

第9章 緩衝材施工技術の高度化検討

9.1 調査の背景及び概要

9.1.1 本研究の目的

本研究では、施工技術の評価項目を工学上無視できる領域まで高度化すること、つまり、緩衝材の長期性能に関して、施工方法による影響度を低減すること（例えば、密度差を生じさせない施工方法の開発）を目的として[1]、施工方法に関する検討および緩衝材施工技術の高度化に取り組んでいる。緩衝材施工技術の高度化によって施工技術が緩衝材の長期性能に及ぼす影響を低減できれば、再冠水中に緩衝材に発生する事象が、緩衝材の長期性能に及ぼす影響を小さくすることが出来るため、長期性能評価技術の精度が向上し、緩衝材の建設操業技術と長期性能予測に資するデータから、双方向に情報のやり取りが容易になる。この「施工方法による影響度の低減」については、平成 21 年度報告書の第一分冊「遠隔操作技術高度化開発」3.4 人工バリアの品質管理技術の検討における緩衝材の施工品質管理技術の整理の検討成果（実規模縦型処分施設での吹付け施工に関する知見）[2]等を活用する。

再冠水後長期間に亘り“緩衝材の性能を適切に確保”するためには、図 9.1.1-1 に示すように“長期性能の初期条件として再冠水後”の緩衝材の品質を評価した上で、緩衝材の“長期性能（劣化・変質等）を評価”し、確認することが必要になる。“長期性能の初期条件として再冠水後”の緩衝材の品質を評価するためには、“建設操業時の施工品質”を評価した上で、“地下水の浸潤等再冠水時の影響”を適切に評価することが必要となる。“建設操業時の施工品質”は、設計仕様、施工材料、施工（建設操業）技術、施工精度および原位置における施工条件（湧水圧・量等）によって制約を受けることから、本研究が果たす役割は大きい。

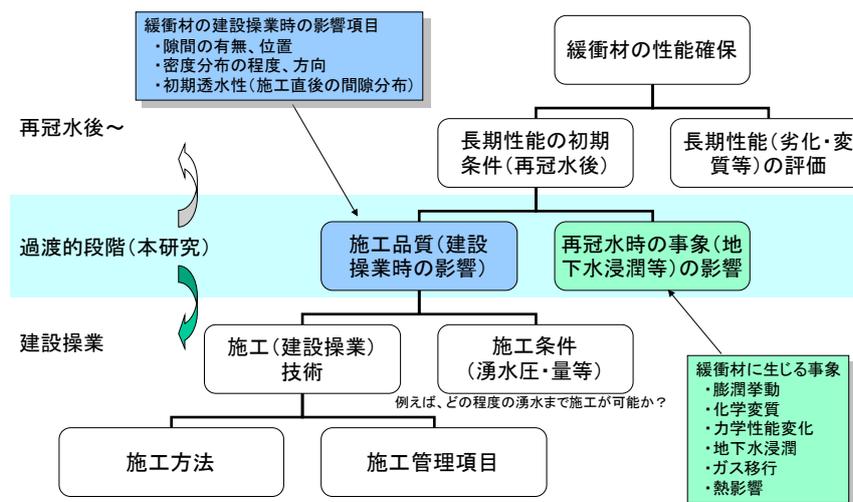


図 9.1.1-1 本研究の位置づけ

9.1.2 緩衝材の施工技術に関するこれまでの成果の概要

(1) 平成 21 年度の成果[2]

- ▶ 緩衝材の構築技術であるブロック定置工法、ペレット充填工法、転圧工法、吹付け工法に対して、非遠隔操作区域および遠隔操作区域における最適な施工品質管理技術を選択するための指標の作成を目的とし、検討を行った。ただし、本検討においては、施工方法が具体化されていない現状を踏まえ、搬送・定置後の緩衝材ではなく、最小施工単位における施工品質管理技術についてのみ考慮した。
- ▶ 取りまとめたブロック施工、ペレット施工、原位置締固め施工、吹付け施工に関する施工品質管理技術の適用例のうち、既往研究においての施工高さが低く、検討実績が少ない吹付け施工に関して、実規模での施工を実施し施工品質管理技術の適用を行った。実規模縦型処分施設緩衝材を吹付け施工によって構築する際に適用した吹付け施工の品質管理技術については、施工後に解体して密度分布を計測して確認を行った。
- ▶ 吹付け施工試験では、遠隔操作性の有無を考慮した上で、電子レンジ法による含水比計測および地盤硬度計測・シリコンオイル比重法による供試体密度計測を実施し、施工中の品質管理技術としての妥当性を検証し、吹付け工法における適切な品質管理方法について検討を行った。その結果、吹付け施工はほぼ均質な乾燥密度の緩衝材を構築可能であり、本施工方法に対する地盤硬度計・近赤外線水分計における適用性は非常に高いという結果が得られた。

(2) 平成 22 年度の成果[3]

- ▶ 緩衝材の施工方法を高度化することによって密度分布や隙間がない緩衝材を構築できれば、再冠水に伴う様々な発生事象の影響を低減できる可能性がある。そのため、密度分布が小さく、隙間が出来ない施工法である吹付け工法による緩衝材の施工試験の前段階として吹付け箱試験を行った。吹付け箱試験によって後述する様々なベントナイトの設定含水比の配合設計に資するデータが取得できる。
- ▶ 吹付け試験に供したベントナイトは、MX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clay の 3 種類である。これらはモンモリロナイトの含有率が異なり、MX80、Milos Ca bentonite は Na 型モンモリロナイトが 60～80%、Friedland Clay は 30%程度である。
- ▶ 吹付け箱試験の結果、MX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clay のうち、モンモリロナイト含有率の高いケースでは密度が緩衝材の仕様を満足できなかった。これは、モンモリロナイトの含有率が高いため、加水した間隙水のほとんどがモンモリロナイトの吸着水として奪われ、締固め土を構築する際に不可欠な自由水が不足しているためだと考えられる。
- ▶ Friedland Clay は非常に高い密度を達成でき、透水係数も POSIVA 社の埋め戻し材の仕様を満足するものであった。本材料は、POSIVA 社の埋め戻し材料のリファレンス材料であることから、埋め戻し材の施工方法として吹付けを適用できることが分かった。

- 緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討のための試験計画の更新を行った。POSIVA の処分孔の仕様である毎分 0.1 リットル/処分孔以下の基準を参考に、湧水を有する処分孔を模擬した大型セルへの緩衝材施工に関して検討を行った。

(3) 平成 23 年度の成果[4]

- 緩衝材の施工方法を高度化することによって密度分布や隙間がない緩衝材を構築できれば、再冠水に伴う様々な発生事象の影響を低減できる可能性がある。そのため、平成 22 年度は密度分布が小さく、隙間が出来ない施工法である吹付け工法による緩衝材の施工試験の前段階として MX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clay の 3 種類のベントナイトの吹付け箱試験を行った。
- 平成 23 年度は、緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討のための試験計画の更新を行った。緩衝材表面近傍の止水性能評価試験の結果を参考にして、0.10/min. 湧水を有する処分孔を模擬した大型セルへの緩衝材施工に関して検討を行った。結晶質岩の亀裂から勢い良く出る湧水や堆積岩の滲み出る湧水などをパラメータとした試験計画を立案した。

(4) 平成 24 年度の成果[5]

- 実際の処分施設で緩衝材を施工する場合を想定して、湧水がある処分孔を模擬したモールドで吹付け試験を行い、湧水環境下における施工性、および施工品質の確認を行った。
- 吹付け試験では、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの一部分を模擬した実規模大のモールドを使用し、モールドの周囲に配置した孔から堆積岩を模擬した面状の湧水、若しくは結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を発生させた。総湧水量は堆積岩のケースでは 27 の孔から 0.10/min、結晶質岩では 3 つの孔から 0.10/min と 0.010/min で実施した。なお、吹付け中に漏水が発生した場合、ただちに視認できること、また、モールド底面に溜まった湧水をモールド外部に排水することを目的として、モールド側壁と底板の間には、約 5mm のクリアランスを設けた。
- 平成 24 年度の試験条件では、湧水環境下における吹付け施工は可能であり、均質な密度を得ることはできるが、施工時における止水は不可能であるという結論に至った。
- 平成 24 年度では、湧水の排水機能を目的として生じた特有の境界条件が設定されており、実際には、施工完了後に粘土プラグや天然バリアで体積拘束される緩衝材の膨潤特性による止水性の評価はできなかった。そこで、吹付け施工後の緩衝材を体積拘束した状態において、湧水の止水性を評価可能な試験計画を立案した。

(5) 平成 25 年度の成果[6]

- 平成 24 年度の結果では、湧水の排水機能を目的として生じた特有の境界条件が設定されていたため、体積拘束された状態における緩衝材の膨潤効果による止水性の評価はできなかった。そこで、平成 25 年度の実施事項として、吹付け施工した緩衝材の体積を拘束した状態において、湧水の止水性を評価可能な実規模施工試験を行った。
- 吹付け試験では、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの一部分を模擬した実規模大のモールドを使用し、モールドの周囲に設置した孔から堆積岩を模擬した面状の湧水、若しくは結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を発生させた。総湧水量は堆積岩のケースでは 27 の孔から 0.10/min、結晶質岩では 3 つの孔から 0.10/min で実施した。なお、モールドの底板と側面は剛結されており、吹付けの進捗に伴って、仕切り板を設置した。また、吹付け終了後には、緩衝材を目視で確認するための透明アクリル製の蓋と緩衝材の膨潤圧に十分耐える強度を持った鋼製蓋を、モールドの上面に取り付けて緩衝材の体積を拘束した。
- 平成 24 年度の結果と同様、吹付け工法は、湧水環境下においても均質かつ高密度な緩衝材を構築可能であるが、施工中における湧水の完全な止水は困難であり、吹付け施工中から緩衝材の体積拘束作業間において、送水ノズルから拘束圧の小さい緩衝材天端部にかけて水みちが発生した。
- 堆積拘束した緩衝材への人工給水（給水圧 200kPa）を約 50 日間継続した後、吹付け施工時と同様に、0.10/min の流量で破過試験を行った。計測した破過圧は、吹付け施工時の最大送水圧よりも高くなったことから、体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的であることを確認した。

9.2 平成 26 年度の調査概要

9.2.1 調査項目

緩衝材の設計や品質管理、搬送・定置技術、長期性能予測等への反映を行うためには、緩衝材の施工方法により品質自体を向上させて、再冠水時に発生する現象（膨潤挙動、化学変質など）に及ぼす影響を低減させることが必要となる。そこで、これまでの研究では、緩衝材の品質向上（均質で隙間を生じさせない施工）の可能性を有するベントナイト吹付け技術に着目した検討を行うことによって、施工能力および品質に関する知見を取得した。

平成 25 年度の試験では、図 9.2.1-1 に示す HLW 地層処分施設の縦置きレイアウトを模擬した実規模のモールドを 4 分割した領域(図 9.2.1-2 参照)に対して、吹付け施工で緩衝材を構築した。その際に、モールドの周囲に配置した孔から堆積岩を模擬した面状の湧水、若しくは結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を発生させた。総湧水量は堆積岩のケースでは 27 の孔から 0.1ℓ/min、結晶質岩では 3 つの孔から 0.1ℓ/min で実施した。モールドの底板と側面は剛結されており（図 9.2.1-3 参照）、吹付けの進捗に伴って、仕切り板を設置した（図 9.2.1-4 参照）。その結果、Case1 では吹付け開始から 100 分後、Case2 では 55 分後に送水圧が急激に低下し、吹付け終了後において、Case1,2 共に水みちの発生を確認した。このことから、吹付け試験では、湧水環境下においても均質かつ高密度な緩衝材を構築可能であるが、施工中における湧水の完全な止水は困難であることを確認した。

その後、処分ピットへの仮設プラグ設置下でのパイピング・エロージョン現象に対する緩衝材の膨潤効果を確認するために、モールドに上蓋を設置し、緩衝材の体積を拘束した状態で、送水圧 200kPa で給水を行い、緩衝材を膨潤させた。人工給水を約 50 日間継続した後、緩衝材の体積拘束を解除し、吹付け施工時と同じ総流量 0.1ℓ/min で再度送水を行った。その結果、Case1,2 共に最大送水（破過）圧は、吹付け施工中の値と比較して高く、その増加量は、Case1 で 188kPa、Case2 では 46kPa であった。このことから、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象は、仮設プラグなどによって体積拘束した緩衝材を効率良く膨潤させることによって抑制できる可能性を確認した。

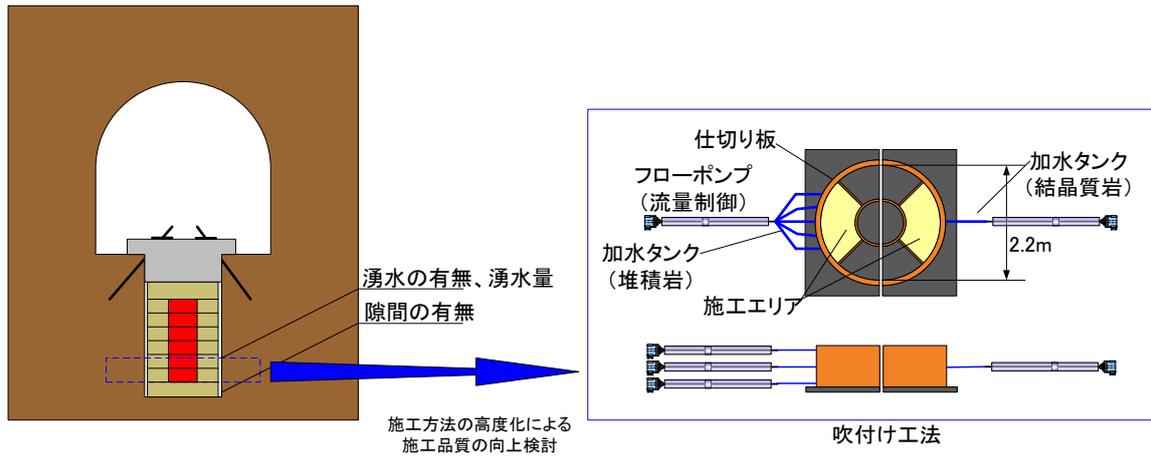


図 9.2.1-1 施工方法の高度化試験イメージ



図 9.2.1-2 実規模 1/4 リングモールド外観



図 9.2.1-3 底板と側壁の剛結箇所

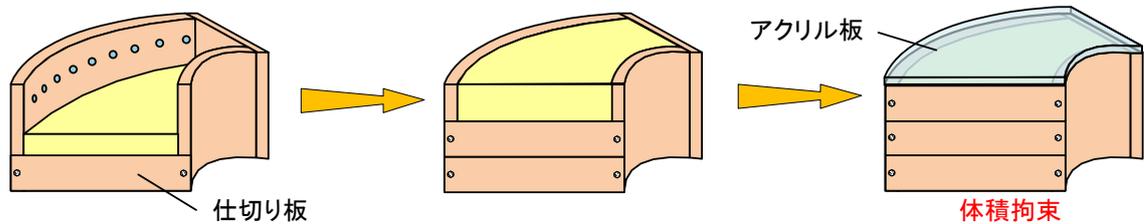


図 9.2.1-4 実規模 1/4 リングモールド組立順序

平成 26 年度では、平成 25 年度に実施したパイピング・エロージョン現象に対する緩衝材の膨潤効果の検討を継続して実施する。具体的には、緩衝材の膨潤挙動は非常に緩慢であることに鑑みて、体積拘束した緩衝材への人工給水を長期間継続し、緩衝材を十分に膨潤させた後に、再度パイピング・エロージョン現象の抑制効果を確認する。

9.3 吹付け施工技術の高度化に向けた取り組み

9.3.1 本検討の背景

放射性廃棄物地層処分施設における緩衝材であるベントナイト系人工バリアの構築工法としては、これまでに原位置締固め工法やブロック定置工法等が検討されている。原位置締固め工法は、一般の土木工事を含め実績が多く、様々な知見が得られているが、ベントナイト系人工バリアに要求されている止水性能を満足させるために必要な均質かつ高い乾燥密度を達成させるためには、狭隘な箇所での施工性の向上や施工時の周辺岩盤、近接構造物への力学的影響の低減などが必要である。また、ブロック定置工法に関しては、ブロック製造・把持・定置技術の精度向上、ブロックの隙間の評価方法などが検討されている。これらの従来技術に対して、吹付け工法は、狭隘な箇所においても周辺構造物への力学的影響をほとんど与えず、高密度かつ均質な緩衝材を構築可能な技術である。本検討では、この吹付け施工技術の概要、並びに高度化に向けた取り組みに関して述べる。

9.3.2 吹付け工法の概要

一般的に、吹付け工法は、事前に水分量を調整した材料を吹付ける「湿式吹付け技術」とノズル付近で乾燥材料と水を混合させて吹付ける「乾式吹付け技術」に二分化されるが、本吹付け工法は前者の「湿式吹付け技術」を応用した高密度ベントナイト構築技術である。本工法では、原則的にノズルワークが可能な施工空間が存在すれば施工可能なため、転圧工法やブロック定置工法と比較して、狭隘箇所での施工性に優れている。また、特筆すべき点は、後述する吹付けノズルや施工条件などの様々な技術開発によって、これまで吹付け工法では不可能とされてきた緩衝材の施工品質管理基準である乾燥密度 1.6Mg/m^3 を達成している点である。

本工法で使用する施工機器は、一般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ー（図 9.3.2-1）とローター式吹付け機（図 9.3.2-2）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（図 9.3.2-3）とリバウンド材料の吸引式回収装置（図 9.3.2-4、図 9.3.2-5）等も使用している。各標準機器の仕様一覧を表 9.3.2-1 に示す。また、図 9.3.2-6 には、本工法の標準機器と機械配置を示す。



図 9.3.2-1 ドライコンプレッサー

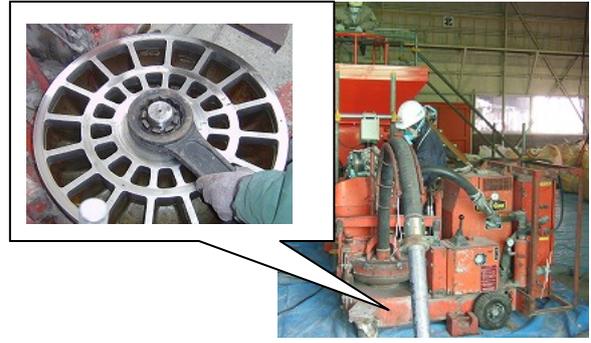


図 9.3.2-2 ローター式吹付け機



図 9.3.2-3 材料供給機



図 9.3.2-4 吸引回収機



図 9.3.2-5 集塵機

表 9.3.2-1 本工法の標準機器仕様一覧

材料ホース内径 (mm)		50.8
ドライ コンプレッサー	吐出圧力 (MPa)	0.69
	吐出空気量 m ³ /分	19.4
	出力 (PS)	190
ローター式 吹付け機	材料吐出量 (m ³ /hr.)	20
	所要空気圧力 (MPa)	0.74
	ローター回転数 (rpm)	30
	材料送り最大距離 (m)	水平 200 垂直 100
湿潤材料 供給機	材料吐出量 (m ³ /hr.)	4
	回転数 (rpm)	10
	ホッパー容積 (m ³)	1.4

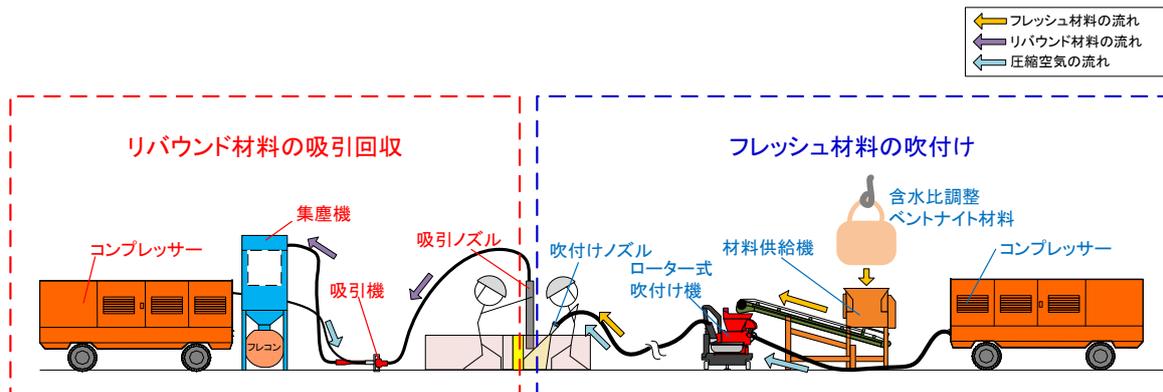


図 9.3.2-6 吹付け工法の標準機器と配置

本工法のような湿式吹付け工法では、均一な施工品質を確保するために湿潤材料を定量に供給することが重要となる。本工法で用いている湿潤材料の供給機は、図 9.3.2-7 に示すような解砕型の造粒機構を備えている。

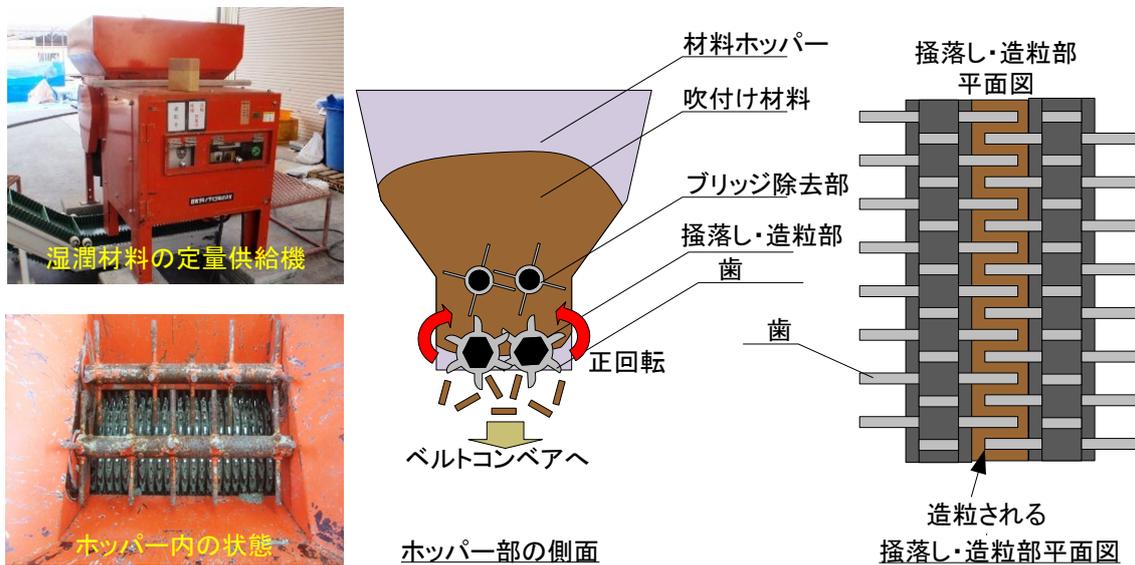


図 9.3.2-7 湿潤材料の定量供給機

一般的に湿潤状態の紛体材料は、ホッパー内でアーチ効果によるブリッジを形成し、材料の定量供給を困難にする。このため、本工法で使用する湿潤材料供給機には、ホッパー内にブリッジ除去用の回転シャフトを設置している。さらに、ホッパーの排出部付近に落とされた材料を一定速度で強制的に掻落し・造粒部でベルトコンベアに排出することによって一定供給性を実現している。この機械を通過した材料は、ゆるい団粒物となるが、圧縮空気で吹付け機から吹付けノズルに至るまでのホース内を搬送される間に再び解砕される程度の硬さになるように、掻落し・造粒部の歯の間隔を調整している。図 9.3.2-8 は、湿潤材料供給機の供給量の定量性を示している。湿潤材料供給機は、掻落し・造粒部の回転数によってその供給量を制御している。このため、回転数が大きい程、供給量が増えることになる。図から、吹付け材料の含水比にはよるものの、掻落し・造粒部の回転数と材料供給量の関係はほぼ線形であることが分かる。

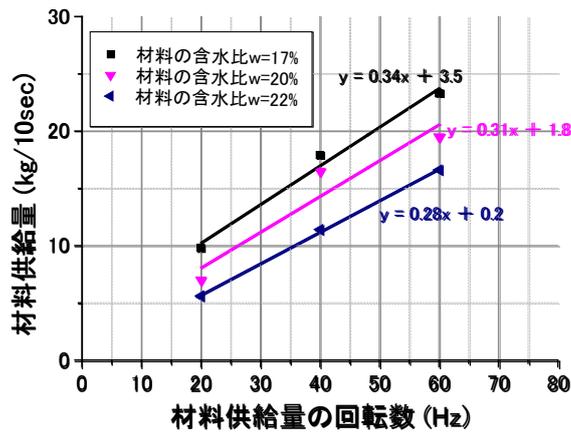


図 9.3.2-8 湿潤材料供給機の供給量の定量性

また、本工法では、吹付けノズルとして超音速ノズル（別名：ラバールノズル、スーパーソニックノズル）を採用している。この超音速ノズルは、ロケットエンジンの噴射口やアブレイシブエアジェットによる切削、ジェットバーナー、ジェットミルなど圧縮性流体を超音速にまで加速できるノズルとして、広く使用されているものである。図 9.3.2-9 に超音速ノズルの概略図を示す。超音速ノズルとは、図に示すような圧縮部とその後に続く拡張部があるノズルの総称であり、空気などの圧縮性流体が亜音速まで加速されれば、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、拡張部で密度を下げながら超音速にまで加速できるものである。

本検討で用いた超音速ノズルの形状は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 のベントナイト系人工バリアを構築可能となるように、図 9.3.2-9 に示した拡張角度 θ_e 、拡張部の長さ Le などをパラメータとした室内試験[7]によって決定している。

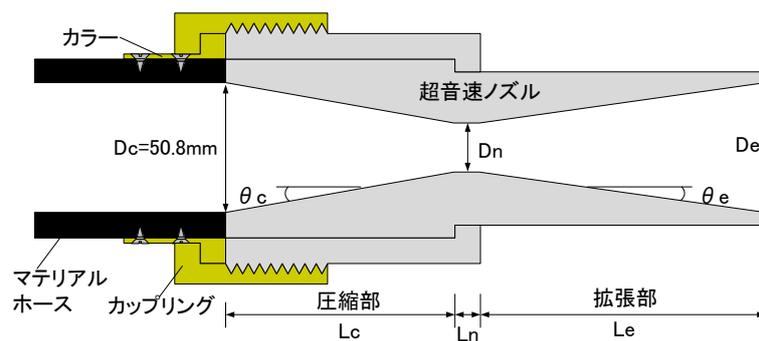


図 9.3.2-9 超音速ノズルの概略図

図 9.3.2-10 には振動転圧工法と吹付け工法による緩衝材の密度分布の比較を示している。どちらも低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設における側部緩衝材を模擬した施工エリアで緩衝材を施工した場合のサンプリングコアの密度分布を示している。図 9.3.2-10 から、転圧工法によって得られた緩衝材は仕上がり層上部、中央部、層下部ごとに密度が分かれ、上部から下部に向かって密度が低下しており、その差は 0.3Mg/m^3 程度である。また、目標の緩衝材全体の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 であるのにも関わらず、最大乾燥密度が 1.75Mg/m^3 程度と大きい。一方、吹付け工法で施工した緩衝材の密度分布は、 0.1Mg/m^3 の幅に収まり、最大乾燥密度も 1.68Mg/m^3 程度であることがわかる。

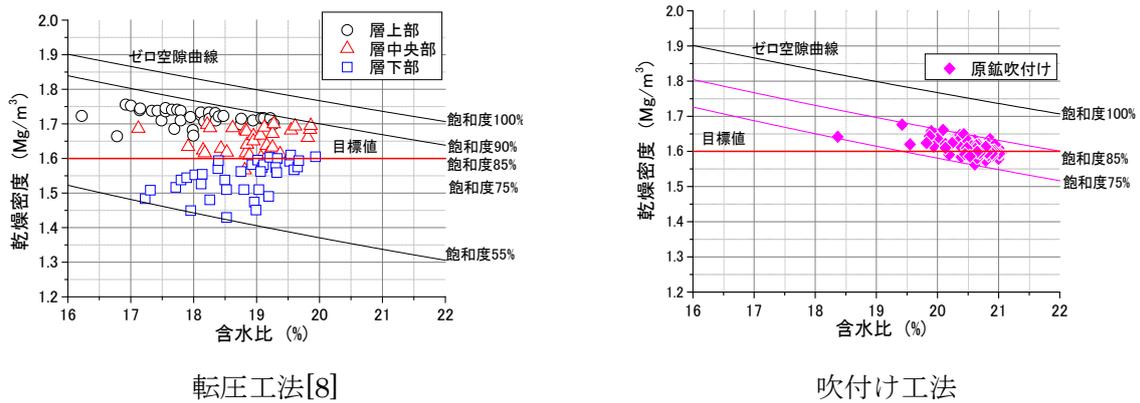


図 9.3.2-10 転圧と吹付け工法による緩衝材の密度分布の比較

吹付け工法では、吹付けた材料のうち、質量割合で3割程度が付着せずにリバウンド材料として滞留する。この滞留したリバウンド材を巻込んで吹付けを行った場合、緩衝材の密度が低下し、品質不良を発生させる恐れがあるため、施工時においては、リバウンド材の回収が肝要となる。そこで、図9.3.2-11に示すような、リバウンド材の吸引回収方法を適用する。この吸引回収方法は、吸引機と吸引ノズル、集塵機で構成されており、狭隘箇所における使用にも適した方法である。また、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り、コンクリート吹付けと異なりリバウンド材料は水和反応して固化することはないことから、回収したリバウンド材料は何度でも再利用して吹付けることが可能である。

吸引機は、図9.3.2-12に示すような圧縮空気のベルヌーイ効果を利用した構造である。

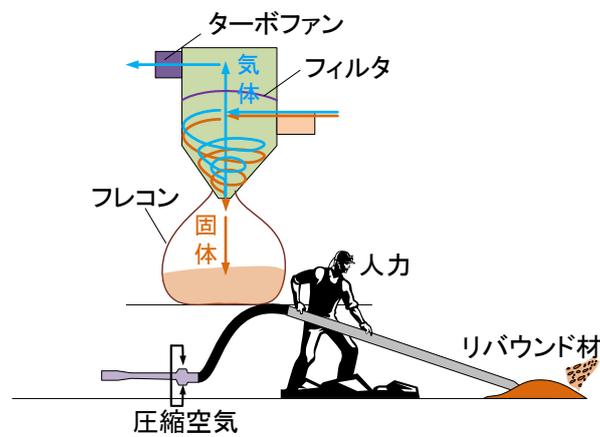


図 9.3.2-11 吸引方式によるリバウンド材の回収イメージ

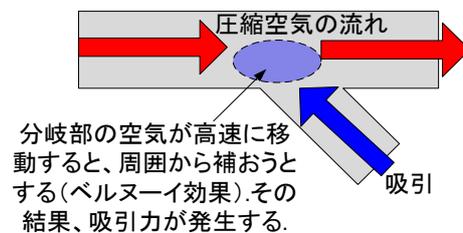


図 9.3.2-12 吸引機のベルヌーイ効果

リバウンド材料を再利用する際の留意事項として、吸引回収される際に圧縮空気に洗われることによって、リバウンド材料の含水比が低下することが挙げられる。含水比の低下は、吹付けた緩衝材の乾燥密度を増加する方向に変化させるため、止水性などの緩衝材の品質上問題はないと考えられるが、過度に乾燥した材料を吹付けることはリバウンド率の増加と過度な密度分布を発生させるため好ましくない。そこで、リバウンド材の回収時に、吸引されたリバウンド材が吸引時の圧縮空気内で対流するのを短時間に制限するために、図 9.3.2-13 に示すようなサイクロン効果を利用した気体と固体の分離機を採用している。これにより、表 9.3.2-3 に示すように吸引することによる含水比の低下割合を 0.3%にすることができる。

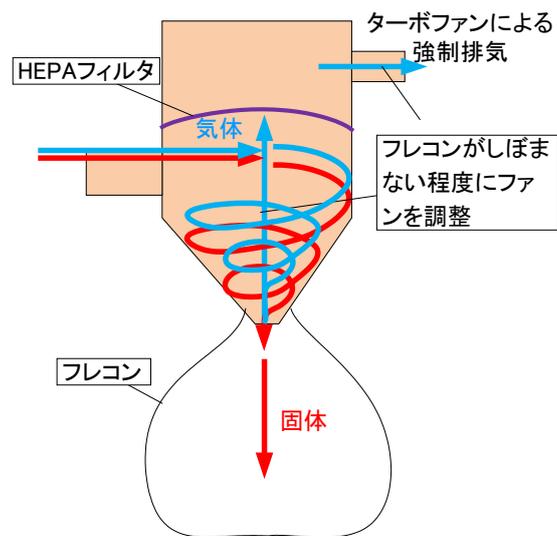


図 9.3.2-13 サイクロンによる気体と個体の分離技術

表 9.3.2-2 サイクロンによる気体と固体の分離技術の効果

吸引時間 (sec)	吸引量 (kg)	吸引速度 (kg/sec)	含水比 低下率 (%)
528	390	0.74	0.3

9.3.3 吹付けベントナイトの密度管理方法[9]

吹付けたベントナイトの乾燥密度は、図 9.3.3-1 に示すようなシリコンオイルを浸漬液とした浮力法（アルキメデス法）で取得した嵩密度から算出している。

一般に締固めたベントナイトは不飽和であり、土粒子の接触点にあるメニスカス水の表面張力によって崩れることなく紛体材料の集合体としていられる（図 9.3.3-2）。仮にベントナイトを水やエタノールなどの極性を持つ液体に漬ければ、空隙が極性を有する液体で満たされるためにメニスカス水に溶解し、表面張力（界面自体）がなくなり、土粒子をつなぎとめている力は分子間力のみとなる（図 9.3.3-3）。さらに極性を有する液体が周囲を取り囲んでいる供試体表面では、極性を持つ液体がベントナイトのもつ吸着水や層間水を奪うために集合体の状態ではなくなり、土粒子の凝集・沈殿・分散によって浸漬前に比べて大きく変形してしまう。

一方、シリコンオイル、ケロシン等の非極性有機分子からなる浸漬液にベントナイトを漬けても、メニスカス水と非極性有機分子の間には界面張力が作用し、さらに、メニスカス水と土粒子間の水素結合のほうが、非極性有機分子と土粒子間の分子間力よりも強いため、メニスカス水を剥ぎ取ることができない（図 9.3.3-3）。また、非極性有機分子ではベントナイトは膨潤できないことから、結果として締固めたベントナイトはシリコンオイルに半年以上浸漬しても膨潤や崩壊することはない。

従来から行われていたケロシンを用いた浮力法では、ケロシンが不飽和地盤材料の空隙に染込み易いことから、飽和土のみを対象としていた。しかしながら、シリコンオイルはケロシンなどに比べて、ある程度自由に粘性を選べることから、ベントナイト粒子間の空隙に入り込み難い粘性を選択できるため、不飽和土への適用も可能である。また、揮発しにくい、製品の品質が安定しており比重が常に一定である、表面張力が小さいためにメニスカス水との界面張力を低下させにくいなどの特徴がある。これにより、吹付けベントナイトのような焼結していない多孔質体の嵩体積を浮力法によって計測することができる。

試験手順は、先ず吹付けたベントナイトから任意の形状に供試体を切り出す。浮力法の長所は、ノギス法のように寸法どおりに切り出す必要がなく計測手間が少ないために、簡便でかつ人為的誤差が少ないことが挙げられる。次に、この切り出した供試体の気中重量 W_a を計測した後に供試体をシリコンオイルにつけて液中重量 W_b を計測する。この気中重量 W_a と液中重量 W_b の差が吹付けベントナイトに作用する浮力 $W_c = W_a - W_b$ となる。この浮力 W_c をシリコンオイルの比重 ρ_c で除すれば、吹付ベントナイトの嵩密度 $V_c (= W_c / \rho_c)$ が求められる。これにより、吹付けベントナイトの嵩密度 $\rho_t (= W_a / V_c)$ が求められ、さらに吹付けベントナイトの含水比 w より、吹付けベントナイトの乾燥密度 $\rho_d (= \rho_t (1 + w/100))$ が求められる。

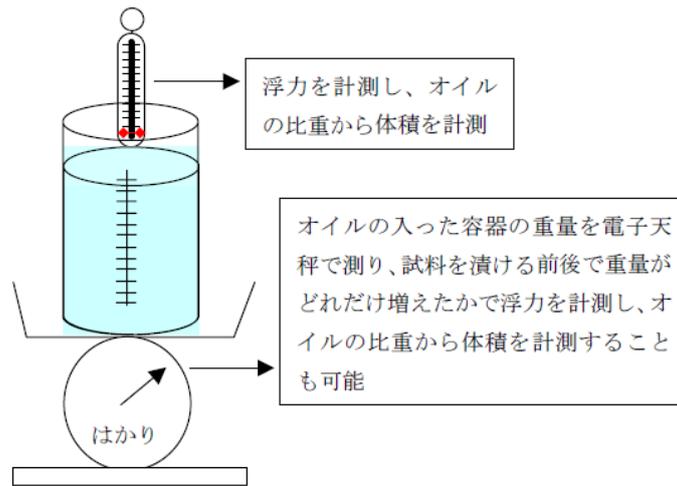


図 9.3.3-1 浮力法による嵩密度測定方法

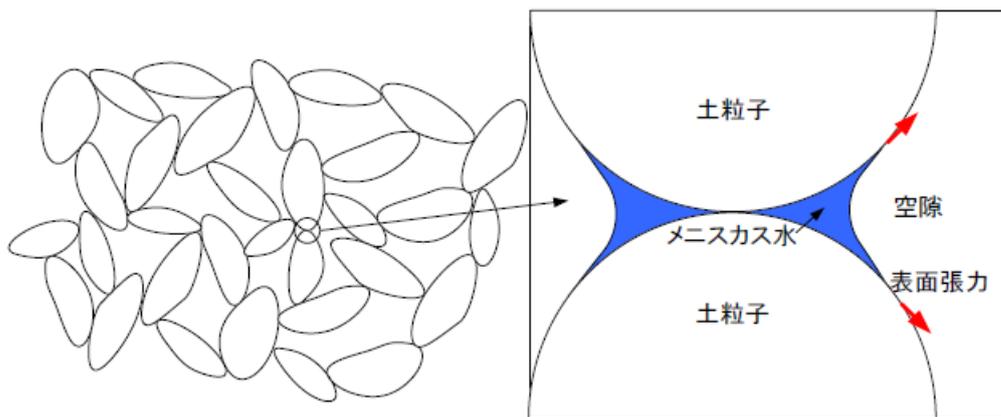


図 9.3.3-2 不飽和土のメニスカス水の表面張力の概念図

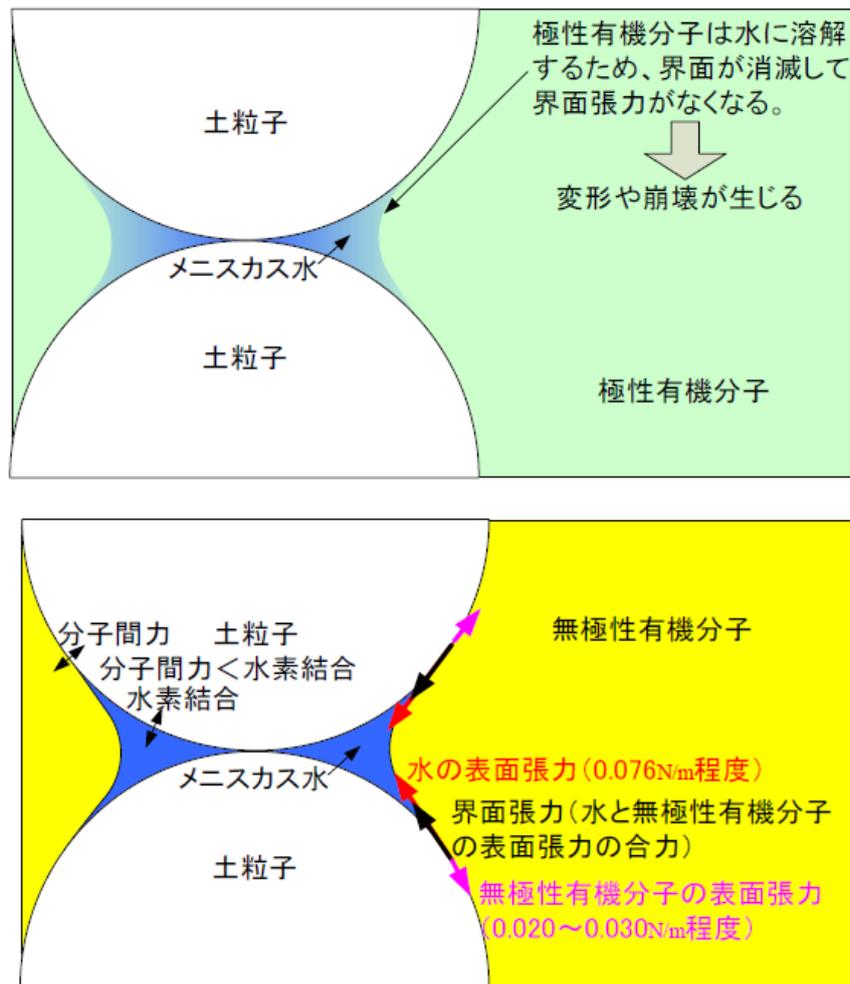


図 9.3.3-3 極性有機分子-水、無極性有機分子-水の界面張力の相違

図 9.3.3-4 に吹付けベントナイトの浸漬時間とシリコンオイルを用いた浮力法から求めた乾燥密度の関係を示す。図からも明らかなように、乾燥密度が 1.6Mg/m^3 付近では、シリコンオイルが染込むのに時間がかかるため。浸漬後 1 分程度で浮力を計測すれば、シリコンオイルがベントナイトに染込む影響はほとんど無いといえる。ただし、乾燥密度が 1.6Mg/m^3 以下の場合には、比較的早い浸漬時間でシリコンオイルがベントナイトに染込む影響で嵩密度が大きめに算出され、精度を高めるためには極力迅速に浮力を計測する必要がある。

そこで、シリコンオイルが染込む影響を次のような手順で補正する。まず、十分にシリコンオイルがベントナイトに染込んだ状態での液中重量 W_b^* を求める。このベントナイトを取り出して表面のシリコンオイルのみを拭き取り気中重量 W_a^* を計測する。このとき、ベントナイトに染込んだシリコンオイルの体積は、 $\Delta V = ((W_a^* - W_b^*) / \rho_o)$ となる。これにより、シリコンが染込む前の体積は、 $V_c = (W_a - W_b^*) / \rho_c + \Delta V$ で与えられる。よってベントナイトの嵩密度は $\rho_t = (W_a / V_c)$ として求められる。この方法では、シリコンオイルが染込む影響を除去でき、浮力が落ち着くまでゆっくりと計測できる。図 9.3.3-5 にこのシリコンオイルが染込む影響を除去した嵩密度を示す。図 9.3.3-4 と比較して、計測される嵩密度が浸漬時間に依らず一定値を示していることがわかる。

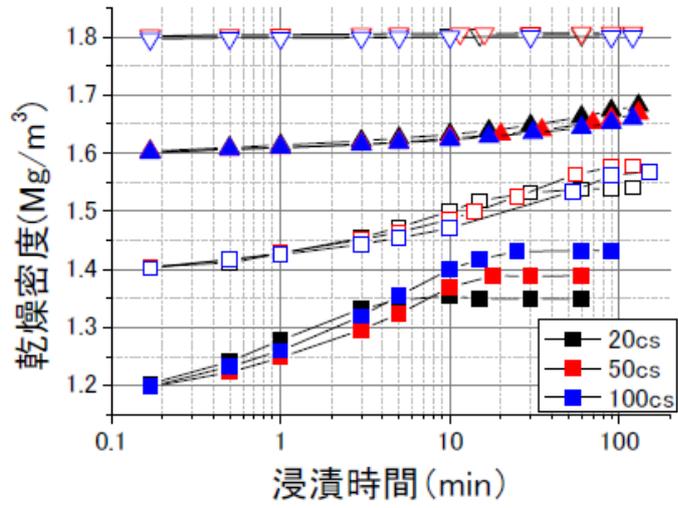


図 9.3.3-4 浸漬時間と乾燥密度関係 (シリコンオイル染込みの影響あり)

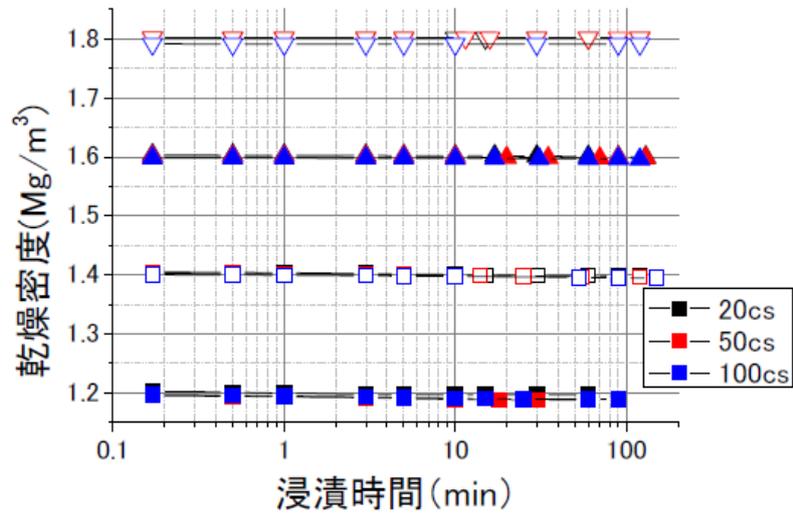


図 9.3.3-5 浸漬時間と乾燥密度関係 (シリコンオイル染込みの影響除去)

9.3.4 平成 22 年度の緩衝材の施工技術の高度化のための施工試験[3]

(1) 吹付け試験概要

吹付け方式による緩衝材施工では、事前に吹付け材料の含水比調整を行っている。この際の設定含水比は、通常、使用するベントナイトのモンモリロナイト含有率に依存しており、通常は、含水比をパラメータにした吹付け箱試験を行い、含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線）を材料ごとに取得し、材料の配合設計に資するデータとする。そこで、緩衝材の施工技術の高度化のための施工試験では、様々なベントナイト系材料の含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線）取得のための吹付け箱試験を行った。これらの結果は、それ以降に実施する吹付け方式による緩衝材施工実験に資するデータとなった。

使用したベントナイト系材料は、アメリカ産の MX80、ギリシャ産の MilosCa ベントナイト、ドイツ産の Freadland Clay の 3 種類である。これらのベントナイト系材料はフィンランドの HLW 地層処分の実施主体である POSIVA 社が緩衝材や埋め戻し材として仕様を検討しているものである。これらの材料はそれぞれモンモリロナイト含有率が異なるため、モンモリロナイト含有率と吹付け方式による緩衝材施工の関係に資するデータとなる。

(2) 試験ケース

平成 21 年度までは吹付け工法による緩衝材の施工は山形県産のクニゲル V1 のみで行ってきた。これに対して HLW 放射性廃棄物地層処分の最終処分地が決定しているフィンランド、スウェーデンなどでは、緩衝材は MX80、Milos Ca-bentonite、埋め戻し材は Friedland Clay などのように用途に応じて使い分けている。

ここでは吹き付け工法に適する材料を検討することを目的として、緩衝材として MX80、Milos Ca-bentonite、埋め戻し材として Friedland Clay を採用し、先ず吹付け工法によって吹付け箱試験を行う。吹付け箱試験の概要を図 9.3.4-1 に、試験で使用する吹付け箱を図 9.3.4-2 に示す。吹付け箱試験では、壁に立てかけた吹付け箱を吹付けによって充填し、吹付けベントナイトの密度を取得した。

次に、吹付け箱試験結果から得られた締固め曲線を用いて吹付け材料の配合を決定し、決定した配合の各種ベントナイト系人工バリア材料を用いて吹付け施工を行った。この際、所定の湧水量に対して施工可能性を検討した。POSIVA 社によれば、毎分 0.1 リットル/処分孔が仕様限界であるため、本検討でもこの値を参考に試験条件を決定した。

平成 21 年度は前述の試験手順のうち吹付け箱試験までを実施した。得られた結果を以下に述べる。

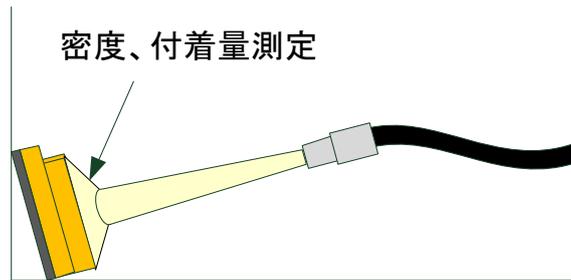


図 9.3.4-1 吹付け箱試験の概要

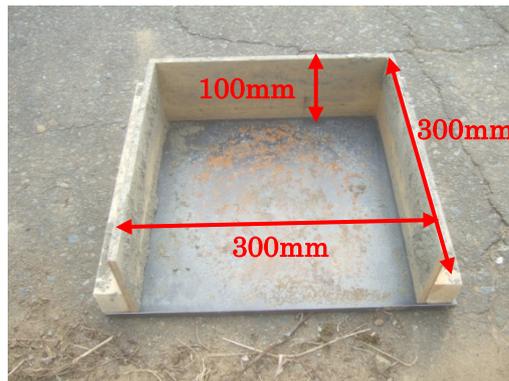


図 9.3.4-2 試験で使用した吹付け箱

(3) 試験方法

吹付け箱試験に使用した吹付けシステムは、前述の吹き付け施工技術の概要に示す通りである。本システムでは、締固めエネルギー5Ecの突固め試験と同等の乾燥密度で、吹付けベントナイトを構築することが可能である。

測定したデータは、施工品質に関連する乾燥密度と、施工性に関連する付着量である。乾燥密度はシリコンオイル法[9]で計測した湿潤密度と電子レンジ法で計測した含水比を用いて算出し、付着量は吹付け後の吹付け箱の重量から吹付け前の吹付け箱の重量を差し引いて算出した。

(4) 各試料の基礎物性

まず、メチレンブルー吸着量試験で調べたMX80、Milos Ca-bentonite、Friedland Clayのモンモリロナイト含有率を表9.3.4-1に示す。なお、比較のためクニゲルV1の試験結果も表中に示す。表より、MX80、Milos Ca-bentoniteはクニゲルV1よりモンモリロナイト含有率が高い材料であり、逆にFriedland ClayはクニゲルV1よりモンモリロナイト含有率が低い材料であると判断できる。なお、本試験のメチレンブルー吸着量試験はクミネ工業株式会社に依頼し、【日本ベントナイト工業会標準試験法：ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法, JBAS-107-91, 1991】[10]に則り実施した。

表 9.3.4-1 各試料のモンモリロナイト含有率

材料	モンモリロナイト含有率(%)			
	1回目	2回目	3回目	平均
MX80	71.4	71.4	71.4	71.4
Milos Ca-bentonite	67.1	67.1	67.1	67.1
Friedland Clay	27.1	27.1	27.1	27.1
クニゲル V1	61.4	61.4	62.9	61.9

次に、各試料の土粒子密度を表 9.3.4-2 に示す。

表 9.3.4-2 各試料の土粒子密度

材料	土粒子密度(Mg/m ³)
MX80	2.80
Milos Ca-bentonite	2.78
Friedland Clay	2.91

次に、突固め試験で得られた各試料の締固め曲線（締固めエネルギー5Ec）を図 9.3.4-3 に示す。図より、モンモリロナイト含有率が高くなると締固め曲線は右下方にシフトし、最適含水比は高く、最大乾燥密度は小さくなるのがわかる。

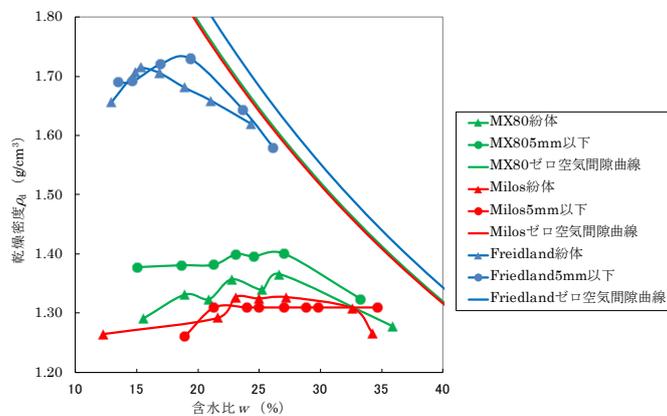


図 9.3.4-3 突固め試験で得られた締固め曲線（締固めエネルギー5Ec）

(5) 吹付け箱試験の試験条件

吹付け箱試験の試験ケース一覧を表 9.3.4-3 に示す。前述の締固め試験の結果を踏まえ、MX80、Milos Ca-bentonite、Friedland Clay の 3 種類の試料それぞれに対し、最適含水比を中心に含水比を変化させた 5 ケースの試験を行うこととし、さらに全ての試料で粉体と 5mm 以下の 2 種類の最大粒径の試料を用意して、計 30 ケースの試験を実施した。

表 9.3.4-3 吹付け箱試験ケース一覧

材料	粒径	含水比(%)				
		20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	20.0	22.6	24.4	26.8	29.8
	5mm 以下	19.6	22.7	24.9	26.2	28.8
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	20.0	22.5	24.7	26.6	29.1
	5mm 以下	20.0	23.1	25.3	26.6	31.0
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0
	粉体	16.5	18.4	19.8	23.9	24.9
	5mm 以下	16.4	18.5	21.2	23.5	31.3

(6) 平成 22 年度の吹付け箱試験結果

まず、吹付け箱試験で得られた乾燥密度を表 9.3.4-4 に、締固め曲線を図 9.3.4-4 に示す。モンモリロナイト含有率の高いMX80やMilos Ca-bentoniteのデータにはばらつきがみられるものの、モンモリロナイト含有率が高い試料ほど乾燥密度が小さくなっていることから、吹付け箱試験で得られた締固め曲線は突固め試験で得られた締固め曲線と同様の傾向を示すと判断できる。

表 9.3.4-4 各試験ケースの乾燥密度一覧

材料	粒径	乾燥密度(Mg/m ³)				
		20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	1.36	1.20	1.27	1.22	1.23
	5mm 以下	※1	※1	1.17	1.20	1.30
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	※1	1.27	1.32	1.15	1.15
	5mm 以下	※1	※1	※1	1.28	1.34
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0
	粉体	1.77	1.73	1.66	1.54	1.39
	5mm 以下	1.72	1.71	1.60	1.59	1.44

※1：付着が不十分のため計測不可

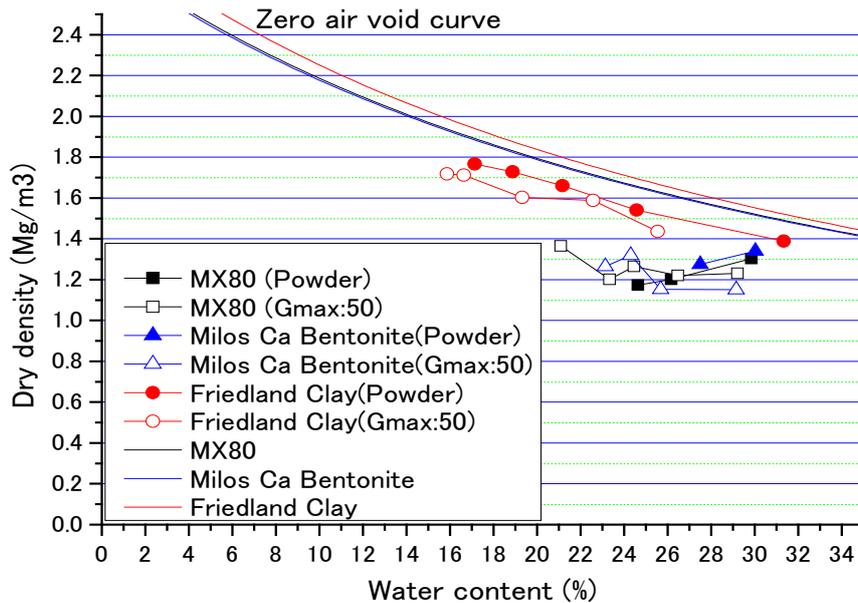


図 9.3.4-4 吹付け箱試験で得られた締固め曲線

次に、吹付け箱への付着量を表 9.3.4-5 に、各試験ケースの吹付け後の吹付け箱の写真を図 9.3.10-2～図 9.3.4-10 に示す。全ての試料で含水比が高いケースほど付着量が多いことから、含水比の増加に従ってベントナイト試料の付着力は増加し、施工性は向上すると判断できる。

表 9.3.4-5 各試験ケースの付着量一覧

材料	粒径	付着量(kg)				
		20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	2.30	3.38	4.46	8.72	20.96
	5mm 以下	0.68	3.66	5.98	8.40	3.74
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	※1	1.44	3.54	2.90	9.50
	5mm 以下	※1	※1	※1	0.52	0.60
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0
	粉体	7.96	9.16	13.64	17.78	20.76
	5mm 以下	5.04	13.76	14.70	17.80	30※2

※1：付着せず

※2：電子秤の上限値



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%

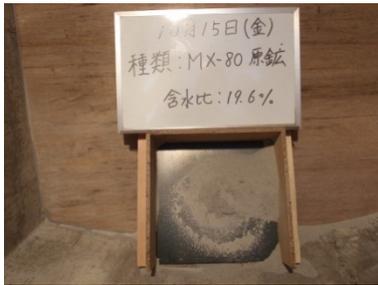


(d)計画含水比 27%

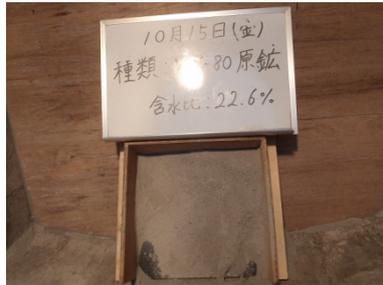


(e)計画含水比 30%

図 9.3.10-5 吹付け後の吹付け箱の写真 (MX80 粉体)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.3.4-6 吹付け後の吹付け箱の写真 (MX80 5mm 以下)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.3.4-7 吹付け後の吹付け箱の写真 (Milos Ca-bentonite 粉体)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.3.4-8 吹付け後の吹付け箱の写真 (Milos Ca-bentonite 5mm 以下)



(a)計画含水比 16%



(b)計画含水比 18%



(c)計画含水比 18%



(d)計画含水比 23%



(e)計画含水比 25%

図 9.3.4-9 吹付け後の吹付け箱の写真 (Friedland Clay 粉体)



(a)計画含水比 16%



(b)計画含水比 18%



(c)計画含水比 18%



(d)計画含水比 23%



(e)計画含水比 25%

図 9.3.4-10 吹付け後の吹付け箱の写真 (Friedland Clay 5mm 以下)

一方、モンモリロナイト含有率の高いMX80及びMilos Ca-bentoniteに着目すると、モンモリロナイト含有率の低いFriedland Clayと比較して明らかに付着量が少なく、低含水比側では試料が全く付着しないケースもみられた。このような傾向が生じるのは、モンモリロナイト含有率が高いと試料内の水分が吸着水として土粒子に吸着されて自由水が減少し、付着力が低下するためと考えられる。この鉱物表面の吸着水は、鉱物と水素結合をしている水分子であり、いわゆる液体として振舞うのではなく鉱物の一部として固体として振舞うものである。実際に、例えば含水比25%のMX80、Milos-Ca Bentoniteを触れた感覚は、25%のFriedland Clayの場合に比べ、明らかにパサパサした感じである。土粒子密度が2.7Mg/m³程度の材料を乾燥密度1.6Mg/m³に締め固めた場合の飽和含水比は26%程度であることを考えると、MX80やMilos-Ca Bentoniteを単体で乾燥密度1.6Mg/m³に占め固める場合には、ほとんど自由水がない状態であると考えられる。

よって、モンモリロナイト含有率の高いベントナイト試料を吹付け工法で施工する場合、施工性を考えれば、試料の含水比を高く設定して付着力を増加させることが必要と判断できる(図9.3.4-11参照)。しかし、品質面を考慮すると、高含水比試料は低密度で飽和してしまうため施工後の乾燥密度が低くなり、要求品質を満足しなくなる可能性が高いと予想される。

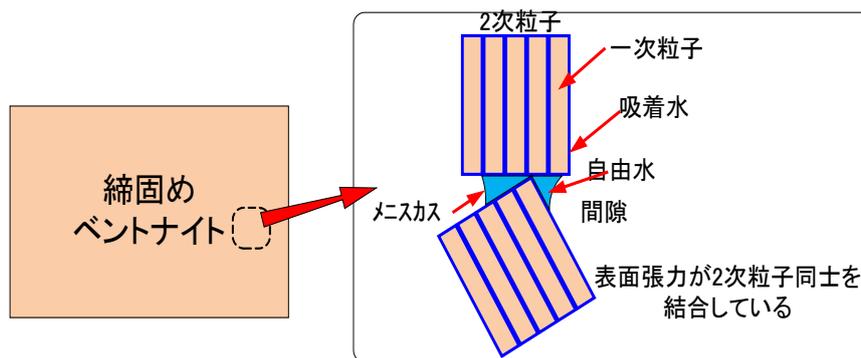


図 9.3.4-11 締め固め工法における間隙水の役割

以上の検討結果から、MX80やMilos Ca-bentoniteなどのモンモリロナイト含有率が高いベントナイト試料をそのまま吹付け工法で施工することは困難であり、何らかの対策を講じることが必要と判断できる。そこで、モンモリロナイト含有率が高いベントナイト試料を吹付け工法で施工する方法として、以下の2つの対策が考えられる。

①試料の膨潤を抑える（吸着水を減らして自由水を増やす）

試料の膨潤を抑える（試料中の吸着水を減らして自由水を増加させる）ことで付着力が増加し、吹付け工法での施工が可能になると考えられる。具体的には、NaHCO₃（重曹）やNa₂CO₃の混合が有効と予想される。

②モンモリロナイト含有率を下げる

ケイ砂を混合してモンモリロナイト含有率を下げることで、付着力が増加し吹付け工法での施工が可能になると考えられる。ただし、モンモリロナイト含有率を変化させると透水係数は変化し、両者の関係は非線形となることから、要求される遮水性を確保するためには、最適なモンモリロナイト含有率（ケイ砂含有率）を実験的に取得する必要がある。

加えて、付着量が多く全ての試験ケースで供試体の作製が可能であった Friedland Clay の紛体試料を使用し、透水試験を実施した。試験結果の一覧を表 9.3.4-6 に、透水係数の経時変化を図 9.3.4-12、乾燥密度と透水係数の関係を図 9.3.4-13 に示す。

表 9.3.4-6 Friedland Clay の透水試験結果

吹付け時含水比 $w(\%)$	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	有効モンモリロナイト密度 $\rho_{em}(\text{Mg}/\text{m}^3)$	透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$
16.5	1.78	0.87	1.38×10^{-12}
18.4	1.71	0.81	1.41×10^{-12}
19.8	1.65	0.76	2.11×10^{-12}
23.9	1.58	0.71	3.19×10^{-12}
24.9	1.39	0.58	8.60×10^{-12}

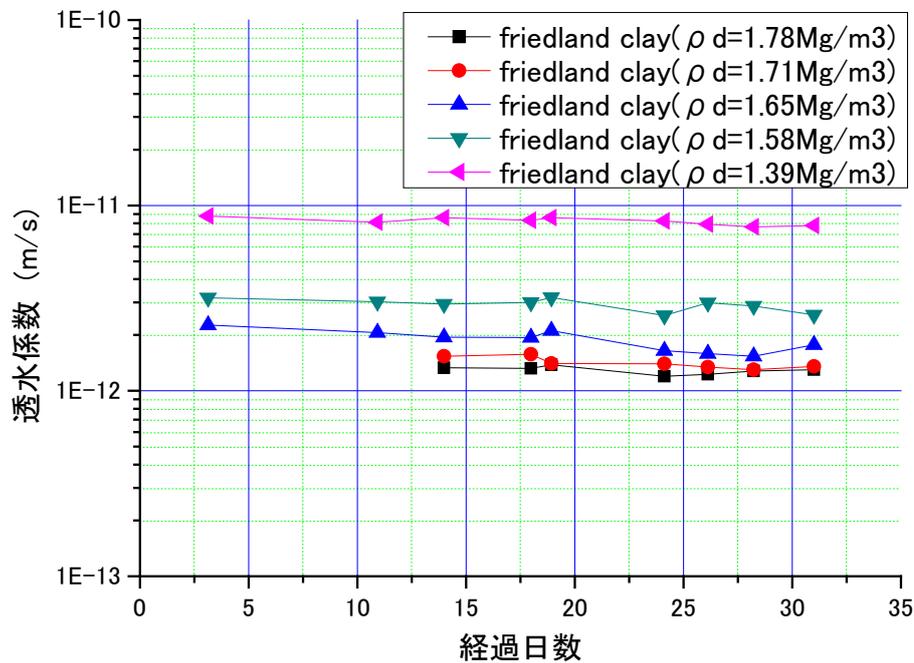


図 9.3.4-12 透水係数の経時変化 (Friedland Clay)

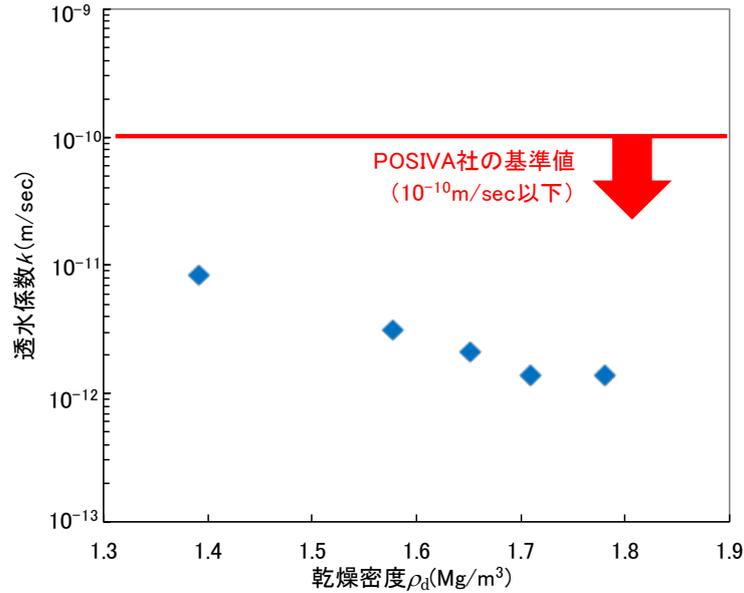


図 9.3.4-13 透水係数と乾燥密度の関係 (Friedland Clay)

図より、乾燥密度が大きくなるに従い、透水係数は小さくなるのがわかる。また、透水係数の値に関しても、フィンランド POSIVA 社が設定した埋戻し部 (Friedland Clay を使用予定) の透水係数の基準である 10^{-10}m/sec 以下を満たしている。よって、Friedland Clay は吹付け施工で透水係数の要求性能を満足させることが可能と考えられる。

また、既往の研究[11]において、モンモリロナイト含有率の異なるベントナイトであっても、有効モンモリロナイト密度 (単位体積あたりに含まれるモンモリロナイトの乾燥重量をモンモリロナイト以外の土粒子の体積を除いた体積で除すことで得られる密度) を用いて透水係数を整理すると、通水溶液が蒸留水であれば交換性陽イオンの種類ごとに両者の関係は一義的に決定すると報告されていることから、Friedland Clay の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係についても同様の傾向がみられるか確認することとした。有効モンモリロナイト密度の算出式は以下に示す (ベントナイト 100% の場合)。なお、今回の試験では、ベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度が得られていないため、モンモリロナイトの土粒子密度とベントナイト中のそれ以外の鉱物の土粒子密度を一定と仮定し、表 9.3.4-2 に示すベントナイト全体の土粒子密度を代用した。

$$\rho_{em} = \frac{\rho_d C_m}{100 - \frac{\rho_d (100 - C_m)}{\rho_{nm}}}$$

ここで、 C_m : モンモリロナイト含有率 (%)

ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_{em} : 有効モンモリロナイト密度 (Mg/m³)

ρ_{nm} : ベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)

Friedland Clay の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 9.3.4-14 に示す。なお、Friedland Clay は Na 型ベントナイトであることから、既往の研究[1]で得られている他の Na 型ベントナイトの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係及び近似式も、比較のため図中に示している。

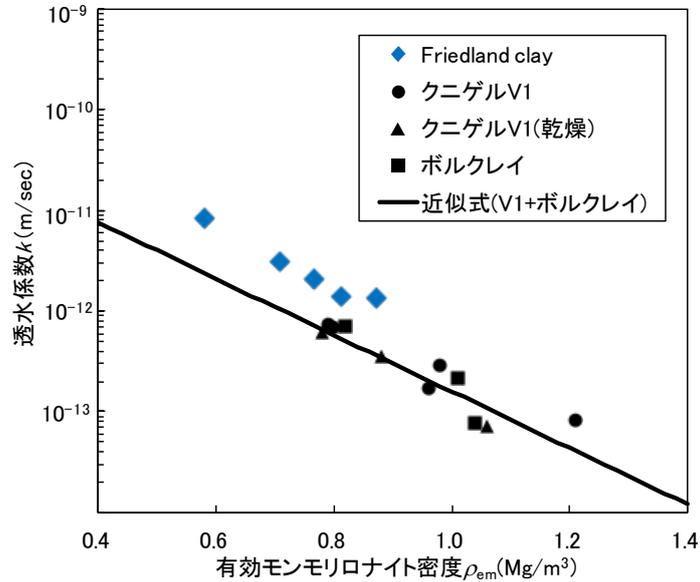


図 9.3.4-14 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 ([1]に加筆)

図より、Na 型ベントナイトである Friedland Clay と他の Na 型ベントナイトを比較すると、Friedland Clay の方が多少高い透水係数を示すものの、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係はおおむね一致することがわかる。この結果から、モンモリロナイトの含有率と交換性陽イオンの種類を把握することで、ベントナイトの産地や種類によらず透水係数を推定することが可能と考えられる。

9.3.5 平成 23 年度の吹付け施工試験計画

(1) 試験概要

平成 22 年度の試験結果を受けて、今後は、 NaHCO_3 混合試料やケイ砂混合試料で突固め試験、吹付け箱試験、透水試験を実施し、最適な配合比を取得する。そして、決定した配合の試料で吹付け試験を実施し、湧水部への施工性を検討することが重要である。

平成 22 年度は、吹付け方式による緩衝材施工試験として、様々なベントナイト系材料の吹付け箱試験を行った。この試験は、材料の含水比を決定するために通常実施される試験である。この結果、高モンモリロナイト含有率の材料は吹付けには適さないが、実績のあるクニゲル V1 だけでなく、ケイ砂を混合してモンモリロナイト含有率を下げた海外のベントナイトでは緩衝材の仕様を満足できる可能性がある。また、Freadland Clay に関しては、ケイ砂を混ぜなくてもそのまま埋め戻し材としての仕様を満足することが分かった。

これらの材料を実際の処分施設で施工する場合、湧水の有無が施工品質に及ぼす影響が無視できないと考えられる。そこで今後の施工試験では、湧水を有する処分坑を模擬したモールドへの吹付け試験を行い、施工品質の確認を行う。本検討は、先行的に吹付け工法を対象とするが、他の緩衝材施工方法についても同様に検討する予定である。

(2) 試験計画

試験では、まず、図 9.3.5-1 に示すように、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの青線で囲まれた箇所を模擬した実規模大のモールドを作製し、それに対して各施工方法を実施する。その際に、モールドの周囲に配置した孔から湧水を模擬した水を流出させる。

さらに、近年、隙間や密度分布が少ない緩衝材の施工方法として提案されている吹付け工法に関して、施工可能な湧水量について検討を行う。

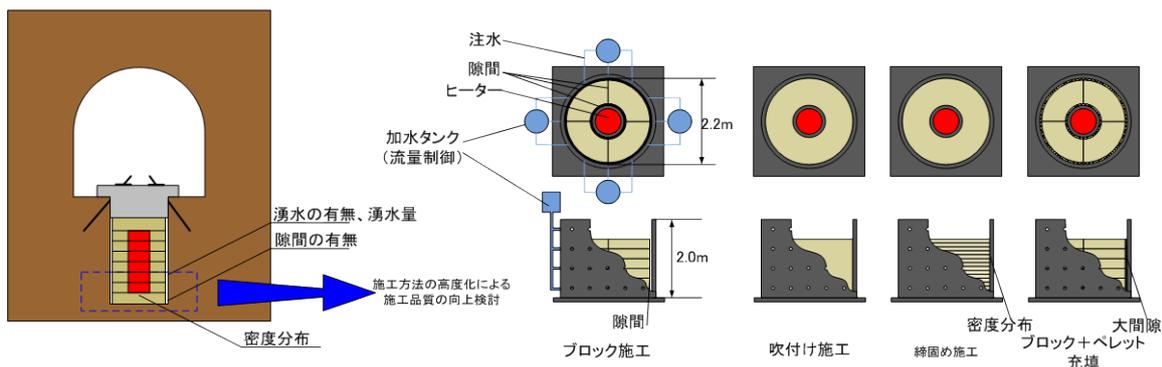


図 9.3.5-1 施工方法の高度化試験イメージ

1) 密度分布や隙間のない緩衝材施工方法の検討

吹付け工法による緩衝材の施工方法を図 9.3.5-2 に示すような工学規模リング型土槽に対して行う。この際に、緩衝材として許容される密度分布や隙間を満足する施工条件を求める。

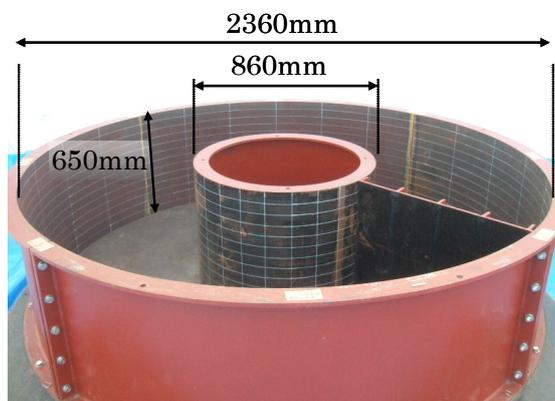


図 9.3.5-2 緩衝材施工試験工学規模リング型土槽

2) 湧水が施工方法及び影響検討

1)で定めた施工方法の下で、湧水が施工時からある場合を想定して、周囲から湧水が生じている状況で施工確認を行い、施工に対する湧水の影響を取得する。このことは施工が終了し処分施設を閉鎖させるまでは、地下水を低下させ緩衝材が湿潤しないように対策することに相当している。しかしながら、実際の状況を踏まえると、湧水を止めるためにはポンプで地下水を汲み上げて地下水位を低下させる必要があるが、建設作業期間中ずっと排水ポンプを稼働し続けることは現実的ではない。さらに、仮に湧水があった場合にも施工品質上問題がないことを示すデータがないことや、実際にどのくらいの湧水量まで緩衝材の施工が可能なのかは緩衝材の施工方法によって異なることが予想されることなどから、湧水量と施工方法をパラメータにした検討が必要である。

9.4 実規模施工確認試験

9.4.1 本検討の背景

放射性廃棄物地層処分施設における緩衝材の構築に関しては、転圧工法やブロック定置工法、吹付け工法等の施工技術に関する品質や歩掛り、コスト等を比較し、最も合理的な工法を採用することが重要となる。しかしながら、実際の施工環境を想定した上での施工性確認試験の実績は少なく、工法選定の根拠となるデータが不足していることが現状である。これらの課題に取り掛かる第一歩として、本検討では、先行的に吹付け施工技術に着目した施工性確認試験を実施した。本検討から得られた結果は、吹付け施工の更なる高度化に質するのみでなく、最終的な工法選定時における選択メニューの拡充にも期待できると考える。

9.4.2 平成 24 年度の湧水環境下における吹付け施工実験[4]

(1) 実験の目的及び概要

緩衝材の設計や品質管理、搬送・定置技術、長期性能予測等への反映を行うためには、緩衝材の施工方法により品質自体を向上させて、再冠水時に発生する現象（膨潤挙動、化学変質など）に及ぼす影響を低減させることも必要となる。そこで、本研究では、品質向上（均質で隙間を生じさせない施工）の可能性を有するベントナイト吹付け施工技術に着目し、実際の施工環境を想定した施工能力に関する知見の取得を行った。

既に、既往の研究において吹付け工法で施工した緩衝材の均質性が確認されていることから、本研究では、実際の処分施設で緩衝材を施工する場合を想定して、湧水がある処分孔を模擬した実規模のモールドで吹付け実験を行い、湧水環境下における施工性、および施工品質の確認を行う。なお、本研究では吹付け工法だけでなく、他の緩衝材施工方法についても同様に検討する計画であるが、平成 24 年度は吹付け工法に着目して検討を行った。

(2) 実験条件

本実験では、図 9.4.2-1 に示すように、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの青線で囲まれた箇所を模擬した実規模のモールド（外径 2360mm、内径 860mm、高さ 500mm）を 4 分割した領域に対して吹付け施工で緩衝材を施工した。モールドの側面には底面から 50、250、450mm の高さ（上段、中段、下段と称す）に 9 個の孔が周方向に均等に配置（図 9.4.2-2、図 9.4.2-3 参照）されている。また、モールドの底板と側面の間には、約 5mm のクリアランスが設けられている。これは、吹付け中に漏水が発生した場合、ただちに視認できること、また、モールド底面に溜まった湧水をモールド外部に排水することを目的としている。

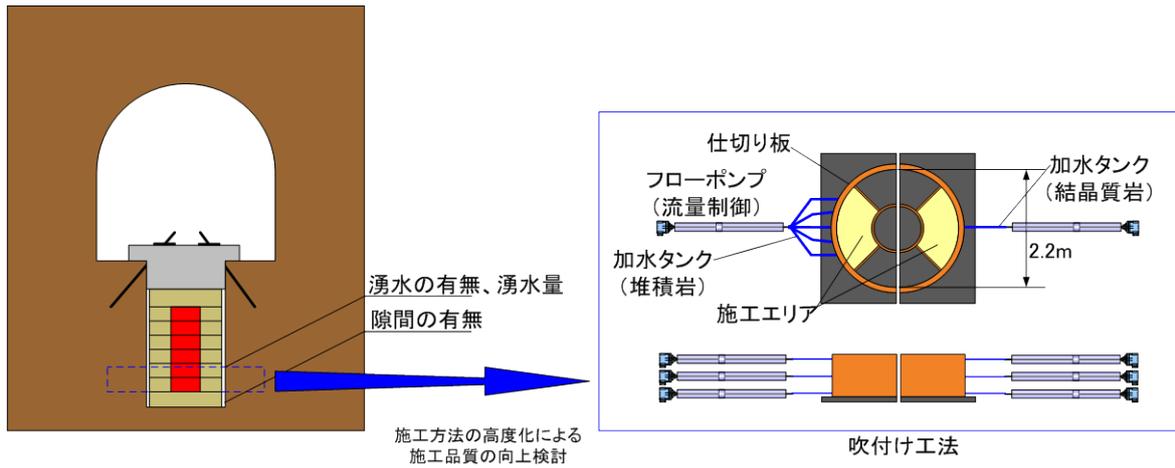


図 9.4.2-1 施工方法の実験イメージ

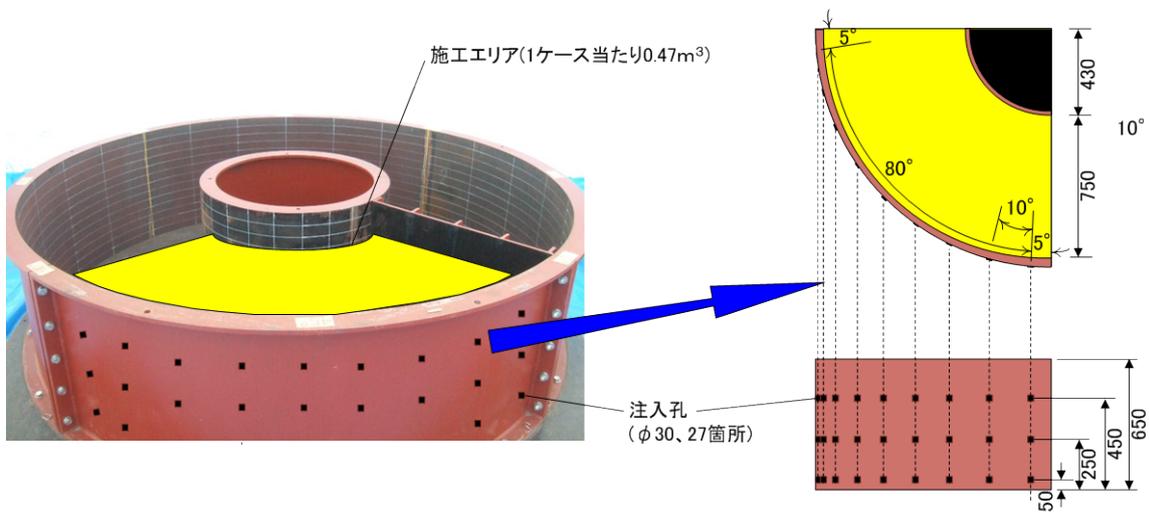
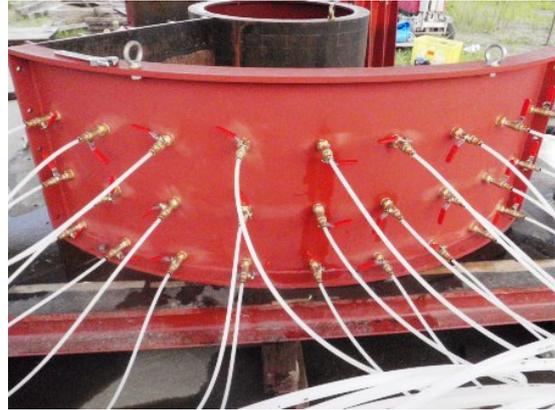


図 9.4.2-2 リング型モールドの諸元



全景



外壁側



内壁側



排水溝

図 9.4.2-3 リング型モールド

湧水環境を模擬するための装置として、フローポンプを図 9.4.2-4 に、ジャンクションパイプを図 9.4.2-5 に、シーケンサとモータドライバ、PC コンピュータで構成された制御機器を図 9.4.2-6 にそれぞれ示す。また、装置の系統図を図 9.4.2-7 に示す。本実験では、水道水をモールド内へ圧送するために 3 台のフローポンプを使用した。各フローポンプは、モールドの 3 高さ方向（上、中、下段）にそれぞれ対応しており、ポンプから圧送した水は、ジャンクションパイプを介して 9 方向に分岐され、モールドに設置された各孔から排水される。この際、流量の制御はシーケンサとモータドライバ×3、計測用 PC を用いて行った。また、各フローポンプの送水圧を計測するために、対応するジャンクションパイプに圧力計を設置した。



図 9.4.2-4 フローポンプ



図 9.4.2-5 ジャンクションパイプ



図 9.4.2-6 制御機器 (シーケンサ、モータドライバ、PC)

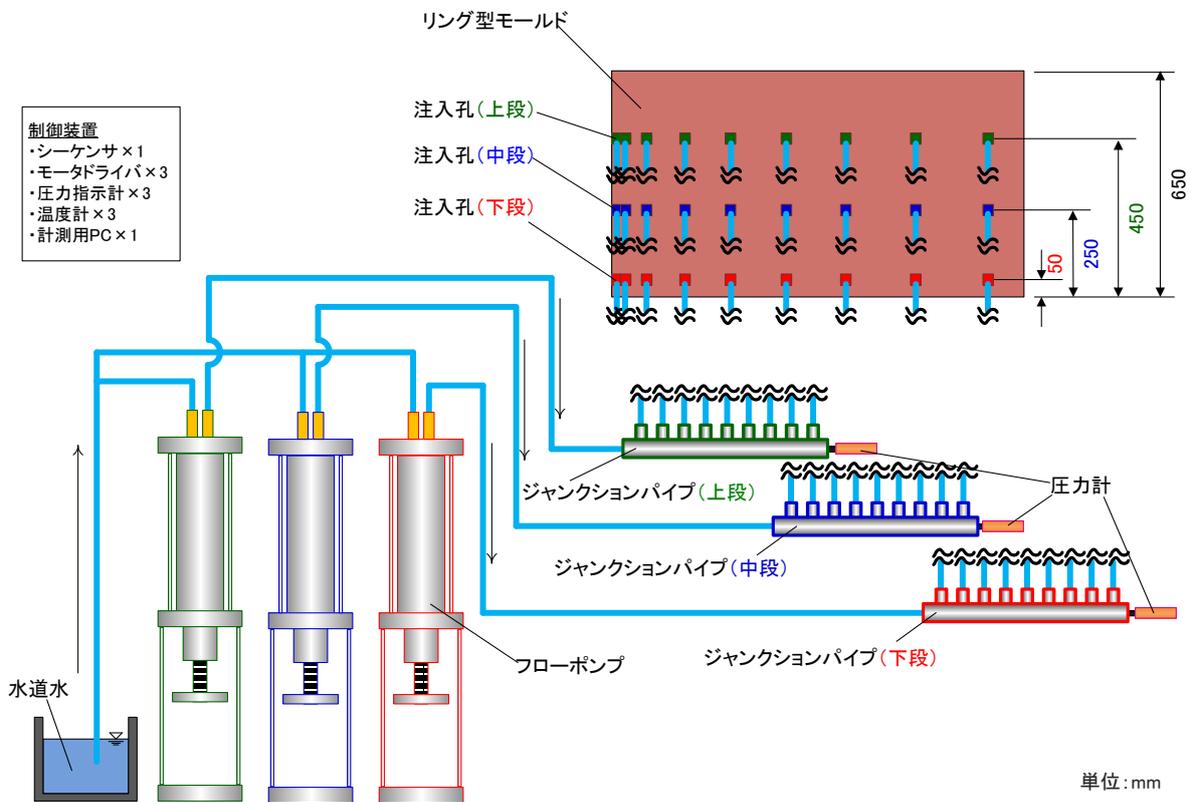


図 9.4.2-7 実験装置系統図 (Case1)

実験ケースを表 9.4.2-1 に示す。実験は、堆積岩を模擬した面状の湧水を想定し、全 27 箇所
の孔から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case1 と、結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を想定し、
3 箇所の孔から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case2、Case2 の湧水量を 0.01ℓ/min に変更した
Case3 の全 3 ケースを行った。

表 9.4.2-1 実験ケース

実験ケース	岩種	湧水条件	湧水箇所	湧水量
Case 1	堆積岩	面状湧水	27 箇所	0.1 ℓ/min (湧水孔 1 箇所当たり 0.1/27 ℓ/min) 面状湧水
Case 2	結晶質岩	噴水状湧水	3 箇所	0.1 ℓ/min (湧水孔 1 箇所当たり 0.1 /3 ℓ/min) 噴水状湧水
Case 3	結晶質岩	噴水状湧水	3 箇所	0.01 ℓ/min (湧水孔 1 箇所当たり 0.1 /3 ℓ/min) 噴水状湧水

(3) 吹付け方法

湧水環境下における吹付けでは、構築した施工部に湧水が接触することによる施工部の品質低下が問題となる。そのため、構築した施工部に湧水が極力接触しないような吹付け方法（主にノズルワーク）を行う必要がある。本実験で採用した吹付け方法について、Case1 の場合を図 9.4.2-8 に、Case2、3 の場合を図 9.4.2-9 にそれぞれ示す。Case1 における吹付（図 9.4.2-8 参照）けでは、仕切り壁側から鉛直縦向きに施工部を構築し、半径方向の孔を閉塞させながら吹付けを行う。これにより、構築した施工部と他の孔から発生する湧水の接触を抑制できる。次に、Case2 では、モールドの底盤から鉛直上方向に吹付けを行う。この際、吹付け圧を利用して、未閉塞孔からの湧水を吹き飛ばし、構築した施工部への接触を避ける。

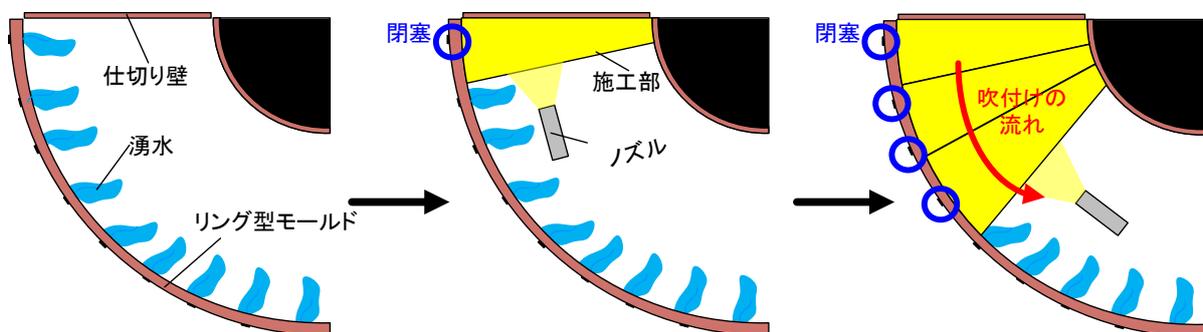


図 9.4.2-8 Case1 の吹付け方法（平面図）

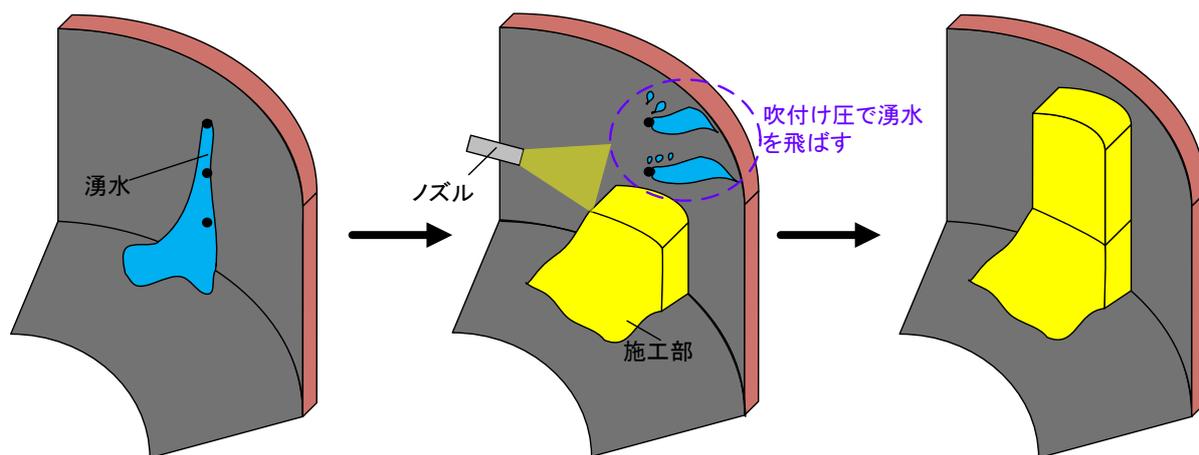


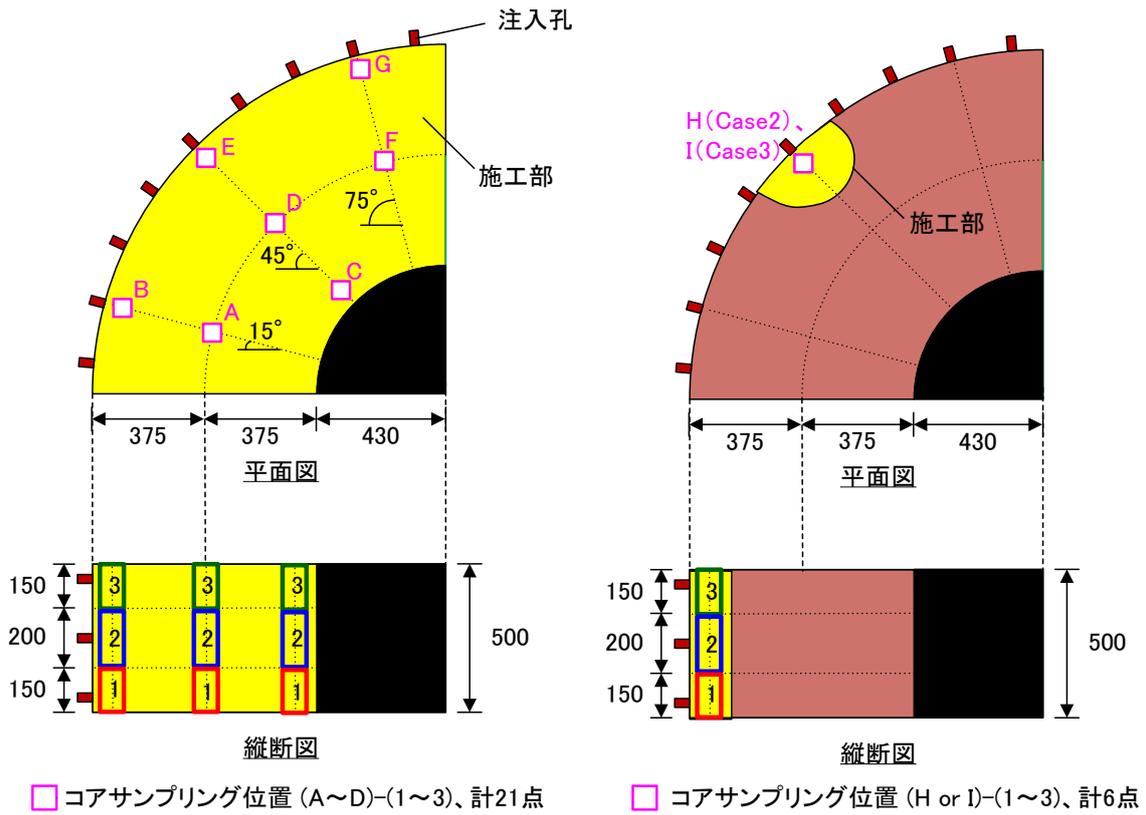
図 9.4.2-9 Case2 の吹付け方法

(4) 検討項目

本実験では、湧水環境下における吹付け施工の施工性、および施工品質の確認を目的としている。具体的な確認事項として、施工性に関しては下記を検討した。

- ・湧水環境下における吹付け施工の適用性の可否
- ・吹付け施工中における湧水圧力（送水圧）の変化

また、施工品質の確認では、吹付け終了後に施工部のブロックサンプルを行い、乾燥密度の深度分布および径方向分布を調べた。なお、乾燥密度は、アルキメデスの原理を利用したシリコンオイル比重法で計測した。図 9.4.2-10 にサンプリングの位置を示す。Case1 では、径方向に 7 箇所（A～D）、各箇所の深度方向 3 点（1～3）の全 21 箇所、Case2、3 においては径方向に 1 箇所（H または I）、深度方向 3 点（1～3）の各 3 箇所でサンプリングおよび密度計測を行った。



(a) Case1

(b) Case2、3

図 9.4.2-10 ブロックサンプル箇所

(5) 実験結果

1) Case1

Case1 における吹付けでは、堆積岩を模擬した面状の湧水環境を想定し、全 27 箇所の孔から $0.1\text{l}/\text{min}$ の湧水を生じさせた。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.4.2-11、図 9.4.2-12 に示す。図 9.4.2-12 から、堆積岩を模擬した面状の湧水環境においても、吹付け施工によって、ベントナイト系人工バリアが構築可能であることが確認できた。

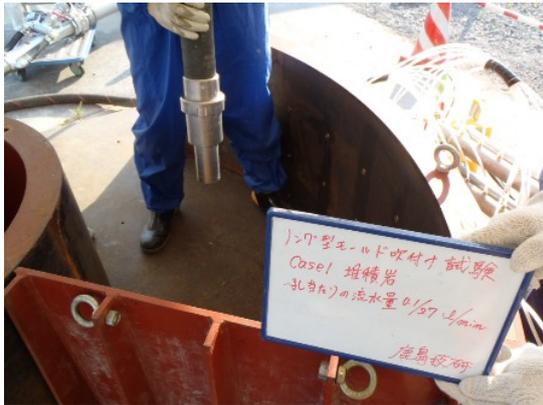


図 9.4.2-11 吹付け前の様子 (Case1)



図 9.4.2-12 吹付け後の施工部 (Case1)

a. 送水圧

図 9.4.2-13 に吹付け開始からの経過時間—送水圧—湧水流量の関係を示す。図中の送水圧は、合計湧水量が $0.1\text{l}/\text{min}$ を満足した時点をも 0kPa としている。また、赤、青、黄色で示した数値は、リング型モールドの湧水孔の箇所 (図 9.4.2-14 参照) であり、吹付け施工中に各孔が閉塞したタイミングを矢印で示している。図 9.4.2-13 から、各段のフローポンプの送水圧は、吹付け最中にピーク値を示すものの、吹付け終了後には 0kPa 程度に低下している。このため、全ての湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。そこで、吹付け終了後にリング型モールドの周囲を確認したところ、図 9.4.2-15 や図 9.4.2-16 に示すようなリング型モールドの側壁と底盤および仕切り壁のクリアランスからの漏水を確認した。これらのクリアランスは、モールドの組立てに起因するものや、湧水の排水機能を目的として生じた本実験特有の境界条件であるため、今回の結果をそのまま実施工に反映することは適切ではなく、実施工の境界条件をより忠実に再現した条件下での吹付け施工を行う必要がある。

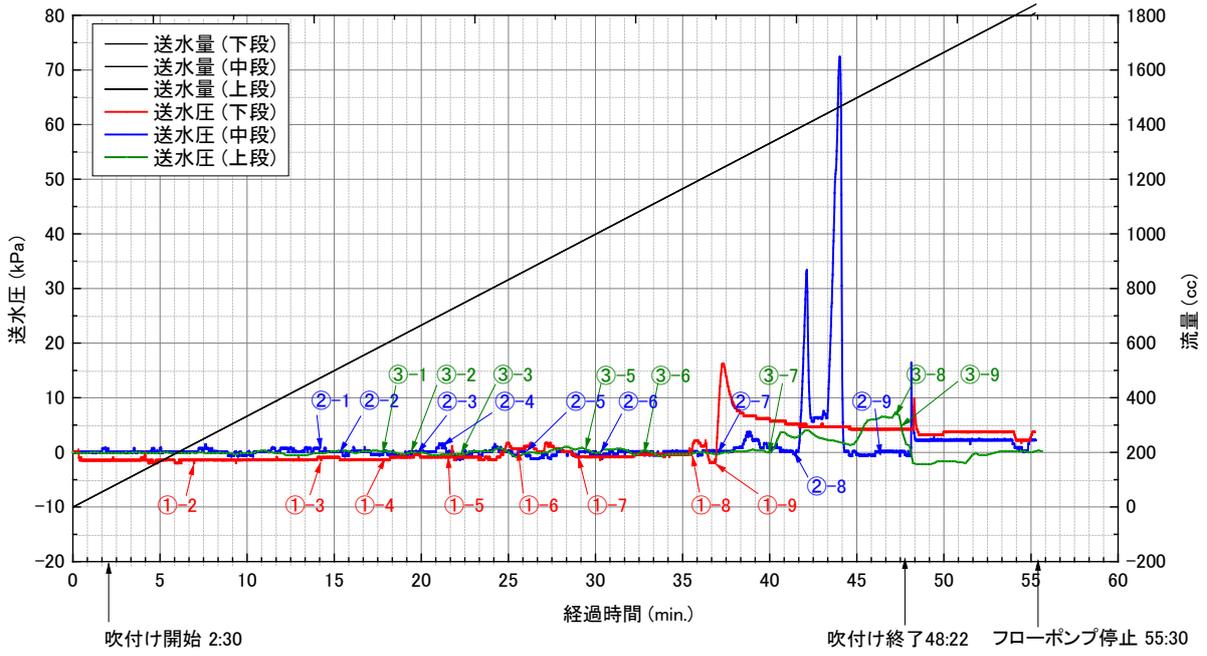


図 9.4.2-13 経過時間—送水圧—流量関係 (Case1)

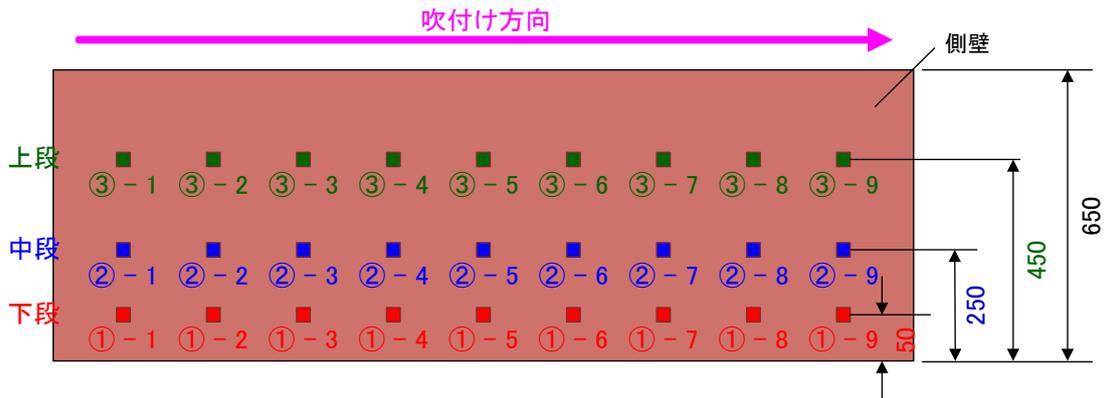


図 9.4.2-14 リング型モールドの湧水孔

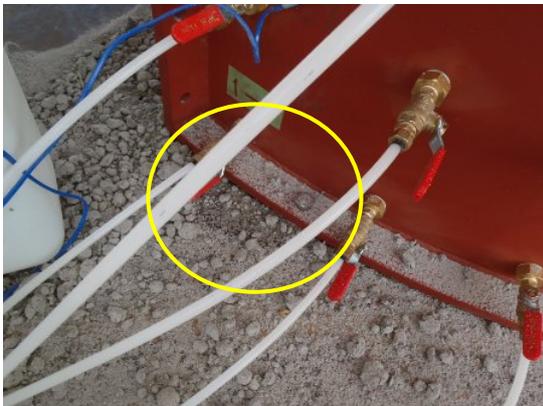


図 9.4.2-15 側壁と底盤の間からの水漏れ

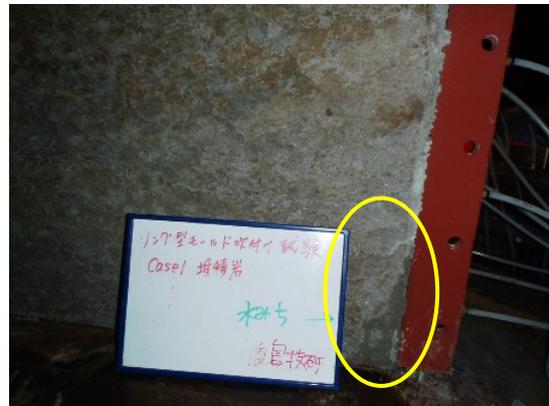


図 9.4.2-16 仕切り壁と側壁の間からの水漏れ

b. 施工部の密度分布

図 9.4.2-17 に施工部の密度分布を示す。図は、各湧水孔高さ ($h=50、250、450\text{mm}$) における施工部の密度分布を平面図で示している。各段の結果から、モールド中心から半径方向へ向かって密度が小さくなるのがわかる。特に、下段における密度の変化は大きく、モールド中心付近の密度は 1.7Mg/m^3 程度であるのに対して、側壁付近では 1.6Mg/m^3 の箇所が存在している。このことは、吹付け中に湧水が完全に止水されず、施工部を侵食し続けた結果と考える。

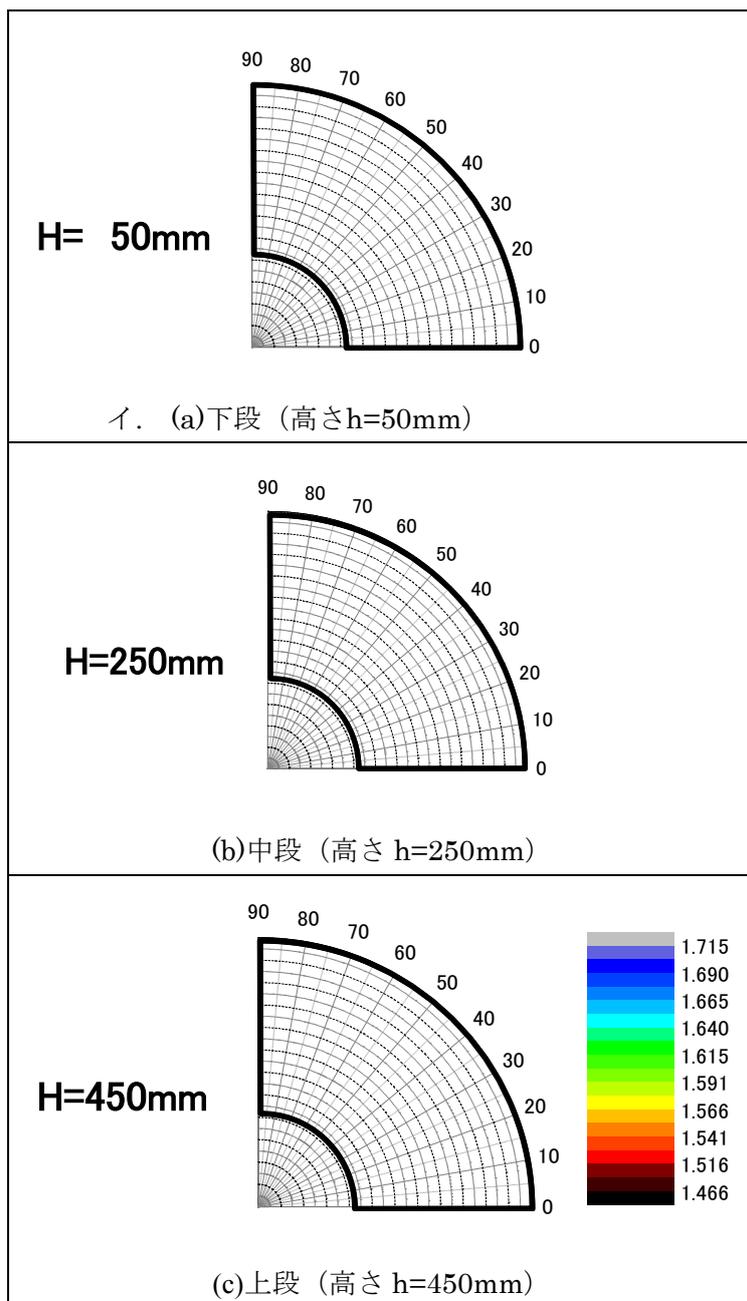


図 9.4.2-17 密度分布図 (Case1、平面図)

2) Case2

Case2 では、結晶質岩を模擬した噴水状の湧水環境を想定し、全3箇所から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせた。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.4.2-18、図 9.4.2-19 に示す。図 9.4.2-19 から、結晶質を模擬した噴水状の湧水環境においても、Case1 の堆積岩の場合と同様、吹付け施工によって、ベントナイト系人工バリアが構築可能であることが確認できた。



図 9.4.2-18 吹付け前の様子 (Case2)



図 9.4.2-19 吹付け後の施工部 (Case2)

a.送水圧

図 9.4.2-20 に吹付け開始からの経過時間—送水圧—湧水流量の関係を示す。図から、中段と下段のフローポンプの送水圧は、2.7分経過時にピーク値を示すものの、吹付け終了後には 0kPa 程度に低下していることから、Case1 と同様、湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。

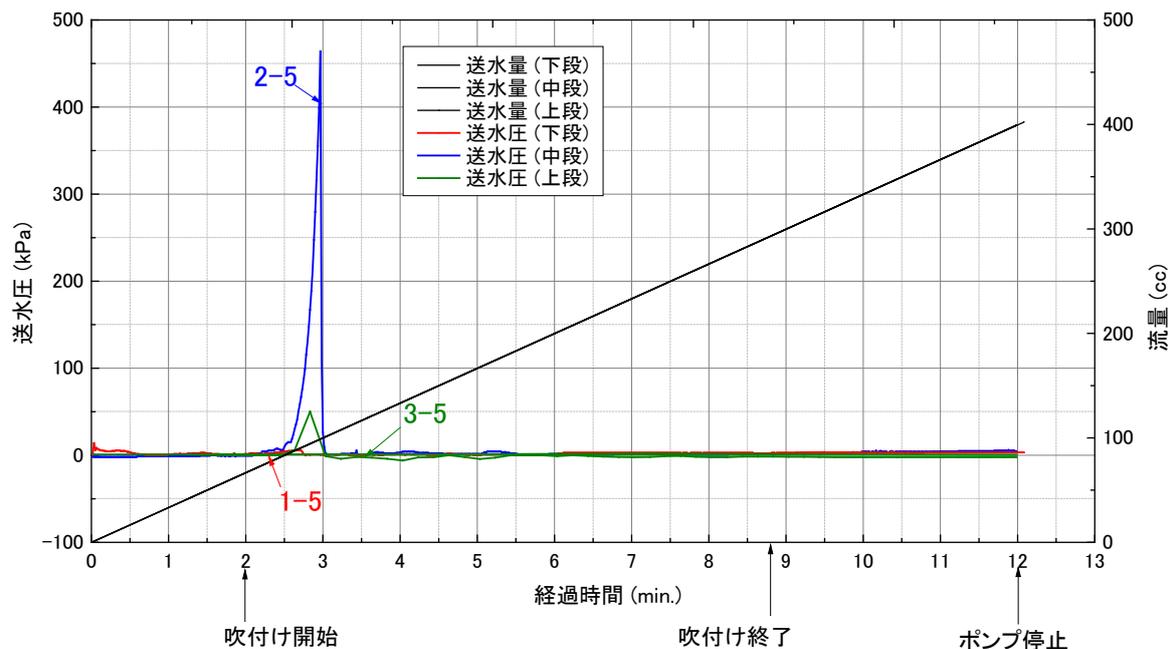


図 9.4.2-20 経過時間—送水圧—流量関係 (Case2)

b. 施工部の密度分布

図 9.4.2-21 に施工部の密度分布を示す。図は、施工部の高さ $h=50\sim 450\text{mm}$ までの密度分布を側面図で示している。図から、施工部の密度は $1.670\sim 1.680\text{ Mg/m}^3$ 程度でほぼ均一に分布していることがわかる。次に、密度サンプル時における各ブロックの界面付近（図 9.4.2-22 参照）を観察すると、中段の孔からの湧水が止水されておらず、施工部上に湧水の流れた経路が確認できる。

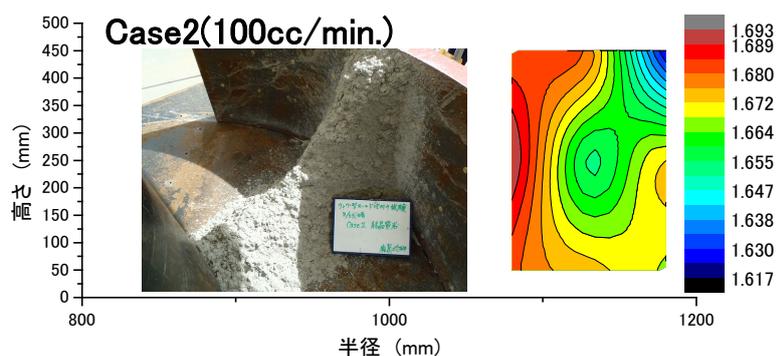


図 9.4.2-21 密度分布図 (Case2、側面図)

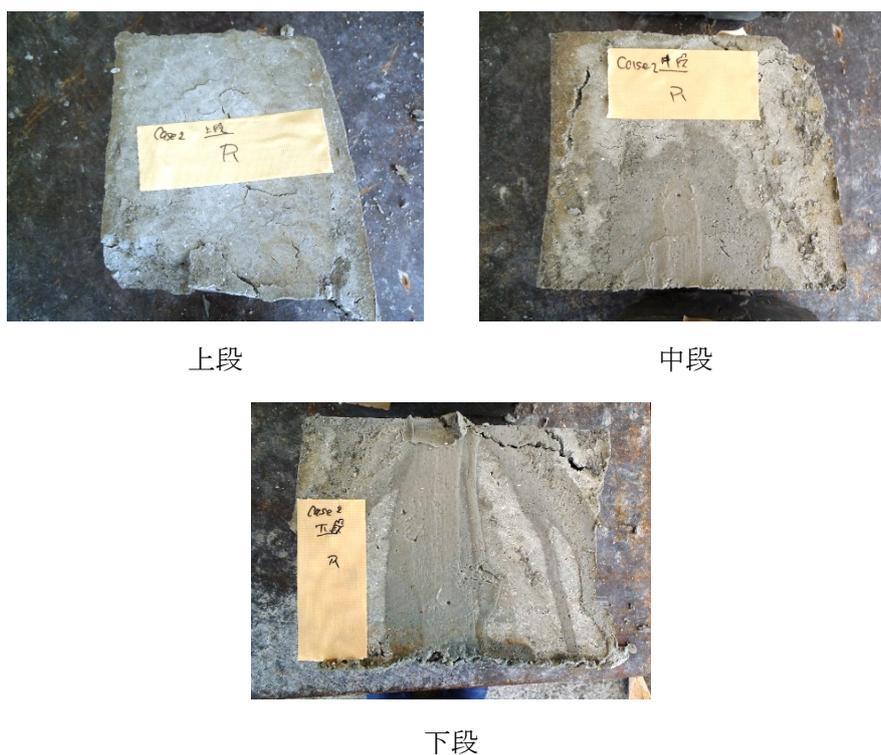


図 9.4.2-22 各段における施工部の側壁との界面部 (case2、モールド中心からの距離 1180mm)

3) Case3

Case2 において、湧水の止水が確認できなかったことから、Case3 では、湧水量を Case2 の 0.1 ℓ/min から 0.01ℓ/min に変更して吹付けを行った。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.4.2-23、図 9.4.2-24 に示す。



図 9.4.2-23 吹付け前の様子 (Case3)



図 9.4.2-24 吹付け後の施工部 (Case3)

a.送水圧

図 9.4.2-25 に吹付け開始からの経過時間—送水圧—湧水流量の関係を示す。図から、Case1、2 と同様、Case3 においても、吹付け終了後には送水圧が 0kPa 程度に低下していることから、湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。

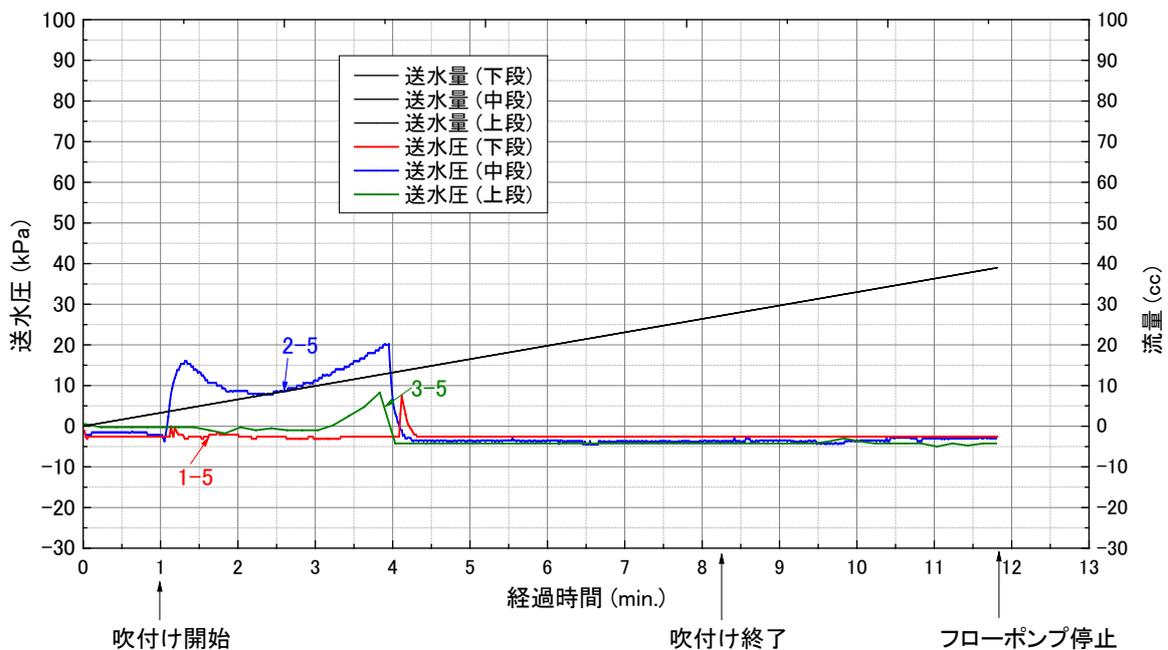


図 9.4.2-25 経過時間—送水圧—流量関係 (Case3)

b.施工部の密度分布

図 9.4.2-26 に施工部の密度分布を示す。図は、施工部の高さ $h=50\sim 450\text{mm}$ までの密度分布を側面図で示している。図から、Case2 と同様、Case3 における施工部の密度は $1.660\sim 1.680\text{Mg/m}^3$ であり、ほぼ均一に分布していることがわかる。密度サンプル時における各ブロックの界面（図 9.4.2-27 参照）を観察すると、下段の湧水孔からの湧水の流れが確認されたが、その量は Case2 より少ないことがわかる。

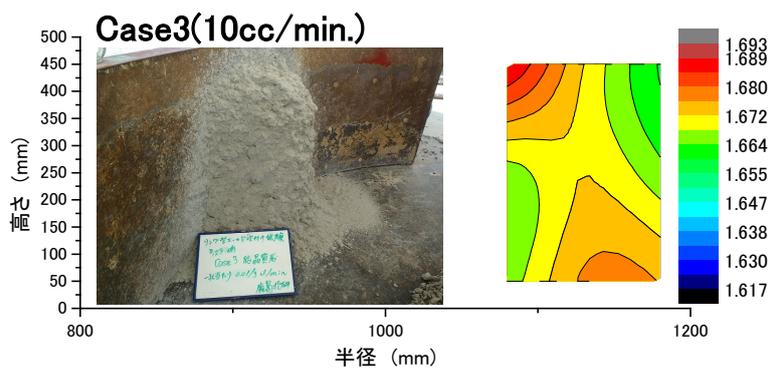


図 9.4.2-26 密度分布図 (Case2、側面図)

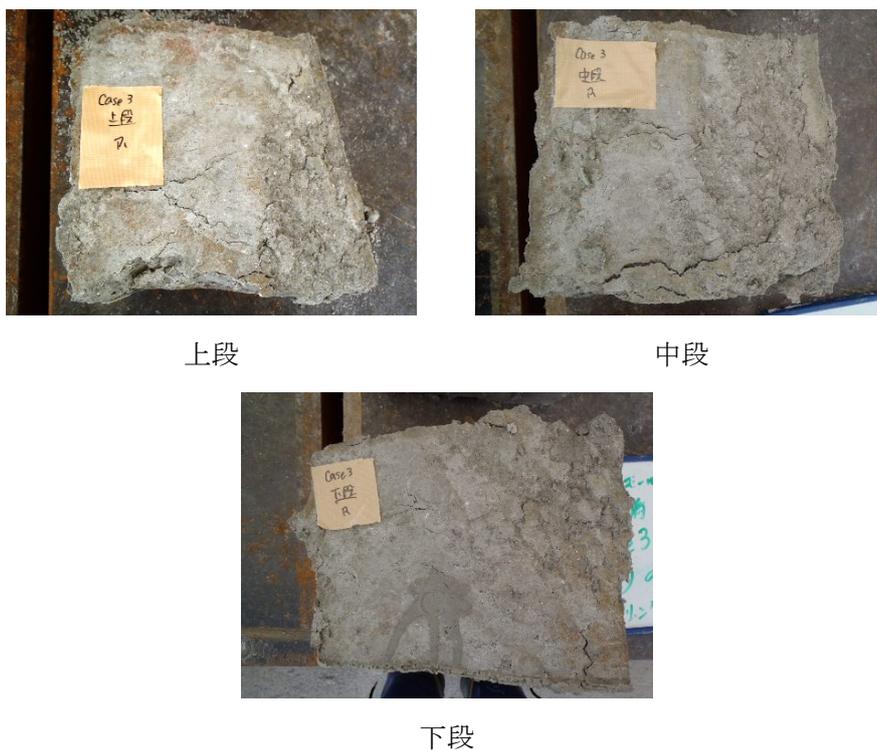


図 9.4.2-27 各段における施工部の側壁との界面部 (Case3、モールド中心からの距離 1180mm)

(6) まとめ

H24年度の湧水環境下における吹付け施工実験の結果を下記にまとめる。

- ▶ 吹付け施工は、湧水発生状況下においてもベントナイト系人工バリアを構築可能である。
- ▶ 現状の吹付け施工技術は、天然バリアからの湧水量が 0.1ℓ/min である場合、一時的に止水可能ではあるが、完全な止水は難しく、施工部に水みちが発生する。
- ▶ 本実験における吹付けエリアには、モールドの組立てや湧水の排水機能を目的として生じた特有の境界条件が設定されており、本実験結果をそのまま実施工に反映することは適切ではない。実施工の境界条件をより忠実に再現した条件下での吹付け施工を行う必要がある。

9.4.3 平成 25 年度の湧水環境下における吹付け施工実験

構築された緩衝材は、粘土プラグや天然バリアによって体積拘束下に置かれることが想定される。しかしながら、平成 24 年度の結果では、湧水の排水機能を目的として生じた特有の境界条件が設定されていたため、体積拘束された状態における緩衝材の膨潤効果による止水性の評価はできなかった。そこで、平成 25 年度の実施事項として、吹付け施工後の緩衝材を体積拘束した状態において、湧水の止水性を評価可能な実規模施工試験を行った。

本試験の検討フローを図 9.4.3-1 に示す。まず、前述の湧水影響評価試験と同様な実規模緩衝材の 1/4 分割したリングモールドに人工的に湧水を発生させ、湧水がある状況で緩衝材を施工し、体積拘束下にした (STEP1)。次に、体積拘束条件下にした緩衝材への人工給水を行い、十分に膨潤させる (STEP2)。この際、浸潤・膨潤状況は、アクリル製の上蓋越しに目視観察できる。最後に、再度、上蓋を外し、給水圧を増加させ、破過圧を計測する (STEP3)。

破過が確認されたら、その時点の供試体の状況に応じて、エロージョン試験や浸潤状況の確認のための解体を行う。

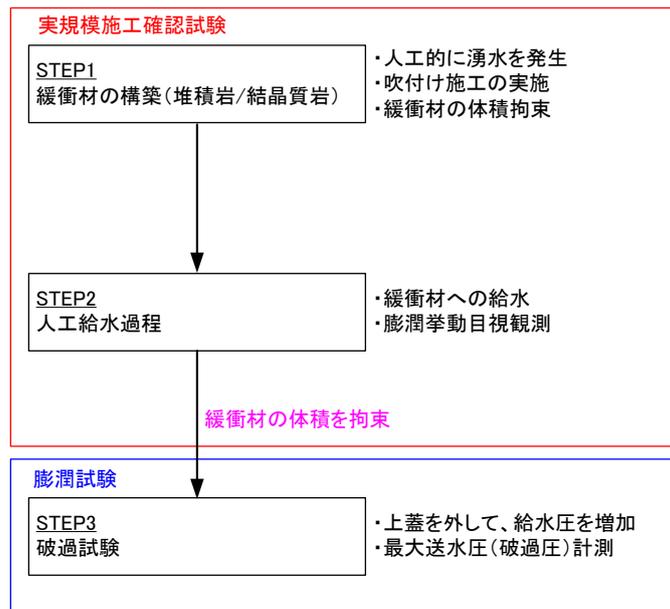


図 9.4.3-1 検討のフロー

(1) 実験条件

実験ケースを表 9.4.3-1 に示す。実験は、平成 24 年度の研究に倣い、堆積岩を模擬した面状の湧水を想定し、全 27 箇所の孔から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case1 と、結晶室岩を模擬した噴水状の湧水を想定し、3 箇所の孔から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case2 の計 2 ケースを行った。

表 9.4.3-1 実験ケース

試験ケース	使用材料	目標乾燥密度	想定岩種	湧水量	確認項目
Case1	珪砂混じりベントナイト (Na 型ベントナイトと珪砂を質量割合 7:3 で混合)	1.6Mg/m ³ 程度	堆積岩	流量一定条件 湧水孔(27 箇所)当たり 0.1ℓ/min 面状湧水	施工性 施工品質 止水性
Case2			結晶質岩	流量一定条件 湧水孔(3 箇所)当たり 0.1ℓ/min 面状湧水	

吹付けに使用する材料は、Na 型ベントナイト (クニミネ工業産クニゲル V1) に珪砂 (三河珪砂 V3 号とアルバニー珪砂 5 号を質量割合 1:1 で混合) を質量割合 7:3 で混合した珪砂混じりベントナイトである。この吹付け材料は、図 9.4.3-2、図 9.4.3-3 に示すアイリッヒミキサー (アイリッヒ社製 DEV22、容量 2250ℓ) を用いた水添加混合方式によって、仕上がり含水比が $w=20 \pm 2\%$ の範囲に収まるように作製した。このアイリッヒミキサーは、回転する容器 (パン) に対して、逆方向に回転するアジテータと上下方向の混合に特化した機能を持つ鋤型の回転ブレード (スター) によって、材料への高い剪断力と複雑な流れおよび速度差を発生させ、緻密かつ均一な混合を可能とする混合機械である。

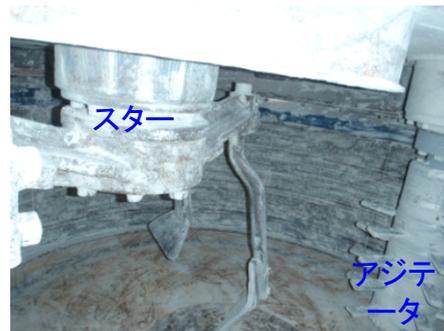


図 9.4.3-2 アイリッヒミキサーの外観

図 9.4.3-3 アイリッヒミキサーの攪拌翼

水添加混合方式の作業フローとアイリッヒミキサーの運転条件を図 9.4.3-4、表 9.4.3-2 にそれぞれ示す。吹付け材料の混合・含水比調整は、約 500kg を 1 バッチとして、計 6 バッチ実施した。各製造バッチにおいて、混練後の材料から試料を 3 点採取し、平均含水比が管理目標値 ($w=20\pm 2\%$) を満足していることを確認する。平均含水比が管理目標値から外れた場合は、追加で試料を 3 点採取し、計 6 試料の平均含水比が管理目標値を満足していることを確認する。

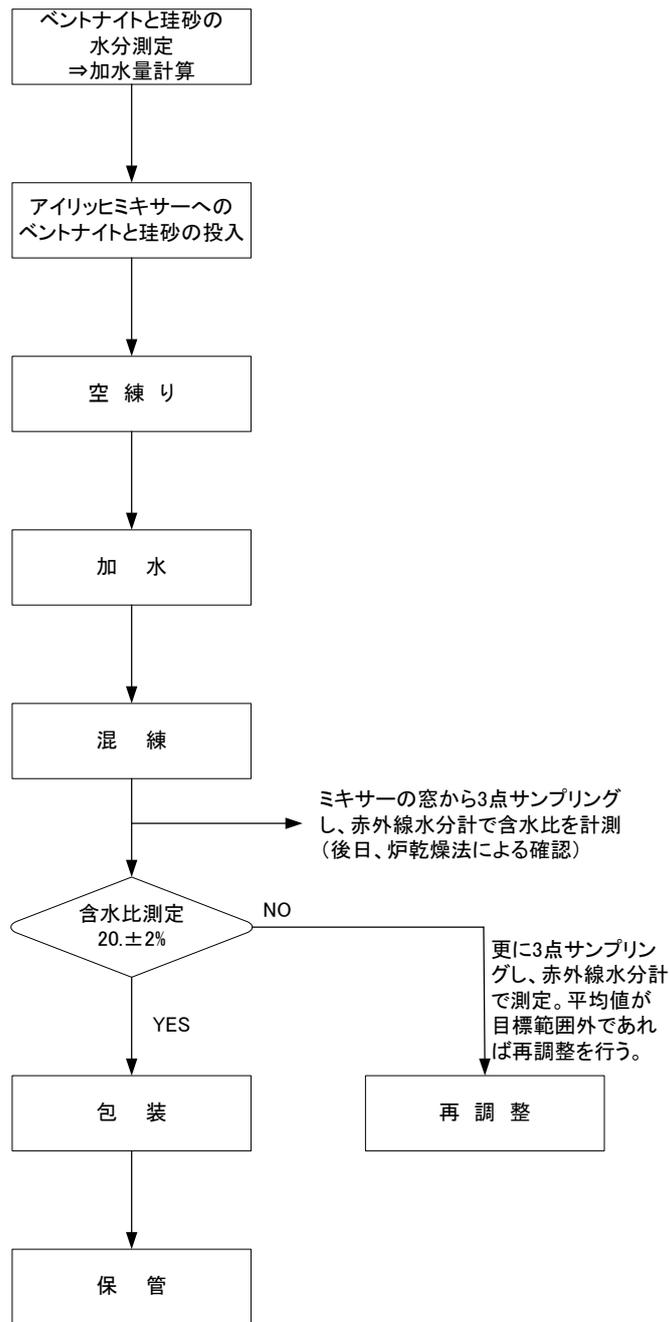


図 9.4.3-4 水添加混合方式の作業フロー

表 9.4.3-2 アイリッヒミキサーの運転条件

空練り時間	1分	
加水時間	約5分	練りながら、30ℓ/分で加水
混練時間	3分	
パン※回転数	8.6R/M	※容器
スター※※回転数	35.6R/M	※※鋤型の回転アーム
アジテータ※※※回転数	683R/M	※※※ミキシング部位

※R/M：回転数/分

調整後の含水比が管理目標値を外れたバッチに関しては、下記の再調整作業を行う。

【低含水比 ($w < 18\%$) に外れた場合】

含水比測定値から、管理目標中央値 $w=20\%$ まで含水比を上げるのに必要な水量を計算し、ミキサ内に低含水比側の材料を投入した後、計量した水を添加し再度ミキサで練混ぜを実施する。

【高含水比 ($w > 22\%$) に外れた場合】

含水比測定値から、管理目標中央値 $w=20\%$ まで含水比を下げるのに必要な珪砂混じりベントナイト（未調整品）の量を計算し、高含水比側の材料の入ったフレコンバック内に計量した未調整品を添加した後、まとめてホッパーより材料をミキサ内に投入し、再度ミキサで練混ぜを実施する。過剰分の調整に必要な添加量は未調整品の調整前含水比から設定する。

吹付け材料の含水比測定は、以下の通り実施した。

①混練作業中

簡易な含水比測定を可能とする赤外線水分装置(ケット化学研究所社製 FD230、図 9.4.3-5、図 9.4.3-6 参照)を用いて、製造バッチ毎に約 150g の試料を 3 点採取して材料の含水比が管理範囲内 ($w=20\pm 2\%$) にあることを確認した。赤外線水分装置の乾燥温度は 105°C とし、乾燥後の材料の質量は変動幅が 0.05%以内になることを確認した後に測定した。



図 9.4.3-5 赤外線水分計への試料投入



図 9.4.3-6 含水比計測 (3 点/バッチ)

②混練終了時

①で含水比を計測した試料を用いて、炉乾燥法[12]による含水比測定を行い、赤外線水分計の測定精度を確認した。

①、②で実施した含水比測定の結果とその比較を表 9.4.3-3、図 9.4.3-7 にそれぞれ示す。図 9.4.3-7 から、①、②の含水比はほぼ同様の値であり、管理基準も満足していることを確認したため、実規模施工確認試験の吹付け材料として使用した。

表 9.4.3-3 含水比測定結果

	バッチ					
	1	2	3	4	5	6
①混練中(近赤外線水分計)	19.0	20.3	20.0	19.8	20.5	20.2
②混練後(炉乾燥法)	19.3	20.4	20.2	20.1	20.2	20.3

単位：%

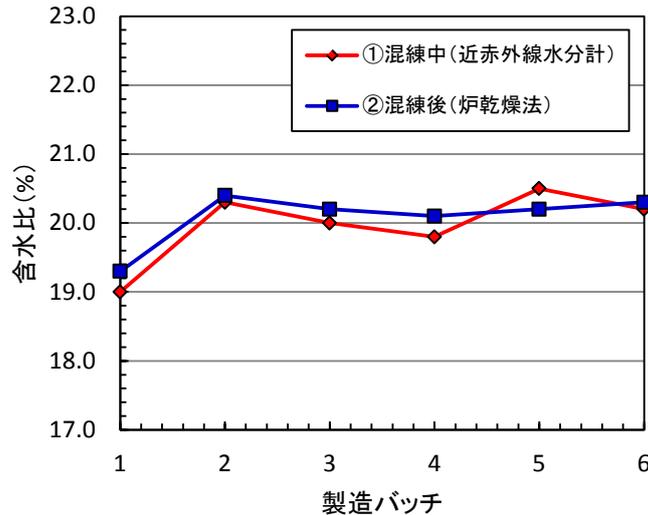


図 9.4.3-7 近赤外線水分計と炉乾燥法による含水比の測定結果

本実験では、図 9.4.3-8 に示す HLW 地層処分 の縦置きレイアウトを模擬した実規模のモールド (外径 2360mm、内径 860mm、高さ 500mm) を 4 分割した領域に対して、吹付け施工で緩衝材を施工した。このモールドの側面には、平成 24 年度と同様、底板から 50、250、450mm の高さ (上段、中段、下段と称す) に 9 個の孔が周方向に均等に配置されている。モールドの底板と側面は剛結されており (図 9.4.3-9 参照)、吹付けの進捗に伴って、仕切り板を設置した (図 9.4.3-10 参照)。また、吹付け終了後には、モールドの上面に緩衝材を目視で確認するための透明アクリル製の蓋と緩衝材の膨潤圧に十分耐える強度を持った鋼製蓋を取り付けて緩衝材の体積を拘束した。

実規模モールドの諸元を図 9.4.3-11、図 9.4.3-12、図 9.4.3-13、図 9.4.3-14 にそれぞれ示す。



図 9.4.3-8 実規模 1/4 リングモールド外観



図 9.4.3-9 底板と側壁の剛結箇所

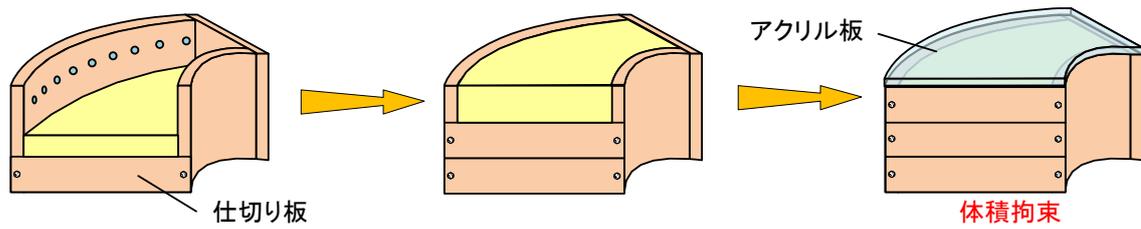


図 9.4.3-10 実規模 1/4 リングモールド組立順序

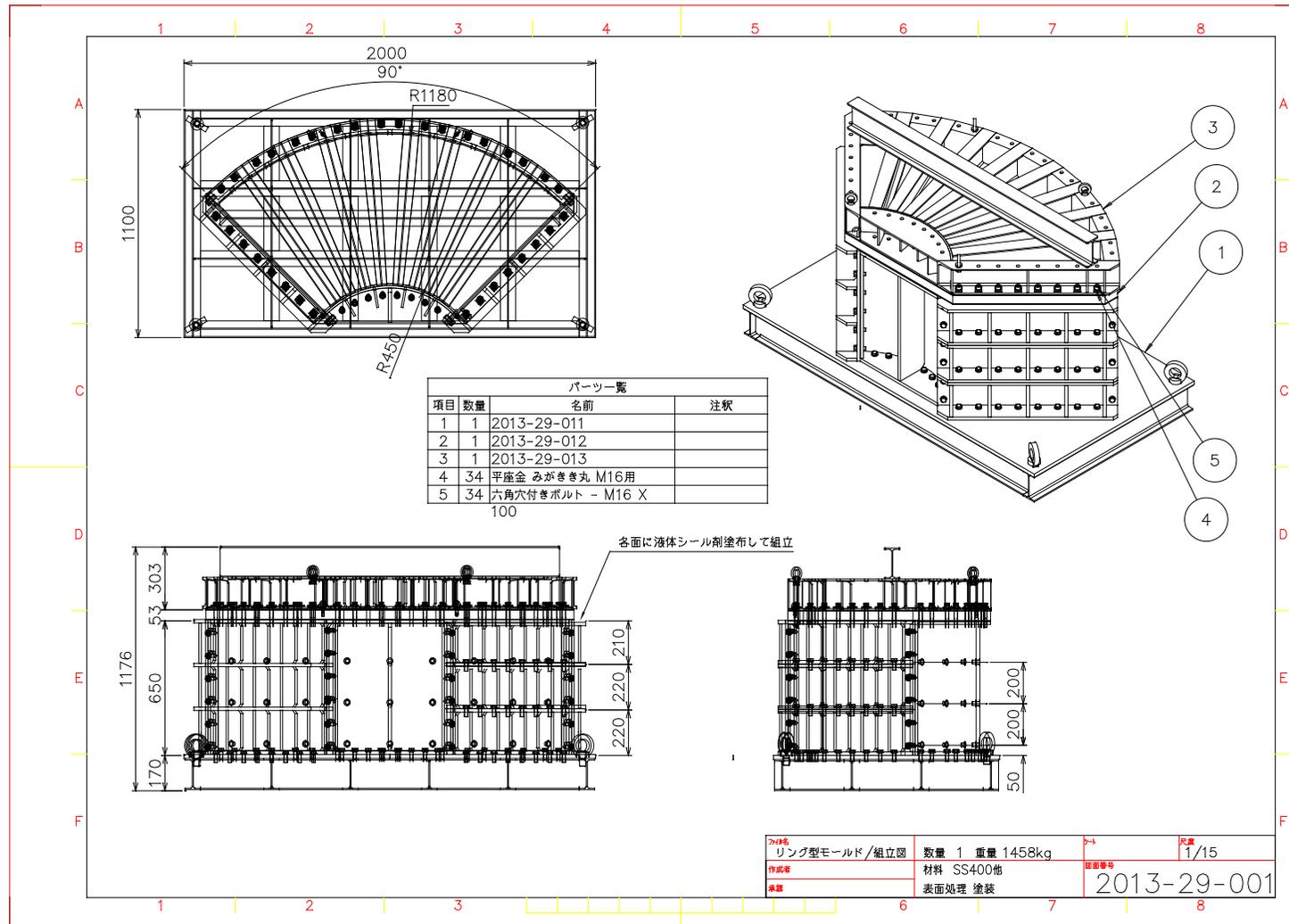


図 9.4.3-11 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)

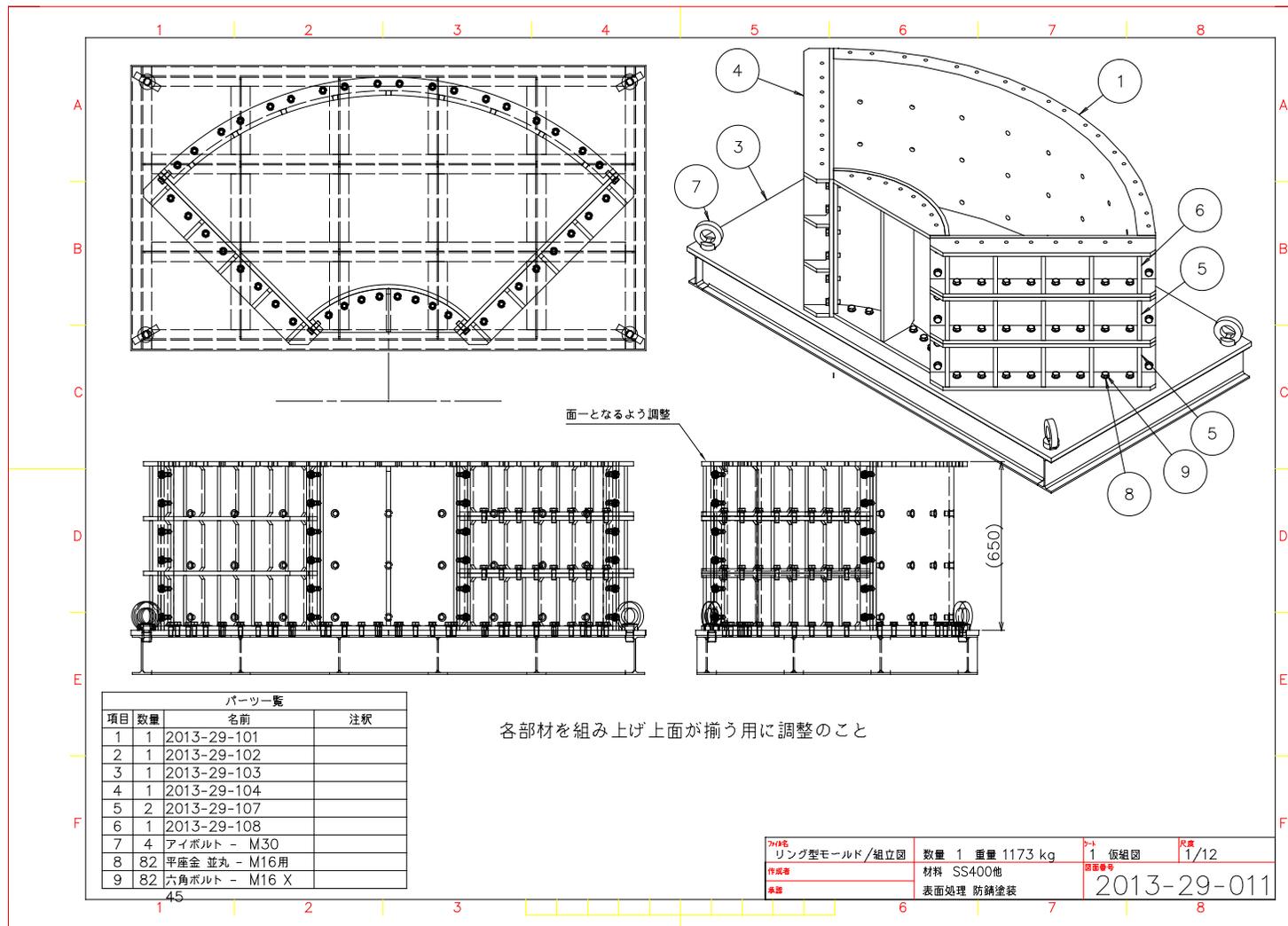


図 9.4.3-12 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)

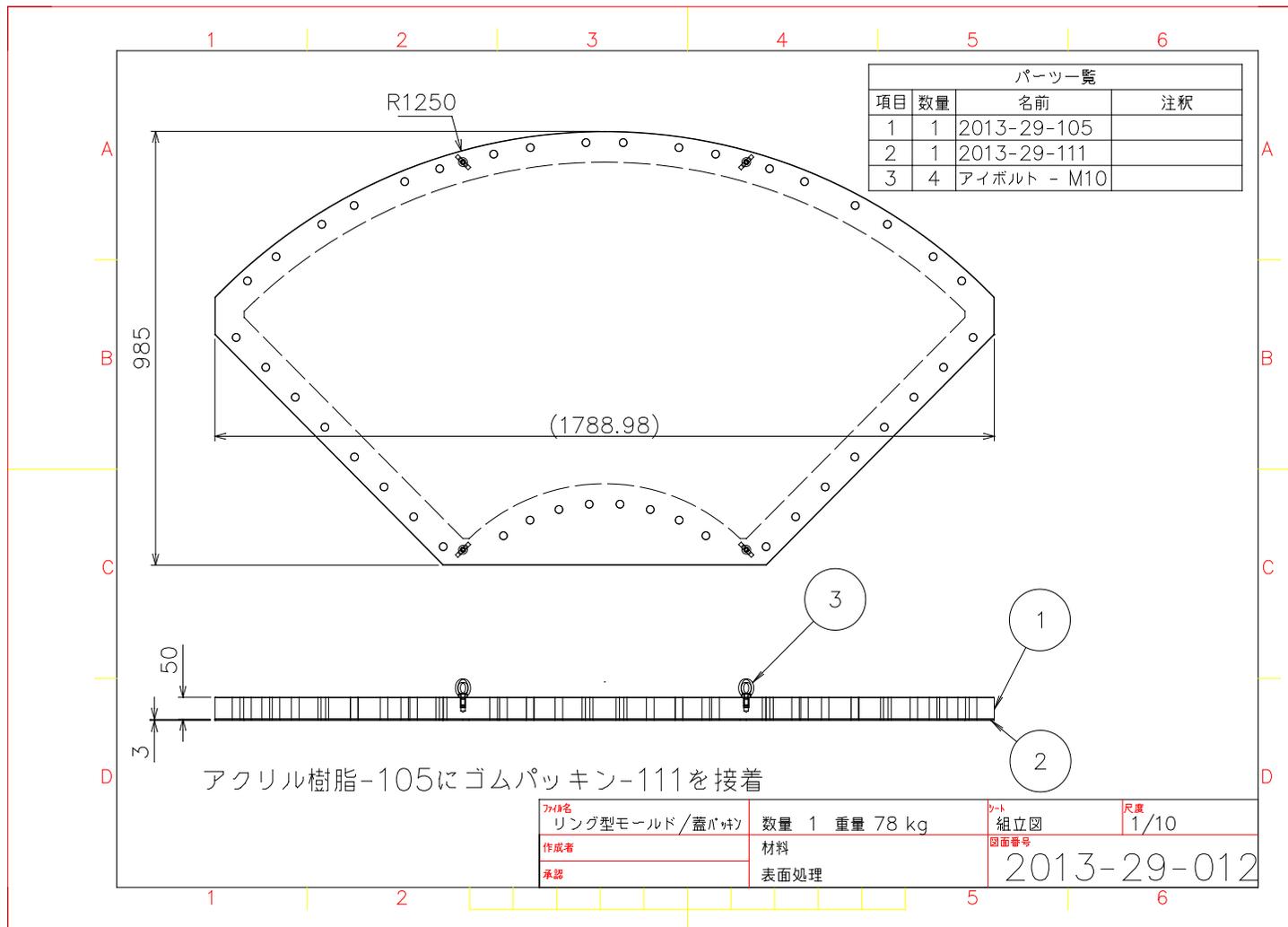


図 9.4.3-13 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (アクリル蓋)

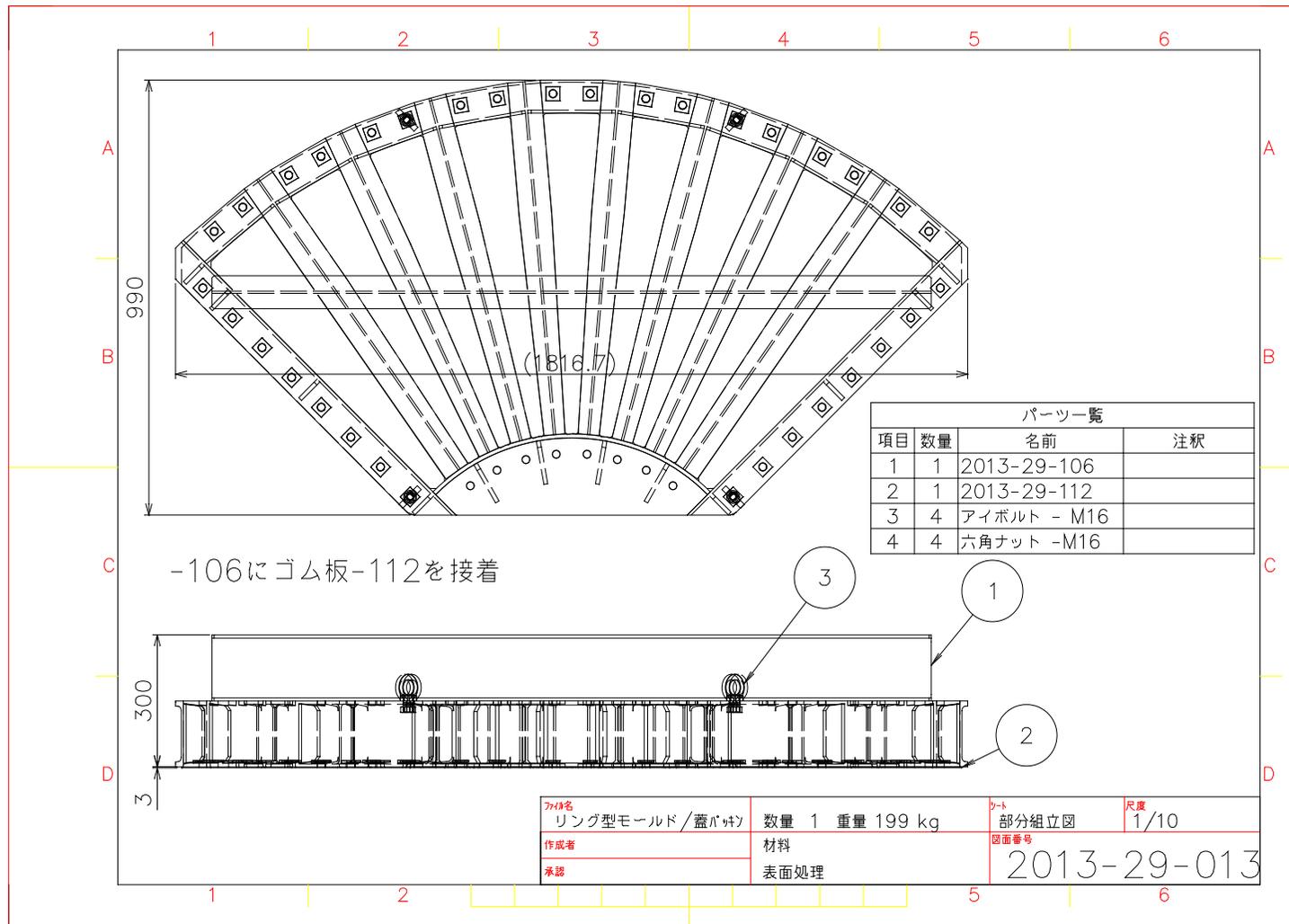


図 9.4.3-14 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (鋼製蓋)

実規模 1/4 リングモールドは、金属面と金属面のシールおよび金属面とゴム板やアクリル蓋のシールによって止水する構造になっているが、これらの接触面は直交する箇所が多く、O リング等によるシールが期待できない恐れがあるため、図 9.4.3-15、図 9.4.3-16 に示す液状ガスケット (ThreeBond 1121) をシーリング材として使用した。表 9.4.3-4 に液状ガスケットの諸元を示す。

この液状ガスケットは、シリコンコーキング等の一般止水材よりも耐圧性が高く、非硬化性で変形に対する追従性に優れており、温度変化に対してシール性が低下し難いことが特徴である。



図 9.4.3-15 液状ガスケット



図 9.4.3-16 塗布の様子

表 9.4.3-4 液状ガスケットの諸元

主成分	変性エステル系樹脂	
外観	ペースト状	目視
色相	灰色	目視
粘度	300000 mPa・s	25°C・BH 粘度計
比重	1.45	25°C・比重カップ
引火点	203°C	
腐食性	なし	
溶剤	無溶剤	
耐圧性	90kgf/cm ²	室温
	70kgf/cm ²	80°C

湧水環境を模擬するための装置は平成 24 年度と同様、フローポンプ (図 9.4.3-17 参照) とジャンクションパイプ (図 9.4.3-18 参照)、制御機器 (シーケンサとモータドライバ、PC コンピュータで構成。図 9.4.3-19 参照) を用いた。装置の系統図 (Case1 の場合) を図 9.4.3-20 に示す。平成 25 年度の実験では、平成 24 年度の仕様 (図 9.4.2-7 参照) とは異なり、3 本のジャンクションパイプを連結した。これによって、フローポンプとモールド側壁の上・中・下段に

設置された各湧水孔との水頭差に変化が生じ、各段における湧水孔からの流量が必ずしも同一にならない（全体流量は一定）恐れがあるが、この流量の違いは無視してよい程小さいため、本実験ではこの影響に関する検討は省略した。



図 9.4.3-17 フローポンプ



図 9.4.3-18 ジャンクションパイプ

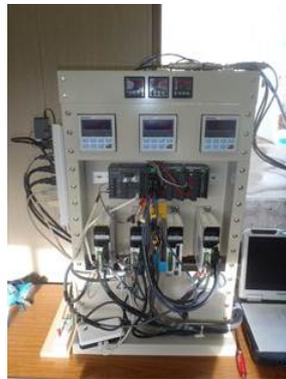


図 9.4.3-19 制御機器（シーケンサ、モータドライバ、PC）

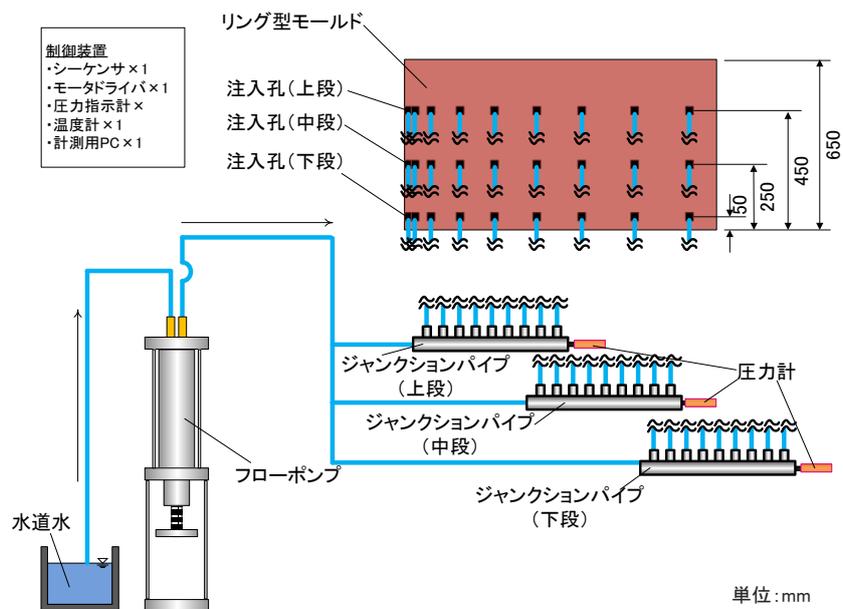


図 9.4.3-20 実験装置系統図（Case1 の場合）

(2) 吹付け方法

湧水環境下における吹付け方法に関しては、平成 24 年度と同じ方法（図 9.4.3-21）を採用した。この吹付け方法は、仕切り壁側から鉛直向きに施工部を構築し、半径方向の孔を閉塞させながら吹付けを行うものである。これにより、構築した施工部と他の孔から発生する湧水の接触を極力減らすことが可能であり、緩衝材の品質低下を抑制できる。

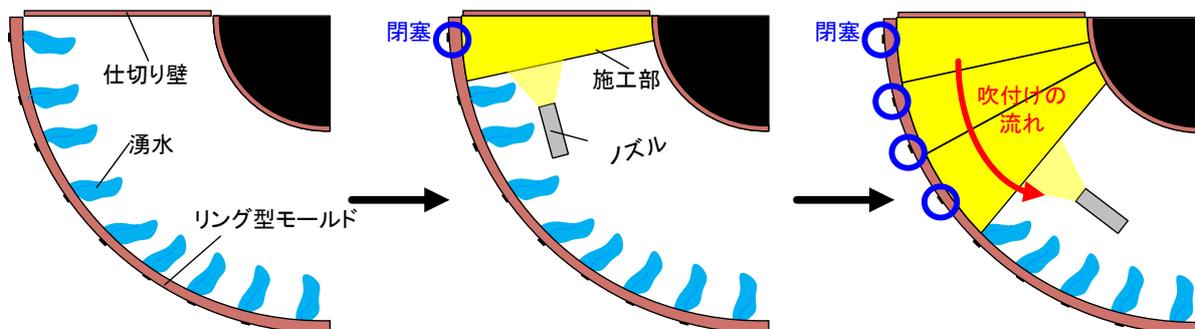


図 9.4.3-21 吹付け方法（平面図、図 9.4.2-8 を再掲）

(3) 実験結果【STEP1】

想定岩種を堆積岩とした Case1 における経過時間－送水量－流量の関係と各イベントの状況を図 9.4.3-22 と表 9.4.3-5 に示す。図 9.4.3-22 から、吹付け開始から約 100 分経過後（吹付け終了時。表 9.4.3-5 の⑤参照）において、送水圧が 150kPa 程度まで急激に上昇し、その後、25kPa 程度まで緩やかに低下した（図 9.4.3-22 紫矢印参照）。この時の緩衝材の状態を観察すると、モールド側壁付近の緩衝材天端部からの漏水が確認された（表 9.4.3-5 の⑥参照）。この漏水箇所は、緩衝材の最終吹付け部に相当し、本実験が 0.10/min の流量制御条件であることを考慮すると、既に閉塞された送水ノズルと比較して、未閉塞の送水ノズルからの送水圧力が高くなる場所である。これにより、緩衝材内部にエロージョンが発生し、送水ノズルから拘束圧の小さい緩衝材天端部にかけて水みちが発生したものと考えられる。

以上のことから、平成 24 年度の試験結果と同様、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることを再確認した。

吹付け終了後には、緩衝材の上端面を整形し、アクリル蓋と鋼製蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が 200kPa 程度まで上昇したことを確認し、Case1 の実規模吹付け試験を終了した。

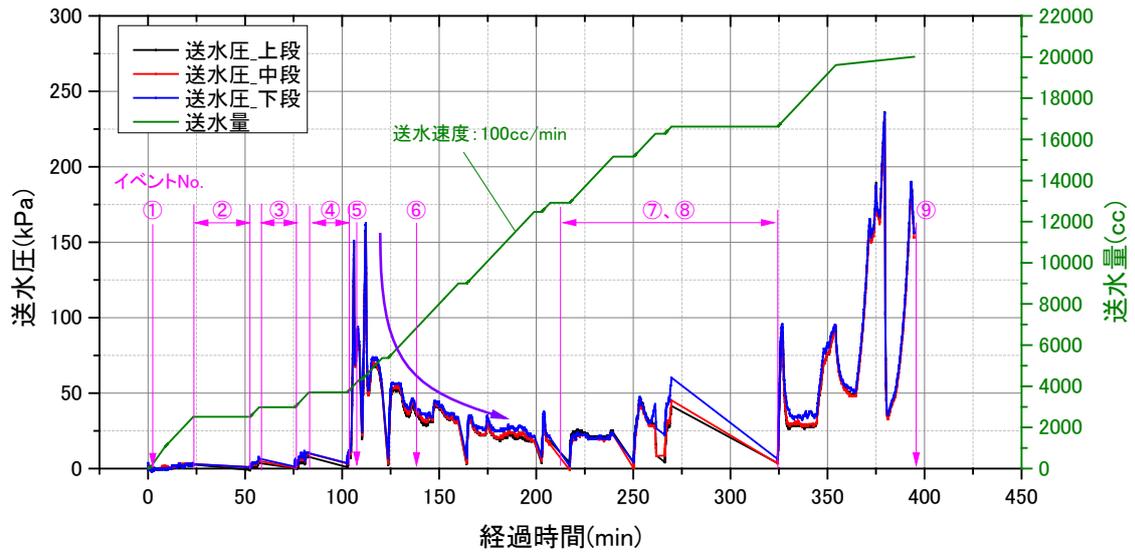
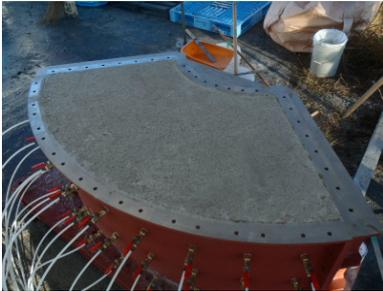


図 9.4.3-22 経過時間—送水量—流量関係【Case1 堆積岩】

表 9.4.3-5 各イベントの状況【Case1 堆積岩】

① 吹付け開始	② 側壁 1 段目設置 (吹付け、送水停止)	③ 側壁 2 段目設置 (吹付け、送水停止)
		
④ 側壁 3 段目設置 (吹付け、送水停止)	⑤ 吹付け完了	⑥ 水みちの確認
		
⑦ 上端面の整形	⑧ 上蓋の設置	⑨ 送水開始、送水圧上昇の確認
		

次に、想定岩種を結晶質岩とした Case2 の場合を図 9.4.3-23 と表 9.4.3-6 にそれぞれ示す。図 9.4.3-22、図 9.4.3-23 から、吹付け開始から約 55 分経過後（2 段目の側壁設置時。表 9.4.3-6 の③参照）において、送水圧が 275kPa 程度を示した後、25kPa 程度まで低下した（図 9.4.3-23 紫矢印参照）。この時の緩衝材の状態を観察すると、3 本の送水ノズル直上付近の緩衝材天端部から漏水が確認された（表 9.4.3-6 の⑥参照）。このことから、平成 24 年度や Case1 の結果と同様、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることを再確認した。

吹付け施工終了後には、緩衝材の上端面を整形し、モールドの上蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。

吹付け終了後には、緩衝材の上端面を整形し、アクリル蓋と鋼製蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が 200kPa 程度まで上昇したことを確認し、Case2 の実規模吹付け試験を終了した。

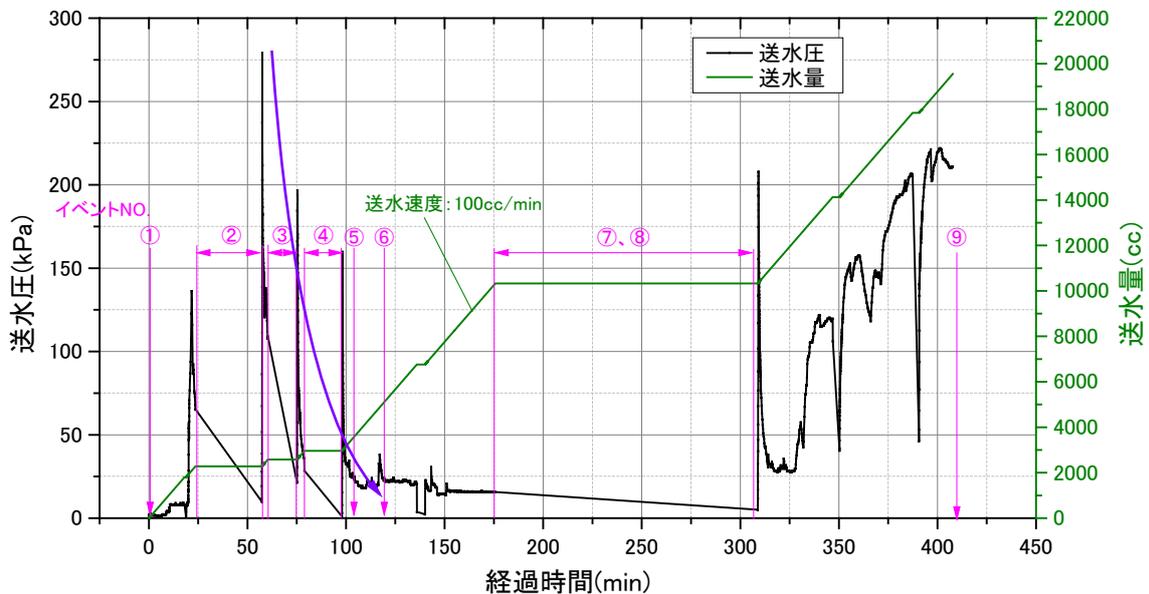


図 9.4.3-23 経過時間—送水量—流量関係【Case2 結晶質岩】

表 9.4.3-6 各イベントの状況【Case2 結晶質岩】

① 吹付け開始	② 側壁 1 段目設置 (吹付け、送水停止)	③ 側壁 2 段目設置 (吹付け、送水停止)
		
④ 側壁 3 段目設置 (吹付け、送水停止)	⑤ 吹付け完了	⑥ 水みちの確認
		
⑦ 上端面の整形	⑧ 上蓋の設置	⑨ 送水開始、送水圧上昇の確認
		 緩衝材の天端と上蓋間 における湧水の移動状況

表 9.4.3-7 と図 9.4.3-24 に、緩衝材の密度試験結果を示す。乾燥密度の測定は、シリコンオイル比重法を用いて、吹付け施工前と各 Case 施工時の計 3 回実施した。図 9.4.3-24 から、乾燥密度は 1.620~1.670Mg/m³ の範囲に収まっていることがわかる。平成 24 年度の結果から、吹付け施工によって構築した緩衝材の密度分布はほとんどないことを鑑みると、本試験においても、緩衝材は目標乾燥密度 1.600Mg/m³ 程度で均質に施工できていると考えられる。

表 9.4.3-7 シリコンオイル比重法による測定結果

測定場所	供試体の質量 g	供試体の質量 (浸油後) g	供試体の体積			含水比			湿潤密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]			
			シリコンオイルにおける供試体の見掛けの質量 g	シリコンオイルの密度 (20CS) g/cm ³	体積 cm ³	w		ma g		mb g	mc g	g/cm ³	g/cm ³
						%	平均値						
試験吹き	115.636	116.086	60.490	0.9645	57.6	20.2	20.6	192.2	184.2	144.3	2.006	1.669	1.644
Case1	129.467	129.885	67.357	0.9587	65.2	20.9	20.6	191.1	183.0	144.4	1.985	1.642	
Case2	114.319	115.20	59.100	0.9587	58.5	20.6	20.6	196.7	187.8	144.4	1.954	1.620	

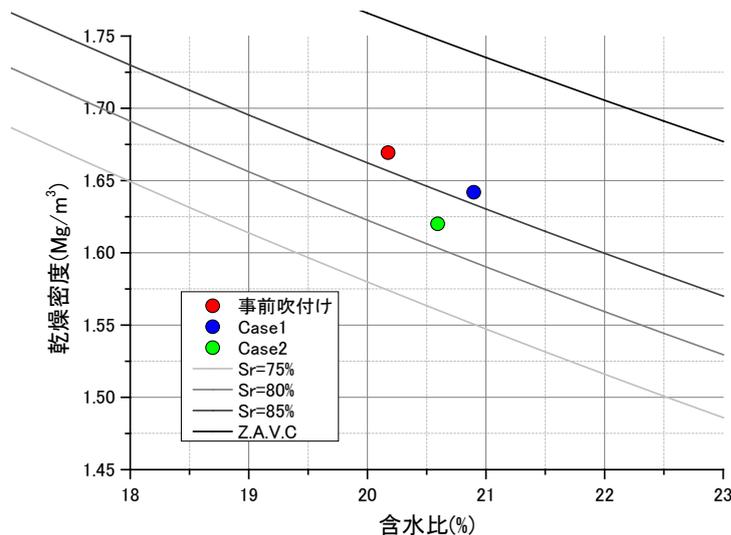


図 9.4.3-24 含水比と乾燥密度の関係

(4) 実験結果【STEP2】

STEP2 では、図 9.4.3-25 に示すように、体積拘束下の緩衝材に給水を行い、緩衝材の膨潤を促した。給水圧は、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じない程度で、極力大きい方が好ましい。さらに、給水圧を、緩衝材への水の浸潤速度よりも速く作用させると、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じる可能性が懸念されることから、給水圧と給水圧の増加速度は試行錯誤しながら決定した。給水圧は、吹付け施工中に確認された最大給水圧（Case1 堆積岩：150kPa 程度。Case2 結晶質岩：250kPa 程度）を参考として、200kPa 以上を目標とした。図 9.4.3-26 に人工給水過程の給水圧の経時変化を示す。

Case1 では、まず、10kPa で 2 日間給水した後に給水圧を一気に 200kPa まで増加させた。この際、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が観察されたことから、給水圧を 10kPa に低下させた。次に、50kPa で約 10 日間給水した後に 100kPa まで給水圧を増加させて 1 日間静

置した。ここで、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じていないことを確認して、さらに 200kPa まで給水圧を増加した。200kPa まで増加させた段階で、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が観察されたことから、給水圧を再度 10kPa に低下させて約 10 日間静置した。約 10 日間の静置後、給水圧を 50kPa まで増加させ、さらに 100kPa まで増加させて 13 日間静置し、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じていないことを確認して、20kPa/日の速度で給水圧を 200kPa まで増加させた。このような段階的な給水圧の増加では、200kPa の給水圧であっても界面の隙間は観察されなかった。このため、給水圧 200kPa のままで約 5 日間、静置した。

Case2 では、先ず、200kPa まで一気に給水圧を増加させたが緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じなかったため、さらに 300kPa まで給水圧を増加させた。この際、界面に隙間が観察されたことから給水圧を再び 200kPa まで低下させて、約 50 日間静置した。



図 9.4.3-25 緩衝材への給水状況

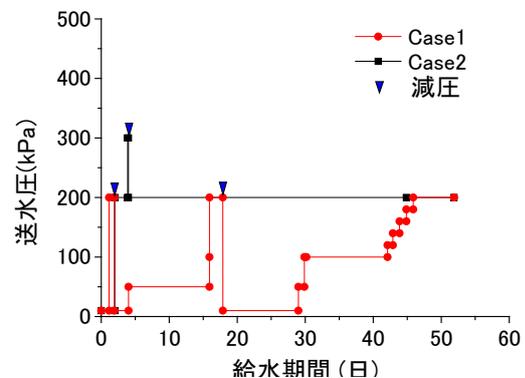


図 9.4.3-26 人工給水仮定の給水圧の経時変化

図 9.4.3-27、図 9.4.3-28 には Case1 と Case2 の給水開始から約 2 ヶ月間経過した後の緩衝材上端面の様子を示している。図から、Case1, Case2 とともに、界面に隙間がなく、ある程度、膨潤してきていることが確認できた。

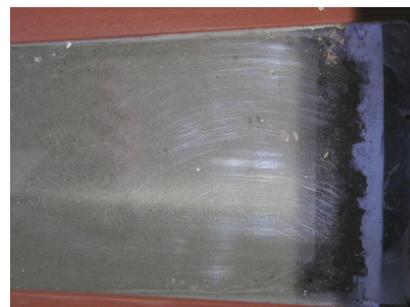


図 9.4.3-27 Case1 緩衝材の上端面 (送水期間：約 2 ヶ月)

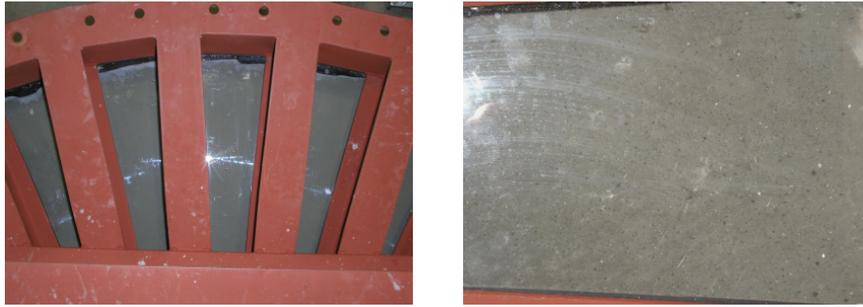


図 9.4.3-28 Case2 緩衝材の上端面（送水期間：約 2 ヶ月）

(5) 実験結果【STEP3】

STEP3 では、1/4 リング型モールドの上蓋を外して緩衝材の体積拘束を解除した後、吹付け試験時と同様、0.1ml/min で送水を行った。

送水開始からの経過時間と送水圧の関係を図 9.4.3-29、図 9.4.3-30 にそれぞれ示す。なお、図 9.4.3-29、図 9.4.3-30 には、参考値として、Case1 の吹付け施工中における最大送水（破過）圧を赤線で示している。

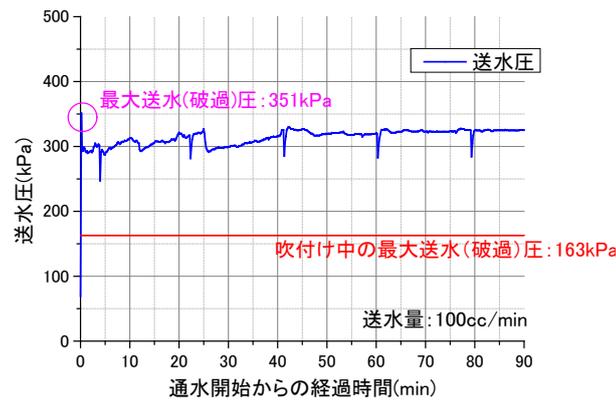


図 9.4.3-29 経過時間－送水圧の関係【Case1 堆積岩】

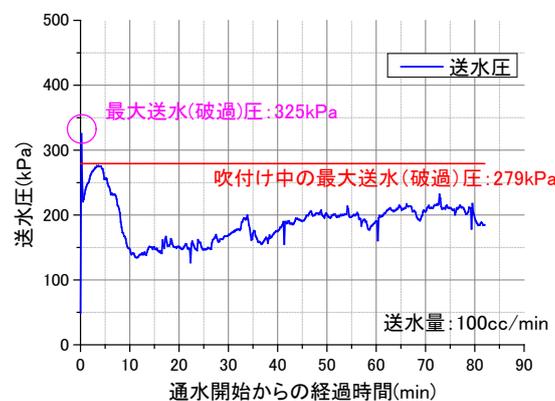


図 9.4.3-30 経過時間－送水圧の関係【Case2 結晶質岩】

図 9.4.3-29、図 9.4.3-30 から、Case1、Case2 とともに最大送水（破過）圧（図 9.4.3-29、図 9.4.3-30 の○参照）は、吹付け施工中の値と比較して高く、その増加量は、Case1 で 150kPa 程度、Case2 では 50kPa 程度であった。また、送水圧の経時変化に着目すると、Case2 では、最大送水（破過）圧を示した後に 150kPa 程度まで低下しているが、Case1 の場合では、ほぼ最大送水（破過）圧のまま推移している。これは、Case1 が 27 か所から給水したのに対して、Case2 の給水箇所が 3 か所しかなく、その膨潤領域が Case1 に比べて局所的であるため、一旦破過すると人工給水による膨潤の効果がなくなるためであると考えられる。このことから、人工給水を緩衝材のパイピング・エロージョン対策として実施する場合、給水箇所はなるべく分散させて膨潤領域が広範囲に亘るようにした方が、効果が高いことが分かった。また、結晶質岩の処分坑道で湧水がある場合、湧水による膨潤領域が小さく、一旦破過するとパイピング・エロージョン現象が生じやすいため、仮端部プラグなどの設置により処分坑道内を拡散場とするとともに、十分な膨潤時間を取る必要がある。

以上の結果から、体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。

(6) まとめ

H25 年度の湧水環境下における吹付け施工実験の結果を下記にまとめる。

- 吹付け工法は、湧水環境下においても均質かつ高密度な緩衝材を構築可能であるが、施工中における湧水の完全な止水は困難である。
- 吹付け施工中～緩衝材の体積拘束作業間において、緩衝材に水みちが発生した。この水みちは、送水ノズルから緩衝材天端部にかけて発生している。緩衝材の天端部は、拘束圧がほぼゼロであるため、水みちが発生し易いと考えられる。
- 体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。

9.4.4 平成 26 年度の試験計画

平成 26 年度では、平成 25 年度に実施したパイピング・エロージョン現象に対する緩衝材の膨潤効果についての検討を継続して行う。具体的には、緩衝材の膨潤挙動が非常に緩慢であることに鑑みて、体積拘束した緩衝材への人工給水を長期間継続し、緩衝材を十分に膨潤させた後に再度破過試験を行い、パイピング・エロージョン現象の抑制効果を確認する。

(1) 試験条件

試験ケースを表 9.4.4-1 に示す。本試験では、平成 25 年度の吹付け試験で構築した 2 つの緩衝材を使用する。体積拘束した緩衝材に対して、天然バリア材が堆積岩 (Case1) の場合と結晶質岩 (Case2) の場合を想定し、Case1 ではモールド側面に設置した 27 箇所から、Case2 では堆積岩を想定した 3 箇所からそれぞれ人工給水を行う。地層処分施設的设计深度が地下 300m 以深であることを鑑みると、人工給水時の給水圧は、3.0MPa 程度が理想である。しかしながら、リング型モールド的设计許容圧力が 2.0MPa であるため、人工給水時における緩衝材の膨潤圧と水圧 (給水圧と同等) がモールドに及ぼす影響を考慮すると、本試験における最大給水圧は、1.0MPa 程度が限界である。そのため、人工給水時には、目標給水圧を 1.0MPa として、平成 25 年度に実施した給水過程 (図 9.4.3-26 参照) を参考に、給水圧と給水圧の増加速度を、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じない程度で段階的に付与する。給水圧が 1.0MPa に到達した後は、人工給水を約 4 ヶ月間継続し、緩衝材を十分に膨潤させる。その後、平成 25 年度に実施した破過試験を再度行い、計測した破過圧の値から、パイピング・エロージョン現象に対する緩衝材の膨潤効果を評価する。

表 9.4.4-1 試験ケース

試験ケース	緩衝材の構築方法	想定岩種	給水条件	確認項目
Case1	吹付け工法 (H25 の施工 試験)	堆積岩	給水圧 1.0MPa モールド側壁の 27 箇所から給水	給水量 破過圧
Case2		結晶質岩	給水圧 1.0MPa モールド側壁の 3 箇所から給水	

(2) 人工給水

人工給水の状況および給水期間と給水圧の関係を図 9.4.4-1、図 9.4.4-2、図 9.4.4-3 にそれぞれ示す。Case1,2 共に、目標送水圧 1.0MPa に至る過程において、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が発生したことから（図 9.4.4-2、図 9.4.4-3 の紫部参照）、一時的に送水圧を低下させたり、緩衝材を封圧させたりして対応を行った。送水圧が 1.0MPa に到達した後は、人工給水を継続し緩衝材を十分に膨潤させた。全給水期間は、Case1（体積岩）の場合で 240 日間、Case2（結晶質岩）では 225 日間であった。

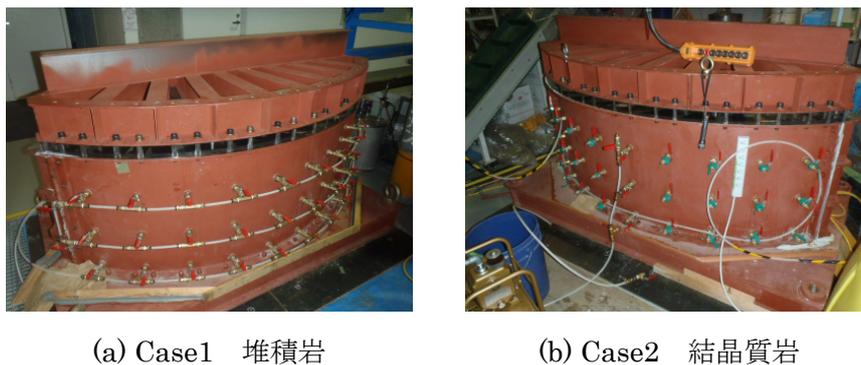


図 9.4.4-1 人工給水の状況

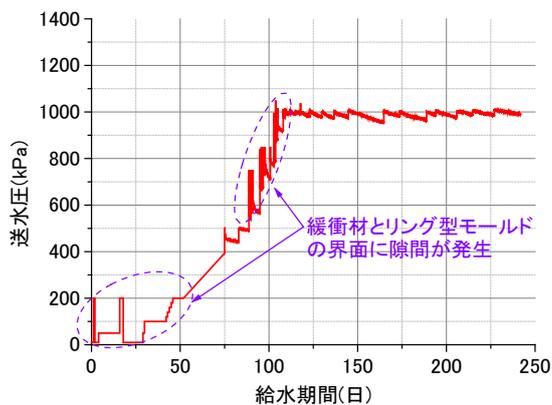


図 9.4.4-2 給水期間と給水圧の関係 (Case1 堆積岩)

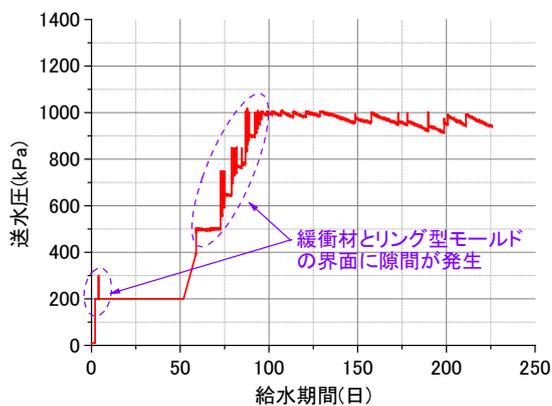


図 9.4.4-3 給水期間と給水圧の関係 (Case2 結晶質岩)

(3) 破過試験

人工給水による緩衝材の膨潤効果を確認するために、人工給水後の緩衝材の体積拘束を解除し破過試験を実施した。破過試験時の通水量は、STEP3 の検討と同様、100cc/min である。試験結果を図 9.4.4-4 と図 9.4.4-5 にそれぞれ示す。図 9.4.4-4 と図 9.4.4-5 から、Case1、2 共に、最大送水（破過）圧は、吹付け時や人工給水 50 日間後の最大送水（破過）圧よりも低い結果となった。図 9.4.4-4 と図 9.4.4-5 の結果を人工給水期間と最大送水（破過）圧の関係で整理すると（図 9.4.4-6 参照）、給水期間 50 日以降における最大送水（破過）圧の低下が確認できる。最大送水（破過）圧が低下した原因の一つとしては、ベントナイトの化学変質が考えられ、今回使用した鋼製モールドから溶出した Fe イオンによって、ベントナイトが Fe 型化し、膨潤性能が低下した恐れがある。図 9.4.4-7 に示す破過試験終了後の緩衝材の状況と図 9.4.3-27、図 9.4.3-28 に示す人工給水初期における緩衝材の状況を比較すると、緩衝材の色の変化や錆の付着が確認できることから、ベントナイトが何らかの化学変質している可能性は高い。

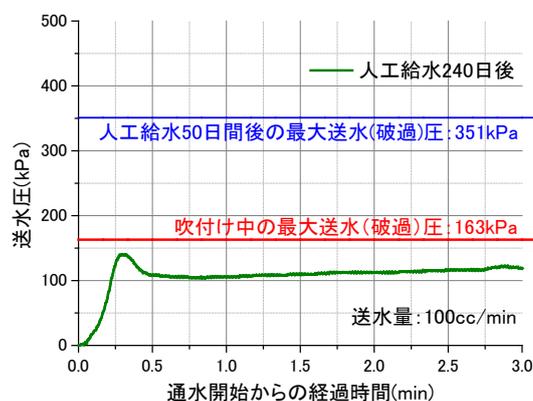


図 9.4.4-4 破過試験結果 (Case1 堆積岩)

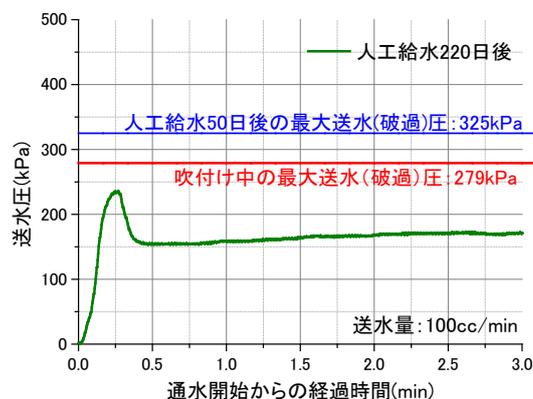


図 9.4.4-5 破過試験結果 (Case2 結晶質岩)

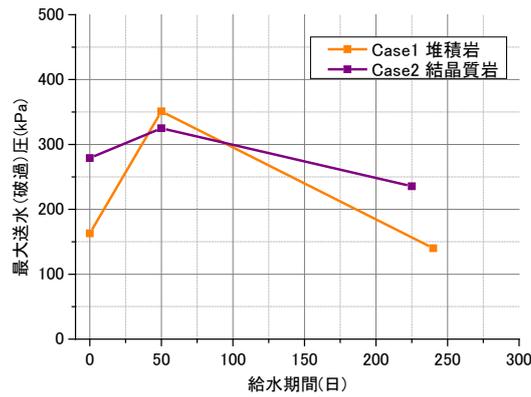
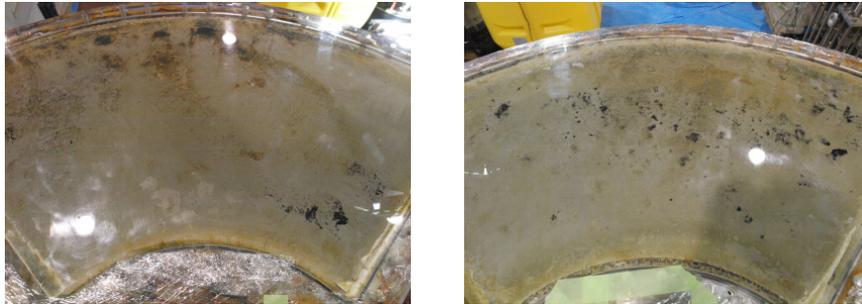


図 9.4.4-6 最大送水圧と給水期間の関係



(a) Case1 堆積岩

(b) Case2 結晶質岩

図 9.4.4-7 破過試験後における緩衝材天端部の状態

人工給水を長時間実施したにも関わらず、最大送水（破過）圧が低下した要因については詳細に検討する必要がある。本結果の要因として、鋼製モールドから溶出した Fe イオンによるベントナイトの Fe 型化が挙げられることから、今後は緩衝材の化学分析等を実施する予定である。具体的には、緩衝材の各箇所からサンプリングした試料に対して、化学変質および飽和度、乾燥密度を確認する。化学変質が確認された場合には、サンプリング試料を膨潤圧試験に供し膨潤圧の測定を実施する。この際、化学変質前のベントナイトの膨潤圧試験も実施する。確認された膨潤圧と本試験での最大送水（破過）圧との比較・検討を行い、最大送水（破過）圧が低下した要因について詳細な検討を行う。

(4) 水みち経路の推定

(3) 破過試験が終了した後に、水みちの経路を推定するための試験を行った。本試験では、最大送水（破過）圧計測後の緩衝材（Case1、2）に対して 100cc/min での送水を継続して行い、モールド側壁に設置した送水孔のコックを上段から中段へと順に閉鎖する（図 9.4.4-8、図 9.4.4-9 参照）ことによって、送水圧の変化を確認した。結果を図 9.4.4-9、図 9.4.4-11 に示す。Case1、2 共に上段のコックを閉じたことによる送水圧の変化はほとんど確認されなかった。しかしながら、上・中段のコックを閉じて下段の送水孔のみからの送水になると、送水圧は Case1 で約 900kPa、Case2 では約 1200kPa と破過試験時の最大送水（破過）圧よりも高い値を示し

た。このことから、破過試験時に生じた水みちは、中段および上段の送水孔から緩衝材天端に架けて形成されたものであり、下段の送水孔からの水みちは、本試験によって新たに形成されたと考えられる。上・中段と比較して、下段の送水孔から緩衝材天端までの排水経路は長いことから、この排水経路の違いが、水みちの形成に影響を与えていると推測する。

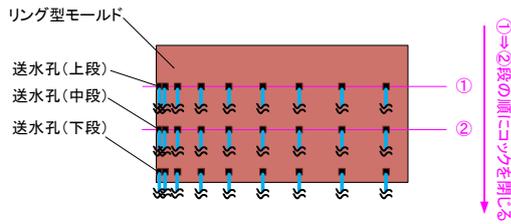


図 9.4.4-8 送水孔の閉鎖手順 (Case1)

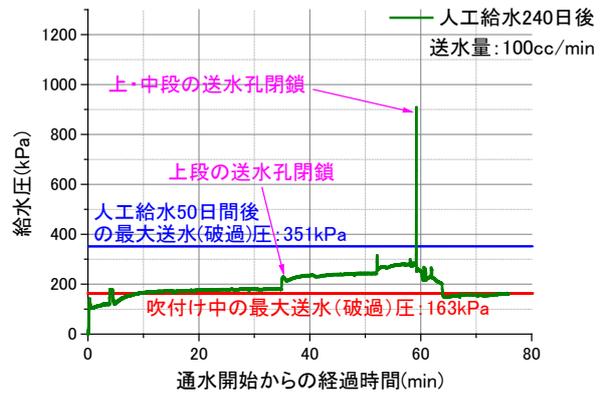


図 9.4.4-9 経過時間－送水圧関係 (Case1)

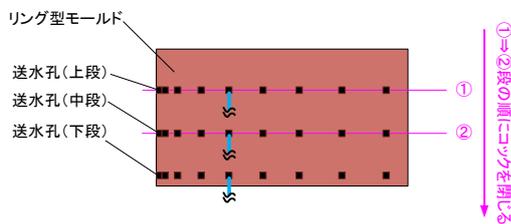


図 9.4.4-10 送水孔の閉鎖手順 (Case2)

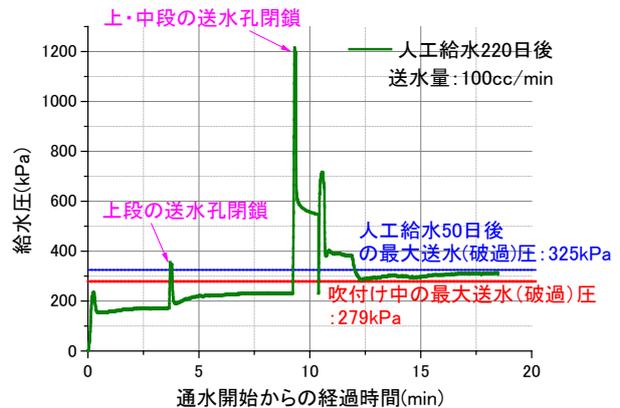


図 9.4.4-11 経過時間－送水圧関係 (Case2)

(5) まとめ

H26年度の人工給水による緩衝材の膨潤効果に関する結果を下記にまとめる。

- ▶ 体積拘束した緩衝材への人工給水を長期間継続し、H25年度と同様の破過試験を行った。その結果、最大送水（破過）圧はH25年度の結果よりも低くなり、人工給水による緩衝材の膨潤効果を確認することができなかった。
- ▶ 緩衝材の膨潤効果が低下した原因としては、鋼製モールドから溶出したFeイオンによって、ベントナイトがFe型化したことが考えられるため、本試験で用いた緩衝材の化学分析や膨潤圧試験を実施して、ベントナイトのFe型化による膨潤性能の低下について詳細に検討する予定である。
- ▶ 破過試験時に形成された水みちの経路を推測した結果、水みちは、リング型モールドの下段からではなく、上・中段の送水孔から緩衝材天端に架けて形成されていることがわかった。このことから、水みちの形成要因として、湧水の発生場所から緩衝材天端部まで距離が大きく関係していると考えられるため、詳細に検討する必要がある。

9.5 まとめ

9.5.1 実施内容

本検討では、緩衝材の施工方法の品質自体を向上させて、再冠水時に緩衝材に発生する事象に及ぼす影響を低減させる観点から、緩衝材の施工検討を実施した。緩衝材の施工方法を高度化させ、均質な緩衝材を施工できれば、施工品質が再冠水中の緩衝材に発生する事象に及ぼす影響や、再冠水中に緩衝材に発生する事象が長期性能に及ぼす影響を、それぞれ低減させることができる。そのため、工学技術の高度化によって施工品質から長期性能までの連続的な評価を可能にすることができる。

平成 22 年度には吹付け施工に適用可能な材料を調べるために、各国のベントナイト系材料を用いて吹付け箱試験を実施した。平成 23 年度では、平成 22 年度に実施した緩衝材表面近傍の止水性能評価の検討結果を受けて、吹付け工法による緩衝材表面近傍の止水性能向上を意図した施工試験計画を検討した。平成 24 年度では高レベル放射性廃棄物地層処分施設堅置き処分孔と同規模のリング型モールドに対して、湧水を模擬してモールド壁面から水を供給した状態で緩衝材の吹付け施工を行った。平成 25 年度では、平成 24 年度の結果からを参考として、体積拘束下における緩衝材の止水性に関する評価を行った。

9.5.2 平成 26 年度までの成果

- 緩衝材の施工方法を高度化することによって密度分布や隙間がない緩衝材を構築できれば、再冠水に伴う様々な発生事象の影響を低減できる可能性がある。そのため、平成 22 年度は密度分布が小さく、隙間が出来ない施工法である吹付け工法による緩衝材の施工試験の前段階として MX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clay の 3 種類のベントナイトの吹付け箱試験を行った。
- 平成 23 年度は、緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討のための試験計画の更新を行った。緩衝材表面近傍の止水性能評価試験の結果を参考にして、0.10/min 湧水を有する処分孔を模擬した大型セルへの緩衝材施工に関して検討を行った。結晶質岩の亀裂から勢い良く出る湧水や堆積岩の滲み出る湧水などをパラメータとした試験計画を立案した。
- 実際の処分施設で緩衝材を施工する場合を想定して、湧水がある処分孔を模擬したモールドで吹付け試験を行い、湧水環境下における施工性、および施工品質の確認を行った。
- 吹付け試験では、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの一部分を模擬した実規模大のモールドを使用し、モールドの周囲に配置した孔から堆積岩を模擬した面状の湧水、若しくは結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を発生させた。総湧水量は堆積岩のケースでは 27 の孔から 0.10/min、結晶質岩では 3 つの孔から 0.10/min と 0.010/min で実施した。なお、吹付け中に漏水が発生した場合、ただちに視認できること、また、モールド底面に溜まった湧水をモールド外部に排水することを目的として、モールド側壁と底板の間には、約 5mm のクリアランスを設けた。

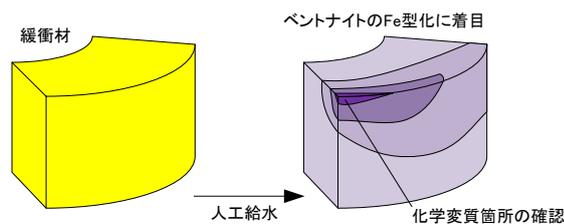
- 平成 24 年度の試験条件では、湧水環境下における吹付け施工は可能であり、均質な密度を得ることはできるが、施工時における止水は不可能であるという結論に至った。
- 平成 24 年度では、湧水の排水機能を目的として生じた特有の境界条件が設定されており、実際には、施工完了後に粘土プラグや天然バリアで体積拘束される緩衝材の膨潤特性による止水性の評価はできなかった。そこで、吹付け施工後の緩衝材を体積拘束した状態において、湧水の止水性を評価可能な試験計画を立案した。
- 吹付け施工中において緩衝材に生じる水みちは、湧水箇所から緩衝材天端部にかけて発生している。これは、緩衝材の天端部は、拘束圧がほぼゼロであるため、水みちが発生し易いことが原因と考えられる。
- 体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。
- 体積拘束した緩衝材への人工給水を長期間継続し、H25 年度と同様の破過試験を行った。その結果、最大送水（破過）圧は H25 年度の結果よりも低くなり、人工給水による緩衝材の膨潤効果を確認することができなかった。
- 緩衝材の膨潤効果が低下した原因としては、鋼製モールドから溶出した Fe イオンによって、ベントナイトが Fe 型化したことが考えられるため、本試験で用いた緩衝材の化学分析や膨潤圧試験を実施して、ベントナイトの Fe 型化による膨潤性能の低下について詳細に検討する予定である。
- 破過試験時に形成された水みちの経路を推測した結果、水みちは、リング型モールドの下段からではなく、上・中段の送水孔から緩衝材天端に架けて形成されていることがわかった。このことから、水みちの形成要因として、湧水の発生場所から緩衝材天端部まで距離が大きく関係していると考えられるため、詳細に検討する必要がある。

9.6 今年度の試験結果を踏まえた今後の試験計画

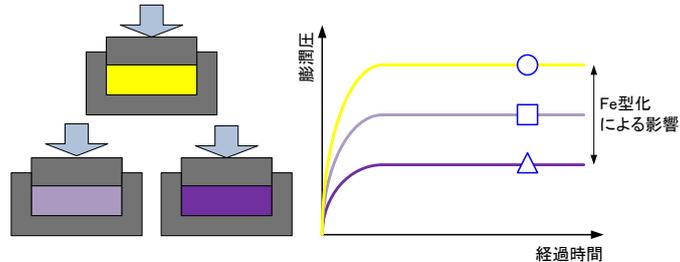
9.6.1 化学変質による膨潤性能低下の検証

(3) 破過試験で記載したように、長期に亘る人工給水の影響が最大送水（破過）圧の増加に結びつかなかった原因の一つとして、ベントナイトの変質による膨潤圧の低下が挙げられる。そこで、今後の試験案として、破過試験に供した緩衝材のブロックサンプリングを行い、各ブロックの化学分析や乾燥密度、飽和度を計測し、各指標の分布状況を確認する。ベントナイトの Fe 型化が確認された箇所に関しては、交換性 Fe の化学当量毎に区分した供試体を膨潤圧試験に供し膨潤圧の確認を行う。この際、人工給水前の緩衝材を想定し作製した供試体の膨潤圧試験も行う。得られた膨潤圧と破過試験時の最大送水（破過）圧を比較し、化学変質による最大送水（破過）圧低下の原因について考察を行う。

①化学分析、飽和度、乾燥密度測定



②膨潤圧試験



③最大送水(破過)圧と膨潤圧との比較

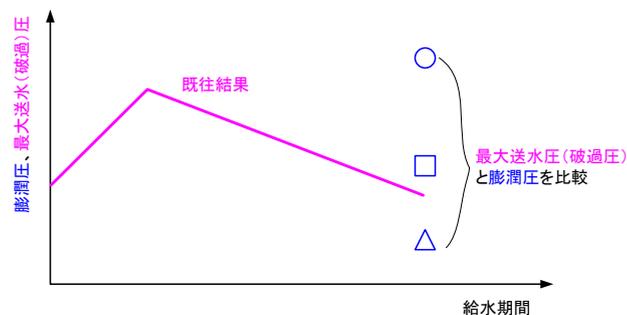


図 9.6.1-1 今後の試験計画案

第9章参考文献

- [1] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第1分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2009）.
- [2] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成21年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第1分冊）－遠隔操作高度化開発－（2/2）（2010）.
- [3] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成22年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2011）.
- [4] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成23年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2012）.
- [5] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2013）.
- [6] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成25年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質/健全性評価手法の構築－緩衝材（2/2）（2014）.
- [7] 小林一三，中寫誠門，戸井田克，田中俊行：ベントナイト吹付け技術の開発（その1）－高密度吹付け工法の室内試験と混合方法の検討－.鹿島技術研究所年報 Vol.54(2006).
- [8] 吉越一郎、千々松正和、中越章雄、三反畑勇：ベントナイト層の施工方法の開発.ハザマ研究年報 Vol39 (2007).
- [9] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成18年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書（2/2）（2007）.
- [10] 日本ベントナイト工業会標準試験法：ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法，JBAS-107-91 (1991).
- [11] 長谷川琢磨：ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響、電力中央研究所受託報告、N04005(2004).
- [12] 日本工業規格：土の含水比試験方法，JIS A 1203:2009

第10章 地下研究施設におけるエロージョン試験

10.1 背景

高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置後再冠水期間に、処分孔への地下水の浸入による水みち（パイピング）、浸食（エロージョン）が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げ、緩衝材成分が流出する場合には、長期性能に影響を与える可能性がある。そのため、実際の処分環境に近い幌延深地層研究所の350m坑道にある試験坑道5において、湧水量が比較的多い状況で工学的対策を施さずに緩衝材を定置した場合の挙動（エロージョン、膨潤）を確認することを目的としている。

10.2 試験の概要

10.2.1 実施事項

本試験における実施事項は以下に示す8項目である。各項目について、実施内容の概要を以下に示す。

(1) 緩衝材用混合材料の製作

緩衝材の構成材料として、ベントナイト（クニゲル V1）70wt%とケイ砂 30wt%の配合となる混合土を、含水比を調整しながら製作した。

(2) 緩衝材ブロックの製作

試験体の主な構成材料である緩衝材ブロックは、膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 となるように、膨潤前の乾燥密度を 1.92Mg/m^3 とし、初期含水比は 10%とした。ブロック形状はハンドリング性を考慮し、円周向 8 分割、縦方向 6 段の計 48 分割を全て同一形状とした。試験ケースは、緩衝材流出予備試験（緩衝材ブロック 1 段）と緩衝材流出試験（緩衝材ブロック 6 段+ペレット）の 2 ケースであるので、これに必要となる数量の緩衝材ブロックを製作した。

(3) 緩衝材ブロック定置治具の製作

緩衝材ブロックを載せて、試験孔内へ設置するためのステンレス製の治具を製作した。

(4) 試験孔の湧水量測定

試験孔の周辺には、割れ目が分布しており、相互に割れ目のネットワークが繋がっている可能性が高い。そこで、試験に先立ち、各試験孔の孔内水位上昇速度を計測し、換算して各試験孔の湧水量を求めた。湧水量の測定は、隣接孔の状況を変化（充水、排水）させて行った。

(5) 緩衝材流出予備試験

薄い塩水である地下水が、ある程度の流入量で処分孔内に流入した場合、定置した緩衝材ブロック（クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%）がどのような挙動を起こすのかを本試験前に把握するため、試験孔 3 に高さ 10cm の緩衝材ブロックを 1 段（高さ：10cm、重量：約 40.8kg）のみ定置し、隙間は埋め戻さず、流出状況を観察するとともに、吸光度分析によるエロージョン量の測定を行うための試料を採水した。

(6) 緩衝材流出試験

工学規模サイズの試験において、実際の岩盤内に緩衝材ブロック+ペレット隙間充填を設置した場合に起こる、様々な現象（流出、膨潤など）を確認するため、試験孔 2 に緩衝材ブロック 6 段（重量：245kg）を治具（重量：約 57kg）の上に積んでから定置し、隙間にペレットを自然落下で充填した後、地下水を自然流入させてエロージョン現象の観察および吸光度分析によるエロージョン量の測定を行うための試料を採水した。

(7) 採取試料の吸光度分析

上記の“緩衝材流出予備試験”および“緩衝材流出試験”で採水した試料について、吸光度分析によるエロージョン量の測定を行った。

(8) 地下水の採水

本試験とは別に小規模試験機を使って、緩衝材ブロックの膨潤圧を測定するために、50L の地下水を採取した。

10.2.2 実施事項

本試験の実施工程表を以下の表 10.2.2-1 に示す。

表 10.2.2-1 実施工程

	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
緩衝材用混合材料の製作	■							
緩衝材ブロックの製作		■	■	■				
緩衝材ブロック定置治具の製作			■	■	■			
試験孔の湧水量測定				■				
地下水の採水				■				
緩衝材流出予備試験						■		
緩衝材流出試験						■	■	■
採取試料の吸光度分析							■	■

10.3 既往検討の概要

10.3.1 SKBにおける検討

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）によるベントナイト系材料を緩衝材として用いる処分概念（KBS-3）は、スウェーデンやフィンランドなどで採用されている。この処分概念では、処分孔へ地下水が流入し、緩衝材のパイピング・エロージョンが発生すると、緩衝材の透水性が増大してしまうことが懸念されている。そのため、SKBでは緩衝材のパイピングによって生じるエロージョンに関する研究が進められており、いくつかの報告がなされている。

ベントナイト系緩衝材のパイピング・エロージョンに関する2006年時点の知見に関する報告書[1]では、ベントナイトの膨潤特性に加え、幾何形状、水の流入速度、水圧上昇速度がパイピングを起こす影響因子として挙げられており、KBS-3Hコンセプトでパイピングの起こる条件として、流量 0.1 L/minに加えて、割れ目内の水圧上昇速度 100 kPa/hrを挙げている。ただし、他にも緩衝材の幾何形状や膨潤に要する時間等も要因となるため、実際の現象はもっと複雑であると述べている。

また、水質も影響を及ぼすことが知られており、容器の腐食環境及びベントナイトのゾル化やパイピング・エロージョンと言ったリスク要因についての安全評価上の検討の前提として参照するため、空隙率 43%のベントナイトと周囲の地下水の間の化学平衡を仮定した化学計算も実施されている[2]。この解析における化学反応には、硫酸カルシウムや石英等のベントナイト随伴鉱物との反応も含まれている。

SKBが水質と流量を変化させて圧縮ベントナイトを対象として行った室内試験[3]の結果を表 10.3.1-1 に示す。この結果からは、塩分濃度が高くなるほどベントナイトの流出が増加する傾向はあるが、1 処分孔当たり流量の寄与が最も大きく、0.1 L/min以上で顕著となることが示されている。

SR-Siteプロジェクト報告書[4]では、処分孔へ流入する水の圧力がベントナイトの膨潤圧を上回ると、緩衝材のパイピングが生じ、形成されたパイプ状の水みち内の流れがエロージョンを起こし、緩衝材が流出する可能性があるとしている。ただし、不飽和の状態から再冠水による飽和過程では、膨潤圧が発揮される前に水みちが形成される恐れがあり、飽和途中でのパイピングについては、MX-80 の高い膨潤性のために緩衝材内部の飽和が遅延されることが原因の一つとされている。

これらの検討を基に同報告書では、緩衝材のパイピング・エロージョンへの対応策として、エロージョンによる緩衝材の流出量が 100kg を超えない程度に抑制するため、総浸入水量が 150 m³未滿となるように、処分孔を横切る割れ目は透水性が低いものを選択することとされている。現時点では流量が 0.1 L/min 以上となる割れ目と交差する処分孔を回避することが検討されている。ただし、不確実性を持つ要因が多いため、今後見直すべき課題であるともしている。

表 10.3.1-1 SKB による室内試験結果[5]

Sample	Water type	Flow	Test length	Test duration	Total amount solid mass eroded		Erosion velocity in average	Difference inflow and outflow after 7 hours	Comments
					Dried clay	Water samples			
		l/min	m	h	g	g	g/h	litres	
D122	Tap water	0.01	1	7	39	17	2.4	0.3	Low erosion velocity. The main part of the block areas are not influenced.
D124	Tap water	1	1	7	347	395 **	49.5	*	The main part of the block areas are not influenced. Sharp ditch in the middle.
D212	1% salt	0.01	0.2	7	40	45	6.4	0.6	Low erosion velocity.
D221	1% salt	0.001	1	8	0	0	0	0.5	All water from inflow was left in the clay.
D222	1% salt	0.01	1	7	65	58	8.3	1.4	Low erosion velocity.
D223	1% salt	0.1	1	7	*	260	37	1.5	The water affect the surrounding bentonite blocks. A lot of material erodes.
D224	1% salt	1	1	3	1159	1169**	390	*	The water affect the surrounding bentonite blocks. Very high erosion velocity.
D322	3.5% salt	0.01	1	8	84	92	11.5	2.2	Low erosion velocity. Most of the water stays in the clay which swells on the surface.

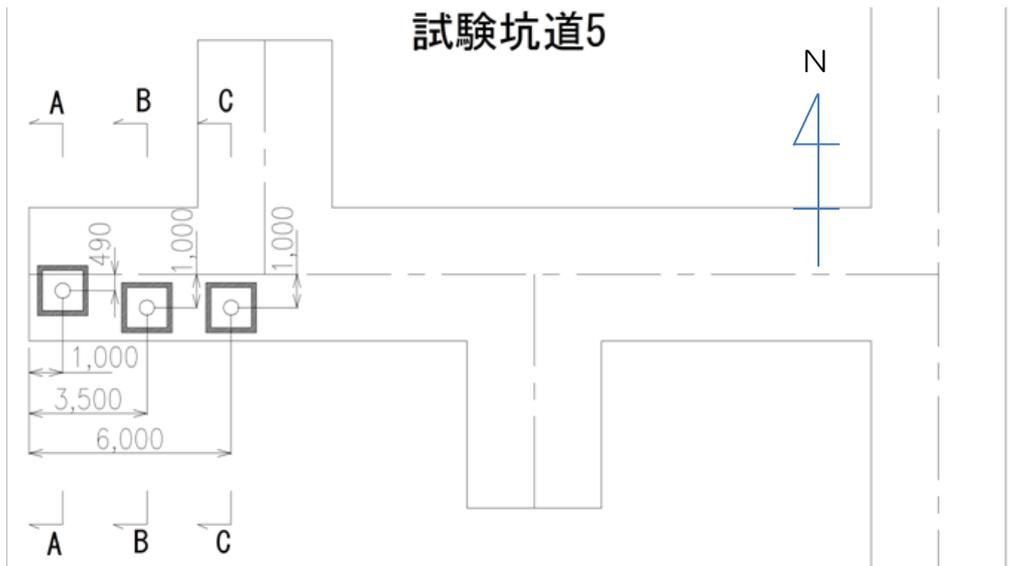
* not measured

**calculated from 16 water samples out of 420 litres (19 samples out of 180 litres for test D224)

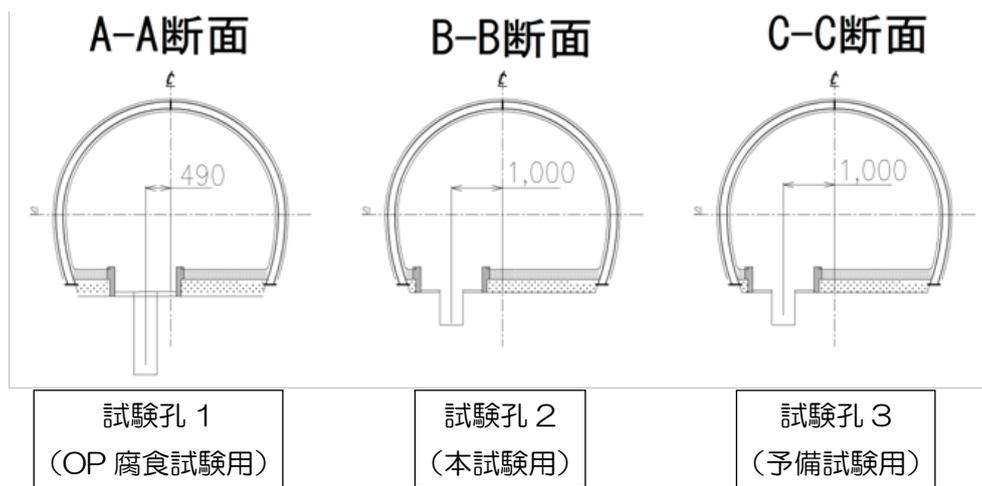
10.3.2 地下施設での試験

本試験で実施する地下施設におけるエロージョン試験は、地下施設内の堆積岩に掘削した工学規模の試験孔にベントナイト系緩衝材ブロック等を設置し、エロージョン現象を把握することを目的としている。エロージョン試験は H25 年度に試験坑道 5 において掘削した 3 つの試験孔のうち、試験孔 2 および試験孔 3 において実施する。試験孔 2 では緩衝材ブロックを 6 段定置して外周をペレットで充填する「緩衝材流出試験」を行い、試験孔 3 では緩衝材ブロック 1 段のみを定置して、現象を把握するための「緩衝材流出予備試験」を行う。試験坑道 5 内の 3 つの試験孔の配置を図 10.3.2-1 に示す。

これらの試験孔の掘削直後に確認された湧水はいずれも壁面のひび割れから一様に流入する状況であり、削孔後に測定した湧水量は試験孔 2 で約 5.5L/分、試験孔 3 で約 8.0L/分であった。ただし、掘削から時間が経過しているため、本試験では湧水量の測定を改めて実施した (10.7 節参照)。併せて、試験孔の状態を再確認することを目的に試験孔の出来形確認と壁面観察を新たにやり直した。試験孔 1~3 の出来形については、レベル測量等で確認した寸法の一覧を表 10.3.2-1 に示す。壁面観察については 10.4 節に示す。



(a) 試験坑道 5 平面図

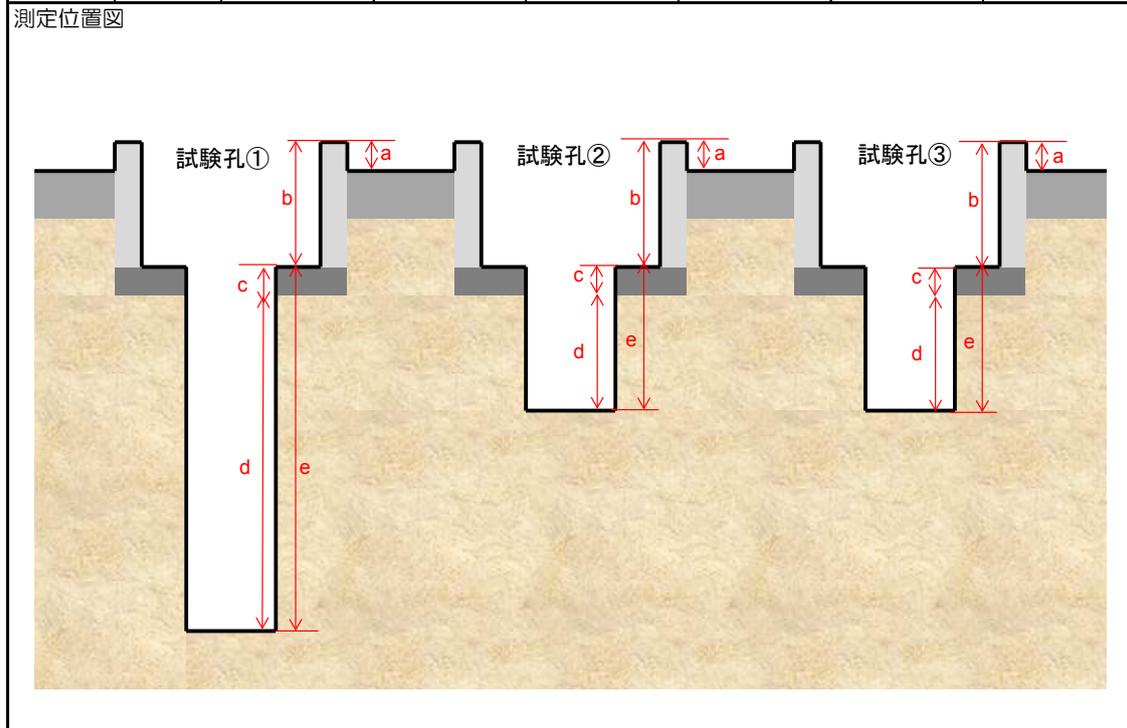


(b) 試験坑道断面図

図 10.3.2-1 試験坑道 5 における 3 つの試験孔配置

表 10.3.2-1 試験孔の出来形一覧（レベル測量による再確認結果）

試験孔名	位置	測定箇所					備考
		土手高さ a(mm)	箱抜き高さ b(mm)	無収縮モル厚 c(mm)	試験孔深さ d(mm)	掘削孔深さ e(mm)	
試験孔1	北側	61	490	80	1667	1747	
	南側	64	492	120	1629	1749	
	東側	65	485	110	1646	1756	
	西側	61	495	90	1666	1756	
試験孔2	北側	61	497	150	699	849	
	南側	65	510	200	636	836	
	東側	63	499	150	699	849	
	西側	62	511	150	692	842	
試験孔3	北側	56	470	180	699	879	
	南側	62	474	180	693	873	
	東側	61	462	180	705	885	
	西側	62	473	180	687	867	



※c：無収縮モルタル（ピット底盤）厚さはスケールによる目視

10.4 試験孔壁面の再観察

本試験の実施に際して、昨年度実施した試験孔削孔時の孔壁観察および写真撮影 [5]と同様に孔壁観察および写真撮影を行い、両者の比較による現状確認と掘削後からの変状の有無を確認した。

10.4.1 壁面観察結果まとめ

壁面観察結果のまとめを表 10.4.1-1 および表 10.4.1-2 に示す。いずれの孔も孔壁表面の形状や割れ目の顕在状況に前回観察時からの大きな変化は認められなかった。一部、前回記載のなかった割れ目を確認されており追加したが、すべてが新規の割れ目ということではなく、前回観察時に壁面の汚れ等により不鮮明で読み取れなかった割れ目も含まれると考えられる。

壁面からの湧水の発生状況についても、一見すると孔内全域から流入しているように見えるが、「10.7.3 目視による湧水箇所の概略確認」において後述するように、浅い部分からの湧水によるものである可能性もある。

表 10.4.1-1 壁面観察結果のまとめ (試験孔 2)

項目	内容	備考
岩種	稚内層	試験坑道 5 周辺の岩と同一。
岩級	CM-M	割れ目密集部が全域に発達 (30%以上) している。
割れ目の分布・性状	断層は認められない。 構造性と推察される割れ目が分布。	全体的に構造性割れ目が密に発達している。
湧水箇所	孔内全域より流入水あり。 北側、余掘り部 (底から約 5cm) にやや多い湧水箇所あり。	東側の孔口からの深度 5~35cm 一帯は試験孔 3 と通じていると想定される (湧水量測定結果より)。
その他	グラウト孔が南側の孔口から深度 0.60m に出現。	

表 10.4.1-2 壁面観察結果のまとめ（試験孔 3）

項目	内容	備考
岩種	稚内層	試験坑道 5 周辺の岩と同一。
岩級	CM-M	割れ目密集部が深度 0.50m まで発達（30%以上）している。
割れ目の分布・性状	断層は認められない。 構造性と推察される割れ目が分布。	深度 0.00～0.50m 区間は構造的割れ目が密に発達する。 深度 0.50m 以深では塊状地山部が多く分布している。
湧水箇所	孔内全域より流入水あり。	南東側の孔口からの深度 38cm 付近で試験孔 2 と通じていると想定される（湧水量測定結果より）。
その他	グラウト孔が孔口からの深度 0.35m～0.40m で出現。	

10.4.2 壁面観察図

デジタルカメラで撮影した写真に基づく壁面観察図を図 10.4.2-1 および図 10.4.2-3 に示す。なお、昨年度は試験孔掘削直後にも同様の壁面観察図を実施しており、に示す観察結果のスケッチでは、前回確認した割れ目を赤色で、今回新たに確認された割れ目については青色で描いている。

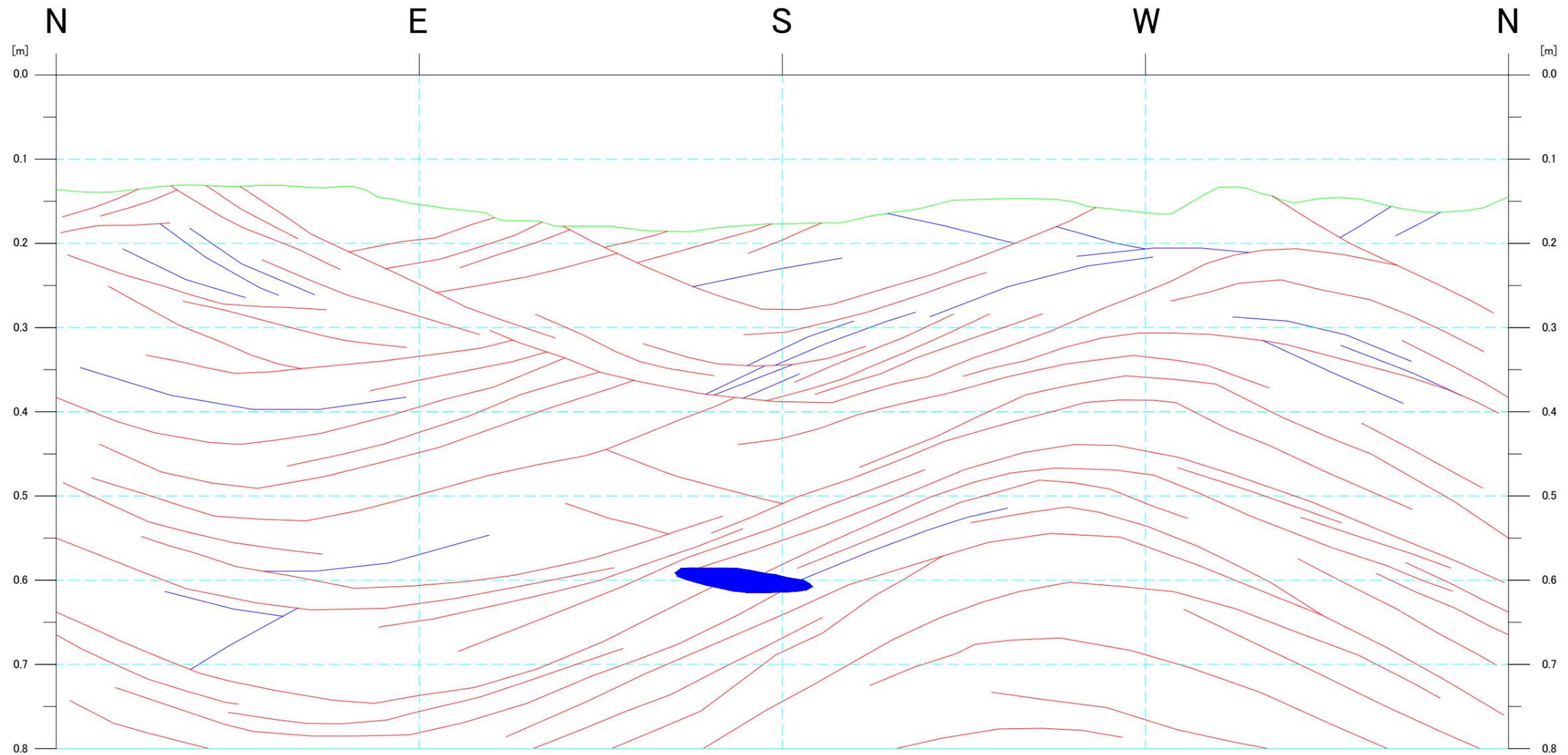
(1) 壁面画像撮影範囲

壁面観察のための写真は、深度方向に 3 分割、円周方向に 5 分割し、それぞれの領域が少しずつラップするようにデジタルカメラで撮影した。壁面画像撮影範囲を（試験孔 2）および図 10.4.2-4（試験孔 3）に示す。参考までに、上記範囲の試験孔 2 および 3 を対象とした撮影写真について、複数の画像ファイルをパノラマ合成機能により合成した結果を図 10.4.2-5 および図 10.4.2-6 に示す。ただし、パノラマ合成は必ずしも正確とは言えないため、あくまで参考程度のものであるとする。

パイピングエロージョン試験孔

試験孔 2 TG5-PE-1

掘削深度:0.80 m
* 0.00 m = 箱抜底盤



- 凡例
- : コンクリート地山境界
 - : 構造的割れ目(前回記載)
 - : 構造的割れ目(今回記載)
 - : 断層
 - : グラウト孔

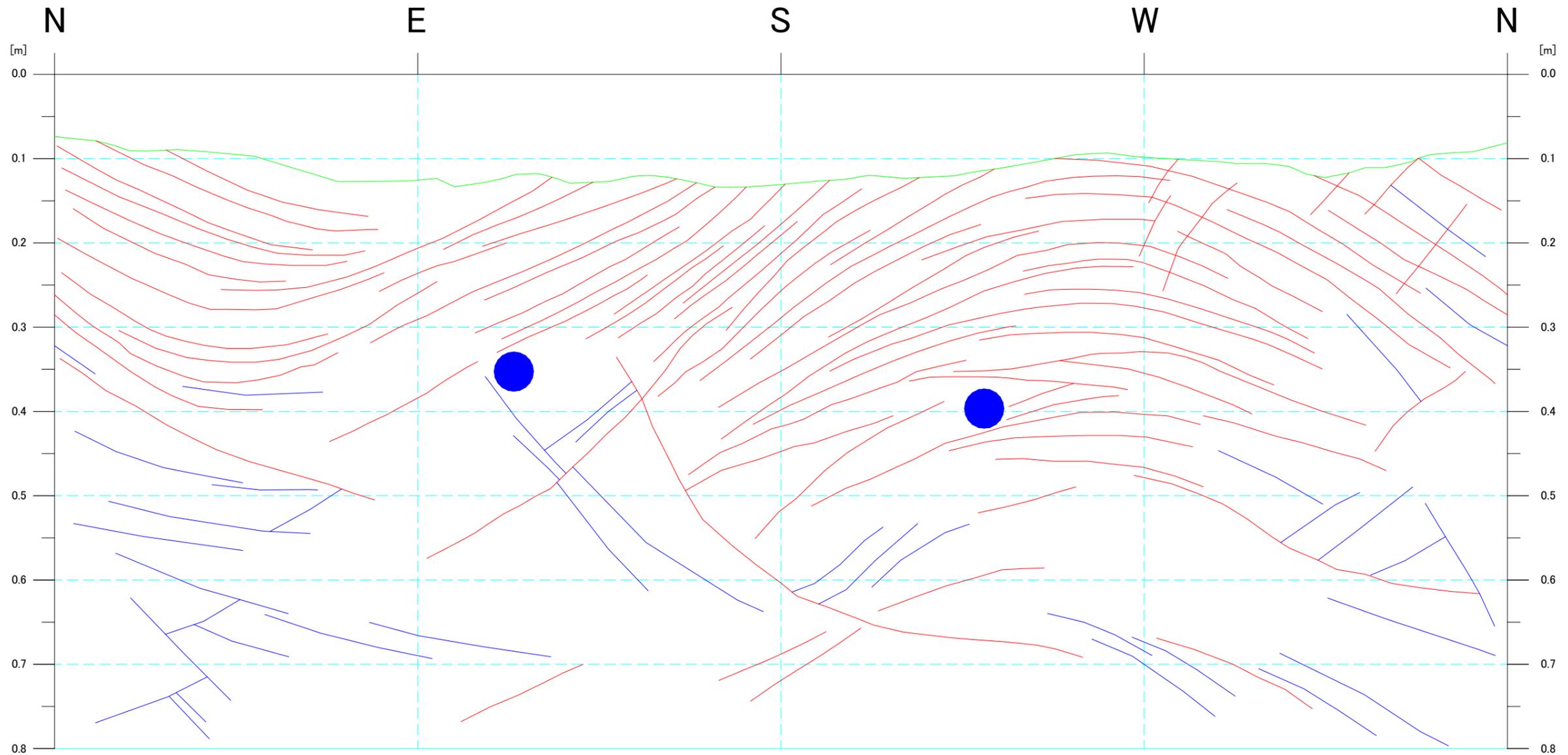
図10.4.2-1 壁面観察スケッチ (試験孔2)

パイピングエロージョン試験孔

試験孔 3 TG5-PE-2

掘削深度: 0.80 m

* 0.00 m = 箱抜底盤



- 凡例
- : コンクリート地山境界
 - : 構造的割れ目(前回記載)
 - : 構造的割れ目(今回記載)
 - : 断層
 - : グラウト孔

図10.4.2-2 壁面画像撮影範囲(試験孔2)

パイピングエロージョン試験孔

試験孔 2 TG5-PE-1

掘削深度: 0.80 m
* 0.00 m = 箱拔底盤

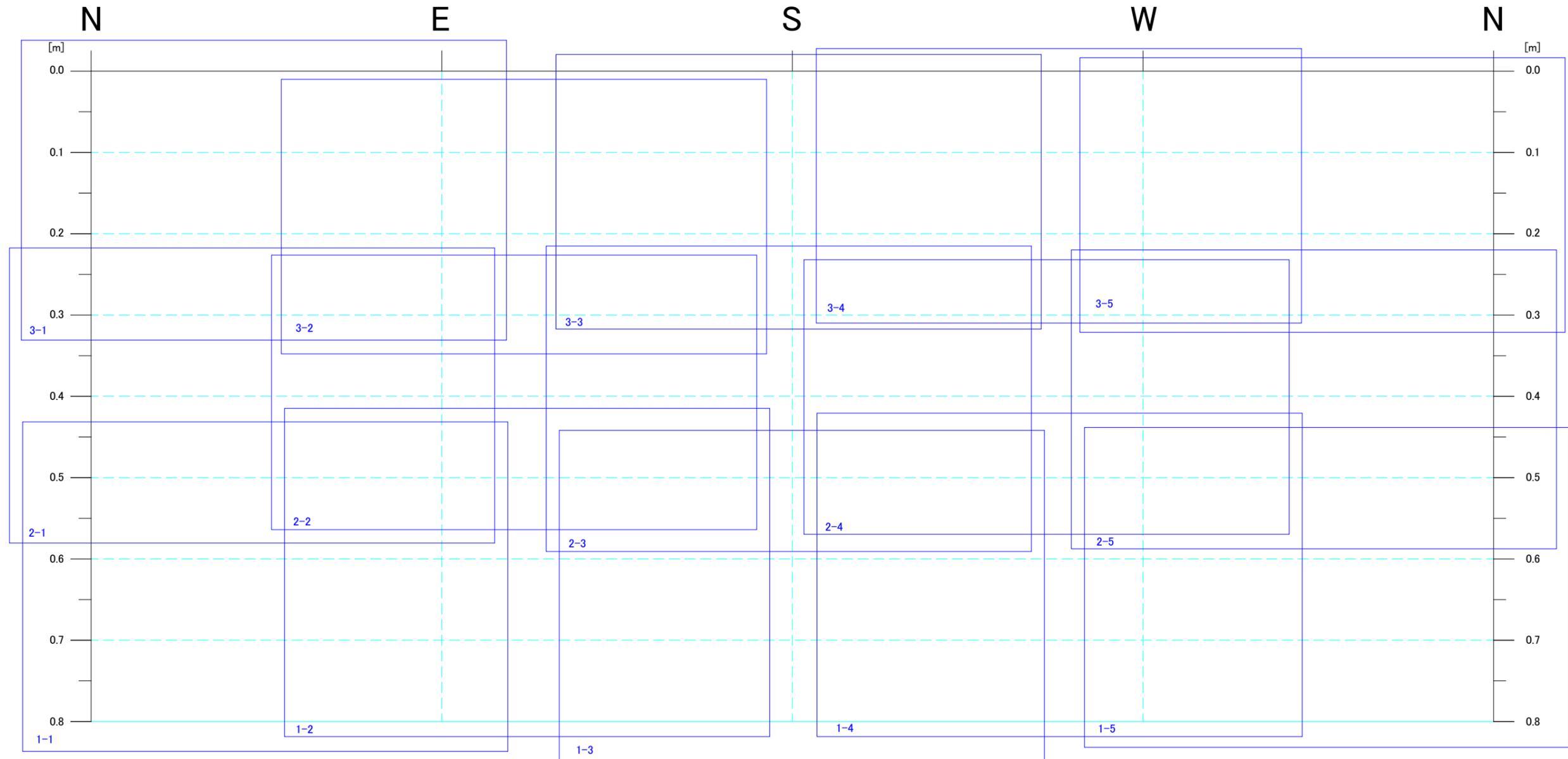


図10.42-3 壁面画像撮影範囲 (試験孔2)

パイピングエロージョン試験孔

試験孔 3 TG5-PE-2

掘削深度: 0.80 m
* 0.00 m = 箱拔底盤

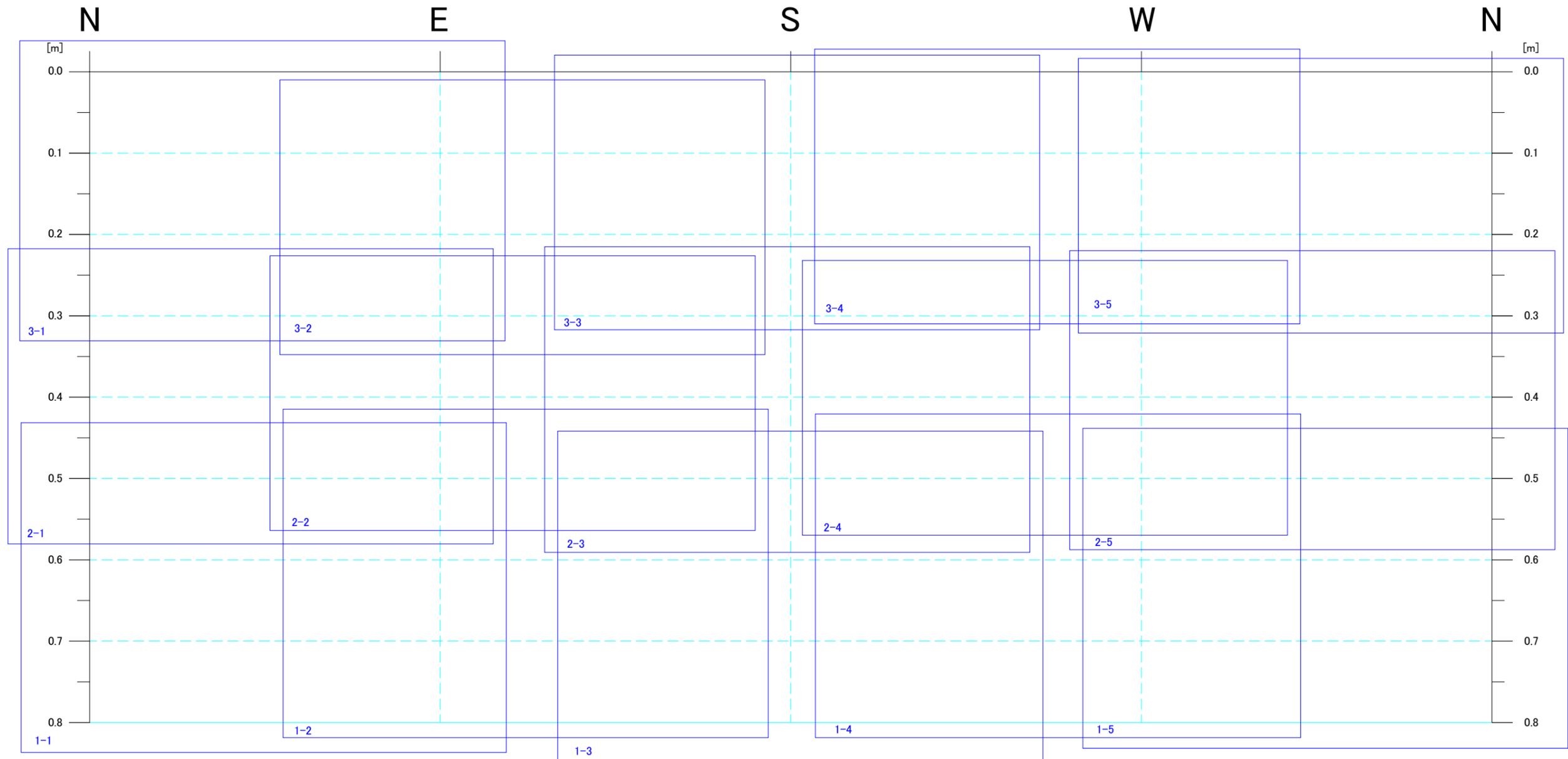


図10.42-4 壁面画像撮影範囲 (試験孔3)

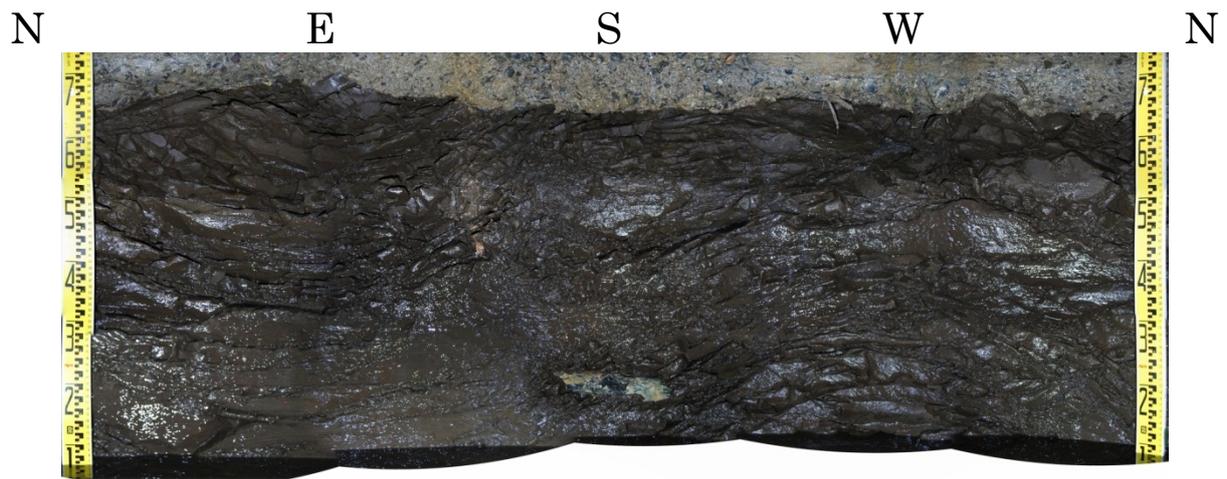


図 10.4.2-5 (参考) 試験孔 2 の壁面写真を合成したパノラマ写真

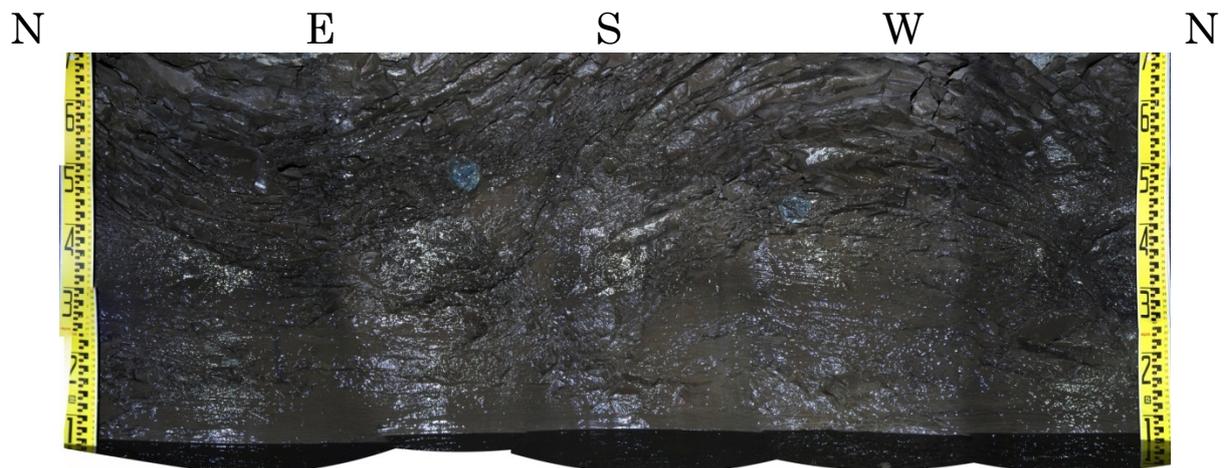


図 10.4.2-6 (参考) 試験孔 3 の壁面写真を合成したパノラマ写真

10.5 緩衝材ブロックの制作

10.5.1 緩衝材用混合材料の製作

試験材料は緩衝材ブロック、大小粒径ペレットである。緩衝材ブロックの仕様は、材料の配合がベントナイト（クニゲル V1）70wt%とケイ砂 30wt%の混合であり、膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 となるように、膨潤前の乾燥密度は 1.92Mg/m^3 となっている。また、初期含水比は 10.5%である。以下に混合材料の製作について示す。

(1) 使用材料

緩衝材に用いる混合材料（クニゲル V1 と珪砂の混合土）を構成する使用材料について表 10.5.1-1 に示す。また、混合材料の配合比について表 10.5.1-2 に示す。

表 10.5.1-1 混合材料の使用材料

使用材料	備 考
クニゲル V1	ベントナイト
珪砂	3号および5号珪砂（日陶連原料(株)）を1:1で混合
水道水	混合水として使用

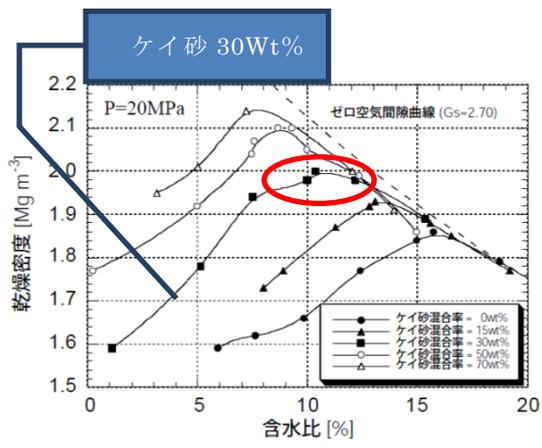
表 10.5.1-2 混合材料の配合重量比

配合材料	原料配合重量比
クニゲル V1	70wt%
珪砂 3号（日陶連原料(株)）	15wt%
珪砂 5号（日陶連原料(株)）	15wt%

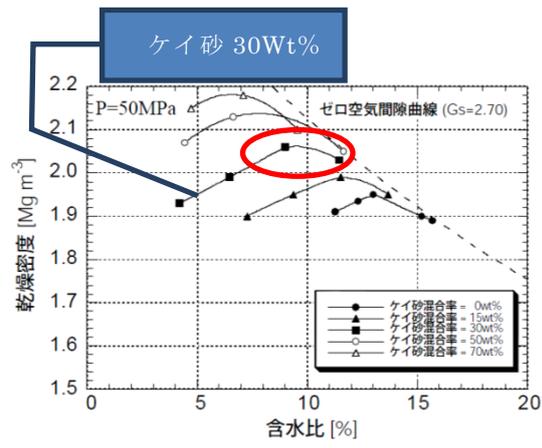
(2) 含水比

既往の実績等よりケイ砂混合率 30wt%、乾燥密度 1.64Mg/m^3 の緩衝材ブロックの製作時含水比を 10.5%と設定した。既往の知見等を以下に示す。

成型圧力が 20MPa および 50MPa でのケイ砂混合率の異なる材料における既往の締固め試験の結果[6]を図 10.5.1-1 に示す。この結果より、ケイ砂混合率 30wt%では静的圧力 20MPaと 50MPaのいずれの場合でも含水比 10%程度で締固め性がよくなっている。



(a) 静的圧力 20MPa



(b) 静的圧力 50MPa

図 10.5.1-1 静的締固め試験結果

(3) 製作方法

1) 混合フロー

混合材料の混合フローを図 10.5.1-2 に示す。

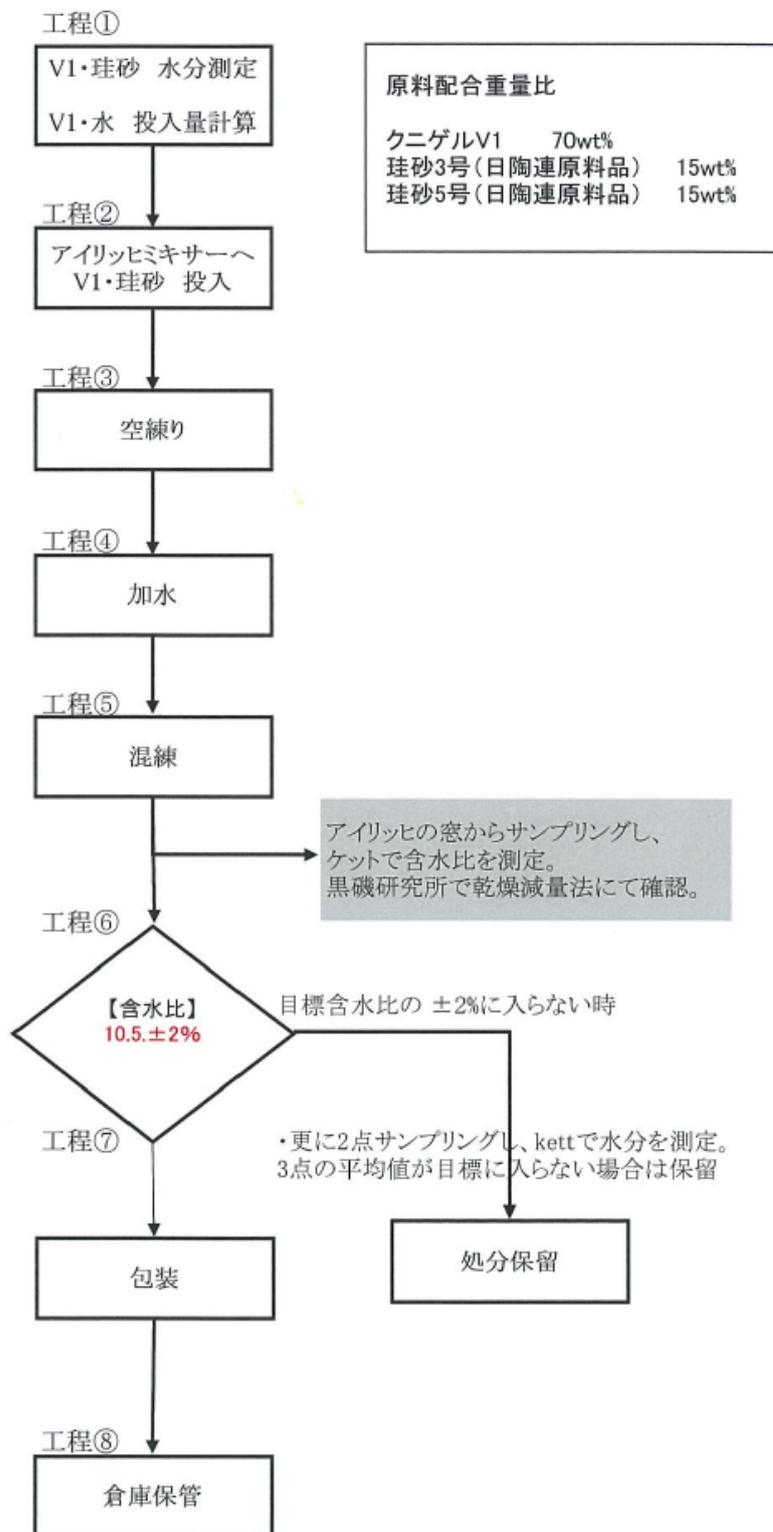


図 10.5.1-2 混合材料（クニゲル V1 と珪砂の混合土）の製作フロー

2) 製作の状況

図 10.5.1-3～図 10.5.1-12 に混合材料の製作時の様子を示し、各工程での作業について記載する。

工程① V1・珪砂水分測定、V1・水投入量計算

クニゲル V1・珪砂の混合土の含水比が 10.5%になるよう、クニゲル V1、珪砂それぞれの含水比を測定した。その測定結果に合わせ、クニゲル V1 のミキサーへの投入量及び水の投入量を計算行った。

工程② アイリッヒミキサーへ V1・珪砂投入

混合を行うアイリッヒミキサーにクニゲル V1 及び珪砂を投入した。クニゲル V1 は貯蔵してあるサイロから図 10.5.1-3 に示すように投入量を調整し、ミキサーへ投入した。ミキサーへの珪砂投入時の様子を図 10.5.1-4 に示す。



図 10.5.1-3 クニゲル V1 投入量調整



図 10.5.1-4 珪砂投入状況

工程③ 空練り

クニゲル V1 と珪砂をミキサーに投入した後、空練りを 1 分間行った。

工程④ 加水

空練り終了後、工程①で算出した量の水分をミキサー内に投入した。図 10.5.1-5 に示す調整盤を使用し、水分投入量を設定した。



図 10.5.1-5 水分投入量調整盤

工程⑤ 混練

水分投入後、3分間の混練を行った。図 10.5.1-6 にアイリッヒミキサー内部の様子を示す。



図 10.5.1-6 アイリッヒミキサー内部

工程⑥ 含水比の確認

3分間の混練終了後、含水比の測定を実施した。含水比の測定には Kett 水分計を用いた。この結果、含水比が目標の $10.5\% \pm 2\%$ の範囲内であることを確認した。

もし、含水比が目標含水率と異なる場合は、材料を廃棄し再度製作を行うものとした。図 10.5.1-7 に分析用の試料採取時の様子を示す。また、使用した Kett 水分測定器を図 10.5.1-8 に示す。



図 10.5.1-7 分析試料採取



図 10.5.1-8 Kett 水分測定

工程⑦ 包装

含水比が目標設定値範囲内の場合、ミキサーの中の混合土をベルトコンベアーにて輸送した。輸送時の様子を図 10.5.1-9 に示す。輸送された混合土は図 10.5.1-10 に示すとおりフレコンバックに梱包した。なお、この際保管時の含水比の変動を防ぐためフレコンバック内にビニールバックを設置し空気と接しないようにした。



図 10.5.1-9 混合材料のベルトコンベアー輸送



図 10.5.1-10 混合材料のフレコンバックへの収納

工程⑧ 倉庫保管

梱包された混合土は倉庫にて1週間程度保管し、圧縮成型工場へ輸送した。この際は含水比の変動を抑えるため、降雨の影響を受けない場所にて保管を行った。保管時の様子を図 10.5.1-11 に示す。また、図 10.5.1-12 に示すようにタグを用いてバッチ管理を実施した。



図 10.5.1-11 倉庫保管(1週間程度で移送)



図 10.5.1-12 フレコンバックタグ

なお、図 10.5.1-8 に示す Kett による水分試験は簡易測定であり、後日クニミネ工業(株) 研究所にて乾燥減量法により測定を実施した。試料を秤量瓶に入れ、一晩 105℃で乾燥の後、計量し値を算出した。

(4) 品質確認

1) 試験項目

材料混合時に実施した試験項目を表 10.5.1-3 に示す。各材料（クニゲル V1、珪砂）について、含水比の確認のため含水比試験を、混合率の確認のためメチレンブルー吸着量試験をそれぞれ実施した。

表 10.5.1-3 使用材料の試験項目

材料名	試験項目	数量・頻度
クニゲル V1	含水比 (JIS A 1203)	混合期間 (約 3 日) 毎 1 試料 (1 検体/試料)
	メチレンブルー吸着量 (JBAS-107-91) (検量線用: ベントナイト 100% の場合)	1 試料 (3 検体/試料)
珪砂	含水比 (JIS A 1203)	混合期間 (約 3 日) 毎 1 試料 (1 検体/試料)
	メチレンブルー吸着量 (JBAS-107-91) (検量線用: ベントナイト 0% の場合)	1 試料 (3 検体/試料)

2) 品質管理項目

表 10.5.1-4 に混合材料の品質管理項目を示す。

表 10.5.1-4 混合材料の品質管理項目

材料名	品質管理項目	数量・頻度
混合材料	含水比 (JIS A 1203)	1 試料/バッチ (1 検体/試料)
	メチレンブルー吸着量 (JBAS-107-91)	混合期間 (約 3 日) 毎 1 試料 (3 検体/試料)

3) 品質確認結果

a. メチレンブルー吸着量測定

メチレンブルー吸着量試験結果よりクニゲル V1 の混合率は 68.8~70.3%であった。この結果より、クニゲル V1 と珪砂の混合材料の混合比が 70:30 になっていることを確認した。

b. 含水比測定

混合材料の含水率の測定結果を表 10.5.1-5 に示す。

表 10.5.1-5 材料含水比

番号	含水比(%)
1	11.2

2	11.4
3	11.2

上記の結果、全ての製作バッチにおいて目標管理値である含水比 $10.5 \pm 2\%$ (8.5～12.5%)を満たしていることを確認した。

10.5.2 緩衝材ブロックの製作

試験ケースは、緩衝材流出予備試験（緩衝材ブロック 1 段）と緩衝材流出試験（緩衝材ブロック 6 段+ペレット）の 2 ケースであるので、これに必要となる数量（56 個）の緩衝材ブロックを製作した。緩衝材ブロックはハンドリング性を考慮して、横方向 8 分割、縦方向 6 分割の計 48 分割のブロックが全て同一形状であるため、金型を用いた静的プレスにより全ブロックを製作した。以下に緩衝材ブロックの製作について示す。

(1) 製作方法

1) 製作フロー

図 10.5.2-1 にエロージョン試験用緩衝材の製作フローを示す。

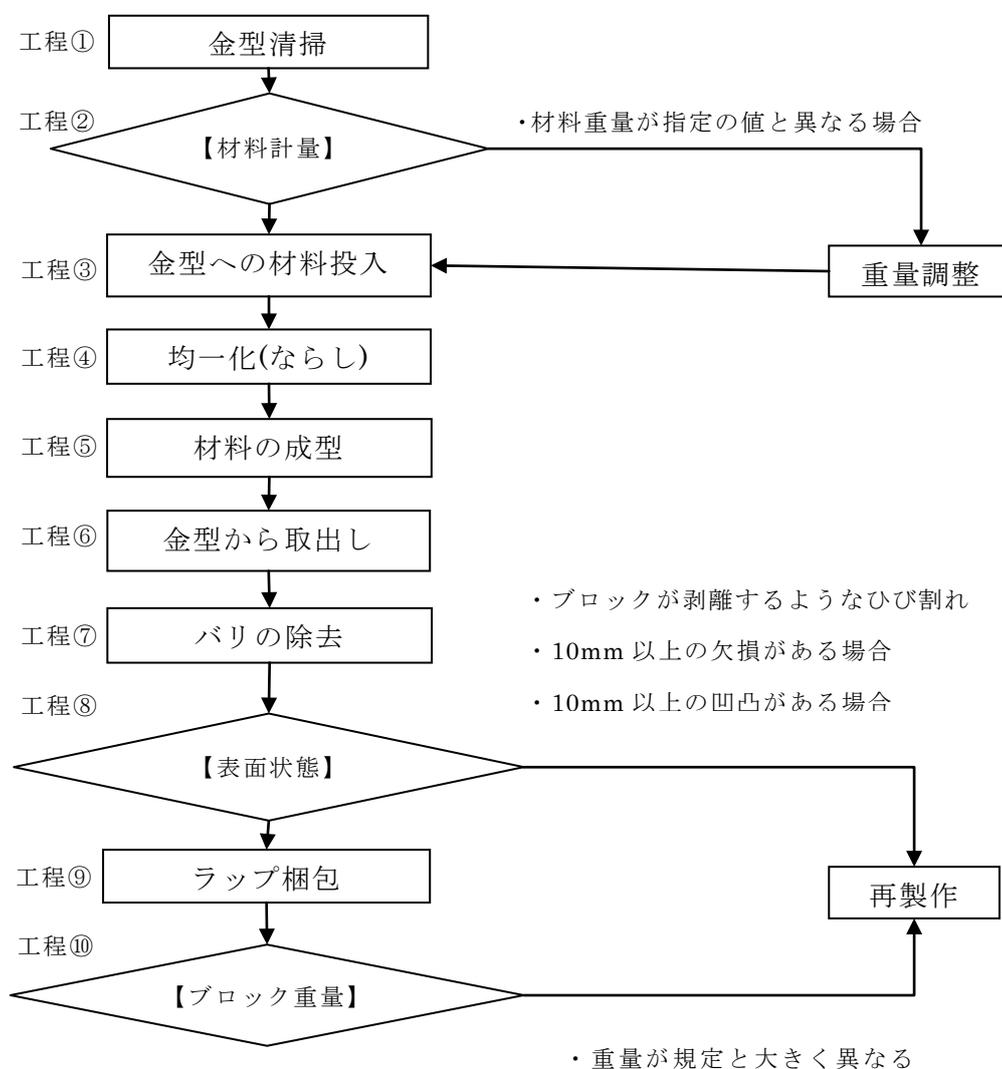


図 10.5.2-1 エロージョン試験用緩衝材ブロックの製作フロー図

2) 製作時の状況

緩衝材ブロックの製作工程を以下の①～⑩に示す。また、図 10.5.2-2～図 10.5.2-10 にエロージョン試験用緩衝材の製作時の状況である。

工程① 金型の清掃

材料投入に先立ち、金型の付着物（残留した材料等）を除去する。

工程② 材料計量

投入する材料が規定されたブロック重量内に収まるように計量する。図 10.5.2-2 に材料計量の様子を示す。



図 10.5.2-2 材料計量の様子

工程③ 金型への材料投入

金型底部に金型付着防止のためにビニールシートを敷き、材料を金型へ投入する。図 10.5.2-3 に材料投入の様子を示す。



図 10.5.2-3 金型への材料投入

工程④ 均一化(ならし)

投入した材料を水平にならし、金型への材料付着防止のために上面にビニールを敷く。図 10.5.2-4 に均一化の様子を示す。



図 10.5.2-4 均一化(ならし)

工程⑤ 材料の成型

投入した材料を圧縮し成型する。図 10.5.2-5 に材料の成型の様子を示す。



図 10.5.2-5 材料の成型

工程⑥ 金型から取出し

金型から成型されたブロックを取出す。図 10.5.2-6 に金型からの取出しの様子を示す。



図 10.5.2-6 金型からの取出し

工程⑦ バリの除去

ブロック上面より付着防止ビニールを取除き、ブロックのバリを除去する。図 10.5.2-7 にバリの除去の様子を示す。



図 10.5.2-7 バリの除去

工程⑧ 表面状態確認及び寸法測定

ブロック底面の付着防止シートを取除き、ブロックの表面状態を確認する。このとき「ブロックが剥離するようなひび割れ」、「10mm 以上の欠損」、「10mm 以上の凹凸」のいずれかがある場合は不良品としてブロックは廃棄し、再製作を行うこととした。図 10.5.2-8 に表面状態の確認及び寸法測定の様子を示す。



図 10.5.2-8 表面状態の確認及び寸法測定

工程⑨ ラップ梱包

ブロックをラップで梱包し、ラップ表面に ID を記載する。図 10.5.2-9 にラップ梱包の様子を示す。



図 10.5.2-9 ラップ梱包

工程⑩ ブロック重量確認

成型されたブロックが規定の重量内であることを確認した。図 10.5.2-10 にブロック重量確認の様子を示す。



図 10.5.2-10 製品重量の確認

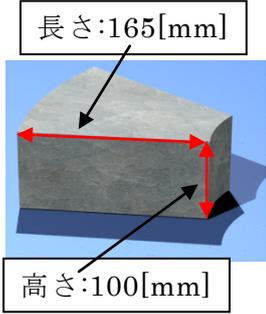


図 10.5.2-11 完成品外観(左:梱包前、右:梱包後)

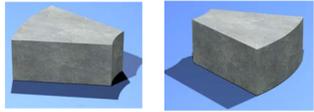
(2) 管理基準値

表 10.5.2-1 に衝材ブロックの製作上の品質・出来形確認項目・管理基準値を示す。なお、材料の含水比によって出来形寸法に影響を受けるため、投入量については、試験用緩衝材ブロックの脱型後の乾燥密度が 1.92Mg/m^3 となるように、現場にて適宜調整をしつつ作業を行った。

表 10.5.2-1 緩衝材ブロック製作時の品質・出来形確認項目・管理基準値

項目	内容	設定値	管理基準値	頻度
材料投入量	圧縮成型機の金型への材料投入量を電子秤にて測定	設計投入量：材料ごとの含水比に対して、成型後乾燥密度が $1.92\text{[Mg/m}^3]$ となるように投入量を調整	設計投入量 \pm 1%	ブロック 1 個 毎
成型圧力	圧縮成型機のゲージ圧力を目視確認	サンプルブロック製作時の実績より成型圧力：約 31.61[MPa]	設定値 (出来形品質により圧力を調整)	
圧縮保持時間	圧縮保持時間をストップウォッチ等にて測定	実績より約 20[min]	設定値	
ブロック寸法	圧縮成型機から脱型したブロックの寸法（高さ：4 箇所、長さ：5 箇所）をノギスにて測定		設計値 \pm 2mm	
ブロック外観	圧縮成型機から脱型したブロックの外観を写真撮影 正面、右側面、背面、左側面、上面、底面の 6 面を撮影	—	—	
脱型後乾燥密度	圧縮成型機から脱型したブロックの質量を電子秤にて測定し乾燥密度を算出	目標乾燥密度： $1.92\text{[Mg/m}^3]$	目標値 \pm 0.1 $[\text{Mg/m}^3]$	

また各管理基準項目に対してブロック全数に対して検査し、検査シートに記録した。図 10.5.2-12 の検査シートの一例を示す。

投入前測定	製作日	2014年 10月 29日			
	ブロックID	No.001			
	製作に用いたプレス機	70-CO10.5-1/8-100-1.9-001			
	製作に用いたプレス機	2号機			
	材料重量	[kg]	5.23		
	材料含水比	[wt%]	11.2		
	ゲージ圧力	[kg/cm ²]	204.08		
	成型力	[ton]	78.38		
	成型圧力	[MPa]	31.61		
	圧縮時間	[min]	3		
圧縮保持時間	[min]	20			
金型内ブロック寸法	[mm]		ピストン	シリンダー	金型内H寸法
		測定①	145.54	244.31	
		測定②	145.50	244.37	
		測定③	145.48	244.36	
		測定④	145.53	244.33	
平均	145.51	244.34	98.83		
金型内湿潤密度	[Mg/m ³]	2.18			
金型内乾燥密度	[Mg/m ³]	1.96			
脱型方法	-	金型分解+押し出し			
製品重量	[kg]	5.22			
金型への付着重量	[kg]	0.02			
重量合否		合格			
外観	ブロック表面状態	20mm以上の欠損	無し		
		5mm以上の凹凸	無し		
		ブロックが剥離するよう なひび割れ	無し		
					
品質合否		合格			
ブロック寸法	[mm]		高さ	長さ	
		測定①	100.32	166.14	
		測定②	100.33	166.05	
		測定③	100.17	166.03	
		測定④	100.27	166.09	
		測定⑤	100.27	166.06	
平均	100.27	166.07			
脱型後湿潤密度	[Mg/m ³]	2.12			
脱型後乾燥密度	[Mg/m ³]	1.91			
製作終了日時		2014年 10月 29日	11時 50分		
製作終了時の温度・湿度		15℃	20%		
備考	ピストンへの材料付着防止対策として、圧縮面にビニールシート装着。				

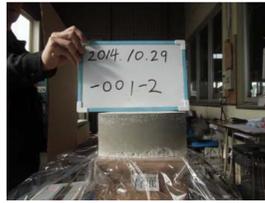
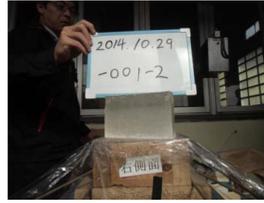
	製作日	2014年10月29日	ブロックID	No.001
記録写真	正面		背面	
	右側面		左側面	
梱包時	上面		底面	
		*ID.No.記載面を撮影 		

図 10.5.2-12 検査記録シート一例

10.6 緩衝材ブロック定置治具の製作

緩衝材ブロックの試験孔内への設置のための治具を製作した。以下に定置治具の製作について示す。

10.6.1 定置治具図面

緩衝材ブロック用定置治具およびスペーサーについて、図面を図 10.6.1-1 および図 10.6.1-2 に示す。

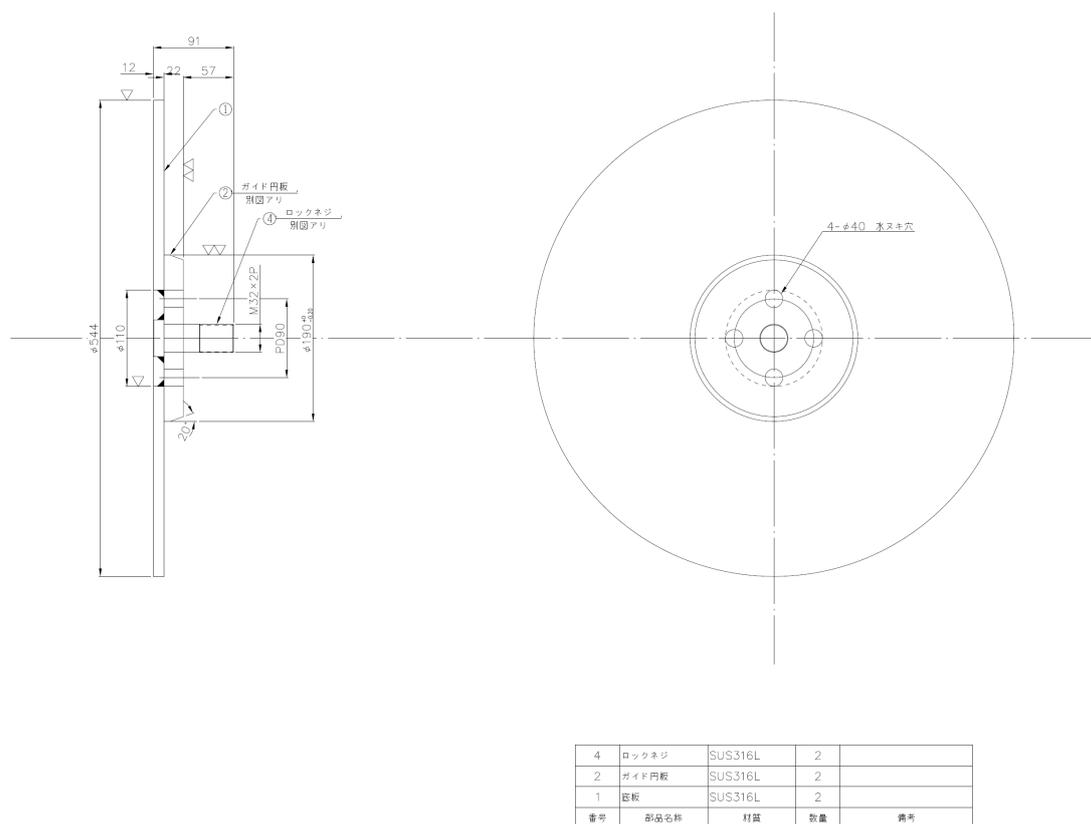


図 10.6.1-1 緩衝材定置治具底板図面

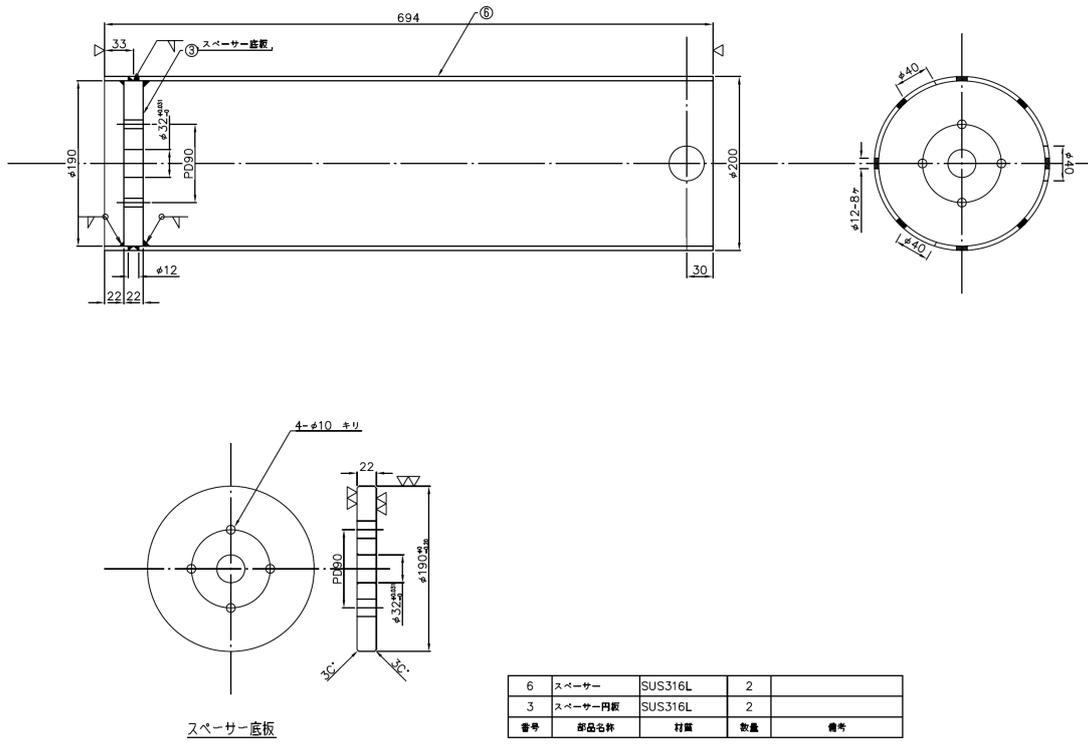


図 10.6.1-2 緩衝材定置治具スペーサー・スペーサー-底板図面

10.6.2 定置治具の強度確認

(1) 緩衝材ブロック膨潤による外圧強度

エロージョン試験用定置治具のスペーサーの緩衝材ブロックの膨潤による外圧強度の計算結果を表 10.6.2-1 に示す。

強度確認のための前提条件として、材料はSUS316L、評価温度 40℃以下、膨潤によって作用する外圧を 1MPaとした。また、確認方法はJIS B 8265-2010 圧力容器の構造 - 一般事項^[7] 附属書EのE4.2 項 円筒胴の計算厚さを使用した。

スペーサー外径 D_o 、スペーサー長さ L 、仮定した板厚 t より得られる L/D_o および D_o/t を用いて、文献[7]内に示される対応する形状曲線より係数 A が得られ、係数 A と対応する文献[7]内に示される材料曲線より係数 B が得られる。膨潤によって作用する圧力 1MPa を許容圧力と仮定したとき、下記の式 1 を基に計算上得られる必要な板厚は $t=2.7249\text{mm}$ となった。設計上のスペーサー板厚は 5mm であるので、強度は十分である。

$$P_a = \frac{4Bt}{3D_o} \quad \text{式 1}$$

表 10.6.2-1 外圧強度計算結果

項目	記号	単位	数値
スペーサー外径	D_o	[mm]	208
スペーサー長さ	L	[mm]	694
スペーサー板厚	T_N	[mm]	5
許容圧力	P_a	[MPa]	1
A 値	A	-	0.000593
B 値	B	[N/mm ²]	57.26138
許容圧力を満たす板厚	t	[mm]	2.7249

(2) 定置治具引き上げ／吊り下げ強度

定置治具の作用荷重の内訳を表 10.6.2-2 に示す。定置治具の質量は本体 48kg と取り付け予定のカバーの質量 57 kg の合計とし、緩衝材ブロックは本試験を対象として、5.2kg/個×8 個/段×6 段より 250kg とした。

表 10.6.2-2 作用荷重内訳

項目	記号	単位	数値
定置治具の質量	m_1	[kg]	105
試験ブロックの質量	m_2	[kg]	250
作用荷重	$F=m_1+m_2$	[N]	3,550

これに対し、定置治具の各箇所の強度計算結果を表 10.6.2-3～表 10.6.2-6 に示す。

定置治具の底板の許容荷重については以下に示す式 2 を用いて算出した。なお底板の材料については SUS316L とし、評価温度は 40℃以下として計算を行った。底盤強度に対する許容荷重の算出に使用したパラメータと算出結果を表 10.6.2-3 に示す。

$$P_{1a} = \rho \cdot A = \left(\frac{\sigma_y \cdot h^2}{\beta_{15} \cdot a^2} \right) \cdot \left\{ \pi(a^2 - b^2) \right\} \quad \text{式 2}$$

表 10.6.2-3 底板強度計算結果

項目	記号	単位	数値
底板の径	$2a$	[mm]	544
底板穴の径	$2b$	[mm]	110
内外半径比	b/a	[-]	0.2
底板の板厚	h	[mm]	12
β_{15}	β_{15}	[-]	1.6
材料の耐力	σ_y	[MPa]	175
許容荷重	P_{1a}	[N]	47,457

定置治具の溶接部の許容荷重については以下に示す式 3 および式 4 を用いて算出した。なお、溶接脚長は板厚（12mm）の 70%として計算を行った。定置治具の溶接部に対する許容荷重の算出に使用したパラメータと算出結果を表 10.6.2-4 に示す。

$$P_{1b} = \sigma_y \cdot Aw \cdot \eta \quad \text{式 3}$$

$$Aw = \pi(110 - 0.7 \times 12) \times 12 \times 0.707 \times 0.7 \times 12 \quad \text{式 4}$$

表 10.6.2-4 溶接部強度計算結果

項目	記号	単位	数値
溶接部の断面積	Aw	[mm ²]	1,877
材料の耐力	σ_y	[MPa]	175
溶接継手効率	η	[-]	0.3849
許容荷重	P_{1b}	[N]	126,430

ロックネジの許容荷重については以下に示す式 5 および式 6 を用いて算出した。なお、ロックネジの材料はSUS316Lとし、評価温度は40℃以下として計算を行った。ロックネジに対する許容荷重の算出に使用したパラメータと算出結果を表 10.6.2-5 に示す。

$$P_2 = \frac{\sigma_y \cdot As}{1.5} \quad \text{式 5}$$

$$As \geq \frac{\pi}{4} d_2^2 = \frac{\pi}{4} \times 30.701^2 \quad \text{式 6}$$

表 10.6.2-5 ロックネジの強度計算結果

項目	記号	単位	数値
ボルトの有効断面積	As	[mm ²]	740
材料の耐力	σ_y	[MPa]	175
許容荷重	P_2	[N]	86,333

スペーサーの管断面に対する許容荷重については以下に示す式 7 および式 8 を用いて算出した。なお、スペーサーの材料は SUS316L とし、評価温度は 40°C 以下として計算を行った。スペーサーの管断面に対する許容荷重の算出に使用したパラメータと算出結果を表 10.6.2-6 に示す。

$$A_1 = \left\{ \pi \left(\frac{198 + 208}{1.5} \right) - 3 \times 40 \right\} \times 5 \quad \text{式 7}$$

$$P_{3a} = \frac{\sigma_y \cdot A_1}{1.5} \quad \text{式 8}$$

表 10.6.2-6 スペーサー強度計算結果

項目	記号	単位	数値
管の断面積	A_1	[mm ²]	2,588
材料の耐力	σ_y	[MPa]	175
許容荷重	P_{3a}	[N]	301,933

スペーサーの吊上げ部のせん断力について次の式を用いて算出した。スペーサーの管断面に対する許容荷重の算出に使用したパラメータ及び管断面に対する許容荷重については表 10.6.2-7 に示す。

$$A_2 = 3 \times \left(40 - \frac{40}{2} \right) \times 5 \quad \text{式 9}$$

$$P_{3b} = \frac{\sigma_y \cdot A_2}{1.5\sqrt{3}} \quad \text{式 10}$$

表 10.6.2-7 スペーサー強度計算結果

項目	記号	単位	数値
管の断面積	A_2	[mm ²]	450
材料の耐力	σ_y	[MPa]	175
許容荷重	P_{3a}	[N]	30, 311

表 10.6.2-3 から表 10.6.2-7 の強度計算結果より許容荷重 (P_{1a}, P_{1b}, P_2, P_3 の最小値) は 30,311 N であり、定置治具の作用荷重 F の 3,550N よりも大きいことから、定置治具の強度は十分であると言える。

10.6.3 定置治具製作結果

緩衝材ブロック用定置治具の製作結果の定置治具の写真を以下に示す。また検査記録については添付資料に示す。



図 10.6.3-1 エロージョン試験用定置治具

10.7 試験孔の湧水量測定

試験孔の周辺に分布している割れ目のネットワークが相互に繋がっている可能性が高い。そこで、試験孔 2 および 3 でエロージョン試験を実施するのに先立ち、試験坑道 5 における試験孔 1～3 の湧水量を孔内水位上昇速度から換算して求めた。また、満水後の水の動きについては 3 次元流向流速測定により行った。

10.7.1 湧水量測定

(1) 測定ケース設定

湧水量の測定は、隣接孔の状況を変化（充水、排水）させて行い、周辺孔の状態が湧水量に及ぼす影響を確認した。測定ケースを表 10.7.1-1 に示す。

表 10.7.1-1 湧水量測定実施ケース

試験 ケース	流入量 測定孔	測定時の状態			実施回数 (回)
		試験孔 1	試験孔 2	試験孔 3	
1	試験孔 1	■	○	○	1
2	〃	■	○	×	1
3	〃	■	×	○	1
4	〃	■	×	×	1
5	試験孔 2	○	■	○	1
6	〃	○	■	×	1
7	〃	×	■	○	1
8	〃	×	■	×	1
9	試験孔 3	○	○	■	1
10	〃	○	×	■	1
11	〃	×	○	■	1
12	〃	×	×	■	1

■：測定孔（カラの状態から流量測定、○：満水、×：カラ）

(2) 湧水量測定方法

湧水量測定の流れを図 10.7.1-1 に示す。また以下に各項目の詳細を示した。

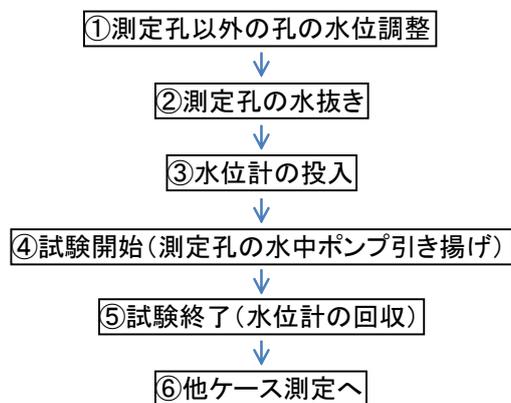


図 10.7.1-1 湧水量測定フロー

① 測定孔以外の孔の水位調整

湧水量測定では表 10.7.1-1 に示すようにケースにより測定孔以外の孔（以後、他孔と呼ぶ）を満水や空の状態に測定孔からの湧水量を計測した。そのため他孔の水位を満水や空の状態に調整した。調整方法は図 10.7.1-2 に示すように、満水の場合は掘削孔高さの位置に水位がくるように試験前にバケツ等で水位を調整した。また、空にする場合は水中ポンプを試験孔下部に設置して、試験孔の水を汲み出した。また試験中は常時排水の状態とした。

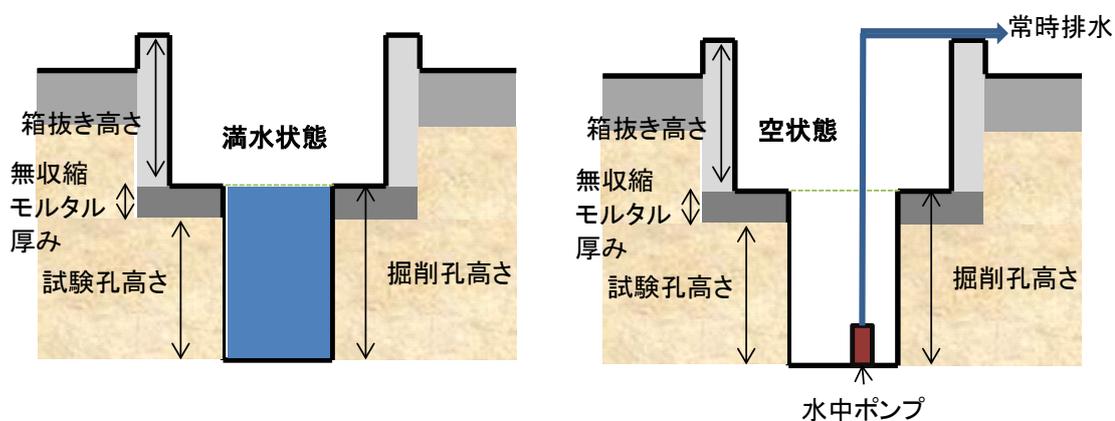


図 10.7.1-2 満水や空の状態の模式図

② 測定孔の水抜き

①の作業と同時に測定孔も水を汲み出し、空の状態とした。水の汲み出し方法は①の作業と同様に測定孔下部に水中ポンプを設置して汲み出した。

③ 水位計の投入

水位測定は圧力式の水位計を用いた。試験孔の水の汲み出しと他孔の水位調整がともに終了してから、水位計を測定孔内に紐で吊るし孔底まで降ろした。なお、水位計は自己ロガータイプのため、試験終了後に回収しなければデータを確認出来ない。そのため、試験中の水位の確認やおおまかな水位上昇速度の把握を目的として、ロープ式水位計（水面に接触するとブザー音になり、その際にロープに記載された目盛りから水位を読み取る。）も併用した。使用した圧力式水位計とロープ式水位計の仕様を表 10.7.1-2 に示す。またこれらの写真を図 10.7.1-3 に示す。

表 10.7.1-2 水位計の仕様

種別	名称	主な仕様	数量	備考	寸法
水位計	圧力式水位計（絶対圧水位計）	OYO 製：S&DL mini4800 水位測定範囲：10m 精度：±0.1%ofF.S. メモリ容量：40000 点	1	温度測定も可能	φ22mm×L150mm
	大気圧計（バロメータ；大気圧補正用）	OYO 製：S&DL mini4800 精度：±0.1%ofF.S. メモリ容量：40000 点	1	上記水位計の大気圧補正用	φ22mm×L150mm
	ロープ式水位計	ヤマヨ測定器製：RWL50M 目盛り：片面 1cm 目盛り. センサ：φ12mm×L150mm 50g	1	水位確認用	220×139×333mm



圧力式水位計



ロープ式水位計

図 10.7.1-3 水位計写真

④ 試験開始

測定孔の水中ポンプ引き上げを試験開始とし、開始時刻を記録した。

⑤ 試験終了

湧水量測定は測定孔が満水状態となるまで行うことを基本としたが、他孔が空の状態など水位回復が極端に遅い場合には満水状態の前でも試験を終了するものとした。試験終了は水位計を回収した時点とし、終了時刻を記録した。湧水量は回収した水位計の水位データより得られる水深と測定孔の直径から算出した。

⑥ 他ケース測定へ

他ケースが残っている場合は①から再度計測を実施した。図 10.7.1-4 に湧水量測定状況を示す。



図 10.7.1-4 湧水量測定状況

(3) 湧水量測定結果

図 10.7.1-5～図 10.7.1-7 に各試験孔で測定した湧水量測定試験の水位経時変化をケースごとに示す。図の左軸は試験孔の孔底からの水位高さを示し、下軸は試験開始からの経過時間を示している。なお、図の掘削孔高さとは試験孔高さは表 10.3.2-1 の平均値を示した(以後特に表記がない場合、掘削孔高さとは試験孔高さは平均値を示す)。

試験孔 1 については、図 10.7.1-5 より他孔が満水であるケース 1 が最も水位回復が早く、

次に隣接する試験孔 2 が満水で試験孔 3 が空のケース 2 となった。試験孔 2 が空のケース 3 とケース 4 は水位の回復傾向がほぼ同じであった。このことから試験孔 1 の水位回復は他孔の水位状況に影響を受けており、隣の試験孔 2 の影響を最も受けることが分かった。

試験孔 2 については、図 10.7.1-6 より他孔が満水であるケース 5 が最も水位回復が早く、次に試験孔 1 が満水で試験孔 3 が空のケース 6 が早く、試験孔 1 が空で試験孔 3 が満水のケース 7 がほぼ同程度であり、他孔がいずれも空のケース 8 が最も水位回復が遅かった。このことから試験孔 2 の水位回復は他孔の水位状況に影響を受けており、両孔の影響をほぼ同程度受けていると考えられる。

試験孔 3 については、図 10.7.1-7 より他孔が満水であるケース 9 が最も水位回復が早く、次に試験孔 2 が満水で試験孔 1 が空のケース 11 の水位回復が早かった。試験孔 2 が空の状態のケース 10 とケース 12 の水位回復はいずれも極端に水位回復が遅くなり、上昇傾向はほぼ同じであった。このことから試験孔 3 の水位回復は試験孔 2 の状態に大きな影響を受けていると考えられる。

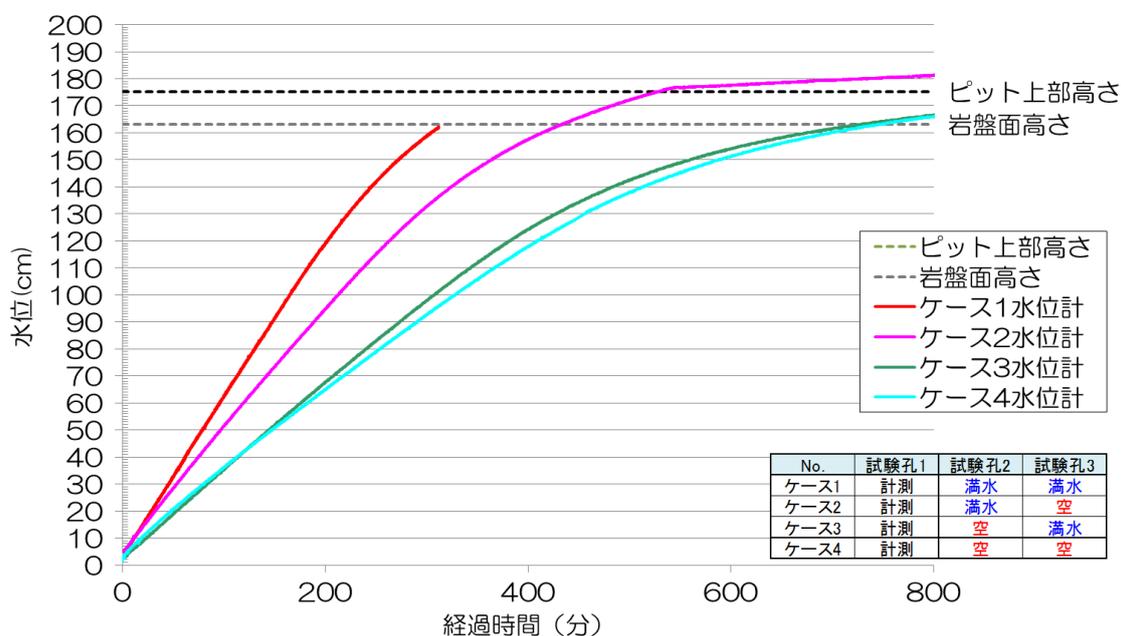


図 10.7.1-5 水位経時変化 (試験孔 1)

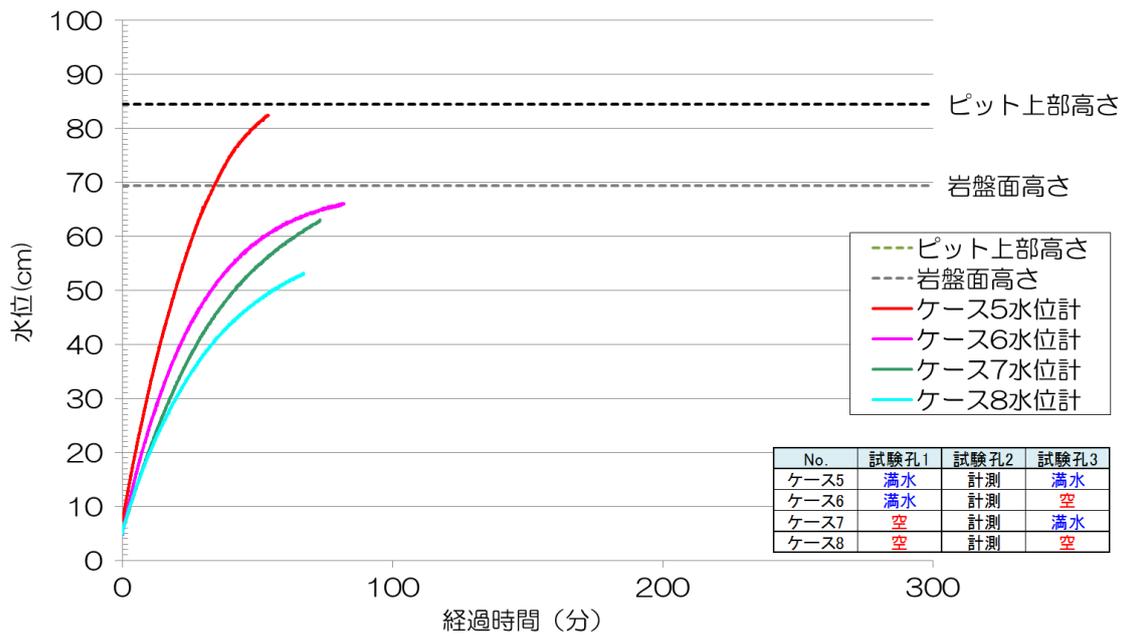


図 10.7.1-6 水位経時変化 (試験孔 2)

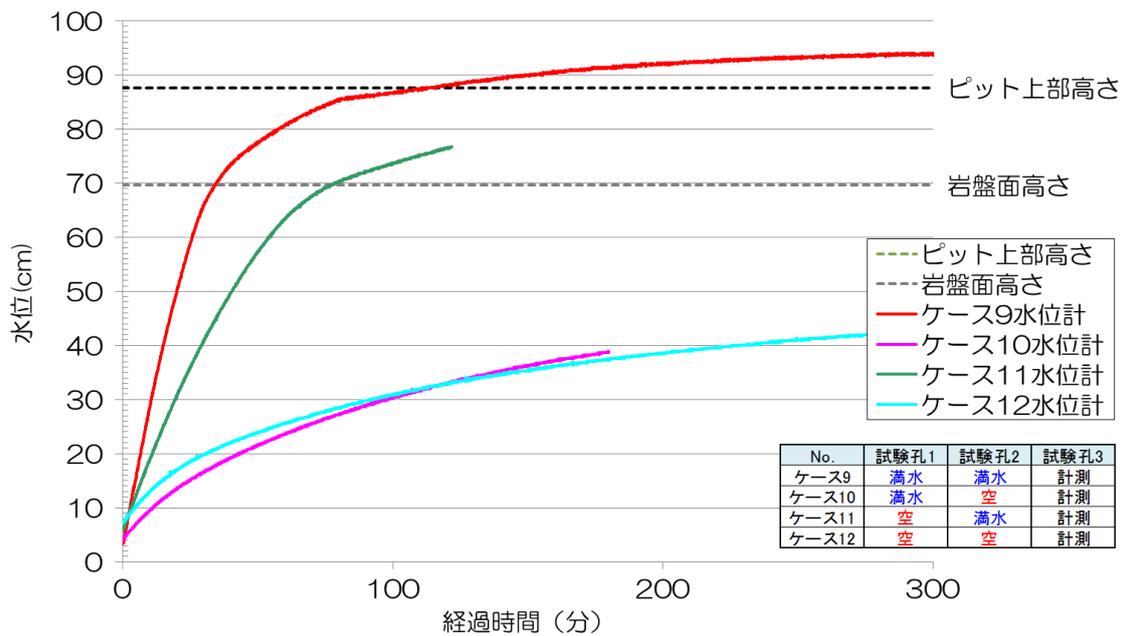


図 10.7.1-7 水位経時変化 (試験孔 3)

さらに、上記の結果を基に、湧水量測定試験時の水深の変化に応じた湧水量の変化について整理した。結果を図 10.7.1-8～図 10.7.1-10 にケースごとに示す。図の左軸は試験孔底からの水位高さを示し、下軸は湧水量を示している。なお、湧水量は水位の移動平均を求め、その値から水位上昇量を算出し、試験孔の面積を乗じて得られる値をプロットした。移動平均の取得期間は湧水量とサンプリングタイムを勘案して試験孔 1 が 10 分、試験孔 2 が 2 分、試験孔 3 が 5 分とした。また、図中に示した平均湧水量は、計測開始から水位が岩盤面高さに達するまで、それに満たない場合は試験開始から試験終了までの水位上昇量に断面積を乗じて得られる湧水増加量とそれまでに要した時間を用いて、以下の式より求めた。

$$\text{平均湧水量 (L/min)} = \text{湧水増加量 (L)} \div \text{所要時間 (min)}$$

試験孔 1 については、図 10.7.1-8 に示すように、どの水位においても他孔がいずれも満水のケース 1 の湧水量が最大であり、次に隣接する試験孔 2 のみが満水のケース 2 が大きく、試験孔 2 のみが空のケース 3 と他孔がいずれも空のケース 4 が最小で概ね同程度であるという結果となった。また、いずれのケースも水位 100cm 付近で曲線の傾きが変化しており、湧水量が減少する傾向が見られた。

試験孔 2 については、図 10.7.1-9 に示すように、どの水位においても他孔がいずれも満水のケース 5 の湧水量が最大であった。次に試験孔 1 のみ満水のケース 6 の湧水量、試験孔 3 のみ満水のケース 7、他孔がいずれも空のケース 8 の順に湧水量が大きいという結果となったが、ケース 6～8 の差は顕著なものではなかった。ケース 7 は、孔底付近では最も少ないケース 8 と同程度であったが、水位 55cm 付近より上の水位ではケース 6 と概ね同じ湧水量となった。なお、試験孔 1 のように湧水量曲線の傾きが明瞭に変化する個所はなかった。

試験孔 3 については、図 10.7.1-10 に示すように、どの水位においても多孔がいずれも満水のケース 9 の湧水量が最大であり、次に試験孔 2 のみが満水のケース 11 が大きいという結果となった。また、試験孔 2 のみが空のケース 10 と他孔がいずれも空のケース 12 はほぼ同じ傾向であり、前出の 2 ケースと比較して極端に湧水量が小さいという結果となった。また、ケース 9 とケース 11 では、水位 55 cm のあたりで曲線の傾きが変化しており、湧水量が減少する傾向が見られた。

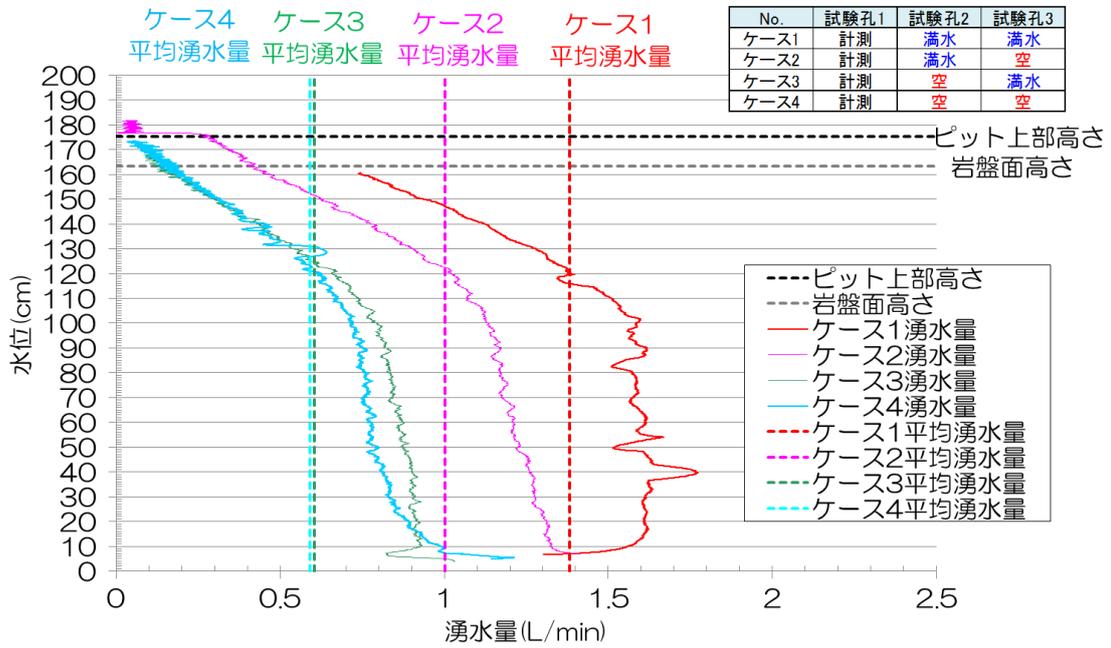


図 10.7.1-8 湧水量の深度分布 (試験孔 1)

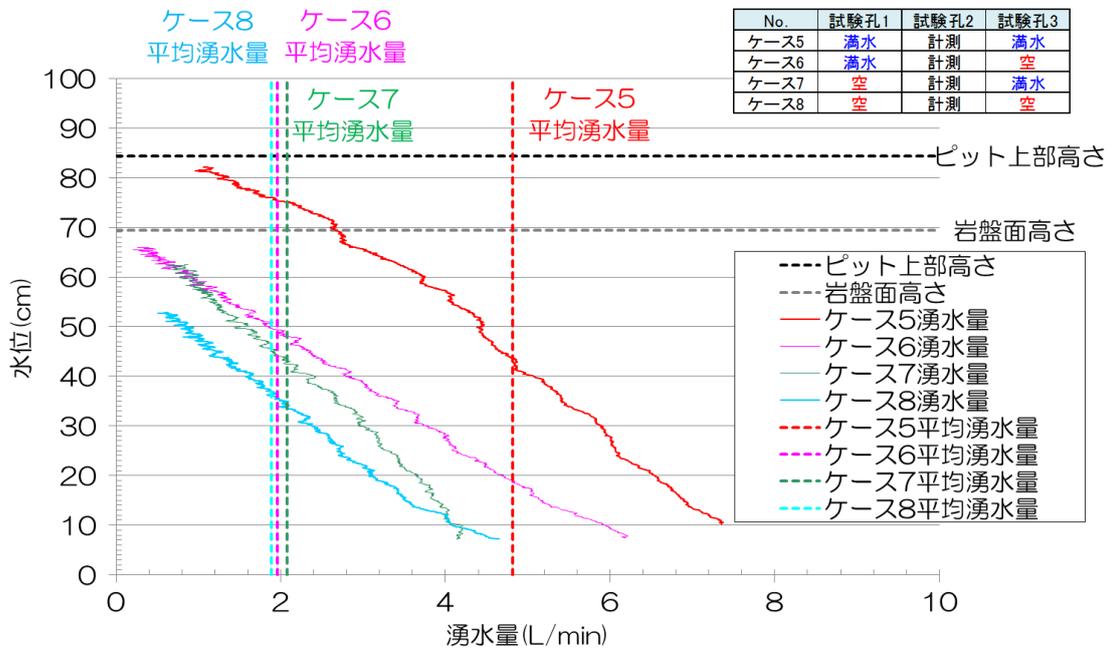


図 10.7.1-9 湧水量の深度分布 (試験孔 2)

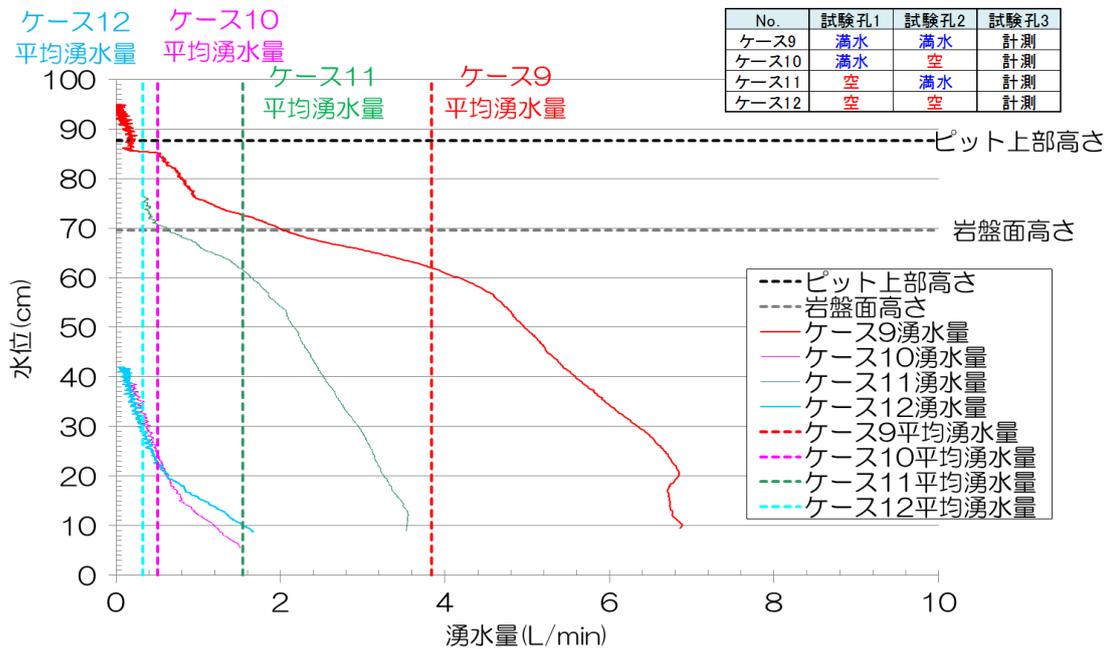


図 10.7.1-10 湧水量の深度分布 (試験孔 3)

試験孔 1 と 3 で確認された湧水量の変化する深度については、図 10.7.1-11 に示すように湧水量が多い割れ目ではその高さを水位が超えると静水圧がかかるため湧水量が減少することが考えられる。そのため、試験孔 1 では孔底からの高さ 100cm 付近、試験孔 3 では試孔底からの高さ 55 cm 付近に湧水量が多い割れ目がある可能性が高い。特に試験孔 3 については、「10.4 試験孔壁面の再観察」でも割れ目の確認されている範囲に該当することから、試験孔 3 ではこの付近に湧水量が多い割れ目がある可能性が高い。ただし、対象割れ目を水位が超えても静水圧の増加は緩やかであり、この高さより低い位置に割れ目がある場合も考えられることから、湧水割れ目の高さをこの情報だけでは断言できない。

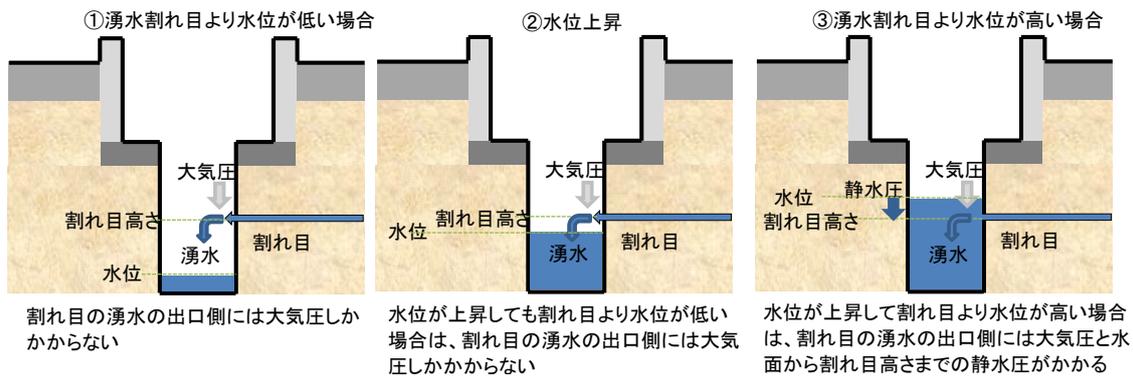


図 10.7.1-11 湧水割れ目と湧水量の関係模式図

表 10.7.1-3 に各ケースの平均湧水量、他孔の状態および同一試験孔での計測における他孔満水時の湧水量に対する比をまとめて示す。前述のとおり、各孔の平均的な湧水量については、計測開始から水位が岩盤面高さに達するまで、それに満たない場合は試験開始から試験終了までの水位上昇量、断面積および所要時間より算出した。各孔の断面積については、上部で測定された直径（試験孔 1 は $\phi 59\text{cm}$ 、試験孔 2 及び 3 は $\phi 58\text{cm}$ ）を用いて算出される円の面積で一定と見なした。

他孔満水時の湧水量をケース間で比較すると、試験孔 2 と 3 が 4~5 L/min であるのに対し、試験孔 1 の湧水量は 1.4 L/min であり、両者と比べて少ない結果となった。ただし、試験孔 3 は試験孔 2 を空にした状態であると湧水量は大きく下がり、他孔満水時に比べて 10%程度であった。このことから、試験孔 3 の湧水は周辺からの流入よりも、試験孔 2 からの流入の寄与が大きいと考えられる。

その試験孔 2 については、他孔のいずれかが空であるケースはいずれも、他孔満水時のケース 5 の約 40%となるが、細かく見ると試験孔 1 が空で試験孔 3 が満水のケース 7 が 44%、試験孔 1 が満水で試験孔 3 が空のケース 6 が 42%、他孔がいずれも空のケース 8 が 40%となっており、試験孔 3 が空のケースの湧水量の低下が大きい。さらにケース 7 は試験孔 2 の水位が上昇するにつれ、湧水量の低下が大きくなり、最終的にケース 6 とほぼ同じ湧水量になることから、試験孔 2 と 3 は亀裂を介して直接通じていると考えることができる。このことは、試験孔 3 を計測孔としたケースで試験孔 2 を空としたケース 10 とケース 12 が極端に低下したうえ、水位が途中までしか回復しなかったことから示唆されている。

一方、試験孔 1 については、他孔満水時も湧水量が 1.4 L 程度と少なく、他孔が空の際

も湧水量の減少は1L以下であるため、他孔の影響が小さいと言える。また、「10.4 試験孔壁面の再観察」の結果からも割れ目が少なく、周辺岩盤からの湧水も少ないと考えられる。試験孔2が空のケース3とケース4は湧水量が他孔満水時のケース1の40%程度になるが、湧水量の減少も1L/min以下であり、試験孔2から直接湧水が供給されていると言うよりも、周辺岩盤からの湧水が多い試験孔2が坑道周辺の湧水を集めるため、坑道周辺の水位が下がり、湧水量が減少している可能性も考えられる。なお、試験孔2を空、試験孔3を満水として、試験孔1のケース3において、時間経過とともに試験孔3の水位が低下することが確認されており、このことから試験孔2と3が亀裂を介して通じていることは明らかであると言える。

なお、試験は連日実施しているため試験坑道5自体の水位が低下していた可能性もあり、湧水量の変化は隣接した試験孔の影響だけでない可能性もあるため、定量的な評価には注意が必要である。

表 10.7.1-3 平均湧水量および測定時の隣接孔の状態

測定孔	ケース	平均湧水量(L/min)／隣接孔の状態			他孔満水時との比
		試験孔1	試験孔2	試験孔3	
試験孔1	ケース1	1.4	満水	満水	—
	ケース2	1.0	満水	空	71%
	ケース3	0.60	空	満水	43%
	ケース4	0.59	空	空	42%
試験孔2	ケース5	満水	4.8	満水	—
	ケース6	満水	2.0	空	42%
	ケース7	空	2.1	満水	44%
	ケース8	空	1.9	空	40%
試験孔3	ケース9	満水	満水	3.8	—
	ケース10	満水	空	0.51	13%
	ケース11	空	満水	1.5	39%
	ケース12	空	空	0.33	9%

10.7.2 3次元流向流速測定

(1) 測定ケース設定

全孔満水時における試験孔内の水の流れの有無を確認するため、3次元流向流速測定を行った。なお、試験孔2,3に関しては、他孔が満水と空の場合で湧水量が大きく異なったため、湧水箇所を確認することを目的とした流向流速測定についても試みた。表10.7.2-1に流向流速測定の実施ケースを示す。

表 10.7.2-1 流向流速測定実施ケース

測定項目	測定孔	測定位置(cm)		測定箇所	各孔の状態			実施回数 (回)
		(孔底からの高さ)			試験孔1	試験孔2	試験孔3	
流向流速 測定	試験孔1	上	165	試験孔 中央	満水	満水	満水	1
		中	88		満水	満水	満水	1
		下	5		満水	満水	満水	1
	試験孔2	上	68	試験孔 中央	満水	満水	満水	1
		中	41		満水	満水	満水	1
		下	5		満水	満水	満水	1
	試験孔3	上	70	試験孔 中央	満水	満水	満水	1
		中	44		満水	満水	満水	1
		下	5		満水	満水	満水	1
流向流速 測定 (湧水箇所確認)	試験孔2	試験孔下部から上部まで連続測定		試験孔端 (試験孔3側)	満水	満水	空	1
	試験孔3			試験孔端 (試験孔2側)	満水	空	満水	1

(2) 流向流速測定方法

1) 満水後の水の動きの測定方法

各孔満水時に各試験孔に水の流れていないか確認するため流向流速測定を実施した。流向流速測定の流れを図 10.7.2-1 に示す。また以下に各項目の詳細を示す。

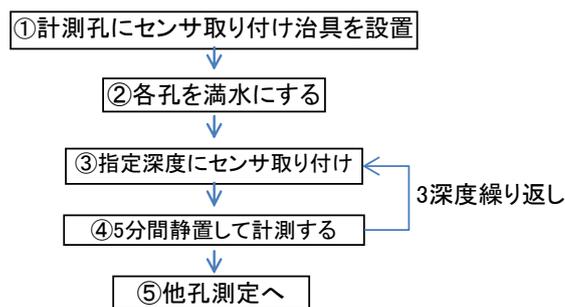


図 10.7.2-1 流向流速測定フロー

① 測定孔にセンサ取り付け治具を設置

測定孔にL型アングルを利用したセンサ取り付け治具を設置した。治具の役割はセンサを指定方位・深度にしっかり固定するためである。そのため治具はアンカーとボルトを用いて試験坑道の底盤コンクリートに固定した。設置状況を図 10.7.2-2 に示す。また、センサ位置は試験孔の中心とし、計測深度は試験孔の上中下三か所（表 10.7.2-1 参照）とした。X Y Z 流速方位を図 10.7.2-3 に示す。流向流速の方位は、試験坑道 5 の坑道軸を X 軸、直交方位を Y 軸、深度上下方向を Z 軸とした。東から西（坑道入口から奥へ）の流れが X+、北から南の流れが Y+、深度上から下への流れ（下降流）を Z+とした。



図 10.7.2-2 流向流速センサ取り付け治具設置状況

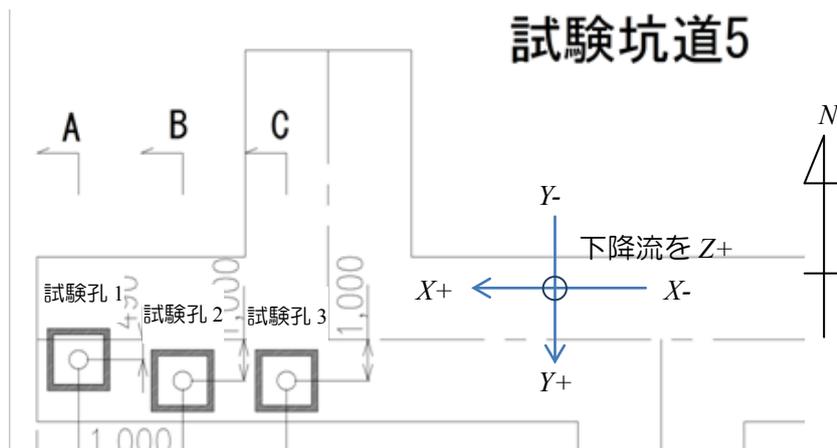


図 10.7.2-3 流向流速方位

② 試験孔を全孔満水にする

試験前に各孔を満水にした。満水状態は図 10.7.1-2 に示したように掘削孔高さまで水で満たした状態とした。

③ 指定深度にセンサ取り付け

図 10.7.2-5 の写真に示すように、L型アングルを組み合わせた治具に電磁流向流速計のセンサ部を固定して指定深度に設置した。本試験で用いた電磁流向流速計の主な仕様を表 10.7.2-2 に、計測器一式の写真を図 10.7.2-4 にそれぞれ示す。流向流速計はセンサ

部、インターフェイス部に分かれており、インターフェイスから、デジタル信号で計測値が計測・収録用のパソコンに送られる。

表 10.7.2-2 流向流速計の主な仕様

種別	名称	主な仕様	数量	備考	寸法
流向流速計	3 軸電磁流向流速センサ	JFE アドバンテック製：ACM3-RS 測定項目：X・Y・Z 水平鉛直 3 方向流速 測定範囲：各軸±250cm/sec. 測定精度：±2% or 0.5cm/sec 分解能：0.1cm/sec 検出部寸法：直径 20mm 球形	1		最大径 34mm 全長 420mm
	インターフェイス	JFE アドバンテック製：ACM-4IF 最大接続数：4 本 デジタル出力信号：RS232C アナログ出力信号：-1V～+1V	1	流速センサ用インターフェイス	260×190×40mm



図 10.7.2-4 流向流速計



図 10.7.2-5 センサ部取り付け状況

④ 5 分間静置して計測する

流向流速計の固定が終了したら、5 分間静置して計測した。計測中はセンサが揺れないよう測定孔の周りには近寄らないようにした。



図 10.7.2-6 流向流速測定状況

⑤ 他孔の計測へ

一つの試験孔の上中下三か所（表 10.7.2-1 参照）の計測が終了したら、①に戻り他孔の

計測を実施した。

2) 湧水箇所（深度）確認方法

試験孔 2、3 に関しては他孔が満水と空の場合では、湧水量が大きく違ったため、孔間で連結がある湧水割れ目が存在する可能性が考えられた。そのため、湧水箇所確認のために、他孔が空の状態での流向流速測定を実施した。

電磁流向流速計を用いた湧水箇所（深度）確認方法のフローを図 10.7.2-7 に示す。また下記に各項目の詳細を示した。

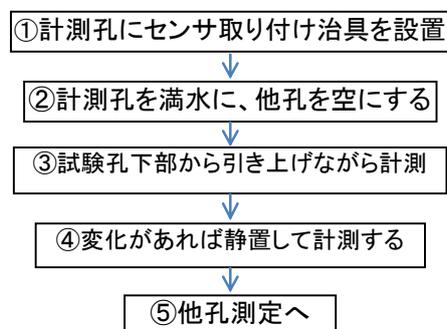


図 10.7.2-7 湧水箇所（深度）確認方法フロー

① 測定孔にセンサ取り付け治具を設置

他孔側の孔壁から 3cm 程度の個所にセンサがくるようにセンサ取り付け治具を設置した。

② 測定孔を満水に、他孔を空にする

試験孔 2 を計測する場合、試験孔 3 は空にして、試験孔 2 から 3 への孔間の流れが生じやすいようにした。孔間の割れ目が生じている個所があれば、割れ目に向かい試験孔の水の流出が起き、付近には流出点に向かって水の流れが生じると考えられる。そのためセンサが孔壁側への流れを検知した場合、その周辺に流出を生じている割れ目があると考えられる。図 10.7.2-8 に模式図を示す。また試験孔 3 を計測する場合、試験孔 3 を満水にして、試験孔 2 を空にした。この場合センサは試験孔 2 寄りの壁面に設置した。

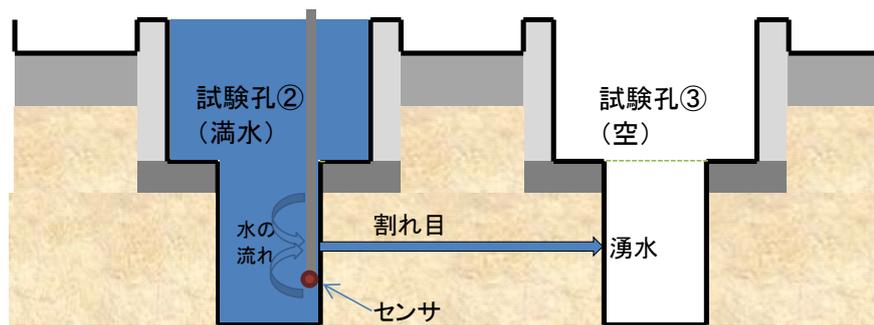


図 10.7.2-8 湧水箇所（深度）確認方法模式図

③ センサを試験孔下部から引き上げながら計測

センサ取り付け治具をスライドさせて、センサを試験孔下部からゆっくりと引き上げながら計測した。その際、出力に明瞭な変化が確認された深度では、④に移行した。

④ 変化があれば静置して計測する

引き上げ時に明瞭な変化があった箇所はセンサを固定して静置させ、計測を実施した。計測後は③の手順に戻り、再度引き上げながらの計測を実施した。

⑤ 他孔測定へ

試験孔高さ付近までセンサが来たら、測定を終了し、他孔の計測に移った。

(3) 流向流速測定結果

1) 満水後の水の動きの測定結果

全試験孔満水時における、試験孔間の水の流れの有無を確認することを目的として実施した、流向流速測定の結果を表 10.7.2-3 に示す。測定はセンサを試験孔内 3 箇所の所定の高さに設置し、静置してからデータを取得した。表には開始から 3 分後、4 分後、5 分後の 1 分間の移動平均値を 3 点と静置 3 分後から 3 分間の測定による平均的な値も示した。

結果は、試験孔 1 の中部と試験孔 3 の下部が若干他よりも高い値となった以外は、概ね測定精度である 0.5 cm/sec 以下を示した。また、3 分間の平均値については、どの試験孔のどの位置の値でも、測定精度である 0.5 cm/sec 以下の値を示した。これらの結果を踏まえると、各孔ともに計測可能な流れは生じていないと考えられる。

試験孔 1 の中部と試験孔 3 の下部の比較的大きな計測結果については、深度が変わると全方向でともに小さくなるため、何らかの誤差の可能性はある。電磁流速計の計測誤差の

原因として挙げられる最大の要因は、100Vの商用電源につながった励磁コイルであり、そこから誘導ノイズが信号線に入る恐れがある。別の要因としては、センサ付近に孔内で発生する気泡が接触した可能性も考えられるが明確ではない。

表 10.7.2-3 満水後の水の動きの測定結果

測定場所	測定深度(cm)	3分後流速(cm/sec)			4分後流速(cm/sec)			5分後流速(cm/sec)			3分間平均流速(cm/sec)			
		X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向	
試験孔1	上	165	-0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	-0.2	0.3	0.2	-0.2	0.2	0.1	-0.1
	中	88	-0.1	0.4	0.4	0.1	0.3	0.6	-0.1	0.3	0.5	0.0	0.4	0.5
	下	5	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0
試験孔2	上	68	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0
	中	41	0.0	0.2	-0.1	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.3	-0.1
	下	5	-0.1	0.1	0.0	-0.1	0.2	0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.1	0.2	0.1
試験孔3	上	70	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.2	-0.1	0.2	0.2	-0.1	0.2	0.2	-0.1
	中	44	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.2	-0.2	0.1	0.3	-0.1	0.1	0.2	-0.1
	下	5	-0.6	0.3	-0.5	-0.4	0.3	-0.5	-0.6	0.3	-0.5	-0.5	0.3	-0.5

2) 湧水箇所（深度）確認結果

試験孔 2, 3 間の連通箇所の特定を目的に、センサを試験孔内で鉛直上方に動かしながら流向流速測定を行った。試験は徐々にセンサを引き上げ、反応があった箇所で静置させ、流向流速を計測する手順とした。

図 10.7.2-9 に試験孔 2 の測定結果を示す。その際、センサは試験孔 3 寄りに設置し、試験孔 2 は満水で試験孔 3 を空の状態とした。なお、設置治具の向きを入れ替えた関係で、流向流速測定の時とは方位が異なることに注意が必要となる（方位は図内に示した）。図に示すように、孔底から 5cm に静置させた時は各軸ともに流れはないが、5cm から 30cm に引き上げる途中で各軸共に流速が増加した。そのため孔底から 30cm の高さでセンサを静置して計測した。結果は X 軸が試験孔 3 側に 0.7cm/sec で、Y 軸は精度以下、Z 軸は 0.8cm/sec 程度の上昇流が計測された。この付近の割れ目から試験孔 3 側に向けた流れが生じていると考えられる。

また、30cm から 60cm に引き上げる途中で Y 軸方向に変化が生じた。そのため、高さ 60cm の位置でもセンサを静置して計測した。結果 X 軸方向は精度以下になったが、Y 軸は南側から北方向に 1cm/sec 程度、Z 軸は 0.8cm/sec 程度の上昇流が計測された。X 軸方向の流れはなくなったが、南北方向の流れが生じており、センサ設置個所の北側に流出する割れ目が生じていると考えられる。その後 68cm まで引き上げセンサを静置させたが、60cm の時から大きな変化はなかった。

以上の結果を踏まえると、高さ 30cm～68cm までは流出する割れ目が全体的に分布している可能性が高い。表 10.7.2-4 に各高さで静置時に計測した流速を示す。

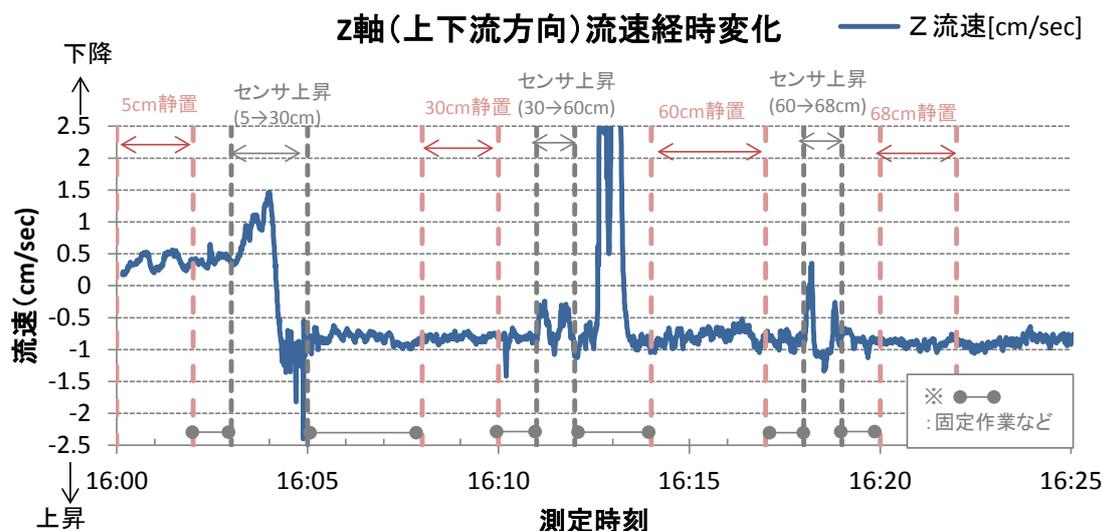
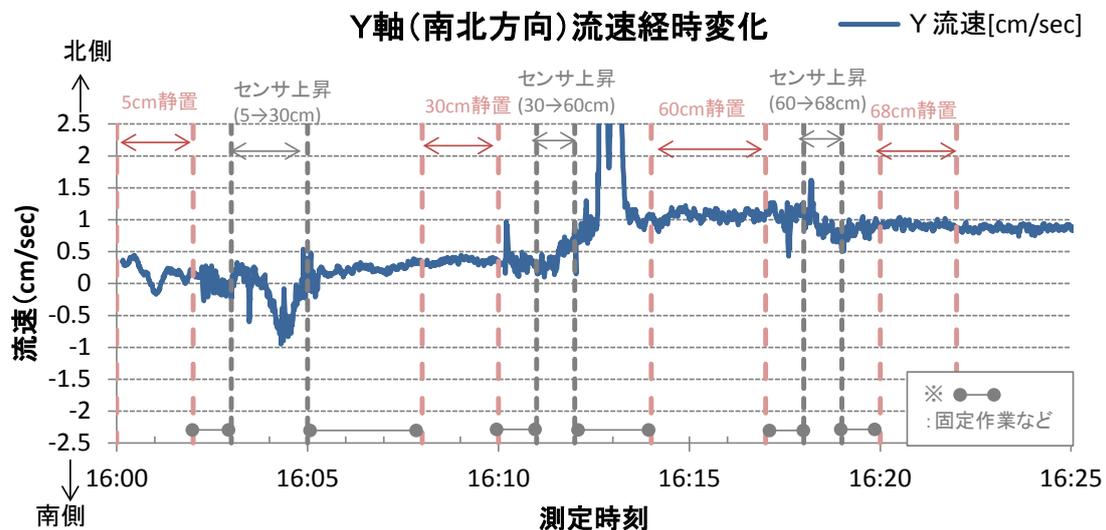
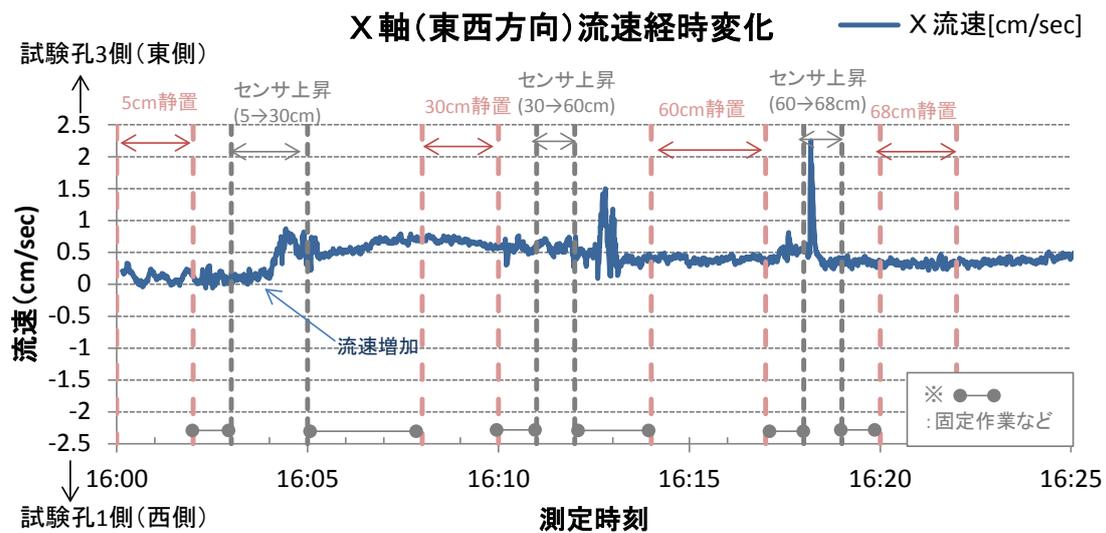


図 10.7.2-9 試験孔 2 の湧水箇所 (深度) 確認結果

表 10.7.2-4 試験孔 2 各深度での流速（静置計測）

孔底からの高さ	X流速	Y流速	Z流速	XY合成流速	XZ合成流速	YZ合成流速
[cm]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]
5	0.1	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4
30	0.7	0.4	-0.8	0.8	1.1	0.9
60	0.4	1.1	-0.8	1.2	0.9	1.3
68	0.3	0.9	-0.9	1.0	1.0	1.3

同様に、図 10.7.2-10 に試験孔 3 の測定結果を示す。その際、センサは試験孔 2 寄りに設置し、試験孔 3 は満水で試験孔 2 を空の状態とした。なお、設置治具の向きを元に戻したため、試験孔 2 の方向とは逆になっている（方位は図内に示した）。

図に示すように、孔底より 5cm に静置させた時は各軸ともに流れはないが、5cm から 44 cmに引き上げる途中で各軸共に流速が増加した。そのため、孔底から 44 cmの高さで静置させ計測した。結果は X 軸が試験孔 2 側に 0.6cm/sec で、Y 軸は精度以下、Z 軸は 0.6cm/sec 程度の上昇流が計測された。この付近の割れ目から試験孔 2 側に向けた流れが生じていると考えられる。

その後 68cm まで引き上げたが流速は 44cm の時点と大きな変化はなく、試験孔 2 側に向けた流れが継続した。

以上の結果を踏まえると、高さ 44cm～68cm までは流出する割れ目が全体的に分布している可能性が高い。表 10.7.2-5 に各高さで静置時に計測した流速を示す。

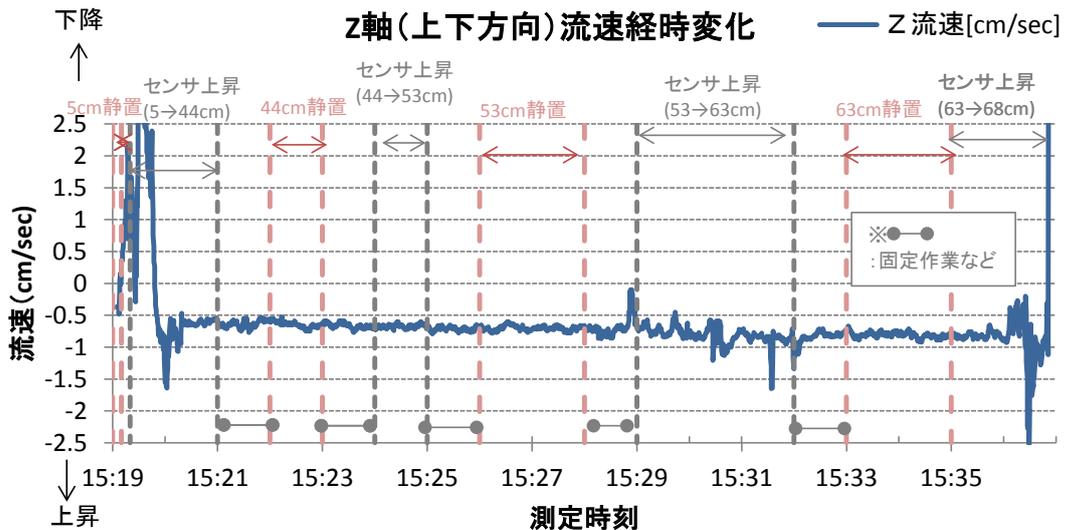
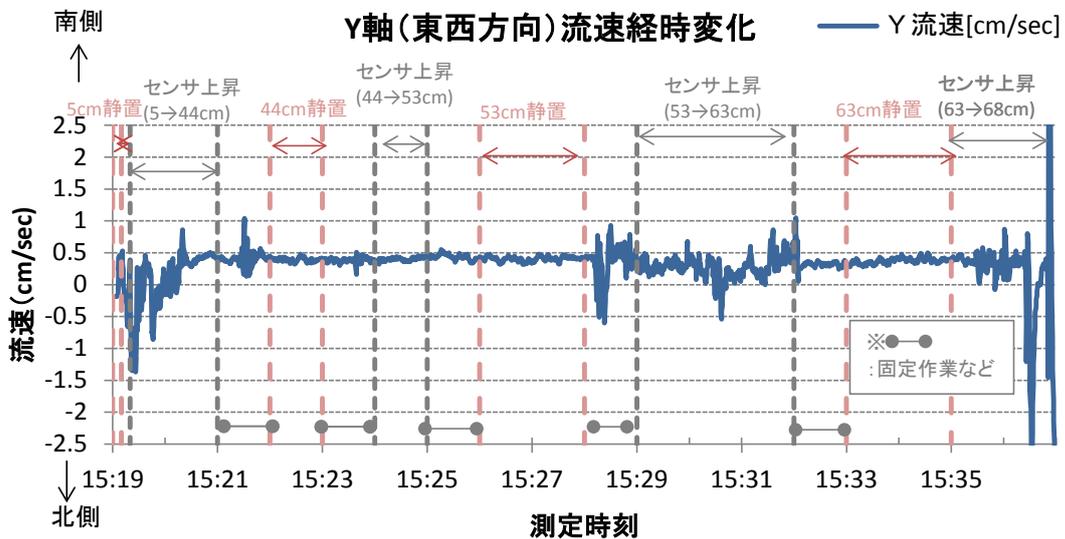
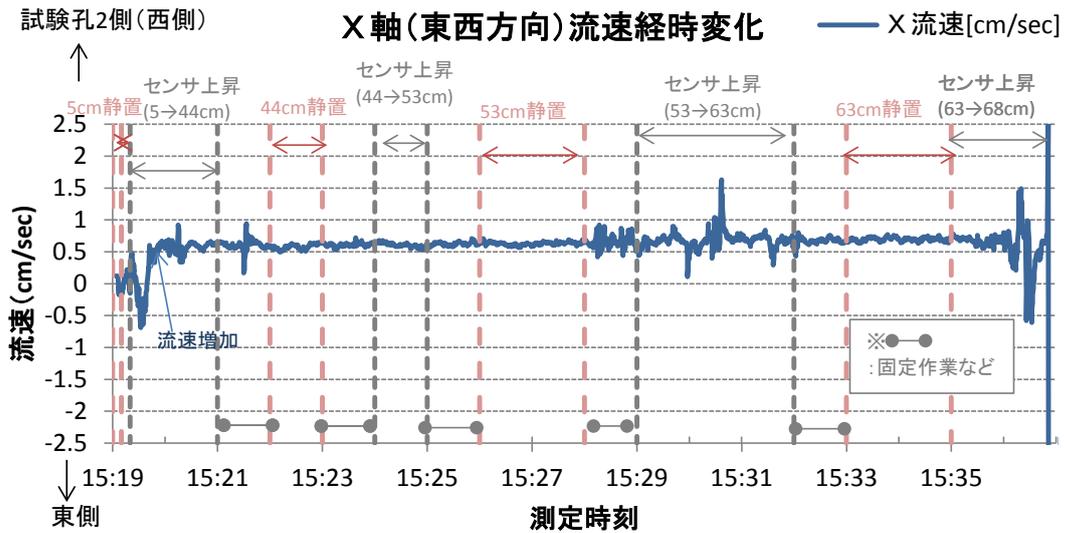


図 10.7.2-10 試験孔 3 の湧水箇所 (深度) 確認結果

表 10.7.2-5 試験孔 3 各深度での流速（静置計測）

孔底からの高さ	X流速	Y流速	Z流速	XY合成流速	XZ合成流速	YZ合成流速
[cm]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]	[cm/sec]
5	0.0	0.1	-0.2	0.3	0.3	0.4
44	0.6	0.4	-0.6	0.8	0.9	0.8
53	0.6	0.4	-0.7	0.9	0.9	0.8
63	0.7	0.3	-0.8	0.8	1.1	0.9

10.7.3 目視による湧水箇所の概略確認

(1) 湧水箇所観察方法

これまでの湧水量測定の結果より、試験孔 2 と 3 が繋がっていることが示唆された。本試験の検討対象であるエロージョン現象は孔内の湧水状況が試験に大きな影響を及ぼすことが想定されるため、目視による湧水箇所の確認を実施した。湧水箇所の観察は他孔が満水の状態で観察孔を空にした状態で、目視により実施し、湧水がある個所の位置や深度を記録した。

(2) 湧水箇所観察結果

目視による簡易な湧水箇所の確認結果を図 10.7.3-1 に示す。ただし、試験孔壁面は平滑でなく、湧水量も多くないことから、厳密な湧水箇所の特定は困難であった。試験孔 2 および 3 に湧水量の多い部分が比較的浅い部分にあることが確認された。その位置からの滴水が存在することにより、それより深い部分では湧水箇所の特定は困難であった。

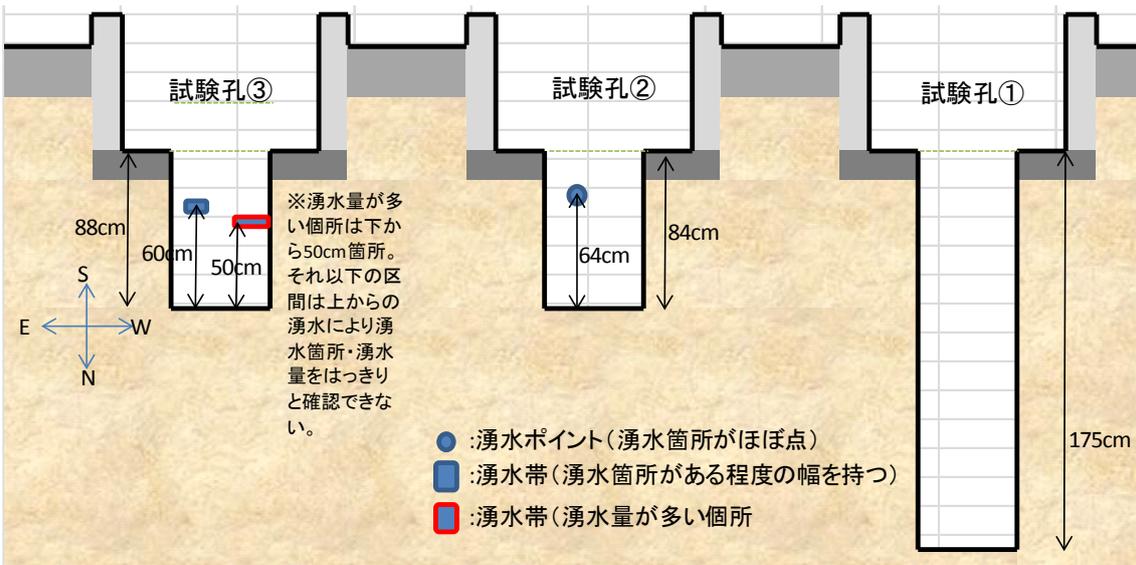
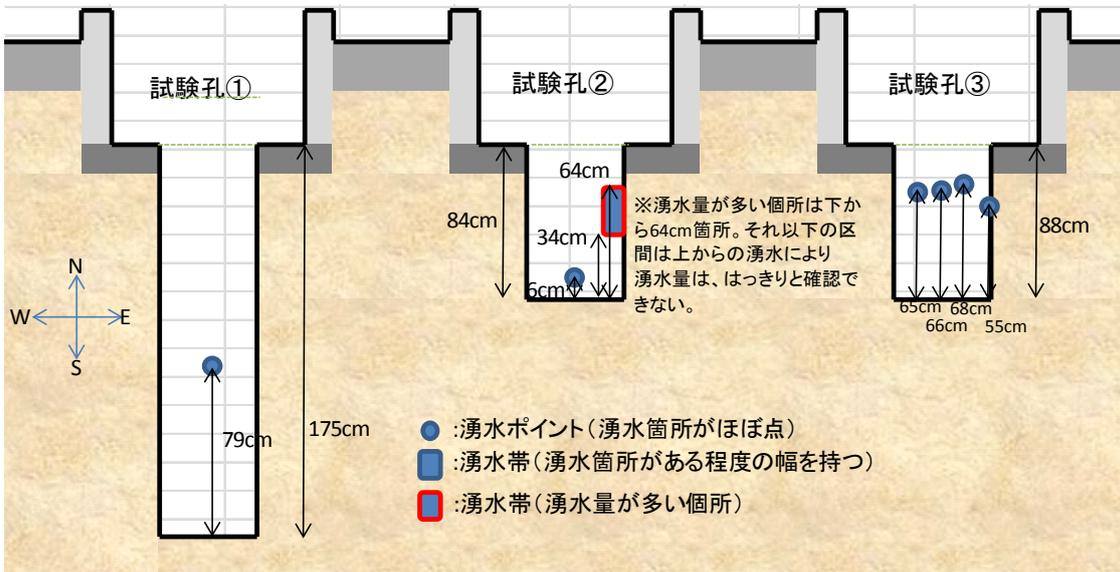


図 10.7.3-1 目視による簡易湧水確認結果 (上 ; 北側投影面、下 : 南側投影面)

10.8 地下水の採水

10.8.1 地下水の採取

別途実施される地上での小規模模擬試験機を用いた緩衝材ブロックの膨潤圧測定に供する地下水として試験孔 2 からの湧水を 60L 採水した (図 10.8.1-1 および図 10.8.1-2 参照)。



図 10.8.1-1 地上試験用の湧水採水状況 (試験孔 2)



図 10.8.1-2 採水した試験孔 2 の湧水 (60L)

10.9 緩衝材流出予備試験

緩衝材流出予備試験は試験孔 3 を対象として以下の手順により実施予定である。

10.9.1 湧水量測定

試験孔 3 の湧水量を試験直前に測定する。測定方法は、前述の「10.7 試験孔の湧水量測定」に準じる。その際、隣接する試験孔 2 および OP 腐食試験が実施中の試験孔 1 については手を加えない。

10.9.2 緩衝材ブロックの設置

試験孔 3 に溜まった地下水を水中ポンプで排出したあと、試験孔の底部が概ね水平になるよう、珪砂を投入して均しておく。

予備試験では、高さ 10cm の緩衝材ブロックを 1 段（高さ：10cm、重量；約 40.8kg）、定置治具（重量：約 57kg）の上に載せ、チェンブロックを用いて、試験孔 3 の中にブロックおよび定置治具（総重量：約 100kg）を真っ直ぐ吊り下ろす。

その後、エロージョン現象を近距離で撮影するため、緩衝材ブロックと岩盤との隙間に CCD カメラを 2 個セットする。併せて、上部からもエロージョンの状況を撮影するため、ビデオカメラをセットする。その際、パイピング・エロージョンの発生場所が、岩盤と緩衝材ブロックの界面（境界）かどうか分かることが望ましいので、偏光フィルター等で水面の反射の影響を低減することを試みる。

10.9.3 流出試料の採取

緩衝材ブロックを載せた定置治具を試験孔内に設置後、地下水を自由に流入させる。その間、地下水位が処分孔の天端と路盤レベルとの間の 30cm 区間で一定となるように、排水ポンプの吸水口の高さを調整して設置する（図 10.10.3-1 参照）。

その後、流出試料を以下の手順で採取する。

- ① 孔内水位が排水ポンプの水位に達し、排水が実施されるようになったら、その時点か

ら地下水を 5 分吸い上げ、坑道内に配置してある流出水一次採水用のポリバケツ 22L 相当に注水する。

- ② ポリバケツ内の水溶液を攪拌し、200cc の捕集ビンに入れて試料を採取する。
- ③ ①と②の作業を 1 時間後までは 10 分毎、2 時間までは 20 分毎、3 時間まで 30 分毎に 4 時間以降 48 時間までに 1 時間に 1 回試料を採取する。採取した試料は後述する「10.10.5 採取試料の吸光度分析」で分析する。
- ④ 試験終了後（48 時間経過後）、定置治具ごと緩衝材ブロックを吊り上げ、状況の観察を行う。また、岩盤と緩衝材ブロックの付着状況を目視等により観察する。

10.10 緩衝材流出試験

緩衝材流出試験は、緩衝材流出予備試験の終了後、試験孔 2 を対象として以下の手順により実施予定である。

10.10.1 湧水量測定

試験孔 2 の湧水量を試験直前に測定する。測定方法は、前述の「10.7 試験孔の湧水量測定」に準じる。その際、隣接する試験孔 3 および OP 腐食試験が実施中の試験孔 1 については手を加えない。

10.10.2 緩衝材ブロックの設置

予備試験と同様に、試験孔 2 に溜まった地下水を水中ポンプで排出したあと、試験孔の底部が概ね水平になるよう、珪砂を投入して均しておく。

本試験では、高さ 10cm の緩衝材ブロックを 6 段（高さ：60cm、重量；約 245kg）、定置治具（重量：約 57kg）の上に載せ、チェーンブロックを用いて、試験孔 2 の中にブロックおよび定置治具（総重量：約 300kg）を真っ直ぐ吊り下ろす。なお、本試験では、原環センターからの支給品であるベントナイトペレットを岩盤と緩衝材ブロックの隙間に充填する。この時、投入方法は自然落下方法とし、投入前後の重量を計測して、投入重量を管理する。なお、後述の CCD カメラは、ペレット投入前にセットしておく。

予備試験と同様に、エロージョン現象を近距離で撮影するため、緩衝材ブロックと岩盤との隙間に CCD カメラを 2 個セットする。併せて、上部からもエロージョンの状況を撮影するため、ビデオカメラをセットする。その際、パイピング・エロージョンの発生場所が、岩盤と緩衝材ブロックの界面（境界）かどうか分かることが望ましいので、偏光フィルター等で水面の反射の影響を低減することを試みる。なお、CCD カメラでの撮影は 48 時間までとし、48 時間撮影終了後に撤去する。

10.10.3 流出試料の採取

ペレット投入後、地下水を自由に流入させる。その間、地下水位が処分孔の天端と路盤レベルとの間の 30cm 区間で一定となるように、排水ポンプの吸水口の高さを調整して設置する（図 9 参照）。

その後、流出試料を以下の手順で採取する。

- ① 孔内水位が排水ポンプの水位に達し、排水が実施されるようになったら、その時点から地下水を 5 分吸い上げ、坑道内に配置してある流出水一次採水用のポリバケツ 22L 相当に注水する。
- ② ポリバケツ内の水溶液を攪拌し、200cc の捕集ビンに入れて試料を採取する。
- ③ ①と②の作業を 1 時間後までは 10 分毎、2 時間までは 20 分毎、3 時間まで 30 分毎に 4 時間以降 48 時間までに 1 時間に 1 回試料を採取する。採取した試料は後述する「10.10.5 採取試料の吸光度分析」で分析する。
- ④ 本試験は 48 時間の連続測定終了後、およそ 1 か月静置し、定期的（週一回程度）に試料の採取を行う予定であり、48 時間経過後は排水ポンプを停止し、採水時のみ排水ポンプを稼働させる。

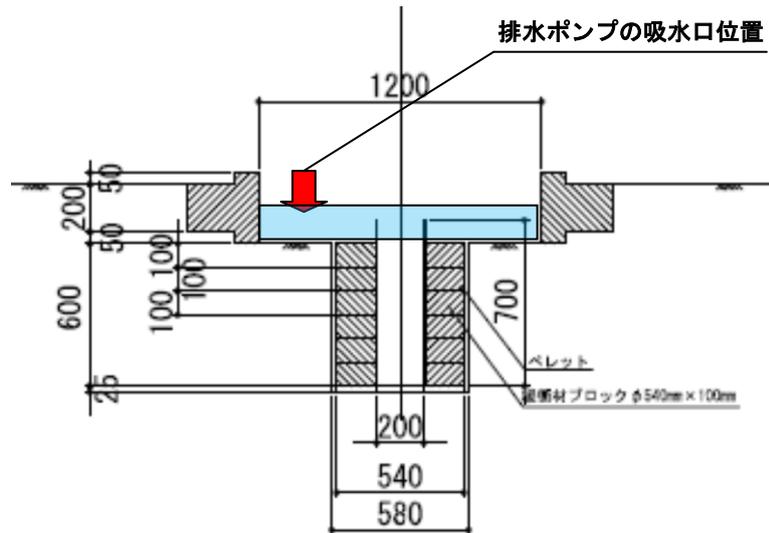


図 10.10.3-1 緩衝材流出試験におけるエロージョン量の測定

10.10.4 解体・コア分析

試験終了後（約 1 ヶ月経過後）、定置治具ごと緩衝材ブロックを吊り上げ、状況の観察を行う。また、岩盤と緩衝材ブロックの付着状況も観察する。ただし、緩衝材が膨潤によって岩盤と過度に密着している場合、無理に引き上げるとクレーン等の坑内設備を破損する恐れがあるため、クレーンに作用する荷重を確認しながら吊り上げ、場合によっては岩盤と緩衝材の密着を切断することもあり得る。

吊り上げた緩衝材ブロックについては、解体および分析（乾燥密度測定）を行う。試料は深さ方向に下、中、上（下から 1 段目、4 段目、6 段目）の位置ごとに、円周方向に内、中、外の位置、計 9 箇所からコアドリルを用いて採取するものとする。採取した試料は、所定の室内試験室に持ち帰り、土の含水比試験(JIS A 1203)、土粒子の密度試験 (JIS A 1202)、土の湿潤密度試験(JIS A 1224)等を実施する。

10.10.5 採取試料の吸光度分析

吸光度分析の実施手順を以下に示す。

(1) 使用機械

本試験では「株式会社 日立ハイテクノロジー社製 レシオビーム分光光度計 U-5100

(図)」を用いるものとする。この機械は波長範囲が 190～1,100nm と広く、通常の純水での測定と比較して不確定な物質が混入している可能性のある幌延の地下水の測定において有効であると考えられるため採用した。ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの吸光度の変化率が最も大きくなると考えられる 300nm についてもカバーしている。



図 10.10.5-1 分光光度計 U-5100 (日立ハイテク HP より)

(2) キャリブレーション

エロージョン量の測定に先立って、キャリブレーションを以下の手順で行う。試料への分散剤（ミラクル DP 200C）の添加を含む資料の調製方法については、地盤工学会基準（JGS0251-2000）の方法に準じるが、試行錯誤的な予備試験を行って手順の仔細を決定する。

- ① 現地地下水を使ってバックグラウンドの測定を行う。その際、現地地下水に分散剤を添加するケースも併せて行い、分散剤の添加による影響を把握する。さらに分散剤の攪拌時間についても標準の 1 分間で妥当であるかを確認する。
- ② 緩衝材サンプルを現地地下水に加えて濃度既知の検量溶液を作成し、これを用いて複数の濃度既知の溶液を作成する。その際、希釈が必要となる場合には、バックグラウンドの状態を統一するため、希釈水には現地地下水を用いるものとする。
- ③ 上記の溶液を用いて吸光度分析を行い、①のバックグラウンドの結果も踏まえて検量線（濃度と強度の相関）を取得する

なお、キャリブレーション・検量線の取得の作業は流出試験の直前に行うことで、季節変動等の外乱による現地地下水の変化に伴う測定誤差を低減する。

(3) エロージョン量の測定

採取した試料は、吸光度分析器の容器に移し、下記に示すものと同等の分散剤を入れて超音波等で分散させ、吸光度分析計により、吸光度分析で計測する。

製造元：株式会社片山化学工業研究所

販売元：片山ナルコ株式会社

製品名：ミラクル DP 200C

流出予備試験および流出試験で捕集ビンに採水した試料中に含まれるモンモリロナイトの濃度を吸光度分析により測定する。上記(2)で得られた強度と濃度との相関関係を示す検量線を活用し、測定された強度をモンモリロナイトの濃度へと換算する。

10.11 緩衝材流出予備試験試

緩衝材流出予備試験は試験孔 3 を対象として以下の手順により実施した。

10.11.1 湧水量測定

緩衝材流出予備試験に先立ち、試験孔 3 の湧水量を測定した。測定方法は、前述の「10.7 試験孔の湧水量測定」に準じて行った。その際、隣接する試験孔 2 およびオーバーパック腐食試験が実施中の試験孔 1 については特に手を加えずに測定を行った。結果を図

10.11.1-1 および図 10.11.1-2 に示す。

試験孔 1 においてオーバーパック腐食試験の試験体設置が行われる前（10.7 におけるケース 9）と比較すると、水位の上昇速度すなわち湧水量は小さくなっている。これは試験孔 1 に腐食試験の試験体を設置した影響であると推測されるが、具体的な影響要因については、試験体周りの埋戻し砂に設置した排水管からの排水による周辺の水圧低下や、試験孔上部に充填した粉末ベントナイトによる水みちの閉塞などが考えられるものの、特定することは困難である。

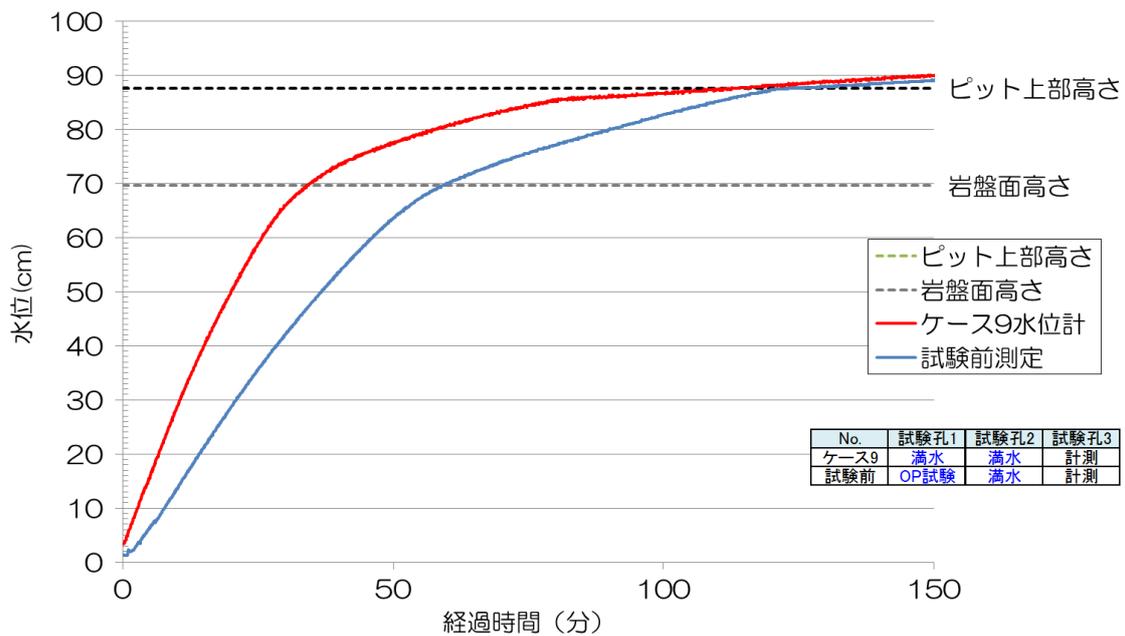


図 10.11.1-1 水位経時変化（試験孔 3；試験前測定）

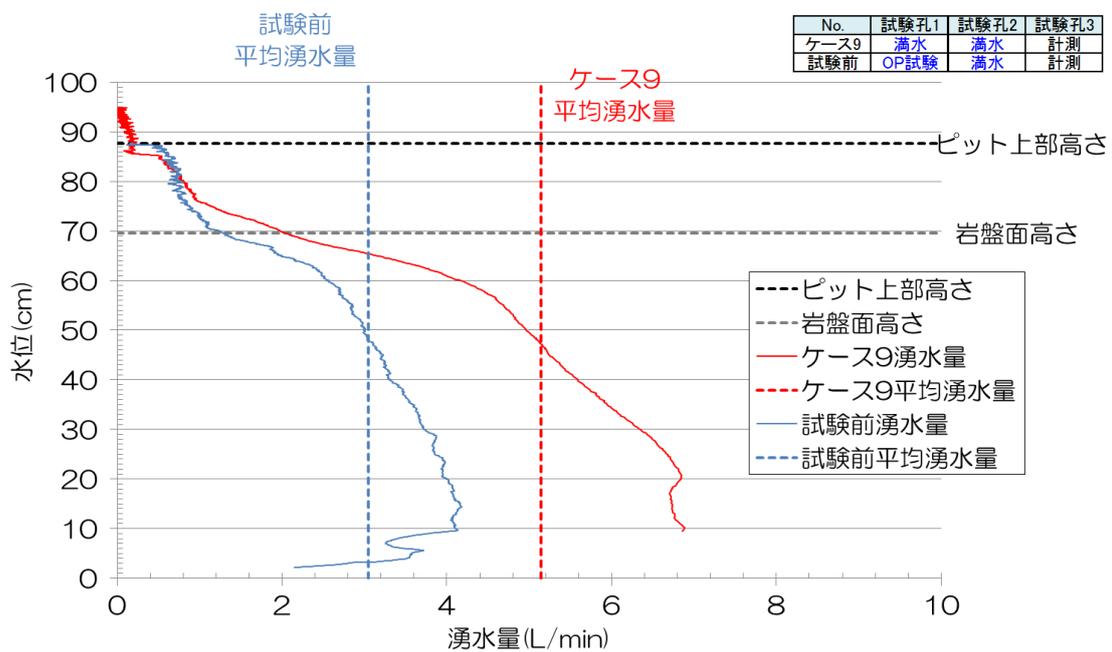


図 10.11.1-2 湧水量の深度分布（試験孔 3；試験前測定）

10.11.2 試験体・撮影機材等の設置

予備試験における試験体は、高さ 10cm の緩衝材ブロックを 1 段（高さ：10cm、重量；約 40.8kg）、定置治具（重量：約 57kg）の上に載せて作成した（図 10.11.2-1 参照）。チェーンブロックを用いて、この試験体（総重量：約 100kg）を真っ直ぐ吊り下ろして試験孔 3 の中に定置した（図 10.12.2-2 参照）。その際、図 10.11.2-2 に示したスペーサーの内側に排水ポンプを設置して、試験孔内からの湧水を排水しながら作業を行った。

試験体設置後は、エロージョン現象を近距離で撮影するため、緩衝材ブロックと岩盤との隙間の上方に CCD カメラを 2 台セットした（図 10.11.2-3 参照）。また、上部からもエロージョンの状況を撮影するため、水面の反射を低減するための偏光フィルターを装着したビデオカメラをほぼ真上にセットした。なお、これらの設置が完了後は、速やかに撮影を開始し、採水開始から 48 時間経過後に撮影を終了した。観察結果については、「10.12.5」において後述する。

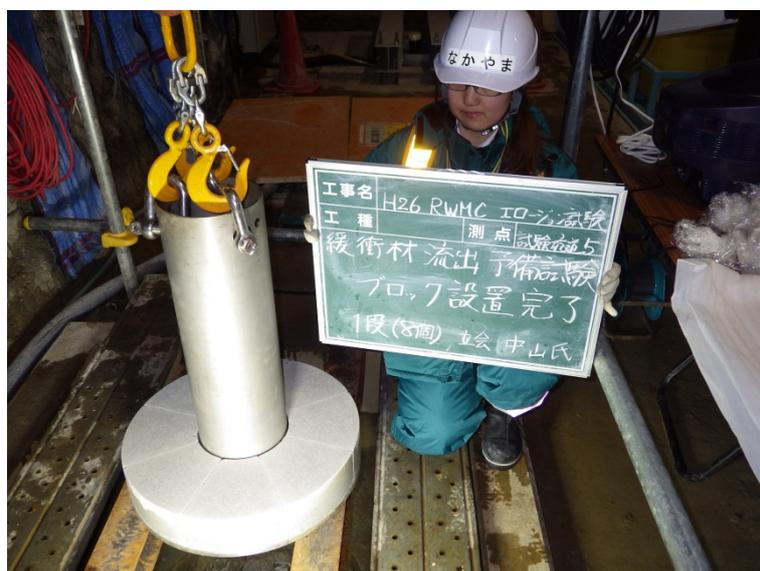


図 10.11.2-1 緩衝材ブロック設置完了

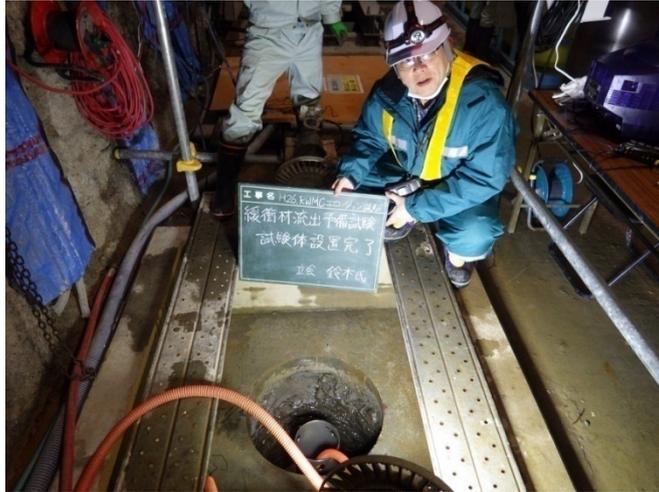


図 10.11.2-2 試験体設置完了

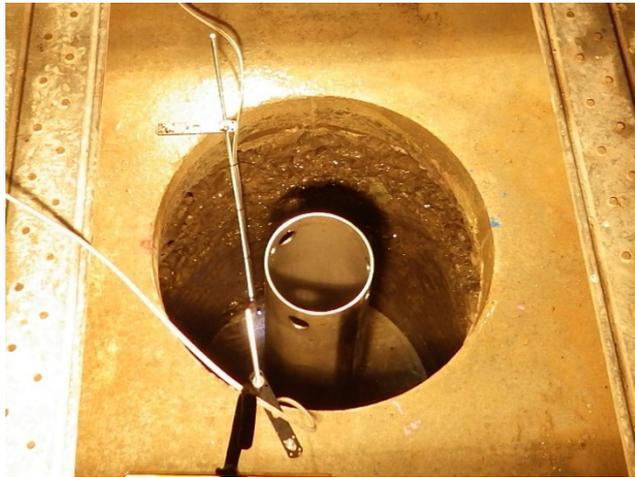


図 10.11.2-3 撮影機材の設置 (上：CCD カメラ、下：ビデオカメラ)

10.11.3 流出試料の採取

試験体と撮影機材を設置した後、これまでスパーサー内から行っていた排水を停止し、地下水を試験孔内に自由に流入させた。その間、地下水位がピット底板上面から+5cm～+10cmの範囲に位置するように、排水ポンプの吸水口をピット底板上面の高さに設置した（図 10.11.3-1 緩衝材流出予備試験におけるポンプ採水位置参照）。その後、流出試料を以下の手順で採取した。

- ① 孔内水位が排水ポンプの吸水口の高さを 5cm 以上上回り、排水できるようになってから、水の吸い上げを開始した。なお、採水間隔が長くなると水位が上がりすぎることが想定されたので、試験中はピット底板+5～+10cm の範囲に収まるよう適宜調整した。
- ② 排水ホース内に残った水の混合を防ぐため、吸い上げ開始直後の排水は小バケツ 1 杯分程度捨て、流出水一次採水用のポリバケツ（22L 相当）を軽く共洗いしてから、流出水を約 1 杯分溜めた（図 10.11.3-2 ポンプによる採水状況参照）。
- ③ ハンドミキサーでポリバケツ内の水を攪拌した後、200cc の捕集ビンで試料を採取した（図 10.11.3-3 採水後の攪拌・試料採取状況参照）。

①～③の作業を開始から 1 時間は 10 分毎、1～2 時間は 20 分毎、2～3 時間は 30 分毎、4 時間以降 48 時間までは 1 時間に 1 回行い、試料を採取した。採取した試料の分析については、「10.12.7 採取試料の吸光度分析」において後述する。

なお、試験終了後（48 時間経過後）は試験体を撤去する予定であったが、緩衝材流出試験と同様に約 1 ヶ月間静置し、同時期に撤去することとした。

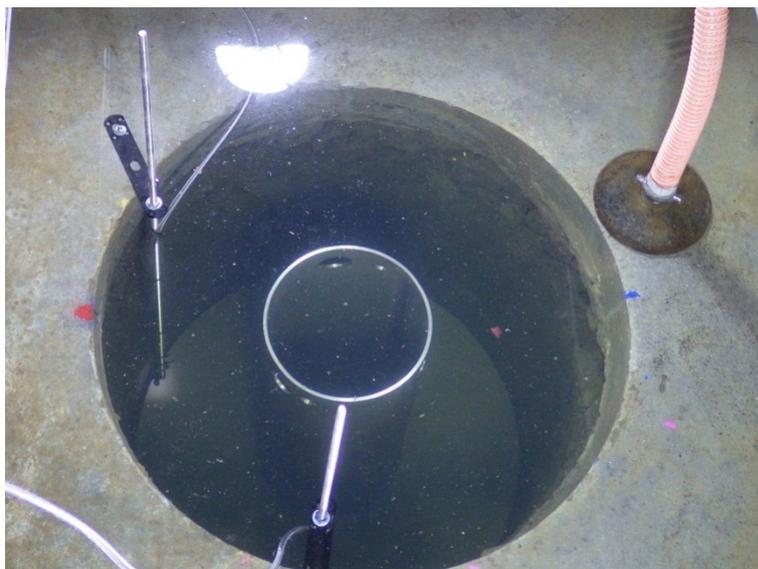


図 10.11.3-1 緩衝材流出予備試験におけるポンプ採水位置



図 10.11.3-2 ポンプによる採水状況



図 10.11.3-3 採水後の攪拌・試料採取状況

10.11.4 試験体の撤去

試験体設置から約1ヶ月経過後、定置治具ごと緩衝材ブロックを吊り上げ（図 10.11.4-1 ジャッキアップによる試験体引上げ状況参照）、緩衝材ブロックの撤去と状況の観察を行った（参照）。観察結果については、次項の「10.11.6 試験体の状態確認」において後述する。その後、岩盤と緩衝材ブロックの付着状況の観察を目的とした写真撮影を実施し、最後に試験孔の高圧洗浄（図 10.11.4-3 孔壁洗浄状況（試験孔3））を行い現状復旧した（図 10.11.4-4 孔壁洗浄完了（試験孔3）参照）。



図 10.11.4-1 ジャッキアップによる試験体引上げ状況



図 10.11.4-2 試験体の状態確認（予備試験；引き上げ後）

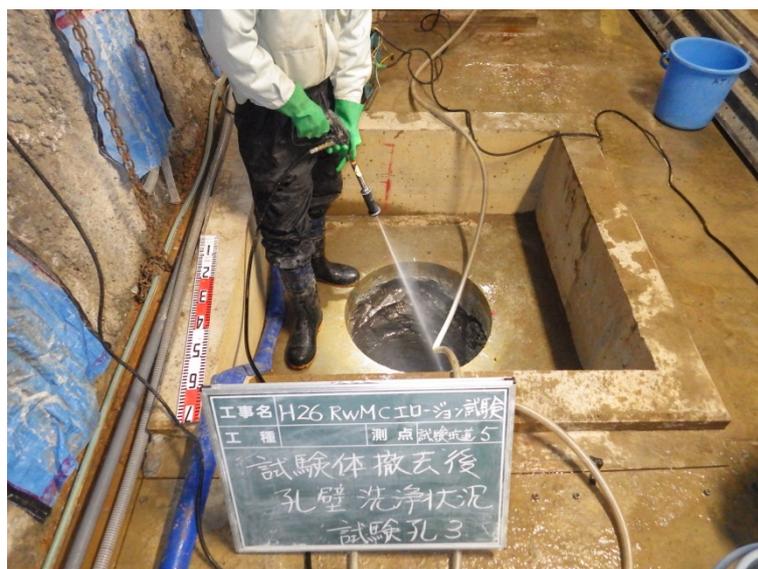


図 10.11.4-3 孔壁洗浄状況（試験孔 3）



図 10.11.4-4 孔壁洗浄完了（試験孔 3）

10.11.5 試験体の状態確認

(1) 48 時間連続採水中の観察

緩衝材流出予備試験で撮影した記録の一部を以下に示す図 10.11.5-1～図 10.11.5-4 は緩衝材ブロックが膨潤する様子を CCD カメラによる接写で確認した結果である。試験孔内の地下水に接触した緩衝材ブロックは隙間を埋めるように外側に膨潤し、派生した塊が自

重に耐えきれない大きさになると、崩れ落ちて隙間に積もっていく様子が確認された。



図 10.11.5-1 採水開始直後（赤線は外縁の初期位置）



図 10.11.5-2 採水開始 12 時間後（赤線は外縁の初期位置）



図 10.11.5-3 採水開始 24 時間後（赤線は外縁の初期位置）

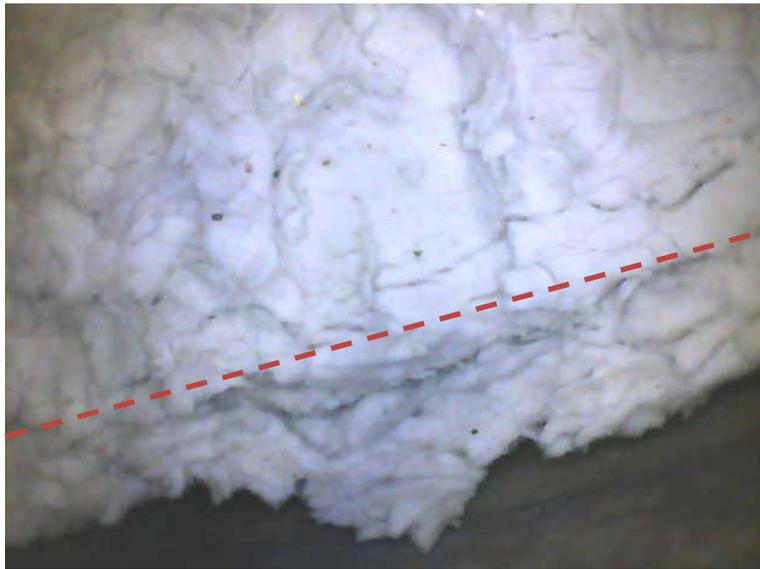


図 10.11.5-4 採水開始 48 時間後（赤線は外縁の初期位置）

(2) 試験体撤去時の観察

試験開始から 1 か月経過した試験孔 3 の様子を図 10.11.5-5 に示す。目視では緩衝材ブロックと岩盤との隙間は完全に閉塞しており、さらに試験体引上げ時に試験体の中央にあるスペーサー（底部で試験孔と通じている）の内側から排水しても試験孔内の水位が低下しなかったことから、岩盤と緩衝材ブロックの隙間は閉塞されていることが示唆された。

また、引き上げ後に解体した緩衝材ブロックを図 10.12.4-6 に示す。定置治具と接している試験体の底や試験体同士が接触する継ぎ目の位置では、内部に水と接触せず試験体が乾燥している部分が目立っており、表面が膨潤した状態であっても緩衝材ブロックが高い遮水性能を発揮していることが確認された。



図 10.11.5-5 岩盤と緩衝材の隙間の閉塞状況（1 か月後）



図 10.11.5-6 回収した試験体ブロック

(3) 試験孔 3 の孔壁観察写真

緩衝材の試験孔の孔壁への付着状況を確認するため、試験体撤去後の孔壁の写真撮影を試験孔の洗浄前に実施した（図 10.11.5-7 参照）。

図 10.11.5-8 にパノラマ写真として示すように、試験体を設置していた範囲は概ね均等に緩衝材が付着しており、パイピング等の形跡を確認することはできなかった。

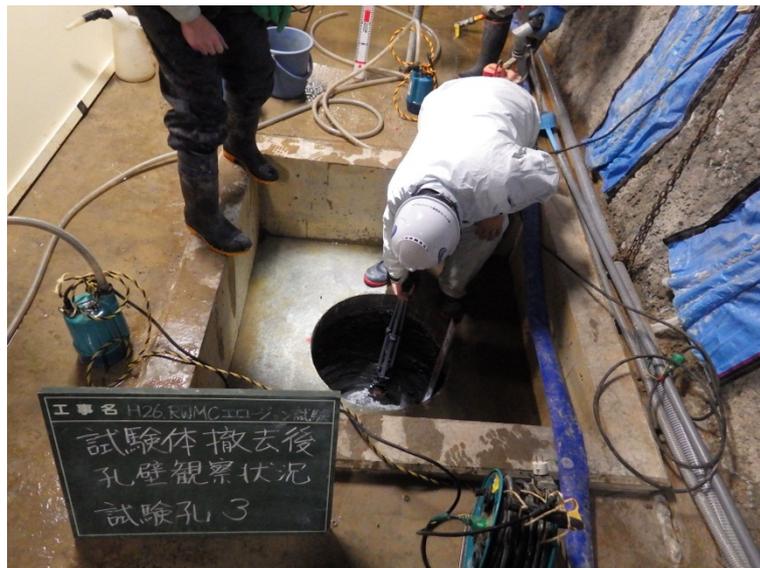


図 10.11.5-7 孔壁観察状況（試験孔 3）

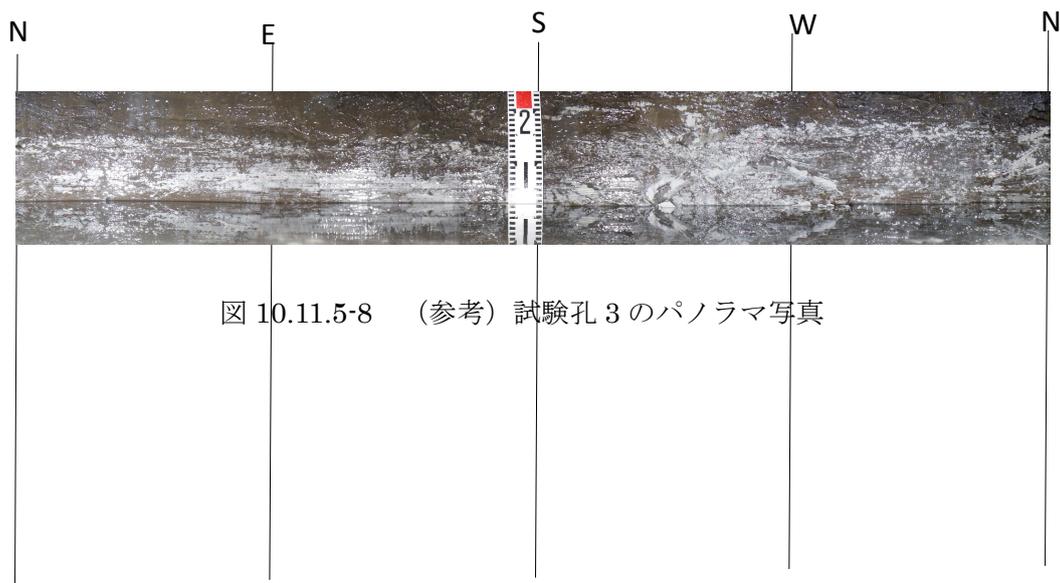


図 10.11.5-8 （参考）試験孔 3 のパノラマ写真

10.12 衝材流出試験

緩衝材流出試験は、緩衝材流出予備試験の終了後、試験孔 2 を対象として以下の手順により実施した。

10.12.1 湧水量測定体

緩衝材流出試験に先立ち、試験孔 2 の湧水量を測定した。測定方法は、前述の 10.7 「試験孔の湧水量測定」に準じて行った。その際、隣接する試験孔 3 および OP 腐食試験が実施中の試験孔 1 については特に手を加えずに測定を行った。結果を図 10.12.1-1 および図 10.12.1-2 に示す。

試験孔 1 でオーバーパック腐食試験の試験体設置が行われる前(10.7におけるケース 5)と比較すると、水位の上昇速度すなわち湧水量は小さくなっている。この傾向は予備試験と同様であり、試験孔 1 に腐食試験の試験体を設置した影響であると推測されるが、具体的な影響要因を特定することは前述のとおり困難である。

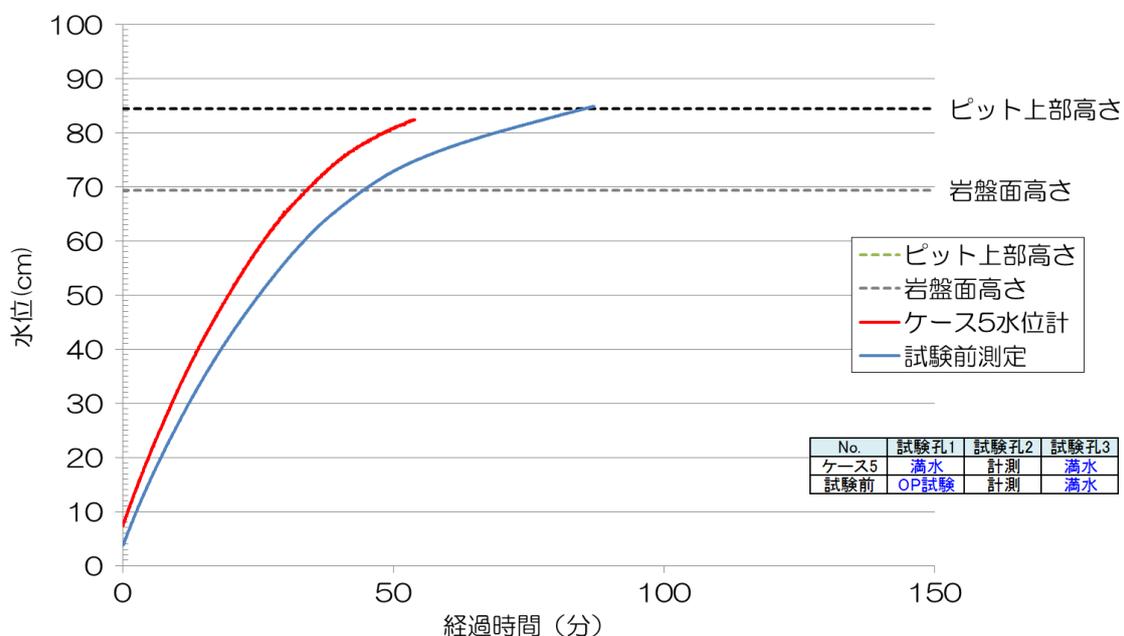


図 10.12.1-1 水位経時変化（試験孔 2；試験前測定）

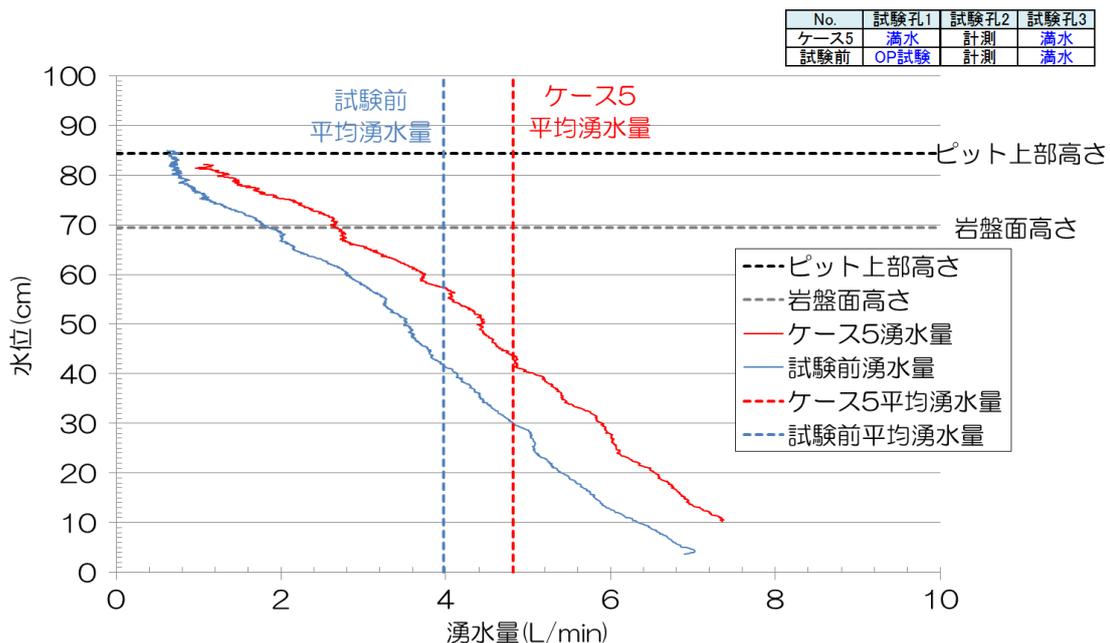


図 10.12.1-2 湧水量の深度分布（試験孔 2；試験前測定）

10.12.2 試験体・撮影機材等の設置

緩衝材流出試験における試験体は、高さ 10cm の緩衝材ブロックを 6 段（高さ：60cm、重量；約 245kg）、定置治具（重量：約 57kg）の上に乗せて作成した（図 10.12.2-1 参照）。チェーンブロックを用いて、この試験体（総重量：約 300kg）を真っ直ぐ吊り下ろして試験孔 2 の中に定置した（図 10.12.2-2 参照）。その際、予備試験同様、図 10.6.1-2 に示したスパーサーの内側に排水ポンプを設置して、試験孔内からの湧水を排水しながら作業を行った。また、本試験では、貴センターからの支給品であるベントナイトペレットを 4mm 径のものと 0.3mm 径のものを重量比 1：1 で事前に混合し、岩盤と緩衝材ブロックの隙間に自然落下による投入によって充填した（図 10.12.2-3 参照）。ベントナイトペレットはいずれも乾燥密度 2 g/cm³ であり、投入したペレットの質量は 37kg であった。設計上は緩衝材と岩盤との隙間の体積は約 19L であるが、割れ目等で崩れている場所が多いため実際の体積は不明である。

試験体設置およびペレット投入後は、予備試験と同様に緩衝材ブロックと岩盤との隙間の上方に CCD カメラを 2 台、偏光フィルターを装着したビデオカメラをほぼ真上に 1 台それぞれセットした。なお、これらの設置が完了後は、速やかに撮影を開始し、採水開始

から 48 時間経過後に撮影を終了した。観察結果については、「10.12.5 試験体の状態確認」
において後述する。



図 10.12.2-1 緩衝材ブロック組立完了



図 10.12.2-2 試験体挿入完了



図 10.12.2-3 ベントナイトペレット投入状況

10.12.3 流出試料の採取

予備試験と同様、試験体設置・ペレット投入および撮影機材設置後、スペーサー内から行っていた排水を停止し、地下水を試験孔内に自由に流入させた。その間、地下水位がピット底板上面から+5cm～+10cmの範囲に位置するように、排水ポンプの吸水口をピット底板上面の高さに設置した。その後は予備試験と同様、流出試料を以下の手順で採取した。

- ① 孔内水位が排水ポンプの吸水口の高さを 5cm 以上上回り、排水できるようになってから、水の吸い上げを開始した。なお、採水間隔が長くなると水位が上がりすぎることが想定されたので、試験中はピット底板+5～+10cmの範囲に収まるよう適宜調整した。
- ② 排水ホース内に残った水の混合を防ぐため、吸い上げ開始直後の排水は小バケツ 1 杯分程度捨て、流出水一次採水用のポリバケツ（22L 相当）を軽く共洗いしてから、流出水を約 1 杯分溜めた。
- ③ ハンドミキサーでポリバケツ内の水を攪拌した後、200cc の捕集ビンで試料を採取した。
- ④ ①～③の作業を開始から 1 時間は 10 分毎、1～2 時間は 20 分毎、2～3 時間は 30 分毎、4 時間以降 48 時間までは 1 時間に 1 回行い、試料を採取した。採取した試料の分析については、「10.12.7 採取試料の吸光度分析

⑤ 」において後述する。

⑥ 試験終了後（48時間経過後）は約1ヶ月間静置し、その間、週一回の頻度で試料の採取を行った。

なお、27回目の採水からは試験体上部に堆積しているベントナイト成分を採取しやすくなるように、排水ポンプの吸水口の高さを試験体に近づけるよう変更した。一度は試験体の上に接するよう配置したが（エラー! 参照元が見つかりません。参照）、ポンプ吸水口で目詰まりが生じたため、約2cm引き上げて設置し直した（図10.12.3-2参照）。



図 10.12.3-1 ポンプ吸水位置変更（1回目；試験体上）



図 10.12.3-2 ポンプ吸水位置変更 (2 回目 ; 試験体上面+2cm)

10.12.4 試験体の撤去・解体

約 1 か月の静置期間を経て、試験体の引き上げに先立ち、上部に堆積している沈殿物の厚さを確認した後(図 10.12.4-1 参照)、岩盤と緩衝材ブロックの付着状況を観察するため、最上段の緩衝材ブロックを破壊せずに取得することを試みた(図 10.12.4-2 参照)。しかし、膨潤および岩盤への付着が進行しており、状態を確認できるような試験体の取り出しはできなかった(図 10.12.4-3 参照)。

その後、定置治具ごと緩衝材ブロックを吊り上げたが、緩衝材が膨潤によって岩盤と過度に密着している場合、無理に引き上げるとクレーン等の坑内設備を破損する恐れがあったため、クレーンに作用する荷重を確認しながら、岩盤と緩衝材の密着を切断する作業を挟みながら吊り上げた(図 10.12.4-4 参照)。試験体引上げ後は、ブロックの解体と観察を行うとともに、密度分析に供するコアを採取した(図 10.12.4-5、図 10.12.4-6 参照)。観察結果については、次項の「10.12.5 試験体の状態確認」において後述し、コア分析結果については「試験体のコア分析」において後述する。試験体撤去終了後は岩盤と緩衝材ブロックの付着状況の観察を目的とした写真撮影を実施し、最後に試験孔の高圧洗浄(図 10.12.4-7)を行い現状復旧した(図 10.12.4-8 参照)。



図 10.12.4-1 試験体の状態確認（本試験；引き上げ前）



図 10.12.4-2 岩盤との付着状況確認（試験体取出し作業）



図 10.12.4-3 岩盤との付着状況確認（取り出した試験体）



図 10.12.4-4 チェーンブロックによる試験体引上げ状況



図 10.12.4-5 緩衝材ブロック解体状況



図 10.12.4-6 分析コア取得状況

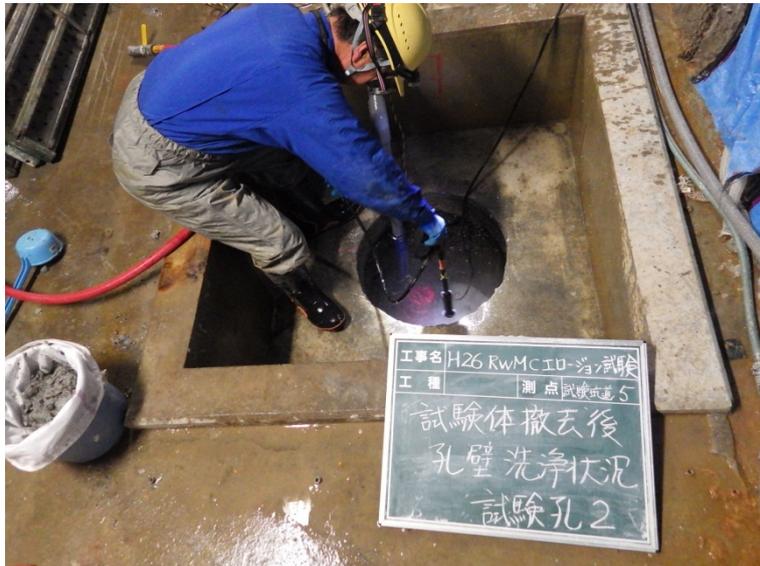


図 10.12.4-7 孔壁洗浄状況（試験孔2）

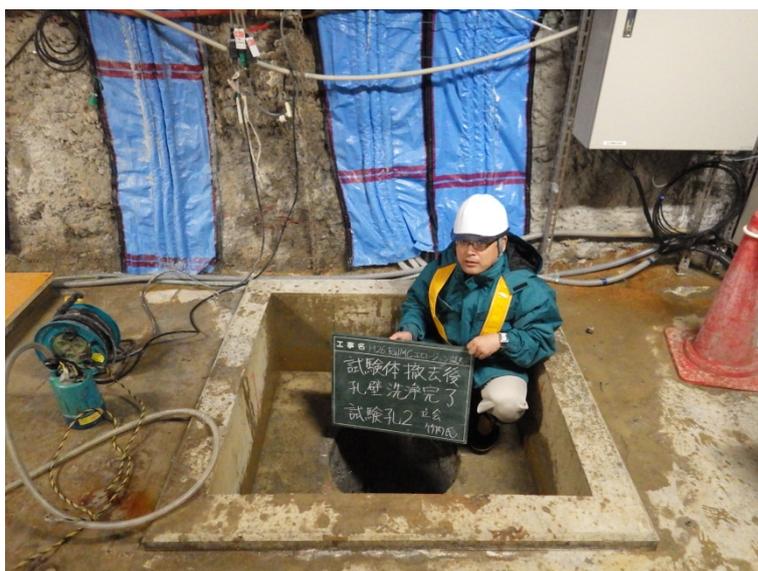


図 10.12.4-8 孔壁洗浄完了（試験孔 2）

10.12.5 試験体の状態確認

(1) 48 時間連続採水中の観察

緩衝材流出試験で撮影した記録の一部を以下に示す。まずは、緩衝材と岩盤の隙間に充填したベントナイトペレットが、緩衝材ブロックよりも先行して膨潤する様子を CCD カメラによる接写で確認した結果を、図 10.12.5-1～図 10.12.5-7 に示す。初期状態から水位が回復するまでの約 15 分間はほとんど動きが無いのに対し、水位が回復した 20 分以後の写真は試験孔内の水位上昇に伴い、ベントナイトペレットが先行して膨潤する様子が確認できた。

また、開始から 24 時間後の試験体上面のベントナイトペレットの様子を図 10.12.5-8 に示す。粒子の大きい 4mm 径のベントナイトペレットは吸水膨張によってひび割れているが、粒子の小さい 0.3mm 径のペレットは形状を保ったまま膨潤しており、粒径による膨潤の仕方の違いも確認された。なお、ここに写っている岩は試験体上面とピット底版との間に位置しており、ここが試験孔 2 に流入する主な水みちとなっているように映像からは見られた。



図 10.12.5-1 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始直後）



図 10.12.5-2 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 10 分後）



図 10.12.5-3 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 15 分後）



図 10.12.5-4 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 20 分後）



図 10.12.5-5 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 25 分後）



図 10.12.5-6 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 30 分後）

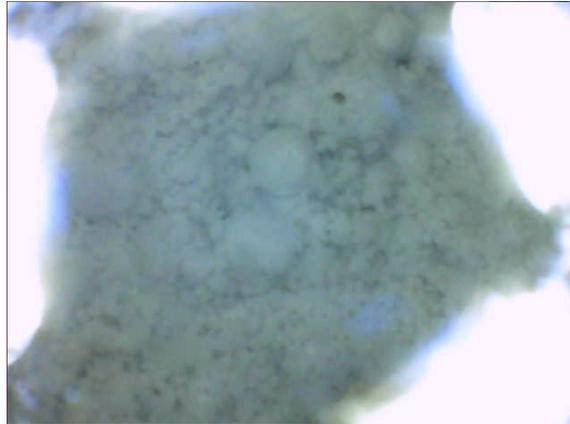


図 10.12.5-7 同位置でのベントナイトペレットの膨潤状況（再冠水開始 35 分後）
（※水面がカメラ位置に到達）



図 10.12.5-8 ベントナイトペレットの水中での膨潤状況（再冠水開始 24 時間後）

(2) 試験体撤去時の観察

試験開始から 1 か月経過した試験孔 2 の様子を図 10.12.5-9 に示す。目視では、緩衝材は膨潤により設置当初より全体的に盛り上がっているが、特にブロックの外縁付近でペレットと見られる部分の盛り上がりが目立っていた。

試験体の引上げ・解体後の緩衝材ブロックを観察したところ、ペレット部が先行して膨

潤が進行し、ブロック部がほとんど膨潤していない部分があることを確認した（図 10.12.5-10 参照）。引き上げ後に解体した緩衝材ブロック（図 10.12.5-11）についても、設置手順の関係で比較的長い時間試験孔内の水と接していた最下段のブロックを除き、大半はペレット部が先行して膨潤しており、定置治具と接している試験体の底面や試験体同士が接触する継ぎ目の位置では、水と接触せず試験体が乾燥したままになっている部分が多く、表面が膨潤した状態であっても緩衝材ブロックが高い遮水性能を発揮していることが確認された。



図 10.12.5-9 緩衝材の膨潤状況（1 か月後）

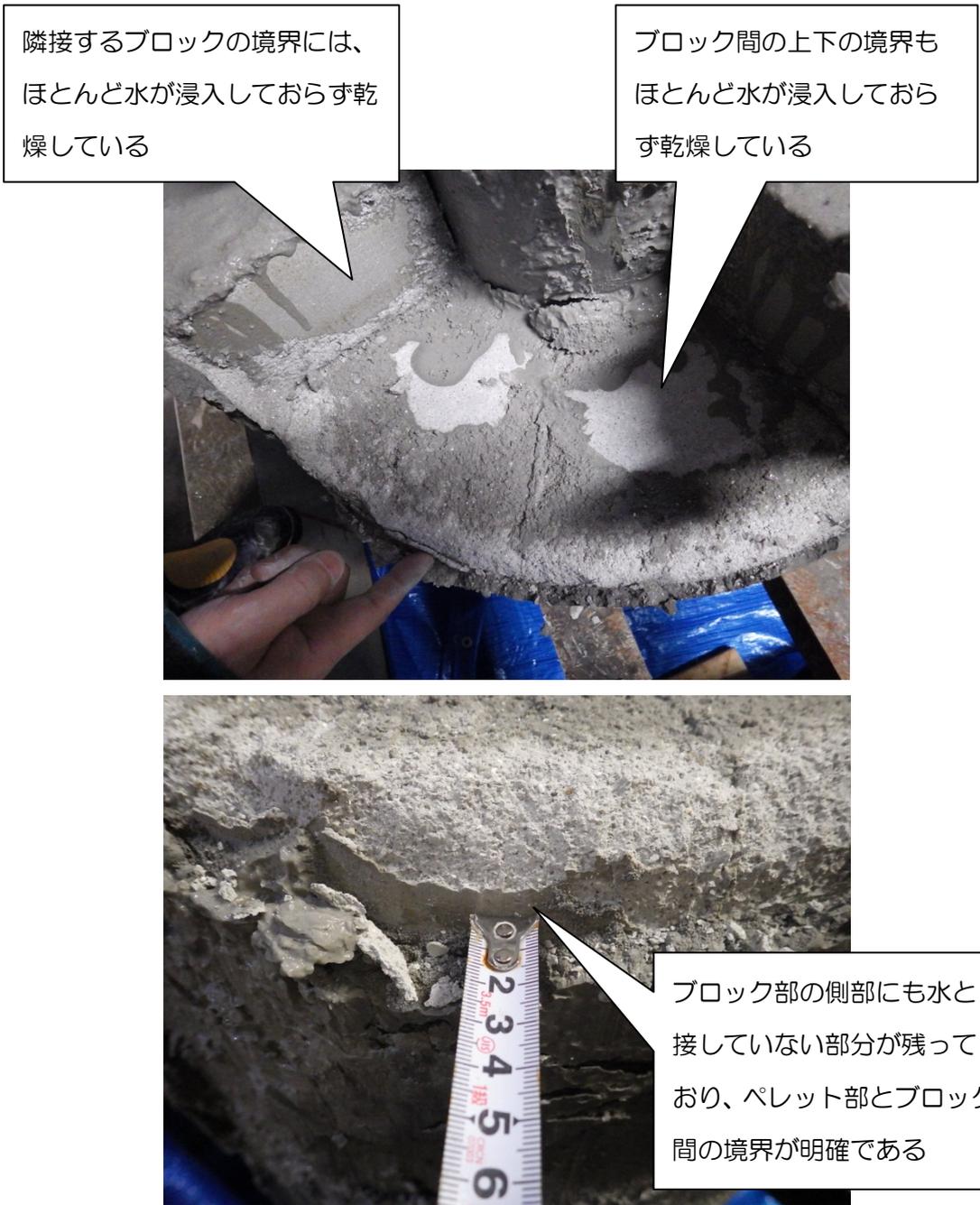


図 10.12.5-10 引き上げた試験体の状態

(上；乾燥した部分を多く残すブロックの状態、下；ペレット部とブロック部の境界)



図 10.12.5-11 回収した試験体ブロック

(3) 試験孔 2 の孔壁観察写真

緩衝材の試験孔の孔壁への付着状況を確認するため、試験体撤去後の孔壁の写真撮影を試験孔の洗浄前に実施した（図 10.12.5-12 参照）。

試験孔 2 の孔壁の状態を図 10.12.5-13 にパノラマ写真として示す。一部で緩衝材の付着が無い部分があるが、これは作業中の排水に伴う水面の上下によって剥げ落ちてしまったものであると考えられる。ペレットの膨潤が進行しており、試験体を設置していた範囲は緩衝材がかなり密着していたため、パイピング等の形跡を確認することは困難な状況であった。



図 10.12.5-12 孔壁観察状況（試験孔 2）

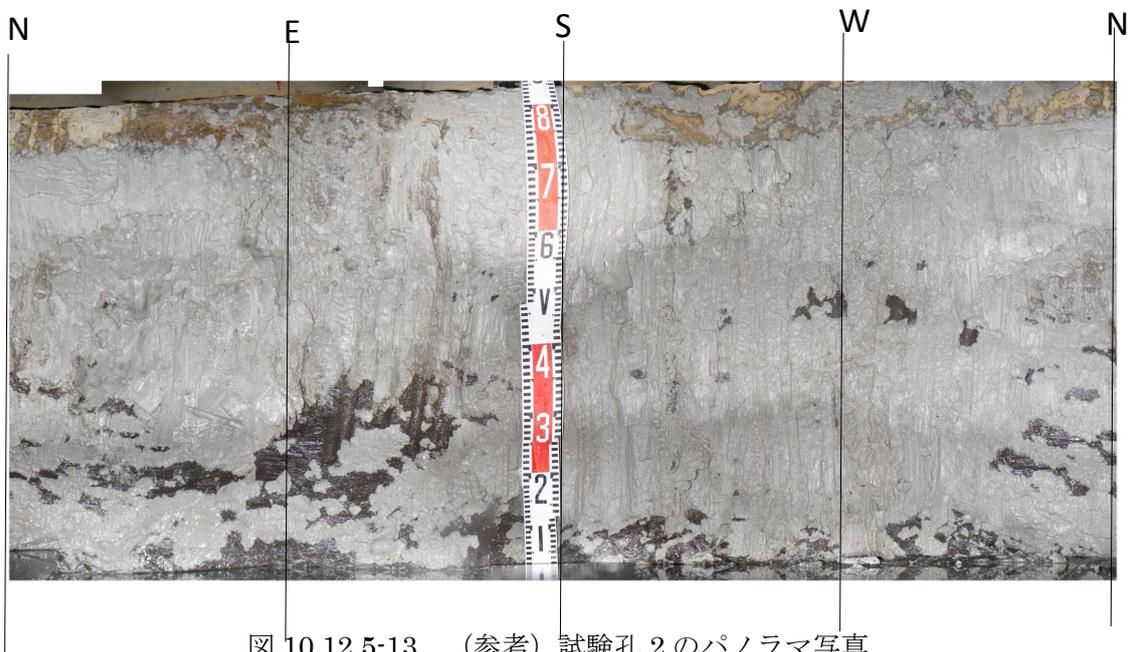


図 10.12.5-13 （参考）試験孔 2 のパノラマ写真

10.12.6 試験体のコア分析

撤去した試験体の緩衝材ブロックから、深さ方向に上部、中部、下部（上から 1 段目、4 段目、6 段目）の位置ごとに、円周方向に内、中、外の位置、計 9 箇所から分析（乾燥密度測定）用のコアを採取した（図 10.12.6-1～図 10.12.6-3）。

採取した試料は、室内試験室に持ち帰り、土の含水比試験（JIS A 1203）、土粒子の密度試験（JIS A 1202）、土の湿潤密度試験（JIS A 1224）等を実施した。試験結果を採取したコアの土質試験結果表 10.12.6-1 に示す。

得られた試験結果によると、試験体の乾燥密度の大きさは、中部>下部>上部の順であり、同一段内では、中>外、内であった。この結果から、今回の試験で示唆された事項について以下に示す。

- ・ 深度ごとの乾燥密度の差については、試験体設置直後にペレット間隙内の水みちが閉じ、試験体の上面だけで水と接触する状態になったために上部の密度低下が大きくなり、下部については試験体設置手順の都合で最下段が比較的長期間、試験孔内の水に接していたため、中部よりも密度低下が進んでいたと考えられる。
- ・ 同一段内での乾燥密度の差については、緩衝材ブロックが水と接触できるのがスペーサーとの隙間があった内側と、膨潤により水みちが閉塞されるまでペレットの隙間があった外側で両者に顕著な差が無く、中央は水の浸入が困難な状況にあったためと考えられる。
- ・ 外見上、ほとんど水の浸入が見られなかった No.5（中部・中）のコアでは、乾燥密度が製造時（ 1.9g/cm^3 ）よりも若干小さい 1.77g/cm^3 であった。このコアは、ブロックが水と接しておらずに当初に近い硬さが残っており、コア取得の作業が最も困難であった。その結果、コアが途中で折れ、長さが最も短いサンプルとなっており、測定した寸法の誤差の影響が大きくなった可能性がある。
- ・ 一方、含水比はコアサンプルの重量だけで測定するため、コアの寸法測定の誤差の影響を受けない。上記の No.5 のコアの含水比は製造時（11%）とほぼ同程度の 11.9% であり、見た目から想定される状況に合った結果が得られた。
- ・ その他のコアについては、試験体上部がすべて 23%以上であり、次いで下部・外側のコアが 18%である以外は、製造時よりわずかに増えた程度であり、これらも見た目から想定される状況に合った結果が得られた。

- この結果に対して、間隙比や飽和度は非常にバラつきが大きくなっていた。これらの値は、密度を用いて算出される値であり、この点からもコア寸法の取得に誤差が大きかったことが示唆される結果となった。その原因としては、想定よりも緩衝材ブロックの硬さが残っていたこともあり、今回のコア取得方法が硬いコアに対しては適切でなかったことが挙げられる。硬さが残るコアの取得方法については、今後の試験手順の検討において留意すべき課題である。



図 10.12.6-1 試験体から取得したコア（上部）



図 10.12.6-2 試験体から取得したコア（中部）



図 10.12.6-3 試験体から取得したコア（下部）

表 10.12.6-1 採取したコアの土質試験結果

	上部 (1 断目)			中部 (4 段目)			下部 (6 段目)		
	内	中	外	内	中	外	内	中	外
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.790	1.895	1.830	1.689	1.981	1.909	1.602	1.783	1.987
乾燥密度 ρ_d g/cm ³	1.416	1.538	1.489	1.503	1.770	1.676	1.399	1.574	1.684
土粒子密度 ρ_s g/cm ³	2.716	2.725	2.727	2.709	2.711	2.710	2.704	2.709	2.714
含水比 w %	26.4	23.2	23.0	12.3	11.9	13.8	14.5	13.2	18.0
間隙比 e	0.918	0.772	0.831	0.802	0.532	0.617	0.933	0.721	0.612
飽和度 S_w %	78.1	81.9	75.5	41.5	60.6	60.6	42.0	49.6	79.8
平均直径 D cm	2.975	2.975	2.975	2.975	2.975	2.975	2.975	2.975	2.975
平均高さ H cm	7.890	6.594	7.426	5.140	3.405	4.537	4.285	4.754	8.738
コア体積 V cm ³	54.85	45.84	51.62	35.73	23.67	31.54	29.79	33.05	60.74

10.12.7 採取試料の吸光度分析

緩衝材流出予備試験および緩衝材流出試験で採取した水に含まれるベントナイトの量を確認するための吸光度分析を行った。実施手順を以下に示す。

①測定器具定

本試験の吸光度分析においては、「株式会社 日立ハイテクノロジー製 レシオビーム分光光度計 U-5100」および「株式会社 エスエムテール製 超音波分散機 UH-50」を用いた。U-5100 は波長範囲が 190～1,100nm と広く、通常の純水での測定と比較して不確定な物質が混入している可能性のある幌延の地下水の測定において有効であると考えられるため採用した。ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの吸光度の変化率が最も大きくなると考えられる 300nm についてもカバーしている。



図 10.12.7-1 分光光度計 U-5100 および超音波分散機 UH-50

②キャリブレーション

エロージョン量の測定に先立って、キャリブレーションを以下の手順で行った。なお、季節変動等の外乱による現地地下水の変化に伴う測定誤差を低減するため、キャリブレーション・検量線の取得の作業は流出試験の直前に採水した地下水を用いて行った。試料への分散剤（ミラクル DP 200C）の添加を含む資料の調製方法については、地盤工学会基準（JGS0251-2000）の方法を基本とした。

- 1) 現地地下水を使ってバックグラウンドの測定を行った。その際、現地地下水に分散剤を添加するケースも併せて行い、分散剤の添加による影響を把握したが、特に影響はなかった。なお、分散剤の攪拌時間は標準である1分間とした。
- 2) 緩衝材サンプル（貴センター支給のペレット）を現地地下水に加えて濃度既知の検量溶液を作成し、これを用いて複数の濃度既知の溶液を作成した。その際、希釈が必要となる場合には、バックグラウンドの状態を統一するため、希釈水には現地地下水を用いた。
- 3) 上記の溶液を用いて吸光度分析を行い、①のバックグラウンドの結果も踏まえて検量線（濃度と強度の相関）を取得した。取得した検量線を図 10.12.8-2 に示す。



図 10.12.7-2 検量線作成状況

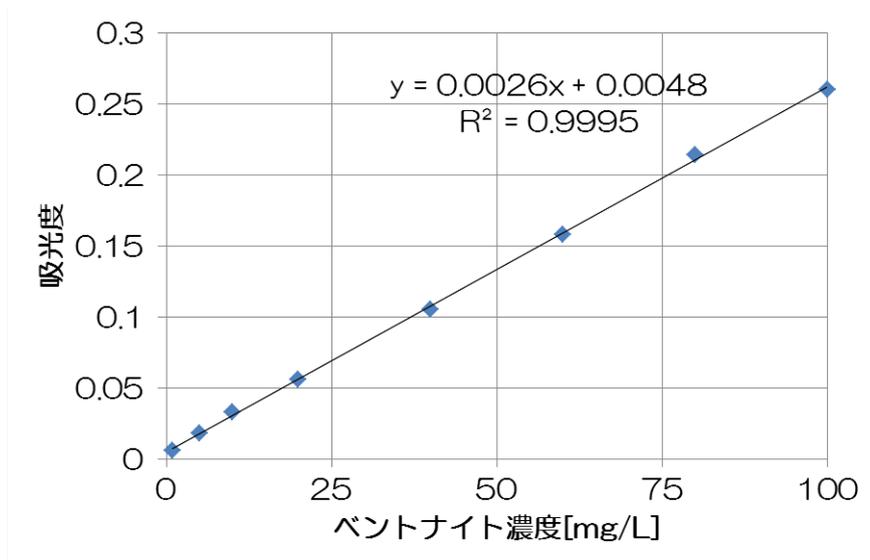


図 10.12.7-3 現地地下水と緩衝材によって得られた検量線

③エロージョン量の測定

緩衝材流出予備試験および緩衝材流出試験で捕集ビンに採水した試料は、吸光度分析器の容器に移し、下記に示す分散剤を入れて超音波等で分散させ、吸光度分析法によって試料中に含まれるベントナイトの濃度を測定し、これを緩衝材のエロージョン量と見なすこととした。

製品名：ミラクル DP 200C (図 10.12.7-4 参照)

製造元：株式会社片山化学工業研究所

販売元：片山ナルコ株式会社



図 10.12.7-4 分散剤 (ミラクル DP 200C)

吸光度分析においては、前項 0 で得られた強度と濃度との相関関係を示す検量線を用いて、測定された強度をベントナイトの濃度へと換算した。両試験について得られたベントナイト濃度の経時変化を図 10.12.7-5 に示す。

緩衝材流出試験については、試験開始直後とポンプ位置を変更した直後の測定においてベントナイト濃度の値が増加した。しかし、これは試験体の設置やポンプの据替において生じた試験孔内の擾乱によるものと考えられ、それ以外には緩衝材流出予備試験も含めて、いずれの試験でも有意な濃度値は測定されなかった。

試験体上部の湧水によって緩衝材の細粒が浮遊している様子は確認できたにも関わらず、

吸光度分析でベントナイト濃度が測定されなかった原因としては、湧水量測定でも得られていたように、試験孔内の上昇流が小さく、浮遊している粒子が試験体の上方に設置していたポンプの吸水口まで運ばれなかったことも原因の一つであると考えられる。

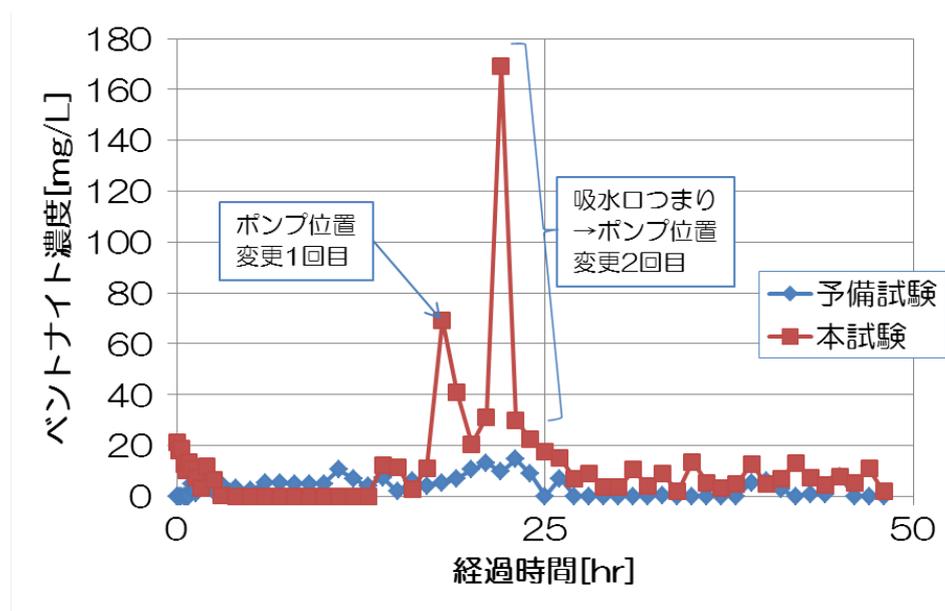


図 10.12.7-5 吸光度分析で得られた排水中のベントナイト濃度の経時変化

10.13 試験結果の評価と今後の方針

10.13.1 試験結果の評価

今回の試験の結果を以下とその評価を示す

試験孔 3（緩衝材ブロック 1 段のみ配置）の試験結果

- 地下水流入量が、地下水流量 7L/分→2L/分の場合に、緩衝材ブロック 1 段は膨潤し、外側 2cm の隙間を埋めることが判明した。
- 緩衝材ブロックの表面にやわらかい物質が約 4cm の厚さで堆積していた。
- 緩衝材ブロックと岩盤の隙間は、膨潤によって比較的硬い部分が低面から約 10cm の範囲で存在していた。
- 緩衝材ブロック断面の中心部は、1 ヶ月の期間では、膨潤が進んでいないことが

わかった。

- 岩盤と緩衝材ブロックの隙間にパイピングが発生したかどうかは、確認できなかった。
- 岩盤面の位置にバキュームの吸い取り口を設置し、地下水を採取したが、吸光度計による測定ではエロージョン量を計測できなかった。
-

試験孔 2（緩衝材ブロック 6 段+ペレットによる隙間充填）の試験結果

- 地下水流量 7L/分→2L/分の場合に、ペレット部分が膨潤によって膨れ、緩衝材ブロックの表面には約 40mm の柔らかい沈殿物が堆積していた。CCDカメラで、微粒子が緩衝材ブロックの上を浮遊していることから、ペレットの成分が堆積したものと考えられる。
- ペレットは、地下水に触れると 1 時間以内で形が崩れて分解し、その後膨潤することが判明した。1 か月後に取出したところ、固いペレット層を構成していることが判明した。
- エロージョン水の採取に当たって、当初バキュームの吸入口を緩衝材ブロックより 20cm 上の岩盤面高さのところに設置していたが、吸光度計では有意なエロージョン量を測定することができなかった。

試験の評価

- 今回の試験ではペレットを緩衝材ブロックと岩盤との間に充填することの効果を確認した。ペレットの乾燥密度は緩衝材ブロックよりも低いですが、緩衝材ブロックよりも先に膨潤することによって岩盤と緩衝材ブロックの隙間に硬い緩衝材の層を形成し、緩衝材ブロックの表面にしっかり吸着することによって、緩衝材ブロック表面のエロージョン現象を低減する可能性が高いことがわかった。
- 試験孔 3 において、緩衝材ブロック 1 段と岩盤との間にパイピングが発生したか、否かは確認が困難であり、緩衝材ブロックの上面に堆積した物質は、鉛直上側に膨出したものか、エロージョンしたものかの判断は困難であった。
- 試験孔 2 において、緩衝材ブロック 6 段と岩盤との間に充填したペレットとの界面は吸着が進行しているため、パイピングが発生したような形跡はなかった。

- ▶ 試験孔 2 において、ペレットと岩盤との間にパイピングが発生したかどうかの確認はできなかったが、緩衝材ブロックの上部の地下水には、緩衝材の微粉末が浮遊していることが常時確認できたことから、ペレットがエロージョンを起こした可能性が高いと推察される。
- ▶ 吸光度計によるエロージョン量は有意な量の測定ができなかった。これは、試験孔の中でパイピング/エロージョンが発生しなかったのではなく、バキュームによる吸水口により摂取方法、位置が適切ではなかったことが考えられる。実際には緩衝材の上側への膨潤を拘束するものがないために、緩衝材ブロックが膨潤したことと、試験孔 2 の場合には、ペレットのエロージョン物質が堆積したものが混在しているものと考えられる。

10.13.2 平成 27 年度の試験計画結果

室内試験のエロージョン量測定と同じ条件でエロージョン量を測定することを来年度実施する予定である。試験のイメージを図 10.13.2-1 に示す。すなわち、岩盤面高さの位置に、仮設プラグ（蓋）を設置して、その一部に $\Phi 5\text{mm}$ の孔を設け、そこからエロージョン水を採取する。また、小規模試験において、幌延の試験坑道と同じイオン濃度の地下水を使って、エロージョン試験を行い、単純な系での挙動を調査する必要があると考えている。

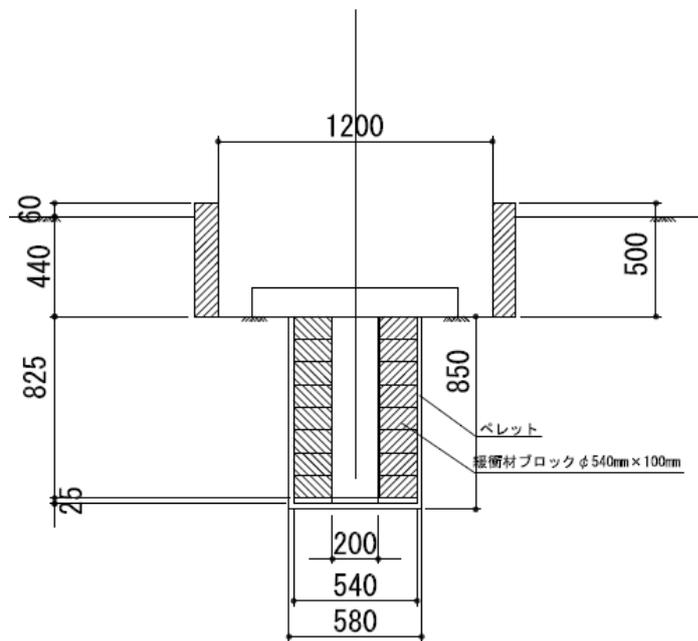


図 10.13.2-1 緩衝材試験に仮設プラグを設置したイメージ

第 10 章参考文献

- [1]Börgesson, L. and Sandén, T. : Piping and erosion in bufferand backfill materialsCurrent knowledge, SKB R-06-80, 2006.
- [2] SKB : Long-term safety for KBS-3repositories at Forsmark andLaxemar – a first evaluationMain Report of the SR-Can project, SKB TR-06-09, 2006.
- [3] Sandén, T. and Börgesson, L. : Deep repository-engineeredbarrier system. Piping anderosion in tunnel backfillLaboratory tests to understandprocesses during early water uptake, SKBR-06-72, 2008.
- [4]SKB : Long-term safety for the finalrepository for spent nuclear fuelat ForsmarkMain report of the SR-Site project, SKBTR-11-01, 2011.
- [5] 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－, JNC TN1400 99-020～023, 1999.
- [6] 日本工業規格：JIS B 8265-2010 圧力容器の構造一般事項