平成26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

平成19年度～平成26年度の取りまとめ
報告書

平成27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

この報告書は、平成 19 年～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」および平成 25 年～平成 26 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」で実施された 8 年間の確証試験の内容および成果をとりまとめたものである。ここでは、8 年間の成果の内、代表的なもの、重要なものについて、部材別に記載しており、各年度の実施内容あるいは、詳しい試験の内容・条件や成果の詳細、試験・計測データについては、各年度の報告書を参照されたい。また、試験計画の基本的な考え方や試験施設の詳細設計については、平成 17 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査「地下空洞型処分施設性能確証試験」および平成 18 年度管理型処分技術調査等「地下空洞型処分施設性能確証試験」の報告書を参照されたい。

報告書目次

第 1 章 確証試験の概要.....1-1
1.1 確証試験の背景、目的.....1-1
1.1.1 余裕深度処分について.....1-1
1.1.2 試験の背景.....1-1
1.1.3 試験の目的と概要.....1-2
1.2 試験計画.....1-3
1.2.1 余裕深度処分の対象廃棄物.....1-3
1.2.2 安全確保に関する基本的要件.....1-3
1.2.3 人工バリアの要求機能.....1-5
1.2.4 確証試験とその経過の概要.....1-8
1.3 成果の概要.....1-13
1.3.1 緩衝材.....1-13
1.3.2 低拡散材.....1-14
1.3.3 コンクリートピット.....1-15
1.3.4 充てん材(区画内充てん材、上部充てん材).....1-16
1.3.5 埋戻し材（上部埋戻し材）.....1-17
1.3.6 挙動計測.....1-18
1.3.7 地震時挙動.....1-19

第 2 章 確証試験の内容と成果.....2-1
2.1 緩衝材.....2-1
2.1.1 実施概要.....2-1
2.1.2 基本条件の設定.....2-4
(1) 要求機能と技術要件.....2-4
(2) 設計仕様項目.....2-5
(3) 管理項目と管理目標値.....2-6
1) 透水係数.....2-6
2) 乾燥密度.....2-7
3) 含水比.....2-8
4) 厚さ.....2-8
5) 膨潤圧、強度・変形係数、鉱物組成.....2-9
2.1.3 確証試験の課題と実施内容.....2-10
(1) 確証試験の課題.....2-10
(2) 実施内容.....2-13
2.1.4 確証試験結果.....2-14
(1) 含水比調整検討.....2-14

1）使用材料の選定.....2-14
2）施工機械の選定.....2-15
3）含水比調整結果.....2-17
(2) 施工検討.....2-22
1）既往の施工技術と施工環境条件.....2-22
2）底部緩衝材の転圧施工.....2-23
3）側部緩衝材の転圧工法.....2-31
4）上部緩衝材の転圧工法.....2-37
5）側部緩衝材・隅角部の吹付け工法.....2-39
(3) 初期性能の検討.....2-49
1）初期性能確認試験項目.....2-49
2）既往試験の初期性能.....2-51
3）初期性能確認.....2-52
2.1.5 まとめと今後の検討課題.....2-56
(1) 課題に対する照査.....2-56
1）含水比調整検討.....2-56
2）施工検討.....2-56
3）初期性能の検討.....2-57
(2) 本プロジェクトの成果.....2-57
1）含水比調整検討.....2-57
2）施工検討.....2-58
3）初期性能の検討.....2-59
(3) 今後の検討課題.....2-59
1）含水比調整検討.....2-59
2）施工検討.....2-59
2.2 低拡散材.....2-62
2.2.1 実施概要.....2-62
2.2.2 基本条件の設定.....2-64
(1) 要求機能と技術要件.....2-64
(2) 設計仕様項目.....2-65
(3) 管理項目および管理目標値.....2-65
2.2.3 確証試験の課題と実施内容.....2-67
(1) 確証試験の課題.....2-67
(2) 実施内容.....2-69
2.2.4 確証試験結果.....2-70
(1) 材料検討.....2-70
1）材料・配合仕様の設定.....2-70
2）材料特性試験（室内試験）.....2-75

(2) 施工検討 2-75
1) 打込み時の側圧 2-75
2) 充てん性および流動性 2-78
3) ひび割れ 2-80
4) 施工時品質管理方法 2-86
(3) 初期性能の検討 2-87
1) 初期性能確認試験項目 2-87
2) 初期性能確認 2-89
2.2.5 まとめと今後の検討課題 2-91
(1) 課題に対する照査 2-91
(2) 本プロジェクトでの成果 2-91
(3) 今後の検討課題 2-92
2.3 コンクリートピット 2-94
2.3.1 概要 2-94
2.3.2 基本条件の設定 2-96
(1) 要求機能と技術要件 2-96
(2) 設計仕様項目 2-97
(3) 管理項目および管理目標値 2-97
2.3.3 確証試験の課題と実施内容 2-98
(1) 確証試験の課題 2-98
(2) 実施内容 2-100
2.3.4 確証試験結果 2-100
(1) 材料検討 2-100
1) 材料・配合仕様の設定 2-100
2) 材料特性試験（室内試験・実機試験） 2-108
(2) 施工検討 2-108
1) 検討結果 2-108
2) 施工時の品質管理 2-112
2.3.5 初期性能の検討 2-113
(1) 初期性能確認試験項目 2-113
(2) 初期性能確認 2-115
2.3.6 まとめと今後の検討課題 2-116
(1) 課題に対する照査 2-116
(2) 本プロジェクトでの成果 2-116
(3) 今後の検討課題 2-117
2.4 充てん材 2-119
2.4.1 実施概要 2-119
2.4.2 基本条件の設定 2-120

(1) 要求機能と技術要件 2-120
(2) 設計仕様項目 2-121
(3) 管理項目および管理目標値 2-121
2.4.3 確証試験の課題と実施内容 2-122
(1) 確証試験の課題 2-122
(2) 実施内容 2-124
2.4.4 確証試験結果 2-124
(1) 材料検討 2-124
1) 材料・配合仕様の設定 2-124
2) 材料特性試験（室内試験・実機試験） 2-134
(2) 施工検討 2-135
1) 施工上の課題整理 2-135
2) 検討手順（施工確認試験実施の流れ） 2-135
3) 検討結果 2-136
4) 施工時品質管理方法 2-143
(3) 初期性能の検討 2-144
1) 初期性能確認試験項目 2-144
2) 初期性能確認 2-146
2.4.5 まとめと今後の検討課題 2-147
(1) 課題に対する照査 2-147
(2) 本プロジェクトでの成果 2-147
(3) 今後の検討課題 2-148
2.5 埋戻し材 2-150
2.5.1 実施概要 2-150
2.5.2 基本条件の設定 2-151
(1) 要求機能と技術要件 2-151
(2) 設計仕様項目 2-152
(3) 管理項目および管理目標値の設定 2-153
2.5.3 確証試験の課題と実施内容 2-153
(1) 確証試験の課題 2-153
1) 材料配合と施工管理目標の設定 2-153
2) 練り混ぜ方法の検討 2-154
3) 施工方法の検討と適用性の確認 2-154
4) 施工後の品質の確認 2-154
(2) 実施内容 2-154
2.5.4 確証試験結果 2-155
(1) 材料検討 2-155
1) 材料・配合仕様の設定 2-155

(2) 施工検討 2-159
1) 練り混ぜ方法の検討 2-159
2) 施工方法（上部埋戻し材の構築方法）の検討 2-164
2.5.5 初期性能の検討 2-173
(1) 初期性能確認試験項目 2-173
(2) 初期性能確認 2-175
1) 透水試験 2-175
2.5.6 まとめと今後の課題 2-177
(1) 課題に対する照査 2-177
(2) 本プロジェクトでの成果 2-178
(3) 今後の検討課題 2-178
2.6 挙動計測・地震影響検討 2-181
2.6.1 挙動計測 2-181
(1) 挙動計測の内容 2-181
1) 計測目的と計測方法 2-181
2) 計測器配置 2-183
(2) 挙動計測の成果 2-186
1) 試験施設の挙動 2-186
2) 周辺岩盤挙動 2-191
(3) まとめ 2-192
2.6.2 地震影響検討 2-193
(1) 地震影響検討の目的 2-193
(2) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響 2-193
1) 検討概要 2-193
2) 解析条件 2-194
3) 解析結果の分析 2-195
(3) 地震動の観測と分析 2-204
1) 検討概要 2-204
2) 観測地震動 2-204
3) 解析条件 2-207
4) 解析結果の分析 2-208
(4) まとめ 2-210
1) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響 2-210
2) 地震動の観測と分析 2-210
第 3 章 まとめ 3-1

図目次

図 1.1-1　人工バリアの基本構成の検討例.....1-2
図 1.2-1　人工バリア性能の経時変化のイメージ.....1-8

図 2.1-1　人工バリア構成.....2-1
図 2.1-2　有効粘土密度（乾燥時）と透水係数の関係.....2-7
図 2.1-2　有効粘土密度（乾燥時）と透水係数の関係.....2-7
図 2.1-3　クニゲル V1 の有効粘土密度（乾燥時）～透水係数（定水位法、ケイ砂混合を抽出）.....2-8
図 2.1-4　層を 3 分割して計測したコア単位の有効ベントナイト乾燥密度の分布.....2-8
図 2.1-5　転圧工法で使用した材料の粒径加積曲線.....2-14
図 2.1-6　小型試験結果（含水比測定結果）.....2-16
図 2.1-7　大型試験結果（含水比測定結果）.....2-16
図 2.1-8　ベントナイト含水比調整作業フロー（1 バッチ毎）.....2-17
図 2.1-9　ペレガイアによる調整後の含水比分布（全体）.....2-17
図 2.1-10　ペレガイアによる再調整後の含水比分布.....2-18
図 2.1-11　使用したアイリッヒミキサと攪拌機構の概念図.....2-18
図 2.1-12　方法 1 での含水比調整結果.....2-20
図 2.1-13　方法 2 での含水比調整結果.....2-20
図 2.1-14　方法 3 での含水比調整結果.....2-20
図 2.1-15　含水比調整前後の粒度分布の変化.....2-21
図 2.1-16　凍結混合と水添加混合による吹付け材料の含水比の比較.....2-22
図 2.1-17　1 層ごとの施工試験の主要なフロー.....2-25
図 2.1-18　大型フィニッシャ.....2-25
図 2.1-19　撒出し・敷均しレーンおよび区分け（平面図）.....2-26
図 2.1-20　振動ローラの種類による.....2-26
図 2.1-21　大型振動ローラによる.....2-26
図 2.1-22　各層における仕上り乾燥密度と転圧回数の関係.....2-28
図 2.1-23　各層における採取コアの含水比と乾燥密度との関係.....2-29
図 2.1-24　3 分割コアの乾燥密度の分布.....2-29
図 2.1-25　3 次元スキャニング測量結果の例（10 層目）.....2-30
図 2.1-26　ベントナイト供給機.....2-31
図 2.1-27　ベントナイト敷均し機.....2-32
図 2.1-28　側部緩衝材の施工フロー.....2-33
図 2.1-29　転圧時のローラ幅.....2-34
図 2.1-30　ローラ幅と走行レーンの関係.....2-34
図 2.1-31　各ローラ幅で転圧した後の乾燥密度.....2-35
図 2.1-32　層内の乾燥密度の分布図でみたローラ幅 710mm と 850mm の比較.....2-35

図 2.1-33　含水比と乾燥密度の関係 2-36
図 2.1-34　含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線と施工試験の比較） 2-37
図 2.1-35　上部緩衝材のコア密度の測定結果（全データ） 2-39
図 2.1-36　上部緩衝材のコア密度測定による乾燥密度の測定結果（全データ） 2-39
図 2.1-37　吸引方式によるリバウンド材料回収イメージ 2-40
図 2.1-38　本工法の標準機器と機械配置 2-41
図 2.1-39　超音速ノズルの断面図 2-42
図 2.1-40　吊り下げた状態の吹付けロボット 2-43
図 2.1-41　試験中の動作の様子 2-43
図 2.1-42　セメント系材料への吹付け時とベントナイト系材料への 吹付け時のノズルワーク 2-44
図 2.1-43　材料供給量と含水比による施工管理図 2-44
図 2.1-44　吹付け施工時の乾燥密度確認試験イメージ 2-45
図 2.1-45　乾燥密度の比較 2-46
図 2.1-46　凍結混合と水添加混合による吹付け材料の乾燥密度の比較 2-46
図 2.1-47　リバウンド材の再利用に伴う施工時の含水比の推移 2-47
図 2.1-48　含水比と乾燥密度の関係 2-48
図 2.1-49　密度一定吹付け（15、16 層目）の吹付け回数と乾燥密度の関係 2-48
図 2.1-50　透水係数と乾燥密度の関係（既往データ） 2-51
図 2.1-51　膨潤圧と乾燥密度の関係（既往データ） 2-51
図 2.1-52　一軸圧縮強度と含水比の関係（既往データ） 2-52
図 2.1-53　変形係数と含水比の関係（既往データ） 2-52
図 2.1-54　一軸圧縮強度と乾燥密度の関係（既往データ） 2-52
図 2.1-55　変形係数と乾燥密度の関係（既往データ） 2-52
図 2.1-56 透水係数と乾燥密度の関係 2-53
図 2.1-57 膨潤圧と乾燥密度の関係 2-54
図 2.1-58　一軸圧縮強度と含水比の関係 2-55
図 2.1-59　変形係数と含水比の関係 2-55
図 2.1-60　一軸圧縮強度と乾燥密度の関係 2-55
図 2.1-61　変形係数と乾燥密度の関係 2-55

図 2.2-1　地下空洞型処分の施設構成 2-62
図 2.2-2　本試験における低拡散材の配置 2-62
図 2.2-3　ブリーディング 2-73
図 2.2-4　V 漏斗流下時間 2-73
図 2.2-5　スランプフロー 2-73
図 2.2-6　圧縮強度 2-73
図 2.2-7　型枠および支保工の設置状況 2-76

図 2.2-8　土圧計の配置（左側：LP45）.....2-76
図 2.2-9　打込み時間と側圧の関係（左側：LP45）.....2-77
図 2.2-10　液圧が作用する時間.....2-78
図 2.2-11　スランプフローの品質管理結果.....2-78
図 2.2-12　V 漏斗流下時間の品質管理結果.....2-79
図 2.2-13　打込み時の流動勾配.....2-80
図 2.2-14　底部低拡散材のひび割れ状況（平面図）.....2-81
図 2.2-15　側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）.....2-81
図 2.2-16　材齢 812 日における側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）2-82
図 2.2-17　側部低拡散材（LP60 配合）のひび割れ状況（側面図）.....2-82
図 2.2-18　側部低拡散材打込み後の温度分布.....2-83
図 2.2-19　側部低拡散材の有効応力計測定結果.....2-84
図 2.2-20　材齢に伴う合計ひび割れ幅の推移と長さ変化の関係.....2-85
図 2.2-21　合計ひび割れ幅の推移と湿度の関係.....2-85
図 2.2-22　モルタルの空隙率とトリチウムの実効拡散係数.....2-90

図 2.3-1　地下空洞型処分の施設構成.....2-94
図 2.3-2　外部から見たコンクリートピット.....2-94
図 2.3-3　経時変化（10～30℃　左：スランプフロー、右：漏斗流下時間）.....2-103
図 2.3-4　経時変化（30℃　左：スランプフロー、右：漏斗流下時間）.....2-103
図 2.3-5　スランプフローを 650mm とする時の石灰石微粉末量と SP 添加率の関係....2-104
図 2.3-6　石灰石微粉末量と V 漏斗流下時間の関係.....2-105
図 2.3-7　石灰石微粉末量とブリーディング率の関係.....2-105
図 2.3-8　石灰石微粉末量と間隙通過性の関係.....2-106
図 2.3-9　コンクリートピットの流動勾配.....2-109
図 2.3-10　吐出量と流動勾配の関係.....2-109
図 2.3-11　上部コンクリートピットのひび割れ状況.....2-110
図 2.3-12　ひび割れ深さ確認コア削孔位置.....2-110
図 2.3-13　表面締固めバイブレータ.....2-111
図 2.3-14　施工状況.....2-111

図 2.4-1　地下空洞型処分の施設構成.....2-119
図 2.4-2　区画内充てん材.....2-119
図 2.4-3　上部充てん材施工状況.....2-119
図 2.4-4　充てん材配合検討フロー.....2-125
図 2.4-5　配合検討フローと検討概要.....2-127
図 2.4-6　スランプフローとモルタル V 漏斗流下時間の関係.....2-127
図 2.4-7　スランプフローの経時変化（20℃）.....2-129

図 2.4-8　スランプフローの経時変化（60℃）.....2-129
図 2.4-9　流動性確認試験での流動勾配.....2-129
図 2.4-10　上部充てん材の配合検討フローと検討概要.....2-130
図 2.4-11　V 漏斗流下時間とスランプフロー.....2-131
図 2.4-12　ブリーディング率とスランプフロー.....2-131
図 2.4-13　膨張材量と圧縮強度の関係(20℃).....2-132
図 2.4-14　膨張材量と圧縮強度の関係(60℃).....2-132
図 2.4-15　混和剤の種類と経時変化の関係(20℃).....2-133
図 2.4-16　混和剤の種類と経時変化の関係(60℃).....2-133
図 2.4-17　施工確認試験の検討手順と検討内容.....2-136
図 2.4-18　ポンプ車のピストン前面圧と吐出量.....2-137
図 2.4-19　模擬廃棄体の状況.....2-137
図 2.4-20　ポンプ方式による充てん性確認試験平面図.....2-138
図 2.4-21　吐出量と流動勾配.....2-138
図 2.4-22　バケット打込み状況.....2-139
図 2.4-23　充てん材（平面部）施工範囲平面図.....2-139
図 2.4-24　打込み毎の排出位置と勾配.....2-139
図 2.4-25　上部充てん材の打込みパターン.....2-141
図 2.4-26　3D スキャナによる高さ計測結果.....2-141
図 2.4-27　バケット配置状況.....2-141
図 2.4-28　バケット配置平面図.....2-141
図 2.4-29　仕上がり面の高さ分布図.....2-142
図 2.4-30　表面敷均し装置.....2-142

図 2.5-1　地下空洞型処分の施設構成.....2-150
図 2.5-2　締固め曲線（クニゲル V1：砂＝15：85）.....2-157
図 2.5-3　乾燥密度・含水比と透水係数との関係.....2-158
図 2.5-4　バッチ式機械の例.....2-159
図 2.5-5　連続式機械の例.....2-160
図 2.5-6　ベントナイト混合土製造フロー図.....2-161
図 2.5-7　混合土製造状況.....2-161
図 2.5-8　自走式土質改良機（SR-2000G）で製造した
混合土の含水比および混合率の測定結果.....2-162
図 2.5-9　自走式土質改良機（SR-2000G）で製造した
混合土の含水比および混合率の経時変化.....2-162
図 2.5-10　連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の測定結果.2-163
図 2.5-11　連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の経時変化.2-163
図 2.5-12　上部埋め戻し材の施工手順の例.....2-165

図 2.5-13　施工確認試験での上部埋戻し材の施工手順 2-166
図 2.5-14　施工フロー 2-167
図 2.5-15　吹付け時の機械配置図 2-167
図 2.5-16　施工状況 2-167
図 2.5-17　各敷均し厚さでの転圧段階と層厚の関係 2-168
図 2.5-18　各敷均し厚さでの仕上がり密度 2-168
図 2.5-19　上部埋戻し材の乾燥密度と含水比の関係 2-170
図 2.5-20　施工後の含水比 2-170
図 2.5-21　施工後の乾燥密度 2-170
図 2.5-22　施工後の締固め度 2-170
図 2.5-23　施工試験後の混合率 2-170
図 2.5-24　上部埋戻し材吹付け施工時のリバウンド材の含水比 2-171
図 2.5-25　上部埋戻し材吹付け施工時のリバウンド材の混合率 2-172
図 2.5-26　上部埋戻し材吹付け施工時の施工前後の材料の含水比の変化 2-172
図 2.5-27　透水係数と乾燥密度の関係 2-175
図 2.5-28　透水係数と有効粘土乾燥密度の関係 2-176
図 2.5-29　既往研究における透水係数と有効粘土密度の関係 2-176

図 2.6-1　設置計器数量および計測器配置（その 1） 2-183
図 2.6-2　設置計器数量および計測器配置（その 2） 2-184
図 2.6-3　設置計器数量および計測器配置（その 3） 2-185
図 2.6-4　底部緩衝材の沈下量計測結果 2-187
図 2.6-5　底部緩衝材の土圧計測結果 2-187
図 2.6-6　底部低拡散材の応力計測結果 2-188
図 2.6-7　底部コンクリートピットの応力計測結果 2-188
図 2.6-8　側部コンクリートピットの応力計測結果 2-189
図 2.6-9　側部低拡散材の応力計測結果 2-189
図 2.6-10　上部コンクリートピットの応力計測結果 2-190
図 2.6-11　上部低拡散材の応力計測結果 2-190
図 2.6-12　上部埋戻し材の沈下量計測結果 2-191
図 2.6-13　岩盤変位計測結果 2-191
図 2.6-14　岩盤間隙水圧計測結果 2-191
図 2.6-15　解析対象の施設状態 2-194
図 2.6-16　解析モデル(全体) 2-194
図 2.6-17　解析モデル(地下空洞施設) 2-194
図 2.6-18　検討に用いた地震動の例(Lv1、水平方向) 2-195
図 2.6-19　空洞全体の挙動（Lv2、変位 200 倍） 2-195
図 2.6-20　引張強度に対する安全係数と地震動レベルの関係（Phase1） 2-196

図 2.6-21　せん断強度に対する局所安全係数 SF(履歴最小) 2-197
図 2.6-22　最大主応力(引張側、履歴最大).....2-197
図 2.6-23　節点ジョイント設置箇所（Phase1） 2-197
図 2.6-24　節点ジョイント設置箇所（Phase2） 2-198
図 2.6-25　せん断強度に対する局所安全係数 SF(Lv2、履歴最小) 2-198
図 2.6-26　最大主応力(Lv2、引張側、履歴最大).....2-198
図 2.6-27　緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの関係のイメージ 2-199
図 2.6-28　施設の変形形状（Lv2、46.14s、変位 200 倍） 2-200
図 2.6-29　緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線.....2-200
図 2.6-30　緩衝材の塑性化状況（Lv2） 2-200
図 2.6-31　緩衝材の塑性化状況（Lv2、解析終了時） 2-200
図 2.6-32　弾性解析結果から評価した緩衝材の局所安全係数 SF(Lv2、履歴最小).....2-200
図 2.6-33　緩衝材の厚さの残留変位（Lv2、解析終了時、変位 200 倍） 2-200
図 2.6-34　透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係 2-201
図 2.6-35　緩衝材の体積ひずみ増分 2-201
図 2.6-36　不飽和混合土供試体の一面せん断試験の X 線 CT 結果 2-202
図 2.6-37　不飽和混合土供試体の一面せん断試験の応力経路 2-202
図 2.6-38　せん断帯有無による飽和混合土供試体の透水係数と乾燥密度の関係 2-202
図 2.6-39　緩衝材の隙間透水試験の概念図.....2-203
図 2.6-40　透水係数の測定結果と既存値との比較 2-203
図 2.6-41　地震計設置位置 2-204
図 2.6-42　観測地震動の最大加速度と計測高さの関係（左から x、y、z 方向） 2-206
図 2.6-43　解析モデル（全体） 2-207
図 2.6-44　解析モデル（試験空洞周辺） 2-207
図 2.6-45　観測地震動（地震計①） 2-208
図 2.6-46　入力地震動（解析モデル下端） 2-208
図 2.6-47　解析結果と観測データの比較（y 方向） 2-209

表目次

表 1.2-1　各過程に要求される基本安全機能 1-5
表 1.2-2　人工バリアの部材と要求機能の対応 1-7
表 1.2-3　確証試験の構成と各試験の目的 1-9
表 1.2-4　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その 1） 1-10
表 1.2-5　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その 2） 1-11
表 1.2-6　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その 3） 1-12

表 2.1-1　緩衝材試験の主な成果の概要 2-3
表 2.1-2　緩衝材の要求機能 2-5
表 2.1-3　緩衝材の要求機能、技術要件と設計仕様項目 2-6
表 2.1-4　緩衝材の管理項目と管理目標値 2-6
表 2.1-5　緩衝材の施工時の品質管理項目（転圧工法の場合の例） 2-9
表 2.1-6　緩衝材の施工時の品質管理項目（吹付け工法の場合の例） 2-10
表 2.1-7　緩衝材確証試験の課題 2-12
表 2.1-8　緩衝材確証試験の課題に対する対応と実施内容 2-13
表 2.1-9　クニゲル GX の仕様 2-14
表 2.1-10　クニゲル GX の仕様（粒度） 2-14
表 2.1-11　転圧工法で使用した材料の材料仕様項目の基本統計量（平成 19～25 年度） 2-15
表 2.1-12　検討に用いた小型ミキサ 2-15
表 2.1-13　底部緩衝材の施工条件　一覧表 2-24
表 2.1-14　大型フィニッシャの仕様 2-25
表 2.1-15　使用振動ローラ（1.5t 級および 2.5t 級）の主要緒元 2-27
表 2.1-16　大型振動ローラ（11t 級，19t 級）の主要緒元 2-27
表 2.1-17　部材厚に関する 2-30
表 2.1-18　ベントナイト敷均し機の仕様 2-32
表 2.1-19　上部緩衝材の施工条件　一覧表 2-38
表 2.1-20　上部緩衝材の敷均し・転圧の手順 2-38
表 2.1-21　本工法の標準機器仕様一覧（カタログスペック） 2-41
表 2.1-22　緩衝材の初期性能確認試験項目 2-50
表 2.1-23　技術要件に対応する初期性能確認試験 2-52

表 2.2-1　低拡散材の主な成果の概要 2-63
表 2.2-2　低拡散材の要求機能 2-64
表 2.2-3　低拡散材の要求機能、技術要件と設計仕様項目 2-65
表 2.2-4　低拡散材の管理項目と管理目標値 2-66
表 2.2-5　低拡散材の検討課題の一覧 2-68
表 2.2-6　低拡散材確証試験の課題に対する対応と実施内容 2-69

表 2.2-7　低拡散材の使用材料 2-70
表 2.2-8　本試験における低拡散材の基本配合設計 2-71
表 2.2-9　低拡散材の使用材料 2-74
表 2.2-10　低拡散材の配合 2-74
表 2.2-11　各配合の打ち込み箇所 2-74
表 2.2-12　選定配合におけるフレッシュ試験結果 2-75
表 2.2-13　選定配合における圧縮強度試験結果 2-75
表 2.2-14　低拡散材の品質管理項目および実績値（底部，側部，上部） 2-86
表 2.2-15　低拡散材の要求機能と初期性能確認試験項目 2-88
表 2.2-16　拡散試験の試験条件 2-89
表 2.2-17　拡散試験の試験結果 2-89

表 2.3-1　コンクリートピットの主な成果の概要 2-95
表 2.3-2　コンクリートピットの要求機能 2-96
表 2.3-3　コンクリートピットの要求機能と設計仕様項目 2-97
表 2.3-4　コンクリートピットの管理項目と管理目標値 2-97
表 2.3-5　コンクリートピットの検討課題 2-99
表 2.3-6　コンクリートピット確証試験の課題に対する対応と実施内容 2-100
表 2.3-7　コンクリートピットの使用材料 2-101
表 2.3-8　本試験におけるコンクリートピットの基本配合設計 2-101
表 2.3-9　想定した環境温度と本試験における設定温度 2-102
表 2.3-10　使用した石灰石微粉末 2-102
表 2.3-11　コンクリートピットの使用材料 2-107
表 2.3-12　コンクリートピットの選定配合 2-107
表 2.3-13　コンクリートピット各部材での使用配合 2-107
表 2.3-14　選定配合におけるフレッシュ試験結果 2-108
表 2.3-15　選定配合の圧縮強度試験結果 2-108
表 2.3-16　出来形管理の計測値（底部、側部、上部） 2-111
表 2.3-17　コンクリートピットの品質管理項目と計測値 2-112
表 2.3-18　コンクリートピットの要求機能と初期性能試験項目 2-114
表 2.3-19　設計基準強度に達する積算温度および材齢 2-115

表 2.4-1　充てん材の主な成果の概要 2-120
表 2.4-2　充てん材の要求機能 2-121
表 2.4-3　充てん材の要求機能、技術要件と設計仕様項目 2-121
表 2.4-4　充てん材の管理項目と管理目標値 2-122
表 2.4-5　充てん材の検討課題の一覧 2-123
表 2.4-6　充てん材確証試験の課題に対する対応と実施内容 2-124

表 2.4-7　充てん材の使用材料 2-125
表 2.4-8　本試験における充てん材の基本配合の選定 2-126
表 2.4-9　本試験における充てん材の配合設計方針 2-126
表 2.4-10　スランプフローと石灰石微粉末量の関係 2-128
表 2.4-11　使用した混和剤 2-129
表 2.4-12　区画内充てん材の使用材料の代表例 2-130
表 2.4-13　区画内充てん材の選定配合 2-130
表 2.4-14　目標スランプフローの設定と石灰石微粉末量の選定 2-131
表 2.4-15　使用した混和剤の種類 2-133
表 2.4-16　上部充てん材の使用材料の代表例 2-134
表 2.4-17　上部充てん材の選定配合 2-134
表 2.4-18　選定配合におけるフレッシュ試験結果 2-135
表 2.4-19　施工上の検討課題 2-135
表 2.4-20　区画内充てん材の品質管理項目と計測値 2-143
表 2.4-21　上部充てん材の品質管理項目と計測値 2-143
表 2.4-22　充てん材の要求機能と初期試験項目 2-145
表 2.4-23　区画内充てん材の乾燥単位容積質量（kg/m^3） 2-146

表 2.5-1　上部埋戻し材の主な成果の概要 2-151
表 2.5-2　埋戻し材の要求機能 2-152
表 2.5-3　埋戻し材の要求機能、技術要件と設計仕様項目 2-153
表 2.5-4　埋戻し材の管理項目と管理目標値 2-153
表 2.5-5　埋戻し材確証試験の課題に対する対応と実施内容 2-154
表 2.5-6　候補材料とその評価 2-156
表 2.5-7　本試験における低拡散材の配合設計方針 2-157
表 2.5-8　上部埋戻し材の吹付け施工の施工速度およびリバウンド率 2-173
表 2.5-9　上部埋戻し材の初期性能確認試験項目 2-174

表 2.6-1　試験施設構成部材の計測項目と計測方法 2-182
表 2.6-2　初期性能に関する取得データ 2-182
表 2.6-3　影響の程度と健全性 2-186
表 2.6-4　設置位置選定根拠 2-205
表 2.6-5　地震計の仕様 2-205
表 2.6-6　回収データの仕様 2-205
表 2.6-7　観測地震動一覧 2-206

第1章　確証試験の概要

1.1　確証試験の背景、目的

1.1.1　余裕深度処分について

原子炉施設の運転と解体に伴い、使用済み制御棒と炉内構造物などの放射性廃棄物が発生するが、これらのうち一部は、含まれる放射性核種の濃度が「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令」第三十一条に規定された濃度（「現行の政令濃度上限値」という）を超える。このような廃棄物の大半は、ステンレス鋼などの金属が燃料近傍で中性子照射されて生じた放射化金属であり、この他、コンクリート、使用済みのイオン交換樹脂などが含まれる。このような廃棄物は、原子炉施設内に保管されている。

原子力委員会は、「現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について」（平成 10 年 10 月 16 日）[1]において、「対象廃棄物の処分方策を検討するに当たって、安全を確保すること、及び、将来世代に負担を残さないという観点も踏まえ処分場跡地については一般的であると考えられる利用が制約されないようにすること」との基本を示した上で、「処分された廃棄物に人間が接触することを避けるために、一般的であると考えられる地下利用に対して十分余裕を持った深度への処分」として、次のように記述している。「現在の大都市における地下利用の状況を踏まえても、支持層の上面よりも深く、これに基礎となる地盤の強度などを損なわないための離隔距離を確保し、例えば地表から 50～100m 程度の深度の地下に処分すれば、住居建設などの一般的であると考えられる地下利用はもとより高層建築物などの建設を制約しなくとも人間が廃棄物に接触することは避けられ、これに伴う被ばくは生じない」。原子力委員会はこのような「一般的であると考えられる地下利用に十分余裕をもった深度に処分する」（余裕深度処分）という考え方を示した上で、さらに処分にあたっては「現行の低レベル放射性廃棄物が処分されているコンクリートピットと同等以上の放射性核種閉じ込め機能を持った処分施設を」、「放射性核種の移行抑制機能の高い地中で」、人間の活動によって人間が廃棄物に接触する可能性が十分小さいと考えられる地下数十ｍ程度の深度に設置することによって実現出来るとしている。

その後、これを受けて電気事業者を中心に余裕深度処分に関する各種の調査、検討が実施され、処分施設の概念などがいろいろな場で発表されてきた。

1.1.2　試験の背景

余裕深度処分の概念については、電気事業者、建設会社等で検討が進み、例えば、「低レベル放射性廃棄物の次期埋設施設の検討状況　余裕深度処分対象廃棄物の概要　国などの報告書による検討事例より」[2]において、廃棄体、充填材(低拡散層)、コンクリートピット、ベントナイト(低透水層)、埋戻材から構成される施設の概念が示された。図 1.1-1[3]にその概念の検討例を示す。

さらに、その施設を構成する要素に対して、期待する機能について議論が進み、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「低レベル放射性廃棄の余裕深度処

分に係る安全規制について」[4]（以下、「廃棄物安全小委報告書」とする）において、充てん材、低拡散層や低透水層等の人工バリアの「基本的要件（安全機能等）」（以下、基本安全機能とする）として、閉じ込め、遮へい、移行抑制、離隔、冷却の機能が重要であることが示された。それを受け、原子力学会、土木学会において、基本安全機能を満足させるための技術要件や品質確保のための検査項目、検査方法などについての原子力学会標準[5]や土木学会の技術文書[6]が発刊された。

その後、原子力規制委員会によって、第二種廃棄物を対象とし、余裕深度処分に係るものを除く新基準として、「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[7]「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」[8]が平成 25 年 12 月 18 日に施行されたが、これらはトレンチ処分やピット処分を対象としたものであり、余裕深度処分については、平成 26 年 10 月 1 日に原子力規制委員会は、原子力規制庁に対し、原子力施設の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物に係る規制（第二種廃棄物埋設に係る規制）について、課題を整理し規制基準等の検討に着手するよう指示を行い、検討が始まっている。

余裕深度処分は、いくつかの人工バリアを配置することにより、比較的浅い地下に大量の廃棄物を効率的にかつ安全に処分できる概念である。また、この人工バリアの材料、性能や施工方法などの成立可能性については、主に試験室や要素試験レベルでの基本的な検討がなされてきている。

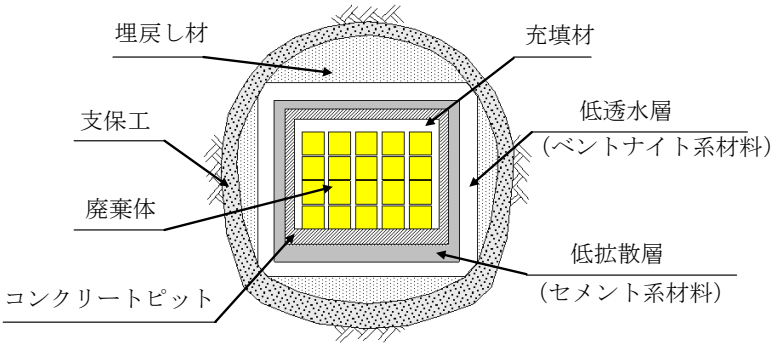


図 1.1-1　人工バリアの基本構成の検討例[3]

1.1.3　試験の目的と概要

上記のように、電気事業者、大学、建設会社などの各方面で、余裕深度処分について、試験室や研究所での基本的な試験が実施され、また一部で部分試験体による試験が実施され、余裕深度処分の成立性についての基礎データが蓄積された[9][10][11][12][13][14] 。

余裕深度処分では、地下 50 から 100m 程度の深度に幅 18m、高さ 18m程度の規模の空洞を掘りその内部に「現行の低レベル放射性廃棄物が処分されているコンクリートピットと同等以上の放射性核種閉じ込め機能を持った処分施設を設置」[15]することとなり、大型の地下空洞とはいえ作業スペースの限られた地下空間での高品質な人工バリアの構築が重要となってくる。また、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」[6]においては、原子力安全委員会の「人工バリアに関する長期的安全確保の考え方の整理(案)」[16]（以下、「長期

的安全確保の考え方の整理」とする）を踏まえ、長期的安全確保の考え方として、「埋め戻し完了以降は、その時間的スケール及び離隔された状態であることをふまえれば、人工バリアに対して人手による維持・管理は現実的には困難であることから」「建設・操業段階の過程において人工バリアの長期的な性能・状態は概ね決まってしまうということであり、当該過程における設計、品質管理および検査などの工学的対応が非常に重要であるといえる」としている。

このように、余裕深度処分では建設操業段階での品質が非常に重要であることから、現実の地下空間で施工試験を実施して、地下空間で適用可能な機械や工法の選定と施工可能性の確認および構築されたバリアの品質の確認や品質管理方法の確立が重要となった。

これらの情勢を背景に、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る共通的な基盤技術の確立を目的として、実際の地下環境下において余裕深度処分に想定されている実規模の処分施設の模擬施設を構築し、施設の建設に係る施工技術、施設の核種閉じこめや施設構造体としての初期性能並びに施工後における施設性能に係る計測と評価等、実際に施工した処分施設の総合的な性能の確認を行う目的で、平成 17 年度から性能確証試験が、国の事業として予算化され開始された。同事業は、平成 18 年度までに試験計画を立案し、平成 19 年度から「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」として、日本原燃の試験空洞を利用して現地での確証試験を開始し、平成 24 年度までに人工バリアの主要な部分について、適用可能な施工方法の確証とバリアの品質についてのデータ取得を終了した。また、平成 25 年度、平成 26 年度には、残された主に上部の部位について、「閉鎖技術確証試験」として、同様に施工方法の確証と品質データの取得を行った。また、構築段階で、周辺の岩盤および部材において各種の計測を行い、構築中の挙動を確認した。また、平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の発生を受け、処分施設の地震時の挙動についての検討も実施した。

1.2　試験計画

1.2.1　余裕深度処分の対象廃棄物

余裕深度処分の対象となる放射性廃棄物は、「廃棄物安全小委報告書」[4]に示されている。これによると、対象廃棄物のうち原子炉から発生するものとしては、運転中に発生する放射化金属および使用済み樹脂、解体時に発生する解体廃棄物等がある。また、再処理施設および MOX 燃料加工施設等において発生するものは、操業・運転等に伴い発生するプロセス廃棄物、雑廃棄物、チャンネルボックスおよびバーナブルポイズン、解体時に発生する解体廃棄物等がある。

1.2.2　安全確保に関する基本的要件

廃棄物の埋設施設に要求される機能について、「廃棄物安全小委報告書」[4]では、「廃棄物埋設施設の位置構造および設備が、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物による災害の防止上支障がないものであることに関して、これら施設に具備されるべき基本的要件（安全機能等）を把握し、それに対して必要な安全規制を講じていくことが重要である。」としており、基本安全機能として「閉じ込め」、「遮へい」、「移行抑制」、「離隔」、「冷却」が示されている。

余裕深度処分の対象廃棄物には長半減期核種も含まれていることから、これら基本安全機能

のうち、「移行抑制」、「離隔」は、数万年以上にわたる長期間が期待されると考えられる。「その間、能動的な管理・監視を継続することを前提とするのは現実的ではなく、受動的に長期にわたり安全性が確保される構造とする必要がある。」[17]とされており、予め期待する機能が発揮できる状態・環境を、建設段階において造り上げる必要があるものと考えられる。

さらに、「廃棄物安全小委報告書」[4]では上記の基本安全機能について、「過程毎に考慮すべき要件が変化していくことから、対象廃棄物について想定される取り扱い過程を時系列的に沿って区分し、各過程において想定される安全確保上考慮すべき基本的要件を考慮して安全確保を図っていく必要がある」としており、①受け入れから定置まで、②定置から埋め戻しまで、③埋め戻し完了から管理を必要とする期間の終了まで、④管理を必要とする期間終了後の４つの過程に区分し、各過程において要求される基本安全機能が表 1.2-1[6]のように示されている。

さらに、「廃棄物安全小委報告書」[4]では、「設計・建設段階で、長期的な移行抑制機能の性能の変遷について考慮が必要と考えられる。」「埋戻し完了後以降においては人工バリアに土圧等が加わることから、人工バリアの劣化に加えて構造的な安定性についても同様に設計・建設段階での考慮が必要である。」としている。

このような長期的な変遷に関して、「長期安全確保の考え方の整理」[16]では、「安全評価にあたっては、人工バリアの状態を長期にわたり設定し、シナリオを作成する必要がある。このためには、将来の人工バリアの物理・化学的な状態を十分に理解し、安全評価上の基礎を与える必要がある。」としており、閉鎖前段階と閉鎖後段階で人工バリアの状態設定の必要性とその内容について示している。さらに、長期安全評価において増加する可能性がある不確実性について、「不確実性に対しては、安全評価結果の信頼性を確保するため、人工バリアに過度な性能を期待しないなど、不確実性の程度をふまえた適切な状態設定が行われている必要がある。」としている。

これらを踏まえ、人工バリアに係る安全確保の考え方について、「長期安全確保の考え方の整理」[16]の中で次のように整理している。

「・人工バリアに対しては、現状の技術で合理的に達成できる範囲において高い性能を確保し、また、長期の状態設定に伴う不確実性に起因する安全評価の信頼性低下に対しては、できる限り工学的な対応が図られた設計がなされていることを要求する。
・人工バリアの設計の妥当性に係わる判断基準は、処分システムを対象とした安全評価の結果が、シナリオ区分に応じて示されている目安線量を満足していることとする。」

「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」[6]において、余裕深度処分における人工バリアの長期安全確保の考え方について、「余裕深度処分における基本安全機能は、地下施設が設計・建設され、「閉じ込め」、「遮へい」を確保した後、埋め戻しされ「移行抑制」、「離隔」へと移行する。」「地下施設は地下水により徐々に冠水し、地下環境で生じる物理的・化学的な作用を受け、状態が変化していく。埋め戻し完了以降は、その時間スケールおよび離隔された状態であることを踏まえれば、人工バリアに対して人の手による維持・管理は現実的ではないことから、物理的・化学的な条件に応じて人工バリアの移行抑制機能は

徐々に低下して行くものと考えられる。すなわち、建設・操業段階の過程において人工バリアの長期的な性能・状態は概ね決まってしまうということであり、当該過程における工学的な対応が非常に重要であるといえる。」と記述し、建設・操業段階で良好な品質の人工バリアを構築することが、長期の安全確保にとって重要であることを述べている。

表 1.2-1　各過程に要求される基本安全機能[6]

	①受け入れから定置まで	②定置から埋戻しまで	③埋戻し完了後から管理を必要とする期間の終了まで	④管理を必要とする期間終了後
安全機能	・閉じ込め機能 ・放射線遮へい機能 ・必要に応じて冷却機能	←基本的に左欄同様	・移行抑制機能 ・離隔機能	←基本的に左欄同様
安全確保の考え方	・平常時、異常時の環境中への核種移行の可能性の考慮 ・廃棄体自体の安定性と施設・設備との組み合わせによって安全を確保	←基本的に左欄同様 ・移行抑制を期待する人工バリアに遮へい機能等を期待する場合には、これに考慮	・人工バリア、天然バリアの組合せによって安全が確保	←基本的に左欄同様
確認･検査に係わる記述	―	―	・移行抑制機能の性能低下及び構造的安定性について設計・建設段階で配慮	←基本的に左欄同様
段階管理に係わる記述	―	―	・埋設保全区域を設定し、掘削行為等を制限する等の管理を行うことにより公衆の安全を図る	・被ばくによる潜在的危険性が、その後管理を要しないレベルで推移することを総合的に確認できた時点で管理不要 ・生活環境から離隔が確保される必要有

1.2.3　人工バリアの要求機能

「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」[6]では、「廃棄物安全小委報告書」で示された基本安全機能「閉じ込め」、「遮へい」、「移行抑制」、「離隔」に加えて、「地下水シナリオ評価技術報告書」[3]で言及している、「確実な建設・操業を行うための空間・力学的安定性の確保のために要求される機能として「操業上の機能」」も、余裕深度処分施設の「要求機能」としている。本報告書ではこれにならい、これらの要求機能を参考とする。また、本報告書の地下空洞型施設の部材は「緩衝材」、「低拡散材」、「充てん材(区画内充てん材、上部充てん材)」、「コンクリートピット」、「埋戻し材（空洞内埋戻し材、（以下、上部埋戻し材）、坑道埋戻し材）」を検討対象とするが、「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」[6]に加えて、「余裕深度処分施設の施設検査方法」[5]も参考とすると、それぞれ以下のような要求機能が期待される。

・緩衝材（低透水層、ベントナイト）

「閉じ込め」: 操業・建設段階の期間中、地下水の浸入を抑制すること

「移行抑制」: 埋戻し後の段階において、地下水の流動を遅くし、緩衝材よりも内側を拡散場とすること（低透水性）

「操業上の機能」: 底部緩衝材には、埋設設備および廃棄体の支持部材として十分な強度を有す

ること（力学的安定性）

・低拡散材

「遮へい」: 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること（放射線の遮へい）

「移行抑制」: 放射性核種の拡散による移行を抑制すること（低拡散性）

放射性核種を収着すること（核種収着）

・充てん材(区画内充填材、上部充填材)

「遮へい」: 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること（放射線の遮へい）

「移行抑制」: 放射性核種を収着すること（核種収着）

・コンクリートピット

「遮へい」: 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること（放射線の遮へい）

「移行抑制」: 放射性核種を収着すること（核種収着）

「操業上の機能」: 建設・操業段階において、作用する荷重、地震力等に対して健全であること（空間・力学的安定性）

・埋戻し材（上部埋戻し材、坑道埋戻し材）

「移行抑制」: 埋戻し後以降の長期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること（力学的安定性）

連続した地下水移行経路を形成しないこと、周辺岩盤よりも低い透水性を有すること（低透水性）

隙間なく充てんされること（低透水性）

「離隔」: 容易な人の侵入を抑制すること（閉塞性）

本確証試験においては、緩衝材の「閉じ込め」「移行抑制（低透水性)」、低拡散材の「移行抑制（低拡散性)」、コンクリートピットの「操業上の機能（空間・力学的安定性)」、充てん材の「遮へい」、上部埋戻し材の「移行抑制（低透水性)」を主に期待する機能として設計段階から考慮する機能とし、これらについては、特性値を取得し期待する機能を発揮し得る目標値を満足することを確認することとした。

また、緩衝材の「低透水性」、低拡散材の「低拡散性」については、現時点において具体的な性能が示されている。「低透水性」にかかる透水係数については、「第２次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ」[18]が参照でき、この中で、緩衝材内部の物質移行が拡散支配になることを指向し，拡散場を形成できる条件として 1m程度の部材厚さのときの透水係数を 1.0×10^{-11} m/s 以下としている。低拡散材の「低拡散性」については、別の既往検討の中で、「低拡散層のセメント系材料の拡散係数については、ベントナイト系材料の実効拡散係数が 1E-10m²/s 程度と推定されることから、より小さな値として、De=1E-11～1E-12m²/s 程度の性能を期待している」[19]とし、具体的な拡散係数として目標がおおよそながら提示されている。

低拡散材、コンクリートピットの「放射線の遮へい性」や「核種収着性」、埋戻し材の「力学特性」に関しては、設計段階においては考慮しないが、付帯的に考慮する機能として、特性値を取得することとした。それは、これらの機能に関連する特性値に目標値を設定することは、廃棄体条件や、岩盤や地下水流動などの外的要因が決まってからなされるべきものであり、本

確証試験では設定できないためである。また、埋戻し材の「閉塞性」に関しては、施工確認の段階で、隙間なく施工できることを目視等で確認することとした。本取りまとめにおける、人工バリアの各部材と要求機能の対応を表 1.2-2にまとめる。●が「主に期待する機能として設計段階から考慮する」機能であり、○が「設計段階においては考慮しないが、付帯的に考慮する機能として、特性値を取得する」機能である。

なお、本確証試験における要求機能を満たすための初期的な性能（以下、初期性能）は、試験施設の建設完了時点（上部空間の埋戻しまで終了した時点）の性能と定義することとし、この性能は安全評価において要求される施設の長期経過後の性能に対して以下のような考慮が払われた上で設定されるものとしている。性能の経時変化のイメージを図 1.2-1に示す。

- 人工バリアの化学的劣化や力学的要因による劣化等、現状の知見において長期間経過後において生じるであろうと考えられる事象への考慮。
- 長期の不確実性を見込んだ安全裕度

したがって、実際に長期劣化や不確実性を評価した上で設定した安全裕度ではないことに注意されたい。このような状態設定の変化に関する評価は、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」[20]の安全評価の更新に資する「新しい科学技術的知見の収集」に基づいて実施する、状態設定に関するデータを収集し実施すべきである。

表 1.2-2　人工バリアの部材と要求機能の対応

要求機能		段階	機能の内容	部材				
				緩衝材	低拡散材	コンクリートピット	充てん材	埋戻し材
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること	●	—	—	—	—
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと	—	○	○	●	—
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	—	●	—	—	—
			放射性核種を収着すること	—	○	○	●	—
			低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	●	—	—	—	○※
			連続した地下水移行経路を形成しないこと 周辺岩盤よりも低い透水性を有すること※※ 隙間なく充てんされること※※※	—	—	—	—	●
	離隔		離隔距離を確保すること	—	—	—	—	—
			容易な侵入を防止すること	—	—	—	—	○
操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	●（底部緩衝材）	—	●	—	—
			坑道の形状を維持すること	—	—	—	—	—

※；埋戻し材の「低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと」は、「埋戻し後以降の長

期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること（力学特性）」である。

※※；「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」[6]に示された機能に加え、本確証試験で追加した機能。

※※※；「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」[6]に示された機能に加え、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」[5]を参考にして、本確証試験で追加した機能

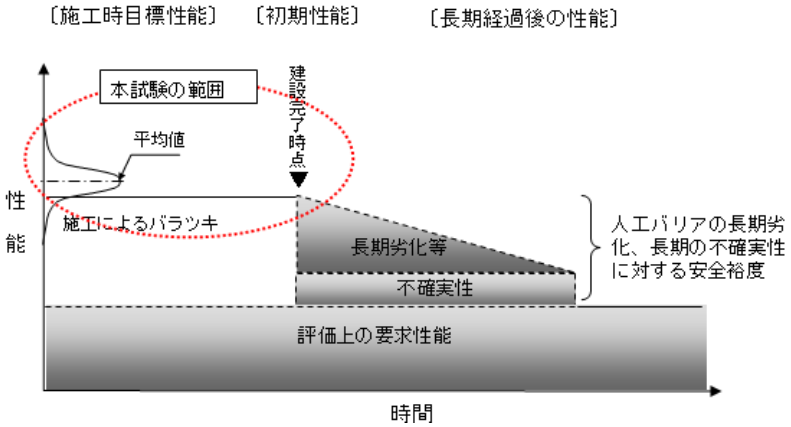


図 1.2-1　人工バリア性能の経時変化のイメージ

1.2.4　確証試験とその経過の概要

確証試験は、処分施設施工確認試験、初期性能確認試験、施設／岩盤挙動計測試験の３種類の試験から構成される。各試験の目的を表 1.2-3に示す。

試験に供する地下空洞として、青森県六ヶ所村における日本原燃（株）所有の試験空洞を利用した。処分施設施工確認試験は、人工バリアを構成する全ての部位を組み合わせて実施し、断面的には実物大で、奥行き方向には実施設の長大なピットの内の１区画分を対象とした。実規模・実環境下における試験としては我が国でも初めてのものであり、人工バリアの実規模での施工性確認は本試験の中でも最も重要な試験と位置付けた。

緩衝材については、既存の重機（一部改造も含む）を使用して地下空間で高密度低透水のものが構築可能か、地下空間での構築に当たっての品質管理方法はどうあるべきか、構築物の精度、施工効率などについて試験を行い、また、できあがった緩衝材の透水係数などの性能やそのバラツキなどを把握した。低拡散材などのセメント系部位については、緻密で耐久性に優れた材料を選定し、かつ水みちとなるひび割れや打継目などの弱点の少ないものとなるように、流動性の良い高流動材料を使用することとした。

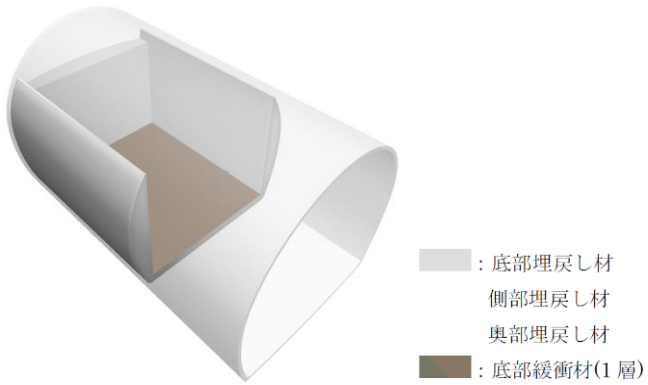
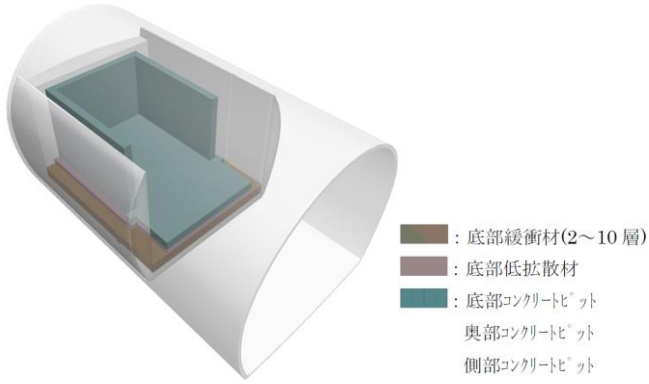
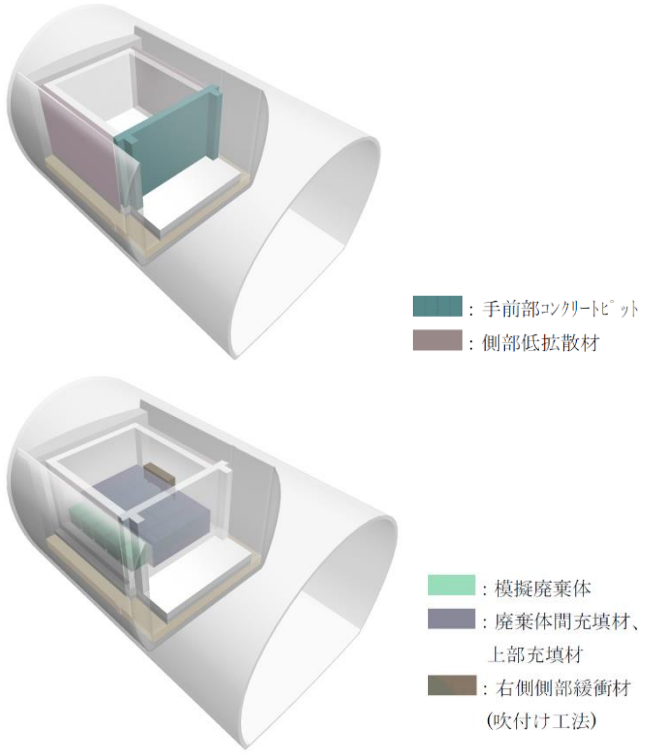
表 1.2-3　確証試験の構成と各試験の目的

確証試験を構成する試験	各試験の目的
1. 処分施設施工確認試験	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、施工方法等の実施設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、施工方法等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。

確証試験の各年度の実施項目と試験施設の構築状況を表 1.2-4、表 1.2-5、表 1.2-6に示す。

また、本報告書では８カ年にわたる実施内容を、重要な成果を中心とした観点からとりまとめたものであり、個々の試験実施内容、条件、個別の詳細な成果などについては、各年度ごとの報告書が公開されているので、そちらを参照されたい。

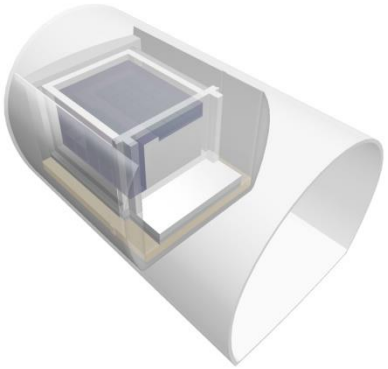
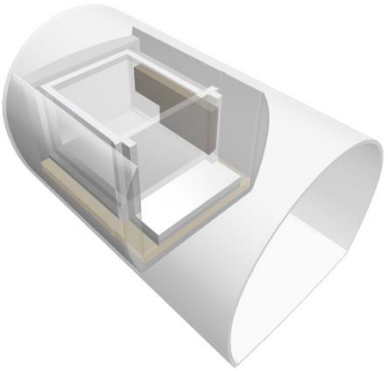
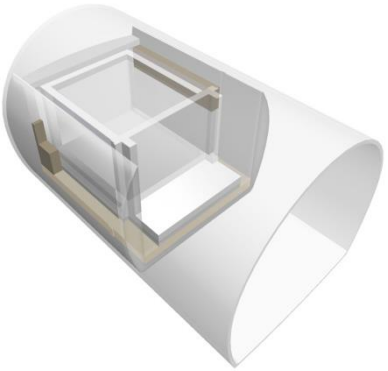
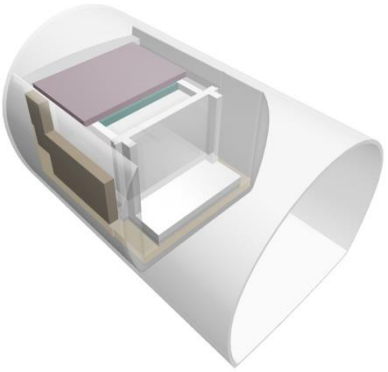
表 1.2-4　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その１）

年度	施設の構築状況	確証試験項目
平成19年度		○　底部・側部埋戻し材施工・初期性能確認試験 ○　底部緩衝材施工・初期性能確認試験（第１層） ○　試験空洞内滴水対策工 ○　岩盤挙動計測器設置 ○　計測システム設置 ○　地中無線の適用性検討 ○　共通仮設備設置 ■　低拡散材の品質管理方法の検討 ■　セメント系材料の特性調査 ■　ベントナイト材料特性調査
平成20年度		○　ベントナイト含水比調整 ○　底部緩衝材施工・初期性能確認試験（第 2～10 層） ○　底部低拡散材施工・初期性能確認試験 ○　底部・奥部・側部コンクリートピット施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器および計測システムの設置 ■　セメント系材料の特性調査 ■　ベントナイト材料特性測定
平成21年度		○　手前部コンクリートピットの施工・初期性能確認試験 ○　側部低拡散材施工・初期性能確認試験 ○　廃棄体間充填材施工・初期性能確認試験 ○　上部充填材施工・初期性能確認試験 ○　側部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器および計測システムの設置 ■　充填材充填性測定 ■　ひび割れ解析・評価 ■　セメント系材料の特性調査 ■　ベントナイト材料特性測定

○⇒地下空洞内での施工確認試験

■⇒地上での試験、机上検討、室内試験等、検討業務

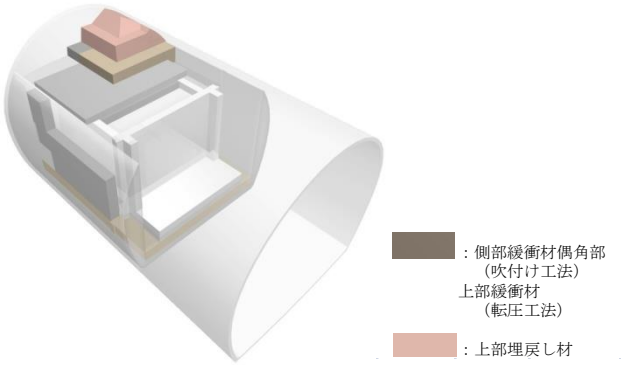
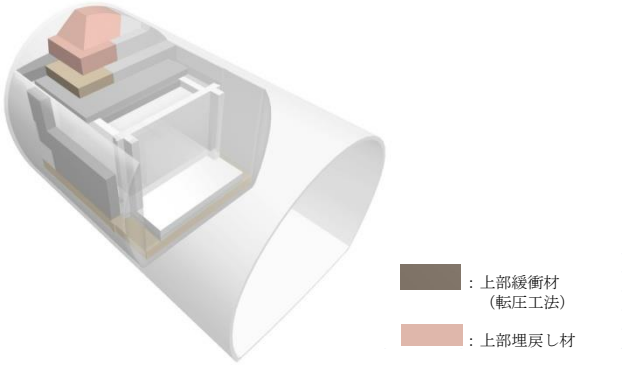
表 1.2-5　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その２）

年度	施設の構築状況	確証試験項目
平成22年度	 ：模擬廃棄体 ：廃棄体間充填材、上部充填材  ：右側側部緩衝材(転圧工法)	○　廃棄体間充填材施工・初期性能確認試験 ○　上部充填材施工・初期性能確認試験 ○　側部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器および計測システムの設置 ○　ひび割れ解析・評価 ■　セメント系材料の特性測定 ■　ベントナイト材料特性測定
平成23年度	 ：右側側部緩衝材(転圧工法)、左側側部緩衝材(吹付け工法)	○　側部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　上部充填材他施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測 ■　セメント系材料の特性測定 ■　ベントナイト材料特性測定 ■　セメント系材料の解析・評価
平成24年度	 ：左側側部緩衝材(転圧工法)、左側側部緩衝材(吹付け工法) ：上部ｺﾝｸﾘｰﾄﾋﾟｯﾄ ：上部低拡散材	○　側部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　上部コンクリートピット施工・初期性能確認試験 ○　上部低拡散材施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器の設置 ○　ひび割れ解析・観察・評価 ■　セメント系材料の特性測定 ■　ベントナイト材料特性測定

○⇒地下空洞内での施工確認試験

■⇒地上での試験、机上検討、室内試験等、検討業務

表 1.2-6　確証試験施設の各年度の構築状況と試験項目（その 3）

年度	施設の構築状況	確証試験項目
平成25年度		○　側部緩衝材偶角部施工・初期性能確認試験 ○　上部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　上部埋戻し材施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器および計測システムの設置 ○　ひび割れ観察・評価 ■　セメント系材料の特性測定 ■　ベントナイト材料特性測定
平成26年度		○　上部緩衝材施工・初期性能確認試験 ○　上部埋戻し材施工・初期性能確認試験 ○　挙動計測器および計測システムの設置 ○　ひび割れ観察・評価 ■　セメント系材料の特性測定 ■　ベントナイト材料特性測定

○⇒地下空洞内での施工確認試験

■⇒地上での試験、机上検討、室内試験等、検討業務

1.3　成果の概要

1.3.1　緩衝材

緩衝材の主たる要求機能は建設・操業期間中における閉じ込めと、埋戻し後の移行抑制であり、これらの機能を満たすための低透水性が重要な性能として期待されている。緩衝材の仕様の設定や施工方法の検討を行うにあたり、施工性の確認と低透水性などの性能の確認を行うことが重要である。これまでの緩衝材の施工性や性能に関する検討は、小規模な施工試験や研究室レベルでの検討であった。具体的な設計と建設にあたっては、実際の地下空間の環境下において実規模の施工が実現可能であることの実証や、施工された緩衝材の品質のばらつきの評価などが必要であり、そのための確証試験を実施した。

緩衝材の材料であるベントナイトについて、既往知見をもとにベントナイトが有する特性および施工性を調査して、検討を行った。これまでの研究で緩衝材の主要材料として期待されている粉末ベントナイト（クニゲル V1）は、微粉に加工されたベントナイトであるが、高い乾燥密度を得るには大きな締固めエネルギーが必要である。一方、既往の研究において、微粉にする前の粒状ベントナイト（クニゲル GX）は、クニゲル V1 に比較して低い締固めエネルギーで高い密度を達成できることが確認されている。これらの研究成果を踏まえて本試験ではクニゲル GX を緩衝材の材料として選定した。緩衝材の構築にあたり、大量の粒状ベントナイトを使用することから、粒状ベントナイトの含水比調整をペレガイアミキサ、アイリッヒミキサ（容量 2000 リットルクラス）を用いて実施した。その結果、締固め施工後の緩衝材の品質への影響を考慮して設定した、目標値である含水比 21±2%の範囲に調整することが十分可能であることを確認した。その結果、所定の品質で含水比調整できることが分かり、ばらつきの程度を把握できた。

緩衝材の施工方法については、実際の地下環境下で人工バリアの一連の建設工程を模擬した試験の過程において施設特有の施工条件を踏まえて最適な方法を選定して試験を実施する必要があった。底部緩衝材施工時においては施工エリアが相対的に大きく、一方で周辺が埋戻し材で囲まれた空間の中での施工である。この施工条件下で大型重機を用いた撒出しおよび転圧による施工性を確認した。一方、側部低拡散材と側部埋戻し材で囲まれた狭隘な空間での施工となる側部緩衝材施工時においては、小型機械または吹付工法を適用した施工試験を行った。特に、吹付施工については、これまでに実規模レベルでの施工実現性を確立するに至っていないため、実環境下で施工サイクルを考慮した試験を行い、施工仕様を設定することは重要な課題の一つであった。

施工にあたり、転圧工法においては、従来の土木工事のような盛土の施工の時に、転圧機械に応じた材料の敷均し厚さと転圧回数を規定し、その敷均し厚さと転圧回数を満足すれば、目標とする乾燥密度に到達できるかの確認を実施し、このような施工管理で行っても十分に目標の乾燥密度（1.6±0.1Mg/m^3）で構築できることを確認した。また、吹付け工法においては、吹付け時の含水比と材料供給量の関係を施工時に管理すれば、目標とする乾燥密度（1.6±0.1Mg/m^3）に到達することを、地下空洞内の環境条件下での実規模の施工において明らかにした。

さらに、本試験の重要な課題として原位置施工後の緩衝材の初期性能の確認がある。これま

で緩衝材の性能は、主に室内で作製した材料をもとに試験を行って取得するものが主であった。今後、本試験と同規模の試験を実施する可能性は少なく、実規模で構築した部材でどの程度の性能を有するかを確認することが求められていた。そこで、選定した施工方法により構築した施設から試料を採取して室内試験により性能を確認し、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往試験の結果との比較を行った。その結果、現場から採取した試料と室内で作製した供試体との間で、透水係数や膨潤圧の測定結果に差異が生じないことが分かった。また、従来から示唆されていた、乾燥密度との相関性についても、現場から採取した試料を用いた試験結果からも認められた。

1.3.2　低拡散材

低拡散材に主に期待される機能は、核種の拡散抑制である。また、この他に核種の収着や移流による核種移行を抑制するための低透水性が、期待される機能として考えられる。このうち、拡散抑制については拡散係数で性能を確認することとし、本確証試験の初期性能目標値として $1.0\times10^{-12}m^2/s$ と設定した。

低拡散材の候補材料は、上記機能を達成するため、拡散抑制機能に優れ、長期変質に対しても抵抗性を有する材料選定が重要である。候補材料としては高い拡散抑制機能を有し、経済性も優れているセメント系材料が挙げられる。セメント系材料において、長期変質に関して特に考慮すべき項目として、溶脱評価とひび割れ評価が挙げられる。セメント系材料を用いる場合、地下水との接触によるセメントの溶脱を考慮する必要がある。また、ひび割れは、低拡散材の低拡散性能を低下させるだけでなく、セメントの溶脱を促進する可能性がある。セメントの溶脱を抑制するには、初期の品質を緻密かつ均質にすることでセメントマトリックスを構成する水和物そのものも溶解しにくいものとすることが重要である。また、このことは、低拡散性の向上につながることでもあるので、「拡散抑制機能を満足し、ひび割れの制御効果や充てん性が期待できる材料・配合を選定」することで、解決できると考えられる。したがって、セメント系材料の配合設計にあたっては、低拡散性能の向上と溶脱抑制の観点から緻密な材料を指向するとともに、ひび割れ抑制の観点から水和熱および自己収縮などを低減することが重要であり、充てん性を確保するため、流動性の高い高流動モルタルを選定した。

低拡散材に使用するセメント系材料の具体的な配合の方向性については、既往の検討事例を参考にして、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを添加し、水結合材比の低減などにより、高緻密化ならびにひび割れ抑制が期待できるセメント系材料を指向した。このような材料の実効拡散係数はこれまでの知見に基づけば、$1.0\times10^{-12}m^2/s$ 程度以下が見込まれ、スランプフロー試験で確認した流動性に関しても、満足のいく結果が得られた。

施工検討における充てん性および流動性について、ポンプ圧送時の充てん性を評価し、良好な流動性を有すること、および特別な作業を必要とせず、部材の端部まで充てん可能であることを確認した。施工検討における型枠設計について、処分施設におけるバリア材として水みちを残さないために、型枠セパレータを使用せずに施工することが求められるが、実物大の確証試験において出来型精度に大きな影響を与えることなく施工可能な方法を提示した。選定した配合である高流動モルタルの打込み時の側圧は、必ずしも液圧で作用するものでなく、今回の

例では打込み開始から約 1 時間 20 分までは液圧で作用し、最大で 70kPa 程度であったが、型枠が変形するような圧力ではなかった。この知見は、型枠の設計・施工の合理化に向けて活用できるものである。

地下環境下で施工した部材から採取したコア試料を用いて拡散係数の測定試験を行った。その結果、本試験で選定した配合での拡散係数は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、2 桁程度小さい値であり、非常に小さい拡散係数の材料であることが明らかになった。比較対象として作製した室内作成供試体と施工した部材から採取したコア試料とが同程度の値で管理目標値（$1.0\times10^{-12}m^2/s$ 以下）を満たすことから、施工の影響は小さいことが示された。

また、施工後の品質として、施工後に発生する躯体表面で観察されるひび割れについて評価を行った。実物大の施工検討におけるひび割れ開口面積について検討した結果、低拡散材の主な要求機能である拡散抑制の観点から求められるひび割れ開口面積比率（0.05%）を長期的にも下回ることが推定され、低拡散材の部材全体としても低拡散性に対して高い品質を有していることが示された。

1.3.3　コンクリートピット

地下空洞型処分施設におけるコンクリートピットは空間･力学安定性を主たる要求機能とし、建設・操業中の安全、作業空間の確保や、自重・外力に対する安定性を確保するものである。その要求機能は通常の土木構造物と同様のものであり、現状の土木分野における構造設計が適用可能である。コンクリートピットには力学安定性の確保に関わる所定の力学特性を有する材料・配合であること、および安定性を損なうような欠陥が生じない、均質な部材を構築し、所定の出来形・空間を確保する施工が求められる。

コンクリートピットの確証試験は、力学安定性を満足し、ひび割れの制御効果や密実性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性や出来形、ひび割れの発生状況および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

余裕深度処分における安全評価の説明性向上の観点から、コンクリートピットの材料は隣接して構築される低拡散材と同等の材料・配合であることが望ましいと考えられる。

本試験では、主たるセメント系人工バリアである低拡散材の配合を参考に、低コスト化、高性能化を志向し、配合設計を実施した。流動性やブリーディングの低減および材料分離抵抗性の向上ならびに施工不良に起因する局所的な不均質性を排除するための自己充てん性、品質低下のリスクを低減させる目的で、石灰石微粉末を用いた粉体系の高流動コンクリートを選定した。選定した配合の高流動コンクリートは、スランプフロー、V 漏斗通過時間などの試験結果より、流動性が確保され、硬化後の圧縮強度も 91 日材齢で $70N/mm^2$ 程度と十分に強いことが確認できた。

施工検討における打込み方法について、ポンプ圧送を前提とした検討を実施した。実物大の施工試験を通じて、打込み箇所の数と場所の設定が重要であること、また、吐出量の調整による流動勾配の調整、補助バイブレータの使用が有効な手段であることを明らかにした。

地下空洞内の温度環境において、施工検討におけるひび割れの抑制について、コンクリート表面の乾燥が原因とされるひび割れを対象として実物大の施工試験を実施した。その結果、打込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブレータによる表面仕上げによる対策がひび割れの制御に有効であることを確認した。

コンクリートピットの初期性能としての力学特性について、室内試験で採取した標準養生供試体、長距離圧送を伴う施工後に採取したコア供試体、出荷プラントでの標準養生供試体、地下環境での現場水中養生での供試体を用いた試験を行った結果、いずれも設定した圧縮強度を満足することを確認した。選定した配合を用いた施工により、要求機能である力学的安定性の確保を満たした部材の構築が可能であることがわかった。

1.3.4　充てん材(区画内充てん材、上部充てん材)

充てん材は廃棄体を線源とする放射線に対する遮へいと、移行抑制（放射性核種の収着）を主たる要求機能とし、放射線量を合理的な範囲で極力低くして、核種移行の遅延を図るものである。充てん材のうち、区画内充てん材は廃棄体間（一部上部）の狭隘な空間を確実に充てんできるよう高流動モルタルを基本とした配合とした。一方、上部充てん材には、その後工程において上部コンクリートピットなどの施工が人力によって施工する必要があることより、より高い遮へい性能が求められることから粗骨材を使用し乾燥単位容積質量を大きくした高流動コンクリートを選定した。充てん材には放射線環境下での作業となり、遠隔操作による無人化施工が前提とされるため、充てん性や流動性が施工上、特に重要な要求事項であった。

充てん材の確証試験は、遮へい性を満足し、施工時の充てん性や流動性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性や出来形および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

区画内充てん材では高流動モルタル材料である低拡散材の配合を、上部充てん材では高流動コンクリートであるコンクリートピットの配合を基本として配合検討を実施し、所定の充てん性・流動性が確保される材料配合を見出した。特に、区画内充てん材では、廃棄体熱が充てん材のフレッシュ性状に与える影響が懸念されたが、熱環境を変化させた室内試験を行い、混和剤に高性能 AE 減水剤と遅延型の減水剤を使用することで、室内試験の規模においては、熱影響による経時変化の少ない配合とすることが可能であることを実証した。

放射線管理下での無人化施工を前提とした充てん材の打込み方法として長距離ポンプ圧送と移動式バケット方式の２種類を対象として地上ヤードおよび地下環境における実物大の試験を実施し、それぞれの打込み方式における施工速度や充てん材の品質変動についてのデータを収集し、施工の可能性を確認したうえで、品質管理上の留意点を見出した。

空洞内で想定される長距離のポンプ圧送を前提とした試験の結果、水平換算距離 300m程度は圧送が可能であるが、材料分離や単位容積質量の減少に注意が必要であることが判明した。また、上部充てん材の無人化施工ではコンクリートのバケット運搬と打込み、表面均し装置の採用が効果的であることが分かった。区画内充てん材の収縮による間隙の発生と抑制対策の検討のため、室内充てん性試験を実施し、打込み後、充てん材の水分が他部材へ吸収されること

で界面に間隙が発生する可能性が高く、注意が必要であることを明らかにした。間隙の発生が許される程度により、吸水を抑制するための散水方法を検討する必要があることがわかった。

充てん材の要求機能である遮へい性については、地下環境における実物大の試験を通じて、材料の乾燥を考慮しても JASS5N に示される単位容積質量を確保できることが確認できた。

1.3.5　埋戻し材（上部埋戻し材）

埋戻し材はセメント系材料からなる底部と側部、セメント系／土質系材料からなる上部とに分けられ、地下空洞とコンクリートピット／人工バリア部材との間の隙間を充てんした部材である。

底部、側部、奥部埋戻し材は、コンクリートピット／人工バリア部材の構築よりも前に施工された。材料として低発熱ポルトランドセメントにフライアッシュを混入したコンクリート（スランプ型および一部高流動型）を使用して、底部・側部および奥部に鉄筋コンクリート構造の埋戻し材を施工し、施工性、品質（材料特性、出来型）、初期性能（強度特性、止水性能、化学的安定性など）の確認を行った。施工性については、コンクリート打こみ時に型枠に作用する荷重評価、鉄筋継手方法の比較評価を始め、空洞内で施工性を低下させる要因と対策に関する知見を得た。品質については、コンクリートのフレッシュ性状に影響を及ぼす要因と対策に関する知見を得た。

「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」（土木学会）では、上部埋戻し材は「空洞内充てん材」と記載されており、アクセス坑道などの埋戻し材のことを「埋戻し材」と記載しており、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」（日本原子力学会）では、上部埋戻し材は「空洞内充てん材」、アクセス坑道などの埋戻し材のことを「坑道の埋戻し材」と記載している。本報告書では、上部埋戻し材の検討を進めるが、本報告で得られた知見はアクセス坑道などの「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」の検討と共通事項であると考えられるため、後述のとおり、二つの埋戻し材（「空洞内充てん材」、「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」）の要求機能をまとめて検討を進めた。

上部埋戻し材の狭隘な空間、すなわち、人工バリア（低拡散材・緩衝材）と岩盤との間の空洞や隙間は、地下水の流動に伴う核種移行の経路としないため、隣接する緩衝材をはじめとした人工バリアや空洞の力学的安定性を保つため、また、容易に人が侵入できないようにするために、埋戻す必要がある。本試験では、主に土質系材料であるベントナイト混合土を選定して実施した。ベントナイト混合土を用いた上部埋戻し材の確証試験は、低透水性（地山相当の透水係数よりも小さいこと（1.0×10^{-8}m/s 以下））、隙間なく施工できる充てん性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

既往の研究事例を参考に、ベントナイト混合土の配合を設定し、室内試験により透水係数を十分に小さくできることを確認した。また、目標とする透水係数をもとに乾燥密度と含水比の仕様を設定し、施工時の管理目標値を設定できた。ベントナイト混合土の製造や、上部埋戻し材の施工は、現状で選択し得る方法で実施した。

ベントナイト混合土の製造においては、含水比やベントナイトの混合率のばらつきの程度を把握できた。上部埋戻し材の構築にあたって、転圧工法と吹付け工法の組み合わせて行う方法を採用した。この転圧工法と吹付け工法の組み合わせによって、狭隘でかつ隅角部を有する上部埋戻し材の構築が可能であることを明らかにした。

転圧工法においては、事前に敷均し厚さと転圧回数の関係を把握し、施工時の管理目標としての乾燥密度に到達する転圧回数を設定した。試験空洞内での施工では、この敷均し厚さ、転圧回数で施工するものとし、所定の敷均し厚さ、転圧回数で施工しているかを管理する、いわゆる工法規定的な施工管理手法で実施した。その結果、このような工法規定的な管理で施工しても、管理目標を満足することを確認できた。吹付け工法においても、室内締め固め試験 A 法に対する締固め度が 90%以上を概ね達成し、平均で 94%を満足することが分かった。これは、一般的な土工事における道路盛土での締固めと同等以上に締め固められたといえる値である。施工時の材料のリバウンド率は、12～13%程度であった。

さらに、施工後の上部埋戻し材から採取した試料を用いて、透水試験などの室内試験を実施し、初期的な性能の確認を行った。その結果、透水係数が十分に小さい（透水係数で 1.0×10^{-11}m/s 程度）ことを確認した。これは、試験空洞周辺岩盤の透水係数の最低値である 7.8×10^{-8}m/s よりも小さい。また、既往知見で得られている有効粘土乾燥密度と透水係数との関係として整理できる可能性が示唆された。

1.3.6　挙動計測

施工確認試験による人工バリアの構築は段階的に進められる。そのため、試験施設を構成する部材は、その施工により隣接部材に力学的な影響を与えるとともに、後続する部材の施工の影響を受ける。挙動計測の目的は、施工時および施工後の試験施設の力学挙動と周辺岩盤への影響を把握し、試験施設の健全性を評価することである。本試験では、試験施設の施工を開始した平成 19 年度から、試験施設に温度計やひずみ計などの計測器を設置し、施工時および施工後の試験施設の挙動を計測した。また、周辺岩盤には、間隙水圧計および岩盤変位計を設置して、試験施設構築に伴う挙動を計測した。

底部緩衝材の沈下量（最大 1.3mm）および土圧（最大 0.2MPa）は、概ね上載圧（約 0.2MPa）に相当する程度であり、過大な沈下および土圧は生じていない。

低拡散材に発生する応力は引張応力以下である。低拡散材にはひび割れが発生しているが、ひび割れ幅は 0.25mm 以下（底部）、0.5mm 以下（側部・上部）である。また、これら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ていない。

上部埋戻し材の施工が進行するに伴い、新たに構築された上部埋戻し材の自重増加分により沈下計に 5mm 程度の変位量が観測された。平成 26 年 2 月現在、沈下計の変位量には収束傾向が確認できる。また、上部埋戻し材の施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の変位量の収束値は概ね整合していることが分かった。

試験施設の荷重により生じる周辺岩盤（施設下部）の岩盤変位は、この変位量から推定した岩盤の弾性係数（2,300MPa）と確証試験着手時の検討に採用した弾性係数（2,000MPa）が同程度であることから、想定範囲内の挙動である。したがって過大な変形

や緩み域の進展はなく、施設構築の周辺岩盤への影響は小さいと評価される。また、試験期間中の周辺岩盤間隙水圧の変動は小さく（最大 3m 程度）、施設構築が地下水流動へ与える影響は小さいと評価される。

これらの計測結果より、試験施設構築が周辺岩盤や試験施設に与える影響は施設・周辺岩盤の健全性を損なうものではなく、現時点では、試験施設および周辺岩盤の健全性は確保されていると評価できる。

1.3.7　地震時挙動

地下空洞施設のような大深度かつ大規模地下構造物については、検討事例が少なく、地震の影響について明確にされていないのが現状である。そこで、巨大地震が建設・操業時の地下空洞施設に与える影響を把握することを目的として、仮想的に設定した地震動を用いて解析的検討を行った。地震が地下空洞施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材に与える影響を把握するために、地震動レベルの異なる 3 つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度：250Gal、450Gal、900Gal）を用いて 2 次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。この解析によって、250Gal 程度では、全体的に地震動による影響は見られず、コンクリートピット、低拡散材などのセメント系部材の人工バリアに関しては、それよりも大きな 450Gal や 900Gal という地震動に対しても、部材の耐力は十分であることを確認した。

緩衝材に関しては、より現実的な地震時挙動を模擬するために、ベントナイトを材料とする緩衝材とその周辺のセメント系部材間の剥離・すべりを考慮できるモデルおよび緩衝材の弾塑性挙動を考慮できるモデルを導入し、450Gal の地震動を用いた場合の緩衝材が塑性化する領域や塑性化後の挙動（塑性ひずみ等）を把握した。緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）に伴い、透水性が変化する可能性が考えられるため、解析結果および既往試験結果に基づいて、地震時の透水性の変化についての分析を行った。解析結果の分析から、連続体挙動の範囲では、地震の影響による緩衝材の透水係数の増加は最大でも 0.131%であり、透水性に及ぼす影響は小さいことがわかった。一方、緩衝材のせん断帯の発生・進展に伴う不連続挙動が透水性に与える影響に関しては、既往文献調査を実施し、定体積条件においては、緩衝材にせん断による低密度帯が生じにくく、仮にせん断帯や隙間が存在しても、再冠水後の飽和状態になれば透水性に与える影響は小さくなることがわかった。

また、放射性廃棄物処分施設の設計・施工を行う上で、地震動の設定や、空洞および処分施設の地震時の振動特性を把握することは重要であり、そのためには地下構造物の地震動観測が必要であると考えられる。独立行政法人防災科学技術研究所により整備・運用されている K-NET、KiK-net などの地震観測網においても、全国各地の観測点で地震動を計測しており、蓄積された観測データは地震防災などの様々な実務や研究に使用されている。しかし、地下空洞施設のような大深度かつ軟岩中における大規模地下空洞、さらに実規模大の人工バリア施設を含めた地震動観測を実施した事例は報告されていない。そこで、人工バリアの地震時の振動特性を把握することを目的として、試験施設の 3 箇所に地震計を

設置して地震動観測を行い、観測データを用いた地震応答解析を実施した。軟岩中における大規模地下空洞および実規模大の試験施設の地震動観測を実施した事例は少なく、地震動観測データは、今後の地下空洞施設の地震影響検討において有用なものと考えられる。

地震観測データの分析、および観測データを用いた地震応答解析の結果、周辺岩盤の固有振動数（数 Hz）と比較して、試験施設の固有振動数が 15～20Hz と大きいことを、地震動観測データおよび地震応答解析結果より確認し、試験施設の地震時振動特性を把握できた。

今後の課題として、本解析では、試験空洞底盤および施設上に設置した地震計の観測データを用いているため、観測データには試験空洞および試験施設の影響が含まれており、地下空洞の外から入射してくる地震動を正確に把握できない。施設の振動特性を精度よく把握するには、入力地震動を精度よく把握する必要があるため、試験空洞および試験施設の影響を受けない地震動を観測し、分析を行うことが望まれる。

1章　参考文献

[1]原子力委員会　原子力バックエンド対策専門部会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について、平成10年10月
[2]日本原燃：低レベル放射性廃棄物の次期埋設施設の検討状況　余裕深度処分対象廃棄物の概要　国などの報告書による検討事例より、原子力安全委員会低レベル埋設分科会、埋分第１－２号、平成17年9月5日
[3]社団法人土木学会エネルギー土木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：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、土木学会、2008年6月
[4]総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：低レベル放射性廃棄の余裕深度処分に係る安全規制について、平成20年1月18日
[5]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、2011
[6]社団法人土木学会エネルギー土木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、土木学会、2009年7月
[7]原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則、平成二十五年十二月六日原子力規制委員会規則第三十号
[8]原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について、平成25年11月27日　原管廃発第1311277号、平成25年12月18日施行
[9]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次とりまとめ―, 分冊2　地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, p.Ⅳ-77～Ⅳ-80，1999
[10]千々松正和，吉越一郎，中越章雄，雨宮清：ベントナイトの現場締固め施工に関する検討（その1）狭隘部の施工確認試験結果, 日本原子力学会2006年春の年会要旨集, B26, p.26, 2006
[11]小野文彦，庭瀬一仁，谷智之，中越章雄，千々松正和：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, CS05-09, pp.323～324, 2006.9
[12]千々松正和，吉越一郎，中越章雄，雨宮清：ベントナイトの現場締固め施工に関する検討（その1）狭隘部の施工確認試験結果, 日本原子力学会2006年春の年会要旨集, B26, p.26, 2006
[13]田中幸久，中村邦彦，工藤康二，廣永道彦，仲神元順，庭瀬一仁，小松進一：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.207～223，2007.2
[14]工藤康二，田中幸久，雨宮清，中越章雄，茂呂吉司，千々松正和，辻建二，庭瀬一仁，小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，CS1-050，p.99～100，2003
[15]電気事業連絡会：余裕深度処分に関する検討状況について、原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会、平成19年10月18日
[16]原子力安全委員会：人工バリアに関する長期的安全確保の考え方の整理(案)、第１８回第二種破棄物埋設分科会　平成２１年６月９日資料　二分第18-4号
[17]IAEA : IAEA SAFTY STANDARDS SERIES Near Surface Disposal of Radioactive Wste、No.WS- R- 1
[18]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とりまとめー，pp.3-11~3-12，2005
[19]京谷修：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況、第60回土木学会年次学術講演会研究討論会　資料　研-08、2005年9月
[20]原子力安全委員会：第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方、平成22年8月9日　原子力安全委員会決定

第2章　確証試験の内容と成果

2.1 緩衝材

2.1.1 実施概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.1-1 に示す。施設は要求機能に応じた複数の部材で構成されており、廃棄体、コンクリートピットおよび低拡散材を包み込むように緩衝材が配置される計画である。

緩衝材は底部、側部、上部の 3 部位によって構成され、部材厚さは 1m である。

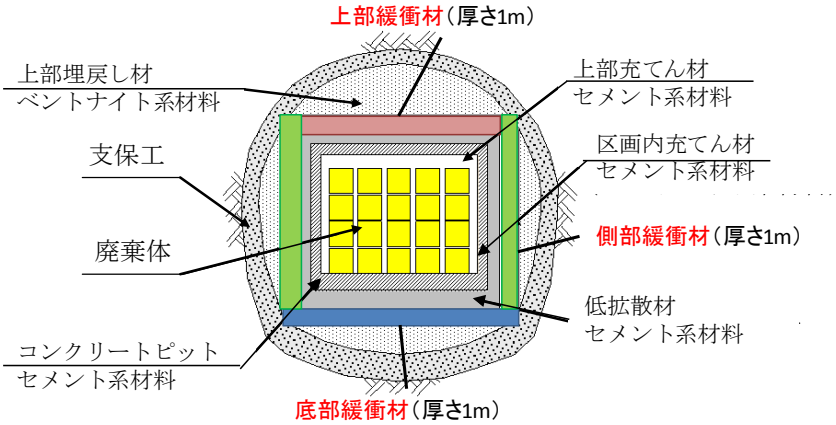


図 2.1-1　人工バリア構成（土木学会、2008 を加筆修正）[1]

緩衝材の主たる要求機能は建設・操業期間中における閉じ込めと、埋戻し後の移行抑制であり、これらの機能を満たすための低透水性が重要な性能として期待されている。緩衝材の仕様の設定や施工方法の検討を行うにあたり、施工性の確認と低透水性等の性能の確認を行うことが重要である。

これまで、緩衝材の施工性や性能に関する検討は小規模な施工試験や研究室レベルでの検討であった。今後の具体的な設計と建設にあたっては、実際の地下空間の環境下において実規模の施工が実現可能であることの実証や、施工された緩衝材の品質のばらつきの評価等が必要とされてきている。

緩衝材の材料であるベントナイトについて、既往知見をもとにベントナイトが有する特性および施工性を調査して、検討を行った。これまでの研究で緩衝材の主要材料として期待されている粉末ベントナイト（クニゲル V1）は、微粉に加工されたベントナイトであるが、高い乾燥密度を得るには大きな締固めエネルギーが必要である[2]。一方、既往の研究において、微粉する前の粒状ベントナイト（クニゲル GX）は、クニゲル V1 に比較して低い締固めエネルギー（1Ec=約 5.6kJ で規定される土に与えるエネルギーの値）で高い密度を達成できることが確認されている[3]。これらの研究成果を踏まえて本試験ではクニゲル GX を緩衝材の材料として選定した。底部緩衝材では大量の

ベントナイトを使用することから、ベントナイトの含水比調整を現地で実施して調整後に含水比のばらつきの評価を実施した。

緩衝材の施工方法については、実際の地下環境下で人工バリアの一連の建設工程を模擬した試験の過程において施設特有の施工条件を踏まえて最適な方法を選定して試験を実施する必要があった。底部においては施工エリアが相対的に大きく、一方で周辺が埋戻し材で囲まれた空間の中での施工である。この施工条件下で大型重機を用いた撒出しおよび転圧による施工性を確認した。一方、側部低拡散材と側部埋戻し材で囲まれた狭隘な空間での施工となる側部においては、小型機械または吹付工法を適用した施工試験を行い、それらの適用性を検討した。特に吹付施工については、これまでに実規模レベルでの施工実現性を確立するに至っていないため、実環境下で施工サイクルを考慮した試験を行い、施工仕様を設定することは重要な課題の一つであった。

さらに、本試験の重要な課題として原位置施工後の緩衝材の初期性能の確認がある。これまで緩衝材の性能は、主に室内で作製した材料をもとに試験を行って取得するものが主であった。今後、本試験と同規模の試験を実施する可能性は少なく、実規模で構築した部材でどの程度の性能を有するかを確認することが求められていた。そこで、選定した施工方法により構築した施設から試料を採取して室内試験により性能を確認し、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往試験の結果との比較を行った。

緩衝材試験の主な成果の概要を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1　緩衝材試験の主な成果の概要

<table>
<tr><td colspan="2">含水比調整検討</td><td>○比較的大量の含水比調整を高性能のバッチ式機械で実施した結果、使用する材料（特に、初期含水比）にばらつきがある場合でも、材料をグルーピングして含水比調整を実施すれば所定の品質の含水比調整が実施できることを明らかにした。また、吹付工法への適用を想定した凍結混合法による含水比調整も、水添加混合法と同等の品質が確保できることを確認した。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">施工検討</td><td>転圧施工</td><td>○実際の施工空間を模擬した施工試験を通して、各部位の施工条件を踏まえた施工機械を選定し、敷均し・転圧の一連の施工工程を考慮して施工試験を行った結果、要求機能を満たした品質の緩衝材が施工できることを明らかにした。底部緩衝材ではアスファルトフィニッシャによる敷均し、大型振動ローラを用いた振動締固めを行い、既存技術を用いた緩衝材の施工実現性を確認した。側部緩衝材では、狭隘な空間での施工性を踏まえて開発した材料供給機、敷均し機を用いて材料供給、敷均しを行い、既存技術である小型振動ローラによる振動締固めによって実際の環境下での施工が可能であることを確認した。
○転圧機械毎に所定の乾燥密度が得られる敷均し厚さと転圧回数をまず把握し、これらを施工時に満足することにより、緩衝材の品質を確保できるか検証した。底部・側部・上部緩衝材のそれぞれの施工試験で敷均し時の管理で敷均し厚さが一定となるように施工し、大型振動ローラ、小型振動ローラ、それぞれで必要な転圧回数で施工した。そのような施工管理を適用することにより、所定の品質の緩衝材を構築できることが可能であったため、転圧工法では、敷均し厚さと転圧回数を管理することで品質の確保が可能であることが示唆された。
○施工された緩衝材の品質のばらつきを確認した。敷均し厚さを 200mm とした標準ケースにおいて、大型振動ローラを用いた底部緩衝材、小型振動ローラを用いた側部緩衝材でいずれも乾燥密度のばらつきは±0.10Mg/m^{3}程度だった。敷均し厚さを 100mm とすると乾燥密度のばらつきは±0.05Mg/m^{3}程度となった。乾燥密度のばらつきを低減する上で、敷均し厚さを薄くすることが有効であることを確認した。</td></tr>
<tr><td>吹付施工</td><td>○狭隘な空間における緩衝材施工への適用が期待できる吹付工法を用いて底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部において人力、およびロボット施工による施工試験を行った結果、いずれの部位においても所定の品質を満足しており、実規模レベルでの施工方法を確立した。
○吹付け施工の際に発生するリバウンド材料の回収方法、再利用方法を検討し、リバウンド材料とフレッシュ材料を混合することにより再利用が可能であることを確認した。これにより廃棄する材料を低減させることが可能となり、吹付工法を適用した緩衝材施工の効率化を図った。
○実規模施工への吹付工法の適用性検討を通して、シリコーンオイル法による密度測定や、含水比と材料供給量を制御する密度管理方法の適用性を確認し、吹付工法による品質･施工管理方法を確立した。</td></tr>
<tr><td colspan="2">初期性能の検討</td><td>○実際の地下環境下で施工した緩衝材から採取した試料を用いた初期性能試験を実施した。その結果、転圧工法、吹付工法のいずれにおいても必要な初期性能を満足することを確認した。また、本試験の値は室内で圧縮整形された供試体を用いた既往試験の結果と同等であることを確認した。この結果から、これまでの室内試験レベルでのデータも実構造物の設計・評価に用いることが可能であると判断できる。</td></tr>
</table>

2.1.2 基本条件の設定

(1) 要求機能と技術要件

余裕深度処分施設は要求機能に応じた様々な部材で構成されている。緩衝材に求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[4]）において基本安全機能のうち「閉じ込め」、「移行抑制（低透水性)」、操業上の機能として「力学的安定性の確保」が示されている。

「閉じ込め」は建設・操業段階において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緩衝材の低透水性により抑制することで、埋設地外への有意な核種移行を防止する機能である。また、「移行抑制（低透水性)」は、緩衝材の低透水性により、緩衝材内側の人工バリア内を通過する地下水流量を低減し、放射性核種の移行を抑制する機能である。ともに低透水性を期待する機能であり、第 1 章に記載のとおり本試験においても緩衝材の要求機能として「閉じ込め」、「移行抑制（低透水性)」を設定する。

また、操業上の機能である「力学的安定性の確保」は底部緩衝材に求める機能である。底部緩衝材上において人工バリアの構築、廃棄体の定置作業が行われるため、底部緩衝材には操業期間中の安定性が機能として求められる。本試験では、底部緩衝材施工後、各人工バリアの構築、摸擬廃棄体の定置を行い、上部埋戻し材まで施工することからそれらの上載荷重が底部緩衝材に作用することとなる。実施工に近い荷重を作用させた試験は他に類をみないことから「力学的安定性の確保」も要求機能として設定し、施工期間中の挙動計測により力学的安定性を確認した。施工期間中の挙動計測データは「2.6 挙動計測・地震影響」において記載した。

緩衝材の要求機能と技術要件を表 2.1-2 に示す。

閉じ込め機能に関わる地下水の浸入挙動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必要となる。同じく移行抑制機能に対して、埋戻し後以降の長期にわたり、緩衝材内側の人工バリア内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必要である。

底部緩衝材に要求される「力学的安定性の確保」に対しては、人工バリアや廃棄体による上載荷重に対して支持部材として十分な強度が求められることから、技術要件として変形特性や強度特性である力学特性が必要となる。

表 2.1-2　緩衝材の要求機能（土木学会､2009[4]）

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏洩を防止すること	●	透水特性
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して，十分な遮へいを有すること	－	－
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	－	－
			放射性核種を収着すること	－	－
			低透水性により，処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	●	透水特性
			連続した地下水移行経路を形成しないこと	－	－
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	－	－
操業上の機能		建設操業	確実な建設，操業が行われるための力学的安定性が確保されること	●	力学特性
			坑道の形状を維持すること	－	－

(2) 設計仕様項目

上述したとおり、緩衝材の技術要件を「透水特性」および「力学特性」と設定した。地下施設を構成する各部位を設計・施工する上で、設定された技術要件を大きく支配する項目が設計仕様項目である。

本試験では、透水特性に対する設計仕様項目として、透水係数、厚さ、膨潤圧、鉱物組成を設定した。また、力学特性に対する主な設計仕様項目は、強度・変形係数とした。設計仕様項目を要求機能、技術要件とともに表 2.1-3 に示す。既往の検討（土木学会、2009[4]）では、密度（かさ密度）も設計仕様項目として考慮しており、密度（かさ密度）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している。本試験では、透水係数に対して長期状態変化を考慮して初期性能を設定したことから、密度（かさ密度）は設計仕様項目から外すこととした。

表 2.1-3　緩衝材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

要求機能		段階	技術要件	設計仕様項目	
				施工時性能・状態	長期状態変化
基本安全機能	閉じ込め	建設・操業	透水特性	・透水係数 ・厚さ	－
	移行抑制 （拡散抑制）	埋戻し後	透水特性	・透水係数 ・厚さ	・膨潤圧 ・鉱物組成
操業上の機能	力学的安定性の確保	建設・操業	力学特性	強度・変形係数	

(3) 管理項目と管理目標値

緩衝材の試験での管理項目を選定して管理目標値を設定した。緩衝材の管理項目と管理目標値を表 2.1-4 に示す。緩衝材の要求機能である閉じ込め、移行抑制（低透水性）に対する設計仕様項目は施工時性能･状態に関しては同じ項目である。管理項目の設定にあたっては複雑さを回避するため要求機能を移行抑制（低透水性）に絞って記述した。

表 2.1-4　緩衝材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
移行抑制 (低透水性)	透水係数	5.0×10^{-13}m/s 以下	初期性能の目標値
	乾燥密度	1.6 ± 0.1Mg/m^3	施工時の管理項目
	含水比	21±2%	施工時の管理項目
	厚さ	－	（底部緩衝材を対象） 管理目標値は設定せず、施工後の精度を評価
	膨潤圧	－	管理目標値は設定せず、初期性能を確認
	鉱物組成	－	ベントナイト材料の品質管理にてモンモリロナイト含有率を確認
力学的安定性の確保	強度・変形係数	－	管理目標値は設定せず、初期性能を評価

緩衝材の管理項目として、設計仕様項目にあげた透水係数、厚さ、膨潤圧、鉱物組成、強度・変形係数の他、透水係数の代替特性である乾燥密度と、材料の含水比調整時の含水比を項目として追加した。

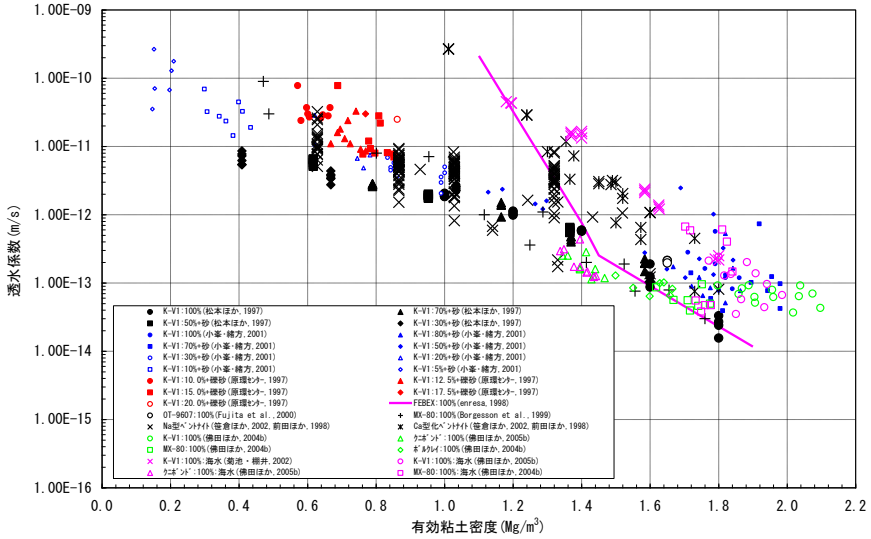
1) 透水係数

透水係数の管理目標値は第 1 章に記載した既往の検討[5]で示されている透水係数 1.0×10^{-11}m/s という値に、人工バリアの化学的劣化や力学的要因による劣化等、現状の知見において長期間経過後において生じるであろうと考えられる事象、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ること、施工時のばらつきを考慮に入れて、透水係数 5.0×10^{-13}m/s という目標値を設定した。

2) 乾燥密度

圧縮したベントナイトの透水係数に関するデータは、わが国では地層処分分野において豊富なデータ、知見が蓄積されている。図 2.1-2 は、国内外のベントナイトの透水係数と有効粘土密度（乾燥密度や混合率等から算出される密度）に関するデータを網羅的に整理した例である[6]。このグラフより、有効粘土密度と透水係数には相関性があると考えられる。したがって、密度を管理することにより緩衝材に要求される透水性能を確保することが可能であることが示唆される。

透水係数の測定時間は長期間（数十日程度）となるため、施工管理のために日常的に測定することは現実的ではない。そこで、透水係数の代替特性である乾燥密度を管理項目として採用した。



注 1：凡例の K-V1 はクニゲル V1 を示す

図 2.1-2　有効粘土密度（乾燥時）と透水係数の関係[6]

図 2.1-2 よりクニゲル V1 のうち、降水系のデータを抽出し、回帰曲線とデータのばらつきの偏差を示したものを図 2.1-3 に示す。この図によれば、緩衝材の透水係数の初期性能 5.0×10^{-13}m/s に対応する乾燥密度は約 1.4Mg/m^3 となる。本試験では、施工時に生じるばらつきに対してある程度の余裕をもたせて、管理目標値を 1.6±0.1Mg/m^3 と定めた。

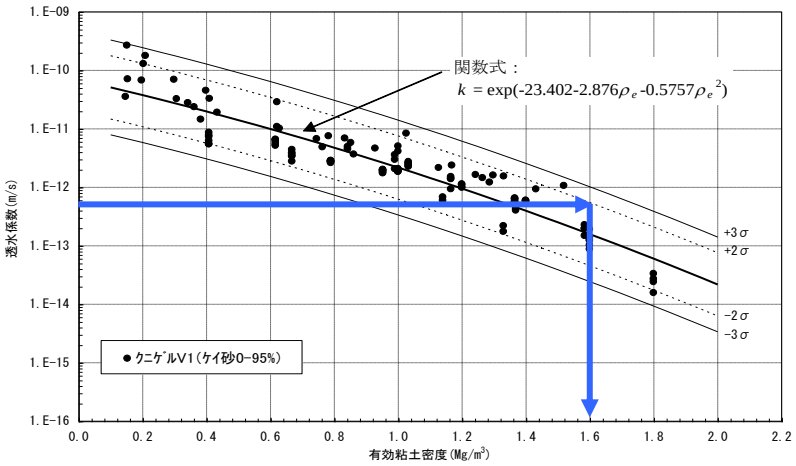


図 2.1-3　クニゲル V1 の有効粘土密度（乾燥時）～透水係数（定水位法、ケイ砂混合を抽出）

3) 含水比

ベントナイトも通常の土質材料のように締固め特性と含水比との間には密接な関係がある。品質のばらつきの少ない緩衝材を構築するためには、材料の含水比を均一に調整する必要がある。そこで、含水比を緩衝材の管理項目に追加した。

緩衝材は締固めによって、単位締固め層の中でも密度分布を持つことが知られている。図 2.1-4 には転圧施工後のサンプリングコアを層の上中下に 3 分割したコアの乾燥密度と含水比の関係を示す[7]。この図からは、含水比 21%程度になると鉛直方向のバラツキが小さくなることが示唆され、均一に施工できると考えられる。実施工のばらつきを考慮して含水比 21%±2%を管理目標値とすることとした。

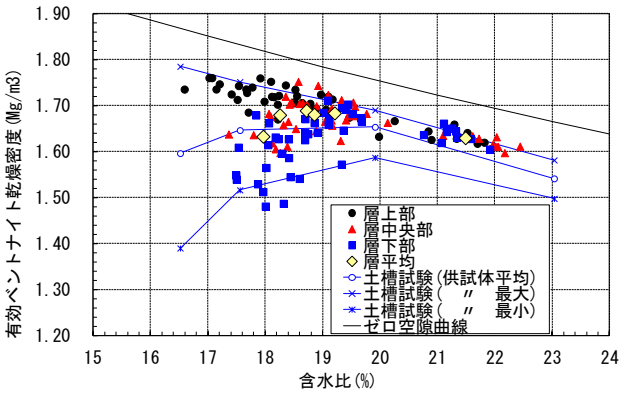


図 2.1-4　層を 3 分割して計測したコア単位の有効ベントナイト乾燥密度の分布[7]

4) 厚さ

底部緩衝材では転圧方向と厚さ方向が一致し、厚さが施工精度に依存する。一方、側部緩衝材の厚さは隣接部材（側部低拡散材、側部埋戻し材）の施工精度により決定されるものである。そこで厚さは底部緩衝材の管理項目として設定した。

緩衝材の設計厚さは既往研究[8]を参考に 1m とした。本試験では、この値に対して上限値、下限値を定めず、施工精度を確認することを目的とした。

5) 膨潤圧、強度・変形係数、鉱物組成

膨潤圧、強度・変形係数については管理目標値は設定しないで、施工後の初期性能を室内試験で確認し、既往研究での室内試験結果と比較することを目的とした。また、鉱物組成に関しては、材料の品質管理においてモンモリロナイト含有率を管理するものとした。

以上の施工時、施工直後の管理項目に基づく施工を行い、施工後品質の確認を行うこととした。緩衝材の施工は転圧工法および吹付け工法で行った。本試験では、各工法ともに施工時の管理手法は、乾燥密度の目標値である 1.6±0.1Mg/m^3 を満足出来る方法を採用し、その時に、要求される機能を満たすことができる所定の品質（例えば透水係数等）を確保できるかの確認を試行した。そこで、土木学会[4]に示されている品質管理項目を参考にして転圧工法の品質管理項目を表 2.1-5 のように設定した。また、吹付け工法については、既往の研究[9]を参考にして表 2.1-6 のように設定した。

表 2.1-5　緩衝材の施工時の品質管理項目（転圧工法の場合の例）

要求機能	設計仕様項目	施工時の品質管理項目		
		材料管理	工法管理	施工直後の状態 （出来形管理）
移行抑制 （低透水性）	透水係数 （代替特性、密度）	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率 ・粒度分布 ・含水比 ・塑性限界	・敷均し方法 ・転圧方法	・乾燥密度 ・含水比
	厚さ	－	－	・部材寸法
	鉱物組成	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率	－	－
操業上の 機能	強度・変形係数 （代替特性、密度）	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率 ・粒度分布 ・含水比 ・塑性限界	・敷均し方法 ・転圧方法	・乾燥密度 ・含水比

表 2.1-6　緩衝材の施工時の品質管理項目（吹付け工法の場合の例）

要求性能	設計仕様項目	施工時の品質管理項目		
		材料管理	工法管理	施工直後の状態（出来形管理）
移行抑制(低透水性)	透水係数(代替特性、密度)	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率 ・粒度分布(最大粒径5mm) ・含水比：21±2% (ﾌﾚｯｼｭ材とﾘﾊﾞｳﾝﾄﾞ材の混合率 ⇒含水比が21±2%を満たすこと) ・塑性限界	・材料供給量 （8～20kg/10sec） ・ｺﾝﾌﾟﾚｯｻｰ流量 （15m³/min以上） ・吹付け距離 （1m程度）	・乾燥密度 ・含水比
	厚さ	－	－	・部材寸法
	鉱物組成	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率	－	－
操業上の機能	強度・変形係数(代替特性、密度)	・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率 ・粒度分布 ・含水比 ・塑性限界	・材料供給量 （8～20kg/10sec） ・ｺﾝﾌﾟﾚｯｻｰ流量 （15m³/min以上） ・吹付け距離 （1m程度）	・乾燥密度 ・含水比

2.1.3 確証試験の課題と実施内容

(1) 確証試験の課題

緩衝材の主な要求機能は移行抑制（低透水性）と、底部緩衝材における力学的安定性の確保である。原位置における実規模での施工試験を通して、低透水性や力学性能を損なうような欠陥を生じさせず、均質な部材を構築するための施工方法の確認と、構築後の部材の初期性能の確認を行うことを目的とし、以下の事項を考慮して検討を実施した。

- 通常の土質材料と同様に、緩衝材の材料であるベントナイトも含水比と締固め特性との間に密接な関係があり、含水比により締固め後の乾燥密度は影響を受ける。そのため、施工時の品質確保の観点から，緩衝材に使用するベントナイト材料の含水比を適切に調整することが求められる。
- 緩衝材の施工部位には底部、側部、上部があり、施工部位によって施工条件が異なる。また、各部位では狭隘な空間となる隅角部を有しており、適切な施工方法を適用しないと品質に欠陥が生じる可能性がある。そのため、使用する施工機械や施工方法の選定に当たっては、各部位の特徴を踏まえることが重要である。
- 既往の検討では、透水係数等の緩衝材の性能に関して室内整形試料による値を用いた評価が主であった。今後、余裕深度処分施設の具体的な設計・建設を行うに当たっては、実際の地下環境下、実規模で構築した部材での初期性能を確認することが必要とされてきている。

上述の考え方を踏まえて、緩衝材の施工成立性や要求機能の確保を確証試験で確認する上で考慮すべき課題を検討項目と関連付けて整理した。緩衝材確証試験の課題と課題に対する対応を表 2.1-7 に示す。課題は要求機能、技術要件、設計仕様項目および管理項目（管理目標値）

と対応する形式でまとめた。検討項目は、含水比調整機械の選定と品質のばらつきを低減した含水比調整の検討（含水比調整検討)、実際の施工環境下において所定の品質を確保した施工が可能かどうかを確認するための検討（施工検討)、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）に分類した。

表 2.1-7　緩衝材確証試験の課題

要求機能	技術要件	設計仕様項目	管理項目	管理目標値	検討項目	課題	課題に対する対応
拡散抑制（低透水性）	透水特性	透水係数	透水係数	5×10^{-13}m/s 以下	初期性能の検討	【初期性能の確保】 実施工で構築した部材の初期性能の確認	・施工後のコア採取、透水試験の実施
			(代替特性) 乾燥密度	1.6±0.1Mg/m^3	施工検討（品質の確認）	【施工後の達成密度の確認】 選定した施工方法、施工部位に応じた密度の達成度の確認	・施工時の品質管理、施工後の密度データ採取
			含水比	21±2%	含水比調整検討（品質の確認）	【含水比調整】 品質のばらつきの少ない緩衝材を構築するため、材料の含水比が均一になるような含水比調整の実施	・ミキサ等の施工機械の選定、練混ぜ試験の実施
		厚さ	厚さ	－	施工検討 （施工精度の確認）※底部緩衝材対象	【大型重機を用いた施工精度】 実環境下で一連の建設工程を実規模で施工した事例がない、施工精度に関わるデータの取得	・施工後の出来形データの取得
		膨潤圧	膨潤圧	膨潤圧	初期性能の検討	【原位置施工データの取得】 既往検討は主に室内整形コアを用いた試験である。実規模試験でのデータ取得が必要	・施工後のコア採取、膨潤圧試験の実施
力学的安定性の確保	力学特性	強度・変形係数	強度・変形係数	－	初期性能の検討	【原位置施工データの取得】 既往検討は主に室内整形コアを用いた試験である。実規模試験データ取得が必要	・施工後のコア採取、強度試験の実施
上記の要求機能を確保する上で求められる施工方法・施工仕様（各設計仕様項目共通）			－	－	施工検討	【施工方法の選定】 施工条件に応じて適切な施工方法を選定 【施工仕様の設定】 要求機能を確保する上で必要な品質を確保できる施工仕様を設定。また、工法規定による施工実現性を確認 【狭隘な空間の緩衝材施工方法】 隅角部等の狭隘な空間を対象とした緩衝材の施工方法については、これまでに実規模レベルでの施工実現性を確立するに至ってない。施工方法の確認が急務	・底部・側部・上部の各部位の特徴を踏まえて施工方法を選定 ・施工パターンを変化させた施工試験によるデータ取得 ・同一の施工仕様による施工試験の実施とデータ取得 ・狭隘な空間への適用が期待できる吹付工法による施工試験を行い、実規模レベルでの施工実現性の確認、施工の効率化、品質・施工管理方法の構築を実施

(2) 実施内容

「(1) 確証試験の課題」に示した課題に対する対応と確証試験での実施内容を表 2.1-8 に整理した。実施内容の詳細および試験結果については「2.1.4 確証試験結果」で個別に述べる。

表 2.1-8　緩衝材確証試験の課題に対する対応と実施内容

検討項目		課題に対する対応	実施内容
含水比調整		・ミキサ等の施工機械の選定と練り混ぜ試験の実施	・既往の研究結果に基づいて含水比調整に用いるミキサを選定、実機を用いた練混ぜ試験を実施して、調整後含水比のばらつきを評価した。
施工検討	共通	・施工方法の選定	・底部・側部・上部の各部位の特徴と既存の施工機械の実績を踏まえて、各部位で適切な施工機械・施工方法を選定した。
	転圧工法	・施工仕様の設定と施工後の品質・出来形確認	・選定した施工機械･方法による撒出し・敷均し、転圧による締固め試験を実施した。 ・施工パターンを変化させた施工試験によるデータを取得して試験結果を評価することにより、所定の品質を確保した施工仕様を設定した。 ・同一の施工仕様の施工試験によるデータを取得して試験結果を評価することにより、敷均し厚さ・転圧回数を管理することによって、品質が確保できるか確認した。 ・施工終了後の出来形データを取得して施工精度を評価した。
	吹付工法	・狭隘部への吹付工法の適用、施工後の品質確認、施工効率化、品質・施工管理方法の構築	･底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部において人力およびロボット施工による施工試験を行い、吹付工法によって所定の品質を満足することを確認した。 ･吹付け施工の際に発生するリバウンド材料回収方法として、含水比低下の少ない吸引回収方法を開発し適用性を確認した。また、リバウンド材の再利用方法として、フレッシュ材とリバウンド材の混合割合の管理を行う方法を構築した。 ・吹付け工法の品質管理・確認方法としてシリコーンオイル法の適用性を確認するとともに、含水比と材料供給量の制御による吹付け密度の管理方法を確立した。
初期性能の検討		・施工後のコア採取、室内試験による初期性能の評価	実際に施工した緩衝材の各部位から試料を採取して室内試験（透水試験、膨潤圧試験、強度試験）により初期性能を評価、既存の室内成型試料による性能との比較を実施した。

2.1.4 確証試験結果

(1) 含水比調整検討

1) 使用材料の選定

伊藤ら[10]により、現場締固め工法により緩衝材を施工するための粒状ベントナイトが開発された。施工後の密度のばらつきを低減させるためには施工前の材料の含水比のばらつきを小さくすることも有効である。材料の最大粒径が大きい方が締固め性は良いが、水分調整後の含水比のばらつきを小さくすることも考慮して最大粒径の設定を行っている。その結果、施工用材料として最大粒径 10mm（9.5mm ふるい通過分）の粒状ベントナイト（名称；クニゲル GX）が開発された。本施工試験においても、この材料を用いることとした。なお、本材料の製品仕様は、表 2.1-9 および表 2.1-10 に示すように設定されている。

表 2.1-9　クニゲル GX の仕様

品質管理項目	管理値	品質管理項目	管理値
最大粒径	10mm	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）
含水比	10%以下		
塑性限界	30%以下	膨潤力	10(ml/2g)以上

表 2.1-10　クニゲル GX の仕様(粒度)

材料	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	0.850	0.425	0.250	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

実際に使用した材料の粒径加積曲線を図 2.1-5 に示す。また、自然含水比、塑性限界、メチレンブルー吸着量、膨潤力の基本統計量を表 2.1-11 に示す。表 2.1-11 に示す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材料仕様項目と比べて大きい。自然含水比は多少ばらつく傾向があるため、ばらつきを考慮して含水比調整を実施する必要がある。

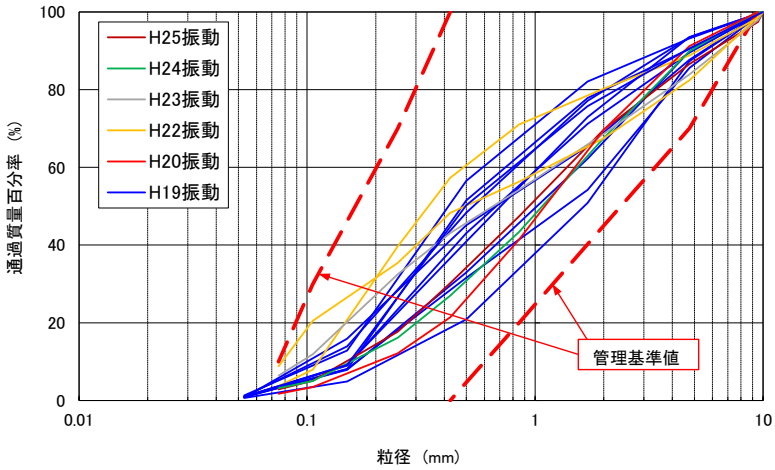


図 2.1-5　転圧工法で使用した材料の粒径加積曲線

表 2.1-11　転圧工法で使用した材料の材料仕様項目の基本統計量（平成 19～25 年度）

	自然含水比	塑性限界	ﾒﾁﾚﾝﾌﾞﾙｰ吸着量	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

2) 施工機械の選定

既往の研究結果より、含水比調整に用いるミキサを選定した。伊藤ら[11]により、各種小型試験を用いて含水比調整試験が実施されている。試験に使用されたミキサを表 2.1-12 に示す。

表 2.1-12　検討に用いた小型ミキサ

No.	検討ミキサ	装置概略	メーカー	型式	容量(ℓ)	回転数	投入質量(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	撹拌付回転容器型	日本アイリッヒ	R08-W	75	アジテータ:700/rpm パン(周速):1m/sec	50
7	プローシェア	回転鋤型	太平洋機工	WB-75	75	主軸:165rpm チョッパー:3,000rpm	50

試験の結果、得られた含水比測定値の平均値、最大最小値は図 2.1-6 に示す通りである。同図よりパン型、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結果となっている。表 2.1-12 に示す二軸強制型以降の No.4～No.7 のミキサ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結果となっている。小型ミキサの試験結果を踏まえ、大型ミキサを用いた試験も実施されている。試験はパン型強制混合造粒型ミキサ（ペレガイア、容量 1,000ℓ、投入量 700kg）および撹拌付回転容器型ミキサ（アイリッヒ、容量 2,250ℓ、投入量 900kg）を用いて行われた。図 2.1-7 には試験結果を示す。(a)は設定含水比が 18.5%のケース、(b)は設定含水比が 21%のケースの試験結果である。含水比のばらつきはどちらのミキサでも±1%程度となっている。

以上の結果を踏まえ、本施工試験では大型のペレガイアおよびアイリッヒを用いた含水比調整を行うことを基本とした。伊藤らの試験では、各ミキサとも２回（２バッチ）程度の含水比調整を行い、そのバッチ単位での材料の含水比のばらつきを確認しているのみである。本施工試験では、複数の方法で大量に含水比調整を行った場合、それぞれの方法の含水比の

ばらつきがどの程度になるのかを確認することを目的とした。また、これらの試験とは水の添加方法が全く異なる、凍結混合方式についても適応性を検討した。凍結混合方式の詳細については、後述する。

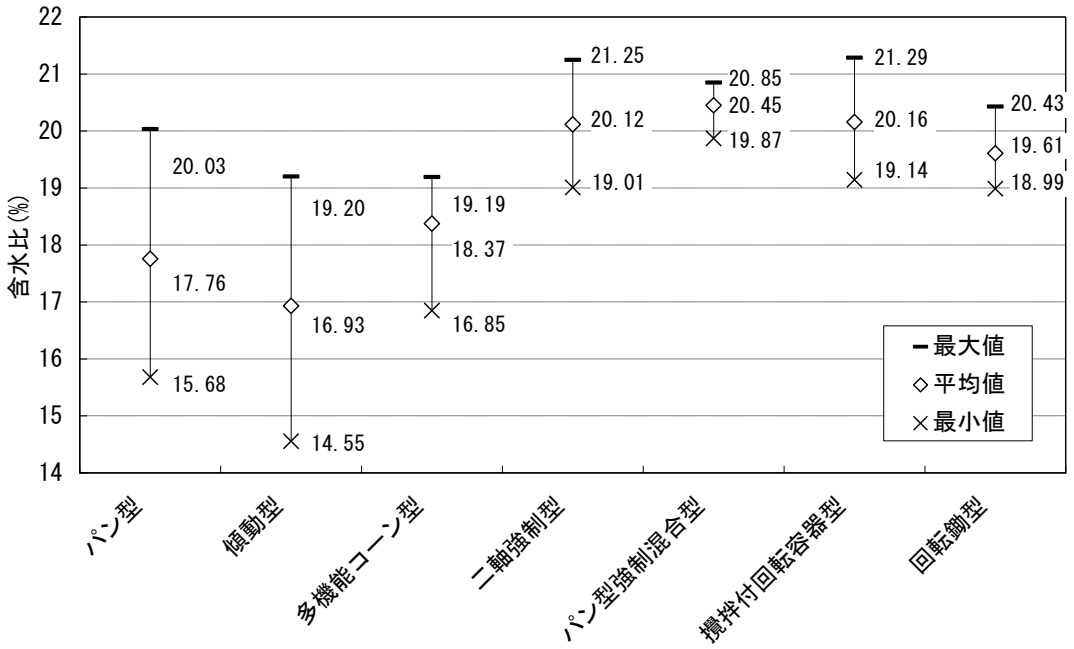
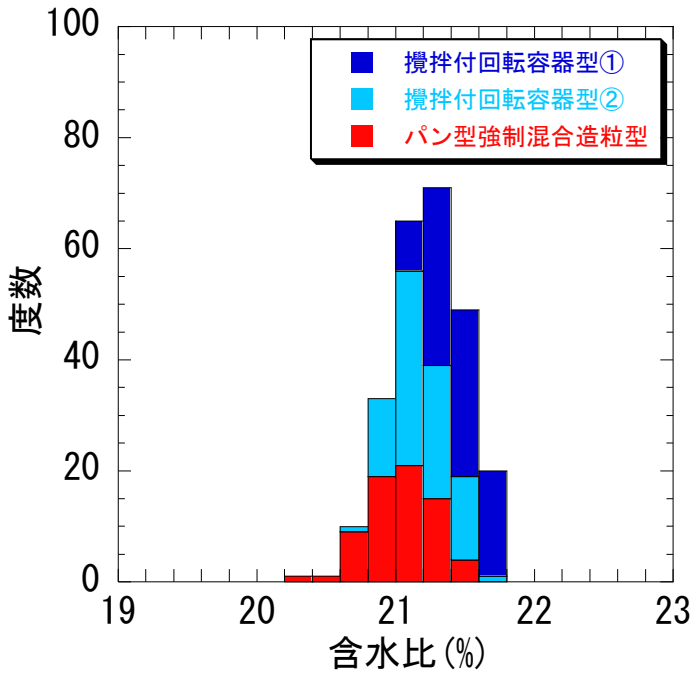


図 2.1-6　小型試験結果（含水比測定結果）



攪拌付回転容器型	
平均値	21.30
中央値	21.29
標準偏差	0.22
変動係数	1.03
範囲	1.01
最大値	21.77
最小値	20.76
標本数	180

パン型強制混合造粒型	
平均値	21.03
中央値	21.07
標準偏差	0.24
変動係数	1.12
範囲	1.13
最大値	21.48
最小値	20.35
標本数	70

図 2.1-7　大型試験結果（含水比測定結果）

3) 含水比調整結果

a. ペレガイアを用いた含水比調整

ペレガイア（容量 1,000ℓ）を用いた含水比調整を実施した。含水比の調整作業フローは図 2.1-8 に示す通りである。自然含水比状態のクニゲル GX をミキサに投入し、水と混練することにより、所定の含水比に調整した。含水比の調整作業は地上に設置した仮設プラントで実施した。初期含水比の測定は 1t ごとに、水添加量の設定は 500kg ごとに行った。

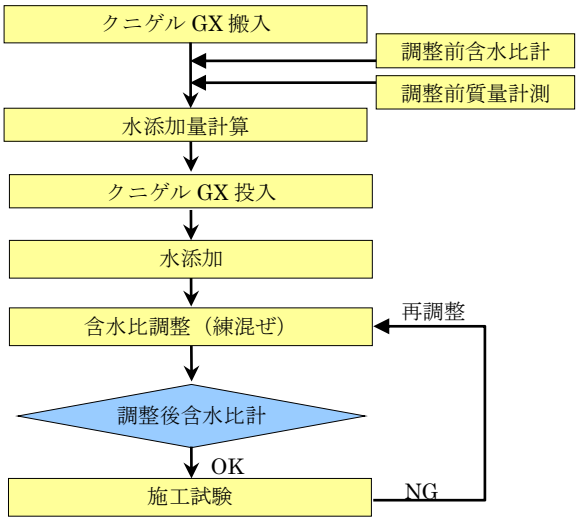


図 2.1-8　ベントナイト含水比調整作業フロー（1 バッチ毎）

調整後のクニゲル GX の含水比分布を図 2.1-9 に示す。管理目標値を外れる割合は全 723 バッチのうち 14.9%（高含水比側：5.1%（37 バッチ）、低含水比側： 9.8%（71 バッチ））であった。これは、混練時に内部に付着したクニゲル GX の一部が剥がれて混入したり、付着したクニゲル GX に過剰に吸水されたりするなどの状況が不規則に発生するためと考えられる。このような要因により、管理目標値を外れる頻度（確率）がどの程度なのか把握することができた。

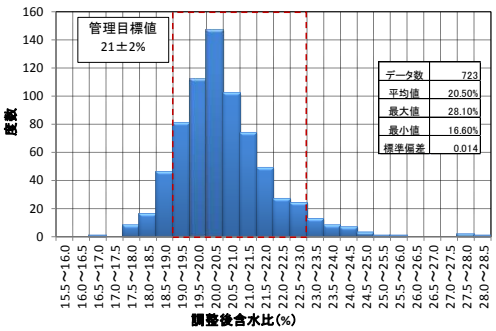


図 2.1-9　ペレガイアによる調整後の含水比分布（全体）

再調整後のクニゲル GX の含水比分布を図 2.1-10 に示す。この結果より、再調整を行うことにより、全バッチを管理目標値の範囲に収めることができた。

以上より、ペレガイヤミキサを用いたクニゲル GX の含水比の調整では、管理目標値を外れる場合も発生したが、適切な再調整を実施することにより、管理目標値に収めることも可能であることを明らかにできた。

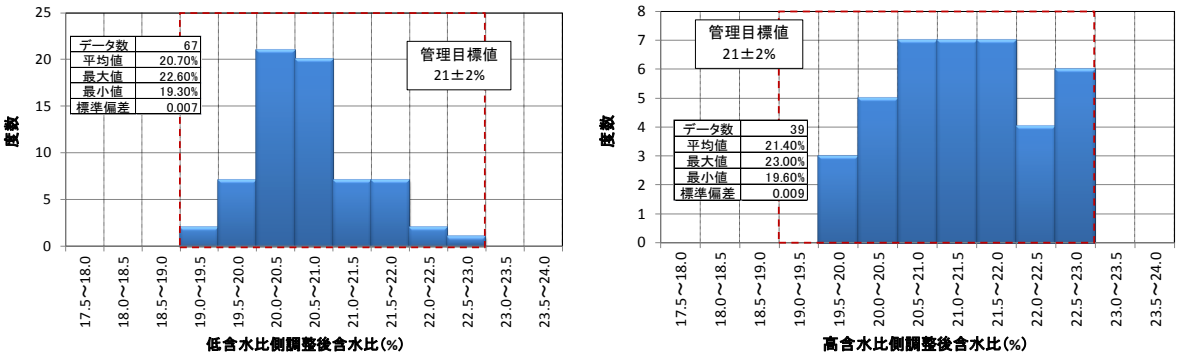


図 2.1-10　ペレガイアによる再調整後の含水比分布
（左；低含水比側（ω＜19%）、右；高含水比側（ω＞23%）

b. アイリッヒミキサを用いた含水比調整

使用したアイリッヒミキサを図 2.1-11 に示す。図 2.1-11 に示すように、アイリッヒミキサでは材料を容器（パン）ごと回転させている。これに対しパンの内部で偏心位置の逆方向に回転するアジテータとパンの外周に沿って移動するスクレーパが、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、ミクロで緻密な混合を実現する。

図 2.1-11　使用したアイリッヒミキサと攪拌機構の概念図

含水比調整の作業フローは基本的にペレガイアの場合と同じである（図 2.1-8 参照）。含水比調整に際し、ベントナイトの初期含水比をフレコン毎に事前に測定し、この測定した初期含水比に応じた水添加量を算出し水添加調整を行った。

水添加量の算出は、以下の 3 種類の方法で実施した。水添加量の設定頻度は方法 1 が 1 回であり、方法 3 が最も多い。

（方法 1）全材料の初期含水比の測定結果（炉乾燥）の平均値から水添加量を算出

（方法 2）全材料の初期含水比の測定結果（炉乾燥）から材料をグルーピングし、各グループの初期含水比の平均値から各グループ単位で水添加量を算出

（方法 3）バッチ単位での初期含水比の測定結果（赤外線水分計）からバッチ単位での水添加量を算出

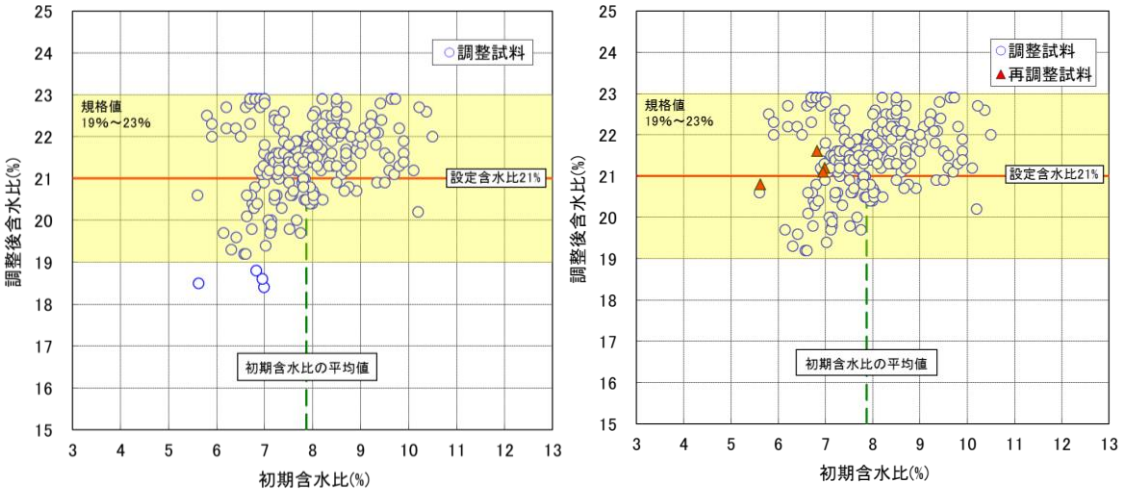
含水比調整結果を図 2.1-12～図 2.1-14 に示す。それぞれ練り混ぜを行った 1 バッチ単位での材料の初期含水比と調整後の含水比をプロットした結果である。図 2.1-12 は上記の水添加量の算出方法のその 1、すなわち全材料の初期含水比の平均値から水添加量を算出した結果である。初期含水比が低い場合、水添加量が不足し、結果として調整後の含水比が規格値を下回るものがあった。しかし、これらについて再調整（再水添加）することにより全て管理目標値内の含水比にすることが可能であることが分かった。再調整を行ったバッチ数は 4 バッチで全体の 220 バッチに対して 1.8%発生した。

図 2.1-13 は、初期含水比の測定結果に基づき材料を 4 つのグループに分け、そのグループごとの初期含水比から水添加量を算出した結果である。初期含水比の最も高いグループ（グラフ中のグループ 4）の調整後の含水比が規格値を下回る結果となった。これは、初期含水比の測定時点で生じた不具合、例えば、フレコン内でも含水比が高い部分をサンプリングしてしまった、等が考えられる。しかし、これら調整後に規格値を下回る材料についても、再調整（再水添加）することにより全て規格値の範囲に収めることは可能である。再調整を行ったバッチ数は 9 バッチで全体の 92 バッチに対して 9.8%であった。グループ 4 では、13 バッチ中 9 バッチ（グループ 4 の 69.2%）が外れ、このことより、初期含水比の測定が重要であることが示唆される。また、グループ 1～3 に関しては、再調整する必要がなく、測定した初期含水比の分布幅 1～2%程度のグルーピングに応じた水添加量の設定頻度でも十分管理目標値に収めることが可能であった。グループ 4 で発生した不具合を除外すれば、精度の高い含水比調整が可能であることが分かった。

図 2.1-14 はバッチ単位で加水直前に赤外線水分計で初期含水比を測定し水添加量を算出した方法 3 の結果である。若干、管理目標値を下回っているものがあるが、全体的にはバッチ毎に水添加量を算出しているので、方法 1 のように初期含水比の平均値から算出する場合に比べて管理目標値を外れる確率が少なく、全体の 213 バッチに対して 2 バッチ外れた（0.9%外れた）。管理目標値を外れる要因は、極少量の材料を用いて赤外線水分計で初期含水比を測定したことによる測定方法による誤差と思われる。

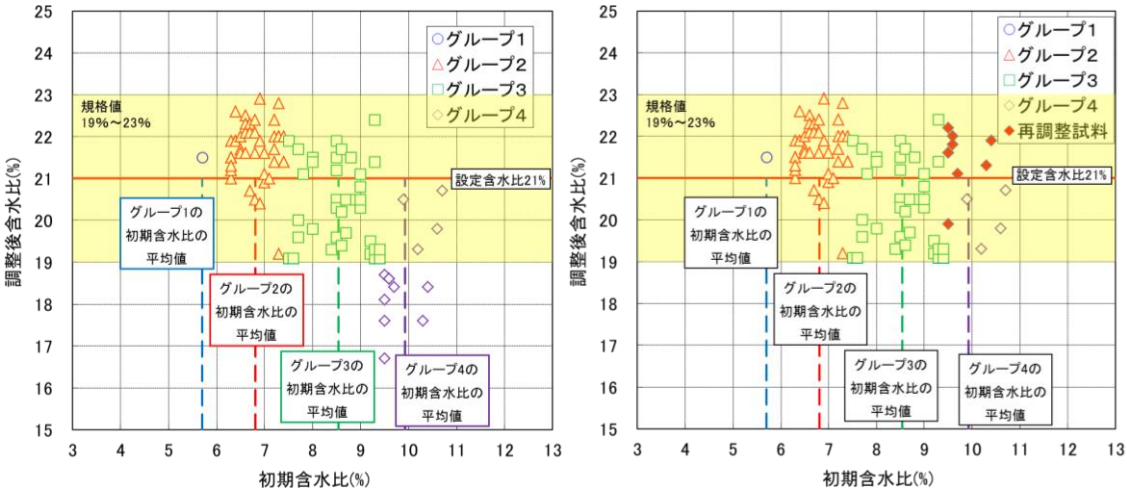
初期含水比の測定を入荷時のフレコン毎（約 500kg 毎）に測定したが、5%～11%程度の範囲でばらつきがあった。この測定した初期含水比に応じた水添加量の設定を、60 トン/回～500kg/回（含水比調整バッチ毎）という頻度で行った。ただし、初期含水比を 1～2%範囲毎にグルーピングする場合は、明確に何トン/回という回数の設定はできない。このように水添加量の設定頻度を、あるいは初期含水比のグループ毎に設定を変更して行うことによって取得したデータは、水添加量の設定頻度を判断する重要な知見となる。

以上のように、含水比調整を精度良く実施する上で、初期含水比の測定が重要であることも明らかとなった。



(a)各フレコン単位での初期含水比と調整後含水比　　(b)再調整結果

図 2.1-12　方法 1 での含水比調整結果



(a)各フレコン単位での初期含水比と調整後含水比　　(b)再調整結果

図 2.1-13　方法 2 での含水比調整結果

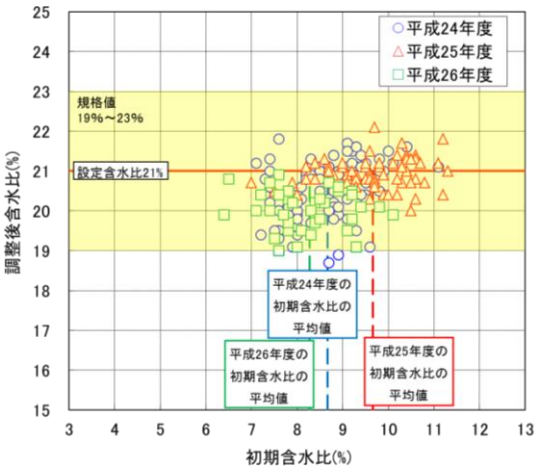


図 2.1-14　方法 3 での含水比調整結果

c. 凍結混合法を用いた含水比調整

凍結混合法とは、a.、b.で述べたような高性能の機械による固液混合の含水比調整技術ではなく、冷却した粉体材料と微粉砕氷を低温環境下で粉体混合することによって含水比調整する技術であり、混合機器自体には特段の制約はない。粉体材料と微粉砕氷の混合には二軸強制型ミキサを使用し、適用性を検討した。

確証試験では後述する側部緩衝材の吹付け施工用の材料の一部に適用した。使用材料の最大粒径は吹付け施工時のリバウンド率の抑制の観点から 4.75mm とした。

特に留意した作業手順を以下に示す。

・初期含水比のばらつきをなくすために十分に切り返す

・材料を小分け計量する

・小分けした材料を冷凍室で-10℃程度に冷却する

・微粉砕した粉体状の氷を準備

・低温環境下で所定の含水比となる質量割合で冷却ベントナイトと粉体状氷を粉体状態のままで混合する。

・冷却ベントナイトと微粉砕氷の混合物を外袋付きフレキシブルコンテナに封入して、常温で解凍する

また、外袋付きフレキシブルコンテナ中で解凍するのは、解凍中に結露した水がベントナイトに染み込み含水比が変化するのを防ぐためである。また、フレキシブルコンテナに入った-10℃程度のベントナイトを解凍するのに要する時間は一日程度である。

この凍結混合方法の特徴は、混合時に間隙水が氷状であるため、砂同士を混合しているのと同じ状態であり、だまになりにくく均一に混合されるため、図 2.1-15 に示すように含水比調整前後で粒度分布がほとんど変化しないことである。そのため、含水比調整前後で粒度分布が変化することが好ましくない吹付け工法に対しては最適と言える。

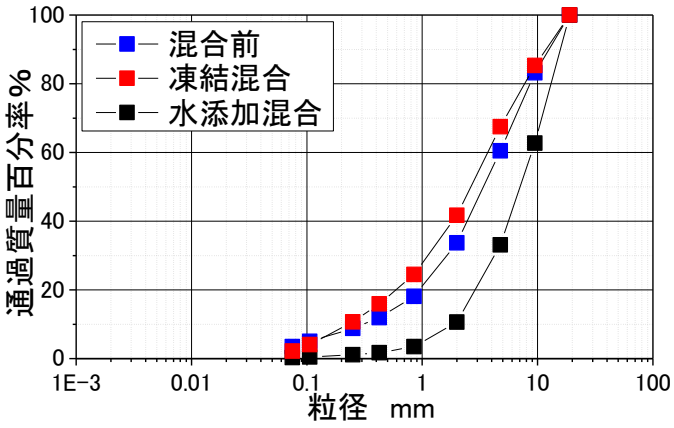
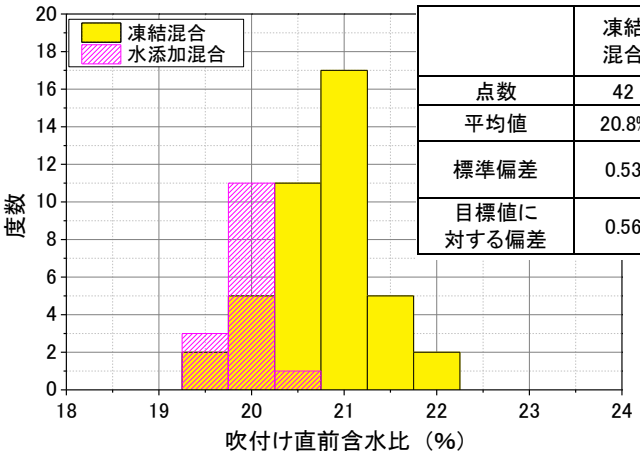


図 2.1-15　含水比調整前後の粒度分布の変化

さらに凍結混合方法では、含水比調整が粉体状の氷と粗粒ベントナイトの粉体混合によってなされるため、含水比調整自体に大きな機械や高出力の動力は必要ない。つまり大き

な冷凍設備が用意できれば比較的簡単に大量製造が可能となる。さらに混合機への付着もほとんどないため、回収率もほぼ 100%である。

図 2.1-16 に含水比調整精度の検討結果を示す。図には、凍結混合方法と同じ材料と同じ混合機器を用いて実施した水添加混合の結果も比較対象として併せて示す。管理基準値 21±2%に対して、凍結混合方法の平均値が 20.8%、水添加混合方法の平均値が 20.0%であった。また、母集団の標準偏差は、それぞれ 0.53 と 0.20 である。ただし、これは平均値に対するばらつきであり、目標値 21%に対する偏差は、それぞれ、0.56 と 1.06 であった。試験室規模での練混ぜ試験結果では、二つの含水比調整方法とも、目標値を満足することができた。



	凍結混合	水添加混合	目標値
点数	42	15	—
平均値	20.8%	20.0%	21.0%
標準偏差	0.53	0.20	—
目標値に対する偏差	0.56	1.06	—

図 2.1-16　凍結混合と水添加混合による吹付け材料の含水比の比較

(2) 施工検討

1) 既往の施工技術と施工環境条件

a. 既往の施工技術の調査結果

底部緩衝材を対象とした既往の研究において、クニゲル GX を用いたランマによるコンクリートピット内の締固め試験が要素試験として実施されており、仕上り層厚 10cm で、有効粘土乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を越える施工が十分に可能であることが確認されている[12]。また、別の研究では、同じくクニゲル GX を用いて、幅 6m、延長 12m、層厚 1m の底部緩衝材を模擬した転圧工法に関する施工試験が地下空洞内で実施されている[13]。この研究では、2.5t 級の小型振動ローラと 19t 級の大型振動ローラを組合せた転圧工法により、ベントナイトの含水比 18.5%および 21.0%のクニゲル GX を用いて仕上り厚さ 10cm 程度で乾燥密度 1.6Mg/m^3 程度を満足できる見通しを立てている。また、21.0%で施工した時の方が仕上り時の緩衝材の乾燥密度のバラつきも小さく、仕上り層厚 18cm で施工しても目標乾燥密度である 1.6Mg/m^3 を達成できることを確認している。

側部緩衝材は、幅が狭く両側の壁が高い、トレンチ状の狭隘な空間内で施工する必要がある。このような空間での施工を対象にした既往の検討は、小型振動ローラによる転圧[14]、

ブロック定置による方法[15]、粒状ベントナイトの充填による方法[16]、吹付け工法による施工[12]が挙げられる。

これら既往の研究では、実際に適用が想定されるものと同等の施工機械での実施はされているが、実環境下に近い条件での施工はなされておらず、また、図 2.1-2 のデータも室内成型供試体を用いた試験結果であり、実物に近い条件で施工したものから採取した供試体を用いての試験結果との比較・検証を行っておらず、実物を設計・施工する際に知見を反映できるかの確証がないのが現状である。

b. 施工環境条件と施工方法の選定

実際の余裕深度処分においては、地下空洞内に処分施設が建設されることより、温度・湿度環境の条件は、浅地中トレンチ処分施設や浅地中ピット処分施設の建設よりも、地中処分施設の環境に近い。また、底部緩衝材の施工においては、地下空洞内といえども、先述のとおり、道路造成や盛土で用いられる大型施工機械が利用できる。

側部緩衝材や上部緩衝材の施工においては、施工幅制限や空頭制限など、空間的に制約があるため、底部緩衝材のように転圧工法をそのまま適用することはできない。側部緩衝材の施工箇所は、幅 1m・高さ約 8m の狭隘なトレンチ状の空間であり、実物の処分施設では奥行き方向に 100m 程度となることが予想される（本試験においては、実物の処分施設とは異なり、トンネル軸方向の延長一区画分の長さであると予想される 12m程度である）。このような狭隘な箇所へは、底部緩衝材に適用できる振動ローラではなく、小型の振動ローラ[8]や吹付け工法[12]が適用できると考えられる。また、アーチ天端付近の空頭制限のある、隅角部に対して、本試験では吹付け工法を適用することとした。

上部緩衝材施工時においては、平面部での施工となるため、底部緩衝材と同様に転圧工法の適用が可能となる。しかし、本確証試験では、ピット上部への機械の搬入方法に制限があったため、小型振動ローラを用いた転圧工法を適用することとした。以下、各部位・工法ごとに検討結果をまとめる。

2) 底部緩衝材の転圧施工

転圧回数の最適化等の施工仕様の検討、およびその転圧回数を管理することによって、要求される品質（透水係数および代替特性の乾燥密度）が確保できるかの検証を目的として表 2.1-13 に示す施工条件で底部緩衝材の転圧施工を行った。敷均し厚さの条件は 200mm で一定とした。ケース 1～ケース 6 は、転圧機械と転圧回数の関係を確認するケースとした。ケース 1～ケース 4 は、19t 級大型振動ローラを用いた場合の検討ケースで、2.5t 級振動ローラによる予備転圧の必要性の有無および大型振動ローラの初期転圧（無振動転圧）、本転圧（振動転圧）の転圧回数の最適化について検討を行ったものである、ケース 5、6 については、11t 級大型振動ローラに関する検討ケースである。ケース 7 については、同一の転圧方法での施工試験を行った。

各ケースの施工後、性能および品質のばらつきを検討するためのデータを取得し評価した。また、10 層目を施工した時点での不陸の程度の確認を行った。

表 2.1-13　底部緩衝材の施工条件　一覧表

ケース No.		1	2	3	4	5	6	7
施工層		1	2	3	4	5	6	7～10
転圧種類		（転圧回数）						
予備転圧	2.5t 級	2	2	—	—	—	—	—
初期転圧	19t 級	8	4	4	4	—	—	—
	11t 級	—	—	—	—	4	4	4
本転圧	19t 級	6	4	4	2	—	—	—
	11t 級	—	—	—	—	6	4	4

a. 施工方法

大型アスファルトフィニッシャによる敷均し⇒2.5t 級舗装用振動ローラを用いて無振動で行う予備転圧⇒大型振動ローラを用いて無振動で行う初期転圧⇒大型振動ローラで振動を加えながら行う本転圧の順で施工を行った。含水比調整されたクニゲル GX を高密度に締固めるためには、段階的に転圧エネルギーを上げる必要があると考えられ、予備転圧、初期転圧の実施が想定されている。そのため、施工試験を通して、予備転圧、初期転圧の必要性や適用性を検討した。また、転圧のオーバーラップに関しては、締固め残しがないように 300mm 程度オーバーラップさせながらの転圧を行った。図 2.1-17 に 1 層毎の施工試験フローを示す。

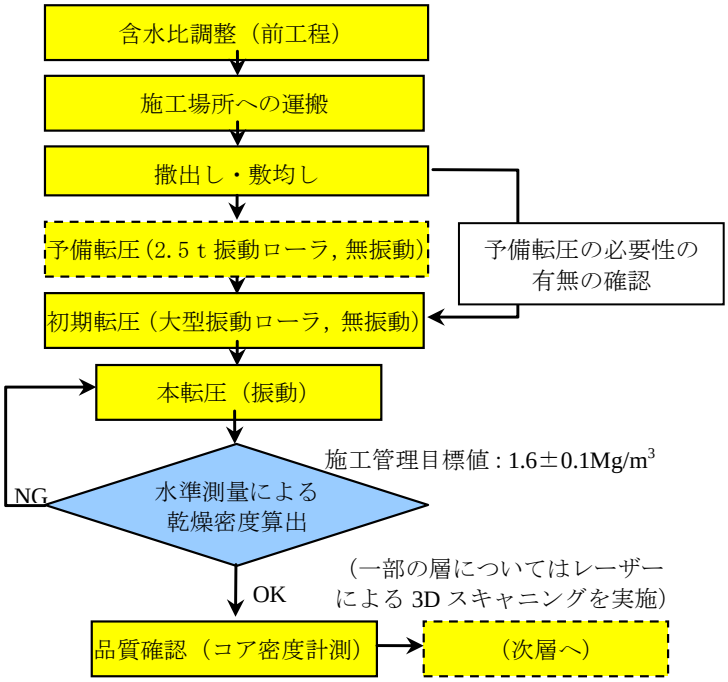


図 2.1-17　1 層ごとの施工試験の主要なフロー

・敷均し方法

敷均しは、基本的にはアスファルト舗装工事などで用いられている大型フィニッシャ（図 2.1-18）を使用し、大型フィニッシャではできない奥部（切羽壁際より奥行方向 2m 幅）および手前部（手前端部締切より 1m）については、人力で行った。敷均し方法の区分けは図 2.1-19 に示すとおりである。表 2.1-14 に大型フィニッシャの仕様を示す。

撒出し･敷均しの順序は、奥部を人力で行った後、大型フィニッシャで 3 レーンを施工し、最後に手前部を人力で行った。

図 2.1-18　大型フィニッシャ

表 2.1-14　大型フィニッシャの仕様

項目	仕様
総質量	19,000kg（5m 幅員時）
全長	6,247mm
全幅	3,191mm（ホッパ閉 2,500mm）
全高	3,780mm（キャノピートップ迄）
舗装幅	2,500mm～5,000mm（伸縮最大幅）
舗装厚	300mm 迄
作業速度	0～20m/min
移動速度	0～20km/h
クラウン量	－2～＋4%
振動	0～3,600vpm（バイブレータ）
回転数	0～1,700min^{-1}（タンパー）

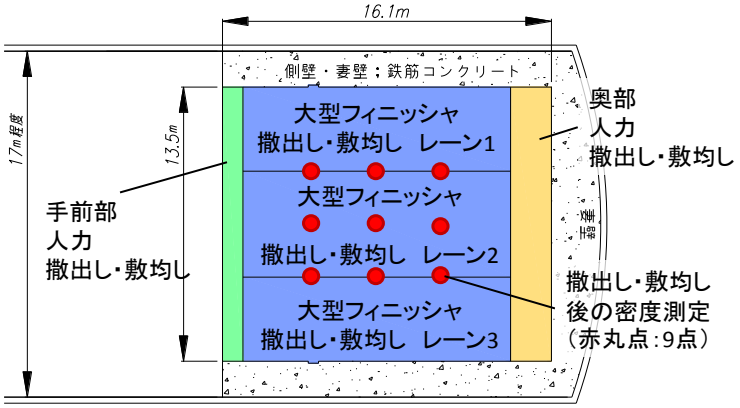


図 2.1-19　撒出し・敷均しレーンおよび区分け（平面図）

・転圧方法

図 2.1-20 に振動ローラの種類による施工箇所の区分けを示す。大型振動ローラで施工できる一般部、転圧機械の乗り込み口である手前端部、壁際の大型振動ローラが施工できない奥部および側部に区分けした。

予備転圧は、アスファルト舗装時の締固めに使用される 2.5t 級舗装用振動ローラで行った。奥部・側部の初期転圧・本転圧には 1.5t 級の小型振動ローラを使用した。この小型振動ローラは、本来トレンチ状の掘削箇所における埋戻し時の転圧等に使用される機械であり、その構造上、壁際までの締固めが可能である。表 2.1-15 に使用した小型振動ローラ（1.5t 級および 2.5t 級）の仕様を示す。

一般部および手前端部の初期転圧・本転圧は、大型振動ローラを使用して行った。大型振動ローラは、11t 級および 19t 級を使用し、使用する機械による仕上り品質の違いを確認することとした。表 2.1-16 に、各大型振動ローラの主要諸元を示す。また、図 2.1-21 に施工状況を示す。

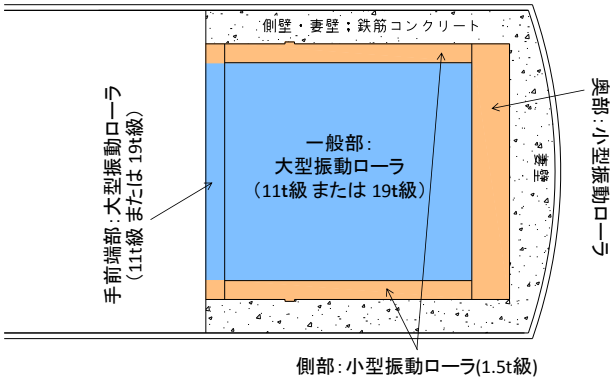


図 2.1-20　振動ローラの種類による施工箇所の区分け

図 2.1-21　大型振動ローラによる底部緩衝材の施工試験状況

表 2.1-15　使用振動ローラ（1.5t 級および 2.5t 級）の主要緒元

ローラ種別	1.5 t 級	2.5t 級
機体長	1,500mm	2,675mm
機体高	1,200mm	1,575mm
機体幅	610mm～850mm	1,290mm
機体質量	1,548kg	2,640kg
エンジン	空冷 2 気筒ディーゼル	空冷 2 気筒ディーゼル
速度	1.2km/h	2km/h
車輪幅	278×2～398×2	1,200mm
操作	リモートコントロール	搭乗式

表 2.1-16　大型振動ローラ（11t 級，19t 級）の主要緒元

ローラ種別	11t 級	19t 級
機体長	5,808mm	6,250mm
機体高	2,972mm	2,910mm
機体幅	2,250mm	2,530mm
機体質量	10,950kg	19,400kg
周期	36Hz/30Hz	32Hz/30Hz
振幅	0.9mm/1.8mm	1.8mm/2.3mm
起振力	170kN/236kN	343kN
速度	2km/h	2km/h
車輪幅	2,130mm	2,150mm
操作	搭乗式	搭乗式

・施工管理手法の概要

主な施工管理は、施工した層の乾燥密度が管理目標値である 1.6±0.1Mg/m^3 を満足するかを確認するものとした。乾燥密度の確認方法は、レベルによる水準測量（以下、レベル測量）による高さ／層厚管理、投入質量の管理、含水比の管理より行った。レベル測量は 1 層あたり 195 点測定した。また、実際に施工後の底部緩衝材からコアを採取し、このコアのかさ密度と含水比より乾燥密度を求めた（以下、コア法とする）。コアの採取はコアドリルにより行い、1 層目：39 点、2～6 層目；各層 21 点、7～10 層目；各層 29 点、計 260 点を採取した。また、一部のコアについては、同一層内でのばらつき（乾燥密度の分布）を評価するため、層の厚さ方向に 3 分割して密度を測定した。

施工前、1、2、5、10 層目については、3 次元レーザースキャナを用いて計測し、レベル測量との整合性を確認するとともに、レベル測量と同様にその層全体での平均的な乾燥密度を算出した。また、仕上り面のスキャナ情報により、不陸の状態を確認した。

b. 施工結果

各層のコアの乾燥密度の測定結果の平均値を図 2.1-22 に示す。各層から採取したコアの乾燥密度の平均値はいずれの層でも、すなわち、19t 級大型振動ローラ、11t 級大型振動ローラのいずれを用いても管理目標値を満足する結果が得られた。これは、施工機械の能力に応じて転圧回数を変更することにより、また、その際、前節で示した施工管理手法に従えば、管理目標値を満足する底部緩衝材の構築が可能であることを示唆する。

19t 級大型振動ローラを用いた 1 層目～4 層目では 2.5t 級小型振動ローラによる予備転圧の有無や大型振動ローラによる無振動転圧である初期転圧の転圧回数の違いによる有意な差は見られなかった。3、4 層目で比較すると、転圧回数と達成密度の間に相関がみられ、転圧回数の少ない 4 層目の方が密度は小さい結果となることを確認した。

1 層目～4 層目の結果より、11t 級大型振動ローラを用いたケースでは 2.5t 級小型振動ローラによる予備転圧は行わないこととし、また無振動転圧による初期転圧の回数は 4 回とした。5、6 層目では 11t 級大型振動ローラによる本転圧（振動転圧）回数を変えて試験を行ったが、本転圧の回数が 4 回でも施工管理目標を満足することが分かった。そこで、7 層目以降では同一の転圧回数（無振動 4 回、振動 4 回）で施工を実施したが、いずれの層においても管理目標値を満足する結果を得た。

層	使用機械（一般部）	転圧回数 予備転圧	初期転圧	本転圧	コアの乾燥密度（Mg/m³）平均値
10	11t級大型振動ローラ	0	4	4	1.621
9		0	4	4	1.625
8		0	4	4	1.614
7		0	4	4	1.605
6		0	4	4	1.648
5		0	4	6	1.665
4	19t級大型振動ローラ	0	4	2	1.646
3		0	4	4	1.678
2		2	4	4	1.645
1		2	8	6	1.669

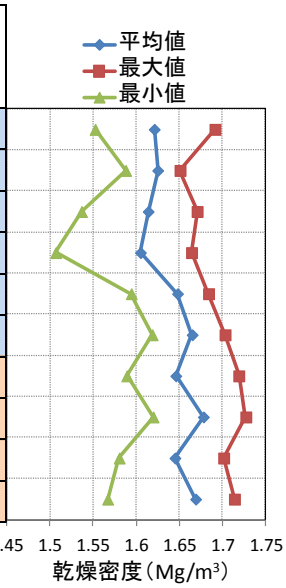


図 2.1-22　各層における仕上り乾燥密度と転圧回数の関係

5，6 層目の仕上り密度は 7～10 層目の密度より大きい値となったが、5，6 層目の密度が相対的に大きい原因としては、使用材料の含水比の影響が考えられる。図 2.1-23 に 5 層目～10 層目での各層の含水比と乾燥密度の関係を示す。5、6 層目で使用したベントナイトの含水比の平均値は 20.0%で 7 層目～10 層目（20.7%～20.8%）より小さかった。含水比が相対的に小さいことの影響により、5、6 層目の乾燥密度が相対的に高くなったと考えられる。

7 層目～10 層目でのコアの乾燥密度は管理目標値である 1.50～1.70Mg/m³ の間に分布した。同一転圧回数で施工した場合、乾燥密度はこの程度のばらつきが生じることを確認できた。

図 2.1-24 に各層を上下方向に 3 分割したコアの乾燥密度の測定結果を示す。上部は振動ローラに接する部分、下部は前施工層に接する部分、その中間部分を中部とした。

上部、中部、下部それぞれの平均値は 1.665 Mg/m³、1.639 Mg/m³、1.606 Mg/m³ であった。相対的に上部の乾燥密度は高めに、下部の方は低めになる結果となり、同一層内でも乾燥密度の分布が生じた。上部と下部のコアで管理目標値を外れるものがあったが、これらは

全測定データの 4.1%であった。全体での密度の分布範囲は 1.437～1.730Mg/m³、平均値は 1.637Mg/m³ であった。3 分割したコアの乾燥密度の平均値（1.637Mg/m³）は、分割せずに測定したコアの乾燥密度の平均値（1.640Mg/m³）とほぼ整合する結果となった。

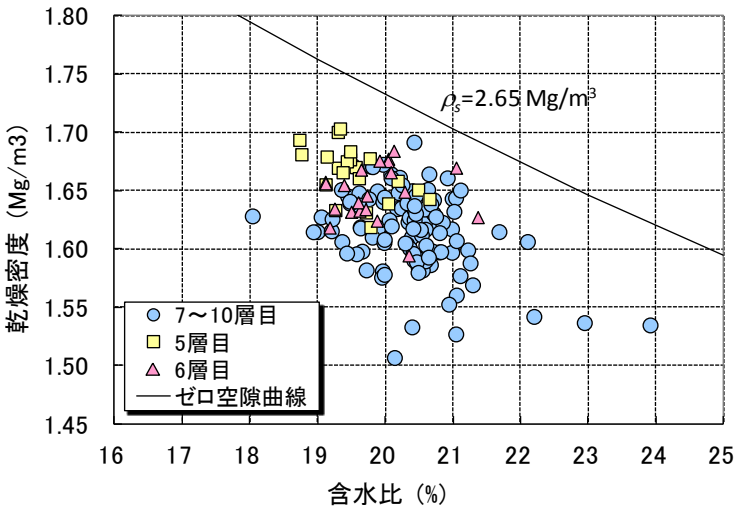
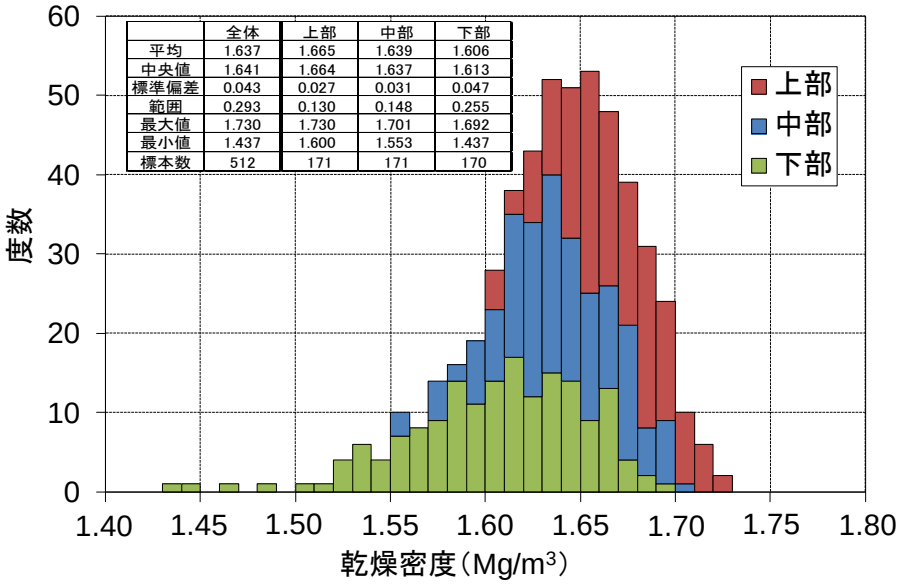


図 2.1-23　各層における採取コアの含水比と乾燥密度との関係



	全体	上部	中部	下部
平均	1.637	1.665	1.639	1.606
中央値	1.641	1.664	1.637	1.613
標準偏差	0.043	0.027	0.031	0.047
範囲	0.293	0.130	0.148	0.255
最大値	1.730	1.730	1.701	1.692
最小値	1.437	1.600	1.553	1.437
標本数	512	171	171	170

図 2.1-24　3 分割コアの乾燥密度の分布

転圧後の仕上がり面の標高と不陸を確認するため、3 次元スキャニングによる測定を施工試験前、2、5、10 層目終了時に行った。本報告では、10 層目のデータを示す。表 2.1-17 に部材厚に関する統計データを、図 2.1-25 に 3 次元スキャニングによる 10 層目の仕上がり面の等高線図を示す。等高線図の上側が空洞の奥部にあたる妻壁側であり、左軸の数字（84～99）が小さいと坑口側となる。凡例のコンターの色は、赤ければ仕上がり高さが相対的に高いことを示している。中間部分の色で-88.46 という数字は、施工目標となる設計標高値（m）であることを示す。

奥部の妻壁から約 1m（左軸の数字では 97.5 付近）のところで尾根状に標高が高くなり、手前端部（左軸の数字では 83.5～85.5）でも面的に標高が高くなった。前者は一般部と奥部（図 2.1-19 および図 2.1-20 参照）との境界部であり、大型振動ローラがこの境界部付近で振動転圧を停止することによる影響で不陸が発生したと考えられる。

後者は、10 層目においてはこの部分に必要な量より多い材料を投入したことにより所定の高さを超過したことが原因と考えられる。2、5 層目終了時点での 3 次元スキャニングの結果より、適切な量を投入すれば手前端部で標高が高くならないことを確認している。このように空洞軸方向では奥部の一部・手前端部で標高が高くなっているが、その他の部分での不陸は小さい。

一方、空洞横断方向での不陸は、空洞中心から左右に約 2m の付近と側壁部近傍で標高が高くなる傾向となった。これは大型フィニッシャによる材料の撒出し・敷均し時のかさ密度の違いによるものと思われる。

底部緩衝材の部材厚さを、底部緩衝材の施工基盤面となる底版コンクリート仕上がり面と 10 層目完了時の底部緩衝材の仕上がり面の同じ平面座標位置における標高の差より求めた。底部緩衝材の設計厚と最大値・最小値との差はプラス側で 0.0413m、マイナス側で 0.0489m であり、設計値との差は±0.05m 程度であった.

底部緩衝材および底版コンクリートの施工誤差を要因とする仕上がり面の不陸は必ず生じるため、ある程度の裕度を持たせて施工基盤面（空洞掘削面）を設定することは、底部緩衝材の設計厚を確保する上で必要であると考えられる。

表 2.1-17　部材厚に関する統計データ（単位；m）

項目	測定値
設計厚	1.0
平均値	0.9901
標準偏差	0.0170
最大値	1.0413
最小値	0.9511
設計厚との差（＋側）	0.0413
設計厚との差（－側）	0.0489
分布幅（最大値－最小値）	0.0902
測定点数	21,735 点

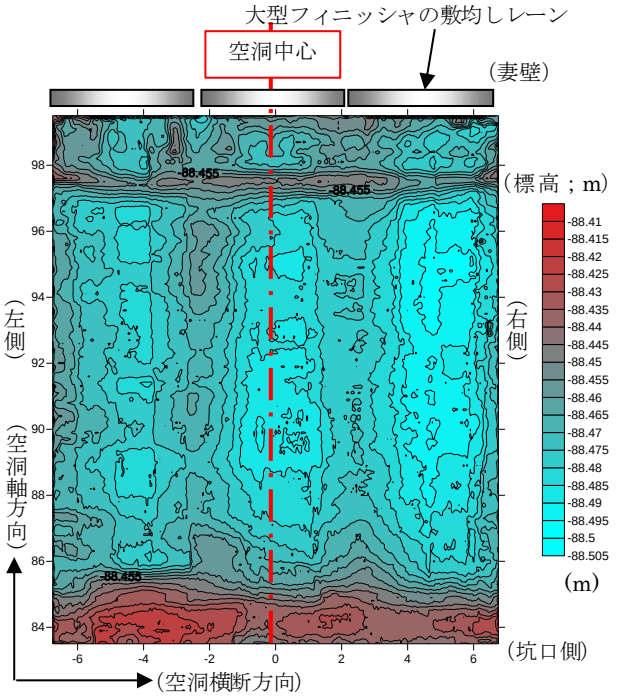


図 2.1-25　3 次元スキャニング測量結果の例（10 層目）

3) 側部緩衝材の転圧工法

側部緩衝材の施工箇所は、先述のとおり狭隘なトレンチ状の空間であり、実物の処分施設では奥行き方向に 100m 程度となることが予想される。このような箇所では、撒出し・敷均しおよび転圧時の施工箇所の幅の制限のみならず、100m 程度の奥行きや約 8m程度の高低差を考慮した、施工箇所への材料の供給方法も課題となる。そこで、まず、側部緩衝材の転圧工法に適した施工システムの検討を行った。

a. 側部緩衝材施工に適した施工システムの検討

まず、材料の供給方法について検討した。材料の供給は、最大 100m 程度の距離をトンネル軸方向に輸送する必要がある。この方法には、①空気圧送、②幅 1m未満のキャリアなどの輸送機械によって敷均し箇所まで輸送する方法、③一旦材料をコンクリートピット上部に荷揚げし、キャリアなどの輸送機械で所定の箇所まで輸送し、敷均し機械へコンクリートピット上部から材料を供給する方法が考えられる。トンネル軸方向の材料の移動と、コンクリートピット上部から敷均し箇所への材料を下す作業が別作業にできることより、③の方法を採用し、図 2.1-26 のような機械を製作した。

図 2.1-26　ベントナイト供給機

材料の敷均し方法は、人力による方法の他、幅 1mのトレンチ状の空間に適合した施工機械を用いる方法が考えられる。しかし、このような空間に適合した施工機械は無いのが現状である。

そこで、専用の敷均し機械（以下、ベントナイト敷均し機）を開発した。ベントナイト敷均し機は、次の 5 つの機能を有するものを設計・製作した。

①幅 1mという狭隘な空間に収まること

②コンクリートピット上部から供給される材料を受け取る機構を有すること

③トンネル軸方向に任意の速度で移動できること

④トンネル軸方向にある一定速度で移動しながら、横断方向に幅 1mで均一に材料の撒出し・敷均しを連続的に行うことが可能であること

⑤任意の厚さで撒出し・敷均しできること

ベントナイト敷均し機は、アスファルトフィニッシャと同様に、材料を受取るホッパ、敷均し厚さを調整するため上下動できる箱型スクレーパ、このスクレーパの内部で材料を横断方向に送り出すスクリューオーガを基本構成とする。移動方式は施工試験領域のトンネル軸方向の延長が 11m 程度と短いため、自走機構は搭載せず、ウィンチによる牽引方式とした。均一な材料の敷均しを行うため、牽引速度とスクリューオーガの回転速度を最適な速度に制御した。図 2.1-27 にベントナイト敷均し機を、表 2.1-18 に機械仕様を示す。

図 2.1-27　ベントナイト敷均し機

表 2.1-18　ベントナイト敷均し機の仕様

機体長	2,350mm
機体高	1,890mm
機体幅	980mm
機体質量	550kg
敷均し幅	980mm
敷均し厚	最大250mm
ウインチ牽引力	940kg
速度	1.1m/min
最大積載量	約0.4m^3

b. 施工方法

側部緩衝材の施工において、底部緩衝材の場合と異なる点は、敷均しを行う際、先述のとおり施工機械に材料を供給する方法がコンクリートピット上部から行うことと、そのための専用の施工機械を用いることである。敷均し後の転圧は、底部緩衝材と同様に、無振動で行う「初期転圧」と振動を加えながら行う「本転圧」の 2 種類を行った。図 2.1-28 に側部緩衝材の施工フローを示す。

本試験では、転圧ローラの幅を変更した場合の影響について調べた。次に同じ転圧幅でも撒出し・敷均し厚さを変更した場合の影響を検討した。その後、同一条件で施工した時の乾燥密度のばらつきの程度や、平面位置の違いによる影響について検討した。これらの検討を行うため、施工は全 136 層の施工を実施した。

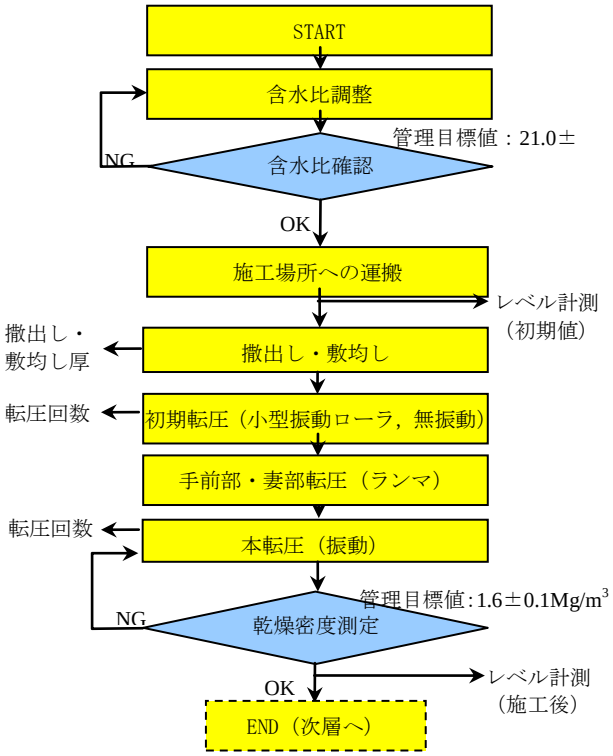


図 2.1-28　側部緩衝材の施工フロー

・敷均し方法

敷均しは基本的にベントナイト敷均し機を用いて行ったが、坑口側の機械の乗り込み口付近は人力にて行った。また、施工面の標高が上がると、ベントナイト供給機からベントナイト敷均し機に材料の供給ができなくなったので、施工高さが 6mに到達してからは人力のみで行った。

ベントナイト敷均し機による敷均し厚さの管理は、作業前に箱型スクレーパを所定の高さに調整して固定することによって行った。箱型スクレーパ内部のスクリューオーガの回転数とウィンチの牽引速度を制御し、均一に撒出し・敷均しできるようにした。人力の場合はレベル測量等により厚さを管理した。

・転圧方法

転圧は図 2.1-29、表 2.1-15 で示した小型振動ローラを用いて行った。幅員 1.0mの箇所を転圧しようとすると、転圧ローラの幅（以下、ローラ幅とする）は 1.0m 以下に制限される。そこで、付替え可能なローラは、幅が 1m以下のものを 3 種類用意した。

図 2.1-29 中の黄色で示した部分は、ローラが接地していない。ローラ幅 1m未満で接地していない部分があるため、往復走行をしているだけでは転圧されない部分が生じる。1.0m幅を不足なく転圧するには、転圧時の走行箇所（以下、走行レーンとする）を変えて転圧する必要がある。図 2.1-30 にローラ幅と走行レーンの関係を横断面図で示す。転圧幅 850mm や 710mm の場合には、走行レーンの数は 2 レーンが、ローラ幅 610mm の場合は 3 レーンが必要である。

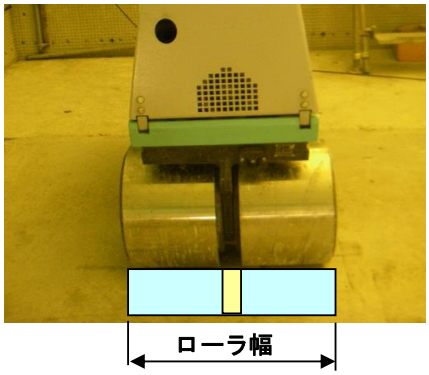
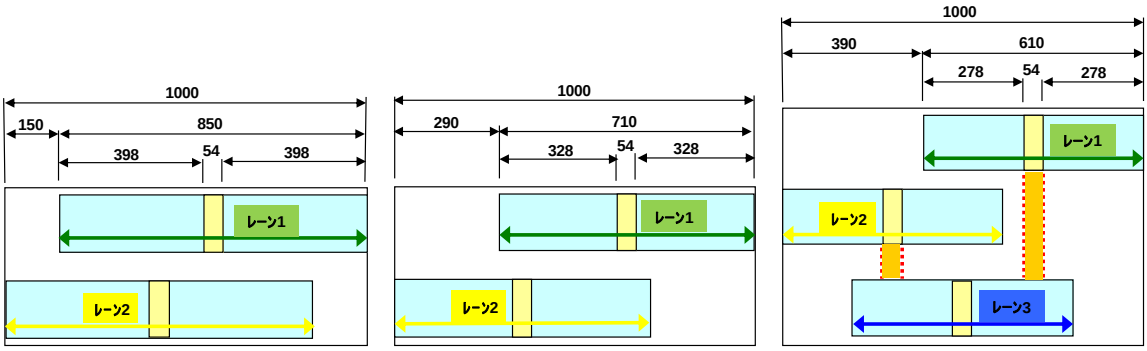


図 2.1-29　転圧時のローラ幅



（a）850mm　　（b）710mm　　（c）610mm

図 2.1-30　ローラ幅と走行レーンの関係

c. 施工結果

転圧ローラの幅を変更した場合の施工後の乾燥密度に与える影響を調べるため、3 つのローラ幅で転圧を行った。転圧後にコア法で求めた乾燥密度を比較した結果を図 2.1-31 に示す。ローラ幅以外の転圧条件は、敷均し厚さを 200mm、転圧回数を 1 走行レーンあたり 8 回という条件とした。図 2.1-31 には各層 6 か所で測定した平均値を示した。ローラ幅が大きくなると各層の乾燥密度の平均値の分布幅が大きくなる傾向がみられた。各ローラ幅での全平均値を比較すると、ローラ幅 610mm と 710mm では、乾燥密度の平均値はほとんど変わらなかった。710mm と 850mm では、乾燥密度の全平均値は 710mm の方が高かった。

次に、走行レーン数が 2 レーンであるローラ幅 710mm と 850mm の二つの場合について、撒出し・敷均し厚さの違いの影響について述べる。敷均し厚さを 150mm、200mm、250mm、ローラ幅 710mm、850mm で転圧した結果を図 2.1-32 に示す。転圧回数は、管理目標値である 1.60±0.1 Mg/m^3 を満足できる回数とし、ローラ幅 710mm の場合、敷均し厚さ 150mm の時には 4 回、200mm の時は 6 回、250mm の場合は 10 回、ローラ幅 850mm の場合、敷均し厚さによらず全て 8 回であった。

ローラ幅 710mm の結果と 850mm の結果を比較すると、ローラ幅 710mm の場合の方が同一層内での密度分布が小さくなる傾向となった。また、敷均し厚さが大きくなると、同一層内での密度差も大きくなる傾向がみられた。

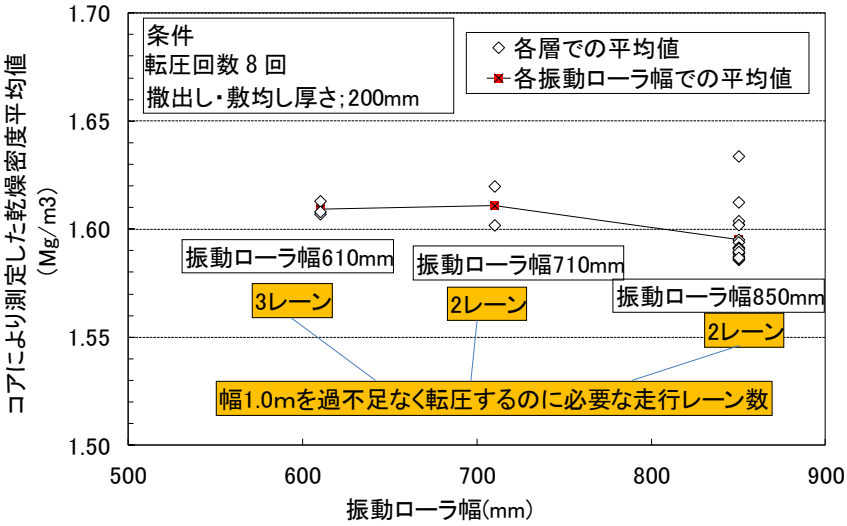
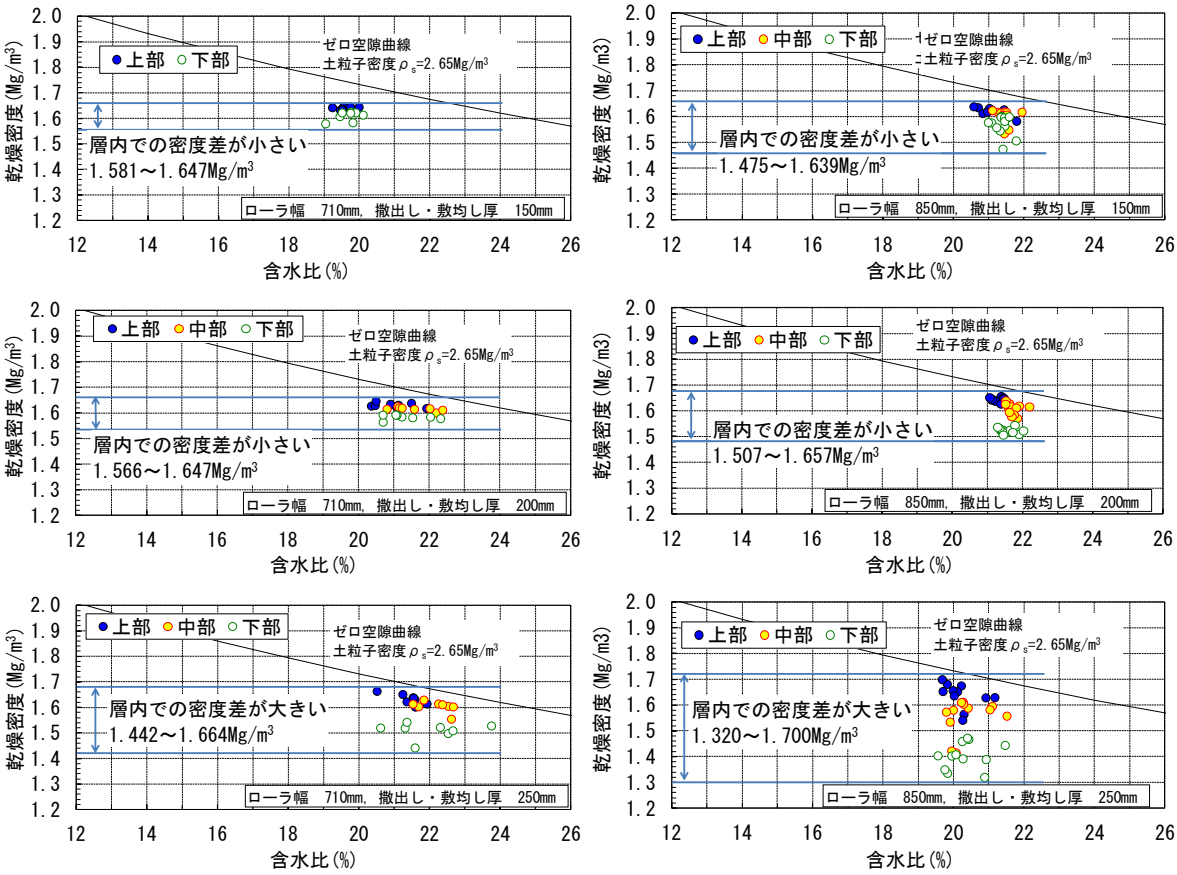


図 2.1-31　各ローラ幅で転圧した後の乾燥密度



(a) ローラ幅 710mm　　(b) ローラ幅 850mm

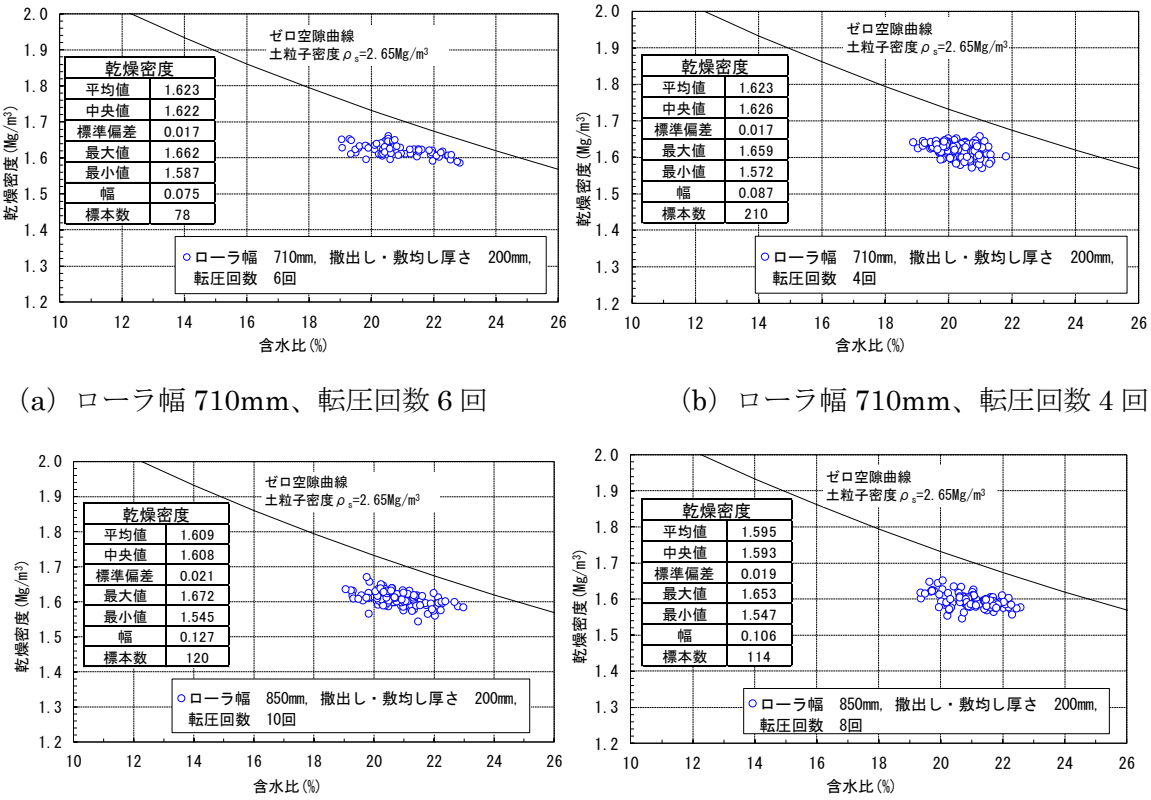
図 2.1-32　層内の乾燥密度の分布図でみたローラ幅 710mm と 850mm の比較

管理目標値を満足することができる転圧回数を把握した後、ローラ幅、敷均し厚さ、転圧回数の条件を固定し、複数の層を施工した時の乾燥密度のばらつきの程度を確認した。

図 2.1-33 にコア法で求めた乾燥密度と含水比の関係を示す。敷均し厚さは 200mm、ローラ幅と転圧回数は 850mm の場合は 10 回と 8 回、710mm の場合は 6 回と 4 回の、計 4

ケースについて検討した。各ケースとも、管理目標値である 1.6±0.1 Mg/m³ を満足することができた。分布幅は管理目標値の幅よりも狭く 0.1 Mg/m³ 程度（±0.05 Mg/m³ 程度）であった。さらに、ローラ幅が 850mm のケースよりは 710mm のケースの方が若干ではあるが、この分布幅は小さくなった。また、転圧回数の違いによる差異はほとんどみられなかった。

含水比と乾燥密度の関係は、締固め曲線に沿うように分布することが予測されたので、締固めエネルギーを変えながら実施した突固めによる土の締固め試験（以下、室内締固め試験）を実施して確認した。図 2.1-34 に室内締固め試験と施工試験結果との比較を示す。室内締固め試験は 1Ec、4.5Ec、15Ec 相当（1Ec≒550 kJ/m³）のエネルギーで締固めた結果を、施工試験結果の代表例として、ローラ幅 710mm、敷均し厚さ 200mm、転圧回数 6 回で転圧したケースのコア法による乾燥密度を示した。施工試験結果は、含水比が小さくなると、乾燥密度は大きくなるように、あるばらつきの幅を持って締固めエネルギー4.5Ec 相当の締固め曲線に沿うような形で分布していることが確認できた。本試験で採用した（含水比調整、敷均しも含めた）施工方法では、室内締固め試験における締固めエネルギーは 4.5Ec に相当すると考えられる。



（a） ローラ幅 710mm、転圧回数 6 回　　（b） ローラ幅 710mm、転圧回数 4 回

（c） ローラ幅 850mm、転圧回数 10 回　　（d） ローラ幅 850mm、転圧回数 8 回

図 2.1-33　含水比と乾燥密度の関係

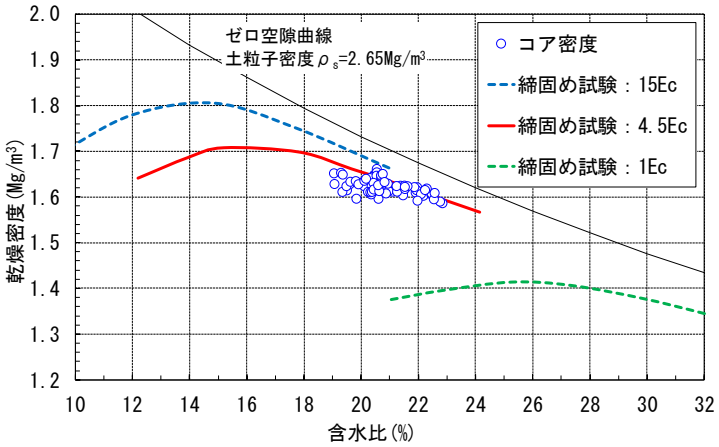


図 2.1-34　含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線と施工試験の比較）

4) 上部緩衝材の転圧工法

上部緩衝材の施工条件は底部緩衝材の施工条件に近いため、底部緩衝材の施工方法や、空洞上部の空間的制限によるダウンサイズした施工機械が転用できる。ダウンサイズ版の施工機械では、敷均し厚さが 200mm に満たないため、100～150mm 程度での施工となる。したがって、その時の転圧時の条件としては、底部緩衝材の時よりも緩くなる。底部や側部で使用した小型振動ローラは敷均し厚さが 200mm で施工が可能であるので、同機械を上部緩衝材の施工に用いるのは可能である。また、これよりも転圧幅が 2～3m 程度と広いが、接地圧が小さく施工能力（締固め性）の劣る汎用的な振動ローラでも敷均し厚さが 100～150mm となれば、所定の品質に施工することは可能であると考えられる。

本試験では、上述の敷均し厚さを踏まえて試験を実施した。ただし、敷均し用のアスファルトフィニッシャのような施工機械は、ピット上部への搬入が不可能であり、施工面積も小さいので、本試験は人力による敷均しとした。また、実際には中型の機械を用いての施工も想定されるが、敷均し機械同様、ピット上部への機械の搬入が困難であるため、本試験では小型振動ローラを用いて施工を行った。

a. 施工方法

本試験では、敷均し厚さは 100mm とし人力で敷均しを行い、転圧機械としては小型振動ローラ（1.5t 級）を用いた。表 2.1-19 に施工条件を示す。敷均し厚さが 100mm であるため仕上がり厚さは約 50mm となる。そこで、施工手順として表 2.1-20 に示す 2 種類の試験を実施し、施工品質の比較を行った。手順 1 は敷均した 1 層ごとに転圧を行い、手順 2 は敷均し 2 層まとめて転圧を行う方法を採用した。その結果、手順 1 の方が施工層内の上下方向での密度差が小さくなるため、基本的には手順 1 で施工を実施した。また、21 層目以降は 20 層目までに比べて施工面積がさらに小さくなるため、敷均し後の初期転圧を小型振動ローラによる無振動転圧とすると施工レーン変更の際に敷均した材料を乱してしまうため、21 層目以降は初期転圧に小型振動ローラ以外の機械を用いることとした。

表 2.1-19　上部緩衝材の施工条件　一覧表

<table>
<tr><th>層</th><th>施工手順</th><th>初期転圧</th><th>本転圧
小型振動ローラ
転圧回数</th><th>備考</th></tr>
<tr><td>1～4</td><td>手順 2</td><td rowspan="3">小型振動ローラ</td><td>4、5、6 回</td><td rowspan="2">施工手順影響
振動ローラ転圧回数</td></tr>
<tr><td>5～8</td><td>手順 1</td><td>2、3、4 回</td></tr>
<tr><td>9～20</td><td rowspan="4">手順 1</td><td>2 回</td><td>一定条件で施工を繰り返
した場合の品質確認</td></tr>
<tr><td>21</td><td>プレートコンパクタ
小型振動ローラ；無振動</td><td>2 回</td><td rowspan="2">初期転圧方法の確認</td></tr>
<tr><td>22</td><td>プレートコンパクタ
バイブロコンパクタ</td><td>2 回</td></tr>
<tr><td>23～40</td><td>プレートコンパクタ
バイブロコンパクタ</td><td>2 回</td><td>一定条件で施工を繰り返
した場合の品質確認</td></tr>
</table>

表 2.1-20　上部緩衝材の敷均し・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 100mm 層厚）	1)第ｎ層、敷均し、人力（約 100mm 層厚）
2) 第ｎ層、予備転圧、無振動転圧（4 回）	2)第ｎ層、予備転圧、無振動転圧（4 回）
3) 第ｎ層、本転圧、振動転圧（2～4 回）	3)第ｎ+1 層、敷均し、人力（約 100mm 層厚）
4) 第ｎ+1 層、敷均し、人力（約 100mm 層厚）	4)第ｎ+1 層、予備転圧、無振動転圧（4 回）
5) 第ｎ+1 層、予備転圧、無振動転圧（4 回）	5)第ｎ、ｎ+1 層、本転圧、振動転圧（4～6 回）
6) 第ｎ+1 層、本転圧、振動転圧（2～4 回）	

b. 施工結果

図 2.1-35 および図 2.1-36 にはコア密度の測定結果を示す。図 2.1-35 はコア密度の含水比と乾燥密度を締固め曲線と比較した結果である。図 2.1-36 は乾燥密度のヒストグラムである。表 2.1-19 に示す 1～20 層目を平成 25 年度に実施し、21 層目～40 層目を平成 26 年度に実施している。平成 25 年度に比べて平成 26 年度の方が材料の含水比が低めであったため含水比は低い側に結果がプロットされているが、密度のばらつきについては、大きな差異はない。平成 25 年度と平成 26 年度で初期転圧の方法に違いがあるが、初期転圧の方法による施工品質の違いには有意な差は無いといえる。

上部緩衝材の転圧施工においても、底部緩衝材や側部緩衝材における施工管理手法を踏襲することが可能であることが分かった。さらに、暫定的に用いた施工機械であっても、十分に管理目標値を満足できることを確認できたので、本確証試験における施工管理手法、すなわち、レベル測量による高さ／層厚管理、投入質量の管理、含水比の管理より、施工した層全体の平均的な乾燥密度をその場で確認し、かつ、実際に施工後の緩衝材から採取したコアを用いて乾燥密度を確認するという、一連の施工管理手法は、どのような施工機械、例えば、汎用的な振動ローラ等を用いても適用できる見通しが得られた。

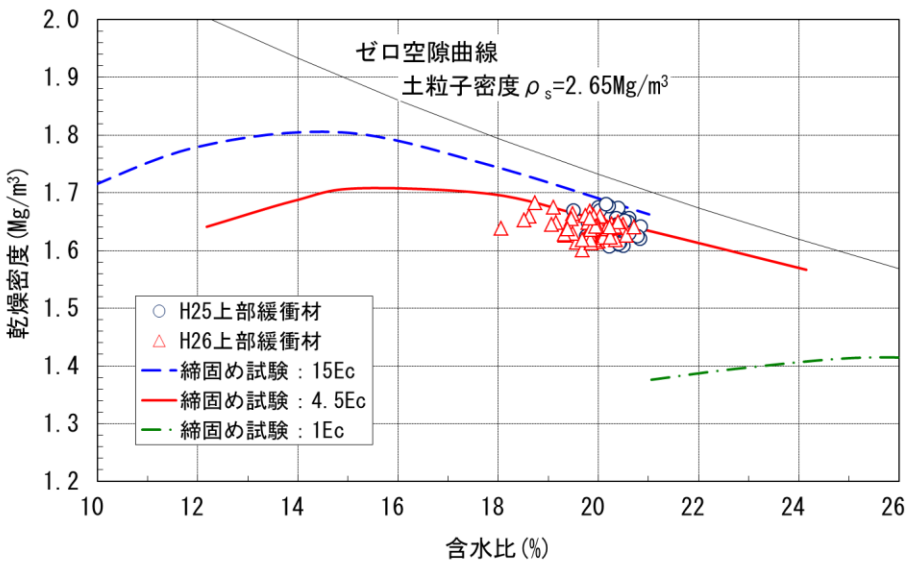


図 2.1-35　上部緩衝材のコア密度の測定結果（全データ）

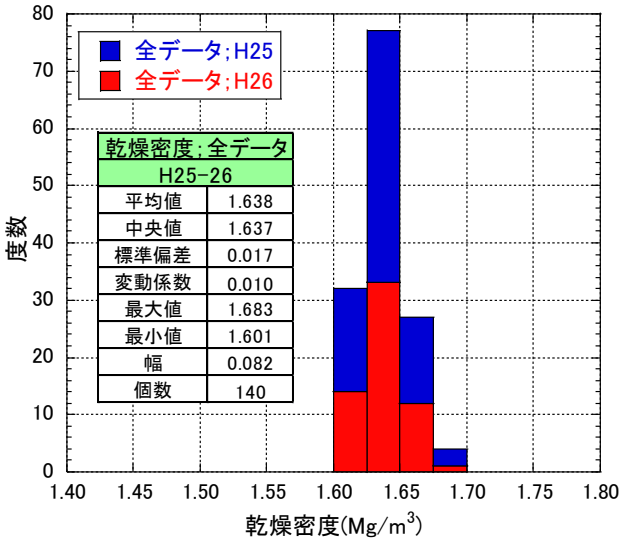


図 2.1-36　上部緩衝材のコア密度測定による乾燥密度の測定結果（全データ）

5) 側部緩衝材・隅角部の吹付け工法

緩衝材のうち、側部緩衝材へ適用可能な工法の一つに吹付け工法があげられる。また、底部緩衝材、上部緩衝材の隅角部は、転圧工法の適用が難しい箇所であり、特に上部緩衝材の隅角部はアーチ天端付近の空頭制限により事実上、転圧工法の適用が不可能である。このような箇所へ適用する施工方法として吹付け工法の適用性について検討を行った。

吹付け工法は、一般的には、ノズルマンがノズルを操作できる空間があれば施工でき、その施工性も施工エリアの形状に大きな影響を受けない。さらに、吹付け機器を据え付けて、吹付けホースを長くすれば、側部緩衝材のような奥まった狭隘部であっても施工可能である。

吹付け工法は、吹付け材料一粒一粒に速度エネルギを与えており、その速度エネルギーを持った粒子は、対象物に衝突する際に発生する衝突圧によって粒子自らが高密度になるものである。土粒子一粒一粒に等価なエネルギーを直接与えているため、吹付けた層内の密度分布は小さくなる特徴を有する。

a. 吹付け工法に用いた材料

吹付け工法の場合、吹付けた材料のうちの 7 割程度の材料が対象箇所に付着せずに、跳ね返る（以下、リバウンド材料）。吹付けた材料の湿潤質量に対するリバウンド材料の湿潤質量割合（以下、リバウンド率）は、最大粒径が大きいほど大きくなる傾向を示す。一方、吹付け材料の最大粒径が小さくなると、吹付けた材料の乾燥密度が小さくなる傾向を示す。そのため、最適な最大粒径を調べた結果、最大粒径が 5mm 程度であれば、吹付け材料とリバウンド材料の粒度分布に大差はなく、吹付けた緩衝材の乾燥密度が管理目標値を超えることが明らかとなった。このため、吹付け材料は最大粒径を 5mm に粒度調整したクニゲル GX を用いた。

b. 吹付け工法の機器構成

施工機器は通常のコンクリート吹付け工で使用する市販機器と同等のドライコンプレッサ、ロータ式吹付け機である。また、これらに加えて、湿潤ベントナイトの定量供給機とリバウンド材料の再利用のための吸引式の回収装置とリバウンド材料の供給機も使用している。

吹付け材料は、前述のように含水比調整した粗粒ベントナイトである。コンクリート吹付けと異なってリバウンド材料は化学反応によって固化することはなく、何度でも再利用可能であり、施工コストの面からも効率的なリバウンド材の再利用は重要な技術課題である。そのため、本工法を狭隘箇所に適用する場合、このリバウンド回収も狭隘箇所に適した方法で実施する必要がある。そこで、本試験では、吸引方式によるリバウンド回収方法を適用して(図 2.1-37)、リバウンド材は、再度、吹付けるために材料供給機に回収した。

図 2.1-38 には余裕深度処分施設における緩衝材構築に向けて選定した本工法の標準機器と機械配置を示す。また、表 2.1-21 には各標準機器の仕様一覧を示す。

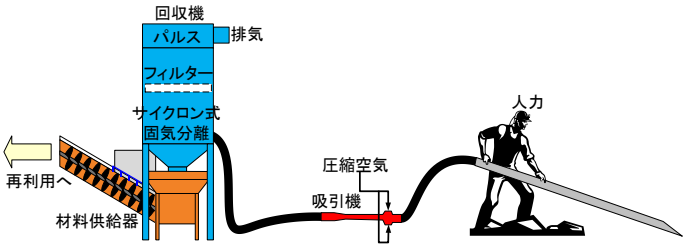


図 2.1-37　吸引方式によるリバウンド材料回収イメージ

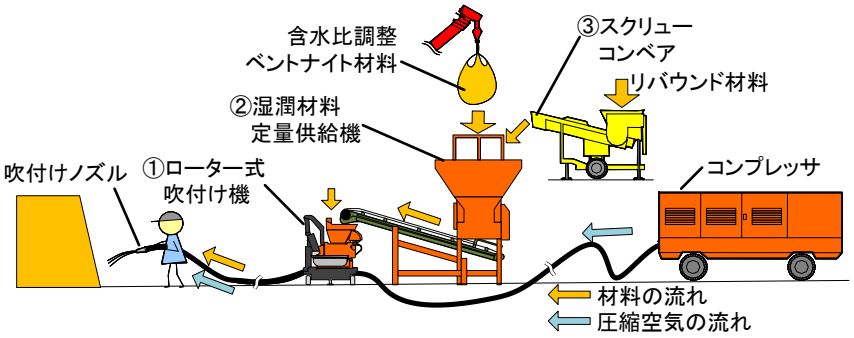


図 2.1-38　本工法の標準機器と機械配置

表 2.1-21　本工法の標準機器仕様一覧（カタログスペック）

材料ホース内径(mm)		50.8
ローター式吹付け機	材料吐出量(m³/hr.)	20
	最大空気圧力(MPa)	0.74
	ロータ回転数(rpm)	30
湿潤材料供給機	材料吐出量(m³/hr.)	4
	回転数（rpm）	10
	ホッパ容積(m³)	1.4
ドライコンプレッサ	吐出圧力(MPa)	0.69
	吐出空気量 m³/分	19.4
	出力(PS)	190

本工法では、これらの汎用的な機器に加え、吹付けノズルとして図 2.1-39 に示すような超音速ノズル(Laval ノズル)を採用している。超音速ノズルとは、ノズル内に内径を部分的に絞ったチョーク部があり、チョーク部の上流側に圧縮部、下流側に拡張部があるノズルの名称であり、圧縮性流体を加速する目的で使用される。このため、ロケットエンジンの噴射口、ジェットバーナ、ジェットミルなどに広く用いられているノズルである。管内を流れてきた圧縮性流体は、圧縮部で圧縮され、且つ速度を速めながらチョーク部に至り、チョーク部で亜音速に達すると圧縮された空気は拡張部で密度を下げながら（体積膨張をしながら）超音速に加速される[17]。このため、吹付け材料の吹付け面への衝突速度が増し、締固め密度が増加する効果がある。

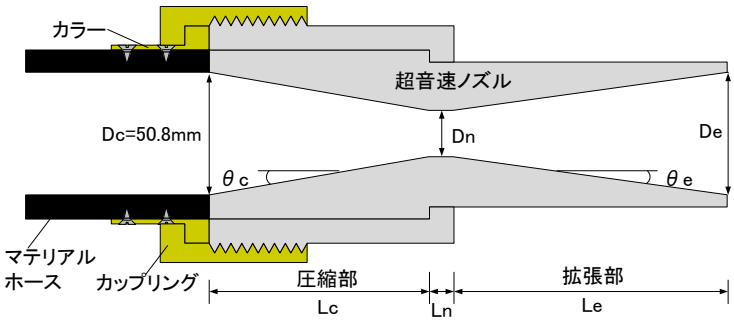


図 2.1-39　超音速ノズルの断面図

c. 吹付けロボットの導入

人力吹付けによる側部緩衝材施工では、人力でノズル操作を行い、吹付け作業と吸引式によるリバウンド材の回収作業を繰り返しながら、奥から手前に吹付け作業を進める必要があった。この吹付け作業の中では、側部緩衝材エリアの狭隘さに起因して、吹付け作業とリバウンド材回収の同時実施が困難、上面型枠設置の手間、人力吹付けによる労働安全上の問題（粉塵、騒音等）などが課題として挙げられた。これらの課題を解決すべく、吊り下げ式の多関節ロボットによる吹付け（モーターで駆動するファクトリーオートメーション（FA）ロボットによる吹付け、以下、ロボット吹付け）の検討を実施した。

吊り下げ式ロボットを導入することにより、高さ方向に緩衝材施工を進めることができるため、施工箇所の下部空間をリバウンド材回収作業に利用することが可能となる。これにより、吹付け作業とリバウンド材回収作業を同時並行で実施することができるため、施工の歩掛り向上を図ることができる。また、上面型枠設置の必要な箇所が最上段のみとなり、設置・解体の手間が省けることも、施工速度の向上に寄与すると期待される。また、ノズル操作を機械化することにより、粉塵・騒音が問題となる吹付け時に施工部近辺に人が立ち入る必要が無くなり、労働安全衛生上の問題の解決と併せて、作業人員削減によるコストダウンにもつながる。

吹付け時のノズル操作を行う吹付けロボットは、安川電機(株)製の 7 関節ロボット MOTOMAN-IA20 である。写真を図 2.1-40 に示す。

本試験では、任意の位置に吹付けロボットを固定して吹付けを行えるよう、専用の吊り下げ治具にロボットを取り付けて使用した。側壁側にローラ、及びゴム板を配備しており、両壁面にローラを押し当てることで姿勢を保持する。上下・奥行き方向への移動はホイストにより行う。本試験中の動作の様子は図 2.1-41 に示す。

ロボット吹付けでは、ノズルワークを事前にプログラミングして入力する必要がある。吹付け工法でリバウンド率を下げるためには、吹付け面に対してノズルの角度が常に直角となるようにすることが最も重要であるため、吹付けロボットのノズルワークでも吹付け面に対してノズルが常に直角となるようにプログラミングした。ただし、このプログラミングでは、一回当たりの吹付け厚を大きくすると、吹付け面に付着したベントナイトが凹凸となってノズルの向きに対して吹付け面が直角とならなくなり、リバウンド率が増加することになる。よって、プログラムでは、ノズルの角度だけでなく、施工途中に凹凸が生

じないようにするために、ノズルの移動速度をなるべく高速にして、薄い層を何度も吹き重ねるノズルワークとした（図 2.1-42 パターン２）。ただし、吹付け面がセメント系材料の場合は、ある程度の吹付け厚さがなければ施工部が剥落するため、通常より厚く施工する必要があることに注意が必要である（図 2.1-42 パターン１）。

本試験で行ったノズルワークでは、上記のノズルワークの工夫によって、全体として施工時のリバウンド率は人力吹付けによる施工でのリバウンド率と同等まで落とすことに成功した。さらに、施工速度は 1.6m³/h となり、人力吹付けの施工速度 1.23m³/h よりも 30%向上させることができた。

(a)上部を吹付け

(b)下部を吹付け

図 2.1-40　吊り下げた状態の吹付けロボット（安川電機(株)製 MOTOMAN-IA20）

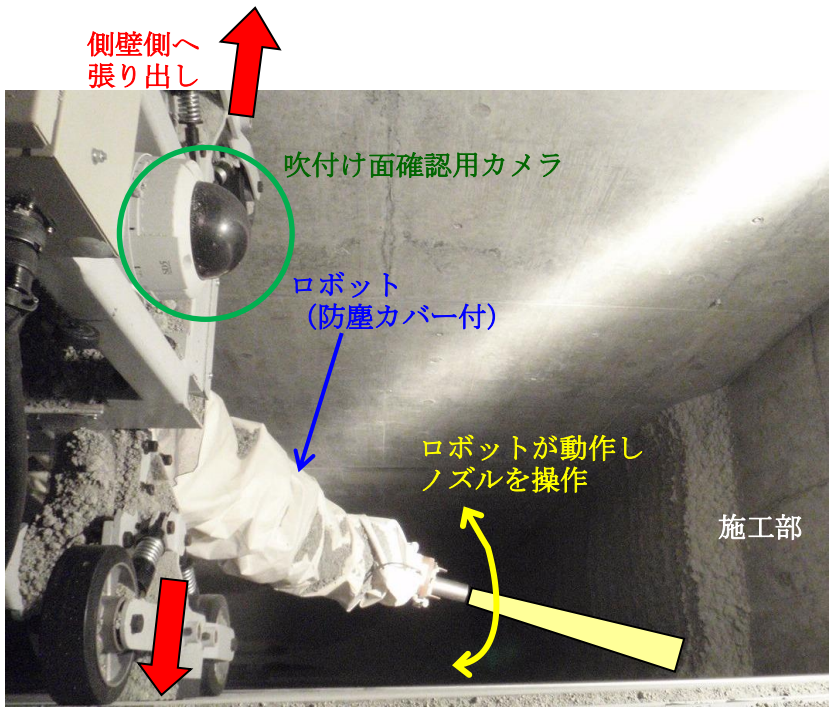


図 2.1-41　試験中の動作の様子

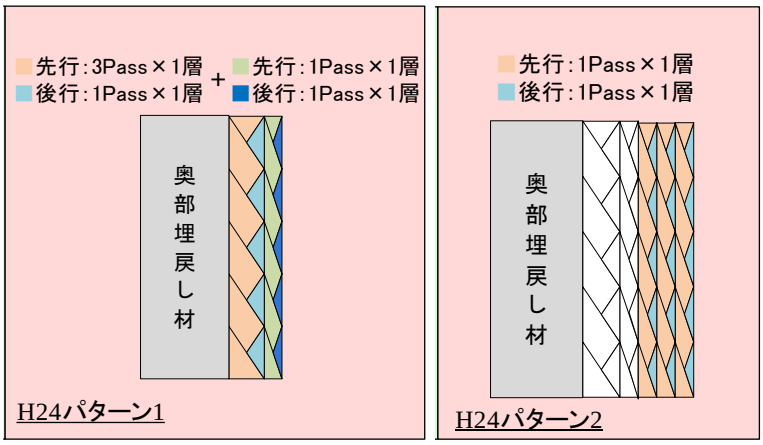


図 2.1-42　セメント系材料への吹付け時（左図）とベントナイト系材料（右図）への吹付け時のノズルワーク

d. 材料供給量による施工管理方法

吹付け工法の場合、吹付けた緩衝材の乾燥密度は、吹付け材料の含水比と供給量によって変化する。そのため、図 2.1-43 に示すような材料供給量と含水比と乾燥密度の関係を施工管理用にチャート化し、材料の含水比に応じて材料供給量を増減させることによって施工した緩衝材が管理目標値を満足するように施工管理を行った。

以下、現場で簡易的に素早く密度を測定する方法（シリコーンオイル法）の適用結果について説明し、その後、含水比調整方法の違いによる影響、リバウンド材の再利用の影響について述べる。そして、最後に図 2.1-43 に示したチャートを用いて施工を行った結果についてまとめる。

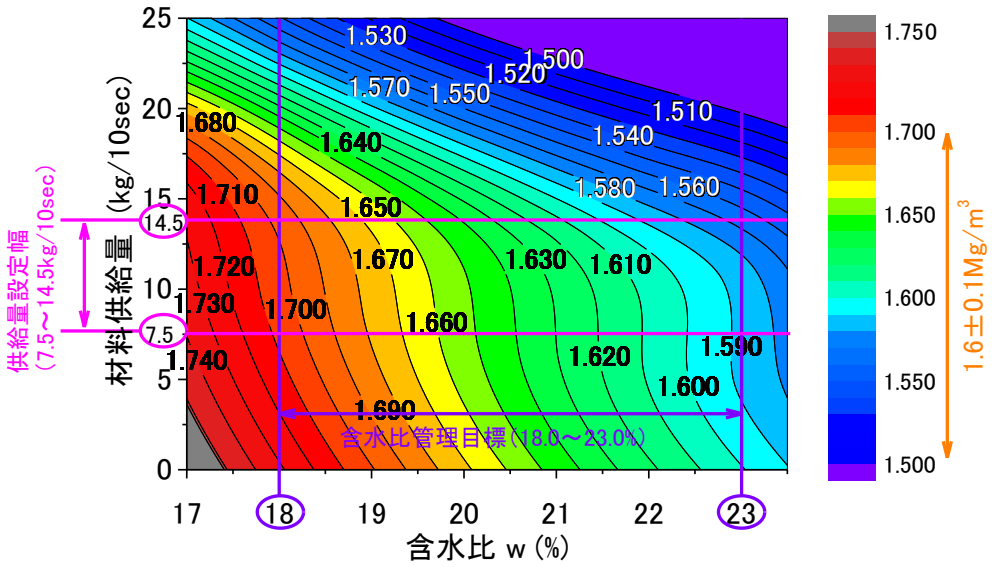


図 2.1-43　材料供給量と含水比による施工管理図

(a) シリコーンオイル法による施工品質管理方法

本試験では、吹き付けた緩衝材の施工時の品質管理をシリコーンオイル法を用いて実施した。このシリコーンオイル法は、締固め土が極性を有する液体に浸漬しても崩れないことを利用したアルキメデス法である。吹付け工法の場合には凸型に吹付けた部位を切り取って、工業製品として密度が保障されているシリコーンオイルに浸けた時の浮力から体積を計測している。凸型に吹付けた部位を切り取れば、サンプリング後の補修が不要である。このシリコーンオイル法と電子レンジ法などによる含水比計測で、施工の歩掛りに影響を及ぼすことなく乾燥密度を測定することが可能となる。図 2.1-43 に乾燥密度確認試験のイメージを示す。

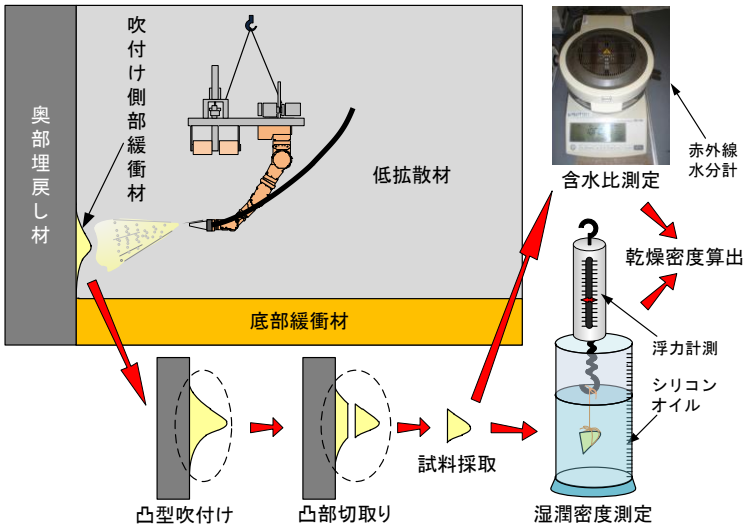


図 2.1-44　吹付け施工時の乾燥密度確認試験イメージ

シリコーンオイル法とノギス法で計測誤差を評価した結果を図 2.1-45 に示す。図から、いずれも管理基準値 1.6±0.1 Mg/m³ の範囲内であり、その差は上限値から下限値までの許容幅 0.200 Mg/m³ に対して、平均で 0.040Mg/m³ の差であることが分かった。シリコー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であることが分かった。

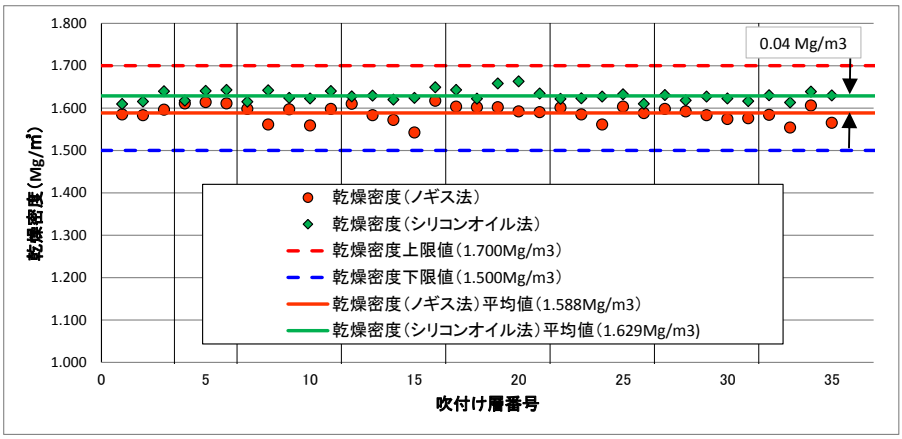


図 2.1-45　乾燥密度の比較

(b)　含水比調整方法の違いによる影響

吹付け工法に使用した材料は、「(1) 含水比調整検討」に述べたように凍結混合方法と水添加混合方法の 2 種類の含水比調整方法を採用して施工を行った。

施工結果として、含水比と乾燥密度の関係を締固め曲線とともにまとめると図 2.1-46 のようになる。図から、水添加混合方法の方が、乾燥密度が高くなっているが、含水比調整方法に依らず、ほとんどの計測点が飽和度 80%線に沿って存在していることが分かる。このことから、両者の乾燥密度の差は含水比の差によるものであり、含水比調整方法が異なっても吹付け材料の含水比が同じであれば同等の乾燥密度が達成可能であることが分かった。

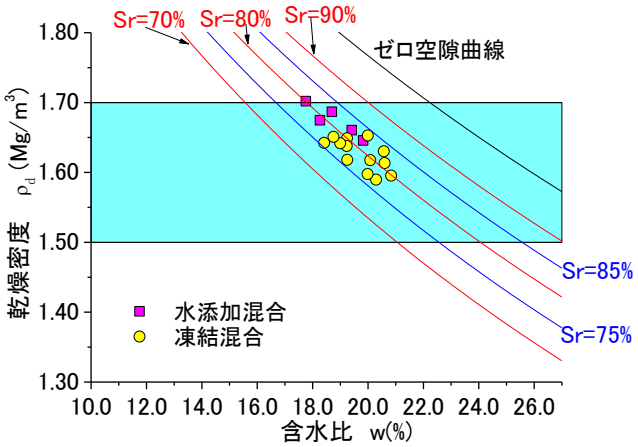


図 2.1-46　凍結混合と水添加混合による吹付け材料の乾燥密度の比較

(c)　リバウンド材の再利用と施工品質

本試験で採用した吸引方式により回収したリバウンド材料は、わずかではあるが材料の含水比が低下する。複数回吹付けられ、また回収されたリバウンド材料は、その回収回数に応じて含水比も低下していく。この含水比の低下に対して、最適な材料供給量を設定できるチャート（図 2.1-43）を用いることにより、図 2.1-45 および図 2.1-47 に示すように、

リバウンド材料の再利用により含水比が若干変動しても、乾燥密度をほぼ一定値に保っていることが分かる。これらの知見から、リバウンド材料を適切に再利用すれば、施工した緩衝材の品質に大きな影響はないと考えられる。

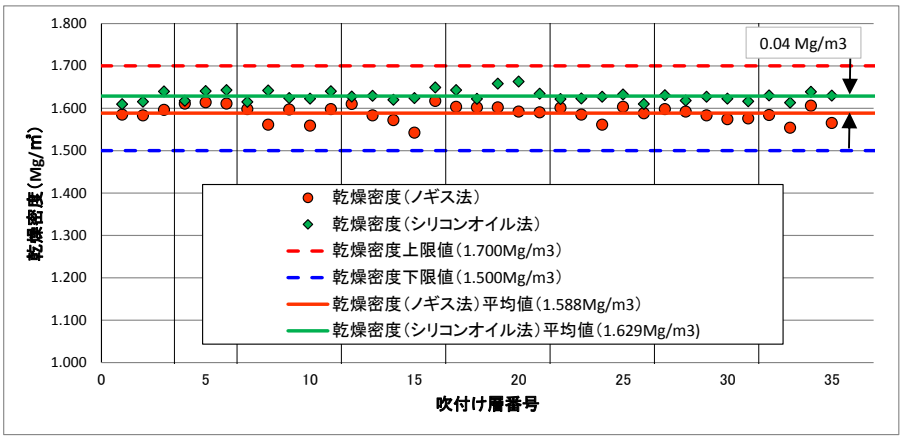


図 2.1 45　乾燥密度の比較（再掲）

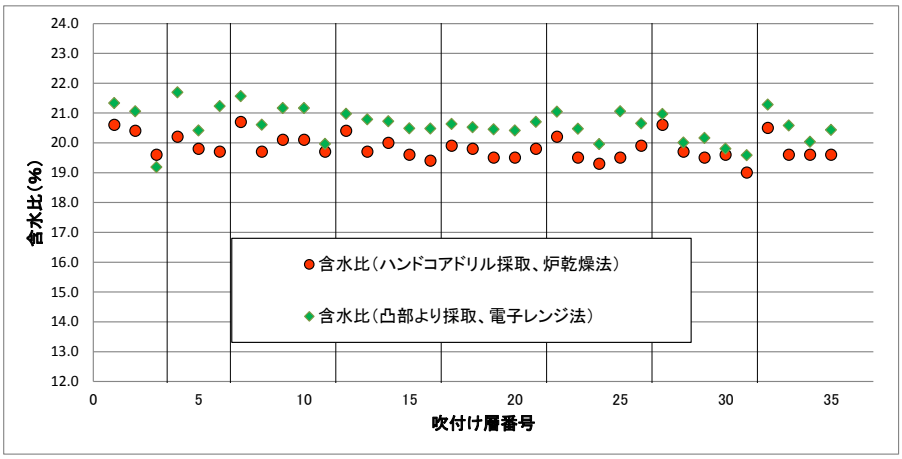


図 2.1-47　リバウンド材の再利用に伴う施工時の含水比の推移

(d) 吹付け工法の施工管理用チャートの適用結果

図 2.1-48 にすべての部位に吹付けた緩衝材の乾燥密度と含水比の関係を示す。図から、乾燥密度のばらつきは含水比のばらつきに起因するもので、全ての部位において飽和度80±5%の範囲にプロットが存在しており、吹付け工法であれば様々な形状の狭隘箇所でも、一定の品質の下で施工が可能であることが分かる。この含水比のばらつきは、含水比調整方法よりもリバウンド材の再利用回数や再利用方法に起因するものであるため、品質を一定に保つためには、含水比の変化に応じた吹付け方法（含水比に応じた材料供給量）が重要となる。

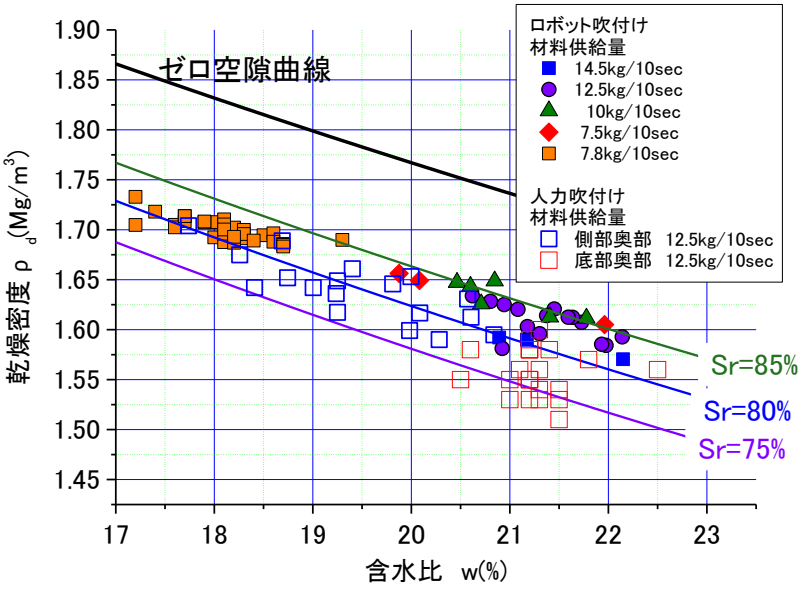


図 2.1-48　含水比と乾燥密度の関係

そのため、図 2.1-43 に示すように、含水比の増減に合わせて材料供給量を増減させて乾燥密度を一定にする方法を構築した。同チャートによって含水比に応じた適切な材料供給量を選定することで、乾燥密度をほぼ一定にできることが分かる。図 2.1-49 には、再利用による材料の乾燥に応じて、材料供給量を増加させて密度を一定に保つべく施工を行った結果を示す。所期の目的どおり、ほぼ一定の乾燥密度が得られ、狭隘部における緩衝材の施工は、吹付け工法によって均質に施工できることが分かった。

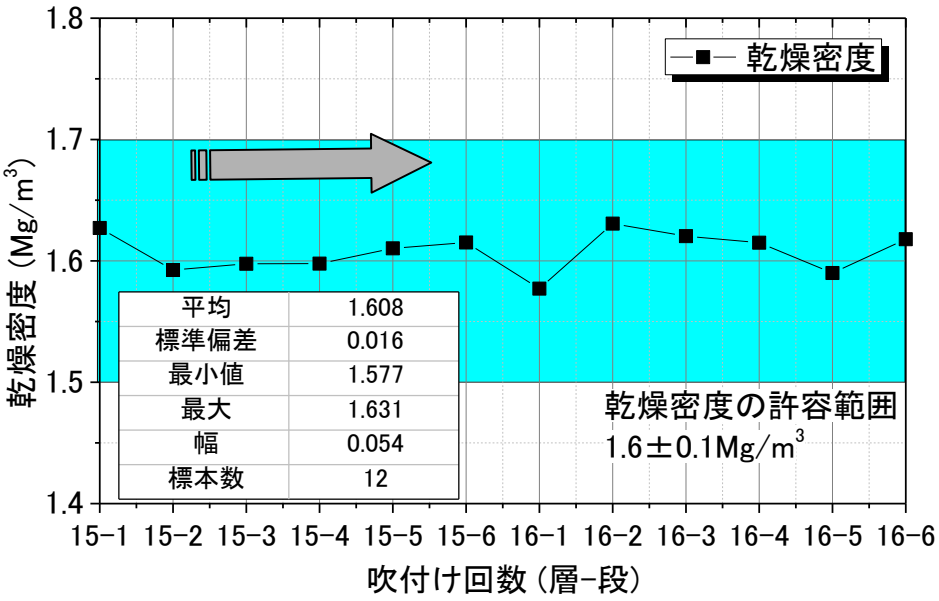


図 2.1-49　密度一定吹付け（15、16 層目）の吹付け回数と乾燥密度の関係

(3) 初期性能の検討

1) 初期性能確認試験項目

緩衝材の初期性能確認試験で実施した試験項目を要求機能と対応する形式で表 2.1-22 で整理した。初期性能確認試験は緩衝材の主たる要求機能である移行抑制（低透水性）および力学的安定性の確保に係わるデータの他、副次的な要求機能に関わるデータや設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得を目的とした試験も実施した。

表 2.1-22　緩衝材の初期性能確認試験項目

機能			段階	機能の説明	試験項目																		
					力学特性				収着	透水	透水への影響因子							拡散	長期力学安定性		化学安定性	諸特性	
					一軸圧縮強度試験	三軸圧縮強度試験	平板載荷試験	クリープ試験	間隙水pH測定	透水試験	乾燥密度試験	含水比試験	メチレンブルー吸着量	交換性陽イオン測定	膨潤力試験	塑性限界試験	粒度試験	拡散試験	圧密試験	膨潤圧試験	鉱物塑性組成	熱伝導率試験	膨潤圧発生に伴う吸水量測定
要求機能	基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射線物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること						○		○	○	○		○	○						
		遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと																			
		移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移動を抑制すること														○				○	
				放射性核種を収着すること					○														
				低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと						○	○	○	○	○	○	○	○			○			
	操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	○	○	○	○															
材料物性			設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得																○	○	○	○	○

緩衝材の設計仕様項目に関わる施工直後の初期性能の確認にあたって、既往の研究による各設計仕様項目に関する知見を整理した。その上で、施工確認試験での現場施工コアを用いた室内試験結果に基づいて以下の事項を確認した。

- 各設計仕様項目の初期性能が所定の品質を確保できていること
- 施工確認試験での原位置から採取した供試体による試験結果を、試験室で製作した供試体を用いた既往データと比較し、室内成型によるデータが実際に処分施設を設計・施工する際の検討材料となり得ること
- 異なる施工方法（転圧（大型、小型）、吹付け）により施工された緩衝材の初期性能に大きな差はないこと

2) 既往試験の初期性能

既往の研究で、室内成型で作成した供試体による試験が行われている。緩衝材の透水特性に関わる設計仕様項目として透水係数および膨潤圧、力学特性に関わる設計仕様項目として一軸圧縮強度および変形係数に関する知見を以下に述べる。

既往データによる室内成型で作成した供試体による透水試験結果から得られた透水係数と乾燥密度の関係を図 2.1-50 に示す。乾燥密度は透水係数と相関性が高いことが示されており、乾燥密度が間接的に透水特性を推定できるパラメータであるといえる。膨潤圧試験結果による膨潤圧と乾燥密度の関係を図 2.1-51 に示す。膨潤圧についても乾燥密度との相関性が確認されている。

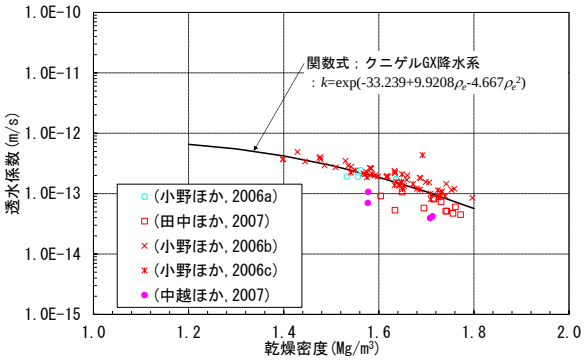


図 2.1-50　透水係数と乾燥密度の関係（既往データ）

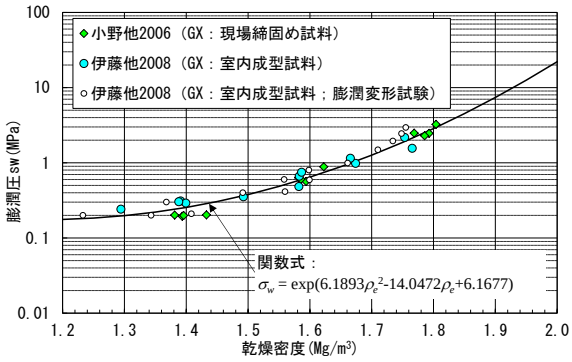


図 2.1-51　膨潤圧と乾燥密度の関係（既往データ）

力学特性に関わる一軸圧縮強度、変形係数は、含水比、乾燥密度をパラメータとして室内試験が実施されており、既往データによる試験結果を図 2.1-52～図 2.1-55 に示す。一軸圧縮強度は含水比の増加に伴い低下し、乾燥密度の増加に伴い増加する傾向となっている。変形係数についても同様の傾向が確認されており、一軸圧縮挙度、変形係数が含水比、乾燥密度と高い相関性を示すといえる。

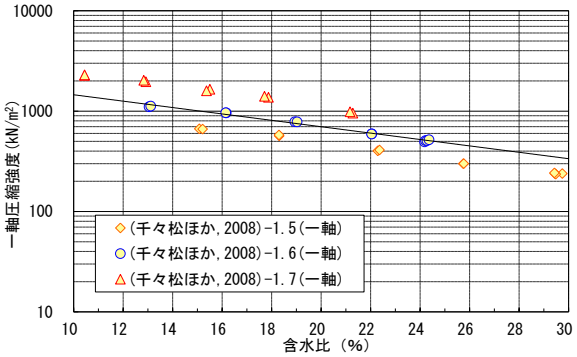


図 2.1-52　一軸圧縮強度と含水比の関係
（既往データ）

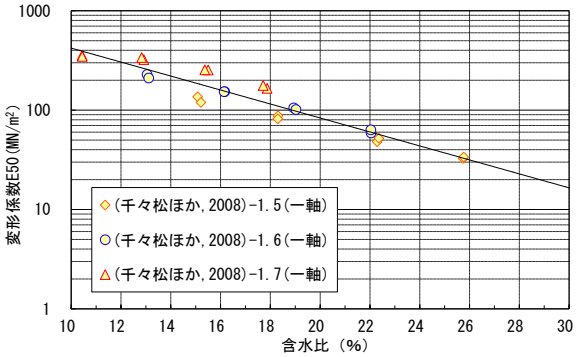


図 2.1-53　変形係数と含水比の関係
（既往データ）

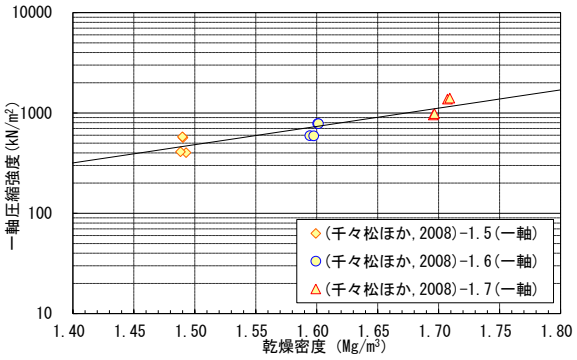


図 2.1-54　一軸圧縮強度と乾燥密度の関係
（既往データ）

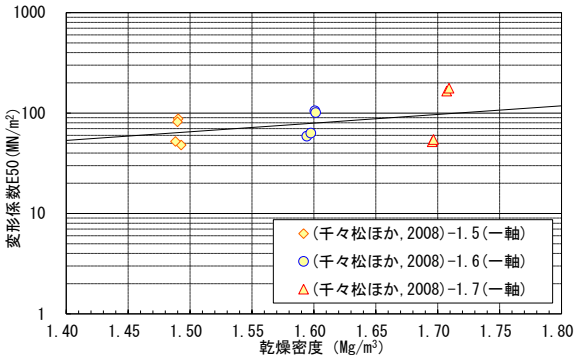


図 2.1-55　変形係数と乾燥密度の関係
（既往データ）

3) 初期性能確認

緩衝材の技術要件と初期性能確認試験との関係を表 2.1-23 に示す。各年度、各部位において施工試験後の原位置から採取した試料を用いて表 2.1-23 に示す各室内試験を実施した。（H26 年度初期性能確認試験結果を用いて更新）

表 2.1-23　技術要件に対応する初期性能確認試験

技術要件	初期性能確認試験方法	
透水特性	JIS A 1218 に準拠	透水試験
	JIS A 1225	乾燥密度測定
	JIS A 1217 に準拠	膨潤圧試験
力学特性	JIS A 1216	一軸圧縮強度試験

a. 透水特性

透水特性に関わる設計仕様項目である透水係数と膨潤圧について、現場施工コアを用いた試験結果を以下に述べる。

(a) 透水係数

透水試験は、施工直後の原位置から採取した試料を用いて定圧透水試験を実施した。透水試験の結果に基づいて、透水係数と乾燥密度の関係を整理した。試験結果を図 2.1-56 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データを併示した。また、図に示す近似式は既往データより同定した。

原位置から採取した試料による透水係数は、5×10^{-13}m/sec 以下を満足する結果が得られており、目標とした品質が確保されていることを確認できた。

原位置採取試料による透水係数は、若干ばらつくものの既往データと同様に乾燥密度との間に相関性が認められ、既往データの傾向と比較的良く整合した結果である。したがって、室内成型で作成した供試体を用いた透水試験の結果でも、実際に処分施設を設計・施工する際の検討材料として活用できると考えられる。

また、原位置採取試料は各部位のデータを集約したもので、大型・小型振動ローラによる転圧工法および吹付け工法と異なる施工方法での試験結果である。異なる施工方法で施工しても透水係数と乾燥密度の相関性が確認できることから、施工方法の違いにより透水係数に大きな差は無いといえる。

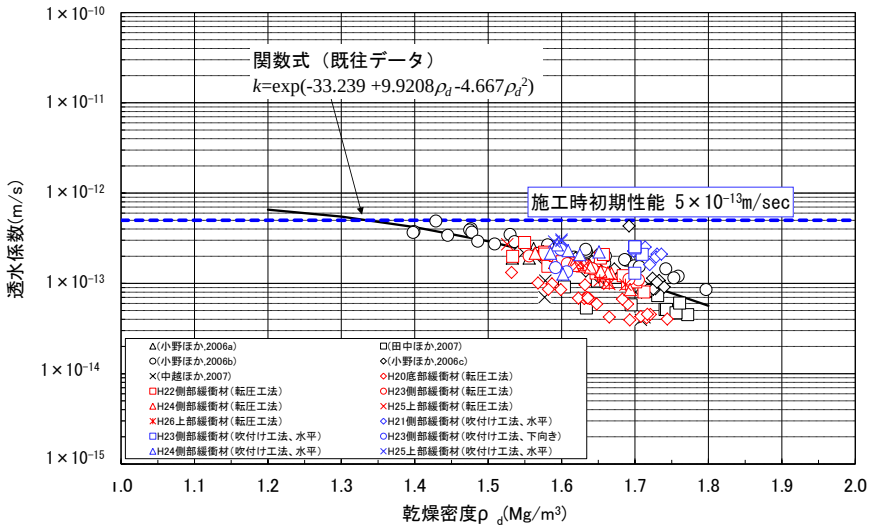


図 2.1-56 透水係数と乾燥密度の関係

(b) 膨潤圧

膨潤圧は、ベントナイト系材料が吸水・浸潤したときの膨潤変形を拘束し、定体積状態にするのに必要な圧力である。膨潤圧試験は、供試体を定体積状態となるように試験装置にセットし、浸潤させることにより発生する荷重を測定するものである。

施工直後の原位置から採取した試料を用いて室内膨潤圧試験を実施した。膨潤圧試験の結果に基づいて、膨潤圧と乾燥密度の関係を整理した。試験結果を図 2.1-57 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データを併示した。また、図に示す近似式は既往データより同定した。

膨潤圧試験に関しても、既往データと同様に膨潤圧と乾燥密度との良好な相関性が確認できた。すなわち、室内成型で作成した供試体を用いた膨潤圧試験結果も実際の処分施設設計・施工時の検討材料として活用でき、施工方法（大型・小型振動ローラ、吹付け）の違いにより膨潤圧に大きな差は無いと考えられる。

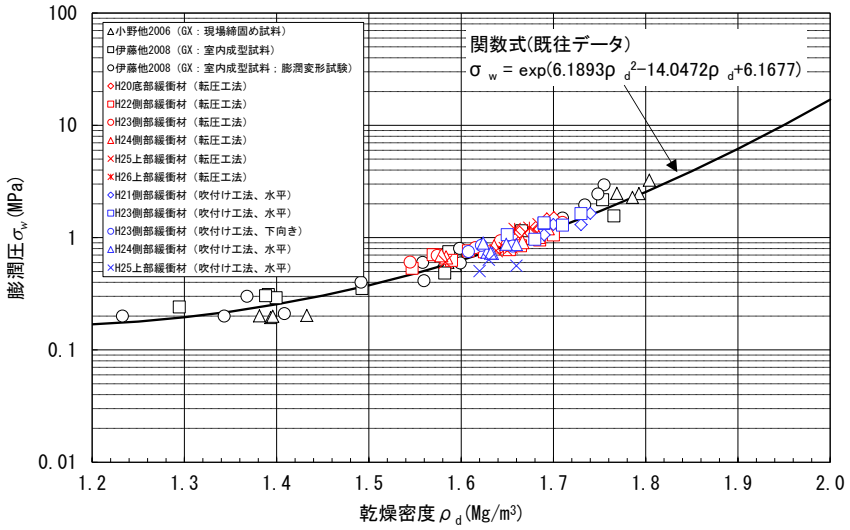


図 2.1-57 膨潤圧と乾燥密度の関係

b. 力学特性

力学特性に関わる設計仕様項目である一軸圧縮強度と変形係数について、現場施工コアを用いた試験結果を以下に述べる。

施工直後の原位置から採取した試料を用いた一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強度と含水比の関係を図 2.1-58 に、変形係数と含水比の関係を図 2.1-59 に、一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を図 2.1-60 に、変形係数と乾燥密度の関係を図 2.1-61 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データを併示した。図中の直線は既往データから求めた近似曲線である。

既往データに原位置採取試料のデータを加えたものでも、一軸圧縮強度は含水比の増加に伴い低下し、乾燥密度の増加に伴い増加する傾向となっている。変形係数についても同様な傾向となった。

現場採取試料による一軸圧縮強度は、含水比、乾燥密度と相関性があり、既往データと整合する傾向を示している。一方、変形係数は含水比、乾燥密度と相関性があるものの、既往データより小さい側でばらつく傾向が認められる。室内で成型したコアは乾燥密度が均一になるように締固め（高さ方向を 5 分割して圧縮成型）を行うのに対して、

現場採取のコアは層内上下方向にある程度の密度分布があることから、締固めの差によって試験結果に差が生じた可能性がある。しかし、多少の差があるものの、ある程度の相関性が確保されていることから、本試験結果で明らかとなった締固め方法による差に留意すれば、室内成型で作成した供試体を用いた一軸圧縮試験結果も実際の処分施設設計・施工時の検討材料として活用できると考えられる。

大型振動ローラ、小型振動ローラによる転圧工法、吹付け工法とそれぞれで行った施工箇所の試験データによる差は小さいことから、施工方法の違いにより一軸圧縮強度、変形係数に大きな差は無いといえる。

操業上の力学的安定性を満足する力学特性が確保されているかの確認として、一軸圧縮強度と上載荷重との比較を行った。図 2.1-60 の既往データと確証試験データを合わせたデータより求めた近似式（q_u=0.7805exp（4.1867 ρ_d））を用いて、乾燥密度の管理基準値（1.6±0.1Mg/m^3）の範囲での一軸圧縮強度を求めると、417～963kN/m^2 となる。底部緩衝材に作用する上載荷重は、現時点（平成 26 年度終了時）において 188kN/m^2 であり、一軸圧縮強度と比べて小さいことから、力学特性に関して所定の品質を確保できたといえる。

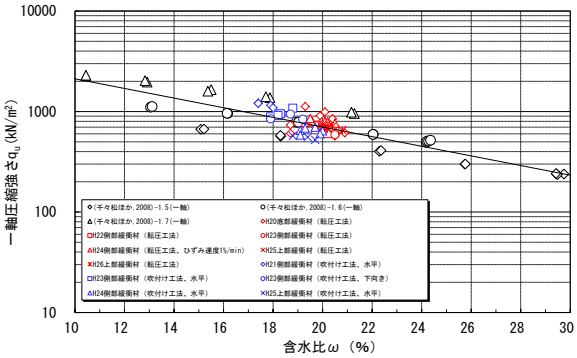


図 2.1-58　一軸圧縮強度と含水比の関係

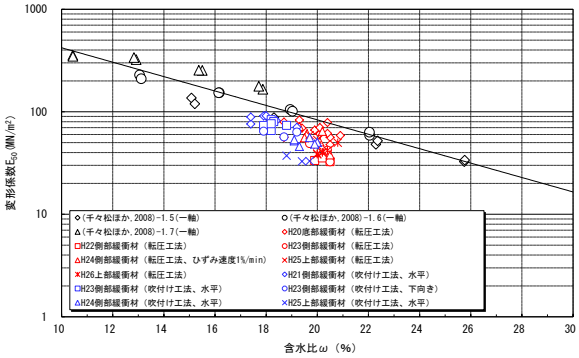


図 2.1-59　変形係数と含水比の関係

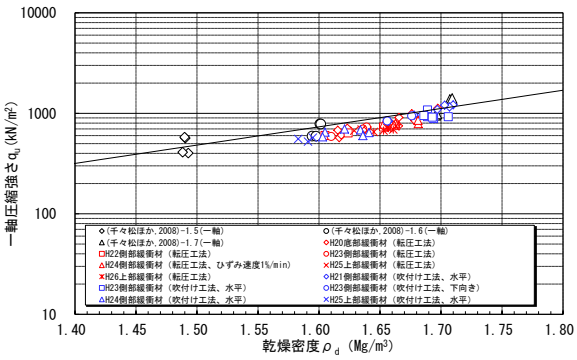


図 2.1-60　一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

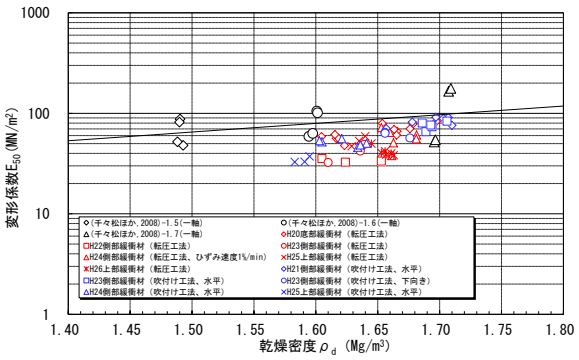


図 2.1-61　変形係数と乾燥密度の関係

2.1.5 まとめと今後の検討課題

(1) 課題に対する照査

本試験の目的は、原位置における実規模での施工試験を通して、緩衝材に使用するベントナイト材料の含水比を適切に調整できることの確認、低透水性や力学性能を損なうような欠陥を生じさせず、均質な部材を構築するための施工が可能であることの確認と、構築後の部材の初期性能の確認を行うことである。本試験の課題に対する照査の結果を以下にまとめる。

1) 含水比調整検討

材料の管理項目である含水比を均質に調整する方法について検討した。施工前の含水比調整の精度は施工後の乾燥密度の精度に影響を及ぼすため、含水比調整の精度を確保することは重要である。検討の結果、ペレガイヤミキサやアイリッヒミキサ等の高性能のバッチ式ミキサを用いれば含水比調整が所定の品質で実施できることを確認した。また、吹付工法への適用を想定した凍結混合法による含水比調整も、確証試験で基本としている水添加法と同等の品質が確保できることを確認し、適用可能であり、含水比調整方法としての選択肢が広がったといえる。

2) 施工検討

緩衝材の最適な施工方法は、緩衝材の施工条件などによって異なるため、施工部位ごとに施工検討を行い、その適用性を確認した。施工部位は、底部緩衝材、側部緩衝材、上部緩衝材であり、いずれも一般部と隅角部を有している。施工方法は振動転圧工法と吹付け工法である。検討の結果、いずれの部位においても所定の品質で施工できることを明らかにした。

振動転圧工法においては、施工部位により使用できる施工機械が異なるが、施工機械に応じた施工仕様を設定することにより、いずれの施工機械でも所定の品質で施工できることを確認した。また、敷均し厚さや転圧回数を調整することにより、施工後の品質（施工層の密度分布）を調整できることも明らかにした。さらに、施工終了後の出来形データを取得して、実規模レベルでの施工による仕上がり厚さ、不陸の程度に関する知見を得た（底部緩衝材における部材厚の設計値との差は±0.05m 程度）。底部緩衝材の施工誤差は、後続する部材の施工に影響を与えることから、実施工においては各部材の施工誤差・ばらつきを考慮した部材設計が必要であり、本試験の結果は人工バリア設計を行う上で貴重なデータとしての活用が期待される。

吹付工法は狭隘な空間における緩衝材施工への適用を想定して、底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部において人力、およびロボット施工による施工試験を行った。含水比と材料供給量を制御する密度管理方法の適用性を検討した結果、い

ずれの部位においても所定の品質を満足しており、吹付工法による実規模レベルでの施工実現性を確立した。

緩衝材に要求される品質が将来的に変わる場合でも、その品質に応じて適切に施工仕様（敷均し厚さ、転圧回数、材料供給量、コンプレッサー流量、吹付け距離）を設定すればこれらを管理することによって、所定の品質を満足することが可能であると示唆された。

3) 初期性能の検討

実際の地下環境下で施工した緩衝材から採取した試料を用いた初期性能試験を実施した。緩衝材の主な要求機能である移行抑制（低透水性）に関わる管理項目である透水係数は、試験の結果、初期性能として期待する管理目標値 5×10^{-13}m/s を満足する結果を得た。また、透水係数の他、膨潤圧、強度・変形係数の各値は室内で圧縮整形された供試体を用いた既往試験の結果と同等であることを確認した。したがって、これまでの室内試験レベルでのデータも実構造物の設計・評価に用いることが可能であると判断できる。

(2) 本プロジェクトの成果

緩衝材の確証試験においては、既存の施工方法のうち実規模での施工性に優れ、施工の成立性を本試験で実証しておく必要があるものとして転圧工法および吹付工法を選定し、これらを適用した試験を行った。試験の結果、いずれの工法でも緩衝材に要求される水準の品質で部材を構築可能であることを明らかにした。

転圧工法では本節で取り上げた施工方法の組み合わせ（ミキサ混合による含水比調整、施工場所に応じて適用した大型・小型振動ローラ）により、実際の地下環境下で敷均し、締固めと一連の施工工程が実規模で実現可能であることを実証した。また、吹付工法においては、転圧工法で施工が困難な狭隘部に対する適用性が十分あること、また実規模施工への適用に当たっての品質管理方法の確立ができたと考えられる。

以下に、施工技術の各項目における特筆すべき成果についてまとめる。

1) 含水比調整検討

- 確証試験では、比較的大量の材料の含水比を高性能のバッチ式機械を用いて調整した。含水比調整を精度良く実施する上で初期含水比の設定が重要であるが、施工工程を踏まえるとどの程度の頻度で初期含水比を設定するかによって品質が変動する可能性があった。本試験では、使用する材料の初期含水比に対する水添加量の設定方法について、三つの方法で設定する方法で実施し、方法毎に現れるばらつきの程度を把握できた。
- 凍結混合方式による含水比調整技術は、冷却したベントナイトと微粉砕氷を粉体状態で混ぜるという新しい発想から誕生したユニークな技術である。本確証試験において、この技術を実規模レベルの施工を想定した大量の材料の含水比調整に適用し、その適用性を確認できたことは特筆に値する。

2) 施工検討

a. 転圧工法

- 余裕深度処分施設を構成する緩衝材はその部位によって空間的な制約があり、適用可能な機械を選定した上で施工を行わなければならない。底部、側部、上部の各部位に対して適切な施工機械を選定し、緩衝材に要求される品質を確保でき得る施工仕様を設定の上、一連の施工工程を踏まえた実規模の施工試験を行った本確証試験の成果は今後、余裕深度処分施設の緩衝材の設計・施工の検討を行う上で貴重なデータとなり得るものである。
- 確証試験は、既存の機械を適用することを前提で実施した。転圧に用いる大型・小型振動ローラ、底部緩衝材の敷均しに適用するアスファルトフィニッシャは既存技術であり、要求される精度で施工が可能であることを明らかにした。一方、側部緩衝材の敷均しに対しては、狭隘な施工空間に適用する既存の機械がないため、確証試験において敷均し機械を開発して、実環境下の敷均しへ適用した。また、課題とされた材料供給に対しても、ピット上部から供給する方式を採用した。本確証試験は限られた範囲の施工であるため、その適用性については検討の余地が残されているものの、今後の詳細な施工検討を行う上で実施工のモデルとして十分活用できる知見であると考えられる。

b. 吹付け工法

- これまで、放射性廃棄物処分施設の施工に関わる検討で、吹付け工法はベントナイト系埋戻し材の施工を対象として行われてきた。これに対して、確証試験では、その吹付け工法を緩衝材の施工方法として実規模試験に初めて適用し、緩衝材の仕様である乾燥密度 1.6±0.1Mg/m^3 を達成可能であることを明らかにした。本確証試験で吹付工法の緩衝材への適用が示されて以降、ヨーロッパの幾つかの国々で、追従して吹付けによる緩衝材施工の試みがなされており、本確証試験の成果は、世界的にも吹付けによる緩衝材施工の先駆けであり、国内外の処分分野に大きな影響を与えたといえる。
- 緩衝材のような高密度の締固め土の施工は、非常に大きな力が要求され、従来、大きな力の載荷が可能な油圧式機械が用いられてきた。しかしながら、吹付け施工では、土粒子一粒一粒に速度エネルギーを与えるという施工原理から、小さな反力でも高密度を達成可能である。確証試験では、これまで非力なために土工には適用されていないモーターで駆動するファクトリーオートメーション（FA）ロボットを吹付け施工に適用した。FA ロボットによる吹付け施工のためにリバウンドの少ないノズルワークを適用し、人力吹付けよりもリバウンド率を低減したこと、ロボット施工による安全衛生上の環境改善、作業人員削減、および施工速度の向上を改善した成果は、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分をはじめ、TRU 廃棄物処分の共通的基盤技術として吹付工法を適用する際の知見として幅広く反映できるものと考えられる。

3) 初期性能の検討

- 施工後の初期性能の確認により、各部位で異なる施工方法による施工で部材を構築した結果、適切な施工仕様を定めた施工によって緩衝材の各部位の初期性能に有意な差が生じないこと、室内にて製作した供試体を用いた初期性能と原位置施工後の初期性能の値が整合した結果は、今後同様な規模の試験実施の可能性が少ないことを踏まえると、緩衝材の設計・施工の計画を進める上で貴重なデータとなりうるものである。

(3) 今後の検討課題

1) 含水比調整検討

- 確証試験の含水比調整はバッチ式の機械を用いて行った。実際の施工においては、ベントナイト必要量がさらに大量となるため、効率化の観点から連続式の機械を用いた含水比調整が必要になると想定される。既往の検討[7]で高性能の連続式機械を用いた検討も行われているが、小型の機械の適用に限られており、製造量も少ない。大型の連続式機械を用いて大量製造する検討を行うことが今後望まれる。

2) 施工検討

a. 転圧工法

- 緩衝材の実施工において、施工効率化の観点から重要となるのは材料の供給方法である。大量の材料をいかに施工ヤードに運搬するか、特に、側部緩衝材の施工においては、効率的な施工ヤードへの材料の運搬方法および敷均し機への材料の供給方法が検討課題である。
- 確証試験では底部、側部、上部の各部位において敷均し、初期転圧、本転圧と手順を踏まえて施工を実施した。実施工において施工ヤードが広くなると、施工の効率化の観点から並行作業を実施することも考えられる。その場合の施工方法や施工手順の検討、施工品質の確認方法の検討も今後必要と考えられる。

b. 吹付工法

- 確証試験における吹付工法の圧送距離は最大で 20m 程度であったが、実際の施工条件を考えると、施工可能な圧送距離を取得しておくことが重要である。圧送距離をパラメータとした施工確認の実施が望まれる。
- 確証試験では吹付け施工の管理方法として、材料供給量と含水比と乾燥密度の関係を管理図として整理した。施工品質の向上を目指して、この管理図の精緻化を図る必要がある。さらに、同手法をベントナイト混合土の施工に適用することで、ベントナイト系埋戻し材の施工品質の向上に役立つものと考えられる。
- 人力吹付けから FA ロボット化するなどの改善により施工速度を 1.5 ㎥/h 程度まで増加させることができた。これは、市販の吹付け施工機器を用いた場合の値であり、今後、コン

プレッサの風量の増加、材料供給量の増加、マテリアルホース径の拡大、吹付け機器の大型化などを行えば、施工速度のさらなる改善が見込まれる。

参考文献

[1]（社）土木学会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008 年 6 月、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（2008).

[2] 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　地層処分の工学的技術, JNC TN1400 99-022, p.Ⅳ-77～Ⅳ-80，1999

[3]雨宮清、中越章雄、茂呂吉司、千々松正和、工藤康二、田中幸久、山崎直、庭瀬一仁、小松進一：ベントナイト原鉱の締固め特性に関する検討－種々の材料に対する室内試験結果－、第 58 回年次学術講演会講演概要集、土木学会、CS7-018、pp.313-314、2003

[4] 土木学会: 余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方. 49-98(2009).

[5]京谷：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況、第 60 回土木学会年次学術講演会研究討論会資料　研-08、2005 年 9 月

[6] 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（2005).

[7] 工藤康二、田中幸久、雨宮清、中越章雄、茂呂吉司、千々松正和、辻建二、庭瀬一仁、小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験、土木学会第 59 回年次学術講演会、CS1-050、pp.99-100 (2004).

[8] 村上利一、谷智之、中越章雄、千々松正和、吉越一郎：余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討、第 62 回年次学術講演会講演概要集、土木学会、CS5-003、2007

[9]Ichizo KOBAYASHI, Masaru TOIDA, Makoto NAKAJIMA, Toshiyuki, TANAKA, Kenji TERADA, Katsumi NONAKA and Junichi YABE: Development of construction methods of the bentonite engineered barrier by the high-density shotclay system, Proceedings of workshop on long-term performance of smectitic clays embedding canisters with highly radioactive waste, 2007.

[10] 伊藤弘志、千々松正和、村上利一：ベントナイト層の現場施工用材料の開発、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS5-001 (2007)

[11]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、CS5-002 (2007).

[12]工藤康二，田中幸久，雨宮清，中越章雄，茂呂吉司，千々松正和，辻建二，庭瀬一仁，小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，CS1- 050，p.99～100，2003

[13]石原輝行、五十嵐孝文、藤原斉郁、村上利一、谷智之：余裕深度処分における底部ベントナイト層の現場施工に関する検討（その 1）－大型重機による施工の成立性と品質管理－、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS5-004(2007).

[14]村上利一、谷智之、中越章雄、千々松正和、吉越一郎：余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討

[15]吉越一郎、千々松正和、中越章雄、庭瀬一仁、谷智之：ベントナイトブロックの製作・施工に関する検討、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS5-006(2007).

[16]石井、青木他：放射性廃棄物処分施設の高密度ベントナイト転圧方法の検討、平成 17 年度土木学会西部支部研究発表会(2006)

[17] J. Conrad Crown : Supersonic nozzle design, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Technical Note No.1651 (1948).

2.2　低拡散材

2.2.1　実施概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.2-1[1]に示す。セメント系材料からなる部材には充てん材、コンクリートピットおよび低拡散材がある。低拡散材はセメント系材料からなる部材の最も外側、緩衝材に接して配置される計画である。

低拡散材は底部、側部、上部の 3 部位によって構成される。本試験においては、底部低拡散材は幅 11.55m×奥行き 16.1m、側部低拡散材は高さ 7.64m×奥行き 11.4m、上部低拡散材は幅 11.55m×奥行き 8.0m である。各部位の厚さはいずれも 0.6m である。

本試験で構築した低拡散材の配置を図 2.2-2 に示す。

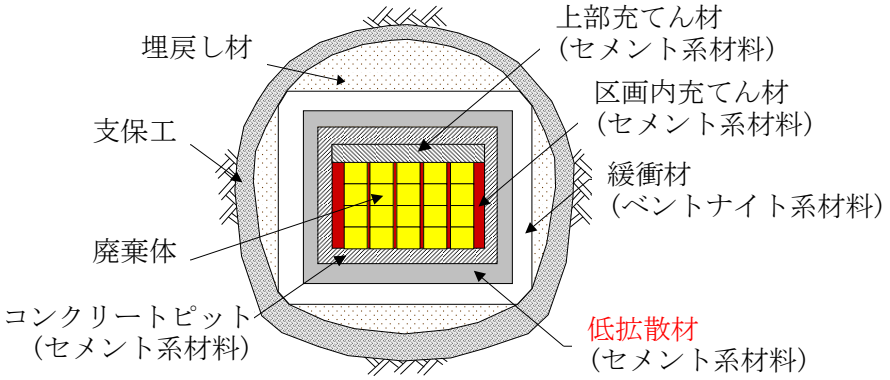


図 2.2-1　地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正）[1]

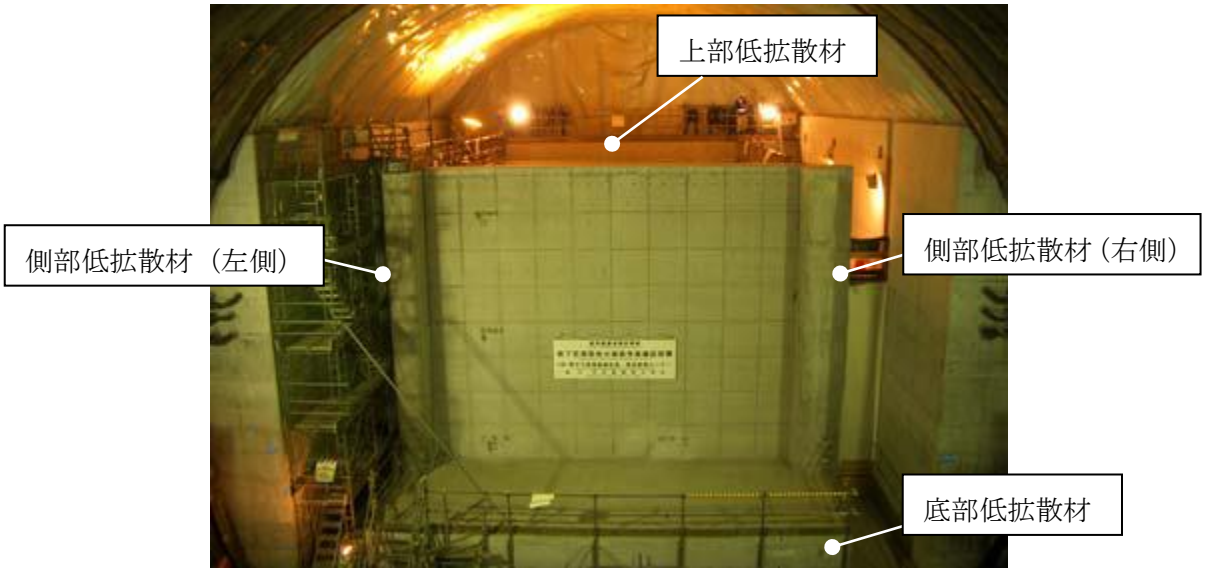


図 2.2-2　本試験における低拡散材の配置

低拡散材は放射性核種の拡散による移行を抑制すること（低拡散性）を主たる要求機能とし、核種移行の遅延を図る部材である。低拡散材は異物による水みちの発生を防ぐため鉄筋や骨材

を廃し、無筋のモルタル造となっている。低拡散材には、拡散係数の小さい緻密な材料であること、および施設全体としての拡散抑制機能が低下しないように、ひび割れの発生やセメントの溶脱を抑制する材料であることが求められる。

本確証試験においては、拡散抑制機能を満足し、ひび割れの制御効果や充てん性が期待できる材料・配合を選定した後に、実規模の施工試験を行い出来形やひび割れ発生状況および初期性能等を確認することで、適用した施工方法の妥当性や成立性を評価すること、および要求機能が確保できることを確証することを目的とした。セメントの溶脱を抑制するには、初期の品質を緻密かつ均質にすることでセメントマトリックスを構成する水和物そのものも溶解しにくいものとすることが重要である。また、このことは、低拡散性の向上につながることでもあるので、「拡散抑制機能を満足し、ひび割れの制御効果や充てん性が期待できる材料・配合を選定」することで、解決できると考えられる。したがって、本確証試験では、セメント溶脱に関する検討は、そのような配合を選定することとした。

本確証試験における主な成果の概要を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1　低拡散材の主な成果の概要

項目	成果概要
低拡散性	低拡散性、充てん性およびひび割れの制御効果を確保した材料・配合を選定し、実規模試験で構築した部材から採取したコアを用いた定常拡散試験法（室内でトリチウムを用いて測定）を行った結果、拡散係数は $10^{-13}m^2/s$ オーダーと極めて低い拡散性（管理目標値 $1.0\times10^{-12}m^2/s$ 以下）を達成できることを確認した。
充てん性	本試験で採用した低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動モルタルは、良好な流動性を示し、部材の端部まで充てん可能であった。
型枠設計	低拡散材に対する型枠は要求機能上、異物による水みちの発生を防ぐため、セパレータを使用しない方法を確立した。
打込み時の側圧	打込み時の側圧に関するデータを取得した。打込み時の側圧は、打込み開始から約 1 時間 20 分までは液圧で作用し、最大で 70kPa 程度であった。この知見は、型枠の設計・施工の合理化に向けて活用できるものである。
ひび割れ発生状況	ひび割れは低熱ポルトランドセメントや膨張材等の効果によって制御され、低拡散材全体についても、ひび割れ開口部表面積比率が 0.011%以下という、高い品質を有していることを確認した。 なお、低拡散材に生じたひび割れは、温度、乾燥および隣接部材の拘束の影響を受けて発生したものと考えられる。材齢 10 日程度の水和熱による温度ひび割れは、膨張材等の効果により十分制御されたと考えられる。

2.2.2　基本条件の設定

(1)　要求機能と技術要件

余裕深度処分施設は要求機能に応じた様々な部材で構成されている。低拡散材に求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[2]）において基本安全機能のうち「遮へい」、「移行抑制（低拡散性、核種収着）」、操業上の機能として「空間・力学安定性」が示されている。本試験においては、第 1 章に記載のとおり、「移行抑制」のうち“放射性核種の拡散による移行を抑制すること（低拡散性）”を低拡散材の主たる要求機能として設定した（表 2.2-2）。

既往の検討（土木学会、2009[2]）では、「低拡散性」を確保するための技術要件として「拡散特性」をあげている。低拡散材の設計においては、放射性物質の移行が移流より拡散が卓越する緩衝材の内側で、拡散による放射性物質の移行抑制を図る“低拡散性の確保”が求められる。したがって、本試験においても既往の検討と同様に「拡散特性」を技術要件として設定した。

表 2.2-2　低拡散材の要求機能（土木学会、2009[2]を改変）

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏洩を防止すること	－	－
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有すること	○	放射線の遮へい性能
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	●	拡散特性
			放射性核種を収着すること	○	核種収着性
			低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	－	－
			連続した地下水移行経路を形成しないこと	－	－
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	－	－
操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学安定性が確保されること	○	力学特性
			坑道の形状を維持すること	－	－

●：主に期待する機能として設計段階から考慮する機能

○：設計段階においては考慮しないが、付帯的に考慮する機能として、特性値を取得する機能

(2)　設計仕様項目

低拡散材の技術要件「拡散特性」を検討する上で重要度が高い設計仕様項目として、実効拡散係数、部材厚さおよびひび割れ開口面積を設定した（表 2.2-3）。

本試験では、低拡散材の健全部において、低拡散性が担保されていることを確認する指標となる実効拡散係数を設計仕様項目として設定することとした。一方で、ひび割れを有する部位の拡散影響評価式は、健全部の拡散係数とともに、部材厚さおよびひび割れの開口面積によって支配されることが示されている[3]。そこで、部材厚さおよびひび割れの開口面積についても、本試験における設計仕様項目として設定することとした。なお、既往の検討（土木学会、2009[2]）では拡散特性に対する設計仕様項目として“鉱物組成”を取り上げている。しかしながら、“鉱物組成”は使用した材料の特性に関わるものであり、施工により管理できる項目ではないことから、本試験では設計仕様項目からは除外することとした。

表 2.2-3　低拡散材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

要求機能		段階	技術要件	設計仕様項目
基本安全機能	移行抑制（拡散抑制）	埋戻し後	拡散特性	・実効拡散係数
				・部材厚さ
				・ひび割れ開口面積

(3)　管理項目および管理目標値

前述した設計仕様項目について、本試験における低拡散材の管理項目および管理目標値を設定した。設定した管理項目および管理目標値を表 2.2-4 に示す。

設計仕様項目のうち、実効拡散係数および部材厚さを管理項目として管理目標値を設定した。ひび割れ開口面積については、施工後の部材に対して実施するひび割れ観察をもって確認を行うものであるが、実環境下・実規模で構築する部材でのひび割れ発生程度を確認することが確証試験での課題であること、現時点で具体的な管理目標値を定めることは困難であることを考慮して、管理項目としては選定しないものとした。

ここで、拡散係数は、試験の性質上、施工時に直接管理することが困難である。そこで、拡散係数と相関があり、比較的現場に即応できる管理項目（第 1 次代替特性）として空隙率を設定した。ただし、この空隙率も、セメントの硬化後に測定するものであり、現場におけるセメント打込み時の管理項目としては不適切である。そこで、セメント系材料の拡散係数および空隙率は、施工方法よりも主に材料配合によって決定されるという考えのもと、施工時に管理可能な管理項目（第 2 次代替特性）として単位水量、水結合材比および単位容積質量を設定した。実際の施工管理では、別途材料配合検討によって選定された配合条件に誤差が生じないよう、製造時に計量精度を管理することとした。

以上の管理項目に対して設定した管理目標値は表 2.2-4 に示すとおりである。このうち、実効拡散係数の管理目標値は、第 1 章に記載した初期性能の目標値 1×10^{-12} m²/s 以下である。

また、代替特性の管理目標値は、試験・検討の途上にあることから、今後、更なるデータの蓄積を行い、検討することと位置付けた。なお、表 2.2-4 中では、代替特性については暫定的に設定したものという扱いで、（　）書きで記載した。

表 2.2-4　低拡散材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
移行抑制 (拡散抑制)	実効拡散係数	1.0×10^{-12}m²/s 以下	
	空隙率	（約 17%）	実効拡散係数の第 1 次代替特性
	単位水量	（241kg/m³ 以下）	実効拡散係数の第 2 次代替特性 （施工管理基準値 （日常管理値））
	水結合材比	（46.6%以下）	
	単位容積質量	（2,241kg/m³ 以上）	
	ひび割れ開口面積	－	
	部材厚さ	0.6m （ -5mm 以上 +15mm 以下）	

2.2.3　確証試験の課題と実施内容

(1)　確証試験の課題

低拡散材では、主な要求機能である所定の低拡散性を満足する材料を選定すること、および低拡散性を損なうような欠陥を生じさせず、緻密で均質な部材を構築するための施工方法を確認することを目的とし、以下の考え方で検討を実施した。

まず、低拡散材の材料として、基本設計において低拡散性の確保および施工の良否による品質低下リスクの低減、すなわち作業時における締固め不足等の人為的な施工不良に起因する局所的な不均質性を排除するためにも、自己充てん性が求められた。そのため、高流動モルタル配合を基本配合として採用した。その上で、流動性および材料分離抵抗性、ひび割れ制御効果などを満足する配合を選定する必要があった。

次に、要求機能を確保する上で阻害要因となる事象・条件について事前検討した。検討結果を以下に列記する。

- 低拡散材では長期耐久性の観点から、低拡散性の弱部になると考えられる打継目を、できるだけ設けないように、底部・側部・上部の各部位ごとに一度に打込むこととした。また、水みちを生じさせる可能性のある鉄筋やセパレータ等の鋼材は配置できない。セパレータを用いずに無筋モルタル部材を一度に構築した事例はないため、これまでの設計や施工計画の実現性を確認する必要があった。
- 処分施設は複数の部材からなる複合構造体であり、低拡散材の打込み後には、隣接するコンクリートピットからの外部拘束により、ひび割れの発生が懸念された。

上述の考え方を踏まえて、施工の成立性や要求機能の確保を確認する上で、考慮すべき課題を検討項目と関連付けて整理した。低拡散材確証試験の課題と課題に対する対応を表 2.2-5 に示す。課題は要求機能、技術要件、設計仕様項目および管理項目（管理目標値）と対応する形式でまとめた。検討項目は、材料および配合の選定（材料検討）、選定された材料および配合が、対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうかを確認するための検討（施工検討）、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）に分類した。

表 2.2-5　低拡散材の検討課題の一覧

要求機能	技術要件	設計仕様項目	管理項目	管理目標値	検討項目	課題	課題に対する対応
拡散抑制	拡散特性	実効拡散係数	実効拡散係数	1.0×10^{-12}m^2/s 以下	材料検討（低拡散性の確保） 施工検討（品質の確認） 初期性能の検討	【配合選定】 緻密な材料・配合を選定し、期待する初期性能を満足すること	・低拡散性に優れた材料・配合を選定
			(代替特性) 空隙率 単位水量 水結合材比 単位容積質量	約 17% 241kg/m^3 以下 46.6%以下 2,241kg/m^3 以上			・単位水量、水結合材比、単位容積質量による品質の確認 ・施工後のコア採取、拡散試験による拡散性能の評価
		部材厚さ	部材厚さ	0.6m（-5mm 以上+15mm 以下）	施工検討 （型枠設計）	【型枠組立て】 腐食が懸念される鉄筋等の鋼材を配置しない施工方法が要求される。側部低拡散材において、セパレータを使用しない型枠組立てによる施工で部材厚さを確保すること	・施工後の出来型の確認 ・打込み時の側圧の計測および評価
		ひび割れ開口面積	－	－	材料検討	【配合選定】 低拡散性の機能低下を抑制するため、ひび割れの発生が少ない材料とすること	・温度ひび割れの発生の可能性を低減した材料・配合の選定
			－	－	施工検討	【既設部材による外部拘束】 周辺部材の拘束が大きい環境での施工でひび割れ発生が懸念される。実規模試験でのひび割れの発生の程度の確認が必要である	・ひび割れ開口面積に関するデータ取得および評価
		［要求機能を確保する上で求められる施工性］ 各設計仕様項目共通	－	－	材料検討・施工検討	【低拡散性を確保する施工方法】 低拡散性の弱点となる打継目をできるだけ設けないように、部位ごとに一括打込みが要求される。ポンプ圧送時の流動性や材料分離抵抗性を確保した施工方法が必要である。	・充てん性・流動性に優れた配合の設定 ・ポンプ圧送時の充てん性を評価

(2)　実施内容

前述の「(1)　確証試験の課題」に示した課題に対する対応と、確証試験における実施内容を表 2.2-6 に整理した。実施内容の詳細および試験結果については「確証試験結果」で個別に述べる。

表 2.2-6　低拡散材確証試験の課題に対する対応と実施内容

検討項目	課題に対する対応	実施内容
材料検討	・ 低拡散性に優れ、温度ひび割れ発生の可能性を低減し、充てん性・流動性に優れた材料・配合を選定	既往の検討で提案されている材料・配合を基本配合とし、低拡散性の確保、ひび割れの抑制、流動性と材料分離抵抗性の確保等の観点から、配合修正を実施した。その後、石灰石微粉末の混和率に着目した低コスト化を志向するための配合試験を実施した。
施工検討	・ セパレータを使用しない型枠による施工の実施 ・ 打込み時の側圧の計測実施	鋼管およびパイプサポート等の支保部材を型枠の外側に配置する施工方法を適用し、施工精度を確認した。また、打込み時の側圧を計測し、液圧として作用する時間等のデータを取得した。
	・ ポンプ圧送時の充てん性を評価	打込み時の現地フレッシュ性状の確認ならびに打込み時の流動勾配に関わるデータの取得・分析により部位ごとの流動性、充てん性を評価した。
	・ ひび割れ開口面積に関するデータ取得および評価	施工終了後、部材表面のひび割れ観察を実施し、ひび割れ展開図を作成した。ひび割れ開口面積を算出してひび割れの発生程度を評価した。
初期性能確認	・ 施工後のコア採取、拡散試験による拡散性能の評価	施工終了後、各部位よりコアを採取し、室内でトリチウムを用いた定常拡散試験法を実施し、拡散係数を測定した。

2.2.4　確証試験結果

(1)　材料検討

1)　材料・配合仕様の設定

a.　既往の検討

土木学会では、低拡散材の要求機能として、放射線の遮へい、低拡散性、放射性核種の収着、空間・力学安定性を設定しており、これに対する設計仕様項目として、乾燥単位容積質量、部材厚さ、実効拡散係数、ひび割れの開口面積、収着分配係数、鉱物組成、および圧縮強度を設定している[2]。また、これらの設計仕様項目に対し、低拡散材の使用材料として表 2.2-7 を用いた高流動モルタルとすることを示している。

高流動モルタル配合とされている理由は以下のとおりである。一般に、コンクリート中の粗骨材の周辺に形成される遷移帯は、物質の移動経路になることで拡散係数を増大させる。このことから、低拡散材の配合には、遷移帯の影響を低減する目的で、モルタル配合が選定されている。また、流動性やブリーディングの低減および材料分離抵抗性の向上による、また、人為的な施工不良に起因する局所的な不均質性を排除するための自己充てん性による、品質低下のリスクを低減させる目的で、石灰石微粉末を用いた粉体系の高流動モルタルが選定されている。

ひび割れの制御に対しては、膨張材を添加し、結合材は低熱ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用いることで、温度ひび割れの発生の可能性を低減した配合となっている。

表 2.2-7　低拡散材の使用材料（土木学会）[2]

材料	概要
セメント	低熱ポルトランドセメント
骨材	細骨材：石灰砕砂
混和材料	フライアッシュ
	膨張材
	石灰石微粉末
	高性能 AE 減水剤

b.　基本設計

本試験では、上述した既往の検討で選定された材料および配合を基本として、低コスト化を志向し、表 2.2-8 に示す方針で配合設計を実施した。セメント、混和材に用いる材料は、本試験の主な要求機能である移行抑制（低拡散性）や長期安定性等の性能確保の観点から既往の検討[2]を踏襲した。

また、他の既往の検討[3]では、空隙率の低減を目的に水結合材比を 45%程度とし、ポゾラン反応による緻密化や比較的溶解速度の速い水酸化カルシウムが低減することで、拡散係数やベントナイトへの高アルカリ影響の改善が期待できることより、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%程度添加した結合材としている。本研究でも、これらの値を踏襲することとした。

低拡散材に用いる高流動モルタル室内配合選定に関する既往の検討[4]において、空気量が小さくなるとともに圧縮強度が増加し、拡散係数が小さくなることを確認して空気量を 2.5%に設定しており、その配合でのスランプフローは 65±5cm である。本試験ではこれらの知見を参照して空気量、スランプフローを表 2.2-8 のように設定した。

表 2.2-8　本試験における低拡散材の基本配合設計

分類	項目	概要
材料	セメント	低熱ポルトランドセメント
	混和材	フライアッシュⅡ種
		石灰石微粉末
	細骨材	石灰砕砂
	混和剤	高性能 AE 減水剤
配合	水結合材比	45%
	空気量	2.5±1.5%
	スランプ	高流動モルタル スランプフロー65±5cm

c.　室内試験における配合の選定

(a)　配合検討方針

先に述べたように、本試験では既往の検討[3]を踏襲し、水結合材比を 45%程度とし、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%程度添加した結合材を用いた。これに石灰石微粉末を加えた粉末系の高流動モルタルとして配合の検討を行った。

本試験において対象とする高流動モルタルでは、特に充てん性・流動性、さらにポンプ圧送時のポンパビリティや材料分離抵抗性（以下、施工性とする）が課題となる。一般の高流動コンクリートでは、粗骨材とモルタルの分離抵抗性を付与する目的で、石灰石微粉末を用いる場合が多い。そこで、本試験においても、この石灰石微粉末の特性を活用することとし、混和率（細骨材置換）を設定するため、材料分離抵抗性の指標をブリーディング、施工性の指標をＶ漏斗流下時間として評価した。なお、側部低拡散材で用いる石灰石微粉末については、底部低拡散材で用いた石灰石微粉末と密度や比表面積が同等の品質を有し、産地からの運搬距離が短いものを用いることとした。また、細骨材についても、既往の検討で用いられたものと密度等の品質が同等であり、産地から生コンプラントまでの運搬距離が短いものを用いることとした。

(b)　室内試験による評価

本試験では、石灰石微粉末の混和率（LP/B）をパラメータとして、ブリーディング率、Ｖ漏斗流下時間、スランプフロー、圧縮強度を評価し、選定配合を決定した。室内試験結果を図 2.2-3～図 2.2-6 に示す。

図 2.2-3 より、石灰石微粉末混和率の増加とともに、概ね収束に向かい、ブリーディング率の低下効果が大きくならないことが分かる。図 2.2-4 より、漏斗流下時間は、石灰石微粉末混和率とは強い相関が見られないものの、混和率が 45%で最小となった。図 2.2-5 より、スランプフローは、石灰石微粉末混和率の増加とともに増大し、混和率 50%で最大となった。図 2.2-6 より、圧縮強度は、石灰石微粉末量の増加とともに、緩やかに増加する傾向が見られた。

以上の結果より、石灰石微粉末混和率の増加に伴うブリーディング率の低下は、混和率 45%付近で一定値になること、また、Ｖ漏斗流下時間とスランプフローも混和率 45%前後で極値を示す様子が確認されたことから、低拡散材の配合としては、施工時の流動性、充てん性、および材料分離抵抗性を考慮し、石灰石微粉末の混和率を 45%とした配合を選定することとした。

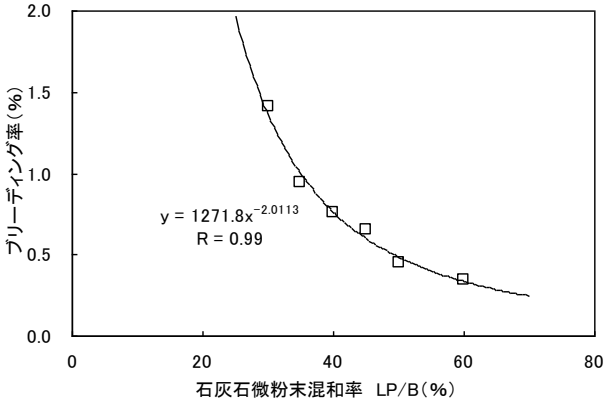


図 2.2-3　ブリーディング

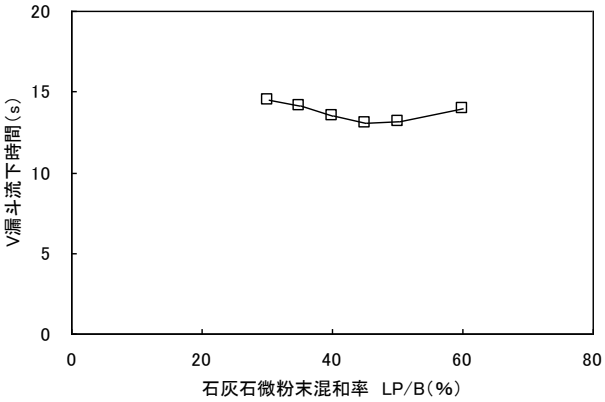


図 2.2-4　V 漏斗流下時間

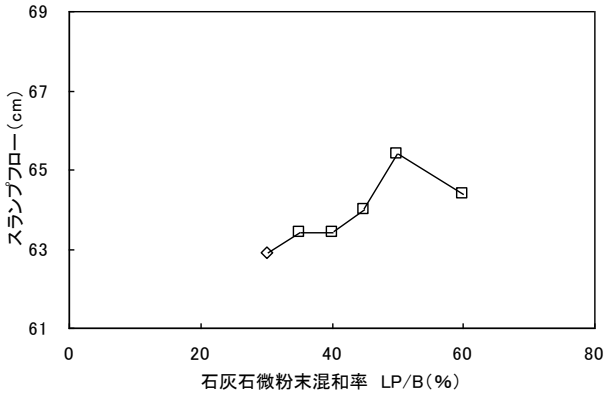


図 2.2-5　スランプフロー

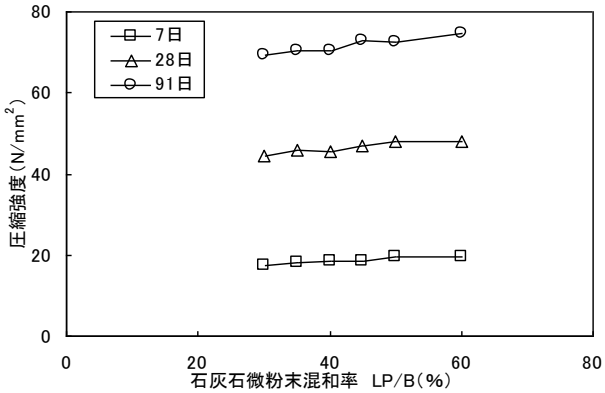


図 2.2-6　圧縮強度

(c)　選定配合

低拡散材の使用材料および室内試験によって決定した使用材料と配合を表 2.2-9 および表 2.2-10 に示す。なお、実際には、使用材料の密度変化やロットの変化に伴い、単位細骨材量を変更した。併せて、高性能 AE 減水剤あるいは空気量調整剤の添加率により、フレッシュ性状を調整した。

また、側部低拡散材の施工時には、左右の低拡散材の LP/B をそれぞれ 45%および 60%とし、両者の比較をすることとした（表 2.2-11）。

表 2.2-9　低拡散材の使用材料

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント、 密度=3.22g/cm^3、比表面積=3,640cm^2/g
混和材	FA	フライアッシュⅡ種、密度=2.18g/cm^3、比表面積=3,820cm^2/g
	LEX	改良型石灰系膨張材、密度=3.05g/cm^3
	LP1	石灰石微粉末、秩父産、密度=2.70g/cm^3、比表面積=5,390cm^2/g
	LP2	石灰石微粉末、宮城産、密度=2.71g/cm^3、比表面積=5,510cm^2/g
細骨材	S	石灰石砕砂（八戸松館産）、密度=2.66g/cm^3、FM=2.75
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤： カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	AS	空気量調整剤： ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.2-10　低拡散材の配合

LP/B (%)	W/B (%)	W/P (%)	単位量（kg/m^3）						SP 添加率(P×%)
			W	LPC	FA	LEX	LP	S	
60	45	28.1	230	338	153	20	307	1196	0.61
45		31.0					230	1273	0.68

※　結合材量:B=LPC+FA+LEX、粉体量:P=B+LP

表 2.2-11　各配合の打ち込み箇所

部材（低拡散材）		配合	
		LP/B=60%	LP/B=45%
底部		○（LP1）	―
側部	左側	―	○（LP2）
	右側	○（LP2）	―
上部		―	○（LP2）

2)　材料特性試験（室内試験）

側部低拡散材の配合検討時に室内試験によって選定した配合について、施工性に影響を及ぼす基本的な特性値であるフレッシュ性状および圧縮強度の結果を以下に示す。材料特性試験の結果を受け、施工試験時に当該配合を用いた。

a.　フレッシュ性状

選定配合におけるフレッシュ試験結果を表 2.2-12 に示す。LP/B=45%は、LP/B=60%と比較して、スランプフローは同程度であったものの、V漏斗流下時間はやや短く、ブリーディング率は多い結果であった。これは、石灰石微粉末混入量の多少による影響と考えられる。

表 2.2-12　選定配合におけるフレッシュ試験結果

LP/B (%)	スランプフロー (mm)	V漏斗流下時間 (秒)	ブリーディング率 (%)
45	640	13.1	0.65
60	644	14.0	0.35

b.　硬化物性

選定配合における圧縮強度の試験結果を表 2.2-13 に示す。圧縮強度は、配合によらずほぼ同程度であった。これは、W/B が同一であることによるものと考えられる。

表 2.2-13　選定配合における圧縮強度試験結果

LP/B (%)	圧縮強度（N/mm^2）		
	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
45	18.6	46.9	72.8
60	19.9	43.2	68.8

(2)　施工検討

1)　打込み時の側圧

コンクリート標準示方書【施工編】[5]では、高流動コンクリートの型枠は、「原則として、液圧として設計しなければならない」と規定されている。本試験では、これに則り、液圧が作用するものとして型枠の設計をした。

前述のように、低拡散材は水みちとなる可能性のある鉄筋やセパレータ等の鋼材を一切配置しない無筋の部材である。そのため、低拡散材の型枠には、セパレータを用いないことと

した。したがって、型枠の組立には、鋼管およびパイプサポート等の支保部材を型枠の外側に配置した。

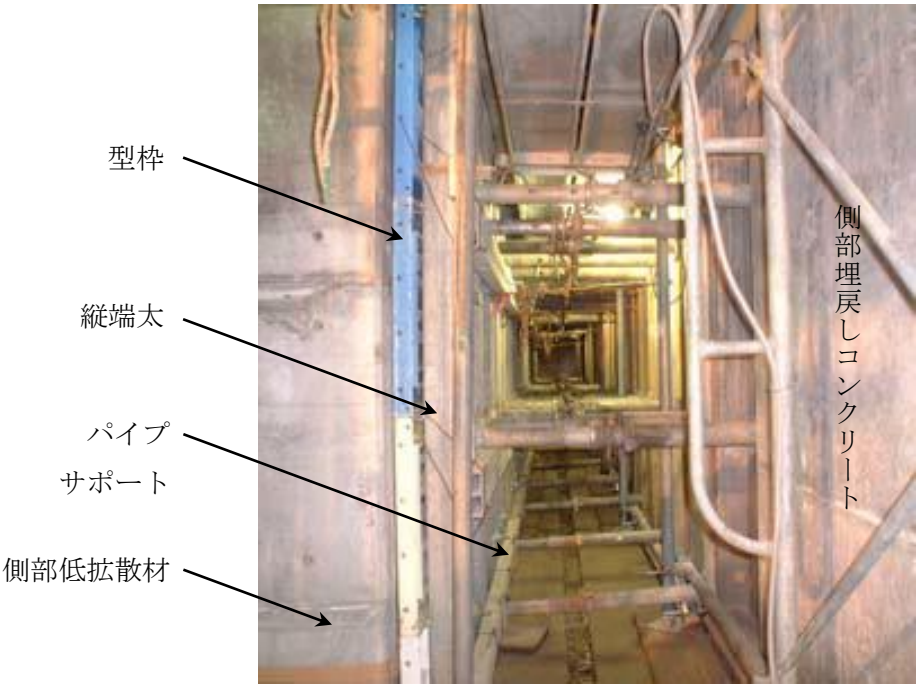


図 2.2-7　型枠および支保工の設置状況

側部低拡散材の施工時に、型枠に作用する高流動モルタルの側圧を測定した。測定には、土圧計（東横エルメス社製、GE-400kPa）を用いた。側部低拡散材の左側（LP45）における土圧計の配置を図 2.2-8 に示す。

打込み開始からの時間で整理した側圧の継時変化を図 2.2-9 に示す。図中には、打込み高さと単位容積質量から算出した液圧相当値も併記した。図より、いずれの場合も、打上り面が計測位置を通過してからある程度までは、側圧は液圧として作用し、その後はほぼ一定となる傾向が認められた。また、その最大値は、70kPa 程度であった。

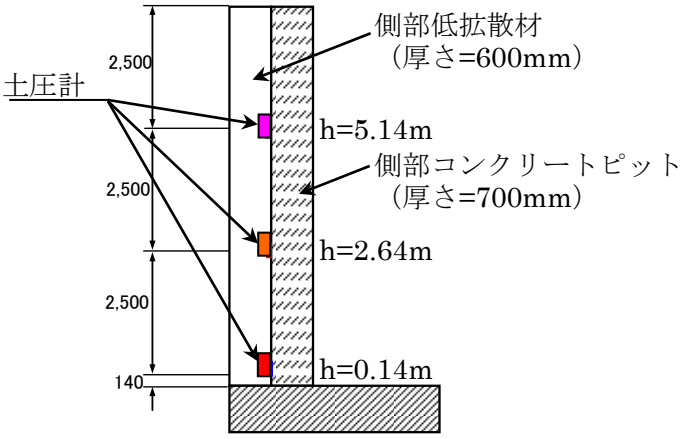


図 2.2-8　土圧計の配置（左側：LP45）

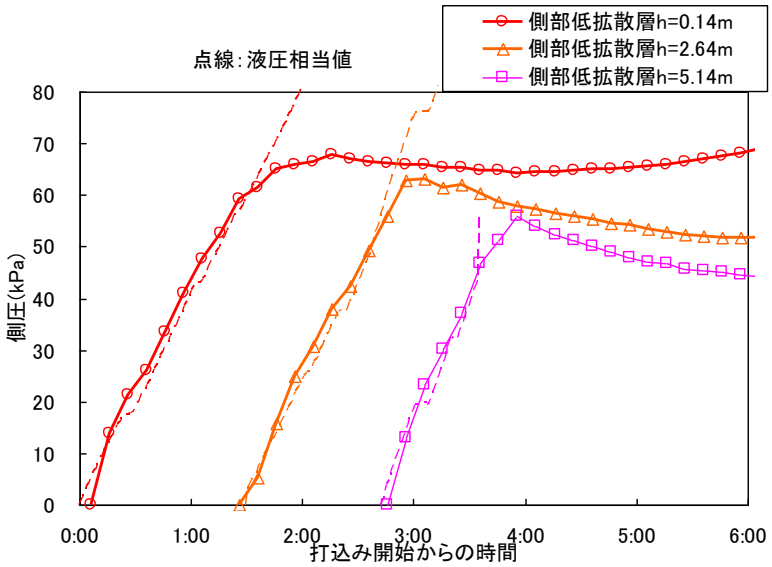


図 2.2-9　打込み時間と側圧の関係（左側：LP45）

既往の試験[6]では本試験の側部低拡散材の右側（LP60）と同様の材料を平均約 1.5m/h の速度で 7.35m 施工しており、この場合の側圧の最大値は約 30kPa と本試験の側部低拡散材の左側に比べ小さくなっている。これは打込み速度が約 2.0m/h であった本試験と比べ、既往の試験[6]の打込み速度が相対的に小さかったことが主な要因と考えられる。

土圧計の計測結果から求めた、その位置での打込み時刻から打上げ高さ相当の液圧が作用するまでの時間（以下、「液圧が作用する時間」と称する）を図 2.2-10 に示す。図中には、コンクリートピット確証試験の知見に示される側部コンクリートピットおよび既往の試験[6]で示される結果（側部低拡散材右側（LP60）と同配合）も併記した。図より、いずれの場合においても、液圧が作用する時間は 1 時間 20 分程度であった。このことから、モルタルとコンクリートの違い、補強鉄筋の有無、部材厚さの違い等があっても、側圧は、対象とする配合のフレッシュ性状の時間変化特性が支配的であると考えられる。

高流動コンクリートの型枠は、原則として液圧として設計する必要があるが、本試験のように、打上り高さが高く、打込み速度の比較的小さい場合は、通常のコンクリートと同様に、打込み速度が側圧の分布に大きな影響を与えるものと考えられる。この傾向は、既往の研究[7]においても報告されている。なお、打込み前に測定した型枠位置と硬化後の構造物の出来形測定の結果から、型枠の緩み等の変形はほとんど無いことを確認した。

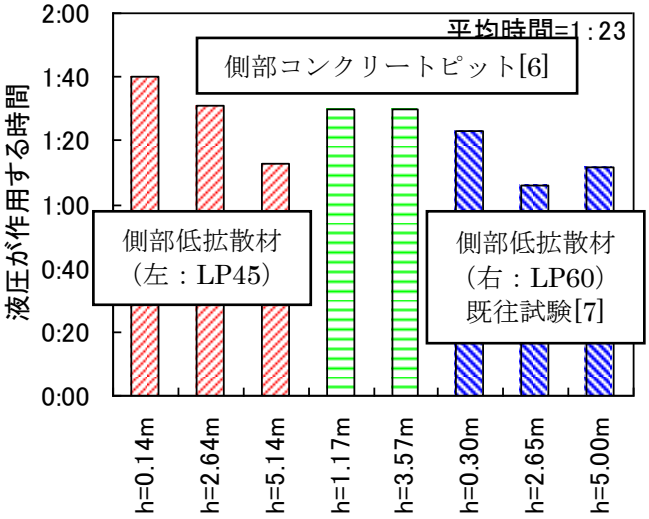


図 2.2-10　液圧が作用する時間

2)　充てん性および流動性

前述のとおり低拡散材は、施工時点において所要の性能および状態が確保されるように施工する必要があり、そのためには、モルタルが確実かつ均一に充てんされる必要がある。

底部低拡散材および側部低拡散材における、製造時と荷卸し時のスランプフローの品質管理結果を図 2.2-11 に示す。スランプフローは、LP45 および LP60 のいずれの場合においても、管理目標値（65±5cm）以内であった。また、製造から荷卸しまで、運搬時間を含めて平均 65 分程度であったが、製造時と荷卸し時のスランプフローはほぼ同程度であった。また、図 2.2-12 に示すように、LP45 および LP60 のいずれの場合においても、V 漏斗流下時間も製造時と荷卸し時はほぼ同等であった。このことから、このことから、製造から荷卸しまでに要する時間（約 1 時間）において十分に流動性を持続できる配合であったといえる。

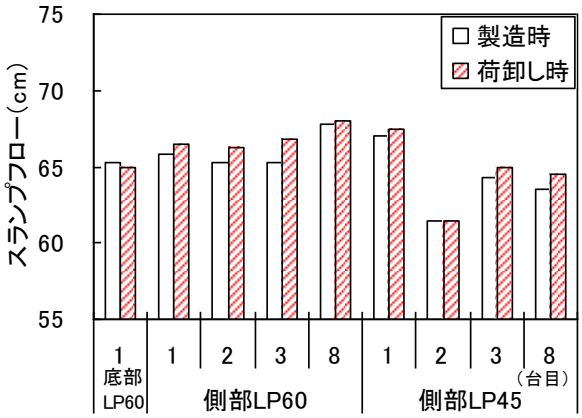


図 2.2-11　スランプフローの品質管理結果

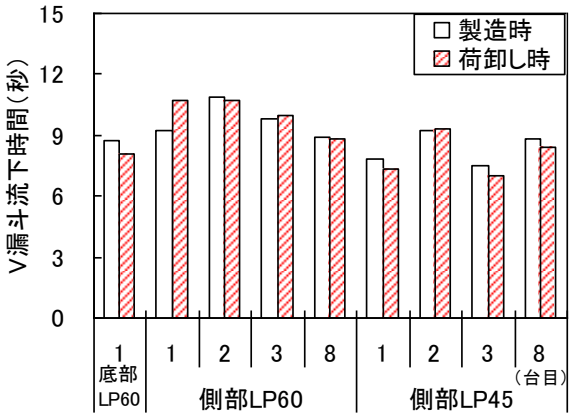


図 2.2-12　V 漏斗流下時間の品質管理結果

底部低拡散材の打込みは、平面的に均一に打ち上がるように施工した。これは、高流動モルタルを一括で大量に、平面的に広い範囲で打込みした例もなく、仕上げ作業も打込み用足場の上からしかできなく、作業性も悪いため、平面的に均一に打ち上がるように施工する必要があったからである。そこで、打込み初期には投入口を固定して打込んだモルタル高さをレベルで計測し、指針[8]に示される流動勾配を算出した。

側部低拡散材では、コンクリートポンプ車により、部材長手方向の中央付近に筒先を固定してモルタルを投入した。打込み高さは、常に打込み面から 50cm 程度となるよう調整した。流動性と打込み速度の関係を確認することを目的に、打込み中にポンプ車の出力を調整して吐出量を 6～24m³/h に変化させた。打上り高さは、型枠天端付近に複数設置したレーザー距離計（DIMETIX 社製 DLS-B15）により、随時計測し、流動勾配を算出した。

吐出量で整理した流動勾配を図 2.2-13 に示す。なお、図中には、石灰石微粉末の混和率を 60%とした配合（LP60）の結果も併記した。底部打込み時の流動勾配は、吐出量が 10m³/h の場合 0.06 であった。また、側部低拡散材の流動勾配は、同一配合の底部の値より小さい結果となった。また、吐出量の増大とともに低下した。この要因の一つとして、底部では打込まれたモルタルが投入先から面的（二次元的）に流動するのに対し、側部では、打込まれたモルタルが型枠の間を線的（一次元的）に流動するためと考えられる。いずれにしても、指針[7]に示される粉体系高流動コンクリートの目標流動勾配（0.1～0.05）よりも小さい値であることから、良好な流動性を有するものと評価できる。なお、脱型後に部材端部まで確実に充てんされたこと、および豆板等の欠陥も生じていないことを確認した。そのため、本試験のように作業性の悪い足場等の条件でも、選定した配合で構築すれば、平面的に均一に打ち上げて施工することが可能であることを確認できた。

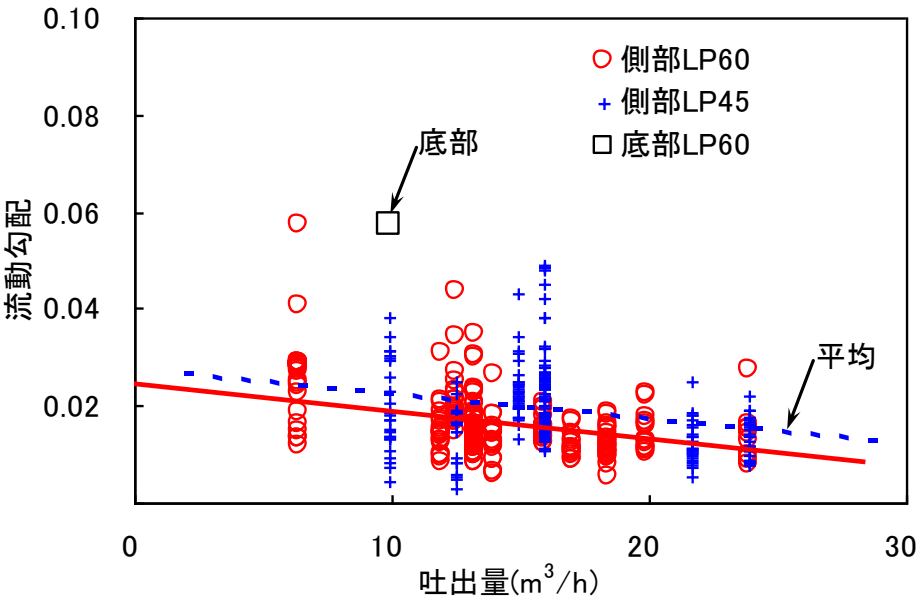


図 2.2-13　打込み時の流動勾配

3)　ひび割れ

低拡散材の主な要求機能である移行抑制（低拡散性）を満足させるために、ひび割れを制限する必要がある。本試験における低拡散材はモルタルである。モルタルは、ひび割れの低減に寄与する粗骨材が存在しないため、コンクリートよりもひび割れが発生しやすい。そのため、本試験における低拡散材は、結合材に低熱ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用いるとともに、ひび割れ制御のための膨張材を添加することで、温度ひび割れの発生を低減した配合としている。「2.2.3　確証試験の課題と実施内容」で述べたように、このような無筋モルタルの大型構造物は世界的にも例が無いことから、そのひび割れに関する評価は本試験における重要な課題である。

底部低拡散材表面には、その上部に構築される底部コンクリートピットのコンクリート打込みまでは、ひび割れは発生していなかった。底部低拡散材の部材上部には底部コンクリートピットがあり、継続して目視観察ができないことから、底部低拡散材には、水平ボーリング孔（φ66mm）を削孔し、ボアホールカメラ（レアックス製 BIP-V システム）による坑内ひび割れの観察を行った。ボアホールカメラによる観察では、材齢 419 日（底部コンクリートピットの打込み日から 380 日）まで、ひび割れは確認されなかったが、材齢 777 日（底部コンクリートピットの打込み日から 738 日）の観察で、ひび割れ幅が 0.25mm 以下のヘアクラックが 2 箇所確認された。底部低拡散材に発生したひび割れの状況を図 2.2-14 に示す。ひび割れは、材齢 419 日～777 日の間に発生したと考えられるが、ボアホールカメラによる観察頻度が少ないため、具体的に特定することはできなかった。なお、ボアホールカメラの分解能は 0.25mm であることから、実際のひび割れ幅はこれ以下と考えられる。

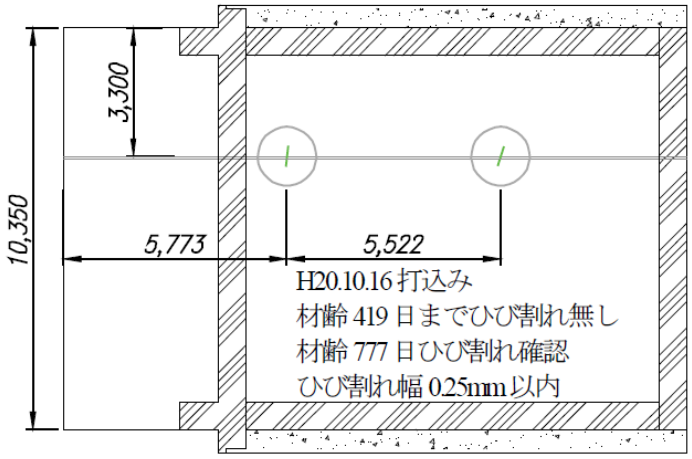
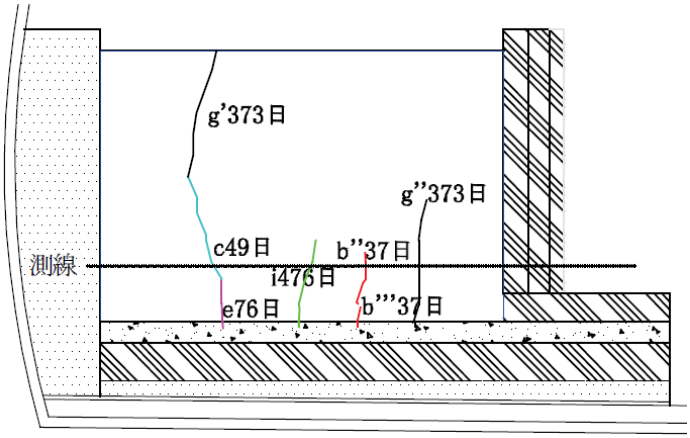


図 2.2-14　底部低拡散材のひび割れ状況（平面図）

側部低拡散材は、LP45 配合を使った左側および LP60 配合を使った右側ともに、脱型後に目視でひび割れ観察を行った。側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況を図 2.2-16 および図 2.2-17 にそれぞれ示す。また、側部低拡散材（LP60 配合）のひび割れ状況を図 2.2-17 に示す。

LP45 配合、LP60 配合ともに、ひび割れの発生は、材齢 1 カ月程度の時点であった。その後、LP45 配合は、材齢 812 日まで増えた。材齢 812 日における最大ひび割れ幅は 0.40mm であった。LP60 配合は、観察を実施した材齢 476 日まで増えた。材齢 476 日における最大ひび割れ幅は 0.20mm であった。

ひび割れ発生の要因には、セメントの水和による温度応力、乾燥収縮等の影響が考えられる。以下に、それぞれの要因について、計測データに基づいた分析を行う。



左側部　LP45		材齢（日）	幅 (mm)	幅※ (mm)
打込み日	H21.9.16	0		
b''	H21.10.23	37	0.1	*0.3*
b'''	H21.10.23	37	0.04	*0.2*
c	H21.11.4	49	0.15	*0.4*
e	H21.12.1	76	0.08	*0.2*
g'	H22.9.24	373	0.5	*0.5*
g''	H22.9.24	373	0.07	*0.2*
i	H23.1.5	476	0.2	*0.2*

※材齢476日経過後のひび割れ幅

図 2.2-15　側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）

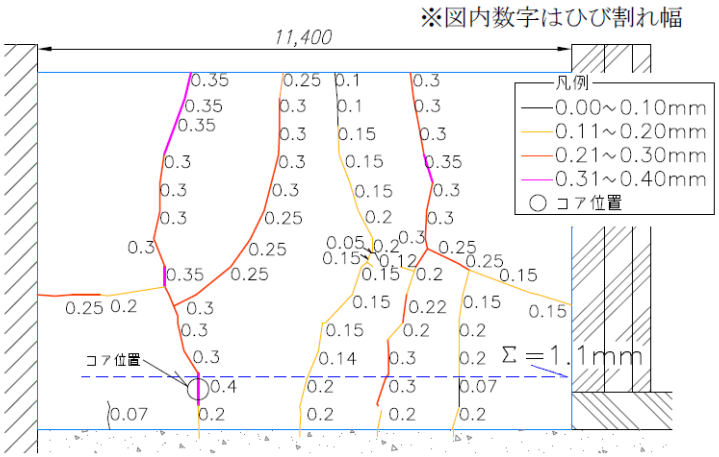
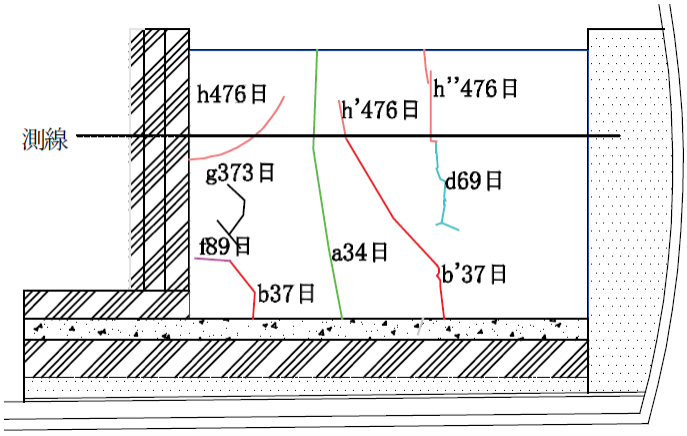


図 2.2-16　材齢 812 日における側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）



右側部　LP60		材齢（日）	幅（mm）
打込み日	H21.9.16	0	
a	H21.10.20	34	0.15
b	H21.10.23	37	0.07
b'	H21.10.23	37	0.15
d	H21.11.24	69	0.06
f	H21.12.14	89	0.05
g	H22.9.24	373	0.05
h	H23.1.5	476	0.2
h'	H23.1.5	476	0.15
h''	H23.1.5	476	0.1

図 2.2-17　側部低拡散材（LP60 配合）のひび割れ状況（側面図）

a.　水和による温度応力とひび割れの関係

側部低拡散材中に埋め込んだ温度計（東横エルメル社製、RT-100）による温度計測結果を図 2.2-18 に、有効応力計（東横エルメス社製、GK-10N-505）による応力計測結果を、別途供試体により試験した引張強度とともに図 2.2-19 に示す。

側部低拡散材打ち込み直後、水和反応による発熱により温度は上昇し、部材には圧縮応力が作用する。その後、温度降下に伴い、応力は引張側に増加する。材齢初期のこの段階で引張強度は小さいため、引張応力の増進に伴ってひび割れが生じやすい状況にある。しかし、この時期の温度と応力は関連性がある挙動を示しており、ひび割れを示唆する変化は認められない。また、前述の側部低拡散材ひび割れ観察でひび割れが確認された時期は材齢 1 ヶ月程度経過後であることから、材齢 10 日程度の初期の温度ひび割れについては、膨張材等の効果により十分制御されたものと考えられる。

その後の応力の経時変化をみると材齢 1 ヶ月付近で応力は急激に徐荷しており、ひび割れの発生による応力解放を感知したものと推定される。しかし、この時点の部材温度の変化は小さく、坑内温度（20℃）に収束している状況にあるため、徐荷前後の応力変化の勾配は小さい。したがって、温度降下に伴い生じる温度応力のみがひび割れの要因ではなく、他の要因が加わってひび割れが発生したと考えられる。

以下では、ひび割れを生じさせる他の要因として乾燥収縮について分析した。

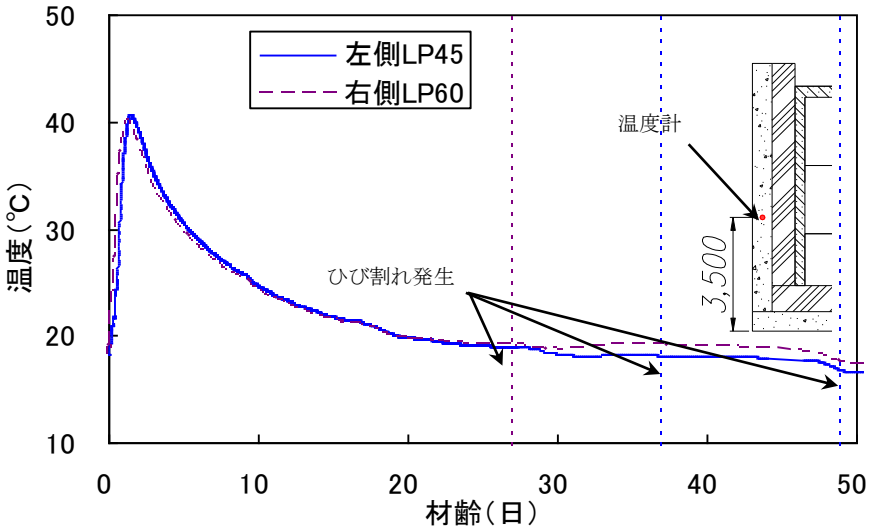


図 2.2-18　側部低拡散材打込み後の温度分布

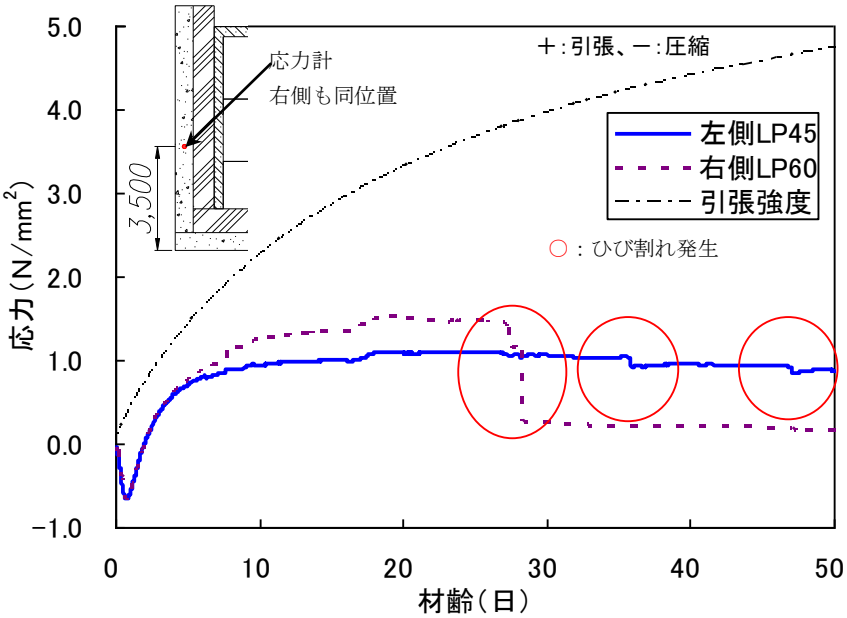


図 2.2-19　側部低拡散材の有効応力計測定結果

b.　乾燥収縮とひび割れの関係

セメント系部材は、乾燥に伴い体積が収縮し、壁体のように端部が拘束されている状況ではこれによりひび割れが発生することも予想される。セメント系部材の乾燥は材齢とともに進むものと考えられるので、材齢とひび割れの関係を調査した。図 2.2-20 に、ひび割れ幅が大きい箇所を含む測線（図 2.2-16）を設定し、測線を通過するひび割れ幅の合計（mm）を示す。また、同図には室内で実施した長さ変化試験（JIS A 1129）の結果を併せて示した。ひび割れ幅の合計値と長さ変化試験結果は、直接比較することはできないが、ひび割れが乾燥収縮によるものである場合、両者には相関があるものと考えられる。図より、材齢 400 日でのひび割れ幅の合計は、LP45 で 1.1mm であった。また、測線におけるひび割れ幅の合計値と室内試験における長さ変化試験結果の傾向を比較すると、両者は同様な傾向を有することが認められる。このことから、合計ひび割れ幅の増加には、乾燥による長さ変化が影響しているものと推察される。

ここで、合計ひび割れ幅の推移と空洞内の相対湿度の関係を図 2.2-21 に示す。図より、ひび割れ幅の合計が増大している材齢 1 カ月および材齢約 400 日では、湿度の低下が確認されている。このことからも、ひび割れの増大には、乾燥による長さ変化が影響を及ぼしているものと推察される。

なお、図 2.2-20 より、長さ変化率については、若材齢時には増加率が大きいものの、材齢の経過に伴い増加率は小さくなっていく傾向が見受けられる。このことからも、ひび割れは、若材齢時に大きく進展し、材齢の経過に伴い進展速度は小さくなっていくものと推察される。

また、底部低拡散材は側部低拡散材に比べてひび割れが少ない。これは外部拘束の違いによるものが大きい。側部低拡散材は、天端を除く全面が手前部・奥部・底部・側部コンクリートピットで拘束されている。さらに、側部コンクリートピットとの界面は側部低拡散層と

の一体化を図るため、打継目凹凸面形成シートによる打継ぎ処理を実施していることから、その拘束は大きい。これに対して底部低拡散材は、鉛直面では奥側の 1 辺が奥部埋戻し材で拘束されているものの、他の 3 辺と上面は無拘束の状態である。また、下面はベントナイトの底部緩衝材であり、セメント系部材による拘束と比較すると小さいと考えられる。

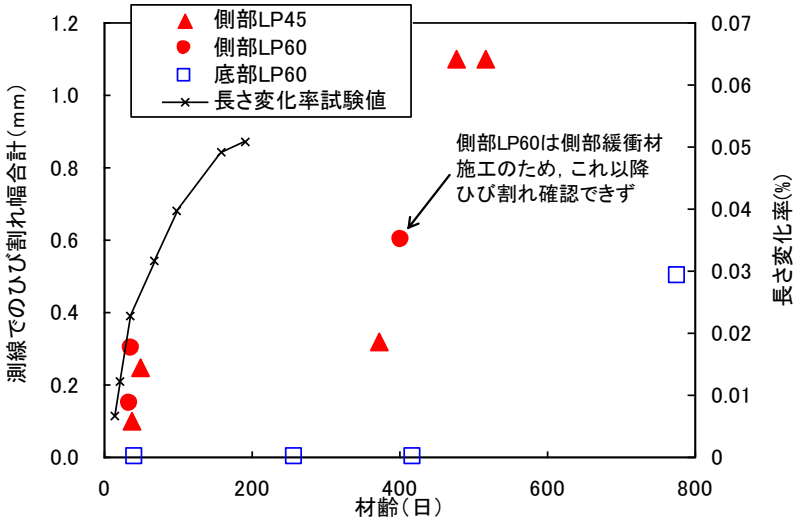


図 2.2-20　材齢に伴う合計ひび割れ幅の推移と長さ変化の関係

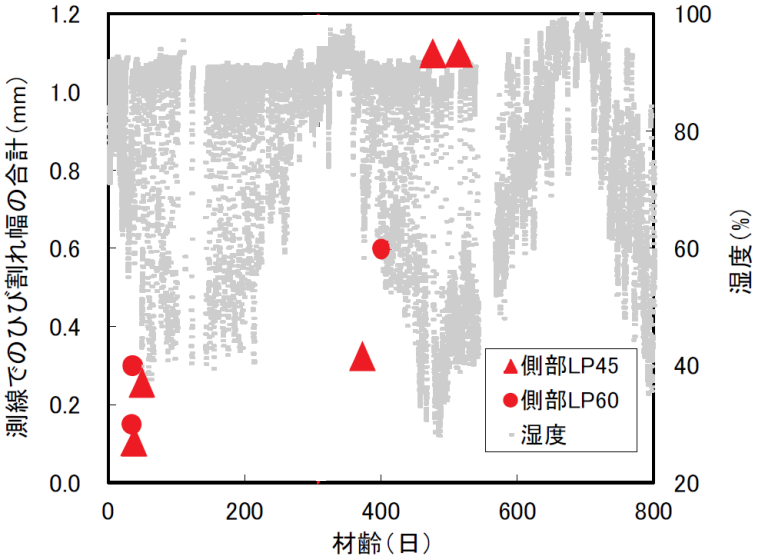


図 2.2-21　合計ひび割れ幅の推移と湿度の関係

c.　ひび割れのまとめ

既往の研究[3]では、低拡散材の超長期の性能評価におけるパラメータの目標値として、「部材の表面積に対してひび割れ開口部の面積（ひび割れ幅×長さ）比率を 0.05%以下と設定した」と示されている。ここで、本試験における側部低拡散材ひび割れ観察におけるひび割れ開口部表面積比率は 0.011%以下であり、上記の目標値である 0.05%に対して、1/5 程

度の値であった。また、図 2.2-20 に示したとおり、室内における長さ変化試験結果は、若材齢時における増加比率が大きく、材齢の経過に伴い増加比率は小さくなる傾向であった。このことから、今後ひび割れがこの参考値を上回る可能性は低いものと推察され、低拡散材の主な要求機能である低拡散性は、ひび割れの観点からも確保されるものと考えられる。

ただし、ひび割れはバリア性能に直接関係する重要なファクターであることから、今後もひび割れの挙動をできる限り長期にわたりモニタリングする必要がある。

4) 施工時品質管理方法

本試験では、コンクリート標準示方書、JASS 5N 等に基づき品質管理基準を定め、これにより品質管理を行った。ここでは、使用材料の特性に応じて、求められる施工性と品質確保の観点からこれまでの施工実績を考慮したうえで管理項目と基準値を設定した。設定した品質管理項目および本試験における実測値の範囲を表 2.2-14 に示す。施工試験の結果、これらの基準値をほぼ達成し、かつ初期性能として問題の無い品質が確保できた。したがって、ここで設定した基準値を達成することにより初期性能の確保が可能であることの傍証が得られたといえる。

表 2.2-14 低拡散材の品質管理項目および実績値（底部，側部，上部）

項目	管理値	単位	準拠規格	検査頻度又はﾛｯﾄの大きさ	試験空洞内の実績範囲
スランプフロー	650±50	mm	JIS A 1150-2001	1 回/150m³	600~683
500mm フロー到達時間	3～15（参考値）	秒	同上	同上	2.1~4.9
漏斗流下時間	7～13（参考値）	秒	JSCE-F 512-2007	同上	6.9~17.9
空気量	2.5±1.5	%	JIS A 1128-2005	同上	1.7~3.8
塩化物量	0.2 以下	kg/m³	JASS 5N	2 回/日	0.0
単位水量	230±20	kg/m³	同上	午前 1 回／午後 1 回	-10.9~9.8（219.1~239.8）
水結合材比	46.6 以下（参考値）	%	—	—	42.8~46.9
単位容積質量	2,241 以上（参考値）	kg/m³	—	1 回/日または重要度に応じて 20～150m³ ごと	2,227~2,273

(3) 初期性能の検討

1) 初期性能確認試験項目

低拡散材の初期性能確認試験で実施した試験項目を、要求機能と対応する形式で表 2.2-15 で整理した。初期性能確認試験は低拡散材の主たる要求機能である拡散抑制に係わるデータの他、副次的な要求機能に関わるデータや設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得を目的とした試験も実施した。

表 2.2-15　低拡散材の要求機能と初期性能確認試験項目

機能			段階	機能の説明	試験項目																		
					力学特性				収着	透水	拡散	拡散／透水への影響因子						化学安定性				熱特性	
												ひび割れ											
												室内試験					調査						
					圧縮強度試験	静弾性係数試験	割裂引張試験	クリープ試験	間隙水pH測定	透水試験	拡散試験	細孔径分布空隙率試験	自己収縮試験	拘束膨張試験	長さ変化試験	断熱温度上昇試験	ひび割れ調査	固相分析	中性化試験	アルカリ骨材反応性試験	耐化学浸食性	熱伝導率試験	比熱試験
要求機能	基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射線物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること																			
		遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと																			
		移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移動を抑制すること							○	○	○	○	○	○	○					○	○
				放射性核種を収着すること					○														
				低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと						○		○	○	○	○	○	○						
	操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	○	○	○	○															
材料物性			設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得															○	○	○	○	○	○

2)　初期性能確認

主な要求機能である拡散抑制に対しては、拡散係数の測定試験を実施し、管理目標値を満足するかの確認を行った。放射性核種の拡散係数は、原子力学会標準[9]を参考としたトリチウムをトレーサに用いた定常拡散試験法(through-diffusion 法)によって測定した。表 2.2-16 に試験条件を示す。試料は、室内配合試験時に採取したものと、硬化後の各部位から採取したコアによるものとした。なお、同じ試料を用いて水銀圧入法により空隙率を測定した。

拡散係数の測定結果を表 2.2-17 に示す。拡散係数は、室内作製供試体で $1.9\times10^{-13}m^2/s$、コア供試体で 1.1×10^{-13}～$1.6\times10^{-13}m^2/s$ であった。これより、いずれの供試体についても、拡散係数の管理目標値である $1.0\times10^{-12}m^2/s$ と比較して、1 オーダー程度小さい値であり、これは、後述する図 2.2-22 で示した既往の研究[10]の値と比較して、2 オーダー低く、非常に小さい拡散係数であった。また、室内作製供試体と、施工の影響が加味されたコア供試体の値はほぼ同等であることが確認された。

表 2.2-16　拡散試験の試験条件

項目	内容
試験溶液	セメント平衡水
トレーサ	トリチウム水（HTO）
トリチウム濃度	300,000cpm/ml 程度
トレーサ濃度分析	放射能測定（液体シンチレーションカウンタ）
試験温度	室温（～25℃）
試験雰囲気	低酸素雰囲気（O_2<1ppm、高純度 Ar ガス）
試料形状	室内作製供試体　：直径 50mm、厚さ 10mm コア供試体　：直径 55mm、厚さ 10mm

表 2.2-17　拡散試験の試験結果

供試体種類		試験期間/最終材齢（月）	実効拡散係数 De (m^2/s)
底部低拡散材	現場(前)	23 / 26	1.5×10^{-13}
	現場(中)	23 / 26	1.6×10^{-13}
	現場(奥)	23 / 26	1.6×10^{-13}
	室内製作	24 / 27	1.9×10^{-13}
側部低拡散材	現場(上)	24 / 29	1.3×10^{-13}
	現場(中)	24 / 29	1.1×10^{-13}
	現場(下)	24 / 29	1.6×10^{-13}
上部低拡散材	コア A(表面)	21 / 24	1.1×10^{-13}
	コア A(中間層)	21 / 24	1.2×10^{-13}
	コア B(表面)	21 / 24	1.3×10^{-13}

コンクリートがトリチウム水と接触している場合、トリチウムは主に自由水の形態でセメントペースト中の空隙を移行するものと考えられる。安田ら[10]は、普通ポルトランドセメント（OPC）とフライアッシュ（FA）を用いたモルタルについて、空隙率と拡散係数の関係を整理しており、フライアッシュを混入したモルタルの拡散係数が小さいことを示している。ここで、本試験で測定された空隙率および拡散係数を、本試験と同様の配合を用いて測定された既往の知見[11]と併せて図 2.2-22 に示す。図より、本試験で用いた高流動モルタルの拡散係数と空隙率の関係は、既往材料によるもの（黒破線）と同様の傾向であることが分かる。

普通ポルトランドセメントを用いた同空隙率のモルタル（黒実線）と比較すると、2 オーダー程度小さいことも分かる。さらに、一般的な普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート配合における塩化物イオンの拡散係数（1.0×10^{-11}～1.0×10^{-12}m²/s）と比較しても、1～2 オーダー程度小さいことから、本試験において提案した配合の高流動モルタルは、拡散抑制効果に優れた材料であることが確認された。

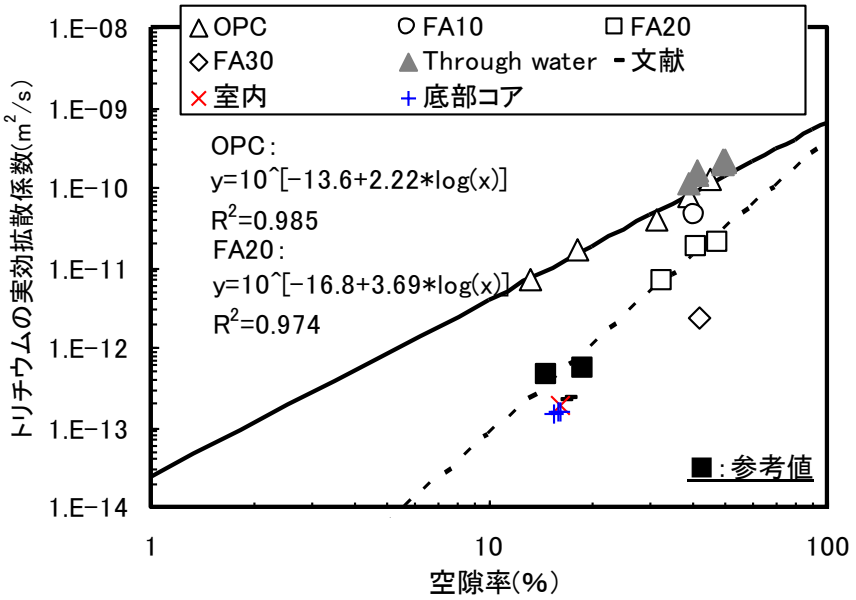


図 2.2-22　モルタルの空隙率とトリチウムの実効拡散係数（[10]に追記）

2.2.5　まとめと今後の検討課題

(1)　課題に対する照査

本試験の目的は、低拡散材の要求機能を確保するための使用材料、施工技術、施工方法等の実施工への適用性を明確にして、構築した部材の施工品質を確認することである。表 2.2-6 に示した本試験の課題に対する照査の結果を以下にまとめる。

- 材料検討について、本試験で選定した低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動モルタル配合は、低拡散性に優れ、温度ひび割れ発生の可能性を低減し、かつ制約条件の多い地下空間における施工においても充てん性・流動性に優れた材料・配合であることを確認した。また、産地が違いプレーン値も異なる石灰石微粉末を使用した場合についても、確証試験を通じて、若干の配合調整を行うことで施工可能であることを実証した。
- 施工検討における充てん性および流動性について、ポンプ圧送時の充てん性を評価し、良好な流動性を有すること、および特別な作業を必要とせず、部材の端部まで充てん可能であることを確認した。
- 施工検討における型枠設計について、処分施設におけるバリア材として水みちを残さないために、型枠セパレータを使用せずに施工することが求められるが、実物大の確証試験において出来型精度に大きな影響を与えることなく施工可能な方法を提示した。
- 高流動モルタルの打込み時の側圧は、必ずしも液圧で作用するものでなく、今回の例では打込み開始から約 1 時間 20 分までは液圧で作用し、最大で 70kPa 程度であった。この知見は、型枠の設計・施工の合理化に向けて活用できるものである。
- 実物大の施工検討におけるひび割れ開口面積について検討した結果、低拡散材の主な要求機能である低拡散性の観点から求められるひび割れ開口面積比率（0.05%）を長期的にも下回ることが推定され、ひび割れを考慮しても高い品質の材料であることが確認できた。また、低拡散材という部材全体としての低拡散性も高いことが示された。
- 地下環境下で施工した部材から採取したコア試料を用いた試験の結果、本試験で選定した配合による拡散係数は、既往材料である普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、2 オーダー程度小さい値であり、非常に小さい拡散係数の材料であることが明らかになった。比較対象として作製した室内作成供試体と施工した部材から採取したコア試料とが同程度の値で管理目標値（1×10^{-12} m^2/s 以下）を満たすことから、施工の影響は小さいことが示された。また、空隙率と拡散係数の関係は、既往の知見とほぼ同等であることが示された。

(2)　本プロジェクトでの成果

放射性核種の拡散による移行を抑制すること（低拡散性）を主たる要求機能とする低拡散材は、その低拡散性により核種移行の遅延を図る部材である。

確証試験では拡散係数の小さい緻密な材料を選定して施工試験を行い、施設全体としての拡散抑制機能を損なうようなひび割れの発生を制御し、所定の精度で施工できること、また、構築した部材の拡散係数が非常に小さいことを確認した。さらに一般に無筋の高流動モルタルを用いて、先行部材の全面拘束を受ける高さ 8m の大型部材を、セパレータ無しの条件で一括打込みにより構築した事例は類を見ず、地下空間内で上記のような高い品質を発揮できる材料や、施工方法を見出し、実施したことはコンクリート技術の開発の上でも重要な成果であるといえる。本プロジェクトの成果は余裕深度処分施設における低拡散材の設計・施工検討に幅広く反映できるものである。

(3)　今後の検討課題

本試験において、残された課題を以下にまとめる。

- 本試験におけるひび割れは、膨張材等の効果によって制御され、要求機能を満足するひび割れ幅以内に収まることが見込まれるものの、ひび割れはバリア性能に直結する重要な事項であることから、今後も継続して調査する必要がある。
- 本試験における初期性能確認試験によって、代表的な特性値は把握できたものの、その値のばらつき等の評価を十分に議論するには至っていない。そのため、ばらつきも含めた特性値の評価を行う必要があるものと考えられる。

参考文献

[1]（社）土木学会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008 年 6 月、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（2008).

[2] 土木学会: 余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方. 49-98(2009).

[3] 庭瀬一仁, 廣永道彦, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設に用いるコンクリートの設計について. コンクリート工学, Vol.44, No.2, 3-8(2006).

[4] 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層に用いる高流動モルタルの室内配合選定. コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, 43-51(2010).

[5] 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】. 299(2007).

[6] 田中俊行, 小林裕, 福田勝美, 広中良和, 村上利一, 枝松良展, 川崎康司: 余裕深度処分におけるセメント系人工バリアの現場施工に関する検討（その 3）－高流動モルタル打設時の側圧に関する考察－. 土木学会第 62 回年次講演会, CS5-035,(2007).

[7] 新保弘，金澤亮一，福田勝美，窪田茂，杉橋直行，根木政広，寺田賢二：地下空洞型処分施設性能確証試験におけるコンクリートピット等施工確認試験に関する検討，土木学会第 64 回年次講演会，CS5-022，2009.

[8] 土木学会: 高流動コンクリート施工指針. 41(1998).

[9] 日本原子力学会 標準委員会 技術レポート: 収着分配係数の測定方法－浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び浅地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順. 15-18(2006).

[10] 安田和弘, 横関康祐, 河田陽介, 吉澤勇二: カルシウム溶出に伴うコンクリートの物理性能及び物質移行性能の変化に関する検討. セメントコンクリート論文集, No.56, 492-498(2002).

[11] 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物施設の実規模試験による初期性能の設定. コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, 53-62(2010).

2.3　コンクリートピット

2.3.1　概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.3-1[1]に示す。セメント系材料からなる部材には充てん材、コンクリートピットおよび低拡散材がある。コンクリートピットは廃棄体を格納するための容器であり、廃棄体定置が完了した後、コンクリートピット内に区画内充てん材が充てんされる計画である。本確証試験におけるコンクリートピットは底部、側部（奥部、手前部、両側部）、上部の 3 部位によって構成される。

図 2.3-2 本確証試験におけるコンクリートピット施工後の状況を示す。

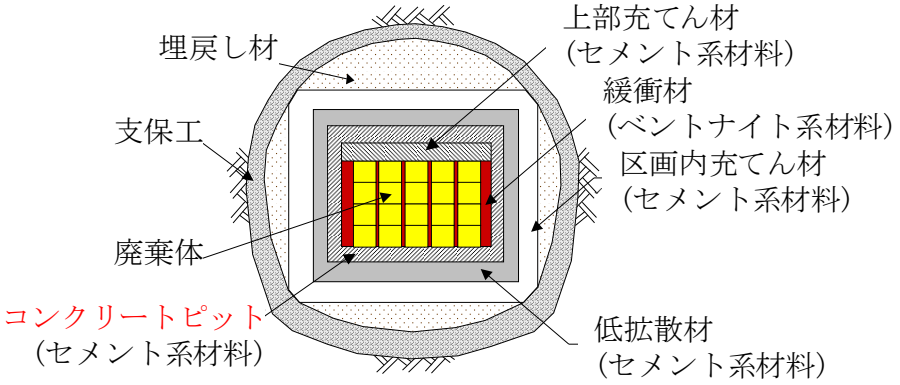


図 2.3-1　地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正[1]）

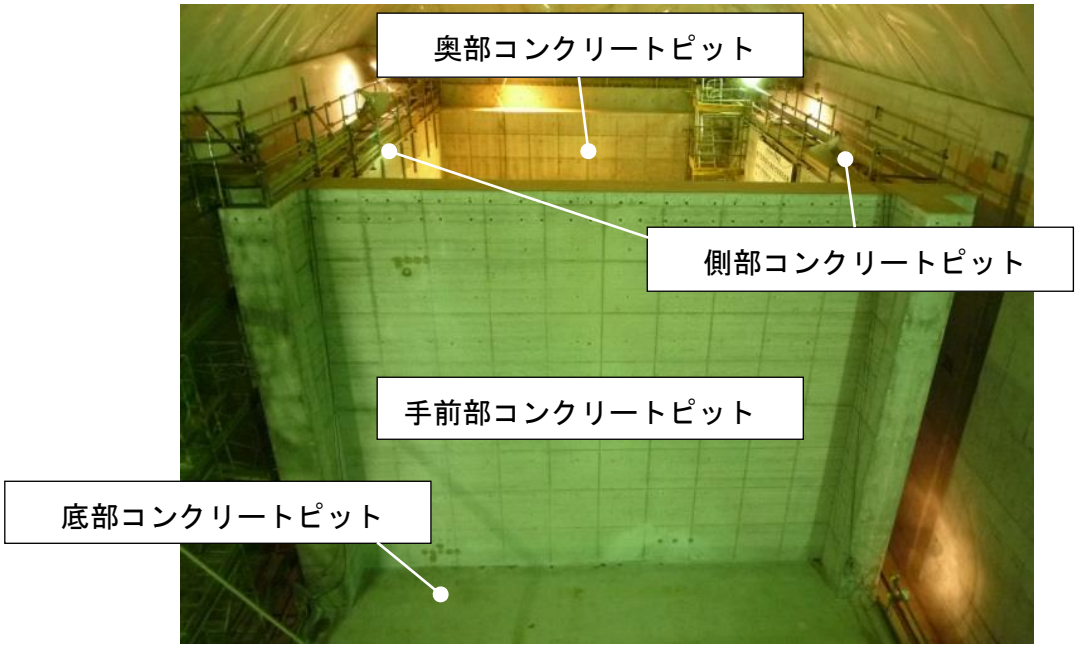


図 2.3-2　外部から見たコンクリートピット

地下空洞型処分施設におけるコンクリートピットは空間・力学安定性を主たる要求機能とし、建設・操業中の安全、作業空間の確保や、自重・外力に対する安定性を確保するものである。

その要求機能は通常の土木構造物と同様のものであり、現状の土木分野における構造設計が適用可能である。コンクリートピットには力学安定性の確保に関わる所定の力学特性を有する材料・配合であること、および安定性を損なうような欠陥が生じない、均質な部材を構築し、所定の出来形・空間を確保する施工が求められる。

コンクリートピットの確証試験は、力学安定性を満足し、ひび割れの制御効果や密実性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性や出来形、ひび割れの発生状況および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

試験の主な成果の概要を以下に述べる。

表 2.3-1　コンクリートピットの主な成果の概要

項目	成果概要
力学特性	選定した配合において､所定の圧縮強度を満足できることを確認した。設計基準強度に達するために必要な積算温度は平均して 2,000（℃・日）程度、材齢換算では約 100 日程度であることを確認した。
収容性 （出来形の確保）	出来形の確保については、各部材の座標計測による出来形管理を実施した。コンクリートピットのいずれの部位（底部、側部、上部）における出来形も規格値内に仕上がり、検討の上選定した配合および施工方法の下、高い精度で部材の施工が可能であることを確認した。
材料のばらつき 環境温度の変化に対する影響	石灰石微粉末の種類や量、環境温度の変化がフレッシュ性状に与える影響を検討した。それらの変動要因に対しては混和剤添加率で調整が可能であることを確認した。
打込み方法	ポンプ圧送を前提とした検討を実施した。打込み箇所の数と場所の設定、補助バイブレータの使用、吐出量の調整による流動勾配の調整により、充てん施工が可能であることを確認した。
ひび割れの抑制	コンクリート表面の乾燥が原因とされるひび割れの対策とし、打込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブレータによる表面仕上げを施し、ひび割れの低減効果があることを確認した。

2.3.2　基本条件の設定

(1) 要求機能と技術要件

余裕深度処分施設は要求機能に応じた様々な部材で構成されている。コンクリートピットに求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[2]）において基本安全機能のうち「閉じ込め」、「遮へい」と「移行抑制」が、また、操業上の機能として、確実な建設・操業を行うための「空間・力学安定性」が示されている。

本試験においては、コンクリートピットは安全評価上、閉じ込め、遮へい、移行抑制性能を直接期待する人工バリアではなく、施設の空間・力学安定性を担保するための構造体と位置づけた。これらのことから、主な要求機能として「建設操業期間中の空間と力学安定性の確保（空間・力学安定性）」を設定した。（表 2.3-2）

既往の検討（土木学会、2009[2]）では、「建設操業期間中の空間と力学安定性の確保（空間・力学安定性）」を確保するための技術要件として「力学特性」をあげている。本試験においては、“建設操業期間中の力学安定性の確保”に対する技術要件として「力学特性」を、“建設操業期間中の空間の確保”に対する技術要件として「収容性」を設定した。

表 2.3-2　コンクリートピットの要求機能（土木学会、2009[2]を改変）

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏洩を防止すること	○	力学特性
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有すること	○	放射線の遮へい性能
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	－	－
			放射性核種を収着すること	○	核種収着性
			低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	－	－
			連続した地下水移行経路を形成しないこと	－	－
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	－	－
操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学安定性が確保されること	●	力学特性 収容性
			坑道の形状を維持すること	－	－

●：主に期待する機能として設計段階から考慮する機能

○：設計段階においては考慮しないが、付帯的に考慮する機能として、特性値を取得する機能

(2) 設計仕様項目

コンクリートピットに求められる空間・力学安定性が要求される期間は、一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木分野における構造設計、並びに耐久性設計の方法が適用可能であるといえる。表 2.3-3 に要求機能に対するコンクリートピットの設計仕様項目を示す。

力学特性に関わる設計仕様項目として圧縮強度を設定した。建設操業期間中の力学安定性を確保するため、底部コンクリートピット上に作用する廃棄体等の上載荷重や、側部コンクリートピットに対して側部低拡散材打込み時に作用する液圧などに対する適切な強度を確保する必要がある。

収容性に関わる設計仕様項目として出来形を設定した。底部コンクリートピット上に廃棄体を定置することからコンクリート仕上がり面には高い精度の平坦性が要求される。また、側部コンクリートピットでは廃棄体を定置する内側寸法を確保するとともに、その外側の部材である側部低拡散材、側部緩衝材の部材厚を確保する上で出来形の管理が重要となる。

表 2.3-3　コンクリートピットの要求機能と設計仕様項目

要求機能		段階	技術要件	設計仕様項目
操業上の機能	確実な建設、操業が行われる空間、力学安定性の確保	建設操業	力学特性	・圧縮強度
			収容性	・出来形

(3) 管理項目および管理目標値

コンクリートピットの確証試験における管理項目とその管理目標値を設定した。

上述した設計仕様項目の圧縮強度、出来形に加え、外観を管理項目として選定した。管理項目および管理目標値を表 2.3-4 に示す。出来形は、延長、基準高、部材厚さ、鉛直度で管理し、外観は、力学特性や収容性へ影響を与える初期欠陥を管理することを目的とし、露出面の状態（コールドジョイント、豆板、砂すじ等の表面欠陥がない）、ひび割れ、打継ぎ目の状態（一体性が確保されていること）を目視確認で管理した。

表 2.3-4　コンクリートピットの管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目		管理目標値
空間・力学安定性	圧縮強度		60N/mm^2
	出来形	延長	設計値±20mm
		基準高	設計値±30mm
		部材厚さ	-5mm 以上、15mm 以下
		鉛直度	設計値±20mm
	外観	露出面の状態	－
		ひび割れ	－
		打継目の状態	－

2.3.3　確証試験の課題と実施内容

(1) 確証試験の課題

コンクリートピットでは、必要な収容性を満足する施工精度で施設が建設できること、力学安定性の確保に関わる所定の力学特性を有する施設が建設できること、安定性を損なうような欠陥を生じさせず、均質な部材を構築するための施工方法の確認を行うことを目的とし、以下の考え方で検討を実施した。

コンクリートピットに期待される要求機能（空間・力学安定性）に対しては、前述のように一般土木構造物として求められる品質管理に基づいて施工を行うことにより満足されるものと考えられる。ただし、使用材料の特殊性や、施工環境、材料の変動などの要因をふまえた検討も行った。

また、基本安全機能に関する副次的な機能のうち、閉じ込め、遮へい、移行抑制についても一般土木構造物として適切な施工を行うことによりその効果が期待できると考えられる。したがって、これらの副次的な要求機能に関しては、密実なコンクリートを施工することが重要であり、具体的にはひびわれや豆板の抑制が主な留意点である。

上述の考え方を踏まえて、施工の成立性や要求機能の確保を確証試験で確認する上で考慮すべき課題を検討項目と関連付けて整理した。コンクリートピットの検討課題を表 2.3-5 に示す。課題は要求機能、技術要件、設計仕様項目および管理項目（管理目標値）と対応する形式でまとめた。検討項目は、材料および配合の選定（材料検討）、選定された材料および配合が、対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうか確認するための検討（施工検討）、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）に分類した。

表 2.3-5　コンクリートピットの検討課題

要求機能	技術要件	設計仕様項目	管理項目	管理目標値	検討項目	課題	課題に対する対応
空間・力学的安定性の確保	力学特性 収容性 （内空寸法）	圧縮強度	圧縮強度	60N/mm^2 以上	初期性能の検討	【原位置施工後の圧縮強度】 実規模試験で構築した部材で力学的安定性を確保するために必要な強度を有することと、施工環境による強度発現傾向を把握すること	原位置採取コアによる圧縮強度、積算温度と圧縮強度の関係の評価
		出来形（延長・基準高・部材厚さ・鉛直度）	出来形延長(①) 基準高(②) 部材厚さ(③) 鉛直度(④)	①設計値±20mm ②設計値±30mm ③-5mm 以上、15mm 以下 ④設計値±20mm	施工検討	【出来形の確保】 廃棄体寸法や操業機械から求められるクリアランスを踏まえた施工精度が要求される	コンクリートピット自体の部材厚と、コンクリートピット構築後の内空断面を対象とした出来形確保の確認
		［阻害要因に対して要求機能を確保する上で求められる施工性］ 各設計仕様項目共通	－	－	材料検討・初期性能の検討 （フレッシュ性状の確保）	【流動性・コスト】 材料分離抵抗性を付与するために使用する石灰石微粉末はフレッシュ性状やコストに大きく影響する。適切な種類・量を選定する必要がある。	配合選定時の石灰石微粉末量の設定
						【材料のばらつき】 材料のばらつきは、構築部材に欠陥を生じる可能性があり、極力小さくする必要がある。	材料のばらつきや環境温度が与える影響度の確認 混和剤添加率による調整方法の策定
						【環境温度の変化】 環境温度の変化によりフレッシュ性状は大きく異なるため、温度が変化した場合の対策が必要である。	
					施工検討 （施工方法）	【打込み方法】 これまで実規模の試験は実施されていないため、各部位の特徴に応じた打ち込み方法は確立されていない。	流動勾配の確認と打ち込み位置の検討
						【ひび割れの抑制】 強度低下をもたらす可能性のあるひび割れを抑制するための養生・仕上げ方法を各部位の特徴に応じて検討する必要がある。	ミスト散布、再振動、表面仕上げ方法の検討

(2) 実施内容

「(1) 確証試験の課題」に示した課題に対する対応と確証試験での実施内容を表 2.3-6 に整理した。実施内容の詳細および試験結果については次章で個別に述べる。

表 2.3-6　コンクリートピット確証試験の課題に対する対応と実施内容

検討項目	課題に対する対応	実施内容
材料検討	・所定の圧縮強度を確保でき、材料のばらつきや環境温度の影響を受けにくい、充てん性・流動性に優れた材料・配合を選定	石灰石微粉末の種類と量と混和剤の種類、添加率をパラメータとし環境温度を変化させた性状確認試験を実施した。
施工検討	・部位の特徴を踏まえた打込み方法の確立	平面部材（底部、上部）と壁部材ではコンクリートの流動性が異なることから、それぞれの部材において、打込み時の流動勾配に関わるデータの取得・分析により部位ごとの流動性、充てん性を評価した。
	・ひび割れ抑制のための養生・仕上げ方法の検討	ミスト散布、再振動、表面仕上げの方法に着目し、それらの施工時期および養生方法の効果について検討した。
	・出来形確保の確認	部材単体（部材厚）と複合部材での出来形確保（施設としての内空確保）について、既設部材の計測値と合わせて整理した。
初期性能の検討	・施工後のコア採取、圧縮試験による評価	室内試験、プラント、現場水中養生での供試体による圧縮試験を実施した。

2.3.4　確証試験結果

(1) 材料検討

1) 材料・配合仕様の設定

a. 既往の検討

土木学会では、コンクリートピットの要求機能として、空間・力学安定性、放射線の遮へい、放射性核種の収着を設定しており、これに対する設計仕様項目として、コンクリート圧縮強度、鉄筋強度および配筋・継手・かぶり、乾燥単位容積質量、部材寸法（厚さ）、収着分配係数、鉱物組成を設定している[2]。これらの設計仕様項目に対して、コンクリートピットは、表 2.3-7 に示す材料を使用することとしている。

表 2.3-7　コンクリートピットの使用材料（土木学会）[2]

材料	概要
セメント	低熱ポルトランドセメント
骨材	粗骨材：石灰砕石 細骨材：石灰砕砂
混和材料	フライアッシュ
	膨張材
	石灰石微粉末
	高性能 AE 減水剤

b．基本設計

余裕深度処分における安全評価の説明性向上の観点から、コンクリートピットの材料は他部材と同等の材料・配合であることが望ましいと考えられる。

本試験では、既往の検討[3]で選定された材料および配合を基本として、主たるセメント系人工バリアである低拡散材の配合を参考に、低コスト化、高性能化を志向し、表 2.3-8 に示す方針で配合設計を実施した。

流動性やブリーディングの低減および材料分離抵抗性の向上による、また、人為的な施工不良に起因する局所的な不均質性を排除するための自己充てん性による、品質低下のリスクを低減させる目的で、石灰石微粉末を用いた粉体系の高流動コンクリートを選定した。水結合材比、空気量、スランプ等は、低拡散材の品質相当を目標とした。

表 2.3-8　本試験におけるコンクリートピットの基本配合設計

分類	項目	概要
材料	セメント	低熱ポルトランドセメント
	混和材	フライアッシュⅡ種
		石灰石微粉末
	粗骨材 細骨材	石灰砕石 石灰砕砂
	混和剤	高性能 AE 減水剤
	膨張材	膨張材
配合（目標値）	水結合材比	45%
	空気量	2.5±1.5%
	スランプ	高流動コンクリート スランプフロー65±5cm
	漏斗流下時間	V 漏斗（吐出口 75×75mm） 7～13 秒
	間隙通過性	ボックス形（障害 R2） 充てん高さ 300mm 以上

c．室内試験における配合の選定

(a) 配合検討方針

a）季節変化による環境温度の影響検討

季節変化による環境温度の変化は、フレッシュ性状に大きな影響を及ぼす。そこで、選

定された配合に対し、環境温度の変化を想定した試験を実施し、温度変化に伴うフレッシュ性状の変動への対策を検討した。試験では、想定した環境温度に対して、練上りのコンクリート温度の目標値とし、表 2.3-9 に示す温度を設定した。

試験は 2 段階で実施した。まず、石灰石微粉末の混合率および混和剤の添加率を固定したケースで、環境温度を要因として、フレッシュ性状の経時変化を確認した。次に、フレッシュ性状の変動に対し、実施工では混和剤での調整が想定されるため、石灰石微粉末の混合率を固定し、混和剤添加率を変動させた試験を実施した。

表 2.3-9　想定した環境温度と本試験における設定温度

想定した環境温度 （室内温度、材料温度）	5℃	10℃	20℃	30℃	10℃
練上り時の 目標コンクリート温度	5℃	10℃	20℃	30℃	20℃※

※　　：低温時、練混ぜ水に温水を使用してコンクリート温度を調整することを想定したケース

b）異なる石灰石微粉末を使用した時の影響検討

高流動コンクリートでは、粗骨材とモルタルの分離抵抗性を向上させる目的で、石灰石微粉末を用いる場合が多い。本試験で対象とする粉体系高流動コンクリートでは、フレッシュ性状確保における石灰石微粉末への役割が特に重要で、例えば、石灰石微粉末の産地変更が発生した場合にはフレッシュ性状への影響が少なからず発生すると想定される。そこで、ステップ 2 では石灰石微粉末の種類（表 2.3-10 参照）およびその量がフレッシュ性状に与える影響を粘性とブリーディング抑制の観点から検討・評価し、配合を選定した。さらに、選定された配合に対して、石灰石微粉末の産地が異なることが硬化性状に及ぼす影響についても確認した。

表 2.3-10　使用した石灰石微粉末

LP1	石灰石微粉末（太平洋セメント社、熊谷工場製） 密度=2.70 g/cm^3、比表面積=5,390cm^2/g
LP2	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.71g/cm^3、比表面積=5,510cm^2/g

(b) 室内試験による評価

a）季節変化による環境温度の影響

図 2.3-3 に各環境温度におけるスランプフローと漏斗流下時間の経時変化を示す。図の凡例は表 2.3-9 に示した温度に対応している。混和剤添加率は 0.85%で統一した。その結果、環境温度 30℃でのスランプフローは、経時的なロスが大きく、60 分経過後でスランプフローの目標値（65±5cm）を大きく下回ることが確認され、対策が必要であることが分かった。それ以外のケースは 120 分経過後においても目標値を満足することが可能であることがわかった。石灰石微粉末は LP1（太平洋セメント社、熊谷工場製）を用いた。

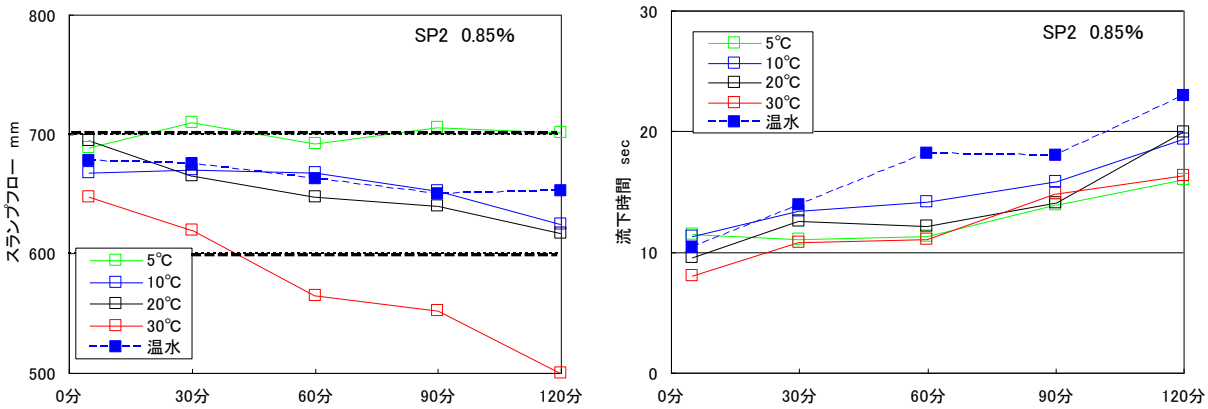


図 2.3-3　経時変化（10～30℃　左：スランプフロー、右：漏斗流下時間）

図 2.3-4 に環境温度 30℃で、混和剤添加率を増加させた場合のスランプフローと漏斗流下時間の試験結果を示す。スランプフローは混和剤添加率を 0.90%に増加した場合に 30～90 分では目標値（65±5cm）を満足すること、漏斗流下時間はほとんど変化がないことを確認した。

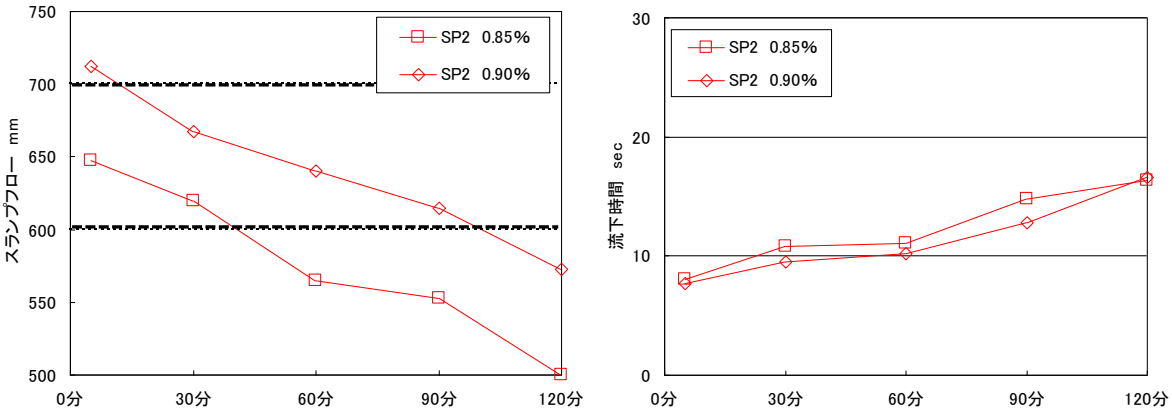


図 2.3-4　経時変化（30℃　左：スランプフロー、右：漏斗流下時間）

以上の結果より、環境温度がフレッシュ性状へ与える影響を把握した。高温時（本試験では 30℃）にはスランプフローのロスが大きくなることが確認された。また、その対策として、プラントにおける試製造の結果によって混和剤添加率を調整し、製造時の各バッチに反映することが有効であることが分かった。このような対策を実施すれば、高品質な材料を製造可能であることが明らかとなった。

b）異なる石灰石微粉末を使用した時の影響

石灰石微粉末として LP2（宮城石灰工業株式会社製）を用いた配合において、石灰石微粉末量をパラメータとして、スランプフローの目標値の中央値 650mm を得られる高性能 AE 減水剤（SP）の添加率、V 漏斗流下時間、ブリーディング率、間隙通過性を評価し、最適な石灰石微粉末量を選定することとした。試験条件として、環境温度は 20℃と

した。室内試験結果を図 2.3-5～図 2.3-8 に示す。これらの図には比較のため、LP1（太平洋セメント社、熊谷工場製）の結果も示した。

図 2.3-5 に示すように、SP 添加率は石灰石微粉末量が 216kg/m³ の付近で極値をとるが、変動は小さいことが確認された。

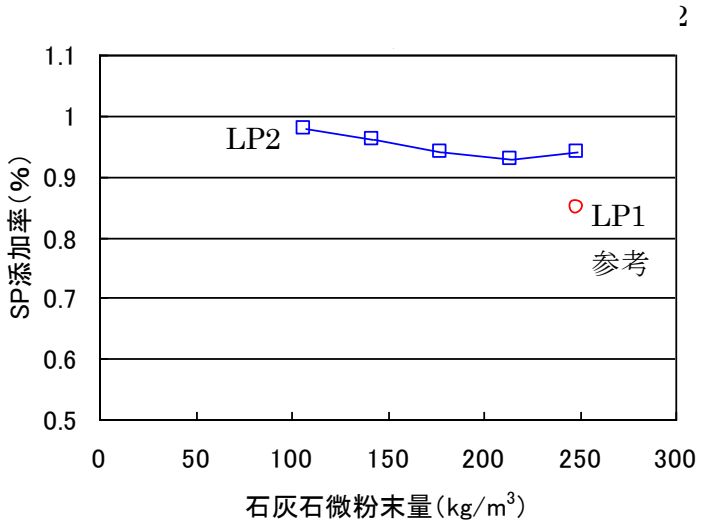


図 2.3-5　スランプフローを 650mm とする時の石灰石微粉末量と SP 添加率の関係

石灰石微粉末量と V 漏斗流下時間の関係を図 2.3-6 に示す。一番粘性の低くなる石灰石微粉末量は 178kg/m³ 付近であることが確認された。

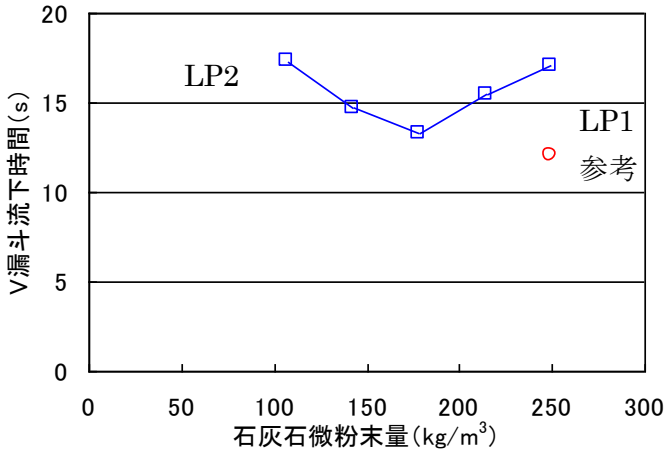


図 2.3-6　石灰石微粉末量と V 漏斗流下時間の関係

石灰石微粉末量とブリーディング率の関係を図 2.3-7 に示す。石灰石微粉末量を増加するほどブリーディング率が小さくなる傾向が認められるが、178kg/m³ 以上ではその傾向はやや緩やかになった。

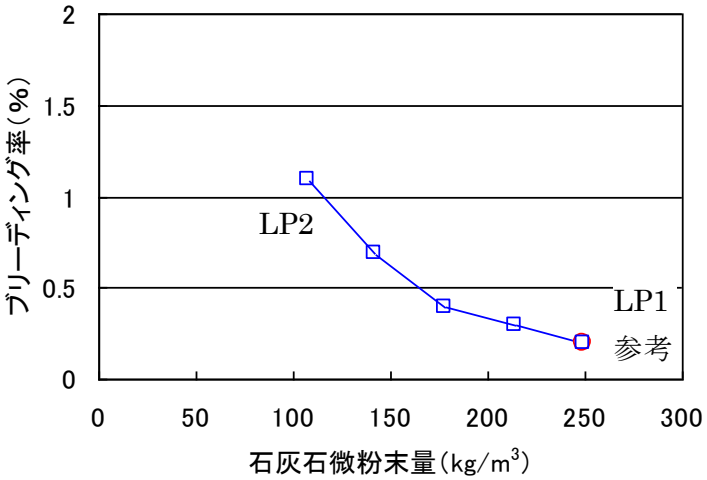


図 2.3-7　石灰石微粉末量とブリーディング率の関係

間隙通過性については、図 2.3-8 に示すように、石灰石微粉末量が 142kg/m³ 以上では間隙通過性試験（R2）における充てん高さ 300mm を満足することを確認した。

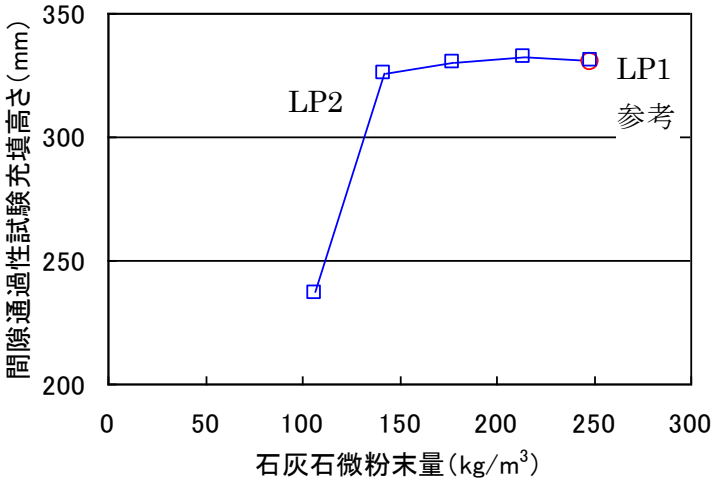


図 2.3-8　石灰石微粉末量と間隙通過性の関係

以上の結果より、石灰石微粉末の種類を変更しても、高性能 AE 減水剤（SP）添加率の調整により、LP1 と同程度のスランプフロー、V 漏斗流下時間を実現できることを確認した。

また、最適な石灰石微粉末量についても検討を実施した。その結果、一番粘性の低くなる（V 漏斗流下時間が最初となる）石灰石微粉末量 178kg/m³ 付近においてもブリーディング、間隙通過性に問題が無いこと、また、スランプフロー650mm を確保する高性能 AE 減水剤の添加率も 0.9～1.0%の範囲で概ね変わらない事から、LP2 を用いた配合における石灰石微粉末量は、178kg/m³（LP2/B=50%）が最適であると判断した。

d．選定配合

室内試験によって決定した使用材料を表 2.3-11 に、選定配合を表 2.3-12 に示す。本確証試験におけるコンクリートピットの各部位での使用配合を表 2.3-13 に整理した。比較のため、施工試験においても LP1 と LP2 の 2 種類の石灰石微粉末を用いた。

表 2.3-11　コンクリートピットの使用材料

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント（太平洋セメント社） 密度=3.22 g/cm^3、比表面積=3,640cm^2/g
細骨材	S	石灰砕砂（八戸松館産）：密度=2.66g/cm^3、FM=2.79
粗骨材	G	石灰砕石（八戸松館産）：最大骨材寸法=20mm、 岩種：石灰岩、密度=2.69g/cm^3、FM=6.63
石灰石微粉末	LP1	石灰石微粉末（太平洋セメント社、熊谷工場） 密度=2.70 g/cm^3、比表面積=5,390cm^2/g
	LP2	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.71g/cm^3、比表面積=5,510cm^2/g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種（東北電力㈱　能代火力発電所） 密度=2.18g/cm^3、比表面積=3,810cm^2/g
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン（太平洋マテリアル）、密度＝3.05 g/cm^3
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	As	空気量調整剤ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.3-12　コンクリートピットの選定配合

LP/B (%)	W/B (%)	W/P (%)	単位量（kg/m^3）								SP 添加率(P×%)
			W	LPC	FA	LEX	LP1	LP2	S	G	
70	45.0	26.4	160	229	107	20	249	—	814	780	0.85
50		30.0					—	178	885	780	0.94

※　　結合材量:B=LPC+FA+LEX，粉体量:P=B+LP

表 2.3-13　コンクリートピット各部材での使用配合

部材		配合	
		LP1 使用	LP2 使用
		LP/B=70%	LP/B=50%
底部		○	—
側部	左側	○	—
	右側	○	—
	手前部	—	○
上部		—	○

2) 材料特性試験（室内試験・実機試験）

コンクリートピットの配合検討で選定した LP/B=70%（LP1 使用）、LP/B＝50%（LP2 使用）の配合について、施工性に影響を及ぼす基本的な特性値と、硬化物性を取得するため、フレッシュ性状試験と、圧縮強度試験を実施した。なお、試験は室内試験と、実際の生コンプラントのミキサを使用する実機試験で実施した。

a．フレッシュ性状

選定配合（LP/B=70%（LP1 使用）、LP/B=50%（LP2 使用））におけるフレッシュ試験結果を表 2.3-14 に示す。両配合とも室内試験練りと、実機試験練りにおいて大きな違いが無く、安定したフレッシュ性状であることが確認できた。

表 2.3-14　選定配合におけるフレッシュ試験結果

LP/B (%)	室内 実機	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ (mm)	V漏斗流下時間 (秒)	間隙通過性 (mm)	空気量 (%)	温度 (℃)
70 (LP1)	室内	678	10.4	―	2.3	17.0
	実機	690	10.7	326，326，325	2.1	16.8
50 (LP2)	室内	656	12.2	330，331，328	2.0	21.0
	実機	660	11.9	324，327，326	1.7	25.5

b．硬化物性

選定配合（LP/B=70%（LP1 使用）、LP/B=50% LP2 使用））の圧縮強度試験結果を表 2.3-15 に示す。圧縮強度は同材齢でほぼ同程度であった。

表 2.3-15　選定配合の圧縮強度試験結果

LP/B (%)	圧縮強度（N/mm²）		
	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
70（LP1）	16.2	44.7	71.7
50（LP2）	17.8	46.3	73.9

以上のように、結合材と石灰石微粉末の種類と混合割合（LP/B）が異なる 2 種類の配合のフレッシュ性状および硬化性状は同等の値を示したことから、産地が異なるいずれの石灰石微粉末も施工試験に適用可能であると判断された。

(2) 施工検討

1) 検討結果

a．打込み方法

コンクリートピットは、底部、側部（奥部、両側部、手前部）、上部に分けられる。コンクリートピットに使用するコンクリートは高流動コンクリートであり、その流動性を生かし、バイブレータによる加振（締固めを目的とした）を行わない施工とした。しかし、例外として形状の特性上、流動勾配が大きくなる底部コンクリートピット、上部コンクリートピット

の施工においては、筒先を移動させ複数個所からの打込みを実施し、下部のコンクリートとの一体性確保と流動補助を目的に、バイブレータを補助的に使用した。側部に関しては、打込み箇所を固定し、端部まで自然に流動させた後、筒先部が天端高さに上がった時点で筒先を端部に移動させる打込み手順を採用した。その結果、底部、側部、上部のいずれのコンクリートピットにおいても隅々まで充てんができることを確認した。

コンクリートピットの流動勾配を部位ごとにまとめたものを図 2.3-9 に示す。図に示すとおり、流動勾配は平面的に広い部材（底部、上部）と、延長に対して幅が狭い部材（奥部、両側部、手前部）で異なり、コンクリートが打ち込まれる部材形状に影響を受けることが確認された。これは低拡散材と同様な傾向であり、底部、上部ではコンクリートが投入先から面的（二次元的）に流動するのに対し、奥部、両側部、手前部では、コンクリートが型枠の間を線的（一次元的）に流動する違いで流動勾配に差が生じたと考えられる。

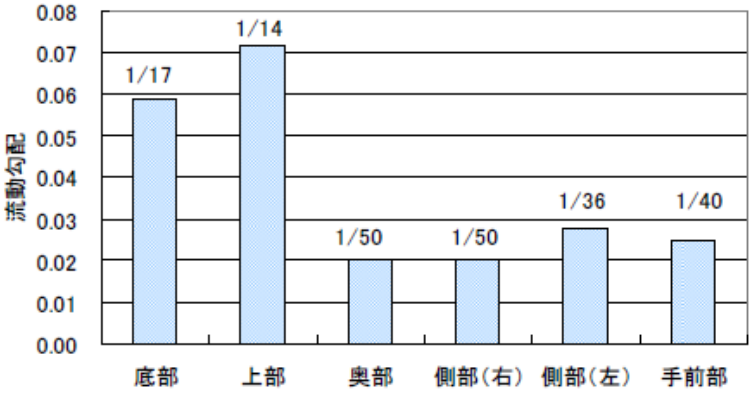


図 2.3-9　コンクリートピットの流動勾配

図 2.3-10 に側部コンクリートピット（左側）打込み時の吐出量と流動勾配の関係を示す。これより、流動勾配は吐出量によっても変化が見られ、側部打込み時の場合は、吐出量が増大すると流動性も増大する傾向が確認された。

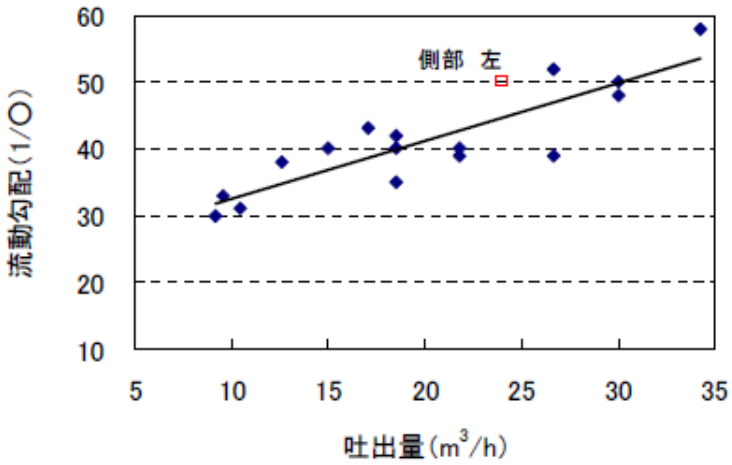


図 2.3-10　吐出量と流動勾配の関係

以上の結果から、実施工においては各部位の特長（平面の広さ、部材幅、部材延長、部材厚さ等）から、打込み箇所の数と場所の設定、吐出量の調整による流動勾配の調整、必要に応じたバイブレータの補助的な使用等が効果的と考えられる。選定したコンクリートピットの配合は、指針[4]に示される粉体系高流動コンクリートの目標流動勾配（1/10～1/20）と同等レベルである。また、脱型後のコンクリート側面に豆板や初期欠陥がなく、隅々まで充てんされることを確認した。実施工においても本試験で選定した配合、施工方法を用いることで品質の高い部材構築が可能である。

b. ひび割れ発生状況の確認と抑制方法

コンクリートピットの各部位（底部、側部、上部）には、表面に微小なひび割れが確認された。上部コンクリートピットのひび割れ状況を図 2.3-11 に示す。これらのひび割れについて図 2.3-12 の位置でコア削孔を行い、また、すべてのひび割れに対し、表層から 2mm 程度をグラインダーで削り、ひび割れ深さを確認した。その結果、今回のひび割れは、いずれも表面近傍（2mm 以下）であることが確認され、コンクリートピットの性能に影響を与えるものではないと考えられた。

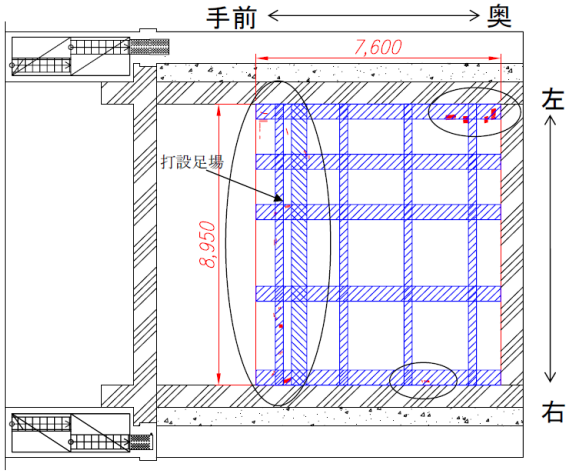


図 2.3-11　上部コンクリートピットのひび割れ状況

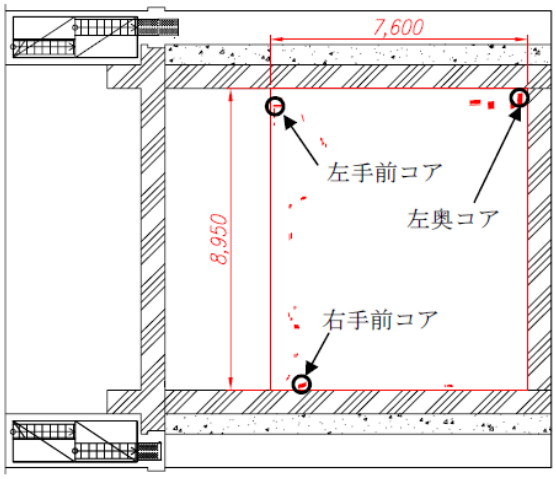


図 2.3-12　ひび割れ深さ確認コア削孔位置

本試験で確認されたひび割れに対する課題と抑制対策について以下にまとめる。

コンクリートピットはその構造上、平面に広い部材（打込み後の表面露出が多い底部と上部）や、既設部に拘束を受けやすい部材（延長がある壁部や、底面と四辺を拘束される上部）が存在する。

平面に広い底部コンクリートピットと上部コンクリートピットにおいては打込み後の急激な乾燥が原因とされるプラスティック収縮ひび割れ、表面付近の異物（次施工の壁部材施工時の型枠サポート設置用アングルを設置しての打込み等）の影響に起因するひび割れに対し対策を検討した。本試験では、打込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブレータによる表面仕上げを施し、ひび割れの低減効果があることを確認した。使用した表面締固め

バイブレータと、使用状況を図 2.3-13、図 2.3-14 に示す。

図 2.3-13　表面締固めバイブレータ

図 2.3-14　施工状況

上部コンクリートピット、壁部コンクリートピットは周囲および底面を拘束されることから、外部拘束による温度ひび割れに対し厳しい条件となる。本試験では、対策として膨張材を使用した配合を選定し、コンクリートピットを構築した。その結果、貫通ひび割れは確認されず、膨張材の使用により、外部拘束による温度ひび割れを抑制できる可能性が確認できた。

c. 出来形確保

コンクリートピットの出来形においては、コンクリートピット構築後の内空断面の確保とコンクリートピット自体の部材厚の確保が課題となる。本試験は各部材（緩衝材、低拡散材、コンクリートピット）においてレベル計測で施工前後の基準高を計測し、施工前後の基準高の差により出来型管理を実施した。

出来形管理の計測値を表 2.3-16 に示す。コンクリートピットのいずれの部位（底部、側部、上部）における出来形も JASS5N[5]の規格値内に仕上がり、検討の上選定した配合および施工方法の下、高い精度で部材の施工が可能であることがわかった。

表 2.3-16　出来形管理の計測値（底部、側部、上部）

出来形	規格値	計測値の範囲
延長（空洞長軸方向）	設計値±20mm	-8～+3
基準高	設計値±30mm	-5～+8
部材厚さ	-5mm 以上 15mm 以下	+3～+10
鉛直度（部材下端での水平方向のずれ）	設計値±20mm	-2～+5

2) 施工時の品質管理

施工時の品質管理として、①フレッシュコンクリートの受入れ可否を判断するための品質管理、②打ち込まれたコンクリートの性能を確認するための品質管理を行った。

本試験では、事前にコンクリート標準示方書[6] 、JASS5N[5] に基づき品質管理基準を定め、これにより品質管理を実施した。表 2.3-17 に品質管理項目と実証試験における計測値の範囲を示す。ここでは、使用材料の特性に応じて、求められる施工性と品質確保の観点からこれまでの施工実績を考慮したうえで管理項目と基準値を設定した。施工試験の結果、これらの基準値を達成し、かつ初期性能として問題の無い品質が確保できた。したがって、ここで設定した基準値を達成することにより初期性能の確保が可能であることの傍証が得られたといえる。

表 2.3-17　コンクリートピットの品質管理項目と計測値

検査項目・基準値および準拠した仕様書類				実証試験における計測値の範囲	
検査・試験の項目	検査基準値 規格値	JIS 等の規格	検査頻度又は ﾛｯﾄの大きさ		
スランプフロー	650±50mm	JIS A 1150	1 回/150 ㎥	600～693	
500mm フロー 到達時間	3～15 秒 (参考値)	JIS A 1150	〃	5.2～10.0	
漏斗流下時間	7～13 秒 (参考値)	JSCE F -512	〃	9.4～20.0	
間隙通過性	ボックス型(R2) 充てん高さ 300mm 以上	JSCE-F511-1999	〃	305～334	
空気量	2.5±1.5%	JIS A 1128	〃	1.3～4.0	
塩化物量	0.2kg/㎥ 以下	JASS 5N	1 回/日	0.03 以下	
単位水量 (エアメータ)	±20kg/㎥	土木研究所	午前 1 回 午後 1 回	-17.0～+8.3	
圧縮強度	σ ≧60N/mm²	JIS A 1108	1 回/150 ㎥	標準	65.4～72.7
	(91 日)			現場 水中	51.8～60.3

2.3.5　初期性能の検討

(1) 初期性能確認試験項目

初期性能確認試験では、コンクリートピットの初期性能を確認するために、施工された施設に対しデータを取得した。主な要求機能である空間・力学安定性に係わるデータの他、副次的な要求機能に関わるデータや設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得を目的とした試験も実施した。コンクリートピットの初期性能確認試験における試験項目を表 2.3-18 に示す。

主な要求機能である力学安定性に対しては、各段階で採取した供試体について、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張試験を実施した。供試体の種類は、プラントでコンクリート製造時に採取し標準養生を行ったもの、施工のばらつきや、環境温度等の影響を把握することを目的として、現場で採取し、現場水中養生を行ったもの、および実構造体からコア抜きで採取したものがある。「(2) 初期性能確認」ではコンクリートピットの初期性能として特に重要な圧縮強度の結果について示す。

表 2.3-18　コンクリートピットの要求機能と初期性能試験項目

機能			段階	機能の説明	試験項目														
					力学特性			遮蔽	収着	透水	拡散／透水への影響因子					化学安定性		熱特性	
											ひび割れ								
											室内試験				調査				
					圧縮強度試験（20℃ 60℃ 105℃）	静弾性係数試（20℃ 60℃ 105℃）	割裂引張試験	乾燥密度試験(JASS5N)	間隙水 pH 測定	透水試験	自己収縮試験（20℃ 60℃）	拘束膨張試験（20℃ 60℃）	長さ変化試験	断熱温度上昇試験	ひび割れ調査	固相分析	アルカリ骨材反応性試験	熱伝導率試験	比熱試験
要求機能	基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射線物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること															
		遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと				○											
		移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移動を抑制すること							○	○	○	○	○			○	○
				放射性核種を収着すること					○										
				低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと						○	○	○	○	○	○				
	操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	○	○	○												
材料物性			設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得													○	○	○	○

(2) 初期性能確認

力学特性に対しては、各部位において、室内試験で採取した供試体、施工後に採取したコア供試体、プラント、および現場水中養生での供試体について、圧縮試験を実施した。その結果、いずれの部材（配合）も設計基準強度 60N/mm² を確保できることを確認した。

一方で、設計基準強度 60N/mm² の発現には、比較的長期の材齢が必要であることが確認された。コンクリートピットの設計・施工においては、設計基準強度の管理材齢の設定が重要となることから、本試験では、設計基準強度に達する材齢を積算温度で整理した。

圧縮強度が設計基準強度 60N/mm² に達する積算温度、および材齢を表 2.3-19 に示す。

コンクリートピットにおいては設計基準強度に達するために必要な積算温度は平均して 2,000（℃・日）程度、材齢換算では約 100 日程度が必要であることがわかった。

表 2.3-19　設計基準強度に達する積算温度および材齢

	底部	奥部	側部	手前部
打設日	2008/11/24	2008/12/18	2009/2/4	2009/8/6
積算温度（℃・日）	2,137	1,732	1,802	1,930
材齢（日）	111	92	89	70

2.3.6　まとめと今後の検討課題

(1) 課題に対する照査

本試験の目的は、コンクリートピットの要求機能を確保するための使用材料、施工技術、施工方法等の実施工への適用性を明確にして、構築した部材の施工品質を確認することである。表 2.3-5 に示した本試験の課題に対する照査の結果を以下にまとめる。

- 材料検討について、低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動コンクリート配合を選定した。選定過程において、石灰石微粉末の種類や量、環境温度の変化がフレッシュ性状に与える影響は未知であったが、確証試験を通じてそれらの変動要因に対しては混和剤添加率で調整が可能であることを実証した。本試験で確立したプロセス（プラントにおける環境温度を踏まえた試製造を行い、その結果によって混和剤添加率を調整し、製造時の各バッチに反映）は、高品質の部材を構築するための知見として実施工に反映できる成果である。
- 施工検討における打込み方法について、ポンプ圧送を前提とした検討を実施した。実物大の施工試験を通じて、打込み箇所の数と場所の設定が重要であること、また、吐出量の調整による流動勾配の調整、補助バイブレータの使用が有効な手段であることを明らかにした。
- 地下空洞内の温度環境において、施工検討におけるひび割れの抑制について、コンクリート表面の乾燥が原因とされるひび割れを対象として実物大の施工試験を実施した。その結果、打込み中のミスト散布、再振動、表面締固めバイブレータによる表面仕上げによる対策がひび割れの制御に有効であることを確認した。
- 地下環境における実物大の施工検討の結果、コンクリートピットのいずれの部位（底部、側部、上部）における出来形とも JASS5N に基づいて設定した目標値内で施工でき、技術要件である収容性が充足されることを確認した。
- コンクリートピットの初期性能としての力学特性について、室内試験で採取した標準養生供試体、長距離圧送を伴う施工後に採取したコア供試体、出荷プラントでの標準養生供試体、地下環境での現場水中養生での供試体を用いた試験を行った結果、いずれも設定した圧縮強度を満足することを確認した。選定した配合を用いた施工により、要求機能である力学安定性を満たした部材の構築が可能であることがわかった。

(2) 本プロジェクトでの成果

大規模地下空洞内という特殊な環境下において、現状の土木分野における設計、施工技術が適用できるかという観点から検討・試験を実施した。その結果、所定の出来形精度と品質が確保できたことが確認され、地下空洞内で施工されるコンクリートピットは地上の施設で行われる既存の施工方法の応用により施工が可能であることが分かった。また、同様にひび割れに対する対策としても、膨張材入りの配合、表面仕上げ、養生が効果的であることが確認された。

(3) 今後の検討課題

実施工においては内空断面の確保が重要となるため、コンクリートピット自体の部材厚は、コンクリートピットより前に施工が計画されている底部緩衝材や低拡散材の出来形に影響される可能性がある。人工バリアシステムを考えた場合、安全評価上の要求機能が求められているのは緩衝材、低拡散材であることから、それら部材の部材厚の確保も重要であり、また施工上のある程度のばらつきを踏まえた余裕代の確保も必要となってくる。

今後はそれらの事を踏まえ、廃棄体寸法や操業機械から求められるクリアランスを設定し、これを確保するように出来形管理の上限下限を別途設定し、設計することが望ましい。

参考文献

[1]（社）土木学会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008 年 6 月、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 (2008).
[2]土木学会: 余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方. (2009).
[3]原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度 地層処分技術調査等ＴＲＵ廃棄物関連処分技術調査地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、(2006).
[4] 土木学会:高流動コンクリート施工指針.(1998).
[5]日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事.(2001).
[6] 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】. (2007).

2.4　充てん材

2.4.1　実施概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.4-1[1]に示す。セメント系材料からなる人工バリア部材には充てん材、コンクリートピットおよび低拡散材がある。廃棄体の周囲には「充てん材」が配置される計画である。ここでは充てん材を、廃棄体間および廃棄体とコンクリートピット間に充てんする「区画内充てん材」と廃棄体上部を充てんする「上部充てん材」に分けて検討する。

本試験で構築した区画内充てん材、上部充てん材の施工状況を図 2.4-2 と図 2.4-3 に示す。

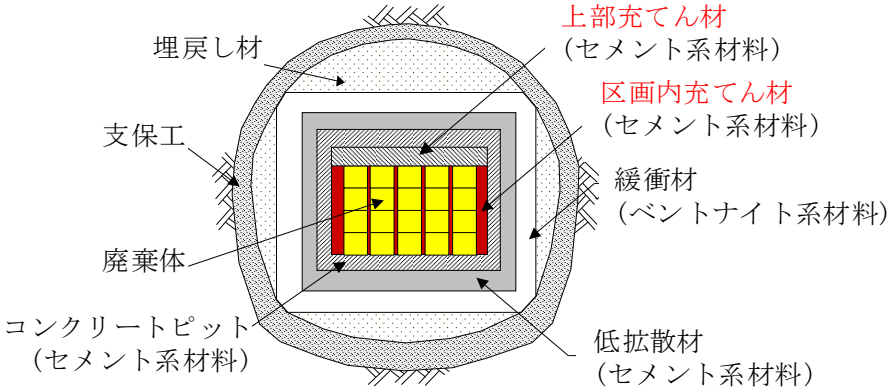


図 2.4-1　地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正）[1]

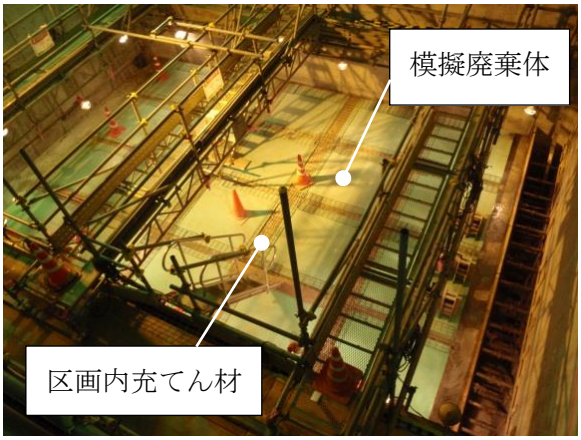


図 2.4-2　区画内充てん材

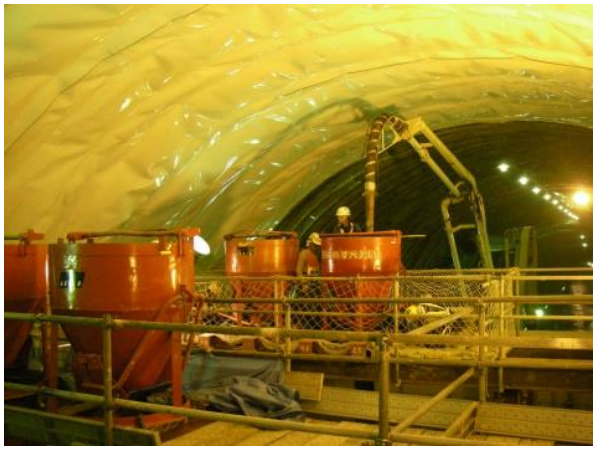


図 2.4-3　上部充てん材施工状況

充てん材は廃棄体を線源とする放射線に対する遮へいと、放射性核種の収着（核種収着）を主たる要求機能とし、放射線量を合理的な範囲で極力低くすること、核種移行の遅延を図るものである。充てん材のうち、区画内充てん材は廃棄体間（一部上部）の狭隘な空間を確実に充てんできるよう高流動モルタルを基本とした配合とした。一方、上部充てん材にはより高い遮へい性能が求められることから粗骨材を使用し乾燥単位容積質量を大きくした高流動コンクリ

ートを選定した。充てん材には放射線環境下での作業となり、遠隔操作による無人化施工が前提とされるため、充てん性や流動性が施工上特に重要な要求事項であった。

充てん材の確証試験は、遮へい性を満足し、施工時の充てん性や流動性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性や出来形および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。試験の主な成果の概要を以下に述べる。

表 2.4-1　充てん材の主な成果の概要

項目	成果概要
遮へい性	遮へい性能に関する管理項目である乾燥単位容積重量について、コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法 JASS 5N [2]に準拠して試験を行った。選定した配合の材料で必要な単位容積質量を確保できることが確認された。
充てん性・流動性	ポンプ方式、バケット方式の両打込み方式における充てん性と流動性、セルフレベリング性について検証を実施し、選定された充てん材の配合で問題無く充てん可能なことを確認した。
廃棄体熱の影響	廃棄体熱による高温環境を想定した配合の選定、硬化物性への影響、施工時の課題を整理した。
放射線管理下での施工（遠隔無人化施工）	無人化施工を模擬した移動式バケットと表面均し装置による仕上げにより、将来的に遠隔操作による無人化施工の可能性を確認した。
他部材との間隙の抑制（区画内充てん材）	打込み後、区画内充てん材の水分が他部材へ吸収されることで界面に間隙が発生する可能性が高いことを確認した。間隙の発生が許される程度により、吸水を抑制するための散水方法を検討する必要がある。

2.4.2　基本条件の設定

(1) 要求機能と技術要件

余裕深度処分施設は要求機能に応じた様々な部材で構成されている。充てん材に求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[3]）において基本安全機能のうち「遮へい」、「移行抑制（核種収着）」が示されている。本試験においても、「1.2.3　人工バリアの要求機能」に記載のとおり施設の建設操業時の遮へいと埋戻し後の移行抑制としての放射性核種の収着を充てん材の主たる要求機能として設定した（表 2.4-2）。

既往の検討（土木学会、2009[3]）では、「遮へい」を確保するための技術要件として「放射線の遮へい性能」を、「拡散抑制」を確保するための技術要件として「核種収着性」をあげている。本試験においても既往の検討と同様に「放射線の遮へい性能」と「核種収着性」を技術要件として設定した。

表 2.4-2　充てん材の要求機能（土木学会、2009[3]を改変）

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏洩を防止すること	－	－
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有すること	●	放射線の遮へい性能
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	－	－
			放射性核種を収着すること	●	核種収着性
			低透水性により，処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	－	－
			連続した地下水移行経路を形成しないこと	－	－
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	－	－
操業上の機能		建設操業	確実な建設，操業が行われる空間，力学安定性が確保されること	－	－
			坑道の形状を維持すること	－	－

(2) 設計仕様項目

既往の検討では、充てん材の技術要件「放射線の遮へい性能」に対して、乾燥単位容積質量、圧縮強度、部材厚さを、「核種収着性」に対しては収着分配係数、充てん量を設計仕様項目として設定している。本試験において「放射線の遮へい性能」に対する設計仕様項目として乾燥単位容積質量、圧縮強度、部材厚さを設定した。一方、「核種収着性」のうち充てん量は本試験では施工後の充てん性を目視により確認することで十分であると判断して設計仕様項目からはずし、収着分配係数のみを設定した。

表 2.4-3　充てん材の要求機能、技術要件と設計仕様項目（土木学会、2009[3]）

要求機能		段階	技術要件	設計仕様項目
基本安全機能	遮へい	建設操業	遮へい性	・乾燥単位容積質量
				・圧縮強度
				・部材厚さ
	移行抑制	埋戻し後	核種収着性	・収着分配係数

(3) 管理項目および管理目標値

充てん材の試験においては、設計仕様項目の中から、以下の考えで管理項目を選定し、管理目標値を設定した。

技術要件「放射線の遮へい性能」に対しては、設計仕様項目のすべてを管理項目に選定した。そのうち、乾燥単位容積質量については選定された配合の単位容積質量を確認することを目的としたため管理目標値は設定していない。技術要件「核種収着性」に対しては、設計仕様項目である収着分配係数が使用した材料の特性に関わるものであり、設計・施工により管理する項目ではないことから管理項目とし設定しないこととした。

圧縮強度の管理目標値は、低レベル放射性廃棄物処分の既往研究における充てん材の設定値[4]である 30N/mm² を設定した。部材厚さは上部充てん材に対する管理項目とした。上部充てん材の高さに対し JASS5N[2]のコンクリート部材の垂直位置精度である±30mm より厳しい高低差±20mm（40mm 範囲）を管理目標値として設定した。

表 2.4-4　充てん材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
遮へい	乾燥単位容積質量	—	試験により確認
	圧縮強度	30N/mm²	
	部材厚さ	±20mm（40mm 範囲）	上部充てん材において設定

2.4.3　確証試験の課題と実施内容

(1) 確証試験の課題

充てん材の施工では、廃棄体発熱の影響を受ける狭隘空間への充てん施工、放射線管理区域内での施工、長距離輸送が必要になるなど、様々な施工・環境上の制約を受けることが想定される。充てん材は、廃棄体間の狭隘な空間に充てんする必要があるとともに、充てん中および硬化後に廃棄体表面からの熱影響を受けることになる。廃棄体の発熱量は小さいものの、ある程度の温度上昇が想定されるため、充てん材の充てん性、間隙通過性などの諸性能に影響が及ぶ可能性がある。また、充てん材は、放射線管理下での施工となるため、遠隔操作が前提となり、充てん中に充てん状況を直接目視確認できないこと、放射線管理区域外から管理区域内の充てん箇所までの長距離輸送を伴うなど、施工上の様々な制約を受ける。さらに、区画内充てん材と上部充てん材においては基本とする要求機能は同じであるが、区画内充てん材では廃棄体間の間隙および廃棄体とコンクリートピット間といった狭隘な空間において隙間無く施工できる確実な充てん性が期待される。一方、上部充てん材は後続する上部コンクリートピット施工時の作業員の被ばくに対する遮へい性がより重要な機能となる。

上述の考え方を踏まえて、施工の成立性や要求機能の確保を確証試験で確認する上で考慮すべき課題を検討項目と関連付けて整理した（表 2.4-5）。課題は要求機能、技術要件、設計仕様項目および管理項目（管理目標値）と対応する形式でまとめた。検討項目は、材料および配合の選定（材料検討）、選定された材料および配合が、対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうか確認するための検討（施工検討）、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）に分類した。

表 2.4-5　充てん材の検討課題の一覧

要求機能	技術要件	設計仕様項目	管理項目	管理目標値	検討項目	課題	課題に対する対応
遮へい	放射線の遮へい性能	乾燥単位容積質量	－	－	材料検討 初期性能の検討	【配合選定】遮へい性を確保する配合を選定すること※上部充てん材において特に重要	単位容積質量の大きな材料・配合の選定 施工後のコア採取、乾燥単位容積質量の測定
		圧縮強度	圧縮強度	30N/mm²	材料検討	【圧縮強度】 実施工においては廃棄体熱環境下での施工となり、圧縮強度に及ぼす影響が懸念される。	下記「廃棄体熱影響の程度」にて検討
		部材厚さ（上部充てん材）	部材厚さ（上部充てん材）	±20mm（40mm 範囲）	施工検討	【部材厚さの確保】 放射線管理下の施工となるため、遠隔無人化施工による打込みで部材厚さを確保しなければならない。	施工後の出来形を確認
		［阻害要因に対して要求機能を確保する上で求められる施工性］ 各設計仕様項目共通	－	－	材料検討・施工検討（流動性・充てん性）	【流動性・充てん性】 廃棄体間の間隙および廃棄体とコンクリートピットといった狭隘な空間で隙間無く充てん可能な流動性が要求される。また、放射線管理下であるため充てん性が要求される。 上部充てん材では、部材厚さ確保のための流動性が必要である。 ※区画内充てん材で特に重要	充てん性・流動性に優れた配合の選定 充てん性（ポンプ打込み時）の評価 充てん性（バケット打込み時）の評価
					材料検討・施工検討（施工環境の考慮）	【廃棄体熱影響の程度】 実施工では廃棄体発熱による高温環境下の施工となり、流動性の低下や硬化体への悪影響が懸念される。	廃棄体熱を考慮した配合の選定 高温環境における養生の硬化物性への影響の評価
						【場内運搬】 荷卸し場所から打込み場所までモルタル・コンクリートの長距離輸送が想定される。ポンプ打込みの場合、長距離圧送により施工性が低下する可能性がある。	長距離圧送性（荷卸し場所から打込み場所までの運搬）の評価
						【放射線管理下の施工】 放射線管理下の施工への対応が要求される。	遠隔無人化施工を前提とした打込み方法の検討
						【他部材との界面に発生する間隙】 遮へい性の観点から、他部材との界面に発生する間隙は極力抑制する必要がある。	間隙の発生を模擬した室内充てん性試験の実施

(2) 実施内容

「(1) 確証試験の課題」に示した課題に対する対応と確証試験での実施内容を表 2.4-6 に整理した。実施内容の詳細および試験結果については次章で個別に述べる。

表 2.4-6　充てん材確証試験の課題に対する対応と実施内容

検討項目	課題に対する対応	実施内容
材料検討	・遮へい性に優れ、廃棄体の熱影響を受けにくい、充てん性・流動性に優れた材料・配合を選定	区画内充てん材では高流動モルタルを、上部充てん材では高流動コンクリートを前提とした配合を選定した。石灰石微粉末量と混和剤の種類、添加率、膨張材の有無をパラメータとし練上がり温度、養生温度を変化させた性状確認試験を実施した。
施工検討	・ポンプ圧送性の確認	地上ヤードで、実施工での配管延長を想定した配管を敷設し、圧送試験を実施した。
	・場内運搬方法をポンプ圧送とした充てん性	打込み時の現地フレッシュ性状の確認ならびに打ち込み時の流動勾配に関わるデータの取得・分析により部位ごとの流動性、充てん性を評価した。
	・放射線環境下での遠隔操作による無人化施工を前提とした打込み方法の検討	打込み方法の机上検討を実施し、バケット方式を選定した。事前実験を実施し、空洞内実試験においてもコンクリートの施工性と合わせて検討した。
	・場内運搬方法に移動式バケットを想定した充てん性	移動式バケットを想定した仮設を構築し、空洞内で実規模の施工試験を実施した。 ポンプ圧送試験と同様の項目で評価した。
	・区画内充てん材と他部材間に発生する間隙の抑制方法	区画内充てん材と他部材間に発生する間隙の原因解明と抑制対策の検討のため、室内充てん性試験を実施した。
初期性能の検討	・施工後のコア採取、圧縮試験による評価	施工終了後、各部位よりコアを採取して、乾燥単位容積質量を測定した。

2.4.4　確証試験結果

(1) 材料検討

1) 材料・配合仕様の設定

a. 既往の検討

土木学会では、充てん材（区画内充てん材、上部充てん材共に）の要求機能として、遮へい、移行抑制を設定しており、これに対する設計仕様項目として、乾燥単位容積質量、部材厚さ、コンクリート圧縮強度、収着分配係数、充てん量を設定している[3]。これらの設計仕様項目に対し、充てん材は、土木学会と同様に表 2.4-7 に示す材料を前提に検討を実施した。

これらの材料は、施工の良否による品質低下のリスク低減とひび割れ制御の観点から選定されたものである。結合材に低熱ポルトランドセメント、および混和材にフライアッシュを用いることで、温度ひび割れの発生を低減する。

表 2.4-7　充てん材の使用材料（土木学会）[3]

材料	概要
セメント	低熱ポルトランドセメント
骨材	細骨材：石灰砕砂
混和材料	フライアッシュ
	石灰石微粉末
	高性能 AE 減水剤

b. 高流動モルタルの選定経緯

充てん材に既存の技術を活用する場合、そのベースとしては、PC グラウト、高流動コンクリート（モルタル）、プレパックドコンクリートの充てんモルタルが参考になると考えられる。ここではそれらの得失を比較して充てん材の配合方針を検討した。充てん材配合検討フローを図 2.4-4 に示す。PC グラウト等に代表されるセメントペーストは、配合上セメント量が多く、マスコンクリートにおいては温度ひび割れ、収縮ひび割れの懸念があるため不採用とした。またプレパックドコンクリートは事前に骨材の投入が必要となり、施工手間と充てん性において不確実性が高いことから不採用とした。以上より、充てん材に使用するセメント系材料は高流動コンクリート（モルタル）を基本とし、区画内充てん材では充てん性を優先させた高流動モルタルを、上部充てん材では遮へい性の観点から高流動コンクリートを選定した。配合選定過程においては、充てん性の確認や施工方法、品質管理方法を検討する必要があり、これについては一般のプレパックドコンクリート等の施工方法、品質管理方法などを参考として設定した。

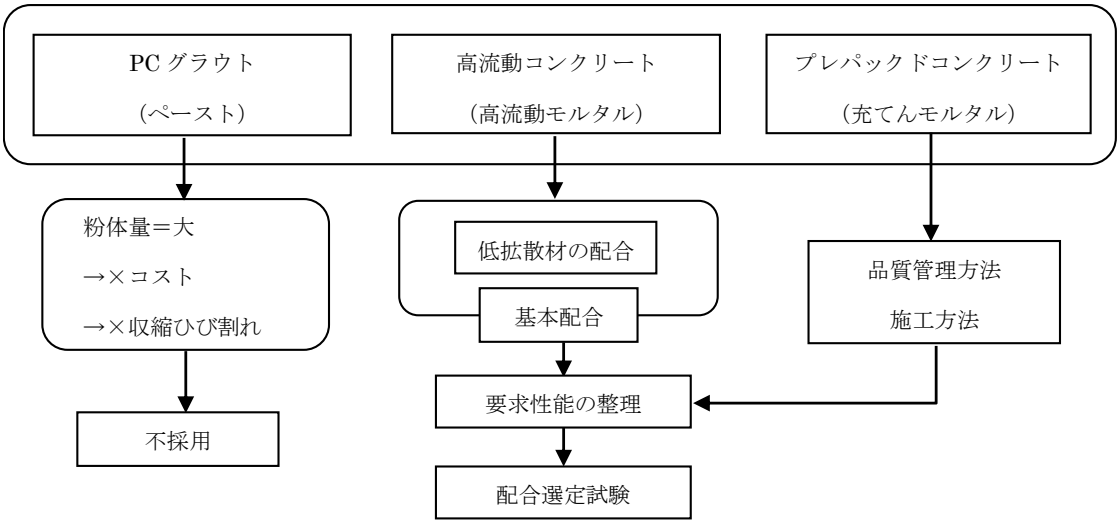


図 2.4-4　充てん材配合検討フロー

c. 基本設計

「2.2 低拡散材」、「2.3 コンクリートピット」に示したように確証試験では、低拡散材やコンクリートピットを対象とした充てん性が高い配合を検討している。充てん材は区画内充てん材と上部充てん材に分けて検討する。区画内充てん材には狭隘な区間をより確実に充填

できる充てん性、上部充てん材は施工後の上部埋戻し等の作業が存在するため遮へい性を重視した配合が必要とされる。

上記の理由から、基本配合として区画内充てん材には低拡散材配合（高流動モルタル）を、上部充てん材にはより単位容積質量の高いコンクリートピットの配合（高流動コンクリート）を選定した。それぞれ要求機能に応じた配合検討を実施した。表 2.4-8 に基本配合の選定を、表 2.4-9 に配合設計方針を示す。区画内充てん材は低拡散材、上部充てん材はコンクリートピットの配合を基本として設定した。このうちスランプフローについては後述するとおり、充てん材に期待する流動性、材料分離抵抗性の観点から目標値を再設定した。

表 2.4-8　本試験における充てん材の基本配合の選定

充てん材の種類	基本配合	選定経緯
区画内充てん材	低拡散材	確実な充てん性が必要
上部充てん材	コンクリートピット	遮へい性向上のためより単位容積質量の高い配合（粗骨材を使用した配合）

表 2.4-9　本試験における充てん材の配合設計方針

	項目	区画内充てん材	上部充てん材
配合方針（目標値）	基本構成	高流動モルタル	高流動コンクリート
	水結合材比	45%	45%
	空気量	2.5±1.5%	2.5±1.5%
	スランプ	スランプフロー82.5±7.5cm	スランプフロー70.0±5.0cm
	漏斗流下時間	モルタル V 漏斗 7～13 秒（参考値）	V 漏斗（吐出口 75×75mm） 7～13 秒程度（参考値）

d. 室内試験における配合の選定

(a) 区画内充てん材

a）検討フロー

区画内充てん材は、同じ高流動モルタルである低拡散材の配合を基本とした。その配合選定では、充てん性の向上を目的とし、室内試験において材料分離をしない範囲で、できる限り流動性を増大させる配合を選定した。また廃棄体熱の影響を受けにくい混和剤を選定した。

配合検討のフローと検討概要を図 2.4-5 に示す。まず（ステップ 1）では、材料分離抵抗性および流動性の観点から、石灰石微粉末量を変化させた 2 種類の配合（配合 LP1：石灰石微粉末量 230kg/m^3、配合 LP2：石灰石微粉末量 307kg/m^3）について目標スランプフローを設定した。さらにそれら 2 種類の配合の内、充てん性の観点から、石灰石微粉末量が 307kg/m^3 の配合を選定した。（ステップ 2）では選定された配合において、廃棄体熱の影響を受けにくい配合の選定を目的とし、フレッシュ性状経時保持性と流動性確保の観点から使用する混和剤を選定した。これらの詳細について次節以降で述べる。

ステップ 1

①2 種類の配合の目標スランプフローを設定
⇒ LP1：（750±50mm） ⇒ LP2：（825±75mm）
（材料分離抵抗性、流動性の観点から設定）

②石灰石微粉末量の選定
⇒ LP2：石灰石微粉末量 307kg/m³の配合を選定
（充てん性の観点から選定）

ステップ 2

廃棄体の発熱を考慮した混和剤の選定
⇒ 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を選定
（経時性状保持性と流動性の観点から選定）

図 2.4-5　配合検討フローと検討概要

b）検討結果

ア）ステップ 1（目標スランプフローの設定と、石灰石微粉末量の選定）

図 2.4-6 に 2 種類の石灰石微粉末量の配合において高性能 AE 減水剤（SP）添加率を変化させた場合のスランプフローと V 漏斗流下時間の関係を示す。LP1 と LP2 の配合を比較すると、石灰石微粉末量が多い LP2 の配合の方が材料分離を起こしにくく、目標スランプフローを大きくできる。充てん性を向上させるためにはスランプフローを増大させることが重要となることから、粘性が高い配合（V 漏斗流下時間が長い）であっても、スランプフローを増大させることが充てん材として適しているといえる。

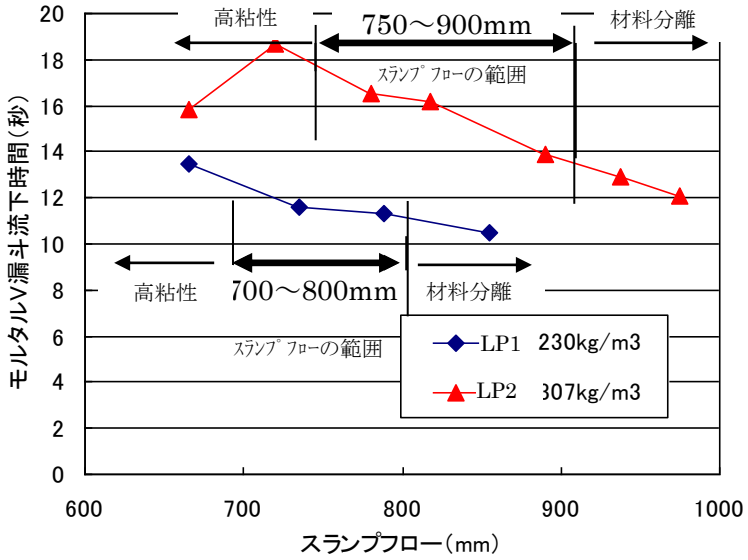


図 2.4-6　スランプフローとモルタル V 漏斗流下時間の関係

室内試験によるスランプフローと石灰石微粉末量の関係をまとめたものを表 2.4-10 に示す。表 2.4-10 より、材料分離を生じず、かつ流動性を確保できるスランプフローの範囲を大きくすることができる LP2（石灰石微粉末量は 307kg/m³）配合が適すると判断し、その目標スランプフローは各フレッシュ特性が良好な範囲として 82.5±7.5cm と設定した。

表 2.4-10　スランプフローと石灰石微粉末量の関係

配合	石灰石微粉末量 (kg/m³)	項　目	スランプフロー(cm)						
			65	70	75	80	85	90	95
LP1	230	コンシステンシー	○	○	○	○	×	－	－
		ブリーディング率	○	○	○	○	○	－	－
		漏斗流下時間（粘性）	○	○	○	○	○	－	－
		自己充填性	×	○	○	○	○	－	－
LP2	307	コンシステンシー	○	○	○	○	○	○	×
		ブリーディング率	○	○	○	○	○	○	○
		漏斗流下時間（粘性）	×	×	○	○	○	○	○
		自己充填性	×	○	○	○	○	○	○

○：良好，△：難あり，×：不適，－不実施

イ）ステップ 2

打込み時に廃棄体の熱影響を受ける充てん材では、高温環境下でもモルタルの流動性が損なわれない混和剤の選定が必要である。ステップ 1 において使用した SP1 は 20℃環境下においてもスランプフローのロスが大きいことが確認されたため、ステップ 2 においては、高温環境下における経時変化の改善を目的とし、別の混和剤を使用した。混和剤は 3 種類を選定し、室内温度 20℃と 60℃においてスランプフローの経時変化試験と流動性試験を実施した。使用した混和剤を表 2.4-11 に示す。

20℃と 60℃におけるスランプフローの経時変化を図 2.4-7、図 2.4-8 に、流動性試験（流動勾配の比較）の結果を図 2.4-9 に示す。その結果 SP3+Ad の混和剤が、スランプの経時保持性、流動性において最も優れていることを確認した。

表 2.4-11　使用した混和剤

段階	呼び名	混和剤の概要とブレンド概要
ｽﾃｯﾌﾟ 1	SP1	高性能 AE 減水剤 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
ｽﾃｯﾌﾟ 2	SP2	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物
	SP3+Ad	SP3：高性能AE減水剤 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 Ad　：減水剤 遅延型（Ⅰ種） 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
	SP4+Ad	SP4：高性能AE減水剤 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物 Ad　：減水剤 遅延型（Ⅰ種） 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

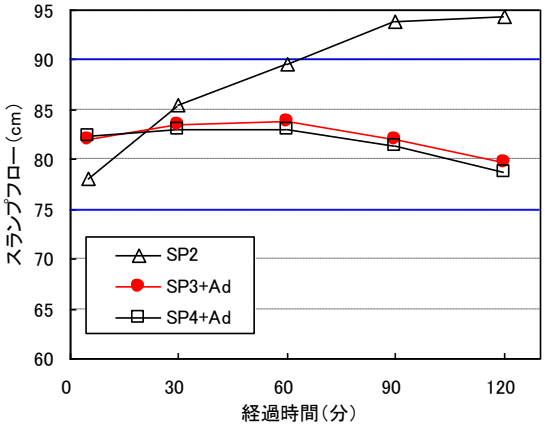


図 2.4-7　スランプフローの経時変化（20℃）

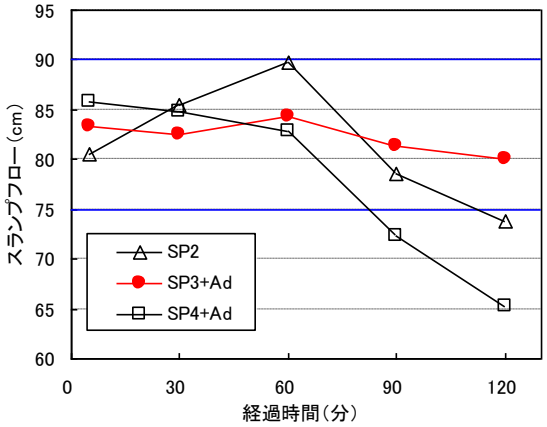


図 2.4-8　スランプフローの経時変化（60℃）

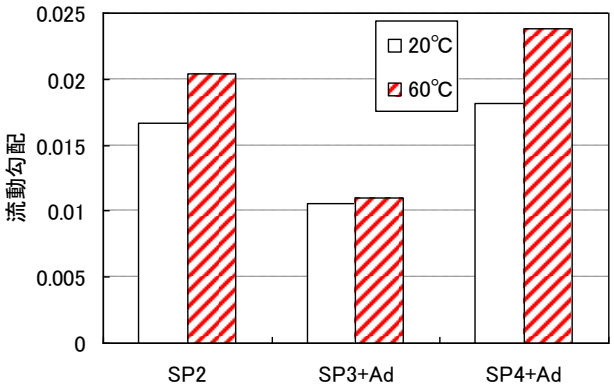


図 2.4-9　流動性確認試験での流動勾配

c）選定配合

室内試験によって決定した使用材料を表 2.4-12 に、選定配合を表 2.4-13 に示す。

表 2.4-12　区画内充てん材の使用材料の代表例

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント密度=3.22 g/cm³、比表面積=3,640cm²/g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種密度=2.18g/cm³、比表面積=3,820cm²/g
石灰石微粉末	LP	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.71g/cm³、比表面積=5,510cm²/g
細骨材	S	石灰砕砂（八戸松館産）：密度=2.66g/cm³、FM=2.79
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 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
	Ad	減水剤 遅延型（Ⅰ種） 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
	As	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.4-13　区画内充てん材の選定配合

W/B (%)	W/P (%)	LP/B (%)	Air (%)	単位量（kg/m³）					Ad P×%	SP P×%
				W	LPC	FA	LP	S		
45	28.1	60	2.5	230	358	153	307	1198	0.30	0.85

※　結合材量:B=LPC+FA+LEX、粉体量:P=B+LP

(b) 上部充てん材

a）検討フロー

上部充てん材は、同じ高流動コンクリートであるコンクリートピットの配合を基本とし、区画内充てん材と同様の考え方で配合を選定した。

配合検討のフローと検討概要を図 2.4-10 に示す。フローに示した経緯は後述する検討結果で述べる。まず（ステップ 1）では、流動性向上の観点からコンクリートピットの配合を基本配合とし、目標スランプフローを設定し、さらに、石灰石微粉末量を選定した。（ステップ 2）では硬化後の収縮低減を目的とした膨張材入りの配合を検討、廃棄体熱の影響を受けにくい混和剤を選定した。これらの詳細について次節以降で述べる。

ステップ 1
目標スランプフローと石灰石微粉末量の選定
⇒ 目標スランプフロー：70.0±5.0cm
⇒ 石灰石微粉末量：249kg/m³
（コンクリートピットの配合を基本配合とし、流動性向上の観点から設定）

↓

ステップ 2
硬化後の収縮低減、廃棄体熱に対抗（性状保持性）できる配合の検討
⇒ 膨張材入りの配合検討：拘束膨張試験、圧縮試験を実施
⇒ 熱影響の少ない混和剤の選定：流動性、フレッシュ性状の確認
（経時性状保持性と流動性の観点から選定）

図 2.4-10　上部充てん材の配合検討フローと検討概要

b）室内試験による評価

ア）ステップ 1（目標スランプフローと石灰石微粉末量の選定）

コンクリートピットの配合（石灰石微粉末量 178kg/m³）を基本とし、流動性や充てん性を向上させるため、石灰石微粉末量を増加させた配合を検討した。検討は石灰石微粉末量を変えた 2 種類の配合（配合 LP50：石灰石微粉末量 249kg/m³、配合 LP60：石灰石微粉末量 215kg/m³）において SP 添加率を変化させ、V 漏斗流下時間、ブリーディング率試験を実施した。試験結果を図 2.4-11、図 2.4-12 に示す。

室内試験によるスランプフローと石灰石微粉末量の関係をまとめたものを表 2.4-14 に示す。表 2.4-14 より、材料分離を生じず、かつ流動性を確保できる範囲でスランプフローを大きくすることができる LP60 の配合が最適と判断した。目標スランプフローは 70±5cm、石灰石微粉末量 215kg/m³（LP60 配合）と設定した。

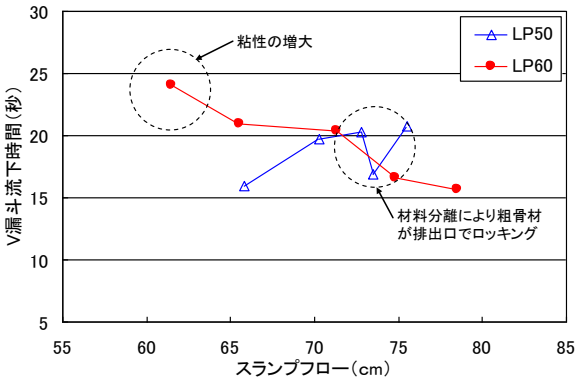


図 2.4-11　V 漏斗流下時間とスランプフロー

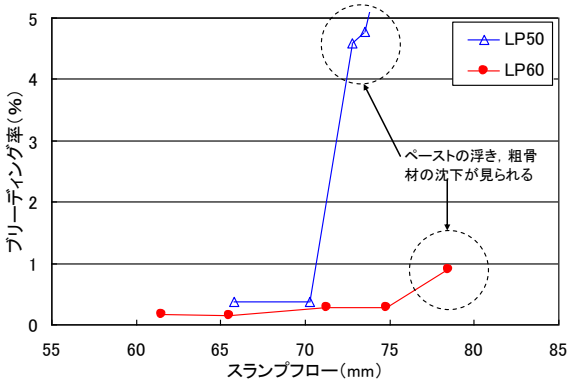


図 2.4-12　ブリーディング率とスランプフロー

表 2.4-14　目標スランプフローの設定と石灰石微粉末量の選定

石灰石微粉末量 (kg/m³)	項　目	スランプフロー(cm)				
		60	65	70	75	80
LP50 (249 kg/m³)	コンシステンシー	－	○	○	×	×
	ブリーディング率	－	○	○	×	×
	漏斗流下時間（粘性）	－	○	○	△	△
	自己充填性	－	○	○	○	○
LP60 (307 kg/m³)	コンシステンシー	△	○	○	○	×
	ブリーディング率	○	○	○	○	△
	漏斗流下時間（粘性）	60	65	70	75	80
	自己充填性	－	○	○	×	×

○：良好，△：難あり，×：不適，－不実施

イ）ステップ 2（膨張材混入量の検討と、廃棄体の発熱を考慮した混和剤の選定）

上部コンクリートピットにおいては、建設作業員に対する遮へい性能を確保するため、隣接する他部材との間の硬化後の収縮による間隙とひび割れの発生を極力抑制させることが求められる可能性がある。ステップ 2 では硬化後の収縮低減を目的とし、膨張材を入れた拘束膨張試験（JIS A 6202（B 法））を、温度の影響を加味して実施した。

試験結果の一例とし、20℃、60℃における膨張材量と圧縮強度の関係を図 2.4-13、図 2.4-14 に示す。

いずれの温度、材齢においても膨張材量の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が認められ、60℃の場合には、20℃よりも圧縮強度の低下が顕著であった。また、膨張材量が 25kg/m³ 以上で供試体表面に網目状のひび割れが発生した。

以上の結果から、膨張材によるひび割れが発生しない範囲で、本試験で設定した目標強度 30N/mm² を確保できる膨張材混入量として 20kg/m³ を選定した。

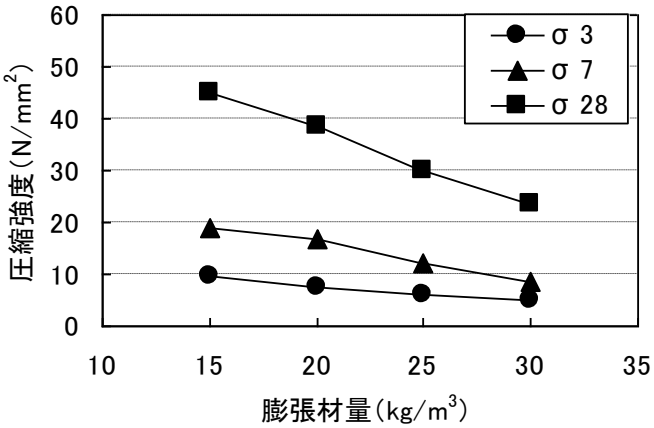


図 2.4-13　膨張材量と圧縮強度の関係(20℃)

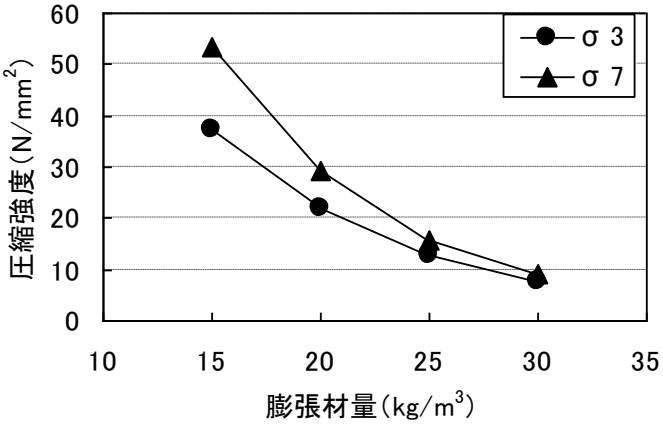


図 2.4-14　膨張材量と圧縮強度の関係(60℃)

上部充てん材は高温環境下でも流動性が損なわれない混和剤の選定が必要である。ステップ 2 においては、4 種類の混和剤を用い、環境温度 20℃と 60℃の条件におけるスランプフロー等の経時変化について試験した。使用した混和剤を表 2.4-15 に示す。試験による混和剤の種類と経時変化の関係を図 2.4-15、図 2.4-16 に示す。その結果、経時変化およびブリーディングが小さい、高性能 AE 減水剤 SP3 に遅延型の減水剤 Ad を 0.2%併用する混和剤が最適と判断した。

表 2.4-15　使用した混和剤の種類

呼び名	混和剤の概要とブレンド概要
SP1	高性能AE減水剤 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 S ポリカルボン酸エーテル系化合物
SP3+Ad0.3%	SP3：高性能AE減水剤 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
SP3+Ad0.2%	Ad　：減水剤 遅延型（Ⅰ種） 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

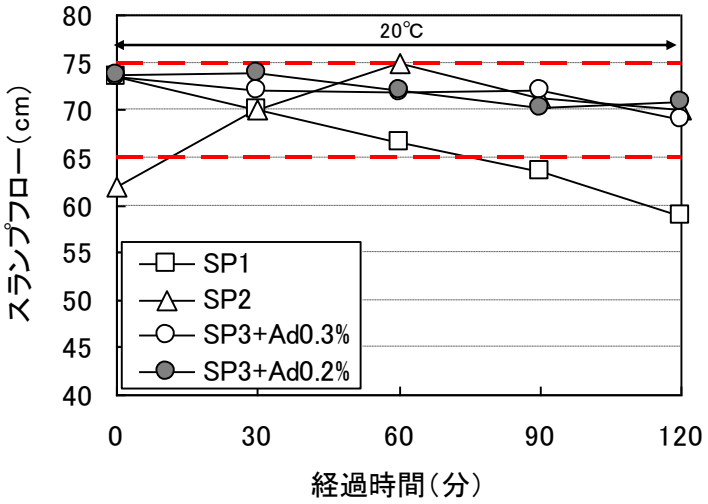


図 2.4-15　混和剤の種類と経時変化の関係(20℃)

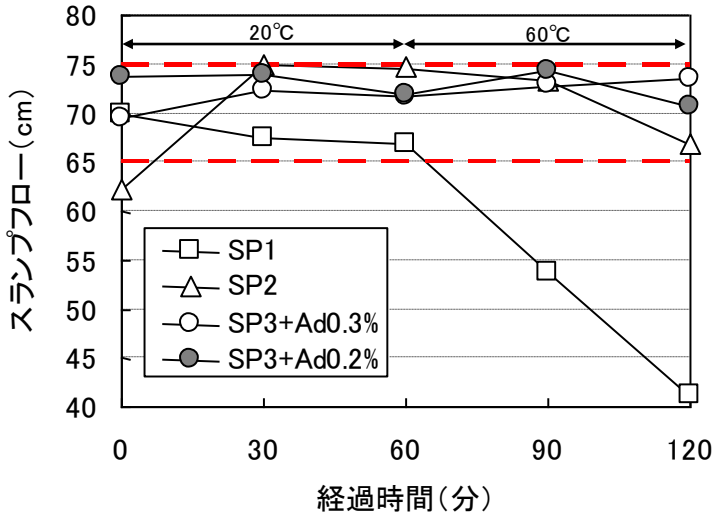


図 2.4-16　混和剤の種類と経時変化の関係(60℃)

c）選定配合

室内試験によって決定した使用材料を表 2.4-16 に、選定配合を表 2.4-17 に示す。

表 2.4-16　上部充てん材の使用材料の代表例

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント 密度=3.22 g/cm³、比表面積=3,540cm²/g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種 密度=2.22g/cm³、比表面積=4,020cm²/g
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン（太平洋マテリアル） 密度＝3.05 g/cm³
石灰石微粉末	LP	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.67g/cm³、比表面積=5,120cm²/g
細骨材	S	石灰砕砂（八戸松館産）：密度=2.67g/cm³、FM=2.71
粗骨材	G	石灰砕砂（八戸松館産）：最大骨材寸法＝20mm、 密度=2.70g/cm³、FM=6.76
混和剤	Ad	減水剤 遅延型（Ⅰ種） 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
	SP	高性能 AE 減水剤 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
	As	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.4-17　上部充てん材の選定配合

W/B (%)	LP/B (%)	Air (%)	単位量（kg/m³）							Ad P×%	SP P×%
			W	LPC	FA	LEX	LP	S	G		
45	60	2.5	160	249	107	20	215	849	780	0.20	0.85

※　結合材量:B=LPC+FA+LEX、粉体量:P=B+LP、Air:空気量

2) 材料特性試験（室内試験・実機試験）

室内試験によって選定した充てん材の配合（区画内充てん材と上部充てん材）について、施工性に影響を及ぼす基本的な特性値を確認するため、フレッシュ性状試験を実施した。なお、室内試験練りと実際の生コンプラントのミキサを使用した実機練りにおいては、ミキサの違い、1 バッチあたりの数量の違い、また骨材の表面水率にも違いがあり、同じ配合でも同様のフレッシュ性状が得られない場合がある。本試験は室内試験で選定された配合の再現性および、調整性の観点から試験を実施した。

試験結果を表 2.4-18 に示す。両配合とも室内試験練りと実機試験練りでは多少のスランプフローの変動はあるが、SP（高性能 AE 減水剤）添加率の変更によりフレッシュ性状の調整が可能なことを確認した。

表 2.4-18　選定配合におけるフレッシュ試験結果

種別	室内 実機	膨張材 添加量 kg/m³	混和剤種	SP 添加率 (P×%)	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ (mm)※	V漏斗 流下時間 (秒)	空気量 (%)	温度 (℃)
区画内 充てん材	室内 (H21)	—	SP3	0.85	888	12.4	1.5	20.2
	実機 (H21)	—	SP3	0.78	777	12.2	3.2	23.2
	実機 (H22)	—	SP3	0.78	746	10.4	4.0	28.4
上部 充てん材	室内 (H21)	—	SP1	0.80	713	23.7	3.3	20.8
	実機 (H21)	—	SP4	0.80	678	9.1	1.2	23.6
	実機 (H22)	20	SP3	1.10	714	8.0	1.8	26.6

※JIS では 5mm 単位での測定だが、ここでは 1mm 単位での測定を実施している。

(2) 施工検討

1) 施工上の課題整理

区画内充てん材及び、上部充てん材の施工上の検討課題を再度、表 2.4-19 に整理する。

表 2.4-19　施工上の検討課題

項目	検討課題
場内運搬	長距離圧送性（アジテータ車から打込み場所までの運搬）
充てん性・流動性	ポンプ圧送による打込み時の充てん性
	移動式バケットによる打込み時の充てん性
放射線管理下の施工	遠隔操作による無人化施工を前提とした打設方法の選定 （バケット・表面ならしをオプションとして検討）
その他	充てん材の収縮により発生する既設部材との隙間の抑制

2) 検討手順（施工確認試験実施の流れ）

施工検討は 3 つの段階（室内試験・机上検討、ヤード・事前試験、空洞内施工試験）に分け実施した。施工検討の検討手順と検討内容を整理したものを図 2.4-17 に示す。以下太字部分の試験について述べる。

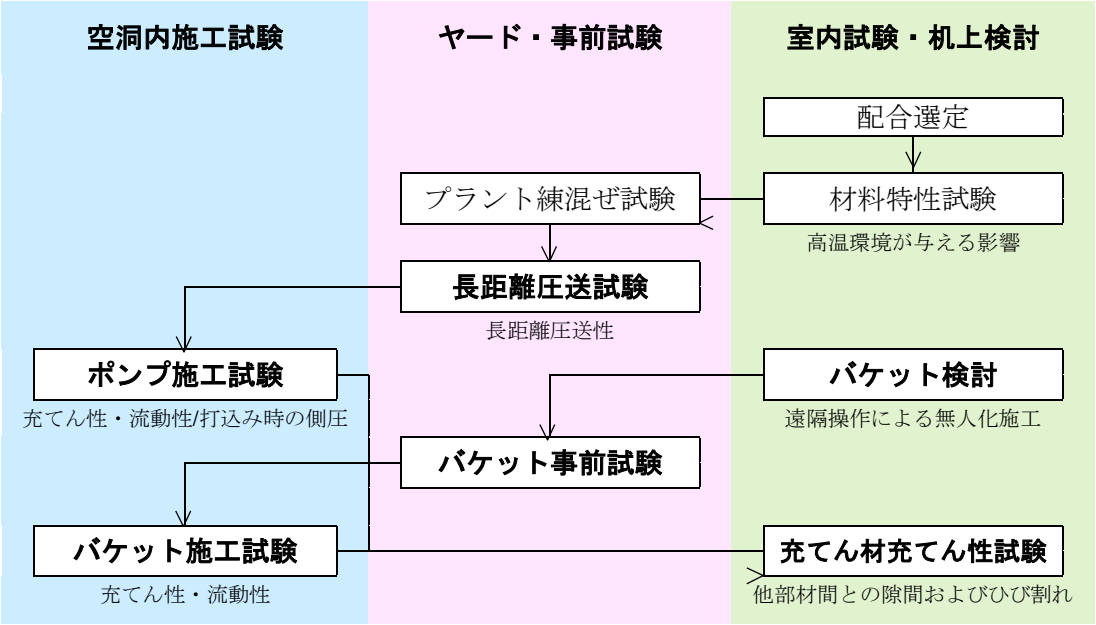


図 2.4-17　施工確認試験の検討手順と検討内容

3) 検討結果

a. ヤード・事前検証実験

(a) 長距離圧送性（アジテータ車から打込み場所までの運搬）

区画内充てん材、上部充てん材ともに、放射線環境下での作業が前提となる。実施工を想定した場合、コンクリートの荷卸し場所は打込み場所とは離れており、ポンプ圧送による打込みの場合は長距離圧送が想定される。そこで、長距離圧送に対するポンプ能力およびコンクリートのフレッシュ性状への影響の把握を目的とし、長距離圧送試験を実施した。

表 2.4-21 にポンプ車のピストン前面圧と吐出量の関係を示す。試験には、超高圧タイプのポンプ車（プッツマイスターBSF2107）を使用した。区画内充てん材、上部充てん材とも、吐出量の増大とともに、ポンプ車のピストン前面圧が増大し、ポンプ車への負荷が増大している。150～250m 程度の場内運搬を想定し設定した、水平換算距離 300m の圧送では、上部充てん材で吐出量 10～20m^3/h 程度、区画内充てん材で 15～50m^3/h 程度が圧送限界と判断された。

長距離圧送後は、区画内充てん材、上部充てん材ともに、スランプフローや空気量、単位容積質量の変化等が認められ、フレッシュ性状に影響が出ることが確認された。上部充てん材に至っては、圧送による粘性の低下に伴い、材料分離を起こした可能性が確認された。遮へい性が要求される当該部材においては、材料分離に起因する単位容積質量の減少には特に注意が必要である。

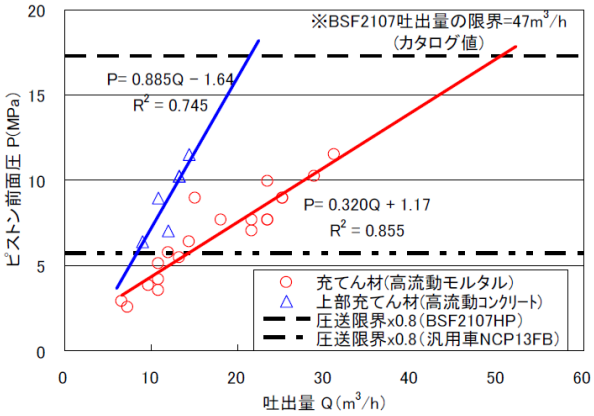


図 2.4-18　ポンプ車のピストン前面圧と吐出量

b．空洞内施工試験

(a) 充てん性・流動性

区画内および上部充てん材の打込み方法は、荷卸し場所から打込み場所までの運搬方法が同一の方式であることが前提となる。本検討では移動式バケット方式とポンプ圧送方式にて試験を実施した。それぞれの打込み方式における充てん性と流動性、セルフレベリング性について検証を実施し、選定された充てん材の配合で問題なく施工ができることを確認した。

a）区画内充てん材

ア）ポンプ圧送による打込み時の充てん性

打込み時のポンプ車吐出量を試験条件として充てん材の充てん性・流動性の確認を行った。模擬廃棄体の配置状況を図 2.4-19 に示す。模擬廃棄体にはコンクリートを充てんし、高流動モルタルを充てんしたときに模擬廃棄体が浮いてこないようにした。本来、廃棄体は発熱が想定されるが、その温度の模擬は本試験では実施していない。

打込みにはコンクリートポンプ車（ニイガタ製 NCP11FB-324）を用い、吐出量を 9.2～24m³/h に変化させて、図 2.4-20 の○の位置から打ち込んだ。また、レーザー距離計(DIMETIX 製 DLS-B15)を各所に設置し、流動の状況をリアルタイムに計測した。

図 2.4-19　模擬廃棄体の状況

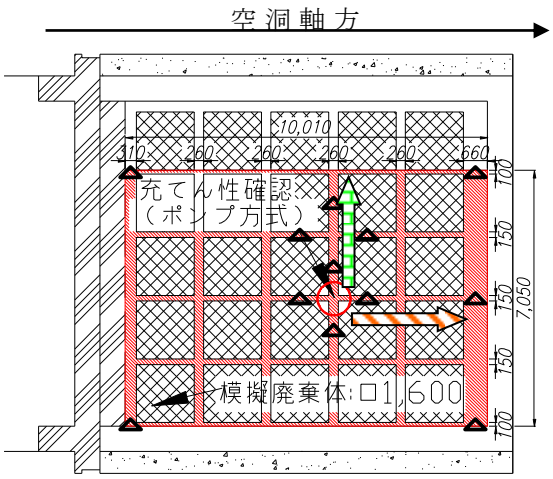


図 2.4-20　ポンプ方式による充てん性確認試験平面図

区画内充てん材のフレッシュ性状は、製造時、荷卸し時のいずれもスランプフロー、モルタルＶ漏斗流下時間および空気量等の品質管理項目は目標値を満たしていた。また、製造時と荷卸し時とでの差は小さく、さらに圧送後の粘性低下やモルタルＶ漏斗流下時間が短くなるなど、施工性を低下させる変化は無かった。

図 2.4-20 中の矢印の経路の流動勾配を図 2.4-21 に示す。間隙幅が広い(260mm)経路では、吐出量の増大とともに、流動勾配が小さくなった。これは吐出量が増えることで、モルタルを押し流す力が増大され、流れが加勢されたことによると考えられる。しかし、間隙幅が狭い(150mm)経路では、吐出量によらず流動勾配はほぼ一定となった。この要因には、間隙幅の異なる経路が交差している場合には間隙幅の広い流れやすい経路を優先して流れること、充てん材が押し流される力と充てん材と模擬廃棄体との摩擦力が釣り合い、間隙幅間の流量が定常状態となっていることが推察される。

試験の結果、選定した配合により、十分な充てん性・流動性が得られ、設定した目標を満足する品質の充てん材を施工できることを確認した。

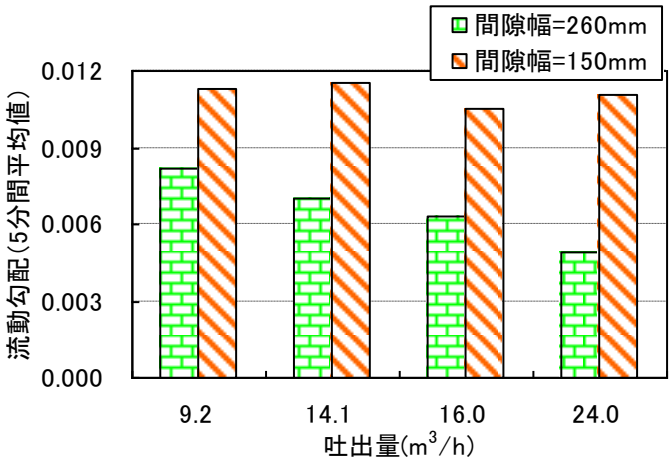


図 2.4-21　吐出量と流動勾配

イ）移動式バケット打込み時の充てん性

移動式バケットによる打込みを模擬した区画内充てん材の充てん試験を実施した。模擬廃棄体 15 体（縦 160cm、横 160cm、高さ 50cm：3 行 5 列：廃棄体間の間隙 15 cm、26cm）の廃棄体間の 4 箇所でバケットの移動を模擬した打込みを実施した。打込み状況を図 2.4-22 に、打込み箇所の平面図を図 2.4-23 に示す。1 回目の打込みは図 2.4-23 の左側の 2 ヶ所のバケットから（打込み位置 A）、2 回目の打込みは右側の 2 つのバケット 2 ヶ所から（打込み位置 B）行った。

図 2.4-22　バケット打込み状況

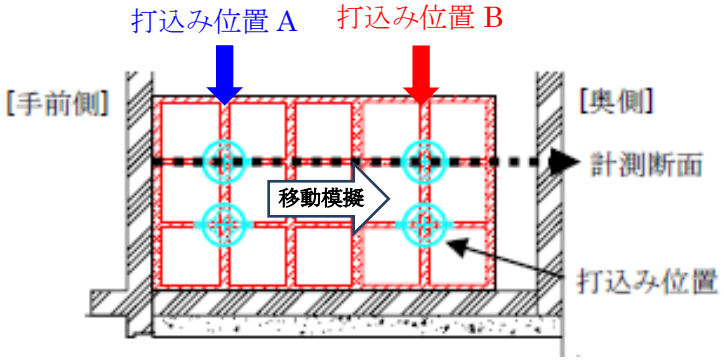


図 2.4-23　充てん材（平面部）施工範囲平面図

区画内充てん材充てん試験における打込み毎の排出位置と勾配を図 2.4-24 に示す。1 回目の打込みで形成された勾配が 2 回目の打込みにより逆転し、1 回目よりも 2 回目の勾配が小さくなることが確認された。したがって、バケットの打込み位置を制御することにより、仕上がり時の高低差を低減させることが可能であることが確認できた。

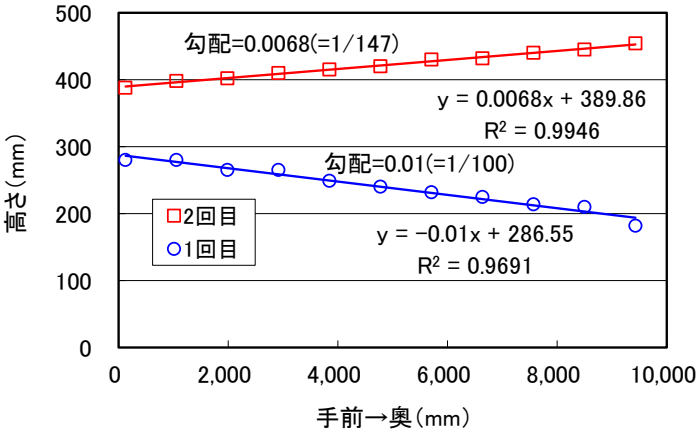


図 2.4-24　打込み毎の排出位置と勾配

打込み終了後、充てん材が硬化した後の仕上がり高さを、整理したところ、ポンプ方式の勾配（1/92）とバケット方式 1 回目の勾配（1/100）は、ほぼ同じ値であり、また室内で実施した流動性確認試験（20℃）の勾配（1/95）とも同程度であることから、本配合でのモルタルの流動勾配は施工方法によらず 1/100 程度といえる。

ウ）他部材との隙間およびひび割れ

鋼製の模擬廃棄体を用いたポンプ打込みの場合、界面の間隙は認められなかったが、バケット方式による打込みでは、硬化後、コンクリート製の模擬廃棄体と区画内充てん材の界面には、1～2mm 程度の間隙が、区画内充てん材の表面には 0.1～0.2mm 程度のひび割れが発生した（ここでは、便宜上界面に生じたものを間隙、充てん材中に発生したものをひび割れと呼ぶものとする）。

界面に間隙が発生した原因を解明するために、模擬廃棄体とその周辺の間隙を模擬した型枠への打込みを行う室内充てん性試験を実施した。室内試験は、スランプフローと打込み速度および型枠の湿潤状態を試験の条件として、模擬廃棄体 1 体とその周囲の間隙を模擬したコンクリート製の型枠に充てん材を打込むものとした。

試験の結果、原位置での区画内充てん試験で発生したものと同様の間隙およびひび割れが発生した。また、間隙、ひび割れの発生に対して、スランプフローと打込み速度が与える影響が小さいことが確認された。一方、型枠の湿潤状態が間隙、ひび割れの発生に与える影響が大きく、乾燥状態の型枠を使用した場合に、間隙幅、間隙深さともに湿潤状態の型枠を使用した場合よりも大きくなることが確認された。

実施工においては、廃棄体が鋼製であるため、廃棄体と区画内充てん材の界面に間隙が生じる可能性は低いが、コンクリートピットと区画内充てん材の界面には、間隙が生じる可能性があると考えられる。この間隙は、他部材が水分を吸収することが影響している。間隙を抑制する対策として、区画内充てん材打込み前に、コンクリートピット表面に散水することが対策の一つとして考えられる。

b）上部充てん材

ア）ポンプ圧送時の充てん性

コンクリートポンプ車の吐出量およびバイブレータによる振動が、コンクリートの流動性に与える影響を評価することを目的に、試験を行った。上部充てん材の打込みパターンは図 2.4-25 に示すようにバイブレータの振動頻度を、バイブ無、バイブ少、バイブ多として施工範囲を 3 区画に区分した。振動は直径 50mm のコンクリート棒形振動機を用いて 5 分ごとに 1 回の頻度を標準とし、バイブ多では 500mm ピッチ、バイブ少では 1,000mm ピッチとした。

硬化後に測定した上部充てん材の 3D スキャナによる高さ計測結果を図 2.4-26 に示す。バイブレータをかけない奥側で上部充てん材の高さが低くなっている様子が確認できる。しかし､バイブレータを使用した場合でも筒先と端部での仕上がり高の差は 82mm あり、出来形目標値（設計高さ±40mm）は確保できていない。

上部充てん材はその要求機能である放射線の遮へいの観点から、部材厚さの確保が重要となる。上部充てん材の厚さを確保するための施工法としては、時間当たりの打込み量の増大や、筒先の移動･複数箇所からの打込み、二層打ちや表面均し等が考えられる。

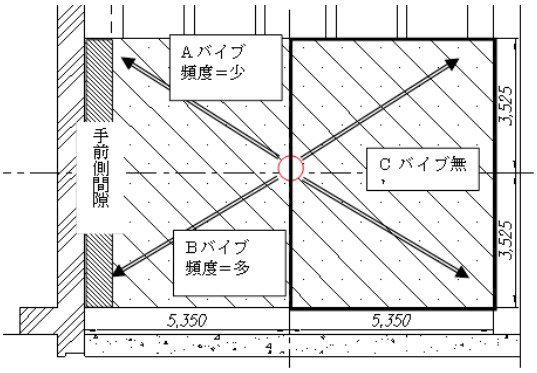


図 2.4-25　上部充てん材の打込みパターン

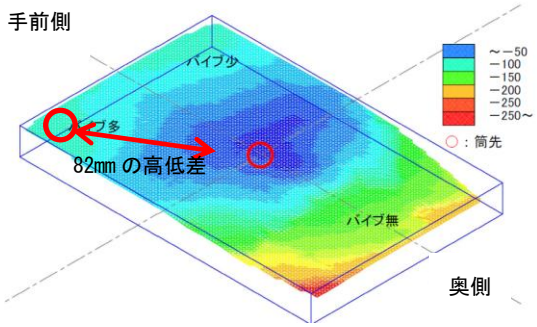


図 2.4-26　3D スキャナによる高さ計測結果

イ）移動式バケット打込み時の充てん性

上部充てん材施工は放射線影響での施工となるため、荷卸し場所から施工場所までの無人場内運搬・打込みと無人表面仕上げ施工が必要である。本試験では、無人施工を想定した移動式バケットによる打込みと表面均し装置を適用した模擬試験を行い、充てん性と平坦性を確認した。バケットの配置状況を図 2.4-27 に配置平面図を図 2.4-28 に示す。

図 2.4-27　バケット配置状況

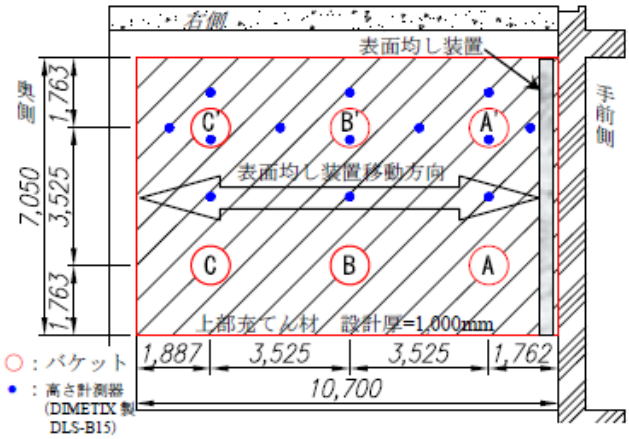


図 2.4-28　バケット配置平面図

バケットから排出した上部充てん材には材料分離は見られず、良好な流動性も確認できた。またバケットの排出位置を移動させることで打上がりの高低差は低減され、最終的な打上がり時点では、高低差 69mm であった。その後、表面均し装置の適用により、本試験の管理目標値とした高低差 40mm 以内を達成した。

図 2.4-29 に示すように打込み面中央、空洞軸方向に沿って溝のような形状で打上がり面が低い箇所が形成された。これは、同時に排出した２つのバケット間の表面部分に発生したこわばりが、流動性を低下させたことが原因であると考えられる。なお、手前側と奥側でみられる仕上がり高さの低い範囲については、表面均し装置の構造により均しができないエリアである。使用した表面均し装置を図 2.4-30 に示す。今回の打込みでは、空洞横断方向に設置された左右 2 個のバケット排出口で同時に打込み、一定の順序で排出口から打込むこととしたが、高低差をさらに低減する方法として、排出位置を自由に変更できる機構や打込み途中段階での加振、仕上げ機の能力向上等が考えられる。

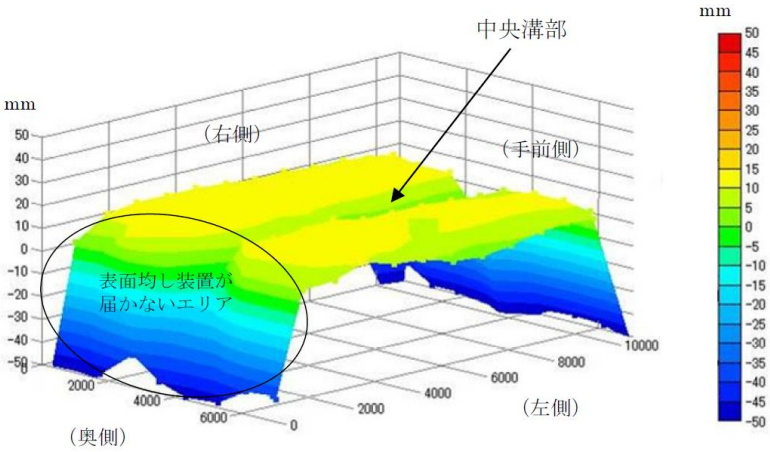


図 2.4-29　仕上がり面の高さ分布図

図 2.4-30　表面敷均し装置

4) 施工時品質管理方法

本試験では、事前にコンクリート標準示方書[5]、JASS5N[2]等に基づき品質管理基準を定め、これにより品質管理を行った。ここでは、使用材料の特性に応じて、求められる施工性と品質確保の観点からこれまでの施工実績を考慮したうえで管理項目と基準値を設定した。施工試験の結果、これらの基準値を達成し、構築した部材が高い圧縮強度を有することを確認できた。したがって、ここで設定した基準値を達成することにより高い品質の確保が可能であることの傍証が得られたといえる。初期性能に関しては、次節にてまとめる。

表 2.4-20　区画内充てん材の品質管理項目と計測値

検査項目・基準値及び準拠した仕様書類				実証試験における計測値の範囲			
検査 試験の項目	検査基準値 規格値	準拠規格	検査頻度又は ﾛｯﾄの大きさ	ポンプ打設 H21		移動式バケット打設 H22	
スランプフロー	825±75mm	JIS A 1150	1 回/50 ㎥	768～815		830～853	
漏斗流下時間	7～13 秒	JSCE F -512	〃	12.8～15.4		10.8～12.7	
空気量	2.5±1.5%	JIS A 1128	〃	2.3～3.1		1.4～1.9	
塩化物量	0.3kg/㎥ 以下	JASS 5N	1 回/日	0.03 以下		0.03 以下	
単位水量 (エアメータ)	±20kg/㎥	土木研究所	午前 1 回 午後 1 回	-13.8～-7.2		-7.7～-1.3	
圧縮強度	σ ≧ 30N/mm² (91 日)	JIS A 1108	1 回/打設	標準	87.9～ 89.9	標準	87.9～ 89.9
				現場 水中	82.2～ 85.7	現場 水中	82.2～ 85.7
出来形（高低差）	—	—	硬化後	-125～-6		33～+50	

表 2.4-21　上部充てん材の品質管理項目と計測値

検査項目・基準値及び準拠した仕様書類				実証試験における計測値の範囲			
検査 試験の項目	検査基準値 規格値	準拠規格	検査頻度又は ﾛｯﾄの大きさ	ポンプ打設 H21		移動式バケット打設 H22	
スランプフロー	700±50mm	JIS A 1150	1 回/50 ㎥	688～723		713～733	
漏斗流下時間	7～13 秒	JSCE F -512	〃	9.3～15.0		5.9～8.1	
空気量	2.5±1.5%	JIS A 1128	〃	1.6～2.3		1.0～1.2	
塩化物量	含有量： 0.3kg/㎥以下	JASS 5N	1 回/日	0.03 以下		0.03 以下	
単位水量 (エアメータ)	±20kg/㎥	土木研究所	午前 1 回 午後 1 回	-6.4～-3.8		-6.3～10.5	
圧縮強度	σ ≧ 30N/mm² (91 日)	JIS A 1108	1 回/打設	標準	81.8～ 83.3	標準	71.2～ 71.7
				現場 水中	71.9～ 74.1	現場 水中	68.8～ 70.3
出来形（高低差）	±40mm	-	硬化後	-286～-9		-19～+14	

(3) 初期性能の検討

1) 初期性能確認試験項目

本試験における初期性能とは、「1.2.3　人工バリアの要求機能」で示したとおり、試験施設の建設完了時点（上部空間の埋戻しまで終了した時点）の性能としており、各部材を構築した時点で測定した。充てん材（区画内充てん材、上部充てん材）の初期性能確認試験では、区画内充てん材および上部充てん材に要求される初期性能を確認するために、施工された施設を対象としてデータ取得、評価を実施した。充てん材の主要な要求機能である遮へい、移行抑制、その他の機能に対しても試験を実施した。充てん材の初期性能確認試験における試験項目を表 2.4-22 に示す。

主な要求機能である「遮へい」に対しては、乾燥密度試験を行い、乾燥単位容積質量を取得して、示方配合での理論単位容積質量との比較を行い同等である事を確認することとした（「2) 初期性能確認」にて記述)。

表 2.4-22　充てん材の要求機能と初期試験項目

機能			段階	機能の説明	試験項目														
					力学特性			遮蔽	収着	透水	拡散／透水への影響因子					化学安定性		熱特性	
											ひび割れ								
											室内試験				調査				
					圧縮強度試験（20℃ 60℃ 105℃）	静弾性係数試験（20℃ 60℃ 105℃）	割裂引張試験	乾燥単位容積質量試験	間隙水pH測定	透水試験	自己収縮試験（20℃ 60℃）	拘束膨張試験	長さ変化試験（20℃ 60℃）	断熱温度上昇試験	ひび割れ調査	固相分析	アルカリ骨材反応性試験	熱伝導率試験	比熱
要求機能	基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射線物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること															
要求機能	基本安全機能	遮へい	建設操業	廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと				○											
要求機能	基本安全機能	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移動を抑制すること							○	○	○	○	○			○	○
要求機能	基本安全機能	移行抑制	埋戻し後	放射性核種を収着すること					○										
要求機能	基本安全機能	移行抑制	埋戻し後	低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと						○	○	○	○	○	○				
要求機能	操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	○	○	○												
材料物性			設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得													○	○	○	○

○：区画内充てん材、上部充てん材の共通試験項目

○：区画内充てん材の試験項目

2) 初期性能確認

a．乾燥単位容積重量

遮へい性能に関する特性値である乾燥単位容積質量について、コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法 JASS 5N [2]に準拠して試験を行った。表 2.4-23 に区画内充てん材の試験結果を示す。乾燥開始から 40 日経過時点での乾燥単位容積質量は 3 供試体の平均値 2,139kg/m^3 となった。JASS 5N[2] では、「乾燥による質量軽減の目安は単位容積質量として約 0.1～0.15t/m^3」とある。区画内充てん材の示方配合の理論単位容積質量 2,255kg/m^3 に対して今回の乾燥による減少分は 116kg/m^3 であり JASS 5N[2] の目安相当の値である。乾燥開始から 40 日までの試験結果の質量変化から外挿により 100 日後の質量を推定すると 2119 kg/m^3（3 供試体平均値）となり、40 日時点の試験値より 20 kg/m^3 減少すると推定される。一方、上部充てん材の乾燥単位容積質量の平均値は 2,272kg/m^3 であり、乾燥による減少を考慮しても JASS5N[2] において遮へいコンクリートに求められる乾燥単位容積質量 2,150kg/m^3 を上回ることが確認できた。本知見は、今後の設計に資する基礎データといえる。

表 2.4-23　区画内充てん材の乾燥単位容積質量（kg/m^3）

区画内充てん材	上部充てん材
2,139	2,272

2.4.5　まとめと今後の検討課題

(1) 課題に対する照査

本試験の目的は、充てん材の要求機能を確保するための使用材料、施工技術、施工方法等の実施工への適用性を明確にして、構築した部材の施工品質を確認することである。表 2.4-5 に示した本試験の課題に対する照査の結果を以下にまとめる。

- 充てん材の要求機能である遮へいについては、地下環境における実物大の試験を通じて、材料の乾燥を考慮しても JASS5N に示される単位容積質量を確保できることが確認できた。
- 区画内充てん材では低拡散材の配合を、上部充てん材ではコンクリートピットの配合を基本として配合検討を実施し、所定の充てん性・流動性が確保される材料配合を見出した。
- 廃棄体熱が充てん材のフレッシュ性状に与える影響が懸念されたが、熱環境を変化させた室内試験を通じて、混和剤に高性能 AE 減水剤と遅延型の減水剤を使用することで、熱影響による経時変化の少ない配合とすることが可能であることを実証した。
- 放射線管理下での無人化施工を前提とした充てん材の打込み方法として長距離ポンプ圧送と移動式バケット方式の２種類を対象として地上ヤード及び地下環境における実物大の試験を実施し、それぞれの打込み方式における施工速度や充てん材の品質変動についてのデータを収集し、施工の可能性を確認したうえで、品質管理上の留意点を見出した。
- 空洞内で想定される長距離のポンプ圧送を前提とした試験の結果、水平換算距離 300m程度は圧送が可能であるが、材料分離や単位容積質量の減少に注意が必要であることが判明した。
- 無人化施工の検討の結果、特にコンクリートのバケット運搬と打込み、表面均し装置の採用が効果的であることが分かった。
- 充てん材の収縮による間隙の発生と抑制対策の検討のため、室内充てん性試験を実施し、打込み後、充てん材の水分が他部材へ吸収されることで界面に間隙が発生する可能性が高く、注意が必要であることを明らかにした。間隙の発生が許される程度により、吸水を抑制するための散水方法を検討する必要がある。

(2) 本プロジェクトでの成果

充てん材の施工では、廃棄体発熱の影響を受ける狭隘空間への充てん施工、放射線管理区域内での施工、長距離輸送が必要になるなど、様々な施工・環境上の制約を受けることが想定される。本プロジェクトでの成果としては、それらの制約条件・環境を前提とした中で、充てん材の要求機能を確保するための配合・施工方法を、具体的な施工上の課題から体系的に整理したことである。

具体的には、放射線管理下における無人化施工方法として長距離ポンプ圧送、移動式バケット方式による施工が可能である見通しを示し、そのうえで無人化施工の本格的な実用化のため

の課題を抽出した。

また、廃棄体熱が充てん材のフレッシュ性状に与える影響に関しては、実規模での廃棄体熱を考慮した施工試験は実施していないため、課題が残る部分はあるのだが、試験室レベルで選定した配合が実規模、実際の環境に近い地下空洞内での気温・湿度・送風等の環境条件下においても問題なく施工できたことから、配合を選定するまでのプロセスは間違っておらず、今後実事業において異なる環境条件や施工条件が示されたとしても、今回と同じ手法で再度配合や施工方法を検討することにより、問題なく高品質な構造物を構築できると考えられる。

(3) 今後の検討課題

本確証試験は、実施設の施工が放射線環境下での無人遠隔施工となることを前提とし、充填材の配合検討や、遠隔操作を模擬した施工試験を実施した。しかし、確証試験における実施上の制約（遠隔操業クレーンや遠隔打込み方法が完全には模擬できていないことなど）のため実施工との相違が予想される。したがって、今後は無人遠隔施工方法の具体的なアプローチを含めた検討が必要である。無人遠隔施工は、施工上問題が発生した場合に人間が対処することができない。そのため施工リスクを想定した対策（や施工機械の設計、オペレーションシステムの開発、施工管理方法、施工計画など）が必要となる。また、先述のとおり、配合の選定時点で考慮すべき廃棄体熱が充てん材のフレッシュ性状に与える影響に関して、地下空洞内での環境下における実規模での廃棄体熱を考慮した施工確認試験を実施し、流動性への影響を確認する必要がある。また、そうして構築された部材からコアを採取して、圧縮強度・乾燥密度測定などの品質確認試験を実施することも必要である。それらを本確証試験で得られた施工技術を基に展開、検討することが今後の課題であるといえる。

参考文献

[1]（社）土木学会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008 年 6 月、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 (2008).
[2]日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事.(2001)
[3]土木学会: 余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方. (2009).
[4]原子力環境整備センター：低レベル放射性廃棄物処分用　廃棄体制作技術について（各種固体状廃棄物）」（1998）
[5] 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】. 299(2007).

2.5　埋戻し材

2.5.1　実施概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.5-1[1]に示す。埋戻し材はセメント系材料からなる底部と側部、セメント系／土質系材料からなる上部とに分けられ、地下空洞とコンクリートピット／人工バリア部材との間の隙間を充てんした部材である。

底部、側部埋戻し材は、コンクリートピット／人工バリア部材の構築よりも前に施工された。底部、側部埋戻し材は、材料として低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを混入したコンクリート（スランプ型及び一部高流動型）を使用して、底部・側部及び奥部に鉄筋コンクリート構造の埋戻し材を施工し、施工性、品質（材料特性、出来型）、初期性能（強度特性、止水性能、化学的安定性等）の確認を行った。施工性については、コンクリート打込み時に型枠に作用する荷重評価、鉄筋継手方法の比較評価を始め、空洞内で施工性を低下させる要因を対策に関する知見を得た。品質については、コンクリートのフレッシュ性状に影響を及ぼす要因と対策に関する知見を得た。なお、底部、側部埋戻し材の施工確認試験については平成 19 年度の報告書[2]に詳細が記載されている。そのため、本節では上部埋戻し材についてまとめる。なお、「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」[3]では、上部埋戻し材は「空洞内充てん材」と記載されており、アクセス坑道等の埋戻し材のことを「埋戻し材」と記載しており、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」[4]では、上部埋戻し材は「空洞内充てん材」、アクセス坑道等の埋戻し材のことを「坑道の埋戻し材」と記載している。本報告書では、上部埋戻し材の検討を進めるが、本報告で得られた知見はアクセス坑道等の「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」の検討と共通事項であると考えられるため、後述のとおり、二つの埋戻し材（「空洞内充てん材」、「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」）の要求機能をまとめて検討を進めている。

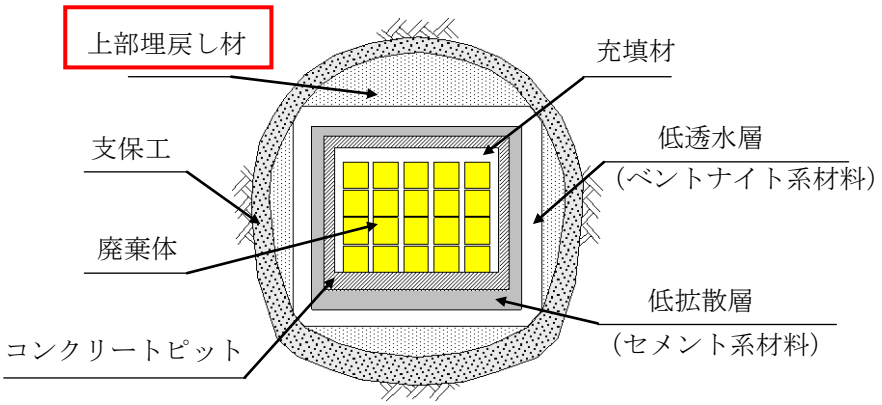


図 2.5-1　地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正）[1]

上部埋戻し材の狭隘な空間、すなわち、人工バリア（低拡散材・緩衝材）と岩盤との間の空洞や隙間は、地下水の流動に伴う核種移行の経路としないため、隣接する緩衝材をはじめとした人工バリアや空洞の力学的安定性を保つため、また、容易に人が侵入できないようにするために、埋戻す必要がある。

本試験における上部埋戻し材の施工箇所は、坑道横断方向 7m×縦断方向 6m×最大高さ 4m 程度のアーチ状の形状をしている。後述するように、土質系材料であるベントナイト混合土を選定して実施した。ベントナイト混合土を用いた上部埋戻し材の確証試験は、低透水性、隙間なく施工できる充てん性が期待できる材料・配合を選定し、実規模の施工試験を行うことにより、適用した施工方法の妥当性および初期性能を確認することで、施工の成立性や要求機能が確保できることの確証を目的として実施した。

試験の主な成果の概要を以下の表 2.5-1 に述べる。

表 2.5-1　上部埋戻し材の主な成果の概要

ベントナイト混合土の仕様	○粉末ベントナイトを母材である砂に混合した材料を用いることとし、要求する性能を満足する仕様（混合率、乾燥密度、初期含水比）を室内試験（締固め試験、透水試験）より設定した。
含水比調整の品質	○バッチ式および連続式の機械を用いてベントナイト混合土の製造品質に関する試験を実施した結果、いずれの機械でも所定の品質を確保することができることを確認した。ただし、製造した混合率および含水比の精度をあげるためには緩衝材と同様に混合前の各材料の初期含水比の把握が重要であることを確認した。 ○大型の連続式機械を用いて比較的大量の混合土の製造を実施した。その結果、緩衝材の含水比調整で用いているような高性能な機械ではなくても、所定の仕様の混合土を安定的に製造できることを確認した。
施工方法の検討と適用性の確認	○狭隘空間に適用し得る施工方法として、転圧工法と吹付け工法の組合せによる方法を選定し、適用性を確認した。その結果、吹付け工法と転圧工法を交互に行うことで、アーチ形状の隅角部を含む狭隘な空間での施工が可能であることを確認した。また、転圧工法に関しては、材料の撒出し厚さと転圧回数を規定すれば、満足できる品質で施工ができることが確認できた。すなわち、工法規定的な施工管理が実施できることを確認できた。
初期性能	○ベントナイトと砂を用いたベントナイト混合土の配合を選定し、実規模試験で構築した部材から採取したコアを用いた透水試験の結果、透水係数は 10^{-11}m/s オーダーとなり、原地盤の透水係数（10^{-8} m/s オーダー）よりも低い部材を構築できることを確認した。

2.5.2　基本条件の設定

(1) 要求機能と技術要件

余裕深度処分施設は要求機能に応じた様々な部材で構成されている。埋戻し材（空洞内充てん材および坑道等の埋戻し材の二つの埋戻し材）に求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[3]）において基本安全機能のうち「移行抑制」、「離隔」が示されている。さらに、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」（日本原子力学会、2011[4]）でも、「移行抑制」が示されている。本試験においては、第 1 章に記載のとおり「移行抑制」を埋戻し材の主たる要求機能として設定した（表 2.5-2）。

既往の検討[3]では、「移行抑制」を確保するための技術要件として「透水特性」をあげており、その機能の内容として“連続した地下水移行経路を形成しないこと”としている。本試験では、埋め戻した部分が選択的に通水経路とならないようにするため、“周辺岩盤よりも低い透水性を有すること”も追加した。さらに別の既往の検討[4]では、「空洞内充てん材」に「低透水層

の拘束」する機能を求めており、「空洞内充てん材には、施工後に人工バリアが要求される機能を阻害するような有害な空隙が残らないように充てんされていることも求められるものと考えられる。」としている。すなわち、“隙間なく充てんされること“も必要であると考えられるため追加した。

これらの内容についても技術要件「透水特性」に基づいて上部埋戻し材が地下水の卓越流路とならないような仕様の設定、施工方法を検討するものである。そのため、本試験においても既往の検討と同様に「透水特性」を技術要件として設定した。また、既往の検討[3]では、「埋戻し後以降の長期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること（力学特性）」も要求機能としてあげているが、本試験においては、外的要因（緩衝材の膨潤圧、湧水量、岩盤のクリープ等）によって上部埋戻し材に求められる力学特性の目標値が設定されると考えられたので、施工後に試料を採取し、特性値を測定し、データを蓄積することとした。また、既往の検討[3] [4]では、長期にわたり化学的に安定であることにより、有害な空隙が発生しないことも求めているが、本試験では、材料選定において対応することとした。なお、ベントナイト混合土の力学試験や材料特性試験の結果に関しては、平成 24 年度、平成 25 年度、平成 26 年度の報告を参照されたい。

表 2.5-2　埋戻し材の要求機能（土木学会､2009[3]を追記）

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏洩を防止すること	－	－
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して，十分な遮へいを有すること	－	－
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	－	－
			放射性核種を収着すること	－	－
			低透水性により，処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	○※	力学特性
			連続した地下水移行経路を形成しないこと 周辺岩盤よりも低い透水性を有すること※※ 隙間なく充てんされること※※※	●	透水特性
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	○	閉塞性
操業上の機能		建設操業	確実な建設，操業が行われる空間，力学安定性が確保されること	－	－
			坑道の形状を維持すること	－	－

※；埋戻し材の「低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと」は、「埋戻し後以降の長期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること（力学特性）」である。

※※；「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」[2]に示された機能に加え、本確証試験で追加した機能。

※※※；「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」[2]に示された機能に加え、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」[3]を参考にして、本確証試験で追加した機能

(2) 設計仕様項目

埋戻し材の技術要件「透水特性」を検討する上で重要度が高い設計仕様項目として、透水係

数を設定した。既往の検討（土木学会、2009[3]）では透水特性に対する設計仕様項目として長期状態変化に関わる項目である“膨潤圧”、“密度（かさ密度）”、“鉱物組成”をとりあげている。本試験では施工直後の透水性が周辺岩盤の透水性と比較してどの程度かを確認することが主たる目的であり、設計仕様項目は透水係数に絞り込んで検討をする方針とした。

表 2.5-3 に埋戻し材の要求機能、技術要件と設計仕様項目をまとめる。なお、“隙間なく充てんされること”に対しては、施工中、目視確認することとしたため、特に表 2.5-3 には記載していない。

表 2.5-3　埋戻し材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

要求機能		段階	技術要件	設計仕様項目
基本安全機能	移行抑制（低透水性）	埋戻し後	透水特性	・透水係数

(3) 管理項目および管理目標値の設定

埋戻し材（上部埋戻し材）の施工試験における管理項目を選定し、管理目標値を設定した。

上述した設計仕様項目である透水係数と、ベントナイト系材料で透水性と関連性が高いと考えられる乾燥密度を管理項目として選定した。乾燥密度に関しては、使用する材料自体が決まらないと設定できない項目である。検討事項として、材料に関する検討結果を後述したので、そこで合わせて記述する。

これらの管理項目に対して設定した管理目標値を表 2.5-4 に示す。このうち、透水係数の管理目標値は、原地盤相当の透水係数であると考えられる 1×10^{-8}m/s 以下とした。乾燥密度の管理目標値は、材料により設定するものとした。詳細については後述する。

表 2.5-4　埋戻し材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
移行抑制 (低透水性)	透水係数	1×10^{-8}m/s 以下	原地盤よりも小さい値
	乾燥密度	材料により設定	検討課題の一つ

2.5.3　確証試験の課題と実施内容

(1) 確証試験の課題

埋戻し材では、主な要求機能である透水特性に関わる所定の透水係数を発揮し得る材料を選定すること、地下空洞と人工バリアとの隙間を充てん可能で、均質な部材を構築するための施工方法を選定し、十分な品質を確保できるのか確認することを目的とし、以下の項目を検討した。

1) 材料配合と施工管理目標の設定

所定の透水係数を発揮し得る材料の選定と、それらを組み合わせた配合の検討をする必要がある。また、検討した配合に関して、実際に現場で施工できるようにするために必要な管理目標値を設定する必要がある。

2) 練り混ぜ方法の検討

検討した配合で、埋戻し材の施工に用いる材料を製造する方法について検討する必要がある。また、製造した材料がどの程度のばらつきを有するのか把握する必要がある。

3) 施工方法の検討と適用性の確認

上部埋戻し材施工箇所の様な、狭隘な施工空間でも適用可能な施工方法について検討する必要がある。また、検討・選定した施工方法に関して、適切な施工管理手法についても検討する必要がある。

4) 施工後の品質の確認

検討・選定した配合、練り混ぜ方法、施工方法によって施工した後の上部埋戻し材が、所定の品質を有するのか確認する必要がある。具体的には、施工後に回収した試料を用いて室内試験を実施し、透水係数等の測定を行う必要がある。

(2) 実施内容

「(1) 確証試験の課題」に示した課題に対する対応と確証試験での実施内容を表 2.5-5 に整理した。実施内容の詳細および試験結果については「2.5.4　確証試験結果」で個別に述べる。

表 2.5-5　埋戻し材確証試験の課題に対する対応と実施内容

検討項目	課題の概要	実施内容
材料検討	材料の選定、配合の検討の実施、施工時の管理目標値の設定	文献調査による候補材料の絞込みおよび配合の検討、室内試験による選定配合の性能の確認および施工時の管理目標値になりうる特性値の抽出と設定
施工検討	練り混ぜ方法の検討と製造後のばらつきの把握	文献調査による候補となる方法の絞込み・検討、選定した方法の練り混ぜ試験の実施による施工性の確認、練り混ぜ後の材料の品質の確認
	施工方法の検討と適用性の確認、施工管理手法の検討	文献調査による候補となる方法の絞込み・検討、選定した方法による施工試験計画の立案および施工試験の実施
初期性能確認	施工後の品質確認	施工終了後、コアを採取して、室内試験で透水係数等の特性値を測定

2.5.4　確証試験結果

(1) 材料検討

1) 材料・配合仕様の設定

a．既往の検討

材料・配合仕様の検討は、土質系材料とセメント系材料の両方について実施した。セメント系材料に関しては、トンネルの覆工コンクリートやセグメント等の裏込注入に用いる充てん用材料を調査し、覆工コンクリートに用いられる高流動コンクリートを抽出した。緩衝材と接触することを考慮して、低アルカリ性セメント（HFSC）高流動型コンクリートの配合設計を行い、試験室で練混ぜ試験、およびテストピースによる圧縮強度試験、割裂引張強度試験を実施した。その結果、十分な充てん性が得られるスランプフローを有し、12N/mm^{2}程度の強度（圧縮）を発揮することを明らかにした。これらの詳細な成果は、平成 24 年度の報告書に記載されているので、そちらを参照されたい。そのため、本報告では、セメント系材料に関する検討については記述しないものとする。

既往の研究の調査[5]を行い、ベントナイト混合土（砂・ベントナイト、礫・砂・ベントナイト、砂・カオリン（ベントナイト代替）、フェロニッケルスラグ・ベントナイト、現地発生土・ベントナイト）、流動化処理土、気泡混合補強土を候補材料として抽出した。これらの材料に対して、施工性、低透水性、力学的安定性、物理・化学的安定性、調達性、経済性を勘案して総合的に評価を行い、ベントナイト混合土（砂・ベントナイト、礫・砂・ベントナイト、礫の代替としてフェロニッケルスラグを使用するものも含む）を候補として選定した。表 2.5-6 に候補材料の選定結果を示す。

次に、ベントナイトおよび母材となる砂・礫の混合率（乾燥質量比）、すなわちベントナイト混合土の配合について既往の研究[6] [7] [8]の調査より検討した。これらの研究では、礫・フェロニッケルスラグ・砂・ベントナイトを混合した、ベントナイト混合土を対象とした透水試験を、ベントナイトの混合率を変化させて実施している。その結果、ベントナイトの混合率が 10%を超えると透水係数が低くなる度合い（ベントナイトを増やす効果、メリット）が小さくなる傾向がみられ、混合率が 15～30%程度を越えると、透水係数はほぼ同じような値となり、1.0×10^{-11}m/s 程度よりも小さくなる。

また、平成 24 年度の検討では、3 種類の配合のベントナイト混合土（ベントナイトの混合率は 15%）で透水試験を実施し、母材に砂や礫、フェロニッケルスラグ（最大粒径が 20mm 以下のもの）を混合すれば透水性に差はほとんどなく、1.0×10^{-11}m/s 程度を発揮することを確認した。

これら既往の知見より、ベントナイト混合土は、砂・礫・フェロニッケルスラグ・ベントナイトを用い、ベントナイトの混合率は 10～20%程度であれば十分に満足のいく性能が得られると考えられる。そのため、選定する施工方法により、配合を選定することが合理的であると考えられる。

本試験では、後述のとおり吹付け工法を採用することとしたので、ベントナイト混合土の配合は、砂とベントナイトを用いた配合で検討を進めることとした。

表 2.5-6　候補材料とその評価

材料			施工性	低透水性	力学的安定性	物理・化学的安定性	調達性	経済性	総合
発生土			△ 確認必要	△ 確認必要	△ 確認必要	○ 天然鉱物が主体	○ 建設地点から	○～△ 加工費(粉砕、乾燥等)次第	△ 未検討内容が多く、見通し不明
ベントナイト混合土	①砂ベントナイト混合土		○ 締固め、吹付けとも施工可能	○ 10^{-10}m/s 程度は可	△ 確認必要	○ 天然鉱物が主体	○ 一般市場で可	△ ベントナイト代が高くやや劣る	○ 強度特性の確認必要
ベントナイト混合土	②礫砂ベントナイト混合土		△ 吹付けは確認必要	○ 砂ベントナイト混合土と同等	○～△ 確認必要（砂ベントナイト混合土より優れる）	○ 天然鉱物が主体	○ 一般市場で可	△ ベントナイト代が高くやや劣る	○ 吹付け施工、力学特性の確認必要
ベントナイト混合土	上記①②の代替材料								
ベントナイト混合土		カオリン使用	△ 確認必要	△ 高密度必要の可能性 →確認必要	△ 確認必要	○ 天然鉱物が主体	○ 一般市場で可	△ ベントナイトと同等	△ ベントナイトの代替とする理由なし
ベントナイト混合土		フェロニッケルスラグ使用	△ 吹付けは確認必要	○ 礫砂ベントナイト混合土と同等→確認必要	△ 礫砂ベントナイト混合土と同等→確認必要	○ フェロニッケルスラグは安定との既往評価	○ 近隣企業（八戸)から可	△ 運搬次第だが砂と同等	○ 吹付け施工、力学特性の確認必要
ベントナイト混合土		発生土使用	△ 確認必要	△ 確認必要	△ 確認必要	○ 天然鉱物が主体	○ 建設地点から	△ 加工費(粉砕、乾燥等)次第	△ 未検討内容が多く、見通し不明
その他	流動化処理土		○ ポンプ打設、締固め不要	△ 長期的な変質可能性大	△ 長期的な変質可能性大	△～× 長期的な変質可能性大、他部位影響	○ 一般市場で可	○ ベントナイト混合土と比較して有利	△～× 長期変質による懸念が大
その他	気泡混合補強土		○ ポンプ打設、締固め不要	△ 長期的な変質可能性大	△ 長期的な変質可能性大	△～× 長期的な変質可能性大、他部位影響	○ 一般市場で可	○ ベントナイト混合土と比較して有利	△～× 長期変質による懸念が大

b. 基本設計

本試験では、上述した既往の検討で抽出・選定された材料および配合を参考として、表 2.5-7 に示す配合とした。ベントナイトの混合率は、15%とした。ベントナイトはクニゲル V1 とした。これは、緩衝材で用いているベントナイトと産地が同じであり、成分組成が同等であることが考えられたため、化学的に影響がないことが期待されたためである。

表 2.5-7　本試験における低拡散材の配合設計方針

分類	項目	概要
材料	ベントナイト	粉末状 Na 型ベントナイト（クニゲルV1）
	砂	三沢産コンクリート用細骨材
配合（乾燥質量比）	ベントナイト	15%
	砂	85%

c. 室内試験における選定配合の性能確認および施工時の管理目標値の設定

選定配合で混練したベントナイト混合土を用いて、室内成型試料を作製し、乾燥密度・含水比と透水係数との関係を把握し、締め固め条件による透水係数の違いを評価した。これにより、締固め度や含水比等の施工時の管理目標値を設定した。以下、これらの試験についてまとめる。

(a) 突固めによる締固め特性測定試験

突固めによる締固め特性測定試験を実施し、締固め曲線を取得した。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。取得した締固め曲線は、図 2.5-2 に示すとおりである。最大乾燥密度ρ_{dmax}は 1.810 Mg/m^3、最適含水比ω_{opt}は 13.7 %であった。

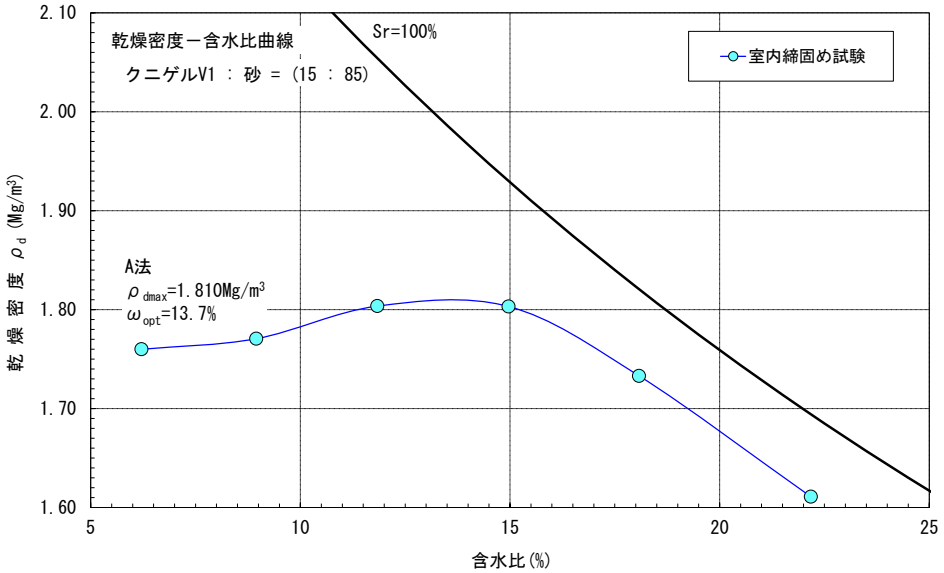


図 2.5-2　締固め曲線（クニゲル V1：砂＝15：85）

(b) 施工時の含水比と管理目標値（乾燥密度）の設定

次に、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の含水比の設定を行った。図 2.5-3 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て得られた締固め曲線から最適含水比（ω_{opt}=13.7%）、ω_{opt}-3%、ω_{opt}+3%、ω_{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)）。透水試験の結果と含水比の関係を下段のグラフに示す。透水試験の方法については、初期性能確認の節で後述する。

図 2.5-3 より、最適含水比より少し高めの含水比の方が、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、施工時の含水比はωopt～ωopt+2%程度（13.5～15.5%）が最適であると判断される。

また、同図より、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。また、締固め規定値 95%でも、目標とする透水係数に余裕があることから、施工時の管理目標値のうち、乾燥密度は現実的にとりうる値として締固め規定値 90%以上である 1.63 Mg/m³ 以上（努力目標として、締固め規定値 95%以上の 1.72 Mg/m³ 以上）とした。

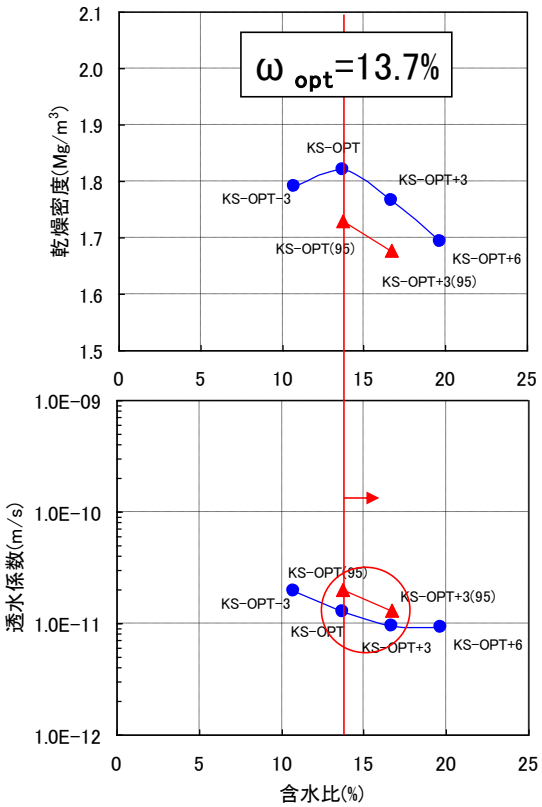


図 2.5-3　乾燥密度・含水比と透水係数との関係

(2) 施工検討

1) 練り混ぜ方法の検討

a．既往の検討

練り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り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り混ぜ試験の結果を踏まえて選定することとした。

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り混ぜ機械の例を図 2.5-4 および図 2.5-5 に示す[9] [10] [11] [12] [13]。図 2.5-4 はバッチ式の機械、図 2.5-5 は連続式の機械である。これら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、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 種類に対して練り混ぜ試験を実施した。この結果については、平成 25 年度の報告書[14]に詳細が記載されているので参照されたい。平成 25 年度に実施した練り混ぜ試験の目的は、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、複数の練り混ぜ機械、練り混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の練り混ぜ試験を実施し、練り混ぜ後の品質を比較検討して、練り混ぜ方法、練り混ぜ機械、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したものである。試験標本数は、練り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。また、練り混ぜ後のベントナイト混合土を用いて、締固め曲線および透水係数を取得し、練り混ぜ機械による差異はほとんどないことを確認した。

(a)パグミル

(b)ジクロス

(c)ペレガイア

(d)アイリッヒ

図 2.5-4　バッチ式機械の例

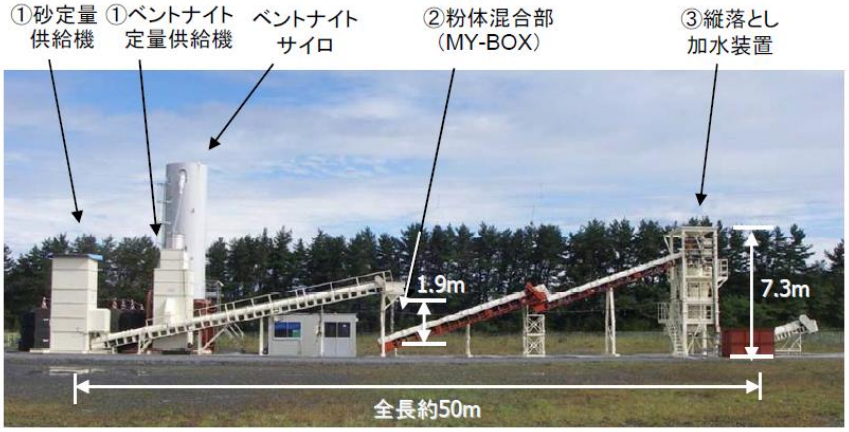
(a)BHS

(b)自走式土質改良機 SR-2000G

(c)Geo-Tom

(d)車載型ツイスター

(e)プロシェア



(f)ミストブレンダー

図 2.5-5　連続式機械の例

b．混合土製造に関する施工試験

実際の施工を考慮して、自走式土質改良機（SR-2000G）と連続式二軸強制ミキサ（GeoTom）を用いて混合土製造に関する検討を行った。

自走式土質改良機は、投入した材料を連続的に混合攪拌し、ベントナイト混合土（埋戻し材の材料）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、本機は水添加機構を備えており、材料の含水比調整も可能である点に特徴がある。

連続式二軸強制ミキサは土砂の定量供給機構と添加材の定量供給機構を備えていない。そのため別途、材料の定量供給機構を用意する必要があったが、後述のとおり自走式土質改良機に比べれば定量供給精度は高くなった。水添加機構も備えていないため、モノーポンプを用いて定量加水を行った。

ベントナイト混合土の混合製造（材料調整）は、所定の混合率、所定の含水比となるように行った。製造したベントナイト混合土は、フレコンバッグに 700～800kg 程度の重さに

詰めた。図 2.5-6 にベントナイト混合土の製造フローを、図 2.5-7 にベントナイト混合土の製造状況を示す。

製造時の含水比および混合率の目標値は、「2.5.4 (1) 1) b.および c.」に従い、混合率は 15.0%、含水比は 13.5%または 14.5%に設定した。なお、自走式土質改良機では 14.5%のものを平成 25 年度に、連続式二軸強制ミキサでは 13.5%のものを平成 26 年度に、それぞれ製造した。次節で製造結果について述べる。

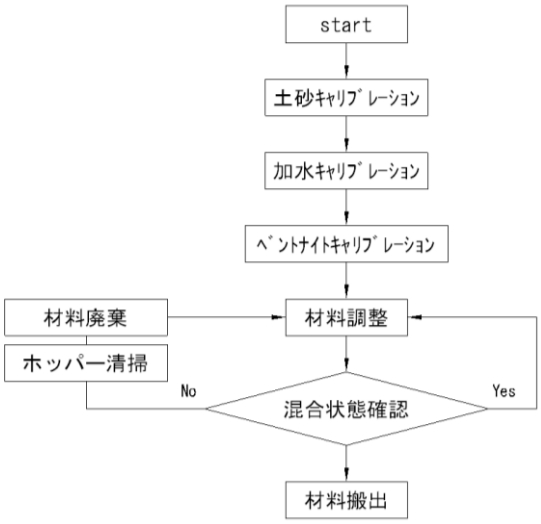


図 2.5-6　ベントナイト混合土製造フロー図

図 2.5-7　混合土製造状況

c. ベントナイト混合土の製造結果

(a) 自走式土質改良機（SR-2000G）

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 2.5-8 に示す。測定頻度は 10t に一度程度サンプリングを行い、一回のサンプリングで含水比は 3 点、混合率測定は 1 点ずつ行った。

含水比の測定は JIS A 1203、混合率の測定は、細粒分含有率の測定（JIS A 1223）を行った。これは、砂分には細粒分がほとんど含まれていないので、ベントナイト混合土の細粒分のほぼ全量がベントナイト分であると考えられるためである。

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。

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 2.5-9 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。

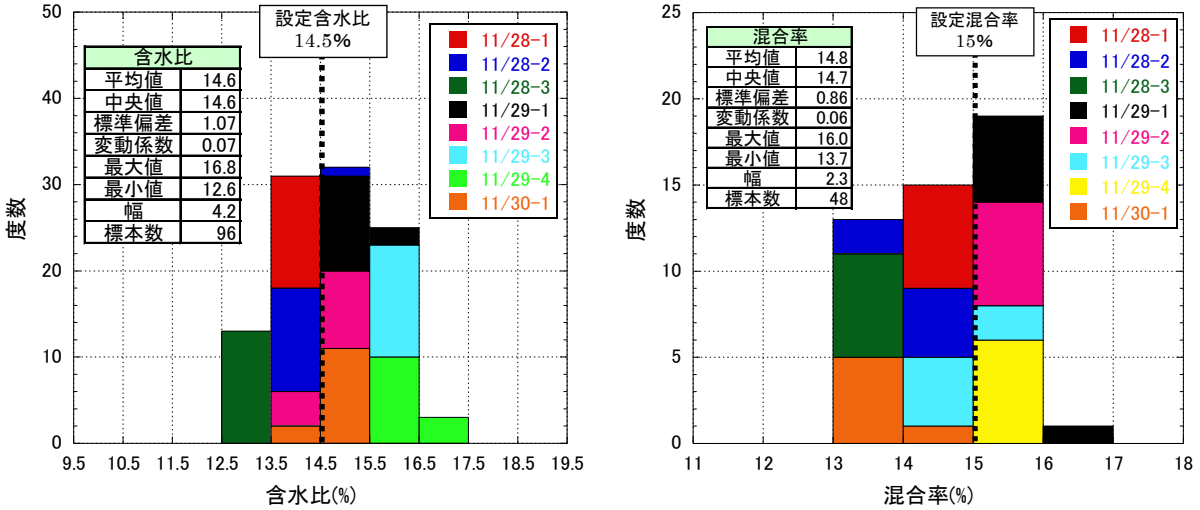


図 2.5-8　自走式土質改良機（SR-2000G）で製造した混合土の含水比および混合率の測定結果

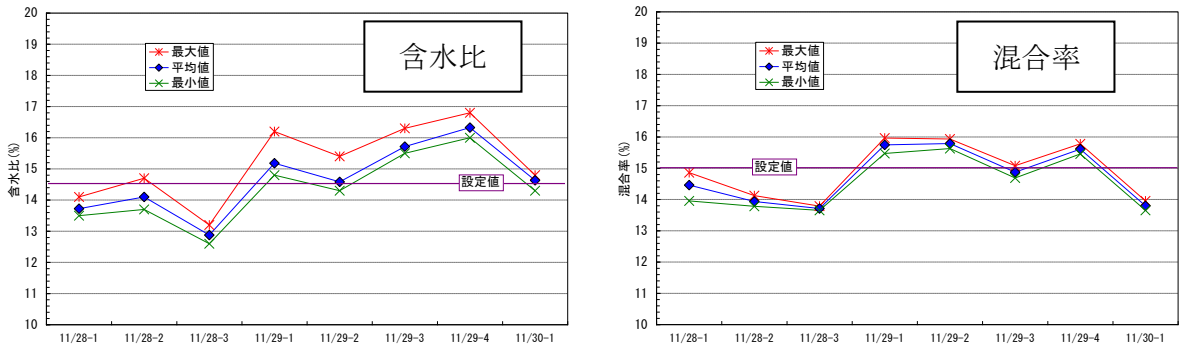


図 2.5-9　自走式土質改良機（SR-2000G）で製造した混合土の含水比および混合率の経時変化

(b) 連続式二軸強制ミキサ（GeoTom）

混合土の製造は、合計 140.4t（フレキシブルコンテナ 170 袋）行った。各フレキシブルコンテナから 1 点ずつサンプリングし、製造した材料の含水比およびベントナイト混合率の測定を行った。ベントナイト混合率は細粒分含有率から算出した。測定した結果を図 2.5-10 に示す。含水比の平均値は 13.5%で設定値と同等となった。分布範囲（ばらつき）は 11.8～15.0%であり、設定値に対して±2%程度であった。連続式二軸強制ミキサ（GeoTom）で混合製造した季節は夏であり、砂の含水比低下が懸念されたが、そのような天候の影響を受けなかった。混合率の平均値は 15.0%で設定値と同等となった。分布範囲（ばらつき）は 14.1～16.7%であり、設定値に対して±1.5%程度であった。時間的な変化を図 2.5-11 に示す。図 2.5-11 はフレコンの製造時間に基づき、のべ製造時間として整理した結果である。含水比、混合率とも製造日によるばらつきの違いは見られない。また、混合率に比べて含水比の方がばらつきは大きくなっている。

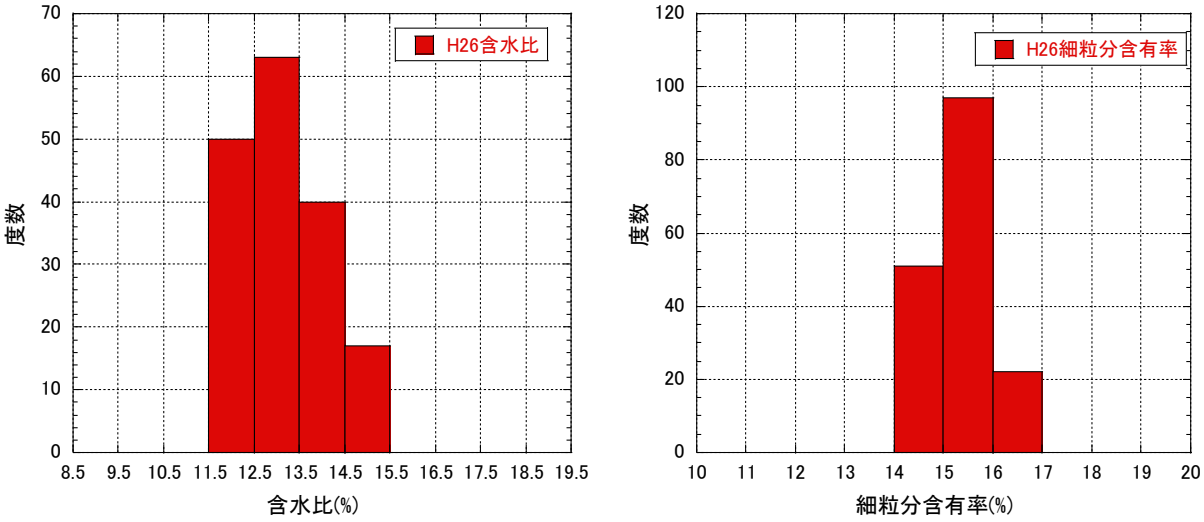


図 2.5-10　連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の測定結果

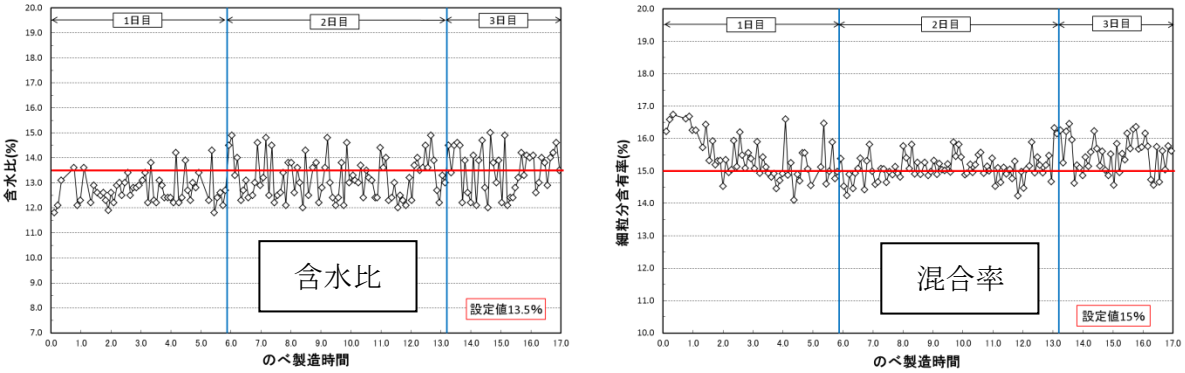


図 2.5-11　連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の経時変化

(c) 評価

二種類の機械を用いて混合土製造方法を実施した。それぞれの機械によるばらつきの程

度を把握することができた。とくに含水比に関しては、使用した材料（砂）の初期含水比のばらつきに大きく依存するものと思われる。

また、品質確認事項として、含水比とベントナイト混合率の測定を実施したが、自走式土質改良機では、2～3 時間に一度程度、連続式二軸強制ミキサではフレキシブルコンテナ一袋ずつで測定しているので、5～10 分に一度程度の頻度で実施した。図 2.5-9 と図 2.5-10 を比較すると、2～3 時間に一度程度の品質確認の程度でも経時的な変化を十分とらえられると考えられる。混合土製造時においては、2～3 時間に一度の品質確認の間に、状態が変化した場合に対する対応として、目視や触診である程度の状態の変化（含水比の変化、ベントナイトの混合率の変化）が、製造後の混合土の色やフレキシブルコンテナに落下するときの様子の観察や、手にとって粘り気を確認することによってできるため、本試験で使用した汎用的な機械で混合土を製造する場合、品質確認の頻度はフレキシブルコンテナ毎に実施する必要がない可能性が示唆される。

2) 施工方法（上部埋戻し材の構築方法）の検討

a．既往の検討

上部埋戻し材施工箇所の様な、狭隘な施工空間でも適用可能な施工方法は、従来型の転圧工法、吹付け工法[15] [16]、ブロック積重ね[17]、ペレット等の充てん[17]、斜め転圧による工法[18] [19]が考えられる。これらの工法は、一般的な土質材料を施工し得るものであるが、主に緩衝材の施工を想定した検討事例が多い。この中でも、吹付け工法の検討を行った事例[16]や、斜め転圧に関する検討[18] [19]は、埋戻し材の施工を対象とした数少ない検討事例である。

平成 24 年度の検討において、これらの工法を抽出し、各施工方法の施工性・経済性の観点から比較検討を行っている。その結果、転圧工法と吹付け工法の有意性が高いと考えられる、としており、図 2.5-12 に示すように、吹付け工法と振動ローラ等による転圧工法を交互に行う方法を示している。

また、最近の検討事例として、圧力釜式吹付け機を用いて実施された吹付け工法と転圧工法について検討した事例が報告されている[20]。使用してい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）が行われており、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。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。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かったが、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 法相当の密度が得られたとしている。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と報告している。また、砂ベンを対象として、ホース長やノズル位置の高さを変えて実施した結果、検討された範囲ではそれらの影響は少ないとしている。一方、礫ベンを吹付けた結果では、施工前後で材料の

粒度は大きく異なり、リバウンド材に礫が多く含まれるためで、結果として施工された材料のベントナイトの混合率は高くなったことを報告している。

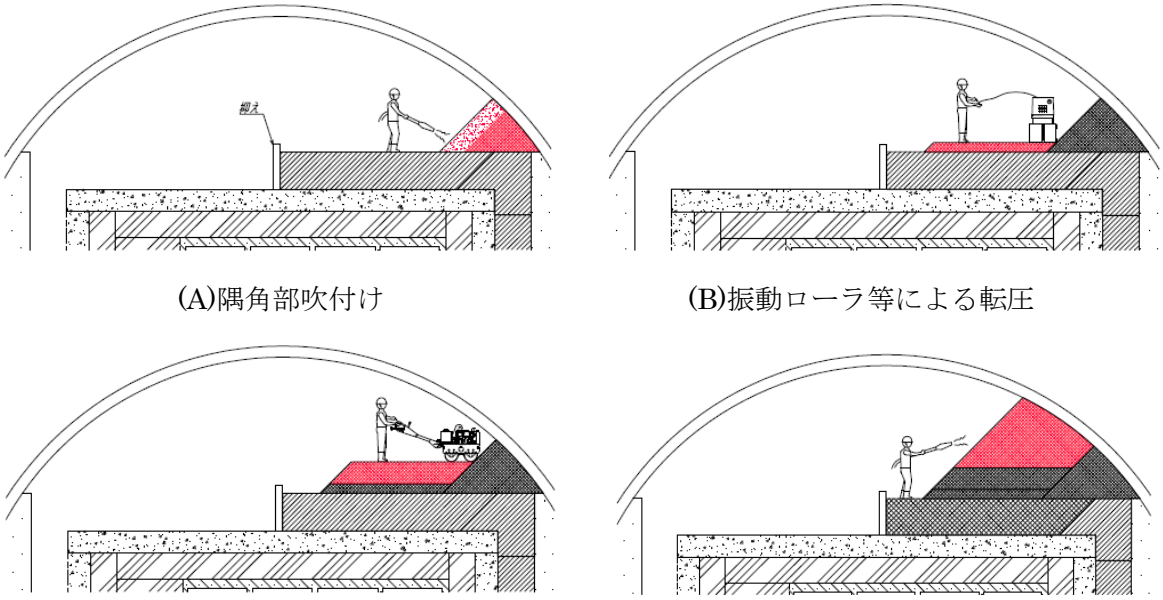


図 2.5-12　上部埋め戻し材の施工手順の例

b. 上部埋戻し材の施工試験方法

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、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するための施工方法、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は、施工部位の形状等制約条件を基に、小型の振動転圧機械による振動転圧工法と吹付け工法を併用して行った。試験空洞のアーチ脚部の隅各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、空洞の天端まで隙間なく施工することができるのかを確認した。

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、小型転圧機械の一つであるバイブロコンパクタを使用した。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。

上部埋戻し材の施工は図 2.5-13 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。ただし、トンネル軸中心線付近では、転圧工法で厚さ 1.6m程度施工してから、アーチ天端まで一気に吹付け工法で施工した。

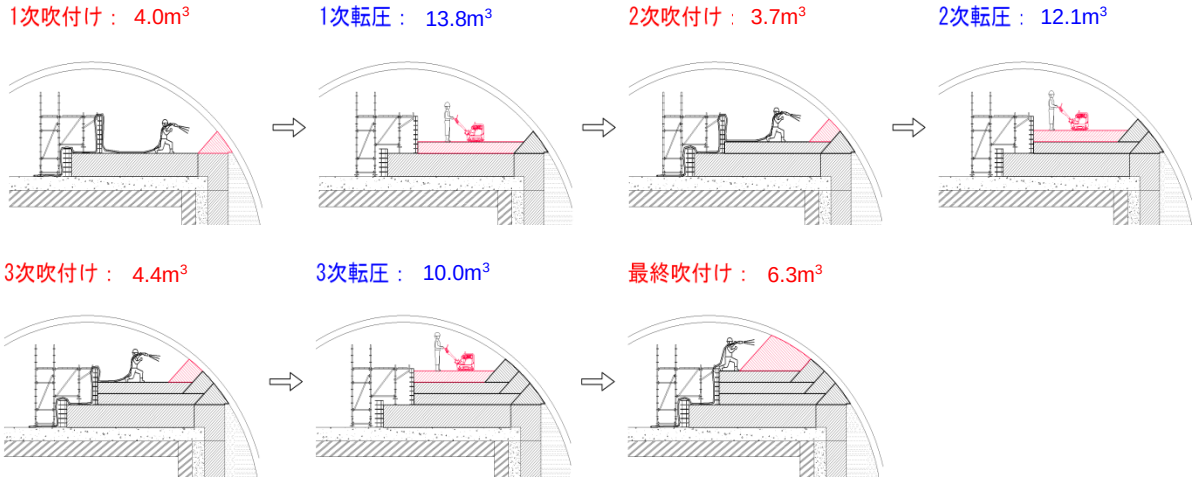


図 2.5-13　施工確認試験での上部埋戻し材の施工手順

転圧工法は、トンネル奥から坑口方向へ敷均してから、転圧を行った。転圧に用いるバイブロコンパクタの操作性を確保する目的で、さらに小型のプレートコンパクタ（60kg）で予備転圧を行った。図 2.5-14 に転圧工法の施工フローを示す。

材料の敷均しは、施工面積が小さいことより、人力で行った。すなわち、ショベル等で撒出した後、レーキ等で敷均した。敷均し時の敷均し高さの管理は、レーザーレベルを用いて行った。敷均し厚さは基本的に 200mm とした。バイブロコンパクタによる本転圧の回数は、6 回とした。事前に行った施工試験により、目標の乾燥密度を発揮できる敷き均し厚さと転圧回数の組合せを設定し、この施工試験で設定した厚さ・回数で施工することとした。このような厚さ・回数を管理することで十分な品質が得られるか、また、どの程度の範囲で品質がばらつくのかを確認した。

吹付け工法では、吹付け機をコンクリートピット下部に配置し、吹付け用ホースをコンクリートピット上部まで配管し、以下の手順で施工した。

① 25t ラフタークレーンで材料（フレキシブルコンテナ）を供給機へ投入
② ベルコンを経由し圧力釜式吹付け機に投入
③ コンプレッサーによる圧縮空気を加え、施工箇所へ材料を吹付け。

また吹付けに際し、試験空洞内の防水シートの凹凸が著しい箇所は、高圧ロール釘打機等を利用し平滑にした。吹付け施工時に発生するリバウンド材はエジェクターおよび人力にて回収した。図 2.5-15 に吹付け時の機械の配置図を示す。

また、図 2.5-16 に転圧状況および吹付け状況を示す。

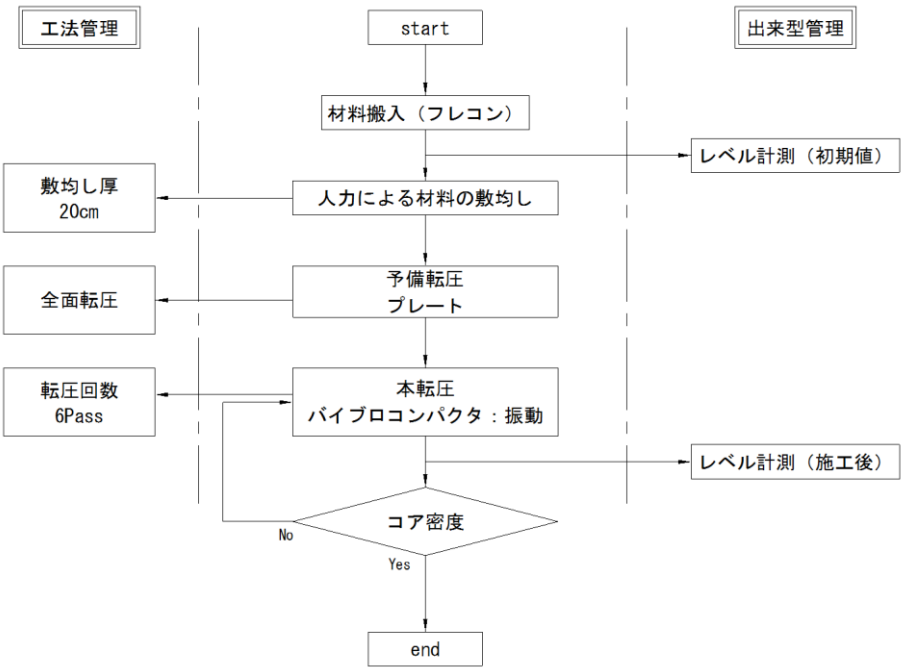


図 2.5-14　施工フロー

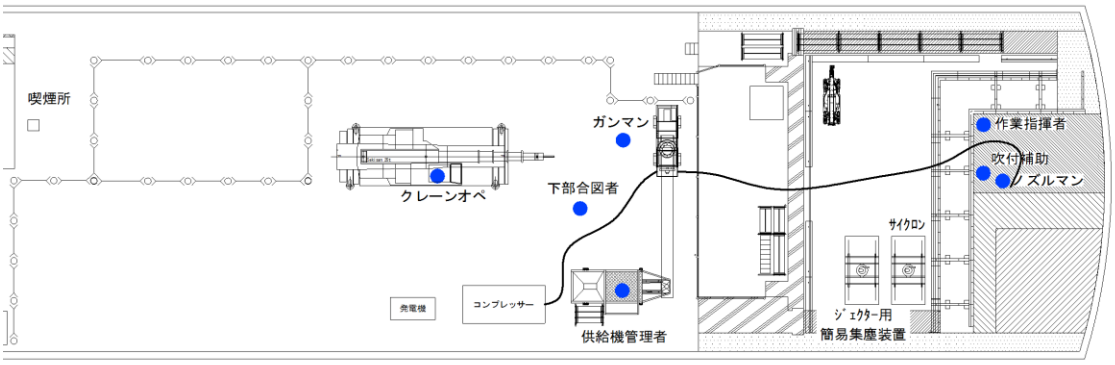


図 2.5-15　吹付け時の機械配置図

図 2.5-16　施工状況

c. 上部埋戻し材の施工試験の結果

(a) 転圧施工時の敷均し厚さ・転圧回数の設定

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 2.5-18 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 2.5-18 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 2.5-19 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。

以上の結果より、本施工試験においては、施工仕様として敷均し厚さ 200mm、振動転圧 6Pass として施工を行なうこととした。

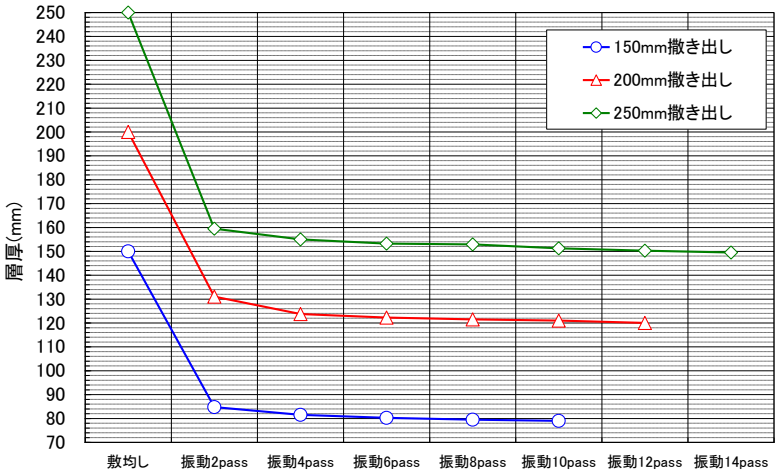


図 2.5-17　各敷均し厚さでの転圧段階と層厚の関係

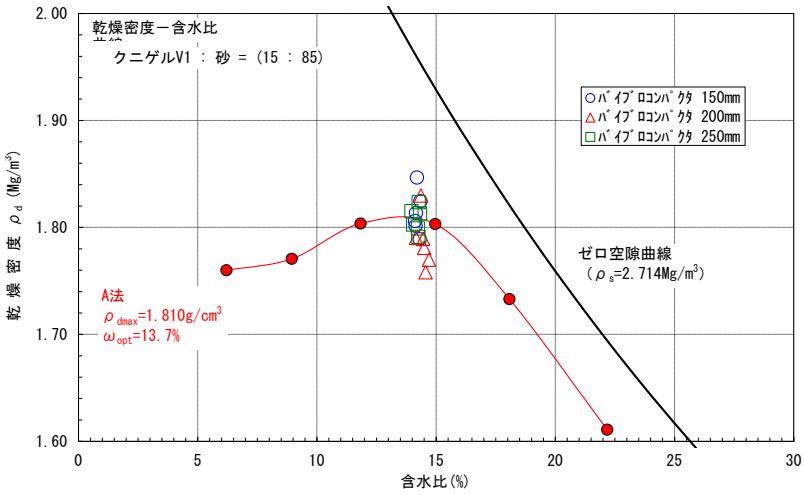


図 2.5-18　各敷均し厚さでの仕上がり密度

(b) 施工後の乾燥密度・含水比・混合率の測定結果

施工後の上部埋戻し材から試料を採取して、乾燥密度と含水比を測定した。図 2.5-19 に上部埋戻し材の乾燥密度と含水比の関係、図 2.5-20 に含水比、図 2.5-21 に乾燥密度、図 2.5-22 に締固め度の測定結果を示す。含水比に関しては、設定含水比が異なるため、平均値が平成 25 年度より平成 26 年度の方が低くなっている。また、平成 25 年度の転圧工法に用いた材料は、平成 25 年度に製造した混合土の中でも、相対的に含水比が高めのものを選別して用いているため、含水比が高めに分布している。これは、含水比が高くなると、吹付け施工に支障をきたすことが予測されたためにとった措置である。

乾燥密度に関しては、吹付け工法の一部を除き、締固め度 90%（＝1.629 Mg/m^3）より高い値となり、全体の平均でも 94%程度であり、管理目標値を概ねクリアした。しかし、吹付け施工、転圧施工とも平成 25 年度より含水比を低めに設定した平成 26 年度の方が乾燥密度は相対的に低下している。それに伴い、A-c 法で行った室内締固め試験の結果に対する締固め度も低下している。これは、締固め度の平均値が 94%程度であったことより、現場施工で発揮できる締固めエネルギーは、室内締固め試験 A 法での締固めエネルギーに対して 94%程度であると想定される。このため、室内締固め試験 A 法の最適含水比より現場施工時の締固めエネルギーの時の最適含水比の方が高い、すなわち、平成 26 年度の設定含水比より平成 25 年度の設定含水比の方が現場施工時の締固めエネルギーに対して高い密度が得られやすい条件となったのではないかと推察される。なお、密度のばらつき（密度の分布幅）に関しては、転圧施工においては、平成 25 年度より平成 26 年度の方が減少する（分布幅が小さくなる）という結果が得られたが、吹付け施工に関しては、平成 26 年度の方がばらつきは大きくなった。これは、平成 25 年度はホースの途中で加圧することにより、ノズル部である程度安定した空気圧が維持できていたが、平成 26 年度では、この途中で加圧することを行わなかった。そのため、ノズル部の空気圧に変動が生じたものと思われる。

施工後の上部埋戻し材から試料を採取して、細粒分含有率の測定を行った。混合土の製造の時と同様に、ベントナイトと混合した砂の粒度分布では、細粒分が含まれていないことを確認したため、ベントナイトの混合率は細粒分含有率と等しいとみなしている。図 2.5-23 に混合率の測定結果を示す。この細粒分含有率から求めた混合率は、転圧施工より吹付け施工の方が高くなった。これは吹付け途中で材料分離が発生し、混合率が高い材料のみが施工箇所に付着し、砂分が多い部分がリバウンドしているためである。リバウンド材に関しては次節にて説明する。

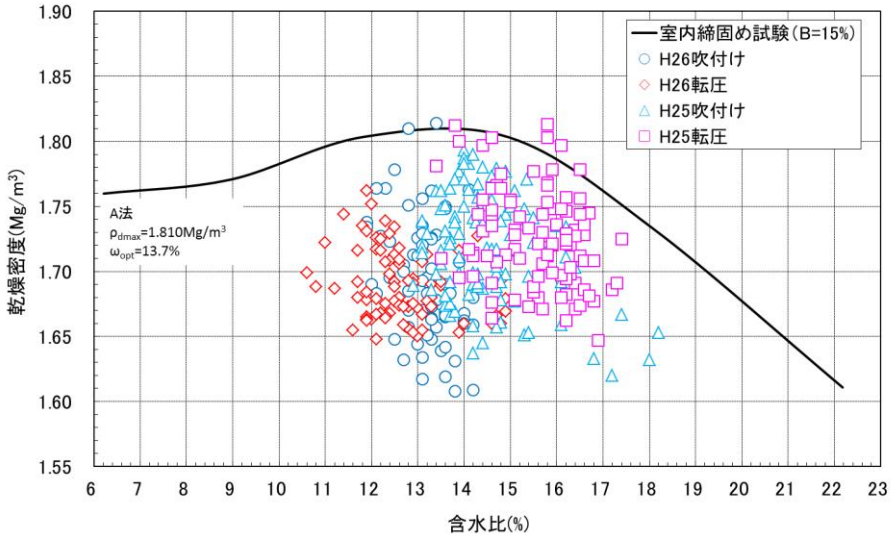


図 2.5-19　上部埋戻し材の乾燥密度と含水比の関係（平成 25～26 年度）

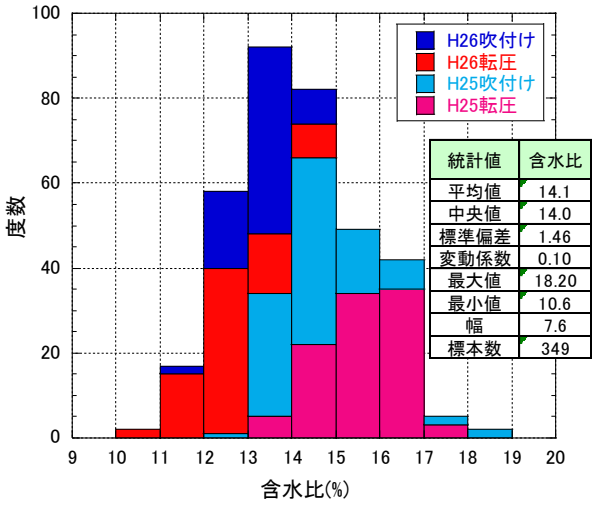


図 2.5-20　施工後の含水比

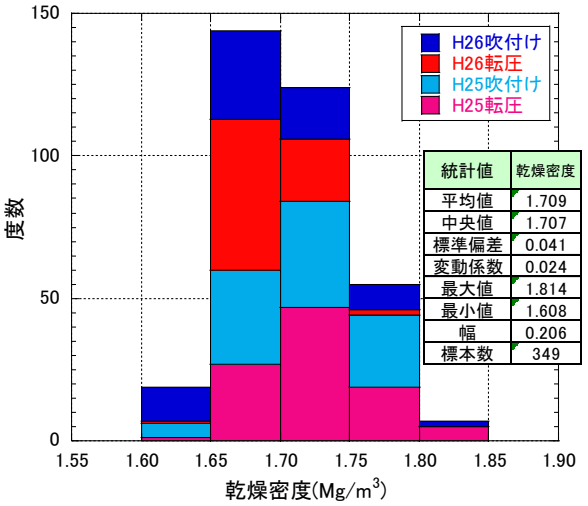


図 2.5-21　施工後の乾燥密度

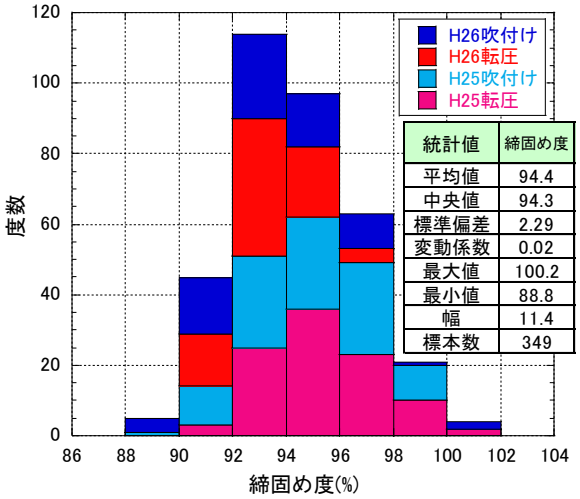


図 2.5-22　施工後の締固め度

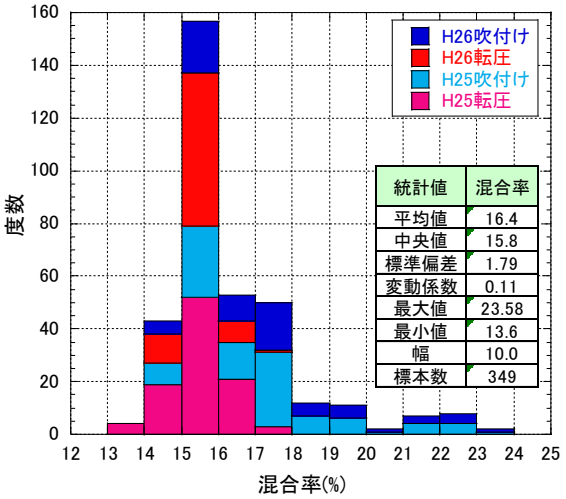


図 2.5-23　施工試験後の混合率

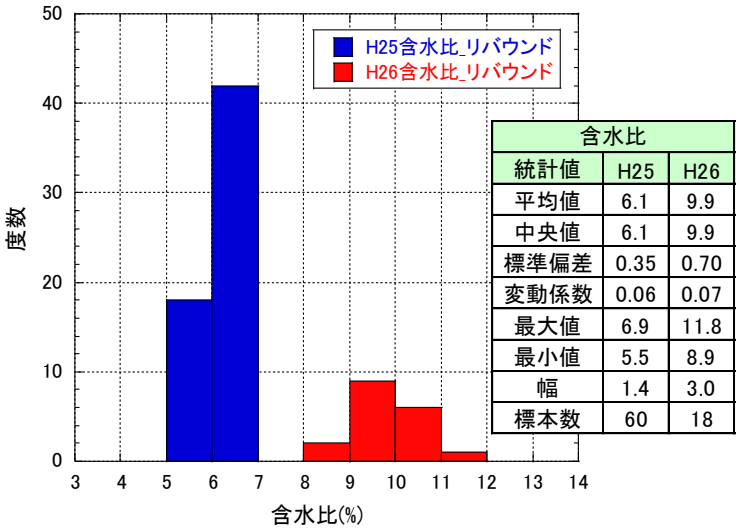
(c) 吹付け施工時のリバウンド

リバウンド材を回収して含水比および混合率の測定を行った。それぞれの結果を図 2.5-24 および図 2.5-25 に示す。リバウンド材の含水比の平均値は、平成 25 年度が 6.1%、平成 26 年度が 9.9%、混合率の平均値は、平成 25 年度が 7.4%、平成 26 年度が 12.1%と、製造時の材料の含水比の平均値（平成 25 年度 14.5%、平成 26 年度 13.5%）、混合率の平均値（平成 25 年度 15.0%、平成 26 年度 15.0%）に比べて両者とも低い値となった。吹付けに伴い含水比が低下することも考えられるため、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 2.5-26 に示す。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。しかしながら、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。以上より、リバウンド材のベントナイト分が低下し、その結果としてリバウンド材の含水比が低くなったといえる。これは、吹付け時に材料の分離が生じ、そのため砂分が多くリバウンドしたものと思われる。

材料分離を誘発する要因としては、以下の項目が考えられる。

- 吹付け圧力；吹付け圧力が高いことにより砂とベントナイトの分離が助長
- 乾燥状態；吹付け中に材料が乾燥することにより分離する可能性
- 含水比；含水比の低下によるリバウンド率の増加
- 練り混ぜ方法（時間）；材料が十分に練り込まれないことによる材料の分離
- 材料種類；ベントナイトの種類により分離抵抗性が異なる可能性
- 砂の粒度；砂の最大粒径が大きいと分離抵抗性が小さくなる可能性

しかし、現段階では、これらの要因のどれが影響しているのかの特定はできていない状況である。吹付け工法に関しては、選定する機械によって状況が変わることも十分考えられるため、本試験で使用した機器類を用いての詳細な検討は実施していない。実事業に際しては、事前に施工試験を実施する必要があると考えらえる。



含水比		
統計値	H25	H26
平均値	6.1	9.9
中央値	6.1	9.9
標準偏差	0.35	0.70
変動係数	0.06	0.07
最大値	6.9	11.8
最小値	5.5	8.9
幅	1.4	3.0
標本数	60	18

図 2.5-24　上部埋戻し材吹付け施工時のリバウンド材の含水比

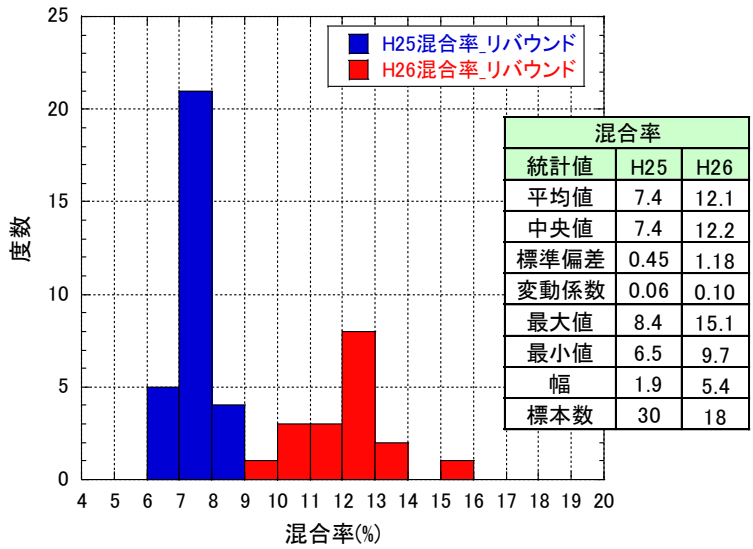


図 2.5-25　上部埋戻し材吹付け施工時のリバウンド材の混合率

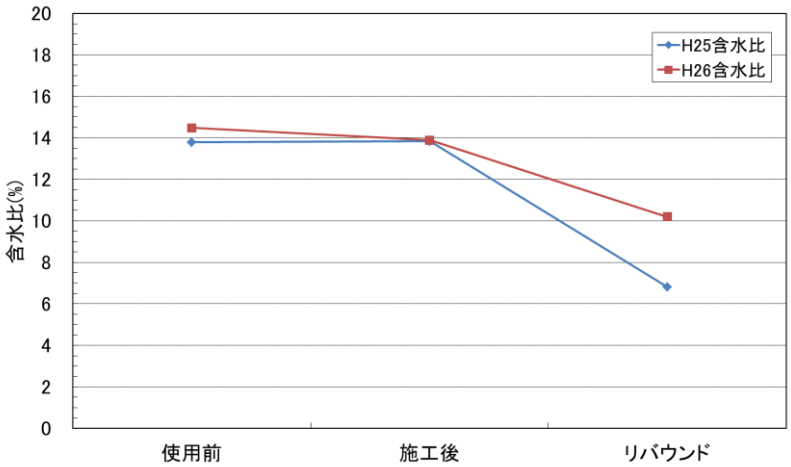


図 2.5-26　上部埋戻し材吹付け施工時の施工前後の材料の含水比の変化

(d) 評価

転圧工法では、選定した機械による事前の施工試験を実施し、適切な敷均し厚さ、転圧回数を設定し、それらを管理しながら施工した。その結果、締固め度 95%程度の上部埋戻し材の構築が可能であることを確認できた。汎用性の高い振動転圧機械により、緩衝材と同様に、道路盛土等の転圧工法において採用されている施工管理手法でも、目標とする乾燥密度を発揮できることを確認できたのは意義が高い。

一方、吹付け工法を適用した結果、こちらも同様に、締固め度 90%程度以上の上部埋戻し材の構築が可能であることを確認できた。

平成 25 年度の合計吹付け量は約 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。平成 26 年度の吹付け量は約 48.6 であり、施工時間は約 40 時間

（吹付けていた時間は約 21 時間）であった。リバウンド量は約 6.0t であった。吹付け速度は時間当たり約 2.3t であり、施工速度は時間当たり約 1.2t となった。また、リバウンド率は約 13%であった。表 2.5-8 に施工料に関するまとめを示す。平成 25 年度に比べて平成 26 年度の施工速度は上昇し、リバウンド率は減少する結果となった。吹付け速度が上昇したのは、材料の含水比を下げたことも要因だと思われる。吹付け時に実施する配管類の清掃や材料の荷降ろし等を含む全体での施工速度に関しては、吹付け速度の上昇に加えて、材料供給機を改造し、フレコンの下部を破袋する機構を設けたことと、材料を吹付け機に投入する前に粉砕する機構を設けたことも要因の１つであると思われる。なお、材料の含水比を下げたことによりリバウンド率が上昇することも考えられたが、今回の試験ではそのような結果とはならなかった。

しかし、吹付け工法によって構築した上部埋戻し材のベントナイト混合率が当初よりも富配合側に偏重する傾向があり、そのため、リバウンド材の混合率が減少し、主に砂分が多くリバウンドしたことが分かった。これにより、吹付け途中に材料分離が発生している可能性が示唆された。

このように、実際の規模、実環境に近い状況下での施工を実施して抽出できた課題の一つに、材料分離が発生することがあげられ、そのようなことが抽出できたことは意義が高い。

表 2.5-8　上部埋戻し材の吹付け施工の施工速度およびリバウンド率

		平成 26 年度	平成 25 年度
吹付け量	(kg)	48,572	57,135
吹付け速度	(kg/h)	2,280	1,909
施工速度	(kg/h)	1,214	995
吹付け時間	10m³ 当り	10:18	8:24
施工時間	10m³ 当り	19:46	15:47
リバウンド率	(%)	12.7	14.8

2.5.5　初期性能の検討

(1) 初期性能確認試験項目

上部埋戻し材の初期性能確認試験で実施した試験項目を要求機能と対応する形式で表 2.5-9 で整理した。初期性能確認試験は低拡散材の主たる要求機能である拡散抑制に係わるデータの他、副次的な要求機能に関わるデータや設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得を目的とした試験も実施した。

これらの試験は、施工後の上部埋戻し材より試料を採取し、成形して試験に用いる供試体とした。

表 2.5-9　上部埋戻し材の初期性能確認試験項目

機能			段階	機能の説明	試験項目											
					力学特性		透水	透水への影響因子								長期力学安定性
					一軸圧縮強度試験	三軸圧縮強度試験	透水試験	乾燥密度試験	含水比試験	メチレンブルー吸着量	交換性陽イオン測定	膨潤力試験	塑性限界試験	粒度試験	細粒分含有率測定（混合率）	膨潤圧試験
要求機能	基本安全機能	閉じ込め	建設操業	放射線物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること			○		○	○	○		○	○		
		遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと												
		移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移動を抑制すること												
				放射性核種を収着すること												
				低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の抑制を行うこと												
				連続した地下水移行経路を形成しないこと	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	操業上の機能		建設操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること												
材料物性			設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得													○

(2) 初期性能確認

主な要求機能である移行抑制に対しては、透水係数を測定する、透水試験を実施した。

1) 透水試験

透水試験の方法については、平成 25 年度および平成 26 年度の報告書に詳細が記載されているので、本節では記載せず、省略する。

供試体の初期乾燥密度は 1.561～1.727Mg/m^3、初期含水比は 12.3～19.0%、ベントナイト混合率は 15.0～20.9%であり、得られた透水係数は 7.07×10^{-12}～7.43×10^{-11}m/s となった。

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、図 2.5-27～図 2.5-28 に示す通り、乾燥密度より有効粘土乾燥密度との相関性が高い結果となった。また、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 2.5-29 に示す既往の研究事例[3]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 0.50～0.63Mg/m^3 の時の値であり、10^{-12}～10^{-11}m/s 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[3]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た。

当該地点の周辺岩盤の透水係数[21]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}～7.43×10^{-11}m/s）は、周辺岩盤より 3 オーダー低い値となった。

しかし、止水性能（透水）の代替え特性として、緩衝材のように、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。

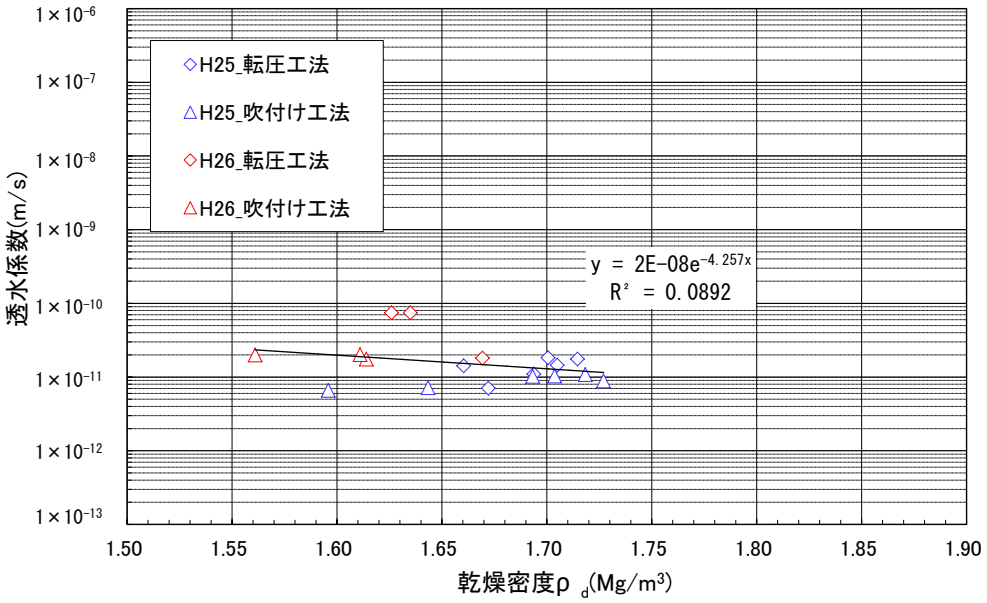


図 2.5-27　透水係数と乾燥密度の関係

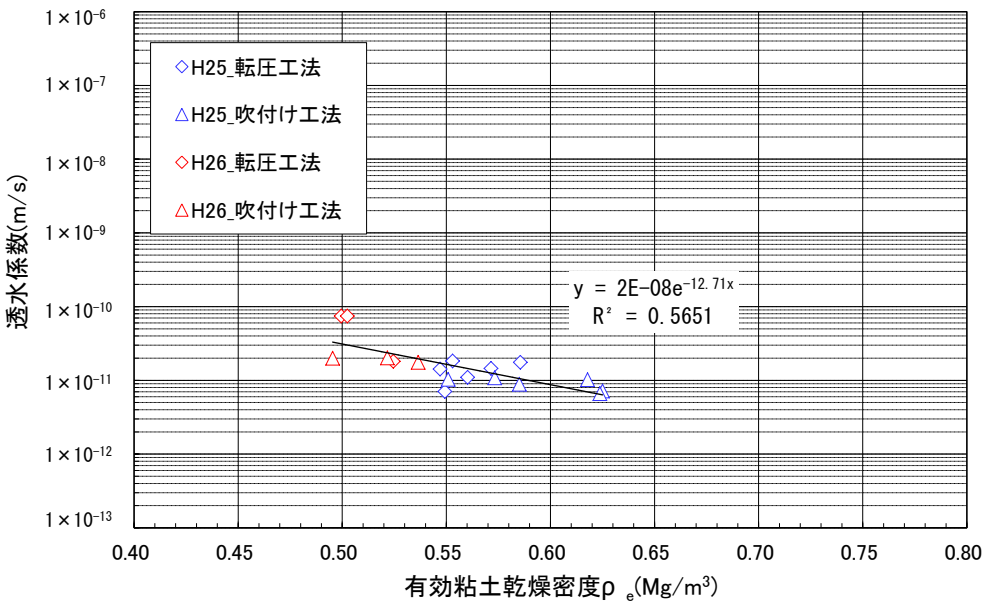


図 2.5-28　透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

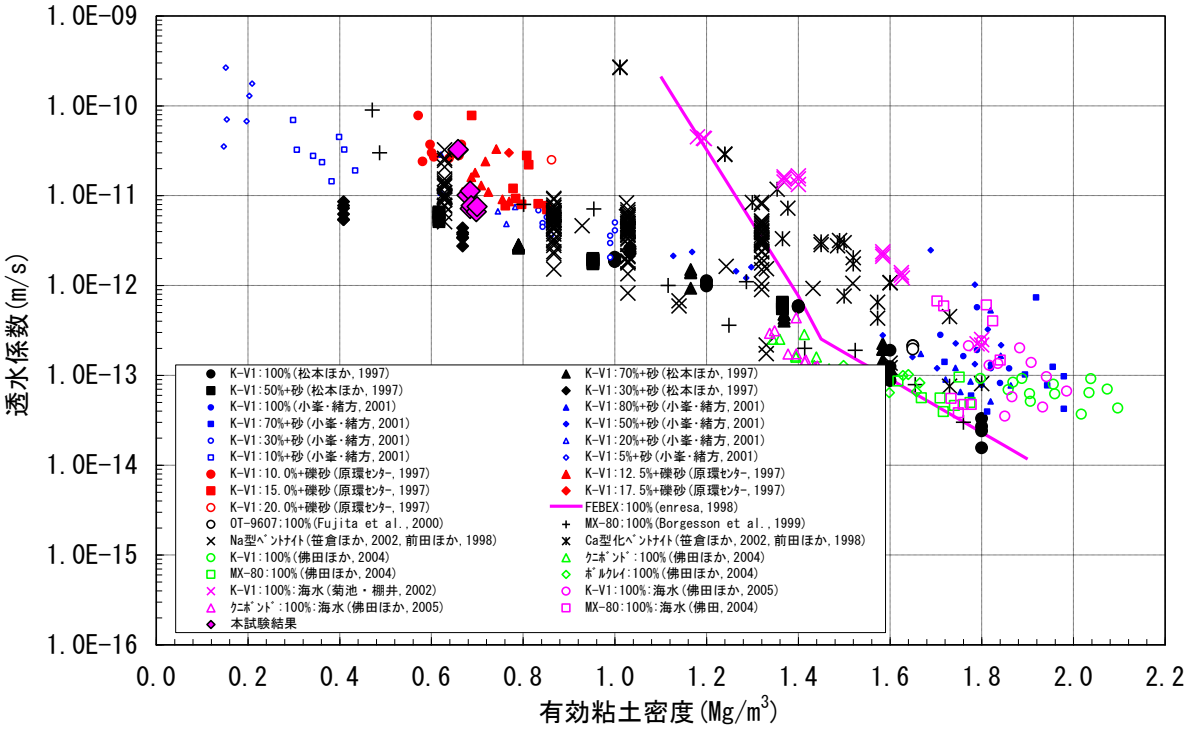


図 2.5-29　既往研究における透水係数と有効粘土密度の関係[3]

2.5.6　まとめと今後の課題

(1) 課題に対する照査

本試験では、国内初となる、ベントナイト混合土を用いた上部埋戻し材の、実規模・実際に近い環境下での施工と施工後の品質を確認した。本試験の結果を以下にまとめる。

- 既往の研究事例を参考に、ベントナイト混合土の配合を設定し、室内試験により透水係数を十分に小さくできることを確認した。また、目標とする透水係数をもとに乾燥密度と含水比の仕様を設定し、施工時の管理目標値を設定できた。このような施工時の管理目標値の設定方法は、一般的な道路盛土等の施工時における設定方法と同等の方法であり、上部埋戻し材の施工に対しても従来通りの方法を適用可能であると考えられる。
- ベントナイト混合土の製造や、上部埋戻し材の施工は、現状で選択し得る方法で実施した。ベントナイト混合土の製造においては、含水比やベントナイトの混合率のばらつきの程度を把握できた。また、施工後の上部埋戻し材の乾燥密度やベントナイトの混合率のばらつきの程度を把握できた。
- 既往の検討より、転圧工法と吹付け工法の組み合わせて行う方法を抽出した。この、転圧工法と吹付け工法の組み合わせによって、狭隘でかつ隅角部を有する上部埋戻し材の構築が可能であることを明らかにした。
- 転圧工法においては、事前に敷均し厚さと転圧回数の関係を把握し、施工時の管理目標である乾燥密度に到達する転圧回数を設定した。試験空洞内での施工では、この敷均し厚さ、転圧回数で施工するものとし、所定の敷均し厚さ、転圧回数で施工しているかを管理する、いわゆる工法規定的な施工管理手法で実施した。その結果、このような工法規定的な管理で施工しても、管理目標を満足することを確認できた。
- 吹付け工法においても、室内締め固め試験 A 法に対する締固め度が 90%以上を概ね達成し、平均で 94%を満足することが分かった。施工時の材料のリバウンド率は、12～13%程度であった。
- 吹付け前後で含水比、混合率が変化し、特に混合率が大きくなる傾向となることがわかった。リバウンドした材料のベントナイト混合率が少ないことより、ベントナイト混合土の砂分が跳ね返っていることがわかった。そのため、吹付け途中で材料分離が発生していることがわかった。含水比の変化は、混合率の変化によるものと考えられる。
- 施工後の上部埋戻し材から採取した試料を用いて、透水試験等の室内試験を実施し、初期的な性能の確認を行った。その結果、透水係数を十分に小さい（透水係数で 1.0×10^{-11}m/s 程度）ことを確認した。これは、試験空洞周辺岩盤の透水係数の最低値である 7.8×10^{-8}m/s よりも小さい。また、既往知見で得られている有効粘土乾燥密度と透水係数との関係として整理できる可能性が示唆された。

(2) 本プロジェクトでの成果

要求機能が決められない状況ではあるが、暫定的に設定した要求機能に対して、材料の選定・配合の設定から、施工時の管理目標の設定、および工法規定的な施工管理でも対応可能であることを確認でき、これらの一環としたプロセスの構築がなされた。

さらに、施工に関して、現状技術の組み合わせ、すなわち、土質材料の締固めに一般的に採用されている転圧工法と、法面のモルタル吹付けや客土吹付け等で採用されている吹付け工法の組み合わせで施工しても、本試験で設定した目標値を満足する性能の上部埋戻し材の構築が可能であることがわかった。

(3) 今後の検討課題

- 緩衝材と同様に、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可能性が示唆されるが、これには、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。
- 吹付け施工時に発生する材料分離を防止する方策
- 選定したもの以外の配合に関する検討

参考文献

[1]（社）土木学会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、2008 年 6 月、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 、2008.
[2]原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 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、2008
[3]土木学会：余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方、2009
[4]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、2011
[5]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費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2012
[6]小峯秀雄、緒方信英：ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と簡易評価法の提案、土木学会論文集、No.708、III-59、133-144、 2002.6
[7]田中、深沢、平、須山：人工地盤構築材料の開発（その３）－礫混入ベントナイト混合土の透水特性－、鹿島技術研究所年報、第 43 号、203-208、 1995.12
[8]尾崎充弘、庭瀬一仁、平川芳明、田島孝敏、新村亮、武内邦文；放射性廃棄物処分施設の土質系埋戻し材の材料特性、土木学会第 62 回年次学術講演会、CS5-011　pp.181-182、2007
[9]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
[10]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
[11]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
[12]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
[13]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
[14]原子力環境整備促進・資金管理センター：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、2014.
[15]Kobayashi, I., Toida, M., Nakajima, M., Tanaka, T., Terada, K., Nonaka, K., and Yabe, J.: Development of Construction Methods of the Bentonite Engineered Barrier by the High-density Shotclay System, Proc. of Workshop on Long-term Performance of Smectitic Clays Embedding Canisters with Highly Radioactive Waste 、2007
[16]石濱裕幸、千々松正和、荻原績、中越章雄：ベントナイト混合土の吹付け施工に関する検討、土木学会第 67 回年次学術講演会、CS13-014、pp.27～28、2012

[17]原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度　管理型処分技術調査等地下空洞型処分施設性能確証試験、2007
[18]D Gunnarsson, L Borgesson, H Hokmark, L-E Johannesson, T Sanden：Report on the installation of the backfill and plug test, IPR-01-17　、2001
[19]千々松正和、吉越一郎、中越章雄、雨宮清：ベントナイトの斜め締固めおよび施工管理方法に関する検討、2007 年春の年会予稿集「放射性廃棄物処分と環境」、原子力学会、p.424、2007
[20]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
[21]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）

2.6　挙動計測・地震影響検討

試験施設の施工を開始した平成 19 年度から、試験施設に温度計やひずみ計等の計測器を設置し、施工時および施工後の試験施設の挙動を計測した。また、周辺岩盤には、間隙水圧計および岩盤変位計を設置して、試験施設構築に伴う挙動を計測した。本節では、挙動計測の内容および挙動計測結果から得られた試験施設構築が施設構成部材に与える影響と、その影響の程度から判断される施設健全性について総括する。また、巨大地震が地下空洞型処分施設（以下、地下空洞施設と称す）に与える影響の解析的検討、および試験施設における地震動観測データの分析について検討成果を述べる。

2.6.1　挙動計測

(1) 挙動計測の内容

1) 計測目的と計測方法

施工確認試験による人工バリアの構築は段階的に進められる。そのため、試験施設を構成する部材は、その施工により隣接部材に力学的な影響を与えるとともに、後続する部材の施工の影響を受ける。挙動計測の目的は、施工時および施工後の試験施設の力学挙動と周辺岩盤への影響を把握し、試験施設の健全性を評価することである。

挙動計測では、施設構成部材に計測器を設置し、施工中および施工後の計測を継続して実施した。施工による施設への影響要因と想定される挙動、その挙動に対して計画した計測項目、計測方法を表 2.6-1に示す。

また、コンクリートピットや低拡散材等のセメント系部材の打込み時に得られた計測結果を用いて、表 2.6-2に示す初期性能（試験施設の建設完了時点の性能）に関するデータを取得した。詳細は、埋戻し材については平成 19 年度報告書[1]、低拡散材およびコンクリートピットについては平成 20 年度報告書[2]、平成 21 年度報告書[3]、平成 24 年度報告書[4]に記載している。

表 2.6-1　試験施設構成部材の計測項目と計測方法

部材	部位	当該部への影響要因		当該部からの影響要因	想定される挙動	計測項目	計測方法
緩衝材	底部	構造部材の自重		他構造物への土圧・振動の作用	土圧の変化	土圧	土圧計
		他構造物施工の影響			振動	加速度	加速度計
			上載荷重		沈下	沈下量	沈下計
			温度応力		温度変化	温度	温度計
			施工時の水分流入		間隙水圧、水分変化	間隙水圧、水分	間隙水圧計、水分計
	側部	構造物の自重		他構造物への土圧・振動の作用	土圧の変化	土圧	土圧計
		他構造物施工の影響			振動	加速度	加速度計
	上部	構造物の自重		他構造物への土圧・振動の作用	土圧の変化	土圧	土圧計
		他構造物施工の影響			振動	加速度	加速度計
低拡散材	底部	構造部材の自重		自重 温度応力	部材の変形 応力変化 打継目の開閉 界面のせん断変形	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			上載荷重 温度応力			界面せん断変位	せん断変位計
						継目開閉度	継目計
						ひび割れ	BTV観察
				他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
	側部	構造部材の自重		自重 液圧 温度応力	部材の変形 応力変化 打継目の開閉 界面のせん断変形 低拡散材の液圧 振動	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			充てん圧、土圧、 振動、温度応力			界面せん断変位	せん断変位計
						継目開閉度	継目計
						液圧	土圧計
						ひび割れ	ひび割れ観察
						振動	加速度計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
	上部	構造部材の自重		自重 温度応力	部材の変形 応力変化	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			土圧、振動			ひび割れ	ひび割れ観察
				他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
コンクリートピット	底部	構造部材の自重		自重 温度応力	低拡散材の変形 応力変化 打継目の開閉 界面のせん断変形 緩衝材の不同沈下	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			上載荷重 温度応力			界面せん断変位	せん断変位計
						継目開閉度	継目計
						部材の傾き	傾斜計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
	側部	構造部材の自重		自重 温度応力	部材の変形 応力変化 打継目の開閉 界面のせん断変形	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			充てん圧、液圧、土圧、 振動、温度応力			鉄筋応力	鉄筋計
						界面せん断変位	せん断変位計
						継目開閉度	継目計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
	手前部	構造部材の自重		自重 温度応力	部材の変形 応力変化	ひずみ	ひずみ計
			充てん圧、液圧 振動、温度応力			鉄筋応力	鉄筋計
							温度計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	
	上部	構造部材の自重		自重 温度応力	部材の変形 応力変化	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			上載荷重、温度応力				
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
区画内充てん材		他構造物施工の影響		充てん圧	充てん材の液圧	液圧	土圧計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
上部充てん材		他構造物施工の影響		充てん圧	充てん材の液圧	液圧	土圧計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
埋戻し材 （セメント系）	底部	構造部材の自重		－	部材の変形 応力変化 振動	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			上載荷重 振動			鉄筋応力	鉄筋計
						振動	加速度計
			水和熱	－	温度変化	温度	温度計
	側部 奥部	構造部材の自重		温度応力	部材の変形 応力変化 振動	ひずみ	ひずみ計
		他構造物施工の影響				応力	応力計
			上載荷重、温度応力 振動			鉄筋応力	鉄筋計
						振動	加速度計
			水和熱	他構造物の熱環境	温度変化	温度	温度計
埋戻し材 （土質系）	上部	構造部材の自重		自重	沈下	沈下量	沈下計
		他構造物施工の影響			温度変化	温度	温度計
周辺岩盤		構造部材の荷重		－	岩盤変位の進展	岩盤変位	岩盤変位計
		施工の地下水流動への影響		－	間隙水圧の変化	間隙水圧	間隙水圧計

表 2.6-2　初期性能に関する取得データ

取得データ	初期性能関連項目	計測項目	計測方法
打込み時温度上昇量	温度特性	温度	温度計
弱材齢時のコンクリート剛性	コンクリートの剛性	応力、ひずみ	有効応力計、ひずみ計、無応力計
線膨張係数	線膨張係数	温度、ひずみ	温度計、無応力計
自己収縮ひずみ・膨張ひずみ	自己収縮ひずみ・膨張ひずみ	温度、ひずみ	温度計、無応力計
ひび割れ指数	ひび割れ特性	有効応力	有効応力計

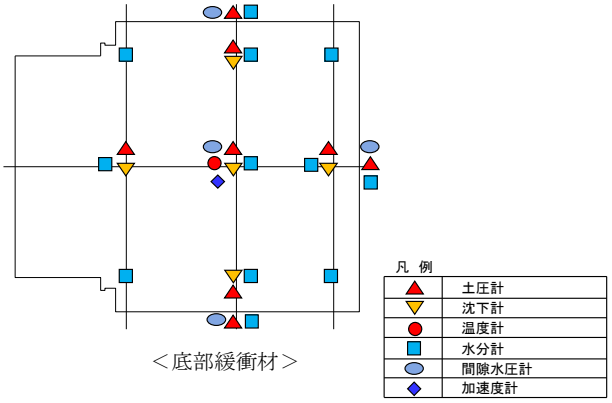
2) 計測器配置

試験施設に設置した計測器の配置を図 2.6-1～図 2.6-3に示す。

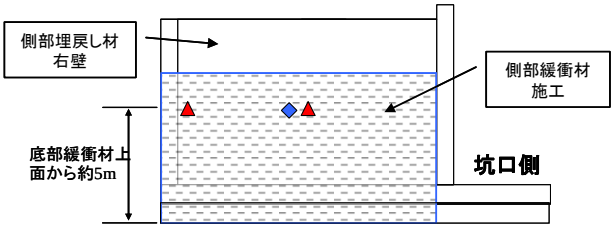
緩衝材

緩衝材設置計器数量

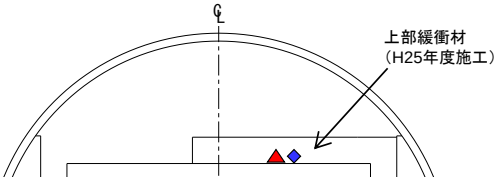
部材	部位	計器	数量	
緩衝材	底部	土圧計	8	31
		沈下計	5	
		間隙水圧計	4	
		水分計	12	
		温度計	1	
		加速度計	1	
	側部	土圧計	2	3
		加速度計	1	
	上部	土圧計	1	2
		加速度計	1	



＜底部緩衝材＞



＜側部緩衝材＞

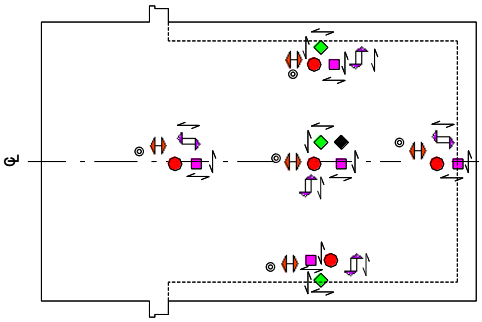


＜上部緩衝材＞

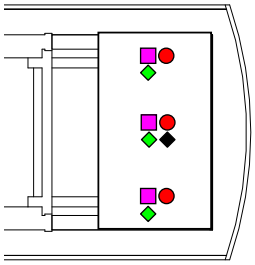
低拡散材

低拡散材設置計器数量

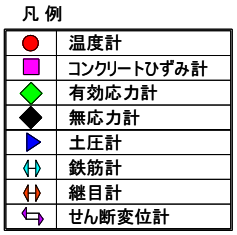
部材	部位	計器	数量	
低拡散材	底部	ひずみ計	30	62
		温度計	15	
		無応力計	1	
		有効応力計	6	
		継目計	5	
		せん断変位計	5	
	側部	ひずみ計	16	57
		温度計	16	
		無応力計	2	
		有効応力計	7	
		継目計	4	
		せん断変位計	4	
		土圧計	6	
		加速度計	2	
	上部	ひずみ計	18	34
		温度計	9	
		無応力計	1	
		有効応力計	6	

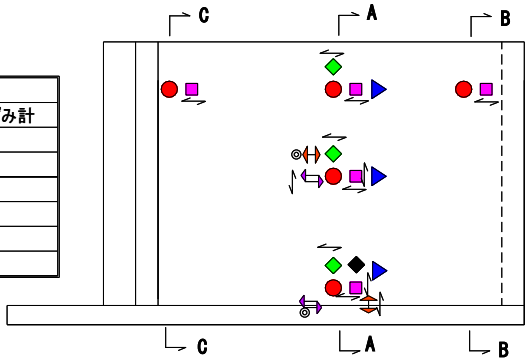


＜底部低拡散材＞



＜上部低拡散材＞





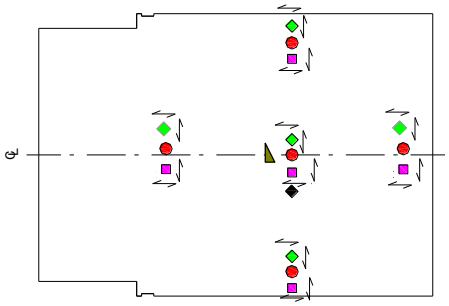
＜側部低拡散材＞

図 2.6-1　設置計器数量および計測器配置（その 1）

コンクリートピット

コンクリートピット設置計器数量

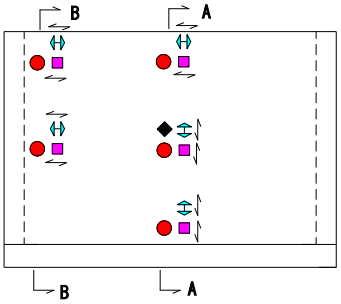
部材	部位	計器	数量	
コンクリートピット	底部	ひずみ計	30	57
		温度計	15	
		無応力計	1	
		有効応力計	10	
		傾斜計	1	
	側部	ひずみ計	26	80
		温度計	26	
		無応力計	2	
		有効応力計	6	
		鉄筋計	20	
	手前部	ひずみ計	10	32
		温度計	11	
		無応力計	1	
		鉄筋計	10	
	上部	ひずみ計	6	12
		温度計	3	
		無応力計	1	
		有効応力計	2	



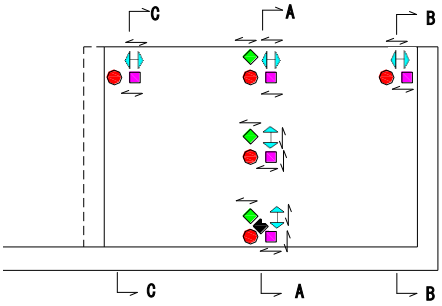
＜底部コンクリートピット＞

凡 例

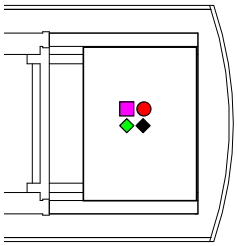
●	温度計
■	コンクリートひずみ計
◆	有効応力計
◆	無応力計
▶	土圧計
⇔	鉄筋計
⇔	継目計
⇆	せん断変位計



＜手前部コンクリートピット＞



＜側部コンクリートピット＞

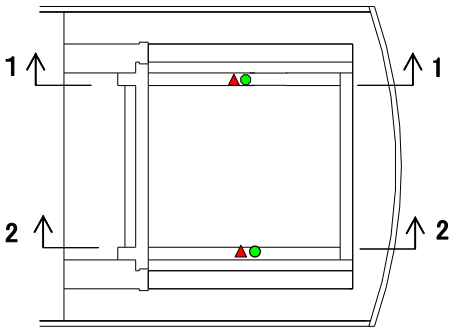


＜上部コンクリートピット＞

区画内充てん材・上部充てん材

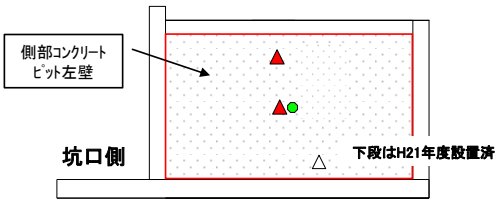
区画内充てん材・上部充てん材設置計器数量

部材	計器	数量	
区画内充てん材	土圧計	3	4
	温度計	1	
上部充てん材	土圧計	1	2
	温度計	1	

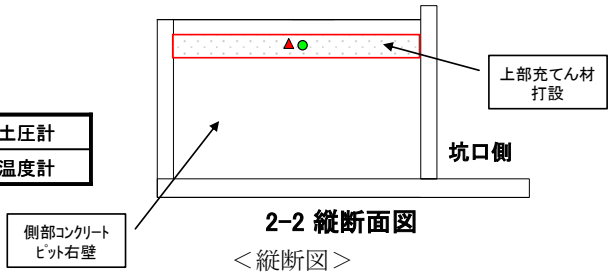


＜平面図＞

▲	土圧計
●	温度計



1-1 縦断面図



2-2 縦断面図

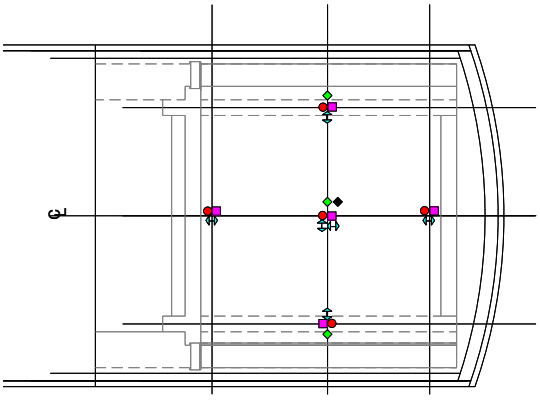
＜縦断図＞

図 2.6-2　設置計器数量および計測器配置（その 2）

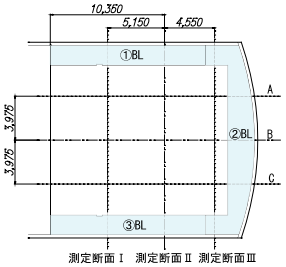
埋戻し材

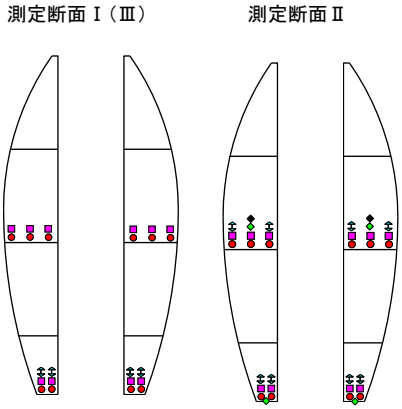
埋戻し材設置計器数量

部材	部位	計器	数量	
埋戻し材 ・底部、側部、奥部はセメント系部材 ・上部は土質系部材	底部	ひずみ計	30	64
		温度計	15	
		無応力計	1	
		有効応力計	6	
		鉄筋計	12	
	側部	ひずみ計	60	116
		温度計	30	
		無応力計	2	
		有効応力計	8	
		鉄筋計	16	
	奥部	ひずみ計	16	35
		温度計	8	
		無応力計	1	
		有効応力計	4	
		鉄筋計	6	
	上部	沈下計	1	2
		温度計	1	

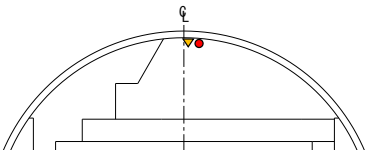


＜底部埋戻し材＞





＜側部埋戻し材＞



＜上部埋戻し材＞

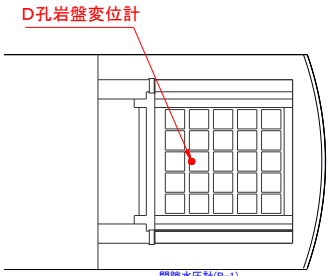
凡 例

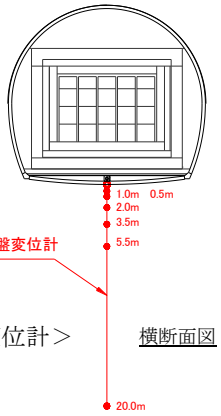
■	コンクリートひずみ計
◆	有効応力計
◆	無応力計
⊕	鉄筋計
●	温度計
▼	沈下計

周辺岩盤

周辺岩盤設置計器数量

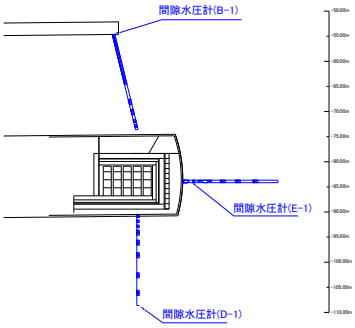
設置箇所	計器	数量	
周辺岩盤	間隙水圧計	31	37
	岩盤変位計	6	
試験空洞内	温湿度計	1	1



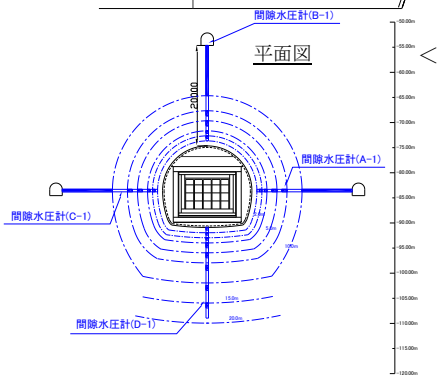


＜岩盤変位計＞

横断面図



（試験空洞縦断面図）



平面図

（試験空洞横断面図）

＜間隙水圧計＞

図 2.6-3　設置計器数量および計測器配置（その 3）

(2) 挙動計測の成果

1) 試験施設の挙動

挙動計測結果より、試験施設構築が施設構成部材に与える影響とその影響の程度から判断される施設健全性を表 2.6-3に示す。また、表中の施設健全性評価における代表的な計測結果を図 2.6-4～図 2.6-14に示す。なお、施設・周辺岩盤挙動計測結果のうち、セメント系壁部材打込み時の側圧計測等の個々の施工イベントに対する挙動計測結果は、前節までの関連部材の成果において記載した。

表 2.6-3　影響の程度と健全性

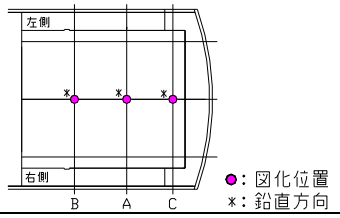
対象構成部材		影響要因	影響の程度と健全性	代表図
底部平板部材	底部緩衝材	上載荷重	[影響の程度] ・概ね上載圧に相当する挙動（土圧、沈下量）である。 [健全性] ・過大な土圧、沈下は生じていない。上載圧の支持部材としての機能を維持している。	図 2.6-4 図 2.6-5
	底部コンクリートピット 底部低拡散材	上載荷重 水和熱	[影響の程度] ・各部材には引張応力が作用するが、引張強度以下である。 ・上部部材施工時のひずみ増加量は、季節変動による温度変化に伴う変動と同程度。 [健全性] ・底部低拡散材では、ひび割れの発生が確認されているが、ひずみ・応力の計測結果からひび割れは局所的なものと考えられる。底部セメント系部材の健全性は確保されていると評価される。	図 2.6-6 図 2.6-7
側部コンクリートピット 側部低拡散材		側圧（液圧、温度応力） 水和熱	[影響の程度] ・隣接部材施工時に引張側に応力は増加するが、全期間を通じて引張応力は引張強度以下である。 ・隣接部材施工時にひずみは膨張する。ひずみの増加量は季節変動による温度変化に伴う変動と同程度である。施工終了後、ひずみは残留せずに減少している。 [健全性] ・側部低拡散材では、ひび割れが発生しているが、過大なひずみ、応力は作用しておらず、側部壁部材の健全性は確保されていると評価される。	図 2.6-8 図 2.6-9
上部コンクリートピット 上部低拡散材		温度応力	[影響の程度] ・湿潤保温養生マットで養生した上部低拡散材の右側でひび割れが発生し、養生終了後の急激な温度低下が原因と考えられる。 [健全性] ・上部低拡散材の右側ではひび割れ発生したが、養生終了後のひび割れ発生後、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ておらず、健全性は確保されていると評価される。左側ではひび割れの発生は確認されていない。	図 2.6-10 図 2.6-11
上部埋戻し材		上載荷重	[影響の程度] ・上部埋戻し材の施工が進行するに伴い、新たに構築された上部埋戻し材の自重増加分により沈下計に 5mm 程度の変位量が観測された。 [健全性] ・施工後には沈下量の収束傾向が確認できること、また、施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の収束値は概ね整合していることから、健全性は確保されていると評価される。	図 2.6-12
岩盤変位計 岩盤間隙水圧計		上載荷重	[影響の程度] ・岩盤変位は弾性挙動の範囲内である。 [健全性] ・緩みの進展はなく周辺岩盤は健全な状態である。	図 2.6-13
		施工全般	[影響の程度] ・試験期間中の間隙水圧の変動は小さい。 [健全性] ・施設構築の周辺岩盤の地下水流動への影響は無い。	図 2.6-14

注）引張強度：低拡散材 5.51N/mm²、コンクリートピット 5.49 N/mm²（室内・標準養生の材齢 91 日の値[5]）

[グラフ中のイベント名称]

- 底埋：底部埋戻し材打設
- 奥埋：奥部埋戻し材打設
- 側埋：側部埋戻し材打設
- 底緩 1：底部緩衝材 1 層目転圧
- 底緩 2：底部緩衝材 2 層目転圧
- 底緩 10：底部緩衝材 10 層目転圧
- 底低：底部低拡散材打設
- 底 CP：底部コンクリートピット打設
- 奥 CP：奥部コンクリートピット打設
- 側 CP：側部コンクリートピット打設
- 模廃：廃棄体中詰めコンクリート打設
- 手 CP：手前部コンクリートピット打設
- 側低：側部低拡散材打設
- 充填･上充：区画内充てん材、上部充てん材打設
- 側緩吹：側部緩衝材（吹付け施工）開始
- 普コ：普通コンクリート打設
- 側緩転：側部緩衝材（転圧施工）開始
- 上 CP：上部コンクリートピット打設
- 上低：上部低拡散材打設
- 上緩吹：上部緩衝材（吹付け施工）開始
- 上緩転：上部緩衝材（転圧施工）開始
- 上埋土：上部埋戻し材（吹付け、転圧施工）開始

底部緩衝材沈下



- 平成 26 年度上部埋戻し材施工終了時の沈下量は 0.4～1.3mm 程度である。上載荷重の増加が少ない 2011 年以降の沈下量は小さい。
- 空洞軸方向の沈下量分布は、手前側（B 断面）、施設中央（A 断面）の沈下量は 1mm を超えるが、施設奥側（C 断面）の沈下量は約 0.4mm と小さい（奥側周辺部材の拘束の影響）。
- 計測値は 2 次元 FEM 解析から推定される上載荷重に対する沈下量と同等な値が生じている。過大な沈下はなく、底部緩衝材の健全性は現時点で保たれていると考えられる。

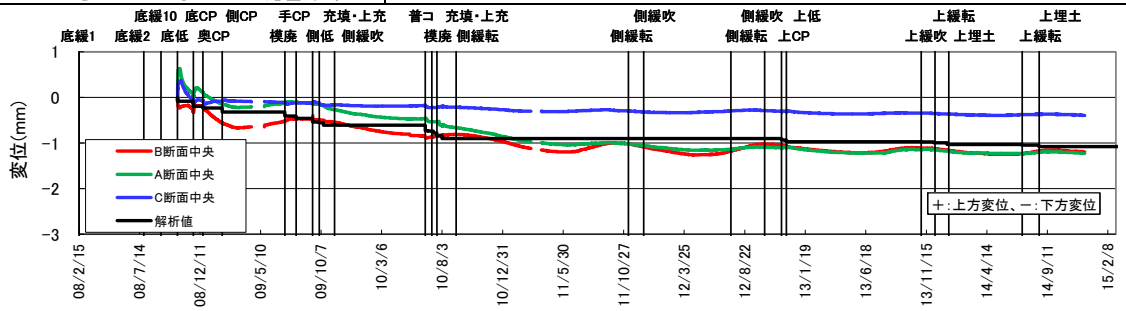
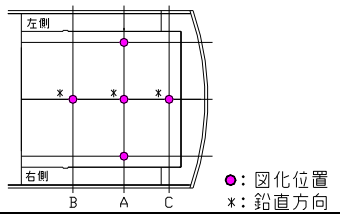


図 2.6-4　底部緩衝材の沈下量計測結果

底部緩衝材土圧



- 土圧は季節変動を伴いながら上昇し、平成 22 年度（2010 年度）施工期間中にピーク（約 0.2MPa）を示す。土圧は上載圧相当の値であり底部緩衝材に過大な土圧は作用していない。
- 部材中央と比べて、端部では側部埋戻し材の温度変化に伴う膨張収縮による拘束の影響を受けて相対的に土圧は大きいが、2011 年以降その差は小さい。

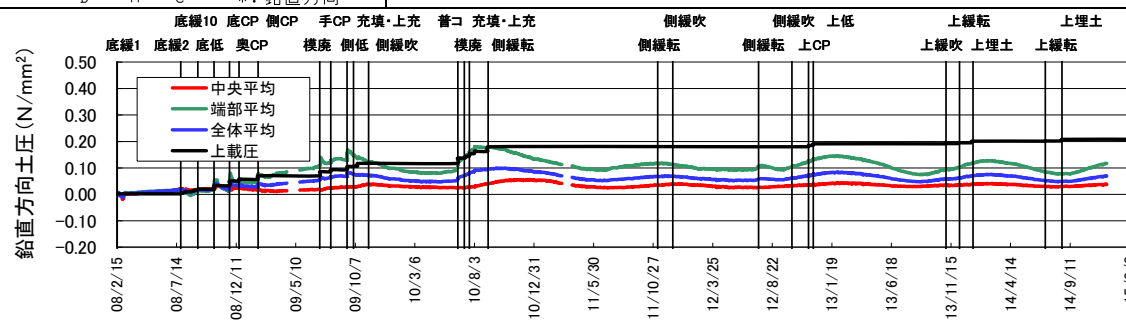
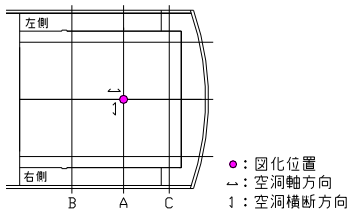


図 2.6-5　底部緩衝材の土圧計測結果

底部低拡散材応力



- 平成 22 年度（2010 年度）充てん材施工終了後に空洞軸方向応力で圧縮応力が増加、同年 12 月に空洞横断方向で引張応力が増加した。BTV 観察により確認されたひび割れによる応力変化を捉えた挙動である。空洞横断方向応力は、その後も引張応力が残留している。
- 平成 21 年度（2009 年度）施工終了後の休止期間中に空洞軸方向の引張応力が約 0.4N/mm² 増加している。同時期に底部緩衝材の沈下量も微増している。
- 上載荷重、水和熱等の施工の影響では、平成 21 年度（2009 年度）模擬廃棄体定置時、平成 22 年度（2010 年度）充てん材打込み時に、空洞軸・横断方向ともに引張応力の増加が認められる。
- BTV 観察により、底部低拡散材ではひび割れが 3 箇所発生したものの、局所的なものであり、ひび割れ幅は 0.25mm（カメラの検知可能幅）以下である。また、発生応力は引張強度（5.51N/mm²）以下であることから、全体として健全性は確保されていると考えられる。

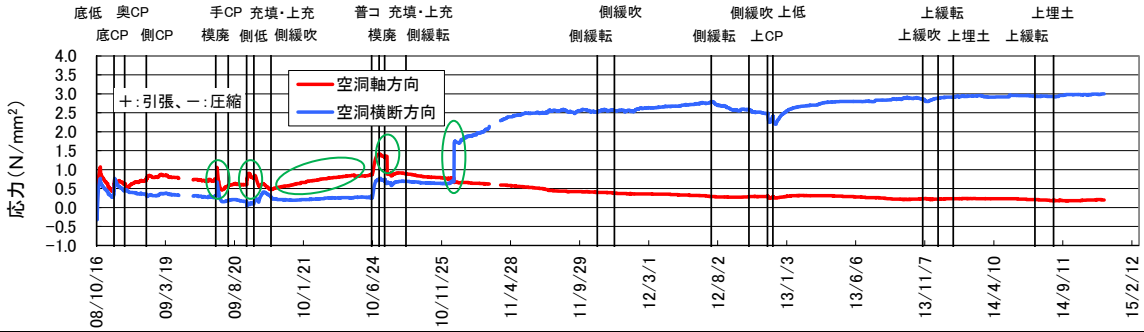
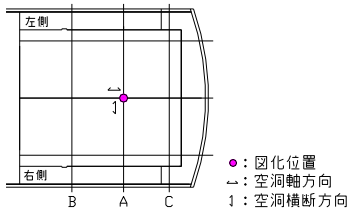


図 2.6-6　底部低拡散材の応力計測結果

底部ｺﾝｸﾘｰﾄﾋﾟｯﾄ応力



- 底部低拡散材と同様に、平成 21 年度（2009 年度）施工終了後の休止期間中に空洞軸方向の引張応力が増加している。底部コンクリートピットでは、平成 22 年度（2010 年度）施工終了後も同様な傾向が示されている。部材温度の低下に伴い部材は収縮するが、空洞軸方向では奥側で拘束が大きいため引張側に進展したものと考えられる。
- 上載荷重の影響では、平成 21 年度（2009 年度）模擬廃棄体定置時、平成 22 年度（2010 年度）充てん材打込み時に影響を受けている。模擬廃棄体定置時では、圧縮応力が増加している。底部低拡散材では、同時期に引張応力が増加していることから、模擬廃棄体内へのコンクリート打込みの水和熱による温度応力で内部拘束が作用したものと考えられる。

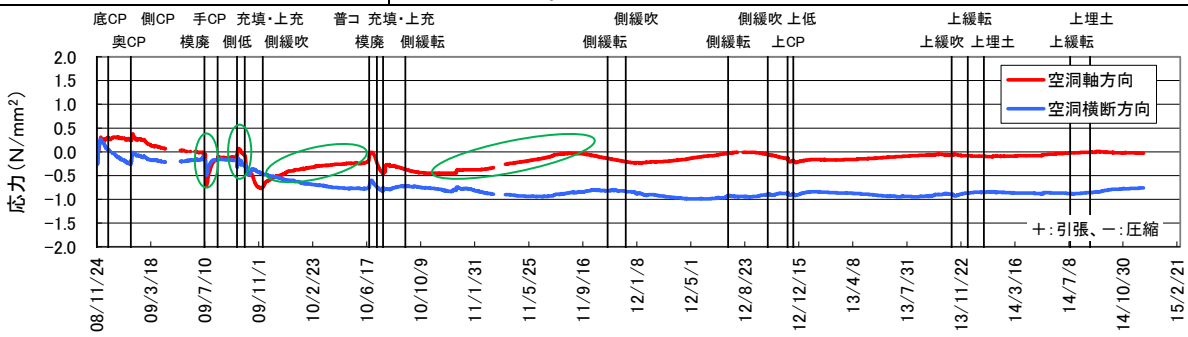
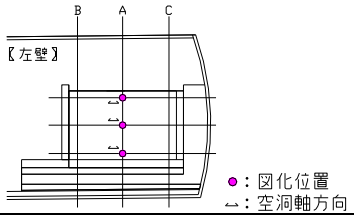


図 2.6-7　底部コンクリートピットの応力計測結果

側部ｺﾝｸﾘｰﾄﾋﾟｯﾄ応力（左壁）



- 平成 21 年度（2009 年度）の側部低拡散材、平成 22 年度（2010 年度）の充てん材の打込み時および打込み終了後に液圧、温度応力、水和熱の影響を受け、応力の出現は高さ方向で異なる挙動を示すが、引張応力の増加は概ね 1N/mm² 以下であり、引張強度（5.49N/mm²）に達することはない。

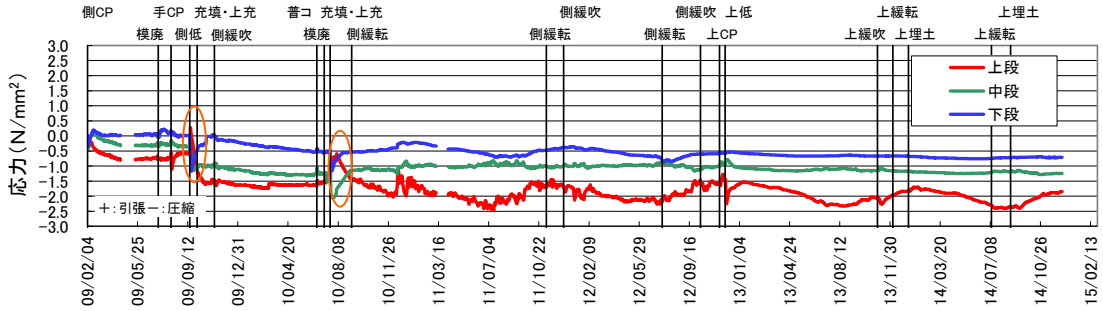
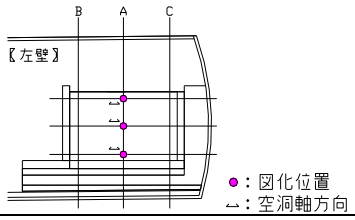


図 2.6-8　側部コンクリートピットの応力計測結果

側部低拡散材応力（左壁）



- 平成 22 年度（2010 年度）の充てん材の打込み時および打込み終了後に液圧、温度応力、水和熱の影響を受け、応力の出現は高さ方向で異なるが、引張応力の増加は概ね 1N/mm² 以下であり、引張強度（5.51N/mm²）に達することはない。
- 下段において引張側の増分応力が打込み終了後に残留する。2010 年 12 月に引張応力の急激な低下があり、壁面観察でもひび割れが確認されている。
- ひび割れ幅は 0.5mm 以下である（ひび割れ調査結果）。

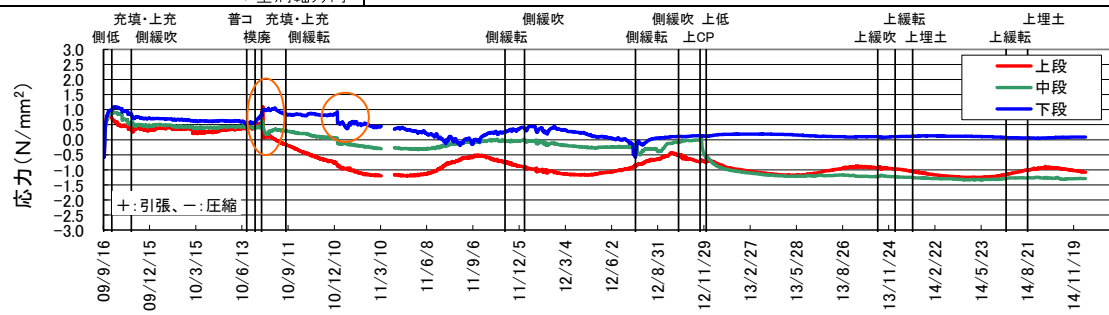
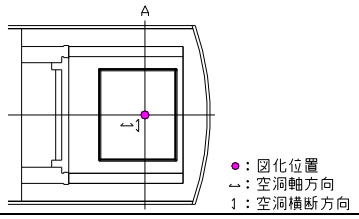


図 2.6-9　側部低拡散材の応力計測結果

上部ｺﾝｸﾘｰﾄﾋﾟｯﾄ応力



- 打込み後圧縮側へ変化し、その後引張側へ推移している。上部低拡散材打込み後には、上部低拡散材の温度上昇および温度下降に伴い、下部部材である上部コンクリートピットは圧縮および引張へ推移する。
- 上部低拡散材打設時の影響が収まった 2013 年 2 月以降は、応力の変動は小さく、引張応力の増加は概ね 1N/mm² 以下であり、引張強度（5.49N/mm²）に達することはない。

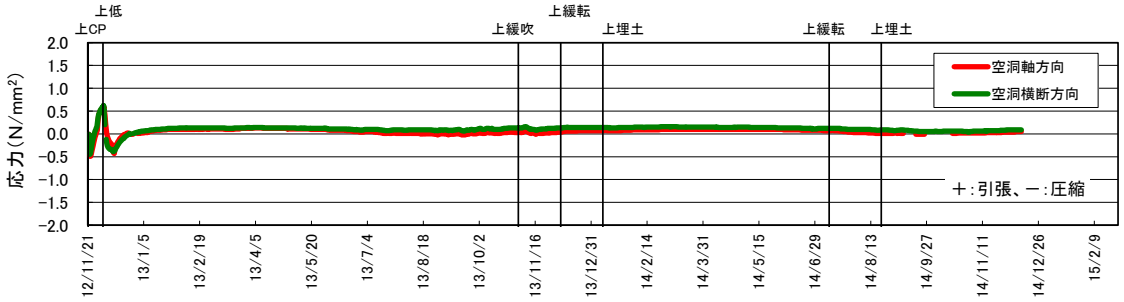
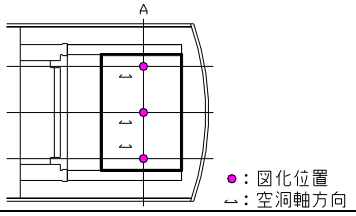


図 2.6-10　上部コンクリートピットの応力計測結果

上部低拡散材応力



- 上部低拡散材打込み終了後のひび割れ観察において、部材右側でひび割れが確認された。
- 部材右側は、打込み後に、湿潤・保温養生マットを用いて養生を行った。養生終了後に部材温度が急激に低下し、それに伴い応力は引張側へ大きく進展した。その後ひび割れ発生とともに引張応力の低下が確認された。
- ひび割れ幅は 0.5mm 以下である（ひび割れ調査結果）。

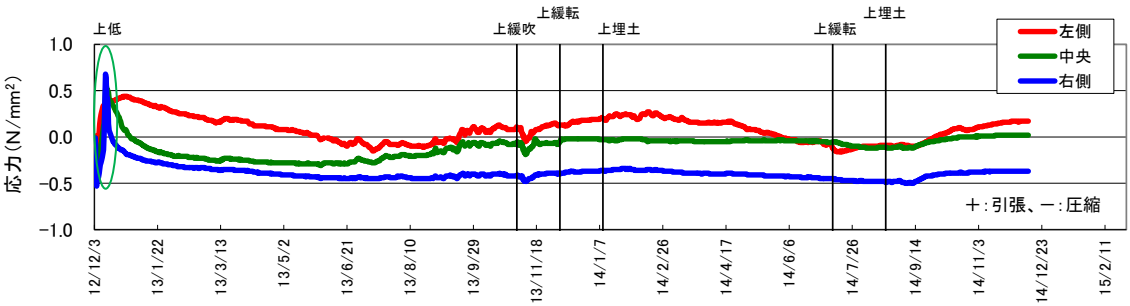
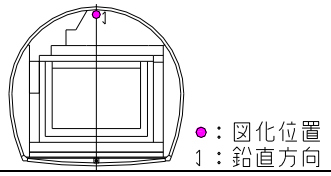


図 2.6-11　上部低拡散材の応力計測結果

上部埋戻し材沈下	・ 平成 26 年度施工終了時の沈下量は 5mm 程度である。 ・ 計測器設置後の埋戻し材吹付け施工時および表面保護コンクリート吹付け施工時に沈下量が急増しており、施工後には粘性的な沈下挙動および収束傾向が確認できる。 ・ 施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の収束値は概ね整合していることから、沈下の主要因は施工材料の追加に伴う自重沈下であると考えられる。



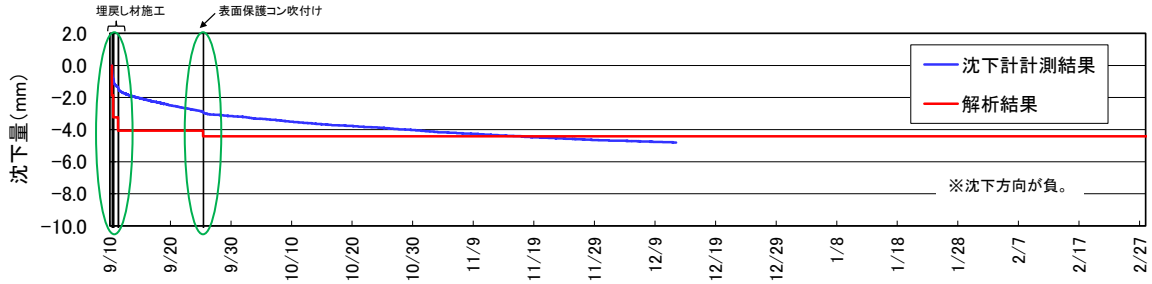


図 2.6-12　上部埋戻し材の沈下量計測結果

2) 周辺岩盤挙動

岩盤変位 （底部）	・ 底部埋戻し材下の岩盤内に設置した岩盤変位計による岩盤変位は、上載荷重の増加に伴い微増する。平成 26 年度施工終了時の壁面変位は約 0.7mm である。 ・ 計測値から推定した岩盤の弾性係数は E≒1,800MPa となり、確証試験着手時の検討に採用した値（E=2,000MPa）と同等であることから、施設建設が周辺岩盤に与える影響は想定範囲内である。

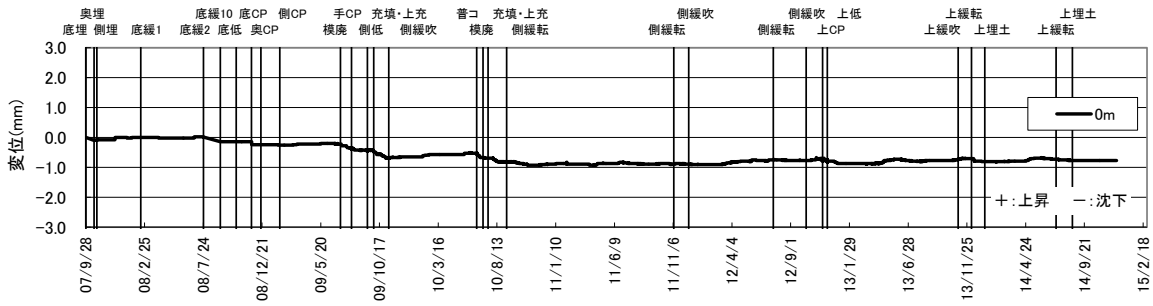


図 2.6-13　岩盤変位計測結果

岩盤間隙水圧 （計測坑 A）	・ 試験期間中の全計測坑での間隙水圧の変動は小さく（最大 3m 程度）、施設構築の周辺岩盤の地下水流動への影響は小さいと考えられる。

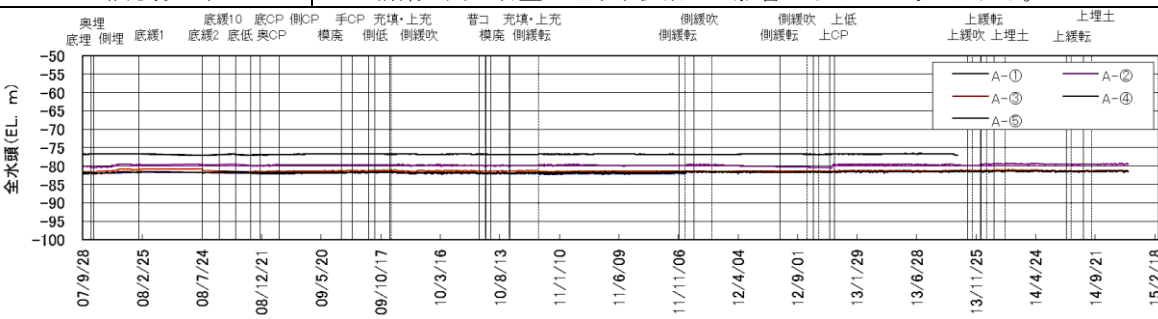


図 2.6-14　岩盤間隙水圧計測結果

(3) まとめ

試験施設に設置し計測器から取得される挙動計測データを用いて、施設全体挙動について取りまとめた。得られた知見は以下の通りである。

- 底部緩衝材の沈下量（最大 1.3mm）および土圧（最大 0.2MPa）は、概ね上載圧（約 0.2MPa）に相当する程度であり、過大な沈下および土圧は生じていない。
- 底部低拡散材は、ひび割れが発生しているが、ひび割れ幅は 0.25mm 以下であり、発生応力は引張強度以下であった。
- 側部低拡散材は、ひび割れが発生しているが、ひび割れ幅は 0.5mm 以下であり、発生応力は引張強度以下であった。
- 上部低拡散材の右側では、養生終了後の急激な温度低下によりひび割れが発生したが、その後のひび割れ幅（0.5mm 以下）の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されていない。上部低拡散材の左側では、ひび割れの発生は観測されなかった。
- 上部埋戻し材の施工が進行するに伴い、新たに構築された上部埋戻し材の自重増加分により沈下計に 5mm 程度の変位量が観測された。平成 26 年 12 月現在、沈下計の変位量には収束傾向が確認できる。また、上部埋戻し材の施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の変位量の収束値は概ね整合していることが分かった。
- 試験施設の荷重により生じる周辺岩盤（施設下部）の岩盤変位は、この変位量から推定した岩盤の弾性係数（1,800MPa）と確証試験着手時の検討に採用した弾性係数（2,000MPa）が同程度であることから、想定範囲内の挙動である。したがって過大な変形や緩み域の進展はなく、施設構築の周辺岩盤への影響は小さいと評価される。また、試験期間中の周辺岩盤間隙水圧の変動は小さく（最大 3m 程度）、施設構築が地下水流動へ与える影響は小さいと評価される。

上記の結果より、試験施設構築が周辺岩盤や試験施設に与える影響は施設・周辺岩盤の健全性を損なうものではなく、現時点で試験施設および周辺岩盤の健全性は確保されていると評価される。

2.6.2　地震影響検討

(1) 地震影響検討の目的

一般に地下構造物は耐震性に富む構造物であることが知られている。しかし、過去の地震によるトンネルの被害事例によると、地震の規模が大きく、地震断層面からの距離が近く、地山に何らかの欠陥がある場合等の特殊条件が介在すれば、トンネルも地震被害を受ける可能性があり、①坑門、坑口部の被害、②不良地山区間の被害、③断層のずれによる被害の 3 パターンに分類されている[6]。地下空洞施設のような大深度かつ大規模地下構造物については、検討事例が少なく、地震の影響について明確にされていないのが現状である。これまで、大深度の放射性廃棄物処分施設の処分坑道を対象として、周辺地盤および支保工の力学安定性を評価した事例[7]はあるが、空洞内の人工バリア施設を含めた地下空洞施設の地震影響の検討は報告されていない。そこで本検討では、巨大地震が建設・操業時の地下空洞施設に与える影響を把握することを目的として、仮想的に設定した地震動を用いて解析的検討を行った。

また、放射性廃棄物処分施設の設計・施工を行う上で、地震動の設定や、空洞および処分施設の地震時の振動特性を把握することは重要であり、そのためには地下構造物の地震動観測が必要であると考えられる。これまで地下発電所、鉱山、トンネル等の地下構造物を対象とした地震動観測が多数実施されてきている[8][9][10]。独立行政法人防災科学技術研究所により整備・運用されている K-NET、KiK-net 等の地震観測網においても、全国各地の観測点で地震動を計測しており、蓄積された観測データは地震防災等の様々な実務や研究に使用されている。しかし、地下空洞施設のような大深度かつ軟岩中における大規模地下空洞、さらに実規模の人工バリア施設を含めた地震動観測を実施した事例は報告されていない。そこで本検討は、人工バリアの地震時の振動特性を把握することを目的として、試験施設の 3 箇所に地震計を設置して地震動観測を行い、観測データを用いた地震応答解析を実施した。

以下に、巨大地震が地下空洞施設に与える影響に関する検討および地震動の観測と分析について示す。

(2) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響

1) 検討概要

巨大地震が地下空洞施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材に与える影響を把握するために、地震動レベルの異なる 3 つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度：250Gal、450Gal、900Gal）を用いて 2 次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。解析対象は、地下空洞施設における廃棄体定置前や埋戻し直後等の図 2.6-15に示すような 4 つの状態（以下、Phase と称す）とした。

上記解析により、ベントナイトを材料とする緩衝材とその周辺のセメント系部材（以下、周辺部材と称す）では剛性等が大きく異なるため、その界面を剛結条件（節点共有）とすると、地震時に緩衝材が周辺部材に引っ張られ、緩衝材に局所的に高い引張応力が発生することがわかった。そこで、より現実的な境界を模擬するために緩衝材と周辺部材の界面に節点ジョイントを組み込み、剥離・すべりを考慮した場合の地震時影響を検討した。

また、緩衝材に修正 R-O モデルを適用した上記解析により、非常に大きな地震動が作用し

た場合には、緩衝材が局所的に塑性化する可能性があることがわかった。このため、緩衝材の弾塑性挙動を考慮した非線形地震応答解析を実施し、緩衝材の塑性化による緩衝材の層厚および透水性への影響を検討した。

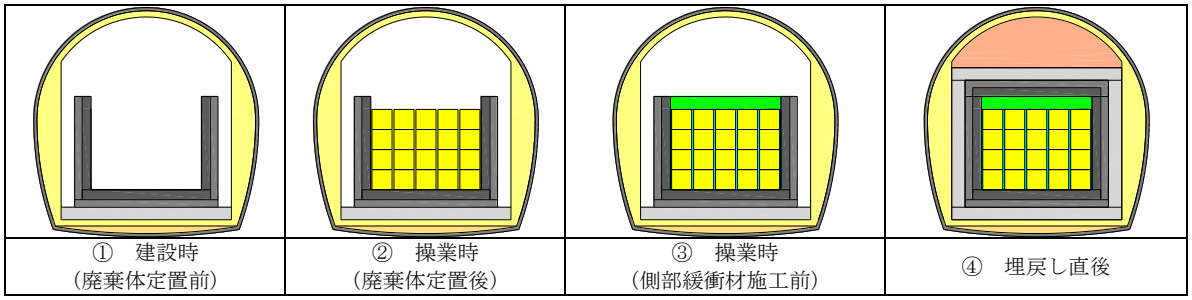


図 2.6-15 解析対象の施設状態

2) 解析条件

a. 解析モデルおよび物性値

埋戻し直後の Phase における解析モデルを図 2.6-16と図 2.6-17に示す。地下空洞周辺の地質構造は、確証試験の実施箇所（試験空洞）近傍の地質構造[11]を参考に水平成層としてモデル化した。側方・底面の境界は、半無限地盤への波動の逸散を考慮するため、ダッシュポットを用いた粘性境界とした。地下空洞施設の部材構成や寸法形状は、試験施設に準拠した。解析に用いた物性値は、確証試験時の試験結果及び参考文献[12]に基づき設定した。なお、岩盤および緩衝材の動的物性のひずみ依存性には修正 R-O モデルを適用し、それ以外の構造物は弾性モデルとした。また、緩衝材と周辺部材の界面は剛結条件とした。

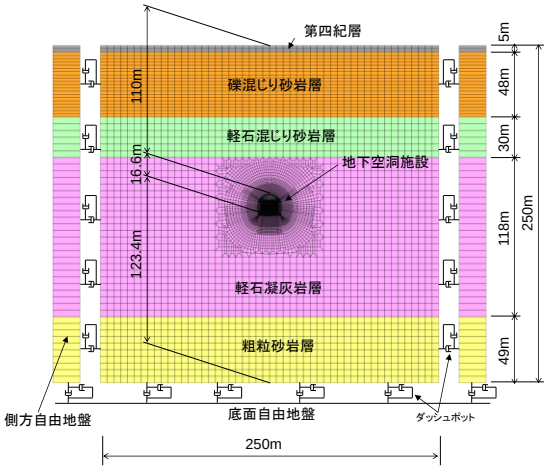


図 2.6-16 解析モデル(全体)

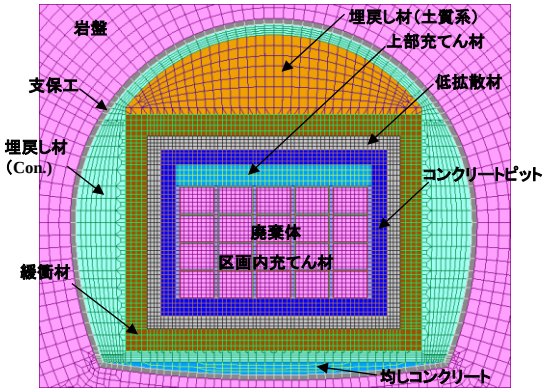


図 2.6-17 解析モデル(地下空洞施設)

b. 検討に用いた地震動

本検討では、試験施設近傍で作成されている地震動[13]を参考として、解放基盤面（深度 53m）での水平方向最大加速度を 250Gal(Lv1)、450Gal(Lv2)、900Gal(Lv3)に振幅調整した 3 種類の地震動を用いた。Lv1 は、空洞位置で水平方向最大加速度が 200Gal 程度になるように設定した（図 2.6-18）。Lv2 と Lv3 は、地下空洞施設の振動特性を検討するために、

極端なケースとして、Lv2 では振幅が Lv1 の 2 倍程度、Lv3 では振幅が Lv2 の 2 倍に設定した。解放基盤表面（地震動の定義位置）は、軽石混じり砂岩層の上面とし、一次元重複反射理論に基づく応答解析により解析モデル下端に引戻した波を解析用入力地震動とした。また、鉛直方向地震動は水平方向の 2/3 の振幅とし、水平・鉛直同時加振とした。

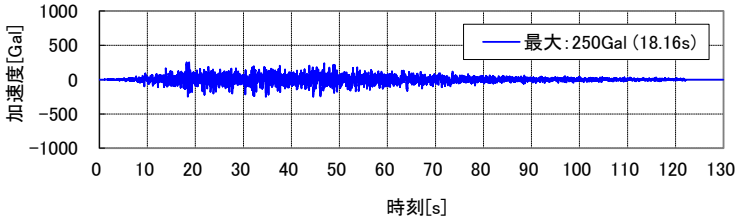


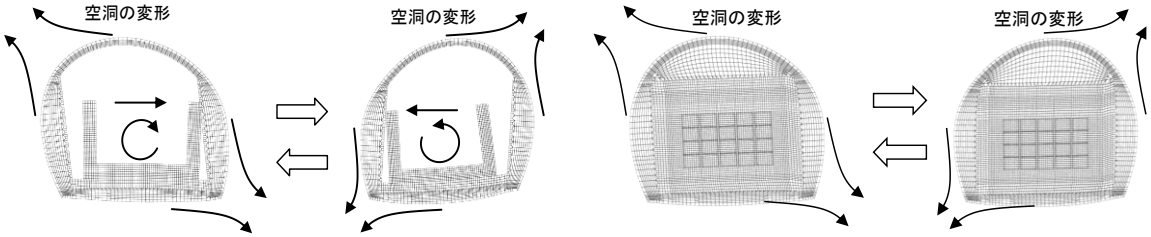
図 2.6-18　検討に用いた地震動の例(Lv1、水平方向)

3) 解析結果の分析

地下空洞施設の地震時全体挙動、人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材を対象とした地震時挙動の分析結果を述べる。ここでは、地震影響を受けやすい廃棄体定置前(以下、Phase1 と称す)と埋戻し直後(以下、Phase2 と称す)の分析結果を示す。

a. 地下空洞施設の全体挙動

Phase1 と Phase2 の空洞全体の地震応答挙動の特徴（Lv2 の地震動を例とする）を図 2.6-19に示す。Phase1、Phase2 ともに、空洞自体は周辺岩盤と一体になって左右斜め方向に引伸ばされるモードで変形する。Phase1 では支保工と埋戻し材（セメント系）は周辺岩盤と一体になって挙動しているのに対して、コンクリートピットと低拡散材は周辺岩盤とは異なる周期で振動する。一方。Phase2 では、コンクリートピットと低拡散材も含め施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するようになる。



（1）Phase1　　（2）Phase2

図 2.6-19　空洞全体の挙動（Lv2、変位 200 倍）

b. コンクリートピットおよび低拡散材の地震時挙動

他の建設・操業段階と比べて地震影響を受けやすい Phase1 の、コンクリートピットと低拡散材の引張強度に対する局所安全係数（引張強度／履歴最大引張応力）と地震動レベルとの関係を図 2.6-20に示す。引張強度 f_{tk} は、コンクリートピットで 3.53MPa（設計基準強度 f'_{ck}=60MPa を $f_{tk}=0.23f'^{2/3}_{ck}$[14]により換算)、低拡散材で 4.68MPa（本確証試験の材料を用い

た試験結果（91 日強度）に基づき設定）とした。発生引張応力が引張強度に達する地震動の解放基盤面での最大加速度は、コンクリートピットでは 500Gal 程度、低拡散材では 1000Gal 以上と推定される。なお、最小の局所安全係数が発生する部位はコンクリートピット、低拡散材ともに左側壁下端であった。地震動 Lv3 の場合には、コンクリートピット内側隅角部（図 2.6-20中の緑色の○印部分）で SF＜1 となるが、RC 断面照査の結果、ひび割れが発生した場合でも部材（鉄筋および圧縮縁のコンクリート）の耐力は十分であることを確認した[15]。

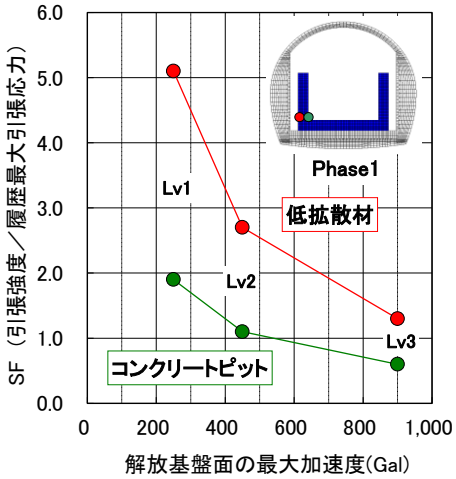


図 2.6-20　引張強度に対する安全係数と地震動レベルの関係（Phase1）

c. 緩衝材の地震時挙動

Phase1 と Phase2 の各地震動レベルにおける、緩衝材のせん断強度に対する局所安全係数の分布を図 2.6-21に、最大主応力(引張側、履歴最大)分布を図 2.6-22に示す。局所安全係数の算定には、Mohr- Coulomb の破壊規準を適用し、試験結果(UU 試験)より粘着力 C=370kPa、内部摩擦角 ϕ=2.64 度とした。上述したように、空洞自体は左右斜め方向に引伸ばされるモードで変形するため、緩衝材は引伸ばされて、Phase1 では底部緩衝材の左右端でせん断・引張応力が生じ易く、Phase2 では施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するために、Phase1 と比較して、せん断・引張応力が生じる領域が大きくなる。Phase1、Phase2 ともに、地震動レベルが大きくなるほどその領域は拡がる。

図 2.6-21～図 2.6-22より、地震動レベルが Lv2 以上で緩衝材のせん断・引張応力の発生が顕著になることから、以降では Lv2 の地震動を用いて緩衝材の詳細検討を実施した。

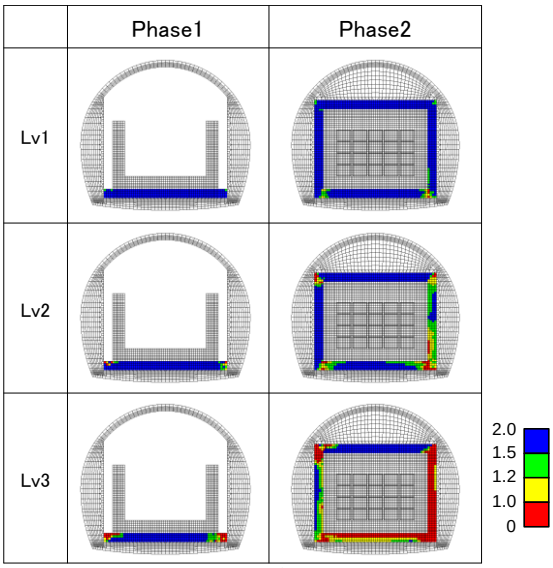


図 2.6-21　せん断強度に対する局所安全係数 SF(履歴最小)

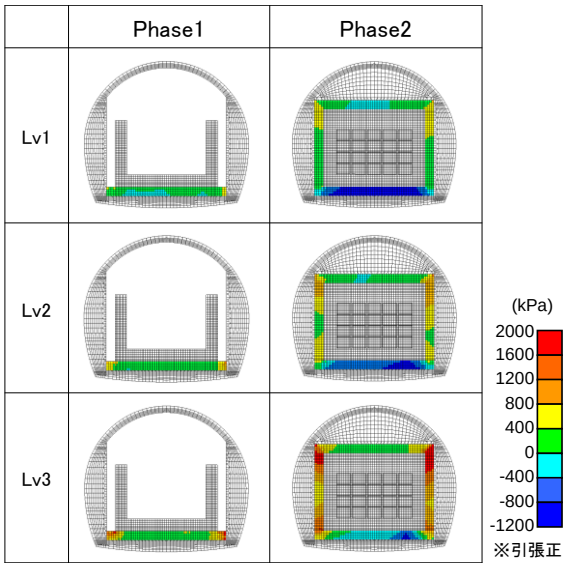


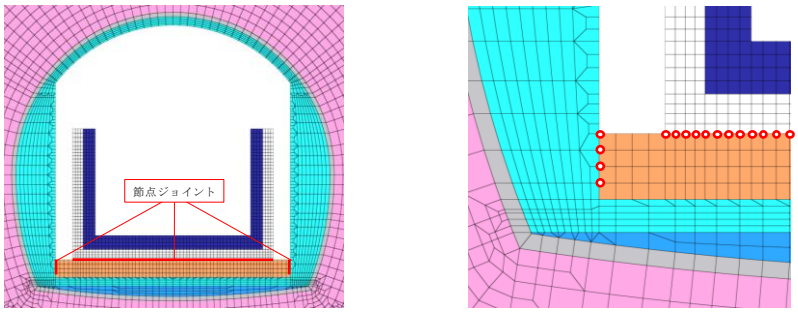
図 2.6-22　最大主応力(引張側、履歴最大)

d. 緩衝材の詳細検討

(a) 緩衝材の剥離・すべりの影響

上記の解析では、緩衝材とその周辺部材の界面の剥離・すべりを考慮していないため（剛結条件）、地震時に緩衝材が周辺部材に引張られ、緩衝材に局所的に高い引張応力が発生することがわかった。剥離・すべりの知見としては、地中構造物の地盤－構造物間では、照査に用いる地震動の種類、地盤および構造物のせん断剛性の大小関係等により、境界面において剥離・すべり等の複雑な現象が生じることがあり、構造物全体の応答に影響を及ぼすことが知られている[16]。本検討でも、緩衝材と周辺部材の剛性等が大きく異なるため、界面で剥離・すべりが発生すると考えられ、それを考慮していない解析では、緩衝材の引張応力を過大に評価する可能性がある。

そこで、図 2.6-23と図 2.6-24に示すように緩衝材と周辺部材の界面に節点ジョイントを組み込み、剥離・すべりの考慮の有無による解析結果の比較・分析を行った。剥離およびすべりは、それぞれ軸方向およびせん断方向の剛性を低下させることにより考慮した。



（1）全体　　（2）拡大

図 2.6-23　節点ジョイント設置箇所（Phase1）

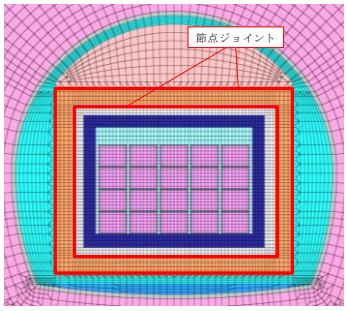


図 2.6-24　節点ジョイント設置箇所（Phase2）

緩衝材のせん断強度に対する局所安全係数 SF(履歴最小)分布を図 2.6-25に、最大主応力(引張側、履歴最大)分布を図 2.6-26に、それぞれ緩衝材と周辺部材の界面を剛結とした場合(ジョイントなし)と、界面での剥離・すべりをジョイント要素により考慮した場合を比較して示す。界面の剥離・すべりを考慮することにより、図 2.6-26に示すように引張応力が発生する領域は狭くなるが、剥離が生じることにより、左右反対側の剥離が生じていない箇所の緩衝材の圧縮応力が増加するため、図 2.6-25に示すようにジョイントなしの場合と比較してせん断強度に対する局所安全係数が 1 以下となる領域が増加した。

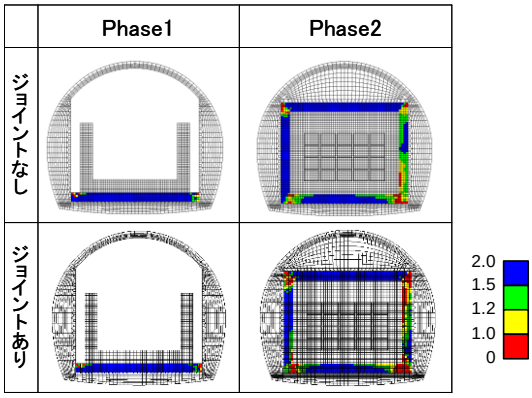


図 2.6-25　せん断強度に対する局所安全係数 SF(Lv2、履歴最小)

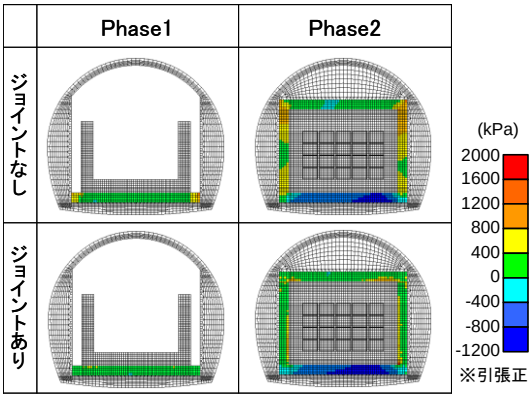


図 2.6-26　最大主応力(Lv2、引張側、履歴最大)

(b) 緩衝材の弾塑性挙動の影響

上記の解析結果から、地震力の大きさによっては、緩衝材が局所的にせん断強度を超過し塑性化する可能性があることが示された。しかし、上記の解析では、緩衝材を弾性体（修正 R-O モデル）としてモデル化しているため、緩衝材の弾塑性的な挙動を評価することができない。実現象では、地震時に緩衝材が塑性化すると、ひずみ・変形量の増加および応力再配分による塑性化領域の進展により、地震後の緩衝材の層厚や透水性等の性能に影響を与える可能性がある。

そこで、緩衝材の弾塑性挙動を考慮した非線形地震応答解析を実施した。緩衝材の塑性化後の挙動を把握するため、緩衝材に適用している修正 R-O モデルを改良し、Mohr-Coulomb の破壊基準により応力を再配分して弾塑性挙動を考慮できるモデルを導入

した。緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの関係のイメージを図 2.6-27に示す。

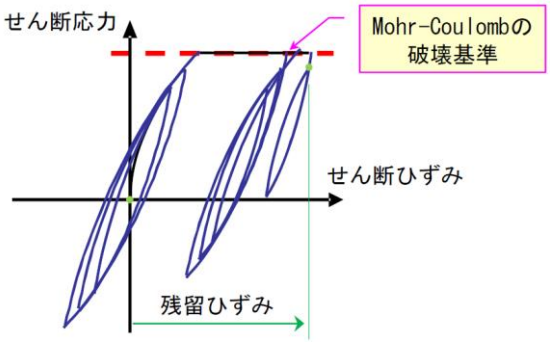


図 2.6-27　緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの関係のイメージ

本検討は、図 2.6-25に示すように緩衝材の全領域に対して、せん断強度に対する局所安全係数が 1 以下となる領域の割合が大きい Phase2 で実施した。Phase2 における底部緩衝材中央の上下面間の水平方向相対変位が最大となった時刻（46.14s）の施設変形形状を図 2.6-28に示す。周辺岩盤のせん断変形の影響を受けて、空洞全体が右方向にせん断変形しており、右側の側部緩衝材の上部は大きく変形して、周辺部材との間で剥離が生じていることがわかる。右下隅角部の緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線を図 2.6-29に示す。応力状態が Mohr-Coulomb の破壊基準に達して塑性化した際に、せん断応力の変化に比べてせん断ひずみが大きく変化しており、その後修正 R-O モデルの履歴ループがもとの位置から大きくずれている様子が確認できる。

緩衝材の塑性化の発生進展状況を図 2.6-30に示す。塑性化の領域が、徐々に拡がっていく様子が確認できる。解析終了時の緩衝材の塑性化の状況を図 2.6-31に、比較のため緩衝材の塑性化を考慮しない弾性解析結果から評価した緩衝材の破壊基準に対する局所安全係数の履歴最小値の分布を図 2.6-32に示す。本解析で塑性化した領域は、弾性解析で局所安全係数の履歴最小値が 1.0 以下の領域よりも大きく拡大しており、これは塑性化の進行に伴う応力再配分の影響と考えられる。一方で、弾性解析で右側部の上部内側や左下隅角部で局所安全係数が 1.0 以下であった領域では塑性化しておらず、弾塑性挙動の考慮の有無で異なる評価が得られる結果となった。

解析終了時の状態から、地震後の緩衝材の着目位置における厚さ方向の残留変化量を図 2.6-33に示す。緩衝材の地震時変化量は最大で 0.49mm（縮まる方向）であり、もとの緩衝材の厚さ 1000mm に対して非常に小さい。

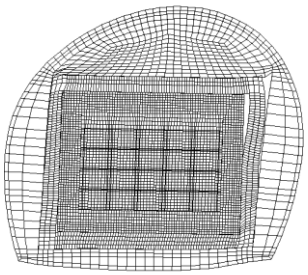


図 2.6-28　施設の変形形状（Lv2、46.14s、変位 200 倍）

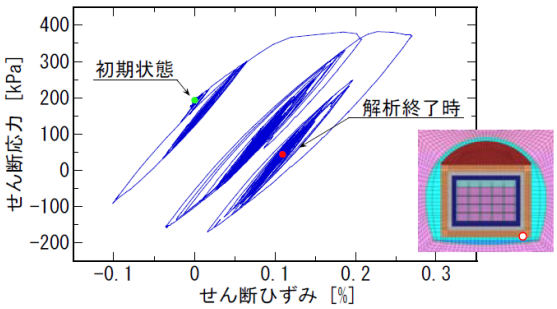


図 2.6-29　緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線

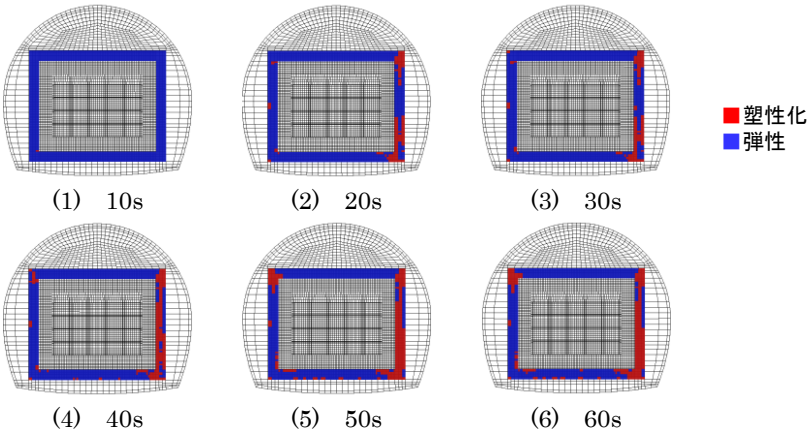


図 2.6-30　緩衝材の塑性化状況（Lv2）

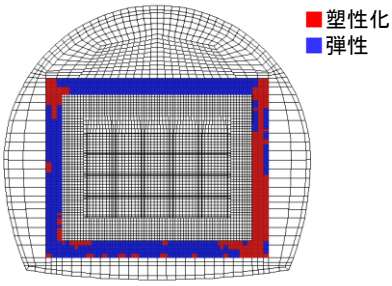


図 2.6-31　緩衝材の塑性化状況（Lv2、解析終了時）

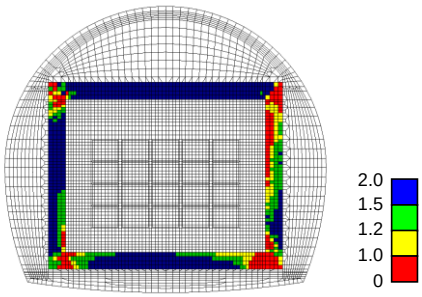


図 2.6-32　弾性解析結果から評価した緩衝材の局所安全係数 SF(Lv2、履歴最小)

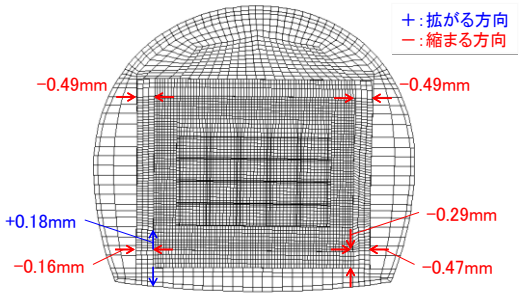


図 2.6-33　緩衝材の厚さの残留変位（Lv2、解析終了時、変位 200 倍）

緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）に伴い、透水性が変化する可能性が考えられる。そこで、緩衝材の塑性化に伴う透水性に及ぼす影響を把握するため、解析で得られた体積ひずみから密度を求め、図 2.6-34に示す透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係[17]を用いて、緩衝材の透水係数変化について検討した。なお、本解析では、緩衝材を連続体としてモデル化しており、せん断帯の発生・進展に伴う不連続挙動は考慮していない。そこで、緩衝材のせん断帯が透水性に与える影響に関しては、既往文献調査を実施した。

図 2.6-35に示すように、地震後（解析終了時）の緩衝材の体積ひずみ増分は最大で 1.936 ×10^{-2}(%)、透水係数の増分に換算すると 0.131%であり、塑性化後の緩衝材が透水性に与える影響は小さいことが確認できた。

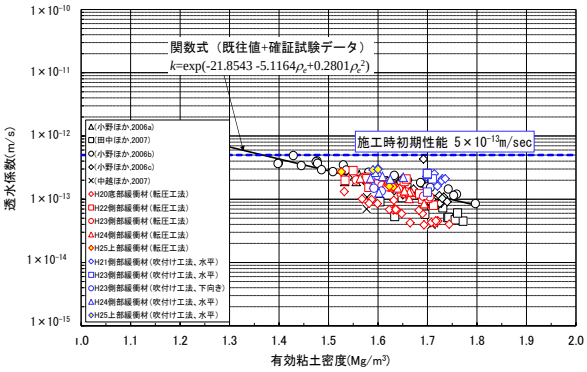


図 2.6-34　透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係[16]

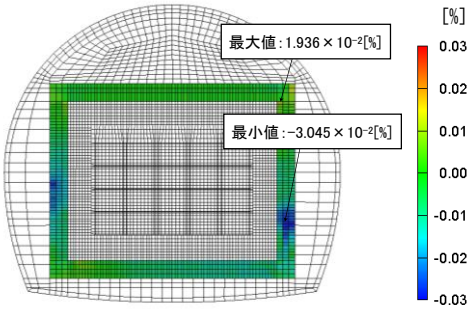


図 2.6-35　緩衝材の体積ひずみ増分（Lv2、解析終了時）

緩衝材の不連続体的挙動によって生じると考えられるせん断帯が、緩衝材の透水性に与える影響に関して、これまで以下の試験が行われている。

小高ら[18]は、不飽和混合土供試体（ベントナイト 70%、珪砂 30%）の定体積条件の一面せん断試験を実施している。せん断後の X 線 CT 結果を図 2.6-36に示す。図 2.6-37に示すように過圧密供試体では垂直応力が小さいため、図 2.6-36の下段のせん断の初期段階で、端部から中心部に向かって水平な亀裂が生じているが、せん断の進行に伴い定体積せん断に伴う正のダイレイタンシーによって垂直応力が上昇し、低密度領域が閉合され、最終状態では正規圧密供試体（上段）と同様に供試体の中心部では低密度領域が消失している。これより、定体積条件では、不飽和供試体を貫通するような低密度帯が生じにくいことが確認されている。本検討の埋戻し直後の状態においても、緩衝材は周辺部材により拘束されており定体積条件に近いと考えられるため、緩衝材にせん断による低密度帯が生じにくいと考えられる。さらに同文献では、飽和供試体においても一面せん断試験を行い、図 2.6-38に示すようにせん断帯の有無による透水係数を比較している。その結果、飽和状態では、せん断帯の有無によって透水性（透水係数と乾燥密度の関係）に有意な差は生じないことが確認されている。

中越ら[19]は、ベントナイトブロックを貫通する隙間（0～12mm）がある不飽和供試体

（図 2.6-39）に、水または水酸化カルシウム水溶液を注水して透水試験を行っている。その結果、ベントナイトに隙間があっても、注水後には比較的早い段階で隙間は閉鎖し、図2.6-40に示すように既往の隙間がない場合の透水係数と乾燥密度の関係と比較しても顕著な差がないことを確認している。

上記の既往文献の内容より、本検討で対象としている埋戻し直後の状態においては、不飽和状態の緩衝材にせん断による低密度帯が生じにくく、仮にせん断帯や隙間が存在しても、飽和状態になれば透水性に与える影響は小さくなると考えられる。

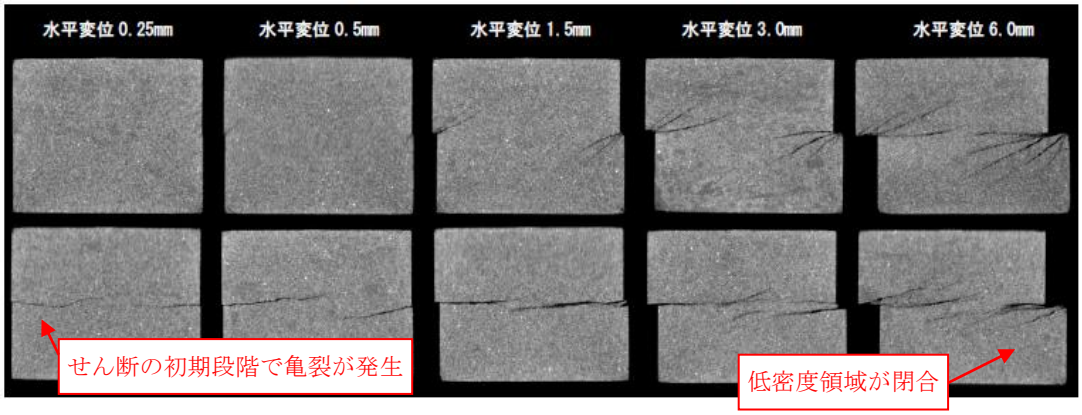


図 2.6-36　不飽和混合土供試体の一面せん断試験の X 線 CT 結果
（上段：正規圧密、下段：過圧密、[17]に一部加筆）

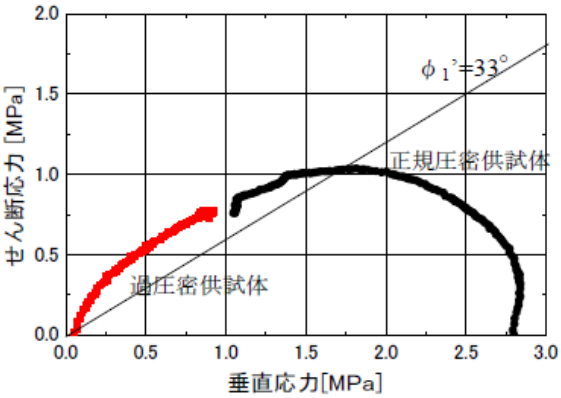


図 2.6-37　不飽和混合土供試体の一面せん断試験の応力経路[18]

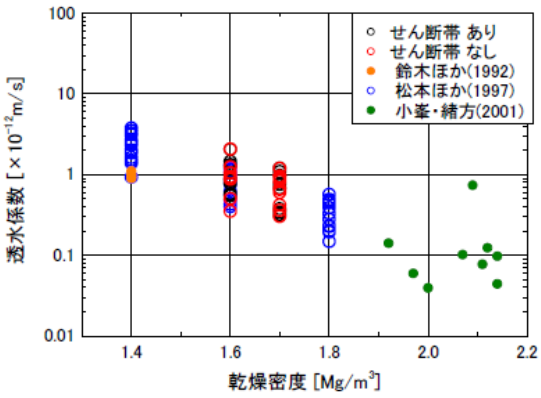


図 2.6-38　せん断帯有無による飽和混合土供試体の透水係数と乾燥密度の関係[18]

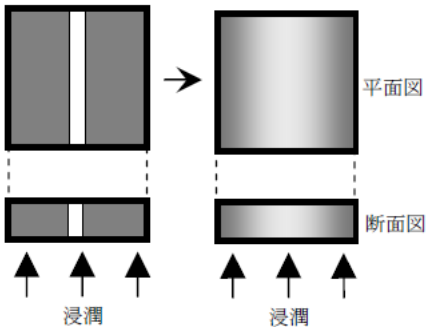


図 2.6-39　緩衝材の隙間透水試験の概念図[19]

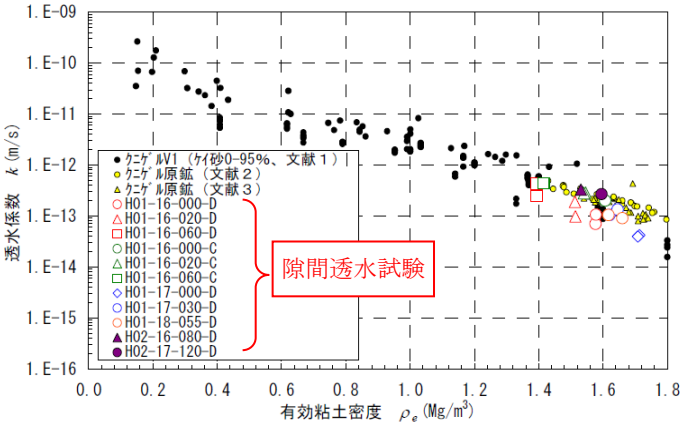


図 2.6-40　透水係数の測定結果と既存値との比較（[19]に一部加筆）

(3) 地震動の観測と分析

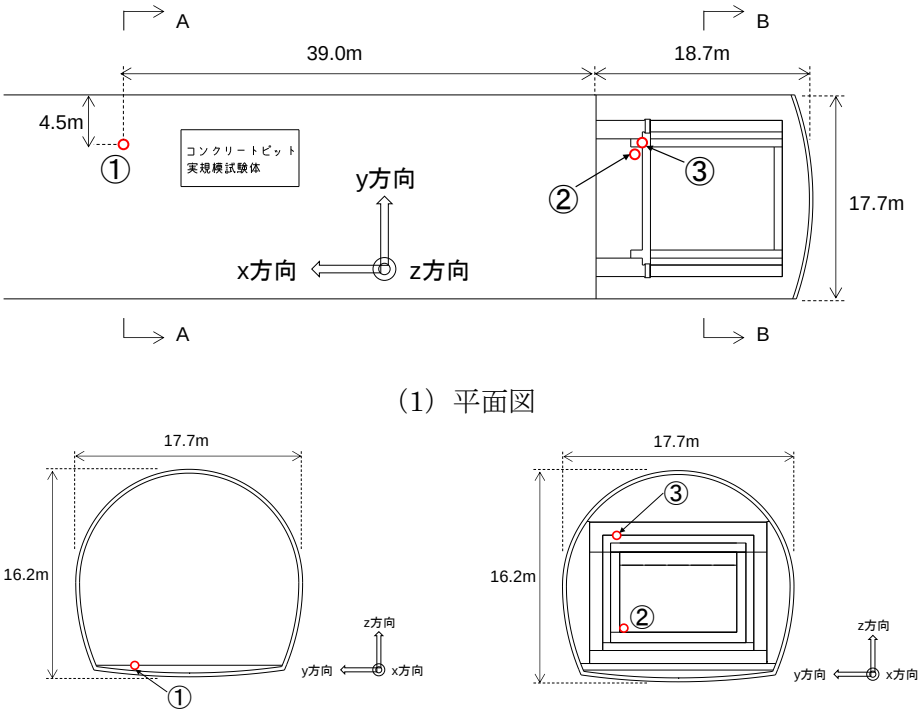
1) 検討概要

試験施設の 3 箇所に地震計を設置して地震動観測を行った。また、観測データを用いて、試験施設を対象とした地震応答解析を実施し、観測データと解析結果の比較により試験施設の地震時の振動特性を分析した。

2) 観測地震動

地震計は計 3 台（地震計①～③と称す）とし、図 2.6-41に示すように地震計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にそれぞれ設置した。設置位置選定根拠を表 2.6-4に示す。各地震計の計測方向は、空洞軸方向を x 方向、空洞横断方向を y 方向、鉛直方向を z 方向とした。

地震計の仕様を表 2.6-5、回収データの仕様を表 2.6-6に示す。トリガ条件は、表 2.6-6に示すように、マスタとするセンサ（地震計①）で、x、y、z 方向のいずれかが 1Gal 以上とした。地震動計測を開始した平成 25 年 10 月 23 日から平成 26 年 12 月 11 日までに観測された地震動一覧を、気象庁発表の六ヶ所村尾駮観測点における情報[20]とともに表 2.6-7に示す。また、各観測地震動の最大加速度と計測高さ（地震計①を基準）の関係を図 2.6-42に示す。平成 26 年 8 月 10 日に観測された地震動で加速度が最も大きく、地震計①の x 方向で最大加速度は 12.5Gal であった。また図 2.6-42より、ほぼ全ての観測地震動で計測位置が高くなるほど最大加速度が増幅する傾向が認められる。



（1）平面図

（2）横断面図（A-A 断面）　　（3）縦断面図（B-B 断面に投影）

図 2.6-41　地震計設置位置

表 2.6-4　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 2.6-5　地震計の仕様

名称	仕　様	機　種
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 ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ周波数：200Hz 送 信 周 波 数：0.5sec 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	富士電機(株)製 MEMS 応用感振センサ CPUKSNSP-00（防水・防塵型）

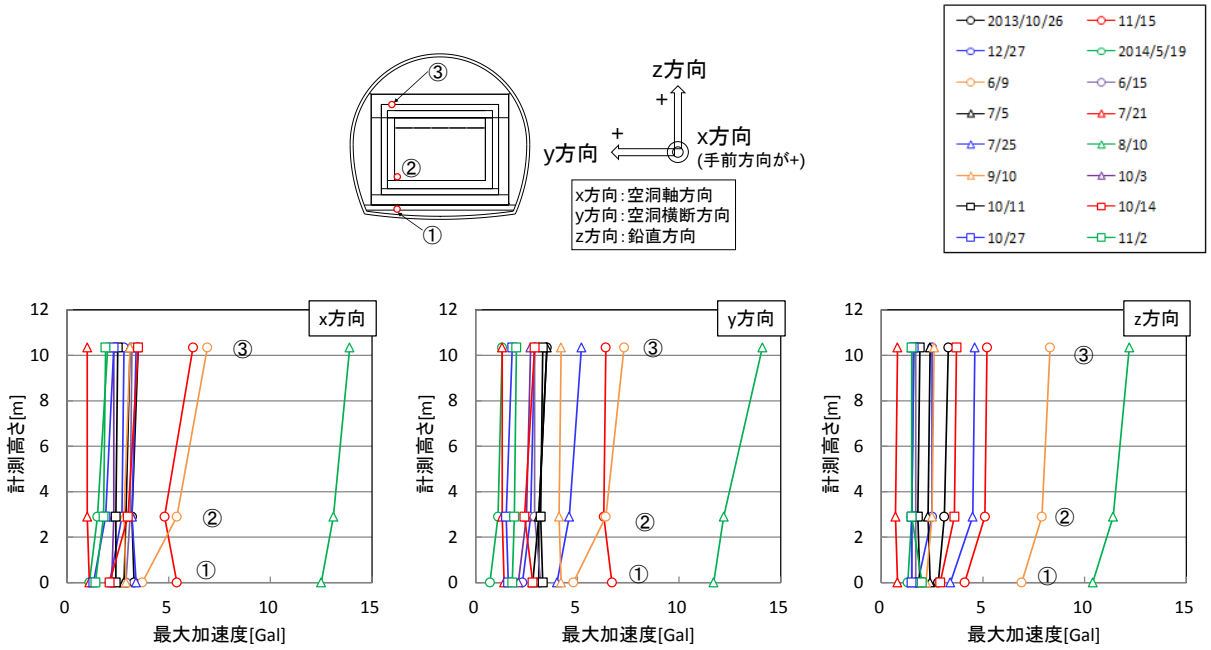
表 2.6-6　回収データの仕様

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）

表 2.6-7　観測地震動一覧

発生日	震源地	マグニチュード	震源深さ	震源距離(六ヶ所村尾駮)	震度(六ヶ所村尾駮)
2013/10/26	福島県沖	M7.1	56km	505km	2
2013/11/15	青森県東方沖	M5.3	63km	102km	2
2013/12/27	岩手県沖	M5.0	38km	122km	2
2014/5/19	青森県東方沖	M4.2	57km	79km	1
2014/6/9	青森県東方沖	M4.6	82km	85km	2
2014/6/15	岩手県内陸南部	M5.5	94km	199km	2
2014/7/5	岩手県沖	M5.9	49km	164km	2
2014/7/21	択捉島南東沖	M6.4	30km	733km	1
2014/7/25	青森県東方沖	M4.9	66km	110km	2
2014/8/10	青森県東方沖	M6.1	51km	94km	3
2014/9/10	岩手県沖	M4.9	67km	124km	1
2014/10/3	岩手県沖	M5.7	28km	142km	2
2014/10/11	青森県東方沖	M6.1	36km	162km	2
2014/10/14	青森県東方沖	M4.4	81km	87km	1
2014/10/27	青森県東方沖	M4.3	92km	111km	1
2014/11/2	青森県東方沖	M4.0	106km	118km	1

※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



※計測高さは、地震計①の高さを基準とした。

図 2.6-42　観測地震動の最大加速度と計測高さの関係（左から x、y、z 方向）

3) 解析条件

解析モデル（地震動観測時点の試験施設を 2 次元モデル化）を図 2.6-43と図 2.6-44に示す。解析物性値は「(2) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響」と同様とした。コンクリートピット内の模擬廃棄体と区画内充てん材は、両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、その物性は区画内充てん材で代表させることとした。

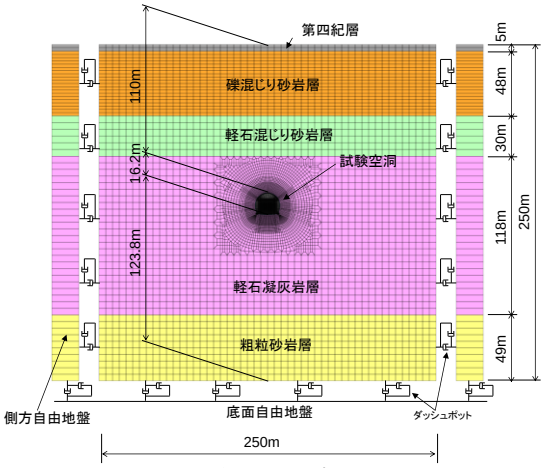


図 2.6-43　解析モデル（全体）

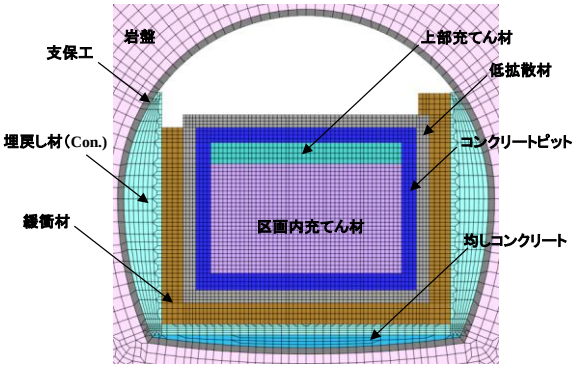


図 2.6-44　解析モデル（試験空洞周辺）

解析に用いた地震動は、平成 25 年 11 月 15 日に観測された地震動とし、地震計①での観測データを図 2.6-45に示す。なお、解析モデルは空洞横断面の 2 次元モデルであるため、解析には y 方向および z 方向の観測地震動を使用した。

地震計①の観測地震動を、一次元重複反射理論に基づく解析（SHAKE）を用いて、地震計①の設置位置から図 2.6-43の解析モデル下端(深度 250m)まで引戻して入力地震動を作成した（図 2.6-46)。なお、高振動数成分を含む地震動を引戻した場合、高振動数成分が卓越した非現実的な加速度波形になる可能性があるため、地震動観測データに対して 20Hz 以上の高振動成分のフィルタ処理を行い、引戻し解析を実施した。図 2.6-46に示すように、入力地震動は数 Gal と小さいため、緩衝材と周辺部材との剥離・すべりおよび緩衝材の弾塑性挙動は考慮していない。

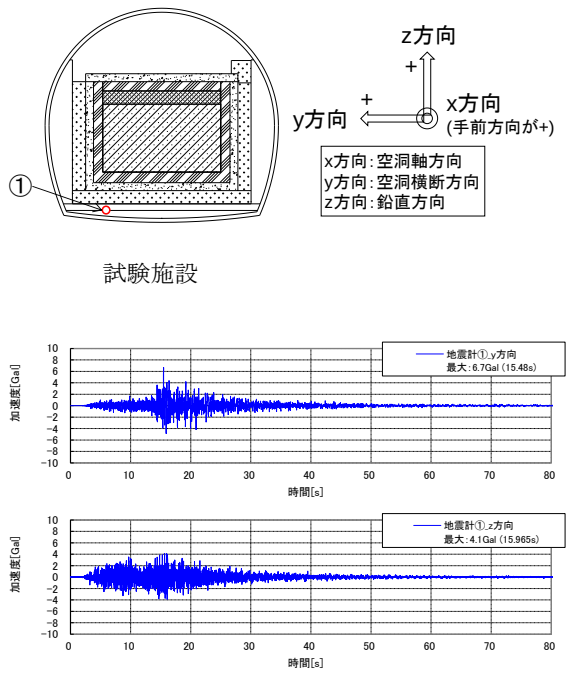


図 2.6-45　観測地震動（地震計①）

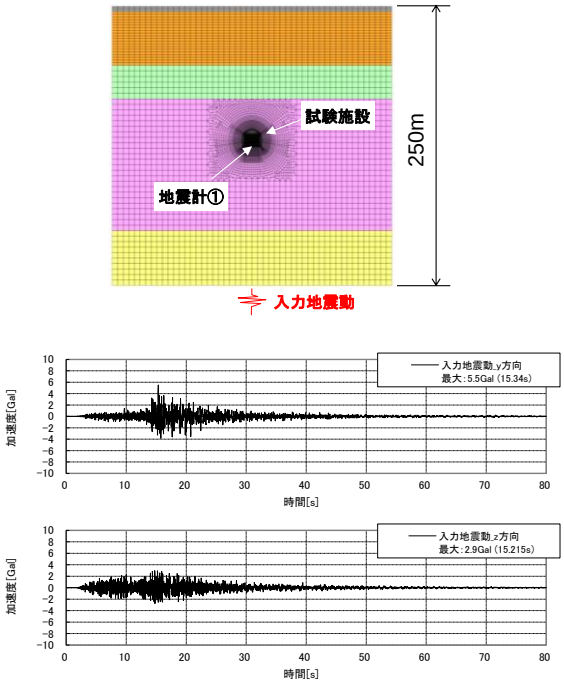


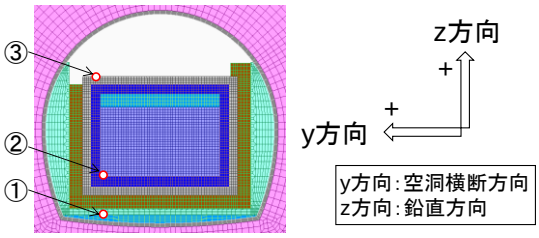
図 2.6-46　入力地震動（解析モデル下端）

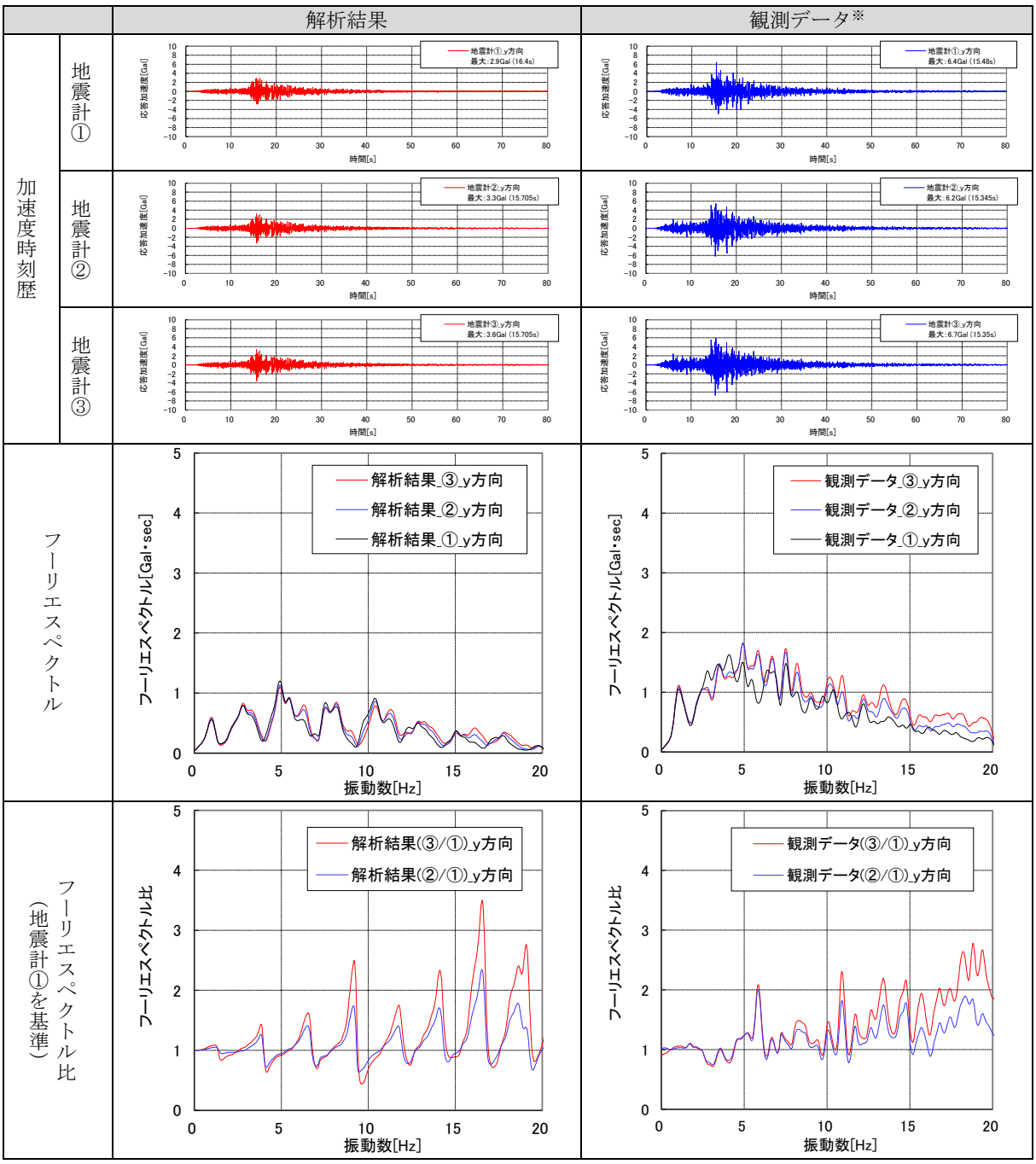
※上から y、z 方向

4) 解析結果の分析

地震計①～③位置の解析結果と観測データの比較（y 方向の加速度時刻歴、フーリエスペクトル、地震計①を基準としたフーリエスペクトル比）を図 2.6-47に示す。

地震計①～③位置ともに、加速度時刻歴およびフーリエスペクトルにおいて解析結果が観測データよりも全体的に応答加速度が小さくなるが、フーリエスペクトル比を比較すると、地震計②③位置の順にフーリエスペクトル比が大きくなり増幅していること、また振動数が大きくなるほどフーリエスペクトル比が大きくなり 15～20Hz の振動数でピークとなる傾向は、解析結果と観測データで類似している。以上より、解析結果と観測データを比較すると、加速度時刻歴およびフーリエスペクトルは乖離するが、フーリエスペクトル比は類似しており、本解析モデルが試験施設の振動特性を反映しているものと考えられる。





※20Hz 以上の高振動成分のフィルタ処理を実施している。

図 2.6-47　解析結果と観測データの比較（y 方向）

(4) まとめ

1) 巨大地震が地下空洞施設に与える影響

巨大地震が地下空洞施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材に与える影響を把握するために、地震動レベルの異なる 3 つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度が Lv1 では 250Gal、Lv2 では 450Gal、Lv3 では 900Gal）を用いて 2 次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。検討成果および今後の課題を以下に示す。

- セメント系部材（コンクリートピット、低拡散材）は、Lv3 の大きな地震動に対しても、部材（鉄筋および圧縮縁のコンクリート）の耐力は十分であることより、力学安定性は非常に高いものであるという結果が得られた。
- 緩衝材は、廃棄体定置前(Phase1)では底部緩衝材の左右端でせん断・引張応力が生じ易く、埋戻し直後(Phase2)では施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するために、Phase1 と比較して、せん断・引張応力が生じる領域が大きくなる。Phase1、Phase2 ともに、地震動レベルが大きくなるほどせん断・引張応力が生じる領域は拡がり、地震動レベルが Lv2 以上でその発生が顕著になることがわかった。そこで、Lv2 の地震動を用いて緩衝材の詳細検討を実施した。
- 緩衝材の詳細検討として、緩衝材と周辺部材との剥離・すべりおよび緩衝材の弾塑性挙動を考慮できるモデルを導入し、緩衝材が塑性化する領域や塑性化後の挙動（塑性ひずみ等）を把握した。その結果、解析終了時の緩衝材の厚さ方向の残留変化量は最大で 0.49mm であり、もとの緩衝材の厚さ（1000mm）に対して非常に小さいことがわかった。
- 緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）に伴い、透水性が変化する可能性が考えられるため、解析結果および既往試験結果に基づいて、地震時の透水性の変化についての分析を行った。

  解析結果の分析から、連続体挙動の範囲では、地震の影響による緩衝材の透水係数の増加は最大でも 0.131%であり、透水性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

  一方、緩衝材のせん断帯の発生・進展に伴う不連続挙動が透水性に与える影響に関しては、既往文献調査を実施し、定体積条件においては、緩衝材にせん断による低密度帯が生じにくく、仮にせん断帯や隙間が存在しても、再冠水後の飽和状態になれば透水性に与える影響は小さくなることがわかった。

2) 地震動の観測と分析

試験施設に地震計を設置し、平成 25 年 10 月～平成 26 年 12 月の期間で 16 波の観測地震動を取得した。また、観測データを用いた地震応答解析結果を実施し、試験施設の地震時挙動を把握した。検討成果および今後の課題を以下に示す。

- 軟岩中における大規模地下空洞および実規模大の試験施設の地震動観測を実施した事

例は少なく、地震動観測データは、今後の地下空洞施設の地震影響検討において有用なものと考えられる。

- 周辺岩盤の固有振動数（数 Hz）と比較して、試験施設の固有振動数が 15～20Hz と大きいことを、地震動観測データおよび地震応答解析結果より確認し、試験施設の地震時振動特性を把握できた。
- 今後の課題として、本解析では、試験空洞底盤に設置した地震計の観測データを用いているため、観測データには試験空洞および試験施設の影響が含まれており、精度が高い解析用入力地震動を作成できない可能性がある。解析用入力地震動の精度を高めるためには、試験空洞および試験施設の影響を受けない当該サイトの岩盤中および地表面での地震動観測データを用いて分析を行うことが望まれる。

参考文献

[1] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 19 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 2.6.2 節, 平成 20 年 3 月

[2] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 20 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 6.4.3 節, 平成 21 年 3 月

[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 8.5.3 節, 平成 22 年 3 月

[4] 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　報告書. 第 9.3.2 節, 平成 25 年 3 月

[5] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 20 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 4.2.1 節, 第 5.2.1 節, 平成 21 年 3 月

[6] 朝倉俊弘他: 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム. 土木学会論文集, No.659／Ⅲ-52, 27-38, 2000.9

[7] 原子力発電環境整備機構: 操業期間中における地層処分施設の地震時空洞安定性に係る検討. 2014 年 6 月

[8] 駒田広也他: 地下発電所空洞における地震観測. 土木学会論文報告集, 第 309 号, 1981.5

[9] 社団法人 日本鉱業会: 地震に関する調査報告. 1985 年 4 月

[10] 浜田政則他: 岩盤空洞の地震時挙動観測と考察. 土木学会論文報告集, 第 341 号, 1984.1

[11] 冨田敦紀他: 余裕深度処分埋設施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動. 電力土木, No.325, 2006.9

[12] 日本原燃株式会社: 再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告　コメント回答（基礎地盤の安定性）. 2010.5

[13] 原子力安全・保安院: 日本原燃株式会社再処理施設及び特定廃棄物管理施設の「耐震設計審査指針」等に照らした耐震安全性評価の確認結果について. 平成 21 年 6 月

[14] 土木学会: 2007 年制定　コンクリート標準示方書［設計編］. 平成 20 年 3 月

[15] 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　報告書. 平成 25 年 3 月

[16] 土木学会 原子力土木委員会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル. 2005 年 6 月

[17] 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 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

[18] 小高猛司他：圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価、地盤工学ジャーナル Vol.5 No.2 207-218、2010

[19] 中越章雄他：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－、土木学会第 62 回年次学術講演会、2007

[20] 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)

第3章　まとめ

第１章、第２章においては、平成１９年度から実施してきた８カ年の研究開発の成果について、実用化に当たっての課題を整理しつつ取りまとめた。

本確証試験では、地下空洞型の余裕深度処分施設の建設・操業・埋戻し時における試験施設の各部材の施工技術・施工方法の確立、および構築した人工バリア等の構築直後における部材の性能確認等を進めてきた。

これらの処分施設の建設時・操業時・閉鎖時の性能確認等に係わる技術開発や余裕深度処分施設の初期的な性能の確認・評価の技術開発の成果は、低レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の余裕深度処分等へ反映される。また、地下空洞型処分施設の埋戻し材等の処分施設の閉鎖に係わる部材の施工技術・施工方法の確立、および構築した部材の構築直後における性能確認等の技術開発の成果は、高レベル放射性廃棄物等の地層処分にも幅広く反映・共有が相互にできるものと考えられる。

しかしながら、本確証試験では、第１章で示したように、既往の研究[1][2]で示されている透水係数や拡散係数に、閉鎖後の人工バリア等の長期的な状態変化や変質等に伴う性能低下を考慮し、既往の研究[1] [2]で示された数値よりも余裕度を持たせた目標値である「初期性能の目標値」を暫定的に設定して実施した。そのため、このような閉鎖後の人工バリア等の性能低下についての具体的な検討は実施していない。

以上のことから、本確証試験の成果、残された課題への対応等を踏まえ、実施すべき研究開発の課題を下記のとおり、抽出し、整理した。

(1)地下空洞型処分施設の建設・操業・閉鎖時の性能確認に係わる課題

1) 既に施工確認試験で構築した低拡散材のひび割れの経時的な調査とその評価、および拡散試験による拡散係数のデータ拡充と低拡散材の性能評価。並びに試験施設の挙動（沈下等含む）確認・評価。
2) 地震が地下空洞施設に与える影響に関して、地下における地震波観測、試験施設における地震時の挙動測定と挙動分析に基づく解析結果の検証。

(2) 地下空洞型処分施設の閉鎖後の長期の性能確認に係わる課題

処分施設の長期の性能確認に関しての課題として、人工バリア等の各部材における長期変質の確認、長期性能の解析・評価、処分施設の再冠水の影響評価、ガス発生の影響評価および長期モニタリング手法の確立等が挙げられる。

参考文献

[1]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とりまとめ－，pp.3-11~3-12，2005

[2]京谷：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況、第 60 回土木学会年次学術講演会研究討論会　資料　研-08、2005 年 9 月