

平成25年度
管理型処分技術調査等事業
地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験
報告書

平成26年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、以下の構成でとりまとめています。

第 1 章～第 10 章

なお、以下の資料を合わせて添付します。

・添付資料－ 1 ～ 添付資料－7

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成 25 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験の成果を取りまとめたものです。

はじめに

地下 50m 以深の大断面の地下空洞にコンクリートの処分ピットを構築し、その周囲をベントナイトの緩衝材で覆う、地下空洞型処分施設は、発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）等の余裕深度処分のための処分施設として、各種の検討がなされている。これまで実施された試験は、人工バリアごとの小規模な試験が主であったが、今後の地下空洞型処分施設的设计・建設に当たっては、より現実に即した条件下で実施する確証的試験の積重ねが必要とされる。特に、処分施設の施工技術を確立し、その施工技術によって構築される施設の性能が、施設に要求される初期性能を満たすかどうか、現実の処分環境におけるその施工性を確認することが重要となる。

本試験は、こうした確証的試験の必要性に鑑み、具体的な地下空洞型処分施設的设计・建設に向け、これまで各方面で実施されてきた試験・検討を基礎に、大断面の地下空洞を利用した原位置における具体的な処分施設を模擬したわが国初の実規模の施工に関わる試験を実施するものである。

平成 17 年度から平成 24 年度までは「地下空洞型処分施設性能確証試験」が実施され、以下の項目について検討がなされている。

平成 17、18 年度において、試験の対象とすべき施設形態と施設を構成する各々の人工バリアに要求される機能等を検討し、幅広い観点から試験の基本計画を策定した上で、将来の具体化の可能性の高い施工技術について詳細な検討を行い、実施に移すための詳細な試験計画を策定された。平成 19 から 24 年度は、下記の施工確認試験等を実施し、それらの施工方法確立の見通しが得られた。

平成 19 年度	底部・側部埋戻し材、底部緩衝材（一部）の施工確認試験等
平成 20 年度	底部緩衝材（残部）、底部低拡散材、底部・側部コンクリートピットの施工確認試験等
平成 21 年度	手前部コンクリートピット、側部低拡散材、充填材（一部）、側部緩衝材（一部）の施工確認試験等
平成 22 年度	充填材（残部）、側部緩衝材（一部）の施工確認試験等
平成 23 年度	側部緩衝材（一部）の施工確認試験等
平成 24 年度	側部緩衝材（一部）、上部コンクリートピット、上部低拡散材の施工確認等

本年度からは、「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」として、上記確証試験で構築された施設の上部空間を対象に、処分施設の閉鎖に係わる確証的な試験を実施する。

本年度は、上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）の施工確認試験等を実施する。本年度実施したこの施工確認試験によって、地下空洞型処分施設の上記の構築部材について適用可能な施工方法の確認とその初期性能を確認する。また、ベントナイト系材料特性試験やセメント系材料特性試験等、必要となる特性試験を実施し、ベントナイト混合土の水理・力学特性値や拡散係数等を取得する。また、巨大地震が地下空洞施設に与える影響について検討する。

本試験の主たる目的は、大断面の地下空洞に建設する施設の施工性の確認と施工に伴う施設の品質の確認にある。これまでに実施してきた一連の試験の成果は、同様の処分施設形態が検討されている低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分をはじめ、TRU 廃棄物の余裕深度処分の共通的基盤技術として幅広く反映できるものである。

なお、本試験は経済産業省の委託により実施するものである。

平成 25 年度管理型処分技術調査等事業
地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書目次

はじめに

第 1 章 全体概要	1-1
1.1 試験の背景・目的	1-1
1.1.1 試験の背景	1-1
1.1.2 試験の目的	1-2
1.2 全体計画	1-3
1.2.1 試験の概要	1-3
1.3 検討の経緯	1-7
1.3.1 検討委員会	1-7
1.3.2 平成 25 年度の成果の概要	1-8
第 2 章 上部緩衝材隅角部施工確認試験・初期性能確認試験	2-1
2.1 施工確認試験	2-1
2.1.1 施工確認試験の概要	2-2
(1) 施工確認試験の方針・目的	2-2
(2) 施工確認試験の計画	2-4
2.1.2 施工確認試験の内容	2-5
(1) 使用機械	2-5
(2) 機械設備配置	2-10
(3) 吹付け工法による施工確認試験内容	2-11
2.1.3 施工管理・品質管理	2-23
(1) 管理項目	2-23
(2) ベントナイト材料品質試験	2-23
(3) ベントナイト含水比調整	2-24
(4) サイクルタイム測定	2-27
(5) 吹付け圧力測定	2-27
(6) 密度測定	2-27
(7) 出来形測定 (3D スキャナ)	2-28
2.2 初期性能確認試験	2-30
2.2.1 初期性能確認試験の概要	2-30
(1) 実施項目および試験数量	2-30
(2) 供試体の採取	2-30
(3) 実施工程	2-33
2.2.2 建設・操業時の安全確保性能の確認試験	2-34

(1) 一軸圧縮強度、変形係数.....	2-34
(2) 三軸圧縮強度.....	2-35
2.2.3 止水性能の確認試験.....	2-36
(1) 密度（コア）.....	2-36
(2) 透水試験.....	2-37
2.2.4 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験.....	2-39
(1) 膨潤圧試験.....	2-39
2.3 施工確認試験結果の評価.....	2-40
2.3.1 材料特性に関する評価.....	2-40
(1) 材料特性に関する品質管理項目.....	2-40
(2) 材料特性の品質管理基準.....	2-41
(3) 品質管理結果.....	2-42
(4) 過去の試験結果との比較.....	2-42
2.3.2 施工・出来形に関する評価.....	2-44
(1) 吹付け作業.....	2-44
(2) リバウンド材回収.....	2-45
(3) 仕上り密度.....	2-48
(4) 施工速度.....	2-53
(5) 出来形管理.....	2-55
(6) 作業環境.....	2-55
2.3.3 歩掛りに関する評価.....	2-58
(1) サイクルタイム.....	2-58
(2) 集塵機配置による改良.....	2-59
2.3.4 施工確認試験の総合評価.....	2-59
(1) 課題への対応と試験結果.....	2-60
(2) 施工性.....	2-60
(3) 品質.....	2-62
(4) サイクルタイム.....	2-62
(5) ベントナイト材料特性.....	2-62
2.3.5 施工確認試験の課題の抽出.....	2-63
(1) 作業ヤードの制限による対策.....	2-63
(2) リバウンド率を低下させる吹付け方法の検討.....	2-63
(3) 廃棄量の低減.....	2-63
(4) 飽和度低下による影響検討.....	2-63
(5) 作業環境のデータ蓄積.....	2-63
2.4 初期性能確認試験結果の評価.....	2-64
2.4.1 建設・作業時の安全確保性能に関する評価.....	2-64
(1) 密度（コア）.....	2-64

(2) 一軸圧縮試験、変形係数.....	2-70
(3) 三軸圧縮試験.....	2-72
2.4.2 止水性能に関する評価	2-74
(1) 透水係数.....	2-74
2.4.3 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能に関する評価	2-75
(1) 膨潤圧試験	2-75
2.4.4 初期性能確認試験の総合評価.....	2-77
(1) 力学特性.....	2-77
(2) 止水性能.....	2-80
(3) 膨潤性能.....	2-81
2.4.5 初期性能確認試験の課題の抽出.....	2-81
(1) 長期力学安定性に資するデータの取得.....	2-81
第 3 章 上部緩衝材平面部施工確認試験・初期性能確認試験.....	3-1
3.1 施工確認試験	3-1
3.1.1 施工確認試験の概要.....	3-2
(1) 施工確認試験の方針・目的.....	3-2
(2) 施工確認試験の計画.....	3-2
3.1.2 施工確認試験の内容.....	3-14
(1) 使用機械.....	3-14
(2) 試験ケース	3-17
(3) 転圧工法による施工確認試験実施内容	3-18
3.1.3 施工管理・品質管理.....	3-33
(1) 管理項目.....	3-33
(2) ベントナイト材料品質試験.....	3-33
(3) ベントナイト含水比調整.....	3-35
(4) レベルによる測定.....	3-38
(5) 転圧方法の違いによる施工高さ.....	3-39
(6) 転圧方法の違いによる乾燥密度.....	3-40
(7) 密度、含水比測定.....	3-47
(8) サイクルタイム測定.....	3-49
(9) 吹付け施工面と転圧施工面の境界部の状況.....	3-49
(10) 空気圧送試験.....	3-50
3.2 初期性能確認試験.....	3-52
3.2.1 初期性能確認試験の概要.....	3-52
3.2.2 建設・作業時の安全確保性能の確認試験.....	3-56
(1) 一軸圧縮試験.....	3-56
(2) 三軸圧縮試験.....	3-59

3.2.3	止水性能の確認試験	3-63
(1)	乾燥密度測定	3-63
(2)	透水試験	3-68
3.2.4	閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験	3-76
(1)	膨潤圧試験	3-76
3.3	施工確認試験結果の評価	3-80
3.3.1	材料特性に関する評価	3-80
(1)	材料特性に関する品質管理項目	3-80
(2)	材料特性の品質管理基準	3-81
(3)	品質管理結果	3-82
(4)	緩衝材の要求機能と材料特性に関する品質管理項目との対応	3-83
3.3.2	施工・出来形に関する評価	3-85
(1)	施工方法	3-85
(2)	施工時の品質管理	3-91
(3)	出来形	3-93
(4)	吹付け施工面と転圧施工面の境界部の状況	3-95
(5)	空気圧送試験	3-96
3.3.3	歩掛りに関する評価	3-98
3.3.4	施工確認試験の総合評価	3-100
(1)	ベントナイト材料特性	3-100
(2)	施工方法	3-102
(3)	施工後の品質・出来形	3-102
(4)	施工効率	3-103
(5)	まとめ	3-104
3.3.5	施工確認試験の課題の抽出	3-104
3.4	初期性能確認試験結果の評価	3-105
3.4.1	建設・作業時の安全確保性能に関する評価	3-105
(1)	一軸圧縮試験結果	3-105
(2)	三軸圧縮試験結果	3-107
3.4.2	止水性能に関する評価	3-110
(1)	乾燥密度	3-110
(2)	透水係数	3-111
3.4.3	閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能に関する評価	3-112
(1)	膨潤圧	3-112
3.4.4	初期性能確認試験の総合評価	3-112
(1)	力学特性	3-113
(2)	止水性能	3-118
(3)	膨潤特性	3-120

3.4.5 初期性能確認試験の課題の抽出	3-122
第 4 章 上部埋戻し材練混ぜ試験および締固め特性評価	4-1
4.1 材料練混ぜ試験	4-3
4.1.1 材料	4-3
(1) ベントナイト	4-3
(2) 礫	4-3
(3) 砂	4-4
4.1.2 文献調査による使用機械の選定	4-5
4.1.3 材料練混ぜ試験の実施方法	4-14
(1) 含水比の設定	4-15
(2) バッチ式の練混ぜ機械での実施方法	4-17
(3) 連続式機械の実施方法	4-18
4.1.4 材料練混ぜ試験の品質管理項目	4-24
4.1.5 試験結果	4-25
(1) バッチ式機械の練混ぜ状況	4-25
(2) 連続式機械の練混ぜ状況	4-27
(3) 室内品質確認試験	4-29
(4) 材料練混ぜ試験結果のまとめ	4-51
4.2 締固め特性等評価試験	4-54
4.2.1 文献調査による試験方法の選定	4-54
4.2.2 転圧工法による確認試験	4-58
4.2.3 吹付け工法による確認試験	4-60
4.2.4 締固め特性等評価試験結果	4-61
(1) 施工試験状況	4-61
(2) 施工試験結果	4-63
(3) 締固め特性等評価試験結果のまとめ	4-84
第 5 章 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験	5-1
5.1 施工確認試験	5-1
5.1.1 施工確認試験の概要	5-2
(1) 施工確認試験の方針・目的	5-2
(2) 施工確認試験の計画	5-2
5.1.2 施工確認試験の内容	5-13
(1) 使用機械	5-13
(2) 転圧工法および吹付け工法による施工確認試験実施内容	5-17
5.1.3 施工管理・品質管理	5-37
(1) 試験管理項目	5-37

(2) 上部埋戻し材材料.....	5-37
(3) ベントナイト混合土製造.....	5-40
(4) 吹付け施工.....	5-41
(5) 転圧施工.....	5-46
5.2 初期性能確認試験.....	5-55
5.2.1 初期性能確認試験の概要.....	5-55
5.2.2 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能の確認試験.....	5-57
(1) 一軸圧縮試験.....	5-57
(2) 三軸圧縮試験.....	5-59
(3) 膨潤圧試験.....	5-60
5.2.3 透水特性の確認試験.....	5-65
(1) 乾燥密度測定.....	5-65
(2) 透水試験.....	5-68
5.3 施工確認試験結果の評価.....	5-77
5.3.1 上部埋戻し材の材料特性に関する評価.....	5-77
(1) 材料特性に関する品質管理項目と管理基準値.....	5-77
(2) 品質管理結果.....	5-77
5.3.2 施工・出来形に関する評価.....	5-80
(1) 施工・出来形に関する管理項目と管理基準値.....	5-80
(2) 吹付け施工時の品質管理結果.....	5-80
(3) 転圧施工時の品質管理結果.....	5-84
(4) 吹付け施工と転圧施工の比較.....	5-88
(5) 出来形.....	5-96
(6) 歩掛りに関する評価.....	5-98
(7) 施工管理方法に関する評価.....	5-98
5.3.3 施工確認試験の総合評価.....	5-105
(1) ベントナイト混合土製造.....	5-105
(2) 施工方法の違いによる施工後の品質.....	5-106
(3) 施工性に関する評価.....	5-107
5.3.4 施工確認試験の課題の抽出.....	5-107
(1) ベントナイト混合土製造技術の検討.....	5-107
(2) リバウンド率を低下させる吹付け方法の検討.....	5-108
(3) 廃棄量の低減.....	5-108
(4) 吹付け施工について.....	5-108
(5) 転圧施工について.....	5-108
(6) 構造異方性について.....	5-108
5.4 初期性能確認試験結果の評価.....	5-109
5.4.1 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能に関する評価.....	5-109

(1) 一軸圧縮試験結果.....	5-109
(2) 三軸圧縮試験結果.....	5-115
(3) 膨潤圧試験結果.....	5-122
5.4.2 止水性能に関する評価.....	5-123
(1) 乾燥密度.....	5-123
(2) 透水試験.....	5-125
5.4.3 初期性能確認試験の総合評価.....	5-126
(1) 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能.....	5-126
(2) 止水性能.....	5-132
5.4.4 初期性能確認試験の課題の抽出.....	5-134
(1) 施工時の含水比管理に関する検討.....	5-134
(2) 吹付け機械による埋戻し土の施工方法に関する検討.....	5-134
(3) 埋戻し土の透水性に関する検討.....	5-135
(4) 閉鎖後の物理・化学的安定性の確保性能に関する評価.....	5-135
(5) 埋戻し土の構造異方性および施工境界の力学特性、水理特性の検討.....	5-135
第6章 ベントナイト系材料特性測定.....	6-1
6.1 ベントナイト系材料特性測定試験の概要.....	6-1
6.1.1 実施概要.....	6-2
6.2 吸水に伴う変形測定試験.....	6-6
6.2.1 試験方法.....	6-6
6.2.2 試験結果.....	6-9
6.2.3 試験結果の評価.....	6-24
6.3 圧密非排水三軸圧縮試験.....	6-26
6.3.1 試験方法.....	6-26
6.3.2 試験結果.....	6-28
6.3.3 試験結果の評価.....	6-39
6.4 変形特性を求めるための繰り返し三軸試験および弾性波速度測定.....	6-41
6.4.1 試験方法.....	6-41
(1) 実験データの処理方法.....	6-42
(2) 非線形履歴挙動のモデル化.....	6-43
(3) 弾性波速度測定方法.....	6-44
6.4.2 試験結果.....	6-45
(1) 等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰率 h	6-45
(2) 非線形履歴挙動のモデル化.....	6-48
(3) 弾性波速度の測定.....	6-55
6.4.3 試験結果の評価.....	6-56
(1) 繰り返し三軸試験.....	6-56

(2) 弾性波速度試験	6-58
(3) 繰返し三軸試験結果と弾性波速度試験結果の比較について	6-58
6.5 段階载荷による圧密試験	6-59
6.5.1 試験方法	6-59
6.5.2 試験結果	6-60
6.5.3 試験結果の評価	6-65
6.6 差圧型透水試験	6-66
6.6.1 試験方法	6-66
(1) 供試体の飽和過程	6-66
(2) 透水試験過程	6-67
6.6.2 試験結果	6-68
6.6.3 試験結果の評価	6-73
6.7 現地発生土を想定した材料を用いた室内試験	6-74
6.7.1 試験概要	6-74
6.7.2 現地発生土に関する試験結果	6-74
(1) 土粒子密度試験	6-74
(2) 湿潤密度試験	6-75
(3) 含水比試験	6-75
(4) 粒度試験	6-75
6.7.3 現地発生土を用いたベントナイト混合土の試験結果	6-76
(1) 液性・塑性限界試験	6-76
(2) 締固め試験	6-76
(3) 透水試験	6-77
(4) 一軸圧縮試験	6-81
6.7.4 試験結果の評価	6-83
6.8 まとめ	6-84
第7章 セメント系材料特性測定	7-1
7.1 実施概要	7-2
7.2 拡散特性測定	7-2
7.2.1 拡散試験	7-2
(1) 試験内容	7-3
(2) 試験手法	7-4
(3) 試験手順	7-4
(4) 解析方法	7-7
(5) 試験結果	7-9
7.2.2 空隙率測定	7-12
(1) 試験方法	7-12
(2) 試験結果	7-13

7.2.3	セメント系材料の拡散係数の特性.....	7-19
(1)	これまで取得した実効拡散係数データのまとめ.....	7-19
7.2.4	まとめ.....	7-23
7.3	上部低拡散材他ひび割れ調査.....	7-24
7.3.1	ひび割れ調査の概要.....	7-24
(1)	ひび割れ調査方法.....	7-25
7.3.2	ひび割れ調査結果.....	7-26
(1)	側部低拡散材のひび割れ履歴.....	7-26
7.3.3	ひび割れ調査のまとめ.....	7-31
(1)	低拡散材.....	7-31
(2)	上部低拡散材・上部コンクリートピット.....	7-31
7.3.4	ひび割れ評価.....	7-31
(1)	上部低拡散材.....	7-31
(2)	上部コンクリートピット.....	7-34
(3)	側部低拡散材.....	7-36
7.3.5	まとめ.....	7-38
7.4	上部低拡散材他長期材齢物性試験.....	7-39
7.4.1	試験の概要.....	7-39
7.4.2	使用材料および配合.....	7-39
7.4.3	長期材齢物性試験.....	7-42
(1)	圧縮強度試験.....	7-42
(2)	静弾性係数試験.....	7-48
(3)	試験のまとめ.....	7-55
7.4.4	長期材齢物性値の評価.....	7-55
(1)	圧縮強度と弾性係数の相関関係.....	7-55
第8章 施設・周辺岩盤挙動計測.....		8-1
8.1	施設挙動計測設備設置（平成25年度）.....	8-1
8.1.1	上部緩衝材.....	8-3
(1)	計測目的.....	8-3
(2)	計器仕様、計器配置.....	8-3
(3)	計器設置.....	8-4
8.1.2	地震観測.....	8-6
(1)	計測目的.....	8-6
(2)	計器仕様、計器配置.....	8-6
(3)	計器設置.....	8-7
8.2	計測データの収集図化.....	8-8
8.2.1	坑内環境他.....	8-9

8.2.2	上部緩衝材	8-9
(1)	動的計測結果.....	8-11
8.2.3	地震観測.....	8-15
(1)	H25年10月26日.....	8-16
(2)	H25年11月15日.....	8-20
(3)	H25年12月27日.....	8-24
8.3	計測データの分析評価.....	8-28
8.3.1	坑内環境計測結果の分析評価.....	8-28
(1)	坑内の気温および湿度.....	8-28
8.3.2	上部緩衝材の計測結果の分析評価.....	8-33
(1)	既往試験結果との比較.....	8-33
(2)	上部低拡散材への影響.....	8-35
8.3.3	底部緩衝材計測結果の分析評価.....	8-39
(1)	計測器配置と上載荷重.....	8-39
(2)	土圧挙動.....	8-41
(3)	沈下挙動.....	8-48
(4)	温度変化.....	8-52
(5)	水分変化.....	8-53
8.3.4	その他の施設挙動計測結果の分析評価.....	8-54
(1)	挙動計測結果と分析評価.....	8-54
8.3.5	周辺岩盤挙動計測結果の分析評価.....	8-59
(1)	岩盤変位.....	8-60
(2)	岩盤内間隙水圧.....	8-62
8.3.6	地震観測結果の分析評価.....	8-64
(1)	最大加速度.....	8-64
(2)	フーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比.....	8-66
(3)	KiK-net データとの比較.....	8-73
8.4	地中無線データ取得.....	8-89
8.5	底部低拡散材 BTV 観察.....	8-91
8.5.1	ひび割れ観測孔位置.....	8-91
8.5.2	BTV 装置.....	8-92
8.5.3	BTV 観察結果.....	8-93
第9章	ボーリング孔等の閉鎖技術の検討.....	9-1
9.1	本検討の背景・目的.....	9-1
9.1.1	本検討の背景.....	9-2
9.1.2	本検討の目的.....	9-2
9.2	既往研究の調査.....	9-2

9.2.1	ボーリング孔の閉塞技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理	9-2
(1)	ボーリング孔の閉塞技術に関する国内外の既往研究	9-2
(2)	ボーリング孔の閉塞技術に関する閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等	9-9
(3)	ボーリング孔の閉塞技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理	9-22
9.2.2	アクセス坑道等の閉鎖技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理	9-27
(1)	アクセス坑道等の閉鎖技術に関する国内外の既往研究	9-27
(2)	アクセス坑道等の閉鎖技術に関する閉鎖時の要求機能や技術的要件、求められる性能等	9-35
(3)	アクセス坑道等の閉鎖技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理	9-37
9.3	閉鎖に用いる材料の調査	9-45
9.3.1	ボーリング孔の閉塞に用いる材料に関する諸条件・要求項目と使用材料の関連性の整理	9-45
9.3.2	アクセス坑道等の閉鎖に用いる材料に関する諸条件・要求項目と使用材料の関連性の整理	9-47
9.4	施工方法の調査・検討	9-48
9.4.1	ボーリング孔のように人が入れない小径・長孔を対象とした検討	9-48
(1)	ボーリング孔（小径や狭隘な空間）を対象とした閉塞技術の整理と前項で整理した諸条件・要求項目との関連性の整理、および材料と組み合わせた施工方法の選定等	9-48
(2)	試験計画（案）の検討	9-49
9.4.2	アクセス坑道等の狭隘な空間を対象とした検討	9-52
(1)	小径や狭隘な空間を対象とした閉鎖技術の整理と前項で整理した諸条件・要求項目との関連性の整理、および材料と組み合わせた施工方法の選定等	9-52
(2)	試験計画（案）の検討	9-52
9.5	まとめ	9-54
	参考文献	9-55
第 10 章	巨大地震が地下空洞施設に与える影響の検討	10-1
10.1	実施概要	10-1
10.1.1	地下空洞型処分施設の耐震設計に係る現状の整理	10-3
(1)	実施設計時の地震力の考え方	10-3
(2)	耐震設計を行う上での課題（設計水平震度の設定について）	10-3

(3) 平成 24 年度に抽出した課題	10-5
10.1.2 検討フロー	10-7
10.1.3 検討対象	10-9
10.2 観測データに基づく試験施設の挙動解析	10-11
10.2.1 観測データの分析・評価	10-11
(1) 計測器設置概要	10-11
(2) 地震動観測データ	10-14
(3) 観測データの分析評価	10-27
10.2.2 解析による地震時の挙動の評価	10-37
(1) 解析条件	10-37
(2) 地震時の地下空洞施設の挙動解析および評価	10-42
(3) 分析評価	10-79
10.3 地震時の地下空洞施設挙動解析および評価	10-93
10.3.1 解析条件の設定	10-93
(1) 検討対象	10-93
(2) 検討用地震動の設定	10-94
(3) 解析モデルの作成	10-96
(4) 検討ケースの設定	10-102
(5) 物性値の設定	10-102
10.3.2 地震時の地下空洞施設の挙動解析および評価	10-119
(1) 地震動の引戻し解析	10-119
(2) 地震応答解析	10-123
10.3.3 地震時の地下空洞施設挙動解析および評価に関するまとめ	10-190
10.4 まとめ	10-191
10.4.1 地震計の観測データの整理と挙動分析	10-191
(1) 入力地震動	10-191
(2) 応答加速度および振動数特性	10-191
10.4.2 地震時の地下空洞施設挙動解析および評価	10-192
10.4.3 今後の課題	10-193
(1) 地震計の観測データの整理と挙動分析	10-193
(2) 地震時の地下空洞施設挙動解析および評価	10-193

おわりに

図目次

【第1章】

図 1.1-1	期待される成果	1-2
図 1.2-1	地下空洞型処分施設の概念の例[1]	1-3
図 1.2-2	試験位置図（断面図）	1-4
図 1.2-3	試験施設の試験開始前の状況（平成25年9月）	1-5
図 1.2-4	試験実施場所	1-6
図 1.3-1	含水比-供給量-乾燥密度等の関係	1-11
図 1.3-2	上部緩衝材隅角部施工試験状況	1-11
図 1.3-3	乾燥密度のバラツキ（全測定データ）	1-12
図 1.3-4	上部緩衝材平面部施工確認状況（転圧工法）	1-13
図 1.3-5	練混ぜ機械	1-14
図 1.3-6	ベントナイト混合土の乾燥密度と含水比の関係	1-15
図 1.3-7	サンプリングにより得られた乾燥密度と含水比の関係	1-17
図 1.3-8	上部埋戻し材施工確認試験状況	1-17
図 1.3-9	地震応答解析モデル	1-19

【第2章】

図 2.1-1	各年度吹付け施工箇所横断図	2-3
図 2.1-2	施工形状図（上：平面図、下：断面図）	2-3
図 2.1-3	施工確認試験施工フロー	2-4
図 2.1-4	湿潤材料供給機	2-6
図 2.1-5	ローター式吹付け機	2-7
図 2.1-6	吹付けノズル（断面拡大図）	2-8
図 2.1-7	ベルヌーイ効果の概念図	2-9
図 2.1-8	吸引式リバウンド材回収装置	2-9
図 2.1-9	ターボファン付き集塵機	2-10
図 2.1-10	吹付け施工時の作業員配置	2-10
図 2.1-11	吹付け機材のレイアウト	2-11
図 2.1-12	含水比調整作業フロー	2-12
図 2.1-13	赤外線水分計による含水比測定状況	2-13
図 2.1-14	ベントナイト保管庫の仮置き状況	2-14
図 2.1-15	25t ラフタークレーンによる資材揚重状況	2-15
図 2.1-16	2t キャリアダンプ（1t 吊クレーン付）	2-15
図 2.1-17	ピット上部での材料移動、仮置き状況	2-16
図 2.1-18	フレコンからの材料投入状況（2t キャリアダンプ使用）	2-16
図 2.1-19	ホッパーに材料投入した状態の湿潤材料供給機の状況	2-17

図 2.1-20	フレッシュ材とリバウンド材の供給状況	2-17
図 2.1-21	吹付け施工およびリバウンド材吸引回収状況	2-18
図 2.1-22	ターボファン付き集塵機.....	2-18
図 2.1-23	フレッシュ材とリバウンド材の混合と供給の様子	2-19
図 2.1-24	シリコンオイル法による乾燥密度試験イメージ.....	2-19
図 2.1-25	シリコンオイル法に用いた計測器	2-20
図 2.1-26	施工時の含水比および供給量管理フロー	2-21
図 2.1-27	吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係.....	2-22
図 2.1-28	含水比-供給量-乾燥密度の関係	2-22
図 2.1-29	ベントナイト材料の試験結果（粒径加積曲線）	2-24
図 2.1-30	ベントナイト材料の試験結果（X線回析による定性解析）	2-24
図 2.1-31	今年度の調整後含水比のヒストグラム（炉乾燥法）	2-26
図 2.1-32	平成 24 年度の調整後含水比のヒストグラム（炉乾燥法）	2-26
図 2.1-33	平成 23 年度の調整後含水比のヒストグラム（炉乾燥法）	2-26
図 2.1-34	圧力計（吹付け機に設置）	2-27
図 2.1-35	コア採取概略位置図.....	2-28
図 2.1-36	3D レーザースキャナ（リーグル社製 VZ-400）	2-28
図 2.2-1	力学試験用サンプリングコアの採取位置及び構成	2-31
図 2.2-2	長尺ボーリングマシンによるコア抜き状況.....	2-32
図 2.2-3	長尺ボーリングマシンにより採取したコアの一例	2-32
図 2.2-4	ハンディコアドリルによるコア抜き	2-33
図 2.2-5	ハンディコアドリルでの試料採取位置（18 層目）	2-33
図 2.2-6	一軸圧縮試験状況	2-34
図 2.2-7	三軸圧縮試験状況	2-35
図 2.2-8	湿潤密度試験状況	2-36
図 2.2-9	試料の飽和過程.....	2-37
図 2.2-10	透水試験方法.....	2-38
図 2.2-11	シリコンオイル比重法に用いた計測器	2-38
図 2.2-12	膨潤圧試験状況.....	2-39
図 2.3-1	加水調整のフローチャート	2-41
図 2.3-2	ベントナイト粒度分布	2-42
図 2.3-3	使用した材料の粒径加積曲線	2-43
図 2.3-4	自然含水比のヒストグラム	2-44
図 2.3-5	塑性限界のヒストグラム.....	2-44
図 2.3-6	膨潤力のヒストグラム	2-44
図 2.3-7	メチレンブルー吸着量のヒストグラム	2-44
図 2.3-8	含水比とリバウンド率の関係	2-46
図 2.3-9	施工形状.....	2-46

図 2.3-10	施工状況写真.....	2-47
図 2.3-11	密度試験結果（シリコンオイル法）	2-48
図 2.3-12	乾燥密度の比較.....	2-49
図 2.3-13	湿潤密度の比較.....	2-49
図 2.3-14	ノギス法の計測誤差発生原因イメージ図	2-50
図 2.3-15	含水比の比較.....	2-50
図 2.3-16	含水比と乾燥密度の関係（シリコンオイル法）	2-51
図 2.3-17	吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係.....	2-51
図 2.3-18	混合材料の含水比-供給量-乾燥密度の関係	2-52
図 2.3-19	含水比-供給量-乾燥密度の関係（H24 年度結果を追記）	2-53
図 2.3-20	含水比-施工速度関係（吹付け施工日毎）	2-54
図 2.3-21	厚さ方向の平均施工速度.....	2-54
図 2.3-22	3D スキャナ計測データ	2-55
図 2.3-23	ピット上（左側奥部）の温湿度計測結果.....	2-56
図 2.3-24	施工 1 層当たりのサイクルタイム	2-58
図 2.3-25	集塵機の配置.....	2-59
図 2.4-1	乾燥密度のヒストグラム（各層）	2-66
図 2.4-2	含水比-乾燥密度関係（各層）	2-66
図 2.4-3	供試体採取概略位置断面図.....	2-67
図 2.4-4	乾燥密度のヒストグラム（施工部平面内）	2-69
図 2.4-5	含水比-乾燥密度関係（施工部平面内）	2-69
図 2.4-6	応力-ひずみ関係（一軸圧縮試験）	2-70
図 2.4-7	一軸圧縮強度と乾燥密度の関係.....	2-71
図 2.4-8	変形係数と乾燥密度の関係	2-72
図 2.4-9	応力-ひずみ関係（三軸圧縮試験）	2-72
図 2.4-10	モールの応力円	2-73
図 2.4-11	拘束圧と変形係数の関係.....	2-74
図 2.4-12	透水係数と有効粘土乾燥密度の関係.....	2-74
図 2.4-13	膨潤圧の経時変化	2-76
図 2.4-14	一軸圧縮強度と含水比の関係	2-78
図 2.4-15	変形係数と含水比の関係.....	2-78
図 2.4-16	一軸圧縮強度と乾燥密度の関係.....	2-79
図 2.4-17	変形係数と乾燥密度の関係.....	2-79
図 2.4-18	透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係	2-80
図 2.4-19	膨潤圧と有効粘土密度（乾燥密度）の関係.....	2-81

【第 3 章】

図 3.1-1	クニゲル V1 の有効粘土密度～透水係数（定水位法、ケイ砂混合を抽出）	3-3
---------	---	-----

図 3.1-2	大型振動ローラによる施工状況	3-4
図 3.1-3	小型振動ローラによる施工状況	3-4
図 3.1-4	大型フィニッシャーによる敷均し	3-5
図 3.1-5	敷均し機による側部敷均し	3-5
図 3.1-6	小型フィニッシャーによる敷均し	3-5
図 3.1-7	小型フィニッシャーによる敷均し	3-5
図 3.1-8	撤出し厚さ 100mm の時の転圧結果	3-5
図 3.1-9	無振動転圧の影響確認結果	3-5
図 3.1-10	ベントナイト保管庫位置図	3-6
図 3.1-11	ベントナイト保管庫全景	3-6
図 3.1-12	上部緩衝材平面部試験前の状況	3-7
図 3.1-13	上部緩衝材平面部完成図	3-7
図 3.1-14	緩衝材構造図	3-8
図 3.1-15	試験状況イメージ図(全体)	3-9
図 3.1-16	試験状況イメージ図(拡大)	3-10
図 3.1-17	施工フロー	3-11
図 3.1-18	施工手順図	3-12
図 3.1-19	アイリッヒミキサ	3-14
図 3.1-20	小型振動ローラ (HC1500-1)	3-15
図 3.1-21	25 t ラフタークレーン	3-16
図 3.1-22	カニクレーン (2.98 t 吊)	3-16
図 3.1-23	含水比調整施工フロー	3-18
図 3.1-24	ベントナイト混練状況	3-19
図 3.1-25	調整後含水比測定状況	3-20
図 3.1-26	ベントナイト保管状況	3-20
図 3.1-27	緩衝材型枠平面図	3-21
図 3.1-28	型枠設置状況	3-21
図 3.1-29	型枠設置後の状況 (外部)	3-22
図 3.1-30	型枠設置後の状況 (内部)	3-22
図 3.1-31	ベントナイト (フレコン) 供給状況平面図	3-23
図 3.1-32	ベントナイト (フレコン) 供給状況断面図	3-23
図 3.1-33	ベントナイト (フレコン) の供給状況	3-23
図 3.1-34	ベントナイトの撤出し状況	3-24
図 3.1-35	ベントナイト敷均し状況平面図	3-24
図 3.1-36	ベントナイト敷均し状況断面図	3-25
図 3.1-37	レーザーレベルによる敷均し厚さの管理状況	3-25
図 3.1-38	ベントナイト敷均し状況	3-25
図 3.1-39	敷均し完了後の状況	3-26

図 3.1-40	ベントナイト転圧状況図(縦断方向).....	3-27
図 3.1-41	ベントナイト転圧状況図(横断方向).....	3-27
図 3.1-42	ランマによる転圧箇所.....	3-27
図 3.1-43	小型振動ローラによる無振動転圧の状況.....	3-28
図 3.1-44	ランマによる転圧の状況.....	3-28
図 3.1-45	小型振動ローラによる振動転圧の状況.....	3-28
図 3.1-46	吹付け施工により構築された斜路との境界部の転圧状況.....	3-29
図 3.1-47	レベル測定・コア採取位置図.....	3-29
図 3.1-48	レベル測量の状況.....	3-30
図 3.1-49	コア採取の状況.....	3-30
図 3.1-50	採取したコア.....	3-31
図 3.1-51	コア採取後の状況.....	3-31
図 3.1-52	シート養生状況.....	3-31
図 3.1-53	空気圧送試験概要断面図.....	3-32
図 3.1-54	ベントナイト材料の試験結果(粒径加積曲線).....	3-34
図 3.1-55	ベントナイト材料の試験結果(X線回析による定性解析).....	3-34
図 3.1-56	使用した材料の初期含水比.....	3-36
図 3.1-57	使用した材料の水分調整後の含水比.....	3-36
図 3.1-58	使用した材料の納品後の含水比.....	3-37
図 3.1-59	使用した材料の納品後の含水比(全数).....	3-37
図 3.1-60	施工面の高さ.....	3-38
図 3.1-61	各施工手順における施工段階での施工高さ.....	3-39
図 3.1-62	施工手順2(2層まとめて振動転圧)で施工した層の層内密度分布.....	3-41
図 3.1-63	施工手順1(1層単位で振動転圧)で施工した層の層内密度分布.....	3-42
図 3.1-64	施工手順2(2層まとめて振動転圧)でのコア密度のヒストグラム.....	3-43
図 3.1-65	施工手順1(1層単位で振動転圧)でのコア密度のヒストグラム.....	3-43
図 3.1-66	四隅における層内密度分布(ランマ転圧時間5分).....	3-44
図 3.1-67	四隅における層内密度分布(ランマ転圧時間2.5分).....	3-45
図 3.1-68	四隅のコア密度のヒストグラム(ランマ転圧時間5分).....	3-46
図 3.1-69	四隅のコア密度のヒストグラム(ランマ転圧時間2.5分).....	3-46
図 3.1-70	各層における密度測定結果.....	3-48
図 3.1-71	コア密度のヒストグラム(各層の平均値).....	3-48
図 3.1-72	コア密度のヒストグラム(全測定データ).....	3-49
図 3.1-73	施工境界部における試料サンプリング.....	3-49
図 3.1-74	供給機への材料投入状況.....	3-50
図 3.1-75	供給機から圧力釜式吹付け機へ材料を供給している様子.....	3-50
図 3.1-76	ピット上部に設置したサイクロンの様子.....	3-51
図 3.1-77	サイクロンから材料が排出されている様子.....	3-51

図 3.2-1	供試体採取位置図	3-53
図 3.2-2	供試体断面図.....	3-53
図 3.2-3	小型コアドリルによるコア採取の状況	3-54
図 3.2-4	小型コアドリルにより採取したコアの状況.....	3-54
図 3.2-5	一軸圧縮試験の状況.....	3-56
図 3.2-6	一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_1)	3-57
図 3.2-7	一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_2)	3-57
図 3.2-8	一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_3)	3-57
図 3.2-9	一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係	3-58
図 3.2-10	三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係.....	3-61
図 3.2-11	モールの応力円 (全応力)	3-62
図 3.2-12	主応力表示のモールクーロンの破壊規準	3-62
図 3.2-13	変形係数～拘束圧関係	3-62
図 3.2-14	各採取位置における乾燥密度分布	3-64
図 3.2-15	コアの含水比と乾燥密度の関係.....	3-65
図 3.2-16	2分割コアの乾燥密度のヒストグラム	3-66
図 3.2-17	2分割コアによる密度試験結果と室内締固め試験の比較	3-67
図 3.2-18	層平均でのコア密度測定結果と室内締固め試験の比較.....	3-67
図 3.2-19	透水試験用の供試体.....	3-68
図 3.2-20	透水試験方法.....	3-69
図 3.2-21	膨潤圧試験用供試体の成形の状況	3-70
図 3.2-22	試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況	3-71
図 3.2-23	透水試験装置.....	3-72
図 3.2-24	透水試験途中経過 (供試体 PE_1-1～PE_1-2)	3-73
図 3.2-25	透水試験途中経過 (供試体 PE_2-1～PE_2-2)	3-74
図 3.2-26	乾燥密度と透水係数の関係	3-75
図 3.2-27	クニゲル GX の透水係数の既存値との比較.....	3-75
図 3.2-28	膨潤圧試験用供試体の成形の状況	3-76
図 3.2-29	試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況	3-77
図 3.2-30	膨潤圧試験装置.....	3-77
図 3.2-31	膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_1-1～SW_1-2)	3-78
図 3.2-32	膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_2-1～SW_2-2)	3-78
図 3.2-33	膨潤圧と乾燥密度の関係.....	3-79
図 3.2-34	クニゲル GX の膨潤圧の既存値との比較.....	3-79
図 3.3-1	含水比調整のフロー	3-81
図 3.3-2	ベントナイト粒度分布	3-82
図 3.3-3	確証試験で使用した材料の粒度分布.....	3-83
図 3.3-4	使用した材料の初期含水比と納品後の含水比の関係	3-86

図 3.3-5	使用した材料の初期含水比と納品後の含水比（全数）の関係	3-87
図 3.3-6	使用した材料の調整後の含水比と納品後の含水比の関係	3-87
図 3.3-7	施工手順 2（2 層まとめて振動転圧）での乾燥密度と含水比の関係	3-88
図 3.3-8	施工手順 1（1 層単位で振動転圧）での乾燥密度と含水比の関係	3-89
図 3.3-9	四隅の乾燥密度と含水比の関係（ランマー転圧時間 5 分）	3-90
図 3.3-10	四隅の乾燥密度と含水比の関係（ランマー転圧時間 2.5 分）	3-90
図 3.3-11	各層における密度測定結果	3-91
図 3.3-12	レベルにより算出した密度と乾燥密度との比較	3-91
図 3.3-13	コア密度と含水比の関係（各層の平均値）	3-92
図 3.3-14	コア密度と含水比の関係（全測定データ）	3-92
図 3.3-15	施工面高さのコンター図	3-94
図 3.3-16	施工境界部から採取したコア	3-95
図 3.3-17	各圧送における圧送量と圧送に要した時間	3-96
図 3.3-18	各圧送における圧送速度	3-96
図 3.3-19	含水比測定結果	3-97
図 3.3-20	含水比の変化	3-97
図 3.3-21	10m ³ 当りの施工時間の比較	3-98
図 3.3-22	10m ³ 当りの施工時間の側部緩衝材（平成 24 年度）との比較	3-99
図 3.3-23	各年度の粒径加積曲線	3-100
図 3.3-24	自然含水比のヒストグラム	3-101
図 3.3-25	塑性限界のヒストグラム	3-101
図 3.3-26	膨潤力のヒストグラム	3-101
図 3.3-27	メチレンブルー吸着量のヒストグラム	3-101
図 3.3-28	各層の不陸の最大値	3-103
図 3.4-1	一軸圧縮強さと乾燥密度の関係	3-106
図 3.4-2	変形係数と乾燥密度の関係	3-106
図 3.4-3	破壊ひずみと乾燥密度の関係	3-106
図 3.4-4	変形係数～せん断ひずみ速度関係	3-107
図 3.4-5	最大主応力差～せん断ひずみ速度関係	3-107
図 3.4-6	粘着力～せん断ひずみ速度関係	3-108
図 3.4-7	内部摩擦角～せん断ひずみ速度関係	3-108
図 3.4-8	変形係数～乾燥密度	3-108
図 3.4-9	主応力差～乾燥密度	3-109
図 3.4-10	2 分割コアによる乾燥密度試験結果と室内締固め試験の比較	3-110
図 3.4-11	2 分割コアの乾燥密度のヒストグラム	3-111
図 3.4-12	透水係数と乾燥密度の関係	3-111
図 3.4-13	膨潤圧と乾燥密度の関係	3-112
図 3.4-14	一軸圧縮強さと含水比の関係（転圧工法）	3-114

図 3.4-15	変形係数と含水比の関係（転圧工法）	3-114
図 3.4-16	一軸圧縮強さと乾燥密度の関係（転圧工法）	3-115
図 3.4-17	変形係数と乾燥密度の関係（転圧工法）	3-115
図 3.4-18	一軸圧縮強さと含水比の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-116
図 3.4-19	変形係数と含水比の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-116
図 3.4-20	一軸圧縮強さと乾燥密度の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-117
図 3.4-21	変形係数と乾燥密度の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-117
図 3.4-22	透水係数と有効粘度密度（乾燥密度）の関係（転圧工法）	3-119
図 3.4-23	透水係数と有効粘度密度（乾燥密度）の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-119
図 3.4-24	膨潤圧と有効粘度密度（乾燥密度）の関係（転圧工法）	3-121
図 3.4-25	膨潤圧と有効粘度密度（乾燥密度）の関係（転圧工法+吹付け工法）	3-121

【第4章】

図 4.1-1	三沢砂の粒径加積曲線	4-4
図 4.1-2	バッチ式機械の例	4-7
図 4.1-3	連続式機械の例	4-8
図 4.1-4	各種練混ぜ機械を用いたクニゲル GX の練混ぜ試験結果[1]	4-9
図 4.1-5	連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験結果；含水比[2]	4-10
図 4.1-6	連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験結果；混合率[2]	4-10
図 4.1-7	連続式練混ぜ機械（SR-2000G）を用いた練混ぜ試験結果；含水比[2]	4-11
図 4.1-8	連続式練混ぜ機械（SR-2000G）を用いた練混ぜ試験結果；混合率[2]	4-11
図 4.1-9	連続式練混ぜ機械（Geo-Tom）を用いた練混ぜ試験結果；含水比[3]	4-12
図 4.1-10	連続式練混ぜ機械（Geo-Tom）を用いた練混ぜ試験結果；含水比[3]	4-12
図 4.1-11	締固め曲線（クニゲル V1：砂=15：85）	4-15
図 4.1-12	締固め曲線（クニゲル V1：砂：礫(2005)=15：35：50）	4-16
図 4.1-13	締固め曲線（クニゲル V1：砂：礫(1005)=15：35：50）	4-16
図 4.1-14	バッチ式機械を用いた練混ぜ試験手順	4-17
図 4.1-15	自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた練混ぜ試験手順	4-18
図 4.1-16	自走式土質改良機（SR-2000G）のキャリブレーション手順	4-19
図 4.1-17	SR-2000G を用いた練混ぜ試験の概要	4-20
図 4.1-18	ミストブレンダーの概要	4-21
図 4.1-19	（参考）実規模プラント設備	4-21
図 4.1-20	粉体の事前混合の概要	4-23
図 4.1-21	粉体混合装置および加水装置の概要	4-23
図 4.1-22	パグミルによる練混ぜの状況	4-25
図 4.1-23	アイリッヒによる練混ぜの状況	4-25

図 4.1-24	バッチ式ミキサーの回収率の比較	4-26
図 4.1-25	自走式土質改良機 (SR-2000G) によるベントナイト混合土製造の状況	4-27
図 4.1-26	ミストブレンダーによるベントナイト混合土製造の状況	4-28
図 4.1-27	各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果 ; 砂ベントナイト	4-30
図 4.1-28	各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果 ; 礫ベントナイト (2005)	4-31
図 4.1-29	各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果 ; 礫ベントナイト (1005)	4-31
図 4.1-30	練混ぜ材料の含水比測定結果の平均値および最大・最小値の比較 ; 砂ベ ントナイト	4-32
図 4.1-31	練混ぜ材料の含水比測定結果の標準偏差の比較 ; 砂ベントナイト	4-32
図 4.1-32	練混ぜ材料の含水比測定結果の平均値および最大・最小値の比較 ; 礫ベン トナイト	4-33
図 4.1-33	練混ぜ材料の含水比測定結果の標準偏差の比較 ; 礫ベントナイト	4-33
図 4.1-34	連続式機械を用いて製造した材料の含水比測定結果の時間的变化	4-34
図 4.1-35	各練混ぜ機械で練混ぜた材料の混合率測定結果 ; 砂ベントナイト	4-36
図 4.1-36	各練混ぜ機械で練混ぜ材料の混合率測定結果 ; 礫ベントナイト (2005)	4-37
図 4.1-37	各練混ぜ機械で練混ぜた材料の混合率測定結果 ; 礫ベントナイト (1005)	4-37
図 4.1-38	練混ぜ材料の混合率測定結果の平均値および最大・最小値の比較 ; 砂ベン トナイト	4-38
図 4.1-39	練混ぜ材料の混合率測定結果の標準偏差の比較 ; 砂ベントナイト	4-38
図 4.1-40	練混ぜ材料の混合率測定結果の平均値および最大・最小値の比較 ; 礫ベン トナイト	4-39
図 4.1-41	練混ぜ材料の混合率測定結果の標準偏差の比較 ; 礫ベントナイト	4-39
図 4.1-42	連続式機械を用いて製造した材料の混合率測定結果の時間的变化	4-40
図 4.1-43	ミストブレンダーによる混合の空練後と加水後の混合率の比較	4-41
図 4.1-44	練混ぜ後の粒度分布の比較 ; 砂ベントナイト	4-41
図 4.1-45	練混ぜ後の粒度分布の比較 ; 礫ベントナイト (2005)	4-42
図 4.1-46	練混ぜ後の粒度分布の比較 ; 礫ベントナイト (1005)	4-42
図 4.1-47	練混ぜ後の材料の締固め性の比較 ; 砂ベントナイト	4-43
図 4.1-48	練混ぜ後の材料の締固め性の比較 ; 礫ベントナイト (2005)	4-44
図 4.1-49	練混ぜ後の材料の締固め性の比較 ; 礫ベントナイト (1005)	4-44
図 4.1-50	飽和度確認および透水試験の概要	4-47
図 4.1-51	練混ぜ後の材料の透水性の比較 ; 砂ベントナイト	4-49
図 4.1-52	練混ぜ後の材料の透水性の比較 ; 礫ベントナイト (2005)	4-49
図 4.1-53	練混ぜ後の材料の透水性の比較 ; 礫ベントナイト (1005)	4-50
図 4.1-54	練混ぜ後の材料の透水係数と乾燥密度の関係 ; 砂ベントナイト	4-50
図 4.2-1	施工機械の例[10]	4-55
図 4.2-2	施工結果の例 ; 締固め曲線との比較[10]	4-56
図 4.2-3	施工結果の例 ; 締固め度 ⁴⁾	4-57

図 4.2-4	施工結果の例；吹付け前後の材料の粒度分布[10].....	4-57
図 4.2-5	転圧試験用試験ピット	4-59
図 4.2-6	バイブロコンパクタによる施工状況.....	4-61
図 4.2-7	ハンドガイド振動ローラによる施工状況	4-61
図 4.2-8	小型振動ローラによる施工状況.....	4-61
図 4.2-9	各転圧機械による転圧後の施工面の状況	4-62
図 4.2-10	吹付け工法による施工状況.....	4-63
図 4.2-11	各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係（砂ベントナイト、敷均し厚さ 150mm）	4-65
図 4.2-12	各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係（砂ベントナイト、敷均し厚さ 200mm）	4-65
図 4.2-13	各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係（砂ベントナイト、敷均し厚さ 250mm）	4-66
図 4.2-14	各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係（礫ベントナイト、敷均し厚さ 150mm）	4-66
図 4.2-15	各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係（礫ベントナイト、敷均し厚さ 200mm）	4-67
図 4.2-16	敷均し厚さと施工高さが収束するのに必要な転圧 Pass 数の関係（砂ベントナイト）	4-68
図 4.2-17	敷均し厚さと施工高さが収束するのに必要な転圧 Pass 数の関係（礫ベントナイト）	4-68
図 4.2-18	砂ベントナイトの転圧試験の結果	4-69
図 4.2-19	礫ベントナイト（2005）の転圧試験の結果.....	4-70
図 4.2-20	砂ベントナイトの吹付け試験の結果（コア全ての乾燥密度と含水比）	4-71
図 4.2-21	礫ベントナイト（2005）の吹付け試験の結果（コア全ての乾燥密度と含水比）	4-71
図 4.2-22	礫ベントナイト（1005）の吹付け試験の結果（コア全ての乾燥密度と含水比）	4-72
図 4.2-23	砂ベントナイトの転圧試験の結果（締固め度）	4-73
図 4.2-24	礫ベントナイト（2005）の転圧試験の結果（締固め度）	4-73
図 4.2-25	吹付け試験と転圧試験（バイブロコンパクタ）の締固め度の比較.....	4-74
図 4.2-26	吹付け試験での各材料のリバウンド率.....	4-74
図 4.2-27	吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布（砂ベントナイト）	4-75
図 4.2-28	吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布（礫ベントナイト（2005））	4-76
図 4.2-29	吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布（礫ベントナイト（1005））	4-77

図 4.2-30	吹付け試験後のベントナイト混合率.....	4-78
図 4.2-31	転圧試験後のベントナイト混合率（砂ベントナイト）	4-78
図 4.2-32	転圧試験後のベントナイト混合率（礫ベントナイト）	4-79

【第5章】

図 5.1-1	ベントナイト混合土の施工時含水比設定のための試験結果.....	5-3
図 5.1-2	小型フィニッシャーによる敷均し	5-4
図 5.1-3	小型フィニッシャーによる敷均し結果	5-5
図 5.1-4	上部埋戻し材構造図.....	5-6
図 5.1-5	上部埋戻し材完成図.....	5-7
図 5.1-6	試験状況イメージ図（全体）	5-8
図 5.1-7	試験状況イメージ図（拡大）	5-9
図 5.1-8	施工フロー	5-10
図 5.1-9	施工確認試験の施工手順.....	5-11
図 5.1-10	自走式土質改良機	5-13
図 5.1-11	バイブロコンパクタ	5-14
図 5.1-12	圧力釜式吹付け機	5-15
図 5.1-13	25 t ラフタークレーン	5-16
図 5.1-14	カニクレーン.....	5-16
図 5.1-15	ベントナイト混合土製造フロー図	5-17
図 5.1-16	ベントナイト混合土製造状況	5-18
図 5.1-17	ベントナイト混合土製造位置・運搬ルート図	5-18
図 5.1-18	倉庫への一時保管状況	5-19
図 5.1-19	コンクリートピット前面ヤード仮置き状況.....	5-19
図 5.1-20	上部埋戻し材型枠詳細図.....	5-20
図 5.1-21	上部埋戻し材抑え金物詳細図	5-20
図 5.1-22	上部埋戻し材型枠設置状況.....	5-21
図 5.1-23	抑え金物設置状況	5-21
図 5.1-24	型枠設置後内部の状況	5-22
図 5.1-25	吹付け工法の施工手順	5-22
図 5.1-26	吹付け施工時の機械配置平面図.....	5-23
図 5.1-27	吹付け機と吹付け箇所的位置関係	5-23
図 5.1-28	供給機への材料投入状況.....	5-24
図 5.1-29	吹付け機へ材料供給状況.....	5-24
図 5.1-30	人力吹付け状況	5-25
図 5.1-31	吹付け後状況.....	5-25
図 5.1-32	リバウンド材回収状況	5-25

図 5.1-33	3D 測量の様子.....	5-27
図 5.1-34	写真測量の様子.....	5-27
図 5.1-35	トータルステーションによる測量の様子.....	5-28
図 5.1-36	シンウォールサンプラー.....	5-28
図 5.1-37	サンプリング状況.....	5-29
図 5.1-38	転圧施工の手順.....	5-29
図 5.1-39	材料投入状況.....	5-30
図 5.1-40	材料投入状況.....	5-30
図 5.1-41	材料の運搬状況.....	5-31
図 5.1-42	材料の敷均し状況.....	5-31
図 5.1-43	レーザーレベル.....	5-32
図 5.1-44	レーザーレベルによる敷均し厚さの管理状況.....	5-32
図 5.1-45	敷均し状況.....	5-32
図 5.1-46	敷均し完了後の状況.....	5-33
図 5.1-47	予備転圧状況.....	5-33
図 5.1-48	転圧状況図(縦断方向).....	5-34
図 5.1-49	転圧状況図(横断方向).....	5-34
図 5.1-50	振動コンパクタによる転圧状況；縦断方向.....	5-34
図 5.1-51	振動コンパクタによる転圧状況；横断方向.....	5-34
図 5.1-52	レベル測定・コア採取位置図.....	5-35
図 5.1-53	レベル測量の状況.....	5-36
図 5.1-54	シンウォールサンプラーによるサンプリング状況.....	5-36
図 5.1-55	シート養生状況.....	5-36
図 5.1-56	使用した材料の初期含水比.....	5-39
図 5.1-57	使用した砂の土粒子密度.....	5-39
図 5.1-58	使用した砂の粒径加積曲線.....	5-40
図 5.1-59	1BL 施工終了状況.....	5-42
図 5.1-60	2BL 施工終了状況.....	5-42
図 5.1-61	3BL 施工終了状況.....	5-42
図 5.1-62	4BL 施工終了状況.....	5-43
図 5.1-63	吹付け施工後の含水比の度数分布.....	5-43
図 5.1-64	吹付け施工後の乾燥密度の度数分布.....	5-44
図 5.1-65	吹付け施工後の混合率の度数分布.....	5-44
図 5.1-66	3D スキャナ測定結果（4次吹付け（4BL））.....	5-46
図 5.1-67	写真測量結果（4次吹付け（4BL））.....	5-46
図 5.1-68	各敷均し厚さでの転圧段階と層厚の関係.....	5-47
図 5.1-69	各敷均し厚さでの仕上がり密度.....	5-47
図 5.1-70	各敷均し厚さでの締固め度.....	5-48

図 5.1-71	レベルによる測定の方向.....	5-48
図 5.1-72	各層の施工高さ（横断方向）	5-49
図 5.1-73	各層の施工高さ（縦断方向）	5-50
図 5.1-74	転圧施工後の含水比の度数分布.....	5-51
図 5.1-75	転圧施工後の乾燥密度の度数分布	5-51
図 5.1-76	転圧施工後の締固め度の度数分布	5-51
図 5.1-77	転圧施工後の混合率の度数分布.....	5-52
図 5.1-78	かさ密度測定結果	5-52
図 5.1-79	転圧施工のサイクルタイム.....	5-53
図 5.1-80	3D スキャナ測定結果（3次転圧）	5-54
図 5.1-81	写真測量結果（3次転圧）	5-54
図 5.2-1	一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係	5-58
図 5.2-2	膨潤圧試験用供試体の成形の状況	5-61
図 5.2-3	試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況	5-61
図 5.2-4	膨潤圧試験装置.....	5-62
図 5.2-5	膨潤圧の経時変化（供試体 SW_1-1～SW_1-3）	5-63
図 5.2-6	膨潤圧の経時変化（供試体 SW_2-1～SW_2-3）	5-63
図 5.2-7	膨潤圧の経時変化（供試体 SW_3-1～SW_3-3）	5-64
図 5.2-8	膨潤圧の経時変化（供試体 SW_4-1～SW_4-3）	5-64
図 5.2-9	シンウォールサンプラーを施工層に貫入している状況.....	5-65
図 5.2-10	サンプリングの状況.....	5-65
図 5.2-11	乾燥密度のヒストグラム.....	5-66
図 5.2-12	締固め度のヒストグラム.....	5-66
図 5.2-13	含水比のヒストグラム	5-67
図 5.2-14	混合率のヒストグラム	5-67
図 5.2-15	供試体と透水円筒との隙間の充填状況	5-68
図 5.2-16	飽和度確認および透水試験の概要	5-71
図 5.2-17	透水試験装置.....	5-72
図 5.2-18	透水試験結果（吹付け施工；供試体 PE_1-1～PE_1-3）	5-73
図 5.2-19	透水試験結果（転圧施工；供試体 PE_2-1～PE_2-3）	5-74
図 5.2-20	透水試験結果（吹付け施工；供試体 PE_3-1～PE_3-3）	5-75
図 5.2-21	透水試験結果（転圧施工；供試体 PE_4-1～PE_4-3）	5-76
図 5.3-1	製造した混合土の含水測定結果.....	5-78
図 5.3-2	製造した混合土の混合率測定結果	5-78
図 5.3-3	製造した混合土の含水比の経時変化.....	5-79
図 5.3-4	製造した混合土の混合率の経時変化.....	5-79
図 5.3-5	吹付け施工後の乾燥密度と含水比の関係	5-81
図 5.3-6	吹付け施工後の締固め度の度数分布.....	5-81

図 5.3-7	吹付け施工後の混合率の度数分布	5-82
図 5.3-8	リバウンド材の含水比の度数分布	5-82
図 5.3-9	リバウンド材の混合率の度数分布	5-82
図 5.3-10	施工前後の材料の含水比の変化	5-83
図 5.3-11	施工段階と施工高さの関係	5-84
図 5.3-12	転圧回数と施工密度の関係	5-84
図 5.3-13	各転圧段階における乾燥密度と含水比の関係	5-85
図 5.3-14	転圧回数と締固め度の関係	5-85
図 5.3-15	施工層厚の度数分布	5-86
図 5.3-16	転圧施工後の乾燥密度と含水比の関係	5-87
図 5.3-17	施工試験後の乾燥密度と含水比の関係	5-89
図 5.3-18	施工試験後の含水比の度数分布	5-89
図 5.3-19	施工試験後の乾燥密度の度数分布	5-90
図 5.3-20	施工試験後の締固め度の度数分布	5-90
図 5.3-21	施工試験後の締固め度と含水比の関係	5-91
図 5.3-22	施工試験後の混合率の度数分布	5-91
図 5.3-23	施工前後の材料の含水比の変化	5-92
図 5.3-24	施工前後の材料の混合率の変化	5-93
図 5.3-25	有効粘土乾燥密度の度数分布	5-94
図 5.3-26	有効モンモリロナイト乾燥密度の度数分布	5-95
図 5.3-27	各施工方法による施工時間の比較	5-98
図 5.3-28	トータルステーションを用いた施工管理の試験状況	5-99
図 5.3-29	トータルステーションを用いた施工管理の使用機材	5-99
図 5.3-30	トータルステーション (PS-103A、トプコン製)	5-99
図 5.3-31	トータルステーションの固定状況	5-100
図 5.3-32	トータルステーションを用いた転圧管理状況 ; 転圧前	5-100
図 5.3-33	トータルステーションを用いた転圧管理状況 ; 2Pass 転圧	5-101
図 5.3-34	トータルステーションを用いた転圧管理状況 ; 4Pass 転圧	5-101
図 5.3-35	トータルステーションを用いた転圧管理状況 ; 6Pass 転圧	5-101
図 5.3-36	施工終了後の走行軌跡図	5-102
図 5.3-37	施工終了後の転圧回数分布図	5-102
図 5.3-38	転圧センサーの反応状況	5-104
図 5.3-39	製造した混合土の含水比および混合率	5-106
図 5.3-30	施工試験後のサンプリングにより得られた締固め度と含水比の関係	5-107
図 5.4-1	一軸圧縮強さ～乾燥密度	5-111
図 5.4-2	変形係数～乾燥密度	5-111
図 5.4-3	破壊ひずみ～乾燥密度	5-111
図 5.4-4	一軸圧縮強さと各物性値との関係	5-112

図 5.4-5	一軸圧縮試験による変形係数と各物性値の関係.....	5-113
図 5.4-6	一軸圧縮試験による破壊ひずみと各物性値との相関性.....	5-114
図 5.4-7	三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係.....	5-116
図 5.4-8	モールの応力円 (全応力)	5-117
図 5.4-9	主応力表示のモールクーロンの破壊規準	5-117
図 5.4-10	変形係数～拘束圧関係	5-117
図 5.4-11	粘着力～乾燥密度の関係.....	5-118
図 5.4-12	内部摩擦角～乾燥密度の関係	5-118
図 5.4-13	主応力差～乾燥密度の関係.....	5-118
図 5.4-14	変形係数～乾燥密度	5-119
図 5.4-15	粘着力～含水比の関係	5-119
図 5.4-16	内部摩擦角～含水比の関係.....	5-119
図 5.4-17	主応力差～含水比の関係.....	5-120
図 5.4-18	変形係数～含水比の関係.....	5-120
図 5.4-19	UU ₃ (吹付)のモール応力円.....	5-121
図 5.4-20	乾燥密度、含水比の変動.....	5-121
図 5.4-21	膨潤圧と乾燥密度の関係.....	5-122
図 5.4-22	膨潤圧と有効粘土乾燥密度の関係	5-122
図 5.4-23	密度試験結果と室内締固め試験の比較	5-123
図 5.4-24	有効粘土乾燥密度のヒストグラム	5-124
図 5.4-25	乾燥密度と透水係数の関係	5-125
図 5.4-26	有効粘土乾燥密度と透水係数の関係.....	5-125
図 5.4-27	一軸圧縮強さと含水比の関係 (再掲)	5-126
図 5.4-28	一軸圧縮試験による変形係数と含水比の関係 (再掲)	5-127
図 5.4-29	既往研究における一軸圧縮強度と有効粘土密度の関係[i]	5-128
図 5.4-30	既往研究における弾性係数の有効粘土密度の関係[i].....	5-128
図 5.4-31	吹付け施工および転圧施工による埋戻し土の一軸圧縮試験結果	5-129
図 5.4-32	既往研究におけるベントナイト混合土の一軸圧縮試験結果[ii]	5-129
図 5.4-33	主応力差と乾燥密度の関係 (再掲)	5-130
図 5.4-34	主応力差と含水比の関係 (再掲)	5-130
図 5.4-35	変形係数と拘束圧の関係 (再掲)	5-131
図 5.4-36	乾燥密度、含水比の変動.....	5-131
図 5.4-37	透水係数と有効粘土乾燥密度の関係 (再掲)	5-133
図 5.4-38	既往研究における透水係数と有効粘土密度の関係[5].....	5-134

【第6章】

図 6.1-1	ベントナイト混合土の締固め曲線と室内試験供試体仕様	6-4
図 6.2-1	膨潤圧発生に伴う吸水量測定試験装置概略図	6-6

図 6.2-2	供試体への水の流入量の算出方法	6-8
図 6.2-3	各鉛直圧における吸水量と経過時間の関係.....	6-11
図 6.2-4	各鉛直圧下における変位および鉛直ひずみと経過時間の関係.....	6-12
図 6.2-5	各鉛直圧下における給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係	6-13
図 6.2-6	締め固め規定値ごとの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係.....	6-15
図 6.2-7	締め固め規定値ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係.....	6-16
図 6.2-8	初期含水比ごとの載荷後の変位および鉛直ひずみと経過時間の関係	6-17
図 6.2-9	初期含水比ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係	6-18
図 6.2-10	初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（ W_{opt} 、 C 値=90%）	6-21
図 6.2-11	初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（ W_{opt} 、 C 値=95%）	6-21
図 6.2-12	初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（ W_{opt} 、 C 値=100%）	6-21
図 6.2-13	初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（ W_{opt+2} 、 C 値=100%）	6-22
図 6.2-14	初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（ W_{opt+4} 、 C 値=100%）	6-22
図 6.2-15	給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（ W_{opt} 、 C 値=90%）	6-23
図 6.2-16	給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（ W_{opt} 、 C 値=95%）	6-23
図 6.2-17	給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（ W_{opt} 、 C 値=100%）	6-23
図 6.2-18	給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（ W_{opt+2} 、 C 値=100%）	6-24
図 6.2-19	給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（ W_{opt+4} 、 C 値=100%）	6-24
図 6.3-1	三軸圧縮試験装置	6-27
図 6.3-2	破壊に至るまでの有効応力経路概略図	6-27
図 6.3-3	圧密排水量～時間関係	6-29
図 6.3-4	主応力差～軸ひずみ関係.....	6-29
図 6.3-5	モールの応力円	6-29
図 6.3-6	主応力比～軸ひずみ関係.....	6-30
図 6.3-7	有効応力経路図.....	6-30
図 6.3-8	平均主応力と軸差応力の関係（限界状態）	6-30
図 6.3-9	圧密排水量～時間関係	6-31
図 6.3-10	主応力差～軸ひずみ関係.....	6-31
図 6.3-11	モールの応力円	6-31
図 6.3-12	主応力比～軸ひずみ関係.....	6-32
図 6.3-13	平均主応力と軸差応力の関係	6-32

図 6.3-14	平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)	6-32
図 6.3-15	圧密排水量～時間関係	6-33
図 6.3-16	主応力差～軸ひずみ関係.....	6-33
図 6.3-17	モールの応力円	6-33
図 6.3-18	主応力比～軸ひずみ関係.....	6-34
図 6.3-19	平均主応力と軸差応力の関係	6-34
図 6.3-20	平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)	6-34
図 6.3-21	圧密排水量～時間関係	6-35
図 6.3-22	主応力差～軸ひずみ関係.....	6-35
図 6.3-23	モールの応力円	6-35
図 6.3-24	主応力比～軸ひずみ関係.....	6-36
図 6.3-25	平均主応力と軸差応力の関係	6-36
図 6.3-26	平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)	6-36
図 6.3-27	圧密排水量～時間関係	6-37
図 6.3-28	主応力差～軸ひずみ関係.....	6-37
図 6.3-29	モールの応力円	6-37
図 6.3-30	主応力比～軸ひずみ関係.....	6-38
図 6.3-31	平均主応力と軸差応力の関係	6-38
図 6.3-32	平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)	6-38
図 6.3-33	最大主応力差と拘束圧の関係	6-39
図 6.3-34	内部摩擦角と粘着力の関係.....	6-40
図 6.4-1	$\epsilon_a \sim \sigma_a$ 履歴曲線模式図	6-43
図 6.4-2	骨格曲線と履歴曲線の説明	6-43
図 6.4-3	実験結果 (不飽和 : C 値=95%, W_{opt})	6-46
図 6.4-4	実験結果 (不飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-46
図 6.4-5	実験結果 (不飽和 : C 値=100%, W_{opt})	6-46
図 6.4-6	実験結果 (不飽和 : C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-47
図 6.4-7	実験結果 (飽和 : C 値=95%, W_{opt})	6-47
図 6.4-8	実験結果 (飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-47
図 6.4-9	実験結果 (飽和 : C 値=100%, W_{opt})	6-48
図 6.4-10	実験結果 (飽和 : C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-48
図 6.4-11	試験結果のフィッティング (5 回 : 不飽和 : C 値=95%, W_{opt})	6-50
図 6.4-12	試験結果のフィッティング (10 回 : 不飽和 : C 値=95%, W_{opt})	6-50
図 6.4-13	試験結果のフィッティング (5 回 : 不飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-50
図 6.4-14	試験結果のフィッティング (10 回 : 不飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-51
図 6.4-15	試験結果のフィッティング (5 回 : 不飽和 : C 値=100%, W_{opt})	6-51
図 6.4-16	試験結果のフィッティング (10 回 : 不飽和 : C 値=100%, W_{opt})	6-51

図 6.4-17	試験結果のフィッティング (5回: 不飽和: C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-52
図 6.4-18	試験結果のフィッティング (10回: 不飽和: C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-52
図 6.4-19	試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C 値=95%, W_{opt})	6-52
図 6.4-20	試験結果のフィッティング (10回: 飽和: C 値=95%, W_{opt})	6-53
図 6.4-21	試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-53
図 6.4-22	試験結果のフィッティング (10回: 飽和: C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)	6-53
図 6.4-23	試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C 値=100%, W_{opt})	6-54
図 6.4-24	試験結果のフィッティング (10回: 飽和: C 値=100%, W_{opt})	6-54
図 6.4-25	試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-54
図 6.4-26	試験結果のフィッティング (10回: 飽和: C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)	6-55
図 6.4-27	弾性波速度と含水比の関係	6-56
図 6.4-28	弾性波速度と締固め度の関係	6-56
図 6.4-29	せん断剛性 G_0 と締固め度の関係	6-57
図 6.5-1	e-logp 曲線 (C 値=95%)	6-61
図 6.5-2	m_v -logp 曲線 (C 値=95%)	6-61
図 6.5-3	e-logk 曲線 (C 値=95%)	6-61
図 6.5-4	k-logp 曲線 (C 値=95%)	6-62
図 6.5-5	e-logk 曲線 (C 値=95%)	6-62
図 6.5-6	e-logp 曲線 (C 値=100%)	6-63
図 6.5-7	m_v -logp 曲線 (C 値=100%)	6-63
図 6.5-8	C_v -logp 曲線 (C 値=100%)	6-64
図 6.5-9	k-logp 曲線 (C 値=100%)	6-64
図 6.5-10	e-logk 曲線 (C 値=100%)	6-64
図 6.6-1	飽和度確認および透水試験の概要	6-68
図 6.6-2	透水試験結果; C 値=100%, $w_{opt}-2\%$	6-69
図 6.6-3	透水試験結果; C 値=100%, $w_{opt}+2\%$	6-69
図 6.6-4	透水試験結果; C 値=100%, $w_{opt}+4\%$	6-70
図 6.6-5	透水係数と初期含水比の関係	6-70
図 6.6-6	透水係数と乾燥密度の関係	6-71
図 6.6-7	透水係数と有効粘土乾燥密度の関係	6-71
図 6.6-8	透水係数と有効粘土湿潤密度の関係	6-72
図 6.6-9	乾燥密度と透水係数の関係	6-72
図 6.7-1	現地発生土 (軽石凝灰岩) の土粒子密度測定結果	6-74
図 6.7-2	現地発生土 (軽石凝灰岩) の含水比測定結果	6-75
図 6.7-3	現地発生土 (軽石凝灰岩) の粒度分布	6-76
図 6.7-4	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の締固め試験結果	6-77
図 6.7-5	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果 (A 法ベース)	6-79
図 6.7-6	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果 (C 法ベース)	6-80

図 6.7-7	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係	6-82
図 6.7-8	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の変形係数と乾燥密度の関係	6-82

【第7章】

図 7.2-1	上部低拡散材コア採取位置	7-3
図 7.2-2	セメント系材料の拡散試験の試験装置の概要	7-4
図 7.2-3	セメント系材料試料の拡散試験フロー	7-5
図 7.2-4	セメント系材料の拡散試験用成型	7-6
図 7.2-5	上部低拡散材コア A(表面)の拡散プロファイル	7-9
図 7.2-6	上部低拡散材コア A(中間層)の拡散プロファイル	7-10
図 7.2-7	上部低拡散材コア B(表面)の拡散プロファイル	7-10
図 7.2-8	水銀圧入試験装置	7-12
図 7.2-9	インクボトル空隙の模式図 (吉田らの文献[1])	7-13
図 7.2-10	上部低拡散材 (コア A(表面)、材齢 14 ヶ月) における空隙径分布	7-13
図 7.2-11	上部低拡散材 (コア A(中間層)、材齢 14 ヶ月) における空隙径分布	7-14
図 7.2-12	上部低拡散材 (コア B(表面)、材齢 14 ヶ月) における空隙径分布	7-14
図 7.2-13	材齢と全空隙率の関係	7-16
図 7.2-14	材齢と連続空隙率の関係	7-17
図 7.2-15	材齢とインクボトル空隙率の関係	7-18
図 7.3-1	調査対象範囲 (赤：平面、緑：断面)	7-24
図 7.3-2	調査箇所の状況	7-25
図 7.3-3	低拡散材ひび割れ履歴図 (その 1)	7-27
図 7.3-4	低拡散材ひび割れ履歴図 (その 2)	7-28
図 7.3-5	側部低拡散材表面ひび割れ展開図	7-29
図 7.3-6	上部コンクリートピット・上部低拡散材表面ひび割れ展開図	7-30
図 7.3-7	上部低拡散材の温度計測結果	7-32
図 7.3-8	上部低拡散材のモルタル応力計測結果	7-33
図 7.3-9	上部コンクリートピットの温度計測結果	7-34
図 7.3-10	上部コンクリートピットの応力計測結果	7-35
図 7.3-11	側部低拡散材の温度計測結果	7-37
図 7.3-12	側部低拡散材の応力計測結果	7-38
図 7.4-1	圧縮強度試験結果 (現場水中供試体)	7-47
図 7.4-2	静弾性係数試験結果 (現場水中供試体)	7-54
図 7.4-3	圧縮強度と静弾性係数の関係 (底部コンクリートピット)	7-56
図 7.4-4	圧縮強度と静弾性係数の関係 (手前部コンクリートピット)	7-56
図 7.4-5	圧縮強度と静弾性係数の関係 (底部低拡散材)	7-56
図 7.4-6	圧縮強度と静弾性係数の関係 (側部 (左側) 低拡散材)	7-57
図 7.4-7	圧縮強度と静弾性係数の関係 (充てん材)	7-57
図 7.4-8	圧縮強度と静弾性係数の関係 (上部充てん材)	7-57

【第8章】

図 8.1-1	計器配置図	8-4
図 8.1-2	計器設置位置および設置状況	8-5
図 8.1-3	地震計設置状況	8-7
図 8.2-1	動的計測概要（平面図）	8-9
図 8.2-2	動的計測概要（縦断面図）	8-10
図 8.2-3	計器設置後状況写真	8-10
図 8.2-4	転圧時状況写真	8-10
図 8.2-5	動的計測の計測時間	8-11
図 8.2-6	小型振動ローラの計器設置断面の通過	8-11
図 8.2-7	計測結果（2層、1回目転圧）	8-12
図 8.2-8	計測結果（2層、2回目転圧）	8-12
図 8.2-9	計測結果（4層、1回目転圧）	8-13
図 8.2-10	計測結果（4層、2回目転圧）	8-13
図 8.2-11	計測結果（5層）	8-14
図 8.2-12	計測結果（6層）	8-14
図 8.2-13	気象庁発表情報（H25年10月26日）	8-16
図 8.2-14	地震計①の加速度時刻歴（H25年10月26日）	8-17
図 8.2-15	地震計②の加速度時刻歴（H25年10月26日）	8-18
図 8.2-16	地震計③の加速度時刻歴（H25年10月26日）	8-19
図 8.2-17	気象庁発表情報（H25年11月15日）	8-20
図 8.2-18	地震計①の加速度時刻歴（H25年11月15日）	8-21
図 8.2-19	地震計②の加速度時刻歴（H25年11月15日）	8-22
図 8.2-20	地震計③の加速度時刻歴（H25年11月15日）	8-23
図 8.2-21	気象庁発表情報（H25年12月27日）	8-24
図 8.2-22	地震計①の加速度時刻歴（H25年12月27日）	8-25
図 8.2-23	地震計②の加速度時刻歴（H25年12月27日）	8-26
図 8.2-24	地震計③の加速度時刻歴（H25年12月27日）	8-27
図 8.3-1	空洞内気温・湿度の経時変化（百葉箱温湿度計 A-①）	8-30
図 8.3-2	空洞内計測位置別の日平均気温・湿度の変動状況	8-31
図 8.3-3	坑口－空洞の気温・湿度の比較（分散型温湿度計 B-⑤、B-①、B-②）	8-32
図 8.3-4	振動転圧時の最大土圧（鉛直方向）	8-34
図 8.3-5	振動転圧時の最大加速度（鉛直方向）	8-34
図 8.3-6	上部低拡散材の圧縮強度試験結果（H24年度報告書）	8-35
図 8.3-7	上部低拡散材計測器の計測値	8-37
図 8.3-8	上部低拡散材計測器の挙動	8-38
図 8.3-9	土圧計・沈下計設置位置図（平面図）	8-40

図 8.3-10	土圧計・沈下計設置位置図（横断面図、縦断面図）	8-40
図 8.3-11	底部緩衝材 土圧計計測結果（鉛直方向）	8-43
図 8.3-12	底部緩衝材 土圧計計測結果（水平方向）	8-44
図 8.3-13	H24 年度と H25 年度の土圧計計測結果比較（A 断面）	8-45
図 8.3-14	今年度施工後の鉛直方向土圧変化量比較（A 断面左右）	8-46
図 8.3-15	今年度施工後の水平方向土圧変化量比較（A 断面左右）	8-46
図 8.3-16	土圧計測値と温度計計測値の関係（H25 年 2 月 1 日～H26 年 2 月 14 日）	8-47
図 8.3-17	土圧計経年変化（A 断面左右、H20 年 2 月 15 日～H26 年 2 月 14 日）	8-47
図 8.3-18	底部緩衝材 沈下計計測結果	8-49
図 8.3-19	底部緩衝材沈下量分布（空洞軸方向）	8-50
図 8.3-20	沈下計計測値と温度計計測値の関係（H25 年 2 月 1 日～H26 年 2 月 14 日）	8-50
図 8.3-21	沈下計経年変化（A 断面中央）	8-51
図 8.3-22	底部緩衝材沈下量の計測値と解析値の比較（A 断面）	8-51
図 8.3-23	温度計設置位置	8-52
図 8.3-24	底部緩衝材の温度経年変化	8-52
図 8.3-25	底部緩衝材の温度経時変化	8-53
図 8.3-26	底部緩衝材の間隙水圧経時変化	8-53
図 8.3-27	上部低拡散材の温度計測結果	8-55
図 8.3-28	上部低拡散材のひずみ計測結果（空洞軸方向）	8-56
図 8.3-29	上部低拡散材のひずみ計測結果（空洞軸直交方向）	8-57
図 8.3-30	上部低拡散材のモルタル応力計測結果	8-58
図 8.3-31	D 孔岩盤変位計位置図	8-59
図 8.3-32	間隙水圧計位置図	8-60
図 8.3-33	D 孔岩盤変位計経時変化図	8-61
図 8.3-34	D 孔岩盤変位計経時分布	8-61
図 8.3-35	間隙水圧経時変化（A、B 孔）	8-62
図 8.3-36	間隙水圧経時変化（C、D、E 孔）	8-63
図 8.3-37	x 方向の最大加速度比較	8-65
図 8.3-38	y 方向の最大加速度比較	8-65
図 8.3-39	z 方向の最大加速度比較	8-65
図 8.3-40	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（H25 年 10 月 26 日）	8-68
図 8.3-41	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（H25 年 11 月 15 日）	8-69
図 8.3-42	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（H25 年 12 月 27 日）	8-70
図 8.3-43	解析による加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比	

	(H24 年度実施、Phase3)	8-71
図 8.3-44	解析による加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H24 年度実施、Phase4)	8-72
図 8.3-45	コンクリート重力ダムの固有周期と堤高の関係[4]	8-73
図 8.3-46	試験空洞と KiK-net 六ヶ所の位置関係	8-74
図 8.3-47	KiK-net 六ヶ所のボーリング柱状図	8-75
図 8.3-48	KiK-net 六ヶ所と試験空洞の方位	8-76
図 8.3-49	KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測データ (H25 年 10 月 26 日)	8-77
図 8.3-50	KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測データ (H25 年 11 月 15 日)	8-78
図 8.3-51	KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測データ (H25 年 12 月 27 日)	8-79
図 8.3-52	KiK-net 六ヶ所 (標高+5m) の観測データ (H25 年 10 月 26 日)	8-80
図 8.3-53	KiK-net 六ヶ所 (標高+5m) の観測データ (H25 年 11 月 15 日)	8-81
図 8.3-54	KiK-net 六ヶ所 (標高+5m) の観測データ (H25 年 12 月 27 日)	8-82
図 8.3-55	最大加速度比較 (H25 年 10 月 26 日)	8-84
図 8.3-56	最大加速度比較 (H25 年 11 月 15 日)	8-84
図 8.3-57	最大加速度比較 (H25 年 12 月 27 日)	8-84
図 8.3-58	加速度のフーリエスペクトル (H25 年 10 月 26 日)	8-86
図 8.3-59	加速度のフーリエスペクトル (H25 年 11 月 15 日)	8-87
図 8.3-60	加速度のフーリエスペクトル (H25 年 12 月 27 日)	8-88
図 8.4-1	無線温度計と有線温度計の比較	8-90
図 8.4-2	無線間隙水圧計と有線間隙水圧計の比較	8-90
図 8.5-1	BTV 観測孔水平位置図 (単位 : mm)	8-92
図 8.5-2	BTV 観測孔鉛直位置図 (単位 : mm)	8-92
図 8.5-3	H23 年度までに BTV 観察で確認されたひび割れ位置	8-93
図 8.5-4	今年度 (H25 年度) の BTV 観察結果	8-94

【第 9 章】

図 9.2-1	Stripa 鉱山の外観図[1]	9-4
図 9.2-2	瑞浪超深地層研究所周辺における地質[2]	9-5
図 9.2-3	瑞浪超深地層研究所の研究計画[3]	9-5
図 9.2-4	Grimsel 試験サイト近傍の航空写真[4]	9-6
図 9.2-5	Grimsel 試験サイトの坑道レイアウト[4]	9-7
図 9.2-6	HADES 地下研究施設レイアウト[5]	9-7
図 9.2-7	緩衝材構築技術に関する検討例 (ベントナイトペレットの充填状況) [6]	9-8
図 9.2-8	穴開き銅製パイプ内の高圧縮ベントナイトの浸潤による時間経過[7]	9-11
図 9.2-9	鉛直ボーリング孔の閉塞試験レイアウト (左 : 穴開き銅版、右 : 銅製メッシュ) [7]	9-12
図 9.2-10	簡易透水試験装置 (左 : 概念図、右 : 写真) [8]	9-13

図 9.2-11	上部低拡散材計器配置図.....	9-15
図 9.2-12	BOS 試験レイアウト[10].....	9-16
図 9.2-13	SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの概念図[11].....	9-17
図 9.2-14	SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの実施坑道[11].....	9-18
図 9.2-15	SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの概要図および実施場所[11]	9-18
図 9.2-16	SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの実施状況[11].....	9-19
図 9.2-17	ケーシング頭頂部の溶接による閉塞[12].....	9-21
図 9.2-18	コンクリートキャップ打設[12].....	9-21
図 9.2-19	円柱ベントナイトブロックの施工方法.....	9-23
図 9.2-20	円柱ベントナイトブロックの施工方法 (その2) [13]に加筆.....	9-24
図 9.2-21	ベントナイトペレットによる施工方法 (空気圧送) [10].....	9-25
図 9.2-22	改良コアバレルを使用した圧縮ベントナイトの打設[10].....	9-25
図 9.2-23	置換工法によるセメントプラグの設置例[14].....	9-26
図 9.2-24	処分坑道の断面形状[15].....	9-28
図 9.2-25	プラグ機能の概念[15].....	9-28
図 9.2-26	埋戻しおよびプラグの機能[16].....	9-29
図 9.2-27	廃棄物の処分坑道断面図 (カテゴリーB)	9-29
図 9.2-28	廃棄物の処分坑道断面図 (カテゴリーC)	9-30
図 9.2-29	坑道および人工バリア仕様[18].....	9-30
図 9.2-30	領域区分概念におけるプラグおよび埋戻し概念図[18].....	9-31
図 9.2-31	処分坑道と人工バリア仕様[20].....	9-31
図 9.2-32	処分坑道の埋戻し[21].....	9-32
図 9.2-33	ブロックによる埋戻し[22].....	9-32
図 9.2-34	処分坑道のプラグ形状[22].....	9-33
図 9.2-35	処分坑道と人工バリア仕様 (ILW) [23].....	9-33
図 9.2-36	処分坑道断面図(縦置き) [24]	9-34
図 9.2-37	坑道の埋戻し、シールおよびプラグ概念[24].....	9-34
図 9.4-1	小型地中無線送信装置.....	9-50
図 9.4-2	間隙水圧計付き小型地中無線送信機.....	9-50
図 9.4-3	ボーリング孔対応受信機.....	9-50
図 9.4-4	地中無線装置を用いた施工後の品質管理方法のイメージ.....	9-51
図 9.4-5	湧水下での狭隘部の埋戻しおよびプラグの施工イメージ図.....	9-53

【第 10 章】

図 10.1-1	地下深部における地震動の観測事例.....	10-4
図 10.1-2	せん断応力分布の比較.....	10-5
図 10.1-3	緩衝材の局所安全係数分布 (せん断、平成 24 年度の検討結果より抜粋) ...	10-6
図 10.1-4	検討フロー (観測データに基づく試験施設の挙動解析)	10-8

図 10.1-6	本年度の試験施設の最終形状	10-10
図 10.1-7	緩衝材の非線形挙動の影響を考慮した解析の検討対象	10-10
図 10.2-1	地震計設置位置	10-11
図 10.2-2	地震計設置状況写真（地震計③）	10-12
図 10.2-3	地震計設置状況写真（養生ケース内）	10-13
図 10.2-4	気象庁発表情報（2013年10月26日）	10-15
図 10.2-5	地震計①の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-16
図 10.2-6	地震計②の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-17
図 10.2-7	地震計③の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-18
図 10.2-8	気象庁発表情報（2013年11月15日）	10-19
図 10.2-9	地震計①の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-20
図 10.2-10	地震計②の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-21
図 10.2-11	地震計③の加速度時刻歴（上から x、y、z 方向）	10-22
図 10.2-12	気象庁発表情報（2013年12月27日）	10-23
図 10.2-13	地震計①の加速度時刻歴（2013年12月27日）	10-24
図 10.2-14	地震計②の加速度時刻歴（2013年12月27日）	10-25
図 10.2-15	地震計③の加速度時刻歴（2013年12月27日）	10-26
図 10.2-16	最大加速度の比較	10-28
図 10.2-17	鉛直方向と水平方向の最大加速度の比率（地震計①）	10-29
図 10.2-18	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2013年10月 26日）	10-31
図 10.2-19	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2013年11月 15日）	10-32
図 10.2-20	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2013年12月 27日）	10-33
図 10.2-21	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（H24年度実施、 Phase3）	10-34
図 10.2-22	加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（H24年度実施、 Phase4）	10-35
図 10.2-23	コンクリート重力ダムの固有周期と堤高の関係	10-36
図 10.2-24	埋設空洞および人工バリアの断面図	10-38
図 10.2-25	地震応答解析モデル（全体）	10-39
図 10.2-26	地震応答解析モデル（埋設空洞周辺）	10-39
図 10.2-27	引戻し解析モデル	10-43
図 10.2-28	観測地震動のフィルタ処理	10-44
図 10.2-29	CASE1 の引戻し解析結果	10-46
図 10.2-30	CASE2 の引戻し解析結果	10-47
図 10.2-31	引戻し解析における観測データと解析モデル下端での応答比較（CASE2、	

	E+F 波、y 方向)	10-48
図 10.2-32	入力地震動妥当性検討モデル	10-50
図 10.2-33	地震計①位置の解析結果と観測データの比較 (CASE1)	10-51
図 10.2-34	地震計①位置の解析結果と観測データの比較 (CASE2)	10-52
図 10.2-35	最大加速度比較.....	10-53
図 10.2-36	レーリー減衰の減衰率と振動数の関係.....	10-54
図 10.2-37	着目点の応答加速度 (地震計①位置)	10-57
図 10.2-38	着目点の応答加速度 (地震計②位置)	10-58
図 10.2-39	着目点の応答加速度 (地震計③位置)	10-59
図 10.2-40	緩衝材の引張応力の地震時増分 (水平方向、引張正、履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-60
図 10.2-41	緩衝材の圧縮応力の地震時増分 (水平方向、圧縮負、履歴最小、単位 : kN/m ²)	10-60
図 10.2-42	緩衝材の引張応力の地震時増分 (鉛直方向、引張正、履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-61
図 10.2-43	緩衝材の圧縮応力の地震時増分 (鉛直方向、圧縮負、履歴最小、単位 : kN/m ²)	10-61
図 10.2-44	緩衝材のせん断応力地震時増分 (履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-62
図 10.2-45	緩衝材のせん断応力地震時増分 (履歴最小、単位 : kN/m ²)	10-62
図 10.2-46	緩衝材の引張ひずみの地震時増分 (水平方向、引張正、履歴最大、単位 : %)	10-63
図 10.2-47	緩衝材の圧縮ひずみの地震時増分 (水平方向、圧縮負、履歴最小、単位 : %)	10-63
図 10.2-48	緩衝材の引張ひずみの地震時増分 (鉛直方向、引張正、履歴最大、単位 : %)	10-64
図 10.2-49	緩衝材の圧縮ひずみの地震時増分 (鉛直方向、圧縮負、履歴最小、単位 : %)	10-64
図 10.2-50	緩衝材のせん断ひずみの地震時増分 (履歴最大、単位 : %)	10-65
図 10.2-51	緩衝材のせん断ひずみの地震時増分 (履歴最小、単位 : %)	10-65
図 10.2-52	緩衝材の最大せん断ひずみ (履歴最大、単位 : %)	10-66
図 10.2-53	本解析での最大せん断ひずみレベル.....	10-66
図 10.2-54	低拡散材の引張応力の地震時増分 (水平方向、引張正、履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-67
図 10.2-55	低拡散材の圧縮応力の地震時増分 (水平方向、圧縮負、履歴最小、単位 : kN/m ²)	10-67
図 10.2-56	低拡散材の引張応力の地震時増分 (鉛直方向、引張正、履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-68
図 10.2-57	低拡散材の圧縮応力の地震時増分 (鉛直方向、圧縮負、履歴最小、単位 :	

	kN/m ²)	10-68
図 10.2-58	低拡散材のせん断応力地震時増分 (履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-69
図 10.2-59	低拡散材のせん断応力地震時増分 (履歴最小、単位 : k N/m ²)	10-69
図 10.2-60	低拡散材の引張ひずみの地震時増分 (水平方向、引張正、履歴最大、単位 : %)	10-70
図 10.2-61	低拡散材の圧縮ひずみの地震時増分 (水平方向、圧縮負、履歴最小、単位 : %)	10-70
図 10.2-62	低拡散材の引張ひずみの地震時増分 (鉛直方向、引張正、履歴最大、単位 : %)	10-71
図 10.2-63	低拡散材の圧縮ひずみの地震時増分 (鉛直方向、圧縮負、履歴最小、単位 : %)	10-71
図 10.2-64	低拡散材のせん断ひずみの地震時増分 (履歴最大、単位 : %)	10-72
図 10.2-65	低拡散材のせん断ひずみの地震時増分 (履歴最小、単位 : %)	10-72
図 10.2-66	コンクリートピットの引張応力の地震時増分	10-73
図 10.2-67	コンクリートピットの圧縮応力の地震時増分	10-73
図 10.2-68	コンクリートピットの引張応力の地震時増分	10-74
図 10.2-69	コンクリートピットの圧縮応力の地震時増分	10-74
図 10.2-70	コンクリートピットのせん断応力地震時増分 (履歴最大、単位 : kN/m ²)	10-75
図 10.2-71	コンクリートピットのせん断応力地震時増分 (履歴最小、単位 : kN/m ²)	10-75
図 10.2-72	コンクリートピットの引張ひずみの地震時増分	10-76
図 10.2-73	コンクリートピットの圧縮ひずみの地震時増分	10-76
図 10.2-74	コンクリートピットの引張ひずみの地震時増分	10-77
図 10.2-75	コンクリートピットの圧縮ひずみの地震時増分	10-77
図 10.2-76	コンクリートピットのせん断ひずみの地震時増分 (履歴最大、単位 : %)	10-78
図 10.2-77	コンクリートピットのせん断ひずみの地震時増分 (履歴最小、単位 : %)	10-78
図 10.2-78	解析結果と観測データの比較 (地震計①)	10-80
図 10.2-79	解析結果と観測データの比較 (地震計②)	10-81
図 10.2-80	解析結果と観測データの比較 (地震計③)	10-82
図 10.2-81	地震計①位置の最大加速度比較	10-83
図 10.2-82	地震計②位置の最大加速度比較	10-83
図 10.2-83	地震計③位置の最大加速度比較	10-83
図 10.2-84	解析結果と観測データの最大加速度比	10-84
図 10.2-85	解析結果と観測データのフーリエスペクトル比較 (y 方向)	10-85
図 10.2-86	解析結果と観測データのフーリエスペクトル比較 (z 方向)	10-86

図 10.2-87	応答加速度の出力位置	10-87
図 10.2-88	緩衝材の外側・内側の応答加速度比較（底部）	10-88
図 10.2-89	緩衝材の外側・内側の応答加速度比較（側部下部）	10-89
図 10.2-90	緩衝材の外側・内側の応答加速度比較（側部上部）	10-90
図 10.2-91	相対変位の出力位置.....	10-91
図 10.2-92	相対変位とせん断剛性の関係	10-92
図 10.2-93	相対変位の正規化とせん断剛性の関係	10-92
図 10.3-1	検討対象の埋設空洞および人工バリアの断面	10-93
図 10.3-2	試験空洞近傍の地質構造（試験空洞縦断面）	10-94
図 10.3-3	解放基盤表面の加速度波形（日本原燃基準地震動 Ss-1 波、引戻し前、2E）	10-95
図 10.3-4	Probabilistic Seismic Hazard Curves[13].....	10-95
図 10.3-5	地震応答解析モデル（全体）	10-96
図 10.3-6	地震応答解析モデル（埋設空洞周辺）	10-96
図 10.3-7	節点ジョイント設置箇所，Phase1.....	10-97
図 10.3-8	節点ジョイント設置箇所，Phase2.....	10-97
図 10.3-9	節点ジョイントの非線形性.....	10-99
図 10.3-10	破壊型修正 R-O モデルのせん断応力～せん断ひずみ履歴のイメージ	10-100
図 10.3-11	検討対象とする施設の状態	10-102
図 10.3-12	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（第四紀層 PH）	10-106
図 10.3-13	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（礫混じり砂岩層 Tss）	10-107
図 10.3-14	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（軽石混じり砂岩層 Tps）	10-107
図 10.3-15	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（軽石凝灰岩層 Tpt）	10-108
図 10.3-16	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（粗粒砂岩層 Tcs）	10-108
図 10.3-17	地層分割図	10-109
図 10.3-18	埋戻し材（セメント系）の静弾性係数と材齢の関係	10-111
図 10.3-19	G/G ₀ ～ γ と h～ γ の関係（緩衝材）	10-112
図 10.3-20	低拡散材の静弾性係数と材齢の関係.....	10-113
図 10.3-21	コンクリートピットの静弾性係数と材齢の関係.....	10-114
図 10.3-22	充填材の静弾性係数と材齢の関係	10-115
図 10.3-23	上部充填材の静弾性係数と材齢の関係	10-116
図 10.3-24	地震動の引戻しについて.....	10-119
図 10.3-25	解放基盤表面の地震動のフーリエスペクトルの比較（水平方向）	10-121
図 10.3-26	解放基盤表面の地震動の加速度応答スペクトルの比較（水平方向）	10-121
図 10.3-27	解放基盤表面の地震動の加速度時刻歴（引戻し前、2E、フィルタ処理後）	10-122
図 10.3-28	入力地震動の加速度時刻歴（引戻し後、2E）	10-122
図 10.3-29	相対変位出力箇所	10-123

図 10.3-30	低拡散材の応答変位出力節点	10-124
図 10.3-31	空洞上下間の水平方向相対変位	10-126
図 10.3-32	施設の変形形状 時刻 46.09s	10-127
図 10.3-33	解析モデル全体の変形形状 時刻 46.09s	10-127
図 10.3-34	施設の変形形状 時刻 130s	10-128
図 10.3-35	解析モデル全体の変形形状 時刻 130s	10-128
図 10.3-36	底部緩衝材の水平方向相対変位	10-130
図 10.3-37	施設の変形形状 時刻 18.26s	10-130
図 10.3-38	緩衝材の最大主応力分布 履歴最大 引張：正	10-131
図 10.3-39	緩衝材の最大せん断ひずみ分布 履歴最大	10-132
図 10.3-40	緩衝材の塑性状況の経時変化（1）	10-133
図 10.3-41	緩衝材の塑性化状況の経時変化（2）	10-134
図 10.3-42	緩衝材の塑性化状況、解析終了時（130s）	10-135
図 10.3-43	せん断に対する緩衝材の局所安全係数分布、平成 24 年度、履歴最小	10-135
図 10.3-44	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（1）	10-137
図 10.3-45	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（2）	10-137
図 10.3-46	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（3）	10-138
図 10.3-47	低拡散材の応答加速度 水平方向	10-139
図 10.3-48	低拡散材の応答加速度 鉛直方向	10-139
図 10.3-49	低拡散材側部の水平方向相対変位	10-140
図 10.3-50	施設の変形形状 時刻 18.26s	10-141
図 10.3-51	施設の変形形状 時刻 46.06s	10-141
図 10.3-52	低拡散材の安全係数分布 引張 履歴最小	10-142
図 10.3-53	低拡散材の最大主応力分布 時刻 18.26s 引張：正	10-143
図 10.3-54	低拡散材の最大主応力分布 時刻 46.06s 引張：正	10-143
図 10.3-55	低拡散材の最大主応力分布 履歴最大 引張：正	10-144
図 10.3-56	低拡散材の最小主応力分布 時刻 18.26s 圧縮：負	10-145
図 10.3-57	低拡散材の最小主応力分布 時刻 46.06s 圧縮：負	10-145
図 10.3-58	低拡散材の最小主応力分布 履歴最小 圧縮：負	10-146
図 10.3-59	低拡散材の最大主ひずみ分布 時刻 18.26s 引張：正	10-147
図 10.3-60	低拡散材の最大主ひずみ分布 時刻 46.06s 引張：正	10-147
図 10.3-61	低拡散材の最大主ひずみ分布 履歴最大 引張：正	10-148
図 10.3-62	低拡散材の最小主ひずみ分布 時刻 18.26s 圧縮：負	10-149
図 10.3-63	低拡散材の最小主ひずみ分布 時刻 46.06s 圧縮：負	10-149
図 10.3-64	低拡散材の最小主ひずみ分布 履歴最小 圧縮：負	10-150
図 10.3-65	コンクリートピットの安全係数分布 引張 履歴最小	10-151
図 10.3-66	コンクリートピットの最大主応力分布 時刻 18.26s 引張：正	10-152
図 10.3-67	コンクリートピットの最大主応力分布 時刻 46.06s 引張：正	10-152

図 10.3-68	コンクリートピットの最大主応力分布	履歴最大 引張：正	10-153
図 10.3-69	コンクリートピットの最小主応力分布	時刻 18.26s 圧縮：負	10-154
図 10.3-70	コンクリートピットの最小主応力分布	時刻 46.06s 圧縮：負	10-154
図 10.3-71	コンクリートピットの最小主応力分布	履歴最小 圧縮：負	10-155
図 10.3-72	コンクリートピットの最大主ひずみ分布	時刻 18.26s 引張：正	10-156
図 10.3-73	コンクリートピットの最大主ひずみ分布	時刻 46.06s 引張：正	10-156
図 10.3-74	コンクリートピットの最大主ひずみ分布	履歴最大 引張：正	10-157
図 10.3-75	コンクリートピットの最小主ひずみ分布	時刻 18.26s 圧縮：負	10-158
図 10.3-76	コンクリートピットの最小主ひずみ分布	時刻 46.06s 圧縮：負	10-158
図 10.3-77	コンクリートピットの最小主ひずみ分布	履歴最小 圧縮：負	10-159
図 10.3-78	空洞上下間の水平方向相対変位		10-161
図 10.3-79	施設の変形形状	時刻 46.11s	10-162
図 10.3-80	解析モデル全体の変形形状	時刻 46.11s	10-162
図 10.3-81	施設の変形形状	時刻 130s	10-163
図 10.3-82	解析モデル全体の変形形状	時刻 130s	10-163
図 10.3-83	底部緩衝材の水平方向相対変位		10-165
図 10.3-84	施設の変形形状	時刻 46.14s	10-165
図 10.3-85	緩衝材の最大主応力分布	履歴最大 引張：正	10-166
図 10.3-86	緩衝材の最大せん断ひずみ分布	履歴最大	10-167
図 10.3-87	緩衝材の塑性化状況の経時変化（1）		10-168
図 10.3-88	緩衝材の塑性化状況の経時変化（2）		10-169
図 10.3-89	緩衝材の塑性化状況、解析終了時（130s）		10-170
図 10.3-90	せん断に対する緩衝材の局所安全係数分布、平成 24 年度、履歴最小		10-170
図 10.3-91	緩衝材の厚さの残留変化量		10-171
図 10.3-92	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（1）		10-172
図 10.3-93	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（2）		10-173
図 10.3-94	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（3）		10-174
図 10.3-95	緩衝材のせん断応力-せん断ひずみ履歴曲線（4）		10-175
図 10.3-96	低拡散材の応答加速度	水平方向	10-176
図 10.3-97	低拡散材の応答加速度	鉛直方向	10-177
図 10.3-98	低拡散材側部の水平方向相対変位		10-178
図 10.3-99	施設の変形形状	時刻 46.13s	10-178
図 10.3-100	低拡散材の安全係数分布	引張 履歴最小	10-179
図 10.3-101	低拡散材の最大主応力分布	時刻 46.13s 引張：正	10-180
図 10.3-102	低拡散材の最大主応力分布	履歴最大 引張：正	10-180
図 10.3-103	低拡散材の最小主応力分布	時刻 46.13s 圧縮：負	10-181
図 10.3-104	低拡散材の最小主応力分布	履歴最小 圧縮：負	10-181
図 10.3-105	低拡散材の最大主ひずみ分布	時刻 46.13s 引張：正	10-182

図 10.3-106	低拡散材の最大主ひずみ分布	履歴最大	引張：正	.....	10-182
図 10.3-107	低拡散材の最小主ひずみ分布	時刻 46.13s	圧縮：負	.....	10-183
図 10.3-108	低拡散材の最小主ひずみ分布	履歴最小	圧縮：負	.....	10-183
図 10.3-109	コンクリートピットの安全係数分布	引張	履歴最小	.....	10-184
図 10.3-110	コンクリートピットの最大主応力分布	時刻 46.13s	引張：正	.....	10-185
図 10.3-111	コンクリートピットの最大主応力分布	履歴最大	引張：正	.....	10-186
図 10.3-112	コンクリートピットの最小主応力分布	時刻 46.13s	圧縮：負	.....	10-187
図 10.3-113	コンクリートピットの最小主応力分布	履歴最小	圧縮：負	.....	10-187
図 10.3-114	コンクリートピットの最大主ひずみ分布	時刻 46.13s	引張：正	.....	10-188
図 10.3-115	コンクリートピットの最大主ひずみ分布	履歴最大	引張：正	.....	10-188
図 10.3-116	コンクリートピットの最小主ひずみ分布	時刻 46.13s	圧縮：負	.....	10-189
図 10.3-117	コンクリートピットの最小主ひずみ分布	履歴最小	圧縮：負	.....	10-189

表目次

【第1章】

表 1.2-1	試験項目・目的	1-4
表 1.2-2	試験の全体工程	1-5
表 1.3-1	平成 25 年度検討委員会実施経緯	1-7
表 1.3-2	平成 25 年度の実施工程表	1-9

【第2章】

表 2.1-1	試験実施数量	2-5
表 2.1-2	施工確認試験実施工程表	2-5
表 2.1-3	湿潤材料供給機（グラニューレーター）の標準仕様	2-6
表 2.1-4	コンプレッサーの標準仕様	2-7
表 2.1-5	吹付け機の標準仕様	2-8
表 2.1-6	施工確認試験の施工管理・品質管理項目	2-23
表 2.1-7	ベントナイト材料の仕様（管理基準値）および試験結果一覧	2-24
表 2.1-8	調整前後の含水比一覧	2-25
表 2.1-9	本試験で使用したスキャナの仕様	2-29
表 2.2-1	実施項目・数量	2-30
表 2.2-2	側部緩衝材施工確認試験実施工程（平成 25 年度）	2-33
表 2.3-1	ベントナイト材料特性に関する品質管理項目	2-40
表 2.3-2	材料特性に関する品質管理基準	2-41
表 2.3-3	今年度使用したベントナイト材料の特性一覧表	2-42
表 2.3-4	ベントナイト（クニゲル GX）の粒径仕様	2-42
表 2.3-5	ベントナイト（クニゲル GX）の管理値	2-43
表 2.3-6	吹付け工法で使用した材料の材料特性の基本統計量	2-43
表 2.3-7	湿潤材料定量供給機の改良点（H24 年度）	2-45
表 2.3-8	各年度のリバウンド率	2-46
表 2.3-9	材料廃棄率	2-47
表 2.3-10	年度別廃棄率	2-47
表 2.3-11	含水比と供給量の採用値	2-52
表 2.3-12	温度上昇量の比較	2-57
表 2.3-13	平成 24 年度吹付け工法での課題と今年度実施した対応策	2-60
表 2.3-14	施工性に影響を与える因子	2-61
表 2.4-1	乾燥密度測定結果（各層）	2-65
表 2.4-2	乾燥密度統計データ（各層）	2-65
表 2.4-3	乾燥密度測定結果（18 層目）	2-68
表 2.4-4	乾燥密度統計データ（18 層目）	2-68

表 2.4-5	乾燥密度測定結果 (35 層目)	2-68
表 2.4-6	乾燥密度統計データ (35 層目)	2-68
表 2.4-7	一軸圧縮試験結果一覧	2-71
表 2.4-8	三軸圧縮試験 (UU) 結果一覧	2-73
表 2.4-9	透水試験結果一覧表	2-75
表 2.4-10	膨潤圧試験結果一覧表	2-76

【第 3 章】

表 3.1-1	試験数量	3-13
表 3.1-2	全体工程表	3-13
表 3.1-3	詳細作業工程表	3-13
表 3.1-4	主要使用機械一覧表	3-14
表 3.1-5	機械仕様 (アイリッヒミキサ)	3-14
表 3.1-6	機械仕様 (小型振動ローラ)	3-15
表 3.1-7	カニクレーン主要緒元	3-17
表 3.1-8	敷均し・転圧の手順	3-17
表 3.1-9	施工ケース	3-18
表 3.1-10	施工確認試験の品質管理・管理項目	3-33
表 3.1-11	ベントナイト材料の仕様 (管理基準値) および試験結果一覧	3-34
表 3.1-12	含水比調整調整結果	3-35
表 3.1-13	施工パターン	3-47
表 3.2-1	試験項目および試験数量	3-52
表 3.2-2	品質測定試験 (室内試験) ケース	3-55
表 3.2-3	一軸圧縮試験結果一覧表 (既往の結果を含む)	3-58
表 3.2-4	三軸圧縮試験条件	3-59
表 3.2-5	三軸圧縮強度試験(UU 試験)結果一覧表 (既往の結果を含む)	3-60
表 3.2-6	透水試験結果	3-72
表 3.2-7	膨潤圧試験結果	3-79
表 3.3-1	ベントナイト材料特性に関する品質管理項目	3-80
表 3.3-2	材料特性に関する品質管理基準	3-81
表 3.3-3	今年度使用したベントナイト材料の特性一覧表	3-82
表 3.3-4	ベントナイト (クニゲル GX) の粒径仕様	3-82
表 3.3-5	緩衝材に対する代表的な現象・反応および関連する主要な項目 [8]	3-84
表 3.3-6	含水比測定に試料として必要な最小質量	3-86
表 3.3-7	施工時間の比較	3-99
表 3.3-8	ベントナイト (クニゲル GX) の管理値	3-100
表 3.3-9	振動工法で使用した材料の材料特性の基本統計量 (平成 19~25 年度)	3-101
表 3.4-1	初期性能確認試験の試験項目	3-105

【第4章】

表 4.1-1	使用材料と混合率（乾燥重量比）	4-3
表 4.1-2	ミルシートによる品質（クニゲル V1）	4-3
表 4.1-3	練混ぜ前の砂の品質；土粒子密度（三沢産コンクリート用砂）	4-4
表 4.1-4	練混ぜ前の砂の品質；粒度特性（三沢産コンクリート用砂）	4-4
表 4.1-5	クニゲル GX の練混ぜ試験に使用された各種練混ぜ機械[1]	4-9
表 4.1-6	連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験[2]	4-10
表 4.1-7	連続式練混ぜ機械（SR-2000G）を用いた練混ぜ試験[2]	4-11
表 4.1-8	連続式練混ぜ機械（Geo-Tom）を用いた練混ぜ試験[3]	4-12
表 4.1-9	連続式練混ぜ機械（ミストブレンダー）を用いた練混ぜ試験結果[5]	4-13
表 4.1-10	練混ぜ機械の概要	4-14
表 4.1-11	材料練混ぜ試験ケース	4-14
表 4.1-12	室内締固め試験の結果と設定含水比	4-15
表 4.1-13	品質確認試験数量	4-24
表 4.1-14	品質確認試験ケースと数量	4-24
表 4.1-15	品質確認試験	4-29
表 4.1-16	透水試験用供試験体の仕様	4-48
表 4.1-17	本試験で使用した練混ぜ機械	4-53
表 4.2-1	施工結果の例；吹付け試験ケース[10]	4-55
表 4.2-2	試験施工（転圧）ケース	4-58
表 4.2-3	転圧試験概要	4-59
表 4.2-4	使用した機械の概要	4-59
表 4.2-5	試験施工（吹付け）ケース	4-60
表 4.2-6	転圧試験結果（ハンドガイド振動ローラ）	4-80
表 4.2-7	転圧試験結果（バイブロコンパクタ）	4-81
表 4.2-8	転圧試験結果（小型振動ローラ）	4-82
表 4.2-9	吹付け試験結果	4-83
表 4.2-10	機械および敷均し厚の違いによる必要振動 Pass 数	4-85

【第5章】

表 5.1-1	試験施工（転圧）ケース	5-5
表 5.1-2	試験施工（吹付け）ケース	5-5
表 5.1-3	試験数量	5-11
表 5.1-4	全体工程表	5-12
表 5.1-5	工事工程表（詳細）	5-12
表 5.1-6	主要使用機械一覧表	5-13
表 5.1-7	自走式土質改良機主要緒元	5-14

表 5.1-8	バイブロコンパクト主要緒元	5-14
表 5.1-9	圧力釜式吹付け機主要緒元	5-15
表 5.1-10	カニクレーン主要緒元	5-16
表 5.1-11	施工確認試験の管理項目	5-37
表 5.1-12	ベントナイト（クニゲル V1）試験結果一覧	5-38
表 5.1-13	混合条件表	5-38
表 5.1-14	混合土製造量	5-40
表 5.1-15	混合土製造結果；含水比	5-41
表 5.1-16	混合土製造結果；混合率	5-41
表 5.1-17	吹付け施工の施工結果	5-43
表 5.1-18	吹付け施工の施工速度およびリバウンド、ロス率	5-45
表 5.1-19	施工体積の比較（吹付け施工）	5-45
表 5.1-20	施工体積の比較（転圧施工）	5-54
表 5.2-1	初期性能確認項目および数量	5-55
表 5.2-2	品質測定試験（室内試験）ケース	5-56
表 5.2-3	一軸圧縮試験結果一覧表	5-58
表 5.2-4	三軸圧縮試験条件	5-59
表 5.2-5	三軸圧縮強度試験(UU 試験)結果一覧表	5-60
表 5.2-6	膨潤圧試験結果	5-62
表 5.2-7	透水試験結果	5-72
表 5.3-1	材料特性の管理項目と管理基準値	5-77
表 5.3-2	施工・出来形に関する管理項目と管理基準値	5-80
表 5.3-3	上部緩衝材上面部からの施工高さの不陸	5-86
表 5.3-4	施工体積の比較（吹付け施工）	5-96
表 5.3-5	施工体積の比較（転圧施工）	5-96
表 5.3-6	施工体積の比較（全体）	5-96
表 5.3-7	各計測方法における各手順での所要時間	5-97
表 5.3-8	計測方法の比較	5-97
表 5.3-9	施工方法の違いによる室内試験結果	5-106
表 5.4-1	初期性能確認試験の試験項目	5-109
表 5.4-2	UU_3(吹付)の試験結果一覧表	5-121
表 5.4-3	施工方法の違いによる物理特性試験結果	5-132

【第 6 章】

表 6.1-1	試験項目	6-2
表 6.1-2	試験条件	6-3
表 6.1-3	試験仕様	6-5
表 6.2-1	各段階における供試体の性状	6-10

表 6.2-2	試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度 (鉛直圧 100kPa)	6-20
表 6.2-3	試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度 (鉛直圧 500kPa)	6-20
表 6.2-4	試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度 (鉛直圧 1000kPa)	6-20
表 6.3-1	三軸圧縮強度試験の試験仕様	6-27
表 6.3-2	三軸圧縮強度試験 (\overline{CU} 試験) 結果一覧表	6-28
表 6.3-3	取得パラメーター一覧表	6-28
表 6.4-1	繰り返し三軸試験の試験仕様	6-42
表 6.4-2	H-D,R-O モデルパラメーター一覧	6-49
表 6.4-3	試験時の供試体諸元	6-55
表 6.4-4	弾性波測定試験結果	6-55
表 6.4-5	供試体条件、締固め度、含水比によるせん断剛性の変化率	6-57
表 6.4-6	繰り返し三軸試験と弾性波速度試験における G_{max} の比較	6-58
表 6.5-1	標準圧密試験の試験仕様	6-60
表 6.5-2	圧密試験結果 C 値 95%, W_{opt} 載荷過程	6-60
表 6.5-3	圧密試験結果 C 値 95%, W_{opt} 除荷過程	6-60
表 6.5-4	圧密試験結果 C 値 100%, W_{opt} 載荷過程	6-62
表 6.5-5	圧密試験結果 C 値 100%, W_{opt} 除荷過程	6-63
表 6.5-6	圧縮指数、膨張指数一覧	6-65
表 6.6-1	透水試験結果	6-73
表 6.7-1	現地発生土を用いた室内試験の項目および数量	6-74
表 6.7-2	現地発生土 (軽石凝灰岩) の湿潤密度測定結果	6-75
表 6.7-3	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の液性・塑性限界測定結果	6-76
表 6.7-4	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験ケース	6-78
表 6.7-5	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果	6-81
表 6.7-6	軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の一軸圧縮強度試験結果	6-81

【第 7 章】

表 7.2-1	継続試験の一覧	7-3
表 7.2-2	セメント系材料の拡散試験条件	7-7
表 7.2-3	上部低拡散材における HTO の実効拡散係数	7-11
表 7.2-4	各空隙率の測定結果	7-15
表 7.2-5	平成 24 年度の全空隙率測定結果との比較	7-15
表 7.2-6	材齢による全空隙率	7-16
表 7.2-7	材齢による連続空隙率	7-17
表 7.2-8	材齢によるインクボトル空隙率	7-18
表 7.2-9	低拡散材およびコンクリートピットにおける HTO の実効拡散係数	7-20
表 7.2-10	室内作製供試体の養生条件一覧表	7-21
表 7.2-11	現場打込み供試体の養生条件一覧表	7-21

表 7.2-12	室内試験 基本配合	7-22
表 7.2-13	室内試験 変動配合	7-22
表 7.2-14	室内試験 高空隙率	7-22
表 7.2-15	底部低拡散材の配合(LS1-LP66)	7-22
表 7.2-16	側部低拡散材の配合(LS2-LP45)	7-22
表 7.2-17	手前部コンクリートピットの配合(C-LP50)	7-22
表 7.2-18	上部低拡散材の配合(LS1-LP53)	7-22
表 7.3-1	側部低拡散材のひび割れ調査履歴	7-26
表 7.4-1	各部材における試験材齢	7-39
表 7.4-2	長期材齢評価試験数量	7-39
表 7.4-3	各部材の使用材料	7-40
表 7.4-4	底部コンクリートピットの配合(LS1-249)	7-41
表 7.4-5	上部コンクリートピットの配合(LS2)	7-41
表 7.4-6	底部低拡散材の配合(LS1-LP66)	7-41
表 7.4-7	上部低拡散材の配合(LS1-LP53)	7-41
表 7.4-8	充てん材の配合(LEX 無し SP3+Ad)	7-41
表 7.4-9	上部充てん材の配合(LEX 有り SP3+Ad)	7-41
表 7.4-10	圧縮強度試験結果一覧 (コンクリートピット)	7-44
表 7.4-11	圧縮強度試験結果一覧 (低拡散材)	7-44
表 7.4-12	圧縮強度試験結果一覧 (廃棄体間充てん材)	7-45
表 7.4-13	圧縮強度試験結果一覧 (上部充てん材)	7-46
表 7.4-14	静弾性係数試験結果一覧 (コンクリートピット)	7-51
表 7.4-15	静弾性係数試験結果一覧 (低拡散材)	7-51
表 7.4-16	静弾性係数試験結果一覧 (廃棄体間充てん材)	7-52
表 7.4-17	静弾性係数試験結果一覧 (上部充てん材)	7-53
表 7.4-18	長期材齢評価試験のまとめ	7-55
表 7.4-19	強度近似式の定数	7-55

【第 8 章】

表 8.1-1	上部緩衝材計器設置一覧	8-1
表 8.1-2	地震計設置一覧	8-2
表 8.1-3	計器仕様および数量	8-3
表 8.2-1	加速度センサの仕様	8-6
表 8.2-2	設置位置選定根拠	8-6
表 8.2-3	地震観測の計測条件および計測データの仕様	8-7
表 8.3-1	既設および H25 年度新設計器一覧	8-8
表 8.3-2	坑内環境計測一覧	8-9
表 8.3-3	上部緩衝材計測一覧	8-9

表 8.3-4	上部緩衝材の動的計測実施層	8-11
表 8.3-5	地震計計測一覧	8-15
表 8.3-6	地震動一覧	8-15
表 8.4-1	施工イベント一覧	8-28
表 8.4-2	上部緩衝材施工時の動的計測結果の最大値一覧	8-34
表 8.4-3	底部緩衝材の上載荷重一覧	8-41
表 8.4-4	最大土圧一覧 (H25年2月1日～H26年2月14日)	8-47
表 8.4-5	最大沈下量一覧 (H25年2月1日～H26年2月14日)	8-50
表 8.4-6	間隙水圧計計測区間一覧	8-60
表 8.4-7	観測地震動の最大加速度一覧	8-64
表 8.4-8	試験施設の3次元的構造の特徴	8-67
表 8.4-9	KiK-net 六ヶ所の詳細	8-74
表 8.4-10	地震計と KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測地震動の最大加速度一覧 ..	8-83

【第9章】

表 9.2-1	ボーリング孔の閉塞技術に関して調査対象とする既往研究	9-3
表 9.2-2	各プロジェクトのボーリング孔の閉塞における検討条件	9-10
表 9.2-3	上部低拡散材計器仕様および数量一覧表	9-14
表 9.2-4	SB 原位置試験結果[11]	9-20
表 9.2-5	埋戻し材とプラグに関する既往検討	9-27
表 9.2-6	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (日本：高レベル廃棄物)	9-35
表 9.2-7	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (日本：TRU 廃棄物)	9-35
表 9.2-8	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (フランス)	9-36
表 9.2-9	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (フィンランド：高レベル廃棄物)	9-36
表 9.2-10	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (スウェーデン：低・中レベル廃棄物)	9-36
表 9.2-11	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (スウェーデン：高レベル廃棄物)	9-36
表 9.2-12	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (スイス)	9-37
表 9.2-13	埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能 (カナダ)	9-37
表 9.2-14	埋戻し材の環境条件と要求性能 (日本：余裕深度処分)	9-37
表 9.2-15	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (日本：高レベル廃棄物)	9-38
表 9.2-16	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (日本：TRU 廃棄物)	9-39
表 9.2-17	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (フランス)	9-39
表 9.2-18	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (フィンランド：高レベル廃棄物)	9-40
表 9.2-19	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (スウェーデン：低・中レベ	

	ル廃棄物)	9-41
表 9.2-20	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (スウェーデン: 高レベル廃棄物)	9-41
表 9.2-21	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (スイス)	9-42
表 9.2-22	埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料 (カナダ)	9-43
表 9.2-23	埋戻し材の要求性能と候補材料 (日本: 余裕深度処分)	9-43
表 9.2-24	ベントナイト系材料による埋戻し施工方法[16]	9-44
表 9.3-1	ボーリング孔の閉塞材料と要求項目との関係	9-46
表 9.3-2	ボーリング孔の閉塞材料と諸条件との関係	9-46
表 9.3-3	埋戻しとプラグに関する要求性能と使用材料	9-47
表 9.4-1	ボーリング孔の条件に応じた閉塞材料と施工方法	9-48
表 9.4-2	ベントナイト系材料の施工方法の実証 (地下水: 有り) の方策	9-49
表 9.4-3	施工後の品質管理方法 (材料と孔壁の界面の閉塞) の方策	9-49
表 9.4-4	アクセス坑道等の閉鎖材料と施工方法	9-52
表 9.4-5	狭隘部でのプラグの施工の方策	9-53
表 9.5-1	ボーリング孔の条件に応じた閉塞材料と施工方法 (再掲)	9-54
表 9.5-2	アクセス坑道等の閉鎖材料と施工方法 (再掲)	9-54

【第 10 章】

表 10.2-1	地震動レベル	10-12
表 10.2-2	地震計の仕様	10-12
表 10.2-3	データ回収の仕様	10-13
表 10.2-4	地震動一覧	10-14
表 10.2-5	観測地震動の最大加速度一覧	10-27
表 10.2-6	鉛直方向と水平方向の最大加速度の比率一覧 (地震計①)	10-28
表 10.2-7	試験施設の 3 次元的構造の特徴	10-36
表 10.2-8	部材ごとの材料モデル	10-38
表 10.2-9	解析物性値一覧	10-41
表 10.2-10	引戻し解析に用いる地盤物性値	10-42
表 10.2-11	固有値解析モデル	10-53
表 10.2-12	有値解析結果	10-54
表 10.2-13	質量比例係数 α と剛性比例係数 β	10-54
表 10.2-14	図化項目一覧	10-55
表 10.2-15	解析結果図化項目一覧	10-56
表 10.2-16	相対変位結果 (履歴最大)	10-92
表 10.3-1	地震動レベル	10-95
表 10.3-2	節点ジョイントのパラメータ	10-99
表 10.3-3	部材ごとの材料モデル	10-101

表 10.3-4	解析物性値一覧.....	10-103
表 10.3-5	引戻し解析に用いる地盤物性値.....	10-104
表 10.3-6	地盤物性値（修正 R-O モデルのパラメータ）.....	10-105
表 10.3-7	SHAKE を用いた地震動の引戻し解析で得られた最大せん断ひずみ.....	10-106
表 10.3-8	地震応答解析に用いる地盤物性値.....	10-109
表 10.3-9	支保工の諸元および物性値.....	10-110
表 10.3-10	解析に用いる支保工の物性値.....	10-110
表 10.3-11	埋戻し材（セメント系）の物性値.....	10-111
表 10.3-12	埋戻し材（土質系）の物性値.....	10-111
表 10.3-13	緩衝材の物性値.....	10-112
表 10.3-14	低拡散材の物性値.....	10-113
表 10.3-15	コンクリートピットの物性値.....	10-114
表 10.3-16	充填材の物性値.....	10-115
表 10.3-17	上部充填材の物性値.....	10-116
表 10.3-18	廃棄体容器の物性値.....	10-117
表 10.3-19	廃棄体内部の物性値.....	10-117
表 10.3-20	廃棄体内部の単位体積重量算定表.....	10-117
表 10.3-21	均しコンクリートの物性値.....	10-118
表 10.3-22	基本ケースの図化項目一覧.....	10-123
表 10.3-23	解析結果図化項目一覧.....	10-125
表 10.3-24	解析結果図化項目一覧.....	10-160

添付資料-1	試験写真集
添付資料-2	施工確認試験（上部緩衝材隅角部）データ集
添付資料-3	施工確認試験（上部緩衝材平面部）データ集
添付資料-4	上部埋戻し材練混ぜ試験および締固め特性評価_データ集
添付資料-5	施工確認試験（上部埋戻し材）データ集
添付資料-6	ベントナイト混合土材料特性測定_データ集
添付資料-7	施設・周辺岩盤挙動計測データ集

第 1 章 全体概要

第1章 全体概要

1.1 試験の背景・目的

1.1.1 試験の背景

地下 50m 以深の大断面の地下空洞にコンクリートの処分ピットを構築し、その周囲をベントナイトの緩衝材で覆う地下空洞型処分施設は、平成 10 年代前半頃から関係する箇所で小規模な試験や検討が行われていたが、平成 10 年代後半頃から、大規模な試験の計画が検討され、試験を開始しているところである。

本確証試験は、日本原燃（株）が進めている低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設検討のための試験空洞を活用し、地下空洞型処分施設の確証試験を行うものであり、大断面の地下空洞において具体的な処分施設を模擬したわが国初の実規模の施工に関わる試験となる。このため、試験の計画にあたっては、発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の余裕深度処分等の設計等に関係してきた専門家からなる委員会を設け、幅広く関連する知見や意見等を取り入れて検討を進めてきた。

本確証試験開始前の平成 17 年度から平成 24 年度まで「地下空洞型処分施設性能確証試験」が実施されており、主に以下の項目が検討され、成果を得ている。

平成 17 年度：施設形態・人工バリアの要求機能設定、試験全体の基本計画策定

平成 18 年度：詳細設計・詳細な試験計画策定

平成 19 年度：平成 19 年度から大断面の試験空洞において底部・側部埋戻し材、
底部緩衝材（一部）の施工確認試験等

平成 20 年度：底部緩衝材、底部低拡散材、奥部・側部コンクリートピット施工確
認試験等

平成 21 年度：手前部コンクリートピット、側部低拡散材、充填材（一部）側部緩
衝材（一部）施工確認試験等

平成 22 年度：充填材（残部）、側部緩衝材（一部）施工確認試験

平成 23 年度：側部緩衝材（一部）施工確認試験等

平成 24 年度：側部緩衝材（一部）、上部コンクリートピット、上部低拡散の材施工
確認試験等

平成 19 年度から実施したこれら一連の施工確認試験において、地下空洞型処分施設としての主要な構造部の施工方法の確認とその初期性能を確認することができた。

本年度からは、「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」として、処分施設の閉鎖に係わる確証的な試験を実施する。本年度は上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材の施工確認試験等を実施する。また、ボーリング孔等の閉鎖技術および巨大地震が地下空洞施設に与える影響について検討する。

1.1.2 試験の目的

発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分は、地下50m以深の大断面の地下空洞型処分施設における処分を概念とした検討が行われてきている。これまで、処分施設の閉鎖技術としては、地上での小規模要素試験等において基礎的な試験が行われているのみであり、今後の地下空洞型処分施設的设计・建設に当っては、現実に即した試験条件下での確証的な試験が必要となる。特に、処分施設の人工バリア上部は高所で狭隘な空間であることから、この空間を閉鎖する埋戻し材が、実施工において要求される必要性能を確保できるか、また、現実的で合理的な施工方法を確立できるかを検証する必要がある。

本確証試験では、大断面の地下空洞において、埋戻し材としての要求品質の確保と、合理的な施工技術、施工方法の実規模施設への適用性の確証を目的とし、具体的な処分施設を模擬した実規模施設において施工試験を実施し、実用的な施工技術の確立に資する。

本確証試験は、大断面の地下空洞に構築される地下空洞型処分施設を対象としており、具体的な地下空洞型処分施設的设计・建設に向け、これまでの試験・検討を基礎に、処分施設の施工技術の確立と、その施工技術によって構築された施設の性能を現実の処分環境において確認する。このため、同様の処分施設形態が検討されている発電所廃棄物やTRU廃棄物等の余裕深度処分に対して人工バリア等の施工技術が現実的に対応可能であることを示すことができるものと考えている。また、発電所廃棄物やTRU廃棄物等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係わる共通的な基盤技術の確立に貢献するものである。本試験で期待される成果を整理したものを図1.1-1に示す。

本試験は実規模大で実施する総合的な試験。このため、以下の期待が大きい。

- 実規模での施工の実現性と品質確認、諸データの蓄積、信頼性の向上
- 施工後の施設全体としての力学的安定性、施設の性能に係る計測
- 施設形態が類似する今後のTRU廃棄物等の地下空洞型処分技術へも反映

特に、

- 現場施工技術の反映
- 材料配合、施工手順、施工方法とその性能に対する知見の反映

更に、

- 実処分施設の建設段階での国の規制に対して、施設確認方法等の知見の反映

図 1.1-1 期待される成果

1.2 全体計画

1.2.1 試験の概要

試験は、大断面を有する地下空洞に、地下空洞型処分施設を模擬した試験施設を構築し、施設施工方法の成立性と人工バリア等の初期性能を確認するとともに、施工中・施工後における施設および岩盤の挙動計測等を行うものである。検討が進められている地下空洞型処分施設の概念は図 1.2-1 に示すように、地下空洞内において廃棄体周囲に低透水層として緩衝材（ベントナイト）やセメント系材料（低拡散層、コンクリートピット、充填材）で構成される人工バリア等を構築し、周辺岩盤とあわせた多重バリアシステムとして放射性核種を長期間に渡って閉じ込めるものである。

本確証試験は、この施設構造を模擬して実施された「地下空洞型処分施設性能確証試験」の試験施設の上部空間を使用して、緩衝材(上部)および埋戻し材を対象に、試験施設を構築し、処分施設の閉鎖に係わる埋戻し材等の施工確認試験、初期性能確認試験、施設／岩盤挙動計測の3種類の試験を実施する。各試験の目的を表 1.2-1 に、試験位置を図 1.2-2 に、試験施設の試験開始前の状況を図 1.2-3 に、試験工程を表 1.2-2 に示す。また、試験に供する地下空洞として、青森県六ヶ所村において日本原燃（株）が掘削した試験空洞を利用する。試験の実施場所を図 1.2-4 に示す。

処分施設施工確認試験は、人工バリア等を構成する全ての部位を組み合わせ実施し、実規模・実環境下における試験としてはわが国でも初めてのものであり、人工バリア等の実規模での施工性確認は、最も重要な試験と位置付けられる。

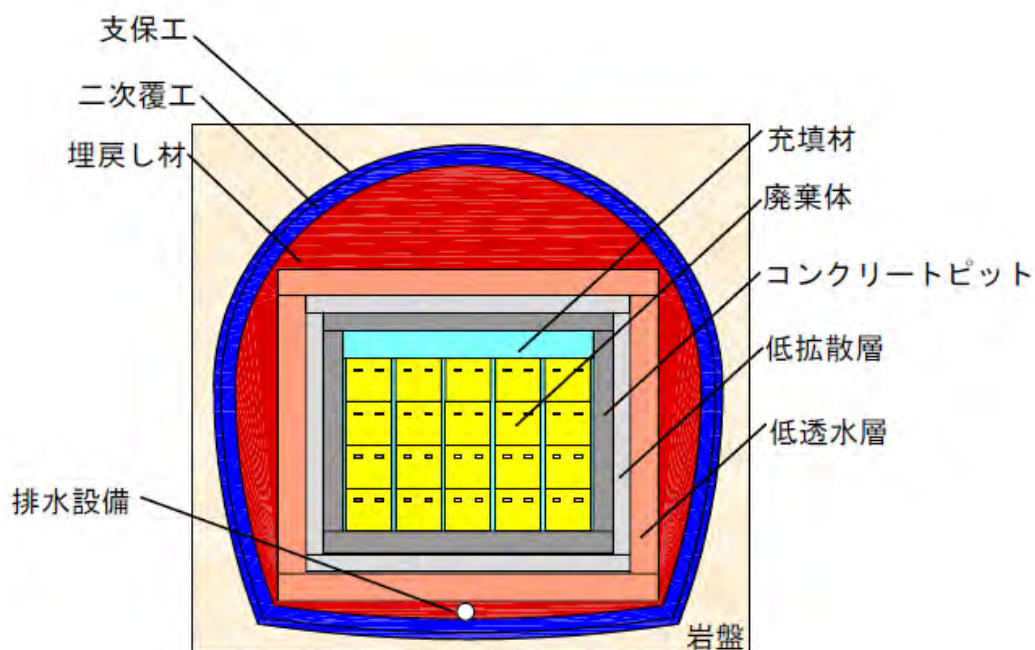


図 1.2-1 地下空洞型処分施設の概念の例[1]

表 1.2-1 試験項目・目的

試験項目	目的
1. 処分施設施工確認試験 ①上部緩衝材施工試験 ②上部埋戻し材施工試験	実際の地下空洞環境下において実規模の施設を施工することにより、施工技術、施工手順、施工方法等の実施への適用性を確認する。 また、処分施設を構成する構成要素ごとに、複数の施工技術、施工方法を適用するとともに、施工の精度、効率を考慮して総合的な施設の施工性を確認する。
2. 初期性能確認試験	施工された施設について、力学的安定性、核種閉じ込め性等の安全評価において要求される初期性能に関わる品質について、その達成度やバラツキ等を確認する。
3. 施設/岩盤挙動計測	施工された施設の力学的安定性や周辺岩盤に与える影響等を評価するために、施設や周辺岩盤の力学・水理挙動を計測する。

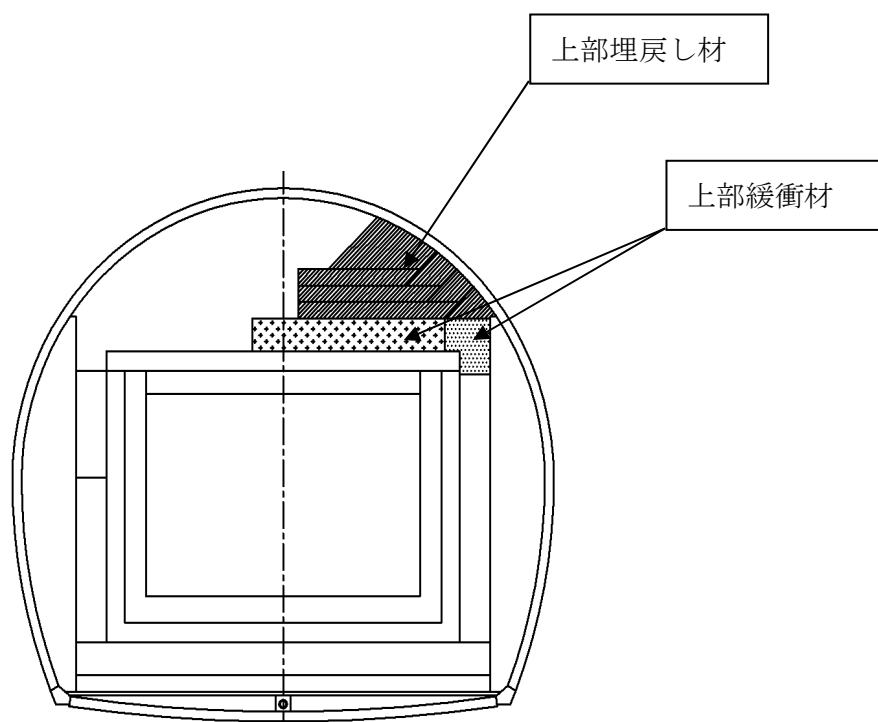


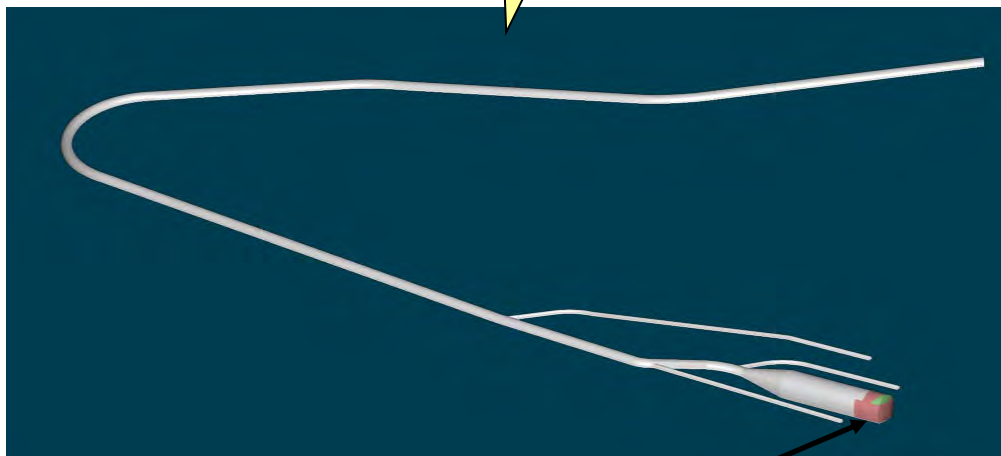
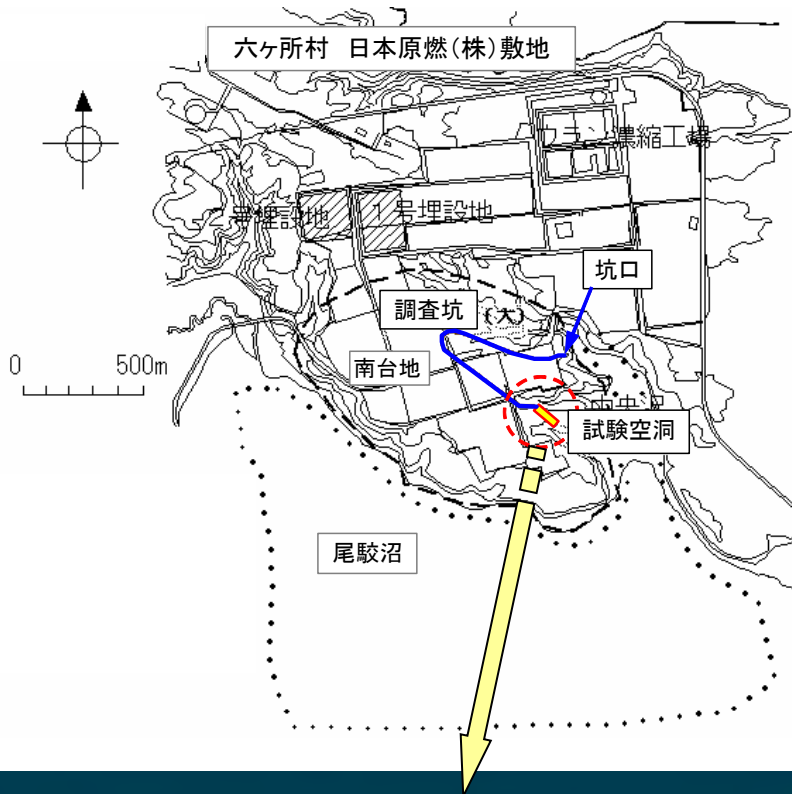
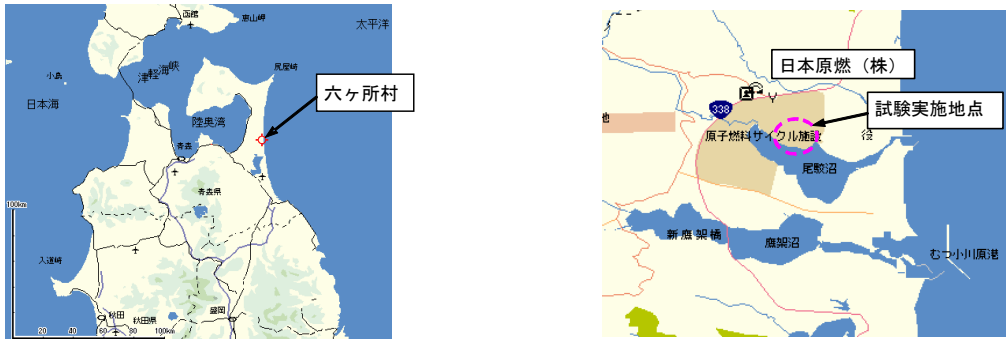
図 1.2-2 試験位置図 (断面図)



図 1.2-3 試験施設の試験開始前の状況（平成 25 年 9 月）

表 1.2-2 試験の全体工程

事業項目	平成25年度
(1) 施設施工確認試験・初期性能確認試験	
1 上部緩衝材試験	狭隘部における施工方法の比較検討、選定 現地施工・性能確認試験
2 上部埋戻し材試験(含む練混ぜ試験他)	材料配合検討、狭隘部における施工方法の検討 現地施工・性能確認試験(含む練混ぜ試験)
(2) 施設・周辺岩盤挙動計測	
1 計測機の設置、施設・岩盤の挙動計測	計測機器設置およびデータの取得
2 データの解析評価	取得データの解析・評価
(3) 材料特性試験	
1 土質系材料等の材料特性の把握	材料特性の把握・評価
(4) ボーリング孔等の閉鎖技術の検討	閉鎖技術の情報収集、現状把握、検討
(5) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響の検討	
1 地震計設置、地震観測、挙動解析、観測値との比較・分析	地震計の設置・観測、挙動解析
2 巨大地震の地下空洞施設への影響の検討	観測データと解析結果の比較・分析、影響の検討
(6) 総合評価	
1 埋設施設の施工技術、初期性能に係る総合評価	比較工法の施工技術・初期性能の評価
2 閉鎖技術に係る実施工への適用性の検討	比較工法の施工技術に係る適用性の検討
(7) 情報収集及び委員会の設置・運営	国内外の情報収集、委員会の設置・運営（3回）



試験実施位置

図 1.2-4 試験実施場所

1.3 検討の経緯

1.3.1 検討委員会

本確証試験開始前の平成 17 年度から平成 24 年度まで「地下空洞型処分施設性能確証試験」が実施されており、地下空洞型処分施設の確証試験の基本計画策定、処分施設の詳細設計および詳細試験計画の策定が実施された。また、平成 19 年度からは、試験空洞内において実規模施工試験を開始しており、底部・側部埋戻し材から始まり緩衝材、低拡散材、コンクリートピット、充填材の施工確認試験を進め、平成 24 年度には上部低拡散材施工確認試験まで実施された。同時に、施工確認試験を補完するために必要となる材料特性試験、挙動計測データの収集等を行なわれた。

本年度からは、「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」として、処分施設の閉鎖に係わる確証的な試験を実施することとし、本年度は平成 24 年度に構築した上部低拡散材の上に上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）の施工確認試験等を実施した。同時に、施工確認試験を補完するために必要となるベントナイト系材料特性試験やセメント系材料特性試験、挙動計測データの収集等を行った。また、ボーリング孔等の閉鎖技術および巨大地震が地下空洞施設に与える影響について検討した。

試験を実施するに当たっては、（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター内に「地下空洞型処分施設性能確証試験検討委員会」を設け、学識経験者等の参加協力を得て検討を進めた。同委員会における平成 25 年度の検討の経緯は表 1.3-1 に示すとおりである。

表 1.3-1 平成 25 年度検討委員会実施経緯

開催日	場所	審議内容
第 1 回 平成 25 年 11 月 1 日	（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター 第 1、2 会議室	・上部緩衝材、上部埋戻し材の施工確認試験等の実施計画 □材料特性試験等の実施計画 ・巨大地震の影響検討等の実施計画 等
第 2 回 平成 25 年 12 月 19 日	（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター 第 1、2 会議室	・上部緩衝材施工確認試験の成果（中間報告） ・上部埋戻し材施工確認試験の成果（中間報告） ・巨大地震の影響検討の成果（中間報告）
第 3 回 平成 26 年 2 月 27 日	（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター 第 1、2 会議室	・上部緩衝、上部埋戻し材の施工確認試験の成果 □材料特性試験の成果 ・挙動計測・解析の成果 ・巨大地震の影響検討の成果 他

1.3.2 平成 25 年度の成果の概要

平成 25 年度は、施工確認試験・初期性能確認試験として、上部緩衝材、上部埋戻し材試験を実施した。同時に、既設置および新規に設置した計測設備による観測、セメント系材料・ベントナイト系材料特性に係るデータを取得した。また、ボーリング等の閉鎖技術および巨大地震が地下空洞施設に与える影響について検討した。

以下に平成 25 年度の成果の概要を紹介する。表 1.3-2 に平成 25 年度の実施工程表を示す。

表 1.3-2 平成 25 年度の実施工程表

主な実施項目	2013年（平成25年）								2014年（平成26年）																
	9月		10月		11月		12月		1月		2月		3月												
施工・初期性能確認試験																									
(1) 上部緩衝材隅角部試験																									
① 全体計画の策定	■																								
② 準備・製造・吹付け試験等			■																						
③ 初期性能確認					■																				
(2) 上部緩衝材平面部試験																									
① 全体計画の策定	■		■																						
② 準備・製造・転圧工法による試験							■																		
③ 初期性能確認									■																
(3) 上部埋戻し材練混ぜ試験、締固め特性評価																									
① 全体計画の策定	■		■																						
② 準備・練混ぜ試験・締固め特性試験 他							■																		
(4) 上部埋戻し材試験																									
① 全体計画の策定	■		■		■		■																		
② 準備・製造・吹付け試験・転圧工法試験									■																
③ 初期性能確認											■														
材料特性試験																									
ベントナイト	■																								
セメント系材料	■																								
施設・周辺岩盤挙動計測	■																								
ボーリング孔等の閉鎖技術の検討	■																								
巨大地震が地下空洞施設に与える影響の検討	■																								
品質評価	■																								
検討委員会									▼	第1回	11/1					▼	第2回	12/19					▼	第3回	2/27

(1) 上部緩衝材隅角部施工確認試験・初期性能確認試験

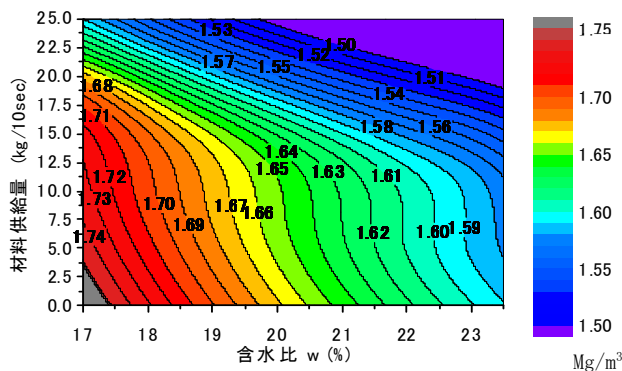
緩衝材に求められる要求機能は、「止水（透水係数、密度、膨潤特性）」である。

上部緩衝材隅角部の施工試験の方法としては、側部緩衝材上部の空洞天井との間の空間(上部緩衝材隅角部と称する)での緩衝材の構築は、狭隘であり、かつ上部が空洞天井アーチの曲面であるという施工条件を考慮すると、これまでのような転圧機械等の使用や吹付けロボットの使用が困難であることから、人力による吹付け工法を選定した。また、リバウンド材を有効に再利用することとし、リバウンド材の含水比の低下に合わせて材料供給量を制御する方法で試験を実施し、施工性、品質等について検討を行った。使用材料として破碎したベントナイト原鉱（クニゲル GX、最大粒径 5 mm）を使用し、含水比調整方法は、一般に用いられている水添加混合方式を採用した。吹付け材料の含水比調整後の含水比は、平均 20.6%であり、含水比の管理基準値 $21\pm 2\%$ の範囲内であった。含水比調整後に吹付けベントナイト工法により、上部緩衝材の右側隅角部において、幅が 1.0m および 1.5m、高さ 1.69m、奥行き 5.25m の、逆 L 型の形状の範囲を施工し、採用した施工方法の実施設への使用の可否を試験で検証した。また、透水係数、密度、強度、膨潤特性を把握するため初期性能試験を実施した。

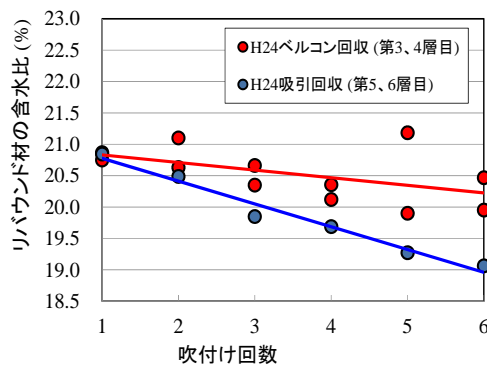
施工確認試験の結果、吹付け施工後の緩衝材の乾燥密度は、 1.588Mg/m^3 前後の値となり、今回、適用した材料供給システム、リバウンド回収方式、リバウンド材の含水比低下に応じた吹き付け材料供給量の制御等の施工法を採用することにより、管理目標値である平均乾燥密度 1.6Mg/m^3 に施工できることを確認した。リバウンド率は、約 37.8% であり、既往試験結果と比較して高い値となった。リバウンド材を再利用するにあたり、リバウンド材の含水比の低下に合わせた材料供給量の制御する方法により、バラツキの小さい密度管理が出来ることが確認できた。その結果、実規模・実環境下における施工時管理基準値 $1.6\pm 0.1\text{Mg/m}^3$ を満足することが確認でき、実施設での吹付け量として $1.01\text{m}^3/\text{h}$ 程度が可能であることが想定される。吹付けベントナイトの含水比－供給量－乾燥密度関係を図 1.3-1 に示す。また、施工確認試験の状況を図 1.3-2 に示す。

また、初期性能試験の結果、緩衝材の透水係数は、約 $3\times 10^{-13}\text{m/s}$ 程度の性能が得られ、緩衝材の目標性能である $5\times 10^{-13}\text{m/s}$ を満足することが確認された。膨潤力も基準値を満足しており、初期性能は、満足していることが確認できた。

以上のことから、今回採用した工法の適用性が把握でき、その結果、施工性、品質（乾燥密度等の材料特性・層厚さ等の出来形）、初期性能（透水係数、密度、膨潤特性等）が確認されたことから、採用した施工技術・施工方法が現実の施設の施工においても使用できることを確認した。また、実施工の留意点についても把握した。なお、吹付けベントナイト工法を用いて施工した緩衝材の品質に係るデータは、転圧工法と比較して少なく、今後、データの蓄積を図ることが望まれる。



含水比と材料供給量と乾燥密度の関係



吹付け回数とリバウンド材含水比

図 1.3-1 含水比-供給量-乾燥密度等の関係



上部緩衝材隅角部の吹付け状況

上部緩衝材スロープ部吹付け状況

図 1.3-2 上部緩衝材隅角部施工試験状況

(2) 上部緩衝材平面部施工確認試験・初期性能確認試験

緩衝材に求められる要求機能は、「止水（透水係数、密度、膨潤特性）」である。

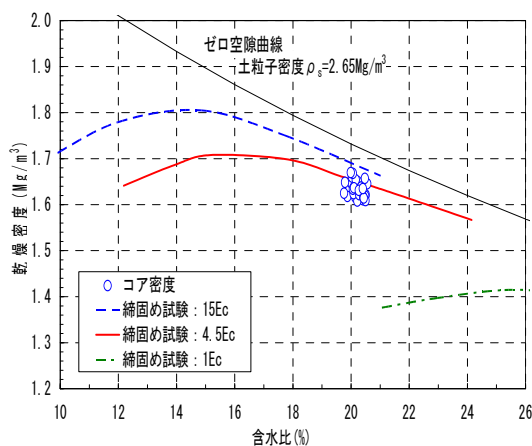
上部緩衝材平面部の施工試験方法としては、上部緩衝材の実施設の施工では、施工空間の制約から大型機械の使用は難しく、中型若しくは小型の機械による施工が想定される。本施工確認試験においては施工ヤードの制約上、小型振動ローラを用いて施工を行った。また、本施工試験では敷均しは施工ヤードの制約上、人力で実施したが、実施設の施工には小型のフィニッシャーの使用も考えられることから、それを想定した敷均し厚さ（100mm）での転圧工法を採用することとし、施工性、品質等について検討を行った。使用材料として破碎したベントナイト原鉱（クニゲル GX、最大粒径 10 mm）を使用し、含水比調整方法は、一般に用いられているミキサを用いた水添加混合法式を採用した。ベントナイトの含水比調整後に小型振動ローラ（車輪幅 850mm）による転圧工法により、上部緩衝材の一部（高さ 1m×幅約 6m×奥行き約 5m、20 層）を施工し、採用した施工方法の実施設への使用の可否を試験で検証した。また、透水係数、密度、強度、膨潤特性を把握するため初期性能試験を実施した。

施工確認試験の結果、含水比調整については、調整後の含水比は、平均 20.9%であり、含

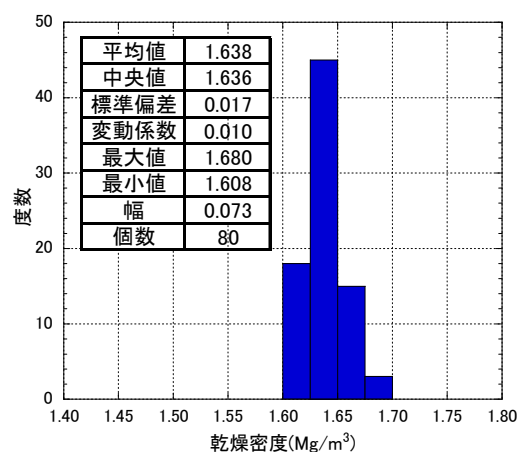
水比管理基準値 $21 \pm 2\%$ の範囲内であった。また、施工パターンとしては、2層分まとめて振動転圧を行う場合と1層単位で振動転圧を行う場合の施工後の品質の確認およびサイクルタイムの比較を行った。その結果、施工時間としては両パターンで大きな差は無いが、施工後の品質としては、1層単位で施工を行った場合の方が層内の密度のばらつきは小さくなることが分かった。そこで、1層単位で振動転圧を行うことを基本とし、施工仕様（人力敷均し100mm、無振動転圧4Pass、振動転圧2Pass）で、工法を規定することにより施工を行い、施工後の品質を確認した結果、仕上り密度のばらつきの幅は層全体の平均として 0.02 Mg/m^3 程度、コアの密度としては、 0.04 Mg/m^3 程度とかなり小さくなることが分かった。また、全測定データの乾燥密度は、図 1.3-3 に示すようなバラツキであることを把握し、バラツキがかなり小さい施工方法であることを実規模・実環境下で確認した。また、管理目標値である平均乾燥密度 1.6 Mg/m^3 に施工できることを確認できた。施工確認試験の状況を図 1.3-4 に示す。

また、初期性能試験の結果、緩衝材の透水係数は、約 $1 \sim 3 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 程度の性能が得られ、緩衝材の目標性能である $5 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ を満足することが確認された。一軸圧縮強度、内部摩擦角、せん断定数、膨潤力は、既往の結果と同程度の値が得られており、初期性能は、満足していることが確認できた。

以上のことから、今回採用した小型振動ローラ（車輪幅 850mm）による転圧工法の適用性が把握でき、その結果、施工性、品質（乾燥密度のバラツキ等の材料特性・層厚さ等の出来形）、初期性能（透水係数、密度、膨潤特性等）が確認されたことから、採用した施工技術・施工方法が現実の施設の施工においても実現できることを確認するとともに、適用できる技術として確立することができた。また、実施工の留意点についても把握した。なお、小型振動ローラを用いて広がりのあるエリアを施工した緩衝材の品質に係るデータは少なく、今後、データの蓄積を図ることが望まれる。



コア密度と含水比の関係



コア密度のヒストグラム

図 1.3-3 乾燥密度のバラツキ（全測定データ）



人力による敷均し状況



小型振動ローラによる転圧状況

図 1.3-4 上部緩衝材平面部施工確認状況（転圧工法）

(3) 上部埋戻し材練混ぜ試験および締固め特性評価

a. 上部埋戻し材練混ぜ試験

上部埋戻し材に求められる品質は、現段階で具体的に定められていないが、締固め後の目標透水係数の均質性を確保するため、上部埋戻し材の材料としてベントナイト（クニゲルV1）および砂等を使用して、複数の練混ぜ機械、練混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の材料練混ぜ試験を実施し、練混ぜ後の品質を比較検討して、練混ぜ方法、練混ぜ機械および材料配合の違いによる混合率、含水比のばらつきの程度を確認する。試験に用いた練混ぜ機械は、バッチ式としてアイリッヒミキサーとパグミル、連続式として自走式土質改良機（SR-2000G）とミストブレンダーを選定した。練混ぜ機械を図 1.3-5 に示す。なお、ミストブレンダーについては、図示の機械よりも小規模な機械を使用し練混ぜ試験を実施している。

試験の結果、ベントナイト混合土の含水比のバラツキは、連続式よりもバッチ式の方が小さい結果となった。ベントナイトの混合率については、設定値（15%）と混合後の平均値のずれは、バッチ式と連続式の違いは見られず、混合率は 14.9%～15.4%の範囲となり全ての機械で同じ程度である。ベントナイト混合土の粒度分布については、練混ぜ前と練混ぜ後、の各材料とも、練混ぜ機械による違いはほとんど無い結果が得られた。締固め性については、各機械で製造した材料の土の突固め試験（A 法）により得られた結果を室内で練混ぜた材料（バット練り（手練り））で得られた締固め曲線と比較した。砂ベントナイトに関しては、概ね室内で練混ぜた材料（バット練り（手練り））で得られた締固め曲線上にあり、それぞれの機械で練混ぜられた材料の締固め性の差はほとんどない。ベントナイト混合土の透水性については、今年度実施したベントナイト混合土の透水試験の結果、透水係数はすべての試験ケースにおいて、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下の透水係数となり、練り混ぜ方法の違いによる透水性の差は明確には見られなかった。



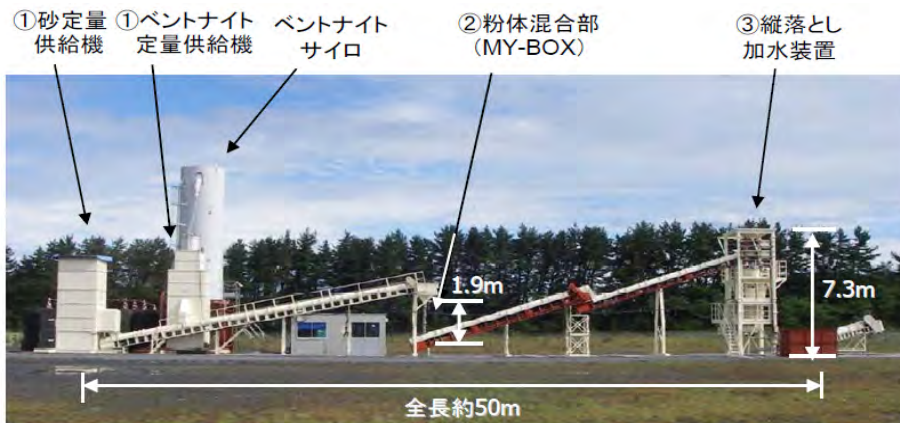
アイリッヒミキサー (バッチ式機械)



パグミル (バッチ式機械)



自走式土質改良機 SR-2000G (連続式機械)



ミストブレンダー* (連続式機械)

*:練混ぜ試験では、図示の設備よりも小規模な機械を用いて実施した。

図 1.3-5 練混ぜ機械

b. 締固め特性評価

締固め等特性確認試験は、複数の機械および施工法により実施し、品質（仕上り品質のばらつきを含む）および施工性等の所要の項目についてのデータ収集・確認を行い、ベントナイト混合土の施工への適用性を検討した。本試験での施工方法は、転圧工法と吹付け工法とした。試験に使用する機械は、最近の検討事例から選定し、転圧工法は3種類（ハンドガイド振動ローラ、バイブロコンパクタ、小型振動ローラ）とし、吹付け工法は、1種類（圧力釜式吹付け機）を採用した。使用したベントナイト混合土は、品質の安定しているアイリッヒミキサーにより練混ぜた。転圧工法による確認試験は、締固めエネルギーの異なる機械、

材料配合（砂とベントナイト、礫とベントナイト）、敷均し厚さをパラメータとして実施し、品質を確認した。

転圧機械を使用した締固め試験の結果、締固めエネルギーが大きい機械ほど少ない Pass 数で締固めでき、転圧機械で発揮しうる締固め度は、95%以上であることを確認した。

吹付け工法による締固め試験の結果では、吹付け工法による締固め度は、吹付け工法は 93.0～96.4%となり、転圧機械によるものに比べて小さい結果となったがいずれの材料配合でも締固め度は 90%以上となっている。また、リバウンド材が発生することを確認した。吹付けた全材料に対するリバウンド材の比率（リバウンド率）は材料配合の違いによって異なり、材料の最大粒径が大きいほど、リバウンド率が高い結果となった。また、リバウンド材の粒度分布は、礫分が多く含まれていることが分かった。

ベントナイト混合土の乾燥密度と含水比の関係を図 1.3-6 に示す。

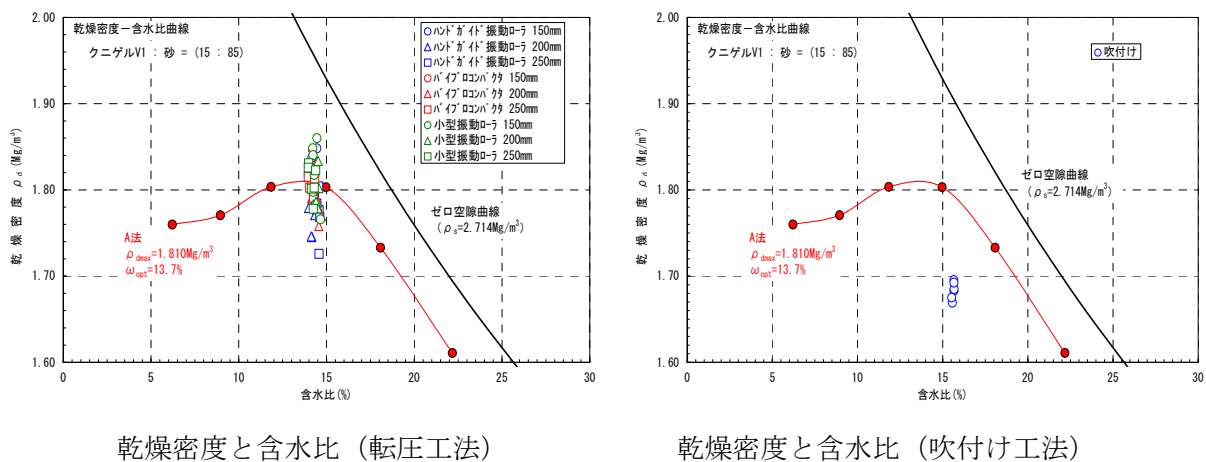


図 1.3-6 ベントナイト混合土の乾燥密度と含水比の関係

(4) 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験

上部埋戻し材の具体的な性能の目標の数値は、今後選定される処分場サイトの特性や処分概念によって決まるものと考えられる。今回の確認試験では、昨年度の検討結果を踏まえて、上部埋戻し材に期待される一部の機能を暫定的な目標値として設定することとした。昨年度の検討結果より、期待される機能として透水性、力学安定性、物理・化学的安定性が挙げられている。このうち、透水性については、本確認試験の実施に当たり、暫定的な指標として透水係数を選定し、管理目標値を周辺の地盤と同程度の透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ に設定した。また、力学安定性と物理・化学的安定性は、処分サイトの特性等に大きく影響されることから、ここでは設定しない。なお、力学安定性に関連する物性値として強度特性等のデータを取得した。

上部埋戻し材は、対象部位が上部緩衝材の上部にあたり、上部空間が非常に狭隘で、上部・側部がアーチ形の特異形状をした空間の閉鎖を行うことから、使用材料、使用機械、施工方法等を選定して施工試験を実施した。

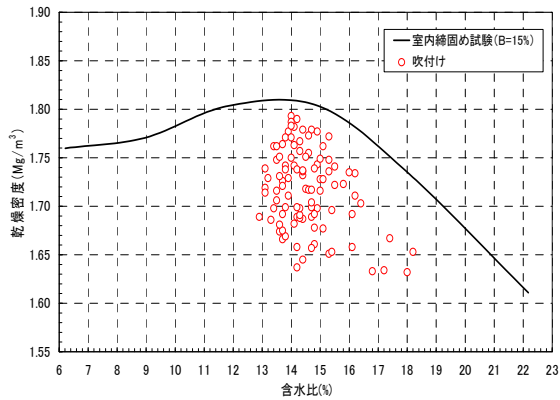
上部埋戻し材の施工試験方法としては、上部埋戻し材の実施設の施工では大型機械の使用は不可能であり、中型若しくは小型の機械による施工および特異形状に対応した施工方法が

適用されることが想定される。本施工確認試験においては施工ヤードの制約上、バイブロコンパクタによる転圧工法と吹付け機による吹付け工法を用いて試験を実施し施工性、品質等について検討を行った。使用材料としてベントナイト混合土（クニゲル V1：砂＝15：85（重量比））を使用し、埋戻し材製造方法は、自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた水添加混合法式を採用した。ベントナイト混合土の製造後に敷均し（厚さ 200 mm（人力））、バイブロコンパクタによる転圧工法および天井までの高さが低い側部アーチ付近は吹付け工法により上部埋戻し材の一部（高さ約 3m×幅約 6m×奥行き約 6m）を施工し、採用した施工方法の実施設への使用の可否を試験で検証した。また、透水係数、密度、強度、膨潤特性を把握するため初期性能試験を実施した。

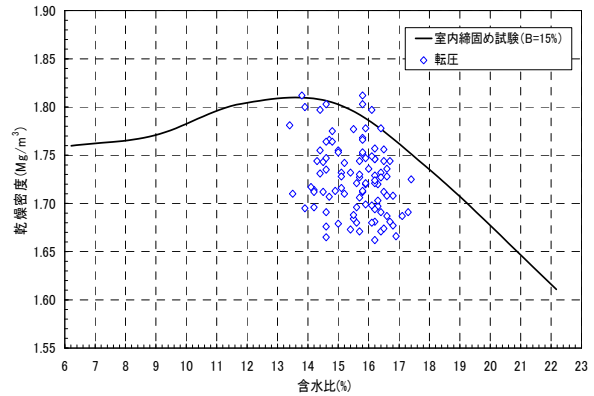
施工確認試験の結果、埋戻し材製造については、設定値（ベントナイト混合率 15%、含水比 14.5%）に対して混合率は $\pm 1.5\%$ 程度、含水比は $\pm 2\%$ 程度と、ややばらつきの大きい結果となった。また、施工後の品質については、吹付け施工と転圧施工で大きな違いは無いという結果が得られた。施工後の乾燥密度は $1.60\sim 1.80 \text{ Mg/m}^3$ 程度で、平均が約 1.72 Mg/m^3 となり、締固め度は $90\sim 100\%$ 程度で、平均締固め度は約 95% であることが分かった。また、吹付け工法におけるリバウンド率は、約 15% 程度であることが分かった。今回の試験で品質のバラツキの程度が明らかとなるとともに、今回採用した 2 種類の施工方法を組合せることにより、特異形状の空間を埋戻すことが出来る工法であることを実規模・実環境下で確認した。施工後、サンプリングにより得られた乾燥密度と含水比の関係を図 1.3-7 に、上部埋戻し材施工確認試験の状況を図 1.3-8 に示す。

また、初期性能試験の結果、埋戻し材の透水係数は、約 $1\times 10^{-11} \text{ m/s}$ 程度の性能が得られ、初期性能として設定した値である $1.0\times 10^{-8} \text{ m/s}$ を満足することが確認された。また、一軸圧縮強度、内部摩擦角、せん断定数、膨潤力が測定され、今回使用したベントナイト混合土の物性値が把握できた。

以上のことから、今回上部埋戻し材の施工に採用したバイブロコンパクタによる転圧工法および吹付け工法の特異形状した上部埋戻し部への適用性が把握でき、その結果、施工性、品質（乾燥密度のバラツキ等の材料特性・層厚さ等の出来形）、初期性能（透水係数）が確認されたことから、既存の施工機械・施工方法を用いて上部埋め戻し材が構築出来ることが確認された。また、実施工の留意点についても把握した。なお、ベントナイト混合土のバイブロコンパクタによる転圧工法および吹付け工法を用いて実規模で施工した埋戻し材の品質に係るデータは、緩衝材と比較して少なく、今後、データの蓄積を図ることが望まれる。



吹付け工法による施工後



転圧工法による施工後

図 1.3-7 サンプルングにより得られた乾燥密度と含水比の関係



人力吹付け状況



バイブロコンパクタによる転圧状況

図 1.3-8 上部埋戻し材施工確認試験状況

(5) ベントナイト材料特性測定

本測定では、材料特性の知見が十分に得られていない上部埋戻し材の材料であるベントナイト混合土について、水理特性、強度特性、圧密特性を把握することを目的とし、吸水に伴う膨潤変形測定試験、圧密非排水三軸圧縮強度試験（CUバー）、変形特性を求めるための繰り返し三軸試験、圧密試験および透水試験を実施した。

その結果、吸水に伴う変形測定試験から混合土が吸水し、変形する際に発生する一次元変形量および単位時間あたりの吸水量のデータを取得した。圧密非排水三軸圧縮試験から混合土の力学特性として粘着力 $c=121.0\text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 15 度程度の材料であることが分かった。変形特性を求めるための繰り返し三軸試験および弾性波速度測定から混合土の動的特性値である等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰率 h 等を把握するとともに、飽和状態での弾性波速度 V_p は約 2000m/sec となり、不飽和の V_p の約二倍の値となっていることが分かった。

段階载荷による圧密試験から圧縮指数 C_c 、膨張指数 C_s を求めた。透水試験から透水係数が約 $1 \times 10^{-11}\text{m/s}$ 程度であった。透水係数と有効粘土乾燥密度あるいは有効粘土湿潤密度との相関性は見られなかった。

(6) セメント系材料特性測定

拡散抑制を期待される上部低拡散材について、定常拡散試験等を実施した。拡散試験では、現地で打設された低拡散材から採取した試料で試験（平成 24 年度開始）を行った。また、上部低拡散材等のひび割れ調査を実施した。

試験の結果、今年度測定したデータに基づく拡散係数は、実効拡散係数が $1.3 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ （暫定値）程度の値であった。これまでに現場施工された LPC-FA 系の低拡散材を用いた拡散係数測定の結果より得られた定常状態後の実効拡散係数は $1 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲であったことから、平成 24 年度から実施している上部低拡散材を用いた試験についても同様な傾向となる見込みが得られた。

ひび割れ調査結果、前回調査（平成 25 年 3 月 13 日）から今回調査（平成 26 年 2 月 14 日）まで、上部低拡散材および上部コンクリートピットにおいて、ひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されなかった。

(7) 施設・周辺岩盤挙動計測

平成 25 年度までに構築した施設と周辺岩盤に設置した計測器を含め、計測データを取得し、整理・評価を実施した。なお、本年度、上部緩衝材施工試験時に上部低拡散材の表面に上部緩衝材施工の影響を把握するため土圧計、加速度計および地震計を設置した。

今年度設置し計測を実施した土圧計と加速度計のデータ解析結果から上部緩衝材の施工に伴う小型振動ローラの荷重や振動による低拡散材への力学的な影響は、小さいことを確認した。また、地震計により地下空洞内の試験施設で比較的小さな地震波を 3 回観測している。

(8) ボーリング孔等の閉鎖技術の検討

地下空洞型処分施設の閉鎖に係る検討として、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖技術について、実施工における実用的な施工技術とその課題の把握を主な目的として、使用材料、施工方法等について既往の研究成果の調査を行った。

その結果、ボーリング孔の閉塞に関しては、地層処分以外でのボーリング孔の閉塞時の要求項目としては、現状での帯水層の水質の維持など環境の観点で閉塞の主眼となり、セメント系での置換工法が用いられているのが現状であることが分かった。また、地層処分分野では超長期間の閉塞に主眼が置かれるため、緩衝材と同様にベントナイト系でのボーリング孔の閉塞が主体の研究対象となり、そのための施工方法が検討されている。しかし、現状では、明確な要求項目が明らかになっていないことに加え、未だ施工方法が確立されていないことが分かった。アクセス坑道の閉塞等に関しては、埋め戻し材およびプラグの要求性能と候補材料が調査対象の各国間で異なることが分かった。これら性能を確保するための施工方法については吹付け工法による締固め、転圧工法等による締固めおよびベントナイト等の土質系材料のブロックの積み込みが抽出されたが、まだ、確定されていないのが現状であった。

(9) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響の検討

本検討では、上記(6)で設置した地震計の観測データを整理し、応答挙動（加速度等）を分析するとともに、地震応答解析結果と比較分析することより試験施設の地震時の定性的な挙動について検討を行った。また、平成24年度の「地下空洞型処分施設性能確証試験」での検討では、地震による影響で緩衝材に局部的にせん断強度を超える応力が発生する可能性があることが示された。そこで、本検討では緩衝材の非線形挙動の影響を考慮した非線形解析を実施し、強度を超える応力発生後の施設の挙動を把握した。

地震計の観測データを用いた地震応答解析では、試験空洞底盤で観測した地震動を用いて解析入力地震動を作成し、2次元 FEM モデルにより時刻歴非線形地震応答解析を実施した。解析結果と本試験施設で観測した地震動データを比較分析し検討を行った結果、本解析モデルが本試験施設の振動数特性を反映できることが確認できた。なお、今回観測された地震は比較的小さな地震波であったが、今後、多くの地震波での解析データを蓄積することにより使用した解析モデルの適用性を示すことが望まれる。解析に用いた地震応答解析モデルを図 1.3-9 に示す。

また、地震時の施設挙動解析・評価の結果、緩衝材に Mohr-Coulomb の破壊基準によるせん断強度到達と塑性変形が考慮できる弾塑性モデルを適用した非線形地震応答解析によって、緩衝材の破壊発生による影響を考慮した地下空洞施設の地震時挙動を検討した。緩衝材はせん断強度に到達し塑性変形が発生することを解析的に再現することができた。また、その塑性変形が発生した領域と、残留ひずみについても評価することができ、地震後の残留変形も少ないことが分かった。

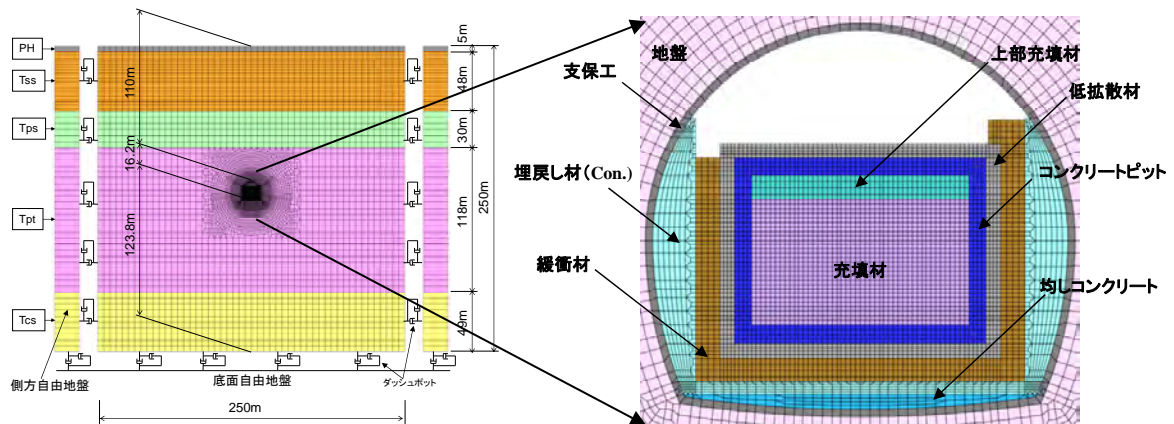


図 1.3-9 地震応答解析モデル

参考文献

- [1] 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第二種廃棄物埋設分科会（第1回）資料「余裕深度処分の安全確保の考え方」（平成19年11月15日 電気事業連合会）

第 2 章 上部緩衝材隅角部施工確認試験・初期性能確認試験

第2章 上部緩衝材隅角部施工確認試験・初期性能確認試験

2.1 施工確認試験

【目的】

側部緩衝材上部の空洞天井との間の空間(上部緩衝材隅角部と称する)での緩衝材の構築は、狭隘でありかつ上部が空洞天井アーチの曲面であるという施工条件を考慮すると、これまでのような転圧機械等の使用や吹付けロボットの使用が困難であることから、人力による吹付け工法の適用可能性を検討することとし、試験によりその施工性、品質、歩掛および新たな課題について検討を行った。この上部緩衝材隅角部施工確認試験(吹付け工法)(以下、本試験と称する)では、過去に実施した吹付け工法による側緩衝材施工確認試験の結果に基づき、実施工を想定した品質管理の下で、人力による上部緩衝材隅角部の吹付け施工による施工確認試験を実施し、吹付け工法の実施工への適用性を検討するものである。また、試験後の上部緩衝材隅角部の品質を確認することにより、品質確保のための管理方法の確立に資するデータの収集を行うものである。

今年度は、上部緩衝材の右側隅角部において、幅が 1.0m および 1.5m、高さ 1.69m、奥行き 5.25m の、逆 L 型の形状で隅角部の多い範囲において、人力による吹付け施工による試験を実施した。

【まとめ】

今年度は、材料供給量の設定方法や、リバウンド材の供給方法等、実施工を想定した施工法、品質管理の下で上部緩衝材隅角部の吹付け施工を人力にて実施した。その結果、吹付け工法により緩衝材の要求品質を満足する施工が可能であることと、実施工においても吹付け工法は十分に実現性がある工法であることを確認した。以下に、本試験を通じて明らかとなった事項を列挙する。

- 含水比-供給量-乾燥密度の関係を示すチャートを用いて品質管理を実施することで、要求品質を満足可能であることを確認した。今後は本チャートの精度向上のため、特に低供給量条件でのデータ取得が必要と思われる。
- 吹付け工法は任意の形状を施工可能であるため隅角部の施工において有効であるが、リバウンド率が高くなってしまうため、吹付け方法・形状等について検討が必要である。
- シリコンオイル法による密度計測手法は、ノギス法による計測結果と差があるものの、十分な精度を有していることを確認した。吹付け工法は凸状供試体を容易に作成できるため、シリコンオイル法による密度計測は実施工における品質管理方法として最適な手法であると思われる。
- 吹付け機器はピット上部に設置しても十分な作業エリアを確保可能であることを確認した。また、吹付け機器のピット上部への設置により、圧送距離を短くすることが可能であることが確認できた。

- リバウンド材の再利用に関して、より実施工に則した方法として、リバウンド材の材料供給量はリバウンド率に応じて決定し、リバウンド材の含水比は既往の実績から吹付けによる含水比の低下量を推定することでも要求される施工品質を十分に満足可能であることを確認した。

2.1.1 施工確認試験の概要

(1) 施工確認試験の方針・目的

本試験は、日本原燃(株)が進めている低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分等施設検討のための試験空洞内において、先行して実施した施工確認試験で構築された地下空洞型処分施設の模擬施設で実施した。すなわち、試験環境の面において実施工と同様に地下環境下という条件下での実規模大の試験であり、人力吹付け工法による施工の適用性確認、出来形確認、品質確認、歩掛計測等を行うものである。

側部緩衝材の施工は、底部緩衝材の施工範囲に比べて、幅 1.0m と非常に狭隘であることから大型重機による施工は困難であり、これまでも様々な施工方法が検討されてきた。その中で、平成 21 年度の側部緩衝材施工確認試験[1]では、人力によるノズル操作での水平吹付け作業と、吸引方式によるリバウンド材回収を採用して施工試験を実施し、その施工性、品質、歩掛についてのデータを取得した。また、平成 23 年度および平成 24 年度の側部緩衝材施工確認試験[2]、[3]では、リバウンド材回収の施工効率の向上と、吸引方式による回収による含水比の低下抑制を目的として、吊り下げ型吹付けロボットによる吹付けの試験を実施し、施工性、品質、歩掛等についてデータを取得した。

今年度の施工確認試験では、側部緩衝材上部の空洞天井との間の狭隘な空間での緩衝材の構築という条件を鑑み、これまでのような転圧機械等の使用や吹付けロボットの使用が困難であることから、人力による吹付け工法の適用可能性を検討することとし、その施工性、品質、歩掛および新たな課題について検討を行った。

過去に吹付け施工した箇所を示したイメージ断面図を図 2.1-1 に、今年度施工した形状のイメージ図を図 2.1-2 に示す。今年度の上部緩衝材隅角部の施工形状は、幅が 1.5m となる箇所があり、隅角部が多いことが特徴である。これまで吹付け工法を適用してきた側部緩衝材の施工形状に比べ幅が 0.5m 広く、隅角部が多いことから、施工形状が吹付け施工に及ぼす影響が検討対象の一つとなる。

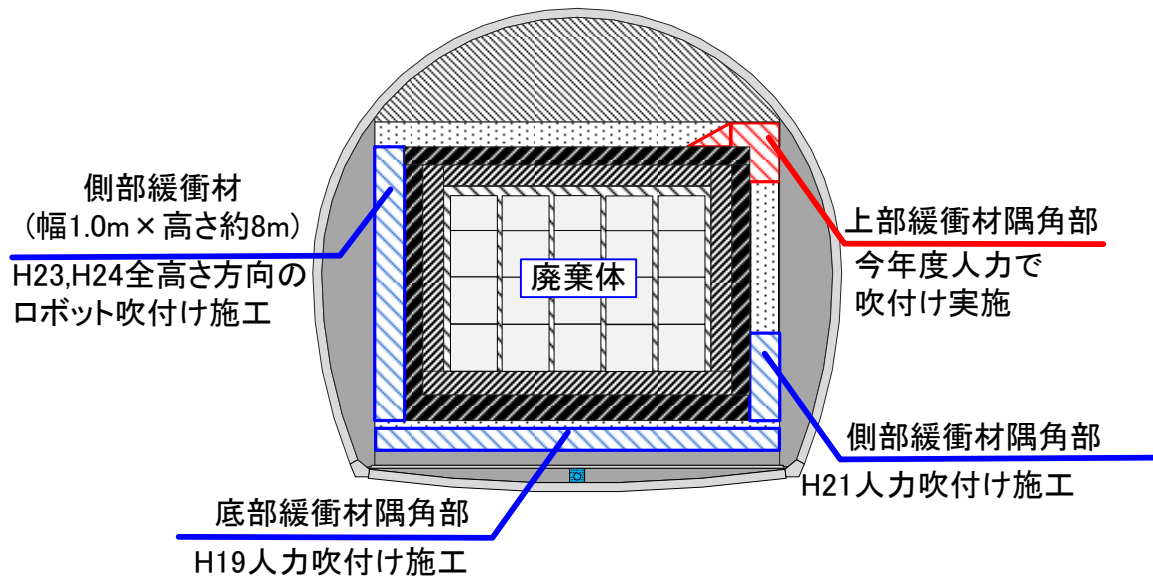


図 2.1-1 各年度吹付け施工箇所横断面図

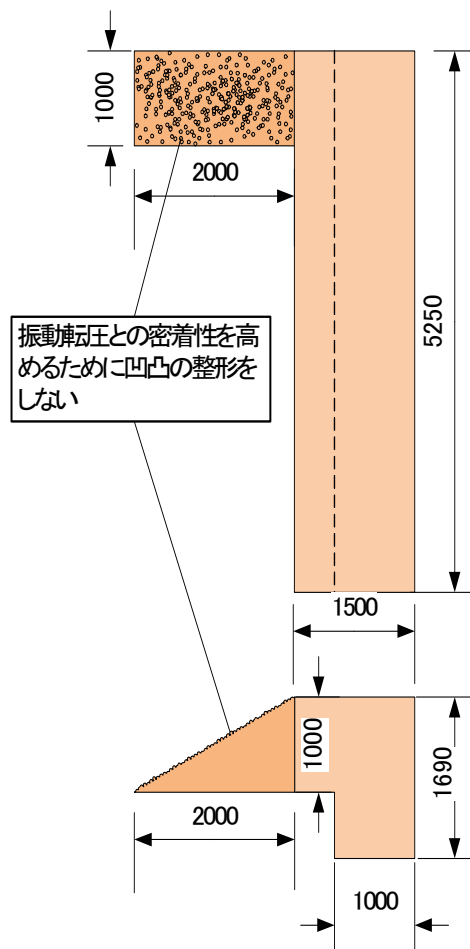


図 2.1-2 施工形状図 (上：平面図、下：断面図)

(2) 施工確認試験の計画

1) 施工確認試験の施工フロー

施工確認試験の施工フローを図 2.1-3 に示す。

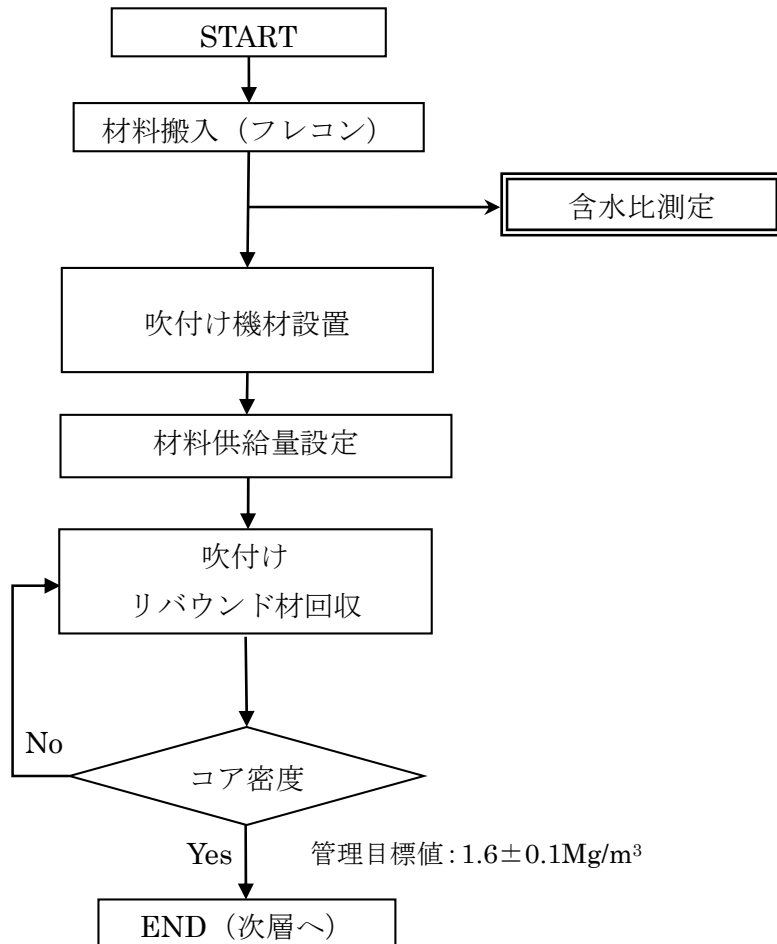


図 2.1-3 施工確認試験施工フロー

2) 使用材料

本試験では、100%ベントナイト（クニゲル GX 最大粒径 5mm）を用い、含水比調整した材料を使用した。含水比調整の管理基準値を $21.0 \pm 2\%$ 、水添加量を決定するための設定含水比を 21.0%とした。調整方法は平成 23~24 年度の施工確認試験と同様とし、自然含水比状態の材料に水を添加し、アイリッヒミキサで混合する方法（水添加混合方式）で行った。

含水比調整した材料はフレコンバッグに約 300kg 程度の重さに詰めて、トラックによって運搬し、ベントナイト保管庫にて保管を行った。

3) 実施数量

施工確認試験の実施数量を表 2.1-1 に示す通りである。

表 2.1-1 試験実施数量

項目	内容	単位	数量	摘要
上部緩衝材隅角部施工確認試験	吹付け機械を使用した吹付け工法による上部緩衝材隅角部の施工	m ³	11.4	上部緩衝材の右側隅角部（幅 1.0～1.5m、高さ 1.69m、奥行き 5.25m）について、吹付け機械を使用した吹付け工法により、緩衝材の施工を実施する。

4) 実施工程

上部緩衝材隅角部施工確認試験における、実施工程表を表 2.1-2 に示す。

表 2.1-2 施工確認試験実施工程表

項目	9月			10月			11月			12月			H26年1月			2月			3月			備考
	10	20	30	10	20	31	10	20	30	10	20	31	10	20	31	10	20	28	10	20	31	
計画検討			■																			
ベントナイト倉庫テント張				■																		
昇降設備設置			■																			
開口部養生 転落防止設備設置				■																		
埋戻しコンクリート					■																	
上部緩衝材隅角部吹付け						■	■	■	■													
初期性能確認試験									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
報告書作成																■	■	■	■	■	■	■

2.1.2 施工確認試験の内容

(1) 使用機械

本試験の吹付け設備は、材料供給機、コンプレッサー、ローター式吹付け機、吹付けノズルおよびリバウンド材回収装置からなる。吹付け設備を構成する各装置の詳細を以下に示す。

1) 湿潤材料定量供給機

本試験に使用した改良型湿潤材料定量供給機（AGC プライブリコ社製グラニューレーター）を図 2.1-4、機械の仕様を表 2.1-3 に示す。本機は吹付け材料を定量に供給できるため、均

質な吹付けを行うことが可能である。また、モーターの回転数を変更することで供給量の調整も可能である。本試験では、ベントナイトのフレッシュ材料の定量供給にこの湿潤材料定量供給機を使用した。



図 2.1-4 湿潤材料供給機

表 2.1-3 湿潤材料供給機（グラニューレーター）の標準仕様

メーカー	AGC プライブリコ社製	
機種名	グラニューレーター	
部位	湿潤材料供給機	ベルトコンベアー
材料吐出量(m ³ /hr)	1.0~4.0	—
回転数(rpm)	1~10（常用使用回転数）	—
所要電力	200/220V・4P・7.5Kw	200/220V・4P・0.4Kw
駆動	インバータモーターによる無段変速回転	—
ホッパー容積(m ³)	1.4	—
寸法(mm)	1590W×1490L×2530H	300W×3000L
質量(kg)	約 1200	

2) 改良型湿潤材料定量供給機

リバウンド材料の供給には供給部のブレードを短くした改良型湿潤材料定量供給機を用いる。平成 23 年度の試験においてはリバウンド材料の供給に上述の湿潤材料定量供給機を使用し、吹付け材料が再利用を重ねるごとに団粒化かつ高密度化することが確認されており、ノズルの閉塞を誘発する結果となった。平成 24 年度の試験においては、材料を造粒させることなく定量供給可能な材料供給機として、供給部のブレードを短くした改良型湿潤材料定量供給機をリバウンド材の供給に用いた。その結果、平成 24 年度の試験においては、リバウンド材料供給時の団粒化を低減可能であることが確認され、ノズルの閉塞は発生しなかった。今年度の試験においてもこの改良型湿潤材料定量供給機によりリバウンド材料の供給を行った。

3) コンプレッサー

本試験では、吹付け用として PDS655SD (190HP ドライ)、吸引式のリバウンド回収機用として PDS655S (190HP) の 2 台のコンプレッサーを使用した。コンプレッサーの仕様を表 2.1-4 に示す。

表 2.1-4 コンプレッサーの標準仕様

呼称	190HPドライ	190HP
タイプ	トレーラ	トレーラ
メーカー	北越工業	北越工業
型式	PDS655SD	PDS655S
吐出空気量(m ³ /min)	18.5	18.5
吐出圧力(MPa)	0.7	0.7
潤滑油量(L)	80	80
エアコックサイズ・数量	20A・2ヶ 50A・1ヶ	20A・2ヶ 50A・1ヶ
燃料タンク容量(L)	270	270
燃料消費量(L/h)	32	22
エンジンオイル量(L)	23	23
寸法(mm)	全長 L	3,650
	全幅 W	1,685
	全高 H	2,070
乾燥質量[整備質量](kg)	3,120[3,460]	2,850[3,190]

4) 吹付け機

本試験に使用した吹付け機 (AGC プライブリコ社製ニードガン 2000) を図 2.1-5 に、機械の仕様を表 2.1-5 に示す。本機は、乾式吹付けだけでなく、湿式吹付けにおいても材料の均一吐出かつ連続投入が可能なため、良質な緩衝材を構築することができる。また、本機には圧力計も設置しており、吹付け中のホース内の圧力の確認も可能な構造である。



図 2.1-5 ローター式吹付け機

表 2.1-5 吹付け機の標準仕様

メーカー	AGC プライブリコ(株)
機種	ニードガン 2000
材料ホース内径(mm)	63.5
材料吐出量 (m ³ /hr)	20
所要空気量(m ³ /min)	20
所要空気圧力(MPa)	0.74
材料送り最大距離(m)	水平 200・垂直 100
吹付け可能最大粒径(mm)	15
駆動	7.5kw インバーターモーター 220V 3相
回転数(rpm)	5~16.5 (常用使用回転数)
寸法(mm)	990W×1845L×1175H
質量(kg)	約 1200

5) 吹付けノズル

本試験で使用した吹付けノズルの断面拡大図を図 2.1-6 に示す。ノズルは超音速ノズルと呼ばれる内部に圧縮部と拡張部があるノズルである。この超音速ノズルは、圧縮流体が圧縮部で密度を高めながら亜音速まで加速されると、拡張部ではその密度を下げながら超音速まで加速されるというものである。本試験の場合、圧縮流体は空気であり、加速された空気は速度エネルギーが吹付け材料の速度エネルギーに転化され、最終的には締固めエネルギーとなる。さらに、超音速ノズルの拡張部の形状が吹付け材料を平坦に吹付けるため、リバウンド率を低下させる効果もある。そのため、本ノズルを使用することで、高密度かつ低リバウンド率での施工が可能である。

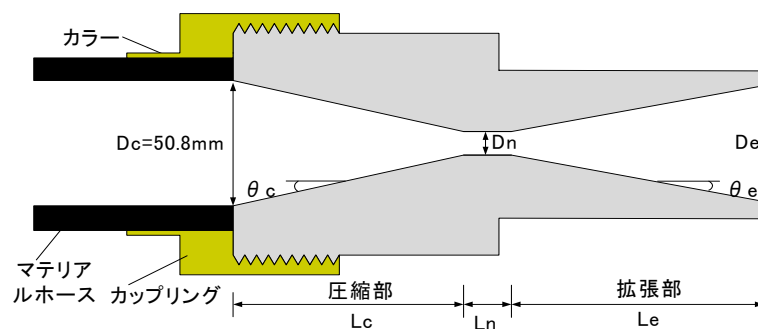


図 2.1-6 吹付けノズル（断面拡大図）

6) リバウンド材回収装置

吹付け施工では、ベントナイト材料を 100% 付着させることは難しく、リバウンド材が生じることは避けられない。吹付け時はノズルから高圧縮空気が噴射されているため、施工面に滞留するリバウンド材を吹き飛ばしながら施工することが可能であるが、リバウンド材が

一定量以上積み、施工面に干渉するような状態になれば、施工品質に影響することが懸念される。そのため、リバウンド材は適宜回収する必要がある、その施工性をよく検討する必要がある。

平成 21 年度の吹付け工法の確証試験では、圧縮空気の流れて発生するベルヌーイ効果(図 2.1-7 参照)を利用した吸引式を主に使用していたが、この際に使用していた吸引式装置では吸引後の材料が常に搬送空気に曝されることとなるため回収材料の含水比低下量が大きく、リバウンド材再利用の障害となっていた。

一方、平成 23 年度の試験では、水平吹付け試験時にはベルトコンベア式のリバウンド材回収方法を新たに考案してその効果を検討したところ、含水比の低下は抑えることができたが、狭隘部でのベルトコンベアの移動作業等で吹付け作業の効率が低下する結果となった。

平成 24 年度においては、平成 21 年度および平成 23 年度の試験結果を踏まえ、吸引回収方式にターボファン付き集塵機を組み合わせ、回収後の材料が搬送空気に曝されるのを防ぐことにより、含水比の低下を抑制する改良吸引方式を新たに導入した。

今年度の試験においては、平成 24 年度に使用した改良型リバウンド材吸引回収装置を用いてリバウンド材の回収を行った。吸引式リバウンド材回収装置を図 2.1-8 に、ターボファン付き集塵機を図 2.1-9 に示す。

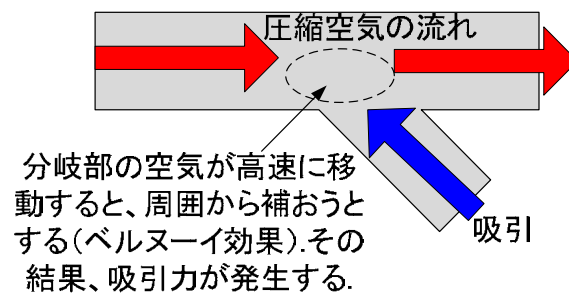


図 2.1-7 ベルヌーイ効果の概念図



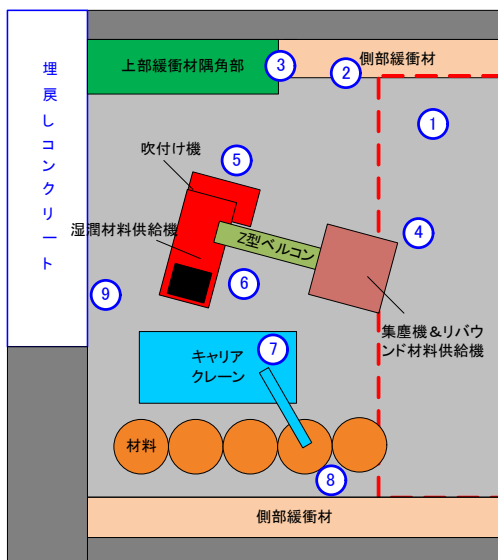
図 2.1-8 吸引式リバウンド材回収装置



図 2.1-9 ターボファン付き集塵機

(2) 機械設備配置

吹付け施工時の作業員配置を図 2.1-10 に、吹付け機材レイアウト状況を図 2.1-11 に示す。吹付け機はピット上部に設置した。また、吹付け施工部はネットで覆うことにより粉塵の飛散を抑制した。



作業員配置

- ①作業指揮者
- ②リバウンド材吸引回収者
- ③吹付け作業者
- ④集塵機&リバウンド材料供給機操作者
- ⑤吹付け機操作者
- ⑥フレッシュ材投入者
- ⑦2t キャリアダンプ (1t 吊クレーン付) 操作者
- ⑧玉掛け者
- ⑨密度・含水比試験実施および記録係

図 2.1-10 吹付け施工時の作業員配置



図 2.1-11 吹付け機材のレイアウト

(3) 吹付け工法による施工確認試験内容

1) ベントナイト含水比調整

本試験では、自然含水比状態の材料に水を添加しアイリッヒミキサにて混合する方法（水添加混合方式）で含水比調整を行い、含水比の調整精度を確認した。含水比調整の管理基準値は $21.0 \pm 2\%$ であり、加水量を決定するための設定含水比を 21.0% とした。調整方法は平成 24 年度の施工確認試験と同様である。また、含水比の測定方法については、赤外線水分計による計測および炉乾燥法の 2 つの測定法で同一材料の含水比を測定した。

水添加方式による含水比調整作業フローを図 2.1-12 に示す。

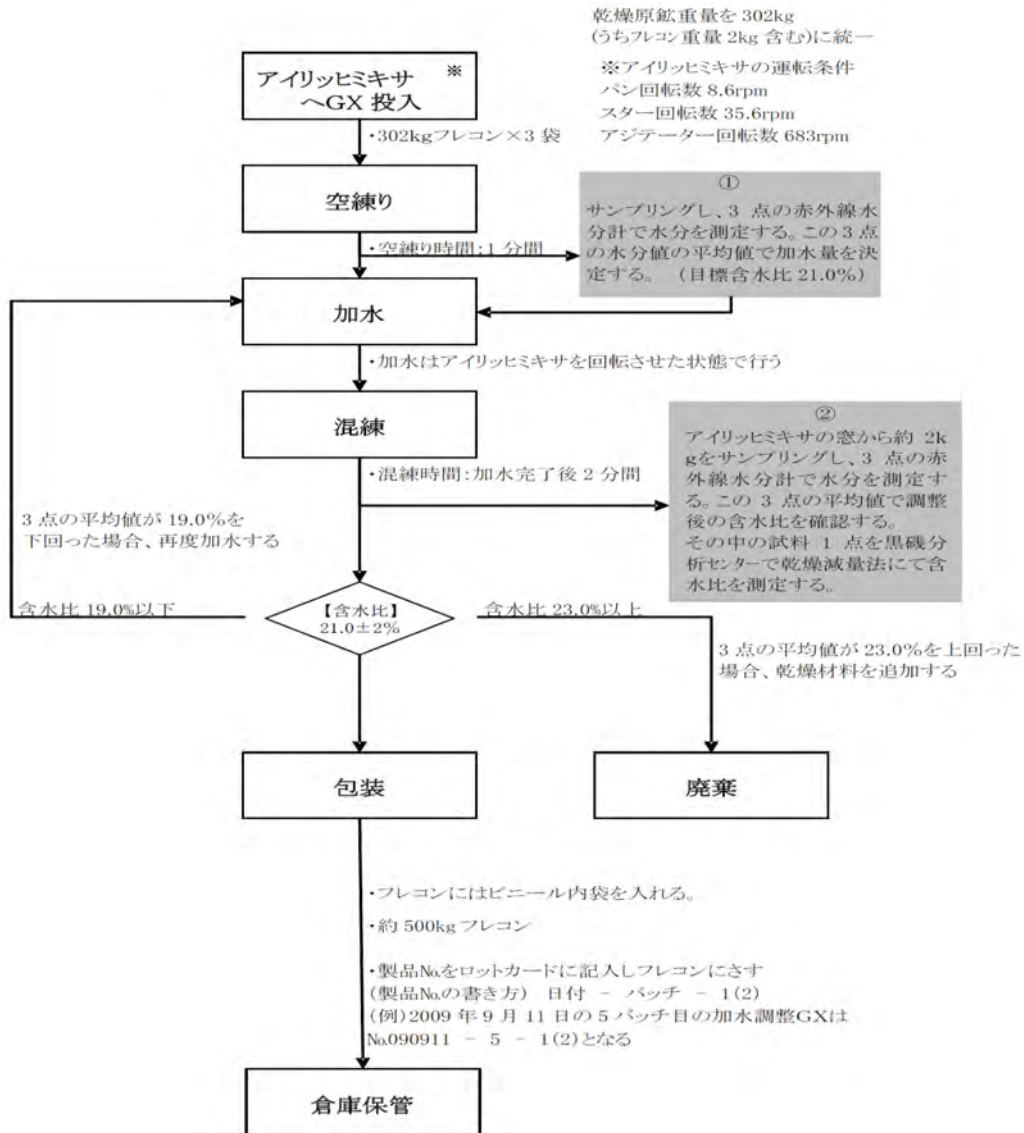


図 2.1-12 含水比調整作業フロー

含水比調整作業における含水比の測定には、短時間でデータを取得可能な赤外線水分計による計測と、JIS A 1203 に準じた炉乾燥法 (JIS A 1203) による計測を併用した。具体的には、含水比調整作業時に必要となる調整前含水比や調整後含水比をその場で確認する際に、即時性のある測定方法として赤外線水分計による計測を行い、調整後含水比の詳細確認には炉乾燥法を適用した。また、含水比測定方法の違いが測定結果に及ぼす影響についても確認するため、調整後の含水比は電子レンジ法でも測定を行った。以下に測定方法の詳細を示す。

a. 赤外線水分計による計測

使用した赤外線水分計 (ケット科学研究所製 FD720) を図 2.1-13 に示す。以下に、赤外線水分計による計測手順を述べる。

- ① 材料を測定機へ投入する。1回あたりの材料使用量については、0.02%の精度を確保するための必要量が 10g、最大使用量が 100g と本機の仕様書に記載されており、かつ容

器内に薄く広げられる程度が適量とも記載されていることから、上記の条件を満たす約 25g で統一することとした（図 2.1-13 (a)参照）。

- ② 試料を乾燥する。乾燥は本機のデフォルト設定で行うこととし、120℃で乾燥を行い 30 秒間の含水比変化量が 0.05%以下となった時点で終了とした。



(a)材料投入



(b)計測

図 2.1-13 赤外線水分計による含水比測定状況

b. 炉乾燥法（JIS A 1203）

以下に、炉乾燥法の手順を示す。

- ① 含水比測定容器の質量を測定する。
- ② 測定試料を含水比測定容器に採取し、質量を測定する（図 2.1 13 (b)参照）。なお、最大粒径が 5mm 以下の今回の試料では、JIS A 1203 に基づいて 100g 以上の試料で計測を行うこととする。
- ③ 試料を 110±5℃に調整した乾燥炉で 24 時間乾燥する。
- ④ 乾燥した試料を炉から取り出し、ほぼ室温となるまで冷ます。
- ⑤ 乾燥質量を測定する。
- ⑥ （数式 2.1-1）により含水比を算出する。

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (\text{数式 2.1-1})$$

ここに、

- w : 含水比 (%)
- m_a : 試料と容器の質量 (g)
- m_b : 乾燥試料と容器の質量 (g)
- m_c : 容器の質量 (g)

c. 電子レンジ法（JGS A 0112）

以下に、電子レンジ法の手順を示す。

- ① 含水比測定容器の質量を測定する。
- ② 測定試料を含水比測定容器に採取し、質量を測定する。なお、最大粒径が 5mm 以下の今回の試料では、JIS A 1203 に基づいて最少質量を 30g～100g に設定して計測を行うこととした。

③ 試料を含水比が一定質量になるまで加熱する。

今回の試験において加熱時間は 1 分とした。電子レンジ法による含水比測定値の加熱時間との関係[4]を図 1.8-7 に示す。

④ 乾燥した試料を取り出し、ほぼ室温となるまで冷ます。

⑤ 乾燥質量を測定する。

⑥ (数式 2.1-2 により含水比を算出する。

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \quad (\text{数式 2.1-2})$$

ここに、

w : 含水比 (%)

m_a : 試料と容器の質量 (g)

m_b : 乾燥試料と容器の質量 (g)

m_c : 容器の質量 (g)

2) ベントナイトの運搬・保管

ベントナイトは 2.5t フォークリフトにて日本原燃(株)敷地内保管庫へと仮置きし、試験中に必要量を随時試験空洞内に搬入した。なお、保管の際に、地熱や外気温の変化による結露で含水比が変化しないよう、パレットに載せた状態で保管した (図 2.1-14 参照)。



図 2.1-14 ベントナイト保管庫の仮置き状況

試験空洞内での資材の荷降ろし、揚重の様子を図 2.1-15 に、ピット上の資材の運搬揚重のための機械を図 2.1-16 に、ピット上の材料仮置きを図 2.1-17 に示す。なお、試験空洞内への運搬には 4t ユニックを、試験空洞内での荷降ろしおよび運搬には 25t ラフタークレーン（図 2.1-15 参照）を、コンクリートピット上部での運搬には 2t キャリアダンプ（1t 吊クレーン付）（図 2.1-16 参照）を使用した。この 25t ラフタークレーンおよび 2t キャリアダンプ（1t 吊クレーン付）は、その他資機材の運搬や、材料の投入作業にも使用している。

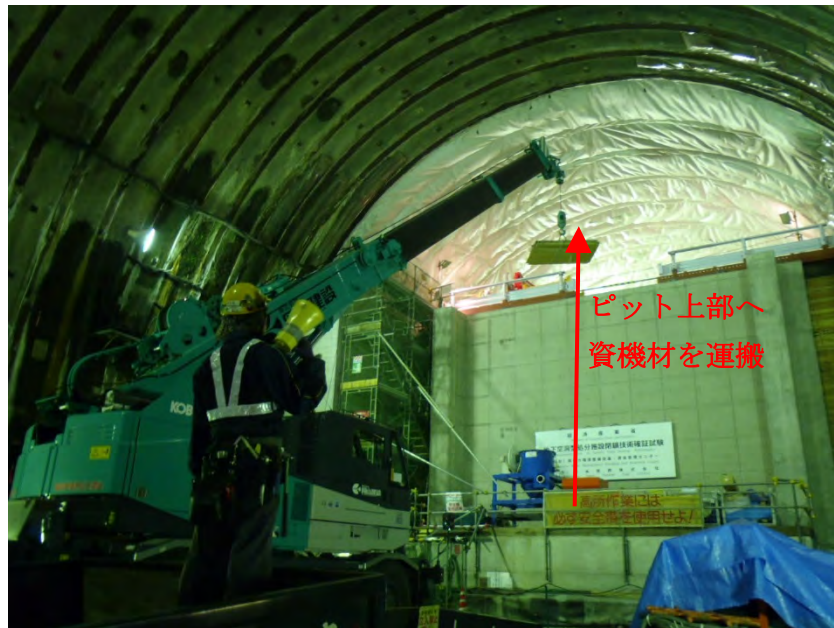


図 2.1-15 25t ラフタークレーンによる資材揚重状況



図 2.1-16 2t キャリアダンプ（1t 吊クレーン付）



図 2.1-17 ピット上部での材料移動、仮置き状況

3) ベントナイトフレッシュ材の供給

ベントナイトのフレッシュ材の供給は、湿潤材料供給機（図 2.1-4 参照）を使用して行った。湿潤材料供給機のホッパーへのフレッシュ材の投入は、フレッシュ材の入った底開き式のフレキシブルコンテナ（以下、フレコンと称する）を 2t キャリアダンプ（1t 吊クレーン付）で吊り上げて行う（図 2.1-18 参照）。ホッパーへ材料を投入した状態の湿潤材料供給機を図 2.1-19 に、材料供給の様子は図 2.1-20 に示す。



図 2.1-18 フレコンからの材料投入状況（2t キャリアダンプ使用）



図 2.1-19 ホッパーに材料投入した状態の湿潤材料供給機の状況



図 2.1-20 フレッシュ材とリバウンド材の供給状況

4) 人力吹付け

吹付けは人力にて実施した。吹付け面から 1m 程度の離隔を取り、吹付け面に対してノズルが極力直角となるように位置し、1 層当りの厚さを 15cm/層として、吹付け面が平滑となるように施工した。上端面を平坦に仕上げるために、上端部に型枠を設置して施工した。また、吹付け面と転圧施工面との施工境界状況を確認するため、奥側に斜路形状で吹付けを行った。なお、吹付けと同時進行で、リバウンド材の回収を行った。

各層の吹付け完了時には、密度確認の供試体採取のため、凸部を形成して吹付けを終了した。詳細については後述する。吹付け実施状況を図 2.1-21 に示す。



図 2.1-21 吹付け施工およびリバウンド材吸引回収状況

5) リバウンド材回収

リバウンド材の回収は吸引回収機を用いて人力にて行った（図 2.1-21 参照）。吸引されたリバウンド材は圧縮空気によりターボファン付き集塵機へ搬送され、ホッパー内にてリバウンド材と空気が分離され、リバウンド材のみが下部の材料供給機へ落下する。昨年度まではターボファン付き集塵機から落下したリバウンド材はフレコンで受けていたため、リバウンド材再利用時には揚重作業が必要であったが、ターボファン付き集塵機と改良型湿潤材料定量供給機とを上下に配置することにより、リバウンド材は吸引回収された後、連続して供給されるため、揚重作業が低減された。（図 2.1-22 参照）なお、リバウンド材の重量測定は、供給機の下に敷き鉄板を敷設し、そこにロードセルを設置することで測定した。



図 2.1-22 ターボファン付き集塵機

6) リバウンド材供給

リバウンド材の供給は、改良型湿潤材料定量供給機を使用して行った。改良型湿潤材料定量供給機から供給されたリバウンド材はベルトコンベアにて搬送され、フレッシュ材搬送用のベルトコンベアの上へと排出されてフレッシュ材と混合され、吹付け機へ供給される。(図 2.1-23 参照)



図 2.1-23 フレッシュ材とリバウンド材の混合と供給の様子

7) 吹付け時の密度および含水比測定方法

現地での吹付け後の密度確認方法として、短時間で速報値を取得可能であるシリコンオイル法による乾燥密度試験と、電子レンジ法による含水比試験を実施した。シリコンオイル法による乾燥密度試験のイメージを図 2.1-24 に、シリコンオイル法に用いた計測器の状況を図 2.1-25 に示す。

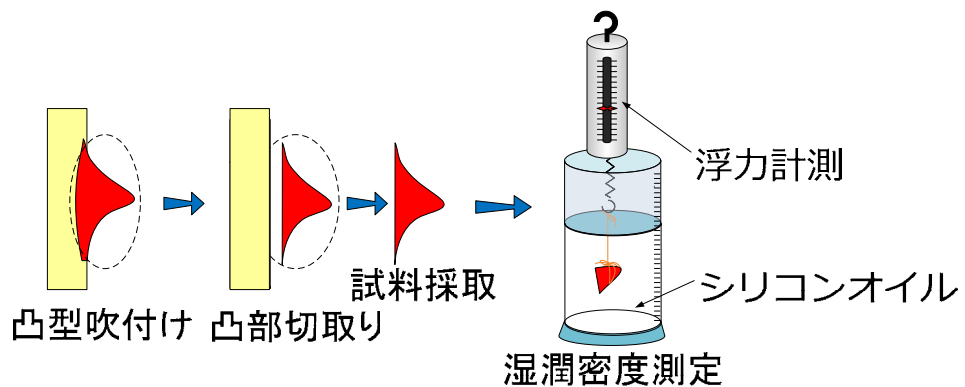


図 2.1-24 シリコンオイル法による乾燥密度試験イメージ



図 2.1-25 シリコンオイル法に用いた計測器

8) 吹付け時の含水比および材料供給量管理

リバウンド材再利用時の品質管理を行うためには、達成密度に大きな影響を及ぼす吹付け時の材料の含水比、すなわちフレッシュ材とリバウンド材を混合した後の含水比と、混合材料の供給量について管理する必要がある。

施工時における含水比と供給量の管理フローを図 2.1-26 に示す。手順は以下に述べる通りである。

- ① リバウンド材の重量を計測する。リバウンド材の重量は、リバウンド材供給機下部にロードセルを設置して重量を計測し、供給機のホッパーが空の状態での重量を差し引くことで求めた。
- ② リバウンド材の重量を次層の施工で全て使い切るよう、リバウンド材重量を次層の施工時間で除した値を次ケースのリバウンド材供給量 (kg/10sec) として設定する。なお、次層の施工時間は前層でのリバウンド率から推定した。
- ③ フレッシュ材供給量を設定し、②で求めたリバウンド材供給量を加えて、次層の混合材供給量を決定する。また、吹付け回数の増加による含水比の低下に伴って乾燥密度が上昇し過ぎないように、混合材料の供給量を徐々に増加させるようにフレッシュ材の供給量を設定することで乾燥密度が一定となるよう管理した。
- ④ フレッシュ材含水比と、②と③で得られるリバウンド材とフレッシュ材の混合比率から加重平均をとることにより、混合材の含水比を算出する。なお、混合材含水比の算出においてリバウンド材の含水比は、昨年度までに取得した回収方法と含水比低下量に関するデータから、吹付け 1 回当りの含水比低下量を 0.4%/回とした。吹付け回数とリバウンド材含水比の関係を図 2.1-27 に示す。
- ⑤ ③で求めた混合材料の供給量と、④で求めた混合材料の含水比の関係から、昨年度まで

の試験で得られた図 2.1-28 に示す含水比-供給量-乾燥密度関係[4]を用いて推定の乾燥密度を確認する。

- ⑥ 推定した乾燥密度が管理目標値 $1.5 \sim 1.7 \text{Mg/m}^3$ の範囲外であれば、フレッシュ材供給量を設定し直すことで調整する（手順③～⑤）。

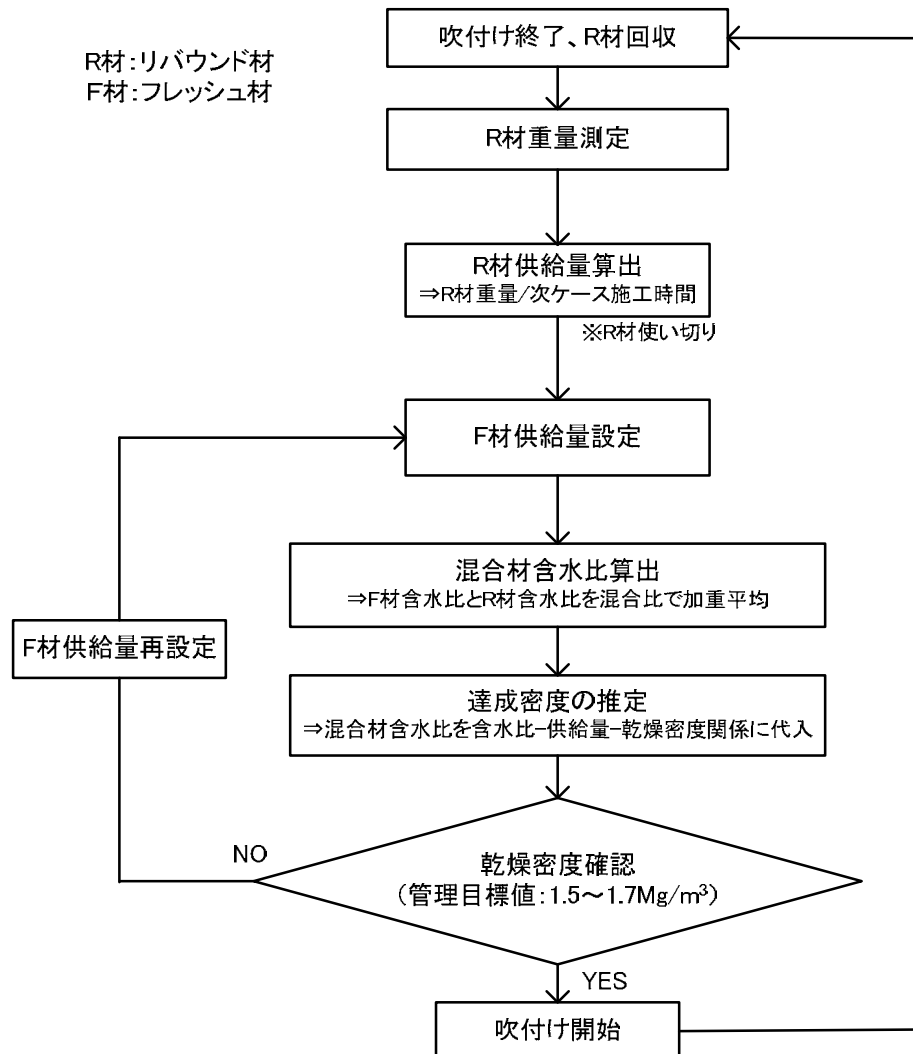


図 2.1-26 施工時の含水比および供給量管理フロー

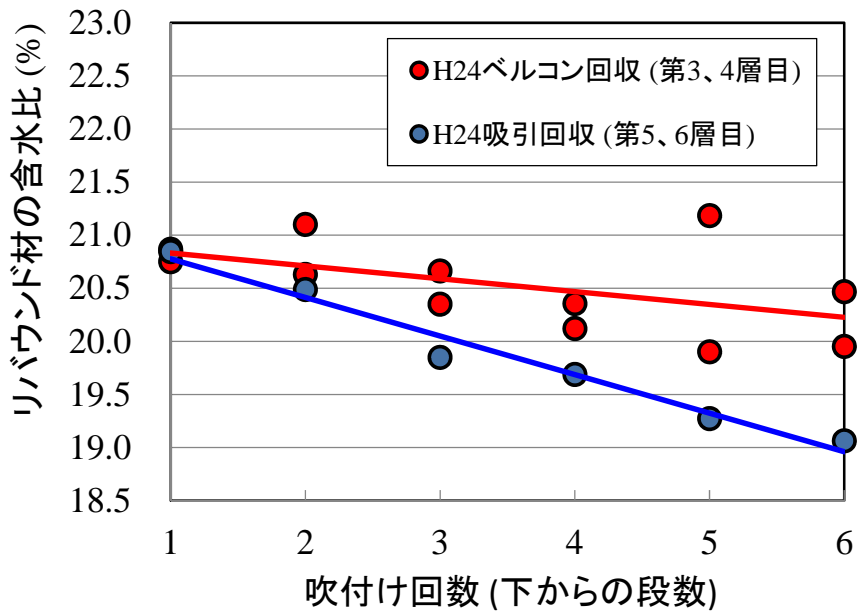


図 2.1-27 吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係

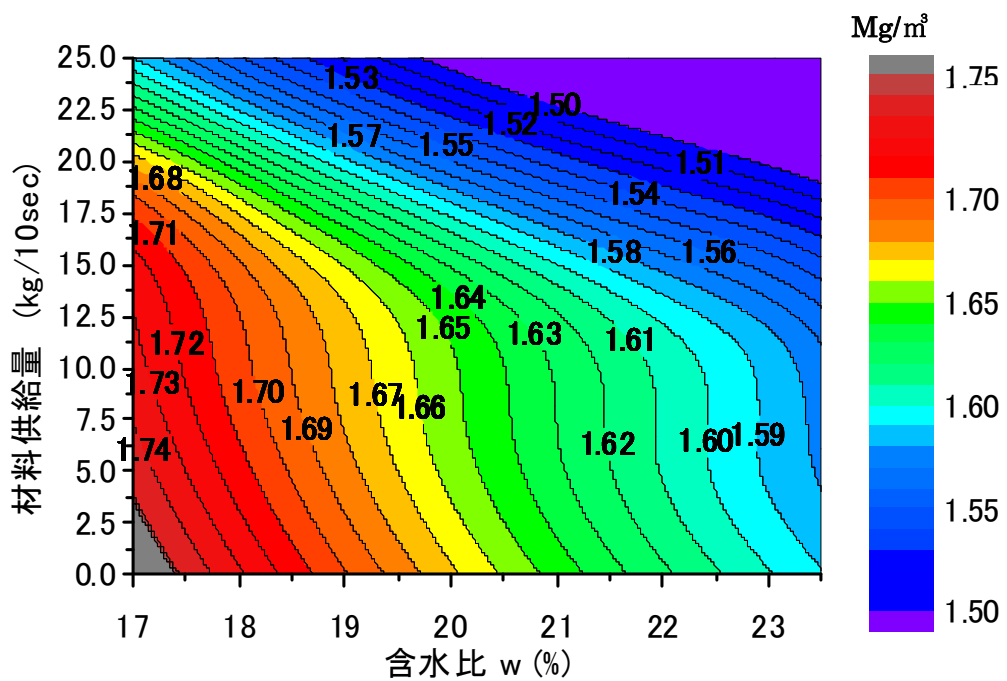


図 2.1-28 含水比-供給量-乾燥密度の関係

2.1.3 施工管理・品質管理

(1) 管理項目

施工確認試験における施工管理・品質管理項目を表 2.1-6 に示す。

表 2.1-6 施工確認試験の施工管理・品質管理項目

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理目標	実施時期	実施場所	数量
品質管理 (施工前)	フレッシュ材 含水比	土質試験法 JIS A 1203	21%±2% 以内	使用直前 (採取)	試験室	1点/フレコン
施工管理 (施工時)	吹付け圧	吹付け機圧力計	異常の 無いこと	施工時	現地	—
	吹付け面	目視による観察	異常の 無いこと	施工時	現地	—
	吹付け 完了確認	目視	異常の 無いこと	各施工段階終了後	現地	—
施工管理 品質管理 (施工後)	リバウンド	質量計測	30%以下	施工量終了時	—	1回/日
	密度	シリコン オイル法	1.6±0.1 Mg/m ³	適宜	現地	—
	出来形	3D スキャナ	規定の施工 体積以上	施工前、施工後	現地	—
その他	周辺環境	(温度、湿度)	—	適宜	現地	日常記録
	サイクル タイム	ストップウォッ チ等	—	施工時	現地	日常記録
	施工内容記録	(記録簿、写真)	—	—	施工時	日常記録

(2) ベントナイト材料品質試験

緩衝材の材料は、これまでの試験と同様にベントナイト（クニゲル GX 5mmアンダー）100%とした。ベントナイト材料の仕様（管理基準値）および使用材料の試験結果一覧を表 2.1-7 に示す。また、対象としたベントナイト原材料の粒径加積曲線を図 2.1-29 に、X 線回折による鉱物組成定性解析結果を図 2.1-30 に示す。

含水比、最大粒径、膨潤力、塑性限界、メチレンブルー吸着量、陽イオン交換容量の各試験値において、管理基準値を満たす結果が得られた。また、鉱物組成分析結果においては、モンモリロナイト等のピーク位置にばらつきは見られないことから、鉱物組成に大きな変化は見られないことが分かった。粒度曲線についても、管理目標範囲を満たす結果が得られた。

表 2.1-7 ベントナイト材料の仕様（管理基準値）および試験結果一覧

試験項目	管理基準値	ミルシート値
		試料数	6
含水比 (%)	10.0 以下	8.0~5.6
最大粒径 (mm)	10 以下	合格
膨潤力(ml/2g)	10 以上	15
塑性限界(%)	30 以下	23.7~24.0
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	63~77	66
陽イオン交換容量 (meq/100g)	—	66.7

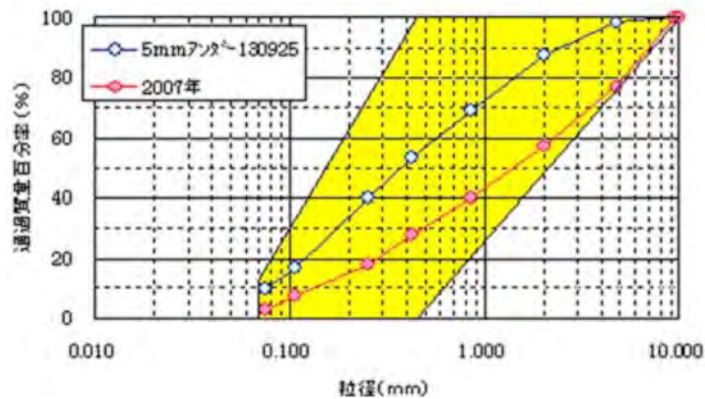


図 2.1-29 ベントナイト材料の試験結果（粒径加積曲線）

※ グラフ中の 2007 年・・・土木学会第 62 回年次学術講演会（平成 19 年 9 月）CS5-001
ベントナイト層の現場施工用材料の開発から抜粋した値

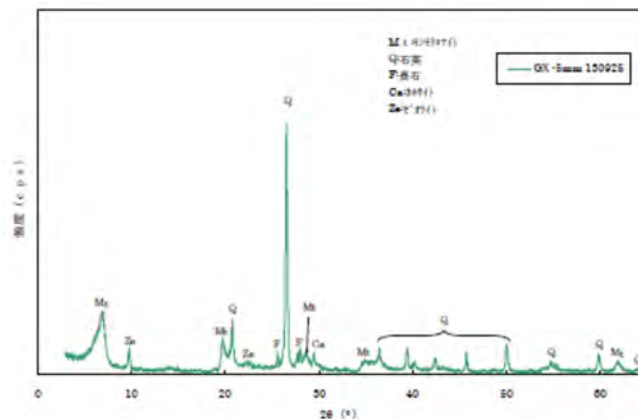


図 2.1-30 ベントナイト材料の試験結果（X線回析による定性解析）

(3) ベントナイト含水比調整

本試験で準備した材料の重量（含水比調整後）は、約 32.4t で、調整実施数は 38 バッチである。調整後の 1 バッチ分の材料（約 1.1t）は 3 つのフレコンに分けて保存した。

調整前後の含水比一覧表をに、調整後含水比のヒストグラムをに示す。また、比較のため平成 24 年度の側部緩衝材吹付け試験時調整後含水比のヒストグラムをに、平成 23 年度側部緩衝材吹付け試験時の水添加方式による調整後含水比のヒストグラムをに示す。

表 2.1-8 調整前後の含水比一覧

バッチ No.	調整前赤外線 含水比(%)	加水量 (ℓ)	調整後赤外線 含水比(%)	調整後炉乾燥 含水比(%)
1	8.0	102	20.6	20.5
2	8.5	96	20.3	20.4
3	7.7	105	20.6	20.1
4	9.1	90	20.4	20.6
5	6.4	120	20.6	20.2
6	7.9	103	20.5	20.2
7	8.8	93	20.7	20.6
8	8.4	99	20.4	20.4
9	6.6	117	20.4	20.3
10	7.8	105	20.5	20.4
11	8.6	95	20.6	20.4
12	9.0	92	20.8	20.7
13	8.4	98	20.6	20.5
14	9.0	91	20.7	20.2
15	10.1	80	20.8	20.7
16	10.3	77	20.4	20.4
17	9.4	87	20.0	20.3
18	8.1	101	20.4	20.3
19	8.0	103	20.6	20.3
20	8.0	103	20.6	20.7
21	9.6	84	20.9	20.9
22	8.3	100	20.3	20.3
23	8.0	103	20.5	20.3
24	7.6	107	20.3	20.2
25	8.2	100	20.6	20.4
26	8.6	96	20.2	20.6
27	9.0	92	20.3	20.0
28	8.9	92	20.9	20.9
29	8.9	93	21.2	20.7
30	7.2	112	21.1	20.9
31	9.4	87	21.1	20.8
32	8.7	95	20.8	20.7
33	10.3	77	21.1	20.6
34	9.8	55	21.1	20.4
35	8.8	94	20.6	20.9
36	9.5	87	20.5	20.8
37	10.4	76	21.1	21.2
38	9.5	57	20.9	21.0
最大	10.4		21.2	21.2
最小	6.4		20.0	20.0
中央	8.7		20.6	20.5
平均	8.6		20.6	20.5
標準偏差	0.96		0.29	0.28

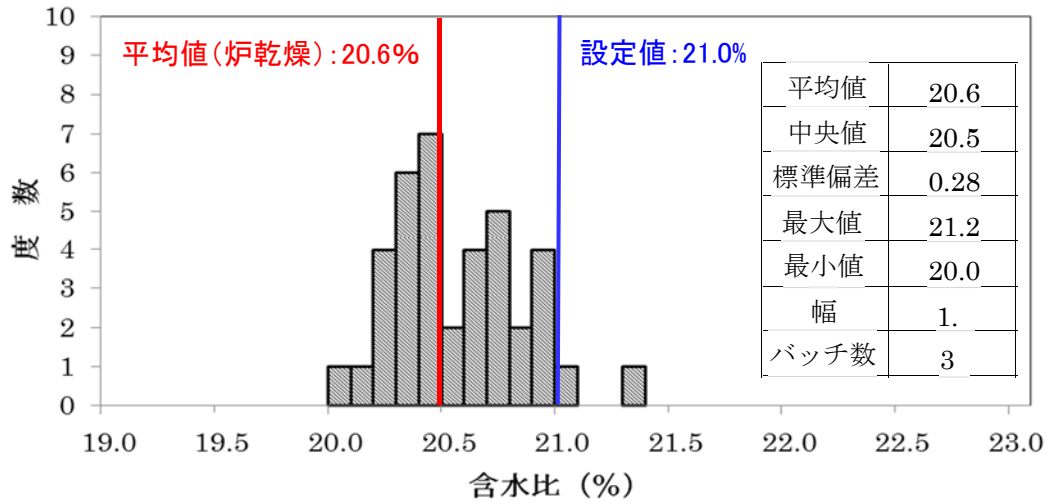


図 2.1-31 今年度の調整後含水比のヒストグラム (炉乾燥法)

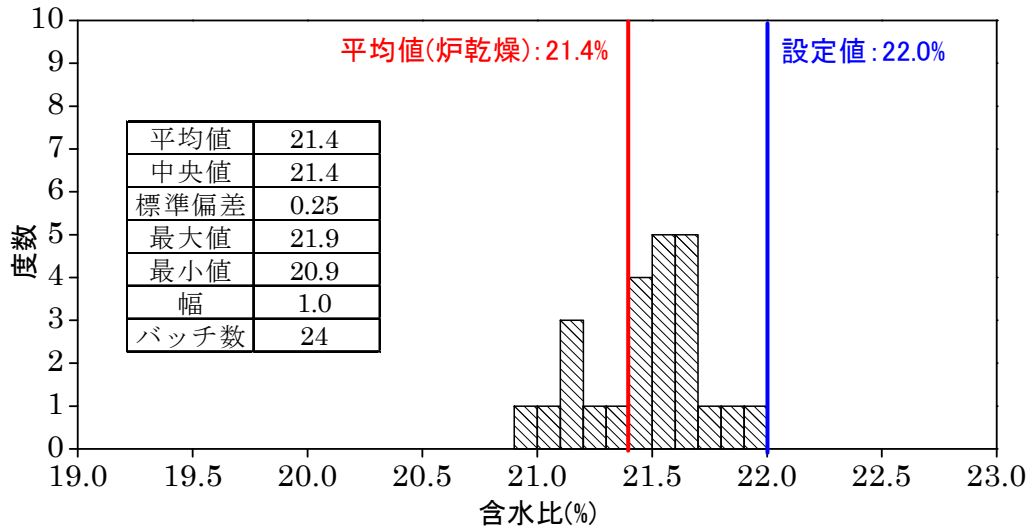


図 2.1-32 平成 24 年度の調整後含水比のヒストグラム (炉乾燥法)

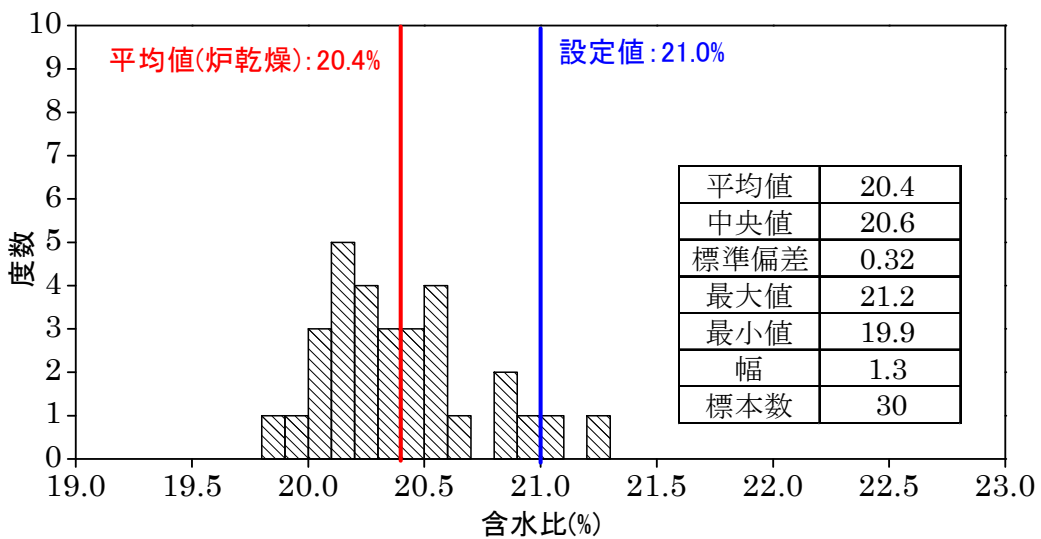


図 2.1-33 平成 23 年度の調整後含水比のヒストグラム (炉乾燥法)

図 2.1-31 に示す通り、調整後含水比の平均値は 20.5%と、設定値 21.0%より 0.5%低い結果となった。この傾向は同ミキサを使用した平成 24 年度の試験や平成 23 年度の試験でも得られている。原因としては、加水量の不足（電磁流量計の計量誤差）、ミキサ内部への高含水比材料の付着等の理由が考えられる。

含水比のばらつきの幅については、最大値と最小値の差が 1.2%と、標準偏差も 0.28 と、平成 24 年度の試験と同様に小さくすることが出来た。この要因には、前述の通り本試験では初期重量を厳密に管理して加水量を決定したことや、赤外線水分計を 3 台使用して 1 バッチあたり 3 点の含水比計測を行い、より正確に調整前含水比を計測したことが挙げられる。

(4) サイクルタイム測定

本試験の施工方法における施工速度や歩掛を算出する上で、サイクルタイムが必要となることから、ストップウォッチ等で施工時間を記録した。計測結果は添付資料に示す通りである。考察については後述する。

(5) 吹付け圧力測定

試験中のマテリアルホースの破損を防止するため、吹付け機に取り付けた圧力計（図 2.1-34 参照）にて管内の圧力について確認しながら吹付け試験を行った。本試験においては、マテリアルホースの最高使用圧力である 0.7MPa を超えることは無かった。計測結果は添付資料に示す通りである。

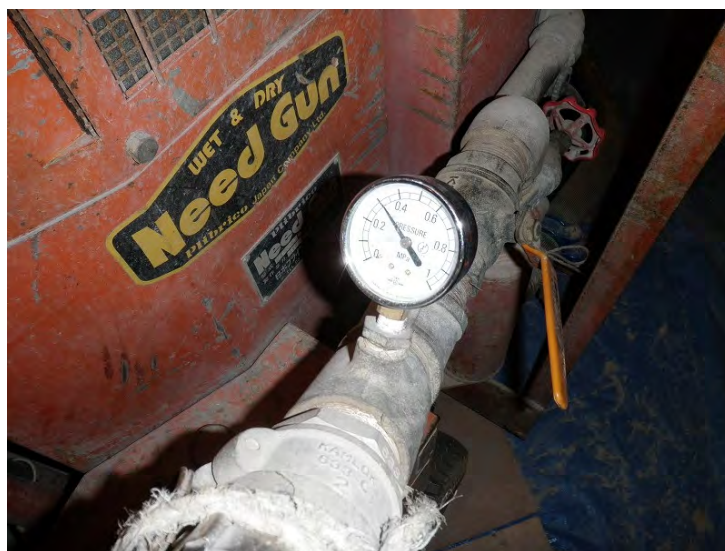


図 2.1-34 圧力計（吹付け機に設置）

(6) 密度測定

本試験では、所定の乾燥密度（ $1.5\sim 1.7\text{Mg/m}^3$ ）を達成していることを定期的に確認するため、シリコンオイル法（図 2.1-24、図 2.1-25 参照）にて速報的に密度を取得した。シリコンオイル法による施工品質の確認方法の妥当性を検討するために、シリコンオイル法とほぼ

同じ個所においてハンドコアドリルで得たコアに対してノギス法（初期性能確認試験）も実施した。実施個所を図 2.1-35 に示す。

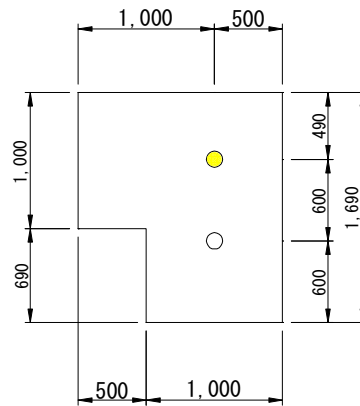


図 2.1-35 コア採取概略位置図

(7) 出来形測定（3D スキャナ）

本試験の出来形計測は、3D レーザースキャナを用いて実施した。吹付け施工は、任意形状での施工が可能な反面、施工後の表面形状が不規則となるため施工体積を正確に把握することが困難であるが、3D レーザースキャナは任意形状の対象物を測定可能なため、吹付け面の状態によらず正確に施工形状を把握することができる。また、施工前後の測定データの差から施工体積を算出し、施工時の材料の使用重量と廃棄重量から施工部全体の密度を概算した。測定結果および考察については後述する。

使用したスキャナは RIEGL 社製 VZ-400 である。外観を図 2.1-36 に、仕様を表 2.1-9 に示す。



図 2.1-36 3D レーザースキャナ（リーグル社製 VZ-400）

表 2.1-9 本試験で使用したスキャナの仕様

モデル	RIEGL 社製 VZ-400	
測定原理	タイムオブフライト法	
ユーザーインターフェース	ノートパソコン	
カメラ	NIKON D700	
レーザーPRR(Peak)	100kHz	
最長測定距離	600m	
最短測定距離	1.5m	
精度	5mm	
確度	3mm	
レーザー波長	近赤外線	
ビーム広がり角	0.3mrad	
1パルスあたりの検出ターゲット数	無制限	
垂直ライン	スキャン範囲	全 100° (60° ~ -40°) ※専用治具で 360° 測定可
	スキャン方式	回転多角ミラー
	スキャンレート	3 ライン/秒~120 ライン/秒
	角度ステップ幅	0.0024° ≤ Δφ ≤ 0.288°
	角度測定分解能	0.0005° (1.8arcsec)
水平ライン	スキャン範囲	最大 360°
	スキャン方式	回転ヘッド方式
	スキャンレート	0° ライン/秒~60° /秒
	角度ステップ幅	0.0024° ≤ Δφ ≤ 0.5°
	角度測定分解能	0.0005° (1.8arcsec)
傾斜計	内臓 (スキャナの鉛直方向設置用)	
インターフェース	LAN、10/100/1000 Mbit/sec スキャナー上部 LAN、10/100 Mbit/sec 内臓 WLAN USB2.0	
データ保存	内部 32GB フラッシュメモリ	
電源入力電圧	11~32V	
消費電力	標準 65W	
主寸法/重量	308mm×180mm (長さ×直径) / 9.6kg	
温度範囲	0℃~40℃ (作動)	-10℃~50℃ (保管)
保護クラス	IP64	

1) 吹付け完了確認 (目視)

吹付け完了後に、目視にて吹付け面にひび割れや欠損等の異常が無いことを確認した。

2) リバウンド率および廃棄率

本試験では、各試験ケースでのリバウンド率についても詳細に検討するため、全試験ケースで回収を行ったリバウンド材料の重量を測定した。測定結果および考察については後述する。計測した全ケースの測定結果は添付資料に示す。

加えて、1日の施工終了時に廃棄する重量を測定し、1日の施工終了時の廃棄率 (= 廃棄する重量 / 使用したフレッシュ材の重量) についても確認を行った。測定結果および考察については後述する。

2.2 初期性能確認試験

2.2.1 初期性能確認試験の概要

(1) 実施項目および試験数量

日本原子力学会標準「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」および土木学会(2009)「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」の検討成果を元に、緩衝材の要求機能と技術要件を抽出し、必要な試験項目を設定した。すなわち緩衝材には、「基本安全機能」として閉じ込めおよび移行抑制機能が要求されており、その技術要件として透水特性が、また、「操業上の機能」の技術要件として力学特性が上げられている。そのため、透水係数、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、膨潤圧試験を実施した。これらの特性と密接な関係がある密度についても測定した。

実施項目と数量を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 実施項目・数量

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準* (規格値)	実施時期	実施場所	数量
密度	密度 (コア)	(ノギス法)	乾燥密度 1.6±0.1Mg/m ³	コアサンプリング後	応用地質 コアラボ	55 (55 供試体)
基本特性 (透水)	透水係数 (変水位)	透水試験 JIS A 1218	—	コアサンプリング後	応用地質 コアラボ	1*** (3 供試体)
基本特性 (強度)	一軸圧縮強度 変形係数	土質試験法 JIS A 1216	—	コアサンプリング後	応用地質 コアラボ	1*** (3 供試体)
	三軸圧縮強度 (UU 試験)	土質試験法 JGS 0527 に準拠	—	コアサンプリング後	応用地質 コアラボ	1*** (3 供試体)
	膨潤特性	膨潤圧試験 2.3 に記載の通り	—	コアサンプリング後	応用地質 コアラボ	1*** (3 供試体)

* 将来的に仕上がり検査となる可能性のある項目であり、ここでは、それに関するデータを取得することが目的である。したがって、管理基準として表には数値が示しているが、あくまで目標値であり、その数値で合格の判定をするものではない。これらの値を参考にして、将来、規格値が設定されることになる。

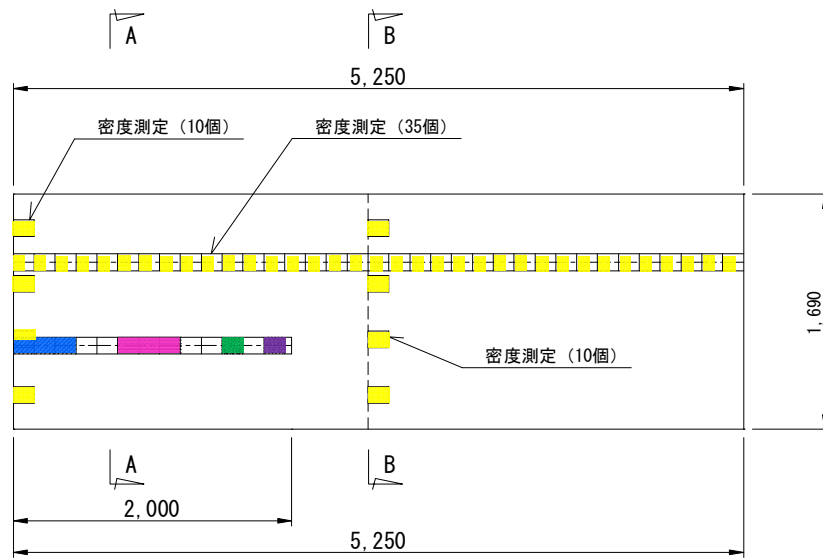
*** 透水試験、一軸圧縮試験および膨潤圧試験は、バラツキを考慮し各地点で 3 ケース実施。

**** 三軸圧縮試験は各地点 3 拘束圧で実施。

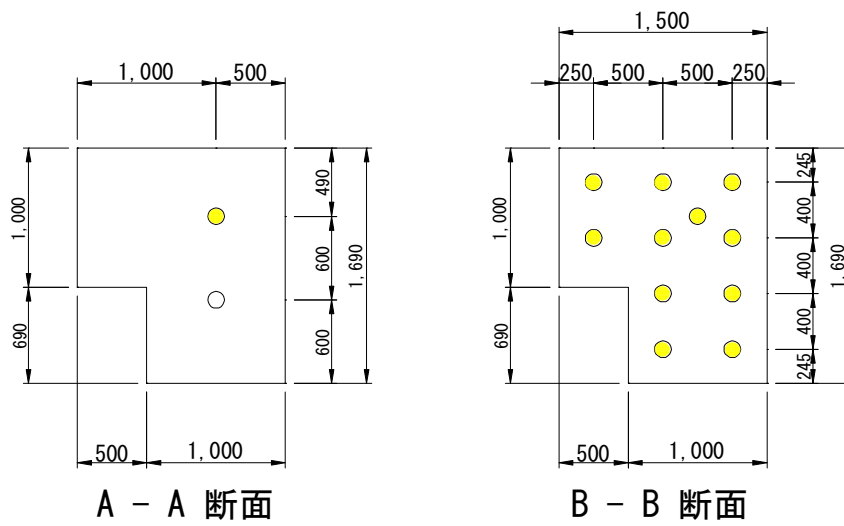
(2) 供試体の採取

1) 採取位置

力学試験用サンプリングコアの採取位置および構成を図 2.2-1 に示す。



側面図



A - A 断面

B - B 断面

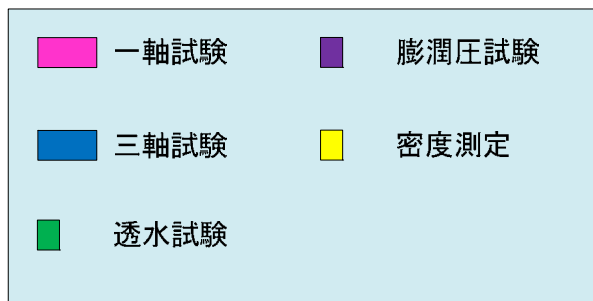


図 2.2-1 力学試験用サンプリングコアの採取位置および構成

2) 採取方法

a. ボーリング

最終仕上げ面からのボーリングコアの採取は、長尺ボーリングマシンを用いて行った。ビットはメタルクラウンとし、切削屑はエアにより排出した。掘削孔径は初期性能確認試験の供試体サイズ（最大φ60mm）を考慮してφ66mmとし、削孔長さは2.0mとした。ボーリング時の反力は、ピットおよび側部埋戻しコンクリートに反力架台を設置し、ボーリングロッドを水平方向に据え付けて行った。削孔方向の水平性を確認するために、ボーリングマシン設置時に水平器にてボーリングロッドが水平であることを確認してからコアリングを行った。ボーリング実施状況を図 2.2-2 に示す。また、採取したコアの一例を図 2.2-3 に示す。



図 2.2-2 長尺ボーリングマシンによるコア抜き状況



図 2.2-3 長尺ボーリングマシンにより採取したコアの一例

b. ハンディコアドリル

ハンディコアドリルによるコア採取は、各層（1層厚さ15cm）の吹付け完了後に1箇所での採取を実施した。また、中間層および最終層では、11個のコア採取を実施した。削孔径はφ60mmとし、長さは密度試験に供することが出来るよう約10cmとした。削孔時は、圧縮空気を削孔部に吹付けることで切削屑を除去しながら削孔を行った。ハンディコアドリルによる試料採取の様子を図 2.2-4、図 2.2-5 に示す。



図 2.2-4 ハンディコアドリルによるコア抜き



図 2.2-5 ハンディコアドリルでの試料採取位置（18層目）

(3) 実施工程

初期性能確認試験の実施工程を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 側部緩衝材施工確認試験実施工程（平成 25 年度）

種別	平成 25 年						平成 26 年									
	11 月			12 月			1 月			2 月			3 月			
	10	20	30	10	20	31	10	20	31	10	20	28	10	20	31	
サンプリング	■															
透水試験 (定水位透水試験)			■													
膨潤圧試験			■													
一軸圧縮試験			■													
三軸圧縮試験(UU 試験)			■													
湿潤密度試験			■													

2.2.2 建設・操業時の安全確保性能の確認試験

(1) 一軸圧縮強度、変形係数

一軸圧縮試験は、JIS A1216:2009「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して実施した。以下に一軸圧縮試験の手順を示す。

- ① 供試体を所定の寸法（直径 50mm×高さ 100mm）に成形する。
- ② 供試体の質量、寸法を計測し、湿潤密度を求める。
- ③ 供試体の削り屑により含水比を求める。
- ④ 供試体を一軸圧縮試験装置に設置し供試体上部端面と受圧板の平行度を確認調整する。
- ⑤ 圧縮速度 1%/min の速度にて圧縮する。この時、圧縮変位および圧縮荷重を測定する。試験状況を、図 2.2-6 に示す。

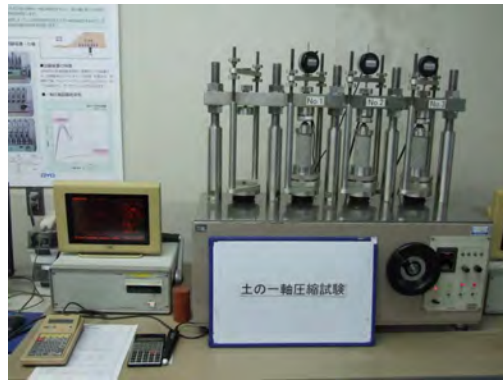


図 2.2-6 一軸圧縮試験状況

- ⑥ 圧縮試験は、以下の基準のいずれかを確認した時点で終了した。
 - ・ 最大圧縮強さを確認した後 3%の圧縮ひずみを確認。
 - ・ 最大圧縮強さを確認度 1/3 の強度低下を確認。
 - ・ 圧縮ひずみ 15%を確認。
- ⑦ 試験結果より、(数式 2.2-1) および (数式 2.2-2) により圧縮応力および圧縮ひずみを求め、圧縮応力の最大値を一軸圧縮強さ (q_u) とした。

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{100}\right) \times 10 \quad (\text{数式 2.2-1})$$

σ : 圧縮応力(k N/m²)

P : ε を測定したときの圧縮力(N)

A_0 : 供試体の初期断面積 (cm²)

ε : 圧縮ひずみ (%)

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (\text{数式 2.2-2})$$

ε : 圧縮ひずみ (%)

ΔH : 圧縮量(cm)

H_0 : 供試体の初期高さ (cm)

(2) 三軸圧縮強度

三軸圧縮試験は、JGS 0521-2009「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法」に準拠して実施した。JGS 基準は、社団法人 地盤工学会の定める試験基準である。以下に三軸圧縮試験の手順を示す。供試体を所定の寸法（直径 50mm×高さ 100mm）に成形する。

- ① 供試体の質量、寸法を計測し、湿潤密度を求める。
- ② 供試体の削り屑により含水比を求める。
- ③ 供試体を三軸室に設置し、メンブレン、試料キャップを設置し止水する。
- ④ 供試体を非排水状態として、三軸室にセル水を給水する。
- ⑤ 供試体に拘束圧を載荷する。ここでは、各供試体の拘束圧を 1.0、2.5、4.0MPa とした。
- ⑥ 圧縮速度を 0.01%/min として供試体を圧縮する。この時、圧縮量、軸圧縮力を測定する。圧縮試験中の状況を図 2.2-7 に示す。
- ⑧ 圧縮試験は、以下の基準のいずれかを確認した時点で終了した。
 - ・ 最大圧縮強さを確認した後 3%の圧縮ひずみを確認。
 - ・ 最大圧縮強さを確認度 1/3 の強度低下を確認。
 - ・ 圧縮ひずみ 15%を確認。
- ⑨ 測定結果を用い、(数式 2.2-3)により主応力差を求める。なお、軸ひずみは(数式 2.2-6)と同様に求める。
- ⑩ 主応力とせん断力の関係から、強度定数 (α_{uu} 、 φ_{uu}) を求める。なお、せん断力は(数式 2.2-4)により定義する。

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A_0} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_a}{100}\right) \times 0.01 \quad (\text{数式 2.2-3})$$

σ_a : 主応力差(MPa)
 P : ε_a を測定したときの軸圧縮力(N)
 A_0 : 供試体の初期断面積 (cm²)
 ε_a : 軸ひずみ (%)

$$\tau = \frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} \quad (\text{数式 2.2-4})$$

τ : せん断力(MPa)



図 2.2-7 三軸圧縮試験状況

2.2.3 止水性能の確認試験

(1) 密度（コア）

本試験では、吹付けによって構築された側部緩衝材の施工品質やその均質性を確認することを意図して、上部緩衝材隅角部の施工箇所からコアを採取し、その密度を測定した。コア採取や試験方法の詳細を下記に示す。

1) 乾燥密度の測定方法

コアの乾燥密度は、先ず、湿潤密度を JIS A1225:2009「土の湿潤密度試験方法・ノギス法」に準じて取得し、含水比を JIS A1203:2009（測定方法は上述の通り）を用いて算出した。以下に湿潤密度試験の試験手順を示す。

- ① コア試料より切り分けた試料の側面および端面をトリマー、直ナイフ、マイターボックス等を用いて成形する。成形用器材の写真および成形供試体の状況を図 2.2-8 に示す。



(a) 供試体成形用器材



(b) 成形後供試体状況

図 2.2-8 湿潤密度試験状況

- ② ノギスを用い供試体の直径、高さを測定し記録する。
- ③ 天秤により供試体の質量を測定し記録する。
- ④ 以上の作業は、供試体の乾燥を防ぐため、供試体成形後直ちに行う。
- ⑤ 供試体の測定結果を基に（数式 2.2-5）により湿潤密度を算出する。

$$\rho_t = \frac{m}{V} \quad (\text{数式 2.2-5})$$

ここに、

ρ_t : 湿潤密度 (Mg/m³)

m : 供試体質量 (g)

V : 供試体体積 (cm³)

乾燥密度は、含水比 w を用いて、 $\rho_d = \rho_t / (1 + w / 100)$ から算出する。

(2) 透水試験

透水試験は、JIS A1218:2009「土の透水試験方法」に準拠して実施した。以下に試験手順を示す。

【供試体の作製過程】

- ① 試料の側面を成形し、透水試料容器に挿入する。その時、試料容器と供試体の間に隙間が出来ないように注意する。試料容器の寸法は、直径 40mm、高さ 20mm である。
- ② 試料容器端部の余分な試料を直ナイフで取り除き平滑にする。
- ③ 圧密容器に入った試料の質量を測定する。
- ④ 成型時の削り屑で含水比を測定する。
- ⑤ 透水試験用容器に設置し機器を組み立てる。

【供試体の飽和化過程】

- ① 透水容器を脱気水の入った減圧脱気水槽に水浸し、約-700mmHg に減圧して脱気する。脱気期間はおよそ 2 日間とした。
- ② 試験容器を減圧脱気水槽から取り出し送水試験用水槽に移設する。
- ③ 供試体下部をフローポンプに接続して 0.002cc/min の速度で通水する。供試体の空隙体積は最大 4.18cc であることから、通水期間約 60 時間（この間の送水量は 4.8cc > 4.18cc）で間隙空気の排出がなされたと判断し、透水試験過程に移行する。

(図 2.2-9 参照)

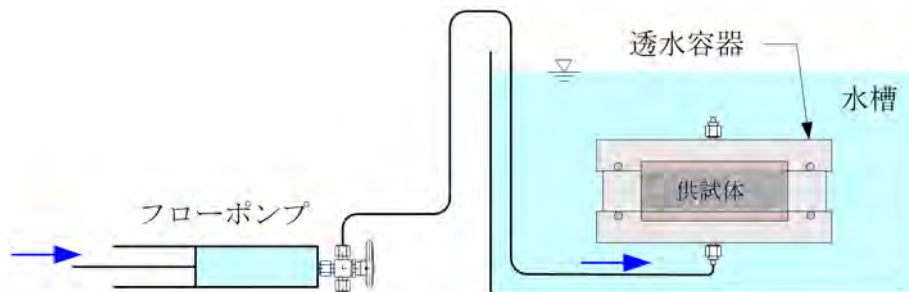


図 2.2-9 試料の飽和過程

【透水試験過程】

以下に、透水試験過程の手順を示す。

- ① 飽和した透水容器の供試体上部および下部に二重管ビューレットを接続する。
- ② ビューレット内部には、試験用水としてイオン交換水を入れる。また、試験用水の上部には蒸発防止用のシリコンオイルを入れておく。シリコンオイルの粘性は 10cP とした。
- ③ 供試体上用二重管ビューレット内に 250kPa、供試体下部用二重管ビューレット内に 50kPa の空圧を載荷する (図 2.2-10 参照)
- ④ 透水量および水温と時間の関係を継続的に測定する。試験状況を図 2.2-11 に示す。

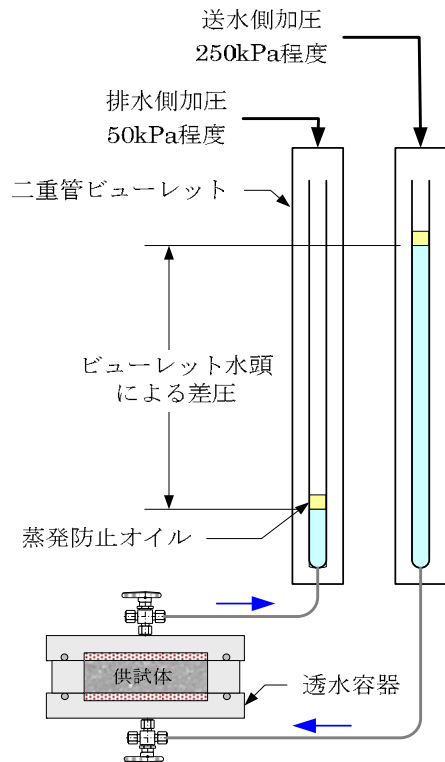


図 2.2-10 透水試験方法



図 2.2-11 シリコンオイル比重法に用いた計測器

- ⑤ 試験後の供試体含水比を測定する。
- ⑥ 試験結果と（数式 2.2-6）により透水係数を算出する。

$$k_t = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)}$$

（数式 2.2-6）

ここに、

k_T : $T^\circ\text{C}$ における透水係数(cm/s)

L : 供試体の長さ(cm)

h : 水位差 (cm)

Q : 透水量 (cm³)

A : 供試体の面積 (cm²)

$(t_2 - t_1)$: 測定時間 (s)

2.2.4 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験

(1) 膨潤圧試験

膨潤圧試験は、圧密試験と同等の試験容器を用い、体積を拘束した状態で供試体の吸水に伴い発生する供試体軸方向応力を測定する。以下に試験手順を示す。なお、供試体寸法は、直径 60mm、高さ 20mm とした。試験の様子は図 2.2-12 に示す。



図 2.2-12 膨潤圧試験状況

【膨潤圧試験過程】

- ① 供試体の体積を拘束した状態で、供試体の上下より試料への吸水を許す。供試体の下面にはビューレットより給水し、上面は載荷板面より膨潤圧容器内の試験用水を給水させる。この時、供試体の膨潤量が 0 であることを確認し、もし、変位が生じるようであれば制御して変形を 0 とする。
- ② 吸水開始と同時に膨潤荷重を荷重計で測定する。
- ③ 試験の継続は、膨潤荷重が一定となることを確認するまでとする。
- ④ 測定結果を基に（数式 2.2-7）で最大膨潤圧を求める。

$$p_{s\max} = \frac{F_{\max}}{A} \times 0.01$$

（数式 2.2-7）

ここに、

- $p_{s\max}$: 最大膨潤圧 (MPa)
 F_{\max} : 最大膨潤荷重 (N)
 A : 供試体の面積 (cm²)

- ⑤ 試験が終了した後、供試体の試験後含水比を測定する。

2.3 施工確認試験結果の評価

2.3.1 材料特性に関する評価

今年度の上部緩衝材隅角部施工確認試験に使用した材料の材料特性について、材料購入時の試験成績書（ミルシート）を用いて整理した。また、既往試験結果との比較は「2.3.3 (5) ベントナイト材料特性」で記述する。

(1) 材料特性に関する品質管理項目

H20年度地下空洞型処分施設性能確証試験のうちの底部緩衝材施工確認試験において抽出されたベントナイト材料特性に関する品質管理項目を表 2.3-1 に示す。今年度の上部緩衝材隅角部施工確認試験においても、H20年度の品質管理項目に準じて品質管理を行った。

表 2.3-1 ベントナイト材料特性に関する品質管理項目

分類	項目	方法	目的・概要
材料特性 (基本)	最大粒径	JIS A 1204 (日本工業規格)	最大粒径・粒度は、材料の含水比、吹付け施工の密度、均質さ、リバウンド率に影響を与える。材料の含水比のばらつきは密度のばらつきの要因となり、緩衝材の品質のばらつきの直接的な要因となる。
	粒度	JIS A 1203 (日本工業規格)	
	調整前含水比	JIS A 1203 (日本工業規格)	調整前含水比は、含水比調整時の加水量を設定する際の基本情報である。また、ベントナイトの購入は質量単位で行うため、調整前含水比が高いと、見かけ上の材料費が高くなる。
	塑性限界	JIS A 1205 (日本工業規格)	地盤材料の保水力、透水性、細粒分含有率等に相関がある物理量であり、その他、力学パラメータとの相関も検討されている。既往の研究でも数多く取得されており、本検討で使用する材料の妥当性を確認する。
	メチレンブルー吸着量	JBAS-107-91 (日本ベントナイト工業会標準試験方法)	メチレンブルー吸着量試験は、ベントナイトの陽イオン交換容量（CEC）の簡易測定法として多年用いられてきた方法である。CECはモンモリロナイト含有量と関係があり、この目安として試験が行われる。モンモリロナイト含有量はベントナイトの低透水性、膨潤性の源であり、緩衝材の材料として重要な指標である。
	膨潤力	JBAS-104 (日本ベントナイト工業会標準試験方法)	膨潤力試験は膨潤性能を評価する試験である。膨潤の圧力ではなく、吸水して膨潤する量の評価する。

(2) 材料特性の品質管理基準

H20年度の底部緩衝材施工確認試験においては、ベントナイト材料特性に関する品質管理基準が設定されている。材料特性の品質管理基準を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-2 材料特性に関する品質管理基準

品質管理項目	管理値
最大粒径	5mm
含水比	10%以下
塑性限界	30%以下
メチレンブルー吸着量 (モンモリロナイト含有量)	63mmol/100g 以上 (45%以上)
膨潤力	10 (ml/2g) 以上

本試験では、ベントナイト材料の購入元であるメーカー（クニミネ工業株）において材料の加水調整および各種試験を行っており、購入したベントナイト材料のミルシートにより材料品質の確認を行う。なお加水調整にはアイリッヒ・インテンシブ・ミキサー (Mixer Type:DEV22) を用いた。加水調整のフローチャートをに示す。

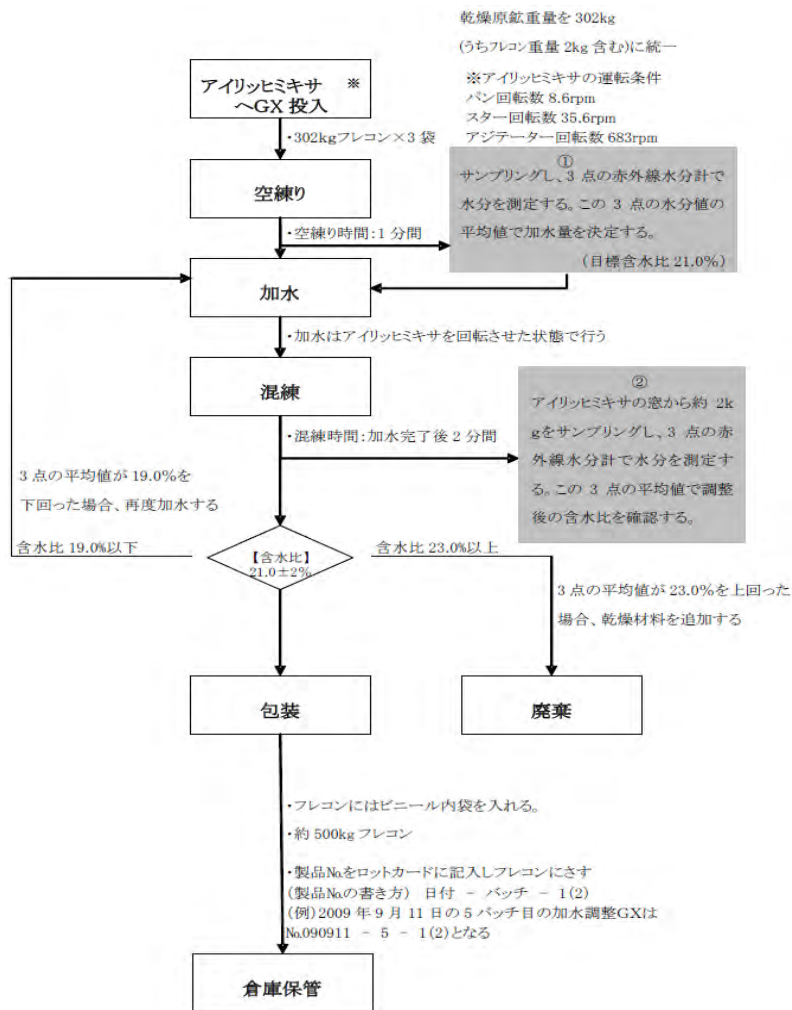


図 2.3-1 加水調整のフローチャート

(3) 品質管理結果

今年度に使用したベントナイト材料の各物性値の一覧表を、ベントナイト（クニゲル GX）の粒径仕様をに示す。また、ベントナイト材料の粒度分布をに示す。

今年度使用したベントナイト材料の最大粒径、自然含水比、塑性限界、メチレンブルー吸着量、膨潤力とも表 2.3-2 に示す管理管理基準値を満たしている。また、粒度分布についても管理基準値の範囲内である。

表 2.3-3 今年度使用したベントナイト材料の特性一覧表

試料名	最大粒径	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	5mm以下	%	%	mmol/100g	ml/2g
130905	○	8.0	24.0	66.0	15.0
130925	○	8.6	23.7	66.0	15.0
平均値		8.3	23.9	66.0	15.0

表 2.3-4 ベントナイト（クニゲル GX）の粒径仕様

	ふるいを通るものの質量百分率 (%)								
	ふるいの呼び寸法 (mm)								
	19	9.5	4.75	2	0.85	0.425	0.25	0.106	0.075
クニゲルGX	100	100	70~100	45~100	20~100	0~100	0~70	0~30	0~10

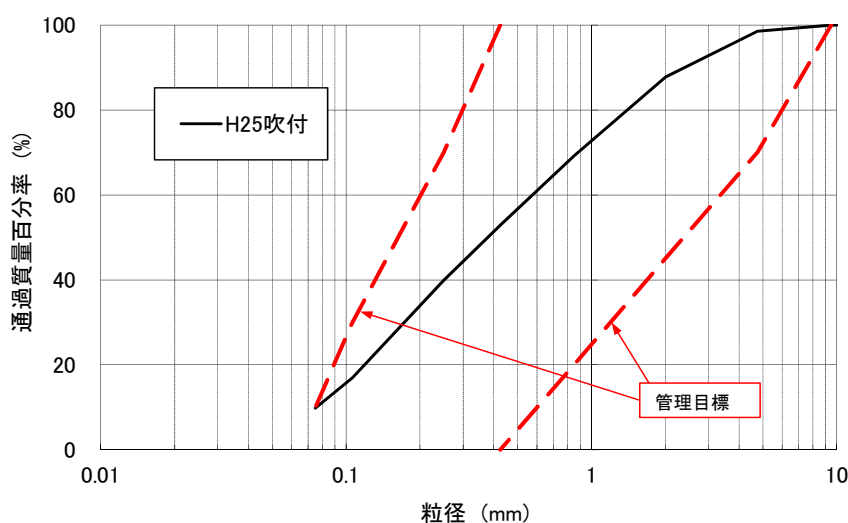


図 2.3-2 ベントナイト粒度分布

(4) 過去の試験結果との比較

平成 21 年度の施工確認試験以降、材料特性データが蓄積されてきており、ここでは、これまでのデータを集約し、特性値の変動やバラツキの傾向について考察した。

平成 21 年度、23 年度～25 年度の吹付け工法による施工確認試験での材料特性データを集約した粒径加積曲線を図 2.3-3 に示す。過年度の粒度分布はの管理基準値の範囲内に分布している。

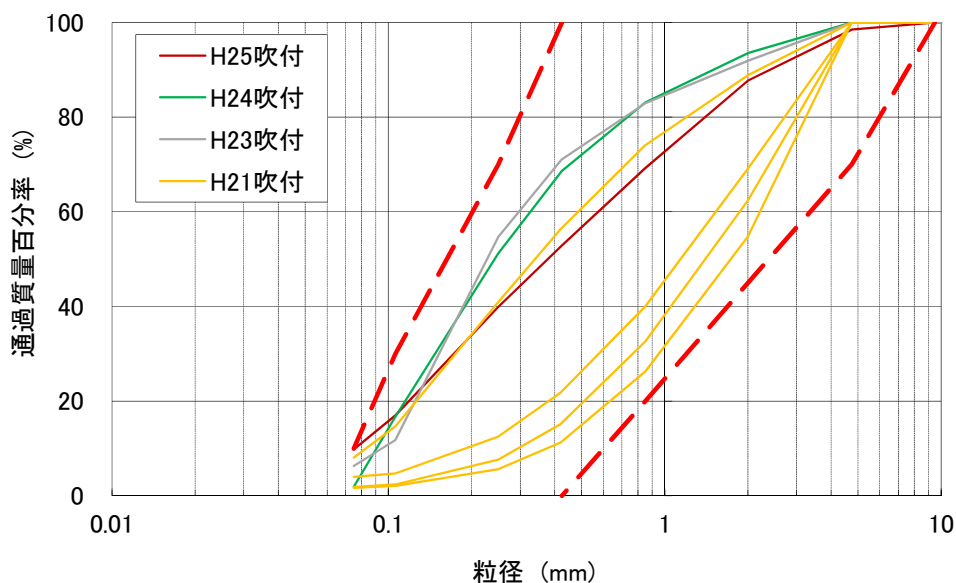


図 2.3-3 使用した材料の粒径加積曲線

ベントナイト（クニゲル GX）の管理値一覧を表 2.3-5 に、吹付け工法で使用したベントナイト材料の試験値（集約データ）の基本統計量を表 2.3-6 に、各ヒストグラムを図 2.3-4～図 2.3-7 に示す。

各項目とも、バラツキはあるものの、いずれも管理値の範囲内である。変動係数でバラツキを評価すると、自然含水比の変動係数がその他の特性と比べて大きい。塑性限界、メチレンブルー吸着量、膨潤力とも年度の違いで大きな差異はなく、吹付け工法で使用した材料の特性の変動は小さいといえる。

表 2.3-5 ベントナイト（クニゲル GX）の管理値

	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	%	%	mmol/100g	ml/2g
管理値	10以下	30以下	63以上	10以上
特性値範囲	6.2～8.6	22.4～24.3	64～66	14～16

表 2.3-6 吹付け工法で使用した材料の材料特性の基本統計量

	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	%	%	mmol/100g	ml/2g
平均値	7.2	23.3	65.4	15.1
中央値	7.1	23.4	66.0	15.0
標準偏差	0.80	0.63	0.68	0.57
変動係数	0.11	0.03	0.01	0.04
最大値	8.6	24.3	66.0	16.0
最小値	6.2	22.4	64.0	14.0
範囲	2.4	1.9	2.0	2.0
標本数	9	9	9	9

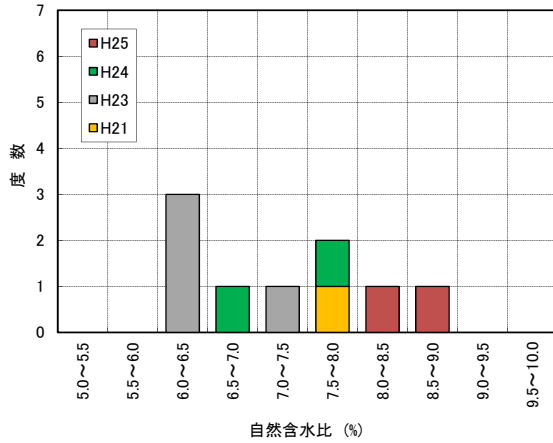


図 2.3-4 自然含水比のヒストグラム

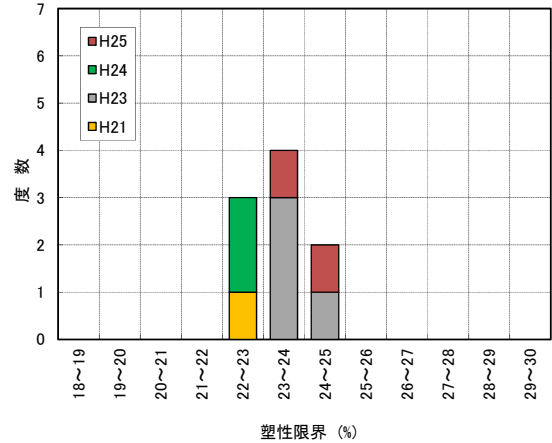


図 2.3-5 塑性限界のヒストグラム

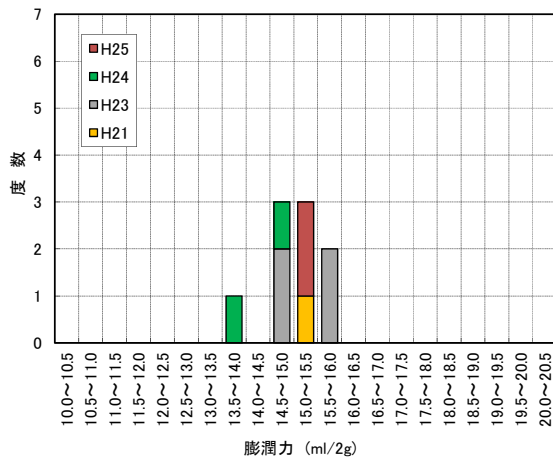


図 2.3-6 膨潤力のヒストグラム

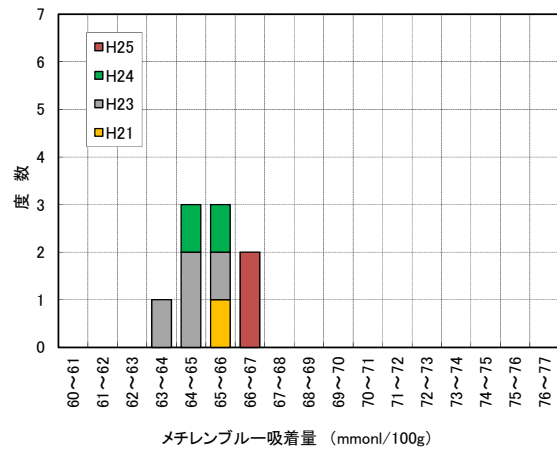


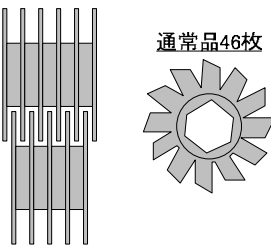
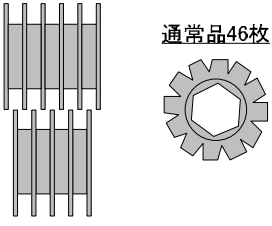


図 2.3-7 メチレンブルー吸着量のヒストグラム

2.3.2 施工・出来形に関する評価

(1) 吹付け作業

吹付け作業は予定通り、順調に遂行できた。H23 年度にリバウンド材料の再利用方法が原因で発生したノズルの閉塞は、H24 年度[3]と同様に、リバウンド材料の団粒化低減と定量供給性を両立させたブレード形状を有する改良型湿潤材料定量供給機をリバウンド材供給に用いることで、全く発生することがなかった。H24 年度と本年度の施工を通じてリバウンド材料の再利用を実施してきたが、ノズルの閉塞は全く発生しておらず、このことから、リバウンド材料の再利用方法に起因するノズルの対策方法として採用したブレード形状の変更(団粒化の低減)が有効であることが確認できた。

表 2.3-7 湿潤材料定量供給機の改良点 (H24 年度)

	標準	改良
ブレード配置のイメージ	 <p>通常品46枚</p>	 <p>通常品46枚</p>
特徴	標準品	全てのブレードの長さを短くする
団粒化状況	 <p>× 団粒化する</p>	 <p>○ 団粒化は低減</p>
定量供給性	◎ 定量供給性あり	○ 定量供給性あり

(2) リバウンド材回収

1) リバウンド材吸引回収

今年度の試験においてリバウンド材の回収は、H24 年度[1]と同様にターボファン付き集塵機を組み合わせた改良型リバウンド材吸引回収装置を用いて行った。また、集塵機と改良型湿潤材料定量供給機を上下に合体させることにより、回収されたリバウンド材は連続して供給・再利用され、より実施工に則した吹付けを実施した。

集塵機と改良型湿潤材料定量供給機を上下に合体させた際、クレーン作業のための高さ制限対策として集塵機底部の排出口が供給機ホッパー内に入り込んだ形状として全体の高さが低くなるようにしており、そのため供給機ホッパーの容量は昨年度までより減少している。吹付け施工中、回収したリバウンド材の量が供給機のホッパー容量を超えることがあったため、その際には吸引回収作業を一時中断する必要があるほか、吸引回収のためのエアバルブを操作する作業が発生した。また、供給機ホッパーの容量超過により吸引しきれなかったリバウンド材に関しては、スコップにて回収した後に計量し、再利用せずに廃棄した。

2) リバウンド率

含水比とリバウンド率の関係を図 2.3-8 に示す。リバウンド率は平均で 37.8%と、比較的高い値であった。各年度におけるリバウンド率の比較を表 2.3-8 に示す。

リバウンド率が高かったことに関して、以下の理由が考えられる。

- ・ 施工形状が、足元が幅 1.0m であるのに対し、吹付け幅は 1.5m と広く、吹付け面に対して垂直に吹付けることが困難であったため (図 2.3-9、図 2.3-10 参照)。

- ・ 施工形状が、型枠・壁際の隅角部が多い形状であったため。
(側部緩衝材の場合は両側面のみ)
- ・ リバウンド材が供給機のホッパー容量をオーバーした際に、ターボファン付き集塵機内で空気に曝されることでリバウンド材が過度に乾燥したため。

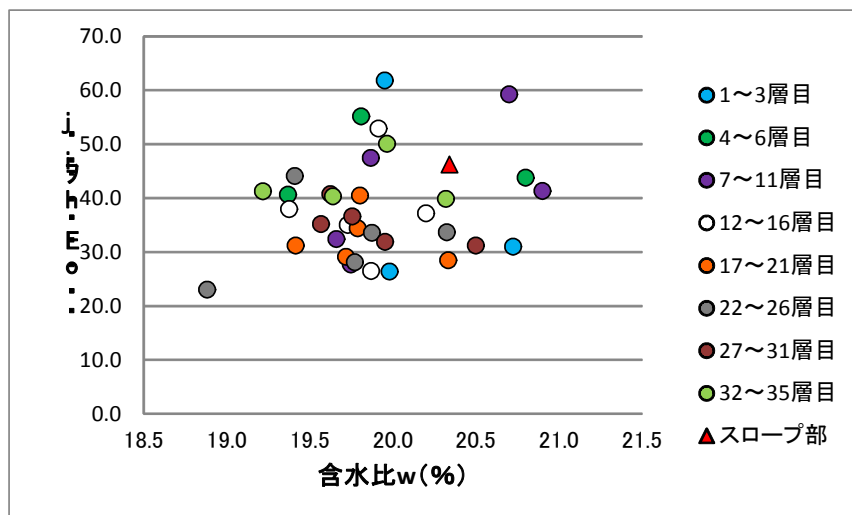


図 2.3-8 含水比とリバウンド率の関係

表 2.3-8 各年度のリバウンド率

年度	吹付け方法	リバウンド率 (%)
H22	(ロボット)	41.7
	(ノズルマン)	32.1
H23	(ロボット)	37.5
H24	(ロボット)	28.5
H25	(ノズルマン)	37.8

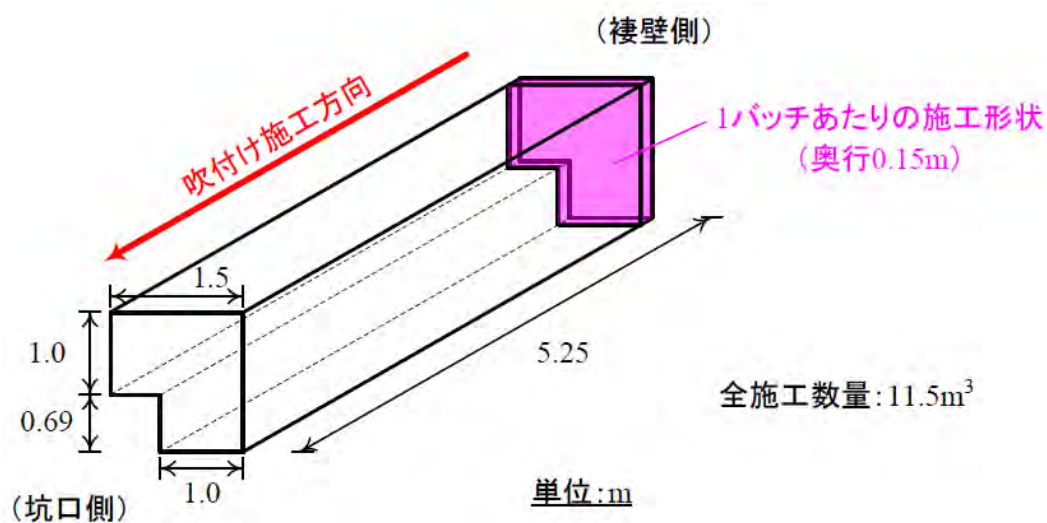


図 2.3-9 施工形状

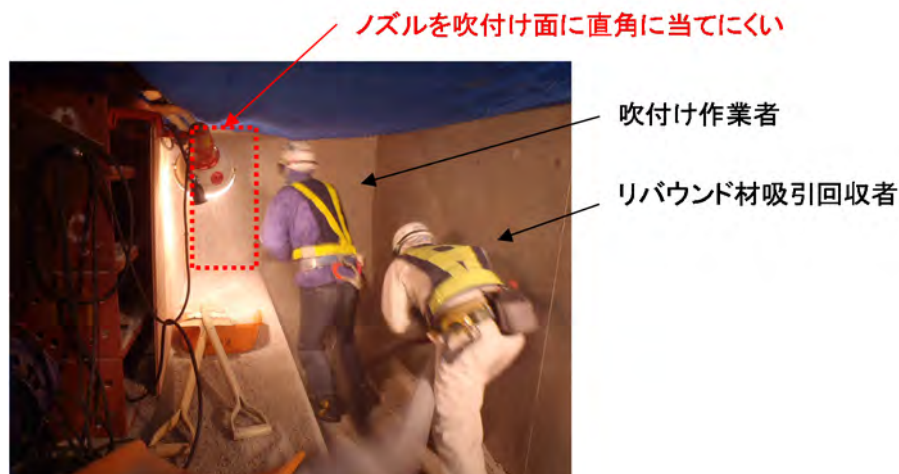


図 2.3-10 施工状況写真

3) 材料廃棄率

使用した材料は、各施工日の施工終了時に廃棄を行った。材料廃棄率を表 2.3-9 に示す。廃棄率は、各施工日のフレッシュ材使用量と廃棄する材料の重量から求めた。過去の吹付け施工における廃棄率を表 2.3-10 に示す。今年度の材料廃棄率が高かったことに関して、リバウンド率が高かったことが理由として挙げられる。各層施工時に回収されたリバウンド材のうち、供給機のホッパー容量を超えた分はスコップにて回収して計量した後、再利用せずに廃棄となったことと、各施工日の最終層施工時に発生したリバウンド材は全量が廃棄されるため、その量が多かったためと考えられる。

表 2.3-9 材料廃棄率

施工日	施工層数	使用量(kg)	廃棄量(kg)	廃棄率(%)
11/2	3	2,787	803	28.3
11/5	3	2,268	480	20.8
11/6	5	5,418	1,345	24.4
11/7	5	3,919	685	17.2
11/8	5	4,123	887	21.1
11/9	5	3,809	591	14.0
11/11	5	3,695	738	19.6
11/12	4	3,844	1,323	33.8
計	35	29,865	6,802	22.4

表 2.3-10 年度別廃棄率

年度	平均廃棄率(%)
H23	水平：約 30 下向き：約 20
H24	6.8
H25	22.4

(3) 仕上り密度

現地にて乾燥密度を速報的に確認するために、各層にてシリコンオイル法による試験を実施した。なお、この供試体はノギス法による初期性能確認試験用の供試体採取位置と同位置から採取しており、それぞれの乾燥密度測定結果を比較した。なお、シリコンオイル法による密度試験における含水比は、現地にて電子レンジ法により求めた値、一方ノギス法による密度試験における含水比は、室内にて炉乾燥法により求めた値を用いた。

1) シリコンオイル法による乾燥密度測定結果

シリコンオイル法による乾燥密度測定結果のヒストグラムを図 2.3-11 に示す。ばらつきが非常に小さく、均質な緩衝材が施工できていることが分かる。シリコンオイル法は、施工後に 5 分間程度で湿潤密度と含水比が計測できるため、ノギス法等の従来法に比べ、施工直後の緩衝材の品質を計測することができる。

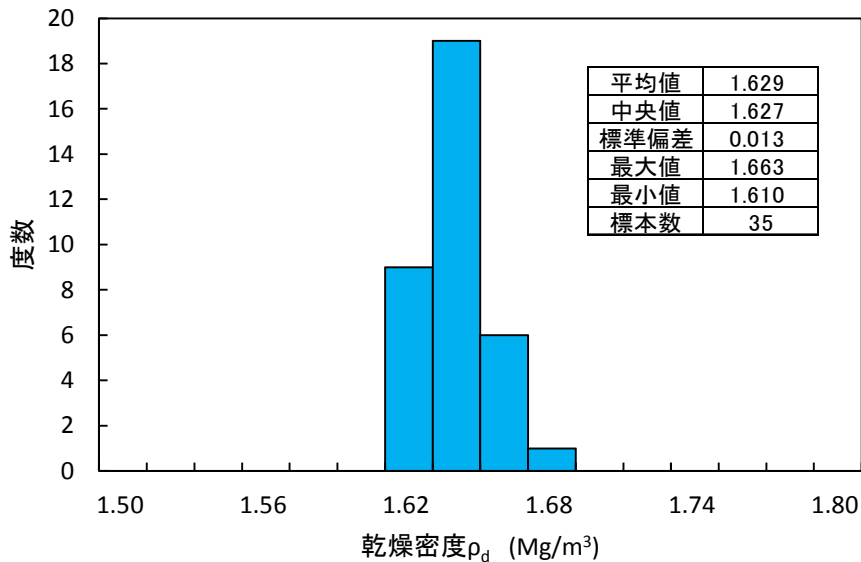


図 2.3-11 密度試験結果（シリコンオイル法）

a. シリコンオイル法とノギス法による乾燥密度測定結果の比較

シリコンオイル法とノギス法による密度測定結果に関して、層毎の乾燥密度測定結果を図 2.3-12 に、湿潤密度測定結果を図 2.3-13 に示す。なお、グラフ中の縦線は、施工日毎の区切りを示している。

シリコンオイル法による測定値はノギス法による測定結果に対して、乾燥密度は平均で 0.040Mg/m^3 高く、湿潤密度は平均で 0.061Mg/m^3 高い。シリコンオイル法およびパラフィン法 (JIS A 1225) は、不定形な試料の体積を浮力から計測するのに対して、ノギス法は円筒形に整形したコアの体積を代表的な直径と高さを各 3 か所程度計測して体積を算出する方法である。ノギス法は、本試験で使用している最大粒径 5 mm のベントナイト原鉱石を含む材料を成型する際のコア表面の凹凸や、コアの整形の精度によっては体積を大きめに評価する傾向がある (図 2.3-14 参照)。そのため、シリコンオイル法に比べ、ノギス法

で計測した乾燥密度の方が常に小さめの値を与えている。

このような計測方法の特徴に起因する差を考慮しても、乾燥密度の測定結果はシリコンオイル法とノギス法で、いずれも管理基準値 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ の範囲内にあり、その差は上限値から下限値までの許容幅 0.200Mg/m^3 に対して、 0.040Mg/m^3 の差であることから、シリコンオイル法による乾燥密度測定結果は十分な精度を有しており、現地における密度計測の簡便性や迅速性に鑑みて、実施工における品質管理方法として有効な手段といえる。

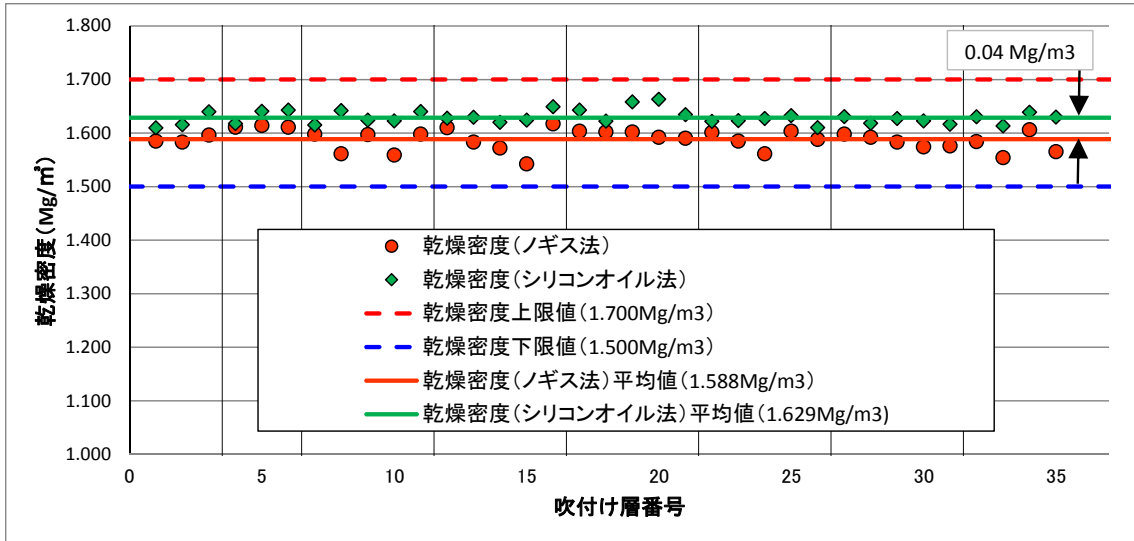


図 2.3-12 乾燥密度の比較

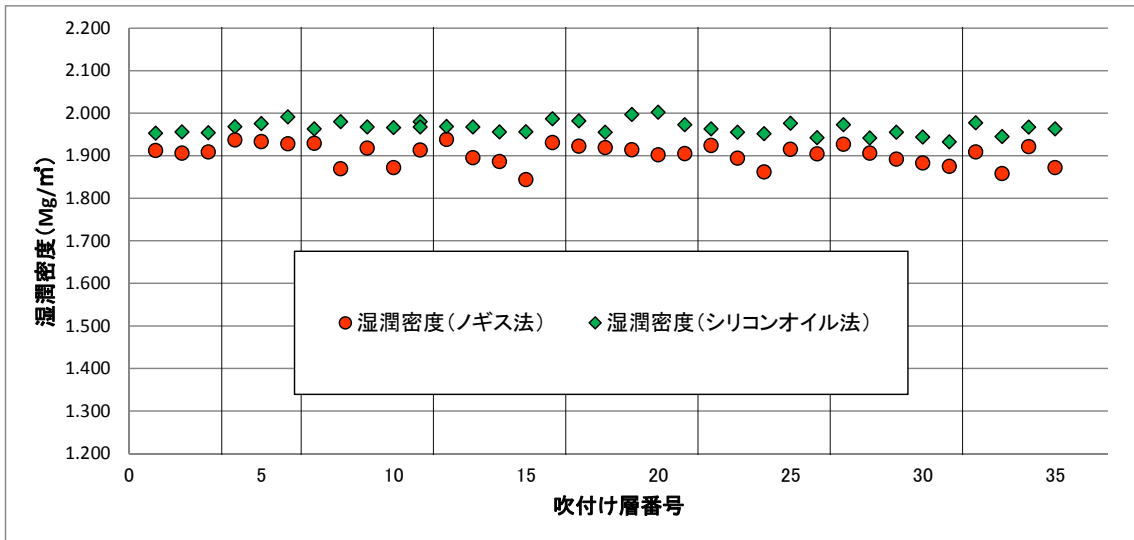


図 2.3-13 湿潤密度の比較

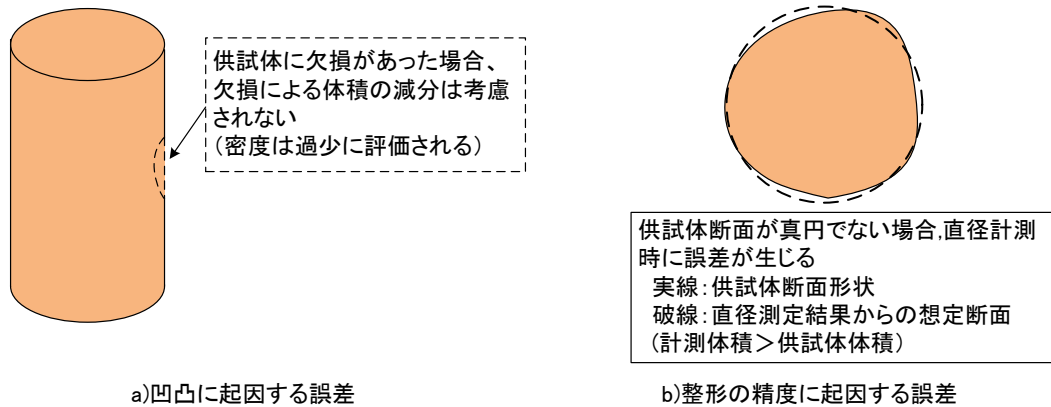


図 2.3-14 ノギス法の計測誤差発生原因イメージ図

b. 電子レンジ法と炉乾燥法による含水比測定結果の比較

電子レンジ法と炉乾燥法による含水比測定結果に関して、層毎の含水比測定結果を図 2.3 15 示す。炉乾燥法の方が電子レンジ法に比べて含水比は小さくでる傾向にある。電子レンジ法では現地の吹付け箇所凸部より試料を採取するのに対して、炉乾燥法における供試体のサンプリングはハンドコアドリルを用いて実施している。そのためハンドコアドリルの摩擦熱と、切削屑を除去するために用いた圧縮空気により、炉乾燥法の含水比は、電子レンジ法の含水比より低くなっているものと考えられる。

このような計測方法の特徴に起因する差を考慮しても、電子レンジ法と炉乾燥法の含水比の測定結果の差は最大 1.5% (4、6、25 層目) でありベントナイト材料 (フレッシュ時) の含水比の管理値 $21.0 \pm 2.0\%$ に対し小さいものと考えられる。よって電子レンジ法による含水比測定結果は十分な精度を有しており、現地における密度計測の簡便性や迅速性に鑑みて、実施工における品質管理方法として有効な手段といえる。

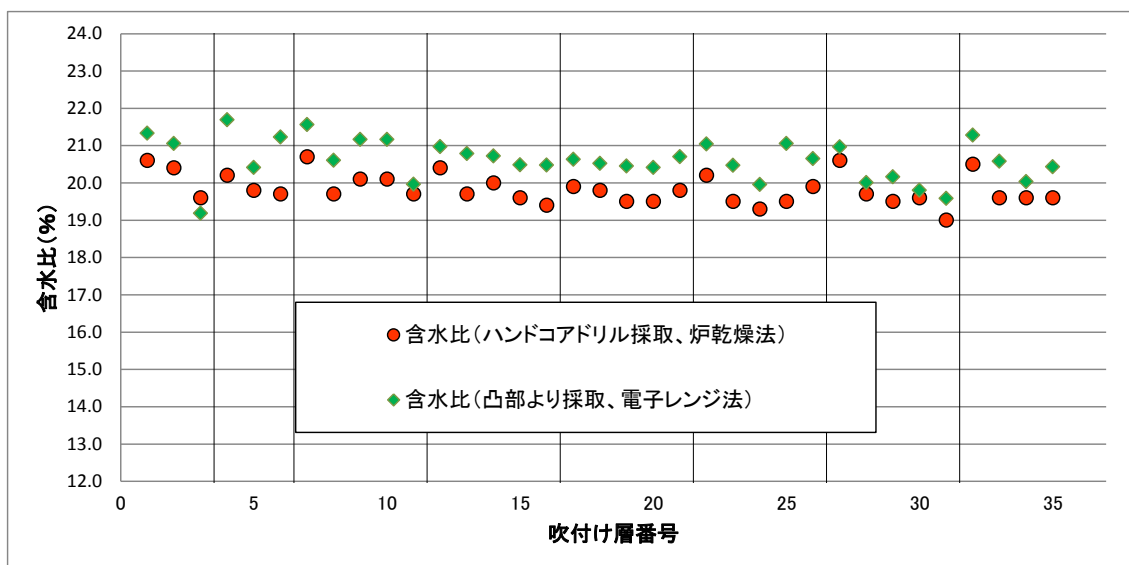


図 2.3-15 含水比の比較

2) 含水比と乾燥密度の関係

a. H25年度の結果

シリコンオイル法と電子レンジ法により計測した、含水比と乾燥密度の関係を図 2.3-16 に示す。

リバウンド材を再利用しながら吹付けを行う場合、材料供給量を一定とすると吹付け回数を重ね吹付け材料が乾燥するのに伴い、乾燥密度は等飽和度曲線に沿って上昇するが、今年度の吹付けにおいては、H24年度の実績から作成した「吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係(図 2.3-17)」、および「混合材料の含水比-供給量-乾燥密度の関係(図 2.3-18)」を用いて、吹付けに伴うリバウンド材の含水比低下量を予測し、含水比低下に応じて乾燥密度が一定となるような材料供給量を予め設定しておくことで、均質かつより実施工に則した条件での施工を実施した。ただし、緩衝材の含水比が過度に低下した場合、坑内の湿気・地下水により膨潤し、ひび割れが生じる懸念があるため注意が必要と考えられる。今年度の各吹付け層において採用した含水比と材料供給量を表 2.3-11 に示す。なおリバウンド材の含水比低下の予測では、図 2.3-17 の「吸引回収」の結果より 1 回の吸引回収毎に含水比が 0.4%低下するものとして、フレッシュ材との混合材料の含水比計算を行った。

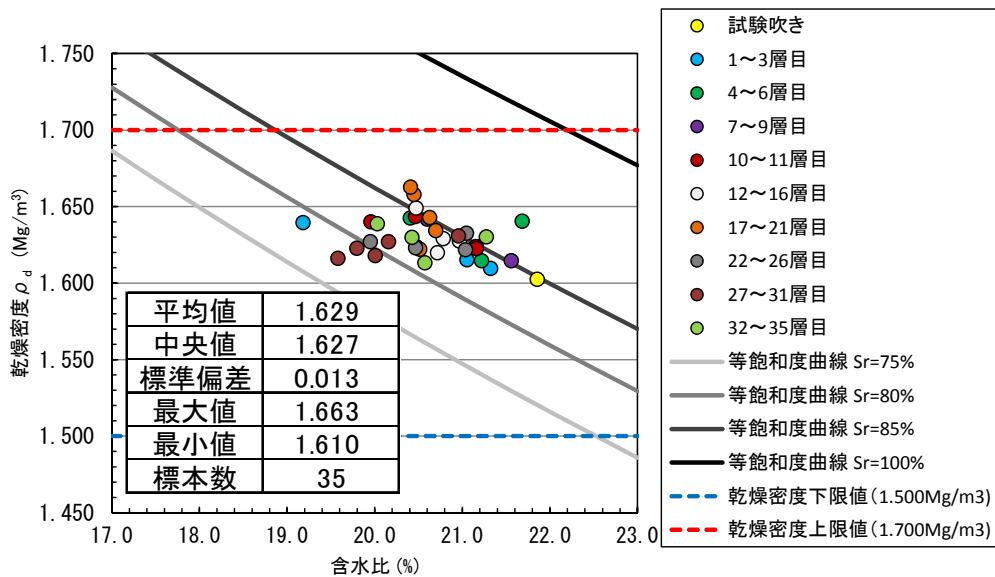


図 2.3-16 含水比と乾燥密度の関係 (シリコンオイル法)

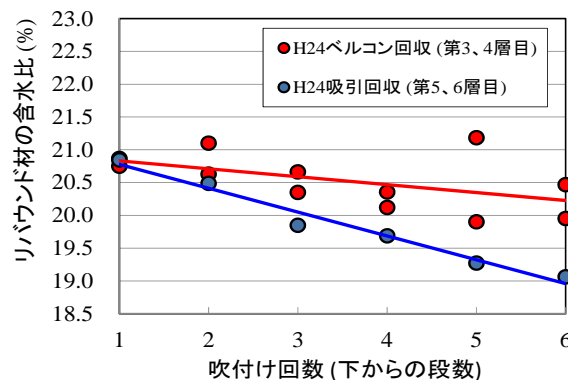


図 2.3-17 吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係

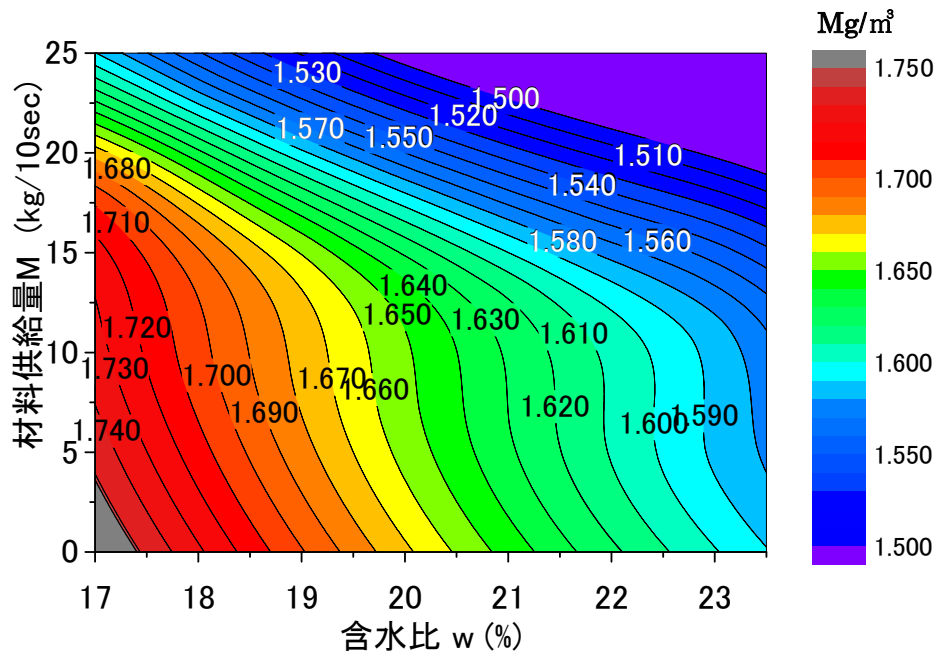


図 2.3-18 混合材料の含水比-供給量-乾燥密度の関係

表 2.3-11 含水比と供給量の採用値

吹付け箇所	含水比	単位供給量
層目	%	kg/10sec
1	20.7	8.9
2	20.0	9.3
3	20.0	9.7
4	20.8	9.8
5	19.4	9.3
6	19.8	9.7
7	20.9	9.8
8	19.9	9.3
9	19.7	9.7
10	20.7	8.9
11	19.7	9.5
12	20.2	8.9
13	19.9	9.3
14	19.7	9.3
15	19.9	9.3
16	19.4	9.7
17	20.3	8.9
18	19.7	9.3
19	19.8	9.3
20	19.4	9.3
21	19.8	9.7
22	20.3	8.9
23	19.8	9.3
24	19.4	9.3
25	18.9	9.3
26	19.9	9.7
27	20.5	8.9
28	20.0	9.3
29	19.6	9.3
30	19.8	9.3
31	19.6	9.3
32	20.3	8.9
33	19.6	9.3
34	19.2	9.3
35	20.0	9.3

b. 過去の試験結果との比較

今年度の結果と H24 の密度一定吹付け（15、16 層目）の結果の比較を図 2.3-19 に示す。両者の乾燥密度の範囲は $1.6 \pm 0.06 \text{Mg/m}^3$ でありばらつきが小さいことから、供給量の調整により密度のばらつきを抑えた施工が可能であることが確認できた。

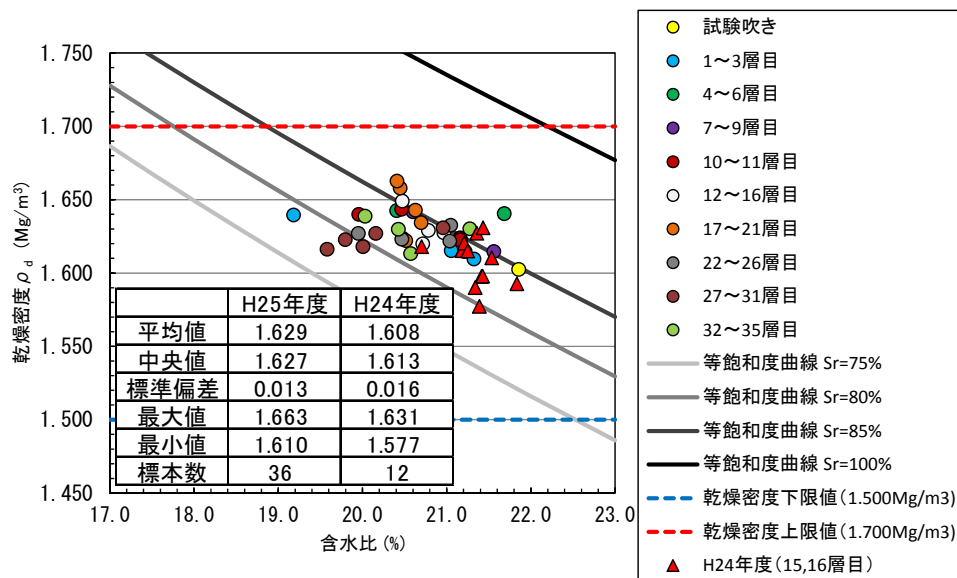
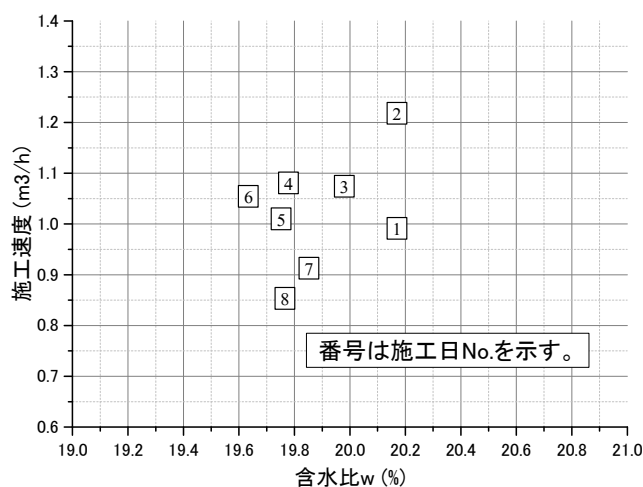


図 2.3-19 含水比-供給量-乾燥密度の関係（H24 年度結果を追記）

(4) 施工速度

吹付け施工日（スロープ部は含まず）毎の含水比と施工速度の関係を図 2.3-20 に示す。施工速度は平均して $1.014 \text{m}^3/\text{h}$ であった。含水比が高くなるほど施工速度が上昇する傾向がみられ、これは含水比が高くなるほど付着力が大きくなるためと考えられる。図 2.3-21 に示すように平均施工速度（ $1.014 \text{m}^3/\text{h}$ ）から厚さ方向の平均施工速度を求めると、 $0.463 \text{m}/\text{h}$ であった。



(1)含水比-施工速度関係

施工日 No.	日付	施工		
		開始層	終了層	層数
1	11/2	1	3	3
2	11/5	4	6	3
3	11/6	7	11	5
4	11/7	12	16	5
5	11/8	17	21	5
6	11/9	22	26	5
7	11/11	27	31	5
8	11/12	32	35	4

(2)施工日 No.の対応

図 2.3-20 含水比-施工速度関係 (吹付け施工日毎)

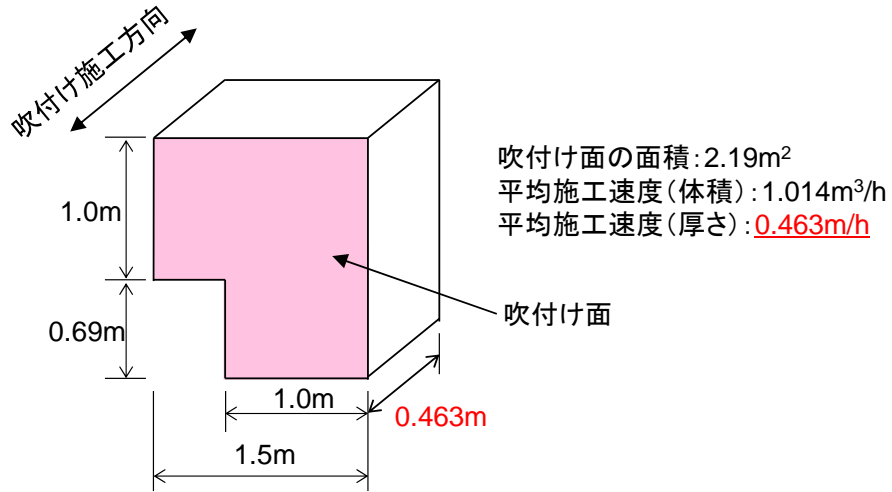


図 2.3-21 厚さ方向の平均施工速度

(5) 出来形管理

本試験の出来形計測は、3D レーザースキャナを用いて実施した。施工体積を施工前後での差から求めた結果、施工体積は 12.8m³であった。含水比をフレッシュ材料含水比（クニミネ工業測定）の平均値と仮定し、施工部の質量をフレッシュ材投入質量と廃棄質量の差として計算すると、乾燥密度は 1.622Mg/m³ であると推定される。これはシリコンオイル法による乾燥密度の測定結果である 1.629Mg/m³ と概ね一致している。

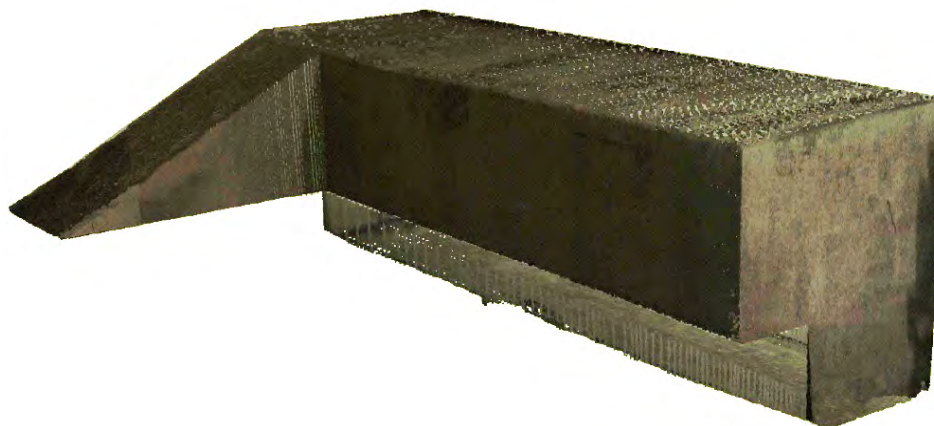


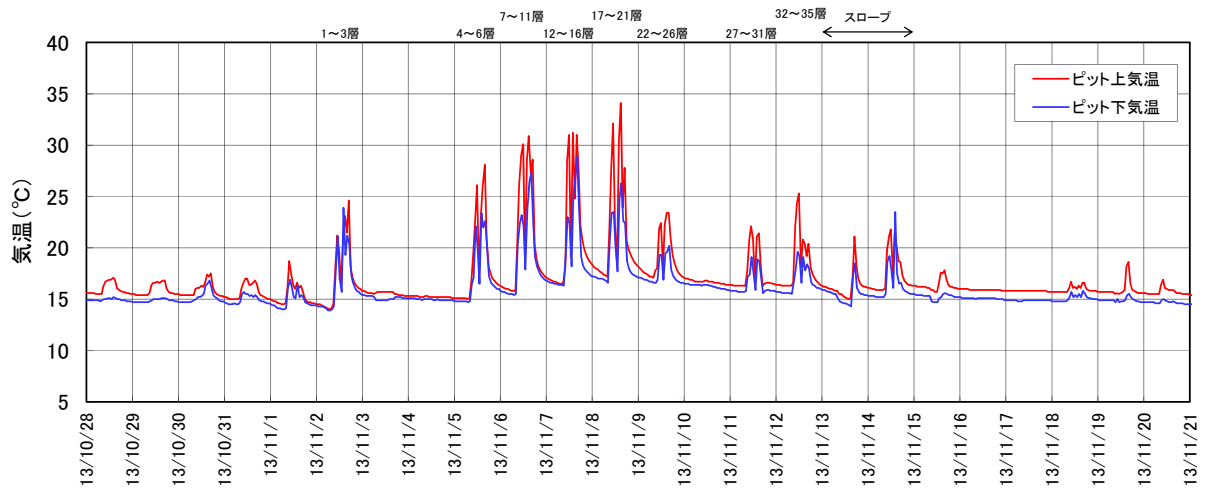
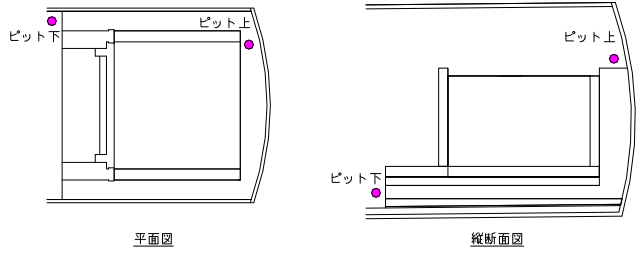
図 2.3-22 3D スキャナ計測データ

(6) 作業環境

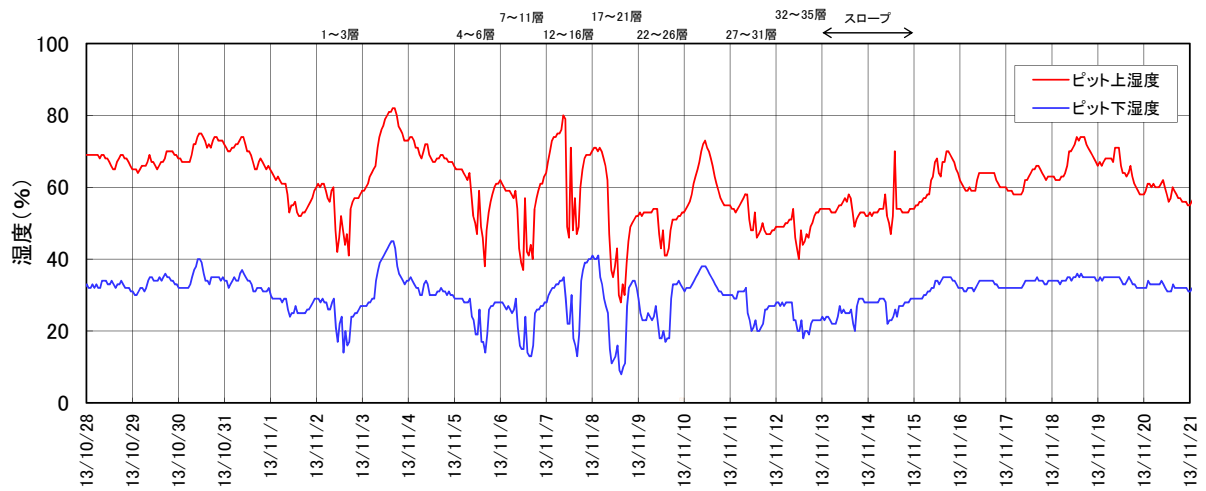
吹付け施工中は、コンプレッサーの圧縮空気により、作業ヤードであるピット上の温度が上昇した。ピット上の左側奥部に設置している分散型温湿度計の計測結果を図 2.3-23 に示す（計測間隔は 1 時間）。比較のため、ピット下の試験施設手前に設置している分散型温湿度計の計測結果も併記する。

温度については、吹付け施工によりピットの上下ともに上昇しており、作業ヤードであるピット上の方がピット下と比較して温度上昇量が大きい。当日の午前 8 時（作業開始前）の気温と、当日の最大温度の差分より、当日の温度上昇量を整理したものを表 2.3-12 に示す。ピット上における最大温度は 34.1℃（11 月 8 日）であり当日の温度上昇量は 16.8℃あった。一方、その日のピット下では、最大温度は 26.3℃であり温度上昇量は 9.5℃あった。なお、11 月 9 日に空洞の風管の向きを変更しており、11 月 9 日以前のピット上の温度上昇量は 10.6～16.8℃であったのに対し、11 月 9 日以降では 5.3～9.0℃となり吹付け施工による温度上昇を抑制することができた。その他に高温作業環境への対策として、風量の調節を実施した。

湿度については、吹付け施工日と施工日以外との大きな差は見られず、常にピット上はピット下に比べて約 30%大きい。



(1)温度



(2)湿度

図 2.3-23 ピット上 (左側奥部) の温湿度計測結果

表 2.3-12 温度上昇量の比較

	ピット上			ピット下			備考
	当日8時	最大値	温度上昇量	当日8時	最大値	温度上昇量	
	℃	℃	℃	℃	℃	℃	
2013/10/28	15.5	17.1	1.6	14.8	15.2	0.4	
2013/10/29	15.4	16.8	1.4	14.7	15.1	0.4	
2013/10/30	15.4	17.5	2.1	14.8	16.8	2.0	
2013/10/31	15.0	17.0	2.0	14.5	15.7	1.2	
2013/11/1	14.5	18.7	4.2	14.0	16.9	2.9	
2013/11/2	14.0	24.6	10.6	13.9	23.9	10.0	1~3層施工
2013/11/3	15.6	15.8	0.2	14.9	15.4	0.5	
2013/11/4	15.2	15.3	0.1	14.9	15.1	0.2	
2013/11/5	15.0	28.1	13.1	14.7	23.4	8.7	4~6層施工
2013/11/6	15.8	30.9	15.1	15.4	27.3	11.9	7~11層施工
2013/11/7	16.5	31.2	14.7	16.4	28.9	12.5	12~16層施工
2013/11/8	17.3	34.1	16.8	16.8	26.3	9.5	17~21層施工
2013/11/9	17.2	23.4	6.2	16.7	20.2	3.5	22~26層施工、風管位置変更
2013/11/10	16.7	17.0	0.3	16.4	16.5	0.1	
2013/11/11	16.3	22.1	5.8	15.7	19.1	3.4	27~31層施工
2013/11/12	16.3	25.3	9.0	15.6	19.6	4.0	32~35層施工
2013/11/13	15.8	21.1	5.3	15.5	18.5	3.0	スロープ施工
2013/11/14	15.9	21.8	5.9	15.2	23.5	8.3	スロープ施工
2013/11/15	16.1	17.8	1.7	15.3	15.6	0.3	
2013/11/16	15.9	16.0	0.1	15.1	15.2	0.1	
2013/11/17	15.8	15.8	0.0	14.8	14.9	0.1	
2013/11/18	15.7	16.7	1.0	14.8	15.8	1.0	
2013/11/19	15.7	18.6	2.9	14.9	15.5	0.6	
2013/11/20	15.5	16.9	1.4	14.6	15.0	0.4	

2.3.3 歩掛りに関する評価

(1) サイクルタイム

施工1層（各層約 $2.19\text{m}^2 \times 0.15\text{m} = 0.33\text{m}^3$ ）当たりのサイクルタイムを図2.3-24に示す。なお、図中に示す各作業時間は、吹付け全35層中33層の各作業時間を平均したもので、ハンドコアドリルによる供試体採取を11点実施した18、35層目の作業時間は除いている。

リバウンド材回収作業に関して、前述の通りリバウンド率が予想以上であったため、リバウンド材回収に、吸引回収が25分、スcoopによる回収が10分、合計で35分要していた。

フレッシュ材投入作業に関して、作業ヤードの高さが制限されていることから、フレッシュ材を入れたフレコンの投入作業時の揚重高さを抑えるため、昨年度まで使用していた約500kg/袋のものから、今年度は約300kg/袋のものに変更している。そのため揚重する袋数が増加している。今年度は各層約900kgのフレッシュ材料を投入しているため、1層につき平均して3袋のフレコンを投入する必要がある。また、フレコン底の口と、乾燥防止用の内袋の開袋に手間取ったことから、フレッシュ材料の投入に1層につき約30分を要した。

今年度試験の品質確認試験を除いた施工サイクル（吹付け、フレッシュ材投入、準備、リバウンド材回収）の1層当たりの施工時間は35分であり、施工速度としては $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ となり昨年度実施したロボット吹付けの施工速度 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ より僅かに速い結果となった。これは、昨年度実施したリバウンド材の含水比測定を、今年度は実施しないで施工する方法をとったためであると考えられる。なお、昨年度の施工試験における施工サイクル（吹付け工、ロボット移動、リバウンド材収納、フレッシュ材投入、リバウンド材投入、リバウンド材重量測定、リバウンド材含水比測定）での1段当たり（施工体積は 0.1m^3 ）の施工時間は11分であった。また、吹付け時間のみで考えた場合は、今年度の人力による吹付けのみの施工速度は $1.0\text{ m}^3/\text{h}$ で、昨年度のロボットによる吹付けのみの施工速度（ $1.8\text{ m}^3/\text{h}$ ）より大幅に低下した。これは、リバウンド率が昨年度（28.5%）より高く（37.8%）、実吹付け量が増加したためと考えられる。

サイクルタイムの短縮のためには、リバウンド材回収に関しては施工形状の検討や吸引回収機の性能・容量の検討が必要であると考えられる。また、フレッシュ材投入作業に関しては、フレコンの構造や材料投入方法の見直しによって改善可能であると考えられる。

経過時間 (min)		20	25	30	35	40	45
作業項目 (時間: min)	材料投入・吹付け	吹付け、フレッシュ材投入 (20)		フレッシュ材投入、準備 (10)			
	リバウンド材回収	リバウンド材吸引回収 (25)			リバウンド材スcoop回収 (10)		
	品質確認試験	含水比・密度試験 (20)					試料採取 (初期性能・シッコイ法) (15)

- 実施工において不可欠な工程
- 改善が見込める工程
- 施工試験のための工程

図 2.3-24 施工1層当たりのサイクルタイム

(2) 集塵機配置による改良

H24年度までは、図 2.3-25 に示すようにターボファン付き集塵機から落下したリバウンド材はフレコンで受けていたため、リバウンド材料再利用時には揚重作業が必要であったが、H25年度は「2.3.2 (2) 1) リバウンド材吸引回収」で述べたように、ターボファン付き集塵機とリバウンド材料供給機とを上下に配置することにより、リバウンド材は吸引回収された後、連続して供給されるため、揚重作業が低減された。一方、作業ヤードの高さ制限の関係から、供給機ホッパーの容量は H24 年度までより減少し、吹付け施工中回収したリバウンド材の量が供給機のホッパー容量を超えることがあり、その際には吸引回収作業を一時中断する必要があったほか、吸引回収のためのエアバルブを操作する作業が発生した。

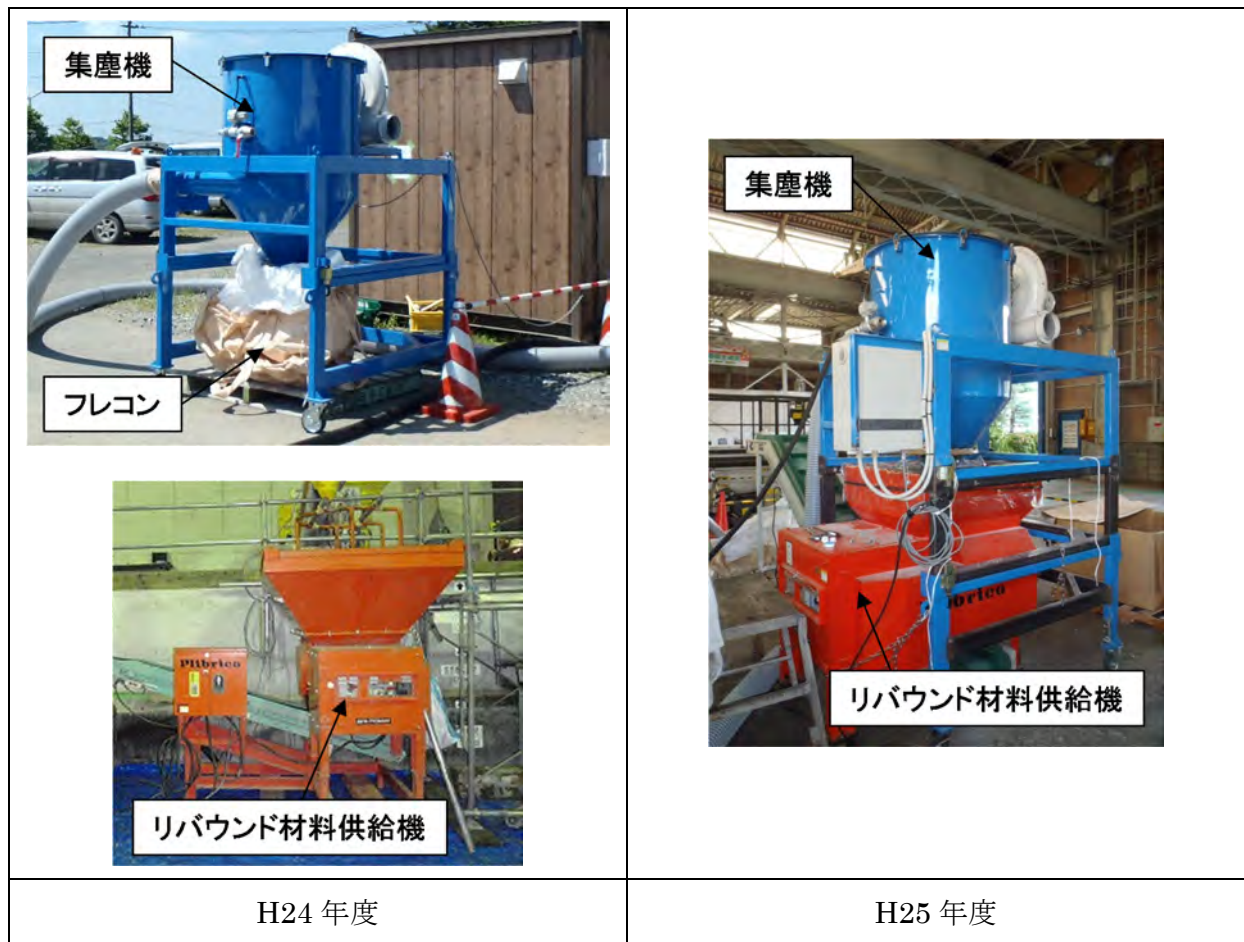


図 2.3-25 集塵機の配置

2.3.4 施工確認試験の総合評価

本年度の上部緩衝材隅角部施工確認試験では、昨年度までの吹付け施工による検討で確立した施工技術および施工機械を用いて、人力による吹付け施工を実施した。

以下に、前述の 2.3.1 ～2.3.3 をまとめることにより、上部緩衝材隅角部施工確認試験に関する分析評価のまとめを述べる。

(1) 課題への対応と試験結果

平成 24 年度の課題に対して今年度実施した対応策を表 2.3-13 に示す。

表 2.3-13 平成 24 年度吹付け工法での課題と今年度実施した対応策

分類	NO.	平成 24 年度課題	今年度対応策
施工	①	リバウンド材回収過程での加水調整・再利用	今年度はリバウンド材の加水調整は実施せず、フレッシュ材とリバウンド材を混合した後の含水比と、混合材料の吹付け供給量を調整して仕上がりの品質を確保した。
	②	材料の長距離搬送への対応	緩衝材の長距離搬送試験（空気圧送試験）を実施し、材料の品質、施工効率への影響を検討した。
品質	③	吹付け工法による施工データの蓄積	混合材料の含水比と吹付け供給量の関係について施工データを蓄積した。

各課題とその対応および試験結果を以下に記述した。

課題① リバウンド材回収過程での加水調整・再利用

今年度はリバウンド材の加水調整は実施せず、平成 24 年度の「密度一定吹付け」と同様に、フレッシュ材とリバウンド材の混合材料の吹付け供給量を調整して施工を行った。

H24 年度の実績から作成した「図 2.3-17 吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係」からフレッシュ材とリバウンド材の混合材料の含水比を求め、また「図 2.3-19 含水比-供給量-乾燥密度の関係（H24 年度結果を追記）」から混合材料の吹付け供給量を設定することにより仕上がりの乾燥密度を管理した。

課題② 材料の長距離搬送への対応

「第 3 章 上部緩衝材施工確認試験（平面部：振動工法）」の「3.3.2(6) 空気圧送試験」にて記載した。

課題③ 吹付け工法による施工データの蓄積

混合材料の吹付け供給量を調整した施工データを蓄積することにより、本施工方法の信頼性を向上させた。

(2) 施工性

施工速度や廃棄率等の施工性、試験実績に基づくサイクルタイムについて評価を行った。

1) 施工性に影響を与える因子

施工性に影響を与える因子となるリバウンド率、リバウンド材再利用に伴う含水比低下、団粒化、作業ヤードの制限、施工形状に関する試験結果を表 2.3-14 に示す。

表 2.3-14 施工性に影響を与える因子

影響因子	試験結果
リバウンド率	<p>今年度リバウンド率は 37.8%と既往試験結果と比較して高い値となった。原因として以下が挙げられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 人力施工ではノズルを吹付け面に垂直に当てるのが難しい箇所があったため（図 2.3-9、図 2.3-10 参照）。 ・ 今年度の施工形状が、型枠・壁際の隅角部が多い形状であったため。 ・ リバウンド材が供給機のホッパー容量をオーバーした際に、ターボファン付き集塵機内で空気に曝されることでリバウンド材が過度に乾燥し、含水比が低くなり付着力が小さくなったため。
リバウンド材の含水比低下	<p>リバウンド材の再利用に伴って含水比は低下する。含水比が低下すると付着力が小さくなり、リバウンド率が大きくなる。そこで今年度は H24 年度に改良した吸引回収方式を採用して、含水比の低下を抑制した。</p>
リバウンド材の団粒化	<p>今年度は、H24 年度に改良した改良型湿潤材料定量供給機（表 2.3-7）を用いることで、団粒化を抑えノズルの閉塞は全く発生することがなかった。</p>
作業ヤードの制限	<p>ターボファン付き集塵機とリバウンド材料供給機とを上下に配置することにより、H24 年度までのリバウンド材の揚重作業が低減された。一方、作業ヤードの高さ制限の関係から、供給機ホッパーの容量は H24 年度までより減少し、吹付け施工中回収したリバウンド材の量が供給機のホッパー容量を超えることがあり、吸引回収作業を一時中断することとなった。</p>

2) 施工速度

今年度は、昨年度までの試験により、リバウンド材の含水比低下量を把握できたことから、昨年度まで実施したリバウンド材の含水比測定を省略したことにより、1 施工サイクル当りの施工速度は、0.1 m³/h 程度上昇できた。ただし、単純に吹付けのみを比較場合には、今年度の吹付けの施工速度は 1.0m³/h であり、既往試験結果（H23 年度：1.4 m³/h、H24 年度：1.8 m³/h）と比較して低下した。この原因として、今年度の施工ではリバウンド率が高く、実吹付け量が増加したことが挙げられる。

3) 材料廃棄率

今年度の材料廃棄率は 22.4%であり、H24 年度試験結果の 6.8%と比較して増加した。この原因として、今年度の施工ではリバウンド率が高かったことと、供給機のホッパー容量を超えたリバウンド材は再利用せずに廃棄となったことが挙げられる。

(3) 品質

1) シリコンオイル法による品質管理の適用性

現地にて乾燥密度を速報的に確認するために、シリコンオイル法および電子レンジ法の適用性について検討した結果、両者とも同等の試験であるノギス法および炉乾燥法による試験結果と差があるものの十分な精度を有していることを確認した。吹付け工法は凸状供試体を容易に作成できること、および現地における密度計測の簡便性や迅速性を鑑みて、シリコンオイル法および電子レンジ法による密度計測は実施工における品質管理方法として有効な手法であると考えられる。

2) 含水比と材料供給量の制御

今年度は、平成 24 年度の「密度一定吹付け」と同様に、フレッシュ材とリバウンド材の混合材料の吹付け供給量を調整して施工を行った。

今年度は、H24 年度の実績から作成した「図 2.3-17 吹付け回数とリバウンド材の含水比の関係」から 1 回の吸引回収毎に含水比が 0.4%低下するものと予測して、フレッシュ材との混合材料の含水比計算を行い、実施工に合わせた施工管理を実施した。

3) 仕上がり密度

今年度は、平成 24 年度の「密度一定吹付け」と同様に、乾燥密度のばらつきが小さい結果が得られ、吹付け供給量調整による密度管理を実現した。

(4) サイクルタイム

今年度は吹付け施工の合理化のため、以下のことを実施し、サイクルタイムの短縮に寄与することを確認した。

- ・ ターボファン付き集塵機とリバウンド材料供給機とを上下に配置することにより、既往試験におけるリバウンド材を入れたフレコンの揚重作業に係る時間を低減した。
- ・ 現地にて乾燥密度を速報的に確認するために、シリコンオイル法による試験を実施した。

しかし、フレッシュ材投入およびリバウンド材回収作業において、予想以上に時間がかかることが確認された。サイクルタイムの短縮のためには、フレッシュ材投入作業に関してはフレコンの構造や材料投入方法の見直し、リバウンド材回収に関しては施工形状の検討や吸引回収機の性能・容量の検討が必要であると考えられる。

(5) ベントナイト材料特性

平成 21 年度の施工確認試験以降、材料特性データが蓄積されてきており、ここでは、これまでのデータを集約し、特性値の変動やばらつきの傾向について考察した。平成 21 年度、23 年度～25 年度の吹付け工法による施工確認試験での材料特性データを集約した粒径加積曲線を図 2.3-3 に示す。過年度の粒度分布は表 2.3-2 の管理基準値の範囲内に分布しており、管理値の範囲内であることを確認できた。

2.3.5 施工確認試験の課題の抽出

(1) 作業ヤードの制限による対策

リバウンド材吸引回収機（集塵機、リバウンド材料供給機）の性能向上、容量アップの検討が望まれる。

上部緩衝材の施工では、作業ヤードの制限により、施工機械や資機材の配置に影響が出る。今年度は、リバウンド材料の揚重作業低減のために、集塵機とリバウンド材料供給機とを上下に配置した。しかし作業ヤードの高さ制限の関係から、供給機ホッパーの容量は H24 年度までより減少し、そのため吹付け施工中回収したリバウンド材の量が供給機のホッパー容量を超えることがあった。容量を超過したリバウンド材は再利用せずに廃棄したため、廃棄量増加の原因にもなった。

(2) リバウンド率を低下させる吹付け方法の検討

リバウンド率を低下させるために、人力施工による吹付け技術の向上および吹付け施工形状の検討が望まれる。

今年度の上部緩衝材隅角部の施工形状では、人力施工によって緩衝材を吹付け面に対して垂直に吹付けることが困難であったこと、また型枠・壁際の隅角部が多い形状であったことより予想以上にリバウンド率が高くなった。

(3) 廃棄量の低減

廃棄量を低減させる方法の検討が望まれる。

既往試験および今年度試験において、当日の作業終了時に発生したリバウンド材は、翌日になると含水比の低下が大きく、再利用が困難であることから、当日の作業終了時点でのリバウンド材は廃棄とした。翌日もリバウンド材を再利用できるような保管方法の検討が望まれる。

(4) 飽和度低下による影響検討

リバウンド材を再利用しながら吹付けを行う場合、材料供給量を一定とすると、吹付け回数を重ねて吹付け材料が乾燥する（含水比が低下する）のに伴い、乾燥密度は等飽和度曲線に沿って上昇するが、今年度の吹付けにおいては、仕上がりの乾燥密度がほぼ一定となるように、材料の含水比の変化に応じて材料供給量を調整した。この場合、乾燥密度は一定だが含水比が低下するため、飽和度が低下することになる。よって、吹付け施工における飽和度が緩衝材の品質に与える影響検討が望まれる。

(5) 作業環境のデータ蓄積

作業環境の改善を図るため、吹付け施工中の環境データの蓄積を行うことが望まれる。データとしては、作業ヤードおよび吹付け場所の温度、湿度、粉塵量、また空洞風管の風量、向きが挙げられる。

2.4 初期性能確認試験結果の評価

2.4.1 建設・作業時の安全確保性能に関する評価

(1) 密度（コア）

ハンドコアドリルを用いて供試体を採取し、乾燥密度の測定をノギス法により実施した。供試体は各層にて採取した。また、18、35層目（中間層と最終層）では各々10点から供試体を採取しており、吹付け施工面内での密度の分布状況を確認した。

1) H25年度の結果

a. 各層の乾燥密度測定結果

1～35層の各層で測定した乾燥密度試験結果を表 2.4-1 に、その統計データを表 2.4-2 に示す。また、乾燥密度のヒストグラムを図 2.4-1 に、含水比との関係を図 2.4-2 に示す。乾燥密度は全体として $1.542\sim 1.617\text{Mg/m}^3$ の範囲であり、管理基準値である $1.6\pm 0.1\text{Mg/m}^3$ の範囲内の結果であった。また表 2.4-2 に示すように、標準偏差は平成 24 年度が 0.035 であったのと比較して、今年度は 0.018 と、乾燥密度のばらつきが小さいことがわかる。

なお、ノギス法とシリコンオイル法（施工確認試験）の乾燥密度結果の比較は「2.3.2 (3) 1) a. シリコンオイル法とノギス法による乾燥密度測定結果の比較」で述べる。

表 2.4-1 乾燥密度測定結果 (各層)

測定位置	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
1層目	20.6	1.912	1.585
2層目	20.4	1.906	1.583
3層目	19.6	1.909	1.596
4層目	20.2	1.937	1.611
5層目	19.8	1.933	1.614
6層目	19.7	1.928	1.611
7層目	20.7	1.929	1.598
8層目	19.7	1.869	1.561
9層目	20.1	1.918	1.597
10層目	20.1	1.872	1.559
11層目	19.7	1.913	1.598
12層目	20.4	1.938	1.610
13層目	19.7	1.895	1.583
14層目	20.0	1.886	1.572
15層目	19.6	1.844	1.542
16層目	19.4	1.931	1.617
17層目	19.9	1.922	1.603
18層目	19.8	1.919	1.602
19層目	19.5	1.914	1.602
20層目	19.5	1.902	1.592
21層目	19.8	1.905	1.590
22層目	20.2	1.924	1.601
23層目	19.5	1.894	1.585
24層目	19.3	1.862	1.561
25層目	19.5	1.915	1.603
26層目	19.9	1.904	1.588
27層目	20.6	1.927	1.598
28層目	19.7	1.906	1.592
29層目	19.5	1.892	1.583
30層目	19.6	1.883	1.574
31層目	19.0	1.875	1.576
32層目	20.5	1.909	1.584
33層目	19.6	1.858	1.554
34層目	19.6	1.921	1.606
35層目	19.6	1.872	1.565
平均値	19.8	1.904	1.588

表 2.4-2 乾燥密度統計データ (各層)

		H25年度	H24年度
平均値	Mg/m ³	1.588	1.612
中央値	Mg/m ³	1.592	1.615
標準偏差	-	0.018	0.035
最大値	Mg/m ³	1.617	1.683
最小値	Mg/m ³	1.542	1.524
標本数	体	35	51

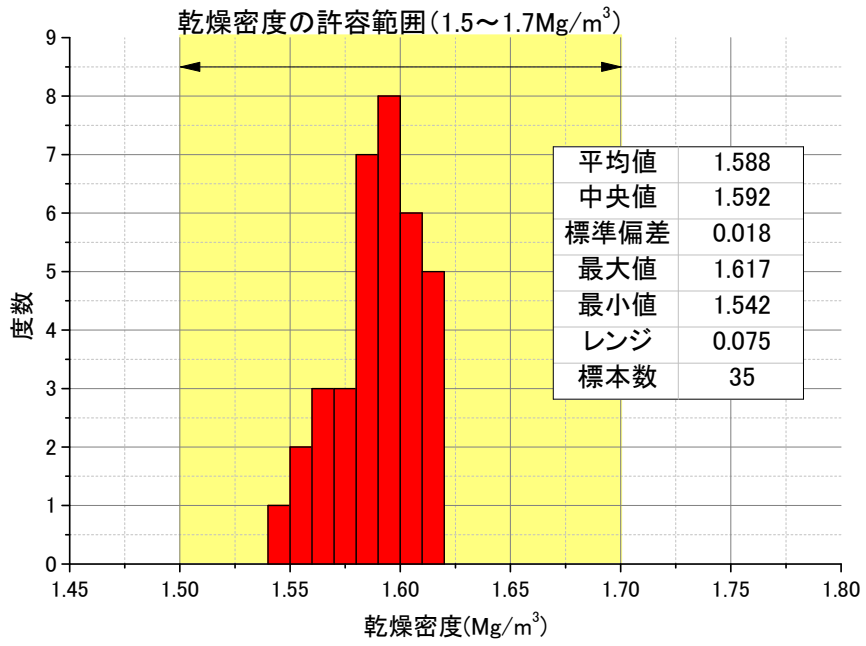


図 2.4-1 乾燥密度のヒストグラム (各層)

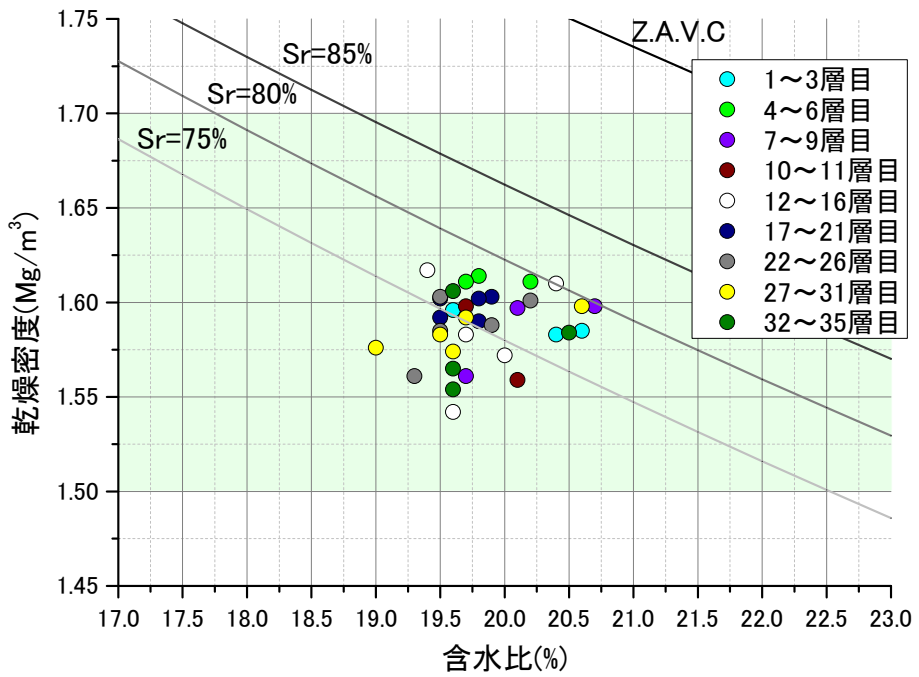


図 2.4-2 含水比-乾燥密度関係 (各層)

b. 施工部平面内での乾燥密度測定結果

18、35層目では、同一層内での密度の分布を確認するため、同一層内から10点のサンプリングを実施した。サンプリングの概略位置を図2.4-3に示す。

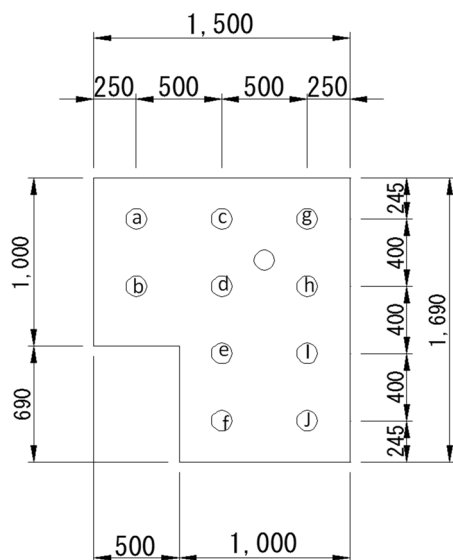


図 2.4-3 供試体採取概略位置断面図

18、35層目にて測定した乾燥密度試験結果とその統計データを表2.4-3～表2.4-6に示す。また、乾燥密度のヒストグラムを図2.4-4に、含水比との関係を図2.4-5に示す。

乾燥密度は全体として18層目で $1.594\sim 1.621\text{Mg/m}^3$ 、35層目で $1.556\sim 1.615\text{Mg/m}^3$ の範囲であり、管理基準値である $1.6\pm 0.1\text{Mg/m}^3$ の範囲内の結果であった。また、標準偏差は18層目が0.009、35層目で0.018であり、乾燥密度のばらつきが小さいことがわかる。なお、平均の乾燥密度は18層目が 1.609Mg/m^3 、35層目が 1.573Mg/m^3 と、18層目の乾燥密度の方が高い値を示している。施工条件に関して、35層目は最終層であるため、出来形の寸法を確認しながら数回に分けて吹付けを行っており、施工が断続的であったことが影響していると考えられる。また、材料供給量は両層とも同条件での施工であったが、吹付け材料（フレッシュ材とリバウンド材の混合）の含水比は18層目が19.7%であるのに対し、35層目は20.0%と若干高く、そのため含水比の低い18層目の方が若干高い乾燥密度となったとも推測される。

表 2.4-3 乾燥密度測定結果 (18 層目)

測定位置	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
a	20.0	1.918	1.598
b	19.8	1.934	1.614
c	19.8	1.929	1.610
d	19.9	1.931	1.611
e	19.7	1.908	1.594
f	20.0	1.936	1.613
g	19.9	1.920	1.601
h	19.7	1.940	1.621
i	20.0	1.929	1.608
j	20.0	1.942	1.618
平均値	19.9	1.929	1.609

表 2.4-4 乾燥密度統計データ (18 層目)

平均値	1.609
中央値	1.611
標準偏差	0.009
最大値	1.621
最小値	1.594
標本数	10

表 2.4-5 乾燥密度測定結果 (35 層目)

測定位置	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m ³)	乾燥密度 (Mg/m ³)
a	19.8	1.882	1.571
b	19.5	1.869	1.564
c	19.8	1.904	1.589
d	19.7	1.863	1.556
e	19.8	1.875	1.565
f	19.7	1.933	1.615
g	19.7	1.881	1.571
h	19.8	1.864	1.556
i	19.7	1.869	1.561
j	19.6	1.886	1.577
平均値	19.7	1.883	1.573

表 2.4-6 乾燥密度統計データ (35 層目)

平均値	1.573
中央値	1.568
標準偏差	0.018
最大値	1.615
最小値	1.556
標本数	10

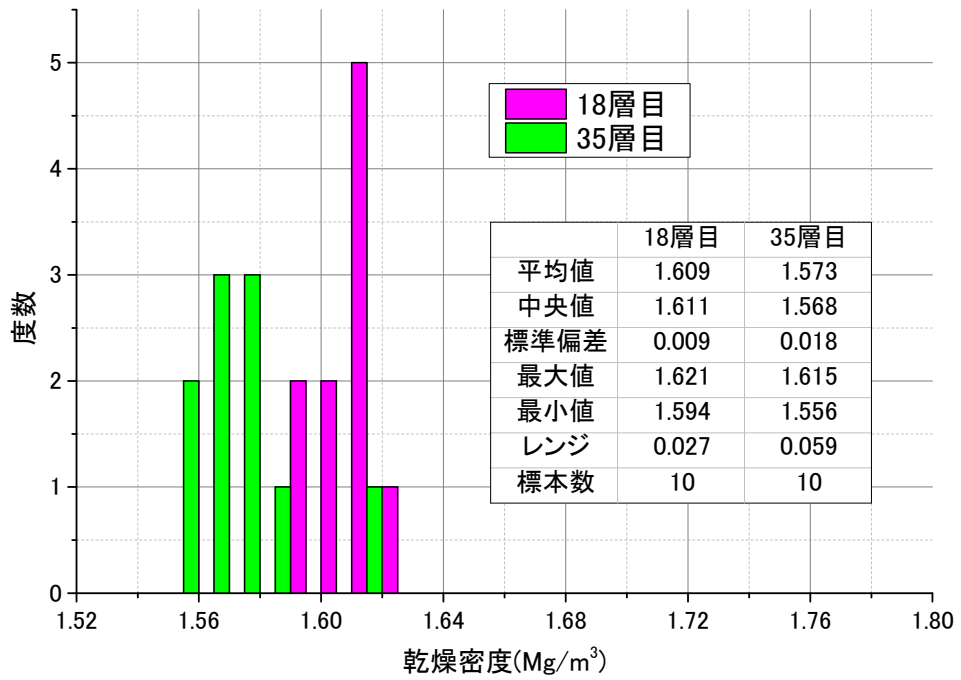
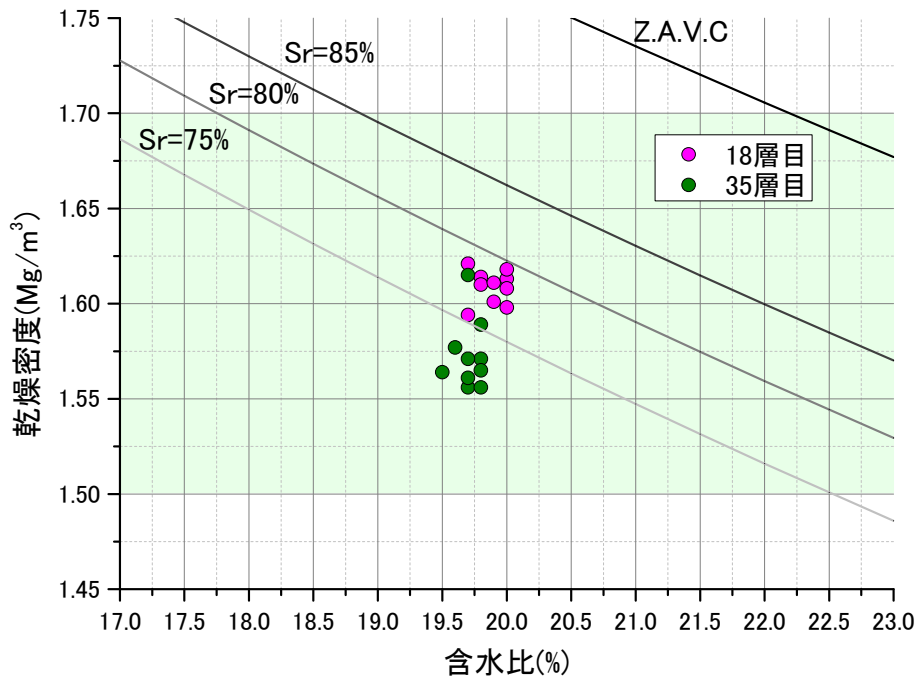


図 2.4-4 乾燥密度のヒストグラム (施工部平面内)



図

2.4-5 含水比・乾燥密度関係 (施工部平面内)

(2) 一軸圧縮試験、変形係数

今年度の一軸圧縮試験の応力-ひずみ関係を図 2.4-6、既往の試験結果との比較を表 2.4-7 に示す。一軸圧縮強さ q_u は、平均で 551kN/m^2 、変形特性の指標となる E_{50} は平均で 34.4MN/m^2 であった。

ここで、 q_u および E_{50} について乾燥密度で整理すると、それぞれ図 2.4-7、図 2.4-8 のようになる。なお図中には、平成 23、24 年度施工箇所の試験結果も示している。図より、一軸圧縮強度および変形係数は施工方法によらず乾燥密度に対して線形の関係にあることがわかる。平成 21 年度の試験は、水平に吹付けた緩衝材に対し、ボーリングコアを鉛直下向きに採取して試験を実施している。試験結果から、吹付け工法は、品質的に異方性が無い緩衝材が施工可能であると言える。また、平成 23 年度は下向きの吹付け施工を実施している。試験結果から、吹付け工法は、任意の方向での施工が可能であると言える。

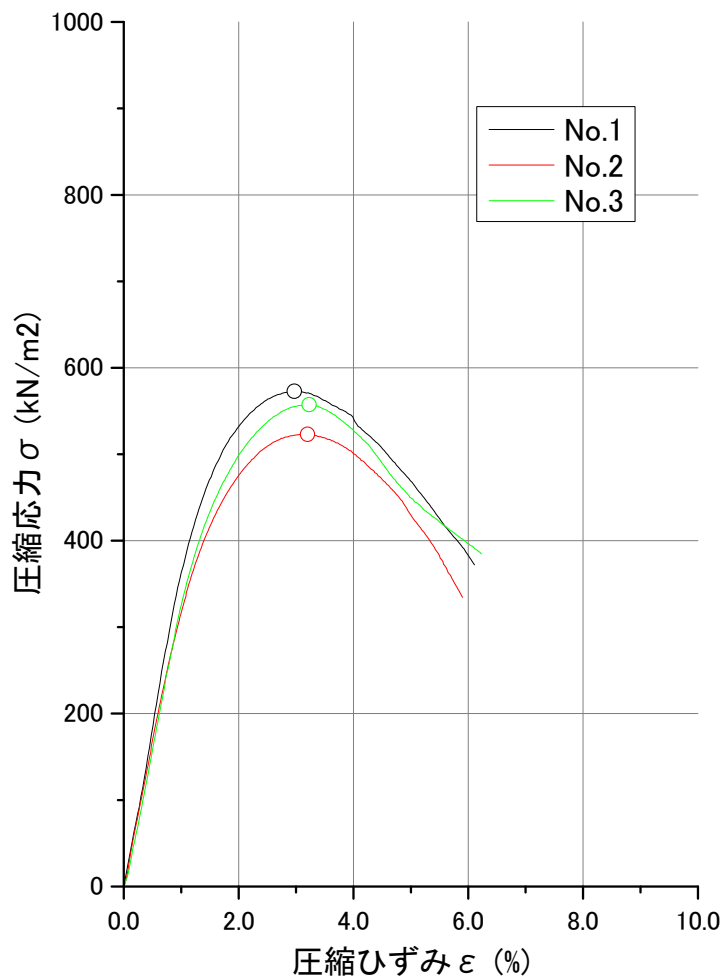


図 2.4-6 応力-ひずみ関係（一軸圧縮試験）

表 2.4-7 一軸圧縮試験結果一覧

試験名	試料 No.	$e_f(\%)$	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)	E_{50} (MN/m^2)	q_u (kN/m^2)	E_{50} 平均値 (MN/m^2)	q_u 平均値 (kN/m^2)
H25年度 水平吹付け (人力)	1	2.97	18.8	1.595	37.3	573	34.4	551
	2	3.20	19.7	1.591	33.0	523		
	3	3.23	19.4	1.583	32.8	557		
H24年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	2.85	19.1	1.605	52.0	650	53.7	644
	上段-2	3.17	19.1	1.603	53.3	583		
	上段-3	3.87	19.7	1.621	55.9	698		
	下段-1	3.78	19.3	1.634	45.9	683	48.2	642
	下段-2	4.07	20.0	1.641	50.4	642		
	下段-3	3.93	19.9	1.636	48.4	600		
H23年度 下向き吹付け (ロボット)	1	3.01	17.9	1.656	64.5	844	61.5	875
	2	3.14	19.2	1.656	63.3	838		
	3	4.00	18.7	1.676	56.8	942		
H23年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	4.49	18.8	1.689	73.5	1080	74.2	976
	上段-2	3.35	18.2	1.706	83.5	924		
	上段-3	3.53	18.2	1.689	65.5	925		
	下段-1	3.85	18.3	1.686	80.0	948	76.6	916
	下段-2	2.85	17.9	1.694	73.4	885		
	下段-3	4.20	18.2	1.693	76.3	914		
H21年度 水平吹付け (人力)	B1-1	3.32	17.4	1.710	75.9	1213	86.1	1153
	B1-2	3.33	17.9	1.707	91.0	1155		
	B1-3	3.16	18.0	1.697	91.3	1091		
	B3-1	3.36	17.4	1.703	88.8	1206	80.4	1000
	B3-2	2.65	18.4	1.678	81.8	959		
	B3-3	2.94	19.2	1.657	70.6	834		

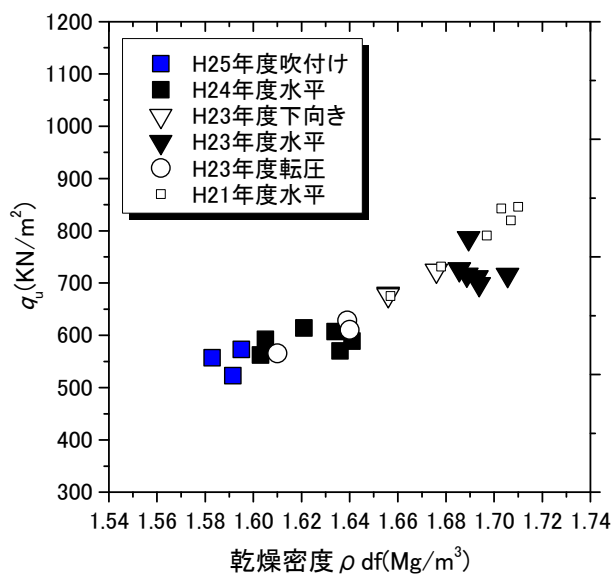


図 2.4-7 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

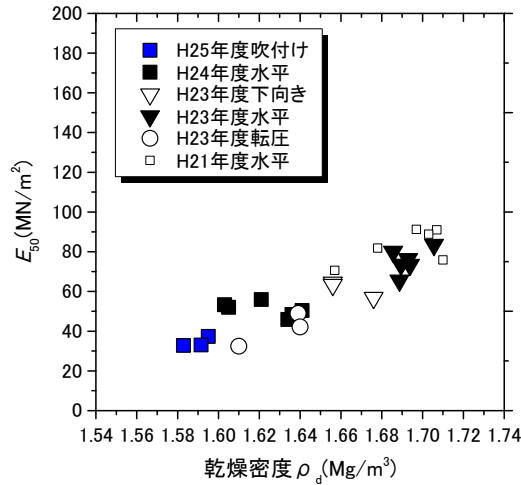


図 2.4-8 変形係数と乾燥密度の関係

(3) 三軸圧縮試験

今年度の三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係を図 2.4-9、既往の試験結果との比較を表 2.4-8 に示す。またモールの応力円を図 2.4-10、拘束圧と変形係数の関係を図 2.4-11 に示す。

図 2.4-9 および図 2.4-11 より、側圧の増加 (No.1:1.0MPa、No.2:2.5MPa、No.3:4.0MPa) と共に主応力差の最大値および E_{50} が増加する傾向を示す。一般に、飽和した粘性土では、非圧密非排水せん断で得られるせん断抵抗角 (ϕ_{uu}) はほぼ 0 と言われている。しかし、試料が不飽和の場合には、側圧の増加に伴い供試体内部の空隙が圧縮することで有効応力が増加し、結果として強度増加する場合がある。三軸圧縮試験に使用した供試体の飽和度は、土粒子の密度 (σ_s) をクニゲル GX の既往の知見[1]から 2.65Mg/m^3 と仮定すると、約 73%であることから、本試験で得られた ϕ_{uu} は、試料が不飽和であることに起因するものと考えられる。

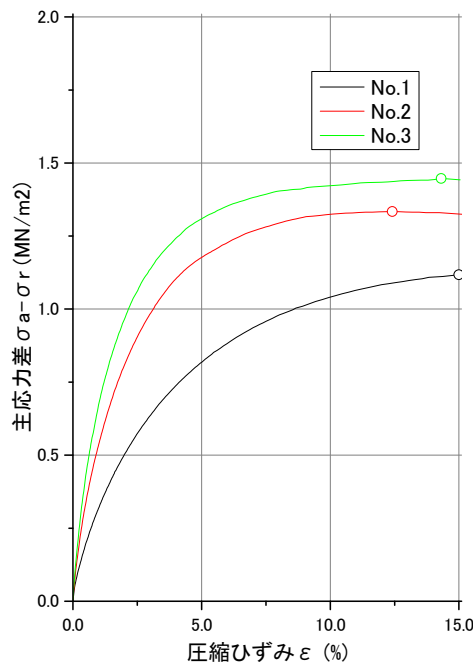


図 2.4-9 応力-ひずみ関係 (三軸圧縮試験)

表 2.4-8 三軸圧縮試験 (UU) 結果一覧

試験名	試料No.	側圧 (Mpa)	手応力差最大時		E50 (Mpa)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	せん断抵抗角 ϕ_{uu} (°)	みかけの粘着力 c_{uu} (Mpa)
			主応力差 (oa-or) (kPa)	軸ひずみ er (%)						
H25年度 人力	1	1.0	1120	15.0	23.4	19.3	1.592	73.7	2.99	0.49
	2	2.5	1330	12.4	47.2	19.4	1.581	72.9		
	3	4.0	1450	14.3	64.5	19.3	1.581	72.5		
H24年度 ロボット	1	1.0	800	15.0	19.1	19.6	1.624	78.6	2.47	0.34
	2	2.5	930	12.6	36.6	19.9	1.602	77.2		
	3	4.0	1070	9.3	56.9	19.8	1.598	76.3		
	1	1.0	810	15.0	19.5	19.8	1.602	76.8	5.61	0.27
	2	2.5	1160	11.1	45.0	19.4	1.620	77.3		
	3	4.0	1460	12.7	49.8	19.5	1.649	81.2		
H23年度 ロボット (下向き)	1	1.0	1270	15.0	31.9	18.8	1.637	76.9	6.24	0.47
	2	2.5	1730	15.0	37.6	18.4	1.554	66.4		
	3	4.0	2000	15.0	64.9	17.7	1.552	63.7		
H23年度 ロボット (水平)	1	1.0	1330	15.0	42.7	18.1	1.699	81.4	1.86	0.62
	2	2.5	1490	14.1	55.6	17.9	1.717	82.8		
	3	4.0	1530	15.0	69.3	18.1	1.715	83.5		
	1	1.0	1260	15.0	41.2	18.5	1.687	81.7	1.67	0.59
	2	2.5	1400	15.0	52.2	18.1	1.698	81.3		
	3	4.0	1440	15.0	69.4	18.5	1.691	82.2		
H21年度 人力	B2-1	1.0	1320	14.0	57.4	19.1	1.694	85.3	3.50	0.56
	B2-2	2.5	1540	15.0	54.1	18.8	1.698	84.4		
	B2-3	4.0	1710	9.3	78.3	18.6	1.700	83.8		
	B3-1	1.0	1230	14.0	39.6	19.5	1.667	83.5	3.77	0.53
	B3-2	2.5	1540	12.6	57.5	18.8	1.657	79.3		
	B3-3	4.0	1650	12.0	85.6	18.9	1.684	83.1		

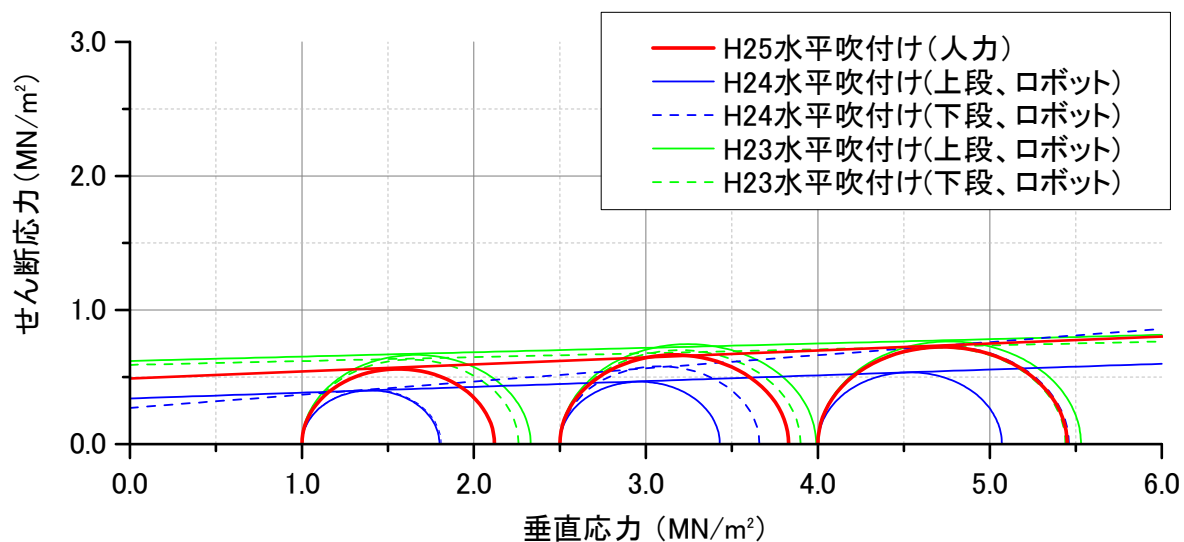


図 2.4-10 モールの応力円

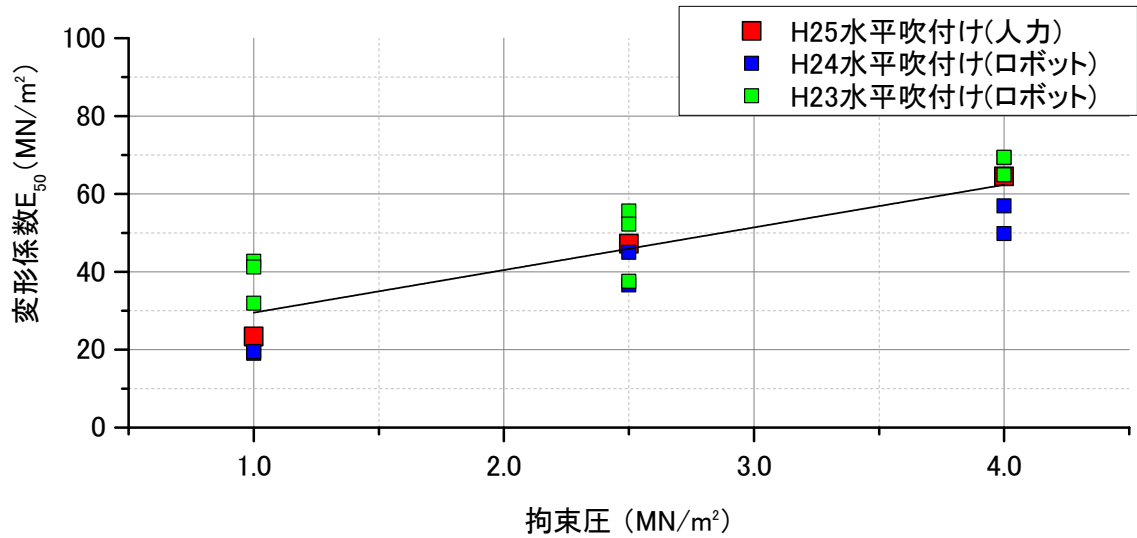


図 2.4-11 拘束圧と変形係数の関係

2.4.2 止水性能に関する評価

(1) 透水係数

今年度の透水係数と有効粘土乾燥密度の関係を図 2.4-12、透水試験結果一覧表を表 2.4-9 に示す。なお、表 2.4-9 には比較のため既往試験結果を併せて示す。既往試験結果との比較分析は「2.4.4 初期性能確認試験の総合評価」で述べる。今年度得られた透水係数は緩衝材に要求される止水性能「透水係数 $5 \times 10^{-13}(\text{m/s})$ 以下」を満足している。

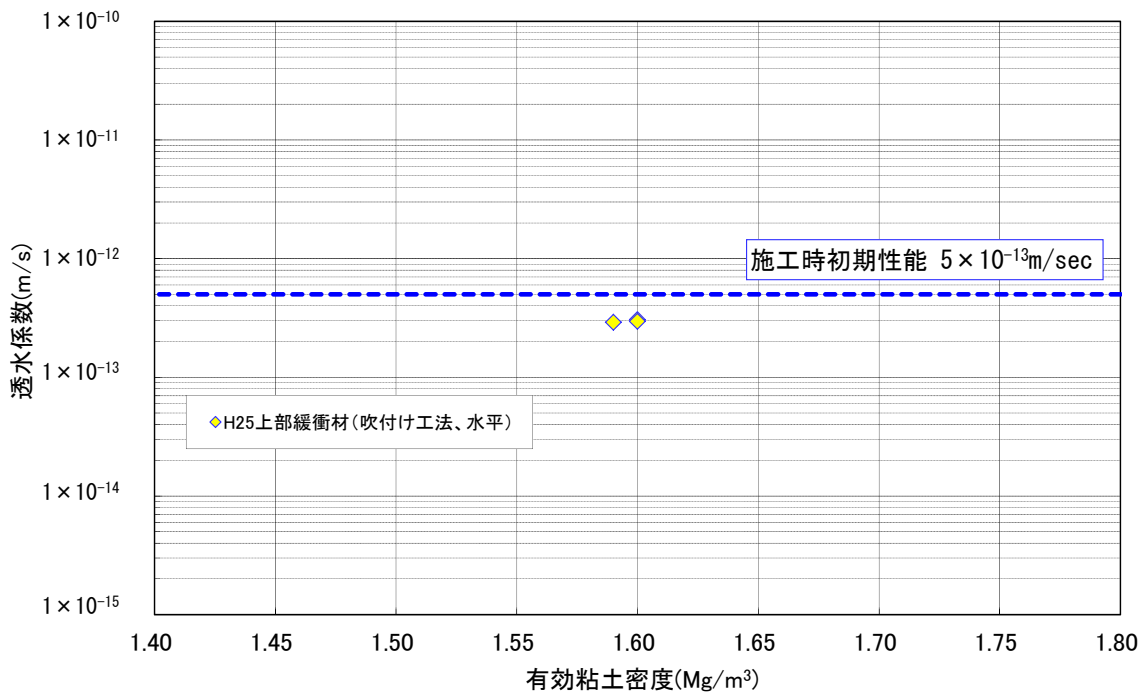


図 2.4-12 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

表 2.4-9 透水試験結果一覧表

試験名	試料 No.	含水比 w(%)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	透水係数 k(m/sec)
H25年度 水平吹付け (人力)	1	17.7	1.60	3.06×10^{-13}
	2	18.3	1.59	2.90×10^{-13}
	3	18.2	1.60	2.96×10^{-13}
H24年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	18.3	1.61	2.30×10^{-13}
	上段-2	19.2	1.65	2.22×10^{-13}
	上段-3	19.9	1.60	1.27×10^{-13}
	下段-1	20.0	1.59	2.67×10^{-13}
	下段-2	18.1	1.59	2.15×10^{-13}
	下段-3	19.3	1.63	2.08×10^{-13}
H23年度 下向き吹付け (ロボット)	1	19.0	1.60	2.37×10^{-13}
	2	19.3	1.59	1.49×10^{-13}
	3	18.9	1.61	1.34×10^{-13}
H23年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	17.8	1.70	1.29×10^{-13}
	上段-2	18.6	1.71	2.09×10^{-13}
	上段-3	18.6	1.70	2.54×10^{-13}
	下段-1	18.3	1.70	2.46×10^{-13}
	下段-2	18.9	1.70	2.53×10^{-13}
	下段-3	18.9	1.70	2.53×10^{-13}
H21年度 水平吹付け (人力)	B1-1	17.2	1.73	2.11×10^{-13}
	B1-2	17.0	1.74	1.61×10^{-13}
	B1-3	17.4	1.70	2.52×10^{-13}
	B3-1	17.6	1.73	1.96×10^{-13}
	B3-2	17.5	1.72	2.11×10^{-13}
	B3-3	17.4	1.71	2.28×10^{-13}

2.4.3 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能に関する評価

(1) 膨潤圧試験

今年度試験の膨潤圧の経時変化を図 2.4-13、膨潤圧試験結果一覧を表 2.4-10 に示す。なお、表 2.4-10 には比較のため既往試験結果を併せて示す。既往試験結果との比較分析は「2.4.4 初期性能確認試験の総合評価」で述べる。図 2.4-13 より、試験時間の増加に伴って膨潤圧は平衡状態に達していることが分かる。

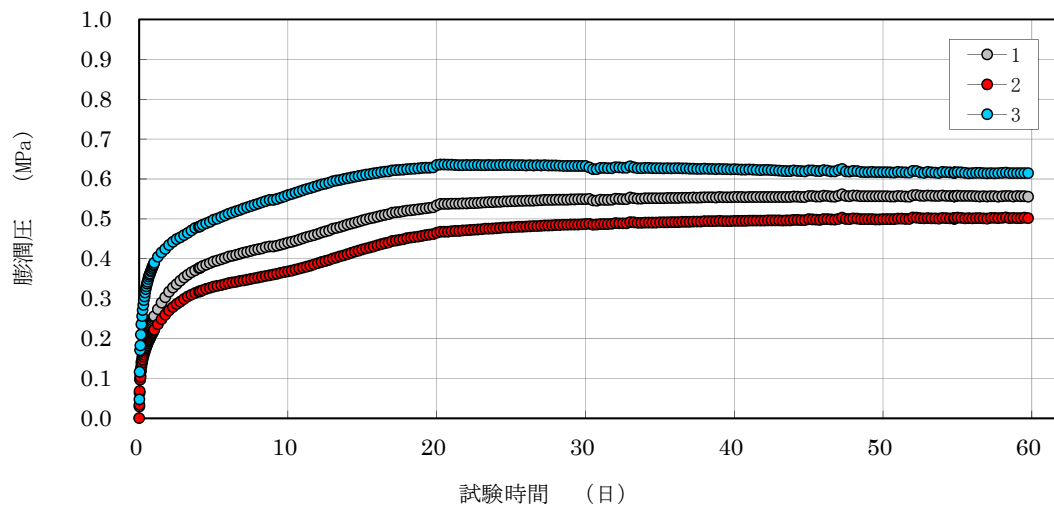


図 2.4-13 膨潤圧の経時変化

表 2.4-10 膨潤圧試験結果一覧表

試験名	試料 No.	含水比 w(%)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	膨潤圧 (kPa)
H25年度 水平吹付け (人力)	1	18.8	1.66	562
	2	19.2	1.62	503
	3	19.3	1.63	636
H24年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	18.4	1.66	868
	上段-2	18.5	1.63	742
	上段-3	19.9	1.62	893
	下段-1	19.9	1.63	721
	下段-2	18.8	1.65	872
	下段-3	19.6	1.63	729
H23年度 下向き吹付け (ロボット)	1	19.3	1.62	853
	2	19.3	1.66	839
	3	19.9	1.61	750
H23年度 全高さ 水平吹付け (ロボット)	上段-1	18.3	1.69	1,332
	上段-2	18.4	1.69	1,352
	上段-3	16.7	1.73	1,634
	下段-1	18.9	1.65	1,059
	下段-2	18.3	1.68	965
	下段-3	17.0	1.71	1,289
(参考) H21年度	B1-1	17.5	1.74	1,643
	B1-2	17.2	1.70	1,309
	B3-1	18.3	1.69	1,057
	B3-2	17.4	1.73	1,306

2.4.4 初期性能確認試験の総合評価

初期性能確認試験では、吹付け工法で構築した部材からコアを採取して各試験を実施し、施設施工後の初期性能を把握した。今年度実施した試験は、「建設・作業時の安全確保性能の確認試験」、「止水性能の確認試験」、「閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験」に分類される。

建設・作業時の安全確保性能の確認試験として一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施した。止水性能の確認試験として透水試験と密度試験を実施した。閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験として、膨潤圧試験を実施した。

上記試験により、構築した部材の初期性能として、一軸圧縮強さ、変形係数、三軸圧縮強度、透水係数、膨潤圧の各データを把握した。

一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数、膨潤圧は乾燥密度に依存することが確認された。また、取得した一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数、膨潤圧を既往データと比較して概ね整合する値が得られたことを確認した。詳細については、本節において後述する。

緩衝材の主機能である止水性能に関しては、透水係数の品質達成度を確認した。今年度得られた透水係数は、平成 24 年度までのデータも含めて施工時初期性能 $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ 以下を満足する結果が得られ、緩衝材に要求される初期性能を達成できた。

以下では、一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数、膨潤圧について既往データとの比較および考察を記載した。

(1) 力学特性

一軸圧縮強度と含水比の関係を図 2.4-14 に、変形係数と含水比との関係を図 2.4-15 に、一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を図 2.4-16 に、変形係数と乾燥密度との関係を図 2.4-17 に示す。今年度取得したデータに加えて、平成 21、23、24 年度の吹付け工法による施工時のデータおよび既往試験データ[5]を併記した。

吹付け工法での一軸圧縮強さ、変形係数は含水比、乾燥密度との関係において既往データと良く整合する傾向を示す。よって、含水比、乾燥密度と一軸圧縮強度、変形係数の関係を取得しておけば、含水比、乾燥密度から緩衝材の一軸圧縮強さ、変形係数を概ね想定できる見込みが確認できた。

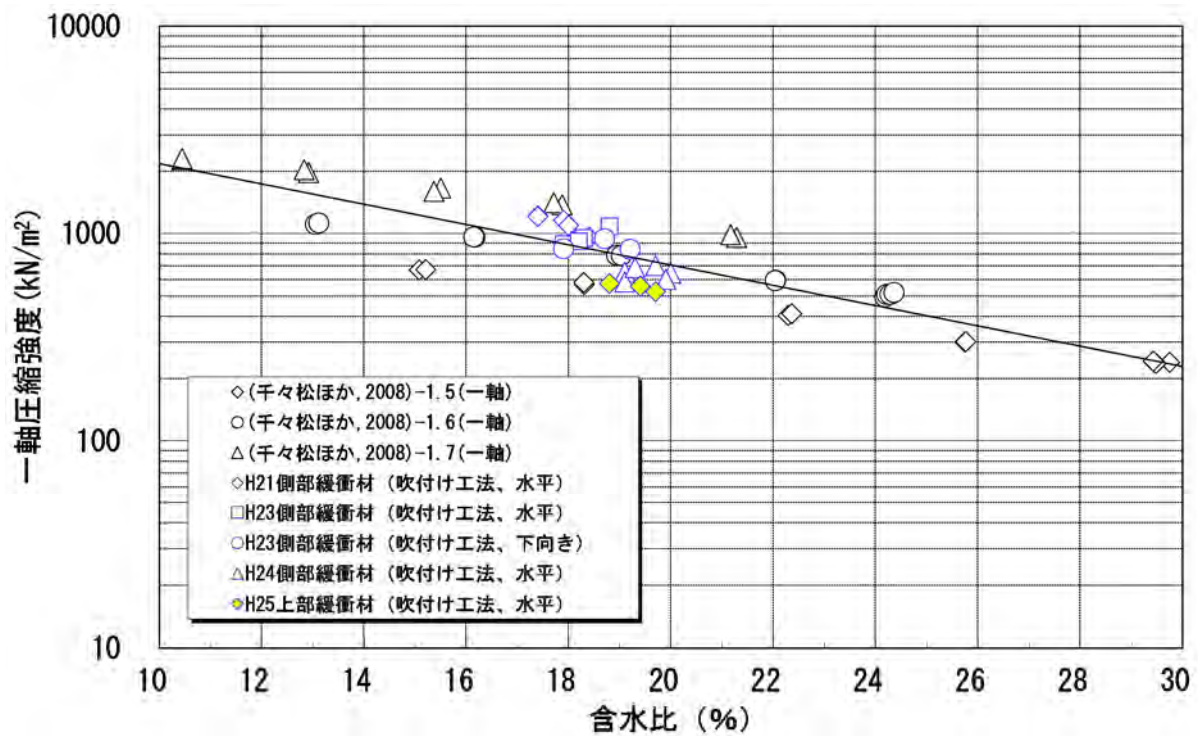


図 2.4-14 一軸圧縮強度と含水比の関係
(直線は既往データ[5]の結果より設定)

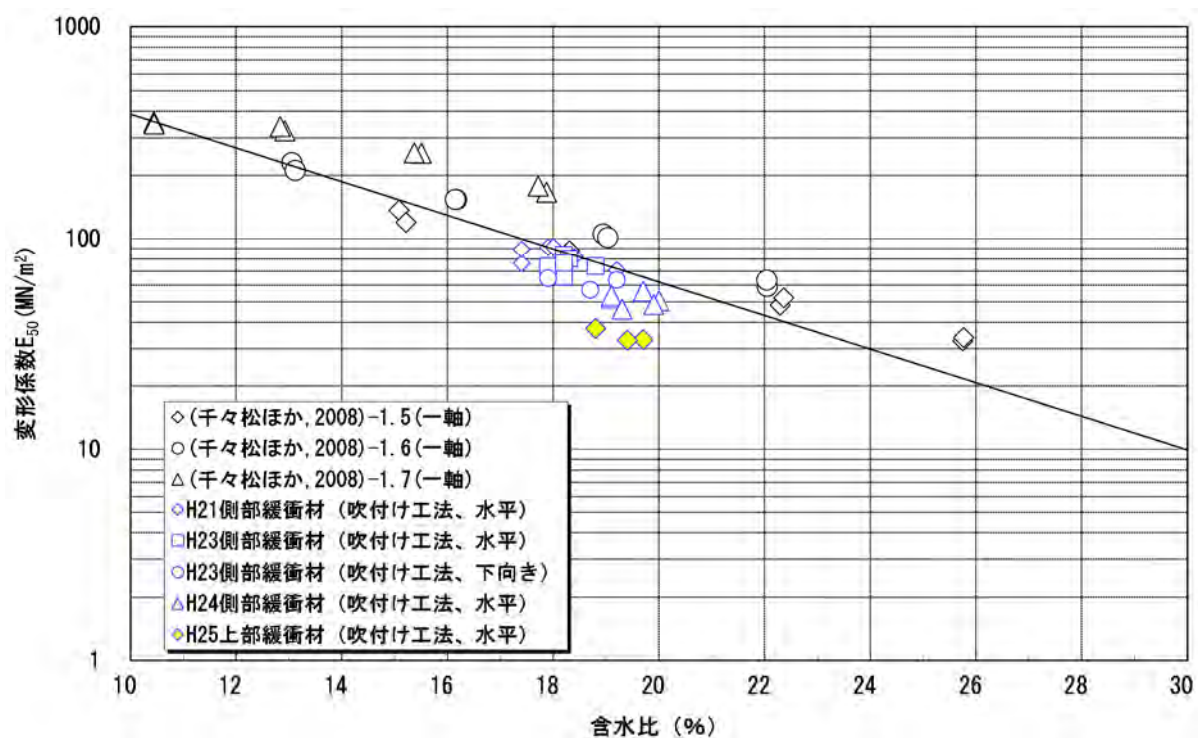


図 2.4-15 変形係数と含水比の関係
(直線は既往データ[5]の結果より設定)

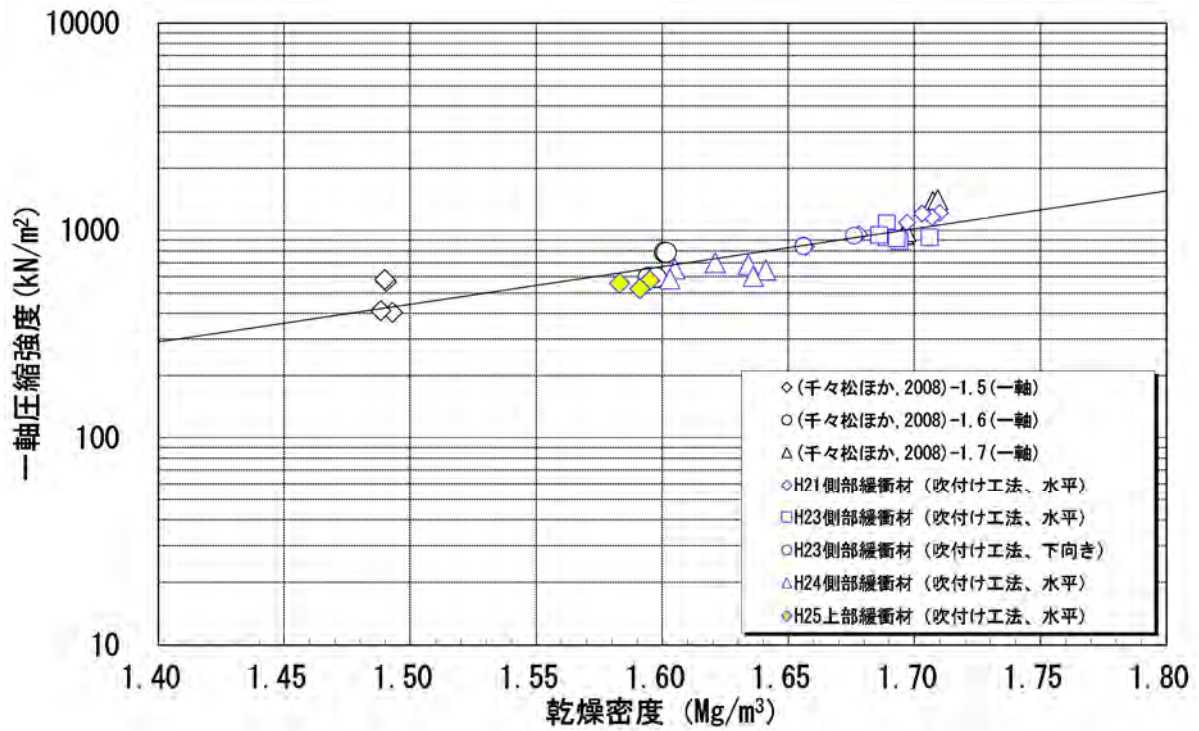


図 2.4-16 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係
(直線は既往データ[5]の結果より設定)

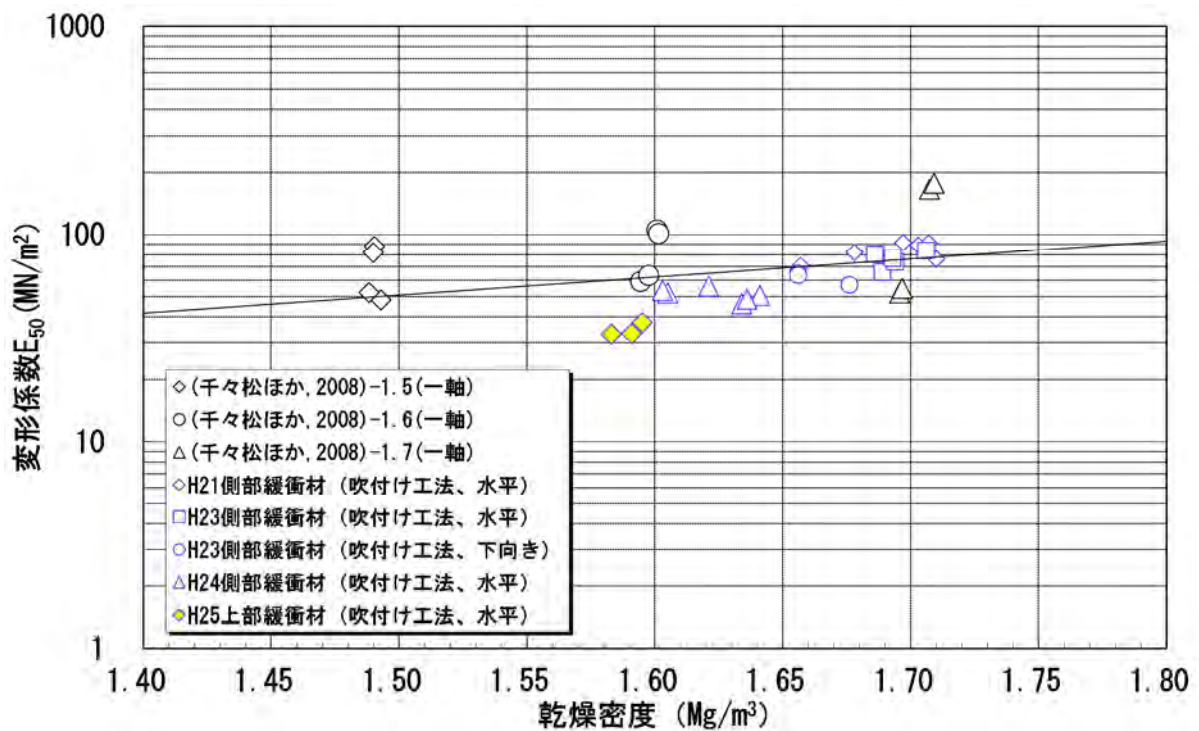


図 2.4-17 変形係数と乾燥密度の関係
(直線は既往データ[5]の結果より設定)

(2) 止水性能

緩衝材は止水が主に期待する機能である。本試験においては、緩衝材透水係数の施工時初期性能として $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ を設定した。施工時においては、この透水係数を試験施設において直接管理することは困難であることから、その代替特性として、透水係数と相関の高い乾燥密度により管理することとした。ベントナイトの乾燥密度の施工管理基準値は、 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ としている。

今回の施工確認試験で構築した緩衝材は、「2.3.2 (3) 仕上り密度」で述べたように、乾燥密度は全測定値でみた場合でも、 $1.60 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ の範囲となり管理基準値を満足する結果となった。

これまでクニゲル GX を対象に実施された透水試験の結果得られた透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係を図 2.4-18 に示す。同図の近似式は、既往データ[6] [7] [8] [9] [10] と、平成 21、23、24 年度側部緩衝材、平成 25 年度上部緩衝材初期性能確認試験での透水試験による透水係数から同定したものである。平成 21 年度の試験は、ノズルを水平にして吹付けた緩衝材に対し、ボーリングコアを鉛直下向きに採取して試験を実施している。試験結果から、吹付け工法は、品質的に異方性が無い緩衝材が施工可能であると言える。また、平成 23 年度は下向きの吹付け施工を実施している。試験結果から、吹付け工法は、任意の方向での施工が可能であると言える。今年度実施した上部緩衝材の試験結果は、既往の透水係数と比較的良く整合しており、本試験における透水係数の施工時初期性能 $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ 以下を満足する結果である。

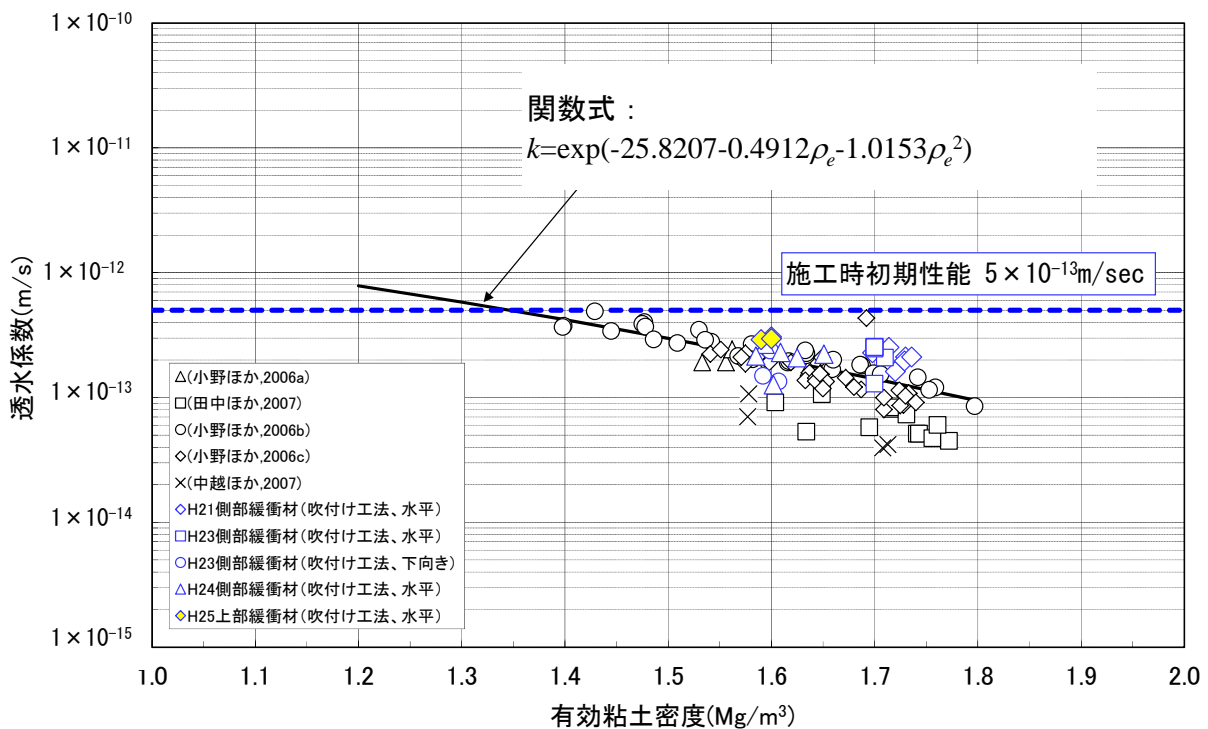


図 2.4-18 透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係

(関数式は、既往データ [6][7][8][9][10]と、平成 21 年度・23 年度・24 年度側部緩衝材(吹付け)、および平成 25 年度上部緩衝材 (吹付け) の確認試験結果のデータより設定)

(3) 膨潤性能

これまでにクニゲル GX を対象に測定された膨潤圧と有効粘土密度(乾燥密度)の関係を、既往データ[2][3]とともに図 2.4-19 に示す。同図の近似式は、既往データ[11][12]と、平成 21、23、24 年度側部緩衝材、平成 25 年度上部緩衝材初期性能確認試験での膨潤圧試験データから同定したものである。平成 21 年度の試験は、ノズルを水平にして吹付けた緩衝材に対し、ボーリングコアを鉛直下向きに採取して試験を実施している。試験結果から、吹付け工法は、品質的に異方性が無い緩衝材が施工可能であると言える。また、平成 23 年度は下向きの吹付け施工を実施している。試験結果から、吹付け工法は、任意の方向での施工が可能であると言える。上部緩衝材の試験結果は、これまでに得られている値と良く整合した結果である。

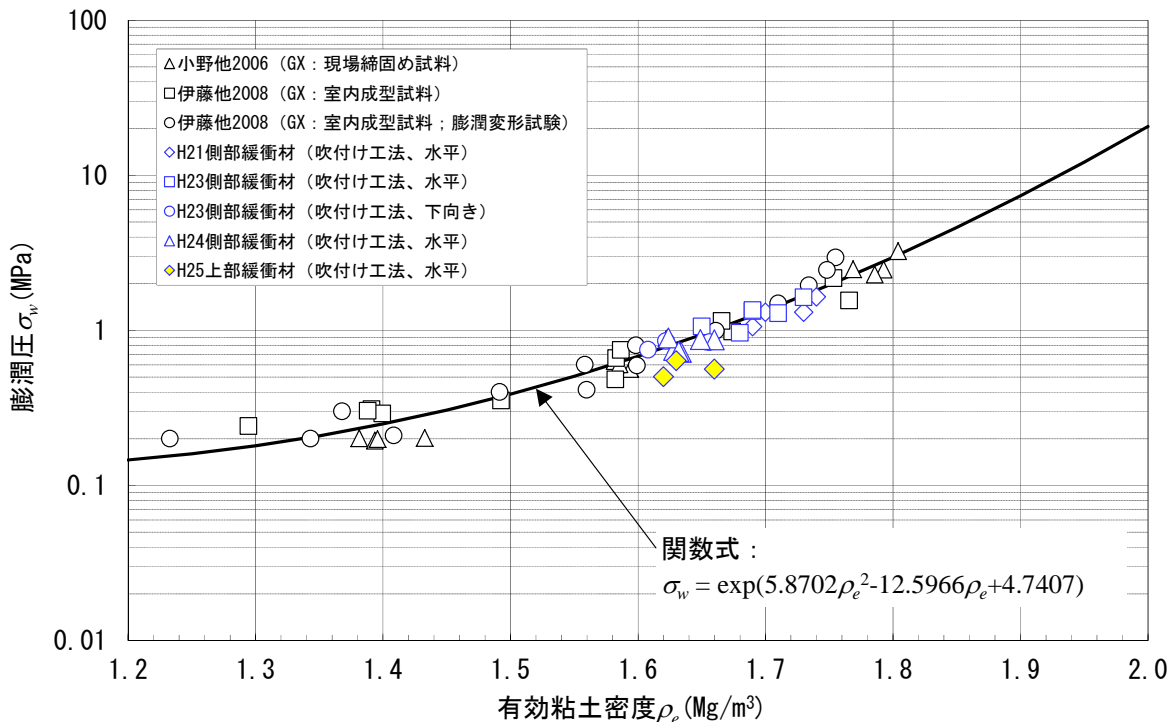


図 2.4-19 膨潤圧と有効粘土密度(乾燥密度)の関係

(関数式は、既往データ[11][12]と、平成 21 年度・23 年度・24 年度側部緩衝材(吹付け)、および平成 25 年度上部緩衝材(吹付け)の確認試験結果のデータより設定)

2.4.5 初期性能確認試験の課題の抽出

今年度施工した上部緩衝材より試料を採取して、初期性能を確認した。平成 21、23、24 年度の試験結果を含めると、吹付け工法でのデータはある程度蓄積されてきている。今後、吹付け工法の適用性向上のため、下記データ拡充が考えられる。

(1) 長期力学安定性に資するデータの取得

これまで、吹付け工法による側部緩衝材初期性能確認試験では、不飽和状態での一軸圧縮試験、三軸圧縮 UU 試験を実施し、試験施設の初期性能データを取得してきた。今後は、長期性能評価に資するため、飽和後の強度・変形データの取得が考えられる。

【参考文献】

- [1] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、第 I 分冊 (2011)。
- [2] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書。
- [3] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度管理型処分技術調査等委託事業 地下空洞型処分施設性能確証試験報告書。
- [4] 石井健嗣 他：吹付けによる緩衝材構築工法 (SHOTCLAY 工法) の施工管理方法に関する検討、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、2013.9。
- [5] 千々松ほか：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験 (その 2) 不飽和支持力に関する検討、土木学会第 63 回年次学術講演会 CS05-15、2007.9
- [6] 小野ほか(2006a)：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果、第 61 回年次学術講演会概要集、共通セッション CS05-09、pp.323～324
- [7] 田中ほか(2007)：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価、土木学会論文集 C、vol.63、No.1、pp.207～223
- [8] 小野ほか(2006b)：ベントナイト原鉱石の高速透水試験－プレス飽和法一、日本原子力学会「2006 年秋の大会」、p.108
- [9] 小野ほか(2006c)：ベントナイト原鉱石の高速透水試験－締固め施工した供試体の乾燥飽和法一、日本原子力学会「2006 年秋の大会」、p.109
- [10] 中越ほか(2007)：ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討 (その 2) 一透水性に関する検討一、第 62 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション、CS5-008、pp.175～176
- [11] 小野ほか：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果、第 61 回年次学術講演会講演概要集、CS05-052、2006.9
- [12] 伊藤ほか：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験 (その 1) 膨潤挙動に関する検討、第 63 回年次学術講演会概要集、共通セッション CS05-14、2008.9

第 3 章 上部緩衝材平面部施工確認試験・初期性能確認試験

第3章 上部緩衝材平面部施工確認試験・初期性能確認試験

3.1 施工確認試験

【目的】

上部緩衝材平面部は、その下部に重要な人工バリアである上部低拡散材が存在し、また、上部空間もアーチ状に湾曲した空洞の天井に近接し、非常に狭隘な施工空間である。そのため、実施設においては、底部緩衝剤の施工で使用したような大型機械の使用は不可能であり、中型若しくは小型の機械の使用が想定される。そこで今回の試験においては、施工箇所の下部に与える影響を少なくし、限られた上部空間や施工ヤードの条件から、大型機械ではなく、側部緩衝材試験で実績のある小型振動ローラによる転圧工法の適用性を試験で確認することとした。

本試験の目的は、昨年度までに実施した、転圧による側部緩衝材施工確認試験の試験結果を踏まえ、原位置で振動転圧による上部緩衝材の施工を実施することにより、施工性の確認を行うものである。また、施工後の上部緩衝材の品質を確認することにより、材料・施工法・品質に関する管理手法等における重点管理項目を抽出し、品質確保のための管理方法の確立に資するデータの収集を行うものである。

施工パターンをいくつか設定し、施工試験を行い、施工精度、施工に係る品質のばらつき等についてのデータ収集、および検討、評価を実施し、転圧工法の上部緩衝材施工への適用性を確認することを目的として行った。

【まとめ】

上部緩衝材の施工高さは約 1m であり、仕上り層厚 50mm で計 21 層の施工試験を行った。上部緩衝材であるため、実施設の施工では大型機械の使用は不可能であり、中型若しくは小型の機械による施工が想定される。本施工確認試験においては施工ヤードの制約上、小型振動ローラを用いて施工を行った。したがって、小型振動ローラを用いて実施したこれまでの緩衝材の施工試験の成果を踏まえて施工試験を行い、施工品質の確認を行った。なお、本施工試験では敷均しは施工ヤードの制約上、人力で実施したが、実施設の施工には小型のフィニッシャーの使用も考えられることから、それを想定した敷均し厚さで施工試験を行うこととした。すなわち、敷均し厚さを 100mm として施工を行った。

施工パターンとしては、2 層分まとめて振動転圧を行う場合と 1 層単位で振動転圧を行う場合の施工後品質の確認およびサイクルタイムの比較を行った。その結果、施工時間としては両パターンで大きな差は無いが、施工後の品質としては、1 層単位で施工を行った場合の方が層内の密度のばらつきは小さくなることが分かった。そこで、1 層単位で振動転圧を行うことを基本とし、施工仕様（敷均し 100mm、無振動転圧 4Pass、振動転圧 2Pass）で、工法規定により施工を行い、施工後の品質の確認を行ったところ、仕上り密度のばらつきは層平均として 0.02Mg/m^3 程度、コア密度として 0.04Mg/m^3 程度となり、ばらつきが少なく施工を行なうことができた。

3.1.1 施工確認試験の概要

(1) 施工確認試験の方針・目的

本試験は、日本原燃(株)が進めている低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設検討のための試験空洞内において、先行して実施した底部緩衝材、底部低拡散材、底部・奥部・側部コンクリートピットおよび側部低拡散材の施工確認試験で構築された地下空洞型処分施設の模擬施設で実施した。すなわち、施工箇所および周辺環境の面において、実施工と同様の条件下での実規模大での試験であり、原位置での転圧による施工性の確認、および品質管理に関わるデータの収集を行った。

本試験においては、現実的な土木技術の採用とその施工方法により施工された緩衝材の性能が要求性能を満足するか否かを確認することが重要である。このため、上部緩衝材平面部の施工確認試験において、施工層によって施工パターンを変化させ、施工された各層が要求性能を満足するか否かを確認すると同時に、今後の実施工に反映できるように施工上の品質管理方法を明らかにすることを試験の方針とした。

上部緩衝材平面部の施工確認試験は、上部低拡散材構築後に、その上にベントナイト材料を原位置にて締固めて厚さ 1.0m で所要の密度の緩衝材を構築する試験である。使用する材料はベントナイトである。既往の研究の知見より転圧締固め施工による同一層内の密度のばらつきが小さくなる含水比として 21.0%が設定されている。ベントナイトは、ベントナイト工場内のミキサを用いて加水・練混ぜを行い所定の含水比に調整し、施工試験に供給するためにベントナイト保管庫に運搬・保管を行う。施工機械は、側部緩衝材試験で使用した小型振動ローラ等を用いる事とした。底部緩衝材の施工試験においては大型振動ローラを用いて施工を行ったが、本プロジェクトにおける上部緩衝材においては、空洞天井との施工空間の制約を考慮し、隅角部については吹き付け、平面部については小型の振動ローラを用いて施工試験を行うこととした。

(2) 施工確認試験の計画

ここでは以下に、1)品質管理基準の設定、2)施工確認試験内容の計画、3) 試験場所、4)施工確認試験の施工フロー、5)使用材料 6)実施数量、7)実施工程について、概要を記載した。

1) 品質管理基準の設定

平成 17 年度、平成 18 年度に実施した基本計画および詳細計画において、緩衝材施工時における施工管理目標としてベントナト乾燥密度を管理することにより、緩衝材の要求性能が満足しているか否かを管理することとし、次の値としている。

- ・管理目標値（ベントナイト乾燥密度）： $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/ m}^3$

この管理目標値は以下の考え方により設定されている。

- ・人工バリアの長期の化学的劣化や力学的劣化、あるいは長期にわたるための不確実性を考慮に入れた性能を確保すべきこと。
- ・施工時のばらつきを考慮に入れて施工する初期性能とすべきこと。

これらの考え方から、緩衝材については、透水係数として $5 \times 10^{-13} \text{m/s}$ を確保すべき初期

性能と定められている。しかし、この透水係数は施工中の短時間で確認できないことから、施工中における施工管理として、透水係数と相関のあるベントナイト乾燥密度を施工中の管理値とした。具体的な管理すべきベントナイト乾燥密度として、概ね 1.5 Mg/m^3 以上あれば初期性能を満足するが、これに施工中のばらつきを考慮し、 $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ と定められている。この関連を図 3.1-1 に示す。

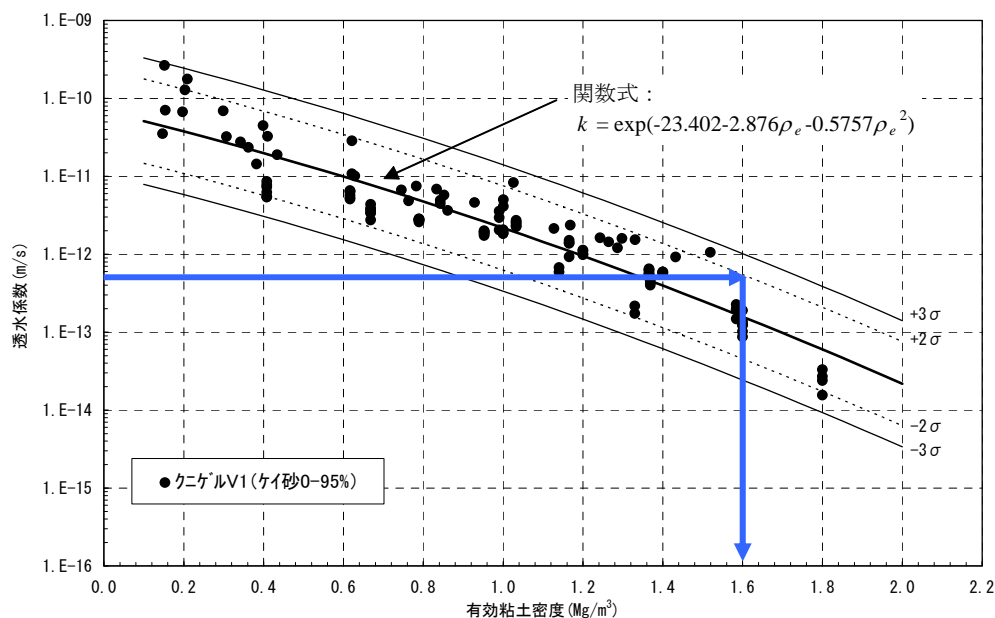


図 3.1-1 クニゲル V1 の有効粘土密度～透水係数（定水位法、ケイ砂混合を抽出）

本緩衝材施工確認試験においては、このベントナイト乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ を管理目標値として管理する。なお、1層当りの仕上り厚さは約 100 mm である。施工後の乾燥密度の規格値は $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ であるが、施工終了後のレベルによる計測やコア採取による密度管理の際には $1.6 \pm 0.05 \text{ Mg/m}^3$ を管理規準値として締め固め施工を行った。

2) 施工確認試験内容の計画

緩衝材の振動転圧工法による施工としては、底部緩衝材における大型振動ローラによる施工および底部緩衝材の端部や側部緩衝材における小型振動ローラによる施工がある。上部緩衝材の施工は底部緩衝材に類似した施工になる。図 3.1-2 には大型振動ローラによる底部緩衝材の施工状況を、図 3.1-3 には小型振動ローラによる底部緩衝材の端部の施工状況を示す。

底部緩衝材と上部緩衝材で施工範囲は類似しているが、異なる点として、施工箇所の下に廃棄体（確認試験ではないが、実事業においては存在する）や低拡散材があることがあげられる。また、上部空間も限られており、本施工確認試験においては平面的な施工ヤードも限られている。以上、施工箇所の下部に与える影響を少なくするため、そして限られた上部空間や施工ヤードの条件から、大型機械ではなく、小型機械による施工にならざるを得ないと考えられる。なお、限られた上部空間の中で施工可能な中型の機械による施工も選択肢としては考えられますが、確認試験における上部緩衝材の施工に関しては、上下間での資材搬入

の制限や施工ヤードの広さの制限から、これまでの施工確認試験で実績のある図 3.1-3 に示す小型振動ローラを用いた施工を基本とする。



図 3.1-2 大型振動ローラによる施工状況



図 3.1-3 小型振動ローラによる施工状況

振動転圧工法においては、材料の敷均しの精度が施工後の品質に大きく影響を与える。底部緩衝材の施工確認試験においては、図 3.1-4 に示すような大型のアスファルトフィニッシャーが適用された。側部緩衝材の際には、施工幅が 1m と狭小で既存の機械が使用できないため、図 3.1-5 に示すような敷均し機が開発され適用された。いずれも所定の品質（敷均し厚さ 200mm 程度）での敷均しを行うことが可能であり、転圧後の品質（密度）にも問題が無いことが確認された。

上部緩衝材の場合は、施工範囲が底部緩衝材と同様であることから図 3.1-4 に示す大型フィニッシャーを用いて敷均しを行うことが望ましいと考えられるが、前記のように上部空間や施工ヤード、上下間の資材搬入に制限があるため、このような大型機械が使用できない。

そこで、まずは既存機械での適用可能性について検討することとし、図 3.1-6 に示す小型フィニッシャーの適用性について事前に検討がなされている。その結果、軽微な改良を施すことにより対象材料（クニゲル GX）の敷均しは可能であり、図 3.1-7 に示すように一定の厚さで敷均しができることが確認されている。実施工においては、このような小型のフィニッシャーの適用が十分に可能と考えられるが、今回の試験条件では施工延長があまりに短く、このような機械を用いて施工することが困難である。

以上から、今回の試験では撒出し・敷均しは人力で行うものとし、その敷均し厚さについては、最大で 150mm 程度の敷均し厚さとなる小型フィニッシャーでの実験結果を踏まえ、基本の敷均し厚さは 100mm とした。その場合、仕上がり厚さは約 50mm であり、所定の厚さ（1m）の上部緩衝材を仕上がるのに 20 層の施工が必要となる。



図 3.1-4 大型フィニッシャーによる敷均し



図 3.1-5 敷均し機による側部敷均し



図 3.1-6 小型フィニッシャーによる敷均し



図 3.1-7 小型フィニッシャーによる敷均し

以上、標準的な施工手順は、これまでの施工確認試験の結果を踏まえて以下の通りとする。

- ・材料敷均し→小型振動ローラ無振動転圧（4Pass）→小型振動ローラ振動転圧（2Pass）
- 平成 23 年度の施工確認試験において、撒出し厚さが 100mm の時には図 3.1-8 に示すように 2Pass で所定の密度を達成できたことより振動転圧 Pass 数に関しては 2Pass を基本とする。無振動転圧に関しては、平成 24 年度の施工確認試験結果において、図 3.1-9 に示すように 2、4、6Pass で仕上がり密度に優位な差が無いことより側部緩衝材における無振動転圧回数は 4Pass と設定されたことより、上部緩衝材における無振動転圧も 4Pass と設定する。

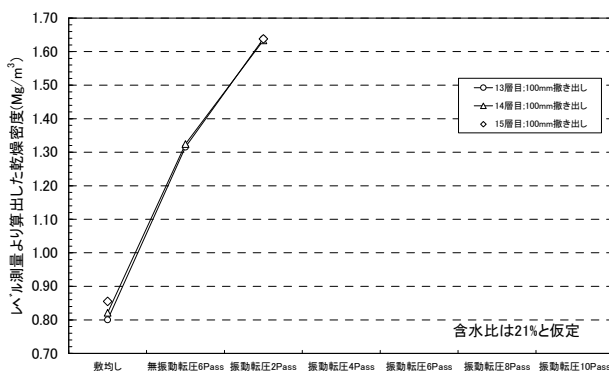


図 3.1-8 撒出し厚さ 100mm の時の転圧結果

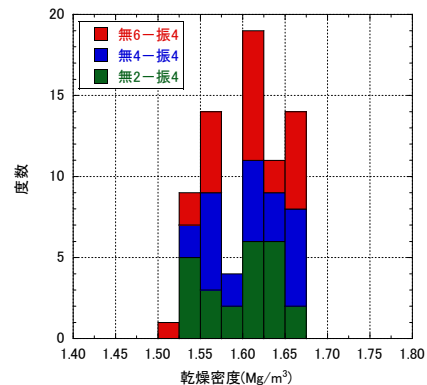


図 3.1-9 無振動転圧の影響確認結果

3) 試験場所

工場で含水比調整されたベントナイトは運搬され、日本原燃(株)の敷地内に設置してあるベントナイト保管庫に一時仮置を行った。図 3.1-10 にベントナイト保管庫の位置図を示す。図 3.1-11 にベントナイト保管庫を示す。

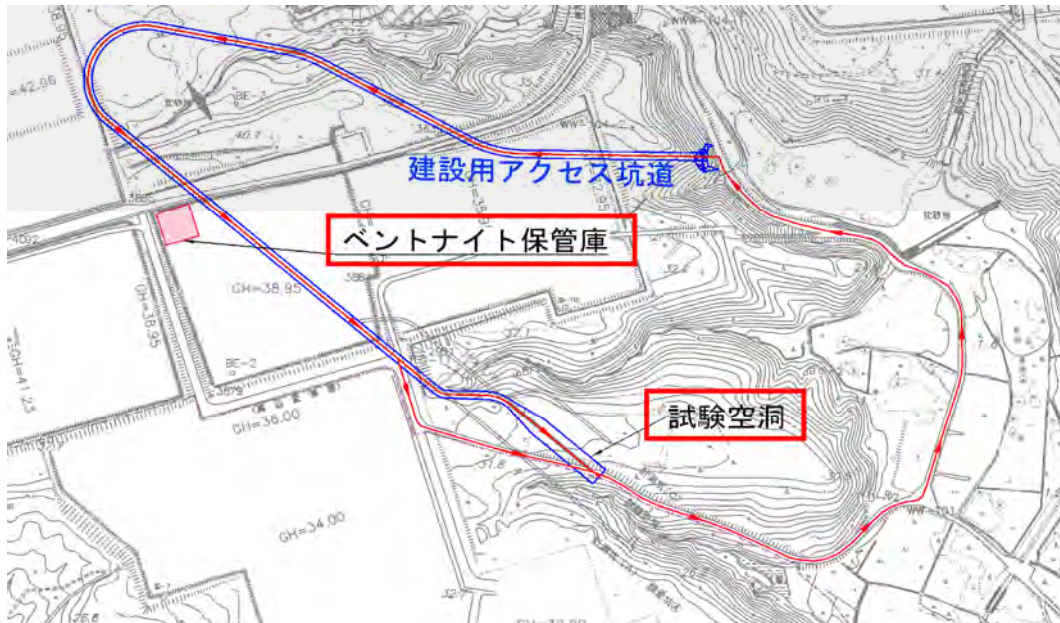


図 3.1-10 ベントナイト保管庫位置図



図 3.1-11 ベントナイト保管庫全景

上部緩衝材平面部施工確認試験は試験空洞の奥、幅 6.275m×奥行き 5.25mの範囲で行った。図 3.1-12 に上部緩衝材平面部の施工確認試験前の状況を、図 3.1-13 に上部緩衝材平面部の完成図を示す。また、緩衝材の構造図を図 3.1-14 に、図 3.1-15 および図 3.1-15 に試験状況のイメージ図を示す。



図 3.1-12 上部緩衝材平面部試験前の状況

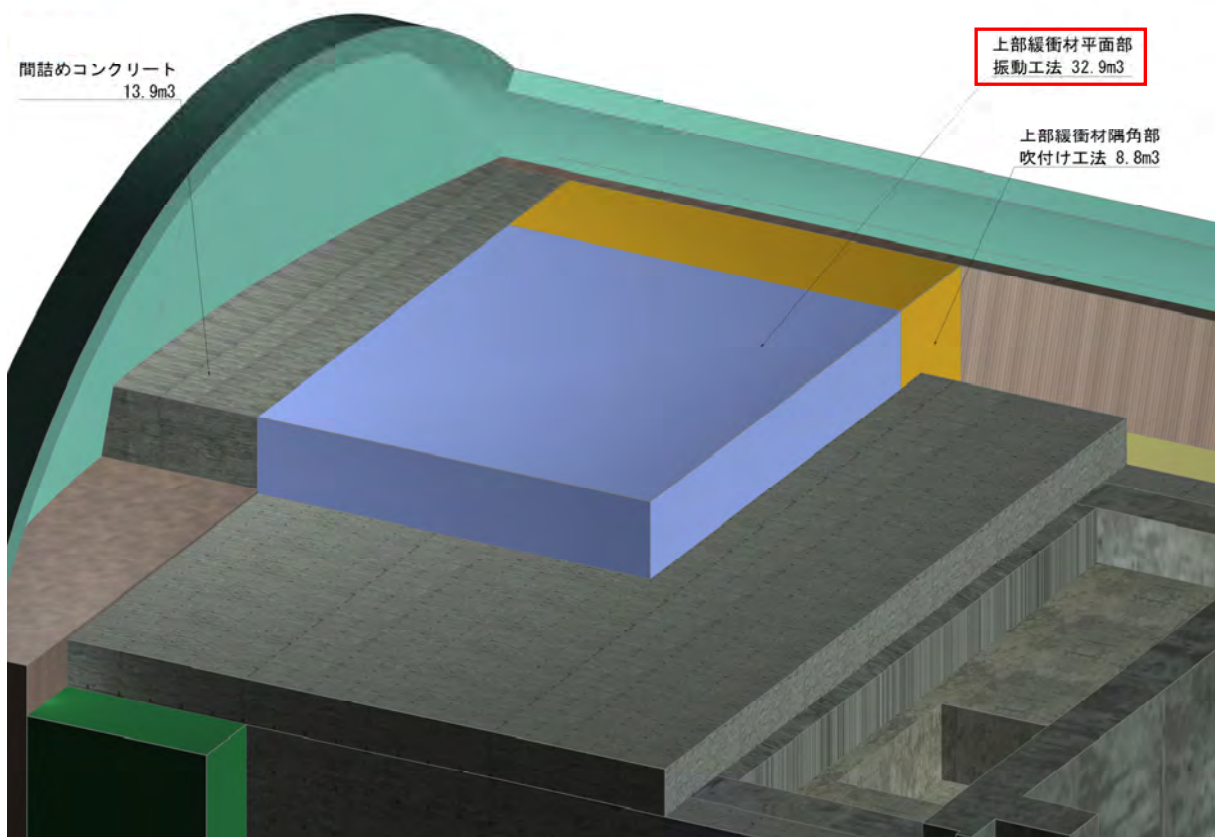


図 3.1-13 上部緩衝材平面部完成図

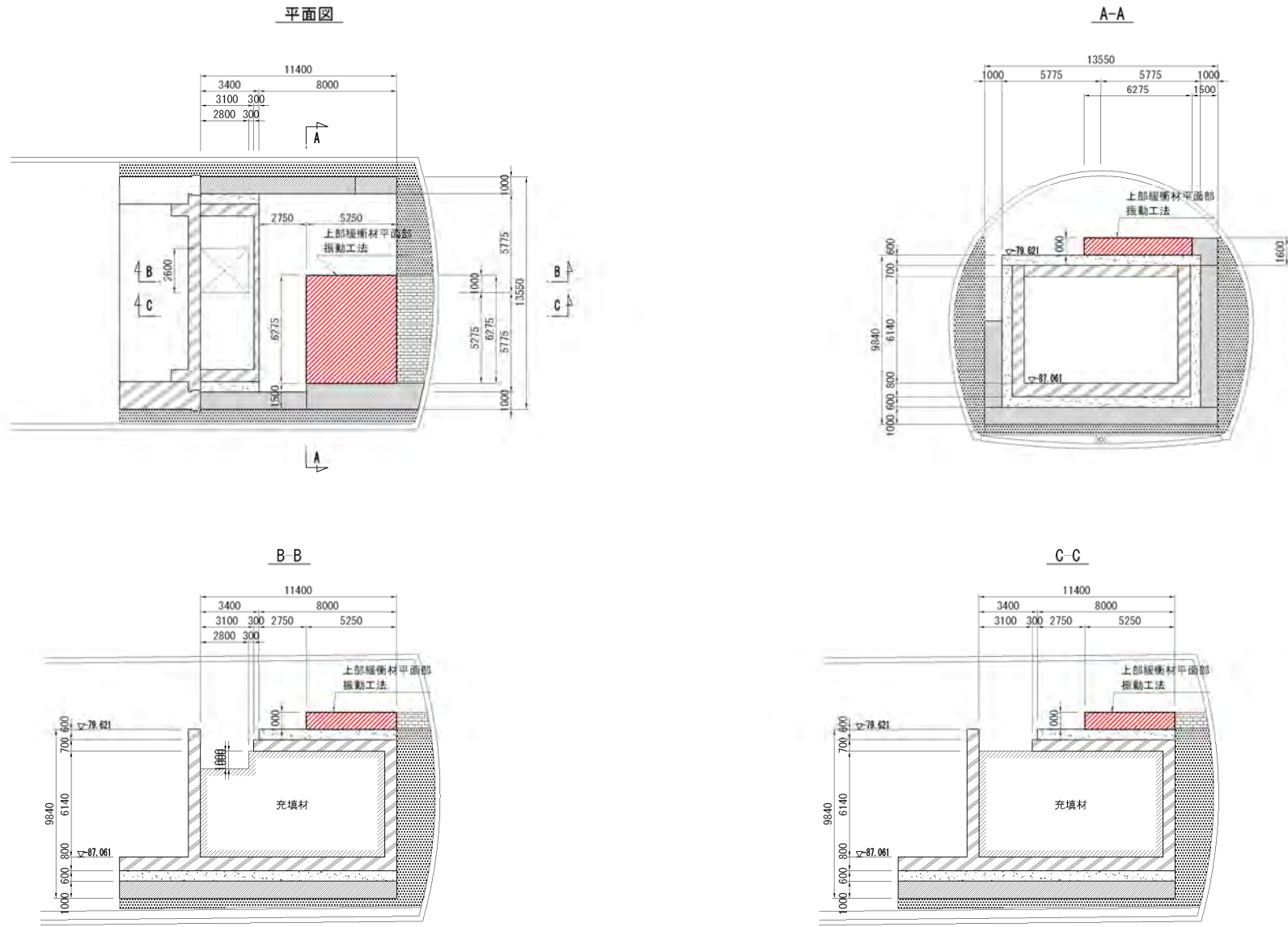


图 3.1-14 緩衝材構造図

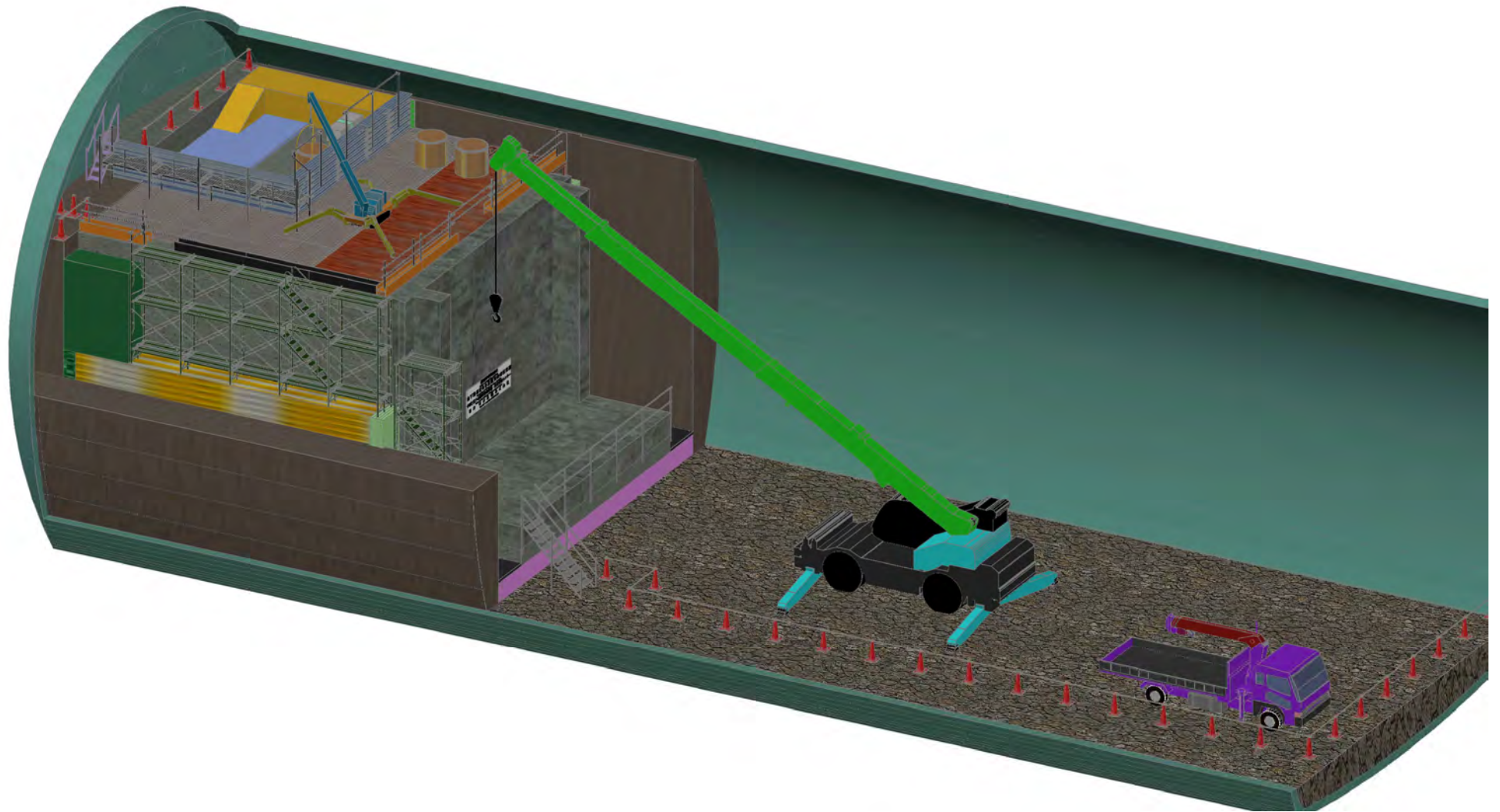


図 3.1-15 試験状況イメージ図(全体)

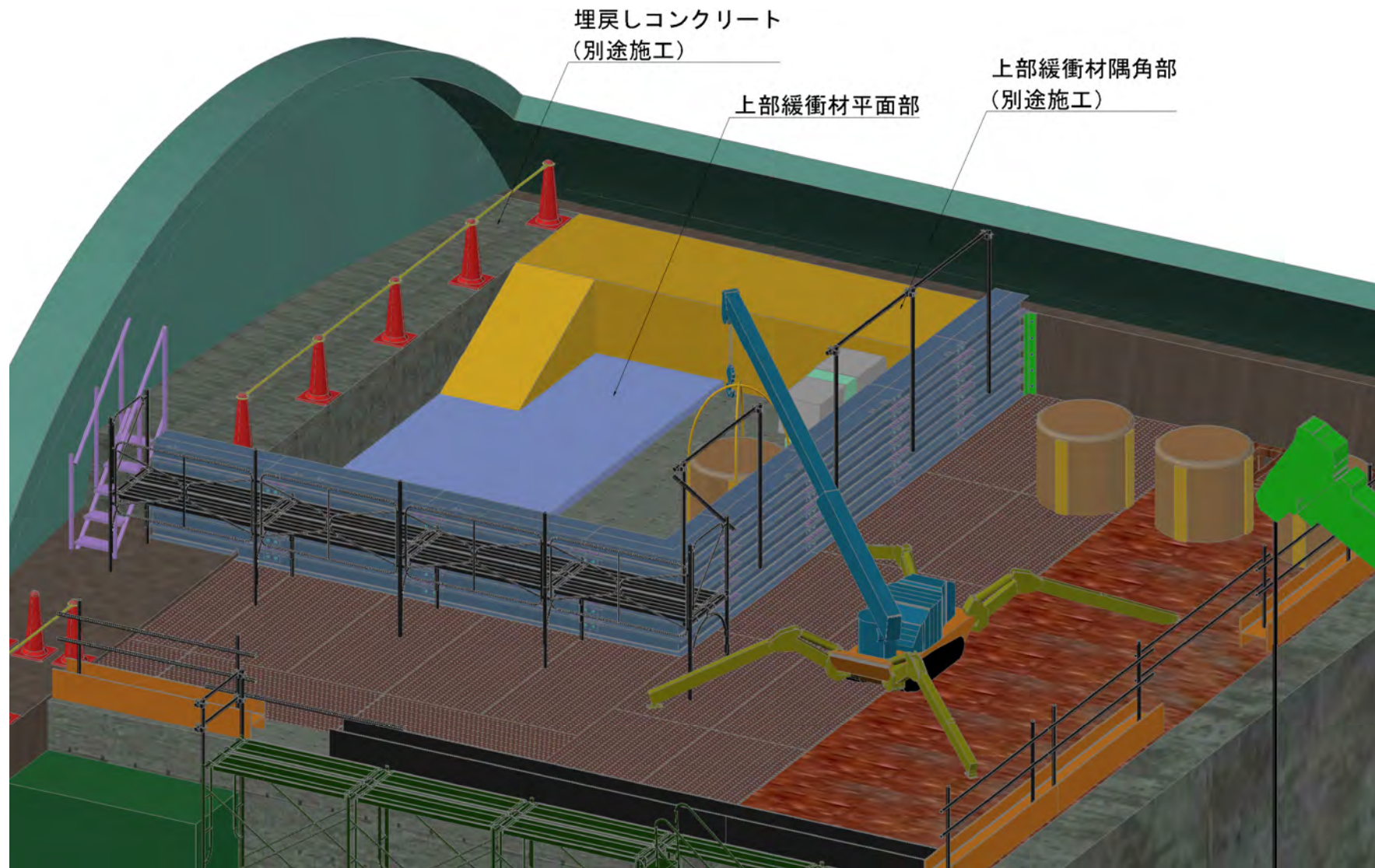


図 3.1-16 試験状況イメージ図(拡大)

4) 施工確認試験の施工フロー

上部緩衝材平面部の施工確認試験の施工フロー、および施工手順図を図 3.1-17、

図 3.1-18 に示す。緩衝材は半面ずつ敷均し、転圧は全面を対象とした。転圧に用いる小型振動ローラは、試験終了まで型枠内に残置するため、敷均し範囲に応じて適宜、移動させた。

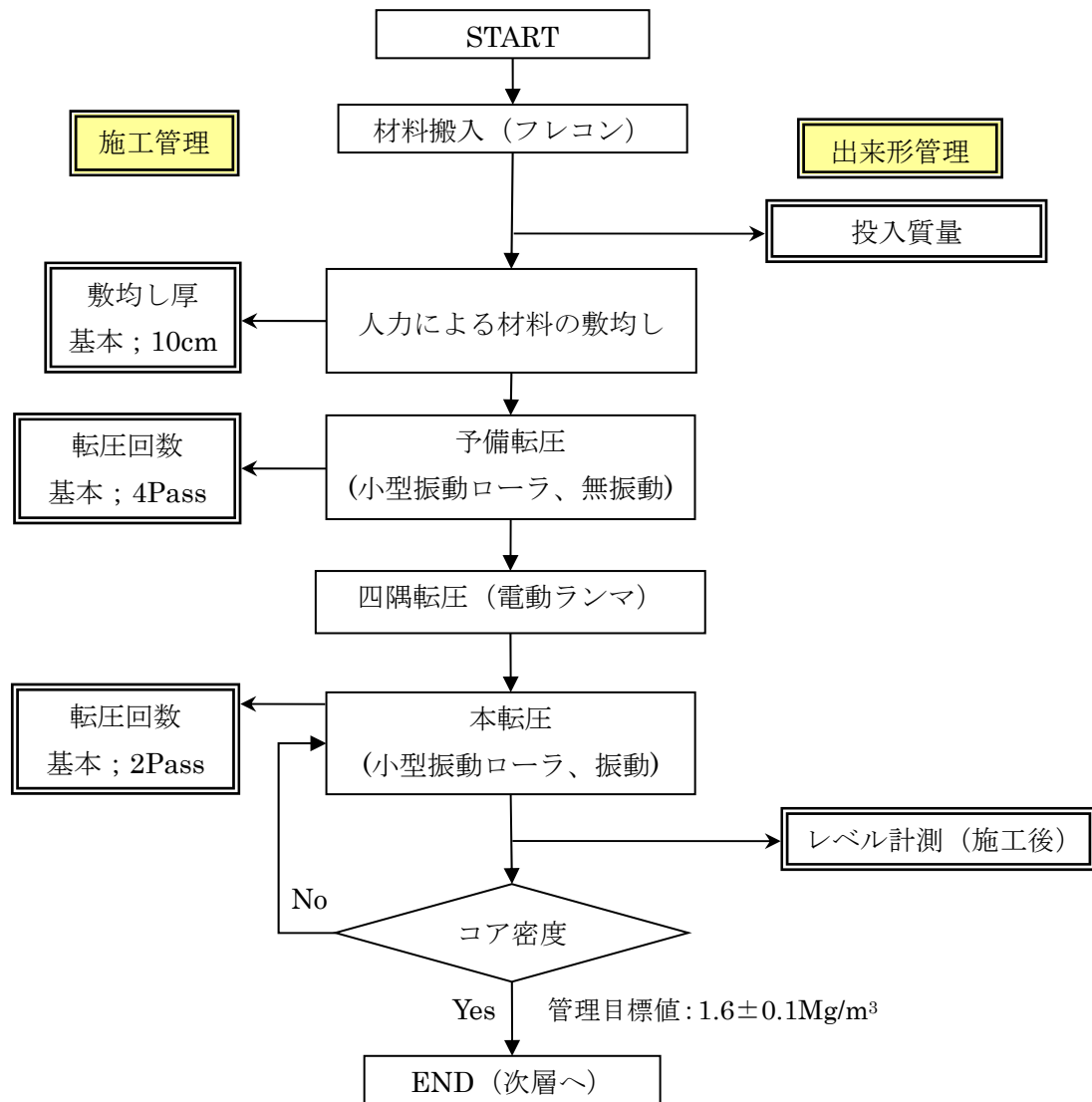


図 3.1-17 施工フロー

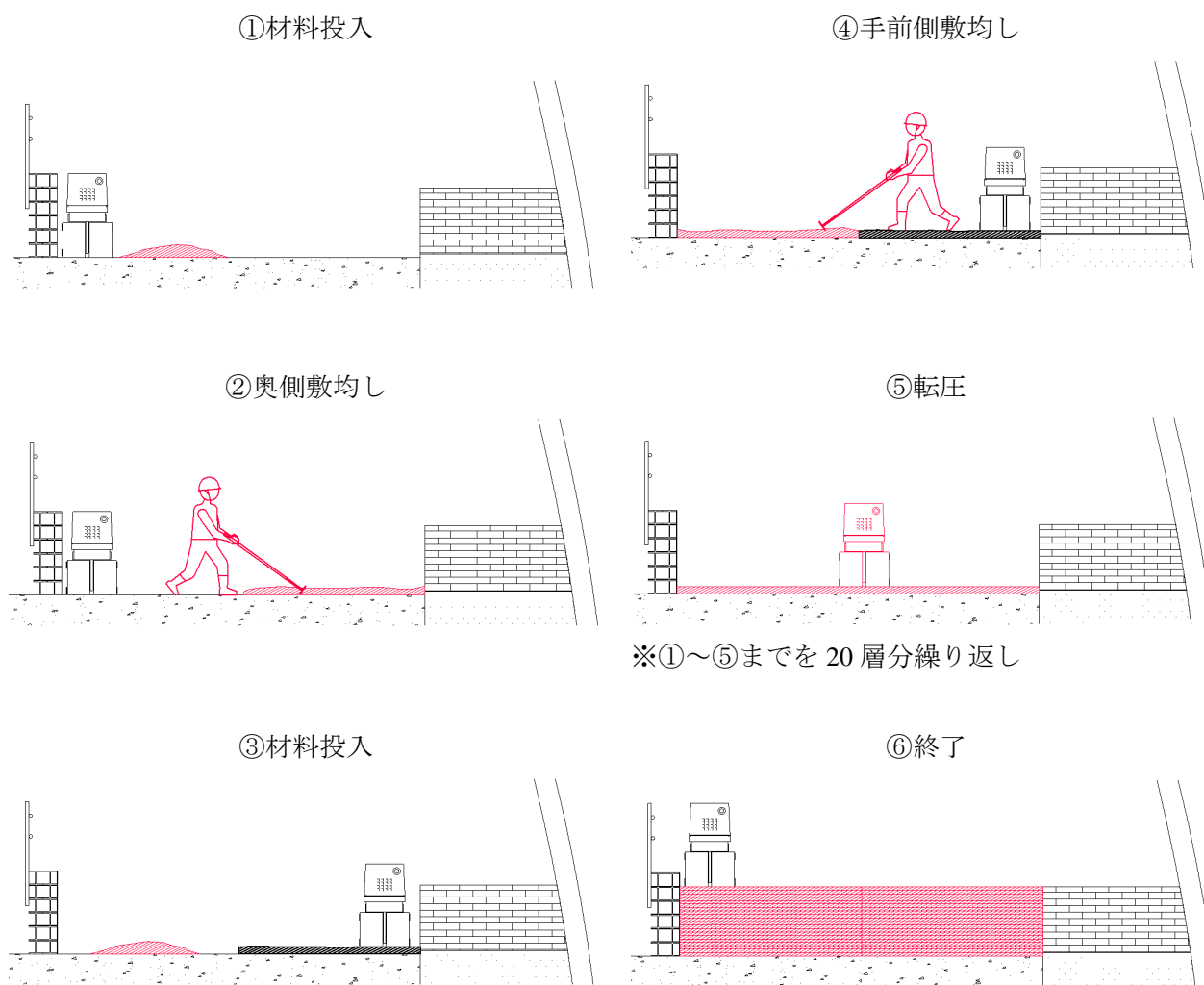


図 3.1-18 施工手順図

5) 使用材料

緩衝材の材料はベントナイト（クニゲル GX）100%とし、別途工場で含水比調整を行ったベントナイト（管理目標値 含水比 $\omega=21\% \pm 2\%$ ）を使用した。ベントナイトは山形県にあるクニミネ工業(株)左沢工場産の粒状ベントナイトである。アイリッヒミキサを用いて含水比調整を行い、フレコンバッグに約 300kg 程度の重さに詰めて、トラックによって運搬し、ベントナイト保管庫にて保管を行った。

6) 実施数量

試験数量は表 3.1-1 に示す通りである。

表 3.1-1 試験数量

項目	種目	単位	数量	摘要
上部緩衝材平面部施工確認試験	転圧機械を使用した転圧工法による上部緩衝材平面部の施工	m ³	32.9	上部緩衝材平面部（幅 6.275m×奥行き 5.25m×厚さ 1.0m＝32.9m ³ ）について、小型振動ローラ等の転圧機械を使用した転圧工法により、緩衝材の施工を実施する。

7) 実施工程

実施工程を全体工程を表 3.1-2 に、詳細作業工程を表 3.1-3 に示す。

表 3.1-2 全体工程表

作業内容	2013年(平成25年)		2014年(平成26年)		
	11月	12月	1月	2月	3月
全体計画の策定	[Gantt bar from Nov 1 to Nov 15]				
試験準備	[Gantt bar from Nov 15 to Nov 25]				
施工確認試験	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]				

表 3.1-3 詳細作業工程表

年月日	11月															12月																													
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31														
項目	[文化の日 振替休日]															[勤労感謝の日]															[天皇誕生日]														
計画・検討・事前準備	[Gantt bar from Nov 1 to Nov 25]																																												
教育等	[Gantt bar from Nov 25 to Nov 28]																																												
仮設工	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
準備工	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
ベントナイト準備	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
施工確認試験	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
進捗	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
初期性能試験	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
サンプリング (別途業務)	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												
室内試験	[Gantt bar from Dec 1 to Dec 15]																																												

3.1.2 施工確認試験の内容

(1) 使用機械

使用機械の一覧を表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 主要使用機械一覧表

使用用途	名 称	型 式	単 位	数 量	備 考
含水比調整	アイリッヒミキサ	DE22	台	1	
材料投入	ラフタークレーン	25 t 吊	台	1	
敷均し	カニクレーン	2.98 t 吊	台	1	
転圧	小型振動ローラ	HC1500-1	台	1	
	ランマ	打撃力 750~1000kg	台	1	

1) 含水比調整機械（アイリッヒミキサ）

含水比調整に使用したアイリッヒミキサは、材料を容器（パン）ごと回転させている。これに対し偏心位置で逆方向に回転するアジテータが、材料に高いせん断力を発生させ、複雑な流れの中で生じる速度差によって、マイクロで緻密な混合を実現している。使用したアイリッヒミキサを図 3.1-19 に、機械仕様を表 3.1-5 機械仕様（アイリッヒミキサ）に示す。



図 3.1-19 アイリッヒミキサ

表 3.1-5 機械仕様（アイリッヒミキサ）

名 称	アイリッヒ・インテンシブ・ミキサ
装置タイプ	攪拌付回転容器型
Mixer Type	DE22
最大混練量	1,500 ℓ
回転数：アジテータ	550 回転/min
パン（周速）	1.0 m/min

2) 小型振動ローラ

図 3.1-20 に示す小型振動ローラは、本来トレンチ状の溝掘削場所における底盤転圧に使用される振動ローラである。その構造上、壁際までの締固めが可能である。また、同規格の振動ローラに比べて振幅や起振力が大きい点も特徴である。今回は、土工用ローラ（凸凹）を平滑に改造し、壁際コンクリートのための防護材の貼付け、薄層ベントナイト締固めのための振幅方向を調整したものを使用した。表 3.1-6 に小型振動ローラの主要緒元を示す。



図 3.1-20 小型振動ローラ（HC1500-1）

表 3.1-6 機械仕様（小型振動ローラ）

メーカー	安藤ハザマ
型 式	HC1500-1
機 体 長	1,500mm
機 体 高	1,200mm
機 体 幅	610mm～850mm
機 体 質 量	1,548kg
周 期	32Hz
振 幅	2.1mm
起 振 力	80kN
エ ン ジ ン	空冷 2 気筒ディーゼル
速 度	1.2km/時
車 輪 幅	298×2～398×2
操 作	リモートコントロール

3) 荷揚げ機械

a. 25 t ラフタークレーン

試験空洞からコンクリートピット上部にフレコンバッグ（ベントナイト）を移動するのに、25 t ラフタークレーンを使用した。図 3.1-21 に使用した 25 t ラフタークレーンを示す。



図 3.1-21 25 t ラフタークレーン

b. カニクレーン (2.98 t 吊)

コンクリートピット上部において、25 t ラフタークレーンにて吊上げたフレコンバッグ（ベントナイト）を施工ヤードに投入するのに、カニクレーンを用いた。図 3.1-22 に使用したカニクレーンを、表 3.1-7 にカニクレーンの仕様を示す。



図 3.1-22 カニクレーン (2.98 t 吊)

表 3.1-7 カニクレーン主要緒元

メーカー	前田製作所
型 式	MC-305C
機 体 長	4,285mm
機 体 高	1,695mm
機 体 幅	1,280mm
機 体 質 量	3,900kg
最大吊上げ量	2.98t×2.5m
走行速度	0～2.8km/h
定格出力	20.7PS/2,500rpm
燃料タンク容量	軽油 40 ㍓

(2) 試験ケース

本施工確認試験での標準的な敷均し・転圧の手順は、表 3.1-8 の左側に示す手順（手順 1）である。しかし、小型振動ローラの締固め性能としては、2 倍の敷均し厚さの締固めに対しても十分であるので、振動の本転圧を 2 層ごとに実施する手順についても試行する。特に、上部低拡散材のすぐ上での施工となる第 1 層目、2 層目においては、表 3.1-8 に示す手順 2 にて施工を行った方が低拡散材への影響が少ないと考えられる。

以上を踏まえた施工ケースを表 3.1-9 に示す。まずは、手順 2 での施工を行う（1～4 層）。その後、5～8 層において、手順 1 での施工を行うとともに、振動転圧 Pass 数および隅部のランマ転圧時間に関する検討を行う。これらの結果を踏まえて、9 層目以降は、規定された工法にて施工を行い、その際の緩衝材の品質のばらつきについて確認を行う。なお、施工後のレベル測量は各層終了後に行うが、コアサンプリングによる密度測定は、2 層の施工が終了後にまとめて行うこととする。

表 3.1-8 敷均し・転圧の手順

手順 1：標準的な手順（1 層単位で振動転圧）	手順 2：2 層まとめて振動転圧
1) 第 n 層、敷均し、人力（約 100 mm 層厚）	1) 第 n 層、敷均し、人力（約 100 mm 層厚）
2) 第 n 層、予備転圧、無振動転圧（4Pass）	2) 第 n 層、予備転圧、無振動転圧（4Pass）
3) 第 n 層、本転圧、振動転圧（2Pass）	3) 第 n+1 層、敷均し、人力（約 100 mm 層厚）
4) 第 n+1 層、敷均し、人力（約 100 mm 層厚）	4) 第 n+1 層、予備転圧、無振動転圧（4Pass）
5) 第 n+1 層、予備転圧、無振動転圧（4Pass）	5) 第 n、n+1 層、本転圧、振動転圧（4～6Pass）
6) 第 n+1 層、本転圧、振動転圧（2～4Pass）	

表 3.1-9 施工ケース

層	施工手順	振動ローラ転圧 Pass 数	ランマ転圧時間	備考
1~4	手順 2	4、5、6Pass	5 分	施工手順影響
5~6	手順 1	2、3、4Pass	5 分	振動ローラ転圧 Pass 数 ランマ転圧時間影響
7~8			2.5 分	振動ローラ転圧 Pass 数 ランマ転圧時間影響
9~20	手順 1	2Pass ^{※1)}	2.5 分 ^{※2)}	工法規定による品質確認

※ 1) : 5~8 層の施工結果により設定された振動ローラ転圧 Pass 数

※ 2) : 5~8 層の施工結果により設定されたランマ転圧時間

(3) 転圧工法による施工確認試験実施内容

1) ベントナイト含水比調整

工場にて含水比調整を行った施工フローを図 3.1-23 に示す。

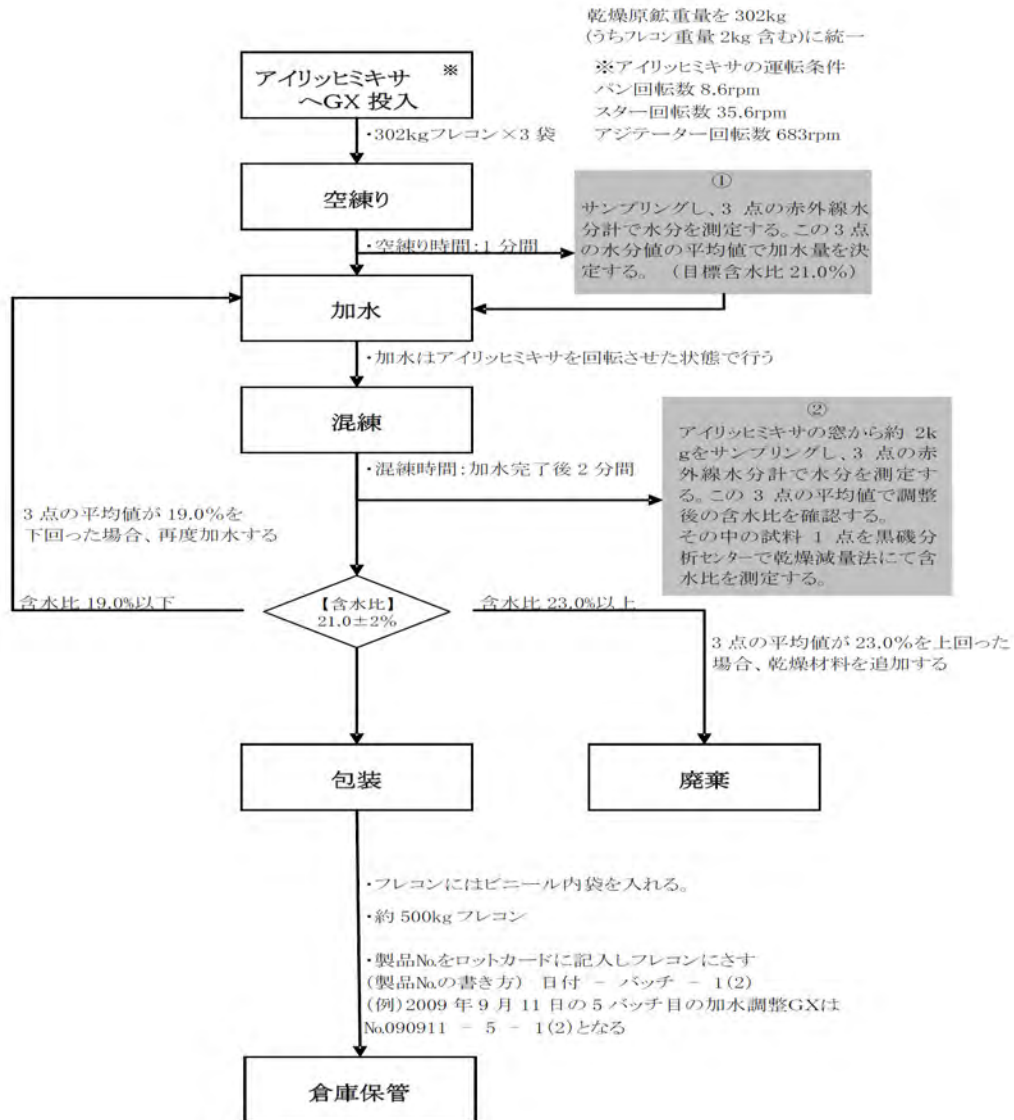


図 3.1-23 含水比調整施工フロー

ベントナイトの含水比調整は、アイリッヒミキサ（容量 1500ℓ）内で加水し所定の含水比に調整した。原材料をアイリッヒミキサに投入・空練り後、3 点/1 バッチ（900 kg）の頻度でベントナイトの初期水分量を赤外線水分計により測定し、目標含水比 21.0%となるように加水量を算出する。ミキサを回転しながら必要量を加水して混練りした。

調整後の含水比の確認は、3 点/1 バッチの頻度で赤外線水分計による確認と、1 点/1 バッチの頻度で炉乾燥法による確認を行った。

以下にベントナイト含水比調整の手順を示す。

- ① 調整前質量の計測（1 バッチ毎に重量測定）
- ② 初期含水比測定（赤外線水分計による測定、1 バッチ単位の平均値の算出）
- ③ 加水量の算出（初期含水比および設定含水比より加水量を算出）
- ④ 加水調整
- ⑤ 調整結果の確認（赤外線水分計による調整直後の確認：3 点/バッチ
炉乾燥法による確認：1 点/バッチ）
- ⑥ 完成質量の計測（1 点/フレコン）

また、加水調整時の作業手順は以下の通りとした。

- ① 加水量の確認
- ② 捨て練りの実施
- ③ 本練り；から練り 1 分、加水終了後、本練り 2 分
- ④ 含水比の確認の結果、管理目標値外の場合は再調整
⇒含水比の低いもの；再加水
⇒含水比の高いもの；未調整材料を用いて再調整

設定値：含水比 21%

管理基準値：含水比 19~23%（含水率 16.0~18.7%）

図 3.1-24にアイリッヒミキサによるベントナイト混練状況を、図 3.1-25に赤外線水分計による調整後含水比測定状況を示す。



図 3.1-24 ベントナイト混練状況



図 3.1-25 調整後含水比測定状況

2) 材料運搬・保管

含水比調整で製造したベントナイトをフレコンバッグ（約 300 kg/フレコン）に詰め、16tトラックによりベントナイト保管庫に運搬した。運搬車からベントナイト保管庫に荷降ろしする際には2tフォークリフトを用いた。

材料の保管では、ベントナイトの下に木製パレットを敷き設し、地面に直接置かないこととし、ベントナイトの防湿に努めた。図 3.1-26 にベントナイト保管状況を示す。



図 3.1-26 ベントナイト保管状況

3) 緩衝材型枠設置

上部緩衝材平面部の試験エリアは、「地下空洞型処分施設性能確証試験試験」で構築された施設の一部のエリアであるため、緩衝材施工用の型枠を設置して施工ヤードとした。図 3.1-27 に型枠の平面図を示す。型枠として、H-200 の H 型鋼材を使用した。各々の H 型鋼材はボルトで接合し一体化させた。型枠設置はカニクレーンを使用し、①、②部材から行った。④部材は奥部埋戻しコンクリートに、⑤部材は、側部埋戻しコンクリートにアンカーボルトにて固定した。図 3.1-28 に型枠の設置時の状況を、図 3.1-29 に型枠設置後の外部の状況、図 3.1-30 に内部の状況を示す。

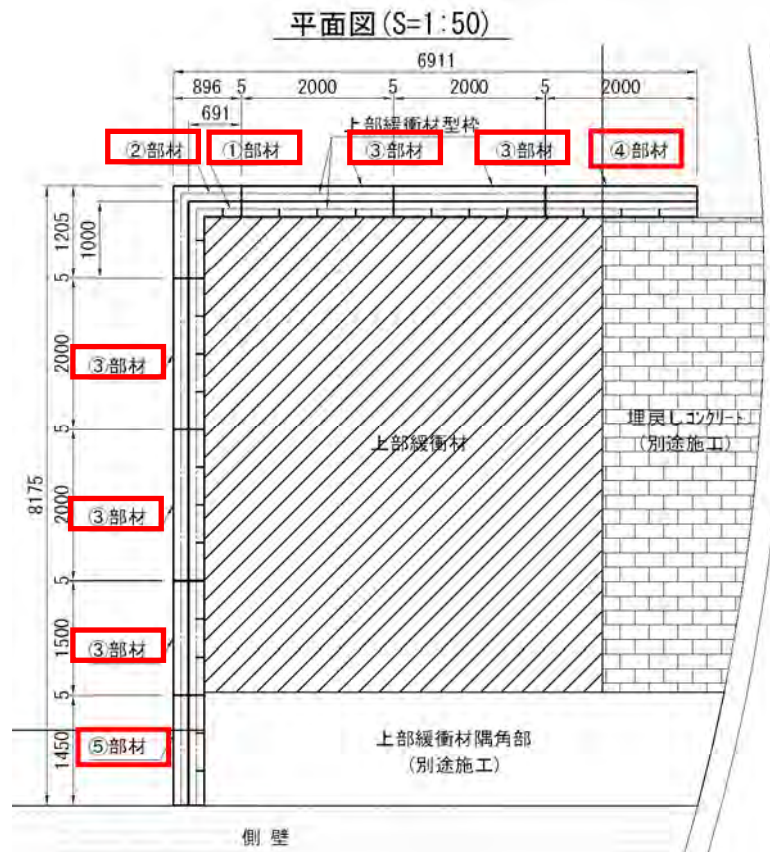


図 3.1-27 緩衝材型枠平面図

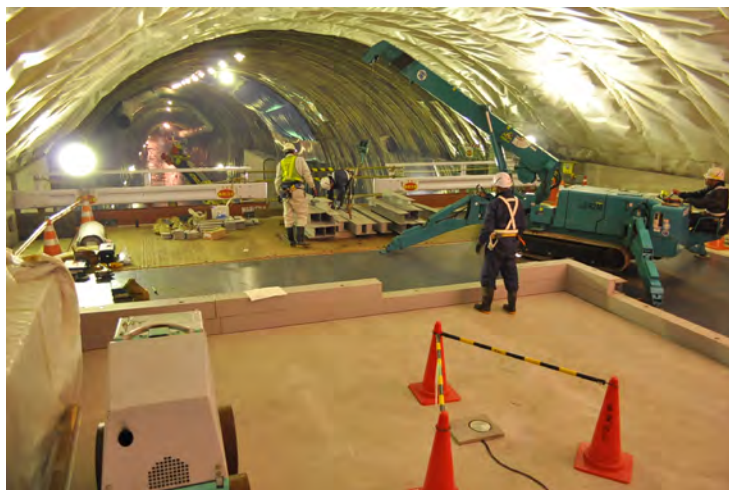


図 3.1-28 型枠設置状況



図 3.1-29 型枠設置後の状況（外部）



図 3.1-30 型枠設置後の状況（内部）

4) ベントナイト供給

25t ラフタークレーンにてピット上部に吊り上げたフレコンを、カニクレーンを使用して型枠内へ吊り上げて施工面へ撒出した。作業手順は以下の通りである。

- ① 使用するベントナイトの質量を測定する。
- ② 25t ラフタークレーンにてコンクリートピット上へフレコンを搬入する。
- ③ カニクレーンにてベントナイトを撒き出す。

図 3.1-31 および図 3.1-32 には、ベントナイト（フレコン）供給状況の平面図および断面図を示す。図 3.1-33 にはカニクレーンを用いた施工ヤードへのベントナイト（フレコン）の供給状況を、図 3.1-34 には撒出し状況を示す。

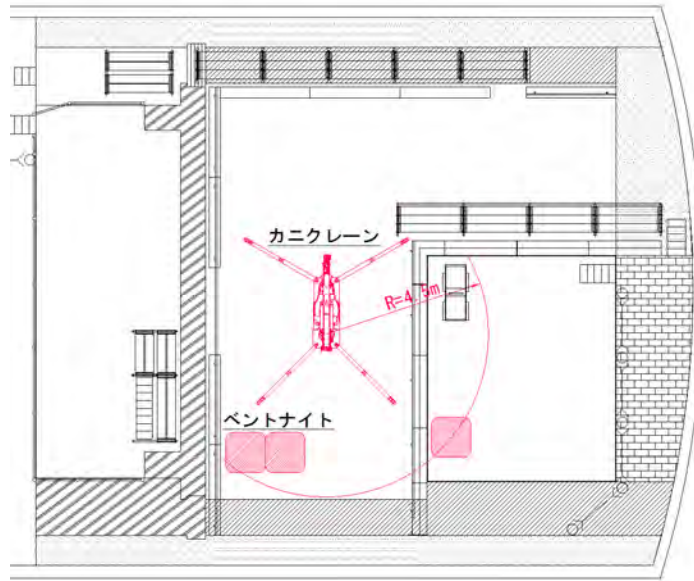


図 3.1-31 ベントナイト（フレコン）供給状況平面図

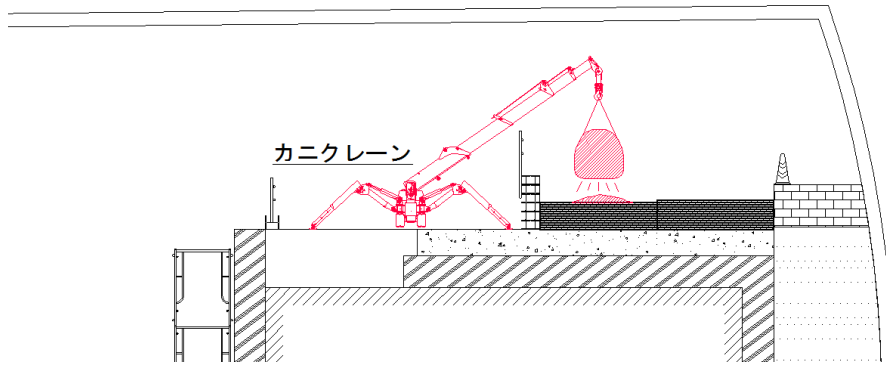


図 3.1-32 ベントナイト（フレコン）供給状況断面図



図 3.1-33 ベントナイト（フレコン）の供給状況



図 3.1-34 ベントナイトの撒出し状況

5) ベントナイト敷均し

施工ヤードに撒出したベントナイトを人力にて敷均した。レーザーレベルを用いて所定の敷均し厚さになるように敷均した。小型振動ローラは施工ヤードに入れたままで施工を行うため、ある区画を所定の高さに敷均した後に、その箇所に小型振動ローラを移動して、残りの箇所の敷均しを行った。作業手順は、以下の通りである。

- ① 木製の平レーキを使用してベントナイトを均等に敷き均す。
- ② 敷均し厚さはレーザーレベルを用いて管理する。
- ③ ある区画を敷均した後に、そこに小型振動ローラを移動して、残りの箇所を敷均す。

図 3.1-35 および図 3.1-36 に敷均し状況の平面図および断面図を示す。図 3.1-37 にはレーザーレベルを用いた敷均し厚さの管理状況を、図 3.1-38 には敷均しの状況を、図 3.1-39 には敷均し完了後の状況を示す。

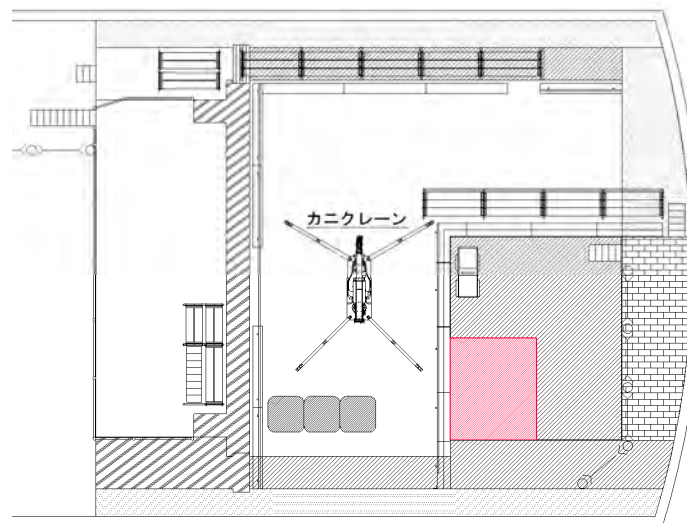


図 3.1-35 ベントナイト敷均し状況平面図

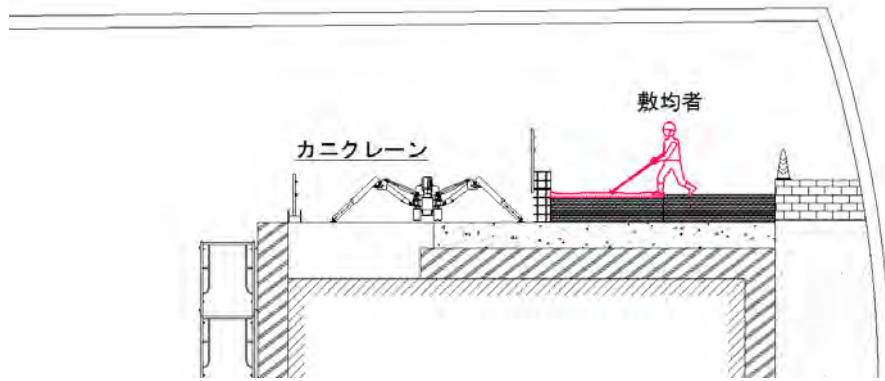


図 3.1-36 ベントナイト敷均し状況断面図



図 3.1-37 レーザーレベルによる敷均し厚さの管理状況



図 3.1-38 ベントナイト敷均し状況



図 3.1-39 敷均し完了後の状況

6) ベントナイト転圧

転圧は小型振動ローラにて行った。小型振動ローラのローラ幅は 0.85m で、両輪の間には約 70mm の隙間がある。そのため、約 100mm の重複部分を設けて転圧を行った。転圧レーン数は 10 レーンとし、振動ローラによる振動転圧回数は 2Pass とした。このとき、走路延長とローラ幅（両輪の間の隙間は除く）の掛け算で総転圧面積を計算し、施工対象面積で割ることにより平均の転圧回数を算出してみると、約 2.5Pass となる。ただし、転圧した箇所と未転圧の箇所を一緒に施工すると、既に転圧している箇所には転圧のエネルギーは十分には作用しないと考えられるため、実際の転圧回数は 2～2.5Pass の間になっているのではないかと推察される。なお、四隅の転圧は、ランマにて行った。

作業手順は、以下の通りである。

- ① 小型振動ローラにより無振動転圧を行う。
- ② 四隅部をランマにて転圧する。
- ③ 小型振動ローラにより振動転圧を行う。

図 3.1-40 には縦断方向の転圧状況図を示す。この方向で施工箇所の端部を施工した後に、図 3.1-41 に示す横断方向に残りの箇所の転圧を行う。振動転圧は、この順番で転圧を行ったが、無振動転圧は逆の順番で転圧を行った。これは、図 3.1-40 の方向を無振動転圧してから図 3.1-41 の方向の無振動転圧を行おうとすると、機械を 90° 転回する必要があり、それを行うと、敷均した材料を乱してしまうためである。したがって、無振動転圧については、先に横断方向にほぼ全面で転圧を行い、その後、残った両端について縦断方向に無振動転圧した。図 3.1-42 にはランマの転圧箇所を示す。図 3.1-43 には小型振動ローラによる無振動転圧の状況を、図 3.1-44 にはランマによる転圧状況を、図 3.1-45 には小型振動ローラによる振動転圧状況を示す。なお、吹付け施工により構築された斜路について、図 3.1-46 に示すように斜路を乗り上げるようにして小型振動ローラで直接転圧を行った。

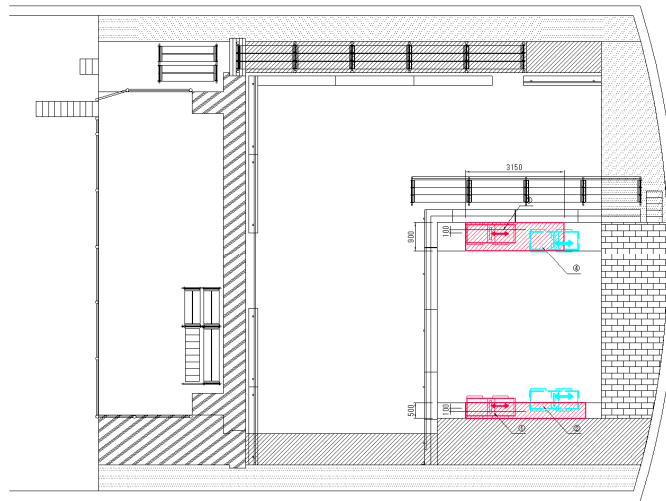


図 3.1-40 ベントナイト転圧状況図(縦断方向)

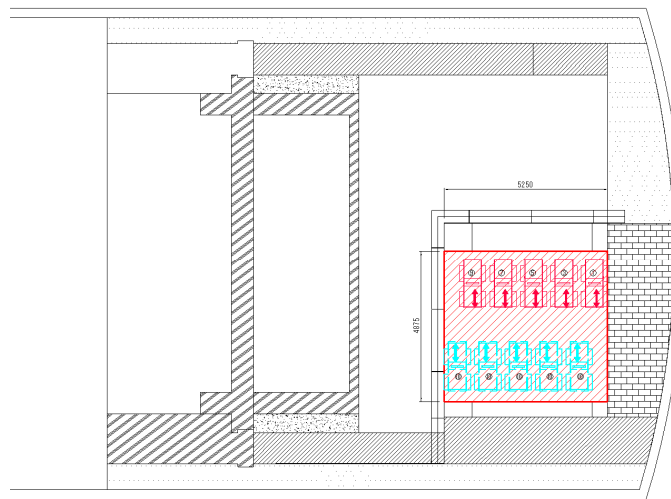


図 3.1-41 ベントナイト転圧状況図(横断方向)

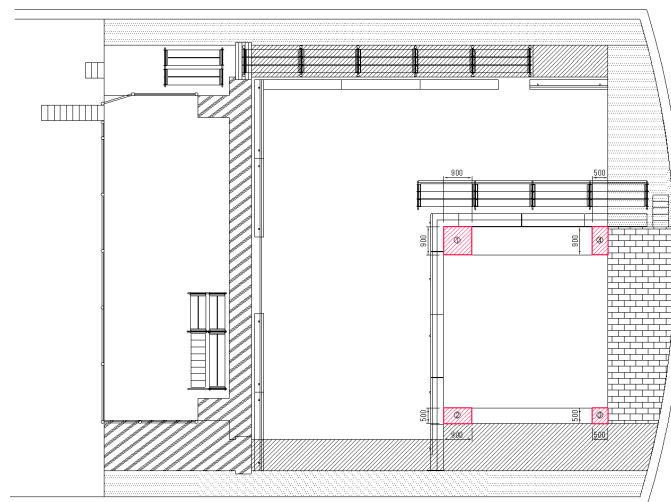


図 3.1-42 ランマによる転圧箇所



図 3.1-43 小型振動ローラによる無振動転圧の状況



図 3.1-44 ランマによる転圧の状況



図 3.1-45 小型振動ローラによる振動転圧の状況



図 3.1-46 吹付け施工により構築された斜路との境界部の転圧状況

7) 出来形管理

転圧施工後、レベル測量を行って仕上り密度の確認を行った。測定値が管理基準値内であった場合は、施工を終了した。密度が低い場合は、さらに再転圧を行った。図 3.1-47 にレベル測量の位置を、図 3.1-48 にレベル測量の状況を示す。

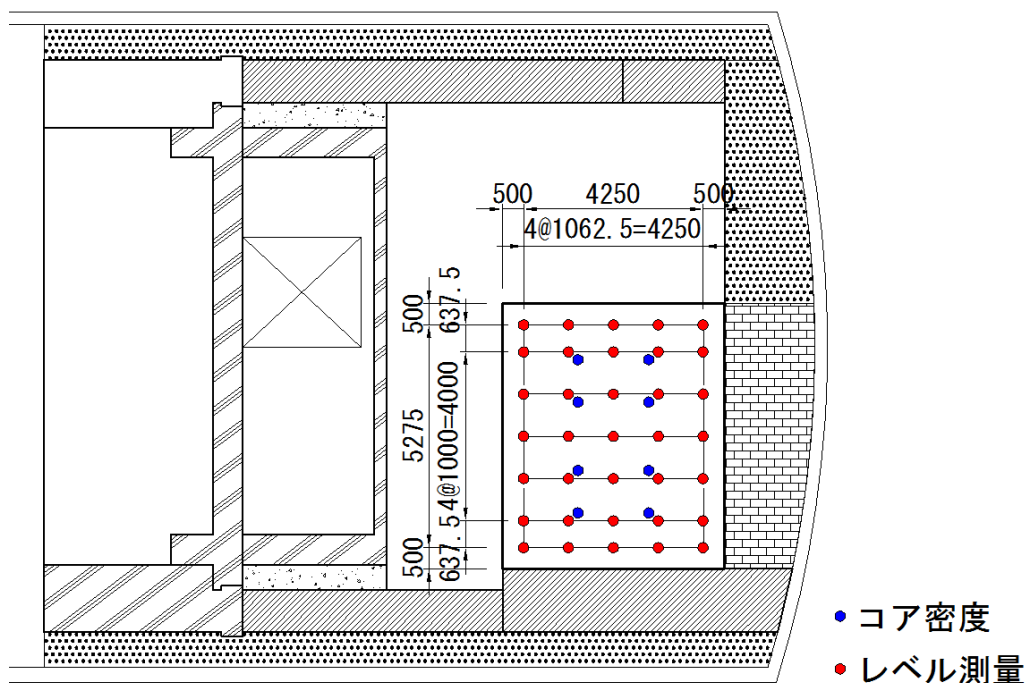


図 3.1-47 レベル測定・コア採取位置図



図 3.1-48 レベル測量の状況

8) 品質管理

レベル測量による密度の確認終了後、コアドリルによりベントナイトのコア採取を行った。コア採取によって、コア密度および含水比の測定を行った。コア密度測定は、1層当り8点とした。レベル測量は各層ごとに行ったが、コア密度測定は2層ごと（厚さ10cm）に行った。

コア採取位置の平面図を図 3.1-47 に示す。図 3.1-49 にコア採取状況、図 3.1-50 に採取したコア、図 3.1-51 にコア採取後の状況を示す。



図 3.1-49 コア採取の状況



図 3.1-50 採取したコア



図 3.1-51 コア採取後の状況

9) 養生

施工終了後、ベントナイト保護のためシート養生を行った。図 3.1-52 に養生状況を示す。



図 3.1-52 シート養生状況

10) 空気圧送試験

本試験では、25t ラフタークレーンを用いて緩衝材材料をコンクリートピット上面に吊り上げることを基本としているが、将来的な技術開発として材料の空気圧送試験を行った。

圧力釜式吹付け機でベントナイトをコンクリートピット上部へ空気圧送し、ホース出口にサイクロンを設置し、ベントナイトと空気を分離させることによりベントナイトの性状を変化させることなく搬送できるか否かの確認を行うことを目的として実施した。

圧送試験の概要を図 3.1-53 に示す。サイクロンとは、粉体分離器、または粉末分離器と称され、気体もしくは液体中に混じった粉末状の固体を、各々に分離するための装置である。

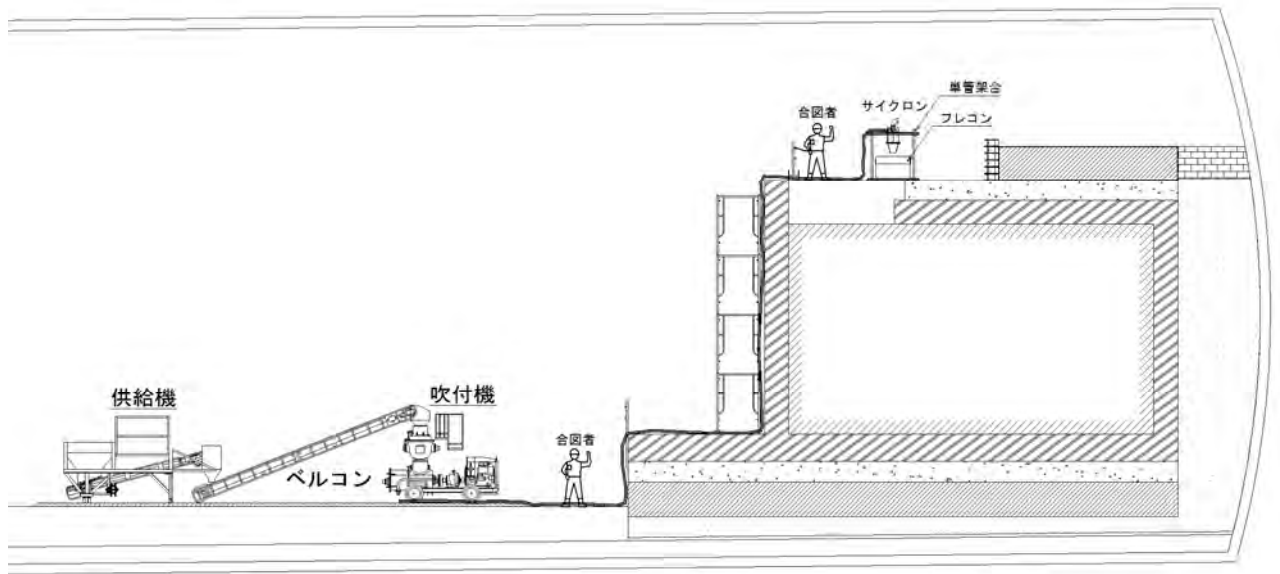


図 3.1-53 空気圧送試験概要断面図

作業手順は以下の通りである。

- ① 圧力釜式吹付け機、ベルコン、材料供給機をピット下部に設置する。
- ② コンプレッサーを設置し、圧力釜式吹付け機を接続する。
- ③ 発電機を設置し、圧力釜式吹付け機を接続する。
- ④ 25t ラフタークレーンにてコンクリートピット上部にサイクロンを搬入する。
- ⑤ サイクロン用架台を組立て、サイクロンを設置し縞鋼板等に架台を固定する。
- ⑥ 25t ラフタークレーンにてベントナイトを供給機に投入する。
- ⑦ 空気圧送試験を行う。
- ⑧ 搬送されたベントナイトはサイクロン直下に設置されたフレコンに入れる。
- ⑨ 搬送時間、搬送前後の材料の性状（含水比）について確認する。

3.1.3 施工管理・品質管理

(1) 管理項目

施工確認試験における品質管理・管理項目を表 3.1-10 に示す。

表 3.1-10 施工確認試験の品質管理・管理項目

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理目標値	管理 or 確認	実施時期	数量
品質管理 (施工前)	材料質量	吊秤	1層当りの必要 質量	管理	敷均し時	層単位
施工管理 (施工時)	敷均し高さ	(墨出し)	設定高さ	管理	敷均し時	—
	転圧回数	—	所定 pass 数	管理	施工時	—
施工管理 品質管理 (施工後)	密度	(コア密度)	乾燥密度 1.6±0.1Mg/m ³	管理	施工終了後	6点/層
	含水比	JIS A 1203	—	確認	施工終了後	6点/層
	施工面観察	(目視)	異常の有無	管理	施工終了後	各層単位
	出来形	レベル測量	設計高さ±3cm	施工後	施工終了後	各層単位
その他	坑内環境デ ータ	(温度、湿度)	—	—	常時	日常記録
	施工内容記 録	(記録簿、写真)	—	—	施工時	日常記録
	サイクルタ イム	(ストップウォッ チ)	—	—	施工時	日常記録

(2) ベントナイト材料品質試験

緩衝材の材料は、これまでの試験と同様にベントナイト（クニゲル GX）100%とした。ベントナイト材料の仕様（管理基準値）および使用材料の試験結果一覧を表 3.1-11 に示す。また、対象としたベントナイト原材料の粒径加積曲線を図 3.1-54 に、X線回折による鉱物組成定性解析結果を図 3.1-55 に示す。

含水比、最大粒径、膨潤力、塑性限界、メチレンブルー吸着量、陽イオン交換容量の各試験値において、管理基準値を満たす結果が得られた。また、鉱物組成分析結果においては、モンモリロナイト等のピーク位置にばらつきは見られないことから、鉱物組成に大きな変化は見られないことが分かった。粒度曲線についても、管理目標範囲を満たす結果が得られた。

表 3.1-11 ベントナイト材料の仕様（管理基準値）および試験結果一覧

試験項目	管理基準値	ミルシート値
	試料数	6
含水比 (%)	10.0 以下	8.3~9.2
最大粒径 (mm)	10 以下	合格
膨潤力(ml/2g)	10 以上	13~15
塑性限界(%)	30 以下	23.2~25.2
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	63~77	65~68
陽イオン交換容量 (meq/100g)	—	67.8

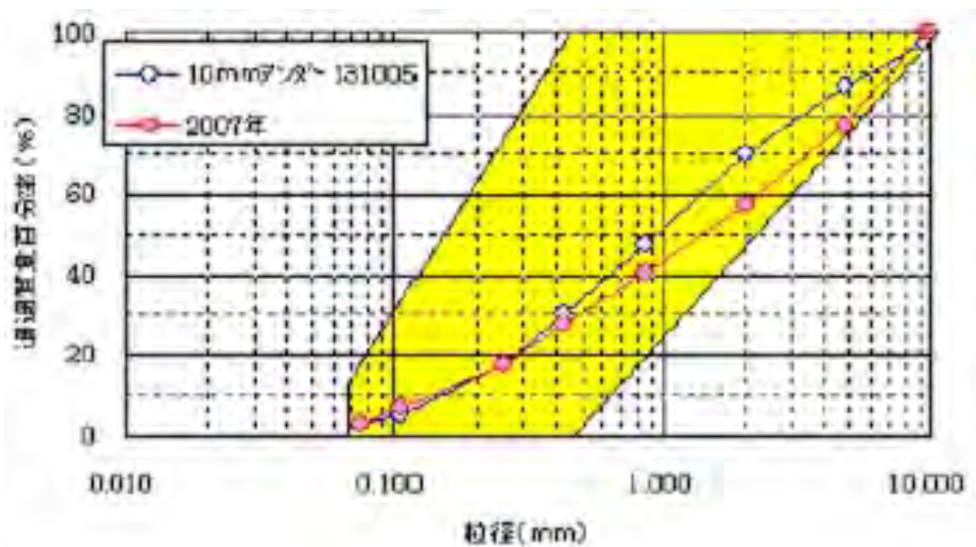


図 3.1-54 ベントナイト材料の試験結果（粒径加積曲線）

※ グラフ中の 2007 年・・・土木学会第 62 回年次学術講演会（平成 19 年 9 月）CS5-001
ベントナイト層の現場施工用材料の開発から抜粋した値

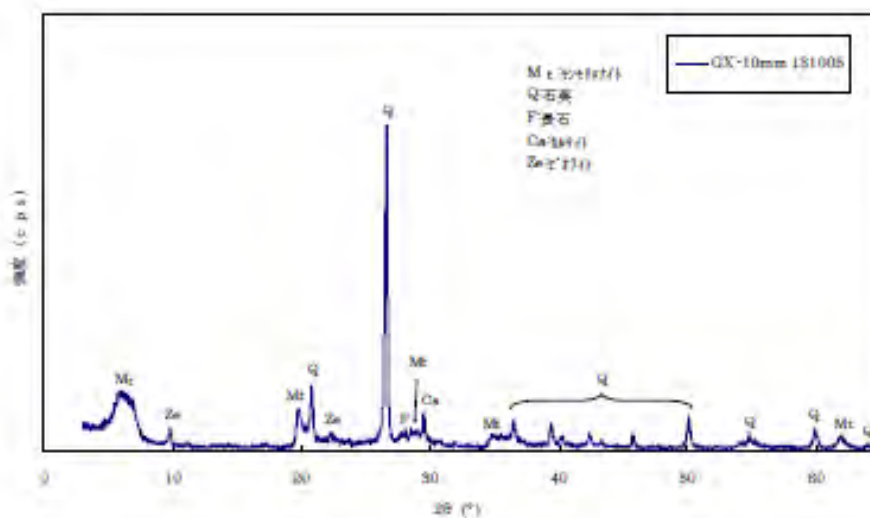


図 3.1-55 ベントナイト材料の試験結果（X線回析による定性解析）

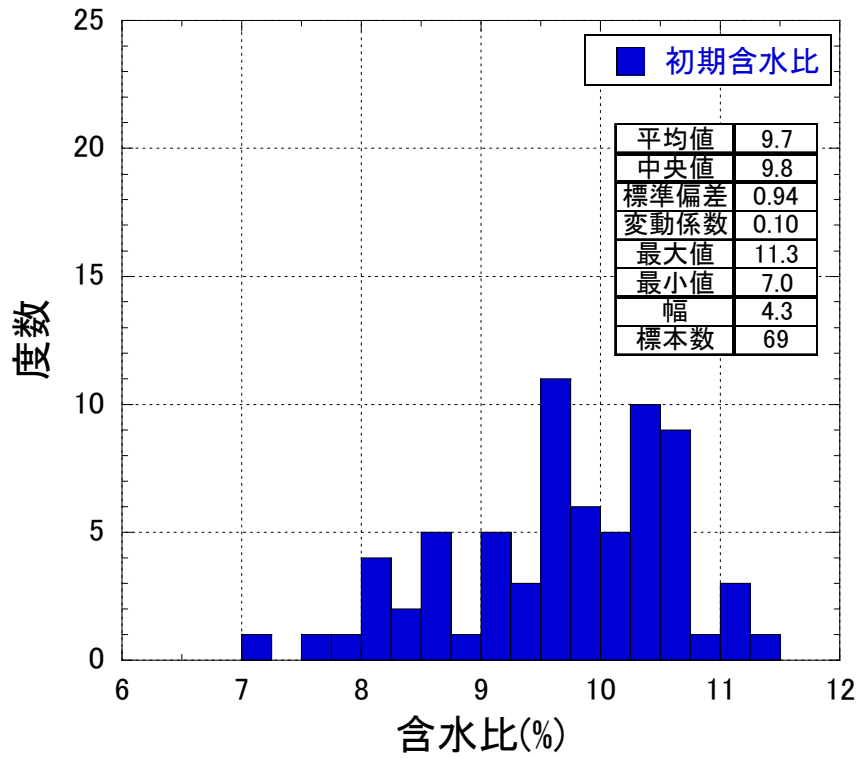


図 3.1-56 使用した材料の初期含水比

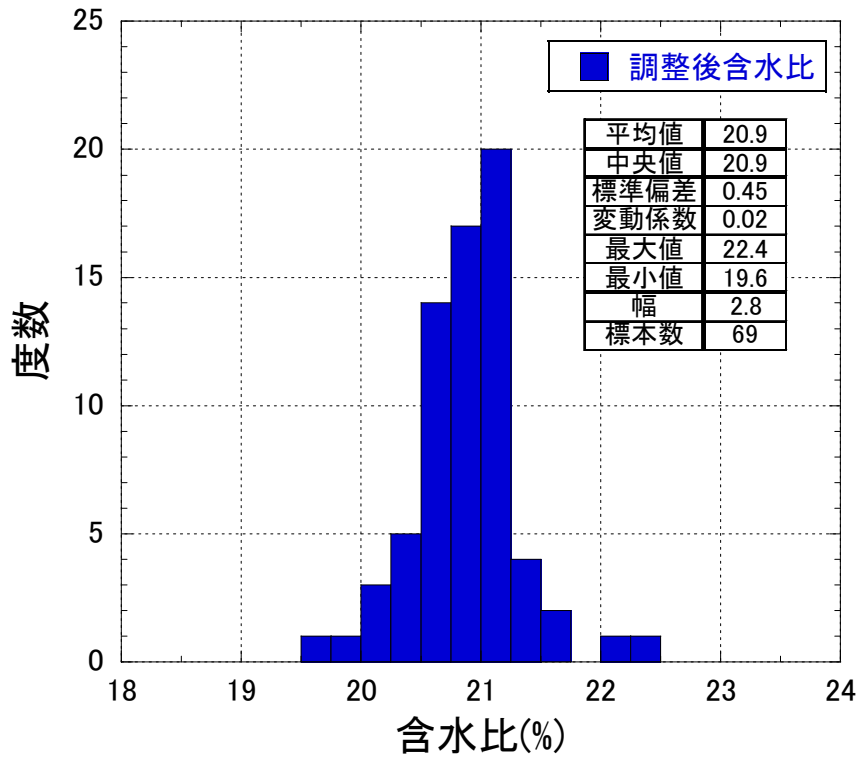


図 3.1-57 使用した材料の水分調整後の含水比

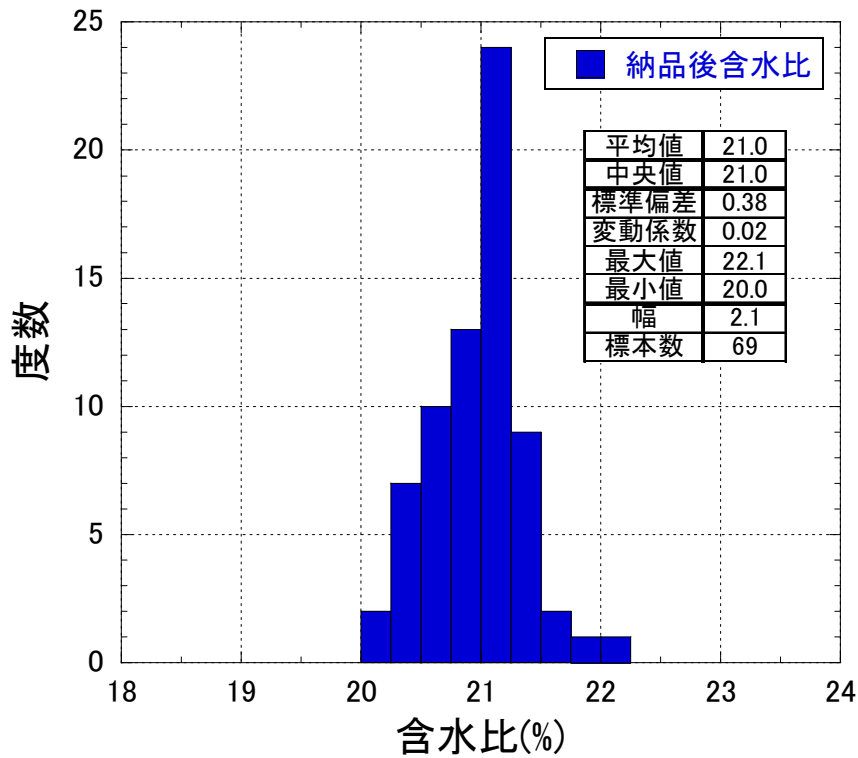


図 3.1-58 使用した材料の納品後の含水比

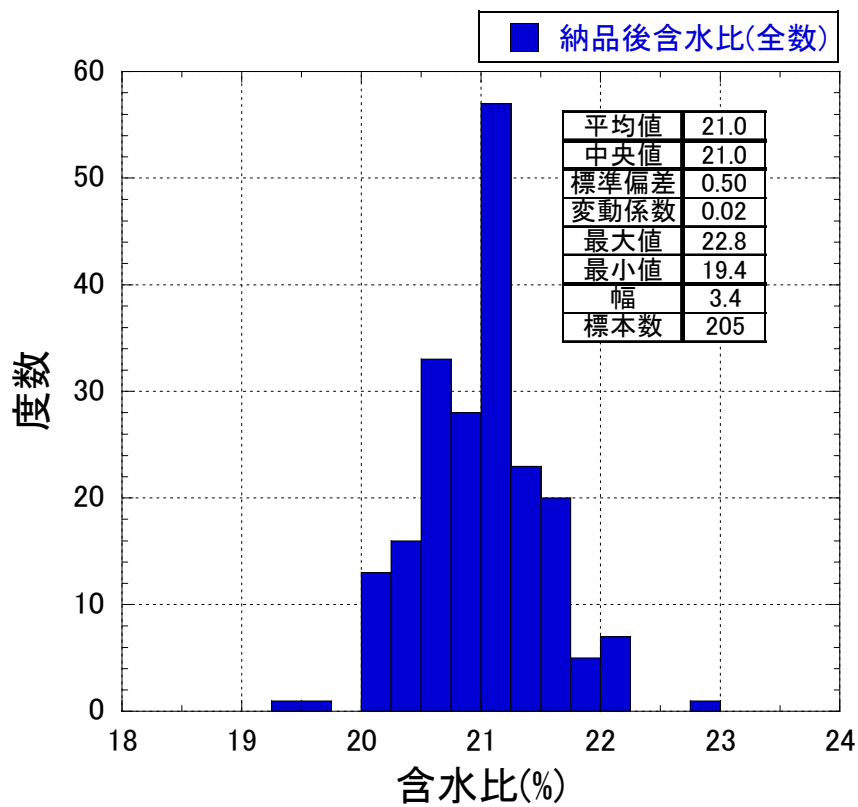


図 3.1-59 使用した材料の納品後の含水比 (全数)

(4) レベルによる測定

各層の転圧終了後にレベルにより出来形測定を実施した。測定箇所は横断方向 7 箇所、縦断方向 5 箇所の計 35 箇所（1 層当り）とした。ベントナイトを敷き均す前にあらかじめ施工部分の面積（ピット幅および長手方向の長さ）を計測し、所要の仕上り厚さとなった時に乾燥密度が $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ となる質量のベントナイトを投入した。したがって、施工後のレベル測定から仕上り厚さを求め、施工面積と仕上り厚さから施工箇所の体積を算出することにより、施工後の密度確認をすることができる。図 3.1-60 には施工開始位置からの施工面の高さを示す。それぞれ、施工面の横断方向のレベル測量結果（5 側線）および縦断方向のレベル測量結果（7 側線）の平均値である。

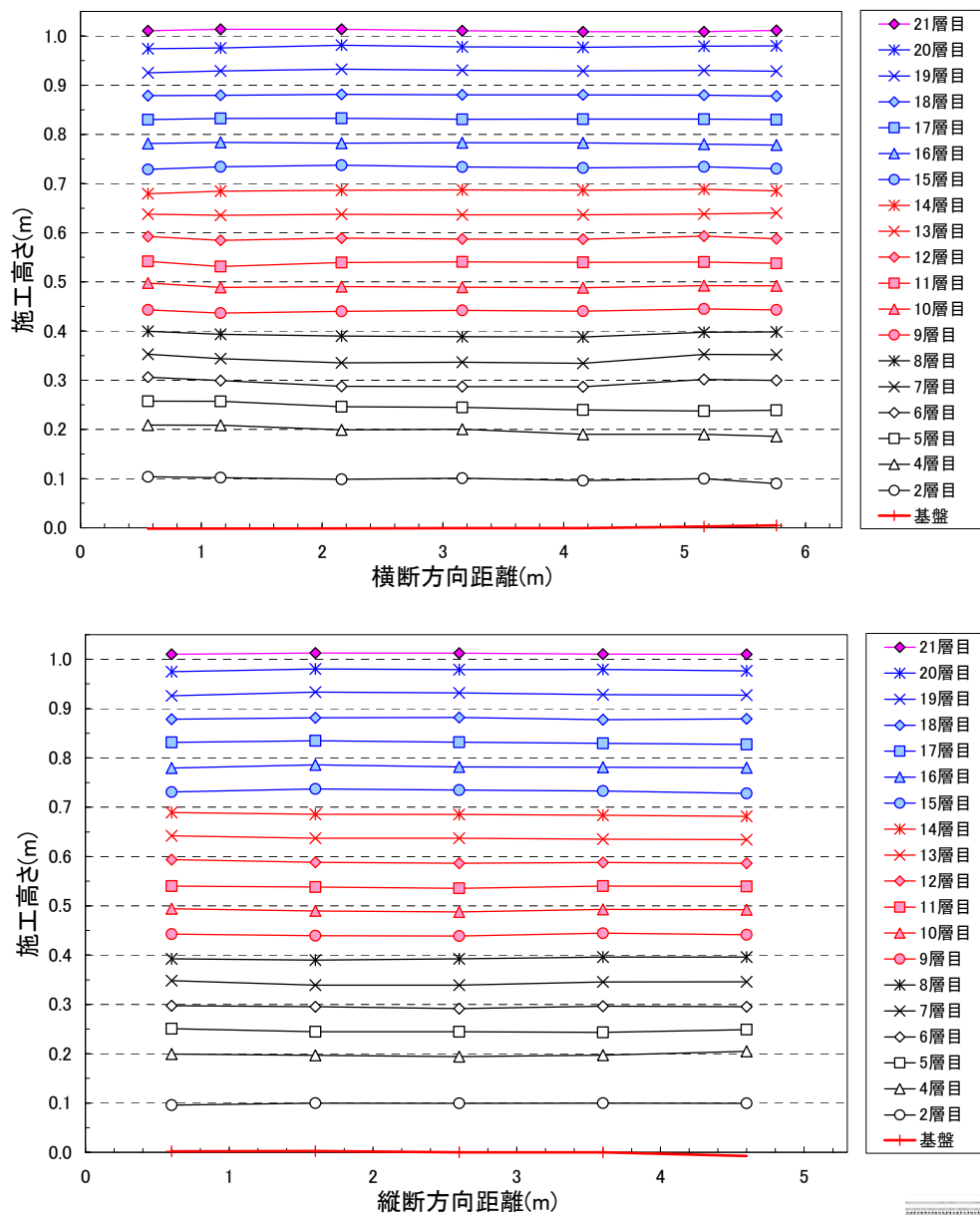


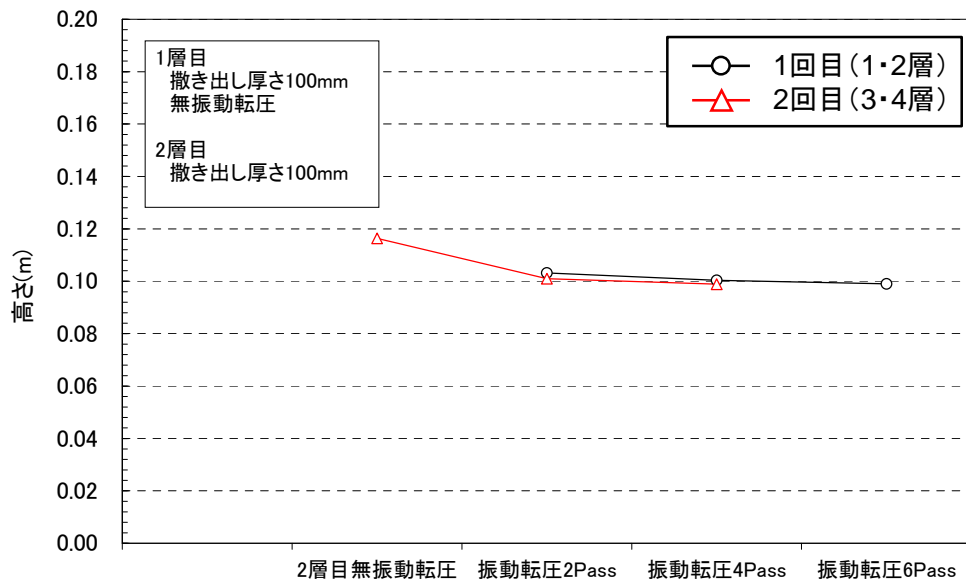
図 3.1-60 施工面の高さ

(5) 転圧方法の違いによる施工高さ

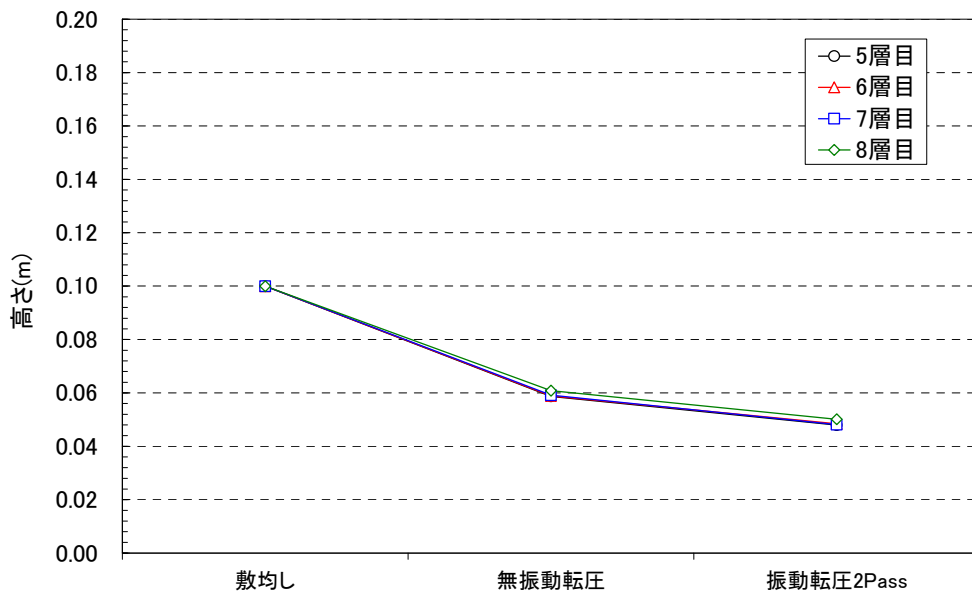
表 3.1-9 の施工手順 2 (1~4 層) および施工手順 1 (5~8 層) の施工高さの変化を図 3.1-61 に示す。

施工手順 2 については、1・2 層、3・4 層の 2 回施工を行ったが、1 回目 (1・2 層) は振動転圧 6Pass で、2 回目 (3・4 層) は振動転圧 4Pass で所定の仕上り厚さ (100mm) に達した。

施工手順 1 については、5~8 層目までの 4 回施工を実施したが、全ての層において振動転圧 2Pass で所定の仕上り厚さ (50mm) に達した。また、5~8 層の無振動転圧終了時、振動転圧 2Pass 終了時の施工面高さはほぼ同じ値となっており、各層の施工での差は小さかった。



(a) 施工手順 2 (2 層まとめて振動転圧)



(b) 施工手順 1 (1 層単位で振動転圧)

図 3.1-61 各施工手順における施工段階での施工高さ

(6) 転圧方法の違いによる乾燥密度

本施工確認試験では、敷均し1層（層圧100mm）ごとに転圧する手順1と、2層まとめて転圧する手順2との比較、およびランマによる転圧を行った四隅について、転圧方法と乾燥密度についての検討を行った。

本施工確認試験での標準的な施工手順は、表3.1-8の左側に示す手順（手順1）である。しかし、小型振動ローラの締固め性能としては、2倍の敷均し厚さの締固めに対しても十分であるため、振動の本転圧を2層ごとに実施する手順についても実施し、手順の違いによる施工密度の違い、および四隅のランマによる転圧時間の違いによる施工後の密度の違いについて検討した。

図3.1-62には施工手順2にて4層目の施工が終了した後に、3層目、4層目のコアサンプリングを行い、それぞれの層を2分割して乾燥密度の測定を行った結果を示す。コアサンプリングは6点実施した。2層まとめて振動転圧していることにより、上層（4層目）から下層（3層目）にいくに従い乾燥密度が小さくなっている。すなわち、上層に比べて下層の方が乾燥密度は小さくなっており、上層上部と下層下部との乾燥密度の差が大きくなっている。

図3.1-63には施工手順1にて6層目の施工が終了した後に、5層目、6層目のコアサンプリングを行い、それぞれの層を2分割して乾燥密度の測定を行った結果を示す。図3.1-62に示して施工手順2の場合と比べると、各層の上下での密度差はあるものの、上層に比べて下層の方が密度が小さいということはない。

図3.1-64および図3.1-65には、それぞれ、施工手順2で施工した際のコア密度のヒストグラムおよび施工手順1で施工した際のコア密度のヒストグラムを示す。施工手順2、すなわち、1層単位で振動転圧を行った場合の方が密度のばらつきは小さいことが分かる。

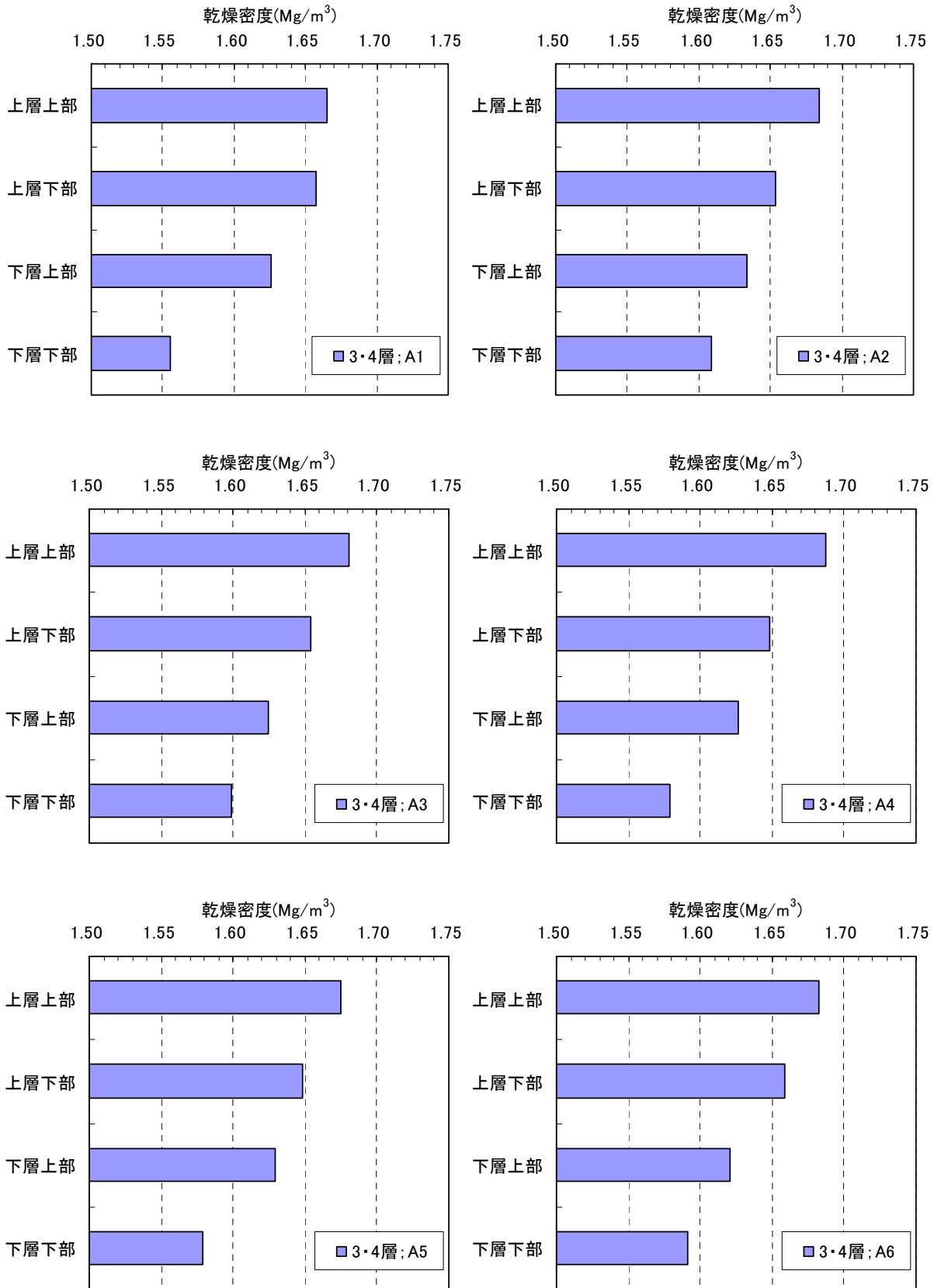


図 3.1-62 施工手順 2 (2層まとめて振動転圧) で施工した層の層内密度分布

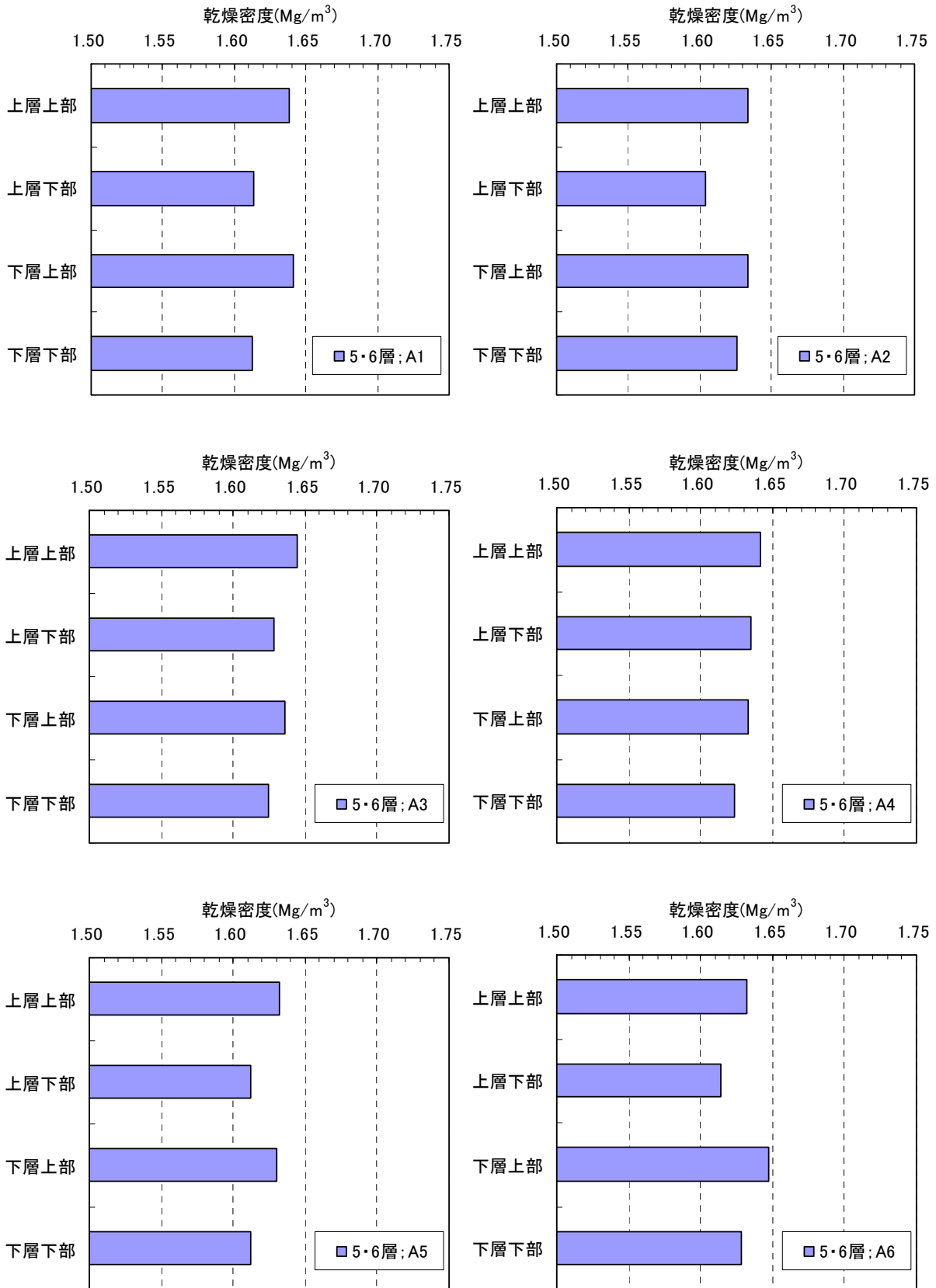


図 3.1-63 施工手順1 (1層単位で振動転圧) で施工した層の層内密度分布

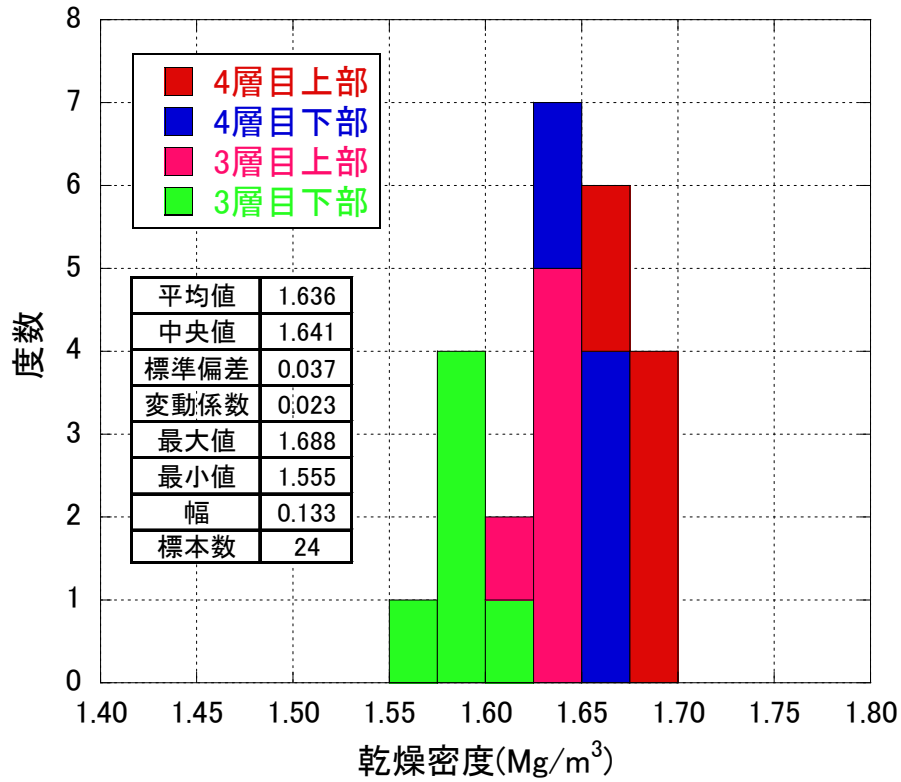


図 3.1-64 施工手順2（2層まとめて振動転圧）でのコア密度のヒストグラム

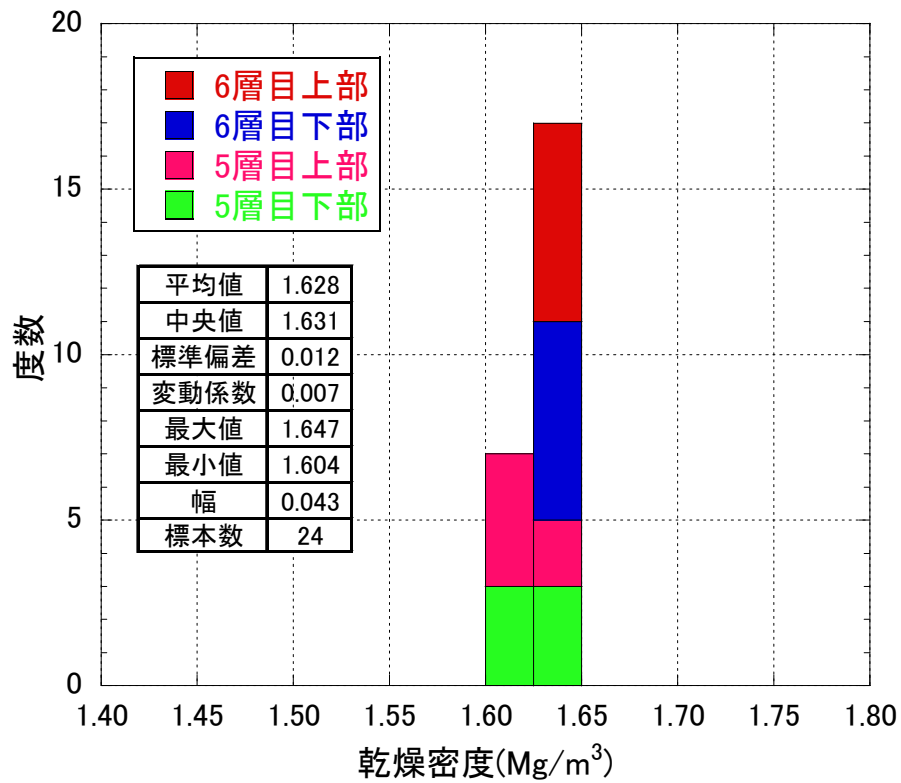


図 3.1-65 施工手順1（1層単位で振動転圧）でのコア密度のヒストグラム

次に、ランマにより四隅を転圧した際のランマ転圧時間の違いによる施工後の品質の比較を行った。図 3.1-66 はランマの転圧時間が 1ヶ所当たり 5 分の時のコア密度の分布を、図 3.1-67 にはランマの転圧時間が 1ヶ所当たり 2.5 分の時のコア密度の分布を示す。なお、ランマ転圧は 1 層単位で実施しており、コアサンプリングは四隅の 4 点で実施した。図 3.1-68 および図 3.1-69 にはコア密度のヒストグラムを示す。ランマの転圧時間が 5 分の時の方が 2.5 分の時よりコア密度の平均値は高くなっており、ばらつきも小さいが、それほど大きな差はない。

以上の結果を踏まえ、9 層目以降の施工パターンは、手順 1（各層で振動転圧）で無振動転圧 4Pass、振動転圧 2Pass とし、四隅のランマの転圧時間は 2.5 分として試験を行った。

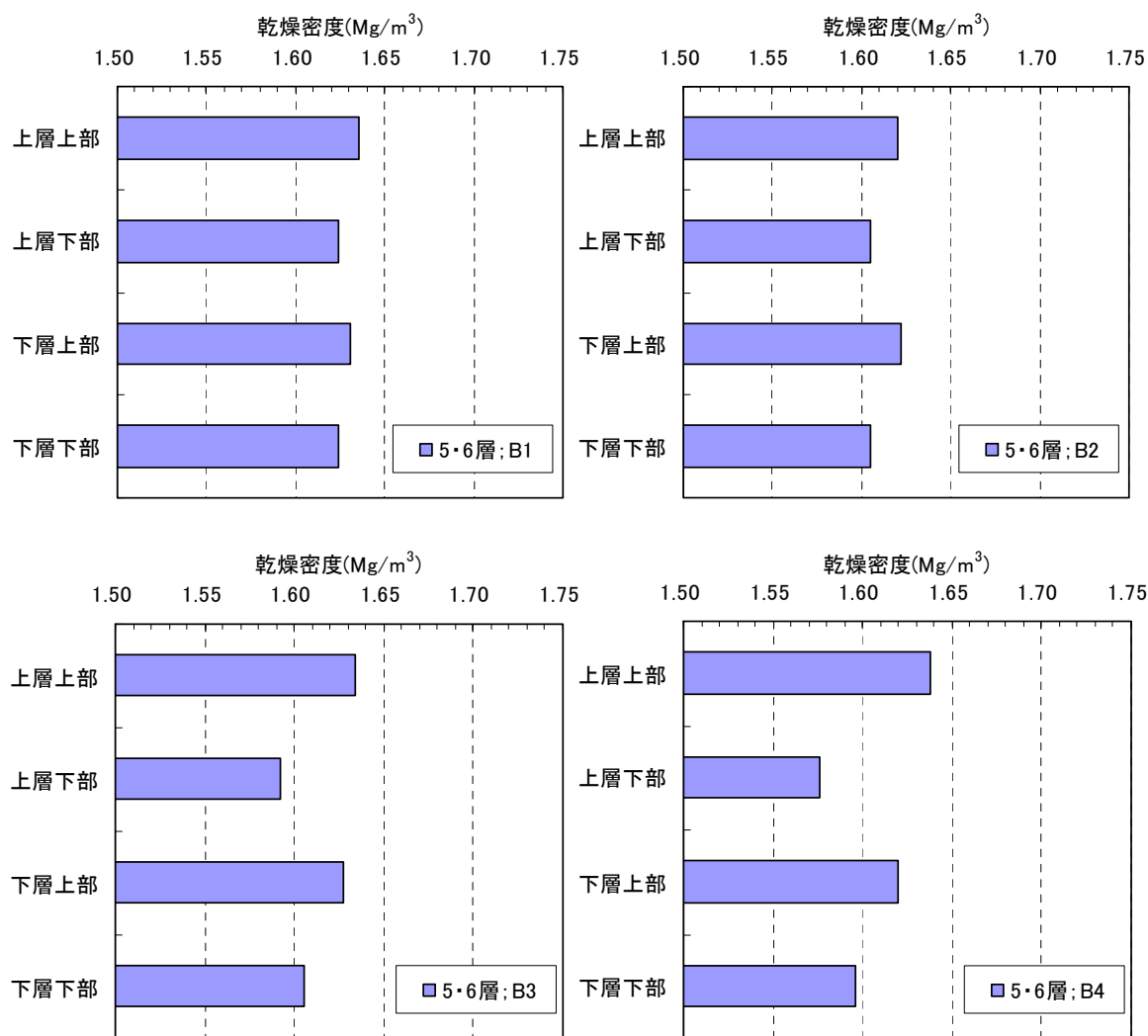


図 3.1-66 四隅における層内密度分布（ランマ転圧時間 5 分）

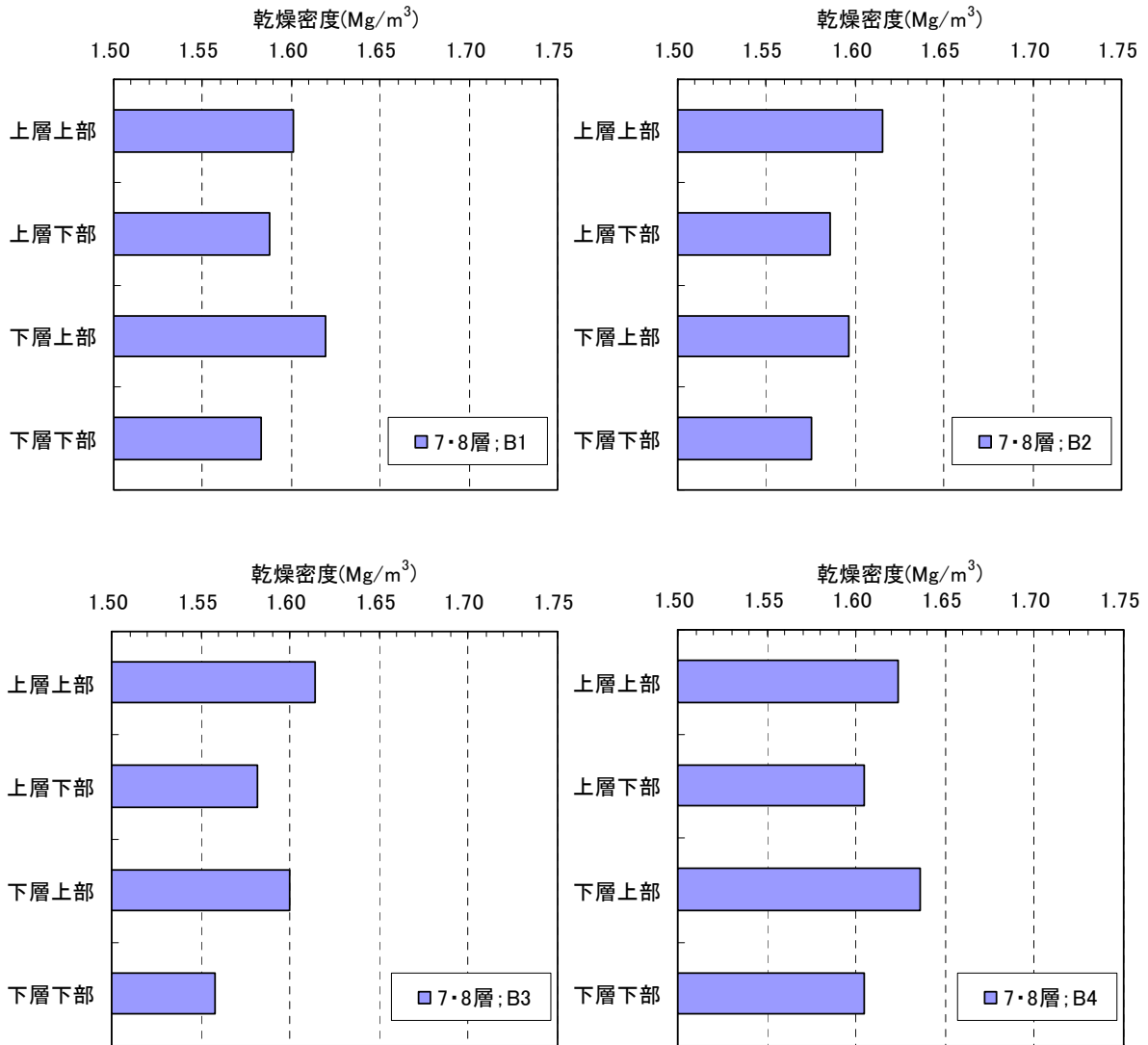


図 3.1-67 四隅における層内密度分布 (ランマ転圧時間 2.5 分)

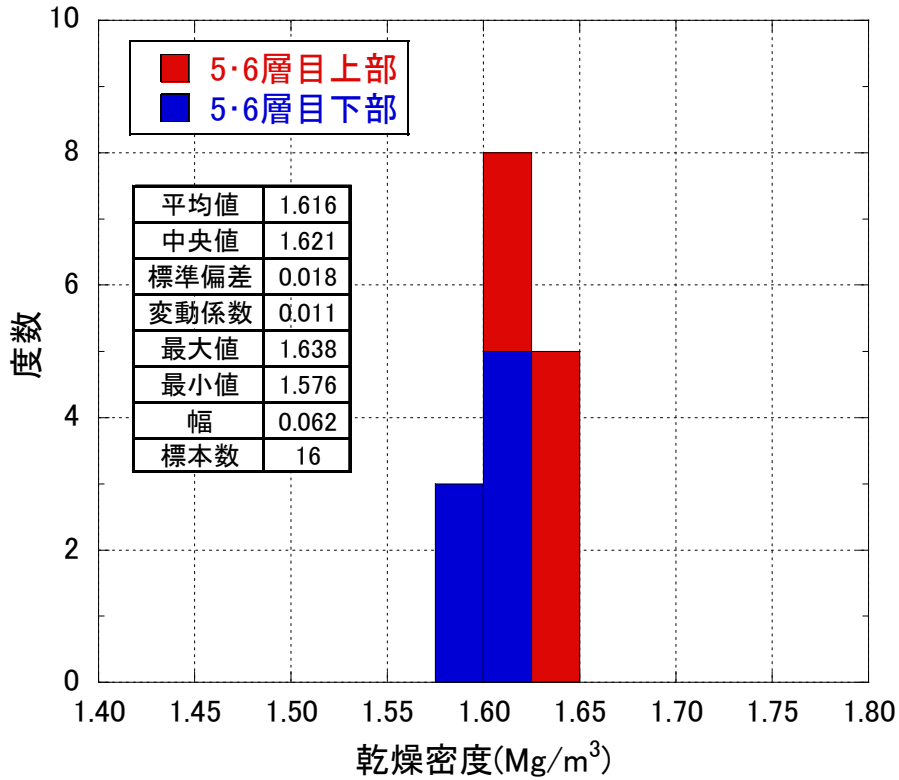


図 3.1-68 四隅のコア密度のヒストグラム (ランマ転圧時間 5 分)

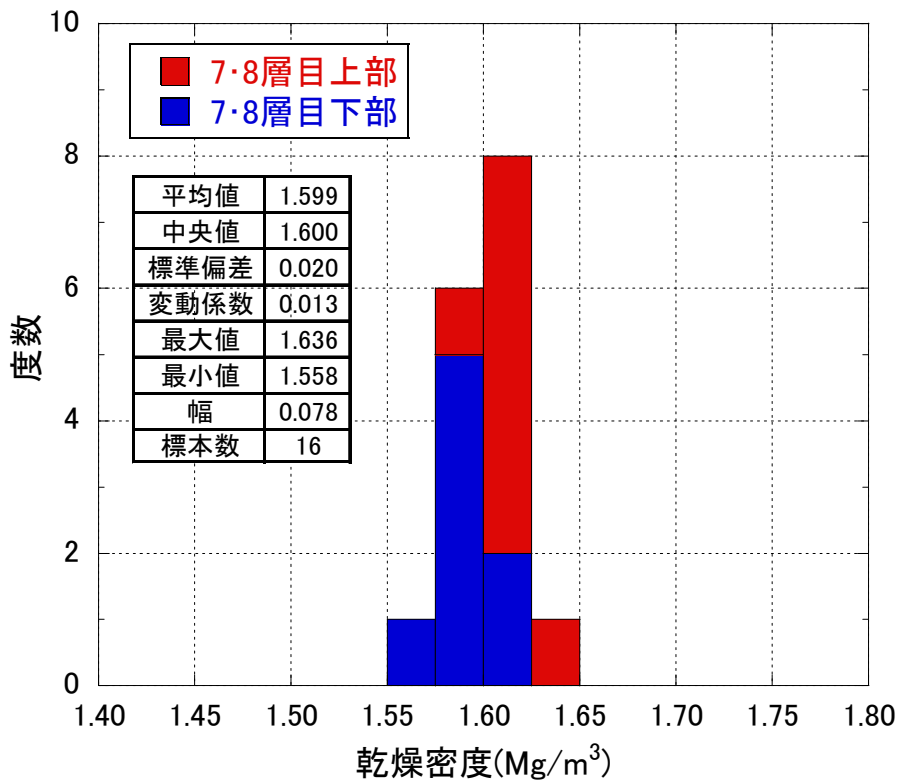


図 3.1-69 四隅のコア密度のヒストグラム (ランマ転圧時間 2.5 分)

(7) 密度、含水比測定

施工は全 21 層実施したが、施工パターンは表 3.1-13 に示す通りである。各層において目標密度および仕上がり高さ、施工面積から投入質量を事前に算出して、施工後のレベル管理を行うことにより施工管理を行った。なお、吹付け工法により施工された斜路の部分の体積を考慮して各施工層の投入材料の質量の算出は行っている。また、最終 21 層については、投入可能量（残量）から目標敷均し厚さを逆に算出して撤出しを行った。

品質管理用のコアサンプリングは 2 層単位で実施した。コアサンプリングは各層 8 点実施し、密度を測定した。測定箇所は、図 3.1-47 に示す通りである。図 3.1-70 には、各層（2 層単位）のコア密度測定結果およびレベルにより算出した密度（2 層の平均）を示す。仕上がり密度は 1.62～1.66Mg/m³ の範囲となっている。図 3.1-71 に各層のコア密度の平均値のヒストグラムを、図 3.1-72 には全データコア密度のヒストグラムを示す。

表 3.1-13 施工パターン

施工層	敷均し	無振動転圧	振動転圧	品質管理	手順
1 層目	敷均し	無振動転圧	—	—	手順 2
2 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
3 層目	敷均し	無振動転圧	—	—	手順 2
4 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
5 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
6 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
7 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
8 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
9 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
10 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
11 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
12 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
13 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
14 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
15 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
16 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
17 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
18 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
19 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	手順 1
20 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	サンプリング	
21 層目	敷均し	無振動転圧	振動転圧	—	施工高さ調整

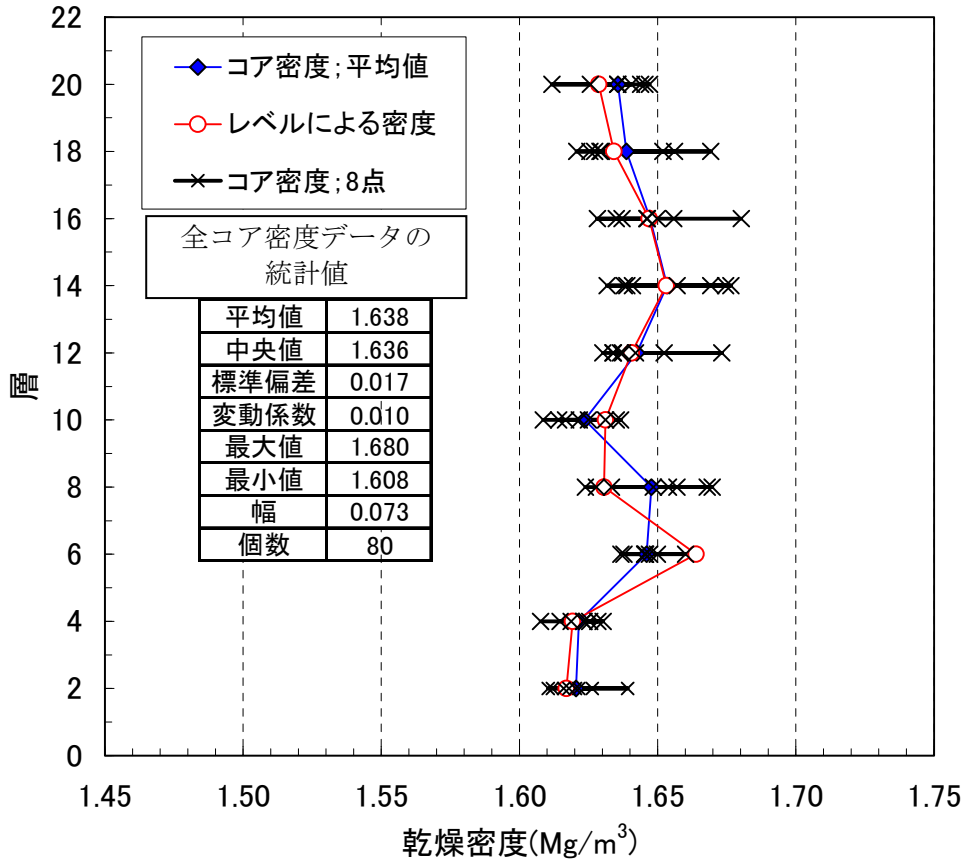


図 3.1-70 各層における密度測定結果

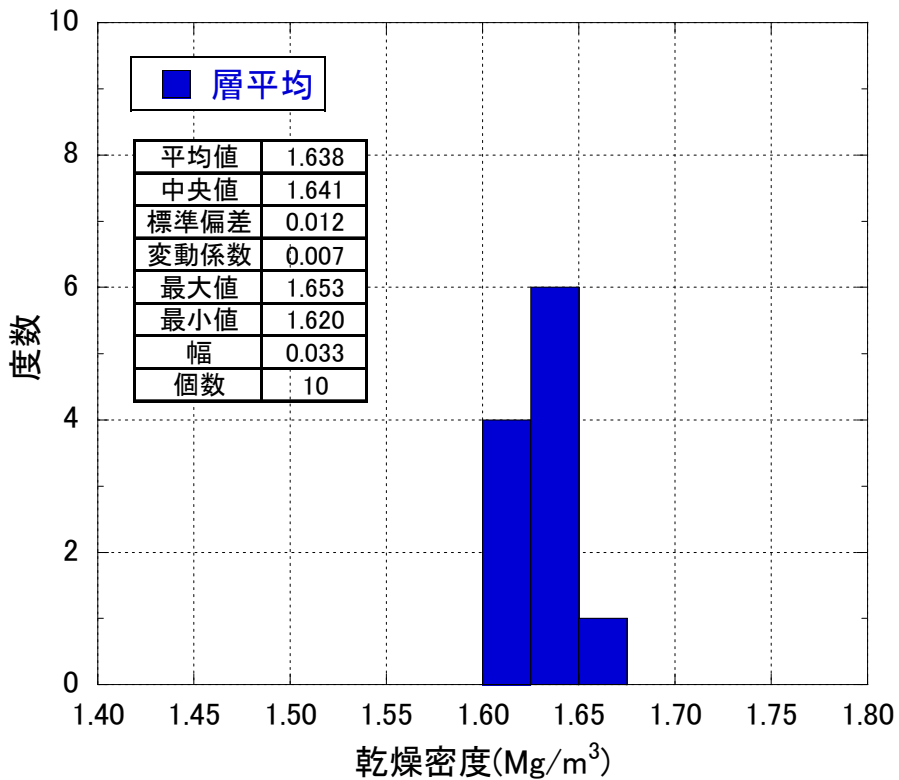


図 3.1-71 コア密度のヒストグラム (各層の平均値)

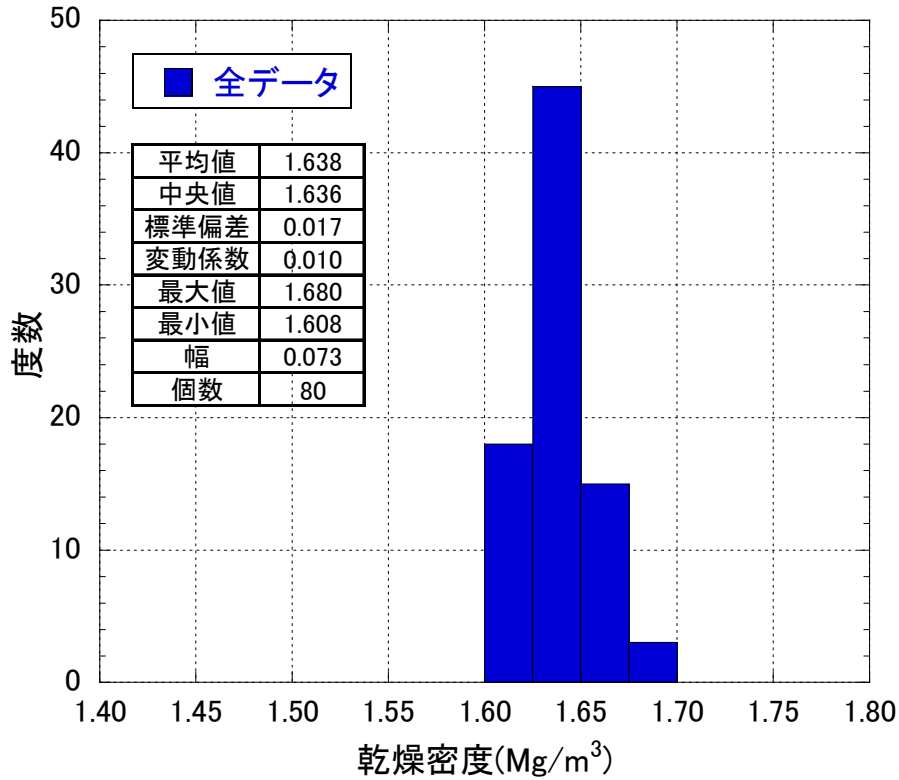


図 3.1-72 コア密度のヒストグラム (全測定データ)

(8) サイクルタイム測定

本試験の施工方法における施工速度や歩掛を算出する上で、サイクルタイムが必要となることから、ストップウォッチ等で施工時間を記録した。計測結果は添付資料に示す遠しである。考察については後述する。

(9) 吹付け施工面と転圧施工面の境界部の状況

吹付け工法により施工され構築された斜路部に、図 3.1-46 に示したように小型振動ローラを乗り上げるようにして施工した箇所について、その境界部の状況を確認するために図 3.1-73 に示す位置においてコアのサンプリングを行った。考察については後述する。



図 3.1-73 施工境界部における試料サンプリング

(10) 空気圧送試験

圧力釜式吹付け機およびサイクロンを用いて、ベントナイト材料の空気圧送の可能性に関する試験を実施した。試験の概要は図 3.1-53 に示す通りであり、ピットの下部に圧力釜式吹付け機を配置し、ピット上部への材料搬送を行った。図 3.1-74 に、供給機に材料を投入している様子を、図 3.1-75 に供給機から圧力釜式吹付け機へ材料を供給している様子を、図 3.1-76 にはピット上部に設置したサイクロンの様子を、図 3.1-77 にはサイクロンから排出されている材料の様子を示す。空気圧送は本試験として3回実施した。本試験においては圧送の前後で材料の質量計測を行った。また、圧送後に一部材料を回収して含水比測定を行い、水分変化の有無を確認した。結果および考察については後述する。

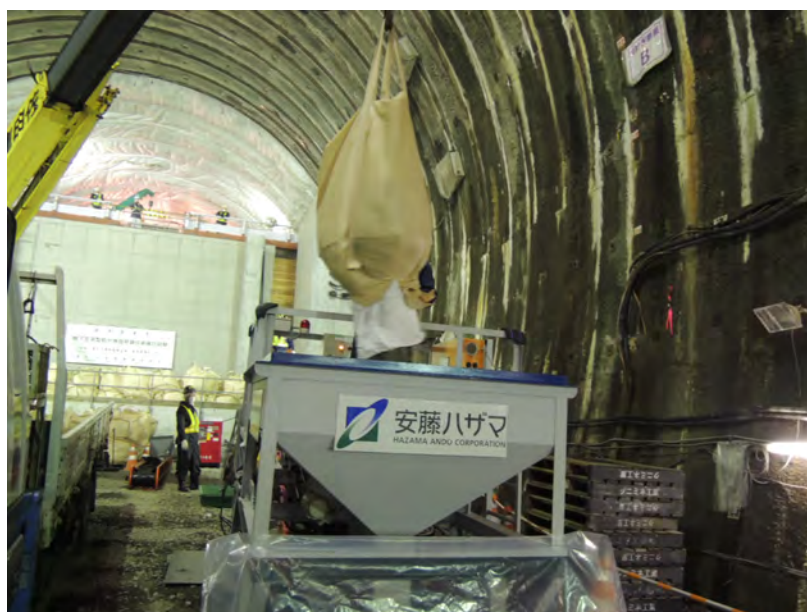


図 3.1-74 供給機への材料投入状況



図 3.1-75 供給機から圧力釜式吹付け機へ材料を供給している様子



図 3.1-76 ピット上部に設置したサイクロンの様子



図 3.1-77 サイクロンから材料が排出されている様子

3.2 初期性能確認試験

3.2.1 初期性能確認試験の概要

(1) 試験項目および試験数量

日本原子力学会標準「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」および土木学会(2009)「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」の検討成果を元に、緩衝材の要求機能と技術要件を抽出し、必要な試験項目を設定した。すなわち緩衝材には、「基本安全機能」として閉じ込めおよび移行抑制機能が要求されており、その技術要件として透水特性が、また、「作業上の機能」の技術要件として力学特性が上げられている。これらを踏まえ、以下の試験を実施した。

初期性能確認試験は、下記の通り大きく3つに分類される。

- ①建設・作業時の中の安全確保性能のための試験
- ②止水性能のための試験
- ③閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能のための試験

今年度は①建設・作業時の中の安全確保性能のための試験として一軸圧縮強度試験、三軸圧縮強度試験、②止水性能のための試験として透水試験およびその代替特性確認のための乾燥密度測定試験、③閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能のための試験として膨潤圧測定試験を行った。

施工完了時点の品質を確認することを目的に室内試験を実施した。試験項目および試験数量を表 3.2.1 に示す。

表 3.2-1 試験項目および試験数量

No.	分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	実施時期	実施場所	数量	記録方法	検査確認者	報告方法	報告時期	不適合時の対応	備考
1	(透水) 基本特性	透水係数	JIS A 1218 に準拠	コアサンプリング後	室内試験室	4	データシート	主任技術者	書面	試験後	再試験	2点/層×2層× 1箇所×1面
2	基本特性(強度)	一軸圧縮 強度強度	JIS A 1216			1						1試験(3試料)× 1面
3		三軸圧縮 強度強度	JGS0527 に準拠			1						1試験(3試料)× 1面
4		膨潤特性	膨潤圧試験			4						2点/層×2層× 1箇所×1面
5	代替特性	密度 (コア)	ノギス法 (2分割)		現地試験室	40						2点/層×4層× 5箇所×1面
6		含水比	JIS A 1203			40						2点/層×4層× 5箇所×1面

(2) 供試体の採取

図 3.2-2 には試験用試料の採取位置を示す。室内試験用の試料のサンプリングは透水試験、膨潤圧試験、一軸圧縮強度試験、三軸圧縮強度試験用については 16 層目終了時点、密度試験については 20 層目終了時点で行った。供試体は $\phi 100\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ の形状とし、これを分割して試験用供試体を整形した。図 3.2-2 に供試体断面図を示す。

コアの採取は、 $\phi 100\text{mm}$ 小型コアドリルにより実施した。小型コアドリルによる採取状況を図 3.2-3 に、採取したコアを図 3.2-4 に示す。また、初期性能確認試験の試験ケースを表 3.2-2 に示す。

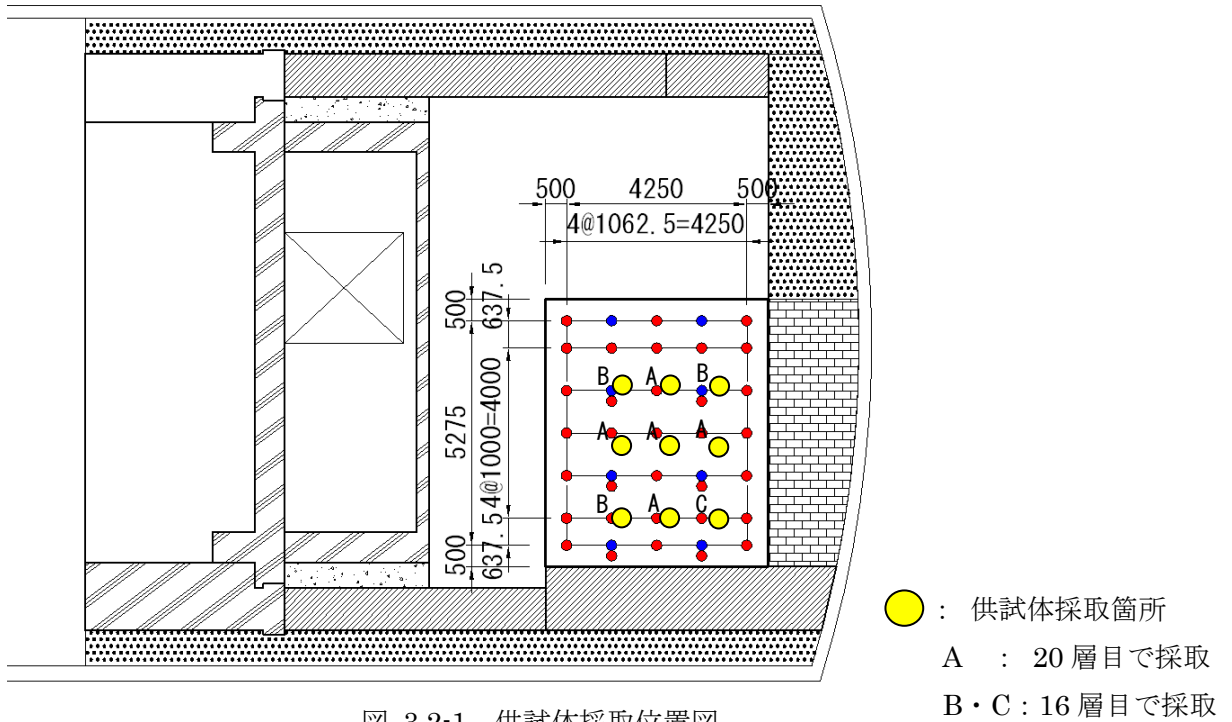


図 3.2-1 供試体採取位置図

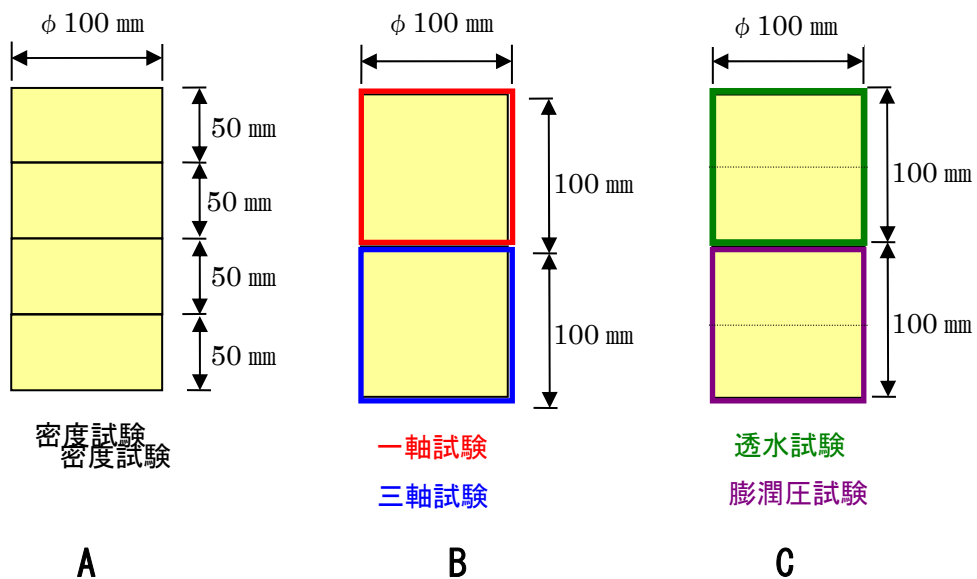


図 3.2-2 供試体断面図



図 3.2-3 小型コアドリルによるコア採取の状況



図 3.2-4 小型コアドリルにより採取したコアの状況

表 3.2-2 品質測定試験（室内試験）ケース

試験種類	試験ケース名	コアリング位置	試験数	供試体寸法(mm)
一軸圧縮試験	UCS_1	B	1	φ50×H100
	UCS_2	B	1	φ50×H100
	UCS_3	B	1	φ50×H100
三軸圧縮試験	UU_1	B	1	φ50×H100
	UU_2	B	1	φ50×H100
	UU_3	B	1	φ50×H100
透水試験	PE_1-1	C	1	φ60×H10
	PE_1-2	C	1	φ60×H10
	PE_2-1	C	1	φ60×H10
	PE_2-2	C	1	φ60×H10
室内膨潤圧試験	SW_1-1	C	1	φ60×H20
	SW_1-2	C	1	φ60×H20
	SW_2-1	C	1	φ60×H20
	SW_2-2	C	1	φ60×H20

3.2.2 建設・作業時の安全確保性能の確認試験

(1) 一軸圧縮試験

1) 試験方法

一軸圧縮強度ならびに変形係数を得るために、採取したコアを用いて、一軸圧縮試験を行った。供試体の大きさは直径 50mm×高さ 100mm を基本とした。試験は「土の一軸圧縮試験 (JIS A 1216)」に準拠して行った。また、含水比の測定は、「土の含水比試験方法 (JIS A 1203)」に準拠して行った。

2) 試験結果

図 3.2-5 には試験状況を示す。現地から採取したコアの寸法は直径約 100mm、高さ約 100mm であるため、それをトリミングにより成形して約 50mm×100mm の寸法の供試体とした。図 3.2-6～図 3.2-8 には試験を行った供試体の試験前後の状況を示す。

表 3.2-3 に今年度実施した一軸圧縮試験結果を既往値と合わせて整理し、図 3.2-9 に圧縮応力～ひずみ曲線を示す。一軸圧縮強度 q_u は $671.5\text{kN/m}^2 \sim 690.1\text{kN/m}^2$ であり、破壊ひずみ ε_f は $3.7\% \sim 5.1\%$ 、変形係数 E_{50} は $47.0 \sim 59.1\text{MN/m}^2$ の範囲であった。それぞれの平均値は一軸圧縮強度が 677.9kN/m^2 、破壊ひずみ ε_f が 4.6% 、変形係数 E_{50} が 53.1MN/m^2 であった。



(a)採取したコア



(b)トリミング状況



(c)試験用供試体



(d)試験状況

図 3.2-5 一軸圧縮試験の状況



(a) 試験前



(b) 試験後

図 3.2-6 一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_1)



(a) 試験前



(b) 試験後

図 3.2-7 一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_2)



(a) 試験前



(b) 試験後

図 3.2-8 一軸圧縮試験前後の供試体の状況 (UCS_3)

表 3.2-3 一軸圧縮試験結果一覧表 (既往の結果を含む)

実施年	試験 ケース名	乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 [%]	一軸圧縮強さ [kN/m ²]	破壊ひずみ [%]	変形係数 [MN/m ²]	軸ひずみ速度 [%/min]
2010	UCS_19C	1.653	19.9	728.7	5.3	33.4	1
	UCS_39C	1.624	20.5	637.6	4.7	32.6	1
	UCS_59C	1.605	20.2	601.3	3.6	35.4	1
2011	UCS_83B	1.639	19.7	728.9	3.3	48.9	1
	UCS_83C	1.636	20.4	695.4	4.3	42.1	1
	UCS_83D	1.610	20.5	588.0	3.6	32.4	1
2012	UCS-1B	1.660	20.2	786.8	4.1	64.5	1
	UCS-1C	1.663	20.1	796.3	5.3	50.8	1
	UCS-1D	1.661	20.5	765.1	6.3	37.9	1
	UCS-2B	1.681	19.6	790.2	4.4	61.0	1
	UCS-2C	1.653	19.3	779.5	4.0	72.0	1
	UCS-2D	1.681	19.5	851.6	5.1	55.6	1
	UCS-1I1	1.635	19.9	645.6	5.0	38.8	0.01
	UCS-1I2	1.614	20.1	589.3	3.9	36.9	0.01
	UCS-1I3	1.680	19.0	755.7	6.0	29.5	0.01
	UCS-2I1	1.608	19.5	591.7	4.6	42.1	0.01
	UCS-2I2	1.634	18.7	670.9	4.7	38.6	0.01
	UCS-2I3	1.635	19.3	657.7	3.3	54.9	0.01
2013	UCS_1	1.635	20.0	690.1	5.1	53.1	1
	UCS_2	1.629	20.0	672.2	5.1	47.0	1
	UCS_3	1.640	19.7	671.5	3.7	59.1	1

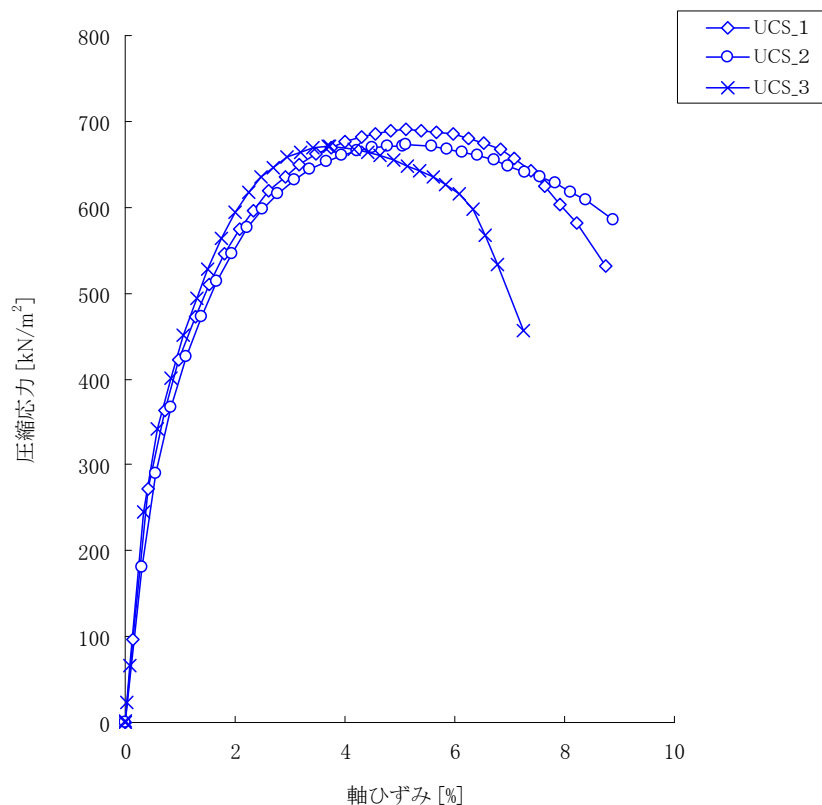


図 3.2-9 一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係

(2) 三軸圧縮試験

1) 試験方法

採取したコアを用いて、三軸圧縮試験（UU 試験）を行い、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ を求めた。供試体の大きさは直径 50mm×高さ 100mm を基本とした。試験方法は地盤工学会規定の方法（JGS 0527）に準拠した。表 3.2-4 には三軸圧縮試験条件を示す。試験数は 1（拘束圧 3 段階）とした。

表 3.2-4 三軸圧縮試験条件

圧密・排水条件		UU（非圧密非排水三軸試験）
供試体作製過程	供試体の作製方法	現地サンプリングコアを所定の寸法に成形
	供試体寸法	Φ50mm×H100mm
	乾燥密度 (Mg/m ³)	約 1.6
拘束圧	1.0MPa、2.5MPa、4.0MPa	
せん断過程	せん断ひずみ速度 (%/min)	1
	軸圧縮終了判定	以下のいずれかの項目が該当した時点
		①軸ひずみ 15%に達した時点
		②荷重計の読みが最大となってから引き続き軸ひずみが 3%以上生じた時点
③荷重計の読みが最大値の 2/3 程度に減少した時点		

（特筆）

- ・地盤工学会規準「土の圧密非排水三軸圧縮試験方法」（JGS 0523-2000）に準じる。
- ・ひずみ速度は制御上、0.01%/min 以下は計測できない。
- ・制御上、ひずみ速度は 1%/min 程度まで設定が可能である。

試験は、「土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）」のうち、トリミング法で行った。また、載荷等は「土の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験方法（JGS 0521）」に準拠して行った。含水比の測定は、「土の含水比試験方法（JIS A 1203）」に準拠した。

2) 試験結果

三軸圧縮試験(UU 試験)結果を、既往の試験結果と合わせて表 3.2-5 に整理する。今年度の試験では、粘着力は 452.1kN/m²、せん断抵抗角は 2.2° であり、既往の結果に近い値であった。

各拘束圧下の応力（主応力差）～ひずみ関係を図 3.2-10 に示す。モールの応力円や主応力表示の破壊規準線を一軸圧縮試験結果も併記する形で図 3.2-11、図 3.2-12 に示すが、既往の試験結果の範囲内に収まっていることが確認できる。

今年度の結果は同一条件（同一せん断ひずみ速度）である昨年度の結果に近い結果となっている。ただし、図 3.2-13 に示すように、得られた変形係数に拘束圧依存性がみられるが、得られた値は昨年度より小さい値となっている。

表 3.2-5 三軸圧縮強度試験(UU 試験)結果一覧表 (既往の結果を含む)

実施年	試験 ケース名	乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 [%]	拘束圧 [kN/m ²]	最大 主応力差 [kN/m ²]	破壊 ひずみ [%]	変形 係数 [MN/m ²]	粘着力 [kN/m ²]	せん断 抵抗角 [deg.]	せん断 ひずみ速度 [%/min]
2010	UU_18C	1.634	20.6	1000	794.4	12.8	22.2	338.4	2.99	0.01
	UU_38C	1.640	20.0	2500	1049.5	12.3	38.9			0.01
	UU_59C	1.596	21.4	4000	1124.2	11.7	50.8			0.01
2011	UU_84B	1.639	20.1	1000	1088.9	13.7	37.7	427.7	4.27	0.01
	UU_84C	1.620	20.7	2500	1310.6	10.8	50.7			0.01
	UU_84D	1.614	20.5	4000	1571.2	13.2	67.7			0.01
2012	UU-1B	1.659	20.1	1000	990.1	14.0	58.04	447.3	2.26	1
	UU-1C	1.650	20.2	2500	1181.3	13.6	68.37			1
	UU-1D	1.659	20.8	4000	1234.9	14.3	85.02			1
	UU-2B	1.652	19.4	1000	1071.9	15.0	53.21	505.6	1.42	1
	UU-2C	1.626	19.4	2500	1195.2	14.7	60.56			1
	UU-2D	1.639	19.5	4000	1223.9	14.9	98.64			1
2013 (今年度)	UU-1	1.646	18.9	1000	1041.1	14.9	30.91	452.1	2.22	1
	UU-2	1.661	19.8	2500	1101.2	14.2	49.50			1
	UU-3	1.674	19.7	4000	1282.2	12.2	67.07			1

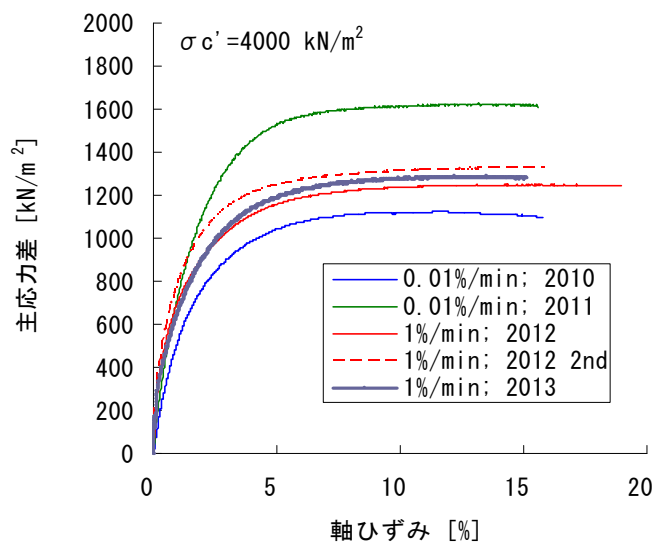
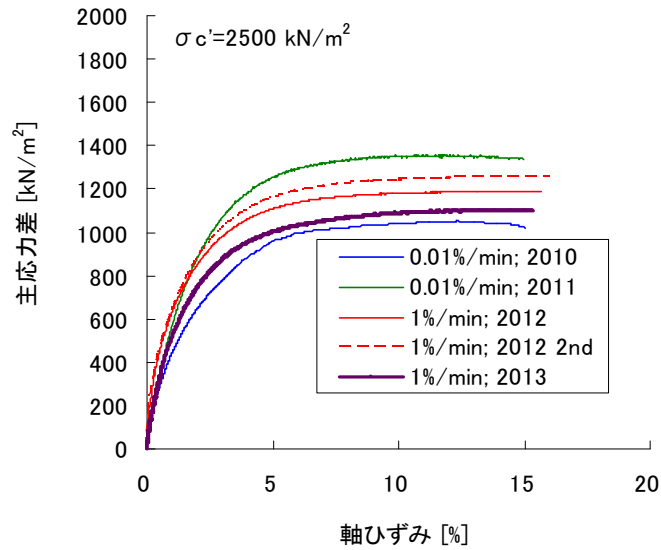
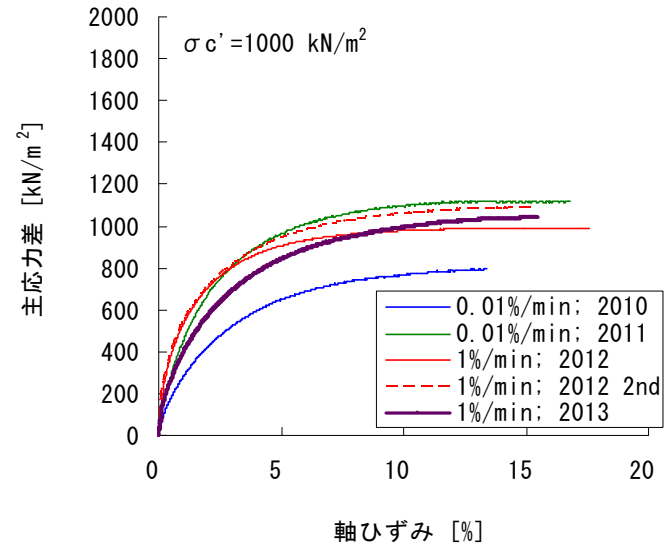


図 3.2-10 三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係

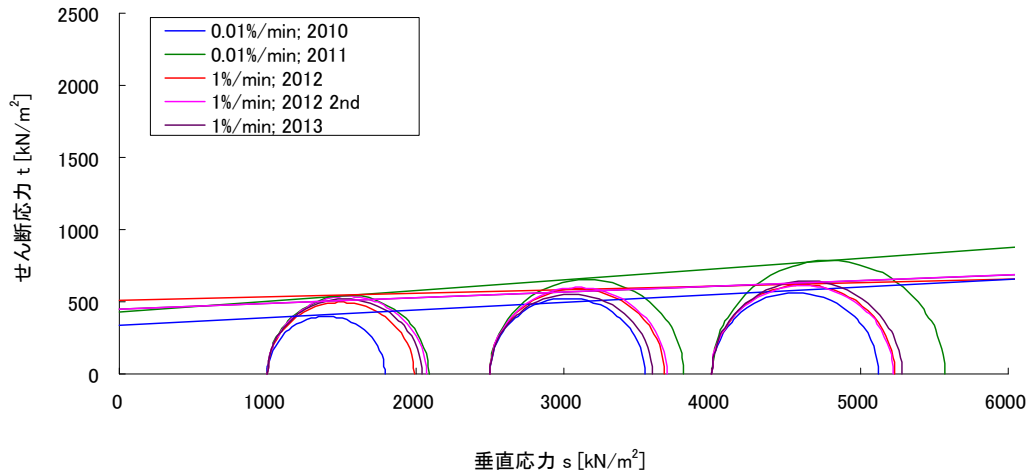


図 3.2-11 モールの応力円 (全応力)

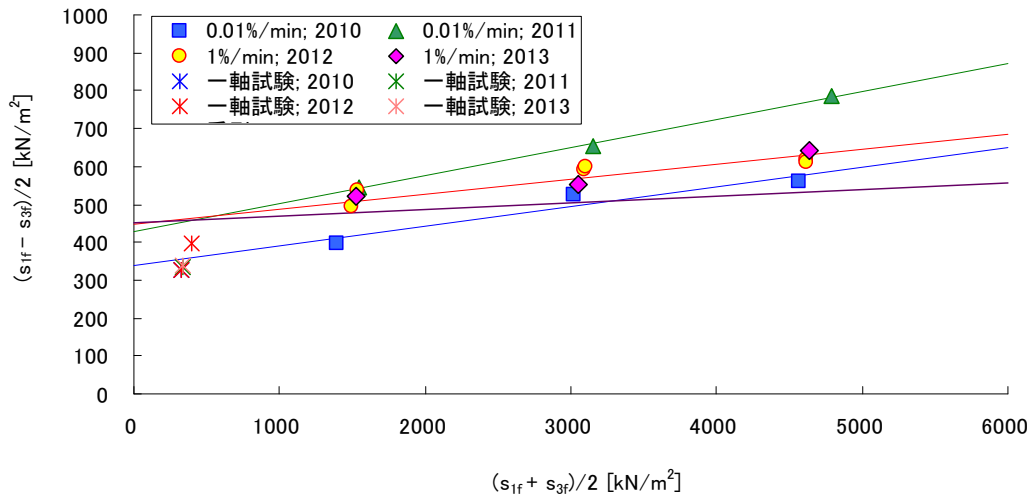


図 3.2-12 主応力表示のモールクーロンの破壊規準

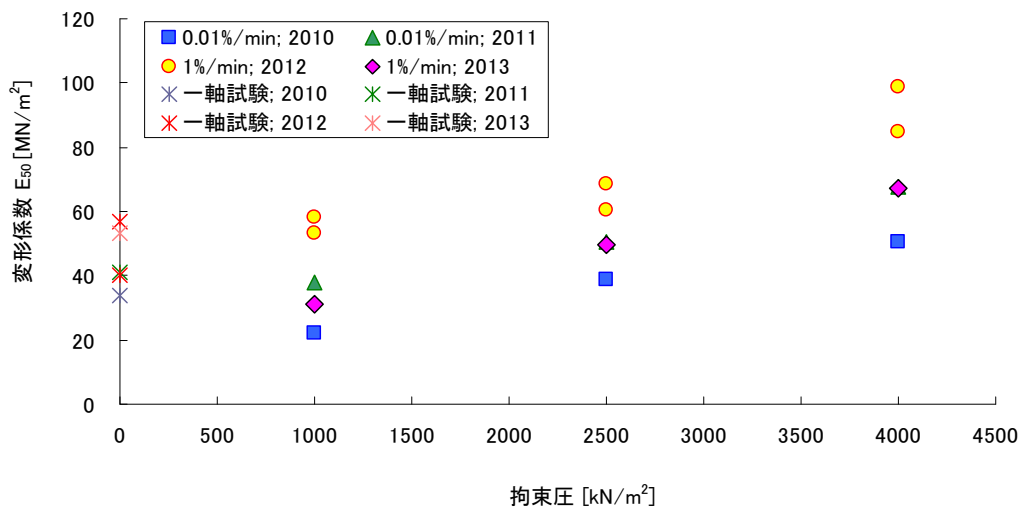


図 3.2-13 変形係数～拘束圧関係

3.2.3 止水性能の確認試験

(1) 乾燥密度測定

1) 試験方法

乾燥密度の測定に関しては、コア採取を行いコアの乾燥密度を求めた。コア密度に関しては、各層約 5cm を上下方向に 2 分割して測定を行った。試験は、「土の湿潤密度試験方法(JIS A 1225)」に準拠して実施した。「土の湿潤密度試験方法(JIS A 1225)」に示された測定方法のうち、ノギス法を用いて密度測定を行った。また、含水比の測定は、「土の含水比試験方法 (JIS A 1203)」に準拠して実施した。

2) 試験結果

図 3.2-14 にはサンプリングを実施した 5 地点における乾燥密度の測定結果を示す。各地点にて 4 層分 (17 層目から 20 層目、1 層が約 5cm 厚さ) のサンプリングを行い、各層を 2 分割して密度測定を行った。各層とも層の上部に比べて下部の方が密度は小さくなっている。施工層上部 (20 層目) と施工層下部 (17 層目) で密度に大きな差は見られないため、施工時の振動の影響が下の方までは影響していないと考えられる。

図 3.2-15 には 2 分割コア密度の測定結果を示す。17~20 層目の密度測定結果である。(a)は 1 層を 2 分割したコア (1 層の上部、下部) の測定値をプロットした結果、(b)は 2 分割したコアの測定値から層平均を算出してプロットした結果である。2 分割したコア密度は $1.60 \sim 1.70 \text{Mg/m}^3$ の範囲であった。また、層平均はほぼ $1.62 \sim 1.65 \text{Mg/m}^3$ の範囲に入っている。すなわち、層平均としての乾燥密度の範囲は $\pm 0.02 \text{Mg/m}^3$ の範囲であり、層を上下に 2 分割して層内の密度のばらつきを求めても $\pm 0.05 \text{Mg/m}^3$ の範囲程度であり、仕上がり層厚 5cm で施工を行ったことにより、非常にばらつきが少なく施工ができていると言える。

図 3.2-15 の結果を乾燥密度のヒストグラムとしてまとめたものが、図 3.2-16 である。2 分割したコア全てのヒストグラムおよび統計値に加えて、上部、下部の測定結果のみで整理したヒストグラムおよび統計値も示している。

図 3.2-17 に 2 分割コアの密度測定結果をクニゲル GX の室内突き固め試験結果より得られた締固め曲線と比較した結果を示す。2 分割コアの密度測定結果は締固めエネルギー 4.5Ec での締固め曲線に対して上下にばらつくような結果となっていることが分かる。図 3.2-18 には層平均でのコア密度の測定結果と締固め曲線との比較を示す。層平均密度の値は締固めエネルギー 4.5Ec での締固め曲線上にほぼ位置していることが分かる。

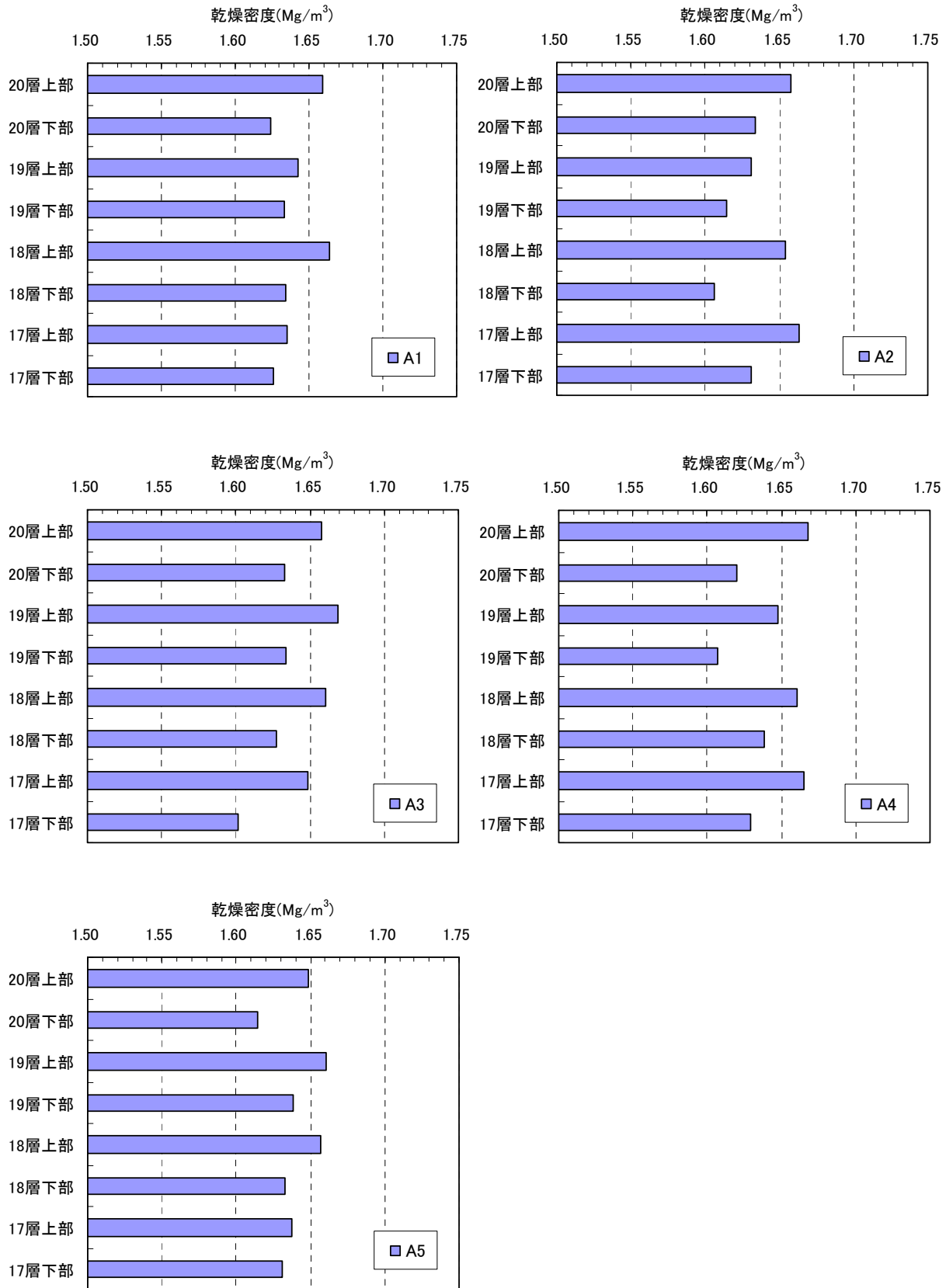
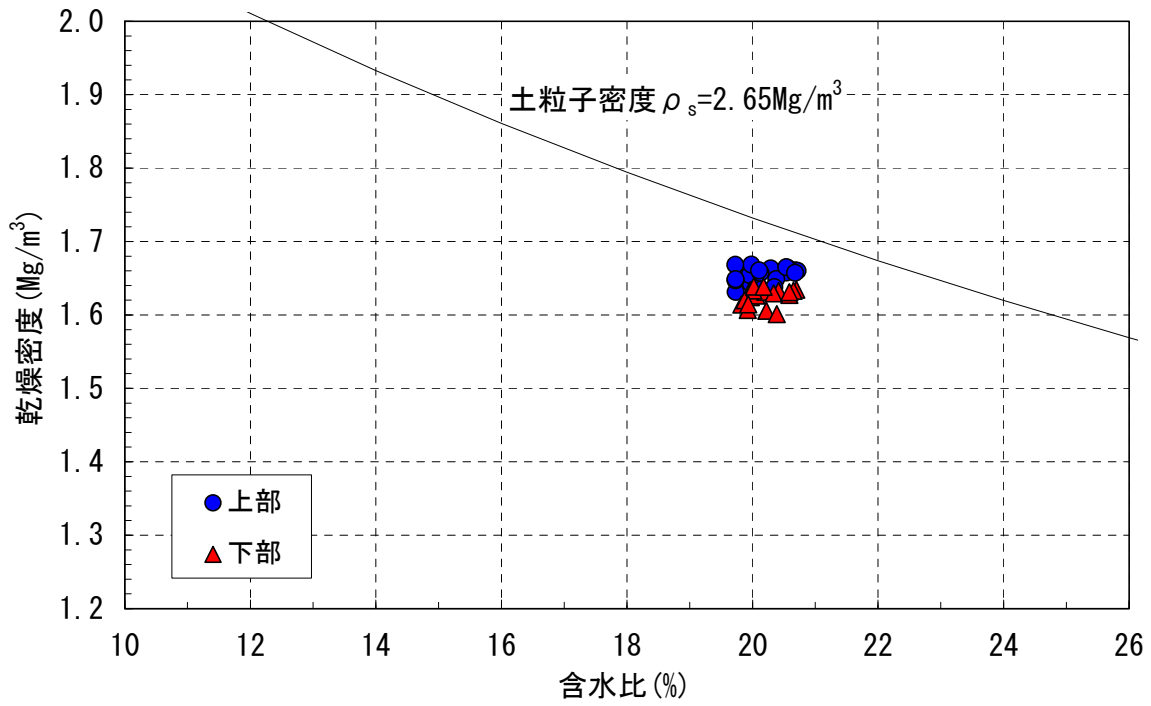
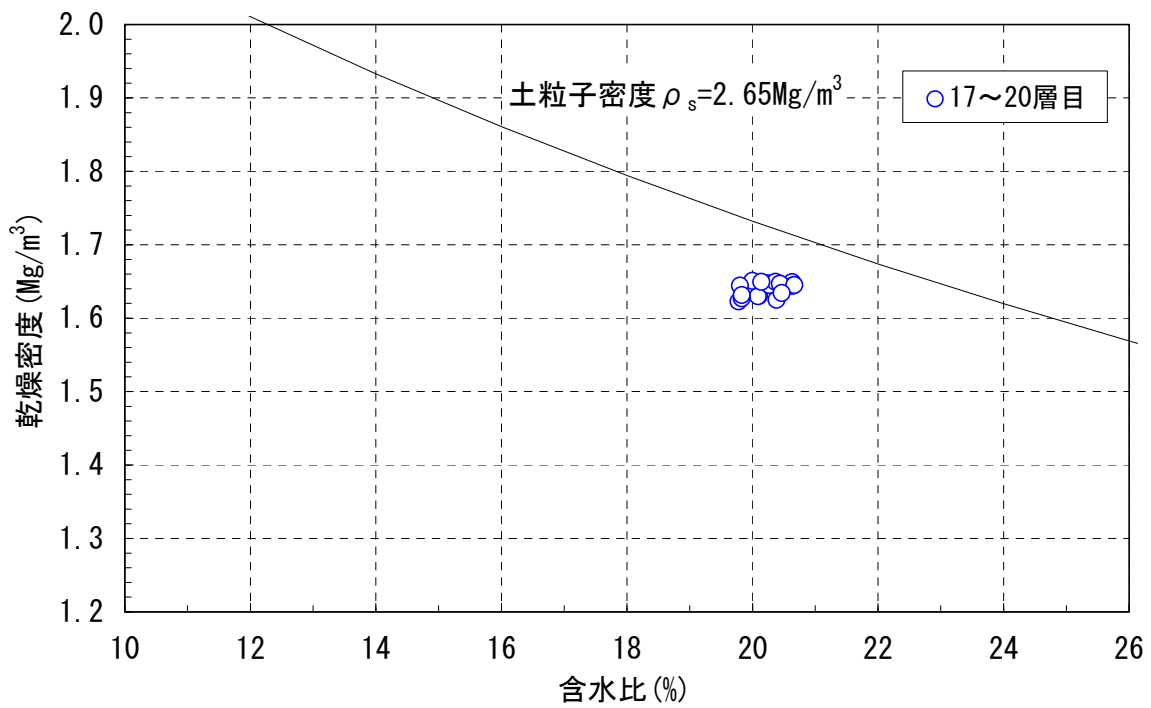


図 3.2-14 各採取位置における乾燥密度分布



(a) 2分割コア



(b) 2分割コアの平均

図 3.2-15 コアの含水比と乾燥密度の関係

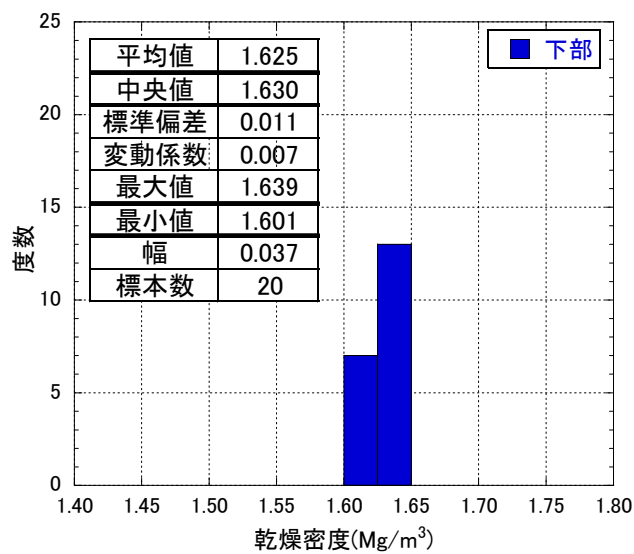
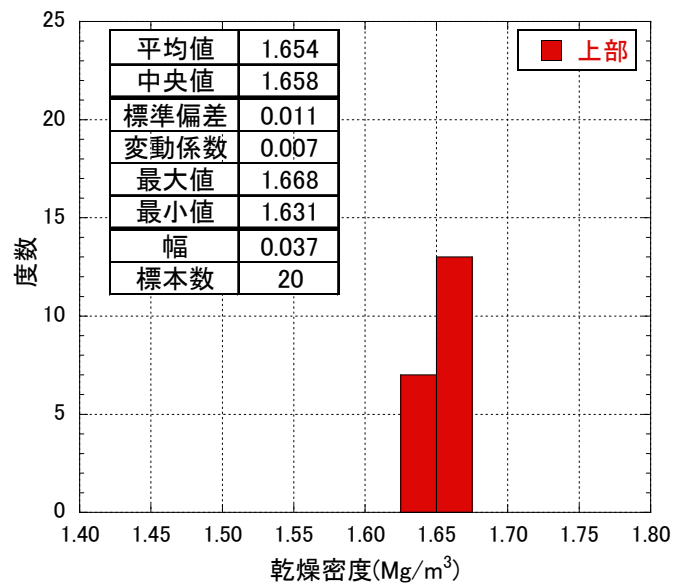
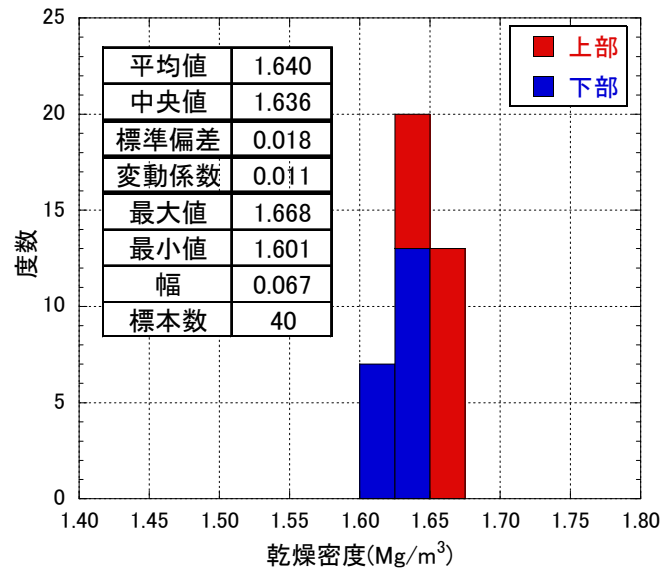


図 3.2-16 2分割コアの乾燥密度のヒストグラム

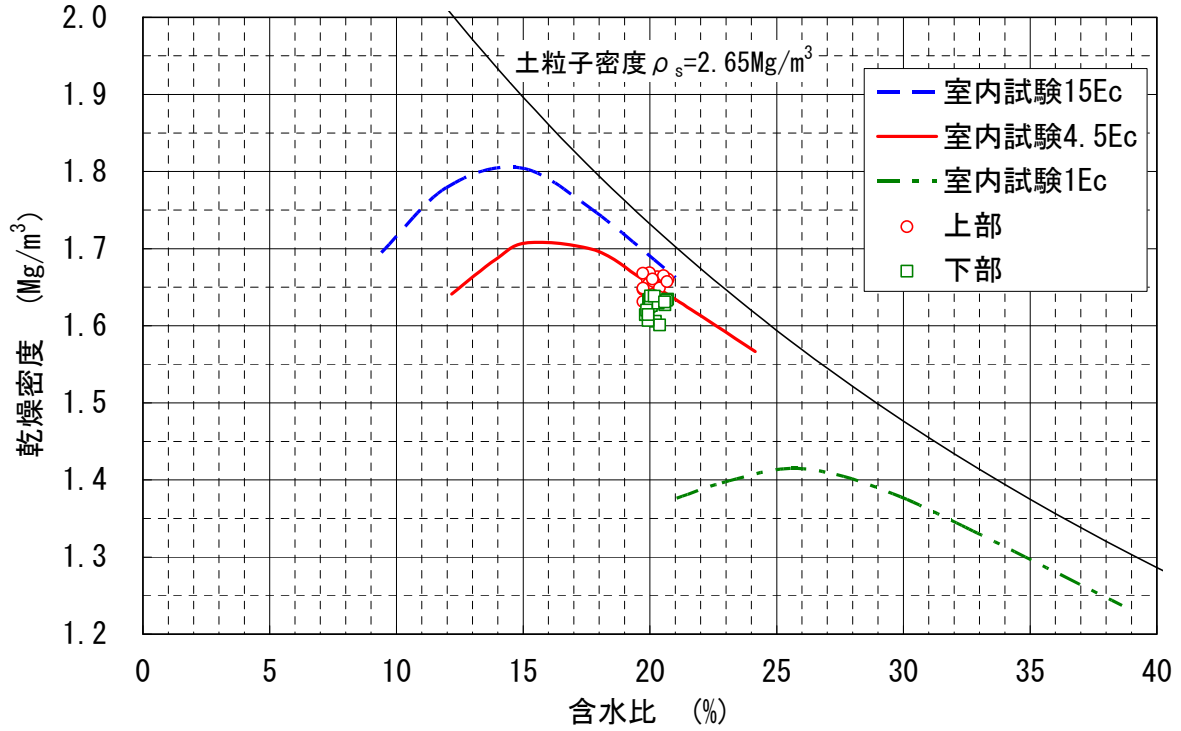


図 3.2-17 2分割コアによる密度試験結果と室内締固め試験の比較

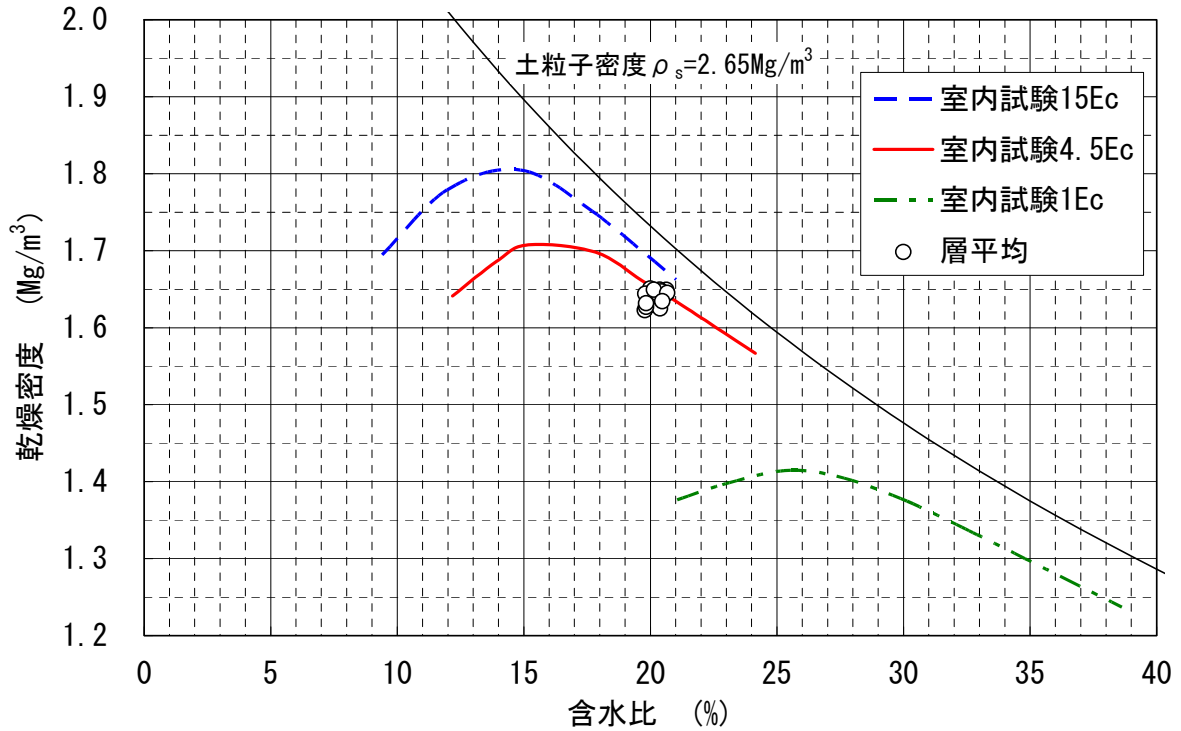


図 3.2-18 層平均でのコア密度測定結果と室内締固め試験の比較

(2) 透水試験

1) 試験方法

透水試験の供試体は、転圧方向に対して平行な方向に通水させる透水試験用の供試体に関しては図 3.2-19 に示すように 1つの施工単位（厚さ 5cm）を対象として、その上部部分、下部部分から 2個の供試体(直径 60mm、厚み 10mm)を作製した。

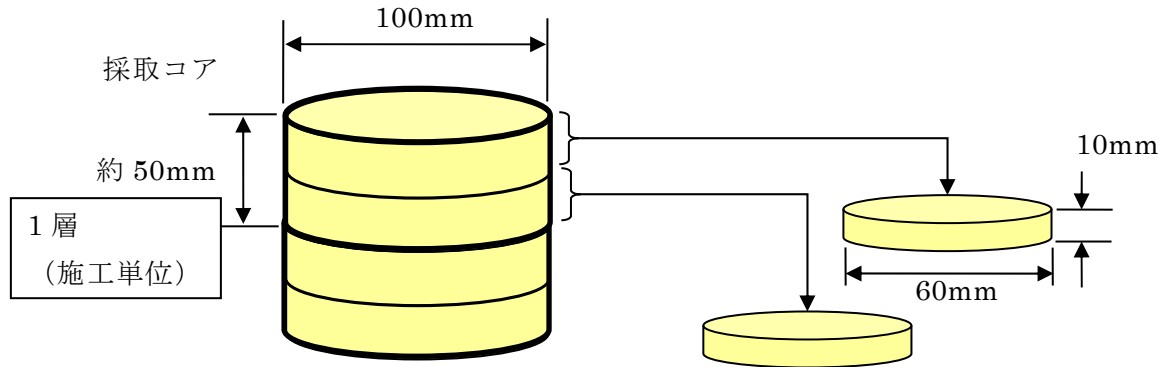


図 3.2-19 透水試験用の供試体

透水試験は、「土の透水試験方法 (JIS A1218)」に準拠して実施した。試験手順を以下に示す。

1) 供試体の作製過程

- 試料の所定の大きさに成形する。試料寸法は、直径 60mm、高さ 10mm とする。
- 成形後の試料の質量を測定する。
- 成形時の削り屑で含水比を測定する。
- 透水試験用容器に試料を設置し、機器を組み立てる。

2) 供試体の飽和過程

供試体は透水試験用容器ごと減圧脱気水槽に入れて脱気した。脱気法の場合、間隙内の空気が急な移動をすることも考えられ、このことにより供試体内部に水みちができることも懸念されるので、脱気水槽の減圧は段階的に行った。

3) 透水試験過程

以下に、透水試験過程の手順を示す。

- 飽和した透水容器の供試体上部および下部に二重管ビューレットを接続する。
- ビューレット内部には、試験用水としてイオン交換水または蒸留水を入れる。
- 透水試験は定圧透水試験とする。ベントナイトの緩衝材の供試体は、透水係数が小さいと考えられるので、上流側と下流側に空気圧等で加圧し、一定の水頭差をつけて、定圧で供試体に通水するものとする。このときの差圧を適切に選択し、供試体内部に水みちが形成されないようにする。空気圧等は一気に上げず、段階的に上げる。

図 3.2-20 に例として、上流側と下流側に加圧して通水する試験の概念図を示す。

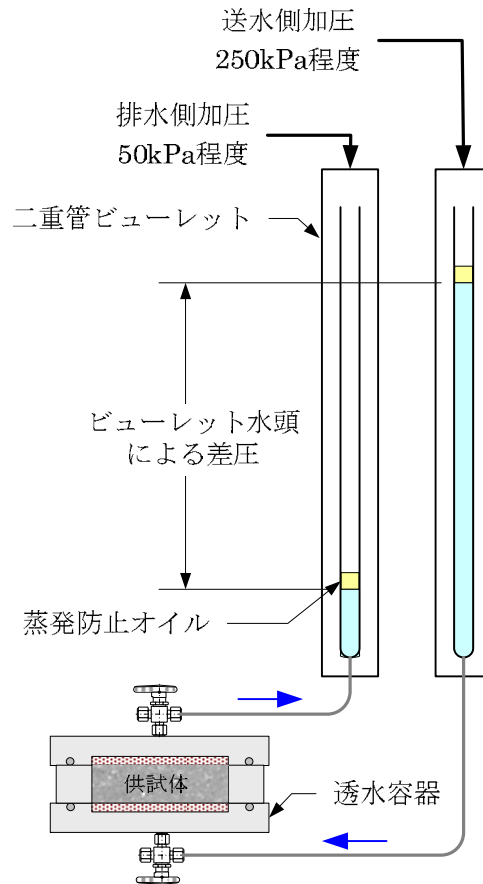


図 3.2-20 透水試験方法

- d) 透水量および水温と時間の関係を継続的に測定する。
- e) 試験後の供試体含水比を測定する。
- f) 試験結果と次式により透水係数を算出する。

$$k_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \times \frac{1}{100}$$

ここに、

- k_T : T°Cにおける透水係数 (m/s)
- L : 供試体の長さ (cm)
- h : 水位差 (cm)
- Q : 透水量 (cm³)
- A : 供試体の面積 (cm²)
- $(t_1 - t_2)$: 測定時間 (s)

2) 試験結果

図 3.2-21 に透水試験用供試体の成形の状況を示す。1層あたり約 50mm のコアを上下に分割し所定の厚さになるように成形し、その後、所定の直径になるように側面をトリミングして試験用の供試体とした。図 3.2-22 には成形した供試体を試験用セルにセッティングした状況を示す。



(a)採取したコア



(b)コアを分割した状態



(c)トリミング状況



(d)試験用供試体

図 3.2-21 膨潤圧試験用供試体の成形の状況

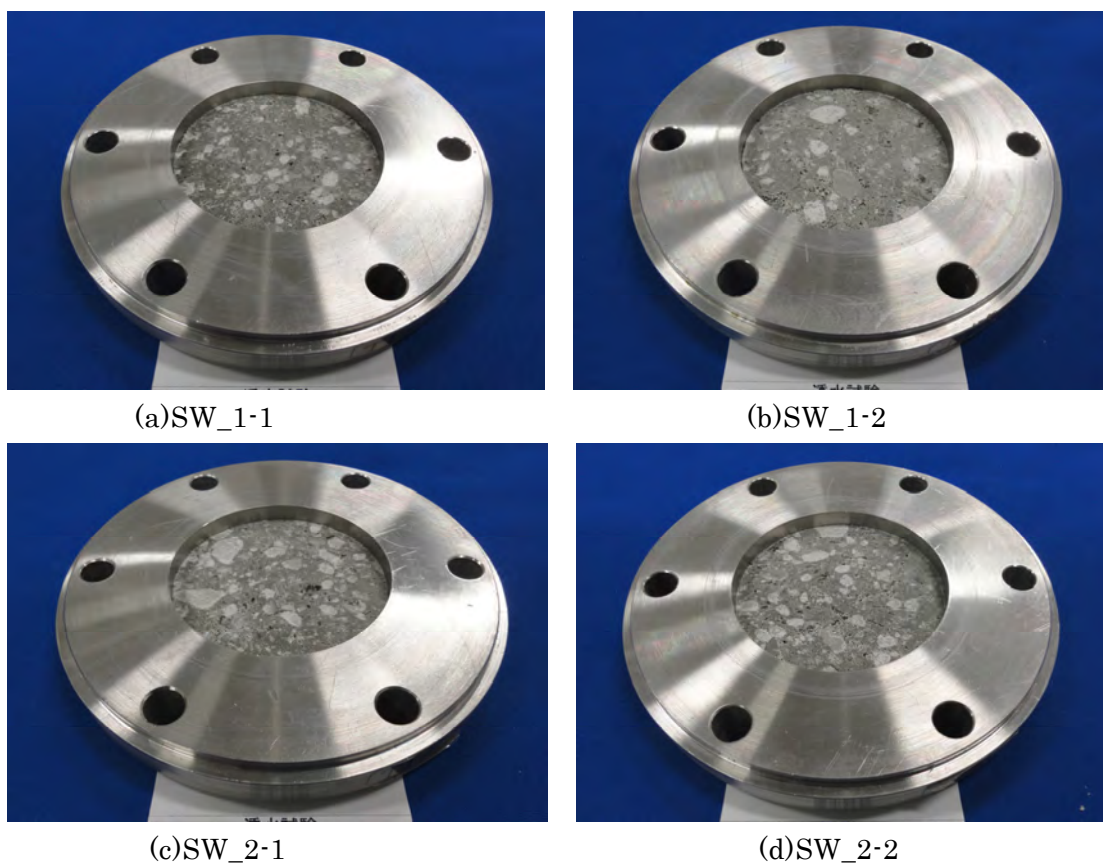


図 3.2-22 試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況

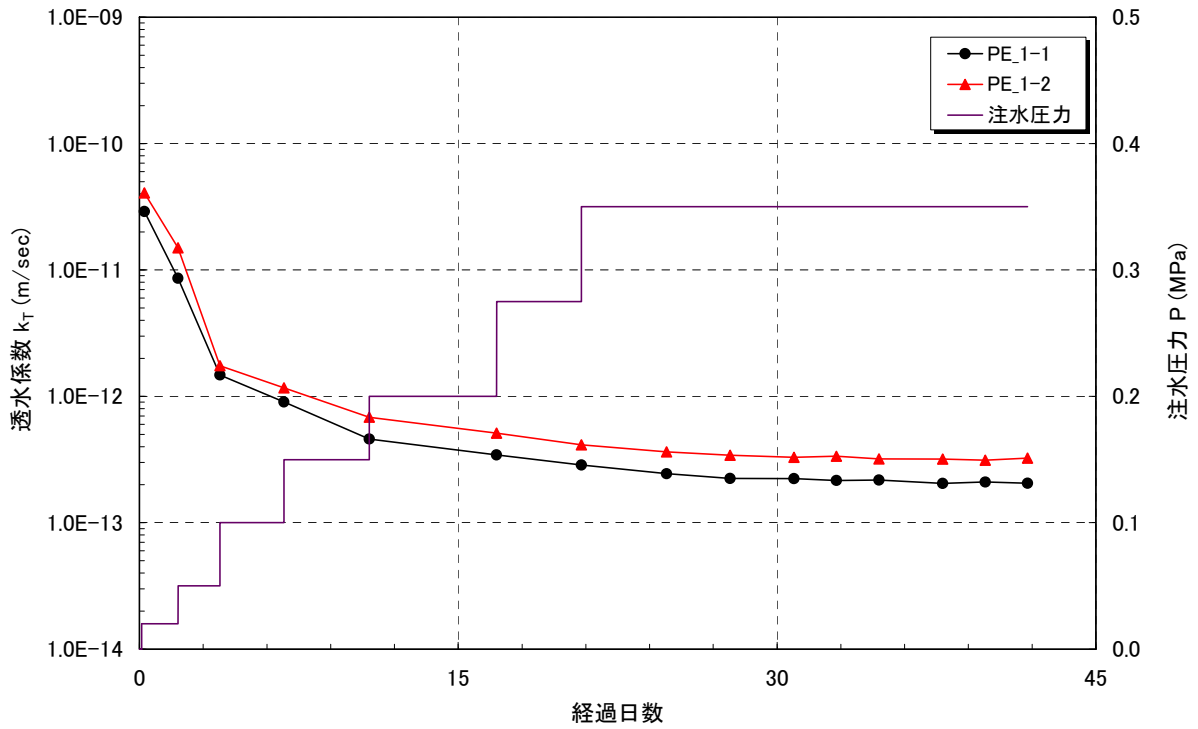
透水試験は、図 3.2-23 に示す透水試験装置を用いて実施した。図 3.2-24～図 3.2-25 には透水試験の結果を示す。それぞれ、(a)は注水量から算定した見かけの透水係数 k_T 、(b)は供試体飽和後に算定した温度補正透水係数 k_{15} の経時変化である。各層を上下方向に2分割して透水係数を測定しているが、各層の上部（例えば、図 3.2-24 では PE_1-1 が上部で、PE_1-2 が下部）の方が下部より密度が大きいため測定される透水係数の値は小さくなっている。図 3.2-26 には、各供試体の乾燥密度と測定された透水係数の値を示す。乾燥密度が高くなるにつれて透水係数の値が小さくなっていることが分かる。図 3.2-27 には既存値との比較を示す。既存値ともよく整合していることが分かる。なお、表 3.2-6 に透水試験結果の一覧を示す。



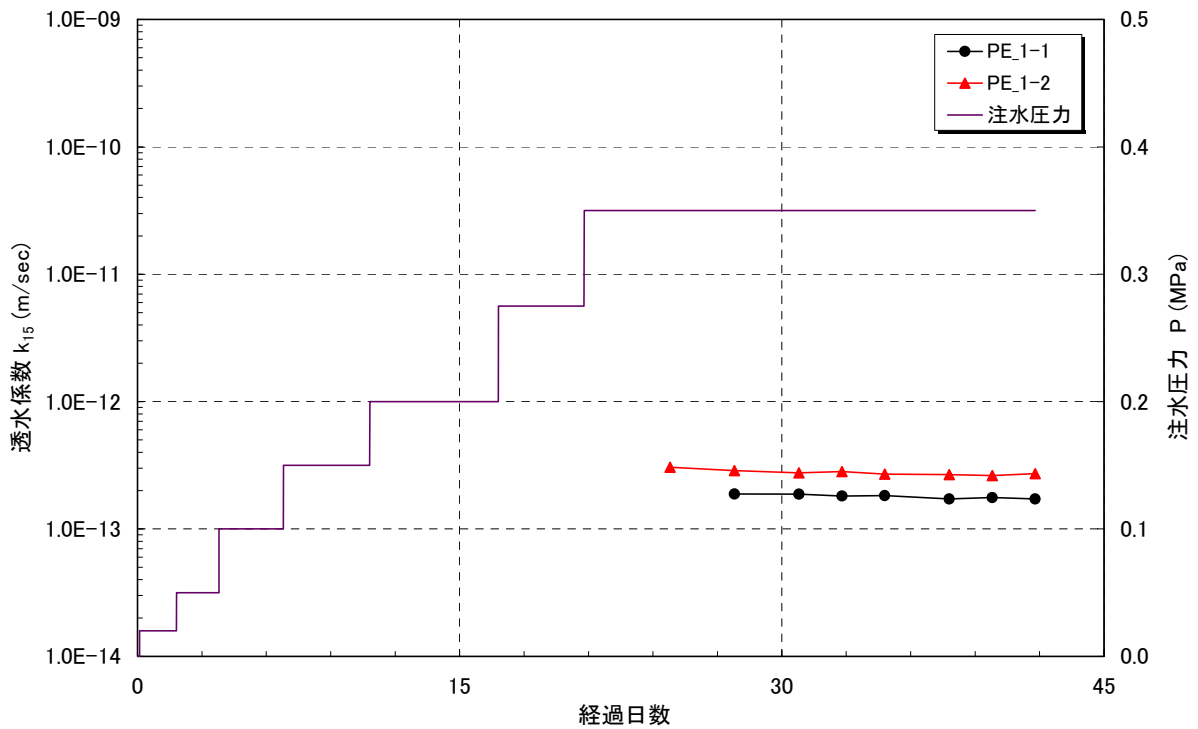
図 3.2-23 透水試験装置

表 3.2-6 透水試験結果

試験ケース	乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	透水係数 (m/sec)	備考
PE_1-1	1.621	20.0	1.80×10^{-13}	
PE_1-2	1.526	20.1	2.71×10^{-13}	
PE_2-1	1.631	20.7	1.57×10^{-13}	
PE_2-2	1.623	20.0	1.60×10^{-13}	

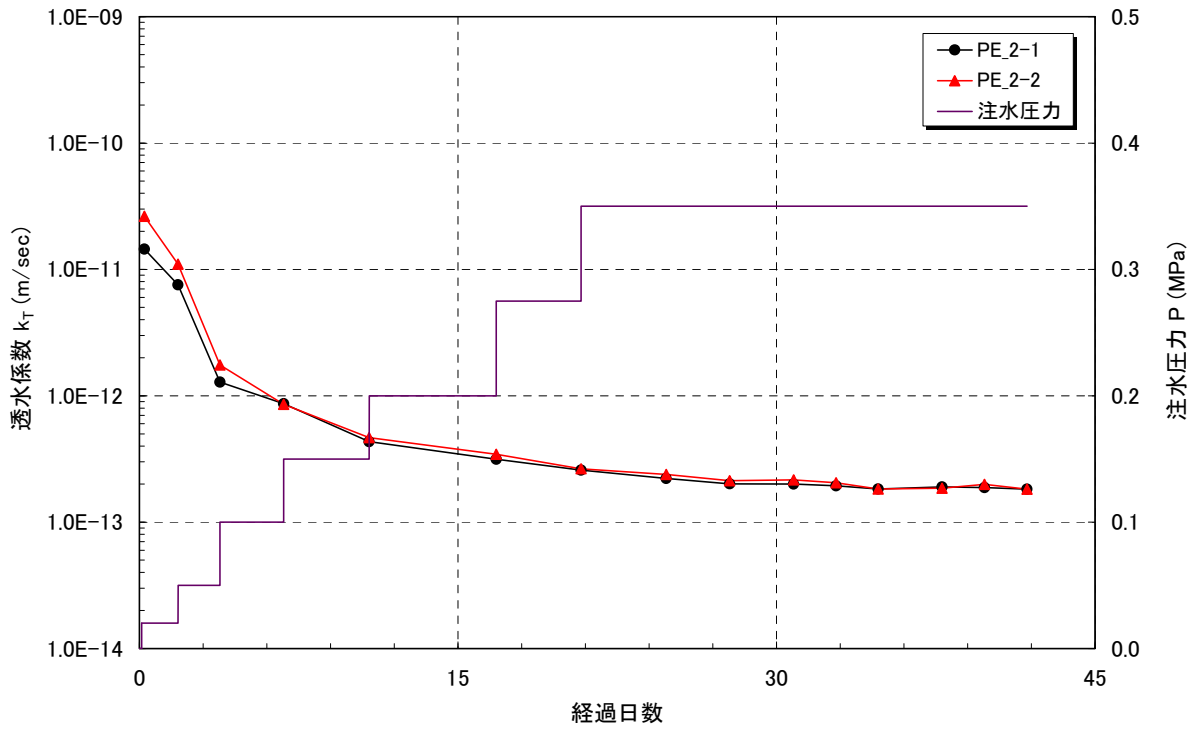


(a) 試験開始からの透水係数の経時変化

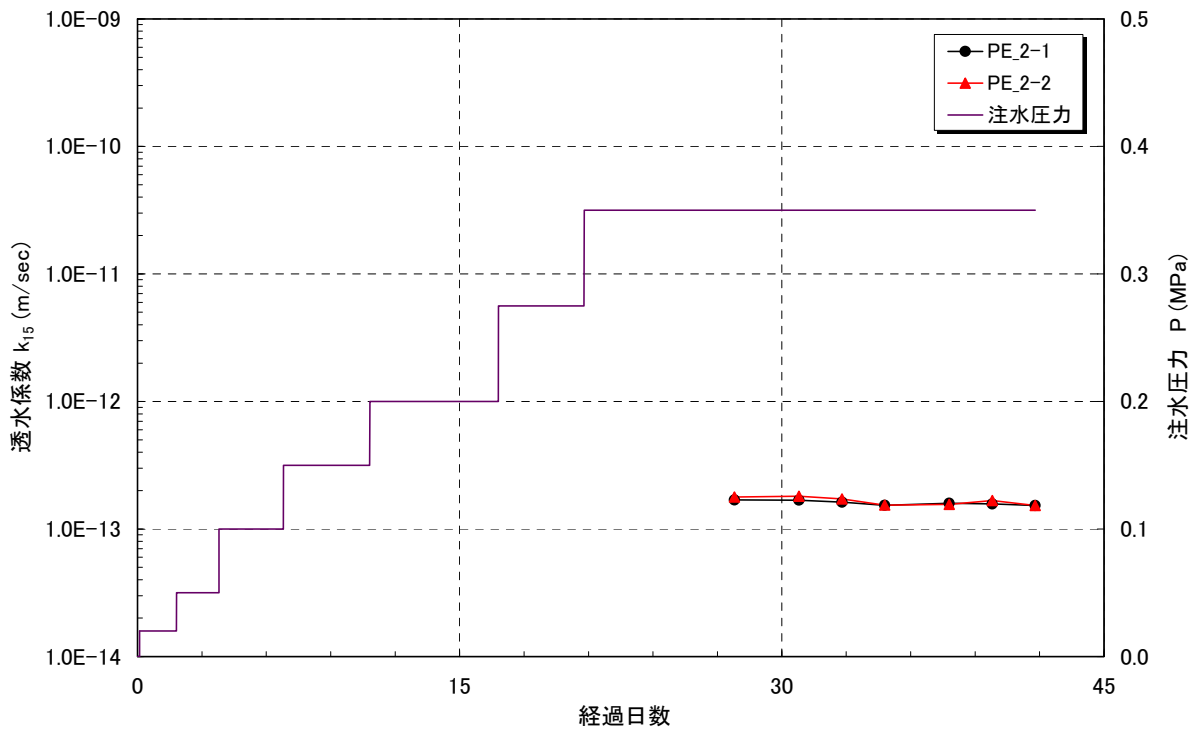


(b) 供試体飽和後の温度補正透水係数

図 3.2-24 透水試験途中経過 (供試体 PE_1-1~PE_1-2)



(a) 試験開始からの透水係数の経時変化



(b) 供試体飽和後の温度補正透水係数

図 3.2-25 透水試験途中経過 (供試体 PE_2-1~PE_2-2)

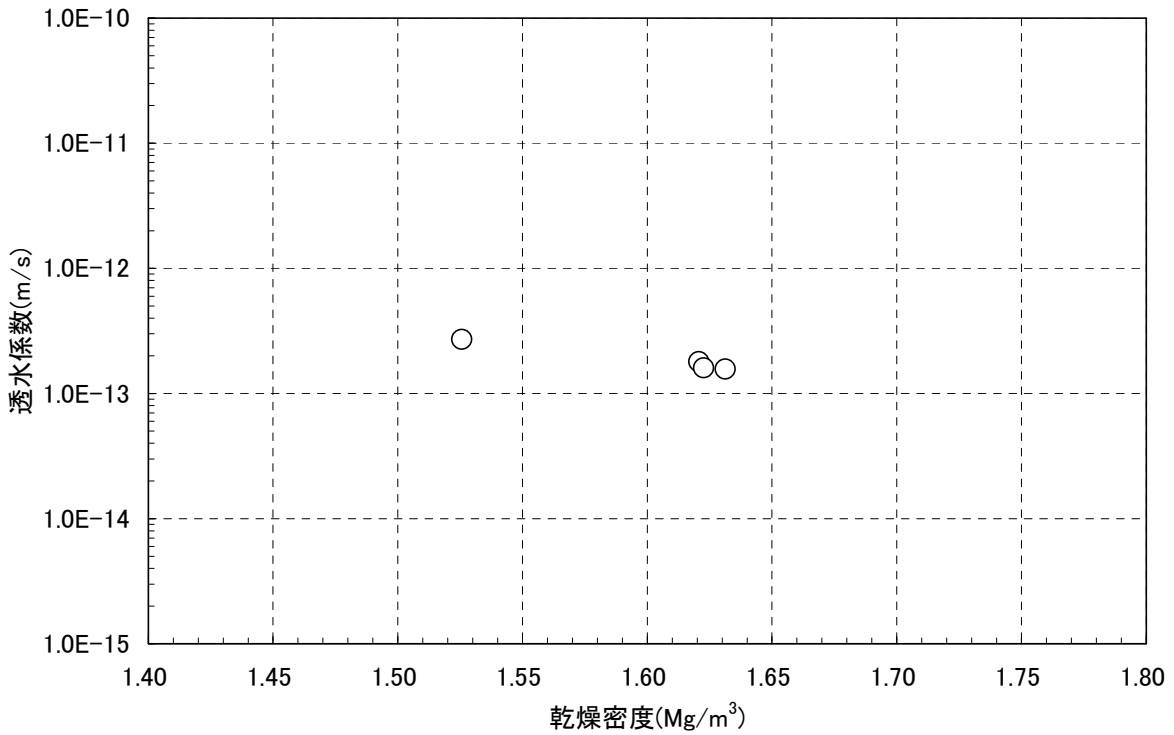


図 3.2-26 乾燥密度と透水係数の関係

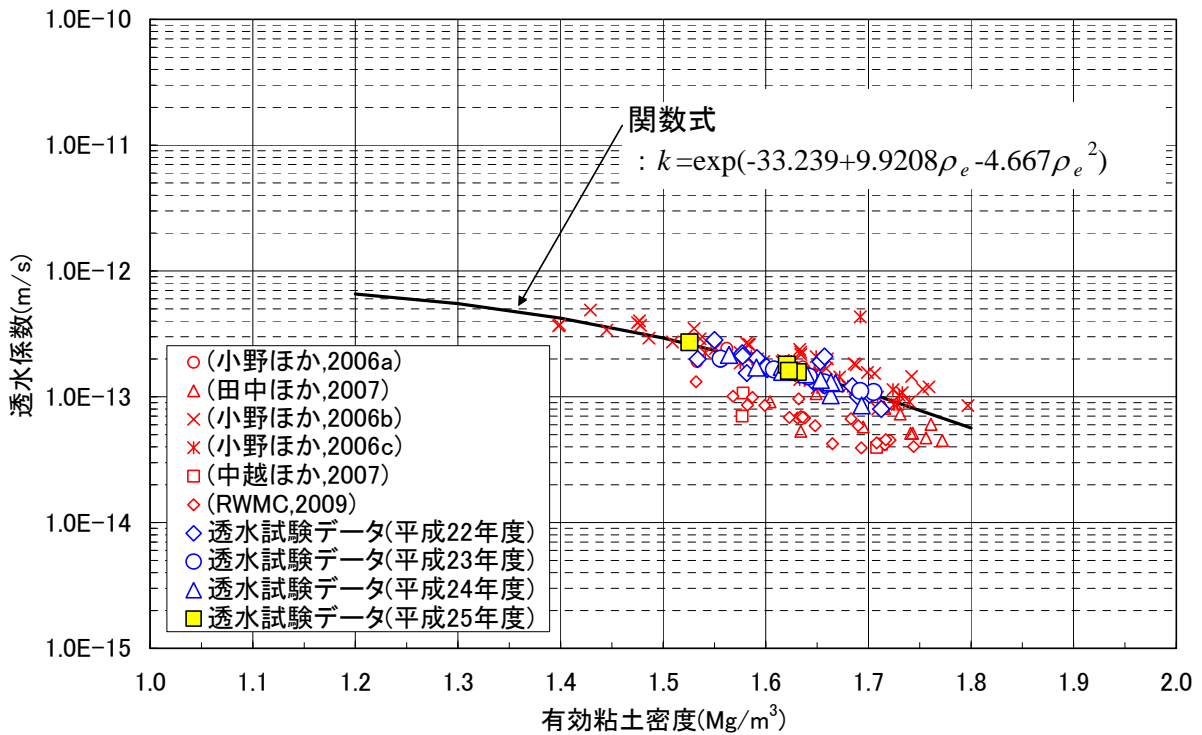


図 3.2-27 クニゲル GX の透水係数の既存値との比較
(関数式は、既往結果[1]・[2]・[3]・[4]・[5]のデータより設定)

3.2.4 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験

(1) 膨潤圧試験

1) 試験方法

膨潤圧試験は現地採取試料を用い、浸潤による膨潤圧の測定を行った。試験は、圧密試験と同等の試験容器を用い、体積を拘束した状態で供試体の吸水に伴い発生する供試体軸方向応力を測定する。なお、供試体寸法は、直径 60mm、高さ 20mm とした。

2) 試験結果

図 3.2-28 に膨潤圧試験用供試体の成形の状況を示す。1層あたり約 50mm のコアを上下に分割し所定の厚さにさるように成形し、その後、所定の直径になるように側面をトリミングして試験用の供試体とした。図 3.2-29 には成形した供試体を試験用セルにセッティングした状況を示す。



(a)採取したコア



(b)コアを分割した状態

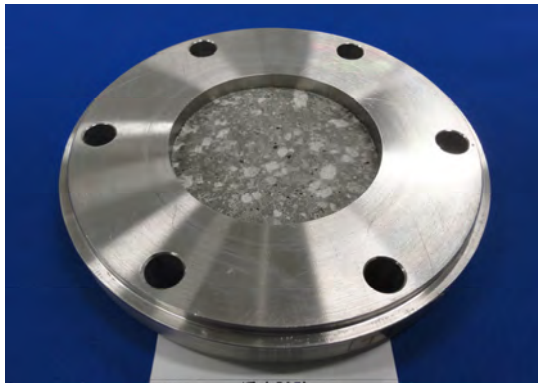


(c)トリミング状況

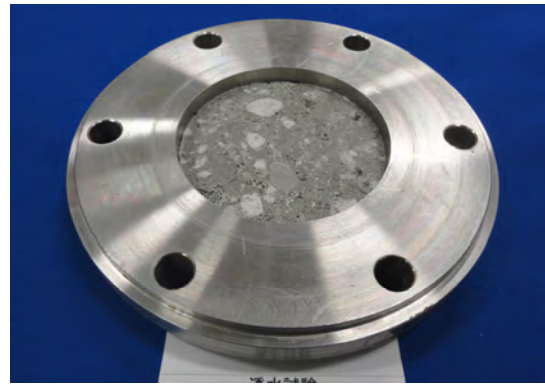


(d)試験用供試体

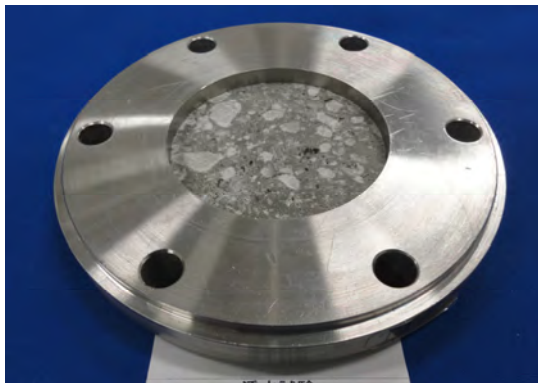
図 3.2-28 膨潤圧試験用供試体の成形の状況



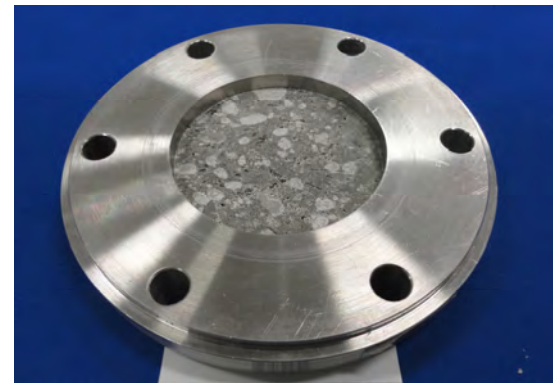
(a)SW_1-1



(b)SW_1-2



(c)SW_2-1



(d)SW_2-2

図 3.2-29 試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況

図 3.2-30 に使用した膨潤圧試験装置を示す。図 3.2-31～図 3.2-32 および表 3.2-7 は膨潤圧の測定結果である。それぞれ、層の上下の部分の試料を用いて試験を実施しているが、上部から下部になるにつれて膨潤圧の値は小さくなっている。値は 0.6MPa から 0.8MPa 程度までばらつく結果となった。図 3.2-34 には供試体の乾燥密度と平衡膨潤圧の関係を示す。供試体の乾燥密度が 1.58Mg/m^3 から 1.64Mg/m^3 の範囲でばらついているが、供試体の乾燥密度が大きくなるにつれて平衡膨潤圧の値は大きくなっていることが分かる。図 3.2-34 には、これまでクニゲル GX を対象に得られている膨潤圧の値との比較を示す。今回の結果は、これまでの結果と良く整合していることが分かる。



図 3.2-30 膨潤圧試験装置

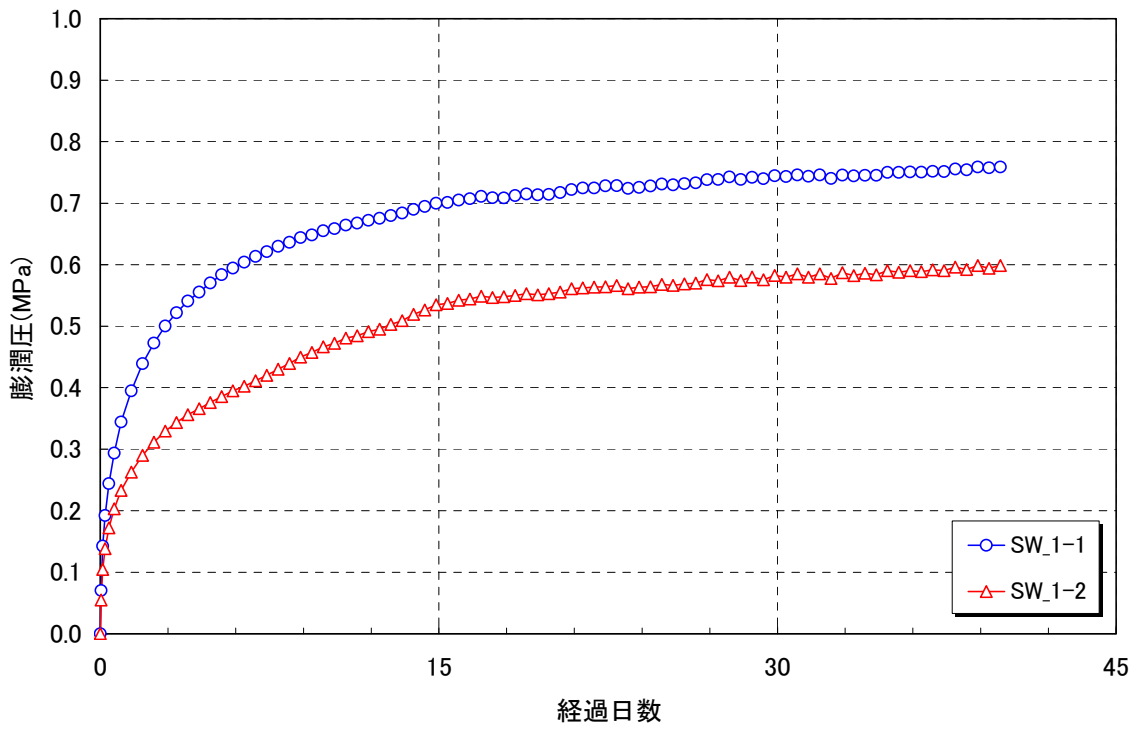


図 3.2-31 膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_1-1~SW_1-2)

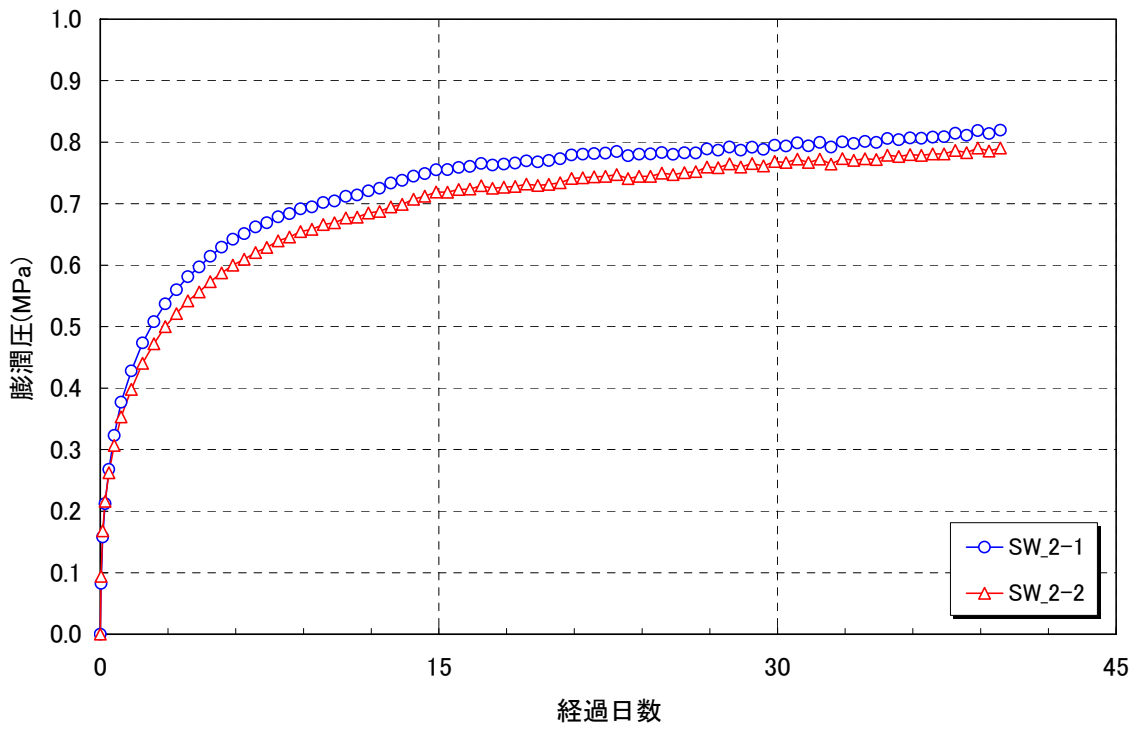


図 3.2-32 膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_2-1~SW_2-2)

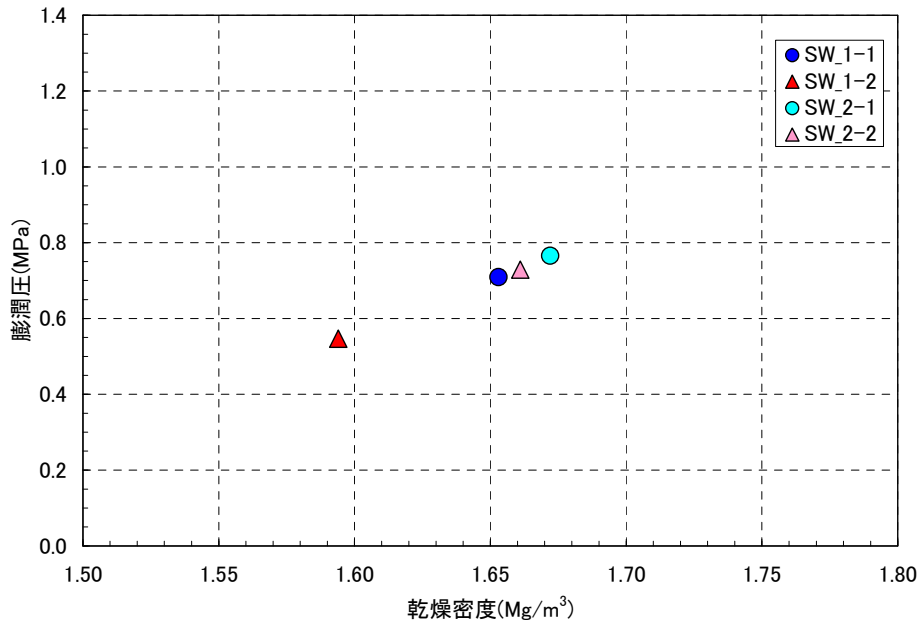


図 3.2-33 膨潤圧と乾燥密度の関係

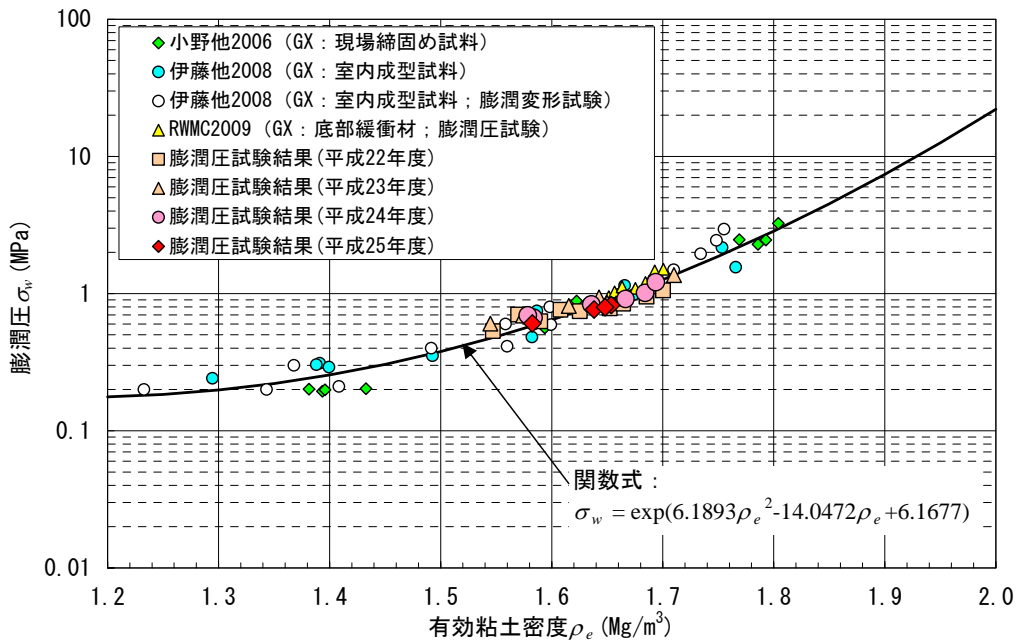


図 3.2-34 クニゲル GX の膨潤圧の既存値との比較
(関数式は小野ほか(2006a)、伊藤ほか(2008)のデータより設定)

表 3.2-7 膨潤圧試験結果

試験ケース	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	平衡膨潤圧 (MPa)	備考
SW_1-1	1.653	20.1	0.742	
SW_1-2	1.594	20.4	0.582	
SW_2-1	1.672	20.3	0.797	
SW_2-2	1.661	20.1	0.772	

3.3 施工確認試験結果の評価

上部緩衝材平面部の施工確認試験結果に基づいて、材料、施工方法、品質、出来形、歩掛りについて分析し、振動工法による上部緩衝材平面部施工の施工実現性について評価する。

3.3.1 材料特性に関する評価

(1) 材料特性に関する品質管理項目

平成 20 年度地下空洞型処分施設性能確証試験のうちの底部緩衝材施工確認試験において抽出されたベントナイト材料特性に関する品質管理項目を表 3.3-1 に示す。今年度の上部緩衝材平面部施工確認試験においても、平成 20 年度の品質管理項目に準じて品質管理を行った。

表 3.3-1 ベントナイト材料特性に関する品質管理項目

分類	項目	方法	目的・概要
材料特性 (基本)	最大粒径	JIS A 1204 (日本工業規格)	最大粒径・粒度は、材料の含水比、吹付け施工の密度、均質さ、リバウンド率に影響を与える。材料の含水比のばらつきは密度のばらつきの要因となり、緩衝材の品質のばらつきの直接的な要因となる。
	粒度	JIS A 1203 (日本工業規格)	
	調整前含水比	JIS A 1203 (日本工業規格)	調整前含水比は、含水比調整時の加水量を設定する際の基本情報である。また、ベントナイトの購入は質量単位で行うため、調整前含水比が高いと、見かけ上の材料費が高くなる。
	塑性限界	JIS A 1205 (日本工業規格)	地盤材料の保水力、透水性、細粒分含有率などに相関がある物理量であり、その他、力学パラメータとの相関も検討されている。 既往の研究でも数多く取得されており、本検討で使用する材料の妥当性を確認する。
	メチレンブルー吸着量	JBAS-107-91 (日本ベントナイト工業会標準試験方法)	メチレンブルー吸着量試験は、ベントナイトの陽イオン交換容量 (CEC) の簡易測定法として多年用いられてきた方法である。CEC はモンモリロナイト含有量と関係があり、この目安として試験が行われる。モンモリロナイト含有量はベントナイトの低透水性、膨潤性の源であり、緩衝材の材料として重要な指標である。
	膨潤力	JBAS-104 (日本ベントナイト工業会標準試験方法)	膨潤力試験は膨潤性能を評価する試験である。膨潤の圧力ではなく、吸水して膨潤する量を評価する。

(2) 材料特性の品質管理基準

平成 20 年度の底部緩衝材施工確認試験においては、ベントナイト材料特性に関する品質管理基準が設定されている。材料特性の品質管理基準を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2 材料特性に関する品質管理基準

品質管理項目	管理値
最大粒径	10mm
含水比	10%以下
塑性限界	30%以下
メチレンブルー吸着量 (モンモリロナイト含有量)	63mmol/100g 以上 (45%以上)
膨潤力	10 (ml/2g) 以上

本試験では、ベントナイト材料の購入元であるメーカー（クニミネ工業(株)）において材料の含水比調整および各種試験を行っており、購入したベントナイト材料のミルシートにより材料品質の確認を行う。なお加水調整にはアイリッヒ・インテンシブ・ミキサー（Mixer Type : DEV22）を用いた。加水調整のフローを図 3.3-1 に示す。

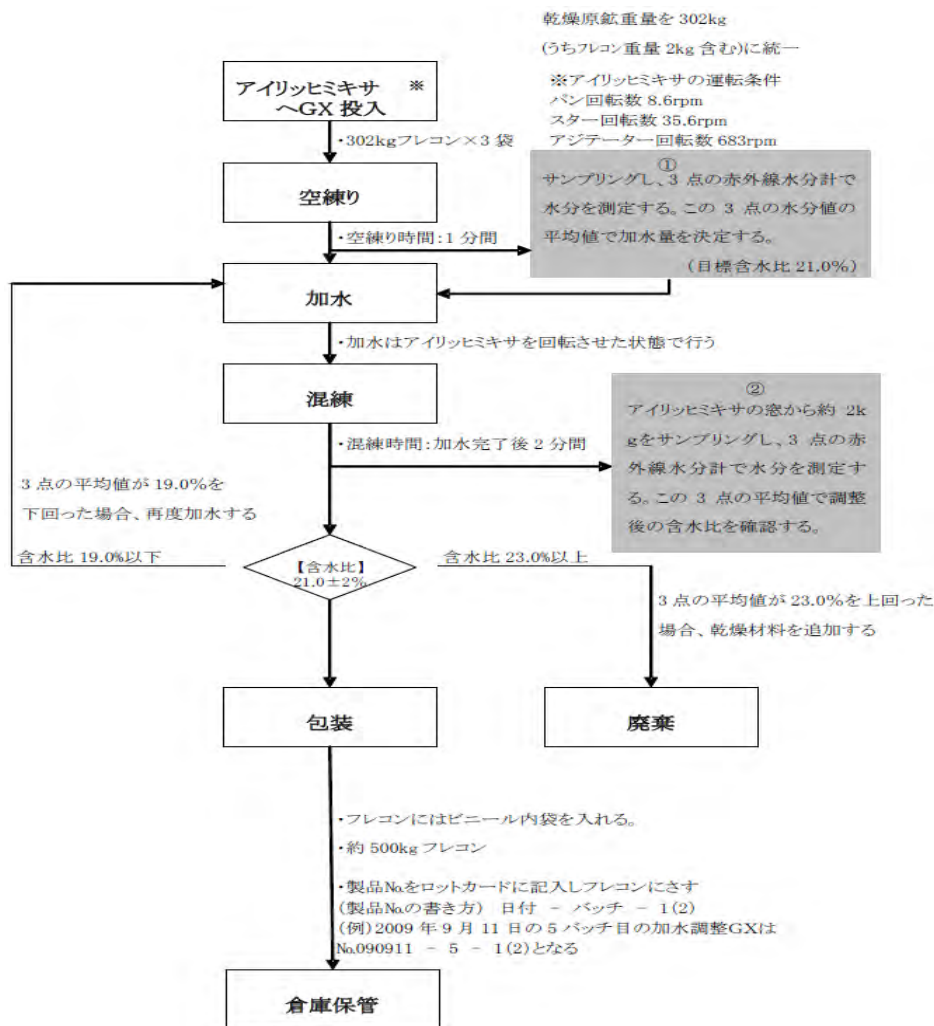


図 3.3-1 含水比調整のフロー

(3) 品質管理結果

今年度に使用したベントナイト材料の各物性値の一覧を表 3.3-3、ベントナイト（クニゲル GX）の粒径仕様を表 3.3-4 に示す。また、ベントナイト材料の粒度分布を図 3.3-2 に示す。

今年度使用したベントナイト材料の最大粒径、自然含水比、塑性限界、メチレンブルー吸着量、膨潤力とも表 3.3-2 に示す管理基準値を満たしている。また、粒度分布についても管理基準値の範囲内である。なお、図 3.3-3 に地下空洞型処分施設性能確証試験（以下、「確証試験」）で使用した材料の粒度分布を参考に示す。

表 3.3-3 今年度使用したベントナイト材料の特性一覧表

試料名	最大粒径	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	10mm以下	%	%	mmol/100g	ml/2g
130905	○	8.8	25.2	68.0	15.0
130925	○	9.0	23.7	67.0	15.0
131005	○	9.0	23.8	65.0	13.0
131018	○	9.2	23.2	66.0	15.0
131101	○	8.5	23.4	66.0	15.0
131113	○	8.3	23.7	66.0	15.0
平均値		8.8	23.8	66.3	14.7

表 3.3-4 ベントナイト（クニゲル GX）の粒径仕様

	ふるいを通るものの質量百分率 (%)								
	ふるいの呼び寸法 (mm)								
	19	9.5	4.75	2	0.85	0.425	0.25	0.106	0.075
クニゲルGX	100	100	70~100	45~100	20~100	0~100	0~70	0~30	0~10

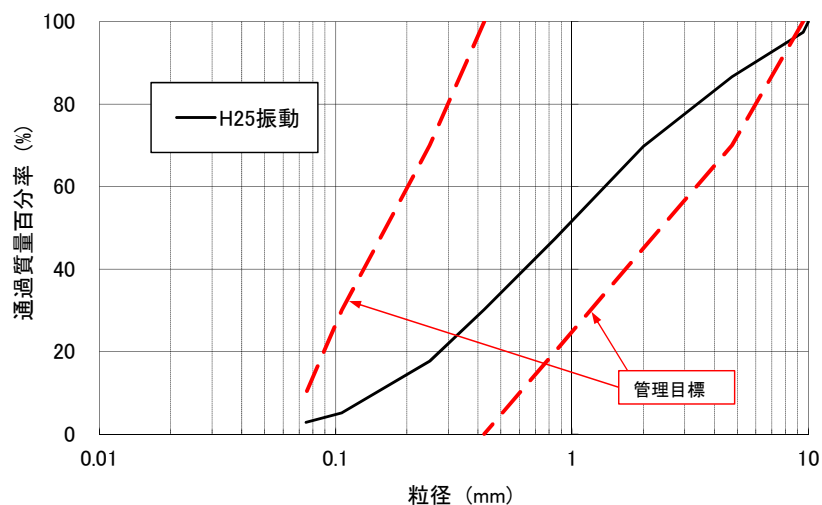


図 3.3-2 ベントナイト粒度分布

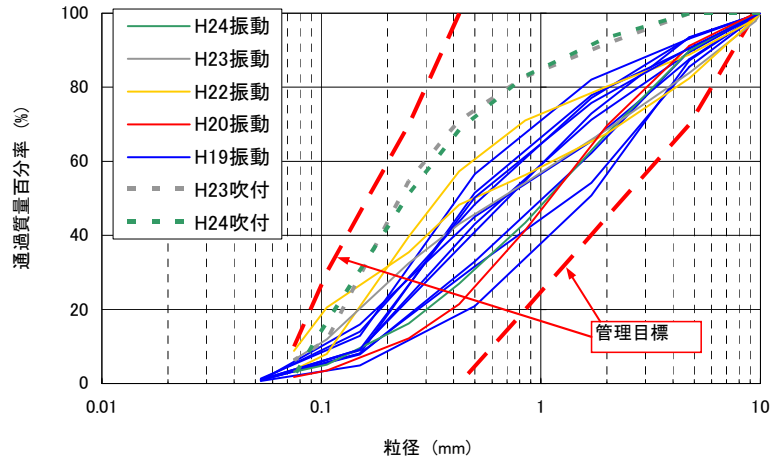


図 3.3-3 確証試験で使用した材料の粒度分布

(4) 緩衝材の要求機能と材料特性に関する品質管理項目との対応

ここでは、表 3.3-1 に示したベントナイト材料特性に関する品質管理項目について、緩衝材の要求機能との対応を述べる。

緩衝材に求められる要求機能は、放射線障害防止上の観点から要求される基本安全機能のうち、「閉じ込め」と「移行抑制」である。また、緩衝材には、放射線障害防止上の基本安全機能のほかに「操業上の機能」として確実な建設・操業を行うための力学的安定性の確保が要求される。

建設・操業段階の期間において求められる閉じ込め機能は、放射性核種の移行媒体となる地下水が廃棄体へ浸入することを抑制することで、埋設地外への有意な核種移行を防止する機能であり、地下水の浸入は、緩衝材の透水特性によって支配されることから、地下水浸入抑制の技術要件として透水特性があげられる。また、コンクリートピットの建設、廃棄体の定置作業などは、処分空洞の底部に施工された緩衝材上で行われる。そのため、底部緩衝材には、廃棄体やコンクリートピットなどの支持部材として十分な強度が求められることから、技術要件として力学特性が挙げられている。上部の緩衝材へは底部緩衝材ほどの荷重は作用しないが、上載される上部埋戻し材を支持するに十分な強度が求められるものと考えられる。

埋戻し後においては、移行抑制機能を確保するため、緩衝材には、人工バリア内部を通過する地下水の流量の低減を図ることが求められる。地下水通過流量は、緩衝材の透水特性によって支配されるため、緩衝材に対する技術要件として透水特性があげられる。

以上のように、緩衝材の要求機能に関わる技術要件には透水特性と力学特性があげられる。透水特性および力学特性に関連のある材料管理項目には、モンモリロナイト含有率、層間陽イオン組成、粒度分布、含水比、塑性限界があげられており[8]、表 3.3-1 の管理項目のうち、粒度分布、塑性限界、メチレンブルー吸着量はこれら技術要件に関連のある材料管理項目の一部である。

緩衝材に長期的な変化をもたらす代表的な現象・反応と、その現象・反応と関連する主要な特性を表 3.3-5 に示す。鉱物組成は長期的な化学的変質に影響を与えるものと考えられて

いる。特に有効モンモリロナイト密度や層間陽イオン組成は、長期的な透水係数を支配する重要な因子であり、設計、品質管理および検査において配慮すべき項目である。密度（かさ密度）については、長期的な化学的変質が生じた場合の透水係数の増大の程度を決定する因子となる。強度・変形係数、膨潤圧は、力学的変化に影響する因子である。強度・変形係数は、人工バリアの長期的な力学変形を支配するものであり、膨潤圧は空洞内充てん材の領域へのはらみ出しや周辺の亀裂・隙間に対する材料流出に影響するものと考えられている[8]。表 3.3-1 の管理項目のうち、メチレンブルー吸着量、膨潤力は長期的な移行抑制機能に影響を及ぼす項目としても材料管理項目となる。

表 3.3-5 緩衝材に対する代表的な現象・反応および関連する主要な項目[8]

重要度の高いパラメータ	性能を支配する主要な物理・化学特性	長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応	左記現象・反応に影響する当該部位の主要な項目
透水係数	モンモリロナイト層間イオン種	・交換性陽イオンの変化	・鉍物組成（層間陽イオン組成） ・密度（かさ密度）
	モンモリロナイト含有率	・モンモリロナイトの溶解	・鉍物組成（モンモリロナイト含有率）
	乾燥密度	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出	・強度・変形係数 ・膨潤圧
	間隙水の水質	・塩水の影響 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—
厚さ	厚さ	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出	・強度・変形係数 ・膨潤圧
	短絡経路の有無	・力学的影響による物理的損傷 ・膨潤による自己シール	・膨潤圧

3.3.2 施工・出来形に関する評価

上部緩衝材施工確認試験では、施工高さは約1mであり、仕上り層厚50mmで計21層の施工試験を行った。上部緩衝材では、実際には大型あるいは中型の振動ローラを用いて施工を行うことが可能であるが、本施工確認試験においては施工ヤードの制約上、小型振動ローラを用いて施工を行った。また上部緩衝材の四隅の部分はランマを用いて行い、その転圧時間を変えた施工試験により品質を確保するための仕様の検討を行った。なお、本施工試験では敷均しは施工ヤードの制約上、人力で実施し、実際には小型のフィニッシャの使用も考えられることから、それを想定した敷均し厚さ(100mm)で施工試験を行うこととした。

以下では、今年度実施した施工試験の結果と、その結果得られる品質および出来形の確認を行うことで施工方法の評価を実施した。

(1) 施工方法

1) ベントナイト含水比調整

今年度の含水比調整は、平成24年度までの側部緩衝材施工確認試験と同様に、アイリッヒミキサを使用した水添加混合方式により行った。調整後の含水比は、管理目標値の $21 \pm 2\%$ を満足する結果となった。

今回の水分調整はバッチごとに初期含水比を測定し、その値からバッチごとに加水量を算出して水分調整を行っているため、調整後の含水比のばらつきは初期含水比のばらつきより小さくなっている。にはバッチごとの材料の初期含水比と納品後に測定した含水比の比較を示す。初期含水比のばらつきに比べて、調整後のばらつきが小さくなっていることが分かる。には、納品後に測定した含水比の全データをプロットした結果を示す。同図においても納品後の材料の含水比のばらつきの方が初期含水比のばらつきより小さくなっている。

なお、初期含水比および調整後の含水比の測定は赤外線水分計(FD-720)を用いて実施されており、納品後の含水比の測定は炉乾燥法により実施した。炉乾燥による含水比の測定が18~24時間を要するに比べて、赤外線水分計による含水比の測定は迅速に行うことが可能であるが(十数分程度)が、測定する量が大きくことなる。炉乾燥による含水比測定は測定する材料の最大粒径により必要となる最小質量が表3.3-6に示すようにJIS(日本工業規格)により規定されており、クニゲルGXは最大粒径が10mmであるため、150gから300gが必要となる。一方、赤外線水分計には規定がないが、対象の材料は基本として粉体や液体であり、測定可能な量は最大120gであるが、量が多いと測定に時間を要するため通常は10数g程度を用いて測定を行う。測定する量の違いもあるので、両者により測定された値の比較を行った。結果をに示す。多少の違いは見られるものの、それほど大きな差はない。

表 3.3-6 含水比測定に試料として必要な最小質量

試料の最大粒径 mm	試料の最小質量
75	5kg~30kg
37.5	1kg~5kg
19	150g~300g
4.75	30g~100g
2	10g~30g
0.425	5g~10g

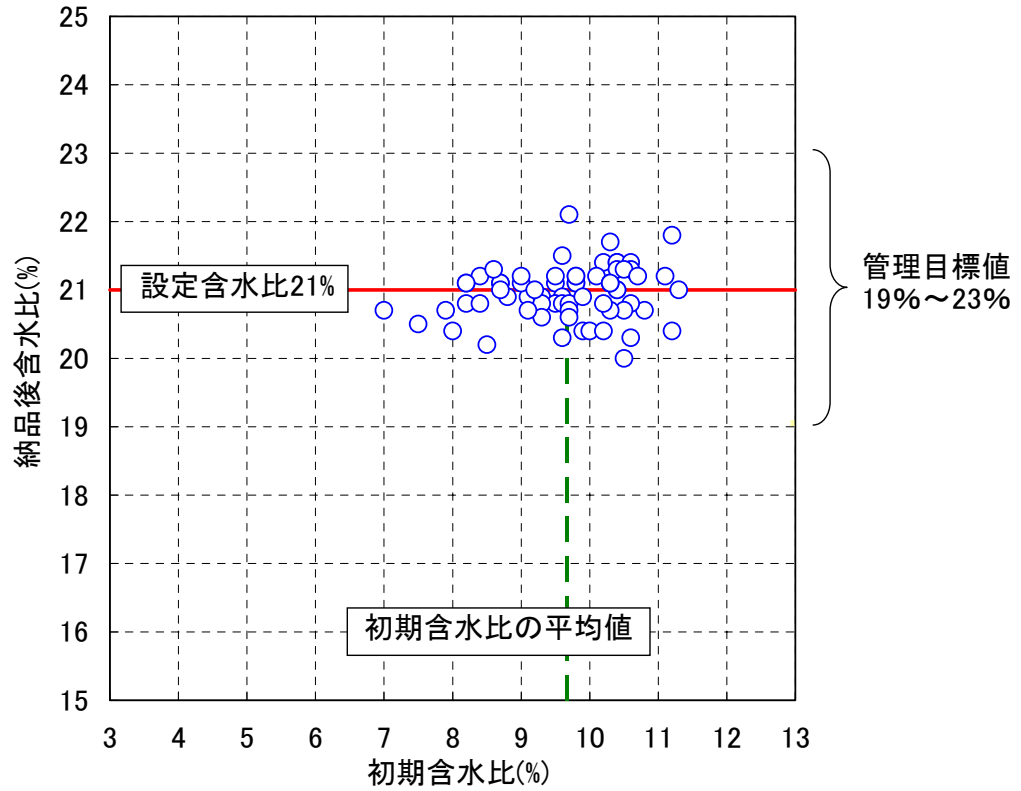


図 3.3-4 使用した材料の初期含水比と納品後の含水比の関係

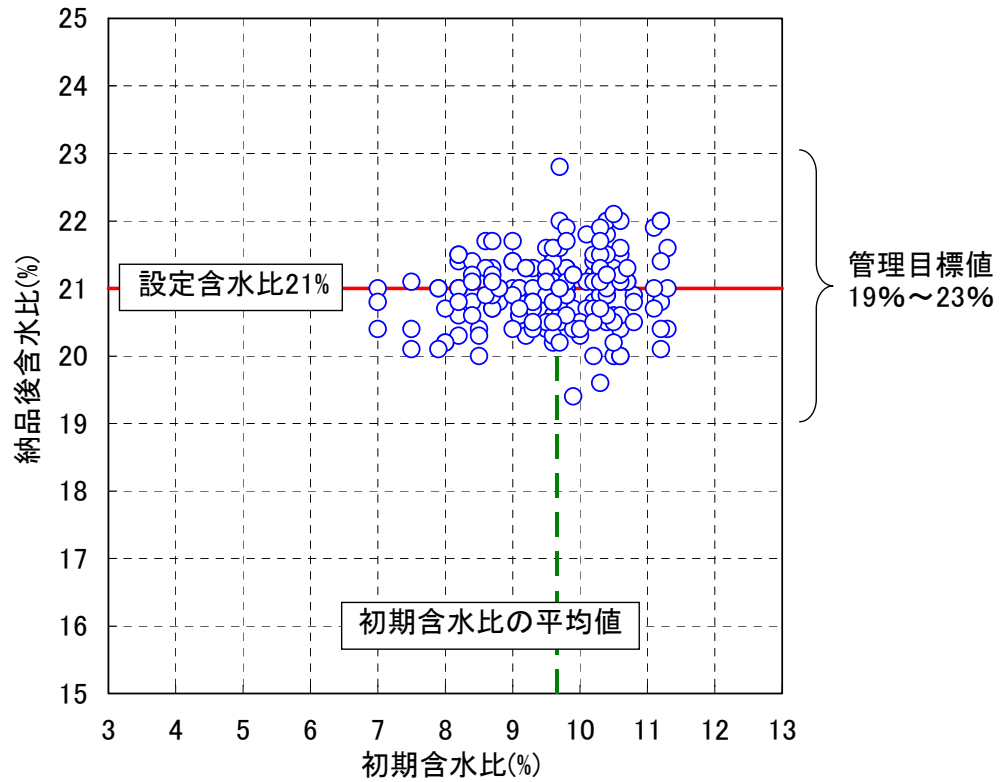


図 3.3-5 使用した材料の初期含水比と納品後の含水比（全数）の関係

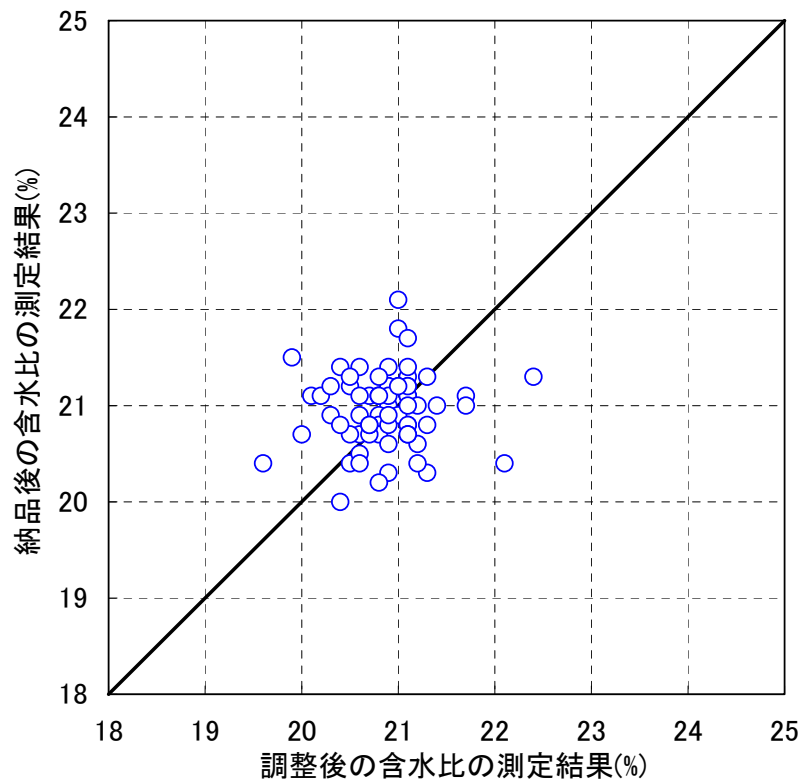


図 3.3-6 使用した材料の調整後の含水比と納品後の含水比の関係

2) 材料敷均し

本施工試験では敷均しは施工ヤードの制約上、人力で実施し、実際には小型のフィニッシャーの使用も考えられることから、それを想定した敷均し厚さ（100mm）で施工試験を行うこととした。人力敷均しによる歩掛り評価は「3.3.3 歩掛りに関する評価」で述べる。

3) 乾燥密度

a) 小型振動ローラ転圧

2層まとめて振動転圧した場合（手順2）の乾燥密度は、2層まとめて振動転圧していることにより、上層から下層にいくに従い小さくなっている。すなわち、乾燥密度は、上層に比べて下層の方が小さくなっており、上層上部と下層下部との差が大きくなる。

また、1層ごとに振動転圧した場合（施工手順1）の乾燥密度は、各層の上下で差はあるものの、施工手順2の場合と比べると、上層と下層の差は小さい。乾燥密度のばらつきは、施工手順1で振動転圧を行った場合の方が施工手順2に比べ小さいことが分かる。

施工手順2の乾燥密度は、平均値 1.636Mg/m^3 で、 $1.60 \pm 0.09\text{Mg/m}^3$ の範囲で、施工手順1の乾燥密度は、平均値 1.628Mg/m^3 で、 $1.60 \pm 0.05\text{Mg/m}^3$ の範囲になっており、いずれも管理目標値 $1.60 \pm 0.10\text{Mg/m}^3$ 以内である。

施工手順2および施工手順1で施工した場合の乾燥密度と含水比の関係を図 3.3-7および図 3.3-8 に示す。これからの図も施工手順1の方が施工手順2より乾燥密度のばらつきが小さいことが分かる。なお、図には室内で実施した突き固めによる締固め試験の結果も記載している。施工試験により得られた密度は、 4.5Ec の締固めエネルギーで実施した締固め試験で得られた締固め曲線に近い値となっている。すなわち、所定の乾燥密度を得るために必要な締固めエネルギーは約 4.5Ec であるといえる。

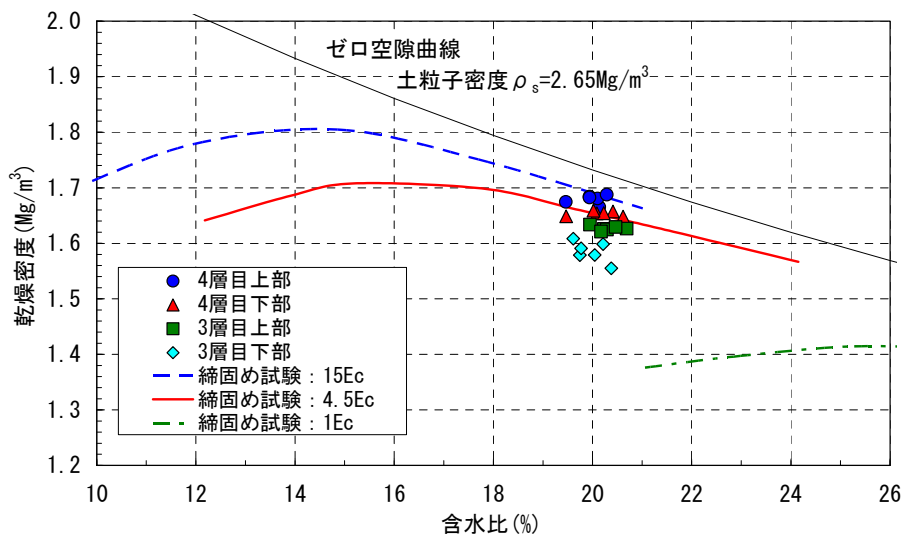


図 3.3-7 施工手順2（2層まとめて振動転圧）での乾燥密度と含水比の関係

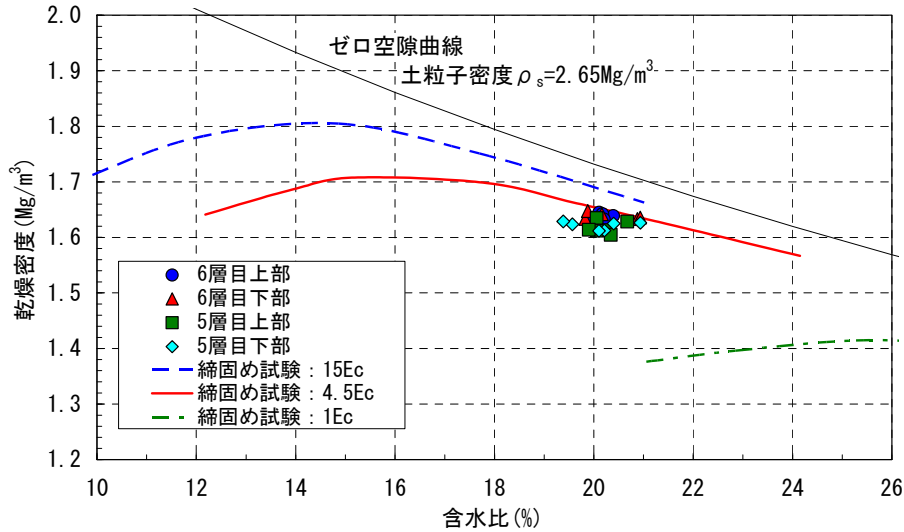


図 3.3-8 施工手順 1 (1 層単位で振動転圧) での乾燥密度と含水比の関係

b) ランマ転圧

ランマにより四隅を転圧した際の、ランマ転圧時間の違いによる施工後の乾燥密度の比較を行った。ランマ転圧は 1 層単位で実施しており、コアサンプリングは四隅の 4 点 (で実施した。

ランマ転圧の乾燥密度の層内分布は、ランマ転圧を 1 層単位で実施しているため、小型振動ローラの施工手順 1 (1 層単位で振動転圧) の結果と同様の傾向となっている。

ランマの転圧時間が 5 分の時 (平均値 1.616Mg/m^3 、標準偏差 0.018) の方が 2.5 分の時 (平均値 1.599Mg/m^3 、標準偏差 0.020) より乾燥密度の平均値は高く、ばらつきも小さくなっているが、同程度の値と評価される。乾燥密度は、ランマ転圧時間が 5 分の時に $1.60 \pm 0.04\text{Mg/m}^3$ の範囲に、2.5 分の時に $1.60 \pm 0.05\text{Mg/m}^3$ の範囲にあり、いずれも管理目標値 $1.60 \pm 0.10\text{Mg/m}^3$ 以内である。

ランマの転圧時間が 1ヶ所当たり 5 分および 2.5 分の場合の乾燥密度と含水比の関係を図 3.3-9 および図 3.3-10 に示す。これらの図には室内で実施した突き固めによる締固め試験の結果も記載している。ランマによる施工により得られた乾燥密度は 4.5Ec の締固めエネルギーで実施した締固め試験で得られた締固め曲線に近いが、これよりは低い値である。ランマ転圧時間が 5 分の方が 2.5 分より締固め曲線 (4.5Ec) に近づく傾向が見られるが、それほど大きな差はないと評価される。

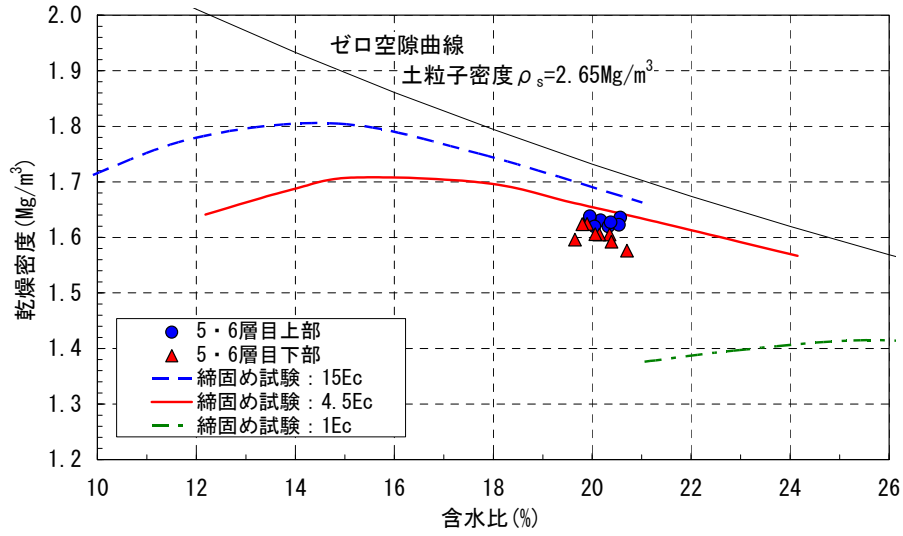


図 3.3-9 四隅の乾燥密度と含水比の関係（ランマー転圧時間 5 分）

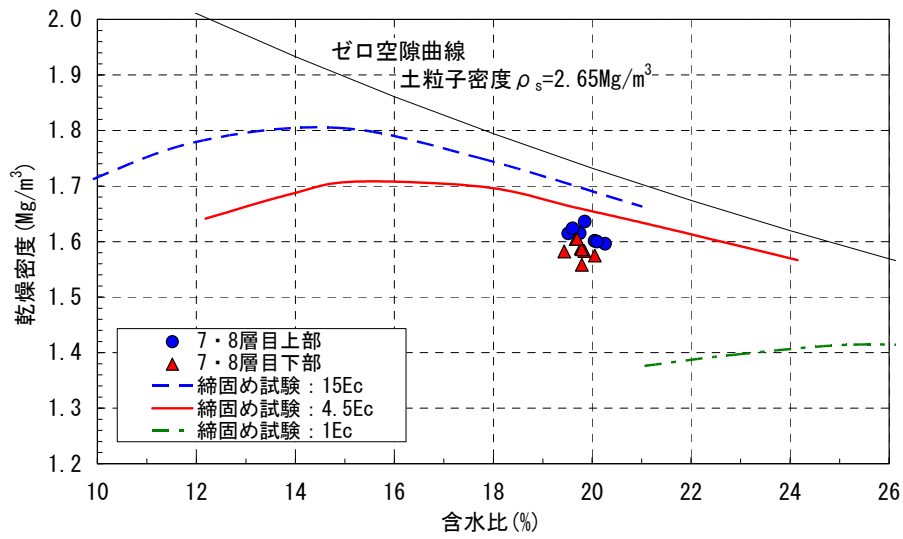


図 3.3-10 四隅の乾燥密度と含水比の関係（ランマー転圧時間 2.5 分）

(2) 施工時の品質管理

各層施工終了後、レベル測量により施工高を測定し、施工高から算出した施工体積と投入重量から密度を取得した。各層（2層単位）のコア密度測定結果およびレベルにより算出した密度（2層の平均）の比較を図 3.3-11 に示す。施工後の仕上り密度（コアの乾燥密度）は $1.61 \sim 1.68 \text{ Mg/m}^3$ の範囲となっており、コア密度とレベル測量による密度は概ね整合する結果が得られている。

図 3.3-12 に示すようにコアにより測定された乾燥密度の層平均とレベル測量により算出された各層の密度は概ね整合する結果が得られており、レベル測量による密度管理手法は、乾燥密度を平均値で管理する点で許容できる範囲の測定が可能であると評価される。

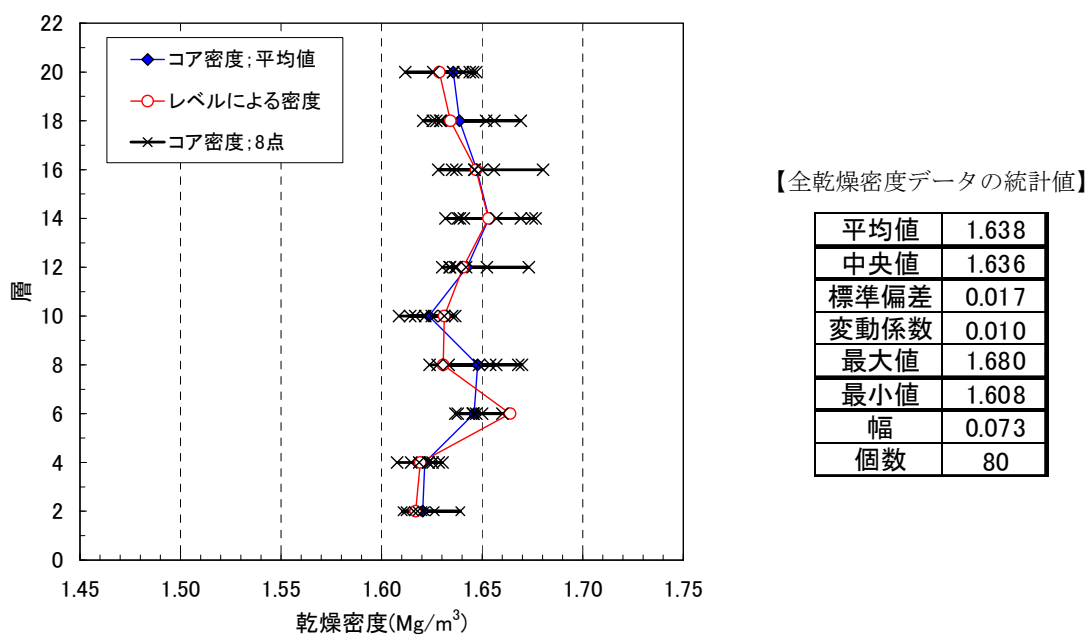


図 3.3-11 各層における密度測定結果

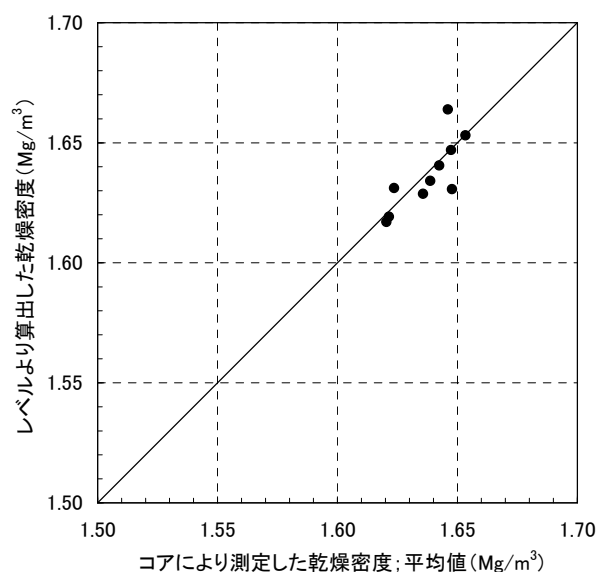


図 3.3-12 レベルにより算出した密度と乾燥密度との比較

図 3.3-13、は各層の平均値のコアの乾燥密度と含水比の関係を示す。含水比は 20～21%の間でばらつき、乾燥密度は 1.62～1.66Mg/m³の間でばらついていることがわかる。すなわち、管理目標値 1.60±0.10Mg/m³に対して、ほぼ 1.60±0.05Mg/m³の範囲となっており、ばらつき自体は±0.02 Mg/m³程度となっている。図 3.3-14 はコア密度の全測定値の結果を示す。全コア密度に関しても 1.60±0.10Mg/m³の範囲に収まっている。また、ばらつきも±0.05 Mg/m³以下と小さくなっている。

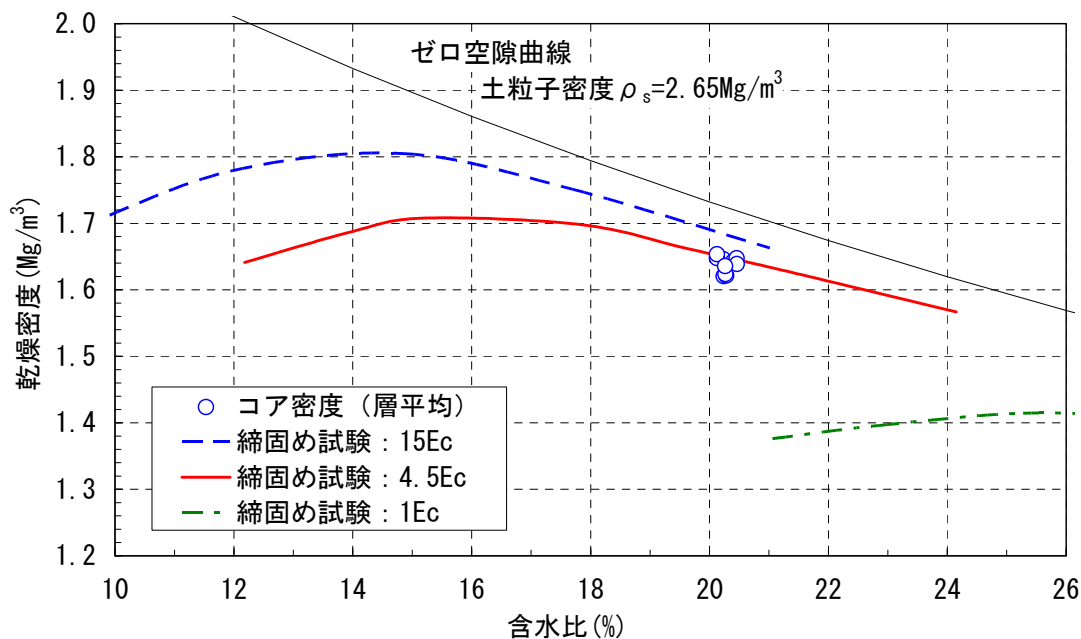


図 3.3-13 コア密度と含水比の関係（各層の平均値）

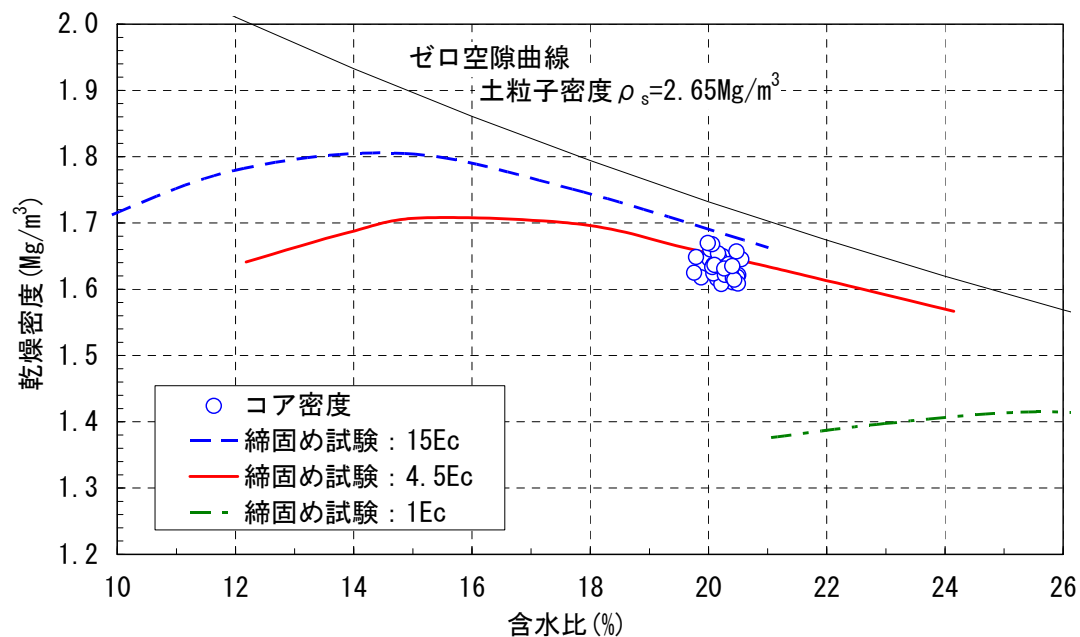


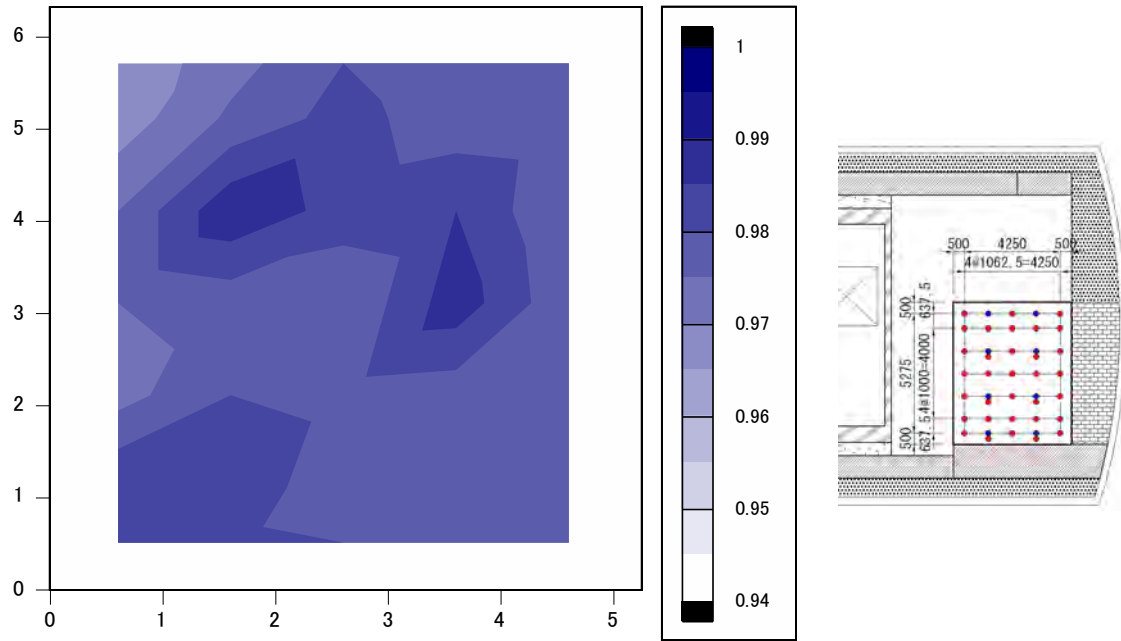
図 3.3-14 コア密度と含水比の関係（全測定データ）

(3) 出来形

上部緩衝材平面部施工試験では、各層の施工終了後にレベル測量を行い、層ごとの仕上がり高さを管理した。ここでは、振動締固めによる仕上がり高さのばらつきの把握と最終層終了時の仕上がり高さについての評価を実施した。

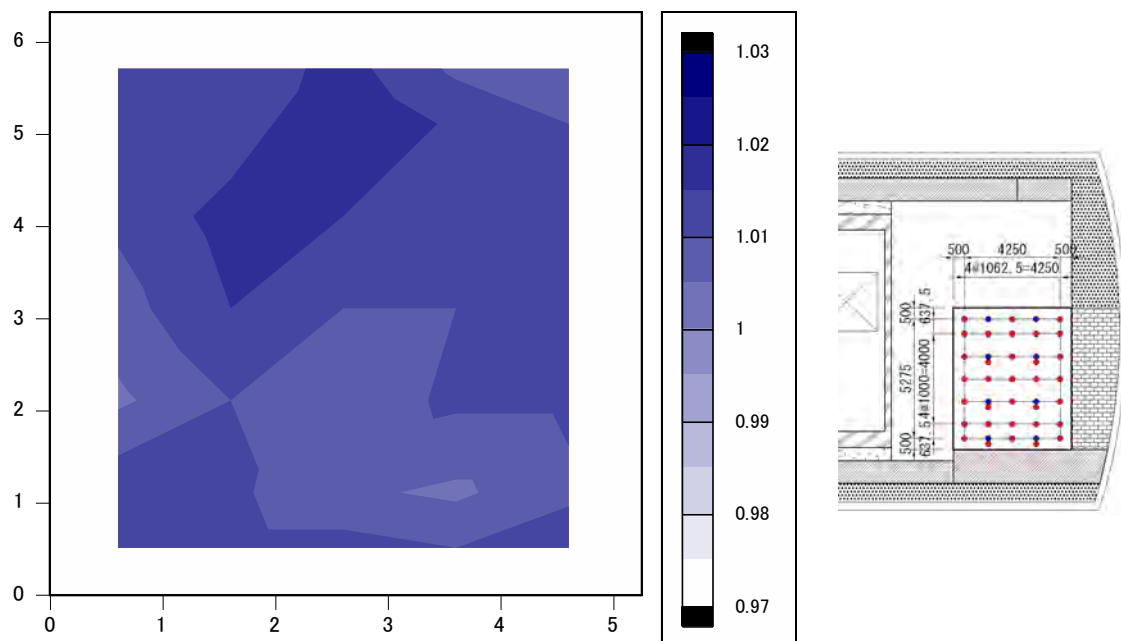
図 3.3-15 には、20 層目施工後および仕上げの最終 21 層目施工後の施工面のコンター図を示す。施工面高さの差（不陸）は、20 層目施工時では 23mm であったが、最終 21 層目では 16mm と小さくなった。最終 21 層目については、投入可能量（残量）から目標敷均し厚さを逆に算出して撒出しを行った。

レーザーレベルを用いて撒出し厚さの管理を行ったこともあり、大きな不陸は生じていないことがわかる。施工高さの管理方法として、レーザーレベルの使用は有効的であると思われる。



最大	最小	差
0.989m	0.966m	0.023m

(a) 20 層目



最大	最小	差
1.020m	1.004m	0.016m

(b) 21 層目

図 3.3-15 施工面高さのコンター図

(4) 吹付け施工面と転圧施工面の境界部の状況

吹付け施工面と転圧施工面との境界部の密着状況を確認するため、図 3.1-87 に示す位置でコアを採取した。採取したコアを図 3.3-16 に示す。図 3.3-16 の矢印を結ぶ位置が施工境界面と想定されるが、目視では施工境界を明確に把握することはできなかった(図 3.3-16 では、鉛筆でマーキングしている)。

すなわち、この異なる施工方法による施工境界も、通常の振動転圧時の施工境界と同程度に密着しており、評価上、特に大きな問題にはならないと思われる。また、隅部においては、このような手順で施工することによりランマ等の小型機械を用いなくても施工できる可能性があることがわかった。なお、境界面の一体性について客観的に評価するには、強度については一面せん断試験を実施することによりある程度は評価可能であり、密度については CT スキャン等による非破壊検査で定性的に評価することが可能であると考えられる。



図 3.3-16 施工境界部から採取したコア
(目視ではわかりにくいので鉛筆でマーキングしている)

(5) 空気圧送試験

圧力釜式吹付け機およびサイクロンを用いた材料の空気圧送の可能性に関する試験を実施した。各回（3回）の圧送量と圧送に要した時間を図 3.3-17 に示す。圧送後に含水比の測定用のサンプリングを行ったため、圧送量は少しずつ減少している。一方、圧送時間に関しては、圧送量の減少割合以上に低下している。圧送速度の算出結果を図 3.3-18 に示す。圧送速度は圧送回数が増えるにつれて増加しており、この要因はオペレーターの操作慣れによるものと考えられる。含水比の測定結果の分布を図 3.3-19、各段階における含水比の平均値および最大・最小値の変化を図 3.3-20 に示す。圧送を繰り返すことにより、含水比は徐々に低下しており、圧送前と圧送 3 回目では含水比の低下量は約 0.3%であった。

今回は圧送ケースが 1 回であり、オペレーターの操作慣れによる圧送時間のばらつきが大きかった。今後は試験数を増やして圧送機械、圧送距離、圧送時の気温等による影響を検討していくことが求められる。

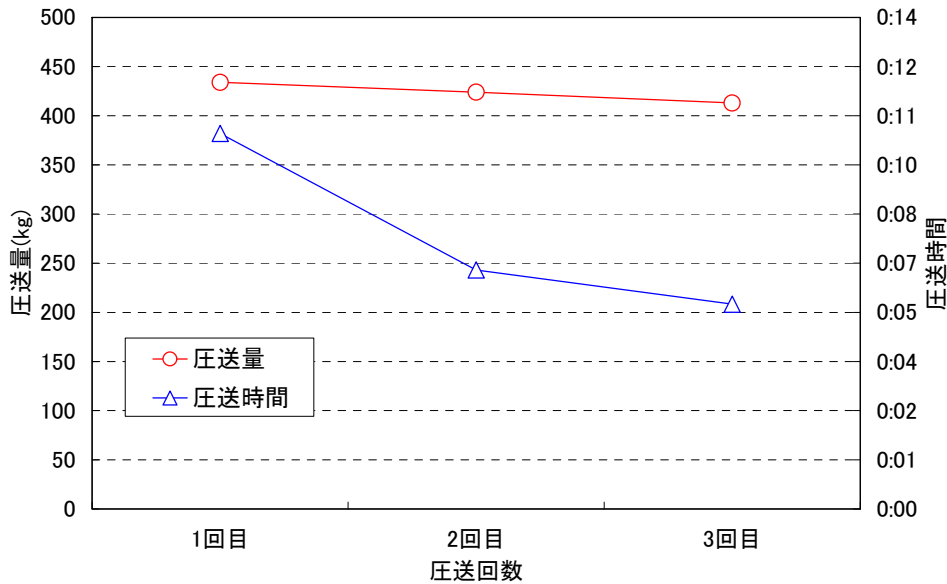


図 3.3-17 各圧送における圧送量と圧送に要した時間

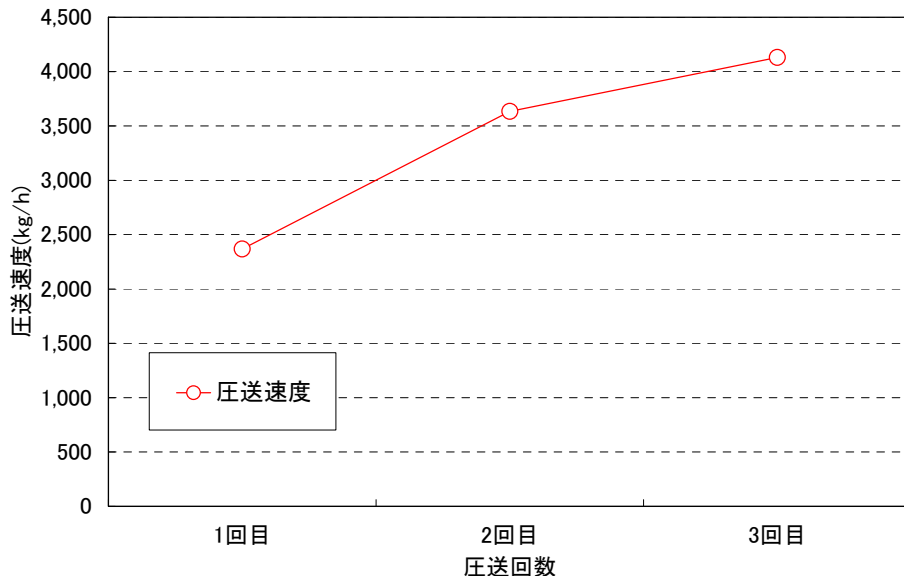
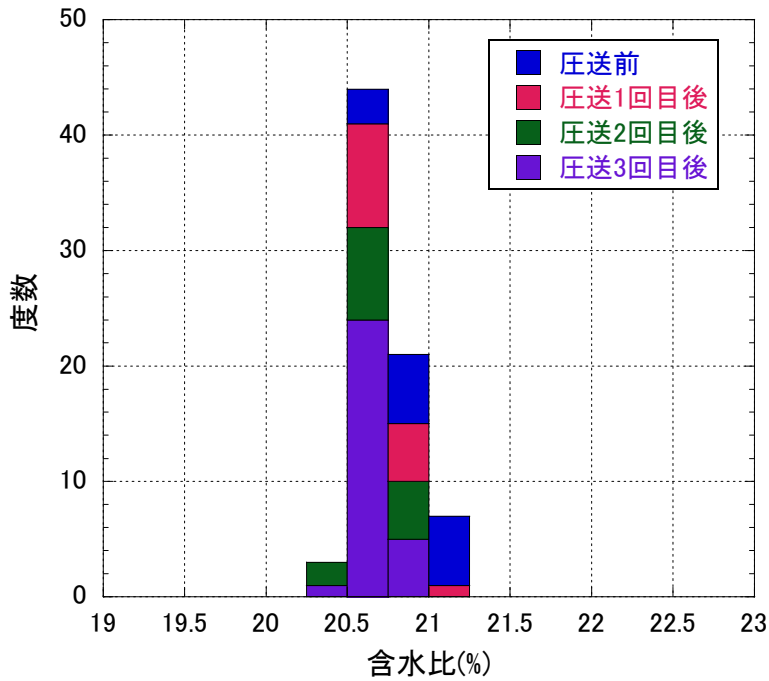


図 3.3-18 各圧送における圧送速度



圧送前		圧送2回目後	
平均値	20.9	平均値	20.7
中央値	20.9	中央値	20.6
標準偏差	0.17	標準偏差	0.16
変動係数	0.01	変動係数	0.01
最大値	21.1	最大値	20.9
最小値	20.6	最小値	20.4
幅	0.5	幅	0.5
標本数	15	標本数	15
圧送1回目後		圧送3回目後	
平均値	20.7	平均値	20.6
中央値	20.7	中央値	20.6
標準偏差	0.13	標準偏差	0.12
変動係数	0.01	変動係数	0.01
最大値	21.0	最大値	20.9
最小値	20.5	最小値	20.4
幅	0.5	幅	0.5
標本数	15	標本数	30

図 3.3-19 含水比測定結果

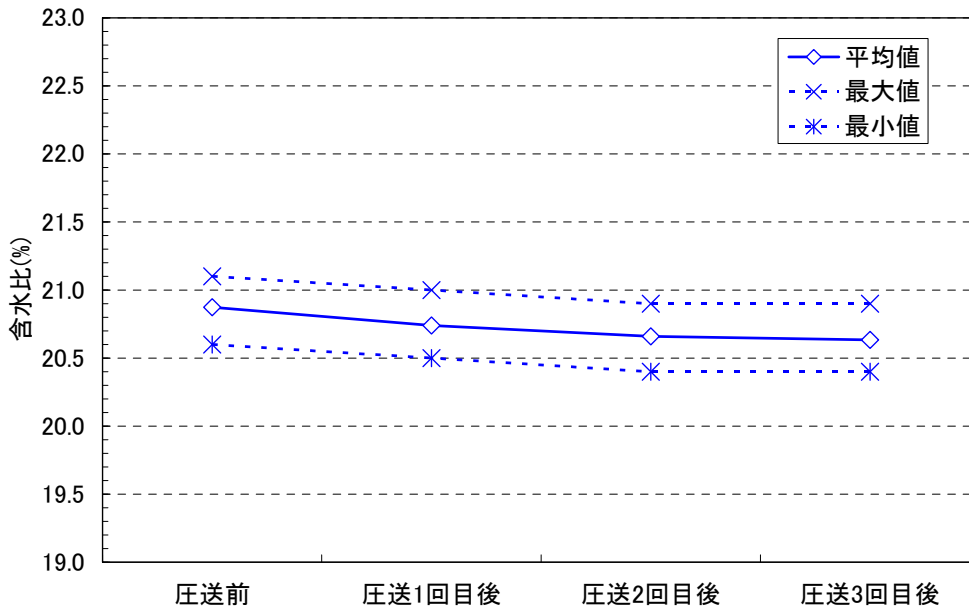


図 3.3-20 含水比の変化

3.3.3 歩掛りに関する評価

本施工試験結果から得られた 10m³ 当たりの施工時間（仕上がり厚さが 0.1m×100m²）を図 3.3-21 に示す。それぞれ、敷均し時間、無振動転圧時間、振動転圧時間、コア採取時間（8本）を示している。今回の施工試験では敷均しを人力で行ったため、敷均しに最も時間を要していることがわかる。施工手順 1 と施工手順 2 を比べると施工時間に関してはほぼ同程度である。また、平成 24 年度の側部緩衝材施工試験で得られた 10m³ 当たりの施工時間との比較を図 3.3-22 に示す。平成 24 年度の側部緩衝材と比べると今年度の上部緩衝材では敷均しが人力であるためこれに要している時間が他の工程に比べて極端に大きいことが分かる。また、無振動転圧、振動転圧の時間も多くなっているが、これは施工レーン数が側部緩衝材に比べて上部緩衝材の方が多いため、レーン変更に要する時間の分、施工時間が多くなっていると考えられる。上部緩衝材の実施工における転圧には大型あるいは中型の機械を用いることが可能であるため、その場合には施工レーン数が少なくなり、結果として上部緩衝材における転圧の歩係りに関しては側部緩衝材と比べて遜色ない値になると思われる。また、側部に比べて施工ヤードが広いため、複数の機械を投入することも可能であると思われる。

比較のため、今年度の転圧工法と吹付け施工における施工時間を表 3.3-7 に示す。なお、ここでの施工時間には、試験施工に伴うコア抜き等の時間は含めていない。10m³ 当たりの施工時間は、転圧工法が 7 時間 11 分、吹付け工法が 17 時間 40 分であり、吹付け工法は転圧工法の約 2.5 倍の施工時間がかかる。

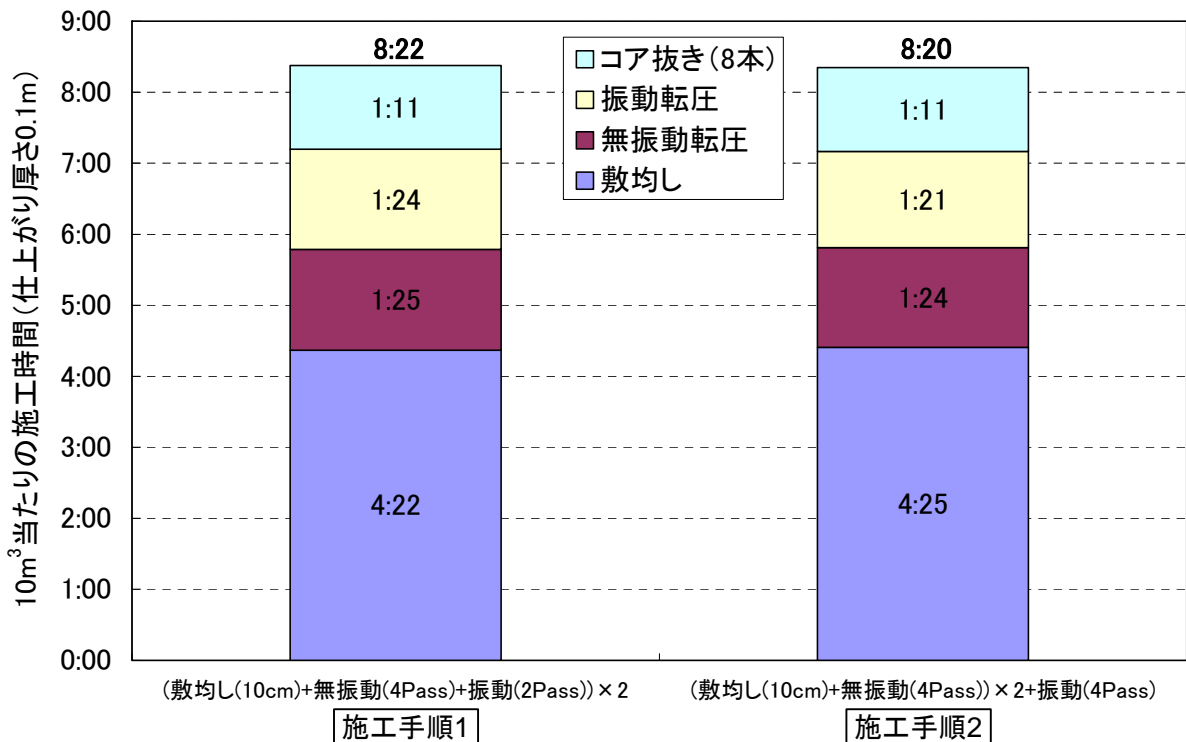


図 3.3-21 10m³ 当たりの施工時間の比較

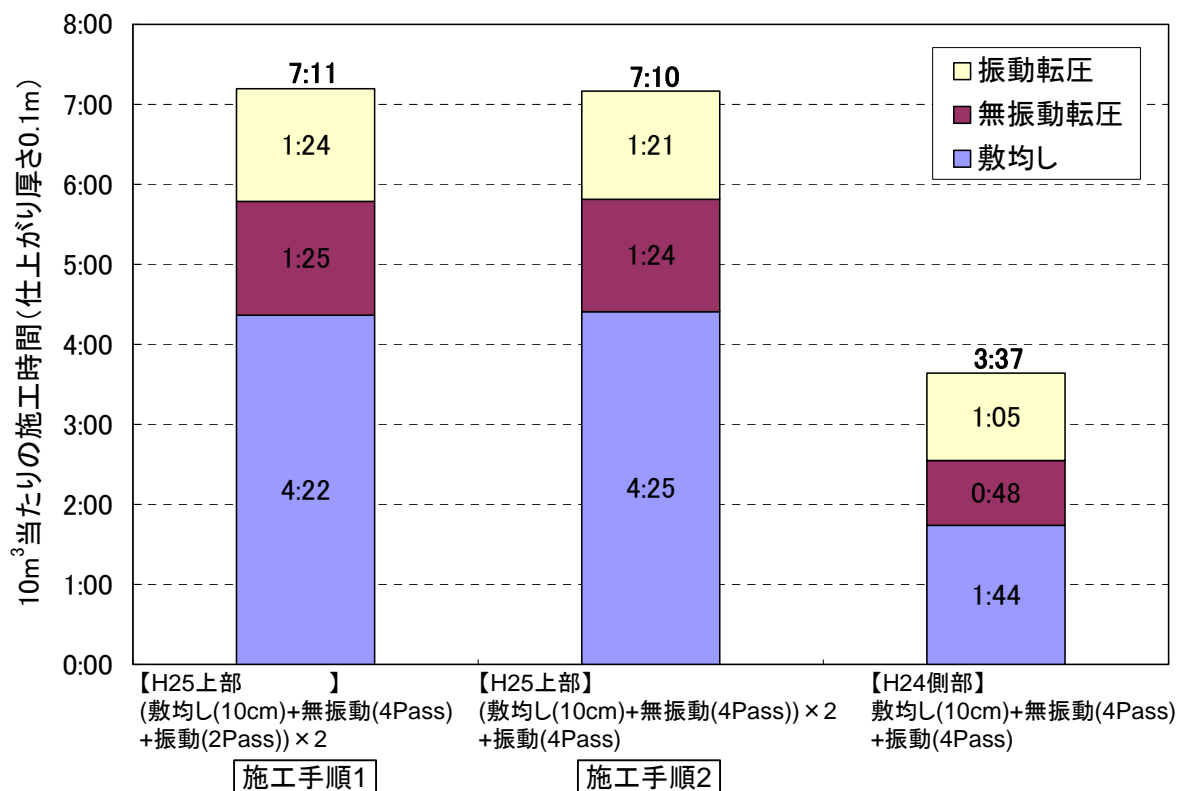


図 3.3-22 10m³当りの施工時間の側部緩衝材（平成 24 年度）との比較

表 3.3-7 施工時間の比較

	起算数量[m³]	施工時間	10m³当たりの 施工時間
転圧工法	10.00	7時間11分	7時間11分
吹付け工法	0.33	0時間35分	17時間40分

※コア抜き等の試験施工に伴う時間を除く

3.3.4 施工確認試験の総合評価

(1) ベントナイト材料特性

平成 19 年度の施工確認試験以降、材料特性データが蓄積されてきており、ここでは、これまでのデータを集約し、特性値の変動やばらつきの傾向について考察した。

平成 19～20 年度、平成 22～25 年度の振動工法による施工確認試験での材料特性データを集約した粒径加積曲線を図 3.3-22 に示す。過年度の粒度分布は表 3.3-4 の管理基準値の範囲内に分布している。

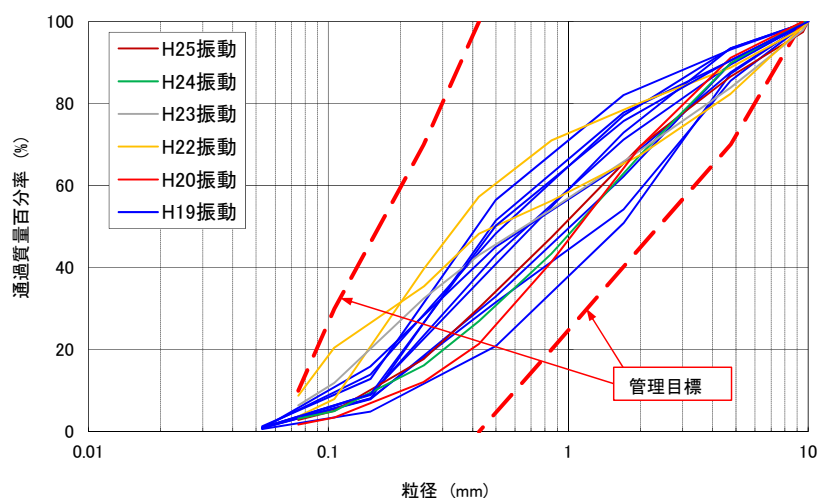


図 3.3-23 各年度の粒径加積曲線

ベントナイト（クニゲル GX）の管理値一覧を表 3.3-8 に、振動工法で使用したベントナイト材料の試験値（集約データ）の基本統計量を表 3.3-9、各特性値のヒストグラムを図 3.3-24～図 3.3-27 に示す。各項目ともばらつきを有するが、いずれも管理値の範囲内である。変動係数でばらつきを評価すると、自然含水比の変動係数がその他の特性値と比べて大きい。その他の塑性限界、メチレンブルー吸着量および膨潤力は、年度の違いで大きな差異はなく、材料の特性値の変動は小さいといえる。

表 3.3-8 ベントナイト（クニゲル GX）の管理値

	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	%	%	mmol/100g	ml/2g
管理値	10以下	30以下	63以上	10以上
特性値範囲	6.1～9.3	21～25.2	65～76	13～20

表 3.3-9 振動工法で使用した材料の材料特性の基本統計量（平成 19～25 年度）

	自然含水比	塑性限界	メチレンブルー吸着量	膨潤力
	%	%	mmol/100g	ml/2g
平均値	7.6	22.9	68.1	16.0
中央値	7.4	23.1	67.0	15.0
標準偏差	0.99	1.02	2.96	1.58
変動係数	0.13	0.04	0.04	0.10
最大値	9.3	25.2	76.0	20.0
最小値	6.1	21.0	65.0	13.0
範囲	3.2	4.2	11.0	7.0
標本数	32	35	35	35

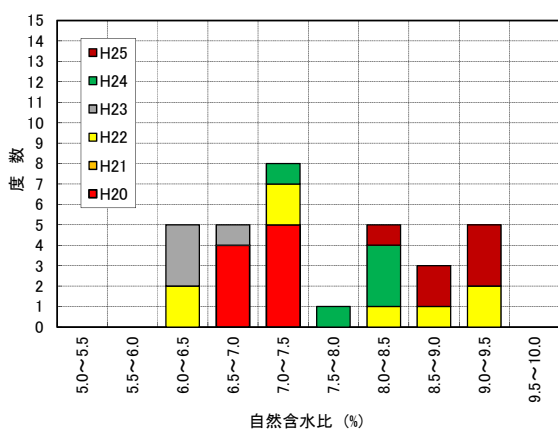


図 3.3-24 自然含水比のヒストグラム

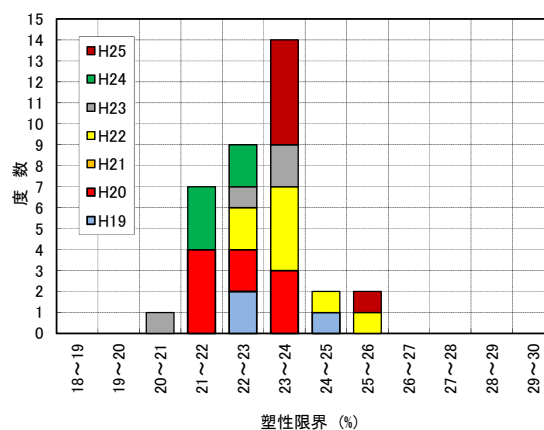


図 3.3-25 塑性限界のヒストグラム

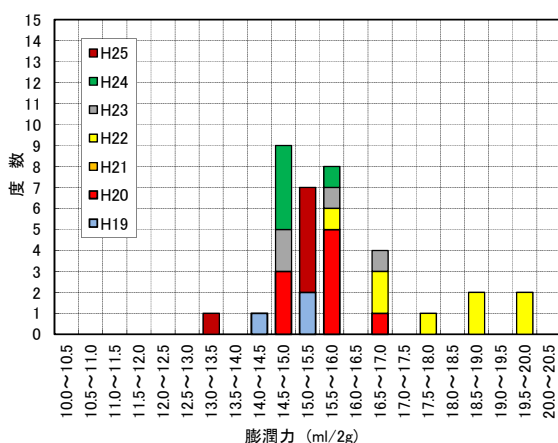


図 3.3-26 膨潤力のヒストグラム

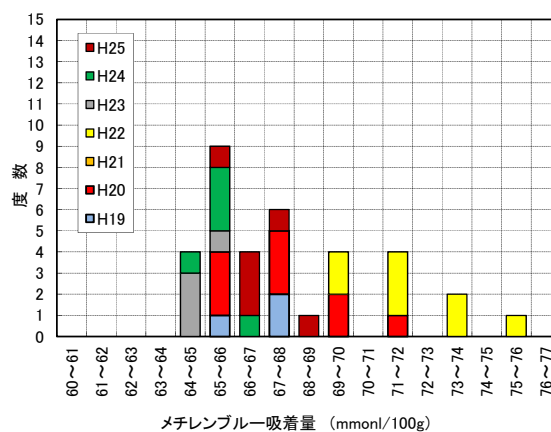


図 3.3-27 メチレンブルー吸着量のヒストグラム

(2) 施工方法

1) 含水比調整

今年度の含水比調整は、アイリッヒミキサを使用した水添加混合方式により行い、全フレコンとも、調整後含水比は、 $21 \pm 1.4\%$ の範囲となり、管理基準値 $21 \pm 2\%$ を満足した。バッチ単位での添加水設定は、初期含水比測定および添加量調整に時間を要するが、含水比調整の品質を確保する上で有効な手段であると考えられる。

2) 材料敷均し・振動締固め

本施工試験では敷均しは施工ヤードの制約上、人力で実施した。本施工確認試験での敷均し・転圧の手順は、1～4層は施工手順2（2層ごとに振動転圧）、5～8層は施工手順1（1層ごとに振動転圧）の2ケースで施工を行った。

検討の結果、施工手順1と施工手順2の施工後の乾燥密度の平均値（それぞれ 1.628Mg/m^3 、 1.636Mg/m^3 ）には大きな違いはなく、いずれも管理目標値 $1.60 \pm 0.10\text{Mg/m}^3$ 以内であった。しかし、施工手順1では層内の乾燥密度の標準偏差は0.012であり、施工手順2（同0.037）と比較してはるかに小さい。また、歩掛りに関しては、施工手順1と施工手順2の施工パターンの違いによる施工時間（ 10m^3 当たり）は、ほぼ同等（それぞれ 10m^3 当たり7時間10分、7時間11分）であった。さらに、施工手順1による5～8層の検討では、振動転圧が2Passで所定の仕上り厚さに達した。これより、9層以降では施工手順1で振動ローラ転圧Pass数は2Passに設定した。

また、5～8層のランマ転圧時間の検討において、乾燥密度の平均値は、ランマの転圧時間が5分、2.5分の時でそれぞれ 1.616Mg/m^3 、 1.599Mg/m^3 となり、いずれも管理目標値 $1.60 \pm 0.10\text{Mg/m}^3$ 以内であった。また、標準偏差においては、ランマの転圧時間が5分、2.5分の時でそれぞれ0.018、0.020であり大きな差はなかった。これより、9層以降ではランマ転圧時間は2.5分に設定した。

(3) 施工後の品質・出来形

1) 仕上り密度（施工後の乾燥密度）

全20層の施工後の乾燥密度は、各層の平均値で整理した場合に平均値 1.638Mg/m^3 で $1.60 \pm 0.06\text{Mg/m}^3$ の範囲に、全測定データで整理した場合に平均値 1.638Mg/m^3 で $1.60 \pm 0.08\text{Mg/m}^3$ の範囲にあり、管理目標値 $1.60 \pm 0.10\text{Mg/m}^3$ 以内で施工が可能であることが明らかとなった。施工後の乾燥密度は、4.5Ecの締固めエネルギーでの締固め試験による締固め曲線に最も近い値であった。

2) 施工高

各層施工終了後にレベル測量を行い、各層の仕上り高さを管理した。今回はレーザーレベルを用いて撒出し厚さの管理を行い、施工高さはほぼ計画高さ通りであった。各層の施工面高さの差（不陸）の最大値を図3.3-28に示す。全層における不陸の最大値は、横断方向で

2.3cm、縦断方向 1.0cm であり、小型振動ローラの進行方向である横断方向の方が、縦断方向よりも不陸が大きい傾向が見られる。施工高さが 0.45m (9 層目) 以降では、各層の不陸がほぼ 1cm 未満と安定している。

20 層目施工時では 23mm あった不陸は、仕上げの最終 21 層目では、投入可能量 (残量) から目標敷均し厚さを逆に算出して撒出しを行った。その結果、最終 21 層目では、施工面高さの差 (不陸) は 16mm と小さくなった。

以上のように、本試験で確認された施工高のばらつき程度であれば管理目標値内の施工が可能であることを確認できた。

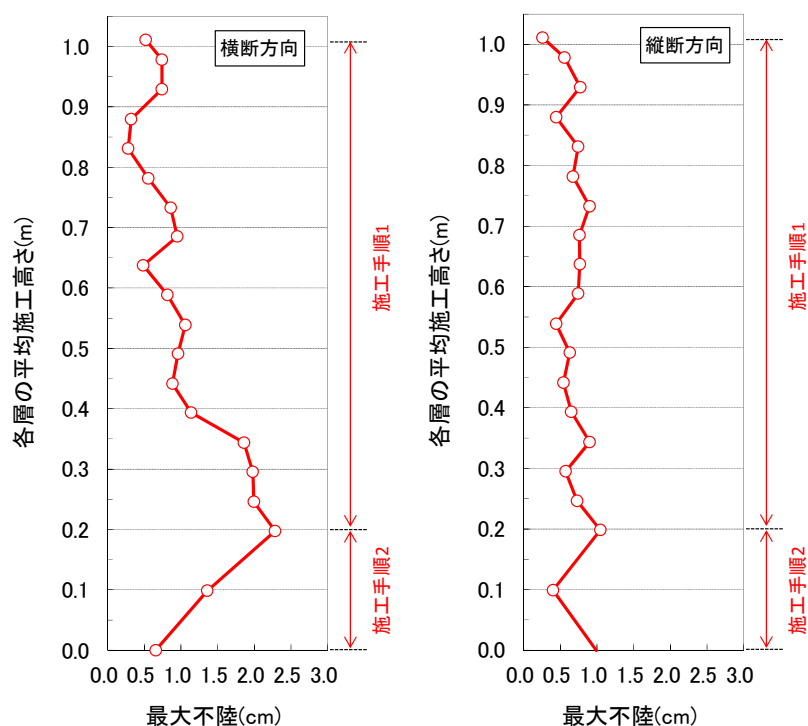


図 3.3-28 各層の不陸の最大値

3) 施工面の境界について

吹付け施工面と転圧施工面との境界は、目視でははっきりと確認できないほど密着していた。吹付けと転圧という異なる施工方法による施工境界は、通常の転圧時の施工境界と同程度に密着しており、評価上、特に大きな問題にはならないと思われる。また、隅部においては、このような手順で施工することによりランマ等の小型機械を用いなくても施工できる可能性があることがわかった。

(4) 施工効率

今回の施工試験では敷均しを人力で行ったため、平成 24 年度の側部緩衝材施工試験と比較すると、敷均しに要した時間が約 2.5 倍に増加した。その他の施工工程である、無振動転圧、振動転圧の時間も側部緩衝材施工試験と比較すると多くなっているが、これは施工レーン数

が側部緩衝材に比べて上部緩衝材の方が多いため、レーン変更に要する時間が多くなっているためであると考えられる。

上部緩衝材の実施工では、今年度の施工面積より幅、奥行きともに大きくなると想定されるため、転圧には小型の機械ではなく、大型あるいは中型の機械を用いることが可能であるため、その場合には施工レーン数が少なくなり、結果として上部緩衝材における転圧の歩係りに関しては側部緩衝材と比べて遜色ない値になると考えられる。

(5) まとめ

上述したように、本試験で確立した施工方法により、構築した部材においてばらつきが少なく、必要な品質を確保することができた。また、初期性能確認試験において述べるように、緩衝材の主機能である止水性能に関して、構築した部材が要求される初期性能を満足することを確認している。

3.3.5 施工確認試験の課題の抽出

本施工試験では施工ヤードの制約上、敷均しは人力、転圧には小型振動ローラで施工したが、上部緩衝材の実施工では、本試験の施工ヤードより広くなるため、機械による敷均し、大型あるいは中型の機械による転圧施工が可能であると考えられる。ただし施設形状上、上部緩衝材の空洞横断面方向の左右端部については作業高さの制限があるため、施工機械の選定に関する検討が課題として考えられる。また、吹付け部と転圧部の施工境界については、今年度の斜路におけるコアの目視結果より、通常の転圧施工による施工境界と同程度に密着していることを確認したが、今後、一面せん断試験、透水試験、CT スキャン等の試験により、施工境界の影響を定量的に確認することが望まれる。

3.4 初期性能確認試験結果の評価

今年度実施した初期性能確認試験の試験項目を表 3.4-1 に示す。

建設・作業時の安全確保性能に係わる試験としては、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施し、振動締固め施工で構築した部材の強度特性・変形特性を確認した。

止水性能に係わる試験では、透水試験を実施し、振動締固め施工で構築した部材の透水係数の把握、初期性能の品質達成度の確認を実施した。

閉鎖後の力学的・化学的安定確保性能に係わる試験では、膨潤圧試験を実施し、膨潤圧を把握した。

表 3.4-1 初期性能確認試験の試験項目

要求性能	試験項目	数量	試験目的
建設・作業時の安全確保性能	一軸圧縮試験	1	・強度・変形特性の把握
	三軸圧縮試験 (UU)	1	
止水性能	透水試験	4	・透水特性の把握
	密度試験 (コア法)	40	
閉鎖後の力学的・化学的安定確保性能	膨潤圧試験	4	・長期力学安定性の把握

3.4.1 建設・作業時の安全確保性能に関する評価

(1) 一軸圧縮試験結果

上部緩衝材施工終了後、構築した部材からコアを採取して一軸圧縮試験を実施した。試験のひずみ速度は 1%/min として行い、既往試験結果と比較を行った。

乾燥密度と一軸圧縮強さ、変形係数および破壊ひずみの関係を図 3.4-1～図 3.4-3 に示す。各図には平成 22～24 年度の試験結果（平成 24 年度はひずみ速度 0.01%/min も実施）も併記した。

乾燥密度と一軸圧縮強さの関係をみると、一軸圧縮強さは乾燥密度に依存する傾向がある。

変形係数、破壊ひずみについても乾燥密度に依存する傾向があるが、一軸圧縮強さに比べるとばらつきが大きい。

本年度実施した試験結果は、乾燥密度が同程度の既往試験結果と概ね同程度の強度・変形特性を発揮することを確認した。

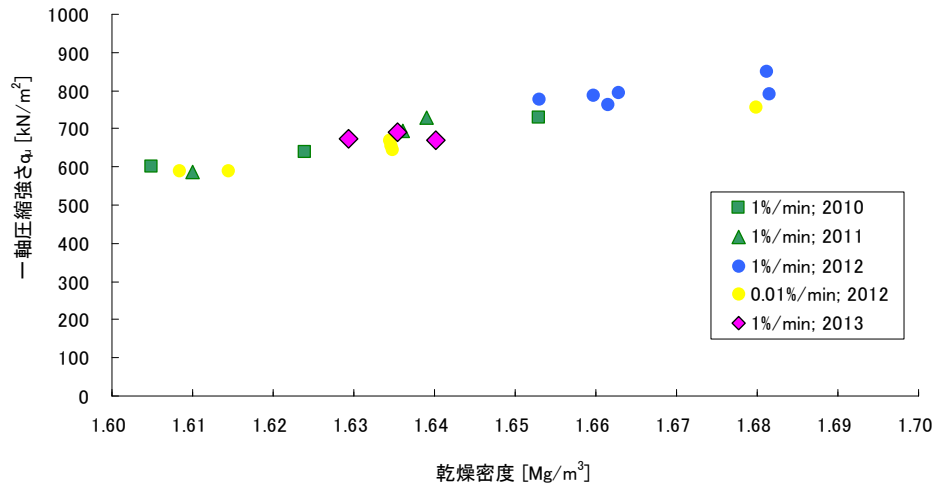


図 3.4-1 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

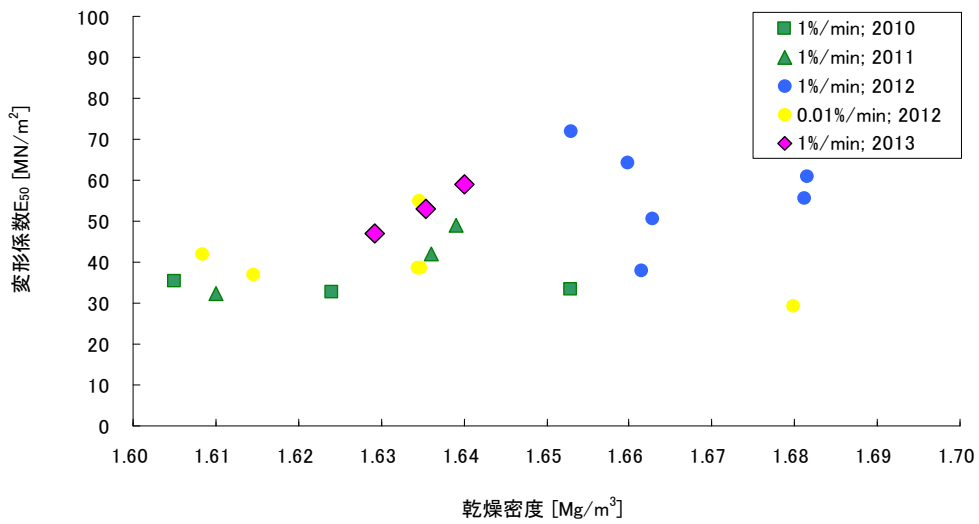


図 3.4-2 変形係数と乾燥密度の関係

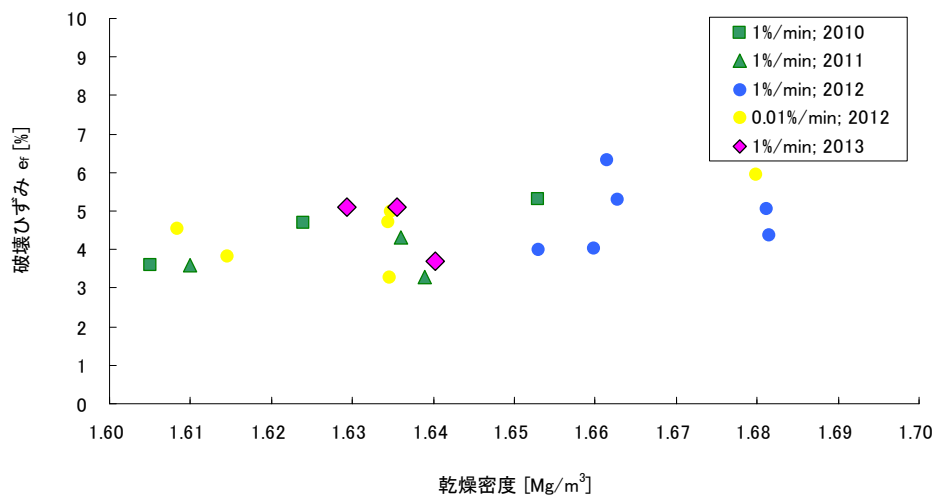


図 3.4-3 破壊ひずみと乾燥密度の関係

(2) 三軸圧縮試験結果

今年度の三軸圧縮試験（UU）はひずみ速度を 1%/min として行い、既往試験結果と比較を行った。

主要な強度特性値（変形係数、最大主応力度、粘着力、内部摩擦角）のせん断ひずみ速度依存性を、一軸圧縮試験結果も合わせて図 3.4-4、図 3.4-5、図 3.4-6、図 3.4-7 に比較した。一軸圧縮試験でも認められたように、変形係数についてはせん断ひずみ速度依存性が確認できた。最大主応力差は一軸圧縮試験で僅かにせん断ひずみ速度依存性が認められたものの、三軸圧縮強度試験（UU 試験）結果ではばらつきの範囲内で概ね同程度の結果が得られており、明確な依存性は認められない。粘着力についてもせん断ひずみ速度の顕著な影響は認められなかった。また、内部摩擦角はせん断ひずみ速度が速い条件の方が小さく、約 1/2 程度となり、高拘束圧側での最大主応力差の増加傾向が従来に比べて比較的小さい影響が表れている。

一軸圧縮試験において圧縮強さや変形係数と乾燥密度の間に比較的有意な関係性が認められたことから、三軸圧縮強度試験（UU 試験）についても図 3.4-8、図 3.4-9 に密度依存性を確認したところ、三軸圧縮強度試験（UU 試験）で得られた変形係数に関しては、若干の乾燥密度依存性が認められた。一方、最大主応力差については、乾燥密度依存性は認められなかった。

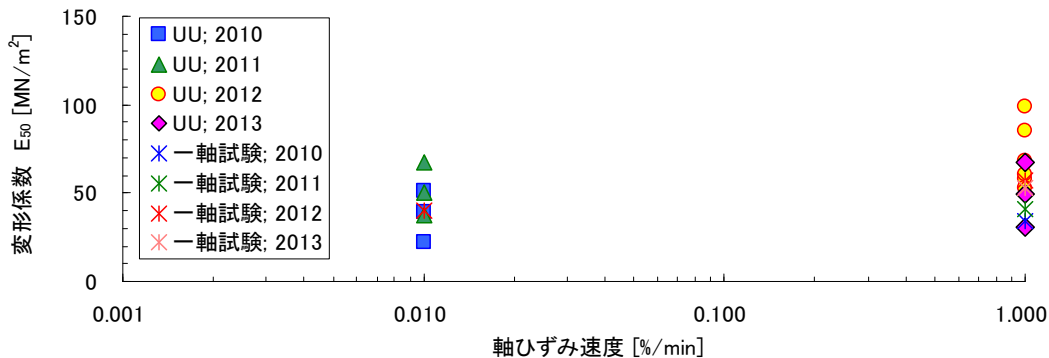


図 3.4-4 変形係数～せん断ひずみ速度関係

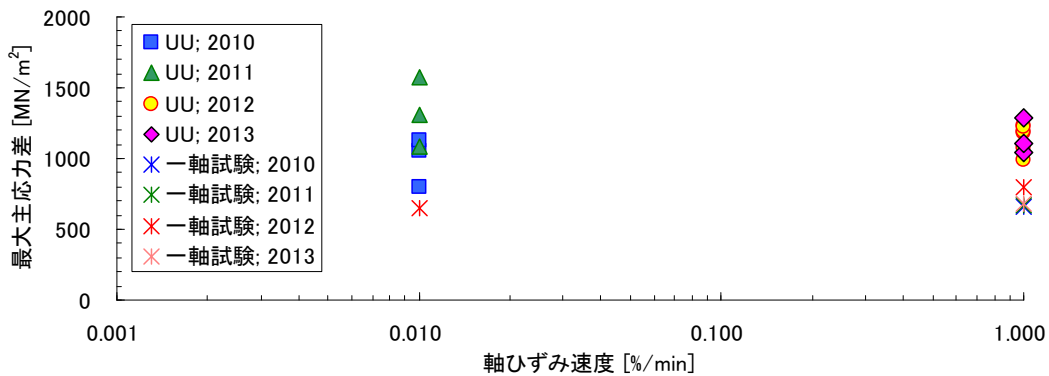


図 3.4-5 最大主応力差～せん断ひずみ速度関係

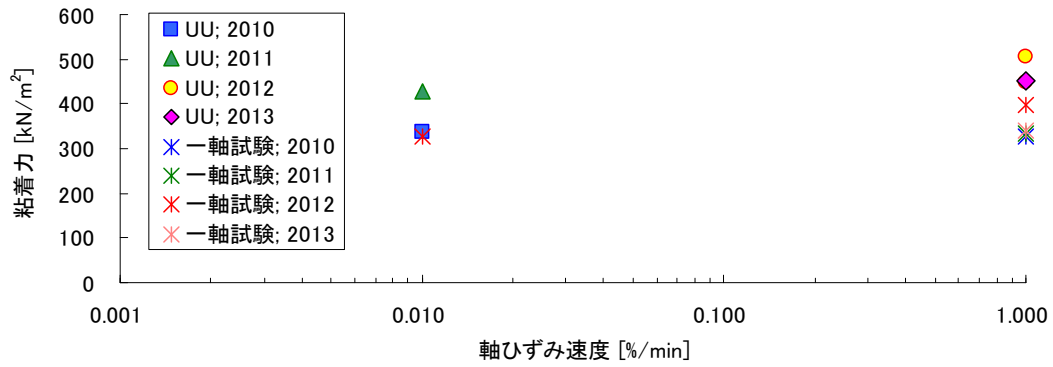


図 3.4-6 粘着力～せん断ひずみ速度関係

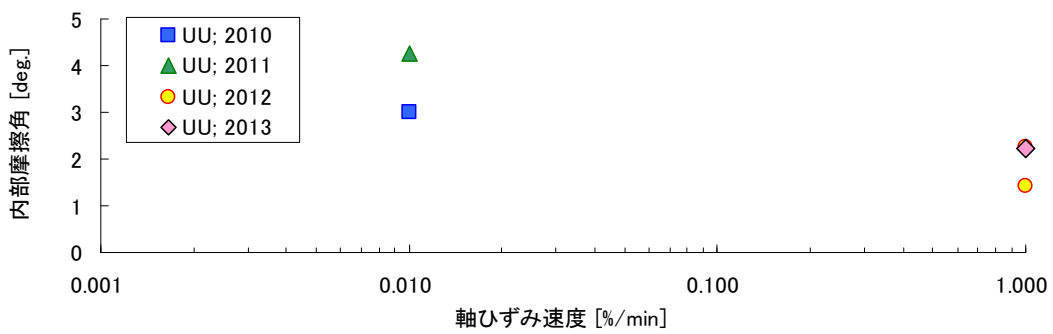


図 3.4-7 内部摩擦角～せん断ひずみ速度関係

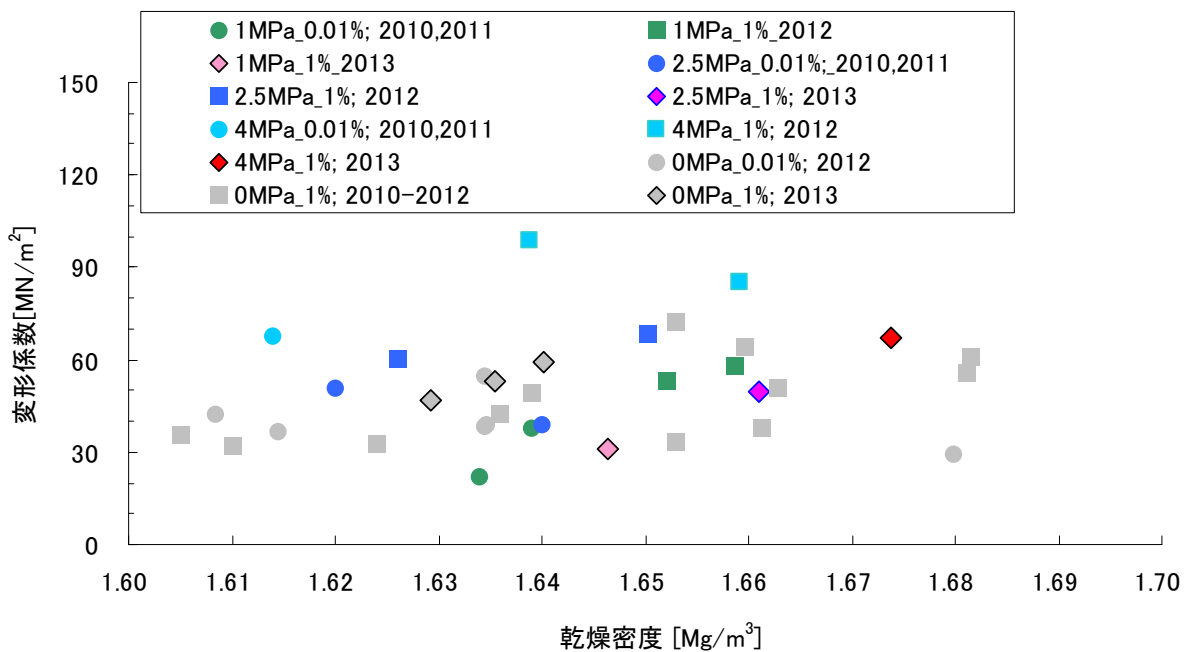


図 3.4-8 変形係数～乾燥密度

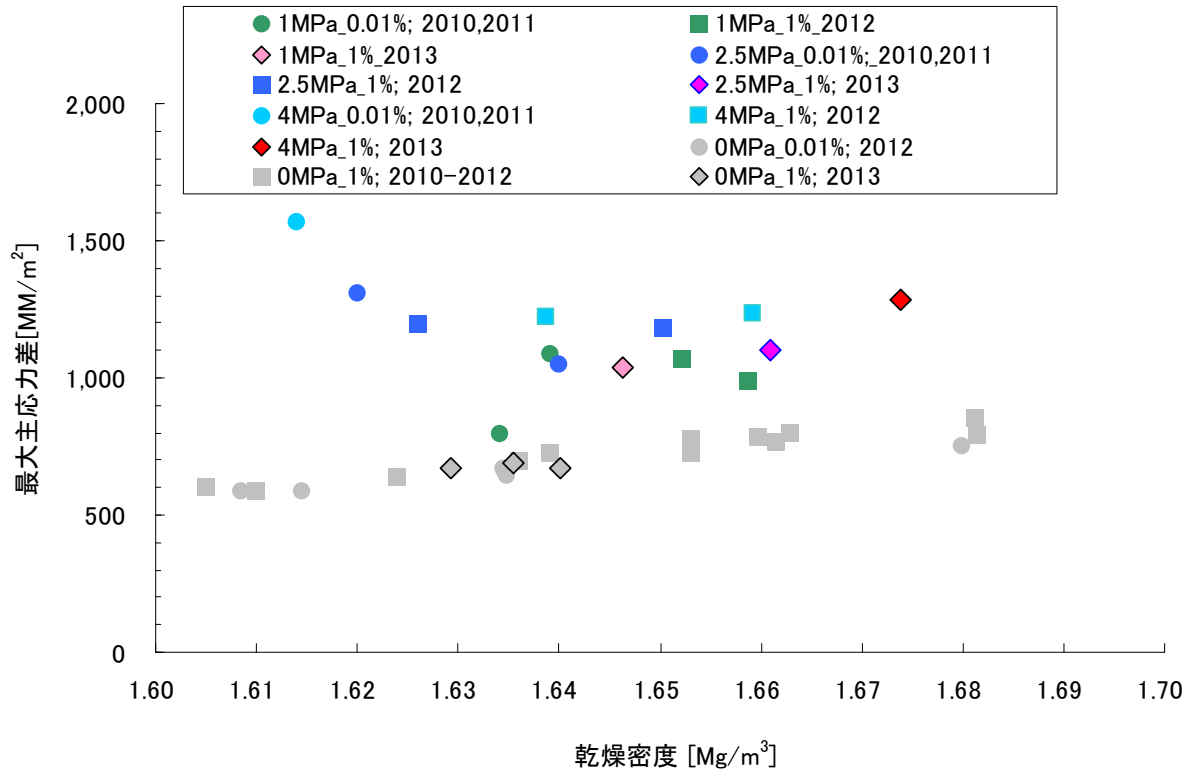


図 3.4-9 主応力差～乾燥密度

3.4.2 止水性能に関する評価

(1) 乾燥密度

透水係数の代替特性となる乾燥密度について、施工後の上部緩衝材からコア採取を行い、乾燥密度を測定した。乾燥密度に関しては、各層約 50mm のコアを上下方向に 2 分割して測定を行った。乾燥密度と含水比の関係を図 3.4-10 に、乾燥密度のヒストグラムを図 3.4-11 に示す。

2 分割による乾燥密度は、上部の平均が 1.654 Mg/m³、下部の平均が 1.625 Mg/m³ と、約 0.03 Mg/m³ 程度下部の方が小さくなっている。ばらつきの幅は両方とも 0.037 Mg/m³ と極めて小さい。全体での乾燥密度は平均が 1.640 Mg/m³、最大 1.668 Mg/m³、最少 1.601 Mg/m³ で、 $1.60 \pm 0.07 \text{Mg/m}^3$ の範囲にあり、管理基準値 ($1.60 \pm 0.10 \text{Mg/m}^3$) を満たしている。

図 3.4-10 には、突固め試験での締固めエネルギー曲線を示しており、締固めエネルギー 4.5Ec の締固め曲線に対して、上部および下部の密度は曲線の上下にばらつくような結果となっていることが分かる。

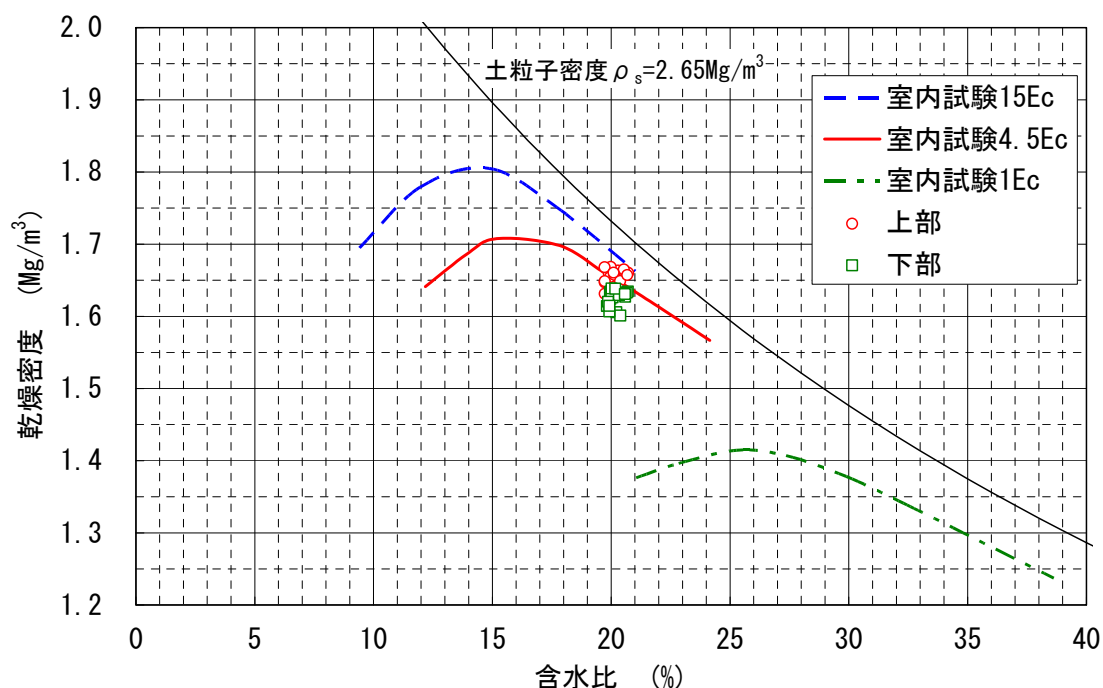


図 3.4-10 2 分割コアによる乾燥密度試験結果と室内締固め試験の比較

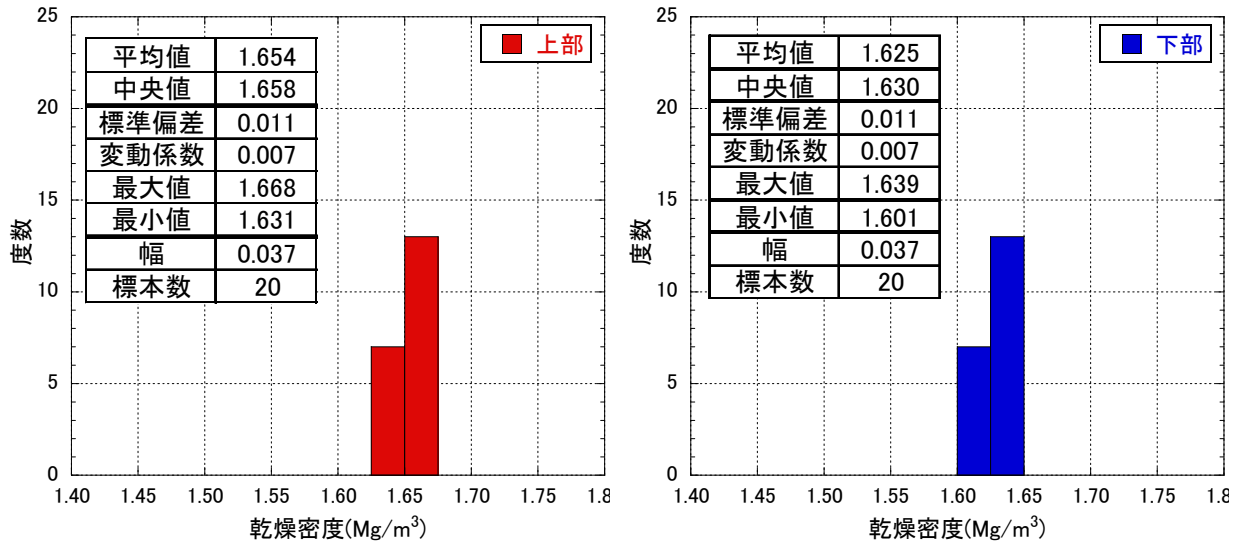


図 3.4-11 2分割コアの乾燥密度のヒストグラム

(2) 透水係数

乾燥密度と透水係数の関係を図 3.4-12 に示す。透水試験による透水係数は、緩衝材に要求される止水性能「透水係数 5×10^{-13} m/sec 以下」を満足する値であった。

透水係数と乾燥密度の関係には相関が認められ、乾燥密度が高くなるにつれて透水係数の値が小さくなっていることが分かる。

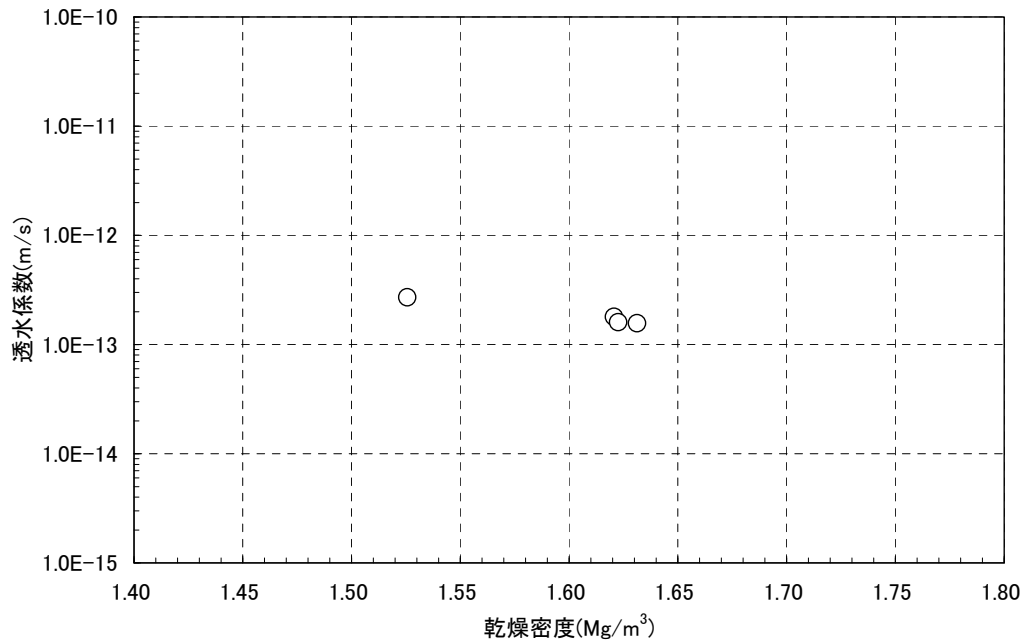


図 3.4-12 透水係数と乾燥密度の関係

3.4.3 閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能に関する評価

(1) 膨潤圧

膨潤圧試験のための供試体は1層あたり約50mmのコアを上下に2分割して供試体を作成した（SW_1-1とSW_2-1が上部、SW_1-2とSW_2-2が下部）。膨潤圧と乾燥密度の関係を図3.4-13に示す。

乾燥密度が大きくなるに従い、膨潤圧は大きくなる。また、単位施工層の中で下部から上部に上がるにつれて乾燥密度が大きくなり、膨潤圧の値も大きくなる。その値は約0.6MPaから0.8MPaの範囲に分布する。

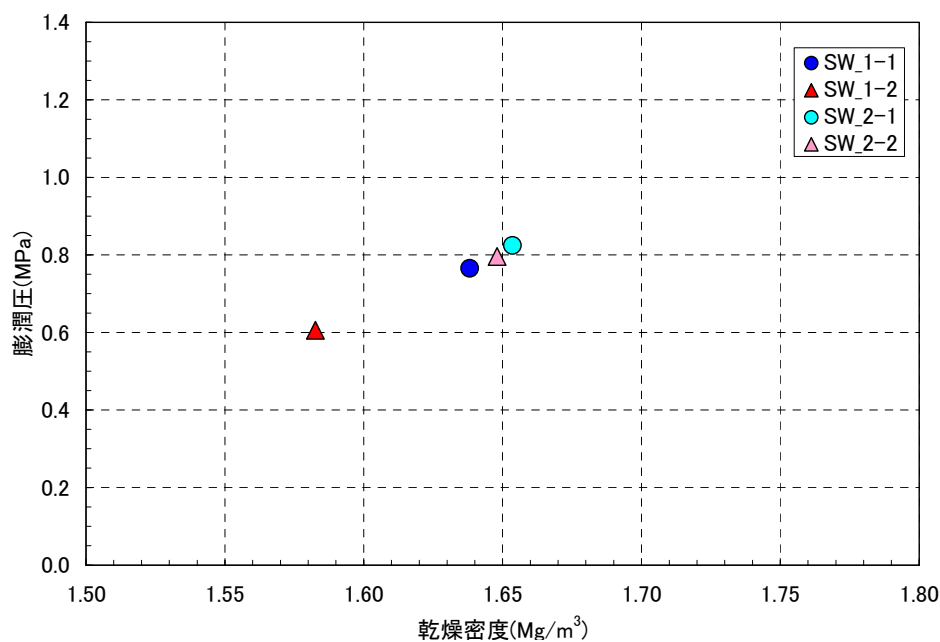


図 3.4-13 膨潤圧と乾燥密度の関係

3.4.4 初期性能確認試験の総合評価

初期性能確認試験では、振動締固め工法で構築した部材からコアを採取して各種試験を実施し、施設施工後の初期性能を把握した。今年度実施した試験は、緩衝材の要求性能から、「建設・作業時の安全確保性能の確認試験」、「止水性能の確認試験」、「閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験」に分類される。

建設・作業時の安全確保性能の確認試験として一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施した。止水性能の確認試験として透水試験と密度試験を実施した。閉鎖後の力学的・化学的安定性の確保性能の確認試験として、膨潤圧試験を実施した。

上記試験により、構築した部材の初期性能として、一軸圧縮強さ、変形係数、三軸圧縮強度、透水係数および膨潤圧の各データを把握した。

一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数および膨潤圧は乾燥密度に依存することが確認された。また、取得した一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数および膨潤圧を既往データと比較して概ね整合する値が得られたことを確認した。詳細については、本節において後述する。

緩衝材の主機能である止水性能に関しては、透水係数の品質達成度を確認した。今年度得ら

れた透水係数は、平成 24 年度までのデータも含めて施工時初期性能 $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ 以下を満足する結果が得られ、緩衝材に要求される初期性能を達成できた。

以下では、一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数および膨潤圧について既往データとの比較および考察を記載した。

(1) 力学特性

緩衝材のうち底部緩衝材においては、施設全体の構造安定性に関連することから、強度・変形特性は緩衝材初期性能確認試験において主要な確認項目である。底部緩衝材の沈下により底部緩衝材上にある底部低拡散材や底部コンクリートピットのひび割れの発生、あるいは底部緩衝材の圧縮変形により施設全体が沈下して上部緩衝材の密度が低下する等の影響を確認するため、強度・変形特性に係るデータの取得は重要である。

一軸圧縮強度と含水比の関係を図 3.4-14 に、変形係数と含水比との関係を図 3.4-15 に、一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を図 3.4-16 に、変形係数と乾燥密度との関係を図 3.4-17 に示す。これらの図には、今年度取得したデータに加えて、平成 20、22、23、24 年度の振動締固め工法による施工時のデータおよび既往試験データ[9]を併記した。なお、平成 24 年度ではひずみ速度を 1%/min と 0.01%/min の 2 ケースの試験を実施しているが、ひずみ速度依存性の影響を考慮して、ひずみ速度 1%/min のデータのみ使用した。

現場採取試料による一軸圧縮強さは、含水比、乾燥密度と相関があり、既往データ[9]と整合する傾向を示す(図 3.4-14、図 3.4-16)。一方、変形係数は一軸圧縮強さと比べるとばらつく傾向があり、既往データより小さい側にばらついている(図 3.4-15、図 3.4-17)。現場採取コアの乾燥密度は、層内上下方向で差があるのに対して、室内整形では均一な密度になるように締固めを行うため、締固めの差によって乾燥密度分布に差が生じた可能性がある。現場採取試料では、試料内の乾燥密度差により多少ばらつきがあるものの、ある程度の相関は保てていると考えられる。

ここで、図 3.4-16 の近似式から乾燥密度の管理基準値 ($1.60 \pm 0.10 \text{Mg/m}^3$) の範囲における一軸圧縮強さの範囲を求めると、 $447 \sim 948 \text{kN/m}^2$ となる。これに対して、上部緩衝材に作用する上部埋戻し材の上載圧は、最大で $\gamma \times h = 20.7 \text{kN/m}^3 \times 3.7 \text{m} = 76.4 \text{kN/m}^2$ であり、一軸圧縮強さより小さい。なお、単位体積重量 γ は、今年度の上部埋戻し材の施工実績(使用量: 139t、施工体積: 約 66m^3) から算出し、高さ h は上部埋戻し材の最大高さ(上部緩衝材上面から試験空洞天端までの距離)とした。同様に、底部緩衝材に作用する上載圧は、今年度までの確認試験の実績から求めると、 181kN/m^2 (累積上載圧 201kN/m^2 から、底部緩衝材の上載圧 20kN/m^2 を差し引いた値) であり、一軸圧縮強さより小さい。

比較のため、図 3.4-14～図 3.4-17 の各図に平成 21、23、24、25 年度の吹付け工法による施工時のデータを併記した図を図 3.4-18～図 3.4-21 に示す。振動締固め工法と吹付け工法では、一軸圧縮強さおよび変形係数と含水比、乾燥密度の関係において大きな差は見られない。

以上より、一軸圧縮強さおよび変形係数と含水比、乾燥密度の関係を取得しておけば、含水比、乾燥密度から緩衝材の一軸圧縮強さおよび変形係数を概ね想定できる見込みが確認で

きた。また、上部緩衝材および底部緩衝材に作用する上載圧は、緩衝材の乾燥密度が管理基準値の上限（ 1.70Mg/m^3 ）と下限（ 1.50Mg/m^3 ）でとりうる一軸圧縮強さより小さいことが確認できた。転圧工法と吹付け工法では、力学的には同程度であることを確認できた。

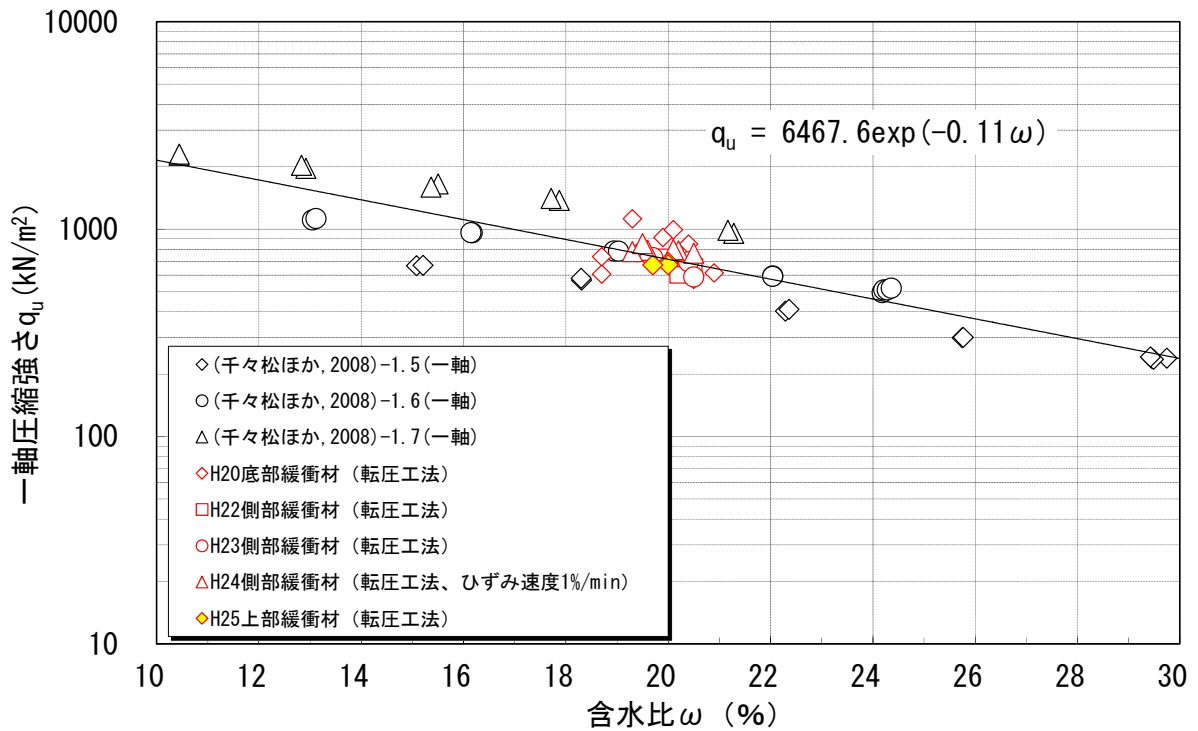


図 3.4-14 一軸圧縮強さと含水比の関係 (転圧工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

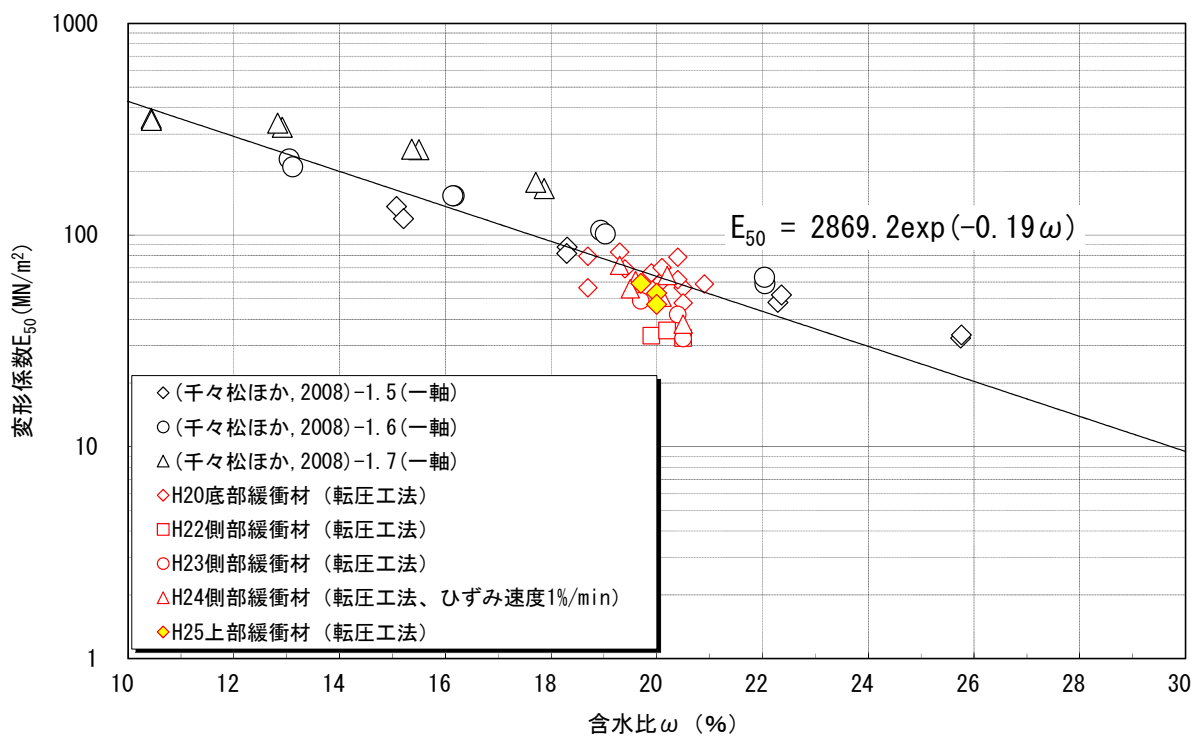


図 3.4-15 変形係数と含水比の関係 (転圧工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

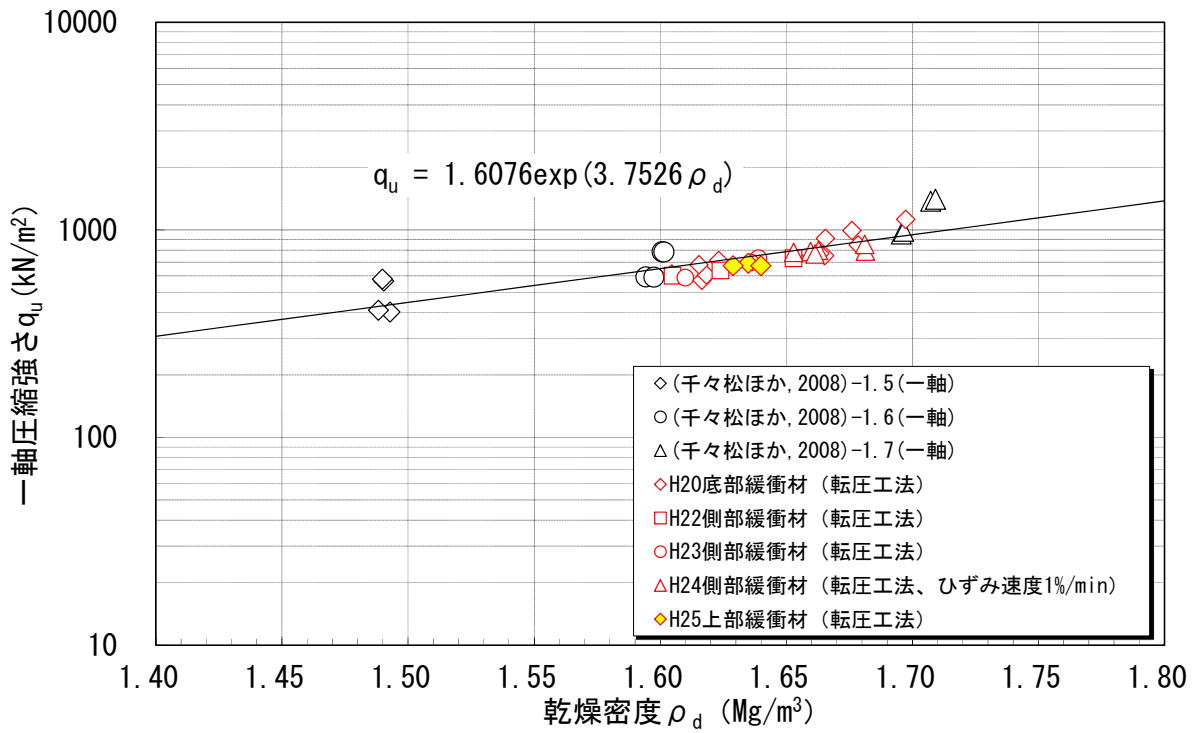


図 3.4-16 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係（転圧工法）
 （関数式は既往データ[9]より設定）

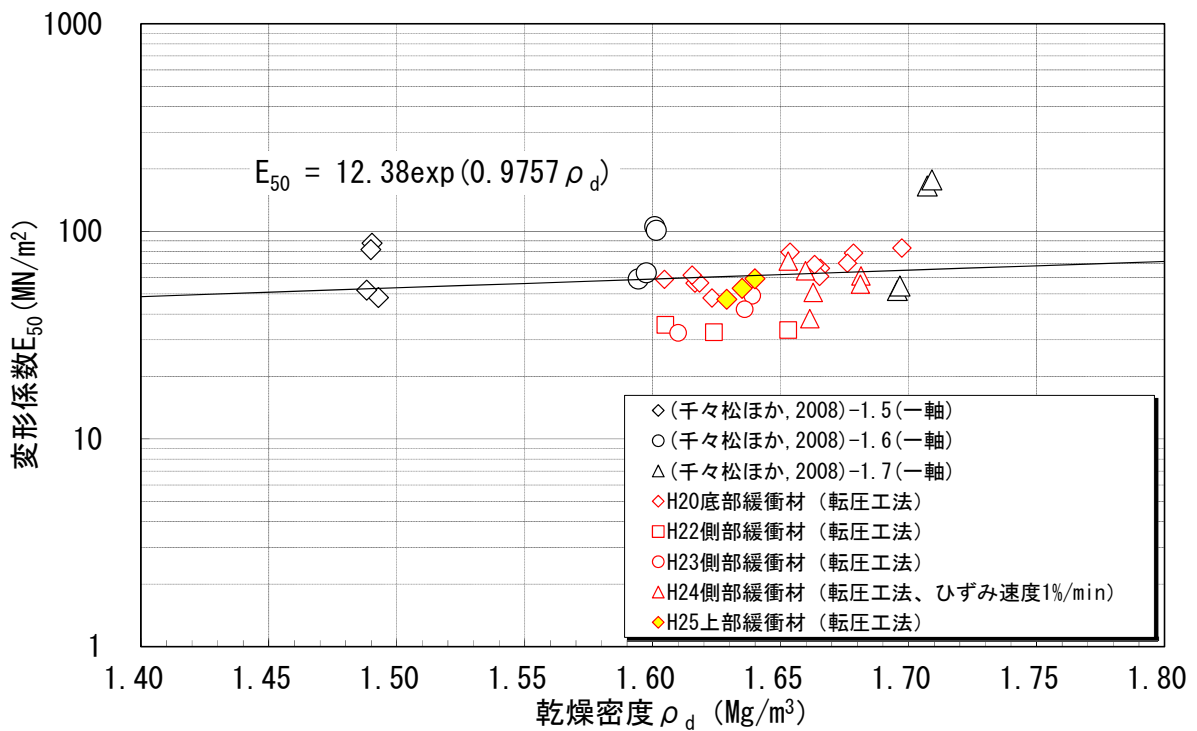


図 3.4-17 変形係数と乾燥密度の関係（転圧工法）
 （関数式は既往データ[9]より設定）

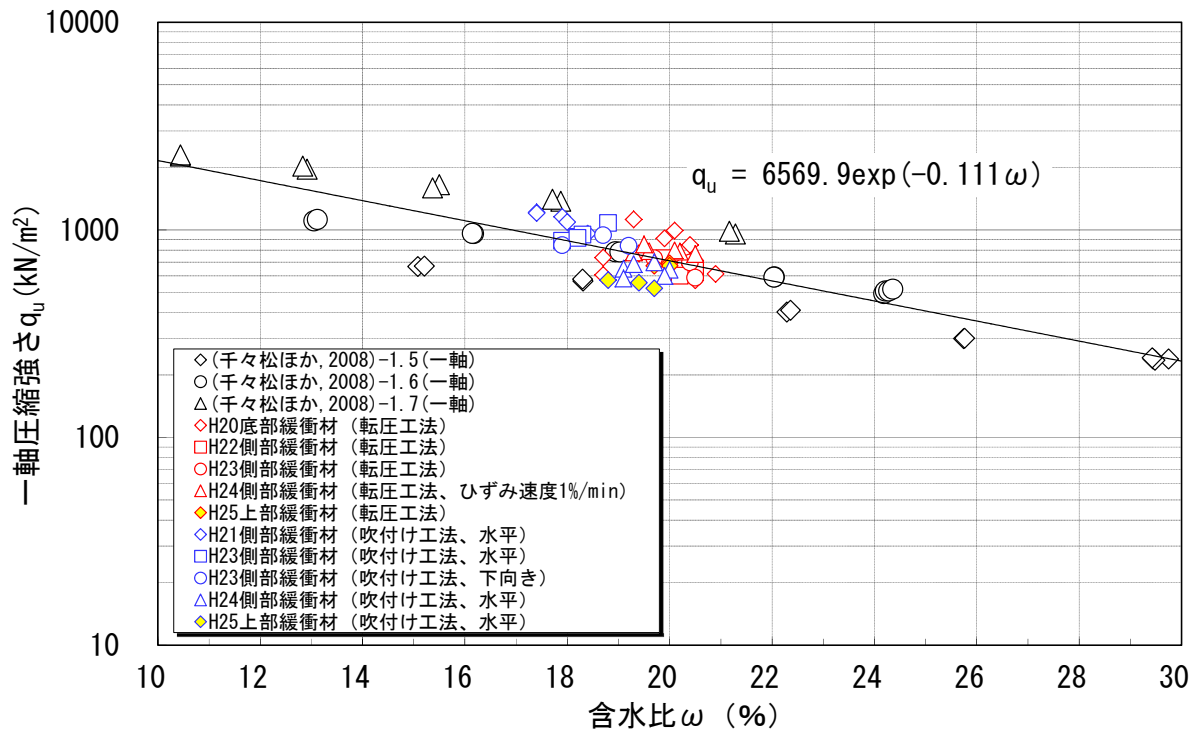


図 3.4-18 一軸圧縮強さと含水比の関係 (転圧工法+吹付け工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

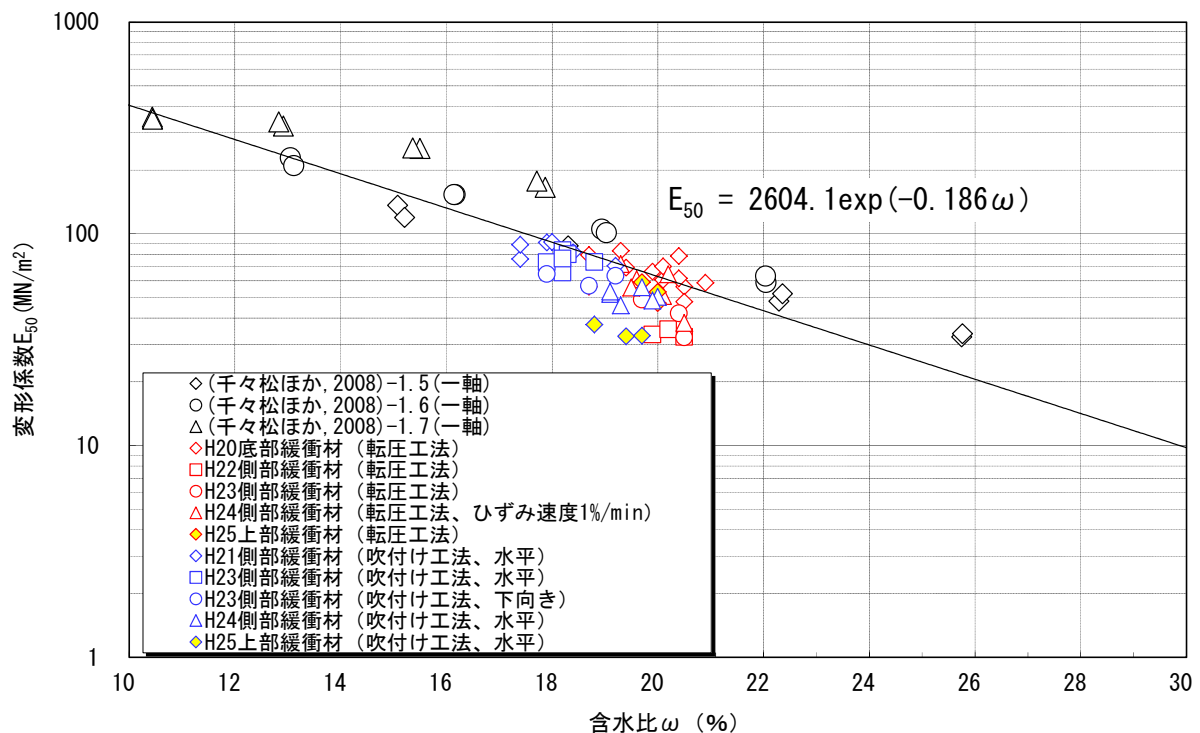


図 3.4-19 変形係数と含水比の関係 (転圧工法+吹付け工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

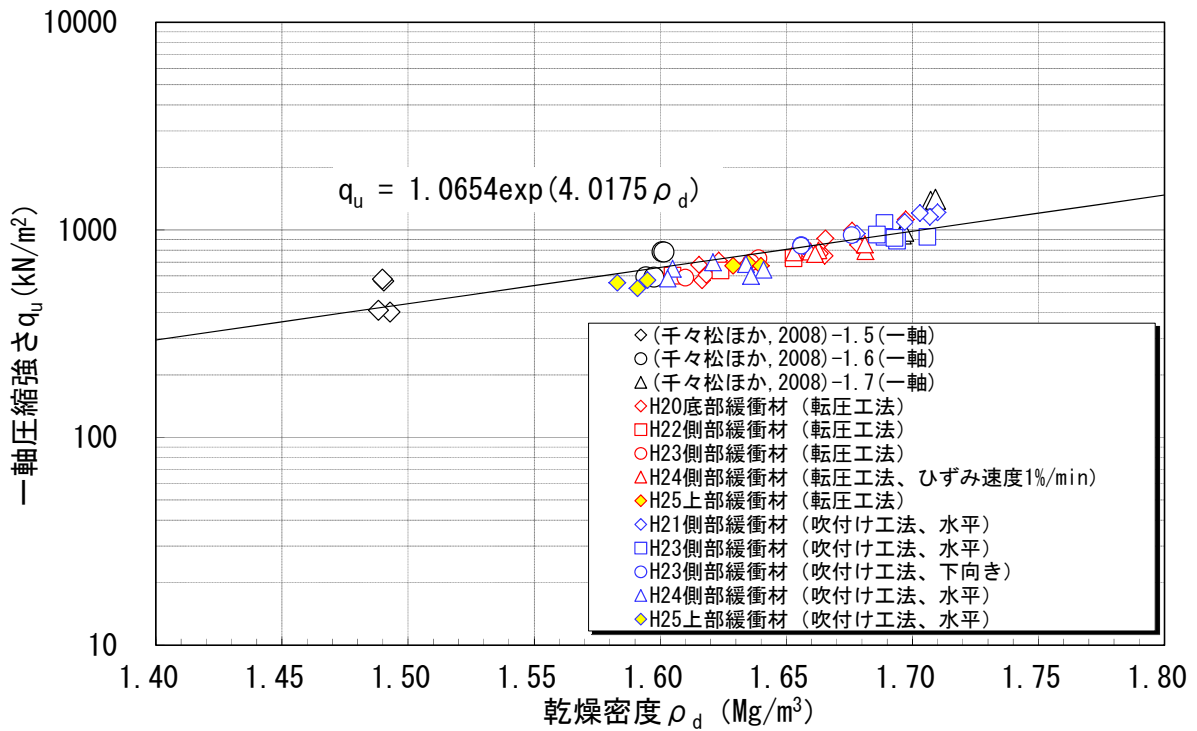


図 3.4-20 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (転圧工法+吹付け工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

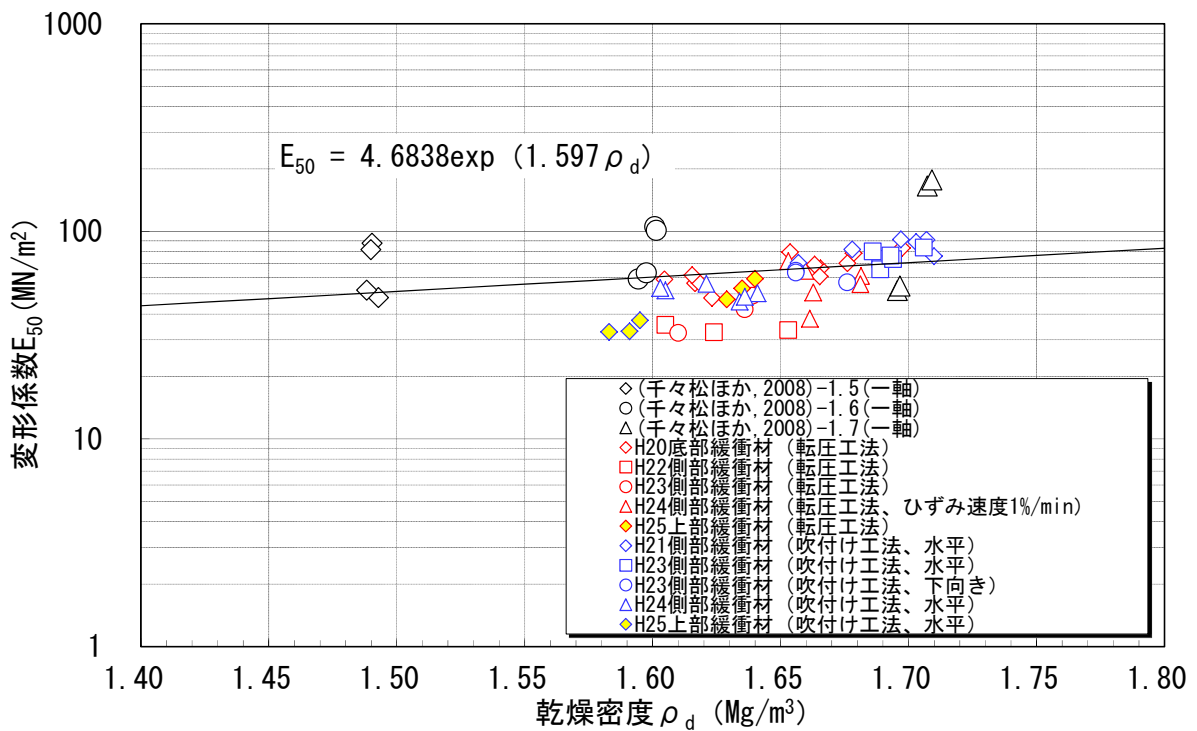


図 3.4-21 変形係数と乾燥密度の関係 (転圧工法+吹付け工法)
(関数式は既往データ[9]より設定)

(2) 止水性能

緩衝材は止水が主に期待する機能である。本試験においては、緩衝材透水係数の施工時初期性能として $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ を設定した。施工時においては、この透水係数を試験施設において直接管理することは困難であることから、その代替特性として、透水係数と相関の高い乾燥密度により管理することとした。ベントナイトの乾燥密度の施工管理基準値は、 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ としている。

今回の施工確認試験で構築した緩衝材の乾燥密度は、「3.3.2 (2) 施工後の品質管理」で述べたように、 $1.60 \pm 0.08 \text{Mg/m}^3$ の範囲となり管理基準値 ($1.60 \pm 0.10 \text{Mg/m}^3$) を満足する結果となった。

これまでクニゲルGXを対象に実施された透水試験で得られた透水係数を図 3.4-20 に示す。同図の近似式は、既往データ[1][2][3][4][5]と、平成 20 年度底部緩衝材、平成 22～24 年度側部緩衝材および平成 25 年度上部緩衝材初期性能確認試験での透水試験による透水係数から同定したものである。今年度実施した上部緩衝材の試験結果は、既往の透水係数と比較的良く整合しており、本試験における透水係数の施工時初期性能 $5 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ 以下を満足する結果である。

比較のため、図 3.4-20 に平成 21、23、24、25 年度の吹付け工法による施工時のデータを併記した図を図 3.4-21 に示す（同図の近似式も吹付け工法のデータを追加している）。振動締固め工法と吹付け工法では、透水係数と乾燥密度の関係において大きな差は見られない。

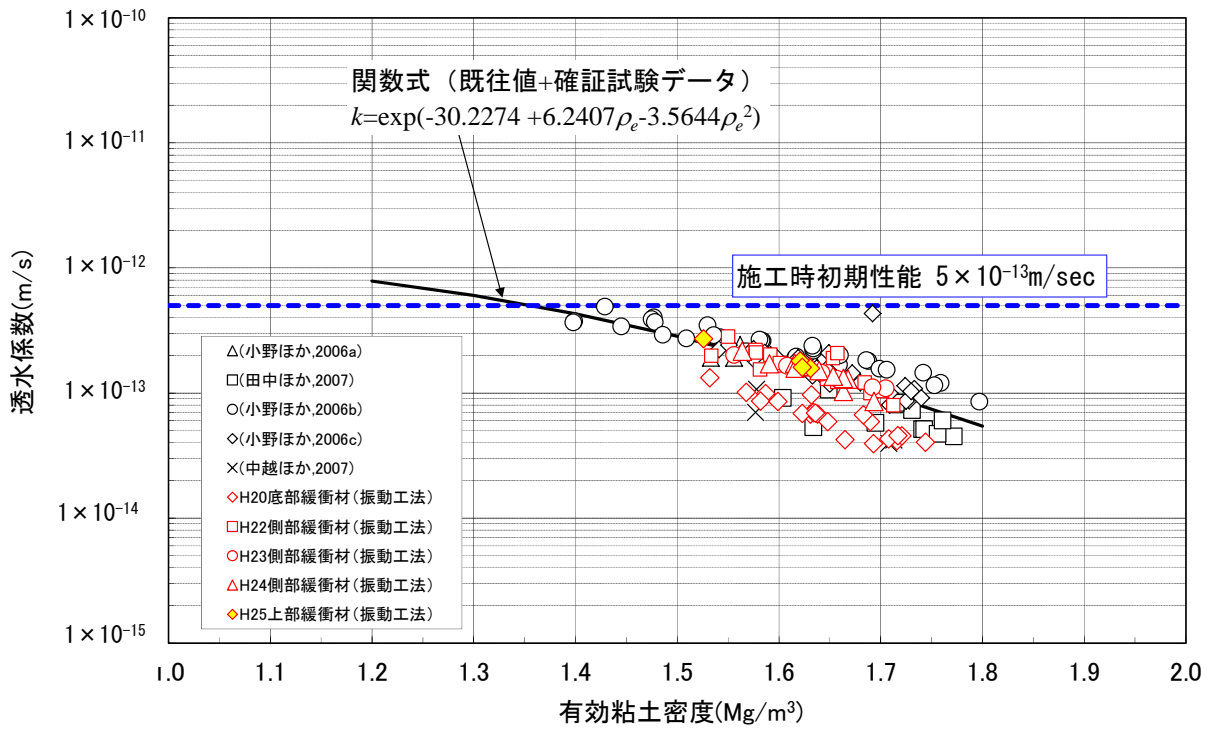


図 3.4-22 透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係（転圧工法）

（関数式は、既往データ[1][2][3][4][5]と、平成20年度底部緩衝材（転圧）、平成22～24年度側部緩衝材（転圧）、平成25年度上部緩衝材（転圧）の確認試験結果のデータより設定）

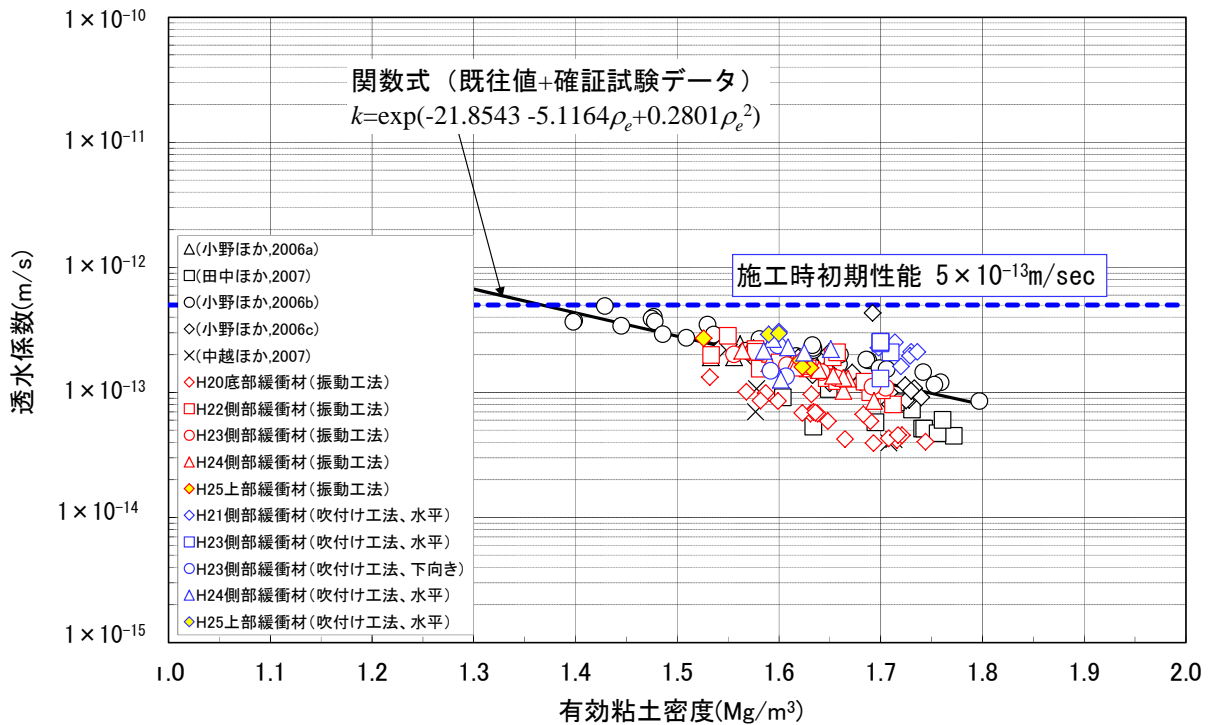


図 3.4-23 透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係（転圧工法+吹付け工法）

（関数式は、既往データ[1][2][3][4][5]と、平成20年度底部緩衝材（転圧）、平成22～24年度側部緩衝材（転圧）、平成25年度上部緩衝材（転圧）、平成21・23・24年度側部緩衝材（吹付け）、平成25年度上部緩衝材（吹付け）の確認試験結果のデータより設定）

(3) 膨潤特性

これまでにクニゲル GX を対象に測定された膨潤圧の値を、既往データ[6][7]とともに図 3.4-24 に示す。同図の近似式は、既往データ[6][7]と、平成 20 年度底部緩衝材、平成 22～24 年度側部緩衝材および平成 25 年度上部緩衝材初期性能確認試験での膨潤圧試験データから同定したものである。上部緩衝材の膨潤圧には、乾燥密度との相関がみられ、これまでに得られている値と良く整合した結果である。なお、近似式から乾燥密度の管理基準値 ($1.60 \pm 0.10 \text{Mg/m}^3$) の範囲における膨潤圧の範囲を求めると、 $0.39 \sim 1.34 \text{MPa}$ となる。

比較のため、図 3.4-24 に平成 21、23、24、25 年度の吹付け工法による施工時のデータを併記した図を図 3.4-25 に示す（同図の近似式も吹付け工法のデータを追加している）。振動締固め工法と吹付け工法では、膨潤圧と乾燥密度の関係において大きな差は見られない。

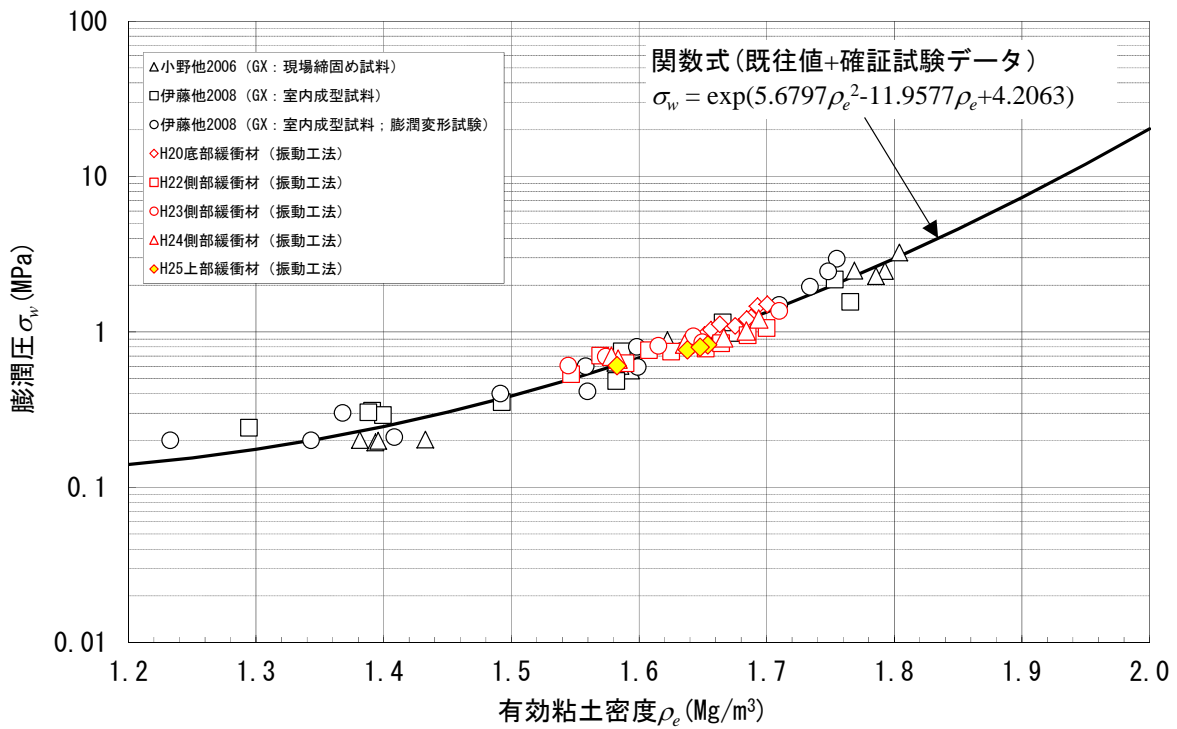


図 3.4-24 膨潤圧と有効粘土密度（乾燥密度）の関係（転圧工法）
（関数式は、既往データ[6][7]と、平成 20 年度底部緩衝材（転圧）、平成 22～24 年度側部緩衝材（転圧）、平成 25 年度上部緩衝材（転圧）の確認試験結果のデータより設定）

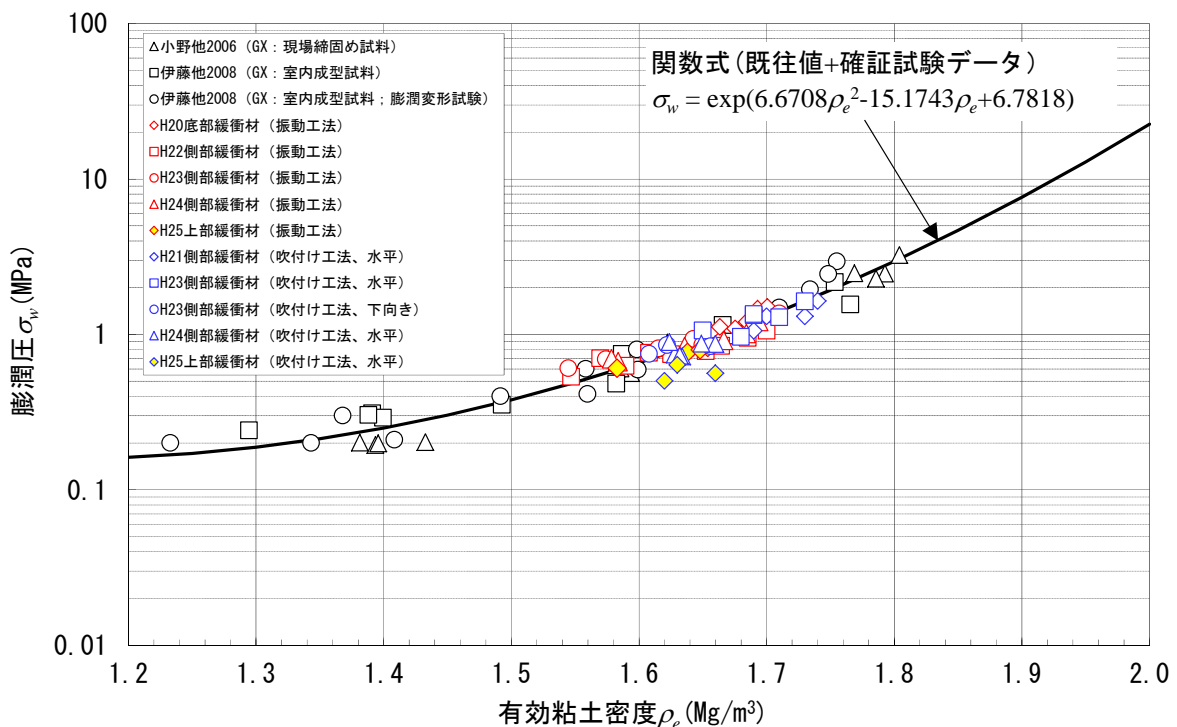


図 3.4-25 膨潤圧と有効粘土密度（乾燥密度）の関係（転圧工法+吹付け工法）
関数式は、既往データ[6][7]と、平成 20 年度底部緩衝材（転圧）、平成 22～24 年度側部緩衝材（転圧）、平成 25 年度上部緩衝材（転圧）、平成 21・23・24 年度側部緩衝材（吹付け）、平成 25 年度上部緩衝材（吹付け）の確認試験結果のデータより設定）

3.4.5 初期性能確認試験の課題の抽出

過年度の初期性能確認試験で緩衝材の性能に関するデータ蓄積が行われてきており、概ね整備された状況である。今後実施が望まれるものとして、長期力学安定性に資する飽和時の強度・変形特性のデータの充足が考えられる。

また、力学解析において緩衝材と周辺セメント系部材の剥離および滑りを考慮する場合、現状では、剥離条件は、節点ジョイントに作用する力がゼロに達したとき、すなわち緩衝材と周辺セメント系部材の境界の引張強度がゼロとしており、一方滑り条件は、節点ジョイントが緩衝材の強度（ c 、 ϕ ）から求めたせん断耐力に達したときと設定している。緩衝材と周辺セメント系部材との境界の力学特性に関する知見は少ないことから、今後は現地コア等を用いて、緩衝材と周辺セメント系部材との境界の引張強度、せん断強度を得ることが望まれる。

【参考文献】

- [1] 小野ほか(2006a)：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果、第 61 回年次学術講演会概要集、共通セッション CS05-09、pp.323～324
- [2] 田中ほか(2007)：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価、土木学会論文集 C、vol.63、No.1、pp.207～223
- [3] 小野ほか(2006b)：ベントナイト原鉱石の高速透水試験—プレス飽和法—、日本原子力学会「2006 年秋の大会」、p.108
- [4] 小野ほか(2006c)：ベントナイト原鉱石の高速透水試験—締固め施工した供試体の乾燥飽和法—、日本原子力学会「2006 年秋の大会」、p.109
- [5] 中越ほか(2007)：ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討（その 2）—透水性に関する検討—、第 62 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション、CS5-008、pp.175～176
- [6] 小野ほか：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果、第 61 回年次学術講演会講演概要集、CS05-052、2006.9
- [7] 伊藤ほか：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験（その 1）膨潤挙動に関する検討、第 63 回年次学術講演会概要集、共通セッション CS05-14、2008.9
- [8] 土木学会：余裕深度処分における地下施設的设计、品質管理および検査の考え方、2009 年 7 月
- [9] 千々松ほか：ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験（その 2）不飽和支持力に関する検討、土木学会第 63 回年次学術講演会 CS05-15、2007.9

第 4 章 上部埋戻し材練混ぜ試験および締固め特性評価

第4章 上部埋戻し材練混ぜ試験および締固め特性評価

【目的】

地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験は、日本原燃株式会社殿の試験空洞を利用して、地下空洞型処分施設の実物大の模擬施設を構築し、施設の建設に関わる施工技術、施設の核種閉じ込めに係わる初期性能、ならびに施工後における施設性能に係わる観測と評価など、実際に施工した模擬施設の総合的な性能の確認を行うものである。

このうち、本業務は、上部埋戻し材の材料としてベントナイト（クニゲルV1）、砂および礫を使用して、複数の練混ぜ機械、練混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の材料練混ぜ試験を実施し、練混ぜ後の品質を比較検討して、練混ぜ方法、練混ぜ機械、および材料配合の違いによる混合率および含水比のばらつきの程度を確認する。

次に、ベントナイト混合土を使用した屋外での締固め特性等の確認試験を実施する。締固め特性等の確認試験は、複数の機械および施工法により実施し、品質（仕上り品質のばらつきを含む）および施工性等の所要の項目についてのデータ収集・確認を行い、ベントナイト混合土を用いた埋め戻し材への適用性を検討するものである。

【まとめ】

1. 材料練混ぜ試験

上部埋戻し材に求められる品質は、現段階で具体的には定められていないが、締固め後の透水係数の均質性を確保するためには、上部埋戻し材の材料としてベントナイトの混合率や含水比のばらつきを抑えたベントナイト混合土を製造する必要がある。そのような背景のもと、本試験では、実用的なベントナイト混合土の製造を念頭に置き、バッチ式機械と連続式機械により製造されたベントナイト混合土の品質およびそのバラツキの程度を確認した。

バッチ式機械は、前述の品質確認試験によると連続式機械に比べ品質のばらつきが少ないが時間あたりの製造能力が小さい。一方、連続式機械は、バッチ式機械の10～25倍の時間あたりの製造能力があるため、その分低コストでベントナイト混合土の製造が可能となると考えられる。しかし、品質のばらつきについては、バッチ式機械相当に精度を上げるためには様々な課題が残る結果となった。また、今回はバッチ式機械として小型の機械を使用しているが、この代わりに大型の機械を用いることにより製造能力を上げることは可能であるが、サイズアップに伴う課題が出てくると思われる。

連続式機械のうち、自走式土質改良機（SR-2000G）は、現段階では含水比のばらつきが大きいこと、こまめにキャリブレーションを行う必要があることより、加水目標値に対して加水量の制御に技術開発の余地があると考えられる。ミストブレンダーは、小型試験機を用いて本試験を実施したため、実規模機械に装備されている材料定量供給機の性能については確認ができなかった。今後は、上記課題を踏まえ試験製造量を増やし、実規模機械を用いた実用的なデータ取得を

行うことが望ましいと考えられる。

2. 締固め特性等評価試験

締固め特性等評価試験の目的は、複数の機械および施工法により実施し、品質（仕上り品質のばらつきを含む）および施工性等の所要の項目についてのデータ収集・確認を行い、ベントナイト混合土の施工への適用性を検討した。

転圧機械を使用した締固め試験の結果、締固めエネルギーが大きい機械ほど少ない Pass 数で締固めできることを確認した。ただし、本試験では、使用機械による相対的な比較評価を行ったため、今後、使用機械と締固めエネルギーの関係性を定量的に計測し、締固め性を評価することで様々な使用機械の適用性の観点で実用的な基礎データが得られると思われる。また、転圧機械で発揮しうる締固め度は、95%以上であることを確認した。

吹付け工法による締固め試験の結果、吹付け工法による締固め度は、93.0～96.4%となり、転圧機械に対して相対的に小さい結果となった。ただし、いずれの材料配合でも締固め度は 90%以上となっている。

また、吹付け工法では、跳ね返ってしまう材料（リバウンド材）が発生することを確認した。吹付けた全材料に対するリバウンド材の比率（リバウンド率）は材料配合の違いによって異なり、材料の最大粒径が大きいほど、リバウンド率が高い結果となった。また、リバウンド材の粒度分布は、礫分が多く含まれていることがわかった。材料の最大粒径により、リバウンド材の粒度分布すなわち、吹付け工法によって締固められた埋戻し材そのもののベントナイトの配合率に影響が出るということがわかった。

吹付け後の試験体のベントナイト混合率を測定した結果、礫分を含む材料を吹付けた場合、相対的にベントナイトの割合が増えることがわかった。この結果から、砂ベントナイトは材料製造時の設定混合率（15%）に近い値で吹付けが可能であるが、礫ベントナイトはベントナイト混合率が 20%程度まで上昇するため、設定よりも富配合となり不経済であることやリバウンド材の廃棄の問題が残る。以上より、今後の課題は、材料配合の段階でリバウンド率を考慮した配合を行うか、リバウンド率を低減させる工夫（例えば、ベントナイト混合土の材料分離を低減させる等）が挙げられる。

4.1 材料練混ぜ試験

複数の練混ぜ機械を用いて、複数の配合で異なる含水比のベントナイト混合土の練混ぜ試験を行い、混合土の練混ぜ後の品質の違いについて比較検討した。

4.1.1 材料

材料練混ぜ試験に使用する材料構成は「平成 24 年度地下空洞型処分施設性能確証試験 上部埋戻し材施工確認試験」において検討された結果より、表 4.1-1 に示す通りとした。

表 4.1-1 使用材料と混合率（乾燥重量比）

ケース番号		1	2	3
材料	仕 様	礫・砂・ベントナイト (礫ベントナイト)		砂・ベントナイト (砂ベントナイト)
ベントナイト	クニゲル V1	15%	15%	15%
礫	2005、八戸産	50%	—	—
	1005、八戸産	—	50%	—
砂	三沢産コンクリート用砂	35%	35%	85%

(1) ベントナイト

本試験に使用したベントナイト（クニゲル V1）は、ミルシート（品質成績書）による品質確認を行った。ミルシートによる品質を表 4.1-2 に示す。

表 4.1-2 ミルシートによる品質（クニゲル V1）

試験項目	ロットNo.301	ロットNo.309	ロットNo.306271
水分 (%)	8.3	7.9	8.0
粒度 (%/-63 μm)	90.6	97.2	93.2
膨潤力 (ml/2g)	19	20	19
pH	10.2	10.2	10.1
見掛比重	0.71	0.68	0.70
MB 吸着量 (mmol/100g)	90	91	89
試験使用先	バッチ式(パグミル,アイソビ)	SR-2000G	ミストブレンダー

ミルシート（品質成績書）提出元：クニミネ工業株式会社 左沢工場

(2) 礫

礫はコンクリート用砕石（JIS A 5005 2009）のうち、粒の大きさにより区分されている 2005（5mm～20mm）と、この 2005 をふるいにかけて 5mm～10mm の粒径分布とした 1005（以下、1005 と記載する）を製造し、試験に用いた。2005 は、市場性があるため入手しやすいが、1005 は入手が困難であることから、上述のとおり粒度を調整し試験に用いた。なお、試験ケースは、2005 を基本ケースとし、1005 は、2005 と粒度の違いによる比較を行う目的のケースとした。

(3) 砂

母材として使用した砂（青森県三沢産）の土粒子密度の測定結果を表 4.1-3 に、表 4.1-4 には粒度特性、図 4.1-1 には粒径加積曲線を示す。なお、砂の初期含水比の平均値は 5.0%であった。

表 4.1-3 練混ぜ前の砂の品質；土粒子密度（三沢産コンクリート用砂）

土粒子密度 (Mg/m ³)	1	2.691	平均	2.699
	2	2.702		
	3	2.704		

表 4.1-4 練混ぜ前の砂の品質；粒度特性（三沢産コンクリート用砂）

ふるい分析	粒径(mm)	通過質量百分率(%)	最大粒径 (mm)	4.75
	4.75	100.0	60%粒径 D_{60} (mm)	0.73
	2	86.5	50%粒径 D_{50} (mm)	0.51
	0.850	64.1	30%粒径 D_{30} (mm)	0.26
	0.425	45.3	20%粒径 D_{20} (mm)	0.20
	0.250	28.7	10%粒径 D_{10} (mm)	0.16
	0.106	0.5	均等係数 U_c	4.6
	0.075	0.2	曲率係数 U_c'	0.58

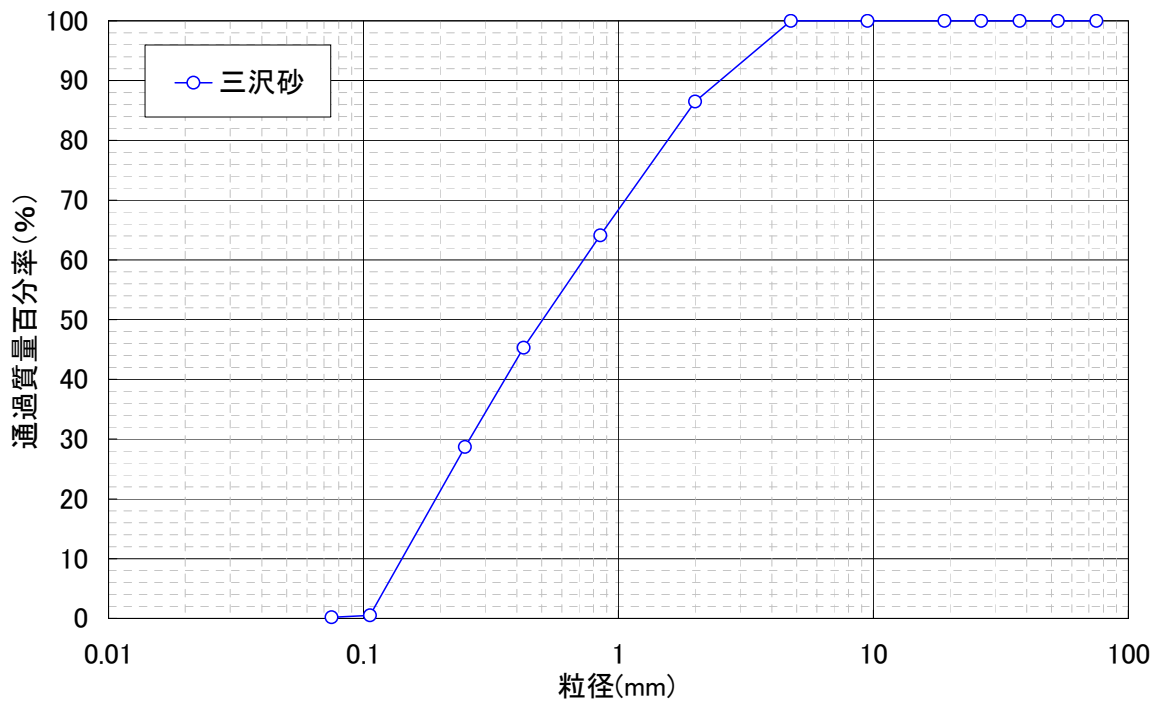


図 4.1-1 三沢砂の粒径加積曲線

4.1.2 文献調査による使用機械の選定

材料練混ぜ試験を行う機械は、最近の余裕深度処分施設におけるベントナイト単体材料の練混ぜ試験の結果や浅地中処分施設におけるベントナイトと砂の混合材料の練混ぜ試験の結果を踏まえて選定するとし文献調査を行った。

これまでにベントナイト単体やベントナイト混合土を対象として実施された試験で使用された練混ぜ機械の例を図 4.1-2 および図 4.1-3 に示す。図 4.1-2 はバッチ式の機械、図 4.1-3 は連続式の機械である。

表 4.1-5 にはベントナイト単体（クニゲル GX）に対して練混ぜ性能を確認するために実施された試験に使用された機械を示す[1]。ベントナイト単体の練混ぜは、バッチ式の機械が使用されている。

これら試験の手順は以下の通りである。

- (1) 材料投入：ミキサー容量の約 70%に相当する質量
- (2) 空練り：2 分間
- (3) 加水：所定量を散水
- (4) 混練：散水後 3 分間（パン型強制混合造粒型ミキサーに関しては、反転 2 分、正転 2 分）
- (5) 排出

試験の結果、得られた含水比測定値の平均値および最大値、最小値を図 4.1-4 に示す。同図は設定含水比が 21%のケースである。図 4.1-4 よりパン型、傾動型では設定含水比との差が大きく、ばらつきも大きいことが分かる。多機能コーン型は、ばらつきは±1%程度であるが、設定含水比との差が大きい。表 4.1-5 に示す二軸強制型以降の No.4～No.7 のミキサーでは設定含水比との差、ばらつきとも小さく品質に大差は無いと言える。

一方、連続式の機械に関しては、ベントナイト混合土を対象に実施されている[2]。表 4.1-6 には、実施された試験のケースを示す。3 種類の機械に対して、ベントナイトの種類および混合率・含水比を変えた試験が実施されている。試験結果を図 4.1-5 および図 4.1-6 に示す。図 4.1-5 は含水比、図 4.1-6 は混合率の結果である。プロシエアミキサは混合率で一部、設定値との差が見られるが、ばらつきが少ない結果が得られている。ツイスターは配合率が高くなると、若干ばらつきが大きくなっている。SR-P1200 は他のミキサーと比べると設定値との差およびばらつきとも大きい結果となっており、特に、配合率が 20%以上の場合、設定値との差が大きく、20%以上では適用が難しいとされた。なお、連続式の機械の場合、平均値に設定値との差異が生じるか否かは、供給精度の影響が大きい。ここでの試験では SR-P1200 およびプロシエアは定量供給装置を用いて試験が行われているが、ツイスターの場合は、事前にベルコンに定量を並べて機械に投入しているので、その分、設定値とのずれに与える影響は他の機械に比べて小さいと思われる。測定値のばらつきは機械の性能そのものを表す指標だと思われるため、この中ではプロシエアが最も性能が高い機械であるといえる。ただし、プロシエアおよびツイスターは練混ぜ機能のみを有する機械であり、定量供給装置が必要なものに対して、SR-P1200 は、これだけで供給、練

混ぜを行なうことが可能である。ただし、この機械ではベントナイトの添加量に制限があったため、その当時に新規に発売された SR-P1200 の後継機種である SR-2000G を用いた試験も実施されている。表 4.1-7 に試験ケースを示す。図 4.1-7 および図 4.1-8 には試験結果を示す。図 4.1-7 は含水比、図 4.1-8 は混合率の試験結果である。混合率が高くなるとばらつきが大きくなっていることが分かるが、概ね混合率 20%まではこの機械を用いての練混ぜは可能であるとされている。

20%より高い混合率の練混ぜに関しては、連続式二軸ミキサー（Geo-Tom）を用いた検討がされている[3]。表 4.1-8 に試験ケースを示す。この機械も練混ぜ機能のみを有する機械であるため、別途、定量供給設備、加水設備が用意されている。ここでは 50%混合までの検討が行われている。図 4.1-9 および図 4.1-10 に試験結果を示す。図 4.1-9 が含水比、図 4.1-10 が混合率の試験結果である。この機械を用いることにより 50%程度までは混合が可能だと示されている。

また、ミストブレンダーは、連続練混ぜ装置「MY-BOX」による粉体混合部と、ミスト噴霧による縦落とし加水装置からなる混合方法であり、近年検討が実施されている[4]。表 4.1-9 に、ミストブレンダーによるベントナイト混合土製造の検証試験結果を示す[5]。当該検証試験の対象は砂と Ca 型ベントナイトの混合土であるが、ベントナイト混合率 25～40%、Wopt+4%の混合土製造において、含水比、混合率ともに均質かつ安定した製造が可能であったとしている。当該工法は、従来のミキサーとは異なる混合方式を採用していることから、他の方法と差別化できる点を考慮し、本試験で比較する練混ぜ方法として採用することとした。

これまでの試験結果を踏まえて、バッチ式機械としては、強制二軸型と容器型のうち汎用性の高いものの例として、パグミルとアイリッヒの 2 種類を用いて材料練混ぜ試験をすることとした。また、連続式機械としては、最も汎用的である自走式土質改良機（SR-2000G）および近年検討が実施されているミストブレンダーの 2 種類に対して材料練混ぜ試験を実施することとした。



(a)パグミル

(b)ジクロス



(c)ペレガイア

(d)アイリッヒ

図 4.1-2 バッチ式機械の例



(a)BHS



(b)自走式土質改良機 SR-2000G



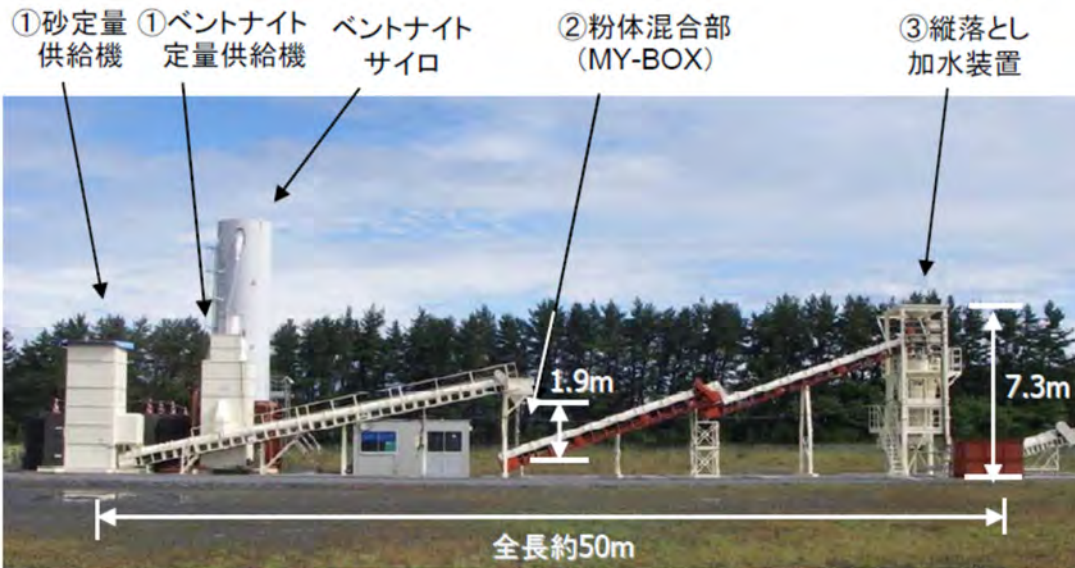
(c)Geo-Tom



(d)車載型ツイスター



(e)プロシエア



(f)ミストブレンダー

図 4.1-3 連続式機械の例

表 4.1-5 クニゲル GX の練混ぜ試験に使用された各種練混ぜ機械[1]

No.	検討ミキサー	装置概略	メーカー	型式	容量 (ℓ)	回転数	投入量 (kg)
1	パン	強制練りパン型	太平洋機工	TM-55	55	主軸:76rpm	37
2	傾動	傾動型	マクロス	TG-537	70	パン:28rpm	47
3	H.F コーン	多機能コーン型	太平洋機工	HFN-50	50	主軸:320rpm スクレーパ:52rpm	33.5
4	パグミル	二軸強制型	石川島建機	DAM60	60	パドル回転数:45rpm	40
5	ペレガイア	パン型強制混合造粒型	北川鉄工所	VZ-100	60	アーム:23.2rpm ロータ:390.0rpm	40
6	アイリッヒ	攪拌付回転容器型	日本アイリッヒ	R08-W	75	アジテータ:700rpm パン(周速):1m/sec	50
7	プロシエア	回転鋤型	太平洋機工	WB-75	75	主軸:165rpm チョッパー:3,000rpm	50

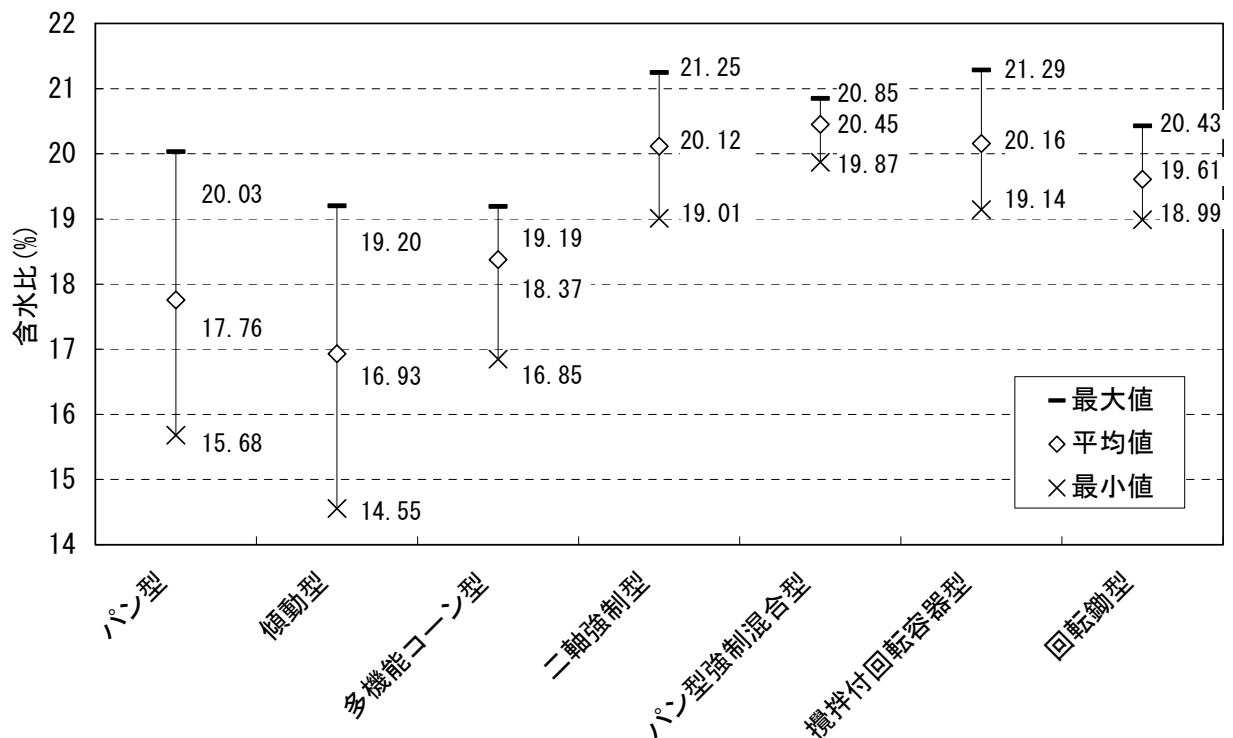


図 4.1-4 各種練混ぜ機械を用いたクニゲル GX の練混ぜ試験結果[1]

表 4.1-6 連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験[2]

試験 ケース	使用機械	使用材料		ベントナイト 混合率(%)	含水比 (%)	混合量 (kg)
		ベントナイト	混合材			
A-1	SR-P1200	クニゲル V1	砂	15	12.5	2,000
A-2	SR-P1200	クニボンド	砂	15	13.5	6,000
A-3	SR-P1200	クニゲル V1	砂	20	11.0	2,000
A-4	SR-P1200	クニボンド	砂	20	13.5	2,000
A-5	SR-P1200	クニボンド	砂	25	14.5	2,000
B1-1	プロシエア	クニゲル V1	砂	15	12.5	50
B1-2	プロシエア	クニボンド	砂	15	13.5	50
B1-3	プロシエア	クニボンド	砂	25	14.5	50
B2-1	プロシエア	クニボンド	砂	15	13.5	150
B2-2	プロシエア	クニボンド	砂	25	14.5	150
C-1	ツイスター	クニゲル V1	砂	15	12.5	50
C-2	ツイスター	クニボンド	砂	15	13.5	50
C-3	ツイスター	クニボンド	砂	25	13.5	50

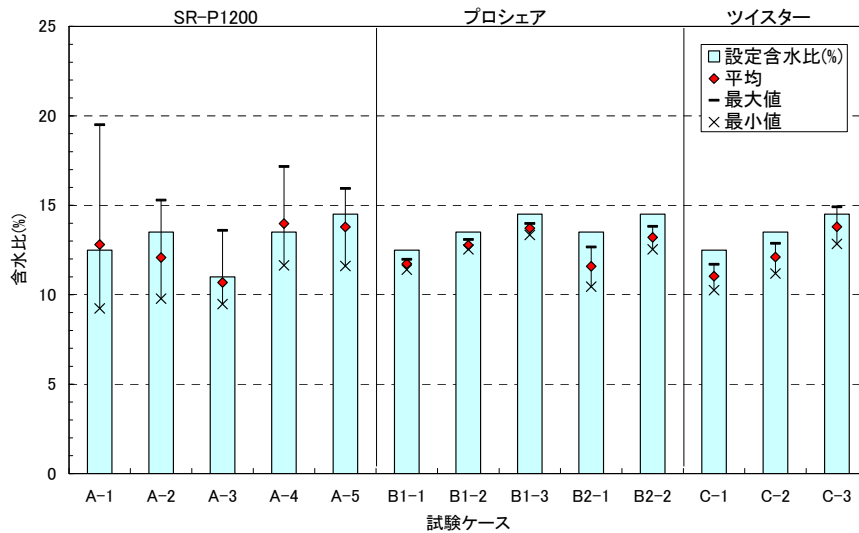


図 4.1-5 連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験結果；含水比[2]

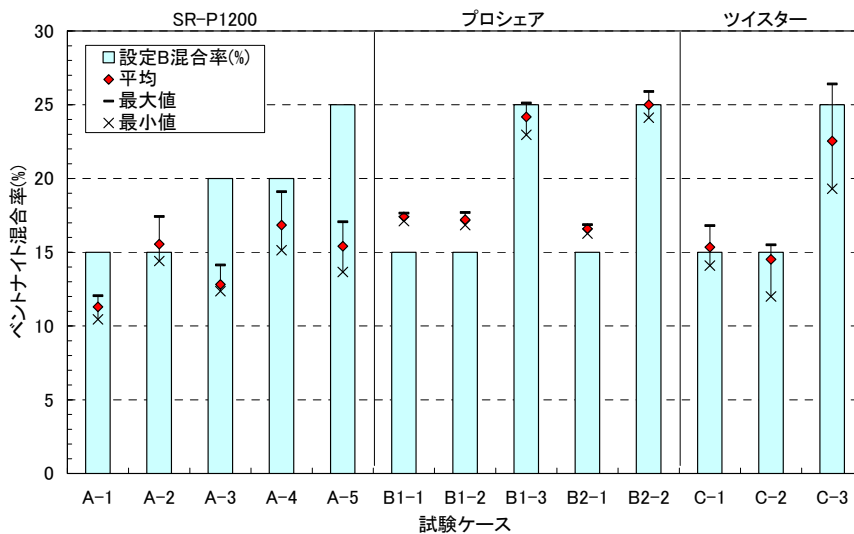


図 4.1-6 連続式練混ぜ機械を用いたベントナイト混合土の練混ぜ試験結果；混合率[2]

表 4.1-7 連続式練混ぜ機械 (SR-2000G) を用いた練混ぜ試験[2]

試験 ケース	使用材料		混合率 (%)	含水比 (%)	混合量 (kg)
	ベントナイト	混合材			
1	クニボンド	砂	15	12.0	50,000
2	クニボンド	砂	20	12.0	120,000
3	クニボンド	砂	25	13.0	35,000
4	クニゲル V1	砂	20	10.0	40,000
5	Na型化クニボンド [※]	砂	20	12.5	40,000

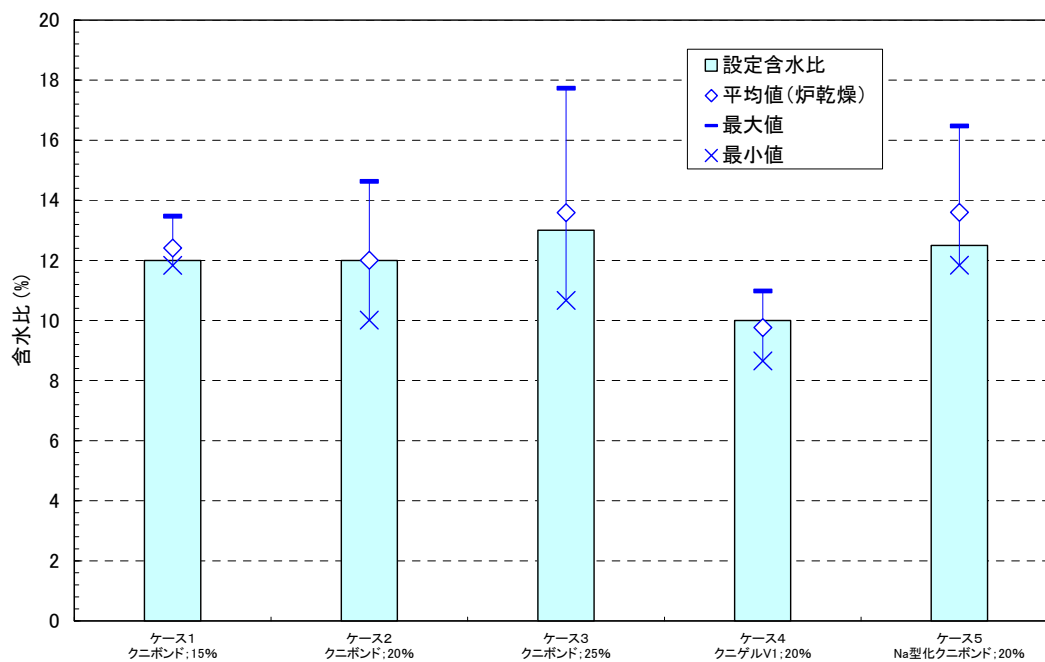


図 4.1-7 連続式練混ぜ機械 (SR-2000G) 用いた練混ぜ試験結果 ; 含水比[2]

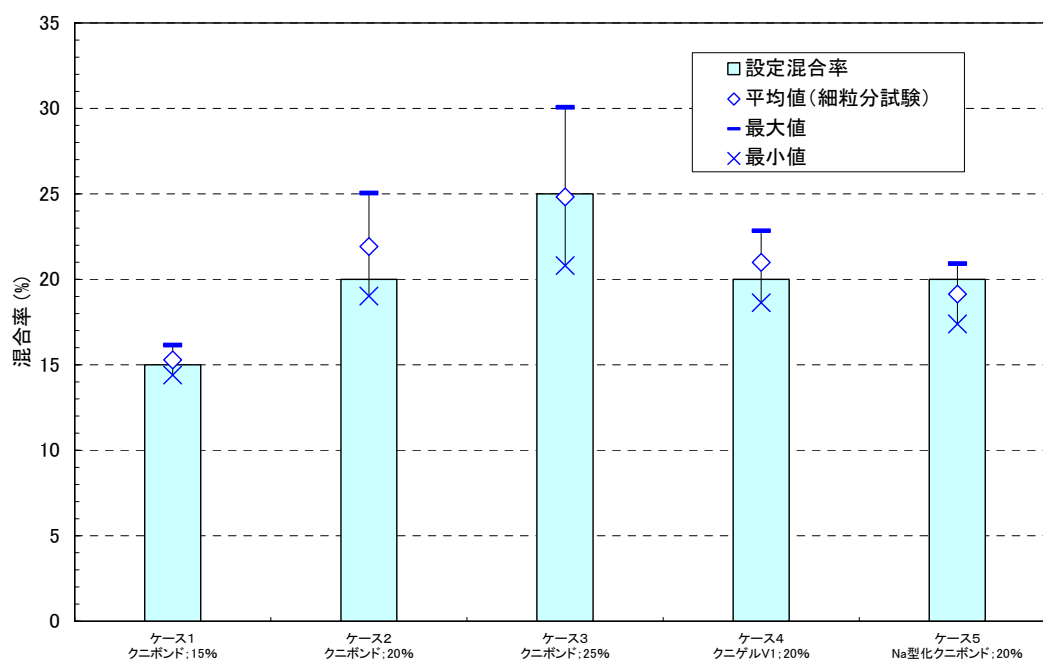
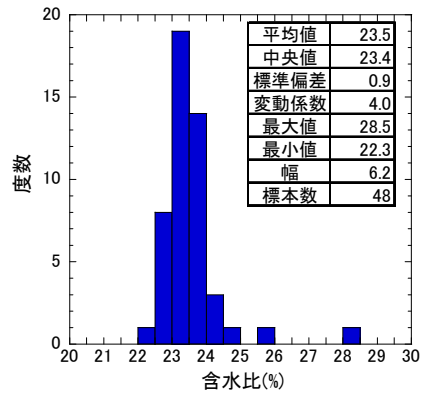
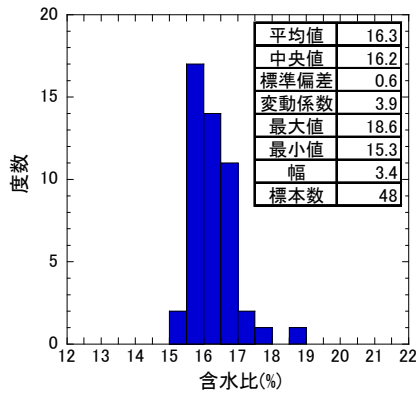
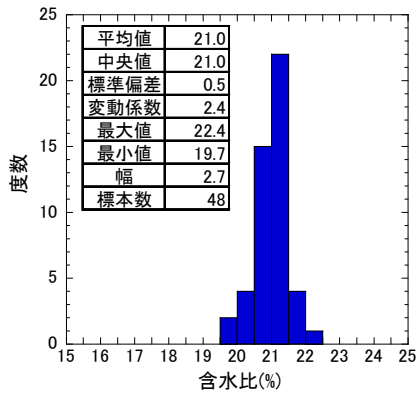


図 4.1-8 連続式練混ぜ機械 (SR-2000G) 用いた練混ぜ試験結果 ; 混合率[2]

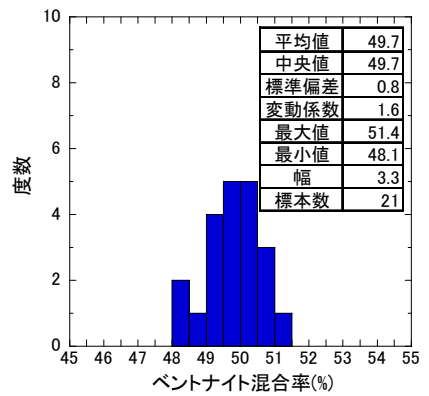
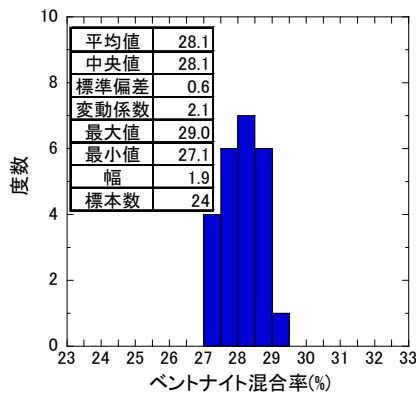
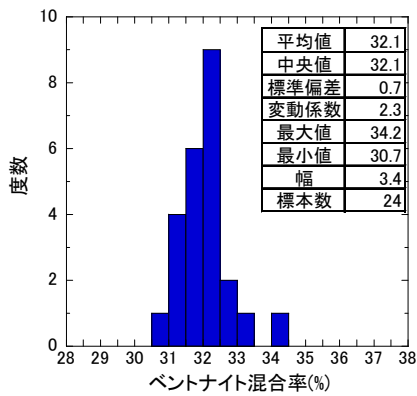
表 4.1-8 連続式練混ぜ機械 (Geo-Tom) を用いた練混ぜ試験[3]

試験ケース	ベントナイト混合率 $M_r(\%)$	設定含水比 $\omega(\%)$	混合パターン
1	30	20	同時混合
2	30	20	加水は後
3	50	25	同時混合



(a)ケース 1 ($M_r=30\%$, $\omega=20\%$) (b)ケース 2 ($M_r=30\%$, $\omega=20\%$) (c)ケース 3 ($M_r=50\%$, $\omega=25\%$)

図 4.1-9 連続式練混ぜ機械 (Geo-Tom) を用いた練混ぜ試験結果 ; 含水比[3]



(a)ケース 1 ($M_r=30\%$, $\omega=20\%$) (b)ケース 2 ($M_r=30\%$, $\omega=20\%$) (c)ケース 3 ($M_r=50\%$, $\omega=25\%$)

図 4.1-10 連続式練混ぜ機械 (Geo-Tom) を用いた練混ぜ試験結果 ; 含水比[3]

表 4.1-9 連続式練混ぜ機械（ミストブレンダー）を用いた練混ぜ試験結果[5]

表-2 検証試験結果総括

試験ケース		BT添加率25% 母材含水比9%	BT添加率30% 母材含水比9%	BT添加率40% 母材含水比9%
ペントナイト 添加率	目標添加率	25.0 %	30.0 %	40.0 %
	平均添加率	25.4 %	29.2 %	37.8 %
	バラツキ (平均値からの離れ)	± 1.9 %	± 1.7 %	± 2.2 %
	標準偏差	0.99	0.76	1.11
	変動係数	3.9 %	2.6 %	2.9 %
含水比	目標含水比	17.0 %	19.9 %	21.8 %
	平均含水比	16.9 %	20.1 %	23.1 %
	バラツキ (平均値からの離れ)	± 1.2 %	± 1.9 %	± 1.6 %
	標準偏差	0.69	0.93	0.96
	変動係数	4.1 %	4.6 %	4.2 %

4.1.3 材料練混ぜ試験の実施方法

バッチ式の機械については、表 4.1-1 に示す 3 種類の材料について試験を行い、それぞれの材料に対して機械の違いが練混ぜ品質に与える影響について検討した。

連続式の機械については 1 種類の材料(ベントナイトと砂の混合材料)についての試験を行い、バッチ式機械との比較を行うこととした。

試験に使用する機械の概要および各機械での投入量は表 4.1-10 に示す通りである。また、試験ケースは表 4.1-11 に示す通りである。

表 4.1-10 練混ぜ機械の概要

方式	名称	メーカー	型式	容量(ℓ)	投入量(kg)	材料	回数
バッチ	パグミル	石川島建機	DAM60	60	35	3 種類	3 回
	アイリッヒ	日本アイリッヒ	R08-W	75	40	3 種類	3 回
連続	SR-2000G	日立建機	SR-2000G	—	2,000	1 種類	1 回
	ミストブレンダー	前田建設	—	—	1,000	1 種類	1 回

表 4.1-11 材料練混ぜ試験ケース

試験ケース	機械	材料	含水比(%)
Case-①-A	パグミル	砂ベントナイト	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-①-B		礫ベントナイト (2005)	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-①-C		礫ベントナイト (1005)	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-②-A	アイリッヒ	砂ベントナイト	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-②-B		礫ベントナイト (2005)	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-②-C		礫ベントナイト (1005)	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-③-A	SR-2000G	砂ベントナイト	ω_{opt} (A 法) +2%
Case-④-A	ミストブレンダー	砂ベントナイト	ω_{opt} (A 法) +2%

(1) 含水比の設定

設定含水比は、室内締固め試験の結果から設定した。締固め試験は、バット練り（手練り）による方法でベントナイト混合土を作成し、突固めによる締固め試験（A法）を実施した。A法の締固めエネルギーによる締固め曲線は、図 4.1-11～図 4.1-13 に示すとおりである。

通常の土質材料の場合、最適含水比より高めの初期含水比の時に飽和の透水係数は最も小さくなると言われている[6]ことから、初期含水比は ω_{opt} （A法）+1～2%程度が良いと思われるが、練混ぜ試験では、含水比が高い方が練混ぜは難しいと考えられるため、高めの目標含水比（ ω_{opt} （A法）+2%）を基本とした。室内締固め試験の結果と設定含水比を表 4.1-12 に示す。

表 4.1-12 室内締固め試験の結果と設定含水比

呼名	材料配合	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (Mg/m ³)	最適含水比 ω_{opt} (%)	設定含水比 $\omega_{opt}+2$ (%)
砂ベントナイト	クニゲルV1：砂 =15：85	1.810	13.7	15.5
礫ベントナイト (2005)	クニゲルV1：砂：礫(2005) =15：35：50	1.977	9.8	12.0
礫ベントナイト (1005)	クニゲルV1：砂：礫(1005) =15：35：50	1.912	11.0	13.0

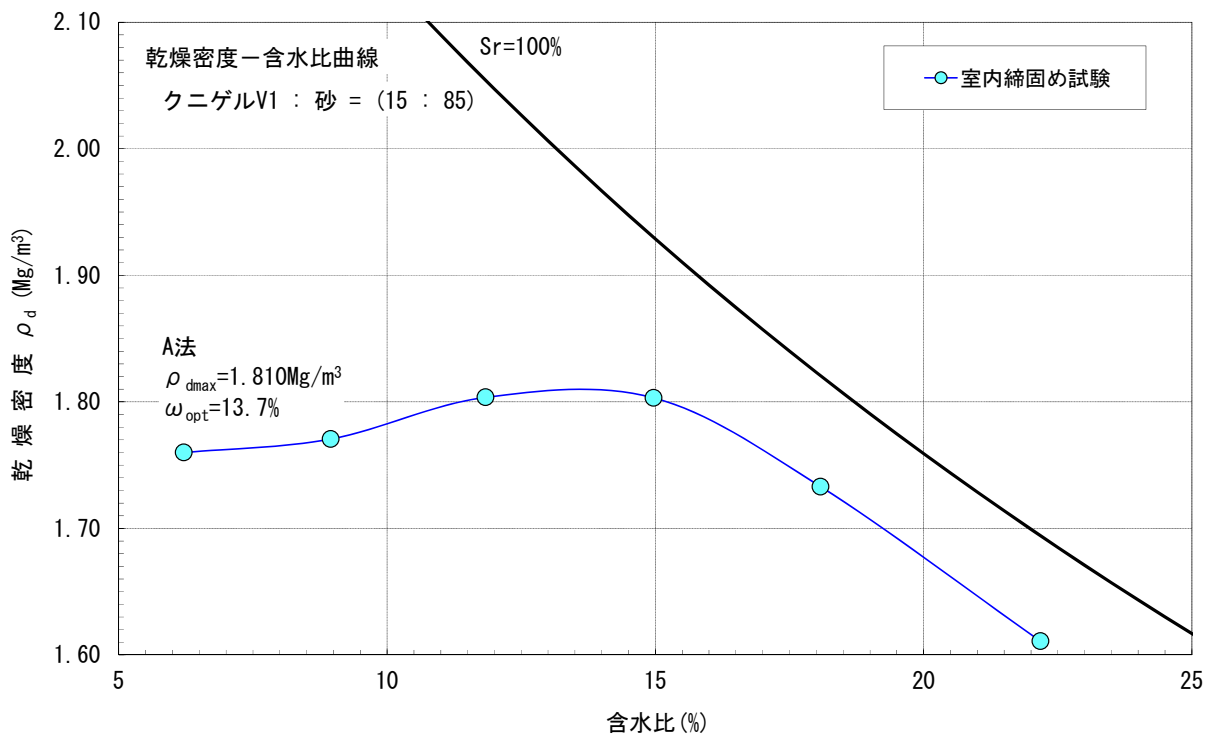


図 4.1-11 締固め曲線（クニゲル V1：砂=15：85）

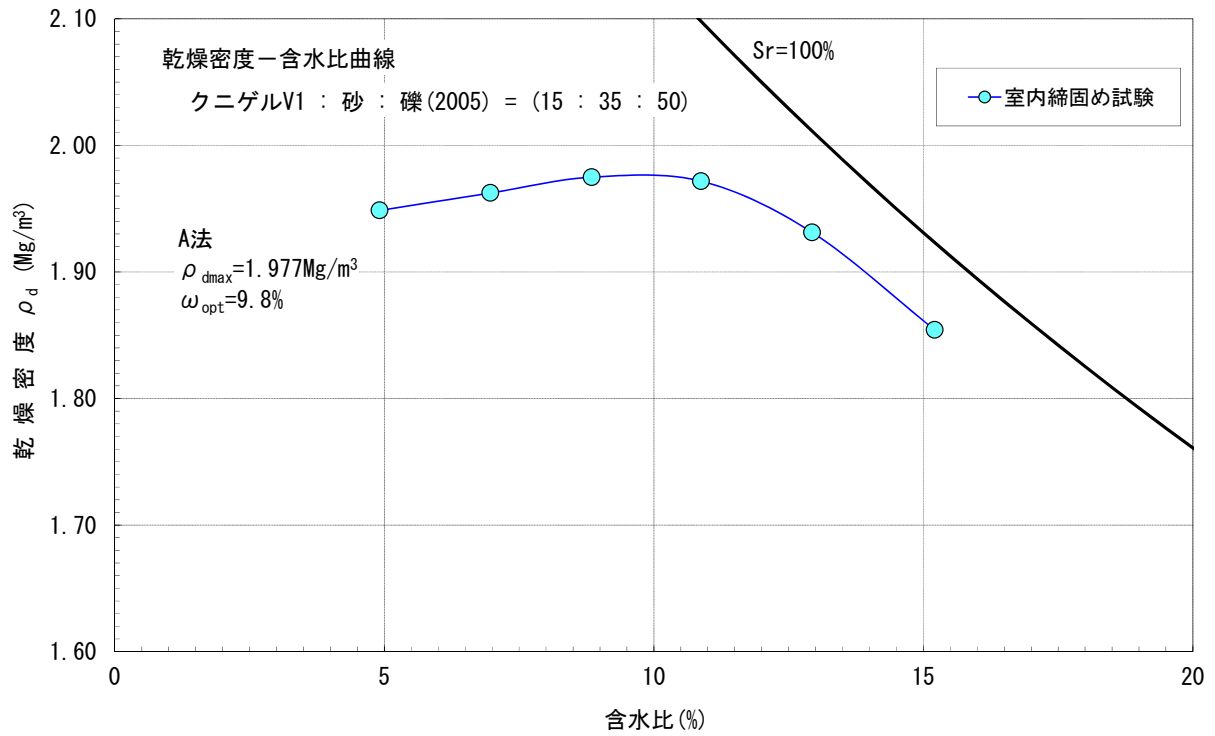


図 4.1-12 締固め曲線 (クニゲル V1 : 砂 : 礫(2005)=15 : 35 : 50)

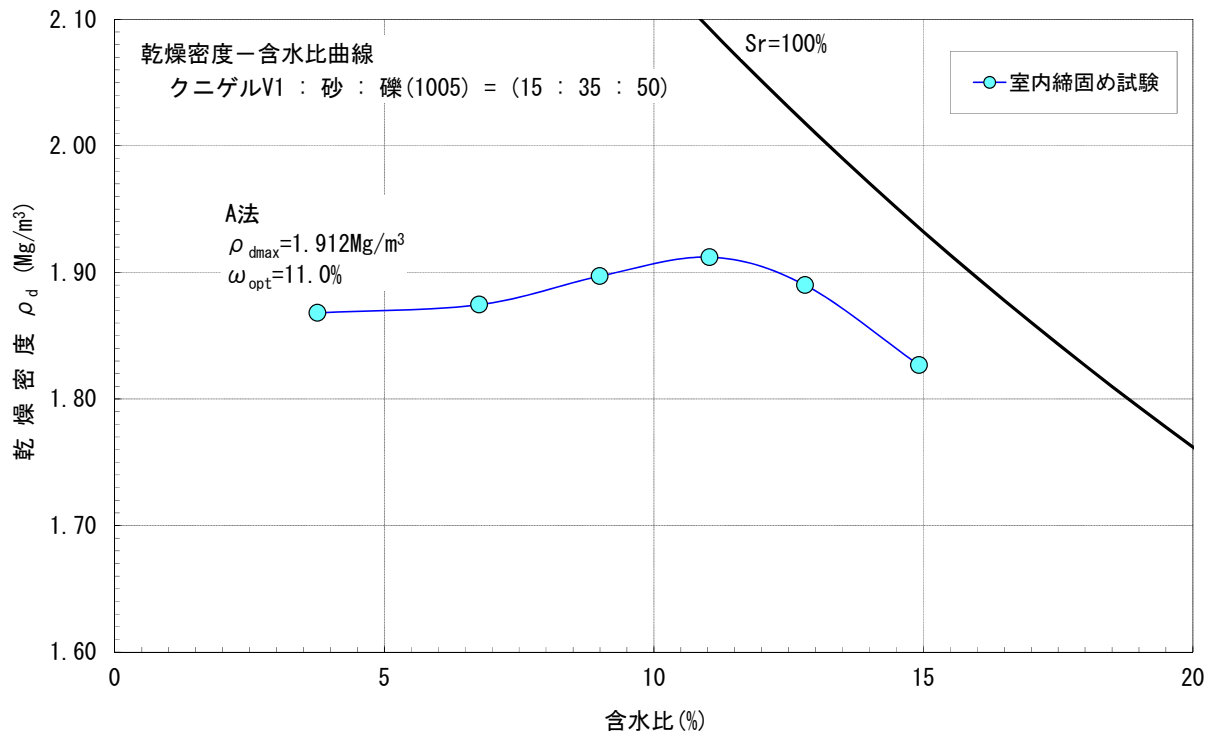


図 4.1-13 締固め曲線 (クニゲル V1 : 砂 : 礫(1005)=15 : 35 : 50)

(2) バッチ式の練混ぜ機械での実施方法

バッチ式の練混ぜ機械は、捨て練りを行った後に本練りを3回行い、各練混ぜ時の材料の品質（混合率、含水比）を確認するとともに、回収率（搬出（出来上り）量／投入量）の変動についてのデータも取得する。なお、バッチ式の練混ぜは、パグミル、アイリッヒともに以下の手順で実施した。材料投入から排出までに要する時間は、概ね1バッチあたり5分程度と想定される。

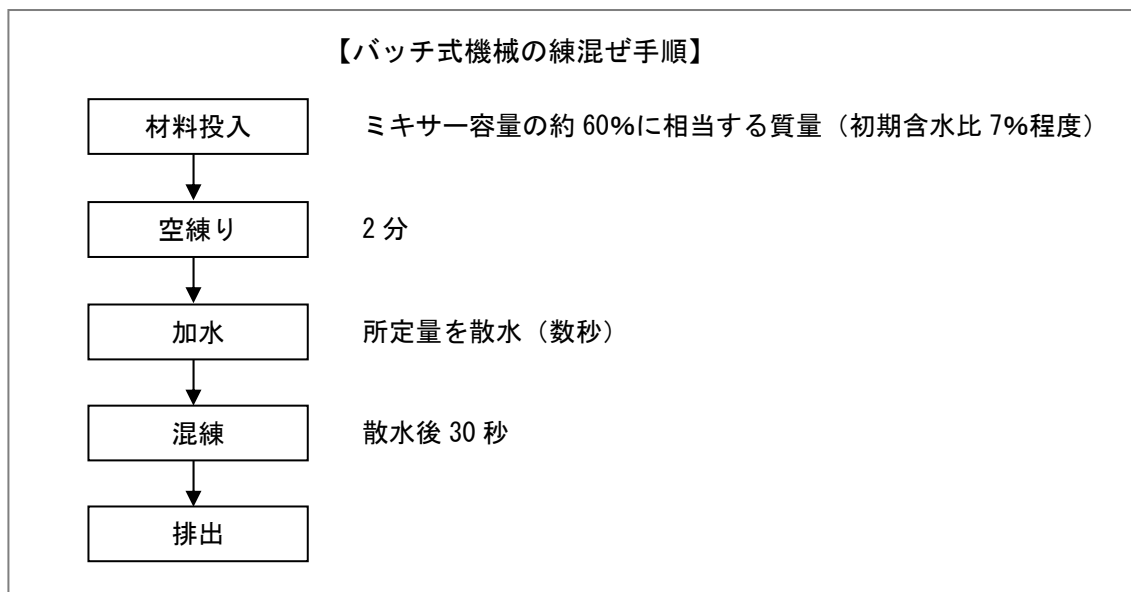


図 4.1-14 バッチ式機械を用いた練混ぜ試験手順

(3) 連続式機械の実施方法

連続式機械は、各機械の製造能力を勘案し自走式土質改良機（SR-2000G）は約 2 t 程度（練混ぜ時間は約 10 分）、ミストブレンダーは約 1 t 程度（製造時間は約 15 分）の材料の練り混ぜを連続的に行い、品質の経時変化に関するデータ取得を行った。

なお、連続式機械の経時変化に対する評価は、事前にキャリブレーションを実施し、品質が安定する段階から初期、中期、終期の 3 回において試料を採取し、品質評価を行うこととした。

1) 自走式土質改良機（SR-2000G）による試験手順

自走式土質改良機（SR-2000G）による練混ぜ試験手順を図 4.1-15 に示す。

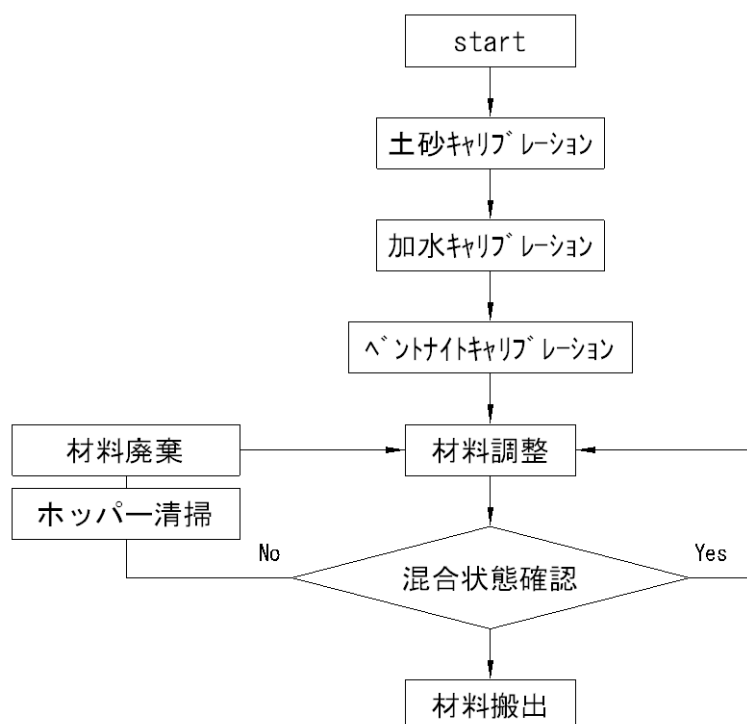


図 4.1-15 自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた練混ぜ試験手順

①材料準備

- ・砂材料は、三沢産コンクリート砂を用いる。
- ・ベントナイトはクニゲル V1 を用いる。
- ・事前に含水比測定を行う。

②キャリブレーション

- ・砂、ベントナイトの初期含水比、設定混合率、設定含水比から機械管理値を設定する。
- ・SR-2000G での土砂、ベントナイト、水の供給量が設定通りか確認する。
- ・SR-2000G による加水に関しては、加水部の先端にシャワー上に加水できるノズルを用いて行うこととする。これは、本機械を用いて実施されたベントナイト混合土の練混ぜ

試験[2]の際に数種のノズルを用いて比較が行われた結果、最も品質が良かったものである。

図 4.1-16 に自走式土質改良機（SR-2000G）のキャリブレーション手順を示す。

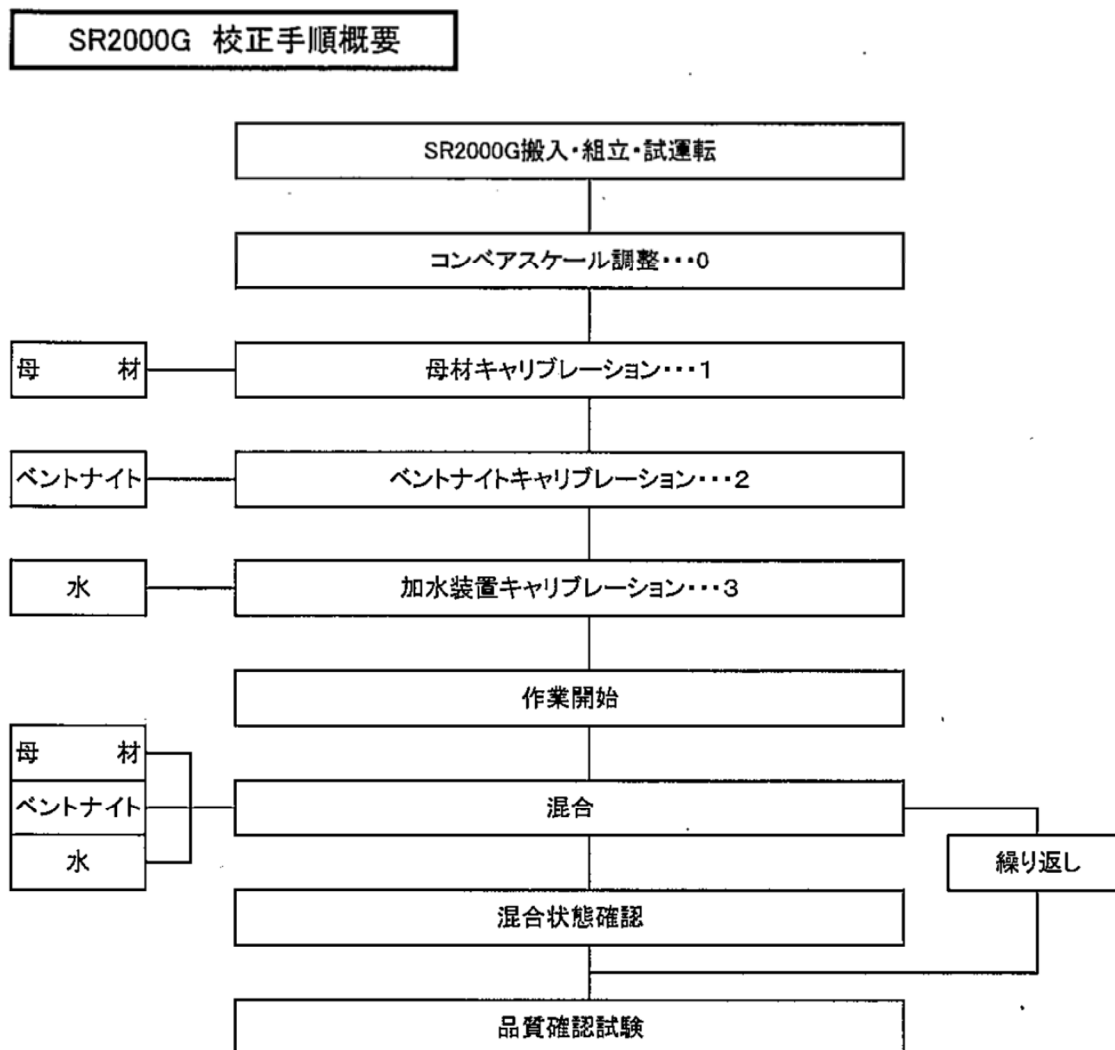


図 4.1-16 自走式土質改良機（SR-2000G）のキャリブレーション手順

③材料の加水混合

- ・砂、ベントナイトを機械に投入する。
- ・混合、加水を開始する。
- ・加水混合開始して排出量が 2t 程度になったら、本試験開始とし、試料採取を行う。
- ・1 回目の試料採取後、1t 製造後、2t 製造後に採取を行う。計 3 回の試料採取を行う。

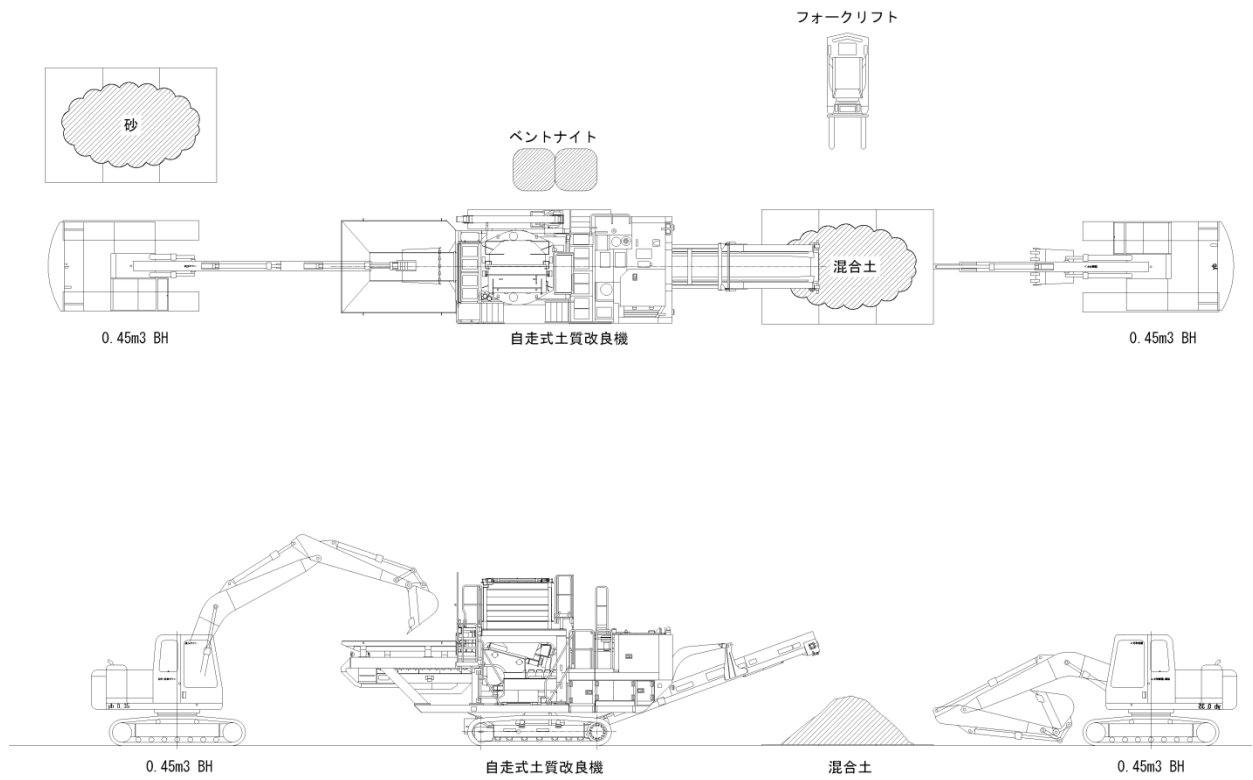


図 4.1-17 SR-2000G を用いた練混ぜ試験の概要

2) ミストブレンダーによる試験手順

a. 概要

ミストブレンダーは、図 4.1-18 に示すとおり粉体の事前混合と材料の加水混合の 2 段階からなる材料製造装置である。実規模プラント装置（図 4.1-19）は、最大製造能力 $10\text{m}^3/\text{h}$ ($18\text{t}/\text{h}$) の製造能力を有する機械である。本試験では、1 t 程度の製造を行い検討することとしたため、この規模の混合土製造に適切な最大 $5\text{m}^3/\text{h}$ ($9\text{t}/\text{h}$) の製造能力を有する小型試験機（プロトタイプ）を用いて本試験を実施した。

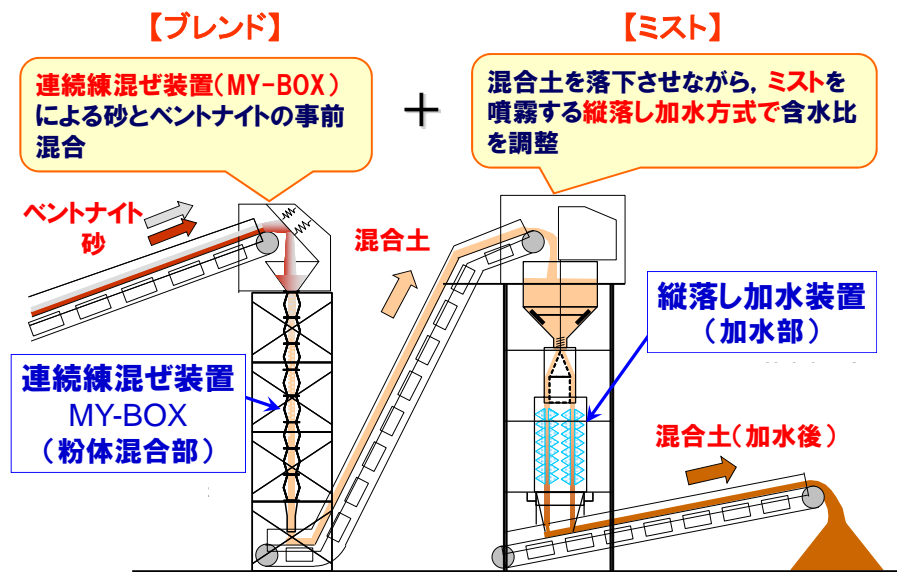


図 4.1-18 ミストブレンダーの概要



図 4.1-19 (参考) 実規模プラント設備

b. 試験手順

①材料準備

- ・砂材料は、三沢産コンクリート用砂を用いる。
- ・試験に必要な所要量を準備し、そこから3試料採取して含水比を確認し、一般的に入手できる砂材料の含水比（3～9%）の範囲にあることを確認する。
- ・ベントナイトはクニゲル V1 を用いる。
- ・試験に必要な所要量を準備し、含水比を確認する。

②粉体の事前混合

- ・粉体(上記の砂およびベントナイト)の事前混合は、 $\square 120\text{mm} \times 240\text{mm} \times 8$ 連の MY-BOX により行う。ただし、1回約 100kg の混合を何回かに分割して所定量を製造する形で行う。
- ・混合は、ベントナイト約 15kg と砂約 85kg（乾燥重量比で 15:85 となるように湿潤重量を調整）を、ベルコンに見立てたシート上に、手作業にて層状に敷き並べることで材料の定量供給を再現し、ウィンチでシートを引っ張ることで MY-BOX 上部のホッパーに材料を投入する。1回当たりの材料投入時間は約 40～50 秒とする。
- ・事前混合した材料は所定量（1000kg 程度）を 70L ポリバケツに仮置きする。仮置きした材料の含水比が変化しないように密封を行う。

③材料の加水混合

- ・材料の加水混合は、最大 $5\text{m}^3/\text{h}$ （9t/h）の製造能力を持つ加水混合装置（ $\phi 720\text{mm}$ 、H1600mm）により行う。
- ・粉体供給速度（粉体材料供給スクリュウの回転数）と水供給定量ポンプの吐出量の組合せに対する、出来上がり混合土含水比の関係を、あらかじめキャリブレーション試験により求めておく。
- ・粉体材料の含水比、および目標とする混合土の含水比から必要な加水量を設定し、上記のキャリブレーションより粉体供給速度と水供給ポンプの吐出量を決定する。
- ・水の供給を開始し、引き続き、粉体を上部ホッパーに一定量確保しながら材料を投入する。供給が安定するのを 10 秒程度待って、混合土材料を連続製造する。
- ・製造される混合土はフネにより回収する。

④試料の採取

- ・所定量を連続製造する時間（1000kg 製造で 15 分程度）に対し、前半、中間、後半という形で、概ね等間隔で試料を採取する。
- ・試料採取はフネで受けた材料からスコップ等で採取する。

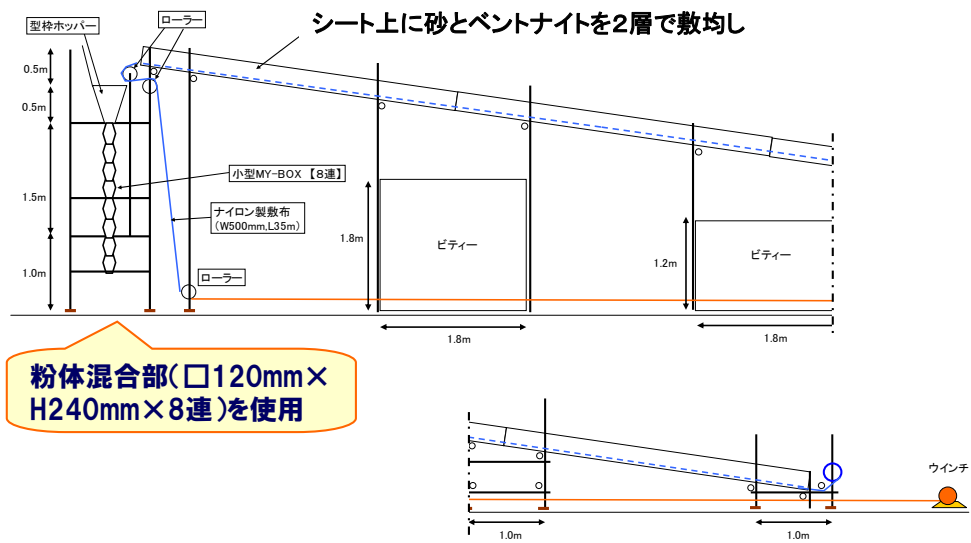


図 4.1-20 粉体の事前混合の概要



砂敷均し



ベントナイト敷均し



粉体混合部 (MY-BOX)



5m³/h タイプ加水混合装置

粉体混合装置と製造の概要

図 4.1-21 粉体混合装置および加水装置の概要

4.1.4 材料練混ぜ試験の品質管理項目

各試験における品質確認試験の項目と数量は表 4.1-13 および表 4.1-14 に示す通りとする。目標含水比に対して、練り混ぜ後の材料の平均含水比の値とばらつきがどの程度になるか確認することを目的とする。標本数は、練混ぜ機械の製造能力に応じて設定した。バッチ式（パグミル、アイリッヒ）は、バッチ単位で精度良く混練できるため、パグミル1バッチ当たりの混練数量（35kg）と、室内試験項目毎に必要な試料の質量から標本数を設定した。連続式は、安定した品質を連続的に製造する最小数量（各々10分程度とすると自走式土質改良機（SR-2000G）は2t、ミストブレンダーは1t）を目安とし、かつ経時変化に関する評価を考慮し標本数を設定した（各機械の練混ぜ数量は、表 4.1-10 を参照）。ミストブレンダーについては、本試験実施あたり小型試験機を使用したため、実規模機械と違う製造工程（空練りに一旦一箇所に集め加水装置へ投入する）になるため、加水前後の混合率に変化の無いことを確認することを目的として、加水前の15試料、加水後の15試料について混合率を確認する。各品質確認試験方法の詳細は、表 4.1-15 にまとめた。

表 4.1-13 品質確認試験数量

試験項目	数量			
	パグミル	アイリッヒ	SR-2000G	ミストブレンダー
含水比	45×3 材料	45×3 材料	120	90
混合率	12×3 材料	12×3 材料	30	加水前 15+加水後 15
締固め性	6×3 材料	6×3 材料	12	9
粒度分布	3 材料	3 材料	1 材料	1 材料
透水性	2×3 材料	2×3 材料	2	2

表 4.1-14 品質確認試験ケースと数量

検討ミキサー	容量	材料	試験ケース	含水比				細粒分含有率				粒度分布		締固め性				透水性				
				1回目	2回目	3回目	計	1回目	2回目	3回目	計	1回目	計	1回目	2回目	3回目	計	1回目	2回目	3回目	計	
パグミル	60L	砂ヘントナイト	Case①-A	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
		礫ヘントナイト(2005)	Case①-B	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
		礫ヘントナイト(1005)	Case①-C	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
アイリッヒ	75L	砂ヘントナイト	Case②-A	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
		礫ヘントナイト(2005)	Case②-B	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
		礫ヘントナイト(1005)	Case②-C	15	15	15	45	4	4	4	12	1	1	2	2	2	6	-	1	1	2	
SR-2000G	連続	砂ヘントナイト	Case③-A	40	40	40	120	10	10	10	30	1	1	4	4	4	12	-	1	1	2	
ミストブレンダー	連続	砂ヘントナイト	Case④-A	-	-	-	0	15 空練後				15	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
				30	30	30	90	5	5	5	15	1	1	3	3	3	9	-	1	1	2	
				計 480				計 132				計 8		計 57				計 16				

4.1.5 試験結果

(1) バッチ式機械の練混ぜ状況

1) 練混ぜ試験状況

図 4.1-22、図 4.1-23 にパグミル、アイリッヒによる練混ぜの状況を示す。パグミルおよびアイリッヒの材料排出後のミキサー内部の状況を比較するとパグミルに比べてアイリッヒの方が内部への付着が少ないことが分かる。

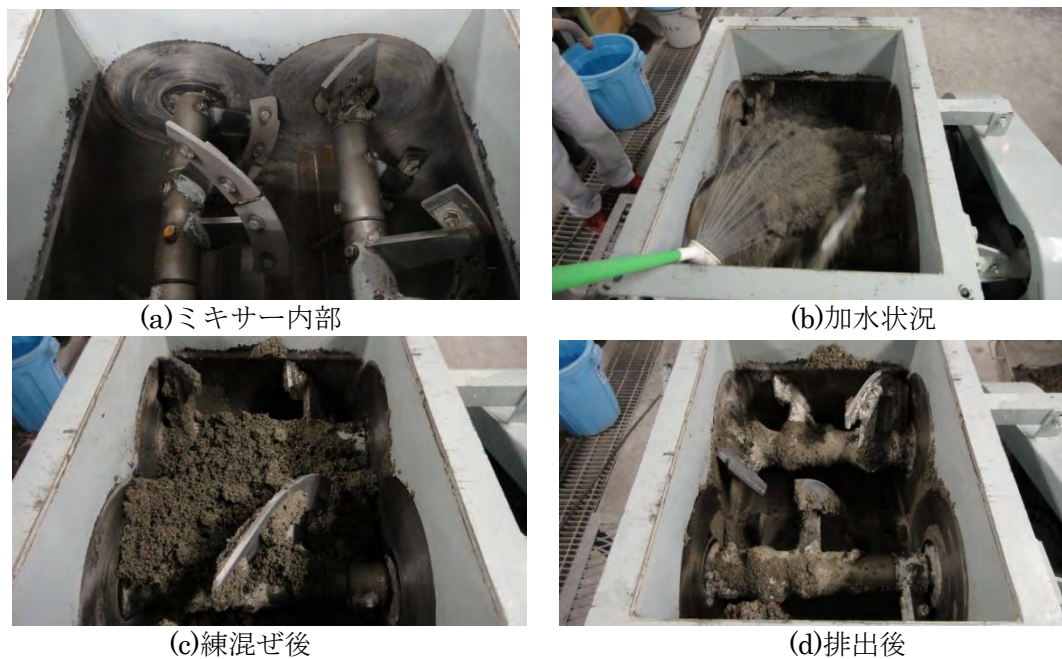


図 4.1-22 パグミルによる練混ぜの状況

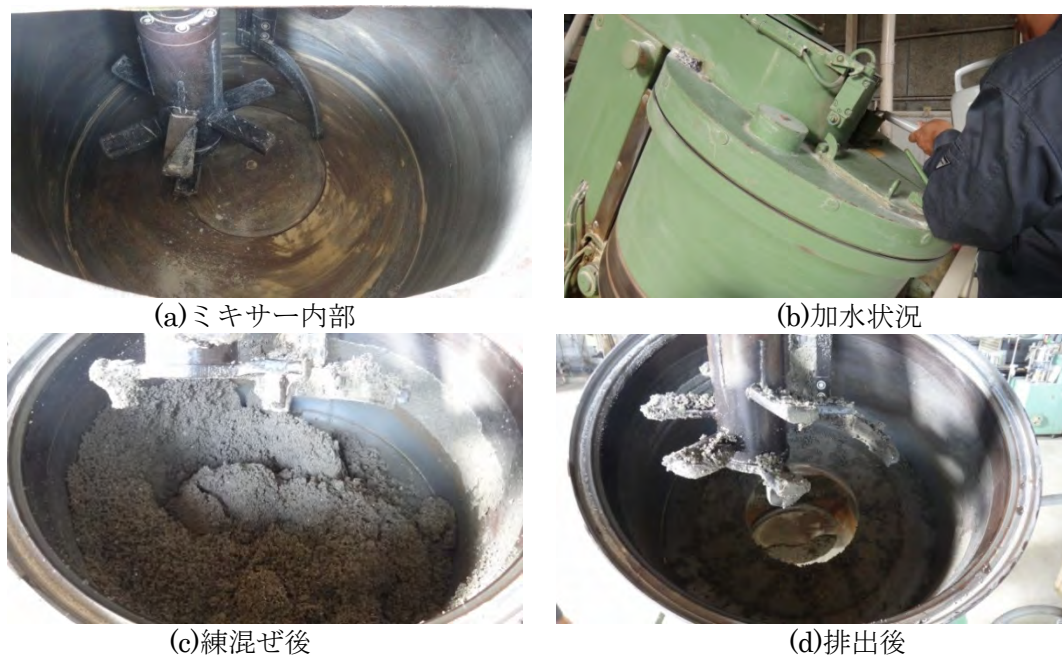
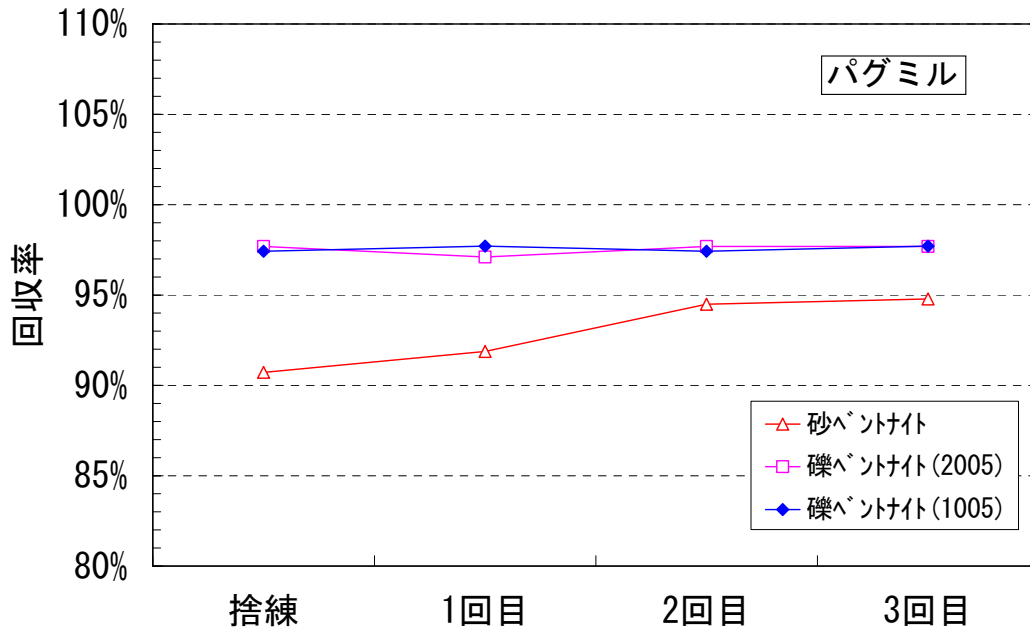


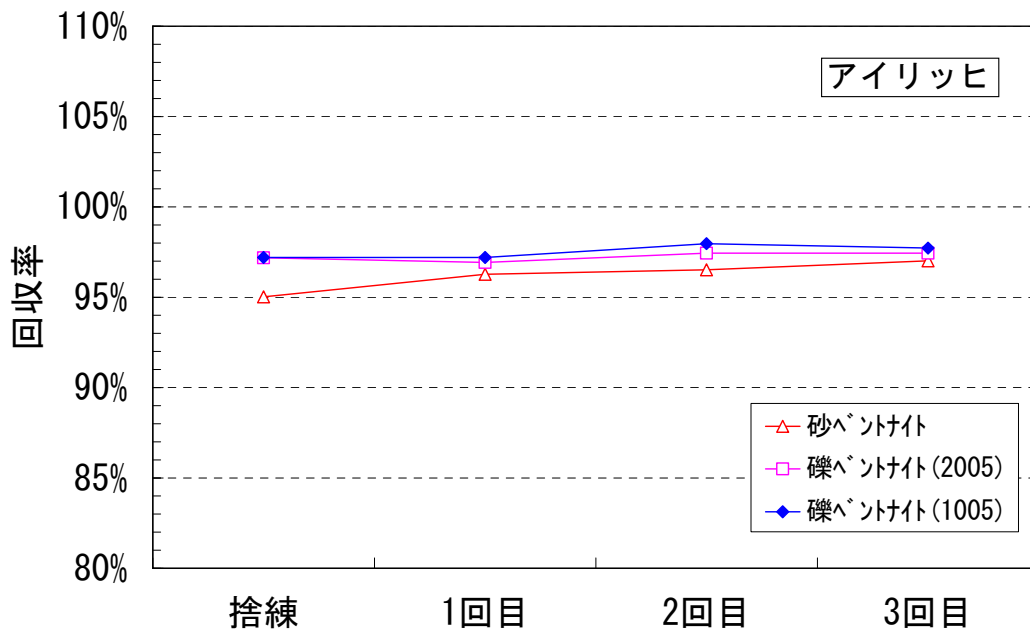
図 4.1-23 アイリッヒによる練混ぜの状況

2) バッチ式ミキサーの回収率の比較

図 4.1-24 にバッチ式ミキサーの回収率を示す。同図より、礫ベントナイト混合土(以下礫ベントナイトという)の方が砂ベントナイト混合土(以下砂ベントナイトという)より回収率が高いことがわかる。すなわち、砂ベントナイトの方が機械への付着が多いといえる。また、アイリッヒの方がパグミルより回収率が高く、砂ベントナイトの方がその傾向が顕著である。



(a)パグミルミキサー



(b)アイリッヒミキサー

図 4.1-24 バッチ式ミキサーの回収率の比較

(2) 連続式機械の練混ぜ状況

図 4.1-25 に自走式土質改良機 (SR-2000G)、図 4.1-26 にミストブレンダーによる試験状況を示す。



(a)練混ぜ機械外観



(b)土砂供給部



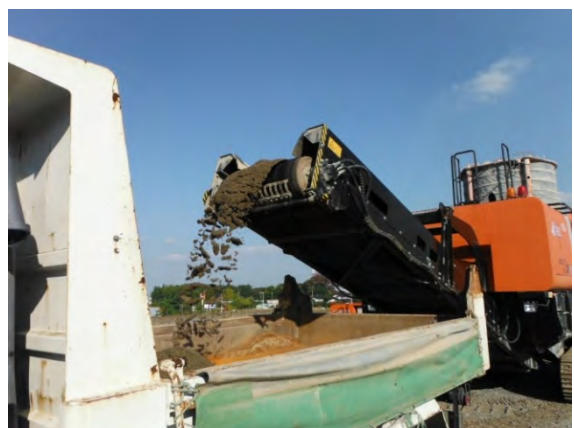
(c)ミキサー部



(d)ベントナイト供給状況



(e)土砂供給状況



(f)混合土排出状況

図 4.1-25 自走式土質改良機 (SR-2000G) によるベントナイト混合土製造の状況



(a) 人力敷均し



(b) 粉体混合過程



(c) 加水過程



(d) MY-BOX (8連)



(e) 粉体混合後 (MY-BOX 通過後)



(f) 加水後 (材料排出)

図 4.1-26 ミストブレンダーによるペントナイト混合土製造の状況

(3) 室内品質確認試験

品質確認試験は、表 4.1-15 に示す JIS 規格に準じて実施した。

表 4.1-15 品質確認試験

試験項目	JIS	試験名称	備考
含水比	JIS A 1203	土の含水比試験	(恒温乾燥炉法)
混合率	JIS A 1223	土の細粒分含有率試験	4.1.6
締め固め性	JIS A 1210	突固めによる土の締め固め試験	(A 法)
粒度分布	JIS A 1204	土の粒度試験	(ふるい分析)
透水性	JIS A 1218	土の透水試験	差圧型 (変水位)

1) 含水比の測定結果

含水比の測定結果を図 4.1-27～図 4.1-29 に示す。図 4.1-27 は砂ベントナイト、図 4.1-28 は礫ベントナイト (2005)、図 4.1-29 は礫ベントナイト (1005) の結果である。砂ベントナイトの練混ぜ試験の結果得られた各練混ぜ機械ごとの含水比の平均値および最大・最小値を図 4.1-30 に示す。また、図 4.1-31 には標準偏差および変動係数を示す。

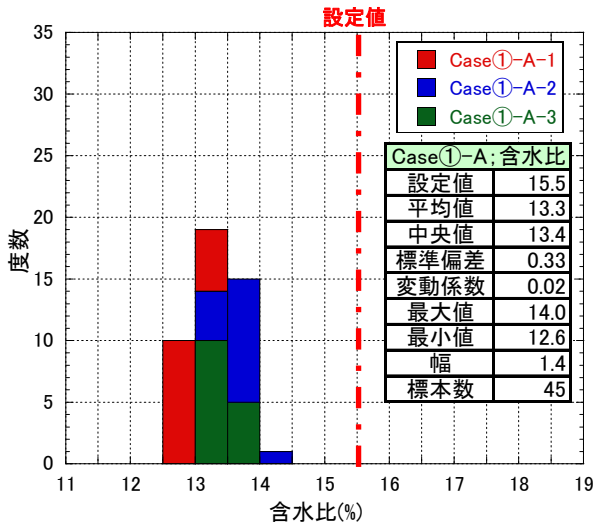
設定含水比に対する練混ぜ後の平均含水比は、アイリッヒは設定値 (15.5%) に近い 15.2% となり、ミストブレンダーでの平均値は設定値 (15.5%) に近い 15.0% となった。パグミルでの平均値は設定値より 2% 以上低く 13.3% となった。これは、アイリッヒに比べてパグミルの回収率が低くパグミル内のシャフトに高含水土がより多く付着している可能性が考えられる。また、パグミルに使用した三沢砂の含水比は、工場出荷時に計測した値に比べてベントナイト混合土製造直前までに低くなっていた可能性も考えられる。以上より、バッチ式の練混ぜ機械は、適時、含水比測定をする等の管理を行なうことで、平均値のずれを調整できるものと考えられる。

自走式土質改良機 (SR-2000G) は、今回設定した含水比 (15.5%) で加水量が追いつかず製造が不可能であった。そのため、目標を 1% 下げ 14.5% として製造を行った。その結果、平均値は 13.9% となり設定値 (14.5%) に対して低い値となった。ばらつきに関する指標 (範囲、標準偏差、変動係数) は、連続式よりバッチ式の方がばらつきは少ない結果となった。したがって、ばらつきの少ない材料を製造したい場合はバッチ式の方が連続式より好ましいと言える。また、ばらつきに関して連続式の SR-2000G とミストブレンダーを比較すると SR-2000G の方が若干ばらつきは大きい結果となっている。

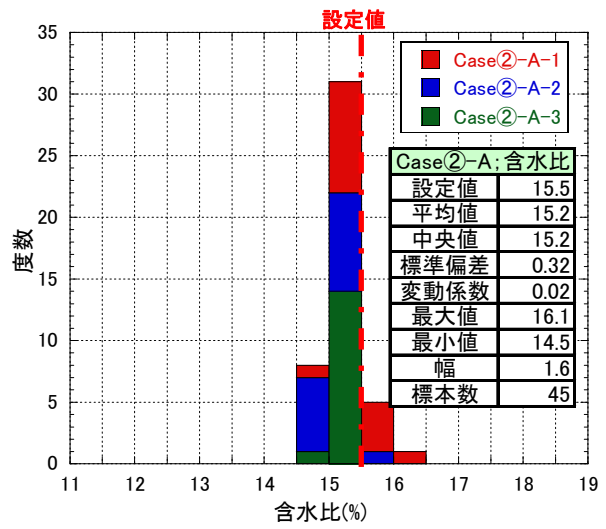
図 4.1-32 および図 4.1-33 には礫ベントナイトの結果を示す。礫ベントナイトに関してはバッチ式のみキサーのみで試験を行った。砂ベントナイトと同様に設定値に対して製造した材料の平均値は小さい値となっているが、その割合は砂ベントナイトに比べて大きい。回収率が高いことより、工場出荷時に計測した礫の含水比の値に比べてベントナイト混合土製造直前までに低くなっていた可能性が考えられる。バッチ式の練混ぜ機械は、適時、含水比測定をする等の管理を行なうことで、平均値のずれを調整できるものと考えられる。また、標準偏差、変動係数とも砂ベントナイトに比べて礫ベントナイトの方が大きくなっている。

連続式の機械に関しては、連続で練混ぜている前半、中間、後半で材料を採取し経時変化に関する品質の確認を行った。図 4.1-34 に結果を示す。SR-2000G、ミストブレンダーとも時間的

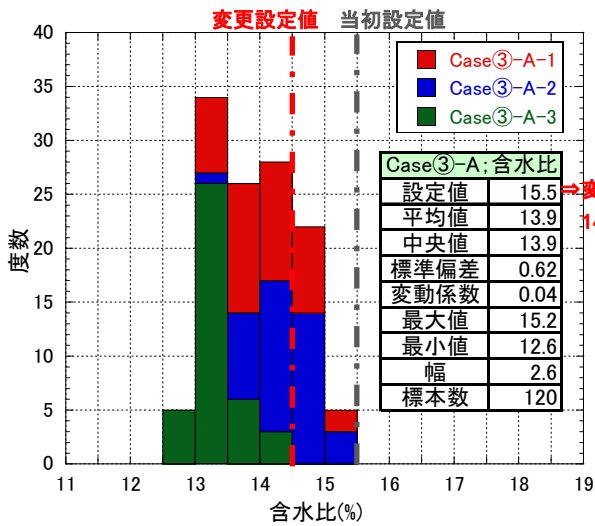
な変化はそれほど大きくはない。



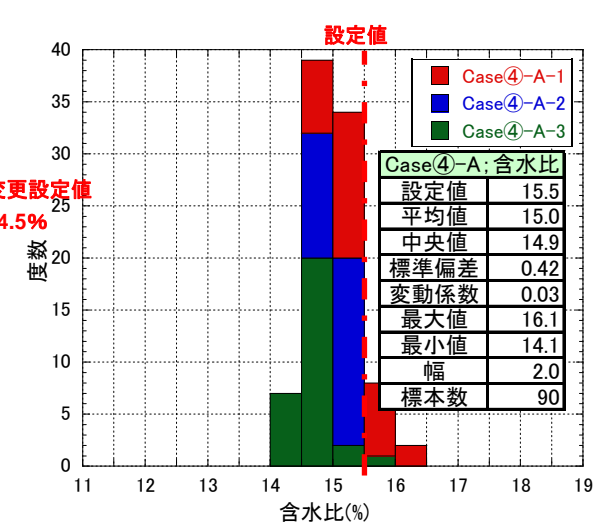
(a) パグミル



(b) アイリッシ



(c) SR-2000G



(d) ミストブレンダー

図 4.1-27 各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果；砂ベントナイト

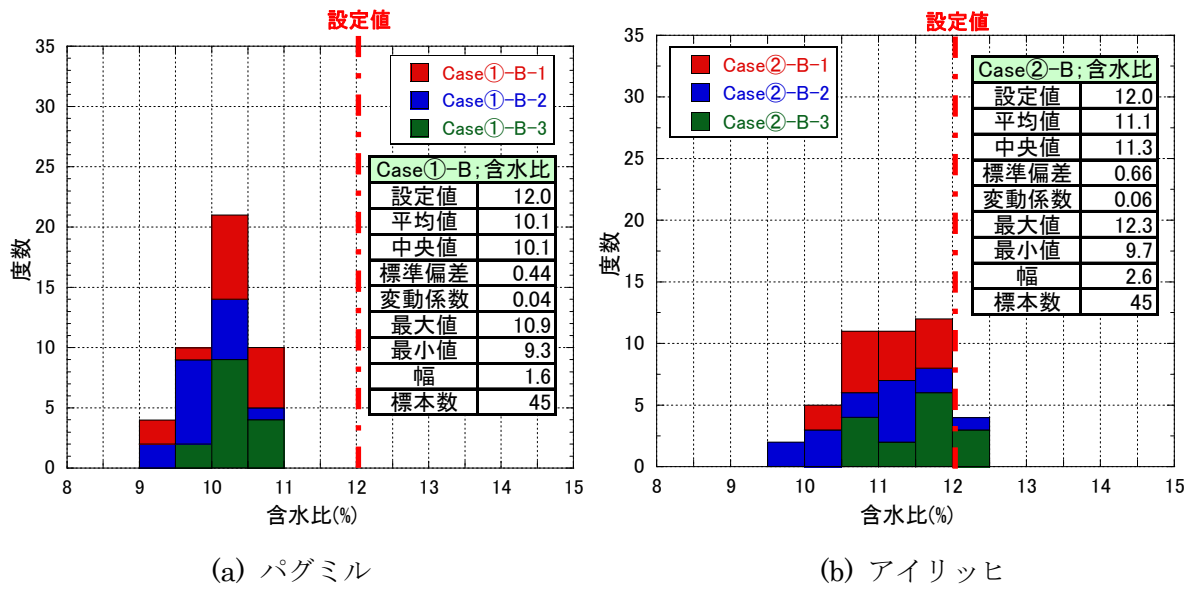


図 4.1-28 各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果；礫ベントナイト（2005）

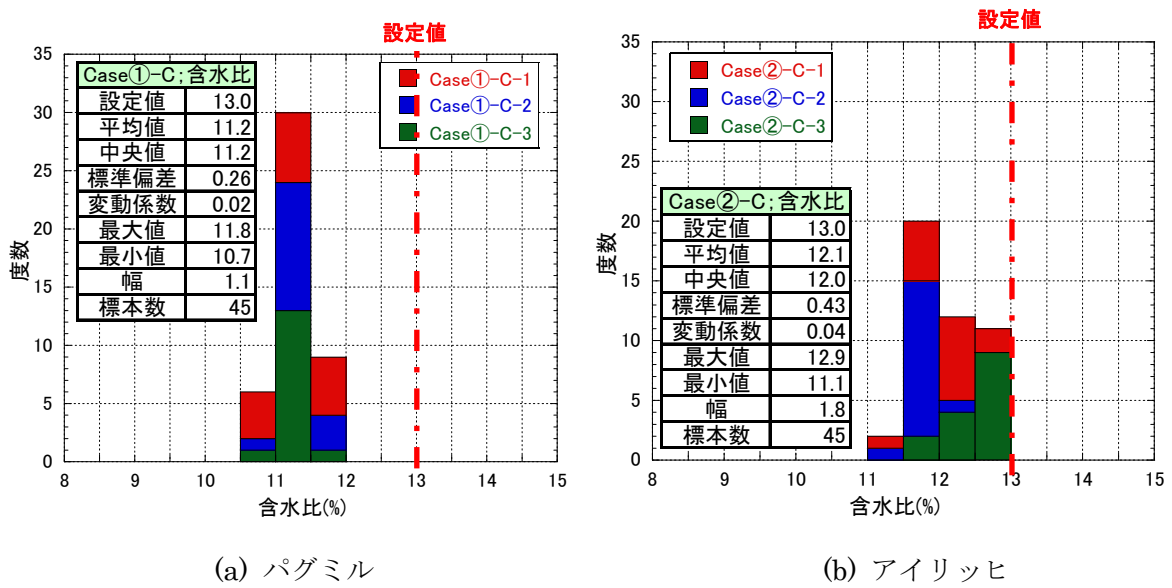


図 4.1-29 各練混ぜ機械で練混ぜた材料の含水比測定結果；礫ベントナイト（1005）

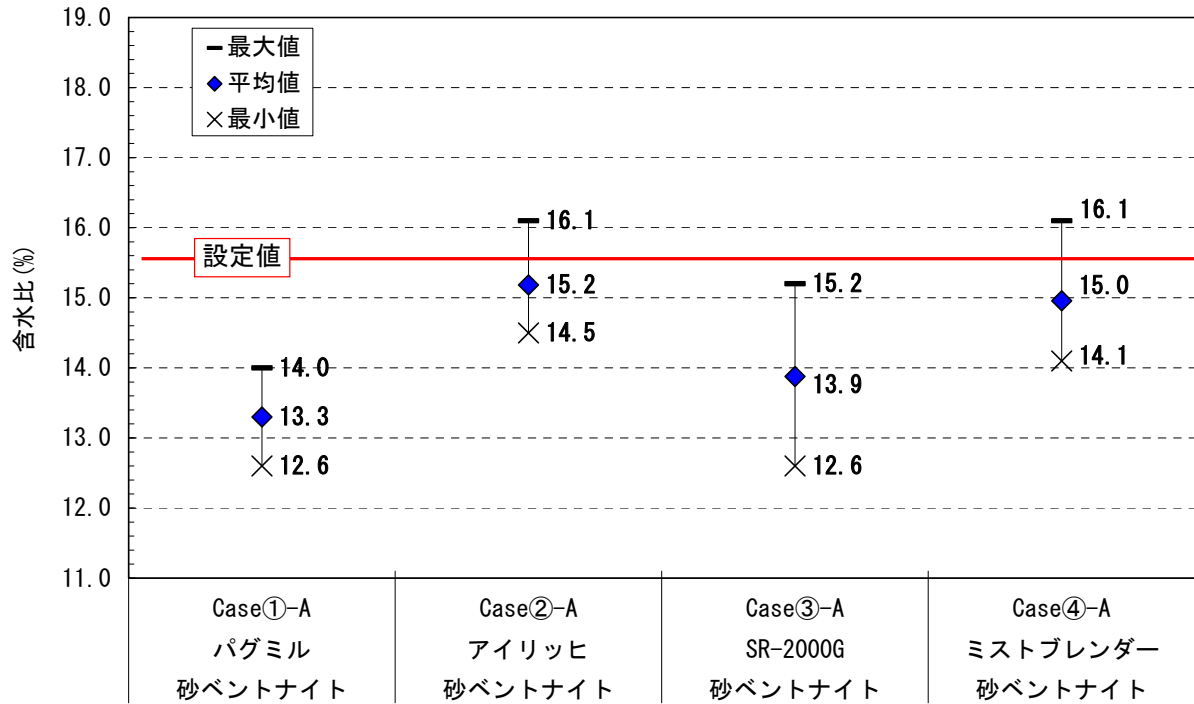


図 4.1-30 練混ぜ材料の含水比測定結果の平均値および最大・最小値の比較；砂ベントナイト

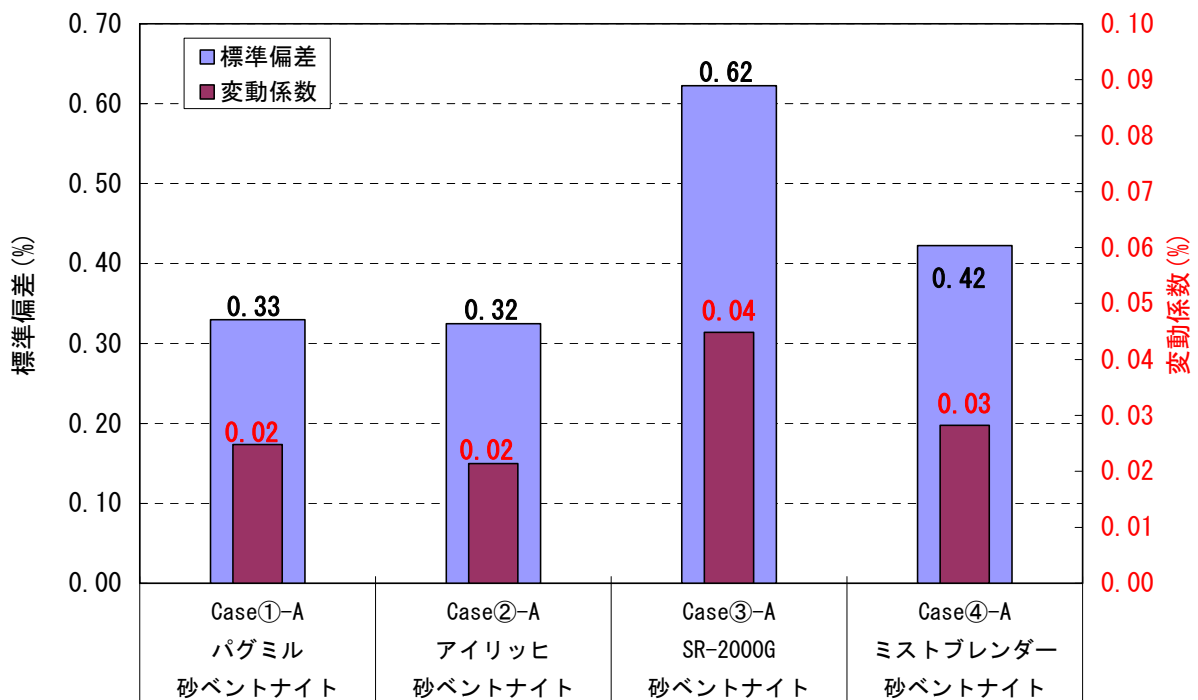


図 4.1-31 練混ぜ材料の含水比測定結果の標準偏差の比較；砂ベントナイト

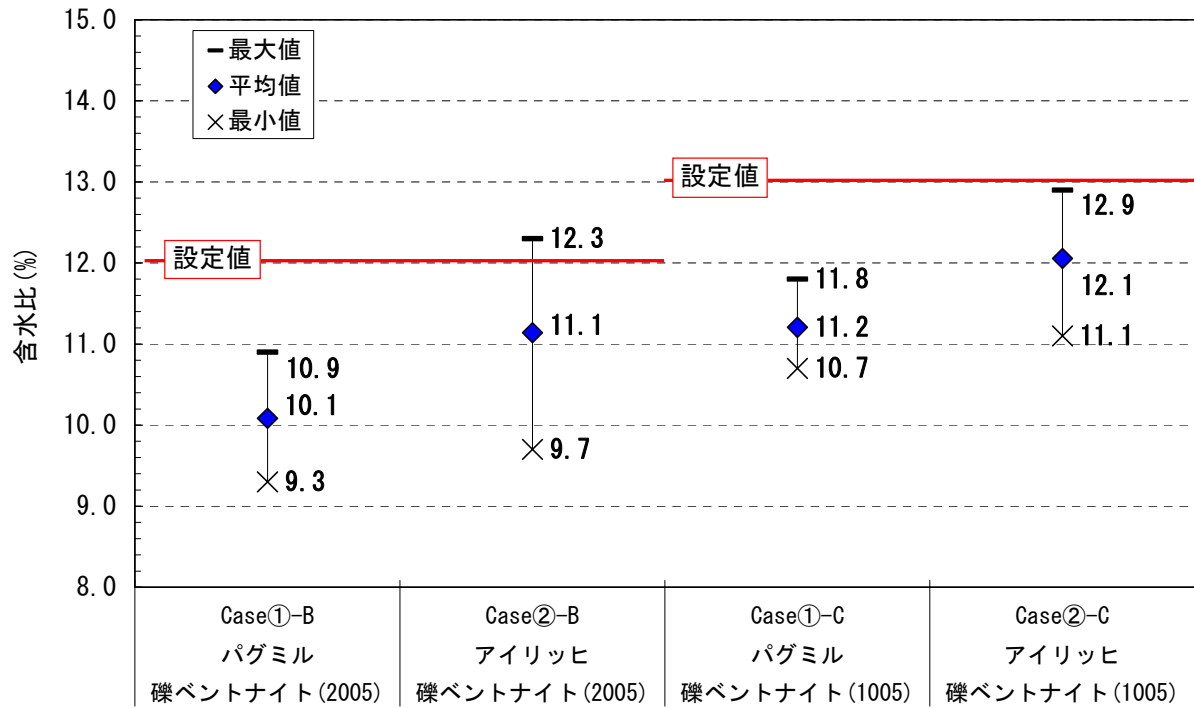


図 4.1-32 練混ぜ材料の含水比測定結果の平均値および最大・最小値の比較；礫ベントナイト

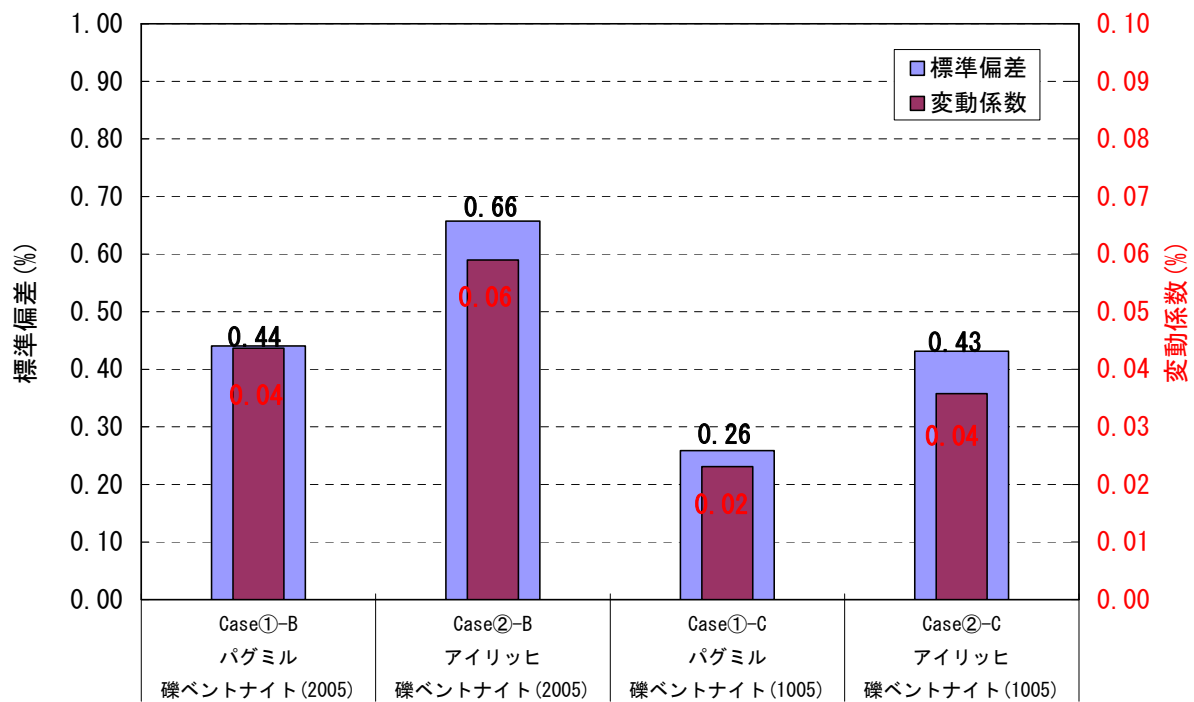
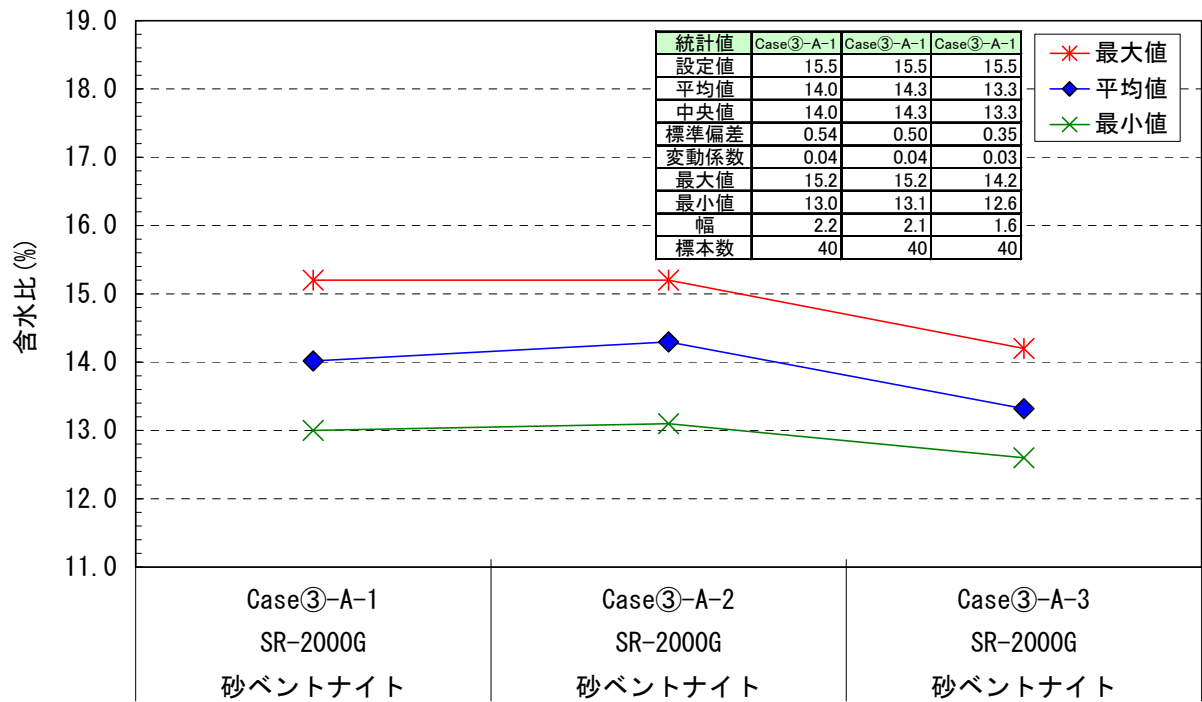
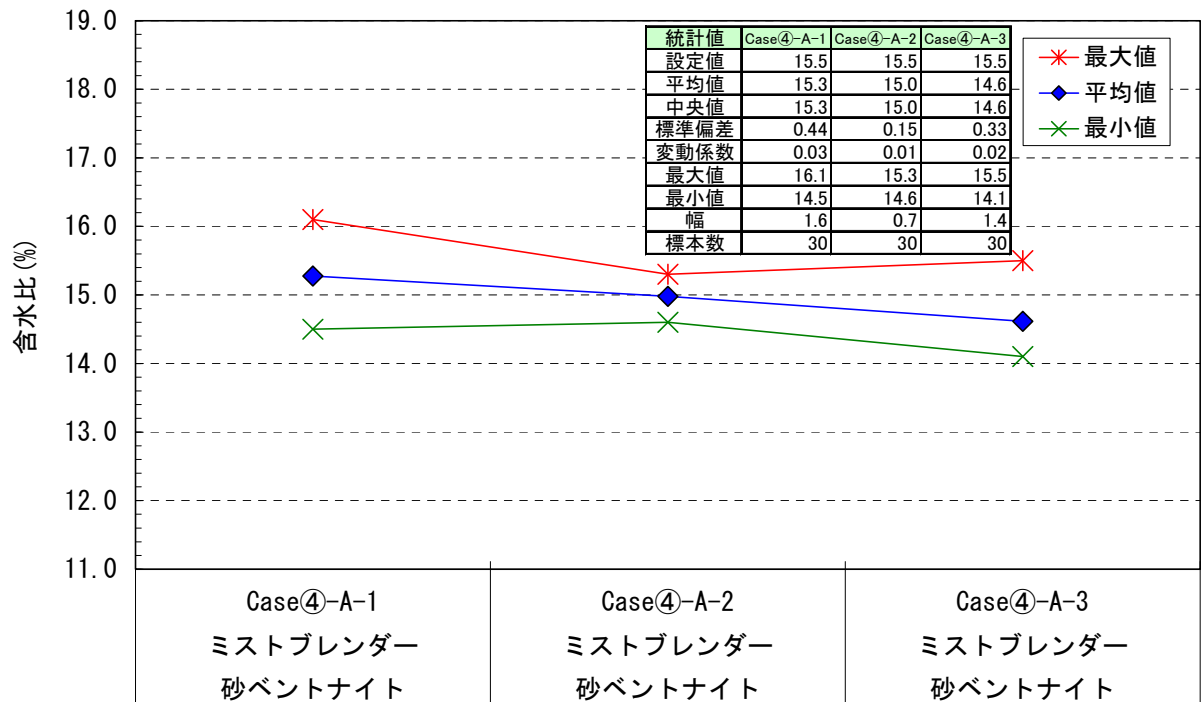


図 4.1-33 練混ぜ材料の含水比測定結果の標準偏差の比較；礫ベントナイト



(a) SR-2000G



(b) ミストブレンダー

図 4.1-34 連続式機械を用いて製造した材料の含水比測定結果の時間的变化

2) 混合率および粒度分布の測定結果

a. 混合率

混合率の測定結果を図 4.1-35～図 4.1-37 に示す。図 4.1-35 は砂ベントナイト、図 4.1-36 は礫ベントナイト（2005）、図 4.1-37 は礫ベントナイト（1005）の結果である。

砂ベントナイトの練混ぜ試験の結果、得られた各練混ぜ機械ごとの混合率の平均値および最大・最小値を図 4.1-38 に示す。また、図 4.1-39 には標準偏差および変動係数を示す。いずれの機械でも混合率の平均値は、設定値（15%）に近い値となった。ばらつきに関しては、連続式よりバッチ式の方がばらつきは少ない結果となった。したがって、ばらつきの少ない材料を製造したい場合は、バッチ式の方が連続式より高い精度の混合率で製造できると言える。

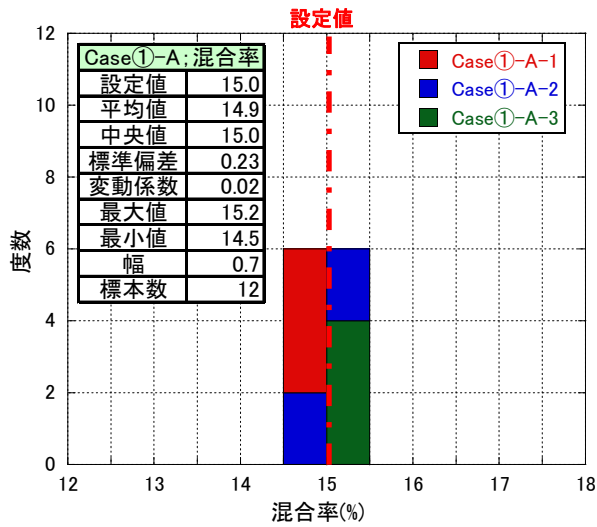
なお、ミストブレンダーに関しては、小型試験機を用いた試験であり、実機と違う製造工程（定量供給機等を用いて含水比調整前の砂とベントナイトの混合をしていないことと、空練り後に一箇所に集め加水装置へ投入していること）になるため、加水前後の混合率を比較することで、MY-BOX の材料混合に対して評価した。混合率試験の結果、加水前後において混合率に大きな差は無く、平均値 14.9%、標準偏差 0.26～0.29 となった。

礫ベントナイトの結果を図 4.1-40 および図 4.1-41 には示す。礫ベントナイトに関してはバッチ式のミキサーのみで試験を行った。混合率は、砂ベントナイトと同様に設定値（15%）に対し近い値となった。また、標準偏差、変動係数とも砂ベントナイトに比べて礫ベントナイトの方が大きくなっている。

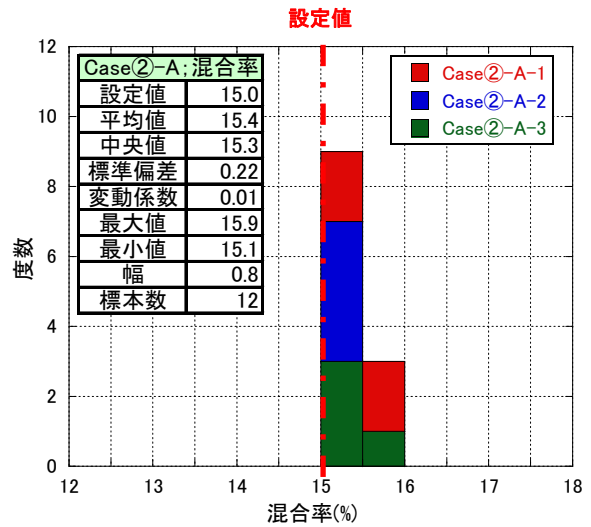
連続式の機械に関しては、連続で練混ぜている前半、中間、後半で材料を採取し経時的な品質の確認を行った。図 4.1-42 に結果を示す。自走式土質改良機（SR-2000G）、ミストブレンダーとも経時的な変化はそれほど大きくはない。また、ミストブレンダーによる加水前後における測定結果を図 4.1-43 に示す。同図からも、加水前後における混合率の違いはほとんど無いことが分かる。

b. 粒度分布

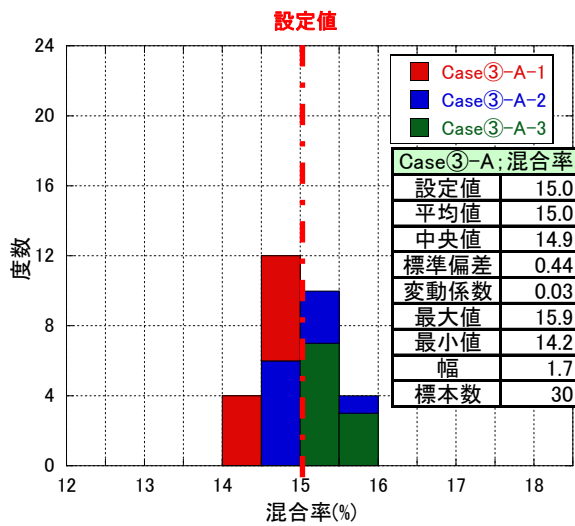
練混ぜ後の材料の粒度分布を図 4.1-44～図 4.1-46 に示す。図 4.1-44 は砂ベントナイト、図 4.1-45 は礫ベントナイト（2005）、図 4.1-46 は礫ベントナイト（1005）の結果である。各材料とも、練混ぜ機械による粒度の違いはほとんど無いことが分かる。



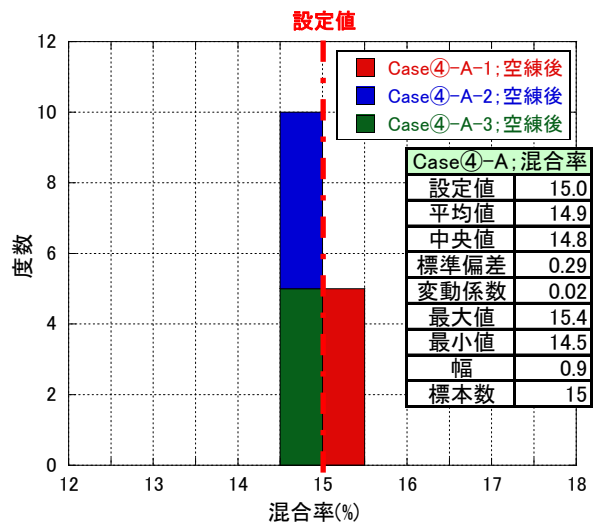
(a) パグミル



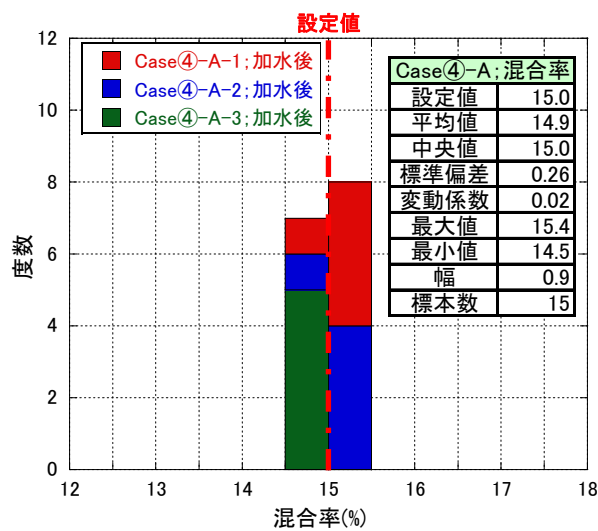
(b) アイリッヒ



(c) 自走式土質改良機 (SR-2000G)

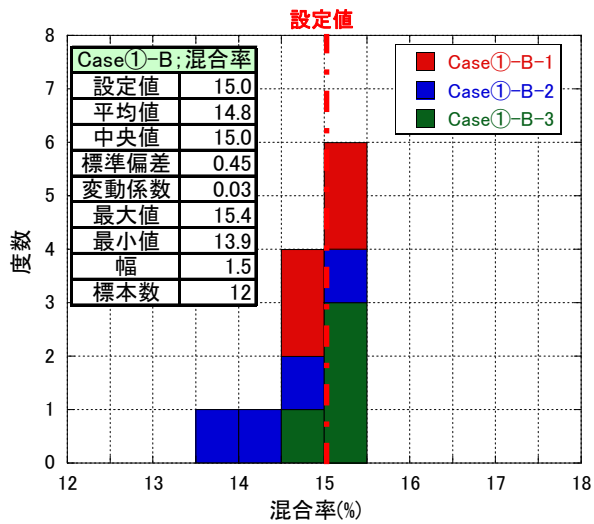


(d) ミストブレンダー (加水前)

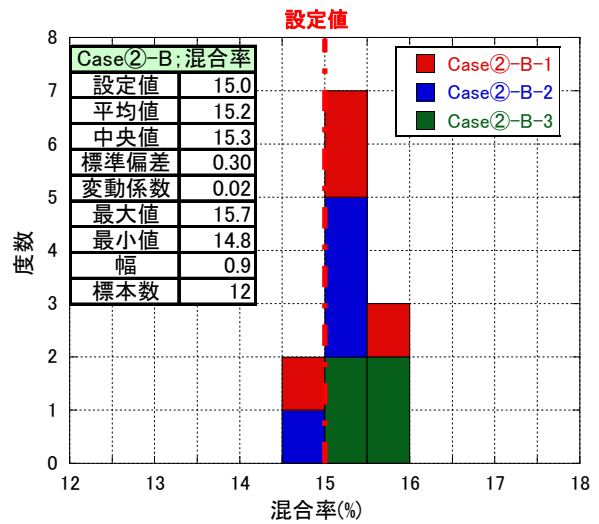


(e) ミストブレンダー (加水後)

図 4.1-35 各練混ぜ機械で練混ぜた材料の混合率測定結果；砂ベントナイト

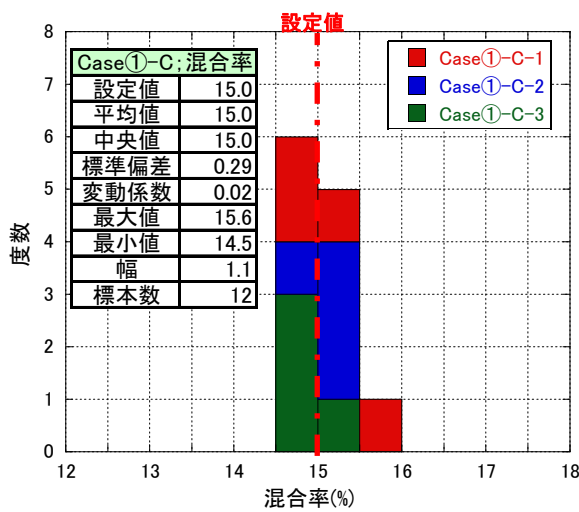


(a) パグミル

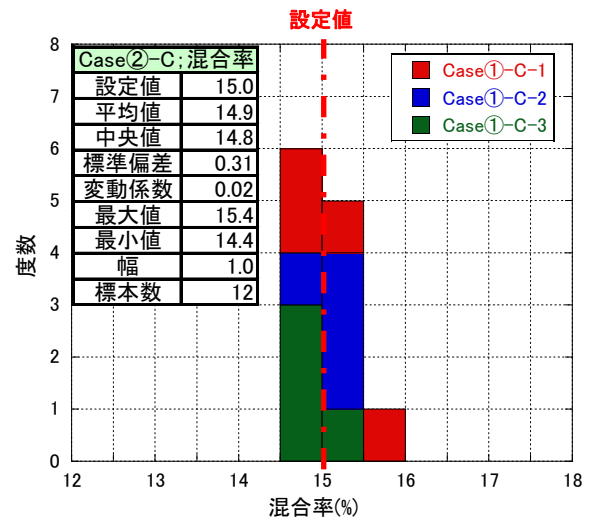


(b) アイリッヒ

図 4.1-36 各練混ぜ機械で練混ぜ材料の混合率測定結果；礫ベントナイト（2005）



(a) パグミル



(b) アイリッヒ

図 4.1-37 各練混ぜ機械で練混ぜた材料の混合率測定結果；礫ベントナイト（1005）

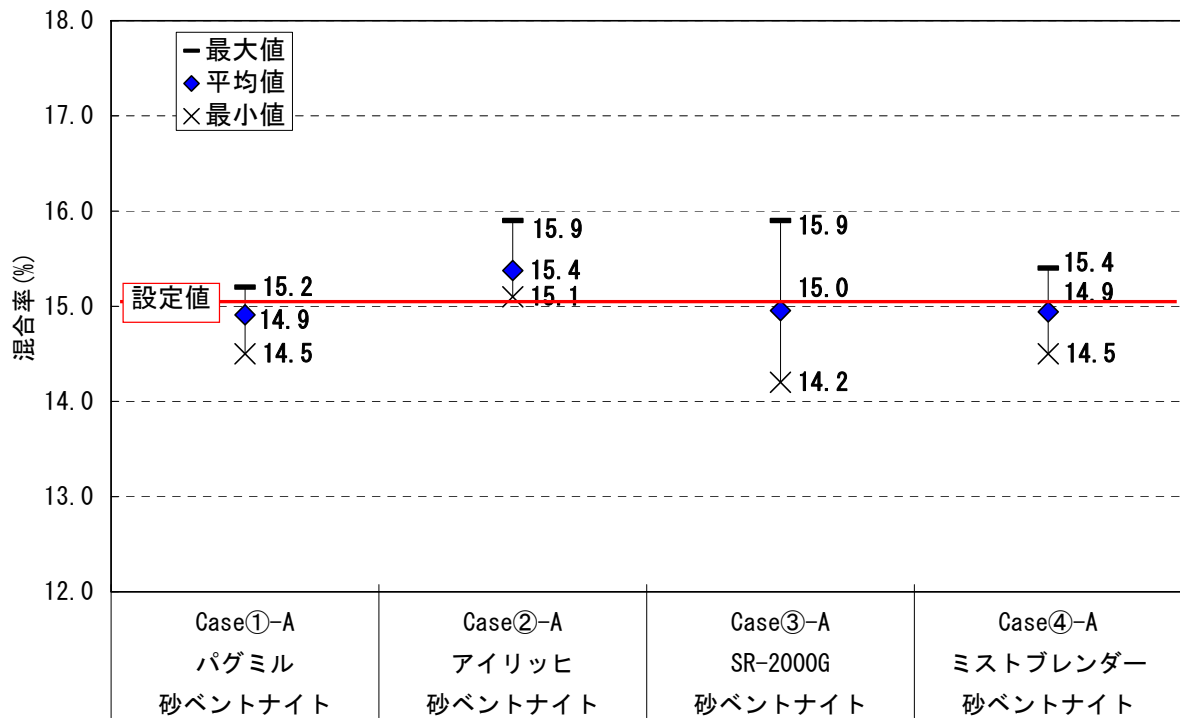


図 4.1-38 練混ぜ材料の混合率測定結果の平均値および最大・最小値の比較；砂ベントナイト

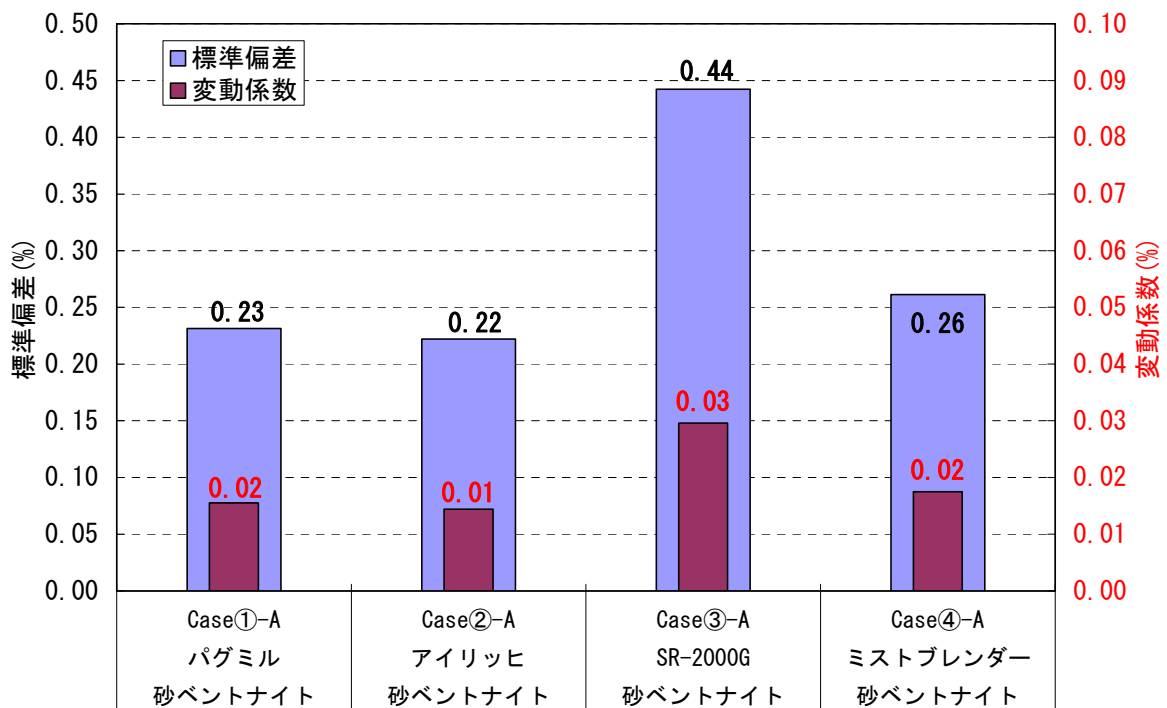


図 4.1-39 練混ぜ材料の混合率測定結果の標準偏差の比較；砂ベントナイト

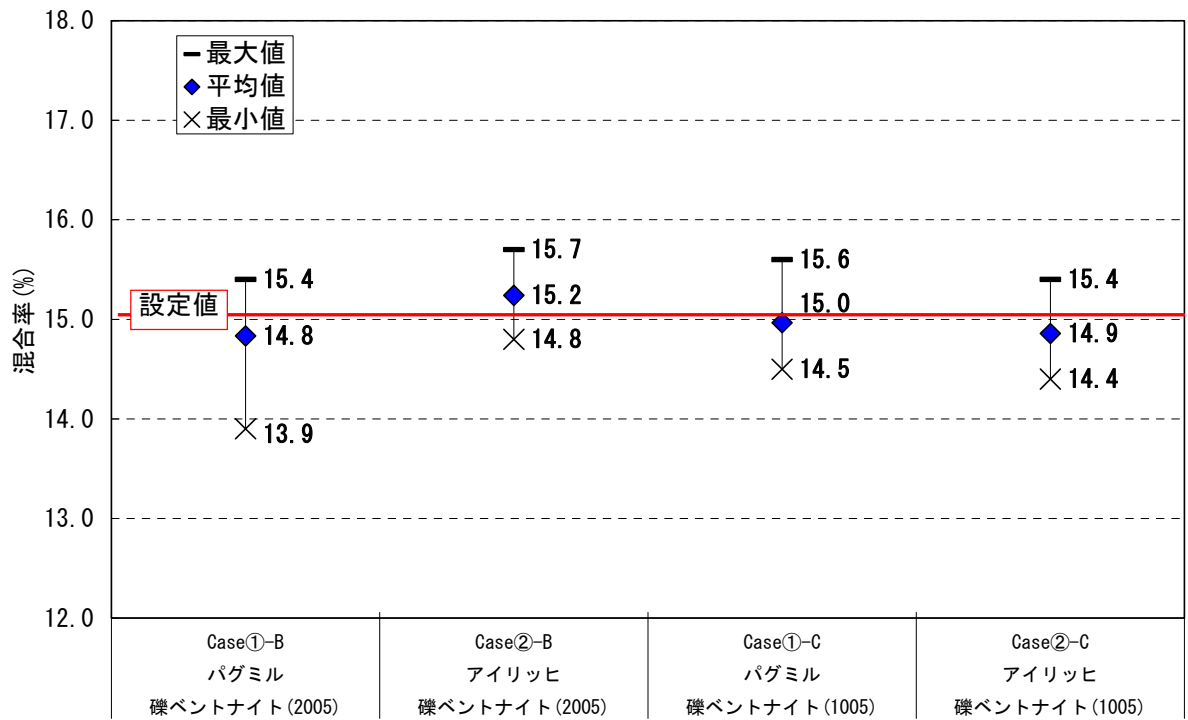


図 4.1-40 練混ぜ材料の混合率測定結果の平均値および最大・最小値の比較；礫ベントナイト

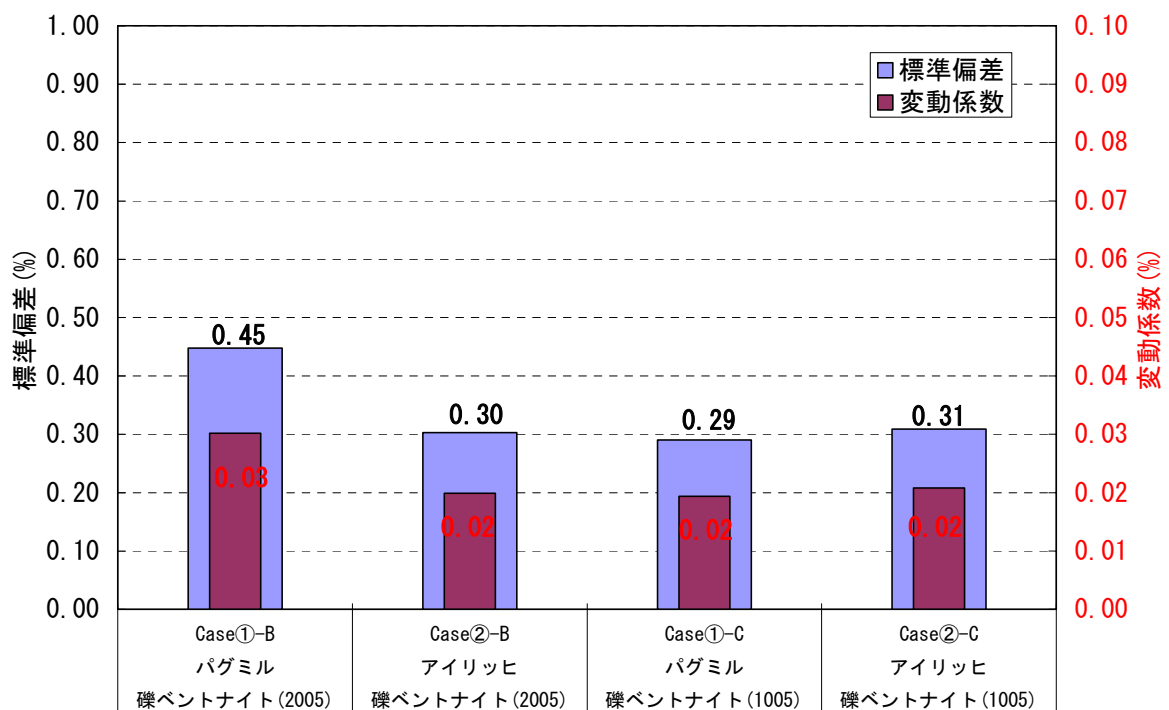
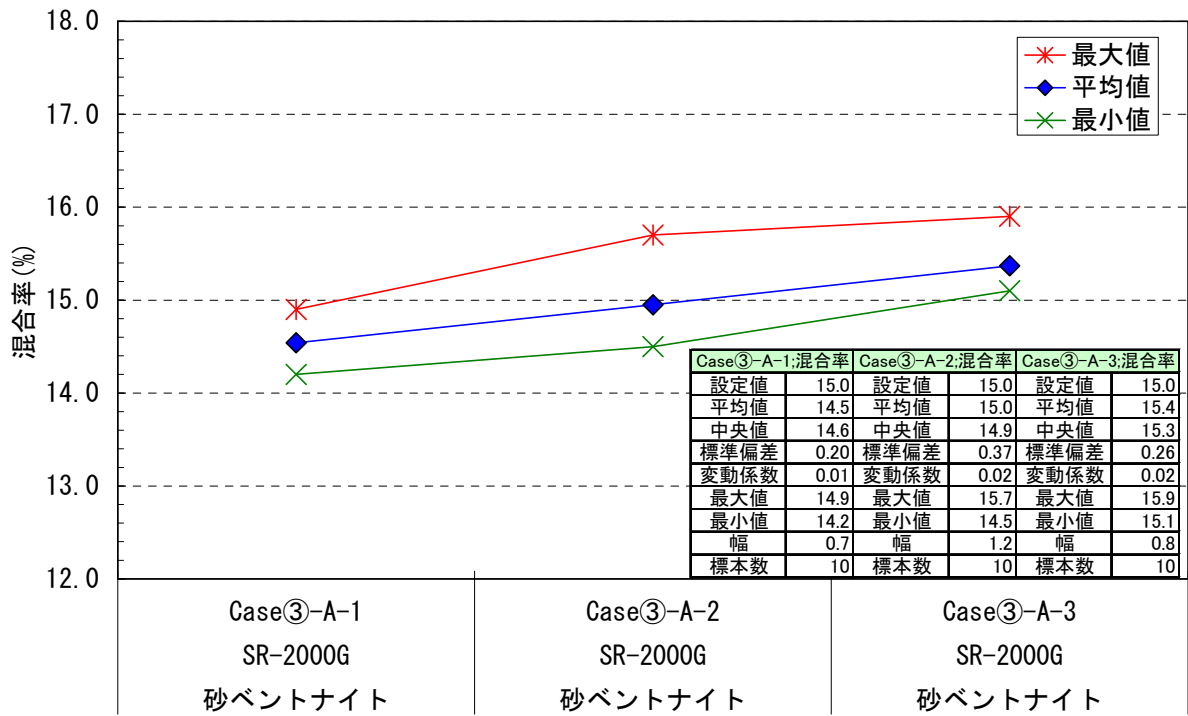
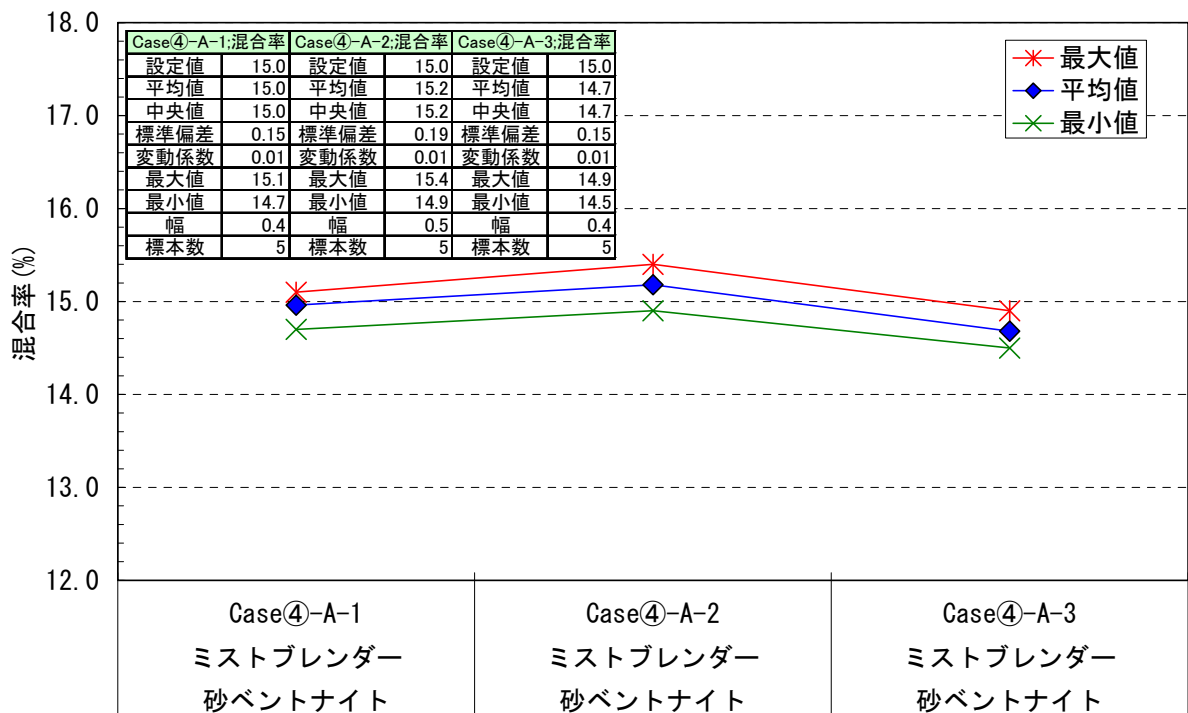


図 4.1-41 練混ぜ材料の混合率測定結果の標準偏差の比較；礫ベントナイト



(a) 自走式土質改良機 (SR-2000G)



(b) ミストブレンダー

図 4.1-42 連続式機械を用いて製造した材料の混合率測定結果の時間的変化

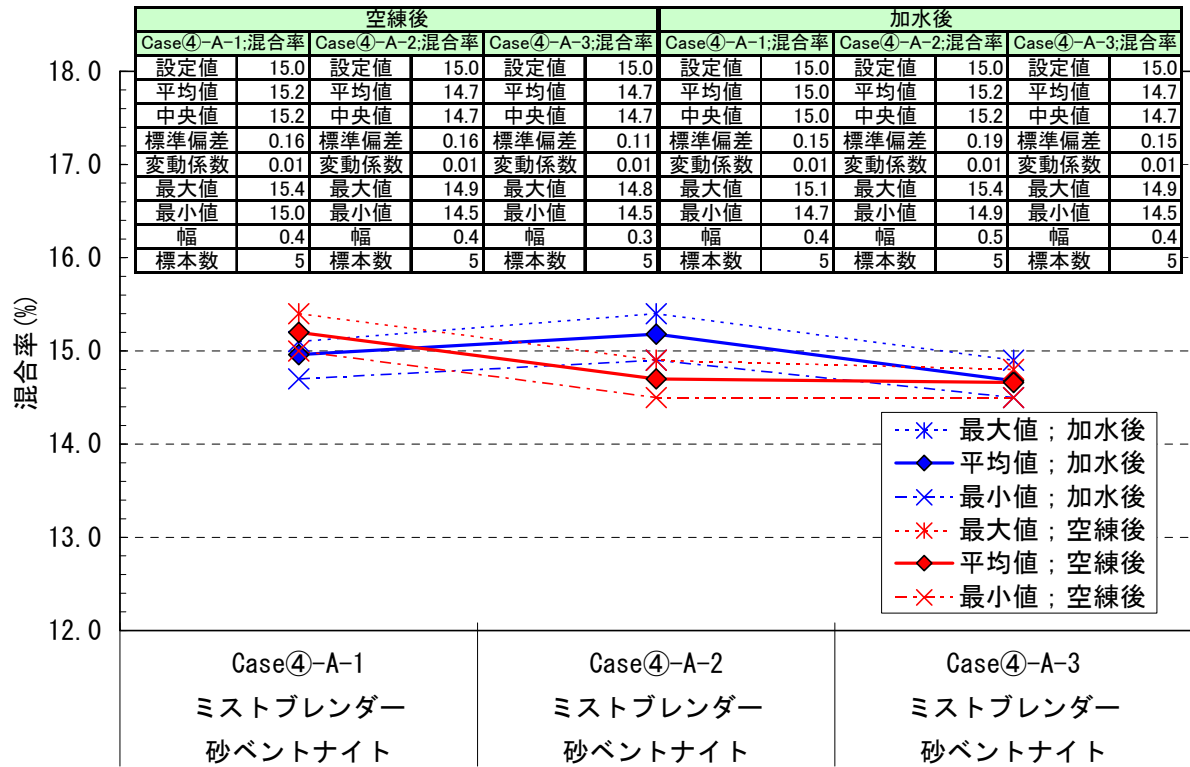


図 4.1-43 ミストブレンダーによる混合の空練後と加水後の混合率の比較

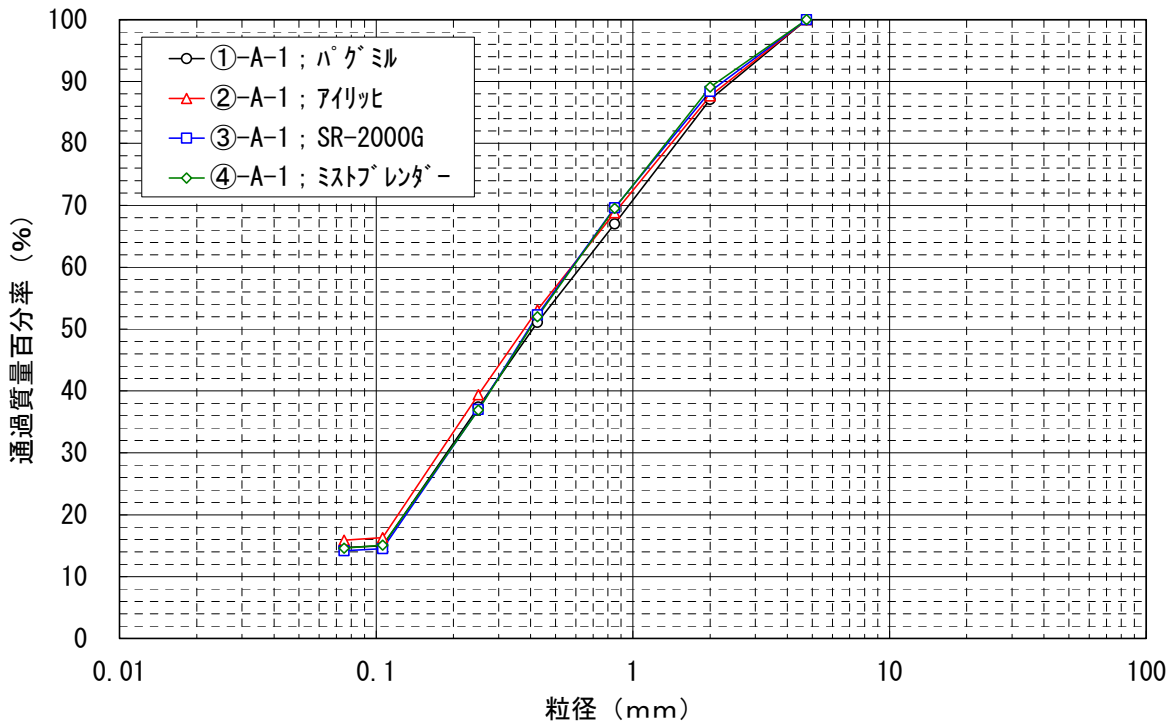


図 4.1-44 練混ぜ後の粒度分布の比較；砂ベントナイト

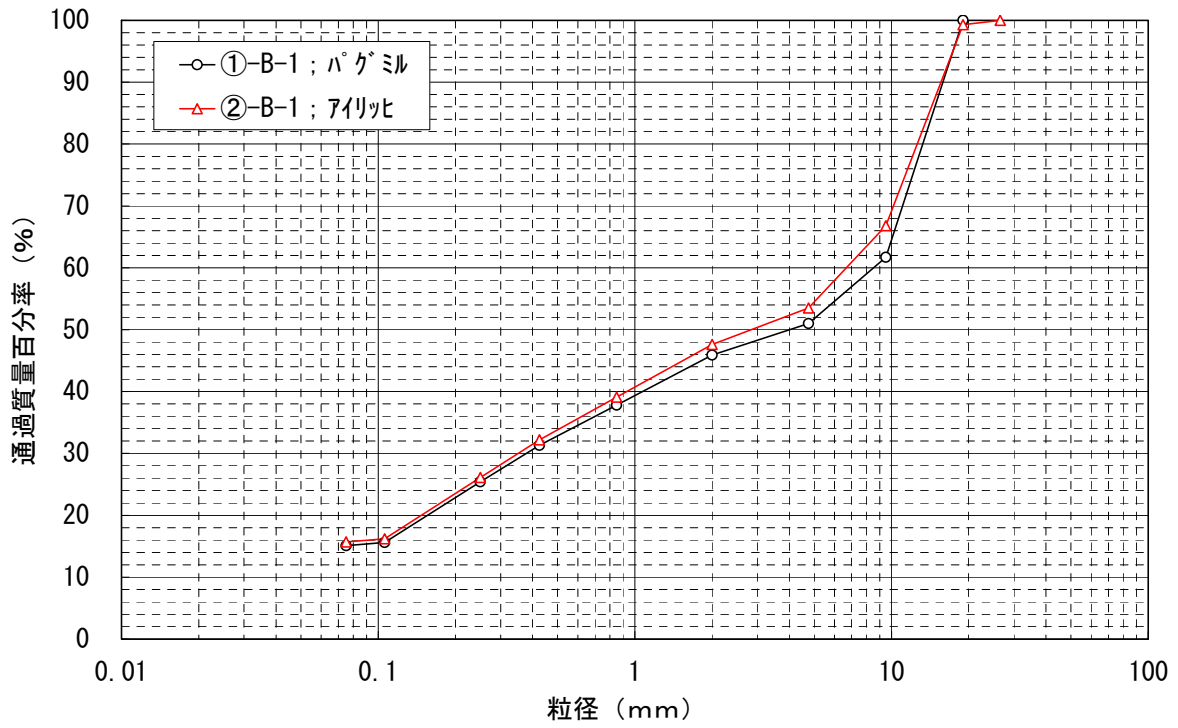


図 4.1-45 練混ぜ後の粒度分布の比較；礫ベントナイト（2005）

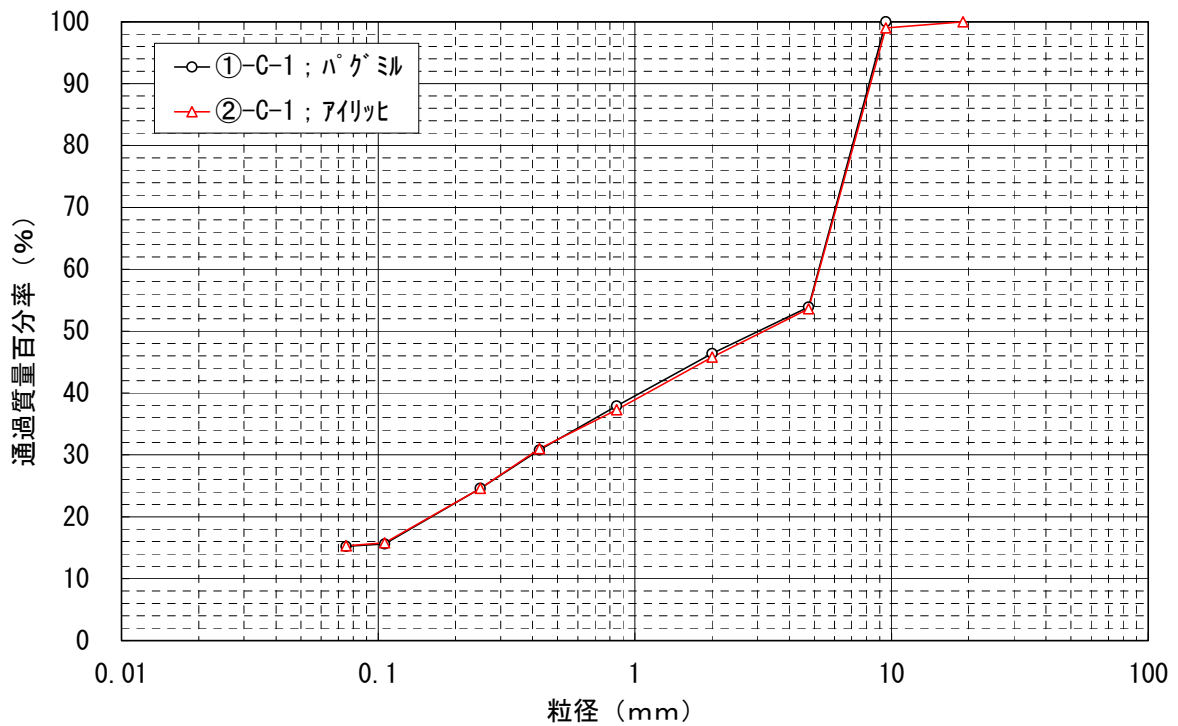


図 4.1-46 練混ぜ後の粒度分布の比較；礫ベントナイト（1005）

3) 締固め性

締固め性は、室内で練混ぜた材料で得られた A 法による締固め曲線に、各機械で製造した材料を同様に A 法により締固めた時の結果（各含水比に対する乾燥密度）をプロットする形で整理した。その結果を図 4.1-47～図 4.1-49 に示す。

締固めた材料は、概ね A 法による締固め曲線上にあり、それぞれの機械で練混ぜられた材料の締固め性の差は小さいと言えるが、詳細にみると、砂ベントナイトでは、ミストブレンダー、自走式土質改良機（SR-2000G）、パグミルの順に最適含水比に近い含水比での締固めとなっていることから、それに応じて乾燥密度が大きくなっていると考えられ、これらの締固め性の差はないと考えられる。ただし、同じ含水比領域のミストブレンダーとアイリッヒを比較すると、アイリッヒの方が締固め性は良い結果となっている。

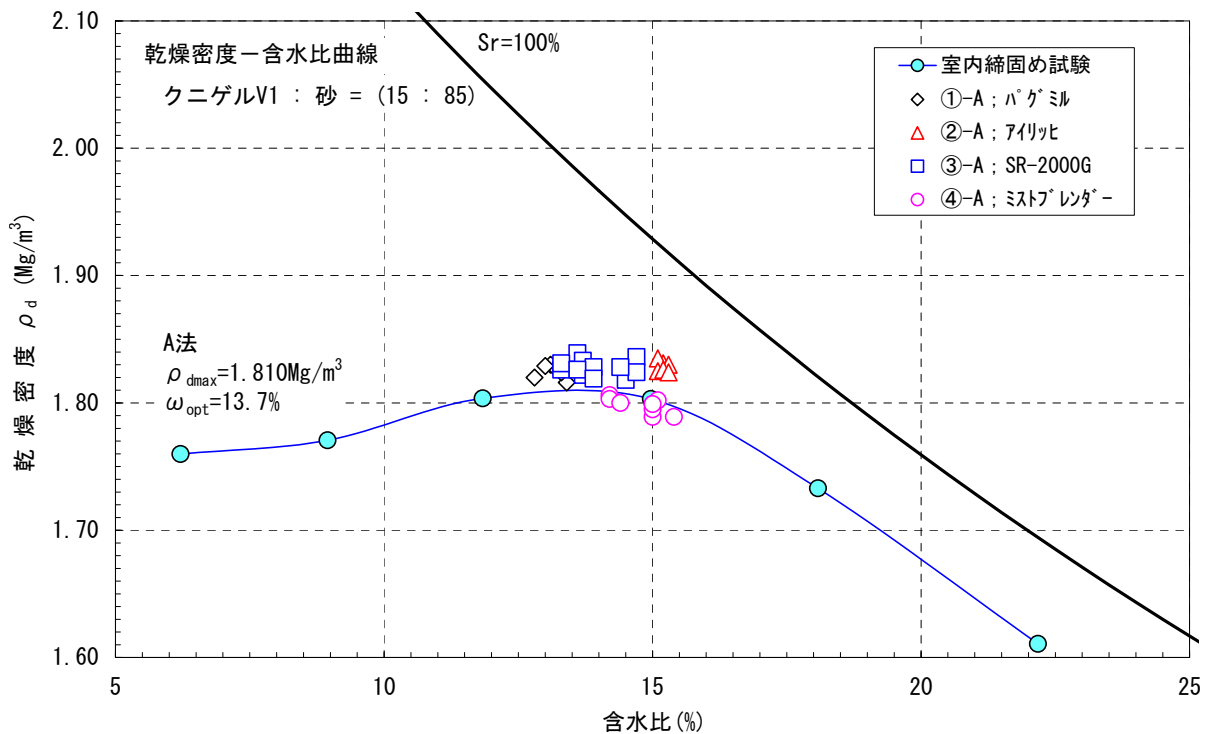


図 4.1-47 練混ぜ後の材料の締固め性の比較；砂ベントナイト

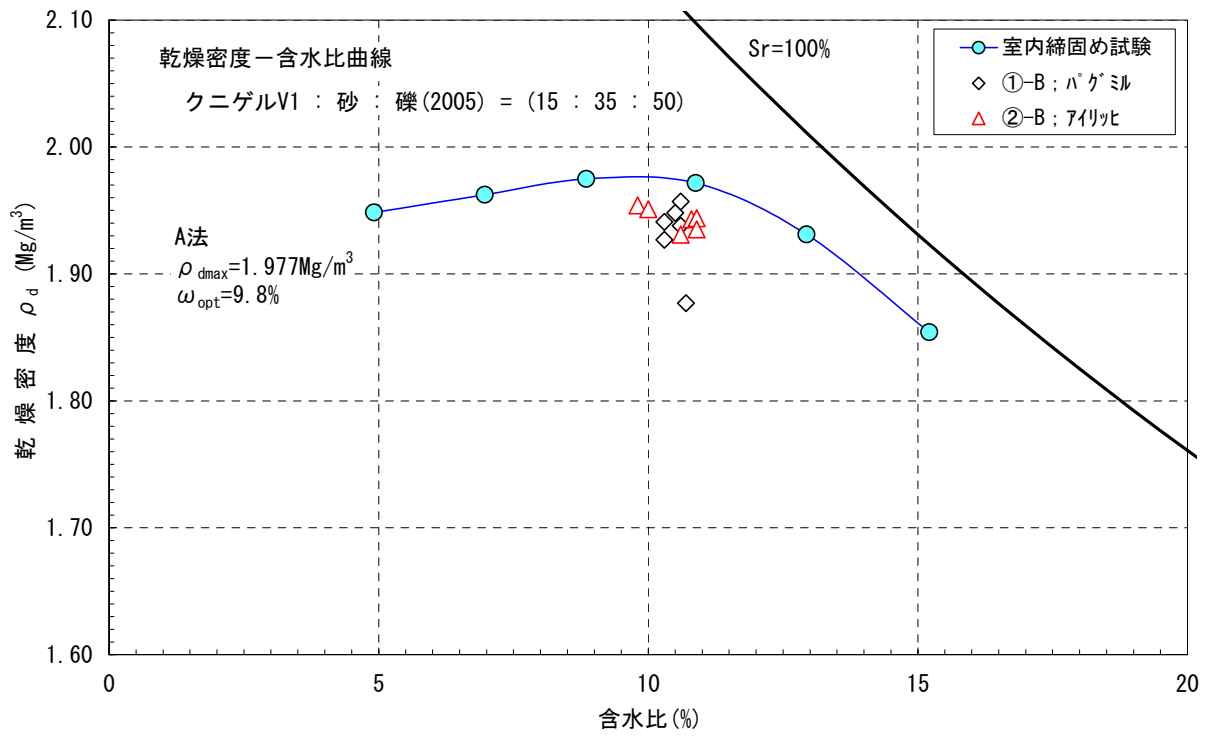


図 4.1-48 練混ぜ後の材料の締固め性の比較；礫ベントナイト（2005）

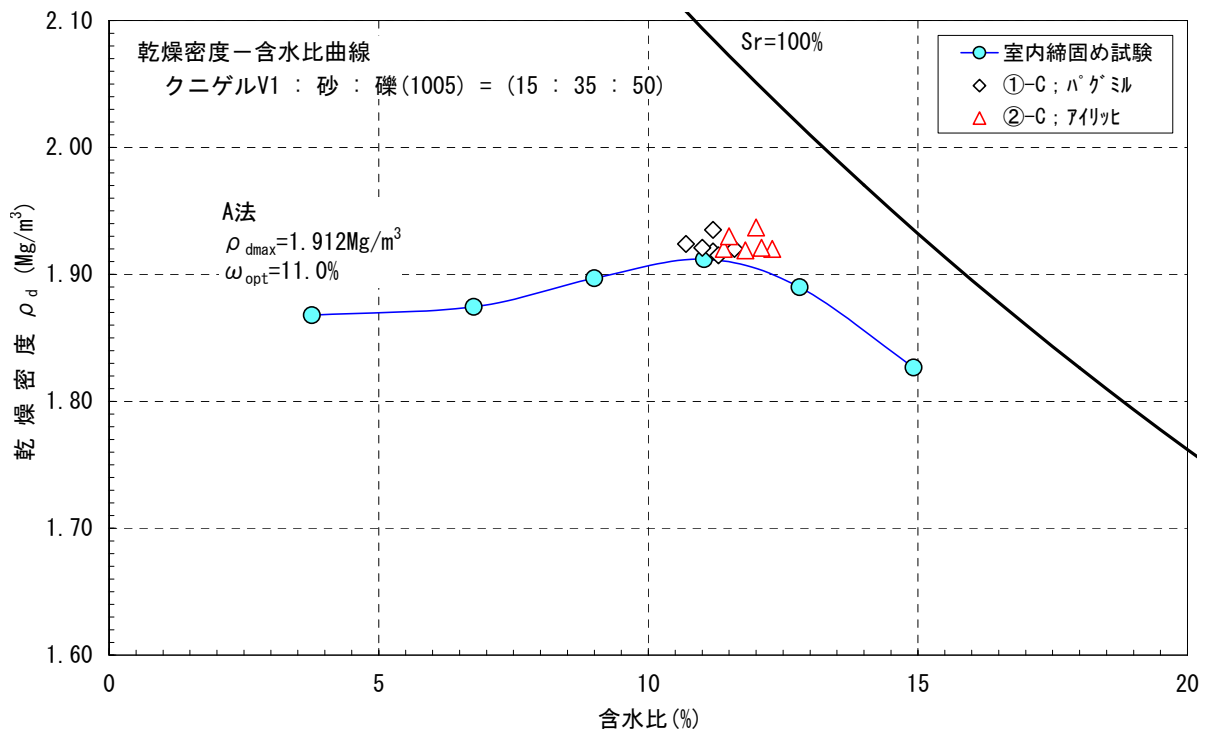


図 4.1-49 練混ぜ後の材料の締固め性の比較；礫ベントナイト（1005）

4) 透水性

透水試験は、各機械で製造した材料を突き固め試験の A 法のエネルギーで締固めた供試体を用いて実施した。本試験方法は、JIS を参考としているが、給水側と排水側で圧力をかけると、それによって供試体の飽和度を評価することを特徴としている。以下に試験手順を示す。

a. 供試体の飽和過程

設定含水比および設定乾燥密度にて透水試験容器内に作製した供試体は透水試験装置にセッティングする前に水浸脱気にて飽和促進する。水浸脱気法の手順を以下に記す。

- ① 水槽に透水セルが完全に浸るだけのイオン交換水を準備し、あらかじめ脱気しておく。
- ② 透水セルを、注水口と排水口のバルブを開いた状態で水浸する。なお、初期に供試体内に残存している空気量が多くて、この方法だと水浸脱気後も供試体内に空気が残存すると懸念される場合は、片側を水中から出した状態で、もう一方側からのみ浸潤をさせて飽和促進を図る。
- ③ 真空ポンプとレギュレーターを用いて圧力を調節しながら、-0.02、-0.04、-0.06、-0.08、-0.095MPa と徐々に減圧する。
- ④ 各段階では 2 時間以上、最後に-0.095MPa 以下まで減圧した状態では 3 時間以上圧力を維持する。
- ⑤ 減圧と同じ要領で段階に分けて徐々に加圧し、最後に大気圧まで上げて 6 時間以上放置する。

この減圧ー加圧を 2 回繰り返す。この後、下記に示す手順で飽和度の確認を行い、飽和度が不足している場合（概ね 95%以下）にはさらに②～⑤の工程を繰り返す。

【飽和度確認の手順】

河野・西垣による方法[8]により、供試体内に背圧 ΔP を作用させたときに供試体内に流入した水量 ΔV を計測することで飽和状態を確認する。飽和度 $S_r(\%)$ は次式から求められる。

$$S_r = \left(\frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_v} \right) \quad \text{式 4.1-1}$$

ここで、 P_0 は初期間隙圧（絶対圧力）、 V_v は供試体の空隙の体積、 H はある温度下における空気の溶解度に相当するパラメータ（ヘンリーの係数）である。なお、本試験ではヘンリーの係数は 0 とする。また、 P_0 は大気圧あるいは間隙水圧にほぼ等しいと考えられるが、厳密な値の決定は難しいため、背圧を 0→50→100kPa と漸増する過程で一つ前段階の背圧が間隙圧に相当すると設定した。

供試体の水浸脱気終了後、透水試験前に実施する飽和度測定の手順を以下に記す。

- ① 試験容器を脱気水槽から取り出し、透水試験装置へ設置し、流入側と流出側のビュレットを接続する。この時、試験容器注水口、排水口ともにバルブは開放状態にしておく。

- ② 注排水ビュレットの水位変化がないことを確認後、排水側バルブを閉じ、注水側から所定の圧力 ΔP で注水を開始する（0→50→100kPaの二段階）。測定の概要を図 4.1-50(a)に示す。注水側ビュレットの流入量 ΔV を定期的に測定し、上記の式により供試体の飽和度を求める。流入量が増えると計算上の飽和度は下がる。なお、圧力を負荷したことによりシンフレックスチューブの変形が生じる場合もある。事前に、空容器にて圧力注入を行い、変形の有無を確認しておく。変形が生じる場合は、その影響を補正して飽和度の測定を行うこととする。
- ③ 求めた飽和度の減少幅が0.05%/日未満になったら、流入量の測定を終了する。
- ④ 測定終了時の流入量 ΔV から、上記の式を用いて背圧作用直前の供試体の飽和度を推定する。

以上により供試体の飽和状態を確認した後に透水試験を実施する。上記の式により算出された飽和度が95%以下となった場合は、前述の通り、水浸脱気を再度行う。

b. 透水試験過程

透水試験は差圧（背圧負荷）型変水位透水試験を基本とする。試験の手順を以下に記す。

- ① 飽和度測定過程を終了し後、排水側へ注水側と同一の圧力を設定する。
- ② 注水側を所定の圧力に増加させ、設定の動水勾配になるように圧力を調整し、注水側、排水側の各通水量の測定を開始する。透水試験の概要を図 4.1-50 (b)に示す。
- ③ 流入量、流出量を2日に1回程度の間隔で測定する。通水量の測定に用いる二重管ビュレットは、流入側、流出側ともに10ml容量（最小目盛は0.05ml）である。これらの通水量測定と同時に注水圧力、水温も記録する。
- ④ 透水係数が安定した状態で4点以上の値が得られるまで、通水を続ける。
- ⑤ 試験終了時は試験容器を解体し、透水円筒内の供試体を取り出して全量で含水比試験を実施する。得られた含水比を用いて、供試体の飽和度を算出する。

流入側、流出側の各二重管ビュレットを使用した差圧型変水位透水試験であるため、透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$ は、以下の式にて算定する[9]。

$$k = \frac{a_{in} \cdot a_{out} \cdot L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{式 4.1-2}$$

ここで、 a_{in} ：注入側のビュレットの断面積(m^2)、 a_{out} ：排水側のビュレットの断面積(m^2)、 L ：供試体長さ(m)、 A ：供試体断面積(m^2)、 t_1 ：測定開始時刻(sec)、 t_2 ：測定終了時刻(sec)、 h_1 ：時刻 t_1 における流入側と流出側との水頭差(m)、 h_2 ：時刻 t_2 における流入側と流出側との水頭差(m)である。

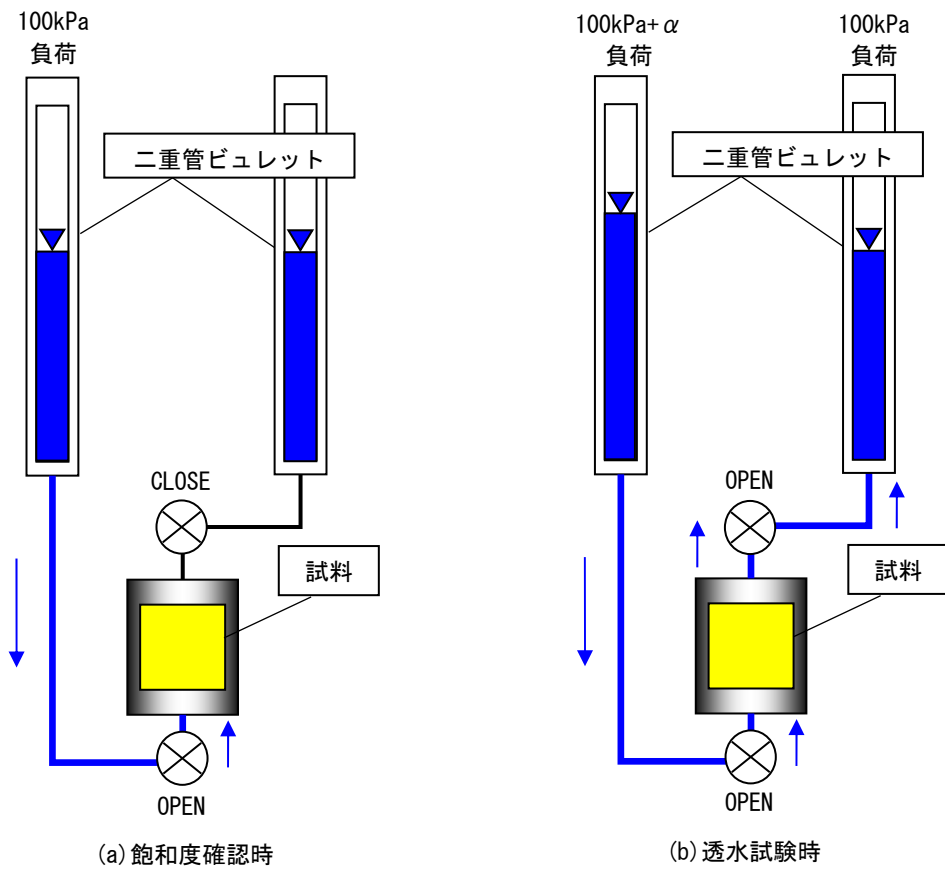


図 4.1-50 飽和度確認および透水試験の概要

透水試験の結果を図 4.1-51～図 4.1-53 に示す。図 4.1-51 は砂ベントナイト、図 4.1-52 は礫ベントナイト（2005）、図 4.1-53 は礫ベントナイト（1005）の結果である。また、表 4.1-16 に各供試体の試験時の乾燥密度と含水比を示す。同一仕様の練り混ぜ材料でも締固め後の乾燥密度は若干異なっているが、得られた透水係数は同じ材料、同じ練り混ぜ機械での練り混ぜでも差がある結果となっている。よって練り混ぜ方法の違いによる透水性の差は明確には見られない。

砂ベントナイトに関して、透水試験に用いた供試体の乾燥密度と透水係数の関係を図 4.1-54 に示す。乾燥密度は 1.80～1.85Mg/m³ の範囲だが、乾燥密度が大きくなると透水係数が小さくなる傾向は見受けられるが、得られた透水係数に大きな違いはない。すなわち、練り混ぜ方法の違いによる練り混ぜ後の材料の透水性の差は小さいといえる。

表 4.1-16 透水試験用供試験体の仕様

機械	材料	ケース	乾燥密度(Mg/m ³)	含水比(%)
パグミル	砂ベン	①-A-2	1.833	13.1
		①-A-3	1.845	12.2
	礫ベン 2005	①-B-2	1.932	10.2
		①-B-3	1.942	9.9
	礫ベン 1005	①-C-2	1.914	10.7
		①-C-3	1.914	11.5
アイリッヒ	砂ベン	②-A-2	1.820	15.1
		②-A-3	1.817	15.3
	礫ベン 2005	②-B-3	1.948	10.5
		②-B-3	1.931	10.9
	礫ベン 1005	②-C-2	1.917	12.0
		②-C-3	1.910	12.1
SR-2000G	砂ベン	③-A-2	1.814	13.1
		③-A-3	1.820	13.6
ミストブレンダー	砂ベン	④-A-2	1.796	15.1
		④-A-3	1.800	14.8

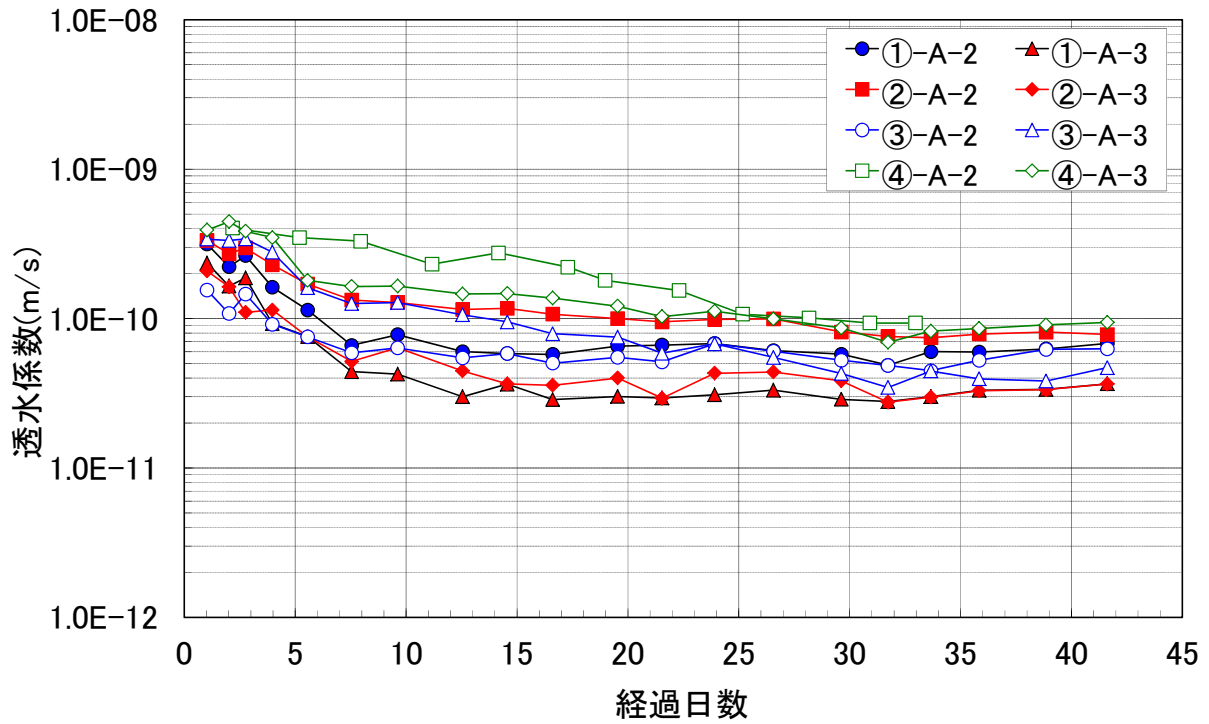


図 4.1-51 練混ぜ後の材料の透水性の比較；砂ベントナイト

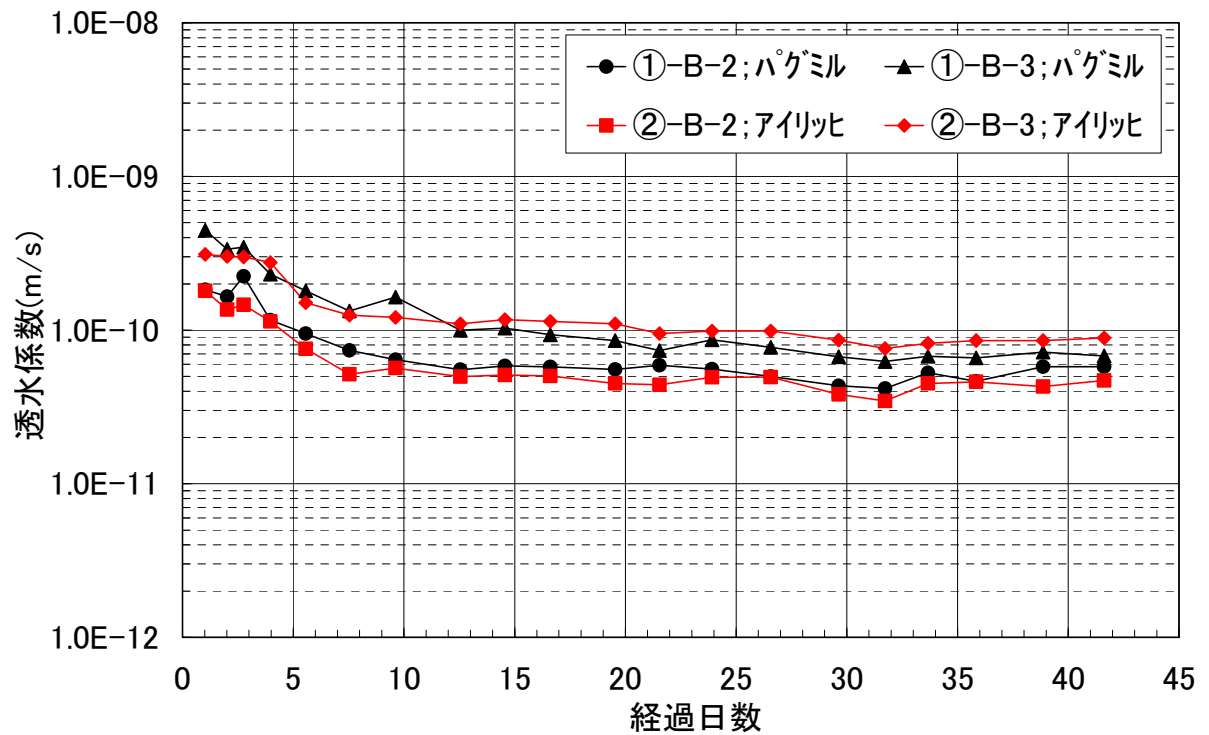


図 4.1-52 練混ぜ後の材料の透水性の比較；礫ベントナイト（2005）

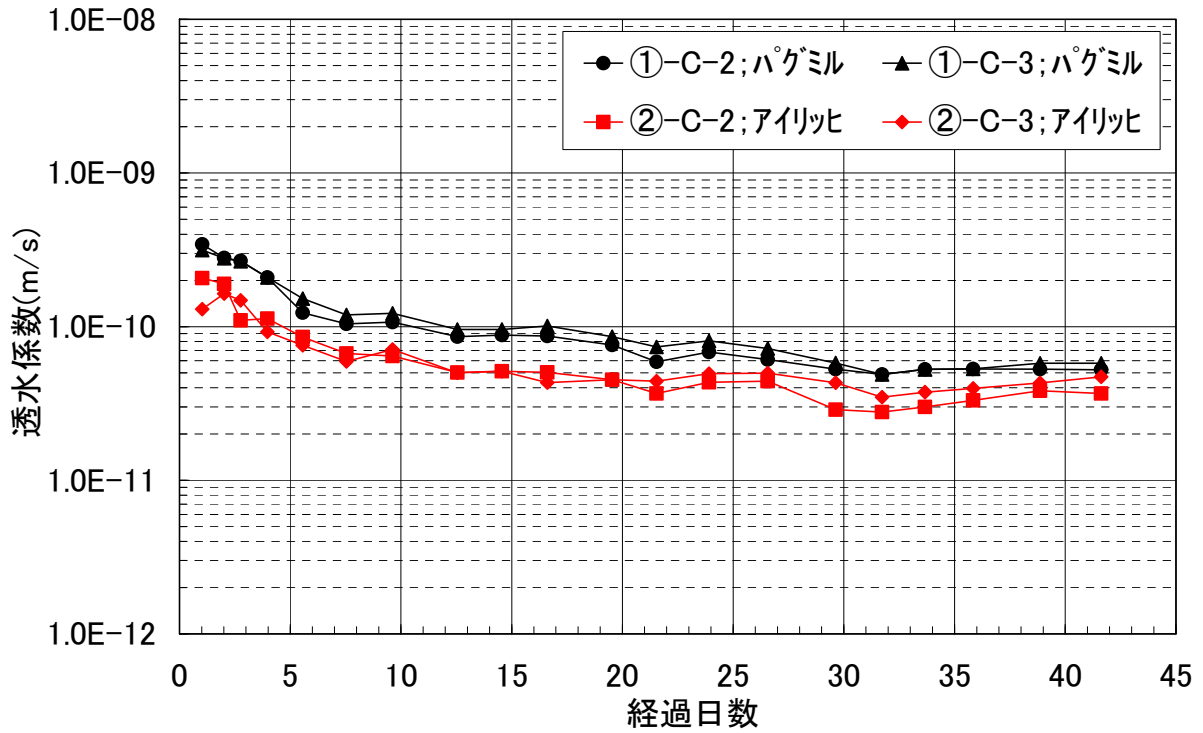


図 4.1-53 練混ぜ後の材料の透水性の比較；礫ベントナイト（1005）

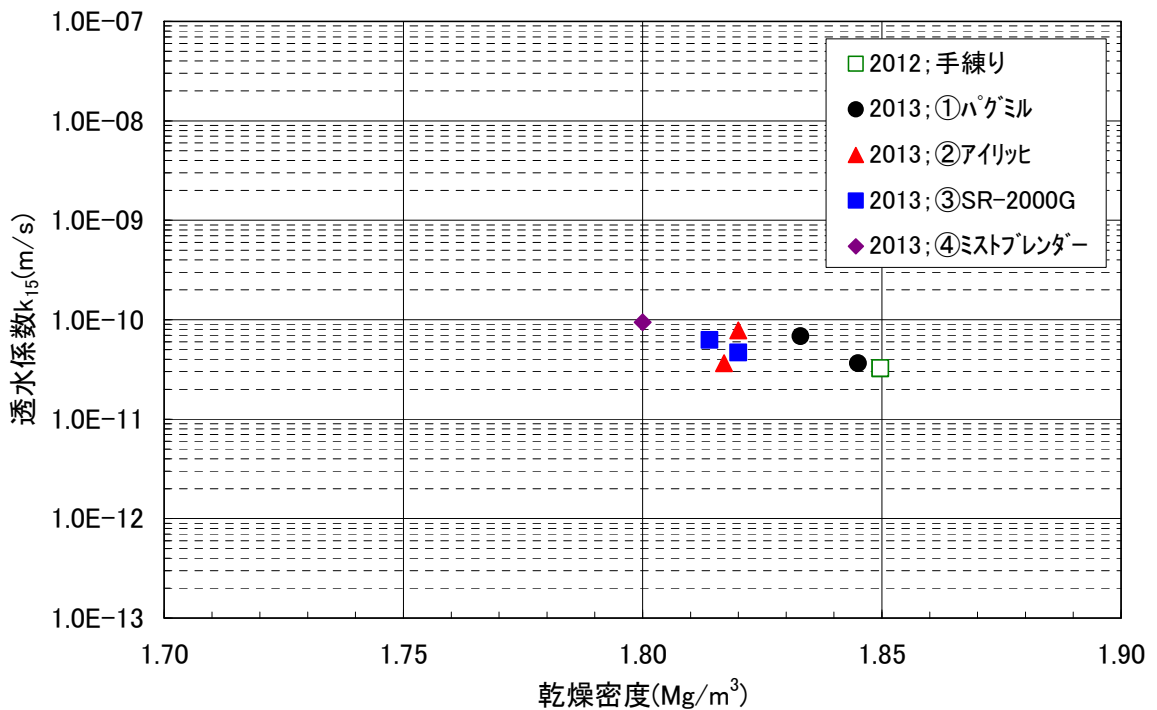


図 4.1-54 練混ぜ後の材料の透水係数と乾燥密度の関係；砂ベントナイト

(4) 材料練混ぜ試験結果のまとめ

材料練混ぜ試験の目的は、上部埋戻し材の材料としてベントナイト（クニゲル V1）および砂等を使用して、複数の練混ぜ機械、練混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の材料練混ぜ試験を実施し、練混ぜ後の品質を比較検討して、練混ぜ方法、練混ぜ機械、および材料配合の違いによる混合率および含水比のばらつきの程度を確認するものである。

試験標本数は、練混ぜ機械により製造能力に応じて設定している。そのため、ばらつきの評価については、最大値・最小値・平均値、および参考として標準偏差についてまとめた。以下、品質評価項目ごとに試験結果を整理する。

1) 含水比

・砂ベントナイトの場合、バッチ式は、パグミルが最大値 14.0%、最小値 12.6%、平均値 13.3%、標準偏差 0.33、アイリッヒが最大値 16.1%、最小値 14.5%、平均値 15.2%、標準偏差 0.32 となるが、連続式の場合は、SR-2000G が最大値 15.2%、最小値 12.6%、平均値 13.9%、標準偏差 0.62、ミストブレンダーが最大値 16.1%、最小値 14.1%、平均値 15.0%、標準偏差 0.42 となり、連続式の最大値と最小値の差は 2～3%程度であるのに対して、バッチ式のばらつきは小さく、最大値と最小値の差は 1～2%程度であった。

・バッチ式で実施した礫ベントナイト（2005）の場合、パグミルが最大値 10.9%、最小値 9.3%、平均値 10.1%、標準偏差 0.44、アイリッヒが最大値 12.3%、最小値 9.7%、平均値 11.1%、標準偏差 0.66、礫ベントナイト（1005）の場合、パグミルが最大値 11.8%、最小値 10.7%、平均値 11.2%、標準偏差 0.26、アイリッヒが最大値 12.9%、最小値 11.1%、平均値 12.1%、標準偏差 0.43、であり、礫ベントナイトでも最大値と最小値の差は 1～2%程度であった。

2) 混合率

・設定値（15%）と平均値のずれは、バッチ式と連続式の違いは見られず、14.9%～15.4%の範囲となり全ての機械で同じ程度であった。

・ばらつきは、砂ベントナイトの場合、バッチ式は、パグミルが最大値 15.2%、最小値 14.5%、平均値 14.9%、標準偏差 0.22、アイリッヒが最大値 15.9%、最小値 15.1%、平均値 15.4%、標準偏差 0.23 となるが、連続式の場合は、SR-2000G が最大値 15.9%、最小値 14.2%、平均値 15.0%、標準偏差 0.44、ミストブレンダーが最大値 15.4%、最小値 14.5%、平均値 14.9%、標準偏差 0.29 となった。連続式の最大値と最小値の差は 0.5～1%程度であるのに対して、バッチ式のばらつきは小さく、最大値と最小値の差は 0.5%以内であった。ただし、本試験のミストブレンダーは定量供給機を使用していないため、MY-BOX による混合に対する評価である。今後実規模機械による試験を行うことが望まれる。

・バッチ式で実施した礫ベントナイト（2005）の場合、パグミルが最大値 15.4%、最小値 13.9%、平均値 14.8%、標準偏差 0.45、アイリッヒが最大値 15.7%、最小値 14.8%、平均値 15.2%、標準偏差 0.30、礫ベントナイト（1005）の場合、パグミルが最大値 15.6%、最小値 14.5%、平均値 15.0%、標準偏差 0.29、アイリッヒが最大値 15.4%、最小値 14.4%、

平均値 14.9%、標準偏差 0.31、であり、礫ベントナイトは最大値と最小値の差は 1.0～1.5% 程度であった。練混ぜ機械により比較すると、2005 の場合はパグミルに比べアイリッヒのほうがばらつきは小さい傾向を示すが、1005 の場合は、いずれの機械もばらつきは同程度となった。

・連続式の経時変化については、SR-2000G の場合、標準偏差 0.20→0.37→0.26 と変化しているのに対し、ミストブレンダーの場合は、標準偏差 0.15→0.19→0.15 と変動幅は小さい。ただし、本試験のミストブレンダーは定量供給機を使用していないため、MY-BOX による混合に対する評価である。今後実規模機械による試験を行うことが望まれる。

また、ミストブレンダーの加水前後（空練後、加水後）の混合率の平均値は、空練後が 14.7～15.2%、加水後が 14.7～15.2% であり、ほぼ設定値（15%）どおりで変化も小さかった。

3) 粒度分布

・各材料とも、練混ぜ機械による粒度分布の違いはほとんど無い結果が得られた。

4) 締固め性

・各機械で製造した材料を土の突固め試験（A 法）により得られた結果と室内で練混ぜた材料（バット練り（手練り））で得られた締固め曲線を比較した。

・砂ベントナイトに関しては、概ね室内で練混ぜた材料で得られた締固め曲線上にあり、それぞれの機械で練混ぜられた材料の締固め性の差はほとんどなかったと考えられる。ただし、同じ程度の含水比であったミストブレンダーとアイリッヒを比較すると、アイリッヒの方が締固め性は良い結果となった。

・礫ベントナイトに関しては、2005 の礫を使用したケース（①-B、②-B）で締固め曲線から乾燥密度が若干低く分布する傾向が見られた。締固め試験は、JIS A 1210（土の締固め試験）に準じて試験を実施したが、モールドの径（A 法：φ 10cm）に対する許容最大粒径は 19mm とされており、2005 の礫は、許容最大粒径に近い A 法のエネルギーにより締固めた時の乾燥密度が低くなった可能性が考えられる。よって、2005 の礫を使用する場合は、例えば B 法による締固めを行う等、モールドによる許容最大粒径より余裕を持った試験方法で実施することが望ましいと考えられる。

5) 透水性

・透水係数の目標値は、平成 24 年度実施の報告書[7]より、施工性確認試験の実施地点周辺地盤の透水係数以下とし、 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を施工確認試験の目標値としている。今年度実施したベントナイト混合土の透水試験の結果、透水係数はすべての試験ケースにおいて、 $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下の透水係数となった。

・練り混ぜ方法の違いによる透水係数を比較すると、同じ練混ぜ材料や練り混ぜ機械であっても乾燥密度が異なる結果となり、練り混ぜ方法の違いによる透水性の差は明確には見られなかった。

・一方、砂ベントナイトに関して、透水試験用供試体の乾燥密度と透水係数の関係を整理すると、乾燥密度は 1.80~1.85Mg/m³ の範囲でばらつく結果となっており、乾燥密度が大きくなると透水係数が小さくなる傾向は見受けられた。ただし、透水係数には 1 桁を超えるような大きな違いはなく、練混ぜ方法の違いによる練混ぜ後の材料の透水性の差は小さい結果となった。

6) 練混ぜ機械の比較

本試験で使用したベントナイト混合土の製造機械は、表 4.1-17 に示すとおりである。

上部埋戻し材に求められる品質は、現段階で具体的に定められていないが、締固め後の目標透水係数の均質性を確保するため、ベントナイト混合率や含水比のばらつきを抑えた均質なベントナイト混合土を製造する必要がある。そのような背景のもと、本試験では、実用的なベントナイト混合土の製造を念頭に置き、バッチ式機械と連続式機械により製造されたベントナイト混合土の品質を確認した。

バッチ式機械は、前述の品質確認試験によると連続式機械に比べ品質のばらつきが少ないが時間あたりの製造能力が小さい。一方、連続式機械は、バッチ式機械の 10~25 倍の時間あたりの製造能力があるため、その分低コストでベントナイト混合土の製造が可能となると考えられるが、品質のばらつきについては、バッチ式機械相当に精度を上げるためには様々な課題が残る結果となった。なお、今回はバッチ式機械として小型の機械を使用しているが、大型の機械を用いることにより製造能力を上げることは可能であるが、サイズアップに伴う課題が出てくると思われる。

自走式土質改良機 (SR-2000G) は、現段階では含水比のばらつきが大きいこと、こまめにキャリブレーションを行う必要があることより、加水目標値に対して加水量の制御に技術開発の余地があると考えられる。

ミストブレンダーは、小型試験機を用いて本試験を実施したため、実規模機械に装備されている材料定量供給機の性能については確認ができなかった。今後は、上記課題を踏まえ試験製造量を増やし、実規模機械を用いた実用的なデータ取得を行うことが望ましいと考えられる。

表 4.1-17 本試験で使用した練混ぜ機械

方式	名称	メーカー	型式	容量 (ℓ)	製造量 (kg)	製造時間 (min)	時間当り製造量 (kg/min)
バッチ式	パグミル	石川島建機 (株)	DAM60	60	35	5	7
	アイリッヒ	日本アイリッヒ (株)	R08-W	75	40	5	8
連続式	自走式土質改良機 (SR-2000G)	日立建機 (株)	SR-2000G	—	2,000	10	200
	ミストブレンダー	前田建設工業 (株)	小型試験機 (プロトタイプ)	—	1,000	15	70

4.2 締固め特性等評価試験

4.2.1 文献調査による試験方法の選定

埋戻し材の施工方法は、平成 24 年度の検討の結果を考慮すると、転圧工法と吹付け工法の二つが本検討の候補に挙げられる。試験空洞での施工確認試験の実施前にそれぞれの工法について試験施工を行い、施工確認試験において実施する施工方法および材料仕様の検討を行う。

試験施工に用いる機械は、最近の余裕深度処分施設における低透水層（緩衝材、ベントナイト単体）や浅地中処分施設における難透水性覆土（ベントナイトと砂の混合材料）を対象に実施された施工試験結果を踏まえて検討する。

図 4.2-1 には、今回の試験と類似の仕様の材料を用いて実施された施工試験において用いられた機械を示す[10]。表 4.2-1 には図 4.2-1(e)の圧力釜式吹付け機を用いて実施された吹付け工法を用いた施工試験のケースを示す。使用するベントナイトはクニゲル V1 で、これを乾燥質量比で 15%混合した材料を用いている。母材として砂のみを用いたケース（砂ベンと称している）と砂と礫を用いたケース（礫ベンと称している）が行われている。礫については、最大粒径の異なる 2 種類の礫が用いられている。砂とベントナイトの混合材に関しては、ホース長やノズル位置の高さをパラメータにして試験を行っているようである。また、転圧工法を用いた施工試験に関しては、砂とベントナイトの混合土（砂ベン）のみに対して試験を実施している。図 4.2-2 には施工試験より得られた密度を室内締固め曲線と比較しており、その結果について示す。(a)は転圧工法、(b)は吹付け工法の結果のようである。転圧工法に関しては、プレートコンパクタによる転圧では得られた密度は低いようだが、それ以外の機械を用いた転圧では、いずれも室内締固め試験 A 法相当の密度は得られていることが分かる。吹付け工法に関しても、室内締固め試験 A 法に近い密度が得られており、砂ベンに比べて礫ベンの方が得られる密度は高かったようである。また、ホース長やノズル位置の高さを変えて試験が行われているが、ここで実施された範囲では、それらの影響は少ないようである。図 4.2-3 には各工法で達成された締固め度を示す。プレートコンパクタを用いた転圧工法以外は、全て締固め度 95%以上を達成しているようである。なお、図 4.2-4 には礫ベンを用いた吹付け施工における吹付け前後の材料の粒度分布を示す。吹付け前後で材料の粒度は大きく異なっているようである。これは、リバウンド材に礫が多く含まれるため、結果として施工された材料のベントナイト混合率は高いという結果となっている。



(a)プレートコンパクタ



(b)バイブロコンパクタ



(c)ハンドガイド振動ローラ



(d)小型振動ローラ

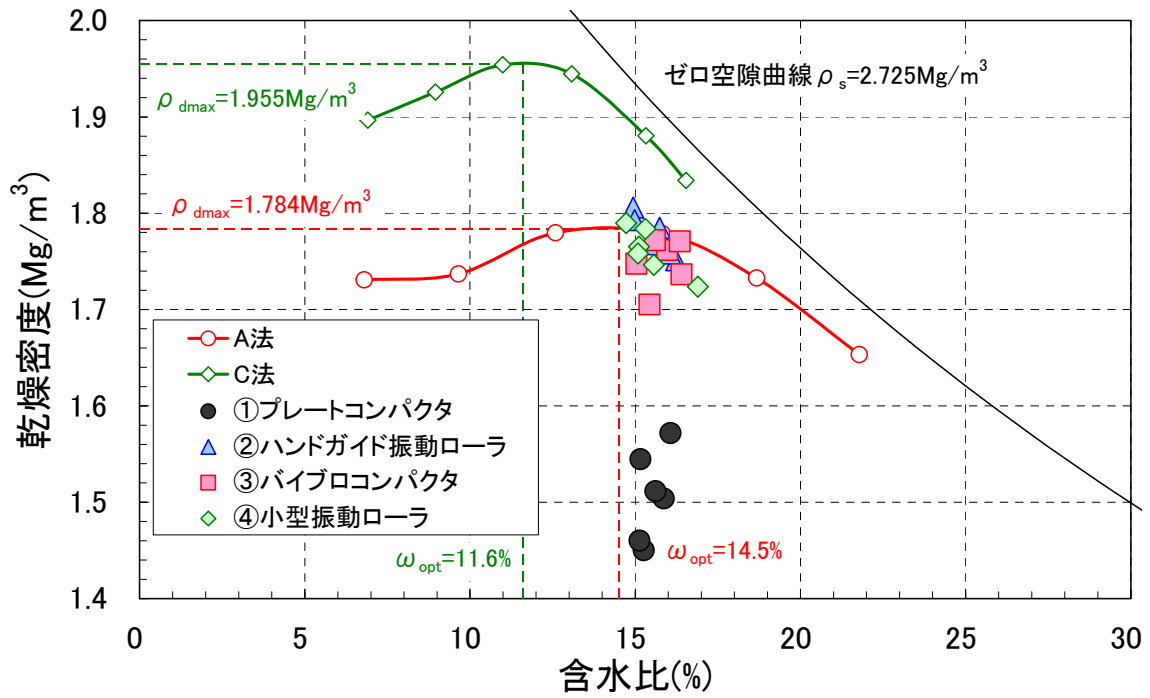


(e)圧力釜式吹付け機

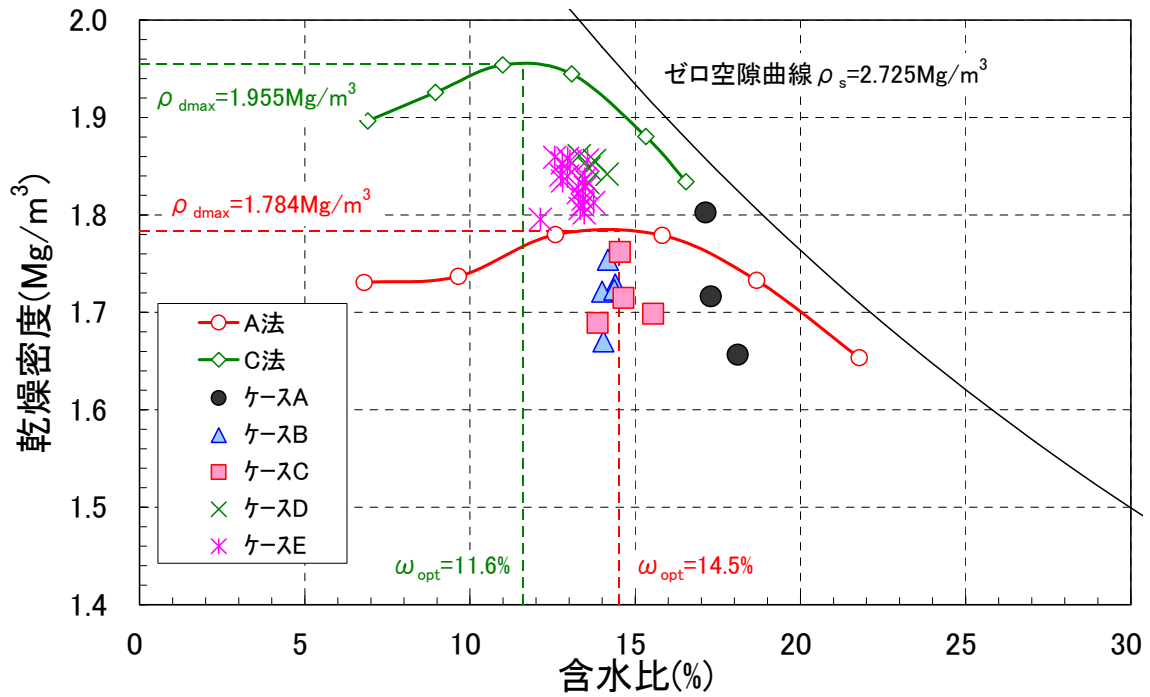
図 4.2-1 施工機械の例[10]

表 4.2-1 施工結果の例；吹付け試験ケース[10]

試験 ケー ス	使用材料			乾燥 質量比	設定 含水比 (%)	ホース 長(m)	ノズル位置の高さ
	ベントナイ ト	砂	礫				
A	クニゲルV1	山砂	—	15:85:0	16.0	20	ノズル=機械
B	クニゲルV1	山砂	—	15:85:0	14.5	40	ノズル=機械
C	クニゲルV1	山砂	—	15:85:0	14.5	40	ノズル=機械+10m
D	クニゲルV1	山砂	1505	15:35:50	13.5	20	ノズル=機械
E	クニゲルV1	山砂	2005	15:35:50	13.5	20	ノズル=機械



(a) 転圧工法



(b) 吹付け工法

図 4.2-2 施工結果の例；締固め曲線との比較[10]

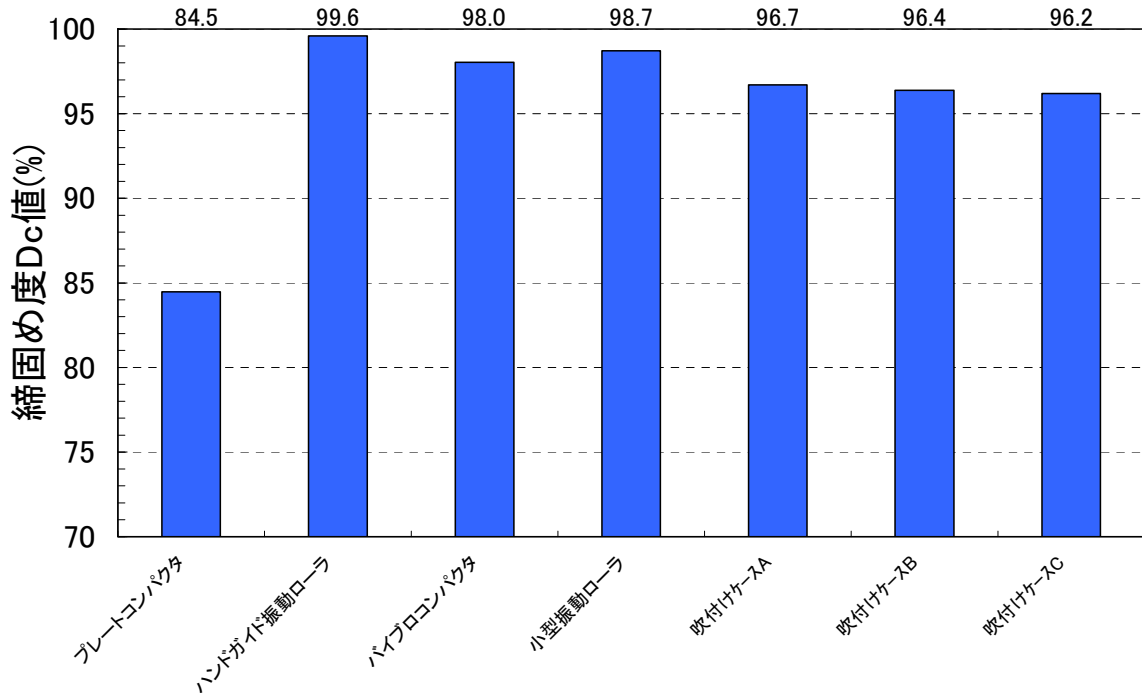


図 4.2-3 施工結果の例；締固め度⁴⁾

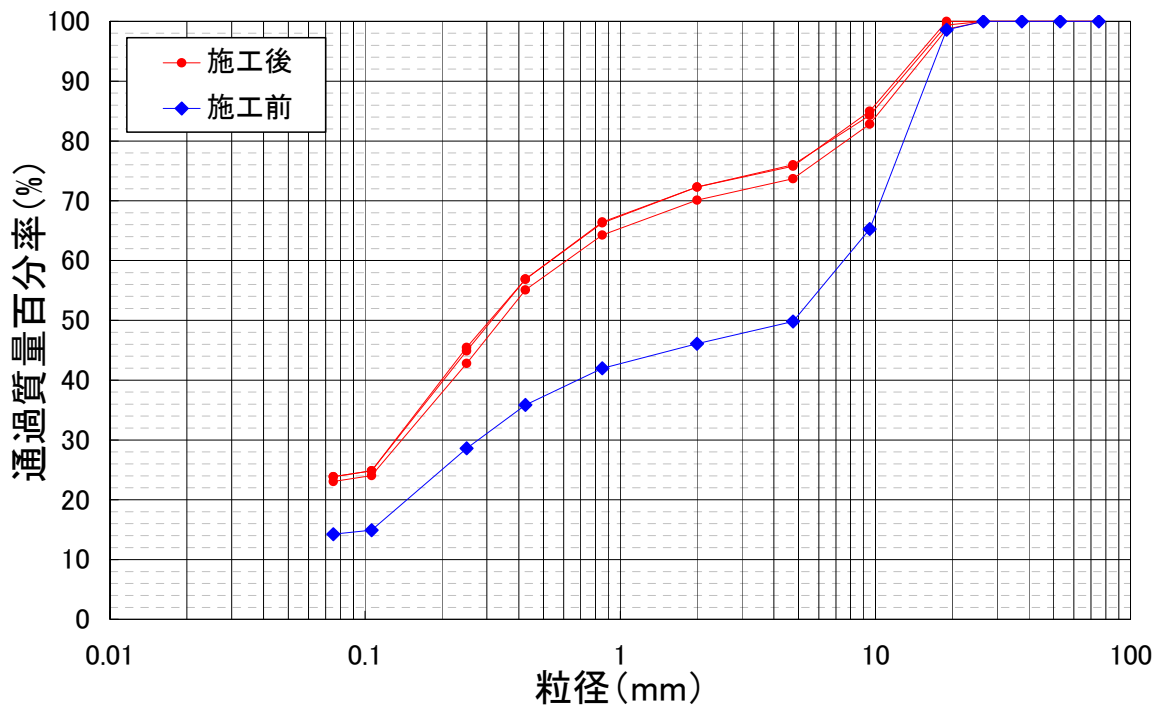


図 4.2-4 施工結果の例；吹付け前後の材料の粒度分布[10]

4.2.2 転圧工法による確認試験

本試験施工で実施する転圧工法の試験ケースは、これまでに実施された試験結果を踏まえ表 4.2-2 のとおり設定した。表 4.2-2 に示す 3 種類の機械に対して、使用材料をパラメータにして転圧試験を実施した。転圧試験は図 4.2-5 に示す試験ピットを用いて行った。試験ピットには事前に基盤層を施工し、その上で転圧試験を行った。1 ゾーンの試験範囲は 1m×4m 程度とし、同時に 3 ゾーン（各試験ゾーン 1 種類の施工機械）の試験施工を行った。試験概要は、表 4.2-3 に示す通りである。なお、試験施工用の材料はアイリッヒミキサーで製造した。初期含水比は、練り混ぜ試験では目標含水比を高めに W_{opt} (A 法) +2% と設定したが、施工試験では、転圧機械や撒き出し厚による施工後品質に違いをみることに、および、材料の違いによる吹付け後の品質の違いをみることを目的としているため、 W_{opt} (A 法) ~ W_{opt} +2% の中間の値、 W_{opt} (A 法) +1% を目標含水比として材料の製造を行った。なお、表 4.2-4 には使用した機械の性能比較を示す。

表 4.2-2 試験施工（転圧）ケース

試験ケース	機械	材料	含水比(%)	敷均し厚さ (mm)	品質確認 試験数
Case-1-1-1	ハンドガイド 振動ローラ	礫ベントナイト (2005)	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-1-1-2				200	6
Case-1-2-1		砂ベントナイト	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-1-2-2				200	6
Case-1-2-3				250	6
Case-2-1-1	バイブロ コンパクタ	礫ベントナイト (2005)	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-2-1-2				200	6
Case-2-2-1		砂ベントナイト	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-2-2-2				200	6
Case-2-2-3				250	6
Case-3-1-1	小型振動 ローラ	礫ベントナイト (2005)	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-3-1-2				200	6
Case-3-2-1		砂ベントナイト	W_{opt} (A 法) +1%	150	6
Case-3-2-2				200	6
Case-3-2-3				250	6

品質確認試験項目；密度、含水比

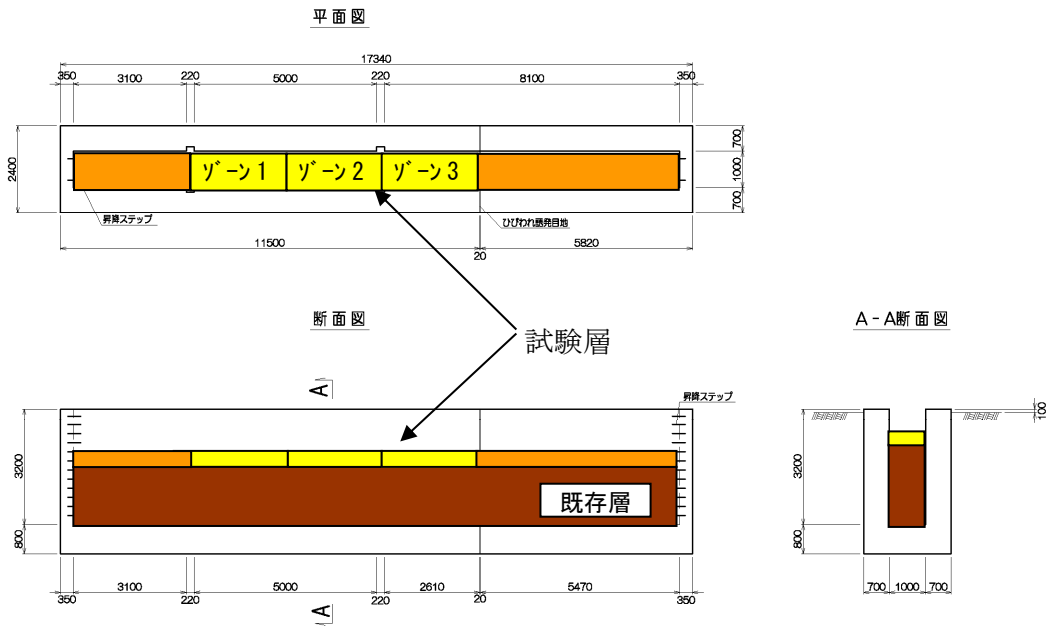


図 4.2-5 転圧試験用試験ピット

表 4.2-3 転圧試験概要

試験層	使用材料	撒き出し厚 (mm)	使用機械		
			ハンドガイド振動ローラ	バイブロコンパクタ	小型振動ローラ
			ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3
1層目	礫ベントナイト (2005)	150	Case-1-1-1	Case-2-1-1	Case-3-1-1
2層目		200	Case-1-1-2	Case-2-1-2	Case-3-1-2
3層目	砂ベントナイト	150	Case-1-2-1	Case-2-2-1	Case-3-2-1
4層目		200	Case-1-2-2	Case-2-2-2	Case-3-2-2
5層目		250	Case-1-2-3	Case-2-2-3	Case-3-2-3

表 4.2-4 使用した機械の概要

機械	ハンドガイド振動ローラ	バイブロコンパクタ	小型振動ローラ
メーカー	酒井重工業	三笠産業	安藤・間
型番	HV60ST	MVH306DS	HC1500-1
全長	2,430mm	1,570mm	1,500mm
全幅	680mm	445mm	610mm~850mm
全高	1,180mm	970mm	1,200mm
重量	635kg	340kg	1,548kg
起振力	11.8kN	46kN	80kN
速度	3.5km/h	1.3km/h	1.2km/h

4.2.3 吹付け工法による確認試験

吹付け工法に関する試験ケースを表 4.2-5 に示す。吹付け工法に関する試験は表 4.1-1 に示す 3 種類の材料に対して、仕上り密度、リバウンド量、リバウンド材の性状（ベントナイト、砂、礫の割合）について比較検討を行う。施工面積は 0.5m×0.5m 程度とし、試験箱の中に吹付けて施工する。施工厚さは 0.2m 程度とする。

表 4.2-5 試験施工（吹付け）ケース

試験ケース	機械	材料	含水比(%)	品質確認試験数
Case-4-1	圧力釜式 吹付け機	砂ベントナイト	W _{opt} (A 法) +1%	6
Case-4-2		礫ベントナイト (2005)	W _{opt} (A 法) +1%	6
Case-4-3		礫ベントナイト (1005)	W _{opt} (A 法) +1%	6

品質確認試験項目；密度、含水比、リバウンド率、粒度

4.2.4 締固め特性等評価試験結果

(1) 施工試験状況

図 4.2-6～図 4.2-8 に転圧試験の状況を示す。図 4.2-6 はバイブロコンパクトを用いた施工の状況、図 4.2-7 はハンドガイド振動ローラを用いた施工の状況、図 4.2-8 は小型振動ローラを用いた施工の状況である。図 4.2-9 には、各転圧機械により施工された転圧面の状況を示す。バイブロコンパクトやハンドガイド振動ローラにより施工された面は小型振動ローラに比べて平滑である。小型振動ローラは四輪であり、前輪・後輪ともに左右の車輪の間に隙間があり、本試験の使用材料に対して小型振動ローラは能力が高すぎて過転圧となっているためであると考えられる。

図 4.2-10 には吹付け施工の状況を示す。



図 4.2-6 バイブロコンパクトによる施工状況



図 4.2-7 ハンドガイド振動ローラによる施工状況



図 4.2-8 小型振動ローラによる施工状況



(a) バイブロコンパクタ



(b) ハンドガイド振動ローラ



(c) 小型振動ローラ

図 4.2-9 各転圧機械による転圧後の施工面の状況



図 4.2-10 吹付け工法による施工状況

(2) 施工試験結果

図 4.2-11～図 4.2-15 に転圧試験の結果で得られた各施工段階と施工層厚の関係を示す。図 4.2-11～図 4.2-13 が砂ベントナイトの時の結果で、図 4.2-11 は敷均し厚さが 150mm の時の結果、図 4.2-12 は敷均し厚さが 200mm の時の結果、図 4.2-13 は敷均し厚さが 250mm の時の結果である。各転圧機械とも施工層厚の高さがほぼ収束するまで施工を行ったが、いずれの敷均し厚さにおいても施工層厚の高さが収束するまでに必要な振動 Pass 数 (1Pass=片道) はバイブロコンパクタが最も多く、小型振動ローラが最も少ないという結果となっている。図 4.2-14 および図 4.2-15 は礫ベントナイト (2005) の時の結果であるが、傾向は砂ベントナイトと同じである。図 4.2-17 は敷均し厚さと施工層厚の高さが収束するのに必要な振動 Pass 数の関係を整理した結果である。敷均し厚さが厚くなると、ほぼ比例的に必要な振動 Pass 数が増加していることが分かる。

図 4.2-18～図 4.2-22 に各試験後に実施した密度測定の結果と室内締固め試験の結果得られた締固め曲線を比較した結果を示す。図 4.2-18 は砂ベントナイトの転圧試験の結果、図 4.2-19 は礫ベントナイト (2005) の転圧試験の結果であり、それぞれ(a)は密度測定した試料全ての結果で、(b)は各施工層の平均値をプロットしたものである。密度は締固め曲線上の上下に±0.1Mg/m³程度の範囲でばらつく結果となっている。砂ベントナイトの場合は、施工機械による仕上がり密度の違いはそれほど大きくないが、礫ベントナイトの場合は、バイブロコンパクタ、ハンドガイド振動ローラ、小型振動ローラと施工機械の施工能力が高くなるにつれ仕上がり密度も高くなっている。図 4.2-20～図 4.2-22 には吹付け試験後に実施した密度測定の結果と室内締固め試験の結果得られた締固め曲線を比較した結果を示す。図 4.2-20 は砂ベントナイト、図 4.2-21 は礫ベントナイト (2005)、図 4.2-22 は礫ベントナイト (1005) の結果である。転圧試験の場合は、室内締固め試験に近い密度が得られる結果となっていたが、吹付け試験の場合は、室内締固め試験より低い密度となっている。ただし、転圧試験に比べて密度のばらつきは小さくなっている。

図 4.2-23 および図 4.2-24 には転圧試験により得られた締固め度を示す。図 4.2-23 は砂ベントナイト、図 4.2-24 は礫ベントナイトの結果である。いずれの材料でも全ての施工機械で締固

め度として 95%以上の高い密度が得られている。図 4.2-25 には吹付け試験の結果得られた締固め度を転圧試験（バイプロコンパクタ）と比較した結果を示す。吹付け試験の結果得られた締固め度は転圧試験に比べれば小さいが締固め度 90%以上となった。

図 4.2-26 には吹付け試験でのリバウンド率を示す。砂ベントナイトの場合は 6.8%と小さい値となっている。それと比較すると礫ベントナイトの場合がリバウンド率は高く、さらに礫の最大粒径が大きくなるとリバウンド率も高くなっている。図 4.2-27～図 4.2-29 には各材料の吹付け試験において材料の粒度を測定した結果である。それぞれ、(a)は吹付けた試験体の粒度、(b)は吹付けた試験体の粒度とリバウンド材の粒度を比較した結果である。また、(a)には吹付け前の材料の粒度も示している。図 4.2-27 は砂ベントナイト、図 4.2-28 は礫ベントナイト（2005）図 4.2-29 は礫ベントナイト（1005）の結果である。砂ベントナイトの場合は、吹付け後の試験体の粒度と吹付け前の材料の粒度に大きな違いはない。また、リバウンド材の粒度もそれほど大きな違いはない。一方、礫ベントナイトの場合は、吹付け前の材料と吹付け後の試験体の粒度で違いが見られ、また、リバウンド材はさらに大きく異なっている。なお、礫の最大粒径が大きいほど、吹付け前、吹付け後、リバウンド材の粒度の違いは大きくなっている。これはリバウンド材に礫分が大きく含まれているためである。

図 4.2-30 には吹付け後の試験体のベントナイト混合率を示す。砂ベントナイトは材料製造時の設定混合率（15%）に近い値となっているが、礫ベントナイトはベントナイト混合率が高くなっている。これは、リバウンドに含まれる礫分が多いため、結果として吹付け後の試験体のベントナイトの割合が増えてしまったためである。一方、図 4.2-31 および図 4.2-32 には転圧試験後の試験体のベントナイト混合率を示す。図 4.2-31 は砂ベントナイト、図 4.2-32 は礫ベントナイト（2005）を用いた転圧試験の結果である。砂ベントナイトは材料製造時の設定混合率（15%）に近い値となっているが、礫ベントナイトはベントナイト混合率が若干高くなっている。

表 4.2-6 から表 4.2-9 には各施工試験における試験データを示す。

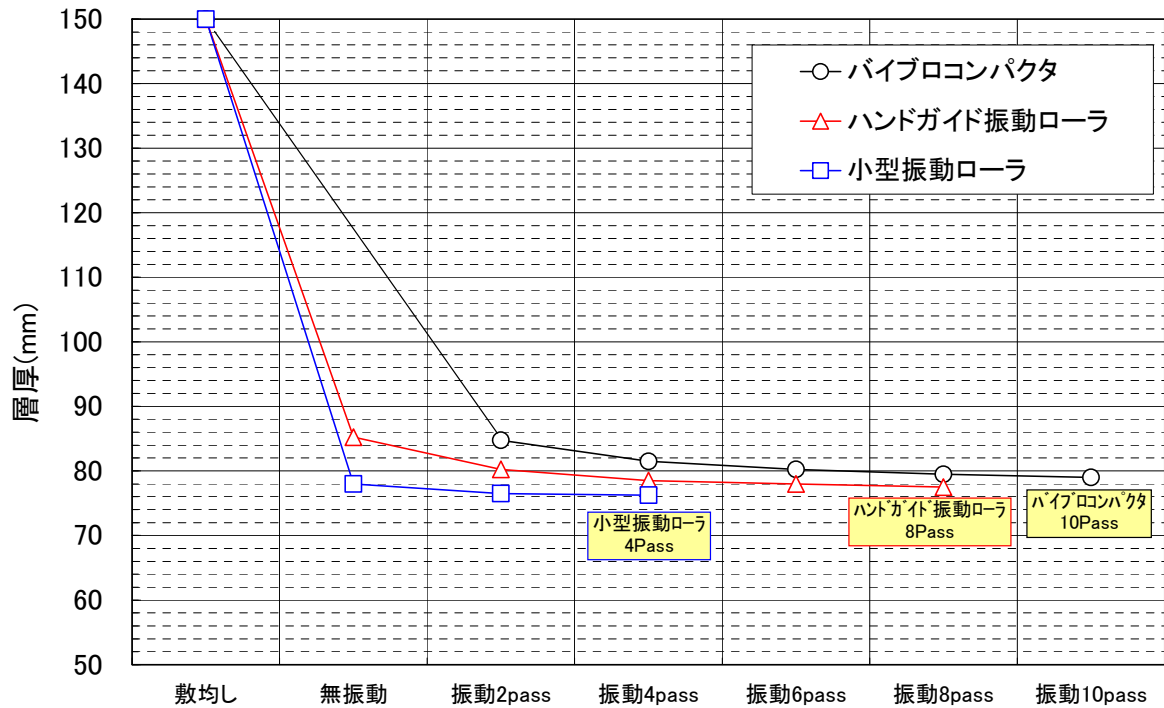


図 4.2-11 各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係 (砂ベントナイト、敷均し厚さ 150mm)

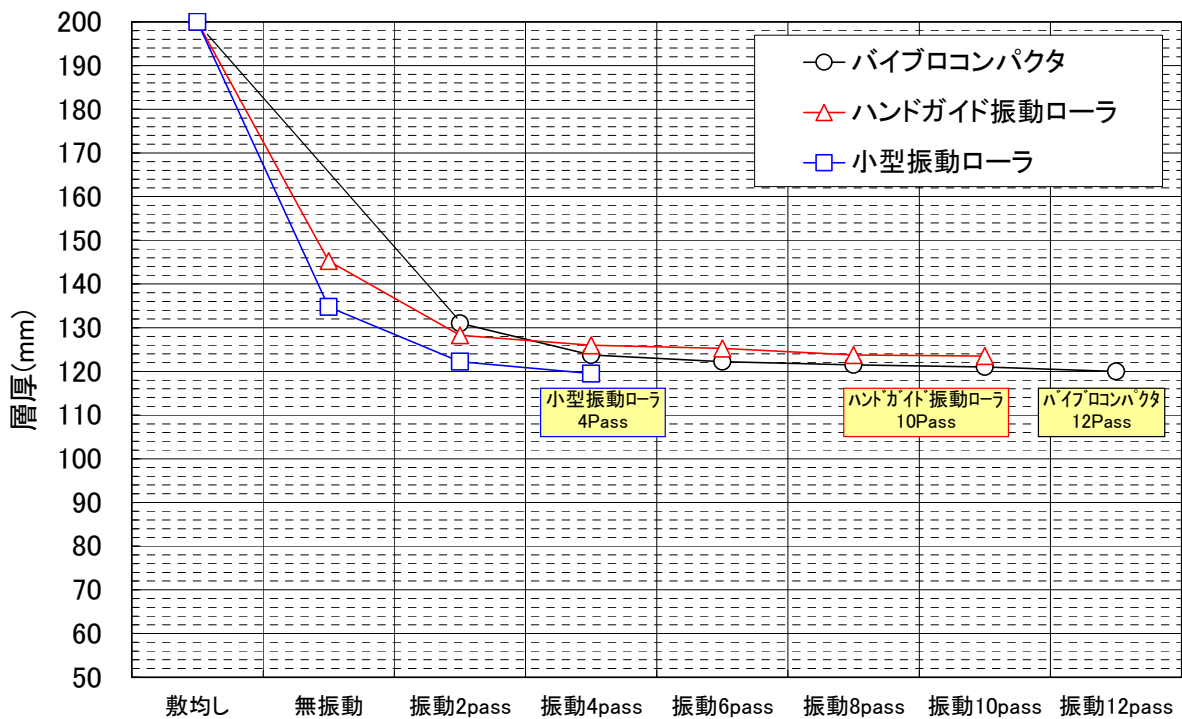


図 4.2-12 各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係 (砂ベントナイト、敷均し厚さ 200mm)

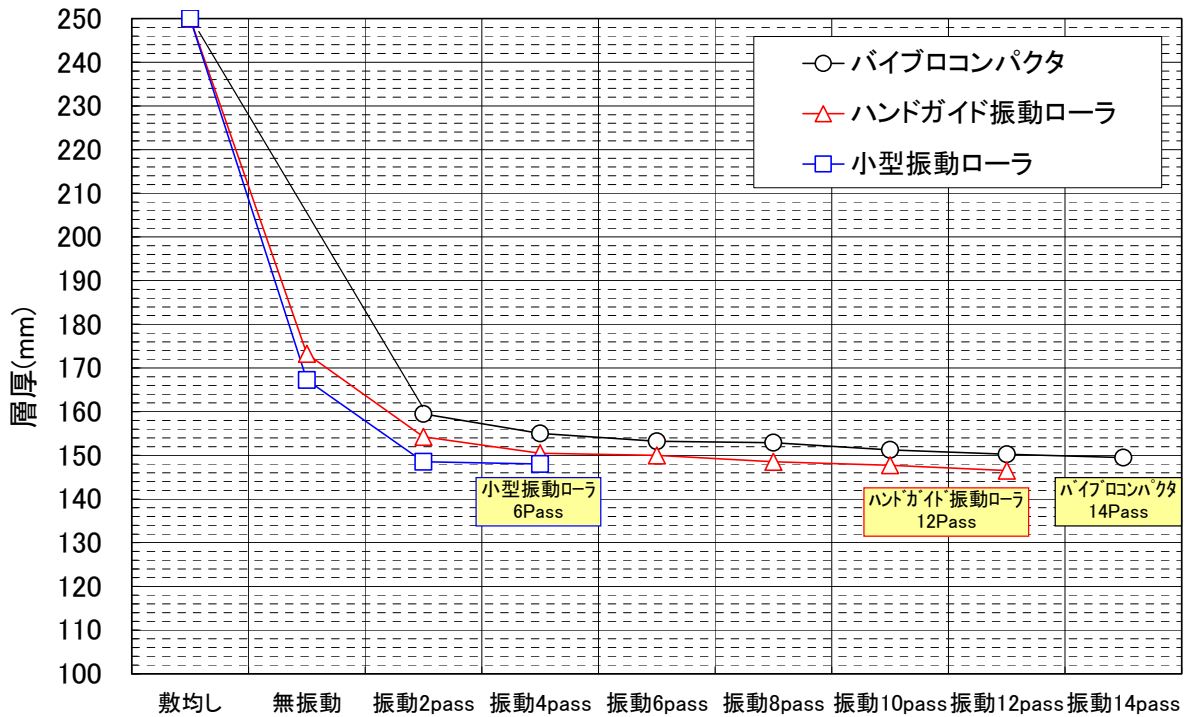


図 4.2-13 各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係 (砂ベントナイト、敷均し厚さ 250mm)

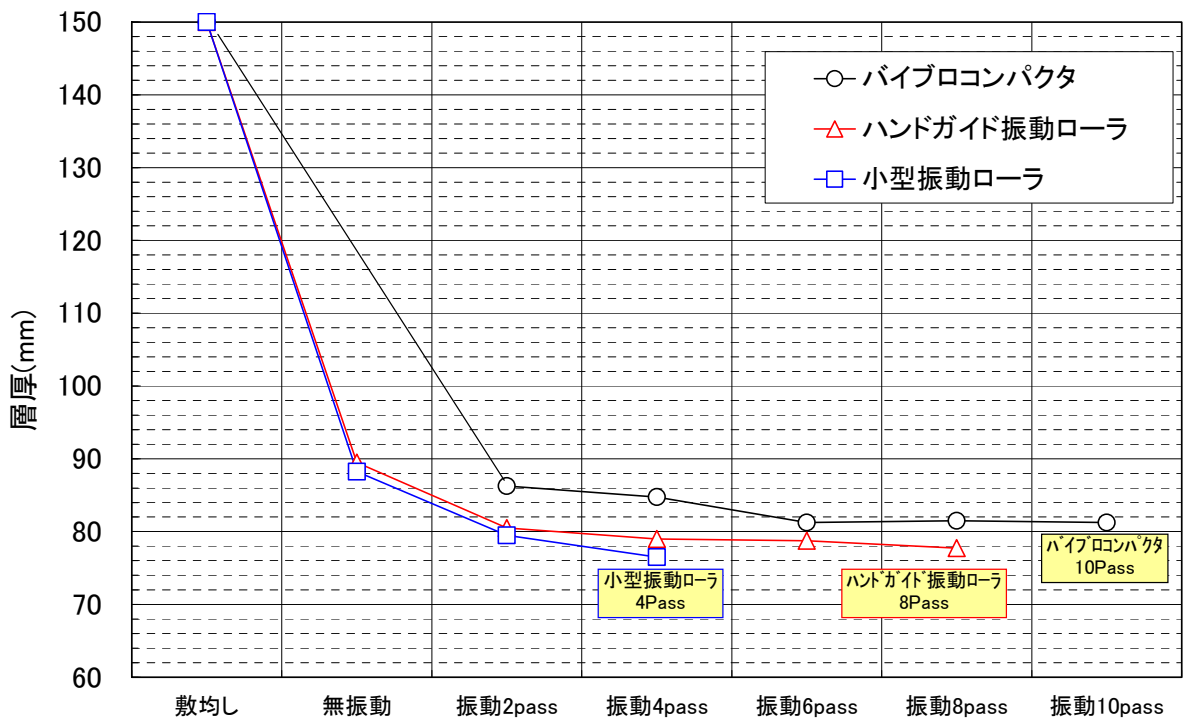


図 4.2-14 各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係 (礫ベントナイト、敷均し厚さ 150mm)

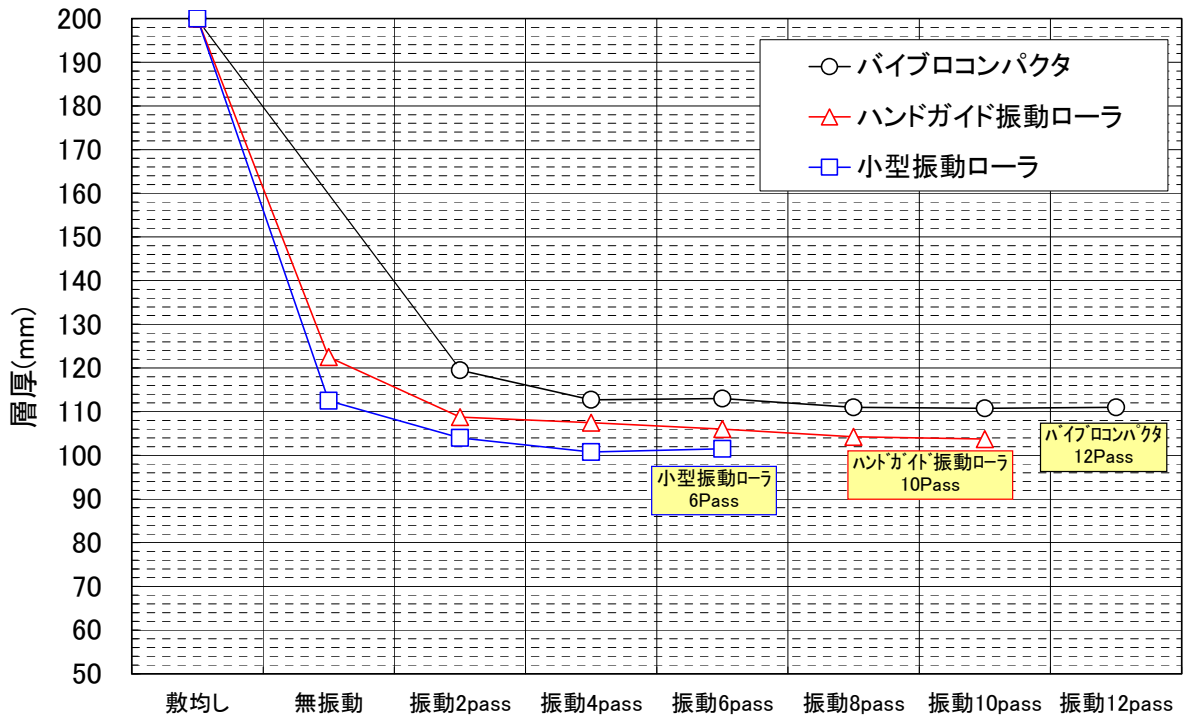


図 4.2-15 各転圧機械による施工段階と施工層厚の関係 (礫ベントナイト、敷均し厚さ 200mm)

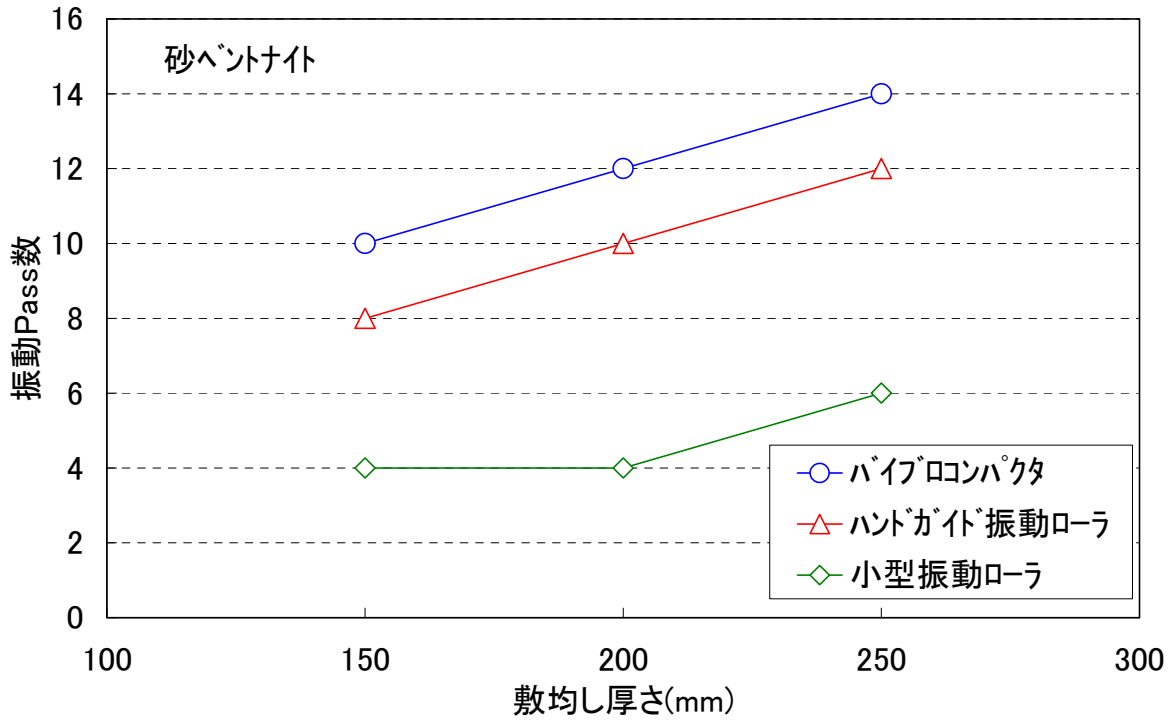


図 4.2-16 敷均し厚さと施工高さが収束するのに必要な転圧 Pass 数の関係 (砂ベントナイト)

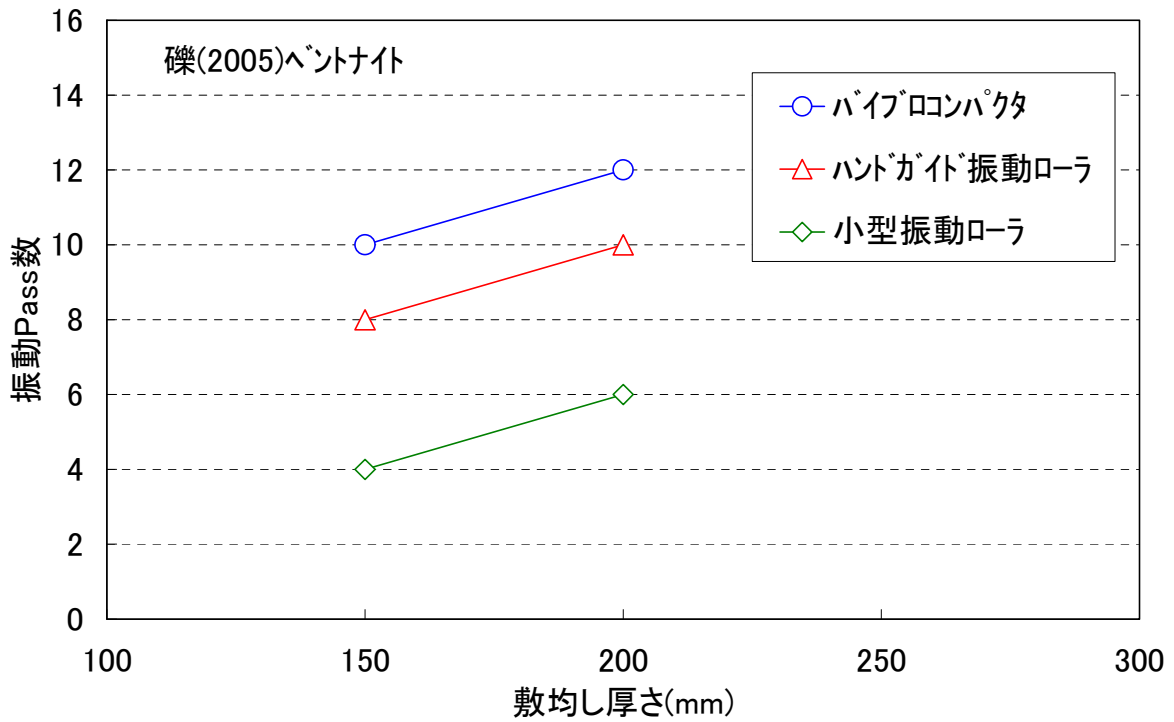
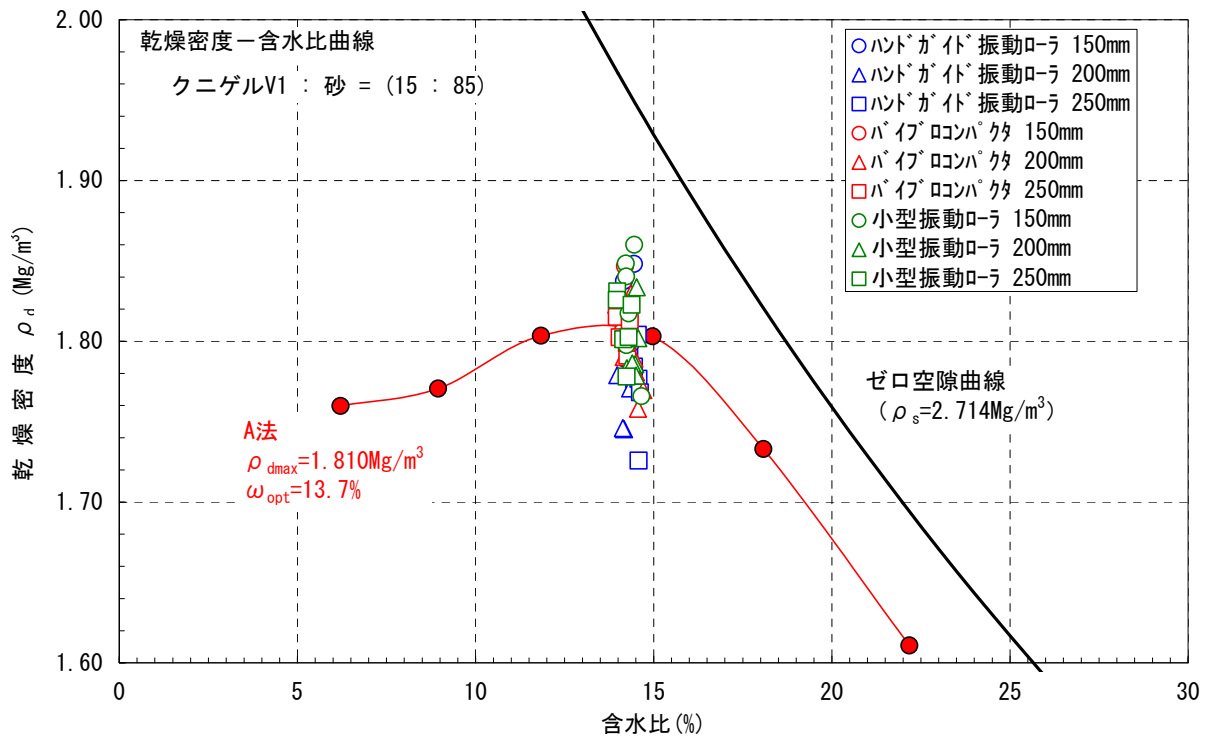
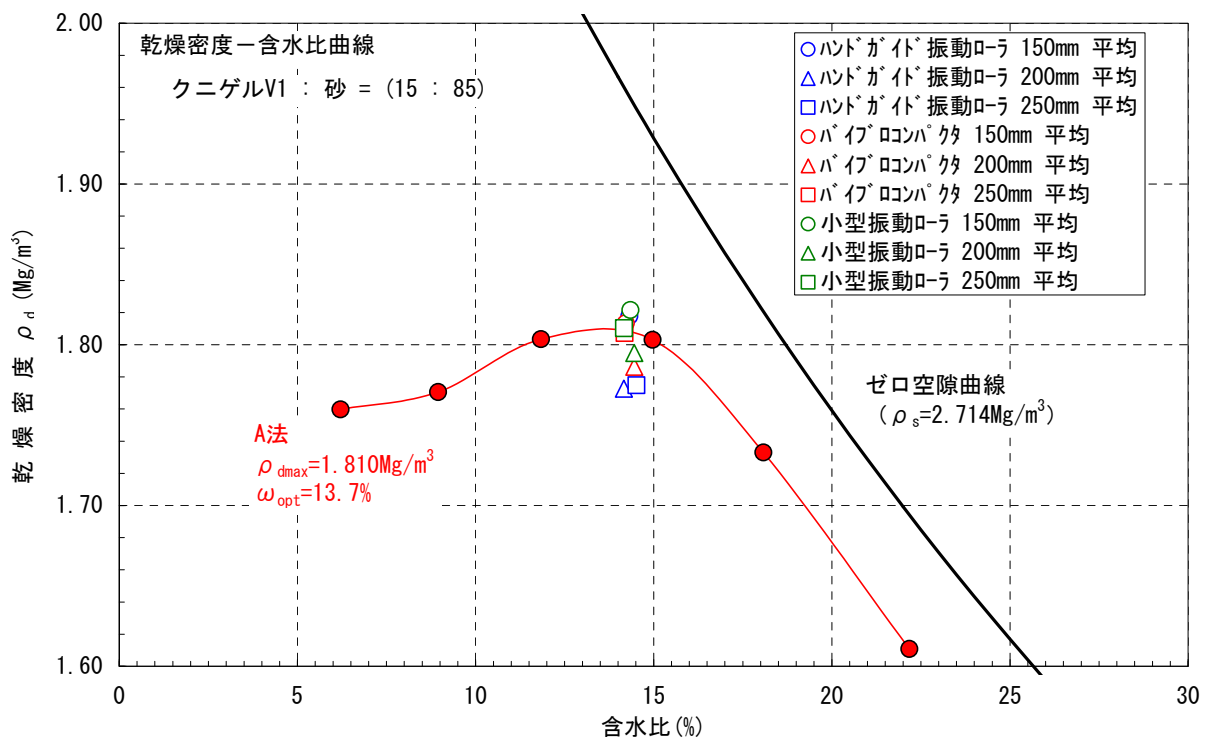


図 4.2-17 敷均し厚さと施工高さが収束するのに必要な転圧 Pass 数の関係 (礫ベントナイト)

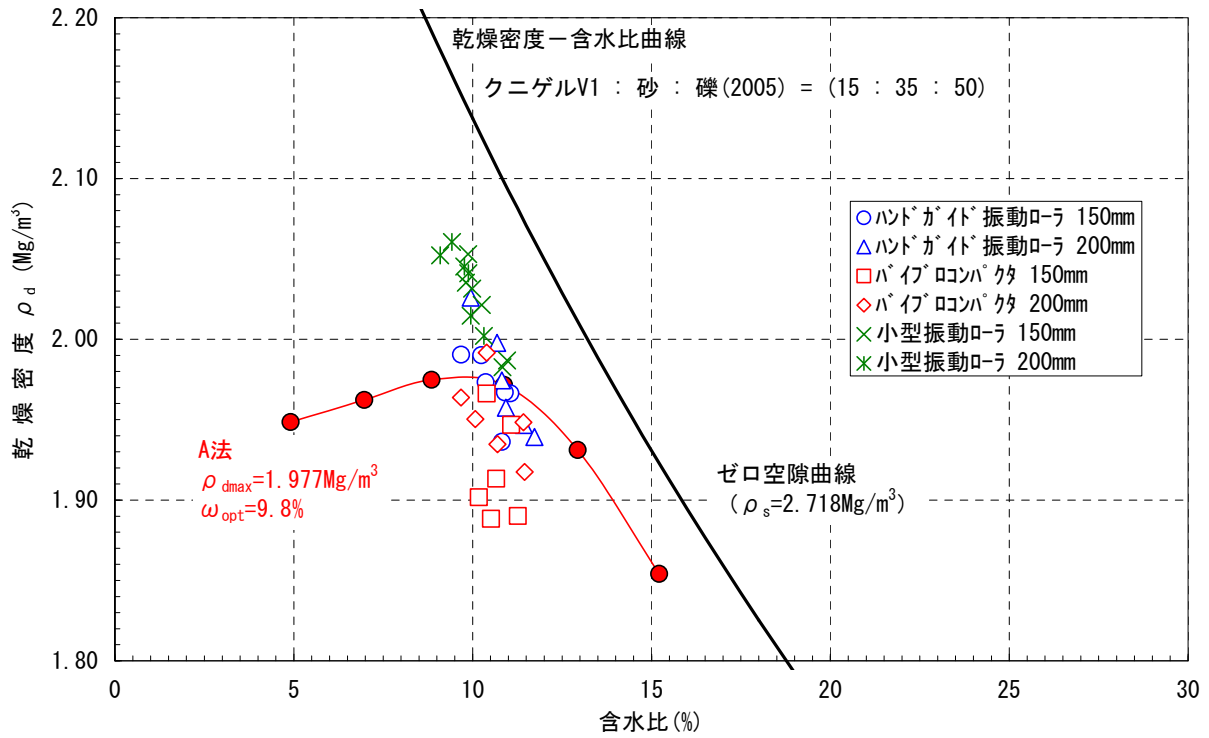


(a) コア全ての乾燥密度と含水比

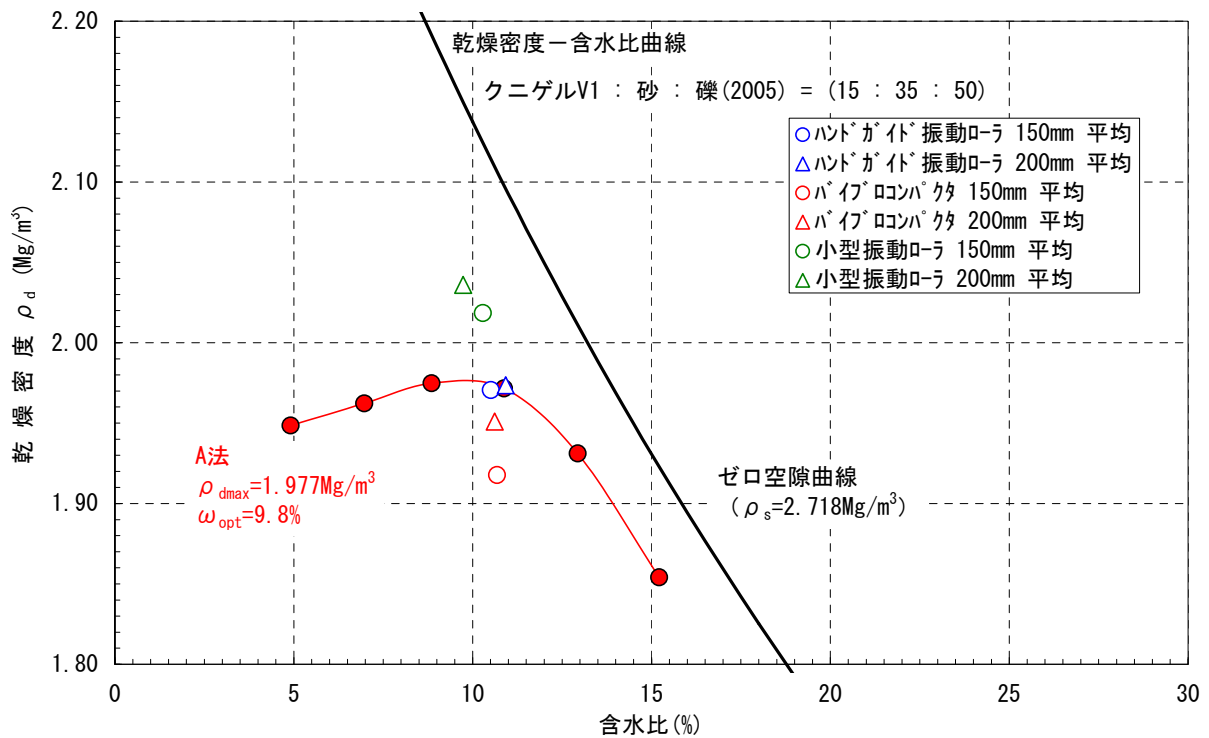


(b) 各施工層の乾燥密度と含水比の平均値

図 4.2-18 砂ベントナイトの転圧試験の結果



(a) コア全ての乾燥密度と含水比



(b) 各施工層の乾燥密度と含水比の平均値

図 4.2-19 礫ベントナイト (2005) の転圧試験の結果

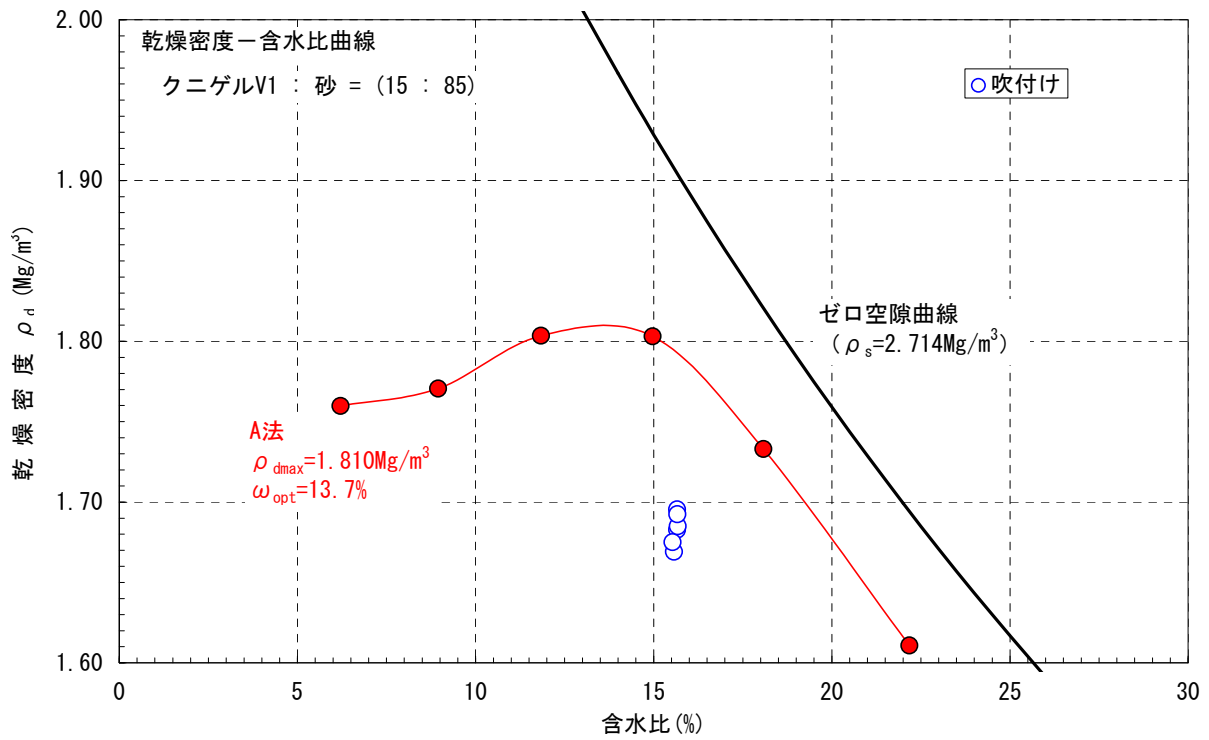


図 4.2-20 砂ベントナイトの吹付け試験の結果 (コア全ての乾燥密度と含水比)

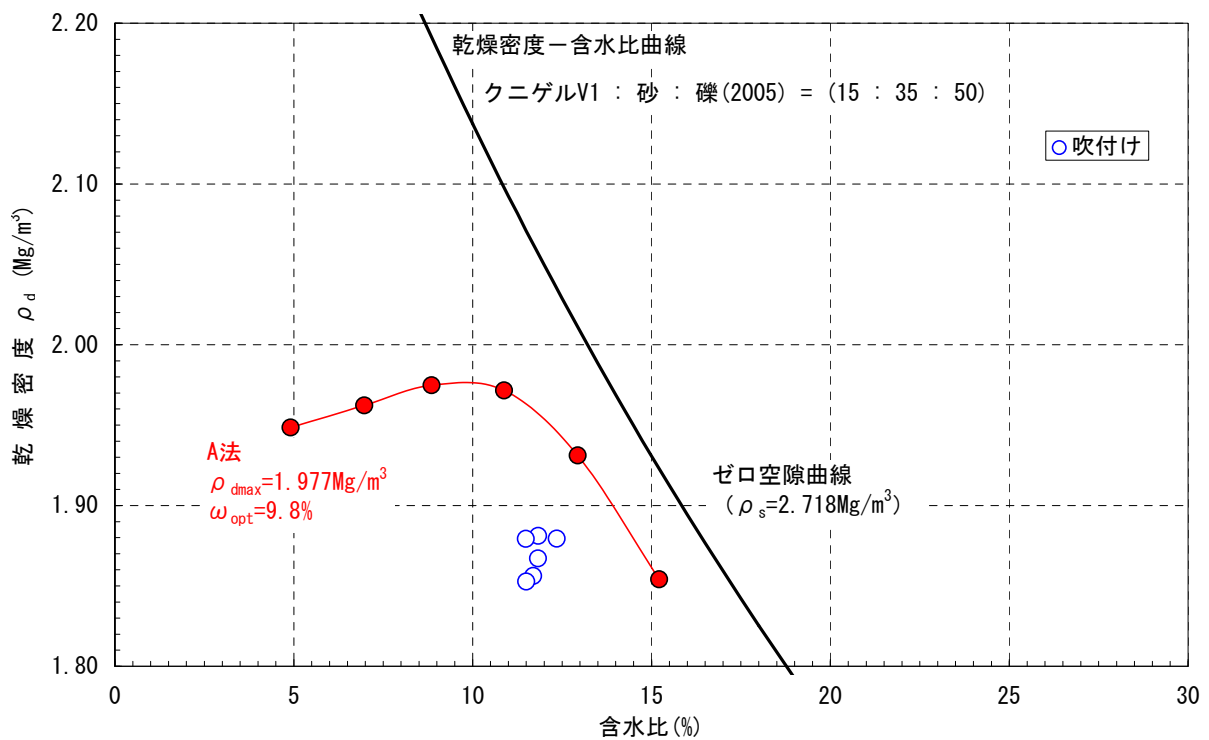


図 4.2-21 礫ベントナイト (2005) の吹付け試験の結果 (コア全ての乾燥密度と含水比)

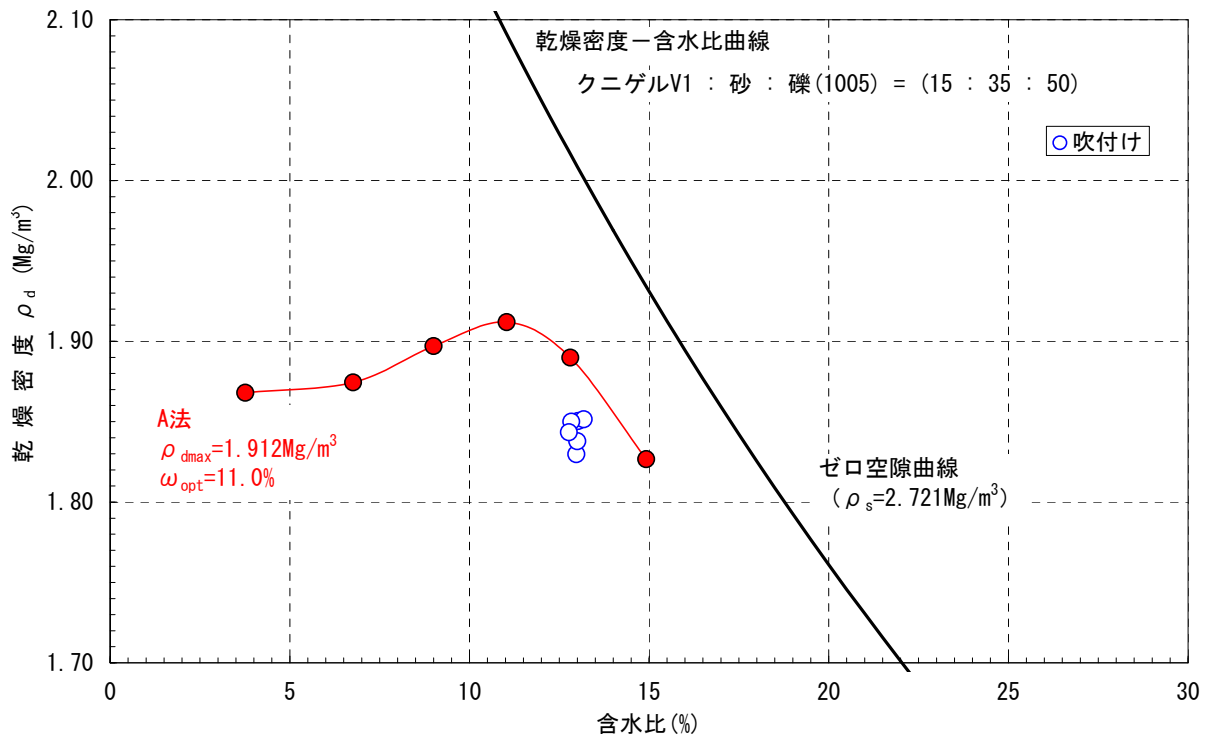


図 4.2-22 礫ベントナイト (1005) の吹付け試験の結果 (コア全ての乾燥密度と含水比)

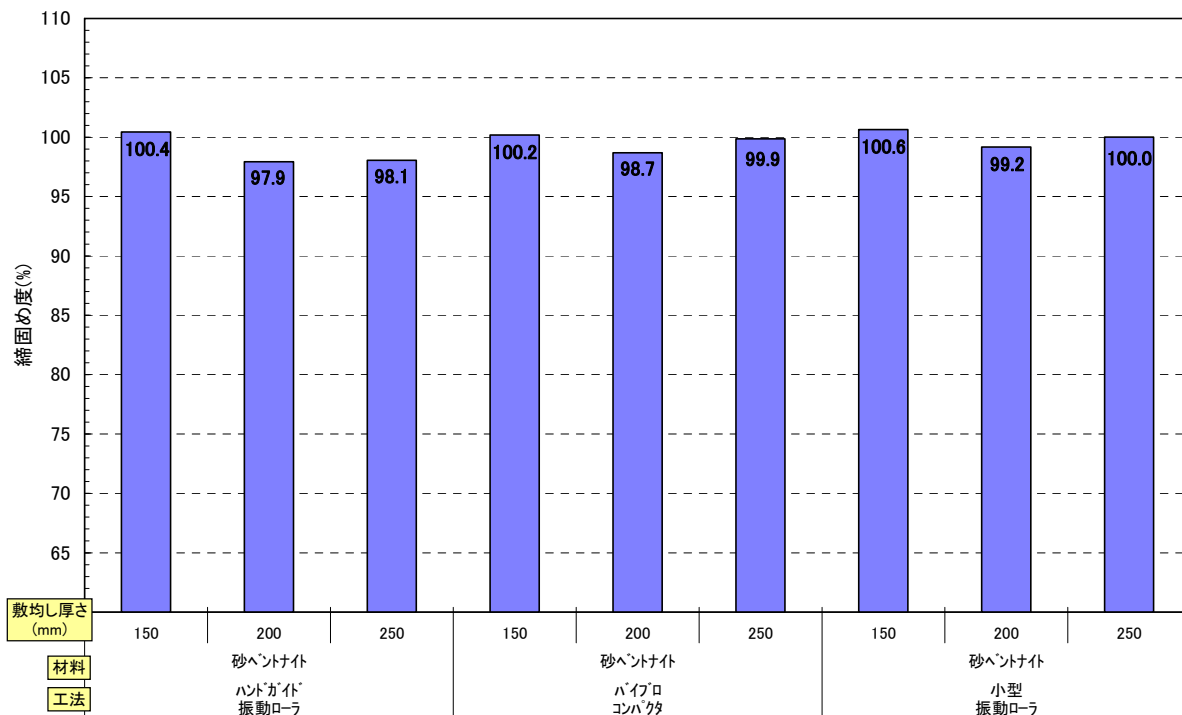


図 4.2-23 砂ベントナイトの転圧試験の結果 (締固め度)

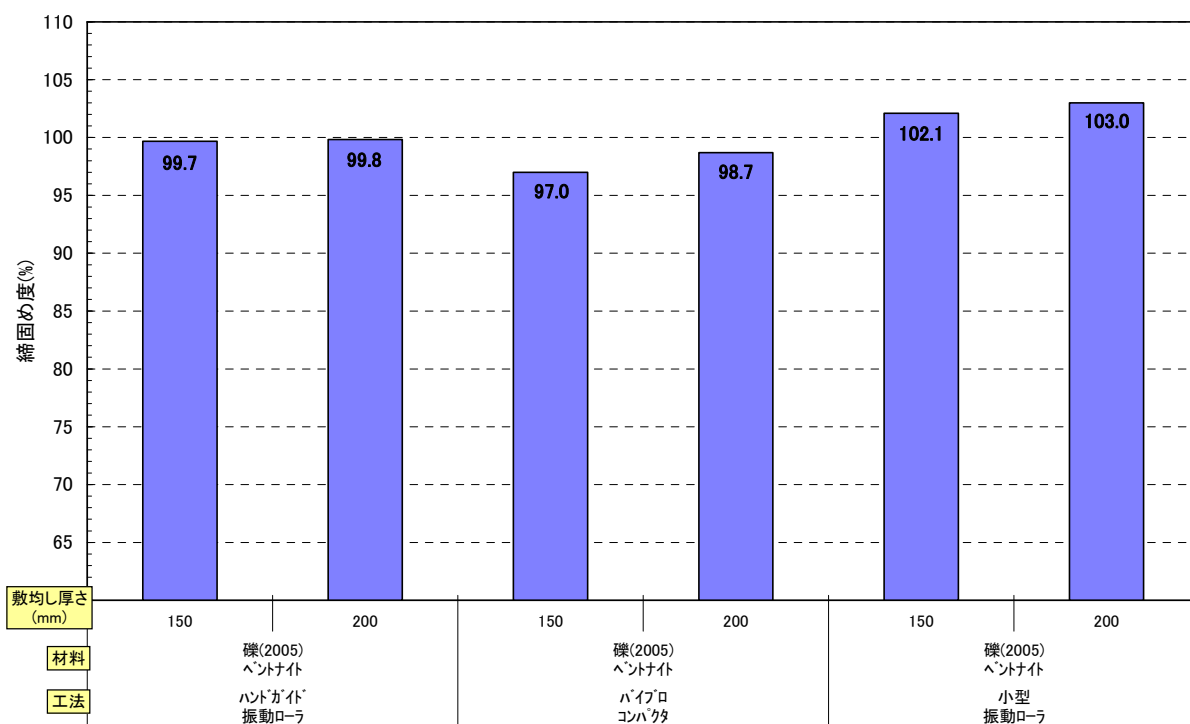


図 4.2-24 礫ベントナイト (2005) の転圧試験の結果 (締固め度)

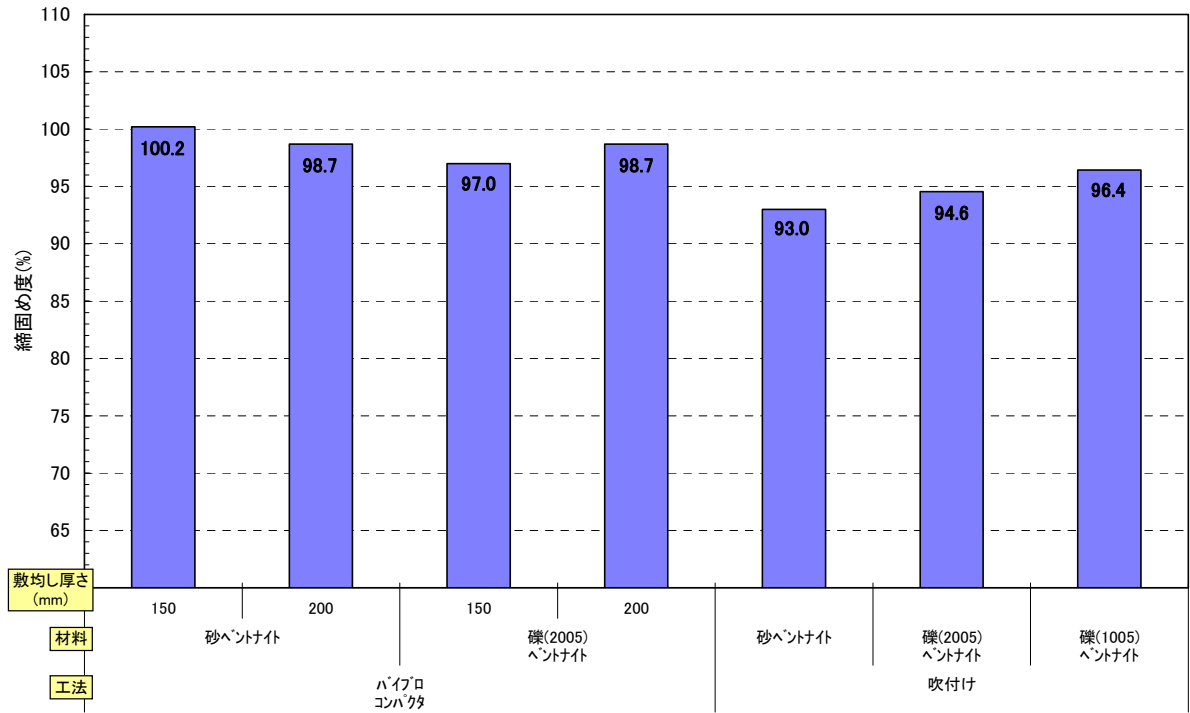


図 4.2-25 吹付け試験と転圧試験（バイブロコンパクト）の締固め度の比較

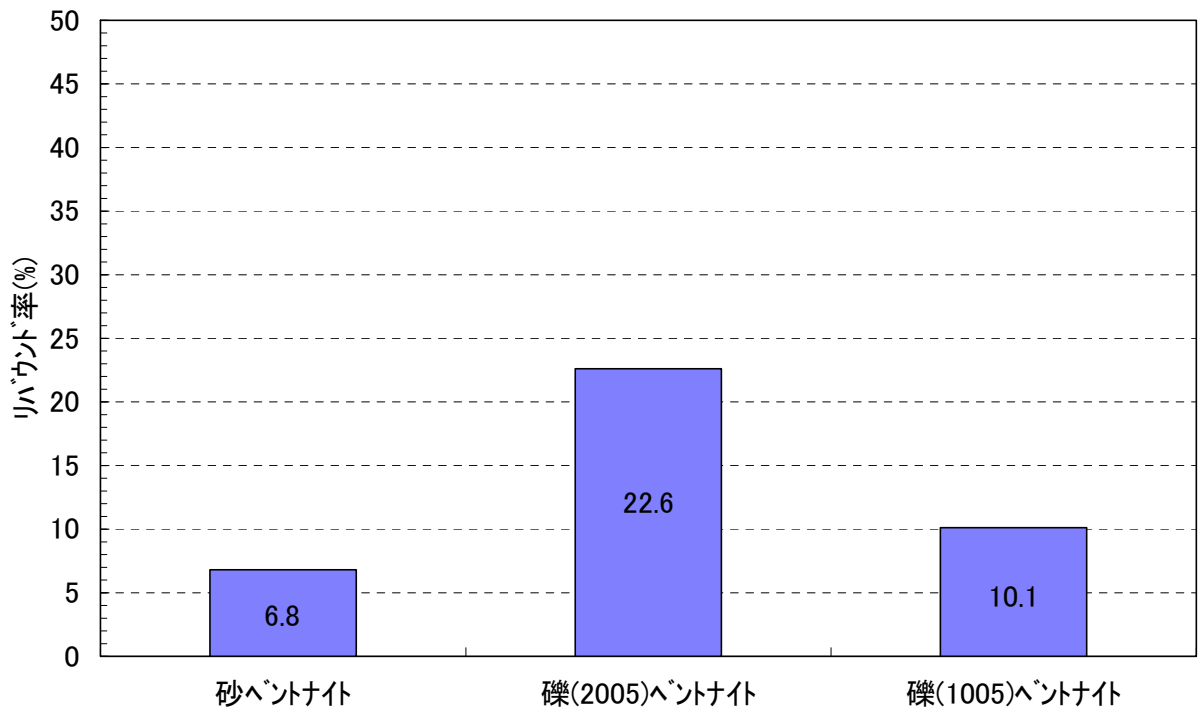
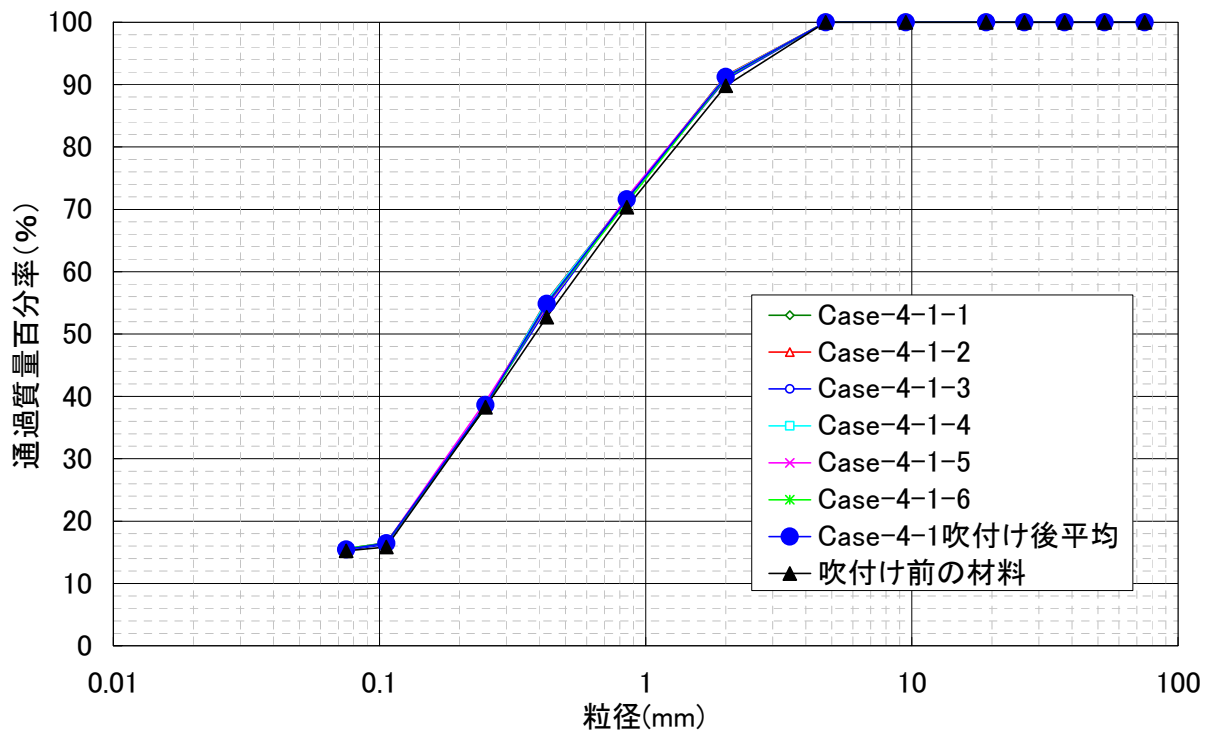
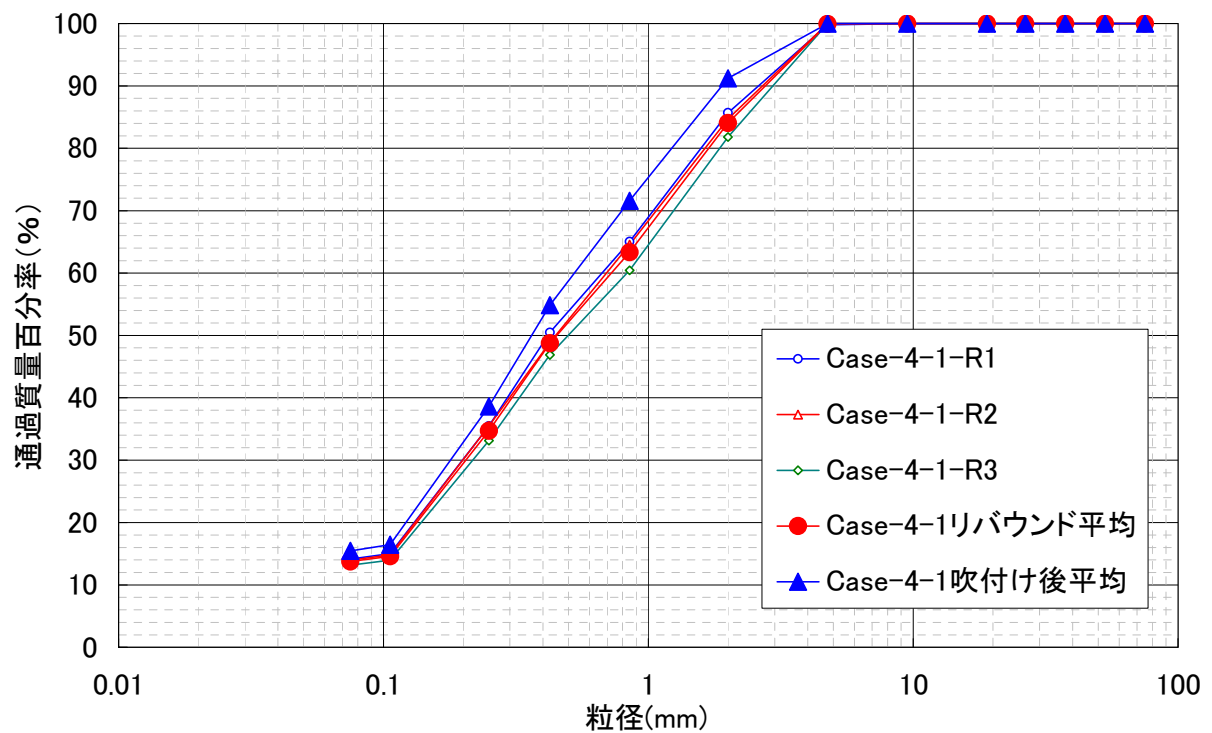


図 4.2-26 吹付け試験での各材料のリバウンド率

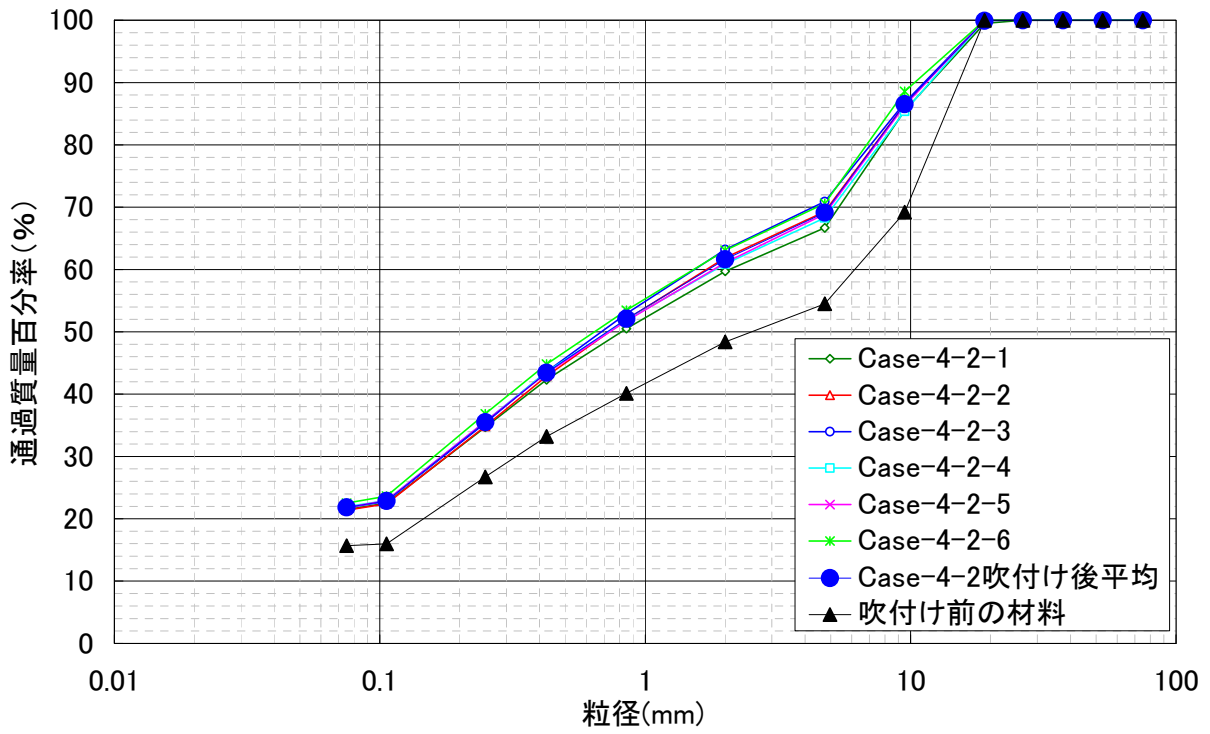


(a) 吹付けされた材料の粒度

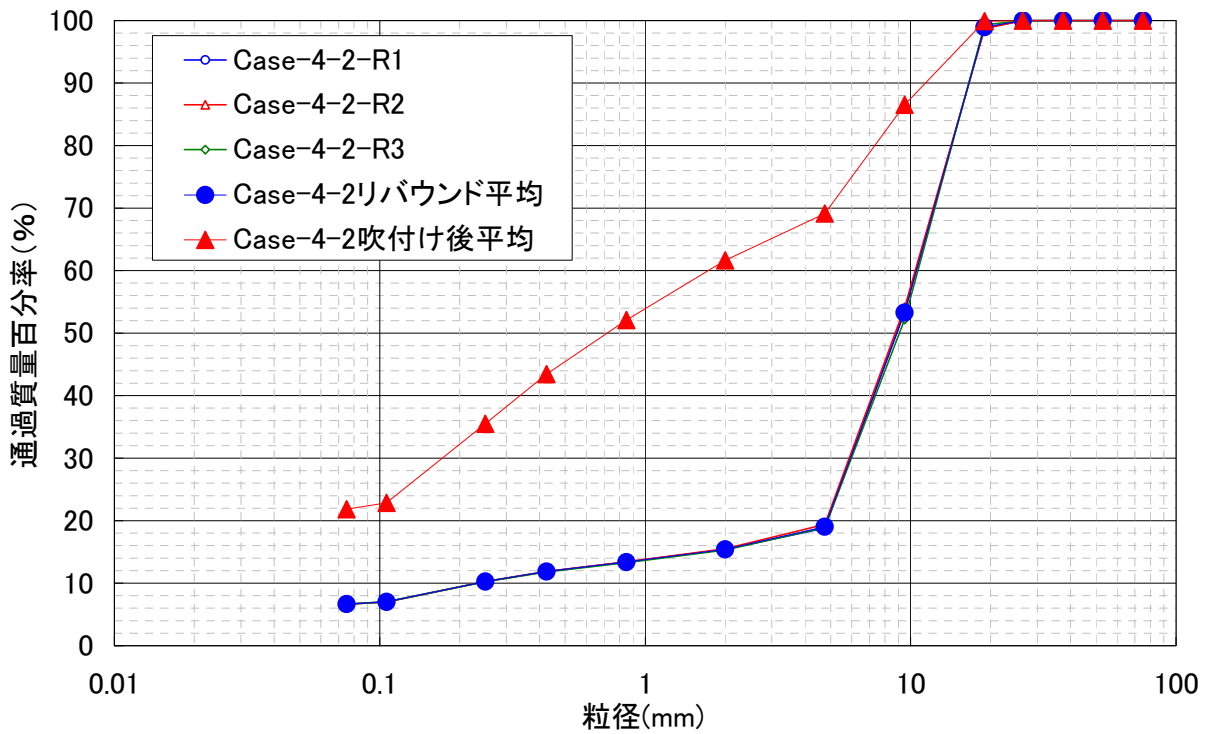


(b)吹付けされた材料とリバウンド材の粒度

図 4.2-27 吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布 (砂ベントナイト)

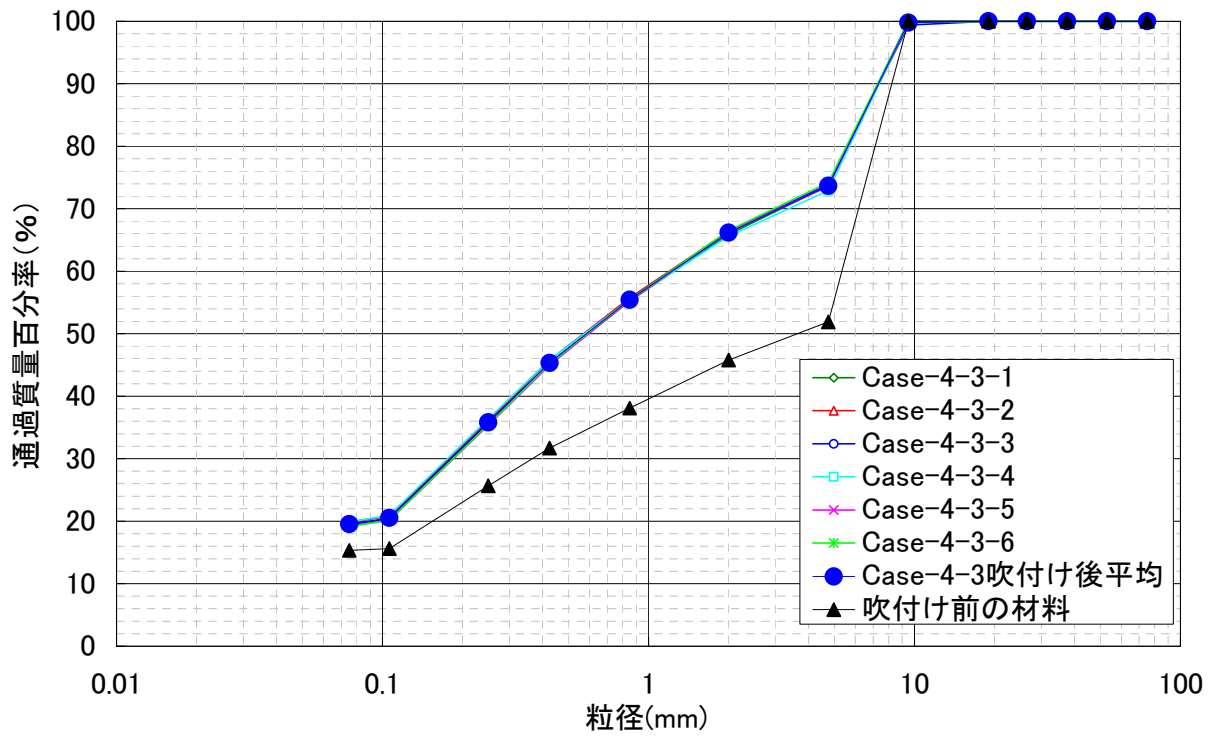


(a) 吹付けされた材料の粒度

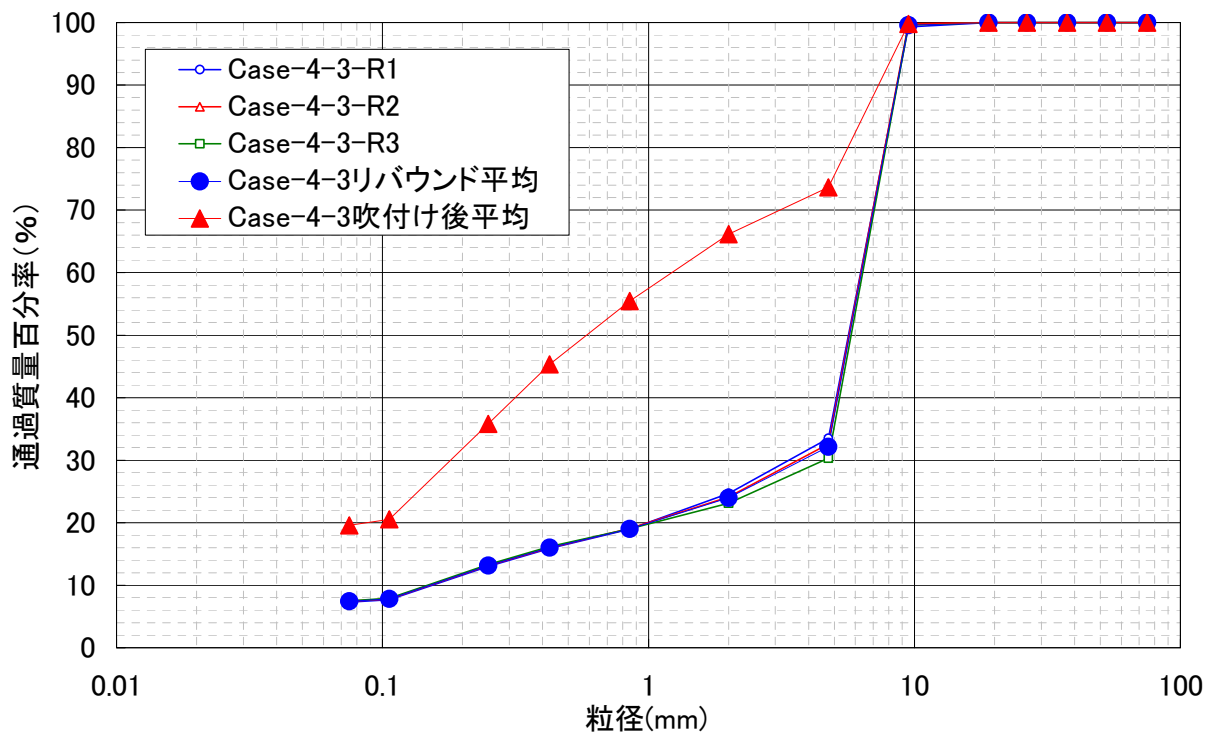


(b)吹付けされた材料とリバウンド材の粒度

図 4.2-28 吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布 (礫ベントナイト (2005))



(a) 吹付けされた材料の粒度



(b)吹付けされた材料とリバウンド材の粒度

図 4.2-29 吹付け試験での吹付け後およびリバウンド材の粒度分布 (礫ペントナイト (1005))

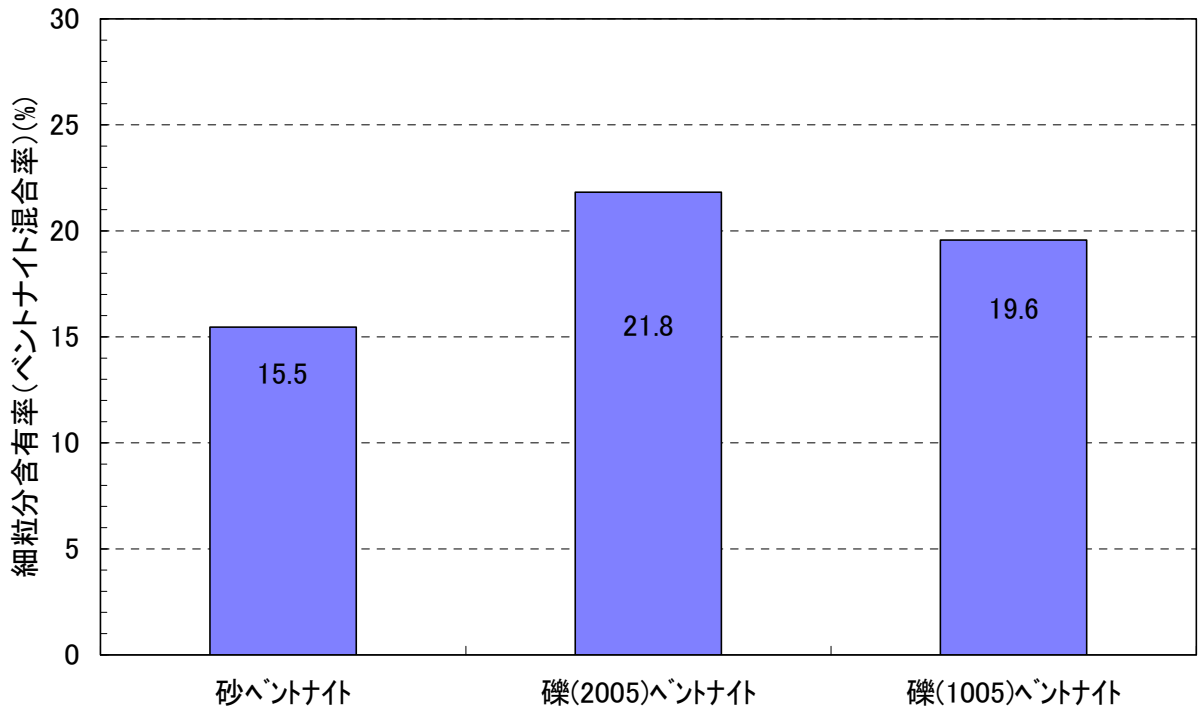


図 4.2-30 吹付け試験後のベントナイト混合率

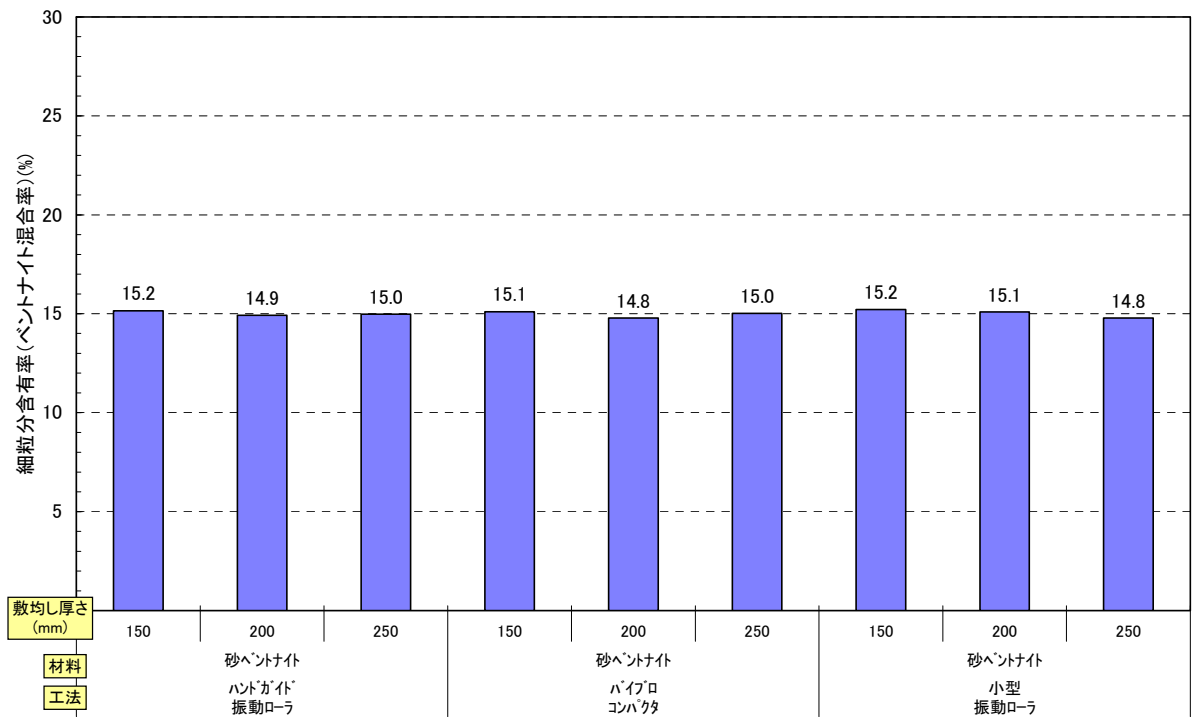


図 4.2-31 転圧試験後のベントナイト混合率 (砂ベントナイト)

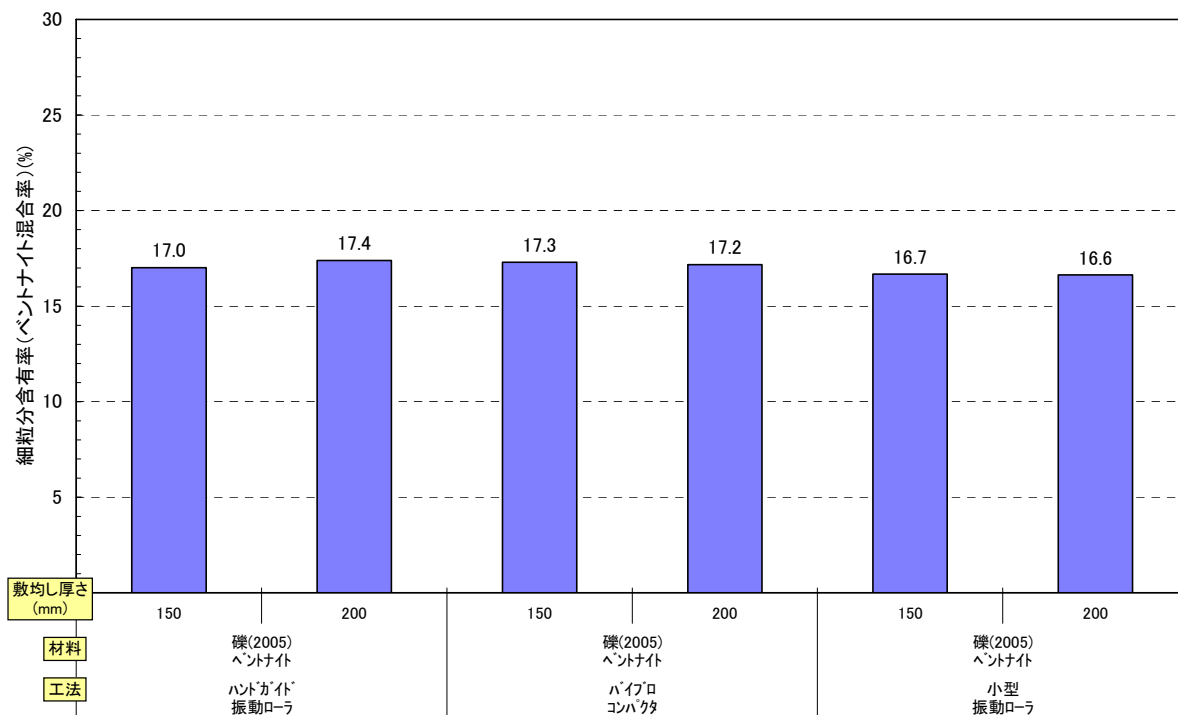


図 4.2-32 転圧試験後のベントナイト混合率 (礫ベントナイト)

表 4.2-6 転圧試験結果 (ハンドガイド振動ローラ)

試験 ケース	機械	材料	敷均し 厚さ (mm)	含水比 (%)		乾燥密度 (Mg/m ³)		締固め度 (%)		細粒分含有率(%) (ベントナイト混合率)		
Case-1-1-1	ハンドガイド 振動ローラ	礫(2005) ベントナイト	150	9.7	10.5	1.990	1.971	100.7	99.7	16.4	17.0	
				10.8		1.936		97.9		17.3		
				10.2		1.990		100.7		16.6		
				11.1		1.966		99.5		17.6		
				10.9		1.967		99.5		17.4		
				10.4		1.973		99.8		16.7		
Case-1-1-2		10.8	10.9	200	10.8	10.9	1.974	1.974	99.9	99.8	17.4	17.4
					11.4		1.947		98.5		18.3	
					10.7		1.998		101.0		17.1	
					11.7		1.939		98.1		18.4	
					9.9		2.026		102.5		15.8	
					10.9		1.957		99.0		17.3	
Case-1-2-1	ハンドガイド 振動ローラ	砂ベントナイト	150	14.3	14.3	1.828	1.818	101.0	100.4	15.1	15.2	
				14.2		1.823		100.7		15.0		
				14.4		1.848		102.1		15.1		
				14.4		1.773		97.9		15.2		
				14.2		1.838		101.5		15.2		
				14.4		1.798		99.3		15.3		
Case-1-2-2		13.9	14.2	200	13.9	14.2	1.823	1.773	100.7	97.9	14.8	14.9
					14.2		1.745		96.4		15.1	
					14.4		1.772		97.9		15.1	
					14.3		1.771		97.8		14.9	
					14.1		1.746		96.5		14.9	
					14.0		1.779		98.3		14.8	
Case-1-2-3	14.6	14.5	250	14.6	14.5	1.804	1.775	99.7	98.1	15.1	15.0	
				14.6		1.777		98.2		15.0		
				14.6		1.726		95.4		15.0		
				14.3		1.790		98.9		14.8		
				14.4		1.784		98.6		15.0		
				14.6		1.768		97.7		15.0		

表 4.2-7 転圧試験結果 (バイブロコンパクタ)

試験 ケース	機械	材料	敷均し 厚さ (mm)	含水比 (%)		乾燥密度 (Mg/m ³)		締固め度 (%)		細粒分含有率(%) (ベントナイト混合率)	
Case-2-1-1	バイブロ コンパクタ	礫(2005) ベントナイト	150	11.1	10.7	1.947	1.918	98.5	97.0	18.1	17.3
				10.4		1.966		99.5		16.6	
				10.7		1.913		96.8		17.1	
				10.5		1.888		95.5		17.1	
				11.3		1.890		95.6		17.9	
				10.2		1.902		96.2		16.8	
Case-2-1-2		10.6	1.951	200	10.4	1.992	100.7	98.7	16.7	17.2	
					11.4	1.948	98.6		18.2		
					9.7	1.964	99.3		16.0		
					11.5	1.917	97.0		18.5		
					10.1	1.950	98.7		16.1		
					10.7	1.935	97.9		17.4		
Case-2-2-1	14.2	1.813	150	14.2	14.2	1.847	100.2	102.0	100.2	15.2	15.1
				14.2		1.813		100.2		14.9	
				14.1		1.806		99.8		15.1	
				14.3		1.824		100.8		15.1	
				14.1		1.801		99.5		15.1	
				14.3		1.789		98.8		15.2	
Case-2-2-2	14.5	1.786	200	14.4	14.5	1.830	98.7	101.1	98.7	14.8	14.8
				14.6		1.758		97.1		14.8	
				14.2		1.790		98.9		14.5	
				14.5		1.781		98.4		14.7	
				14.5		1.789		98.9		14.8	
				14.7		1.770		97.8		15.0	
Case-2-2-3	14.2	1.807	250	14.3	14.2	1.824	99.9	100.7	99.9	14.9	15.0
				14.3		1.791		99.0		14.8	
				14.0		1.815		100.3		14.8	
				14.3		1.813		100.2		15.1	
				14.0		1.803		99.6		15.3	
				14.2		1.799		99.4		15.1	

表 4.2-8 転圧試験結果（小型振動ローラ）

試験 ケース	機械	材料	敷均し 厚さ (mm)	含水比 (%)		乾燥密度 (Mg/m ³)		締固め度 (%)		細粒分含有率(%) (ベントナイト混合率)		
Case-3-1-1	小型振 動ローラ	礫(2005) ベントナイト	150	9.9	10.3	2.053	2.018	103.8	102.1	16.1	16.7	
				10.3		2.021		102.2		16.9		
				10.8		1.983		100.3		17.4		
				11.0		1.987		100.5		17.5		
				10.0		2.031		102.8		16.0		
				9.8		2.035		102.9		16.1		
Case-3-1-2		200	10.3	9.7	2.002	2.036	101.3	103.0	17.5	16.6		
			9.9		2.041		103.2		16.7			
			9.4		2.060		104.2		16.0			
			9.8		2.045		103.5		16.8			
			9.1		2.052		103.8		15.7			
			9.9		2.015		101.9		17.2			
Case-3-2-1	砂ベントナイト	150	14.3	14.7	14.3	1.766	1.822	97.6	100.6	15.3	15.2	
				14.5		1.860		102.8		15.2		
				14.3		1.817		100.4		15.0		
				14.2		1.848		102.1		15.3		
				14.2		1.798		99.3		15.3		
				14.2		1.840		101.7		15.3		
Case-3-2-2		200	14.5	14.5	14.6	14.5	1.802	1.795	99.6	99.2	15.1	15.1
					14.5		1.834		101.3		15.0	
					14.5		1.786		98.7		15.1	
					14.2		1.783		98.5		15.0	
					14.4		1.786		98.7		15.2	
					14.5		1.779		98.3		15.2	
Case-3-2-3	250	14.2	14.2	14.0	14.2	1.831	1.810	101.2	100.0	14.7	14.8	
				14.0		1.826		100.9		14.6		
				14.1		1.801		99.5		14.8		
				14.3		1.803		99.6		14.9		
				14.2		1.778		98.2		14.8		
				14.4		1.823		100.7		15.0		

表 4.2-9 吹付け試験結果

試験 ケース	機械	材料	含水比 (%)		乾燥密度 (Mg/m ³)		締固め度 (%)		細粒分 含有率(% (ベントナイト 混合率)		施工量 (kg)	リバウンド 量(kg)	リバウンド 率(%)
Case- 4-1	圧力 釜式 吹付 け機	砂ベントナイト	15.7	15.6	1.683	1.683	93.0	93.0	15.5	15.5	114.6	7.8	6.8
			15.6		1.669		92.2		15.4				
			15.5		1.675		92.5		15.3				
			15.7		1.695		93.7		15.4				
			15.7		1.685		93.1		15.5				
			15.7		1.692		93.5		15.6				
Case -4-2		礫(2005) ベントナイト	11.8	11.8	1.881	1.869	95.2	94.6	21.5	21.8	42.9	9.7	22.6
			11.7		1.856		93.9		21.4				
			11.5		1.853		93.7		21.8				
			12.4		1.879		95.1		22.0				
			11.8		1.867		94.4		21.8				
			11.5		1.879		95.1		22.5				
Case -4-3		礫(1005) ベントナイト	13.0	13.0	1.850	1.844	96.8	96.4	19.9	19.6	73.2	7.4	10.1
			13.2		1.851		96.8		19.8				
			13.0		1.830		95.7		19.4				
			13.0		1.838		96.1		19.9				
			12.8		1.850		96.8		19.2				
			12.8		1.843		96.4		19.2				

(3) 締固め特性等評価試験結果のまとめ

締固め特性等評価試験の目的は、複数の機械および施工法により実施し、品質（仕上り品質のばらつきを含む）および施工性等の所要の項目についてのデータ収集・確認を行い、ベントナイト混合土の施工への適用性を検討するものである。

本試験での施工方法は、転圧工法と吹付け工法とした。試験に使用した機械は、最近の検討事例[8]からピックアップし、転圧工法は3種類（ハンドガイド振動ローラ、バイブロコンパクタ、小型振動ローラ）とし、吹付け工法は、1種類（圧力釜式吹付け機）を採用した。

本試験に使用したベントナイト混合土は、機械や施工方法の違いによる品質を確認する目的であるため、全て品質の安定しているアイリッヒミキサーにより混練し、材料の統一を図った。なお、含水比は W_{opt} （A法）+1%と設定した。

転圧工法による確認試験は、締固めエネルギーの異なる機械（ハンドガイド振動ローラ、バイブロコンパクタ、小型振動ローラ）、材料配合（砂ベン、礫ベン（2005））、敷均し厚さ（150mm、200mm、250mm）をパラメータとして実施した。品質確認項目は、転圧が終了した段階の乾燥密度と含水比である。なお、敷均し後、転圧 Pass 毎に層厚を計測（レベル測量）し経時変化を確認した。

吹付け工法は、機械は1種類であるが、材料配合を3種類（砂ベン、礫ベン 2005、礫ベン 1005）とし、厚さ 0.2m 程度、施工面積 0.5m×0.5m 程度吹付けを行った時の品質を確認した。品質確認項目は、乾燥密度、含水比、リバウンド率、粒度分布である。

以下、評価項目ごとに試験結果を整理する。

1) 転圧工法における振動 Pass 数

- ・機械および敷均し厚の違いによる必要振動 Pass 数（1Pass=片道）は、表 4.2-10 のとおり整理した。

- ・各転圧機械（締固めエネルギー）による違いの観点では、施工層厚の高さが収束するまでに必要な振動 Pass 数を比較すると、敷均し厚さや材料配合による違いはなく、バイブロコンパクタ→ハンドガイド振動ローラ→小型振動ローラの順で振動 Pass 数が少なくなった。これは、締固めエネルギーが大きいほど少ない Pass 数で締固めできることを示している。ただし、本試験では、使用機械による相対的な比較評価を行ったため、今後、使用機械と締固めエネルギーの関係性を定量的に計測し、締固め性を評価することで様々な使用機械の適用性の観点で実用的な基礎データが得られると思われる。

- ・必要振動 Pass 数は、敷均し厚さが厚くなるとほぼ比例的に増加する結果が得られた。ただし、小型振動ローラについては、砂ベンの場合、150～200mm の敷均し厚までは、4Pass で収束する結果が得られた。

表 4.2-10 機械および敷均し厚の違いによる必要振動 Pass 数

材料	機械	機械の仕様			必要振動 Pass 数		
		重量	起振力	速度	敷均し厚 150mm	敷均し厚 200mm	敷均し厚 250mm
砂ベン	バイブロコンパクタ	340kg	46kN	1.3km/h	10	12	14
	ハンドガイド振動ローラ	635kg	11.8kN	3.5km/h	8	10	12
	小型振動ローラ	1,548kg	80kN	1.2km/h	4	4	6
礫ベン (2005)	バイブロコンパクタ	340kg	46kN	1.3km/h	10	12	
	ハンドガイド振動ローラ	635kg	11.8kN	3.5km/h	8	10	
	小型振動ローラ	1,548kg	80kN	1.2km/h	4	6	

2) 乾燥密度と含水比

・含水比は Wopt (A 法) +1%と設定しアイリッヒミキサーで混練した材料で統一したため、ここでは、転圧工法における使用機械と敷均し厚の違いによる乾燥密度、施工方法の違い（転圧工法と吹付け工法）による乾燥密度を比較した。

・転圧工法による乾燥密度は、全てのケースが A 法による締固め曲線上の上下に±0.1Mg/m³程度の範囲でばらつく結果である。ただし、材料配合の違いで比較すると、砂ベントナイトの場合は、施工機械による仕上がり密度の違いはそれほど大きくないが、礫ベントナイトの場合は、バイブロコンパクタ→ハンドガイド振動ローラ→小型振動ローラの順で施工機械の施工能力が高くなるにつれ仕上がり密度も高くなっている。

・吹付け工法による乾燥密度は、砂ベン、礫ベン (2005) とともに、A 法による締固め曲線より低い密度 (-0.1Mg/m³程度) となっている。ただし、転圧工法に比べて密度のばらつきは小さくなっている。

3) 締固め度

締固め度は、室内締固め試験による最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と各試験ケースの乾燥密度との比 (%) で表す。この値によって締固めの程度を確認した。

なお、近年、一般の土工工事等では、施工全体の品質を迅速に把握する目的で、ラジオアイソトープ (RI) 法による測定が利用されている。今後、実用的なベントナイト混合土の締固め管理を迅速に行う観点で、このような締固め管理方法を複数抽出しその適用性についての検討が望まれる。

以下、締固め度について整理する。

・転圧工法による締固め度は、いずれの材料でも全ての施工機械で締固め度として 95%以上の高い密度が得られている。

・吹付け工法による締固め度は、転圧工法 (バイブロコンパクタの例) で示すと 97.0~100.2%であるに対し、吹付け工法は 93.0~96.4%となり、相対的に小さい結果となる。ただし、いずれの材料配合でも締固め度は 90%以上となっている。

4) 吹付け工法のリバウンド率

・材料配合の違いの観点でリバウンド率を比較すると、砂ベントナイト：6.8%→礫ベントナイト（1005）：10.1%→礫ベントナイト（2005）：22.6%の順に高くなる傾向を示した。すなわち、礫の最大粒径が大きいほど、リバウンドが多い。

・材料配合の違いの観点で吹付け前後の粒度分布およびリバウンド材の粒度分布を比較すると、リバウンド率の傾向と同じように、砂ベントナイト→礫ベントナイト（1005）→礫ベントナイト（2005）の順で吹付け前後およびリバウンド材の粒度分布に違いが大きくなった。すなわち、礫の最大粒径が大きいほど吹付け前後およびリバウンド材の粒度分布の違いが大きい。これはリバウンド材に礫分が多く含まれているためである。

5) 吹付け後の試験体のベントナイト混合率

・材料配合の違いの観点で吹付け後の試験体のベントナイト混合率を比較すると、砂ベントナイト：15.5%→礫ベントナイト（1005）：19.6%→礫ベントナイト（2005）：21.8%の順にベントナイト混合率が高くなっている。これは、リバウンド材に礫分が多いため、結果として吹付け後の試験体のベントナイトの割合が増えてしまったためである。この結果から、砂ベントナイトは材料製造時の設定混合率（15%）に近い値で吹付けが可能であるが、礫ベントナイトはベントナイト混合率が20%程度まで上昇するため、ベントナイトの材料コストが高くなる問題やリバウンド材の廃棄の問題が残る。以上より、今後の課題は、材料配合の段階でリバウンド率を考慮した配合を行うか、リバウンド率を低減させる工夫（例えば、ベントナイト混合土の材料分離を低減させる等）が挙げられる。

【参考文献】

- [1] 伊藤裕紀、谷智之、千々松正和、山本卓也：ベントナイトの含水調整に関する検討、土木学会第 62 回年次学術講演会、pp.163-164、CS5-002、2007
- [2] 岡本大、西嶋久寿、谷智之、河原忠弘、千々松正和、高橋隆太郎、荻原績：低配合ベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討、pp.55-56、CS3-028、2011
- [3] 石濱裕幸、千々松正和、荻原績、中越章雄、西嶋久寿、伊藤裕紀、谷智之、河原忠弘：混合率 30～50%のベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討、pp.59-60、CS3-030、2011
- [4] 久慈雅栄、福田淳、南浩輔、前田和亨、磯野宗一：ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発(その3)－ミストブレンダー工法の実規模プラント概要－、土木学会第 67 回年次学術講演会、pp.23-24、CS13-012、2012
- [5] 福田淳、久慈雅栄、南浩輔、前田和亨、磯野宗一：ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発(その4)－ミストブレンダー工法によるベントナイト混合土の品質－、土木学会第 67 回年次学術講演会、pp.25-26、CS13-013、2012
- [6] 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改定版)、第 6 編第 2 章 土の透水試験、pp.334～347、2000
- [7] 平成 24 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 施工確認試験(上部埋戻し材)、p.2-16
- [8] 河野伊一郎、西垣誠：室内透水試験法に関する 2、3 の考察、土質工学会論文報告集、Vol.22、No.4、pp.181-190、1982.
- [9] Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International D5084-10.
- [10] 千々松正和、石濱裕幸、田嶋宏之、荻原績、中越章雄：放射性廃棄物処分における埋戻し材の施工方法に関する検討、第 48 回地盤工学研究発表会、pp.2181-2182、1091、2013

第5章 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験

第5章 上部埋戻し材施工確認試験・初期性能確認試験

5.1 施工確認試験

【目的】

上部埋戻し材の施工確認試験は、対象部位が上部緩衝材の上部にあたり、上部空間が非常に狭隘で、上部・側部がアーチ形の特異形状をした空間の閉鎖を行うこととなることから、使用材料、使用機械、施工方法等を選定して施工試験を実施し、その使用材料、施工性等を確証するものである。

今回の試験の目的は、平成25年度実施した上部埋め戻し材施工確認試験（机上検討および室内試験）での検討結果を踏まえ、材料として、所定の配合、所定の含水比に調整したベントナイト混合土を使用し、「転圧工法」と「吹付け工法」を併用した方法で上部埋戻し材の施工を実施することにより、施工性を確認するものである。また、施工後の上部埋戻し材の品質を確認することにより、材料・施工方法・品質に関する管理手法等における重点管理項目を抽出し、品質確保のための管理方法の確立に資するデータの収集を行うものである。

【まとめ】

本試験においては、現実的な土木技術の採用とその施工方法により施工された埋戻し材の性能が要求性能を満足するか否かを確認することが重要である。しかしながら、埋戻し材の性能が定量的に規定されていない現時点においては、まずは、最も一般的（汎用的）と思われる材料製造方法および施工方法で施工試験を行なうこととした。埋め戻し材料としては、ベントナイトと砂を混合したベントナイト混合土を使用することとした。

ベントナイト混合土の製造は、は自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた。施工方法は、吹付けと転圧工法を試験対象とした。吹付け施工では、一般的な機械である圧力釜式吹付け機の一部改良型を、転圧施工ではバイブロコンパクタを使用した。転圧工法での材料撒きだしは、人力で敷均しを行った。

自走式土質改良機を用いてベントナイト混合土を製造した結果、設定値（ベントナイト混合率15%、含水比14.5%）に対して混合率は±1.5%程度、含水比は±2%程度と、ややばらつきの大い結果となった。また、施工後の品質については、吹付け施工と転圧施工で大きな違いは無いという結果が得られた。施工後の乾燥密度は1.60～1.80Mg/m³程度で、平均が約1.72Mg/m³となり、締固め度は90～100%程度で、平均締固め度は約95%であった。

吹付け工法において発生するリバウンド材のリバウンド率は約15%であった。リバウンド材の多くは砂分であり、吹付け施工された埋戻し材のベントナイト混合率は転圧施工された埋戻し材よりも高い結果となった。そのため、仕上りの乾燥密度は吹付け施工に比べて転圧施工の方が若干高いものの、有効粘土乾燥密度は吹付け施工の方が高くなっている。

今回の施工確認試験は汎用的な機械を用いて施工した。製造した混合土の混合率がおおよび含水比のばらつきや、施工後の乾燥密度のばらつきについて、これを低減させる必要があるか否かは施工後の品質が埋戻し材の要求性能を満足しているか否かを確認した上で判断する必要がある。

5.1.1 施工確認試験の概要

(1) 施工確認試験の方針・目的

本試験は、日本原燃㈱が進めている低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設検討のための試験空洞内において、先行して実施した底部緩衝材、底部低拡散材、底部・奥部・側部・上部コンクリートピット、および側部・上部低拡散材の施工確認試験で構築された地下空洞型処分施設の模擬施設で実施した。すなわち、施工箇所および周辺環境の面において、実施工と同様の条件下での実規模大施設の閉鎖に係る試験であり、原位置での複数の施工方法による施工性の確認、および品質管理に関わるデータの収集を行うものである。

本試験においては、現実的な土木技術の採用とその施工方法により施工された上部埋戻し材の性能が、施設に要求される性能を満たしているかどうかを確認することが重要である。このため、上部埋戻し材の施工確認試験において、土質系材料を使用して、転圧および吹付けの複数の施工方法による施工を実施し、その施工方法の実施工への適用性の検討、および施工された埋戻し材が要求性能を満足するか否かを確認して、今後の実施工に反映できるための施工方法、および品質管理方法を明らかにすることを試験の目的とした。

上部埋戻し材の施工確認試験は、上部緩衝材構築後、その上部右側隅角部に高さ約 3.0m の埋戻し材を構築する試験である。ベントナイトと砂を練混ぜて製造したベントナイト混合土を材料として使用した。

上部埋戻し材の施工は、施工部位の形状等制約条件を基に、振動工法と吹付け工法を併用して行った。試験空洞の側部や天盤近傍では振動転圧による施工ができないため、これらの箇所の施工は吹付け工法にて施工した。異なる工法を併用して施工することにより、所定の品質の埋戻し材が適切に施工できるのか、また空洞の天盤まで隙間なく施工することができるのかを確認することを目的として実施した。

ベントナイト混合土の製造は、連続製造が可能で製造効率の高い自走式土質改良機を使用し、ベントナイト（クニゲルV1）：砂＝15：85の割合で混合製造した。

振動転圧の機械については、実施工では小型転圧機械の他に中型転圧機械の使用も想定されるが、今回の試験ヤードは極めて狭いため、小型転圧機械（バイブロコンパクト）を使用した。また、吹付け機械は、コンクリート吹付け等でも実績のある湿式の圧力釜式吹付け機を使用した。

また、試験施設での試験の前に、転圧工法および吹付け工法について屋外で予備試験である試験施工を実施し、施工確認試験における施工仕様、および材料仕様（施工時含水比）の設定を行うこととした。

(2) 施工確認試験の計画

上部埋戻し材の施工方法としては転圧工法と吹付け工法がある。試験空洞での施工確認試験の実施前にそれぞれの工法について試験施工を行い、施工確認試験において実施する施工仕様（転圧施工時の敷均し厚さ、転圧回数等）および材料仕様（施工時含水比）の設定を行った。

1) 試験の目標の設定

上部埋戻し材の具体的な性能の目標の数値は、今後選定される処分場サイトの特性や、処分概念によって決まるものと考えられる。今回の試験は、平成 25 年度の検討結果を踏まえて実施する確証試験であり、上部埋戻し材に期待される機能を踏まえて、暫定的な目標値を設定することとした。

平成 25 年度の検討結果より、期待される機能として施工性、透水性、力学安定性、物理・化学的安定性の機能が挙げられる。この中で、定量値として設定できる機能として透水性を期待される機能として設定し、管理目標値を 1.0×10^{-8} (m/s) に設定した。

2) 施工時含水比（材料仕様）の設定

ベントナイト混合土の初期含水比と透水係数の関係を取得し、それに基づき施工時含水比を設定する。図 5.1-1 には、施工時含水比設定のための室内試験結果を示す。

所定の配合（クニゲル V1：砂＝15：85）のベントナイト混合土に対して、締固め試験を実施した結果得られた締固め曲線から最適含水比（ $\omega_{opt}=13.7\%$ ）、 $\omega_{opt}-3\%$ 、 $\omega_{opt}+3\%$ 、 $\omega_{opt}+6\%$ の時の乾燥密度を設定し、その初期含水比および乾燥密度の条件で透水試験を実施した（それぞれ、KS-OPT、KS-OPT-3、KS-OPT+3、KS-OPT+6）。また、締固め曲線上の密度に対して 95%の密度の条件での透水試験も実施した（それぞれ、KS-OPT(95)、KS-OPT+3(95)）。透水試験の結果を(b)に示す。

図 5.1-1 より、最適含水比より少し高めの方の含水比の方が、乾燥密度は低いものの透水係数は小さくなっていることが分かる。この結果を踏まえて、施工時含水比は 15.5%（ $\omega_{opt}+2\%$ 程度）と設定する。

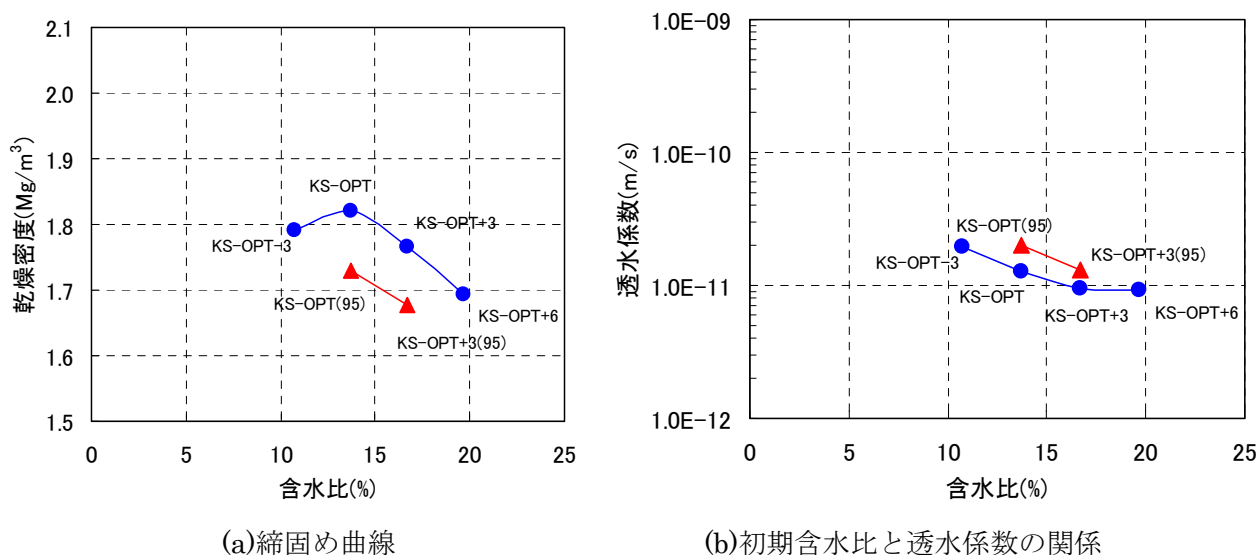


図 5.1-1 ベントナイト混合土の施工時含水比設定のための試験結果

図 5.1-1 の結果より、締固め規定値が 100%（締固め曲線）の時と 95%の時とで、透水係数には大きな差が無いことが分かる。このことから、施工時の管理目標は締固め規定値 95%以上とする。

よって、本施工確認試験で行う実機を用いた材料製造および施工を事前に試験空洞外にて実施し、締固め規定値が95%以上となるような施工仕様を設定した予備施工を行い、施工品質を確認する。転圧施工はバイブロコンパクタ、吹付け施工は圧力釜式吹付け機を用いて施工した。

転圧施工においては、材料の敷均し厚さおよび精度が施工後の品質に大きく影響を与えることが確認されている。底部緩衝材の施工試験においては、大型のアスファルトフィニッシャを改良して適用した。側部緩衝材の際には、施工幅が1mであり既存の機械が使用できないため、新規に敷均し機械を開発して適用した。いずれも所定の品質（敷均し厚さ200mm程度）での敷均しを行うことが可能であり、転圧後の品質（密度）にも問題が無いことが確認できた。

上部埋戻し材の場合は、施工範囲が底部緩衝材と同様であることから大型フィニッシャを用いて敷均しを行うことが理想であるが、上部空間に制限があるため、このような大型機械での施工は現実的でない。新規機械を開発するという手段もあるが、まずは既存機械での適用可能性について検討した。

図5.1-2に示す小型フィニッシャの適用性について検討が実施されている。その結果、軽微な改良を施すことによりベントナイト混合土の敷均しは可能で、図5.1-3に示すように一定の厚さで敷均すこと可能である。ただし、小型のフィニッシャであるため200mmでの敷均しは困難であるが、150mm程度であれば問題なく敷均しが実施できている。

この結果を踏まえて、表5.1-1に示すように敷均し厚さをパラメータにした転圧施工を行い、締固め規定値95%以上を満足する敷均し厚さの設定を行なう。150mmの敷均し厚さは小型フィニッシャを想定しているが、200mm、250mmの厚さは人力での敷均しを想定している。施工面積は各ケース4.0m×1.0m程度とし、各ケース1層の施工を行なう。転圧試験終了後、施工後の品質（仕上り密度、含水比、混合率）の確認を行なう。品質確認試験の数量は各ケース3点とする。

吹付け工法に関しては、表5.1-2に示すケースを実施し、仕上り密度、リバウンド率等について確認する。施工はB0.5m×W0.5m×h0.2m程度とし、試験箱の中に吹付け施工する。



図 5.1-2 小型フィニッシャーによる敷均し



図 5.1-3 小型フィニッシャーによる敷均し結果

表 5.1-1 試験施工（転圧）ケース

試験ケース	機械	材料	設定含水比 (%)	敷均し厚さ(mm)	品質確認試験数
Case1-1	バイブロ コンパクタ	クニゲル V1+砂	ω_{opt} (A法) +2%	150	3
Case1-2				200	3
Case1-3				250	3

品質確認試験項目 = 密度、含水比、混合率

表 5.1-2 試験施工（吹付け）ケース

試験ケース	機械	材料	含水比(%)	品質確認試験数
Case2-1	圧力釜式吹付け機	クニゲル V1+砂	ω_{opt} (A法) +2%	3

品質確認試験項目 = 密度、含水比、混合率、リバウンド率

3) 試験場所

上部埋戻し材施工確認試験は試験空洞の奥で、上部緩衝材上部の右側隅角部の、幅 6.275 m×奥行き 5.70m、の範囲で行った。施工高さは約 3.0mである。図 5.1-4 に上部埋戻し材構造図を、図 5.1-5 に上部埋戻し材の完成図を示す。また、試験状況のイメージ図を図 5.1-6、および図 5.1-7 に示す。

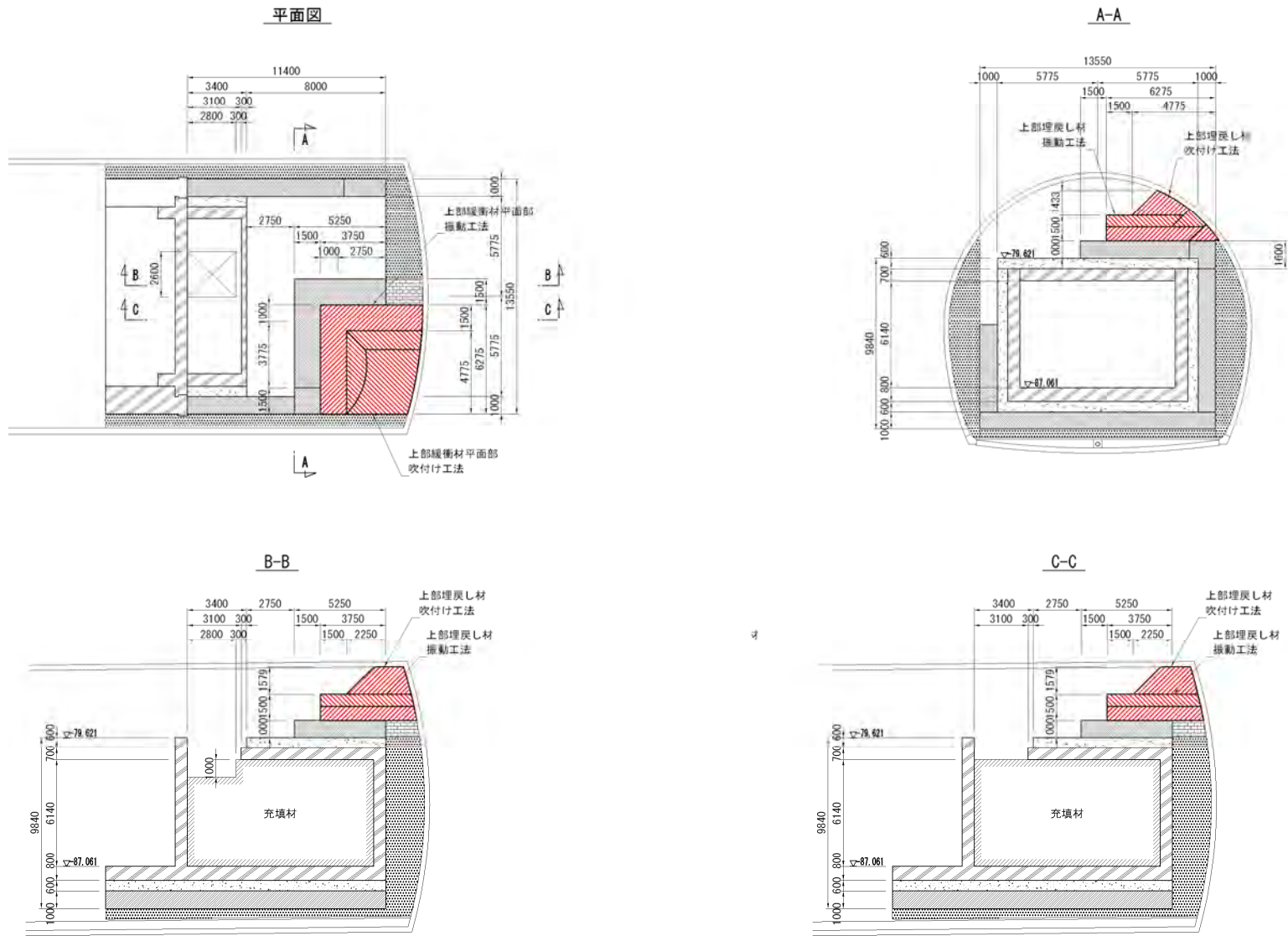


図 5.1-4 上部埋戻し材構造図

上部埋戻し材
吹付け工法 19.5m³

上部埋戻し材
振動工法 34.8m³

5-7

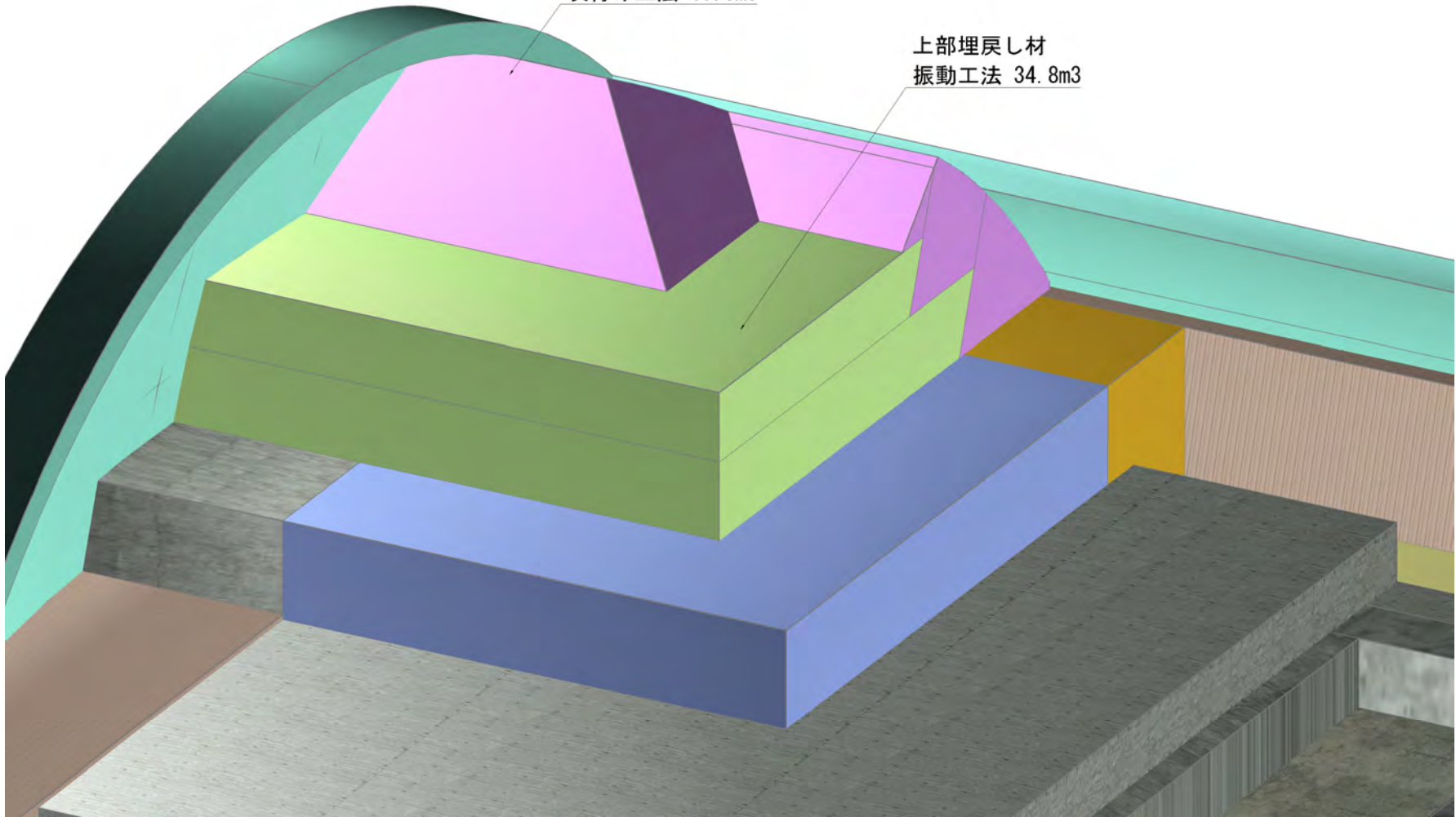


図 5.1-5 上部埋戻し材完成図

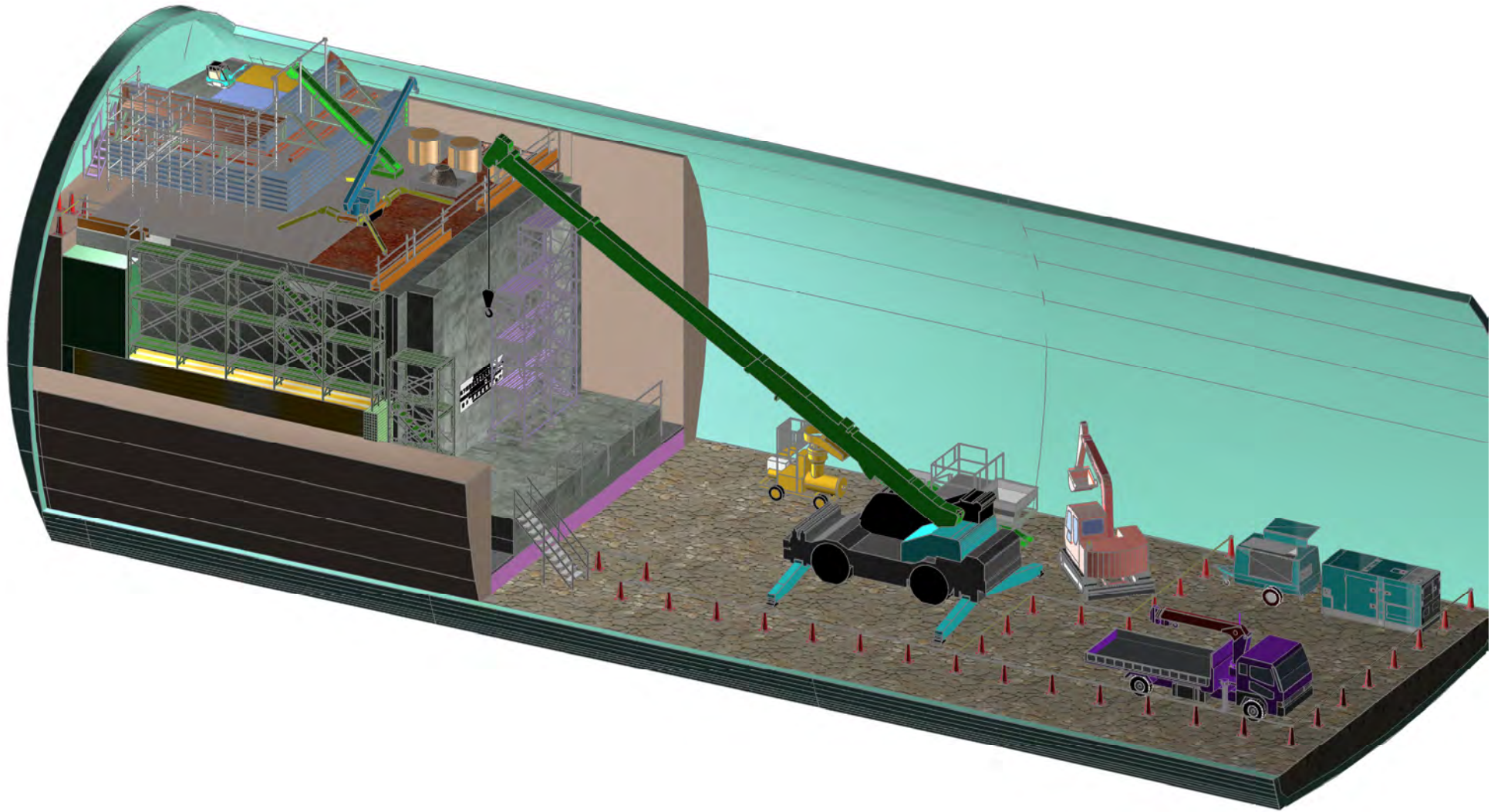


図 5.1-6 試験状況イメージ図（全体）

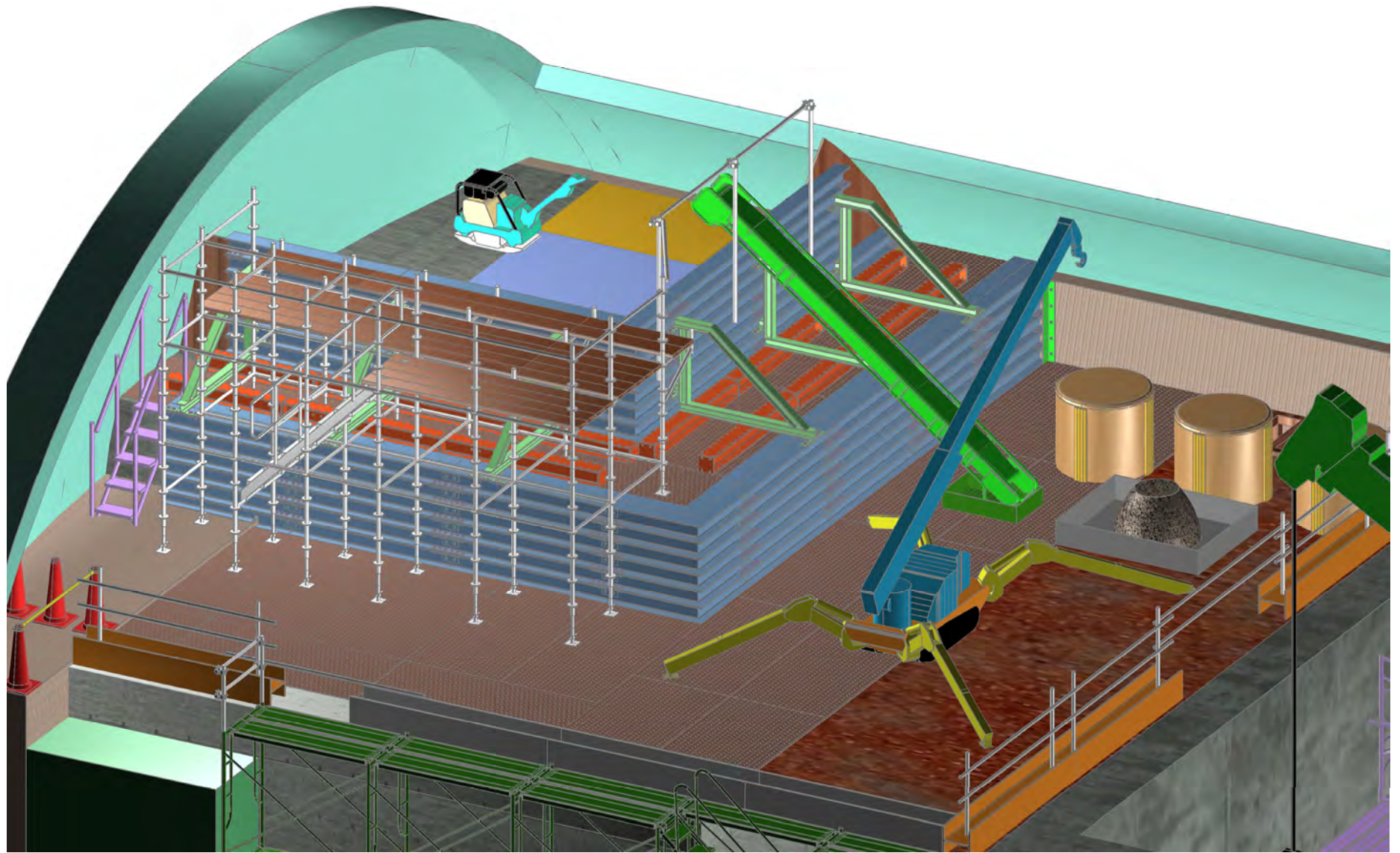


図 5.1-7 試験状況イメージ図 (拡大)

4) 施工確認試験の施工フロー

上部埋戻し材の施工確認試験の施工フローを図 5.1-8 に示す。

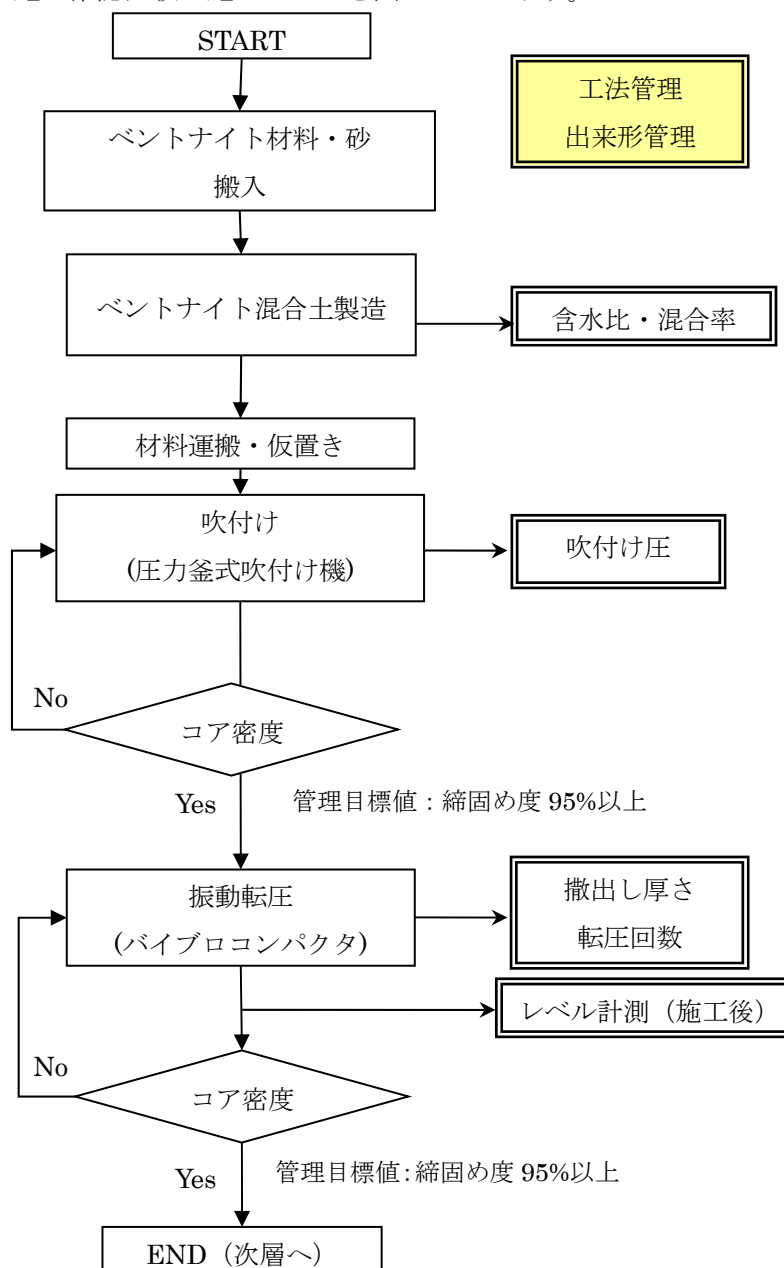


図 5.1-8 施工フロー

上部埋戻し材の施工は図 5.1-9 に示すような手順で実施した。最初に転圧機械による施工が出来ない隅角部を吹付け工法により施工を行い（1次吹付け）、その後、平面部を転圧工法により施工した（1次転圧）。その後、空洞壁面近傍が転圧機械による施工が出来なくなった時点で、再度、隅角部を吹付けにより施工した（2次吹付け）。これを繰り返し（3次転圧まで）、最後は吹付け施工により試験空洞の天盤まで施工を実施し（最終吹付け）、施工終了となる。このように、吹付けと転圧を交互に繰り返して施工を実施した。

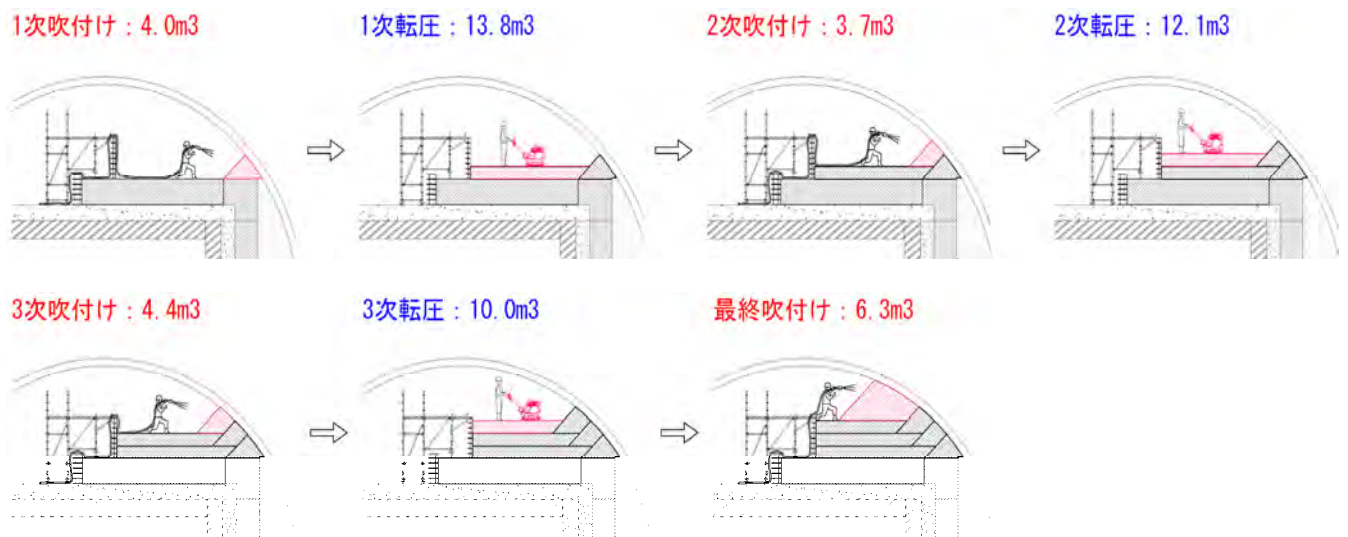


図 5.1-9 施工確認試験のの施工手順

5) 使用材料

上部埋戻し材の材料はベントナイトと砂（コンクリート砂）を重量比で 15 : 85 の割合で混合したベントナイト混合土を使用した。ベントナイト混合土の混合製造は自走式土質改良機を使用し、六ヶ所村内の日本原燃(株)敷地構外のヤードにて実施した。

なお、ベントナイトは山形県にあるクニミネ工業(株)左沢工場産の紛体ベントナイト（クニゲル V1）である。また、砂は青森県三沢産のコンクリート砂である。

6) 実施数量

試験数量は表 5.1-3 に示す通りである。

表 5.1-3 試験数量

項目	単位	数量	摘要
ベントナイト混合土の製造および複数施工による上部埋戻し材の施工	m ³	60	ベントナイトと砂等を所定の配合で混合し、所定の含水比に調整したベントナイト混合土を使用し、吹付け・転圧等の選定した複数の施工方法により、上部埋戻し材のうち、空洞アーチ部右側の一部（幅 6.7m 程度×長さ 6m 程度×高さ 3m 程度）を施工する。

7) 実施工程

全体工程表を表 5.1-4、試験空洞内の作業の全体工程を表 5.1-5、1 サイクル当りの作業工程を表 5.1-6、表 5.1-7 に示す。

表 5.1-4 全体工程表

作業内容	2013年(平成25年)			2014年(平成26年)		
	10月	11月	12月	1月	2月	3月
全体計画の策定						
試験準備						
施工確認試験						

表 5.1-5 工事工程表 (詳細)

年月日	2014/1月														2014/2月																																												
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
項目																																																											
計画・検討・事前準備																																																											
計画・検討																																																											
教育等																																																											
新規入場者教育																																																											
合同避難訓練																																																											
仮設工																																																											
試験室																																																											
現場詰所																																																											
準備工																																																											
機材搬入																																																											
型枠設置																																																											
ベントナイト準備																																																											
六ヶ所での受け取り																																																											
含水比測定(六ヶ所)																																																											
施工確認試験																																																											
吹付け工法																																																											
転圧工法																																																											
片付け																																																											
初期性能試験																																																											
サンプリング(別途業務)																																																											
室内試験																																																											

5.1.2 施工確認試験の内容

(1) 使用機械

主要な使用機械の一覧を表 5.1-6 に示す。

表 5.1-6 主要使用機械一覧表

使用用途	名称	型式・仕様	単位	数量	備考
材料製造	自走式土質改良機	SR-2000G	台	1	
	バックホウ	0.7m ³	台	1	
	バックホウ	0.45m ³	台	2	
運搬・仮置き	ユニック車	4 t	台	1	
	フォークリフト	2 t	台	1	
材料荷揚げ	ラフタークレーン	25 t 吊	台	1	
	カニクレーン	2.98 t 吊	台	1	
転圧	バイプロコンパクタ	MVH-306DSC-PAS	台	1	
吹付け	圧力釜式吹付け機	S4C-1T 改	台	1	

1) 自走式土質改良機 (SR-2000G)

本施工での施工を見据えて、連続式の土質改良機を材料調整機械として採用する。

機体後部の土砂ホッパーに砂を、機体前方の固化材ホッパーにベントナイトをいれ、混合攪拌し連続で埋戻し材を製造することが出来る。通常、土質改良機は高含水比土壌の改良に用いられるが、本機は土質改良機でありながら、加水機構が備わり適当な含水比に水分調整可能である点に特徴がある。図 5.1-10 に自走式土質改良機を、表 5.1-7 に自走式土質改良機主要緒元を示す。



図 5.1-10 自走式土質改良機

表 5.1-7 自走式土質改良機主要緒元

メーカー	日立建機
型 式	SR-2000G
機 体 長	12,560mm
機 体 高	4,510mm
機 体 幅	2, 990mm
機 体 重量	19,600kg
混合方式	2 軸パドルミキサ
混合機ホッパー容量	1.8m ³
混合機供給量	20~170m ³ /h
固化材ホッパー容量	3m ³
固化剤供給量	0.8~13.3m ³ /h

2) バイブロコンパクト (MVH-306DSC-PAS)

転圧工法に使用する重量 300kg の前後進型バイブロコンパクトを図 5.1-11 に示す。施工実績も多く、様々な工事で用いられている機種である。本機種は、運転終了時のエンジン切り忘れを防止する警告機構が備わっている。また、転圧センサー付きの機械を使用し、このセンサーの適用可能性についても検討することとした。表 5.1-8 には主要緒元を示す。



図 5.1-11 バイブロコンパクト

表 5.1-8 バイブロコンパクト主要緒元

メーカー	三笠産業
型 式	MVH-306DSC-PAS
機 体 長	1,570mm
機 体 高	1,120mm
機 体 幅	445mm
機 体 重量	330kg
周 期	73Hz
遠 心 力	45kN
エ ン ジ ン	ヤンマー空冷ディーゼル
速 度	0~23(m/min)

3) 圧力釜式吹付け機 (S4C-1T 改)

吹付けには、従来からあるコンクリート・客土等吹付けに広く利用される圧力釜式吹付け機の一部改良した機械を用いた。コンプレッサーからの圧縮空気により圧力釜内の材料を吹付けることが可能であり、多々の施工実績がある。圧力釜内には材料を送り出すハネが設置されており、このハネの配置・形状を埋戻し材に最適化した機械である(特許 出願中)。また、下釜の蓋には、その開閉状態に応じたセンサーが備わっており、蓋が開いた状態では羽根が回らない仕様になっている。

図 5.1-12 に吹付け機の外観を、表 5.1-9 に主要緒元を示す。



図 5.1-12 圧力釜式吹付け機

表 5.1-9 圧力釜式吹付け機主要緒元

メーカー	三和産業(株)
型式	S4C-1T 改
機体 全長	3400mm
機体 全高	2850mm
機体 全幅	1500mm
機体 重量	2400kg
原動機 種類	モーター
原動機 出力	11kw(インバーター制御)
バルブ操作	手動
タンク容量 (上釜)	272L
タンク容量 (下釜)	378L
最高使用圧力	0.88MPa(0.9kg/cm ²)
空気消費量	min10 m ³ /h

4) ラフタークレーン (25 t 吊)

試験空洞からコンクリートピット上部にフレコンバッグ (混合土) を移動するのに、25 t ラフタークレーンを使用した。図 5.1-13 に使用した 25 t ラフタークレーンを示す。



図 5.1-13 25 t ラフタークレーン

5) カニクレーン (2.98 t 吊)

コンクリートピット上部において、フレコンバッグ (混合土) を施工ヤードへ材料を投入するのに、カニクレーン (2.98 t 吊) を用いた。コンクリートピット上部で埋戻し材型枠設置・振動コンパクタ搬出等々の揚重作業に使用した。

図 5.1-14 にカニクレーンを、表 5.1-10 にカニクレーンの諸元を示す。



図 5.1-14 カニクレーン

表 5.1-10 カニクレーン主要諸元

メーカー	前田製作所
型 式	MC305C
機 体 長	4,285mm
機 体 高	1,695mm
機 体 幅	1,280mm (アウトリガー格納時)
機 体 重量	3,900kg
最大吊上げ量	2.98t×2.5m
走行速度	0~2.8km/h
定格出力	20.7ps/2,500rpm
燃料タンク容量	軽油 40 リットル

(2) 転圧工法および吹付け工法による施工確認試験実施内容

1) ベントナイト混合土製造・保管

上部埋戻し材の材料であるベントナイト混合土は、ベントナイト（クニゲルV1 クニミネ工業(株)）と、砂（三沢産のコンクリート用砂）を 15 : 85 に混合し、含水比を調整した混合土である。

ベントナイト混合土の混合製造（材料調整）は、日本原燃(株)の構外ヤードにて実施した。自走式土質改良機を使用して、所定の混合率、所定の含水比となるように混合製造した。製造したベントナイト混合土は、フレコンバッグに約 700kg 程度の重さに詰めて、製造ヤード内の倉庫に一時保管し、トラックによって試験空洞内に運搬した。

図 5.1-15 に材料製造フローを示す。また、図 5.1-16 に材料製造状況を、図 5.1-17 に混合土製造位置・運搬ルート図を、図 5.1-18 に倉庫への一時保管状況を示す。

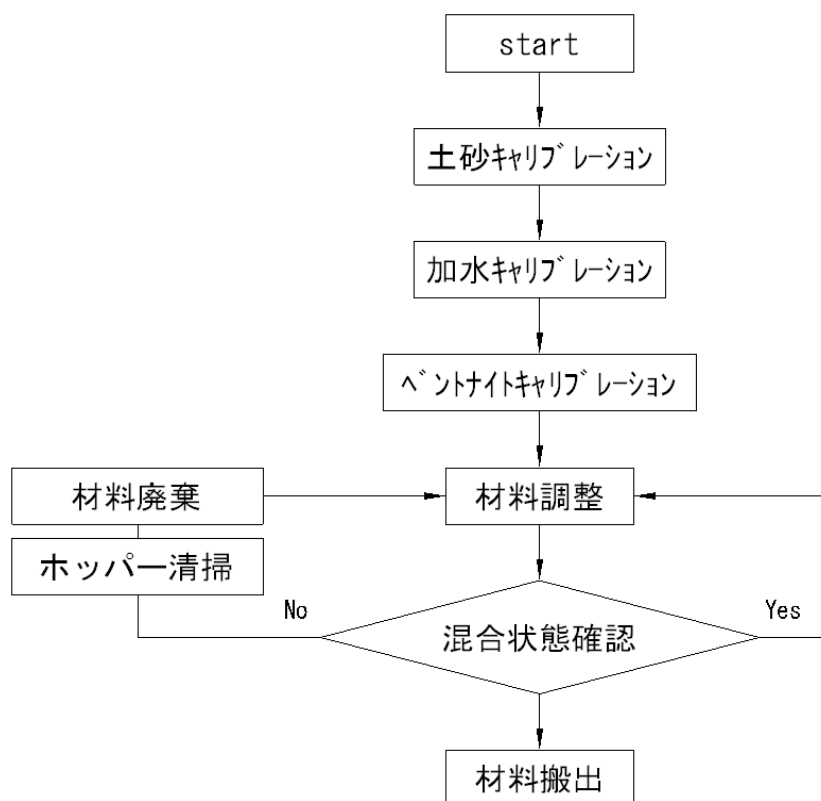


図 5.1-15 ベントナイト混合土製造フロー図



図 5.1-16 ベントナイト混合土製造状況



図 5.1-17 ベントナイト混合土製造位置・運搬ルート図



図 5.1-18 倉庫への一時保管状況

2) 材料仮置き

倉庫で一時保管したベントナイト混合土を、試験空内拡幅部およびコンクリートピット前面ヤードに仮置きした。これは、上部埋戻し材の施工確認試験の実施が厳寒期（1月～2月）となり、ベントナイト材料保管庫の仮置きでは材料が凍結する可能性があり、それを防止するため、試験空洞内への仮置きを行ったものである。図 5.1-19 にコンクリートピット前ヤード仮置き状況を示す。



図 5.1-19 コンクリートピット前面ヤード仮置き状況

3) 上部埋戻し材型枠設置

上部埋戻し材の試験エリアは、試験施設の上部の一部であるため、上部埋戻し材施工用の型枠を設置して施工ヤードとした。埋戻し材型枠(h=1.6m)は、H 鋼(H-200)を工場加工したものを使用した。各々の型枠はボルトにて接合し一体化させた。型枠設置にはカニクレーンを使用し、型枠同士の接続箇所には抑え金物を配置し緩衝材型枠に固定した。

図 5.1-20 に上部埋戻し材型枠詳細図を、図 5.1-21 に上部埋戻し材抑え金物詳細図を示す。また、図 5.1-22 に埋戻し材型枠設置状況を、図 5.1-23 に抑え金物設置状況を、図 5.1-24 に型枠設置後の内部状況を示す。

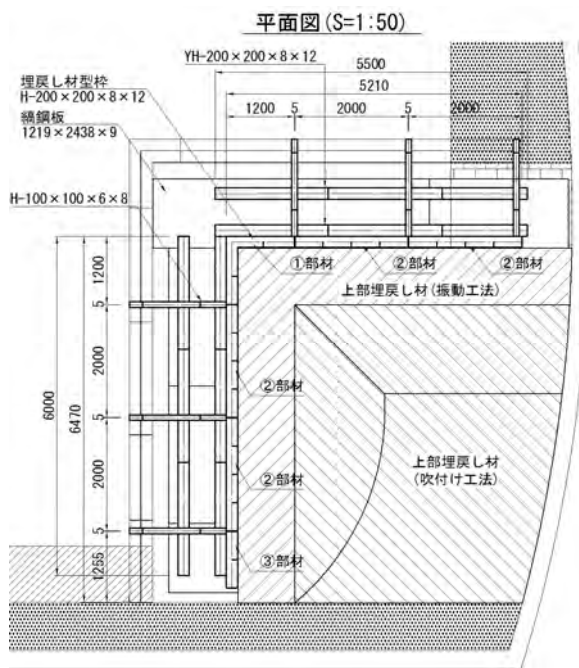


図 5.1-20 上部埋戻し材型枠詳細図

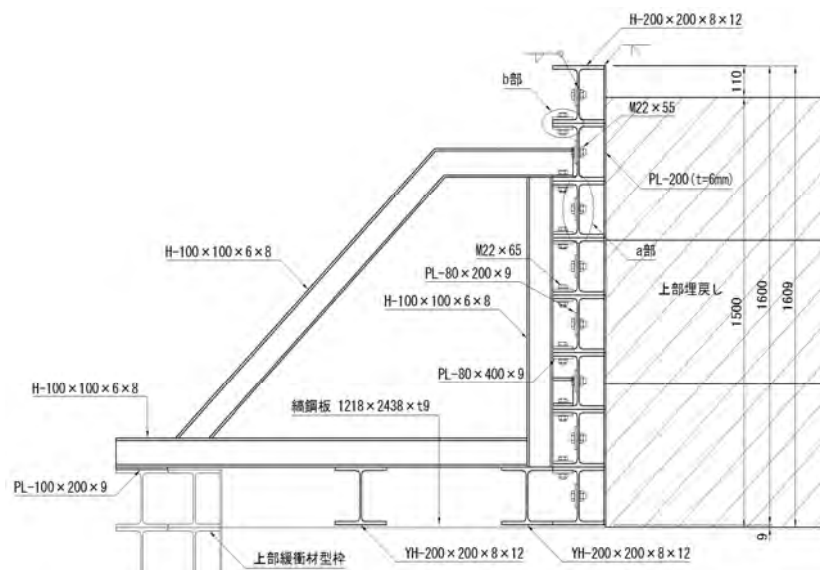


図 5.1-21 上部埋戻し材抑え金物詳細図



図 5.1-22 上部埋戻し材型枠設置状況



図 5.1-23 抑え金物設置状況



図 5.1-24 型枠設置後内部の状況

4) 吹付け工法

吹付けは、圧力釜式吹付けを使用し、ノズルを人間が支え人力にて実施した。吹付け箇所は、空洞天井がアーチ形状した施工箇所のうち、転圧施工ができない箇所とした。

吹付け工法の施工手順を図 5.1-25 に示す。

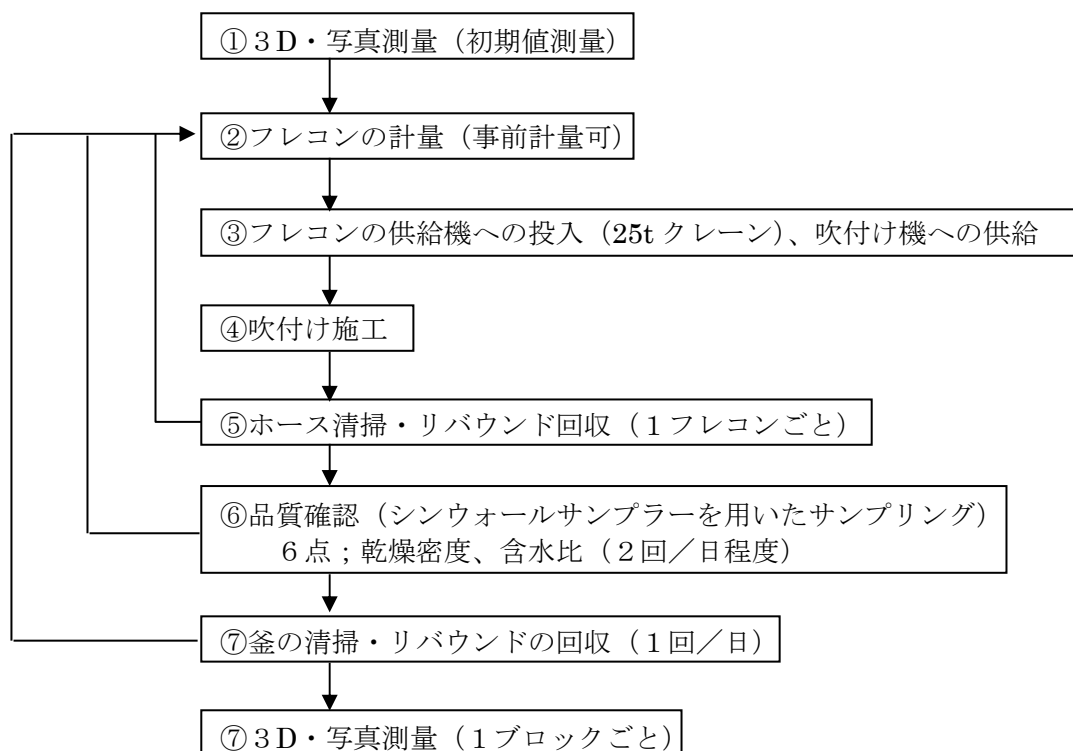


図 5.1-25 吹付け工法の施工手順

a. 材料供給

図 5.1-26 には、吹付け施工時の機械の配置図を示す。吹付け機はピット下部に配置し、吹付けホースをピット上部まで這わせ、ピット上部の施工箇所の施工を行った。図 5.1-27 にはピット下の吹付け設備の配置状況を示す。

吹付け機への材料供給は、フレコンを 25t ラフタークレーンで吊上げてホッパー型の材料供給機に材料を投入し、バルコンにて吹付け機に供給した。図 5.1-28 に供給機への材料投入状況を、図 5.1-29 には供給機からバルコンにて吹付け機に材料を供給している状況を示す。

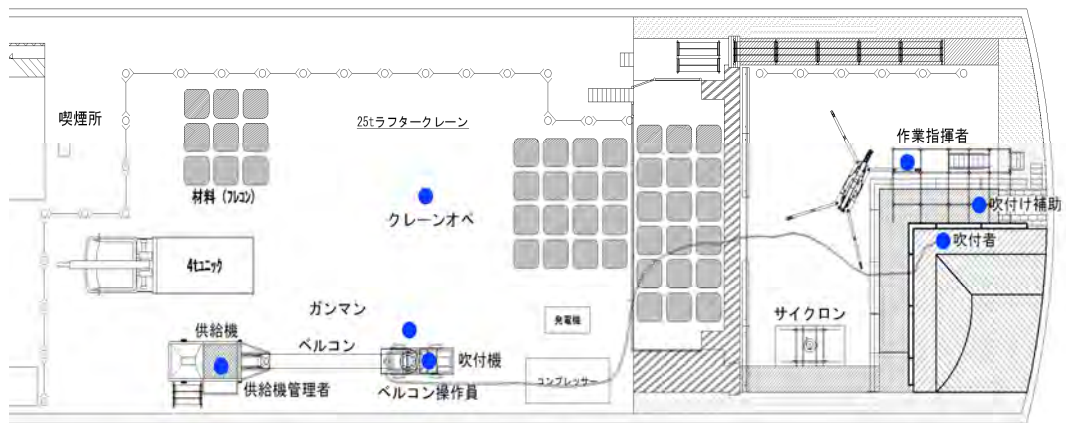


図 5.1-26 吹付け施工時の機械配置平面図



図 5.1-27 吹付け機と吹付け箇所の位置関係

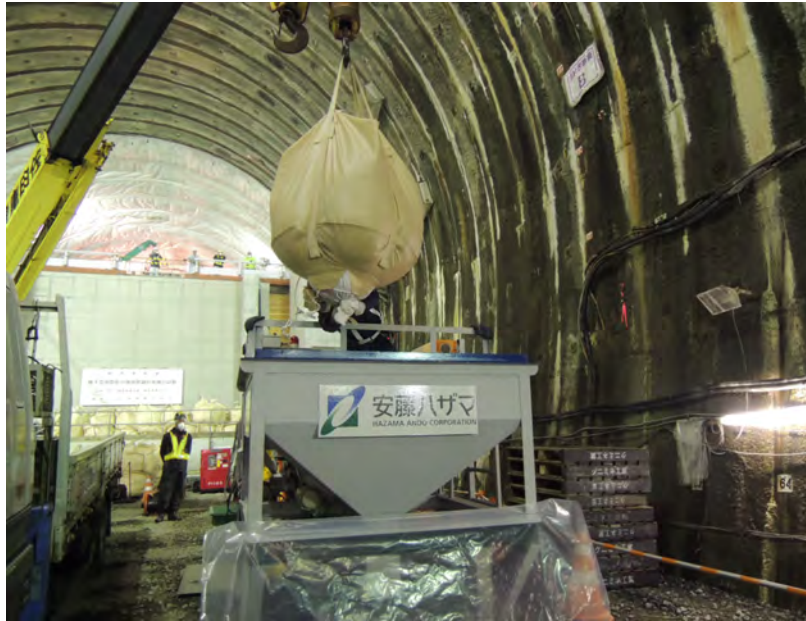


図 5.1-28 供給機への材料投入状況



図 5.1-29 吹付け機へ材料供給状況

b. 吹付け工

図 5.1-25 に吹付け工法の施工手順を示す。吹付け施工は図 5.1-8 に示すように 4 ブロック実施。また、その各ブロックの施工前後で 3D 測量を行い、各ブロックの施工体積の測定を行った。

吹付けは、人力にて吹付け面から 1m 程度の距離で、吹付け面にできるだけ直角となるように吹付けた。また、フレコン 1 体ごとに行い、1 体を吹き終わるたびにリバウンド回収を行った。図 5.1-30 に人力による吹付け状況を、に吹付け後の状況を、にリバウンド材回収状況を示す。



図 5.1-30 人力吹付け状況



図 5.1-31 吹付け後状況



図 5.1-32 リバウンド材回収状況

c. 出来形管理

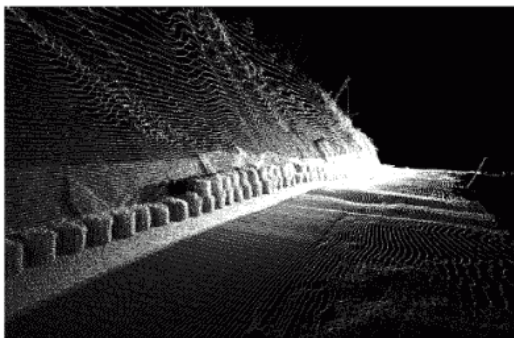
本試験では、出来形管理の一つとして3D スキャナおよび写真測量を実施した。3D スキャナおよび写真測量は、1 ブロックの吹付けごとに実施した。すなわち、吹付け前に状況を計測し(初期値計測)、吹付け完了後の形状を計測して、1 ブロックの出来形を把握した。

3D スキャナおよび写真測量の概要を以下に示す。

また、3D スキャナ測定の様子を図 5.1-33、写真測量の様子を図 5.1-34 に示す。なお、写真測量の場合は、撮影箇所ターゲットをおいて撮影する。ターゲットの位置は事前にトータルステーションで測量を行っておく。トータルステーションによる測量の様子を図 5.1-35 に示す。

【3D スキャナ測量の概要】

近距離型レーザースキャナを用いて吹付け面を計測し、吹付け面の3次元形状を把握するとともに、施工の進捗とともに取得できたデータ群の差分から吹付け厚さを計算する。



基準面データ事例



短距離型レーザースキャナ (例)

3D
ス
キ
ャ
ナ
測
量

【手順】

吹付け前：3D 計測 → 3次元データ群取得 → 基準面データ作成

吹付け後：3D 計測 → 3次元データ群取得 → 計測面データ作成

→ <計測面> - <基準面>の差分データ作成

→ 吹付け厚確認

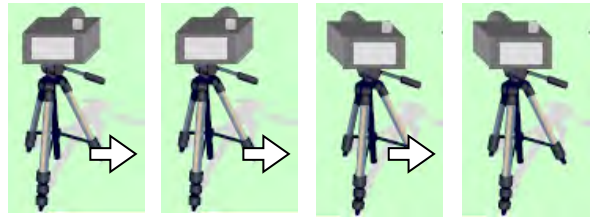
・任意位置での断面図作成。

・一定面積内におけるボリューム計算・平均吹付け厚確認。

【期待精度】 2~3mm/基線 50m

【写真測量の概要】

レンズキャリブレーション※1)を施した一眼レフカメラを用い、吹付け面に正対する複数の位置から撮影した写真を解析して、吹付け面の3次元データを取得する。



【手順】

作業手順は、3D スキャナと同じであるが、吹付け面を適度な明るさに保つ必要がある。

【期待精度】

画素数 600 万画素、焦点距離 18mm

距離 10m、マニュアルフォーカス：縦横で±0.3mm、奥行きで±1.0mm

※1)カメラの内部標定要素（焦点距離、主点位置のズレ等）をあらかじめ求めておく作業



図 5.1-33 3D 測量の様子



図 5.1-34 写真測量の様子



図 5.1-35 トータルステーションによる測量の様子

d. 品質管理

施工終了後、シンウォールサンプラーによるサンプリングにより埋戻し材のサンプリングを行い、密度および含水比の測定を行った。図 5.1-36 にシンウォールサンプラーを、図 5.1-37 にシンウォールサンプラーによるサンプリング状況を示す。



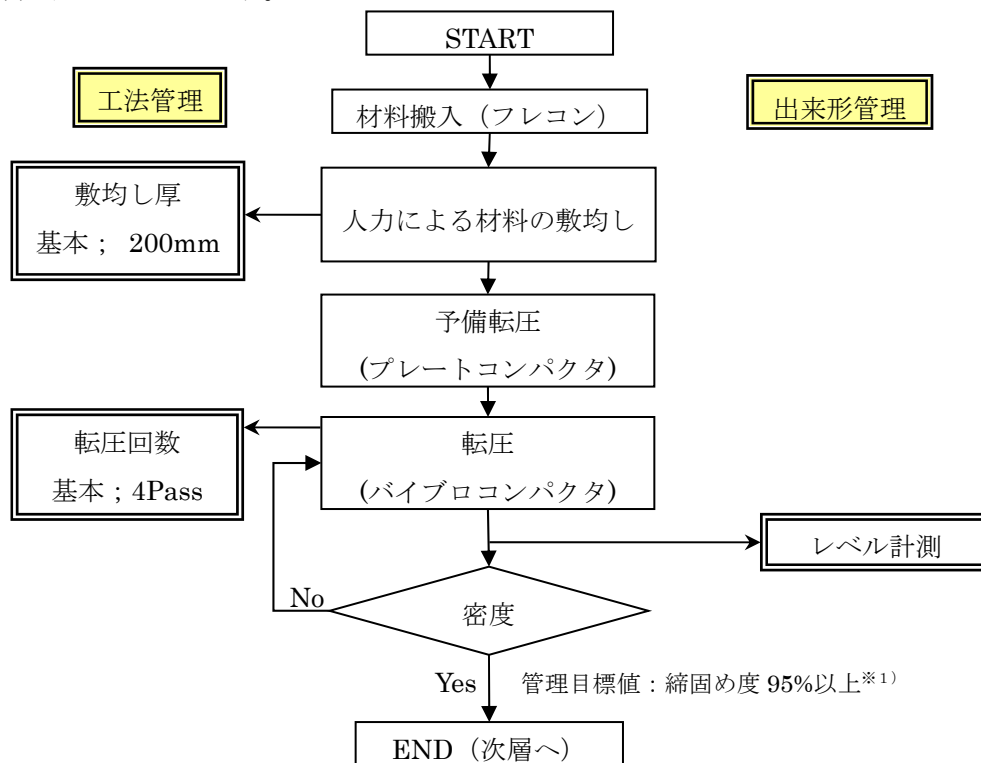
図 5.1-36 シンウォールサンプラー



図 5.1-37 サンプルング状況

5) 転圧工法

転圧は、人力にて材料の敷均しを行い、振動コンパクタを使用して施工した。転圧工法の施工手順を図 5.1-38 に示す。



※1) 最大乾燥密度が 1.810Mg/m^3 であるため締固め度 95%は 1.720Mg/m^3

図 5.1-38 転圧施工の手順

a. 材料供給

材料供給に当たり、はじめに 25t ラフタークレーンにてフレコンバッグに入った材料をピット上部に吊り上げた。ピット上にてフレコンバッグを、カニクレーンを使用してベルトコンベヤ近傍に移動させ、人力でベルトコンベヤに投入し型枠内へ供給した。型枠内の材料は猫車を利用し、型枠内へ敷均した。作業手順は以下の通りである。

- ① 使用する材料の重量を測定する。
- ② 25t ラフタークレーンにてコンクリートピット上へフレコンを搬入する。
- ③ カニクレーンにてピット上のフレコンを移動させ、人力でベルトコンベヤに投入する。
- ④ 猫車を利用し、人力で撒き出す。

図 5.1-39 および図 5.1-40 にカニクレーンを用いて材料をベルトコンベヤに投入している状況を、図 5.1-41 に施工ヤード内にて猫車を用いて材料を運搬している状況を、図 5.1-42 に材料を敷均している状況を示す。



図 5.1-39 材料投入状況



図 5.1-40 材料投入状況



図 5.1-41 材料の運搬状況



図 5.1-42 材料の敷均し状況

b. 材料敷均し

型枠内に敷均した材料を、レーザーレベルを用いて所定の敷均し厚さになるように敷均した。敷均し時は、転圧に使用する振動コンパクタを待避用足場上に移動させた。作業手順は、以下の通りである。

- ① 振動コンパクタを、待避用足場上に移動させる。
- ② 木製の平レーキを使用してベントナイトを均等に敷き均す。
- ③ 敷均し厚さはレーザーレベルを用いて管理する。

図 5.1-43 および図 5.1-44 にレーザーレベルによる敷均し厚さの管理状況、図 5.1-45 に敷均し状況、図 5.1-46 に敷均し完了後の状況を示す。



図 5.1-43 レーザーレベル



図 5.1-44 レーザーレベルによる敷均し厚さの管理状況



図 5.1-45 敷均し状況



図 5.1-46 敷均し完了後の状況

c. 転圧

転圧は振動コンパクタで行った。転圧 pass 数は、6pass を基本とした。なお、敷均し直後に振動コンパクタによる転圧を行うと、転圧レーンの移動時に材料内にめり込んでしまい、平滑な転圧面とすることが難しかったため、表面を平滑にするために、プレートにより予備転圧を行った。図 5.1-47 に予備転圧の状況を示す。

作業手順は、以下の通りである。

- ① プレート(60kg)で、予備転圧を行う。
- ② 振動コンパクタで所要の pass 数を転圧する。



図 5.1-47 予備転圧状況

振動コンパクタによる転圧は、試験空洞の縦断方向、横断方向それぞれに実施した。図 5.1-48 には縦断方向、図 5.1-49 には横断方向の転圧レーンを示す。はじめに、縦断方向の転圧(2pass)を行い、次いで横断方向の転圧(2pass)を行った。再度、縦断方向の転圧(2pass)を行い、6pass とした。図 5.1-50 および図 5.1-51 にそれぞれ縦断方向および横断方向の転圧状況を示す。

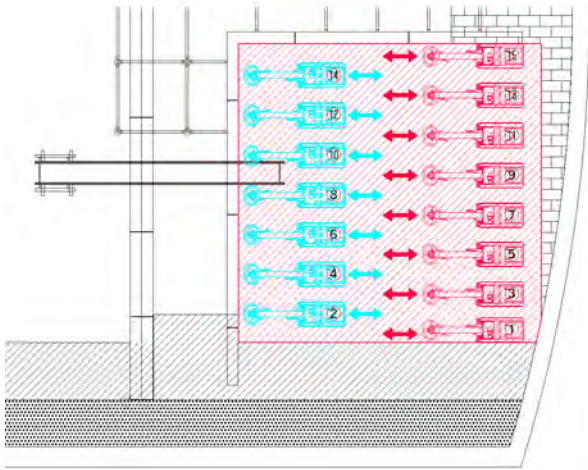


図 5.1-48 転圧状況図(縦断方向)

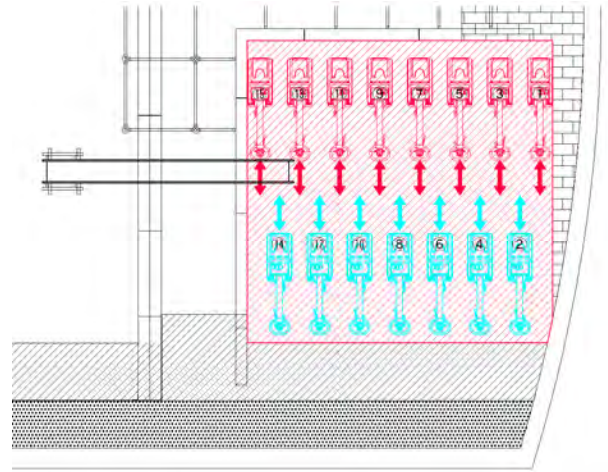


図 5.1-49 転圧状況図(横断方向)



図 5.1-50 振動コンパクタによる転圧状況；縦断方向

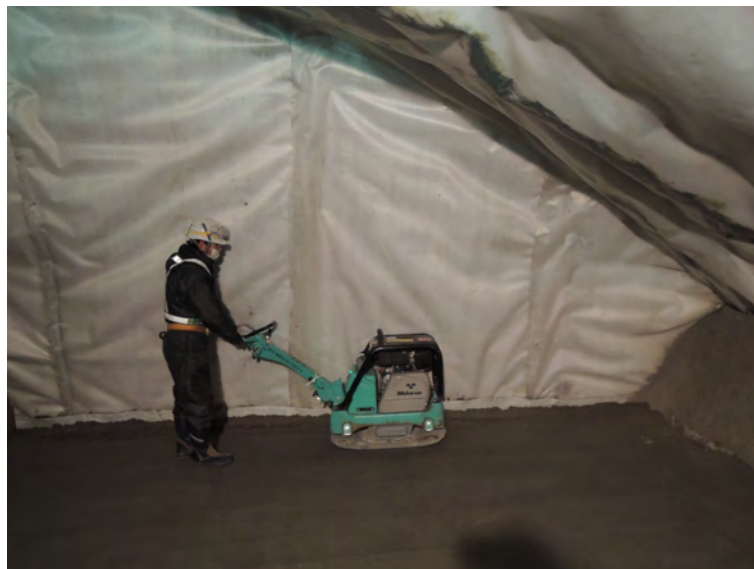
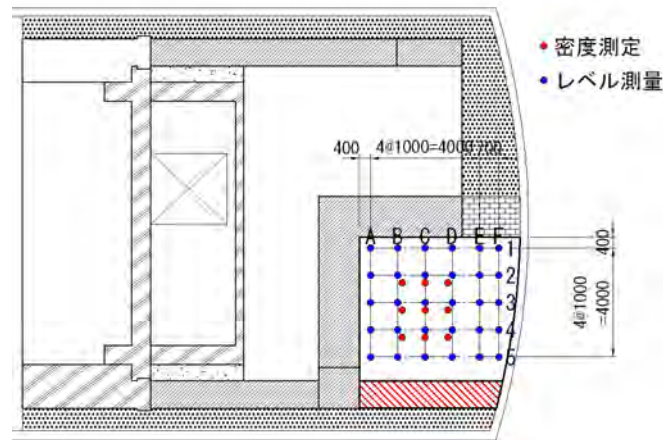


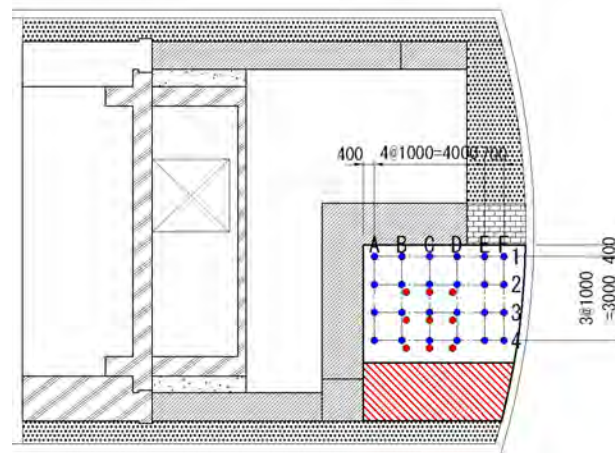
図 5.1-51 振動コンパクタによる転圧状況；横断方向

d. 出来形管理

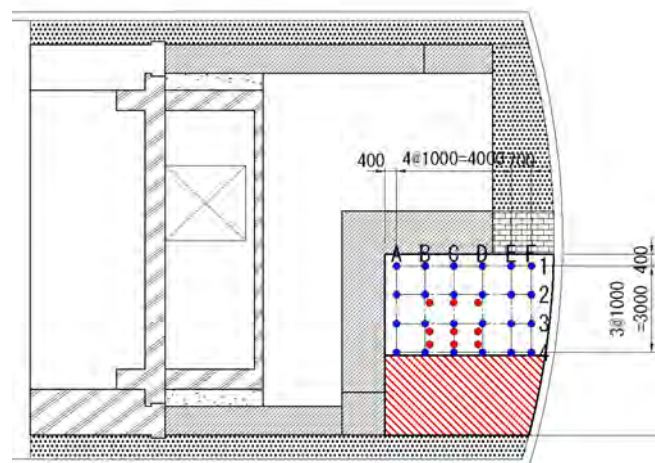
施工後、レベル測量を行い、施工高さの確認を行った。図 5.1-52 にレベル測量の位置を、図 5.1-53 にレベル測量の状況を示す。



一次転圧完了まで



二次転圧完了まで



三次転圧完了まで

図 5.1-52 レベル測定・コア採取位置図



図 5.1-53 レベル測量の状況

e. 品質管理

施工終了後、シンウォールサンプラーによるサンプリングにより埋戻し材のサンプリングを行い、密度および含水比の測定を行った。図 5.1-54 にシンウォールサンプラーを施工層に貫入してサンプリングしている状況を示す。



図 5.1-54 シンウォールサンプラーによるサンプリング状況

6) 養生

吹付けおよび転圧施工終了後、埋戻し材保護のためシート養生を行った。図 5.1-55 に養生状況を示す。



図 5.1-55 シート養生状況

5.1.3 施工管理・品質管理

(1) 試験管理項目

施工確認試験における施工管理・品質管理項目を表 5.1-11 に示す。ベントナイト混合土の材料品質管理、施工中・施工後の施工管理・品質管理等について実施する。

表 5.1-11 施工確認試験の管理項目

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	管理 or 確認	実施時期	数量
品質管理 (材料)	重量	吊秤	—	確認	材料納入時	各フレコン
	粒度分布	JIS A 1204	—	確認	砂納入時	1点/10t程度
	含水比	JIS A 1203	設定値±3%以内	管理	施工前	3点/フレコン
	ベントナイト混合率 (細粒分含有率)	JIS A 1223	設定値±3%以内	管理	施工前	1点/10t程度
	締固め特性	JIS A 1210	—	確認	施工前	1点/10t程度
	重量	吊秤	—	管理	施工前	各層単位(転圧施工)
施工管理 (転圧施工)	敷均し高さ	(レベル測量)	設定値±2cm	管理	敷均し時	—
	転圧回数	—	試験施工より設定	管理	施工時	—
施工管理 品質管理	密度	(コア密度)	設定値±0.10Mg/m ³	管理	施工終了後	8点/1施工単位
	含水比	JIS A 1203	—	確認	施工終了後	8点/1施工単位
	密度	(レベル測量)	—	管理	施工終了後	20点/層(転圧工法)
	施工面観察	(目視)	異常の有無	管理	施工終了後	施工単位
	採取試料観察	(目視)	異常の有無		施工終了後	施工単位
その他	坑内環境データ	(温湿度計)	坑内の温湿度記録	—	常時	日常記録
	施工内容記録	(記録簿、写真)	供給量、リバウンド量、吹付け時間等 (吹付け施工)	—	施工時	日常記録
	サイクルタイム	(ストップウォッチ)	主要工程の所要時間記録	—	施工時	日常記録

(2) 上部埋戻し材材料

上部埋戻し材の材料であるベントナイト混合土製造に使用する材料は、ベントナイトと砂である。ベントナイトはクニミネ工業(株)のクニゲルV1であり、砂は三沢産のコンクリート用砂である。クニゲルV1の品質試験結果を表 5.1-12 に示す。

表 5.1-12 ベントナイト（クニゲル V1）試験結果一覧

試験項目 \ ロット No	306271	301	309	規格
含水比 (%)	8.0	8.3	7.9	10 以下
粒度 (%/-63 μ m)	93.2	90.6	97.2	90 以上
膨潤力(ml/2g)	19	19	20	16 以上
PH	10.1	10.2	10.2	9.0~10.5
見掛比重	0.70	0.71	0.68	0.60~0.75
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	89	90	91	—

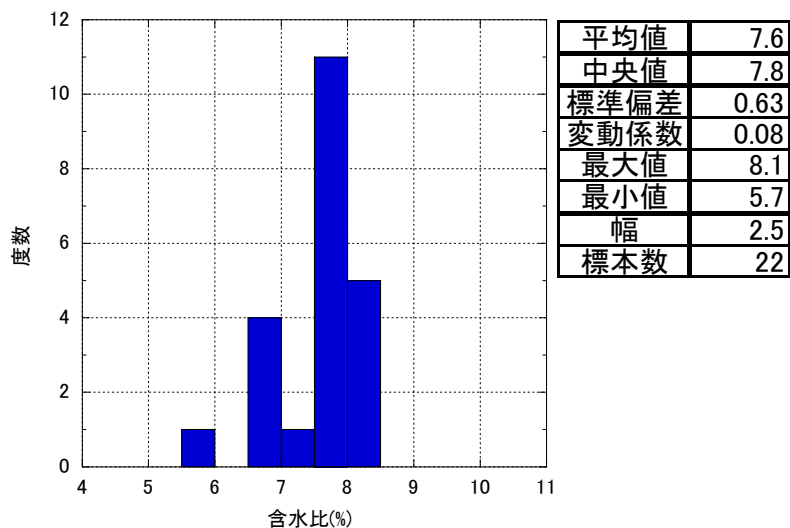
ベントナイト製造前にベントナイトと砂の含水比を測定した。図 5.1-56 に使用した材料の初期含水比を示す。(a)はベントナイト（クニゲル V1）、(b)は砂である。

ベントナイトおよび砂の初期含水比はそれぞれ 7.6%、5.0%であった。この数値を用いて混合条件は、表 5.1-13 を基本として混合土の製造を行った。時間当たりの砂、ベントナイトの投入量および加水量をキャリブレーションにより調整して自走式土質改良機を用いて混合土の製造を行った。

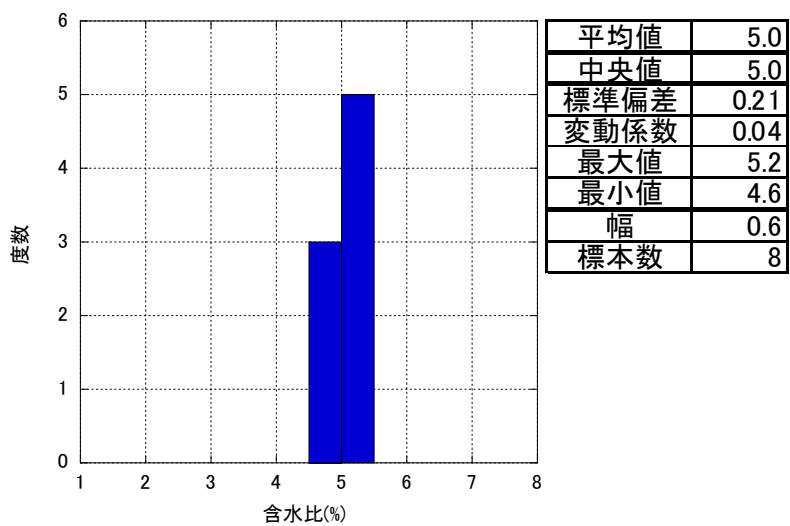
なお、使用した砂の土粒子密度および粒度の測定結果は、それぞれに図 5.1-57 および図 5.1-58 示す通りであった。

表 5.1-13 混合条件表

初期条件				
加水調整前材料	初期含水比 (%)		測定実施日	
クニゲル V1	7.6		2013/11/26	
砂	5.0		2013/11/26	
ベントナイト混合土	5.4		—	
含水比・混合率設定				
対象材料	設定条件			
	含水比 (%)	Be 混合率 (%)	砂混合率 (%)	
ベントナイト+砂	14.5	15	85	
混合条件				
条件	総量	クニゲル V1(t/h)	砂(t/h)	加水(t/h)
材料投入量(t/h)	15.233	2.333	12.900	
乾燥重量(t/h)	14.454	2.168	12.286	
水分量(t/h)	0.779	0.165	0.614	
加水量(t/h)				1.317
仕上がり量(t/h)		16.550		



(a) ベントナイト



(b) 砂

図 5.1-56 使用した材料の初期含水比

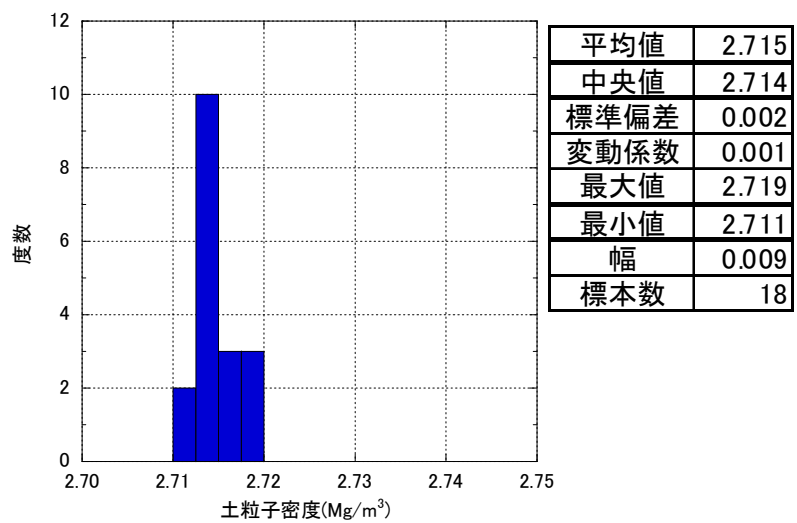


図 5.1-57 使用した砂の土粒子密度

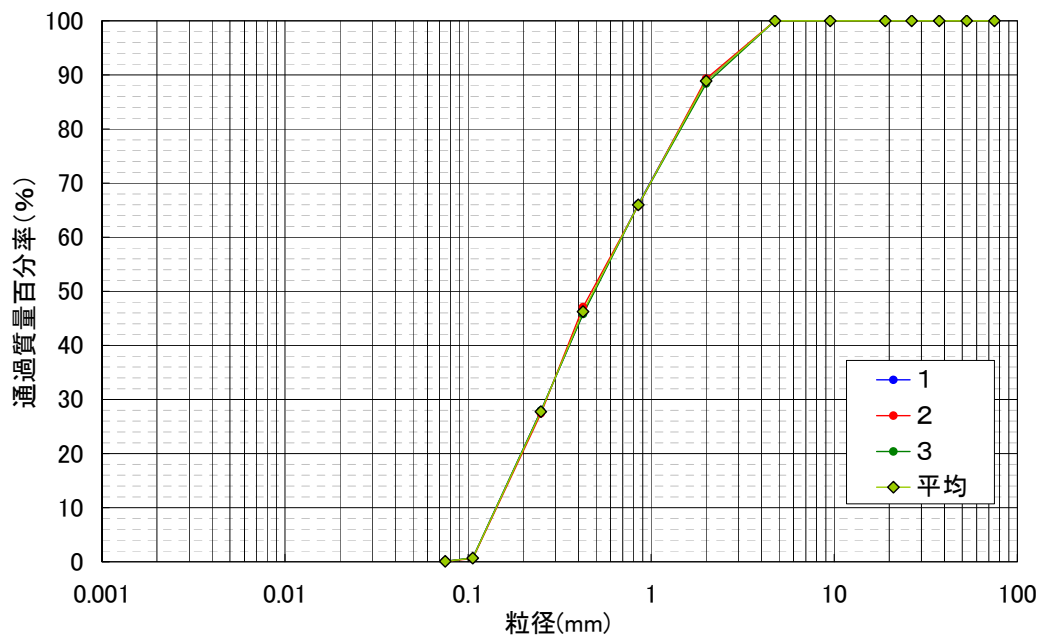


図 5.1-58 使用した砂の粒径加積曲線

(3) ベントナイト混合土製造

ベントナイト混合土の製造は、移動式土質改良機 (SR-2000G) を使用し、11/28～11/30 の3日間で実施した。各日の製造量を表 5.1-14 に示す。合計 154.6t の製造を行った。各日にサンプリングを行い、製造した材料の品質の確認を行った。品質として含水比およびベントナイト混合率の確認を行った。ベントナイト混合率は細粒分含有率から算出した。

表 5.1-15 に含水比測定結果を、図 5.1-16 に混合率測定結果を示す。結果の評価は後述する。

表 5.1-14 混合土製造量

製造日	製造量(t)
11月28日	44.3
11月29日	92.5
11月30日	17.8
合計	154.6

表 5.1-15 混合土製造結果；含水比

含水比	①	②	③	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	全体
	11/28-1	11/28-2	11/28-3	11/29-1	11/29-2	11/29-3	11/29-4	11/30-1	
平均値	13.7	14.1	12.9	15.2	14.6	15.7	16.3	14.6	14.6
中央値	13.7	14.1	12.9	15.2	14.6	15.7	16.3	14.7	14.6
標準偏差	0.21	0.27	0.20	0.39	0.29	0.22	0.23	0.18	1.07
変動係数	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07
最大値	14.1	14.7	13.2	16.2	15.4	16.3	16.8	14.8	16.8
最小値	13.5	13.7	12.6	14.8	14.3	15.5	16.0	14.3	12.6
幅	0.6	1.0	0.6	1.4	1.1	0.8	0.8	0.5	4.2
標本数	12	12	12	12	12	12	12	12	96

表 5.1-16 混合土製造結果；混合率

混合率	①	②	③	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	全体
	11/28-1	11/28-2	11/28-3	11/29-1	11/29-2	11/29-3	11/29-4	11/30-1	
平均値	14.5	13.9	13.7	15.7	15.8	14.9	15.6	13.8	14.8
中央値	14.6	14.0	13.7	15.8	15.8	14.8	15.6	13.8	14.7
標準偏差	0.36	0.13	0.05	0.17	0.14	0.15	0.11	0.11	0.86
変動係数	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
最大値	14.9	14.1	13.8	16.0	15.9	15.1	15.8	14.0	16.0
最小値	14.0	13.8	13.7	15.5	15.6	14.7	15.5	13.7	13.7
幅	0.9	0.3	0.1	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	2.3
標本数	6	6	6	6	6	6	6	6	48

(4) 吹付け施工

1) 施工結果

吹付け施工は図 5.1-9 に示すように 4 ブロック実施した。(下側より 1BL~4BL) それぞれのブロックの施工終了時の状況を図 5.1-59~図 5.1-62 に示す。2BL 施工時には合わせて奥部の施工も行った。

表 5.1-17 に吹付け施工全体での施工量および施工時間を示す。吹付け時間は実際に吹付けていた時間のみを足した時間であり、トータルの施工時間としては、材料を供給機に投入してから吹き終わるまでの時間で、ホース等の清掃の時間等も含んでいる。また、その他のロス、ホース内の残材や吹付け機内の残材等である。

トータルの吹付け量は約 57t であり、施工時間は約 58 時間(吹いていた時間は約 30 時間)であった。約 57t の施工を行った際のリバウンド量は約 8.5t であった。なお、各ブロックの施工結果は添付資料に示す。

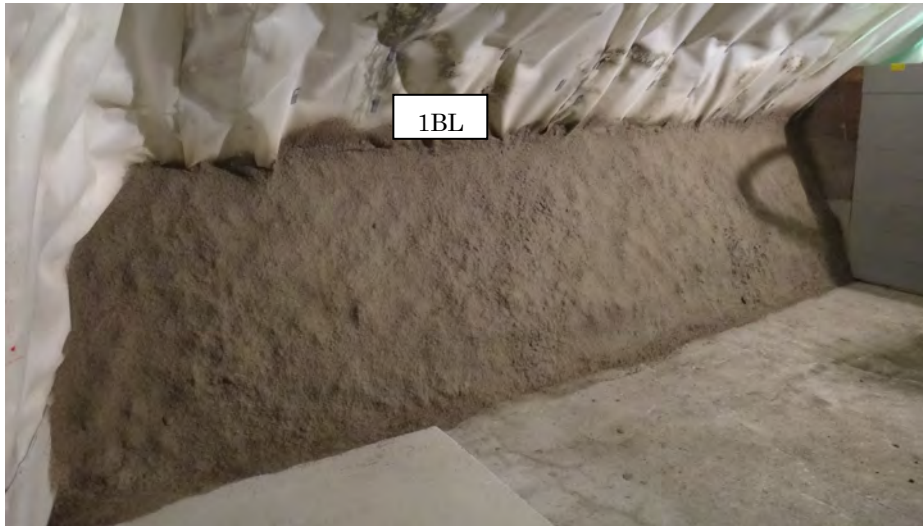


図 5.1-59 1BL 施工終了状況



図 5.1-60 2BL 施工終了状況



図 5.1-61 3BL 施工終了状況

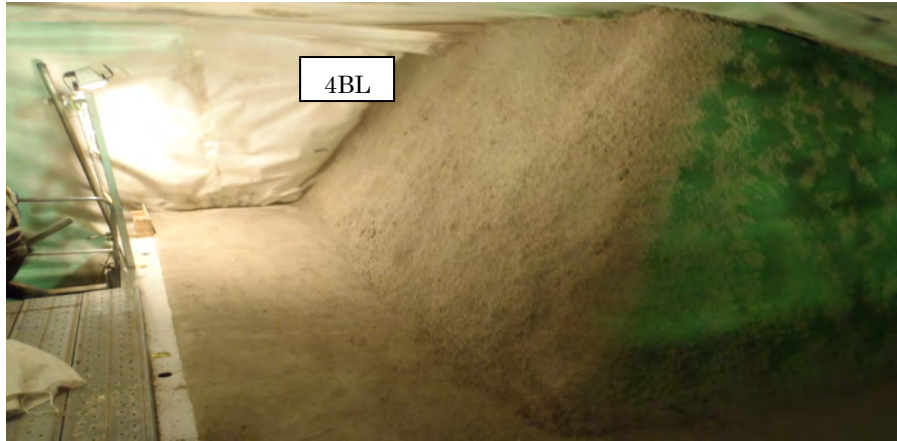


図 5.1-62 4BL 施工終了状況

表 5.1-17 吹付け施工の施工結果

吹付け施工全体	フレコン重量 (kg)	吹付け量 (kg)	リバウンド (kg)	その他 ロス(kg)	供給機 残り(kg)	吹付け 時間	TOTAL 施工時間
合計	69,259	57,135	8,429	1,751	1,944	29:56	57:26

2) 密度測定結果

吹付け施工後にサンプリングを行い、その試料を用いて含水比と乾燥密度を測定した。施工後の含水比の度数分布を図 5.1-63 に、施工後の乾燥密度の度数分布を図 5.1-64 に示す。

含水比は 13~18%の間にばらつく結果となっており、平均値は 14.5%であった。乾燥密度は 1.60~1.80Mg/m³にばらつく結果となっており、平均値は 1.718Mg/m³であった。

また、図 5.1-65 には、混合率を示す。混合率の平均値は 17.2%であった。

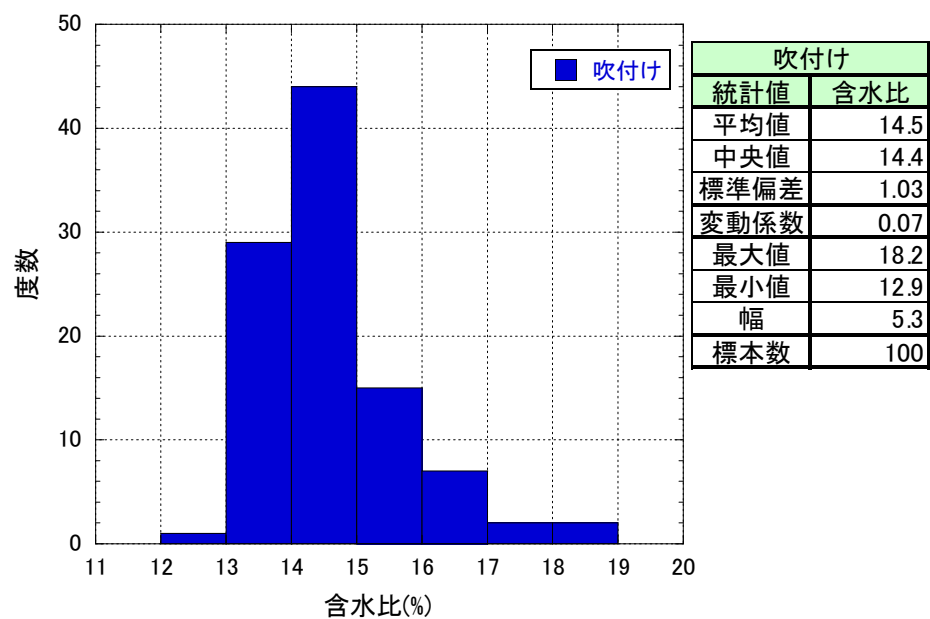


図 5.1-63 吹付け施工後の含水比の度数分布

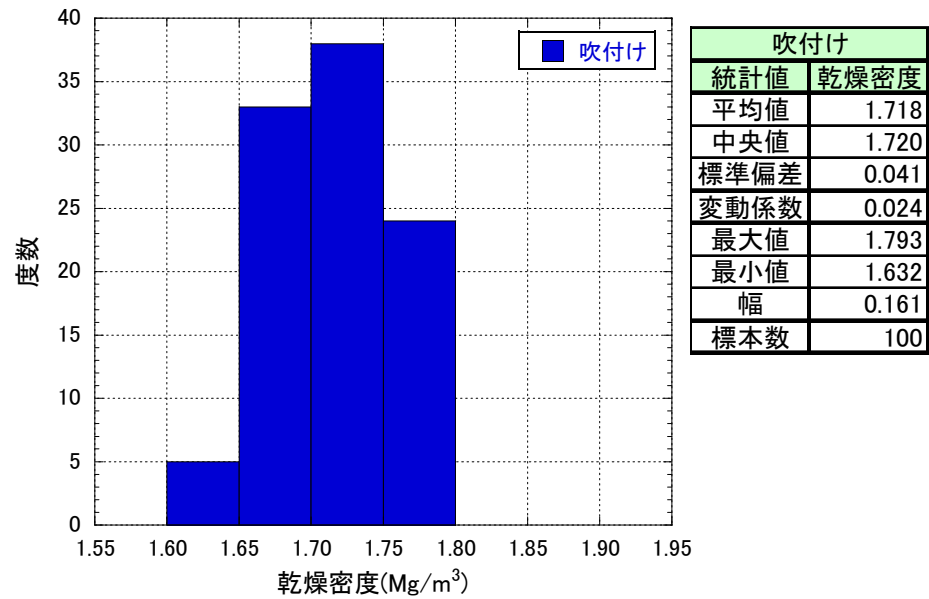


図 5.1-64 吹付け施工後の乾燥密度の度数分布

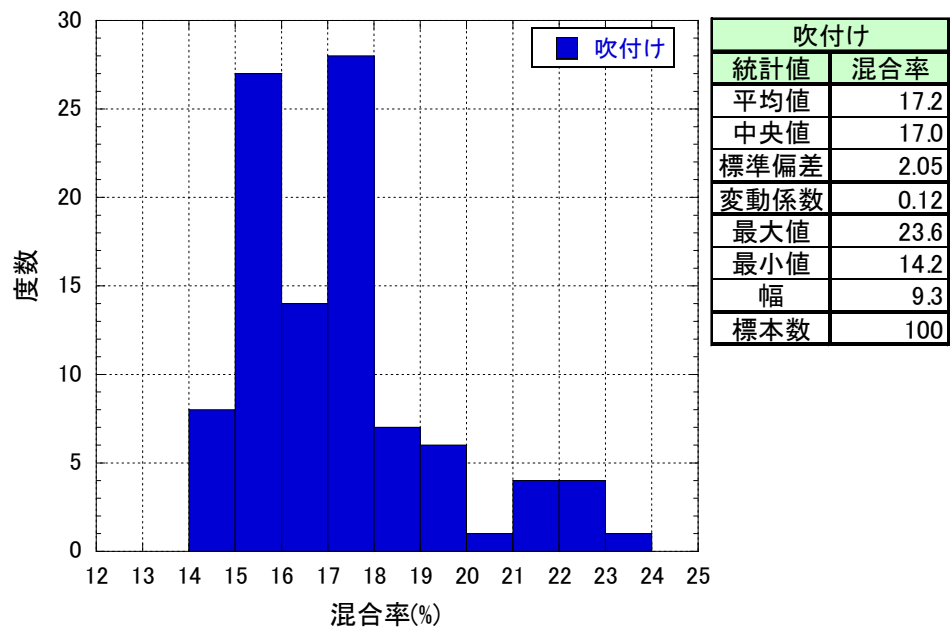


図 5.1-65 吹付け施工後の混合率の度数分布

3) サイクルタイム測定

吹付け施工について施工時間を測定し、サイクルタイムの算出を行った。結果を表 5.1-18 に示す。吹付け速度は時間当たり約 2~3t であり、施工速度（吹付け及びその他の準備等を含めた時間当りの施工量）は時間当たり約 1t となった。また、リバウンド率は約 10%、トータルロス率は約 20%であった。

表 5.1-18 吹付け施工の施工速度およびリバウンド、ロス率

		1BL	2BL&奥部	3BL	4BL	全体
吹付け量	(kg)	10,934	12,539	8,197	25,465	57,135
吹付け速度	(kg/h)	1,608	1,754	2,423	2,021	1,909
施工速度	(kg/h)	815	868	1,185	1,124	995
リバウンド率	(%)	12.1	15.3	13.7	16.0	14.8
ロス率	(%)	18.3	18.4	15.2	18.2	17.8

4) 出来形測量結果

吹付け施工後の出来形測量では、3D スキャナおよび写真測量を実施した。3D スキャナおよび写真測量は、1 ブロックの吹付けごとに実施した。すなわち、吹付け前に状況を計測し(初期値計測)、吹付け完了後の形状を計測して、1ブロックの出来形を把握した。

3D スキャナおよび写真測量による出来形測量の結果を表 5.1-19に示す。表には空洞形状の CAD 図上の寸法と施工後の寸法計測から求めた体積も示している。いずれの体積もほぼ同様の値となっている。3D スキャナおよび写真測量の測定図の一部を図 5.1-66、図 5.1-67に示す。

表 5.1-19 施工体積の比較 (吹付け施工)

吹付け	使用量 (kg)	体 積		
		3D スキャナ (m ³)	写真測量 (m ³)	CAD、レベル・寸法測量 (m ³)
1次	10,934	5.35	5.32	5.01
2次	12,539	5.86	5.72	5.96
3次	8,197	3.92	3.91	4.97
4次	25,465	12.51	12.60	11.61
合計	57,135	27.64	27.55	26.95

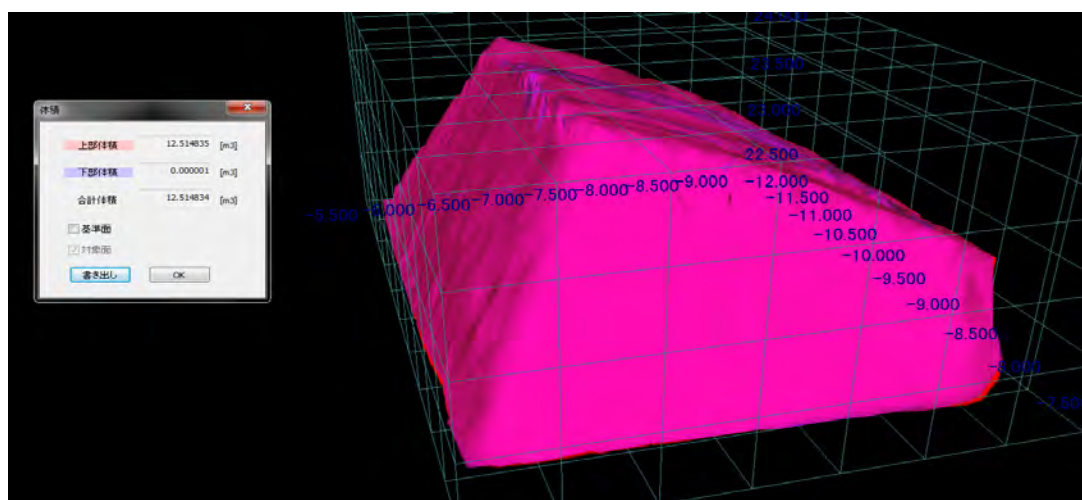


図 5.1-66 3D スキャナ測定結果 (4次吹付け (4BL))

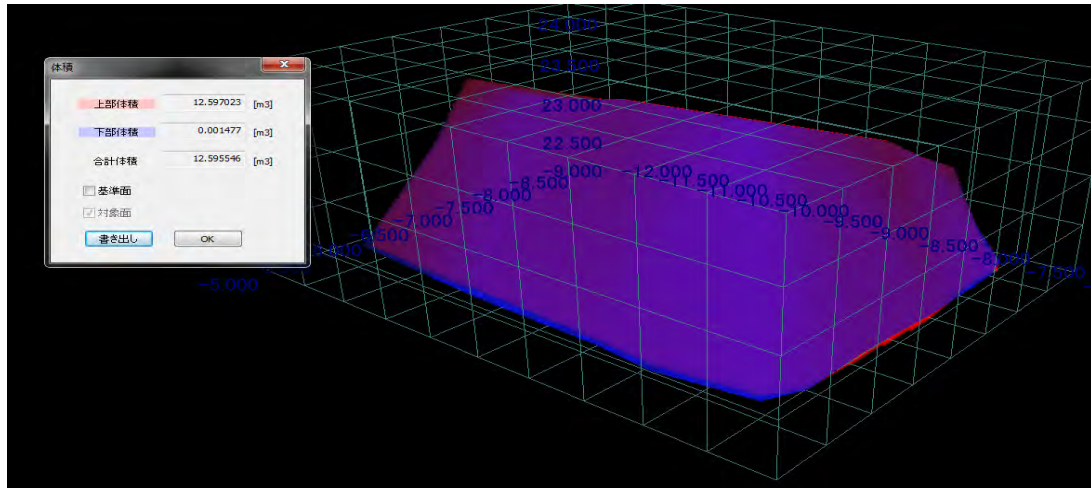


図 5.1-67 写真測量結果（4次吹付け（4BL））

(5) 転圧施工

1) 転圧 Pass 数の設定

バイブロコンパクタを用いた施工の予備試験結果として、敷均し厚さを変化させた時の各転圧段階と施工層厚の関係を図 5.1-68に示す。敷均し厚さ 150mm の時は層厚の変化は振動 4Pass 以降で緩やかとなり、200mm 敷均しでは 6Pass、250mm 敷均しでは 10Pass でほぼ層厚変化は収束する結果となっている。

各敷均し厚さにおいて図 5.1-68に示す最終転圧後にサンプリングによる密度測定を行った結果を図 5.1-69に示す。いずれの敷均し厚さのケースにおいても得られたコア密度は締固め曲線の上下に分布している。したがって、バイブロコンパクタを用いて適切な締固め回数で転圧を行うことにより、敷均し厚さが 150mm から 250mm の範囲においては十分に A 法相当の締固めエネルギーでの施工は可能であることが判る。

図 5.1-70には平均のコア密度から算出した各敷均し厚さでの施工における締固め度を示す。いずれのケースにおいても締固め度は 95%以上で 100%に近い値となっている。

以上の結果より、本施工試験においては、管理目標を締固め度 95%以上とし、それを達成するための施工仕様としては、敷均し厚さ 200mm、振動転圧 6Pass として施工を行なうこととした。

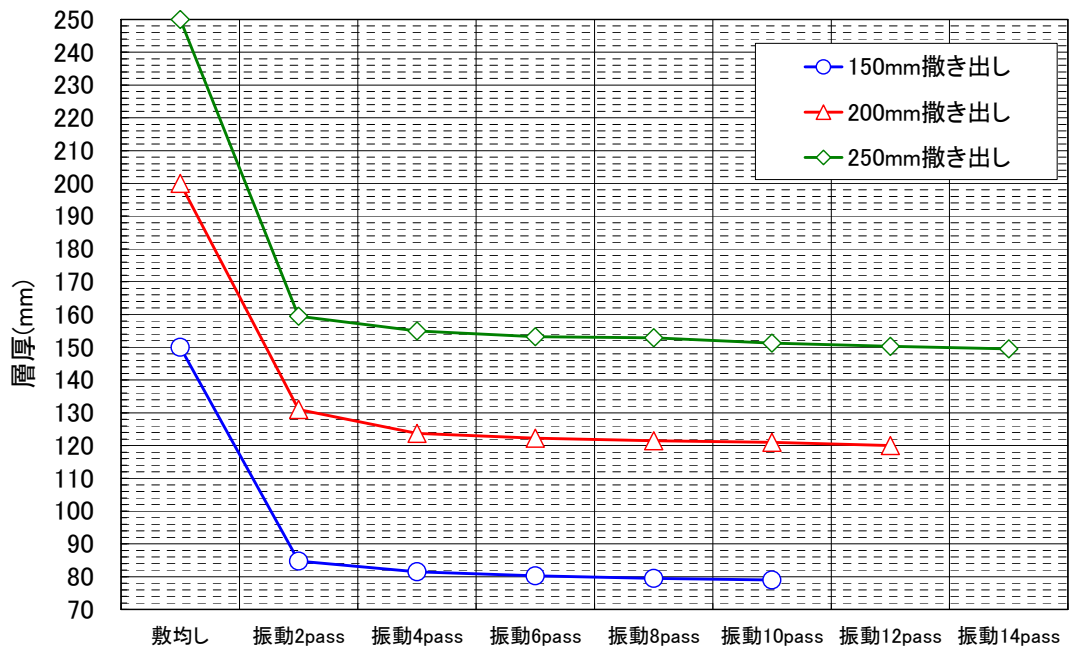


図 5.1-68 各敷均し厚さでの転圧段階と層厚の関係

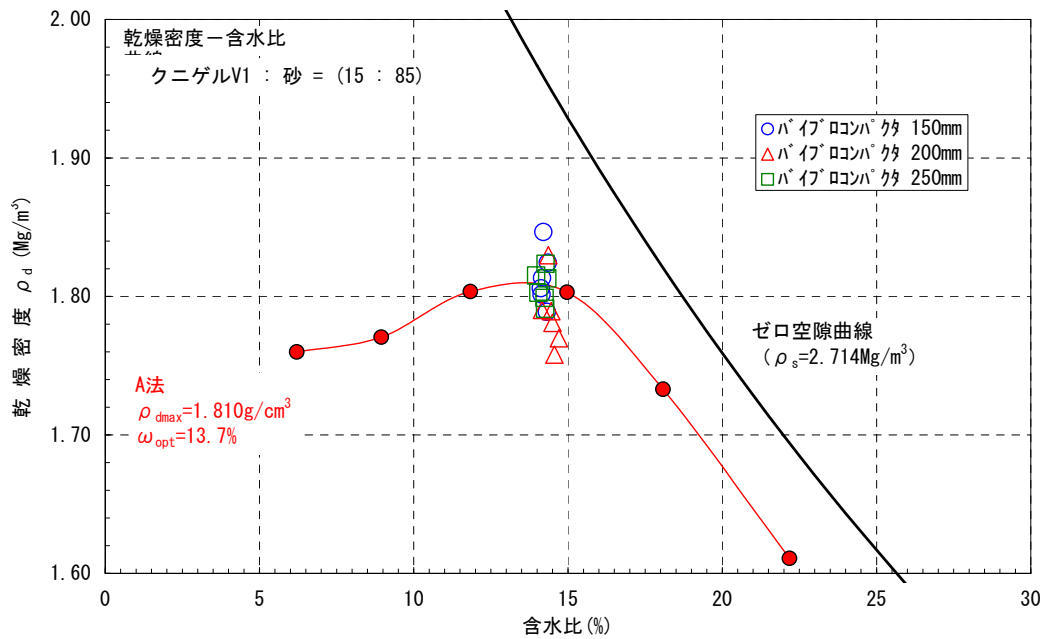


図 5.1-69 各敷均し厚さでの仕上がり密度

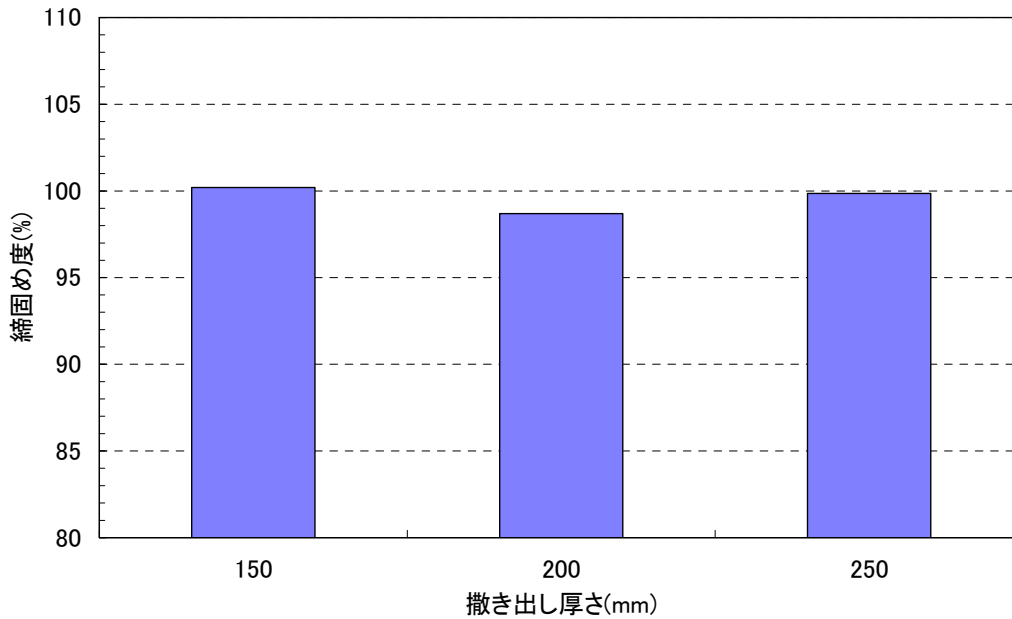


図 5.1-70 各敷均し厚さでの締固め度

2) レベルによる測定結果

図 5.1-72 および図 5.1-73 にレベルによる測量結果を示す。図 5.1-72 は横断方向の結果、図 5.1-73 は縦断方向の結果で、それぞれ(a)は上部低拡散材上面（すなわち、上部緩衝材下面）からの高さ、(b)は上部緩衝材上面（すなわち、上部埋戻し材下面）からの高さを示している。図 5.1-71 に示すように横断方向で 6 測線 (A~E)、縦断方向で 5 測線 (1~5) の測量を行っており、それぞれ、それらの平均値を示している。縦断方向の底盤の奥部は埋戻しコンクリートがあるため、それ以外の部分（手前）と差があるが、それ以外は大きな不陸はない。

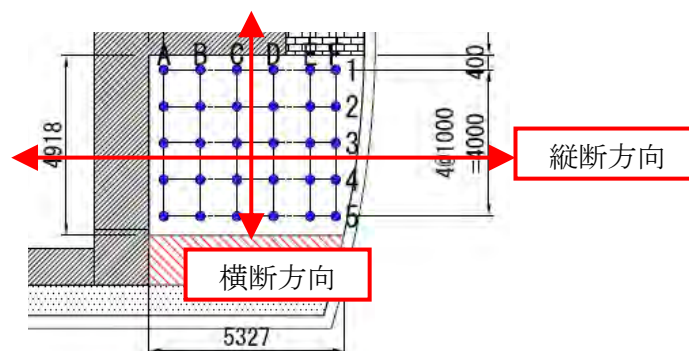
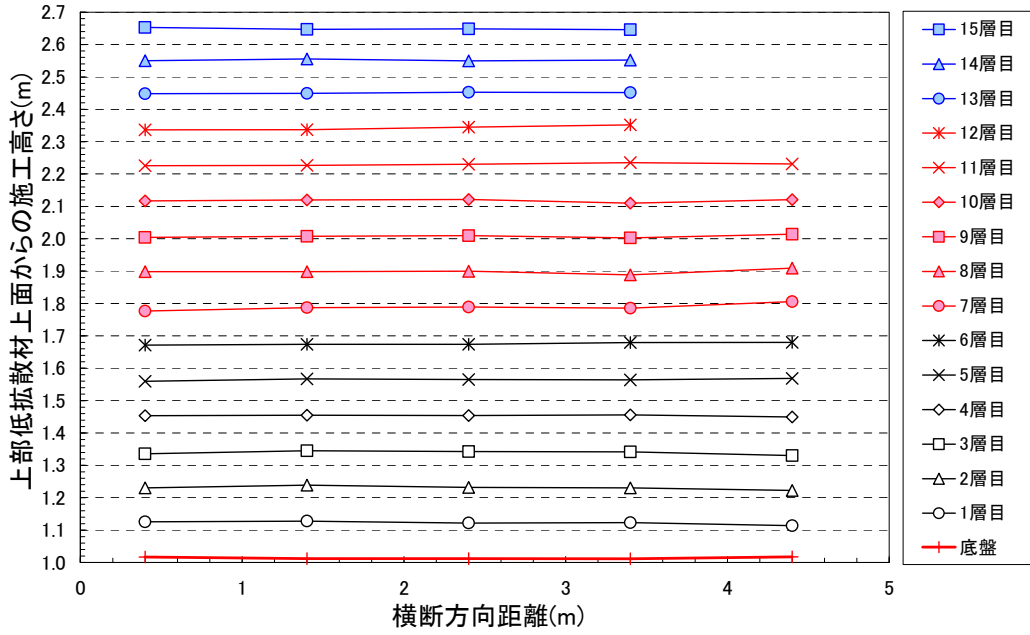
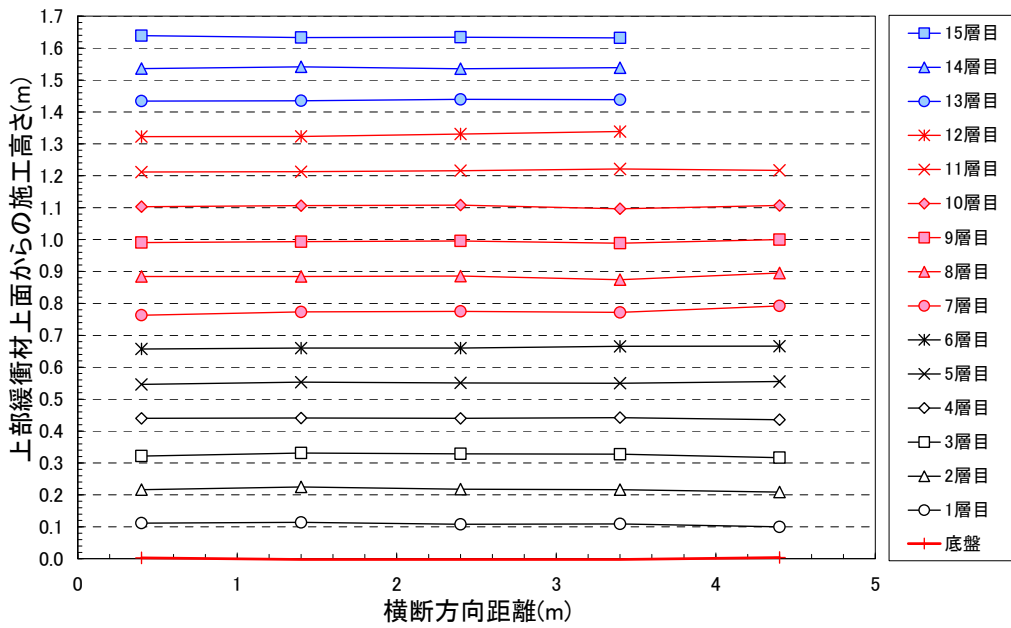


図 5.1-71 レベルによる測量の方向

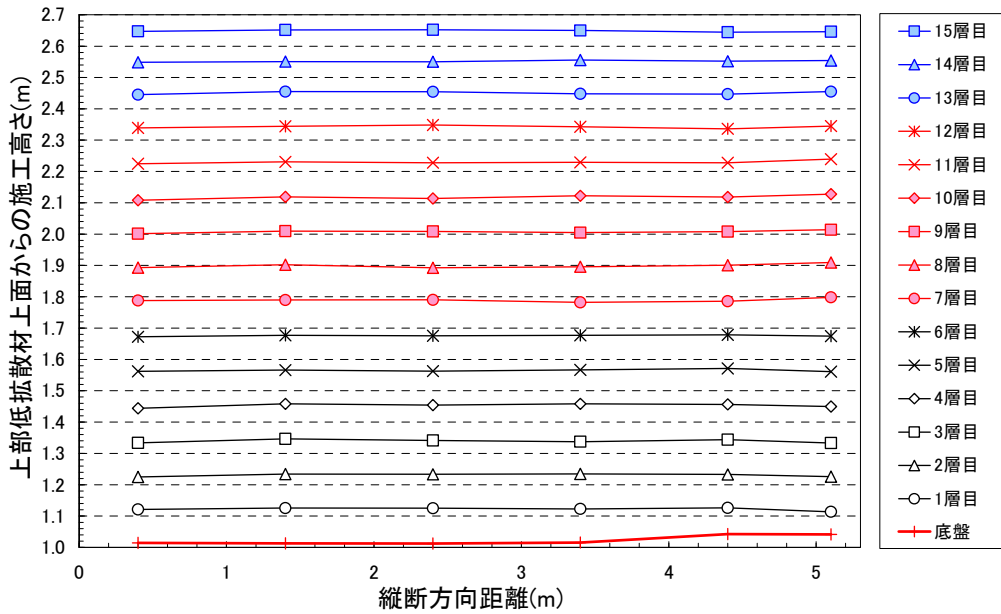


(a) 上部低拡散材上面からの施工高さ



(b) 上部緩衝材上面からの施工高さ

図 5.1-72 各層の施工高さ (横断方向)



(a) 上部低拡散材上面からの施工高さ

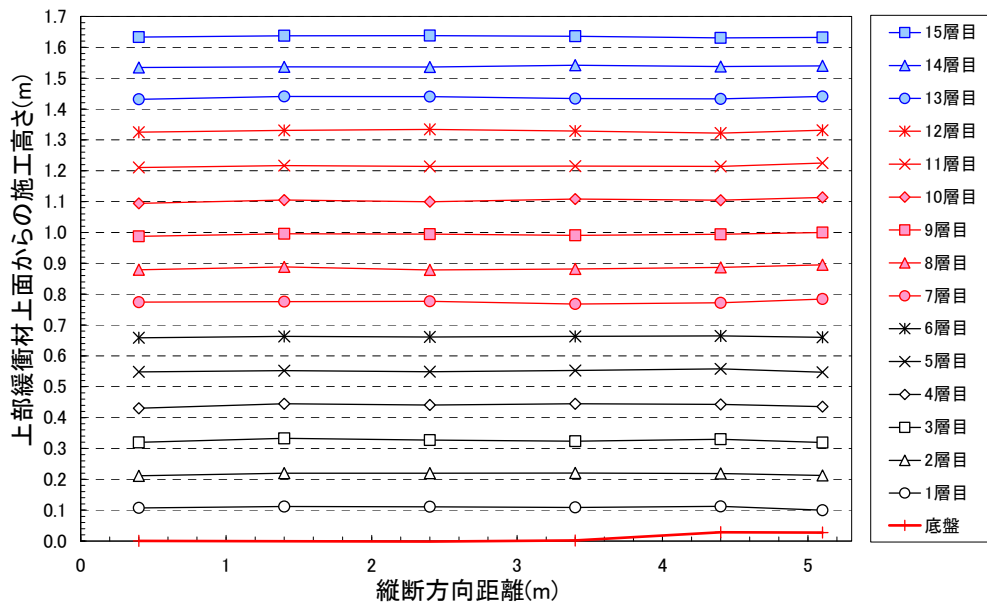
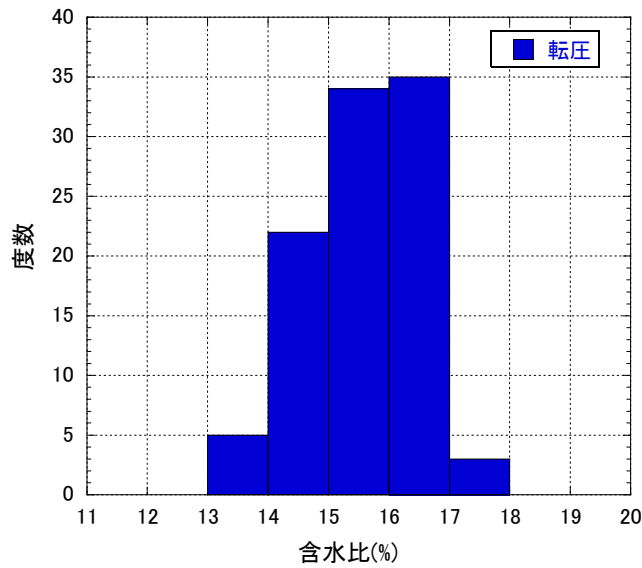


図 5.1-73 各層の施工高さ (縦断方向)

3) 密度測定結果

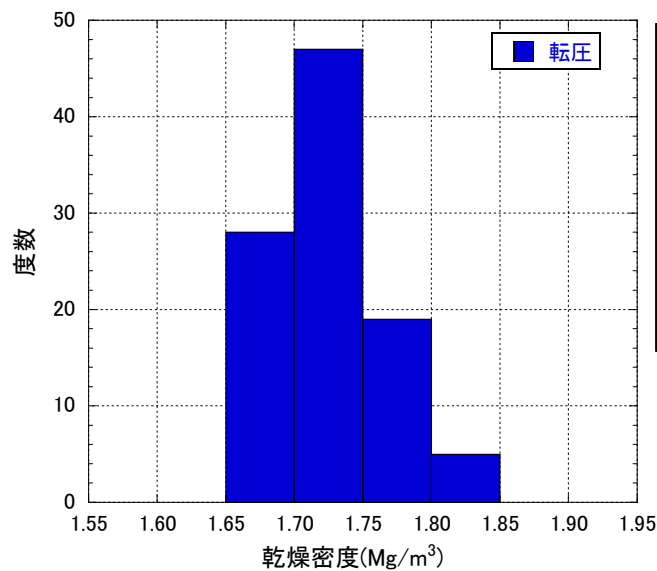
転圧施工後にサンプリングを行い、その試料を用いて含水比と乾燥密度を測定した。図 5.1-74 および図 5.1-75 に、含水比、乾燥密度の度数分布を示す。含水比は 13～18%の間にばらつく結果となっており、平均値は 15.6%であった。乾燥密度は 1.65～1.85Mg/m³の間にばらつく結果となっており、平均値は 1.726Mg/m³であった。

また、締固め度の度数分布を図 5.1-76 に示す。締固め度の平均値は 95.4%となった。



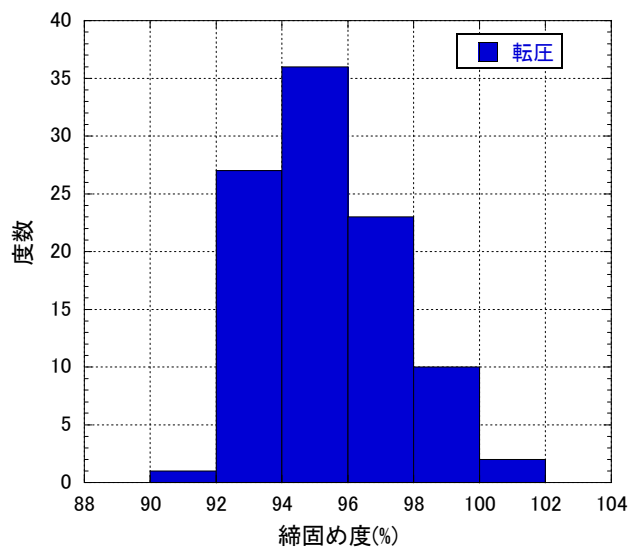
転圧	
統計値	含水比
平均値	15.6
中央値	15.8
標準偏差	0.90
変動係数	0.06
最大値	17.4
最小値	13.4
幅	4.0
標本数	99

図 5.1-74 転圧施工後の含水比の度数分布



転圧	
統計値	乾燥密度
平均値	1.726
中央値	1.724
標準偏差	0.037
変動係数	0.021
最大値	1.812
最小値	1.662
幅	0.150
標本数	99

図 5.1-75 転圧施工後の乾燥密度の度数分布



転圧	
統計値	締固め度
平均値	95.4
中央値	95.2
標準偏差	2.03
変動係数	0.02
最大値	100.1
最小値	91.8
幅	8.3
標本数	99

図 5.1-76 転圧施工後の締固め度の度数分布

4) 密度測定結果

図 5.1-77 には転圧施工後の混合率を示す。混合率の平均値は 15.5%であった。施工前の材料の含水比および混合率の平均値はそれぞれ 14.6%、14.8%であったが、転圧施工には含水比、混合率が高めの材料を用いているため、ほぼ施工前の材料の状態でそのまま施工されていると考えられる。

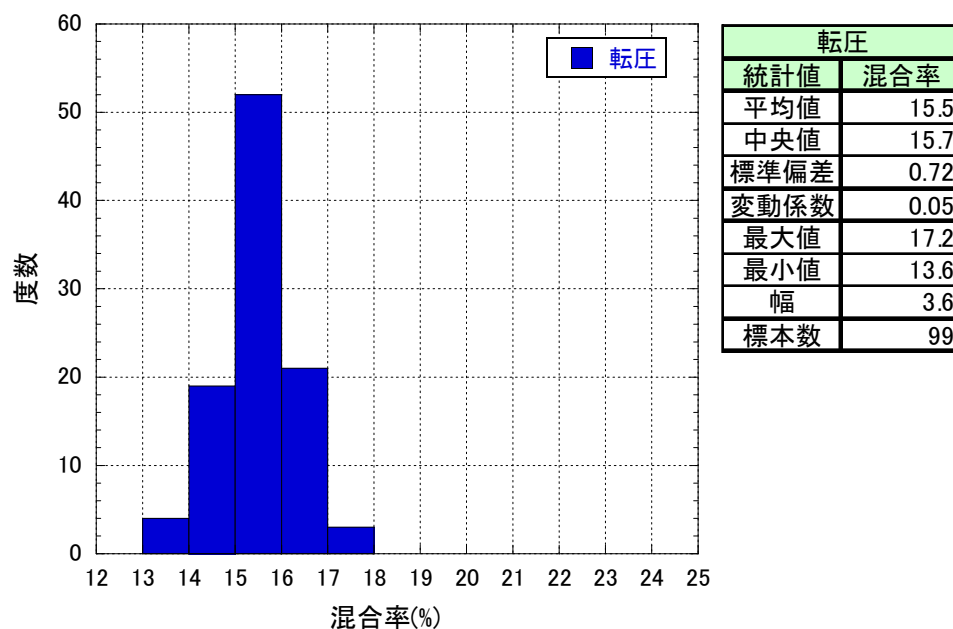


図 5.1-77 転圧施工後の混合率の度数分布

5) かさ密度測定結果

かさ密度の測定結果を図 5.1-78 に示す。かさ密度（乾燥密度）の平均値は約 0.93Mg/m³であり、ばらつきは約 0.1Mg/m³であった。

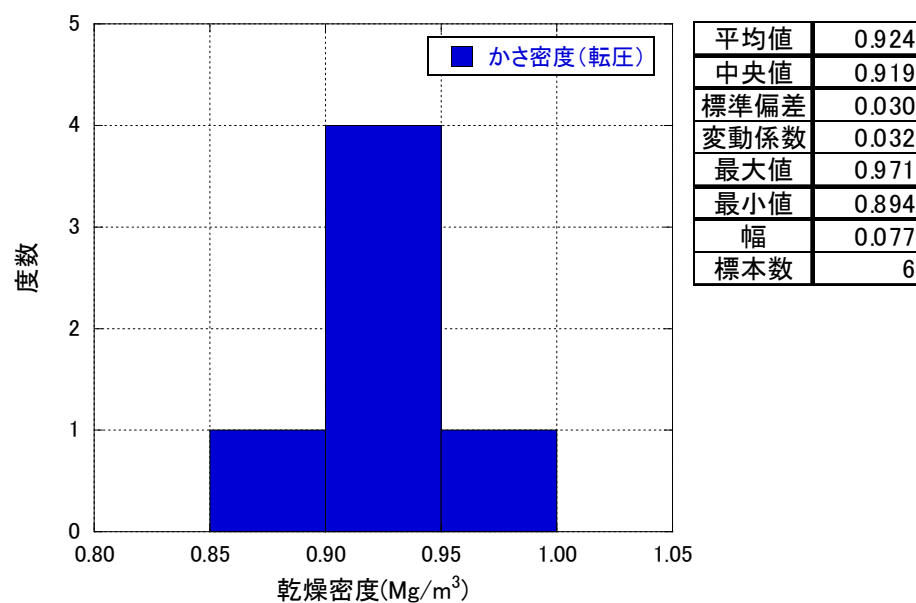
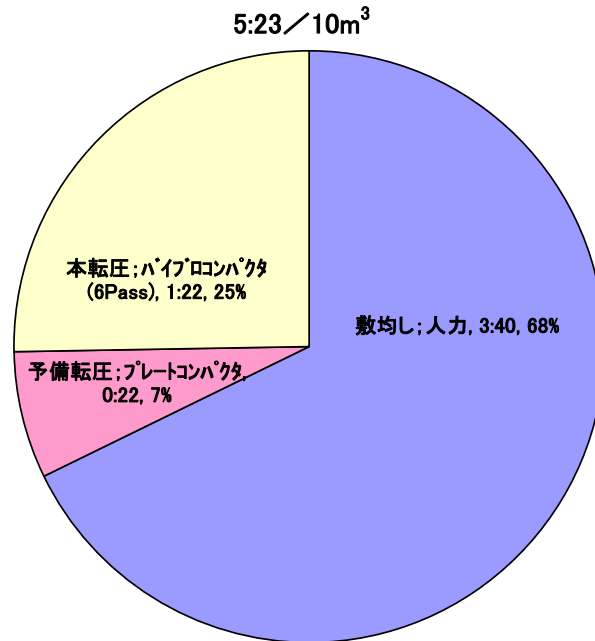


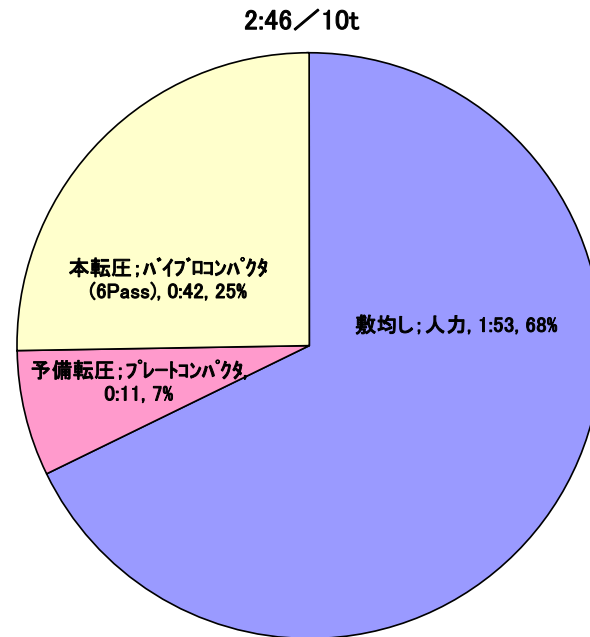
図 5.1-78 かさ密度測定結果

6) サイクルタイム測定結果

施工試験の結果から得られた 10m³ 施工する際、および 10 t 施工する際のサイクルタイムを図 5.1-79 に示す。人力で実施しているため、敷均しに最も多く時間を要する結果となっている。緩衝材施工において材料の敷均しを人力で行った場合と機械で行った場合の結果を比較すると機械で行なうことにより人力の時の半分以下の時間で施工が行えているため、埋戻し材の転圧施工においても敷均し、敷均しを機械化することにより施工時間は大幅に短縮できるものを思われる。



(a) 10m³ 施工する時のサイクルタイム



(b) 10t 施工する時のサイクルタイム

図 5.1-79 転圧施工のサイクルタイム

7) 出来形測量結果

転圧施工後の出来形測量は、吹付け後と同様に3D スキャナおよび写真測量を実施した。3D スキャナおよび写真測量は、1ブロックごとに実施し、材料敷均し前の状況を計測し(初期値計測)、転圧完了後の形状を計測して、1ブロックの出来形を把握した。

3D スキャナおよび写真測量による出来形測量の結果を表 5.1-20 に示す。表には空洞形状の CAD 図上の寸法と施工後のレベル測量から求めた体積も示している。いずれの体積もほぼ同様の値となっている。3D スキャナおよび写真測量の測定図の一部を図 5.1-80、図 5.1-81 に示す。

表 5.1-20 施工体積の比較 (転圧施工)

転圧	使用量 (kg)	体積		
		3D スキャナ (m ³)	写真測量 (m ³)	CAD、レベル・寸法測量 (m ³)
1次	38,987	18.49	18.72	18.95
2次	25,600	12.27	12.11	12.55
3次	17,301	8.20	8.34	8.50
合計	81,888	38.96	39.17	40.00

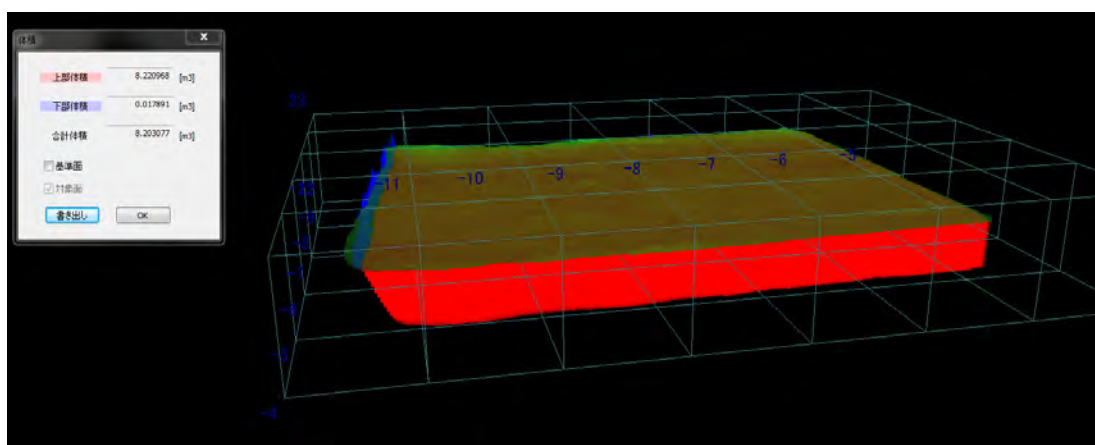


図 5.1-80 3D スキャナ測定結果 (3次転圧)

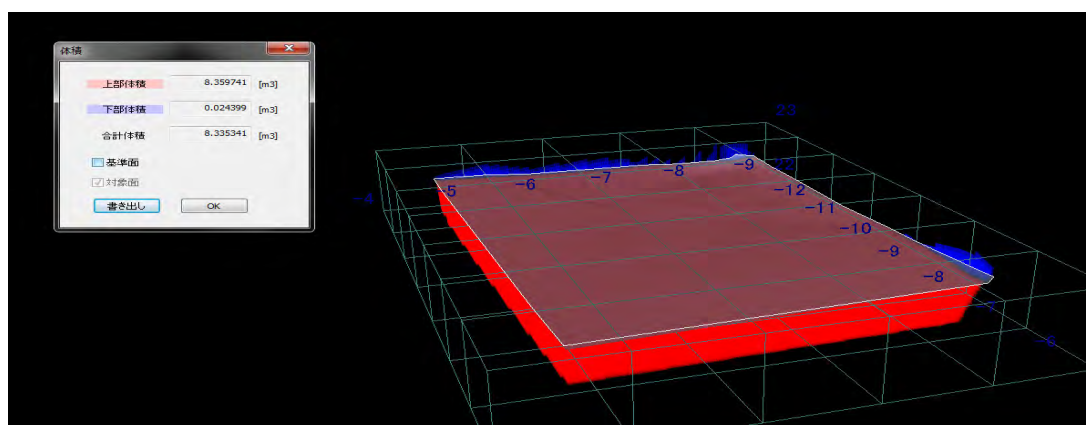


図 5.1-81 写真測量結果 (3次転圧)

5.2 初期性能確認試験

5.2.1 初期性能確認試験の概要

平成 25 年度調査した国内外の埋め戻し材の要求機能に関する情報をもとに、上部埋め戻し材の要求機能を整理すると、日本原子力学会標準「余裕深度処分施設の施設検査方法 2010」および土木学会「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」に記載されているように、緩衝材の膨潤変形を抑止する力学特性が主となる。また、核種の移行抑制に関わる低透水性は上部埋め戻し材に要求される機能ではなく、主に緩衝材に期待される機能であるが、平成 24 年度の報告書でも述べたように、旧埋設規則に記載があったように、上部埋め戻し材にもある程度の低透水性は期待されているものと考えられる。

以上のことから、初期性能確認としては、力学特性を把握するために、一軸圧縮強度試験、三軸圧縮強度試験、膨潤圧測定試験を、また、低透水性を把握するための試験として透水試験およびその代替特性確認のための乾燥密度測定試験を行った。

上記の試験は、施工完了時点の品質を確認することを目的に室内試験を実施した。試験項目および数量を表 5.2-1 に、各試験にて使用した試料の採取位置を整理した一覧を表 5.2-2 示す。

表 5.2-1 初期性能確認項目および数量

No.	分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	実施時期	実施場所	数量	記録方法	検査確認者	監理員への報告方法	監理員への報告時期	不適合時の対応	備考
1	基本特性(透水)	透水係数	JIS A 1218 を参考			12						3 供試体×2 回×2 工法=12 試験
2	基本特性(強度)	一軸圧縮強度	JIS A 1216	コアサンプリング後	室内試験室	4	データシート	主任技術者	書面	試験後	再試験	1 試験(3 試料)×2 回×2 工法=4 試験
3		三軸圧縮強度	JGS0527 に準拠			4						1 試験(3 試料)×2 回×2 工法=4 試験
4		膨潤特性	膨潤圧試験			12						3 供試体×2 回×2 工法=12 試験
5	代替特性	密度	ノギス法			現地試験室						80	20 点×2 回×2 工法=80 点
6		含水比	JIS A 1203	80	20 点×2 回×2 工法=80 点							

表 5.2-2 品質測定試験（室内試験）ケース

試験種類	試験ケース名	サンプリング位置	サンプリング箇所	試験数	供試体寸法(mm)
一軸圧縮試験	UCS_1-1	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UCS_1-2	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UCS_1-3	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UCS_2-1	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UCS_2-2	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UCS_2-3	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UCS_3-1	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UCS_3-2	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UCS_3-3	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UCS_4-1	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
	UCS_4-2	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
	UCS_4-3	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
三軸圧縮試験	UU_1-1	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UU_1-2	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UU_1-3	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ50×H100
	UU_2-1	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UU_2-2	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UU_2-3	転圧(1段目)	5層目	1	φ50×H100
	UU_3-1	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UU_3-2	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UU_3-3	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ50×H100
	UU_4-1	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
	UU_4-2	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
	UU_4-3	転圧(2段目)	11層目	1	φ50×H100
透水試験	PE_1-1	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ75×H60
	PE_1-2	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ75×H60
	PE_1-3	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ75×H60
	PE_2-1	転圧(1段目)	5層目	1	φ75×H60
	PE_2-2	転圧(1段目)	5層目	1	φ75×H60
	PE_2-3	転圧(1段目)	5層目	1	φ75×H60
	PE_3-1	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ75×H60
	PE_3-2	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ75×H60
	PE_3-3	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ75×H60
	PE_4-1	転圧(2段目)	11層目	1	φ75×H60
	PE_4-2	転圧(2段目)	11層目	1	φ75×H60
	PE_4-3	転圧(2段目)	11層目	1	φ75×H60
膨潤圧試験	SW_1-1	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ60×H20
	SW_1-2	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ60×H20
	SW_1-3	吹付け (1BL)	1BL_5	1	φ60×H20
	SW_2-1	転圧(1段目)	5層目	1	φ60×H20
	SW_2-2	転圧(1段目)	5層目	1	φ60×H20
	SW_2-3	転圧(1段目)	5層目	1	φ60×H20
	SW_3-1	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ60×H20
	SW_3-2	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ60×H20
	SW_3-3	吹付け (4BL)	4BL_2	1	φ60×H20
	SW_4-1	転圧(2段目)	11層目	1	φ60×H20
	SW_4-2	転圧(2段目)	11層目	1	φ60×H20
	SW_4-3	転圧(2段目)	11層目	1	φ60×H20
密度試験	—	吹付け (2BL)	2BL_3	20	Φ75×H60
	—	転圧 (2段目)	10層目	20	Φ75×H100
	—	吹付け (3BL)	3BL_2	20	Φ75×H60
	—	転圧 (3段目)	13層目	20	Φ75×H100

5.2.2 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能の確認試験

(1) 一軸圧縮試験

1) 試験方法

一軸圧縮強度ならびに変形係数を得るために、採取したコアを用いて、一軸圧縮試験を行った。供試体の大きさは直径 50mm×高さ 100mm を基本とした。試験は「土の一軸圧縮試験（JIS A 1216）」に準拠して行った。また、含水比の測定は、「土の含水比試験方法（JIS A 1203）」に準拠して行った。

2) 試験結果

表 5.2-3 に今年度実施した一軸圧縮試験結果を整理し、図 5.2-1 に圧縮応力～ひずみ曲線を示す。一軸圧縮強度 q_u は 71.5kN/m^2 ～ 114.9kN/m^2 に分布し、破壊ひずみ ϵ_f は 2.3%～5.7%、変形係数 E_{50} は 3.7 ～ 9.4MN/m^2 の範囲であった。

表 5.2-3 一軸圧縮試験結果一覧表

試験 ケース名	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	混合率 (%)	一軸圧縮強さ (kN/m ²)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m ²)	軸ひずみ速度 (%/min)
UCS_1-1(吹付)	1.690	14.1	16.3	71.5	2.3	8.9	1.00
UCS_1-2(吹付)	1.718	14.0	16.1	85.6	4.2	4.7	1.00
UCS_1-3(吹付)	1.701	14.2	16.8	82.0	2.9	7.0	1.00
UCS_2-1(転圧)	1.677	15.4	16.1	92.2	3.6	5.0	1.00
UCS_2-2(転圧)	1.666	15.1	15.6	89.8	3.7	3.8	1.00
UCS_2-3(転圧)	1.661	15.2	15.9	85.1	4.0	3.7	1.00
UCS_3-1(吹付)	1.670	14.1	18.1	73.6	2.7	9.4	1.00
UCS_3-2(吹付)	1.720	15.1	18.8	95.2	4.6	7.4	1.00
UCS_3-3(吹付)	1.676	14.2	17.5	71.5	3.9	8.9	1.00
UCS_4-1(転圧)	1.735	15.7	16.4	105.4	4.3	5.8	1.00
UCS_4-2(転圧)	1.737	15.6	15.8	113.7	4.7	4.3	1.00
UCS_4-3(転圧)	1.742	15.7	16.0	114.9	5.7	3.9	1.00

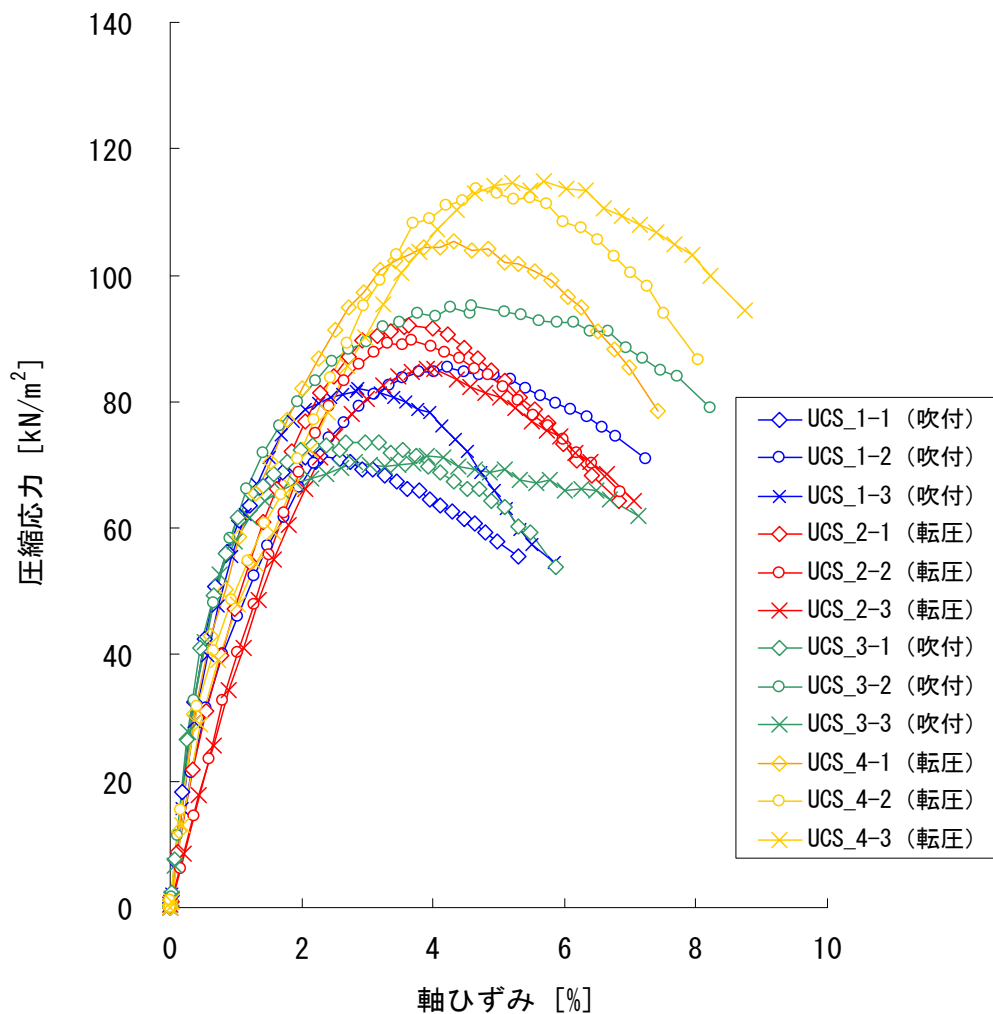


図 5.2-1 一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係

(2) 三軸圧縮試験

1) 試験方法

採取したコアを用いて、三軸圧縮試験（UU 試験）を行い、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ を求めた。供試体の大きさは直径 50mm×高さ 100mm を基本とした。試験方法は地盤工学会規定の方法（JGS 0527）に準拠した。表 5.2-4 には三軸圧縮試験条件を示す。試験数は 1（拘束圧 3 段階）とした。

表 5.2-4 三軸圧縮試験条件

圧密・排水条件		UU（非圧密非排水三軸試験）
供試体作製過程	供試体の作製方法	現地サンプリングコアを所定の寸法に成形
	供試体寸法	Φ50mm×H100mm
	乾燥密度 (Mg/m ³)	約 1.6
拘束圧	1.0MPa、2.5MPa、4.0MPa	
せん断過程	せん断ひずみ速度 (%/min)	1
	軸圧縮終了判定	以下のいずれかの項目が該当した時点
		①軸ひずみ 15%に達した時点
		②荷重計の読みが最大となってから引き続き軸ひずみが 3%以上生じた時点
③荷重計の読みが最大値の 2/3 程度に減少した時点		

(特筆)

- ・地盤工学会規準「土の圧密非排水三軸圧縮試験方法」(JGS 0523-2000)に準じる。
- ・ひずみ速度は制御上、0.01%/min 以下は計測できない。
- ・制御上、ひずみ速度は 1%/min 程度まで設定が可能である。

試験は、「土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）」のうち、トリミング法で行った。また、載荷等は「土の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験方法（JGS 0521）」に準拠して行った。含水比の測定は、「土の含水比試験方法（JIS A 1203）」に準拠した。

2) 試験結果

上部埋戻し材施工後の転圧層、吹付け層より採取した材料を対象に、三種類の拘束圧条件で実施した三軸圧縮強度試験(UU 試験)の結果をに表 5.2-5 示す。

変形係数は 6.7～23.7 MN/m²、粘着力は 42.54～96.61 kN/m²、内部摩擦角は 11.7～16.92 deg であった。

表 5.2-5 三軸圧縮強度試験(UU 試験)結果一覧表

試験 ケース名	乾燥 密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	混合率 (%)	拘束圧 (kN/m ²)	最大 主応力差 (kN/m ²)	破壊 ひずみ (%)	変形係数 (MN/m ²)	粘着力 (kN/m ²)	せん断 抵抗角 (deg.)	軸ひずみ 速度 (%/min)
UU-1-1(吹付)	1.676	16.2	20.4	200	229.5	15.0	6.7	42.54	13.48	1.00
UU-1-2(吹付)	1.688	16.6	21.1	400	351.0	15.0	11.2			
UU-1-3(吹付)	1.761	14.6	17.8	600	799.7	15.0	22.5			
UU_2-1(転圧)	1.700	15.7	16.1	200	316.7	14.9	17.8	89.34	11.70	1.00
UU_2-2(転圧)	1.691	16.4	16.4	400	432.1	14.9	16.8			
UU_2-3(転圧)	1.706	16.5	16.4	600	519.8	15.0	21.3			
UU_3-1(吹付)	1.744	14.4	16.0	200	421.1	15.0	16.3	96.61	16.70	1.00
UU_3-2(吹付)	1.704	15.2	17.7	400	448.7	15.0	8.8			
UU_3-3(吹付)	1.706	16.5	17.0	600	743.8	15.0	20.7			
UU_4-1(転圧)	1.702	15.6	17.4	200	342.7	15.0	13.4	73.90	16.92	1.00
UU_4-2(転圧)	1.740	15.6	16.0	400	576.0	15.0	17.5			
UU_4-3(転圧)	1.707	15.7	15.9	600	665.0	15.0	23.7			

(3) 膨潤圧試験

1) 試験方法

膨潤圧試験は現地採取試料を用い、浸潤による膨潤圧の測定を行った。試験は、圧密試験と同等の試験容器を用い、体積を拘束した状態で供試体の吸水に伴い発生する供試体軸方向応力を測定する。以下に試験手順を示す。なお、供試体寸法は、直径 60mm、高さ 20mm とする。

- a) 供試体の体積を拘束した状態で、試験容器へ給水し、供試体に吸水させる。この時、供試体の膨潤量が 0 であることを確認し、もし、変位が生じるようであれば制御して変形を 0 とする。
- b) 給水開始と同時に膨潤荷重を荷重計で測定する。
- c) 試験の継続は、膨潤荷重が一定となることを確認するまでとする。
- d) 測定結果を基に次式で最大膨潤圧を求める。

$$p_{s\max} = \frac{F_{\max}}{A} \times 0.01$$

ここに、

$p_{s\max}$: 最大膨潤圧 (MPa)

F_{\max} : 最大膨潤荷重 (N)

A : 供試体の面積 (cm²)

- e) 試験が終了した後、供試体の試験後含水比を測定する。

2) 試験結果

図 5.2-2 に膨潤圧試験用供試体の成形の状況を示す。現地にてシンウォールサンプラーを用いて採取した試料を所定の高さ、厚さになるように成形して試験用の供試体とした。図 5.2-3 には供試体を試験用セルにセッティングした状況を示す。



(a)採取した試料



(b)側面を成形している様子



(c)上下面を成形している様子



(d)試験用供試体

図 5.2-2 膨潤圧試験用供試体の成形の状況

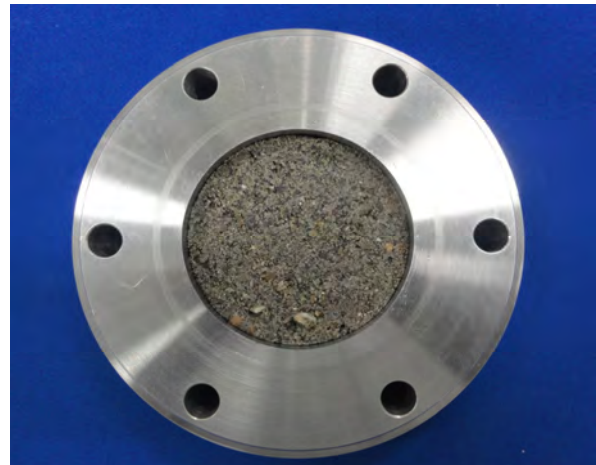
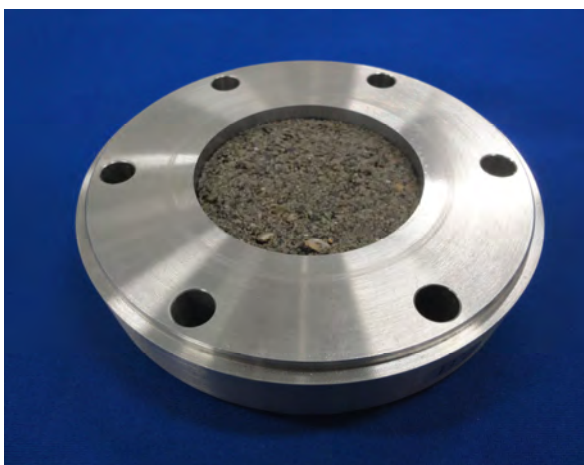


図 5.2-3 試験用供試体の試験用セルへのセッティング状況

図 5.2-4 に使用した膨潤圧試験装置を示す。表 5.2-6 に膨潤圧の測定結果を、図 5.2-5～図 5.2-8 に膨潤圧の経時変化を示す。供試体の初期乾燥密度は 1.641～1.803Mg/m³、初期含水比は 13.0～16.0%、ベントナイト混合率は 14.7～18.4%であり、得られた平衡膨潤圧は 0.0224～0.0586MPa となっている。



図 5.2-4 膨潤圧試験装置

表 5.2-6 膨潤圧試験結果

試験ケース	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	ベントナイト混合率 (%)	平衡膨潤圧 (MPa)	備考
SW_1-1	1.641	13.9	14.7	0.0224	
SW_1-2	1.645	13.7	14.9	0.0259	
SW_1-3	1.677	14.1	15.0	0.0311	
SW_2-1	1.699	16.0	16.9	0.0330	
SW_2-2	1.722	15.8	16.2	0.0401	
SW_2-3	1.716	15.7	16.4	0.0364	
SW_3-1	1.803	14.0	18.4	0.0586	
SW_3-2	1.684	13.0	14.7	0.0259	
SW_3-3	1.659	13.9	17.2	0.0362	
SW_4-1	1.698	14.8	15.7	0.0363	
SW_4-2	1.683	15.4	15.6	0.0329	
SW_4-3	1.676	16.0	16.5	0.0416	

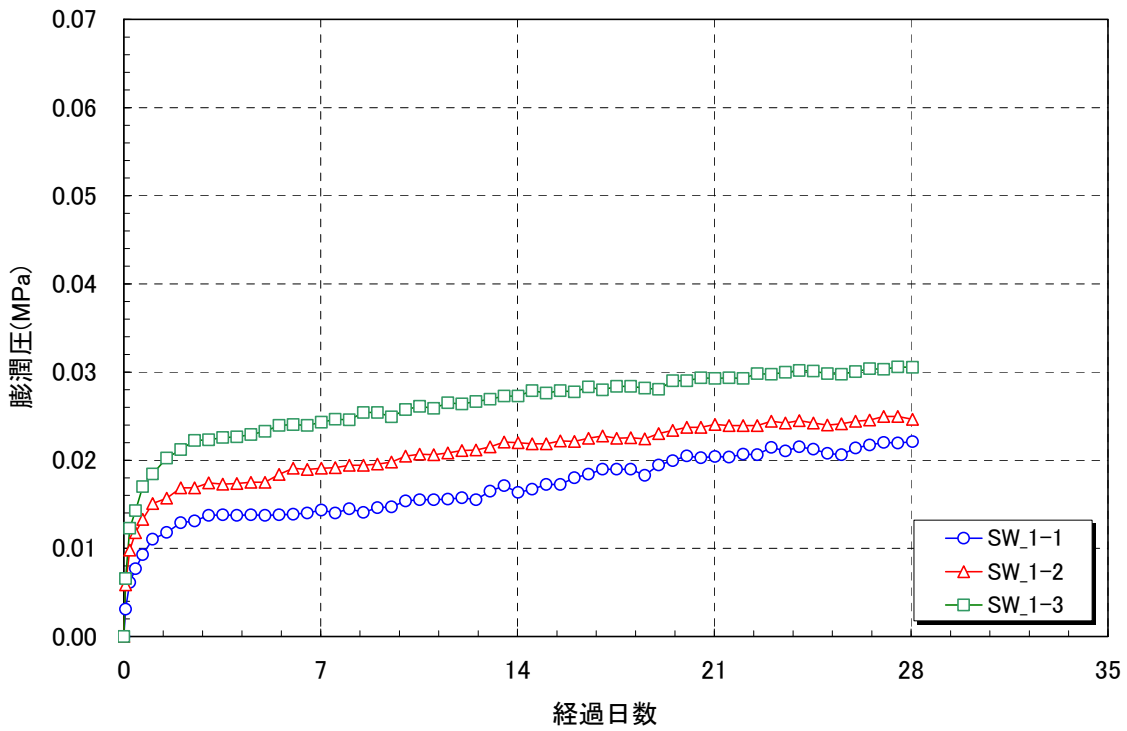


図 5.2-5 膨潤圧の経時変化（供試体 SW_1-1～SW_1-3）

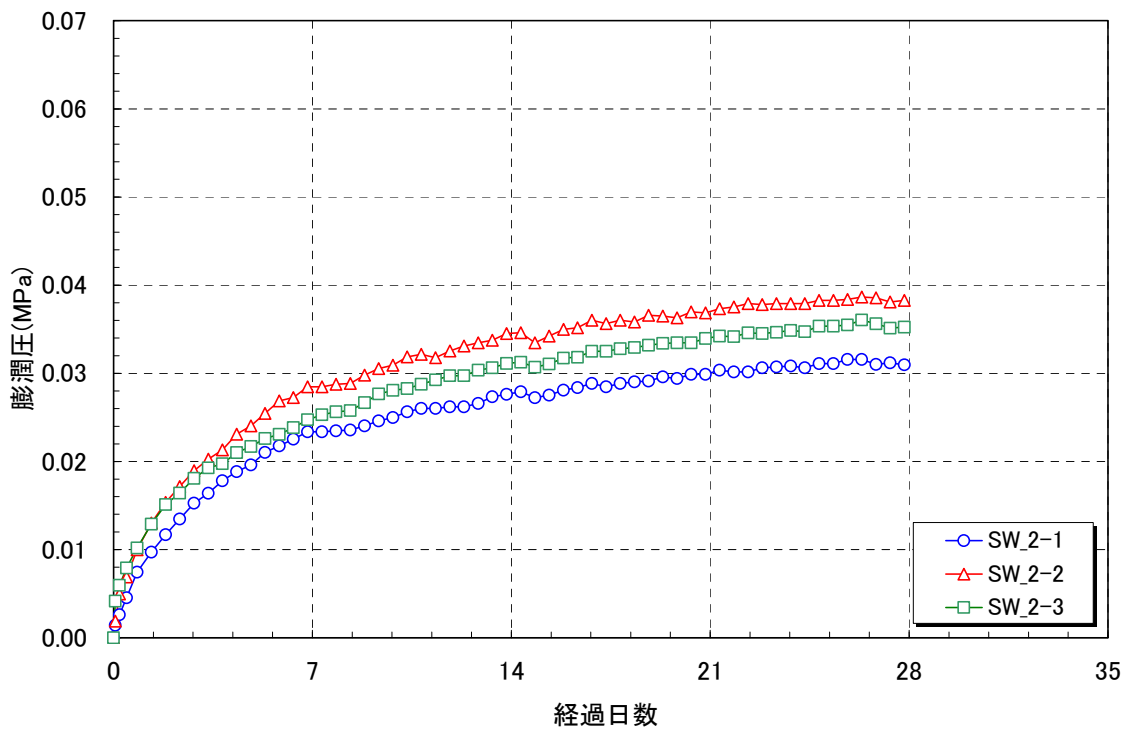


図 5.2-6 膨潤圧の経時変化（供試体 SW_2-1～SW_2-3）

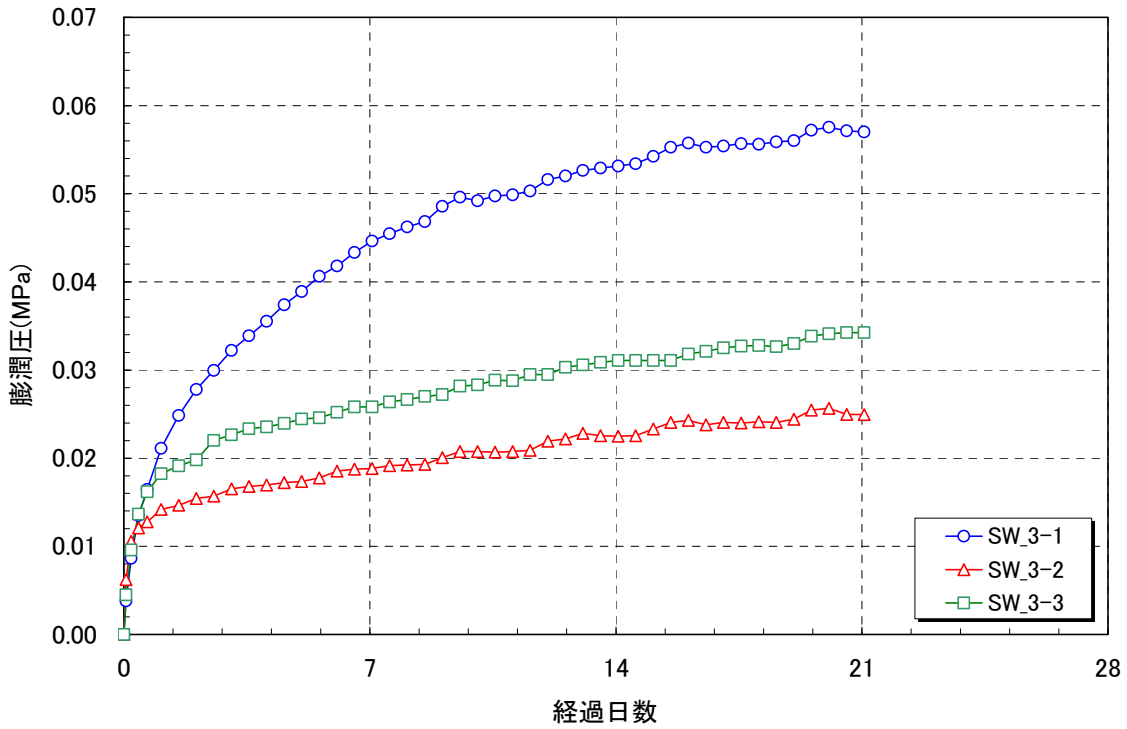


図 5.2-7 膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_3-1~SW_3-3)

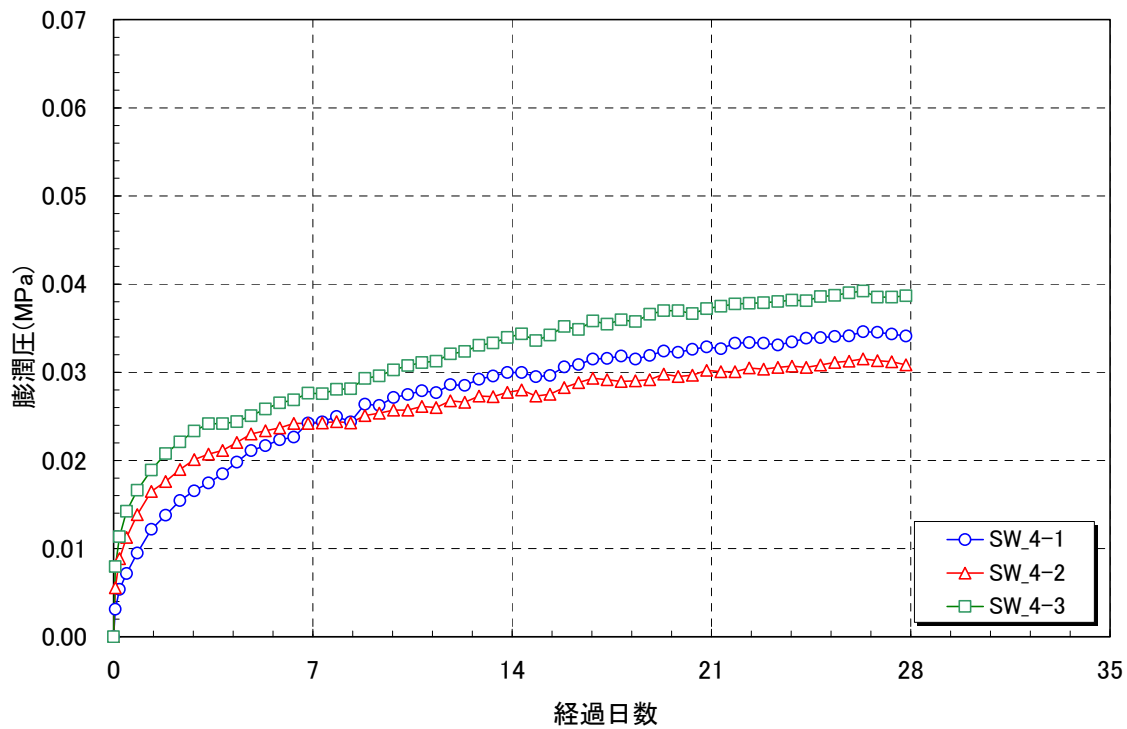


図 5.2-8 膨潤圧の経時変化 (供試体 SW_4-1~SW_4-3)

5.2.3 透水特性の確認試験

(1) 乾燥密度測定

1) 試験方法

乾燥密度に関してはシンウォールサンプラーによるサンプリングにより埋戻し材のサンプリングを行い、湿潤密度および含水比の測定を行なうことにより乾燥密度を算出した。図 5.2-9 にシンウォールサンプラーを施工層に貫入している状況を、図 5.2-10 にサンプリングの状況を示す。



図 5.2-9 シンウォールサンプラーを施工層に貫入している状況



図 5.2-10 サンプリングの状況

2) 試験結果

乾燥密度のヒストグラムを図 5.2-12 に、締固め度のヒストグラムを図 5.2-12 に示す。ヒストグラムは吹付け施工箇所、転圧施工箇所、および全体の結果を示す。

乾燥密度の平均値は、転圧施工が 1.714 Mg/m^3 、吹付け施工が 1.749 Mg/m^3 と、吹付け施工の方が 0.035 Mg/m^3 高くなっている。そのため、締固め度の平均値も吹付け施工（96.6%）の方が転圧施工（94.7%）より高くなっている。

図 5.2-13 には含水比のヒストグラムを示すが、吹付け施工の方が 1%以上低い含水比（平均 14.1%）となっており、最適含水比（13.7%）に近い値である。

密度測定後に、細粒分含有率試験を行い、ペントナイト混合率を算出した結果を図 5.2-14 に示す。混合率については、転圧施工に比べて吹付け施工の方が大きくばらつき、平均値も高いという結果となった。

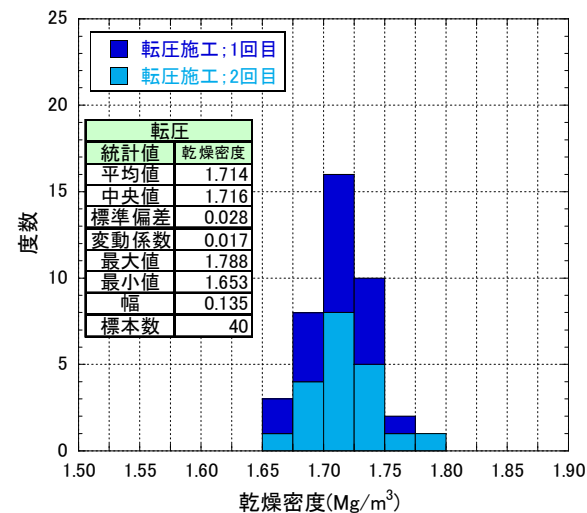
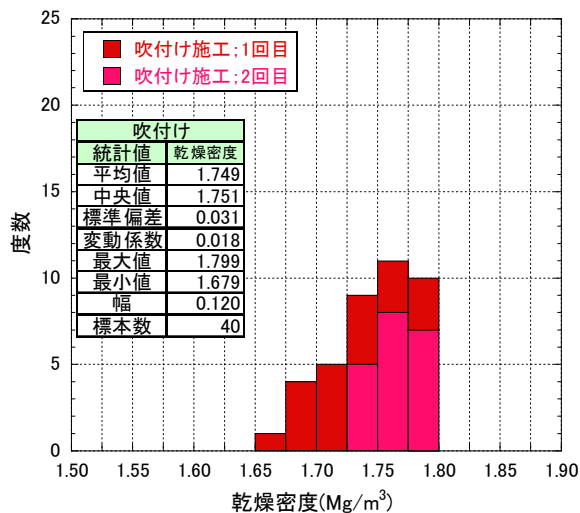
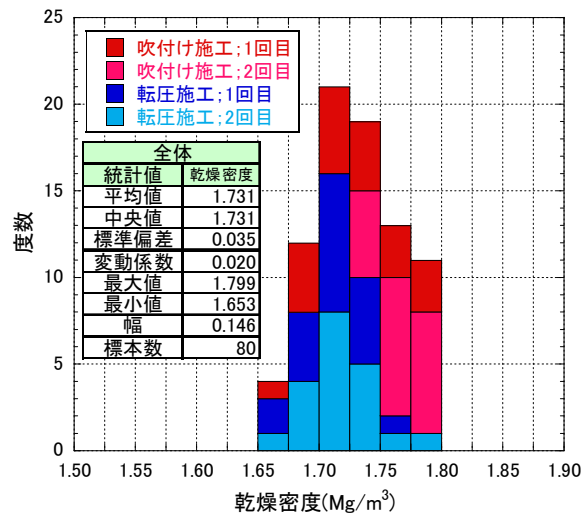
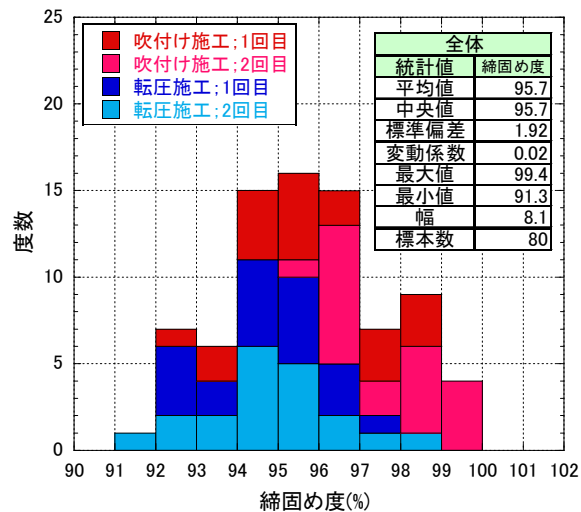
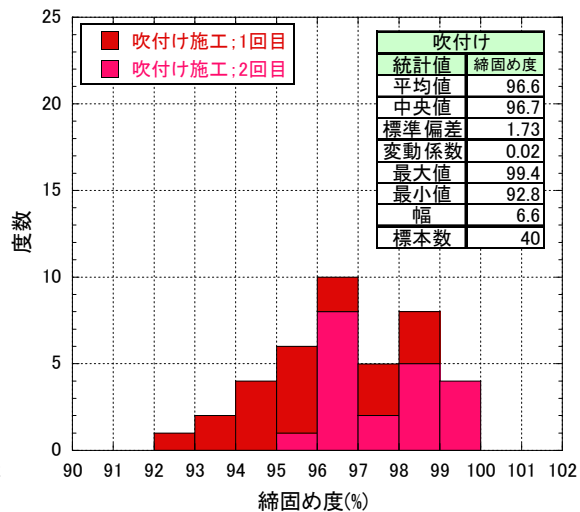


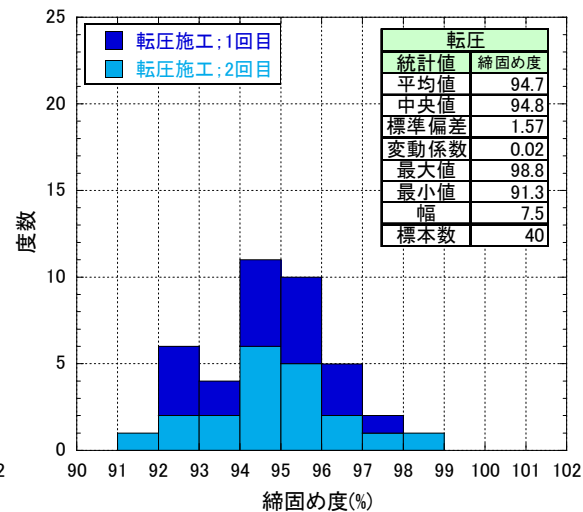
図 5.2-11 乾燥密度のヒストグラム



(a)全体



(b)吹付け施工



(c)転圧施工

図 5.2-12 締固め度のヒストグラム

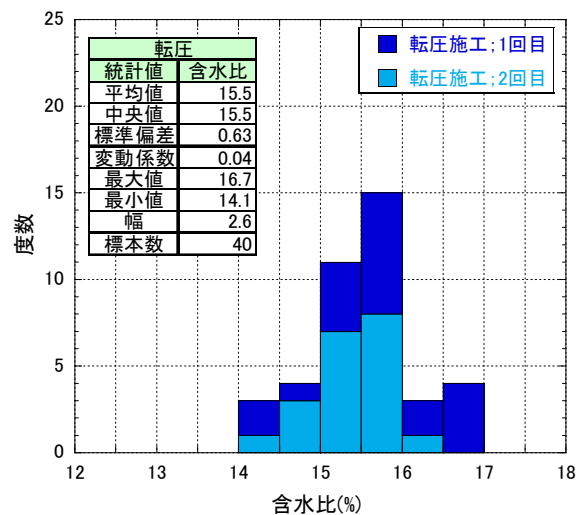
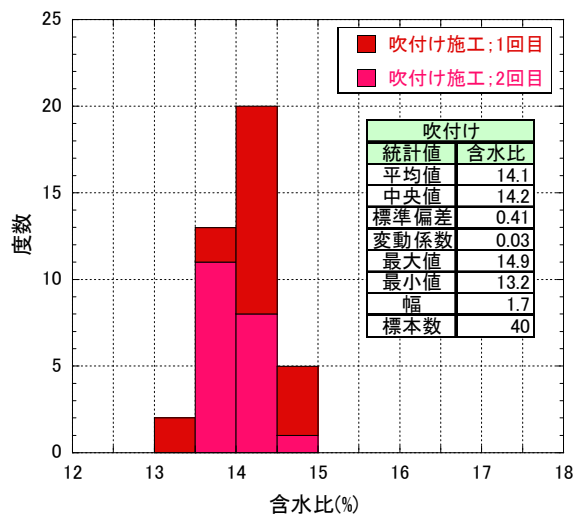
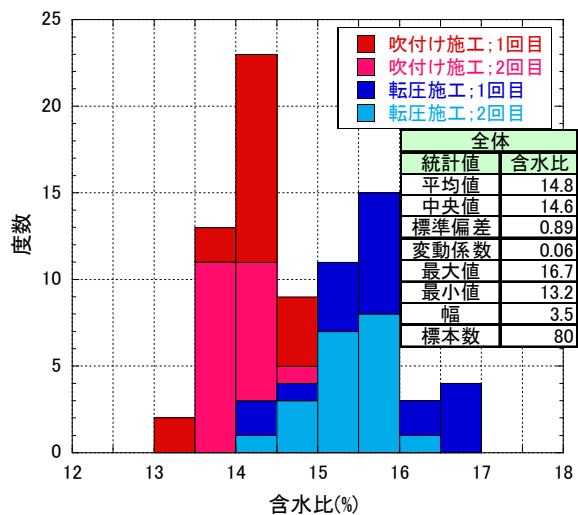
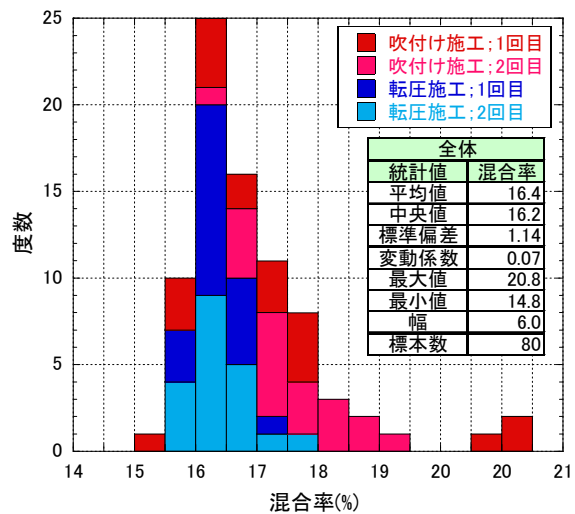
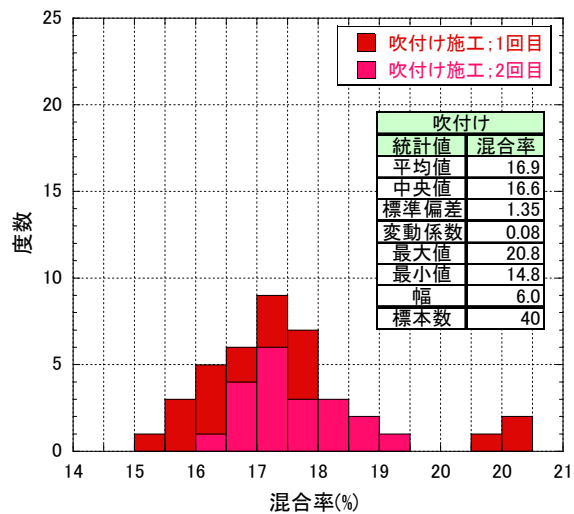


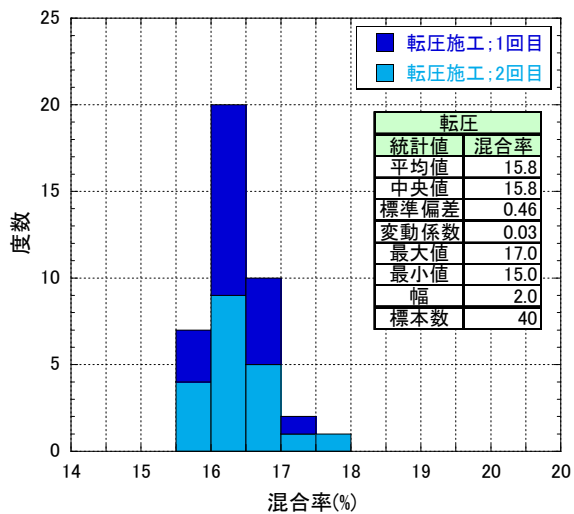
図 5.2-13 含水比のヒストグラム



(a)全体



(b)吹付け施工



(c)転圧施工

図 5.2-14 混合率のヒストグラム

(2) 透水試験

1) 試験方法

透水試験は、以下の手順で実施した。

f. 供試体作成方法

透水試験用供試体の作製の手順を以下に記す。また、作製状況を図 5.2-15 に示す。

- ① シンウォールによりサンプリングした試料の上下の端面を整形して、重量と寸法を計測する。トリミングする際には、供試体が施工層中の中央付近になるよう配慮する。トリミング残土を用いて含水比試験を行う。
- ② 供試体と透水円筒との間に水みちができないよう、エポキシ系接着剤で充填する。透水円筒と供試体との隙間が大きい場合にはスペーサーを入れ、接着剤の使用量を少なくすることで、接着剤の硬化に伴う収縮や発熱を軽減させる。
- ③ 接着剤の硬化後、供試体の上下面に濾紙フィルターと有孔板を設置し、試験容器として組立てる。上部有孔板と試験容器天板との間に隙間ができる場合には、スペーサーを入れて有孔板を押さえ、固定する。



図 5.2-15 供試体と透水円筒との隙間の充填状況

g. 飽和促進方法

設定含水比および設定乾燥密度にて透水試験容器内に作製した供試体は透水試験装置にセッティングする前に水浸脱気にて飽和促進する。水浸脱気法の手順を以下に記す。

- ① 水槽に透水セルが完全に浸るだけのイオン交換水を準備し、あらかじめ脱気しておく。
- ② 試験容器を、注水口と排水口のバルブを開いた状態で水浸する。なお、初期に供試体内に残存している空気量が多くて、この方法だと水浸脱気後も供試体内に空気が残存すると懸念される場合は、片側を水中から出した状態で、もう一方側からのみ浸潤をさせて飽和促進を図る。
- ③ 真空ポンプとレギュレーターを用いて圧力を調節しながら、 -0.02 、 -0.04 、 -0.06 、 -0.08 、 -0.095MPa と徐々に減圧する。
- ④ 各段階では 2 時間以上、最後に -0.095MPa 以下まで減圧した状態では 3 時間以上圧力を維持する。
- ⑤ 減圧と同じ要領で段階に分けて徐々に加圧し、最後に大気圧まで上げて 6 時間以上

放置する。

- ⑥ この減圧－加圧を 2 回繰り返す。この後、下記に示す手順で飽和度の確認を行い、飽和度が不足している場合（概ね 95%以下）にはさらに②～⑤の工程を繰り返す。

h. 飽和度確認の手順

河野・西垣による方法[1]により、供試体内に背圧 ΔP を作用させたときに供試体内に流入した水量 ΔV を計測することで飽和状態を確認する。飽和度 $S_r(\%)$ は次式から求められる。

$$S_r = \left(\frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_v} \right) \quad (1)$$

ここで、 P_0 は初期間隙圧（絶対圧力）、 V_v は供試体の空隙の体積、 H はある温度下における空気の溶解度に相当するパラメータ（ヘンリーの係数）である。なお、本試験ではヘンリーの係数は 0 とする。また、 P_0 は大気圧あるいは間隙水圧にほぼ等しいと考えられるが、厳密な値の決定は難しいため、背圧を $0 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \text{ kPa}$ と漸増する過程で一つ前段階の背圧が間隙水圧に相当するとした。

供試体の水浸脱気終了後、透水試験前に実施する飽和度測定の手順を以下に記す。

- ① 試験容器を脱気水槽から取り出し、透水試験装置へ設置し、流入側と流出側のビュレットを接続する。この時、試験容器注水口、排水口ともにバルブは開放状態にしておく。
- ② 注排水ビュレットの水位変化がないことを確認後、排水側バルブを閉じ、注水側から所定の圧力 ΔP で注水を開始する（ $0 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \text{ kPa}$ の二段階）。測定の概要を図 5.2-12(a) に示す。注水側ビュレットの流入量 ΔV を定期的に測定し、上記(1)式により供試体の飽和度を求める。流入量が増えると計算上の飽和度は下がる。なお、圧力を負荷したことによりシンフレックスチューブの変形が生じる場合もある。事前に、空容器にて圧力注入を行い、変形の有無を確認しておく。変形が生じる場合は、その影響を補正して飽和度の測定を行うこととする。
- ③ 求めた飽和度の減少幅が $0.05\% / \text{日}$ 未満になったら、流入量の測定を終了する。
- ④ 測定終了時の流入量 ΔV から、上記(1)式を用いて背圧作用直前の供試体の飽和度を推定する。

以上により供試体の飽和状態を確認した後に透水試験を実施する。(1)により算出された飽和度が 95%以下となった場合は、前述の水浸脱気を再度行うこととした。

i. 透水試験の手順

透水試験は差圧（背圧負荷）型変水位透水試験を基本とする。試験の手順を以下に記す。

- ① 飽和度測定過程を終了した後、排水側へ注水側と同一の圧力（ 100 kPa ）を設定する。
- ② 注水側を所定の圧力に増加させ、設定の動水勾配（ $\neq 10 \sim 30$ 程度）になるように圧

力を調整し、注水側、排水側の各通水量の測定を開始する。透水試験の概要を図5.2-16(b)に示す。

- ③ 流入量、流出量を2日に1回程度の間隔で測定する。通水量の測定に用いる二重管ビュレットは、流入側、流出側ともに10ml容量（最小目盛は0.05ml）である。これらの通水量測定と同時に注水圧力、水温も記録する。
 - (1) 透水係数が安定した状態で4点以上の値が得られるまで、通水が続ける。
 - (2) 試験終了時は試験容器を解体し、透水円筒内の供試体を取り出して全量で含水比試験を実施する。得られた含水比を用いて、供試体の飽和度を算出する。

流入側、流出側の各二重管ビュレットを使用した差圧型変水位透水試験であるため、透水係数 k (m/sec)は、以下の式にて算定する[2]。

$$k = \frac{a_{in} \cdot a_{out} \cdot L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

ここで、 a_{in} : 注入側のビュレットの断面積(m²)、 a_{out} : 排水側のビュレットの断面積(m²)、 L : 供試体長さ(m)、 A : 供試体断面積(m²)、 t_1 : 測定開始時刻(sec)、 t_2 : 測定終了時刻(sec)、 h_1 : 時刻 t_1 における流入側と流出側との水頭差(m)、 h_2 : 時刻 t_2 における流入側と流出側との水頭差(m)である。

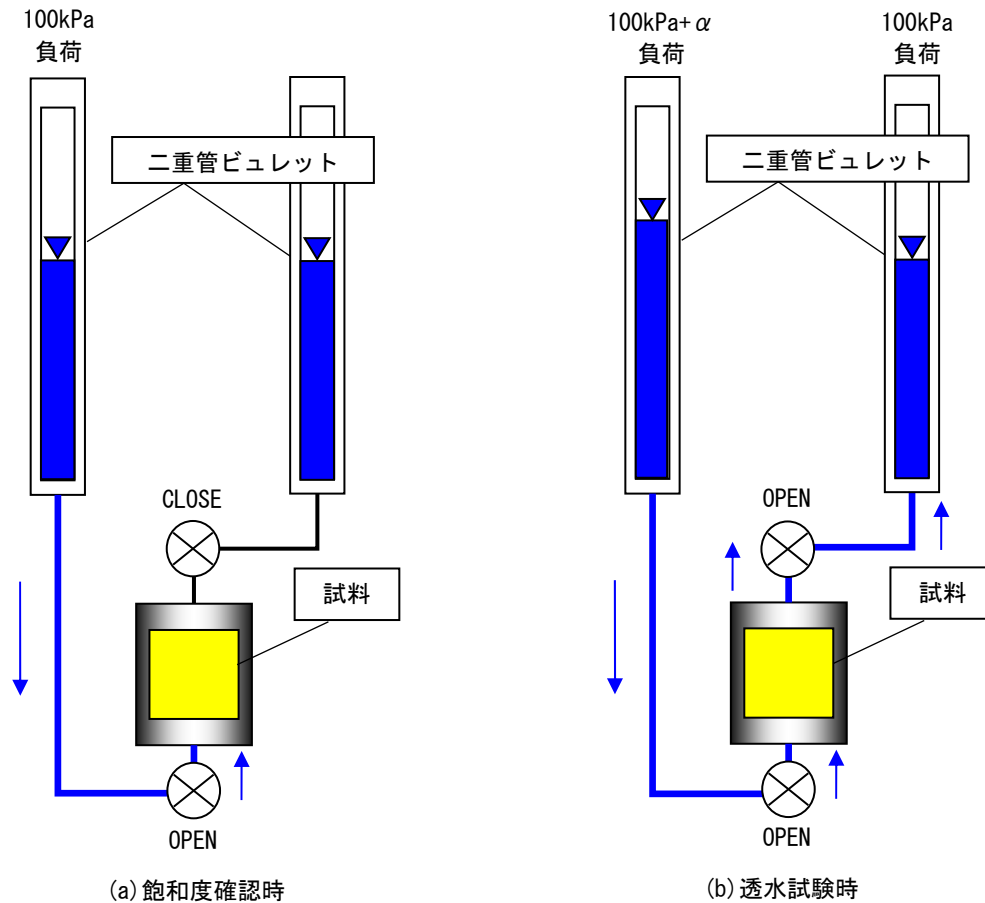


図 5.2-16 飽和度確認および透水試験の概要

2) 試験結果

透水試験は、図 5.2-17 に示す透水試験装置を用いて実施した。表 5.2-7 に透水試験結果の一覧を示す。また、図 5.2-18～図 5.2-21 には透水試験の結果を示す。飽和度確認後に実施した透水試験により算出した温度補正透水係数 k_{15} の経時変化である。

透水係数は転圧施工箇所、吹付け施工箇所とも、管理目標値 (1.0×10^{-8} m/s) を満足する結果となった。

供試体の初期乾燥密度は $1.596 \sim 1.727 \text{Mg/m}^3$ 、初期含水比は 13.3～19.0%、ベントナイト混合率は 15.1～20.9% であり、得られた透水係数は $7.07 \times 10^{-12} \sim 1.83 \times 10^{-11} \text{m/s}$ となっている。

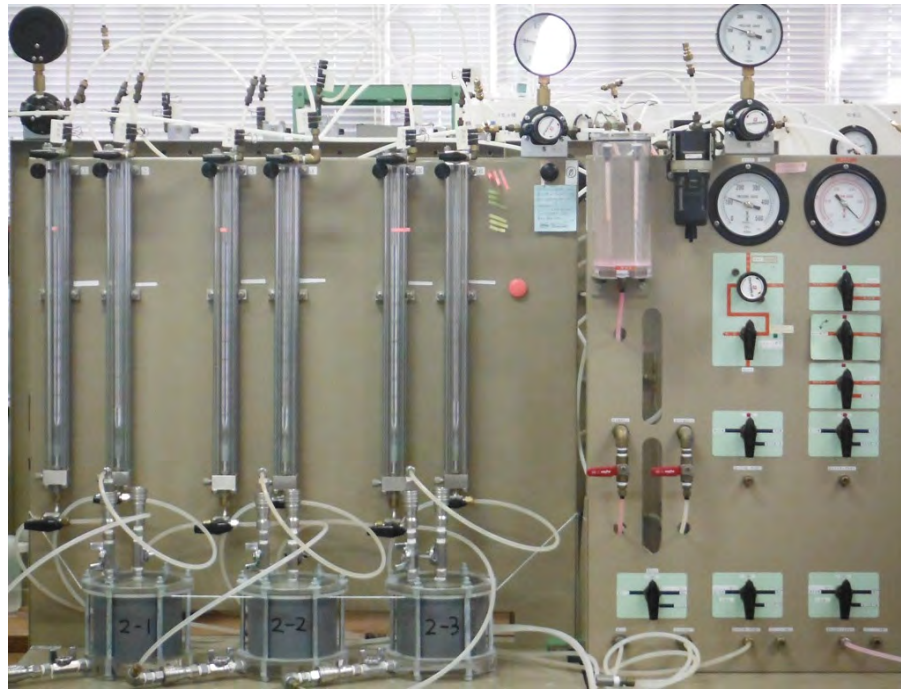
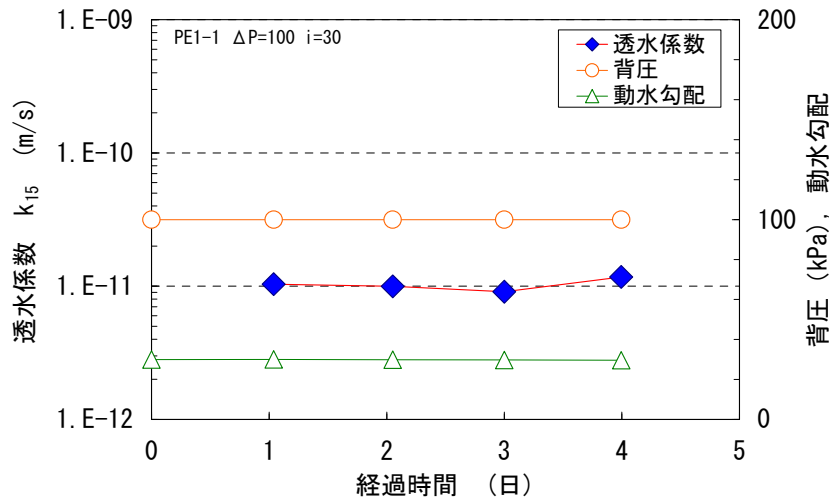


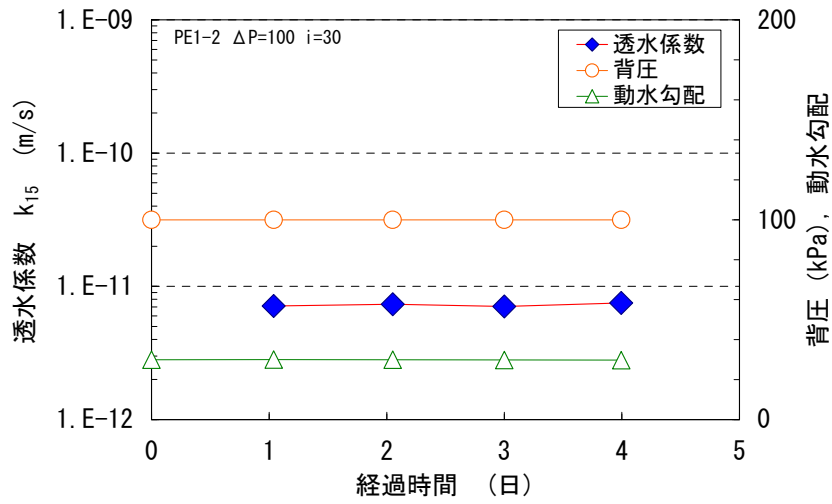
図 5.2-17 透水試験装置

表 5.2-7 透水試験結果

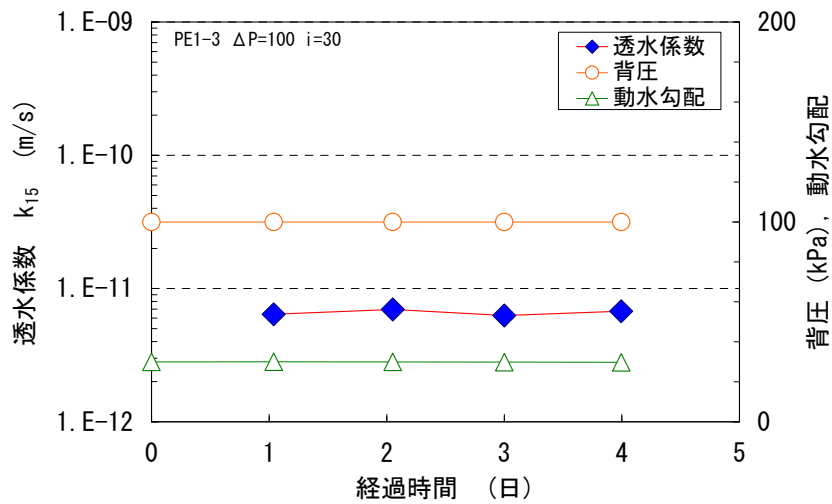
試験ケース	サンプリング位置	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	ベントナイト 混合率 (%)	透水係数 (m/s)
PE_1-1	吹付け (1BL_5)	1.704	13.3	15.1	1.03×10^{-11}
PE_1-2	吹付け (1BL_5)	1.643	16.3	19.5	7.18×10^{-12}
PE_1-3	吹付け (1BL_5)	1.596	19.0	20.9	6.61×10^{-12}
PE_2-1	転圧 (5層目)	1.694	16.3	15.7	1.10×10^{-11}
PE_2-2	転圧 (5層目)	1.705	16.1	15.8	1.45×10^{-11}
PE_2-3	転圧 (5層目)	1.715	16.8	16.0	1.75×10^{-11}
PE_3-1	吹付け (4BL_2)	1.718	14.0	15.5	1.08×10^{-11}
PE_3-2	吹付け (4BL_2)	1.727	14.6	15.7	8.83×10^{-12}
PE_3-3	吹付け (4BL_2)	1.693	14.6	17.8	1.02×10^{-11}
PE_4-1	転圧 (11層目)	1.701	15.3	15.3	1.83×10^{-11}
PE_4-2	転圧 (11層目)	1.660	16.0	16.0	1.42×10^{-11}
PE_4-3	転圧 (11層目)	1.672	15.8	15.8	7.07×10^{-12}



(a) 供試体 PE_1-1

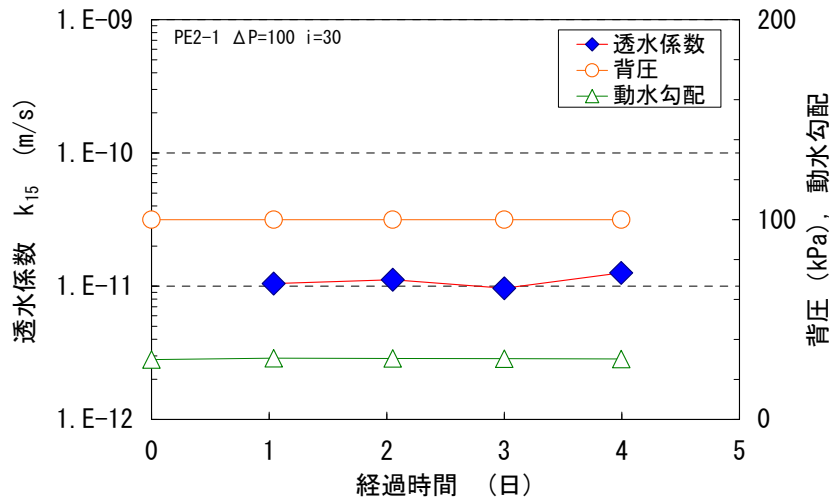


(b) 供試体 PE_1-2

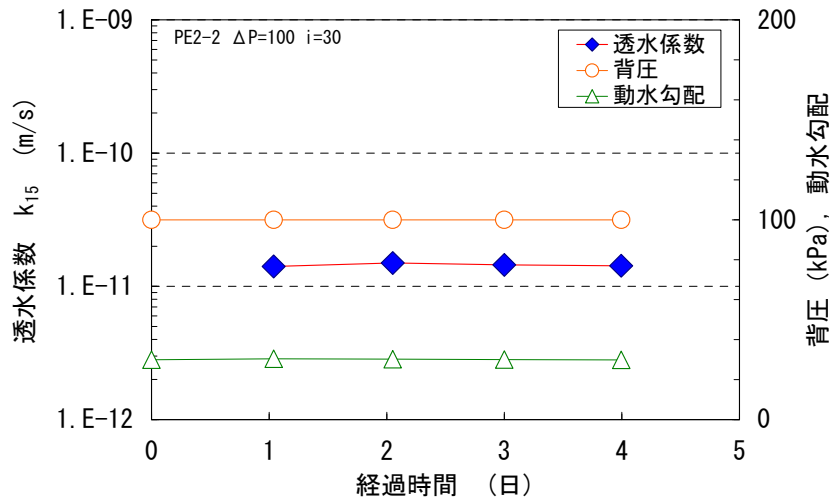


(c) 供試体 PE_1-3

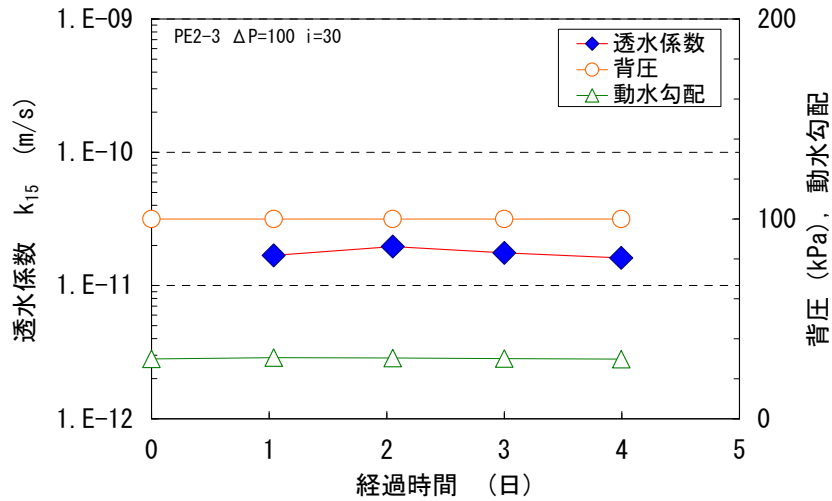
図 5.2-18 透水試験結果 (吹付け施工; 供試体 PE_1-1~PE_1-3)



(a) 供試体 PE_2-1

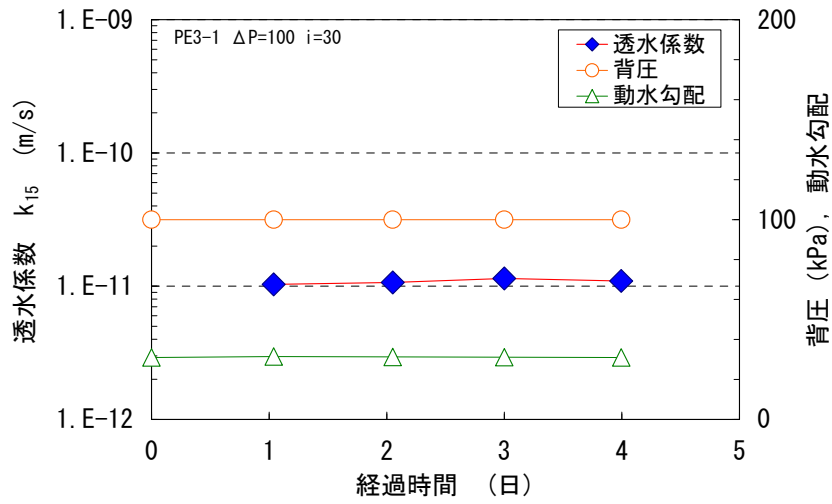


(b) 供試体 PE_2-2

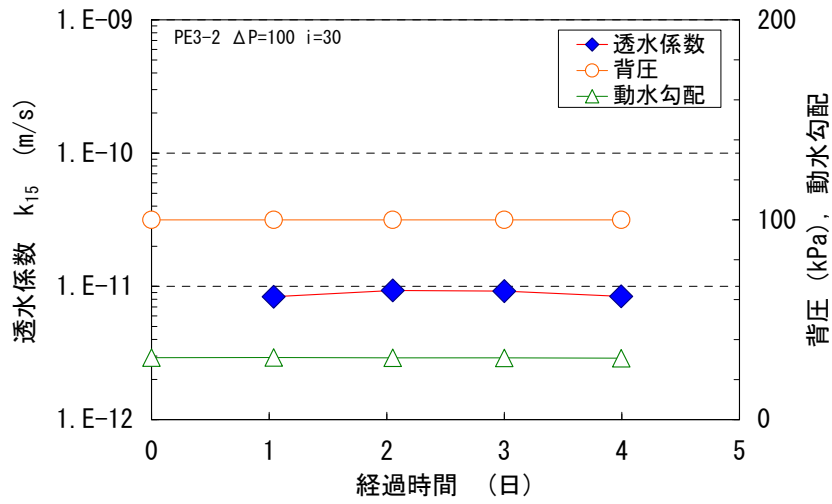


(c) 供試体 PE_2-3

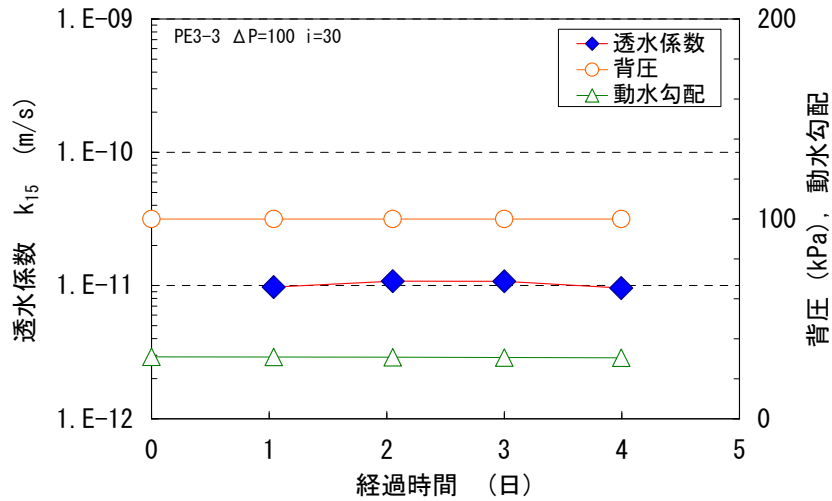
図 5.2-19 透水試験結果 (転圧施工 ; 供試体 PE_2-1~PE_2-3)



(a) 供試体 PE_3-1

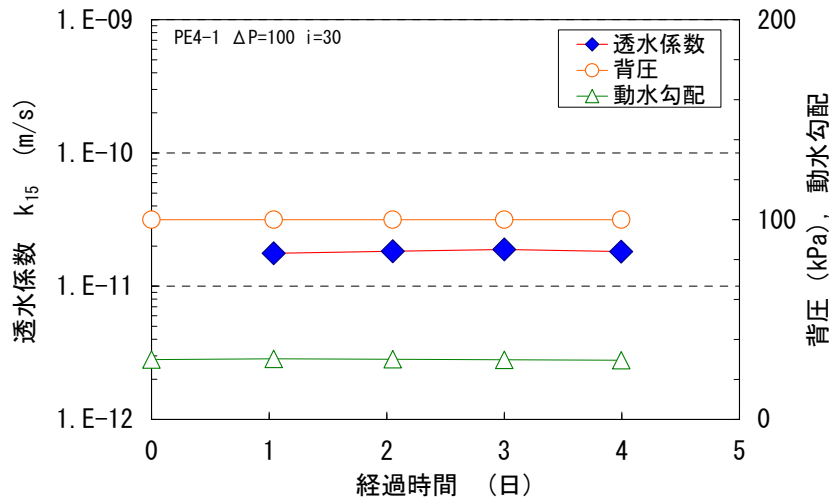


(b) 供試体 PE_3-2

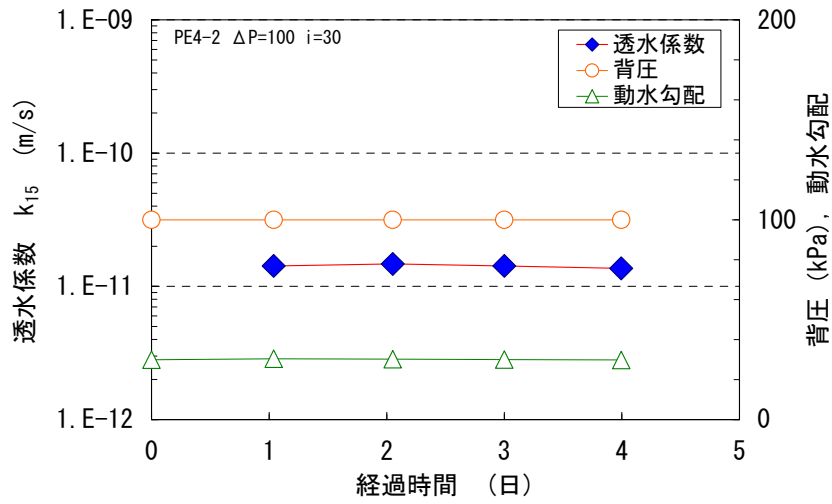


(c) 供試体 PE_3-3

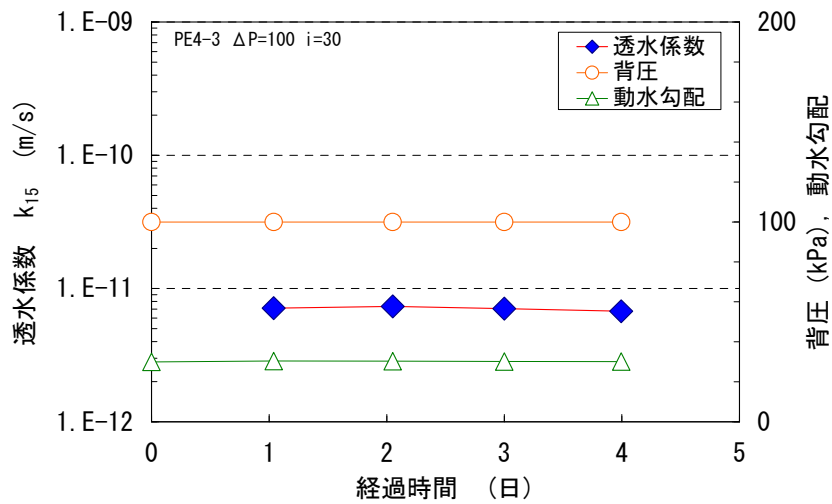
図 5.2-20 透水試験結果 (吹付け施工; 供試体 PE_3-1~PE_3-3)



(a) 供試体 PE_4-1



(b) 供試体 PE_4-2



(c) 供試体 PE_4-3

図 5.2-21 透水試験結果 (転圧施工; 供試体 PE_4-1~PE_4-3)

5.3 施工確認試験結果の評価

5.3.1 上部埋戻し材の材料特性に関する評価

上部埋戻し材の材料は、ベントナイト（クニゲル V1）と砂（三沢産コンクリート用砂）を混合したベントナイト混合土である。自走式土質改良機（SR-2000G）を用いて、目標のベントナイト混合率（15%）、含水比（14.5%：Wopt+1.0%程度）になるように製造した。

(1) 材料特性に関する品質管理項目と管理基準値

上部埋戻し材施工確認試験におけるベントナイト混合土の材料特性の管理項目と管理基準値を表 5.3-1 に示す。

現段階で、上部埋戻し材の材料に関する具体的な管理基準が定められていないため、今年度の施工確認試験においては、自主管理値として設定し試験を実施している。従って、今年度は表 5.3-1 の管理項目と管理基準値を設定した結果、得られた成果となる。

表 5.3-1 材料特性の管理項目と管理基準値

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	管理 or 確認	実施時期	数量
材料管理	重量	吊秤	—	確認	材料納入時	各フレコン
	粒度分布	JIS A 1204	—	確認	砂納入時	1点/10t 程度
	含水比	JIS A 1203	設定値±3%以内	管理	施工前	3点/フレコン
	細粒分含有率	JIS A 1223	設定値±3%以内	管理	施工前	1点/10t 程度
	締固め特性	JIS A 1210	—	確認	施工前	1点/10t 程度
	重量	吊秤	—	管理	施工前	各層単位 (転圧施工)

(2) 品質管理結果

1) 含水比、混合率の測定

製造したベントナイト混合土の含水比、およびベントナイト混合率の結果の度数分布をそれぞれ図 5.3-1 および図 5.3-2 に示す。

含水比の平均値は 14.6%で、ばらつきは 12.6~16.8%の範囲で設定値（14.5%）に対して -1.9~+2.3%程度であり、ややばらつきが大きいものの管理値（±3%）以内であった。

混合率の平均値は 14.8%、ばらつきは 13.7~16.0%の範囲で設定値（15.0%）に対して -1.3~+1.0%程度であり、ばらつきは小さく管理値（±3%）以内であった。

汎用性の広い土質改良機を使用した混合率 15%のベントナイト混合土の製造については、多少のばらつきはあるものの、ほぼ目標とする含水比、混合率の混合土を製造することが可能であることが分かった。

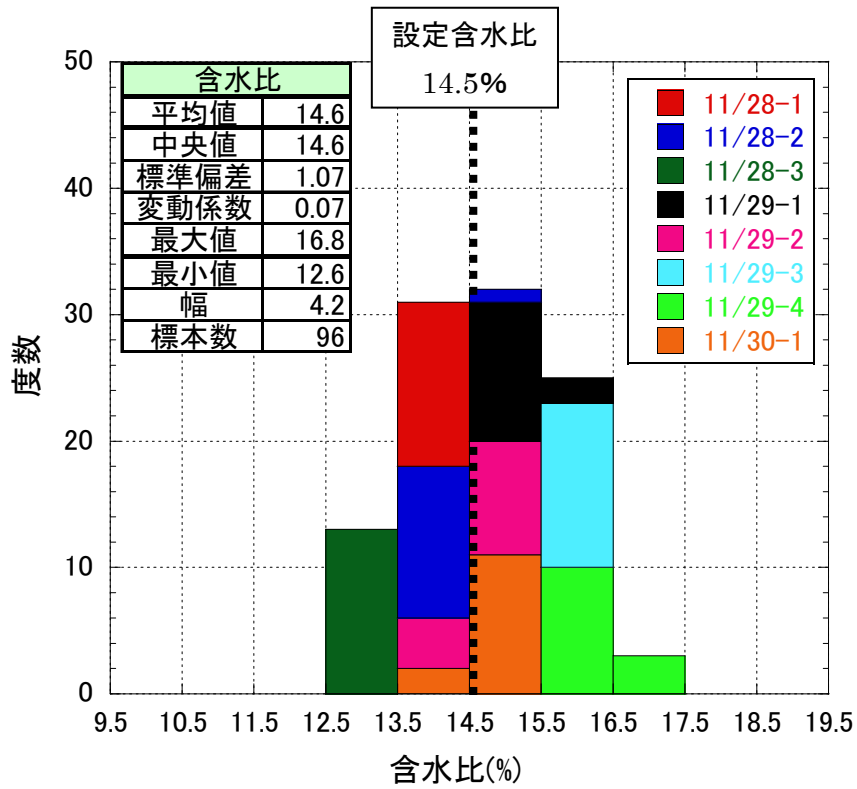


図 5.3-1 製造した混合土の含水測定結果

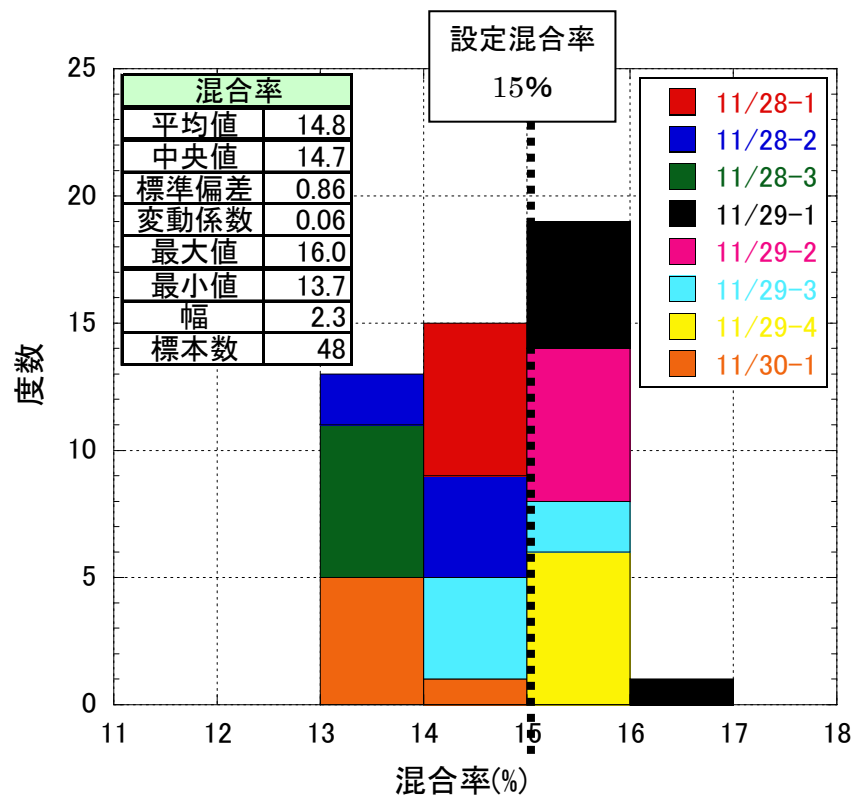


図 5.3-2 製造した混合土の混合率測定結果

2) 混合土製造時の含水比、混合率の経時変化

混合土製造時の含水比および混合率の経時変化について図 5.3-3 および図 5.3-4 に示す。含水比、混合率とも 11/28 は低め（含水比：12.9～14.1%，混合率：13.7～14.5%）で、11/29 は高め（含水比：14.6～16.3%，混合率：14.9～15.8%）という結果であった。ばらつきの原因については、作業当日、断続的に降雪があり、仮置きした砂に僅かに積雪があったため、含水比のばらつきが大きくなったと考えられる。また、加水のためのコントロール装置は自走式土質改良機（SR-2000G）に標準装備されていないため、ベントナイトの添加（一般の土質改良では固化材の添加）に比べて誤差が大きくなった可能性が考えられる。よって、自走式土質改良機（SR-2000G）による加水工程では、天候の影響に左右されにくい工夫や加水装置の技術開発などの課題が残る結果であった。

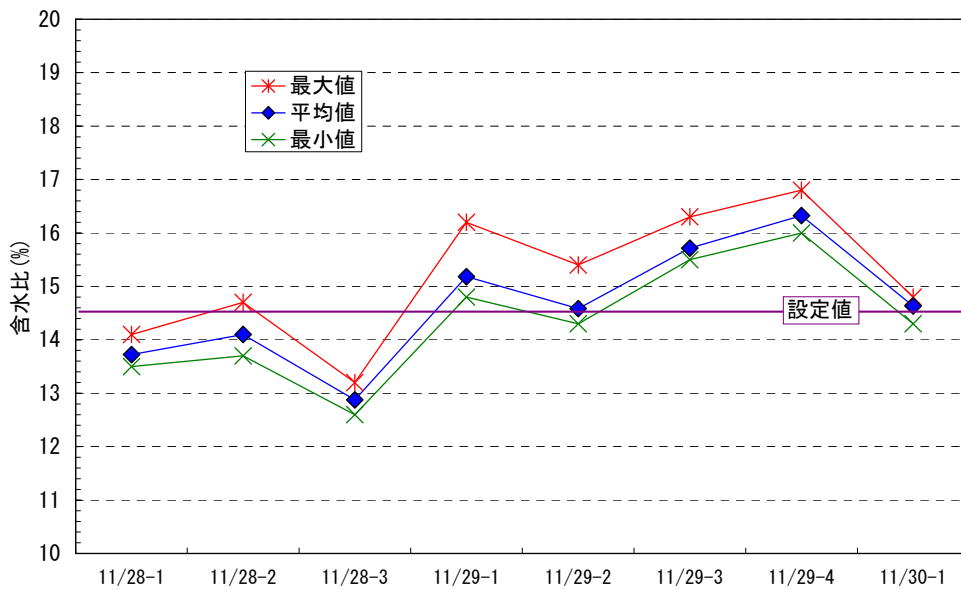


図 5.3-3 製造した混合土の含水比の経時変化

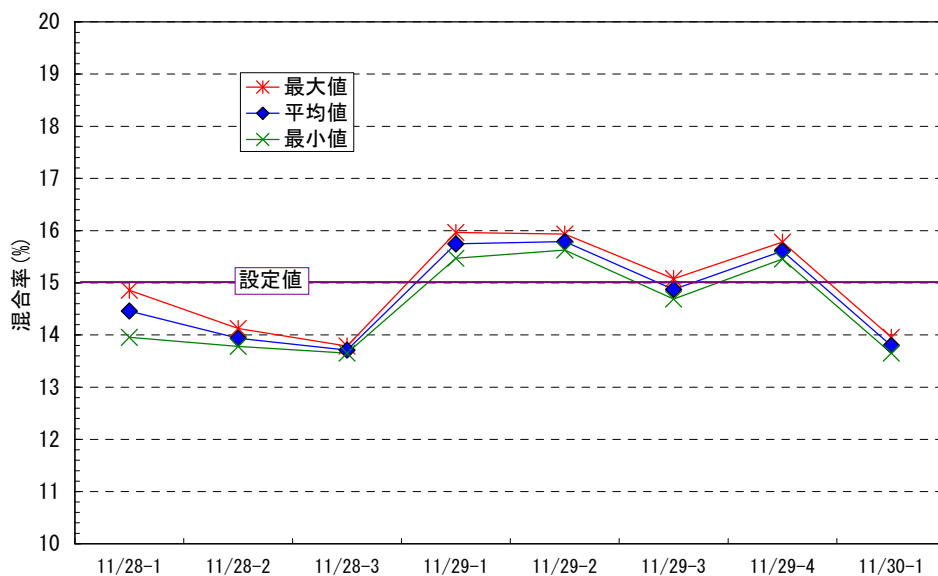


図 5.3-4 製造した混合土の混合率の経時変化

5.3.2 施工・出来形に関する評価

(1) 施工・出来形に関する管理項目と管理基準値

施工・出来形に関する管理項目と管理基準値は、表 5.3-2 に示すとおりである。

転圧施工に関しては、施工仕様設定のための予備試験において、敷均し 200mm、振動転圧 6Pass と設定し、敷均し高さはレベル測量にて管理を行い、転圧回数管理はトータルステーションを用いた転圧回数管理とバイブロコンパクタに装備されている転圧センサーによる管理を実施した。

出来形管理に関しては、空洞形状の CAD 図上の寸法と施工後のレベル測量（転圧施工）や寸法計測（吹付け施工）から求めた体積と 3D スキャナ、写真測量による出来形管理を実施した。

また、施工終了後、シンウォールサンプラーによるサンプリングにより埋戻し材のサンプリングを行い、密度および含水比の測定を行った。

表 5.3-2 施工・出来形に関する管理項目と管理基準値

分類	項目	基準・標準類 (確認方法)	管理基準値	管理 or 確認	実施時期	数量
施工管理 (転圧施工)	敷均し高さ	(レベル測量)	設定値±2cm	管理	敷均し時	—
	転圧回数	—	試験施工より設定	管理	施工時	—
施工管理 品質管理	密度	(コア密度)	設定値±0.10Mg/m ³	管理	施工終了後	8点/1施工 単位
	含水比	JIS A 1203	—	確認	施工終了後	8点/1施工 単位
	密度	(レベル測量)	—	管理	施工終了後	20点/層(転 圧工法)
	施工面観察	(目視)	異常の有無	管理	施工終了後	施工単位
	採取試料観察	(目視)	異常の有無		施工終了後	施工単位

(2) 吹付け施工時の品質管理結果

1) 乾燥密度、含水比

吹付け後の含水比は 12.9～18.2%の範囲、平均値 14.5%に対して-1.6～+3.7%となり、ややばらつきが多い結果となった。乾燥密度は 1.632～1.793Mg/m³の範囲、平均値 1.718Mg/m³に対して-0.086～+0.075Mg/m³となり、ばらつきは小さい結果である。

吹付け施工後の乾燥密度と含水比は、図 5.3-5 に示すとおり、室内で練混ぜた材料で得られた A 法による締固め曲線にプロットして整理した。測定結果は締固め曲線の下側に位置する結果となっている。

また、締固め度の度数分布を図 5.3-6 に示す。締固め度は図 5.3-5 に示す締固め曲線で得られた最大乾燥密度 (1.810Mg/m³) から算出した。締固め度は、図 5.3-13 に示すとおり 90.2～99.1%の範囲であり、締固め度の平均値 (94.9%) は、ほぼ目標値 (95.0%) を満足している。

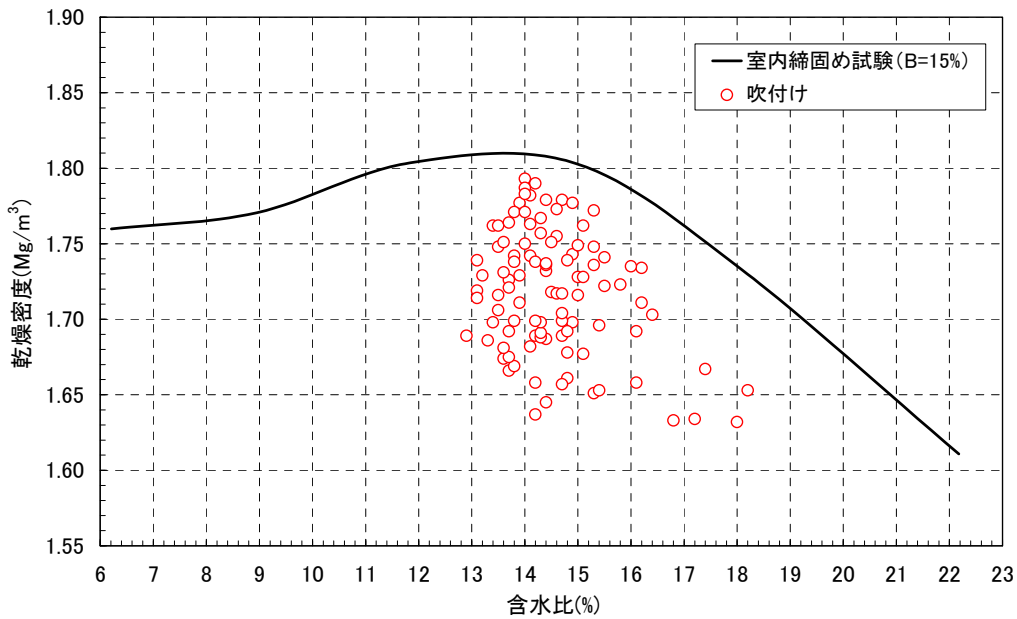


図 5.3-5 吹付け施工後の乾燥密度と含水比の関係

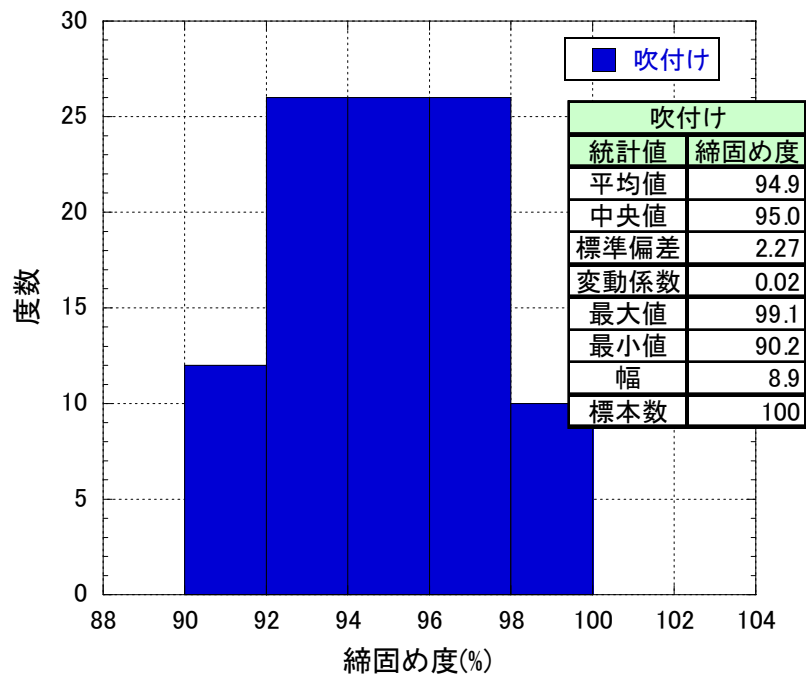


図 5.3-6 吹付け施工後の締固め度の度数分布

2) 混合率

吹付け施工後の混合率の平均値は 17.2%であった (図 5.3-7)。吹付け施工後の混合率の平均値は、材料製造時の混合率 (図 5.3-2) の平均値 (14.8%) より 2.4%高くなった。

これについて原因を調べるため、リバウンド材の含水比および混合率を測定した。結果を図 5.3-8、図 5.3-9 に示す。また、吹付け前の材料、吹付け後の材料 (施工箇所からサンプリング)、リバウンド材について、含水比の測定を行った。含水比の変化を図 5.1-75 に示す。

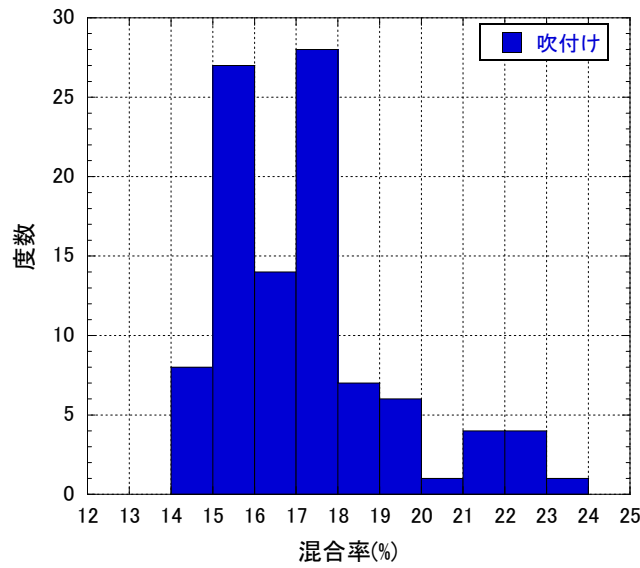


図 5.3-7 吹付け施工後の混合率の度数分布

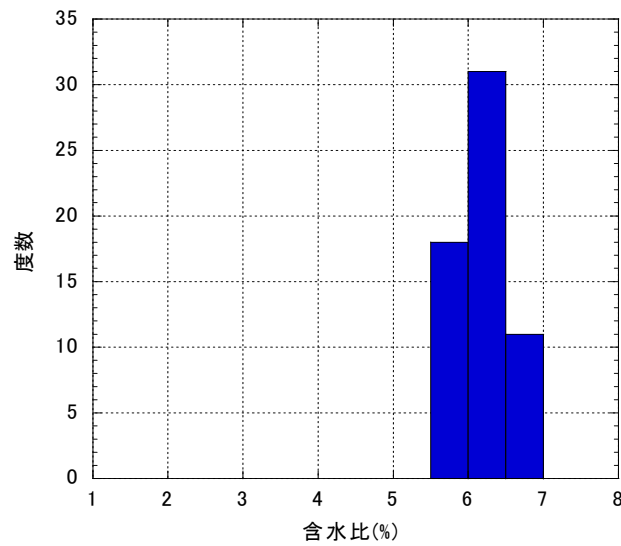


図 5.3-8 リバウンド材の含水比の度数分布

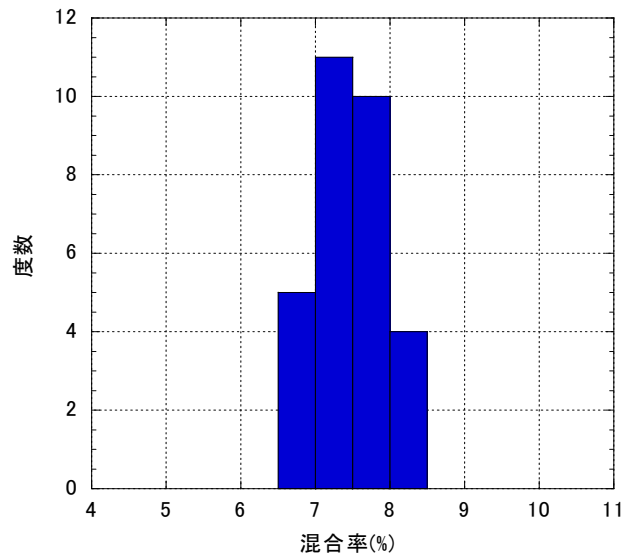


図 5.3-9 リバウンド材の混合率の度数分布

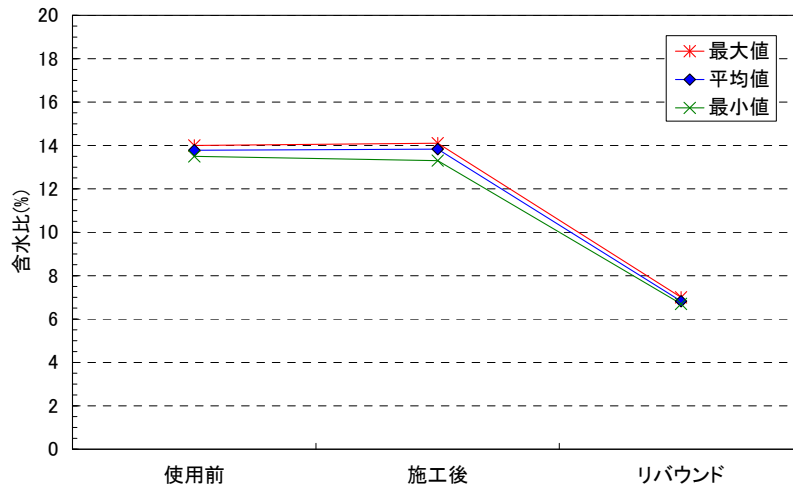


図 5.3-10 施工前後の材料の含水比の変化

リバウンド材の混合率は 7.4%と、製造時の混合率の約半分程度に低下している。また、吹付け前の材料と吹付け施工箇所からサンプリングした材料の含水比にはほとんど変化は無いものの、リバウンド材の含水比はそれらと比べて低い値となった。

これは、吹付け時に混合土の材料分離が生じ、乾燥した砂分が多くリバウンドしたため、リバウンド材の含水比が低くなったものと思われる。

リバウンド材の混合率および含水比に影響を与える要因としては、吹付け圧力、吹付け時の乾燥状態、材料の含水比、材料の練混ぜ方法（時間）、砂の粒度等が考えられる。

事前に実施した試験施工でも同一の材料、含水比で施工を行っているが、その際は今回ほどの混合率の低下は見られなかった。上記の要因の中で試験施工と異なっているには、吹付け圧力と練り混ぜ方法である。吹付け圧力に関しては、圧力そのものは試験施工と同じであるが、今回の施工試験ではホースの途中に Y 字管を設けて再加圧をしている。また、練り混ぜ方法に関しては試験施工の材料はアイリッヒミキサで混合して製造しているが、今回の施工試験では SR-2000G で製造した。

どの要因が、リバウンド材の混合率低下および含水比低下に最も影響を与えているかは今回の試験だけでは確定することはできないが、練り混ぜ方法の違いが要因の一つであると推察される。SR-2000G での製造では、アイリッヒミキサに比べて練り込まれる度合いが小さく、これが影響しているものと思われる。

3) 施工量とリバウンド率

合計吹付け量は約 57t であり、施工時間は約 58 時間（吹付けていた時間は約 30 時間）であった。合計吹付け量（約 57t）に対するリバウンド量は約 8.5t となり、リバウンド率は 14.8%である。時間当りの吹付け量は、約 1.9t/h であり、時間当り施工量は、約 1.0t/h であった。

(3) 転圧施工時の品質管理結果

1) 転圧 Pass 数による締固め度

転圧 Pass 数による締固め度は、材料の敷均し（厚さ 0.20m）後、バイブロコンパクタによる 2 層目および 3 層目の締固めにおいて、施工層厚と仕上がり密度の変化を確認し、室内で練混ぜた材料で得られた A 法による室内締固め試験の最大乾燥密度との比を求めて確認を行った。

転圧後の施工層厚は図 5.3-11 に示すように変化し、バイブロコンパクタで 6Pass 施工した時の施工層厚はいずれの層も約 0.11m となった。一方、2 層目および 3 層目における転圧回数と施工密度との関係を図 5.3-12 に示す。いずれの層も転圧回数が増えるに従い密度も高くなるが、3 層目のほうが密度は大きい結果となった。これは、乾燥密度と含水比の関係（図 5.3-13）に示すとおり、3 層目の方が低い含水比であり最適含水比に近いためであると思われる。

締固め度は、図 5.3-14 に示すとおり、転圧回数 2Pass で 90%以上の締固め度となるが、転圧回数 6Pass で締固め度は約 95%となった。この結果より、バイブロコンパクタ 6Pass 転圧での施工で、所要の品質を満足することが可能であると判断される。

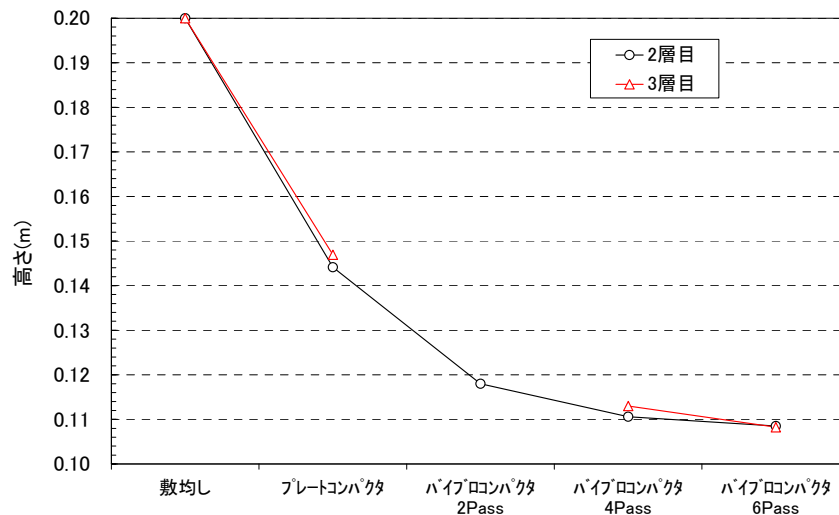


図 5.3-11 施工段階と施工高さの関係

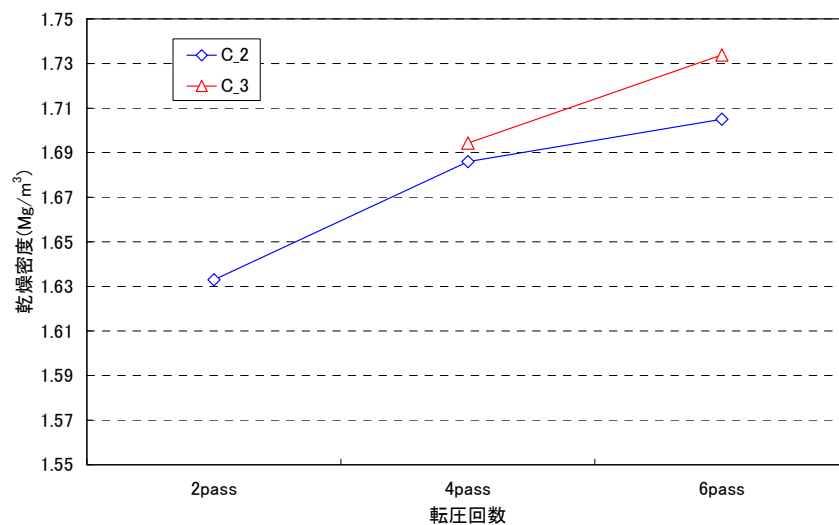
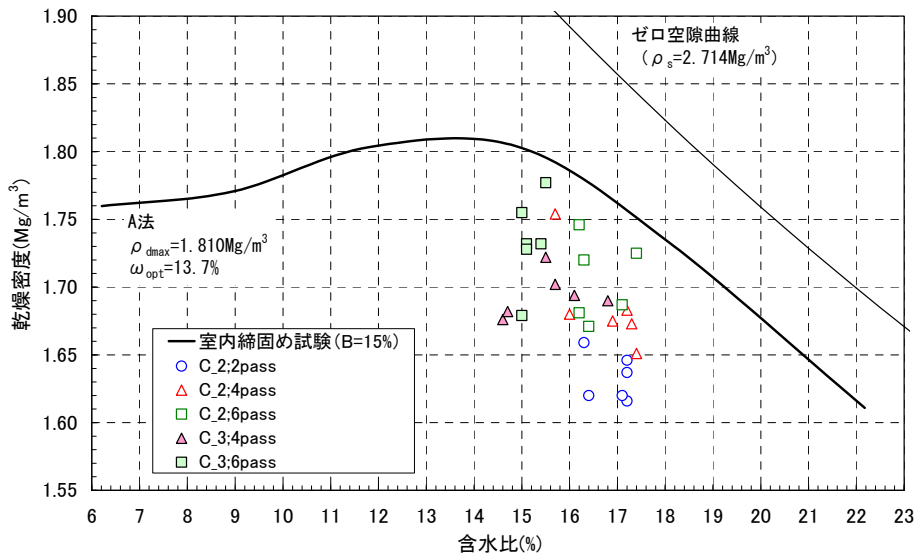
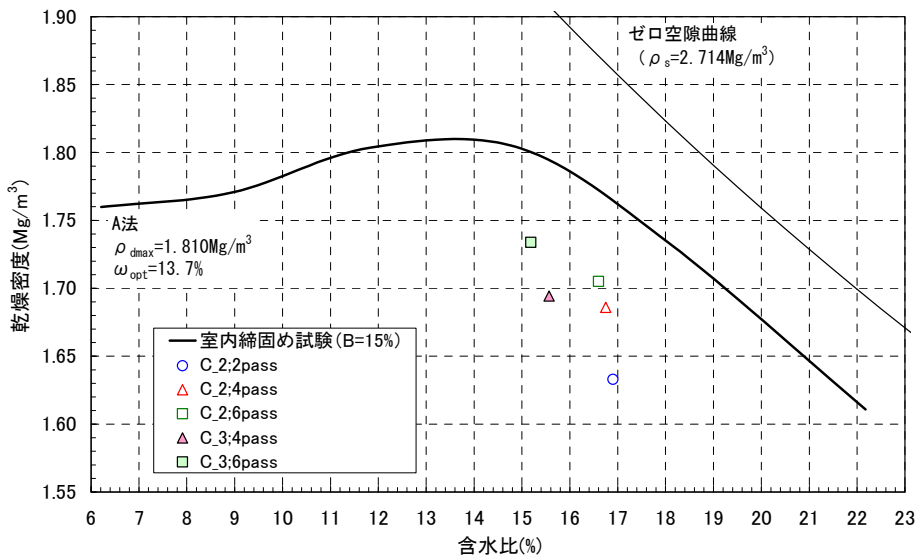


図 5.3-12 転圧回数と施工密度の関係



(a)全測定データ



(b)各転圧段階の平均値

図 5.3-13 各転圧段階における乾燥密度と含水比の関係

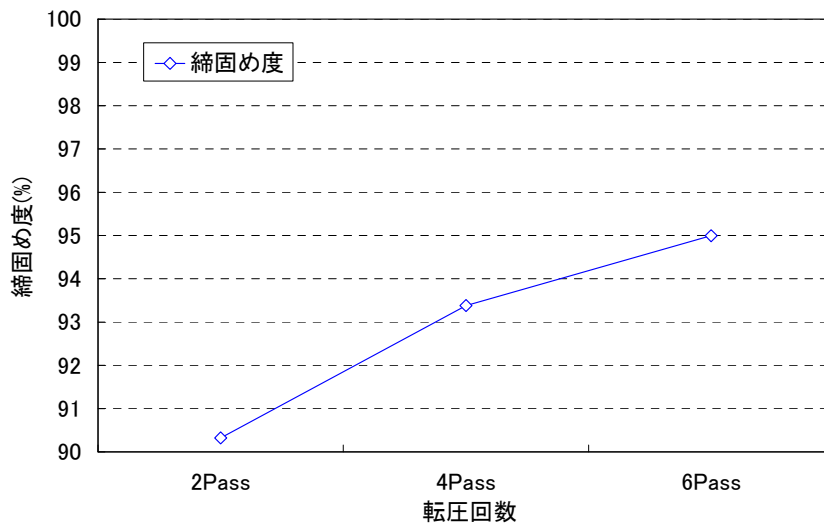


図 5.3-14 転圧回数と締固め度の関係

2) レベルによる測量結果

転圧施工後の不陸については、レベル測量により計測管理を行った。施工高さの不陸は、表 5.3-3 に示すとおり±0.02m 程度であり、各層の施工面において著しい不陸は見られなかった。なお、材料の敷均し厚 0.2m に対して、転圧施工後の層厚の平均値は図 5.3-15 に示すとおり約 0.11m であった。

今回、レーザーレベルを用いて敷均し厚さの管理を行った。大きな不陸は生じていないことから、施工高さの管理方法として、レーザーレベルの使用は有効的であると思われる。

表 5.3-3 上部緩衝材上面部からの施工高さの不陸

箇所	上部緩衝材上面部からの施工高さ (()内は、不陸を示す)				計画高さ (0.11m× 層数)
	最大	最小	差	平均	
上部緩衝材の上面	0.007m (+0.007)	-0.007m (-0.007)	0.014m	0.000m	0.00m
5層目終了時	0.565m (+0.015)	0.534m (-0.016)	0.031m	0.551m	0.55m
10層目終了時	1.120m (+0.020)	1.079m (-0.021)	0.041m	1.104m	1.10m
15層目終了時	1.643m (-0.007)	1.628m (-0.022)	0.015m	1.635m	1.65m

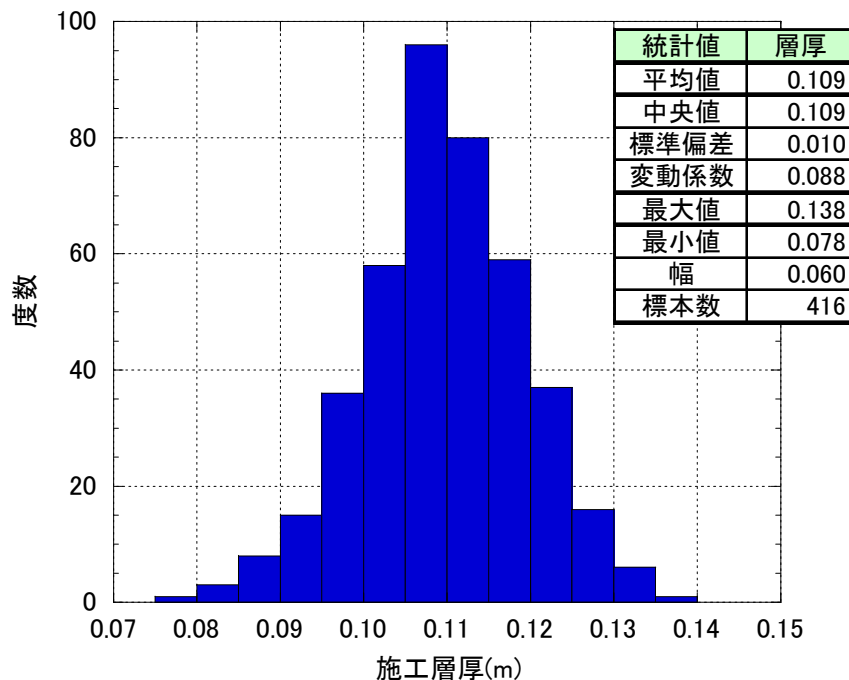


図 5.3-15 施工層厚の度数分布

3) 乾燥密度、含水比

転圧施工後の含水比は 13.4~17.4%の範囲、平均値 15.6%に対して-2.2~+1.8%となり、ややばらつきが多い結果となっている。乾燥密度は 1.662~1.812Mg/m³ の範囲、平均値 1.726Mg/m³ に対して-0.064~+0.086Mg/m³ となり、ばらつきは小さい結果となっている。

転圧施工前の材料の含水比の平均値は 14.6%であるが、そのうち高めの含水比となっていた材料を使用したため、含水比の変化は小さいと考えられる。

転圧施工後の乾燥密度と含水比は、図 5.3-16 に示すとおり、室内で練混ぜた材料で得られた A 法による締固め曲線にプロットして整理した。測定結果は締固め曲線の下側に多く位置し、一部は締固め曲線上あるいは上部に位置する結果となっている。

また、締固め度は 91.8~100.1%の範囲であり、締固め度の平均値は 95.4%であった。転圧 6Pass による施工方法で、目標値 (95.0%) を満足することが可能と判断される。

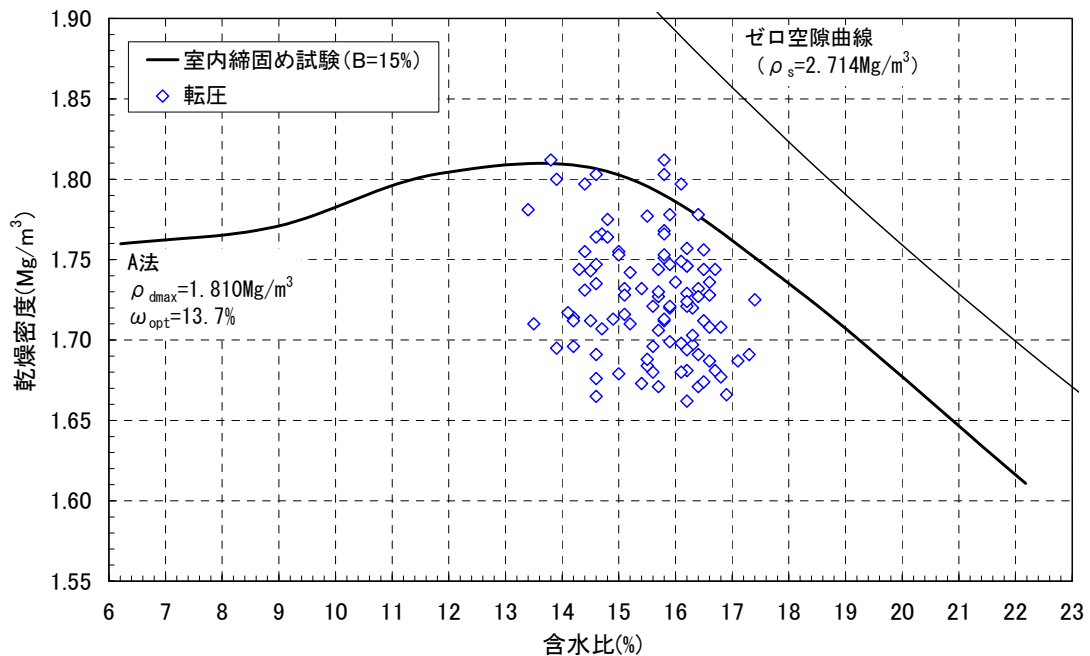


図 5.3-16 転圧施工後の乾燥密度と含水比の関係

4) 混合率

転圧後の混合率の平均値は 15.5%であった。吹付け施工時にみられた施工後の混合率の変化はほとんどなく、ほぼ施工前の材料の状態のまま施工されていると考えられる。

(4) 吹付け施工と転圧施工の比較

1) 施工後の品質の比較

吹付け施工、転圧施工の結果を合わせて図 5.3-17～図 5.3-26 に示す。吹付け施工と転圧施工で仕上がり密度は大きく差は無いという結果となっているが、含水比は転圧施工に比べて吹付け施工の方が低い。これは、前述したように製造した混合土の含水比が低めの材料を吹付け施工に主に使用したことが主要因である。吹付け施工の場合は、圧送する空気の影響（湿度）により材料が乾燥することも考えられるが、に示したように、今回の試験では吹付け施工前後での含水比の変化は少なかったことから、施工に使用した材料の含水比の差によるものが大きいといえる。施工後の含水比の平均値は 15.1%、乾燥密度の平均値は 1.722Mg/m³、締固め度の平均値は 95.1%であった。なお、締固め度と含水比の関係を図 5.3-21 に示す。含水比に関係なく締固め度はばらついているように見えるものの、相関性を調べてみると含水比の増加に伴い締固め度も小さくなっていることが分かる。

混合率の結果は図 5.3-22 に示す通りであるが、転圧施工に比べて吹付け施工の方が混合率は高くなっている。これは前述したように吹付け施工時のリバウンド材における砂の割合が大きいいため、結果として施工箇所の混合率が高くなっているためである。施工前後の含水比および混合率の変化を図 5.3-23 および図 5.3-24 に示す。吹付け施工には含水比および混合率が低めの材料を用いたにも係らず施工後は含水比、混合率とも高めになっている。特に混合率の変化が大きい。

図 5.3-25 および図 5.3-26 には次式により算出した有効粘土乾燥密度および有効モンモリロナイト乾燥密度の度数分布を示す。

・有効粘土乾燥密度

$$\rho_e = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{\left(100 - \frac{\rho_d R_s}{\rho_s}\right)}$$

・有効モンモリロナイト乾燥密度

$$\rho_{em} = \frac{C_m \rho_e}{\left\{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_e}{\rho_{nm}}\right\}}$$

ここで、 ρ_d は乾燥密度 (Mg/m³)、 R_s は砂の混合率 (%)、 ρ_s は砂の土粒子密度 (Mg/m³)、 C_m はモンモリロナイト含有率 (%)、 ρ_{nm} はモンモリロナイト以外の鉱物 (随伴鉱物) の土粒子密度 (Mg/m³) である。モンモリロナイト含有率に関しては、使用したベントナイトのメチレンブルー吸着量が 91mmol/100g をクニピアのメチレンブルー吸着量の値 150mmol/100g で除して算出した。すなわち、 $C_m=60.7\%$ である。また、 $\rho_{nm}=1.81\text{Mg/m}^3$ とした。

有効粘土乾燥密度の平均値は 0.599Mg/m³、有効モンモリロナイト乾燥密度の平均値は 0.397Mg/m³ であった。各施工方法の結果を比べてみると、吹付け工法により得られた乾燥密度の平均値が 1.718 Mg/m³、転圧工法が 1.726 Mg/m³ と転圧工法の方が密度は高かったの

に対し、有効粘土乾燥密度に関しては、吹付け工法の平均値が0.619 Mg/m³、転圧工法が0.579 Mg/m³と吹付け工法の方が高くなっている。有効モンモリロナイト乾燥密度も同様に吹付け工法の平均値が0.412 Mg/m³、転圧工法が0.382 Mg/m³と吹付け工法の方が高くなっている。これは、吹付け工法では施工後のリバウンド材に砂が多かった影響で施工後された箇所のベントナイト混合率が高くなっているためである。

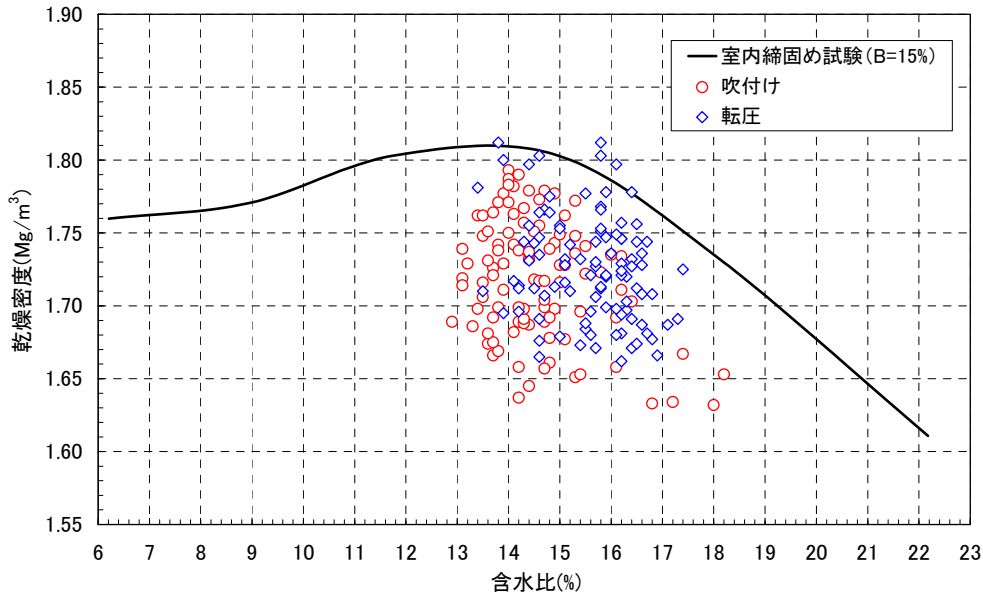


図 5.3-17 施工試験後の乾燥密度と含水比の関係

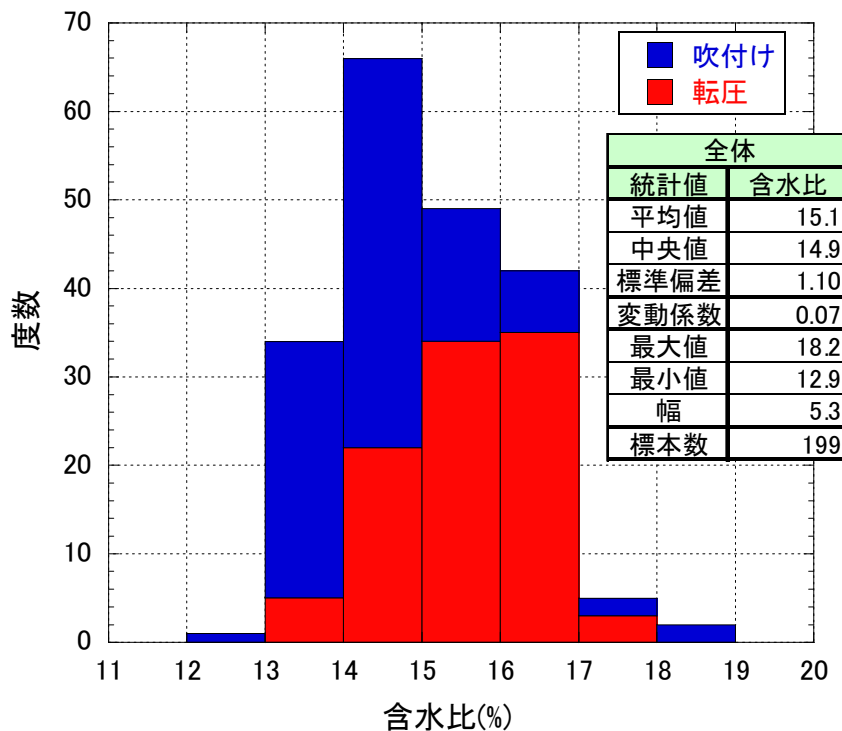


図 5.3-18 施工試験後の含水比の度数分布

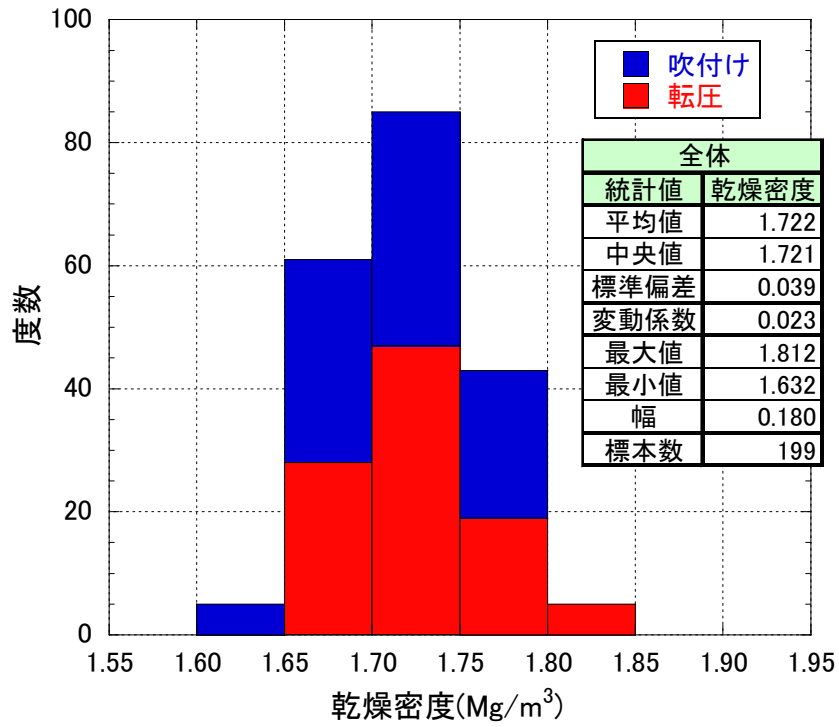


図 5.3-19 施工試験後の乾燥密度の度数分布

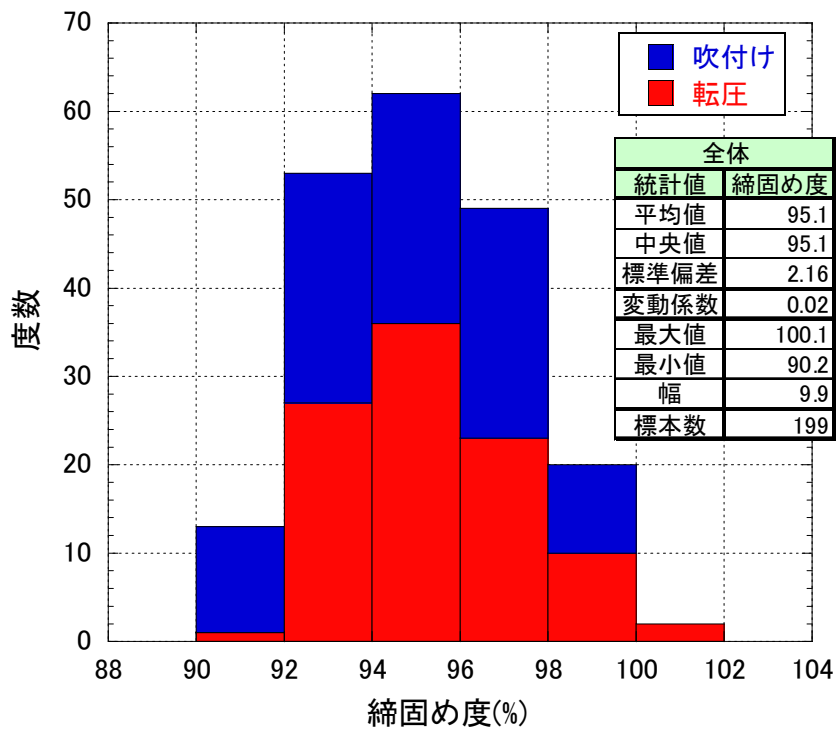


図 5.3-20 施工試験後の締固め度の度数分布

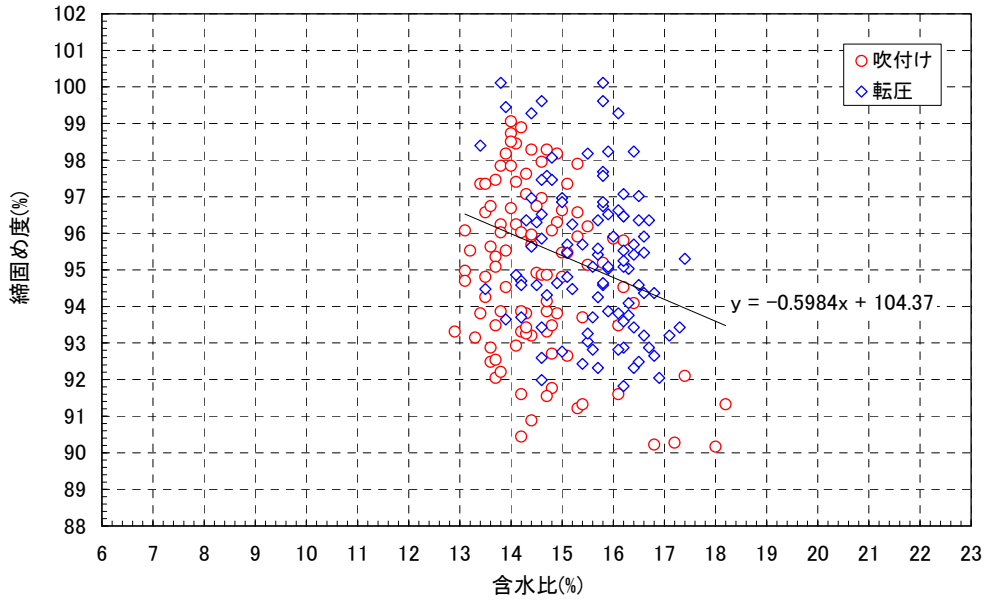


図 5.3-21 施工試験後の締固め度と含水比の関係

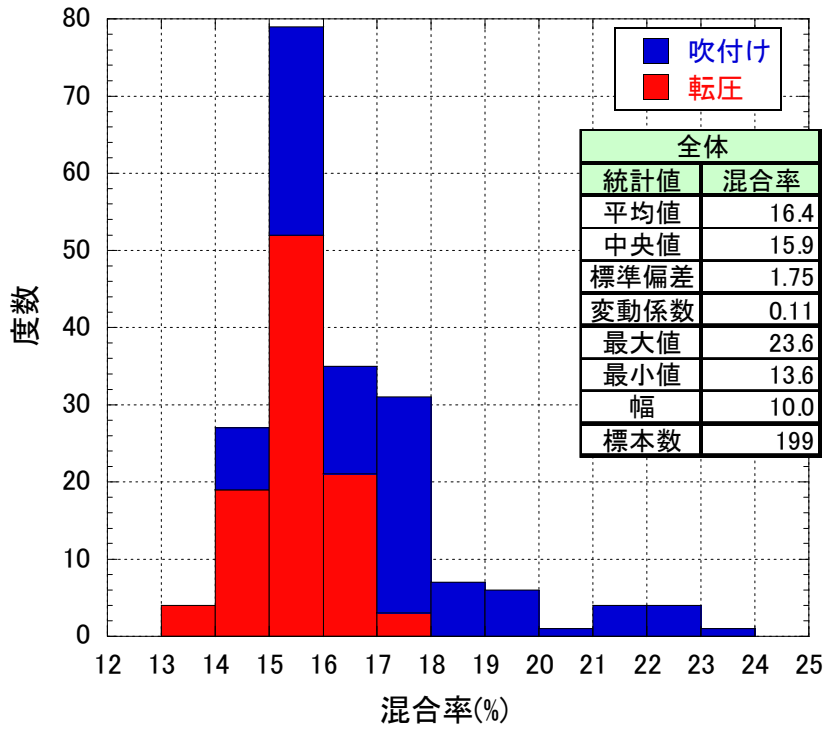
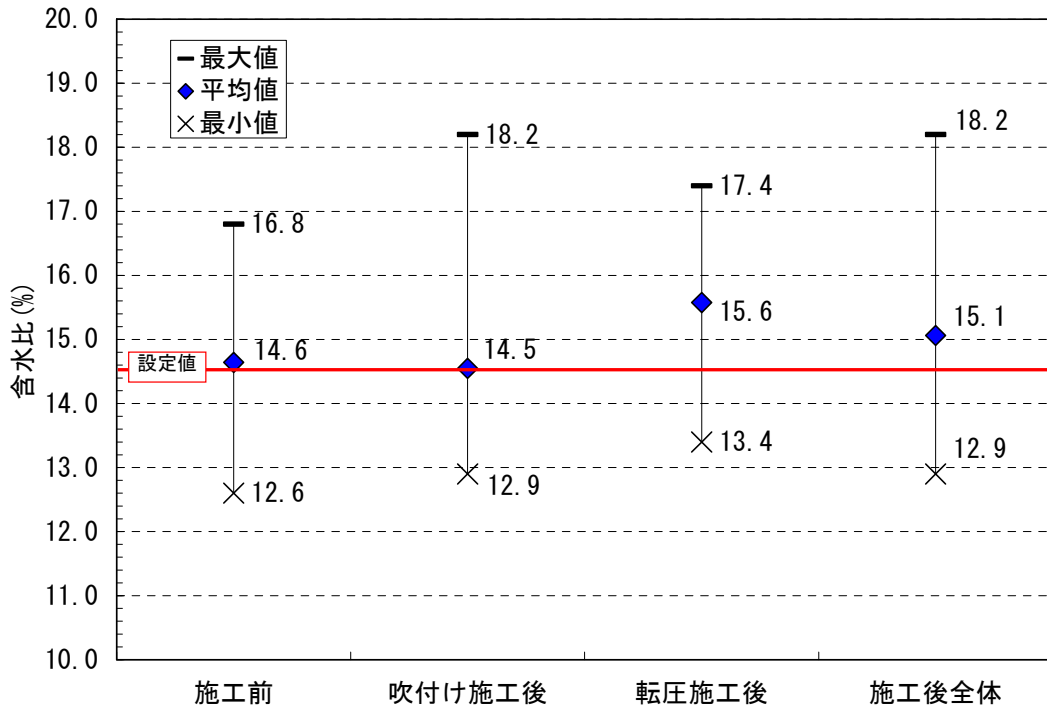
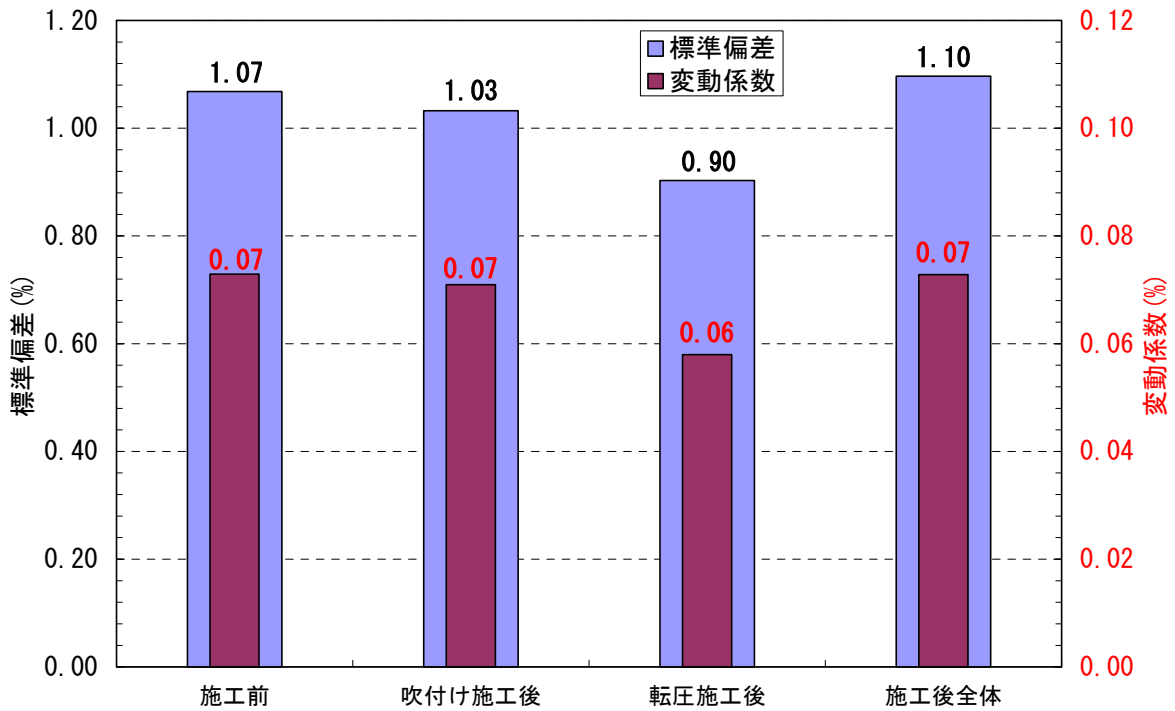


図 5.3-22 施工試験後の混合率の度数分布

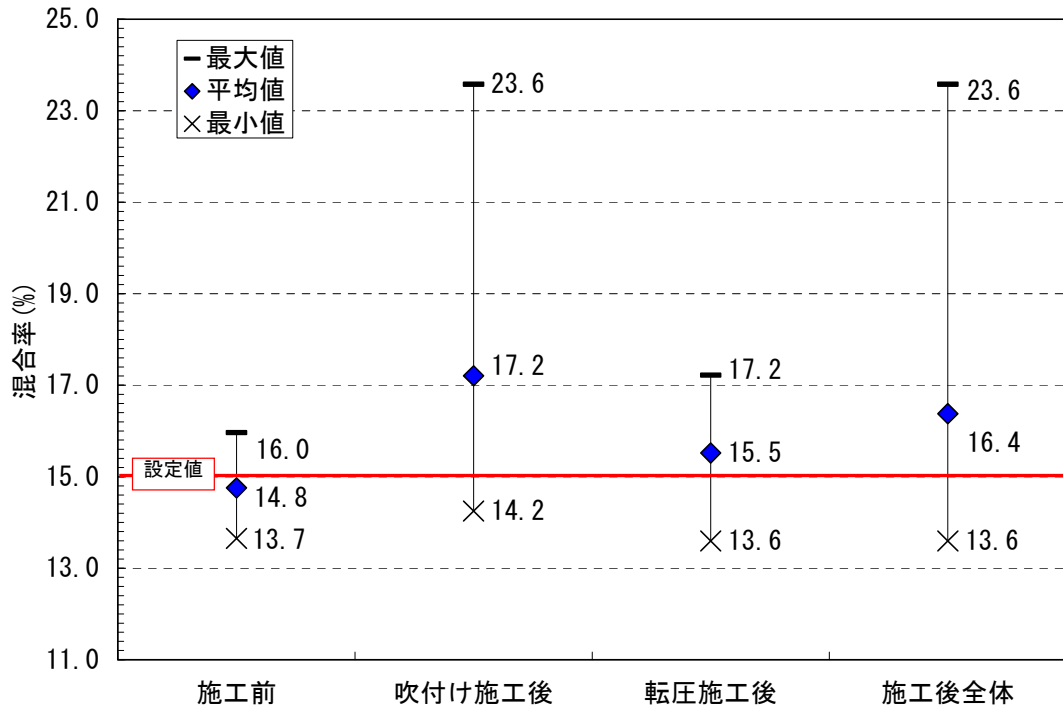


(a) 平均値および最大・最小値

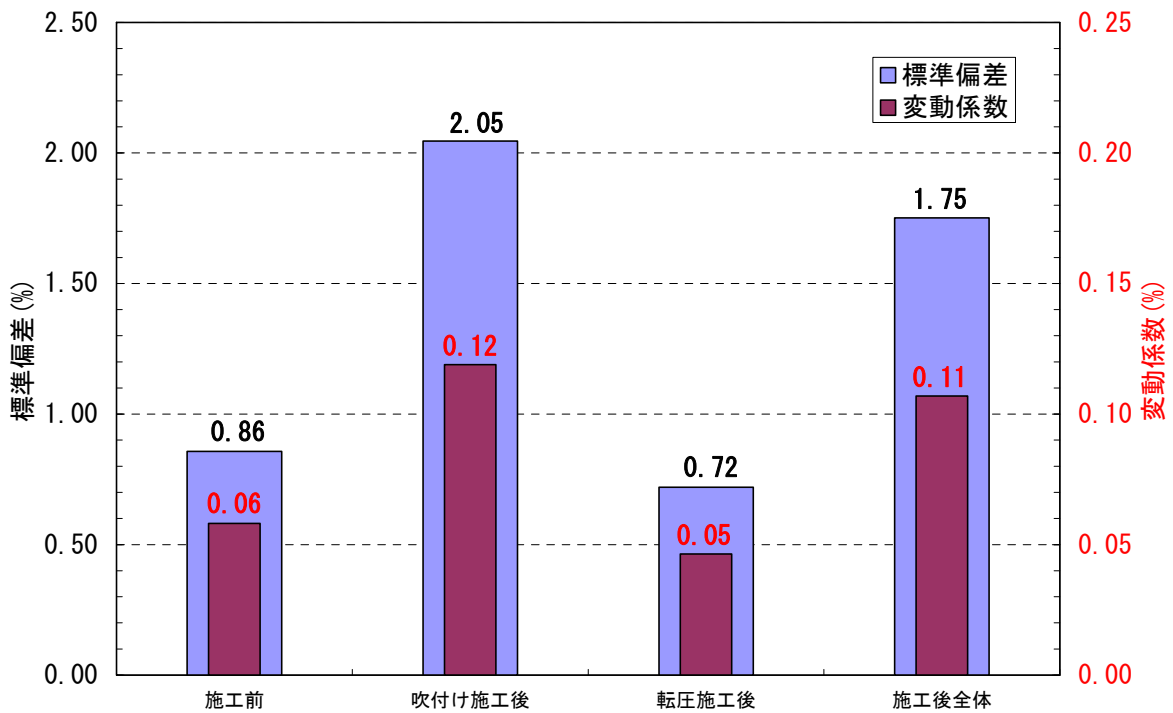


(b) 標準偏差および変動係数

図 5.3-23 施工前後の材料の含水比の変化

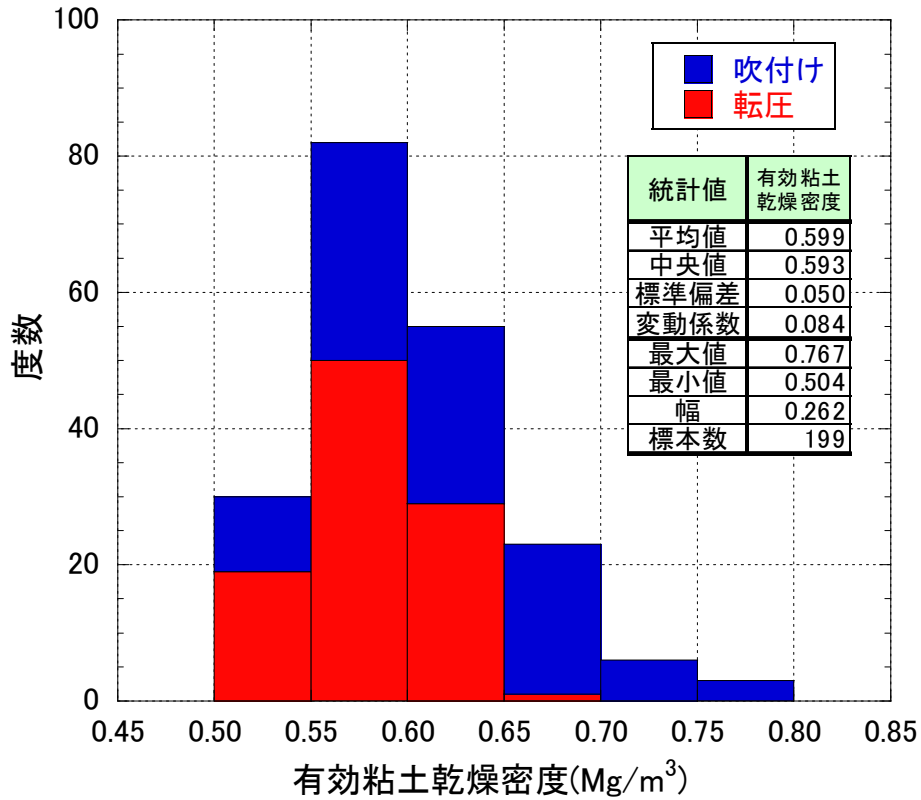


(a) 平均値および最大・最小値



(b) 標準偏差および変動係数

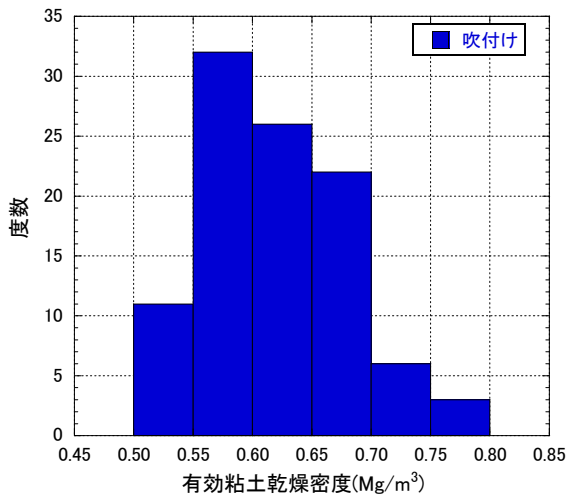
図 5.3-24 施工前後の材料の混合率の変化



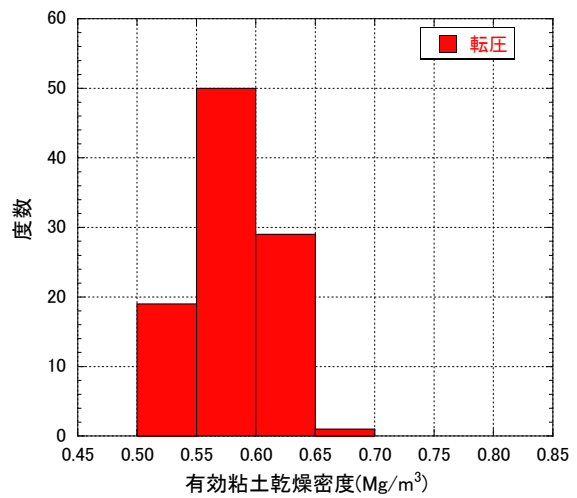
(a)全体

統計値	有効粘土乾燥密度
平均値	0.619
中央値	0.609
標準偏差	0.057
変動係数	0.092
最大値	0.767
最小値	0.504
幅	0.262
標本数	100

統計値	有効粘土乾燥密度
平均値	0.579
中央値	0.579
標準偏差	0.032
変動係数	0.056
最大値	0.671
最小値	0.510
幅	0.161
標本数	99

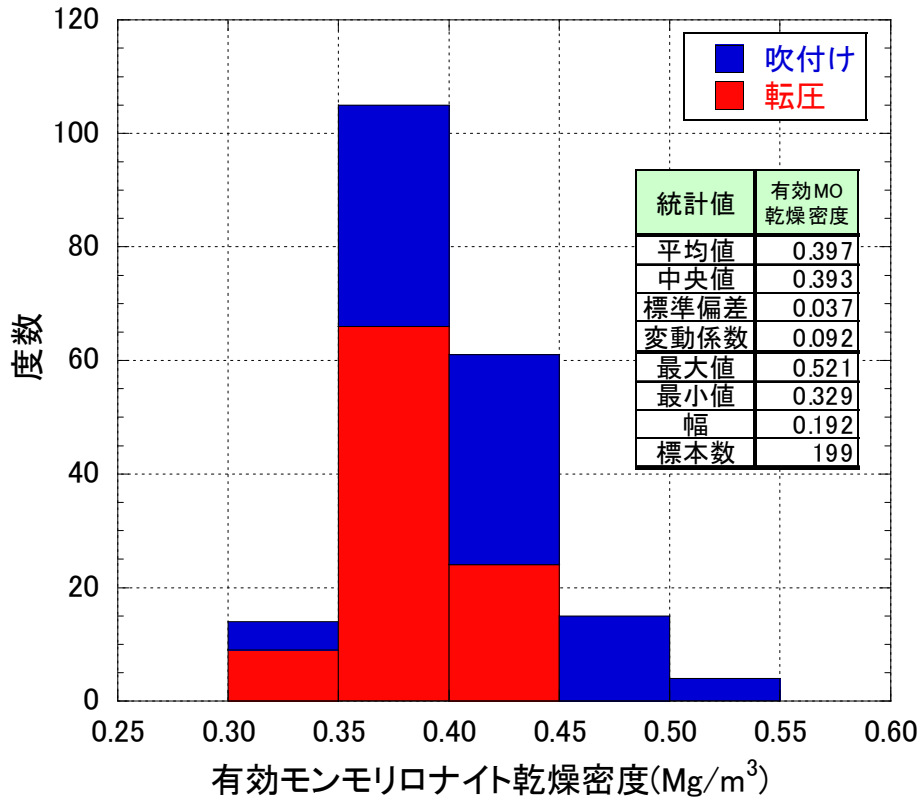


(b)吹付け施工



(c)転圧施工

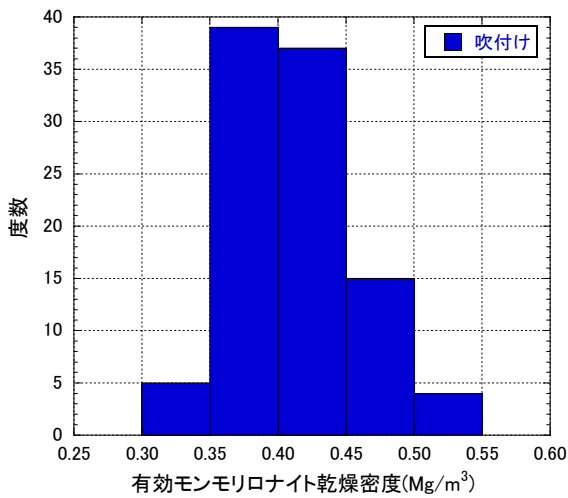
図 5.3-25 有効粘土乾燥密度の度数分布



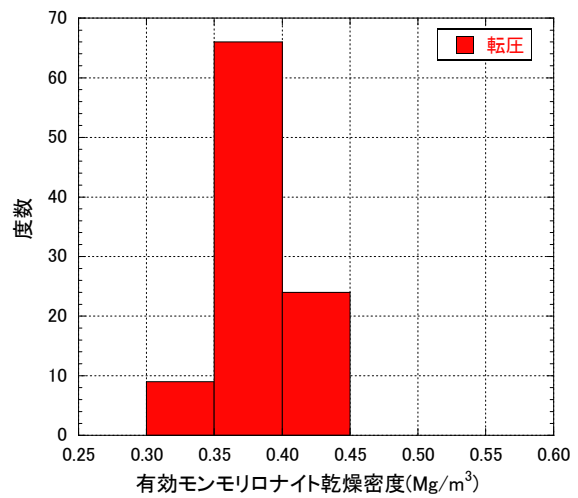
(a)全体

統計値	有効MO 乾燥密度
平均値	0.412
中央値	0.404
標準偏差	0.041
変動係数	0.101
最大値	0.521
最小値	0.329
幅	0.192
標本数	100

統計値	有効MO 乾燥密度
平均値	0.382
中央値	0.383
標準偏差	0.023
変動係数	0.060
最大値	0.449
最小値	0.333
幅	0.116
標本数	99



(b)吹付け施工



(c)転圧施工

図 5.3-26 有効モンモリロナイト乾燥密度の度数分布

(5) 出来形

出来形測量の結果を表 5.1-21～表 5.3-6に示す。表 5.1-21 は吹付け施工の結果、表 5.1-22 は転圧施工の結果、表 5.3-6 は全体の結果である。3D スキャナおよび写真測量は 2.3.3.2 節に示す方法で求めた結果であり。

また、空洞形状の CAD 図上の寸法と施工後のレベル測量（転圧施工）や寸法計測（吹付け施工）から求めた体積を示している。いずれの結果もほぼ同様の結果となっており、全体の施工量は約 66m³であった。

表 5.3-7 には、各計測方法における計測手順と所要時間を示す。今回の測量ではデータ処理を含めたトータルの時間は 3D スキャナによる測量の方が若干長くなった。所要時間に加えて測量精度も考慮した比較を表 5.3-8 に示す。同表には各測量方法の課題も示している。今回の測量規模では両者に大きな優劣の差は見られなかったが、測量対象が広がると、やはり 3D スキャナの方が有利になると思われる。

表 5.3-4 施工体積の比較（吹付け施工）

吹付け	使用量(kg)	体積(m ³)		
		CAD、レベル・寸法測量	3D スキャナ	写真測量
1次	10,934	5.01	5.35	5.32
2次	12,539	5.96	5.86	5.72
3次	8,197	4.97	3.92	3.91
4次	25,465	11.61	12.51	12.60
合計	57,135	26.95	27.64	27.55

表 5.3-5 施工体積の比較（転圧施工）

転圧	使用量(kg)	体積(m ³)		
		CAD、レベル・寸法測量	3D スキャナ	写真測量
1次	38,987	18.95	18.49	18.72
2次	25,600	12.55	12.27	12.11
3次	17,301	8.50	8.20	8.34
合計	81,888	40.00	38.96	39.17

表 5.3-6 施工体積の比較（全体）

全体	使用量(kg)	体積(m ³)		
		CAD、レベル・寸法測量	3D スキャナ	写真測量
合計	139,023	66.95	66.60	66.72

表 5.3-7 各計測方法における各手順での所要時間

写真測量による計測			3Dスキャナによる計測		
作業手順		所要時間	作業手順		所要時間
①	標定用ターゲット設置	5	①	事前に設置したチェッカーズボードの移動点検	10
②	TSにてターゲットに座標付与	15	②	必要に応じて、チェッカーズボード追加。その場合は、TSにて座標付与。	15
③	写真撮影（対称面全体を数枚で）	5	③	3Dスキャナ計測	15
④	専用ソフトウェアで画像間標定（現場）	20	④	解析処理を経て点群データ作成（現場）	20
⑤	専用ソフトウェアにて画像処理 求積対象のモデリングを行い体積計算	120	⑤	点群データのクリーニング処理	30
			⑥	求積対象のモデリングを行い体積計算	90
1計測あたりの所要時間（分）		165	1計測あたりの所要時間（分）		180

表 5.3-8 計測方法の比較

	写真測量による計測	3Dスキャナによる計測
事前準備 （標定点）	複数写真の接合のための標定点を、計測の都度、設置	標定点は一連の計測の最初に設置し、最後まで利用。ただし、各回計測の直前には位置確認
現地計測	計測対象範囲を連続的に撮影 撮影時間は、5分	局所領域のため、1スキャンで完了 撮影時間は、15分
データ処理	現地計測が10分程度であることに対して、ともに120分ほど時間を要す。	
計測精度	坑壁：約30m ³ の吹付量に対して、0.6%の較差。 床面：約40m ³ の転圧量に対して、0.5%の較差。 ともに、写真測量に計測の方が少なく計測された。	
所要時間	165分	180分
課題等 （計測）	範囲が広がると標定点の個数が増える。坑壁に手が届かなくなると高所作業となる。撮影距離が短くなると、ステレオ画像が生成しにくい。	対象までの距離や計測範囲の広さによらず計測できるため、大きな課題は無い。
課題等 （処理）	複数画像を接合し、立体視（3次元化）が可能なデータを作り込むまでに時間を要し、この状態になるまで異常な3次元データを確認できない。 データ処理時間を考慮した写真撮影が必要となる。	3D計測の生データは既に3次元座標を持っており、比較的容易に異常データの除去が可能である。 求積の元データとなるTIN生成と、差分を求める軸方向設定に工夫が必要であった。
評価	<ul style="list-style-type: none"> 平面40m²高さ2m程度の空間であれば、写真測量による計測であっても、高精度な3Dスキャナ相当の計測精度が確保できる。 今回の空間であれば、求積に要する時間はほぼ同等である。 広範囲になると撮影枚数が増えると同時にデータ処理時間も比例的に増加するが、3Dスキャナ計測は一回あたりの計測範囲が広いので、時間的には3Dスキャナの方が有利である。 写真撮影にはノウハウが必要。撮影距離に対しての画角範囲の決定、立体視が可能な撮影ラップ率の決定など。 	

(6) 歩掛りに関する評価

吹付け施工および転圧施工のサイクルタイムの測定結果から施工後の体積が 10m³あるいは施工後の重量が 10t となるのに必要な時間を算出して比較を行った。転圧施工においては、図 5.1-80 に示すように必要施工時間が算出されているが、吹付け施工に関しては、表 5.1-20 に示すように時間当たりの施工重量のみが得られている。

そこで、施工後の密度測定結果を用いて、施工重量から施工体積を換算し、施工後の体積が 10m³となるのに必要な時間を算出した。結果を図 5.1-120 に示す。吹付けによる施工速度から施工時間を算出すると転圧施工に比べて 4 倍程度の時間を要する結果となった。正味の吹付け速度から算出したとしても転圧施工の倍の時間を要する結果となっている。

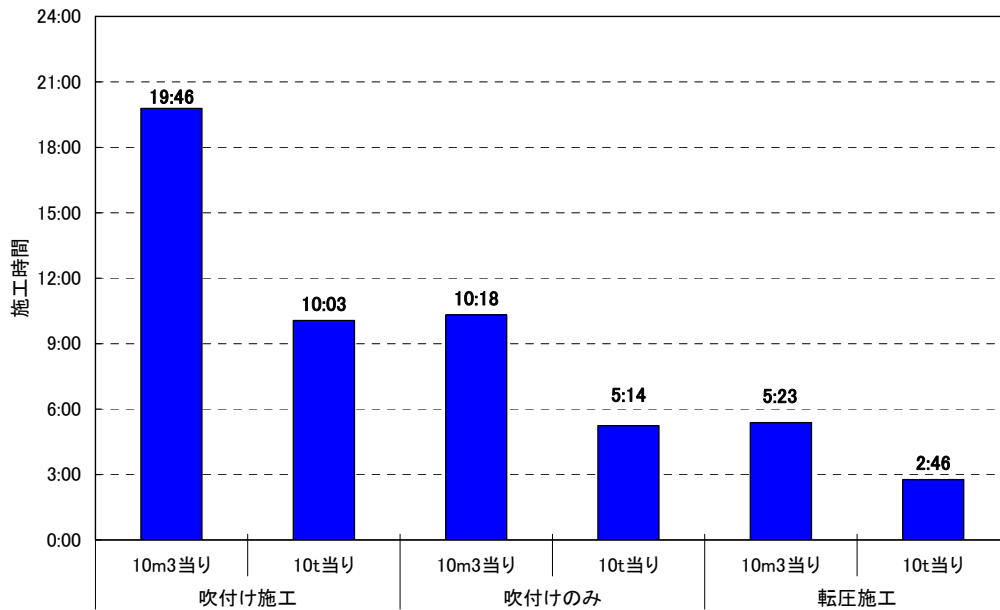


図 5.3-27 各施工方法による施工時間の比較

(7) 施工管理方法に関する評価

1) トータルステーションを用いた転圧回数管理

自動追尾式トータルステーション (TS) によりバイブロコンパクタに取りつけた全方向プリズムを追尾させ、バイブロコンパクタの位置情報をリアルタイムに把握し、移動軌跡をモニタリングする事で、試験ヤードの転圧箇所の転圧回数をカウントし、踏み残しがなく規定転圧回数まで全面で達成しているかを確認できるかを試験した。試験状況を図 5.3-28 に示す。トータルステーションは型枠外の足場上に設置した。使用する機材は図 5.3-29 に示す通りである。バイブロコンパクタの位置情報はパソコンにて管理した。使用したトータルステーションを図 5.3-30 に示す。

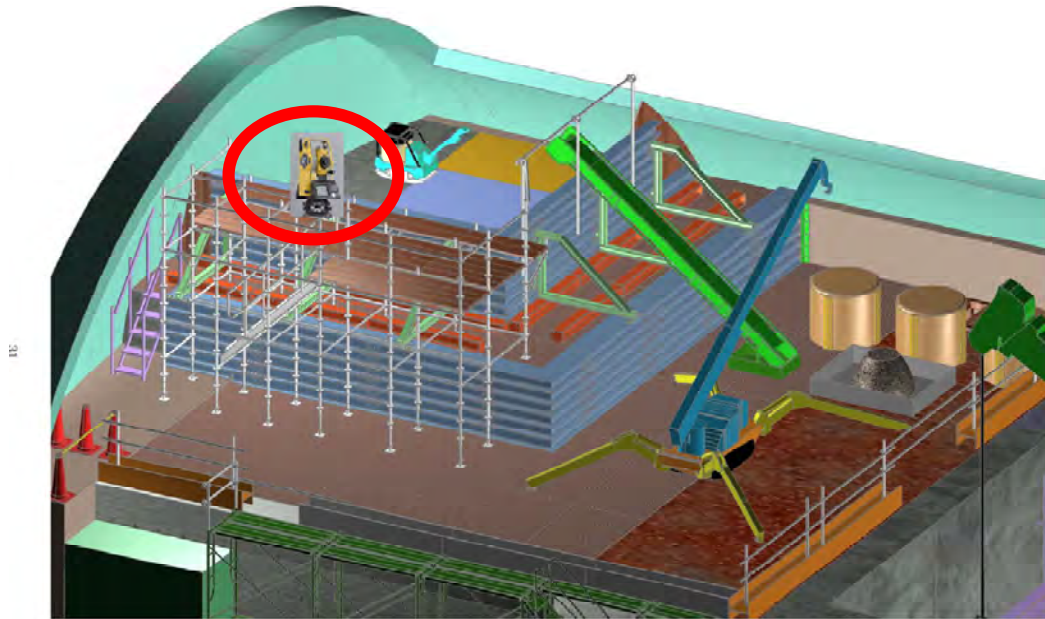


図 5.3-28 トータルステーションを用いた施工管理の試験状況

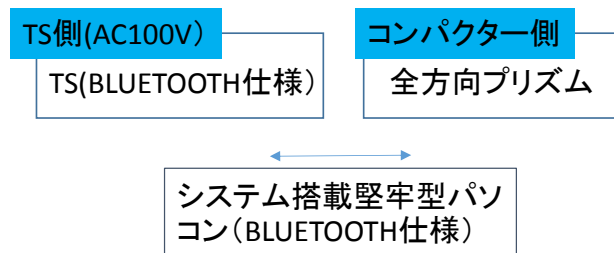


図 5.3-29 トータルステーションを用いた施工管理の使用機材



図 5.3-30 トータルステーション (PS-103A、トプコン製)

トータルステーションは、試験ヤードの型枠外の足場に設置された単管足場を利用しレベルアームにて固定した。設置状況を図 5.3-31 に示す。固定状況を表示用パソコンは測量機の直近に配置し、バイブロコンパクタの動きを合わせて監視できるように配置した



図 5.3-31 トータルステーションの固定状況

計測に際し、施工ヤードを 20cm×20cm のメッシュサイズに分割した。そして、転圧開始から転圧終了までを計測した。下記にモニタリング画面の変遷を添付する。図 5.3-32 は転圧前の状況、図 5.3-33 は転圧 2Pass 終了時、図 5.3-34 は転圧 4Pass 終了時、図 5.3-35 は転圧 6Pass 終了時の状況である。

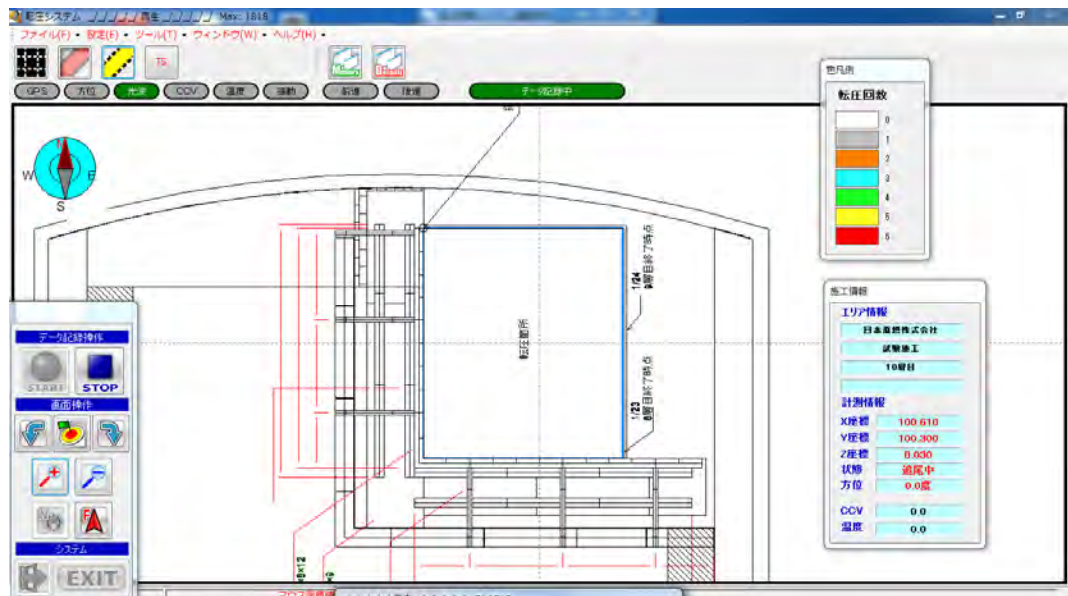


図 5.3-32 トータルステーションを用いた転圧管理状況；転圧前

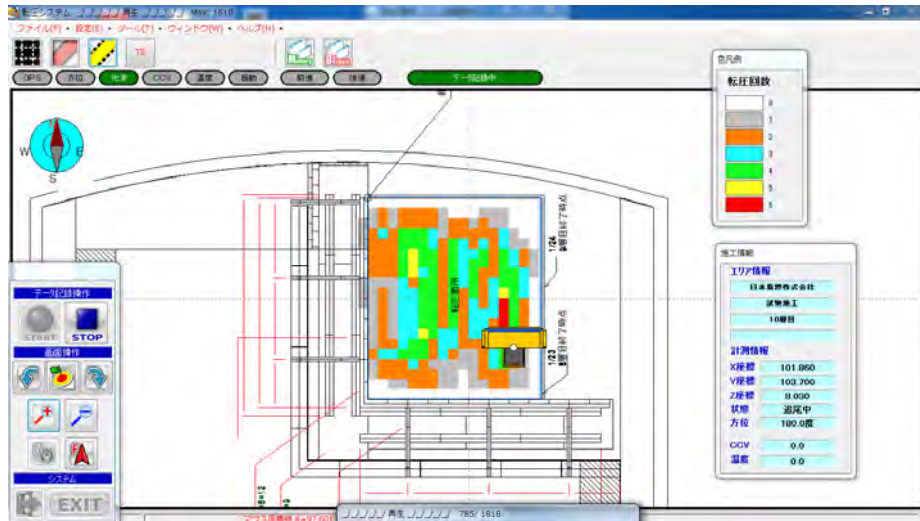


図 5.3-33 トータルステーションを用いた転圧管理状況；2Pass 転圧

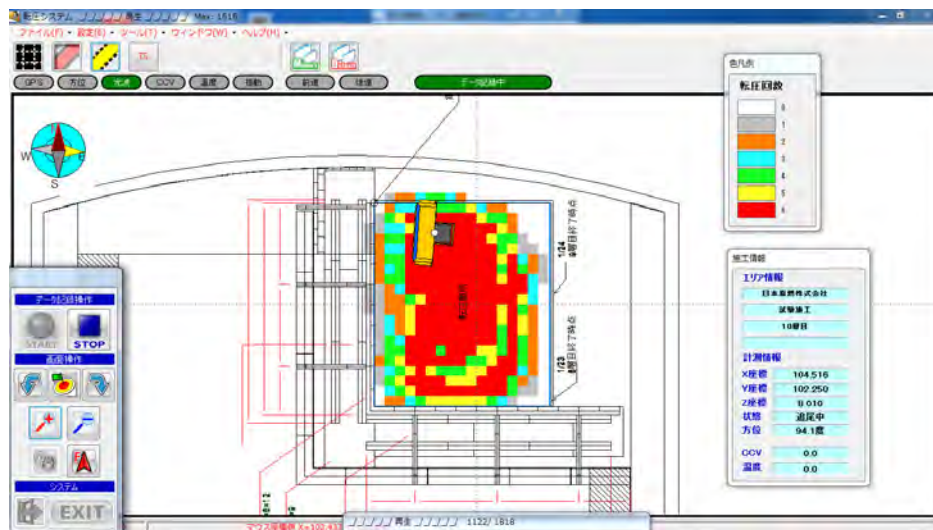


図 5.3-34 トータルステーションを用いた転圧管理状況；4Pass 転圧

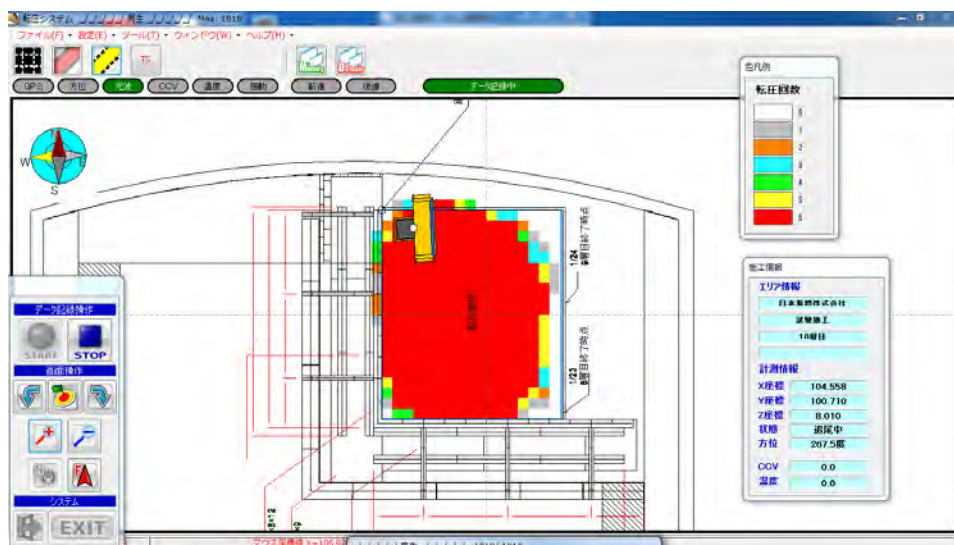


図 5.3-35 トータルステーションを用いた転圧管理状況；6Pass 転圧

最終転圧状況として軌跡図・転圧回数図を出力した。図 5.3-36 は走行軌跡図、図 5.3-37 は転圧回数図である。

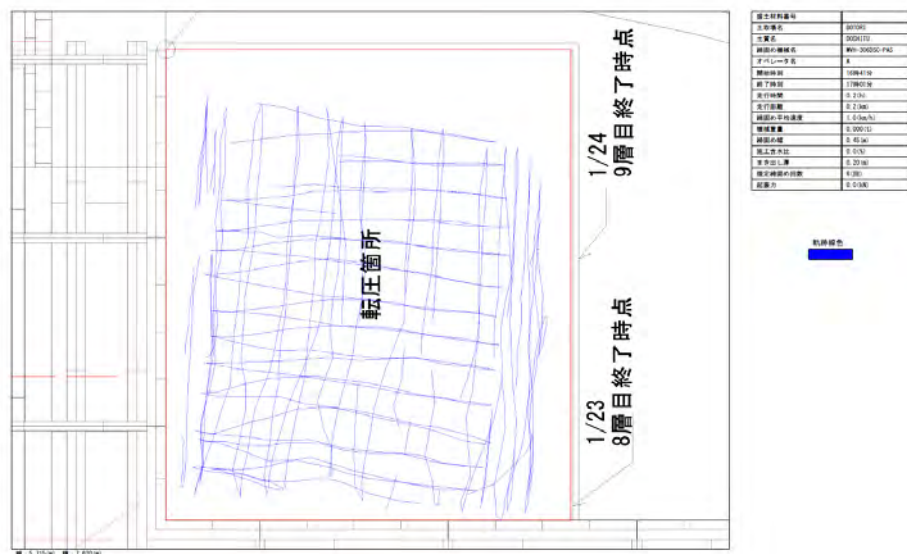


図 5.3-36 施工終了後の走行軌跡図

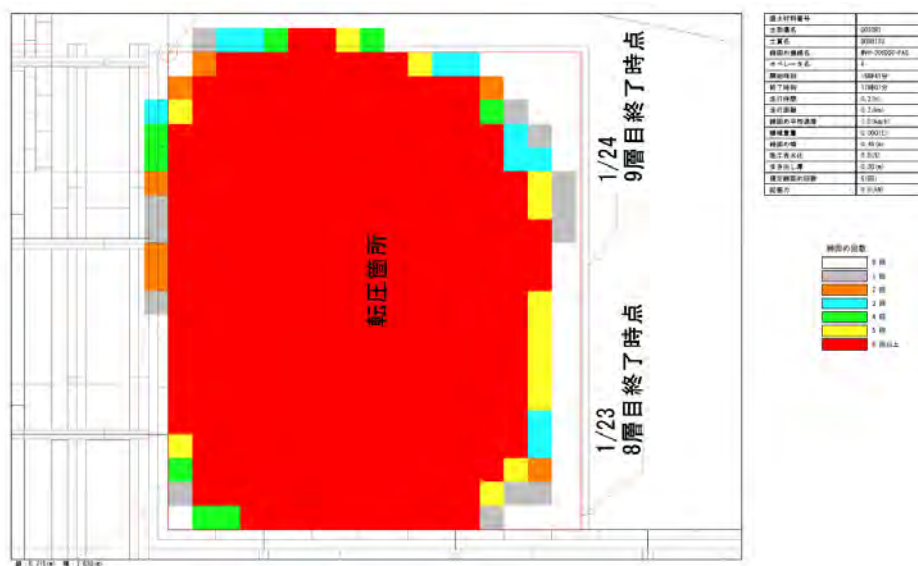


図 5.3-37 施工終了後の転圧回数分布図

今回の試験により、トータルステーションを用いた転圧管理の可能性について確認できた。ただし、空洞内の狭隘に箇所で行なうには、まだ課題が多い。以下に主な課題を示す。

①トータルステーションの設置状況について

今回は単管足場に設置した形となり、バイブロコンパクトの稼動・人間の往来でも測量機への振動が伝わり、測量をする環境としてはあまり良くなかった。それに起因する、コンパクトの位置誤差は、慢性的に発生していると思われる。ただ、測定距離が短かった為、

平面誤差は発生していても±5cm程度であったと想定される。これは、できるだけ転圧機から離れた振動が少ないロケーションで計測できる場所を選定する事で解決ができる。

②機器配置状況について

狭小で近距離なスペースで計測をしたため、バイブロコンパクトとトータルステーションと位置関係で高低差の異なるタイミングがあった。それに起因して、トータルステーションがプリズムを見失う事があった。今回は、その都度バイブロコンパクトを停止させ再計測して対応した。これについては、転圧機のスピードを遅くする、あるいは、トータルステーションと転圧機の配置関係をなるべく近距離にならない配置を検討してやることで解決ができる。

③メッシュサイズについて

バイブロコンパクト自身のプレート幅が40cm×40cmであることもあり、メッシュサイズがあまりに大きいと、転圧ラップ部分において、数センチしかラップさせていないのに、メッシュサイズ分（今回の場合20cm）転圧したという認識になり、現実より多く転圧回数を描画してしまうメッシュが発生した。これについては、メッシュサイズを5～10cm程度に落としてやるのが効果的だが、今回の試験ヤードでは計測誤差もトータルステーションの設置状況による計測誤差もあり、規定転圧に達しても、規定回数色を描画しないメッシュも発生したので、20cmのまま試験を実施した。本施工では、コンバインドローラーなど、大きい重機になれば、この問題について、完全に解消される。

2) 転圧センサーによる転圧施工管理

今回の転圧に使用したバイブロコンパクトは転圧センサーを搭載した機械である。転圧センサーは、起振体部に設置した加速度センサーにより、地盤の剛性値等を定量的に確認できるものである。そこで、転圧センサーによる施工管理の将来的な適用可能性について確認した。

図 5.1-83 に転圧施工時の各 Pass での転圧センサーの反応状況の例を示す。転圧 Pass 数が増すことにより転圧センサーが反応していることが分かる。ただし、常にこのように転圧 Pass 数の増加に伴いセンサーの反応が増えている訳ではない。定量的な管理は難しいが、転圧センサーにより施工状況の確認（転圧が十分か不十分か）を定性的には行えるのではないかとと思われる。



(a) 2Pass



(b) 4Pass



(c) 6Pass

図 5.3-38 転圧センサーの反応状況

5.3.3 施工確認試験の総合評価

今年度の上部埋戻し材施工確認試験は、実施工でも採用される可能性がある吹付け施工と転圧施工の組合せを想定し試験を実施した。試験は、上部埋戻し材として有力候補と考えられる砂ベントナイト混合土を材料とし、混合土の製造後、転圧施工と吹付け施工の2つの施工方法の組合せによる施工確認試験を実施した。

今年度においては、施工方法の違いによる施工後の品質や施工性を評価した。また、実施工における吹付け施工と転圧施工の組合せの適用性についても評価した。

(1) ベントナイト混合土製造

ベントナイト混合土の製造は、バッチ式ミキサーがばらつきの少ない高品質な材料製造を可能である一方、大型化やコストダウンが当面の課題であると考えられる。そこで、今年度は、実用的なデータを取得することを目的とし、産業廃棄物処分場等で混合土製造の実績が多く、最も汎用性の高いと思われる自走式土質改良機（SR-2000G）を用いた混合土の製造を行い、製造後の品質（含水比、混合率）を確認した。

ベントナイト混合土は、吹付け工法および転圧工法により施工される目標数量の約60m³を確保できるよう約154t（フレコン206体）を11月28日～30日の3日間で製造した。なお、1日当りの最大製造量は、1月29日の92.5tであった。

製造した混合土のうち、吹付け施工は、約69t（フレコン96体）を1月9日～22日の中（稼働9日）で使用し、内訳は吹付け量が約57tであり、ロス量は約12tである。また転圧工法は、約82t（フレコン120体）を1月15日～30日の中（稼働9日）で使用した。1日あたりの最大使用量は、吹付け工法が8.1t（ロス量含む）、転圧工法が6.85tという結果であった。

1日当たりの使用量に対する混合土の製造量は、本試験特有の狭い施工エリアという条件下であるため、10倍以上の能力がある。そのため実施工では、本施工試験の10倍程度の施工規模を1日で混合土の製造を行うことが可能であると言える。

また、実施工では、混合土製造後のストックヤードの確保が必要となる。本試験では、試験空洞外の倉庫で一時保管した材料を、アクセス坑道の斜路拡幅部に仮置きしたが、実施工においては坑道内の工事車両が多いため、緊急時を考慮するとその利用も困難である可能性が高い。また、施工直前の混合土の状態は製造直後に比べてダマが多く見受けられた。これは、フレコンに最大1ヶ月間保管した状態で且つ保管場所の移動もあったことが理由の一つと考えられる。

以上より、実施工における混合土の製造は、混合土製造機械の能力や故障リスク等を考慮したうえで、混合土の使用数量に応じて製造時の品質を保持できるよう混合土のストックヤードも含め、適切に設定することが望まれる。

混合土の品質は、設定値（ベントナイト混合率15%、含水比14.5%）に対して混合率は±1.5%程度、含水比は±2%程度となった。含水比については、混合率に比べばらつきが多く、天候の影響も考えられるが、加水量の調整装置について課題が残る結果であった。ただし、ばらつきを低減させる必要があるか否かは施工後の品質が埋戻し材の要求性能を満足しているか否かを確認した上で判断する必要がある。

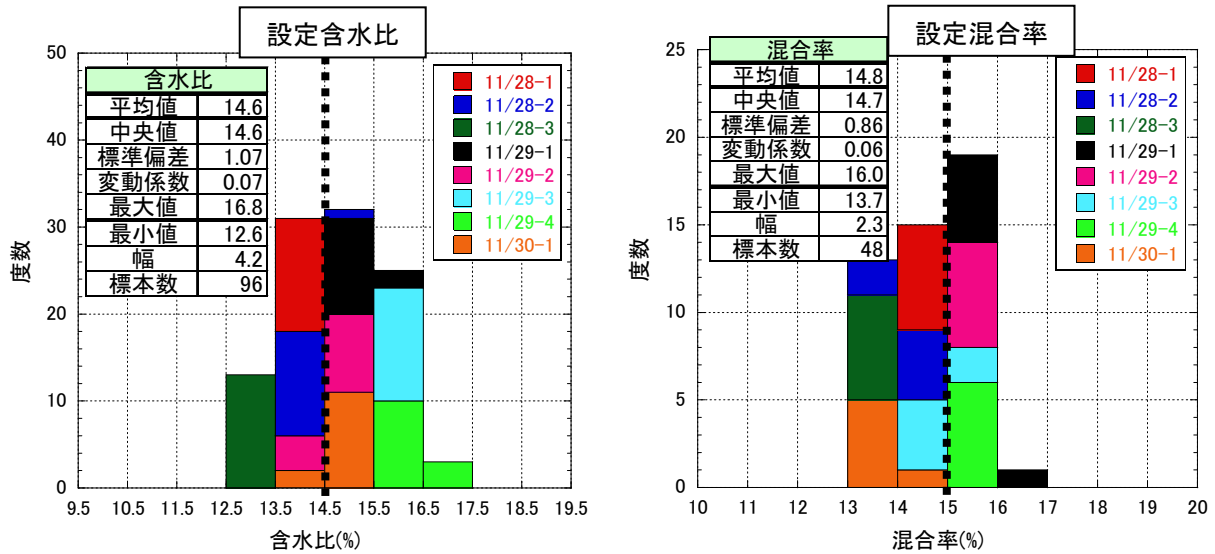


図 5.3-39 製造した混合土の含水比および混合率

(2) 施工方法の違いによる施工後の品質

吹付け施工と転圧施工の施工後の品質について比較を行い、品質の差が生じた原因について考察する。施工方法の違いによる室内試験結果を表 5.3-9 に示す。

表 5.3-9 施工方法の違いによる室内試験結果

項目	施工前の材料			吹付け施工			転圧施工		
	平均値	ばらつきの範囲	標準偏差	平均値	ばらつきの範囲	標準偏差	平均値	ばらつきの範囲	標準偏差
含水比(%)	14.6	12.6~16.8	1.07	14.5	12.9~18.2	1.03	15.6	13.4~17.4	0.90
乾燥密度 (Mg/m ³)	—	—	—	1.718	1.632~1.793	0.041	1.726	1.662~1.812	0.037
締固め度 (%)	—	—	—	94.9	90.2~99.1	2.27	95.4	91.8~100.1	2.03
混合率 (%)	14.8	13.7~16.0	0.86	17.2	14.2~23.6	2.05	15.5	13.6~17.2	0.72

乾燥密度の平均値は、吹付け施工が 1.718Mg/m³、転圧施工が 1.726Mg/m³ で大きく差は無いが、含水比の平均値は、転圧施工が 15.6% に比べ、吹付け施工は 14.5% となり吹付け施工が相対的に低い結果である。これは、製造した混合土の含水比が低めの材料を吹付け施工に主に使用したことが主たる要因である。一方、混合率の平均値は、転圧施工が 15.5% に比べ、吹付け施工は 17.2% となり吹付け施工が相対的に高い結果である。これは、吹付け施工時のリバウンド材は砂の割合が多く、吹付け施工箇所の混合率はベントナイト分が多くなっているためである。すなわち、吹付け施工では、材料分離が生じている可能性が考えられる。材料分離の要因については、本試験では確認ができなかった。

締固め度の平均値は、吹付け施工が 94.9%、転圧施工が 95.4% となり、やや吹付け施工の締固め度が低い結果となっているが、最小でも 90% 以上の締固め度となっている。締固め度と含水比の関係は、図 5.3-30 に示すとおり含水比の増加に伴い締固め度も小さくなっている。

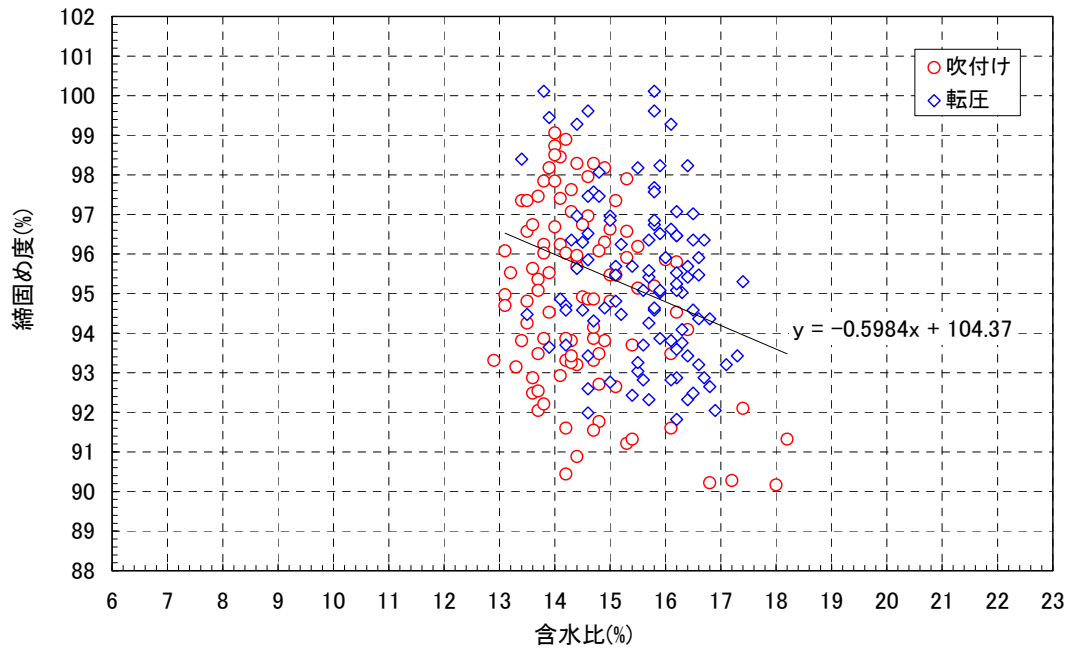


図 5.3-30 施工試験後のサンプリングにより得られた締固め度と含水比の関係

(3) 施工性に関する評価

施工時間に関しては、転圧施工に比べて吹付け施工の方が 4 倍程度の時間を要する結果となった。

また、吹付け施工は、リバウンド率が約 15%、ロス率が 18%となり、転圧施工には無い材料ロスが発生するため、実施工においては、施工時間が短くロスが無い転圧施工で実施するエリアを極力多くすることが効率的であると言える。ただし、空洞アーチ部等の転圧機械が物理的に入らない箇所については、吹付け施工が有力と考えられるため、今後も引き続き、吹付け施工技術の効率化を図る検討が必要であると考えられる。

5.3.4 施工確認試験の課題の抽出

今年度実施した施工確認試験結果から得られた課題を抽出する。

(1) ベントナイト混合土製造技術の検討

ベントナイト混合土の製造技術の向上が課題である。自走式土質改良機 (SR-2000G) によるベントナイト混合土の製造においては、品質のばらつきを抑えるため、天候の影響に左右されにくい加水工程の工夫や加水装置の技術開発などの課題がある。ただし、ばらつきを低減させる必要があるか否かは、埋戻し材の要求性能が定量的に規定された段階で改めて判断する必要がある。

(2) リバウンド率を低下させる吹付け方法の検討

リバウンド率を低下させるために、人力または機械施工による吹付け技術の向上および吹付け施工形状の検討が挙げられる。

リバウンド材の品質に影響を与える要因としては、以下の項目が考えられる。

- ・吹付け機械：吹付け圧力の高低と材料分離の関係性
- ・含水比：リバウンドしにくい含水比
- ・練り混ぜ方法と時間：材料の練り混ぜ度合いと材料分離の関係
- ・材料種類：ベントナイトの種類や砂の最大粒度等と材料分離の関係

(3) 廃棄量の低減

吹付け施工の効率化を図るために、廃棄量（主としてリバウンド材）を低減させる方法の検討が望まれる。リバウンド材は、砂分が多く含水比および混合率の低下が見られたため、フレッシュな材料に混ぜ入れて再利用することが困難であった。再利用が成立するか検討を行うことが考えられる。

(4) 吹付け施工について

吹付け施工時には、当初、長時間の連続吹付け中にホース内の材料閉塞が発生したため、1回に吹付ける量を制限し、定期的にホース内の清掃を実施した。そのため、長時間の連続吹付けが可能で、脈動を低減できる吹付け設備およびホースの採用が課題となる。

(5) 転圧施工について

空洞のアーチを想定した狭隘な施工空間における最適な転圧施工機械の選定が挙げられる。敷均しは、人力による敷均しであったため、機械の敷均しによりサイクルタイムの短縮が考えられる。

(6) 構造異方性について

施工層と平行方向にサンプリングを実施し、構造異方性が無いか品質を確認することが望まれる。吹付け施工あるいは転圧施工後のサンプリング方向は、施工層と直角方法であったため、構造異方性について確認できていない。

5.4 初期性能確認試験結果の評価

今年度実施した上部埋戻し材の初期性能確認試験の試験項目を表 5.4-1 に示す。

基本安全機能（移行抑制）に関わる性能に係わる試験として、一軸圧縮強度試験、三軸圧縮強度試験、膨潤圧測定試験を実施し、構築した部材の強度特性・変形特性を確認した。

また、低透水性を把握するための試験として透水試験およびその代替特性確認のための乾燥密度測定試験を行った。

表 5.4-1 初期性能確認試験の試験項目

性能	試験項目	数量	試験目的
基本安全機能（移行抑制）に関わる性能	一軸圧縮強度試験	4	・強度・変形特性の把握
	三軸圧縮強度試験（UU）	4	
	膨潤圧試験	12	
止水性能	透水試験	12	・透水特性の把握
	密度試験（コア法）	80	

5.4.1 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能に関する評価

(1) 一軸圧縮試験結果

上部埋戻し材施工終了後、転圧施工および吹付け施工により構築した部材からそれぞれコアを採取して一軸圧縮強度試験を実施した。一軸圧縮強度 q_u は $71.5\text{kN/m}^2 \sim 114.9\text{kN/m}^2$ に分布し、破壊ひずみ ϵ_f は $2.3\% \sim 5.7\%$ 、変形係数 E_{50} は $3.7 \sim 9.4\text{MN/m}^2$ の範囲であった。

UCS_2（転圧）、UCS_4（転圧）では UCS_1（吹付）、UCS_3（吹付）に比べ一軸圧縮強度が大きく、剛性が小さいことが確認された。これらの強度特性を図 5.4-1、図 5.4-2、図 5.4-3 のように乾燥密度との比較により整理した。図 5.4-1 示すように、UCS_1（吹付）、UCS_3（吹付）、UCS_4（転圧）では乾燥密度が増加するほど強度が増加していることが確認された。UCS_2（転圧）では UCS_1（吹付）、UCS_3（吹付）よりも乾燥密度は小さいが強度は大きくなった。これは、吹付け、転圧時の締固めエネルギーの違いに起因すると考えられる。同一の試験方法で比較した場合は、UCS_2（転圧）に比べ UCS_4（転圧）の方が密度は高く、その結果、一軸圧縮強さも大きくなっている。UCS_1（吹付）、UCS_3（吹付）においては、強度、剛性に大きな差が認められず、均一な品質が確保出来ていることが確認された。

一軸圧縮強さと、乾燥密度、有効粘土乾燥密度、含水比との関係を図 5.4-4 に示す。一軸圧縮強さには、乾燥密度、有効粘土乾燥密度および含水比との相関性が認められ、各物性値の増加に伴い増加する傾向が見られる。線形回帰による相関係数は、一軸圧縮強さと含水比の関係が最も高く $R^2=0.76$ となっている。施工方法の違いによる一軸圧縮強さは、同じ乾燥密度（ 1.67Mg/m^3 程度）、有効粘土乾燥密度（ 0.60Mg/m^3 程度）で比較すると、転圧施工に比べ吹付け施工の方が小さくなる傾向が認められる。

図 5.4-5 に変形係数 E_{50} と各物性値（乾燥密度、有効粘土乾燥密度、含水比）の関係を示す。変形係数には、乾燥密度および有効粘土乾燥密度との相関性（相関係数 $R^2=0.02\sim0.03$ ）は認められないが、含水比との関係（相関係数 $R^2=0.44$ ）においては、含水比の増加に伴い変形係数が低下する相関性が認められる。施工方法の違いによる変形係数は、同じ乾燥密度（ 1.67Mg/m^3 程度）、有効粘土乾燥密度（ 0.60Mg/m^3 程度）で比較すると、一軸圧縮強さとは大小関係が逆転し、転圧施工に比べ吹付け施工の方が大きくなる傾向が認められる。

図 5.4-6 に破壊ひずみと各物性値（乾燥密度、有効粘土乾燥密度、含水比）の関係を示す。破壊ひずみには、乾燥密度、有効粘土乾燥密度および含水比との相関性が認められ、一軸圧縮強さと同様に各物性値の増加に伴い増加する傾向が見られる。

以上より、今回の供試体条件の範囲（密度、含水比、混合率）では、一軸圧縮強さは乾燥密度および含水比との相関性が認められるが、有効粘土乾燥密度との相関性は低い結果となっている。また、施工方法の違いに着目して、同じ乾燥密度、有効粘土乾燥密度の一軸圧縮強さを比較すると、転圧施工に比べ吹付け施工の方が小さくなる結果となっている。

一方、一軸圧縮試験で得られた変形係数 E_{50} は乾燥密度、有効粘土乾燥密度との相関性は低く、含水比との相関性が高くなっている。施工方法の違いでは、変形係数は一軸圧縮強さの傾向とは異なり、転圧施工に比べ吹付け施工の方が大きくなる結果が得られている。

つまり、吹付け工法は、転圧施工に比べ、乾燥密度、有効粘土乾燥密度が同じであれば、強度は低い剛性は高い結果となっている。このときの両工法での物理特性の違いは、含水比であり、吹付け施工では 14%程度、転圧施工では 15～16%程度となっている。

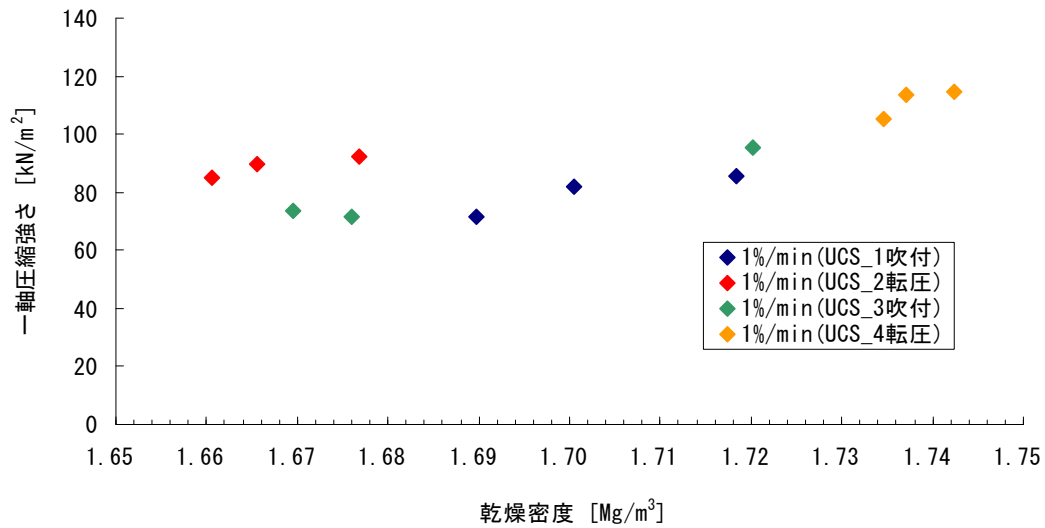


図 5.4-1 一軸圧縮強さ～乾燥密度

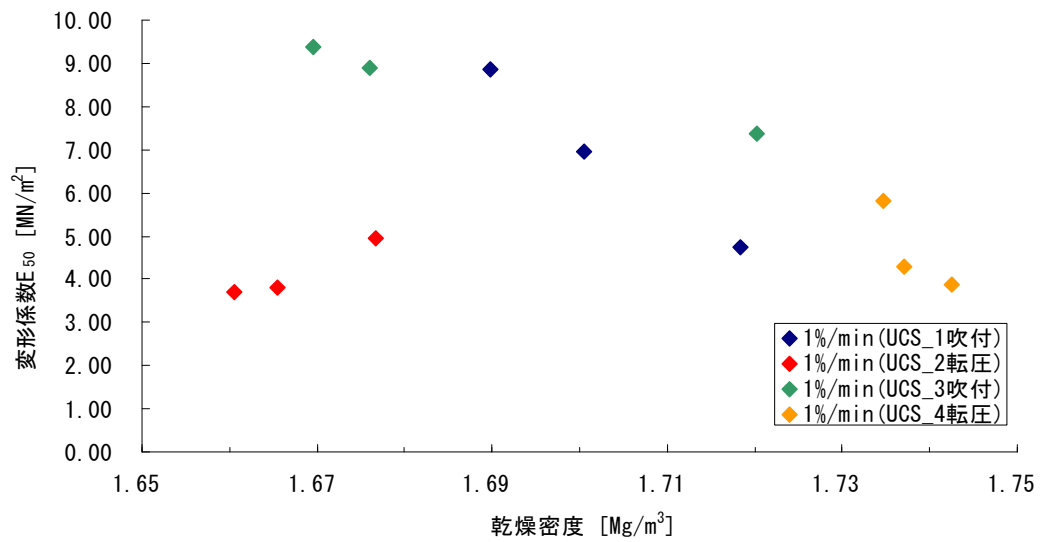


図 5.4-2 変形係数～乾燥密度

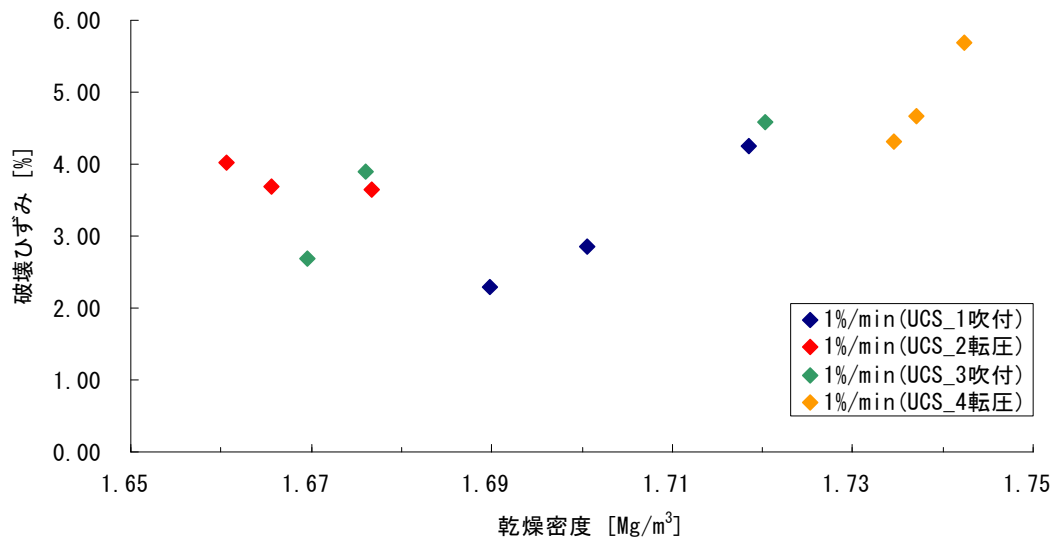
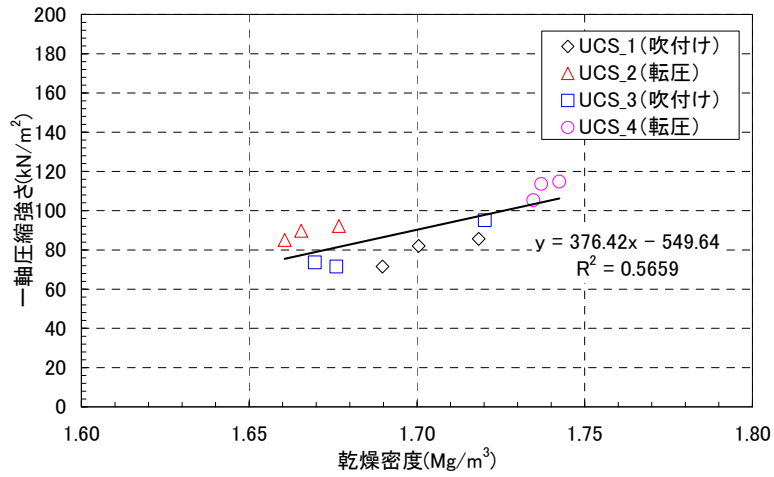
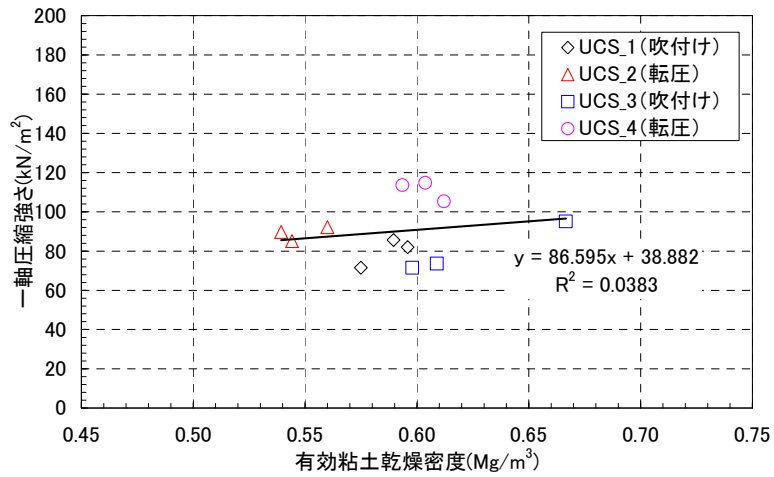


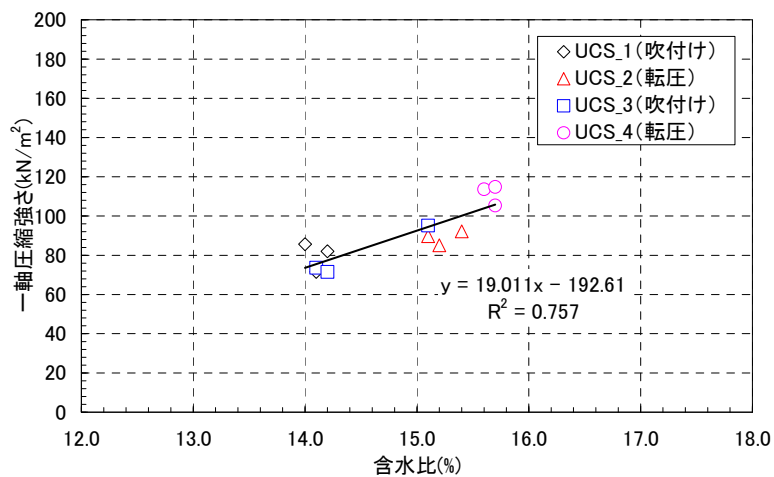
図 5.4-3 破壊ひずみ～乾燥密度



(a)一軸圧縮強さと乾燥密度との相関性

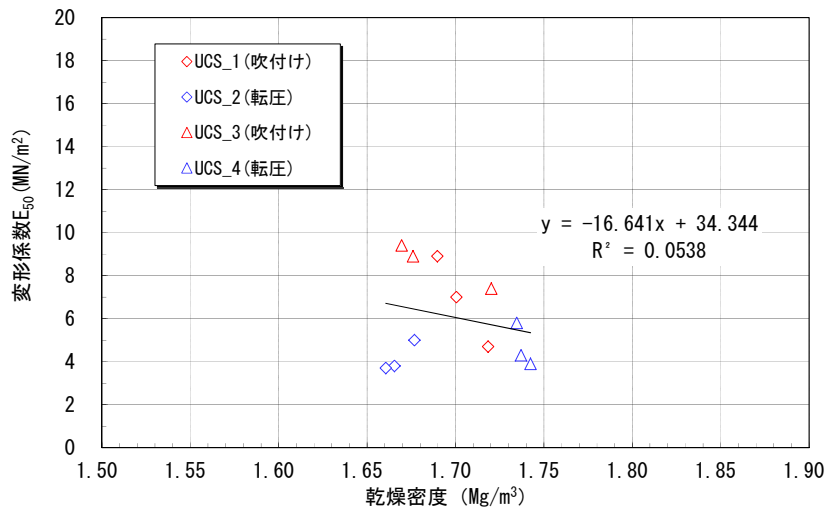


(b)一軸圧縮強さと有効粘土乾燥密度との相関性

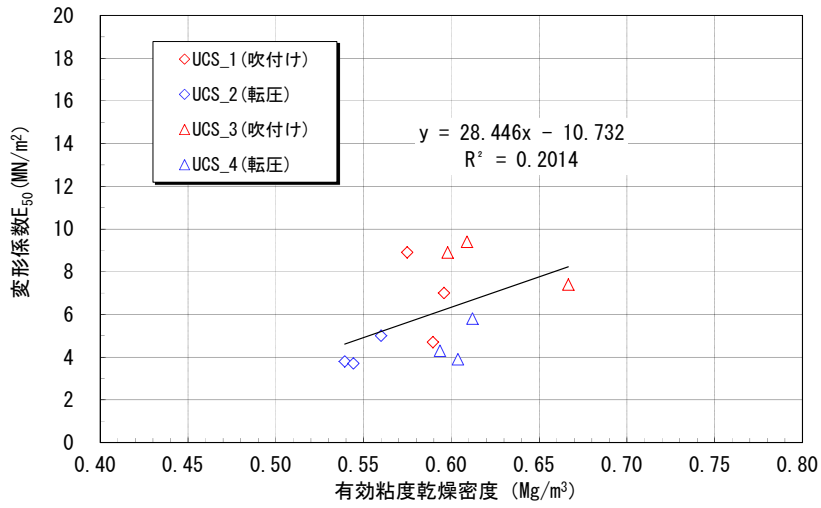


(c)一軸圧縮強さと含水比との相関性

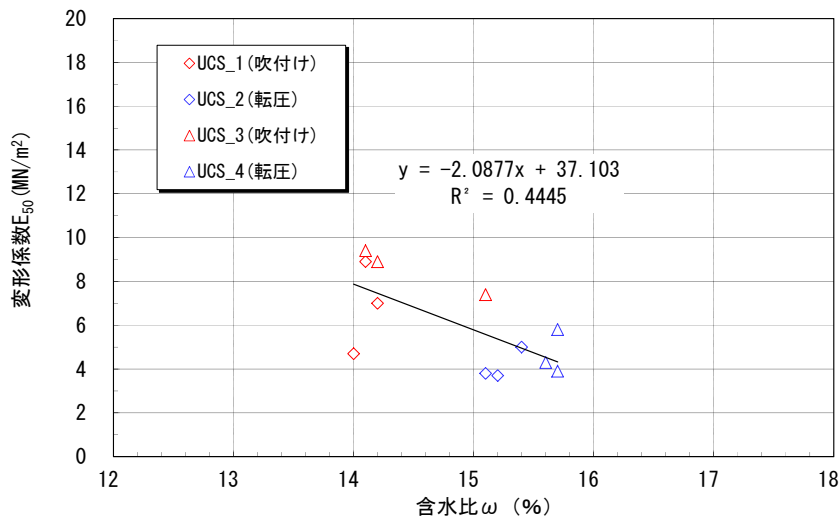
図 5.4-4 一軸圧縮強さと各物性値との関係



(a)変形係数と乾燥密度の関係

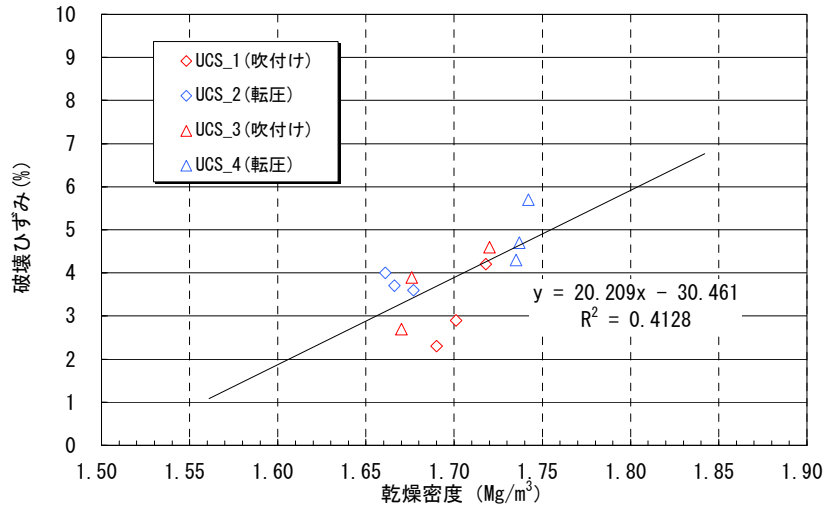


(b)変形係数と有効粘土乾燥密度の関係

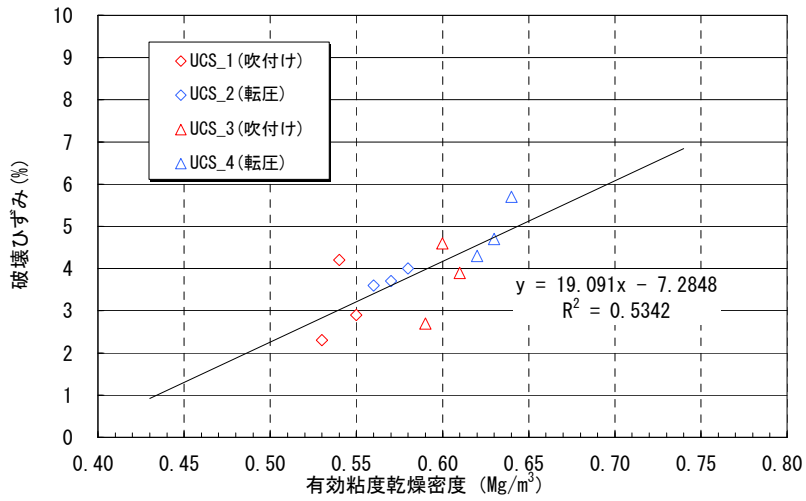


(c)変形係数と含水比の関係

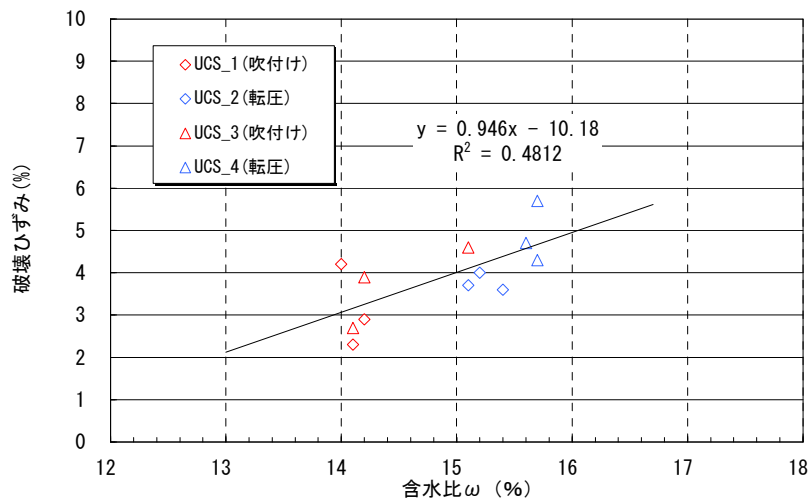
図 5.4-5 一軸圧縮試験による変形係数と各物性値の関係



(a)破壊ひずみと乾燥密度の関係



(b)破壊ひずみと有効粘土乾燥密度の関係



(c)破壊ひずみと含水比の関係

図 5.4-6 一軸圧縮試験による破壊ひずみと各物性値との相関性

(2) 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験(UU 試験)結果について、各拘束圧下の応力(主応力差)～ひずみ関係を図 5.4-7 に示す。また、内部摩擦角、粘着力、主応力差、変形係数と乾燥密度、含水比の関係をそれぞれ図 5.4-11～図 5.4-14、図 5.4-15～図 5.4-18 に示す。

今年度は施工後の転圧層、吹付け層より採取した材料を対象に、三種類の拘束圧条件で試験を実施した。図 5.4-7 より、いずれの拘束圧条件でも比較的再現性の高い応力～ひずみ関係が得られた。モールの応力円や主応力表示の破壊規準線を今年度の一軸圧縮試験結果も併記する形で図 5.4-8、図 5.4-9 に示す。図 5.4-7 より、低拘束圧条件では吹付け、転圧ともに強度に大きな差は確認せず、高拘束圧条件($\sigma_3=400\text{kPa}$ 、 600kPa)になると吹付けの方が大きな強度を示すことが確認された。また、図 5.4-10 に示すように拘束圧の増加に伴い全体的に変形係数は増加しており、中でも UU_1(吹付)で変形係数の増加量が最も大きくなった。このことから、吹付け施工における強度、剛性は拘束圧に大きく依存すると考えられる。

内部摩擦角は、乾燥密度の増加および含水比の低下に伴い増加する傾向となった。粘着力は、吹付け施工で最大最小の値を示し、その中間値に転圧施工の結果が確認された。乾燥密度の増加および含水比の低下に伴い粘着力は増加傾向を示すものの、UU_2 の結果はその傾向に反していることがわかった。

このように今回の試験結果では、吹付け、転圧ともに試験結果に変動が目立ち、特に吹付けの試験結果で顕著となった。特に UU_3 (吹付) は、図 5.4-19 に示すように UU_3-1、UU_3-2 と UU_3-1、UU_3-3 から得られる粘着力と内部摩擦角に大きな差が生じることがわかった。表 5.4-2 より、UU_3-1、UU_3-3 では密度、含水比が概ね一致しているのに対し、UU_3-2 は前述の 2 ケースに低密度、高含水比であり、圧密終了時の体積変化を比較すると UU_3-2 が相対的に最も高い値を示している。これと同様な試験結果の変動は UU_1(吹付)でも確認されており、施工における品質の変動幅は大きいと考えられる。このような背景から、本試験で得られた含水比、乾燥密度の変動を図 5.4-20 の変動エリア(点線部)のように示した。図より、転圧施工に比べ吹付け施工で密度、含水比の変動が大きいことが明らかになった。また、含水比が乾燥側で強度は増加し、湿潤側で低下していることも確認された。これより、目標含水比の検討および現場施工における品質の均一性確保が今後の課題と考えられる。

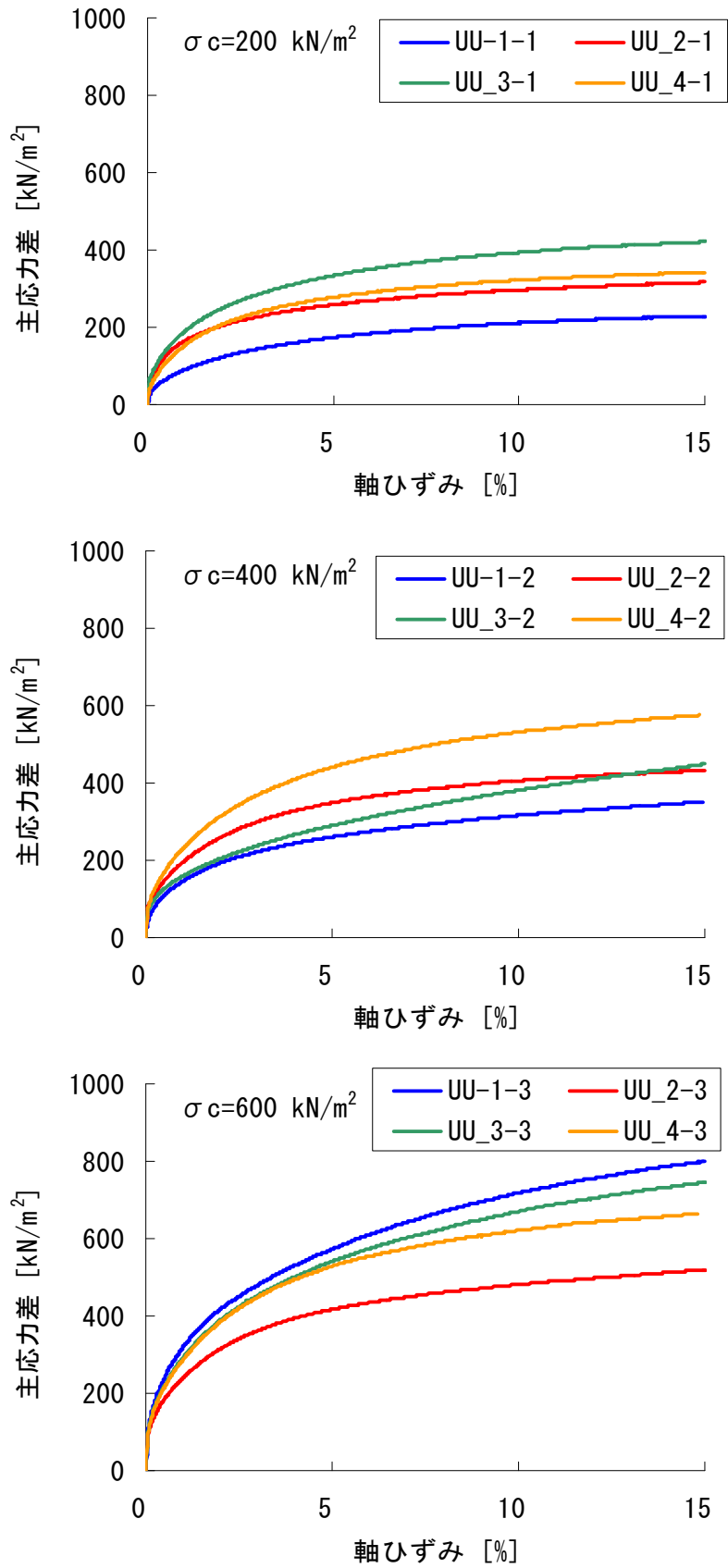


図 5.4-7 三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係

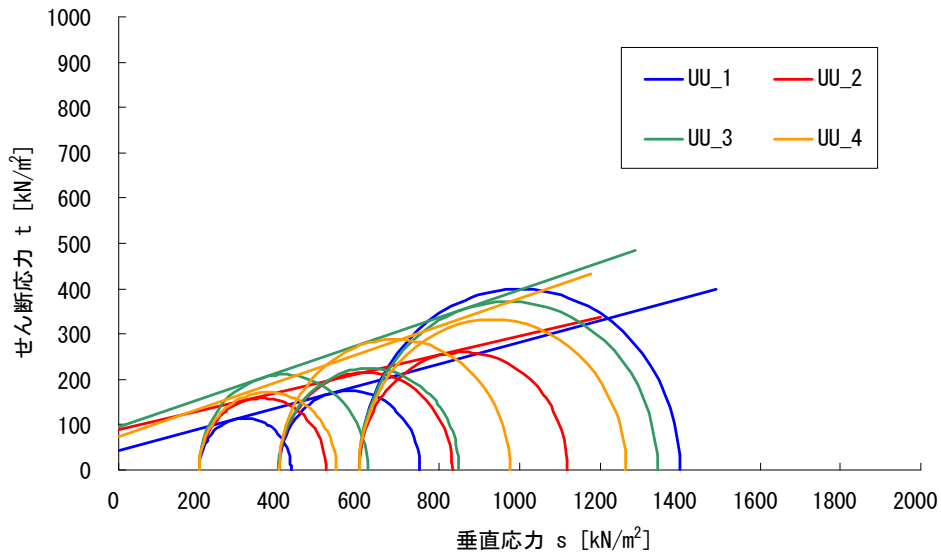


図 5.4-8 モールの応力円 (全応力)

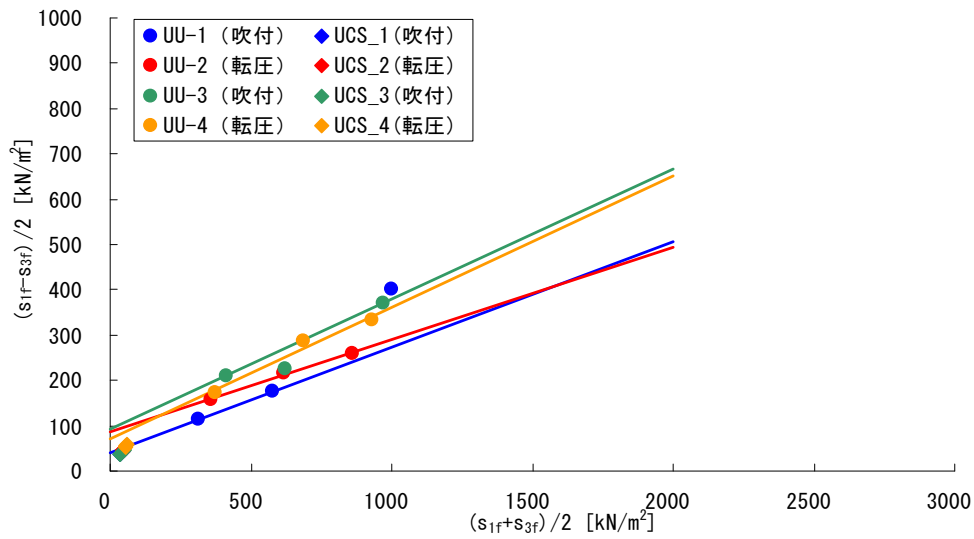


図 5.4-9 主応力表示のモールクーロンの破壊規準

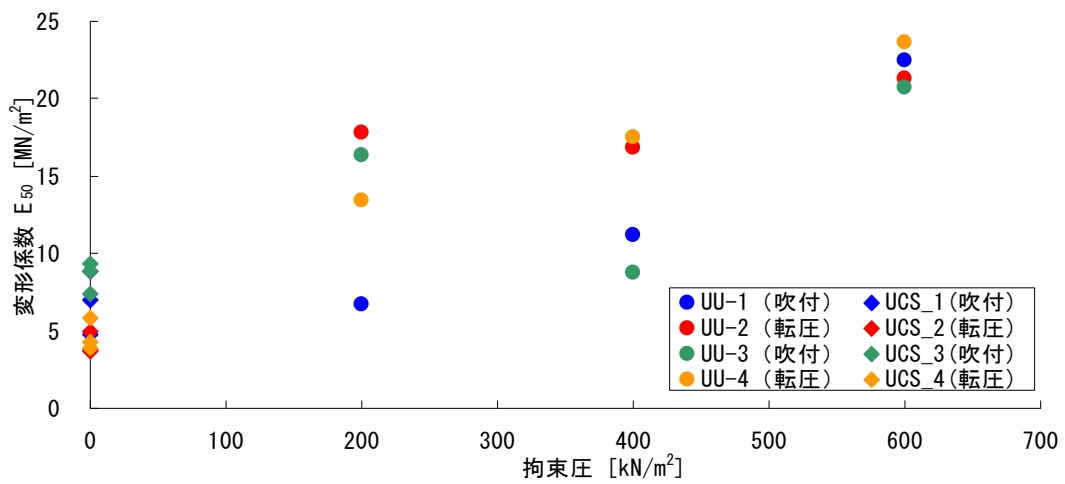


図 5.4-10 変形係数～拘束圧関係

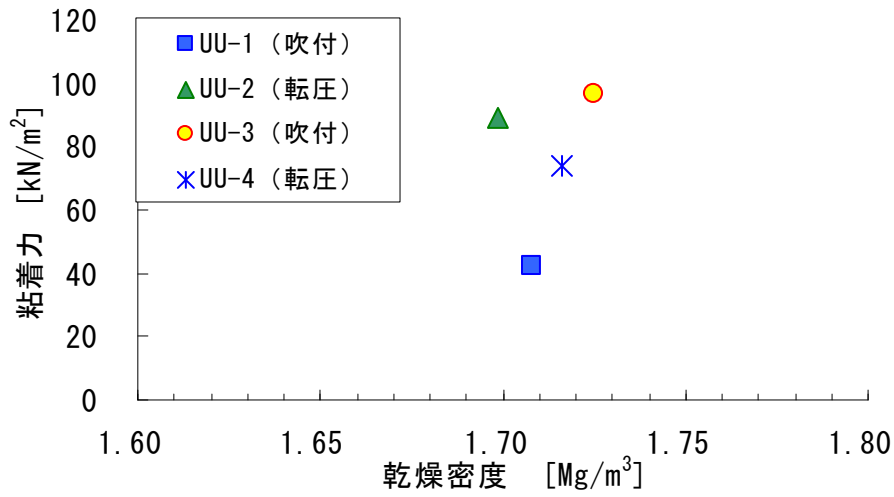


図 5.4-11 粘着力～乾燥密度の関係

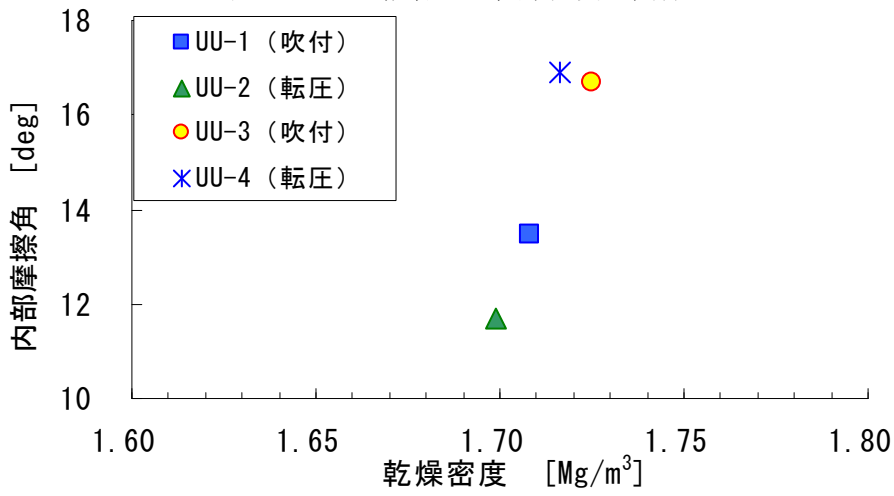


図 5.4-12 内部摩擦角～乾燥密度の関係

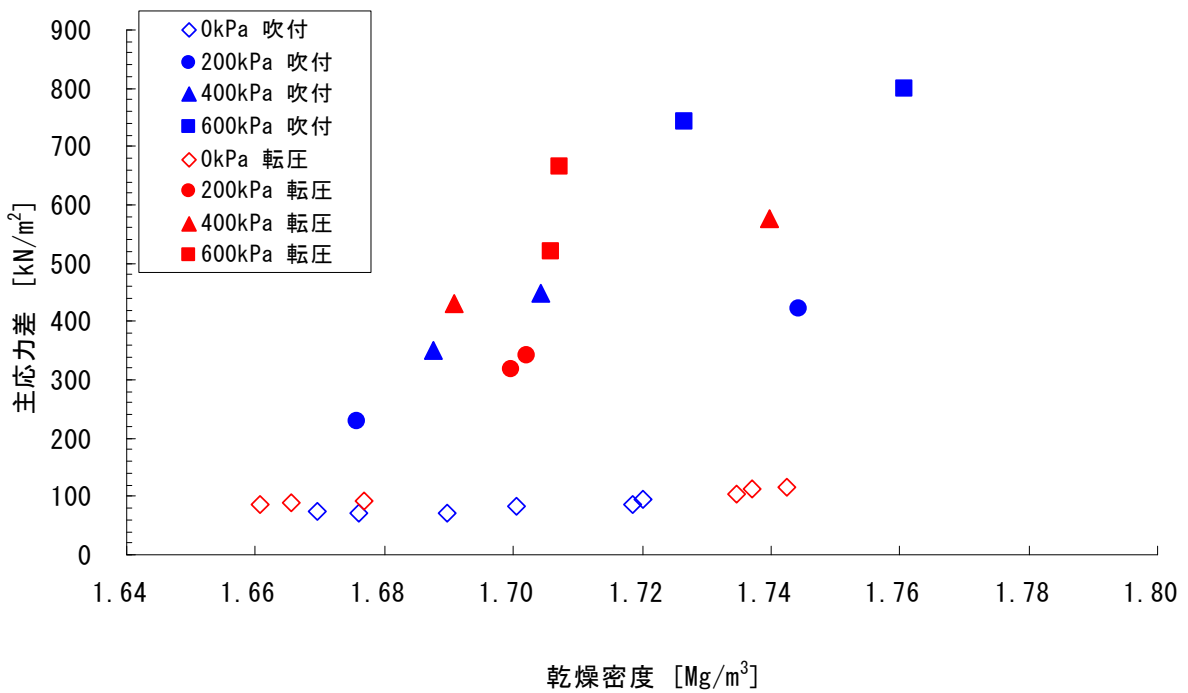


図 5.4-13 主応力差～乾燥密度の関係

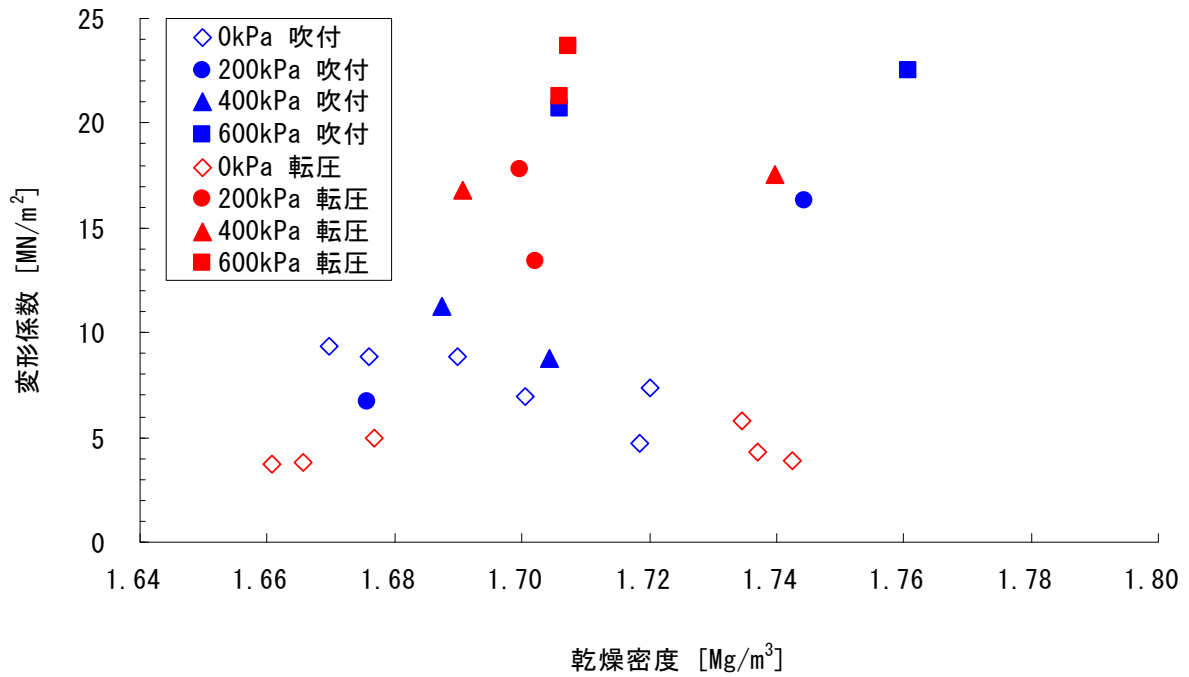


図 5.4-14 変形係数～乾燥密度

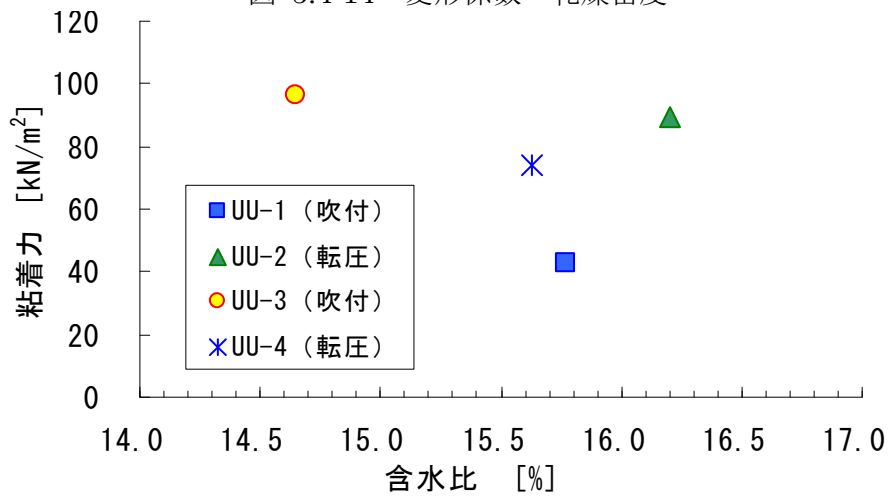


図 5.4-15 粘着力～含水比の関係

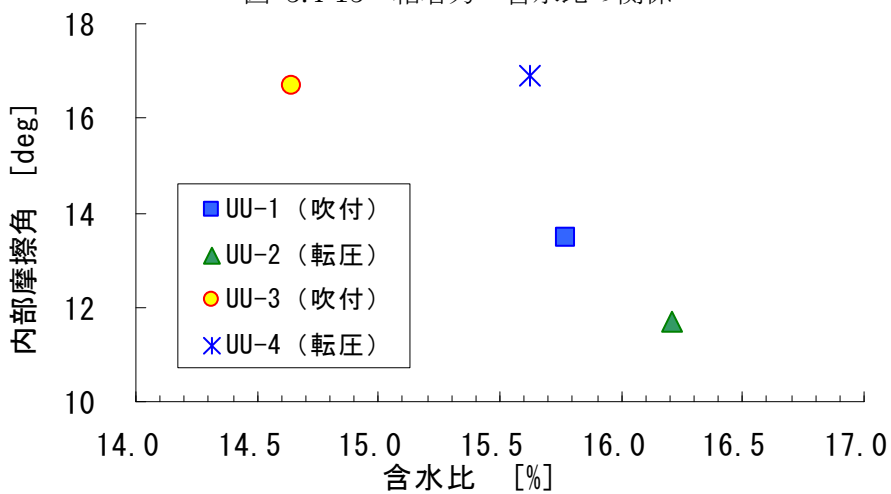


図 5.4-16 内部摩擦角～含水比の関係

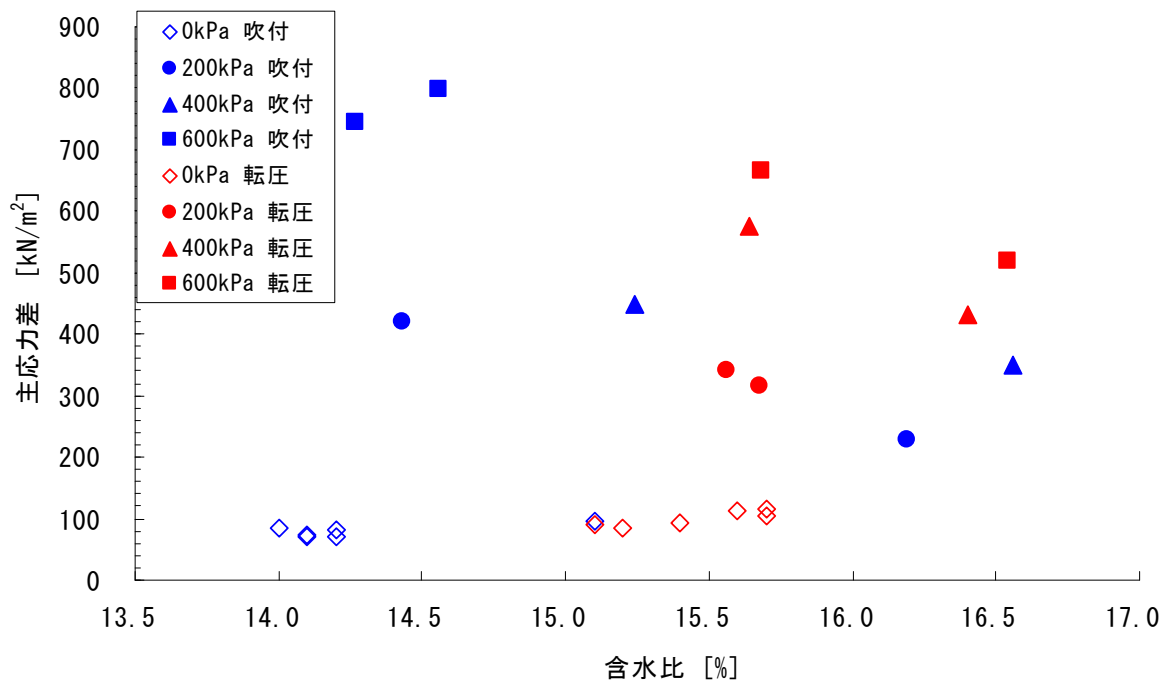


図 5.4-17 主応力差～含水比の関係

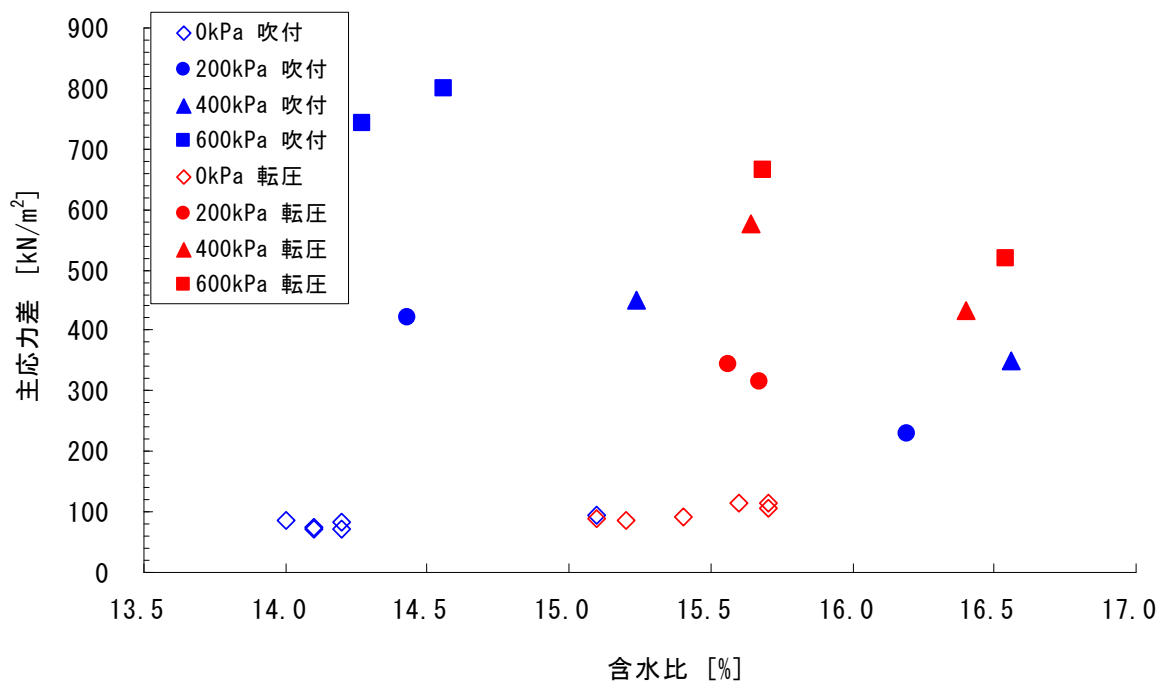


図 5.4-18 変形係数～含水比の関係

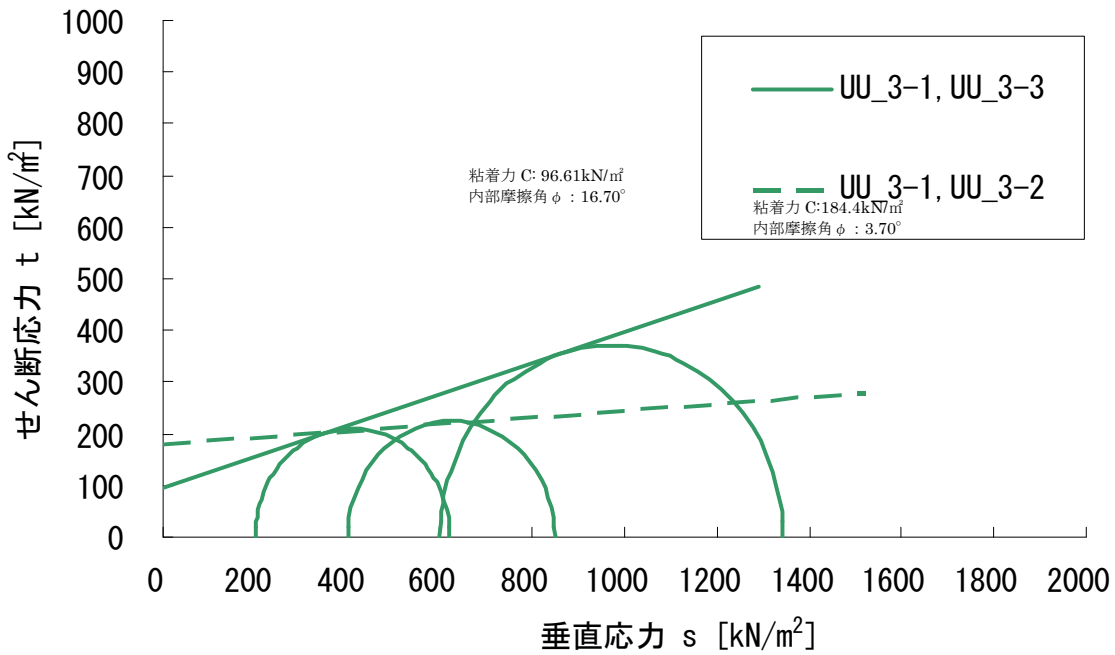


図 5.4-19 UU_3(吹付)のモール応力円

表 5.4-2 UU_3(吹付)の試験結果一覧表

試験ケース名	拘束圧 (kPa)	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	最大主応力差 (kN/m ²)	体積変化 (圧密終了後) (mm)
UU_3-1	200	1.744	14.4	421.1	0.644
UU_3-2	400	1.704	15.2	448.7	1.425
UU_3-3	600	1.726	14.3	743.8	1.511

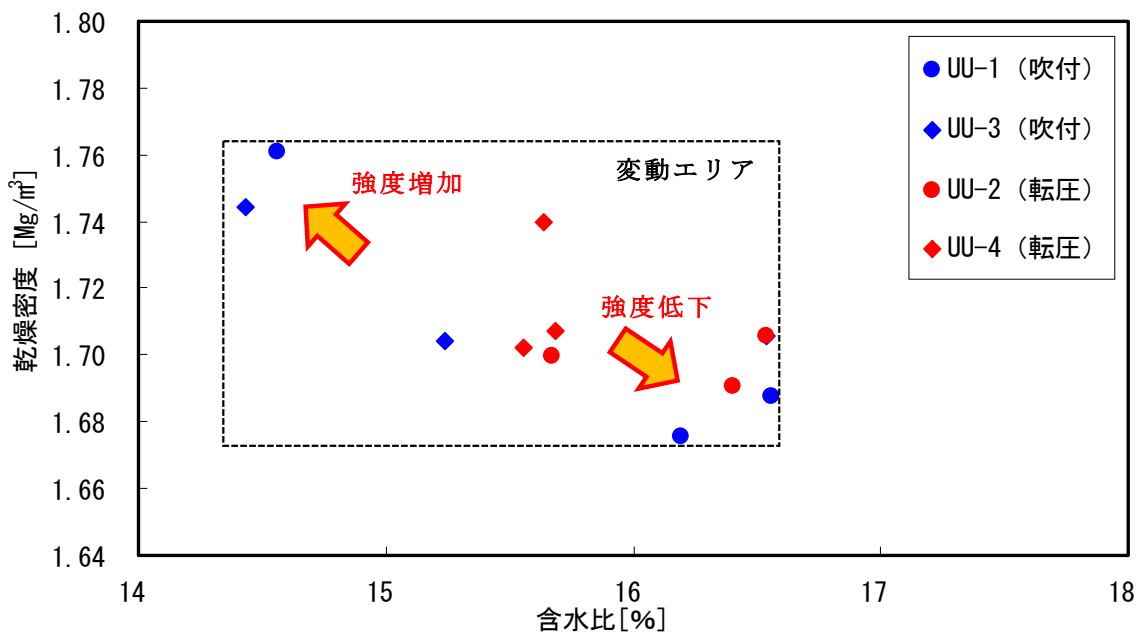


図 5.4-20 乾燥密度、含水比の変動

(3) 膨潤圧試験結果

膨潤圧の値は 0.01MPa 以下と小さい値であった。図 5.2-7 に示すように、吹付け施工の供試体 SW_3-1 の試験結果は、他の供試体に比べ、膨張圧の経時的な増加率および平衡膨張圧が大きくなっている。この供試体の有効粘土乾燥密度は 0.725 Mg/m^3 (図 5.4 37 参照) となっており、その他の供試体 (有効粘土乾燥密度 0.6 以下) よりも大きくなっていることによると考えられる。また、混合率 (18.4%) についても、その他の供試体 (17.2%以下) に比べ大きくなっていることから、砂との材料分離の影響を受け、有効粘土乾燥密度が増加し、膨張圧が増加したものと考えられる。

図 5.4-21 には供試体の乾燥密度と平衡膨潤圧の関係を示す。供試体の乾燥密度が 1.65 Mg/m^3 から 1.80 Mg/m^3 の範囲でばらついているが、供試体の乾燥密度が大きくなるにつれて平衡膨潤圧の値は大きくなっていることが分かる。

図 5.4-22 には、有効粘土乾燥密度と平衡膨潤圧の関係を示す。膨潤圧試験後の供試体の細粒分含有率を測定することによりベントナイト混合率を求め有効粘土乾燥密度を算出している。平衡膨潤圧は、乾燥密度、有効粘土乾燥密度と高い相関性を示し、線形回帰の場合の有効粘土乾燥密度との相関係数は、 $R^2=0.9$ 近くの値になっており、乾燥密度より有効粘土乾燥密度の方が相関性は高くなっている。これらの相関図においては、回帰直線近傍に各供試体のデータが分布しており、験施工方法の違いによる膨潤特性の差異は認められない。

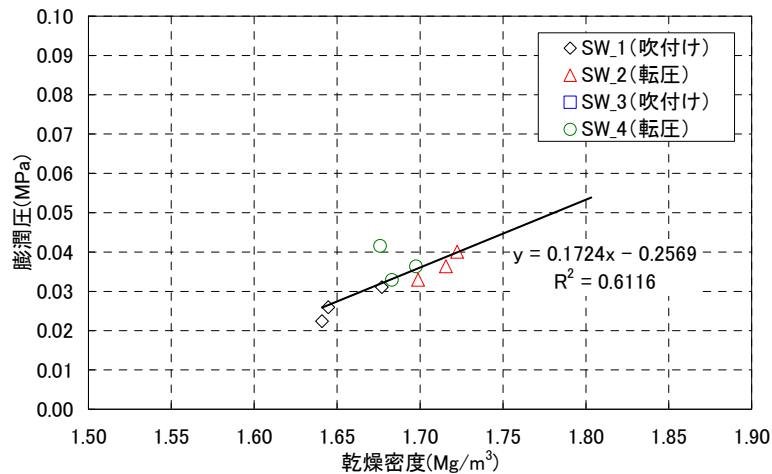


図 5.4-21 膨潤圧と乾燥密度の関係

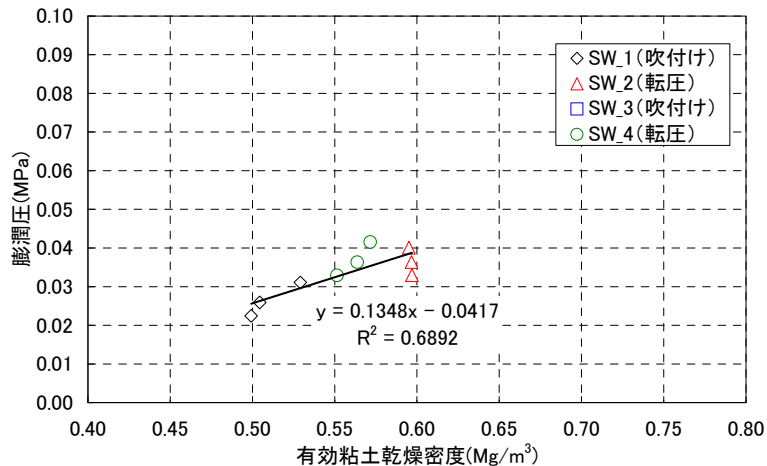


図 5.4-22 膨潤圧と有効粘土乾燥密度の関係

5.4.2 止水性能に関する評価

(1) 乾燥密度

図 5.4-23 には乾燥密度の測定結果を示す。同図には、室内試験により得られた締固め曲線 (A 法) も示している。全体的に締固め曲線の下側に位置する結果となっているが、吹付け施工の結果と転圧施工の結果を比べると吹付け施工の方が転圧施工に比べて含水比が低い側に分布している。これは、施工時に、含水比の低めの材料を吹付け施工に用いたためである。

乾燥密度の平均値は転圧施工に比べて吹付け施工の方が高くなっており、そのため締固め度の平均値も吹付け施工の方が高くなっている。これは、使用した材料の含水比が吹付け施工の方が低く、そのため最適含水比に近い含水比の材料であったため仕上りの密度は吹付け施工の方が高くなったものと思われる。含水比は吹付け施工の方が 1%以上低い含水比 (平均 14.1%) となっており、最適含水比 (13.7%) に近い値である。

混合率については、転圧施工に比べて吹付け施工の方が大きくばらつき、平均値も高いという結果となった。これは、転圧施工時は、材料製造時の状態での施工となっており混合率の施工前後での変化はないが、吹付け施工の場合は吹付け時のリバウンド材の中の砂の割合がベントナイトに比べて多く、その結果として施工した箇所のベントナイトの割合が多い、すなわち、ベントナイト混合率が高くなったためである。

図 5.4-24 には有効粘土乾燥密度のヒストグラムを示す。乾燥密度の平均値は吹付け施工の方が高かったが、分布 (最大値と最小値の幅) については、それほど両方で差が無かったものの、有効粘土乾燥密度にすると吹付け施工の方がばらつきは大きくなっている。これは、ベントナイト混合率のばらつきが転圧施工に比べて吹付け施工の方が大きいためである。

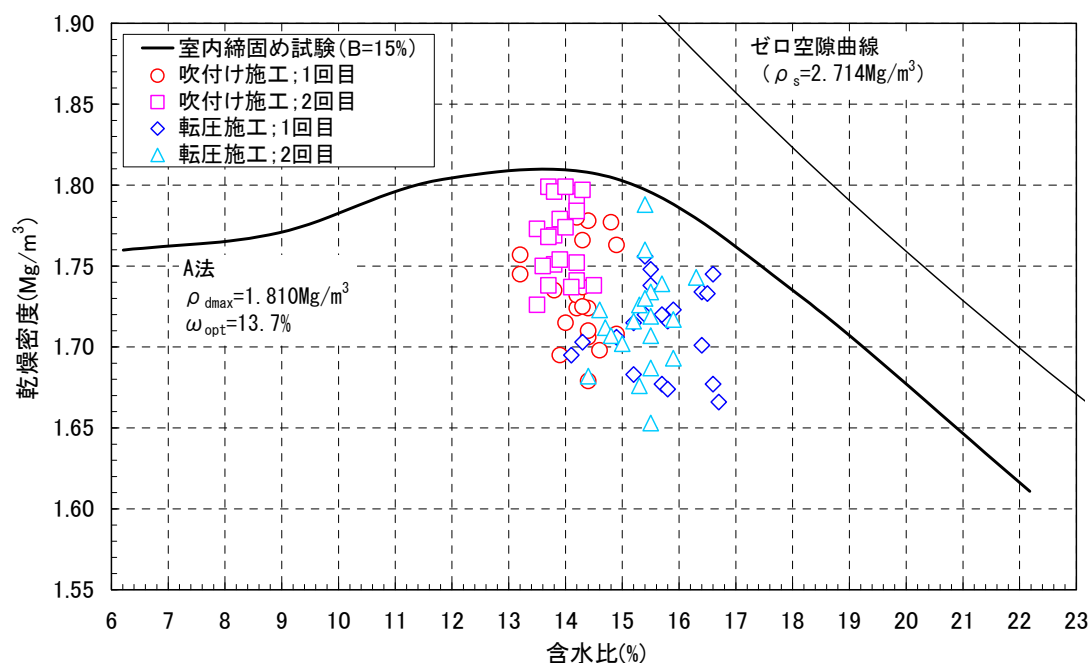
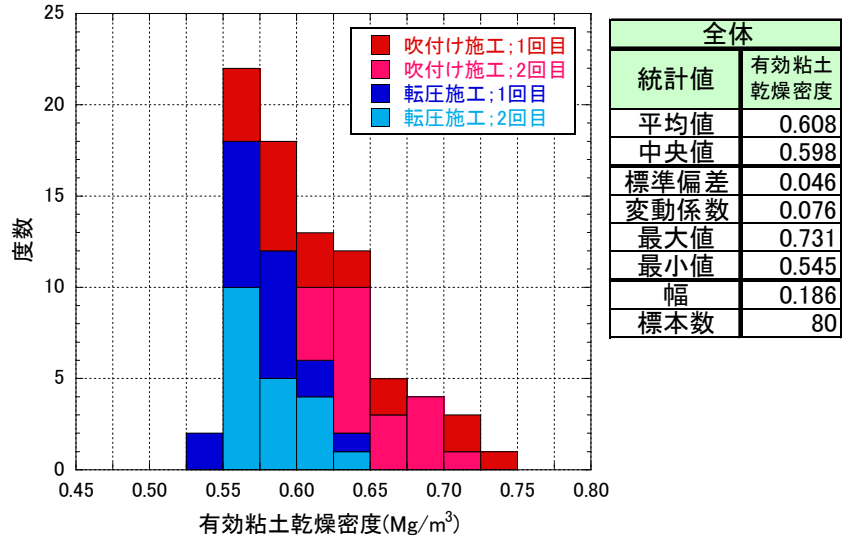
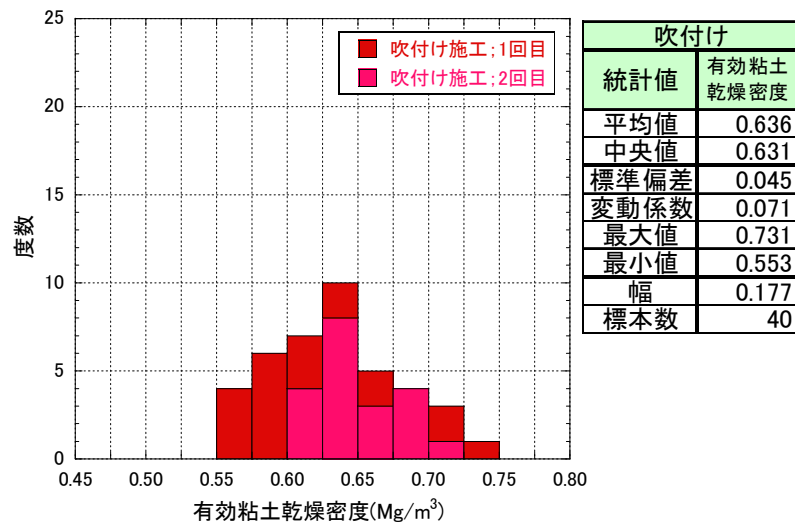


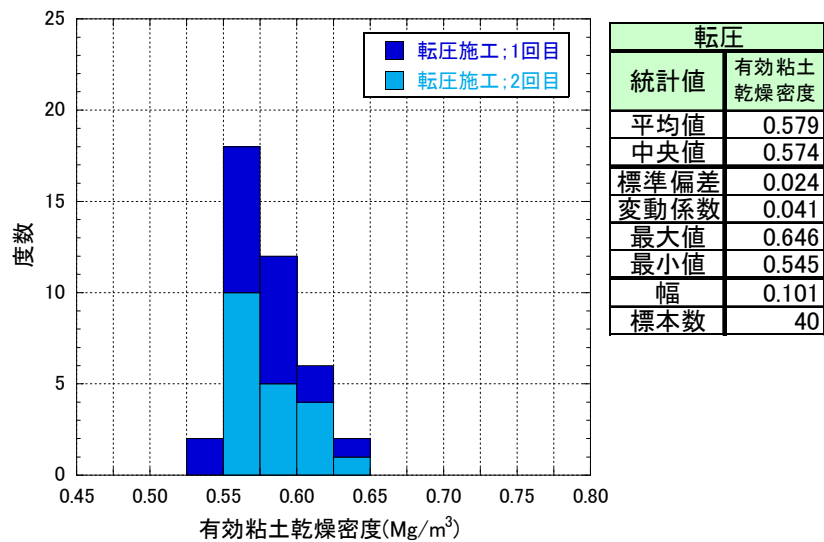
図 5.4-23 密度試験結果と室内締固め試験の比較



(a)全体



(b)吹付け施工



(c)転圧施工

図 5.4-24 有効粘土乾燥密度のヒストグラム

(2) 透水試験

図 5.4-25 には、各供試体の乾燥密度と測定された透水係数の関係を、図 5.4-26 には有効粘土乾燥密度と透水係数の関係を示す。

透水係数には乾燥密度および有効粘土乾燥密度との相関が見られるが、相関係数は $R^2=0.2 \sim 0.3$ と低い。粘土乾燥密度が高くなるにつれて透水係数の値が小さくなる傾向は、後述する既往の研究事例と整合する。

透水係数と乾燥密度および有効粘土乾燥密度の関係においては、施工方法による透水係数の差異は認められない。

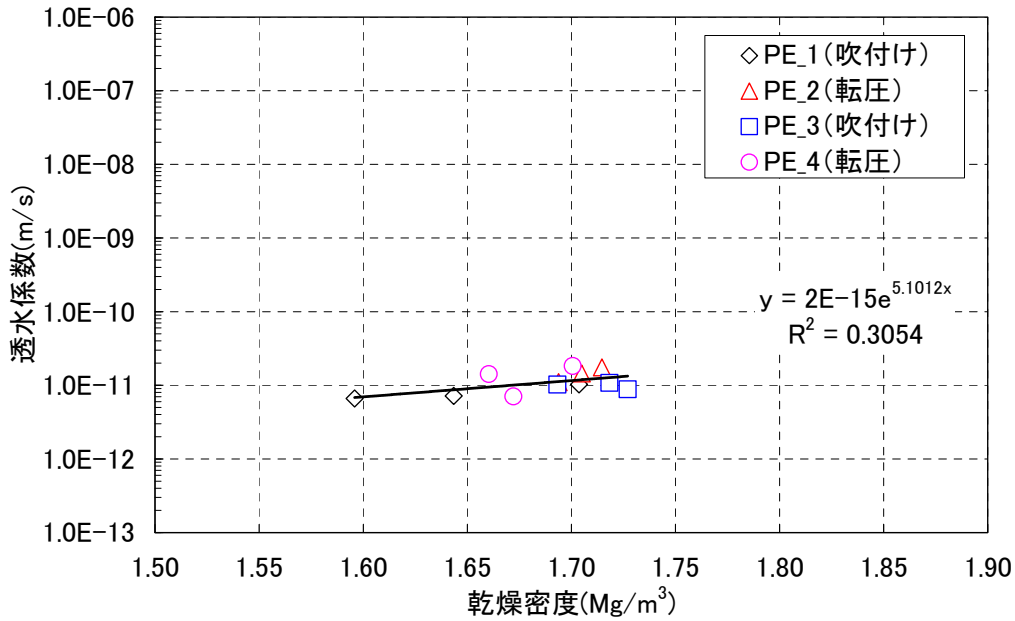


図 5.4-25 乾燥密度と透水係数の関係

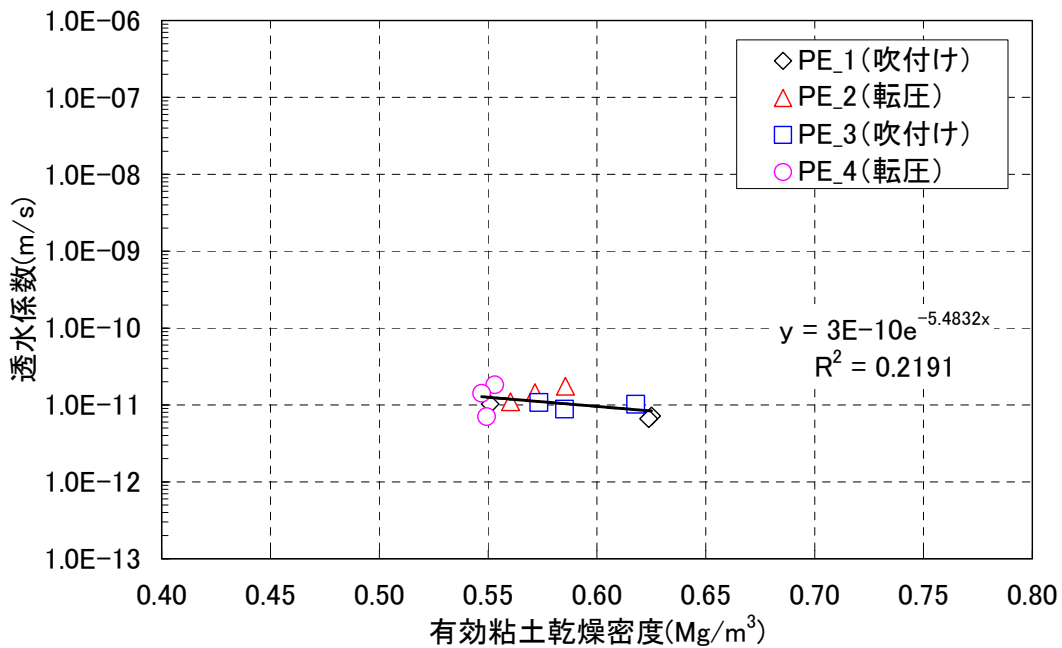


図 5.4-26 有効粘土乾燥密度と透水係数の関係

5.4.3 初期性能確認試験の総合評価

平成25年度の調査した埋め戻し材の要求機能に関する情報をもとに、上部埋め戻し材の要求機能を整理すると、緩衝材の膨潤変形を抑止する力学特性が主となる。また、核種の移行抑制に関わる低透水性は、主に緩衝材に期待される機能であるが、前年度の報告書でも述べたように、旧埋設規則に記載があったように、上部埋め戻し材にもある程度の低透水性は期待されているものと考えられる。

以上のことから、初期性能確認としては、基本安全機能（移行抑制）に関わる性能として力学特性を把握するために、一軸圧縮強度試験、三軸圧縮強度試験、膨潤圧測定試験を、また、低透水性に関する性能を把握するための試験として透水試験およびその代替特性確認のための乾燥密度測定試験を行った。

上記試験により、転圧施工および吹付け施工により構築した部材の初期性能として、一軸圧縮強度、変形係数、三軸圧縮強度、膨潤圧および透水係数おの各データを把握した。

一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数および膨潤圧は乾燥密度に依存することが確認された。また、止水性能に関しては、暫定的に設定した透水係数の品質を達成したことを確認した。

以下では、一軸圧縮強さ、変形係数、透水係数および膨潤圧について既往データとの比較および考察を記載した。

(1) 基本安全機能（移行抑制）に関わる性能

1) 一軸圧縮試験結果に基づく埋戻し土の強度・変形特性評価

一軸圧縮強さ q_u は $71.5\text{kN/m}^2 \sim 114.9\text{kN/m}^2$ の範囲で、変形係数 E_{50} は $3.7 \sim 9.4\text{MN/m}^2$ の範囲でそれぞれ試験結果が得られた。今回の供試体条件の範囲（密度、含水比、混合率）では、一軸圧縮強さは乾燥密度および含水比との相関性が認められるが（図 5.4-27 参照）、有効粘土乾燥密度との相関は低い結果となった。変形係数 E_{50} は乾燥密度、有効粘土乾燥密度との相関性は低く、含水比との相関性が比較的高い結果（図 5.4-28）となった。よって、今回の試験では、含水比は一軸圧縮強さおよび変形係数に共通して相関性が認められることがわかった。

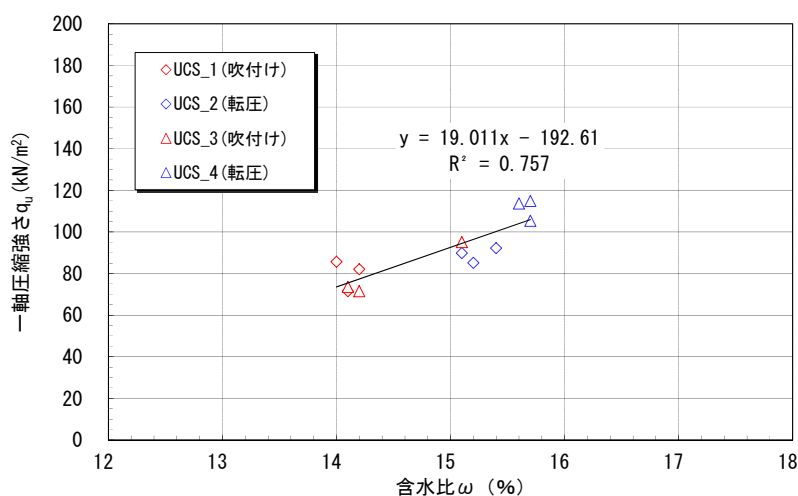


図 5.4-27 一軸圧縮強さと含水比の関係（再掲）

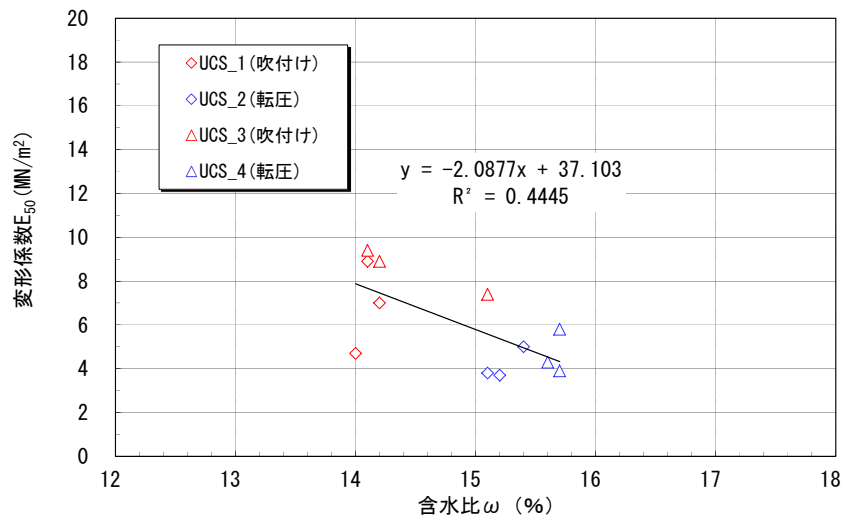


図 5.4-28 一軸圧縮試験による変形係数と含水比の関係 (再掲)

既往研究[3]によると、図 5.4-29、図 5.4-30 に示すように、ベントナイト混合率 15wt% の一軸圧縮強度および変形係数には有効粘土密度との相関性が見られるが、今回の試験結果では有効粘土密度との相関性は低くなっている。今回実施した供試体の有効粘土密度は、0.55~0.65Mg/m³ 程度の限られた範囲になっておりデータ数も十分とは言えない。既往研究においても、このような低い有効粘土密度のベントナイト混合土の一軸圧縮試験も少ないことから、今後、データを蓄積していく必要がある。

施工方法の違いについては、図 5.4-31 に示すように、吹付け工法は、転圧施工に比べ、乾燥密度、有効粘土乾燥密度が同じであれば、強度は低い剛性は高い結果となっている。このときの両工法での物理特性の違いは、含水比であり、吹付け施工では 14%程度、転圧施工では 15~16%程度となっている。

図 5.4-32 に示す既往研究[4]におけるベントナイト混合土の一軸圧縮試験によると、含水比により応力~ひずみ関係、一軸圧縮強さおよび変形係数は大きく異なっている。今回の試験においては、施工性を考慮して、含水比が低めの材料を吹付け施工に用いているが、施工方法の違いを評価するに当たっては、初期設定材料（乾燥密度、含水比、ベントナイト混合率）が同程度であることか望ましいといえる。

今回の試験では、一軸圧縮強さおよび変形係数は含水比と相関性があることが確認された。既往研究[i]では、想定される現象として、ベントナイト混合土に地下水が浸透し飽和度が上昇することにより同一乾燥密度でも強度が低下することがあるため、一軸圧縮強さは飽和度をパラメータとして整理されている。有効粘土密度の上昇により一軸圧縮強度は大きくなるが、飽和度の増加に伴って強度が 1/2 から 1/3 程度に低下していることがわかる (図 5.4-29 参照)。

したがって、ここでの知見および既往研究を踏まえると、含水比をパラメータとした不飽和条件での一軸圧縮試験データを蓄積する必要があり、上部埋戻し土の施工に際しては、含水比の管理が容易な施工機械の選定、改良を試行する必要があると考えられる。

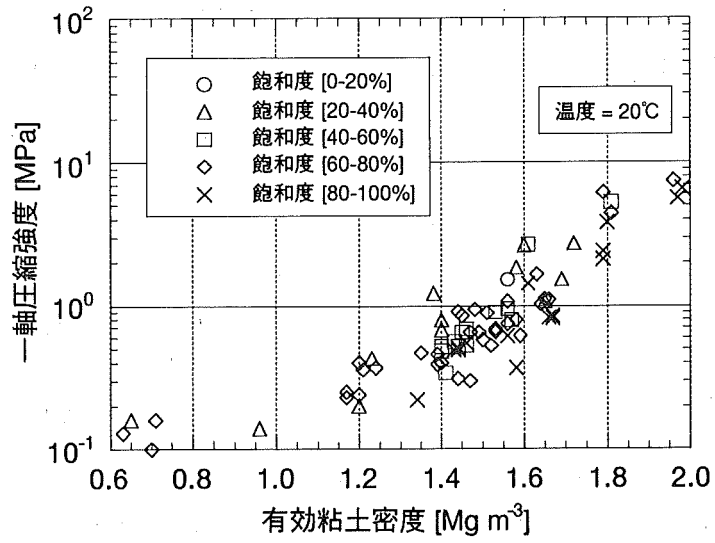


図 5.4-29 既往研究における一軸圧縮強度と有効粘土密度の関係[i]

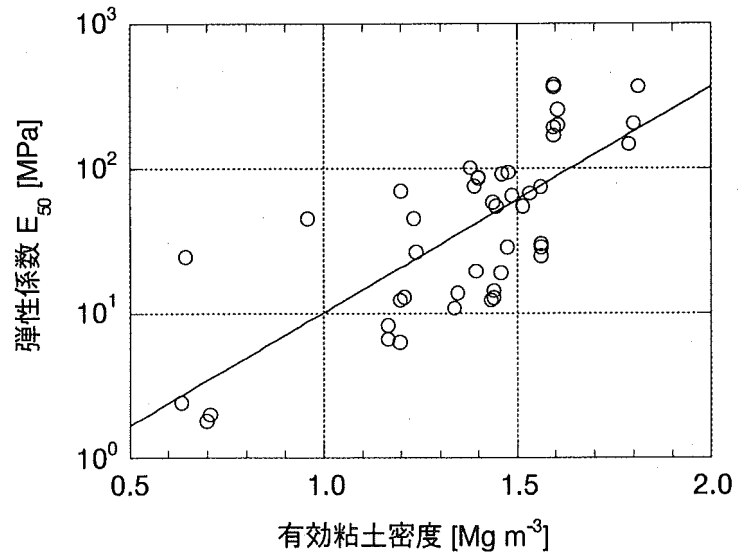


図 5.4-30 既往研究における弾性係数の有効粘土密度の関係[i]

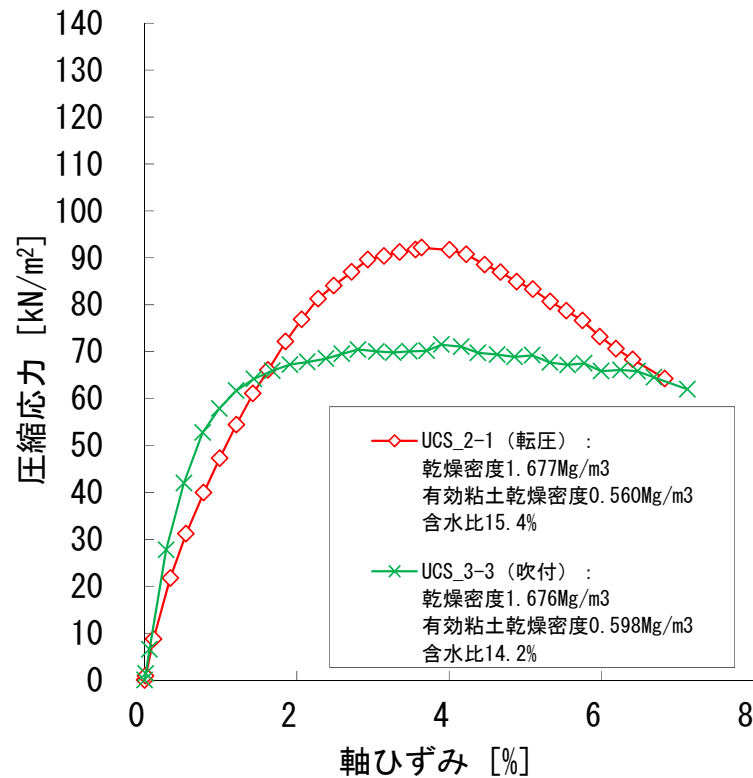


図 5.4-31 吹付け施工および転圧施工による埋戻し土の一軸圧縮試験結果

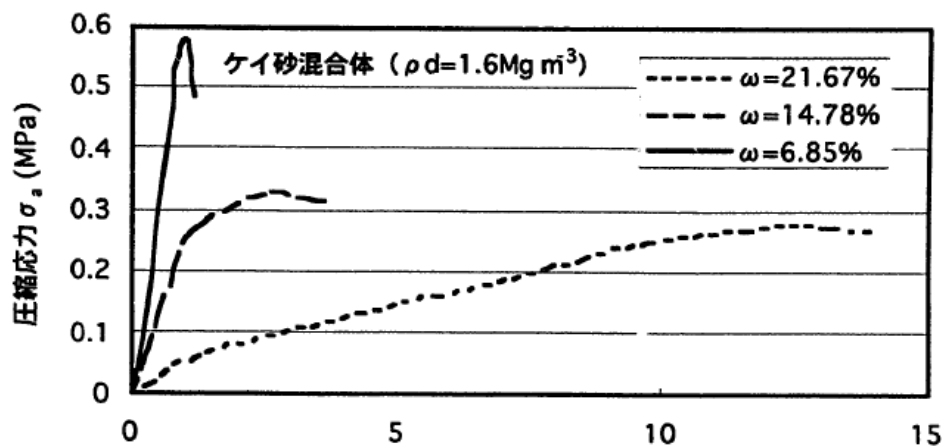


図 5.4-32 既往研究におけるベントナイト混合土の一軸圧縮試験結果[ii]

2) 三軸圧縮試験結果に基づく埋戻し土の強度・変形特性の評価

採取したコアを用いて、三軸圧縮試験（UU 試験）を行い、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ならびに拘束圧毎の変形係数 μ を求めた。

吹付け施工の試験ケースのうち、混合率が 20%程度と他のケース（混合率 16~18%）に比べて大きく、リバウンド等の影響により材料分離している可能性があると考えられる UU_1 シリーズの試験結果を除くと、粘着力は 73~97(kN/m²)、内部摩擦角は 12~17° の範囲となり、施工方法の違いによる強度特性の差異は小さいことがわかった。

図 5.4-33、図 5.4-34 に主応力差と乾燥密度、含水比の関係を示す。同図には拘束圧ごとに回帰直線を示している。拘束圧が 0kN/m²は一軸圧縮試験による主応力差である。主応力差は、乾燥密度の増加および含水比の低下に伴い増加する傾向が認められ、これらの相関関係においては、施工方法の違いによる強度特性の差異は認められない結果が得られている。主応力差と有効粘土乾燥密度との相関性については、砂とベントナイトの材料分離が生じていると考えられる吹付け施工による混合率 20%の試験結果において、有効粘土密度が大きいかにも関わらず、強度が小さい結果が得られ、両者の相関性は認められない結果となった。

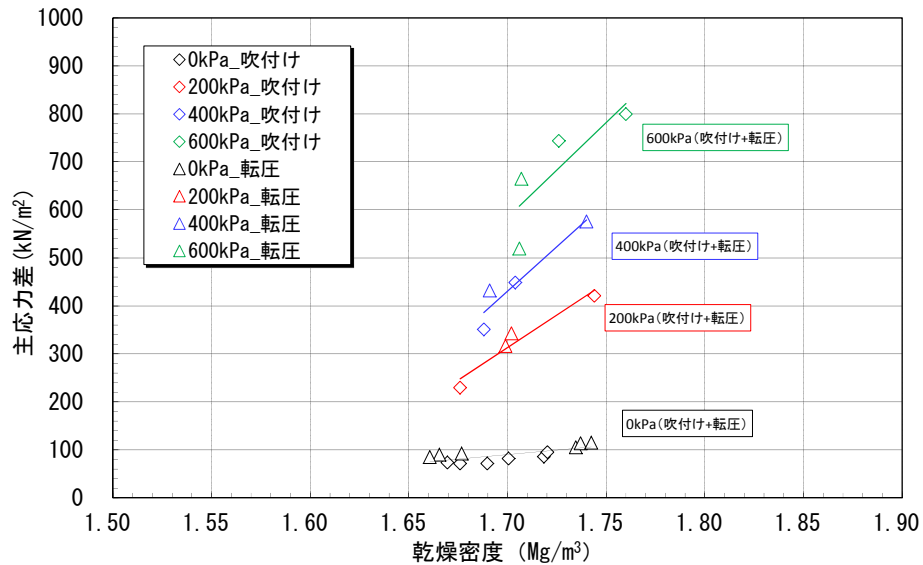


図 5.4-33 主応力差と乾燥密度の関係 (再掲)

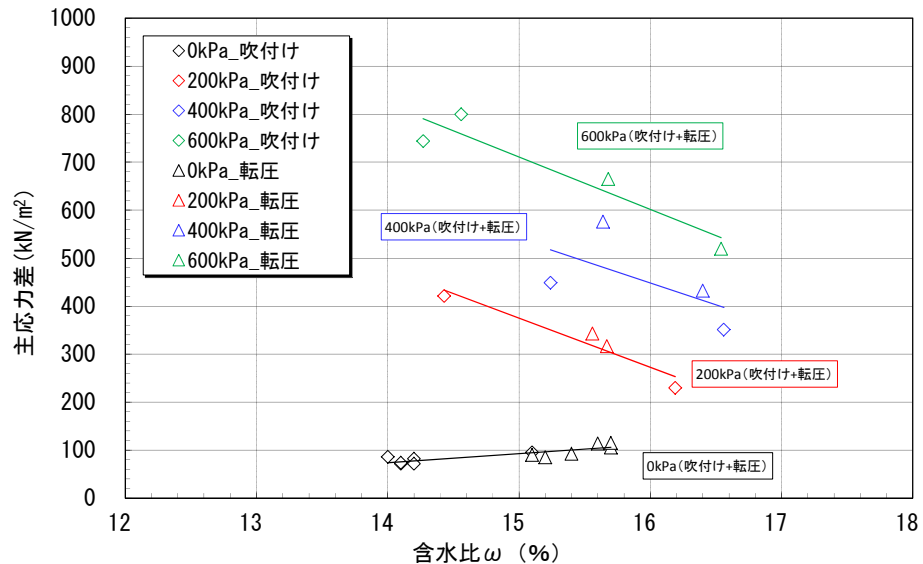


図 5.4-34 主応力差と含水比の関係 (再掲)

図 5.4-35 に変形係数 E_{50} と拘束圧の関係を示す。同図には一軸圧縮試験結果も反映している。変形係数は、拘束圧の増加に伴い増加する傾向が認められる。施工方法の違いに着目すると、変形係数が全体 (吹付け+転圧) 回帰直線よりも極端に小さくなっている吹付け施

工の3供試体 UU_1-1、UU_1-2 および UU_3-2 を除くと、転圧施工と吹付け施工は同程度の変形特性を有していると評価される。なお、上記の変形係数が小さい3供試体のうち、UU-1-1 および UU-1-2 は、他の供試体に比べ混合率が高く、乾燥密度が小さくなっているため、上記の主応力差と同様に変形係数が低下したものと考えられる。UU_3-2 については、上記の2供試体ほどではないが、混合率が17.7%と相対的に高くなっている。

今回実施した条件（乾燥密度、有効粘土乾燥密度、含水比）の範囲においては、変形係数には、乾燥密度、有効粘土乾燥密度および含水比との相関性は認められない結果となった。

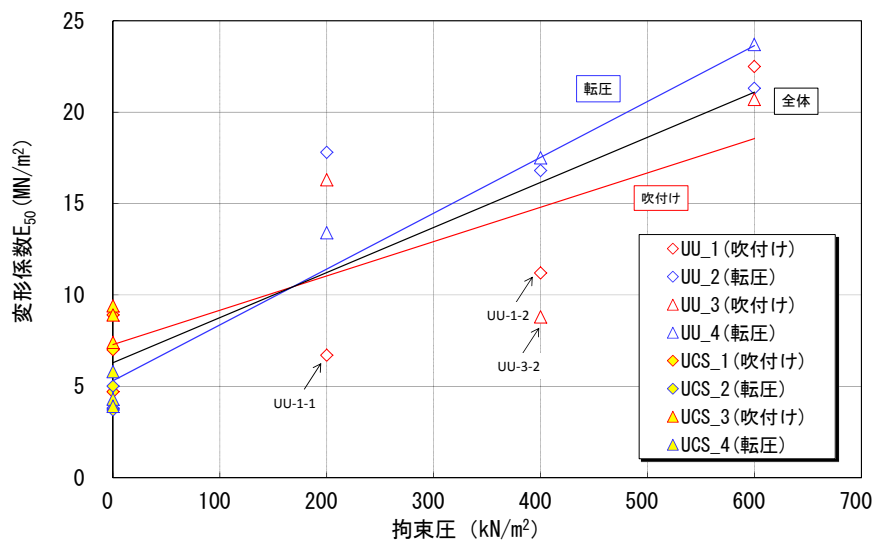


図 5.4-35 変形係数と拘束圧の関係（再掲）

今回の試験結果では、吹付け施工、転圧施工ともに試験結果に変動が目立ち、特に吹付け施工の試験結果で顕著となった。今回の試験で得られた含水比、乾燥密度の変動を図 5.4-36 の変動エリア（点線部）のように示した。同図より、転圧施工に比べ吹付け施工で乾燥密度、含水比の変動が大きいことがわかる。また、強度は含水比が乾燥側で増加し、湿潤側で低下していることも確認された。これより、目標含水比の検討および現場施工における品質の均一性確保が今後の課題と考えられる。

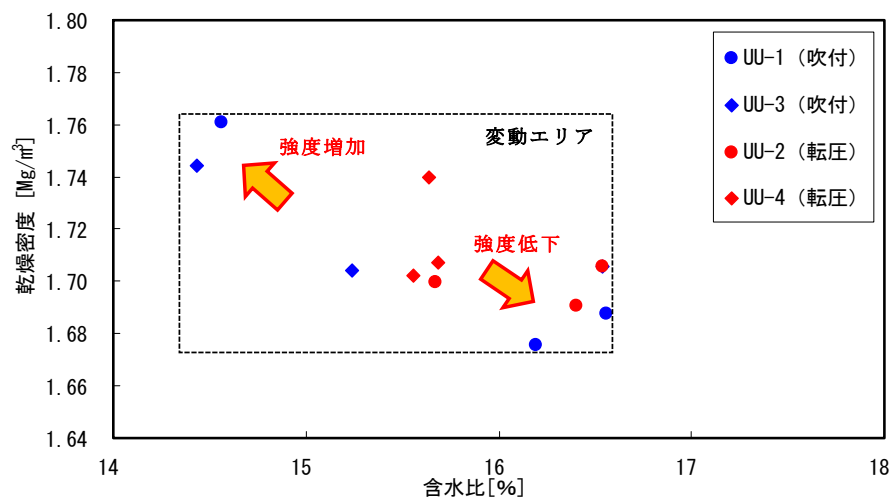


図 5.4-36 乾燥密度、含水比の変動

以上より、今回実施した条件（乾燥密度、有効粘土乾燥密度、含水比）の範囲においては、三軸圧縮試験（UU 条件）で得られた強度特性、変形特性に関してはいずれも拘束圧依存性を有することを確認できた。物理特性との相関性に関しては、強度特性（主応力差）は乾燥密度および含水比との相関性が認められたが、変形特性（変形係数 E_{50} ）には、乾燥密度および含水比との明瞭な相関性は認められなかった。また、いずれの力学特性にも有効粘土乾燥密度との明瞭な相関性は認められなかった。

また、吹付け施工において混合率が 20%程度と高くなっている供試体においては、リバウンド等により砂とベントナイトが材料分離している可能性が考えられ、強度、変形係数が低下する傾向が認められた。

したがって、吹付け施工に関しては、練り混ぜ機械、吹付け機械、および吹付け機械から吹付け部への圧送方法などの改善により、吹付け時のリバウンド発生の抑制や材料圧送時の材料分離の低減が必要であると考えられる。これにより、吹付け施工と転圧施工が混在する箇所での埋戻し土の均質化が図られ、不均一性による応力集中などの発生を抑制できるものと考えられる。

(2) 止水性能

1) 埋戻し土の乾燥密度測定および含水比測定

止水性能（透水）の代替特性（乾燥密度、含水比）を把握するため、乾燥密度測定および含水比測定を実施した。ここでは、吹付け施工と転圧施工の施工後の埋戻し土の品質について比較を行い、品質の差が生じた原因について考察する。施工方法の違いによる物理特性試験結果を表 5.4-3 に示す。

表 5.4-3 施工方法の違いによる物理特性試験結果

項目	吹付け施工			転圧施工		
	平均値	ばらつきの範囲	標準偏差	平均値	ばらつきの範囲	標準偏差
含水比(%)	14.1	13.2~14.9	0.41	15.5	14.1~16.7	0.63
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.749	1.679~1.799	0.031	1.714	1.653~1.788	0.028
締固め度 (%)	96.6	92.8~99.4	1.73	94.7	91.3~98.8	1.57
混合率 (%)	16.9	14.8~20.8	1.35	15.8	15.0~17.0	0.46
有効粘土乾燥密度 (Mg/m ³)	0.636	0.553~0.731	0.045	0.579	0.545~0.646	0.024

乾燥密度の平均値は、吹付け施工が 1.749Mg/m³、転圧施工が 1.714Mg/m³で差異が生じている。含水比の平均値は、転圧施工が 15.5%に比べ、吹付け施工は 14.1%となり吹付け施工が相対的に低い結果である。これは、製造した混合土の含水比が低めの材料を吹付け施

工に主に使用したことが主たる要因である。一方、混合率の平均値は、転圧施工が 15.8% に比べ、吹付け施工は 16.9% となり吹付け施工が相対的に高い結果である。これは、吹付け施工時のリバウンド材は砂の割合が多く、吹付け施工箇所の混合率はベントナイト分が多くなっているためである。すなわち、吹付け施工では、材料分離が生じている可能性が考えられる。

締固め度の平均値は、吹付け施工が 96.6% (最小値 ; 92.8%)、転圧施工が 94.7% (最小値 ; 91.3%) となり、いずれの施工方法でも最小値は 90% 以上の締固め度となっている。

2) 埋戻し土の透水試験

吹付け施工および転圧施工による埋戻し土の止水性を把握するため、透水試験を実施した。

供試体の初期乾燥密度は 1.596~1.727Mg/m³、初期含水比は 13.3~19.0%、ベントナイト混合率は 15.1~20.9% であり、得られた透水係数は 7.07×10^{-12} ~ 1.83×10^{-11} m/s となっている。

透水係数には乾燥密度および有効粘土乾燥密度との相関が見られるが、相関係数は $R^2=0.2\sim0.3$ と低い結果となった。有効粘土乾燥密度が高くなるにつれて透水係数の値が小さくなる傾向は、図 5.4-38 に示す既往の研究事例[5]と整合する結果となっている。また、今回の試験で得られた透水係数は、有効粘土乾燥密度が 0.55~0.63Mg/m³ の時の値であり、 10^{-12} ~ 10^{-11} m/s とのオーダーとなっている。この透水係数のオーダーについても既往の研究事例と整合している。

なお、今回の試験における透水係数と乾燥密度および有効粘土乾燥密度の相関関係においては、施工方法の違いによる透水係数の差異は認められない結果が得られている。

当該地点の周辺岩盤の透水係数[6]は、最小値を示す地層で 7.8×10^{-8} m/s となっており、今回の実施した上部埋戻し土の透水係数 (7.07×10^{-12} ~ 1.83×10^{-11} m/s) は、周辺岩盤より 3 オーダー低い値となっている。

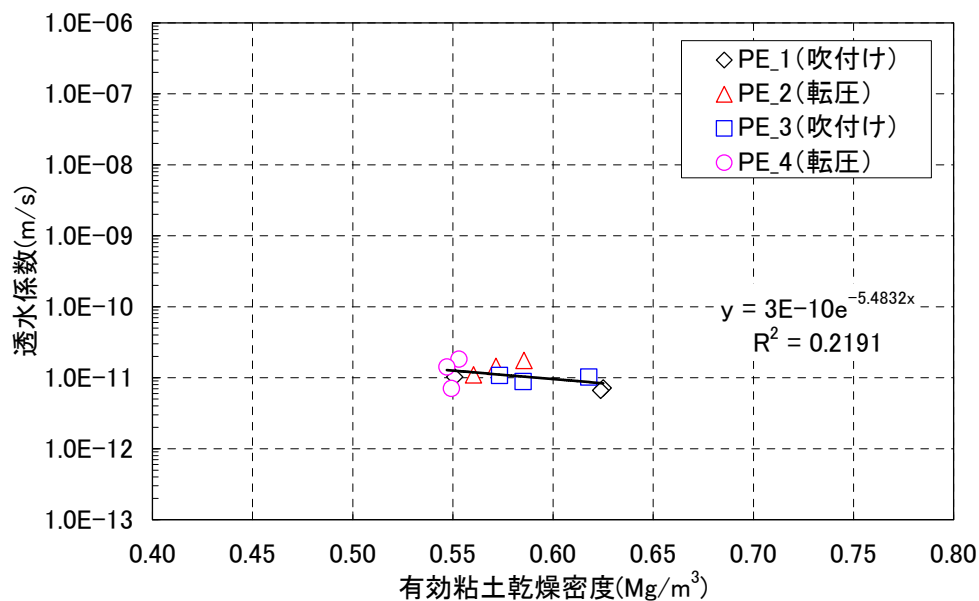


図 5.4-37 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係 (再掲)

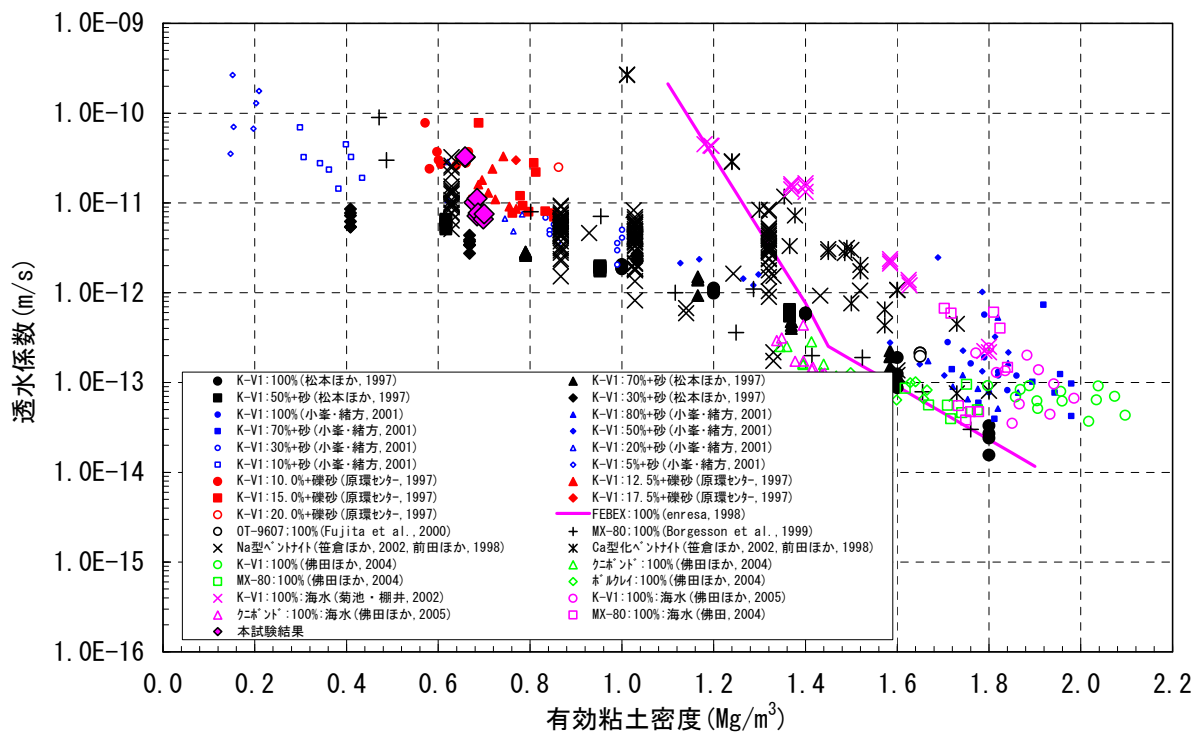


図 5.4-38 既往研究における透水係数と有効粘土密度の関係[5]

5.4.4 初期性能確認試験の課題の抽出

今年度実施した試験結果および既往研究成果を踏まえて、初期性能確認試験の課題を以下にまとめる。

(1) 施工時の含水比管理に関する検討

今年度実施した試験結果および既往研究を踏まえると、含水比をパラメータとした不飽和条件での一軸圧縮試験データを蓄積する必要があり、上部埋戻し土の施工に際しては、含水比の管理が容易な施工機械の選定、改良を試行する必要性があるものと考えられる。

今回の試験結果では、吹付け施工、転圧施工ともに試験結果に変動が目立ち、特に吹付け施工の試験結果で顕著となった。目標含水比の検討および現場施工における品質の均一性確保が今後の課題と考えられる。

(2) 吹付け機械による埋戻し土の施工方法に関する検討

吹付け施工において混合率が20%程度と高くなっている供試体においては、リバウンド等により砂とベントナイトが材料分離している可能性が考えられ、強度、変形係数が低下する傾向が認められた。したがって、吹付け施工に関しては、練り混ぜ機械、吹付け機械、および吹付け機械から吹付け部への圧送方法などの改善により、吹付け時のリバウンド発生を抑

制や材料圧送時の材料分離の低減が必要であると考えられる。これにより、吹付け施工と転圧施工が混在する箇所での埋戻し土の均質化が図られ、不均一性による応力集中などの発生を抑制できると考えられる。

(3) 埋戻し土の透水性に関する検討

透水係数には乾燥密度および有効粘土乾燥密度との相関性が見られ、周辺岩盤より 3 オーダー低い透水係数が得られた。しかし、上記の相関性は、相関係数が $R^2=0.2\sim 0.3$ と低く、止水性能（透水）の代替え特性として、乾燥密度や有効粘土乾燥密度を施工管理および初期性能確認のために適用するにあたっては、試験データの蓄積を図りばらつきを評価する必要があると考えられる。

(4) 閉鎖後の物理・化学的安定性の確保性能に関する評価

再冠水時においては、ベントナイト混合土を採用した場合の埋戻し土も膨張圧が緩衝材に比べ小さいものの発生することが明らかになった。したがって、これらの部材の膨潤圧および強度・変形特性が不飽和状態から飽和状態に至る時間的変化を考慮して、緩衝材の変形や密度変化への影響を検討する必要があると考えられ、埋戻し土の施工から閉鎖後の再冠水に至る力学的境界条件（拘束圧など）や水理境界条件（不飽和から飽和）などの変化を考慮した予測解析を実施し、その結果を考慮した試験の実施が望まれる。

(5) 埋戻し土の構造異方性および施工境界の力学特性、水理特性の検討

今回実施した吹付け施工および転圧施工後のサンプリング方向は、施工層と直角方法であったため、構造異方性について確認できていない。したがって、施工層と平行方向にサンプリングを実施し、構造異方性が無いか品質を確認することが望まれる。

また、吹付け施工と転圧施工の施工境界部の存在が埋戻し土の力学・水理特性に及ぼす影響については把握されていない。今後、施工境界部のサンプリングを実施し、室内試験により、その影響を把握することが望まれる。

【参考文献】

- [1] 河野伊一郎、西垣誠：室内透水試験法に関する 2、3 の考察、土質工学会論文報告集、Vol.22、No.4、pp.181-190、1982.
- [2] Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International D5084-10.
- [3] 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2 地層処分の工学技術、平成 11 年 11 月、JNC TN1400 99-022
- [4] 高治ほか：緩衝材の静的力学特性（研究報告）、核燃料サイクル開発機構 東海事業所、JNC TN8400 99-041、1999 年 11 月
- [5] 土木学会エネルギー委員会、余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、p.151、2009.07
- [6] 日本原燃株式会社、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書、平成 9 年 1 月 平成 9 年 9 月（一部補正）

第6章 ベントナイト系材料特性測定

第6章 ベントナイト系材料特性測定

6.1 ベントナイト系材料特性測定試験の概要

【目的】

本試験は、材料特性に関する知見が十分に得られていない上部埋戻し材の候補材料の一つであるベントナイト混合土について、材料特性の把握を目的とし、水理特性を把握するため、不飽和から飽和へ遷移する時における吸水に伴う変形特性を把握するための試験を行う。また、強度特性および圧密特性を把握するために、強度試験（圧密非排水三軸圧縮強度試験、変形特性を求めするための繰返し三軸試験、弾性波速度測定）、圧密試験、および差圧型透水試験を実施する。

【まとめ】

給水に伴う変形特性を把握するための試験を実施した結果、本試験に用いたベントナイト混合土のベントナイト混合率（15%）では、全試験ケース（鉛直載荷圧 100、500、1000kPa）で初期状態よりも圧縮されることがわかった。ベントナイトの配合率によっては、吸水に伴う変形よりも鉛直圧の載荷による変形の方が、支配的になることがわかった。また、鉛直圧や給水前の供試体の飽和度により、給水後の挙動が影響することもわかった。

一方、再冠水に伴う飽和後の力学特性・圧密特性・透水特性を評価するための試験を実施し、各パラメータの取得ができた。ベントナイトの配合率の検討も含めて、緩衝材からの膨潤圧や岩盤のクリープの相互作用を考慮して試験的・解析的に調査していく必要があると考えられる。

6.1.1 実施概要

上部埋戻し材の有すべき機能としては、「施工性」・「透水性」・「力学的安定性」・「物理・化学的安定性」が挙げられる。本業務では、これらの機能に関連する材料特性の知見が十分に得られていない上部埋戻し材の候補材料の一つであるベントナイト混合土について、水理特性、強度特性、圧密特性を把握することを目的とし、吸水に伴う変形測定試験、圧密非排水三軸圧縮強度試験（ \overline{CU} ）、変形特性を求めるための繰り返し三軸試験、圧密試験および透水試験を実施した。

試験項目を表 6.1-1 に、試験条件を表 6.1-2 に示す。試験に使用する供試体は、施工確認試験（上部埋戻し材施工）で使用するベントナイト混合土と同じ配合（クニゲルV1：三沢砂＝15：85）の材料とし、室内で作製した供試体を使用する。同材料の実施した締固め試験結果を図 6.1-1 に示す。この結果と表 6.1-2 に示す試験条件から試験仕様を設定すると、試験に使用する供試体の仕様は表 6.1-3 に示す通りとなる。

表 6.1-1 試験項目

測定内容	測定項目	試験方法
水理特性(吸水特性)	吸水特性 変形特性	吸水に伴う変形測定試験
強度特性	三軸圧縮強度 変形特性	圧密非排水三軸圧縮強度試験 変形特性を求めるための繰り返し三軸試験
圧密特性	圧密係数	段階载荷による圧密試験
透水特性	透水係数	差圧型の透水試験

表 6.1-2 試験条件

試験項目	乾燥密度 (締固め 規定値、%)	含水比	試験数量 (拘束圧、供試体個数)
吸水に伴う 変形測定試験 (計 15 供試体)	C 値=100	W_{opt}	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
	C 値=95	W_{opt}	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
	C 値=90	W_{opt}	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
	C 値=95	$W_{opt}+2$	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
	C 値=95	$W_{opt}+4$	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
圧密非排水三軸圧縮試験 (計 15 供試体、5 試験)	C 値=100	W_{opt}	3(200kPa、400kPa、600kPa、各 1)
	C 値=100	$W_{opt}+2$	
	C 値=95	W_{opt}	
	C 値=95	$W_{opt}+2$	
	C 値=90	$W_{opt}+2$	
弾性波測定 (4 条件、4 供試体)	C 値=95	W_{opt}	1(100kPa)
	C 値=95	$W_{opt}+2$	
	C 値=100	W_{opt}	
	C 値=100	$W_{opt}+2$	
変形特性を求めるための繰 り返し三軸試験 (4 条件、4 供試体)	C 値=95	W_{opt}	1(100kPa)
	C 値=95	$W_{opt}+2$	
	C 値=100	W_{opt}	
	C 値=100	$W_{opt}+2$	
弾性波測定(飽和状態) (4 条件、4 供試体)	C 値=95	W_{opt}	1(100kPa)
	C 値=95	$W_{opt}+2$	
	C 値=100	W_{opt}	
	C 値=100	$W_{opt}+2$	
変形特性を求めるための繰 り返し三軸試験(飽和状態) (4 条件、4 供試体)	C 値=95	W_{opt}	1(100kPa)
	C 値=95	$W_{opt}+2$	
	C 値=100	W_{opt}	
	C 値=100	$W_{opt}+2$	
段階载荷による圧密試験 (2 条件、2 供試体)	C 値=100	W_{opt}	1(8 段階载荷、6 段階除荷物)
	C 値=95	W_{opt}	1(8 段階载荷、6 段階除荷物)
差圧型透水試験 (3 条件、3 供試体)	C 値=100	$W_{opt}-2$	1
	C 値=100	$W_{opt}+2$	1
	C 値=100	$W_{opt}+4$	1

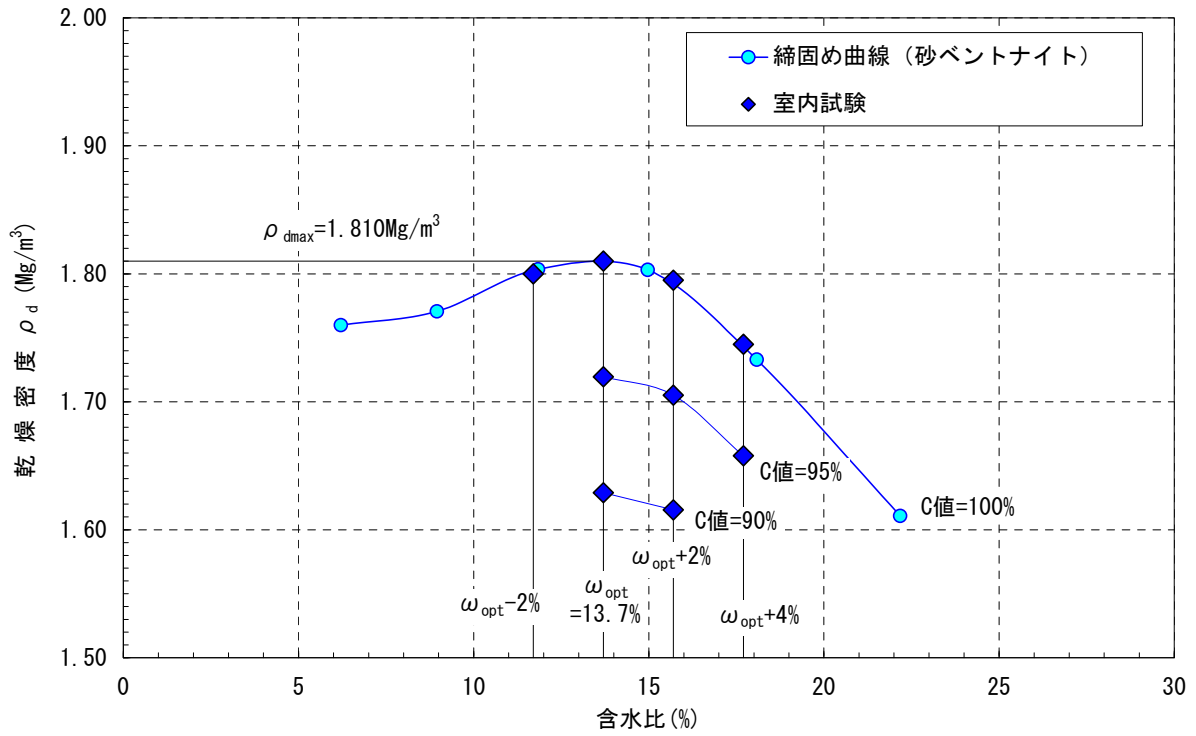


図 6.1-1 ベントナイト混合土の締固め曲線と室内試験供試体仕様

表 6.1-3 試験仕様

試験項目	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	試験数量 (拘束圧、供試体個数)
吸水に伴う 膨潤変形測定試験	1.810	13.7	3(100kPa、500kPa、1000kPa、各 1)
	1.720	13.7	
	1.629	13.7	
	1.795	15.7	
	1.745	17.7	
圧密非排水三軸圧縮試験	1.810	13.7	3(200kPa、400kPa、600kPa、各 1)
	1.720	13.7	
	1.795	15.7	
	1.705	15.7	
	1.616	15.7	
弾性波測定 (不飽和状態)	1.810	13.7	1(100kPa)
	1.720	13.7	
	1.795	15.7	
	1.705	15.7	
変形特性を求めるための繰 り返し三軸試験 (不飽和状態)	1.810	13.7	1(100kPa)
	1.720	13.7	
	1.795	15.7	
	1.705	15.7	
弾性波測定 (飽和状態)	1.810	13.7	1(100kPa)
	1.720	13.7	
	1.795	15.7	
	1.705	15.7	
変形特性を求めるための繰 り返し三軸試験 (飽和状態)	1.810	13.7	1(100kPa)
	1.720	13.7	
	1.795	15.7	
	1.705	15.7	
段階载荷による圧密試験	1.810	13.7	1(8段階载荷、6段階除荷物)
	1.720	13.7	1(8段階载荷、6段階除荷物)
差圧型透水試験	1.800	11.7	1
	1.795	15.7	1
	1.745	17.7	1

6.2 吸水に伴う変形測定試験

図 6.2-1 に吸水に伴う変形特性試験の概略図を示す。本試験は、供試体の側方への変形を抑制した状態において、一定鉛直圧下で砂・ベントナイト混合土が吸水し、変形する際に発生する一次元変形量および単位時間あたりの吸水量を同時に測定する試験である。供試体は直径 60mm、高さ 10mm を標準とする。

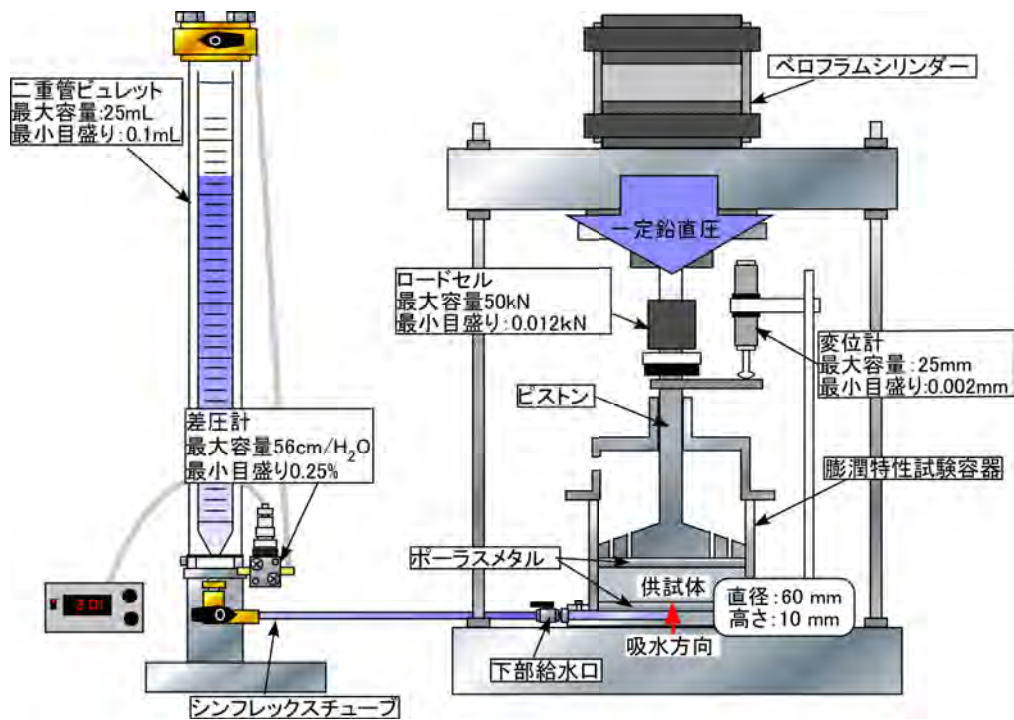


図 6.2-1 膨潤圧発生に伴う吸水量測定試験装置概略図

6.2.1 試験方法

吸水に伴う変形特性試験は、一定鉛直圧下での一次元変形量および単位時間当たりの吸水量を同時に測定する試験である。試験装置は、二重管ビュレット(最大容量:25mL, 最小目盛:0.1mL)、ベロフラムシリンダー、ピストン、ロードセル(最大容量:50kN, 最小目盛:0.012kN)、変位計(最大容量:25mm, 最小目盛:0.002mm)および SUS316L ステンレス製膨潤特性試験容器で構成される。本試験では、SUS316L ステンレス製リングにより側方方向の変形のみを拘束した状態で試験を行う。

一定鉛直圧下における変形量および吸水量測定試験装置は 4 つの供試体を同時に試験できるようになっており、4 連中 2 連は差圧計(最大容量 56cm/H₂O, 最小目盛:0.25%)を有している。差圧計を有する 2 つの供試体の吸水量は、二重管ビュレット管の減少量を目視で計測すると同時に差圧計で測定する。吸水に伴う変形特性試験の試験手順を以下に示す。

- 1) 膨潤特性容器を組み立てて一定鉛直圧下における変形量および吸水量測定試験装置に設置する。

- 2) 二重管ビュレットの水を全て抜いた後に目盛が 25mL の位置まで蒸留水を入れる。差圧計がついている二重管ビュレットは、目盛が 25mL で差圧計をゼロセットする。
- 3) 二重管ビュレットの目盛が 0mL の位置まで蒸留水を入れた。このとき、0mL の目盛を越す位置まで蒸留水を入れて下げる、を数回繰り返しシンフレックスチューブの中の気泡がなくなるようにする。
- 4) 二重管ビュレットと膨潤特性容器をシンフレックスチューブで接続する。
- 5) 膨潤特性容器の給水コックを閉め、二重管ビュレットの給水コックは開けた状態にする。このときの二重管ビュレットの目盛を読み、経過時間が 0 のときの水位とする。
- 6) データロガーをスタートさせる。
- 7) 1 分間以内で所定の鉛直圧を載荷する。
- 8) 供試体の変形量が定常化(双曲線近似の漸近線の 95%を越す程度とした。)するまで静置する。
- 9) 4 つの供試体について、7)~8)の手順を行う。
- 10) 全ての供試体の変形量が定常化したら、給水を開始する。
- 11) 二重管ビュレット内の水の減少量を目視により測定する。
- 12) 吸水量初期誤差の補正を以下のとおり行う。
 - ①膨潤特性容器の底板およびポーラスメタルの試験終了後の質量から、試験前の質量を除いた値を膨潤特性容器の底板およびポーラスメタルへ流入した蒸留水の質量とする。
 - ②二重管ビュレット内の蒸留水の減少量の挙動が変化した点までを底板とポーラスメタルへの流入量とする。

試験終了後、図 6.2-2 のように供試体を 3 層に分割して含水比を測定し、供試体への流入量を算出した。試験終了時のビュレット管内の水の減少量から供試体への流入量を引いた値を供試体以外への水の流入量とした。供試体以外への水の流入量を a_{be} とし、式 6.2-1 により算出する。供試体への流入量は、式 6.2-2 により算出した。

$$a_{be} = Q' - \left\{ \frac{(w' - w_0) \times m_s}{100} \right\} \quad \text{式 6.2-1}$$

$$a(t) = Q(t) - \Delta a_{be} \quad \text{式 6.2-2}$$

ここで、 a_{be} は供試体以外への水の流入量 (ml)、 Q' は試験終了時のビュレット管内の水の減少量 (ml)、 w' は試験終了後の含水比の平均値 (%)、 w_0 は初期含水比 (%)、 m_s は試料の乾燥質量 (g)、 $a(t)$ は時間 t における供試体への流入量 (ml)、 $Q(t)$ は時間 t におけるビュレット管内の水の減少量 (ml) とした。ただし、吸水量がマイナスになる場合、供試体への流入量は 0ml とした。

鉛直ひずみは式 6.2-3 により算出した。本試験において、鉛直ひずみは膨潤を正の値とした。

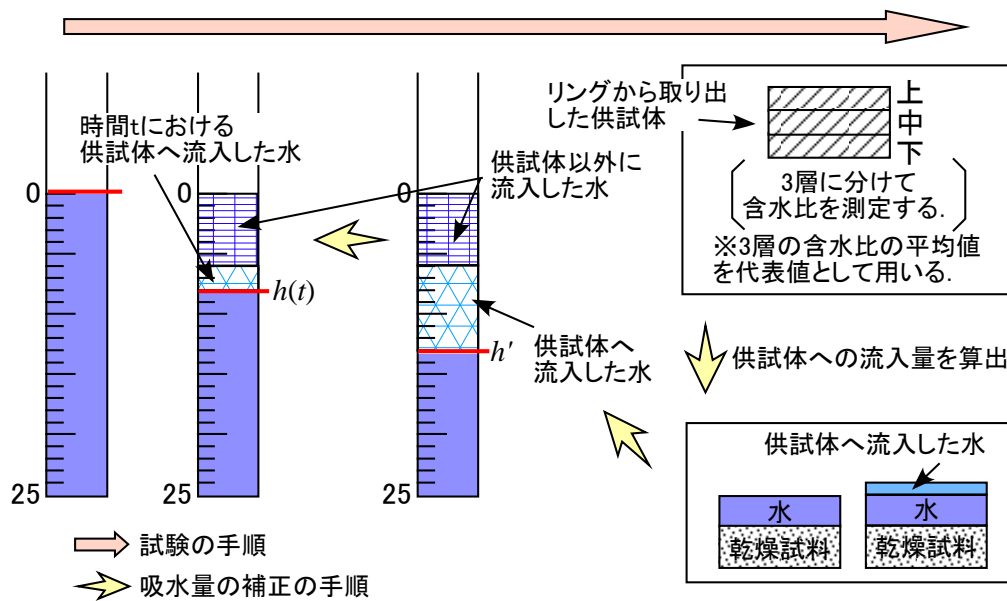


図 6.2-2 供試体への水の流入量の算出方法

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta d}{H} \times 100 \quad \text{式 6.2-3}$$

ここで、 ε_v は鉛直ひずみ (%) (膨潤を正)、 Δd は変位 (mm)、 H は初期供試体高さ (mm) とした。

給水開始からの鉛直ひずみは、式 6.2-4 により算出した。

$$\varepsilon_v' = \frac{\Delta d'}{H'} \times 100 \quad \text{式 6.2-4}$$

ここで、 ε_v' は給水開始からの鉛直ひずみ (%) (膨潤を正)、 $\Delta d'$ は給水開始からの変位 (mm)、 H' は給水開始時の供試体高さ (mm) とした。

飽和度は、式 6.2-5 により算出した。

$$S_r' = \frac{w' \times \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{m_s / (A \times h')} - 1 \right) \times \rho_w} \quad \text{式 6.2-5}$$

ここで、 S_r' は給水開始時の飽和度 (%)、 w' は試験開始時の含水比 (%)、 ρ_s は試料の土粒子の密度 (Mg/m^3)、 A は供試体の断面積 (m^2)、 h' は給水開始時の供試体高さ (m)、 ρ_w は水の密度 ($1.0 \text{ Mg}/\text{m}^3$) とした。

6.2.2 試験結果

表 6.2-1 は、各段階における供試体の性状、図 6.2-3 は、各鉛直圧下における吸水量と経過時間の関係、図 6.2-4 は各鉛直圧下における変位および鉛直ひずみと経過時間の関係、図 6.2-5 は、各鉛直圧下における給水開始からの変位および給水開始からの鉛直ひずみと経過時間の関係である。ただし、ここでいう経過時間とは全て試験開始からの経過時間である。

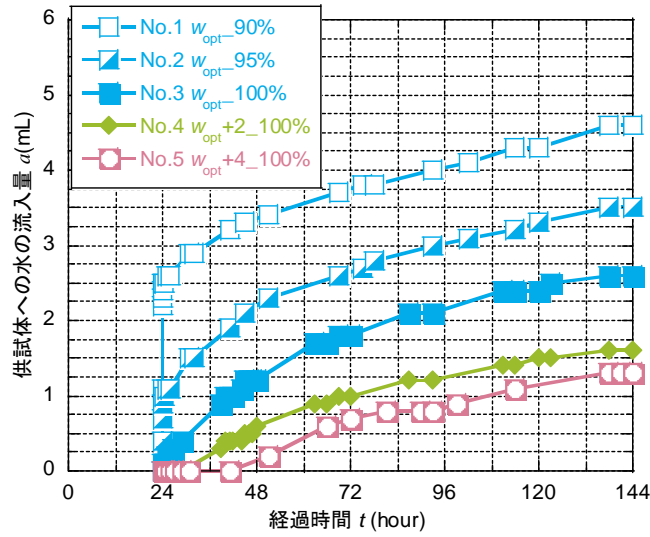
表 6.2-1 および図 6.2-3 より、鉛直圧 500kPa 下および鉛直圧 1000kPa 下、 $W_{opt}+2\%$ および $W_{opt}+4\%$ 、締固め規定値 C 値=100%の供試体 No.9, 10, 14 および 15 は、給水開始時に飽和度が 100%を超えているため初期の含水量以上は吸水しない。しかし、図 6.2-3 では、式 6.2-1 で算出した吸水量がマイナスになる場合、試験終了後の含水比が試験開始時の含水比よりも小さくなっているため、鉛直圧の载荷により供試体内の水が抜けていると考えられる。よって、式 6.2-4 で算出した飽和度が 100%を超える場合、供試体は圧密する傾向があると考えられる。

図 6.2-4 より、鉛直圧の载荷により全ての条件で圧縮・圧密する傾向が認められた。鉛直ひずみは、鉛直圧の増加に伴い大きくなる傾向を示した。しかし、最適含水比 W_{opt} および締固め規定値 C 値=100%の供試体 No.8 および No.13 の場合、鉛直圧 1000kPa 下より 500kPa 下で鉛直ひずみが大きくなった。供試体作製時の乾燥密度の大きさが、No.8 (鉛直下 500kPa) の方が No.13 (鉛直下 1000kPa) よりも大きかったことも要因として考えられるが、今後再現性に関する確認を要する。

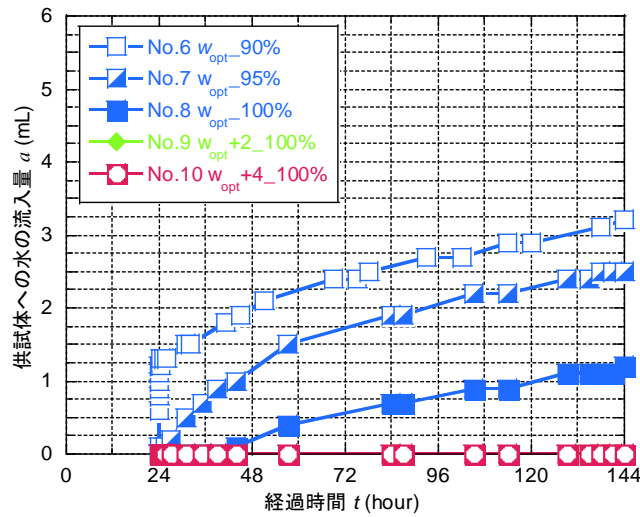
図 6.2-5 より、鉛直圧 100kPa 下では、供試体 No.3 および No.5 で膨潤する傾向が認められた。供試体 No.3 および No.5 は、締固め規定値とともに C 値=100%であり、No.3 は含水比 W_{opt} 、No.5 は含水比 $W_{opt}+4\%$ である。吸水に伴う膨潤による鉛直ひずみは 0.07~0.11%程度であった。また、各鉛直圧下で、給水開始時の飽和度の上昇に伴い、圧縮方向の鉛直ひずみが大きくなる傾向を示した。これは、飽和度の上昇に伴い、強度が低下したことが要因として考えられる。全ての鉛直圧下で最も鉛直ひずみが大きくなったのは、最適含水比 W_{opt} および締固め規定値 C 値=90%の場合であった。

表 6.2-1 各段階における供試体の性状

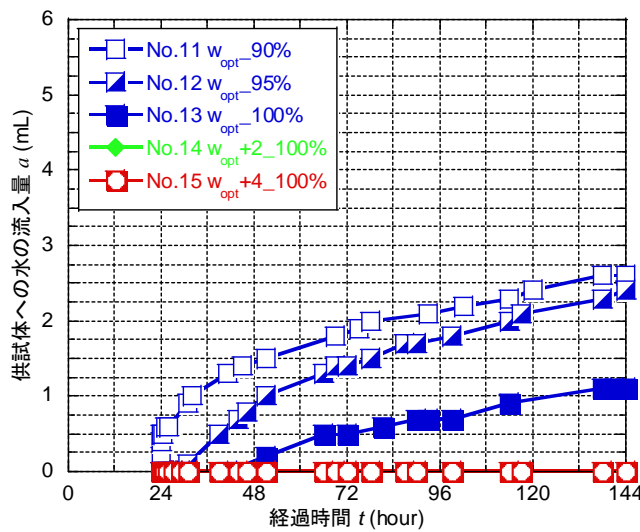
供試体 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
鉛直圧 (kPa)	100					500					1000				
初期状態(経過時間 $t=0$ hour)															
含水比 w_0 (%)	13.5	13.5	13.5	15.4	16.9	13.5	13.5	13.5	15.5	17.8	13.5	13.3	13.4	15.2	17.6
乾燥密度 ρ_{d0} (Mg/m ³)	1.64	1.73	1.82	1.81	1.76	1.64	1.74	1.85	1.83	1.78	1.63	1.71	1.83	1.84	1.77
供試体高さ H_0 (mm)	10.88	10.68	10.79	10.82	10.82	10.72	10.79	10.88	10.91	10.74	10.77	10.92	10.85	10.85	10.89
飽和度 S_{r0} (%)	56.0	64.6	74.2	83.5	85.2	56.0	65.8	79.1	87.6	92.0	54.9	61.1	76.0	86.5	88.6
給水開始時($t=24$ hour)															
乾燥密度 ρ_{d1} (Mg/m ³)	1.75	1.78	1.89	1.88	1.82	1.81	1.88	1.99	1.96	1.96	1.83	1.85	1.94	2.02	2.01
供試体高さ H' (mm)	10.22	10.37	10.38	10.43	10.48	9.85	10.06	10.16	10.19	9.79	9.59	10.09	10.24	9.85	9.55
飽和度 $S_{r'}$ (%)	66.1	70.1	83.8	93.7	93.7	70.4	81.1	99.9	110.0	123.8	75.6	76.9	91.7	120.7	136.8
試験終了時($t=144$ hour)															
乾燥密度 ρ_{d11} (Mg/m ³)	1.75	1.78	1.89	1.88	1.82	1.81	1.88	1.99	1.96	1.96	1.85	1.86	1.94	2.03	2.02
供試体高さ H'' (mm)	10.19	10.37	10.39	10.43	10.49	9.74	10.02	10.15	10.18	9.77	9.51	10.04	10.23	9.85	9.54
飽和度 $S_{r''}$ (%)	111.6	105.1	112.4	111.5	106.2	107.3	110.4	115.8	110.8	124.6	107.6	105.1	105.3	121.0	137.3



(a) 鉛直圧 100kPa



(b) 鉛直圧 500kPa

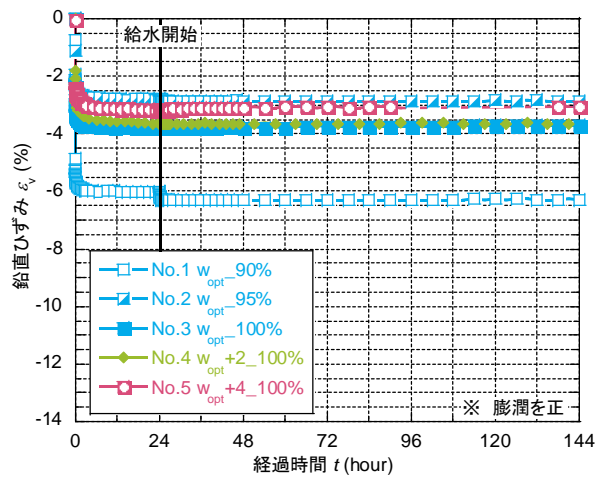
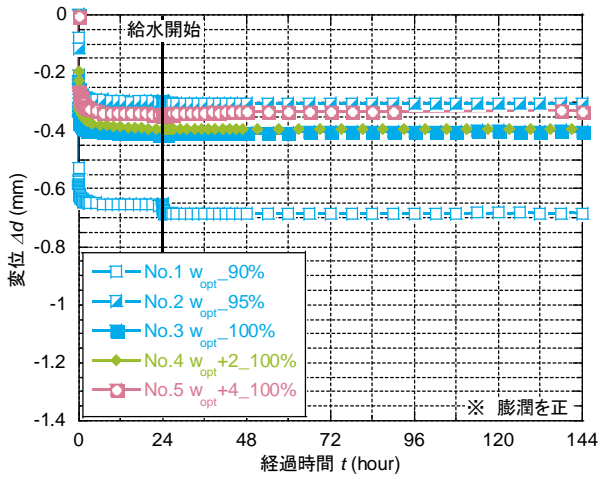


(c) 鉛直圧 1000kPa

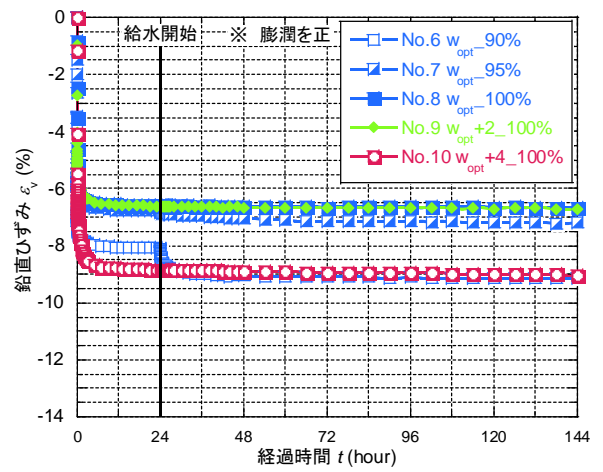
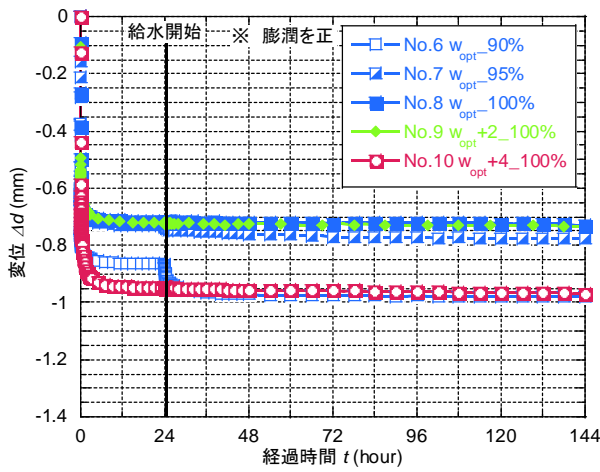
図 6.2-3 各鉛直圧における吸水量と経過時間の関係

変位 (mm)

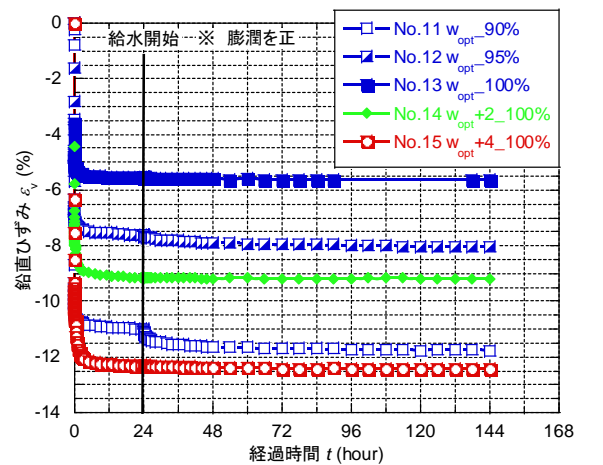
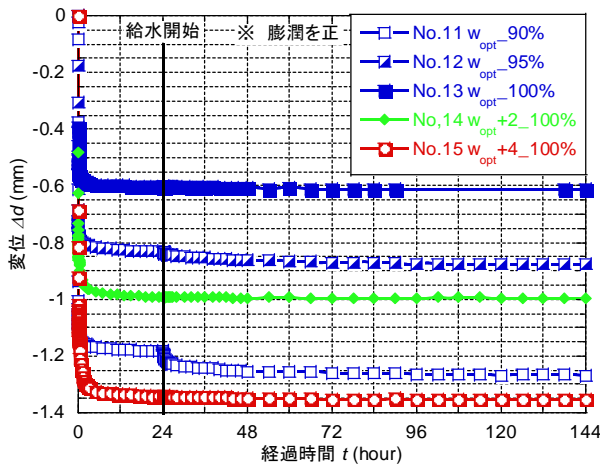
ひずみ (%)



(a) 鉛直圧 100kPa

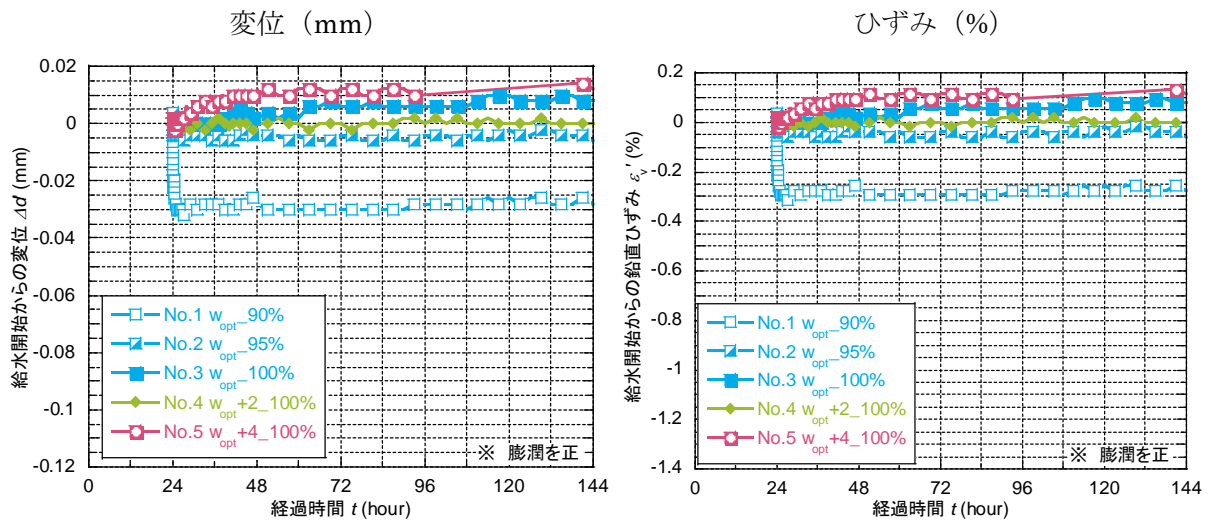


(b) 鉛直圧 500kPa

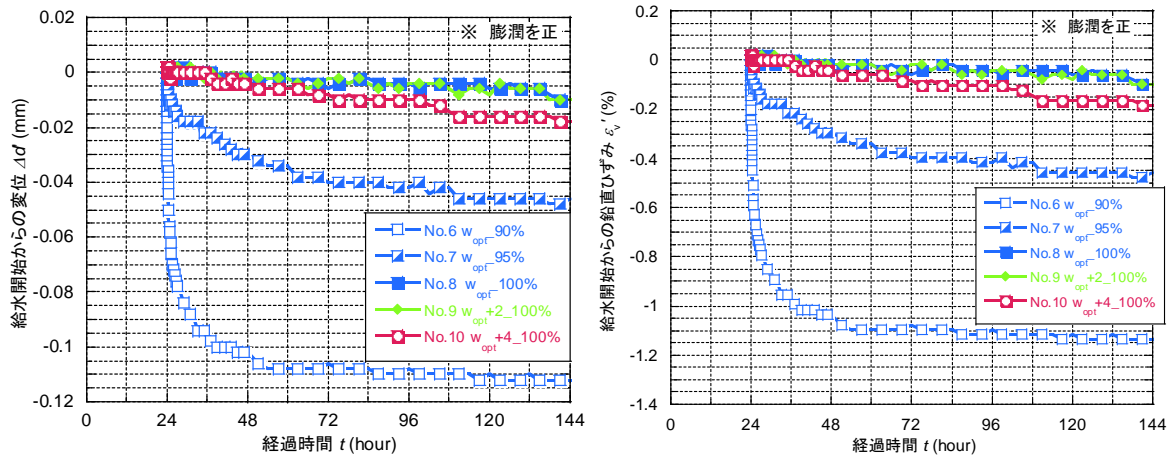


(c) 鉛直圧 1000kPa

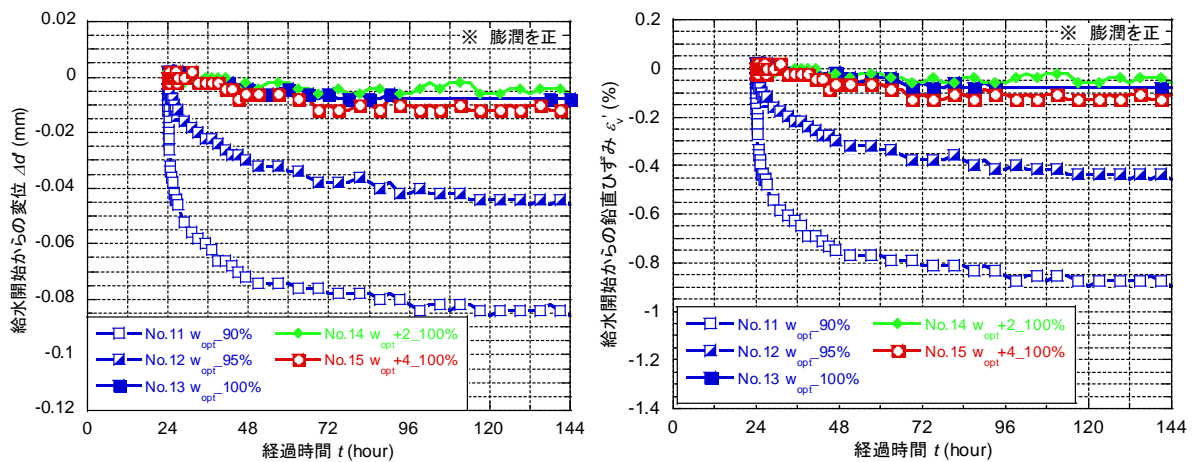
図 6.2-4 各鉛直圧下における変位および鉛直ひずみと経過時間の関係



(a) 鉛直圧 100kPa



(b) 鉛直圧 500kPa



(c) 鉛直圧 1000kPa

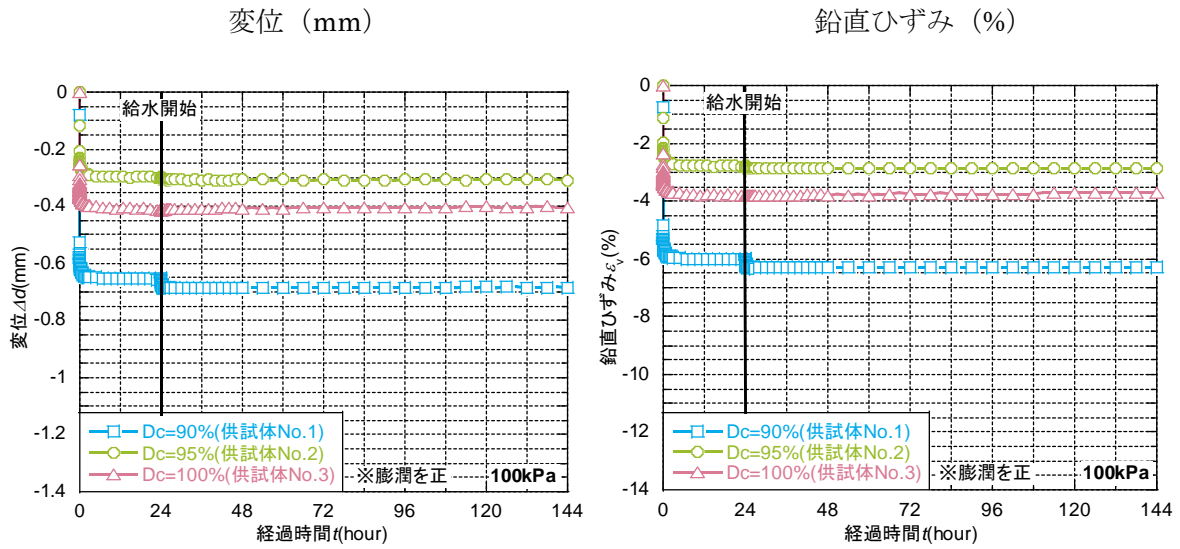
図 6.2-5 各鉛直圧下における給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係

締固め規定値に着目して変形特性をまとめる。図 6.2-6 は締固め規定値ごとの載荷後の変位および鉛直ひずみと経過時間の関係である。図 6.2-6 より、鉛直圧 500kPa 下および 1000kPa 下において、締固め規定値の増加に伴い載荷後の鉛直ひずみが小さくなる傾向が認められた。また、鉛直圧 100kPa 下において、載荷後の鉛直ひずみは、締固め規定値 C 値=95%で最も小さくなった。締固め規定値の影響よりも、載荷後の飽和度の増加による強度低下の影響の方が大きかったためであると考えられる。

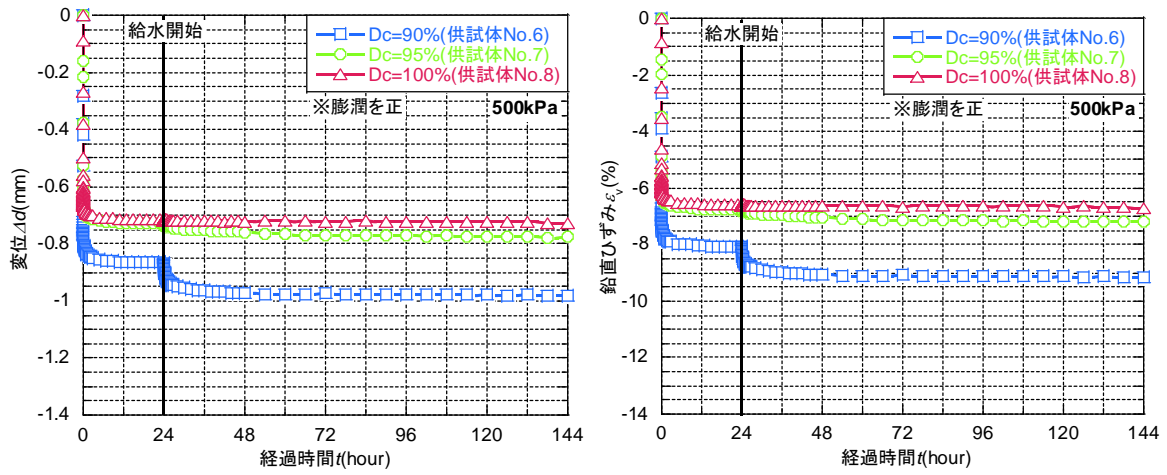
図 6.2-7 は締固め規定値ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係である。図 6.2-7 より、各鉛直圧下において締固め規定値が大きくなると、吸水に伴う圧縮方向の鉛直ひずみは小さくなる傾向を示した。また、鉛直圧 100kPa 下において、供試体作製時の締固め規定値 C 値=100%の場合、膨潤する傾向を示した。鉛直圧 500kPa 下および 1000kPa 下においては、鉛直圧の差異に関わらず、締固め規定値が小さくなるに伴い、鉛直ひずみが大きくなる傾向が認められた。

次に、締固め規定値 C 値=100%の時の供試体の初期含水比の差異に着目して変形特性をまとめる。図 6.2-8 は初期含水比ごとの載荷後の変位および鉛直ひずみと経過時間の関係である。図 6.2-8 より、鉛直圧 100kPa 下においては、初期含水比によらず、載荷後の変位および鉛直ひずみは-3.18~3.80%の範囲内であり、この鉛直圧下では含水比の差異が変位および鉛直ひずみへおよぼす影響はほとんどないと考えられる。鉛直圧 500kPa 下および 1000kPa 下において、初期含水比の増加に伴い圧縮方向の鉛直ひずみは大きくなる傾向が認められた。これは、締固め規定値よりも乾燥密度そのものの影響が大きいためであると考えられる。例えば、鉛直圧 1000kPa の 3 つのケース（供試体 No.13~No.15）では、最適含水比 W_{opt} に近いほど初期乾燥密度が高いため、乾燥密度が高ければ、載荷後の変位および鉛直ひずみが小さいといえる。

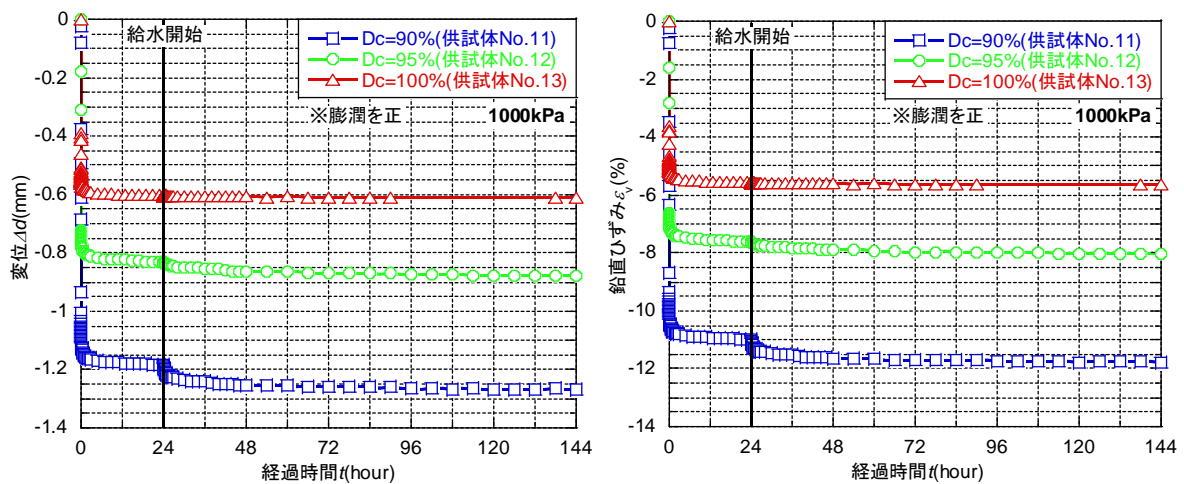
図 6.2-9 は初期含水比ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係である。図 6.2-9 より、鉛直圧 100kPa 下、 W_{opt} および $W_{opt}+4\%$ においてのみ吸水に伴い膨潤する傾向が認められた。鉛直圧 500kPa および 1000kPa 下においては、圧縮する方向に変形したが、0.1%程度の変形量であった。



(a) 鉛直圧 100kPa

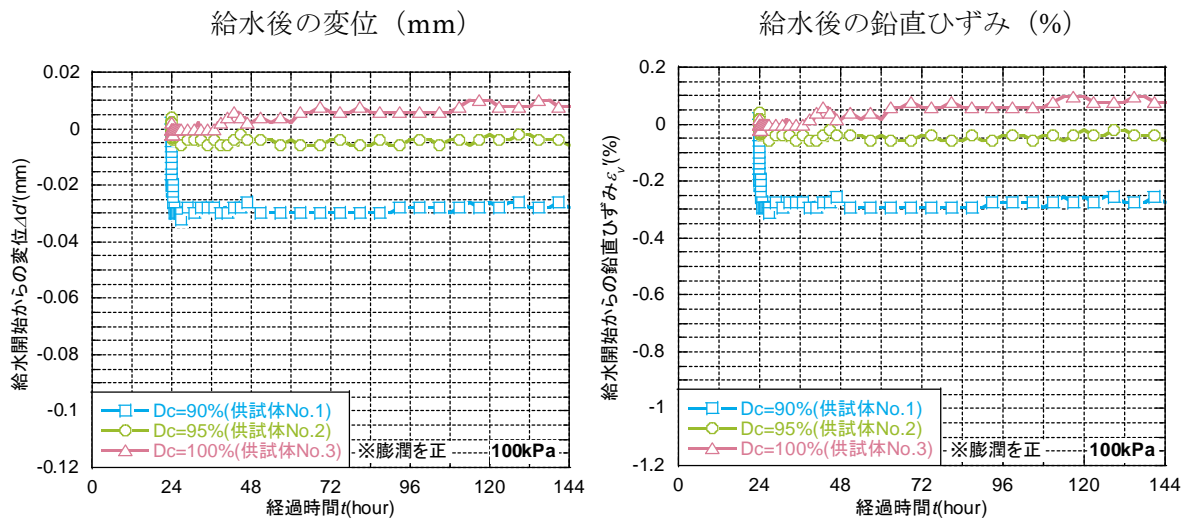


(b) 鉛直圧 500kPa

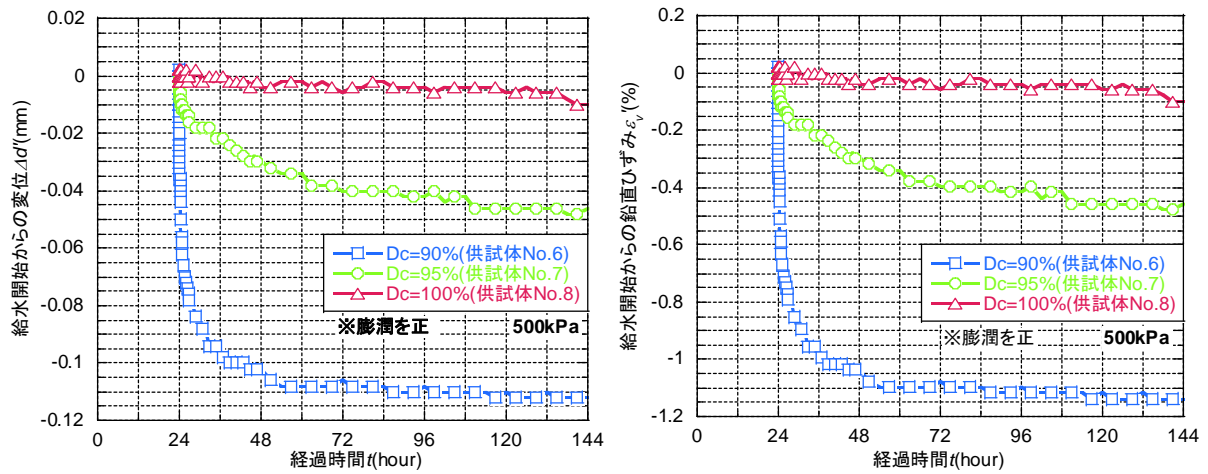


(c) 鉛直圧 1000kPa

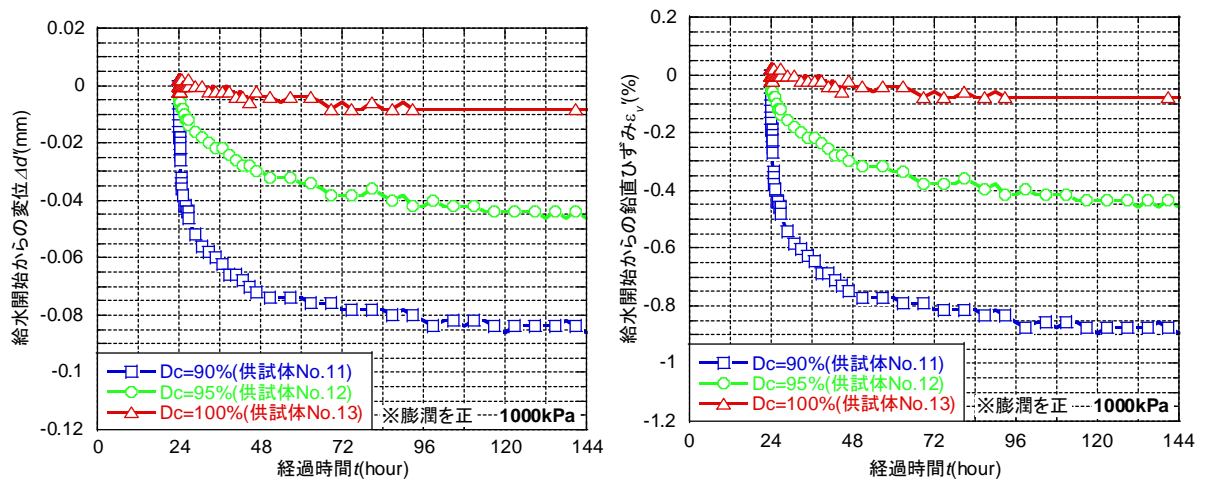
図 6.2-6 締固め規定値ごとの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係



(a) 鉛直圧 100kPa



(b) 鉛直圧 500kPa

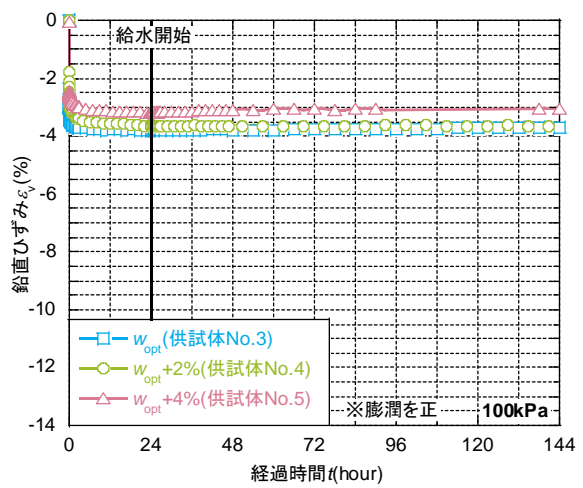
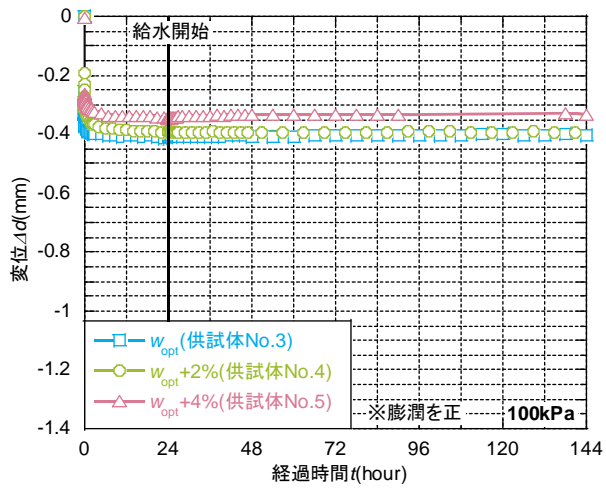


(c) 鉛直圧 1000kPa

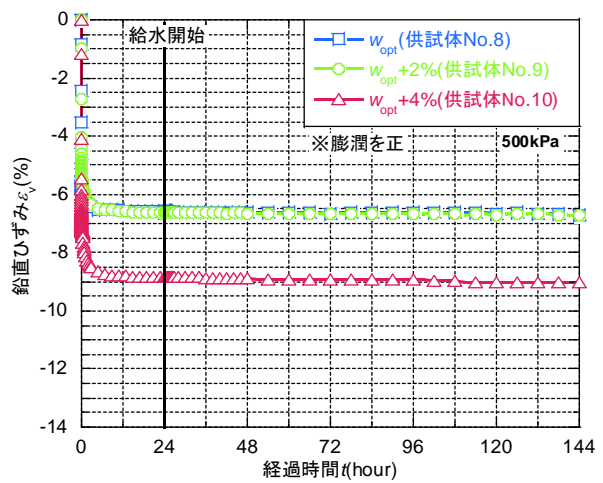
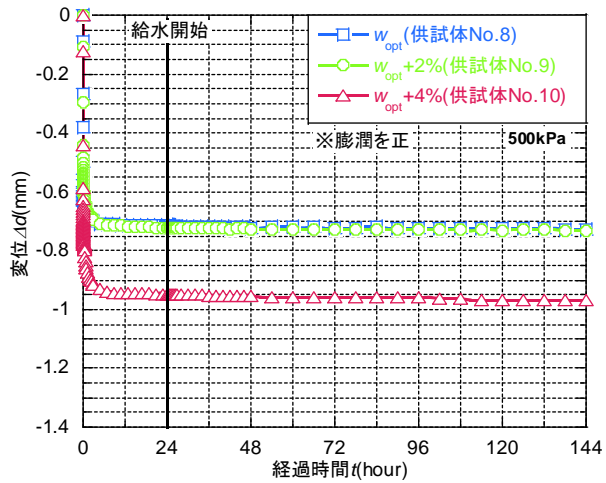
図 6.2-7 締め固め規定値ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係

変位 Δd (mm)

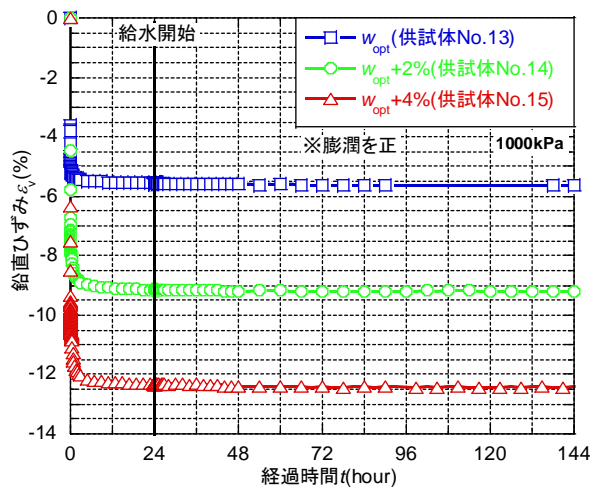
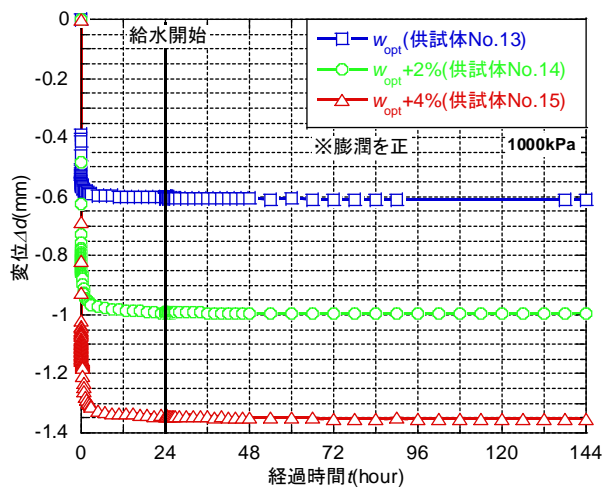
鉛直ひずみ (%)



(a) 鉛直圧 100kPa



(b) 鉛直圧 500kPa

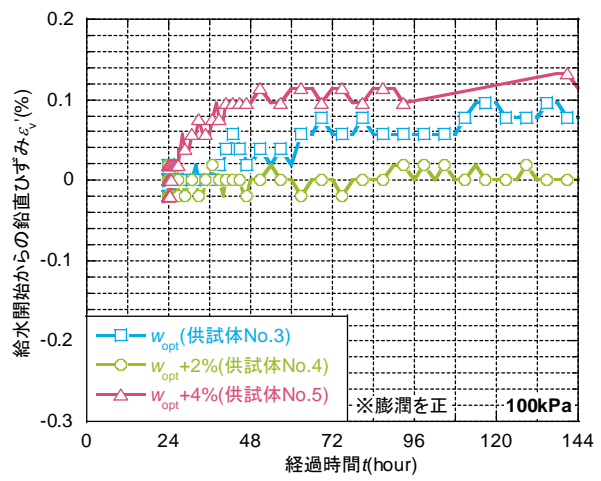
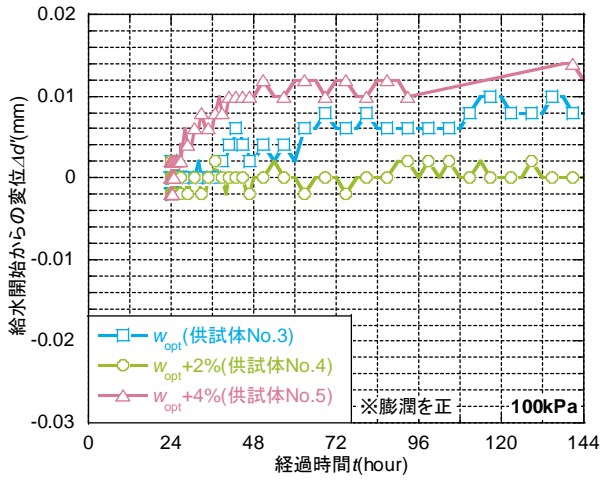


(c) 鉛直圧 1000kPa

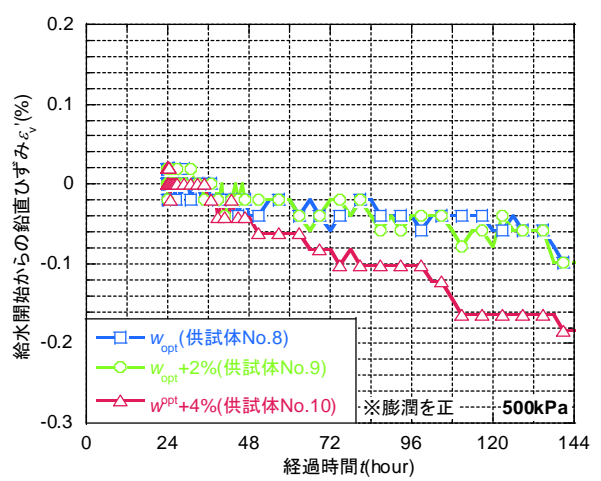
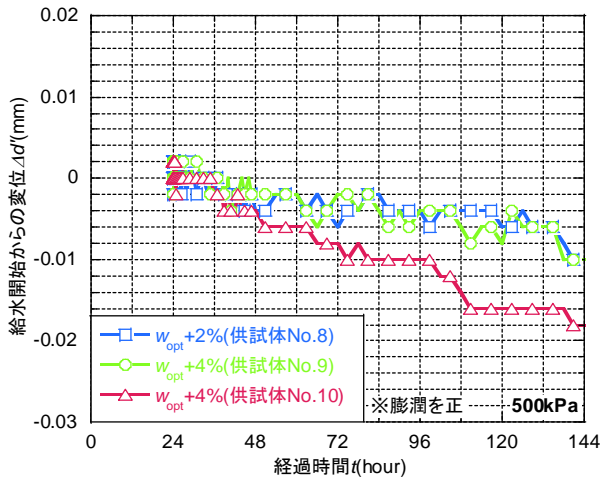
図 6.2-8 初期含水比ごとの载荷後の変位および鉛直ひずみと経過時間の関係

給水後の変位 (mm)

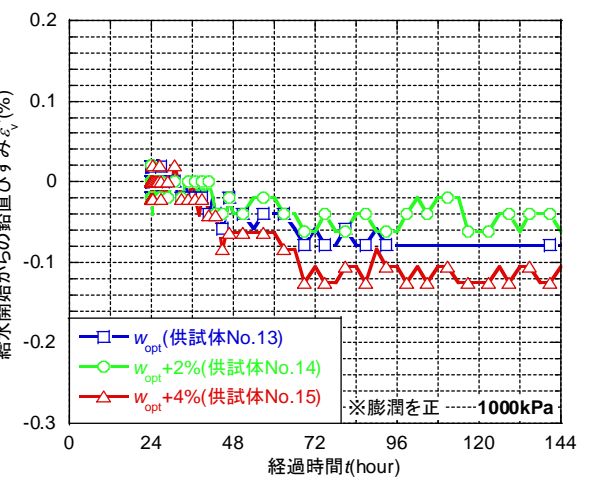
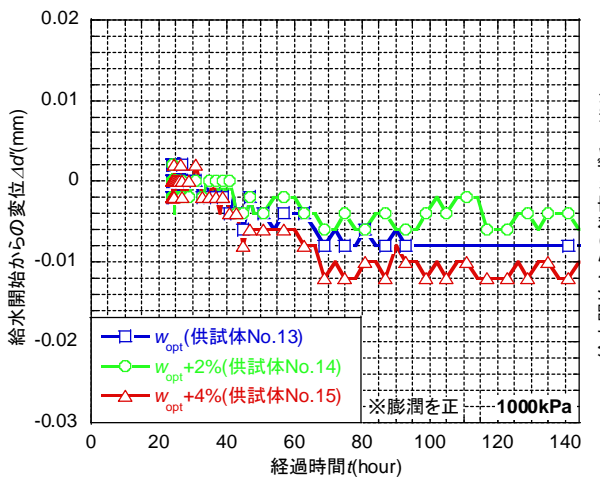
給水後の鉛直ひずみ (%)



(a) 鉛直圧 100kPa



(b) 鉛直圧 500kPa



(c) 鉛直圧 1000kPa

図 6.2-9 初期含水比ごとの給水開始からの変位および鉛直ひずみと経過時間の関係

表 6.2-2～表 6.2-4 に初期状態・鉛直圧載荷後（給水直前）・給水後（試験終了時点）における供試体の乾燥密度と飽和度をまとめた。表中の凡例を表 6.2-4 の下に示す。黄色に反転した試験ケースは給水前に飽和したケースであり、給水後の変化はほとんど発生しなかった。水色に反転したケースも同様に給水前から飽和度が高かったケースであり、鉛直載荷圧力が高いと圧縮され、逆に低いと膨潤するケースも見られた。このことより、給水前の飽和度が給水後の変化へ影響を与えることが考えられる。給水前の飽和度が低い場合は、締固め規定値が低いケースであるため、例外なく給水後も圧縮変形した。

図 6.2-10～図 6.2-14 に初期状態・鉛直圧載荷後（給水直前）・給水後（試験終了時点）の乾燥密度の変化をまとめたグラフを、図 6.2-15～図 6.2-19 に鉛直圧載荷後（給水直前）・給水後（試験終了時点）の到達した鉛直ひずみをまとめたグラフを示す。鉛直圧が大きくなれば最終的な乾燥密度や鉛直ひずみが大きくなる傾向がみられた。また、給水前後の乾燥密度や鉛直ひずみの変化量は、締固め規定値 C 値=90%以外のケースではほとんど発生しなかった。

給水前後の変化量がほとんどなかったことより、飽和度の影響や締固め規定値および初期乾燥密度の変形挙動への影響は、本検討で用いたベントナイト混合土ではあまりないことが考えられる。

表 6.2-2 試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度（鉛直圧 100kPa）

鉛直圧	100					
	初期乾燥密度	給水前乾燥密度	試験後乾燥密度	変位量 (mm)	Sr (初期)	Sr (給水前)
Wopt、C値=90%	1.641	1.746	1.751	-0.028	56.0	66.1
Wopt、C値=95%	1.732	1.782	1.783	-0.006	64.6	70.1
Wopt、C値=100%	1.854	1.894	1.891	0.018	78.6	84.2
Wopt+2、C値=100%	1.810	1.879	1.879	0	83.5	93.6
Wopt+4、C値=100%	1.765	1.823	1.821	0.012	85.2	93.7

表 6.2-3 試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度（鉛直圧 500kPa）

鉛直圧	500					
	初期乾燥密度	給水前乾燥密度	試験後乾燥密度	変位量 (mm)	Sr (初期)	Sr (給水前)
Wopt、C値=90%	1.641	1.785	1.806	-0.112	56.0	70.4
Wopt、C値=95%	1.742	1.869	1.877	-0.046	65.8	81.1
Wopt、C値=100%	1.854	1.985	1.987	-0.01	79.1	99.9
Wopt+2、C値=100%	1.833	1.963	1.965	-0.01	87.6	100.0
Wopt+4、C値=100%	1.781	1.953	1.957	-0.018	92.0	100.0

表 6.2-4 試験段階ごとの乾燥密度および供試体の飽和度（鉛直圧 1000kPa）

鉛直圧	1000					
	初期乾燥密度	給水前乾燥密度	試験後乾燥密度	変位量 (mm)	Sr (初期)	Sr (給水前)
Wopt、C値=90%	1.628	1.828	1.845	-0.086	54.9	75.6
Wopt、C値=95%	1.709	1.850	1.858	-0.046	61.1	76.9
Wopt、C値=100%	1.834	1.942	1.944	-0.008	76.0	91.7
Wopt+2、C値=100%	1.839	2.024	2.025	-0.006	86.5	100.0
Wopt+4、C値=100%	1.766	2.014	2.016	-0.01	88.6	100.0

凡例

給水前に飽和	給水前に飽和度が90%以上	膨潤	圧縮・圧密
--------	---------------	----	-------

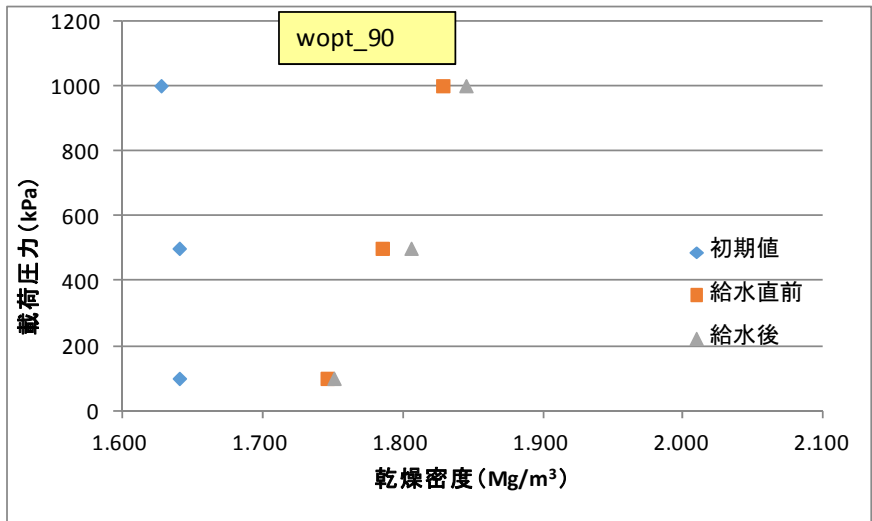


図 6.2-10 初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（Wopt、C 値=90%）

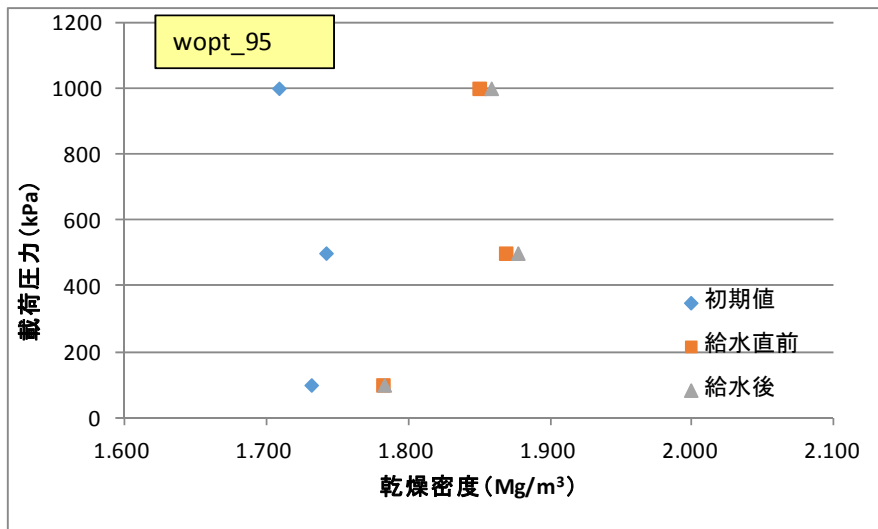


図 6.2-11 初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（Wopt、C 値=95%）

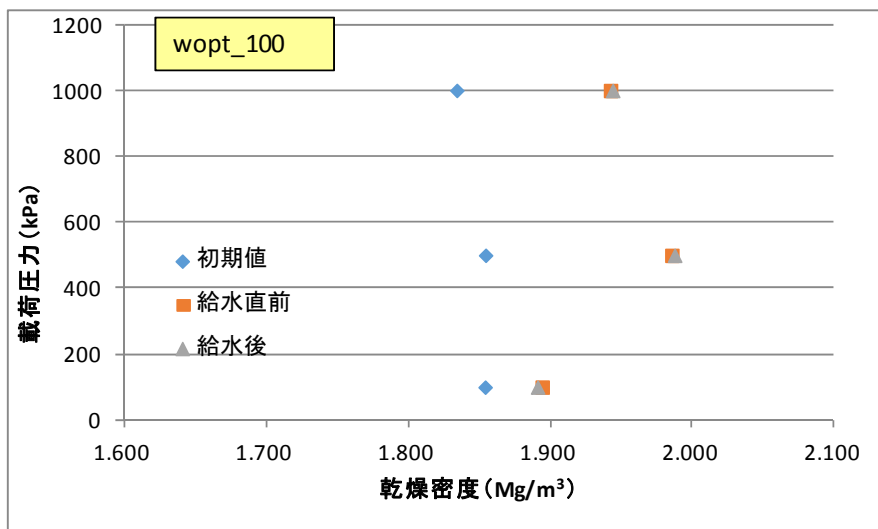


図 6.2-12 初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（Wopt、C 値=100%）

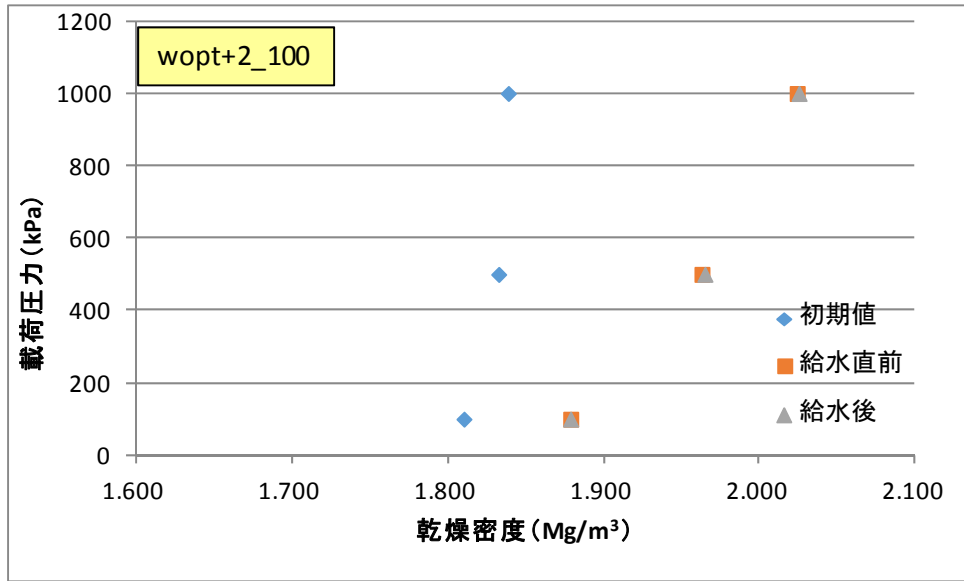


図 6.2-13 初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（Wopt+2、C 値=100%）

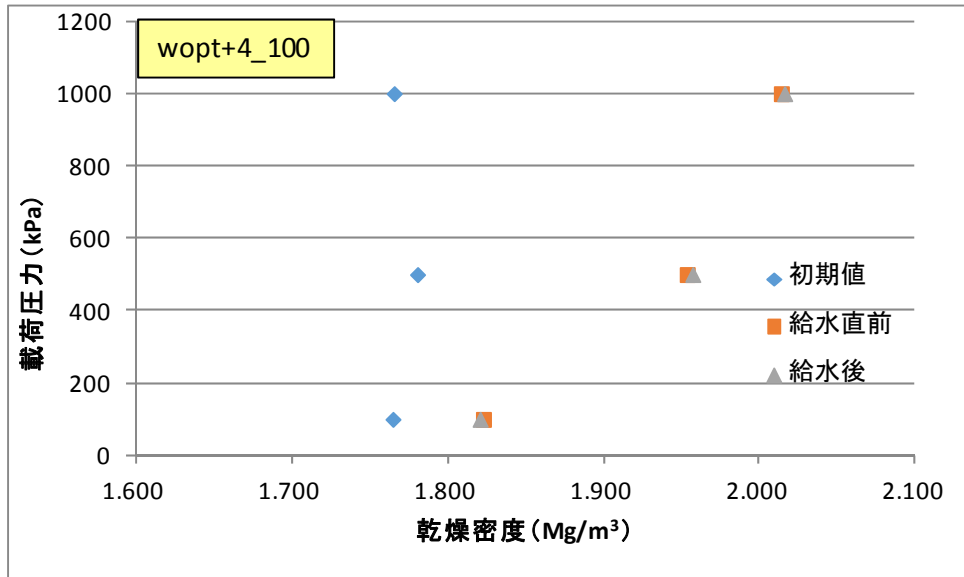


図 6.2-14 初期値～給水前～給水後（試験後）の乾燥密度の遷移（Wopt+4、C 値=100%）

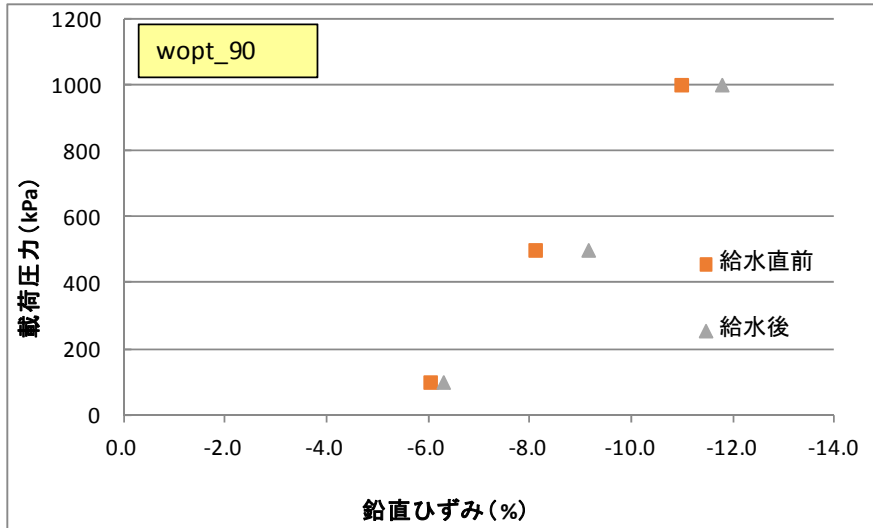


図 6.2-15 給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（Wopt、C 値=90%）

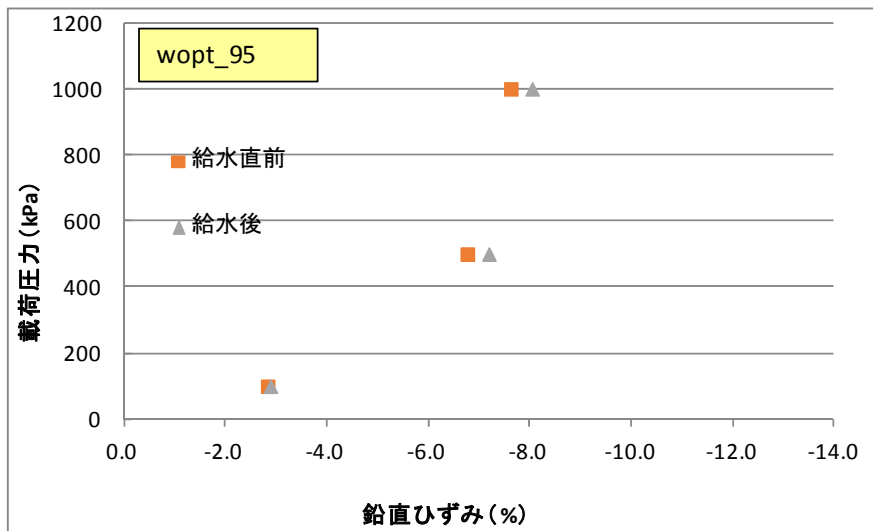


図 6.2-16 給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（Wopt、C 値=95%）

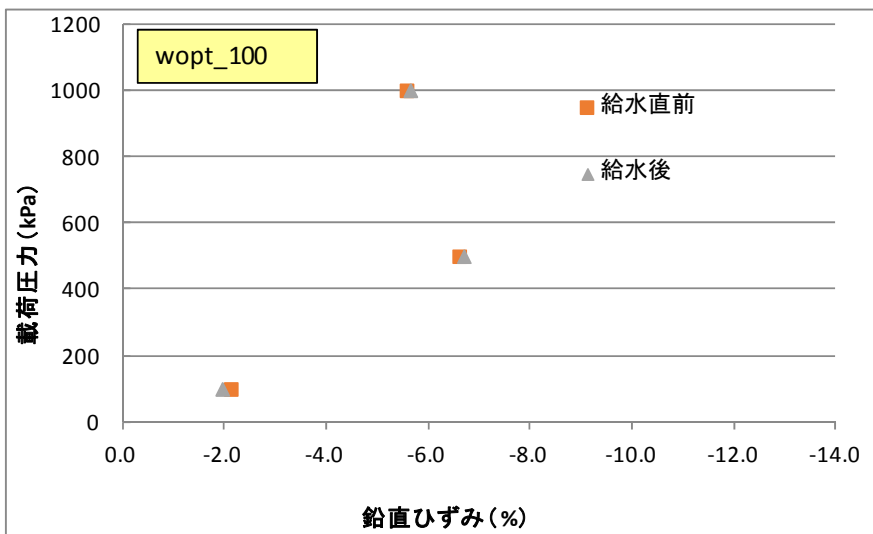


図 6.2-17 給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（Wopt、C 値=100%）

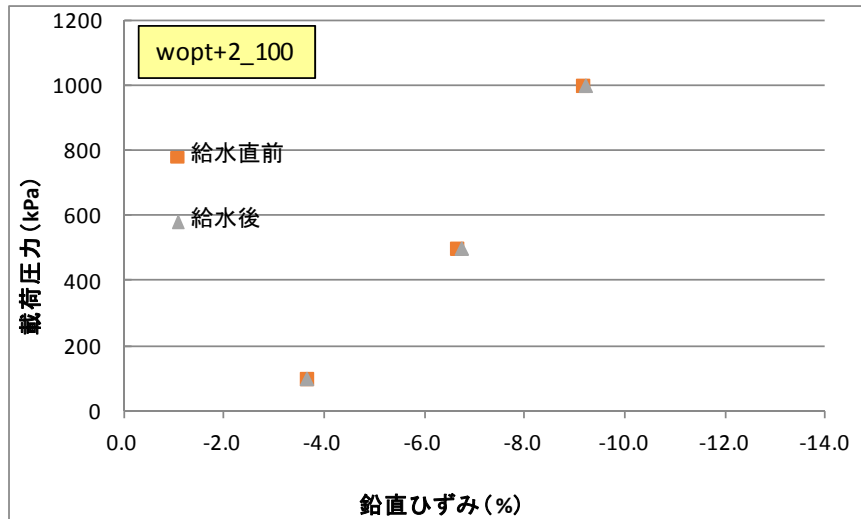


図 6.2-18 給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（Wopt+2、C 値=100%）

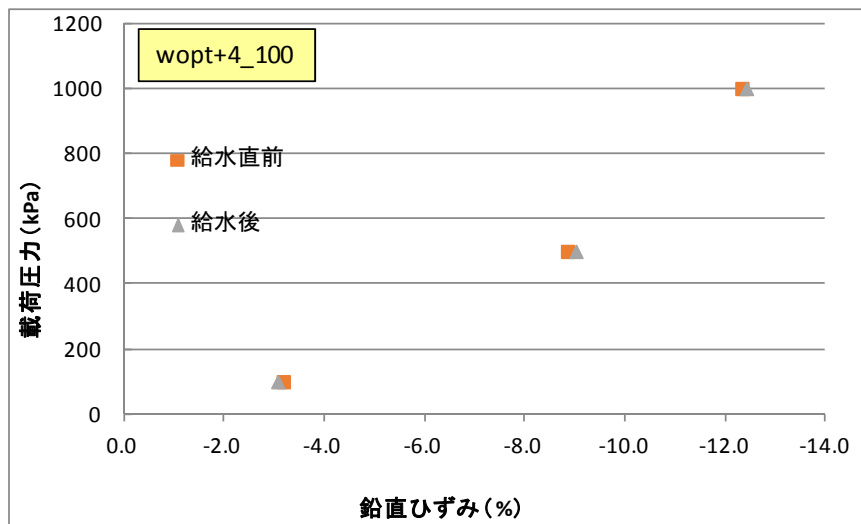


図 6.2-19 給水前～給水後（試験後）の到達鉛直ひずみ（Wopt+4、C 値=100%）

6.2.3 試験結果の評価

得られた知見を以下に示す。

- 1) 鉛直圧の载荷により供試体は圧縮し、ほぼ例外なく初期状態よりも体積が小さく圧縮される変形を示す傾向となった。
- 2) 鉛直圧が高く初期含水比が高い供試体では、鉛直圧の载荷により圧密する傾向を示す場合があった。
- 3) 鉛直圧 100kPa 下においては、吸水に伴い膨潤する傾向を示す場合があった。
- 4) 給水開始時の飽和度の上昇に伴い、圧縮方向の鉛直ひずみが大きくなる傾向が認められた。
- 5) 本試験で用いたベントナイトの配合率では、給水後の変形よりも、鉛直圧载荷後の挙動が支配的となった。

以上の結果から、本試験で用いたベントナイト混合率を用いた場合、試験に用いた鉛直圧レベルの荷重が加われば、上部埋戻し材は将来的に沈下することが予測される。本試験でのベントナイト混合率では、鉛直圧の荷重による鉛直ひずみは吸水に伴う鉛直ひずみの約 7.0~150.0 倍程度であった。上部埋戻し材は配合条件や施工条件によって異なるが、多少なりとも外力によって変形することが予想される。本試験結果は、ベントナイトの配合率によっては、吸水に伴う変形よりも鉛直圧の荷重による変形が、上部埋戻し材の将来の変形量の方に支配的になることを示唆している。また、試験ケースによっては膨潤する方向に変形したケースも見られたが、鉛直圧や給水前の供試体の飽和度により、給水後の挙動が影響することも示唆する結果が得られた。そのため、沈下・膨潤挙動の予測には鉛直圧の荷重時の飽和度の把握が重要となると考えられる。

今後はベントナイト配合率を変更して変形を把握することに加え、低透水層からの発生圧力や岩盤のクリープの相互作用を考慮して試験的・解析的に調査していく必要があると考えられる。

6.3 圧密非排水三軸圧縮試験

上部埋戻し材で考慮すべき事象として、再冠水後の緩衝材の膨潤圧や地下空洞自体のクリープ変形などの外圧が作用することが考えられる。このような状況では、特に前者の場合、緩衝材の変形をある程度までに抑制させることが上部埋戻し材に求められる。そのため、再冠水後の上部埋戻し材の力学特性（飽和状態、拘束状態における変形係数等の土質パラメータ）について把握する目的で、圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。

6.3.1 試験方法

圧密非排水三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水（ \overline{CU} ）三軸圧縮試験方法」（JGS 0523-2009）に準拠して実施する。この試験は、異なる圧密圧力で等方圧密された複数本の円柱状供試体に対して、非排水状態で軸圧縮される際の強度・変形特性を調べるためのものである。

三軸圧縮試験装置は、三軸圧力室、セル圧・背圧・負圧供給タンク、圧縮装置から構成され、圧密・軸圧縮中の力学挙動を変位計・（内・外）ロードセル・間隙水圧計・排水ビューレットにより計測するものである。試験装置の外観を図 6.3-1 に示す。ここでは圧縮成形した円柱状供試体を真空脱気によって強制飽和させて使用し、長期の状態設定のための解析に使用する土質パラメータとして粘着力 c 、 c' と内部摩擦角 ϕ 、 ϕ' を取得することを主な目的とする。また、限界状態パラメータ M は、圧密非排水三軸圧縮試験（ \overline{CU} ）における破壊時の主応力比（図 6.3-2）から得られ、次式で表される。なお、試験供試体は所定の含水比、乾燥密度となるように圧縮成型して作製した。

本検討で実施した三軸圧縮強度試験の試験仕様を表 6.3-1 に整理する。

$$M = \left(\frac{q}{p'} \right)_{cri} \quad \text{式 6.3-1}$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3') \quad (\sigma_2' = \sigma_3') \quad \text{式 6.3-2}$$

$$q = \sigma_1' - \sigma_3' \quad \text{式 6.3-3}$$

また、限界状態パラメータ M は内部摩擦角 ϕ' を用いて次式で算定できることも知られている。

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \text{式 6.3-4}$$

表 6.3-1 三軸圧縮強度試験の試験仕様

準拠規格	地盤工学会基準「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」 (JGS 0523-2009)					
供試体仕様	供試体寸法	$\phi 50\text{mm} \times \text{H}100\text{mm}$				
	作製方法	圧縮成型				
	供試体本数/ケース	3本				
	飽和過程	剛な飽和容器 (二重セル) を用いて、真空脱気を所定回数繰り返す。				
試験仕様	飽和過程 (三軸セル内)	<ul style="list-style-type: none"> ・圧密開始前に供試体、計器経路内を脱気水、二酸化炭素で通水/置換する。 ・圧密終了後の B 値を計測し、所定の値以上になっていることを確認する。 				
	圧密過程	圧力条件	圧密圧力 (kPa)	200	400	600
			セル圧 (kPa)	400	600	800
			背圧 (kPa)	200		
		圧密終了判定	3t 法による打ち切り			
	B 値	≥ 0.95 (圧密終了後)				
せん断過程	せん断速度	0.08%/min				
	軸圧縮終了判定	以下のいずれかの項目が該当した時点で終了。 ①軸ひずみが 15%に達した時点。 ②荷重計の読みが最大後、引き続き軸ひずみが 3%以上生じるか、荷重計の読みが最大値の 2/3 程度に減少した時点。				



図 6.3-1 三軸圧縮試験装置

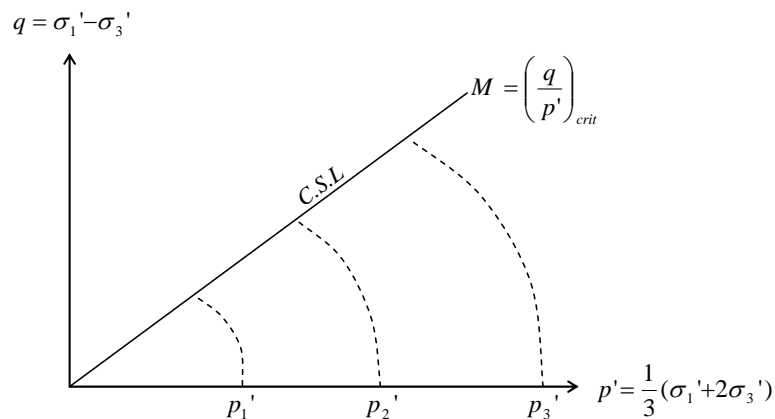


図 6.3-2 破壊に至るまでの有効応力経路概略図

6.3.2 試験結果

三軸圧縮試験結果を表 6.3-2 に示した。この結果を基に、軸差応力～ひずみ関係よりモールの応力円、有効応力～ひずみ関係より有効応力経路を求め、それぞれの粘着力 c' 、せん断抵抗角 ϕ' を決定した。また、平均主応力と軸差応力の関係より限界状態パラメータ M を決定した。試験ケースごとに設定したこれらのパラメータを表 6.3-3 に示す。グラフについては、圧密排水量の経時変化図、最大主応力差と軸ひずみの関係図、モールの応力円図、主応力比と軸ひずみの関係図、有効応力経路図、平均主応力と軸差応力の関係図の順に配置しており、 C 値=100%、 W_{opt} の結果を図 6.3-3～図 6.3-8、 C 値=95%、 W_{opt} の結果を図 6.3-9～図 6.3-14、 C 値=100%、 $W_{opt}+2\%$ の結果を図 6.3-15～図 6.3-20、 C 値=100%、 $W_{opt}+2\%$ の結果を図 6.3-21～図 6.3-26、 C 値=90%、 $W_{opt}+2\%$ の結果を図 6.3-27～図 6.3-32 に示した。

表 6.3-2 三軸圧縮強度試験 (\overline{CU} 試験) 結果一覧表

No	締固め 規定値 %	目標 含水比 %	拘束圧 kN/m ²	最大 主応力差 kN/m ²	破壊時 ひずみ %	変形 係数 MN/m ²	粘着力 c kN/m ²	せん断 抵抗角 deg	せん断 ひずみ 速度 %/mm
1	100	W_{opt}	200	455.7	0.961	23.7	121.0	15.0	0.08
			400	593.6	0.446	66.5			
			600	735.5	0.256	143.8			
2	95		200	223.4	0.480	23.3	42.9	12.9	
			400	334.9	0.197	84.8			
			600	453.2	0.166	136.8			
3	100	$W_{opt}+2$	200	414.7	0.745	26.8	107.2	14.4	
			400	530.1	0.450	58.9			
			600	682.5	0.215	158.5			
4	95		200	231.3	0.454	25.5	47.6	12.6	
			400	339.0	0.192	88.3			
			600	454.8	0.166	137.1			
5	90	200	161.2	0.210	38.4	20.1	12.5		
		400	271.8	0.129	105.4				
		600	382.4	0.125	152.4				

表 6.3-3 取得パラメーター一覧表

No	締固め 規定値 %	目標 含水比 %	設定 密度 %	設定 含水比 Mg/m ³	全応力		応力円		有効応力経 路		限界状態 パラメータ M
					c kN/ m ²	ϕ deg	c' kN/ m ²	ϕ' deg	c' kN/ m ²	ϕ' deg	
1	100	W_{opt}	1.810	13.7	121.0	15.0	16.7	32.0	24.6	31.2	1.369
2	95		1.720	13.7	42.9	12.9	1.9	28.8	1.8	28.8	1.159
3	100	$W_{opt}+2$	1.795	15.7	107.1	14.4	11.2	32.3	19.4	31.5	1.370
4	95		1.705	15.7	47.9	12.4	5.8	28.2	3.9	28.6	1.159
5	90		1.616	15.7	20.1	12.5	2.8	28.7	2.7	28.7	1.166

・ C 値=100%、 W_{opt}

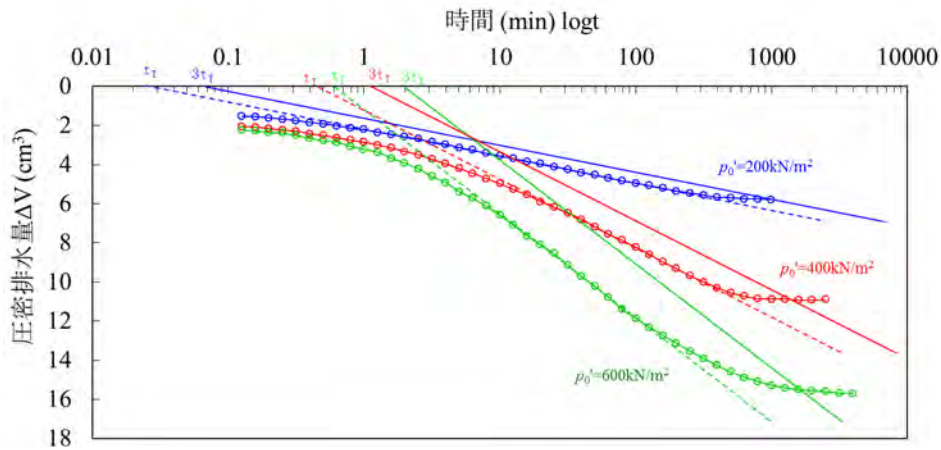


図 6.3-3 圧密排水量～時間関係

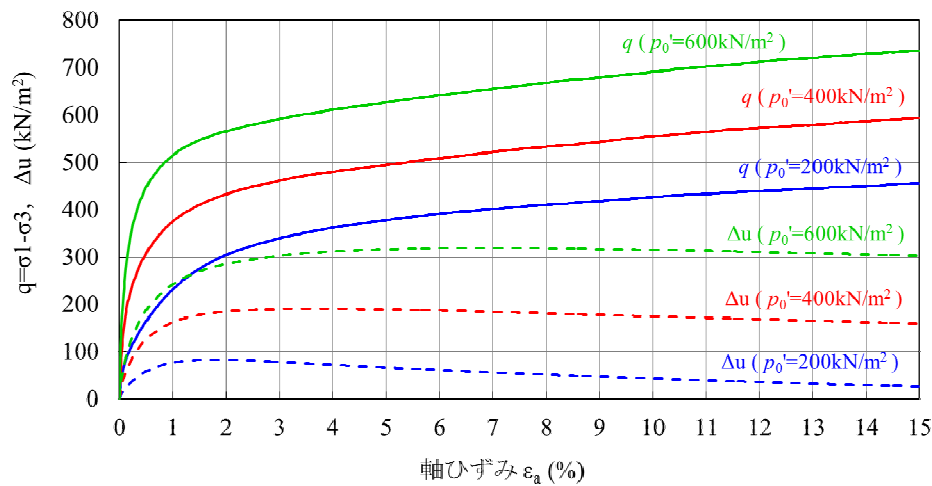


図 6.3-4 主応力差～軸ひずみ関係

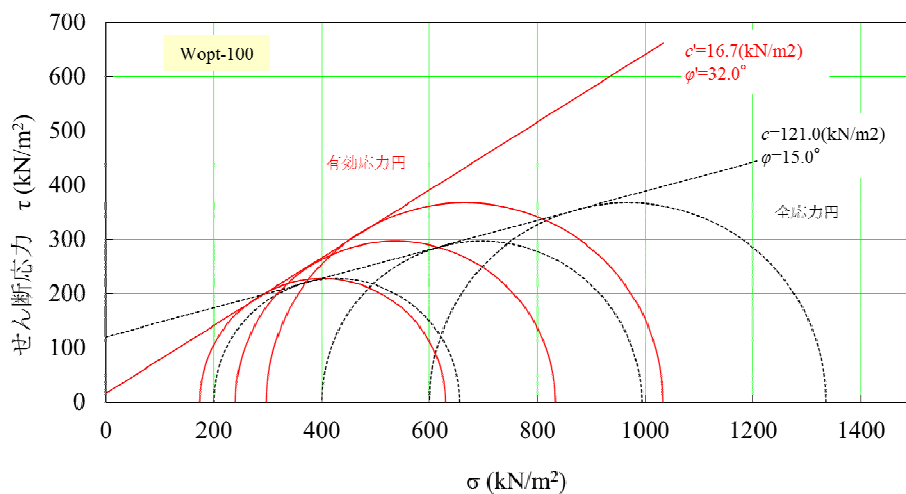


図 6.3-5 モールの応力円

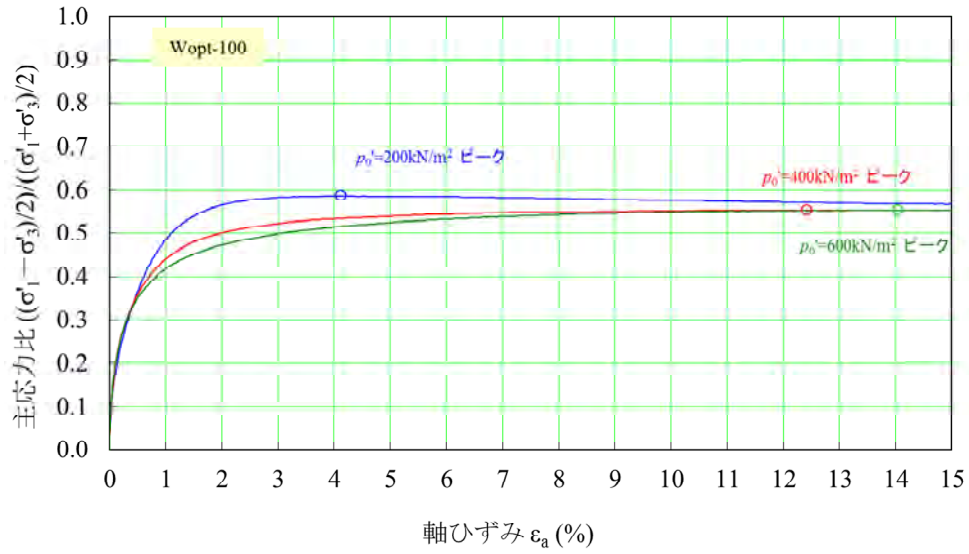


図 6.3-6 主応力比～軸ひずみ関係

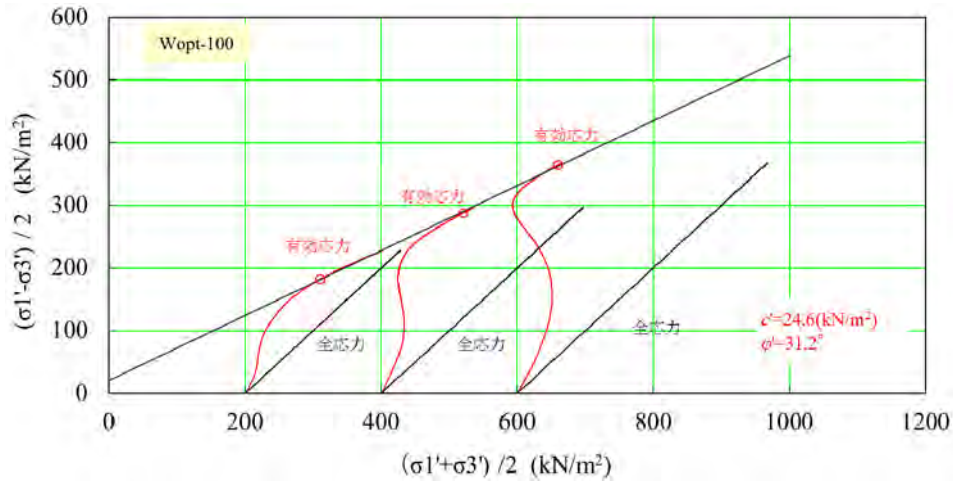


図 6.3-7 有効応力経路図

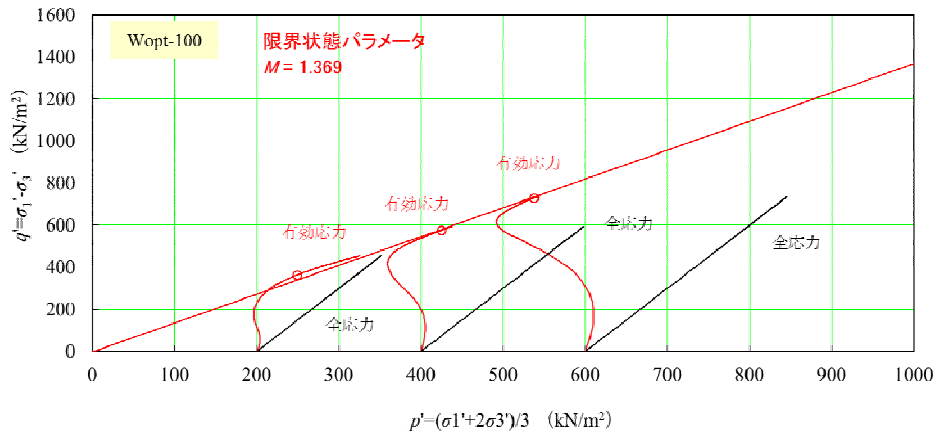


図 6.3-8 平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)

・ C 値=95%、Wopt%

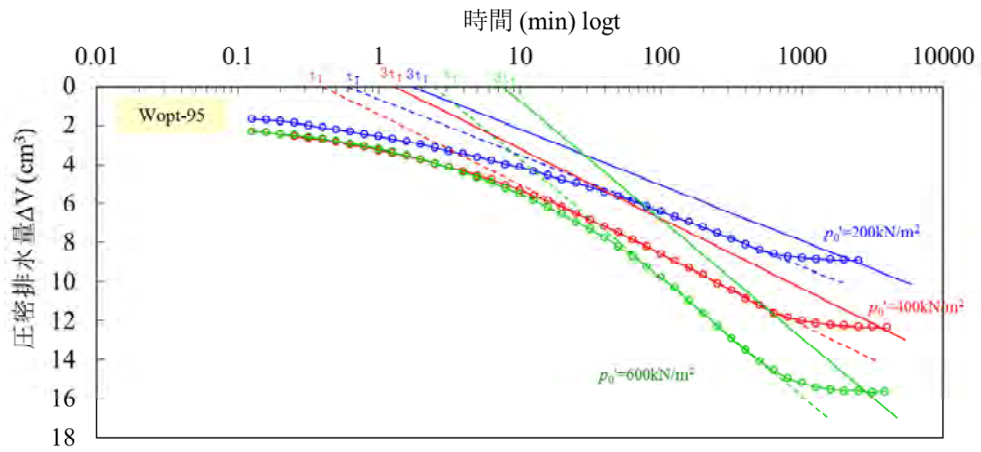


図 6.3-9 圧密排水量～時間関係

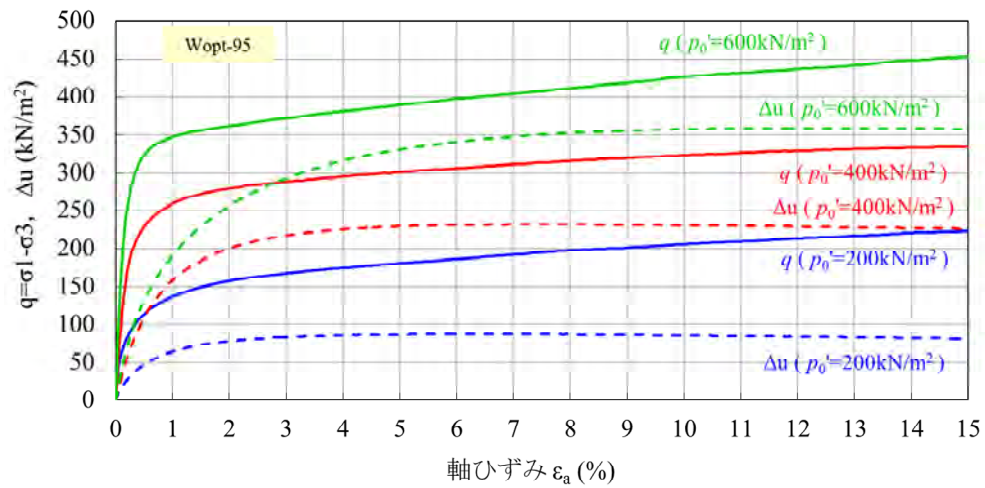


図 6.3-10 主応力差～軸ひずみ関係

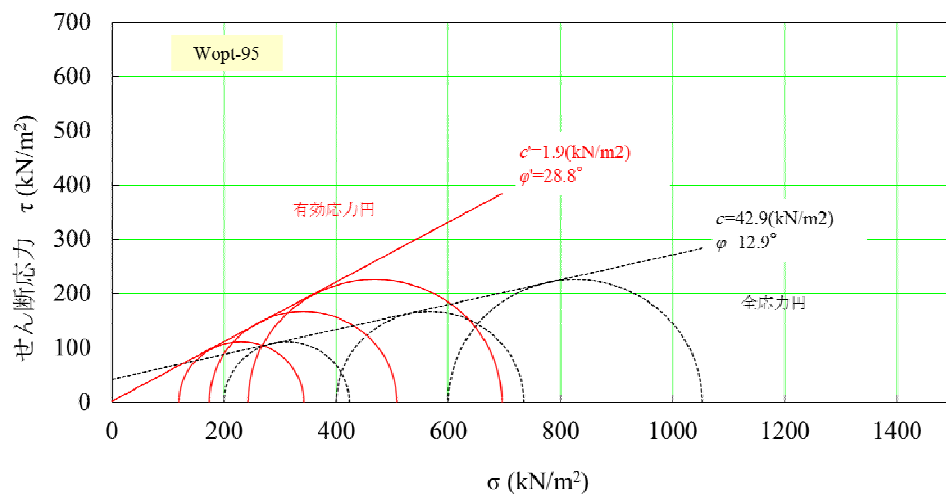


図 6.3-11 モールの応力円

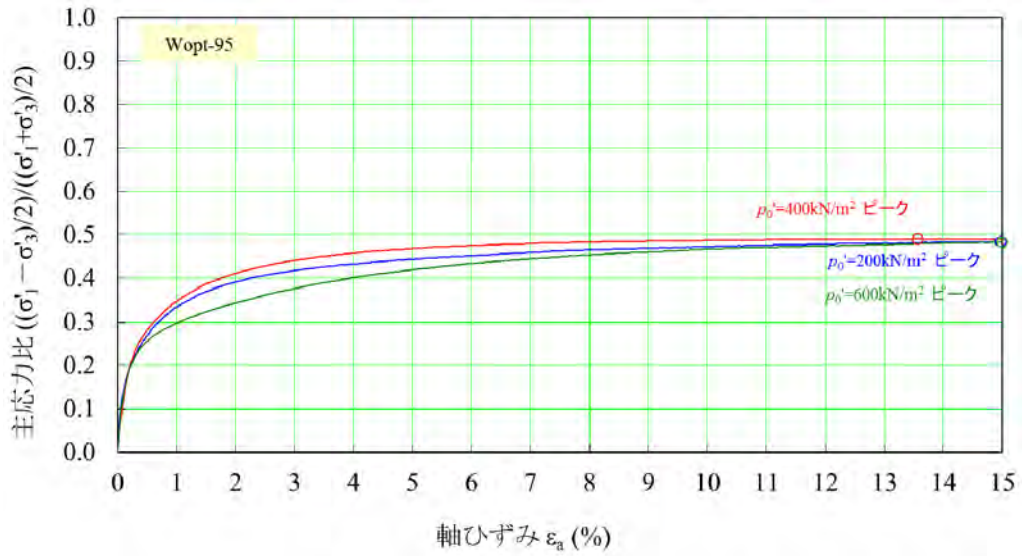


図 6.3-12 主応力比～軸ひずみ関係

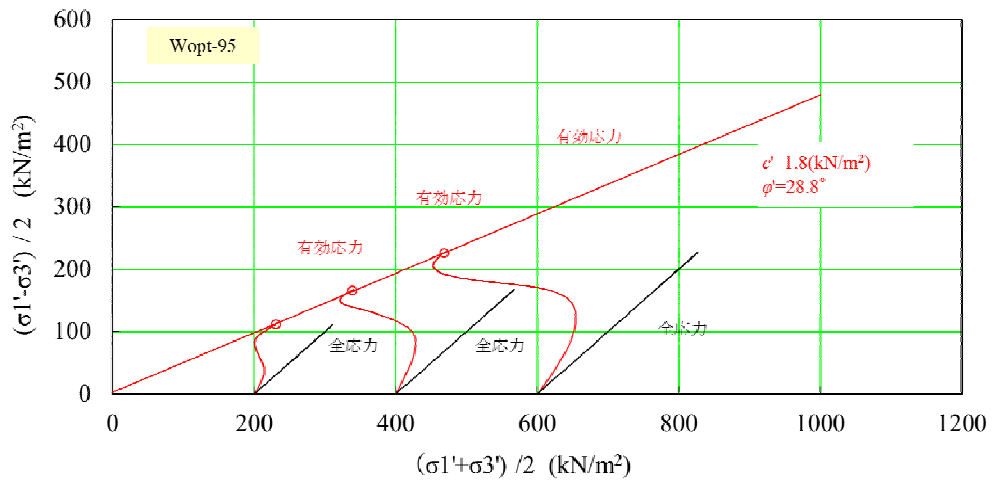


図 6.3-13 平均主応力と軸差応力の関係

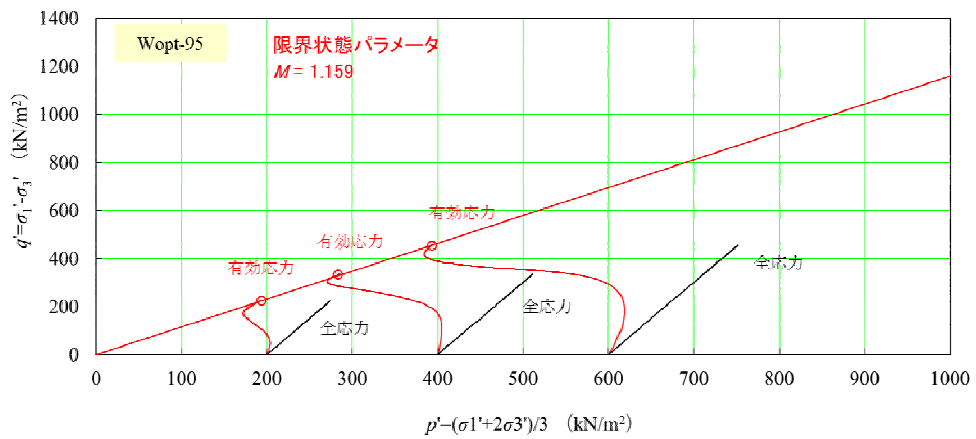


図 6.3-14 平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)

・ C 値=100%、Wopt+2%

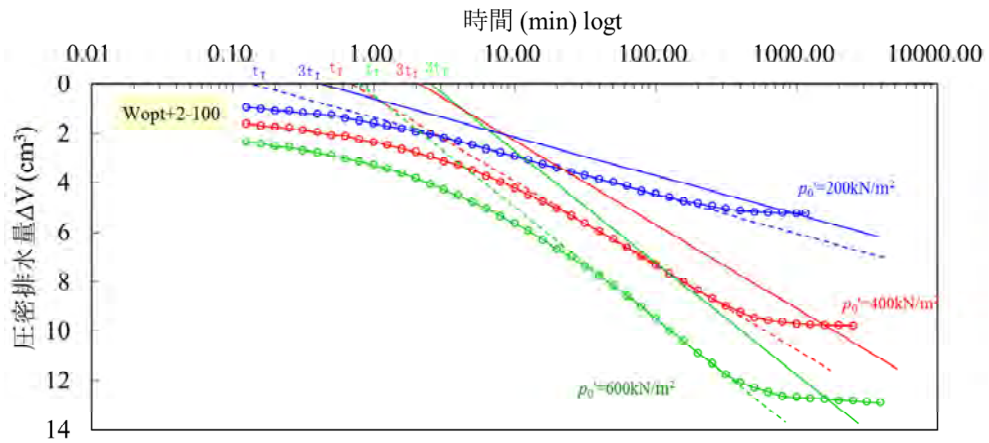


図 6.3-15 圧密排水量～時間関係

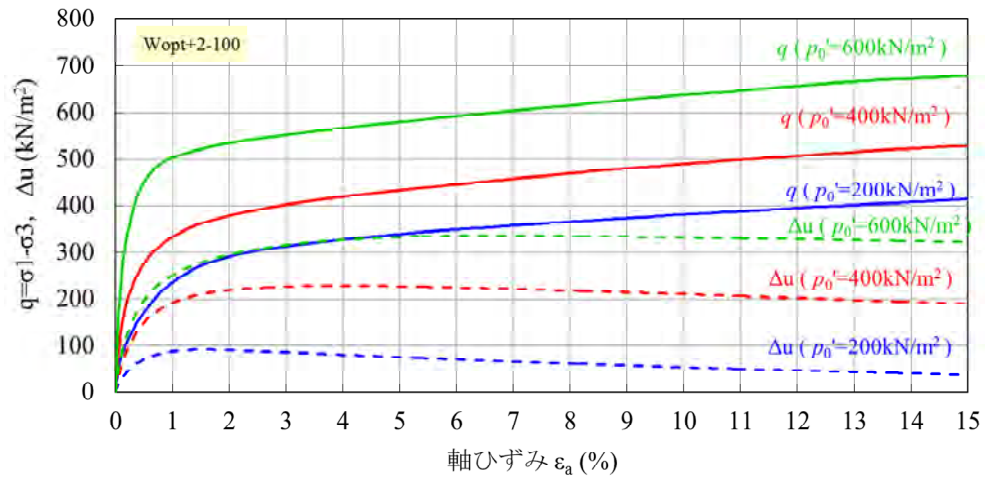


図 6.3-16 主応力差～軸ひずみ関係

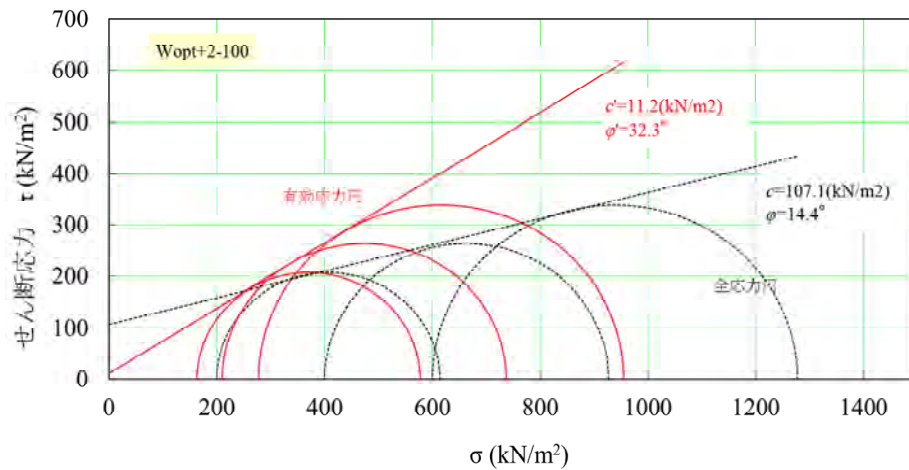


図 6.3-17 モールの応力円

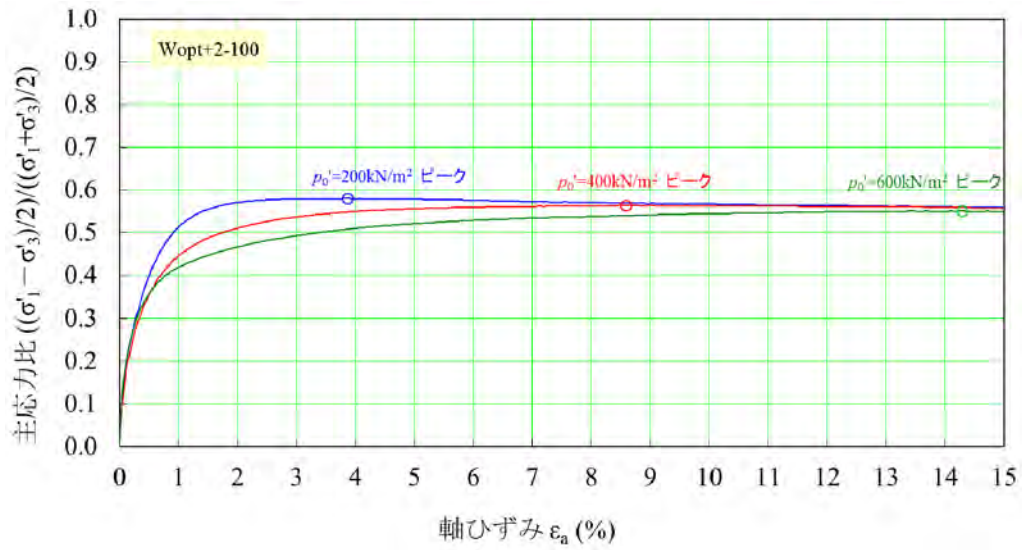


図 6.3-18 主応力比～軸ひずみ関係

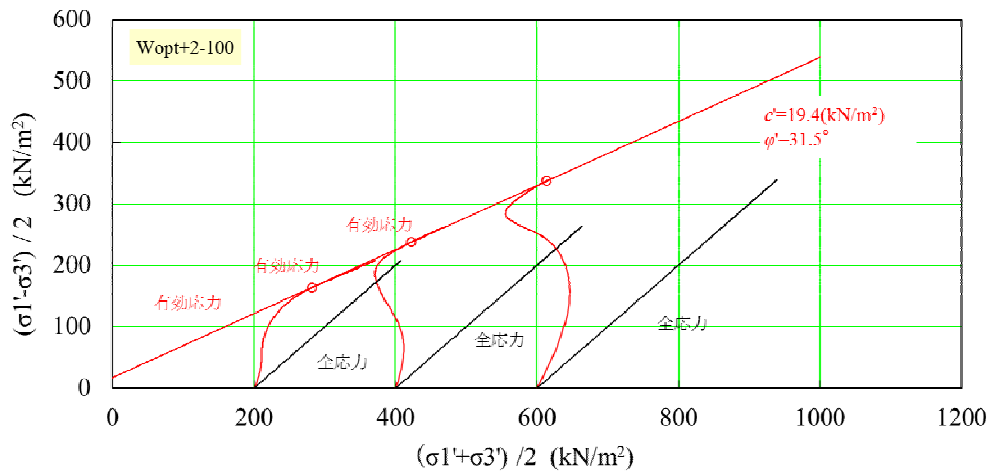


図 6.3-19 平均主応力と軸差応力の関係

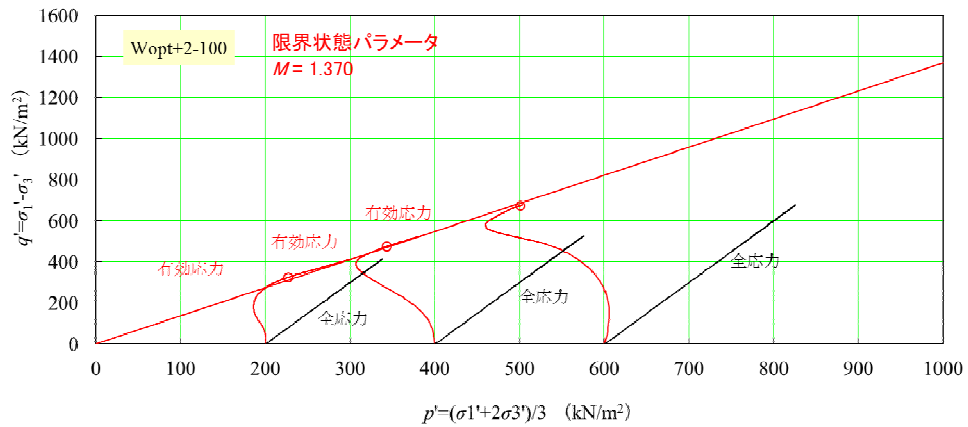


図 6.3-20 平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)

・ C 値=95% , Wopt+2%

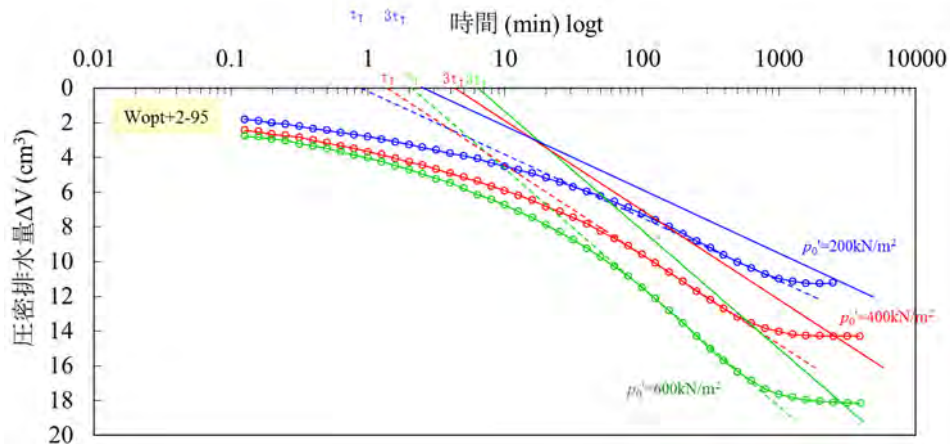


図 6.3-21 圧密排水量～時間関係

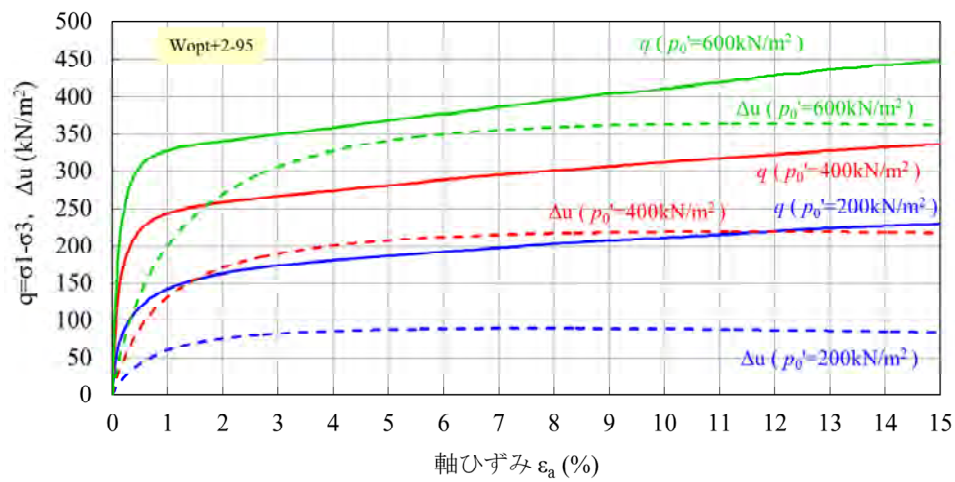


図 6.3-22 主応力差～軸ひずみ関係

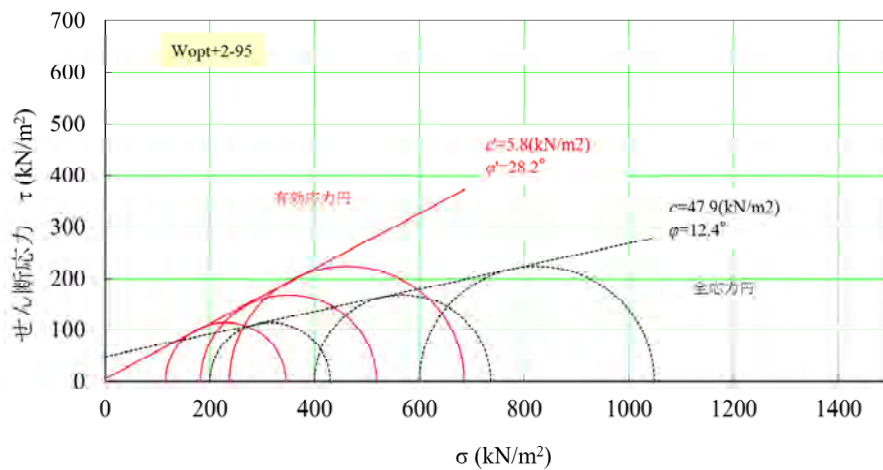


図 6.3-23 モールの応力円

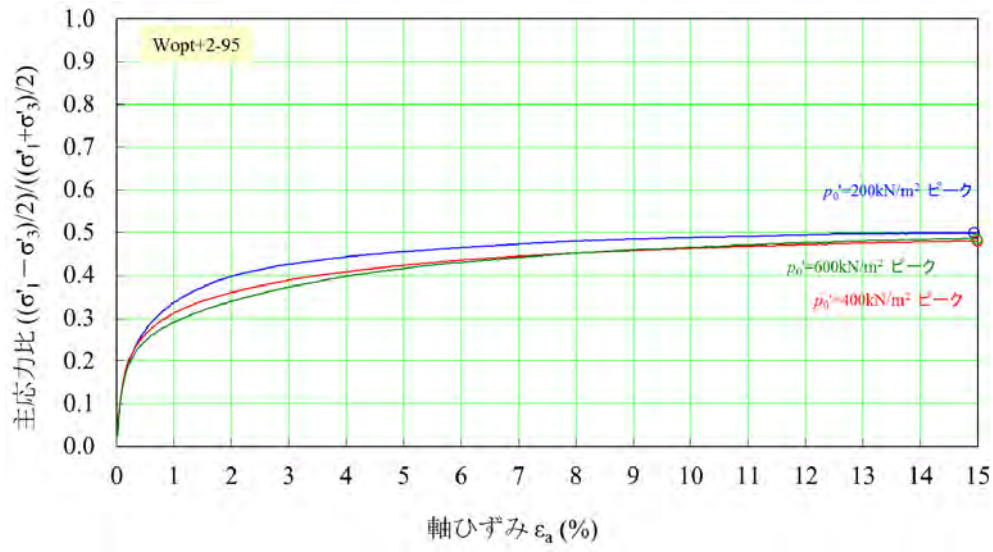


図 6.3-24 主応力比～軸ひずみ関係

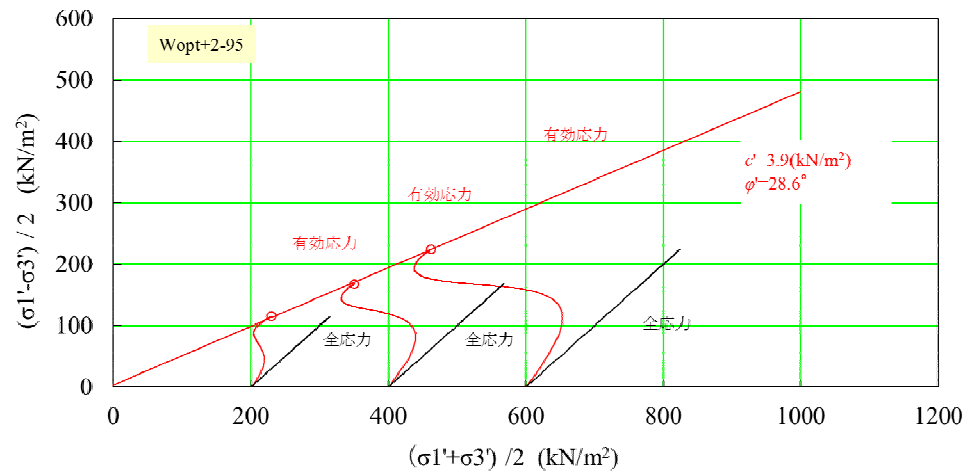


図 6.3-25 平均主応力と軸差応力の関係

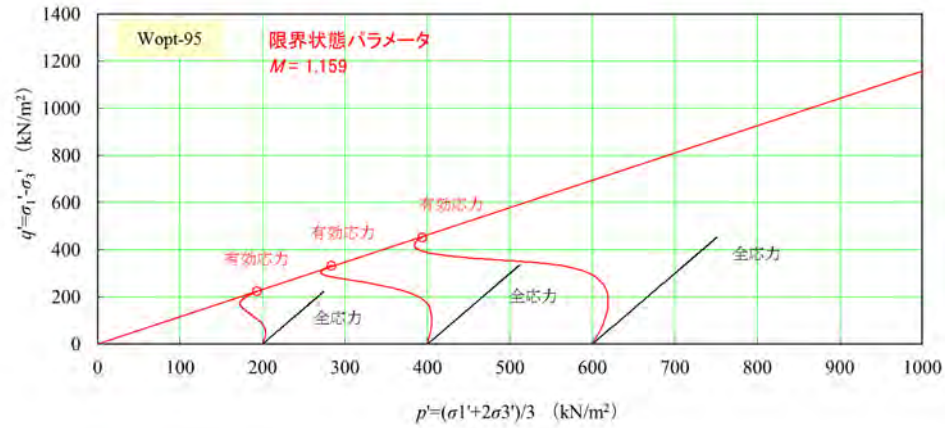


図 6.3-26 平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)

・ C 値=90%、Wopt+2%

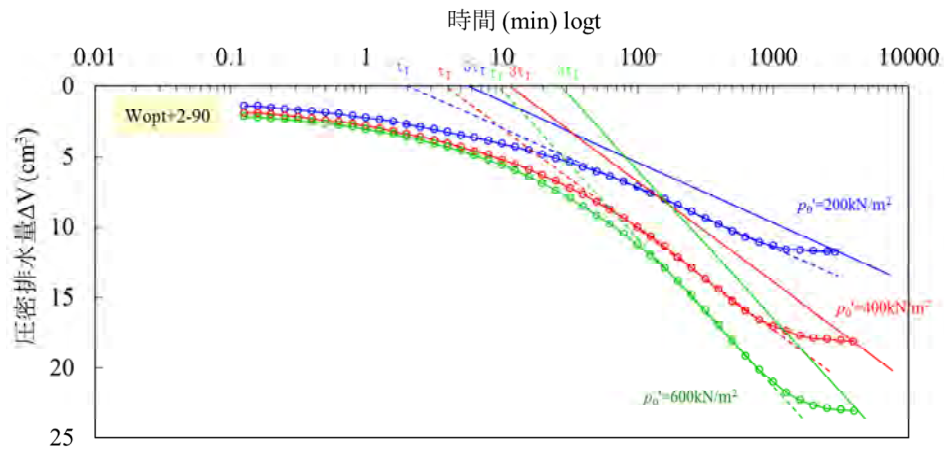


図 6.3-27 圧密排水量～時間関係

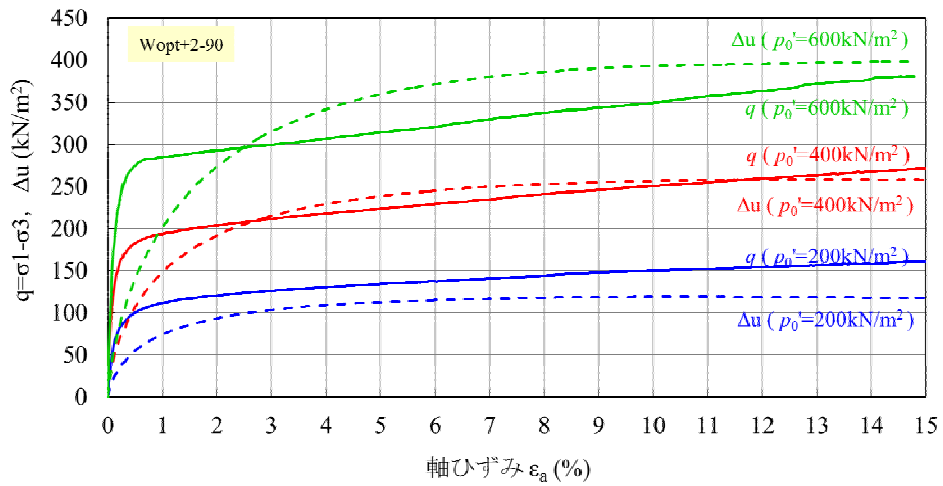


図 6.3-28 主応力差～軸ひずみ関係

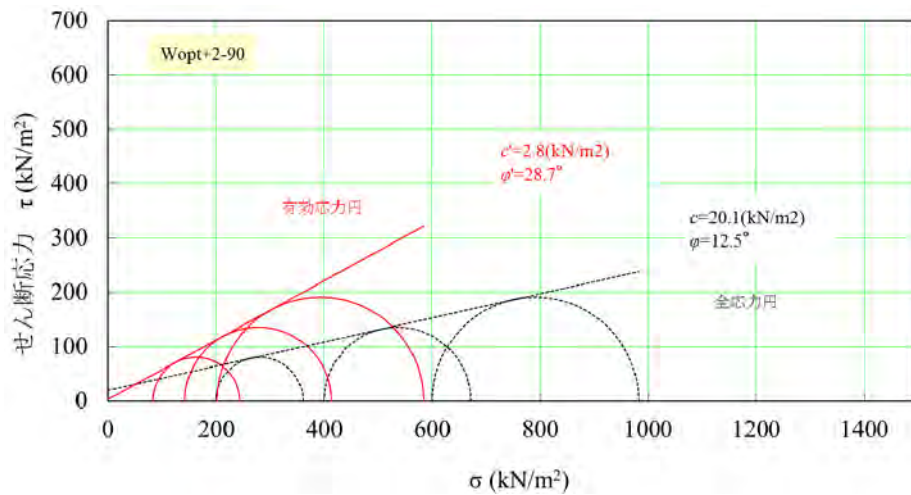


図 6.3-29 モールの応力円

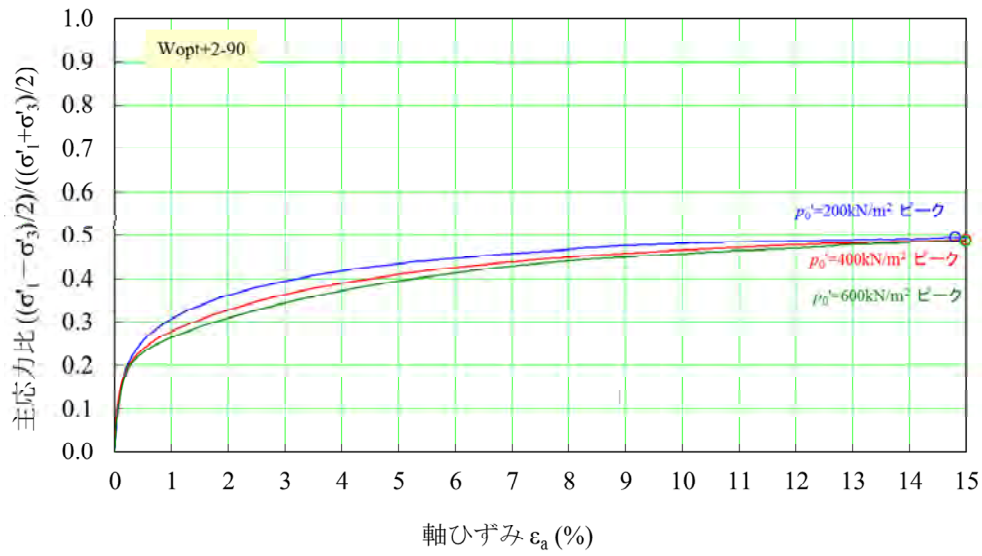


図 6.3-30 主応力比～軸ひずみ関係

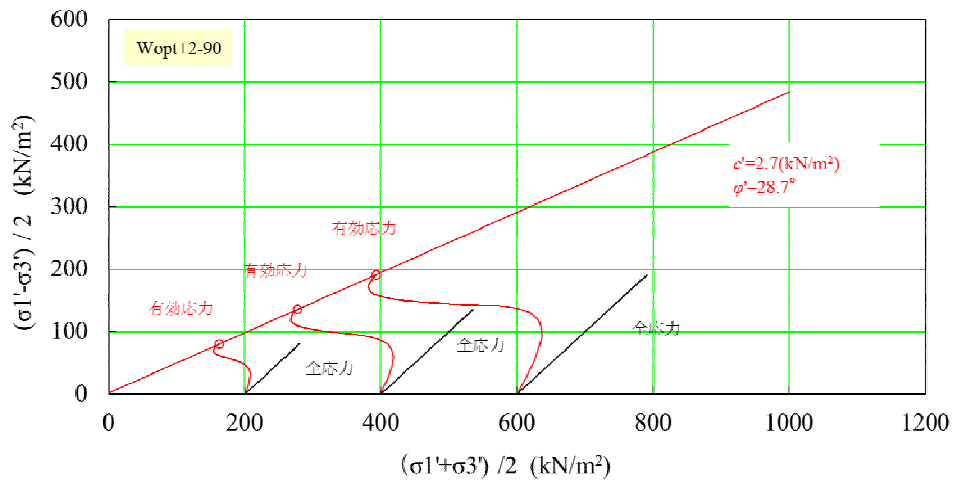


図 6.3-31 平均主応力と軸差応力の関係

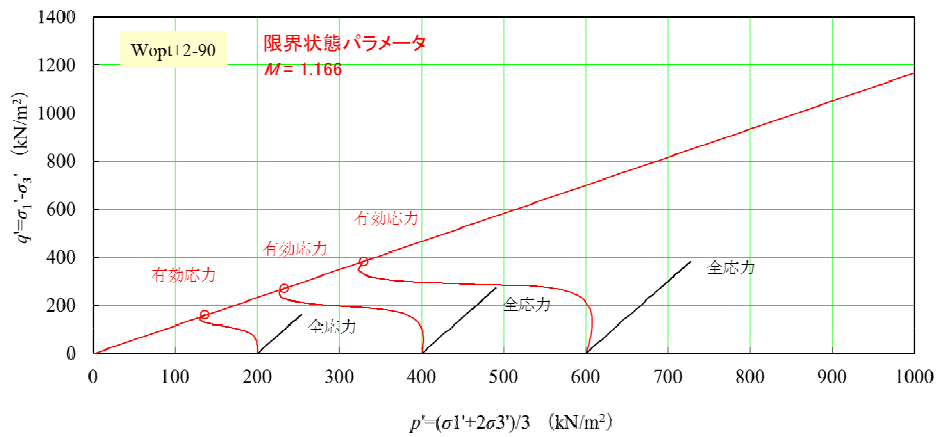


図 6.3-32 平均主応力と軸差応力の関係 (限界状態)

6.3.3 試験結果の評価

全ての試験条件において、拘束圧、締固め度の増加に伴い、最大主応力差、破壊ひずみ、変形係数は増加傾向であることが確認された。図 6.3-33 に最大主応力差と拘束圧の関係図を示す。この図より、締固め規定値 C 値=100%では、含水比の変化に伴う主応力差の変動がみられるが、C 値=95%では含水比の変化に伴う主応力差の変動は見られなかった。この傾向は破壊ひずみ、変形係数においても同様である。

次に粘着力 c' 、内部摩擦角 φ' に着目する。本試験では、前述の通りモールの応力円、有効応力経路図の 2 種類の方法で c' 、 φ' を算出した。得られた c' 、 φ' の関係を図 6.3-34 に示す。この図より、C 値=95%、90%では、それぞれの方法で算出した c' 、 φ' の結果がほぼ一致していることが確認され（図 6.3-34 内の赤点線参照）、C 値=100%では c' 、 φ' は一致しなかった。これは、間隙水圧と軸差応力の増加の仕方の違いに起因すると考えられる。内部摩擦角 φ' のみに着目すると、同一の締固め度の条件下においては、 φ' は概ね一致しており、含水比による影響をほぼ受けないことがわかった。また、限界状態パラメータは締固め度に比例して増加していることがわかった。

以上の結果より、締固め度の増加に伴い内部構造が蜜実になることで強度、内部摩擦角、限界状態パラメータは増加傾向を示すと考えられる。また、高密度（C 値=95%以上）の土質条件では、含水比の影響を受け易いと考えられる。

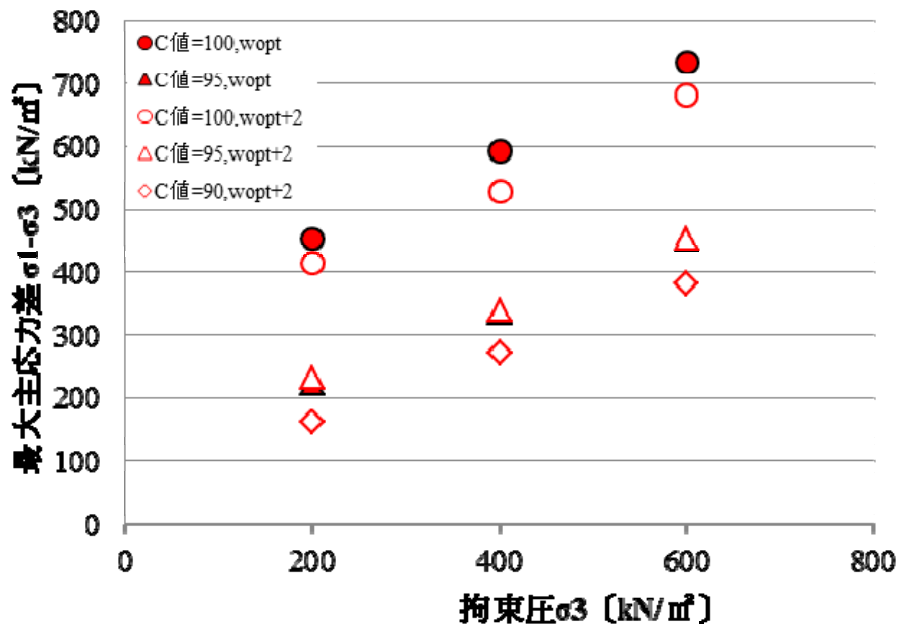


図 6.3-33 最大主応力差と拘束圧の関係

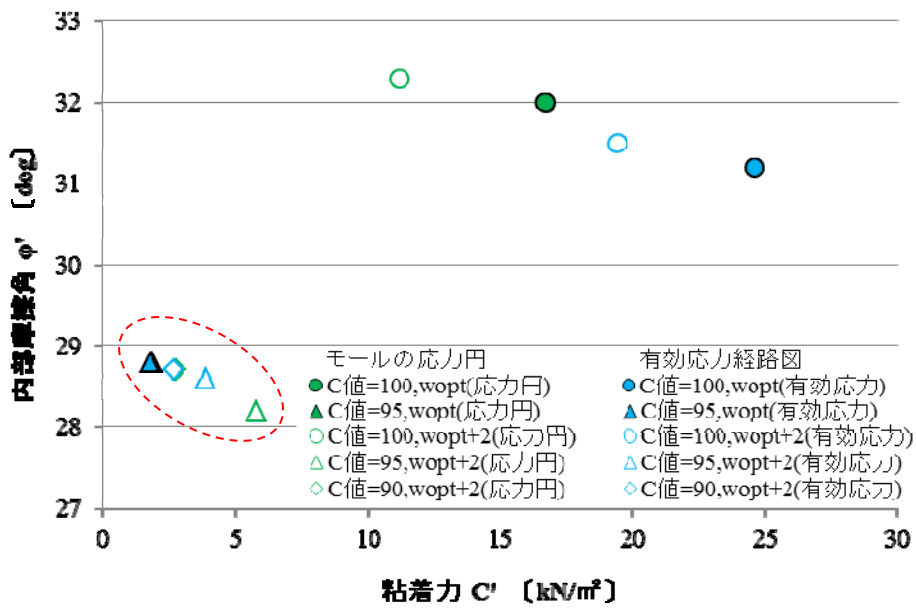


図 6.3-34 内部摩擦角と粘着力の関係

6.4 変形特性を求めるための繰り返し三軸試験および弾性波速度測定

上部埋戻し材の動的挙動を把握する目的で実施する。特に、地震解析等の動的挙動予測に資するパラメータの取得を行う。

6.4.1 試験方法

本試験は、比較的小さいひずみレベル（せん断ひずみで 0.001%～数%程度）における変形特性（せん断剛性比および履歴減衰定数の、せん断ひずみとの関係）の取得を目的とする。試験方法は、地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を求めるための繰り返し三軸試験方法」（JGS 0542-2009）に準拠した。試験は供試体を所定の有効拘束圧で圧密した後、規則波による繰り返し載荷試験を行う。載荷は応力制御により、ひずみの小さい方から大きい方へ軸差応力振幅を段階的に変化させるステージ方式により行う。1 ステージにつき 0.2Hz 程度の正弦波を 11 波加え、そのうち 5 波目と 10 波目のヒステリシスループから得たデータを処理し、せん断剛性率および履歴減衰率とせん断ひずみとの関係をプロットする。さらに、このプロットに対し、R-O および H-D モデルによるフィッティングを行い、各モデルの変形特性パラメータを取得する。

なお、試験供試体は所定の含水比、乾燥密度となるように圧縮成型して作製し、試験装置は三軸圧縮強度試験と同じものを用いる。試験条件により、供試体を飽和させる。

本検討で実施した、繰り返し三軸試験の試験仕様を表 6.4-1 に整理する。

また、「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法（JGS1220-2009）」を参考に、三軸試験セル内で拘束圧をかけた状態で弾性波速度測定も行う。

表 6.4-1 繰り返し三軸試験の試験仕様

準拠規格	地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を求めるための繰り返し三軸試験方法」(JGS 0542-2009)			
供試体仕様	供試体寸法	φ 50mm×H100mm		
	作製方法	圧縮成型		
	供試体本数/ケース	1本		
	飽和過程	剛な飽和容器(二重セル)を用いて、真空脱気を所定回数繰り返す。		
試験仕様	飽和過程(三軸セル内)		・圧密開始前に供試体、計器経路内を脱気水、二酸化炭素で通水/置換する。 ・圧密終了後のB値を計測し、所定の値以上になっていることを確認する。	
	圧密過程	圧力条件	圧密圧力 (kPa)	100
			セル圧 (kPa)	300
			背圧 (kPa)	200
		圧密終了判定	3t法による打ち切り	
	繰り返し荷重過程	波形	正弦波	
周波数		0.2Hz		
第一回荷重片振幅軸ひずみ		≤0.001%		

以下に実験データの主な処理方法と非線形履歴挙動モデルの概要を整理する。

(1) 実験データの処理方法

各荷重ステージの5波、10波目のデータより得られた、片振幅軸ひずみ(%)と片振幅軸応力(MPa)の関係から、せん断ひずみ γ (%)、等価せん断剛性率(MPa)を次式により算出する。

$$\gamma = (1 + \nu)\epsilon_a \quad \text{式 6.4-1}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{\sigma_a}{2(1 + \nu)\epsilon_a} \quad \text{式 6.4-2}$$

また、履歴減衰定数(%)は～履歴曲線(図6.4-1)より、次式で算定する。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad \text{式 6.4-3}$$

ここで、 ΔW は減衰エネルギーで、1回の繰り返し荷重中に、熱・音等になって失われるエネルギーであり、図6.4-1のように履歴曲線で囲まれる面積で求められる。また、 W は、その繰り返し荷重サイクルでの等価弾性エネルギーである。

なお、計算に用いた動的ポアソン比 ν は、弾性波試験の結果から、飽和条件では $\nu=0.5$ とした。

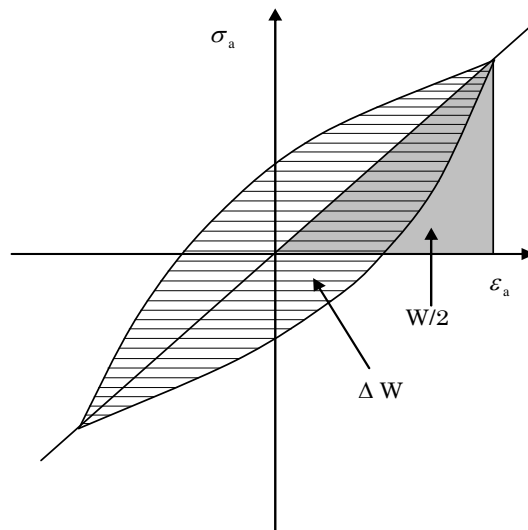


図 6.4-1 $\epsilon_a \sim \sigma_a$ 履歴曲線模式図

(2) 非線形履歴挙動のモデル化

土質材料の非線形ヒステリシス挙動を地震応答解析に適応するためには、数式モデル化する必要がある。試験結果から得られる等価せん断剛性率、履歴減衰定数を用いて応力～ひずみ関係の非線形ヒステリシス挙動を与える力学モデルのうち代表的なものに、応力～ひずみ関係の曲線を履歴曲線と骨格曲線（ひずみ振幅を変化させて得られる履歴曲線の頂点の軌跡）に分離し（図 6.4-2）、骨格曲線を指数関数で表す Ramberg-Osgood モデル（R-O モデル）や双曲線関数で表す Hardin-Drnevich モデル（H-D モデル）がある。

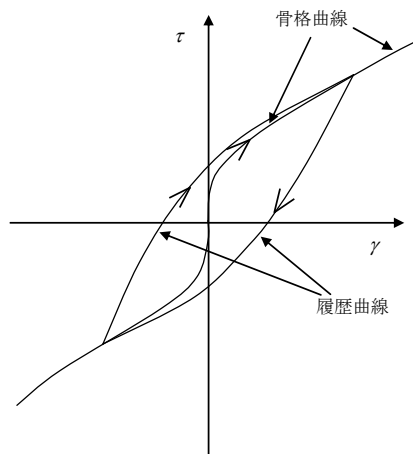


図 6.4-2 骨格曲線と履歴曲線の説明

H-D モデル（双曲線モデル）の骨格曲線は次式で示される。

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \quad \text{式 6.4-4}$$

$$h = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{1 - G/G_{\max}} \right) \left(1 + \frac{G/G_{\max}}{1 - G/G_{\max}} \ln(G/G_{\max}) \right) - \frac{2}{\pi} \quad \text{式 6.4-5}$$

ここに、 G_{\max} は初期せん断弾性係数、 γ_r は規準ひずみで、せん断剛性比 G/G_{\max} が 1/2 となるときのせん断ひずみの値であり、実験値のプロットより G_{\max} および γ_r の値を読み取って用いれば H-D モデルは決まる。ただし、実測で $G = 1/2 \cdot G_{\max}$ になるときの $\gamma = \gamma_{0.5}$ と一致するとは限らないので、実際上の問題として γ_r をどのように決めるかという点で工夫を要する。すなわち、 τ_{\max} の値が問題となるような大きなひずみ領域を対象とするときは、 τ_{\max} を正確に決定し、 $\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max}$ とする。一方、 τ_{\max} の値を問題としない中小ひずみ領域を対象とするときは、 $\gamma_{0.5}$ の値を正確に決定し、 $\gamma_r = \gamma_{0.5}$ とすると良い。

R-O モデルによれば、骨格曲線は次式のように表せる。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right) \quad \text{式 6.4-6}$$

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad \text{式 6.4-7}$$

ここで、 G_{\max} は $\gamma=0$ に相当する最大せん断剛性率、 τ はせん断強度 ($\tau = G\gamma$)、 τ_f は破壊せん断強度、 α 、 β はモデル固有のパラメータである。

(3) 弾性波速度測定方法

「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法 (JGS1220-2009)」を参考として行う。

1) 試験の準備

試験の前に以下の作業を行う。

- a) 速度測定を行うのと同じように発振子と受振子を直接密着させる。
- b) このときの初動の立ち上がり位置を供試体の長さが零のときに相当するとする。

2) P 波速度測定

- a) キャップやペダスタルに P 波の測定ができる発振子や受振子等が内蔵された三軸試験機に供試体をセットする。
- b) 三軸試験セルに水を満たし、供試体に拘束圧を作用させ振動子を供試体に十分密着させる。必要に応じ、少量の接着剤を供試体の両端面に塗布する。
- c) 拘束圧は 100kPa とする。また一連の試験で圧力はほぼ一定となるようにする。
- d) 超音波パルスを発生させ、受振した波の初動の立ち上がりが鋭いことを確認する。初動の立ち上がりが明瞭でない場合には出力や増幅度を増す。
- e) d)の作業でも初動の立ち上がりが明瞭でない場合には 2)からの手順を再度行う。

- f) 以上によっても初動の立ち上がりを定めることができない場合には他の手段によることとする。
- g) 透過した波の立ち上がり部分から透過時間 T_p を原則として $0.1\mu\text{s}$ まで読みとる。
- h) 同一供試体において合計 2 回の測定を行う。

3) S 波速度測定

- a) キャップやペDESTALに S 波の測定ができる発振子や受振子等が内蔵された三軸試験機に供試体をセットする。
- b)~f) 2)に示した b)~f)の手順にしたがい、同様の作業を行う。
- g) 透過時間 T_s を原則として $0.1\mu\text{s}$ まで読みとる。
- h) 同一供試体において合計 2 回の測定を行う。

4) 計算

P 波速度 V_p (m/s) 及び S 波速度 V_s (m/s) は、次式で算出する。このとき 2 回測定した透過時間に対してそれぞれ算出する。

$$V_p = 10^4 \frac{l}{T_p} \quad \text{式 6.4-8}$$

$$V_s = 10^4 \frac{l}{T_s}$$

ここに l : 供試体の長さ (cm)

T_p : P 波の透過時間 (μs)

T_s : S 波の透過時間 (μs)

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\{(V_p/V_s)^2 - 1\}} \quad \text{式 6.4-9}$$

$$G_d = \rho_t \cdot V_s^2 \quad \text{式 6.4-10}$$

$$E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d \quad \text{式 6.4-11}$$

ここに ρ_t : 測定状態における供試体の密度 (g/cm^3)

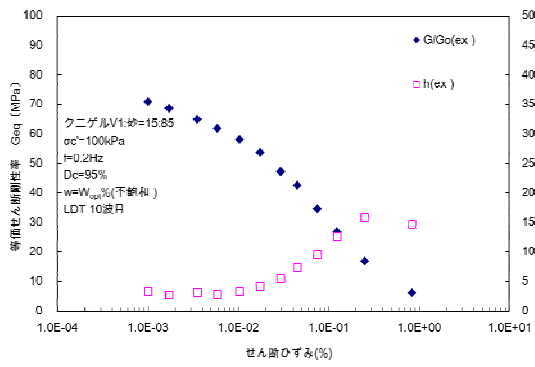
6.4.2 試験結果

(1) 等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰率 h

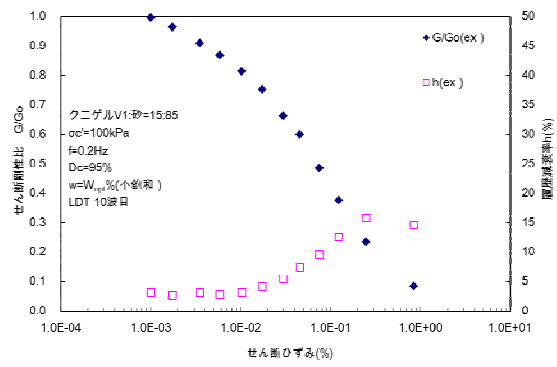
本試験では、締固め度、含水比、飽和条件をパラメータとして計 8 ケースの試験を実施した。

図 6.4-3~図 6.4-10 には、実験で得られた 8 ケースの $G_{eq} \sim \gamma$ 、 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を示す。

G_0 は $G_{eq} \sim \gamma$ のグラフより、せん断ひずみ γ が最も小さい時の値を読み取った。



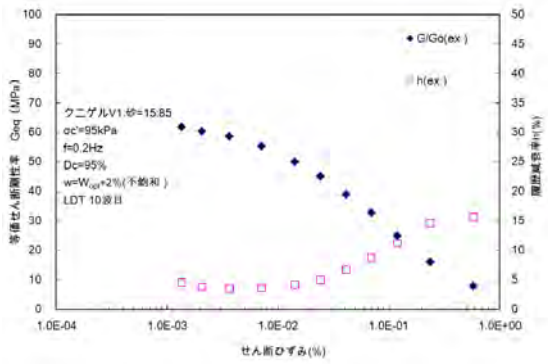
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



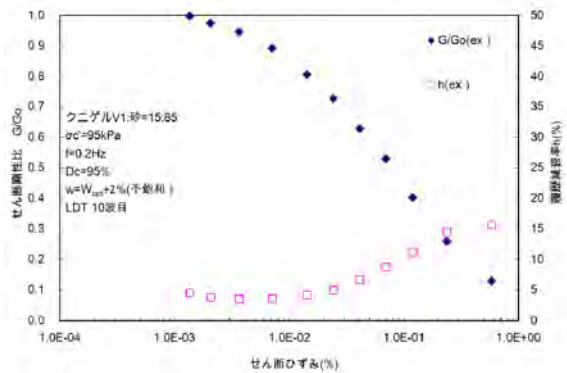
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=70.90\text{MN/m}^2$

図 6.4-3 実験結果 (不飽和 : C 値=95%, W_{opt})



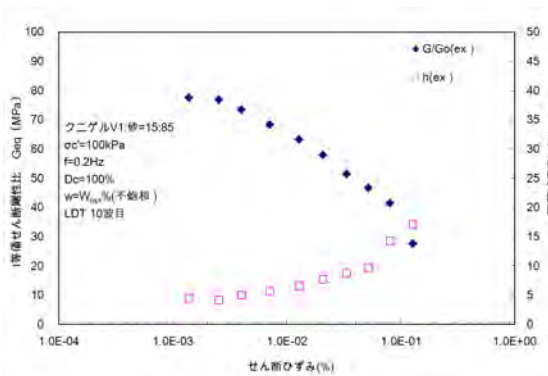
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



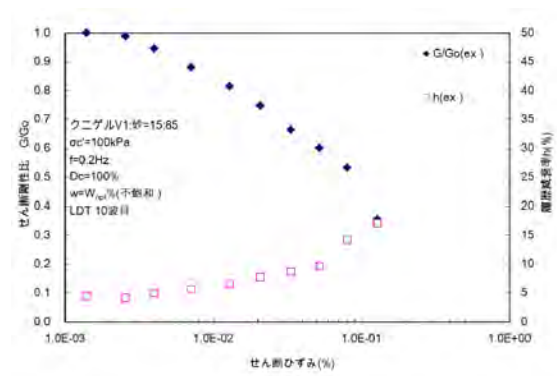
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=61.80\text{MN/m}^2$

図 6.4-4 実験結果 (不飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)



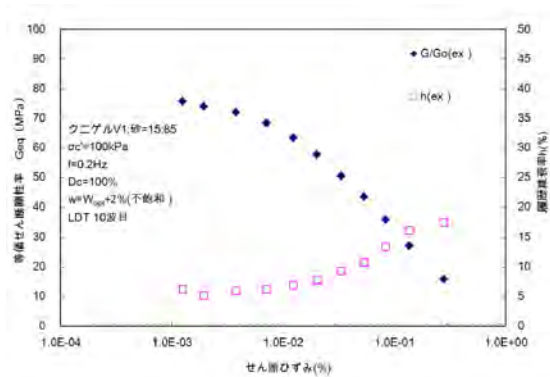
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



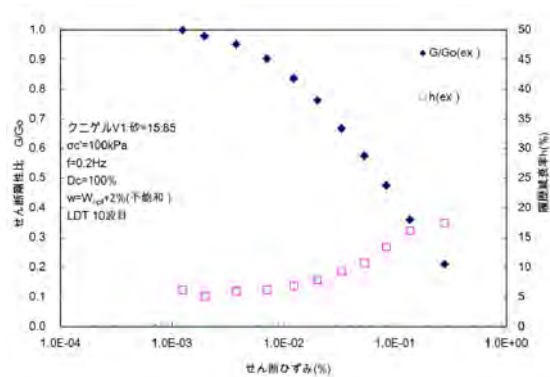
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=77.60\text{MN/m}^2$

図 6.4-5 実験結果 (不飽和 : C 値=100%, W_{opt})



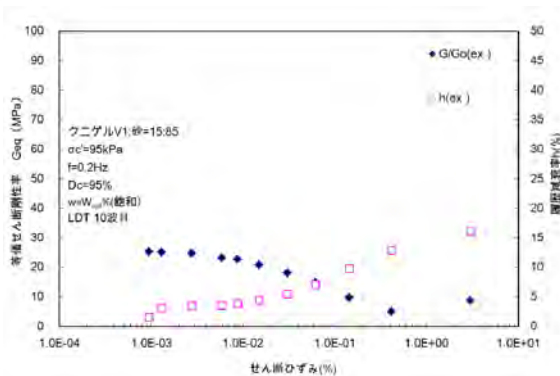
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



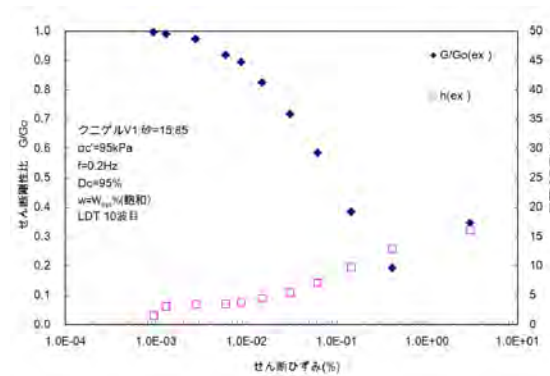
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=75.70\text{MN/m}^2$

図 6.4-6 実験結果 (不飽和 : C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)



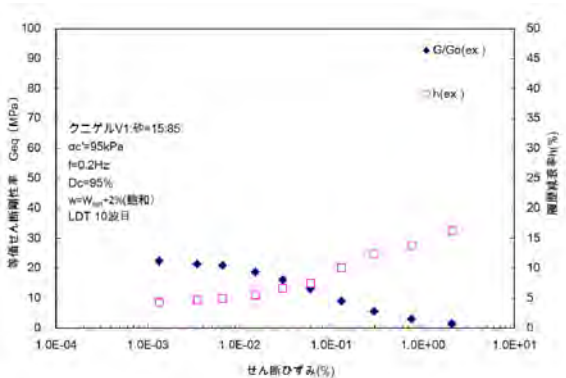
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



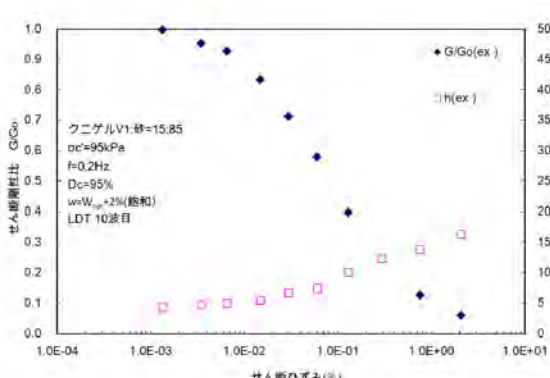
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=25.30\text{MN/m}^2$

図 6.4-7 実験結果 (飽和 : C 値=95%, W_{opt})



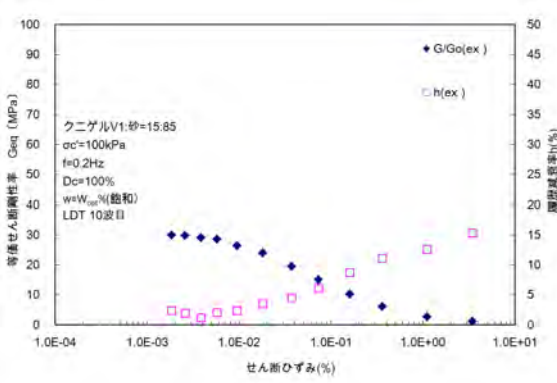
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



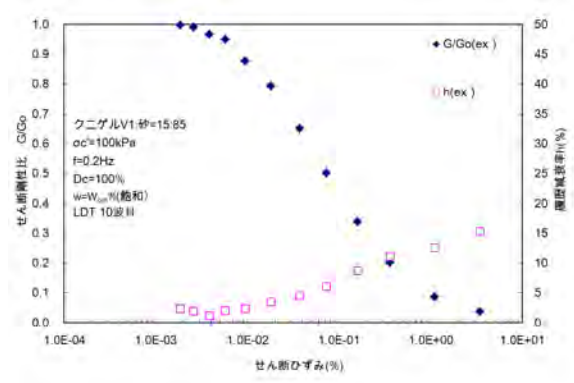
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=22.40\text{MN/m}^2$

図 6.4-8 実験結果 (飽和 : C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)



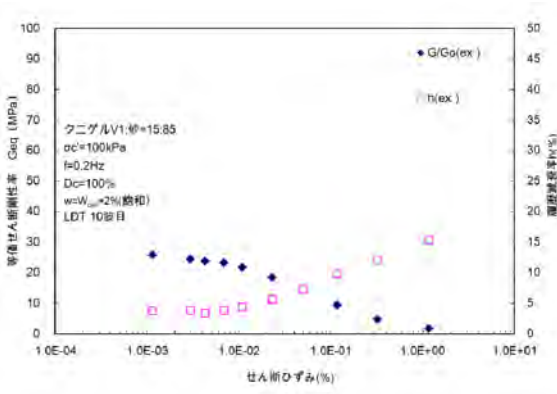
(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



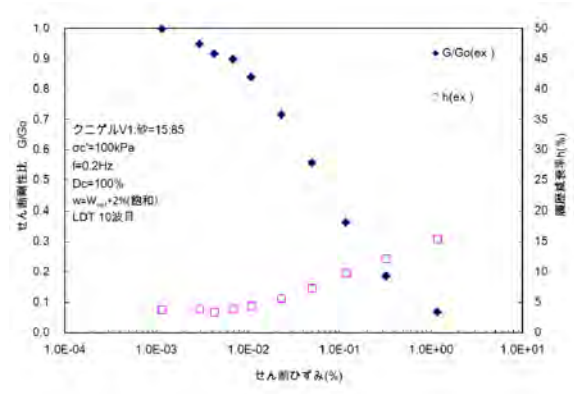
(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=30.00\text{MN/m}^2$

図 6.4-9 実験結果 (飽和 : C 値=100%, W_{opt})



(a) $G_{eq} \sim \gamma, h \sim \gamma$



(b) $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$

$G_0=30.00\text{MN/m}^2$

図 6.4-10 実験結果 (飽和 : C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)

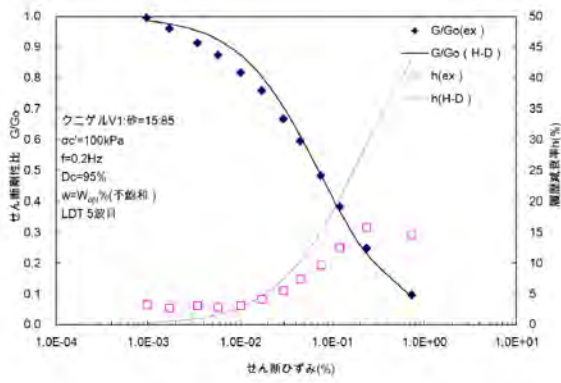
(2) 非線形履歴挙動のモデル化

前述に示した試験結果に基づき、H-D モデル、R-O モデルによる $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線のフィッティング結果(5回、10回)を図 6.4-11~図 6.4-26 のように作成した。それらの結果をまとめたものを表 6.4-2 に示す。

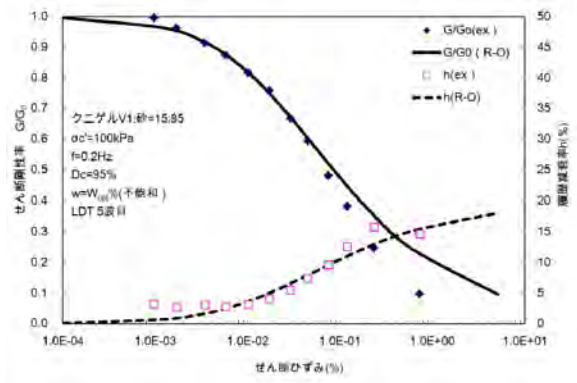
表 6.4-2 H-D,R-O モデルパラメーター一覧

供試体条件		不飽和							
目標含水比(%)		W_{opt}				W_{opt+2}			
締固め度(%)		95		100		95		100	
整理波数		5	10	5	10	5	10	5	10
H-D モデル	G_{max} (MPa)	71.20	70.90	76.60	77.60	61.80	61.80	75.00	75.70
	γ_r (%)	0.0704	0.0714	0.111	0.0890	0.0817	0.0810	0.0778	0.0760
R-O モデル	G_{max} (MPa)	71.477	71.178	76.621	77.643	61.981	61.994	75.033	75.737
	h_{max} (%)	0.20	0.20	0.250	0.250	0.20	0.20	0.25	0.25
	τ_f (MPa)	0.066	0.066	0.148	0.148	0.070	0.070	0.132	0.132
	α	2.021	2.046	4.741	9.688	1.831	1.960	6.865	7.644
	β	1.916	1.916	2.293	2.293	1.916	1.916	2.293	2.293

供試体条件		飽和							
目標含水比(%)		W_{opt}				W_{opt+2}			
締固め度(%)		95		100		95		100	
整理波数		5	10	5	10	5	10	5	10
H-D モデル	G_{max} (MPa)	26.20	25.30	30.30	30.00	22.00	22.40	25.10	25.80
	γ_r (%)	0.0931	0.0969	0.0803	0.0746	0.105	0.0905	0.0775	0.0693
R-O モデル	G_{max} (MPa)	26.283	25.366	30.384	30.082	22.047	22.464	25.158	25.880
	h_{max} (%)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	τ_f (MPa)	0.066	0.070	0.148	0.148	0.070	0.070	0.132	0.132
	α	4.096	3.670	6.641	6.571	3.403	3.818	5.877	7.674
	β	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916	1.916

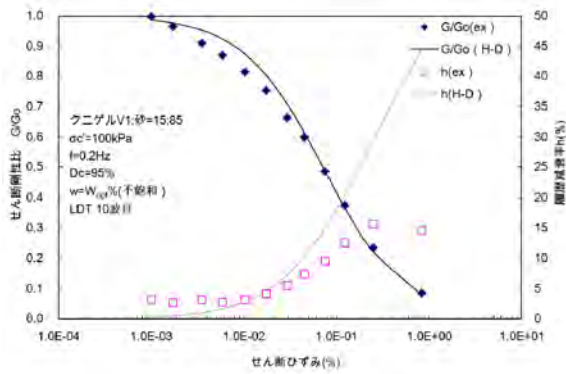


H-D モデル

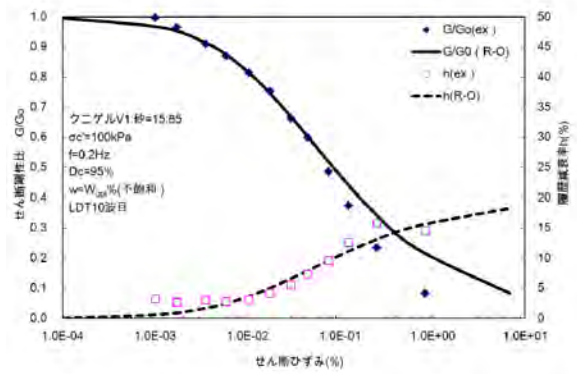


R-O モデル

図 6.4-11 試験結果のフィッティング (5回: 不飽和: C値=95%, W_{opt})

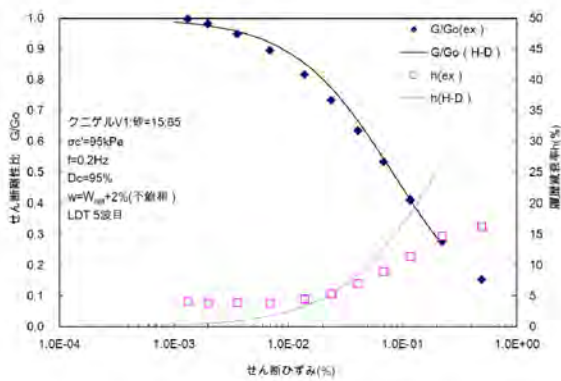


H-D モデル

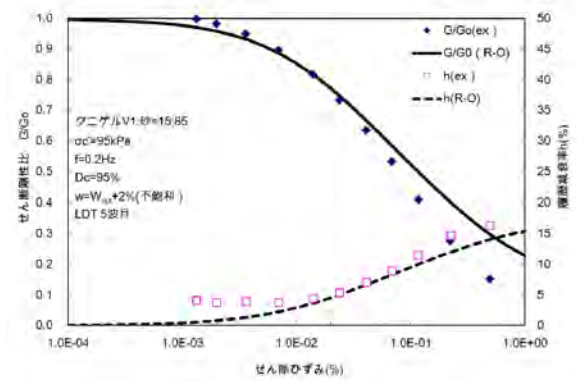


R-O モデル

図 6.4-12 試験結果のフィッティング (10回: 不飽和: C値=95%, W_{opt})

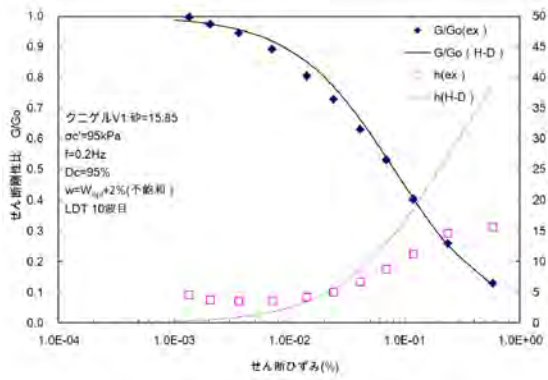


H-D モデル

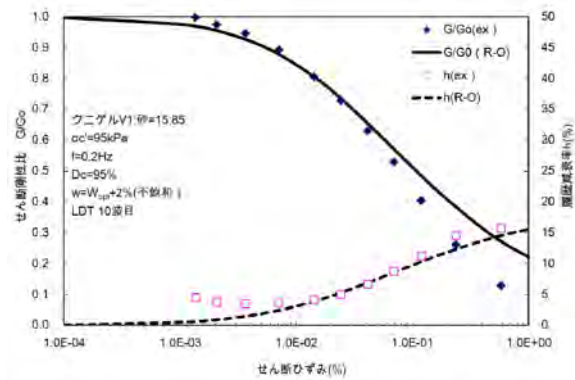


R-O モデル

図 6.4-13 試験結果のフィッティング (5回: 不飽和: C値=95%, $W_{opt}+2\%$)

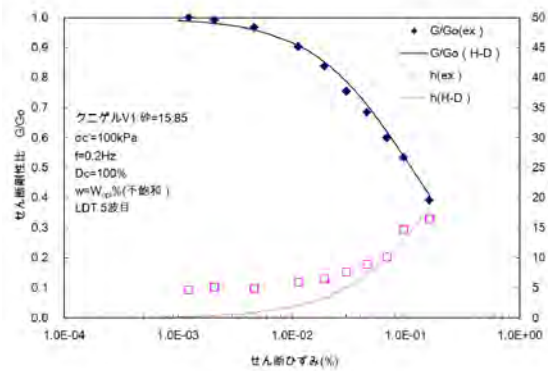


H-D モデル

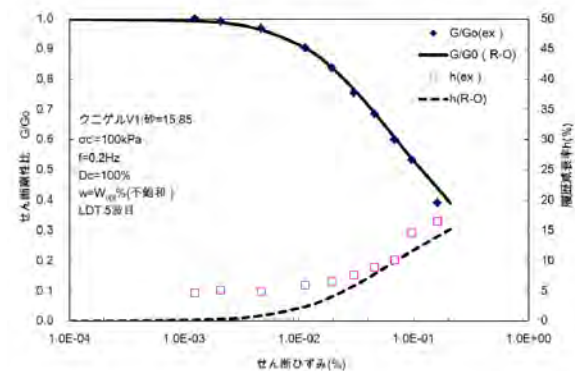


R-O モデル

図 6.4-14 試験結果のフィッティング (10回: 不飽和: C値=95%, $W_{opt}+2\%$)

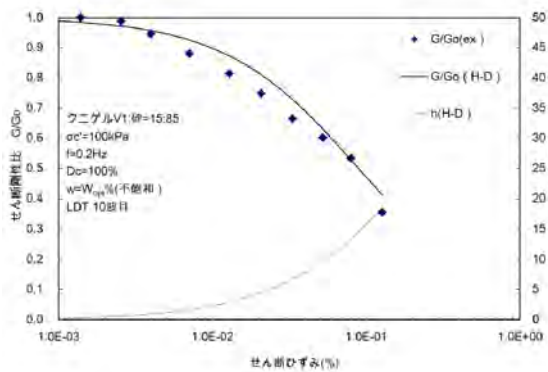


H-D モデル

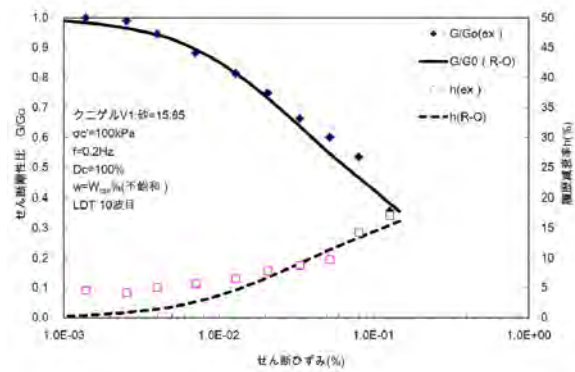


R-O モデル

図 6.4-15 試験結果のフィッティング (5回: 不飽和: C値=100%, W_{opt})

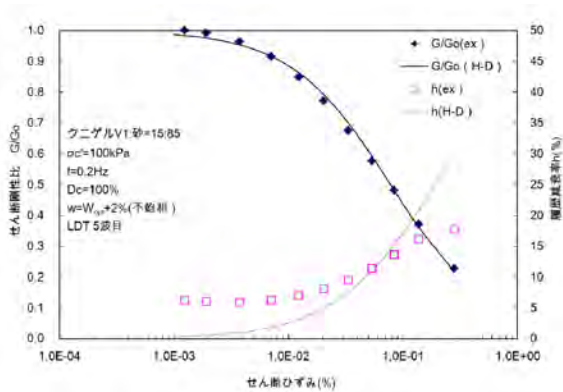


H-D モデル

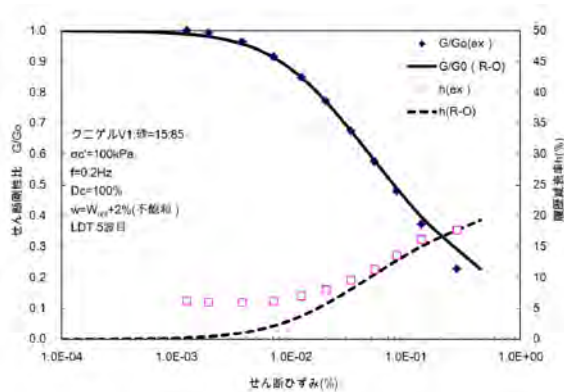


R-O モデル

図 6.4-16 試験結果のフィッティング (10回: 不飽和: C値=100%, W_{opt})

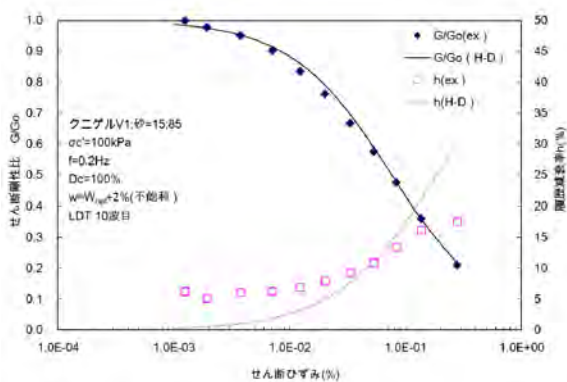


H-D モデル

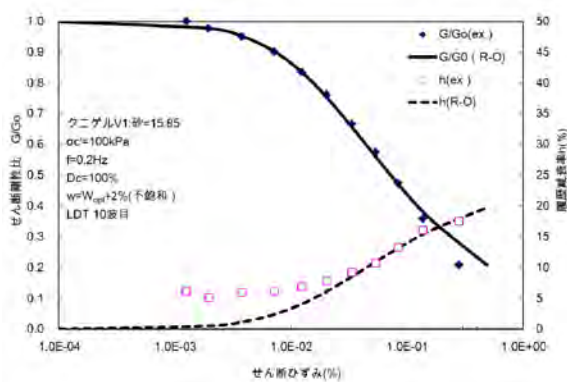


R-O モデル

図 6.4-17 試験結果のフィッティング (5回: 不飽和: C値=100%, $W_{opt}+2\%$)

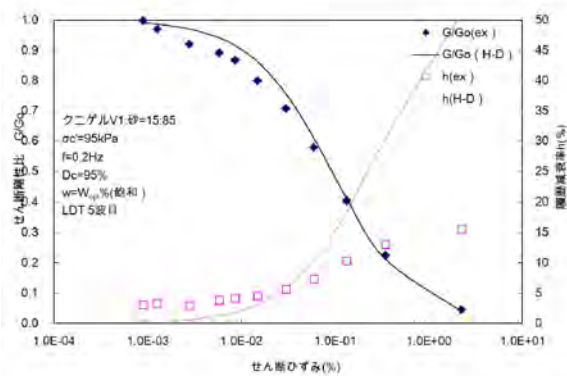


H-D モデル

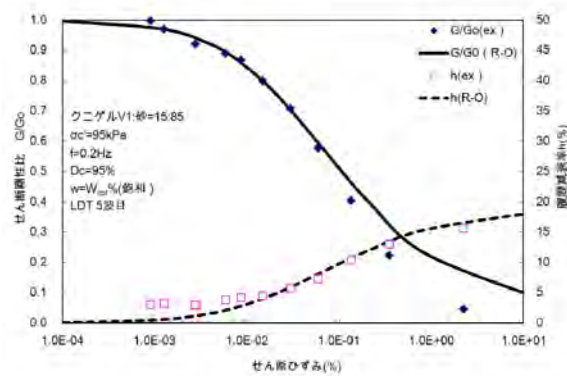


R-O モデル

図 6.4-18 試験結果のフィッティング (10回: 不飽和: C値=100%, $W_{opt}+2\%$)

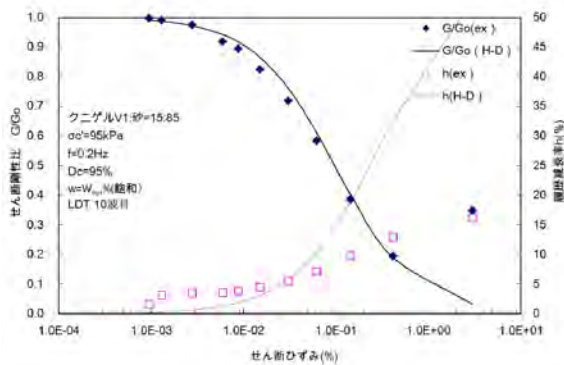


H-D モデル

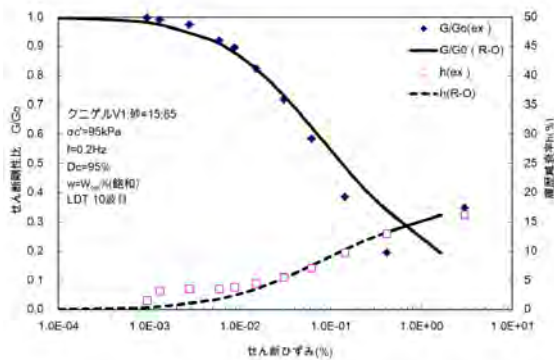


R-O モデル

図 6.4-19 試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C値=95%, W_{opt})

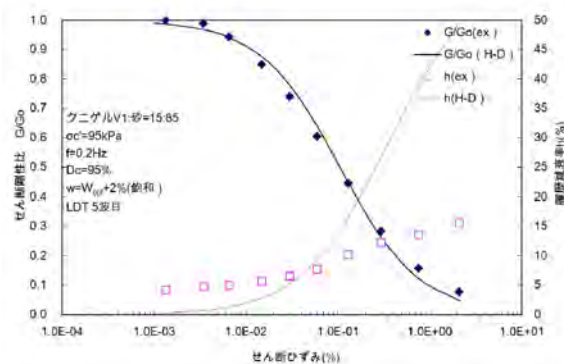


H-D モデル

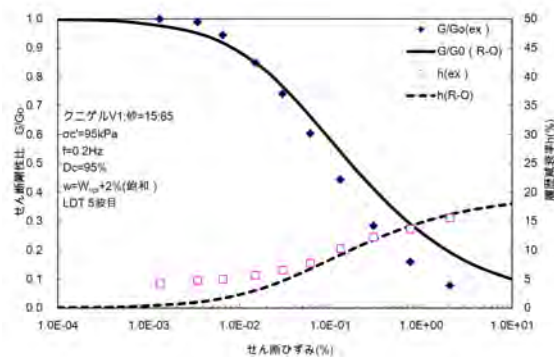


R-O モデル

図 6.4-20 試験結果のフィッティング (10回:飽和: C 値=95%, W_{opt})

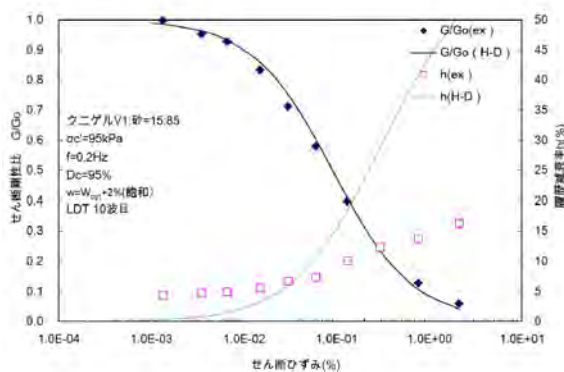


H-D モデル

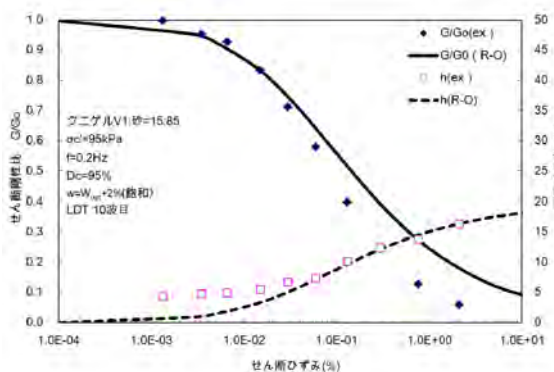


R-O モデル

図 6.4-21 試験結果のフィッティング (5回:飽和: C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)

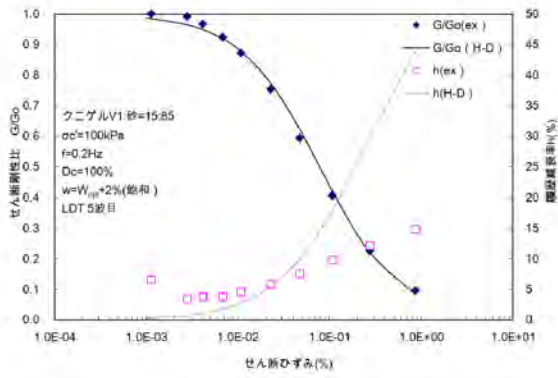


H-D モデル

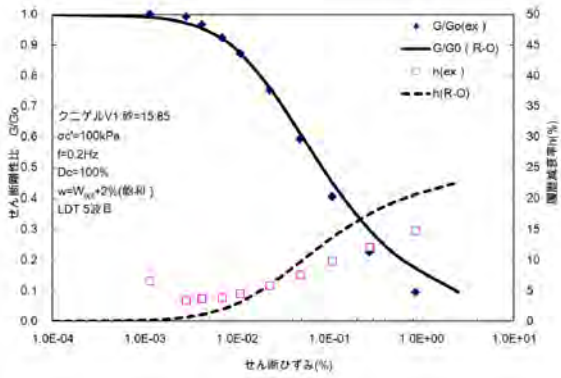


R-O モデル

図 6.4-22 試験結果のフィッティング (10回:飽和: C 値=95%, $W_{opt}+2\%$)

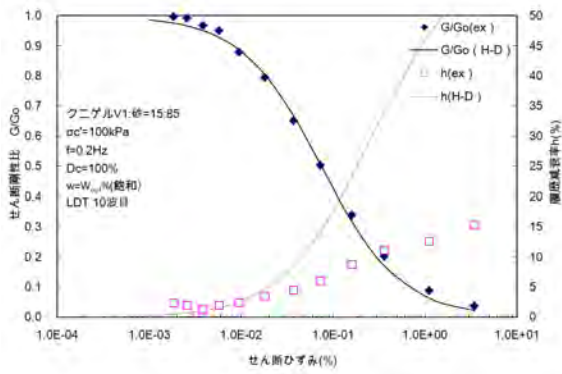


H-D モデル

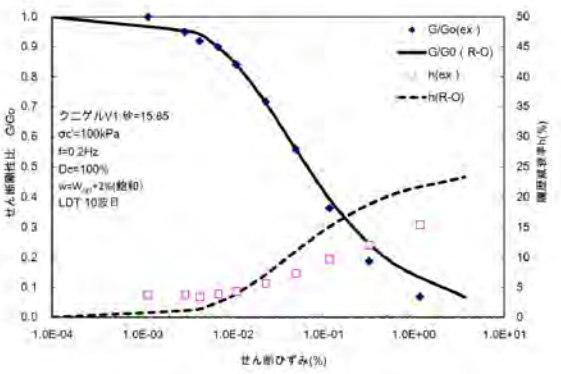


R-O モデル

図 6.4-23 試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C値=100%, W_{opt})

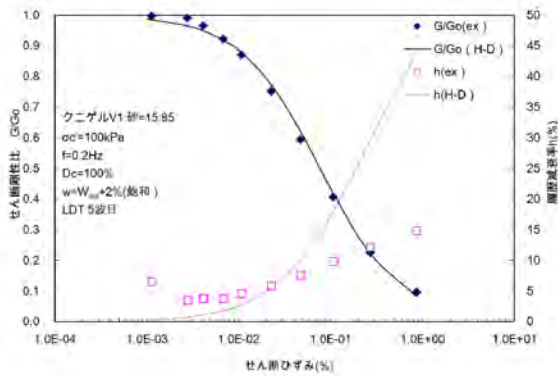


H-D モデル

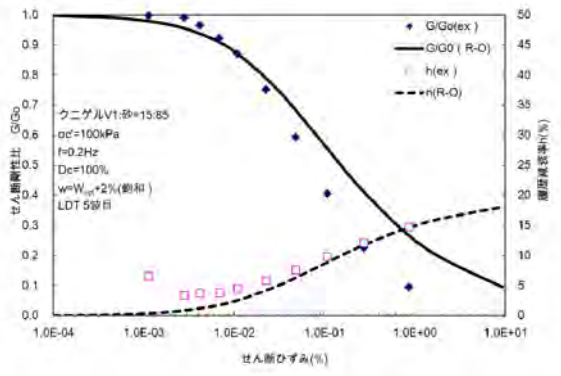


R-O モデル

図 6.4-24 試験結果のフィッティング (10回: 飽和: C値=100%, W_{opt})

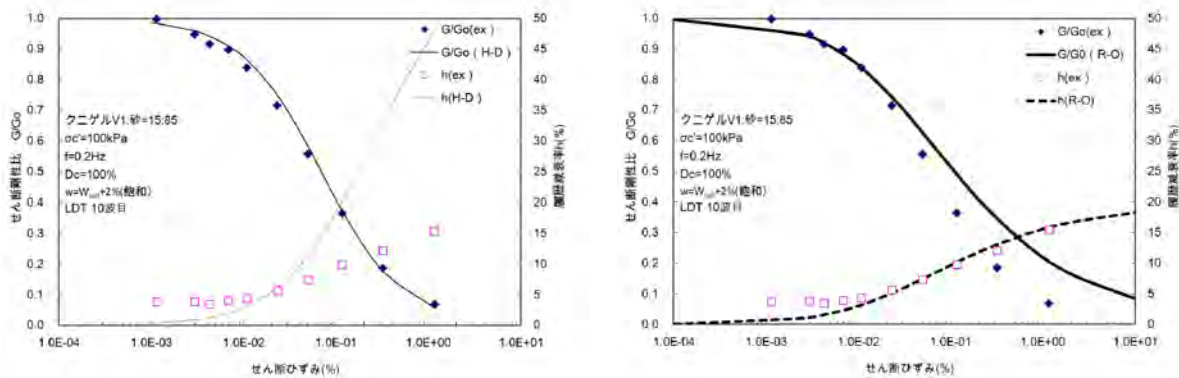


H-D モデル



R-O モデル

図 6.4-25 試験結果のフィッティング (5回: 飽和: C値=100%, $W_{opt}+2\%$)



H-D モデル

R-O モデル

図 6.4-26 試験結果のフィッティング (10 回 : 飽和 : C 値=100%, $W_{opt}+2\%$)

(3) 弾性波速度の測定

試験時の供試体諸元を表 6.4-3、弾性波速度試験により得られた結果およびそれより算出した弾性定数を表 6.4-4 に示す。また、含水比および締めめ規定値と弾性波速度 (V_p, V_s) の関係をそれぞれ図 6.4-27、図 6.4-28 に示す。 V_p は飽和供試体ではほぼ水中での弾性波の透過速度である 2000m/sec 程度であり、 V_s は初期条件によらず概ね 200m/sec 程度となった。飽和度が上がれば、また密度が小さくなれば、せん断剛性は小さくなる傾向を示した。

表 6.4-3 試験時の供試体諸元

	直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)	含水比 (%)	湿潤密度 (Mg/m^3)	乾燥密度 (Mg/m^3)
不飽和	50	100.0	411.4	22.5	2.10	1.71
	50	100.2	410.8	22.5	2.09	1.71
	50	100.0	423.2	18.7	2.16	1.82
	50	100.2	423.2	19.5	2.15	1.80
飽和	50	100.1	383.4	13.2	1.95	1.72
	50	100.0	387.2	15.4	1.97	1.71
	50	100.0	403.3	12.8	2.05	1.82
	50	100.1	403.6	13.1	2.05	1.82

表 6.4-4 弾性波測定試験結果

	含水比 (%)	締めめ規定値 (%)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	ポアソン比 ν	せん断剛性 G (MPa)	ヤング率 E (MPa)	体積弾性係数 K (MPa)
不飽和	13.2	95	609	217	0.427	92.30	263.4	601.4
	15.4	95	779	184	0.470	67.30	197.9	1099.2
	12.8	100	798	216	0.462	96.60	282.1	1175.3
	13.1	100	797	198	0.467	81.20	238.2	1203.2
飽和	22.5	95	1988	149	0.497	47.00	140.7	7817.7
	22.5	95	1913	137	0.497	39.40	118.0	6553.5
	18.7	100	1991	159	0.497	55.10	165.0	9165.0
	19.5	100	1995	144	0.497	44.9	134.4	7468.4

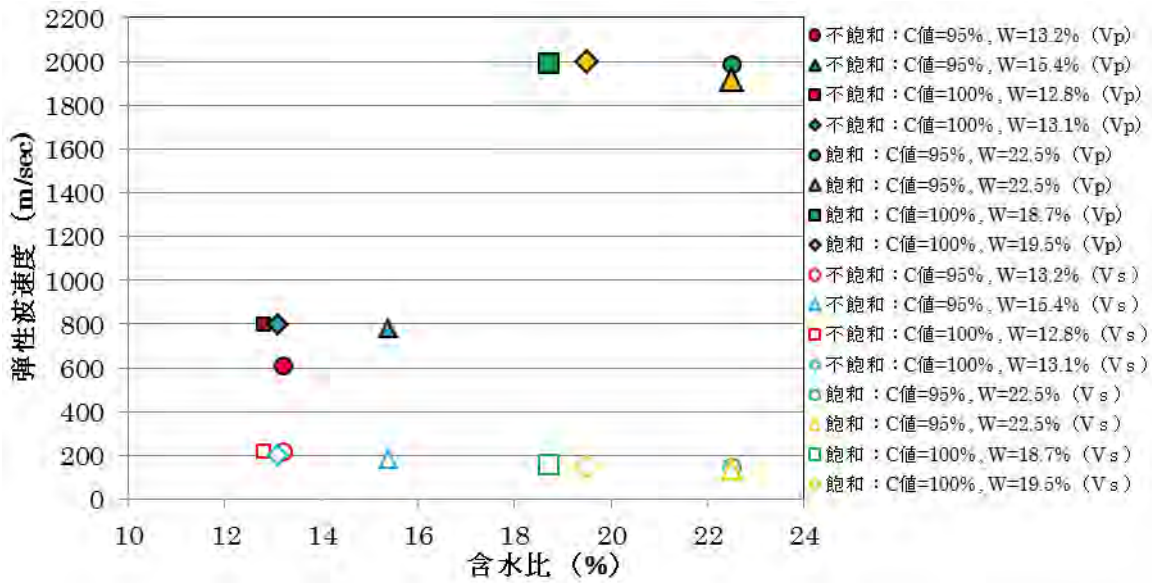


図 6.4-27 弾性波速度と含水比の関係

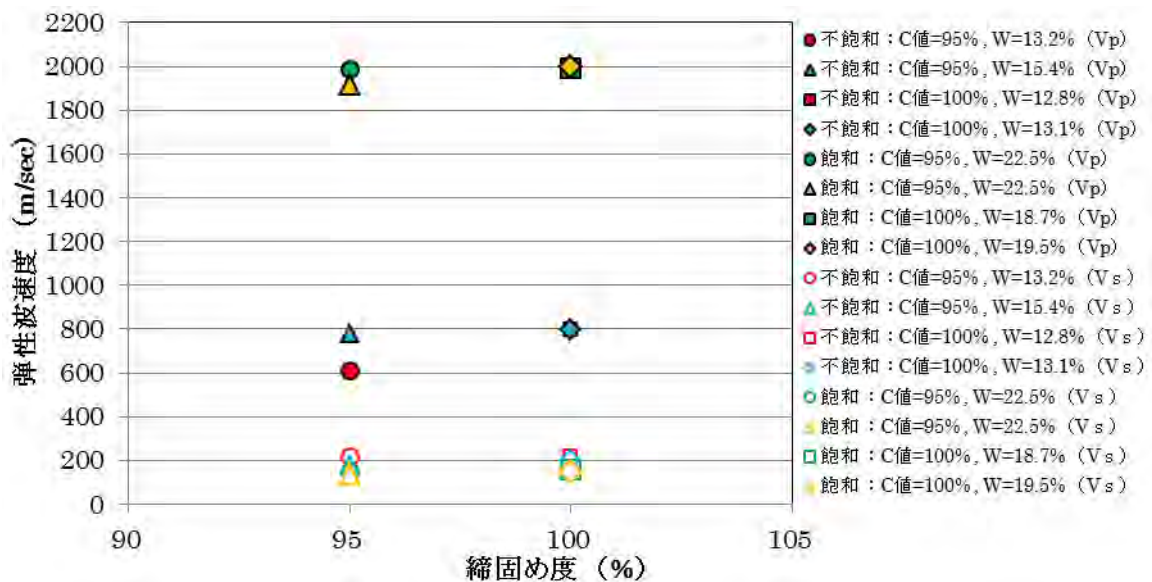


図 6.4-28 弾性波速度と締固め度の関係

6.4.3 試験結果の評価

(1) 繰返し三軸試験

1) 等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰率 h について

実験より得られたせん断剛性 G_0 と締固め度の関係を表したグラフを図 6.4-29 に示す。図より、締固め度の増加に伴い剛性は増加しており、含水比が湿潤側になるほど剛性は低下していることがわかった。また、全ての試験ケースで不飽和時に高い剛性を示すことが確認された。これらの結果は一般の土質と同様の結果であり、飽和に伴う水分の増加による剛性の低下に起因すると考えられる。

ここで、上記の3指標が剛性に与える影響を確認するため、表 6.4-5 のように各指標における剛性変化率を整理した。この表より、締固め度、含水比の変化に伴う剛性変化率は約 1.15 倍程度と微小であったのに対し、飽和と不飽和の違いによる剛性変化率は約 3 倍程度と顕著であることが確認された。このことから、せん断剛性 G_0 は飽和度に大きく依存すると想定される。

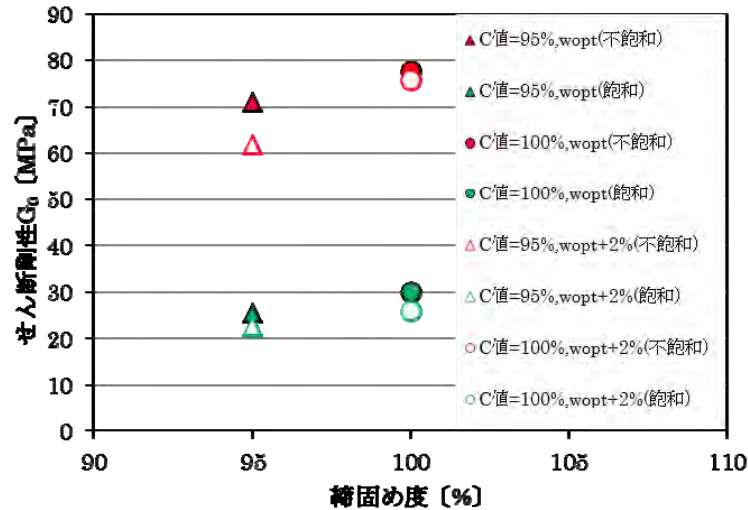


図 6.4-29 せん断剛性 G_0 と締固め度の関係

表 6.4-5 供試体条件、締固め度、含水比によるせん断剛性の変化率

飽和,不飽和による変化率		締固め度による変化率		含水比による変化率	
比較項目	変化率	比較項目	変化率	比較項目	変化率
C値=95%, w_{opt}	2.80	w_{opt} (不飽和)	1.09	C値=95% (不飽和)	1.15
C値=100%, w_{opt}	2.59	$w_{opt}+2%$ (不飽和)	1.22	C値=100% (不飽和)	1.03
C値=95%, $w_{opt}+2%$	2.76	w_{opt} (飽和)	1.19	C値=95% (飽和)	1.13
C値=100%, $w_{opt}+2%$	2.93	w_{opt} (飽和)	1.15	C値=100% (飽和)	1.16

2) 非線形履歴挙動のモデル化

図 6.4-11～図 6.4-26 に示すフィッティング結果から、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線については、H-D モデル、R-O モデルともよくフィッティングされている。一方、 $h \sim \gamma$ 曲線については、R-O モデルに比べ H-O モデルでは、せん断ひずみ γ が大きくなるに従って、過大な h を示す傾向が確認された。これは式 6.4-1 からわかるように H-D モデルでは、 $G=0$ の時に $h=2/\pi$ となるため、 h のとりうる最大の値、すなわち剛-完全塑性体の h と等しくなるという特徴を有しているためである。一方、R-O モデルは比較的大きなひずみレベルの挙動まで再現できていることから、H-D モデルでは R-O モデルに比べ h を課題に評価する傾向にあると考えられる。なお、せん断ひずみ γ が最も小さい時に H-D モデル、R-O モデルで高い精度を確保できていないことが確認された。これは、ひずみレベルの小さい初期段階において、試験値の安定性が確保できなかったことに起因すると考えられる。

(2) 弾性波速度試験

飽和状態での V_p は約 2000m/sec となり、不飽和の V_p の約二倍の値となった。これは、ベントナイトの間隙が隙間無く満たされたことにより、弾性波の伝播効率が高まったためと考えられる。 V_s は含水比、締固め度の増加に対して、横ばいあるいは若干の低下傾向にあるが、これは水分の上昇に伴い、供試体の剛性が低下したことに起因する。この要因については、せん断剛性率の結果において、飽和の G_0 は不飽和の約二倍の値となっている結果からも推測される。

(3) 繰返し三軸試験結果と弾性波速度試験結果の比較について

繰返し三軸試験結果、弾性波速度試験結果から得られた G_{max} の比較を表 6.4-6 に示す。弾性波速度試験のせん断弾性波速度 V_s から得られたせん断剛性率 G は繰返し三軸試験結果の G_{max} に比べ全体的に大きな値を示し、その倍率は不飽和に比べ飽和で大きくなった。また、飽和、不飽和とも締固め度が大きいほど倍率が大きくなっている。これらの要因として、弾性波速度試験の方が繰返し三軸試験に比べて、ひずみレベルや載荷周波数が高いことが推測される。また、せん断弾性波速度測定において、微小な超音波パルス信号を受信するため、計測精度が落ちることも想定され、このことも影響因子の一つと考えられる。

表 6.4-6 繰返し三軸試験と弾性波速度試験における G_{max} の比較

ケース名			$G_{max}(MPa)$		
供試体条件	締固め度	含水比	弾性波速度試験	繰返し三軸試験	弾性波/三軸
不飽和	95	W_{opt}	95.3	70.9	1.3
	100	W_{opt}	67.3	77.6	0.8
	95	W_{opt+2}	96.6	61.8	1.6
	100	W_{opt+2}	81.2	75.7	1.1
飽和	95	W_{opt}	47	25.0	1.9
	100	W_{opt}	39.4	30.0	1.3
	95	W_{opt+2}	55.1	22.4	2.5
	100	W_{opt+2}	44.9	25.8	1.7

6.5 段階载荷による圧密試験

上部埋戻し材で考慮すべき事象として、再冠水後の緩衝材の膨潤圧や地下空洞自体のクリープ変形などの外圧が上げられる。このような状況下での上部埋戻し材の変形挙動を把握するため、圧密試験を実施する。前述の圧密非排水三軸圧縮試験と同様に、再冠水後の上部埋戻し材の力学特性について把握することを目的とする。

6.5.1 試験方法

試験方法は日本工業規格「土の段階载荷による圧密試験方法」(JIS A 1217: 2009))に準拠して実施した。この試験は側方変形を許容しない円筒状の剛な圧密容器を使用する。供試体に対して段階的に一定圧力を作用させ、排水を許容することで一次的に過剰間隙水圧を消散しながら圧密をし、一次圧密に関する圧縮性と圧密速度等の土質定数を求めることを目的とした試験であり、主に細粒分を主体とした透水性の低い飽和供試体に対して実施される。一次圧密とは圧密曲線において、Terzaghi の圧密方程式に代表される熱伝導型圧密方程式の解に従う圧密度 100%までに対応する部分を指す。

圧密試験装置は、圧密リングと底板からなる圧密容器と、圧密容器上端部に所定の荷重を一樣にさせる载荷ロッドから構成され、圧密中の力学挙動を軸変位計により計測する。本試験では錘を载荷フレームに吊り下げ、载荷フレームと剛結した载荷ロッドから圧密リングに対して所定の荷重を作用した。試験供試体は所定の含水比、乾燥密度となるように圧縮成型して作製した。

ここでは最大粒径 2mm の試料を圧縮成形した円柱状飽和供試体を使用し、長期安定性の評価のための解析に使用する土質パラメータとして λ 、を取得することを主な目的とする。

パラメータ λ は $e-\ln p$ 曲線の正規圧密領域の線形勾配を表す圧縮指数である。ここで、 $e-\log p$ 曲線から決まる圧縮指数を C_c とすると、両者の関係は次式のように表される。

$$\lambda = 0.434C_c \quad \text{式 6.5-1}$$

同様に、パラメータ κ は $e-\ln p$ 曲線の過圧密領域の線形勾配を表す膨張指数であり、 $e-\log p$ 曲線から決まる圧縮指数を C_s とすると、両者の関係は次式のように表される。

$$\kappa = 0.434C_s \quad \text{式 6.5-2}$$

本検討で実施した標準圧密試験の仕様を表 6.5-1 に整理する。

表 6.5-1 標準圧密試験の試験仕様

準拠規格	日本工業規格「土の段階載荷による圧密試験方法」(JIS A 1217:2009)		
供試体仕様	供試体寸法	φ 60mm×H20mm	
	作製方法	圧縮成型	
	供試体本数/ケース	1本	
	飽和過程	剛な飽和容器(二重セル)を用いて、真空脱気を所定回数繰り返す。	
試験仕様	飽和過程(三軸セル内)	<ul style="list-style-type: none"> ・圧密開始前に供試体、計器経路内を脱気水、二酸化炭素で通水/置換する。 ・圧密終了後のB値を計測し、所定の値以上になっていることを確認する。 	
	圧力条件	圧密圧力(kPa)	80~2500
		処女荷重段階	8段階
		除荷荷重段階	6段階
	圧密終了判定	24時間圧密を基本とする	
24時間経過しても一次圧密が終了しない場合は、 \sqrt{t} 法により予想される一次圧密終了まで圧密時間を延長する。			

6.5.2 試験結果

標準圧密試験に用いたC値=95%の供試体の諸元を表 6.5-2、表 6.5-3、C値=100%の供試体の諸元を表 6.5-4、表 6.5-5にまとめる。また、間隙比e、体積圧縮係数mv、圧密係数Cv、透水係数kと載荷応力との関係と間隙比eと透水係数kの関係についてC値=95%の結果を図 6.5-1~図 6.5-5、C値=100%の結果を図 6.5-6~図 6.5-10に示す。

表 6.5-2 圧密試験結果 C値 95%,Wopt 載荷過程

項目	記号	単位	載荷過程							
			Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6	Step7	Step8
載荷応力	σ	MN/m ²	80	140	220	380	640	1000	1600	2500
圧密時間	Δt	hour	48	96	144	192	240	288	336	384
圧密変化量	Δd	mm	0.015	0.179	0.192	0.286	0.345	0.341	0.435	0.473
間隙比	e	-	0.575	0.561	0.546	0.523	0.496	0.469	0.435	0.397
体積圧縮係数	m_v	m ² /kN	9.38E-06	1.50E-04	1.22E-04	9.18E-05	6.93E-05	5.04E-05	3.94E-05	2.92E-05
圧密係数	C_v	$\frac{cm^2}{day}$	2835.2	1097.6	1161.6	1360.4	1301.4	1285.1	598.5	152.7
透水係数	K	cm/sec	3.02E-10	1.87E-09	1.61E-09	1.42E-09	1.02E-09	7.35E-10	9.17E-11	5.06E-11
圧縮指数	C_c	-	0.107							

表 6.5-3 圧密試験結果 C値 95%,Wopt 除荷過程

項目	記号	単位	除荷過程					
			Step9	Step10	Step3	Step4	Step5	Step6
載荷応力	σ	MN/m ²	1600	1000	640	380	220	140
圧密時間	Δt	hour	48	96	144	192	240	288
圧密変化量	Δd	Mm	-0.048	-0.05	-0.044	-0.046	-0.124	-0.193
間隙比	e	-	0.401	0.405	0.409	0.412	0.422	0.437
膨潤指数	C_s	-	0.023					

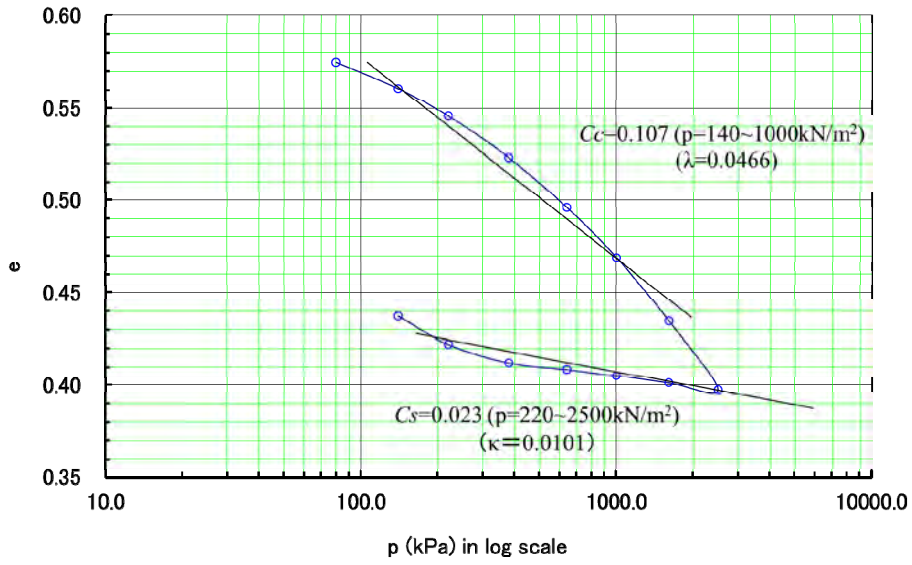


图 6.5-1 e-logp 曲线 (C 值=95%)

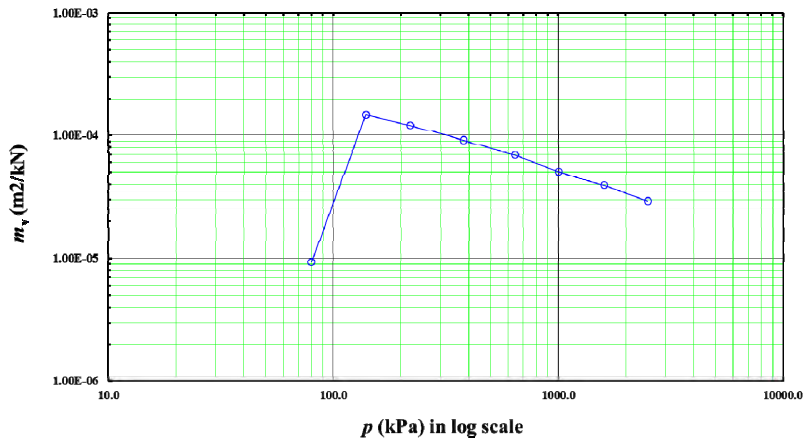


图 6.5-2 m_v -logp 曲线 (C 值=95%)

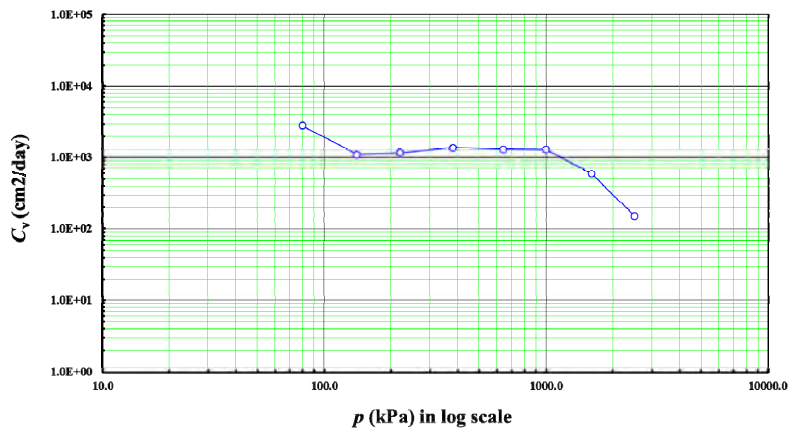


图 6.5-3 e-logk 曲线 (C 值=95%)

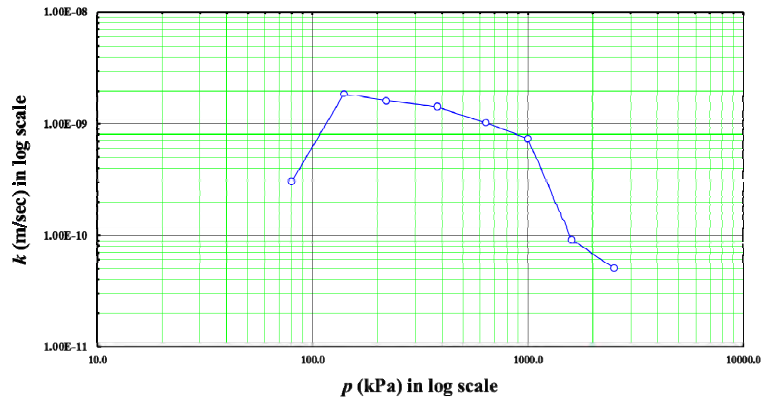


図 6.5-4 k-logp 曲線 (C 値=95%)

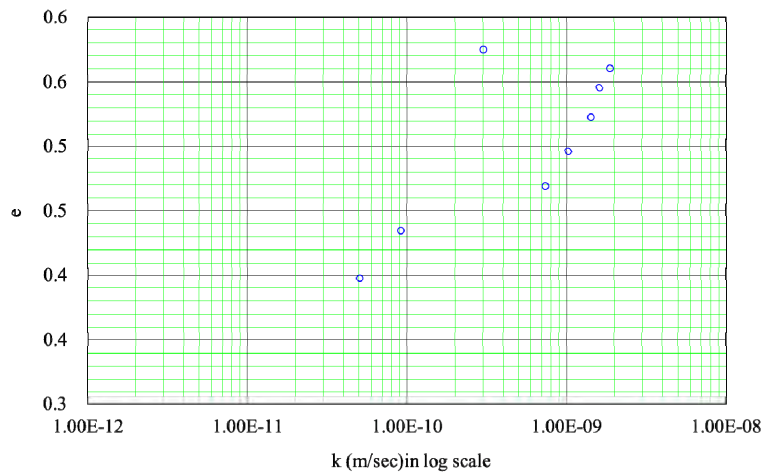


図 6.5-5 e-logk 曲線 (C 値=95%)

表 6.5-4 圧密試験結果 C 値 100%, Wopt 載荷過程

項目	記号	単位	載荷過程							
			Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6	Step7	Step8
載荷応力	σ	MN/m ²	80	140	220	380	640	1000	1600	2500
圧密時間	Δt	hour	48	96	144	192	240	288	336	384
圧密変化量	Δd	mm	0.01	0.088	0.12	0.139	0.141	0.158	0.239	0.298
間隙比	e	-	0.499	0.492	0.483	0.472	0.462	0.450	0.432	0.410
体積圧縮係数	m_v	m ² /kN	6.25E-06	7.35E-05	7.56E-05	4.41E-05	2.77E-05	2.26E-05	2.07E-05	1.75E-05
圧密係数	C_v	c m ² /day	2258.1	1046.1	1165.8	1139.7	1156.9	772.2	390.1	78.1
透水係数	K	m/sec	1.60E-10	8.73E-10	1.00E-09	5.70E-10	3.64E-10	1.98E-10	9.17E-11	1.55E-11
圧縮指数	C_c	-	0.049							

表 6.5-5 圧密試験結果 C 値 100%, W_{opt} 除荷過程

項目	記号	単位	除荷過程					
			Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6
載荷応力	σ	MN/m ²	1600	1000	640	380	220	140
圧密時間	Δt	hour	48	96	144	192	240	288
圧密変化量	Δd	Mm	-0.02	-0.016	-0.011	-0.027	-0.047	-0.166
間隙比	e	-	0.411	0.413	0.413	0.415	0.419	0.431
膨潤指数	C_s	-	0.0086					

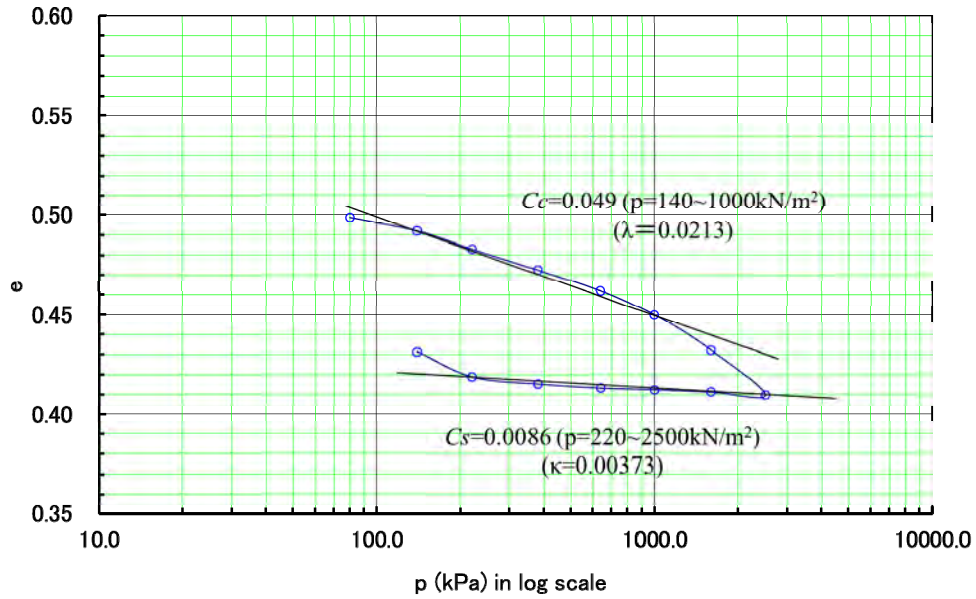


図 6.5-6 e -log p 曲線 (C 値=100%)

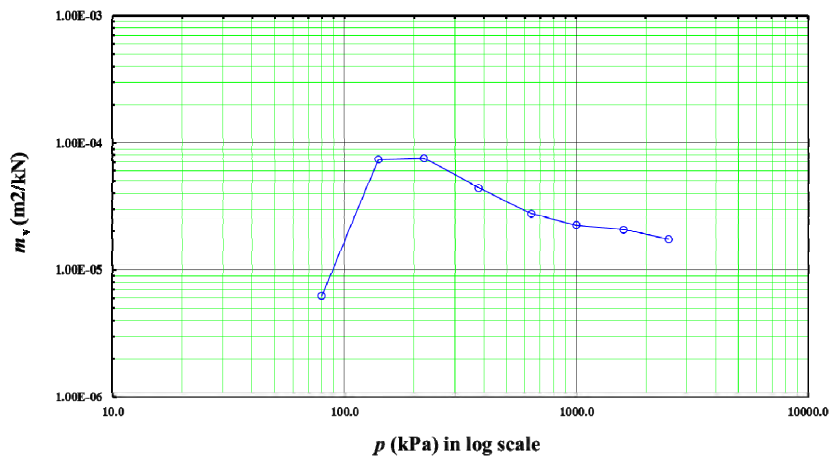


図 6.5-7 m_v -log p 曲線 (C 値=100%)

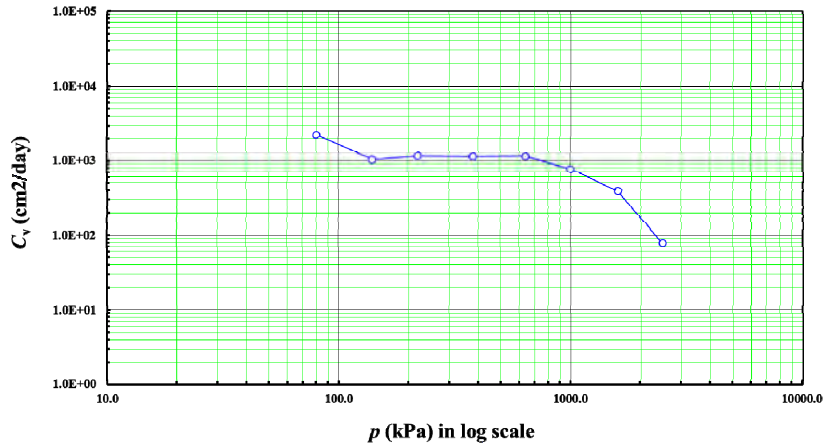


図 6.5-8 C_v -logp 曲線 (C 値=100%)

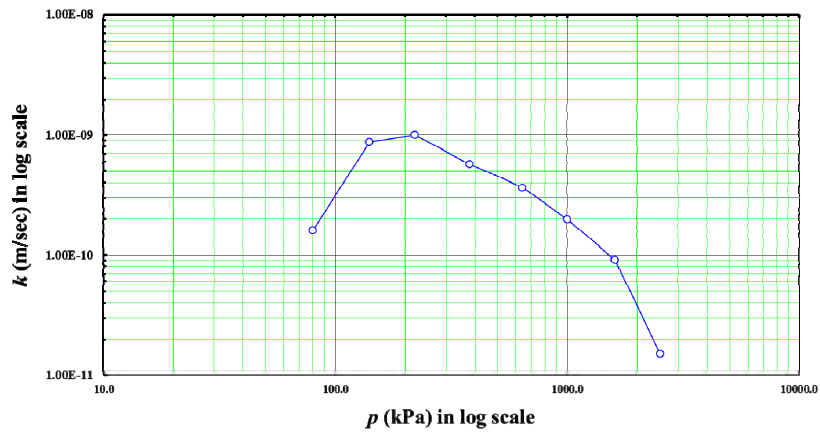


図 6.5-9 k -logp 曲線 (C 値=100%)

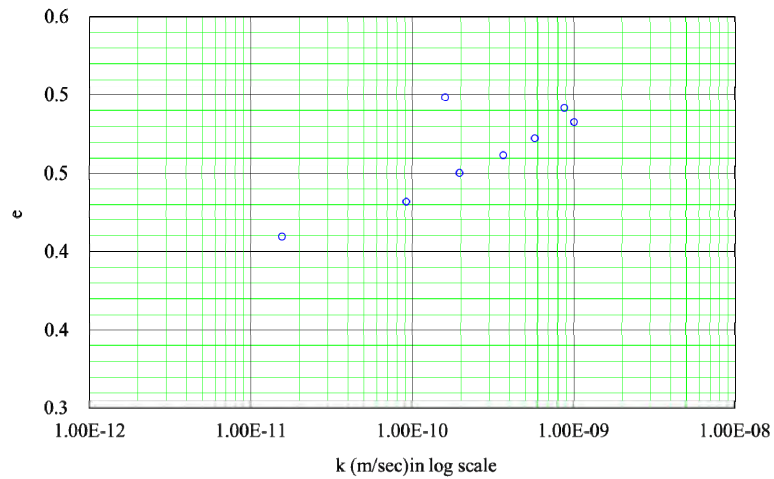


図 6.5-10 e -logk 曲線 (C 値=100%)

6.5.3 試験結果の評価

圧密試験の圧密圧力は、載荷過程は 80,140,220,380,640,1000,1600,2500kPa、除荷過程は 1600,1000,640,380,220,140kPa とした。圧密過程により得られた e -logP 曲線においては、

締固め度 95%、100%ともに明確な直線部分が無かったため、圧密圧力 140～1000kPa の範囲で圧縮指数 C_c 、220～2500kPa の範囲で膨張指数 C_s を測定した。得られた結果を下記の表 6.5-6 に示した。表より、 C_c, C_s はともに締固め度 100%で大きな値を示していることが確認された。このことから、乾燥密度の大きい方が変形しにくい材料であると考えられる。

表 6.5-6 圧縮指数、膨張指数一覧

	C 値=95%	C 値=100%
圧縮指数 C_c	0.107	0.0490
$\lambda (=0.434C_c)$	0.0466	0.0213
膨張指数 C_s	0.0233	0.00859
$\kappa (=0.434C_s)$	0.0101	0.00373

6.6 差圧型透水試験

6.6.1 試験方法

透水試験は、「土の透水試験方法 (JIS A1218)」を参考とした。本試験方法は、JIS を参考としているが、給水側と排水側で圧力をかけることと、それによって供試体の飽和度を評価することを特徴としている。以下に試験手順を示す。

(1) 供試体の飽和過程

設定含水比および設定乾燥密度にて透水試験容器内に作製した供試体は透水試験装置にセッティングする前に水浸脱気にて飽和促進する。水浸脱気法の手順を以下に記す。

- ① 水槽に透水セルが完全に浸るだけのイオン交換水を準備し、あらかじめ脱気しておく。
- ② 透水セルを、注水口と排水口のバルブを開いた状態で水浸する。なお、初期に供試体内に残存している空気量が多くて、この方法だと水浸脱気後も供試体内に空気が残存すると懸念される場合は、片側を水中から出した状態で、もう一方側からのみ浸潤をさせて飽和促進を図る。
- ③ 真空ポンプとレギュレーターを用いて圧力を調節しながら、-0.02、-0.04、-0.06、-0.08、-0.095MPa と徐々に減圧する。
- ④ 各段階では 2 時間以上、最後に-0.095MPa 以下まで減圧した状態では 3 時間以上圧力を維持する。
- ⑤ 減圧と同じ要領で段階に分けて徐々に加圧し、最後に大気圧まで上げて 6 時間以上放置する。

この減圧－加圧を 2 回繰り返す。この後、下記に示す手順で飽和度の確認を行い、飽和度が不足している場合（概ね 95%以下）にはさらに②～⑤の工程を繰り返す。

【飽和度確認の手順】

河野・西垣による方法[1]により、供試体内に背圧 ΔP を作用させたときに供試体内に流入した水量 ΔV を計測することで飽和状態を確認する。飽和度 $S_r(\%)$ は次式から求められる。

$$S_r = \left(\frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_v} \right) \quad \text{式 6.6-1}$$

ここで、 P_0 は初期間隙圧（絶対圧力）、 V_v は供試体の空隙の体積、 H はある温度下における空気の溶解度に相当するパラメータ（ヘンリーの係数）である。なお、本試験ではヘンリーの係数は 0 とする。また、 P_0 は大気圧あるいは間隙水圧にほぼ等しいと考えられるが、厳密な値の決定は難しいため、電中研では背圧を 0→50→100kPa と漸増する過程で一つ前段階の背圧が間隙圧に相当すると設定されているため、本試験でもそれに倣った。供試体の水浸脱気終了後、透水試験前に実施する飽和度測定の手順を以下に記す。

- ① 試験容器を脱気水槽から取り出し、透水試験装置へ設置し、流入側と流出側のビ

ュレットを接続する。この時、試験容器注水口、排水口ともにバルブは開放状態にしておく。

- ② 注排水ビュレットの水位変化がないことを確認後、排水側バルブを閉じ、注水側から所定の圧力 ΔP で注水を開始する（0→50→100 k Pa の二段階）。測定の概要を図 6.6-1(a)に示す。注水側ビュレットの流入量 $\square V$ を定期的に測定し、上記(1)式により供試体の飽和度を求める。流入量が増えると計算上の飽和度は下がる。なお、圧力を負荷したことによりシンフレックスチューブの変形が生じる場合もある。事前に、空容器にて圧力注入を行い、変形の有無を確認しておく。変形が生じる場合は、その影響を補正して飽和度の測定を行うこととする。
- ③ 求めた飽和度の減少幅が 0.05%/日未満になったら、流入量の測定を終了する。
- ④ 測定終了時の流入量 ΔV から、上記(1)式を用いて背圧作用直前の供試体の飽和度を推定する。

以上により供試体の飽和状態を確認した後に透水試験を実施する。なお、飽和度の基準値は 99%以上とする。(1)により算出された飽和度が 95%以下となった場合は、前述の通り、水浸脱気を再度行う。また、95%以上ではあるが 99%以下となった場合は、背圧を 200kPa まで上昇させる。再度の水浸脱気後、あるいは、背圧を 200kPa まで上昇させた後には、再度、(1)により飽和度の確認を行い、99%以上となった後に透水試験を実施することとする。

(2) 透水試験過程

透水試験は差圧（背圧負荷）型変水位透水試験を基本とする。試験の手順を以下に記す。

- ① 飽和度測定過程を終了した後、排水側へ注水側と同一の圧力を設定する。
- ② 注水側を所定の圧力に増加させ、設定の動水勾配になるように圧力を調整し、注水側、排水側の各通水量の測定を開始する。透水試験の概要を図 6.6-1(b)に示す。
- ③ 流入量、流出量を 2 日に 1 回程度の間隔で測定する。通水量の測定に用いる二重管ビュレットは、流入側、流出側ともに 10ml 容量（最小目盛は 0.05ml）である。これらの通水量測定と同時に注水圧力、水温も記録する。
- ④ 透水係数が安定した状態で 4 点以上の値が得られるまで、通水を続ける。
- ⑤ 試験終了時は試験容器を解体し、透水円筒内の供試体を取り出して全量で含水比試験を実施する。得られた含水比を用いて、供試体の飽和度を算出する。

流入側、流出側の各二重管ビュレットを使用した差圧型変水位透水試験であるため、透水係数 $k(\text{m/sec})$ は、以下の式にて算定する [2]。

$$k = \frac{a_{in} \cdot a_{out} \cdot L}{(a_{in} + a_{out})A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{式 6.6-2}$$

ここで、 a_{in} : 注入側のビュレットの断面積(m^2)、 a_{out} : 排水側のビュレットの断面積(m^2)、 L : 供試体長さ(m)、 A : 供試体断面積(m^2)、 t_1 : 測定開始時刻(sec)、 t_2 : 測定終了時刻(sec)、 h_1 : 時刻 t_1 における流入側と流出側との水頭差(m)、 h_2 : 時刻 t_2 における流入側と流出側との水頭差(m)である。

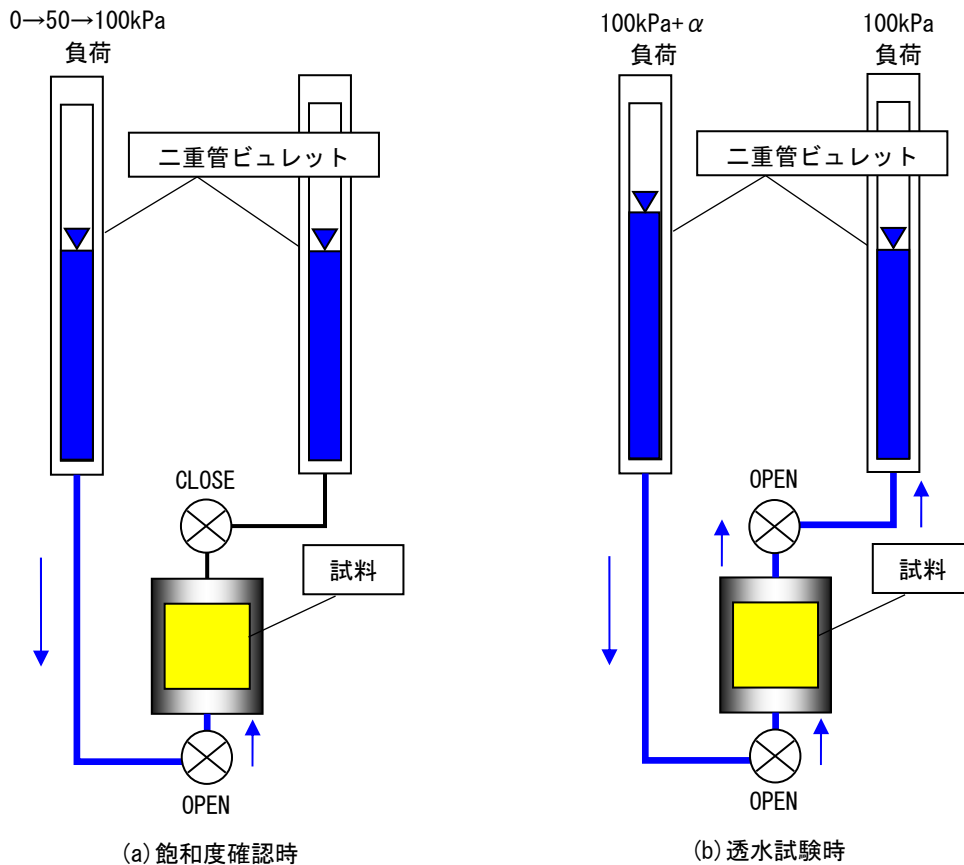


図 6.6-1 飽和度確認および透水試験の概要

6.6.2 試験結果

図 6.6-2～図 6.6-4 に透水試験結果を示す。図 6.6-2 は C 値=100%、 w_{opt} -2%の試験結果、図 6.6-3 は C 値=100%、 w_{opt} +2%の試験結果、図 6.6-4 は C 値=100%、 w_{opt} +4%の試験結果である。透水試験の開始前に水浸脱気による飽和促進、河野・西垣の方法による飽和度の確認を行っているが、水浸脱気に約 5 日、飽和度確認に約 40 日を要しているため、透水試験を開始直後から透水係数が算定できている。図 6.6-5 には、各供試体で得られた透水係数と供試体の初期含水比の関係を、図 6.6-6 には透水係数と乾燥密度の関係を示す。今回の供試体の仕様の範囲では、初期含水比の大小や乾燥密度の大小による透水係数の値の差はほとんど見られなかった。図 6.6-7 には透水係数と有効粘土乾燥密度の関係を、図 6.6-8 には透水係数と有効粘土湿潤密度の関係を示す。なお、図 6.6-9 には乾燥密度と透水係数の関係を示す。今回の供試体の仕様の範囲では、透水係数と有効粘土乾燥密度あるいは有効粘土湿潤密度との相関性は見られなかった。

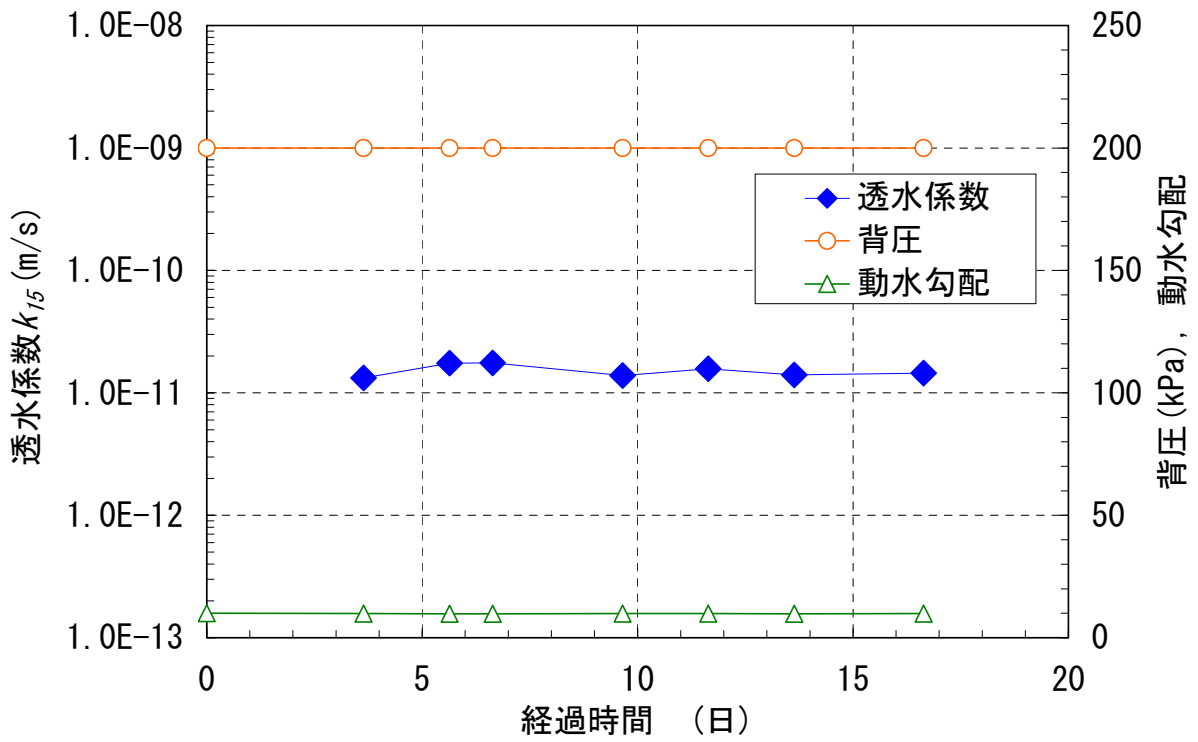


図 6.6-2 透水試験結果；C 値=100%、 $w_{opt}-2\%$

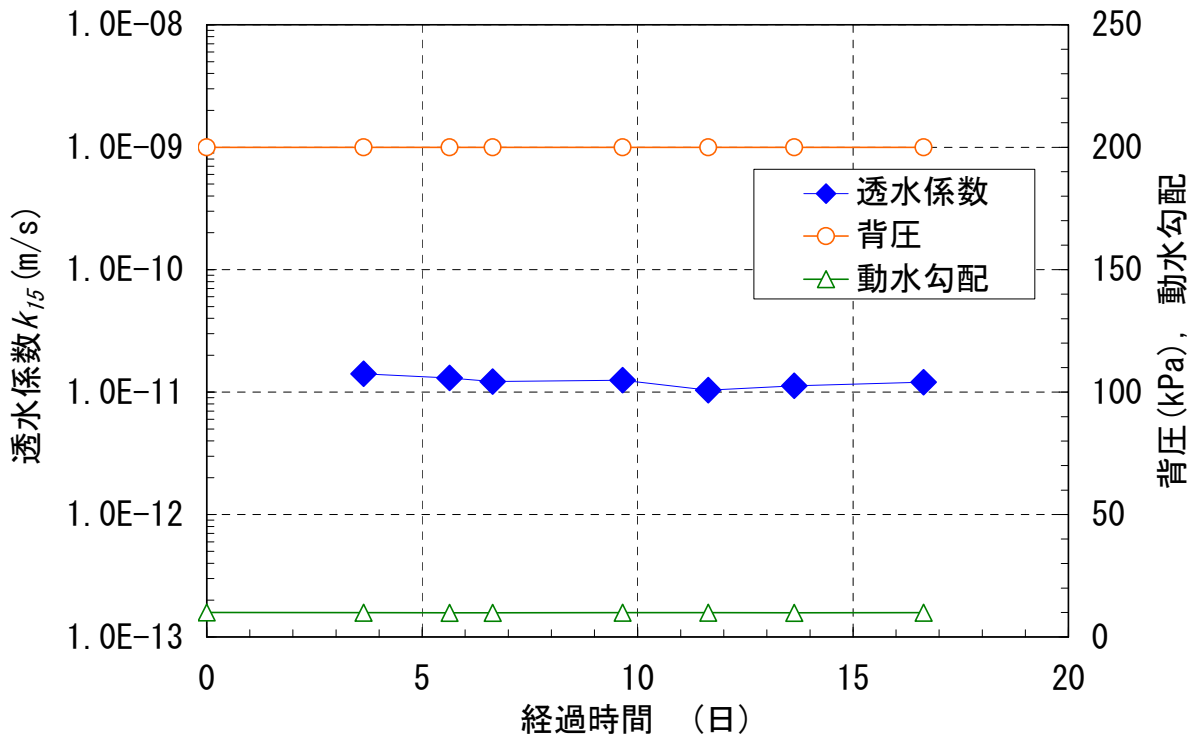


図 6.6-3 透水試験結果；C 値=100%、 $w_{opt}+2\%$

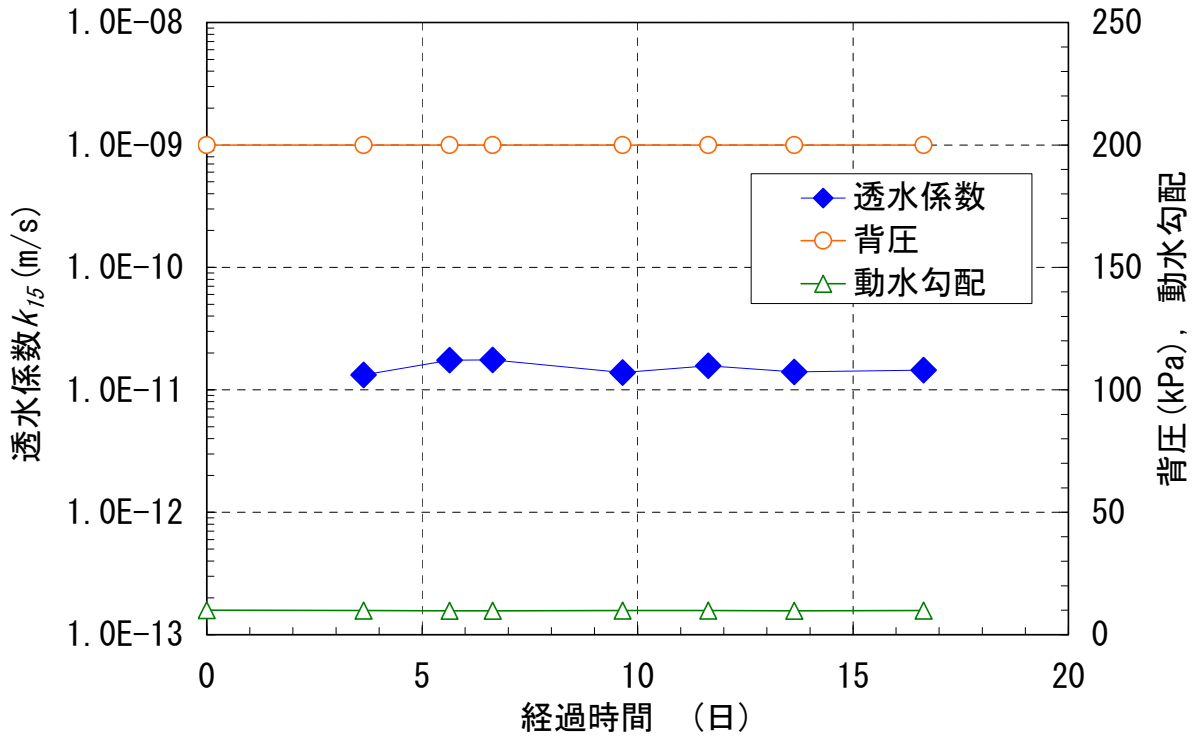


図 6.6-4 透水試験結果；C 値=100%、 $w_{opt} + 4\%$

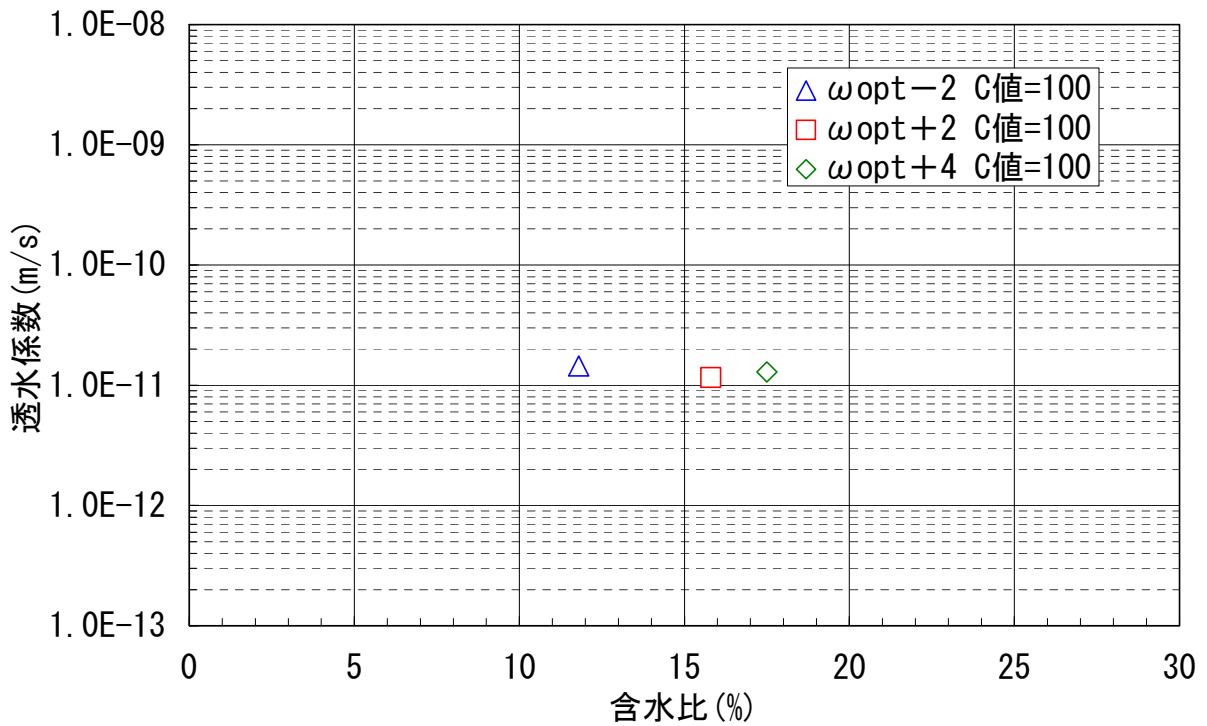


図 6.6-5 透水係数と初期含水比の関係

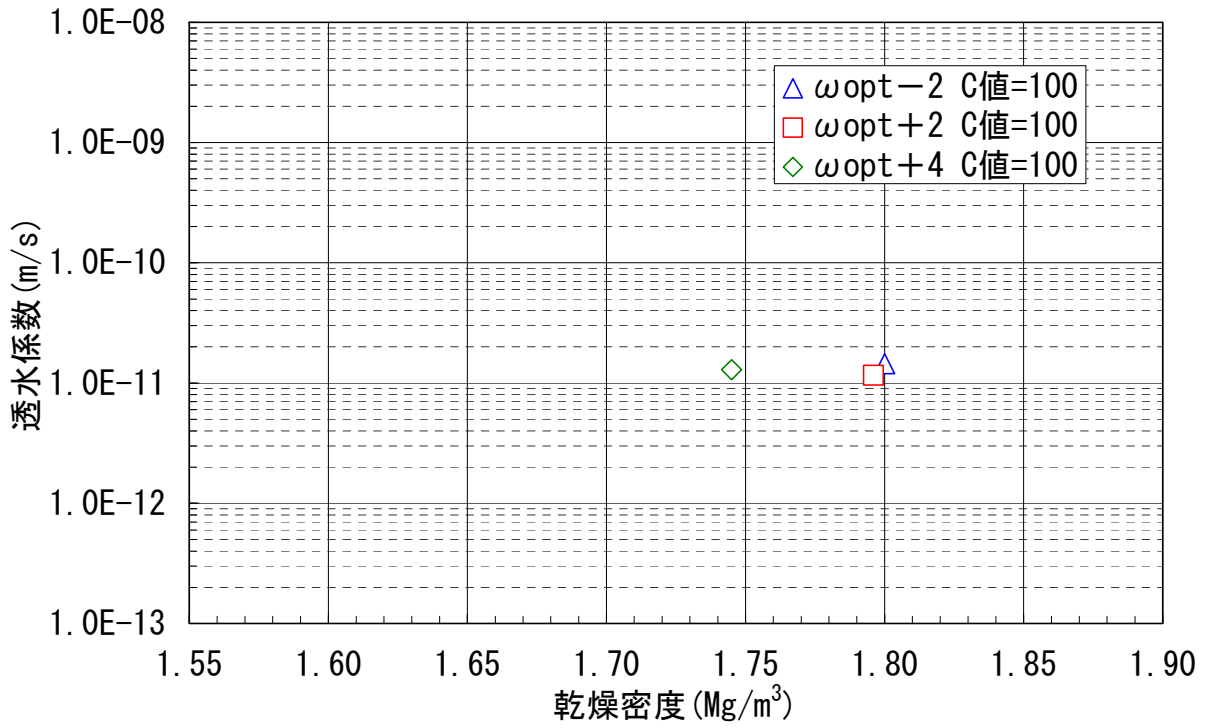


図 6.6-6 透水係数と乾燥密度の関係

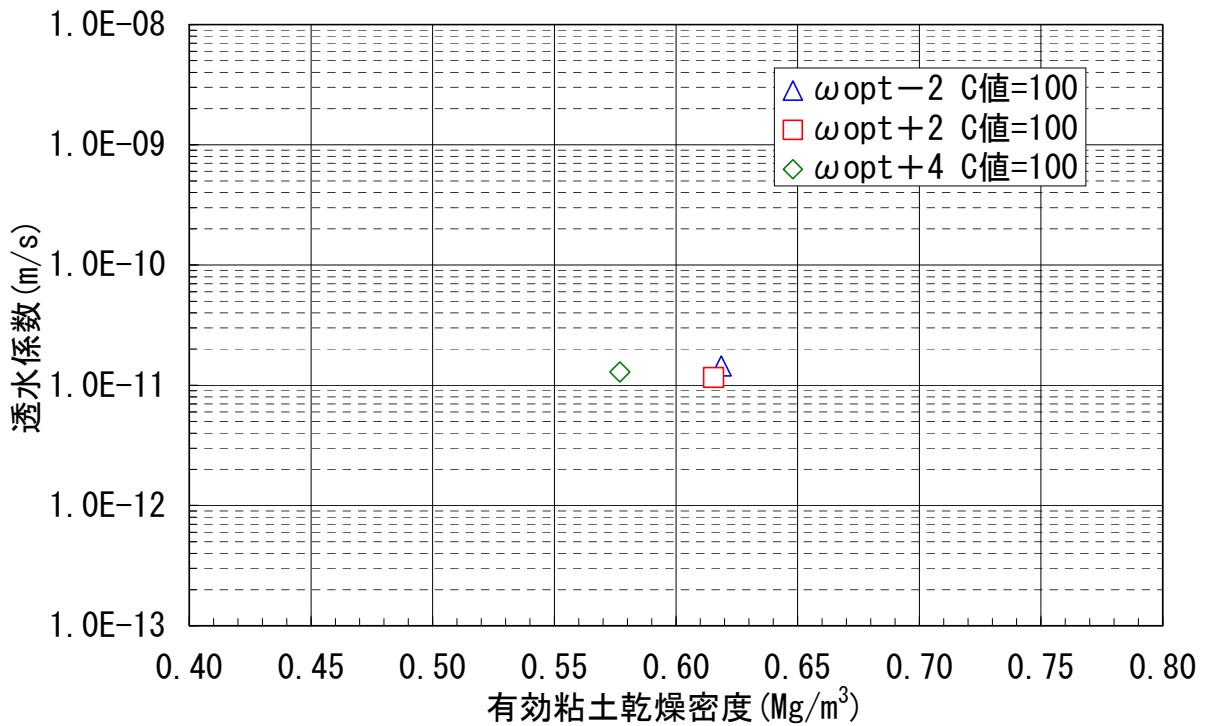


図 6.6-7 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

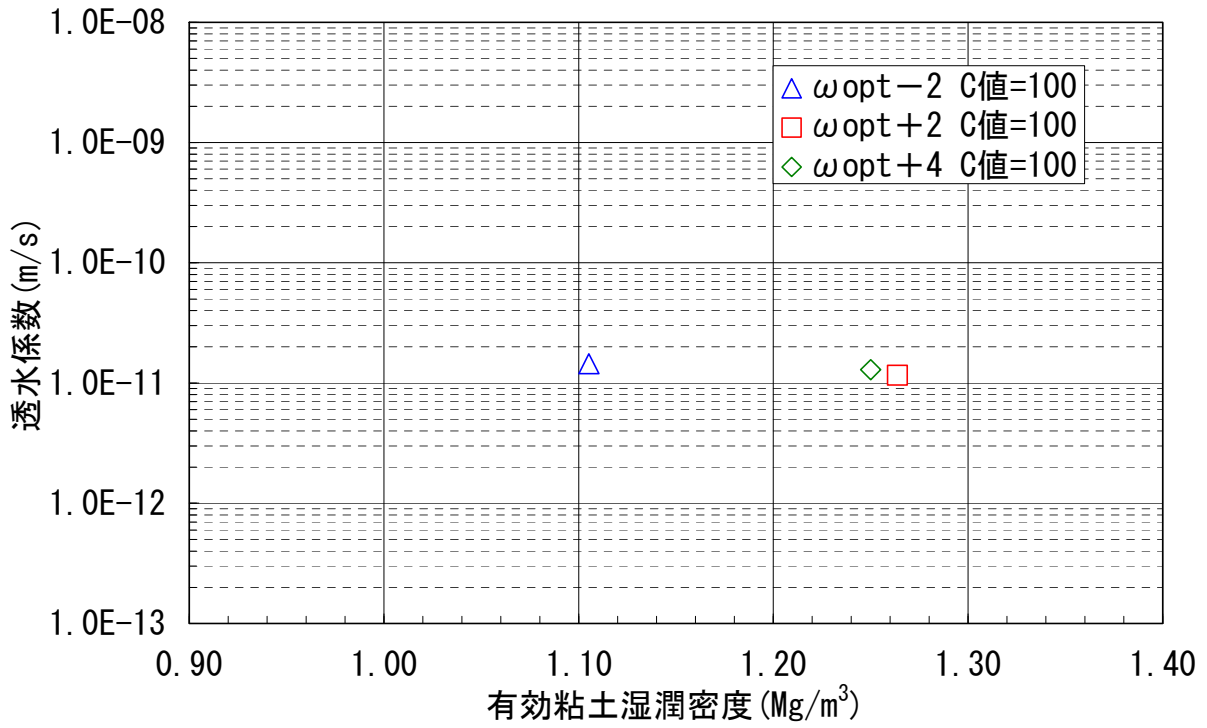


図 6.6-8 透水係数と有効粘土湿潤密度の関係

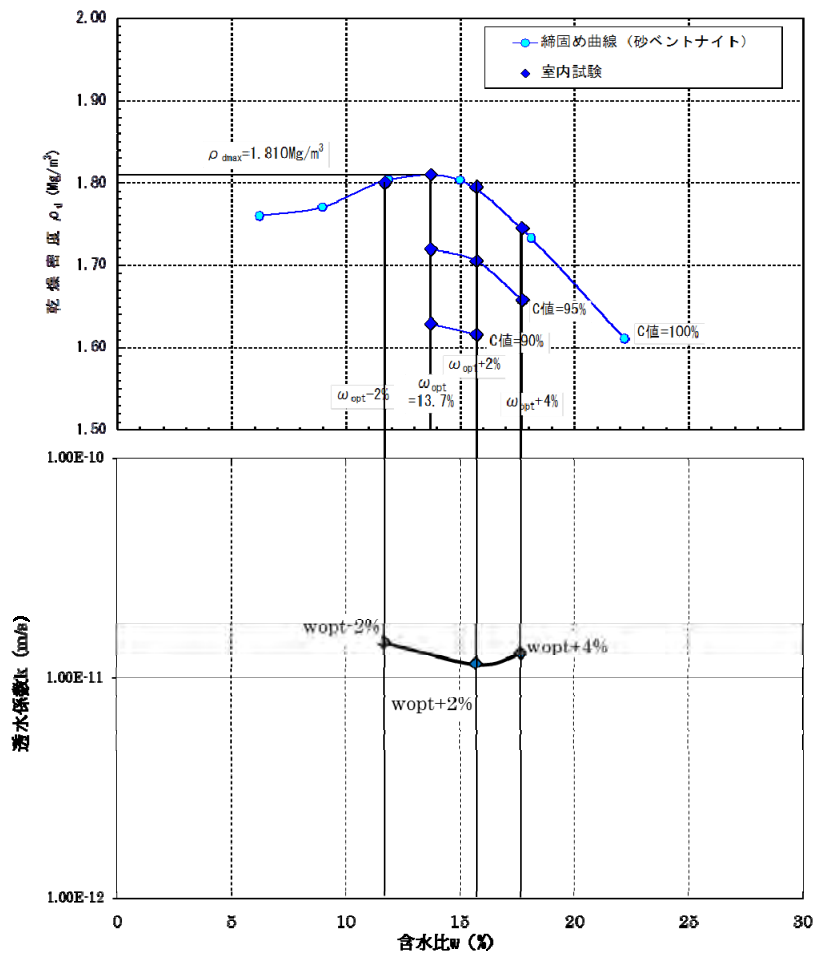


図 6.6-9 乾燥密度と透水係数の関係

6.6.3 試験結果の評価

表 6.6-1 には、試験により得られた透水係数の値を示す。透水係数の値は全て約 $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度であった。今回試験を行った供試体の範囲では透水係数に与える乾燥密度および初期含水比の影響は小さかった。したがって、透水係数と有効粘土湿潤密度あるいは有効粘土湿潤密度とは明確な相関性は見られなかった。

表 6.6-1 透水試験結果

密度仕様	初期含水比仕様	乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)	有効粘土乾燥密度 (Mg/m ³)	有効粘土湿潤密度 (Mg/m ³)	透水係数 (m/s)
C 値=100%	□ _{opt} -2%	1.800	11.7	0.619	1.105	1.45×10^{-11}
C 値=100%	□ _{opt} +2%	1.795	15.7	0.615	1.264	1.16×10^{-11}
C 値=100%	□ _{opt} +4%	1.745	17.7	0.577	1.250	1.29×10^{-11}

6.7 現地発生土を想定した材料を用いた室内試験

6.7.1 試験概要

現地発生土の使用を想定し、本確認試験施設の設置箇所である試験坑道の母岩である軽石凝灰岩を使用したベントナイト混合土の特性を把握するための室内試験を実施した。実施した試験は表 6.7-1 に示す通りである。軽石凝灰岩は 20mm ふるいを通過したものを試験に使用した。また、ベントナイト（クニゲル V1）の混合率は 15%とした。

表 6.7-1 現地発生土を用いた室内試験の項目および数量

対象	試験項目
現地発生土	土粒子密度試験、湿潤密度試験、含水比試験、粒度試験
混合土	液性・塑性限界試験、締固め試験、透水試験、一軸圧縮強度試験

6.7.2 現地発生土に関する試験結果

(1) 土粒子密度試験

軽石凝灰岩の土粒子密度の測定結果を図 6.7-1 に示す。土粒子密度の平均値は 2.330Mg/m³であった。埋戻し材の施工試験に使用した砂の土粒子密度の平均値が 2.715Mg/m³であるため、それに比べて軽石凝灰岩の土粒子密度は小さい。

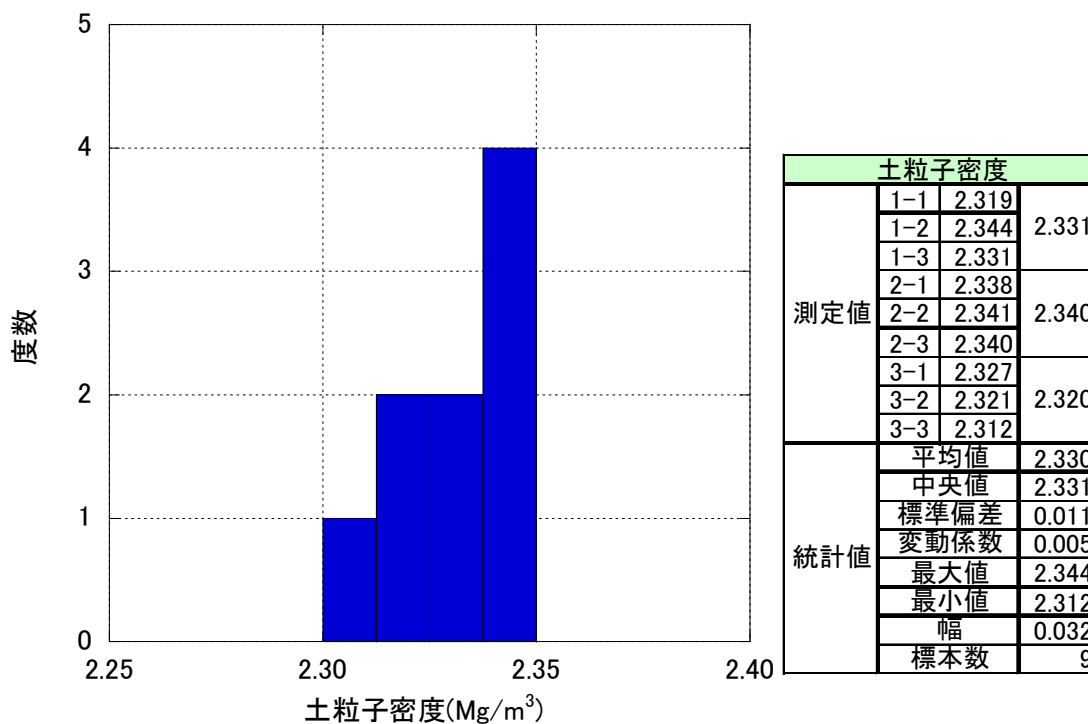


図 6.7-1 現地発生土（軽石凝灰岩）の土粒子密度測定結果

(2) 湿潤密度試験

軽石凝灰岩を締固め試験の A 法エネルギーで突固めて密度の測定を行った。結果を表 6.7-2 に示す。含水比の平均値は 54.9%であり、湿潤密度の平均値は 1.515 Mg/m³、乾燥密度の平均値は 0.978 Mg/m³となった。

表 6.7-2 現地発生土（軽石凝灰岩）の湿潤密度測定結果

測定値	湿潤密度(Mg/m ³)	含水比(%)	乾燥密度(Mg/m ³)
1	1.516	54.6	0.980
2	1.512	55.3	0.974
3	1.518	54.8	0.981
平均値	1.515	54.9	0.978

(3) 含水比試験

軽石凝灰岩の含水比の測定結果を図 6.7-2 に示す。含水比の平均値は 56.2%であった。埋戻し材の施工試験に使用した砂の含水比の平均値が 5.0%であるため、それに比べて軽石凝灰岩の含水比はかなり高い。

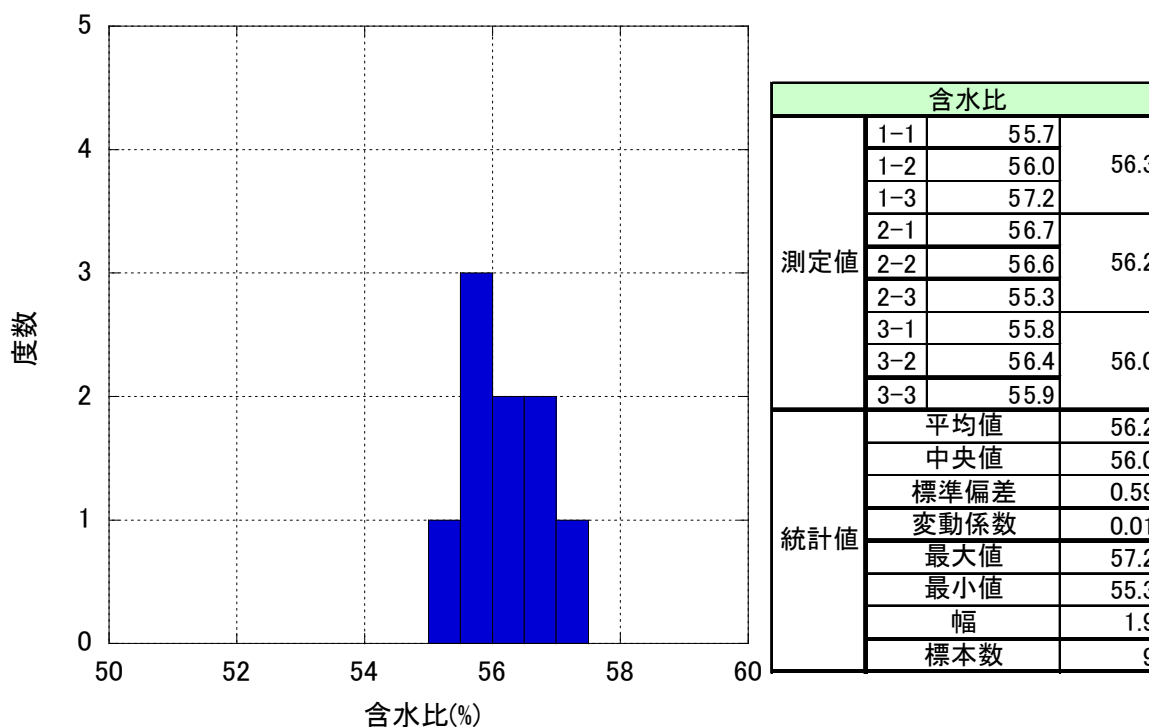


図 6.7-2 現地発生土（軽石凝灰岩）の含水比測定結果

(4) 粒度試験

軽石凝灰岩の粒度分布を図 6.7-3 に示す。粒径が 75 μ m 以下の粒子が 40%以上もあり、埋戻し材の施工試験に使用した砂に比べて細粒分がかなり多いといえる。

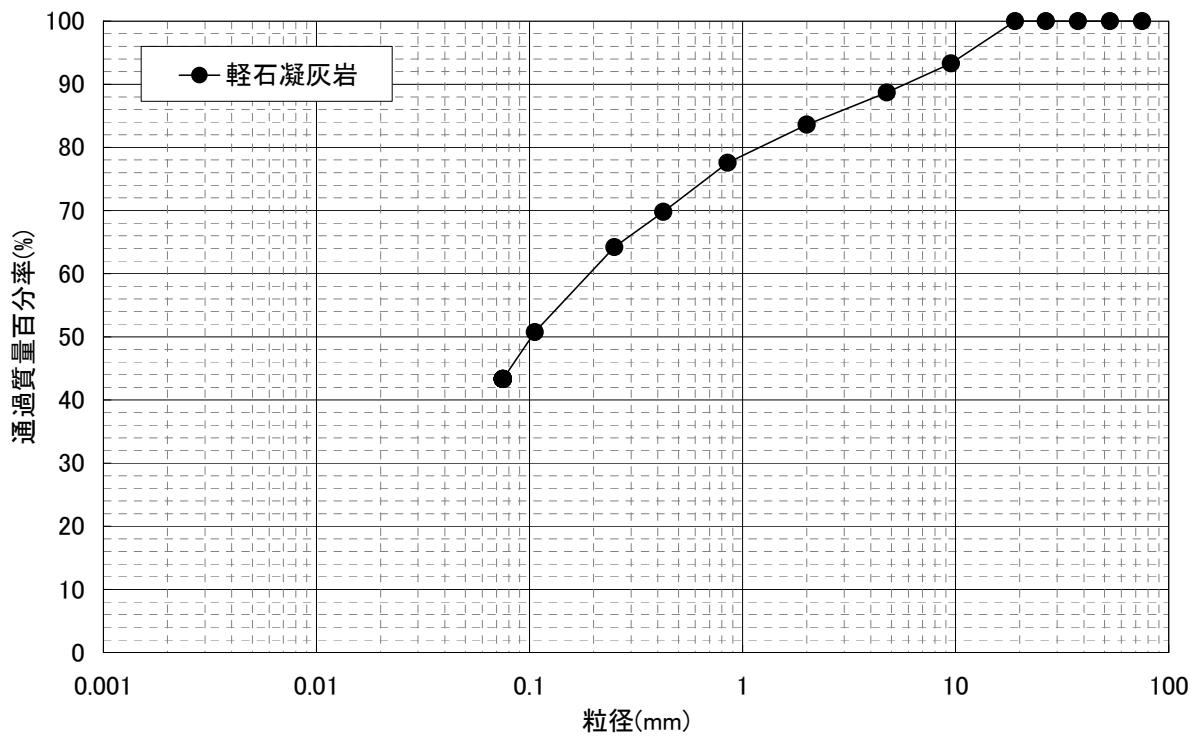


図 6.7-3 現地発生土（軽石凝灰岩）の粒度分布

6.7.3 現地発生土を用いたベントナイト混合土の試験結果

軽石凝灰岩とベントナイト（クニゲル V1）を混合し、ベントナイトの混合率 15%で混合土を作製して試験に供した。以下、試験結果をまとめる。

(1) 液性・塑性限界試験

軽石凝灰岩とベントナイト（クニゲル V1）の混合土（ベントナイト混合率 15%）のコンシステンシー限界を表 6.7-3 に示す。

表 6.7-3 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の液性・塑性限界測定結果

測定値	液性限界 ω_L (%)	塑性限界 ω_P (%)	塑性指数 I_P
1	98.4	37.9	60.5
2	96.3	37.9	58.4
3	96.9	37.8	59.2
平均値	97.2	37.9	59.4

(2) 締固め試験

軽石凝灰岩とベントナイト（クニゲル V1）の混合土（ベントナイト混合率 15%）の締固め試験結果を図 6.7-4 に示す。締固め試験は A 法および C 法で実施した。A 法での最適含水比は 33.8%、最大乾燥密度は 1.069Mg/m^3 となった。また、C 法での最適含水比は 21.2%、

最大乾燥密度は $1.198\text{Mg}/\text{m}^3$ であった。軽石凝灰岩、ベントナイトの初期含水比の値（それぞれ、56.2%、7.6%）から、所定の混合率で混合した混合土の初期含水比は 48.9%と算出され、この値は A 法での最適含水比よりかなり高い値であることが分かる。そのため、試料調整は、一旦軽石凝灰岩を乾燥させてから行った。

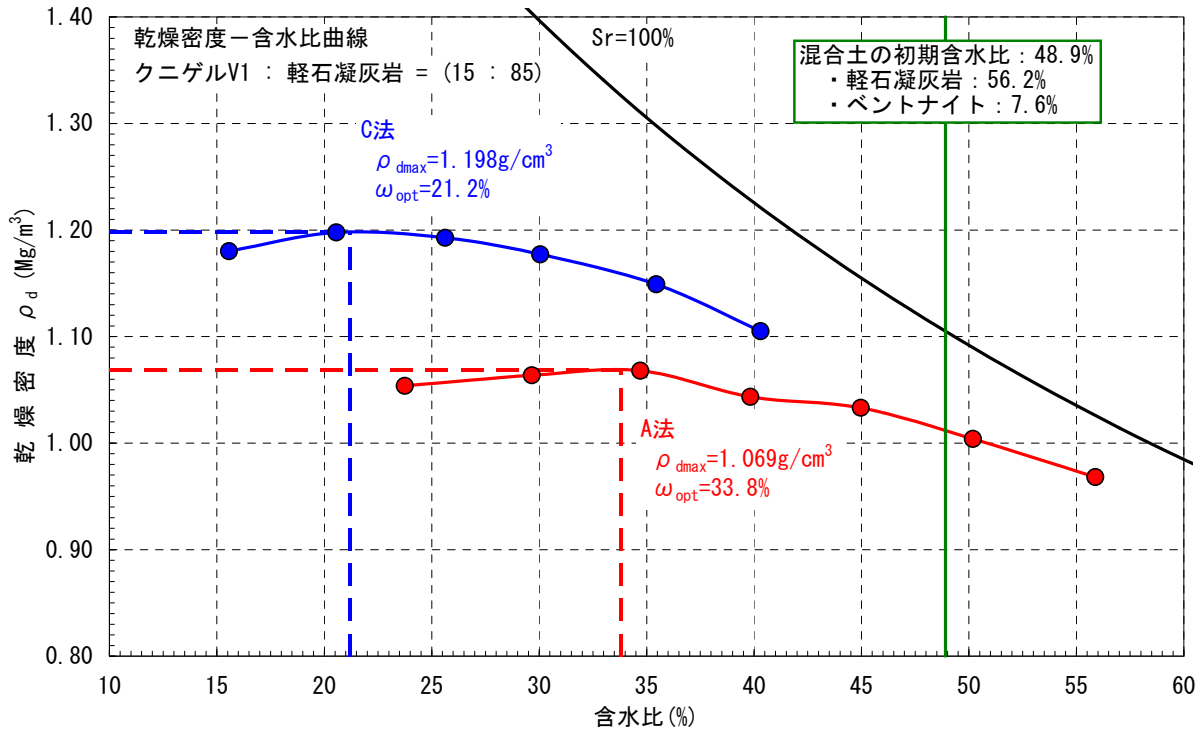


図 6.7-4 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の締固め試験結果

(3) 透水試験

締固め試験の結果に基づき透水試験を実施した。透水試験は初期含水比および乾燥密度をパラメータに実施した。試験仕様を表 6.7-4 に示す。締固め試験 A 法および C 法の結果をもとに透水試験仕様を設定しており、それぞれの最適含水比、最大乾燥密度を基準として、締固め曲線に応じて初期含水比を最適含水比の上下に変化させて試験仕様を設定している。初期含水比が最適含水比 ω_{opt} より 6%低い値、6%および 12%高い値で、乾燥密度がそれぞれの初期含水比における締固め曲線上の値（締固め規定値 C 値=100%）の供試体を対象に試験を実施した。また、最適含水比および最適含水比より 6%高い含水比に関しては、その時の締固め曲線上の乾燥密度の値の 95%の値の時についても試験を実施した。それぞれの試験ケースにおける初期含水比および乾燥密度の値は表 6.7-4 に示す通りである。

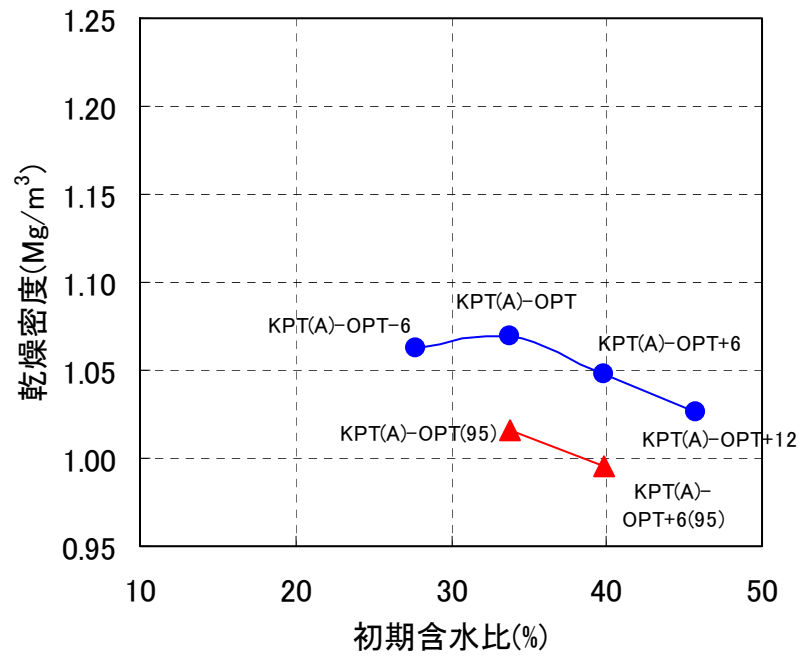
表 6.7-4 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験ケース

ケース	密度仕様	透水試験仕様	初期含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)
KPT(A)-OPT-6	締固め試験の A法がベース	$\omega_{opt}-6\%$ 、C値=100%	27.8	1.062
KPT(A)-OPT		ω_{opt} 、C値=100%	33.8	1.069
KPT(A)-OPT+6		$\omega_{opt}+6\%$ 、C値=100%	39.8	1.048
KPT(A)-OPT+12		$\omega_{opt}+12\%$ 、C値=100%	45.8	1.026
KPT(A)-OPT(95)		ω_{opt} 、C値=95%	33.8	1.016
KPT(A)-OPT+6(95)		$\omega_{opt}+6\%$ 、C値=95%	39.8	0.996
KPT(C)-OPT-6	締固め試験の C法がベース	$\omega_{opt}-6\%$ 、C値=100%	15.2	1.174
KPT(C)-OPT		ω_{opt} 、C値=100%	21.2	1.198
KPT(C)-OPT+6		$\omega_{opt}+6\%$ 、C値=100%	27.2	1.190
KPT(C)-OPT+12		$\omega_{opt}+12\%$ 、C値=100%	33.2	1.163
KPT(C)-OPT(95)		ω_{opt} 、C値=95%	21.2	1.138
KPT(C)-OPT+6(95)		$\omega_{opt}+6\%$ 、C値=95%	27.2	1.131

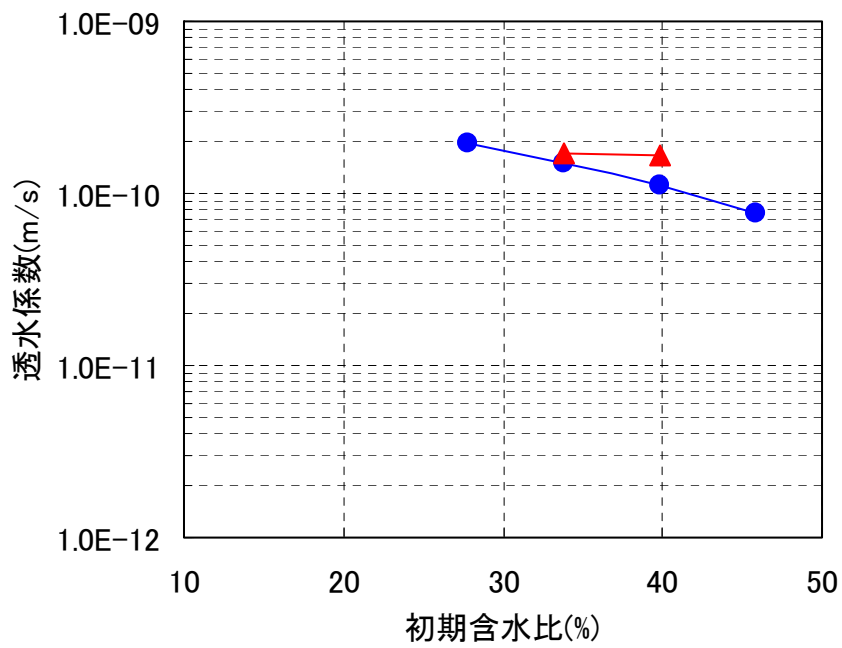
試験結果を図 6.7-5 および図 6.7-6 に示す。図 6.7-5 は締固め試験 A 法に基づき設定した試験ケースの結果、図 6.7-6 は締固め試験 C 法に基づき設定した試験ケースの結果である。それぞれ(a)は締固め試験結果と各透水試験ケースの初期含水比、乾燥密度の値を示したものであり、(b)は透水試験結果である。乾燥密度は 1.0~1.2Mg/m³程度と小さいが、得られる透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 付近の値であり、乾燥密度の値が小さい割には透水係数の値は小さいといえる。

また、透水係数には初期含水比依存性がみられ、最適含水比より高い含水比の時のほうが、乾燥密度が小さいにも関わらず透水係数の値は小さくなっている。なお、締固め規定値 100%と 95%の結果を比較するとそれほど大きな差は無いことが分かる。A 法と C 法の結果を比較しても、乾燥密度の値には 0.15Mg/m³程度の差はあるものの透水係数の差は小さい。すなわち、今回試験を実施した範囲では透水係数に与える乾燥密度の影響は小さいといえる。

表 6.7-5 には得られた透水係数の一覧を示す。

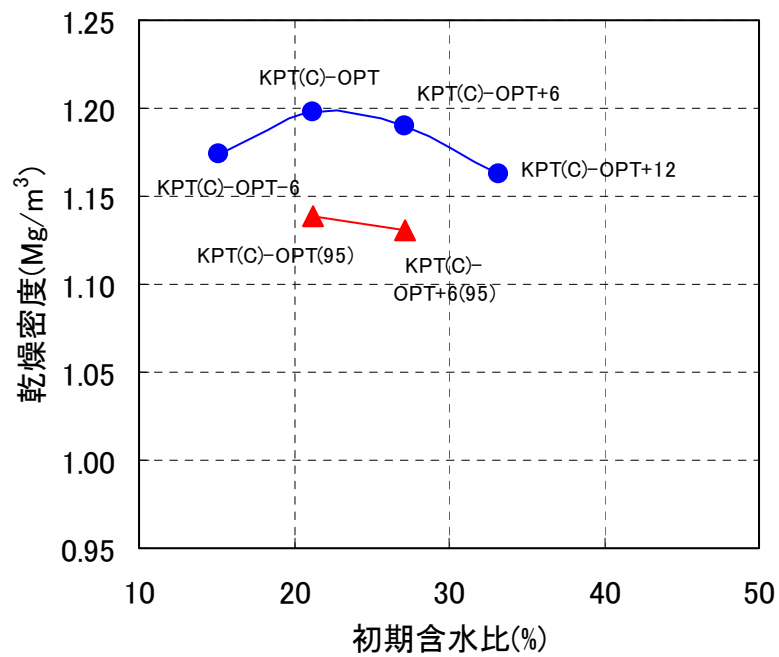


(a)透水試験結果

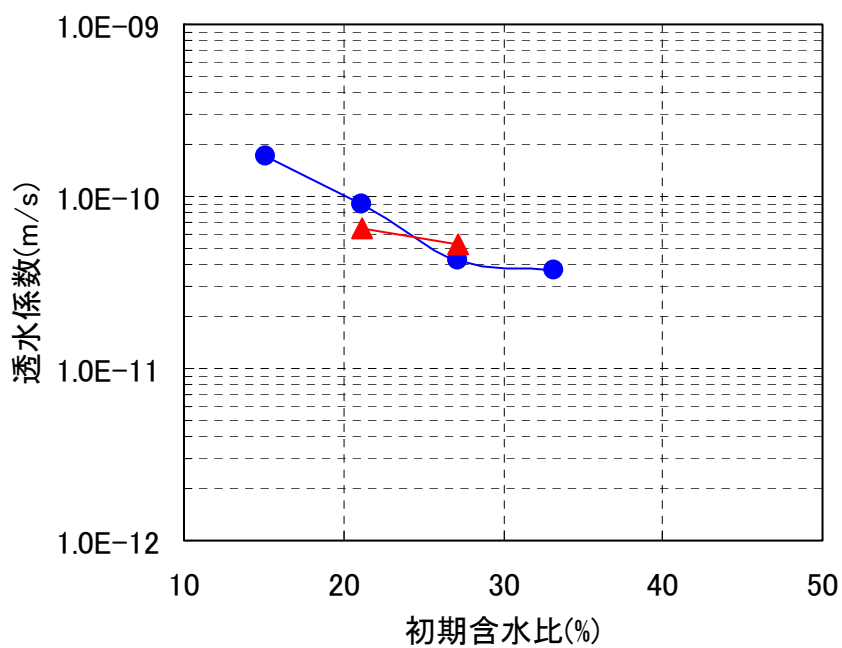


(b)透水試験結果

図 6.7-5 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果 (A 法ベース)



(a)透水試験仕様



(b)透水試験結果

図 6.7-6 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果 (C 法ベース)

表 6.7-5 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水試験結果

ケース	初期含水比(%)	乾燥密度(Mg/m ³)	透水係数(m/s)
KPT(A)-OPT-6	27.2	1.062	1.96E-10
KPT(A)-OPT	34.0	1.069	1.48E-10
KPT(A)-OPT+6	39.4	1.048	1.13E-10
KPT(A)-OPT+12	46.3	1.026	7.65E-11
KPT(A)-OPT(95)	33.3	1.016	1.72E-10
KPT(A)-OPT+6(95)	39.8	0.996	1.67E-10
KPT(C)-OPT-6	15.3	1.174	1.69E-10
KPT(C)-OPT	21.2	1.198	8.98E-11
KPT(C)-OPT+6	27.8	1.190	4.22E-11
KPT(C)-OPT+12	32.8	1.163	3.74E-11
KPT(C)-OPT(95)	20.9	1.138	6.57E-11
KPT(C)-OPT+6(95)	27.3	1.131	5.24E-11

(4) 一軸圧縮試験

一軸圧縮強度試験結果を表 6.7-6 に示す。締固め試験の A 法および C 法で得られた最適含水比、最大乾燥密度の条件の供試体を対象に試験を実施した。一軸圧縮強さおよび変形係数と乾燥密度の関係をそれぞれ図 6.7-7 および図 6.7-8 に示す。透水係数に関しては、乾燥密度依存性は小さかったが、強度に関しては明瞭な乾燥密度依存性がみられ、乾燥密度が高いほど強度は大きくなっている。

表 6.7-6 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の一軸圧縮強度試験結果

密度仕様	試験仕様	湿潤密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	一軸圧縮強さ (kN/m ²)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m ²)
締固め試験の A 法がベース	ω_{pt} ρ_{max}	1.432	32.6	1.080	229.36	1.65	16.74
		1.430	32.0	1.083	232.70	1.64	19.12
		1.429	32.5	1.078	213.11	1.58	18.63
締固め試験の C 法がベース	ω_{pt} ρ_{max}	1.450	19.9	1.209	571.59	1.73	38.73
		1.454	20.1	1.211	515.63	1.74	35.67
		1.452	20.6	1.204	550.37	1.76	37.83

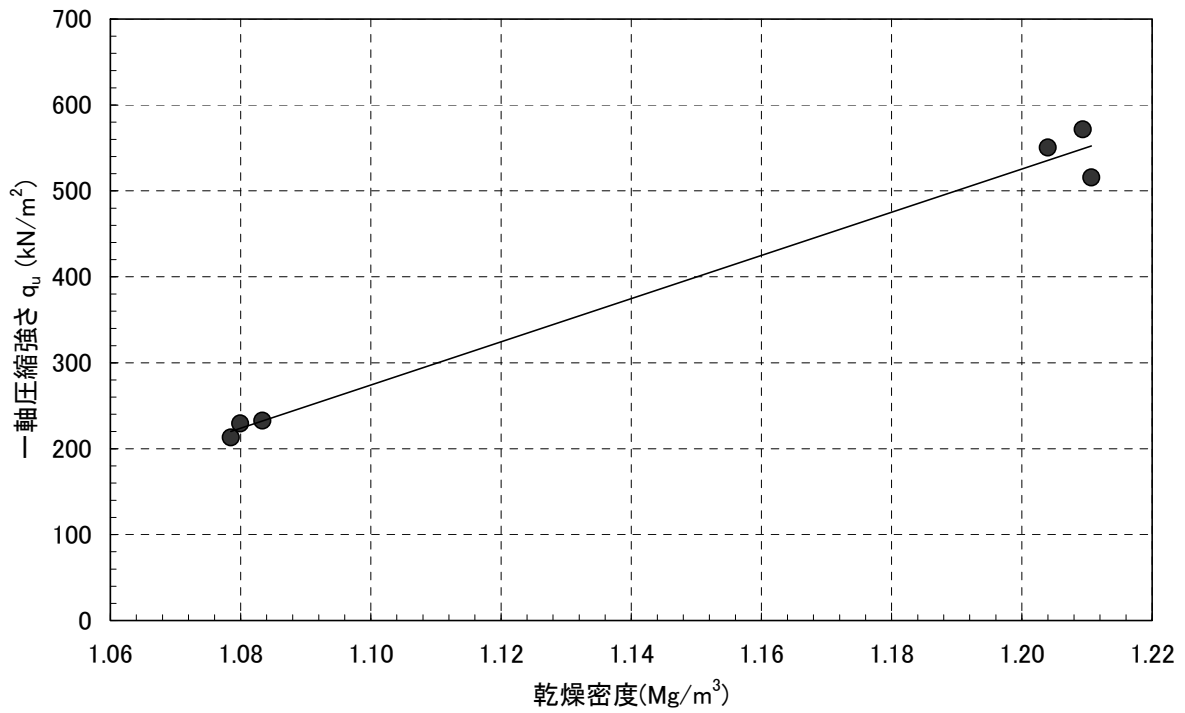


図 6.7-7 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

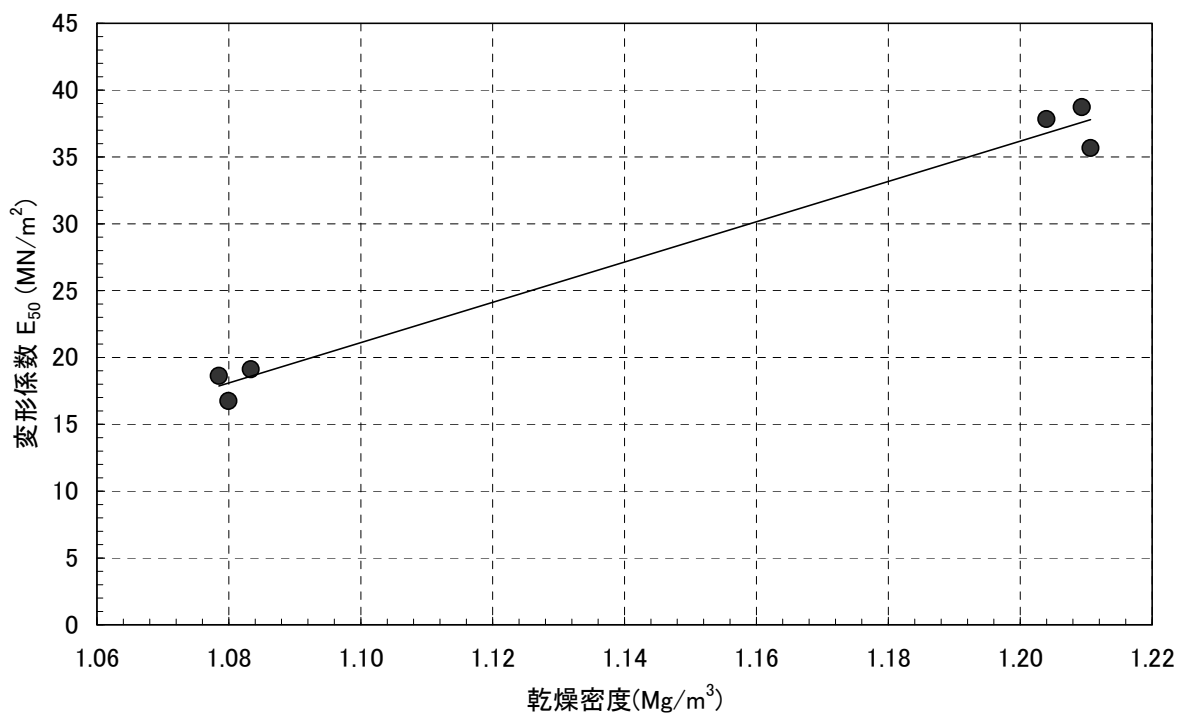


図 6.7-8 軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の変形係数と乾燥密度の関係

6.7.4 試験結果の評価

現地発生土の使用を想定し、本確認試験施設の設置箇所である試験坑道の母岩である軽石凝灰岩を用いた特性試験を実施した。軽石凝灰岩を対象に土粒子密度試験、湿潤密度試験、含水比試験、粒度試験を実施し、基本特性を把握した。その結果、屋外ヤードの仮置き場から採取した軽石凝灰岩の含水比は56%程度と高かった。

この軽石凝灰岩とベントナイト（クニゲルV1）をベントナイト配合率15%で混合したベントナイト混合土を対象に、液性・塑性限界試験、締固め試験、透水試験、一軸圧縮強度試験を実施した。その結果、対象としたベントナイト混合率では、原位置岩盤相当の透水係数（ $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度）よりも小さい透水係数（ $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 程度）を発揮することがわかった。また、非排水せん断強度の目安となる一軸圧縮強度も取得できた。

このような材料を埋戻し材として用いるために、埋戻し材に求める性能に対して、混合土が発揮する性能がどの程度なのかの評価に加え、混合土の製造や締固め時の施工性等を勘案し、これらを総合的に評価して適用性を検討する必要がある。混合土の製造に現地発生土を埋戻し材に転用する際、通常、材料の粒度調整および含水比調整を行う必要がある。これらの調整を適切に実施し、ベントナイト等と混合すれば転用はできると考えられる。

6.8 まとめ

給水に伴う変形測定試験を実施した結果、本試験で用いたベントナイト混合土のベントナイト混合率（15%）では、全試験ケースで初期状態よりも圧縮されることがわかった。ベントナイトの配合率によっては、吸水に伴う変形よりも鉛直圧の载荷による変形が、上部埋戻し材の将来の変形量の方が支配的になることがわかった。また、鉛直圧や給水前の供試体の飽和度により、給水後の挙動が影響することもわかった。

一方、再冠水に伴う飽和後の力学特性・圧密特性・透水特性を評価するための試験を実施し、各パラメータの取得ができた。ベントナイトの配合率の検討も含めて、緩衝材からの膨潤圧や岩盤のクリープの相互作用を考慮して試験的・解析的に調査していく必要があると考えられる。

現地発生土の使用を想定し、本確認試験施設の設置箇所である試験坑道の母岩である軽石凝灰岩を用いた特性試験を実施した。初期含水比が高いものの、軽石凝灰岩を用いたベントナイト混合土の透水係数は、原位置岩盤の透水係数よりも小さくなることがわかった。このような現地発生土を用いる場合、一般的に材料の粒度調整および含水比調整を行う必要があるが、混合土が発揮する性能がどの程度なのかの評価に加え、混合土の製造や締固め時の施工性等を勘案し、これらを総合的に評価して適用性を検討する必要がある。

(参考文献)

[1]河野伊一郎、西垣誠：室内透水試験法に関する 2、3 の考察、土質工学会論文報告集、Vol.22、
No.4、pp.181-190、1982.

[2]Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous
Materials using a Flexible Wall Permeameter, ASTM International D5084-10.

第7章 セメント系材料特性測定

第7章 セメント系材料特性測定

【目的】

セメント系材料特性測定は、拡散抑制機能を期待される低拡散材等のセメント系材料について、品質管理手法の信頼性向上を目的として長期間養生した低拡散材等のセメント系材料について拡散係数とそれに関連する特性値を測定した。ここでは、本年度実施した拡散係数測定試験および空隙率測定の内容について報告する。

また、セメント系材料により施工した試験施設部位のひび割れ状況を把握することを目的にひび割れ調査を実施した。さらに、セメント系材料の長期強度特性を把握する目的で、長期材齢物性試験を実施した。

【まとめ】

これまでに現場施工された LPC-FA 系の低拡散材を用いた拡散係数測定の結果より得られた定常状態後の実効拡散係数は $1 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-13}$ (m²/s) の範囲であった。これは、平成 24 年度から実施している上部低拡散材を用いた試験についても同様な傾向となる見込みが得られた。

空隙率測定の結果より得られた空隙率は、材齢が長くなるほど小さくなる傾向がみられた。また、低拡散材・コンクリートピットによらず、空隙率の低減スピードも概ね一致する傾向がみられることより、空隙率の材齢による変化は、骨材の大きさによらず、セメントやフライアッシュ等の固化材の配合が支配的であると考えられる。特にフライアッシュを混合した場合は、長期材齢において強度が増進するが、それとともにセメント系材料のマトリックス部分の緻密化も進行し、空隙率が小さくなったと考えられる。材齢とともに空隙率の低下することは確認されたが、トリチウムの実効拡散係数は明確には低下せず、定常化する傾向を示す結果が得られた。

ひび割れ調査の結果、平成 24 年度の調査時からの対象部材（上部低拡散材、上部コンクリートピット、左側側部低拡散材）のひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生が無いことを確認した。また、ひび割れ調査対象部材の挙動計測結果においても、季節的な外部環境の変化に沿った挙動に対応した応力変化が認められ、施工に伴いひび割れが発生、進展するような不連続な応力挙動が認められないことから、ひび割れ発生、進展は生じていないものと評価され、ひび割れ調査結果と整合する結果が得られた。

長期材齢物性試験として圧縮強度試験を実施した。その結果、圧縮強度は、材齢 365 日～1500 日まで増進することが確認され、1850 日ではおおむね収束していることが確認された。

7.1 実施概要

拡散抑制を期待される低拡散材について、品質管理方法の信頼性向上を目指し、平成 20～23 年度の「セメント系材料特性測定」および平成 24 年度の「セメント系材料の拡散特性に係るデータ取得」の中で実施した低拡散材に係わる取得データの拡充を目指すものであり、上部低拡散材の拡散係数および空隙率（空隙径分布測定等）のデータを継続して取得するものである。

また、平成 20～平成 24 年度に実施した「地下空洞型処分施設性能確証試験」において、セメント系材料により、コンクリートピット、低拡散材および充填材等を施工している。このうち、上部低拡散材、上部コンクリートピット、および側部低拡散材（左側）について、各部位のひび割れの現況を調査した。また、セメント系材料の長期強度特性を把握するため、「地下空洞型処分施設性能確証試験」において作製したセメント系材料の供試体を使用し、長期材齢物性試験を実施した。

7.2 拡散特性測定

7.2.1 拡散試験

現場打設の上部低拡散材を対象とした供試体は、平成 24 年 12 月に現地打設した上部低拡散材に対して、現場での打設後 1 週間の養生後（湿布養生および湿潤保温マット養生）、図 7.2-1 に示す 2 種類の位置から削孔採取した。このコアを現場（地下空洞内）にて水中養生を 2 ヶ月と 3 週間実施し、 $\phi 50\text{mm}$ 、長さ 30 cm 程度のコアから厚さ 10mm にダイヤモンドカッターを用いて切断成形し、試験カラムに不透水性樹脂で固定した後、拡散係数測定用のセルに設置した。

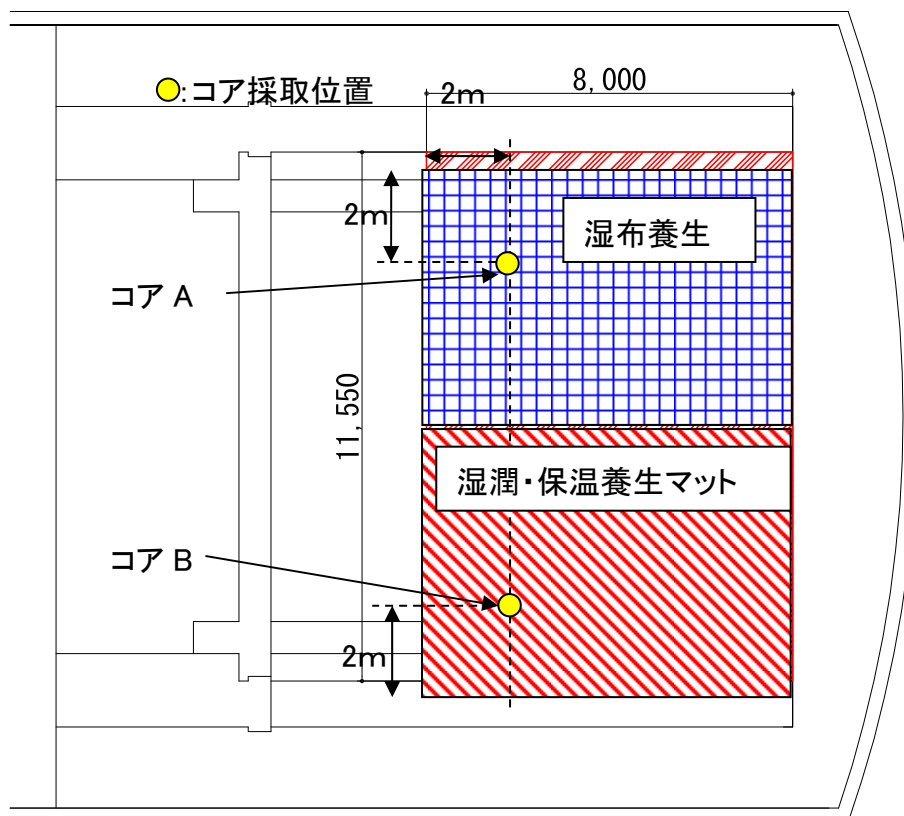


図 7.2-1 上部低拡散材コア採取位置

(1) 試験内容

平成 24 年度実施した「セメント系材料特性測定」のうち、未だ試験が定常に達していない可能性のある供試体に対する試験を継続し、データの精度向上を図るため、表 7.2-1 に示す供試体に対する定常拡散試験を継続して実施した。拡散トレーサはトリチウム水で、試験カラムの厚さは 10mm としている。

表 7.2-1 継続試験の一覧

供試体種類	試験開始月	試料採取までの期間	拡散試験供試体条件				
			養生期間※ (月)	養生方法	試験開始時の材齢 (月)	厚さ (mm)	N 数
現場打設上部低拡散材 コア A(表面)	2013 年 3 月	1 週間	3	打設後； 湿布養生および湿潤・保温マット養生	3	10	1
現場打設上部低拡散材 コア A(中間層)	2013 年 3 月		3		3	10	1
現場打設上部低拡散材 コア B(表面)	2013 年 3 月		3		試料採取後； 現場水中養生	3	10	1

※；養生期間は、打込み直後の養生期間 1 週間を含む

(2) 試験手法

セメント系材料中のトリチウム(HTO)の実効拡散係数(De)は、定常拡散試験法(Through-diffusion法)により取得した。

試験体系を図 7.2-2 に示す。試料を組み込んだ試験カラムの両側に試験槽を設け、片側にトレーサを含む蒸留水の溶液(トレーサ溶液)、もう一方の側にトレーサを含まない溶液(トレーサフリー溶液)を入れ、試料と接触させる。トレーサである HTO はトレーサ溶液側からトレーサフリー溶液側へ向かって試料中を拡散により移行する。ここで、トレーサフリー溶液中のトレーサ濃度を定期的に測定することにより濃度の時間変化(拡散プロファイル)を取得し、トレーサの拡散による移行が定常状態に達した時点、すなわち試料中のトレーサの濃度勾配が直線的となりトレーサ溶液からトレーサフリー溶液へのフラックスが一定となった時点で、フラックスの分析値より De を求めた。

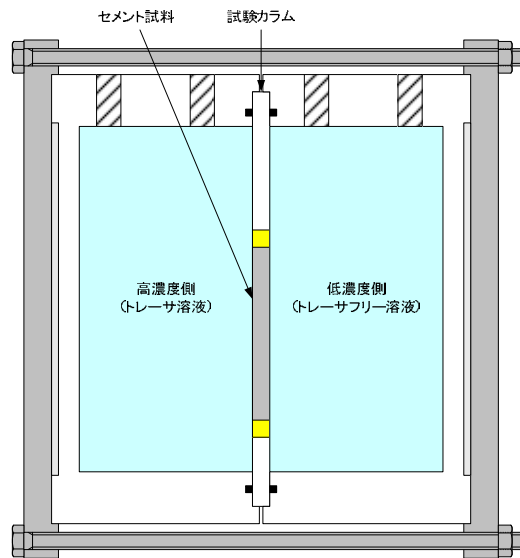


図 7.2-2 セメント系材料の拡散試験の試験装置の概要

(3) 試験手順

セメント系材料の拡散試験フローを図 7.2-3 に示す。直径 50mm のコアから厚さ 10mm にダイヤモンドカッターを用いて切断成形し、試験カラムに不透水性樹脂で固定した後、拡散係数測定用のセルに設置している。拡散試験用に成形したセメント系材料の一例として、一昨年度開始した手前部コンクリートピットのコアを図 7.2-4 に示す。高濃度側拡散セルにトリチウム水を添加して拡散試験を開始した後、適宜、低濃度側拡散セルにおける試験溶液中の HTO の放射性核種濃度を液体シンチレーションカウンタ(PACKARD, TRI-CARB2750TR/LL)で測定した。破過曲線における濃度上昇率が一定となり、定常状態と判断された時点で試験を終了し、De の解析を行った。

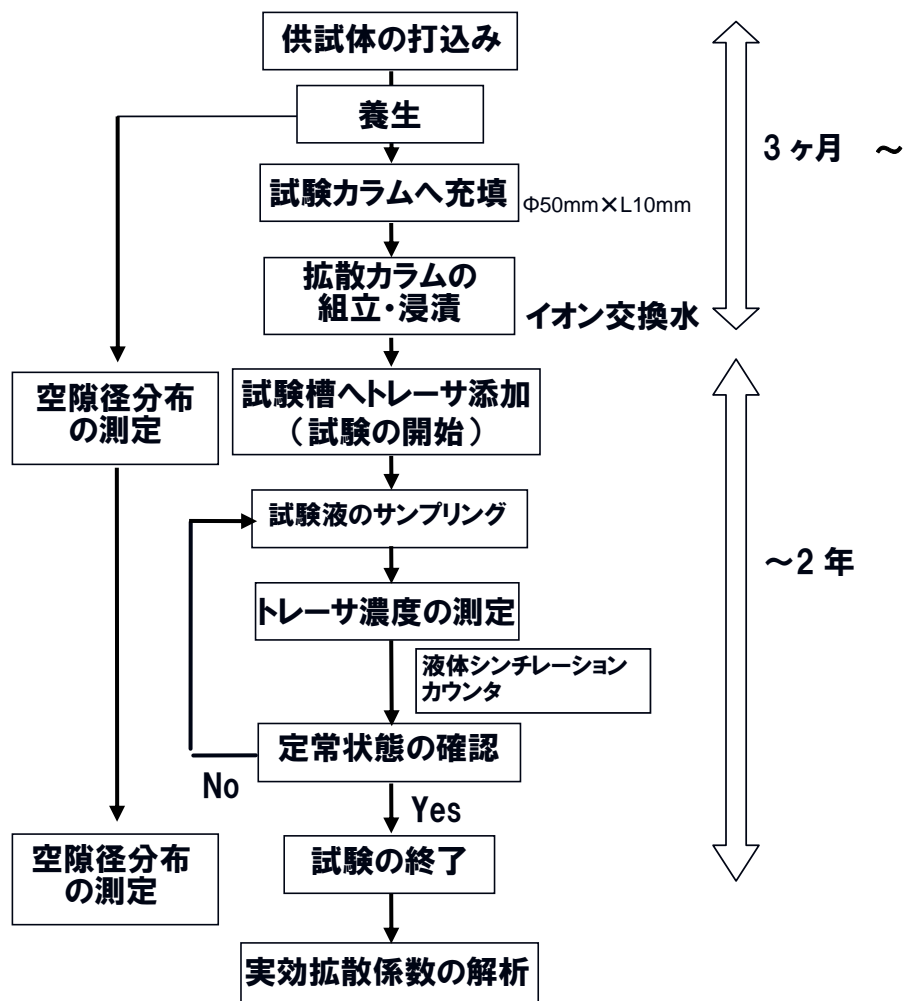
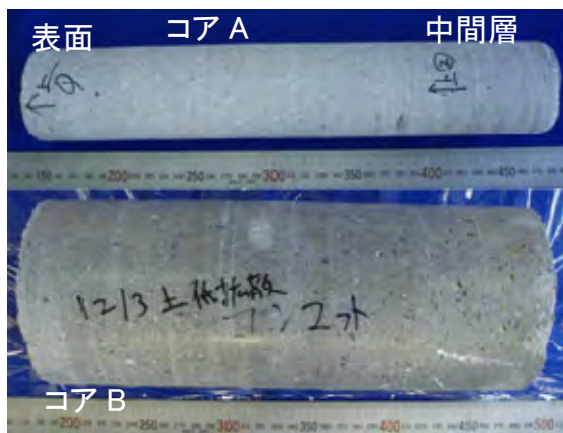
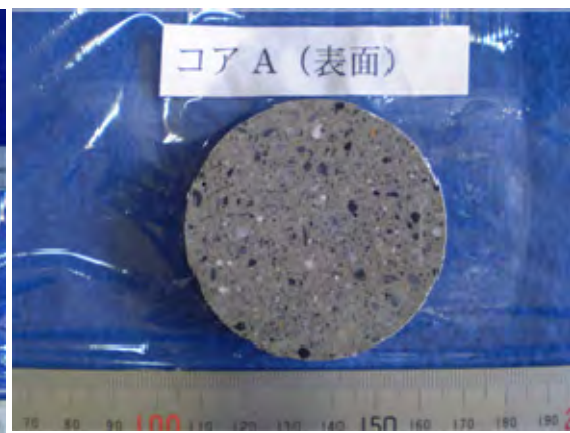


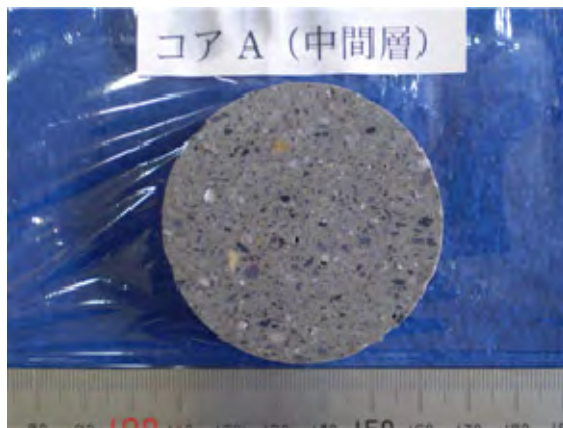
図 7.2-3 セメント系材料試料の拡散試験フロー



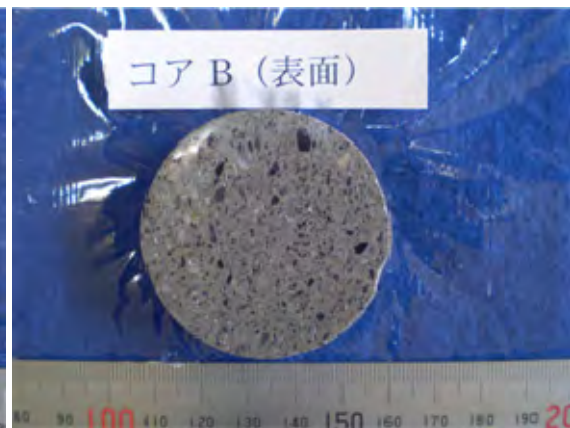
現場打設上部低拡散材（成型前）



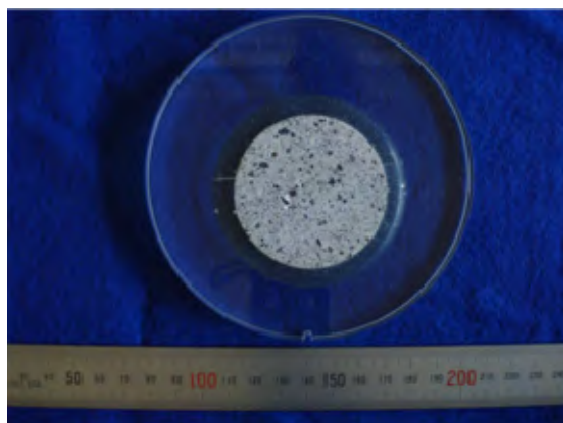
コア A 表面（成型後）



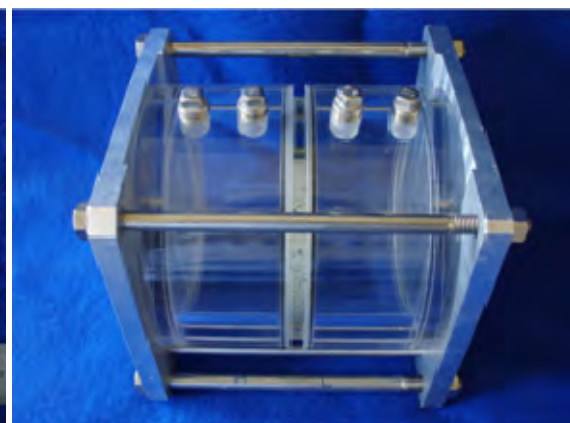
コア A 中間層（成型後）



コア B 表面（成型後）



試験カラムへの固定



拡散セルの外観

図 7.2-4 セメント系材料の拡散試験用成型

拡散試験の条件を表 7.2-2 に示す。

表 7.2-2 セメント系材料の拡散試験条件

項目	内容
試験方法	定常拡散試験法 (Through-diffusion 法)
セメント系材料	上部低拡散材 (コア A(表面)、コア A(中間層)、コア B(表面))
試料形状	φ 50mm × L10 mm
実験水	イオン交換水
トレーサ	トリチウム水 (HTO)
トリチウム濃度	300,000 cpm/ml 程度 (高濃度条件)
トレーサ濃度分析	放射性核種濃度測定 (液体シンチレーションカウンタ)
試験温度	室温 (約 25°C)
試験雰囲気	不活性ガス雰囲気(Ar)

(4) 解析方法

定常拡散試験法による試験結果から、以下の手順により実効拡散係数 De を算出した。

試料中の初期トレーサ濃度を 0 とし、試験期間を通じて高濃度側拡散セル、低濃度側拡散セル中のトレーサ濃度をそれぞれ C_0 、0 に保ったとして、初期条件、境界条件を次のように決めたとき、

$$\begin{aligned} \text{初期条件} \quad & C(x, t = 0) = 0 \\ \text{境界条件} \quad & \begin{cases} C(x = 0, t) = C_0 \\ C(x = L, t) = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

L : セメント系材料供試体の厚さ (m)

C : トレーサ濃度 (Bq/m³)

C_0 : 高濃度側拡散セルのトレーサ濃度 (Bq/m³)

x : 拡散距離 (m)

各位置におけるトレーサの拡散フラックスは、フィックの第 1 法則により

$$F(x, t) = -De \frac{dC(x, t)}{dx}$$

$F(x, t)$: 低濃度側へ単位時間あたりに拡散により移行するトレーサの
フラックス (Bq/m²/s)

De : 実効拡散係数 (m²/s)

と表される。

このフラックスによる低濃度側拡散セルのトレーサの微量な濃度上昇を測定すると、

$$C_L(t) = \frac{Q(t)}{V} = \frac{S}{V} \int_0^t F(L,t) dt = -\frac{SDe}{V} \int_0^t \left(\frac{dC(x,t)}{dx} \Big|_{x=L} \right) dt$$

$C_L(t)$: 低濃度側拡散セルのトレーサ濃度の微量な上昇(Bq/m³)

$Q(t)$: 積算破過量 ($F(t)$ を時間 $t=0 \rightarrow t$ まで積分した量に試料断面積を乗じたもの) (Bq)

S : セメント系材料供試体の断面積 (m²)

V : 低濃度側拡散セル体積 (m³)

となる。この式を前述の初期条件、境界条件で解くと、次の式が得られる。

$$C_L(t) = \frac{Q(t)}{V} = \frac{SLC_0}{V} \left\{ \frac{De t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{De n^2 \pi^2 t}{L^2 \alpha}\right) \right\}$$

α : 収着容量 ($\alpha = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \rho Kd$) (-)

ε : 空隙率 (-)

ρ : 媒体の真密度 (kg/m³)

Kd : トレーサの媒体に対する分配係数 (m³/kg)

上式では $t \rightarrow \infty$ とすると \exp の項は急速に小さくなるため、次の式で近似でき、時間軸の切片 $\frac{L^2 \alpha}{De 6}$ 、傾き $\frac{SLC_0}{V} \frac{De}{L^2} \left(= \frac{S}{V} De \frac{C_0}{L} \right)$ の直線である、次の式で表される。

$$C_L(t) = \frac{Q(t)}{V} \cong \frac{SLC_0}{V} \left(\frac{De t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} \right)$$

これを時間で微分するとトレーサのフラックスが得られ、

$$F(t) = \frac{V}{S} \frac{dC_L(t)}{dt} = De \frac{C_0}{L} (= F_0)$$

F_0 : $F(x, t)$ の定常状態における値 (Bq/s)

となる。これは、試料の低濃度側拡散セル側の境界面におけるフラックスが、 De と、高濃度側拡散セルと低濃度側拡散セルのトレーサ濃度が直線状で結ばれた分布で表される状態でのフラックスとなることを示している。

以上より、 $Q(t)$ を時間 t に対してプロットし、 t に対する直線近似を行うことによって De を算出した。

(5) 試験結果

1) 拡散プロファイル

昨年度、拡散試験を開始した、上部低拡散材コア A(表面)、上部低拡散材コア A(中間層) および上部低拡散材コア B(表面)の上部低拡散材 3 供試体の拡散プロファイルを図 7.2-5～図 7.2-7 に示す。拡散プロファイルは直線的に上昇し、約 5,000 時間程度で若干プロファイルの傾きが低下している。このような傾向はいままでの LPC-FA の定常拡散試験でもみられており、フライアッシュの水和反応が OPC に比べ遅く、長期にわたり水和反応が進行するに従って、空隙径分布が微細側に移行することが知られており（粗な空隙が減少して微細空隙が増加する）、この影響によるものと考えられる。

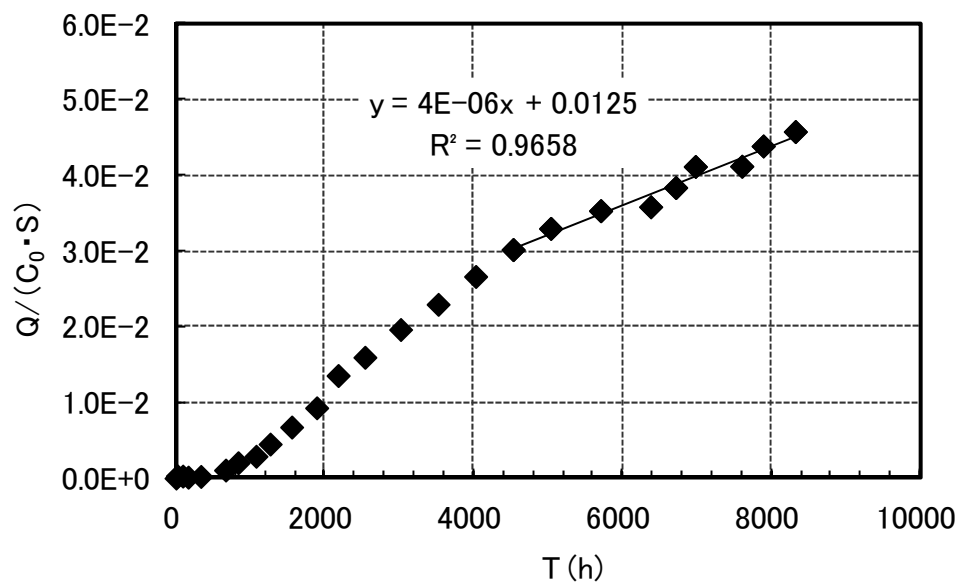


図 7.2-5 上部低拡散材コア A(表面)の拡散プロファイル

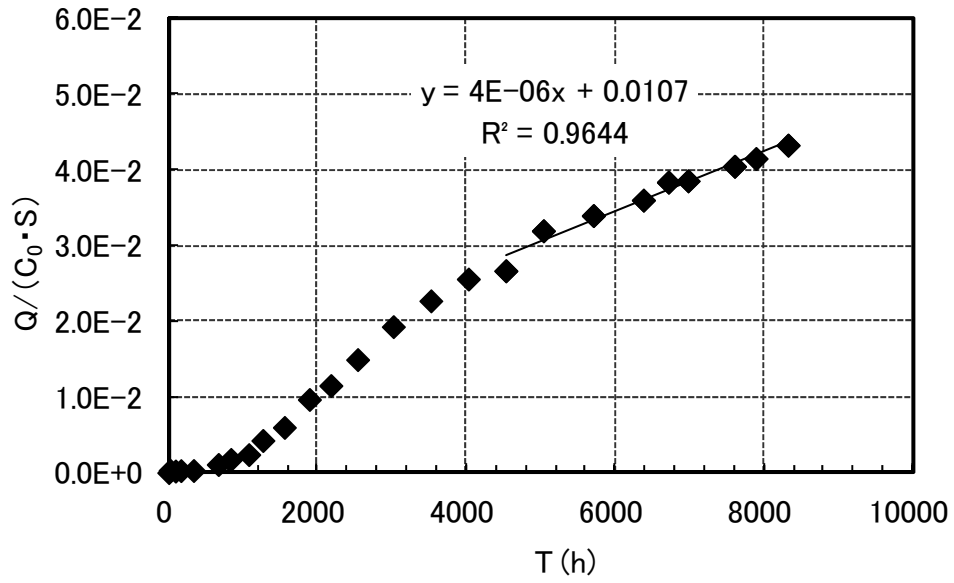


図 7.2-6 上部低拡散材コア A(中間層)の拡散プロファイル

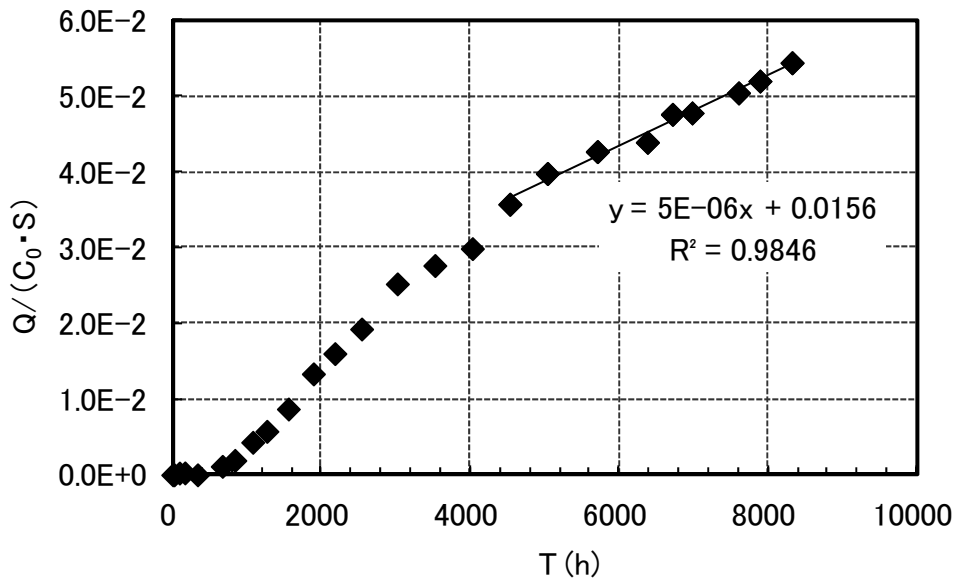


図 7.2-7 上部低拡散材コア B(表面)の拡散プロファイル

2) 実効拡散係数算出結果

各供試体に対して測定された HTO の現状での実効拡散係数 D_e の暫定値を表 7.2-3 に示す。平成 25 年 2 月現在の上部低拡散材の 3 供試体の D_e (暫定値) は $1.1 \times 10^{-13} \sim 1.3 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲であった。

表 7.2-3 上部低拡散材における HTO の実効拡散係数

供試体種類		試料採取までの期間	養生期間※ (月)	試験期間 (現段階) (月)	厚さ (mm)	試験状況	実効拡散係数 D_e (m^2/s)
上部 低拡散 材	コア A (表面)	1 週間 (0.25 月)	3 (湿布養生: 0.25) (現場水中: 2.75)	11	10	継続中	1.1×10^{-13}
	コア A (中間 層)			11	10	継続中	1.1×10^{-13}
	コア B (表面)		3 (湿潤・保温マ ット養生:0.25) (現場水中: 2.75)	11	10	継続中	1.3×10^{-13}

※ ; 養生期間には、打込み直後の養生期間 1 週間を含む。

7.2.2 空隙率測定

本試験の対象としているセメント系材料、LPC+フライアッシュの水和反応は OPC に比べ遅く、長期にわたり水和反応が進行するに従って、空隙径分布が微細側に移行することが知られている（粗な空隙が減少して微細空隙が増加する）。実効拡散係数の測定期間は 1~2 年と長期間かかることから、この期間においても水和反応が進行し空隙径分布が変化する可能性がある。このことを確認するために、本試験では、実効拡散係数測定の終了時もしくは試験途中時における各供試体の空隙率および空隙径分布を水銀圧入法により測定した。

(1) 試験方法

水銀圧入法は、空隙率や空隙径分布といった空隙構造特性を測定する主な手法のひとつであり、本試験では水銀による加圧範囲を 0~60,000psia で制御することにより、365 μ m~3nm の範囲の空隙径分布を測定した。測定装置（島津製作所/Micrometrics 社製, AutoPore IV）を図 7.2-8 に示す。



図 7.2-8 水銀圧入試験装置

なお、本試験における空隙径分布測定では、高圧測定を 2 回実施した。つまり、1 回目の高圧測定後に除圧して試料に作用する圧力を大気圧近傍に戻し、再び水銀の圧力を昇圧して 2 回目の高圧測定を実施した。

図 7.2-9 に示すように、1 回目の高圧測定後の除圧の際には、インクボトル状になっている空隙に圧入された水銀は、試料の外部から作用している圧力が低下してもボトルネックを通過して試料外部に流出することができない。一方、試料外表面の開口部に対してボトルネックになっておらず連続的につながっている空隙に圧入された水銀は、試料に作用している圧力の低下に伴って試料外部に流出する（圧力を作用させ微細空隙に水銀を圧入することと反対の作用）と考えられる。そこで、本試験では 1 回目の水銀圧入操作で試料内部に圧入された水銀の全容積の試料容積に対する割合を全空隙率と定義し、1 回目の除圧後から 2 回目の

加圧操作によって試料に注入された水銀圧入容積の試料容積に対する割合を連続空隙率、全空隙率から連続空隙率を引いた空隙をインクボトル空隙率として区別して定義し、各空隙率を評価した。

空隙率測定は、表 7.2-3 に示した各供試体について実施した。

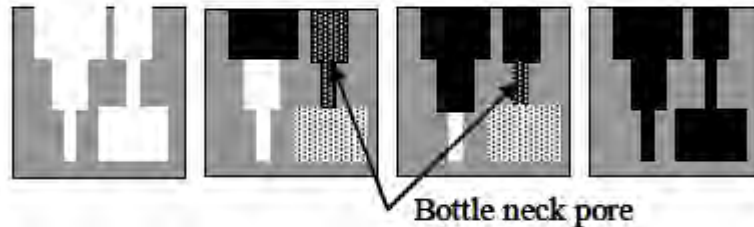


図 7.2-9 インクボトル空隙の模式図 (吉田らの文献[1])

(2) 試験結果

1) 空隙径分布測定結果

拡散試験終了時 (材齢 14 カ月) の上部低拡散材コア A(上部)、コア A(中部)、コア B に対する全空隙径分布および連続空隙径分布の測定結果を図 7.2-10～図 7.2-12 にそれぞれ示した。

上部低拡散材コア A(表面)、コア A(中間層)、コア B(表面)に対しても、全空隙径分布および連続空隙径分布に対する大きな差異はみられなかった。

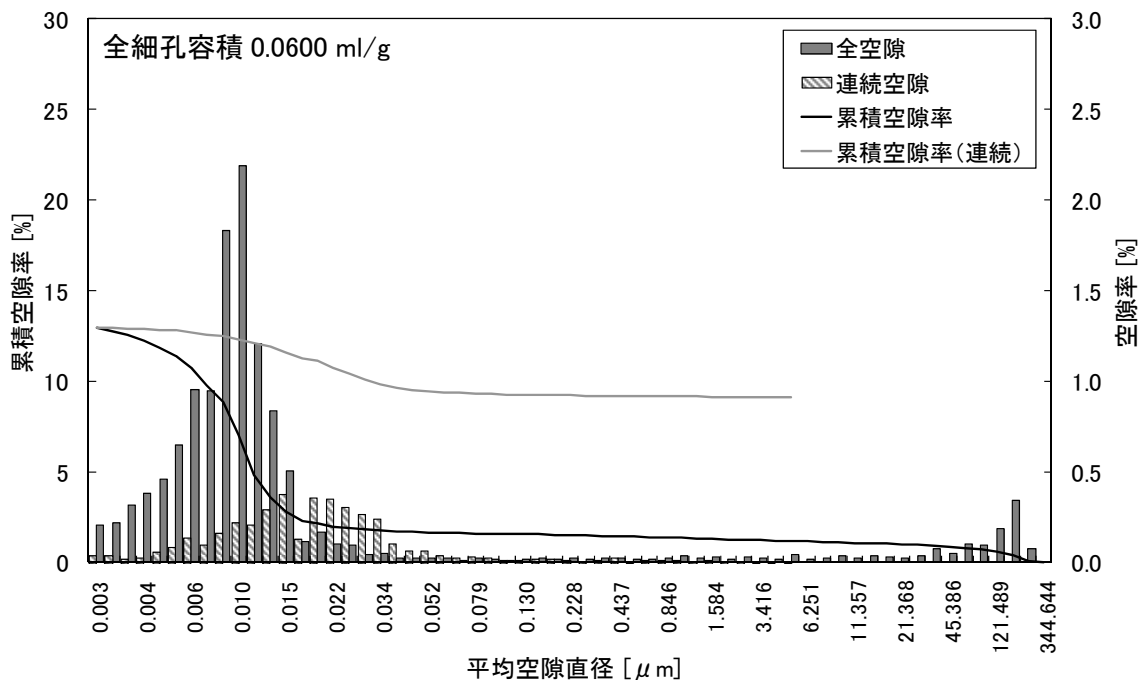


図 7.2-10 上部低拡散材 (コア A(表面)、材齢 14 ヶ月) における空隙径分布

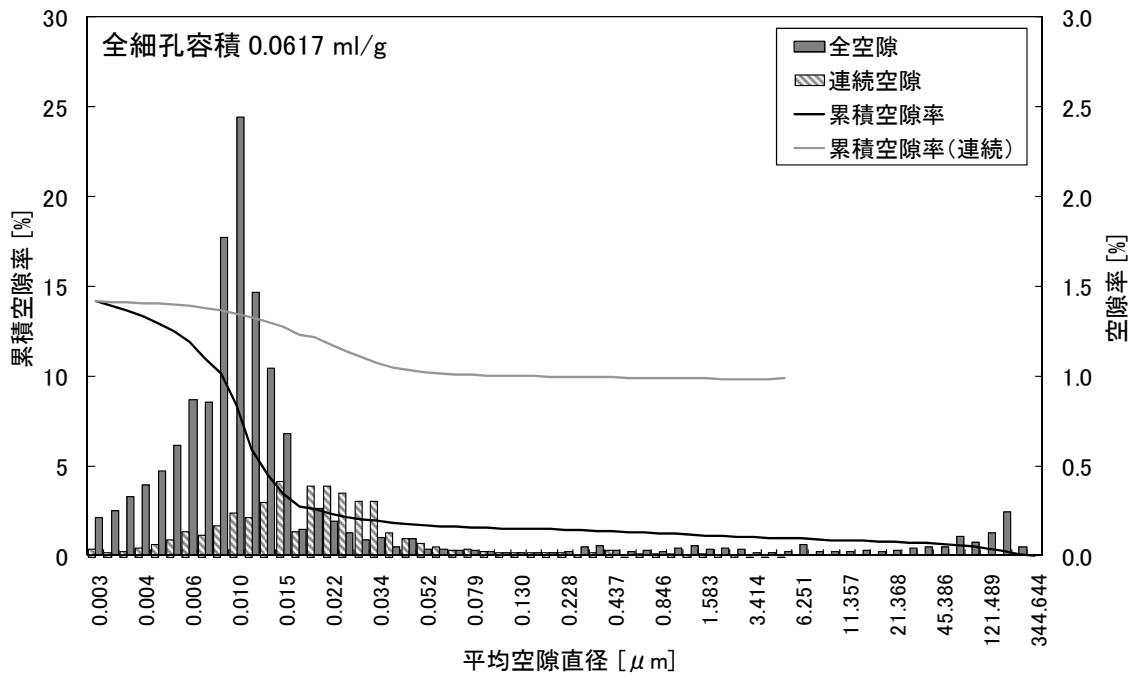


図 7.2-11 上部低拡散材（コアA(中間層)、材齢 14 ヶ月)における空隙径分布

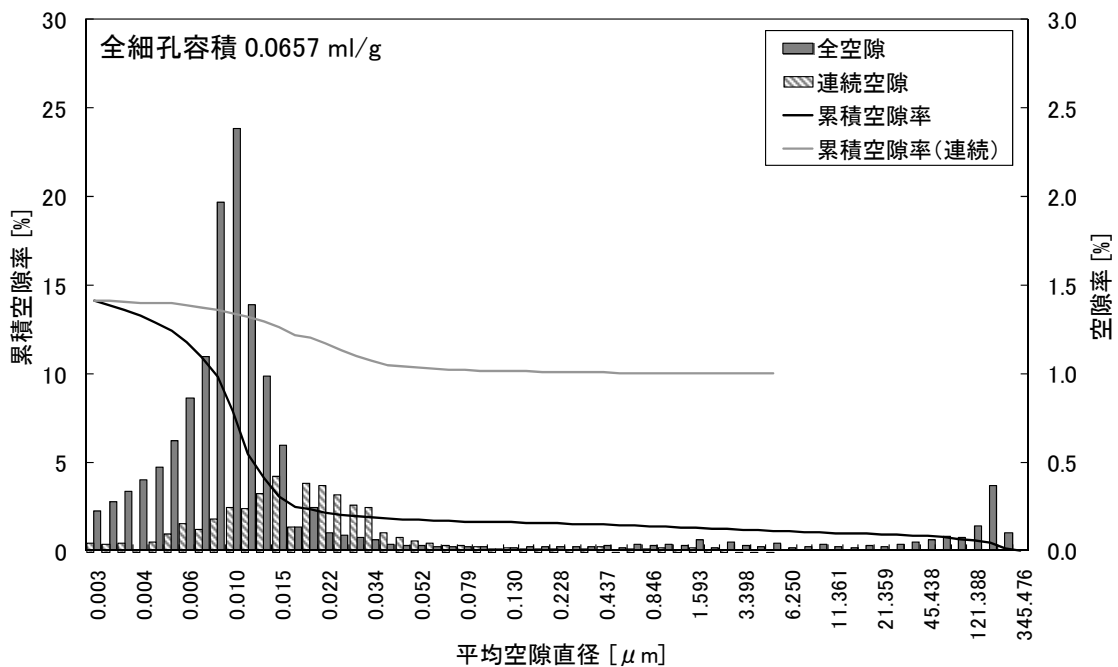


図 7.2-12 上部低拡散材（コアB(表面)、材齢 14 ヶ月)における空隙径分布

2) 空隙率算出結果

前記の空隙径分布測定の結果から得られた、上部低拡散材に対する全空隙率、連側空隙率ならびにインクボトル空隙率の値を表 7.2-4 に示した。全空隙率は 13.0~14.2%であり、連

続空隙率は 3.8～4.3%となった。また、インクボトル空隙量は、全空隙量の 70%程度であった。

上部低拡散材に対する昨年度からの空隙率の測定結果を表 7.2-5 に示した。昨年度の空隙率の測定結果と比較して、材齢の経過とともに空隙率が若干低下している傾向が見られた。

表 7.2-4 各空隙率の測定結果

供試体種類		かさ比重 (g/ml)	真比重 (g/ml)	空隙率		
				全空隙率 (%)	連続空隙率 (%)	インクボトル空隙率 (%)
上部低 拡散材	コア A(表面)	2.16	2.48	13.0	3.8	9.2
	コア A (中間層)	2.29	2.67	14.2	4.3	9.9
	コア B(表面)	2.15	2.50	14.1	4.2	9.9

表 7.2-5 平成 24 年度の全空隙率測定結果との比較

供試体種類		全空隙率(%)	
		H24 年度 (材齢 3 ヶ月)	H25 年度 (材齢 14 ヶ月)
上部低拡散材	コア A(表面)	17.2	13.0
	コア A (中間層)	16.3	14.2
	コア B(表面)	17.2	14.1

3) 空隙率の材齢による変化のまとめ

これまでに取得した現場打設構造物から採取した供試体を対象とした空隙率測定結果の材齢による変化を図 7.2-13～図 7.2-15 および表 7.2-6～表 7.2-8 にまとめた。空隙率は材齢が長くなるほど小さくなる傾向がみられた。また、低拡散材・コンクリートピットによらず、空隙率の低減スピードも概ね一致する傾向がみられる。このことより、空隙率の材齢による変化は、骨材の大きさによらず、セメントやフライアッシュ等の固化材の配合が支配的であると考えられる。特にフライアッシュは、長期材齢において強度が増進するが、それとともにセメント系材料のマトリックス部分の緻密化も進行し、空隙率が小さくなったと考えられる。

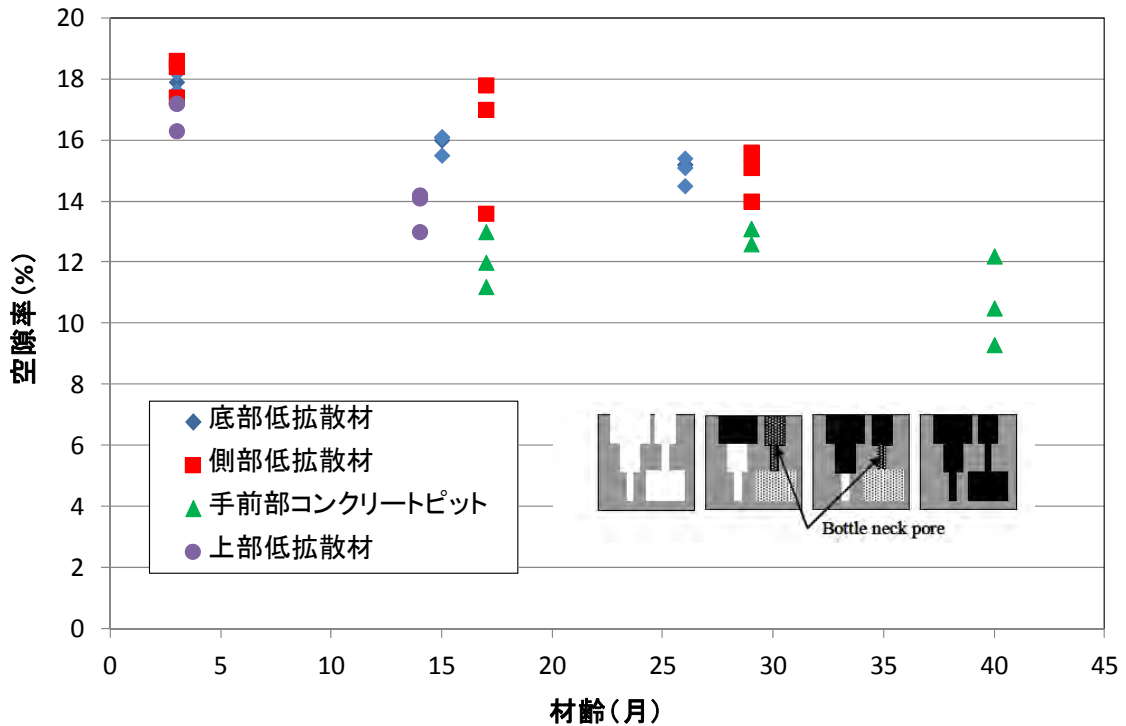


図 7.2-13 材齢と全空隙率の関係

表 7.2-6 材齢による全空隙率

材齢 (月)		3	14	15	17	26	29	40
底部低拡散材	現場 (前)	17.9		16.0		15.2		
	現場 (中)	18.2		15.5		15.4		
	現場 (奥)	17.2		16.1		15.1		
	室内製作	17.6		16.1		14.5		
側部低拡散材	現場 (上)	17.4			13.6		14.0	
	現場 (中)	18.6			17.0		15.6	
	現場 (下)	18.4			17.8		15.1	
手前部コンクリートピット	現場 (A)				11.2		13.1	12.2
	現場 (B)				12.0		13.1	10.5
	現場 (C)				13.0		12.6	9.3
上部低拡散材	コア A(表面)	17.2	13.0					
	コア A(中間層)	16.3	14.2					
	コア B(表面)	17.2	14.1					

※底部低拡散材・側部低拡散材・上部低拡散材 共通の養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 (上部低拡散材についてはコア Bのみ湿潤・保温マット養生) ; 1週間、1週間

コア採取後、現場 (地下空洞内、温度変動あり) での水中養生 ; 2か月と3週間、3か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 3ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

※上部コンクリートピットの養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 ; 1週間、1週間

現場気中養生 (地下空洞内、温度変動あり) 、コア採取後の養生なし ; 16か月と3週間、17か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 17ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

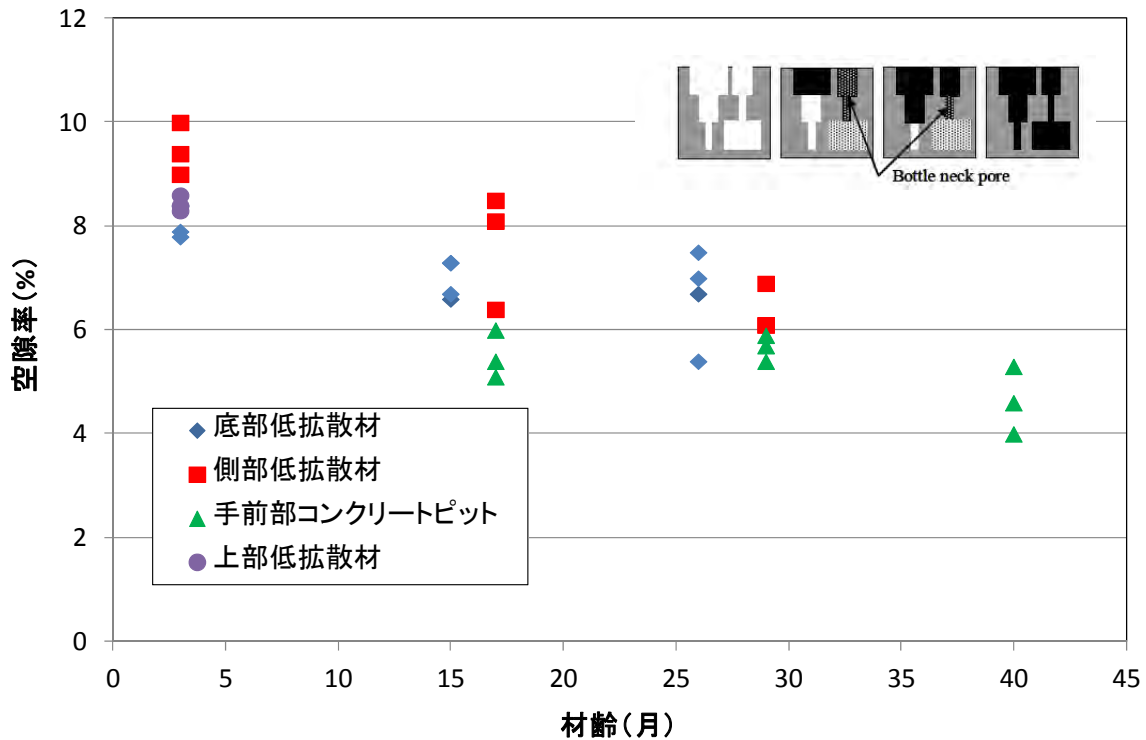


図 7.2-14 材齢と連続空隙率の関係

表 7.2-7 材齢による連続空隙率

材齢 (月)		3	14	15	17	26	29	40
底部低拡散材	現場 (前)	8.4		6.6		6.7		
	現場 (中)	8.4		7.3		7.5		
	現場 (奥)	7.8		7.3		7.0		
	室内製作	7.9		6.7		5.4		
側部低拡散材	現場 (上)	9.0			6.4		6.1	
	現場 (中)	10.0			8.5		6.9	
	現場 (下)	9.4			8.1		6.1	
手前部コンクリートピット	現場 (A)				5.1		5.4	5.3
	現場 (B)				5.4		5.9	4.6
	現場 (C)				6.0		5.7	4.0
上部低拡散材	コア A(表面)	8.6	3.8					
	コア A(中間層)	8.3	4.3					
	コア B(表面)	8.4	4.2					

※底部低拡散材・側部低拡散材・上部低拡散材 共通の養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 (上部低拡散材についてはコア Bのみ湿潤・保温マット養生) ; 1週間、1週間

コア採取後、現場 (地下空洞内、温度変動あり) での水中養生 ; 2か月と3週間、3か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 3ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

※上部コンクリートピットの養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 ; 1週間、1週間

現場気中養生 (地下空洞内、温度変動あり)、コア採取後の養生なし ; 16か月と3週間、17か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 17ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

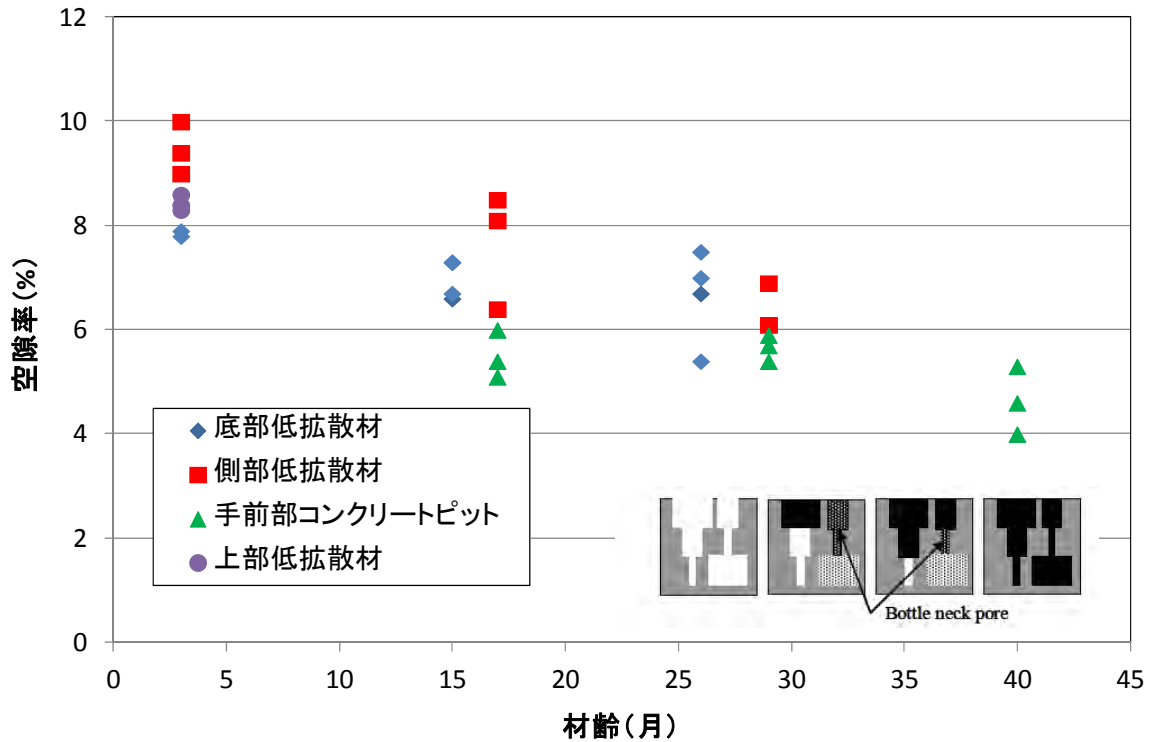


図 7.2-15 材齢とインクボトル空隙率の関係

表 7.2-8 材齢によるインクボトル空隙率

材齢 (月)		3	14	15	17	26	29	40
底部低拡散材	現場 (前)	9.9		9.0		8.6		
	現場 (中)	8.9		8.8		8.1		
	現場 (奥)	10.1		8.7		8.2		
	室内製作	9.7		9.5		9.2		
側部低拡散材	現場 (上)	8.4			7.3		7.9	
	現場 (中)	8.6			8.6		8.7	
	現場 (下)	9.0			9.8		9.0	
手前部コンクリートピット	現場 (A)				6.2		7.7	6.9
	現場 (B)				6.7		7.2	5.9
	現場 (C)				7.1		6.9	5.3
上部低拡散材	コア A(表面)	8.6	9.2					
	コア A(中間層)	8.0	9.9					
	コア B(表面)	8.8	9.9					

※底部低拡散材・側部低拡散材・上部低拡散材 共通の養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 (上部低拡散材についてはコア Bのみ湿潤・保温マット養生) ; 1 週間、1 週間

コア採取後、現場 (地下空洞内、温度変動あり) での水中養生 ; 2 か月と 3 週間、3 か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 3 ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

※上部コンクリートピットの養生条件と期間、材齢

打設後の湿布養生 ; 1 週間、1 週間

現場気中養生 (地下空洞内、温度変動あり)、コア採取後の養生なし ; 16 か月と 3 週間、17 か月

拡散係数測定試験中・室内標準養生 (試験装置内) ; 17 ヶ月目以降、測定時の材齢と等しい

7.2.3 セメント系材料の拡散係数の特性

(1) これまで取得した実効拡散係数データのまとめ

これまでに取得した LPC-FA セメントの供試験体仕様、試験条件と実効拡散係数を表 7.2-9 にまとめた。また、表 7.2-10、表 7.2-11 に各供試体の養生方法と期間についてまとめた一覧表を示す。条件が異なるものについては、灰色で示した。また、各供試体の配合を表 7.2-12～表 7.2-18 に示す。

表 7.2-10 に示した室内試験用の供試体は、温度管理が行われている標準養生による。拡散試験中においても、室温が 25°C前後の室内で試験を実施しているため、標準養生に近い条件と考えられる。

表 7.2-11 に示した「現場打込み供試体」は、湿布養生、および湿潤・保温マット養生を 1 週間行った後にコアドリルで採取し、その後、試験空洞内で水中養生している。この間、試験空洞内での養生であるため、温度が変化する環境下での養生となる。また、手前部コンクリートピットは、1 週間の型枠養生・湿布養生を実施し、脱枠している。脱枠後、16 カ月と 3 週間でコアを採取し、拡散測定を実施した。「現場気中養生」とは、脱枠後、地下空洞の環境下におかれた状態のままであったことを示す。すなわち、手前部コンクリートピットについても、温度が変化する環境下での養生となる。現場打込み後に回収した供試体についても、室内試験用の供試体と同様に、拡散試験中は、室温が 25°C前後の室内で試験を実施しているため、標準養生に近い条件と考えられる。

本試験では、基本的に標準養生または温度変化のある環境下での水中養生された供試体を用いている。

表 7.2-9 低拡散材およびコンクリートピットにおける HTO の実効拡散係数

供試体種類		カラム厚さ (mm)	試験期間/ 最終材齢 (月)	空隙率 (%)	連続 空隙率 (%)	実効拡散 係数 De (m ² /s)	備考
室内試験 基本配合	1	5	12 / 15	14.0	6.0	3.3×10 ⁻¹³	H19 終了
	2	5	12 / 15			3.4×10 ⁻¹³	H19 終了
	3	5	12 / 15			3.4×10 ⁻¹³	H19 終了
	4	5	12 / 15			3.2×10 ⁻¹³	H19 終了
	1-2	10	22 / 25	16.6	7.8	1.9×10 ⁻¹³	H20 終了
	1-3-1	5	14 / 24	14.1	5.1	2.3×10 ⁻¹³	H20 終了
	1-3-2	5	14 / 24			2.6×10 ⁻¹³	H20 終了
	1-4	10	27 / 37	13.9	5.2	1.7×10 ⁻¹³	H21 終了
室内試験 変動配合	空気量 4%	5	12 / 15	15.0	5.8	3.6×10 ⁻¹³	H19 終了
	空気量 6%	5	12 / 15	16.8	6.2	3.4×10 ⁻¹³	H19 終了
	W/B:50%	5	12 / 15	15.1	6.5	3.9×10 ⁻¹³	H20 終了
室内試験 高空隙率	W/B:60%	5	10 / 13	20.3	7.6	4.3×10 ⁻¹³	H19 終了
	W/B:75%	5	10 / 13	21.3	9.3	5.1×10 ⁻¹³	H19 終了
	W/B:90%	5	1 / 4	23.7	---	8.0×10 ⁻¹²	H18 終了
底部 低拡散材	現場(前)	10	23 / 26	15.2	6.7	1.5×10 ⁻¹³	H22 終了
	現場(中)	10	23 / 26	15.4	7.5	1.6×10 ⁻¹³	H22 終了
	現場(奥)	10	23 / 26	15.1	7.0	1.6×10 ⁻¹³	H22 終了
	室内製作	10	24 / 27	14.5	5.4	1.9×10 ⁻¹³	H22 終了
側部 低拡散材	現場(上)	10	26 / 29	14.0	6.1	1.3×10 ⁻¹³	H23 終了
	現場(中)	10	26 / 29	15.6	6.9	1.1×10 ⁻¹³	H23 終了
	現場(下)	10	26 / 29	15.1	6.1	1.6×10 ⁻¹³	H23 終了
手前部 コンクリート ピット	現場(C1)	10	23 / 40	12.6	5.7	1.3×10 ⁻¹³	H24 終了
	現場(C2)	10	23 / 40			1.8×10 ⁻¹³	H24 終了
	現場(C3)	10	23 / 40			1.2×10 ⁻¹³	H24 終了
上部 低拡散材	コア A(表面)	10	11/継続中	13.0	3.8	1.1×10 ⁻¹³	H25 暫定値
	コア A(中間層)	10	11/継続中	14.2	4.3	1.1×10 ⁻¹³	H25 暫定値
	コア B(表面)	10	11/継続中	14.1	4.2	1.3×10 ⁻¹³	H25 暫定値

表 7.2-10 室内作製供試体の養生条件一覧表

状態		試験前	試験中
		養生方法/期間/材齢	養生方法/期間
供試体種類		(月)	(月)
室内試験 基本配合	1	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	2	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	3	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	4	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	1-2	標準養生/3/3	試験容器内/22/25
	1-3-1	標準養生/10/10	試験容器内/14/24
	1-3-2	標準養生/10/10	試験容器内/14/24
室内試験 変動配合	空気量 4%	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	空気量 6%	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
	W/B:50%	標準養生/3/3	試験容器内/12/15
室内試験 高空隙率	W/B:60%	標準養生/3/3	試験容器内/10/13
	W/B:75%	標準養生/3/3	試験容器内/10/13
	W/B:90%	標準養生/3/3	試験容器内/1/4

表 7.2-11 現場打込み供試体の養生条件一覧表

状態		試料採取前	試験前	試験中
		養生方法/期間/材齢	養生方法/期間/材齢	養生方法/期間/材齢
供試体種類		(月)	(月)	(月)
底部 低拡散材	現場(前)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/23/26
	現場(中)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/23/26
	現場(奥)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/23/26
	室内製作		標準養生/3/3	試験容器内/24/27
側部 低拡散材	現場(上)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/26/29
	現場(中)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/26/29
	現場(下)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/26/29
手前部 コンクリート ピット	現場(C1)	湿布・型枠養生/0.25/0.25	現場気中養生/16.75/17	試験容器内/23/40
	現場(C2)	湿布・型枠養生/0.25/0.25	現場気中養生/16.75/17	試験容器内/23/40
	現場(C3)	湿布・型枠養生/0.25/0.25	現場気中養生/16.75/17	試験容器内/23/40
上部 低拡散材	コア A(表面)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/11/14
	コア A(中間層)	湿布養生/0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/11/14
	コア B(表面)	湿潤・保温マット養生 /0.25/0.25	現場水中養生/2.75/3	試験容器内/11/14

表 7.2-12 室内試験 基本配合

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)							
					W	LPC	FA	LEX	LS	S1	SP (P×%)	AS ^{※2} (P×%)
45.0	27.9	60.0	60	2.5	230	338	159	20	310	1211	0.50	0.010

表 7.2-13 室内試験 変動配合

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)							
					W	LPC	FA	LEX	LS	S1	SP (P×%)	AS ^{※2} (P×%)
45.0	27.9	60.0	60	4.0	230	338	159	20	310	1211	0.50	0.015
45.0	27.9	60.0	60	6.0	230	338	159	20	310	1211	0.52	0.035
50.0	30.5	64.0	60	2.5	242	319	145	20	310	1211	0.45	0.010

表 7.2-14 室内試験 高空隙率

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)							
					W	LPC	FA	LEX	LS	S	SP (P×%)	AS ^{※2} (P×%)
60.0	35.1	71.1	60	2.5	259	282	133	17	307	1214	0.08	0.009
75.0	41.1	82.3	60	2.5	280	244	115	14	307	1214	0.08	0.009
90.0	46.5	93.6	60	2.5	295	214	101	13	307	1214	0.08	0.009

表 7.2-15 底部低拡散材の配合(LS1-LP66)

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)						
					W	LPC	FA	LEX	LS	S	SP (P×%)
45.0	28.1	60.0	65.0	2.5	230	338	153	20	307	1199	0.50

表 7.2-16 側部低拡散材の配合(LS2-LP45)

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)						
					W	LPC	FA	LEX	LS	S	SP (P×%)
45.0	31.0	45.0	65.0	2.5	230	338	153	20	230	1279	0.50

表 7.2-17 手前部コンクリートピットの配合(C-LP50)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)							
						W	LPC	FA	LEX	LS	S	G	SP (P×%)
45.0	30.0	53.4	50.0	65.0	2.5	160	229	153	20	178	885	780	0.94

表 7.2-18 上部低拡散材の配合(LS1-LP53)

W/B (%)	W/P (%)	LS 混入率 ^{※1} (%)	スランブ [°] フロー (cm)	空気量 (%)	使用材料および単位量(kg/m ³)						
					W	LPC	FA	LEX	LS	S	SP (P×%)
45.0	30.0	60.0	65.0	2.5	230	338	153	20	307	1279	0.57

※1：結合材量(B=LPC+FA+LEX)に対する石灰石微粉末量 LS の質量割合を示す

※2：空気量調整剤は、マイクロエア 404（消泡剤）を使用

7.2.4 まとめ

実験室において水・結合材比等を上げて製作した空隙率の大きな供試体については、空隙率の増加に伴い実効拡散係数が増加する傾向が見られるが、現実的な配合条件のもとで、現場施工された LPC・FA 系の低拡散材ならびにコンクリートピットの定常状態後のトリチウムの実効拡散係数 (HTO) は $1 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-13} \text{ (m}^2/\text{s)}$ の範囲であり、部材の種類による違いはみられなかった。実効拡散係数が定常状態に至るまでには 1～2 年程度の時間を要することを確認した。

空隙率の測定では、時間の経過とともに空隙率の減少がみられた。空隙率の材齢による変化は、骨材の大きさによらず、セメントやフライアッシュ等の固化材の配合が支配的であると考えられる。特にフライアッシュは、長期材齢において強度が増進するが、それとともにセメント系材料のマトリックス部分の緻密化も進行し、空隙率が小さくなったと考えられる。

本試験では、基本的に標準養生または温度変化のある環境下での水中養生された供試体を用いている。実物での養生状況（1 週間程度の型枠養生・湿布養生の後に脱枠した状態）と比較するとフライアッシュの水和反応による緻密化の度合いが進んでいる可能性が考えられる。そのため、現場での気中養生を行った供試体で拡散係数および空隙率の測定を実施し、比較検討することが望ましい。

7.3 上部低拡散材他ひび割れ調査

7.3.1 ひび割れ調査の概要

今年度においてひび割れ調査を行う個所を図 7.3-1 に、昨年度の状況写真を図 7.3-2 に示す。ひび割れ調査は次に示す 3 か所について、それぞれ 2 回ずつ実施した。調査箇所を以下に示す。

- ①上部低拡散材の上面 (92 m²)
- ②上部コンクリートピット上面 (3 m²)
- ③側部低拡散材表面 (左側) (29 m²)

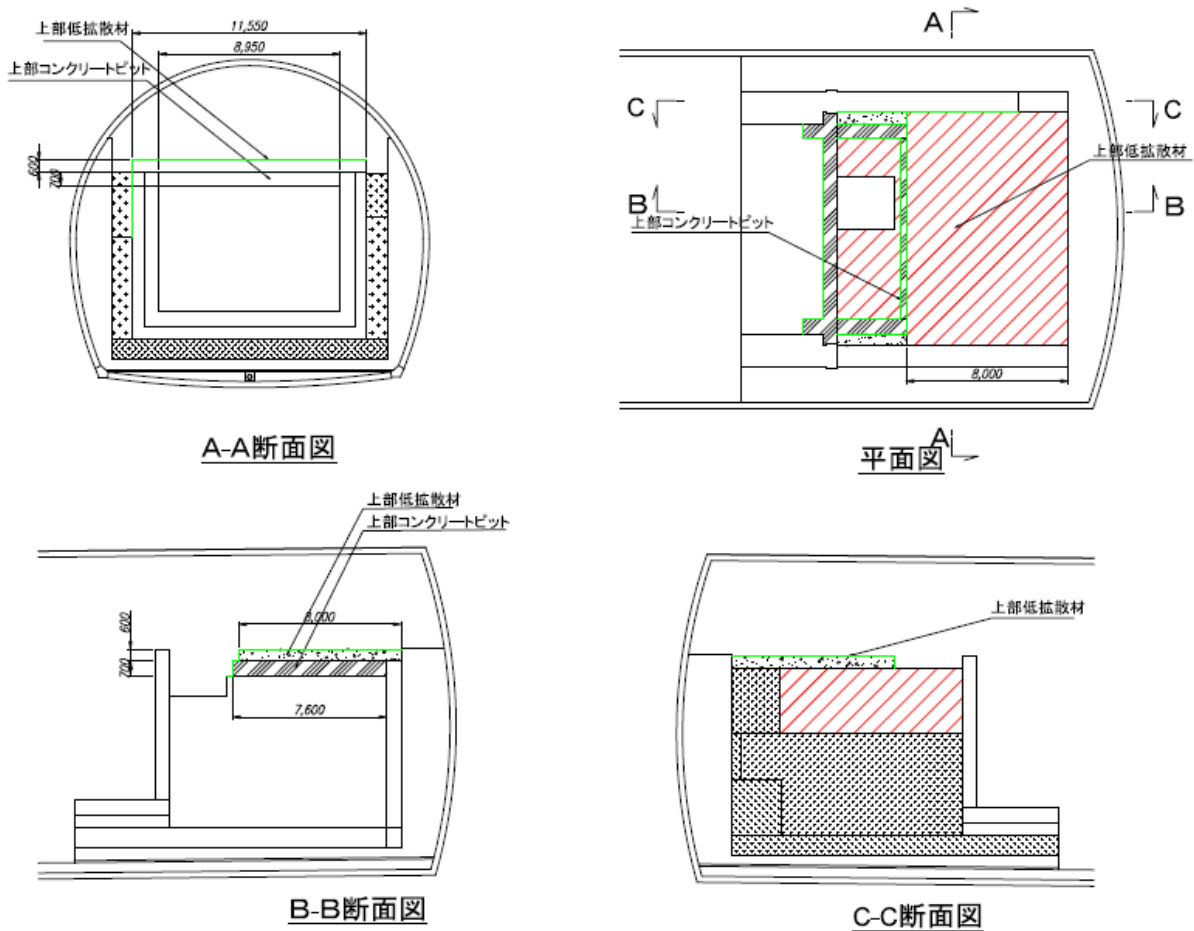


図 7.3-1 調査対象範囲 (赤：平面、緑：断面)



①、②部

③部

図 7.3-2 調査箇所の状況

(1) ひび割れ調査方法

ひび割れ調査方法を以下に示す。

- ①ひび割れ調査は、対象とするひび割れについて、ひび割れ幅、長さ、総延長、発生位置、範囲、発生パターン、段差の有無等について調査した。調査結果は平面図等の図面に記入した。
- ②ひび割れ幅の測定は、クラックスケール等の測定器を使用した。ひび割れの長さ、発生位置、範囲等発については、巻尺等を使用して正確な長さ、位置、範囲を測定した。
- ③1本のひび割れの中でひび割れ幅が異なる場合は、適当な数か所のひび割れ幅を測定して記録する。また、ひび割れ発生箇所に段差が見られた場合は、その位置および段差寸法等を測定して記録する。
- ④上部低拡散材と上部コンクリートピットの側面部にひび割れが認められた場合には、その形状、位置、ひび割れ幅等が分かるように図面に記録した。

7.3.2 ひび割れ調査結果

実施日は施工確認試験開始時（2013.10.16）、および試験施設での上部埋戻し材施工確認試験終了後（2014.2.14）で、調査は図 7.3-1 示す位置で実施する。表 7.3-1 にこれまでの調査履歴を示す。

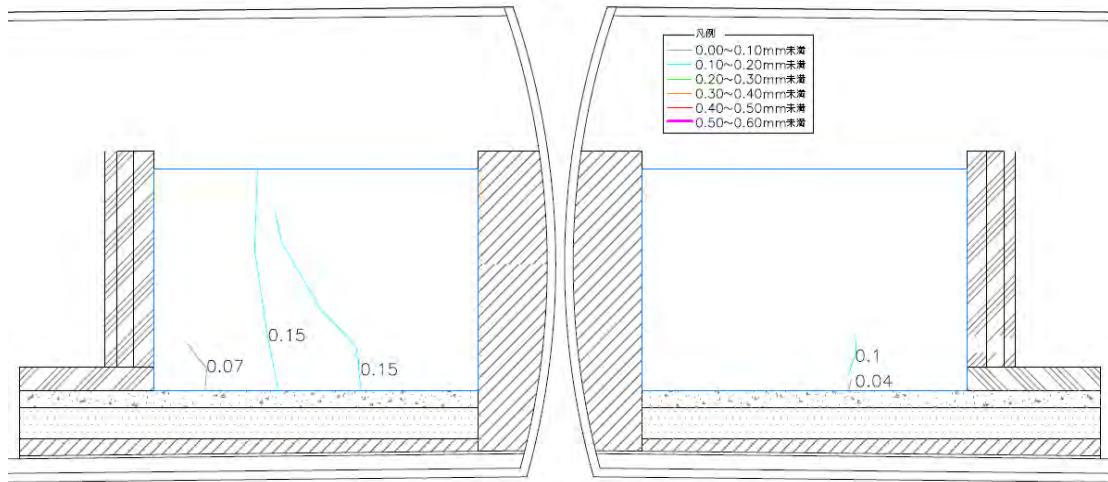
表 7.3-1 側部低拡散材のひび割れ調査履歴

	調査日			材 齢
				打 設 日
H21	2009.	9.	16	
	2009.	10.	23	37
	2009.	12.	14	89
H22	2010.	10.	23	402
H23	2011.	1.	5	476
	2011.	12.	7	812
H24	2012.	3.	13	909
H25	2013.	10.	16	1491
H26	2014.	2.	14	1612

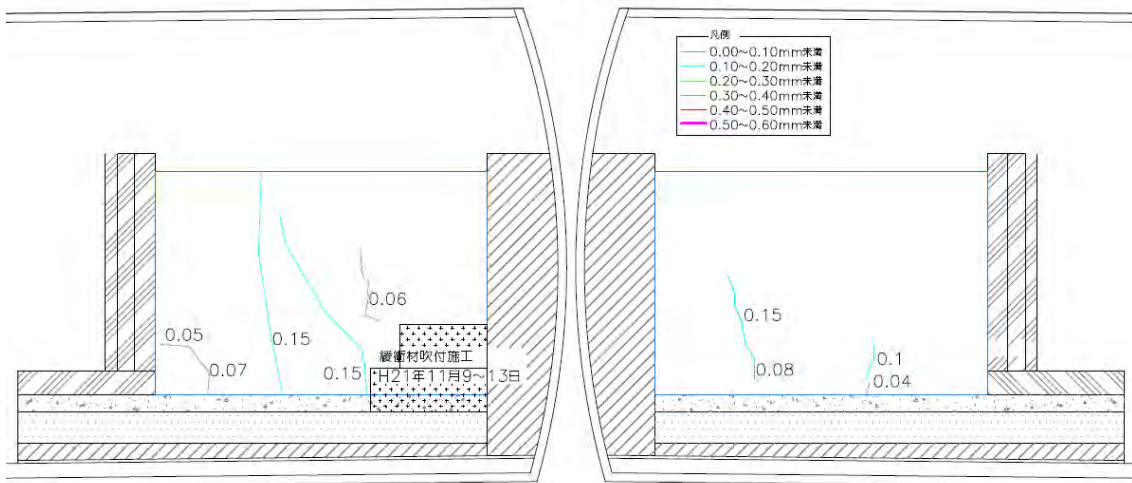
(1) 側部低拡散材のひび割れ履歴

側部低拡散材については定期的にひび割れ観察を実施した。図 7.3-3 および図 7.3-4 にひび割れの履歴を、図 7.3-5 および図 7.3-6 に現時点での側部低拡散材および上部コンクリートピット・上部低拡散材表面のひび割れ展開図を示す。

H21年10月23日 (材齢37日)



H21年12月14日 (材齢89日)



H22年10月23日 (材齢402日)

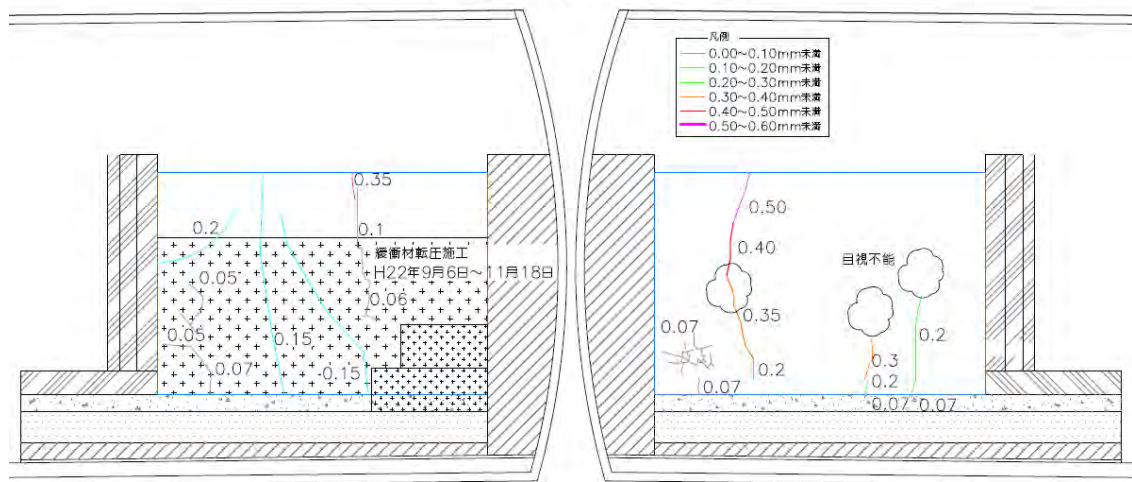
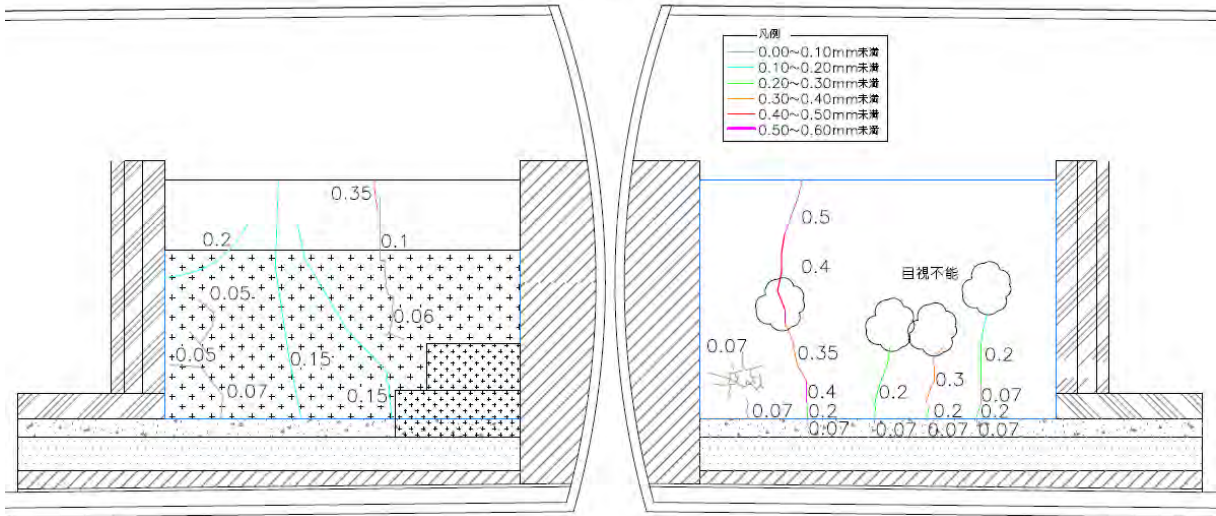
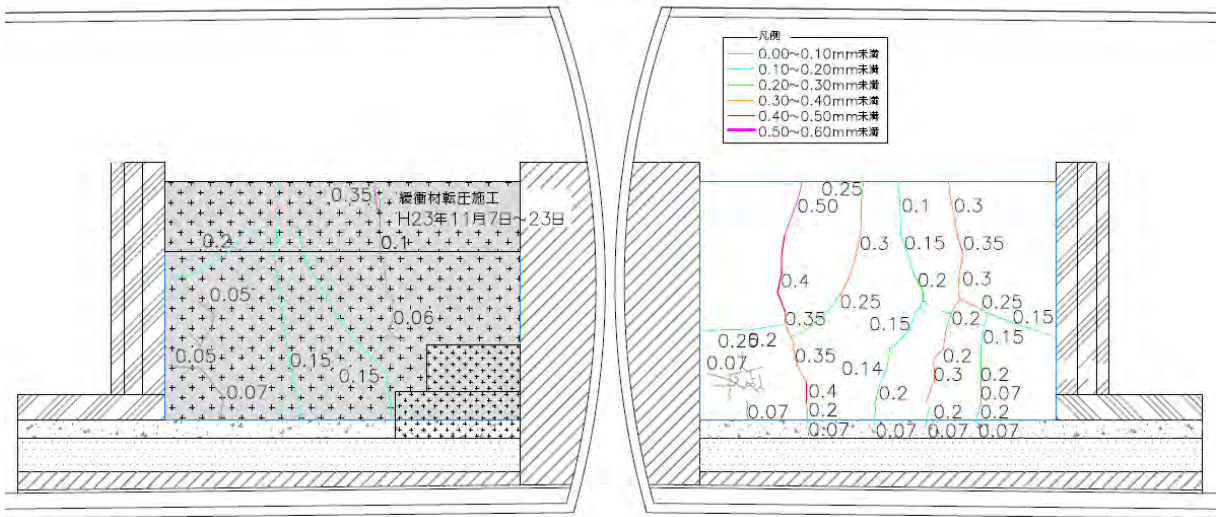


図 7.3-3 低拡散材ひび割れ履歴図 (その1)

H23年1月5日 (材齢476日)



H23年12月7日 (材齢812日)



H24年3月13日 (材齢909日)

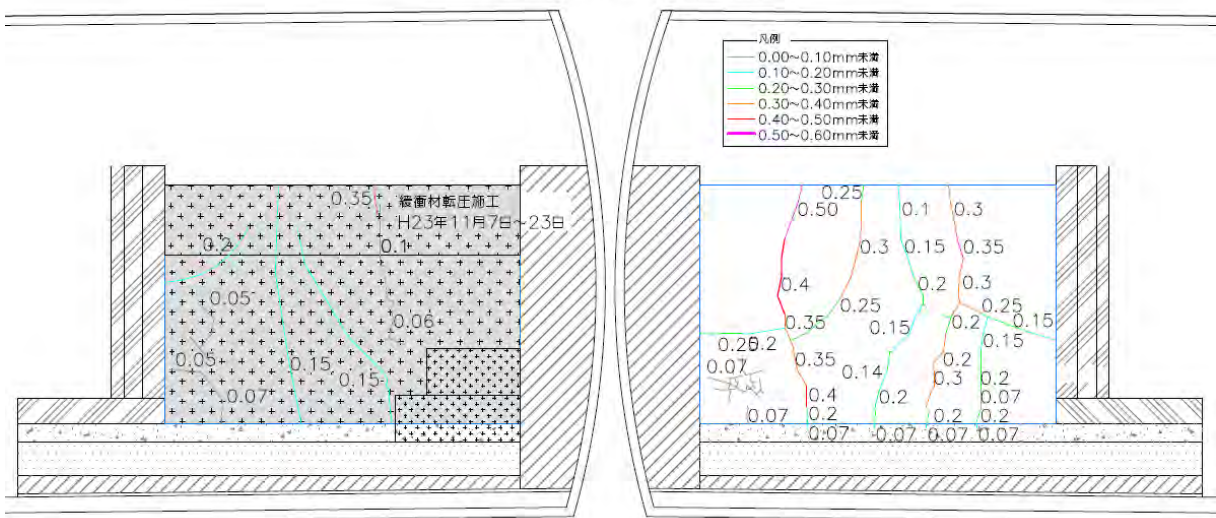


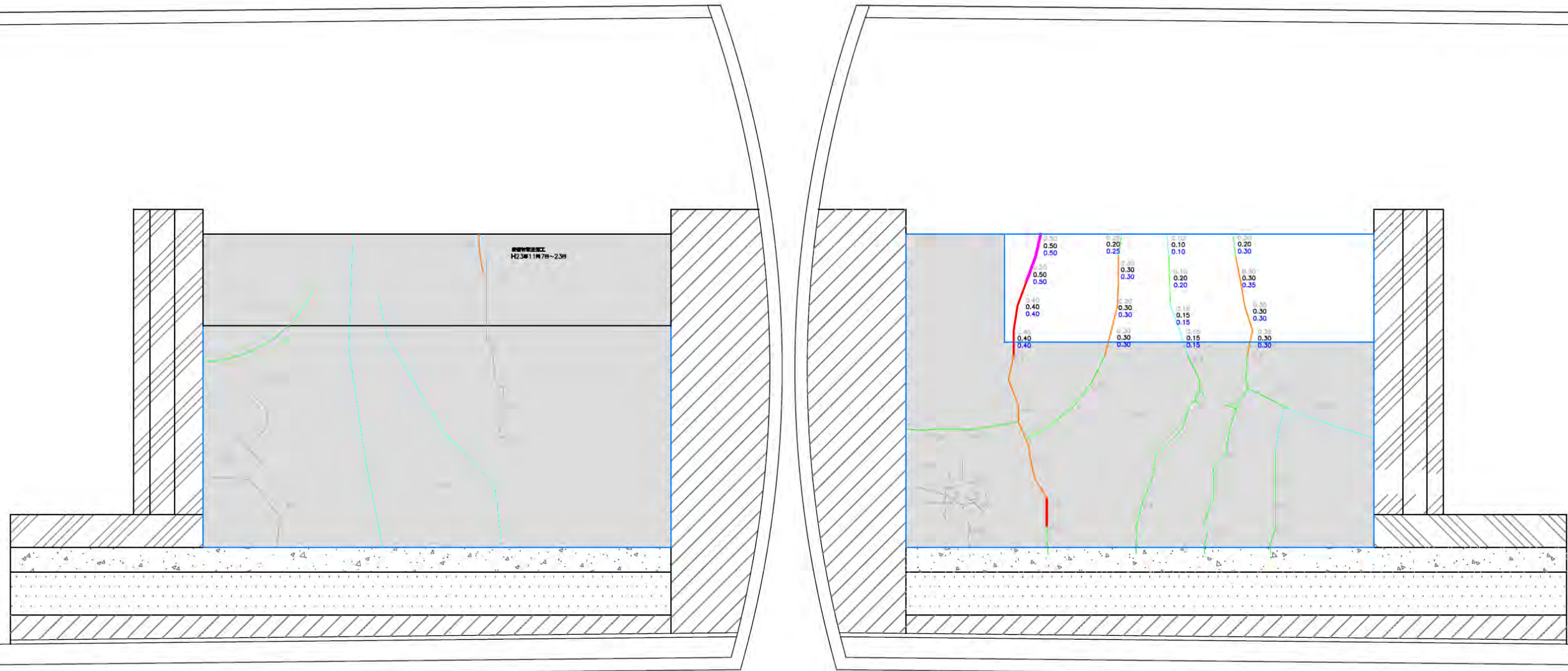
図 7.3-4 低拡散材ひび割れ履歴図 (その2)

ひび割れ展開図（側部低拡散材表面）

測定日：H24年 3月13日（材齢 909日）
 測定日：H25年10月16日（材齢1491日）
 測定日：H26年 2月14日（材齢1612日）

側部低拡散材 正面図（右）

側部低拡散材 正面図（左）



- 凡例
- 0.00~0.10mm未満
 - 0.10~0.20mm未満
 - 0.20~0.30mm未満
 - 0.30~0.40mm未満
 - 0.40~0.50mm未満
 - 0.50~0.60mm未満

※ 図内数字はひび割れ幅（mm）

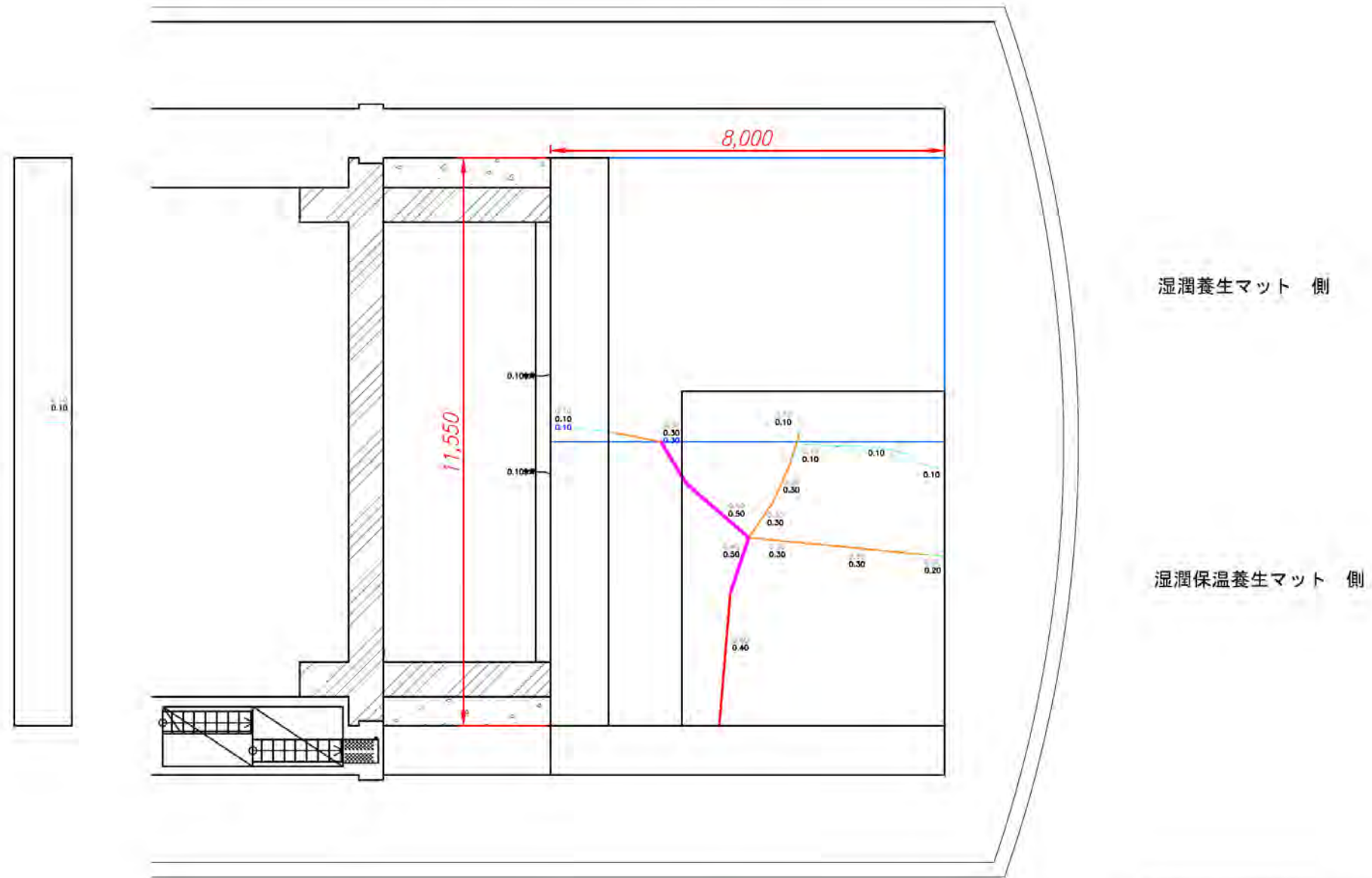
平成25年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 (セメント系材料のひび割れ等に係るデータ取得)	
図面名称	ひび割れ展開図(側部低拡散材表面)
図面番号	添付図-1
縮尺 1:100	製作年月 平成26年 2月
鹿島建設株式会社 東北支店	

図 7.3-5 側部低拡散材表面ひび割れ展開図

ひび割れ展開図（上部低拡散材表面・上部コンクリートピット）

測定日：H24年 3月13日（材齢 177日）
 測定日：H25年10月16日（材齢 699日）
 測定日：H26年 2月14日（材齢 820日）

上部低拡散材 平面



上部低拡散材 側面

- 凡例
- 0.00~0.10mm未満
 - 0.10~0.20mm未満
 - 0.20~0.30mm未満
 - 0.30~0.40mm未満
 - 0.40~0.50mm未満
 - 0.50~0.60mm未満

* 図内数字はひび割れ幅 (mm)

上部低拡散材 側面

平成25年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術検証試験 (セメント系材料のひび割れ等に係るデータ取得)	
調査名称	ひび割れ展開図(上部低拡散材表面・上部コンクリートピット)
調査番号	添付図-2
縮尺	1:100
製作年月	平成26年 2月
鹿島建設株式会社 東北支店	

図 7.3-6 上部コンクリートピット・上部低拡散材表面ひび割れ展開図

7.3.3 ひび割れ調査のまとめ

(1) 低拡散材

前回の計測時(2012.3.13)から、ひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されず、ひび割れの発生と進展は収束したと判断できる。

(2) 上部低拡散材・上部コンクリートピット

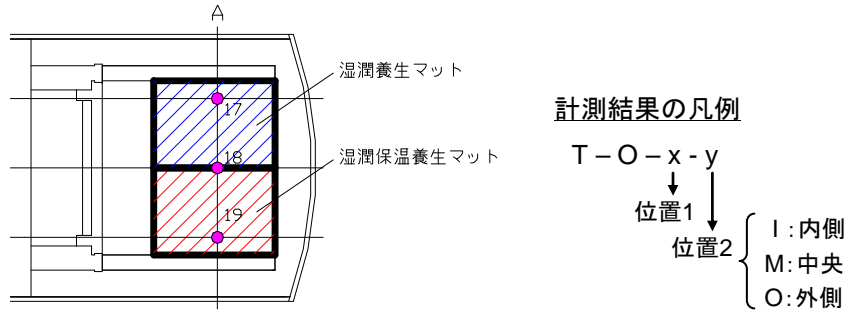
低拡散材と同じく前回の計測時(2012.3.13)から、ひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されず、ひび割れ発生と進展は収束したと判断できる。

7.3.4 ひび割れ評価

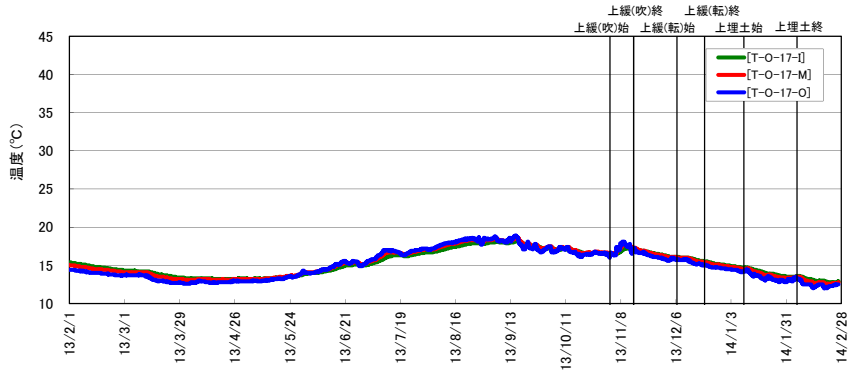
(1) 上部低拡散材

上部低拡散材の温度計測結果を図 7.3-7、応力計測結果を図 7.3-8 に示す。両者ともに、全計測器において年間を通して季節変動している。2013.11.1～11.14 の上部緩衝材（吹付工法）施工に伴う施工ヤードの温度上昇により、上部低拡散材の温度および応力が地下空洞内の温度や湿度等の季節的な外部環境の変化から一旦外れる挙動となるが、施工終了後には再び季節的な外部環境の変化に沿った挙動となっている。

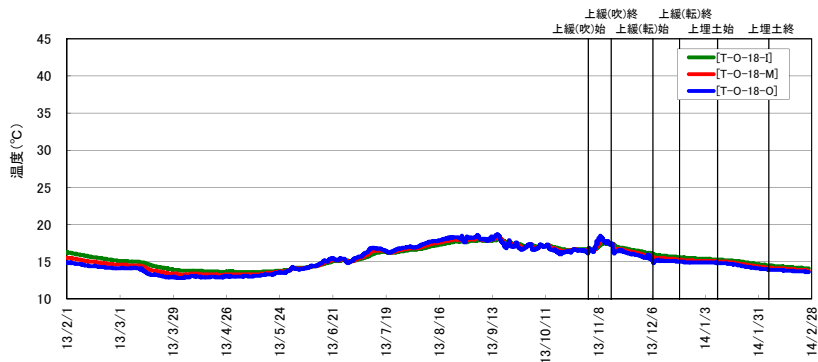
上部低拡散材の挙動計測結果より、年間を通して季節的な外部環境の変化に沿った挙動をしていること、および上部緩衝材（吹付工法）施工時には、上部低拡散材の温度上昇に伴い応力変化が見られるが、応力変化後に残存する挙動がないことにより、今年度の期間中に上部低拡散材にひび割れは発生していないものと考えられ、ひび割れ調査結果と整合する。



上部低拡散材の温度(左側、湿潤養生マット)



上部低拡散材の温度(中央)



上部低拡散材の温度(右側、湿潤保温養生マット)

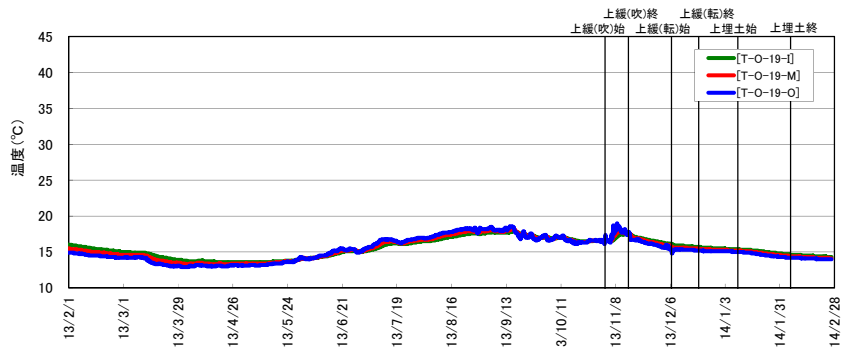
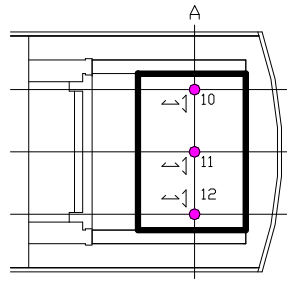


図 7.3-7 上部低拡散材の温度計測結果



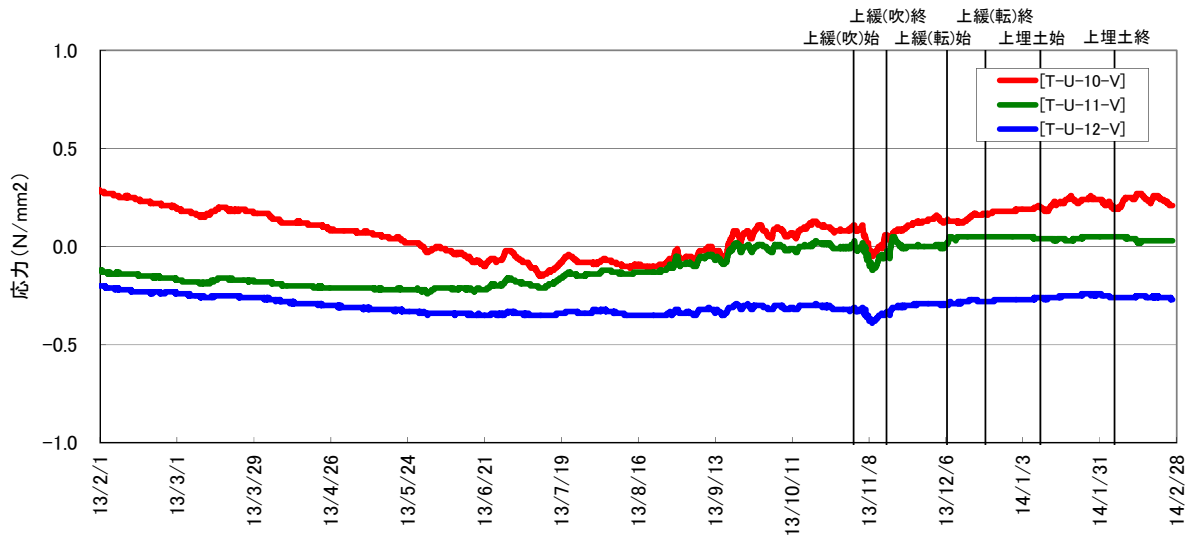
↔: 空洞軸方向
 ↓: 空洞軸直交方向

計測結果の凡例

T-U-x-y
 ↓
 位置
 ↓
 方向 { V: 空洞軸方向
 C: 空洞軸直交方向

上部低拡散材のモルタル応力(空洞軸方向)

+ : 引張、- : 圧縮



上部低拡散材のモルタル応力(空洞横断方向)

+ : 引張、- : 圧縮

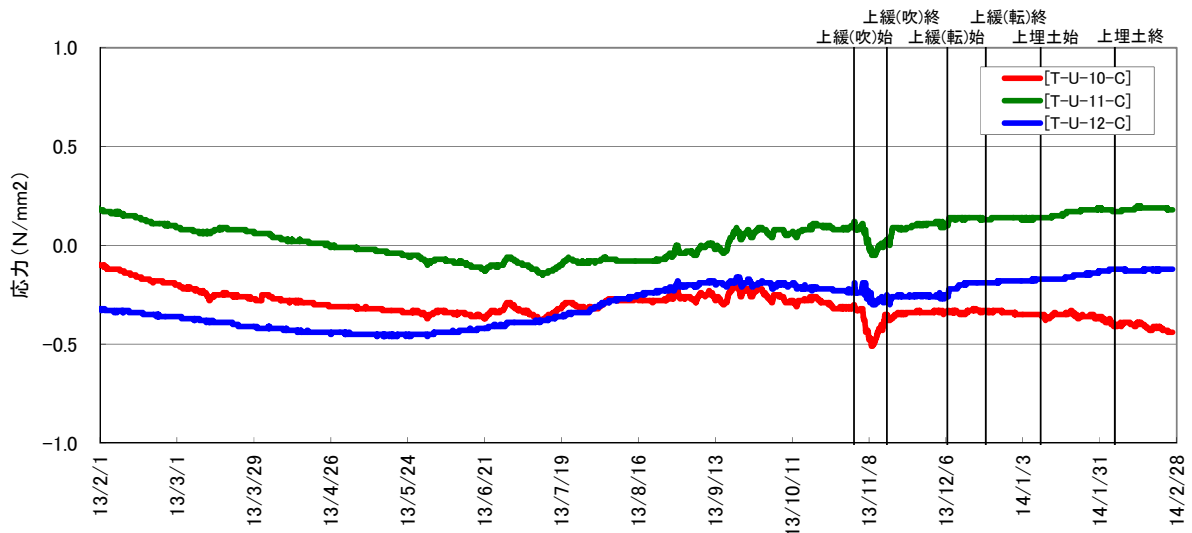


図 7.3-8 上部低拡散材のモルタル応力計測結果

(2) 上部コンクリートピット

上部コンクリートピットの温度計測結果を図 7.3-9、応力計測結果を図 7.3-10 に示す。上部低拡散材の挙動と同様に、温度、応力ともに、全計測器において年間を通して季節的な外部環境の変化に沿った挙動をしている。また、2013.11.1～11.14 の上部緩衝材（吹付工法）施工に伴う施工ヤードの温度上昇により、上部コンクリートピットの温度および応力が季節的な外部環境の変化に沿った挙動から一旦外れたが、施工終了後には再び季節的な外部環境の変化に沿った挙動となっている。

上部低拡散材と同様に、上部コンクリートピットの挙動計測結果より、年間を通して季節的な外部環境の変化に沿った挙動をしていること、および上部緩衝材（吹付工法）施工時には、上部コンクリートピットの温度上昇に伴い応力変化が見られるが、応力変化後に残存する挙動がないことにより、今年度の期間中に上部コンクリートピットにひび割れは発生していないものと考えられ、ひび割れ調査結果と整合する。

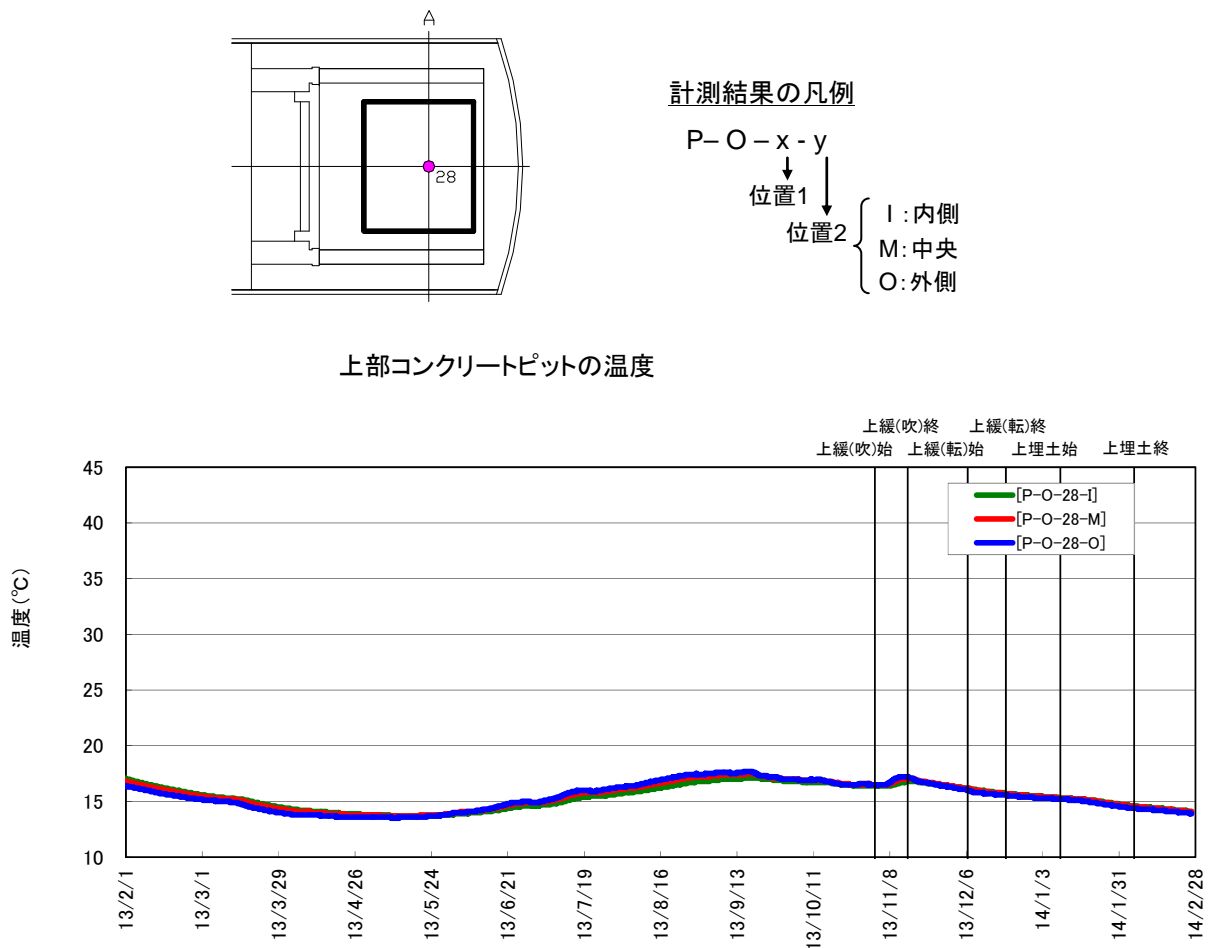
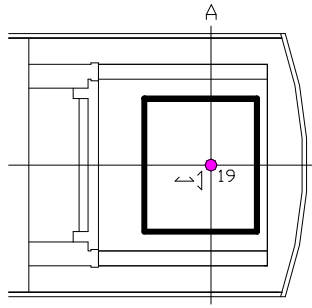


図 7.3-9 上部コンクリートピットの温度計測結果



↔: 空洞軸方向
 ↓: 空洞軸直交方向

計測結果の凡例

P-U-x-y
 ↓
 位置
 ↓
 方向
 { V: 空洞軸方向
 C: 空洞軸直交方向

上部コンクリートピットのコンクリート応力

+ : 引張、- : 圧縮

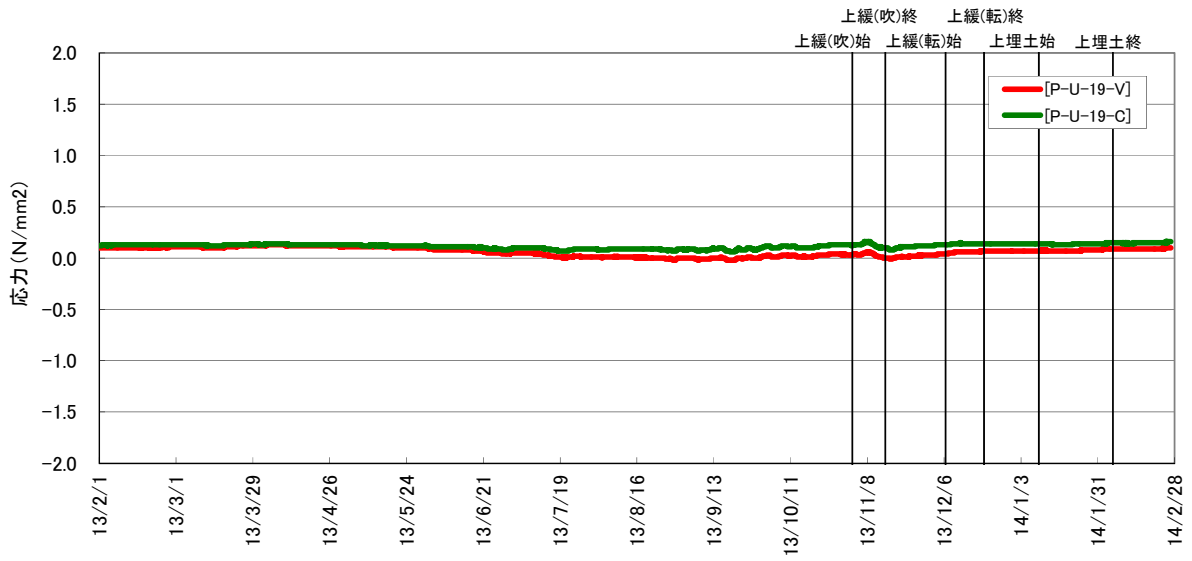
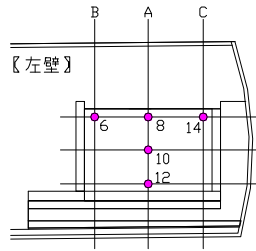


図 7.3-10 上部コンクリートピットの応力計測結果

(3) 側部低拡散材

左側側部低拡散材の中央測線である A 断面(上段、中段、下段)の温度計測結果を図 7.3-11、応力計測結果を図 7.3-12 に示す。上部低拡散材および上部コンクリートピットの挙動と同様に、温度、応力ともに、全計測器において年間を通して季節的な外部環境の変化に沿った挙動をしており、空洞気温の影響を受けやすいと考えられる上段計器は、その他の中段および下段計器より季節変動が大きくなっている。また、2013.11.1～11.14 の上部緩衝材(吹付工法)施工に伴う施工ヤードの温度上昇により、左側側部低拡散材の上段計器においては、温度および応力が季節変動に沿った挙動から一旦外れる挙動となるが、施工終了後には再び季節変動に沿った挙動となっている。

上部低拡散材および上部コンクリートピットと同様に、左側側部低拡散材の挙動計測結果より、年間を通して季節変動に沿った挙動をしていること、および上部緩衝材(吹付工法)施工時には、左側側部低拡散材の温度上昇に伴い応力変化が見られるが、応力変化後に残存する挙動がないことにより、今年度の期間中に左側側部低拡散材にひび割れは発生していないものと考えられ、ひび割れ調査結果と整合する。

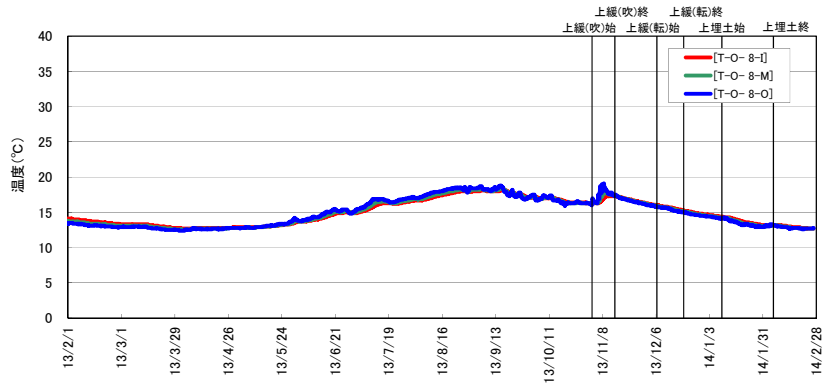


計測結果の凡例

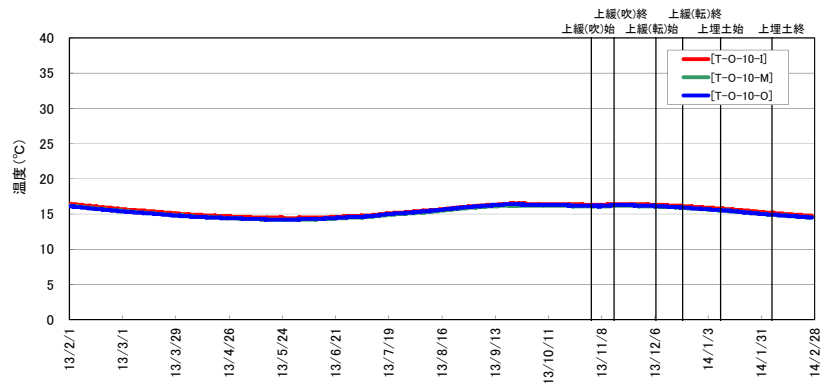
T-O-x-y
 ↓
 位置1 位置2

- I: 模擬廃棄体側
- M: 中央
- O: 岩盤側

側部低拡散材の温度(A断面上段)



側部低拡散材の温度(A断面中段)



側部低拡散材の温度(A断面下段)

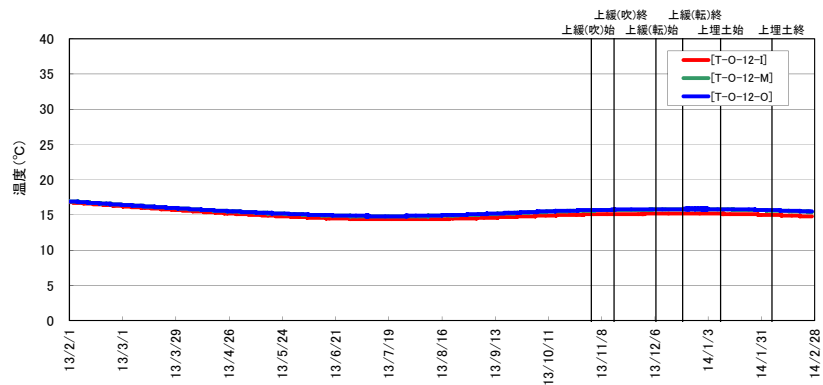
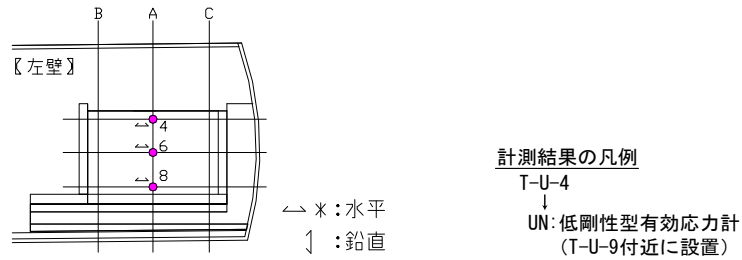


図 7.3-11 側部低拡散材の温度計測結果



側部低拡散材のモルタル応力(A断面)

+ : 引張、- : 圧縮

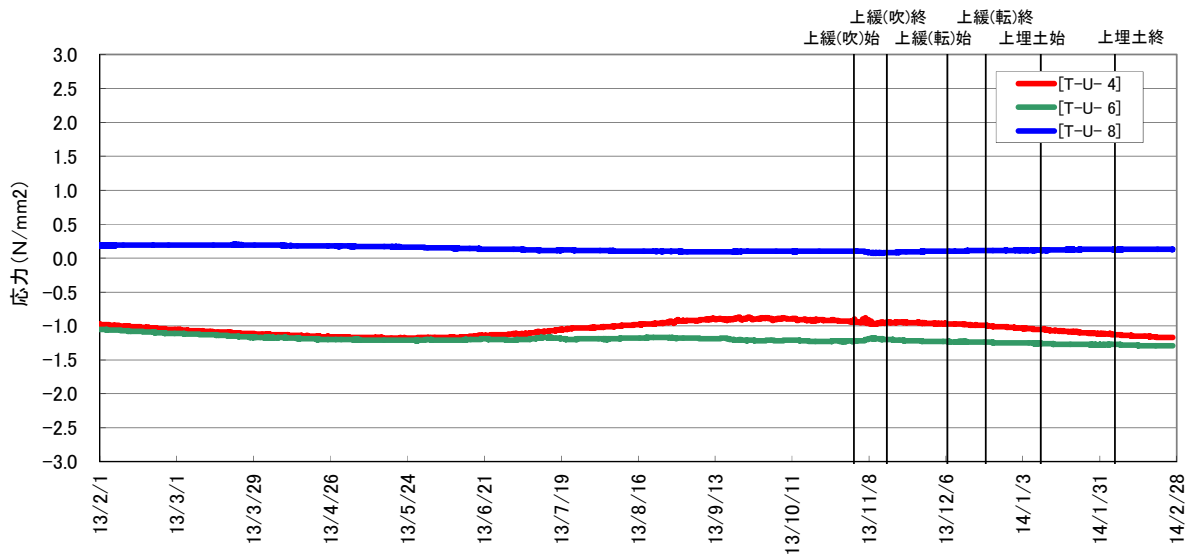


図 7.3-12 側部低拡散材の応力計測結果

7.3.5 まとめ

今年度のひび割れ調査結果により、昨年度の調査時からの対象部材（上部低拡散材、上部コンクリートピット、左側側部低拡散材）のひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されなかった。また、ひび割れ調査対象部材の挙動計測結果においても、季節的な外部環境の変化に沿った挙動に対応した応力変化が認められ、施工に伴いひび割れが発生、進展するような不連続な応力挙動が認められないことから、ひび割れ発生、進展は生じていないものと評価され、ひび割れ調査結果と整合する結果が得られた。

7.4 上部低拡散材他長期材齢物性試験

7.4.1 試験の概要

平成 24 年度までの確証試験で構築したセメント系の各部材について、1 年を超える材齢における圧縮強度と静弾性係数を取得する。これまでの確証試験の部材、配合等の詳細を表 7.4-1 に示す。このうち、表に網掛けをした 6 配合を選択して試験を実施した。また、試験の項目および数量を表 7.4-2 に示す。

表 7.4-1 各部材における試験材齢

部材	部位	配合	打込み日	試験日	
コンクリートピット	底部	LS1-249	H20. 11. 24	5 年	H25. 12. 18
	奥部	LS1-249	H20. 12. 19		
	側部	LS1-249	H20. 2. 4		
	手前部	LS2-178	H21. 8. 6		
	上部	LS2	H24. 11. 21	1 年	H25. 11. 21
低拡散材	底部	LS1-LP60	H20. 10. 16	5 年	H25. 11. 9
	側部 右側	LS2-LP60	H21. 9. 16		
	側部 左側	LS2-LP45	H21. 9. 16		
	上部	LS2-LP53	H24. 12. 3	1 年	H25. 12. 3
充てん材	平面部下部	LEX 無し SP3+Ad	H21. 10. 2	4 年	H25. 11. 10
	高さ模擬部	LEX 無し SP3+Ad	H22. 7. 21		
	平面模擬部	LEX 無し SP3+Ad	H22. 7. 22		
上部充てん材	平面部下部	LEX 無し SP1	H21. 10. 13		
	平面部上部	LEX 有り SP3+Ad	H22. 8. 3	3 年	H25. 9. 26

表 7.4-2 長期材齢評価試験数量

項目	単位	数量	備考
【打設時品質管理現場供試体】			
圧縮強度試験	体	18	各配合 1 材齢, 6 配合, N=3
静弾性係数試験	体	18	同上

7.4.2 使用材料および配合

本試験の対象とした部位の供試体の使用材料を表 7.4-3 に、配合を表 7.4-4～表 7.4-9 に示す。

表 7.4-3 各部材の使用材料

材料	記号	概要
セメント	LPC1	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,540 cm ² /g
	LPC2	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,630 cm ² /g
	LPC3	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)) 密度=3.21 g/cm ³ 、比表面積=3,400 cm ² /g
	LPC4	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,430 cm ² /g
	LPC5	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,520 cm ² /g
細骨材	S1	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.66g/cm ³ 、FM=2.76
	S2	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.66g/cm ³ 、FM=2.74
	S3	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.66g/cm ³ 、FM=2.76
	S4	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.66g/cm ³ 、FM=2.75
	S5	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.65g/cm ³ 、FM=2.74
粗骨材	G1	石灰碎石(八戸松館産):最大骨材寸法=20mm、 岩種:石灰岩、密度=2.69g/cm ³ 、FM=6.81
	G2	石灰碎石(八戸松館産):最大骨材寸法=20mm、 岩種:石灰岩、密度=2.69g/cm ³ 、FM=6.68
	G3	石灰碎石(八戸松館産):最大骨材寸法=20mm、 密度=2.70g/cm ³ 、FM=6.76
石灰石微粉末	LS1	石灰石微粉末(太平洋セメント(株)熊谷工場) 密度=2.71 g/cm ³ 、比表面積=5,390 cm ² /g
	LS2	石灰石微粉末(宮城石灰工業(株)) 密度=2.73 g/cm ³ 、比表面積=5,990 cm ² /g
	LS3	石灰石微粉末(宮城石灰工業(株)) 密度=2.71 g/cm ³ 、比表面積=5,250 cm ² /g
	LS4	石灰石微粉末(宮城石灰工業(株)) 密度=2.72 g/cm ³ 、比表面積=5,420 cm ² /g
	LS5	石灰石微粉末(宮城石灰工業(株)) 密度=2.70 g/cm ³ 、比表面積=5,100 cm ² /g
フライアッシュ	FA1	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所) 密度=2.19g/cm ³ 、比表面積=3,810 cm ² /g
	FA2	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所) 密度=2.15g/cm ³ 、比表面積=3,850 cm ² /g
	FA3	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所) 密度=2.25g/cm ³ 、比表面積=3,840 cm ² /g
	FA4	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所) 密度=2.25g/cm ³ 、比表面積=3,740 cm ² /g
	FA5	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所) 密度=2.15g/cm ³ 、比表面積=3,940 cm ² /g
膨張材	LEX	石灰系膨張材、改良型ハイパーエキスパン(太平洋マテリアル(株)) 密度=3.05 g/cm ³
混和剤	SP1	高性能 AE 減水剤、マイティ 3000H(花王(株)) :カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	SP2	高性能AE減水剤(BASFボゾリス(株))、SP8LS :ポリカルボン酸エーテル系化合物と配合ポリマーの複合体
	Ad2	減水剤 遅延型(Ⅰ種)、ボゾリス No. 89(BASF ボゾリス(株)) :変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体

表 7.4-4 底部コンクリートピットの配合(LS1-249)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)							
					水 W	粉体 P			LS1	S1	G1	SP1 P×%
						結合材 B						
			LPC2			FA2	LEX					
45.0	26.4	51.6	65.0	2.5	160	229	107	20	249	815	780	0.80

表 7.4-5 上部コンクリートピットの配合(LS2)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)							
					水 W	粉体 P			LS2	S2	G2	SP1 P×%
						結合材 B						
			LPC3			FA3	LEX					
45.0	30.0	53.4	65.0	2.5	160	229	107	20	178	886	775	0.75

表 7.4-6 底部低拡散材の配合(LS1-LP66)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)							
					水 W	粉体 P			LS3	S3	G	SP1 P×%
						結合材 B						
			LPC3			FA3	LEX					
45.0	28.1	—	65.0	2.5	230	338	153	20	307	1199	—	0.60

表 7.4-7 上部低拡散材の配合(LS1-LP53)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)							
					水 W	粉体 P			LS4	S4	G	SP1 P×%
						結合材 B						
			LPC4			FA4	LEX					
45.0	30.0	—	65.0	2.5	230	338	153	20	307	1279	—	0.57

表 7.4-8 充てん材の配合(LEX無し SP3+Ad)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)							
					水 W	粉体 P			LS4	S4	G	SP1 P×%
						結合材 B						
			LPC4			FA4	LEX					
45.0	28.1	—	82.5	2.5	230	358	153	20	307	1208	—	0.78

表 7.4-9 上部充てん材の配合(LEX有り SP3+Ad)

W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	スランブ フロー (cm)	空気 量 (%)	使用材料および単位量 (kg/m ³)								
					水 W	粉体 P			LS5	S5	G3	SP2 P×%	Ad2 P×%
						結合材 B							
			LPC5			FA5	LEX						
45.0	28.0	52.5	70.0	2.5	160	229	107	20	215	845	780	1.10	0.20

7.4.3 長期材齢物性試験

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、過去に作製した供試体により、以下の部材および材齢について実施する。

- ・ 底部コンクリートピット (材齢：1,850 日、現場水中養生)
- ・ 上部コンクリートピット (材齢：365 日、現場水中養生)
- ・ 底部低拡散材 (材齢：1,850 日、現場水中養生)
- ・ 上部低拡散材 (材齢：365 日、現場水中養生)
- ・ 廃棄体間充てん材 (材齢：1,500 日、現場水中養生)
- ・ 上部充てん材 (材齢：1,150 日、現場水中養生)

試験方法は「コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108)」に準拠して行う。以下に試験方法を示す。

1) 試験装置

- ① 圧縮試験機は、JIS B 7721 の 7. (試験機の等級) に規定する 1 等級以上のものとする。
- ② 上下の加圧板 (JIS B 7721) は鋼製とし、圧縮面は磨き仕上げとする。

2) 試験手順

- ① 供試体の直径および高さを、それぞれ 0.1mm および 1mm まで測定する。直径は、供試体高さの中央で、互いの直交する 2 方向について測定する。
- ② 試験機は、試験時の最大荷重が指示範囲の 20~100% となる範囲で使用する。同一範囲で指示範囲を変えることができる場合は、それぞれの指示範囲を別個の指示範囲と見なす。
- ③ 供試体の上下端面および上下の加圧板の圧縮面を清掃する。
- ④ 圧供試体を、供試体直径の 1% 以内の誤差で、その中心軸が加圧板の中心と一致するように置く。
- ⑤ 試験機の加圧板と供試体の端面とは直性密着させ、その間にクッション材を入れてはならない。ただし、アンボンドキャッピングによる場合を除く。
- ⑥ 供試体に衝撃をあたえないように一様な速度で荷重を加える。荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{N/mm}^2$ になるようにする。
- ⑦ 供試体が急激な変形を初めて後は、荷重を加える速度の調整を中止して、荷重を加え続ける。
- ⑧ 供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字 3 桁まで読み取る。

3) 計算

供試体の圧縮強度は、次式によって算出する。

$$f_c = \frac{P}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

ここに、 f_c ：供試体の圧縮強度（N/mm²）

P：最大荷重（N）

d：供試体の直径（mm）

4) 報告

試験結果には、次の報告を行う。

- ① 試験年月日
- ② 試験部位、コンクリートの種類、使用材料および配合
- ③ 材齢
- ④ 養生方法
- ⑤ 供試体の番号、直径（mm）
- ⑥ 最大荷重（N）
- ⑦ 圧縮強度（N/mm²）
- ⑧ 供試体の破壊状況
- ⑨ その他報告事項

5) 試験結果

圧縮強度の試験結果を表 7.4-10～表 7.4-13 および図 7.4-1 に示す。表中の養生方法のうち、「室内」とは標準養生、「室内（60℃水中養生）」や「室内（105℃水中気中）」は室内で温度を一定に保ちながら養生したことを示す。また、「プラント採取標準養生」も標準養生であるが、生コンプラント場内での養生であることを示す。「現場水中養生」とは、地下空洞内でモールドで供試体を作製し、そのまま地下空洞内で水中養生を行ったことを示し、温度が変化する状況での養生であることを示す。「コア」とは、打込み後、1週間経過した後にコアリングにより回収した試料であり、その後、地下空洞内で水中養生を行っている。「コア」の後のカッコ書き等の付帯条件は、打込み後の養生条件を示す。そのため、「コア」についても温度が変化する状況での養生である。

圧縮強度は、材齢 365 日～1500 日まで増進することが確認され、1850 日ではおおむね同じ値で横ばいになる傾向がみられた。

表 7.4-10 圧縮強度試験結果一覧（コンクリートピット）

部材	部位・養生条件		材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			
				1	2	3	平均
コンクリート ピット	底部 奥部 側部 (H20年度) 施工	室内	7	20.8	20.8	21.5	21.0
			28	44.6	44.7	44.9	44.7
			91	71.4	71.0	72.7	71.7
		プラント採取 標準養生	7	16.0	16.6	15.9	16.2
			28	40.0	40.2	40.4	40.2
			91	65.3	64.1	65.2	64.9
		現場水中養生	7	10.1	10.2	9.9	10.1
			28	35.3	35.0	34.5	34.9
			91	53.0	52.3	51.8	52.4
		コア	1450	99.8	99.8	98.0	99.2
			1850	105.2	105.8	103.5	104.8
			91	57.2	56.8	54.6	56.2
	上部 (H24年度) 施工	室内	7	18.4	17.9	18.2	18.2
			28	43.5	42.8	43.7	43.3
			91	68.9	68.0	67.8	68.2
		プラント採取 標準養生	7	18.3	17.8	18.6	18.2
			28	43.4	43.1	43.4	43.3
			91	73.0	71.8	71.4	72.1
		現場水中養生	7	14.3	14.3	14.2	14.3
			9	17.9	18.4	18.1	18.1
			28	35.9	34.9	35.2	35.3
コア(湿潤・保温)		91	58.7	56.9	59.4	58.3	
		365	88.4	86.6	86.9	87.3	
		9	26.6	25.5	25.4	25.8	
コア(湿潤)	9	20.4	18.0	17.6	18.7		

表 7.4-11 圧縮強度試験結果一覧（低拡散材）

部材	部位・養生条件		材齢 (日)	静弾性係数(kN/mm ²)			
				1	2	3	平均
低拡散材	底部 (H20年度)	室内	7	19.7	19.7	20.2	19.9
			28	43.6	42.8	43.2	43.2
			91	69	68.1	69.2	68.8
		プラント採取標準 養生	7	18	18.2	18.6	18.3
			28	44.4	44.6	45.4	44.8
			91	75.1	75.4	74.2	74.9
		現場水中	7	16.3	15.9	16.4	16.2
			28	39	39.1	38.4	38.8
			91	57.9	58	57.7	57.9
		コア	1500	112.9	115.2	114.5	114.2
			1850	116.5	111.9	111.7	113.4
			91	65.3	65.3	64.8	65.1
	上部 (H24年度)	室内	7	17.8	17	17.2	17.3
			28	43.3	42	41.8	42.4
			91	69.2	69.2	68.4	68.9
		プラント採取標準 養生	7	17.1	16.6	16.3	16.7
			28	48.5	48.1	47.4	48.0
			91	76.4	75.3	76.8	76.2
		現場水中	7	13.8	14	14.3	14.0
			9	17	16.9	17.3	17.1
			28	37	36.9	36.8	36.9
コア(湿潤・保温)		91	58.2	56.9	57.3	57.5	
		365	116.3	112	112.2	113.5	
		9	33.9	32.6	32.3	32.9	
コア(湿潤)	9	56			56.0		
9	19.8	16.6	19.7	18.7			

表 7.4-12 圧縮強度試験結果一覧（廃棄体間充てん材）

部材	部位・養生条件	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			
			1	2	3	平均
充てん材 (H21年度)	室内(標準養生)	7	21.7	31.3	21.6	24.9
		28	58.4	59.6	58.7	58.9
		91	95.7	94.8	93.9	94.8
		182	105.5	103.6	104.3	104.5
		365	113.2	113.6	115	113.9
	室内(60℃水中養生)	7	77.4	77.2	77	77.2
		28	91.7	90.3	90.8	90.9
		91	94.8	93.7	92.5	93.7
		182	99.8	98.1	98.8	98.9
		365	98	99.4	99.4	98.9
	室内(105℃気中養生)	7	31.8	29.9	28.6	30.1
		28	30.7	33.9	32.1	32.2
		91	33	35.3	31.6	33.3
		182	34.3	32.3	33.3	33.3
		365	29.9	30.6	30.5	30.3
	プラント採取標準養生	7	20.5	21	20.8	-
		28	55.1	57.8	56.3	56.4
		91	87.9	88.3	89.9	88.7
		182	96.7	98.6	97.8	97.7
		365	109.5	109.5	112.3	110.4
	現場水中	7	19.9	20.6	20.1	20.2
		28	51.9	53.1	53.9	53.0
		91	85.7	85.2	82.2	84.4
		365	105.7	103.4	102.1	103.7
		1150	116.3	112.2	119.3	115.9
		1500	115	117.8	120.2	117.7
	k21コア	91	83.4	82.4	83	82.9
		91	89.1	84.2	79.8	84.4
		91	75.4	76.4	77.2	76.3

表 7.4-13 圧縮強度試験結果一覧（上部充てん材）

部材	部位・養生条件	材齡 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			
			1	2	3	平均
上部充てん材 (H22年度)	室内(標準養生)	7	17.5	17.9	17.9	17.8
		28	46.8	47	45.2	46.3
		91	72.4	75.4	74	73.9
		182	86.5	86.5	85.4	86.1
	室内(60°C水中養生)	7	31.1	31.1	29.6	30.6
		28	35.3	30.1	30.7	32.0
		91	46	44.6	44.9	45.2
		182	47.1	43.1	44.9	45.0
	室内(105°C気中養生)	7	19.1	17	16.5	17.5
		28	30.3	30.6	29.9	30.3
		91	28.8	30.7	28.7	29.4
		182	20.7	18.7	33.1	24.2
	プラント採取標準養生	7	20.4	20.4	20.6	20.5
		28	46.4	45.7	46.2	46.1
		91	71.2	71.7	71.5	71.5
		182	84	84.9	85.3	84.7
	現場水中	7	22.9	22.5	22.3	22.6
		28	43.7	43.7	44.1	43.8
		91	68.8	70.3	68.9	69.3
		182	78.3	77.3	77.7	77.8
		450	89.9	89.2	87.3	88.8
		900	95.9	98.2	97	97.0
		1150	96.8	98.2	100	98.3
	コア	137	-	-	-	36.2
		137	-	-	-	40.6
		137	-	-	-	39.9
		137	-	-	-	36.3
		137	-	-	-	34.6
137		-	-	-	34.7	
137		-	-	-	42.8	
137		-	-	-	47.2	
137		-	-	-	39.1	

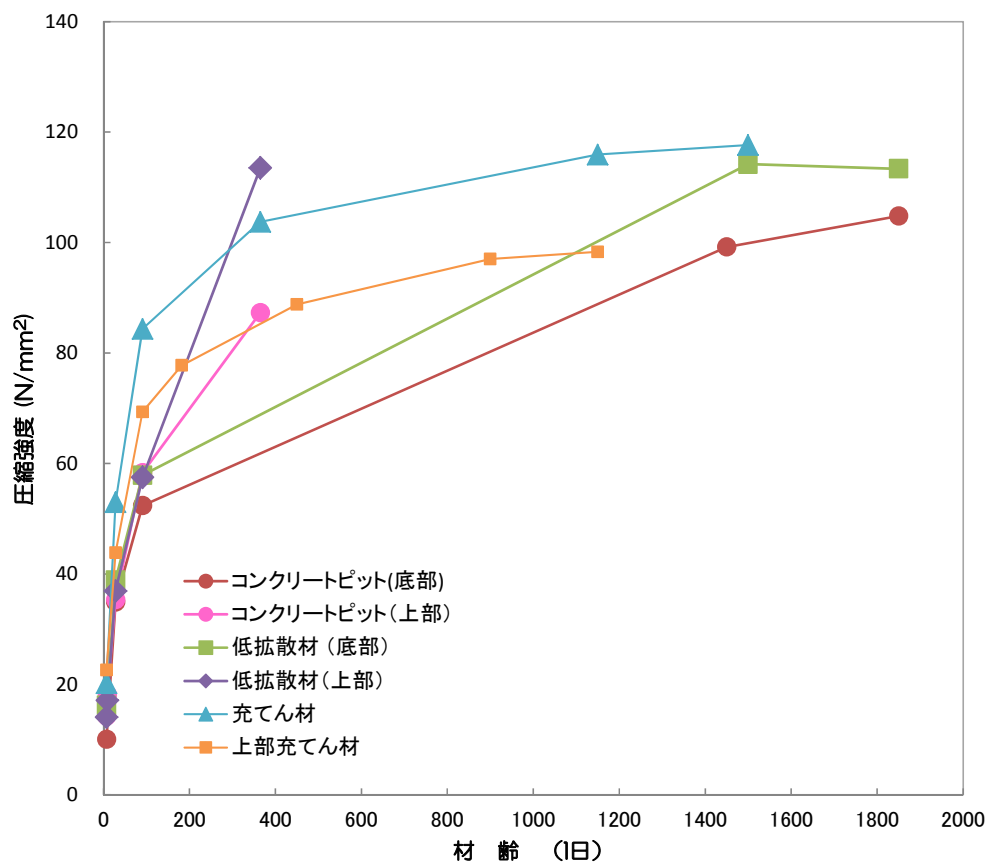
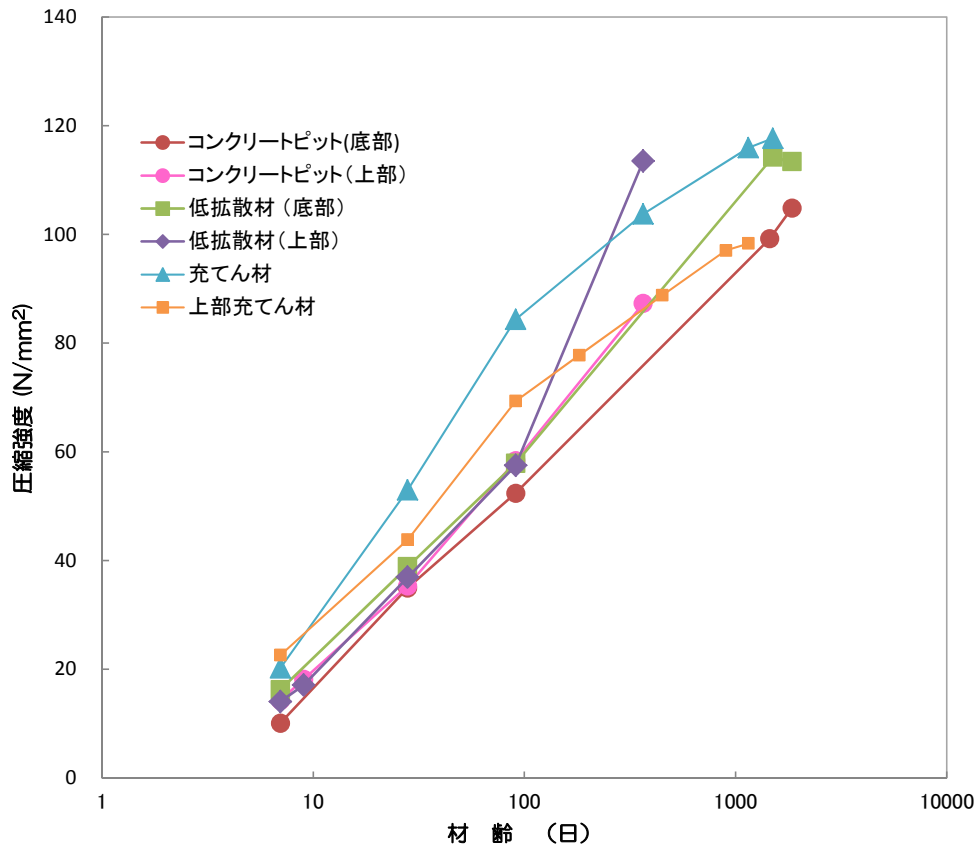


図 7.4-1 圧縮強度試験結果 (現場水中供試体)

(2) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、過去に作製した供試体により、以下の部材および材齢について実施する。

- ・ 底部コンクリートピット (材齢：1,850 日、現場水中養生)
- ・ 上部コンクリートピット (材齢：365 日、現場水中養生)
- ・ 底部低拡散材 (材齢：1,850 日、現場水中養生)
- ・ 上部低拡散材 (材齢：365 日、現場水中養生)
- ・ 廃棄体間充てん材 (材齢：1,500 日、現場水中養生)
- ・ 上部充てん材 (材齢：1,150 日、現場水中養生)

試験方法は「コンクリートの静弾性試験方法 (JIS A 1149)」に準拠して行う。以下に試験方法を示す。

1) 試験装置

- ① 圧縮試験機、上下の加圧板および球面座は、JIS A 1108 の 4. (装置) に規定する 1 のものとする。
- ② ひずみ測定器は、供試体の縦ひずみ (ひずみ度) を 10×10^{-6} 以下の精度で測定できるものとする。また、ひずみ測定器の検長は、コンクリートに用いた粗骨材の最大寸法の 3 倍以上、かつ、供試体の高さの 1/2 以下とする。

2) 試験手順

- ① 供試体の直径および高さを、それぞれ 0.1mm および 1mm まで測定する。直径は、供試体高さの中央で、互いの直交する 2 方向について測定する。
- ② 試験機は、試験時の最大荷重が指示範囲の 20~100% となる範囲で使用する。同一範囲で指示範囲を変えることができる場合は、それぞれの指示範囲を別個の指示範囲と見なす。
- ③ 供試体の上下端面および上下の加圧板の圧縮面を清掃する。
- ④ 圧供試体を、供試体直径の 1% 以内の誤差で、その中心軸が加圧板の中心と一致するように置く。
- ⑤ 試験機の加圧板と供試体の端面とは直性密着させ、その間にクッション材を入れてはならない。ただし、アンボンドキャッピングによる場合を除く。
- ⑥ 供試体に衝撃をあたえないように一様な速度で荷重を加える。荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{N/mm}^2$ になるようにする。
- ⑦ 供試体が急激な変形を初めて後は、荷重を加える速度の調整を中止して、荷重を加え続ける。
- ⑧ 供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字 3 桁まで読み取る。

3) 計算

試験結果の計算は次による。

- ① 試験の結果から、供試体ごとに応力-ひずみ曲線を作成する。
- ② 各供試体の静弾性係数は、次式によって算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 各供試体の静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 : 最大荷重の 1/3 に相当する応力 (N/mm²)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)

ε_1 : 応力によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 : 50×10^{-6}

4) 報告

試験結果には、次の報告を行う。

- ① 試験年月日
- ② 試験部位、コンクリートの種類、使用材料および配合
- ③ 供試体の寸法
- ④ 材齢
- ⑤ 養生方法
- ⑥ ひずみ測定器の種類および検長 (mm)
- ⑦ 最大荷重 (N)
- ⑧ 圧縮強度 (N/mm²)
- ⑨ 静弾性係数 (kN/mm²)
- ⑩ 応力-ひずみ曲線
- ⑪ 供試体の破壊状況
- ⑫ その他報告事項

5) 試験結果

静弾性係数の試験結果を表 7.4-14～表 7.4-17、および図 7.4-2 に示す。表中の養生方法のうち、「室内」とは標準養生、「室内 (60℃水中養生)」や「室内 (105℃水中気中)」は室内で温度を一定に保ちながら養生したことを示す。また、「プラント採取標準養生」も標準養生であるが、生コンプラント場内での養生であることを示す。「現場水中養生」とは、地下空洞内でモールドで供試体を作製し、そのまま地下空洞内で水中養生を行ったことを示し、温度が変化する状況での養生であることを示す。「コア」とは、打込み後、1週間経過した後にコアリングにより回収した試料であり、その後、地下空洞内で水中養生を行っている。「コア」の後のカッコ書き等の付帯条件は、打込み後の養生条件を示す。そのため、「コア」についても温度が変化する状況での養生である。

弾性係数は、材齢 900 日～1500 日まで増進することが確認され、1850 日ではおおむね同じ値で横ばいになる傾向がみられた。

表 7.4-14 静弾性係数試験結果一覧（コンクリートピット）

部材	部位・養生条件		材齢 (日)	静弾性係数(kN/mm ²)			
				1	2	3	平均
コンクリート ピット	底部 奥部 側部 (H20年度) 施工	室内	7	23.3	22.2	23.9	23.1
			28	34.3	35.5	36.2	35.3
			91	40.4	37.4	38.9	38.9
		プラント採取 標準養生	7	-	-	-	-
			28	30.0	30.2	29.3	29.8
			91	36.4	37.8	37.0	37.1
		現場水中養生	7	-	-	-	-
			28	26.5	27.3	27.4	27.1
			91	27.7	30.9	31.7	30.1
			1450	42.9	41.9	45.2	43.3
		コア	7	-	-	-	-
			91	33.9	37.8	34.2	35.3
	365		43.4	43.5	42.4	43.1	
	上部 (H24年度) 施工	室内	7	24.8	23.8	24.6	24.4
			28	33.0	33.1	34.9	33.7
			91	39.1	39.1	39.7	39.3
		プラント採取 標準養生	7	-	-	-	-
			28	35.4	35.0	34.6	35.0
			91	40.4	40.7	40.2	40.4
		現場水中養生	7	-	-	-	-
			9	23.2	23.2	23.6	23.3
28			31.9	31.0	31.8	31.6	
91			38.1	38.4	37.3	37.9	
コア(湿潤・保温)		7	-	-	-	-	
		9	26.7	27.9	28.2	27.6	
	9	24.7	27.2	26.6	26.2		
コア(湿潤)	9	26.7	27.9	28.2	27.6		
	9	24.7	27.2	26.6	26.2		
	9	24.7	27.2	26.6	26.2		

表 7.4-15 静弾性係数試験結果一覧（低拡散材）

部材	部位・養生条件		材齢 (日)	静弾性係数(kN/mm ²)			
				1	2	3	平均
低拡散材	底部 (H20年度)	室内	7	17.1	17.3	17.5	17.3
			28	25.3	25.3	26.2	25.6
			91	30.8	31.1	28.1	30.0
		プラント採取標準 養生	7	-	-	-	-
			28	23.4	23.3	24	23.6
			91	30.6	31.2	30.9	30.9
		現場水中	7	-	-	-	-
			28	22	22.5	22.9	22.5
			91	27.6	27.1	27	27.2
			1500	36	36.3	36.2	36.2
		コア	7	-	-	-	-
			91	25.8	26.6	26.9	26.4
	365		35.4	35.8	36	35.7	
	上部 (H24年度)	室内	7	17.1	16	15.9	16.3
			28	24.3	23.9	23.6	23.9
			91	29	29.1	28.2	28.8
		プラント採取標準 養生	7	-	-	-	-
			28	25.2	25.3	25.2	25.2
			91	30.3	30	30.2	30.2
		現場水中	7	-	-	-	-
			9	14.4	14.7	15	14.7
28			21.8	22	21.9	21.9	
91			27.1	26.9	27.5	27.2	
コア(湿潤・保温)		7	-	-	-	-	
		9	22.4	21.8	21.4	21.9	
	91	28.2			28.2		
コア(湿潤)	9	16.9	16.4	17	16.8		
	9	16.9	16.4	17	16.8		
	9	16.9	16.4	17	16.8		

表 7.4-16 静弾性係数試験結果一覧（廃棄体間充てん材）

部材	部位・養生条件	材齢 (日)	静弾性係数(kN/mm ²)			
			1	2	3	平均
充てん材 (H21年度)	室内(標準養生)	7	19.3	17.8	19.9	19.0
		28	28.7	28.8	28.7	28.7
		91	34.6	33.4	33.5	33.8
		182	35	35.9	35.9	35.6
		365	36.6	36.1	36.8	36.5
	室内(60°C水中養生)	7	31.4	32.2	32.1	31.9
		28	34.8	35.2	35.1	35.0
		91	36.4	36	35.8	36.1
		182	36.1	36.6	36.1	36.3
		365	36.6	36.1	36.6	36.4
	室内(105°C気中養生)	7	17.4	16.3	12.8	15.5
		28	16.1	17.1	16.6	16.6
		91	16.1	17.3	16.9	16.8
		182	17.4	17.1	13.6	16.0
		365	15.5	17.3	17.3	16.7
	プラント採取標準養生	7	-	-	-	-
		28	24.1	27	26.6	25.9
		91	32.4	33.2	33.1	32.9
		182	35.2	33.6	34.8	34.5
		365	37.6	36	38.2	37.3
	現場水中	7	-	-	-	-
		28	25.5	22.7	20.7	23.0
		91	32.2	31.9	31.3	31.8
		365	36.1	35.8	35.9	35.9
		1150	38.0	37.6	38.7	38.1
		1500	37.0	38.1	37.5	37.5
	k21コア	91	30.0	31.2	30.3	30.5
91		33.0	32.8	31.7	32.5	
91		31.4	31.8	31.8	31.7	

表 7.4-17 静弾性係数試験結果一覧（上部充てん材）

部材	部位・養生条件	材齢 (日)	静弾性係数(kN/mm ²)				
			1	2	3	平均	
上部充てん材 (H22年度)	室内(標準養生)	7	18.8	15.1	17.2	17.0	
		28	34.9	36.7	37.4	36.3	
		91	41.3	40	42.1	41.1	
		182	42.4	42.1	41.9	42.1	
	室内(60℃水中養生)	7	14.5	15.6	14.4	14.8	
		28	19.3	16.9	15.5	17.2	
		91	21.5	19.4	23.7	21.5	
		182	31.4	26.9	27.7	28.7	
	室内(105℃気中養生)	7	13.3	11.8	12.9	12.7	
		28	20.8	20.7	20.5	20.7	
		91	15.9	19.4	15.7	17.0	
		182	2.9	2.2	21.6	8.9	
	プラント採取標準養生	7	-	-	-	-	
		28	33.3	32.5	32	32.6	
		91	39	41.5	40	40.2	
		182	38	42.1	44.7	41.6	
	現場水中	7	-	-	-	-	
		28	34.2	35.6	34.2	34.7	
		91	41	37.9	38.9	39.3	
		182	41.9	41.7	42	41.9	
		450	45.6	45.2	43.9	44.9	
		900	45.4	45.3	45.5	45.4	
			1150	45.8	45.8	44.5	45.4
	コア	137	-	-	-	36.2	
		137	-	-	-	40.6	
		137	-	-	-	39.9	
		137	-	-	-	36.3	
		137	-	-	-	34.6	
137		-	-	-	34.7		
137		-	-	-	42.8		
137		-	-	-	47.2		
137		-	-	-	39.1		

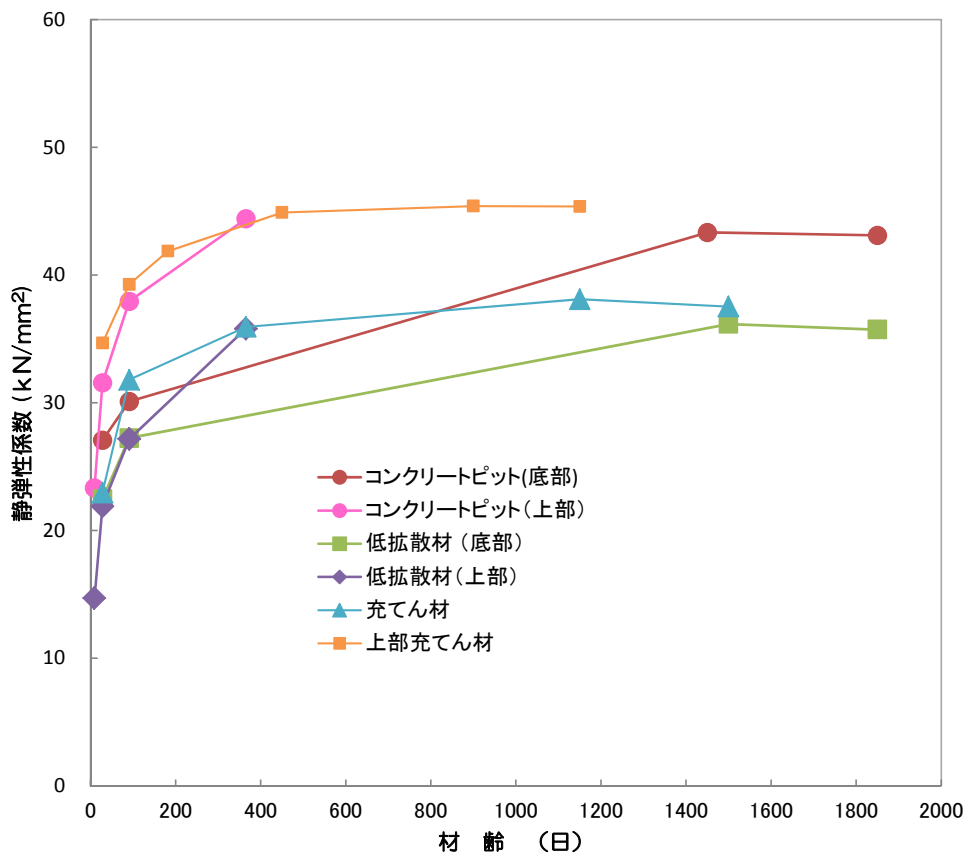
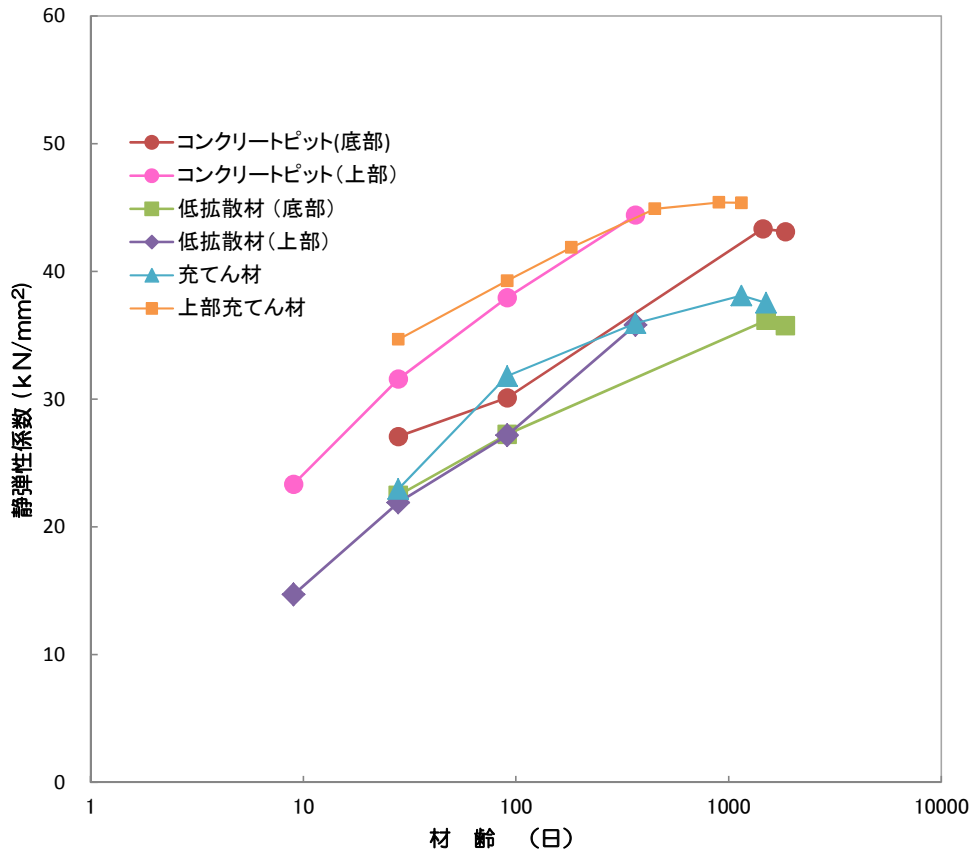


図 7.4-2 静弾性係数試験結果 (現場水中供試体)

(3) 試験のまとめ

H25 年度に実施した長期材齢評価試験の結果を表 7.4-18 にまとめる。

表 7.4-18 長期材齢評価試験のまとめ

部材	部位	試験材齢	試験	品質管理			
				現場水中養生			
				1	2	3	平均
コンクリートピット	底部	1850 日	圧縮強度(N/mm ²)	0	0	0	0.0
			静弾性係数(kN/mm ²)	0	0	0	0.0
	上部	365 日	圧縮強度(N/mm ²)	88.4	86.6	86.9	87.3
			静弾性係数(kN/mm ²)	43.8	44.7	44.7	44.4
低拡散材	底部	1850 日	圧縮強度(N/mm ²)	116.5	111.9	111.7	113.4
			静弾性係数(kN/mm ²)	35.4	35.8	36	35.7
	上部	365 日	圧縮強度(N/mm ²)	116.3	112	112.2	113.5
			静弾性係数(kN/mm ²)	35.4	35.8	36.2	35.8
充てん材	平面部下部	1500 日	圧縮強度(N/mm ²)	115.0	117.8	120.2	117.7
			静弾性係数(kN/mm ²)	37.0	38.1	37.5	37.5
上部充てん材	平面部上部	1150 日	圧縮強度(N/mm ²)	96.8	98.2	100	98.3
			静弾性係数(kN/mm ²)	45.8	45.8	44.5	45.4

7.4.4 長期材齢物性値の評価

(1) 圧縮強度と弾性係数の相関関係

本年度に長期材齢評価した部位の圧縮強度試験と静弾性係数試験の試験結果より、両者の相互的関係を分析評価する。一般に静弾性係数は、圧縮強度から推定できる[3]。ここでは、長期材齢の試験結果を含めた静弾性係数と圧縮強度の関係を整理した。整理した図を図 7.4-3 ~ 図 7.4-8 に示し、それぞれの近似式定数を表 7.4-19 にまとめた。なお、圧縮強度と静弾性係数の関係は、60℃水中養生、105℃気中養生を除く試験結果で近似式定数を整理した。

各部位の静弾性係数の発現性は、圧縮強度で表す近似式関数と相関が高い。したがって、事前に室内試験によって表 7.4-19 示す近似式を取得することによって、静弾性係数は圧縮強度により推定が可能と考えられる。

表 7.4-19 強度近似式の定数

近似式		a	b	R ² 決定係数 (寄与率)
静弾性係数 E(t) と圧縮強度 f' _c (t)	E(t) = a × f' _c (t) ^b			
底部コンクリートピット		5.0894	0.4617	0.9687
手前部コンクリートピット		7.2493	0.4072	0.9975
底部低拡散材		4.6554	0.4322	0.9984
上部低拡散材		3.9279	0.4716	0.9962
充てん材		1.8927	0.6315	0.9929
上部充てん材		9.1774	0.9782	0.9782

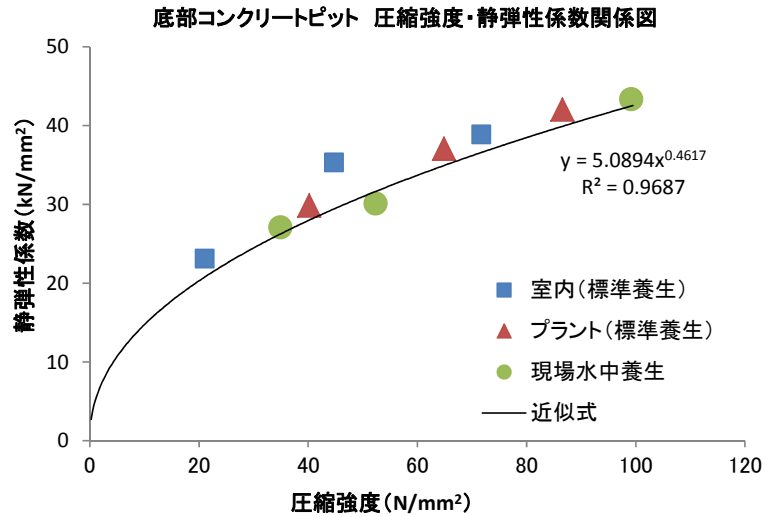


図 7.4-3 圧縮強度と静弾性係数の関係 (底部コンクリートピット)

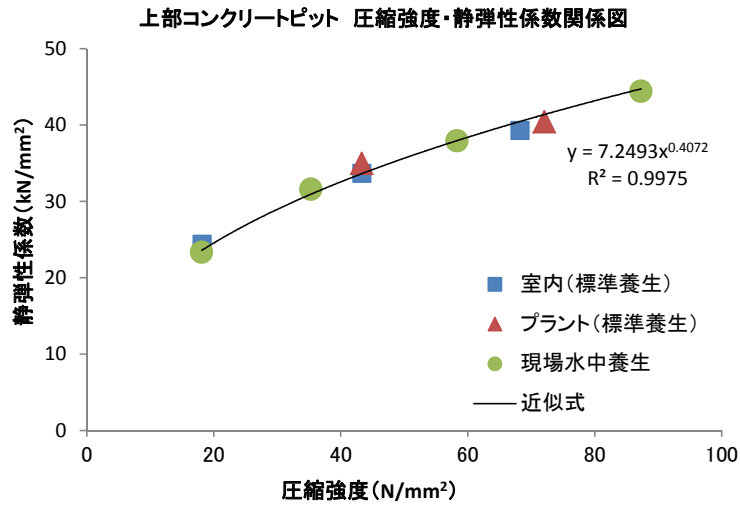


図 7.4-4 圧縮強度と静弾性係数の関係 (手前部コンクリートピット)

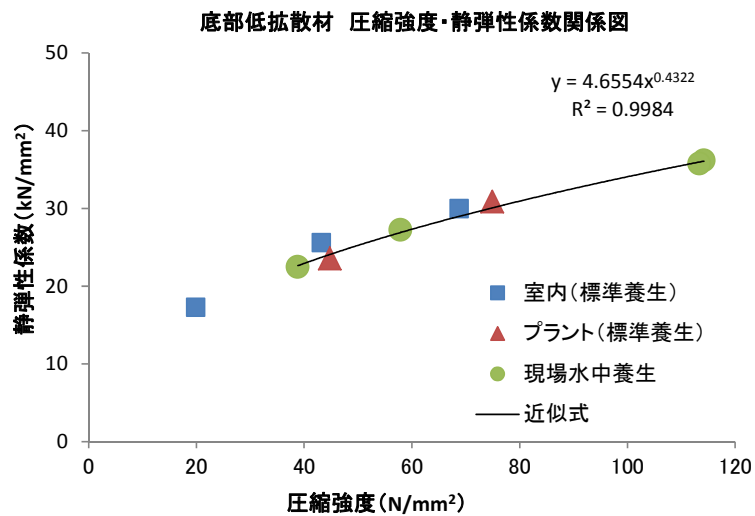


図 7.4-5 圧縮強度と静弾性係数の関係 (底部低拡散材)

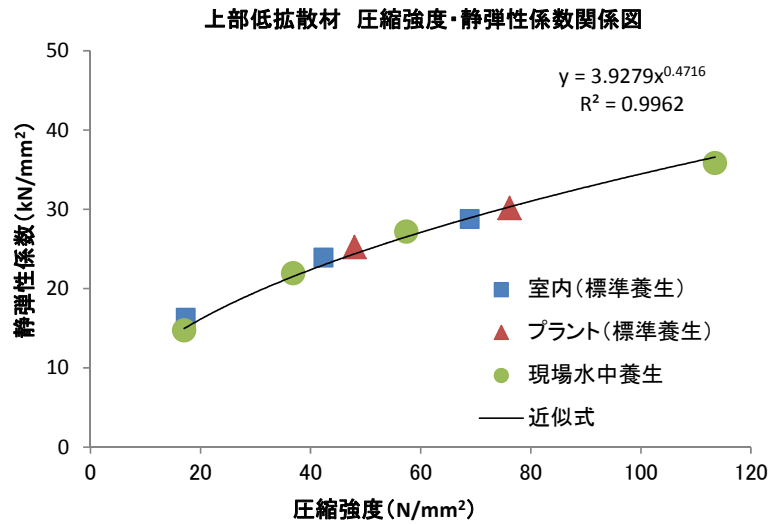


図 7.4-6 圧縮強度と静弾性係数の関係 (側部 (左側) 低拡散材)

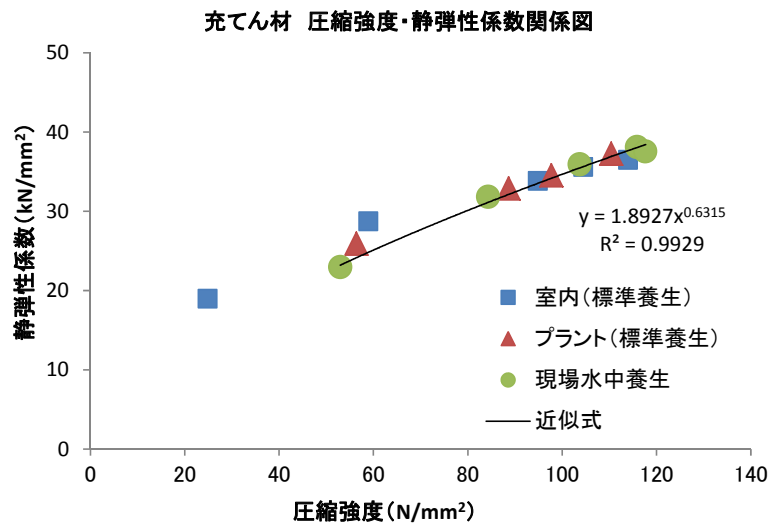


図 7.4-7 圧縮強度と静弾性係数の関係 (充てん材)

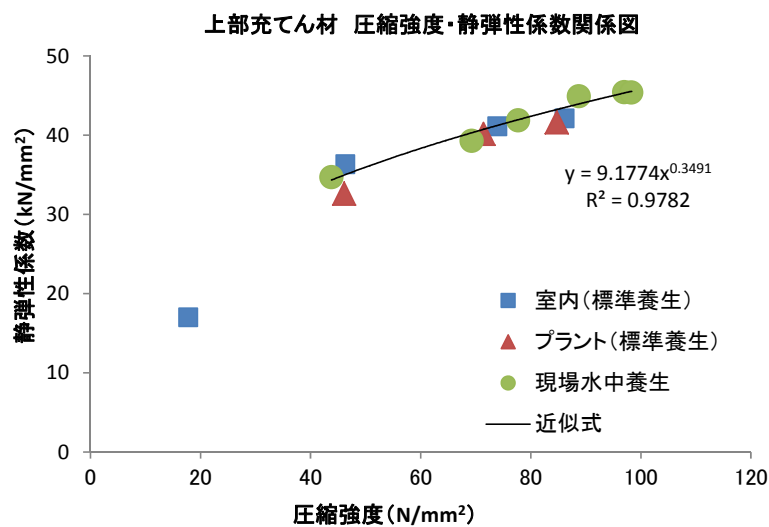


図 7.4-8 圧縮強度と静弾性係数の関係 (上部充てん材)

参考文献

- [1]吉田亮 他：水銀圧入過程における内部空気泡の関与と水銀圧入の有効圧力範囲に関する研究，セメント・コンクリート論文集, Vo.60, pp.68-75 (2006)
- [2]安田和弘 他：カルシウム溶脱に伴うコンクリートの物理性能および物質移行性能の変化に関する検討，Cement Science and Concrete Technology, No.56, pp.492-498 (2002)
- [3]土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、p.340-341、2008.3

第 8 章 施設・周辺岩盤挙動計測

第8章 施設・周辺岩盤挙動計測

8.1 施設挙動計測設備設置（平成 25 年度）

施設挙動計測設備設置について、各部材の計測目的、計測項目、計器仕様、計器配置および計器設置状況を以下に示す。

今年度は上部緩衝材（隅角部）、上部緩衝材（平面部）、上部埋戻し材が施工確認試験の対象となっており、計測器は表 8.1-1 に示すように上部緩衝材（平面部）施工前に上部低拡散材上に土圧計および加速度計を設置した。また今年度は「第 10 章 巨大地震による埋設施設への影響評価」において観測地震動を用いた試験施設の影響評価を実施するために、表 8.1-2 に示すように、試験施設および試験空洞底盤上に地震計を設置した。

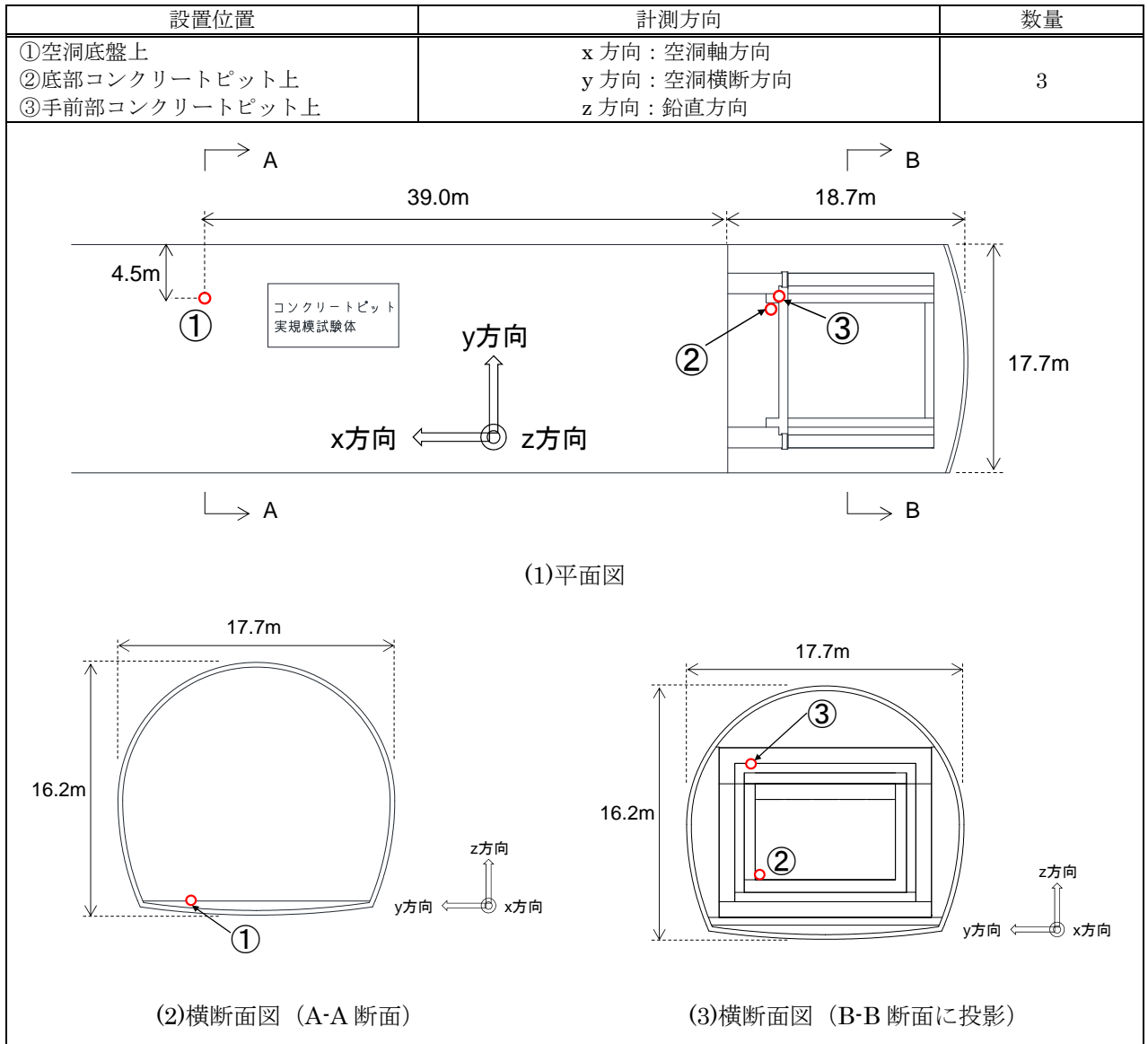
表 8.1-1 上部緩衝材計器設置一覧

部材	計器	数量
上部緩衝材	土圧計 加速度計	1 1

Figure 8.1-1 consists of four diagrams illustrating the instrument installation for the upper cushioning material:

- A-A横断面図 (A-A Cross-section):** Shows a cross-section of the structure with labels for '上部埋戻し材' (Upper backfill material), '上部緩衝材(隅角部)' (Upper cushioning material at corners), and '上部緩衝材(平面部)' (Upper cushioning material on flat surfaces).
- B-B縦断面図 (B-B Longitudinal section):** Shows a longitudinal section with labels for '上部埋戻し材' (Upper backfill material) and '上部緩衝材(平面部)' (Upper cushioning material on flat surfaces).
- 平面図 (Plan view):** Shows a top-down view of the structure with labels for '上部緩衝材(平面部)' (Upper cushioning material on flat surfaces), '上部埋戻し材' (Upper backfill material), and '上部緩衝材(隅角部)' (Upper cushioning material at corners).
- 計測器設置位置図(平面図) (Instrument installation position diagram (Plan view)):** Shows the specific locations for the '土圧計' (Soil pressure gauge, red circle) and '加速度計' (Acceleration gauge, red triangle) on the '上部低拡散材' (Upper low-diffusion material) layer. A legend indicates: 土圧計 (Soil pressure gauge) and 加速度計 (Acceleration gauge).

表 8.1-2 地震計設置一覧



8.1.1 上部緩衝材

(1) 計測目的

上部緩衝材施工時の転圧振動による動的計測を実施し、転圧時の周辺部材への影響を分析することを目的とする。土圧計については、静的計測も併せて実施し、上部緩衝材および上部埋戻し材の施工による土圧変化により周辺部材への影響を分析することを目的とする。

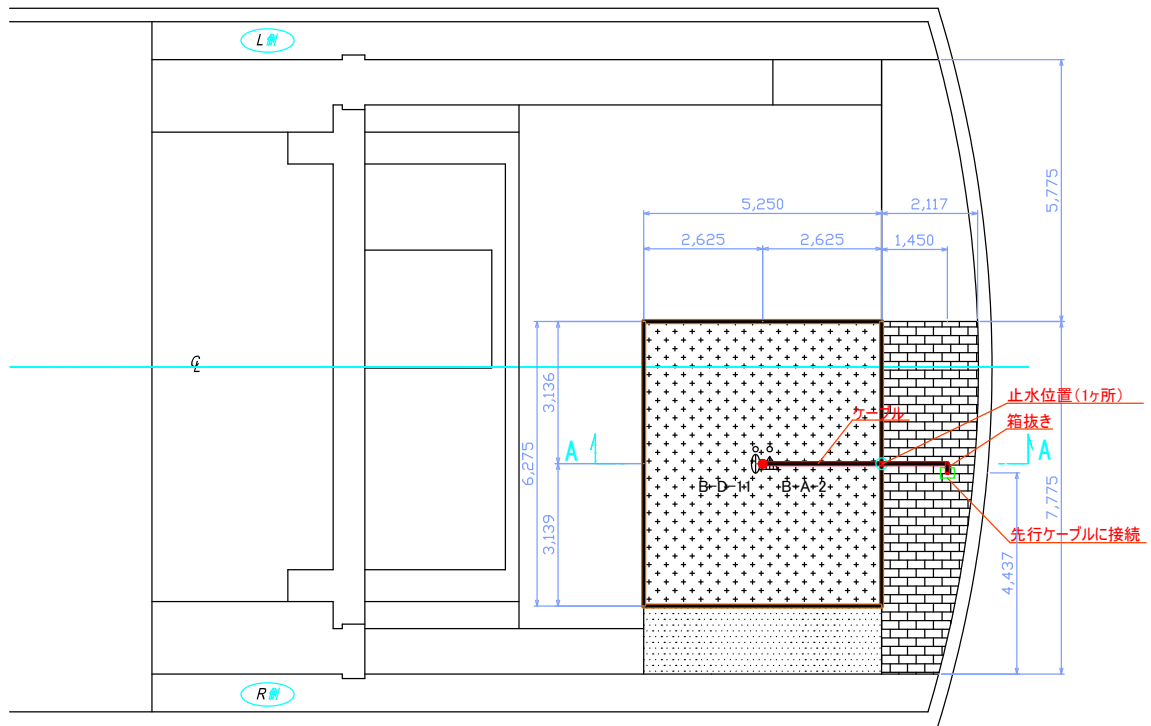
(2) 計器仕様、計器配置

計器仕様および数量を表 8.1-3 に示す。計器は図 8.1-1 に示すように、上部低拡散材上面に土圧計 1 台、加速度計 1 台を設置した。

表 8.1-3 計器仕様および数量

名称	仕様	数量
土圧計	測定範囲：2.0N/mm ² 定格出力：0.9mV/v 以上 非直線性：±1.0%RO 以内 許容温度範囲：-10～+80℃ 入出力抵抗：350Ω	1
加速度計	測定範囲：200m/s ² (20.4G) 定格出力：約 0.5mV/v 非直線性：1.0%RO 許容温度範囲：-10～+50℃ 入出力抵抗：350Ω	1

計器配置平面図



A-A断面図

凡例

	土圧計	中央断面下部(上部低拡散材上 測定方向:鉛直方向)
	加速度計	中央断面下部(上部低拡散材上 測定方向:鉛直方向)

↓ ○ : 計測方向を示す。
(○は、紙面直交方向。)

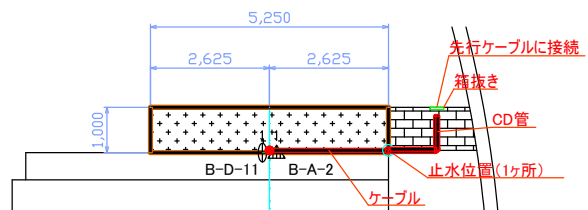
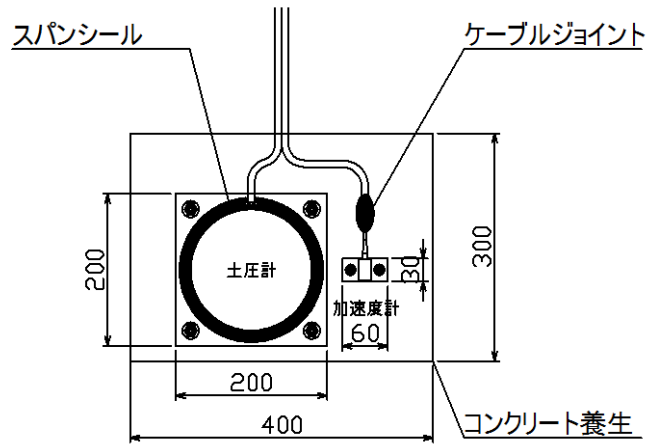


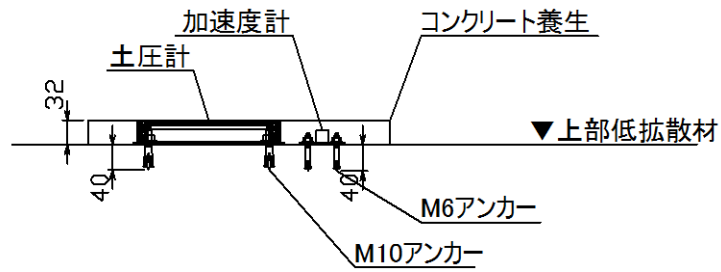
図 8.1-1 計器配置図

(3) 計器設置

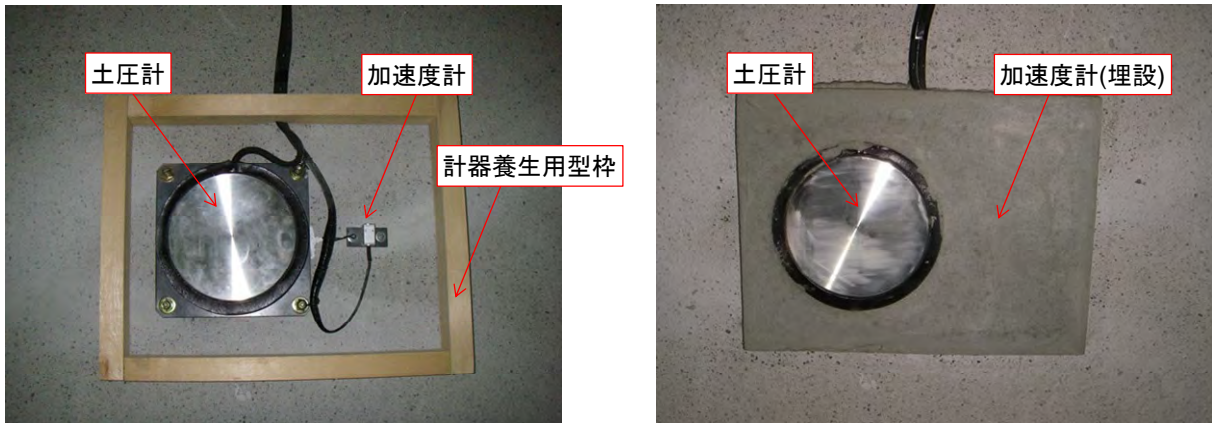
土圧計、加速度計の設置位置および設置状況を図 8.1-2 に示す。



(1) 平面図



(2) 断面図



(3) 設置状況 (左：モルタル養生前、右：モルタル養生後)

図 8.1-2 計器設置位置および設置状況

8.1.2 地震観測

(1) 計測目的

本試験施設で観測された地震動データを分析することにより、地震が試験施設に与える影響を検討することを目的とする。また、「第10章 巨大地震による埋設施設への影響評価」において、観測データを用いた地震応答解析を実施し、観測データと解析結果を比較分析することにより、試験施設の地震時影響評価を実施した。

(2) 計器仕様、計器配置

計器仕様および数量を表 8.1-4 に示す。地震計は計 3 台設置し、表 8.1-2 に示すようにそれぞれ地震計①～③を称することとする。地震計①は試験施設から比較的離れた底盤上、地震計②は底部コンクリートピット上、地震計③は手前部コンクリートピット上とした。設置位置選定根拠を表 8.1-5 に示す。また、計測条件および計測データの仕様を表 8.1-6 に示す。

表 8.1-4 加速度センサの仕様

名称	仕様	数量
加速度センサ	計測範囲：±1.5G 周波数応答：0.1～50Hz 分解能：x、y軸：0.02Gal z軸：0.07Gal サンプリング周波数：100Hz、200Hz 送信周波数：0.5sec (200Hz) 1.0sec (100Hz) 使用条件：周囲温度：-30℃～60℃ 周囲湿度：95%RH 以下 外形寸法：113×90×60mm	3

表 8.1-5 設置位置選定根拠

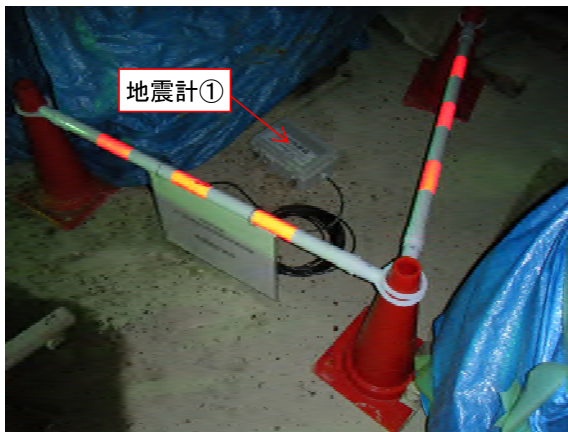
地震計	設置位置	選定根拠
地震計①	試験施設から離れた底盤上 (インバートコンクリート上)	地震応答解析の入力地震動作成用のデータとするため、地震時の試験施設の影響が小さい位置に設置する必要がある。そのため、試験施設から比較的離れた底盤上を選定した。
地震計②	底部コンクリートピット上	底部緩衝材の地震時影響を分析評価するために底部コンクリートピット上を選定した。
地震計③	手前部コンクリートピット上	試験施設全体の地震時影響を分析評価するために、試験施設の中で高位置となる手前部コンクリートピット上を選定した。

表 8.1-6 地震観測の計測条件および計測データの仕様

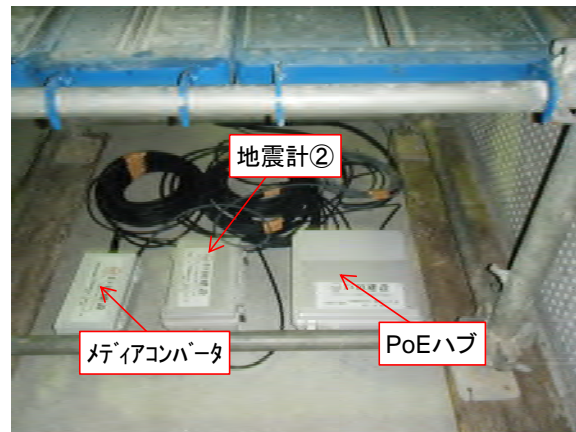
項目	仕様
トリガ条件	マスタとするセンサ（地震計①）で、xyzのいずれかが1Gal以上
トリガ引き伸ばし時間	地震検知時間幅 10秒
プレトリガ時間	トリガ検知前の収集時間 10秒
ポストトリガ時間	地震収束判断時間 60秒
サンプリング周波数	200Hz（1秒間に200データを取得）
出力形式	データ変換後、CSVファイル形式 1列目に取得時刻、2～4列目にXYZの加速度データ（Gal）

(3) 計器設置

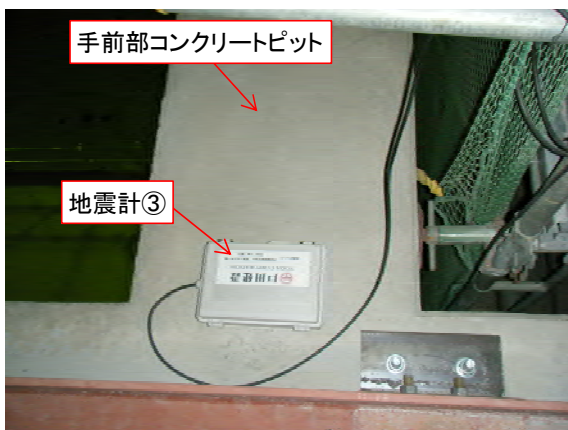
地震計の設置状況を図 8.1-3 に示す。



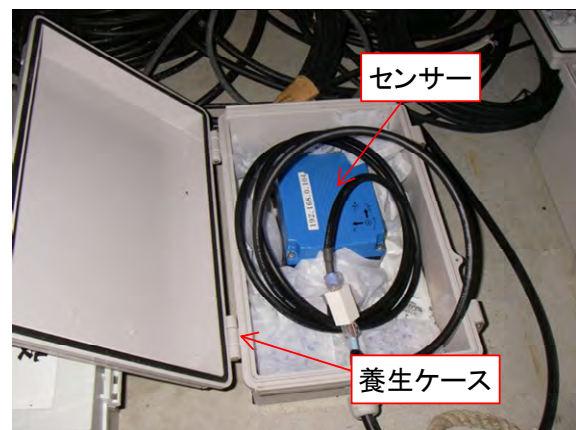
(1) 地震計①（空洞底盤上）



(2) 地震計②（底部コンクリートピット上）



(3) 地震計③（手前部コンクリートピット上）



(4) 地震計養生ケース内

※メディアコンバータ：光ファイバーとLANケーブルの信号を相互に変換する装置

※PoEハブ：LANケーブルによる電源供給を可能にするハブ

図 8.1-3 地震計設置状況

8.2 計測データの収集図化

収集図化の対象となる計器は、昨年度までに設置した既設の計器および今年度新たに設置した計器（表 8.2-1）、分散型計器（表 8.2-2）、地震計（表 8.2-5）である。図化の期間は、H25 年 2 月 1 日~H26 年 2 月 26 日までとした。ここでは、坑内およびアクセス坑道坑口の環境計測データ、今年度新設した土圧計および加速度計の計測データ、地震計の観測データを示し、その他の計測データについては添付資料-7 で示す。

表 8.2-1 既設および H25 年度新設計器一覧

年度	部材名称	計器種別	数量	計
H19	坑内環境	温湿度（百葉箱）	1	1
		間隙水圧計	31	37
	周辺岩盤挙動	岩盤変位	6	
		ひずみ計	106	
		有効応力計	18	
		無応力計	4	215
		鉄筋計	34	
H20	埋戻し材	温度計	53	
		土圧計	8	
		加速度計	1	
		沈下計	5	31
		温度計	1	
		水分計	12	
	底部緩衝材	間隙水圧計	4	
		ひずみ計	30	
		有効応力計	6	
		無応力計	1	62
温度計		15		
継目計		5		
H21	底部低拡散材	せん断変位計	5	
		ひずみ計	30	
		有効応力計	10	
		無応力計	1	57
	底部コンクリートピット	傾斜計	1	
		温度計	15	
		ひずみ計	26	
	側部コンクリートピット	有効応力計	6	
		温度計	26	
		鉄筋計	20	
手前部 コンクリートピット		ひずみ計	10	
		無応力計	1	32
		鉄筋計	10	
	温度計	11		
	側部低拡散材	ひずみ計	16	
有効応力計		6		
低剛性型有効応力計		1		
無応力計		2	57	
温度計		16		
継目計		4		
せん断変位計		4		
土圧計		6		
加速度計		2		
H22	充填材	土圧計	1	1
	充填材	土圧計	2	
		温度計	1	3
	上部充填材	土圧計	1	
		温度計	1	2
側部緩衝材	土圧計	2		
	加速度計	1	3	
	H24	上部コンクリートピット	ひずみ計	6
無応力計			1	12
温度計			3	
有効応力計			2	
上部低拡散材		ひずみ計	18	
	無応力計	1	34	
	温度計	9		
	有効応力計	6		
H25	上部緩衝材	土圧計	1	
		加速度計	1	2
全計測器数量				629

8.2.1 坑内環境他

坑内環境およびアクセス坑道坑口の環境計測一覧を表 8.2-2 に示す。計器設置位置図および計測データは「8.3.1 坑内環境計測結果の分析評価」で示す。

表 8.2-2 坑内環境計測一覧

計測種別		設置位置	計器No.	測定開始日
百葉箱	温度	試験空洞内	A-①	2007/9/28
	湿度		B-①	
分散型 温湿度計	温度		B-②	2007/8/23
	湿度		B-⑤	
	温度				7ヶ所坑 坑口
	湿度		2007/9/26	

8.2.2 上部緩衝材

上部緩衝材の計測一覧を表 8.2-3 に示す。

上部緩衝材の計器では、図 8.2-1、図 8.2-2 に示すように、上部緩衝材（平面部）の振動転圧時の動的計測を実施した。今年度の上部緩衝材（平面部）の施工確認試験は、仕上り層厚 1m に対して 1 層あたり 5cm の計 20 層の振動工法による施工を実施した（詳細は、第 3 章 上部緩衝材施工確認試験（平面部：振動工法）を参照）。そのうち動的計測は 2、4、5、6 層（各仕上り層厚は 10、20、25、30cm）で実施した。計器設置後状況を図 8.2-3 に、転圧時状況を図 8.2-4 に示す。

表 8.2-3 上部緩衝材計測一覧

計器種別	計器No.	設置位置		計測方向	計測開始日
		平面	厚み方向		
土圧計	B-D-11	中央	上部低拡散材 上面	鉛直	2013/12/6 (上部緩衝材施工前)
加速度計	B-A-2				

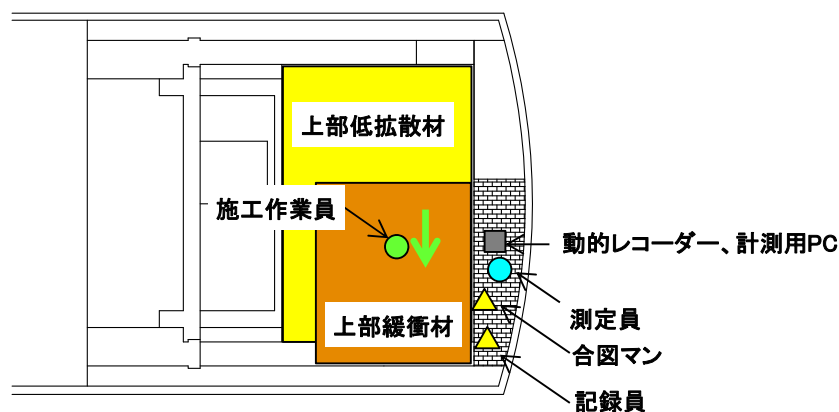


図 8.2-1 動的計測概要（平面図）

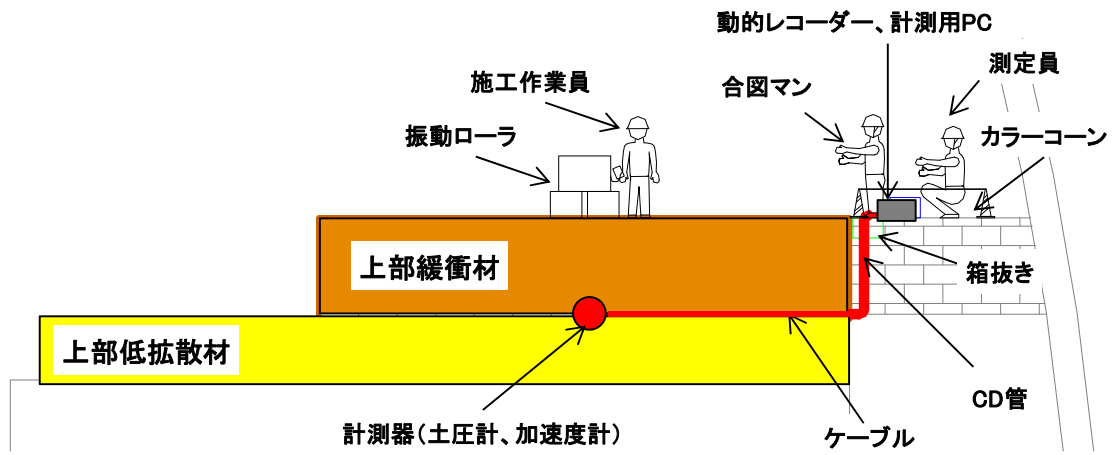


図 8.2-2 動的計測概要 (縦断面図)



図 8.2-3 計器設置後状況写真

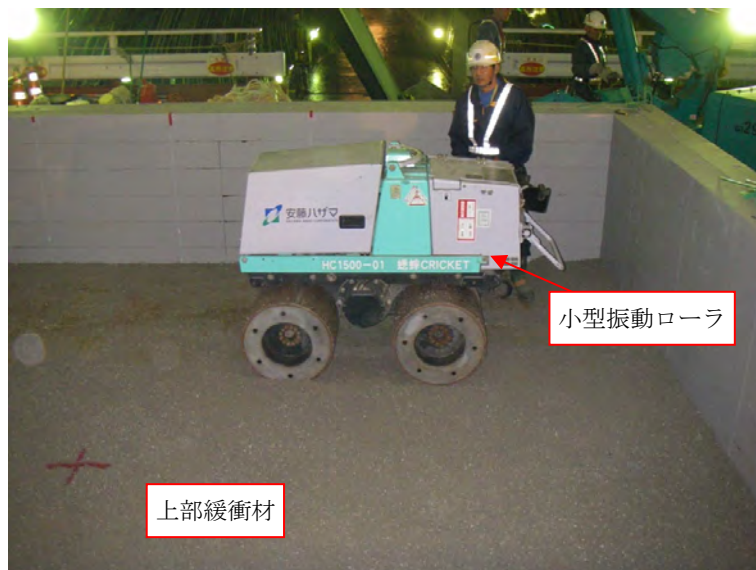


図 8.2-4 転圧時状況写真

(1) 動的計測結果

動的計測実施層の一覧を表 8.2-4 に示す。計測では、図 8.2-5 に示すように小型振動ローラが計器設置位置付近を通過する時間帯を連続的に数往復計測し、図 8.2-6 のように小型振動ローラが計器設置断面を通過した時間を記録した。図 8.2-7～図 8.2-12 に 2、4、5、6 層の振動転圧時の土圧および加速度の経時変化を示す。各計測での土圧および加速度の最大値をグラフに赤丸で示した。計測値の符号については、土圧計は鉛直下向き（圧縮）を正、加速度計は鉛直上向きを正とした。

計測結果より、小型振動ローラの前輪および後輪が計器設置断面を通過した時間（図中の点線）で土圧および加速度が大幅に増加し、両者が連動した挙動となっていることがわかる。

表 8.2-4 上部緩衝材の動的計測実施層

計測層	仕上り層厚	計測回数	計測結果の図番号
2層	10cm	1	図 8.2-7
		2	図 8.2-8
4層	20cm	1	図 8.2-9
		2	図 8.2-10
5層	25cm	1	図 8.2-11
6層	30cm	1	図 8.2-12

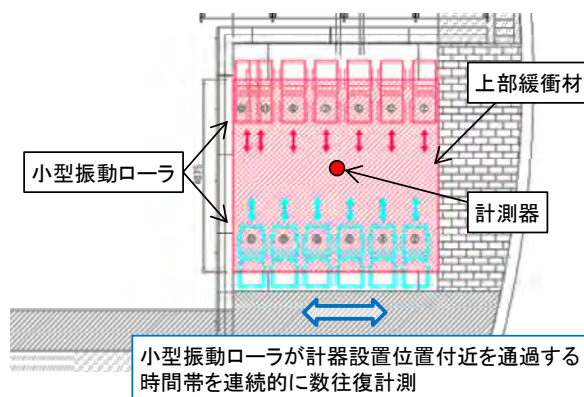


図 8.2-5 動的計測の計測時間

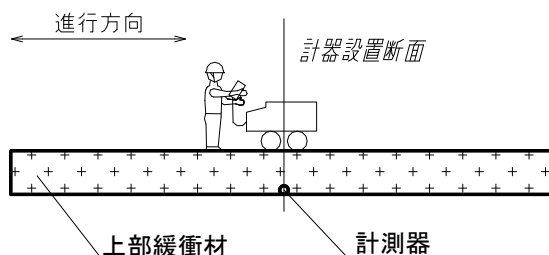
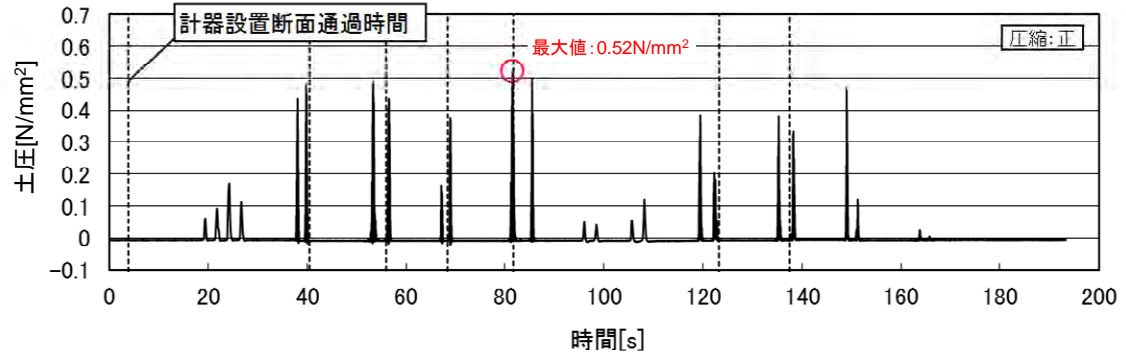
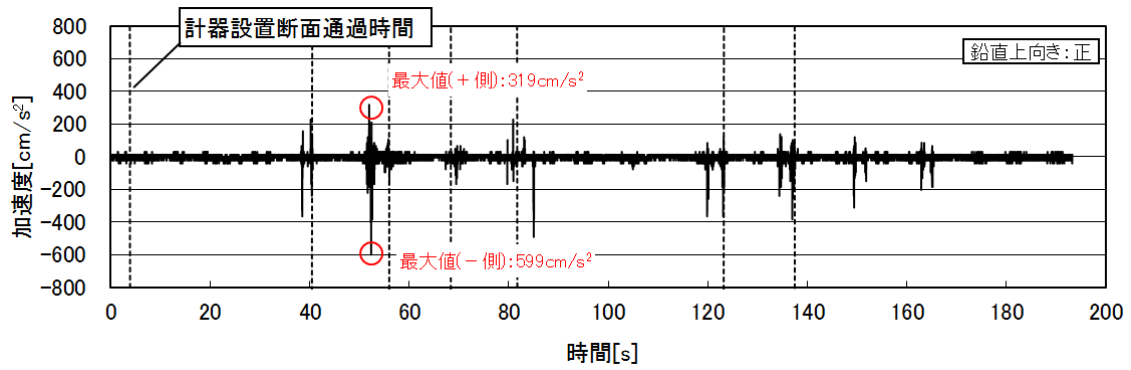


図 8.2-6 小型振動ローラの計器設置断面の通過

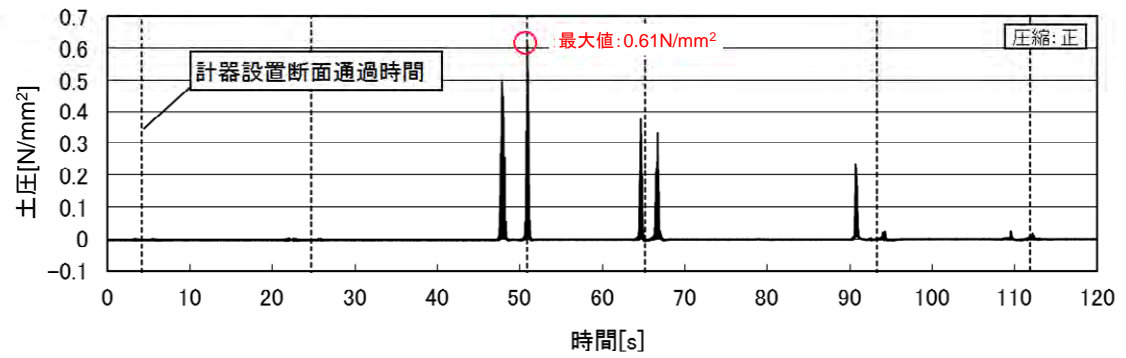


(1) 土圧

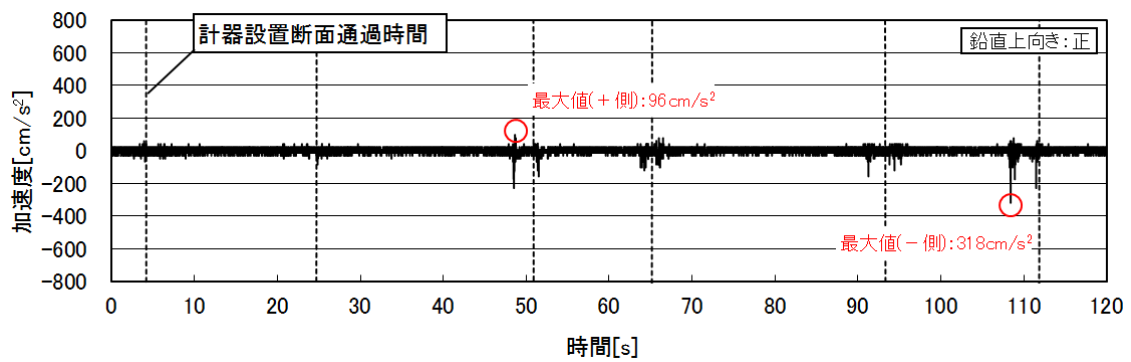


(2) 加速度

図 8.2-7 計測結果 (2層、1回目転圧)

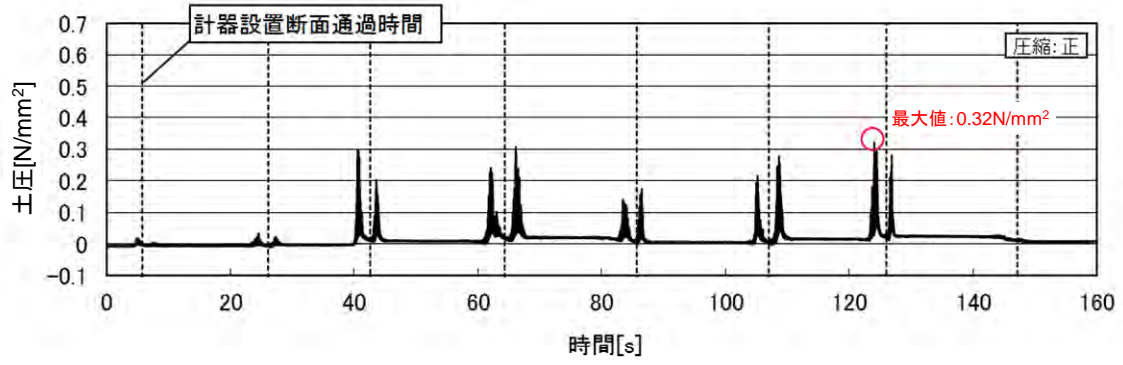


(1) 土圧

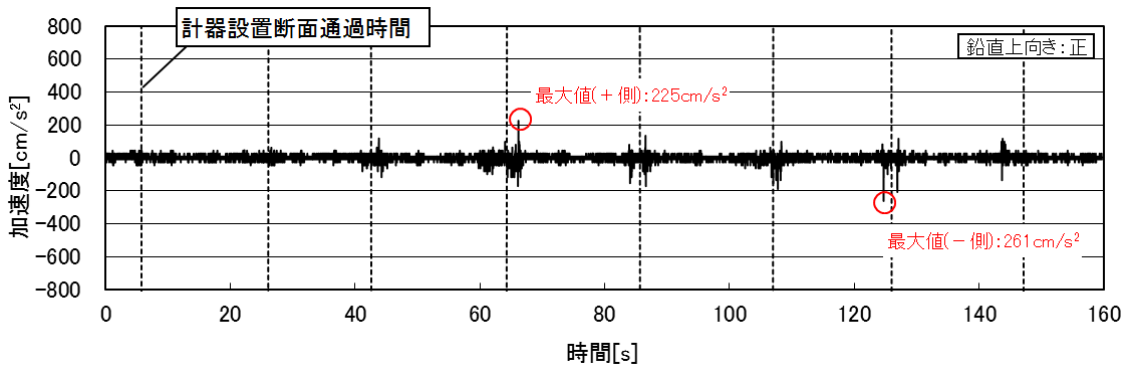


(2) 加速度

図 8.2-8 計測結果 (2層、2回目転圧)

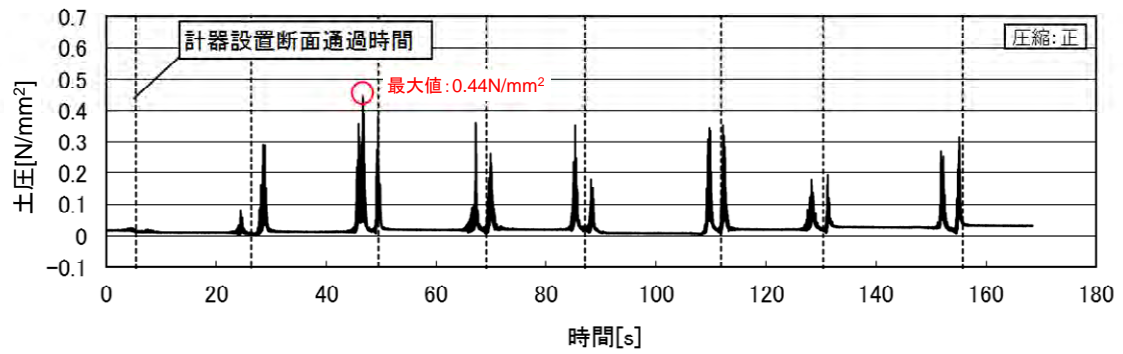


(1) 土圧

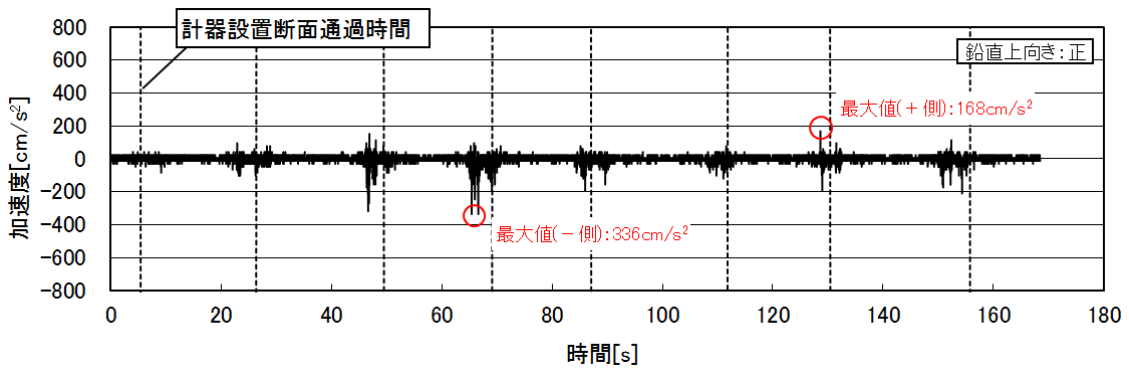


(2) 加速度

図 8.2-9 計測結果 (4層、1回目転圧)

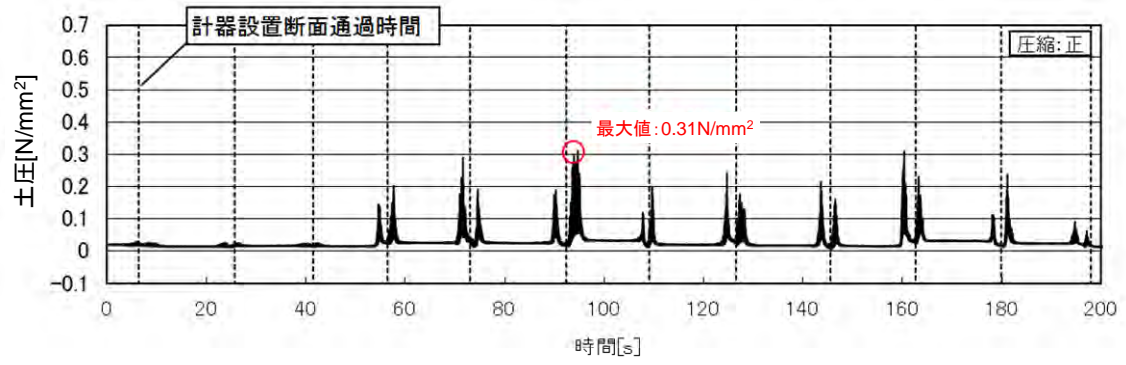


(1) 土圧

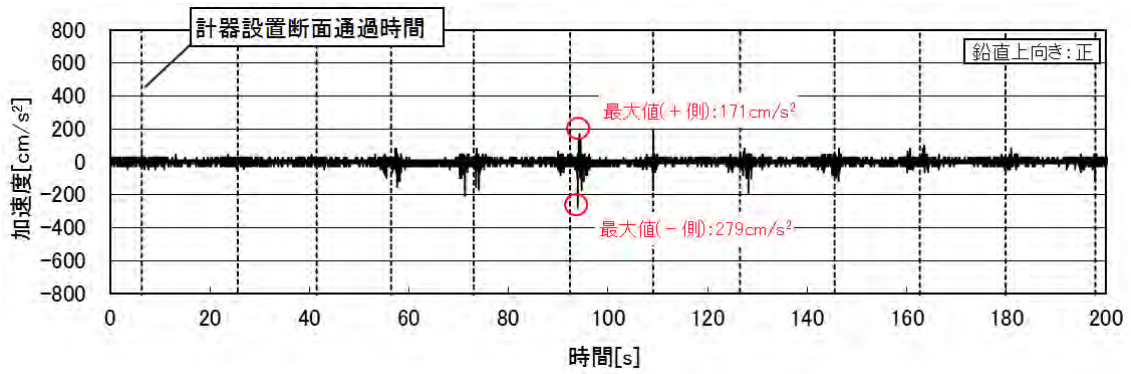


(2) 加速度

図 8.2-10 計測結果 (4層、2回目転圧)

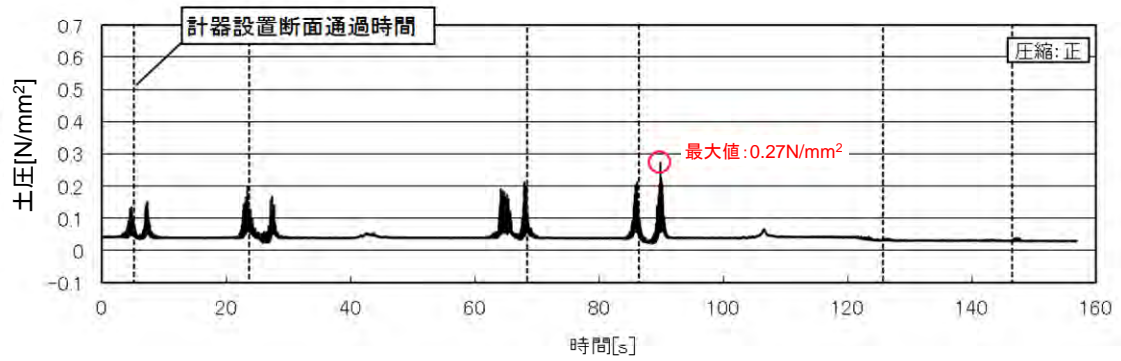


(1) 土圧

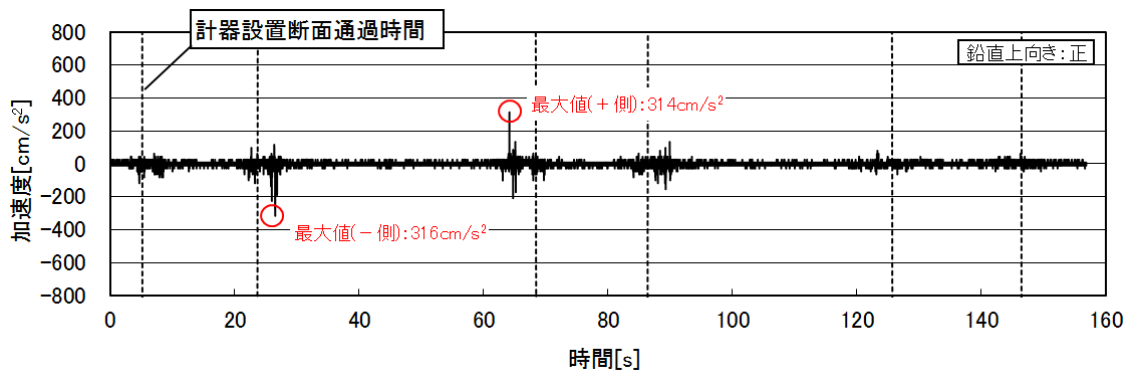


(2) 加速度

図 8.2-11 計測結果 (5層)



(1) 土圧



(2) 加速度

図 8.2-12 計測結果 (6層)

8.2.3 地震観測

地震計の計測一覧を表 8.2-5 に示す。本試験施設に地震計を設置した H25 年 10 月 23 日以降に、気象庁発表[1]の六ヶ所村尾駁観測点における震度が 1 以上であった地震動一覧を表 8.2-6 に示す（H26 年 2 月 28 日現在）。その中で観測できた地震動は 3 回あり、観測データを以降に記載する。

表 8.2-5 地震計計測一覧

計器種別	計器No.	設置位置	計測方向	計測開始日
地震計	地震計①	空洞底盤上	3方向 ・x方向（空洞軸方向） ・y方向（空洞横断方向） ・z方向（鉛直方向）	2013/10/23
	地震計②	底部コンクリートピット上		
	地震計③	手前部コンクリートピット上		

表 8.2-6 地震動一覧

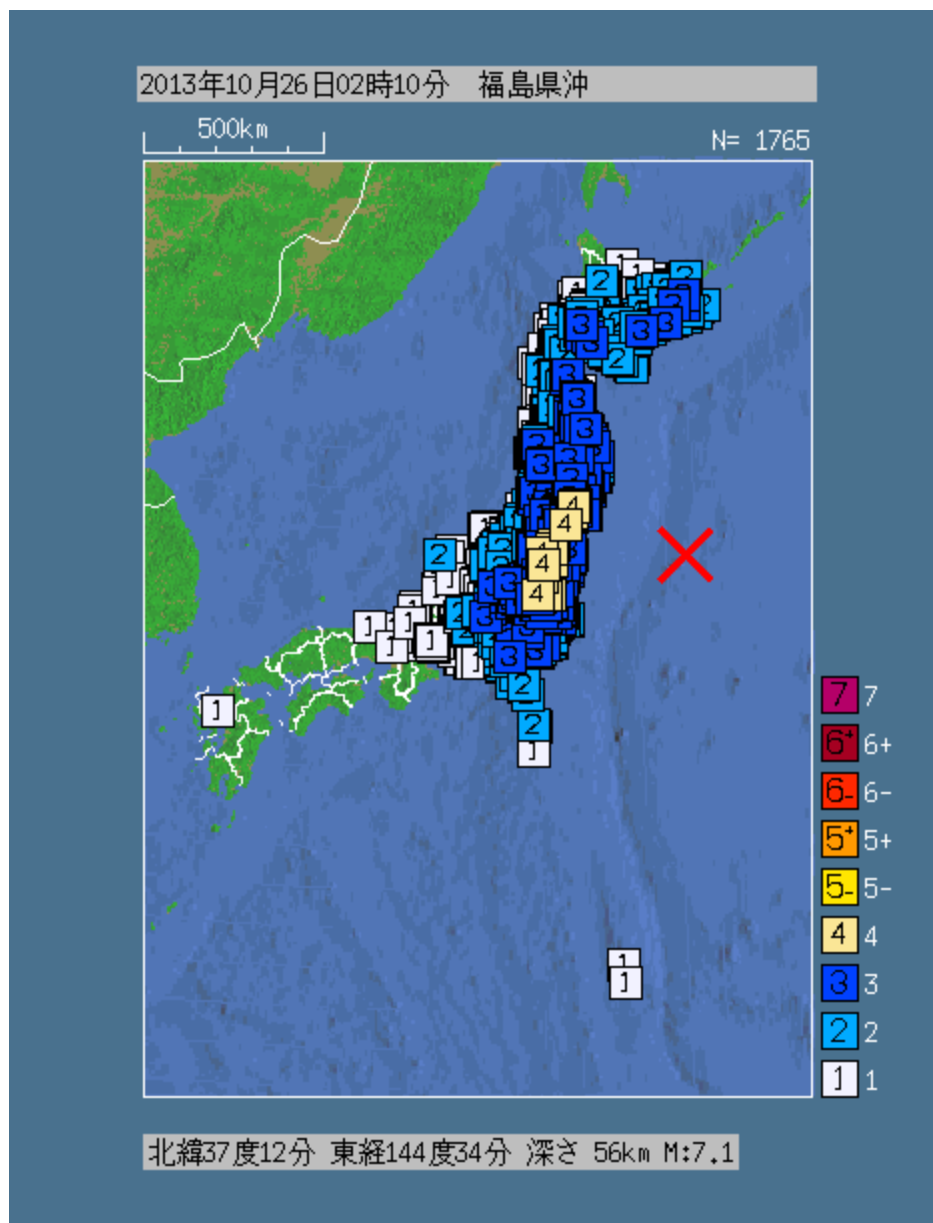
日時	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村 尾駁)	震度 (六ヶ所村 尾駁)	観測データの有無※ (試験空洞)
H25/10/24 13:04:18.8	青森県 下北地方	M4.5	112km	117km	1	無
H25/10/26 2:10:18.3	福島県沖	M7.1	56km	502km	2	有 「(1)」に記載
H25/11/15 11:00:34.4	青森県 東方沖	M5.3	63km	91km	2	有 「(2)」に記載
H25/11/28 2:45:50.6	苫小牧沖	M5.0	90km	147km	2	無
H25/12/13 13:24:54.6	青森県 東方沖	M4.0	56km	88km	1	無
H25/12/26 3:43:22.1	青森県 東方沖	M4.1	56km	132km	1	無
H25/12/27 19:31:18.1	岩手県沖	M5.0	38km	122km	2	有 「(3)」に記載
H26/1/16 10:12:15.4	岩手県沖	M5.1	28km	139km	1	無

※地震観測のトリガ条件：マスタとするセンサ（地震計①）で、xyz 方向のいずれかが 1Gal 以上

(1) H25 年 10 月 26 日

1) 気象庁発表情報

気象庁発表情報[1]を図 8.2-13 に示す。

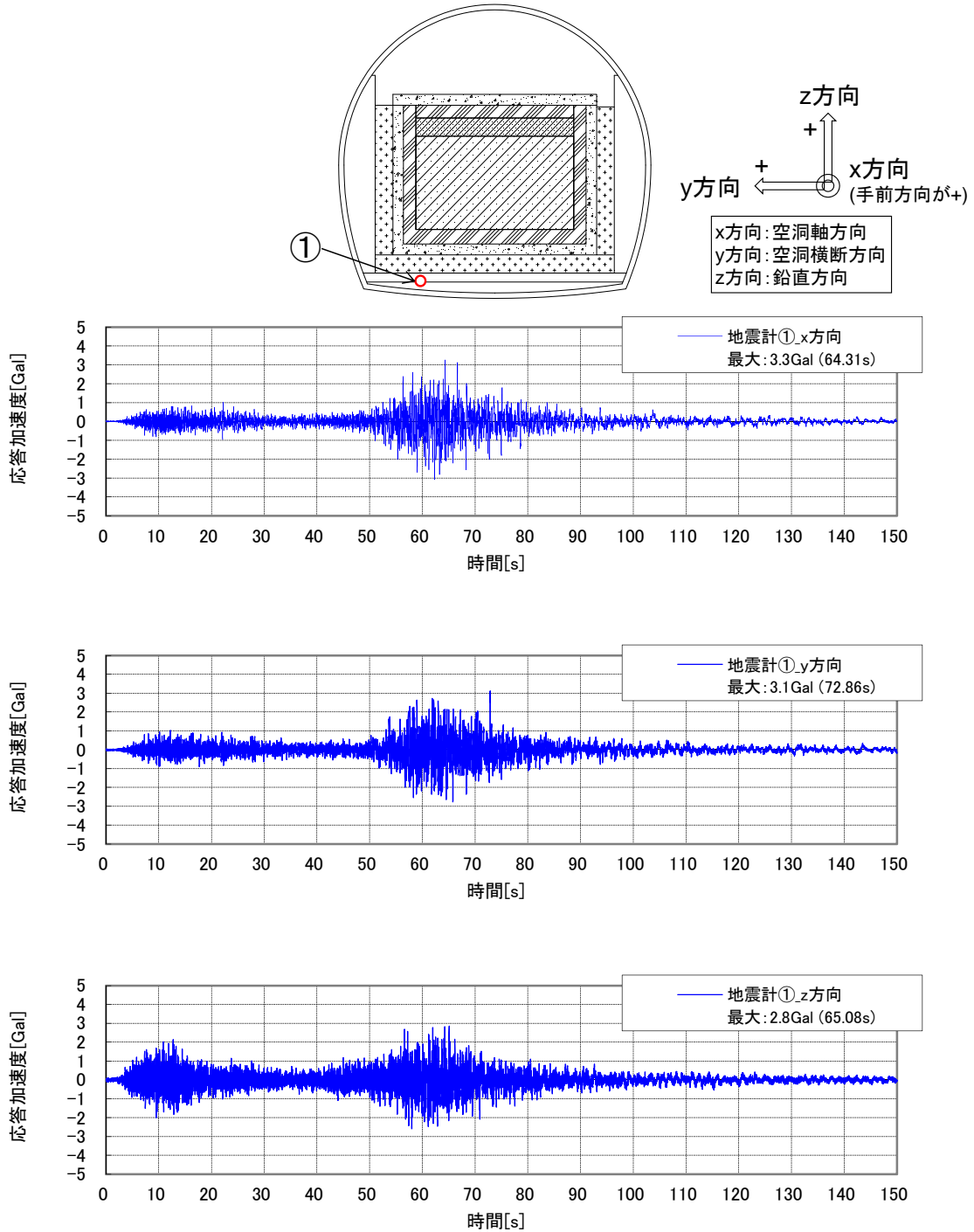


日時	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村 尾駁)	震度 (六ヶ所村 尾駁)
H25/10/26 2:10:18.3	福島県沖	M7.1	56km	502km	2

図 8.2-13 気象庁発表情報 (H25 年 10 月 26 日)

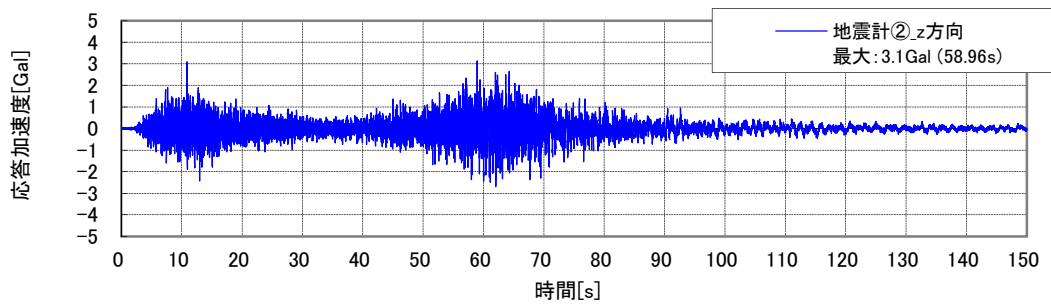
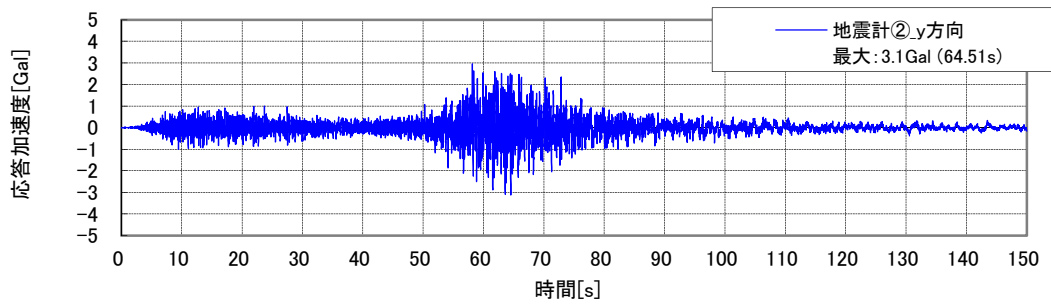
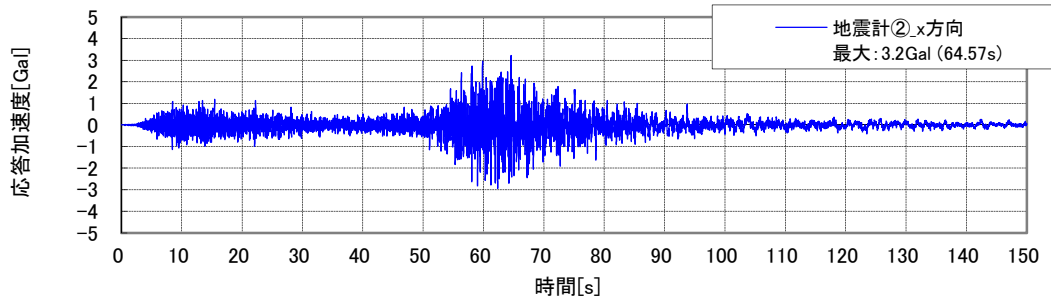
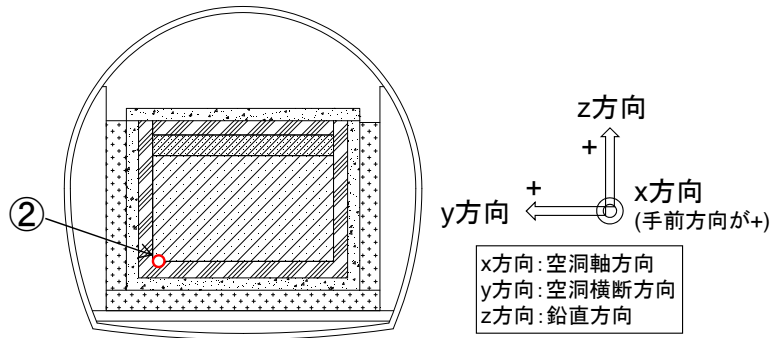
2) 観測データ

観測された加速度時刻歴を図 8.2-14～図 8.2-16 に示す。



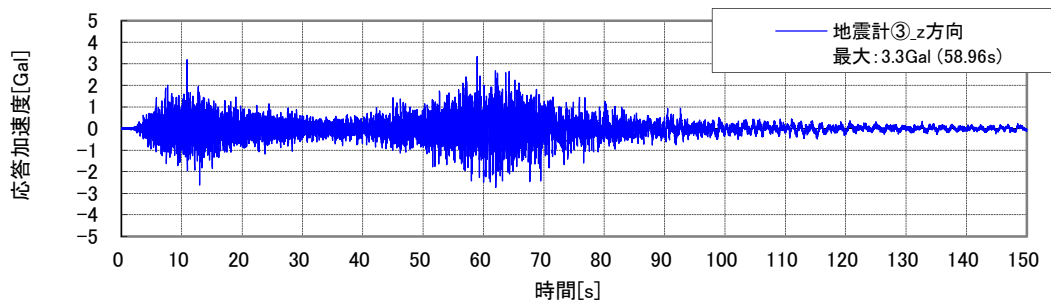
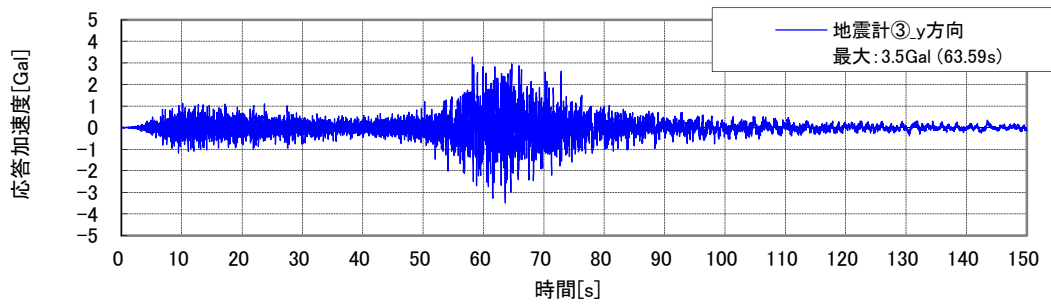
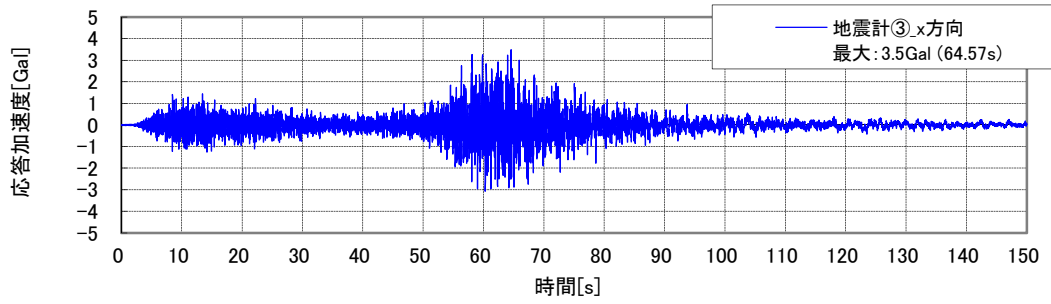
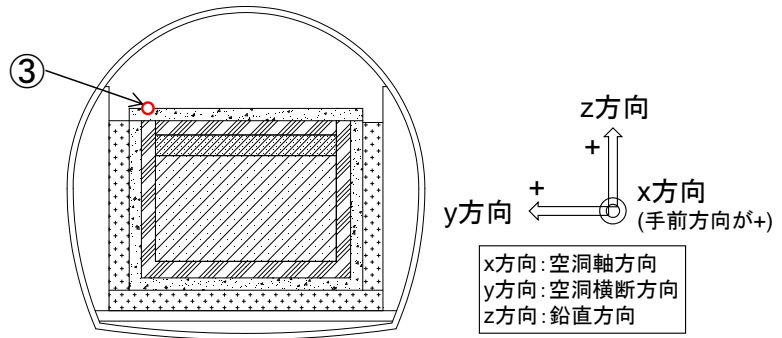
※上から x、y、z 方向

図 8.2-14 地震計①の加速度時刻歴 (H25年10月26日)



※上から x、y、z 方向

図 8.2-15 地震計②の加速度時刻歴 (H25年10月26日)



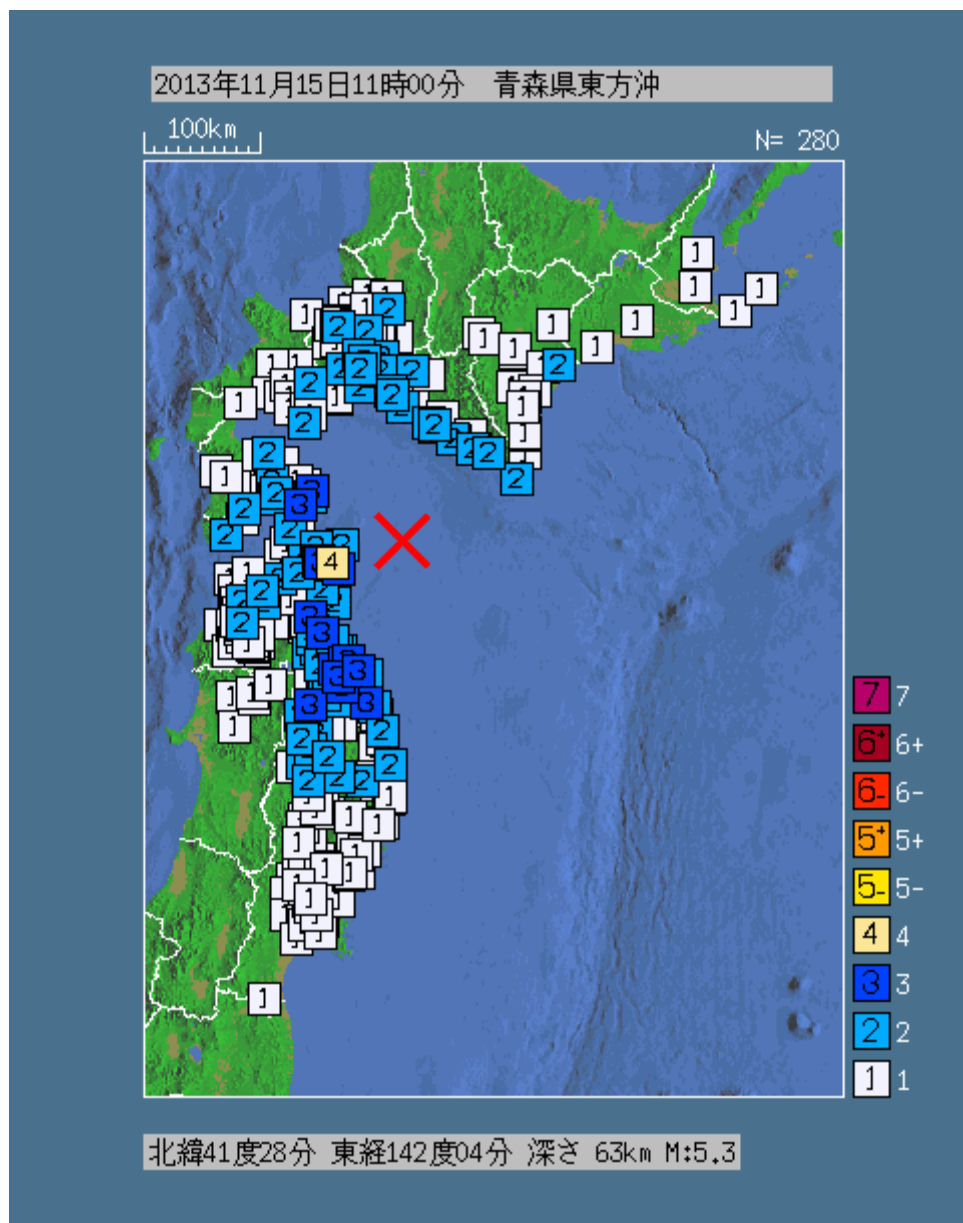
※上から x、y、z 方向

図 8.2-16 地震計③の加速度時刻歴 (H25年10月26日)

(2) H25年11月15日

1) 気象庁発表情報

気象庁発表情報[1]を図 8.2-17 に示す。

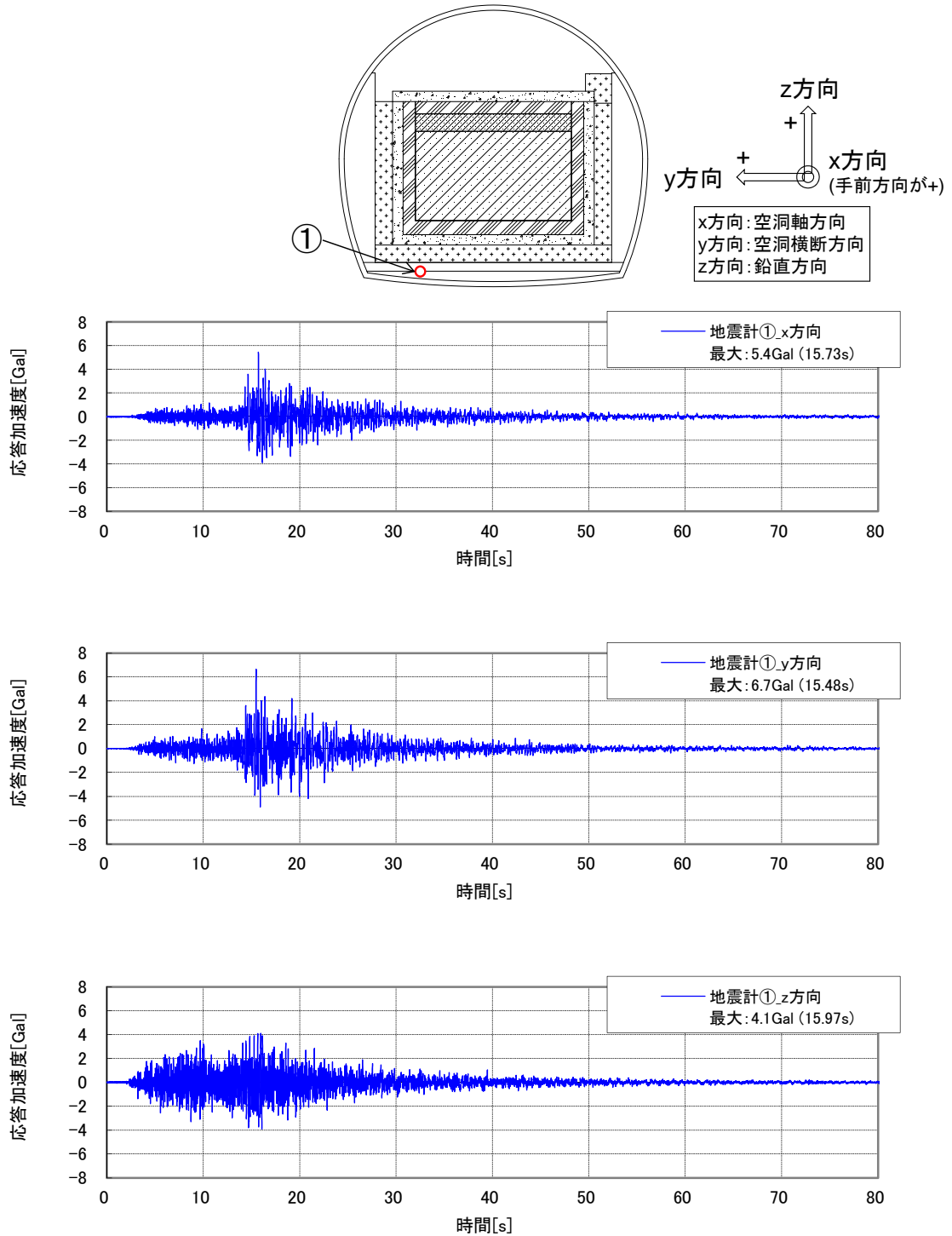


日時	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村 尾駁)	震度 (六ヶ所村 尾駁)
H25/11/15 11:00:34.4	青森県 東方沖	M5.3	63km	91km	2

図 8.2-17 気象庁発表情報 (H25年11月15日)

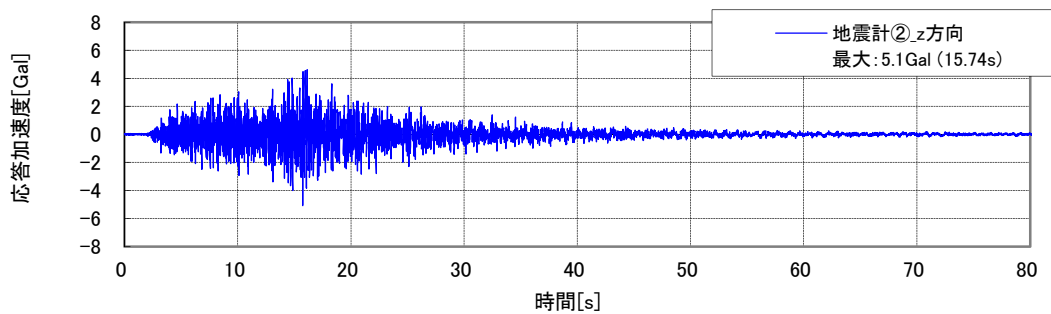
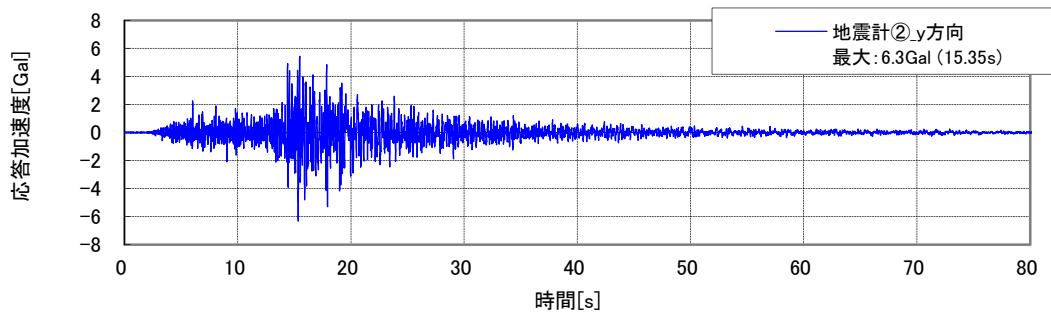
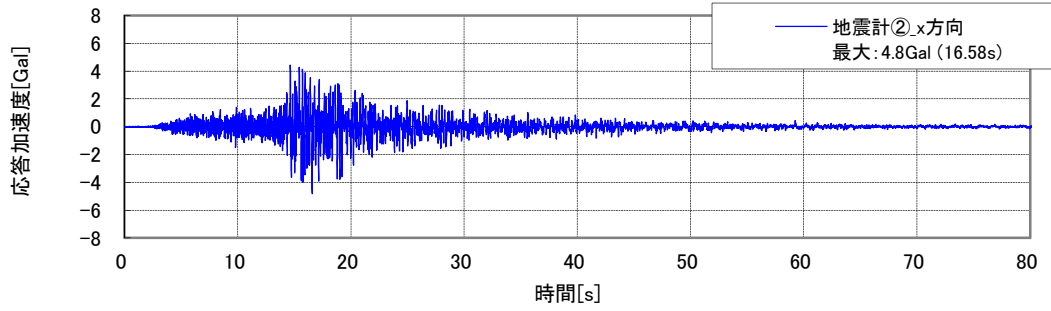
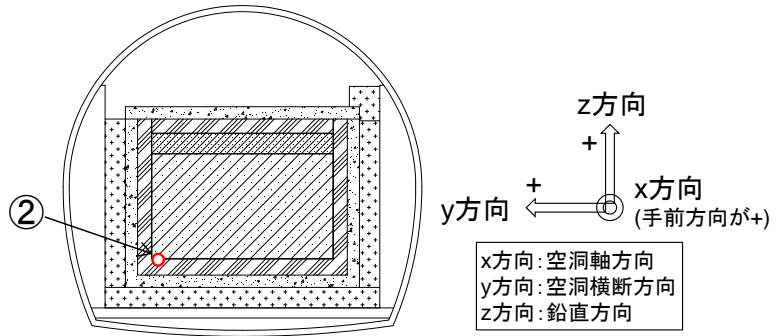
2) 観測データ

観測された加速度時刻歴を図 8.2-18～図 8.2-20 に示す。



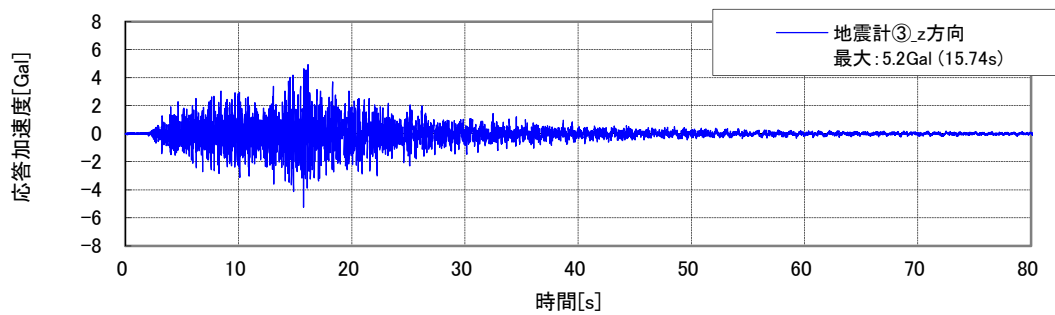
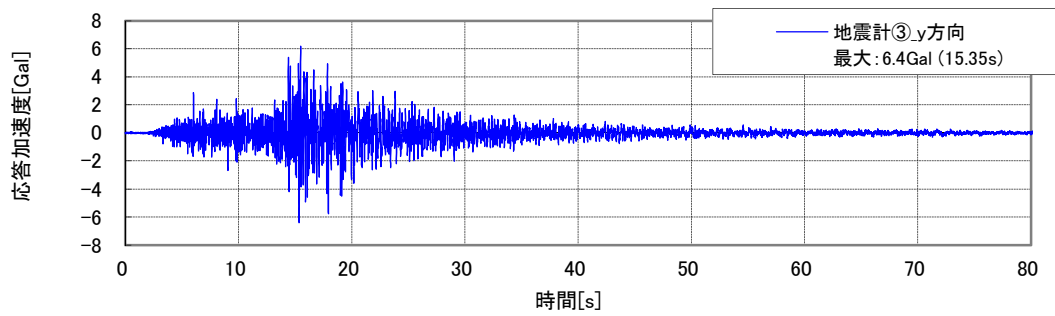
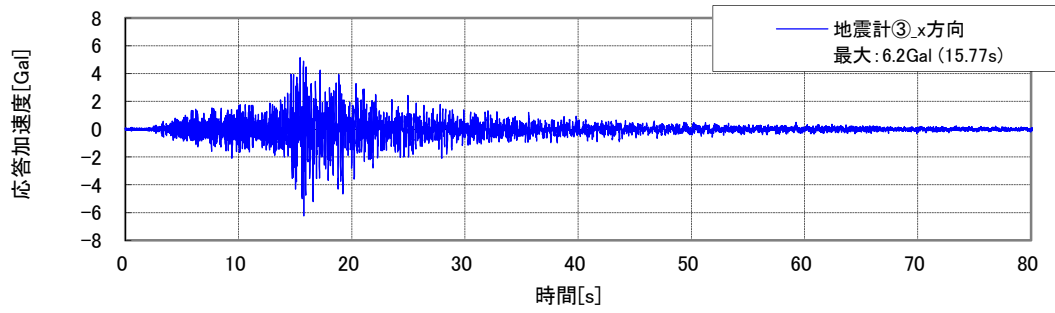
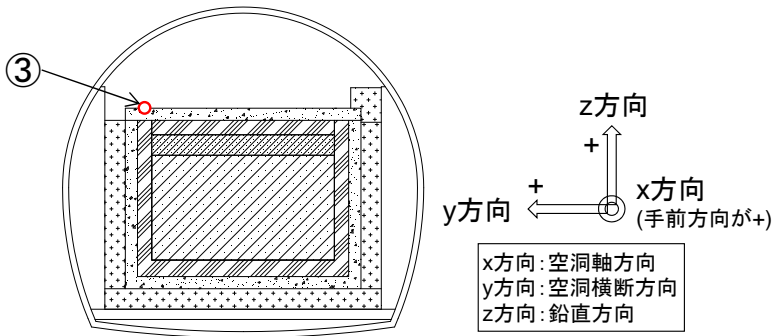
※上から x、y、z 方向

図 8.2-18 地震計①の加速度時刻歴 (H25年11月15日)



※上から x、y、z 方向

図 8.2-19 地震計②の加速度時刻歴 (H25年11月15日)



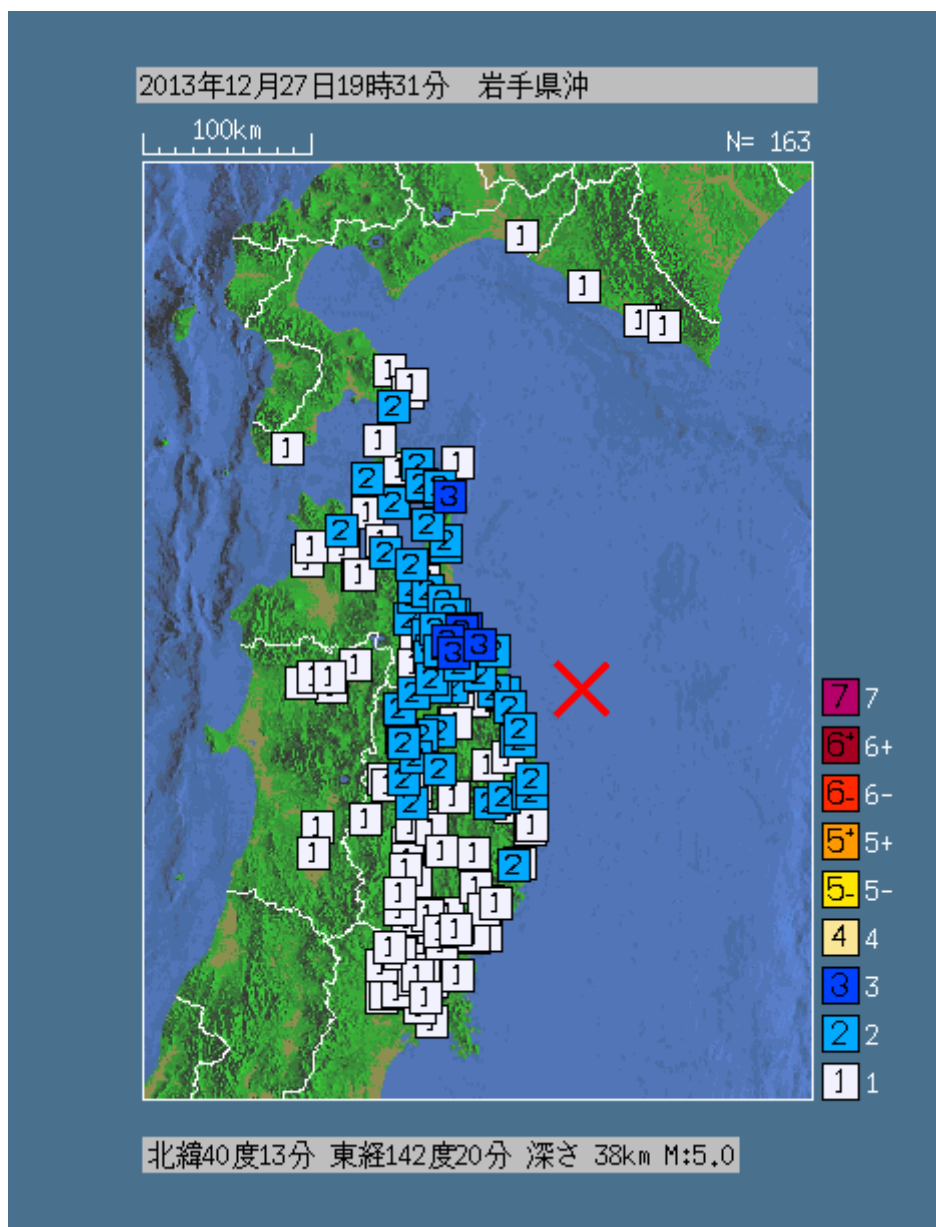
※上から x、y、z 方向

図 8.2-20 地震計③の加速度時刻歴 (H25年11月15日)

(3) H25 年 12 月 27 日

1) 気象庁発表情報

気象庁発表情報[1]を図 8.2-21 に示す。

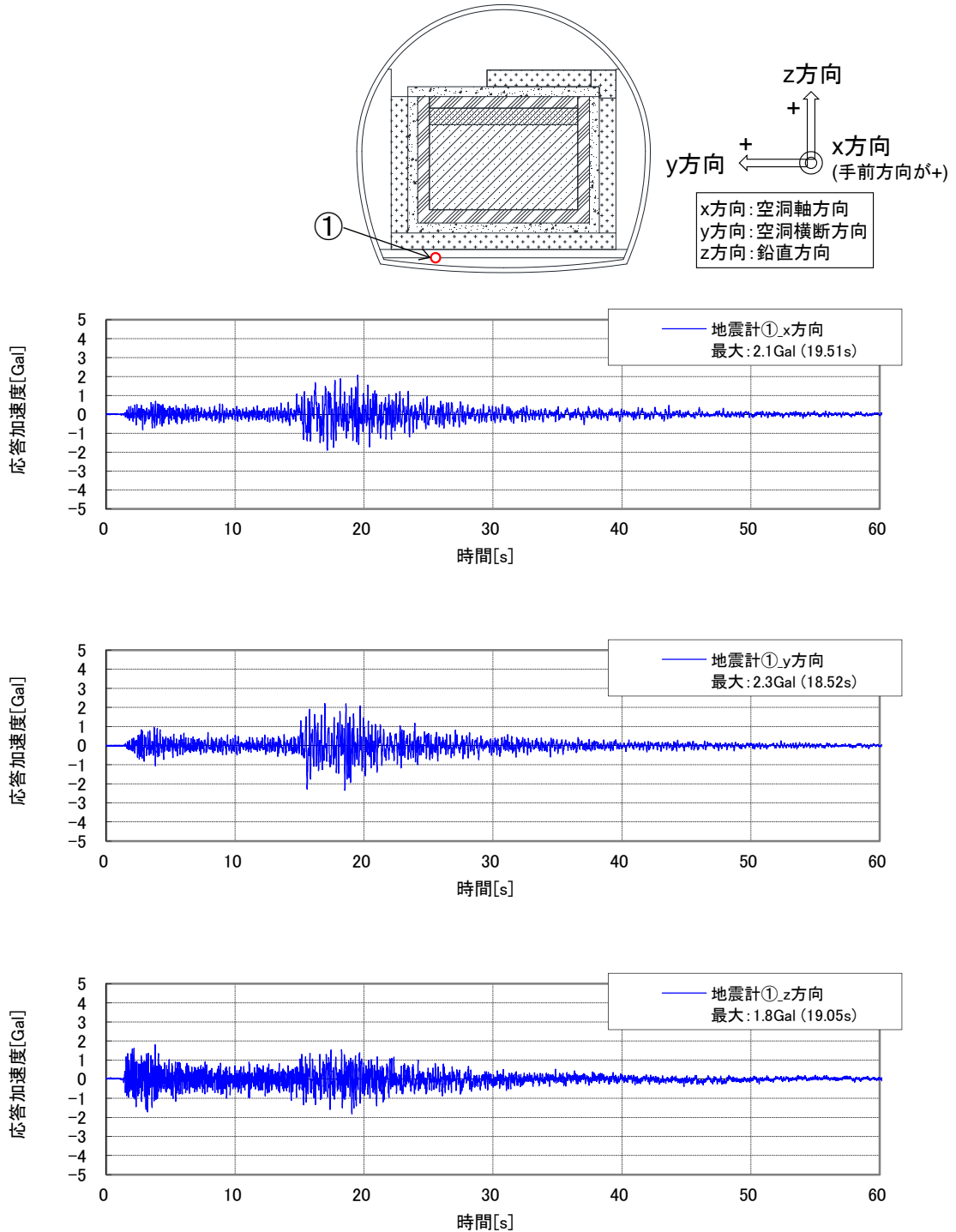


日時	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村 尾駁)	震度 (六ヶ所村 尾駁)
H25/12/27 19:31:18.1	岩手県沖	M5.0	38km	122km	2

図 8.2-21 気象庁発表情報 (H25 年 12 月 27 日)

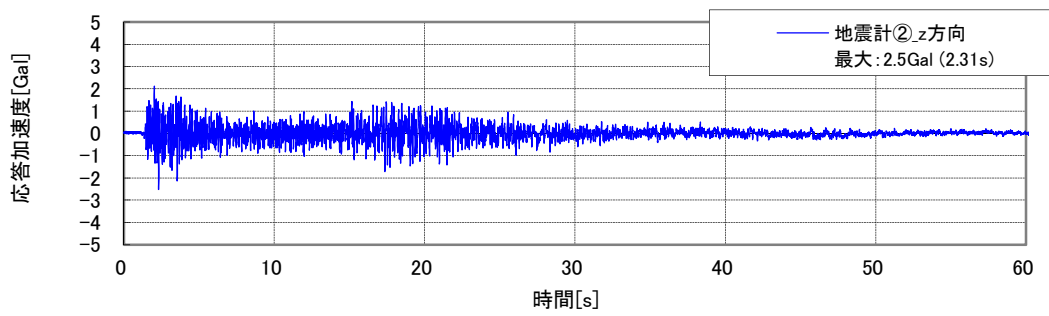
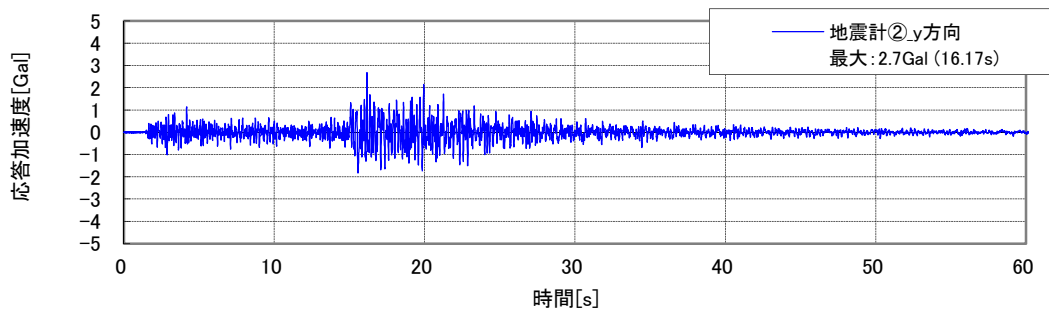
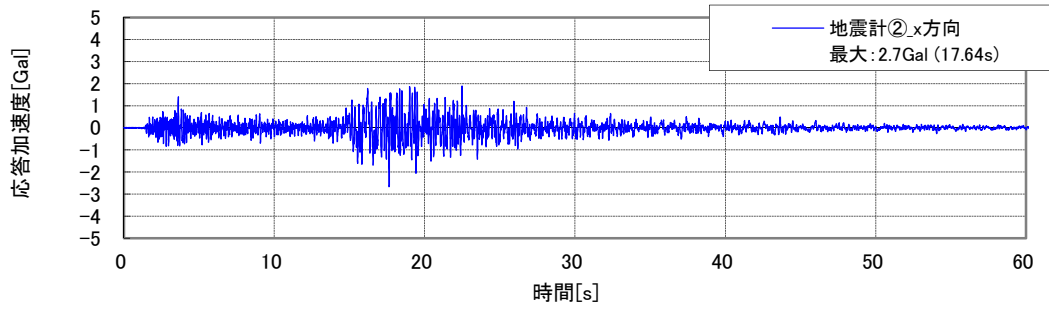
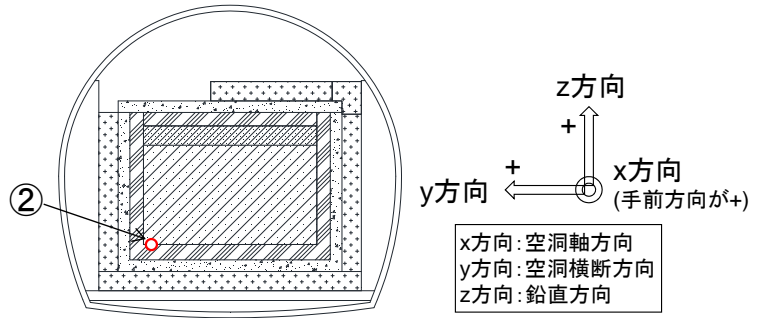
2) 観測データ

観測された加速度時刻歴を図 8.2-22～図 8.2-24 に示す。



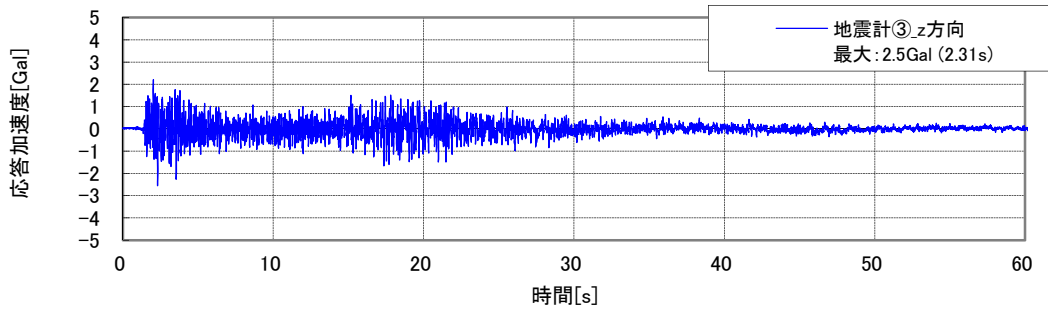
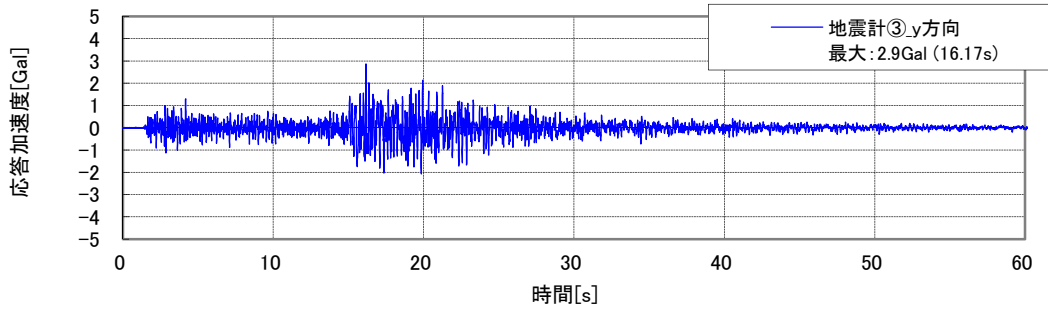
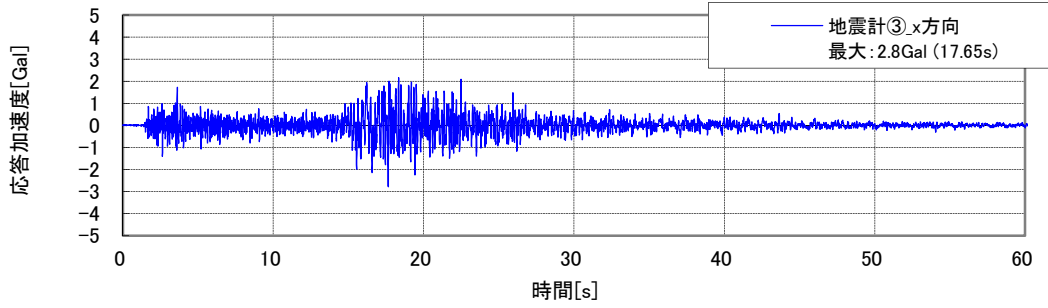
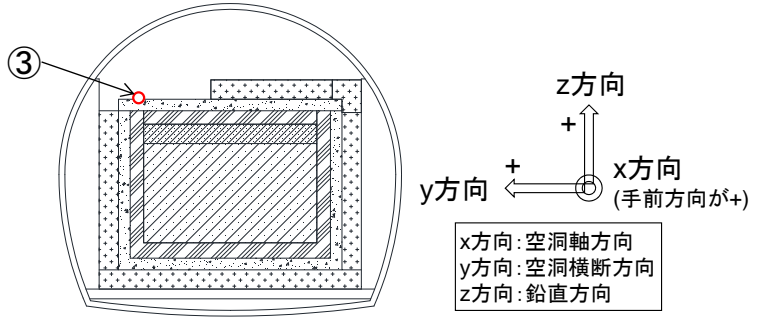
※上から x、y、z 方向

図 8.2-22 地震計①の加速度時刻歴 (H25年12月27日)



※上から x、y、z 方向

図 8.2-23 地震計②の加速度時刻歴 (H25年12月27日)



※上から x、y、z 方向

図 8.2-24 地震計③の加速度時刻歴 (H25年12月27日)

8.3 計測データの分析評価

今年度の施工イベントを表 8.3-1 に示す。本項では、今年度の施工イベントにおける荷重等による施設の力学挙動について、影響を受けやすい部材に着目して分析評価する。また「8.3.6 地震観測結果の分析評価」では、観測された地震動データについて分析評価する。その他の計測器については、年間を通して空洞中の気温変化に応じた季節変動が支配しており、それらの計測データは添付資料-7 に示す。

表 8.3-1 施工イベント一覧

日 時	施工イベント
H25/11/2	上部緩衝材(隅角部)施工開始
H25/11/14	上部緩衝材(隅角部)施工終了
H25/12/6	上部緩衝材(平面部)施工開始
H25/12/20	上部緩衝材(平面部)施工終了
H26/1/9	上部埋戻し材施工開始
H26/2/5	上部埋戻し材施工終了

8.3.1 坑内環境計測結果の分析評価

【目的】

調査坑坑口ならびに試験空洞内の試験施設近傍 3 箇所の坑内気温および湿度の経時変化の傾向と場所による違いに着目し分析評価を行う。

【まとめ】

- ・ 空洞内気温、空洞内湿度ともに季節変動が見られる。空洞内平均気温は、H25 年 2～3 月の冬季期間では約 10～11℃で、H25 年 7～8 月の夏季期間では約 15～18℃となっている。空洞内湿度では、夏季期間では日最高湿度と日最低湿度の差が 20%未満であるが、冬季期間に近づくとつれて日最低湿度が小さくなり、その結果湿度の差が 30%を越える日が見られる。
- ・ 空洞内気温は年間を通して空洞内が坑口より大きくなる傾向がある。また 6～9 月において坑口と空洞内の差が小さくなるが、冬期に向けて差が大きくなっている。

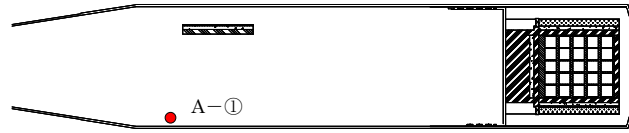
(1) 坑内の気温および湿度

本試験における環境計測は、図 8.3-1～図 8.3-3 に示すように百葉箱温湿度計 1 基 (A-①) による空洞手前ならびに分散型温湿度計 2 基 (B-①、B-②) による試験施設近傍の空洞内計 3 箇所と、分散型温湿度計 1 基 (B-⑤) による坑口 1 箇所で計測を行っている。以下、H25 年 2 月から H26 年 2 月までの環境計測結果の分析結果について以下に示す。

百葉箱温湿度計 A-①で計測された空洞内気温と空洞内湿度について、日平均、日最高、日最低、日較差を図 8.3-1 に示す。空洞内気温については、日平均気温、日最高気温、日最低気温ともに季節変動が見られる。空洞内平均気温は、H25 年 2～3 月の冬季期間では約 10～11℃で、H25 年 7～8 月の夏季期間では約 15～18℃となっている。H25 年 11 月 2 日～14 日の上部緩衝材（吹付工法）、H25 年 12 月 6 日～20 日の上部緩衝材（転圧工法）および H26 年 1 月 9 日～2 月 5 日の上部埋戻し材の施工期間では、施工に伴う空洞内気温の上昇が見られる。気温の日較差（日最大－日最低）の最大値は、それぞれの施工期間で 4.4℃、1.3℃、3.5℃となり、吹付け施工に伴う上部緩衝材（吹付工法）および上部埋戻し材で、施工時のコンプレッサーの圧縮空気により空洞内の気温が上昇したと考えられる。空洞内湿度についても季節変動が見られ、夏季期間では日最高湿度と日最低湿度の差が 20%未満であるが、冬季期間に近づくとつれて日最低湿度が小さくなり、その結果湿度の差が 30%を越える日が見られる。

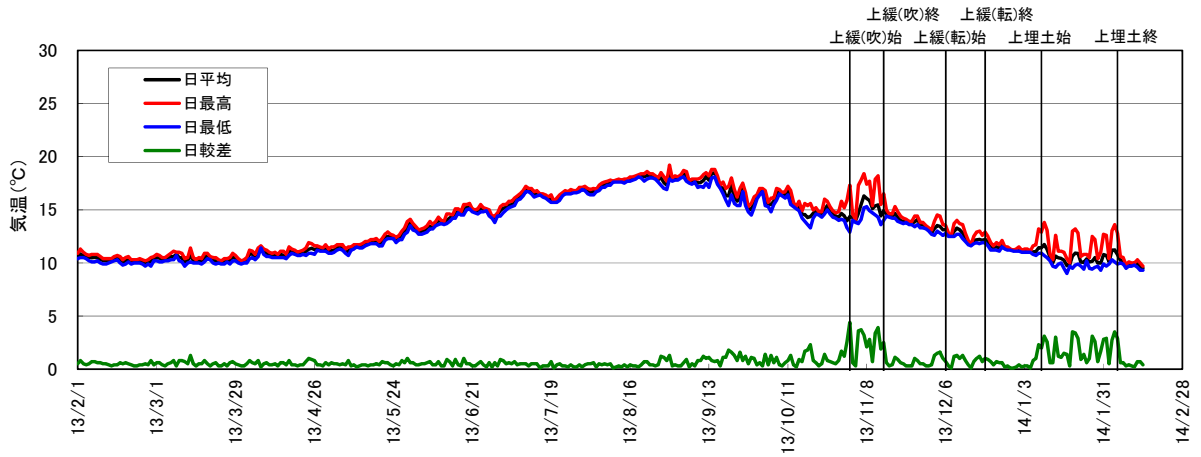
百葉箱温湿度計 A-①および分散型温湿度計 B-①、B-②で計測された空洞内気温、湿度計測結果による、空洞内における計測位置別の日平均気温・湿度を図 8.3-2 に示す。今年度の計測における計測位置（A-①、B-①、B-②）による計測値の差は、空洞内日平均気温では 0～4℃、空洞内日平均湿度では 0～60%となっている。気温については計測位置による差は小さいが、湿度については百葉箱と分散型温湿度計の計測結果の変化傾向に違いが見られる。

分散型温湿度計 B-⑤で計測された坑口気温、湿度計測結果より求めた、日平均気温・湿度を図 8.3-3 に示す（比較のため、空洞内の分散型温湿度計 B-①、B-②の計測結果を併せて載せている）。気温は年間を通して空洞内が坑口より大きくなる傾向がある。また、気温・湿度ともに、6～9 月において坑口と空洞内の差が小さくなるが、冬季に向けて差が大きくなっている。



平面図

百葉箱気温



百葉箱湿度

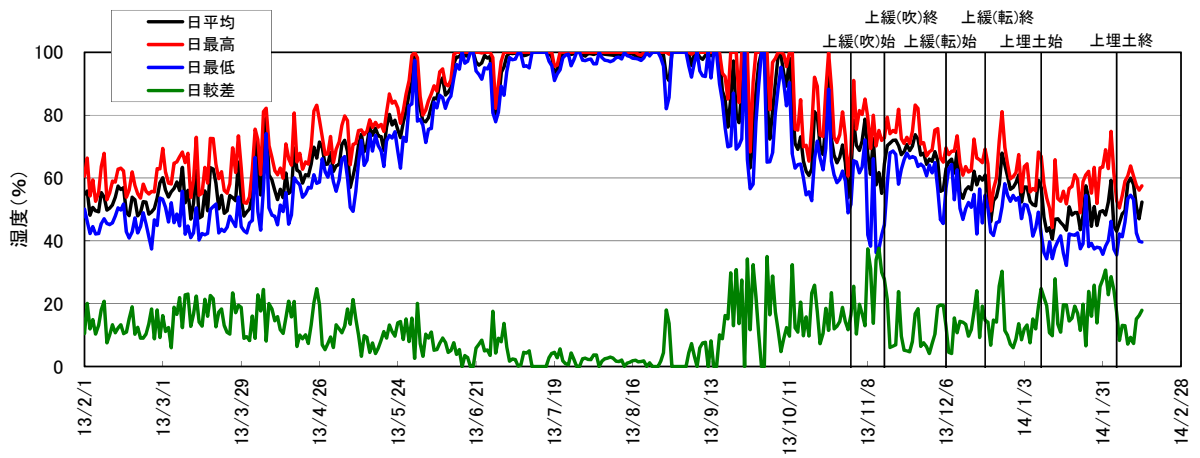
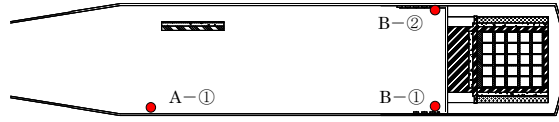
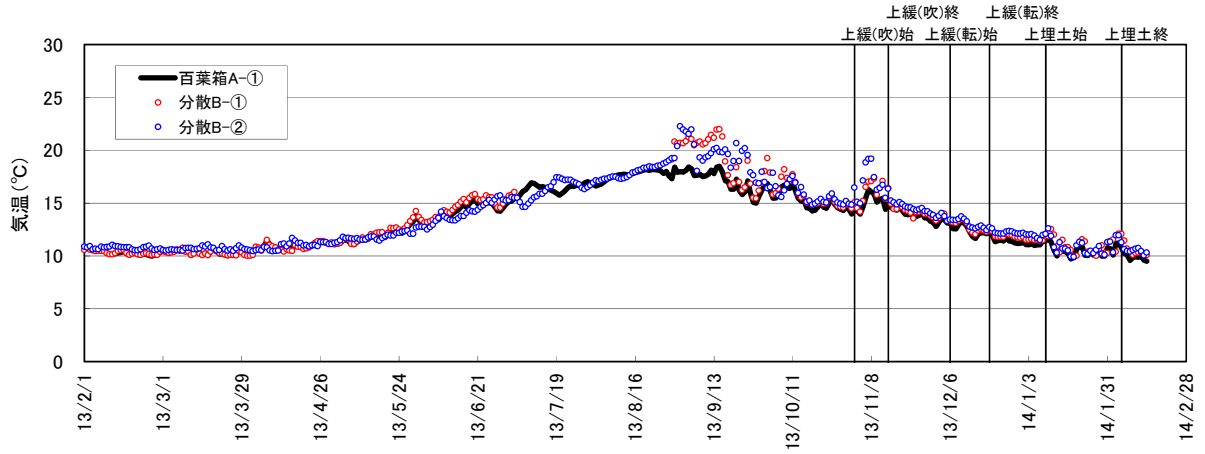


図 8.3-1 空洞内気温・湿度の経時変化（百葉箱温湿度計 A-①）



平面図

百葉箱-分散型の日平均気温比較



百葉箱-分散型の日平均湿度比較

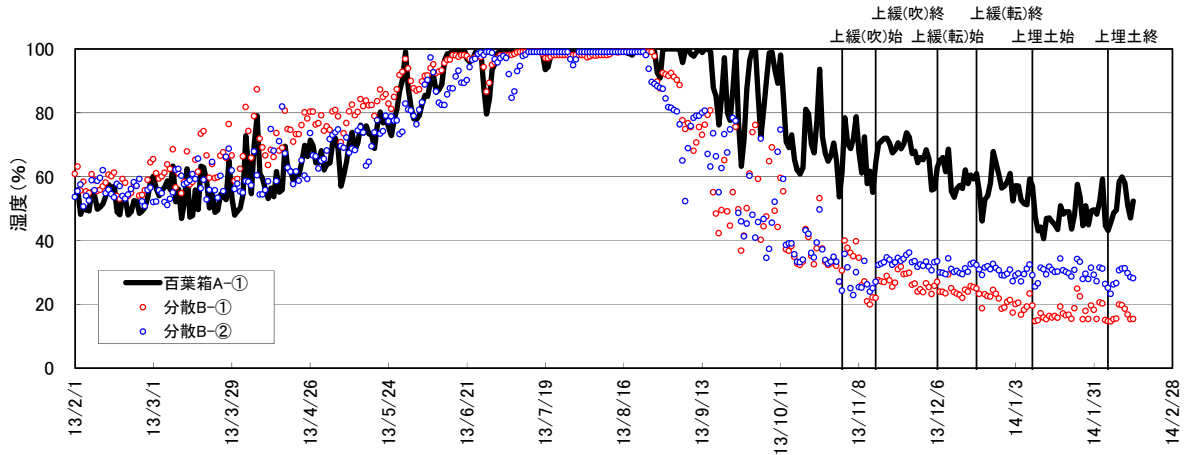
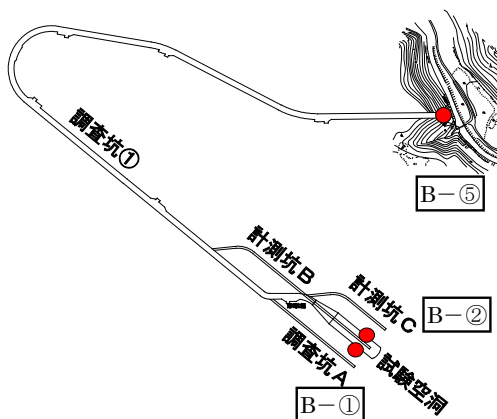
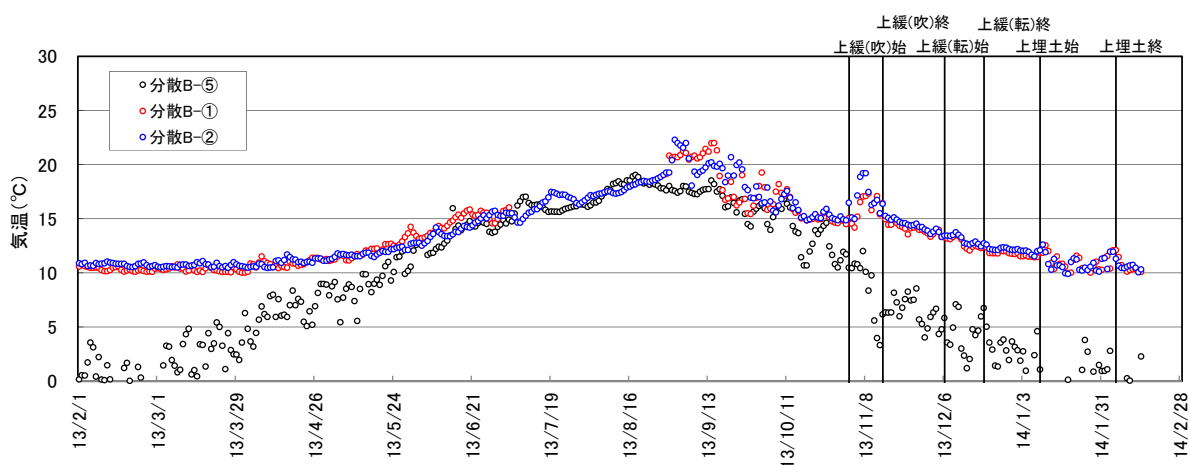


図 8.3-2 空洞内計測位置別の日平均気温・湿度の変動状況



坑口－空洞内の日平均気温比較



坑口－空洞内の日平均湿度比較

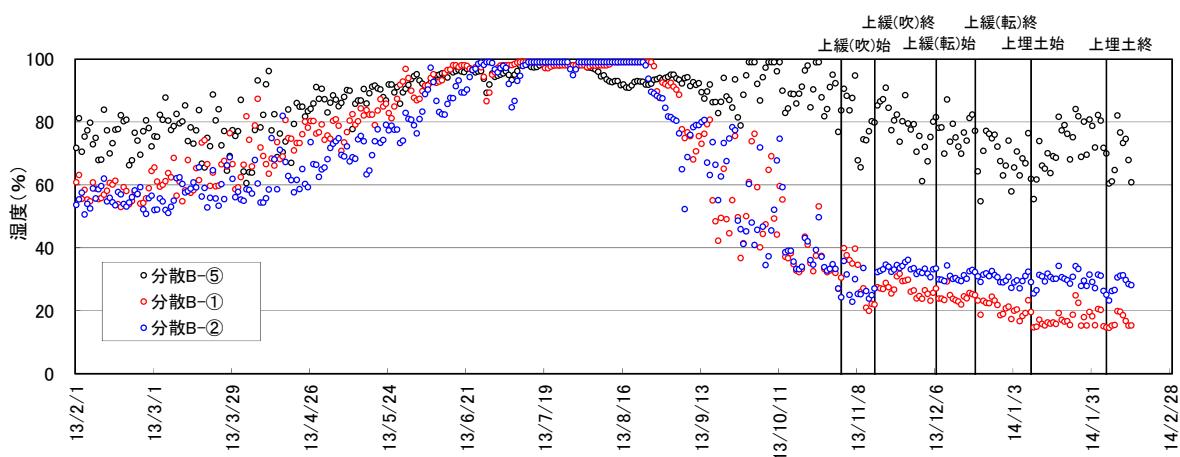


図 8.3-3 坑口－空洞の気温・湿度の比較（分散型温湿度計 B-⑤、B-①、B-②）

8.3.2 上部緩衝材の計測結果の分析評価

【目的】

今年度の上部緩衝材施工確認試験では、小型振動ローラを用いた現地締固めを実施した。上部緩衝材に隣接する上部低拡散材の上面に事前に設置した土圧計、加速度計を用いて振動転圧時の動的計測を行い、取得した動的データの分析に基づいて荷重、振動の上部低拡散材への影響を評価する。

【まとめ】

- ・ 動的土圧は最大 0.61N/mm^2 であり、上部低拡散材の圧縮強度（91日強度で 50N/mm^2 以上）と比較して十分小さい。
- ・ 上部低拡散材に設置した計器の経時変化の分析から、上部低拡散材の応力およびひずみの挙動は、空洞内気温の変化の影響を強く受けているが、上部緩衝材施工による振動転圧の影響は小さいものと考えられる。

(1) 既往試験結果との比較

「8.2.2 (1) 動的計測結果」に示した上部緩衝材（平面部）の振動転圧時の動的計測結果より、仕上り層厚（以下、層厚）における土圧および加速度の最大値を表 8.3-2 に示す。層厚 10cm および 20cm では、振動転圧を 2 回ずつ実施しており、土圧および加速度が大きい方をそれぞれの層厚における最大値とした。また、今年度実施した上部緩衝材の振動転圧時と、H20 年度に実施した底部緩衝材の振動転圧時の最大土圧および最大加速度と層厚との関係を図 8.3-4～図 8.3-5 に示す。なお振動転圧に使用する機械は、上部緩衝材では 1.5t 小型振動ローラ、底部緩衝材では 19t および 11t 大型振動ローラである。

最大土圧は、今年度は層厚 10cm で最大 0.61N/mm^2 となり、層厚が大きくなるにつれて減少した。既往試験結果と比較すると、今年度は H20 年度と比較して全体的に小さくなる傾向があり、施工機械の違いが影響していると考えられる。今年度と H20 年度の差は、層厚 10cm では $1.18\sim 1.34\text{N/mm}^2$ 、20cm では $0.21\sim 0.44\text{N/mm}^2$ であり、層厚が大きくなるにつれて施工機械の影響が小さくなる。

最大加速度は、今年度は層厚 10cm で+側 319cm/s^2 、-側 599cm/s^2 の最大値をとり、層厚が 20cm、25cm と大きくなるにつれて+側-側ともに減少し、30cm では若干増加した。既往試験結果と比較すると、今年度は H20 年度と比較して+側-側ともに小さくなる傾向があり、施工機械の違いが影響していると考えられる。今年度と H20 年度の差は、層厚 10cm では+側 543cm/s^2 、-側 228cm/s^2 、20cm では+側 92cm/s^2 、-側 104cm/s^2 であり、最大土圧と同様に層厚が大きくなるにつれて施工機械の影響が小さくなる。

表 8.3-2 上部緩衝材施工時の動的計測結果の最大値一覧

計測層	仕上り層厚 (cm)	計測回数	最大値		
			土圧計 (N/mm ²)	加速度計	
				+側 (cm/s ²)	-側 (cm/s ²)
2	10	1	0.52	319	-599
		2	0.61	96	-318
4	20	1	0.32	225	-261
		2	0.44	168	-336
5	25	1	0.31	171	-279
6	30	1	0.27	314	-316

 : 各仕上り層厚での最大値
 ※計測値の符号について、土圧計は鉛直下向き(圧縮)を正、
 加速度計は鉛直上向きを正とした。

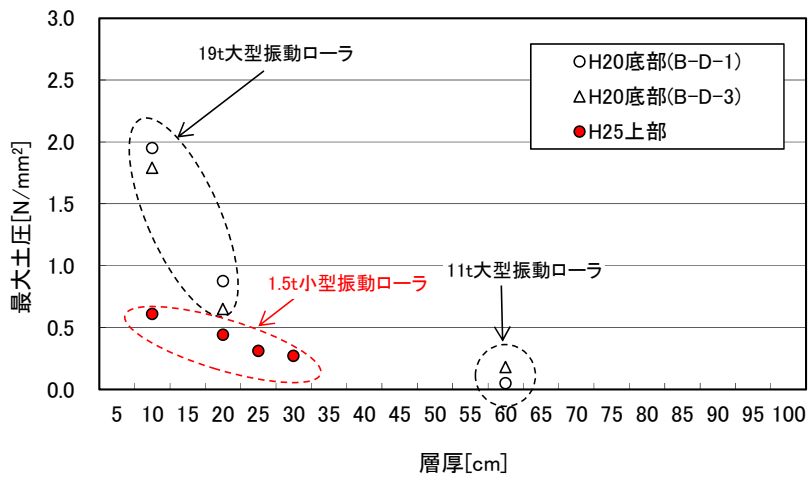


図 8.3-4 振動転圧時の最大土圧 (鉛直方向)

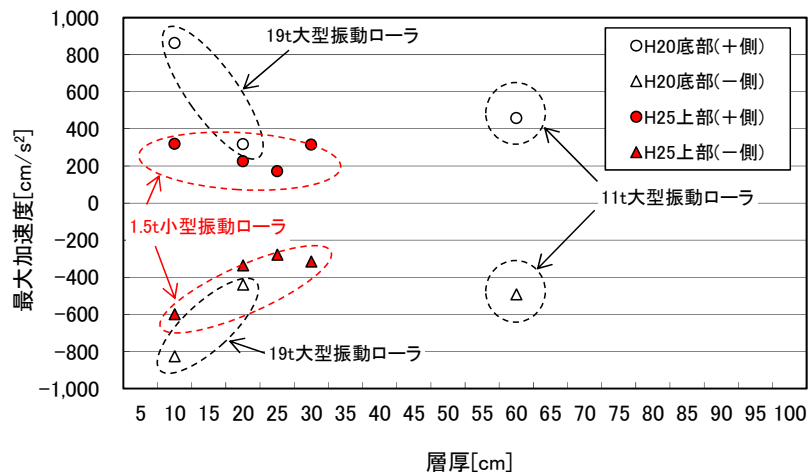


図 8.3-5 振動転圧時の最大加速度 (鉛直方向)

(2) 上部低拡散材への影響

1) 圧縮強度との比較

H24 年度の上部低拡散材の初期性能確認試験における圧縮強度試験結果を図 8.3-6 に示す。図中のコア（湿潤・保温養生）およびコア（湿潤養生）の 91 日強度は 50N/mm^2 以上となっている。今回の動的計測での土圧の最大値は、図 8.3-4 より層厚 10cm の場合で 0.61N/mm^2 であり、低拡散材の圧縮強度と比較して十分小さく、低拡散材に与える影響は小さいと考えられる。

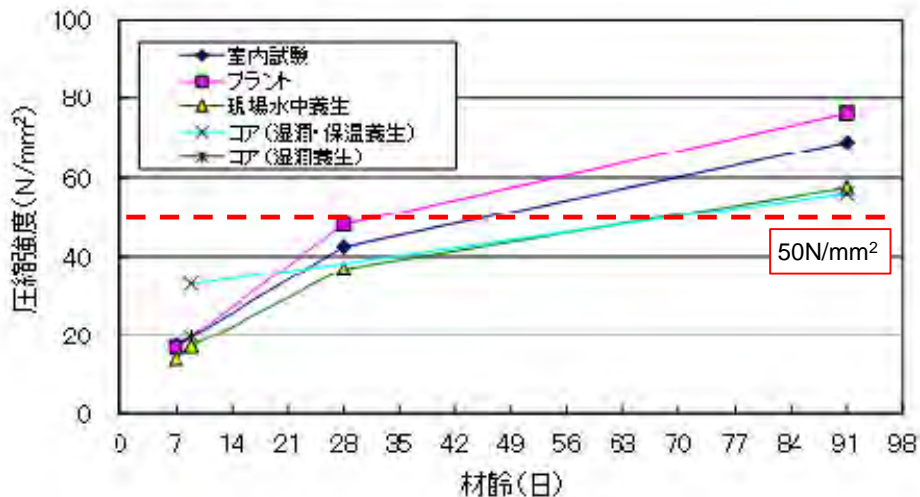


図 8.3-6 上部低拡散材の圧縮強度試験結果（H24 年度報告書）

2) 振動転圧時の挙動計測結果

上部緩衝材の施工による、上部低拡散材への影響をみるため、上部緩衝材施工期間中の上部低拡散材中の温度、自由ひずみ、実ひずみ、拘束ひずみおよび応力の経時変化を図 8.3.7 に示す。分析対象は、各種計器が設置されている上部低拡散材の中央断面、高さ方向中央に設置した計器とした。また、ひずみと応力の計測方向については、施工時の小型振動ローラの進行方向である空洞横断方向の計器を対象とした。また、図 8.3.8 には、上部緩衝材(転圧工法)施工開始日の前日である H25 年 12 月 5 日の計測値を初期値（ゼロクリア）として示した。

[全体傾向]

- ・ 振動転圧開始時の 12 月 5 日～7 日に温度低下し、その後安定している。
- ・ ひずみおよび応力変化は温度変化に連動している。

有効応力計の結果より、施工期間中の応力変化は $-0.01\sim 0.07\text{N/mm}^2$ であり、既往試験結果から算出した低拡散材の引張強度 4.68N/mm^2 (材齢 91 日) と比較しても非常に小さいレベルであり、上部低拡散材に与える影響は小さい。なお 12 月 5 日～7 日の短期間で応力が約 0.05N/mm^2 増加していることについては、下記のように温度変化の影響と考えられる。

[12月5日～7日の計測値変化について]

温度計の計測結果は、 $\Delta T = -0.5^{\circ}\text{C}$ であり、

既往試験結果より、低拡散材の温度膨張率を $\alpha = 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とすると、温度膨張ひずみは

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = -2.5 \times 10^{-6} \text{ (収縮側)}$$

となる。これは無応力計による自由ひずみ量と整合する。

一方、ひずみ計による実ひずみと無応力計による自由ひずみの差分から求めた拘束ひずみは、

$$\varepsilon' = +1.6 \times 10^{-6} \text{ (膨張側)}$$

となり、既往試験結果より低拡散材の弾性係数を $E = 29,300 \text{ N/mm}^2$ (材齢 91 日) とすると、

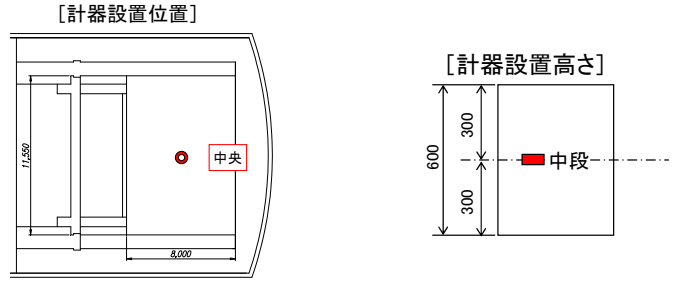
$$\text{応力は、} \sigma = E \cdot \varepsilon' = 29,300 \times 1.6 \times 10^{-6} = 0.05 \text{ N/mm}^2$$

となる。これは有効応力計の計測結果と整合する。

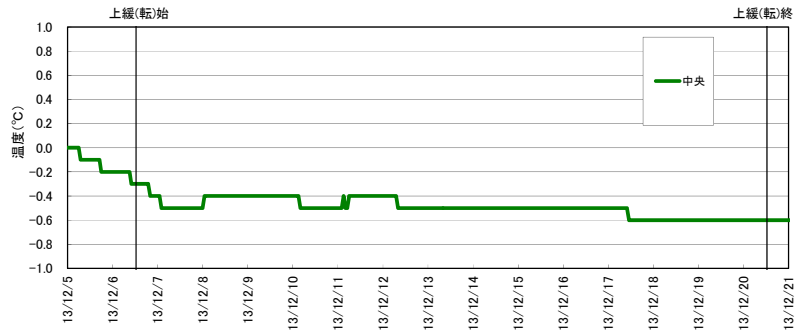
各ひずみについて以下に述べる。

- ・ 自由ひずみは、無応力計の計測値より算出されるひずみ量
(モルタル打設後は、温度ひずみ、乾燥収縮、自己収縮ひずみ、膨張ひずみの総和であるが、上部低拡散打設 (H24 年 12 月 3 日) から約 1 年経過しているため、温度ひずみ以外のひずみは収束していると考えられ、主に温度ひずみを計測している。)
- ・ 実ひずみは、ひずみ計の計測値より算出されるひずみ量
(無応力計の温度ひずみ、乾燥収縮、自己収縮ひずみ、膨張ひずみに、外力による弾性ひずみ、クリープひずみを加えた総和である。)
- ・ 拘束ひずみは、外力に対するひずみ量
(実ひずみから自由ひずみを差し引くことで算出され、外力による弾性ひずみとクリープひずみの総和であり、有効応力計の計測値と整合する。)

以上のように、上部低拡散材の各計器の経時変化の分析から、上部低拡散材の応力およびひずみの挙動は、空洞内気温の変化の影響を強く受けているが、上部緩衝材施工による振動転圧の影響は小さいものと考えられる。



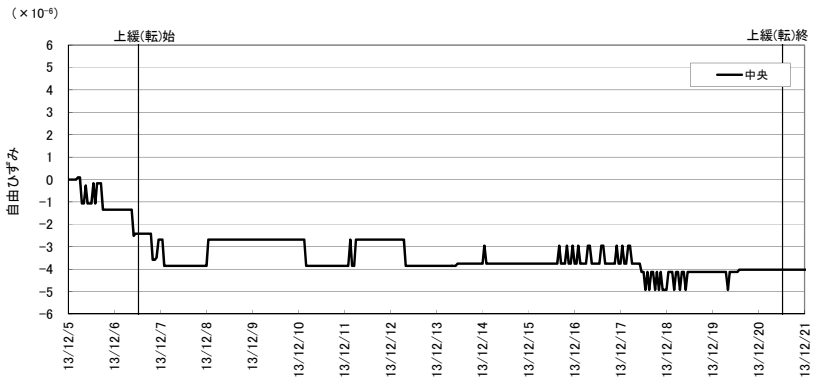
上部低拡散材の温度



(1) 温度

上部低拡散材 無応力計自由ひずみ(中央)

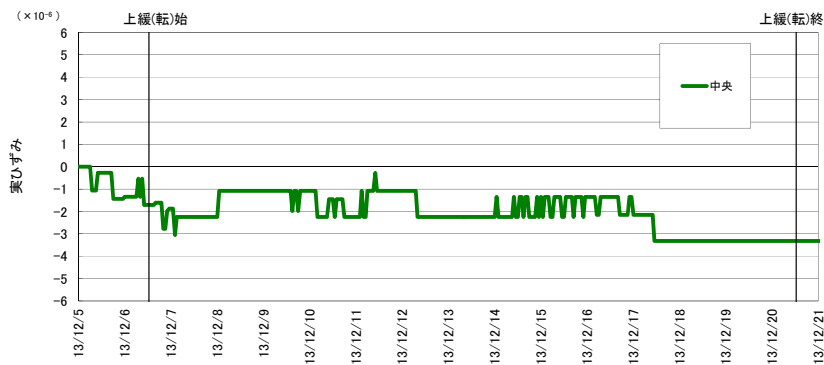
+ : 膨張、- : 収縮



(2) 自由ひずみ (無応力計の計測値)

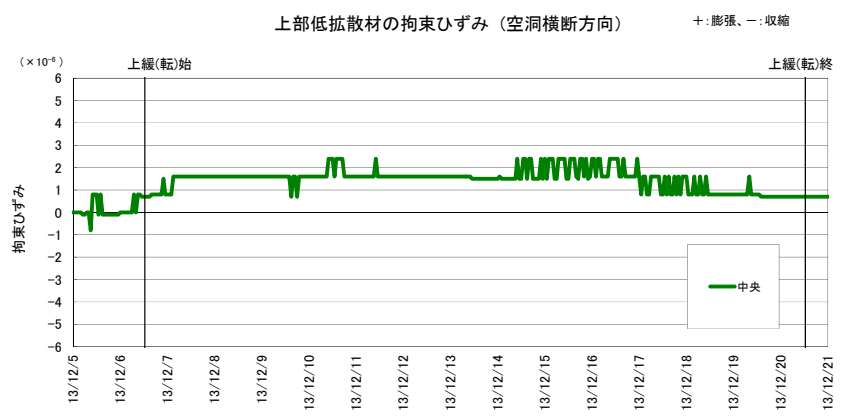
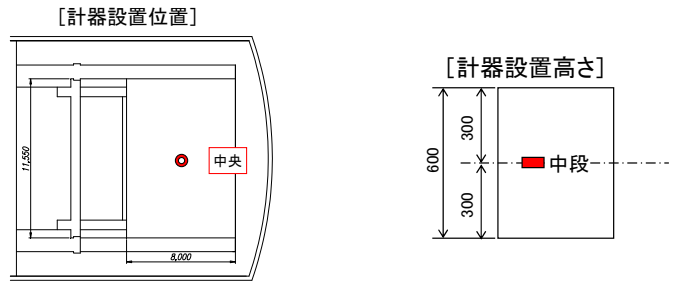
上部低拡散材の実ひずみ (空洞横断方向)

+ : 膨張、- : 収縮

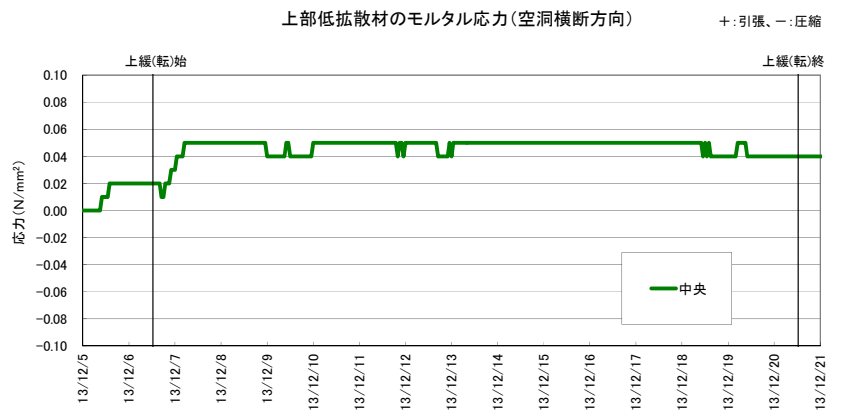


(3) 実ひずみ (ひずみ計の計測値)

図 8.3-7 上部低拡散材計測器の計測値



(4) 拘束ひずみ (実ひずみと自由ひずみの差分)



(5) 有効応力

※ (1) ~ (5) について、H25年12月5日の計測値を初期値 (ゼロクリア) とした。

図 8.3-8 上部低拡散材計測器の挙動

8.3.3 底部緩衝材計測結果の分析評価

【目的】

底部緩衝材の主な要求機能は、「建設・作業中の力学的安定性」である。底部緩衝材上において行われるコンクリートピットの構築、廃棄体定置作業等の上載荷重に対して、支持部材として十分な強度が要求される。

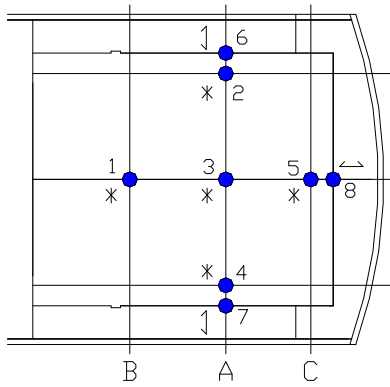
今年度の施工確認試験では上部緩衝材や上部埋戻し材を施工して、上載荷重が増加した。底部緩衝材に作用する土圧や沈下計による計測挙動を分析し、今年度施工に対する力学的安定性を確認する。

【まとめ】

- ・ 土圧計による土圧計測値は季節変動に伴い変動する。今年度に生じた土圧最大値は 0.20N/mm^2 で、H22 年度に確認された最大値 0.21N/mm^2 より小さい値であった。過年度の最大値 0.21N/mm^2 では、底部緩衝材の極限支持力 1.85N/mm^2 と比較して、安全率 8 程度が確保されている。
- ・ 今年度は、上部緩衝材、上部埋戻し材を施工して上載荷重が約 2.2MN （上載圧 0.01N/mm^2 ）が増されたが、H25 年 2 月 1 日の沈下量を基準とした今年度の最大沈下量は -0.09mm 程度と小さい。
- ・ 今年度には、上部緩衝材、上部埋戻し材の施工により、底部緩衝材上の上載荷重は約 2.2MN （上載圧 0.01N/mm^2 ）が増された。これに対して、土圧および沈下量の変化は、上載圧から推測される土圧量および 2 次元 FEM 弾性解析結果から推測される沈下量の範囲内であり、過大な土圧の作用や沈下は認められない。
- ・ 以上より、今年度の施工に対して、底部緩衝材は力学的健全性を確保されていると考えられる。

(1) 計測器配置と上載荷重

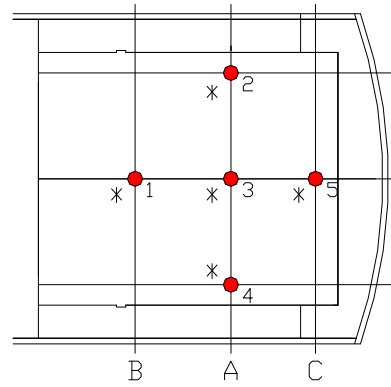
底部緩衝材には、図 8.3.9～図 8.3.10 に示すように、鉛直方向土圧測定のため底部埋戻し材界面に 5 箇所、側方土圧測定のため側部埋戻し材に 2 箇所、奥部埋戻し材に 1 箇所土圧計を設置している。また、沈下計は底部緩衝材上面に 5 箇所設置している。なお沈下計のうち空洞横断方向右側の計測器（B・T-4）は測定不良のため、分析の対象からはずした。



計器番号：B-D-○ (○は上記番号)

1~5：底部埋戻し材との界面
 6,7：側部 ↔ ↓：水平
 8：奥部 *：鉛直

(1) 土圧計

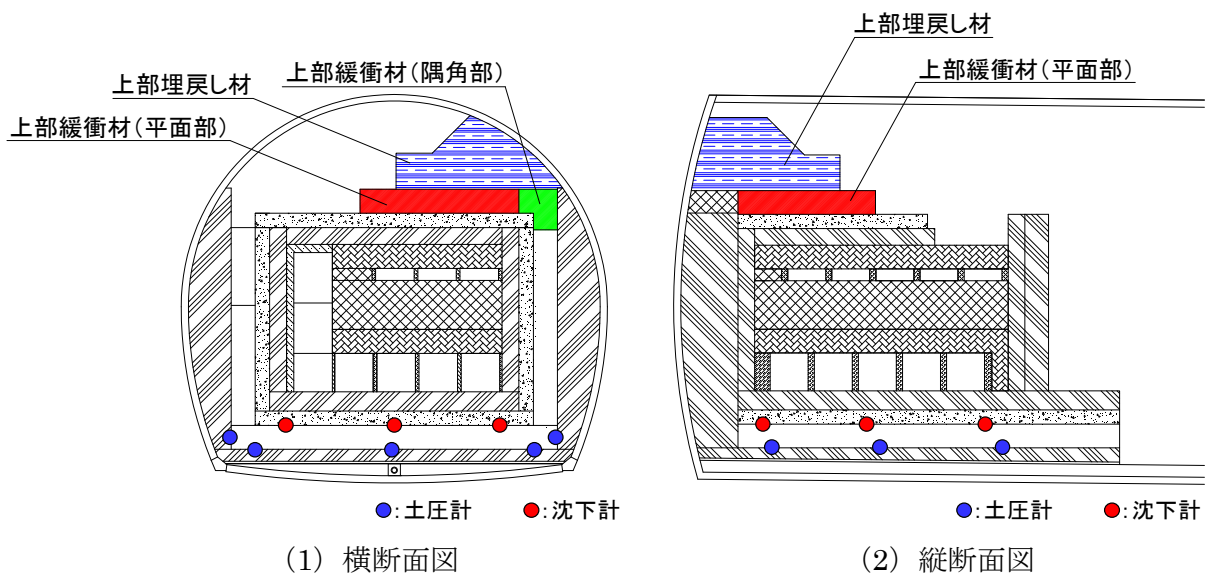


計器番号：B-T-○ (○は上記番号)

*：鉛直

(2) 沈下計

図 8.3-9 土圧計・沈下計設置位置図 (平面図)



(1) 横断面図

(2) 縦断面図

図 8.3-10 土圧計・沈下計設置位置図 (横断面図、縦断面図)

H19年度に実施した底部緩衝材施工から今年度施工試験終了時までの施工イベント毎の上載荷重を表 8.3-3 に示す。今年度の上部緩衝材と上部埋戻し材の施工によって、加増は約 2.2MN (上載圧 0.01N/mm²) で、上部埋戻し材施工終了時の累計重量は 39.19MN (累計上載圧 0.201N/mm²) である。

表 8.3-3 底部緩衝材の上載荷重一覧

施工年度	No.	部材	単位重量※3 (tf/m ³)	寸法			重量 (MN)	累計重量 (MN)	上載圧※1 (N/mm ²)	累計上載圧 (N/mm ²)
				幅	奥行き	高さ				
				(m)	(m)	(m)				
H19~20	1	底部緩衝材	1.993	13.6	16.1	1.0	4.27	4.27	0.020	0.020
H20	2	底部低拡散材	2.247	11.6	16.1	0.6	2.46	6.72	0.013	0.033
	3	底部CP	2.497	10.4	16.1	0.8	3.27	9.99	0.018	0.050
	4	奥部CP	2.497	10.4	0.7	6.8	1.21	11.20	0.007	0.057
	5	側部CP(左右)	2.497	0.7	10.7	6.8	2.51	13.71	0.013	0.070
H21	6	模擬廃棄体(25ヶ)	2.686	1.6	1.6	1.6	2.70	16.41	0.015	0.085
	7	手前部CP	2.497	11.6	0.7	7.4	1.47	17.89	0.008	0.093
	8	側部低拡散材(左右)	2.247	0.6	11.4	7.6	2.30	20.19	0.012	0.105
	9	充填材	2.267	※2			0.41	20.60	0.002	0.107
	10	上部充填材	2.391	7.1	10.7	1.0	1.77	22.37	0.010	0.117
	11	普通コンクリート①	2.300	7.1	10.7	2.0	3.47	25.84	0.019	0.136
H22	12	普通コンクリート②	2.300	-	-	-	0.27	26.11	0.001	0.137
	13	模擬廃棄体(6ヶ)	-	-	-	-	0.09	26.20	0.001	0.138
	14	模擬廃棄体打設	2.300	-	-	-	1.16	27.36	0.006	0.144
	15	充填材(鉛直)	2.267	-	-	-	1.65	29.01	0.009	0.153
	16	充填材(水平)	2.267	-	-	-	0.15	29.16	0.001	0.153
	17	上部充填材	2.391	7.1	10.7	1.0	1.77	30.93	0.010	0.163
	18	側部緩衝材(左右)	1.993	1.0	11.4	8.2	3.63	34.56	0.017	0.180
H24	19	上部コンクリートピット	2.497	7.6	9.0	0.7	1.17	35.73	0.005	0.185
	20	上部低拡散材	2.247	8.0	11.6	0.6	1.22	36.95	0.006	0.191
H25	21	上部緩衝材(隅角部)	1.965	-	-	-	0.25	37.20	0.001	0.192
	22	上部緩衝材(平面部)	-	-	-	-	0.63	37.83	0.003	0.195
	23	上部埋戻し材(吹付け)	-	-	-	-	0.56	38.39	0.003	0.197
	24	上部埋戻し材(転圧)	-	-	-	-	0.80	39.19	0.004	0.201

※1 重量を受面積で除して上載圧を算出している

(No.1: 底部緩衝材面積、No.2~17: 底部低拡散材面積、No.18~24: 底部低拡散材+側部緩衝材面積)

※2 充填材体積は、(廃棄体体積を含む充填材体積)-(廃棄体体積)より算出している

※3 コンクリートピットの単位重量は、コンクリート標準示方書の鉄筋コンクリートの単位重量としている

(2) 土圧挙動

H25年2月1日~H26年2月14日の土圧計測値の経時変化を図8.3.11~図8.3.12に示す。土圧挙動は季節変動をしており、図8.3.11で試験施設を横断方向でみたとき、施設中央の土圧変動幅が小さく、左右端部および側壁の土圧の変動幅が相対的に大きい傾向がある。これは、図8.3.13に示すように、H24年度の挙動傾向と同じである。また、今年度の施工は、図8.3.10に示すように、空洞の中心から右側で実施しており、底部緩衝材に偏荷重が作用することが考えられる。今年度の施工開始(H25年11月2日)からの、鉛直および水平方向の土圧変化量比較(A断面左右)を図8.3.14、図8.3.15に示す(H25年11月2日でゼロクリアしている)。これより、鉛直、水平方向ともに今年度の施工開始以降、土圧が増加している。左右で比較すると、鉛直、水平方向ともに右側の方が土圧変化量は大きく、左右の差分はH26年2月14日時点で、鉛直方向は0.016N/mm²、水平方向は0.012N/mm²となり、底部緩衝材に偏荷重が作用していることがわかる。

季節変動の例として、A断面中央の土圧計(B-D-3)とその付近に設置してある温度計(B-O-1)の今年度の計測結果から求めた、土圧計測値と温度計測値の関係を図8.3.16に示す。これより土圧計測値と温度計測値には負の相関が見られる。

今年度の各計器の土圧最大値とH25年2月1日からの増分を表8.3-4に示す。今年度の増分は最大0.002N/mm²と小さい。また、A断面左側の計器で最大値0.20N/mm²が確認されている。これまでに確認されている土圧最大値はA断面左側でH22年度の0.21N/mm²であり今年度の値と同等である。H22年度地下空洞型処分施設性能確認試験の施設・周辺岩盤挙動計測において、底部緩衝材の極限支持力を1.85N/mm²と設定[2]しており、現時点の支持力に対する安全率は8程度を確保している。

H20年2月15日の計測開始から今年度施工終了時(H26年2月14日)までに測定されたA

断面左右位置（B・D-2、B・D-4）の土圧計計測値の経年変化を図 8.3.17 に示す。両者とも、季節変動を繰り返しながら、上載荷重の増加に伴い増加し、上載荷重レベルとほぼ同じように変化する。図中の実荷重は、表 8.3-3 の累計上載圧である。左右位置（B・D-2、B・D-4）で比較すると、H22 年 9 月（図中の①）の側部緩衝材（右側）施工までは両者で同じトレンドで変動しているが、その後、H24 年 7 月（図中の②）の側部緩衝材（左側）施工までは両者の土圧変化が反転するような挙動を示す。これは施工イベントが、H22～23 年度で右側の側部緩衝材施工、その後 H23～24 年度で左側の側部緩衝材施工を実施しており、施工順序に伴い、本施設の季節変動の影響が左右で異なるためであると考えられる。H24 年 7 月の側部緩衝材（左側）施工後からは、左右の側部緩衝材の状態がほぼ同等となり、両者で同じトレンドを示すようになる。H26 年 2 月現在（図中の③）で左側（B・D-2）が右側（B・D-4）より 0.07N/mm^2 大きくなっている。

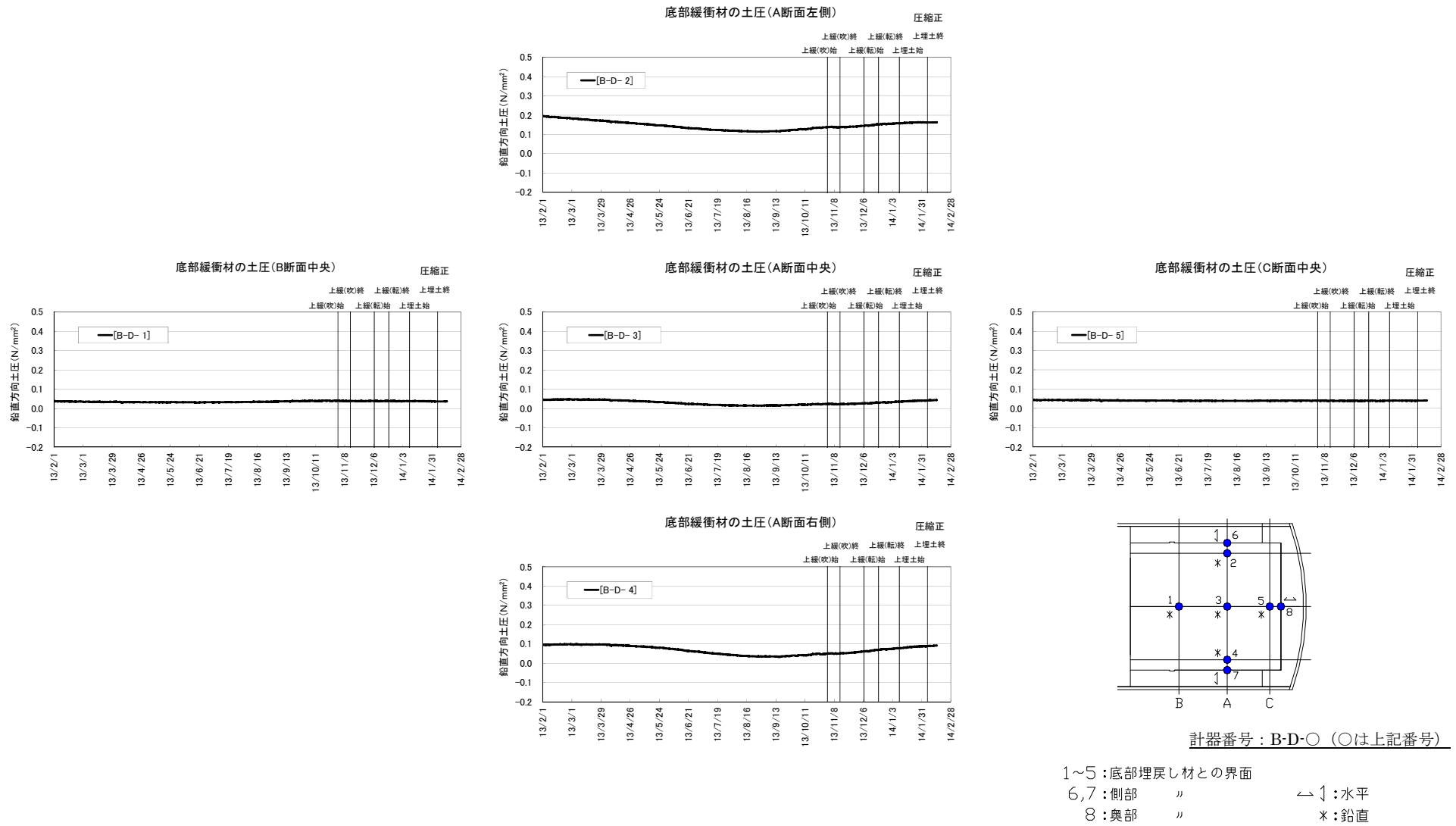
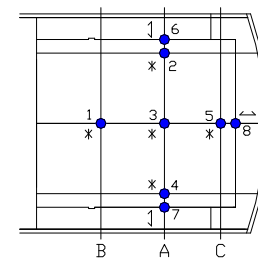
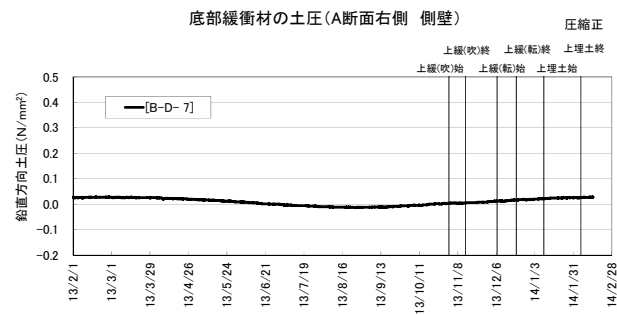
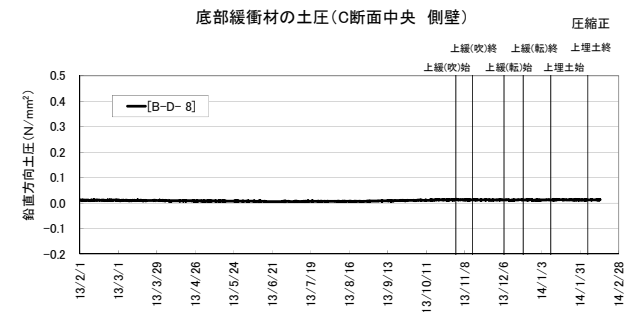
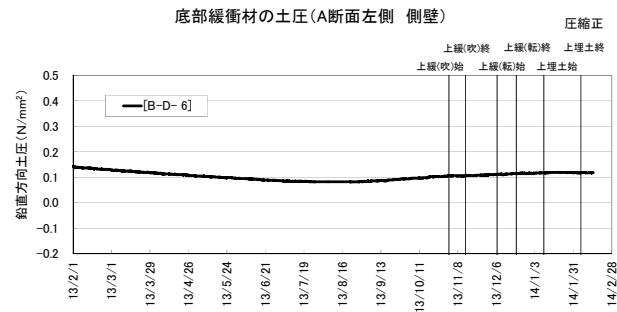


図 8.3-11 底部緩衝材 土圧計計測結果 (鉛直方向)



計器番号：B-D-○ (○は上記番号)

- 1~5：底部埋戻し材との界面
- 6,7：側部 ↔ ↓：水平
- 8：奥部 *：鉛直

図 8.3-12 底部緩衝材 土圧計計測結果 (水平方向)

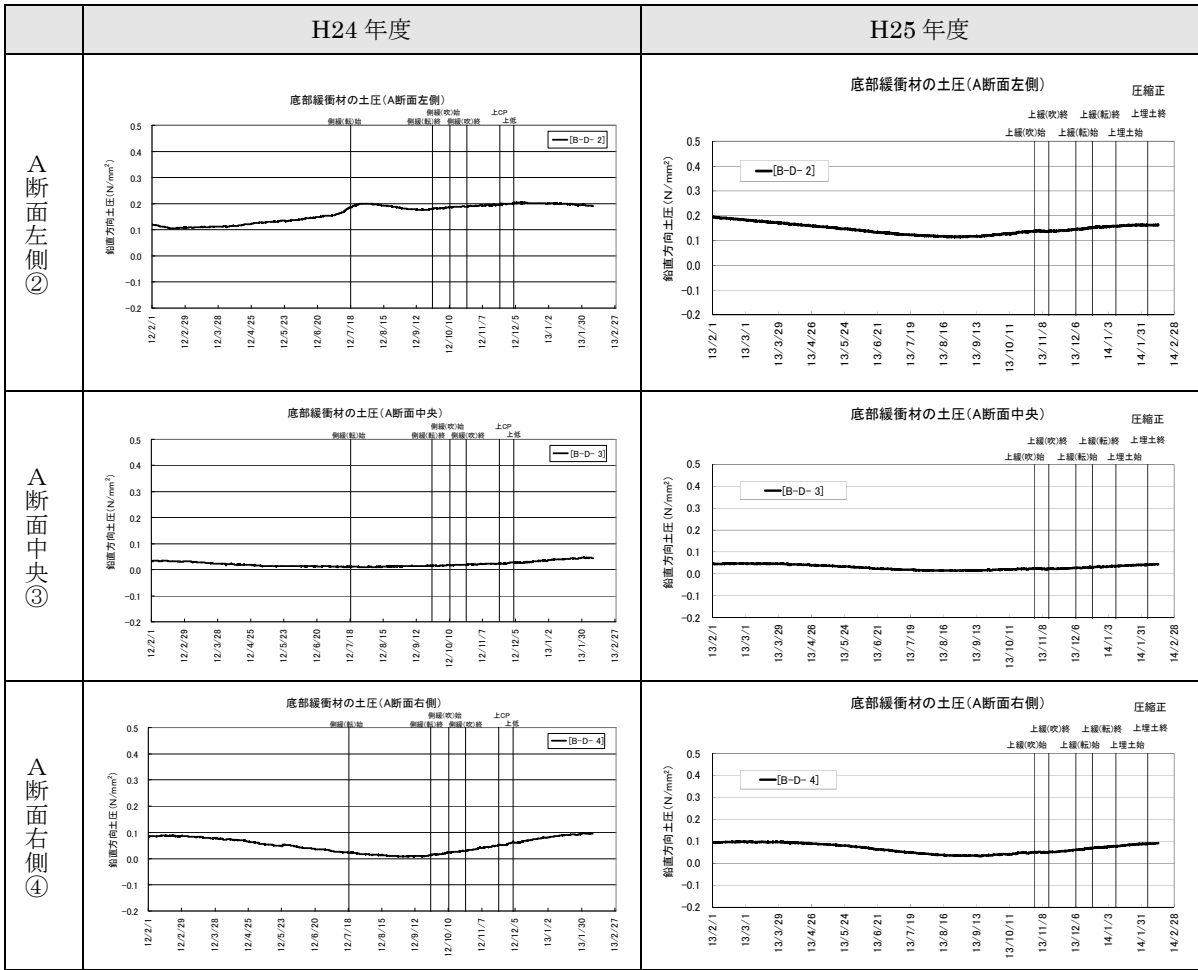


図 8.3-13 H24 年度と H25 年度の土圧計計測結果比較 (A 断面)

底部緩衝材の鉛直方向土圧変化量(A断面左右比較)

圧縮正

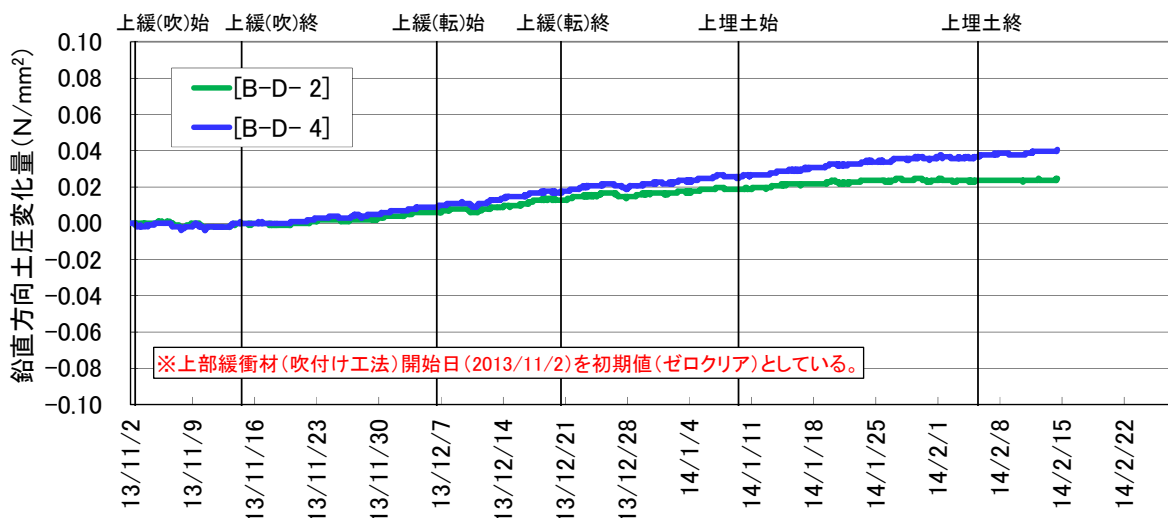


図 8.3-14 今年度施工後の鉛直方向土圧変化量比較 (A断面左右)

底部緩衝材水平方向の土圧変化量(A断面左右比較)

圧縮正

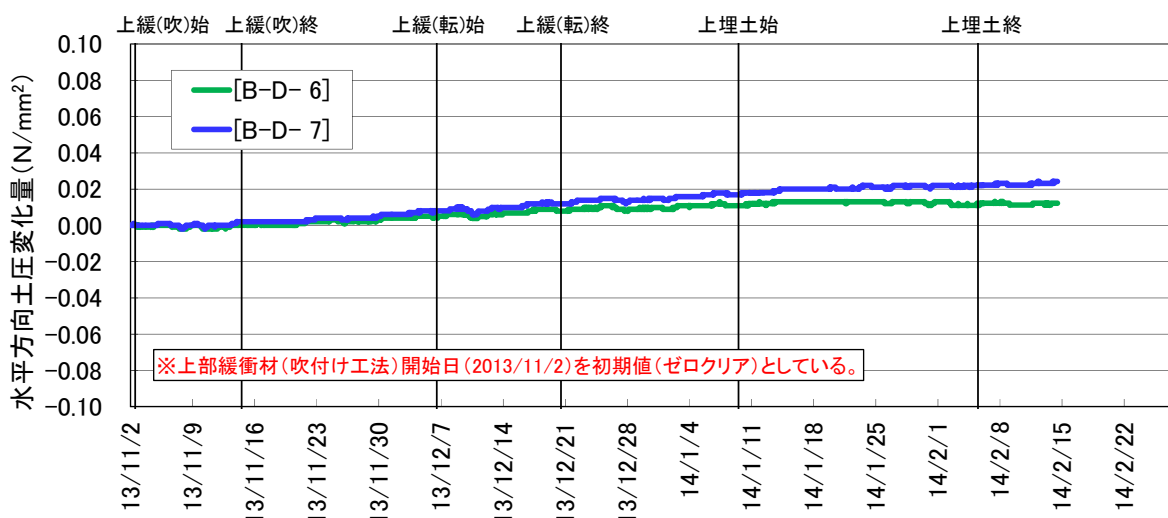


図 8.3-15 今年度施工後の水平方向土圧変化量比較 (A断面左右)

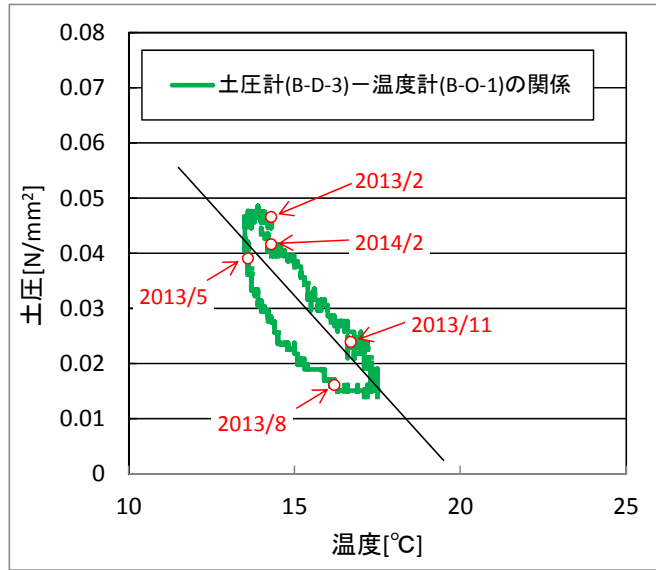


図 8.3-16 土圧計測値と温度計計測値の関係 (H25年2月1日～H26年2月14日)

表 8.3-4 最大土圧一覧 (H25年2月1日～H26年2月14日)

単位: N/mm^2

	鉛直土圧					水平土圧		
	B断面中央	A断面左側	A断面中央	A断面右側	C断面中央	A断面左側壁	A断面右側壁	C断面中央壁
	[B-D-1]	[B-D-2]	[B-D-3]	[B-D-4]	[B-D-5]	[B-D-6]	[B-D-7]	[B-D-8]
最大土圧(H25/2/1～H26/2/14)	0.041	0.197	0.049	0.099	0.046	0.143	0.029	0.015
H25/2/1の土圧	0.040	0.197	0.047	0.097	0.046	0.143	0.027	0.013
増分	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	0.002

底部緩衝材の土圧(A断面左右比較)

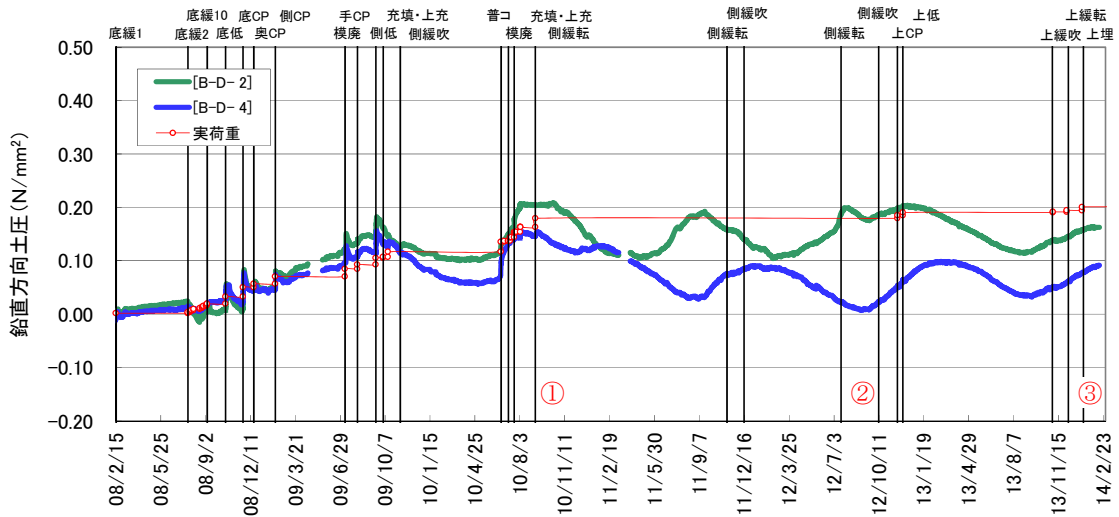


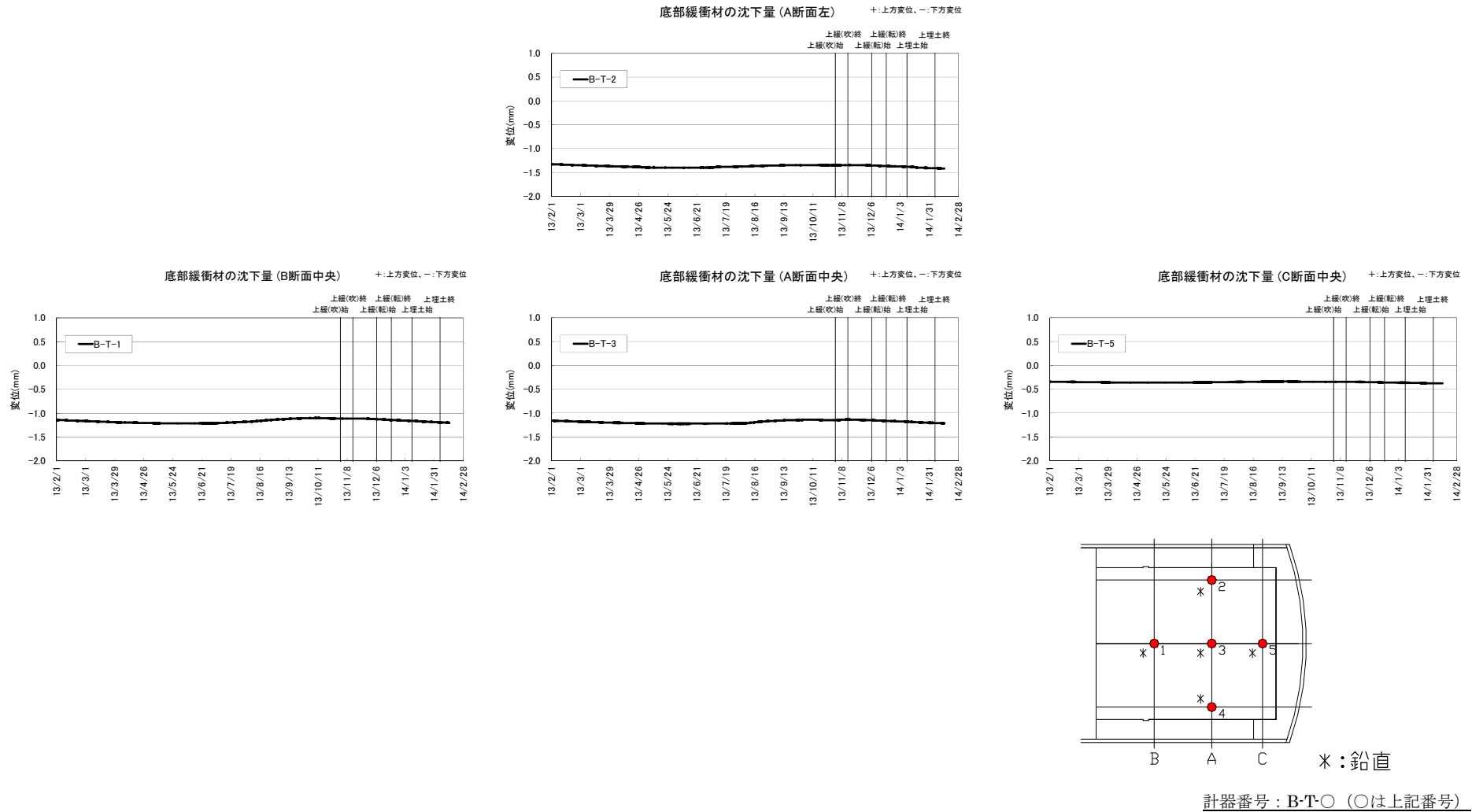
図 8.3-17 土圧計経年変化 (A断面左右、H20年2月15日～H26年2月14日)

(3) 沈下挙動

H25年2月1日～H26年2月14日の沈下計測値の経時変化を図 8.3.18 に、今年度の各計器の最大沈下量を表 8.3-5 に示す。図 8.3.18 に示すように、全体として季節変動しているものの、表 8.3-5 に示す位置ごとの沈下量をみると、H25年2月1日の沈下量を基準とした今年度の最大沈下量の増分は、 $-0.03\sim-0.09\text{mm}$ と小さい。各断面の中央計器の値による空洞軸方向の沈下量分布を図 8.3.19 に示す。施設奥側では、奥部埋戻し材などの周辺部材の拘束が大きいため、底部緩衝材の沈下を抑制していると想定される。C断面とA断面の間の水平距離（約4.3m）と沈下量の差（約0.9mm）から求めた底部緩衝材表面の傾きは約0.01度と小さく、上載荷重作用による底部緩衝材の沈下のばらつきは現時点で小さいといえる。季節変動の例として、A断面中央の沈下計（B-T-3）とその付近に設置してある温度計（B-O-1）の今年度の計測結果から求めた沈下計測値と温度計測値の関係を図 8.3.20 に示す。これより土圧計測値と温度計測値には正の相関が見られる。

H20年10月16日の計測開始から今年度施工終了時（H26年2月14日）までに底部緩衝材のA断面中央（B-T-3）で計測された沈下量の経年変化を図 8.3.21 に示す。同図には横断面2次元モデルのFEM解析結果の沈下量を併せて示した。解析に用いた緩衝材の弾性係数は、底部緩衝材で実施した平板載荷試験結果の最大値、最小値を用いている。実測の沈下量の変化傾向は解析結果と概ね整合している。ただし、実測の沈下量は上載荷重が一定の期間においても変動し、やがて収束する傾向を示しており、緩衝材のクリープ的な挙動が観測されている。

2次元FEM弾性解析での底部緩衝材沈下量[3]と今年度の計測値との比較を図 8.3.22 に示す。計測値（H26年2月14日のデータ）は、A断面左側1.4mm、A断面中央1.2mmであり、平板載荷試験結果の変形係数が最小値での解析結果に相当する値であった。計測値を説明できる解析の変形係数が、平板載荷試験結果の最小値となった理由としては、図 8.3.21 より、計測値に緩衝材のクリープ的な挙動が生じていることによると考えられる。



※A断面右側の計測器 (B・T・4) は計測不良のため、分析の対象から外した。

図 8.3-18 底部緩衝材 沈下計測結果

表 8.3-5 最大沈下量一覧 (H25年2月1日～H26年2月14日)

	単位: mm			
	B断面中央 [B-T- 1]	A断面左側 [B-T- 2]	A断面中央 [B-T- 3]	C断面中央 [B-T- 5]
最大沈下量(H25/2/1～H26/2/14)	-1.21	-1.42	-1.23	-0.38
H25/2/1の沈下量	-1.14	-1.33	-1.16	-0.34
増分	-0.08	-0.09	-0.07	-0.03

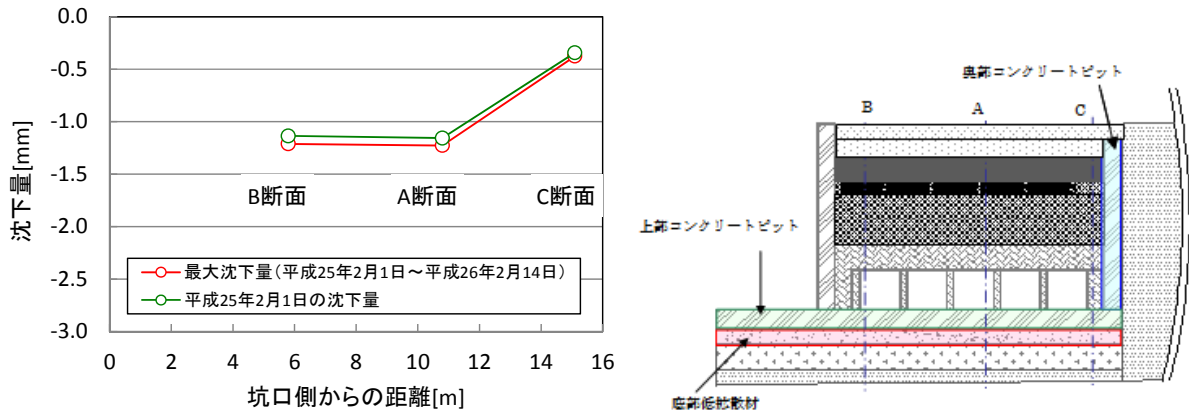


図 8.3-19 底部緩衝材沈下量分布 (空洞軸方向)

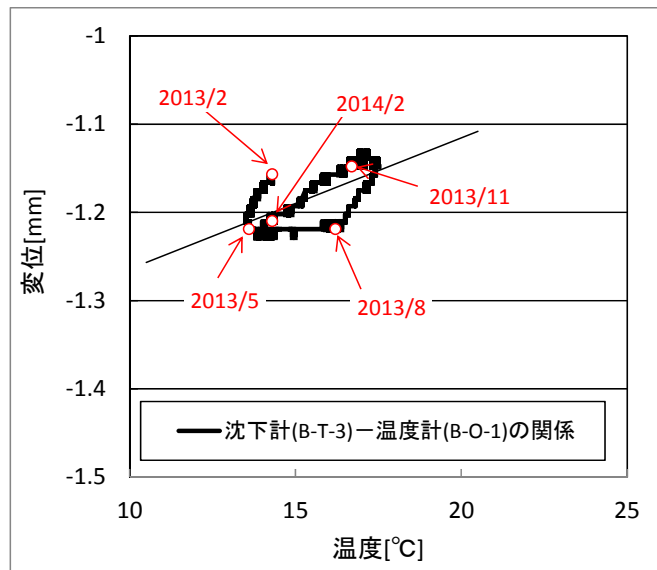


図 8.3-20 沈下計計測値と温度計計測値の関係 (H25年2月1日～H26年2月14日)

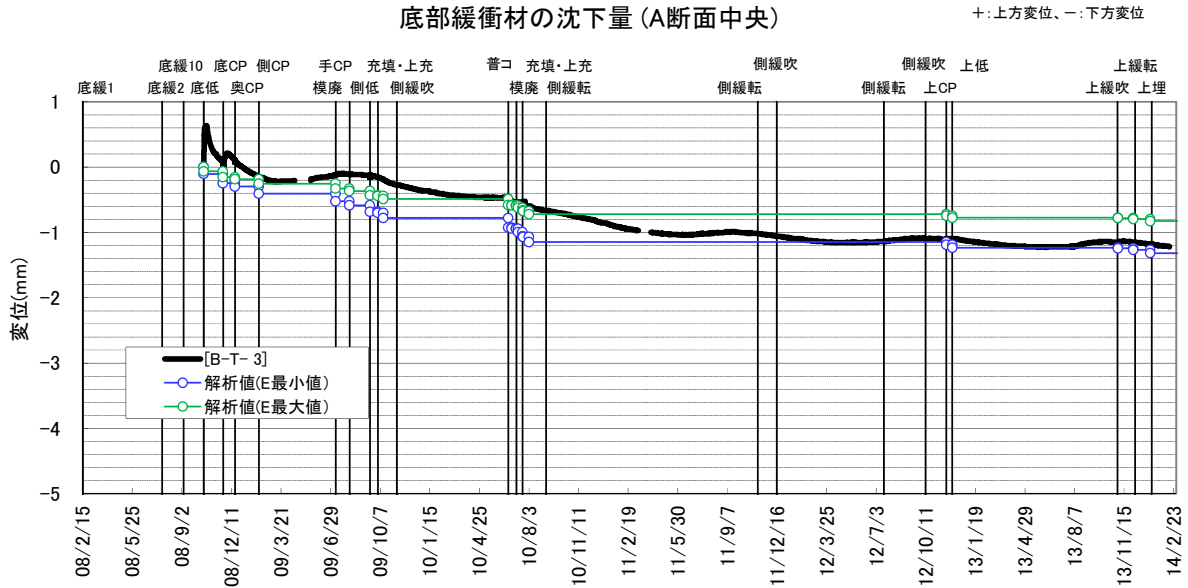


図 8.3-21 沈下計経年変化 (A断面中央)

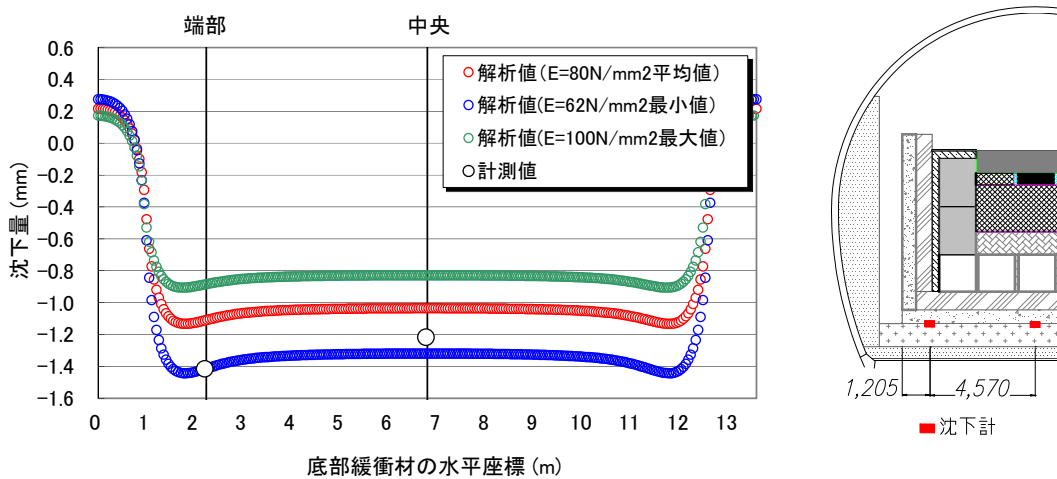


図 8.3-22 底部緩衝材沈下量の計測値と解析値の比較 (A断面)

【解析条件】

- FEM 弾性解析は、底部緩衝材を横断面方向 2 次元でモデル化、3 辺拘束とした。上載荷重は等分布荷重として緩衝材上面（底部低拡散材に接する面）に作用させた。
- 上載圧：0.165N/mm²（表 8.3-3 の累計上載圧から底部低拡散材に直接作用しない底部緩衝材および側部緩衝材の上載圧を除いた値）
- 緩衝材の変形係数は、H20 年度底部緩衝材施工確認試験での平板載荷試験結果を参照し（下記記載）、ポアソン比は H20 年度ベントナイト材料特性試験の一軸圧縮試験結果を参照して設定した（ $\nu = 0.39$ ）。

変形係数：平均 81.7N/mm²、最大値 100.0N/mm²、最小値 62.8N/mm²

試料数 9

(4) 温度変化

底部緩衝材の温度は2箇所計測を行っている。図 8.3.23 に示すように、手前部コンクリートピットより坑口側で1箇所 (B-O-2)、試験施設中央付近 (A 断面) で1箇所 (B-O-1) である。H20 年 10 月 16 日の計測開始から今年度施工終了時 (H26 年 2 月 14 日) までの経年変化を図 8.3.24 に示す。B-O-1、B-O-2 とともに季節変動を繰り返すが、B-O-1 は施工が進むにつれて季節変動量が B-O-2 より小さくなる傾向がある。また、今年度の温度経時変化を図 8.3.25 に示す。坑口側端部に近い B-O-2 は約 13.5℃~17.5℃の間で変動し、端部に近いため坑内気温の影響を受けている。一方、試験施設中央の B-O-1 は約 15℃~16.5℃であり変動は小さい。11 月 2 日~14 日の上部緩衝材 (隅角部) の施工開始時に、坑口側端部に近い B-O-2 で約 0.5℃の温度上昇が認められる。

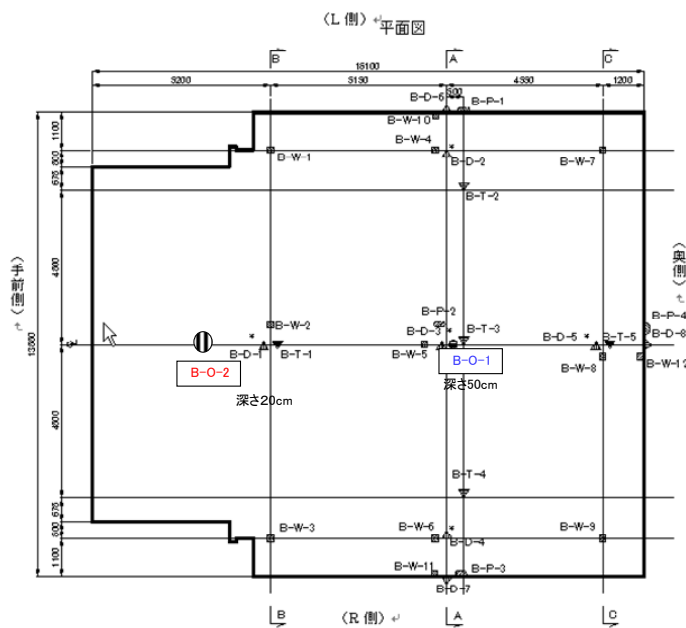


図 8.3-23 温度計設置位置

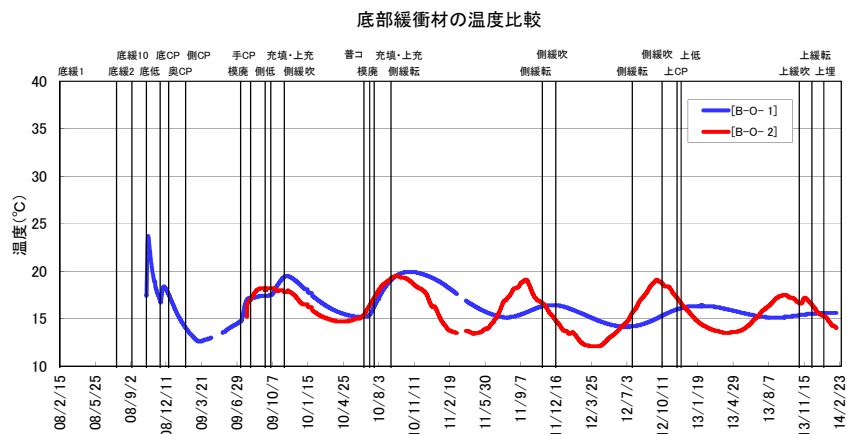


図 8.3-24 底部緩衝材の温度経年変化

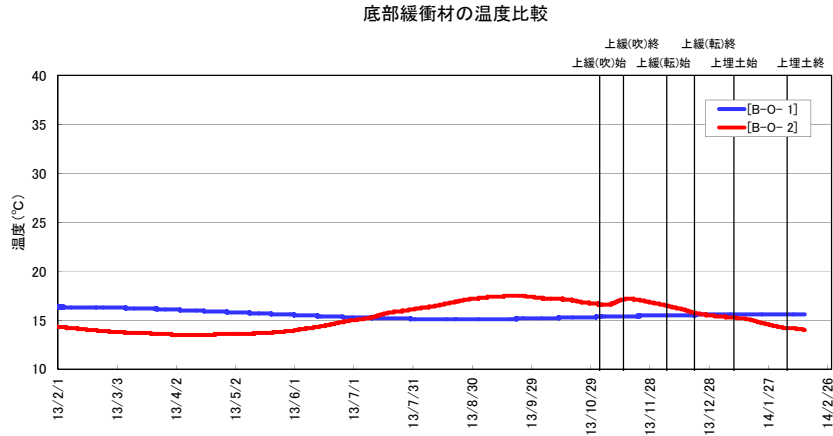


図 8.3-25 底部緩衝材の温度経時変化

(5) 水分変化

底部緩衝材の下部部材である底部埋め戻し材表面に設置した間隙水圧計では、今年度の間隙水圧の変化は認められず、底部緩衝材中の間隙水圧に変動はないといえる。代表例として A 断面中央設置計器 (B-P-2) の今年度の経時変化を図 8.3.26 に示す。

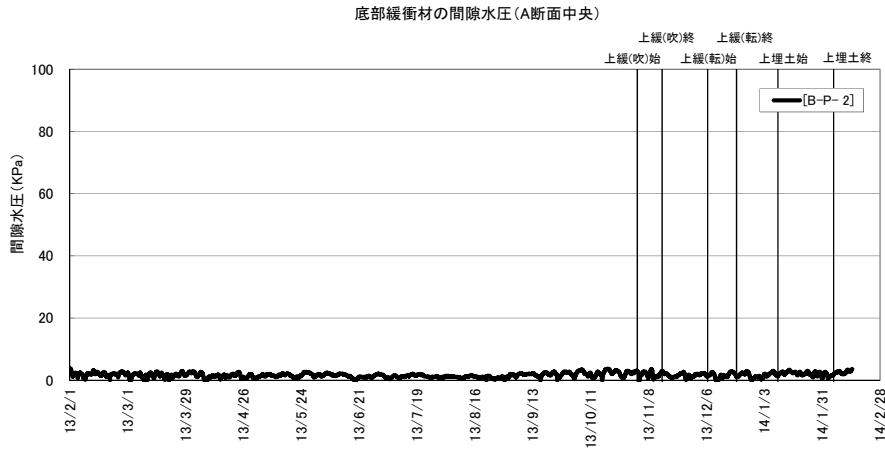
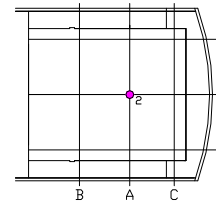


図 8.3-26 底部緩衝材の間隙水圧経時変化

8.3.4 その他の施設挙動計測結果の分析評価

【目的】

今年度の施工確認試験では上部緩衝材や上部埋戻し材を施工して、上載荷重が増加した。今年度施工に対する、周辺部材の力学的安定性を確認する。

【まとめ】

- ・ 上部低拡散材の計測結果より、温度、ひずみ、モルタル応力のいずれの計測結果も年間を通して空洞中の気温変化に応じた季節変動が支配している。
- ・ H25年11月2日～14日の上部緩衝材（吹付工法）の施工期間では、施工に伴う空洞内気温の上昇に伴い、上部低拡散材の温度、ひずみ、モルタル応力の計測結果が変動するが、施工終了後は年間の変動値に戻り、今年度の施工の影響は残存しない。
- ・ その他部材の計測結果も、上部低拡散材の計測結果と同様に、年間を通して空洞中の気温変化に応じた季節変動が支配し、今年度の施工の影響は残存しない。

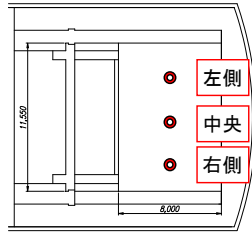
(1) 挙動計測結果と分析評価

挙動計測結果の代表として、今年度の施工部材（上部緩衝材、上部埋戻し材）に隣接している上部低拡散材の温度計測結果を図 8.3-26、ひずみ計測結果を図 8.3-27～図 8.3-28、モルタル応力計測結果を図 8.3-29 に示す。

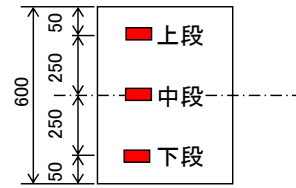
温度、ひずみ、モルタル応力のいずれの計測結果も、今年度の計測期間（H25年2月～H26年2月）を通して季節変動している。図 8.3.27～図 8.3.29 に示すように、温度計とひずみ計においては、計器を部材の上段、中段、下段に設置しており、空洞中の気温変化の影響を受けやすい部材表面側である上段計器が年間の変動量が大きいことがわかる。また、図 8.3.30 に示すように、部材中段に設置したモルタル応力計においても、気温変化に応じた応力変化が生じている。

H25年11月2日～14日の上部緩衝材（吹付工法）の施工期間では、施工に伴う空洞内気温の上昇に伴い、温度、ひずみ、モルタル応力の計測結果が変動するが、施工終了後は年間の変動値に戻り、今年度の施工の影響が残存しない結果となった。

その他部材の計測結果は、添付資料-7に示す。それらの計測結果も、上部低拡散材の計測結果と同様に、年間を通して空洞中の気温変化に応じた季節変動が支配している。また、空洞中の気温変化の影響を受けやすい部材表面側の計器は、今年度の施工に伴う温度変化の影響を受け、施工期間中には温度、ひずみ、応力等が変動するが、施工終了後は年間の変動値に戻り、今年度の施工の影響が残存しない結果となった。

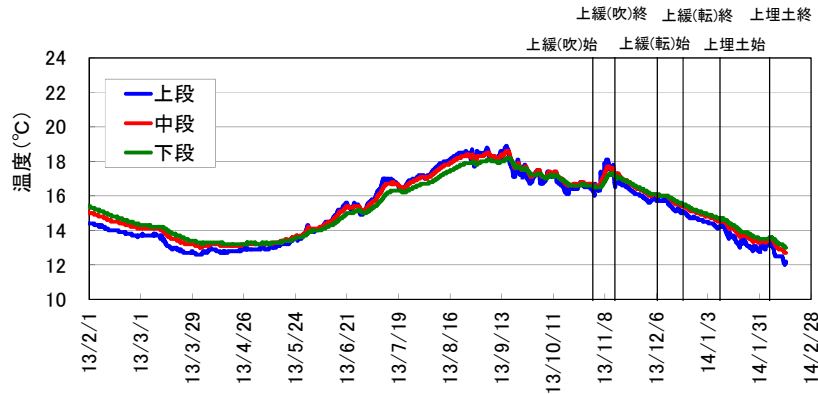


[計器設置位置(平面図)]

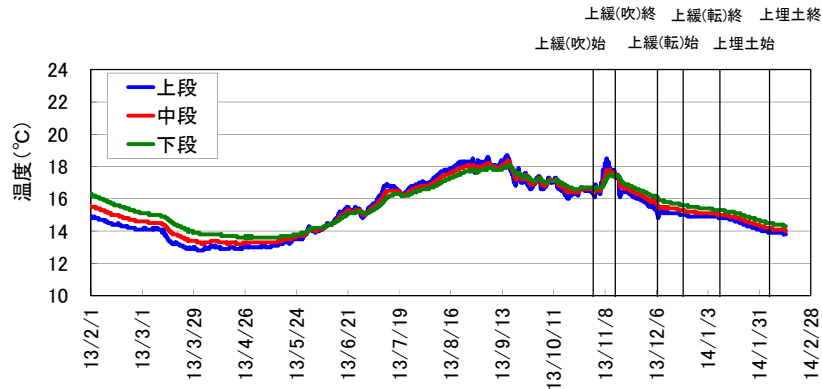


[計器設置高さ]

上部低拡散材の温度(左側)



上部低拡散材の温度(中央)



上部低拡散材の温度(右側)

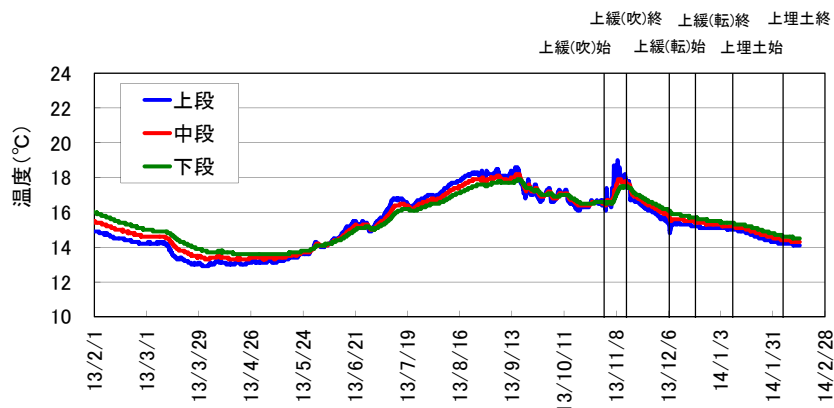
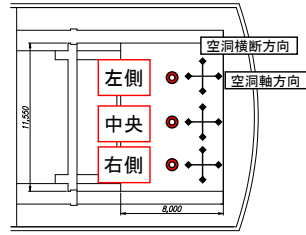
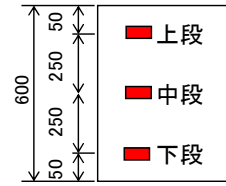


図 8.3-27 上部低拡散材の温度計測結果

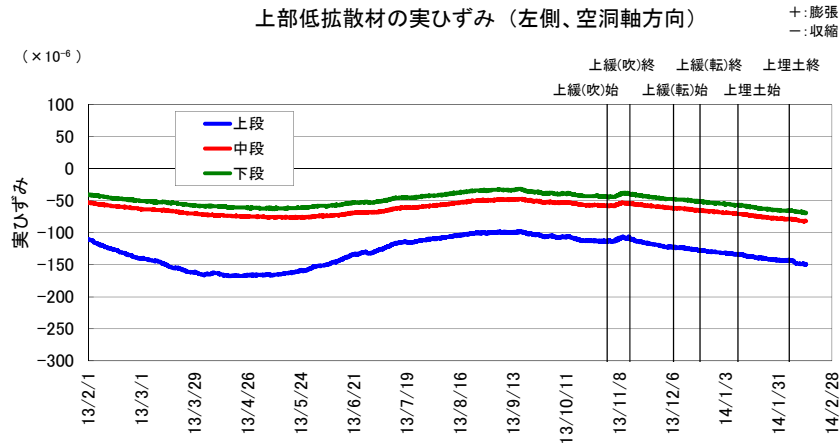


[計器設置位置(平面図)]

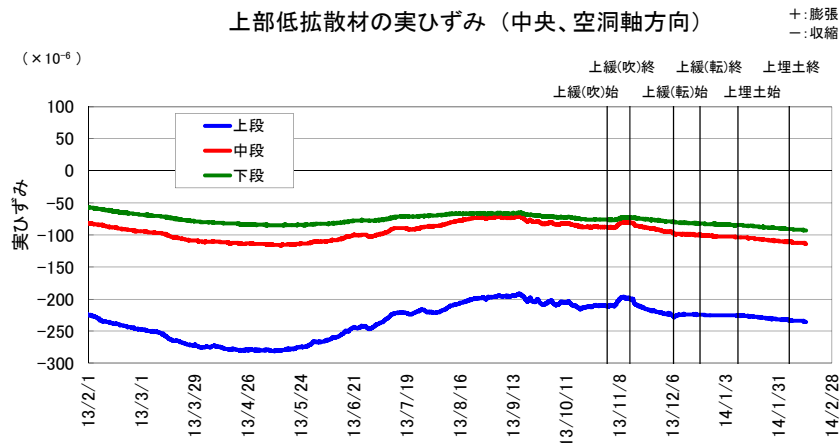


[計器設置高さ]

上部低拡散材の実ひずみ (左側、空洞軸方向)



上部低拡散材の実ひずみ (中央、空洞軸方向)



上部低拡散材の実ひずみ (右側、空洞軸方向)

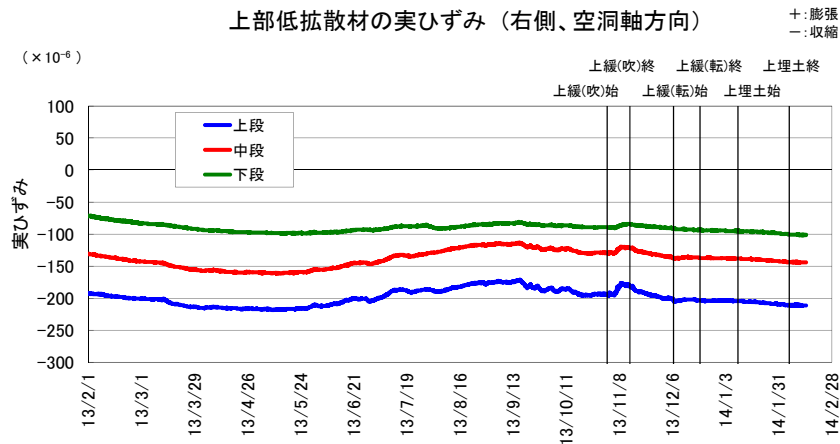
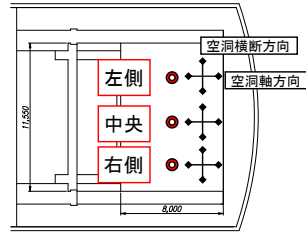
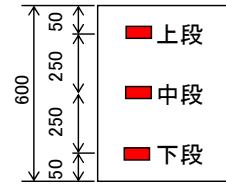


図 8.3-28 上部低拡散材のひずみ計測結果 (空洞軸方向)



[計器設置位置(平面図)]



[計器設置高さ]

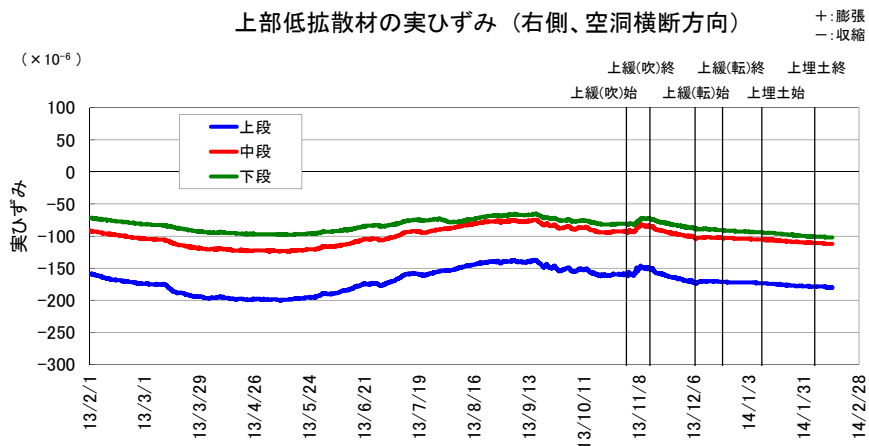
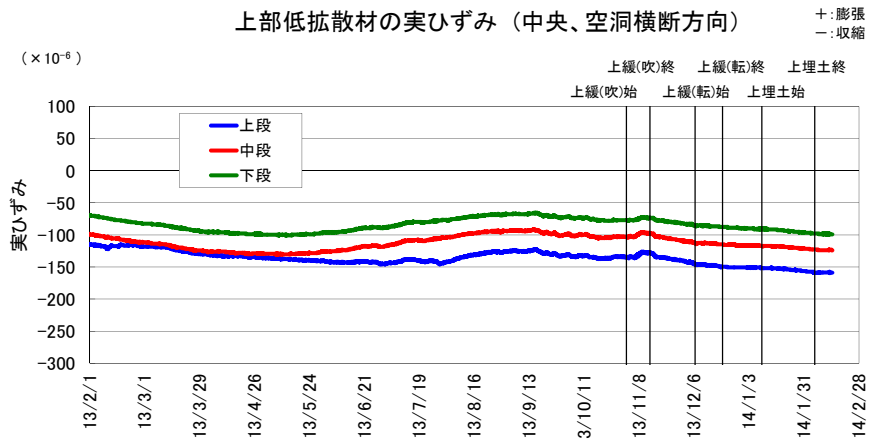
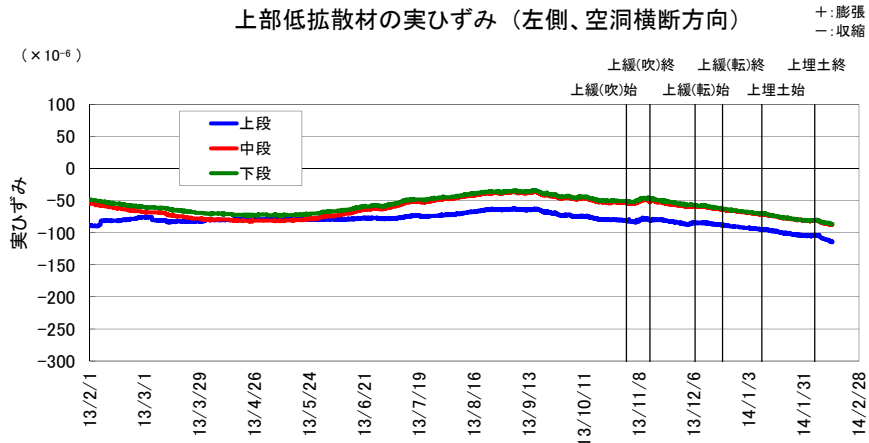
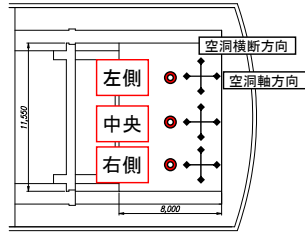
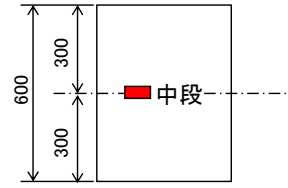


図 8.3-29 上部低拡散材のひずみ計測結果 (空洞軸直交方向)



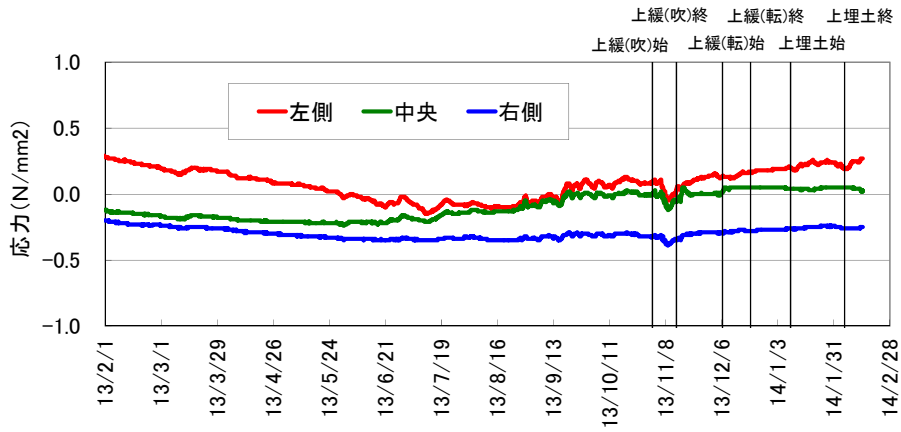
[計器設置位置(平面図)]



[計器設置高さ]

上部低拡散材のモルタル応力(空洞軸方向)

+ : 引張、- : 圧縮



上部低拡散材のモルタル応力(空洞横断方向)

+ : 引張、- : 圧縮

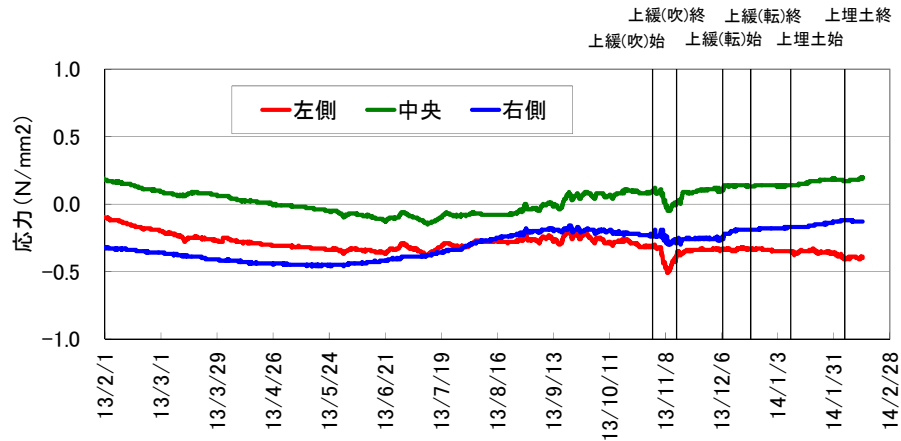


図 8.3-30 上部低拡散材のモルタル応力計測結果

8.3.5 周辺岩盤挙動計測結果の分析評価

【目的】

施工中および施工後の施設周辺岩盤の力学・水理挙動を計測して、施設建設が周辺岩盤に与える影響の程度を把握する。

【まとめ】

- 今年度、上部緩衝材、上部埋戻し材の施工により上載荷重は変化したが、計測結果によると今年度期間中の岩盤変位の変化は最大 0.06mm 程度と小さい。
- 今年度の施工期間を通じて、間隙水圧の変動はわずかである。

本節では、H18 年度に設置した岩盤変位計および間隙水圧計による計測結果を収集・整理して、計測結果より上記の施工に伴う岩盤挙動についての評価を行った。岩盤変位計の計測位置を図 8.3.31 に、間隙水圧計の設置位置および計測区間を図 8.3.32、表 8.3-6 に示す。

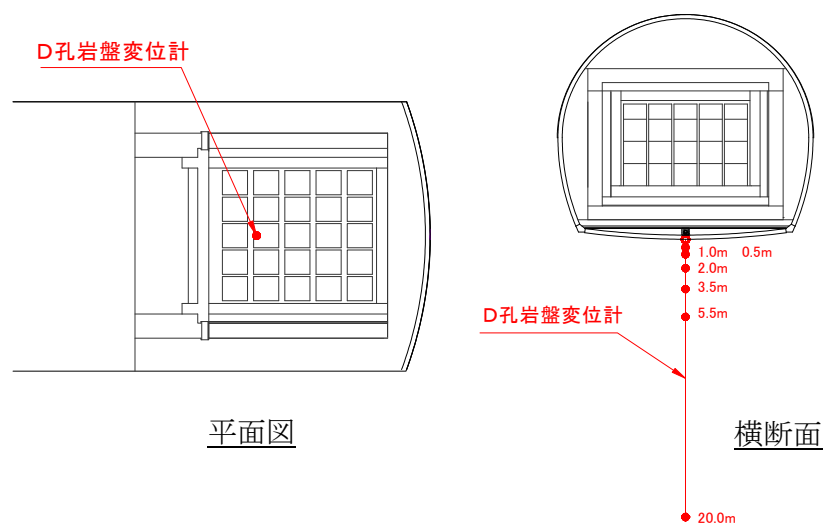


図 8.3-31 D孔岩盤変位計位置図

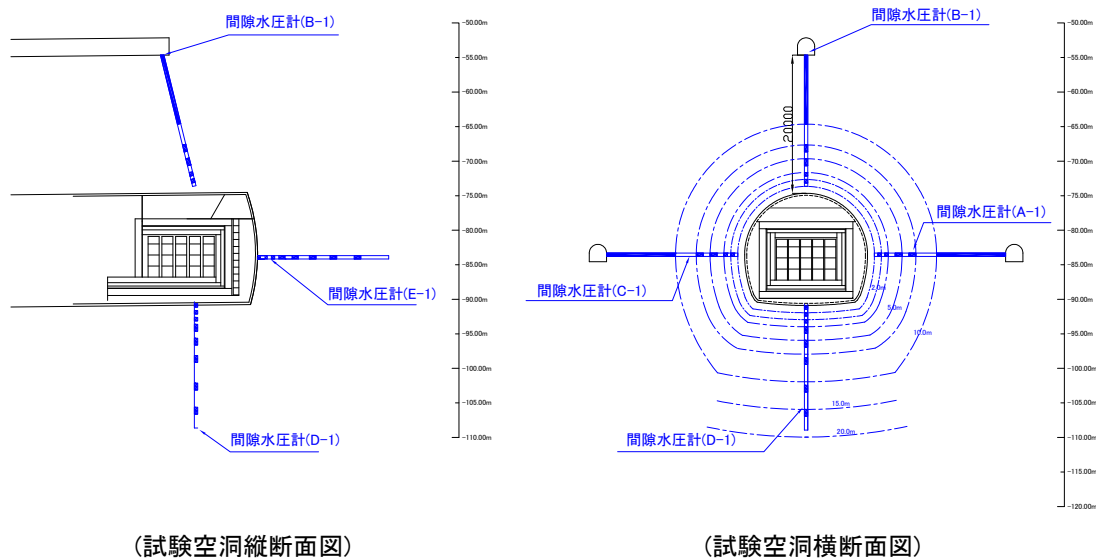


図 8.3-32 間隙水圧計位置図

表 8.3-6 間隙水圧計計測区間一覧

	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1
①区間	10.00 ~ 12.50	10.00 ~ 12.50	10.00 ~ 12.50	0.50 ~ 1.00	0.50 ~ 1.00
②区間	13.50 ~ 15.00	13.50 ~ 15.00	13.50 ~ 15.00	1.50 ~ 2.00	1.50 ~ 2.00
③区間	16.00 ~ 17.00	16.00 ~ 17.00	16.00 ~ 17.00	2.50 ~ 3.00	2.50 ~ 3.00
④区間	17.50 ~ 18.00	17.50 ~ 18.00	17.50 ~ 18.00	4.00 ~ 5.00	4.00 ~ 5.00
⑤区間	18.50 ~ 19.00	18.50 ~ 19.00	18.50 ~ 19.00	6.00 ~ 7.50	6.00 ~ 7.50
⑥区間	/	/	/	8.50 ~ 10.50	8.50 ~ 10.50
⑦区間				11.50 ~ 14.00	11.50 ~ 14.00
⑧区間				15.00 ~ 19.00	15.00 ~ 19.00

(1) 岩盤変位

H25年2月1日からH26年2月14日までの岩盤変位計の各測定深度における変位経時変化を図 8.3.33 に示す。両日における岩盤変位分布図を図 8.3.34 に示す。これより、H26年2月14日時点での岩盤変位は、沈下挙動を呈し、最大1.07mm（深度0.5m）であり、BTVで確認された岩盤内の割れ目近傍で大きくなっている。また、H25年2月1日からH26年2月14日の間の岩盤変位の変化は最大で0.06mmと小さく、計器の測定精度（±0.70mm）と同等である。

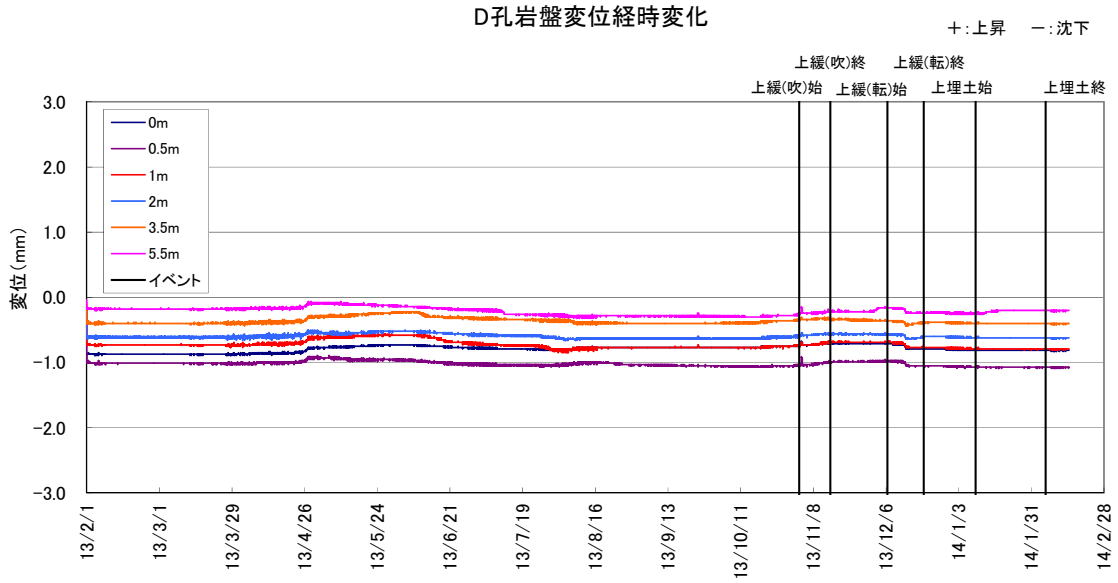


図 8.3-33 D孔岩盤変位計経時変化図

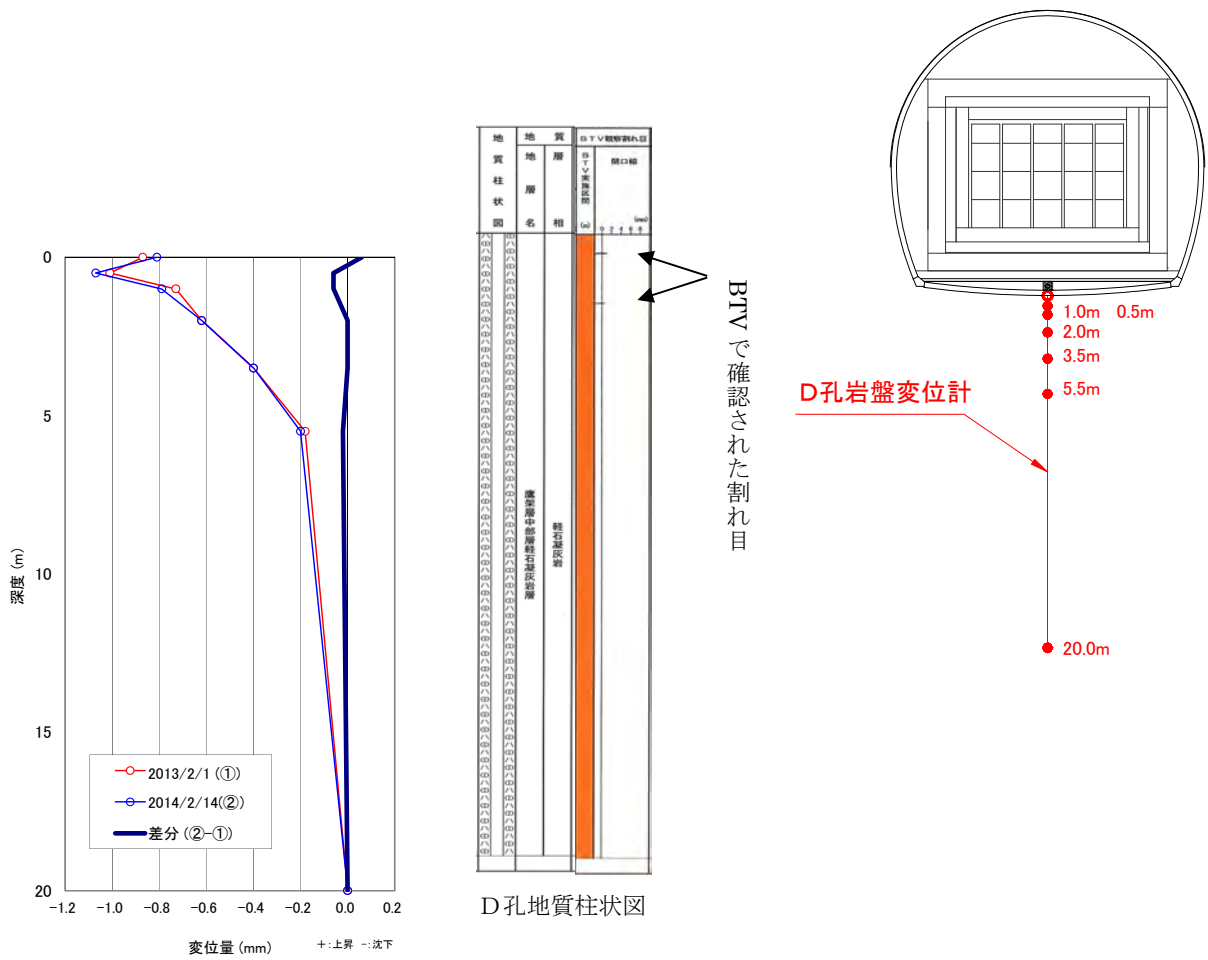


図 8.3-34 D孔岩盤変位計経時分布

(2) 岩盤内間隙水圧

間隙水圧計の計測値の経時変化を全水頭で図 8.3.35～図 8.3.36 に示す。B-④、D-④、E-④のセンサーは過年度に故障しており、今年度は代替機による計測を実施し（H25年10月30日、H26年1月27日）、グラフには○印でプロットした。今年度の施工は、上部緩衝材、上部埋戻し材を実施したが、施工期間を通じて、今年度の計器点検（H25年12月3日～5日）で計器故障または計器不良の可能性があると判定された計器（計器故障：C-②、C-④、E-⑤、計器不良の可能性有り：A-①、B-②、C-③、E-⑥）を除くと、施工期間中の間隙水圧の変動はわずかであり、試験空洞内施設の施工の影響を受けていないと考えられる。また、1年を通して間隙水圧の上昇傾向が認められないことから、防水シート背面の裏面排水工が機能していると考えられる。なおD-②が上記の計器点検（H25年12月3日～5日）の前後に全水頭が1.2m減少したが、その後出力値が安定し、H26年2月時点では計器点検前の全水頭値と同等となっている。

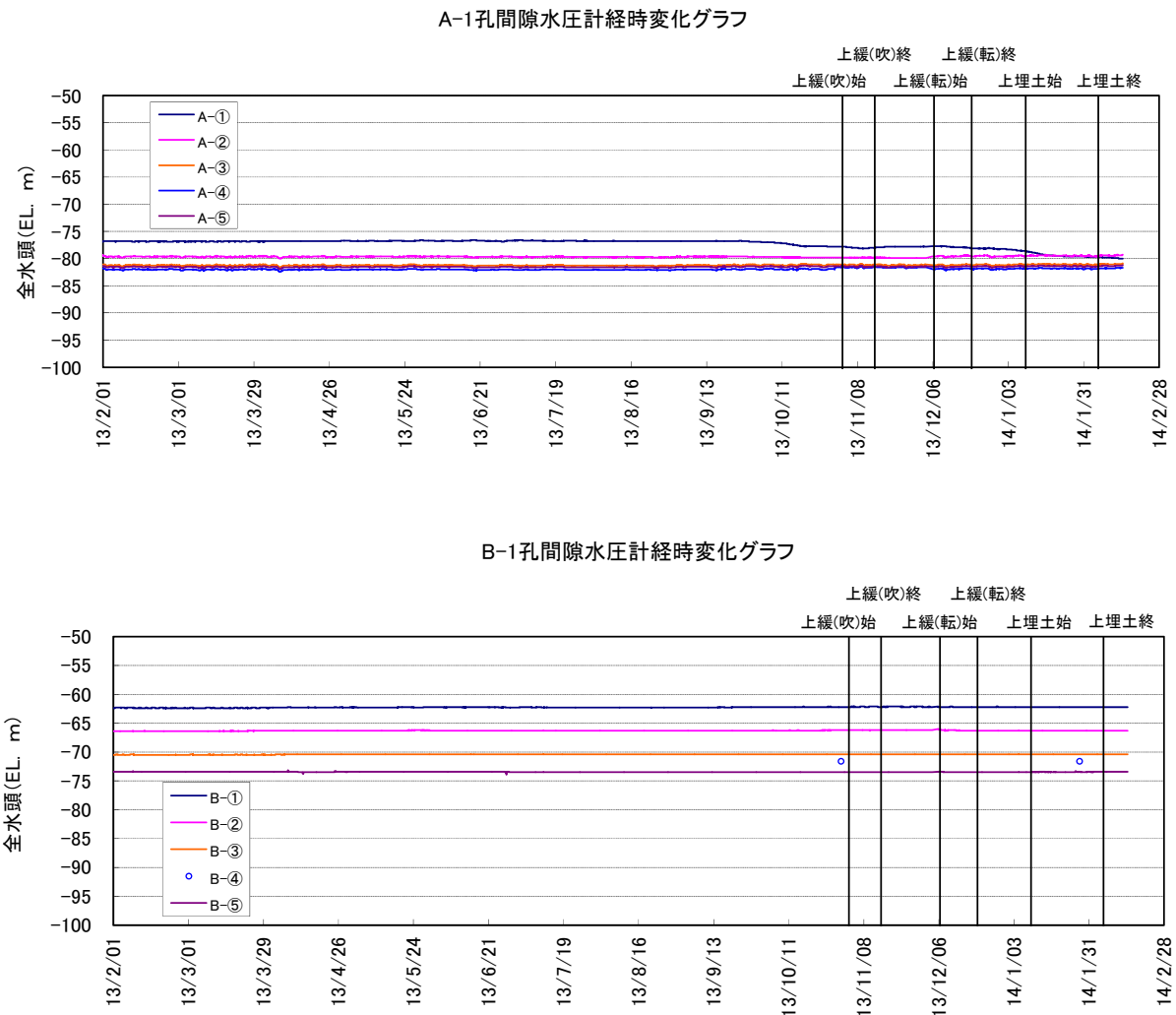
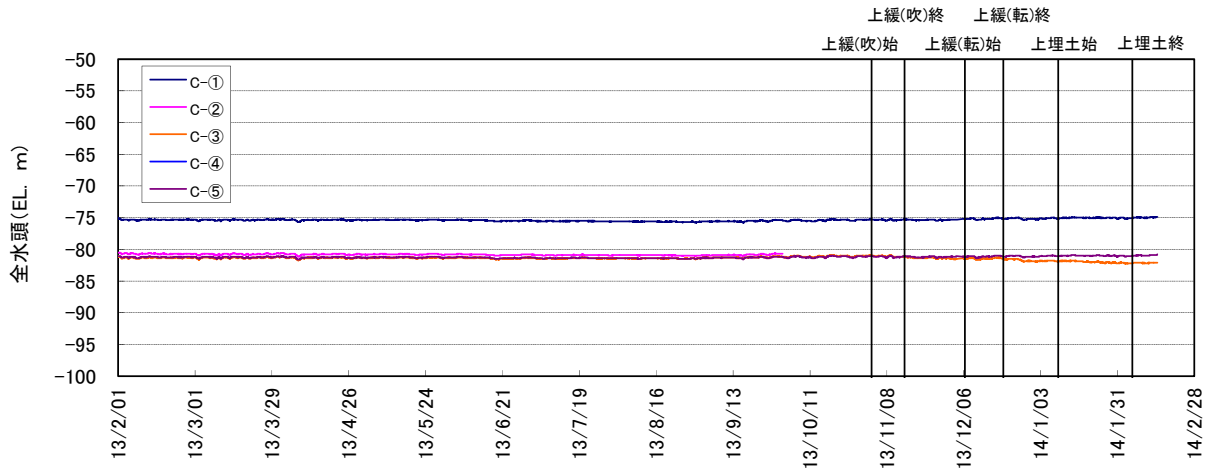
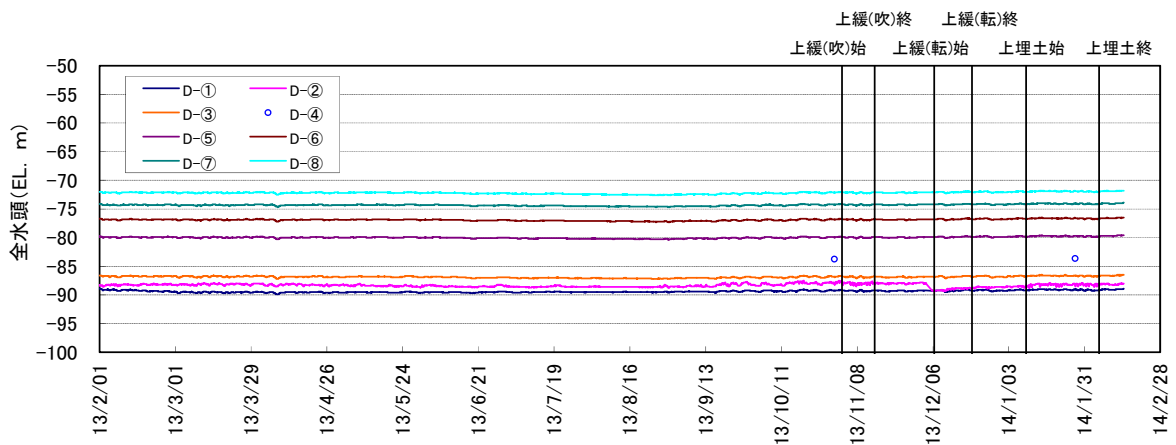


図 8.3-35 間隙水圧経時変化（A、B 孔）

C-1孔間隙水圧計経時変化グラフ



D-1孔間隙水圧計経時変化グラフ



E-1孔間隙水圧計経時変化グラフ

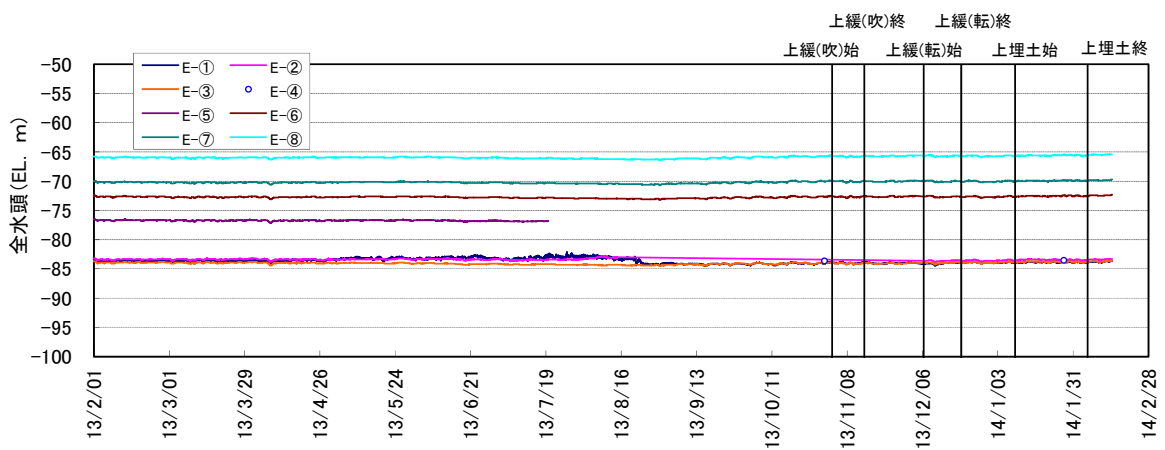


図 8.3-36 間隙水圧経時変化 (C、D、E 孔)

8.3.6 地震観測結果の分析評価

【目的】

本試験施設の地震時挙動を把握することを目的に、試験施設に設置した地震計の観測データを整理し、施設の挙動を分析評価する。

【まとめ】

- ・ 今年度の計測期間中（H25年10月23日～H26年2月26日）に観測できた地震動は3回あった。
- ・ 観測データは、試験施設の3次元的構造の特徴が出ており、水平方向（空洞軸方向、空洞横断方向）は空洞基盤から入った地震動が試験施設内で増幅し、鉛直方向（z方向）は増幅が小さくなっている。空洞軸方向と空洞横断方向で比較すると、空洞軸方向の方が増幅が大きい傾向がある。
- ・ 試験施設の増幅が卓越する振動数帯は、空洞軸方向は16～18Hz付近、空洞横断方向は15～20Hz付近であり、H24年度実施のPhase4（埋戻し直後）の解析結果と傾向が類似している。
- ・ 試験空洞底盤の地震計①（標高約-94m）とKiK-net六ヶ所（標高-96.54m）の観測データのフーリエスペクトルを比較すると、0～3Hz程度の低振動数帯では地震計①とKiK-net六ヶ所は近い値となっている。3Hz以上では、両者のフーリエスペクトル値は乖離し、試験空洞の方が大きくなる傾向を示す。この乖離は、KiK-net六ヶ所では地震計を観測井に設置しているのに対して、本検討の地震計①は試験空洞底盤に設置しており、試験空洞の構造物としての振動特性が含まれていることが主たる原因であり、その他、試験空洞とKiK-net六ヶ所の地質・地層構成の違いも原因と考えられる。

(1) 最大加速度

観測地震動の最大加速度一覧を表 8.3-7 に、また計測方向毎の最大加速度比較を図 8.3.37～図 8.3.39 に示す。3回の地震のうち、H25年11月15日の地震動の加速度が、全計器で4.1～6.7Galの最大値となっている。

表 8.3-7 観測地震動の最大加速度一覧

計器名称	計測高さ* [m]	計測方向	最大加速度[Gal]		
			10/26	11/15	12/27
地震計①	0	x	3.3	5.4	2.1
		y	3.1	6.7	2.3
		z	2.8	4.1	1.8
地震計②	2.9	x	3.2	4.8	2.7
		y	3.1	6.3	2.7
		z	3.1	5.1	2.5
地震計③	10.34	x	3.5	6.2	2.8
		y	3.5	6.4	2.9
		z	3.3	5.2	2.5

*地震計①の高さを基準とした。

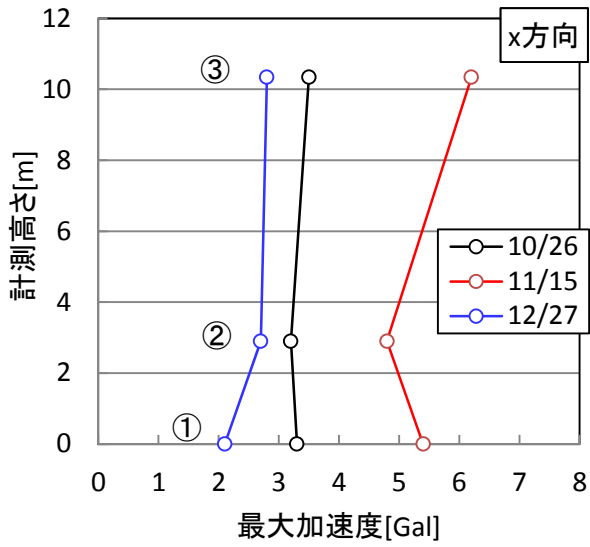
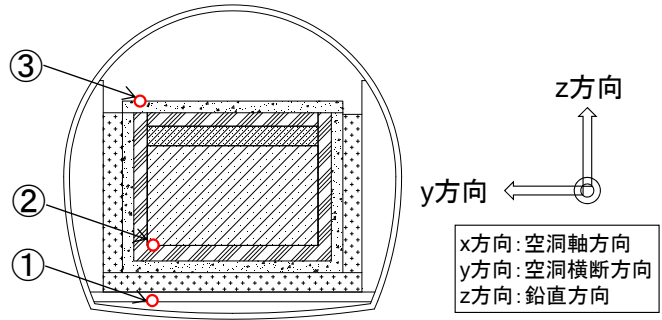


図 8.3-37 x 方向の最大加速度比較

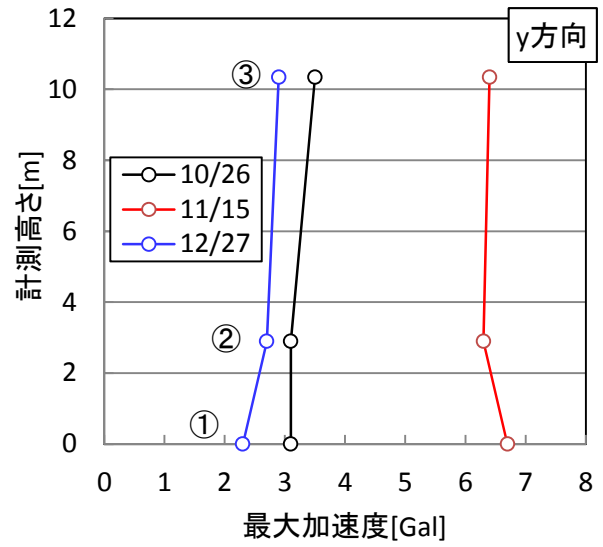


図 8.3-38 y 方向の最大加速度比較

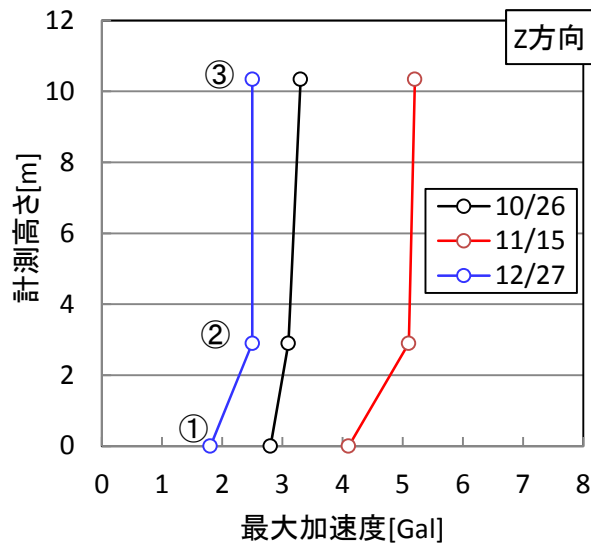


図 8.3-39 z 方向の最大加速度比較

*地震計①の高さを基準とした。

(2) フーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比

観測地震動のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比を図 8.3.40～図 8.3.42 に示す。フーリエスペクトル比より、水平方向（x、y 方向）は空洞基盤から入った地震動が試験施設内で増幅し、鉛直方向（z 方向）は増幅が小さいことがわかる。x 方向と y 方向で比較すると、x 方向の方がフーリエスペクトル比は大きい傾向がある。これは表 8.3-8 に示すような試験施設の 3 次元的構造の特徴が影響しているものと考えられる。

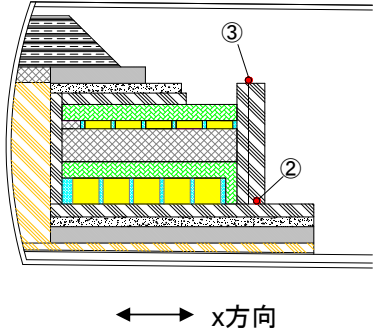
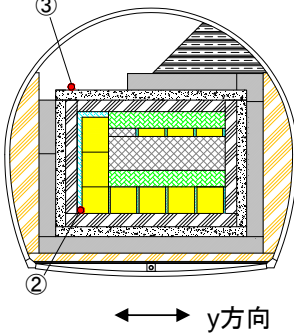
また、底盤の地震計①を基準とした地震計②および③のフーリエスペクトル比が卓越する振動数帯は、x 方向は 16～18Hz 付近、y 方向は 15～20Hz 付近である。比較として、H24 年度実施の「地震による埋設施設への影響評価」の地震応答解析より、本検討と比較的形状に近い Phase3（側部緩衝材施工前）および Phase4（埋戻し直後）の応答加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比を図 8.3.43～図 8.3.44 に示す。なお H24 年度の地震応答解析では、空洞横断面（観測における y-z 断面）を 2 次元でモデル化しており、入力地震動に日本原燃基準地震動 Ss-1 波（最大加速度 450Gal）を採用している。y 方向に着目すると、観測地震動のフーリエスペクトル比は、H24 年度の Phase4（埋戻し直後）のフーリエスペクトル比（図 8.3.44）と傾向が類似している。

以上より、試験施設の卓越振動数帯は水平方向で 15～20Hz 程度と考えられる。試験施設のような重量構造物としては、コンクリート重力ダムが考えられることから、図 8.3.45 に示すコンクリート重力ダムの強震記録データから求めた固有周期と堤高の関係[4]の近似式を用いて、試験施設の固有振動数を求めた。コンクリート重力ダムの固有周期 T は次式で表される。

$$T=0.18/100 \times H \pm 0.05 \quad (T: \text{固有周期[s]、} H: \text{堤高[m]})$$

H を試験施設の底部低拡散材の下端から上部低拡散材の上端までの高さ（8.84m）とすると、固有振動数 $F=1/T$ は 15Hz 以上となり、観測地震動のフーリエスペクトル比から推測される試験施設の固有振動数と同等となる。

表 8.3-8 試験施設の 3 次元的構造の特徴

x 方向	y 方向
 <ul style="list-style-type: none"> 剛性の小さい緩衝材が側壁として構築されていない。 地震計③が設置されている手前部コンクリートピットの坑口側には構造物がない。 	 <ul style="list-style-type: none"> 側部緩衝材が左右に構築されている。

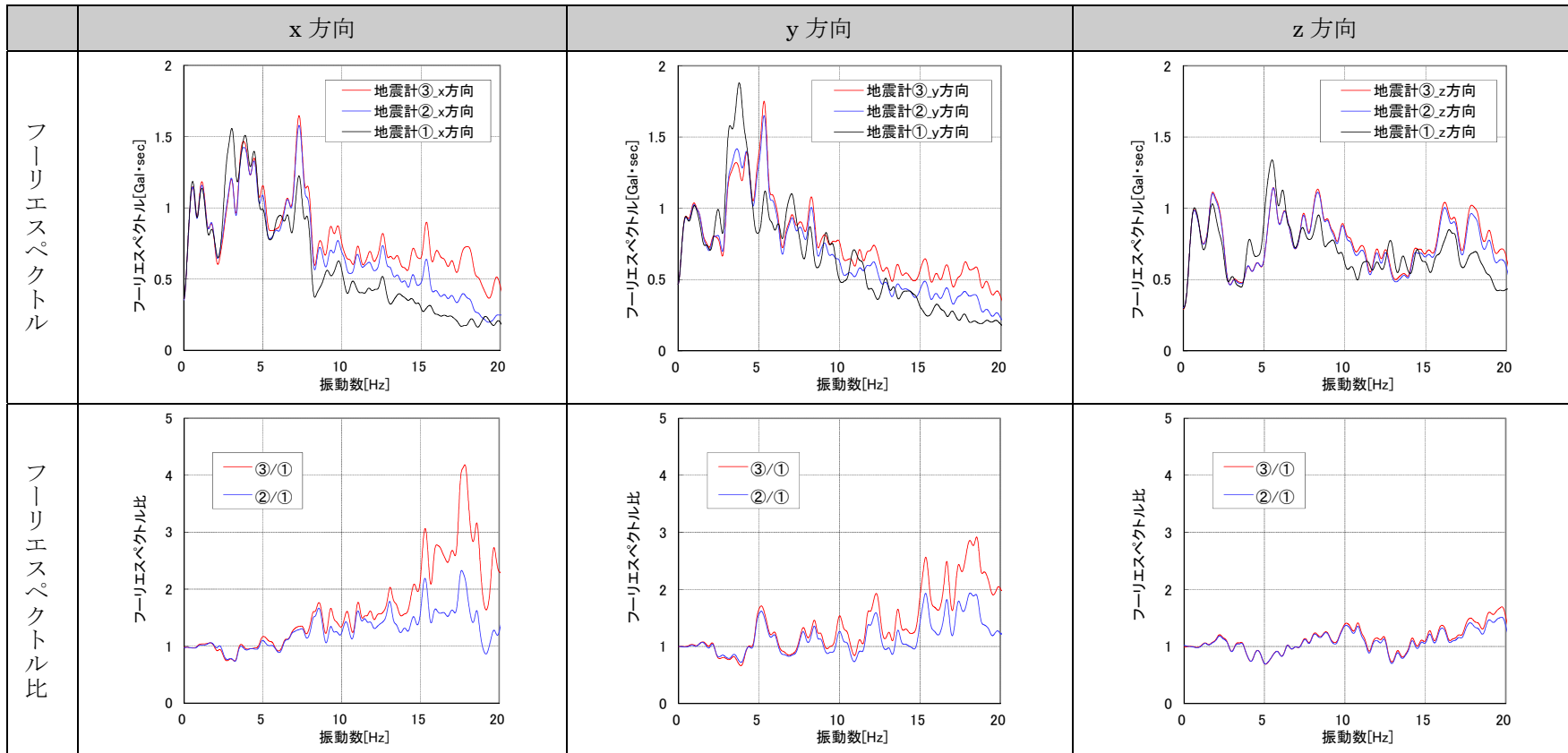
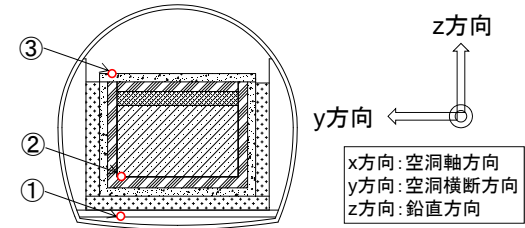


図 8.3-40 加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H25年10月26日)

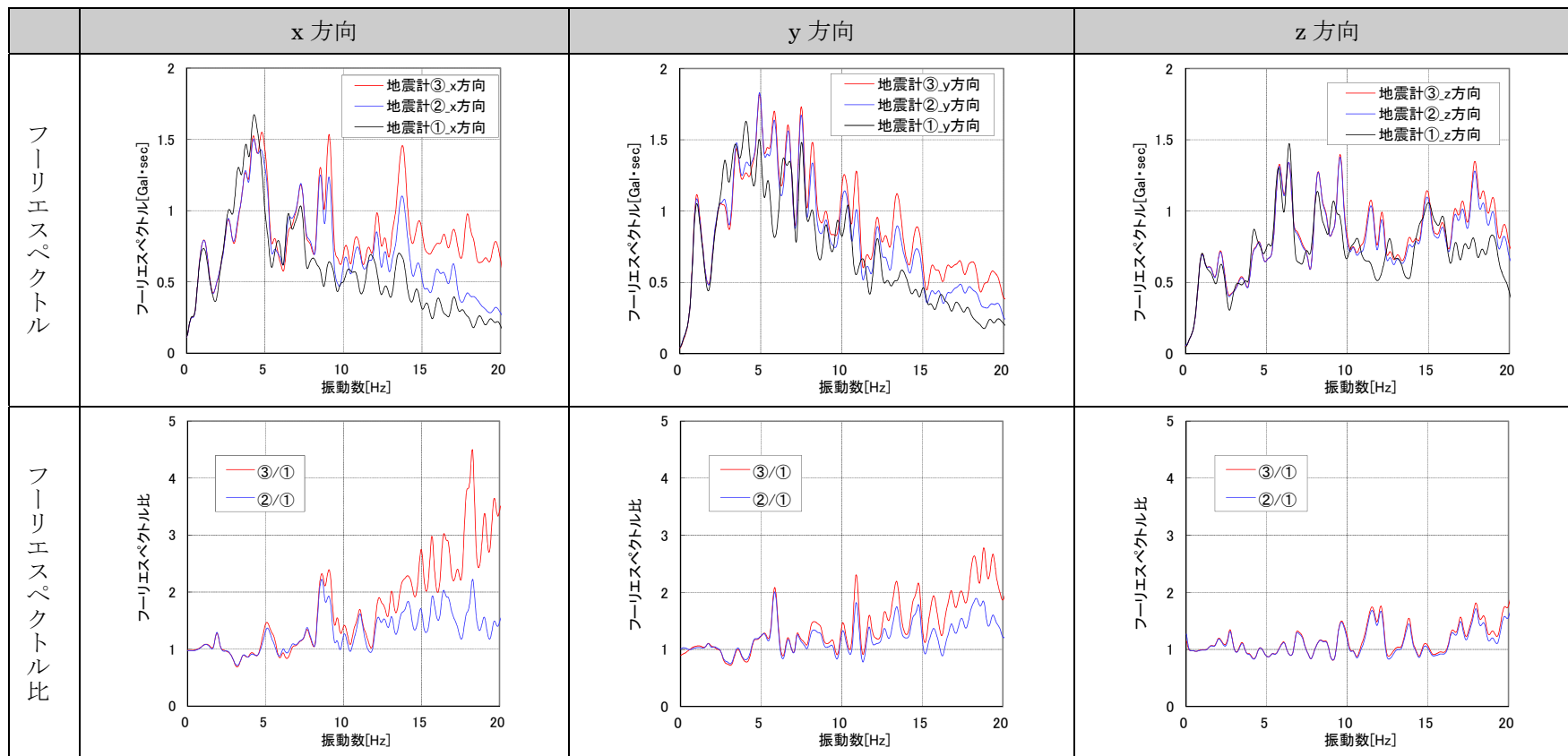
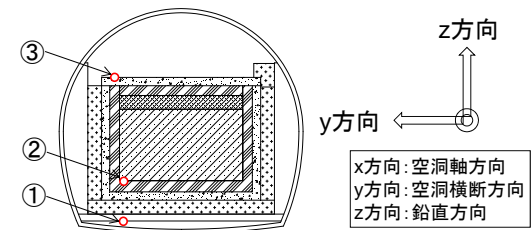


図 8.3-41 加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H25年11月15日)

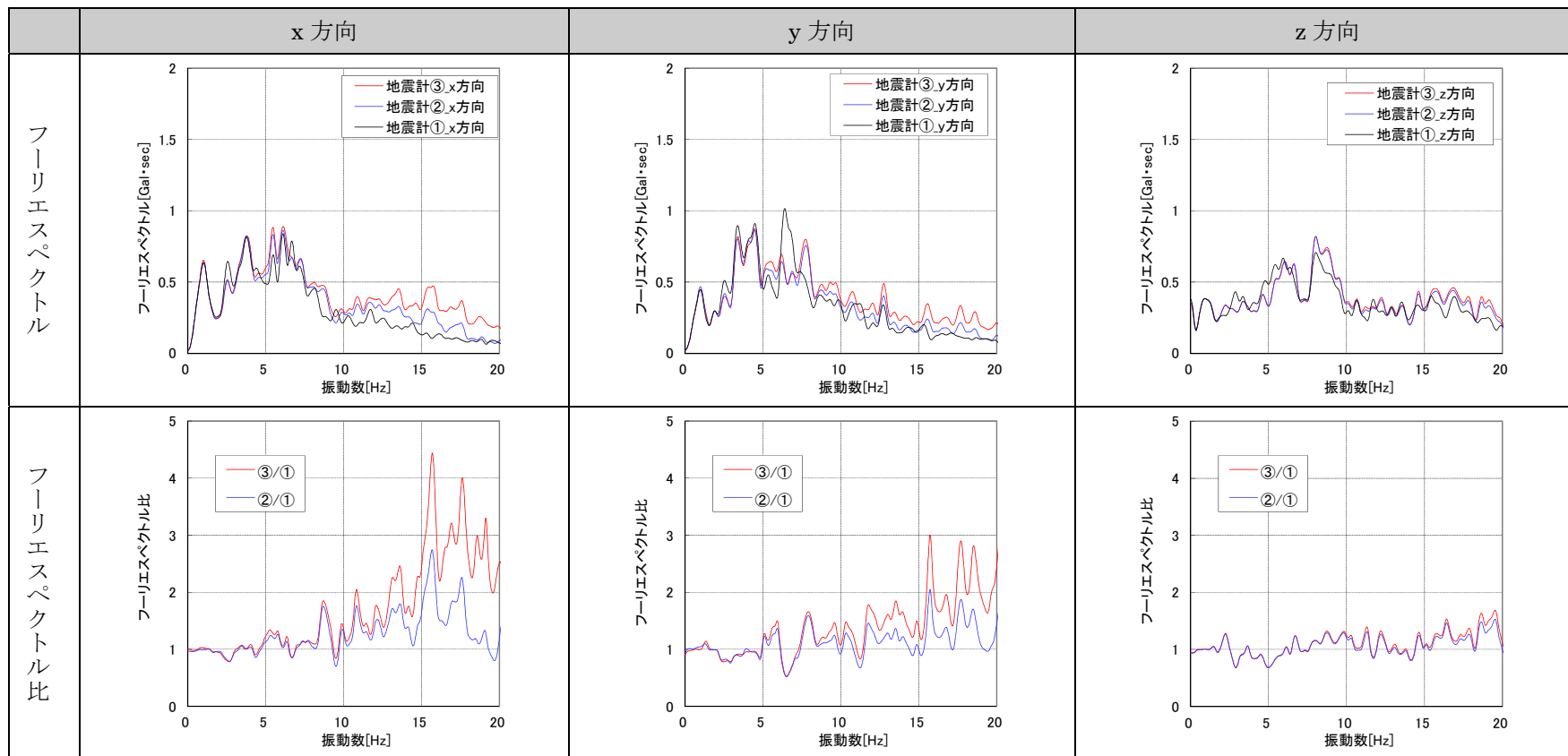
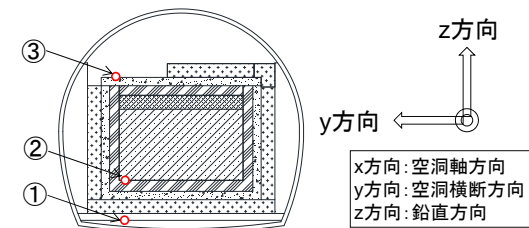


図 8.3-42 加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H25年12月27日)

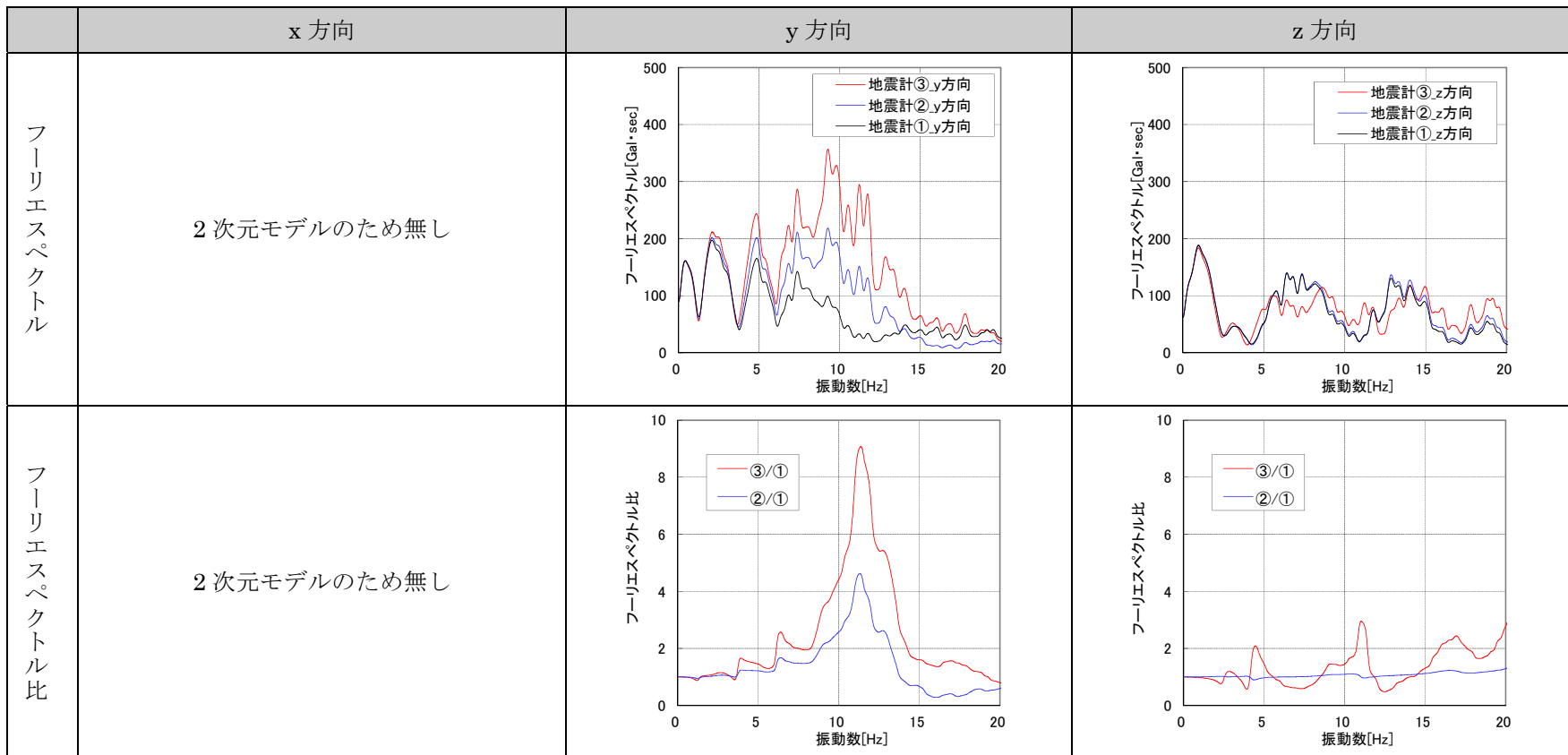
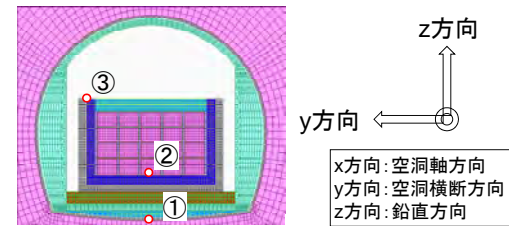


図 8.3-43 解析による加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H24 年度実施、Phase3)

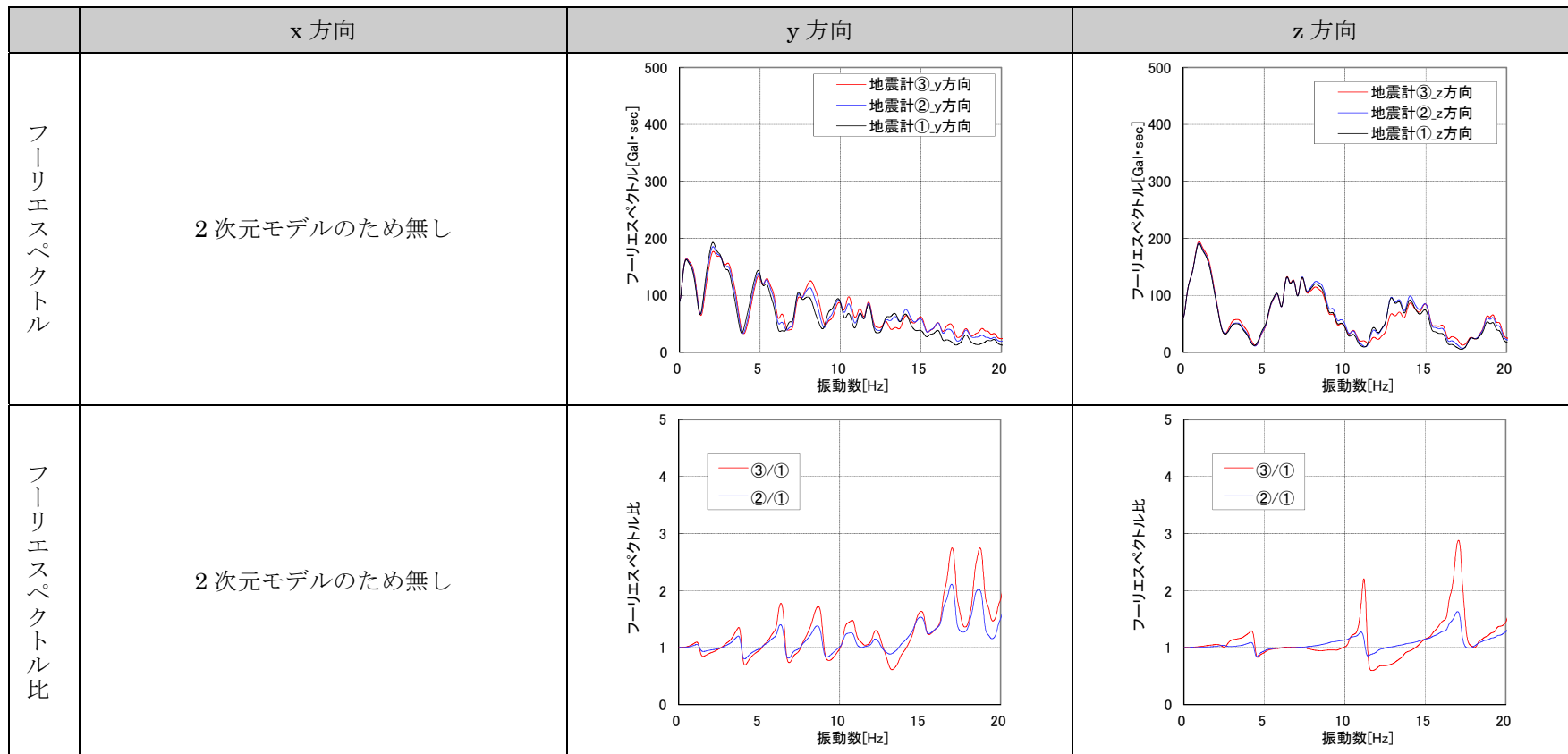
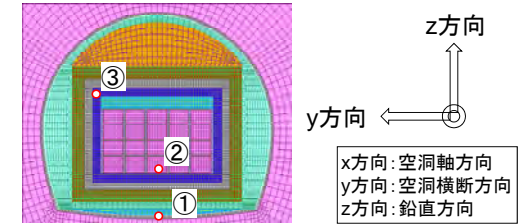


図 8.3-44 解析による加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比 (H24 年度実施、Phase4)

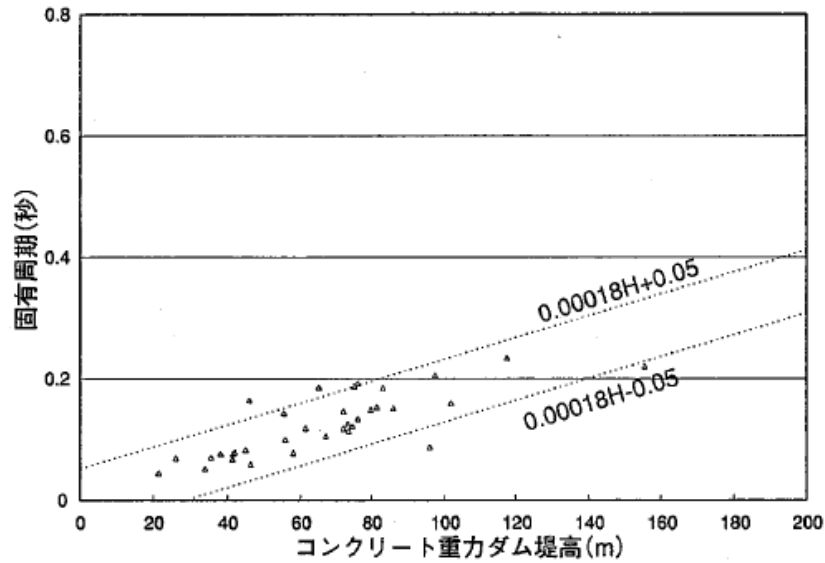


図 8.3-45 コンクリート重カダムの固有周期と堤高の関係[4]

(3) KiK-net データとの比較

1) 概要

試験空洞（地震計①～③）と KiK-net 六ヶ所[5]で観測されたデータを比較する。

KiK-net 六ヶ所の詳細を表 8.3-9 に、試験空洞と KiK-net 六ヶ所の位置関係を図 8.3.46 に、ボーリング柱状図を図 8.3.47 に示す。

KiK-net 六ヶ所では、地表面（標高 5m）と地下（標高-96.54m）で地震観測を行っており、地下の標高は、地震計①が設置してある試験空洞底盤（標高約-94m）と標高が近く、比較分析できるものと考えられる。ただし、図 8.3.46 に示すように、試験空洞と KiK-net 六ヶ所間は約 1.5km 離れており、両者の地質・地層構成が異なる可能性があるため、両者の観測データを同等に扱うことには注意する必要がある。

ここでは、試験空洞と KiK-net 六ヶ所で観測された地震動データを比較することにより、両者の観測日毎の観測データの傾向や特徴を分析することとする。

表 8.3-9 KiK-net 六ヶ所の詳細

項目	内容
データ種別	KiK-net
観測点コード	AOMH06
観測点名	六ヶ所（青森県）
設置位置	北緯 40.9664 度、東経 141.3738 度 (六ヶ所村役場駐車場)
設置高さ	地表面（標高 5m） および地下（標高-96.54m）
設置方位	北から 5° 時計回りに回転



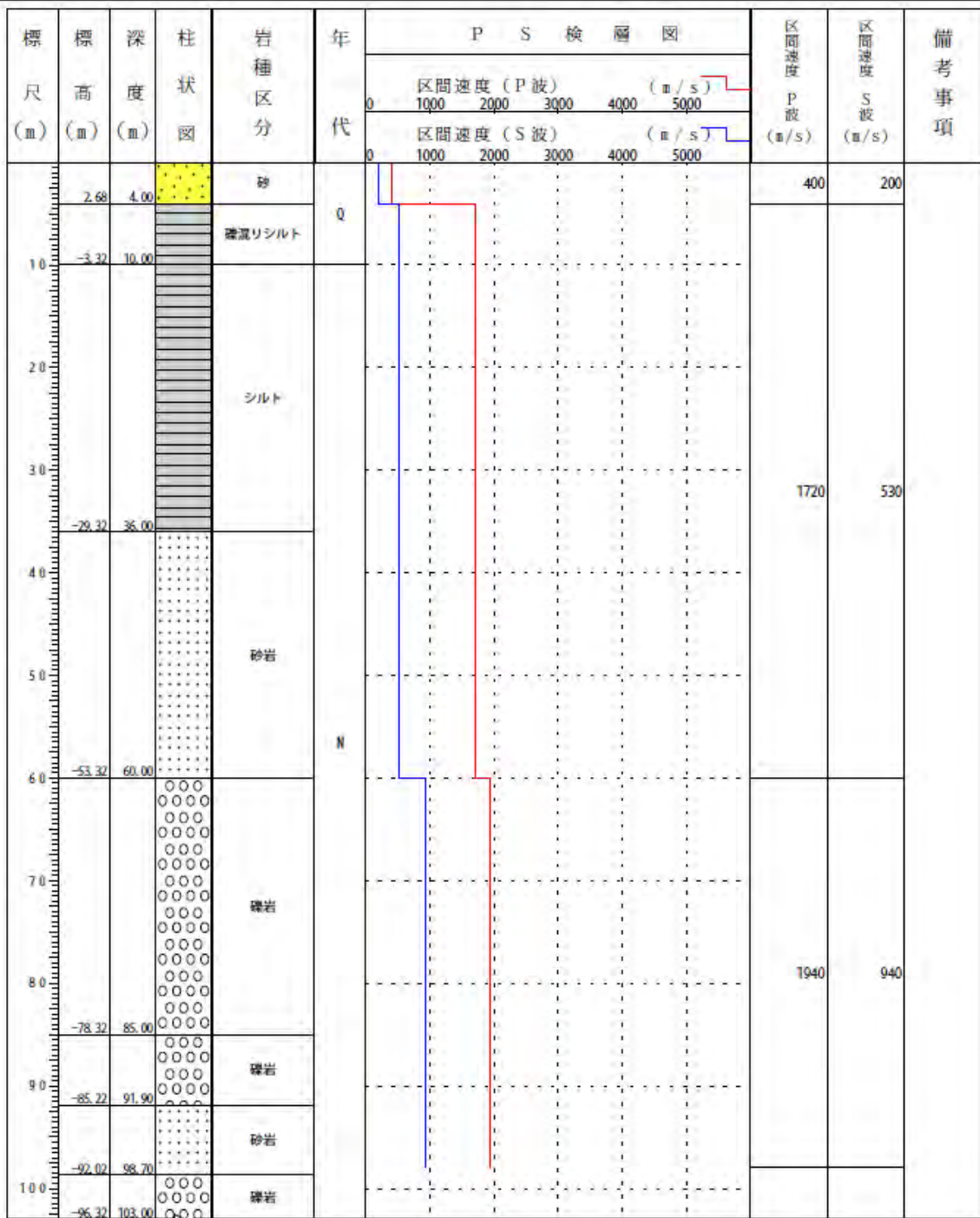
(C)ZENRIN (Z13BB 第 1011 号)

図 8.3-46 試験空洞と KiK-net 六ヶ所の位置関係

ボーリング柱状図

観測点名： 六ヶ所(ろっかしよ)
 所在地： 青森県上北郡六ヶ所村大字尾鉾字野附478-1
 緯度： 40° 57' 50.0"
 孔口標高： +7m

観測点コード： A0MH06
 経度： 141° 22' 39.0"
 総掘進長： 103.00m



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
 Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

図 8.3-47 KiK-net 六ヶ所のボーリング柱状図

なお、KiK-net 六ヶ所と試験空洞における地震計の計測方向は異なるため、既往文献[6]による方法を用いて KiK-net 六ヶ所データの方角補正を行った。

図 8.3.48 に示すように、KiK-net 六ヶ所の方角は北から時計回りに 5° 回転、試験空洞の軸方向は北から反時計回りに 49° 回転している。よって KiK-net 六ヶ所データを反時計回りに 54° 回転して、試験空洞の軸方向に合わせた方角補正を行う。

補正前の N-S 成分および E-W 成分をそれぞれ $N(t)$ 、 $E(t)$ とし、補正後の N-S 成分および E-W 成分をそれぞれ $N'(t)$ 、 $E'(t)$ とする。方位が時計回りに α° 回転したとすると、

$$\begin{pmatrix} N'(t) \\ E'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N(t) \\ E(t) \end{pmatrix}$$

の関係がある。ここで t は時間である。

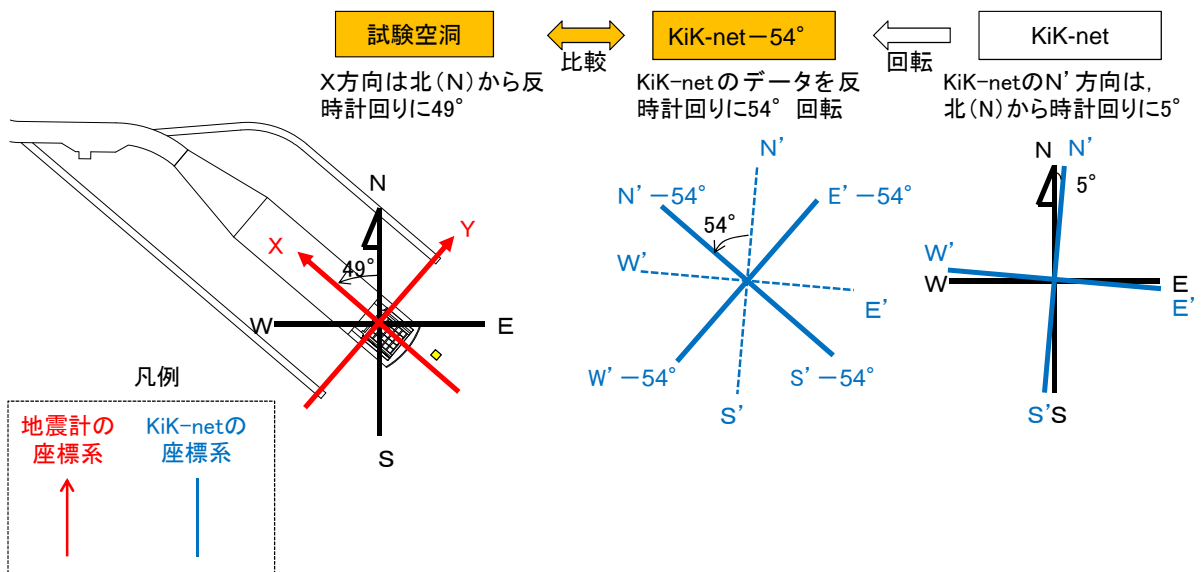
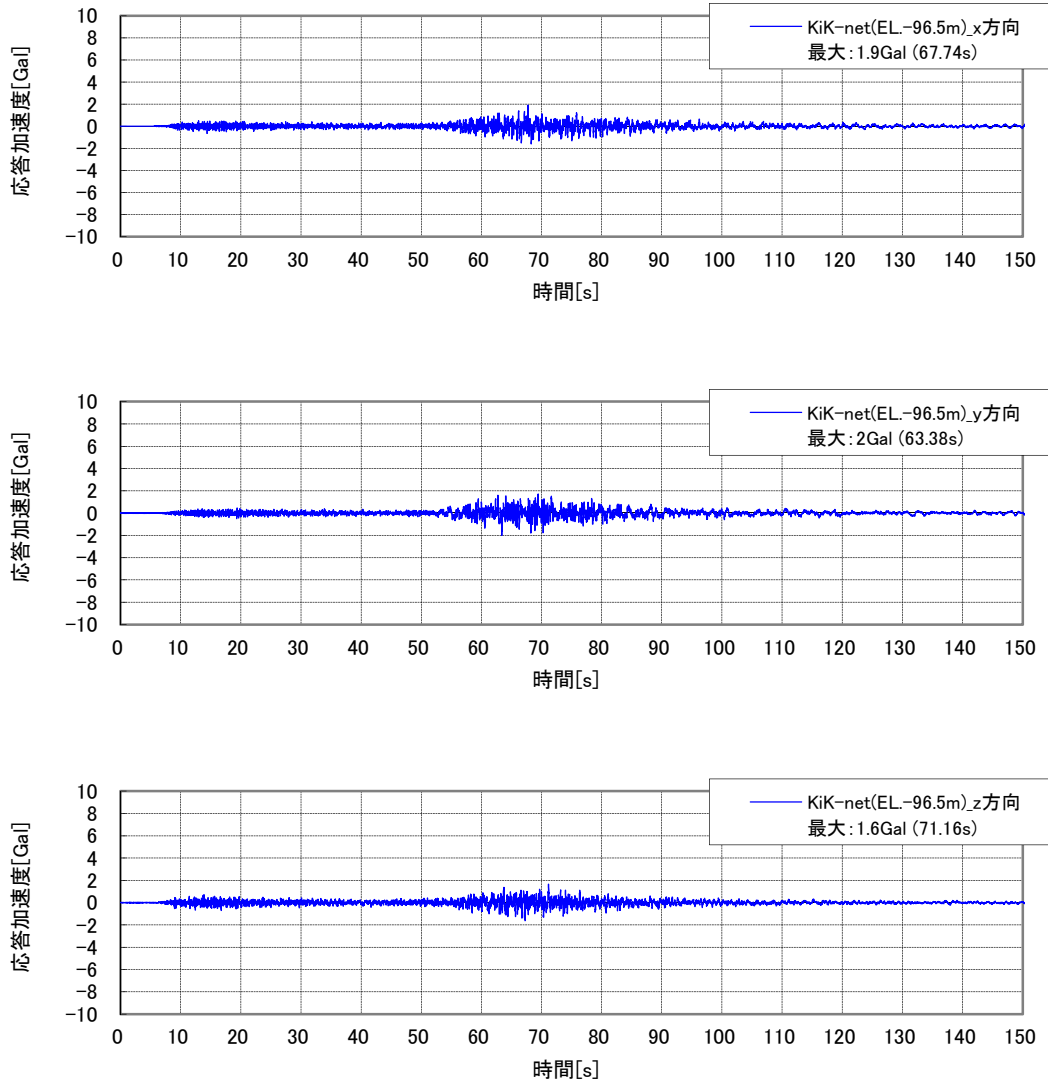


図 8.3-48 KiK-net 六ヶ所と試験空洞の方角

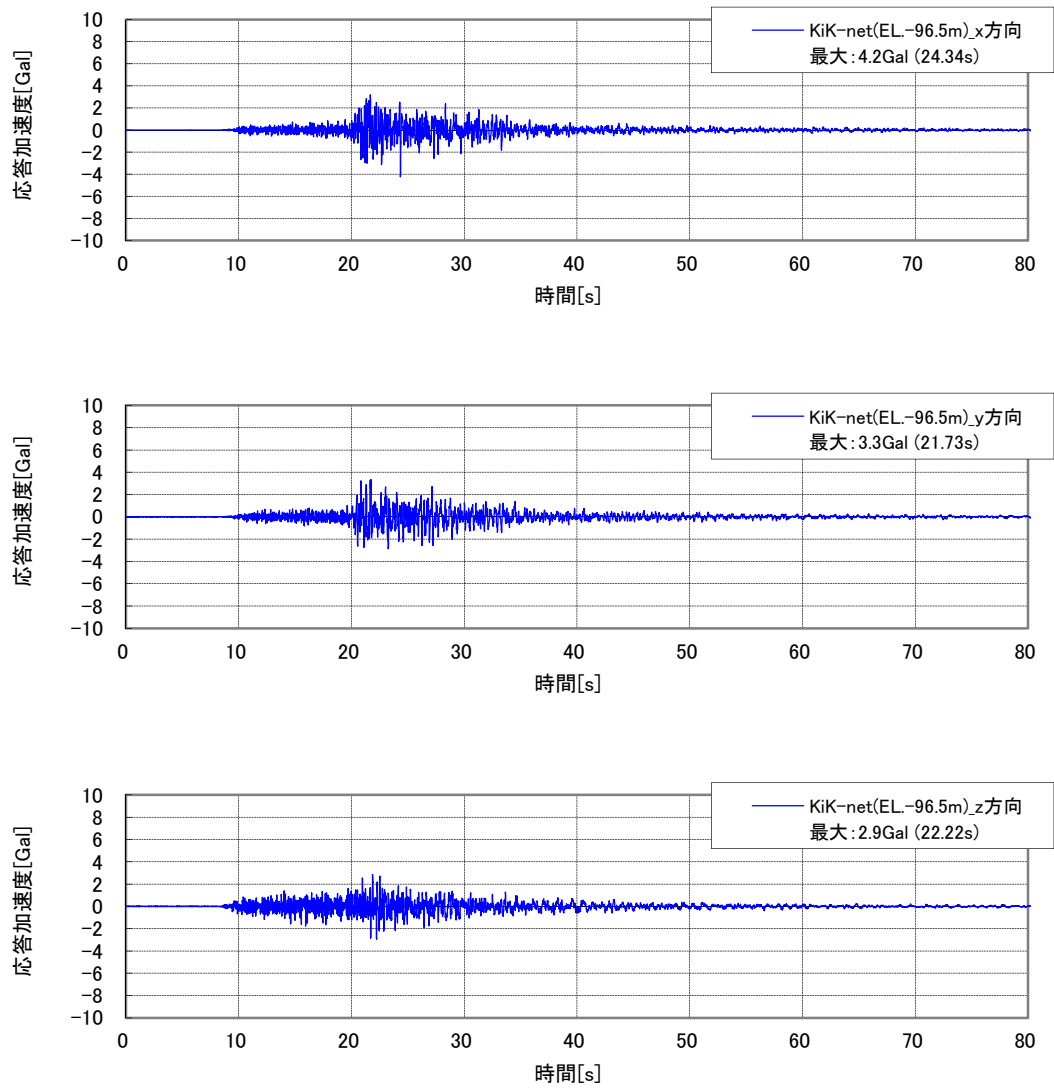
2) 地震動観測データ

KiK-net 六ヶ所で観測された、地下（標高-96.54m）における観測データを図 8.3.49～図 8.3.51 に、地表面（標高+5m）における観測データを図 8.3.52～図 8.3.54 に示す。



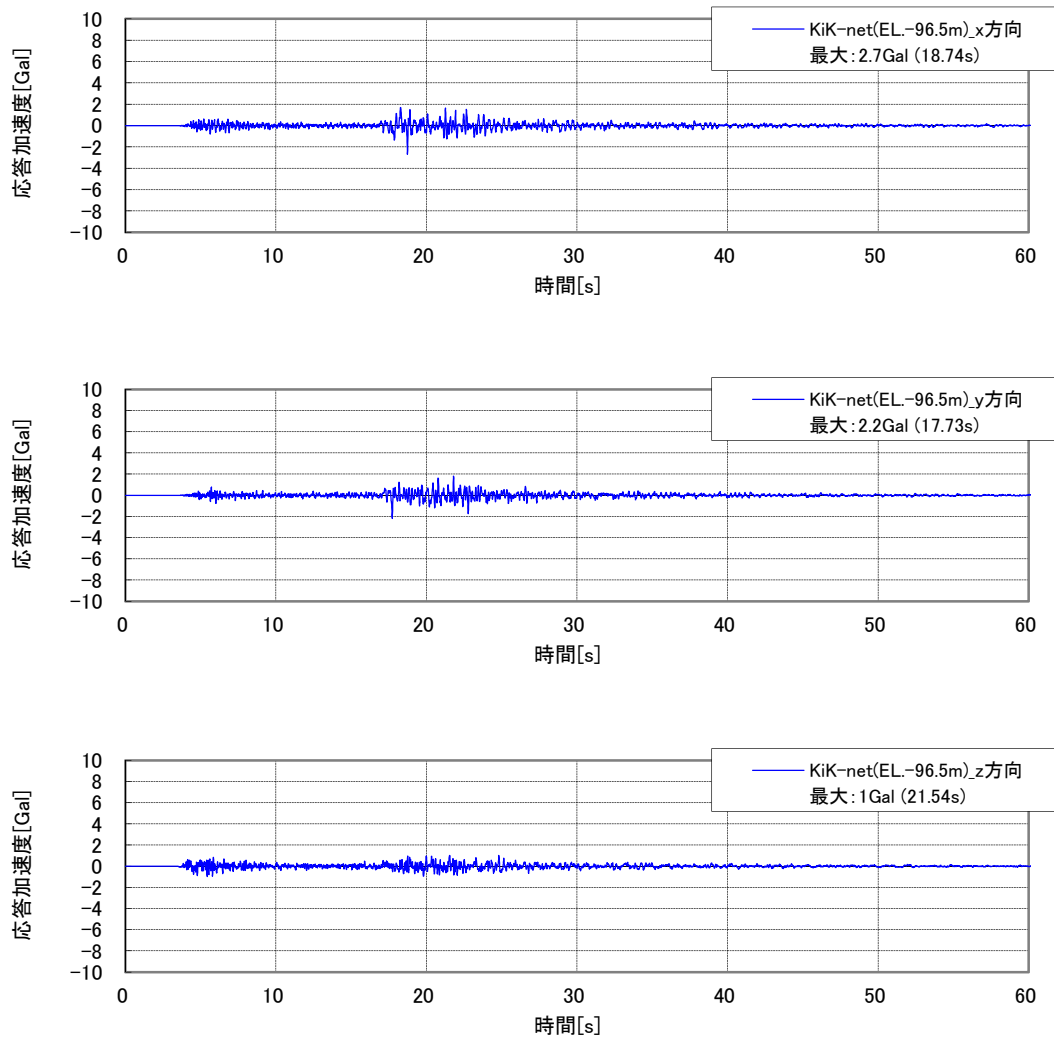
※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-49 KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（H25年10月26日）



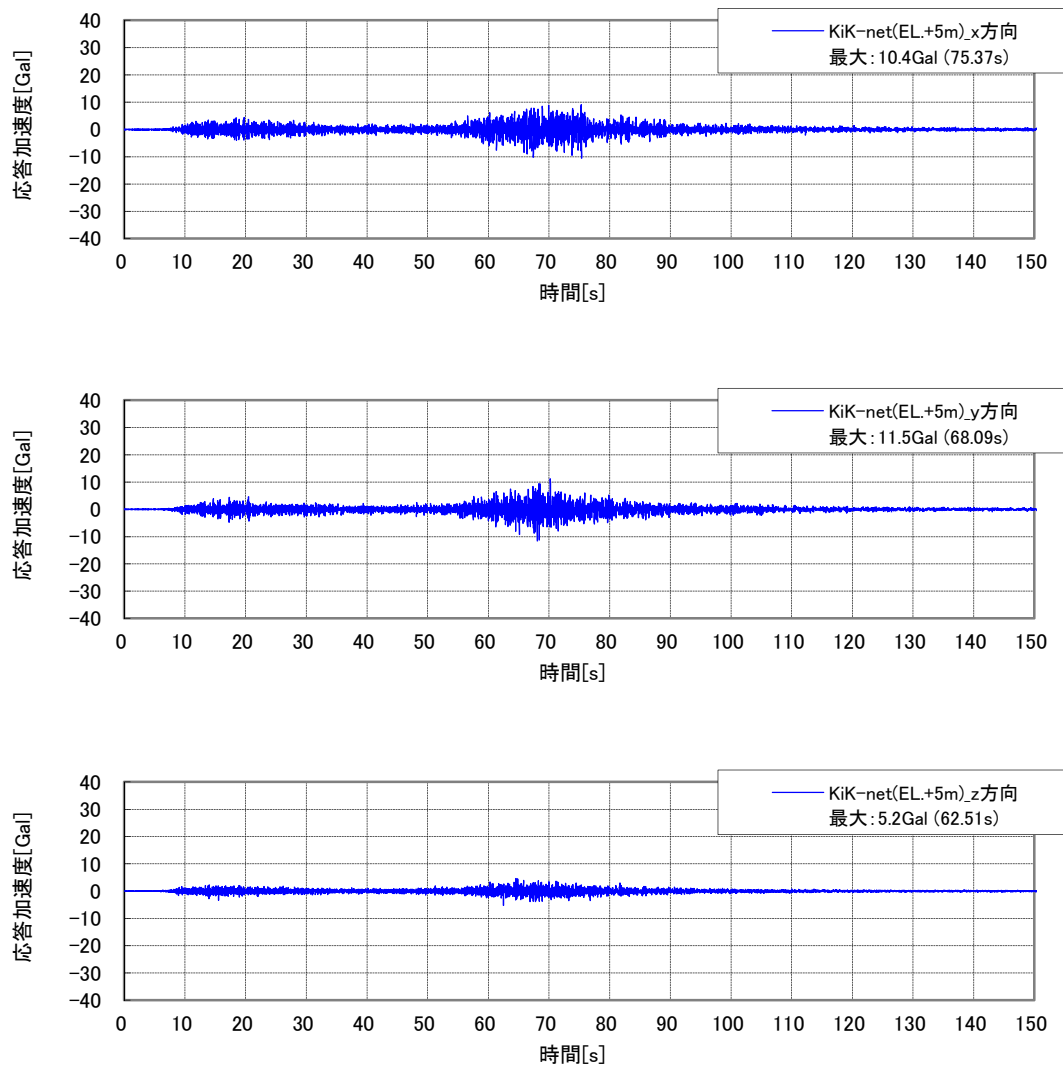
※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-50 KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測データ (H25 年 11 月 15 日)



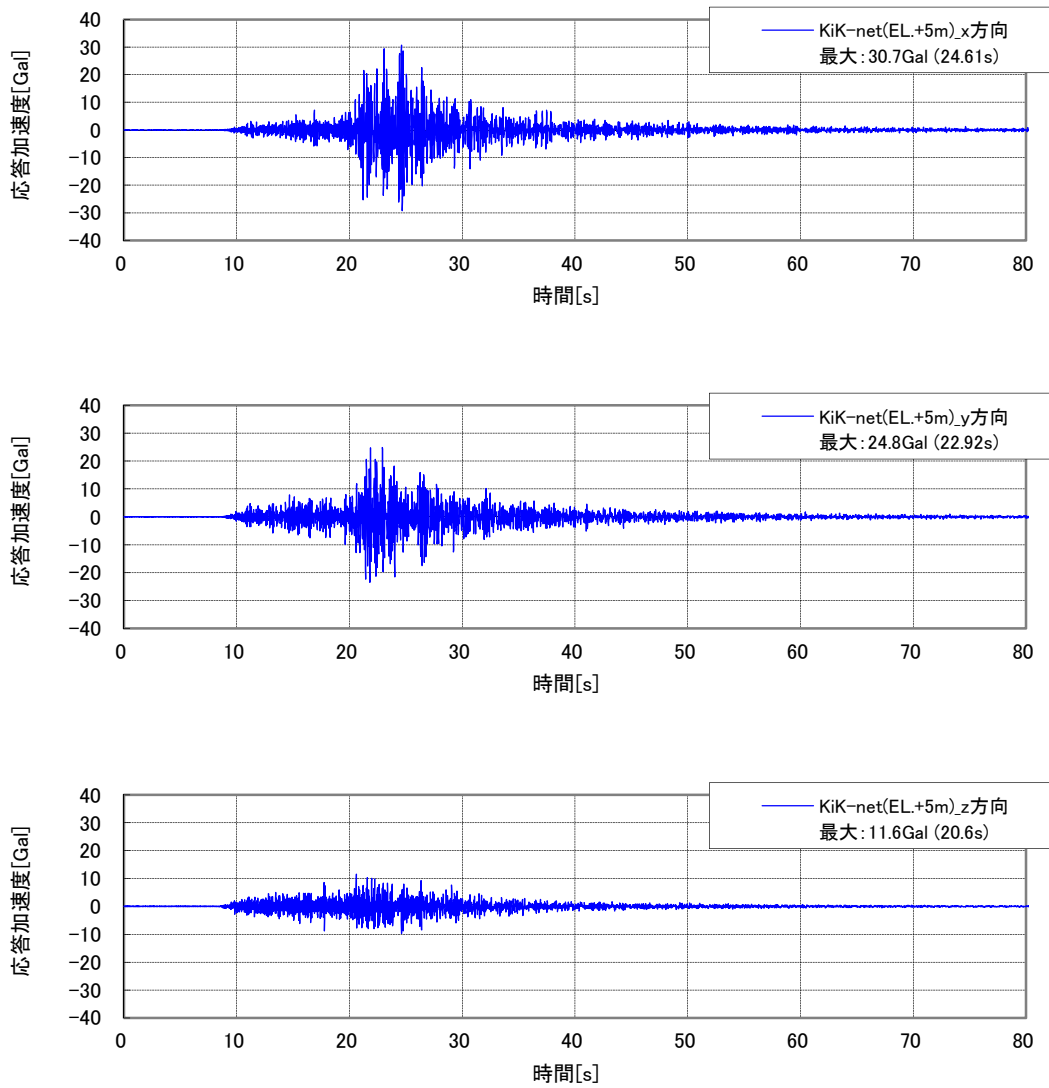
※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-51 KiK-net 六ヶ所 (標高-96.54m) の観測データ (H25 年 12 月 27 日)



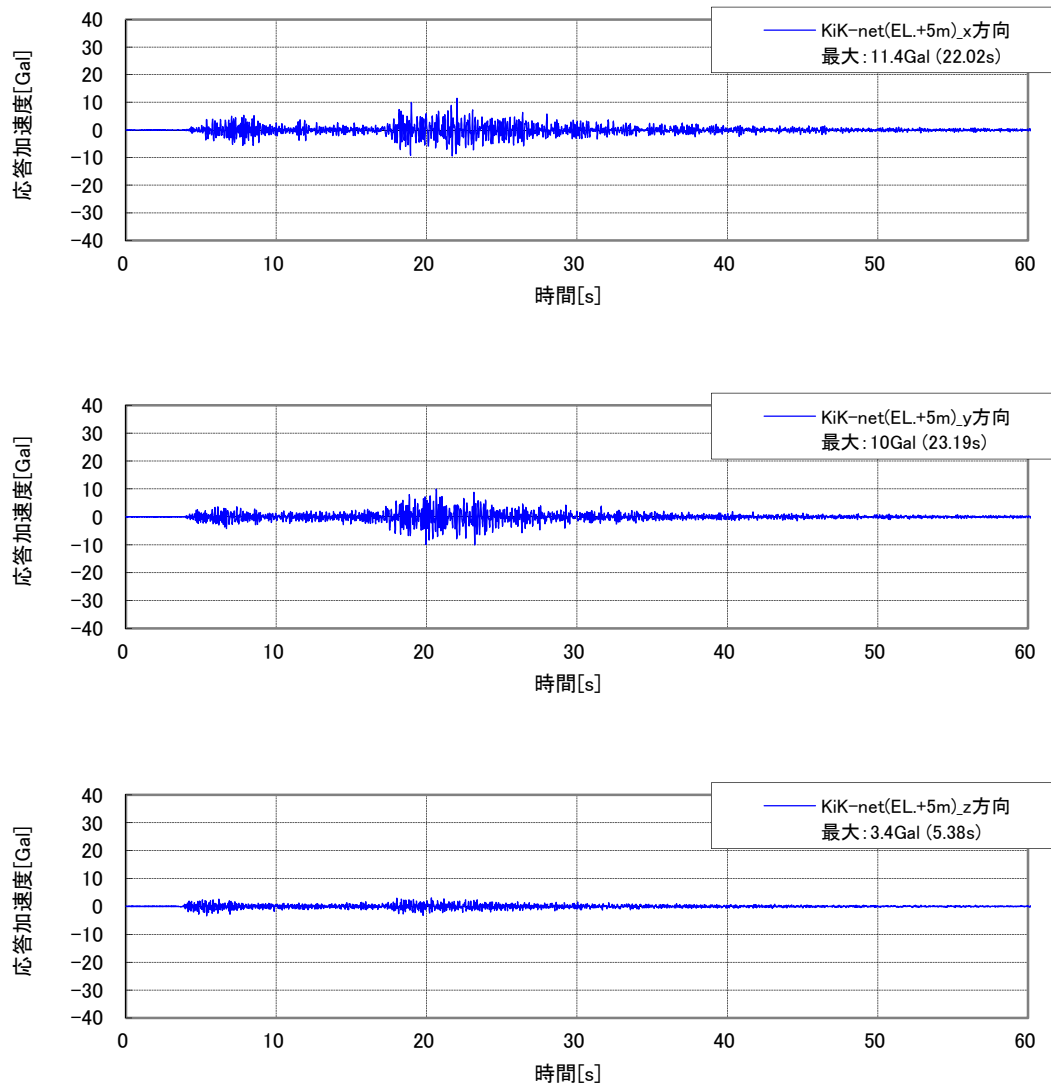
※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-52 KiK-net 六ヶ所 (標高+5m) の観測データ (H25 年 10 月 26 日)



※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-53 KiK-net 六ヶ所（標高+5m）の観測データ（H25 年 11 月 15 日）



※上から x、y、z 方向。KiK-net データの方位補正を行い、試験空洞の x、y、z 方向に変換した。

図 8.3-54 KiK-net 六ヶ所（標高+5m）の観測データ（H25 年 12 月 27 日）

3) 最大加速度

試験空洞（地震計①～③）と KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）で観測されたデータの最大加速度一覧を表 8.3-10 に、各観測日の最大加速度比較を図 8.3.55～図 8.3.57 に示す。図 8.3.55～図 8.3.57 より、計測方向（xyz 方向）に対する最大加速度は、各観測日において、試験空洞と KiK-net 六ヶ所で概ね同様の傾向となっている。また標高が近い地震計①（標高約-94m）と KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の最大加速度を比較すると、地震計①の方が 0～3Gal 程度大きくなっている。

試験空洞と KiK-net 六ヶ所では、地質条件や計測条件が異なるため、観測データを一概に比較はできないが、大きな差異はないものと考えられる。

表 8.3-10 地震計と KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測地震動の最大加速度一覧

観測日	計測方向	最大加速度[Gal]			
		KiK-net	地震計①	地震計②	地震計③
2013/10/26	x	1.9	3.3	3.2	3.5
	y	2.0	3.1	3.1	3.5
	z	1.6	2.8	3.1	3.3
2013/11/15	x	4.2	5.4	4.8	6.2
	y	3.3	6.7	6.3	6.4
	z	2.9	4.1	5.1	5.2
2013/12/27	x	2.7	2.1	2.7	2.8
	y	2.2	2.3	2.7	2.9
	z	1.0	1.8	2.5	2.5

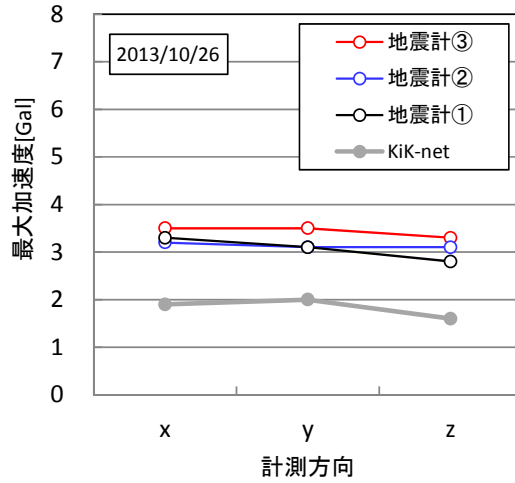


図 8.3-55 最大加速度比較 (H25 年 10 月 26 日)

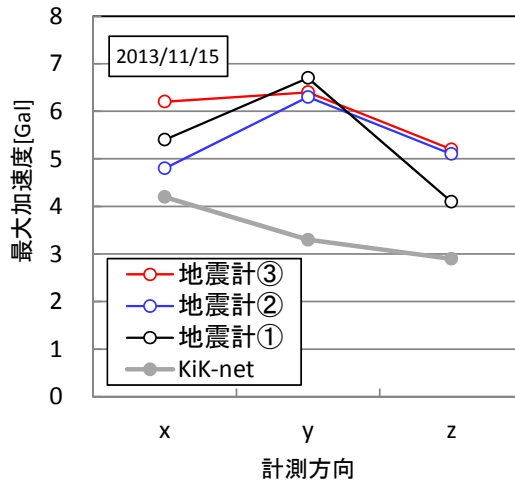


図 8.3-56 最大加速度比較 (H25 年 11 月 15 日)

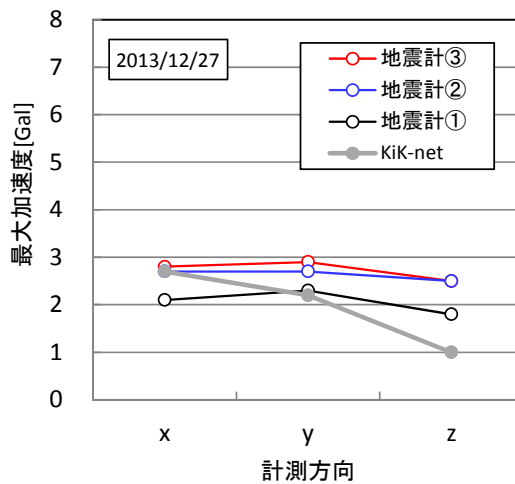


図 8.3-57 最大加速度比較 (H25 年 12 月 27 日)

4) フーリエスペクトル

試験空洞底盤の地震計①（標高約94m）と KiK-net 六ヶ所（標高96.54m）の観測データ（加速度）のフーリエスペクトルを図 8.3.58～図 8.3.60 に示す。

フーリエスペクトルは、いずれの観測日および計測方向においても、0～3Hz 程度の低振動数帯では地震計①と KiK-net 六ヶ所は近い値となっている。3Hz 以上では、両者のフーリエスペクトル値は乖離し、試験空洞の方が大きくなる傾向を示す。この乖離は、KiK-net では地震計を観測井に設置しているのに対して、本検討の地震計①は試験空洞底盤に設置しており、試験空洞の構造物としての振動特性が含まれていることが主たる原因であると考えられる。その他、図 8.3.46 に示すように約 1.5km 離れている試験空洞と KiK-net 六ヶ所の地質・地層構成の違いも原因の一つと考えられる。

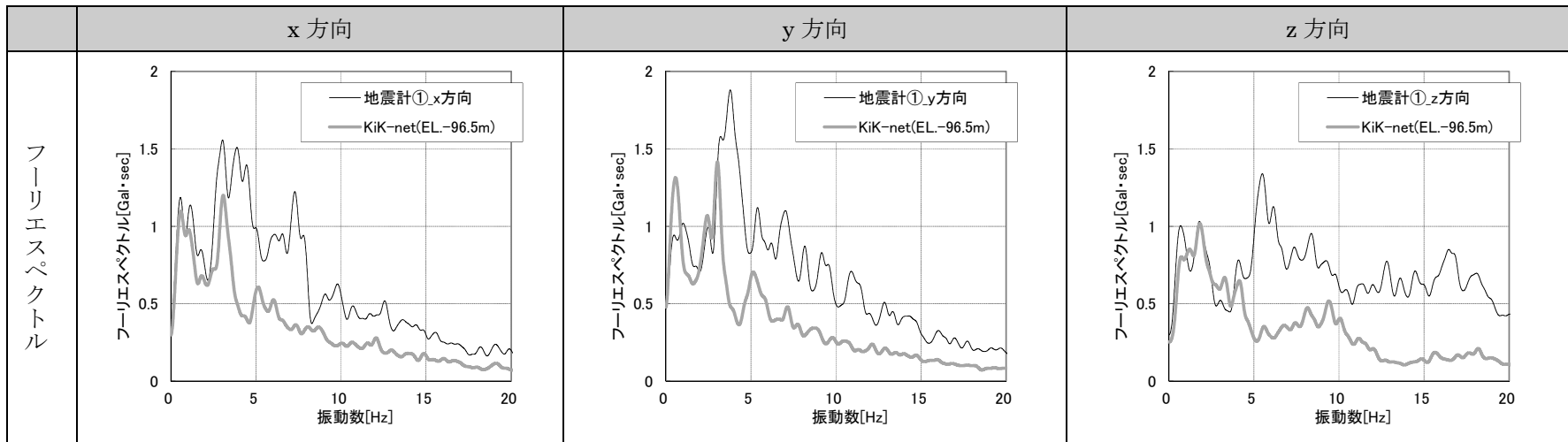
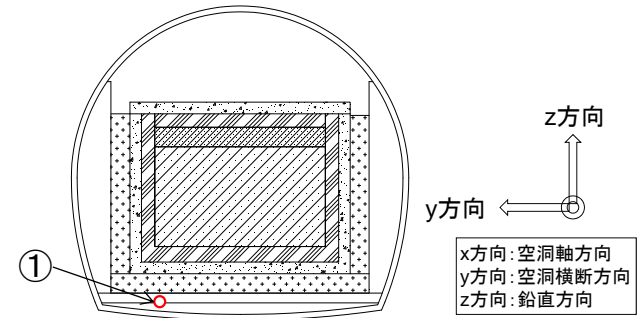


図 8.3-58 加速度のフーリエスペクトル (H25年10月26日)

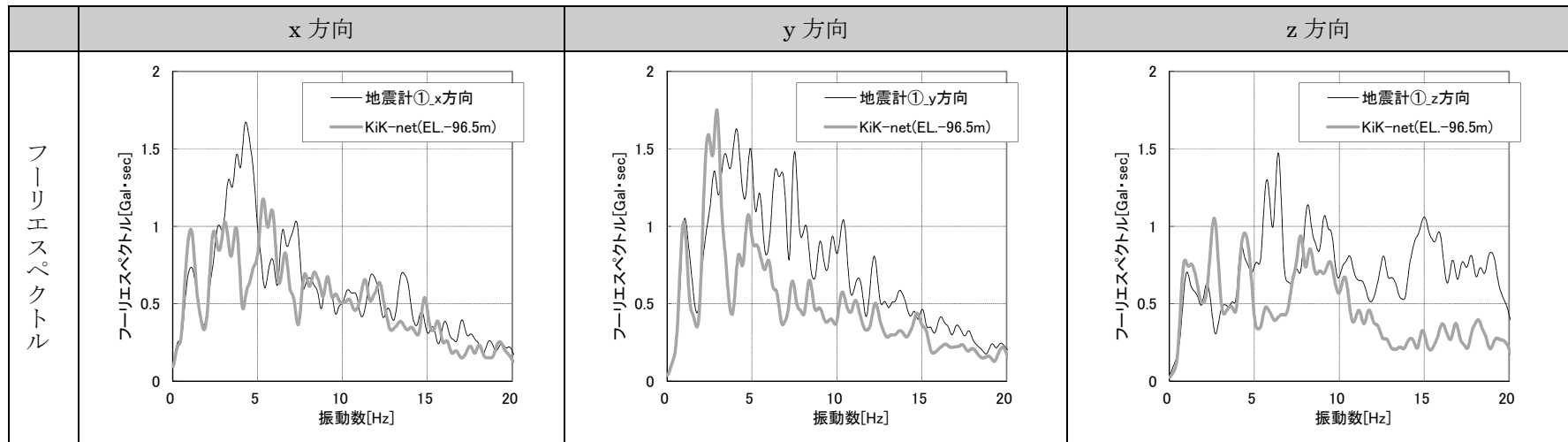
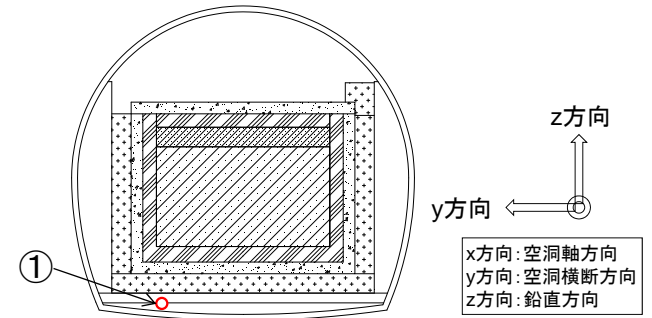


図 8.3-59 加速度のフーリエスペクトル (H25年11月15日)

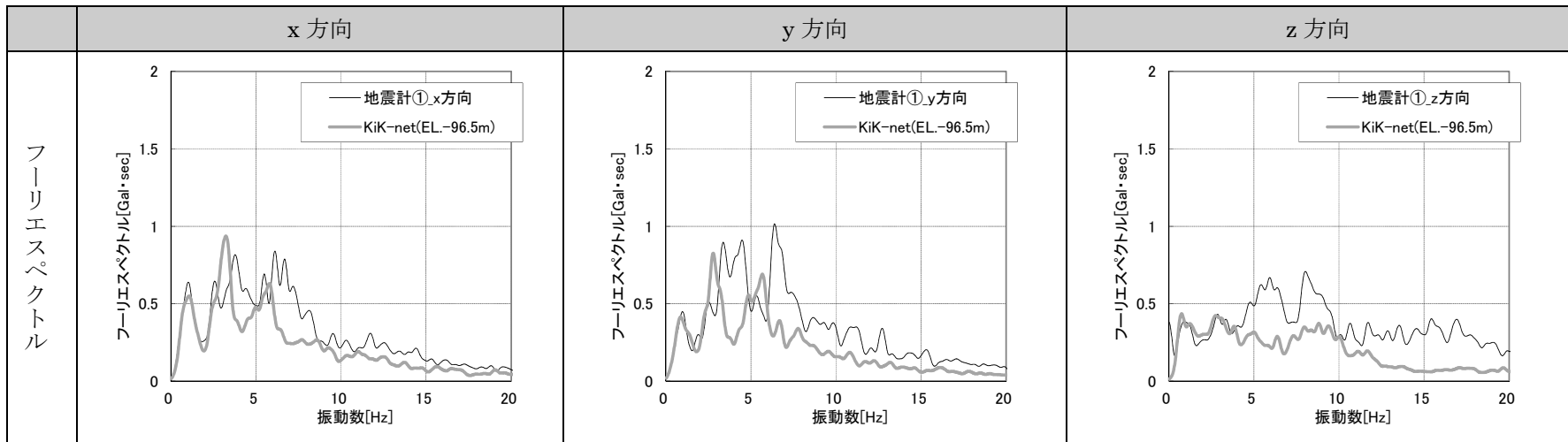
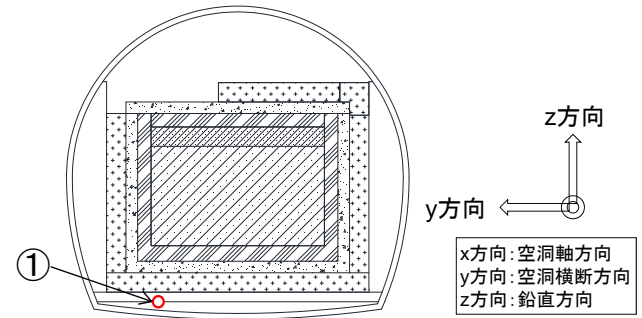


図 8.3-60 加速度のフーリエスペクトル (H25年12月27日)

8.4 地中無線データ取得

【目的】

施設挙動監視への低周波電磁波（周波数 1kHz 程度）を利用した地中無線データ通信技術の適用性を確認するため、H20 年度に底部緩衝材内に温度計、間隙水圧計を接続した送信装置を設置した。H24 年度まで 1 回/年の頻度で無線通信によるデータ取得を実施してきている。今年度も引き続き地中無線データを取得して、別途埋設している有線計測値との比較を行い、埋設した送信装置が正常に稼働していること、データの受信ができることを確認する。

実施日：H26 年 2 月 14 日

【まとめ】

底部緩衝材内部の地中無線温度データおよび間隙水圧データは、地中無線機付近に設置した有線の温度計および間隙水圧計の経時変化と概ね同じ変化を示していることから、地中無線機は正常に機能していることが確認された。

H26 年 2 月 14 日に実施した、地中無線データ回収で取得した緩衝材中の無線温度計および無線温度計付近に設置している有線温度計 (B-O-2) の計測結果を図 8.4-1 に示す。有線温度計は、無線温度計から水平方向に 80cm 離れ、底部低拡散材界面から 20cm 下に埋設されている。無線温度計と有線温度計での温度は、ともに季節変動に伴う変化を示しており、整合するデータが得られた。2 つの計測値には 1℃弱程度の差はあるが、これは計測環境の違いであると考えられる。有線温度計は緩衝材中に設置されており、直接緩衝材に触れて計測しているのに対して、無線温度計は緩衝材中に埋設された円筒状の送信装置の中に設置されており、直接緩衝材に触れていない。この計測環境の違いが有線温度計と無線温度計の計測結果の差となっていると考えられる。

間隙水圧計の地中無線データおよび付近に設置している有線間隙水圧計 (B-P-2) の計測結果を図 8.4-2 に示す。無線データおよび有線データともに設置以降の間隙水圧の変化は認められず、同様の結果となっている。

以上より、設置後約 5 年経過時点において地中無線送信装置は正常に機能していることが確認された（送信機の運用期間は 10 年以上）。

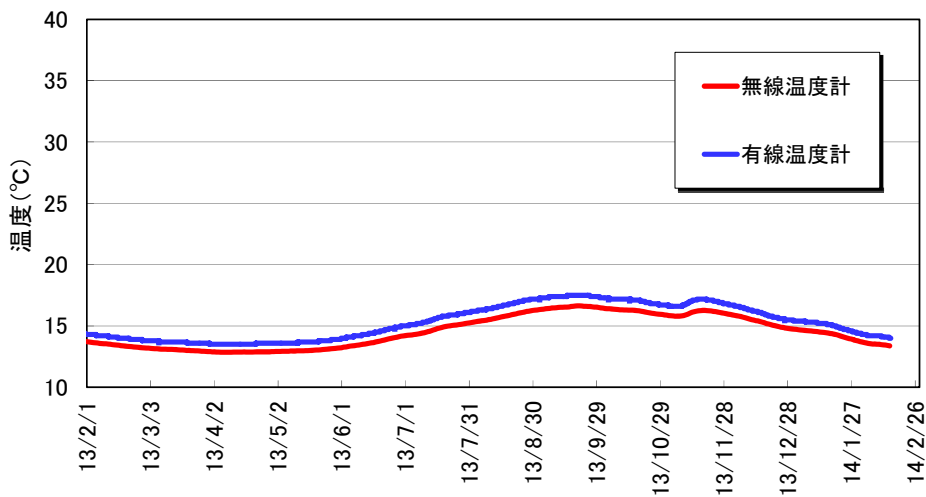
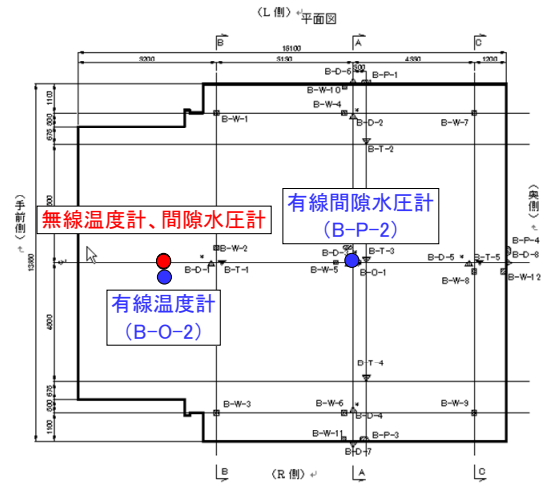


図 8.4-1 無線温度計と有線温度計の比較

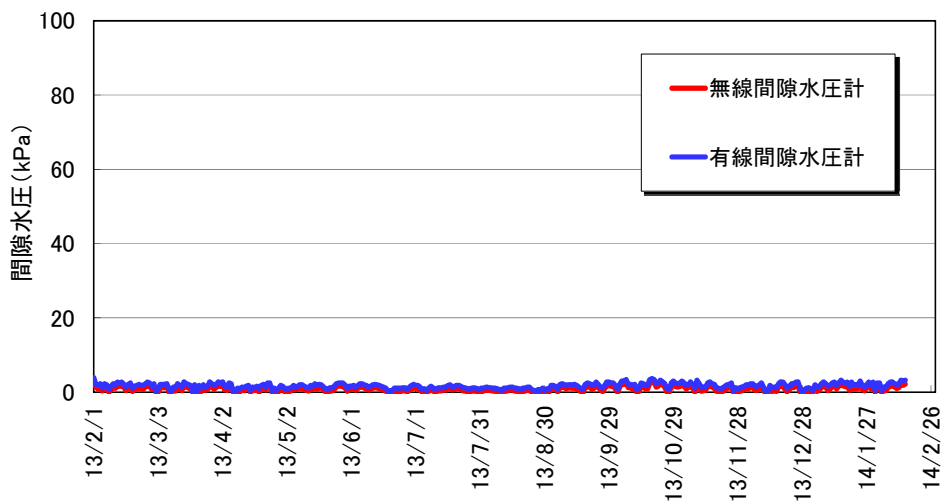


図 8.4-2 無線間隙水圧計と有線間隙水圧計の比較

8.5 底部低拡散材 BTV 観察

【目的】

施工試験により構築される部材が底部低拡散材上に上載荷重として作用するが、その上載荷重による部材変形によりひび割れが発生するかどうかを BTV により観察する。

BTV 観察は、H20 年度より実施しており、H21 年度施工終了時まではひび割れの発生は認められなかった。

H22 年度において、当該年度確証試験全工程終了後（H22 年 12 月 2 日）に実施した BTV 観察の結果、2 箇所ではひび割れが観察された。2 箇所ともにひび割れの走行は空洞横断方向である。挙動計測結果の分析から、手前側のひび割れは H22 年度確証試験開始前に発生したものと推定された。施設中央付近のひび割れは充填材施工終了後、上部充填材施工前に発生したものであった。さらに、H23 年度での BTV 観察（H24 年 1 月 13 日）において新規ひび割れを 1 箇所を確認し、合計 3 本のひび割れが確認されたこととなった。

H24 年度には、上部コンクリートピットおよび上部低拡散材の各施工確認試験が行われ、底部低拡散材上の上載荷重が増加している。今年度の BTV 観察では、上載荷重の増加に伴い、これまでに確認されたひび割れの進展あるいは、新規ひび割れの発生の有無について確認することが目的となる。

今年度の BTV 観察は、上部充填材界面部隙間確認作業の前に実施することとして、下記日程で行った。

実施日：H26 年 2 月 14 日

【まとめ】

観察および分析の結果、既存のひび割れの幅や形状の変化は確認されず、既存ひび割れの進展はないものと判断した。また、新規ひび割れの発生も確認されなかった。

以下に分析・評価結果を詳述する。

8.5.1 ひび割れ観測孔位置

ボーリング孔の位置を図 8.5-1、図 8.5-2 に示す。水平位置は部材中心から左へ 1,875mm である。鉛直位置は、厚さ 600mm の底部低拡散材上端より 250mm 下、下端より 350mm 上である。BTV 観察長は、ボーリング孔長 15.2m のうち、BTV 観察装置のカメラ設置位置より前方プローブ長分（23cm）を除く、約 15.0m 程度とした。

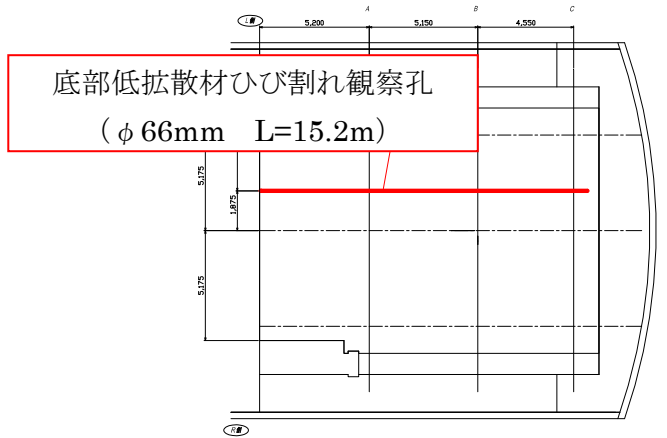


図 8.5-1 BTV 観測孔水平位置図 (単位 : mm)

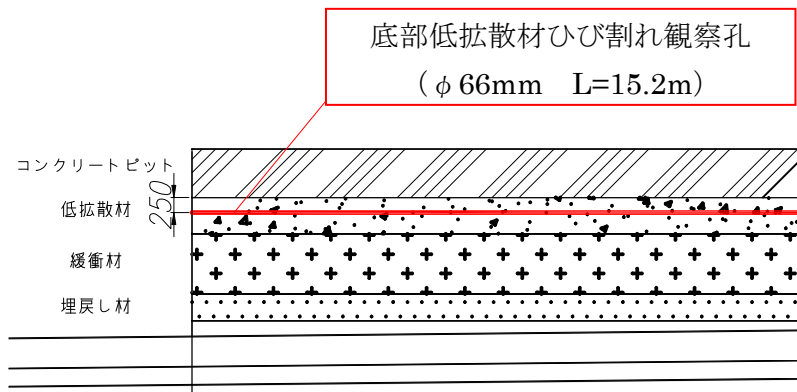


図 8.5-2 BTV 観測孔鉛直位置図 (単位 : mm)

8.5.2 BTV 装置

ボーリング孔壁のひび割れ観察は下記仕様に基づいて実施した。BTV 装置による観察後、孔壁展開画像の表示および亀裂の幾何学性状のデータ整理も行うシステムを用いた。

[ボアホール観察 BIP-V システム概略仕様]

プローブ径 : $\phi 50\text{mm}$

画像観察記録 : 孔壁全周を連続的に定方位観察可能

孔方向 : 全方向可能 (鉛直孔、水平孔、傾斜孔)

観察速度 : 27m/時間

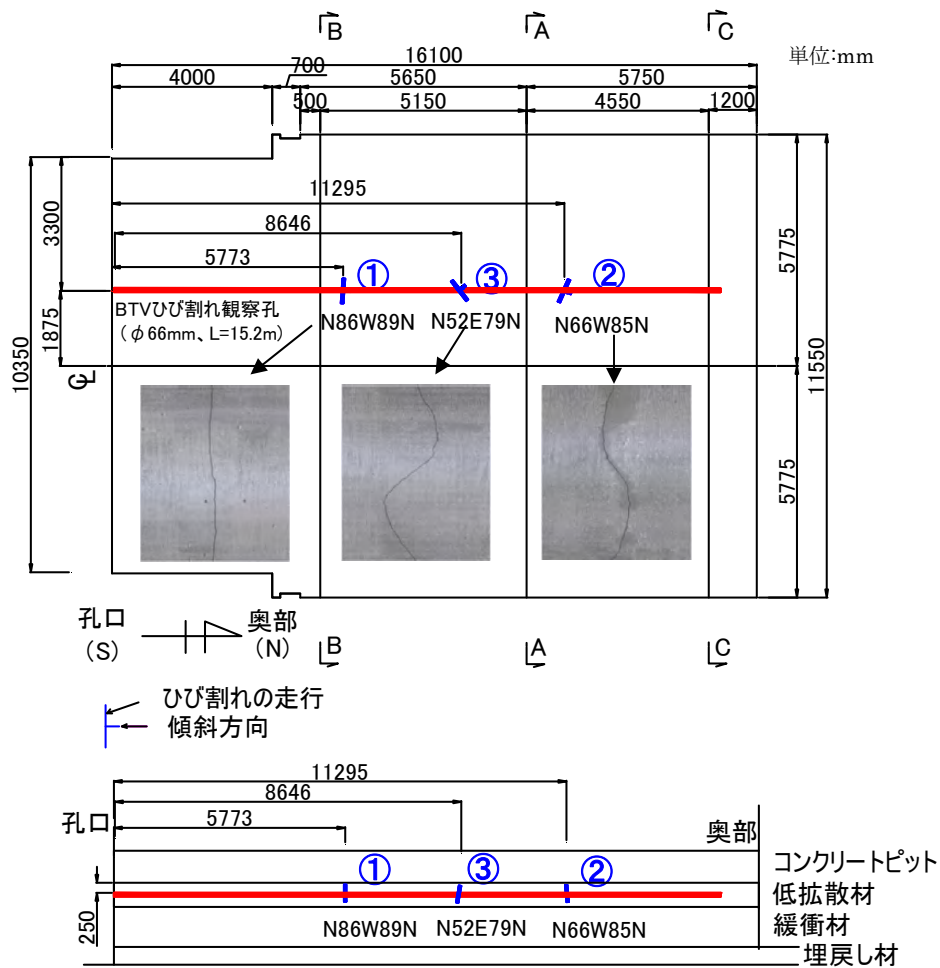
判定可能な最小ひび割れ幅 : 0.25mm

8.5.3 BTV 観察結果

今年度の施工確認試験終了後（H26年2月14日）に実施したBTV観察の結果、新規ひび割れの発生は確認されていない。また、H23年度までに確認されている3本の既存ひび割れに関して、幅の拡大や形状の変化は認められなかった。

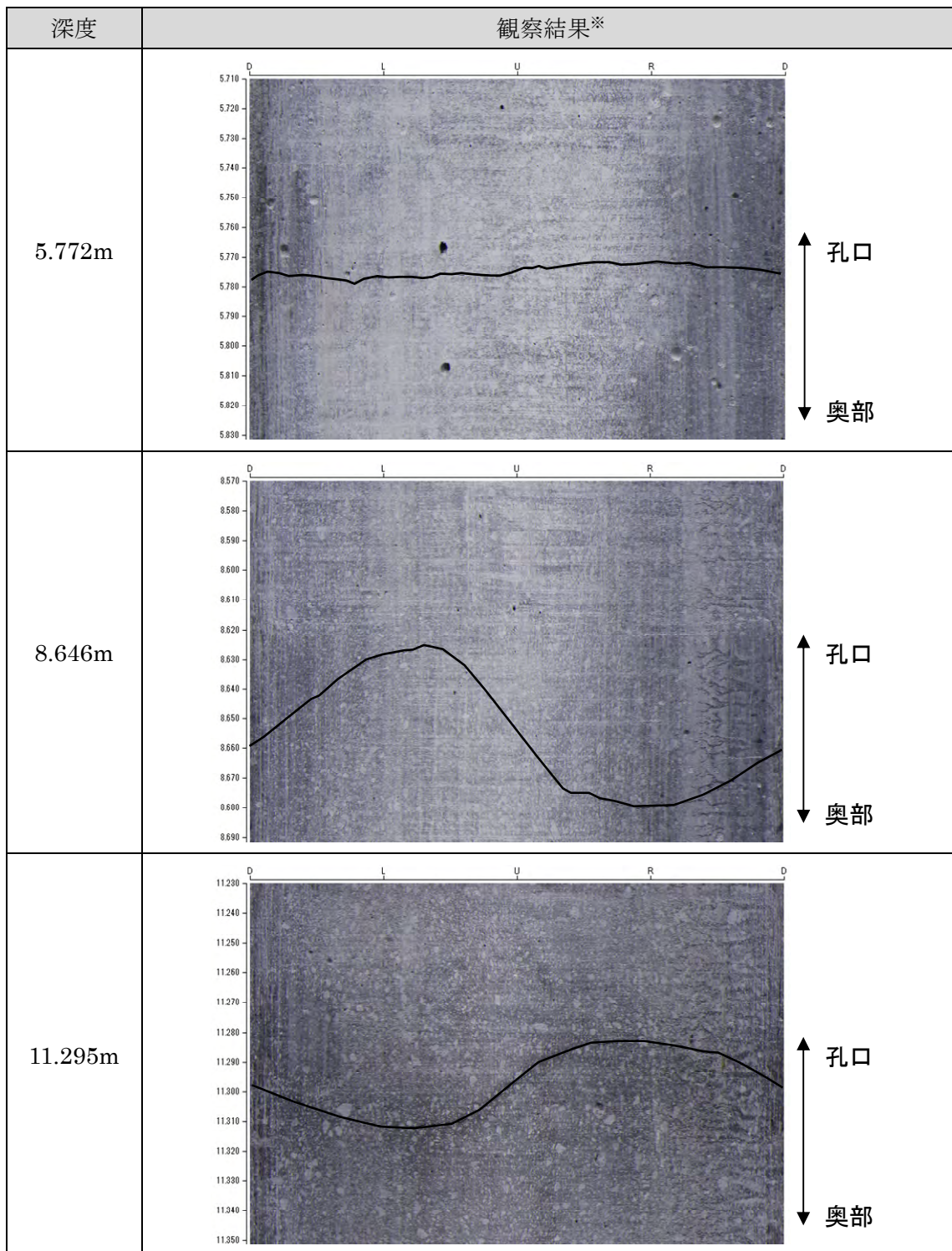
H23年度までに確認されているひび割れの位置を図8.5-3に示す。確認されているひび割れの幅はいずれも0.25mm以下である。また、今年度の観察結果を図8.5-4に示す。

注) 判定可能なひび割れ幅の最小単位は、1ピクセルの画幅（0.25mm）に相当する。「幅」が0.25mmより小さいひび割れに対して、ひび割れの「有無」を検知することは可能であるが、ひび割れの「幅」を定量的に判定できない。そのため、確認されたひび割れの幅は「0.25mm以下」とした。



- ・①、②：H22年度BTV観察（H22年12月2日）に確認
- ・③：H23年度BTV観察（H24年1月13日）に確認

図 8.5-3 H23年度までにBTV観察で確認されたひび割れ位置



※ひび割れ位置をトレースしている

図 8.5-4 今年度 (H25 年度) の BTV 観察結果

参考文献

- [1] 気象庁：気象統計情報 震度データベース検索
(http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html)
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度 管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2011).
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度 管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書, 第Ⅱ分冊 (2010)
- [4] 松本他：ダムで観測された強震記録の解析、ICOLD 第 73 回年次例会ワークショップ提出論文、2005 年 10 月
- [5] 独立行政法人防災科学技術研究所：(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- [6] 汐見勝彦：防災科研 Hi-net 地中地震計設置方位情報推定方法の改良、防災科学技術研究所研究報告、第 80 号、2012 年 11 月

第9章 ボーリング孔等の閉鎖技術の検討

第9章 ボーリング孔等の閉鎖技術の検討

9.1 本検討の背景・目的

【目的】

施設の閉鎖に係る検討として、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖技術についての検討を行う。ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖について、実施工における実用的な施工技術の把握を主な目的として施工方法等について調査する。

国内外の既往文献等より、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖に関する情報を収集し、現状での閉鎖技術の状況を把握するため、以下に示す項目を実施する。

- (1) 既往研究の調査
- (2) 閉鎖に用いる材料の調査
- (3) 施工方法の調査

【まとめ】

本検討は、上記の地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験のうち、施設の閉鎖に係る検討として、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖技術について、実施工における実用的な施工技術とその課題の把握を主な目的として、使用材料、施工方法等について既往の研究成果の調査を行った。

ボーリング孔の閉塞に関しては、地層処分以外でのボーリング孔の閉塞時の要求項目としては、現状での帯水層の水質の維持など環境の観点で閉塞の主眼となり、セメント系での置換工法が用いられているのが現状であることがわかった。また、地層処分分野では超長期間の閉塞に主眼が置かれるため、緩衝材と同様にベントナイト系でのボーリング孔の閉塞が主体の研究対象となり、そのための施工方法が検討されている。しかし、現状では、明確な要求項目が明らかになっていないことに加え、未だ施工方法が確立されていないことがわかった。

アクセス坑道の閉塞等に関しては、埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料が調査対象の各国間で異なることがわかったので、それらを整理した。それら要求性能を確保するための施工方法については吹付け工法による締固め、転圧工法等による締固め、およびベントナイト等の土質系材料のブロックの積み込みが抽出されたが、まだ確定されていないのが現状であった。

9.1.1 本検討の背景

発電所廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分においては、地下 50m以深の大断面の地下空洞型処分施設における処分を概念とした検討が行われてきている。これまで、処分施設の閉鎖技術としては、地上での小規模要素試験等において基礎的な試験が行われているのみであり、今後の地下空洞型処分施設的设计・建設に当っては、現実に即した試験条件下での確証的な試験が必要となる。特に、処分施設の人工バリア上部は高所で狭隘な空間であることから、この空間を閉鎖する埋戻し材が、実施工において要求される必要性能を確保できるか、また、現実的で合理的な施工方法を確立できるかを検証する必要はある。

上記の背景の下、平成 25 年度より地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験が開始され、大断面の地下空洞において、埋戻し材としての要求品質の確保と、合理的な施工技術、施工方法の実規模施設への適用性の確証を目的とし、具体的な処分施設を模擬した実規模施設において施工試験を実施し、実用的な施工技術の確立に資する検討が行われることになっている。なお、平成 19 年度から 25 年度までは、余裕深度処分の実規模大施設の建設に係る施工技術等を確認した「地下空洞型処分施設性能確証試験」が実施されている。

9.1.2 本検討の目的

本検討は、上記の地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験のうち、施設の閉鎖に係る検討として、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖技術について、実施工における実用的な施工技術とその課題の把握を主な目的として、使用材料、施工方法等について既往の研究成果の調査を行った。

9.2 既往研究の調査

9.2.1 ボーリング孔の閉塞技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理

ボーリング孔の閉塞技術に関しては、これまでに国内外の放射性廃棄物処分分野に係る諸機関において様々な検討が行われている。そこで、本業務では以下の手順で、ボーリング孔の閉塞技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性を整理した。

(1) ボーリング孔の閉塞技術に関する国内外の既往研究

ボーリング孔の閉塞技術に関する既往検討は、研究としての位置づけで実験的に行われたもの（原位置試験、室内試験）と実際に施工が行われたものに大別される。実際に施工が行われたものは、処分施設設置箇所として計画されたが、その後その場所での建設が断念され、（以下、サイト放棄という）そのサイトの現状回復が主な目的となるため、放射性廃棄物処分の観点での閉塞とは目的が異なる。

そこで、本業務では研究の位置づけで実験的に行われたもの（原位置試験、室内試験）に主眼を置き調査を行ったが、補足的な位置づけで実際に施工が行われたものについても調査を行った。

ここで対象とする既往研究を表 9.2-1 に示す。同表では実験的に行われたものをⅠと、実際に施工が行われたものをⅡと分類している。

表 9.2-1 ボーリング孔の閉塞技術に関して調査対象とする既往研究

No	プロジェクト名	分類	サイト	実施機関	実施期間
1	STRIPA Project -PhaseII-	Ⅰ	Stripa（スウェーデン）	OECD/NEA	1980-1992
2	試錐孔閉塞技術の開発	Ⅰ	瑞浪（日本）	JNC	1985-2004
3	GTS Project -PhaseIV-	Ⅰ	Grimsel（スイス）	Nagra ほか	1994-1996
4	RESEAL Project	Ⅰ	Mol（ベルギー）	ONDRAF/NIRAS SCK/CEN ほか	1996-2005
5	ESDRED Project -SB-	Ⅰ	Mont. Terri（スイス）	EURIDICE ESDRED ほか	2005-2008
6	Abandonment of Boreholes	Ⅱ	Shellafield（英国）	Nirex	2001
7	Borehole Sealing and Closure Project	Ⅱ	Dounreay（英国）	Nirex	2003
8	Borehole SB4a Sealing/Filling Project	Ⅱ	Wellenberg（スイス）	Nagra	1994-2002

1) STRIPA Project -PhaseII-（スウェーデン）

Stripa Project は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発を目的として、スウェーデンの花崗岩中に位置する Stripa 鉱山（図 9.2-1 参照）の廃坑を利用して OECD/NEA により 1980～1992 年に実施された国際共同研究である。プロジェクトは PhaseⅠ～Ⅲ で構成されており、PhaseⅡ におけるボーリング孔の閉塞試験では、穴開き銅製パイプ中に高密度に締固められたベントナイトコアを閉塞材料として、実際のボーリング孔（孔径 76mm、深度 80m）での閉塞試験を行っている。

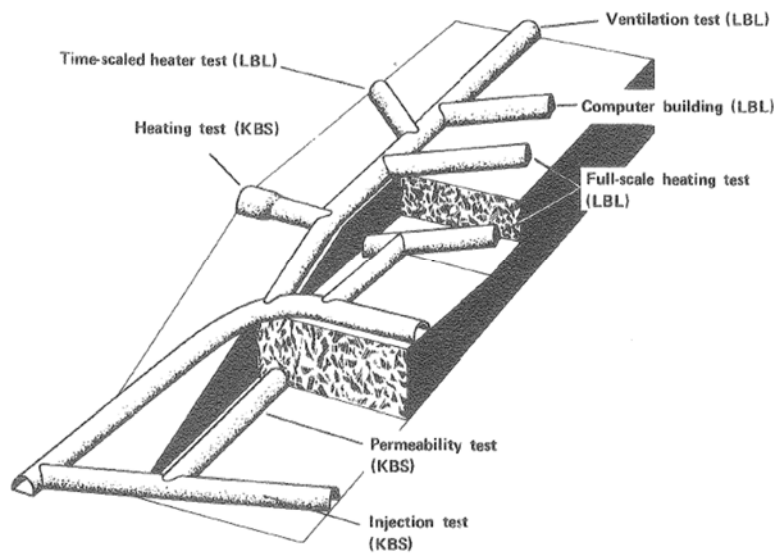


図 9.2-1 Stripa 鉱山の外観図[1]

2) 試錐孔閉塞技術の開発（日本）

東濃地科学センターが計画している瑞浪超深地層研究所（MIU）計画では、結晶質岩の代表としての花崗岩を対象にして、地質環境の評価のための体系的な調査・解析・評価技術の基盤の開発と、深地層における工学的技術の基盤の開発を目的とした地層科学研究を進めている。

東濃地域周辺は、中生層（美濃堆積岩類）とそれを貫く後期白亜紀花崗岩体（土岐花崗岩；82～68Ma）により基盤岩が形成されている（図 9.2-2 参照）。主要な断層として東濃地域のほぼ中央に東西系の走向を示す月吉断層、南東部に北東系の山田断層帯が分布する。瑞浪超深地層研究所は結晶質岩の淡水系地下水を対象とした研究施設という位置づけである。

研究は大きく図 9.2-3 に示すように 3 つの段階に分けて進めている。現在は主に、第 3 段階（研究坑道を利用した研究段階）を行っている。

第 1 段階（地表から調査予測研究段階）の調査に用いたボーリング孔は、調査後にモニタリング孔として使用されるが、ボーリング孔自体が水みちとなり、地質環境に人工的な擾乱を与える可能性があることから最終的に閉塞する必要がある。また、ボーリング孔を使った調査中逸水が発生し、逸水防止対策を施した箇所での水理特性調査や地下水化学組成調査は、測定精度に影響を与える可能性がある。そこで、本調査では、これらについて現状技術の調査・評価を行い、当該技術に関する課題の抽出と課題解決に向けた技術開発手順の検討を行った。ボーリング孔閉塞技術の調査では、文献調査を行い閉塞材としてベントナイト粘土、ベントナイトペレット、エタノールベントナイトの 3 種類を抽出した。

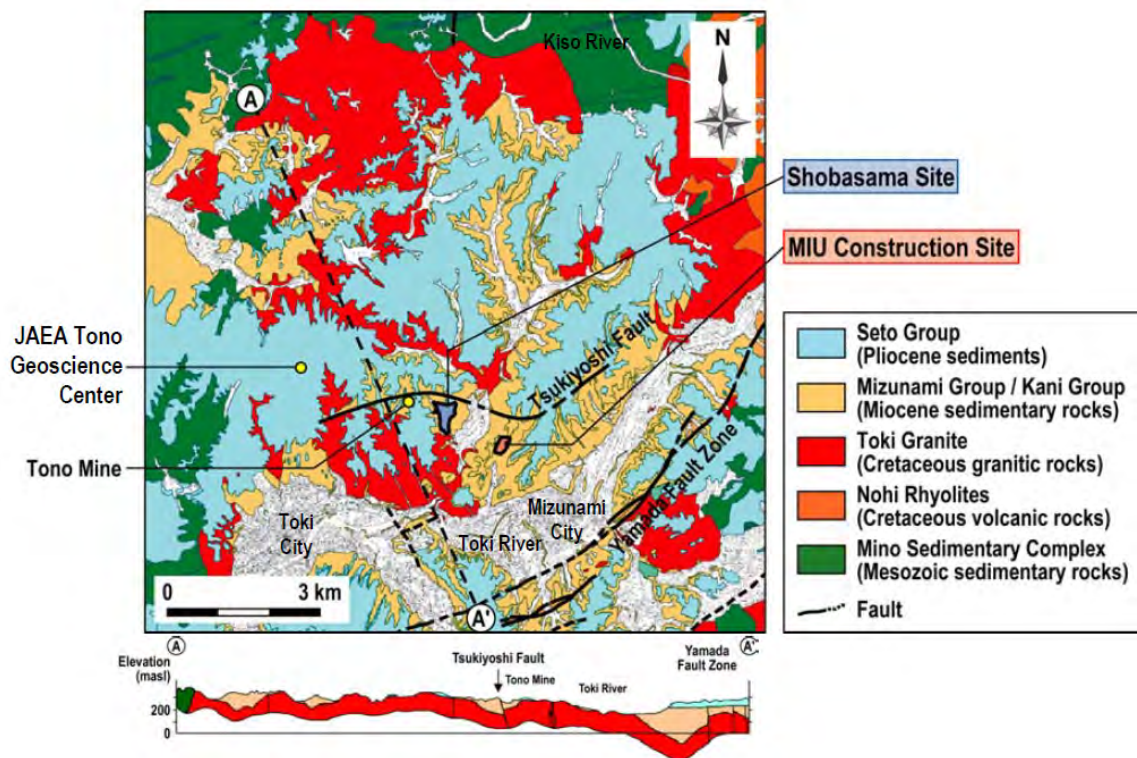


図 9.2-2 瑞浪超深地層研究所周辺における地質[2]



図 9.2-3 瑞浪超深地層研究所の研究計画[3]

3) GTS Project -PhaseIV- (スイス)

Grimsel 試験サイト (Grimsel Test Site : GTS) は、1984 年に NAGRA によって設置された地下研究所である。スイス中央部の海拔 1,730m、地表から深さ 450m の結晶質岩の岩

体内にある（図 9.2-4 および図 9.2-5 参照）。この試験サイトでは、掘削を開始した 1983 年より、地質学、地球物理学、水文地質学、岩石力学および放射性核種移行等を含む多くの分野で幅広い調査を行っている。

2003 年より、実際の処分により近い時間スケールおよび環境条件で処分概念を検討するための研究を目的とした Phase VI が実施されている。具体的なプロジェクト内容としては、母岩の間隙の空間分布およびコロイド形成と核種移行に関する調査、核種の長期拡散試験、長期セメント試験が実施されており、原位置での遠隔操作定置試験や長期材料試験施設の設置等が計画されている。Grimsel 試験サイトでの調査研究には、フランス、ドイツ、日本、スペイン、スウェーデン、スイス、台湾、チェコ、米国、フィンランド、英国、韓国、欧州連合（EU）からの約 25 の組織および国内外の多数の大学、研究所および会社等が参加している。

1994～1996 年に実施された Phase IV では、安全評価に係わる詳細な調査プログラムが組み立てられ、処分場としての適用性、実現性評価および Grimsel の研究サイトとしての適性に関する調査が行われるとともに、他国研究プログラムとの連携を図り、ボーリング孔の閉塞や弾性波トモグラフィの技術開発、空洞近傍の特性取得および放射性核種の移行メカニズム解明のための様々な技術が開発された。ボーリング孔の閉塞に関する検討では、水平ボーリング孔の閉塞を対象として 4～10mm の粒径分布を持つベントナイトペレットを材料とした 2 種類の打設工法（空気圧送方式、改良型コアバレル方式）について、トンネル間にほぼ水平になるよう掘削された 2 本のボーリング孔（径 96mm、長さ 30m 以上）を使用した施工試験が行われた。施工後、膨潤圧力を 4 ヶ月間に亘ってモニタリングし、さらに、膨潤圧力が一定になったことを確認したうえで、水理性能、力学性能に関する品質確認試験が行われた。



図 9.2-4 Grimsel 試験サイト近傍の航空写真[4]

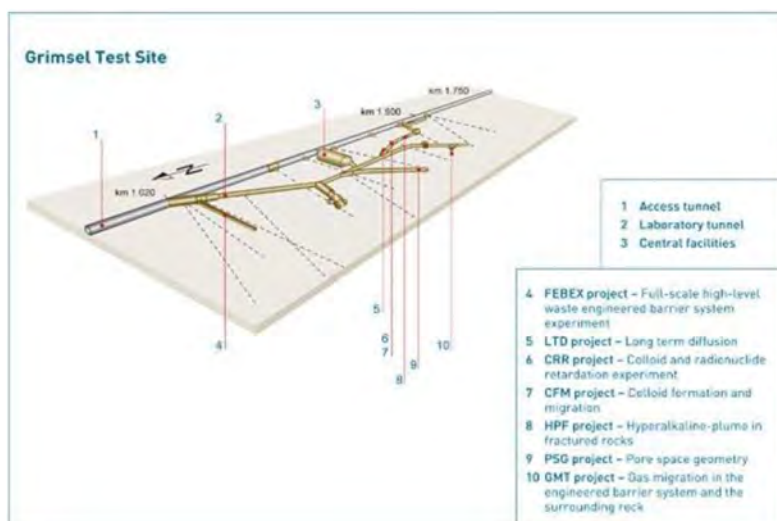


図 9.2-5 Grimsel 試験サイトの坑道レイアウト[4]

4) RESEAL Project (ベルギー)

Reseal Project は、ボーリング孔および立坑の閉塞を実証する目的で 1996 年に Nuclear Fission Safety における EC の特別 RTD プログラムの枠組みで、EC からの財政支援と ANDRA、ENRESA および ONDRAF/NIRAS の委託を受けて RESEAL I としてスタートした研究プロジェクトである。続いて、2000 年には EC の財政支援と ANDRA および ONDRAF/NIRAS の委託を受けて RESEAL II がスタートし、2005 年 3 月までにすべての計画を終了した。一連の実証試験は図 9.2-6 に示す Mol の Boom 粘土内の地下深度 230m の位置に掘削された HADES 地下研究施設で実施され、主に閉塞材料の選定、施工技術やモニタリング技術の開発およびモデル化に関する検討が行われた。閉塞材料についてはベントナイトの使用が検討された。

ボーリング孔の閉塞試験では、Mont. Terri (スイス) の直径 270mm のボーリング孔を用いて高密度に締固められたベントナイトブロックの適用性が検討された。閉塞材料には、カルシウム化ベントナイト Calcigel と珪砂の混合材料が使用され、閉塞材料については混合比を変えて室内試験および実際のボーリング孔を用いた閉塞試験が実施された。

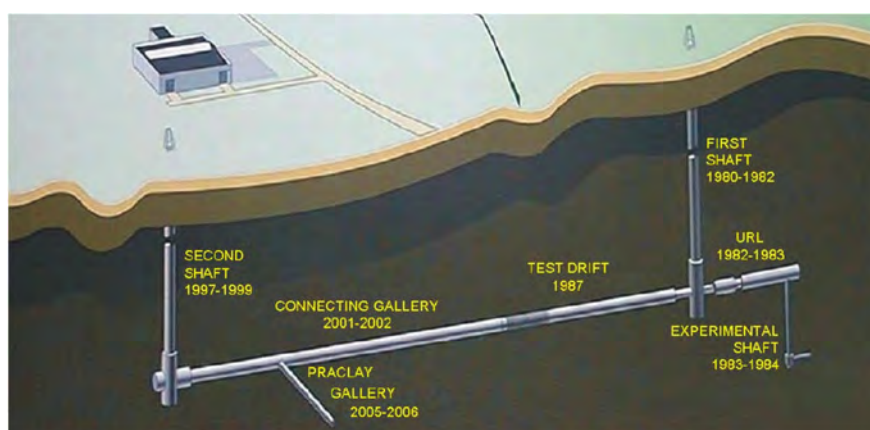


図 9.2-6 HADES 地下研究施設レイアウト[5]

5) ESDRED Project -SB- (スイス)

ESDRED (Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs) は、欧州 9 カ国の 13 機関が参加する国際プロジェクトである。使用済燃料や長寿命放射性廃棄物の地層処分に關する安全を実証するための技術基準を確立することを目的として、2004 年から 5 年間実施された。技術的課題としては、①緩衝材構築技術、②廃棄体の輸送および定置技術、③重量物の設置技術、および④一時閉塞技術に關する検討が行われた。また、運営面で、⑤トレーニングおよびコミュニケーション、⑥統合、⑦マネージメントに關する検討が行われた。

①緩衝材構築技術 (図 9.2-7 参照) のうち、Mont Terri で実施されている粘土層に關する閉塞に關する研究プロジェクトの中で、SB Project はドイツの GRS および BGR が中心となって粘土/砂の混合物の自己閉塞性能に關し原位置試験を行い、透気性や透水性に關する検討を行っている。この試験では、横置き型坑道の中に模擬廃棄体を定置し、坑道と模擬廃棄体との間の隙間をベントナイトペレットで充填することを実施した。図 9.2-7 の中央の円形のものが模擬廃棄体、その周りの灰色のものがベントナイトペレットである。ベントナイトペレットは、図 9.2-7 上部の緑色の円筒状のスクリーオーガによって筒先より排出され、隙間を充填する、というものである。



図 9.2-7 緩衝材構築技術に關する検討例 (ベントナイトペレットの充填状況) [6]

6) その他サイト放棄に伴う現状回復關連

イギリスの Nirex は、1989 年から 1990 年にかけて Sellafield に對して低・中レベル放射性廃棄物の地下処分施設としての適性を評価するための調査を実施し、1991 年には低中レベル放射性廃棄物の処分場として選定した。しかしながら、Cumbria 郡議会在がこの計画を否決し、1997 年に Nirex がこれを了承したため、サイトの放棄が決定された。そのため、1989 年から 1997 年の期間に掘削した地質調査のために 28 本の深層ボーリング孔と 35 本の浅層ボーリング孔

の埋戻しが必要となり、セメントベントナイトによるグラウト注入が行われた。

同じくイギリスの Nirex は 1989 年から 1991 年にかけて当時 FBR 開発の中心地であった Dounreay において低・中レベル放射性廃棄物の地下処分施設のサイト選定を目的とした地質調査を実施した。この期間に深度 1327.4m および 964.8m の 2 本のボーリング孔が削孔され、1995 年までの間に調査・研究が行われた。しかしながら、1998 年に主な施設を移管された英国原子力公社(UKAEA)が Dounreay 再処理施設の閉鎖を決め、2000 年には Dounreay の環境復旧計画を発表した。これを受け、Nirex は両ボーリング孔の閉塞を行った。

スイスの Wellenberg では、低レベル、中レベル放射性廃棄物の処分場候補地の調査の一部として多くのボーリング孔が掘削された。それらの中で傾斜ボーリング孔 SB4a は地下処分施設の設置が計画されている岩盤部に隣接するため、放射性核種の最小限の拡散を規定する安全技術指針に基づき閉塞する必要があった。スイスでこのような措置がとられるのは初めてのことで、本プロジェクトは先行研究的な役割を含んでいる。

ボーリング孔の閉塞材料として、セメント、バライトおよび粘土ペレットを使用した。セメントは間隔を置いて施工され、主に強度を与えている。一方、バライトと粘土ペレットは低透水性の閉塞材料として使用された。これらの材料の特性は事前に室内試験で確認された。その後、原位置にて SB4a 斜めボーリング孔の閉塞作業を行った。

Wellenberg では、処分場建設の計画があったが、1995 年 6 月の州民投票では、探査坑掘削のための地下空間利用の州への許可申請等は否決され、処分概念を見直し、許可申請を州に再度提出されたが、2002 年 9 月の州民投票で再度否決された。

(2) ボーリング孔の閉塞技術に関する閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

前述のとおり整理した各プロジェクトで実施したボーリング孔の閉塞技術に関し、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等について整理を行った。

1) ボーリング孔の閉塞に関する検討条件

各プロジェクトのボーリング孔の閉塞における処分対象、研究段階、および対象母岩を表 9.2-2 に示す。HLW では天然バリアに超長期の核種移行遅延機能を期待しているため、ボーリング孔の閉塞に関する検討が多く実施されている傾向にある。以下に、各プロジェクトの詳細を示す。

表 9.2-2 各プロジェクトのボーリング孔の閉塞における検討条件

No	プロジェクト名	処分対象	研究段階	対象母岩
1	STRIPA Project -PhaseII-	HLW	原位置試験	花崗岩
2	試錐孔閉塞技術の開発	HLW	室内試験	(室内)
3	GTS Project -PhaseIV-	HLW	原位置試験	花崗岩
4	RESEAL Project	ILW/HLW	原位置試験	Boom 粘土
5	ESDRED Project -SB-	HLW	室内試験 原位置試験	Opalinus 粘土
6	Abandonment of Boreholes (Shellfield)	LLW/ILW (サイト放棄)	実施工	砂岩 凝灰岩
7	Borehole Sealing and Closure Project (Dounreay)	LLW (サイト放棄)	実施工	砂岩・ 花崗岩
8	Borehole SB4a Sealing/Filling Project (Wellenberg)	LLW/ILW (サイト放棄)	実施工	泥炭岩

2) STRIPA Project -PhaseII-

STRIPA Project[7]では調査のために掘削されたボーリング孔が埋め戻されず残された場合、核種移行経路になると考えられるため、PhaseII において高密度に締固められたベントナイト（高圧縮ベントナイト、HCB; Highly compacted bentonite）を用いた閉塞方法に関する検討を行っている。

本検討では高圧縮ベントナイトの水の浸入による膨潤割合、動水勾配を有する環境でのパイピングに関する抵抗性、膨潤後のベントナイトと孔壁（ダイヤモンドピットで掘削された滑らかな面）間のせん断抵抗性が試験された。全ての試験では穴開き銅製（穴開き銅版、もしくは銅製メッシュ）パイプ内に高圧縮ベントナイトを充填したもの（図 9.2-8 参照）をボーリング孔に入れる方法をとっている。

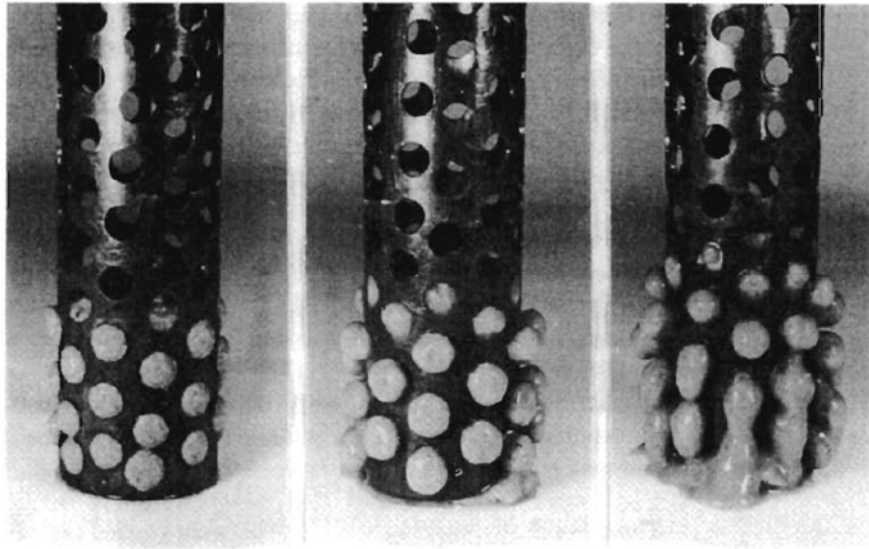


図 9.2-8 穴開き銅製パイプ内の高圧縮ベントナイトの浸潤による時間経過[7]

試験は水平ボーリング孔 ($\phi 56\text{mm}$ 、 $L96.6\text{m}$) 1本と鉛直ボーリング孔 ($\phi 76\text{mm}$ 、 $L14\text{m}$) 2本で実施した。鉛直ボーリング孔の閉塞試験のレイアウトを図 9.2-9 に示す。図 9.2-9 に示すように、本試験では閉塞後のベントナイトの透水特性を把握できるように、動水勾配が設定できるようになっている。

試験の結果、本方法は水平ボーリング孔と鉛直ボーリング孔共に、ボーリング孔の閉塞に実用的であることが示された。水平ボーリング孔では約 450 の動水勾配 (1m 区間に 4.5MPa) を設定しても、パイピングが生じなかった。また、1~4mm のクリアランスであれば、十分に対応が可能であった。また、原位置で測定した透水係数は $10^{-12} \sim 10^{-13}\text{m/s}$ の範囲であり、健全な母岩 (花崗岩) より十分に小さな値がえられている。

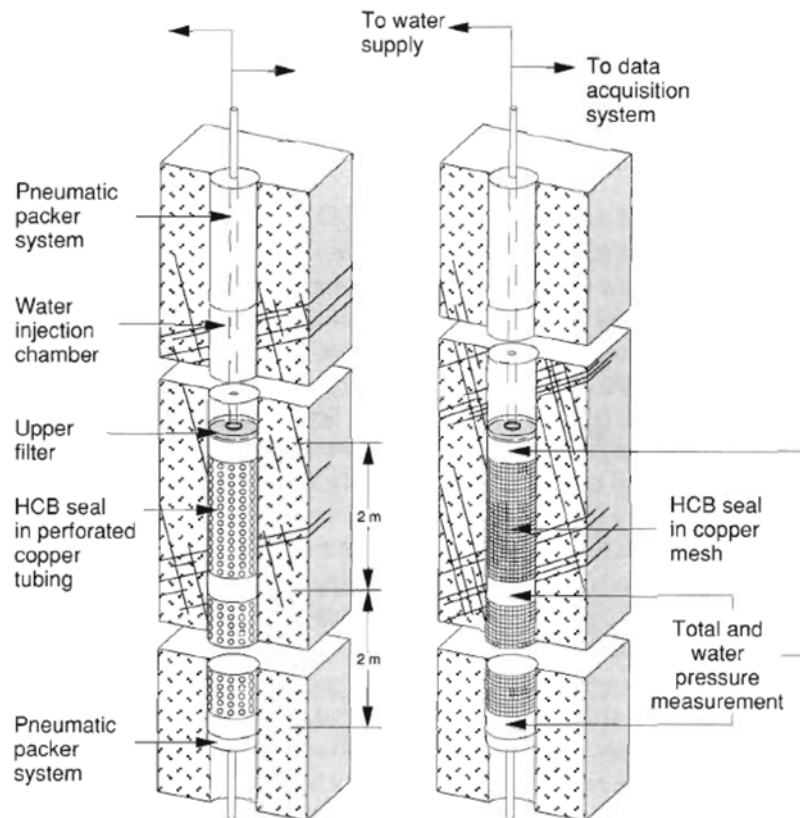


図 9.2-9 鉛直ボーリング孔の閉塞試験レイアウト（左：穴開き銅版、右：銅製メッシュ） [7]

以上の調査結果に基づき、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等に関して整理をした。その結果を以下に示す。

① 処分施設サイト特有の条件や環境条件

本手法が前提とする環境条件は、穴開き銅製パイプが挿入でき、クリアランスが一定で狭いことが必要のため、滑らかな孔壁、つまり孔壁の崩壊が生じていない、孔曲りが生じていない、ケーシング等が設置されていない等となる。また、対象とする区間はボーリング孔全長というよりも、限られた区間が対象となる。

② 閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

基本的に要求される性能は、超長期間に亘る核種の卓越した移行経路の閉塞である（事前に具体的な要求性能を設定していない）。つまり、長期間の低透水性を期待している。

3) JAEA（旧 JNC）東濃地科学センターにおける試錐孔閉塞技術の開発

JAEA（旧 JNC）東濃地科学センターにおける試錐孔閉塞技術の開発[8]において、閉塞材としてベントナイト粘土ブロック、ベントナイトペレット、およびエタノールベントナイトの3種類を選定し、室内試験において閉塞性の確認を行っている図 9.2-10 参照）。各3種類共に、 10^{-11}m/s オーダーの低透水を示し、閉塞材として適用可能であると判断している。

閉塞材は低透水性だけでなく、充填時に隙間を作らない打設充填性能、ボーリング孔の変形をある程度抑制する変形抑制性能、ボーリング孔壁の崩壊等により新たに発生した隙間を充填する空隙充填性能が要求される。閉塞材ごとに、整理し、以下のようにまとめている[8]。

- ✓ ベントナイト粘土ブロックは固形であり、膨潤性も高いことから、変形抑制性能や空隙充填性能は高いが、充填時の作業手法によっては打設時に隙間が発生する可能性がある。
- ✓ ベントナイトペレットは設置時の性状が粒状であり膨潤性も高いことから、打設充填性能や空隙充填性能は高いが、充填物の強度が不足しボーリング孔壁の変形抑制性能が劣る可能性がある。
- ✓ エタノールベントナイトは設置時の性状が液状であり膨潤性も高いことから、打設充填性能や空隙充填性能は高いが、充填物の強度が不足しボーリング孔壁の変形抑制性能が劣る可能性がある。

上記の 3 種類の閉塞材は設置時の性状が固体、粒状、流体であることから、閉塞するボーリング孔の形状や注入方式に合わせて選択する必要があるとしている。各閉塞材の利点と欠点の整理結果を表 9.2-3 のようにまとめている。閉塞手法はボーリング孔の形態や閉塞材に合わせて選定する必要があり、また、閉塞後の検証方法はまだ確立された方法が無いとしている[8]。

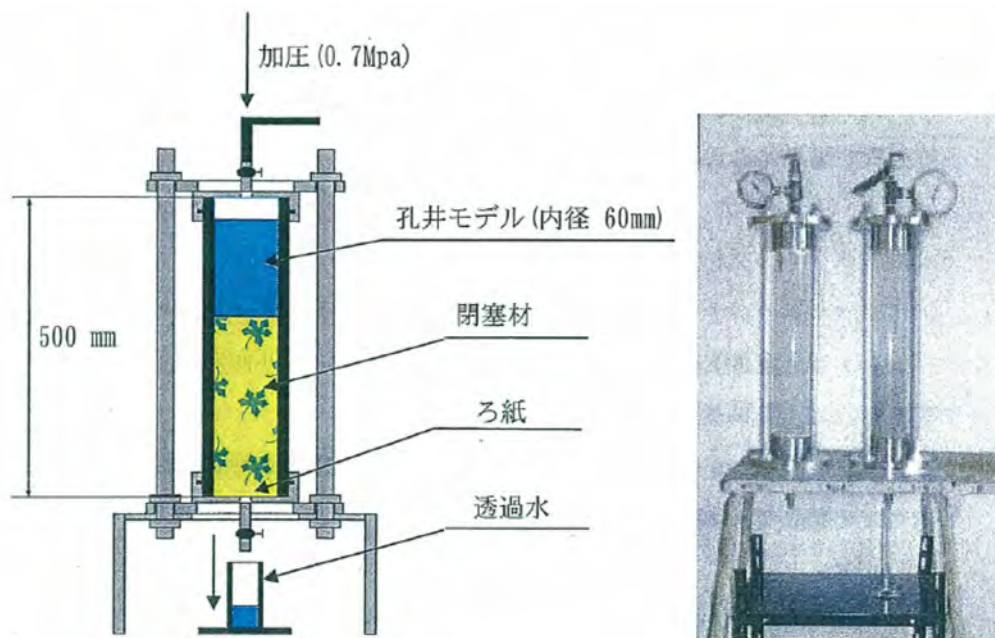


図 9.2-10 簡易透水試験装置 (左：概念図、右：写真) [8]

表 9.2-3 上部低拡散材計器仕様および数量一覧表

閉塞材	利点と欠点	
ベントナイト粘土ブロック	利点	<ul style="list-style-type: none"> ・空隙充填性能が高い ・変形抑制性能が高い ・閉塞材密度を調整できる
	欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・注入方法が限定される。 ・施工方法によっては空隙が生じる。
ベントナイトベレット	利点	<ul style="list-style-type: none"> ・空隙充填性能が高い ・施工が容易
	欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・変形抑制性能が低い ・閉塞材密度の調整ができない
エタノールベントナイト	利点	<ul style="list-style-type: none"> ・空隙充填性能が高い ・施工が容易 ・閉塞材密度を調整できる。
	欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・変形抑制性能が低い

以上の調査結果に基づき、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等に関して整理をした。その結果を以下に示す。

① 処分施設サイト特有の条件や環境条件

本検討での前提条件は調査のために掘削されたボーリング孔全般であり、ボーリング孔壁が崩壊しやすいケース等も対象としている。また、設置してあるケーシングについては撤去を前提としている。

② 閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

閉塞材に求める性能は低透水性だけでなく、充填時に隙間を作らない打設充填性能、ボーリング孔の変形をある程度抑制する変形抑制性能、ボーリング孔壁の崩壊等により新たに発生した隙間を充填する空隙充填性能を挙げているが、定量的な目標は設定されていない。

4) GTS Project -PhaseIV-

サイト調査で掘削されるボーリング孔は潜在的核種移行経路となりえるため、そのシーリング技術の検討として PhaseIV の中で、ボーリング孔の閉塞プロジェクトとして BOS (Borehole sealing)が行われた[9]。

BOS では以下を目的としている。

- ✓ 孔径 76~146mm のボーリング孔のシーリング概念の構築
- ✓ シーリング要素の力学プラグの最適化
- ✓ ボーリング孔長 500m までのシーリング材の定置機器の開発
- ✓ 実物大スケールでのシーリング材の定置技術の実証
- ✓ シーリングシステムの水理特性と力学的安定性の確認

✓ シーリング要素の品質保証方法の確立

試験は図 9.2-11 に示すように、主要坑道 (Main access tunnel) と調査坑道 (Laboratory tunnel) 間にほぼ水平になるよう掘削されたボーリング孔 2 本 (BOS 95.001 および BOS 95.002) で実施している。ボーリング孔間の離れは 30m で坑道の掘削影響が無い領域を試験エリアとしている[10]。試験エリアの透水性は 10^{-12}m/s オーダーであり、健全な花崗岩である。

水平ボーリング孔の閉塞は 4~10mm の粒径分布を持つベントナイト (MX-80) ペレットを材料とした 2 種類の打設工法 (空気圧送方式、改良型コアバレル方式) にて、図 9.2-12 に示すトンネル間の 2 本のボーリング孔 (径 96mm、長さ 30m 以上) を使用した施工試験を行っている。施工後、膨潤圧力を 4 ヶ月間に亘ってモニタリングし、さらに、膨潤圧力が一定になったことを確認したうえで、水理性能、力学性能に関する品質確認試験を行っている。その結果として、閉塞部の透水性は母岩の透水性とほぼ同等の結果を示したとしている。

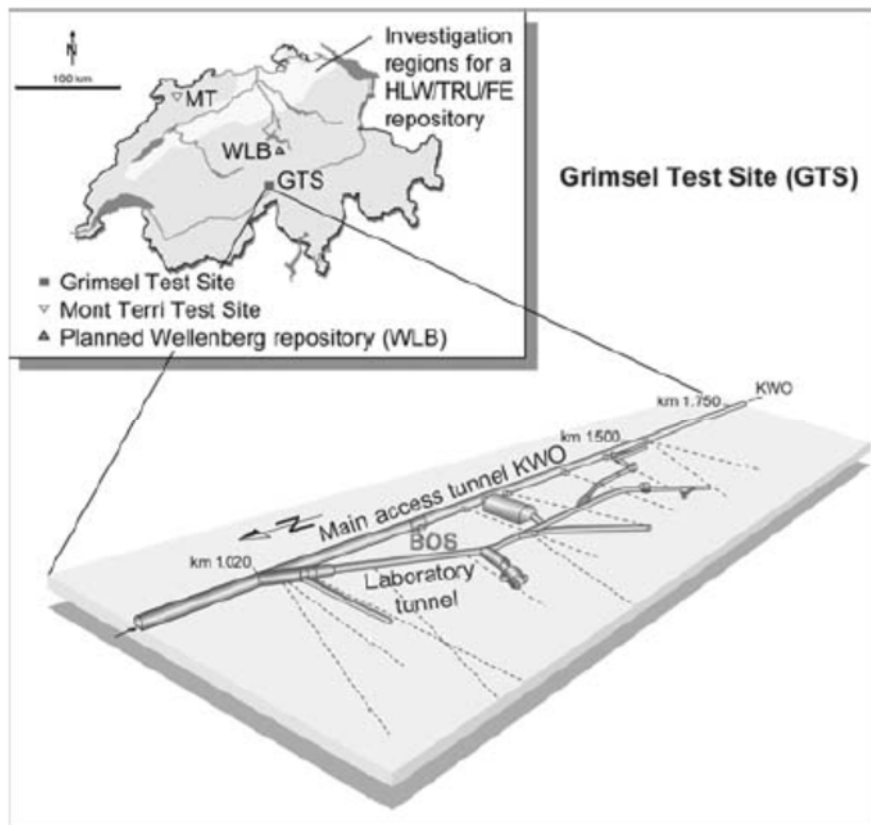


図 9.2-11 上部低拡散材計器配置図

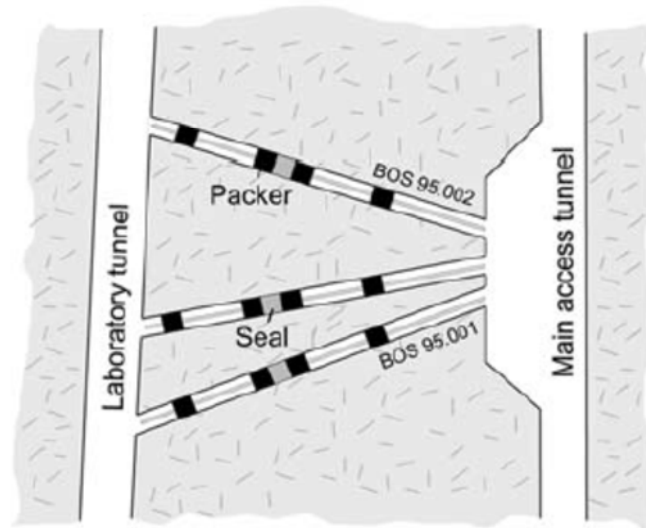
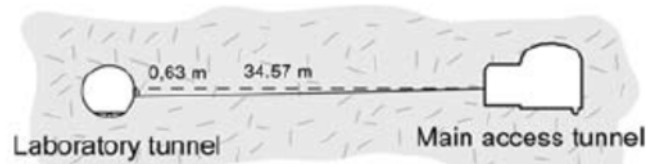


図 9.2-12 BOS 試験レイアウト[10]

以上の調査結果に基づき、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等に関して整理した。その結果を以下に示す。

① 処分施設サイト特有の条件や環境条件

本手法が前提とする環境条件は、水平に掘削されたダイヤモンドピットで掘削された滑らかな孔壁、つまり孔壁の崩壊が生じていない、孔曲りが生じていない、ケーシング等が設置されていない等となる。また、対象とする区間はボーリング孔の限られた区間での対象となる。また、特に湧水が無い箇所のようなものである。

② 閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

基本的に要求される性能は、超長期間に亘る核種の卓越した移行経路の閉塞である（事前に具体的な要求性能を設定していない）。つまり、長期間の低透水性を期待している。

5) RESEAL Project

RESEAL Project[11]ではボーリング孔の閉塞試験として、SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトを Mont. Terri (スイス) で行っている。SBの目的は砂-ベントナイト混合土によるシーリングの技術的実現性の試験および実証である。

地層処分場において閉塞材料に求める性能は、以下の項目としている。

- ✓ ガスの高透過性：廃棄体から発生するガスの蓄圧を避けるために、閉塞材料の不飽和

時に $10^{-15}\text{m}^2 \sim 10^{-14}\text{m}^2$ の高透過性を有すること。

- ✓ 低透水性：初期は $10^{-18}\text{m}^2 \sim 10^{-17}\text{m}^2$ 程度の低透水性を有すること。長期的には岩盤クリープの影響により、更に低減すると考えられる。
- ✓ 緩衝材がガスバントとして機能するように、ガスの破過圧が母岩の間隙水圧以下 (Mont. Terri の場合 2MPa)
- ✓ 緩衝材の膨潤圧はガスの破過圧以下 (ガスが母岩ではなく緩衝材中を透過するため)

SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトでは直径 270mm のボーリング孔を用いて高密度に締固められたベントナイトブロックの適用性を検討している。閉塞材料には、カルシウム化ベントナイト Calcigel と珪砂の混合材料が使用され、閉塞材料については混合比を変えて室内試験および実際のボーリング孔を用いた閉塞試験を実施している。

閉塞材料に関する性能を確認するために原位置で実施された SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの概念図を図 9.2-13 に、実施坑道を図 9.2-14 に、概要図および実施場所を図 9.2-15 に、試験実施状況を図 9.2-16 に示す。材料は砂ベントナイト比が 65% : 35% と、50% : 50% とし、施工は図 9.2-16 に示すように原位置での締固めで行われている。

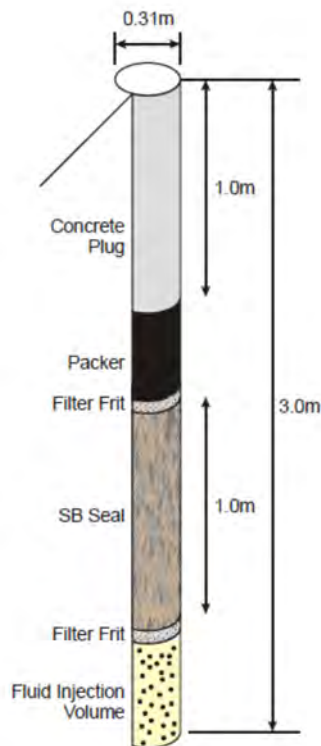


図 9.2-13 SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの概念図[11]

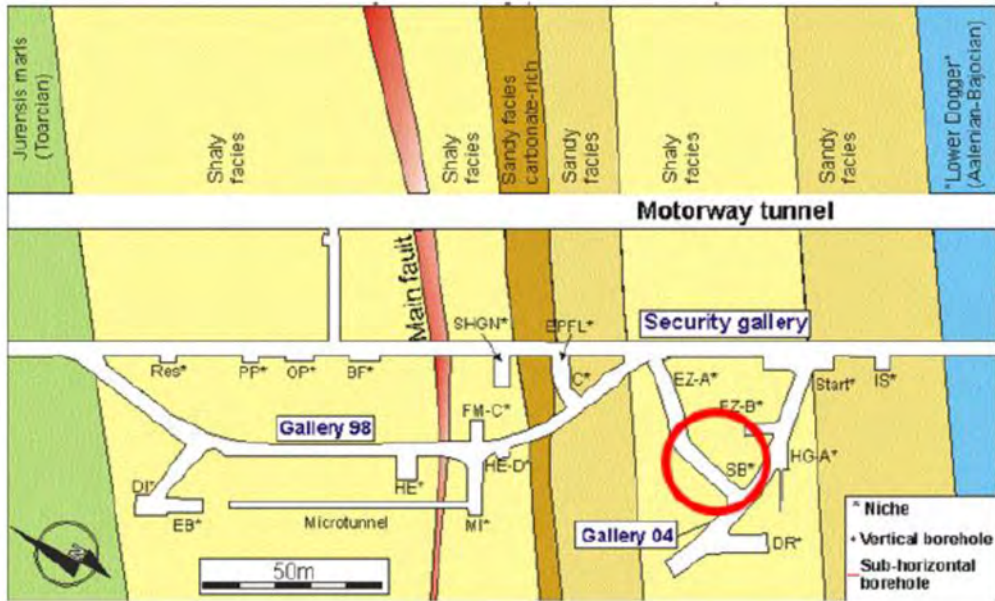


図 9.2-14 SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの実施坑道[11]

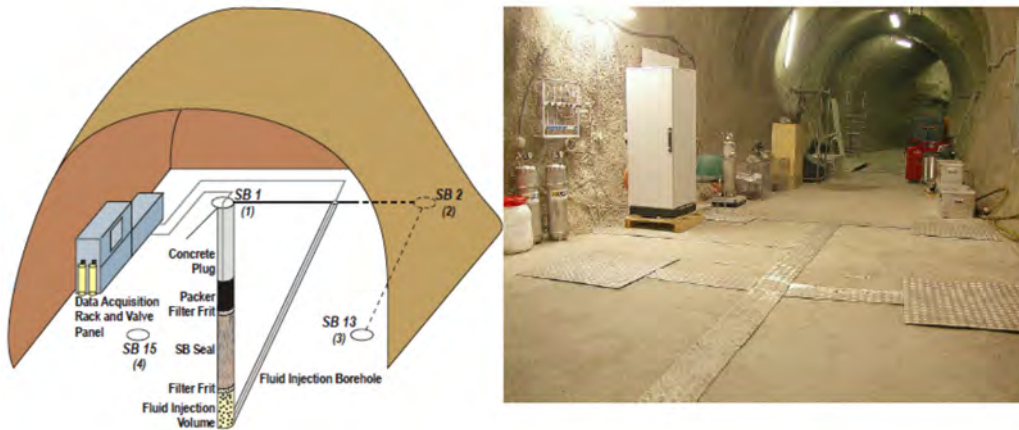


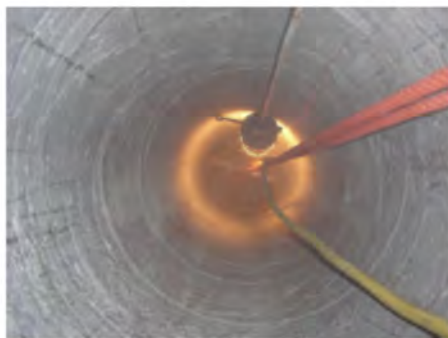
図 9.2-15 SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの概要図および実施場所[11]



a) Empty borehole SB2



b) Gravel of fluid injection volume together with water injection tubes emerging from the inclined injection borehole



c) Installation and compaction of seal material



d) Filter frit at top of seal



e) Packer in borehole SB2



f) Grouted borehole cellar

図 9.2-16 SB (Self-sealing Barriers) プロジェクトの実施状況[11]

SB2 の結果を表 9.2-4 に示す。同表より、SB プロジェクトとしては、室内試験で設定した砂ベントナイト混合土を用いて原位置で実現できることを実証したとまとめている。

表 9.2-4 SB 原位置試験結果[11]

Test parameter	Design values (see Tab. 2.9)	Result of laboratory tests	Result of SB2 test
Installation density	1.93 g/cm ³ (see Tab. 2.4)	1.87 – 1.93 g/cm ³	1.91 g/cm ³
Gas permeability under dry conditions	high (> 10 ⁻¹⁵ m ²)	1.2 · 10 ⁻¹³ m ²	3.29 · 10 ⁻¹⁴ m ²
Water permeability at full saturation	10 ⁻¹⁸ – 10 ⁻¹⁷ m ²	5.2 · 10 ⁻¹⁸ m ²	4.2 · 10 ⁻¹⁸ m ²
Swelling pressure	< 2 MPa	0.2 – 0.4 MPa	0.15 – 0.19 MPa
Gas entry pressure	< 2 MPa	0.4 – 1.1 MPa	0.45 MPa
Gas permeability after gas break- through	high (> 10 ⁻¹⁸ m ²)	1.4 · 10 ⁻¹⁷ m ²	9.3 · 10 ⁻¹⁷ – 4.1 · 10 ⁻¹⁶ m ²

以上の調査結果に基づき、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等に関して整理をした。その結果を以下に示す。

① 処分施設サイト特有の条件や環境条件

本検討が前提とする環境条件は、対象母岩が低透水の粘土であり、湧水等が無い、また将来的には岩盤クリープでボーリング孔が圧縮されることである。

② 閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

廃棄体から発生するガスの蓄圧を避けるために、ガスの高透過性であること、低透水性であること、緩衝材がガスバントとして機能するように、ガスの破過圧が母岩の間隙水圧以下であること、および緩衝材の膨潤圧はガスの破過圧以下であることである。

6) その他サイト放棄に伴う現状回復関連

Sellafield のボーリング孔の閉塞において、既にボーリング孔内に長期計測システムとしてセメントが十分に充填されているものについては、有効なバリア機能が確保されているとみなし、新たな充填を行っていない。ただし、いくつかのボーリング孔では、帯水層に対する止水機能が十分に確保されていない、あるいは、塩水対策が十分でないなどの理由から、部分的あるいは完全に計器を取り外したうえで、セメントバントナイトによるグラウト注入を行っている。また、すべてのボーリング孔において地上部から深度 1.5m までのケーシングを切断し、上方への地下水の移動を防ぐための蓋を取付けたうえで埋め戻す作業を行っている。

Dounreay のボーリング孔の閉塞において、2 本のボーリング孔共に水圧による閉塞のための障害物（堆積物等）の除去、セメント材料（重量比で 6% のバントナイトを含む）によるボ

ーリング孔の充填、孔口（ケーシング頭頂部）の閉塞（溶接図 9.2-17 参照、コンクリートキャップ打設図 9.2-18 参照）、およびボーリング孔の閉塞に伴う廃棄物の処理を行っている。閉塞材料に求めた性能は、力学的安定性の観点から一軸圧縮強度として $10\text{MPa} \pm 4\text{MPa}$ としている。



図 9.2-17 ケーシング頭頂部の溶接による閉塞[12]



図 9.2-18 コンクリートキャップ打設[12]

Wellenberg の傾斜ボーリング孔 SB4a は地下処分施設の設置が計画されている岩盤部に隣接するため、放射性核種の最小限の拡散を規定する安全技術指針に基づき閉塞する必要がある。

ったとしている。ボーリング孔の閉塞材料として、膨潤セメント、バライトおよび粘土ペレットを使用している。セメントは間隔を置いて施工され、主に強度を与えている。一方、バライトと粘土ペレットを低透水性の閉塞材料として使用している。これらの材料の特性は事前に室内試験で確認されている。その後、原位置にて SB4a 斜めボーリング孔の閉塞作業が行われた。

安全上考慮すべき事項の検査として、核種移行に関するバリア機能に影響を与えるパラメータが設定されている。すなわち、長孔を横切る各層の地下水流動、閉塞区間長、および放射性核種の半減期および収着特性について検討が行われている。その結果として、長孔の影響は破碎部に沿った移行経路に相当する程度で、ニアフィールドの高い収着性能と核種の低い拡散性によって、対応する放射線被曝量は保護指標以下に留まることが示され、SB4a 孔の閉塞が安全であることが確認されている。

以上の調査結果に基づき、処分施設サイト特有の条件や環境条件、閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等に関して整理をした。その結果を以下に示す。

① 処分施設サイト特有の条件や環境条件

Sellafield と Dounreay では帯水層の環境保全が基本となっている。また、セメントで固定されている鋼製ケーシング自体は孔口において蓋をすれば水みちにならないと考えられている。Wellenberg では、当初放射性核種の最小限の拡散を規定する安全技術指針の順守が必要となった。

② 閉塞時の要求機能や技術的要件、求められる性能等

Sellafield と Dounreay では環境庁の要求に基づき地表から汚染水の帯水層への浸透、および深部塩水の浸透を防ぐために充填されていることであり、Wellenberg ではもし処分サイトになるのであれば、対応する放射線被曝量は保護指標以下に留まることである。

(3) ボーリング孔の閉塞技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理

ボーリング孔の閉塞技術の使用材料は主にベントナイト系とセメント系に大別される。また閉塞技術の施工方法は使用材料の形態（ブロック、ペレットおよび流体）と関連して決定される。よって、以下に使用材料の形態ごとに整理した。

1) ブロック（円柱ベントナイトブロック）によるボーリング孔の閉塞

STRIPA Project[7]では高密度に締固められたベントナイト（高圧縮ベントナイト、HCB; Highly compacted bentonite）を用いた閉塞方法に関する検討が行われている。

この検討では高圧縮ベントナイトの水の浸入による膨潤割合、動水勾配を有する環境でのパイピングに関する抵抗性、膨潤後のベントナイトと孔壁（ダイヤモンドピットで掘削された滑らかな面）間のせん断抵抗性が試験された。全ての試験では穴開き銅製（穴開き銅版、

もしくは銅製メッシュ) パイプ内に高圧縮ベントナイトを充填したもの (図 9.2-19 参照) をボーリング孔に入れる方法をとっている。

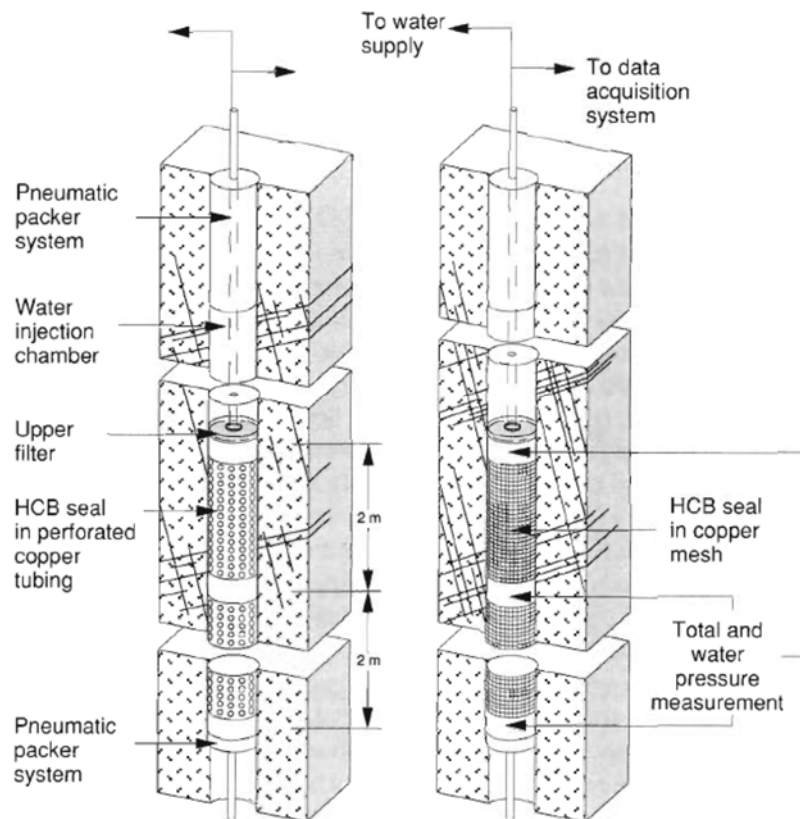


図 9.2-19 円柱ベントナイトブロックの施工方法

(その 1、穴開き銅製パイプによる高圧縮ベントナイトの充填方法) [7]

また R. P. Brenner 等[13]は図 9.2-20 に示すような器具を用いて円柱ベントナイトブロックをボーリング孔底に降ろし、空圧で円柱ベントナイトブロックを留めているせん断ピンを外すことで材料を充填する方法を提案している。岩盤が弱い領域の傾斜ボーリング孔あるいは水平ボーリング孔では、岩盤にダメージを与えたり、円柱型ベントナイトが詰まったりしないようにケーシングが必要となる場合があるが、仮設として設置したケーシングの回収方法については未解決である。ベントナイトの膨潤がボーリング孔の長手方向に広がるのを防ぐため、できるだけ早く円柱ベントナイトブロックの上にセメントによるプラグを打設する必要がある。充填回数を最小限にするためには円柱型ベントナイトは長いほど好ましいが、一方では円柱の器具が詰まり回収できなくなるリスクが生じる。

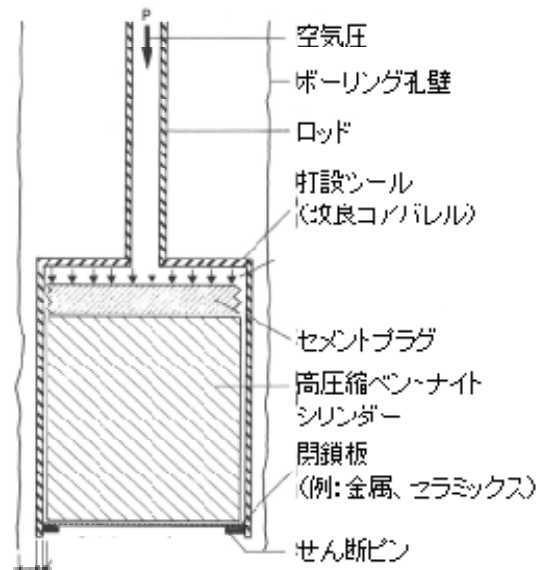


図 9.2-20 円柱ベントナイトブロックの施工方法（その2）[13]に加筆

2) ペレット（ベントナイトペレット）によるボーリング孔の閉塞

ベントナイトペレットは、任意形状の空間に材料を充填できることが長所として挙げられる。このことは、特にボーリング孔が変形している場合に有効である。ベントナイトペレットは高圧縮に成型されたものを使用する。ペレットの密度が低いと施工後に十分に高い密度が得られなくなる。

ベントナイトペレットの簡易な施工方法は沈降工法である。しかしながら、沈降工法による施工は、ボーリング孔が垂直または高傾斜のボーリング孔での使用に限定される。沈降工法では、投入したペレットの重量からベントナイトの飽和後の密度を計算して品質管理を行う。水のあるボーリング孔でも適用可能で、施工が比較的容易であるが、水平ボーリング孔や上向きボーリング孔には使えない。また、塩分濃度が高い地下水があるときは閉塞性能が低くなることが挙げられる。このような条件下では、安全率に余裕を持たせ飽和後の密度が十分確保できるよう設定する必要がある。

P. Blümling [10]は圧縮空気を使ってベントナイトペレットを移送させ、水平ボーリング孔に打設する施工方法を考案している（図 9.2-21 参照）。移送の間、ペレットの一部が砕けることで粒度分布の再配置が発生し、これにより充填性が増す。このため実際の施工でも、飽和後の密度は沈降工法よりも向上すると考えられる。この工法では、不規則な形状をした水平長孔を閉塞することも可能である。圧縮空気によって長距離圧送も可能なため、長距離区間のボーリング孔の閉塞も可能である。ただし、本工法は水のあるボーリング孔や上向きボーリング孔には適用できない。

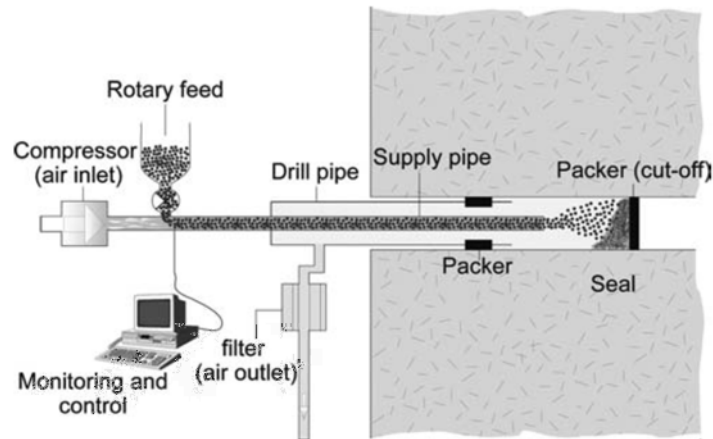


図 9.2-21 ベントナイトペレットによる施工方法（空気圧送）[10]

P. Blümling [10]はベントナイトペレットを打設するために改良したコアバレルを使用する工法を考案している（図 9.2-22 参照）。この工法ではドリルパイプを設置後に、圧縮ベントナイトペレットを詰めた改良コアバレルがドリルパイプの中に挿入され、孔底まで圧送される。ポンプ圧が高くなるとペレットが放出され、ボーリング孔内に充填される。その後、改良コアバレルは回収され、閉塞材料が必要な厚さに達するまでこの手順が繰り返される。この工法の長所は、圧縮空気を使う工法のように特殊な作業が必要なく、通常の掘削作業員で作業を行えることである。また、短所は、本工法は連続処理ではなくバッチ処理となるため、特に深いボーリング孔では多くの時間を要する点が挙げられる。また、不規則な形状をした崩壊性のボーリング孔に適用可能だが、水のあるボーリング孔や上向きボーリング孔では打設できない。

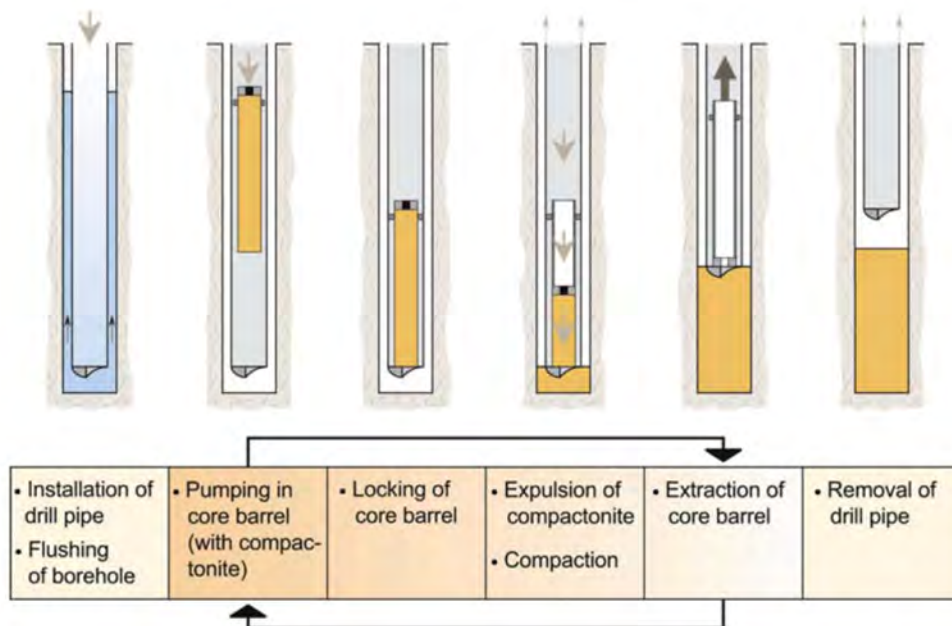


図 9.2-22 改良コアバレルを使用した圧縮ベントナイトの打設[10]

SB (Self-sealing Barriers) プロジェクト[11]においてはベントナイトの原位置での錘を用いた締め固め工法もあるが、地下水が無いこととボーリング孔がかなり短いこと（孔口から目視可能）が前提となるため、ここでは対象外とした。

3) 流体（セメントスラリー、ベントナイトスラリー）によるボーリング孔の閉塞

流体（スラリー）を用いたボーリング孔の閉塞工法としては、石油等の資源分野でも用いられる図 9.2-23 に示す置換工法による施工が用いられている。置換工法とはセメントプラグ等の設置箇所の泥水等とセメントスラリーを置き換えることである。具体的にはセメントスラリー放出口（セメントを挿入するパイプの最下端部）をセメントプラグ設置箇所の最下部に置き、地表からパイプ内を通してセメントスラリーを送入することにより、パイプ端部にセメントを放置しセメントプラグを設置する工法である。セメントスラリーを送入することにより、セメントスラリー相当量の泥水等がパイプ環状部を通して上昇し地表に排出されるので、パイプ下端部では泥水等とセメントスラリーが置き換えられることになる。良好なセメントプラグを得るためには泥水等とセメントスラリーを完全に置換することが必要である。

[14]

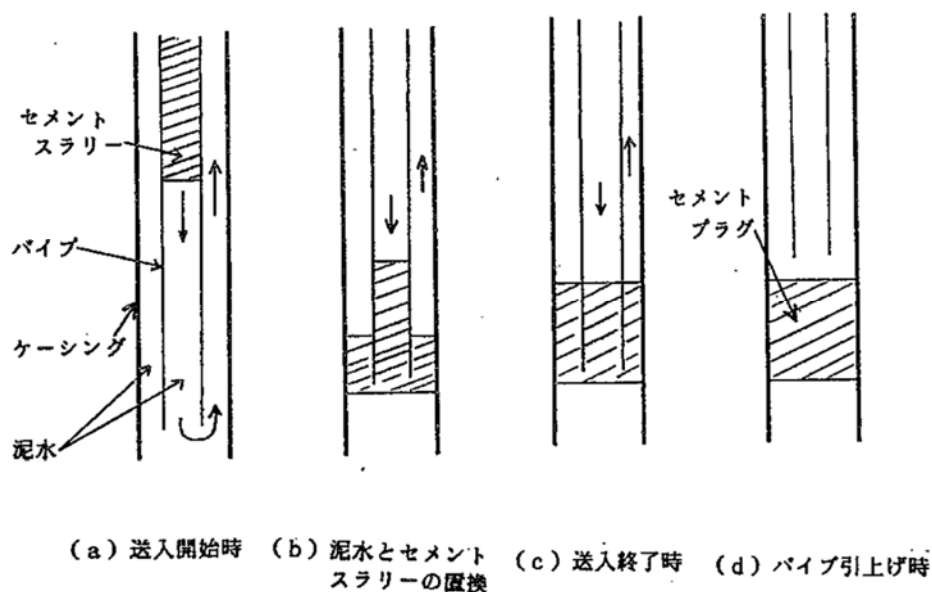


図 9.2-23 置換工法によるセメントプラグの設置例[14]

地層処分以外でのボーリング孔の閉塞時の要求項目としては、現状での帯水層の水質の維持など環境の観点から閉塞の主眼となり、セメント系での置換工法が用いられている。

地層処分分野では超長期間の閉塞に主眼が置かれるため、緩衝材と同様にベントナイト系でのボーリング孔の閉塞が主体の研究対象となり、そのための施工方法が検討されている。しかし、現状では、明確な要求項目が明らかになっていないことに加え、未だ施工方法が確立されていない。

9.2.2 アクセス坑道等の閉鎖技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理

アクセス坑道等の閉鎖技術に関しては、これまでに国内外の放射性廃棄物処分分野に係る諸機関において様々な検討が行われている。ただし、多様な廃棄物に対して、様々な処分概念があるため、共通する埋戻し概念は無い。

そこで、本業務では上記を踏まえ、以下の手順でアクセス坑道等の閉鎖技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性を整理した。

(1) アクセス坑道等の閉鎖技術に関する国内外の既往研究

アクセス坑道等の埋戻し材、更にプラグ（力学プラグおよび水理プラグ）に関する検討は、多くの国で原位置実験結果に基づき実施されている。そこで、本業務では表 9.2-5 に示す国々の放射性廃棄物処分に関する既往の検討を対象に調査を行った。

表 9.2-5 埋戻し材とプラグに関する既往検討

国	対象廃棄物	報告書
日本	高レベル	JNC HLW 第2次とりまとめ[15]
	TRU	第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ[16]
フランス	高、中レベル	Dossier 2005[17]
フィンランド	高レベル	Backfill Concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto [18] The backfill requirements in a KBS-3 type Repository[19]
スウェーデン	低・中レベル	Deep repository for long-lived low-and intermediate-level waste[20]
	高レベル	Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar[21] Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels[22]
スイス	中・高レベル	Project Opalinus Clay, Safety Report[23]
カナダ	高レベル	Enviromental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste[24] Long-Term Management of Nuclear Fuel Waste in Canada[25]

1) 日本

高レベル廃棄物[15]では、図 9.2-24 に示す処分坑道および主要・連絡坑道を有する処分場を前提とし、埋戻しおよびプラグの検討が実施されている。埋戻しは操業段階における主要坑道、閉鎖段階における連絡坑道、アクセス坑道等が対象とされている。その主な要求性能としては、緩衝材の膨出抑制、周辺岩盤の低透水性の維持等が設定され、その候補材料としてはベントナイト混合材料が考えられている。

また、プラグの機能の概念を図 9.2-25 に示す。主要な要求性能としては、緩衝材の移動、膨出の防止、湧水量の多い割れ目の止水、および膨潤応力に抵抗できる強度の確保等が設定され、その候補材料として、設置部位の要求性能に応じて、コンクリート並びに高圧縮ベントナイトブロックが考えられている。

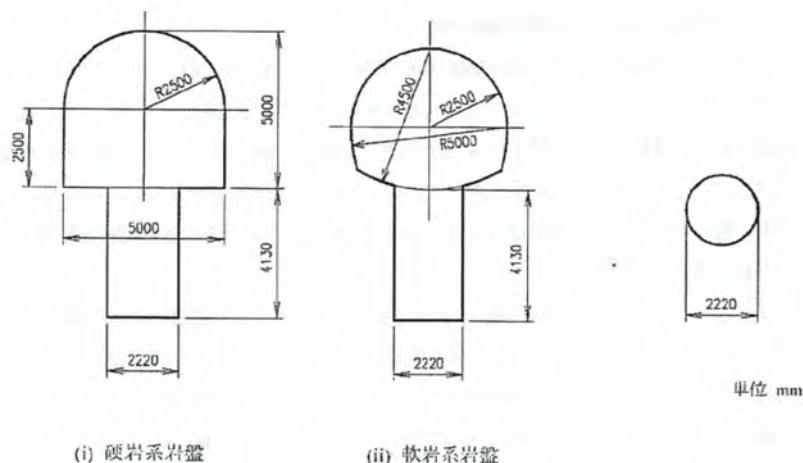


図 9.2-24 処分坑道の断面形状[15]

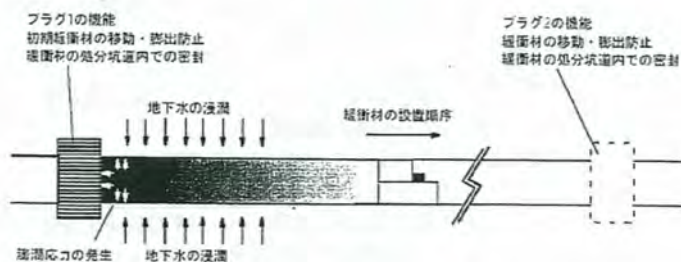


図 9.2-25 プラグ機能の概念[15]

TRU 廃棄物[16]では、埋戻しおよびプラグについては、多重バリアシステムを持つ核種移行遅延機能が正常に機能するように埋戻し材、プラグの仕様および施工位置を設定することが重要であり、核種移行の支配経路形成および隣接する人工バリアの性能低下が生じないようにする必要があるとしている。核種移行の支配経路の形成については、坑道内部を低透水性の材料で埋戻すとともに、止水性を有したプラグによって連続した移行経路を分断する必要があるとしている。図 9.2-26 に埋戻しおよびプラグの機能を示す。

埋戻し材は、処分場閉鎖後に人工バリアの性能低下あるいは核種移行の支配経路形成等が生じないように施工される。埋戻し材の仕様については、低透水性、自己シール性を有する材料による施工が望ましく、隣接する人工バリアに対する影響を考慮する必要がある。セメント系材料の埋戻し材については、一般的なコンクリートが使用できるものと考えられる。

プラグは、掘削影響領域等が連続することで形成される核種移行の支配経路の分断を目的とした水理プラグと、緩衝材の膨潤に伴う移動・流出の防止を目的として設置される力学プ

ラグに分類される。水理プラグについては、機能として低透水性、自己シール性が要求される。ここでは緩衝材と同等の性能を与えるものとした。力学プラグについては、材料としてコンクリートが利用できる。

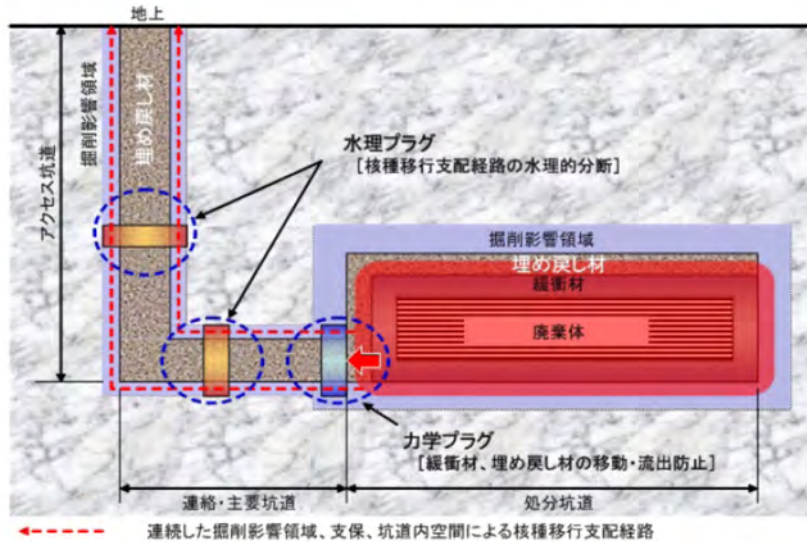


図 9.2-26 埋戻しおよびプラグの機能[16]

2) フランス

フランスにおける高、中レベル廃棄物の処分場の埋戻し材およびプラグの検討[17]は、図 9.2-27 および図 9.2-28 に示す処分坑道を有する処分施設を対象に実施された。閉鎖の要件は、母岩の変形の最小化、地下水流入の制限、処分場の分割することとなっている。埋戻し材の候補材料としてサイトの掘削に伴う粘土質岩の利用が考えられている。また、プラグの要求性能は、水理的バリア機能が設定され、その候補材料として、ベントナイトのような膨張性粘土や高強度の無筋コンクリートが考えられている。

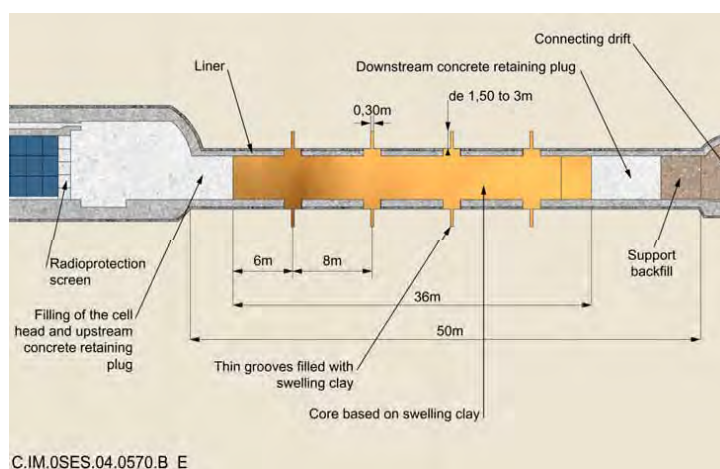


図 9.2-27 廃棄物の処分坑道断面図（カテゴリーB）

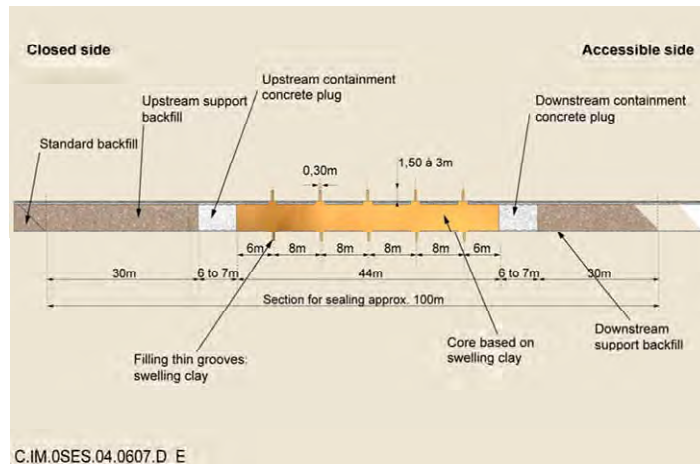


図 9.2-28 廃棄物の処分坑道断面図（カテゴリーC）

3) フィンランド

フィンランドにおける処分場の埋戻し材およびプラグの検討[18] [19]は、高レベル廃棄物処分を対象に、図 9.2-29 に示す坑道および人工バリア仕様を用いて実施された。

その知見によると、埋戻し材の要求性能は、低透水性と自己シール性が設定され、その候補材料としてはベントナイト混合材料が考えられているが、天然の混合粘土、碎石と止水プラグの組み合わせといった選択肢も併せて検討している。また、プラグの主な要求性能は、埋戻し材の支持、低透水性と設定され、その候補材料として、それぞれコンクリートおよびベントナイトが考えられている。図 9.2-30 にプラグおよび埋戻し概念図を示している。

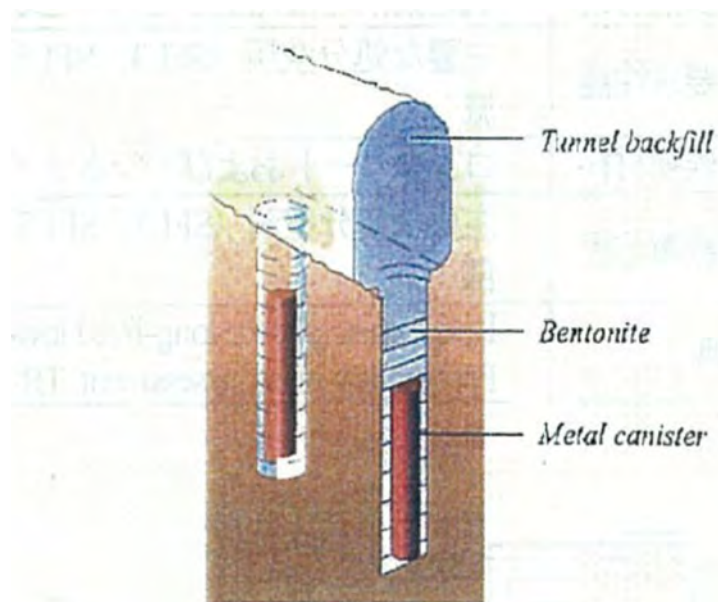


図 9.2-29 坑道および人工バリア仕様[18]

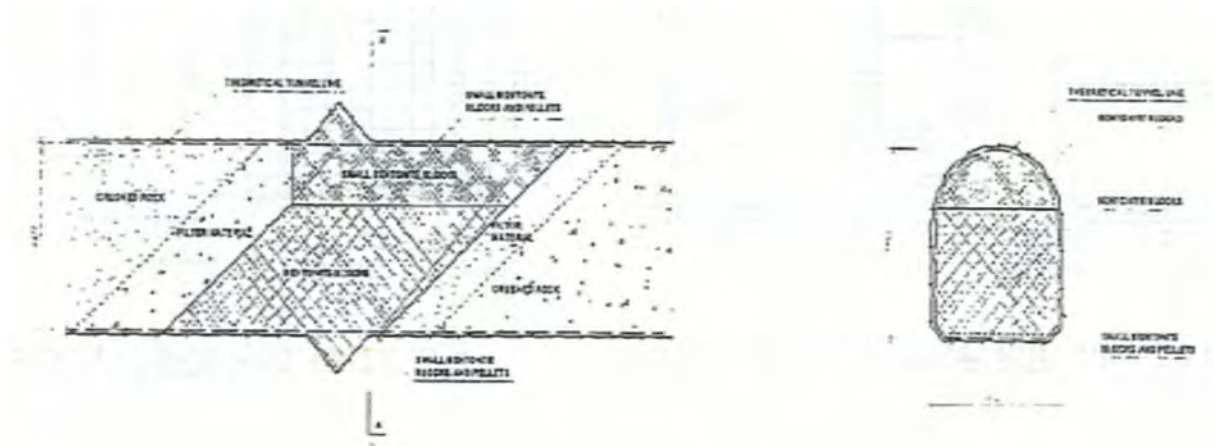


図 9.2-30 領域区分概念におけるプラグおよび埋戻し概念図[18]

4) スウェーデン

スウェーデンの低・中レベル廃棄物処分場の埋戻し材およびプラグの検討[20]は、図 9.2-31 に示す処分坑道と人工バリア仕様を用いて実施された。埋戻し材の主な要求性能としては、核種の収着性、内部構造および坑道壁の支持を設定し、その候補材料は、掘削ズリをふるい分けた砂礫が考えられている。また、プラグの要求性能としては、主要な処分空洞を通過する総流量の効果的な低減といった水理機能を設定し、その候補材料は、コンクリートおよびベントナイトが考えられている。

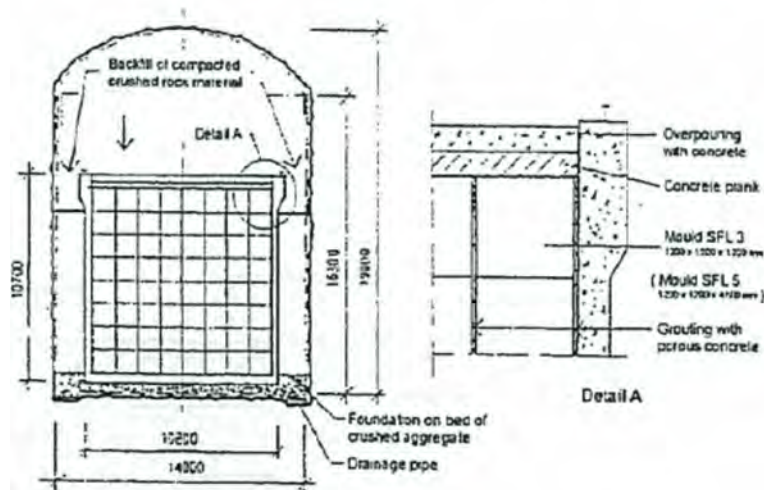


図 9.2-31 処分坑道と人工バリア仕様[20]

スウェーデンの高レベル廃棄物処分場の埋戻し材およびプラグの検討[21] [22]では、埋戻し材の主な要求性能は移流の抑制とされ、その候補材料としては、膨張性粘土もしくはベントナイトと碎石の混合物による圧縮ブロックが挙げられている(図 9.2-32 および図 9.2-33)。ブロックの隙間充填にはベントナイトペレットが考えられている。また、プラグの要求性能

としては、解放されている坑道への水圧抑止とされ、その候補材料として、鉄筋コンクリートが考えられている（図 9.2-34 参照）。

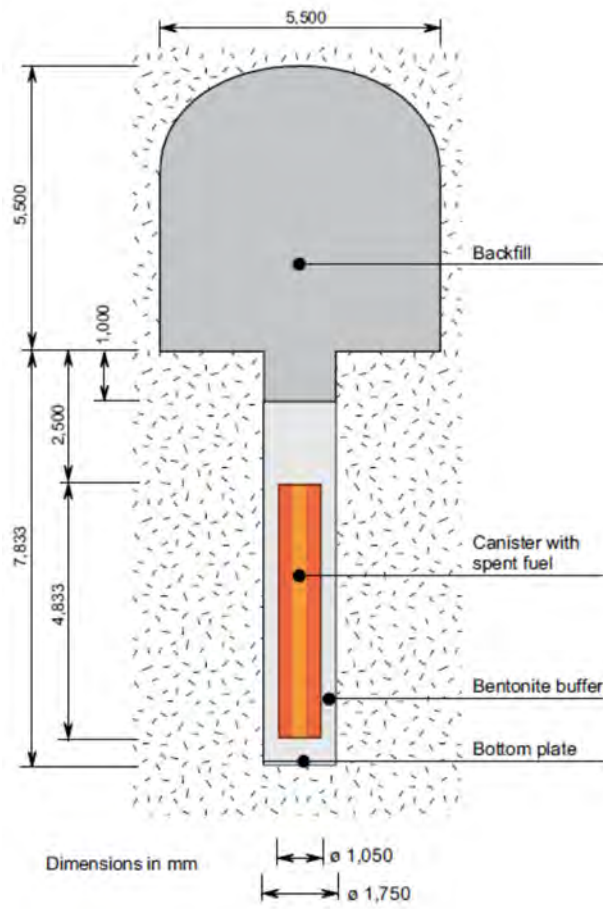


図 9.2-32 処分坑道の埋戻し[21]

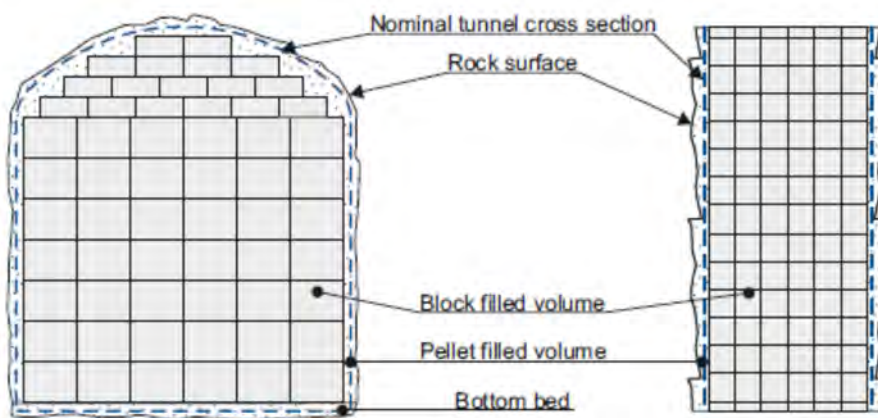


図 9.2-33 ブロックによる埋戻し[22]

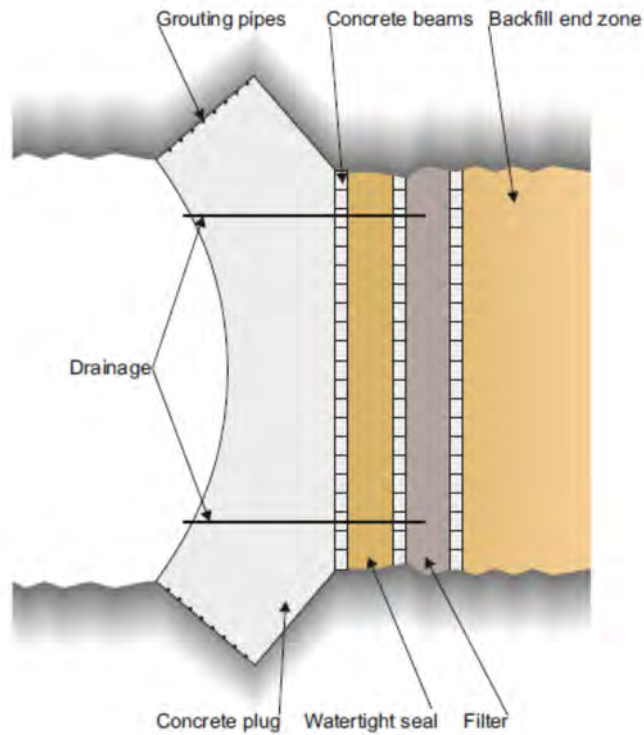


図 9.2-34 処分坑道のプラグ形状[22]

5) スイス

スイスにおける埋戻し材およびプラグの検討[23]では、埋戻し材に対する要求性能として母岩と同等な透水性の確保が設定され、その候補材料として、ベントナイト混合材料が考えられている。また、プラグの要求性能は核種移行の防止が設定され、その候補材料として、コンクリートならびに圧縮ベントナイトが考えられている。プラグ設置位置は、廃棄物のレベル、部位に応じてそれぞれ設定されている。図 9.2-35 に、処分坑道と人工バリア仕様を示している。

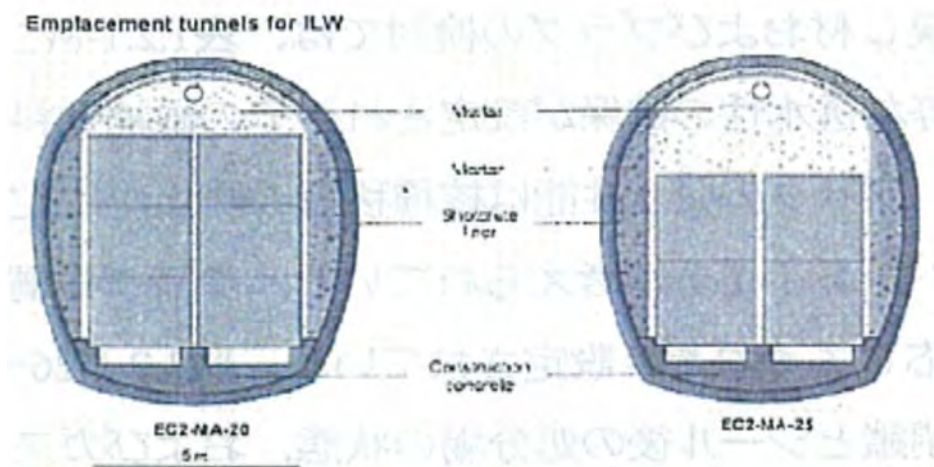


図 9.2-35 処分坑道と人工バリア仕様 (ILW) [23]

6) カナダ

カナダにおける埋戻し材およびプラグの検討[24] [25]は、図 9.2-36 に示す縦置き処分坑道を対象に実施された。埋戻し材の要求性能としては、母岩と同等な透水性の確保が設定されその候補材料として、ベントナイト混合材料が考えられている。また、プラグの主な要求性能としては地下水流動の抑制が設定され、その候補材料として、コンクリートならびにベントナイトブロックが考えられている。プラグの設置位置は、図 9.2-37 に示す様に、坑道と立坑におけるグラウトや破碎帯部分の両端が設定されている。

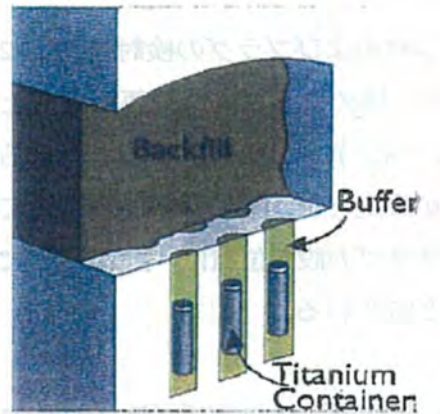


図 9.2-36 処分坑道断面図(縦置き) [24]

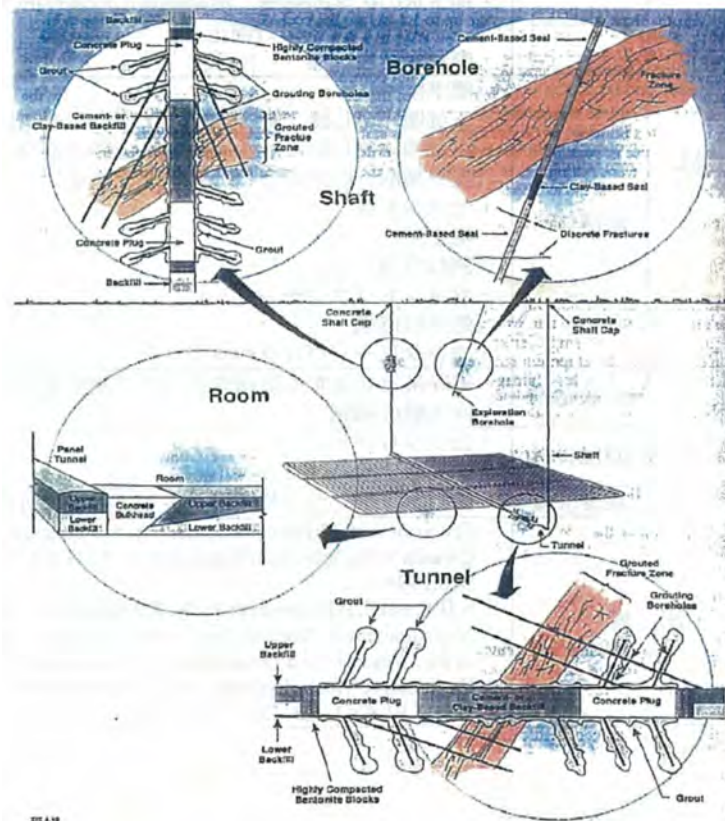


図 9.2-37 坑道の埋戻し、シールおよびプラグ概念[24]

(2) アクセス坑道等の閉鎖技術に関する閉鎖時の要求機能や技術的要件、求められる性能等
 前項で整理した各プロジェクトにおけるアクセス坑道等の閉鎖技術および余裕深度処分におけるアクセス坑道等の閉鎖技術[26][27]に関し、処分施設サイト特有の条件や環境条件（以下、表で環境条件）、閉鎖時の要求機能や技術的要件、求められる性能等（以下、表で要求性能）について整理を行った。

日本の高レベル廃棄物の埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能を表 9.2-6、日本の TRU 廃棄物の環境条件と要求性能を表 9.2-7、フランスの環境条件と要求性能を表 9.2-8、フィンランドの環境条件と要求性能を表 9.2-9、スウェーデンの低・中レベル廃棄物の環境条件と要求性能を表 9.2-10、スウェーデンの高レベル廃棄物の環境条件と要求性能を表 9.2-11、スイスの環境条件と要求性能を表 9.2-12、およびカナダの環境条件と要求性能を表 9.2-13 に示す。また、余裕深度処分に関しては、埋戻し材に関する要求機能のみ表 9.2-14 に整理した。

表 9.2-6 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（日本：高レベル廃棄物）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：未定 ・深度：300m 以上
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の膨出抑制 ・坑道安定性の確保 ・割れ目を充填するといった自己シール機能 ・周辺岩盤の低透水性の維持
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の移動、膨出の防止（処分坑道の両端部） ・湧水量の多い割れ目の止水（処分坑道および主要坑道） ・坑道の密閉あるいは坑道への人間の不用意な侵入を防止（アクセス坑道） ・設置初期における埋戻し材の膨潤応力に抵抗できる強度の確保（アクセス坑道）

表 9.2-7 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（日本：TRU 廃棄物）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：未定 ・深度：300m 以上
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の密度低下を起こさないように空間を残さない ・核種移行の支配経路が生じない ・低透水性 ・自己シール性 ・隣接する人工バリアへの影響を考慮
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・水理プラグ：核種移行の支配経路の分断、低透水性、自己シール性 ・力学プラグ：水理プラグおよび緩衝材の膨潤に伴う移動・流出防止、膨潤圧の支持

表 9.2-8 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（フランス）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：粘土層 ・深度：約 500m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の長期変形の抑制（施工間隙の制限と変形係数の確保）
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・水循環の抑制 ・膨潤圧に対する力学的支持

表 9.2-9 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（フィンランド：高レベル廃棄物）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：結晶質岩 ・深度：約 400m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・低透水性 ・自己シール性 (但し、領域区分の場合には止水プラグと併せた性能となる。) ・岩盤の支持性能（EDZ 拡張の防止）
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・埋戻し材の支持 ・低透水性（主要な割れ目帯の隔離） ・坑道および EDZ に沿う主要な水みちの形成を防止する性能（領域区分概念）

表 9.2-10 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（スウェーデン：低・中レベル廃棄物）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：結晶質岩 ・深度：約 50m 以深
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・処分場の内部エリア周辺に「ハイドロ・ゲージ」を形成する。 ・内部構造および坑道壁の支持 ・核種の収着性
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・主な処分空洞（SFL3、SFL5）を通過する総流量の効果的な低減

表 9.2-11 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（スウェーデン：高レベル廃棄物）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：結晶質岩 ・深度：約 500m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・移流の抑制（透水係数 $< 10^{-10} \text{m/s}$、膨張圧 $> 0.1 \text{MPa}$、温度 $> 0^\circ \text{C}$）
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・解放されている坑道へ水圧抑止（長期の安全機能は持たない）

表 9.2-12 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（スイス）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：オパリナス粘土 ・深度：約 400～900m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・乱されない母岩と同等な透水性の確保
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・核種移行の防止

表 9.2-13 埋戻し材およびプラグの環境条件と要求性能（カナダ）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：未定 ・深度：500～1,000m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材とコンテナの安全を確保 ・地下水の化学的処理、汚染物質の収着性向上や地下水流減速による流汚染物質の移行阻止 ・廃棄物から隔離
プラグ	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・破砕帯と交差する坑道や立坑に位置する決定的な水圧による地下水流動の抑制

表 9.2-14 埋戻し材の環境条件と要求性能（日本：余裕深度処分）

項目	内容
環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・岩種：未定 ・深度：50m～100m
埋戻し	【要求性能】 <ul style="list-style-type: none"> ・移行抑制 連続した地下水経路を形成しないこと ・隔離 容易な侵入を防止すること

(3) アクセス坑道等の閉鎖技術に関する諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性の整理

本項では様々な使用材料と施工方法の中から、前項で整理した諸条件・要求項目に基づきどのように使用材料と施工方法を絞り込んだかに着目し、諸条件・要求項目と使用材料・施工方法の関連性を整理した。

先ず、日本の高レベル廃棄物の埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料を表 9.2-15、日本の TRU 廃棄物の要求性能と候補材料を表 9.2-16、フランスの要求性能と候補材料を表 9.2-17、フィンランドの要求性能と候補材料を表 9.2-18、スウェーデンの低・中レベル廃棄物の要求性能と候補材料を表 9.2-19、スウェーデンの高レベル廃棄物の要求性能と候補材料を表 9.2-20、スイスの要求性能と候補材料を表 9.2-21、およびカナダの要求性能と候補材料

を表 9.2-22 に示す。

また、施工方法についてはまだ確定されておらず、ここではベントナイト系材料を用いた場合に考えうる施工方法を TRU 廃棄物の第 2 次取りまとめ[16]から引用すると、表 9.2-24 のようになる。

表 9.2-15 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（日本：高レベル廃棄物）

項 目	内 容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の膨出抑制 ・坑道安定性の確保 ・割れ目を充填するといった自己シール機能 ・周辺岩盤の低透水性の維持 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト骨材混合率 15%（礫＋ケイ砂とベントナイトの混合物 or 礫＋ベントナイトの混合物）
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の移動、膨出の防止（処分坑道の両端部） ・湧水量の多い割れ目の止水（処分坑道および主要坑道） ・坑道の密閉あるいは坑道への人間の不用意な侵入を防止（アクセス坑道） ・設置初期における埋戻し材の膨潤応力に抵抗できる強度の確保（アクセス坑道） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート（処分坑道の両端部、アクセス坑道） ・高圧縮ベントナイトブロック（湧水量の多い割れ目の両端部） <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の両端部 ・湧水量の多い割れ目の両端部 ・アクセス坑道坑口

表 9.2-16 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（日本：TRU 廃棄物）

項目	内容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の密度低下を起こさないように空間を残さない ・核種移行の支配経路が生じない ・低透水性 ・自己シール性 ・隣接する人工バリアへの影響を考慮 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト系材料
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水理プラグ：核種移行の支配経路の分断、低透水性、自己シール性 ・力学プラグ：水理プラグおよび緩衝材の膨潤に伴う移動・流出防止、膨潤圧の支持 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水理プラグ：緩衝材と同等 ・力学プラグ：コンクリート <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水理プラグ：連絡・主要坑道、アクセス坑道 ・力学プラグ：処分坑道端部

表 9.2-17 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（フランス）

項目	内容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の長期変形の抑制（施工間隙の制限と変形係数の確保） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サイトで掘られた粘土質岩
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水循環の抑制 ・膨潤圧に対する力学的支持 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・膨張性粘土コア（ベントナイト） ・無筋コンクリートプラグ <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の端部 ・主要坑道 or 立坑下端

表 9.2-18 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（フィンランド：高レベル廃棄物）

項 目	内 容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低透水性 ・自己シール性 (但し、領域区分の場合には止水プラグと併せた性能となる。) ・岩盤の支持性能（EDZ 拡張の防止） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・碎石とベントナイト混合の圧縮材 ・天然の混合粘土 ・碎石＋止水プラグ（領域区分の場合） <p>上記、3つの選択肢を検討している。</p>
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・埋戻し材の支持 ・低透水性（主要な割れ目帯の隔離） ・坑道および EDZ に沿う主要な水みちの形成を防止する性能（領域区分概念） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートおよびベントナイト <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の両端部、処分坑道を交差する割れ目帯、アクセス坑道

表 9.2-19 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（スウェーデン：低・中レベル廃棄物）

項目	内容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分場の内部エリア周辺に「ハイドロ・ゲージ」を形成する。 ・ 内部構造および坑道壁の支持 ・ 核種の収着性 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 坑道掘削時に発生したズリをふるい分けた砂礫（4～32mm）
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 主な処分空洞（SFL3、SFL5）を通過する総流量の効果的な低減 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリートおよびベントナイト <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 主な処分空洞（SFL3、SFL5）と周辺処分空洞（SFL4）の連結部

表 9.2-20 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（スウェーデン：高レベル廃棄物）

項目	内容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 移流の抑制（透水係数$<10^{-10}$m/s、膨張圧>0.1MPa、温度$>0^{\circ}$C） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 天然膨張性粘土の圧縮ブロック+同材料のペレット ・ ベントナイトと碎石の混合物の圧縮ブロック+ベントナイトペレット
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 解放されている坑道へ水圧抑止（長期の安全機能は持たない） <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄筋コンクリート <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分空洞前面

表 9.2-21 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（スイス）

項 目	内 容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・乱されない母岩と同等な透水性の確保 <p>【候補材料】</p> <p>[建設、操業用坑道およびアクセス坑道]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト 30%+砂 70%
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・核種移行の防止 <p>【候補材料】</p> <p>[プラグ]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート <p>[シール]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・圧縮ベントナイト（処分坑道と建設用および操業用坑道の交差部） ・圧縮ベントナイト+コンクリートバルクヘッド（アクセス坑道と建設用および操業用坑道の交差部付近） <p>【設置位置】</p> <p>[中レベル廃棄物]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の入口部（プラグ） <p>[高レベル廃棄物]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の全ての両端部（シール） ・処分坑道と建設用および操業用坑道の交差部（シール） <p>[立坑]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・建設用立坑の出口（シール） <p>[アクセス坑道]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アクセス坑道と建設用および操業用坑道の交差部付近（シール）

表 9.2-22 埋戻し材およびプラグの要求性能と候補材料（カナダ）

項目	内容
埋戻し	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材とコンテナの安全を確保 ・地下水の化学的処理、汚染物質の収着性向上や地下水流減速による流汚染物質の移行阻止 ・廃棄物から隔離 <p>【候補材料】</p> <p>[標準部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下部埋戻し材：粘土と碎石の混合（混合比 1:3） ・上部埋戻し材：ベントナイトと砂の混合（混合比 1.2:1） <p>[破砕帯部] 以下の2つ選択肢がある</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セメント系 ・粘土系 <p>[割れ目帯]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セメントグラウチング <p>[処分坑道端]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートバルクヘッド
プラグ	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・破砕帯と交差する坑道や立坑に位置する決定的な水圧による地下水流動の抑制 <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート ・ベントナイトブロック <p>【設置位置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・坑道と立坑におけるグラウトや破砕帯部分の両端

表 9.2-23 埋戻し材の要求性能と候補材料（日本：余裕深度処分）

項目	内容
埋戻し材	<p>【要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・移行抑制 連続した地下水経路を形成しないこと ・隔離 容易な侵入を防止すること <p>【候補材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト混合土

表 9.2-24 ベントナイト系材料による埋戻し施工方法[16]

施工方法	施工概要
<p>吹込み による方法 (吹付け)</p>	<p>(施工方法) 骨材混合体運搬車によって運ばれた材料を吹付け機に投入し、吹付けロボットのブームにより吹込み位置を変えながら施工する。この工法は、吹付け機の圧送力および材料の状態によって吹込み後のリバウンド等が考えられ、求められる施工密度を確保できるかの判断が重要となる。 (適用可能部位) 断面の大きさに左右されず、すべての部位に適用可能。 (問題点) 吹込み作業時に粉塵を発生するため、他の施工方法より作業環境が悪い。また、材料、出来形の品質管理方法が難しい。</p>
<p>現場締固め による方法</p>	<p>(施工方法) 骨材混合体運搬車によって運ばれた材料をブルドーザ等によって撒き出し、振動ローラ等で締固める。この工法は大型機械を使用するため施工効率が良く、締固め機械の能力に応じて施工密度を確保することができる。 (適用可能部位) 主に坑道下部空間で適用可能。 (問題点) 大型機械での施工であるため、施工範囲が限定される。</p>
<p>ベントナイト ブロック による方法</p>	<p>(施工方法) ブロック運搬車によって運ばれたブロックをブロック設置車によって所定の位置に設置する。 (適用可能部位) 壁面沿い端部を除くすべての部位に適用可能。 (問題点) ブロック材の品質管理が容易であるが、粉末ベントナイトの吹込み等によるブロック間およびブロックと岩盤との隙間処理が必要となる。</p>

9.3 閉鎖に用いる材料の調査

9.3.1 ボーリング孔の閉塞に用いる材料に関する諸条件・要求項目と使用材料の関連性の整理

以上の検討から、ボーリング孔の閉塞材料としては、一般にベントナイト系材料とセメント系材料が考えられる。これらの閉塞材料に期待される要件としては、以下のものが挙げられる。

- ◆ 止水性(母岩と比較した場合に同等以上であること)
- ◆ ガスの透過性(廃棄体からガスが発生する場合に蓄圧を防げること)
- ◆ 膨張性(閉塞部と母岩との間に発生する隙間の自己修復機能を有すること)
- ◆ 強度(作業時の短期強度および閉塞後の長期強度を有すること)
- ◆ 可塑性(岩盤クリープなど変形を許容する十分な可塑性を有すること)
- ◆ 長期安定性(化学的および力学的安定性を有すること)
- ◆ 施工性(品質保証が可能な施工性を有すること)

また、ボーリング孔の状態(孔壁崩壊、地下水による冠水)等諸条件として考慮すべきこととしては、以下のものがあげられる。

- ◆ ボーリング孔径
- ◆ ボーリング孔長
- ◆ ボーリング孔掘削方向(鉛直下方、斜坑、水平孔、上方)
- ◆ ケーシング残置
- ◆ ケーシング撤去
- ◆ 岩種(岩盤クリープが生じるか、亀裂など部分的な水みちの有無)
- ◆ 地下水の有無
- ◆ 地下水の水質(塩水)
- ◆ 孔壁崩壊(孔径が部分的に拡大)の有無
- ◆ モニタリング機器の有無
- ◆ 施工実績

そこで、本業務では要求項目と使用材料との関連性を整理した。ボーリング孔の閉塞材料と要求項目との関係を表 9.3-1 に、ボーリング孔の閉塞材料と諸条件との関係を表 9.3-2 に示す。

表 9.3-1 ボーリング孔の閉塞材料と要求項目との関係

要求項目	ベントナイト系材料	セメント系材料
止水性*	○	○
ガスの透過性	△ (配合に依存)	△ (配合に依存)
膨張性	○	△ (膨張材の適用により 硬化時のみ対応)
強度	△	○
可塑性	○	△ (配合、および変形の程度に依存)
長期安定性	○ (パイピングによるエロージョンの 可能性あり)	△ (評価期間に依存)
施工性	△	○

○：対応、△：条件に依存、×：不对応

*:性能評価の観点から、ボーリング孔の掘削方向に移流が生じなければ(拡散のみであれば)、影響が小さい。

表 9.3-2 ボーリング孔の閉塞材料と諸条件との関係

要求項目	ベントナイト系材料	セメント系材料
ボーリング孔径	△ (孔径が小さいと困難)	○
ボーリング孔長	△ (孔長が長いと困難)	○
掘削方向	△	○ (パッカー等を適用すれば上方掘削のボーリング孔にも対応可)
ケーシング残置	○	○
ケーシング撤去	△ (孔壁の状態が乱れるため)	○
岩種	△ (初期:水みちがあるとエロージョンが発生する可能性あり)	○ (初期)
地下水の有無	△	○
地下水の水質	△ (塩水の場合、膨潤が抑制される)	○
孔壁崩壊	△	○
モニタリング機器	○ (撤去が前提)	○ (撤去が前提)
施工実績	△ (ほとんど無し)	○

○：対応、△：条件に依存、×：不对応

表 9.3-1 と表 9.3-2 より、ボーリング孔の閉塞材料として、要求項目の観点からはベントナイト系が適しており、諸条件の観点からはセメント系材料が適している。

今後のボーリング孔の閉塞材料の選定は、具体的（定量的）な要求項目の内容と、今後の諸条件に対応した施工方法の検討結果を考慮して実施すべきである。

9.3.2 アクセス坑道等の閉鎖に用いる材料に関する諸条件・要求項目と使用材料の関連性の整理

アクセス坑道等の閉鎖技術として、埋戻しはベントナイトを混合した土質系材料が、プラグについては目的によって、コンクリートや高圧縮ベントナイトブロックが考えられている。つまり、ボーリング孔の閉塞とは異なり、要求項目に対して使用材料は一種類となっている。

これらの閉鎖部位に期待される具体的な要求性能としては、以上の結果を踏まえると表 9.3-3 に示すように取りまとめることができる。

表 9.3-3 埋戻しとプラグに関する要求性能と使用材料

項目	要求項目	使用材料
埋戻し	母岩と同程度の透水性維持	ベントナイト系材料
	坑道の安定性の確保	
プラグ	力学プラグ： 埋戻しの膨出防止	セメント系材料
	水理プラグ： 水理的短絡パスの遮断	ベントナイト系材料

ベントナイト系材料については空洞内の埋戻し材と同様に、砂ベントナイト混合土や礫砂ベントナイト混合土等が、セメント系材料については高流動コンクリート等が考えられる[26]。

埋戻しとプラグの使用材料と諸条件（例えば、坑道での湧水の程度）を踏まえた場合、考えられる条件については、施工方法で対処すべきと考えられる。

9.4 施工方法の調査・検討

9.4.1 ボーリング孔のように人が入れない小径・長孔を対象とした検討

ボーリング孔を閉塞するためには、要求項目と諸条件を踏まえ、閉塞材料と施工方法を検討する必要がある。

そこで、本業務ではそれらの観点を踏まえ整理した。

(1) ボーリング孔（小径や狭隘な空間）を対象とした閉塞技術の整理と前項で整理した諸条件・要求項目との関連性の整理、および材料と組み合わせた施工方法の選定等

前節の検討において、ボーリング孔の閉塞材料と要求項目との関係（表 9.3-1）と、ボーリング孔の閉塞材料と諸条件との関係（表 9.3-2）を整理し、ボーリング孔の閉塞材料として、要求項目の観点からはベントナイト系が適しており、諸条件の観点からはセメント系材料が適していることを示した。

このことはボーリング孔の条件に応じて閉塞材料を使い分けることが適していることを示している。よって、本検討では、新たに以下の 2 種類のボーリング孔を想定して、表 9.4-1 に示すように概略の再整理を行い、材料と組み合わせた施工方法の選定を行った。また、課題を併記した。

- ◆ 地上から掘削されたボーリング孔（ファーフィールドに存在、数百 m 規模の長さ）
- ◆ 地下坑道から掘削されたボーリング孔（ニアフィールドに存在、数 m～数十 m 規模の長さ）

表 9.4-1 ボーリング孔の条件に応じた閉塞材料と施工方法

項目	地上から掘削された ボーリング孔	地下坑道から掘削された ボーリング孔
諸条件	・ファーフィールドに存在 ・数百 m 規模の長さ	・ニアフィールドに存在 ・数 m～数十 m 規模の長さ
要求項目	・ボーリング孔全体の閉塞	・損傷ゾーンおよび界面の確実な閉塞
使用材料	・セメント系材料	・ベントナイト系材料
施工方法	・置換工法等	【地下水：有り】 ・ベントナイトブロックの定置工法等 【地下水：無し】 ・ベントナイトペレットの沈降工法等
主要課題	・材料と孔壁の界面の閉塞に関する品質管理方法	・施工方法の実証（地下水：有り） ・材料と孔壁の界面の閉塞に関する品質管理方法

ボーリング孔が削孔されている対象地層によっては、界面の確実な閉塞と全体の閉塞を区分し、材料を選定することも考えられる。しかしながら、境界部などの品質管理方法については十分な検討が必要である。

(2) 試験計画（案）の検討

表 9.4-1 に示すように課題は大きく以下の 2 種類に分類される。表 9.4-2 および表 9.4-3 に、それぞれの課題解決に向けた試験計画（案）の検討内容を示す。

- ◆ ベントナイト系材料の施工方法の実証(地下水:有り)
- ◆ 施工後の品質管理方法(材料と孔壁の界面の閉塞)

表 9.4-2 ベントナイト系材料の施工方法の実証（地下水：有り）の方策

主要課題	ベントナイト系材料の施工方法の実証（地下水：有り）
方策	<p>ベントナイトブロックの定置工法については、複数の器具を用いた施工方法が検討されているが、直接ベントナイトブロックを沈降させる工法は検討されていない。</p> <p>ここでは、比較的短いボーリング孔を対象とするため、まず円柱ベントナイトブロックを用いて所定の長さのボーリング孔を沈降工法にて閉塞することが可能かを確認する。</p> <p>例えば 2m 規模の模擬ボーリング孔を用いて施工性および施工条件の確認を行い、好ましいと考えられる施工条件を用いて更に長さを有する実ボーリング孔を用いた実証を行う。</p>
実施内容 および手順	<p>地下水が有るボーリング孔を対象とした円柱のベントナイトブロックを用いた定置（沈降）工法として、以下のような試験内容（施工性の確認、および止水性の確認）が考えられる。</p> <p>A) 模擬ボーリング孔の作成（塩ビ管等）および地下水の充填</p> <p>B) 直径（例えば、クリアランス 2cm および 6cm 程度）および長さ（例えば、10cm×20 個、40cm×5 個程度）をパラメータとしたベントナイトブロックの製作</p> <p>C) 模擬ボーリング孔内への挿入（自由落下、必要に応じて挿入棒による押し込み⇒施工性の確認）</p> <p>D) 模擬ボーリング孔の頭頂部のキャッピングおよび養生</p> <p>E) 簡易通水試験による止水性の確認</p>

表 9.4-3 施工後の品質管理方法（材料と孔壁の界面の閉塞）の方策

主要課題	材料と孔壁の界面の閉塞に関する品質管理方法
方策	<p>施工後の品質管理方法として、模擬ボーリング孔であればボーリング孔の外側から閉塞したボーリング孔の両端部にアクセスし品質を管理できるが、実際のボーリング孔で品質管理を行うのであれば閉塞した両端にケーブルを介さずにアクセスする必要がある。</p> <p>そのためには、地中無線装置を用いることが考えられる。図 9.4-1 に温度計内蔵の小型地中無線送信機を、図 9.4-2 には間隙水圧計を接続した小型地中無線送信機を示す。図 9.4-3 にはボーリング孔内に挿入し、受信が可能な受信機を示す。</p>
実施内容 および手順	<ul style="list-style-type: none"> ・地中無線装置を用い、例えば図 9.4-4 に示すようにボーリング孔の閉塞部上部で擾乱を与え、閉塞部下部でその応答を計測し、閉塞部上部の受信機にデータを伝送する。 ・圧力の応答状況から閉塞状況の確認を行い、本方策の有効性を確認する。



図 9.4-1 小型地中無線送信装置



図 9.4-2 間隙水圧計付き小型地中無線送信機

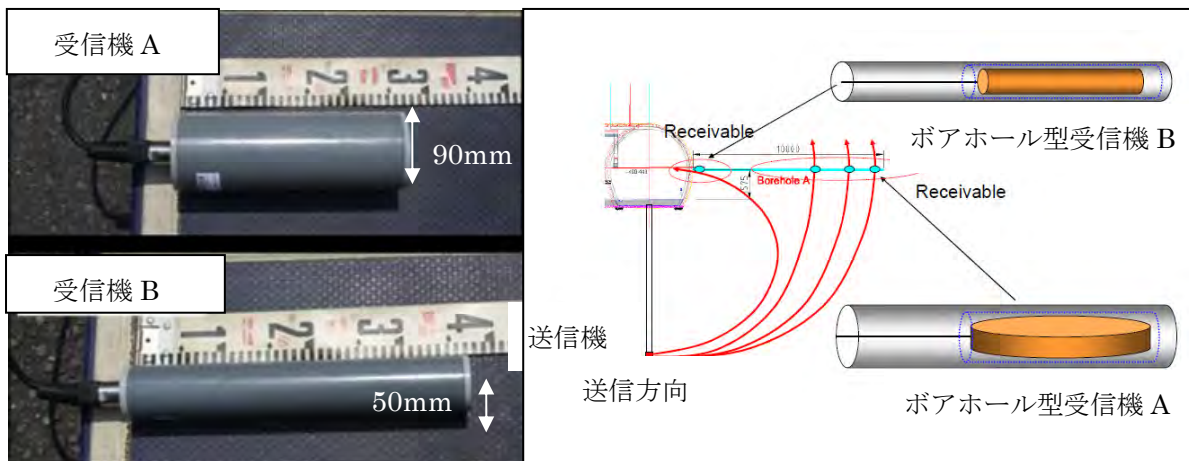


図 9.4-3 ボーリング孔対応受信機

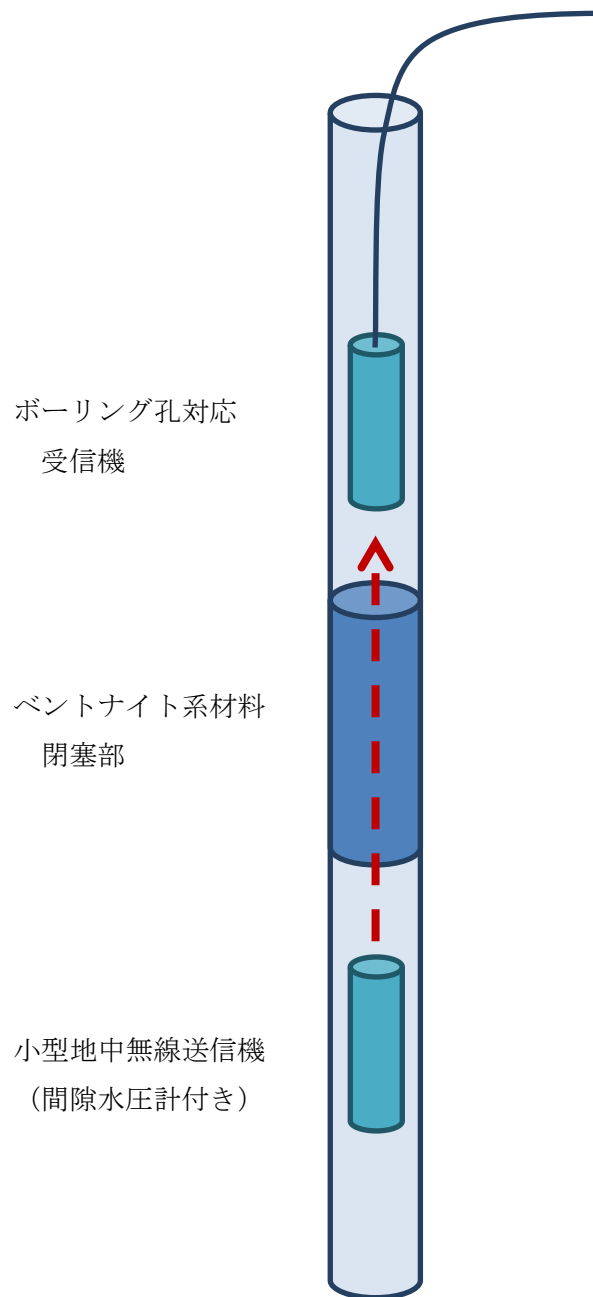


図 9.4-4 地中無線装置を用いた施工後の品質管理方法のイメージ

9.4.2 アクセス坑道等の狭隘な空間を対象とした検討

アクセス坑道等の埋戻しにおいては、ボーリング孔の閉鎖と同様に、要求項目と諸条件を踏まえ、閉塞材料と施工方法を検討する必要がある。

そこで、本業務ではそれらの観点を踏まえ整理した。

(1) 小径や狭隘な空間を対象とした閉鎖技術の整理と前項で整理した諸条件・要求項目との関連性の整理、および材料と組み合わせた施工方法の選定等

前節の検討において、閉鎖部位に期待される具体的な要求性能は、大きく表 9.3-3 に示すように取りまとめられている。

本業務では特に狭隘な空間に着目した場合のアクセス坑道等の閉鎖技術として、坑道の埋戻しと必要に応じて設置されるプラグに関し、諸条件（狭隘、湧水）や要求項目などへの影響の程度を表 9.4-4 に示すように概略の再整理を行い、材料と組み合わせた施工方法の選定を行った。また、課題を併記した。

表 9.4-4 アクセス坑道等の閉鎖材料と施工方法

項目	埋戻し	プラグ	
諸条件	・狭隘 ・湧水	・狭隘 ・湧水	・狭隘 ・湧水
要求項目	・母岩と同程度の透水性維持 ・坑道の安定性確保	力学プラグ ・埋戻しの膨出防止	水理プラグ ・水理的短絡パスの遮断
使用材料	・ベントナイト系材料	・セメント系材料	・ベントナイト系材料
施工方法	・吹付け ・締固め ・ブロック定置 (組み合わせ含む)	・コンクリート打設 (湧水はグラウトにより止める)	・吹付け ・締固め ・ブロック定置 (組み合わせ含む)
主要課題	・狭隘部での施工 ・湧水対策	・特になし (実績多数あり)	・狭隘部での施工 ・湧水対策

(2) 試験計画（案）の検討

表 9.4-4 に示したように課題は大きく次の 2 種類に分類される。

- ◆ 狭隘部での施工
- ◆ 湧水対策

狭隘部での施工においては、埋戻しとプラグ共に、湧水下での施工性を確認することが重要となる。ただし、湧水に関しては基本的に①施設レイアウトで高透水部を避ける、②施工時にグラウトで湧水量を低減させていることを前提とした。

表 9.4-5 に、上記の課題解決に向けた試験計画（案）の検討内容を以下に示す。

表 9.4-5 狭隘部でのプラグの施工の方策

主要課題	湧水下での狭隘部の埋戻しおよびプラグの施工
方策	<p>現在、吹付け施工は、一定の湧水下に置いて施工が可能か検討を行っている。しかしながら、人工湧水での試験のため流量制御の湧水となっており、実環境を十分に模擬しきれていない可能性がある。</p> <p>本検討では、実サイトを対象に湧水箇所における埋戻しとプラグの施工性の確認を行う。</p>
実施内容 および手順	<ul style="list-style-type: none"> ・実サイトを対象に、湧水箇所を調査する。 ・湧水箇所をパラメータとし、対象エリアを設定し、一定区間埋戻し後、プラグを設置する。 ・対象エリアごとに、湧水の浸出状況を確認し、パイピングが生じるか否か確認する。

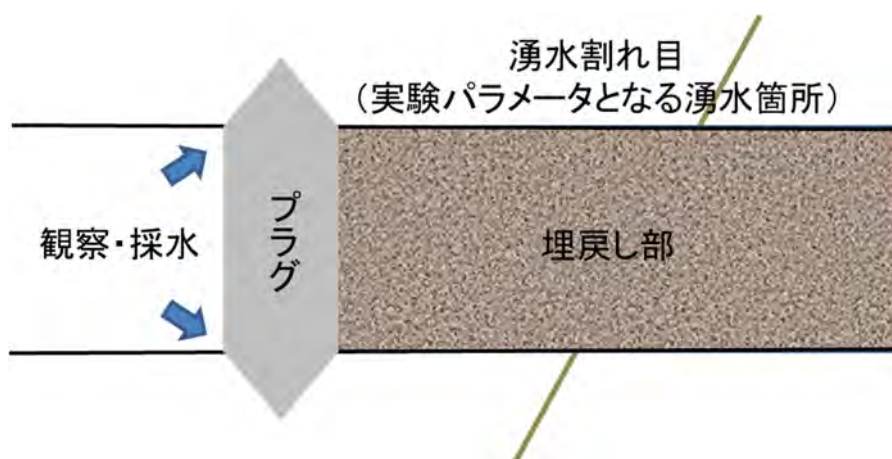


図 9.4-5 湧水下での狭隘部の埋戻しおよびプラグの施工イメージ図

9.5 まとめ

本検討は、上記の地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験のうち、施設の閉鎖に係る検討として、ボーリング孔やアクセス坑道等の閉鎖技術について、実施工における実用的な施工技術とその課題の把握を主な目的として、使用材料、施工方法等について既往の研究成果の調査を行った。

主要な結果を表 9.5-1 および表 9.5-2 に再掲する。

【ボーリング孔等の閉塞】

表 9.5-1 ボーリング孔の条件に応じた閉塞材料と施工方法（再掲）

項目	地上から掘削された ボーリング孔	地下坑道から掘削された ボーリング孔
諸条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ファーフールドに存在 ・数百 m 規模の長さ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ニアフィールドに存在 ・数 m～数十 m 規模の長さ
要求項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング孔全体の閉塞 	<ul style="list-style-type: none"> ・損傷ゾーンおよび界面の確実な閉塞
使用材料	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント系材料 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト系材料
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> ・置換工法等 	<ul style="list-style-type: none"> 【地下水：有り】 ・ベントナイトブロックの定置工法等 【地下水：無し】 ・ベントナイトペレットの沈降工法等
主要課題	<ul style="list-style-type: none"> ・施工後の品質管理方法 (材料と孔壁の界面の閉塞) 	<ul style="list-style-type: none"> ・施工方法の実証（地下水：有り） ・施工後の品質管理方法 (材料と孔壁の界面の閉塞)

【アクセス坑道等の閉塞】

表 9.5-2 アクセス坑道等の閉鎖材料と施工方法（再掲）

項目	埋戻し	プラグ	
諸条件	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘 ・湧水 	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘 ・湧水 	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘 ・湧水
要求項目	<ul style="list-style-type: none"> ・母岩と同程度の透水性維持 ・坑道の安定性確保 	力学プラグ <ul style="list-style-type: none"> ・埋戻しの膨出防止 	水理プラグ <ul style="list-style-type: none"> ・水理的短絡パスの遮断
使用材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト系材料 	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント系材料 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントナイト系材料
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> ・吹付け ・締固め ・ブロック定置 (組み合わせ含む) 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート打設 (湧水はグラウトにより止める) 	<ul style="list-style-type: none"> ・吹付け ・締固め ・ブロック定置 (組み合わせ含む)
主要課題	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘部での施工 ・湧水対策 	<ul style="list-style-type: none"> ・特になし (実績多数あり) 	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘部での施工 ・湧水対策

参考文献

- [1] B. Andersson, et al.: Mining methods used in the underground tunnels and test rooms at Stripa, Technical Project Report No. 8, Lawrence Berkeley National Laboratory (1978).
- [2] 三枝博光ほか：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書、JAEA-Research (2007).
- [3] 日本原子力研究開発機構：資料 14-3 超深地層研究所計画-第1段階の予測結果と第2段階における検証状況および今後の計画-, 第14回 深地層の研究施設計画検討委員会（平成25年3月15日）(2013).
- [4] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて(2013).
- [5] W. Bastiaens et al.: The extension of the HADES underground research facility at Mol, Belgium, The construction of the connecting gallery, EURIDICE report 03-294 (2003).
- [6] W. K. Seidler: PROJECT RESULTS LEAFLET ENGINEERING STUDIES and DEMONSTRATION of REPOSITORY DESIGNS, ESDRED, Mod5-WP9-D12 – Project Results Leaflet (2009).
- [7] C. Fairhurst, et al.: OECD/NEA INTERNATIONAL STRIPA PROJECT, OVERVIEW VOLUME I, EXECUTIVE SUMMARY (1993).
- [8] 島田邦明他：試錐孔閉塞技術の開発，核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書，JNC TN7400 2004-19 (2004).
- [9] B. Frieg, et al.: THE NEAR-FIELD PROGRAMME AND THE TOMOGRAPHY AND BOREHOLE SEALING PROJECTS, Grimesel Test Site (GTS) 1996, Nagra bulletin, No.27 (1996).
- [10] P. Blümling : Borehole sealing project at the Grimsel test site, 3rd European. Engineering Geology Conference 33rd Annual Conference of the Engineered Group of the. Geological Society (1997).
- [11] T. Rothfuchs et al.: Self-Sealing Barriers of Sand/Bentonite-Mixtures in a Clay Repository, SB-Experiment in the Mont Terri Rock Laboratory, Final Report, GRS-302 (2012).
- [12] R. Chaplow: REVIEW OF REQUIREMENTS FOR SEALING INVESTIGATION BOREHOLES, Site Characterisation Project, NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT DIRECTORIATE, Robert Chaplow Associates Limited, P/1035/TR1/2010(Issue 3) (2011).
- [13] R.P. Brenner, P. Jedelhaier: Bohrlochversiegelung –Konzept und Machbarkeitsnachweis, NTB 89-26 (1989).
- [14] 通商産業省立地公害局：石油鉱山の坑井の廃止に関する処置基準および解説 (1986).
- [15] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊2 地層処分の工学技術，JNCTN140099-022 (1999).

- [16] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－(2005).
- [17] Andra: Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository, C.RP.ADP.04.0001 (2005).
- [18] Posiva: Backfill Concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto, 6th I.W. on Design and Construction of Final Repository “Backfill in Radioactive Waste Disposal” (2002).
- [19] Posiva-SKB: The backfill requirements in a KBS-3 type Repository, 6th I.W. on Design and Construction of Final Repository “Backfill in Radioactive Waste Disposal” (2002).
- [20] SKB: Deep repository for long-lived low-and intermediate-level waste, Preliminary safety assessment, TR-99-28 (1999).
- [21] SKB: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation Main Report of the SR-Can project (2006).
- [22] SKB: Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels (2010).
- [23] NAGRA: Project Opalinus Clay, Safety Report, NTB02-05 (2002).
- [24] AECL: Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada’s Nuclear Fuel Waste, AECL-1071.2.1, COG-93-1 (1994).
- [25] S.B.Russell, P.J.Gierszewski, M.R.Jensen, and T.F. Kempe: Long-Term Management of Nuclear Fuel Waste in Canada : Technical Developments in the Concept of Deep Geologic Repository Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation – Third Worldwide Review, LBNL-49767 BERKELEY LAB (2001).
- [26] 日本原子力学会：日本原子力学会標準 余裕深度処分施設の施設検査方法：2010、AESJ-SC-F019:2010 (2011)
- [27] 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方 (2009)
- [28] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 (2013)
- [29] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 (第 3 分冊) モニタリング技術の開発 (2013)