

論文 移動式バケットを利用した充填材施工法の開発と品質評価

木ノ村 幸士*1・廻田 貴志*2・宮原 茂禎*3・武田 均*4

要旨： 余裕深度処分施設に適用する充填材の特殊条件下での施工を実現するため、移動式バケットによる遠隔施工装置を新たに開発し、実際の施工形態を想定した施工性確認試験を実施した。本試験において、流動性に優れた充填材の使用と移動式バケットによる施工法を組み合わせることにより、締固め不要で平坦性確保に優れた遠隔連続施工が可能であることを実証した。また、打設した充填材の硬化後品質について、ひび割れ観察、表面透気試験、圧縮強度試験等を実施し評価を行った。その結果、一部に内部拘束に起因すると思われるひび割れの発生が確認されたが、一般部の透気性、圧縮強度は場所によらず高品質な結果を示した。

キーワード： 余裕深度処分, 充填材, 移動式バケット, 遠隔施工, 平坦性, 表面透気試験

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物のうち放射能濃度が比較的高いものを埋設する余裕深度処分施設は、**図-1**のように処分空洞を帯状に配置し、内部に多重の人工バリアを構築して放射性廃棄物を埋設処分する施設である^{1),2)}。本研究で対象とするピット内充填材（充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリート）の充填作業は、定置後の廃棄体が曝露した状態での作業となるため、処分空洞両端部を遮蔽扉で隔離し、内部は完全無人化施工とする必要がある。

ここで、従来のポンプ圧送による施工とした場合、空洞端部からの長距離圧送による配管閉塞リスクや、狭隘な空間内での配管配置上の制約に起因して、多点打設による充填が困難であるなどの問題が懸念される。また、実規模模擬施設を利用したポンプ圧送による充填材の一点打設試験も既に実施されているが、仕上げ作業なしの無人化施工では出来形の平坦性確保が困難であり、施工法の見直しが必要であるとの見解が示されている³⁾。

そこで、本研究では、上記特殊条件下における充填材の施工を実現するため、移動式バケットによる遠隔施工装置を新たに開発し、流動性に優れた充填材を併用することにより、無人で確実な充填と出来形の平坦性の確保が可能な新たな施工技術の実現を目指し、検討を行った。

2. 施工性確認試験

2.1 試験装置

新たに開発した施工装置を**図-2**に示す。バケット容量は $2.0\text{m}^3 \times 2$ 基とし、所定の位置までレール上を電動走行した後、充填材を打設する。バケット位置はレール横断方向に対し固定である。また、平坦仕上げについては、装置本体から吊下げたパイプレータ装備のフィニッシャーを用いて無人で均し作業を行うことが可能である。

同装置を用いた施工は、長距離ポンプ圧送時の配管閉塞リスクを排除できる上、打設位置・打設点数・打設順序を遠隔操作で自由に変更できることから、施工環境の変化や材料の品質変動に対し施工時に柔軟に対処できる点で、実施工に適用しやすい工法として期待できる。

2.2 試験ヤード

試験ヤードの平面図を**図-3**に示す。試験面は、充填モルタル3面（B, D, E面）と上部遮蔽コンクリート2面（A, C面）である。充填モルタル試験面の廃棄体の大きさ（ $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ ）および廃棄体間隔は、実施工の操業時を模擬して設定した。なお、B面では、充填モルタルと上部遮蔽コンクリートの打ち継ぎ性状を確認するため、下部から約30cmの高さまで充填モルタルを打設した後、3週間後に上部遮蔽コンクリートを打ち継いだ。

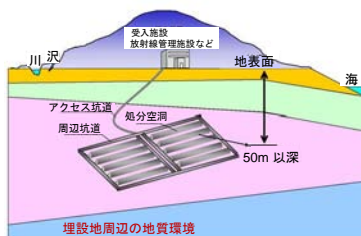


図-1 余裕深度処分施設の概要

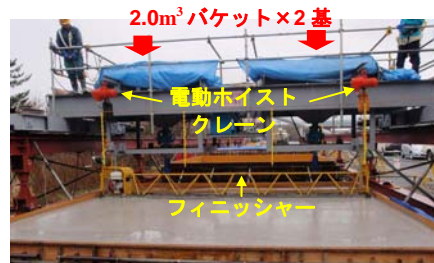


図-2 移動式バケット施工装置

*1 大成建設（株） 原子力本部 原子力技術第三部 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 東京支店 土木部技術部技術室（非会員）

*3 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所 土木構工法研究室 工修（正会員）

*4 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所 土木構工法研究室 工博（正会員）

2.3 配合および使用材料

充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの配合を表-1に示す。なお、充填モルタルの配合は、発熱廃棄体間の充填を想定して開発した、高温環境下でも高い流動性保持性能を有する配合⁴⁾をベースに微修正したものである。使用材料は文献³⁾に記載された通りである。

2.4 試験条件

(1) 打設手順

打設手順を以下に示す。①起点位置にコンクリートポンプ車を据える。②ポンプ車にて移動式バケット内に充填材を順に積み込む。③電動操作により施工装置を所定の位置に移動する。④電動操作によりバケット下部の開閉バルブを開き、打設する。⑤同バルブを閉じる。⑥③～⑤)を必要回数繰り返す。⑦施工装置を起点位置に戻す。⑧再度ポンプ車にてバケット内へ充填材を積み込む。⑨以下、所定量を打設するまで同作業を繰り返す。

なお、上部遮蔽コンクリートを打設する場合には、⑩打設完了後、フィニッシャーを用いて平坦仕上げを行う。

(2) 打設速度

実施工作業時の打設想定速度を模擬して打設速度を設定した。充填モルタルの場合には移動式バケットに原

則2.0m³搭載し60分で1往復とし、上部遮蔽コンクリートの場合には原則4.0m³搭載し60分で1往復とした。

(3) 管理基準目標値

現在のところ、充填材の出来形高さについては、明確な管理基準値の規定が存在しない。そこで、本研究ではJASS5N⁵⁾が規定する垂直方向の部材位置精度の許容値である基準値±3cm以内を参考に、充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの出来形高さの管理基準目標値を基準値±2cm(=最大高低差4cm)と設定し、この値を無人化施工により達成することを検討目標とした。

(4) 計測項目

計測項目および計測頻度を表-2に示す。打設時の充填高さ計測は、スケールによる高さ計測を基本とし、事前に計測した型枠天端高からの下がり計測して充填高さを算出する。計測は打設完了10分後を流動停止とみなし、生コン車1台打設完了ごとに行った。なお、上部遮蔽コンクリートの試験面では、型枠が外周部しか存在せず外周部16点のみの計測としたが、C面については試験面上部に3Dスキャナを設置し、スケール計測と同頻度で平面的な高さ計測を行った。一方、硬化後の出来形計測については、レベルにより全計測点の高さを計測した。

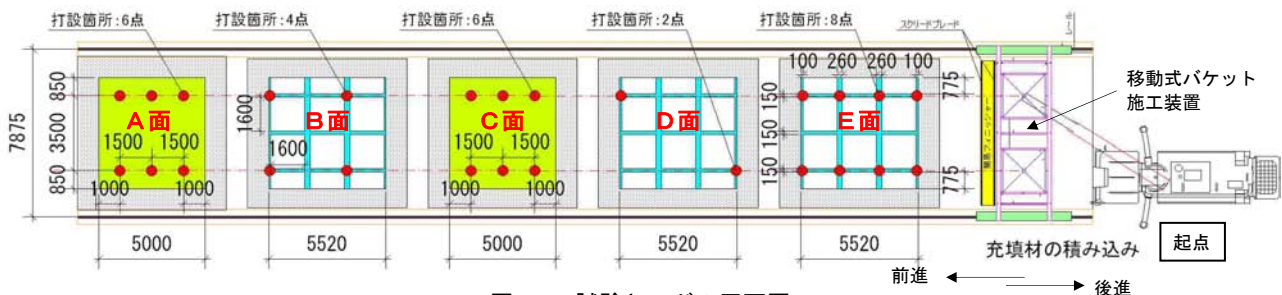


図-3 試験ヤードの平面図

表-1 充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの配合

種別	目標スランプフロー(mm)	目標空気量(%)	W/B(%)	W/P(%)	単体量(kg/m ³)							混和剤(P×%)			
					水W	粉体P			細骨材S1	粗骨材G1	高性能AE減水剤				
						結合材B					石灰石微粉末LS2	減水剤Ad	空気量調整剤As		
						セメントLPC	フライアッシュFA	膨張材LEX							
充填モルタル	825±75*	2.5±1.5	45	28	230	358	153	0	307	1207	780	1.00	---	0.30	0.016
上部遮蔽コンクリート	700±50**	2.5±1.5	45	28	160	249	107	0	215	856	780	---	0.80	---	0.016

* 20℃環境で60分間、その後20℃、40℃、60℃環境いずれにおいても60分間保持可能

** 20℃環境で120分間保持可能

表-2 充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの計測項目

計測項目		計測点/内容	計測頻度
打設時	スケールによる高さ計測	充填モルタル: 20点 上部遮蔽コンクリート: 外周部16点	・生コン車1台打設完了ごと(流動停止時) ・フィニッシャー仕上げ後*
	3Dスキャナによる高さ計測(C面のみ実施)	充填面を平面的に計測	
打設後	レベルによる高さ計測	充填モルタル: 20点 上部遮蔽コンクリート: 25点	・硬化後

* 上部遮蔽コンクリートの場合に実施

(5) 試験ケース

文献³⁾に示された充填モルタルおよび上部充填材の流動勾配実績を参考に、ほぼ平坦な仕上がりが期待できると考えられる試験ケースを計画した。計画にあたっては、許容最大高低差を管理基準目標値である4cmとして当該流動距離で除して許容流動勾配を算出し、許容流動勾配と流動勾配の実績値がほぼ等しくなるように、基本とする打設間隔（基本打設間隔）を設定した。

試験ケースと実施目的を表-3に示す。なお、打設パターン平面図中の丸囲い番号は表-2に示す計測点に対応し、○□△と添付番号は打設順序を示している。

2.5 試験結果

図-3に示す試験ヤードにおいて、充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの施工性確認試験を実施した。打設時の外気温は概ね3~10℃で終日曇天であったが、C面打設日のみ快晴で20℃程度まで外気温が上昇した。

(1) 充填モルタル

流動勾配実績に基づき打設間隔を設定した「①基本打設ケース」では、最終の最大高低差が30mmとなり、管理基準目標値を満足する結果が得られた。そこで、①に対し打設間隔を広げ、施工の合理化を図った「②二点打設ケース」について試験を行った。結果は①と大差なく、同じく管理基準目標値を達成することができた。

ケース①、②において、充填高さはあとから打設する側が高くなる傾向が見られたことから、「③多点打設ケース」では多点かつ千鳥打設による平坦性の改善効果について確認した。結果を図-4に示す。平坦性はさらに改善され、無人でほぼ平坦な仕上がり（セルフレベルング）

を達成できることが確認できた。

本試験結果は、平常時はケース②のような合理性を追求した打設パターンでの施工が可能であること、また、施工中に流動性の低下が見られるような場合には、ケース③の打設パターンに切り替えることで平坦性の改善が可能であることを示しており、移動式バケットを用いた施工法が、施工環境、材料品質変化等の変動リスクに伴う出来形への影響を、施工的な対処によりカバーできる実施工に適した方法であることを示唆している。

(2) 上部遮蔽コンクリート

片押し打設を行ったケース④、⑥における打設完了時の最大高低差は、それぞれ94mm、60mmであった。

一方、双方向打設を行ったケース⑤の打設完了時の最大高低差は75mmであった。ケース⑤の打設完了時およびフィニッシャーによる平坦仕上げ後の出来形計測結果を図-5に示す。なお、打設完了時の出来形図では、中央部が平坦となっているが、これはスケール計測上の都合により外周部16点の値を用いた作図のためである。

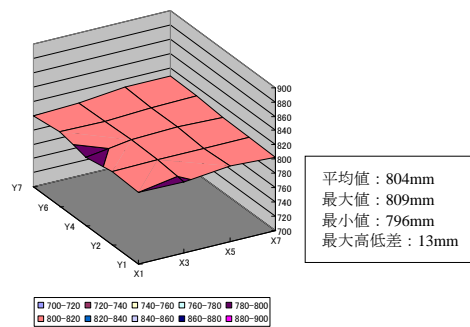


図-4 ケース3の打設完了時の出来形結果

表-3 試験ケースと実施目的

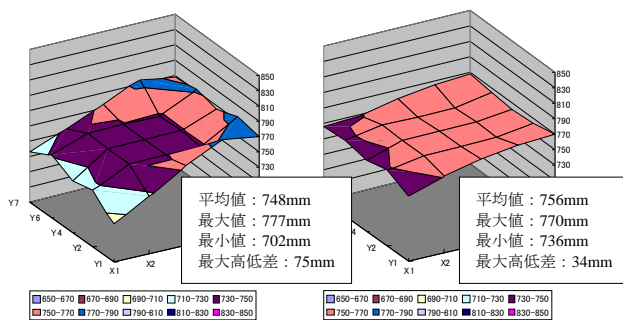
ケース	名称/実施面	実施目的	打設パターン平面図		
充填モルタル	① 基本打設ケース / B面下部	基本打設間隔での流動勾配を確認し、以後の打設パターンに反映	ケース① (B面下部) 1台目: ○1列→□2列 (各点0.25m ³) 2台目: ○1列→□2列 (各点0.25m ³)	ケース② (D面) 1台目: ○点1→□点2 (各点0.5m ³) 2,3台目: ○点1→□点2 (各点1.0m ³)	ケース③ (E面) 1台目: ○1列→2列 (各点0.25m ³) 2,3台目: □3列→4列 (各点0.25m ³) ⇒○1列→2列 (各点0.25m ³)
	② 二点打設ケース / D面	打設間隔の合理化の検討			
	③ 多点打設ケース / E面	多点かつ千鳥打設による平坦性の改善確認			
上部遮蔽コン	④ 片押し打設, フィニッシャー引き仕上げ / A面	・基本打設間隔での流動勾配を確認し、打設間隔の妥当性を検証 ・フィニッシャーの引きによる平坦仕上げ性状の確認	ケース④ (A面) 1,4台目: ○1列→□2列→△3列 (各点0.5m ³) 2,3台目: ○1列→□2列→△3列 (各点0.67m ³)	ケース⑤ (B面上部) 1,3台目: ○1列→□2列→△3列 (1台目各点0.5m ³ , 3台目各点0.67m ³) 2台目: △3列→□2列→○1列 (各点0.67m ³)	ケース⑥ (C面) 1,7台目: ○1列→□2列→△3列 (各点0.5m ³) 2-6台目: ○1列→□2列→△3列 (各点0.67m ³)
	⑤ 双方向打設, フィニッシャー押し仕上げ / B面上部	・双方向打設による平坦性の改善確認 ・フィニッシャーの押しによる平坦仕上げ性状の確認			
	⑥ 片押し打設, フィニッシャー往復仕上げ / C面	・片押し打設による平坦性の確認 ・フィニッシャーの往復による平坦仕上げ性状の確認			

ケース④～⑥の打設完了時の最大高低差を比較すると、片押し打設を双方向打設に変更したことによる平坦性の改善効果は特に見られないことから、上部遮蔽コンクリートについては、片押し打設を基本手順として考えてよいと判断できる。ただし、打設完了時の最大高低差はいずれのケースでも 60～100mm 程度となったことから、充填モルタルに比べ流動性が劣る上部遮蔽コンクリートの場合は、フィニッシャー等を用いた補助工法による平坦仕上げが最終的に必要であると考えられる。

なお、仕上げ方法の違いによる平坦仕上げ性状の違いについては、いずれのケースにおいても最大高低差が管理基準目標値以下となる結果が概ね得られたが、仕上がりが性状としては図-5 に示したケース⑤が最も良好であった。これは、図-6 に示すフィニッシャーに装着したスクリードブレードの形状と関係しており、前進側に装着した排土板形状のブレード前面を使って、充填高さが高い側から低い側へ押しながら、表面を剥ぎ取るように仕上げる方法が、平坦仕上げ方法として適していることが明らかとなった。

3. 硬化後品質評価

上記試験において打設した充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートについて、硬化後品質評価として以下に示す観察、試験を実施した。各試験面は材齢 5 日までシート養生した後脱型し、現地に曝露した。なお、現地での観察および試験は、A 面で材齢 50 日、B 面～E 面で材齢 30 日を経過した時点で実施した。



(左図) 打設完了時 (右図) 平坦仕上げ後

図-5 ケース⑤の打設完了時の出来形結果

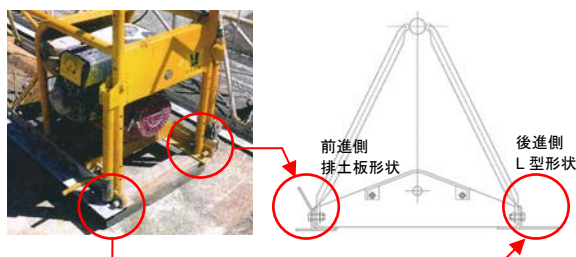


図-6 スクリードブレードの形状

3.1 表面ひび割れ観察およびコア観察

各試験面で表面ひび割れ観察を実施し、ひび割れ進展図を作成した。また、B 面～E 面では天端部から深さ方向にコアを採取し、ひび割れ深さや 60 分間隔の打ち重ねによる打設リフト間の一体性について観察を行った。

(1) 充填モルタル

充填モルタルの試験面 (D 面および E 面) では、型枠セパレータを配置した上部に微細な沈降ひび割れの発生が見られたが、それ以外にひび割れの発生は全く見られなかった。また、打ち重ね部の一体性も良好であった。なお、実施工では、バリア性能への影響を懸念し型枠セパレータの使用は認められないため、このような沈降ひび割れの発生確率は小さいと考えられるが、必要に応じて打設速度を調整し沈降の抑制を図ることも有効である。

(2) 上部遮蔽コンクリート

一例として、充填モルタルと上部遮蔽コンクリートを打ち継いだ B 面のひび割れ進展図を図-7 に示す。図中にはコア採取位置および表面ひび割れ幅を併記している。コア採取位置は、表面ひび割れの有無や、充填モルタルの分岐合流部、直線部等の位置を考慮して決定した。なお、無人化による施工を前提としているため、レイトンス処理等の打ち継ぎ処理は今回行っていない。

B 面天端部では、NS 方向には 3 等分する位置で、EW 方向には 2 等分する位置で幅 0.15～0.35mm のひび割れが見られた。ひび割れ部より採取した B-7 コアの写真を、図-8 に示す。ひび割れ深さは表面より 85mm であり、打ち継ぎ界面では付着切れが見られた。打ち継ぎ界面での一体性の確保は今後の課題であるが、レイトンス処理等の実施は特殊環境下のため実質困難であることから、充填モルタルと上部遮蔽コンクリートの連続打設といっ

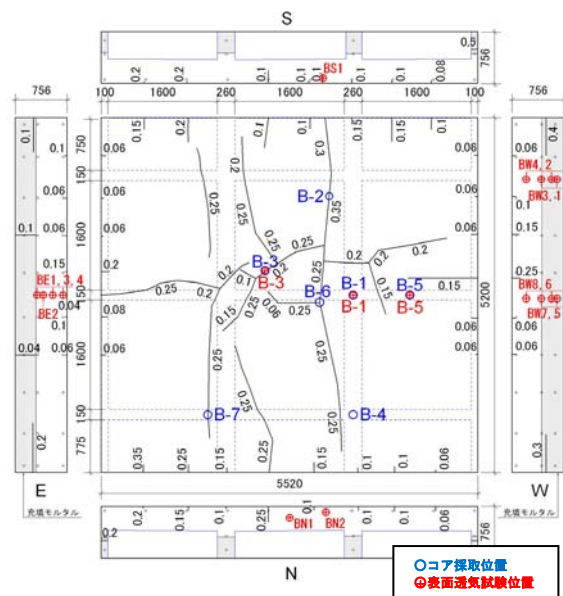


図-7 B 面の表面ひび割れ進展図とコア採取位置

た施工計画的な対応も今後視野に入れる必要がある。

総括すると、A～C 面の上部遮蔽コンクリートの試験面で観察された主要なひび割れ幅は 0.1～0.35mm であった。ひび割れ深さは最大 200mm 程度であり、いずれも仕上がり面から 1 層下の打設リフトで止まっていることが確認された。ひび割れの発生原因としては、外部拘束を受けない天端から深さ方向に発生していることから、主として内外の温度収縮・乾燥収縮差によるものであると考えられる。また、打ち重ね部の一体性については、曇天で打設時の外気温が低かった B 面では特に問題点は見られなかったものの、日射があり外気温が上昇した C 面では、一部で付着切れが見られた。これは、もともと単位水量が少ない配合である上に、日射による乾燥で各リフト表面に早期にこわばりが生じたため、打ち重ね部の一体化が阻害されたためであると推定される。

実施工では、施工は処分空洞内で行われるため、日射による影響は受けないが、放射性廃棄体の発熱影響により同様の問題が生じる可能性は十分に考えられる。したがって、上部遮蔽コンクリートについても、高温環境下で高い流動性を保持可能な配合に今後修正することが望ましい。また、打設時間間隔の短縮の観点から、遮蔽扉の開閉時間や移動式バケット施工装置の移動時間の短縮を図るなどの対策も打ち重ね部の一体性を確保する上で有効である。一方、内部拘束に起因する表面ひび割れの発生に対しては、上部遮蔽コンクリートの打設後に保温養生を行うなどの対策が有効である⁶⁾と考えられる。

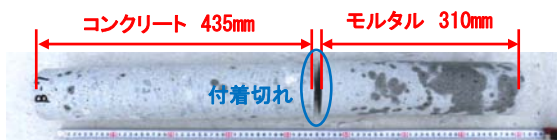


図-8 B-7 コアの観察結果とひび割れ深さ

3.2 表面透気試験

打設した充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの硬化後品質を非破壊で評価する手法として、B～D 面において、Torrent 法による表面透気試験を上述のコア採取前に実施した。ここでは、表-4 に示すように、試験から得られた透気係数をもとに表層の透気性の品質を 5 段階に分けて評価する⁷⁾。試験は、天端部および側部のひび割れのない一般部と打ち重ね部を対象として各面で幅広く実施した。試験結果を図-9 に示す。

充填モルタルについては、一般部と打ち重ね部で表面透気係数に違いは見られず、いずれも一般から良のグレードを示している。この結果は、充填モルタルの打ち重ね部の一体性が良好であることを裏付けている。

一方、上部遮蔽コンクリートでは、こわばりを生じた C 面打ち重ね部での表面透気係数が大きくなった。つまり、これは深度方向に一体化しておらず、不連続面が存在することを意味している。このような不連続面の存在は、施設閉鎖後に廃棄体中の放射性物質が外部へ移行する短絡経路となることから、上述したこわばり対策の検討と効果の確認が今後の重要課題として挙げられる。

表-4 表面透気係数による表層品質のグレード

透気グレード	A	B	C	D	E
透気性評価	優	良	一般	劣	極劣
表面透気係数 k_t ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	< 0.01	0.01-0.1	0.1-1	1-10	> 10

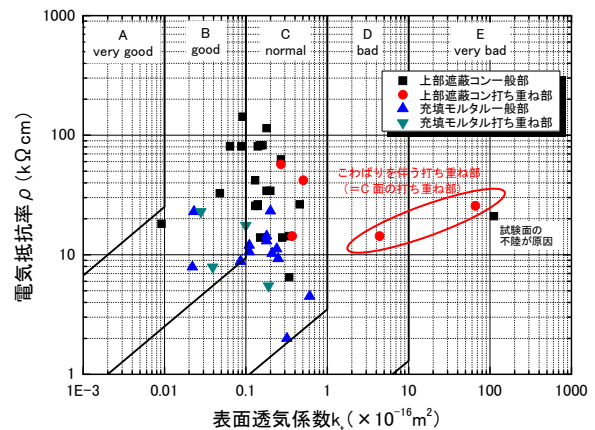


図-9 表面透気係数と電気抵抗率 (B～D 面)

3.3 圧縮強度試験および乾燥密度試験

B～E 面打設時に現場製作したテストピース (以下 TP) と硬化後採取したコアを用いて、圧縮強度試験および、上部遮蔽コンクリートについてはさらに乾燥密度試験を実施した。TP は標準養生し、材齢 28 日で圧縮強度試験、材齢 35 日で乾燥密度試験を実施した。一方、コア供試体については材齢 35 日で両試験を実施した。なお、試験方法は、それぞれ JIS A1108, JASS 5N T-602 に準拠した。

圧縮強度試験の結果を図-10 に、乾燥密度試験結果を表-5 に示す。結果は 3 本の平均値である。

コア供試体の圧縮強度は TP に比べるとやや小さいが、これは後者が標準養生であり水とおよびポズラン反応が進行しているためであると考えられる。また、充填モルタルのコア採取位置 (打設位置からの流動距離) による圧縮強度への影響を、コア D-1/コア E-1 の強度比で評

価すると0.9となるが、これはD-TP/E-TPの強度比0.9と同等であることから、今回の流動距離の範囲内では流動距離が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

また、上部遮蔽コンクリートの乾燥密度については、コア供試体の方が小さく、こわばり発生部から採取したコアC-2の結果が最小であった。ただし、得られた値はいずれも放射線施設の遮蔽計算で一般的に用いられるコンクリートの乾燥密度 2.1t/m^3 を上回っており⁸⁾、一体性が確保されていれば、直ちに必要な遮蔽性を損なうことはないと考えられる。

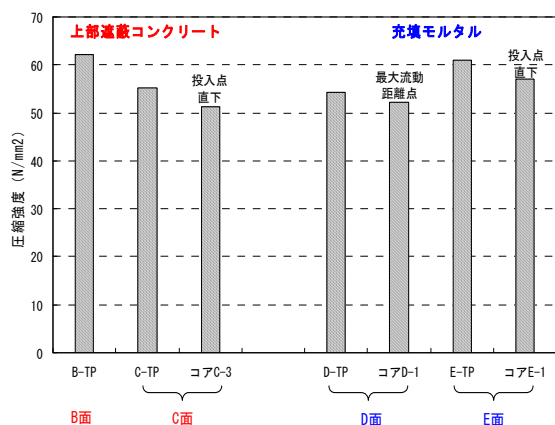


図-10 圧縮強度試験結果

表-5 上部遮蔽コンクリートの乾燥密度試験結果

供試体名称		養生	乾燥密度 (t/m ³)
B面	TP	35日	2.308
	TP	標準養生	2.312
C面	コアC-1 (最大流動距離点)	35日 現場養生	2.221
	コアC-2 (こわばり発生部)		2.201

4. まとめ

余裕深度処分施設に適用する充填材の特殊条件下での施工を実現するため、移動式バケットによる遠隔施工装置を新たに開発し、実際の施工形態を想定した施工性確認試験を実施した。

その結果、流動性に優れた充填材の使用と打設から平坦仕上げまでを遠隔操作で行う移動式バケットによる施工法を組み合わせることにより、締固め不要で平坦性確保に優れた連続施工が可能であることを実証した。また、本施工法は、施工環境、材料品質変化等の変動リスクに伴う出来形への影響を、施工的な対処によりカバーできる実施にに適した方法であることを確認した。

一方、硬化後品質評価では、上部遮蔽コンクリートで一部に内部拘束に起因すると思われるひび割れの発生が

確認された。また、日射による乾燥を受けた試験面では早期にこわばりが生じ、打ち重ね部の一体化が阻害される不具合が確認された。これらの不具合対策は今後の課題であるが、保温養生等の実施や高温環境に強い配合への修正により改善する必要があると考えられる。

充填モルタルおよびこわばりの発生がない上部遮蔽コンクリートの打ち重ね部では、表面透気係数が一般から良のグレードを示しており、深度方向の一体性が良好であることを確認した。また、圧縮強度試験、乾燥密度試験結果については、テストピースに比べ採取コアでやや値が小さくなったが、打設位置からの流動距離による影響は小さく、遮蔽性も必要な性能が確保される範囲であることを確認した。

謝辞

本研究の計画・実施において、群馬大学（現所属，前橋工科大学）辻幸和教授，東京大学 前川宏一教授，東京工業大学 坂井悦郎教授に，ご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)土木学会エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方，2009
- 2) 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，廃棄物安全小委員会（第32回）資料5-2，2008
- 3) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成21年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書（第1分冊），2010
- 4) 木ノ村幸士，武田均，宮原茂禎，松元淳一：温度に依存しない流動性の保持性能を有する高流動モルタルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1175-1180，2010.7
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，2001
- 6) The Japan Concrete Institute：The Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete 2008，2011
- 7) RILEM Technical Committee 189-NEC：Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover, R.Torrent and L.Fernandez Luco, 2007
- 8) 原子力安全技術センター：放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル，2007