

地下空洞型処分施設施工技術の 確証試験の概要

秋山 吉弘、寺田 賢二、山田 淳夫

平成 28 年 3 月

まえがき

地下 50m 以深の大断面の地下空洞に構築されたコンクリートピットと、その周囲を覆う緩衝材などの人工バリアから構成される地下空洞型処分施設は、原子力発電所の廃炉等に伴って発生する解体廃棄物等の処分施設として、各種の検討がなされてきている。これまで実施された試験は、人工バリアごとの小規模な試験が主であったが、今後の地下空洞型処分施設の設計・建設に当たっては、より現実に即した条件下で実施する確証的試験の積み重ねにより、処分施設の施工技術確立が必要とされる。また、その際、その施工技術によって構築される施設の性能が、施設に要求される初期性能を満たすことを確認することが重要となる。

こうした確証的試験の必要性に鑑み、具体的な地下空洞型処分施設の設計・建設に向け、これまでに実施されてきた試験・検討の成果を基礎に、大断面の地下空洞を利用した具体的な処分施設を模擬した我が国初の実規模の施工に関わる試験を実施した。この報告書は、平成 19 年～平成 24 年度管理型処分技術調査等事業「地下空洞型処分施設性能確証試験」および平成 25 年～平成 26 年度管理型処分技術調査等事業「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」で実施された 8 年間の確証試験の主要な成果をとりまとめたものである。

この報告書は 3 章から構成され、第 1 章では、確証試験の背景・目的、確証試験の前提となる人工バリア等の要求機能について述べている。第 2 章では、第 1 章で述べた要求機能を満たすための施工上の管理目標値の設定、管理目標値を達成するための施工技術の確証や施工性の確認に関する成果について記述している。また、第 3 章では、施工中および施工後の人工バリア等の挙動計測結果、地震動の地下空洞型処分施設への影響の解析的検討について述べている。

なお、各年度の試験内容・条件や成果の詳細、試験・計測データについては、各年度の報告書を参照されたい。また、試験計画の基本的な考え方や試験施設の詳細設計については、平成 17 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査「地下空洞型処分施設性能確証試験」および平成 18 年度管理型処分技術調査等「地下空洞型処分施設性能確証試験」の報告書を参照されたい。

目 次

まえがき

第 1 章 確証試験の概要	1
1.1 確証試験の背景、目的	1
1.1.1 余裕深度処分に関する背景情報	1
1.1.2 試験の目的と概要	2
1.2 試験計画	3
1.2.1 安全確保に関する基本的要件	3
1.2.2 人工バリアの要求機能	5
1.2.3 確証試験の概要	8
第 2 章 処分施設施工確認試験	10
2.1 緩衝材	11
2.1.1 実施概要	11
2.1.2 基本条件の設定	13
2.1.3 緩衝材に関する確証試験の課題	14
2.1.4 緩衝材に関する確証試験の結果	15
2.1.5 まとめ	29
2.2 低拡散材	31
2.2.1 実施概要	31
2.2.2 基本条件の設定	32
2.2.3 低拡散材に関する確証試験の課題	33
2.2.4 低拡散材に関する確証試験結果	34
2.2.5 まとめ	42
2.3 コンクリートピット	44
2.3.1 実施概要	44
2.3.2 基本条件の設定	45
2.3.3 コンクリートピットに関する確証試験の課題	46
2.3.4 コンクリートピットに関する確証試験結果	46
2.3.5 初期性能の確認	53
2.3.6 まとめ	54
2.4 充てん材	55
2.4.1 実施概要	55
2.4.2 基本条件の設定	56
2.4.3 充てん材に関する確証試験の課題	57
2.4.4 充てん材に関する確証試験結果	57
2.4.5 まとめ	67
2.5 埋戻し材	69
2.5.1 実施概要	69
2.5.2 基本条件の設定	70
2.5.3 埋戻し材に関する確証試験の課題	71
2.5.4 埋戻し材に関する確証試験結果	71
2.5.5 初期性能の確認	80
2.5.6 まとめ	82
第 3 章 挙動計測・地震影響検討	87
3.1 挙動計測	87

3.1.1	挙動計測の内容	87
3.1.2	挙動計測の成果	92
3.1.3	まとめ	98
3.2	地震影響検討	99
3.2.1	地震影響検討の目的	99
3.2.2	巨大地震が地下空洞型処分施設に与える影響	99
3.2.3	地震動の観測と分析	107
3.2.4	まとめ	114
	あとがき	117

第1章 確証試験の概要

1.1 確証試験の背景、目的

1.1.1 余裕深度処分に関する背景情報

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

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

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

余裕深度処分の概念については、電気事業者、建設会社等で検討が進み、廃棄体、コンクリートピット、低拡散材、緩衝材、充てん材、埋戻し材から構成される施設の概念が示された。図1.1-1[2]にその概念の検討例を示す。

さらに、その施設を構成する要素に対して、期待する機能について議論が進み、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について」[3]（以下、「廃棄物安全小委報告書」という。）において、充てん材、低拡散材や緩衝材等の人工バリアの「基本的要件（安全機能等）」（以下、基本安全機能とする）として、閉じ込め、遮へい、移行抑制の機能が重要であることが示された。それを受け、基本安全機能を満足させるための技術要件や品質確保のための検査項目、検査方法などについての原子力学会標準[4]や土木学会の技術文書[5]が発刊された。

余裕深度処分は、いくつかの人工バリアを配置することにより、地下数十 m 程度の深度に大量の廃棄物を効率的にかつ安全に処分できる概念である。また、この人工バリアの材料、性能や施工方法などの成立可能性については、主に試験室や要素試験レベルでの基本的な検討がなされてきている。

なお、表 1.1-1 のように、人工バリア部材等の名称は、同一部材を指す場合においても、各学会・取りまとめの間で異なる場合がある。本報告書では、図 1.1-1 や表 1.1-1 に示した名称を使用する。

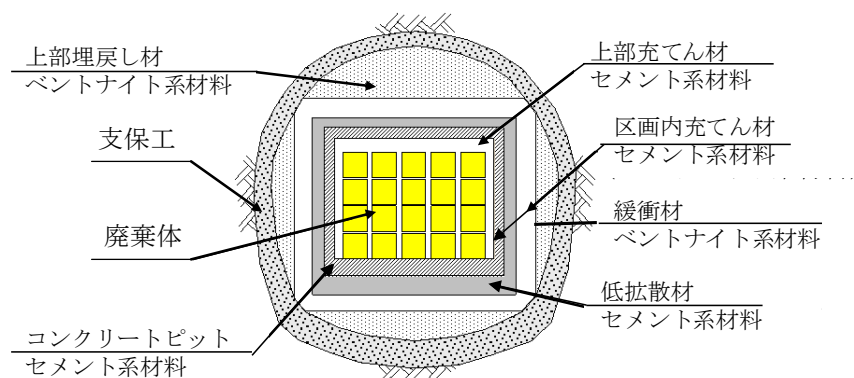


図 1.1-1 人工バリアの基本構成の検討例 ([2] に加筆)

表 1.1-1 各学会・取りまとめにおける人工バリア部材等の名称

学会・取りまとめ	土木学会	TRU 2 次レポート	原子力学会	本報告書（確証試験）
人工バリア部材	支保工	支保工	支保工	支保工
	空洞内充てん材 埋戻し材	埋戻し材	空洞内充てん材 坑道の埋戻し材	埋戻し材（セメント系） 上部埋戻し材（土質系）
	低透水層	緩衝材	低透水層	緩衝材
	低拡散層	—	低拡散層	低拡散材
	コンクリートピット	コンクリートピット	コンクリートピット	コンクリートピット
	区画内充てん材	充填材 充填モルタル	区画内充てん材	区画内充てん材 上部充てん材
	廃棄体	廃棄体 廃棄体パッケージ	廃棄体	廃棄体 模擬廃棄体

1.1.2 試験の目的と概要

上記のように、電気事業者、建設会社など各方面で、余裕深度処分について、試験室や研究所での基本的な試験が実施され、また一部で部分試験体による要素試験が実施され、余裕深度処分の成立性についての基礎データが蓄積された[6][7][8][9][10][11]。

余裕深度処分では、50m 以深の地下に幅および高さが約 10～20m 程度の規模の空洞を掘削し、その内部に「現行の低レベル放射性廃棄物が処分されているコンクリートピットと同等以上の放射性核

種閉じ込め機能を持った処分施設を設置」[12]することが予想されるため、大型の地下空洞とはいえ作業スペースの限られた地下空間での高品質な人工バリアの構築が重要となる。また、土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」[5]においては、原子力安全委員会の「人工バリアに関する長期的安全確保の考え方の整理(案)」[13]（以下、「長期的安全確保の考え方の整理」とする）を踏まえ、「埋め戻し完了以降は、その時間的スケール及び離隔された状態であることをふまれば、人工バリアに対して人手による維持・管理は現実的には困難であることから」「建設・操業段階の過程において人工バリアの長期的な性能・状態は概ね決まってしまうということであり、当該過程における設計、品質管理および検査などの工学的対応が非常に重要であるといえる」として、建設・操業段階で良好な品質の人工バリアを構築することが、長期の安全確保にとって重要であることを述べている。

これらの情勢を背景に、実際の地下環境下において余裕深度処分に想定されている規模の模擬施設を構築し、施設の建設に係る施工技術、施設の核種閉じこめや施設構造体としての初期性能並びに施工後における施設性能の評価等、実規模での施設の総合的な性能の確認を行う目的で、平成 17 年度から「地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査地下空洞型処分施設性能確証試験」が、国の事業として予算化され開始された。同事業は、平成 18 年度に「管理型処分技術調査等地下空洞型処分施設性能確証試験」として、試験計画を立案し、平成 19 年度～平成 22 年までは「管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験」、平成 23 年度、平成 24 年度には「管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設性能確証試験」として、実規模の施設を構築する確証試験を実施し、人工バリアの主要な部分について、適用可能な施工方法の確証とバリアの品質についてのデータ取得を行った。また、平成 25 年度、平成 26 年度には、上部の埋め戻す必要がある空間について、「閉鎖技術確証試験」として、同様に施工方法の確証と品質データの取得を行った。また、構築段階における、周辺岩盤および部材の挙動計測を行い、構築中におけるこれらの挙動を評価した。さらに、地震時の挙動を計測し、これらの観測波形を用いた地震時の挙動解析をするとともに、地震時の施設への影響を仮想的に設定した地震波形を用いた数値解析によって評価した。

1.2 試験計画

1.2.1 安全確保に関する基本的要件

廃棄物の埋設施設に要求される機能について、「廃棄物安全小委報告書」[3]では、「廃棄物埋設施設の位置構造および設備が、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物による災害の防止上支障がないものであることに関して、これら施設に具備されるべき基本的要件（安全機能等）を把握し、それに対して必要な安全規制を講じていくことが重要である。」としており、基本的要件として「閉じ込め」、「遮へい」、「移行抑制」、「離隔」、「冷却」が示されている。

また、「廃棄物安全小委報告書」では上記の基本的要件について、「過程ごとに考慮すべき要件が変化していくことから、対象廃棄物について想定される取り扱い過程を時系列的に沿って区分し、各過程において想定される安全確保上考慮すべき基本的要件を考慮して安全確保を図っていく必要がある」としており、①受け入れから定置まで、②定置から埋め戻しまで、③埋め戻し完了から管理を必要とする期間の終了まで、④管理を必要とする期間終了後の 4 つの過程に区分し、各過程において想定される安全確保上考慮すべき基本的要件（安全機能）が示され、これらは表 1.2-1[5]のように整理され

ている。

さらに、「廃棄物安全小委報告書」では、管理を必要とする期間終了後においては、基本的要件として移行抑制機能および離隔機能が求められるが、当該期間が長期にわたるため、人工バリアの移行抑制機能については、「設計・建設段階で、長期的な移行抑制機能の性能の変遷についての考慮が必要と考えられる。」こと、また、離隔機能については、「廃棄物埋設地が設置される地下の位置によって生活環境からの離隔が確保される必要がある。」としている。これに加えて、「埋戻し完了後以降においては人工バリアに土圧等が加わることから、人工バリアの構造的な安定性についても同様に設計・建設段階での考慮が必要である。」としている。

このような長期的な変遷に関して、「長期安全確保の考え方の整理」[13]やIAEAの安全要件文書[14]などでは、「安全評価にあたっては、人工バリアの状態を長期にわたり設定し、シナリオを作成する必要がある。このためには、将来の人工バリアの物理・化学的な状態を十分に理解し、安全評価上の基礎を与える必要がある。」としており、閉鎖前段階と閉鎖後段階で人工バリアの状態設定の必要性とその内容について示している。さらに、長期安全評価において増加する可能性がある不確実性について、「不確実性に対しては、安全評価結果の信頼性を確保するため、人工バリアに過度な性能を期待しないなど、不確実性の程度をふまえた適切な状態設定が行われている必要がある。」としている。

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

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

表 1.2-1 各過程に要求される安全機能[5]

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

1.2.2 人工バリアの要求機能

「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」[5]では、「廃棄物安全小委報告書」で示された基本的要件である「閉じ込め」、「遮へい」、「移行抑制」、「隔離」、「冷却」に加えて、土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」[2]では、「確実な建設・操業を行うための空間・力学的安定性の確保のために要求される機能として「操業上の機能」をあげている。本報告書では、検討対象とする地下空洞型施設の部材である「緩衝材」、「低拡散材」、「充てん材(区画内充てん材、上部充てん材)」、「コンクリートピット」、「埋戻し材(空洞内埋戻し材(以下、上部埋戻し材))」について、それぞれ以下のような要求機能が期待される。なお、本報告書では、人工バリアの基本を構成する部材を検討対象としているため、冷却機能に係る操業段階の換気や、地下施設の地上からの隔離等を目的とした連絡坑道、アクセス坑道などの埋め戻しは、検討対象としていない。

- ・ 緩衝材(低透水層、ベントナイト)
 - 「閉じ込め」：操業・建設段階の期間中、地下水の浸入を抑制すること
 - 「移行抑制」：埋戻し後の段階において、地下水の流動を遅くし、緩衝材よりも内側を拡散場とすること(低透水性)
 - 「操業上の機能」：底部緩衝材には、埋設設備および廃棄体の支持部材として十分な強度を有すること(力学的安定性)
- ・ 低拡散材
 - 「遮へい」：廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること(放射線の遮へい)
 - 「移行抑制」：放射性核種の拡散による移行を抑制すること(低拡散性)
 - 放射性核種を収着すること(核種収着)
- ・ 充てん材(区画内充填材、上部充填材)
 - 「遮へい」：廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること(放射線の遮へい)
 - 「移行抑制」：放射性核種を収着すること(核種収着)
- ・ コンクリートピット
 - 「遮へい」：廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること(放射線の遮へい)
 - 「移行抑制」：放射性核種を収着すること(核種収着)
 - 「操業上の機能」：建設・操業段階において、作用する荷重、地震力等に対して健全であること(空間・力学的安定性)
- ・ 埋戻し材(上部埋戻し材)
 - 「移行抑制」：埋戻し後以降の長期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること(力学的安定性)
 - 連続した地下水移行経路を形成しないこと、周辺岩盤よりも低い透水性を有すること(低透水性)
 - 隙間なく充てんされること(低透水性)

以上より、本確証試験においては、表 1.2-2 にまとめた、人工バリアの各部材の要求機能を設計段階から考慮する機能とし、特性値を取得し期待する機能を発揮し得る目標値を満足することを確認することとした。

また、各部材のうち、緩衝材の「低透水性」、低拡散材の「低拡散性」については、現時点において具体的な性能の目標値が示されている。「低透水性」にかかる透水係数については、「第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ」[15]が参照でき、この中で、緩衝材内部の物質移行が拡散支配になることを指向し、拡散場を形成できる条件として 1m 程度の部材厚さのときの透水係数を 1.0×10^{-11} m/s 以下としている。低拡散材の「低拡散性」については、別の既往検討の中で、「低拡散層のセメント系材料の拡散係数については、ベントナイト系材料の実効拡散係数が 1×10^{-10} m²/s 程度と推定されることから、より小さな値として、 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ m²/s 程度の性能を期待している」[16]とし、具体的な拡散係数として目標がおおよそながら提示されている。

低拡散材、充てん材、コンクリートピットの「放射線の遮へい性」や「核種収着性」については、廃棄体特性や地下水流動・地化学特性などの外的要因も踏まえて設定することになるため、本確証試験では、「放射線の遮へい性能」については部材の乾燥密度など、また、「核種収着性」については部材の充てん性や乾燥密度、組成などに着目し、評価に資する各部材、材料の基本特性値を取得した。また、埋戻し材の「低透水性」に関しては、施工確認の段階で、隙間なく施工できることを目視等で確認することとした。なお、要求機能を満たすための人工バリアの初期的な性能（以下、初期性能）は、安全評価において要求される施設の長期経過後の性能に対して以下のような考慮が払われた上で設定されるものであるが（図 1.2-1 参照）、本確証試験では、最適な施工方法による試験施設の建設が完了した時点（上部空間の埋戻しまで終了した時点）の人工バリアの性能を初期性能と定義した。

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

したがって、実際に長期劣化や不確実性を評価した上で設定した安全裕度ではないことに注意されたい。このような状態設定の変化に関する評価は、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」[17]の安全評価の更新に資する「新しい科学技術的知見の収集」に基づいて実施する、状態設定に関するデータを収集し実施すべきである。

表 1.2-2 人工バリアの部材と要求機能の対応

要求機能		段階	機能の内容	部材				
				緩衝材	低拡散材	コンクリートピット	充てん材	埋戻し材
基本安全機能	閉じ込め	建設	放射性物質の埋設施設外の環境への有意な漏洩を防止すること	●	—	—	—	—
	遮へい	作業	廃棄体を線源とする放射線に対して、十分な遮へいを有する環境を保つこと	—	●○	●○	●	—
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	—	●	—	—	—
			放射性核種を収着すること	—	●○	●○	●	—
			低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	●	—	—	—	●○※
			連続した地下水移行経路を形成しないこと 周辺岩盤よりも低い透水性を有すること*** 隙間なく充てんされること****	—	—	—	—	●
	建設作業		● (底部緩衝材)	—	●	—	—	

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

※※；「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」[5]に示された機能に加え、本確認試験で追加した機能。

※※※；「余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方」[5]に示された機能に加え、「余裕深度処分施設の施設検査方法：2010」[4]を参考にして、本確認試験で追加した機能

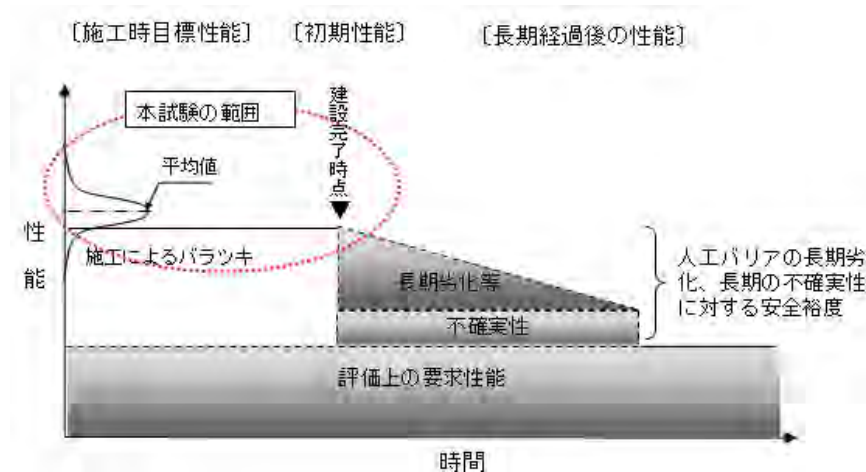


図 1.2-1 人工バリア性能の経時変化のイメージ

1.2.3 確証試験の概要

確証試験は、処分施設施工確認試験(初期性能確認試験を含む)と施設／岩盤挙動計測試験の2種類の試験に大別できる。各試験の目的を表 1.2-3 に示す。

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

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

表 1.2-3 確証試験の構成と各試験の目的

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

1 章 参考文献

- [1] 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について，平成 10 年 10 月．
- [2] 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方，土木学会，2008 年 6 月．
- [3] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について，平成 20 年 1 月 18 日．
- [4] 日本原子力学会標準委員会：余裕深度処分施設の施設検査方法：2010，AESJ-SC-F019:2010，2011.5.31．
- [5] 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方，土木学会，2009 年 7 月．
- [6] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次とりまとめ—分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，IVpp.77-80，1999．
- [7] 千々松正和，吉越一郎，中越章雄，雨宮清：ベントナイトの現場締固め施工に関する検討（その 1）狭隘部の施工確認試験結果，日本原子力学会 2006 年春の年会要旨集，B26，pp.26，2006．
- [8] 小野文彦，庭瀬一仁，谷智之，中越章雄，千々松正和：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果，第 61 回年次学術講演会概要集，CS05-09，pp.323-324，2006.9．
- [9] 千々松正和，吉越一郎，中越章雄，雨宮清：ベントナイトの現場締固め施工に関する検討（その 1）狭隘部の施工確認試験結果，日本原子力学会 2006 年春の年会要旨集，B26，pp.26，2006．
- [10] 田中幸久，中村邦彦，工藤康二，廣永道彦，仲神元順，庭瀬一仁，小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価，土木学会論文集 C，vol.63，No.1，pp.207-223，2007.2．
- [11] 工藤康二，田中幸久，雨宮清，中越章雄，茂呂吉司，千々松正和，辻建二，庭瀬一仁，小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，CS1-050，pp.99-100，2003．
- [12] 電気事業連合会：余裕深度処分に関する検討状況について，原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会，平成 19 年 10 月 18 日．
- [13] 原子力安全委員会：人工バリアに関する長期的安全確保の考え方の整理(案)，第 18 回第二種廃棄物埋設分科会 資料 二分第 18-4 号，平成 21 年 6 月 9 日．
- [14] IAEA：IAEA SAFETY STANDARDS SERIES Near Surface Disposal of Radioactive Waste，No.WS-R-1，1999．
- [15] 電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書 一第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ—，pp.3-11-3-12，2005．
- [16] 京谷修：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況，第 60 回土木学会年次学術講演会研究討論会，資料 研-08，2005 年 9 月．
- [17] 原子力安全委員会：原子力安全委員会決定，第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方，平成 22 年 8 月 9 日．

第 2 章 処分施設施工確認試験

第 2 章においては、大断面の地下空洞を利用した日本で初めての処分施設を模擬した実規模施工に関わる試験の内容とその成果について、人工バリア部材ごとに取りまとめた。

本章の構成は表 2-1 のとおりである。2.1 節～2.5 節では、各部材を対象とした確認試験の内容と成果を取りまとめた。各部材の使用材料や施工方法等の概要を表 2-2 に示す。

表 2-1 第 2 章の構成

節	題目
2.1	緩衝材
2.2	低拡散材
2.3	コンクリートピット
2.4	充てん材
2.5	埋戻し材

表 2-2 各部材の使用材料と施工方法一覧

部材／部位		使用材料	施工方法
緩衝材	底部	粒状ベントナイト (クニゲル GX100%)	転圧工法（大型振動ローラ、小型振動ローラ）
	側部・上部	粒状ベントナイト (クニゲル GX100%)	転圧工法（小型振動ローラ） 吹付け工法
低拡散材	底部・側部・上部	LPC+FA30%、W/B=45% 高流動モルタル	ポンプ圧送による打込み
コンクリートピット	底部・側部・奥部 手前部・上部	LPC+FA30%、W/B=45% 高流動コンクリート	ポンプ圧送による打込み
充てん材	区画内	LPC+FA30%、W/B=45% 高流動モルタル	ポンプ圧送による打込み 移動式バケットを模擬した打込み
	上部	LPC+FA30%、W/B=45% 高流動コンクリート	ポンプ圧送による打込み 移動式バケットを模擬した打込み
埋戻し材	底部・側部・奥部	LPC+FA30%、W/B=45% コンクリート（スランプ型、高流動型）	ポンプ圧送による打込み
	上部	ベントナイト混合土 (粉末状ベントナイト 15%、 砂 85%)	転圧工法（バイブロコンパクタ等） 吹付け工法

2.1 緩衝材

2.1.1 実施概要

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

緩衝材は底部、側部、上部の 3 部位によって構成され、部材厚さは本確認試験では 1m とした。

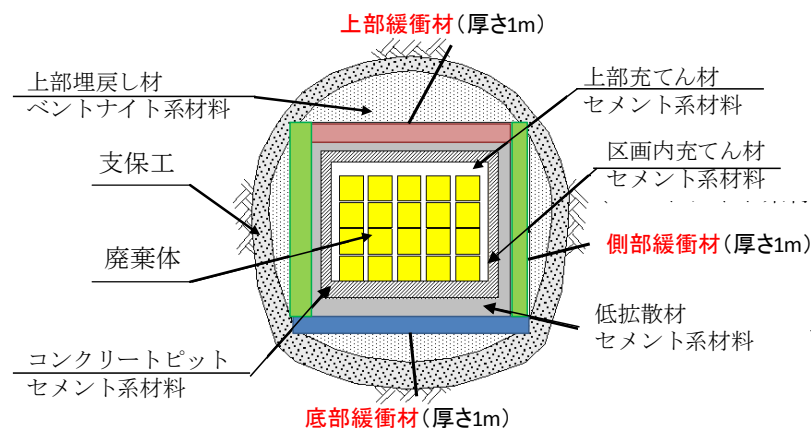


図 2.1-1 人工バリア構成（土木学会、2008 を加筆修正）[1]

緩衝材に求める要求機能については、既往の検討（土木学会、2009[2]）において建設・作業期間中における閉じ込めと、埋戻し後の移行抑制であることが示されており、これらの機能を満たすための技術要件として低透水性が重要な性能として期待されている。また、底部緩衝材の上にコンクリートピット等の構造物が構築されることより、力学的安定性も要求機能として求められ、その技術要件として力学特性が重要な性能として期待されている。そのため、緩衝材の仕様の設定や施工方法の検討を行うにあたり、施工性の確認と低透水性・力学特性等の性能の確認を行うことが重要である。

緩衝材の材料として、低透水性が期待できるベントナイトについて、既往知見をもとにベントナイトが有する特性および施工性を調査・検討した。これまでの研究で緩衝材の主要材料として期待されている粉末ベントナイト（クニゲル V1）は、微粉に加工されたベントナイトであり、高い乾燥密度を得るには大きな締固めエネルギーが必要である[3]。一方、既往の研究において、微粉にする前の粒状ベントナイト（クニゲル GX）は、クニゲル V1 に比較して低い締固めエネルギー（ $1E_c$ =約 550kJ/m^3 で規定される土に与えるエネルギーの値）で高い密度を達成できることが確認されている[4]。これらの研究成果を踏まえて本試験ではクニゲル GX を緩衝材の材料として選定した。選定した材料の製品仕様を表 2.1-1 および表 2.1-2 に示す。また、実際に使用した材料の粒径加積曲線を図 2.1-2 に、自然含水比、塑性限界、メチレンブルー吸着量、膨潤力の基本統計量を表 2.1-3 に示す。

表 2.1-1 クニゲル GX の仕様

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

表 2.1-2 クニゲル GX の仕様 (粒度)

材料	ふるいを通るものの質量百分率 (%)								
	ふるいの呼び寸法 (mm)								
	19	9.5	4.75	2	0.850	0.425	0.250	0.106	0.075
クニゲル GX	100	100	70～100	45～100	20～100	0～100	0～70	0～30	0～10

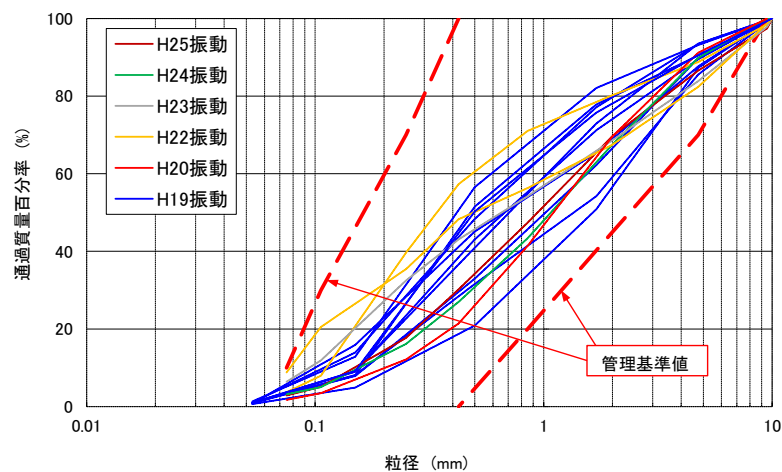


図 2.1-2 転圧工法で使用了材料の粒径加積曲線

表 2.1-3 転圧工法で使用了材料の材料仕様項目の基本統計量 (平成 19～25 年度)

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

緩衝材の施工方法については、実際の地下環境下で人工バリアの一連の建設工程を模擬した試験の過程において施設特有の施工条件を踏まえて最適な方法を選定して試験を実施する必要があった。底部における施工エリアは、周辺が埋戻し材で囲まれた平面的に広がる空間である。この施工条件下で大型施工機械を用いた撤出しおよび転圧による施工性を確認した。一方、側部低拡散材と側部埋戻し材で囲まれた狭隘な空間での施工となる側部においては、小型の施工機械または吹付工法を適用した施工試験を行い、それらの適用性を検討した。

さらに、本試験の重要な課題として構築直後段階における性能の確認がある。これまでの緩衝材の

性能に関するデータは、室内で作製した材料を用いた試験を行って取得されたものであり、実規模で構築した部材から採取した試料を用いた試験を実施して確認することが求められていた。そこで、選定した施工方法により構築した緩衝材から試料を採取して室内試験を実施し、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往試験の結果との比較を行った。

2.1.2 基本条件の設定

2.1.2.1 設計仕様項目と管理項目および施工時の管理目標値

地下施設を構成する各部位を設計・施工する上で、設定された技術要件を大きく支配する項目が設計仕様項目である。

上述したとおり、緩衝材の技術要件は低透水性および力学特性であるが、本試験では、低透水性に対する設計仕様項目として、透水係数、厚さ、膨潤圧、鉱物組成を設定した。また、力学特性に対する主な設計仕様項目は、強度・変形係数とした。設計仕様項目を要求機能、技術要件とともに表 2.1-4 に示す。

緩衝材の試験での管理項目を選定して管理目標値を設定した。緩衝材の管理項目と管理目標値を表 2.1-5 に示す。緩衝材の要求機能である閉じ込め、移行抑制（低透水性）に対する設計仕様項目は施工時性能・状態に関しては同じ項目である。管理項目の設定にあたっては複雑さを回避するため要求機能を移行抑制（低透水性）に絞って記述した。管理目標値は既往の検討[5][6] を参考に暫定的に設定した。

以上の施工時、施工直後の管理項目に基づく施工を行い、施工後品質の確認を行うこととした。緩衝材の施工は転圧工法および吹付け工法で行った。本試験では、各工法ともに施工時の管理手法は、乾燥密度の目標値である $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ を満足できる方法を採用し、その時に、要求される機能を満たすことができる所定の品質（例えば透水係数等）を確保できるかの確認を試行した。

表 2.1-4 緩衝材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

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

表 2.1-5 緩衝材の管理項目と管理目標値

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

2.1.3 緩衝材に関する確証試験の課題

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

- 緩衝材の施工部位には底部、側部、上部があり、施工部位によって施工条件が異なる。また、各部位では狭隘な空間となる隅角部を有しており、適切な施工方法を適用しないと品質に欠陥が生じる可能性がある。そのため、使用する施工機械や施工方法の選定に当たっては、各部位の特徴を踏まえることが重要である。
- 既往の検討では、透水係数等の緩衝材の性能に関して室内整形試料による値を用いた評価が主であった。今後、余裕深度処分施設の具体的な設計・建設を行うに当たっては、実際の地下環境下、実規模で構築した部材での初期性能を確認することが必要とされてきている。

2.1.4 緩衝材に関する確証試験の結果

2.1.4.1 施工方法の選定

1) 既往の施工技術

底部緩衝材を対象とした既往の研究において、クニゲル GX を用いたランマによるコンクリートピット内の締固め試験が要素試験として実施されており、仕上り層厚 10cm で、有効粘土乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を越える施工が十分に可能であることが確認されている[7]。また、別の研究では、同じくクニゲル GX を用いて、幅 6m、延長 12m、層厚 1m の底部緩衝材を模擬した転圧工法に関する施工試験が地下空洞内で実施されている[8]。この研究では、2.5t 級の小型振動ローラと 19t 級の大型振動ローラを組合せた転圧工法により、ベントナイトの含水比 18.5%および 21.0%のクニゲル GX を用いて仕上り厚さ 10cm 程度で乾燥密度 1.6 Mg/m^3 程度を満足できる見通しを立てている。また、21.0%で施工した時の方が仕上り時の緩衝材の乾燥密度のバラつきも小さく、仕上り層厚 18cm で施工しても目標乾燥密度である 1.6 Mg/m^3 を達成できることを確認している。

側部緩衝材は、幅が狭く両側の壁が高い、トレンチ状の狭隘な空間内で施工する必要がある。このような空間での施工を対象にした既往の検討は、小型振動ローラによる転圧[9]、ブロック定置による方法[10]、粒状ベントナイトの充填による方法[11]、吹付け工法による施工[12][13] が挙げられる。

2) 施工環境の条件に合った施工方法の選定

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

側部緩衝材や上部緩衝材の施工においては、施工幅制限や空頭制限など、空間的に制約があるため、底部緩衝材のように転圧工法をそのまま適用することはできない。側部緩衝材の施工箇所は、幅 1m・高さ約 8m の狭隘なトレンチ状の空間であり、実物の処分施設では奥行き方向に 100m 程度となることが予想される（本試験においては、実物の処分施設とは異なり、トンネル軸方向の延長一区画分の長さであると予想される 12m 程度である）。このような狭隘な箇所へは、底部緩衝材に適用できる振動ローラではなく、小型の振動ローラ[9]や吹付け工法[12][13]が適用できると考えられる。また、アーチ天端付近の空頭制限のある、隅角部に対して、本試験では吹付け工法を適用することとした。吹付け工法の概要は、「2.1.4.3 吹付け工法による施工試験」にて説明する。

上部緩衝材施工時においては、平面部での施工となるため、底部緩衝材と同様に転圧工法の適用が可能となる。しかし、本確証試験では、ピット上部への機械の搬入方法に制限があったため、小型振動ローラを用いた転圧工法を適用することとした。図 2.1-5～図 2.1-6 に選定した施工機械と工法を、表 2.1-6～表 2.1-8 に施工機械の仕様を示す。



図 2.1-3 大型フィニッシャ



図 2.1-4 大型振動ローラ



図 2.1-5 小型振動ローラ

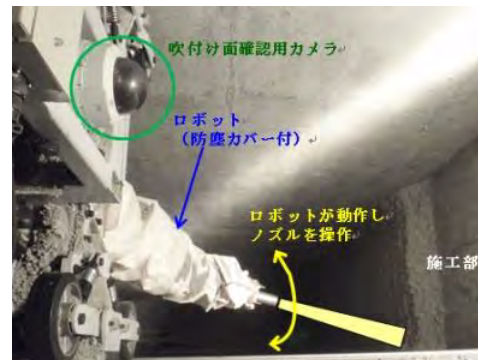


図 2.1-6 吹付け工法

表 2.1-6 大型フィニッシャの仕様

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

表 2.1-7 使用振動ローラ (1.5t 級および 2.5t 級) の主要緒元

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

表 2.1-8 大型振動ローラ（11t 級，19t 級）の主要緒元

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

2.1.4.2 転圧工法による施工試験

転圧工法は、一般的な土工事や盛土工事と同様に、材料を所定の厚さで敷き均し、その後、転圧機械で締め固めるという方法で施工する工法である。

転圧工法においては、施工部位により使用できる施工機械が異なるが、施工機械に応じた施工仕様（敷均し厚さと転圧回数）を設定することにより、いずれの施工機械でも目標とした乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ に仕上げる施工ができることを確認した。

主な施工管理は、施工した層の乾燥密度が管理目標値である $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ を満足するかを確認するものとした。乾燥密度の確認方法は、レベルによる水準測量（以下、レベル測量）による高さ／層厚、投入質量、材料の含水比を確認することにより行った。また、実際に施工後の底部緩衝材からコアを採取し、このコアのかさ密度と含水比より乾燥密度を求めた（以下、コア法とする）。

底部緩衝材は 1 層当たりの仕上がり厚さ 10cm 程度で施工し、所定の部材厚さ（1m）になるように合計 10 層を施工した。各層のコアの乾燥密度の測定結果の平均値を図 2.1-7 に示す。各層から採取したコアの乾燥密度の平均値はいずれの層でも、すなわち、19t 級大型振動ローラ、11t 級大型振動ローラのいずれを用いても管理目標値を満足する結果が得られた。これは、施工機械の能力に応じて転圧回数を変更することにより、管理目標値を満足する底部緩衝材の構築が可能であることを示唆する。

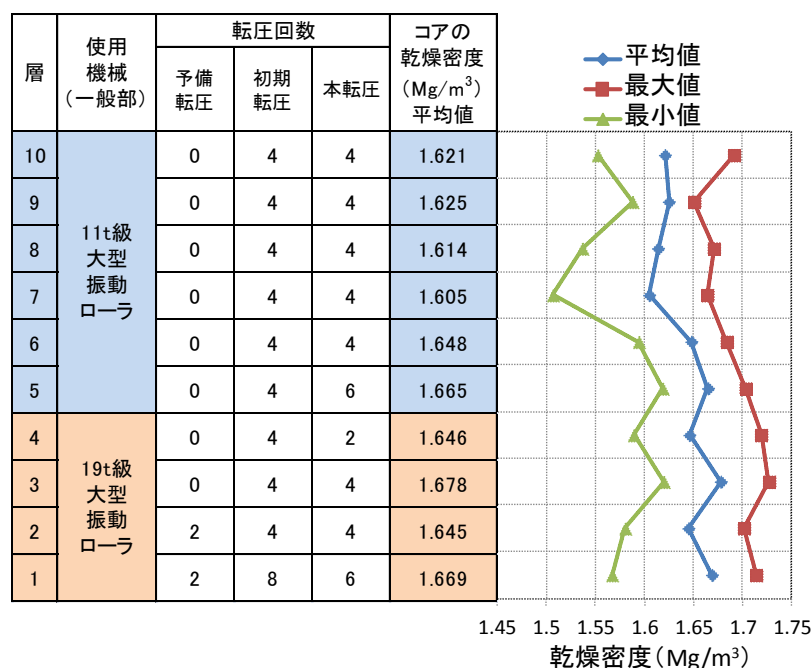


図 2.1-7 各層における仕上り乾燥密度と転圧回数の関係

次に側部緩衝材について述べる。図 2.1-8 に転圧工法で構築した側部緩衝材から採取したコアを用いて求めた乾燥密度と含水比の関係を示す。敷均し厚さは 200mm、ローラ幅 710mm、転圧回数は 6 回と 4 回の、計 2 ケースについて示す。各ケースとも、管理目標値である $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ を満足することができた。分布幅は管理目標値の幅 $\pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ 程度よりも狭く $\pm 0.05 \text{Mg/m}^3$ 程度であった。

含水比と乾燥密度の関係は、締固め曲線に沿うように分布することが予測されたので、締固めエネルギーを変えながら実施した突固めによる土の締固め試験（以下、室内締固め試験）を実施して確認した。図 2.1-9 に室内締固め試験と施工試験結果との比較を示す。室内締固め試験は 1Ec、4.5Ec、15Ec 相当（1Ec≒550 kJ/m³）のエネルギーで締固めた結果を、施工試験結果の代表例として、ローラ幅 710mm、敷均し厚さ 200mm、転圧回数 6 回で転圧したケースのコア法による乾燥密度を示した。施工試験結果は、含水比が小さくなると、乾燥密度は大きくなるように、あるばらつきの幅を持って締固めエネルギー4.5Ec 相当の締固め曲線に沿うような形で分布していることが確認できた。本試験で採用した（含水比調整、敷均しも含めた）施工方法では、室内締固め試験における締固めエネルギーは 4.5Ec に相当すると考えられる。

上部緩衝材の転圧後に採取したコアを用いて求めた乾燥密度と含水比の関係を図 2.1-9 と同様に締固めエネルギーを変えながら実施した室内締固め試験結果と比較結果を図 2.1-10 に示す。上部緩衝材の構築は、ローラ幅 710mm、敷均し厚さ 100mm、転圧回数 2 回で転圧して行った。上部緩衝材の構築においても、敷均し厚さに応じた転圧回数を設定することで目標とする乾燥密度を満足することができた。このように、敷均し厚さと転圧回数を設定することによって締固めエネルギーの調整ができるので、ある分布幅を持った乾燥密度で緩衝材を構築することが可能であることがわかった。

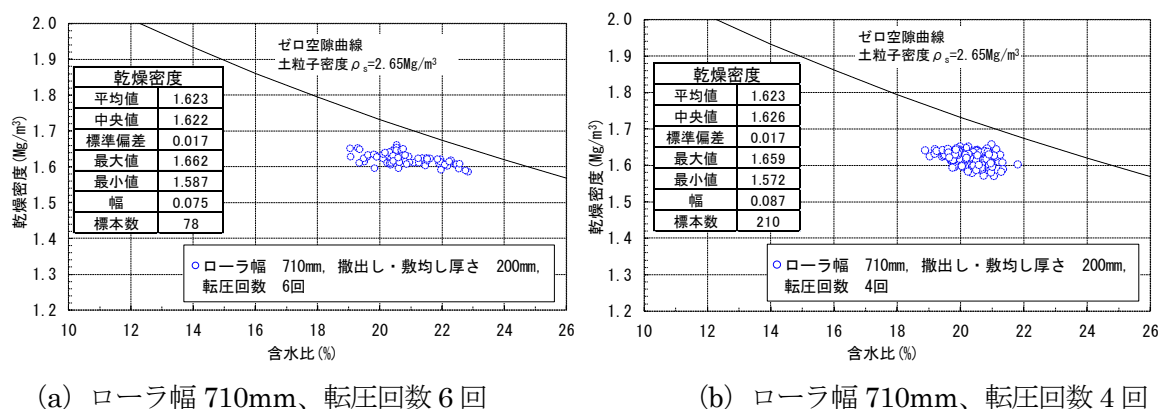


図 2.1-8 含水比と乾燥密度の関係

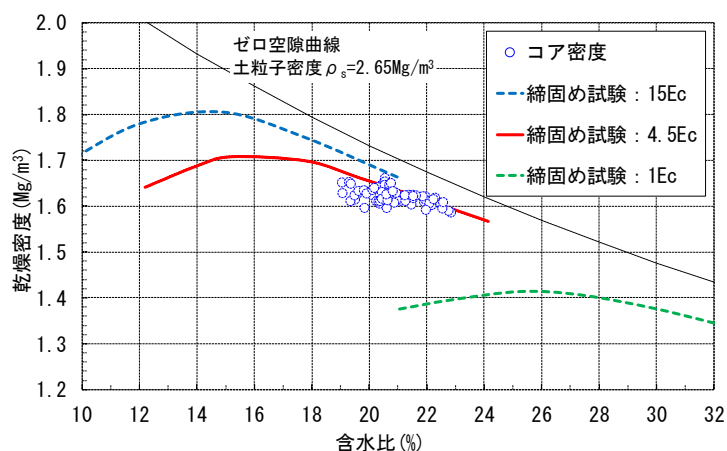


図 2.1-9 含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線と施工試験の比較）

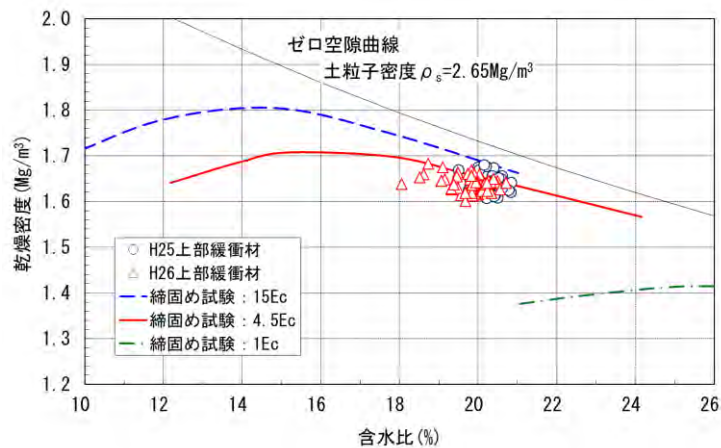


図 2.1-10 上部緩衝材のコア密度の測定結果

また、施工終了後の出来形データを取得して、実規模レベルでの施工による仕上がり厚さに関する知見を得るため、3次元スキャニングにより緩衝材の仕上がり面の不陸（施工面高さの差）測定を実施した（表 2.1-9、図 2.1-11 参照）。その結果、底部緩衝材の設計厚と最大値・最小値との差はプラス側で 0.0413m、マイナス側で 0.0489m であり、設計値との差は±0.05m 程度であることを確認した。また、上部緩衝材についても、仕上がり厚さは最大 1.020m、最小 1.004m と設計厚を満足し、かつ、不陸は 16mm と小さく、この程度であれば管理目標値内の施工が可能であることを確認できた。

表 2.1-9 部材厚に関する統計データ

（単位；m）

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

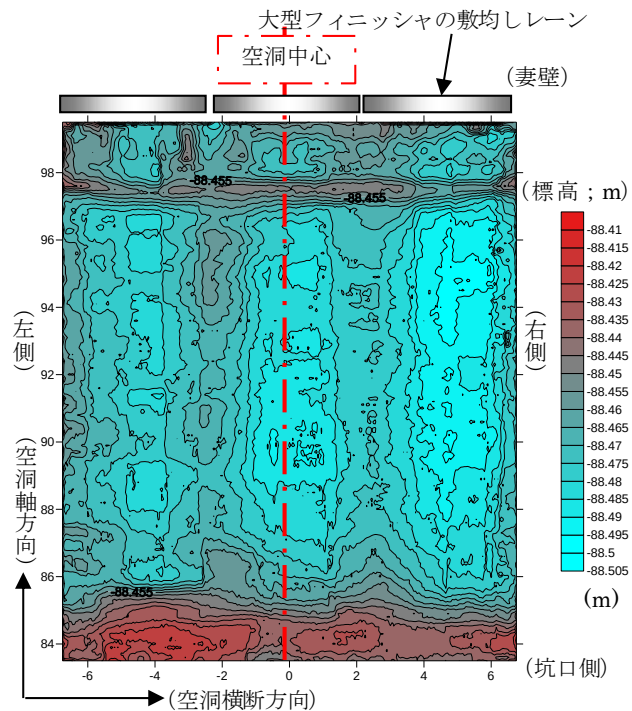


図 2.1-11 3次元スキャニング測定結果の例(10層目)

2.1.4.3 吹付け工法による施工試験

1) 吹付け工法の概要

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

吹付け工法の原理は、圧送空気により吹付け材料一粒一粒に速度エネルギーを与えており、その速度エネルギーを持った粒子は、対象物に衝突する際に発生する衝突圧によって粒子自らが高密度になるものである。土粒子一粒一粒にほぼ等価なエネルギーを直接与えるというものであり、吹き付けた層内の密度分布は小さくなる特徴を有する。

施工機器は通常のコンクリート吹付け工で使用する市販機器と同等のドライコンプレッサ、ロータ式吹付け機である。また、これらに加えて、湿潤ベントナイトの定量供給機とリバウンド材料の再利用のための吸引式の回収装置とリバウンド材料の供給機も使用している。吹付け材料は、何度でも再利用可能であり、本試験では、吸引方式によりリバウンド材を回収し、再度、吹付けた。

図 2.1-12 には余裕深度処分施設における緩衝材構築に向けて選定した本工法の標準機器と機械配置を示す。また、表 2.1-10 に吹付け工法の標準機器の仕様一覧を示す。

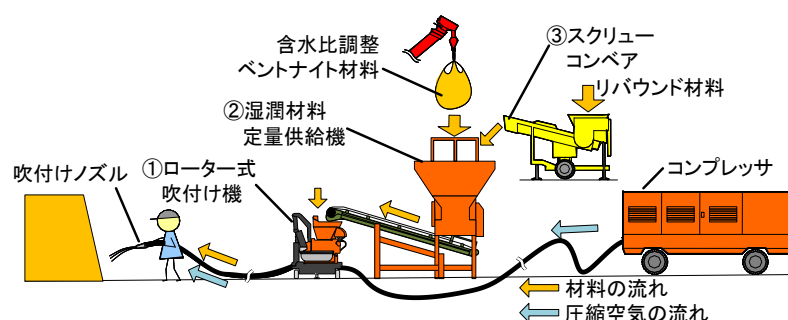


図 2.1-12 吹付け工法の標準機器と機械配置

表 2.1-10 吹付け工法の標準機器仕様一覧（カタログスペック）

吹 付 け 機	材料ホース内径(mm)	50.8
	材料吐出量(m³/hr.)	20
	最大空気圧力(MPa)	0.74
	ロータ回転数(rpm)	30
湿 潤 材 料 供 給 機	材料吐出量(m³/hr.)	4
	回転数 (rpm)	10
	ホッパ容積(m³)	1.4
コ ン プ レ ッ サ	吐出圧力(MPa)	0.69
	吐出空気量 m³/分	19.4
	出力(PS)	190

2) 材料供給量による施工管理方法

吹付け工法の場合、吹付けた緩衝材の乾燥密度は、吹付け材料の含水比と供給量によって変化する。これは、圧送空気量を一定にして施工するためであり、圧送空気量が一定という条件下では、圧送空気中の単位時間当たりのベントナイト粒子の数、すなわち材料の供給量が多くなれば、その分、ベントナイトの一粒一粒に与えられる運動エネルギーが小さくなり、吹付け後の乾燥密度も小さくなるからである。また、ベントナイトのような土質系材料を締め固める場合、材料の含水比によって締め固めの程度が変化するのは転圧工法と同様である。そのため、図 2.1-13 に示すような材料供給量と含水比と乾燥密度の関係を施工管理用にチャート化し、材料の含水比に応じて材料供給量を増減させることによって施工した緩衝材が管理目標値を満足するように施工管理を行った。なお、ここでは、乾燥密度が一定の範囲 ($1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$) に収まるよう、再利用されるリバウンド材の含水比低下を考慮して含水比の管理目標値の再設定 (18.0~23.0%) を行い、材料供給量を設定した。

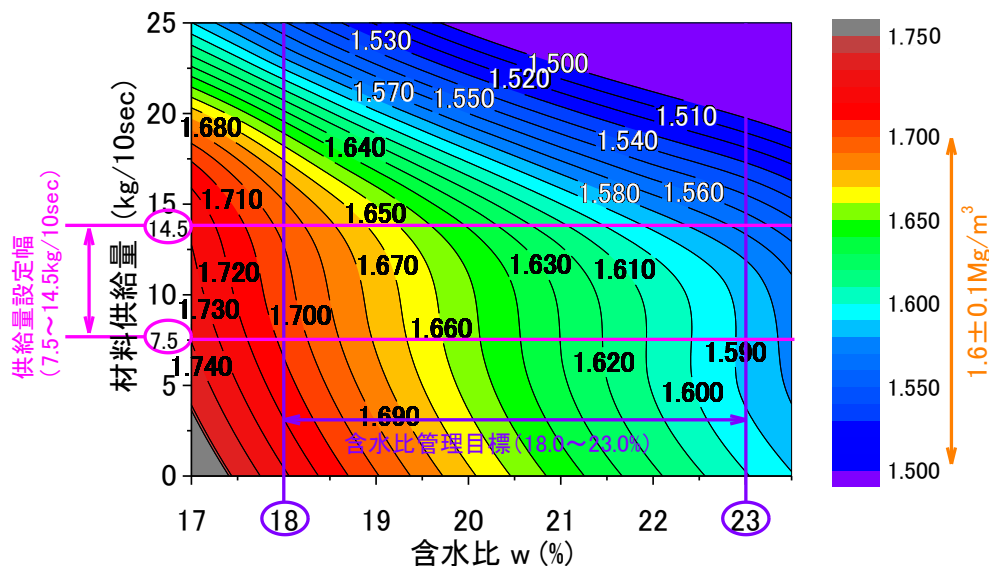


図 2.1-13 材料供給量と含水比による施工管理図

3) 材料供給量による施工管理方法

吹付工法は狭隘な空間における緩衝材施工への適用を想定して、底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部において人力、およびロボット施工による施工試験を行った。含水比と材料供給量を制御する密度管理方法の適用性を検討した結果、いずれの部位においても所定の品質を満足しており、吹付工法による実規模レベルでの施工実現性を確立した。

本試験で採用した吸引方式により回収したリバウンド材料の再利用に伴う含水比の低下は、図 2.1-14 に示すように極わずかである。また、図 2.1-15 に示すように、リバウンド材料の再利用により含水比が若干変動しても、乾燥密度をほぼ一定値に保つことが可能である。所期の目的どおり、ほぼ一定の乾燥密度が得られ、狭隘部における緩衝材の施工は、吹付け工法によって均質に施工できることが分かった。

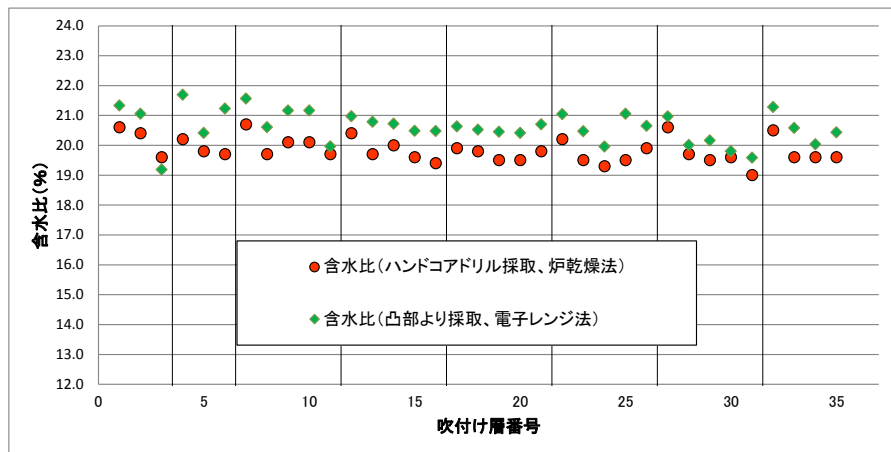


図 2.1-14 リバウンド材の再利用に伴う施工時の含水比の推移

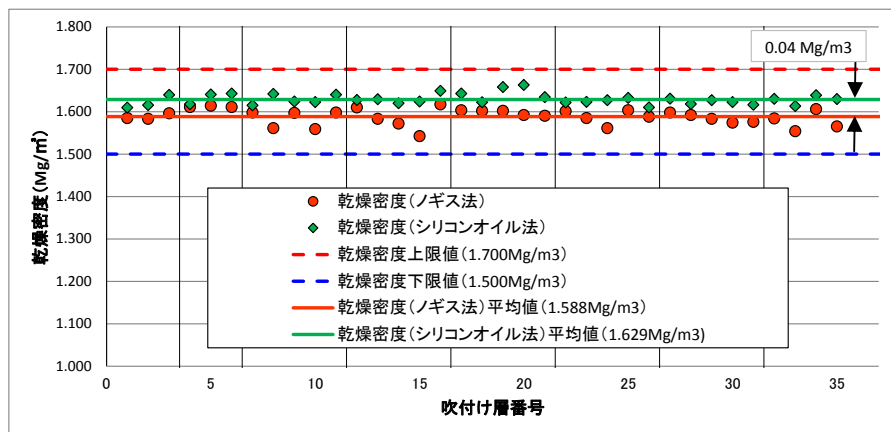


図 2.1-15 乾燥密度の比較

2.1.4.4 初期性能の確認

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

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

緩衝材の技術要件と初期性能確認試験との関係を表 2.1-11 に示す。施工試験後にコアドリルで採取したコア試料を用いて表 2.1-11 に示す室内試験を実施した。

表 2.1-11 技術要件に対応する初期性能確認試験

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

1) 透水係数

透水試験は、施工直後の原位置から採取した試料を用いて定圧透水試験を実施した。透水試験の結果に基づいて、透水係数と乾燥密度の関係を整理した。試験結果を図 2.1-16 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データ[14][15][16][17][18]を併示した。また、図に示す近似式は既往データより同定した。

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

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

また、原位置採取試料は各部位のデータを集約したもので、大型・小型振動ローラによる転圧工法および吹付け工法と異なる施工方法での試験結果である。異なる施工方法で施工しても透水係数と乾燥密度の相関性が認められることも確認できた。

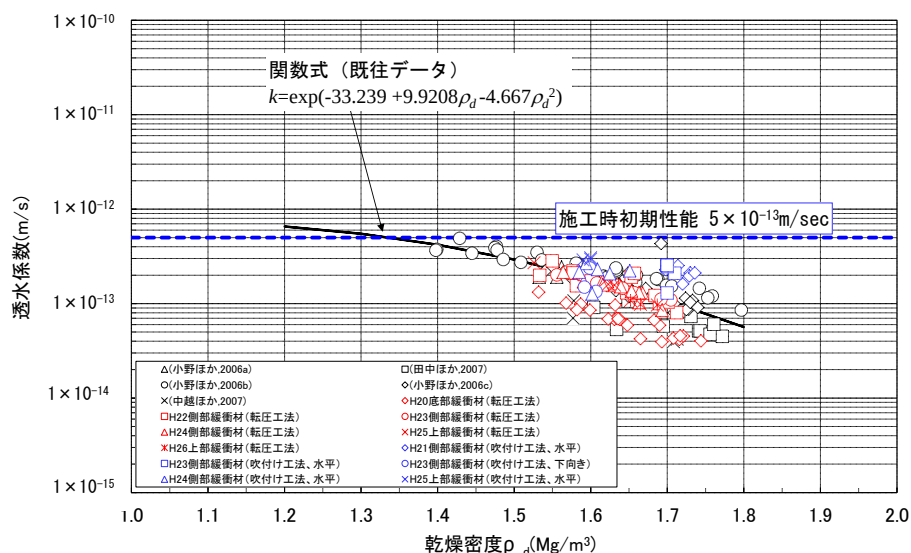


図 2.1-16 透水係数と乾燥密度の関係

2) 膨潤圧

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

施工直後の原位置から採取した試料を用いて室内膨潤圧試験を実施した。膨潤圧試験の結果に基づいて、膨潤圧と乾燥密度の関係を整理した。試験結果を図 2.1-17 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データ[19][20]を併示した。また、図に示す近似式は既往データより同定した。

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

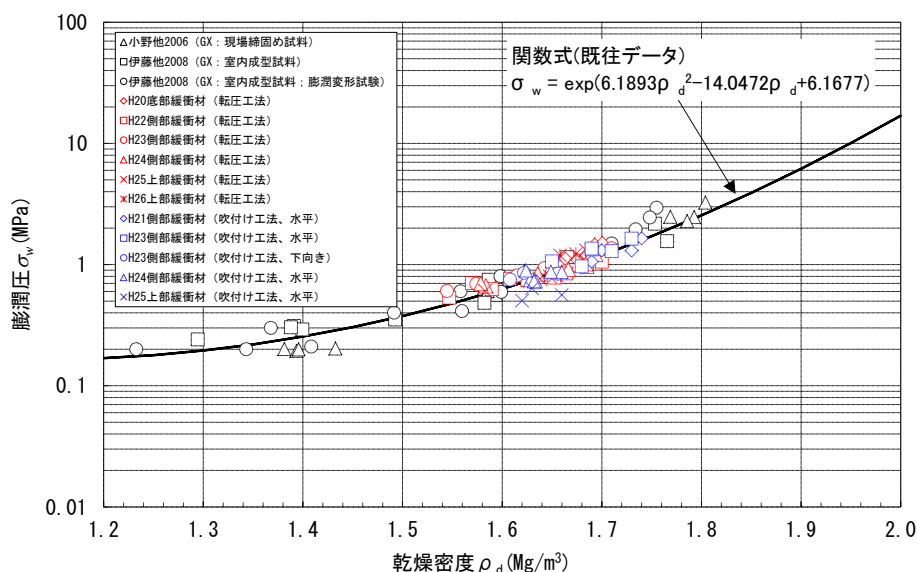


図 2.1-17 膨潤圧と乾燥密度の関係

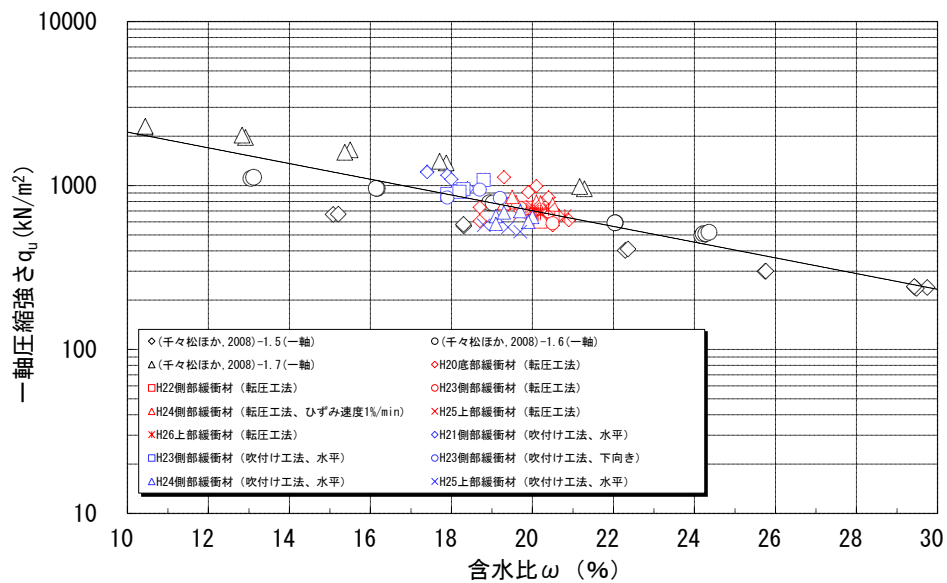


図 2.1-18 一軸圧縮強度と含水比の関係

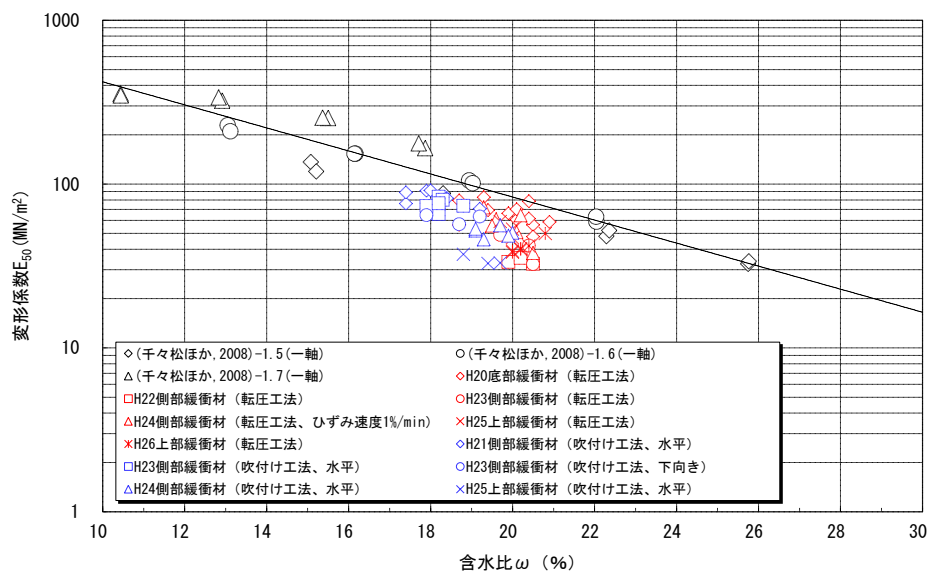


図 2.1-19 変形係数と含水比の関係

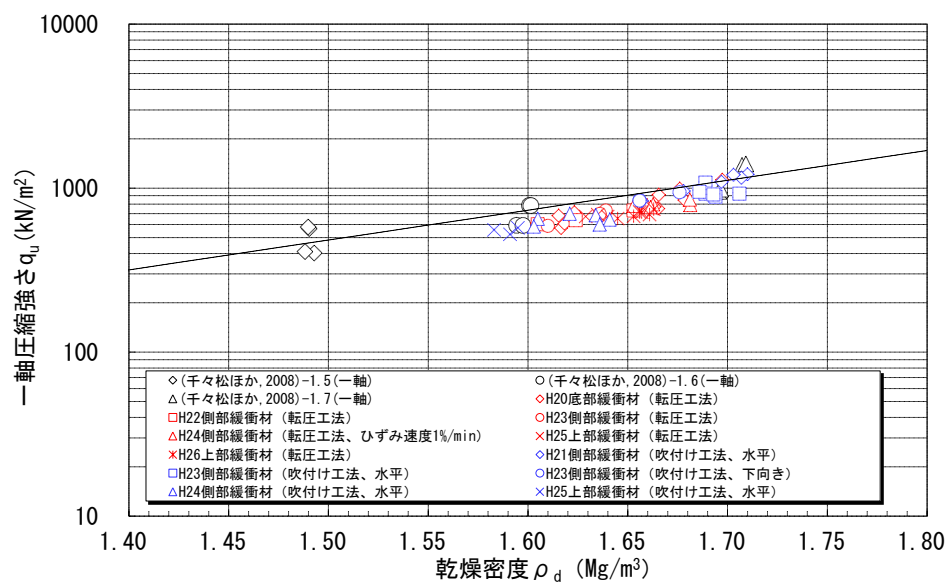


図 2.1-20 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

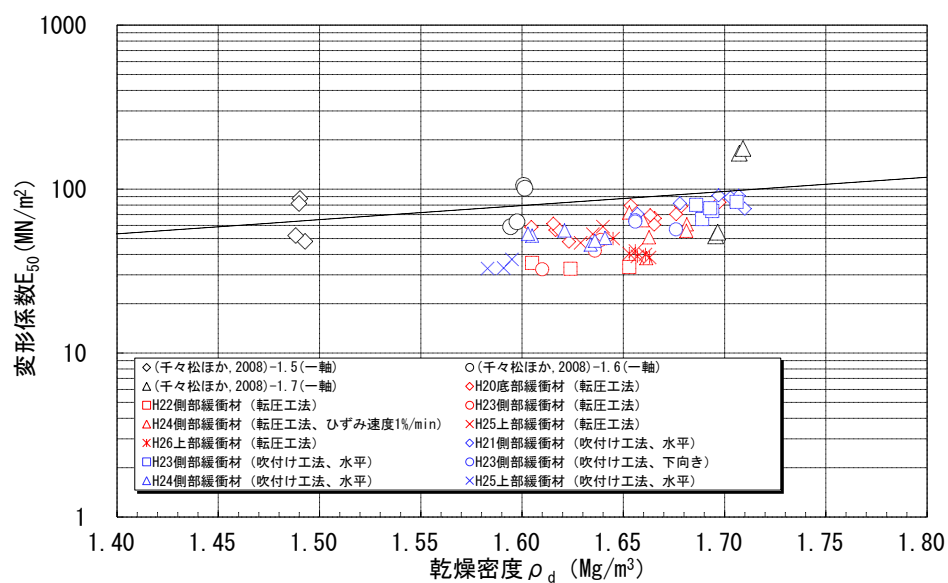


図 2.1-21 変形係数と乾燥密度の関係

3) 力学特性

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

施工直後の原位置から採取した試料を用いた一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強度と含水比の関係を図 2.1-18 に、変形係数と含水比の関係を図 2.1-19 に、一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を図 2.1-20 に、変形係数と乾燥密度の関係を図 2.1-21 に示す。図には、室内成型した試料を用いた既往試験データ[21]を併示した。図中の直線は既往データから求めた近似曲線である。

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

現場採取試料による一軸圧縮強度は、含水比、乾燥密度と相関性があり、既往データと整合する傾向を示している。一方、変形係数は含水比、乾燥密度と相関性があるものの、既往データより小さい側でばらつく傾向が認められる。室内で成型したコアは乾燥密度が均一になるように締固め（高さ方向を 5 分割して圧縮成型）を行うのに対して、現場採取のコアは層内上下方向にある程度の密度分布があることから、締固めの差によって試験結果に差が生じた可能性がある。しかし、多少の差があるものの、ある程度の相関性が確保されていることから、本試験結果で明らかとなった締固め方法による差に留意すれば、室内成型で作成した供試体を用いた一軸圧縮試験結果も実際の処分施設設計・施工時の検討材料として活用できると考えられる。

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

操業上の力学的安定性を満足する力学特性が確保されているかの確認として、一軸圧縮強度と上載荷重との比較を行った。図 2.1-20 の既往データと確認試験データを合わせたデータより求めた近似式 ($q_u = 0.7805 \exp(4.1867 \rho_d)$) を用いて、乾燥密度の管理基準値 ($1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$) の範囲での一軸圧縮強度を求めると、 $417 \sim 963 \text{ kN/m}^2$ となる。底部緩衝材に作用する上載荷重は、現時点（平成 26 年度終了時）において 188 kN/m^2 であり、一軸圧縮強度と比べて小さいことから、力学特性に関して所定の品質を確保できたといえる。

2.1.5 まとめ

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

(1) 施工検討

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

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

吹付工法は狭隘な空間における緩衝材施工への適用を想定して、底部緩衝材隅角部、側部緩衝材奥部・一般部、上部緩衝材隅角部において人力、およびロボット施工による施工試験を行った。含水比と材料供給量を制御する密度管理方法の適用性を検討した結果、いずれの部位においても所定の品質を満足しており、吹付工法による実規模レベルでの施工実現性を確立した。

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

(2) 初期性能の確認

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

(3) 今後の検討課題

1) 転圧工法

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

2) 吹付工法

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

2.2 低拡散材

2.2.1 実施概要

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

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

本試験で構築した低拡散材の配置を図 2.2-2 に示す。

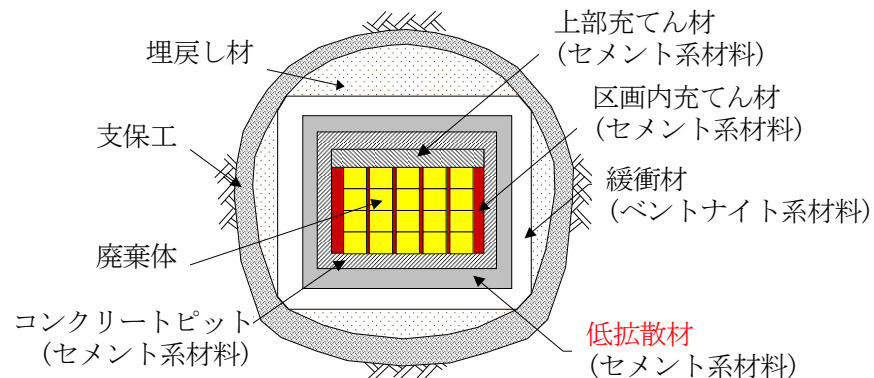


図 2.2-1 地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正）[1]

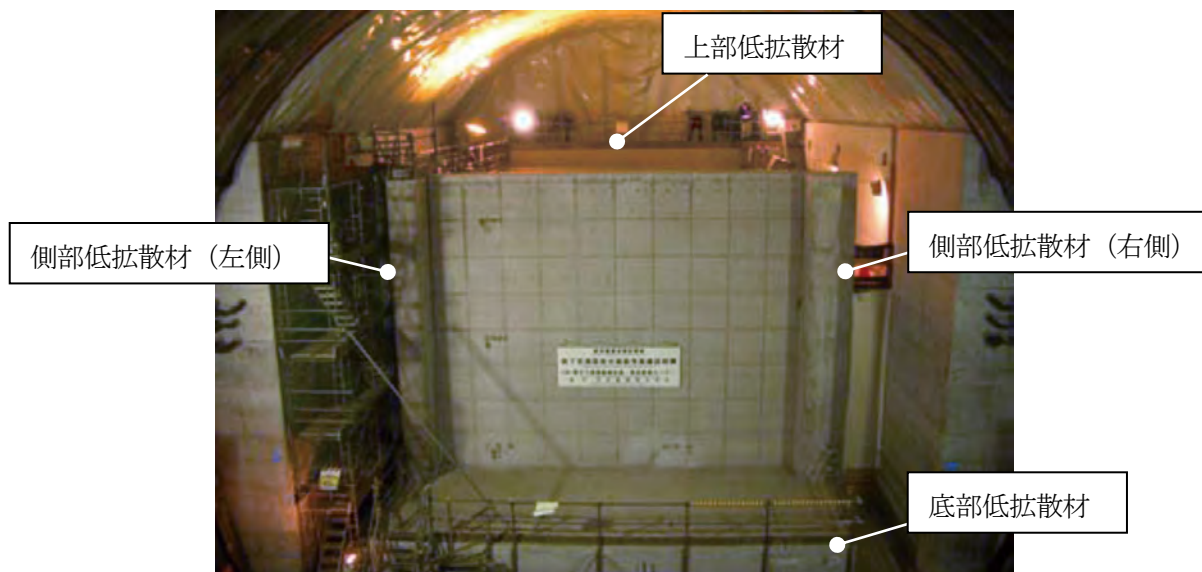


図 2.2-2 本試験における低拡散材の配置

低拡散材は放射性核種の拡散による移行を抑制すること（低拡散性）を主たる要求機能とし、核種移行の遅延を図る部材である。この低拡散性を確保するための技術要件として「拡散特性」があげられる。低拡散材は異物による水みちの発生を防ぐため鉄筋や骨材を廃し、無筋のモルタル造となっている。低拡散材には、拡散係数の小さい緻密な材料であること、および施設全体としての拡散抑制機能が低下しないように、ひび割れの発生やセメントの溶脱を抑制する材料であることが求められる。

本確証試験においては、拡散抑制機能を満足し、ひび割れの制御効果や充てん性が期待できる材料・配合を選定した後に、実規模の施工試験を行い出来形やひび割れ発生状況および初期性能等を確認することで、適用した施工方法の妥当性や成立性を評価すること、および要求機能が確保できることを確証することを目的とした。拡散抑制機能を満足し、ひび割れの制御効果や充てん性が期待できる材料・配合を選定することは、セメントを緻密化・均質化し、かつ、セメントの主要な水和物相を極力低溶解性とする方向であり、セメントの溶脱を抑制する対策と共通である。したがって、本確証試験では、セメントの溶脱抑制は、拡散抑制機能やひび割れの制御効果等が期待できる材料・配合を選定する中で考慮することとした。

2.2.2 基本条件の設定

2.2.2.1 設計仕様項目と管理項目および管理目標値

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

本試験では、低拡散材の健全部において、低拡散性が担保されていることを確認する指標となる実効拡散係数を設計仕様項目として設定することとした。一方で、ひび割れを有する部位の拡散影響評価式は、健全部の拡散係数とともに、部材厚さおよびひび割れの開口面積によって支配されることが示されている[22]。そこで、部材厚さおよびひび割れの開口面積についても、本試験における設計仕様項目として設定することとした。なお、既往の検討（土木学会、2009[2]）では拡散特性に対する設計仕様項目として“鉱物組成”を取り上げている。しかしながら、“鉱物組成”は使用した材料の特性に関わるものであり、施工により管理できる項目ではないことから、本試験では設計仕様項目からは除外することとした。

表 2.2-3 低拡散材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

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

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

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

あること、現時点で具体的な管理目標値を定めることは困難であることを考慮して、管理項目としては選定しないものとした。

以上の管理項目に対して設定した管理目標値は表 2.2-4 に示すとおりである。このうち、実効拡散係数の管理目標値は、第 1 章に記載した初期性能の目標値 $1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 以下である。

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

表 2.2-4 低拡散材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
移行抑制 (拡散抑制)	実効拡散係数	$1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 以下	
	空隙率	(約 17%)	実効拡散係数の第 1 次代替特性
	単位水量	($241 \text{kg}/\text{m}^3$ 以下)	実効拡散係数の第 2 次代替特性 (施工管理基準値 (日常管理値))
	水結合材比	(46.6%以下)	
	単位容積質量	($2,241 \text{kg}/\text{m}^3$ 以上)	
	ひび割れ開口面積	—	
	部材厚さ	0.6m (-5mm 以上+15mm 以下)	

2.2.3 低拡散材に関する確証試験の課題

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

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

次に、要求機能を確保する上で阻害要因となる条件として、打継ぎ目が考えられた。また、水みちを生じさせる可能性のある鉄筋やセパレータ等の鋼材は配置できない。低拡散性の弱部になると考えられる打継ぎ目を、できるだけ設けないように、底部・側部・上部の各部位ごとに一度に打込む必要があり、しかもセパレータを用いずに無筋モルタル部材を一度に構築した事例はないため、これまでの設計や施工計画の実現性を確認する必要があった。

さらに、低拡散材の打込み後には、隣接するコンクリートピットからの外部拘束により、ひび割れの発生が懸念された。

このような課題に対し、材料および配合の選定（材料検討）、選定された材料および配合が対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうかの確認（施工検討）、施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）という観点で確証試験を実施した。

2.2.4 低拡散材に関する確証試験結果

2.2.4.1 材料・配合仕様の設定

1) 既往の検討と基本配合

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

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

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

本試験では、上述した既往の検討で選定された材料および配合を基本として、低コスト化を志向し、表 2.2-3 に示す方針で配合設計を実施した。セメント、混和材に用いる材料は、本試験の主な要求機能である移行抑制（低拡散性）や長期安定性等の性能確保の観点から既往の検討[2]を踏襲した。

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

低拡散材に用いる高流動モルタル室内配合選定に関する既往の検討[23]において、空気量が小さくなるとともに圧縮強度が増加し、拡散係数が小さくなることを確認して空気量を 2.5%に設定しており、その配合でのスランプフローは 65±5cm である。本試験ではこれらの知見を参照して空気量、スランプフローを表 2.2-3 のように設定した。

表 2.2-3 本試験における低拡散材の基本配合設計

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

2) 室内試験による配合の選定

a. 配合選定のための室内試験の概要

本試験において対象とする高流動モルタルでは、特に充てん性・流動性、さらにポンプ圧送時のポンパビリティや材料分離抵抗性（以下、施工性とする）が課題となる。一般の高流動コンクリートでは、粗骨材とモルタルの分離抵抗性を付与する目的で、石灰石微粉末を用いる場合が多い。そこで、本試験においても、この石灰石微粉末の特性を活用することとし、石灰石微粉末の混和率（LP/B）をパラメータとして、ブリーディング率、V 漏斗流下時間、スランプフロー、圧縮強度を評価し、選定配合を決定した。

石灰石微粉末混和率とブリーディング率は反比例の関係を示し、石灰石微粉末混和率を多くしてもブリーディング率の低下効果は小さくなっていくことが分かった。漏斗流下時間は、石灰石微粉末混和率とは強い相関が見られないものの、混和率が 45% で最小となった。スランプフローは、石灰石微粉末混和率の増加とともに増大し、混和率 50% で最大となった。圧縮強度は、石灰石微粉末量の増加とともに、緩やかに増加する傾向が見られた。

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

b. 選定配合

低拡散材の使用材料および室内試験によって決定した使用材料と配合を表 2.2-4 および表 2.2-5 に示す。なお、実際には、使用材料の密度変化やロットの変化にともない、単位細骨材量を変更した。併せて、高性能 AE 減水剤あるいは空気量調整剤の添加率により、フレッシュ性状を調整した。

また、側部低拡散材の施工時には、左右の低拡散材の LP/B をそれぞれ 45% および 60% とし、両者の比較をすることとした（表 2.2-6）。

表 2.2-4 低拡散材の使用材料

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

表 2.2-5 低拡散材の配合

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

※ 結合材量: B=LPC+FA+LEX、粉体量: P=B+LP

表 2.2-6 各配合の打ち込み箇所

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

2.2.4.2 施工の検討

1) 打込み時の側圧

コンクリート標準示方書【施工編】[24]では、高流動コンクリートの型枠は、「原則として、液圧として設計しなければならない」と規定されている。本試験では、これに則り、液圧が作用するものとして型枠の設計をした。

前述のように、低拡散材は水みちとなる可能性のある鉄筋やセパレータ等の鋼材を一切配置しない無筋の部材である。そのため、低拡散材の型枠には、セパレータを用いないこととした。したがって、型枠の組立には、鋼管およびパイプサポート等の支保部材を型枠の外側に配置した。

側部低拡散材の施工時に、型枠に作用する高流動モルタルの側圧を測定した。測定には、土圧計（東横エルメス社製、GE-400kPa）を用いた。側部低拡散材の左側（LP45）における土圧計の配置を図 2.2-4 に示す。

打込み開始からの時間で整理した側圧の継時変化を図 2.2-5 に示す。図中には、打込み高さと単位容積質量から算出した液圧相当値も併記した。図より、いずれの場合も、打上り面が計測位置を通過してからある程度までは、側圧は液圧として作用し、その後はほぼ一定となる傾向が認められた。また、その最大値は、70kPa 程度であった。

なお、打込み前に測定した型枠位置と硬化後の構造物の出来形測定の結果から、型枠の緩み等の変形はほとんど無いことを確認した。

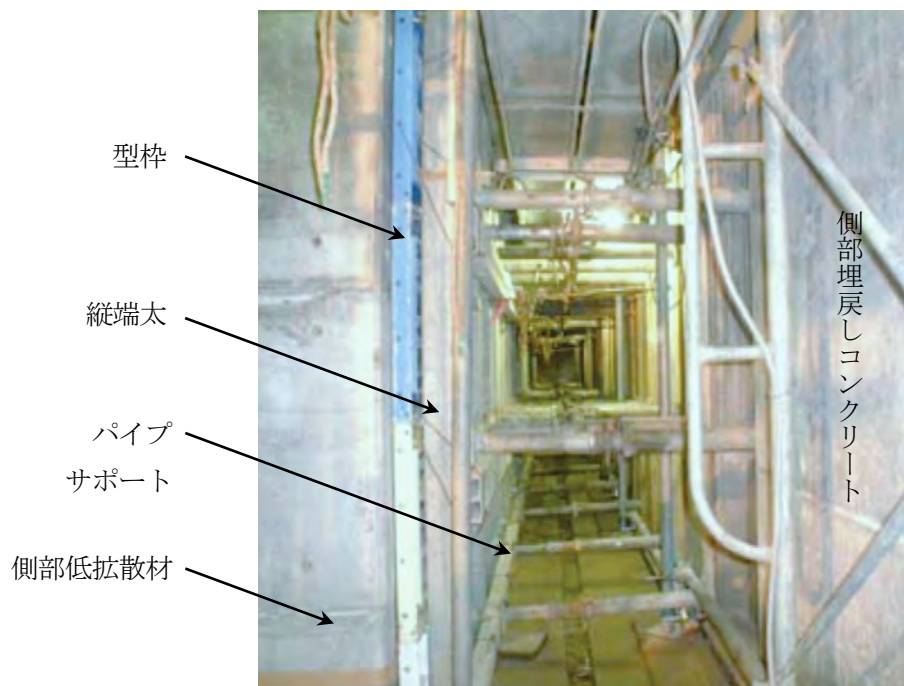


図 2.2-3 型枠および支保工の設置状況

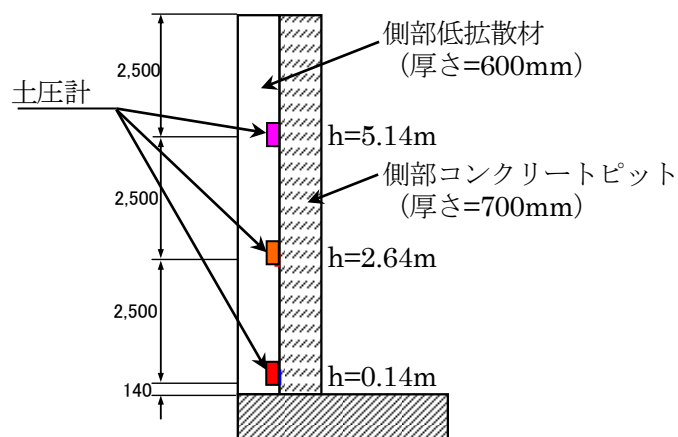


図 2.2-4 土圧計の配置 (左側 : LP45)

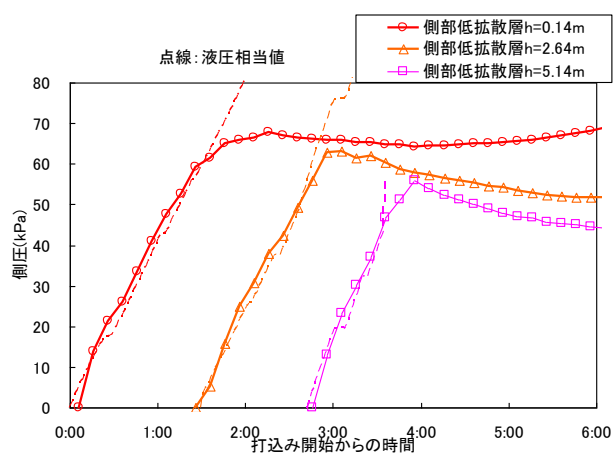


図 2.2-5 打込み時間と側圧の関係 (左側 : LP45)

2) 充てん性および流動性

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

底部低拡散材および側部低拡散材における、製造時と荷卸し時のスランプフローの品質管理結果を図 2.2-6 に示す。スランプフローは、LP45 および LP60 のいずれの場合においても、管理目標値（ $65 \pm 5\text{cm}$ ）以内であった。また、製造から荷卸しまで、運搬時間を含めて平均 65 分程度であったが、製造時と荷卸し時のスランプフローはほぼ同程度であった。また、図 2.2-7 に示すように、LP45 および LP60 のいずれの場合においても、V 漏斗流下時間も製造時と荷卸し時はほぼ同等であった。このことから、このことから、製造から荷卸しまでに要する時間（約 1 時間）において十分に流動性を持続できる配合であったといえる。

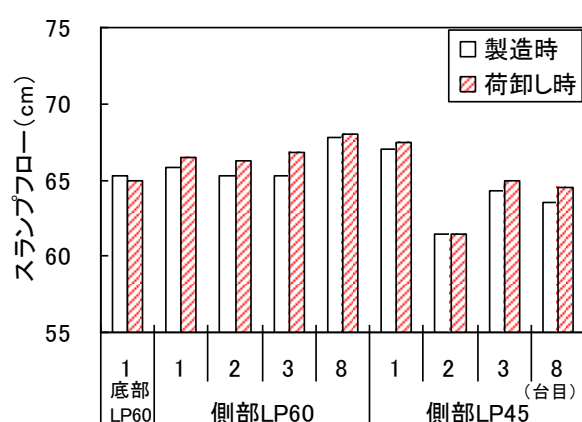


図 2.2-6 スランプフローの品質管理結果

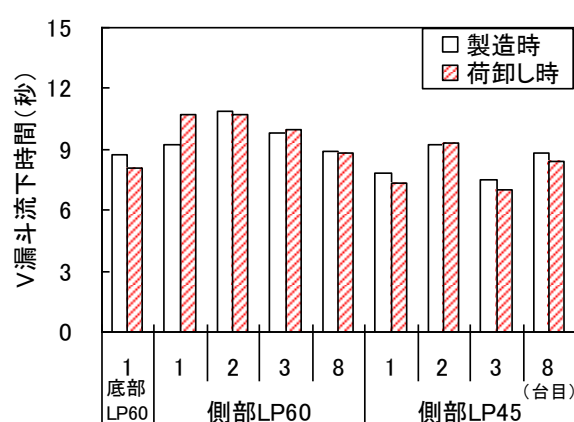


図 2.2-7 V 漏斗流下時間の品質管理結果

底部低拡散材の打込みは、平面的に均一に打ち上がるように施工した。打込み初期には投入口を固定して打込んだモルタル高さをレベルで計測し、指針[25]に示される流動勾配を算出した。

側部低拡散材では、コンクリートポンプ車により、部材長手方向の中央付近に筒先を固定してモルタルを投入した。打込み高さは、常に打込み面から 50cm 程度となるよう調整した。流動性と打込み速度の関係を確認することを目的に、打込み中にポンプ車の出力を調整して吐出量を $6 \sim 24\text{m}^3/\text{h}$ に変化させた。打上り高さは、型枠天端付近に複数設置したレーザー距離計（DIMETIX 社製 DLS-B15）により、随時計測し、流動勾配を算出した。

吐出量で整理した流動勾配を図 2.2-8 に示す。指針[25]に示される粉体系高流動コンクリートの目標流動勾配（ $0.1 \sim 0.05$ ）よりも小さい値であることから、良好な流動性を有するものと評価できる。なお、脱型後に部材端部まで確実に充てんされたこと、および豆板等の欠陥も生じていないことを確認した。そのため、本試験のように作業性の悪い足場等の条件でも、選定した配合で構築すれば、平面的に均一に打ち上げて施工することが可能であることを確認できた。

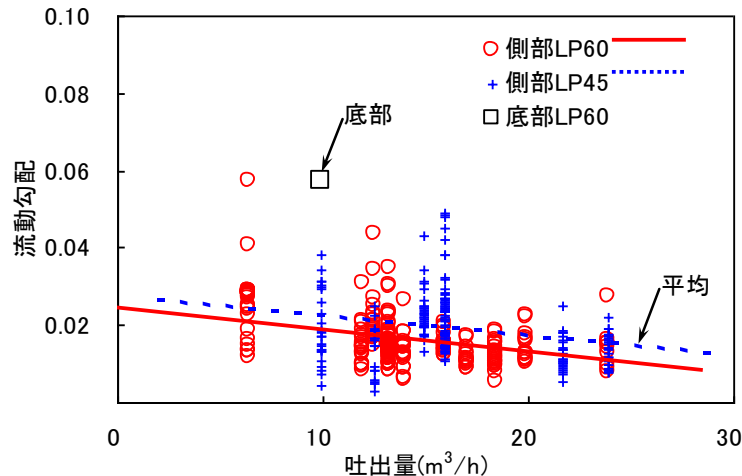


図 2.2-8 打込み時の流動勾配

3) ひび割れ

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

底部・側部・上部低拡散材のそれぞれに発生したひび割れの状況を、BTV 観察および目視観察で把握した。ここでは、側部低拡散材についてまとめる。

側部低拡散材は、LP45 配合を使った左側および LP60 配合を使った右側ともに、脱型後に目視でひび割れ観察を行った。側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況を図 2.2-9 および図 2.2-10 にそれぞれ示す。また、側部低拡散材（LP60 配合）のひび割れ状況を図 2.2-11 に示す。

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

既往の研究[22]では、低拡散材の超長期の性能評価におけるパラメータの目標値として、「部材の表面積に対してひび割れ開口部の面積（ひび割れ幅×長さ）比率を 0.05%以下と設定した」と示されている。ここで、本試験における側部低拡散材ひび割れ観察におけるひび割れ開口部表面積比率は 0.011%以下であり、上記の目標値である 0.05%に対して、1/5 程度の値であった。

ただし、ひび割れはバリア性能に直接関係する重要なファクターであることから、ひび割れの挙動をできる限り観察を継続することが望ましい。

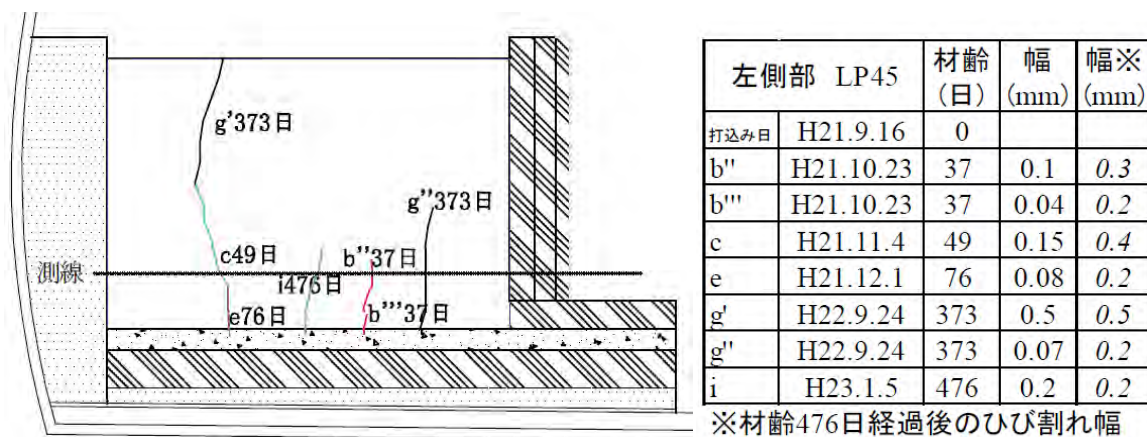


図 2.2-9 側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）

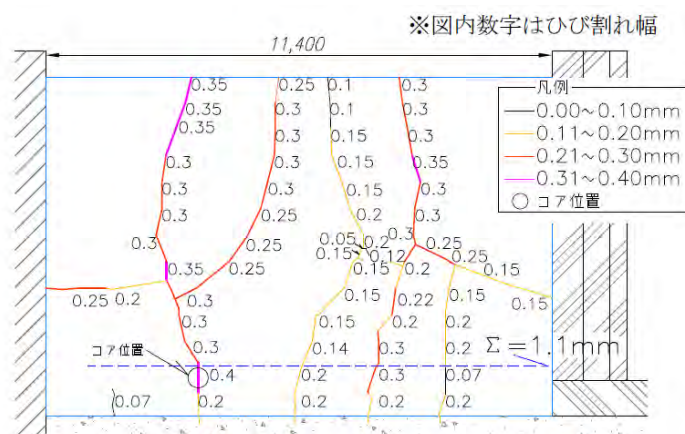


図 2.2-10 材齢 812 日における側部低拡散材（LP45 配合）のひび割れ状況（側面図）

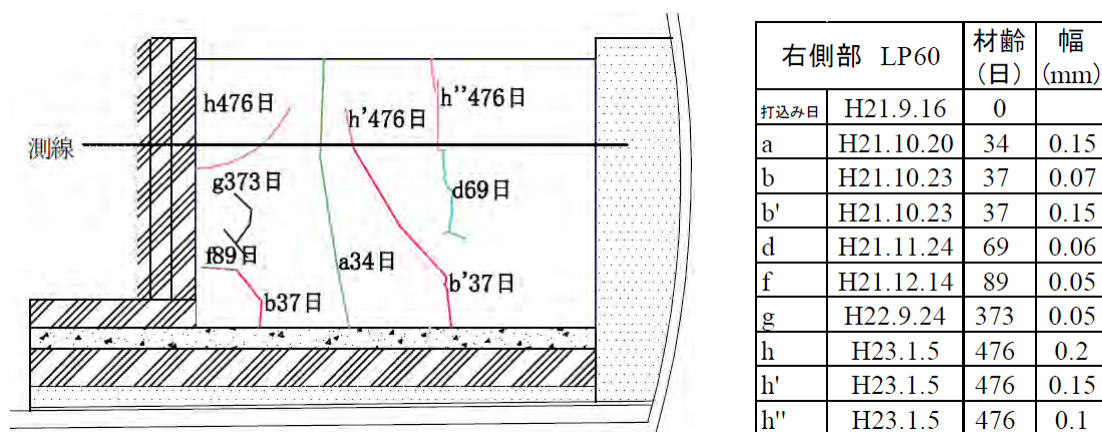


図 2.2-11 側部低拡散材（LP60 配合）のひび割れ状況（側面図）

2.2.4.3 初期性能の確認

初期性能確認試験は低拡散材の主たる要求機能である拡散抑制に係わるデータの他、副次的な要求機能に関わるデータや設計・施工等のための基礎となる基本的な物性の取得を目的とした試験も実施した。

主要要求機能である拡散抑制に対しては、拡散係数の測定試験を実施し、管理目標値を満足するかの確認を行った。放射性核種の拡散係数は、原子力学会標準[26]を参考としたトリチウムをトレーサに用いた定常拡散試験法（through-diffusion 法）によって測定した。表 2.2-7 に試験条件を示す。試料は、室内配合試験時に採取したものと、硬化後の各部位から採取したコアによるものとした。

拡散係数の測定結果を表 2.2-8 に示す。拡散係数は、室内作製供試体で $1.9 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ 、コア供試体で $1.1 \times 10^{-13} \sim 1.6 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ であった。これより、いずれの供試体についても、拡散係数の管理目標値である $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ と比較して、1桁程度小さい値であり、これは、後述する図 2.2-12 で示した既往の研究[27]の値と比較して、2桁程度低く、非常に小さい拡散係数であった。また、室内作製供試体と、施工の影響が加味されたコア供試体の値はほぼ同等であることが確認された。

コンクリートがトリチウム水と接触している場合、トリチウムは主に自由水の形態でセメントペースト中の空隙を移行するものと考えられる。安田ら[27]は、普通ポルトランドセメント（OPC）とフライアッシュ（FA）を用いたモルタルについて、空隙率と拡散係数の関係を整理しており、フライアッシュを混入したモルタルの拡散係数が小さいことを示している。ここで、本試験で測定された空隙率および拡散係数を、本試験と同様の配合を用いて測定された既往の知見[28]と併せて図 2.2-12 に示す。図より、本試験で用いた高流動モルタルの拡散係数と空隙率の関係は、既往材料によるもの（黒破線）と同様の傾向であることがわかる。

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

表 2.2-7 拡散試験の試験条件

項目	内容
試験溶液	セメント平衡水
トレーサ	トリチウム水（HTO）
トリチウム濃度	300,000cpm/ml 程度
トレーサ濃度分析	放射能測定（液体シンチレーションカウンタ）
試験温度	室温（ $\sim 25^\circ\text{C}$ ）
試験雰囲気	低酸素雰囲気（ $\text{O}_2 < 1\text{ppm}$ 、高純度 Ar ガス）
試料形状	室内作製供試体 : 直径 50mm、厚さ 10mm コア供試体 : 直径 55mm、厚さ 10mm

表 2.2-8 拡散試験の試験結果

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

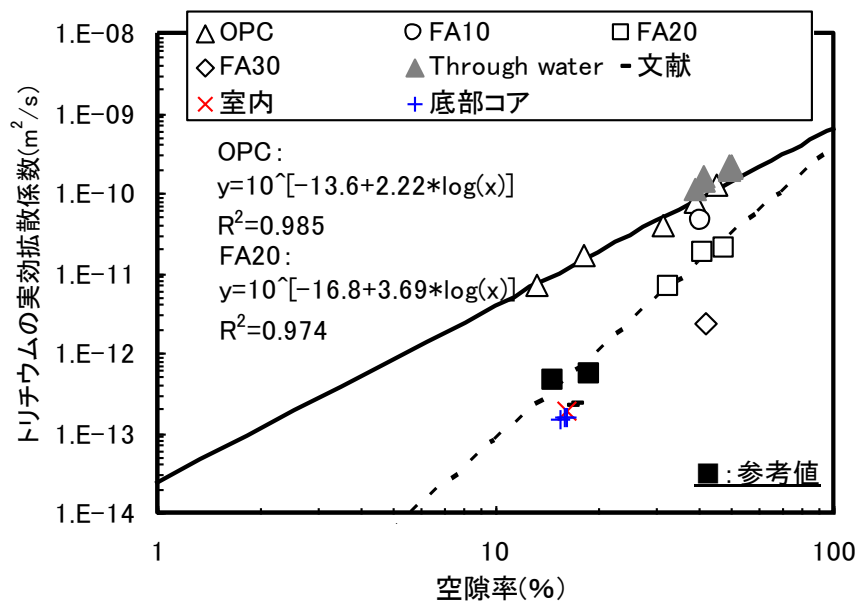


図 2.2-12 モルタルの空隙率とトリチウムの実効拡散係数 ([27]に追記)

2.2.5 まとめ

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

(1) 材料・配合仕様の選定

本試験で選定した低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動モルタル配合は、低拡散性に優れ、温度ひび割れ発生の可能性を低減し、かつ制約条件の多い地下空間における施工においても充てん性・流動性に優れた材料・配合であることを確認した。また、産地が違いブレン値も異なる石灰石微粉末を使用した場合についても、確証試験をつうじて、若干の配合調整を行うことで施工可能であることを実証した。

(2) 施工の検討

施工検討における充てん性および流動性について、ポンプ圧送時の充てん性を評価し、良好な流動性を有すること、および特別な作業を必要とせず、部材の端部まで充てん可能であることを確認した。

施工検討における型枠設計について、処分施設におけるバリア材として水みちを残さないために、型枠セパレータを使用せずに施工することが求められるが、実物大の確証試験において出来型精度に大きな影響を与えることなく施工可能な方法を提示した。

高流動モルタルの打込み時の側圧は、必ずしも液圧で作用するものでなく、今回の例では打込み開始から約 1 時間 20 分までは液圧で作用し、最大で 70kPa 程度であった。この知見は、型枠の設計・施工の合理化に向けて活用できるものである。

実物大の施工検討におけるひび割れ開口面積について検討した結果、低拡散材の主な要求機能である低拡散性の観点から求められるひび割れ開口面積比率（0.05%）を長期的にも下回ることが推定され、ひび割れを考慮しても高い品質の材料であることが確認できた。また、低拡散材という部材全体としての低拡散性も高いことが示された。

(3) 初期性能の確認

地下環境下で施工した部材から採取したコア試料を用いた試験の結果、本試験で選定した配合による拡散係数は、既往材料である普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して、2 オーダー程度小さい値であり、非常に小さい拡散係数の材料であることが明らかになった。比較対象として作製した室内作成供試体と施工した部材から採取したコア試料とが同程度の値で管理目標値（ $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下）を満たすことから、施工の影響は小さいことが示された。また、空隙率と拡散係数の関係は、既往の知見とほぼ同等であることが示された。

(4) 今後の検討課題

今後の検討課題を以下にまとめる。

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

2.3 コンクリートピット

2.3.1 実施概要

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

図 2.3-2 本確認試験におけるコンクリートピット施工後の状況を示す。

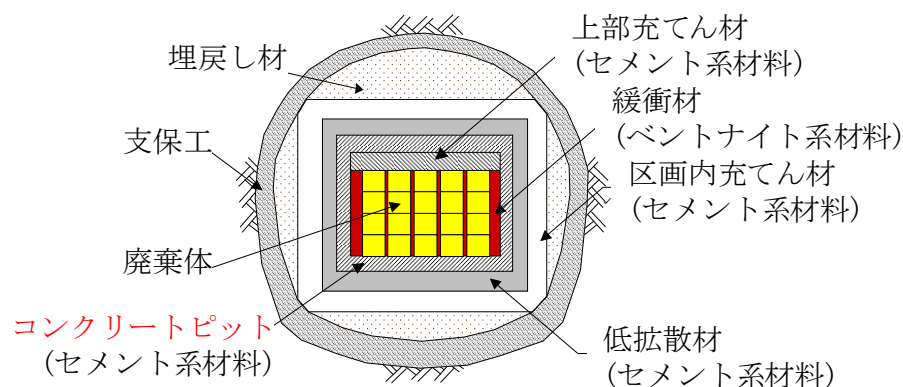


図 2.3-1 地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正[1]）

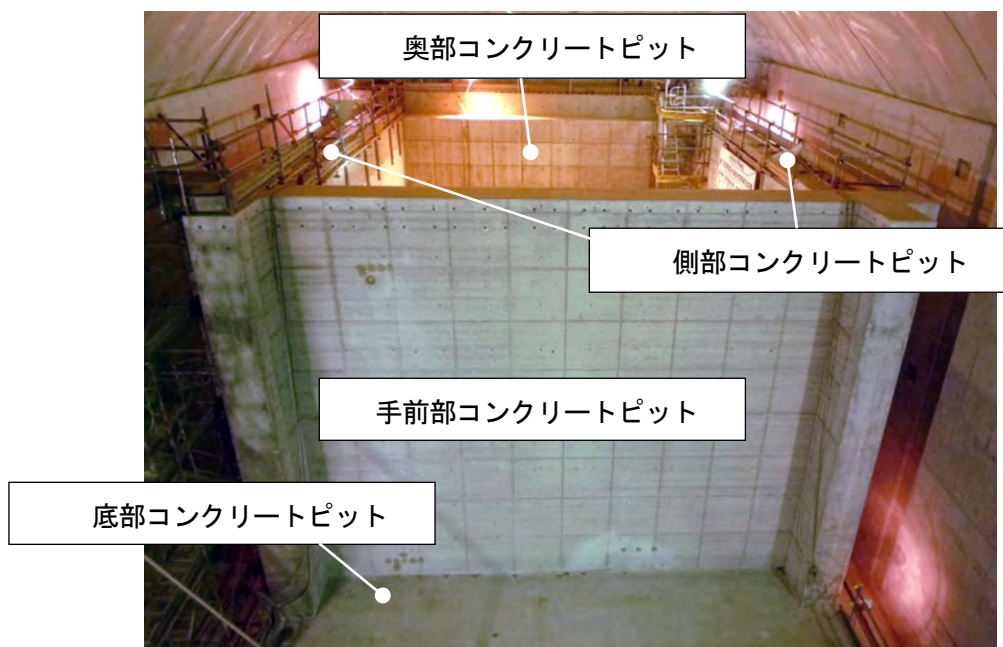


図 2.3-2 外部から見たコンクリートピット

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

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

2.3.2 基本条件の設定

2.3.2.1 設計仕様項目と管理項目および管理目標値

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

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

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

表 2.3-3 コンクリートピットの要求機能と設計仕様項目

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

コンクリートピットの確認試験における管理項目とその管理目標値を設定した。

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

を目視確認で管理した。

表 2.3-4 コンクリートピットの管理項目と管理目標値

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

2.3.3 コンクリートピットに関する確証試験の課題

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

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

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

上述の考え方を踏まえて、施工の成立性や要求機能の確保を確証試験で確認する上で必要な検討項目は、材料および配合の選定（材料・配合仕様の設定）、選定された材料および配合が、対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうか確認するための検討（施工の検討）、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）である。

2.3.4 コンクリートピットに関する確証試験結果

2.3.4.1 材料・配合仕様の設定

1) 既往の検討と基本配合

土木学会では、コンクリートピットの要求機能として、空間・力学安定性、放射線の遮へい、放射性核種の収着を設定しており、これに対する設計仕様項目として、コンクリート圧縮強度、鉄筋強度

および配筋・継手・かぶり、乾燥単位容積質量、部材寸法（厚さ）、収着分配係数、鉱物組成を設定している[2]。

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

本試験では、概念検討[29]で選定された材料および配合を基本として、主たるセメント系人工バリアである低拡散材の配合を参考に、低コスト化、高性能化を志向し、表 2.3-3 に示す方針で配合設計を実施した。

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

表 2.3-3 本試験におけるコンクリートピットの基本配合設計

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

2) 室内試験による配合の選定

a. 配合選定のための室内試験の概要

まず、打込み時の環境温度の変化の影響を検討した。季節変化による環境温度の変化は、フレッシュ性状に大きな影響を及ぼす。そこで、選定された配合に対し、環境温度の変化を想定した試験を実施し、温度変化に伴うフレッシュ性状の変動への対策を検討した。試験では、想定した環境温度に対して、練上りのコンクリート温度の目標値とし、5℃～30℃の間で温度を設定した。

次に、異なる石灰石微粉末を使用した時の影響を検討した。高流動コンクリートでは、粗骨材とモルタルの分離抵抗性を向上させる目的で、石灰石微粉末を用いる場合が多い。本試験で対象とする粉体系高流動コンクリートでは、フレッシュ性状確保における石灰石微粉末への役割が特に重要で、例

えば、石灰石微粉末の産地変更が発生した場合にはフレッシュ性状への影響が少なからず発生すると想定される。そこで、石灰石微粉末の種類（表 2.3 4 参照）およびその量がフレッシュ性状に与える影響を粘性とブリーディング抑制の観点から検討・評価し、配合を選定した。さらに、選定された配合に対して、石灰石微粉末の産地が異なることが硬化性状に及ぼす影響についても確認した。

表 2.3-4 使用した石灰石微粉末

LP1	石灰石微粉末（太平洋セメント社、熊谷工場製） 密度=2.70g/cm ³ 、比表面積=5,390cm ² /g
LP2	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.71g/cm ³ 、比表面積=5,51cm ² /g

石灰石微粉末に LP1（太平洋セメント社、熊谷工場製）を用いて各環境温度におけるスランプフローと漏斗流下時間の経時変化の関係を調べた。その結果、環境温度 30℃でのスランプフローは、経時的なロスが大きく、60 分経過後でスランプフローの目標値（65±5cm）を大きく下回ることが確認され、対策が必要であることが分かった。それ以外のケースは 120 分経過後においても目標値を満足することが可能であることがわかった。高温時（本試験では 30℃）の対策として、プラントにおける試製造を行い、その結果によって混和剤添加率を調整し、製造時の各バッチに反映することが有効であることが分かった。このような対策を実施すれば、高品質な材料を製造可能であることが明らかとなった。

石灰石微粉末として LP2（宮城石灰工業株式会社製）を用いた配合において、石灰石微粉末量をパラメータとして、スランプフローの目標値の中央値 650mm を得られる高性能 AE 減水剤（SP）の添加率、V 漏斗流下時間、ブリーディング率、間隙通過性を評価し、最適な石灰石微粉末量を選定し、LP1（太平洋セメント社、熊谷工場製）を用いた場合の結果と比較した。試験条件として、環境温度は 20℃とした。

室内試験の結果、石灰石微粉末の種類を変更しても、高性能 AE 減水剤（SP）添加率の調整により、LP1 と同程度のスランプフロー、V 漏斗流下時間を実現できることを確認できた。LP2 の最適な石灰石微粉末量については、一番粘性の低くなる（V 漏斗流下時間が最初となる）石灰石微粉末量 178kg/m³付近においてもブリーディングおよび間隙通過性に問題が無いこと、スランプフロー650mm を確保する高性能 AE 減水剤の添加率も 0.9～1.0%の範囲で概ね変わらないことから、178kg/m³（LP2/B=50%）が最適であると判断した。

b. 選定配合

室内試験によって決定した使用材料を表 2.3-5 に、選定配合を表 2.3-6 に示す。本確認試験におけるコンクリートピットの各部位での使用配合を表 2.3-7 に整理した。比較のため、施工試験においても LP1 と LP2 の 2 種類の石灰石微粉末を用いた。

表 2.3-5 コンクリートピットの使用材料

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

表 2.3-6 コンクリートピットの選定配合

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

※ 結合材量:B=LPC+FA+LEX, 粉体量:P=B+LP

表 2.3-7 コンクリートピット各部材での使用配合

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

2.3.4.2 施工の検討

1) 打込み方法

コンクリートピットは、底部、側部（奥部、両側部、手前部）、上部に分けられる。コンクリートピットに使用するコンクリートは高流動コンクリートであり、その流動性を生かし、バイブレータによる加振（締固めを目的とした）を行わない施工とした。しかし、例外として形状の特性上、流動勾配が大きくなる底部コンクリートピット、上部コンクリートピットの施工においては、筒先を移動させ複数箇所からの打込みを実施し、下部のコンクリートとの一体性確保と流動補助を目的に、バイブレータを補助的に使用した。側部に関しては、打込み箇所を固定し、端部まで自然に流動させた後、筒先部が天端高さに上がった時点で筒先を端部に移動させる打込み手順を採用した。その結果、底部、側部、上部のいずれのコンクリートピットにおいても隅々まで充てんができることを確認した。

コンクリートピットの流動勾配を部位ごとにまとめたものを図 2.3-3 に示す。図に示すとおり、流動勾配は平面的に広い部材（底部、上部）と、延長に対して幅が狭い部材（奥部、両側部、手前部）で異なり、コンクリートが打ち込まれる部材形状に影響を受けることが確認された。これは低拡散材と同様な傾向であり、底部、上部ではコンクリートが投入先から面的（二次元的）に流動するのに対し、奥部、両側部、手前部では、コンクリートが型枠の間を線的（一次的）に流動する違いで流動勾配に差が生じたと考えられる。

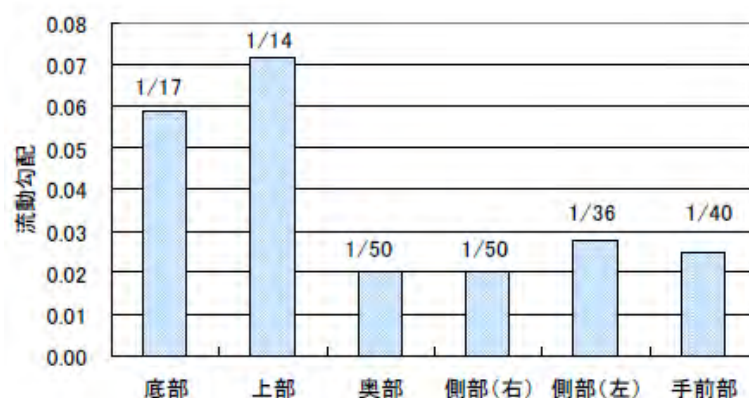


図 2.3-3 コンクリートピットの流動勾配

図 2.3-4 に側部コンクリートピット（左側）打込み時の吐出量と流動勾配の関係を示す。これより、流動勾配は吐出量によっても変化が見られ、側部打込み時の場合は、吐出量が増大すると流動性も増大する傾向が確認された。

以上の結果から、実施工においては各部位の特長（平面の広さ、部材幅、部材延長、部材厚さ等）から、打込み箇所の数と場所の設定、吐出量の調整による流動勾配の調整、必要に応じたバイブレータの補助的な使用等が効果的と考えられる。選定したコンクリートピットの配合は、指針[25]に示される粉体系高流動コンクリートの目標流動勾配（1/10～1/20）と同等レベルである。また、脱型後のコンクリート側面に豆板や初期欠陥がなく、隅々まで充てんされることを確認した。実施工においても本試験で選定した配合、施工方法を用いることで品質の高い部材構築が可能である。

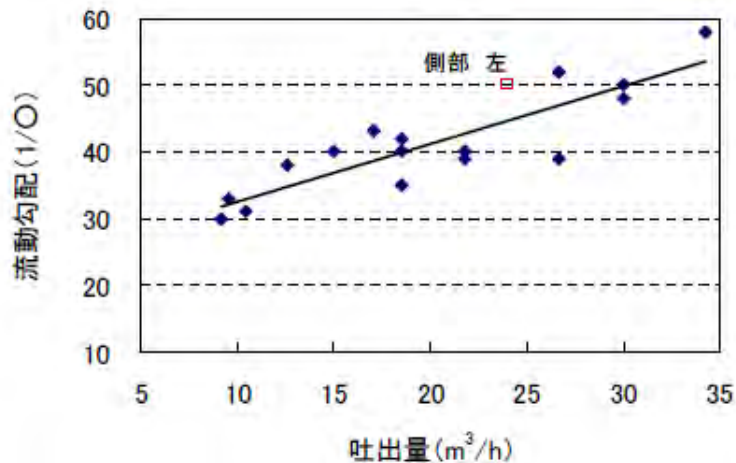


図 2.3-4 吐出量と流動勾配の関係

2) ひび割れ発生状況の確認と抑制方法

コンクリートピットの各部位（底部、側部、上部）には、表面に微小なひび割れが確認された。上部コンクリートピットのひび割れ状況を図 2.3-5 に示す。これらのひび割れについて図 2.3-6 の位置でコア削孔を行い、また、すべてのひび割れに対し、表層から 2mm 程度をグラインダーで削り、ひび割れ深さを確認した。その結果、今回のひび割れは、いずれも表面近傍（2mm 以下）であることが確認され、コンクリートピットの性能に影響を与えるものではないと考えられた。

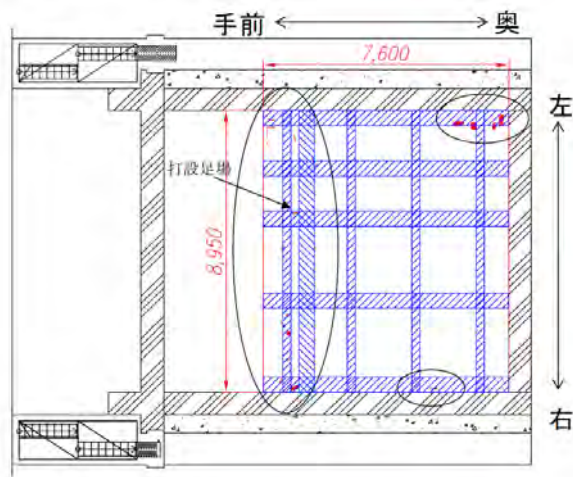


図 2.3-5 上部コンクリートピットの
ひび割れ状況

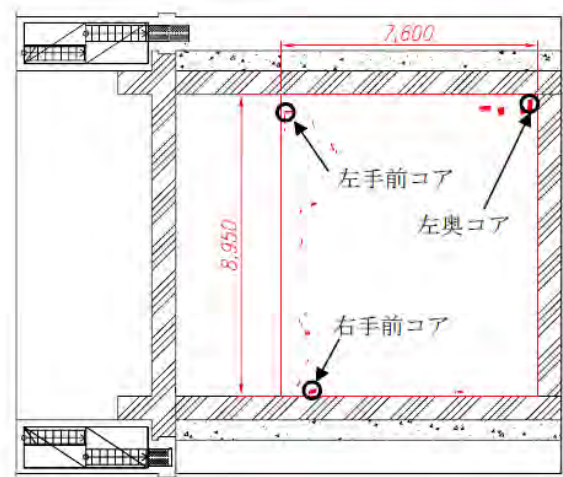


図 2.3-6 ひび割れ深さ確認コア削孔位置

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

平面に広い底部コンクリートピットと上部コンクリートピットにおいては打込み後の急激な乾燥が原因とされるプラスチック収縮ひび割れ、表面付近の異物（次施工の壁部材施工時の型枠サポート設置用アングルを設置しての打込み等）の影響に起因するひび割れに対し対策を検討した。本試験では、打込み中のミスト散布、再振動、表面締めめパイププレートによる表面仕上げを施し、ひび割れ

の低減効果があることを確認した。使用した表面締固めバイブレータと、使用状況を図 2.3-7、図 2.3-8 に示す。



図 2.3-7 表面締固めバイブレータ

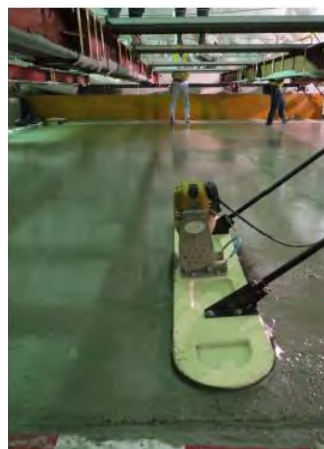


図 2.3-8 施工状況

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

3) 出来形確保

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

出来形管理の計測値を表 2.3-8 に示す。コンクリートピットのいずれの部位（底部、側部、上部）における出来形も JASS5N[30]の規格値内に仕上がり、検討の上選定した配合および施工方法の下、高い精度で部材の施工が可能であることがわかった。

表 2.3-8 出来形管理の計測値（底部、側部、上部）

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

2.3.5 初期性能の確認

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

力学特性に対しては、各部位において、室内試験で採取した供試体、施工後に採取したコア供試体、プラント、および現場水中養生での供試体について、圧縮試験を実施した。その結果、いずれの部材（配合）も設計基準強度 60N/mm^2 を確保できることを確認した。

一方で、設計基準強度 60N/mm^2 の発現には、比較的長期の材齢が必要であることが確認された。コンクリートピットの設計・施工においては、設計基準強度の管理材齢の設定が重要となることから、本試験では、設計基準強度に達する材齢を積算温度で整理した。

圧縮強度が設計基準強度 60N/mm^2 に達する積算温度、および材齢を表 2.3-9 に示す。また、積算温度と圧縮強度の関係を図 2.3-9 に示す。

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

表 2.3-9 設計基準強度に達する積算温度および材齢

	底部	奥部	側部	手前部
打設日	2008/11/24	2008/12/18	2009/2/4	2009/8/6
積算温度 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)	2,137	1,732	1,802	1,930
材齢 (日)	111	92	89	70

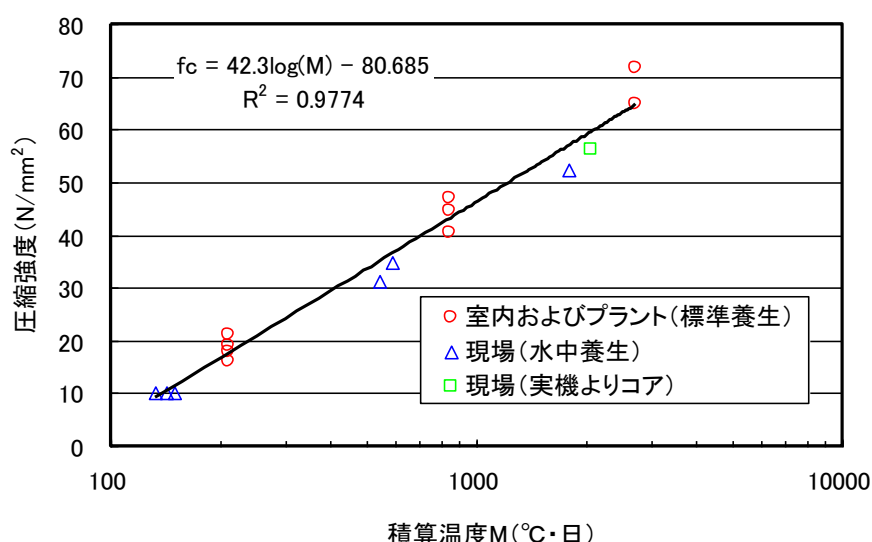


図 2.3-9 積算温度と圧縮強度の関係

2.3.6 まとめ

本試験の目的は、コンクリートピットの要求機能を確保するための使用材料、施工技術、施工方法等の実施工への適用性を明確にして、構築した部材の施工品質を確認することである。以下に本試験の検討結果をまとめる。

(1) 材料・配合仕様の設定

材料検討について、低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用した高流動コンクリート配合を選定した。選定過程において、石灰石微粉末の種類や量、環境温度の変化がフレッシュ性状に与える影響は未知であったが、確証試験をつうじてそれらの変動要因に対しては混和剤添加率で調整が可能であることを実証した。本試験で確立したプロセス（プラントにおける環境温度を踏まえた試製造を行い、その結果によって混和剤添加率を調整し、製造時の各バッチに反映）は、高品質の部材を構築するための知見として実施工に反映できる成果である。

(2) 施工の検討

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

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

(3) 初期性能の確認

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

(4) 今後の検討課題

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

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

2.4 充てん材

2.4.1 実施概要

余裕深度処分施設における人工バリアの施設構成を図 2.3-1[1]に示す。コンクリートピット内に定置された廃棄体の周囲には「充てん材」が配置される計画である。本試験では、充てん材を、廃棄体間および廃棄体とコンクリートピット間に充てんする「区画内充てん材」と廃棄体上部を充てんする「上部充てん材」に分けて検討した。

本試験で構築した区画内充てん材、上部充てん材の施工状況を図 2.3-2 と図 2.4-3 に示す。

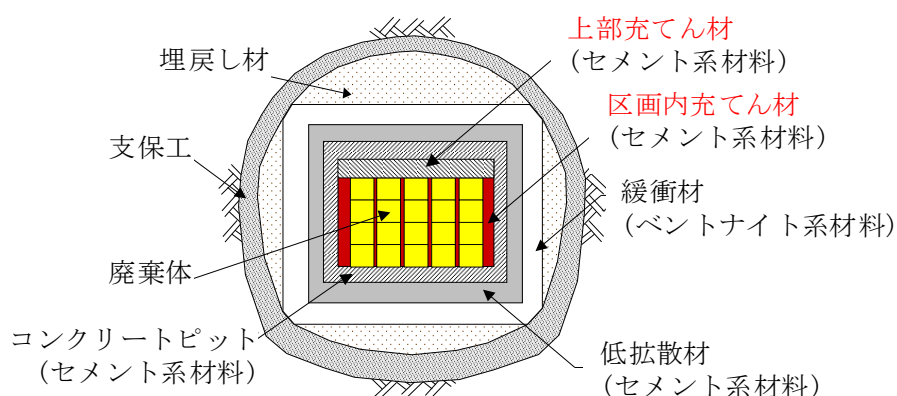


図 2.4-1 地下空洞型処分の施設構成 (土木学会、2008 に加筆修正) [1]

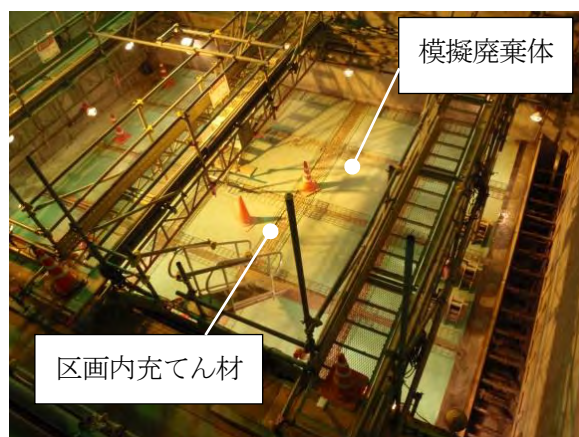


図 2.4-2 区画内充てん材



図 2.4-3 上部充てん材施工状況

充てん材は廃棄体を線源とする放射線に対する遮へいと、放射性核種の収着（核種収着）を主たる要求機能とし、放射線量を合理的に達成可能な範囲で極力低くすること、核種移行の遅延を図るものである。「遮へい」を確保するための技術要件として「放射線の遮へい性能」を、「拡散抑制」を確保するための技術要件として「核種収着性」があげられる。充てん材のうち、区画内充てん材は廃棄体間（一部上部）の狭隘な空間を確実に充てんできるような高流動モルタルを基本とした配合とした。一方、上部充てん材にはより高い遮へい性能が求められることから粗骨材を使用し乾燥単位容積質量を大きく

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

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

2.4.2 基本条件の設定

2.4.2.1 設計仕様項目と管理項目および管理目標値

既往の検討（土木学会、2009[2]）では、充てん材の技術要件「放射線の遮へい性能」に対して、乾燥単位容積質量、圧縮強度、部材厚さを、「核種収着性」に対しては収着分配係数、充てん量を設計仕様項目として設定している。本試験において「放射線の遮へい性能」に対する設計仕様項目として乾燥単位容積質量、圧縮強度、部材厚さを設定した。一方、「核種収着性」のうち充てん量は本試験では施工後の充てん性を目視により確認することで十分であると判断して設計仕様項目からはずし、収着分配係数のみを設定した。

表 2.4-1 充てん材の要求機能、技術要件と設計仕様項目（土木学会、2009[2]）

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

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

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

圧縮強度の管理目標値は、低レベル放射性廃棄物処分の既往研究における充てん材の設定値[31]である 30N/mm² を設定した。部材厚さは上部充てん材に対する管理項目とした。上部充てん材の高さに対し JASS5N[30]のコンクリート部材の垂直位置精度である±30mm より厳しい高低差±20mm（40mm 範囲）を管理目標値として設定した。表 2.4-2 に充てん材の管理項目と管理目標値を示す。

表 2.4-2 充てん材の管理項目と管理目標値

要求機能	管理項目	管理目標値	備考
遮へい	乾燥単位容積質量	—	試験により確認
	圧縮強度	30N/mm ²	
	部材厚さ	±20mm (40mm 範囲)	上部充てん材において設定

2.4.3 充てん材に関する確証試験の課題

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

これらの課題に対する検討項目は、材料および配合の選定（材料・配合仕様の設定）、選定された材料および配合が、対象とする施工環境下において確実に施工可能かどうか確認するための検討（施工の検討）、および施工された構造物の品質確認（初期性能の検討）に分類した。

2.4.4 充てん材に関する確証試験結果

2.4.4.1 材料・配合仕様の設定

1) 既往の検討と基本配合

土木学会[2]では、充てん材（区画内充てん材、上部充てん材共に）の要求機能として、遮へい、移行抑制を設定しており、これに対する設計仕様項目として、乾燥単位容積質量、部材厚さ、コンクリート圧縮強度、収着分配係数、充てん量を設定している。これらの設計仕様項目に対し、土木学会と同様に表 2.4-3 に示す材料を前提に検討を実施した。

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

表 2.4-3 充てん材の使用材料（土木学会）[2]

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

「2.2 低拡散材」、「2.3 コンクリートピット」に示したように確証試験では、低拡散材やコンクリートピットを対象とした充てん性が高い配合を検討している。充てん材は区画内充てん材と上部充てん材に分けて検討する。区画内充てん材には狭隘な区間をより確実に充填できる充てん性、上部充てん材は施工後の上部埋戻し等の作業が存在するため遮へい性を重視した配合が必要とされる。

上記の理由から、基本配合として区画内充てん材には低拡散材配合（高流動モルタル）を、上部充てん材にはより単位容積質量の高いコンクリートピットの配合（高流動コンクリート）を選定した。それぞれ要求機能に応じた配合検討を実施した。表 2.4-4 に基本配合の選定を、表 2.4-5 に配合設計方針を示す。区画内充てん材は低拡散材、上部充てん材はコンクリートピットの配合を基本として設定した。

表 2.4-4 本試験における充てん材の基本配合の選定

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

表 2.4-5 本試験における充てん材の配合設計方針

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

2) 室内試験における配合の選定

a. 区画内充てん材

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

まず、2種類の石灰石微粉末を用いた配合（配合 LP1：石灰石微粉末量 230kg/m³、配合 LP2：石

石灰石微粉末量 307kg/m³) を比較した結果、石灰石微粉末量が多い LP2 の配合の方が材料分離を起こしにくく、目標スランプフローを大きくできることより、こちらの配合を基本配合として検討を進めた。選定された配合において、廃棄体熱の影響を受けにくい配合の選定を目的とし、20℃と 60℃におけるスランプフローの経時変化を確認した。その結果 SP3+Ad の混和剤が、スランプの経時保持性、流動性において最も優れていることを確認した。

室内試験によって決定した使用材料を表 2.4-6 に、選定配合を表 2.4-7 に示す。

表 2.4-6 区画内充てん材の使用材料の代表例

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント密度=3.22g/cm ³ 、比表面積=3,640cm ² /g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種密度=2.18g/cm ³ 、比表面積=3,820cm ² /g
石灰石微粉末	LP	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.71g/cm ³ 、比表面積=5,510cm ² /g
細骨材	S	石灰砕砂（八戸松館産）：密度=2.66g/cm ³ 、FM=2.79
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物と配合ポリマーの複合体
	Ad	減水剤 遅延型（Ⅰ種） 変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体
	As	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.4-7 区画内充てん材の選定配合

W/B (%)	W/P (%)	LP/B (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad P×%	SP P×%
				W	LPC	FA	LP	S		
45	28.1	60	2.5	230	358	153	307	1198	0.30	0.85

※ 結合材量:B=LPC+FA+LEX、粉体量:P=B+LP

b. 上部充てん材

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

まず、コンクリートピットの配合（石灰石微粉末量 178kg/m³）を基本とし、流動性や充てん性を向上させるため、石灰石微粉末量を増加させた配合を検討した。その結果、材料分離を生じず、かつ流動性を確保できる範囲でスランプフローを大きくすることができる LP60 の配合が最適と判断した。目標スランプフローは 70±5cm、石灰石微粉末量 215kg/m³（LP60 配合）と設定した。

上部コンクリートピットにおいては、建設作業員に対する遮へい性能を確保するため、隣接する他部材との間の硬化後の収縮による間隙とひび割れの発生を極力抑制させることが求められる可能性がある。そのため、次段階として、硬化後の収縮低減を目的とし、膨張材を入れた拘束膨張試験（JIS A 6202（B 法））を、温度の影響を加味して実施した結果、膨張材によるひび割れが発生しない範囲で、本試験で設定した目標強度 30N/mm² を確保できる膨張材混入量として 20kg/m³ を選定した。

上部充てん材は高温環境下でも流動性が損なわれない混和剤の選定が必要である。そのため、4 種類の混和剤を用い、環境温度 20℃と 60℃の条件におけるスランプフロー等の経時変化について試験した。その結果、経時変化およびブリーディングが小さい、高性能 AE 減水剤 SP3 に遅延型の減水剤

Ad を 0.2%併用する混和剤が最適と判断した。

以上の検討によって選定した使用材料を表 2.4-8 に、選定配合を表 2.4-9 に示す。

表 2.4-8 上部充てん材の使用材料の代表例

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,540cm ² /g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種 密度=2.22g/cm ³ 、比表面積=4,020cm ² /g
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン（太平洋マテリアル） 密度=3.05 g/cm ³
石灰石微粉末	LP	石灰石微粉末（宮城石灰工業株式会社製） 密度=2.67g/cm ³ 、比表面積=5,120cm ² /g
細骨材	S	石灰砕砂（八戸松館産）：密度=2.67g/cm ³ 、FM=2.71
粗骨材	G	石灰砕砂（八戸松館産）：最大骨材寸法=20mm、 密度=2.70g/cm ³ 、FM=6.76
混和剤	Ad	減水剤 遅延型（Ⅰ種） 変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体
	SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物と配合ポリマーの複合体
	As	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.4-9 上部充てん材の選定配合

W/B (%)	LP/B (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)							Ad P×%	SP P×%
			W	LPC	FA	LEX	LP	S	G		
45	60	2.5	160	249	107	20	215	849	780	0.20	0.85

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

2.4.4.2 施工の検討

1) 施工上の課題整理

区画内充てん材および上部充てん材の施工上の検討課題を表 2.4-10 に整理する。これらの課題に対して検討した結果を以下、順次説明する。

表 2.4-10 施工上の検討課題

項目	検討課題
場内運搬を考慮した長距離圧送に関する検討	長距離圧送性（アジテータ車から打込み場所までの運搬）
充てん性・流動性を確認するための打込み試験	ポンプ圧送による打込み時の充てん性（区画内充てん材、上部充てん材）
	移動式バケットによる打込み時の充てん性（区画内充てん材）
放射線管理下での施工	遠隔操作による無人化施工を前提とした打設方法の選定 （上部充てん材の移動式バケット方式による打込みを対象、表面ならしをオプションとして検討）
他部材との隙間およびひび割れ	充てん材の収縮により発生する既設部材との隙間の抑制

2) 場内運搬を考慮した長距離圧送に関する検討

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

図 2.4-4 に長距離圧送試験の試験状況を、図 2.4-5 にポンプ車のピストン前面圧と吐出量の関係を示す。試験には、超高压タイプのポンプ車（プッツマイスターBSF2107）を使用した。区画内充てん材、上部充てん材とも、吐出量の増大とともに、ポンプ車のピストン前面圧が増大し、ポンプ車への負荷が増大している。150～250m 程度の場内運搬を想定し設定した、水平換算距離 300m の圧送では、上部充てん材で吐出量 10～20m³/h 程度、区画内充てん材で 15～50m³/h 程度が圧送限界と判断された。

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

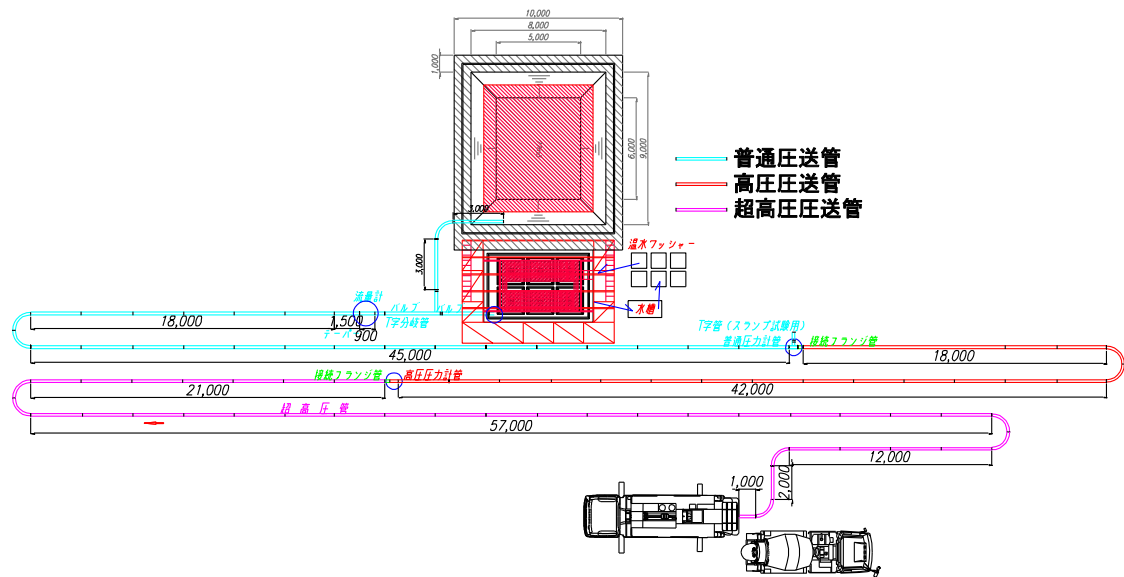


図 2.4-4 長距離圧送試験の試験状況

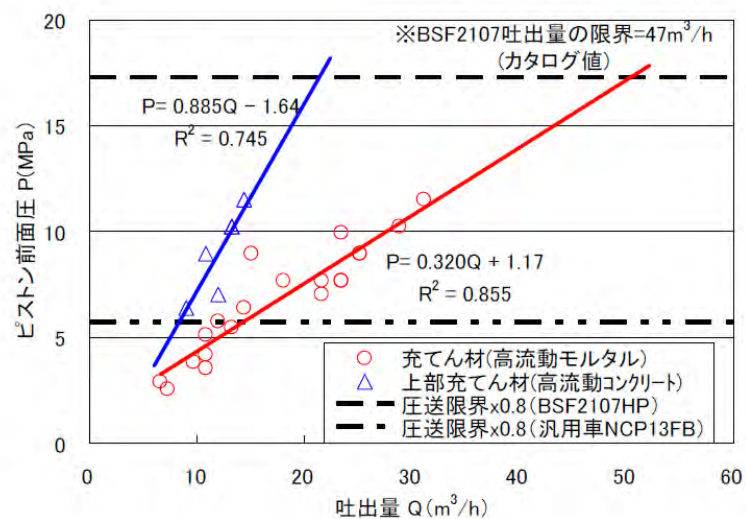


図 2.4-5 ポンプ車のピストン前面圧と吐出量

3) 充てん性・流動性を確認するための打込み試験

区画内および上部充てん材の打込み方法は、荷卸し場所から打込み場所までの運搬方法が同一の方式であることが前提となる。本検討では移動式バケット方式とポンプ圧送方式にて試験を実施した。

それぞれの打込み方式における充てん性と流動性、セルフレベリング性について検証を実施した。

a. ポンプ圧送による打込み時の充てん性

区画内充てん材の打込みは、打込み時のポンプ車吐出量を試験条件として充てん材の充てん性・流動性の確認を行った。模擬廃棄体の配置状況を図 2.4-6 に示す。模擬廃棄体にはコンクリートを充てんし、高流動モルタルを充てんしたときに模擬廃棄体が浮いてこないようにした。本来、廃棄体は発熱が想定されるが、その温度の模擬は本試験では実施していない。

打込みにはコンクリートポンプ車（ニイガタ製 NCP11FB-324）を用い、吐出量を $9.2 \sim 24 \text{ m}^3/\text{h}$ に変化させて、図 2.4-7 の○の位置から打ち込んだ。また、レーザー距離計(DIMETIX 製 DLS-B15)を各所に設置し、流動の状況をリアルタイムに計測した。

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

図 2.4-7 中の矢印の経路の流動勾配を図 2.4-8 に示す。間隙幅が広い(260mm)経路では、吐出量の増大とともに、流動勾配が小さくなった。これは吐出量が増えることで、モルタルを押し流す力が増大され、流れが加勢されたことによると考えられる。しかし、間隙幅が狭い(150mm)経路では、吐出量によらず流動勾配はほぼ一定となった。この要因には、間隙幅の異なる経路が交差している場合には間隙幅の広い流れやすい経路を優先して流れること、充てん材が押し流される力と充てん材と模擬廃棄体との摩擦力が釣り合い、間隙幅間の流量が定常状態となっていることが推察される。

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

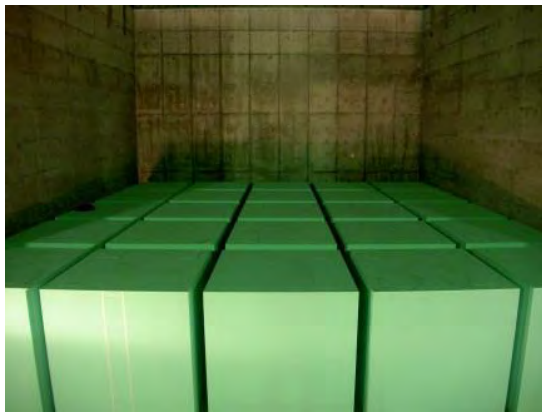


図 2.4-6 模擬廃棄体の状況

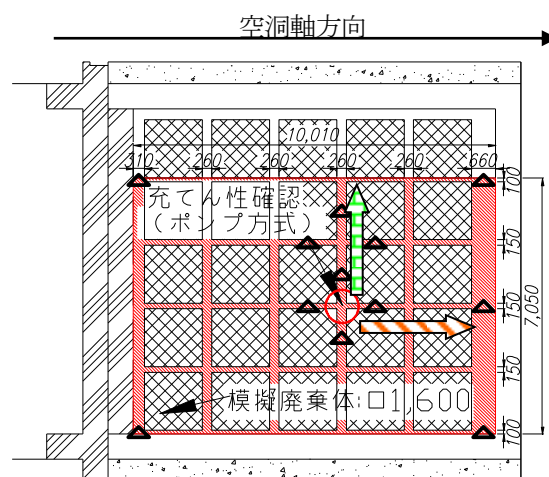


図 2.4-7 ポンプ方式による
充てん性確認試験平面図

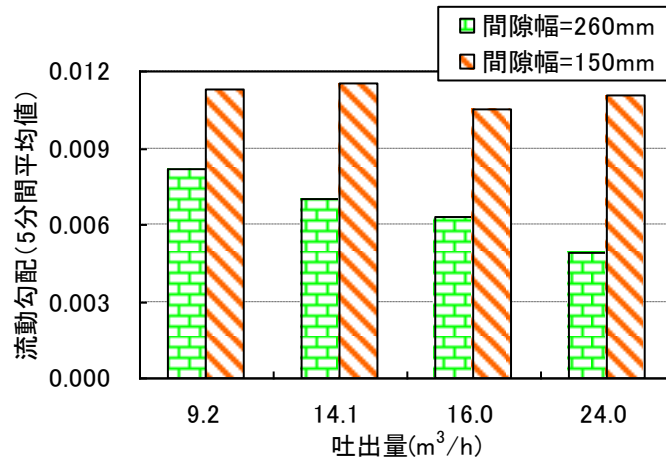


図 2.4-8 吐出量と流動勾配

上部充てん材の打込みは、コンクリートポンプ車の吐出量およびバイブレータによる振動が、コンクリートの流動性に与える影響を評価することを目的に行った。上部充てん材の打込みパターンは図 2.4-9 に示すようにバイブレータの振動頻度を、パイプ無、パイプ少、パイプ多として施工範囲を 3 区画に区分した。振動は直径 50mm のコンクリート棒形振動機を用いて 5 分ごとに 1 回の頻度を標準とし、パイプ多では 500mm ピッチ、パイプ少では 1,000mm ピッチとした。

硬化後に測定した上部充てん材の 3D スキャナによる高さ計測結果を図 2.4-10 に示す。バイブレータをかけない奥側で上部充てん材の高さが低くなっている様子が確認できる。しかし、バイブレータを使用した場合でも筒先と端部での仕上がり高の差は 82mm あり、出来形目標値(設計高さ±40mm)は確保できていない。

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

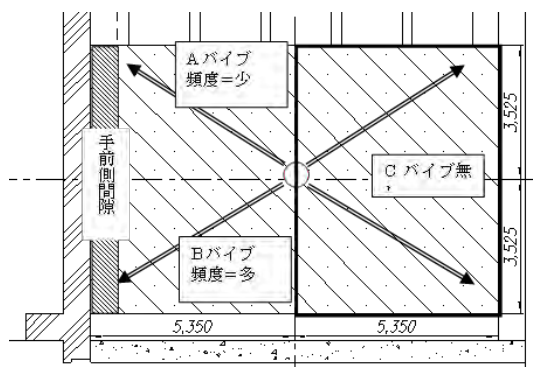


図 2.4-9 上部充てん材の打込みパターン

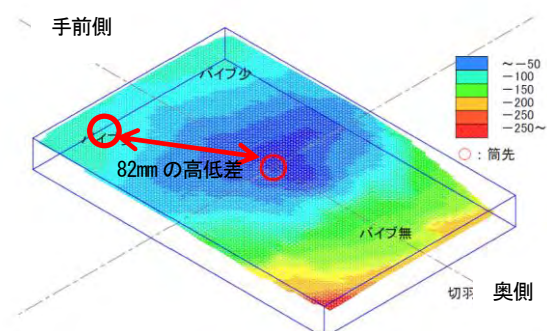


図 2.4-10 3D スキャナによる高さ計測結果

b. 移動式バケット打込み時の充てん性

移動式バケットによる打込みを模擬した区画内充てん材の充てん試験を実施した。模擬廃棄体 15 体(縦 160cm、横 160cm、高さ 50cm : 3 行 5 列 : 廃棄体間の間隙 15 cm、26cm)の廃棄体間の 4

箇所でバケットの移動を模擬した打込みを実施した。打込み状況を図 2.4-11 に、打込み箇所の平面図を図 2.4-12 に示す。1 回目の打込みは図 2.4-12 の左側の 2 ヶ所のバケットから（打込み位置 A）、2 回目の打込みは右側の 2 つのバケット 2 ヶ所から（打込み位置 B）行った。

区画内充てん材充てん試験における打込みごとの排出位置と勾配を図 2.4-13 に示す。1 回目の打込みで形成された勾配が 2 回目の打込みにより逆転し、1 回目よりも 2 回目の勾配が小さくなることが確認された。したがって、バケットの打込み位置を制御することにより、仕上がり時の高低差を低減させることが可能であることが確認できた。

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

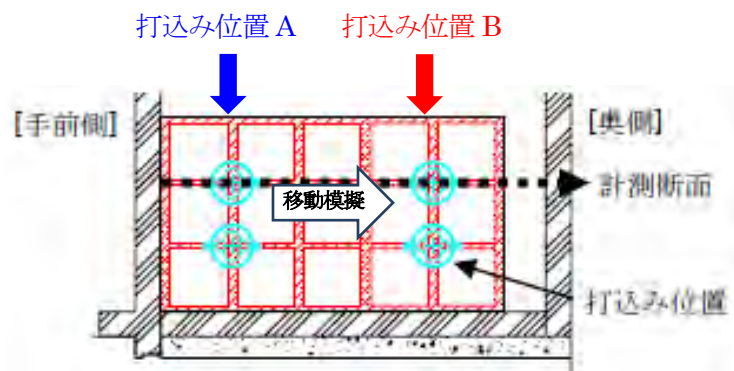


図 2.4-11 バケット打込み状況

図 2.4-12 充てん材（平面部）施工範囲平面図

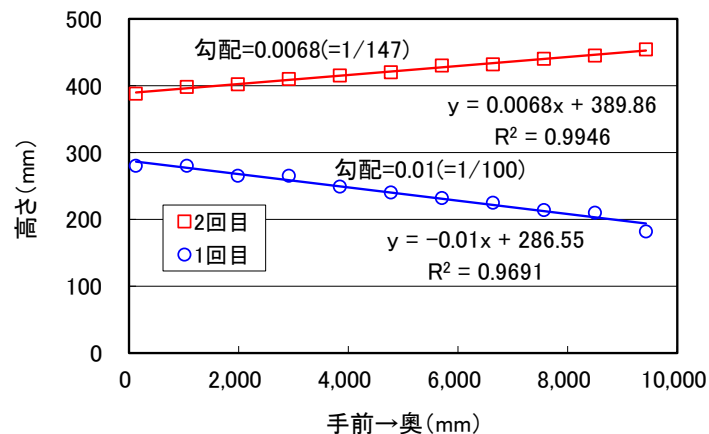


図 2.4-13 打込み毎の排出位置と勾配

4) 放射線管理下での施工

区画内充てん材・上部充てん材施工は放射線影響での施工となるため、荷卸し場所から施工場所までの無人場内運搬・打込みと無人表面仕上げ施工が必要である。本試験では、上部充てん材を対象として、無人施工を想定した移動式バケットによる打込みと表面均し装置を適用した模擬試験を行い、充てん性と平坦性を確認した。バケットの配置状況を図 2.4-14 に配置平面図を図 2.4-15 に示す。

バケットから排出した上部充てん材には材料分離は見られず、良好な流動性も確認できた。またバ

ケットの排出位置を移動させることで打上りの高低差は低減され、最終的な打上り時点では、高低差 69mm であった。その後、表面均し装置の適用により、本試験の管理目標値とした高低差 40mm 以内を達成した。

図 2.4-16 に示すように打込み面中央、空洞軸方向に沿って溝のような形状で打上り面が低い箇所が形成された。これは、同時に排出した 2 つのバケット間の表面部分に発生したこわばりが、流動性を低下させたことが原因であると考えられる。なお、手前側と奥側でみられる仕上がり高さの低い範囲については、表面均し装置の構造により均しができないエリアである。使用した表面均し装置を図 2.4-17 に示す。今回の打込みでは、空洞横断方向に設置された左右 2 個のバケット排出口で同時に打込み、一定の順序で排出口から打込むこととしたが、高低差をさらに低減する方法として、排出位置を自由に変更できる機構や打込み途中段階での加振、仕上げ機的能力向上等が考えられる。



図 2.4-14 バケット配置状況

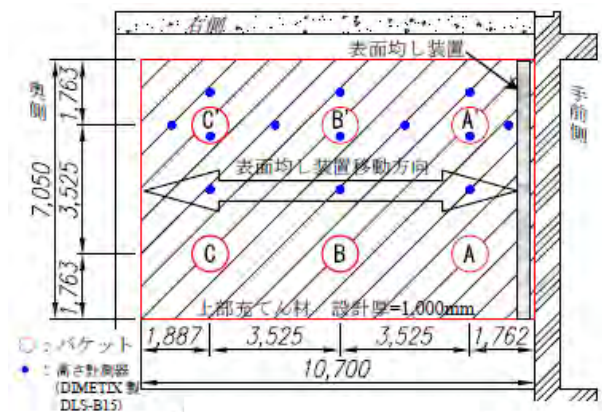


図 2.4-15 バケット配置平面図

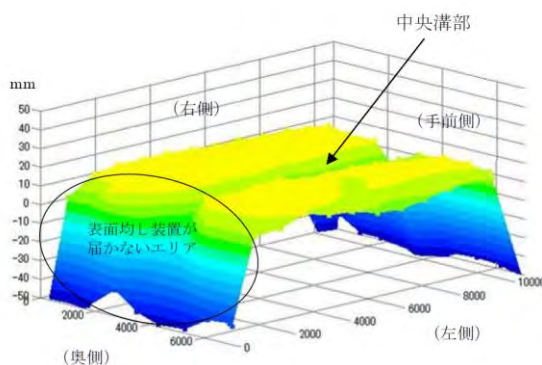


図 2.4-16 仕上がり面の高さ分布図



図 2.4-17 表面敷均し装置

5) 他部材との隙間およびひび割れ

鋼製の模擬廃棄体を用いたポンプ打込みの場合、界面の間隙は認められなかったが、バケット方式による打込みでは、硬化後、コンクリート製の模擬廃棄体と区画内充てん材の界面には、1～2mm 程度の隙間が、区画内充てん材の表面には 0.1～0.2mm 程度のひび割れが発生した（ここでは、便宜上

界面に生じたものを間隙、充てん材中に発生したものをひび割れと呼ぶものとする)。

界面に間隙が発生した原因を解明するために、模擬廃棄体 1 体とその周辺の間隙を模擬したコンクリート製の型枠（湿潤状態）へ充てん材を打込む、室内充てん性試験を実施した。

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

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

2.4.4.3 初期性能の確認

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

遮へい性能に関する特性値である乾燥単位容積質量について、コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法 JASS 5N[30]に準拠して試験を行った。表 2.4-11 に区画内充てん材の試験結果を示す。乾燥開始から 40 日経過時点での乾燥単位容積質量は 3 供試体の平均値 $2,139\text{kg/m}^3$ となった。JASS 5N では、「乾燥による質量軽減の目安は単位容積質量として約 $0.1\sim 0.15\text{t/m}^3$ 」とある。区画内充てん材の示方配合の理論単位容積質量 $2,255\text{kg/m}^3$ に対して今回の乾燥による減少分は 116kg/m^3 であり JASS 5N の目安相当の値である。乾燥開始から 40 日までの試験結果の質量変化から外挿により 100 日後の質量を推定すると $2,119\text{kg/m}^3$ (3 供試体平均値) となり、40 日時点の試験値より 20kg/m^3 減少すると推定される。一方、上部充てん材の乾燥単位容積質量の平均値は $2,272\text{kg/m}^3$ であり、乾燥による減少を考慮しても JASS5N において遮へいコンクリートに求められる乾燥単位容積質量 $2,150\text{kg/m}^3$ を上回ることが確認できた。本知見は、今後の設計に資する基礎データといえる。

表 2.4-11 区画内充てん材の乾燥単位容積質量 (kg/m^3)

区画内充てん材	上部充てん材
2,139	2,272

2.4.5 まとめ

本試験の目的は、充てん材の要求機能を確保するための使用材料、施工技術、施工方法等の実施工への適用性を明確にして、構築した部材の施工品質を確認することである。本試験の検討結果を以下にまとめる。

(1) 材料・配合仕様の設定

区画内充てん材では低拡散材の配合を、上部充てん材ではコンクリートピットの配合を基本として配合検討を実施し、所定の充てん性・流動性が確保される材料配合を見出した。

廃棄体熱が充てん材のフレッシュ性状に与える影響が懸念されたが、熱環境を変化させた室内試験をつうじて、混和剤に高性能 AE 減水剤と遅延型の減水剤を使用することで、熱影響による経時変化の少ない配合とすることが可能であることを実証した。

(2) 施工の検討

空洞内で想定される長距離のポンプ圧送を前提とした試験の結果、水平換算距離 300m 程度は圧送が可能であるが、材料分離や単位容積質量の減少に注意が必要であることが判明した。

無人化施工の検討の結果、特にコンクリートのバケット運搬と打込み、表面均し装置の採用が効果的であることが分かった。

充てん材の収縮による間隙の発生と抑制対策の検討のため、室内充てん性試験を実施し、打込み後、充てん材の水分が他部材へ吸収されることで界面に間隙が発生する可能性が高く、注意が必要であることを明らかにした。間隙の発生が許される程度により、吸水を抑制するための散水方法を検討する必要がある。

(3) 初期性能の確認

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

(4) 今後の検討課題

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

2.5 埋戻し材

2.5.1 実施概要

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

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

本節では、人工バリア部材構築後に唯一空洞内に残された、施工空間上の制約がある、上部埋戻し材の施工についてまとめる。なお、底部、側部埋戻し材の施工については平成 19 年度の報告書[32]に詳細が記載されている。

ここで、既往の検討[2][33]では、上部埋戻し材は「空洞内充てん材」、アクセス坑道等の埋戻し材のことを「埋戻し材」と記載している。本報告書では、上部埋戻し材の検討を進めるが、本報告で得られた知見はアクセス坑道等の「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」の検討に適用可能であると考えられるため、後述のとおり、二つの埋戻し材（「空洞内充てん材」、「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」）の要求機能をまとめて検討を進めている。

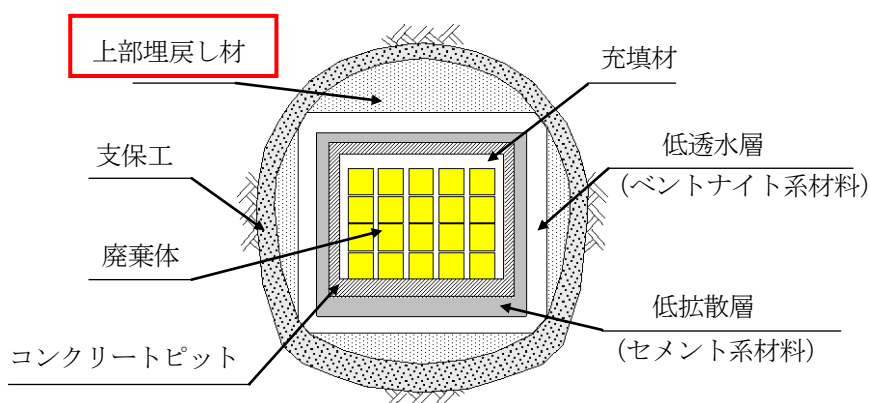


図 2.5-1 地下空洞型処分の施設構成（土木学会、2008 に加筆修正）[1]

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

本試験における上部埋戻し材の施工箇所は、坑道横断方向 7m×縦断方向 6m×最大高さ 4m 程度の

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

ここで、上部埋戻し材、すなわち埋戻し材（「空洞内充てん材」、「埋戻し材（坑道の埋戻し材）」）に求められる要求機能について説明する。

埋戻し材に求める要求機能については、既往の検討[2][33]において「移行抑制」が示されている。「移行抑制」を確保するための技術要件として「透水特性」をあげており、その機能の内容として“連続した地下水移行経路を形成しないこと” “隙間なく充てんされること”としている。本試験では、埋め戻した部分が選択的に通水経路とならないようにするため、“周辺岩盤よりも低い透水性を有すること”も追加した。

これらの内容についても技術要件「透水特性」に基づいて上部埋戻し材が地下水の卓越流路とならないような仕様の設定、施工方法を検討した。

なお、既往の検討[2]で要求機能としてあげている、「埋戻し後以降の長期にわたり緩衝材の膨潤変形を十分小さい水準に抑制すること（力学特性）」については、本試験においては、外的要因（緩衝材の膨潤圧、湧水量、岩盤のクリープ等）によって上部埋戻し材に求められる力学特性の目標値が設定されると考えられたので、施工後に試料を採取し、特性値を測定し、データを蓄積することとした。さらに、既往の検討[2][33]では、長期にわたり化学的に安定であることにより、有害な空隙が発生しないことも求めているが、本試験では、材料選定において対応することとした。

2.5.2 基本条件の設定

2.5.2.1 設計仕様項目と管理項目および管理目標値の設定

埋戻し材の技術要件「透水特性」を検討する上で重要度が高い設計仕様項目として、透水係数を設定した。既往の検討（土木学会、2009[2]）では透水特性に対する設計仕様項目として長期状態変化に関わる項目である“膨潤圧”、“密度（かさ密度）”、“鉱物組成”をとりあげている。本試験では施工直後の透水性が周辺岩盤の透水性と比較してどの程度かを確認することが主たる目的であり、設計仕様項目は透水係数に絞り込んで検討をする方針とした。

表 2.5-1 に埋戻し材の要求機能、技術要件と設計仕様項目をまとめる。なお、“隙間なく充てんされること”に対しては、施工中、目視確認することとしたため、特に表 2.5-1 には記載していない。

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

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

これらの管理項目に対して設定した管理目標値を表 2.5-2 に示す。このうち、透水係数の管理目標値は、原地盤相当の透水係数であると考えられる $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下とした。乾燥密度の管理目標値は、

材料により設定するものとした。詳細については後述する。

表 2.5-1 埋戻し材の要求機能、技術要件と設計仕様項目

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

表 2.5-2 埋戻し材の管理項目と管理目標値

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

2.5.3 埋戻し材に関する確証試験の課題

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

(1) 材料配合と施工管理時の目標の設定

所定の透水係数を発揮し得る材料の選定と、それらを組み合わせた配合の検討をする必要がある。また、検討した配合に関して、実際に現場で施工できるようにするために必要な施工管理時の目標（含水比や締固め度等）を設定する必要がある。

(2) 練り混ぜ方法の検討

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

(3) 施工方法の検討と適用性の確認

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

(4) 施工後の品質の確認

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

2.5.4 埋戻し材に関する確証試験結果

2.5.4.1 材料配合と施工管理時の目標の設定

1) 既往の検討と基本配合の設定

既往の研究の調査[34]を行い、ベントナイト混合土（砂・ベントナイト、礫・砂・ベントナイト、

砂・カオリン（ベントナイト代替）、フェロニッケルスラグ・ベントナイト、現地発生土・ベントナイト）、流動化処理土、気泡混合補強土を候補材料として抽出した。これらの材料に対して、施工性、低透水性、力学的安定性、物理・化学的安定性、調達性、経済性を勘案して総合的に評価を行い、3種類のベントナイト混合土（砂・ベントナイト、礫・砂・ベントナイト、砂の代替としてフェロニッケルスラグを使用するものも含む）を候補として選定した。

次に、ベントナイトおよび母材となる砂・礫の混合率（乾燥質量比）、すなわちベントナイト混合土の配合について既往の研究[35][36][37]の調査より検討した。これらの研究では、ベントナイト混合土を対象とした透水試験を、ベントナイトの混合率を変化させて実施している。その結果、ベントナイトの混合率が10%を超えると透水係数が低くなる度合い（ベントナイトを増やす効果、メリット）が小さくなる傾向がみられ、混合率が15～30%程度を越えると、透水係数はほぼ同じような値となり、 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度よりも小さくなる。

これらの調査結果を参考として、3種類のベントナイト混合土（ベントナイトの混合率は15%）で透水試験を実施した。その結果、ベントナイトに母材となる砂や礫、フェロニッケルスラグを混合すれば透水性に差はほとんどなく、 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度を発揮することを確認した。

本試験では、これらの検討を参考として、転圧と吹付けの両施工法が適用可能であることが概ね確認されており、経済性に関しても他の人工バリア部材の単価と比べてバランスの取れた範囲にあると考えられるベントナイト混合土（砂・ベントナイト）を選定することとした。表 2.5-3 に選定したベントナイト混合土の配合を示す。ベントナイトはクニゲル V1 とし、その混合率は15%とした。これは、緩衝材で用いているベントナイトと産地が同じであり、成分組成が同等であることが考えられたため、化学的に影響がないことが期待されたためである。

表 2.5-3 本試験における低拡散材の配合設計方針

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

2) 室内試験による施工時の管理目標値の設定

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

まず、突固めによる締め固め特性測定試験を実施し、締め固め曲線を取得した。締め固め試験は、バット練り（手練り）による方法でベントナイト混合土を作成し、突固めによる締め固め試験（A 法）を実施した。最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.810 Mg/m^3 、最適含水比 ω_{opt} は 13.7 % であった。

次に、ベントナイト混合土の初期含水比と透水係数の関係を取得し、それに基づき施工時の含水比の設定を行った。取得した締め固め曲線上の含水比・乾燥密度を試験条件として、透水試験を実施した。

また、締固め曲線上の乾燥密度の95%（締固め規定値95%）の条件でも透水試験を実施した。透水試験の結果と含水比の関係を図2.5-2に示す。

同図より、最適含水比より少し高めの含水比の方が、乾燥密度は低いものの透水係数は小さくなっていることがわかる。この結果を踏まえて、施工時の含水比は $\omega_{opt} \pm 2\%$ 程度（13.5～15.5%）が最適であると判断される。

また、同図より、締固め規定値が100%（締固め曲線）の時と95%の時とで、透水係数には大きな差が無いことがわかる。また、締固め規定値95%でも、目標とする透水係数に余裕があることから、施工時の管理目標値のうち、乾燥密度は現実的にとりうる値として締固め規定値90%以上である1.63 Mg/m³以上（努力目標として、締固め規定値95%以上の1.72 Mg/m³以上）とした。

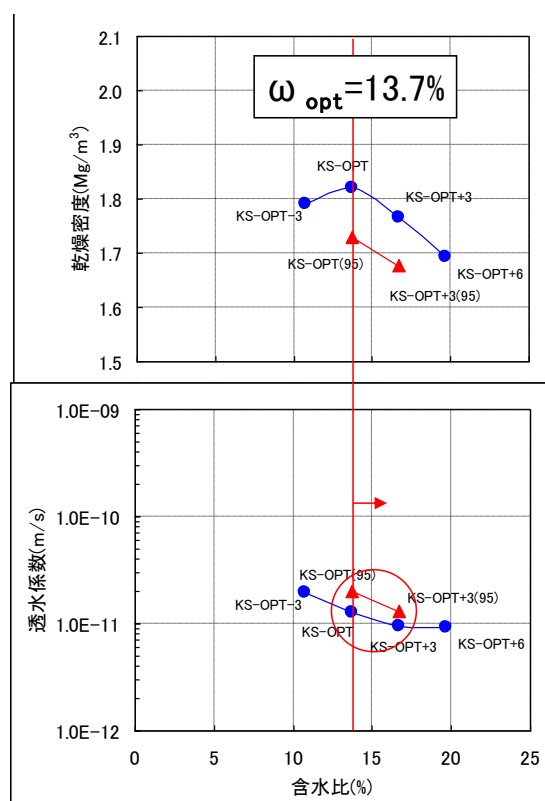


図 2.5-2 乾燥密度・含水比と透水係数との関係

2.5.4.2 練混ぜ方法の検討

既往の検討事例[38][39][40][41][42]を参考に、ベントナイト（クニゲルV1）および砂等を使用して、複数の練り混ぜ機械、練り混ぜ方法により、配合の異なるベントナイト混合土の練り混ぜ試験を実施し、練り混ぜ後の品質を比較検討して、練り混ぜ方法、練り混ぜ機械、および材料配合の違いによる混合率および含水比のばらつきの程度を確認した。また、練り混ぜ後のベントナイト混合土を用いて、締固め曲線および透水係数を取得し、練り混ぜ機械による差異はほとんどないことを確認した。

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

1) 混合土の製造試験方法

自走式土質改良機は、投入した材料を連続的に混合攪拌し、ベントナイト混合土（埋戻し材の材料）を製造することができる。通常、土質改良機は高含水比土壌の改良に用いられるが、本機は水添加機構を備えており、材料の含水比調整も可能である点に特徴がある。

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

ベントナイト混合土の混合製造（材料調整）は、所定の混合率、所定の含水比となるように行った。製造したベントナイト混合土は、フレコンバッグに 700～800kg 程度の重さに詰めた。図 2.5-3 にベントナイト混合土の製造フローを、図 2.5-4 にベントナイト混合土の製造状況を示す。

製造時の含水比および混合率の目標値として、混合率は 15.0%、含水比は 14.5%（自走式土質改良機）または 13.5%（連続式二軸強制ミキサ）に設定した。

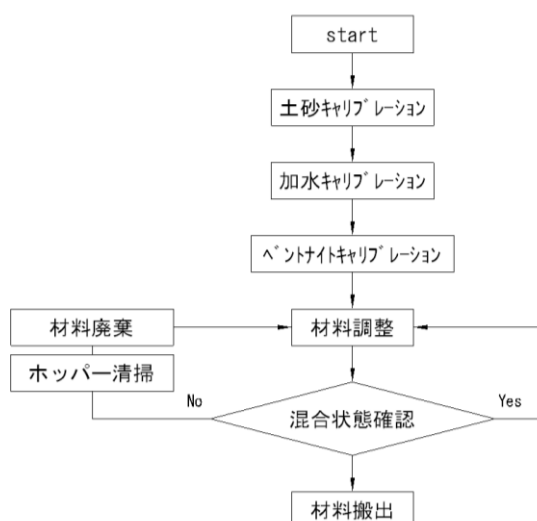


図 2.5-3 ベントナイト混合土製造フロー図



図 2.5-4 混合土製造状況

2) 混合土の製造試験結果

a. 自走式土質改良機 (SR-2000G)

製造したベントナイト混合土の含水比、およびベントナイト混合率の結果の度数分布をそれぞれ図 2.5-5 に示す。測定頻度は 10t に一度程度サンプリングを行い、一回のサンプリングで含水比は 3 点、混合率測定は 1 点ずつ行った。

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

含水比の平均値は 14.6%で、ばらつきは 12.6~16.8%の範囲で設定値(14.5%)に対して-1.9~+2.3%程度であった。混合率の平均値は 14.8%、ばらつきは 13.7~16.0%の範囲で設定値 (15.0%) に対して-1.3~+1.0%程度であった。汎用性の広い土質改良機を使用した混合率 15%のベントナイト混合土の製造については、多少のばらつきはあるものの、ほぼ目標とする含水比、混合率の混合土を製造することが可能であることが分かった。

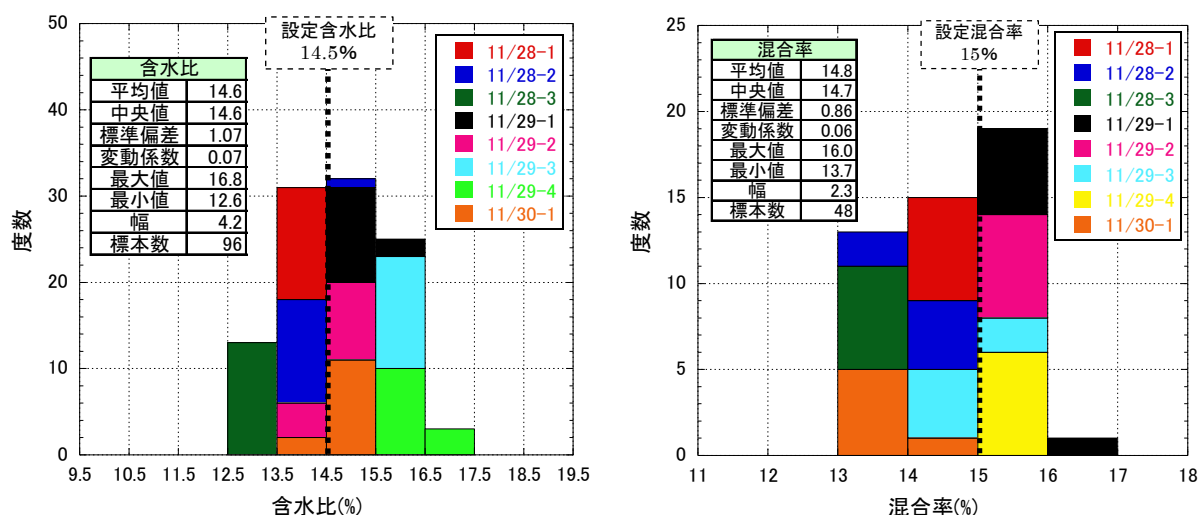


図 2.5-5 自走式土質改良機 (SR-2000G) で製造した混合土の含水比および混合率の測定結果

b. 連続式二軸強制ミキサ (GeoTom)

混合土の製造は、合計 140.4t (フレキシブルコンテナ 170 袋) 行った。各フレキシブルコンテナから 1 点ずつサンプリングし、製造した材料の含水比およびベントナイト混合率の測定を行った。ベントナイト混合率は細粒分含有率から算出した。測定した結果を図 2.5-6 に示す。含水比の平均値は 13.5%で設定値と同等となった。分布範囲 (ばらつき) は 11.8~15.0%であり、設定値に対して±2%程度であった。連続式二軸強制ミキサ (GeoTom) で混合製造した季節は夏であり、砂の含水比低下が懸念されたが、そのような天候の影響を受けなかった。混合率の平均値は 15.0%で設定値と同等となった。分布範囲 (ばらつき) は 14.1~16.7%であり、設定値に対して±1.5%程度であった。時間的な変化を図 2.5-7 に示す。図 2.5-7 はフレコンの製造時間に基づき、のべ製造時間として整理した結果である。含水比、混合率とも製造日によるばらつきの違いは見られない。また、混合率に比べて含水比の方がばらつきは大きくなっている。

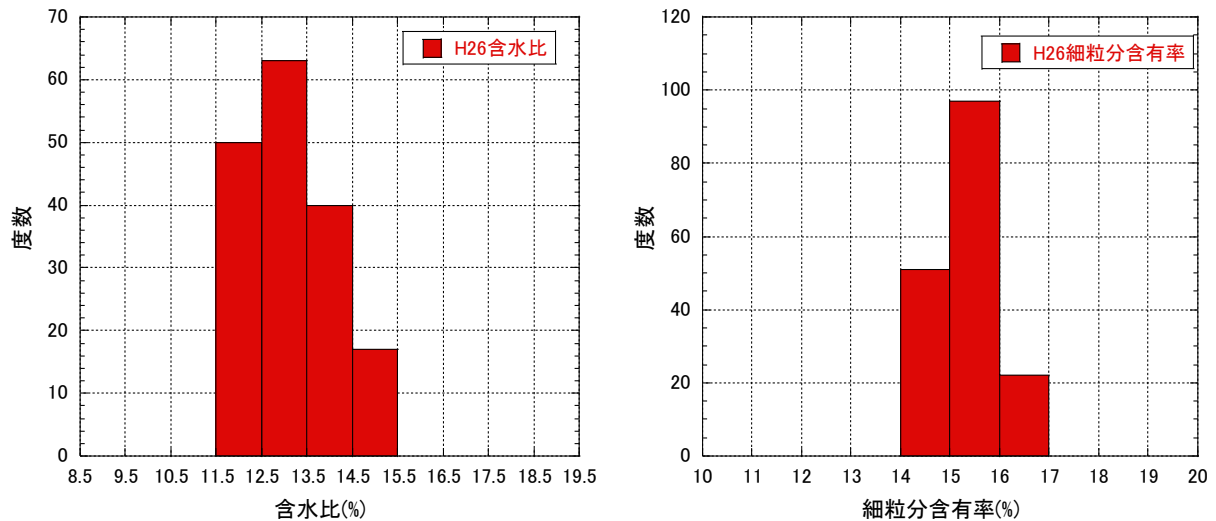


図 2.5-6 連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の測定結果

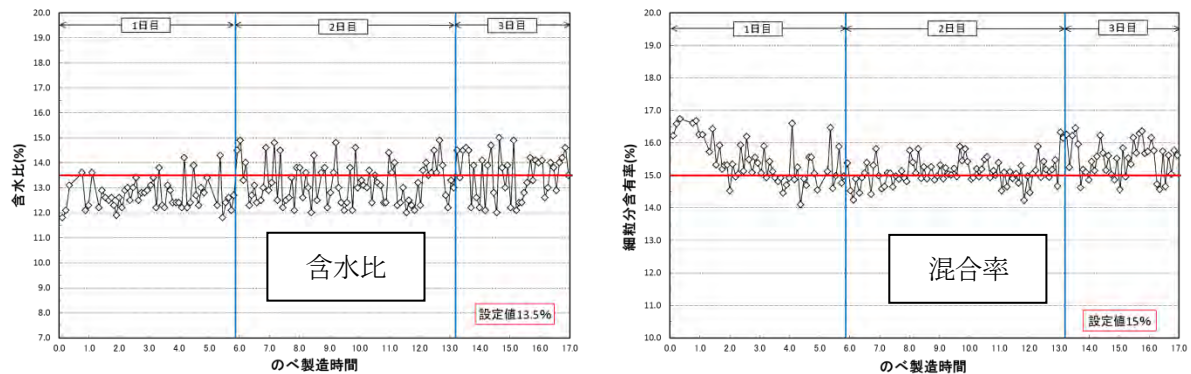


図 2.5-7 連続式二軸強制ミキサで製造した混合土の含水比および混合率の経時変化

2.5.4.3 施工方法の検討と適用性の確認

1) 既往の検討事例を参照した施工方法の選定

上部埋戻し材施工箇所の様な、狭隘な施工空間でも適用可能な施工方法は、従来型の転圧工法、吹付け工法[43][44]、ブロック積重ね[45]、ペレット等の充てん[45]、斜め転圧による工法[46][47]が考えられる。これらの工法は、一般的な土質材料を施工し得るものであるが、主に緩衝材の施工を想定した検討事例が多い。この中でも、吹付け工法の検討を行った事例[44]や、斜め転圧に関する検討[46][47]は、埋戻し材の施工を対象とした数少ない検討事例である。

これらの工法を対象として施工性・経済性の観点から比較検討を行った結果、転圧工法と吹付け工法の有意性が高いと考えられ、吹付け工法と振動ローラ等による転圧工法を交互に行う方法を選定した。

2) 上部埋戻し材の施工試験の概要

本試験においては、現実的な土木技術の採用とその施工方法により施工された上部埋戻し材の性能

が、施設に要求される性能を満たしているかどうかを確認することが重要である。このため、施工方法の実施工への適用性の検討、および施工された埋戻し材が要求性能を満足するか否かを確認して、今後の実施工に反映するための施工方法、および品質管理方法を明らかにすることを試験の目的とした。

上部埋戻し材の施工は、施工部位の形状等制約条件をもとに、小型の振動転圧機械による振動転圧工法と吹付け工法を併用して行った。試験空洞のアーチ脚部の隅各部や天盤近傍では振動転圧による施工ができないため、これらの箇所の施工は吹付け工法にて施工した。異なる工法を併用して施工することにより、所定の品質の埋戻し材が適切に施工できるのか、また、空洞の天盤まで隙間なく施工することができるのかを確認した。

転圧工法は、小型転圧機械の一つであるバイブロコンパクトを使用し、トンネル奥から坑口方向へ敷均してから、転圧を行った。転圧に用いるバイブロコンパクトの操作性を確保する目的で、さらに小型のプレートコンパクト（60kg）で予備転圧を行った。図 2.5-8 に転圧工法の施工フローを示す。

材料の敷均しは、施工面積が小さいことより、ショベル等で撒出した後、レーキ等で敷均した。敷均し時の敷均し高さの管理は、敷均し厚さが 200mm となるようにレーザーレベルを用いて行った。事前に行った施工試験により、目標の乾燥密度を発揮できる敷き均し厚さと転圧回数の組合せを検討し、本転圧の回数を 6 回とした。敷均し厚さ・転圧回数を管理することで十分な品質が得られるか、また、どの程度の範囲で品質がばらつくのかを確認した。

吹付け工法に用いた吹付け機械は、コンクリート吹付け等でも実績のある湿式の圧力釜式吹付け機を使用した。吹付け機をコンクリートピット下部に配置し、吹付け用ホースをコンクリートピット上部まで配管して施工した。吹付け施工時に発生するリバウンド材はエジェクターおよびショベル等で回収した。図 2.5-9 に吹付け時の機械の配置図を示す。

また、図 2.5-10 に転圧状況および吹付け状況を示す。

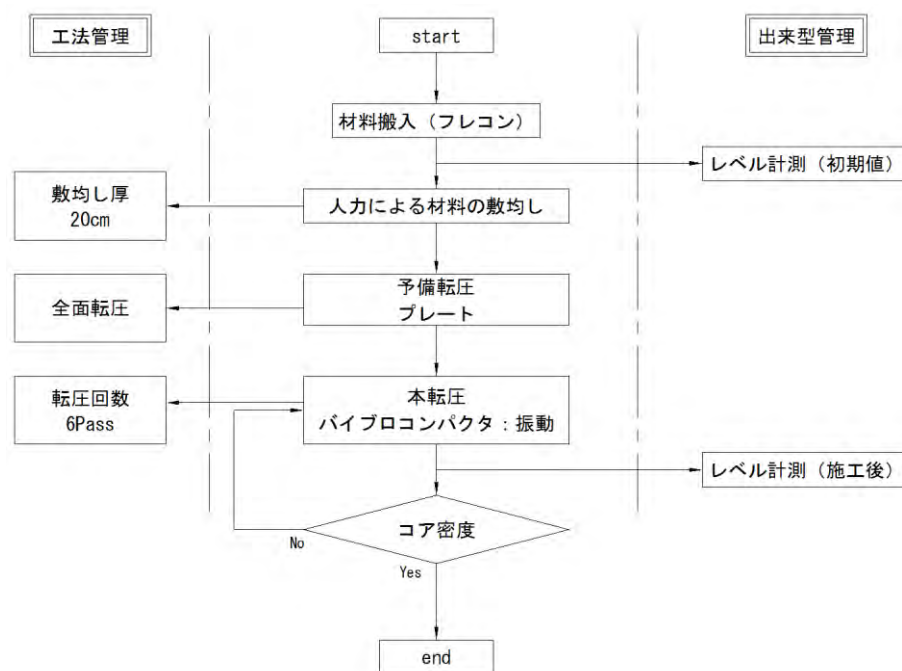


図 2.5-8 施工フロー

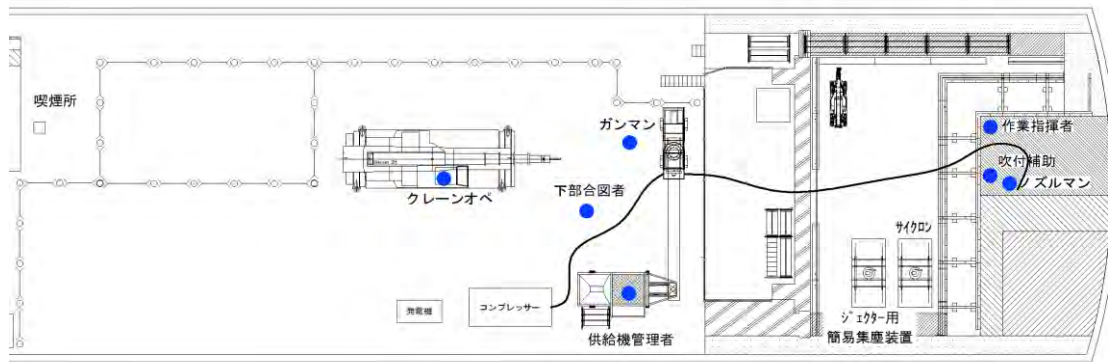


図 2.5-9 吹付け時の機械配置図



図 2.5-10 施工状況

3) 上部埋戻し材の施工試験の結果

施工後の上部埋戻し材から試料を採取して、乾燥密度と含水比を測定した。図 2.5-11 に上部埋戻し材の乾燥密度と含水比の関係を示す。

吹付け工法の一部を除き、締固め度 90% ($=1.629\text{Mg/m}^3$) より高い値となり、全体の平均でも 94% 程度であったので、管理目標値を概ねクリアした。密度のばらつき（密度の分布幅）に関しては、転圧施工においては、平成 25 年度より平成 26 年度の方が減少する（分布幅が小さくなる）という結果が得られたが、吹付け施工に関しては、平成 26 年度の方がばらつきは大きくなった。これは、平成 25 年度はホースの途中で加圧することにより、ノズル部である程度安定した空気圧が維持できていたが、平成 26 年度では、この途中で加圧することを行わなかった。そのため、ノズル部の空気圧に変動が生じたものと思われる。

施工後の上部埋戻し材から試料を採取して、細粒分含有率の測定を行った。混合土の製造の時と同様に、ベントナイトと混合した砂の粒度分布では、細粒分が含まれていないことを確認したため、ベントナイトの混合率は細粒分含有率と等しいとみなしている。図 2.5-12 に混合率の測定結果を示す。この細粒分含有率から求めた混合率は、転圧施工より吹付け施工の方が高くなった。これは吹付け途中で材料分離が発生し、混合率が高い材料のみが施工箇所に付着し、砂分が多い部分がリバウンドしている可能性を示唆している。このように、実際の規模、実環境に近い状況下での施工を実施したことで、課題が抽出できたことは意義がある。

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

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

表 2.5-4 に施工量に関するまとめを示す。平成 25 年度に比べて平成 26 年度の施工速度は上昇し、リバウンド率は減少する結果となった。吹付け速度が上昇したのは、材料の含水比を下げたことも要因と思われる。吹付け時に実施する配管類の清掃や材料の荷降ろし等を含む全体での施工速度に関しては、吹付け速度の上昇に加えて、材料供給機への荷降ろし方法を改良したことも要因の 1 つであると思われる。なお、材料の含水比を下げたことによりリバウンド率が上昇することも考えられたが、今回の試験ではそのような結果とはならなかった。

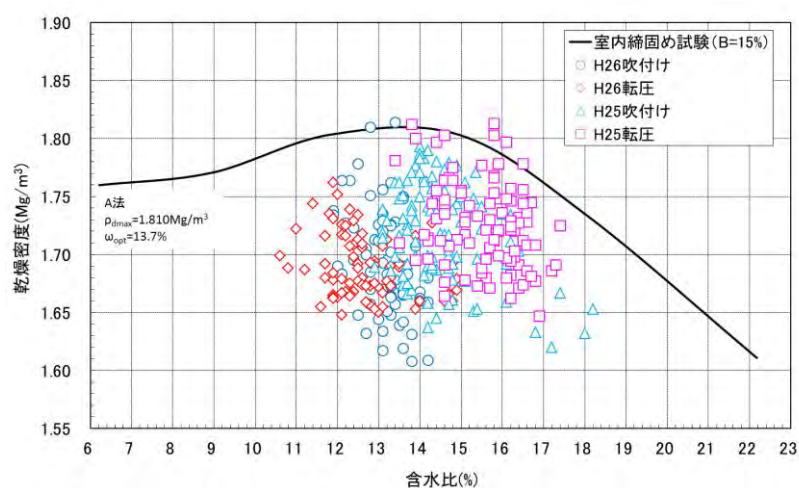


図 2.5-11 上部埋戻し材の乾燥密度と含水比の関係（平成 25～26 年度）

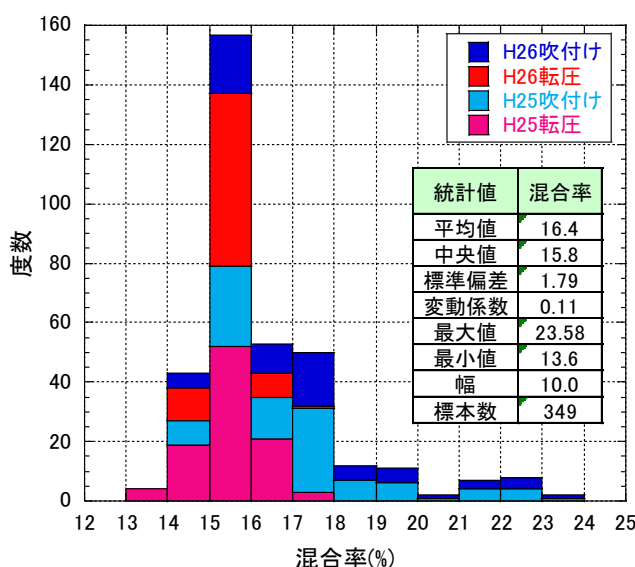


図 2.5-12 施工試験後の混合率

表 2.5-4 上部埋戻し材の吹付け施工の施工速度およびリバウンド率

		平成 26 年度	平成 25 年度
吹付け量	(kg)	48,572	57,135
吹付け速度	(kg/h)	2,280	1,909
施工速度	(kg/h)	1,214	995
吹付け時間	10m ³ 当り	10:18	8:24
施工時間	10m ³ 当り	19:46	15:47
リバウンド率	(%)	12.7	14.8

2.5.5 初期性能の確認

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

供試体の初期乾燥密度は 1.561～1.727Mg/m³、初期含水比は 12.3～19.0%、ベントナイト混合率は 15.0～20.9%であり、得られた透水係数は $7.07 \times 10^{-12} \sim 7.43 \times 10^{-11} \text{m/s}$ となった。

透水係数には乾燥密度および有効粘土乾燥密度との相関が見られ、図 2.5-13～図 2.5-14 に示すとおり、乾燥密度より有効粘土乾燥密度との相関性が高い結果となった。また、有効粘土乾燥密度が高くなるにつれて透水係数の値が小さくなる傾向は、図 2.5-15 に示す既往の研究事例[2]と整合する結果となっている。また、今回の試験で得られた透水係数は、有効粘土乾燥密度が 0.50～0.63Mg/m³ の時の値であり、 $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{m/s}$ のオーダーとなっている。この透水係数のオーダーについても既往の研究事例[2]と整合している。

なお、今回の試験における透水係数と乾燥密度および有効粘土乾燥密度の相関関係においては、施工方法の違いによる透水係数の差異は認められない結果が得られた。

当該地点の周辺岩盤の透水係数[48]は、最小値を示す地層で $7.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ となっており、今回の実施した上部埋戻し土の透水係数 ($7.07 \times 10^{-12} \sim 7.43 \times 10^{-11} \text{m/s}$) は、周辺岩盤より 3 桁程度低い値となった。

しかし、止水性能（透水）の代替え特性として、緩衝材のように、乾燥密度や有効粘土乾燥密度を施工管理および初期性能確認のために適用するにあたっては、試験データの蓄積を図りばらつきを評価する必要があると考えられる。

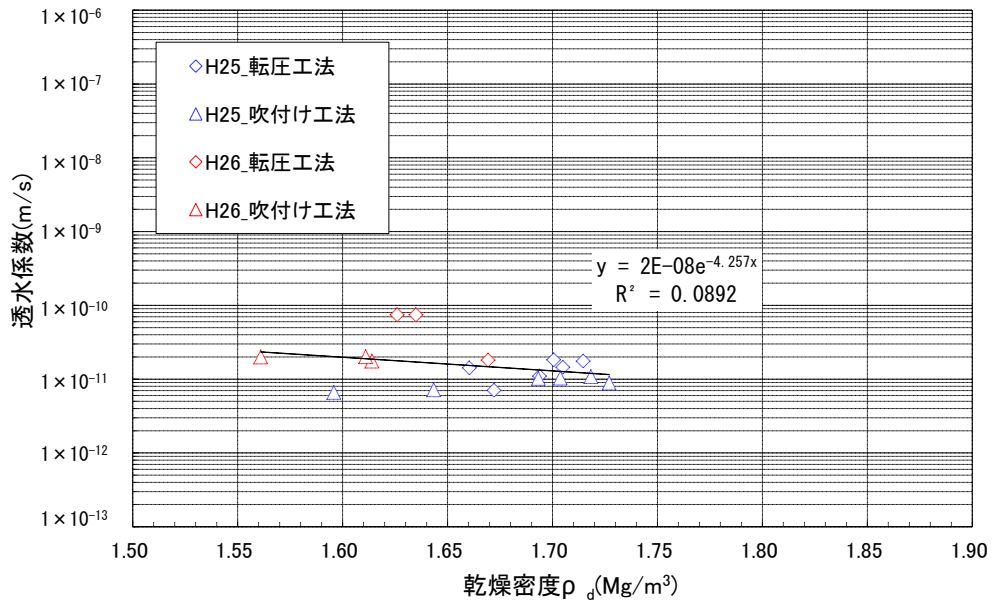


図 2.5-13 透水係数と乾燥密度の関係

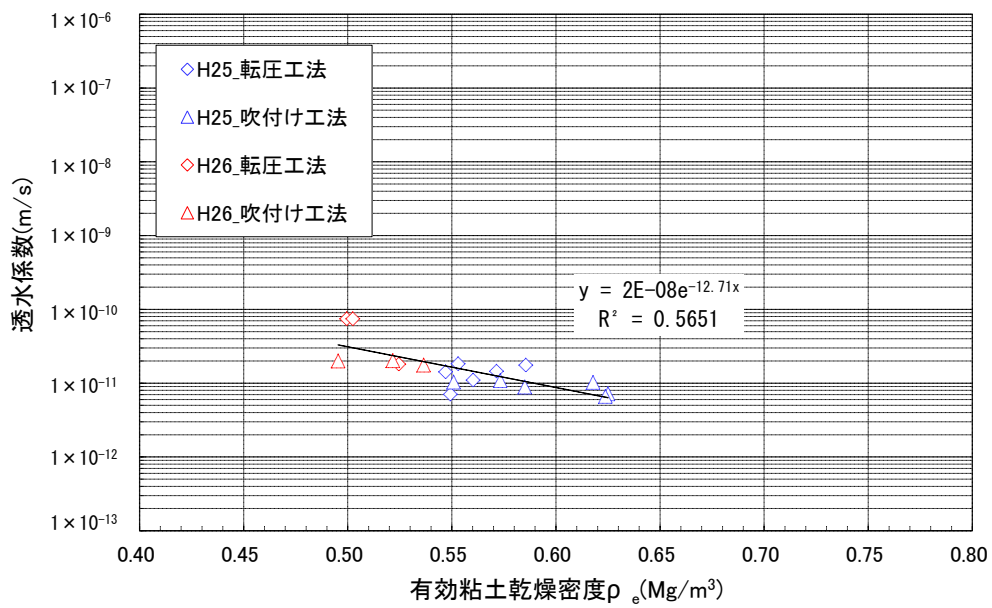


図 2.5-14 透水係数と有効粘土乾燥密度の関係

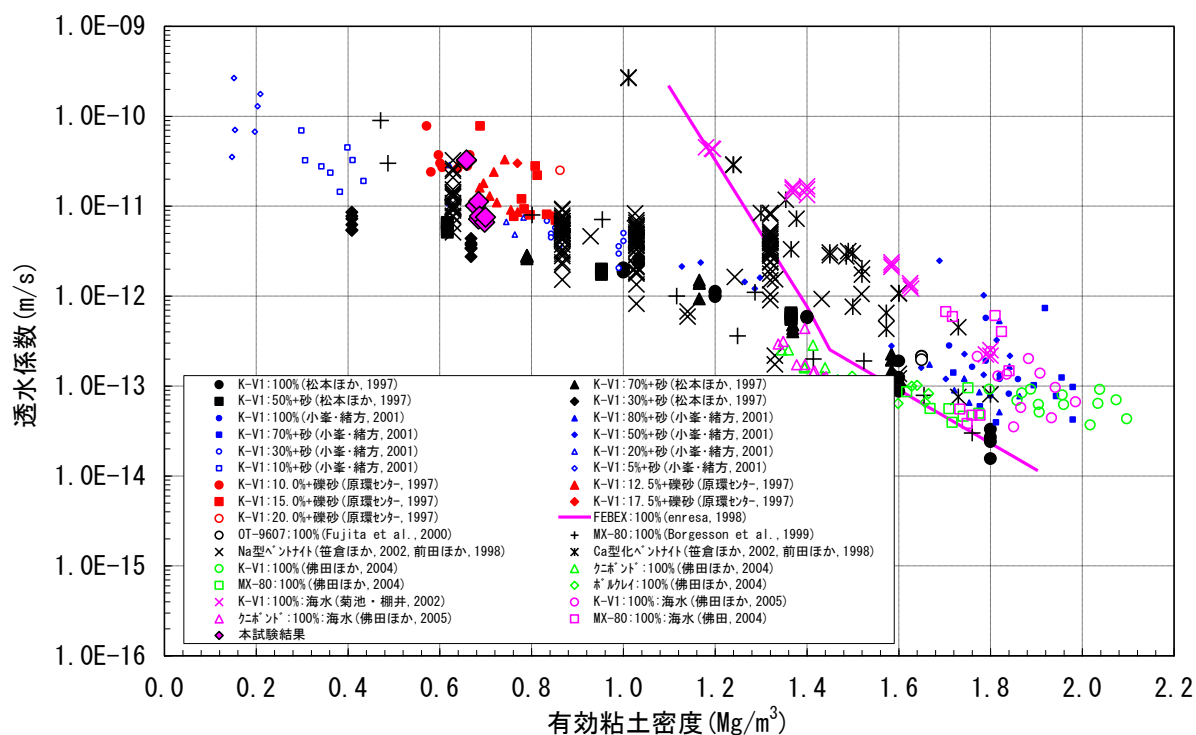


図 2.5-15 既往研究における透水係数と有効粘土密度の関係 ([3]に追記)

2.5.6 まとめ

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

(1) 材料配合と施工管理時の目標の設定

既往の研究事例を参考に、ベントナイト混合土の配合を設定し、室内試験により透水係数を十分に小さくできることを確認した。また、目標とする透水係数をもとに乾燥密度と含水比の仕様を設定し、施工時の管理目標値を設定できた。このような施工時の管理目標値の設定方法は、一般的な道路盛土等の施工時における設定方法と同等の方法であり、上部埋戻し材の施工に対しても従来と通りの方法を適用可能であると考えられる。

(2) 練り混ぜ方法の検討

ベントナイト混合土の製造や、上部埋戻し材の施工は、現状で選択し得る方法で実施した。ベントナイト混合土の製造においては、含水比やベントナイトの混合率のばらつきの程度を把握できた。また、施工後の上部埋戻し材の乾燥密度やベントナイトの混合率のばらつきの程度を把握できた。

(3) 施工方法の検討と適用性の確認

既往の検討より、転圧工法と吹付け工法の組み合わせて行う方法を抽出した。この、転圧工法と吹付け工法の組み合わせによって、狹隘でかつ隅角部を有する上部埋戻し材の構築が可能であることを明らかにした。

転圧工法においては、事前に敷均し厚さと転圧回数の関係を把握し、施工時の管理目標である乾燥密度に到達する転圧回数を設定した。試験空洞内での施工では、この敷均し厚さ、転圧回数で施工するものとし、所定の敷均し厚さ、転圧回数で施工しているかを管理する、いわゆる工法規定的な施工管理手法で実施した。その結果、このような工法規定的な管理で施工しても、管理目標を満足することを確認できた。

吹付け工法においても、室内締め固め試験 A 法に対する締固め度が 90%以上を概ね達成し、平均で 94%を満足することが分かった。施工時の材料のリバウンド率は、12～13%程度であった。

(4) 施工後の品質の確認

施工後の上部埋戻し材から採取した試料を用いて、透水試験等の室内試験を実施し、初期的な性能の確認を行った。その結果、透水係数を十分に小さい（透水係数で $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度）ことを確認した。これは、試験空洞周辺岩盤の透水係数の最低値である $7.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ よりも小さい。また、既往知見で得られている有効粘土乾燥密度と透水係数との関係として整理できる可能性が示唆された。

(5) 今後の検討課題

緩衝材と同様に、止水性能（透水）の代替特性として、乾燥密度や有効粘土乾燥密度を施工管理および初期性能確認のために適用する可能性が示唆されるが、これには、試験データの蓄積を図りばらつきを評価する必要があると考えられる。また、吹付け施工時に発生する材料分離を防止する方策や選定したもの以外の配合に関する検討も課題として考えられる。

2 章 参考文献

- [1] 土木学会エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 2008 年 6 月.
- [2] 土木学会：余裕深度処分の地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方, pp.49-98, 2009.
- [3] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—一分冊 2 地層処分の工学的技術, JNC TN1400 99-022, IV pp.77-80, 1999.
- [4] 雨宮清, 中越章雄, 茂呂吉司, 千々松正和, 工藤康二, 田中幸久, 山崎直, 庭瀬一仁, 小松進一：ベントナイト原鉱の締固め特性に関する検討—種々の材料に対する室内試験結果—, 第 58 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, CS7-018, pp.313-314, 2003.
- [5] 京谷修：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況, 第 60 回土木学会年次学術講演会研究討論会, 資料研-08, 2005 年 9 月.
- [6] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書, 2005.
- [7] 工藤康二, 田中幸久, 雨宮清, 中越章雄, 茂呂吉司, 千々松正和, 辻建二, 庭瀬一仁, 小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, CS1-050, pp.99-100, 2003.
- [8] 石原輝行, 五十嵐孝文, 藤原斉郁, 村上利一, 谷智之：余裕深度処分における底部ベントナイト層の現場施工に関する検討（その 1）—大型重機による施工の成立性と品質管理—, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-004, 2007.
- [9] 村上利一, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和, 吉越一郎：余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-003, 2007.
- [10] 吉越一郎, 千々松正和, 中越章雄, 庭瀬一仁, 谷智之：ベントナイトブロックの製作・施工に関する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-006, 2007.
- [11] 石井卓, 青木孝 他：放射性廃棄物処分施設の高密度ベントナイト転圧方法の検討, 平成 17 年度土木学会西部支部研究発表会, 2006.
- [12] 中畠誠門, 田中俊行, 小林一三, 戸井田克, 福田勝美, 佐藤竜郎, 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔：高密度ベントナイト吹付け工法の開発（その 1）—高品質なベントナイト構築のための材料供給方法の検討—, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, CS05-009, pp.177-178, 2007.9.
- [13] 戸井田克, 田中俊行, 中畠誠門, 小林一三, 福田勝美, 佐藤竜郎, 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔：高密度ベントナイト吹付け工法の開発（その 2）—密度のばらつきと施工方法の検討—, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, CS05-010, pp.179-180, 2007.9.
- [14] 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果, 第 61 回年次学術講演会概要集, CS05-059, pp.323-324, 2006.9.
- [15] 田中幸久, 中村邦彦, 工藤康二, 廣永道彦, 仲神元順, 庭瀬一仁, 小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.207-223, 2007.2.
- [16] 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中島均, 石井卓：ベントナイト原鉱石の高速透水試験—プレス飽和法—, 日本原子力学会 2006 年秋の大会, pp.108, 2006.9.

- [17] 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中島均, 石井卓: ベントナイト原鉱石の高速透水試験ー締固め施工した供試体の乾燥飽和法ー, 日本原子力学会 2006 年秋の大会, pp.109, 2006.9.
- [18] 中越章雄, 千々松正和, 庭瀬一仁, 谷智之: ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討(その 2)ー透水性に関する検討ー, 第 62 回年次学術講演会講演概要集, CS5-008, pp.175-176, 2007.9.
- [19] 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和: 現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, CS05-059, pp. 2006.
- [20] 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 鈴木康正, 千々松正和: ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験 (その 1)ー膨潤挙動に関する検討, 第 63 回年次学術講演会講演概要集, CS05-14, pp. 2008.
- [21] 千々松正和, 鈴木康正, 伊藤裕紀, 庭瀬一仁: ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験 (その 2)ー不飽和支持力に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, CS05-15, pp. 2008.
- [22] 庭瀬一仁, 廣永道彦, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設に用いるコンクリートの設計について. コンクリート工学, Vol.44, No.2, pp.3-8, 2006.
- [23] 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層に用いる高流動モルタルの室内配合選定, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, pp.43-51, 2010.
- [24] 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, pp299, 2007.
- [25] 土木学会: 高流動コンクリート施工指針, pp. 41, 1998.
- [26] 日本原子力学会標準委員会技術レポート: 収着分配係数の測定方法ー浅地中処分のバリア材を対象としたパッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順ー, AESJ-SC-TR001, pp.15-18, 2006.
- [27] 安田和弘, 横関康祐, 河田陽介, 吉澤勇二: カルシウム溶出に伴うコンクリートの物理性能及び物質移行性能の変化に関する検討, セメントコンクリート論文集, No.56, pp.492-498, 2002.
- [28] 庭瀬一仁, 杉橋直行, 辻幸和: 低レベル放射性廃棄物施設の実規模試験による初期性能の設定, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, pp.53-62, 2010.
- [29] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 17 年度 地層処分技術調査等 T R U 廃棄物関連処分技術調査地下空洞型処分施設性能確証試験報告書, 2006.
- [30] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事, 2001.
- [31] 原子力環境整備センター: 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体制作技術について (各種固体状廃棄物), 1998.
- [32] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 19 年度 管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書, 2008.
- [33] 日本原子力学会標準委員会: 余裕深度処分施設の施設検査方法: 2010, AESJ-SC-F019, 2011.5.31.
- [34] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 24 年度 管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書, 2012.
- [35] 小峯秀雄, 緒方信英: ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と簡易評価法の提案, 土木学会論文集, No.708, III-59, pp.133-144, 2002.6.
- [36] 田中俊行, 深沢栄造, 平和男, 須山泰宏: 人工地盤構築材料の開発 (その 3)ー礫混入ベントナイト混合土の透水特性ー, 鹿島技術研究所年報, 第 43 号, pp.203-208, 1995.12.
- [37] 尾崎充弘, 庭瀬一仁, 平川芳明, 田島孝敏, 新村亮, 武内邦文: 放射性廃棄物処分施設の土質系埋

- 戻し材の材料特性, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-011, pp.181-182, 2007.
- [38] 伊藤裕紀, 谷智之, 千々松正和, 山本卓也: ベントナイトの含水調整に関する検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-002, pp.163-164, 2007.
- [39] 岡本大, 西嶋久寿, 谷智之, 河原忠弘, 千々松正和, 高橋隆太郎, 荻原績: 低配合ベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討, CS3-028, pp.55-56, 2011.
- [40] 石濱裕幸, 千々松正和, 荻原績, 中越章雄, 西嶋久寿, 伊藤裕紀, 谷智之, 河原忠弘: 混合率 30～50% のベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討, CS3-030, pp.59-60, 2011.
- [41] 久慈雅栄, 福田淳, 南浩輔, 前田和亨, 磯野宗一: ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発 (その 3) - ミストブレンダー工法の実規模プラント概要 -, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS13-012, pp.23-24, 2012.
- [42] 福田淳, 久慈雅栄, 南浩輔, 前田和亨, 磯野宗一: ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発 (その 4) - ミストブレンダー工法によるベントナイト混合土の品質 -, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS13-013, pp.25-26, 2012.
- [43] Kobayashi, I., Toida, M., Nakajima, M., Tanaka, T., Terada, K., Nonaka, K., and Yabe, J.: Development of Construction Methods of the Bentonite Engineered Barrier by the High-density Shotclay System, Proc. of Workshop on Long-term Performance of Smectitic Clays Embedding Canisters with Highly Radioactive Waste, Lund, Sweden, 2007.
- [44] 石濱裕幸, 千々松正和, 荻原績, 中越章雄: ベントナイト混合土の吹付け施工に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, CS13-014, pp.27-28, 2012.
- [45] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 17 年度 管理型処分技術調査等地下空洞型処分施設性能確証試験, 2007.
- [46] Gunnarsson, D., Borgesson, L., Hokmark, H., Johannesson, L.E., Sanden, T.: Report on the installation of the Backfill and Plug Test, SKB report, IPR-01-17, 2001.
- [47] 千々松正和, 吉越一郎, 中越章雄, 雨宮清: ベントナイトの斜め締固めおよび施工管理方法に関する検討, 2007 年春の年会予稿集「放射性廃棄物処分と環境」, 原子力学会, pp.424, 2007.
- [48] 日本原燃株式会社六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書, 平成 9 年 1 月, 平成 9 年 9 月 (一部補正) .

第3章 挙動計測・地震影響検討

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

3.1 挙動計測

3.1.1 挙動計測の内容

3.1.1.1 計測目的と計測方法

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

挙動計測では、施設構成部材に計測器を設置し、施工中および施工後の計測を継続して実施した。施工による施設への影響要因と想定される挙動、その挙動に対して計画した計測項目、計測方法を表 3.1-1 に示す。

また、コンクリートピットや低拡散材等のセメント系部材の打込み時に得られた計測結果を用いて、表 3.1-2 に示す初期性能（試験施設の建設完了時点の性能）に関するデータを取得した。

表3.1-1 試験施設構成部材の計測項目と計測方法

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

表 3.1-2 初期性能に関する取得データ

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

3.1.1.2 計測器配置

試験施設に設置した計測器の配置を図 3.1-1～図 3.1-3 に示す。

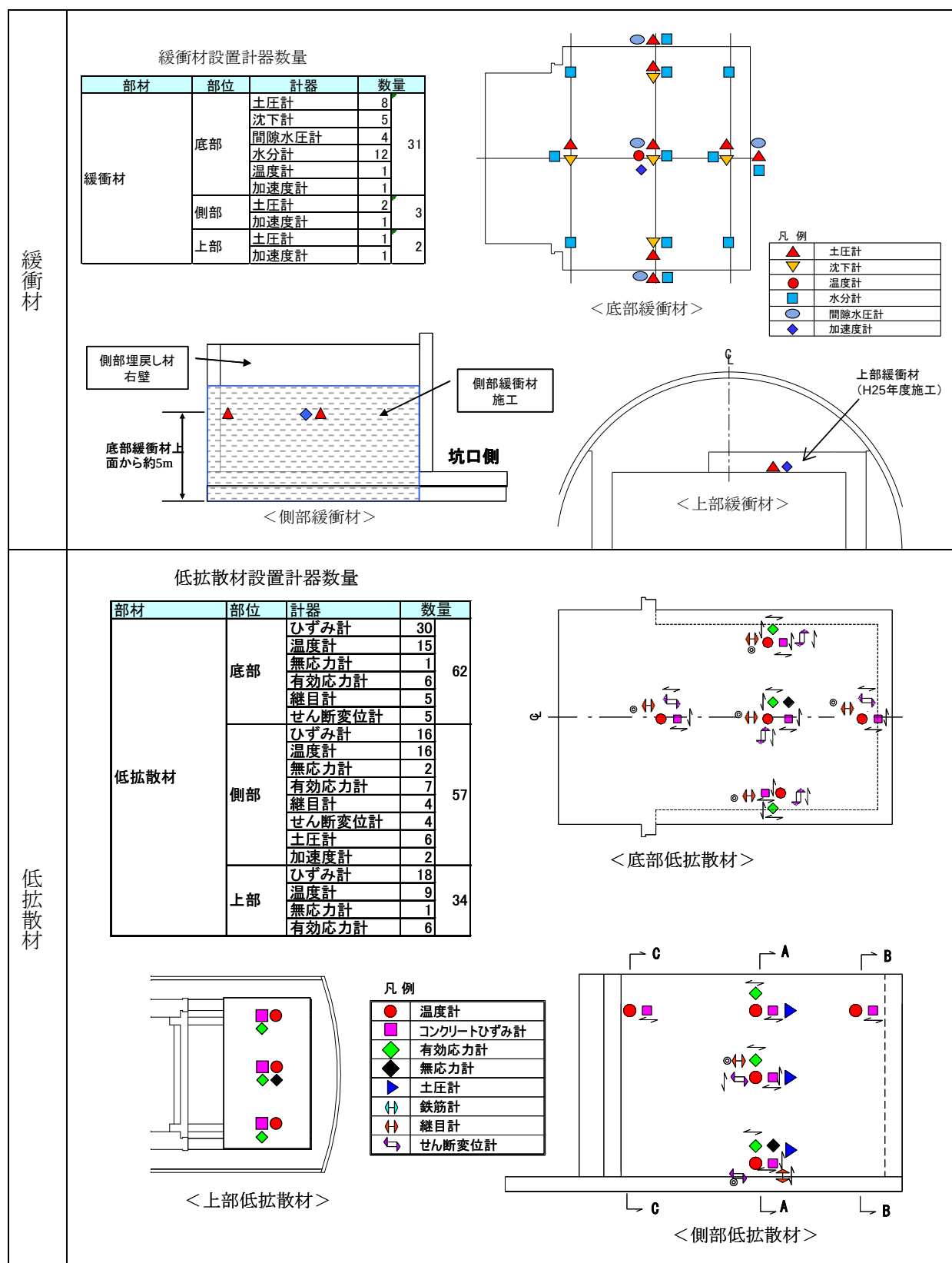


図 3.1-1 設置計器数量および計測器配置 (その 1)

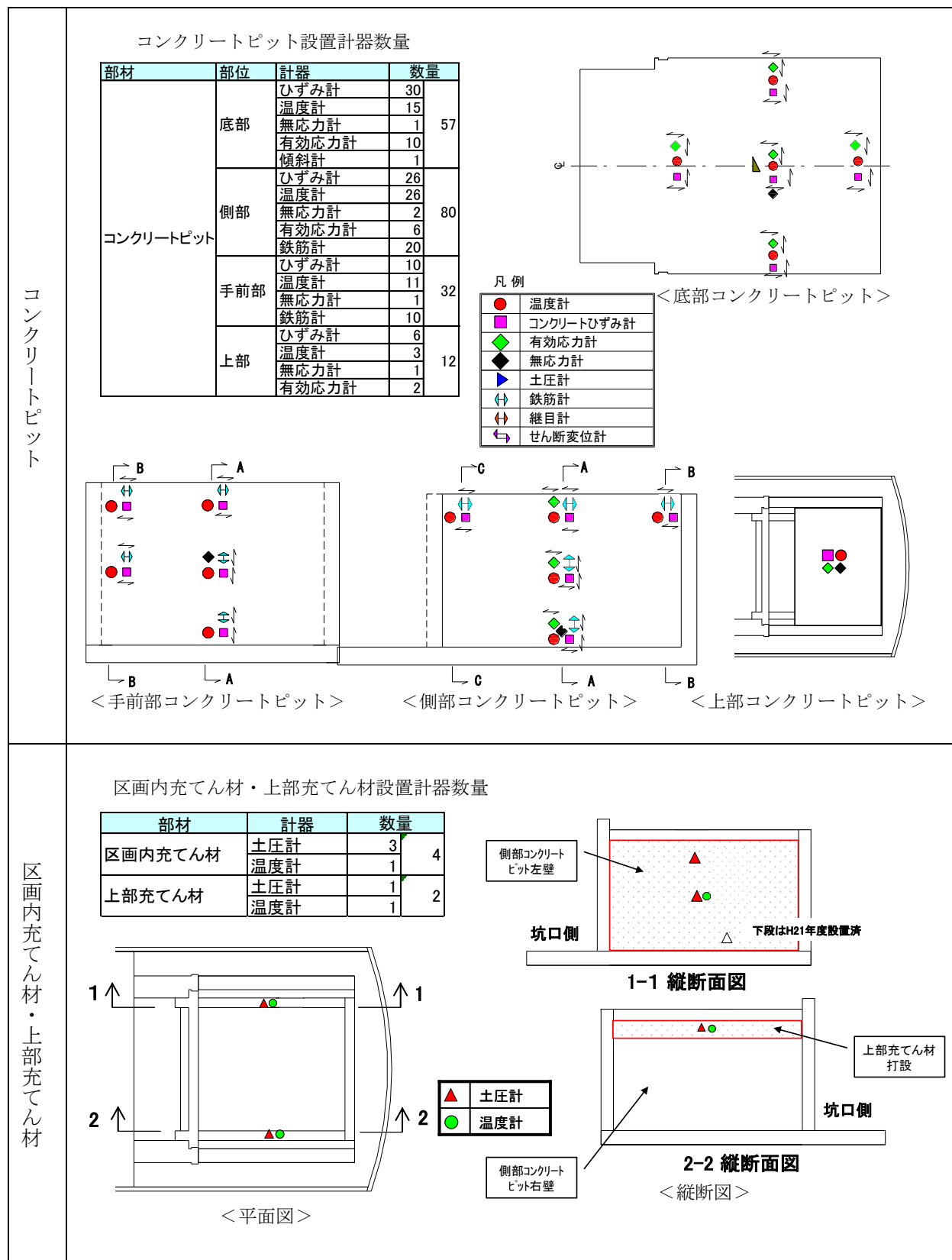
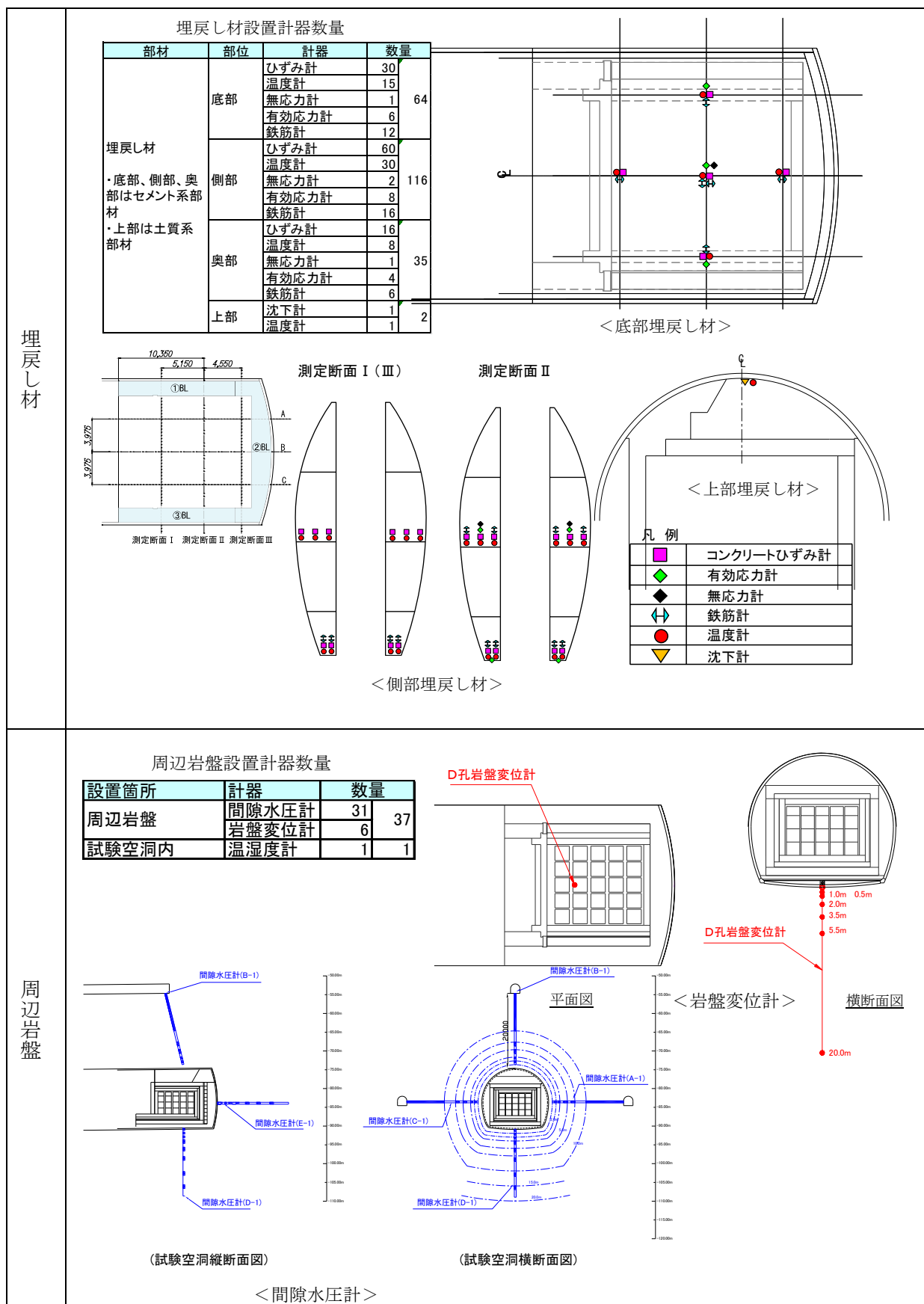


図 3.1-2 設置計器数量および計測器配置 (その 2)



周辺岩盤設置計器数量

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

平面図

横断面図

＜岩盤変位計＞

＜間隙水圧計＞

図 3.1-3 設置計器数量および計測器配置 (その 3)

3.1.2 挙動計測の成果

3.1.2.1 試験施設の挙動

挙動計測結果より、試験施設構築が施設構成部材に与える影響とその影響の程度から判断される施設健全性を表 3.1-3 に示す。また、表中の施設健全性評価における代表的な計測結果を図 3.1-4～図 3.1-14 に示す。なお、施設・周辺岩盤挙動計測結果のうち、セメント系壁部材打込み時の側圧計測等の個々の施工イベントに対する挙動計測結果は、前節までの関連部材の成果において記載した。

表 3.1-3 影響の程度と健全性

対象構成部材		影響要因	影響の程度と健全性	代表図
底部平板部材	底部緩衝材	上載荷重	[影響の程度] - 概ね上載圧に相当する挙動（土圧、沈下量）である。 [健全性] - 過大な土圧、沈下は生じていない。上載圧の支持部材としての機能を維持している。	図 3.1-4 図 3.1-5
	底部コンクリートピット	上載荷重	[影響の程度] - 各部材には引張応力が作用するが、引張強度以下である。 - 上部部材施工時のひずみ増加量は、季節変動による温度変化に伴う変動と同程度。 [健全性] - 底部低拡散材では、ひび割れの発生が確認されているが、ひずみ・応力の計測結果からひび割れは局所的なものと考えられる。底部セメント系部材の健全性は確保されていると評価される。	図 3.1-6 図 3.1-7
	底部低拡散材	水和熱		
側部コンクリートピット	側部低拡散材	側圧（液圧、温度応力） 水和熱	[影響の程度] - 隣接部材施工時に引張側に応力は増加するが、全期間をつうじて引張応力は引張強度以下である。 - 隣接部材施工時にひずみは膨張する。ひずみの増加量は季節変動による温度変化に伴う変動と同程度である。施工終了後、ひずみは残留せずに減少している。 [健全性] - 側部低拡散材では、ひび割れが発生しているが、過大なひずみ、応力は作用しておらず、側部壁部材の健全性は確保されていると評価される。	図 3.1-8 図 3.1-9
上部コンクリートピット	上部低拡散材	温度応力	[影響の程度] - 湿潤保温養生マットで養生した上部低拡散材の右側でひび割れが発生し、養生終了後の急激な温度低下が原因と考えられる。 [健全性] - 上部低拡散材の右側ではひび割れ発生したが、養生終了後のひび割れ発生後、ひび割れ幅の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されておらず、健全性は確保されていると評価される。左側ではひび割れの発生は確認されていない。	図 3.1-10 図 3.1-11
上部埋戻し材		上載荷重	[影響の程度] - 上部埋戻し材の施工が進行するにともない、新たに構築された上部埋戻し材の自重増加分により沈下計に 5mm 程度の変位量が観測された。 [健全性] - 施工後には沈下量の収束傾向が確認できること、また、施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の収束値は概ね整合していることから、健全性は確保されていると評価される。	図 3.1-12
岩盤変位計		上載荷重	[影響の程度] - 岩盤変位は弾性挙動の範囲内である。 [健全性] - 緩みの進展はなく周辺岩盤は健全な状態である。	図 3.1-13
岩盤間隙水圧計		施工全般	[影響の程度] - 試験期間中の間隙水圧の変動は小さい。 [健全性] - 施設構築の周辺岩盤の地下水流動への影響は無い。	図 3.1-14

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

[グラフ中のイベント名称]

- ・底埋：底部埋戻し材打設
- ・奥埋：奥部埋戻し材打設
- ・側埋：側部埋戻し材打設
- ・底緩1：底部緩衝材 1 層目転圧
- ・底緩2：底部緩衝材 2 層目転圧
- ・底緩10：底部緩衝材 10 層目転圧
- ・底低：底部低拡散材打設
- ・底 CP：底部コンクリートピット打設
- ・奥 CP：奥部コンクリートピット打設
- ・側 CP：側部コンクリートピット打設
- ・模廃：廃棄体中詰めコンクリート打設

- ・手 CP：手前部コンクリートピット打設
- ・側低：側部低拡散材打設
- ・充填・上充：区画内充てん材、上部充てん材打設
- ・側緩吹：側部緩衝材（吹付け施工）開始
- ・普コ：普通コンクリート打設
- ・側緩転：側部緩衝材（転圧施工）開始
- ・上 CP：上部コンクリートピット打設
- ・上低：上部低拡散材打設
- ・上緩吹：上部緩衝材（吹付け施工）開始
- ・上緩転：上部緩衝材（転圧施工）開始
- ・上埋土：上部埋戻し材（吹付け、転圧施工）開始

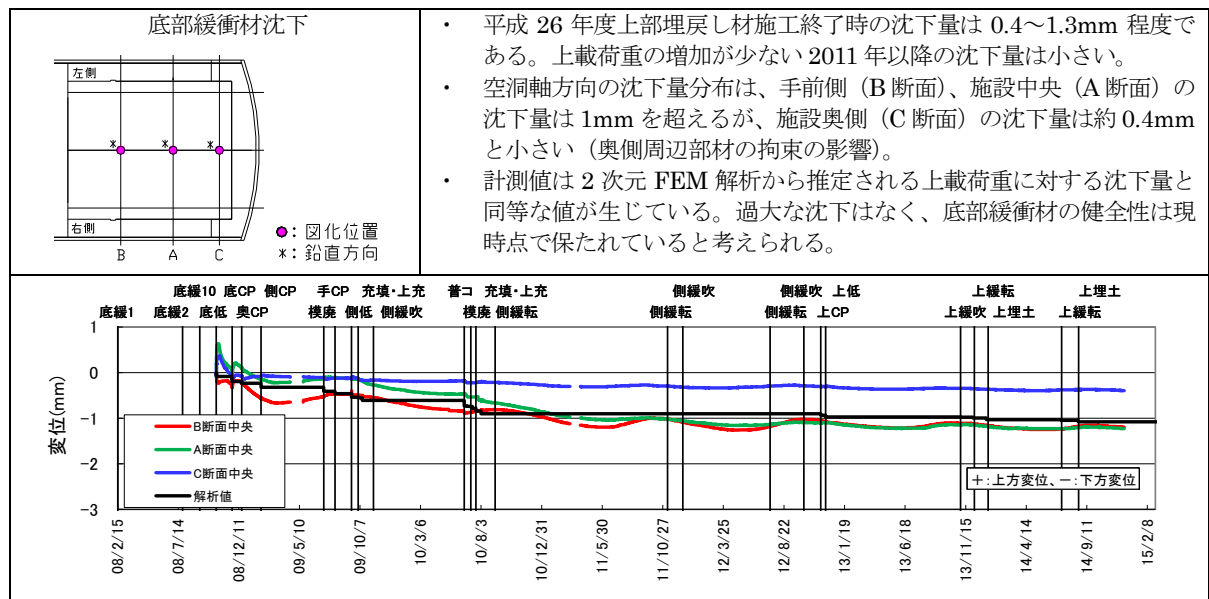


図 3.1-4 底部緩衝材の沈下量計測結果

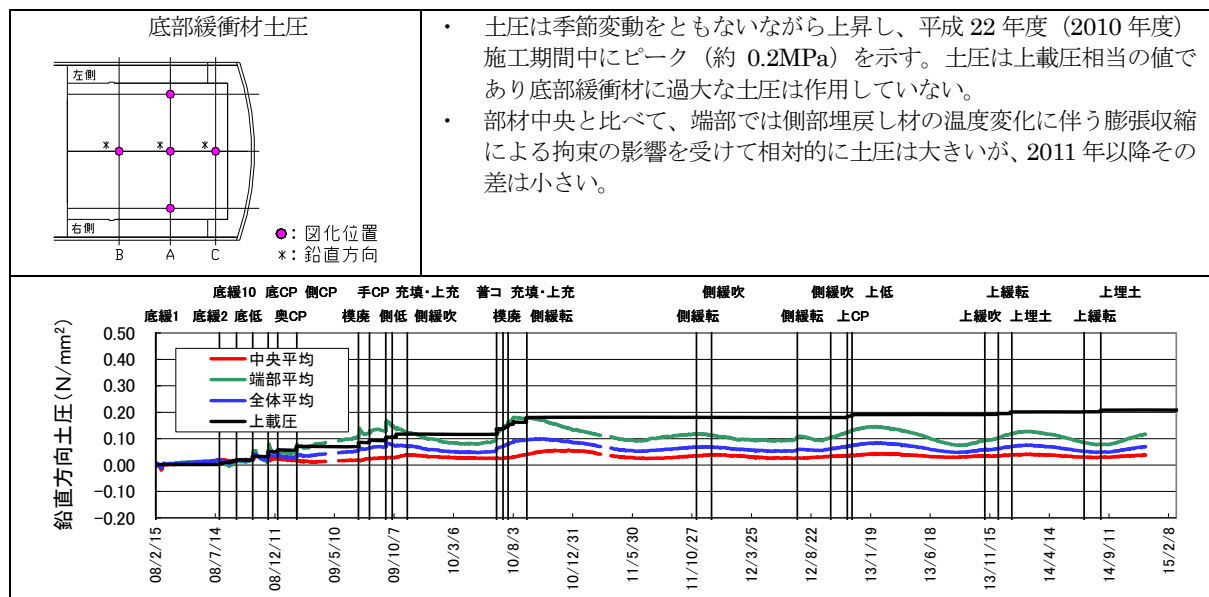


図 3.1-5 底部緩衝材の土圧計測結果

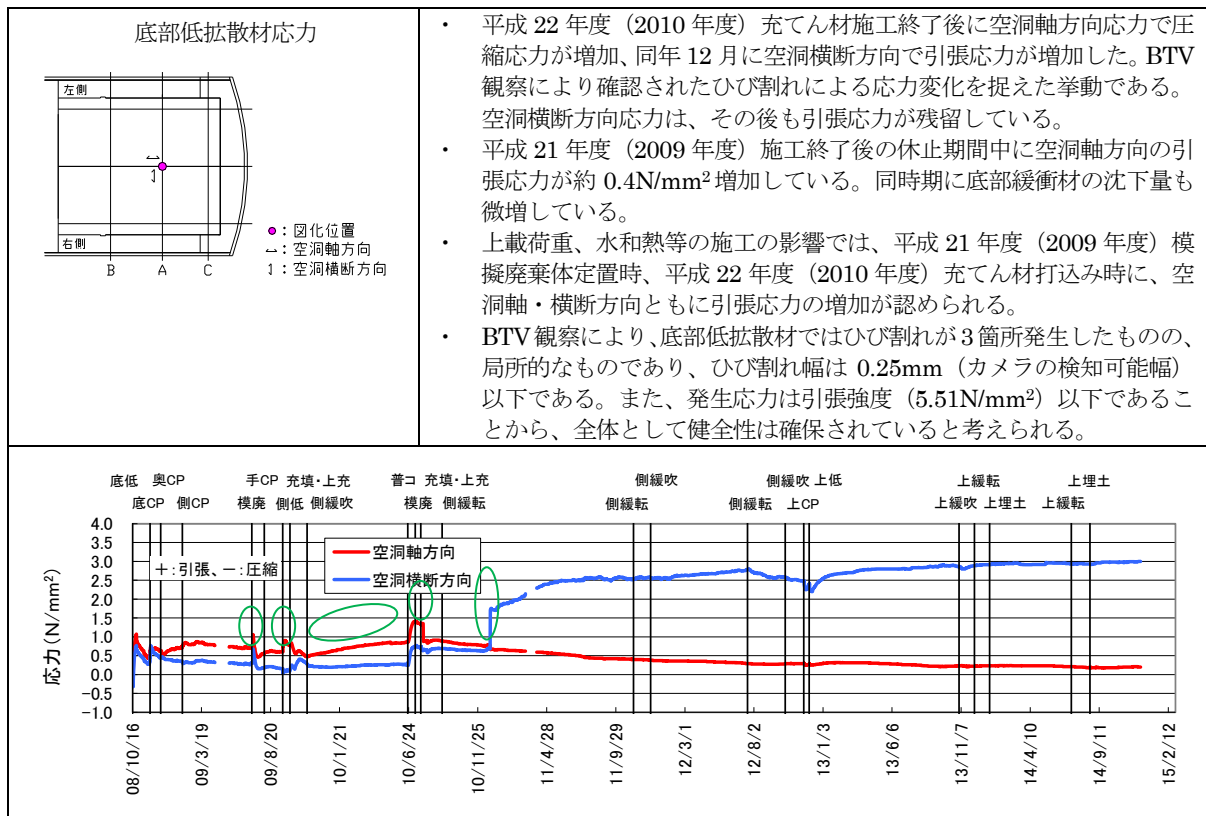


図 3.1-6 底部低拡散材の応力計測結果

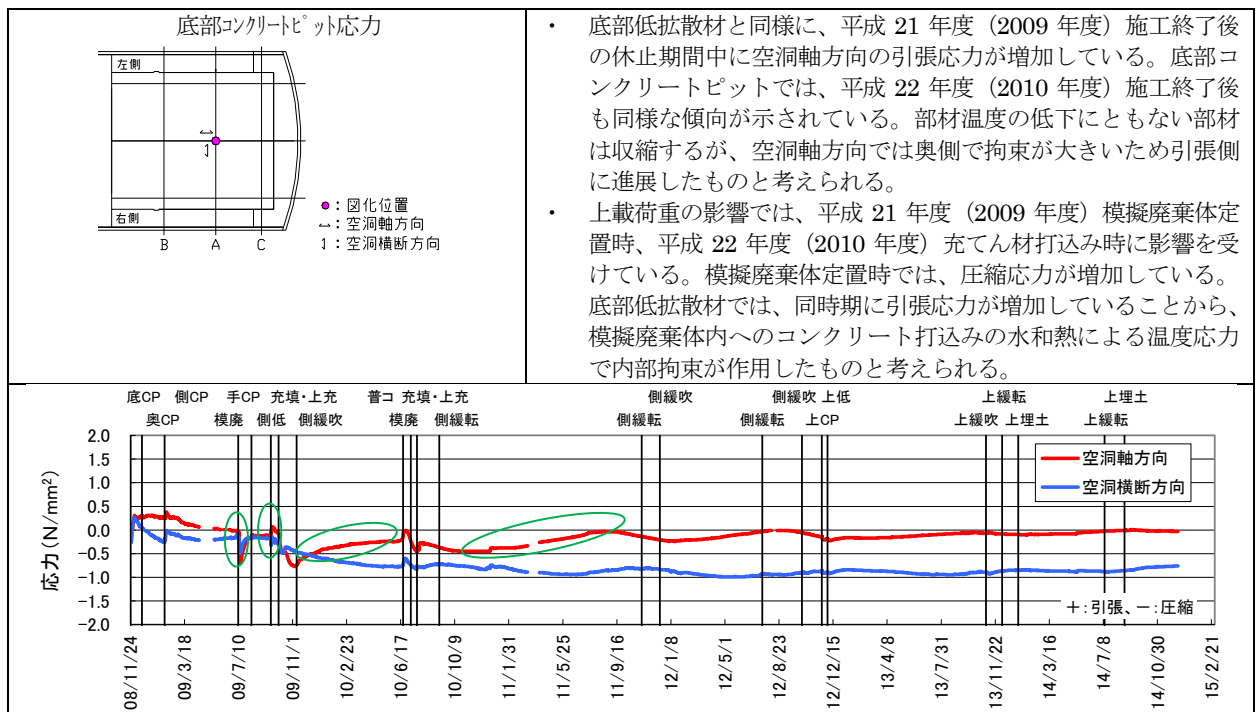


図 3.1-7 底部コンクリートピットの応力計測結果

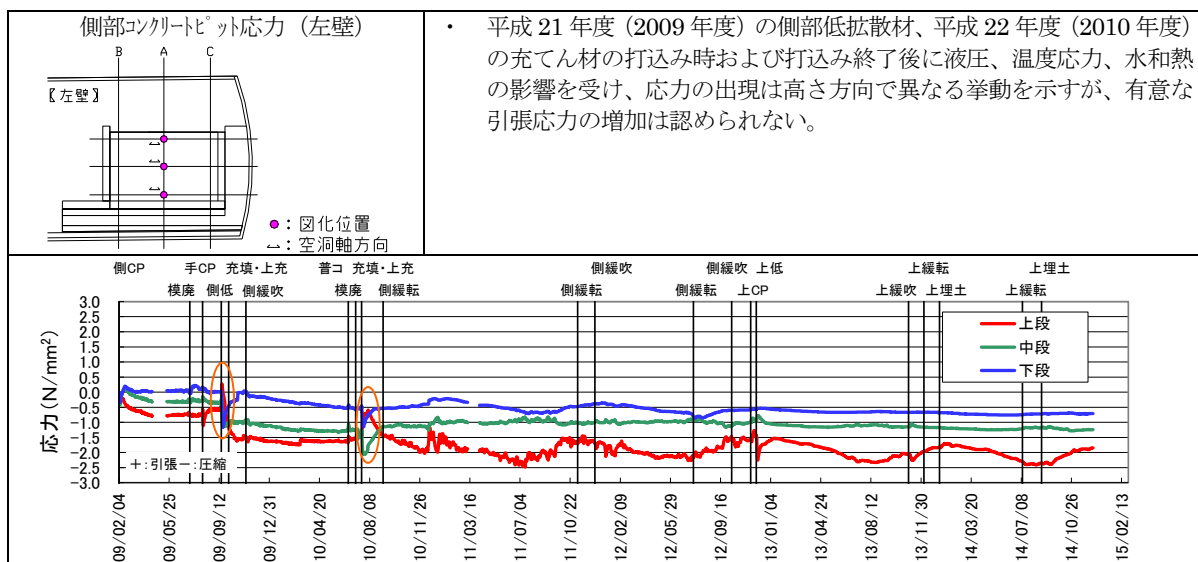


図 3.1-8 側部コンクリートピットの応力計測結果

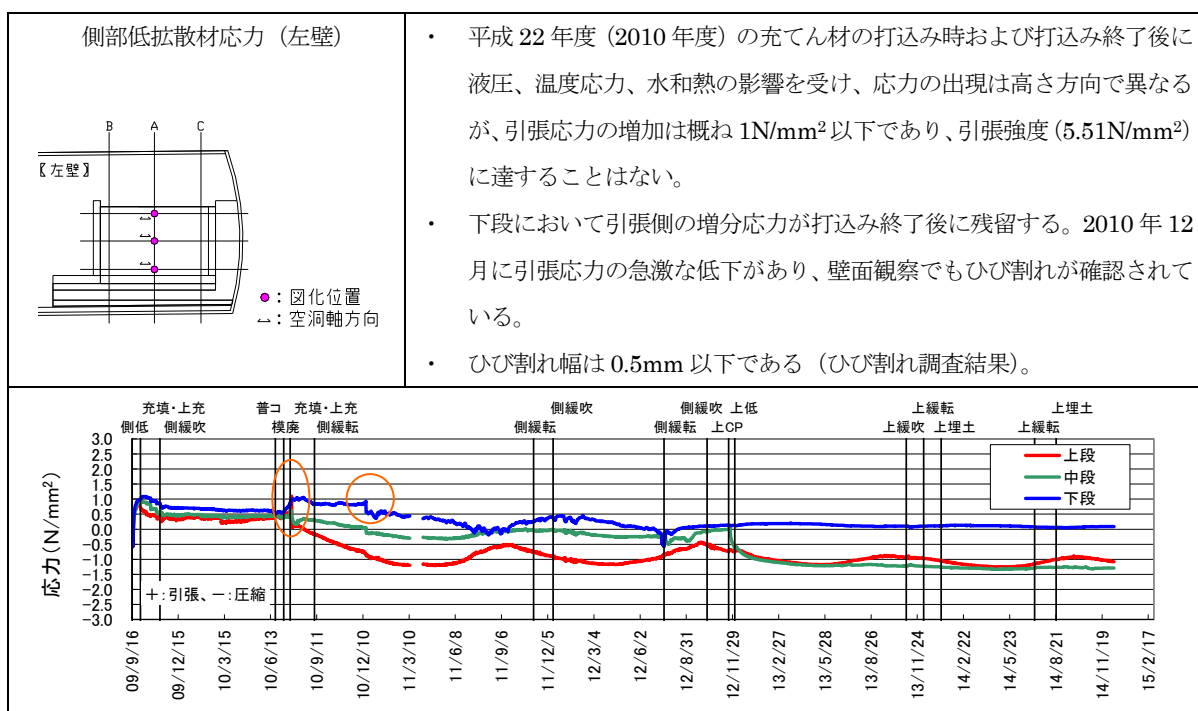


図 3.1-9 側部低拡散材の応力計測結果

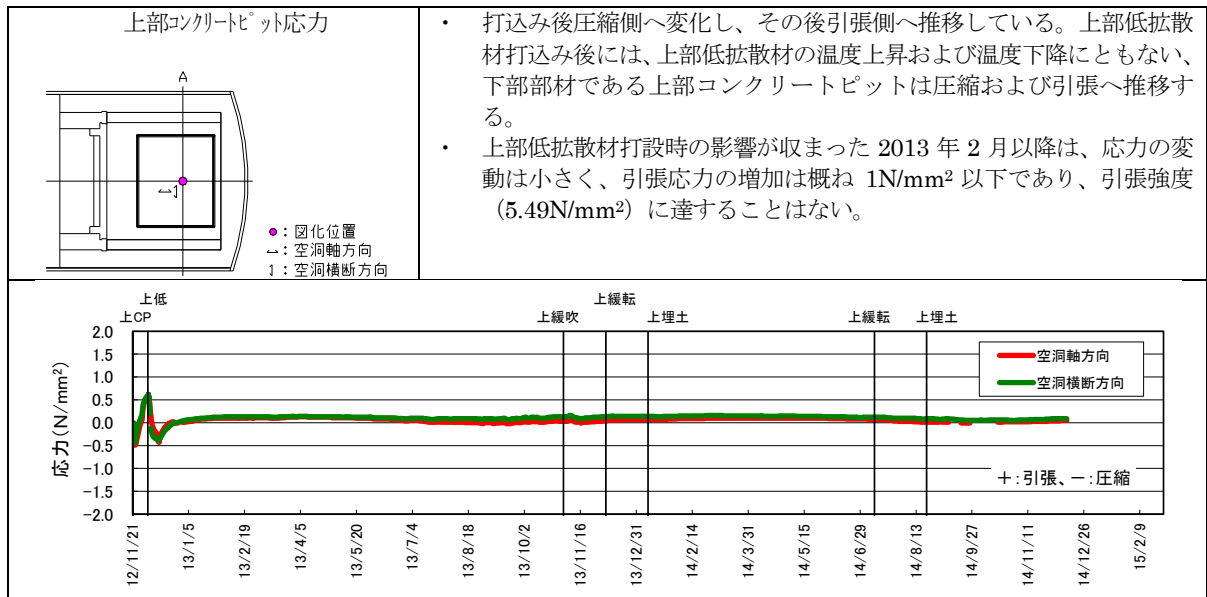


図 3.1-10 上部コンクリートピットの応力計測結果

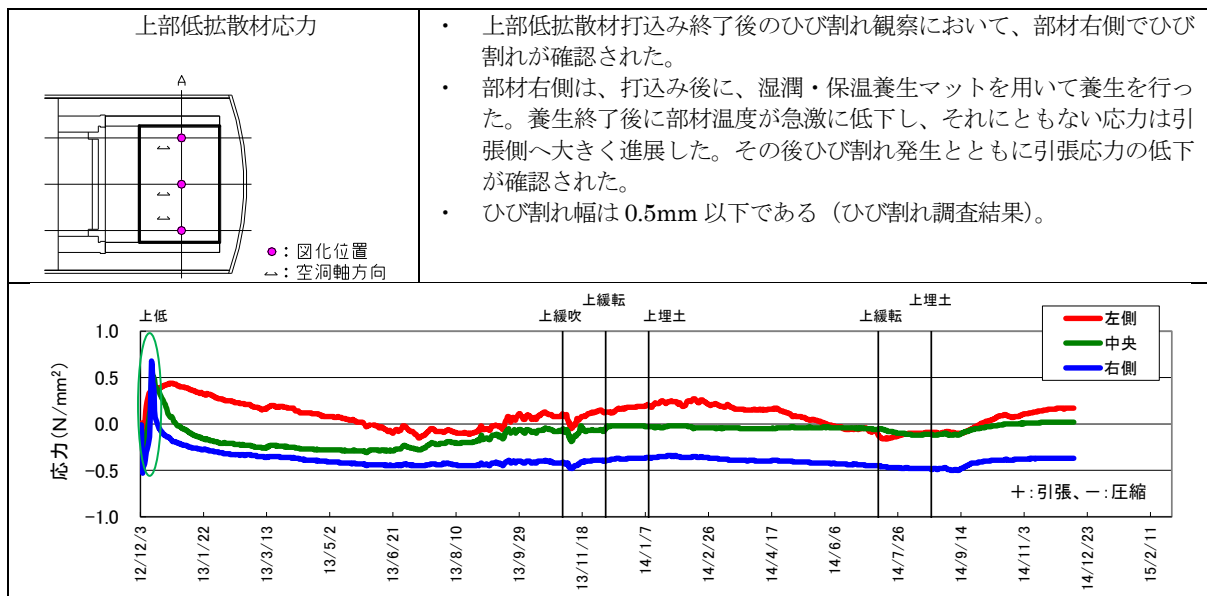


図 3.1-11 上部低拡散材の応力計測結果

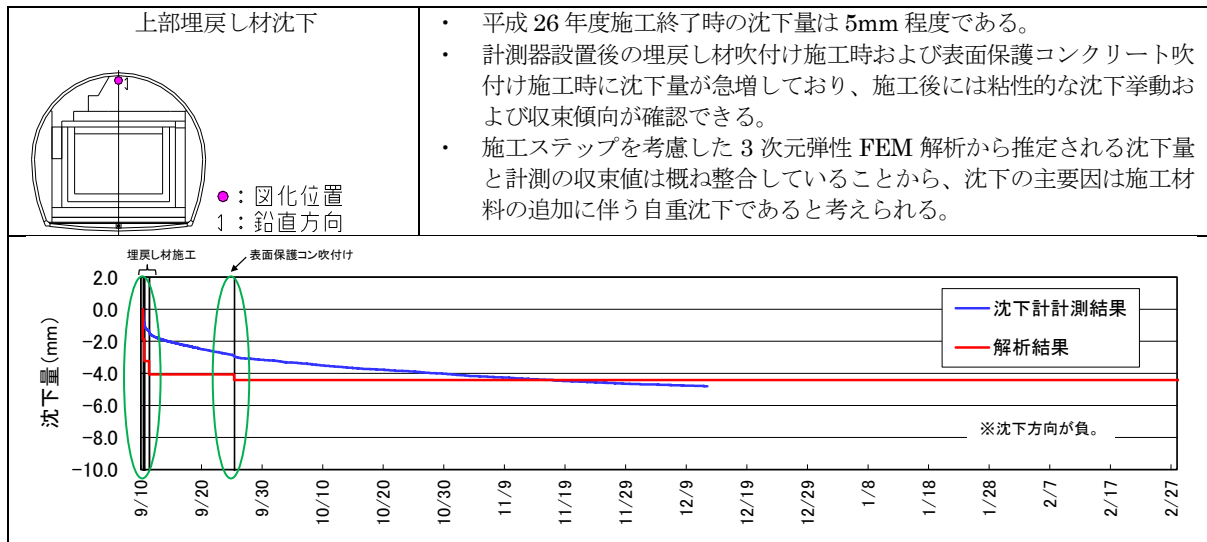


図 3.1-12 上部埋戻し材の沈下量計測結果

3.1.2.2 周辺岩盤挙動

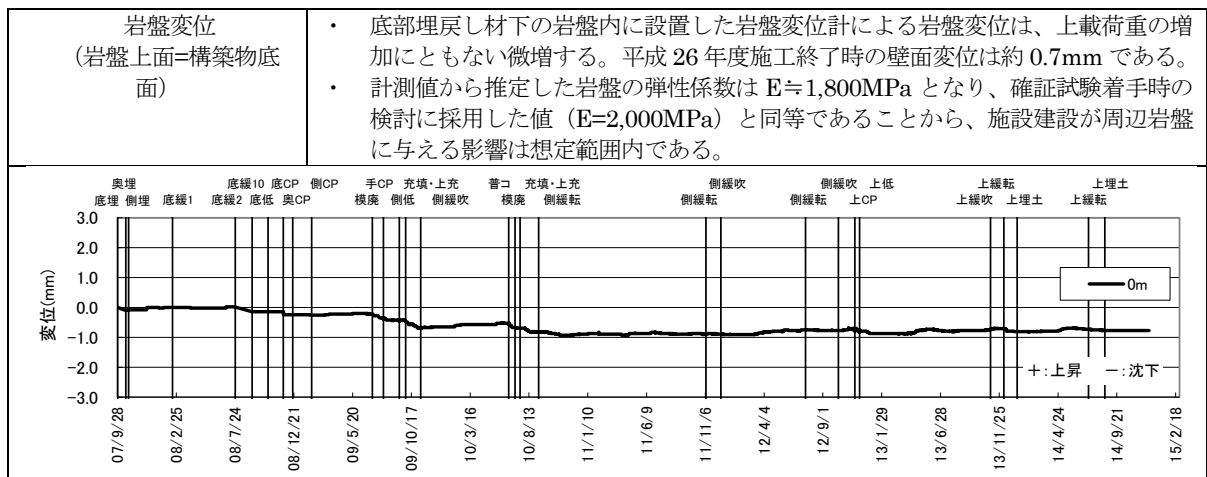


図 3.1-13 岩盤変位計測結果

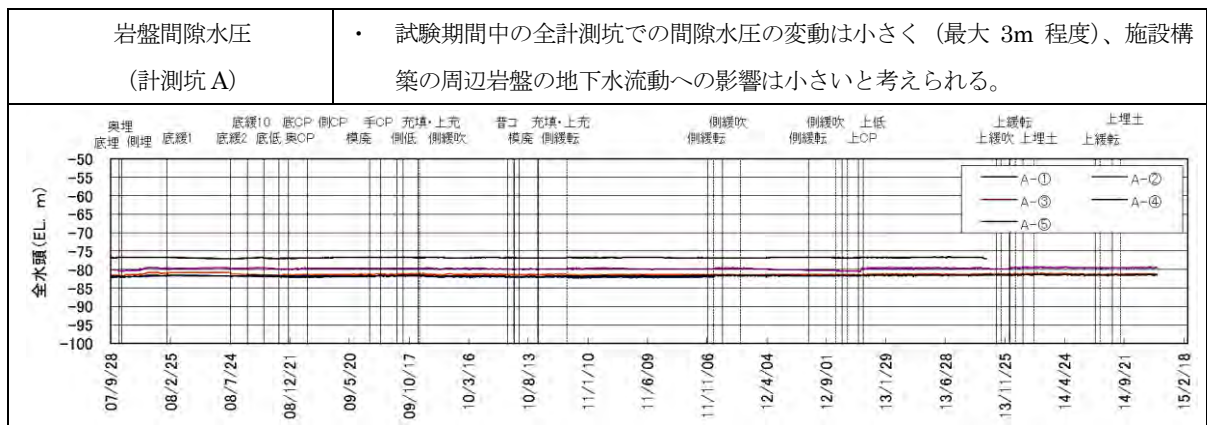


図 3.1-14 岩盤間隙水圧計測結果

3.1.3 まとめ

試験施設に設置し計測器から取得される挙動計測データを用いて、施設全体挙動について取りまとめた。得られた知見は以下のとおりである。

- 底部緩衝材の沈下量（最大 1.3mm）および土圧（最大 0.2MPa）は、概ね上載圧（約 0.2MPa）に相当する程度であり、過大な沈下および土圧は生じていない。
- 底部低拡散材は、ひび割れが発生しているが、ひび割れ幅は 0.25mm 以下であり、発生応力は引張強度以下であった。
- 側部低拡散材は、ひび割れが発生しているが、ひび割れ幅は 0.5mm 以下であり、発生応力は引張強度以下であった。
- 上部低拡散材の右側では、養生終了後の急激な温度低下によりひび割れが発生したが、その後のひび割れ幅（0.5mm 以下）の増大、進展、新たなひび割れの発生は確認されていない。上部低拡散材の左側では、ひび割れの発生は観測されなかった。
- 上部埋戻し材の施工が進行するにともない、上部埋戻し材に設置した沈下計に 5mm 程度の変位量が観測された。上部埋戻し材自体の自重によって、上部埋戻し材に沈下等の変形が生じている可能性があるが、平成 26 年 12 月現在、沈下計の変位量は収束傾向にあることが確認されている。また、上部埋戻し材の施工ステップを考慮した 3 次元弾性 FEM 解析から推定される沈下量と計測の変位量の収束値は概ね整合していることが分かった。
- 試験施設の荷重により生じる周辺岩盤（施設下部）の岩盤変位は、この変位量から推定した岩盤の弾性係数（1,800MPa）と確証試験着手時の検討に採用した弾性係数（2,000MPa）が同程度であることから、想定範囲内の挙動である。したがって過大な変形や緩み域の進展はなく、施設構築の周辺岩盤への影響は小さいと評価される。また、試験期間中の周辺岩盤間隙水圧の変動は小さく（最大 3m 程度）、施設構築が地下水流動へ与える影響は小さいと評価される。

上記の結果より、試験施設構築が周辺岩盤や試験施設に与える影響は施設・周辺岩盤の健全性を損なうものではなく、現時点で試験施設および周辺岩盤の健全性は確保されていると評価される。

3.2 地震影響検討

3.2.1 地震影響検討の目的

一般に地下構造物は耐震性に富む構造物であることが知られている。しかし、過去の地震によるトンネルの被害事例によると、地震の規模が大きく、地震断層面からの距離が近く、地山に何らかの欠陥がある場合等の特殊条件が介在すれば、トンネルも地震被害を受ける可能性があり、①坑門、坑口部の被害、②不良地山区間の被害、③断層のずれによる被害の3パターンに分類されている[1]。地下空洞型処分施設のような大深度かつ大規模地下構造物については、検討事例が少なく、地震の影響について明確にされていないのが現状である。これまで、大深度の放射性廃棄物処分施設の処分坑道を対象として、周辺地盤および支保工の力学安定性を評価した事例[2]はあるが、空洞内の人工バリア施設を含めた地下空洞型処分施設の地震影響の検討は報告されていない。そこで本検討では、巨大地震が建設・操業時の地下空洞型処分施設に与える影響を把握することを目的として、仮想的に設定した地震動を用いて解析的検討を行った。

また、放射性廃棄物処分施設の設計・施工を行う上で、地震動の設定や、空洞および処分施設の地震時の振動特性を把握することは重要であり、そのためには地下構造物の地震動観測が必要であると考えられる。これまで地下発電所、鉱山、トンネル等の地下構造物を対象とした地震動観測が多数実施されてきている[3][4][5]。独立行政法人防災科学技術研究所により整備・運用されている K-NET、KiK-net 等の地震観測網においても、全国各地の観測点で地震動を計測しており、蓄積された観測データは地震防災等の様々な実務や研究に使用されている。しかし、地下空洞型処分施設のような大深度かつ軟岩中における大規模地下空洞、さらに実規模の人工バリア施設を含めた地震動観測を実施した事例は報告されていない。そこで本検討は、人工バリアの地震時の振動特性を把握することを目的として、試験施設の3箇所地震計を設置して地震動観測を行い、観測データを用いた地震応答解析を実施した。

以下に、巨大地震が地下空洞型処分施設に与える影響に関する検討および地震動の観測と分析について示す。

3.2.2 巨大地震が地下空洞型処分施設に与える影響

3.2.2.1 検討概要

巨大地震が地下空洞型処分施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材に与える影響を把握するために、地震動レベルの異なる3つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度：250Gal、450Gal、900Gal）を用いて2次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。解析対象は、地下空洞型処分施設における廃棄体定置前や埋戻し直後等の図 3.2-1 に示すような4つの状態（以下、Phase と称す）とした。

上記解析により、ベントナイトを材料とする緩衝材とその周辺のセメント系部材（以下、周辺部材と称す）では剛性等が大きく異なるため、その界面を剛結条件（節点共有）とすると、地震時に緩衝材が周辺部材に引っ張られ、緩衝材に局所的に高い引張応力が発生することがわかった。そこで、よ

り現実的な境界を模擬するために緩衝材と周辺部材の界面に節点ジョイントを組み込み、剥離・すべりを考慮した場合の地震時影響を検討した。

また、緩衝材に修正 R-O モデルを適用した上記解析により、非常に大きな地震動が作用した場合には、緩衝材が局所的に塑性化する可能性があることがわかった。このため、緩衝材の弾塑性挙動を考慮した非線形地震応答解析を実施し、緩衝材の塑性化による緩衝材の層厚および透水性への影響を検討した。

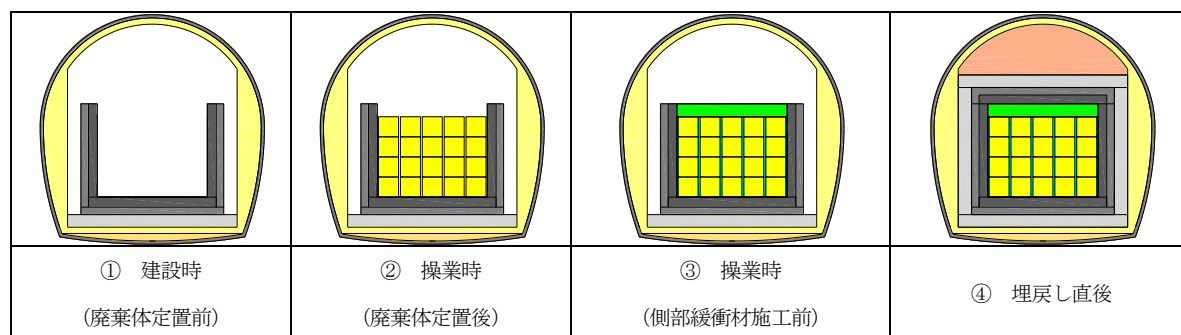


図 3.2-1 解析対象の施設状態

3.2.2.2 解析条件

1) 解析モデルおよび物性値

埋戻し直後の Phase における解析モデルを図 3.2-2 と図 3.2-3 に示す。地下空洞周辺の地質構造は、確証試験の実施箇所（試験空洞）近傍の地質構造[6]を参考に水平成層としてモデル化した。側方・底面の境界は、半無限地盤への波動の逸散を考慮するため、ダッシュポットを用いた粘性境界とした。地下空洞型処分施設の部材構成や寸法形状は、試験施設に準拠した。解析に用いた物性値は、確証試験時の試験結果および参考文献[7]に基づき設定した。なお、岩盤および緩衝材の動的物性のひずみ依存性には修正 R-O モデルを適用し、それ以外の構造物は弾性モデルとした。また、緩衝材と周辺部材の界面は剛結条件とした。

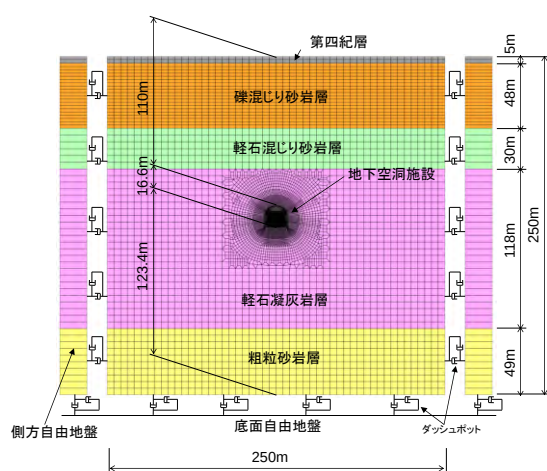


図 3.2-2 解析モデル(全体)

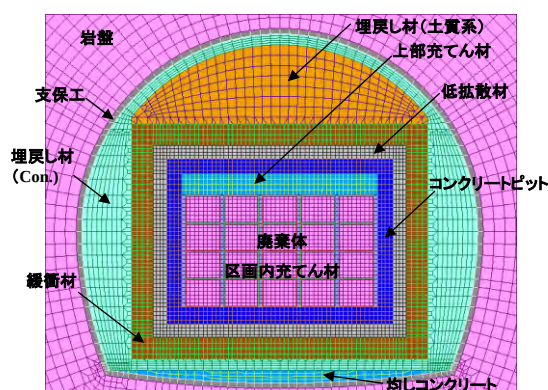


図 3.2-3 解析モデル(地下空洞型処分施設)

2) 検討に用いた地震動

本検討では、試験施設近傍で作成されている地震動[8]を参考として、解放基盤面（深度 53m）での水平方向最大加速度を 250Gal(Lv1)、450Gal(Lv2)、900Gal(Lv3)に振幅調整した 3 種類の地震動を用いた。Lv1 (図 3.2-4) は、空洞位置で水平方向最大加速度が 200Gal 程度になるように設定した。Lv2 と Lv3 は、地下空洞型処分施設の振動特性を検討するために、極端なケースとして、Lv2 では振幅が Lv1 の 2 倍程度、Lv3 では振幅が Lv2 の 2 倍に設定した。解放基盤表面（地震動の定義位置）は、軽石混じり砂岩層の上面とし、一次元重複反射理論に基づく応答解析により解析モデル下端に引戻した波を解析用入力地震動とした。また、鉛直方向地震動は水平方向と同じ波形で振幅を 2/3 とし、水平・鉛直同時加振とした。

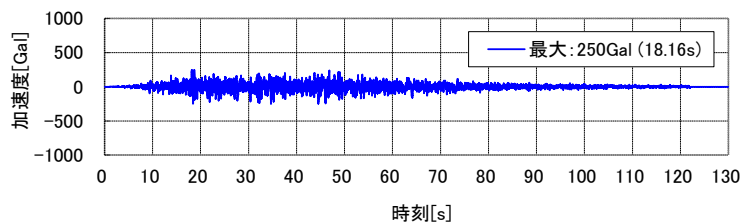


図 3.2-4 検討に用いた地震動の例(Lv1、水平方向)

3.2.2.3 解析結果の分析

地下空洞型処分施設の地震時全体挙動、人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材を対象とした地震時挙動の分析結果を述べる。ここでは、地震影響を受けやすい廃棄体定置前(Phase①)と埋戻し直後(Phase④)の分析結果を示す。

1) 地下空洞型処分施設の全体挙動

Phase①と Phase④の空洞全体の地震応答挙動の特徴（Lv2 の地震動を例とする）を図 3.2-5 に示す。Phase①、Phase④ともに、空洞自体は周辺岩盤と一体になって左右斜め方向に引伸ばされるモードで変形する。Phase①では支保工と埋戻し材（セメント系）は周辺岩盤と一体になって挙動しているのに対して、コンクリートピットと低拡散材は周辺岩盤とは異なる周期で振動する。一方、Phase④では、コンクリートピットと低拡散材も含め施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するようになる。

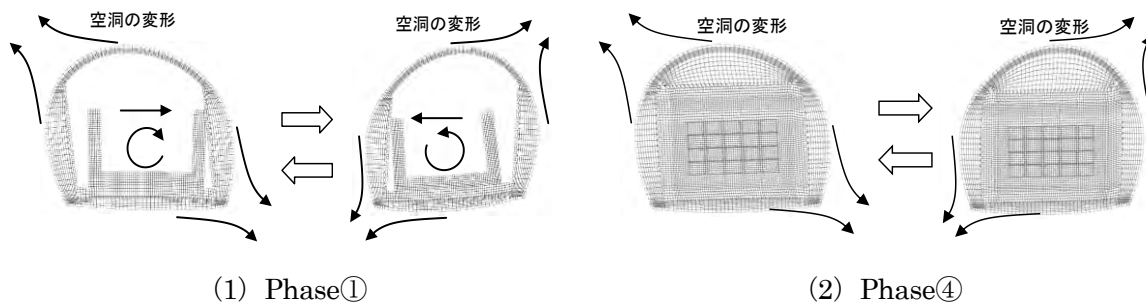


図 3.2-5 空洞全体の挙動 (Lv2、変位 200 倍)

2) コンクリートピットおよび低拡散材の地震時挙動

他の建設・作業段階と比べて地震影響を受けやすい Phase①の、コンクリートピットと低拡散材の引張強度に対する局所安全係数（引張強度／履歴最大引張応力）と地震動レベルとの関係を図 3.2-6 に示す。引張強度 f_{tk} は、コンクリートピットで 3.53MPa（設計基準強度 $f_{ck}=60\text{MPa}$ を $f_{tk}=0.23f_{ck}^{2/3}$ [9] により換算）、低拡散材で 4.68MPa（本確認試験の材料を用いた試験結果（91 日強度）に基づき設定）とした。発生引張応力が引張強度に達する地震動の解放基盤面での最大加速度は、コンクリートピットでは 500Gal 程度、低拡散材では 1000Gal 以上と推定される。なお、最小の局所安全係数が発生する部位はコンクリートピット、低拡散材ともに左側壁下端であった。地震動 Lv3 の場合には、コンクリートピット内側隅角部（図 3.2-6 中の緑色の○印部分）で $SF<1$ となるが、RC 断面照査の結果、ひび割れが発生した場合でも部材（鉄筋および圧縮縁のコンクリート）の耐力は十分であることを確認した。

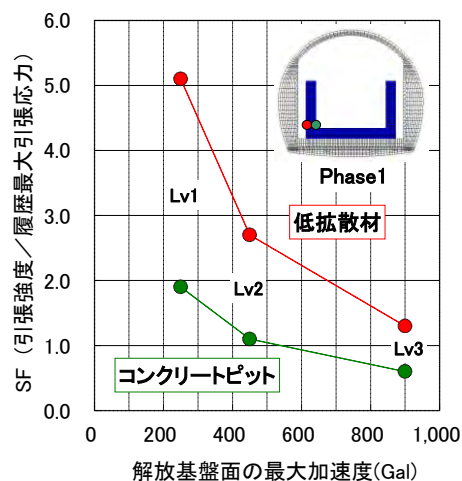


図 3.2-6 引張強度に対する安全係数と地震動レベルの関係（Phase①）

3) 緩衝材の地震時挙動

Phase①と Phase④の各地震動レベルにおける、緩衝材のせん断強度に対する局所安全係数の分布を図 3.2-7 に、最大主応力(引張側、履歴最大)分布を図 3.2-8 に示す。局所安全係数の算定には、Mohr-Coulomb の破壊規準を適用し、試験結果(UU 試験)より粘着力 $C=370\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=2.64$ 度とした。上述したように、空洞自体は左右斜め方向に引伸ばされるモードで変形するため、緩衝材は引伸ばされて、Phase①では底部緩衝材の左右端でせん断・引張応力が生じ易く、Phase④では施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するために、Phase①と比較して、せん断・引張応力が生じる領域が大きくなる。Phase①、Phase④ともに、地震動レベルが大きくなるほどその領域は広がる。

図 3.2-7～図 3.2-7 より、地震動レベルが Lv2 以上で緩衝材のせん断・引張応力の発生が顕著になることから、以降では Lv2 の地震動を用いて緩衝材の詳細検討を実施した。

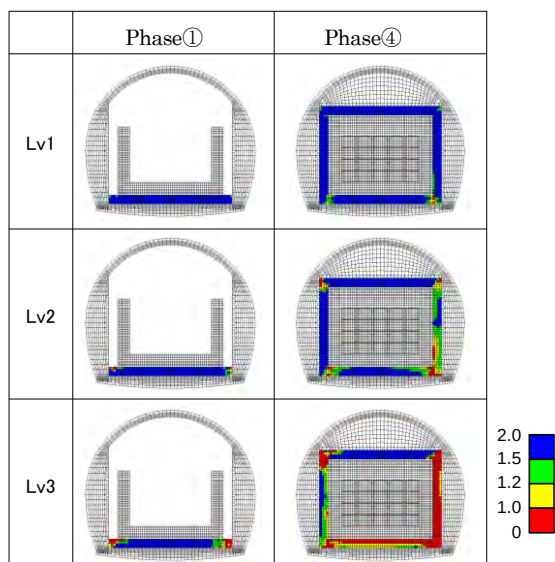


図 3.2-7 せん断強度に対する局所安全係数
SF(履歴最小)

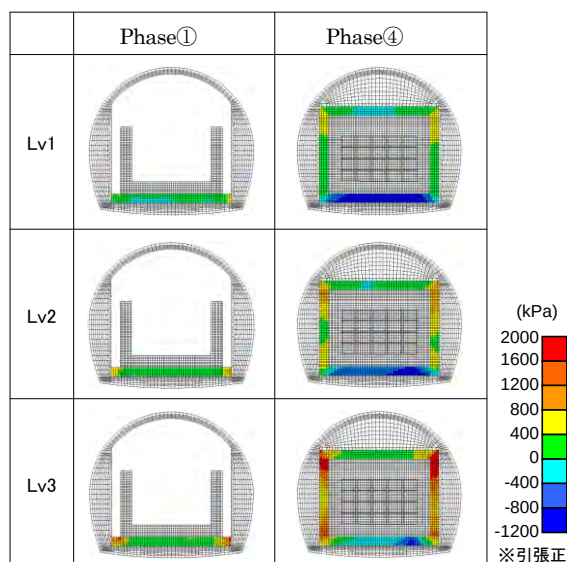


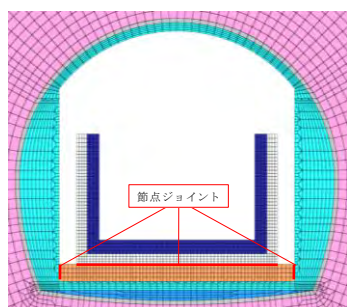
図 3.2-8 最大主応力(引張側、履歴最大)

4) 緩衝材の詳細検討

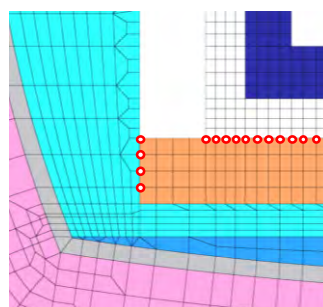
a. 緩衝材の剥離・すべりの影響

上記の解析では、緩衝材とその周辺部材の界面の剥離・すべりを考慮していないため(剛結条件)、地震時に緩衝材が周辺部材に引っ張られ、緩衝材に局所的に高い引張応力が発生することがわかった。剥離・すべりの知見としては、地中構造物の地盤—構造物間では、照査に用いる地震動の種類、地盤および構造物のせん断剛性の大小関係等により、境界面において剥離・すべり等の複雑な現象が生じることがあり、構造物全体の応答に影響を及ぼすことが知られている[10]。本検討でも、緩衝材と周辺部材の剛性等が大きく異なるため、界面で剥離・すべりが発生すると考えられ、それを考慮していない解析では、緩衝材の引張応力を過大に評価する可能性がある。

そこで、図 3.2-9 と図 3.2-10 に示すように緩衝材と周辺部材の界面に節点ジョイントを組み込み、剥離・すべりの考慮の有無による解析結果の比較・分析を行った。剥離およびすべりは、それぞれ軸方向およびせん断方向の剛性を低下させることにより考慮した。



(1) 全体



(2) 拡大

図 3.2-9 節点ジョイント設置箇所 (Phase①)

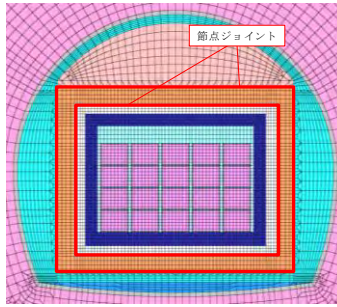


図 3.2-10 節点ジョイント設置箇所 (Phase④)

緩衝材のせん断強度に対する局所安全係数 SF (履歴最小)分布を図 3.2-11 に、最大主応力(引張側、履歴最大)分布を図 3.2-12 に、それぞれ緩衝材と周辺部材の界面を剛結とした場合(ジョイントなし)と、界面での剥離・すべりをジョイント要素により考慮した場合を比較して示す。界面の剥離・すべりを考慮することにより、図 3.2-12 に示すように引張応力が発生する領域は狭くなるが、剥離が生じることにより、左右反対側の剥離が生じていない箇所の緩衝材の圧縮応力が増加するため、図 3.2-11 に示すようにジョイントなしの場合と比較してせん断強度に対する局所安全係数が 1 以下となる領域が増加した。

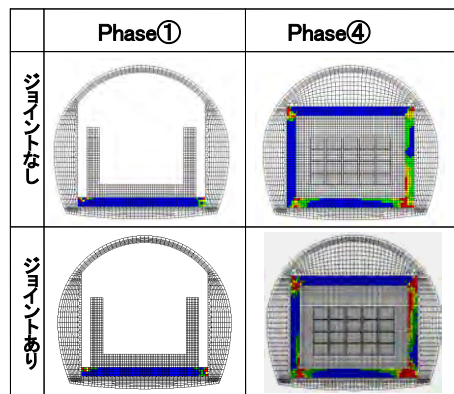


図 3.2-11 せん断強度に対する局所安全係数 SF (Lv2、履歴最小)

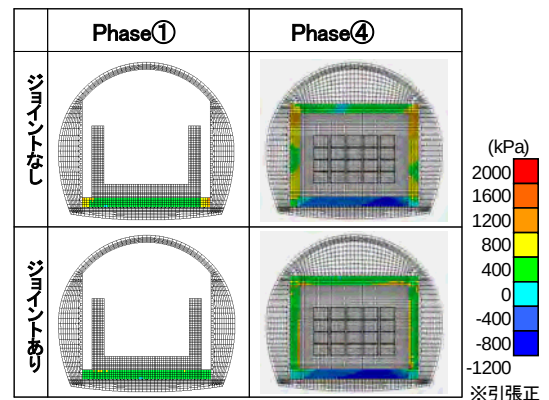


図 3.2-12 最大主応力(Lv2、引張側、履歴最大)

b. 緩衝材の弾塑性挙動の影響

上記の解析結果から、地震力の大きさによっては、緩衝材が局所的にせん断強度を超過し塑性変形が大きくなる可能性があることが示された。しかし、上記の解析では、緩衝材を弾性体(修正 R-O モデル)としてモデル化しているため、緩衝材の弾塑性的な挙動を評価することができない。実現象では、地震時に緩衝材が塑性化すると、蓄積によるひずみ・変形量の増加および応力再配分による塑性化領域の進展により、地震後の緩衝材の層厚や透水性等の性能に影響を与える可能性がある。

そこで、緩衝材の弾塑性挙動を考慮した非線形地震応答解析を実施した。緩衝材の塑性化後の挙動を把握するため、緩衝材に適用している修正 R-O モデルを改良し、Mohr-Coulomb の破壊基準により応力を再配分して弾塑性挙動を考慮できるモデルを導入した。緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの関係のイメージを図 3.2-13 に示す。

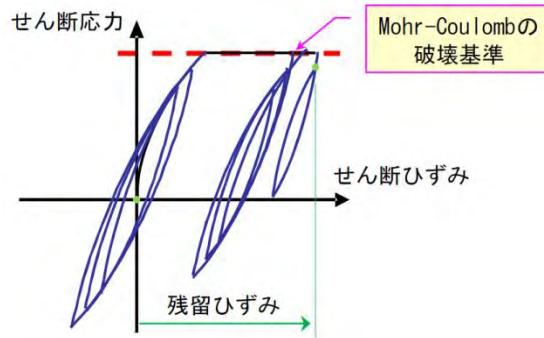


図 3.2-13 緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの関係のイメージ

本検討は、図 3.2-11 に示すように緩衝材の全領域に対して、せん断強度に対する局所安全係数が 1 以下となる領域の割合が大きい Phase④で実施した。Phase④における底部緩衝材中央の上下面間の水平方向相対変位が最大となった時刻 (46.14s) の施設変形状を図 3.2-14 に示す。周辺岩盤のせん断変形の影響を受けて、空洞全体が右方向にせん断変形しており、右側の側部緩衝材の上部は大きく変形して、周辺部材との間で剥離が生じていることがわかる。右下隅角部の緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線を図 3.2-15 に示す。応力状態が Mohr-Coulomb の破壊基準に達して塑性化した際に、せん断応力の変化に比べてせん断ひずみが大きく変化しており、その後修正 R-O モデルの履歴ループがもとの位置から大きくずれている様子が確認できる。

緩衝材の塑性化の発生進展状況を図 3.2-16 に示す。塑性化の領域が、徐々に広がっていく様子が確認できる。解析終了時の緩衝材の塑性化の状況を図 3.2-17 に、比較のため緩衝材の塑性化を考慮しない弾性解析結果から評価した緩衝材の破壊基準に対する局所安全係数の履歴最小値の分布を図 3.2-18 に示す。本解析で塑性化した領域は、弾性解析で局所安全係数の履歴最小値が 1.0 以下の領域よりも大きく拡大しており、これは塑性化の進行に伴う応力再配分の影響と考えられる。一方で、弾性解析で右側部の上部内側や左下隅角部で局所安全係数が 1.0 以下であった領域では塑性化しておらず、弾塑性挙動の考慮の有無で異なる評価が得られる結果となった。

解析終了時の状態から、地震後の緩衝材の着目位置における厚さ方向の残留変化量を図 3.2-19 に示す。緩衝材の地震時変化量は最大で 0.49mm (縮まる方向) であり、もとの緩衝材の厚さ 1000mm に対して非常に小さい。

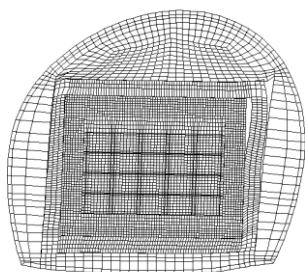


図 3.2-14 施設の変形状 (Lv2, 46.14s、
変位 200 倍)

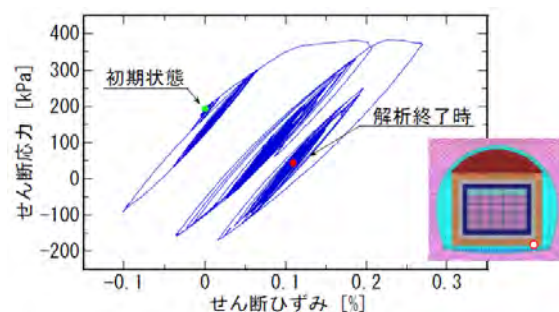


図 3.2-15 緩衝材のせん断応力とせん断ひずみの
履歴曲線

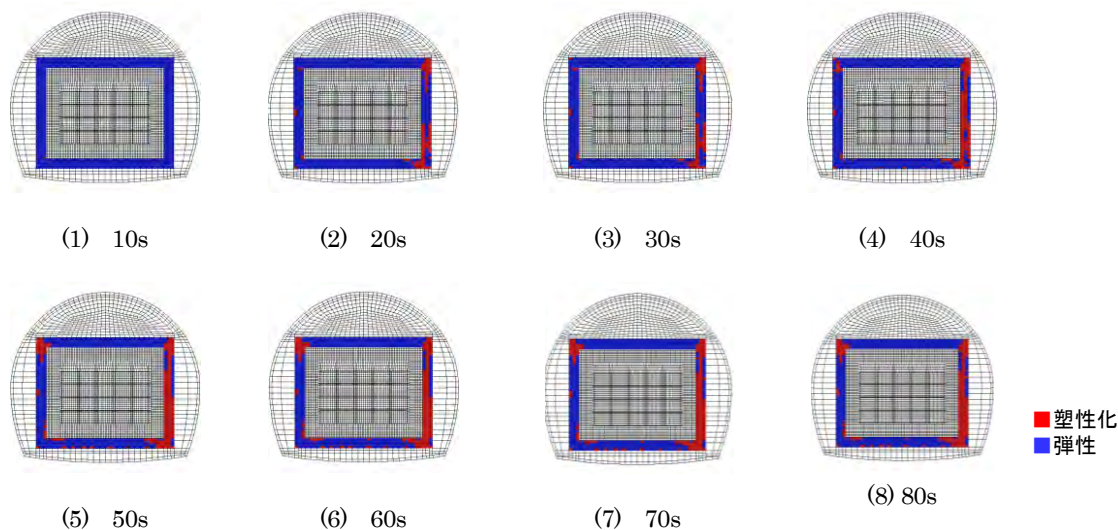


図 3.1-16 緩衝材の塑性化状況 (Lv2)

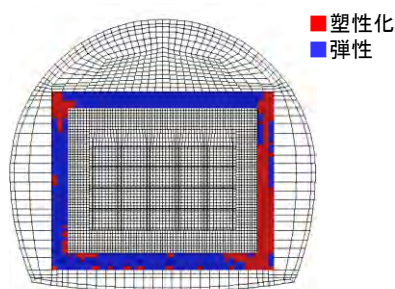


図 3.1-17 緩衝材の塑性化状況 (Lv2、
解析終了時:130s)

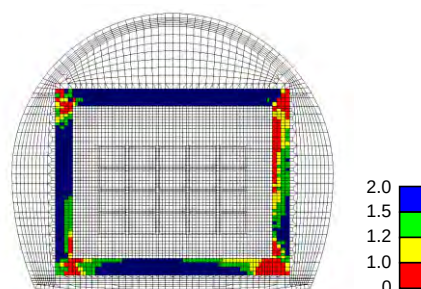


図 3.1-18 弾性解析結果から評価した緩衝材
の局所安全係数 SF(Lv2、履歴最小)

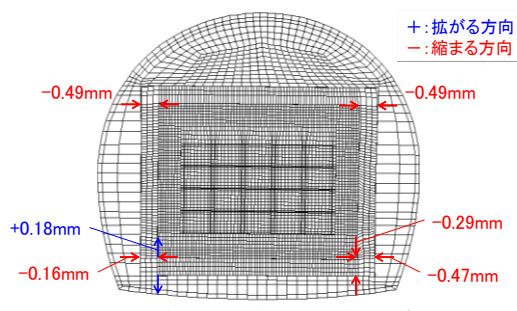


図 3.1-19 緩衝材の厚さの残留変位 (Lv2、解析終了時、変位 200 倍)

緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）にともない、透水性が変化する可能性が考えられる。ここでは、緩衝材を連続体としてモデル化し、緩衝材の塑性化に伴う透水性に及ぼす影響を把握するため、解析で得られた体積ひずみ増分から湿潤密度を、また、湿潤密度と含水比 21%（確証試験の施工管理目標値）より、地震前と地震後の乾燥密度を求め、図 3.2-20 に示す透水係数と有効粘土密度（乾燥密度）の関係を用いて、緩衝材の透水係数変化について検討した。なお、基準となる透水係数は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 （確証試験の施工管理目標値）のときの透水係数とした。

図 3.2-21 に示すように、地震後(解析終了時)の緩衝材の体積ひずみ増分は最大で $1.936 \times 10^{-2}(\%)$ 、透水係数の増分に換算すると 0.131%であり、塑性化後の緩衝材が透水性に与える影響は小さいことが確認できた。なお、本検討で対象としている埋戻し直後の状態(不飽和状態)の緩衝材では、せん断による低密度帯は生じにくく[11]、仮にせん断帯や隙間が存在しても、飽和状態になれば透水性に与える影響は小さくなるため[12]、せん断帯の発生・進展の透水性への影響は小さいと考えられる。

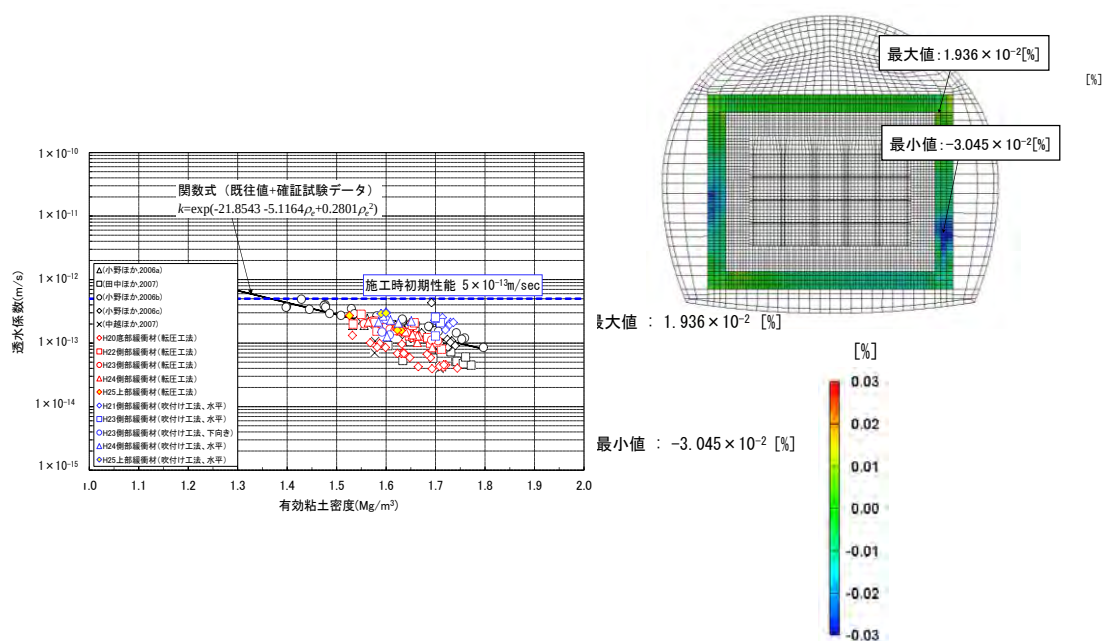


図 3.1-20 透水係数と有効粘土密度(乾燥密度)の関係(図 2.1-15 の再掲) 図 3.1-21 緩衝材の体積ひずみ増分(Lv2、解析終了時)

3.2.3 地震動の観測と分析

3.2.3.1 検討概要

試験施設の3箇所に地震計を設置して地震動観測を行った。また、観測データを用いて、試験施設を対象とした地震応答解析を実施し、観測データと解析結果の比較により試験施設の地震時の振動特性を分析した。

3.2.3.2 観測地震動

地震計は計3台(地震計①～③と称す)とし、図 3.2-22 に示すように地震計①は試験施設から比較的離れた底盤上、地震計②は底部コンクリートピット上、地震計③は手前部コンクリートピット上にそれぞれ設置した。地震計①は、地震応答解析の入力地震動作成用のデータとするため、地震時の試験施設の影響が小さい位置に設置する必要がある。そのため、試験施設から比較的離れた底盤上を選定した。地震計②は、底部緩衝材の地震時影響を分析評価するために底部コンクリートピット上を選定した。地震計③は、試験施設全体の地震時影響を分析評価するために、試験施設の中で高位置と

なる手前部コンクリートピット上を選定した。各地震計の計測方向は、空洞軸方向を x 方向、空洞横断方向を y 方向、鉛直方向を z 方向とした。

地震計の仕様を表 3.2-1、回収データの仕様を表 3.2-2 に示す。トリガ条件は、表 3.2-2 に示すように、マスタとするセンサ（地震計①）で、x、y、z 方向のいずれかが 1Gal 以上を観測した場合とした。地震動計測を開始した平成 25 年 10 月 23 日から平成 26 年 12 月 11 日までに観測された地震動一覧を、気象庁発表の六ヶ所村尾駈観測点における情報[13]とともに表 3.2-3 に示す。また、各観測地震動の最大加速度と計測高さ（地震計①を基準）の関係を図 3.2-23 に示す。平成 26 年 8 月 10 日に観測された地震動で加速度が最も大きく、地震計①の x 方向で最大加速度は 12.5Gal であった。また図 3.2-23 より、ほぼ全ての観測地震動で水平方向の加速度が大きくなり、また、計測位置が高くなるほど最大加速度がわずかに増幅する傾向が認められる。

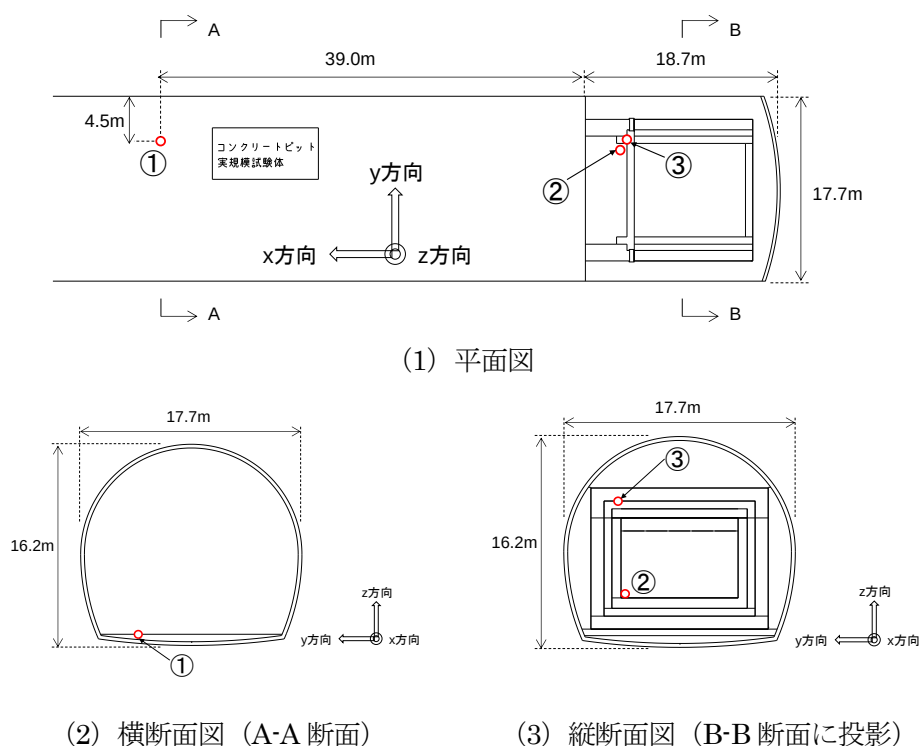


図 3.2-22 地震計設置位置

表 3.2-1 地震計の仕様

名称	仕 様	機 種
加速度センサ	計 測 範 囲 : $\pm 1.5\text{G}$ 周 波 数 応 答 : $0.1 \sim 50\text{Hz}$ 分 解 能 : X、Y 軸 : 0.02Gal Z 軸 : 0.07Gal サンプリグ周波数 : 200Hz 送 信 周 波 数 : 0.5sec 使 用 条 件 : 周囲温度 : $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 周囲湿度 : $95\%\text{RH}$ 以下 外 形 寸 法 : $113 \times 90 \times 60\text{mm}$	富士電機(株)製 MEMS 応用感振センサ CPUKSNSP-00 (防水・防塵型)

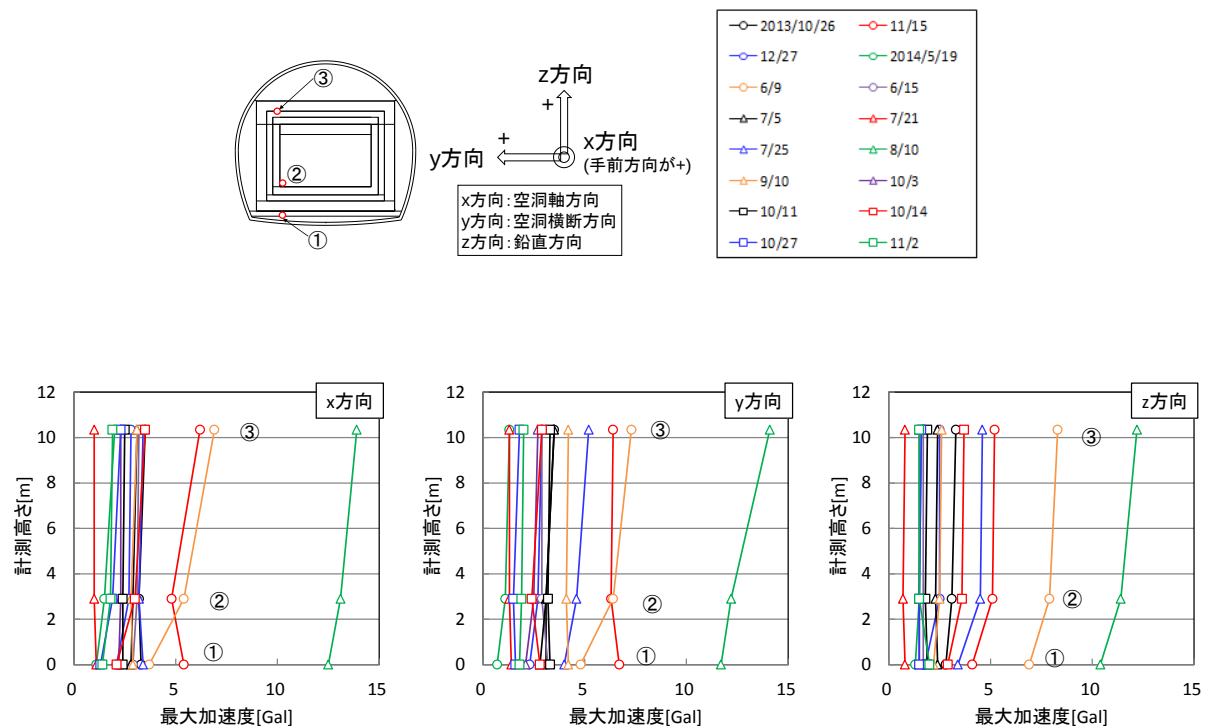
表 3.2-2 回収データの仕様

項目	仕 様
トリガ条件	マスタとするセンサ（地震計①）で、xyz のいずれかが 1Gal 以上
トリガ引き伸ばし時間	地震検知時間幅 10 秒
プレトリガ時間	トリガ検知前の収集時間 10 秒
ポストトリガ時間	地震収束判断時間 60 秒
サンプリング周波数	200Hz（1 秒間に 200 データを取得）
出力形式	データ変換後、CSV ファイル形式 1 列目に取得時刻、2～4 列目に XYZ の加速度データ（Gal）

表 3.2-3 観測地震動一覧

発生日	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村尾駁)	震度 (六ヶ所村尾駁)
2013/10/26	福島県沖	M7.1	56km	505km	2
2013/11/15	青森県東方沖	M5.3	63km	102km	2
2013/12/27	岩手県沖	M5.0	38km	122km	2
2014/5/19	青森県東方沖	M4.2	57km	79km	1
2014/6/9	青森県東方沖	M4.6	82km	85km	2
2014/6/15	岩手県内陸南部	M5.5	94km	199km	2
2014/7/5	岩手県沖	M5.9	49km	164km	2
2014/7/21	択捉島南東沖	M6.4	30km	733km	1
2014/7/25	青森県東方沖	M4.9	66km	110km	2
2014/8/10	青森県東方沖	M6.1	51km	94km	3
2014/9/10	岩手県沖	M4.9	67km	124km	1
2014/10/3	岩手県沖	M5.7	28km	142km	2
2014/10/11	青森県東方沖	M6.1	36km	162km	2
2014/10/14	青森県東方沖	M4.4	81km	87km	1
2014/10/27	青森県東方沖	M4.3	92km	111km	1
2014/11/2	青森県東方沖	M4.0	106km	118km	1

※地震観測のトリガ条件：マスタとするセンサ（地震計①）で、xyz 方向のいずれかが 1Gal 以上



※計測高さは、地震計①の高さを基準とした。

図 3.2-23 観測地震動の最大加速度と計測高さの関係（左から x、y、z 方向）

3.2.3.3 解析条件

解析モデル（地震動観測時点の試験施設を２次元モデル化）を図 3.2-24 と図 3.2-25 に示す。解析物性値は「2.6.2.2 巨大地震が地下空洞型処分施設に与える影響」と同様とした。コンクリートピット内の模擬廃棄体と区画内充てん材は、両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、その物性は区画内充てん材で代表させることとした。

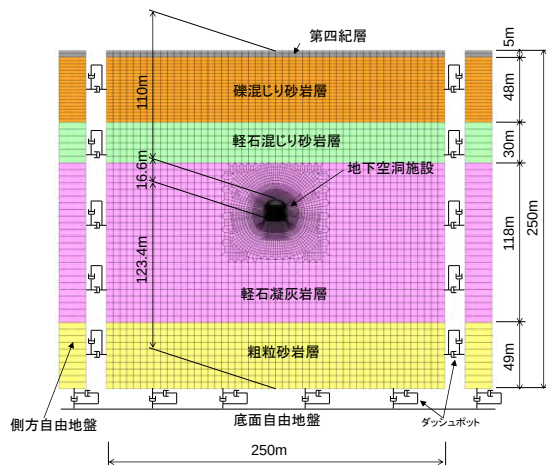


図 3.2-24 解析モデル（全体）

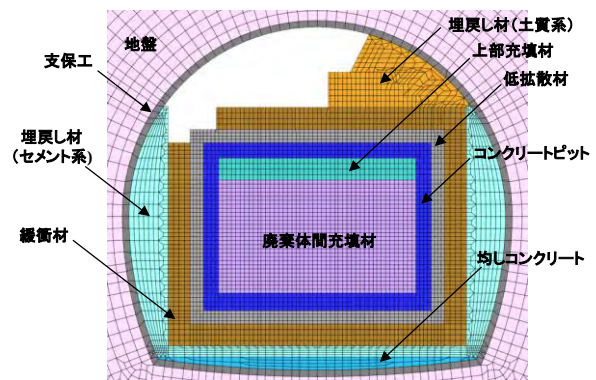


図 3.2-25 解析モデル（試験空洞周辺）

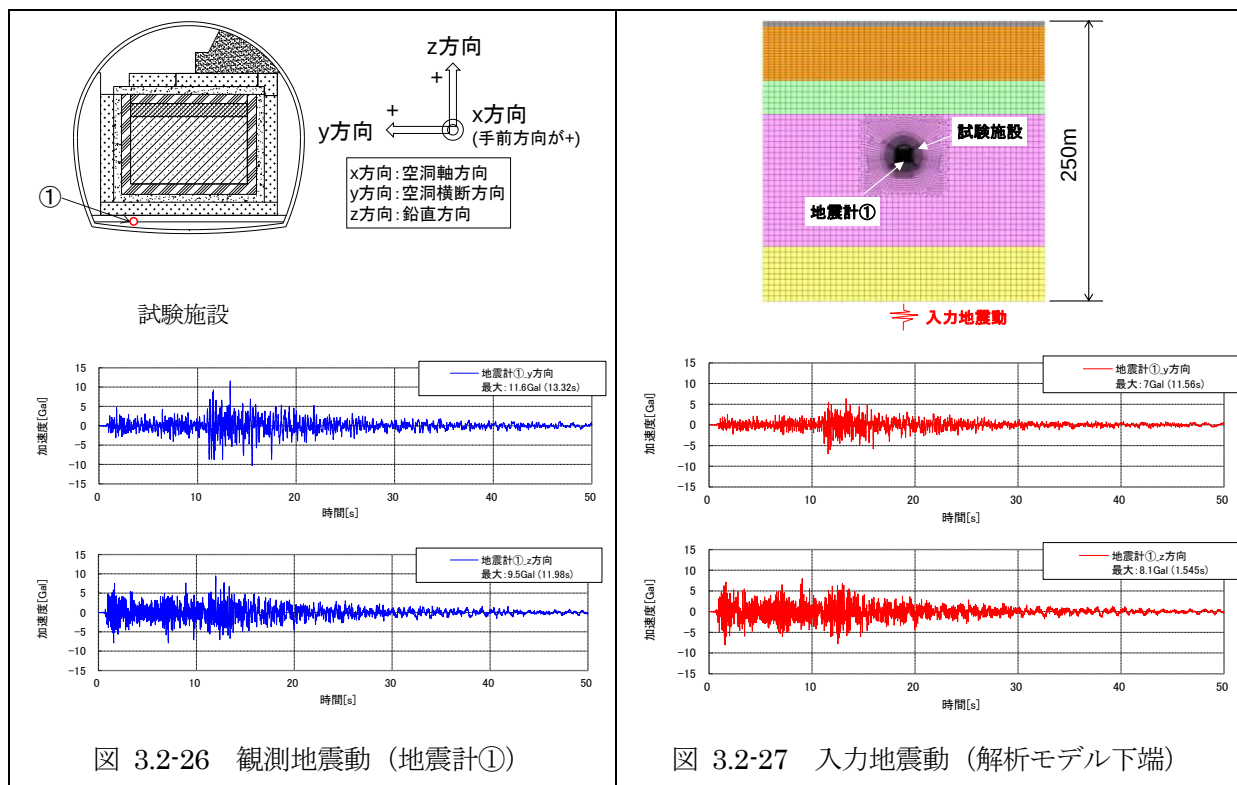
解析に用いた地震動は、地震計①での観測データ中、最も加速度とフーリエスペクトルが大きく、試験施設の固有振動数と推察される 15Hz 以上の成分を多く含んでいる、平成 26 年 8 月 10 日に観測された地震動（図 3.2-26）とした。なお、解析モデルは空洞横断面の 2 次元モデルであるため、解析には y 方向および z 方向の観測地震動を使用した。

地震計①の観測地震動を、一次元重複反射理論に基づく解析（SHAKE）を用いて、地震計①の設置位置から図 3.2-24 の解析モデル下端(深度 250m)まで引戻して入力地震動を作成した（図 3.2-27）。なお、高振動数成分を含む地震動を引戻した場合、高振動数成分が卓越した非現実的な加速度波形になる可能性があるため、地震動観測データに対して 20Hz 以上の高振動成分のフィルタ処理を行い、引戻し解析を実施した。図 3.2-27 に示すように、入力地震動は十数 Gal と小さいため、緩衝材と周辺部材との剥離・すべりおよび緩衝材の弾塑性挙動は考慮していない。

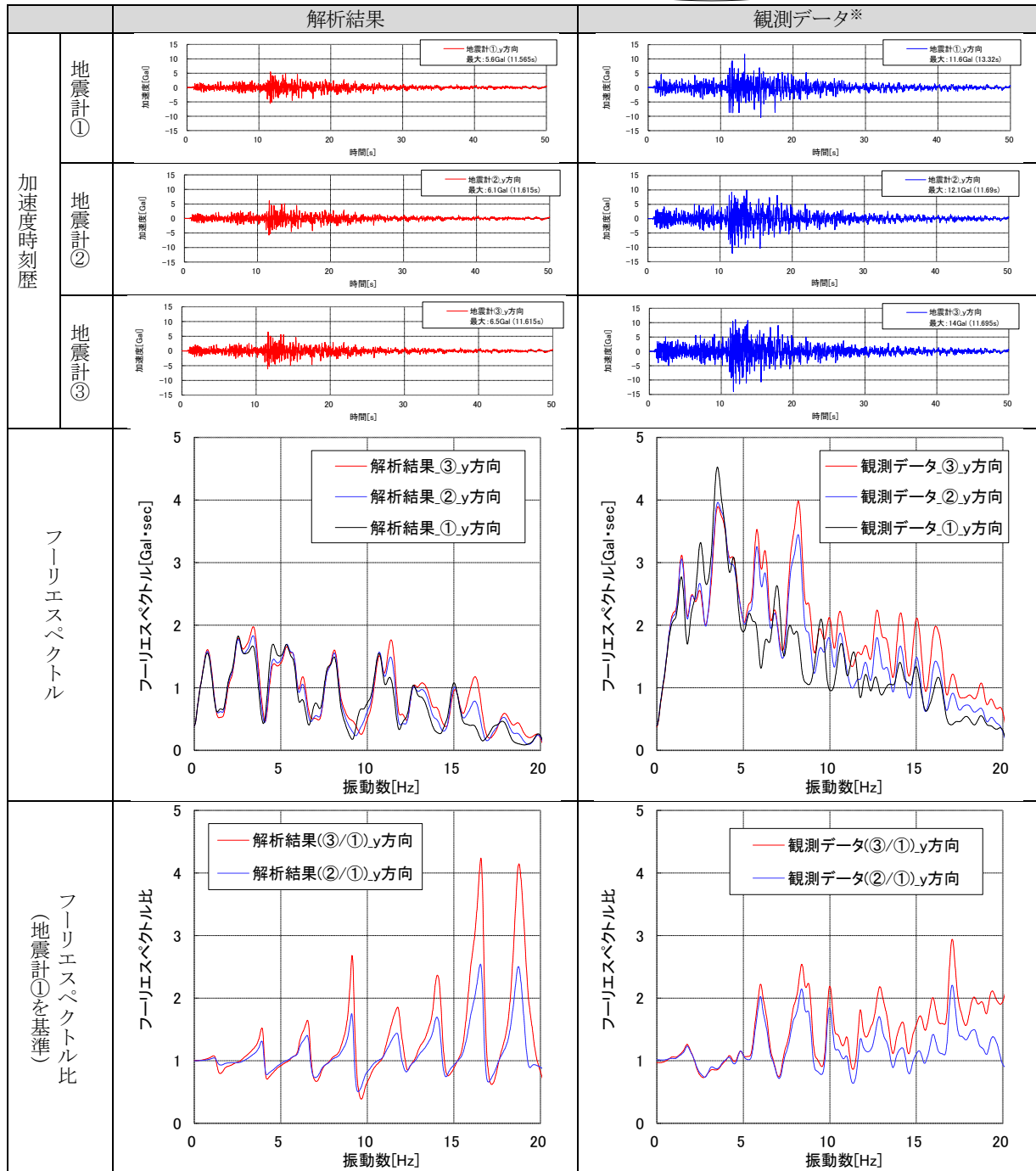
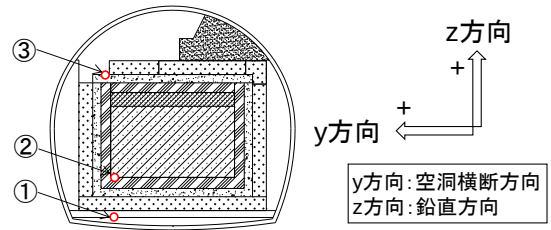
3.2.3.4 解析結果の分析

地震計①～③位置の解析結果と観測データの比較（y 方向の加速度時刻歴、フーリエスペクトル、地震計①を基準としたフーリエスペクトル比）を図 3.2-28 に示す。

地震計①～③位置ともに、最大加速度およびフーリエスペクトルの解析結果が観測データよりも全体的に小さくなる。いっぽう、フーリエスペクトル比を比較すると、地震計①②③位置の順にフーリエスペクトル比が大きくなり増幅していること、また振動数が大きくなるほどフーリエスペクトル比が大きくなり 15～20Hz の振動数でピークとなる傾向は、解析結果と観測データで類似している。以上より、解析結果と観測データを比較すると、加速度時刻歴およびフーリエスペクトルは乖離するが、フーリエスペクトル比は類似しており、本解析モデルが試験施設の振動特性を反映しているものと考えられる。



※上から y、z 方向



※20Hz以上の高振動成分のフィルタ処理を実施している。

図 3.2-28 解析結果と観測データの比較 (y 方向)

3.2.4 まとめ

(1) 巨大地震が地下空洞型処分施設に与える影響

巨大地震が地下空洞型処分施設の全体挙動や人工バリア部材であるコンクリートピット・低拡散材および緩衝材に与える影響を把握するために、地震動レベルの異なる3つの地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度がLv1では250Gal、Lv2では450Gal、Lv3では900Gal）を用いて2次元有限要素法(FEM)による地震応答解析を行った。検討成果および今後の課題を以下に示す。

- セメント系部材（コンクリートピット、低拡散材）は、Lv3の大きな地震動に対しても、部材（鉄筋および圧縮縁のコンクリート）の耐力は十分であることより、力学安定性は非常に高いものであるという結果が得られた。
- 緩衝材は、廃棄体定置前(Phase①)では底部緩衝材の左右端でせん断・引張応力が生じ易く、埋戻し直後(Phase④)では施設全体が周辺岩盤と一体になって挙動するために、Phase①と比較して、せん断・引張応力が生じる領域が大きくなる。Phase①、Phase②ともに、地震動レベルが大きくなるほどせん断・引張応力が生じる領域は広がり、地震動レベルがLv2以上でその発生が顕著になることがわかった。そこで、Lv2の地震動を用いて緩衝材の詳細検討を実施した。
- 緩衝材の詳細検討として、緩衝材と周辺部材との剥離・すべりおよび緩衝材の弾塑性挙動を考慮できるモデルを導入し、緩衝材が塑性化する領域や塑性化後の挙動（塑性ひずみ等）を把握した。その結果、解析終了時の緩衝材の厚さ方向の残留変化量は最大で0.49mmであり、もとの緩衝材の厚さ（1000mm）に対して非常に小さいことがわかった。
- 緩衝材が塑性化すると、塑性ひずみの発生（連続体挙動）やせん断帯の発生・進展（不連続体挙動）にともない、透水性が変化する可能性が考えられるため、解析結果および既往試験結果に基づいて、地震時の透水性の変化についての分析を行った。解析結果の分析から、連続体挙動の範囲では、地震の影響による緩衝材の透水係数の増加は最大でも0.131%であり、透水性に及ぼす影響は小さいことがわかった。
- 今後の課題として、緩衝材と周辺部材との境界の力学特性に関する知見が少ないことから、今後は現地採取試料等を用いて、緩衝材と周辺部材との境界の引張強度、せん断強度を求める試験を実施することが望まれる。

(2) 地震動の観測と分析

試験施設に地震計を設置し、平成25年10月～平成26年12月の期間で16波の観測地震動を取得した。また、観測データを用いた地震応答解析結果を実施し、試験施設の地震時挙動を把握した。検討成果および今後の課題を以下に示す。

- 軟岩中における大規模地下空洞および実規模大の試験施設の地震動観測を実施した事例は少なく、地震動観測データは、今後の地下空洞型処分施設の地震影響検討において有用なものと考えられる。
- 周辺岩盤の固有振動数（数Hz）と比較して、試験施設の固有振動数が15～20Hzと大きいことを、地震動観測データおよび地震応答解析結果より確認し、試験施設の地震時振動特性を把握できた。

- 今後の課題として、解析用入力地震動の精度を高めるためには、地盤構造の十分な調査と地震観測が望まれる。

3 章 参考文献

- [1] 朝倉俊弘他：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659，Ⅲ-52，27-38，2000.9.
- [2] 原子力発電環境整備機構：操業期間中における地層処分施設の地震時空洞安定性に係る検討，2014 年 6 月.
- [3] 駒田広也他：地下発電所空洞における地震観測，土木学会論文報告集，第 309 号，1981.5.
- [4] 社団法人日本鉱業会：地震に関する調査報告，1985 年 4 月.
- [5] 浜田政則他：岩盤空洞の地震時挙動観測と考察，土木学会論文報告集，第 341 号，1984.1.
- [6] 富田敦紀他：余裕深度処分埋設施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動，電力土木，No.325，2006.9.
- [7] 日本原燃株式会社：再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告 コメント回答（基礎地盤の安定性），2010.5.
- [8] 原子力安全・保安院：日本原燃株式会社再処理施設及び特定廃棄物管理施設の「耐震設計審査指針」等に照らした耐震安全性評価の確認結果について，平成 21 年 6 月.
- [9] 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，平成 20 年 3 月.
- [10] 土木学会 原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005 年 6 月.
- [11] 小高猛司他：圧縮ベントナイト緩衝材のせん断破壊時の性能評価，地盤工学ジャーナル Vol.5，No.2，pp.207-218，2010.
- [12] 中越章雄他：ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討（その 2）－透水性に関する検討－，土木学会第 62 回年次学術講演会，2007.
- [13] 気象庁：気象統計情報 震度データベース検索
(http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html)

あとがき

平成 17 年度から平成 24 年度までは資源エネルギー庁の委託事業として「地下空洞型処分施設性能確証試験」が、平成 25 年度から平成 26 年度までは「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」が実施された。

本確証試験は、大断面の地下空洞において具体的な処分施設を模擬した我が国初の実規模の施工に関する試験となる。このため、試験の実施にあたっては、余裕深度処分の施設の設計・施工検討に係りてきた有識者や専門家からなる委員会を設け、幅広く関連する知見や意見等を取り入れて検討した。

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

平成 18 年度：詳細設計・詳細な試験計画策定

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

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

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

平成 22 年度：充填材（残部）、側部緩衝材（一部）の施工確認試験等

平成 23 年度：側部緩衝材（一部）の施工確認試験等

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

平成 25 年度：側部緩衝材（隅角部）、上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）
の施工確認試験等

平成 26 年度：上部緩衝材（一部）、上部埋戻し材（一部）の施工確認試験等

平成 17 年度から実施されたこれら一連の施工確認試験等において、地下空洞型処分施設としての主要な構造部材の施工方法の確認とその初期性能を確認することができた。

すなわち、本確証試験で用いた施工機械や施工時の計画・管理手法等は、特殊な機械・手法ではなく、従前の土木技術を適用することで地下空洞型処分施設の施工が可能であり、かつ、各人工バリア部材に求められる品質を確保できることを確認した。また、本確証試験から、地下空洞内での施工に関する貴重なデータを得ることができた。

また、施設や周辺岩盤の挙動計測および地震観測を実施し、構築過程における地下空洞型施設の相互影響や、地震が地下空洞型施設に与える影響について検討した。

本確証試験で得られた成果は、低レベル放射性廃棄物等の余裕深度処分へ反映される。また、地下空洞型処分施設の埋戻し材等の処分施設の閉鎖に係わる部材の施工技術・施工方法の確立、および構築した部材の構築直後における性能確認等の技術開発の成果は、高レベル放射性廃棄物等の地層処分にも幅広く反映・共有が相互にできるものと考えられる。