

移動式バケットを利用した充填材施工性確認試験

余裕深度処分施設を対象とした無人化施工に向けて

木ノ村 幸士^{*1}・廻田 貴志^{*1}・城所 靖夫^{*2}・立石 洋二^{*3}・宮原 茂禎^{*4}・武田 均^{*4}

Keywords : radioactive waste, filling material, fluidity, finishing work, flatness

放射性廃棄物、充填材、流動性、仕上げ、平坦性

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施設である余裕深度処分施設とは、図-1に示すように処分空洞を帯状に配置し、各処分空洞内に多重の人工バリアを構築して廃棄体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、定置した放射性廃棄物が曝露した状態での作業となることから、当該処分空洞の両端を遮蔽扉で隔離し、内部は完全無人化施工とする必要がある。

本充填作業を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空洞内の配管配置上の制約の観点から多点打設による充填が困難であるなどの問題が指摘されている。また、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した「平成21年度地下空洞型処分施設性能確認試験（以下、国プロ確認試験）」では、実規模模擬施設を利用してポンプ圧送による充填材の1点打設試験を実施した結果、1点打設による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、施工法に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、流動性に優れた充填材と、打設

から平坦仕上げまでを遠隔操作で行う施工装置を組み合わせることにより、無人化施工で確実な充填および出来形の平坦性を確保できる新たな施工技術の確立を目指し、余裕深度処分施設への適用を想定した施工性確認試験を実施することとした。

2. 試験概要

2.1 施工装置

今回新たに製作した移動式バケット施工装置を図-2に示す。移動式バケットによる充填材の施工は、長距離ポンプ圧送時の配管閉塞リスクを排除できる上、打設時に打設位置・打設点数・打設順序を遠隔操作により自由に変更できるという施工面での柔軟性があり、また、坑内環境の変化や材料の品質変動に対し対処がしやすい点でも、実施工への適用上大きな利点がある。

バケット容量は $2.0m^3 \times 2$ 基であり、レール上を速度 $2.5m \sim 25m/\text{分}$ で電動走行することが可能である。なお、移動式バケットの位置はレール横断方向に対しては固定である。吐出口径は5インチであり、所定位置まで移動した後シャッターゲートバルブを開閉して充填材の打設を行う。打設量の管理は、バケット内に設置した $0.5m^3$ 刻み、 $0.67m^3$ 刻みの指標棒を用いて管理する。

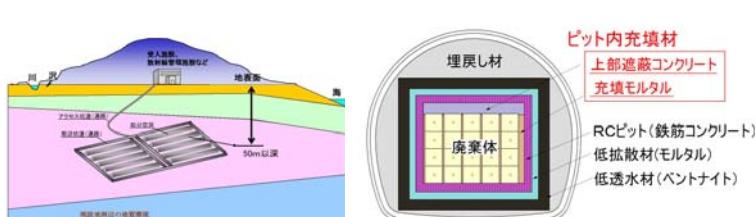


図-1 余裕深度処分施設の概要

Fig.1 Overview of the Japanese intermediate-depth radioactive waste repository

*1 原子力本部原子力技術第三部

*2 土木本部土木技術部 *3 土木本部機械部

*4 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室



図-2 移動式バケット施工装置

Fig.2 Mobile apparatus with buckets and vibrating scraper-blades

また、平坦仕上げについては、装置本体から電動ホイストクレーンで吊下げたエンジン式バイブレータ設備の簡易フィニッシャーを用いて行う。フィニッシャーのスクリードブレードは前進側に排土板形状のもの、後進側にL型形状のものを外向きに装着している。

2.2 試験ヤード

青森県三沢市に図-3に示す試験ヤードを設置した。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(1.6m×1.6m)および廃棄体間隔は実施工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、模擬廃棄体天端の約10cm下がりまで充填モルタルを打設し、硬化後上部遮蔽コンクリートを打ち継ぐ計画とした。

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使用材料を表-1に配合を表-2に示す。両配合は前述の昨年度国プロ確証試験で使用した配合であり、充填モルタルについては発熱廃棄体間の充填を想定し高温環境下で60分間高い流動性を保持する特徴を有する³⁾。なお、両配合は既設計の施設線量評価結果への影響を懸念しペースト部の単位量は変更不可という制約がある。

2.4 試験条件

2.4.1 打設手順

充填材の打設手順を以下に示す。

①起点位置に据え付けたポンプ車に対し、生コン車を1台づけとする。②ポンプ車にて移動式バケット内に充填材を積み込む。積み込みは六ヶ所側、三沢側の順で行う。③電動操作により移動式バケットを所定の位置に移動する。④電動操作によりシャッターゲート

表-1 使用材料

Table1 Material properties of the mix proportions in this study

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), 密度=3.22g/cm ³ , 比表面積=3,630cm ² /g
フライアッシュ	FA	II種(東北電力, 能代火力発電所), 密度=2.29g/cm ³ , 比表面積=3,810cm ² /g
膨張材	LEX	改良型ハイパー・エクスパン(太平洋マテリアル), 密度=3.05g/cm ³
石灰石微粉末	LS2	(宮城石灰工業), 密度=2.70g/cm ³ 、比表面積=5,390cm ² /g
細骨材	S1	石灰碎砂(八戸松館産) 密度=2.66g/cm ³ , FM=2.68
粗骨材	G1	石灰碎石(八戸松館産) 密度=2.69g/cm ³ , FM=6.52
混和剤	SP1	高性能AE減水剤(BASFポゾリス), レオビルドSP8LS, ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
	SP2	高性能AE減水剤(花王),マイティ3000H,カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	Ad	減水剤,超遅延形(BASFポゾリス), No.89,変性リグニンスルホン酸系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(BASFポゾリス),マイクロエア404,ポリアルキレンジコール誘導体

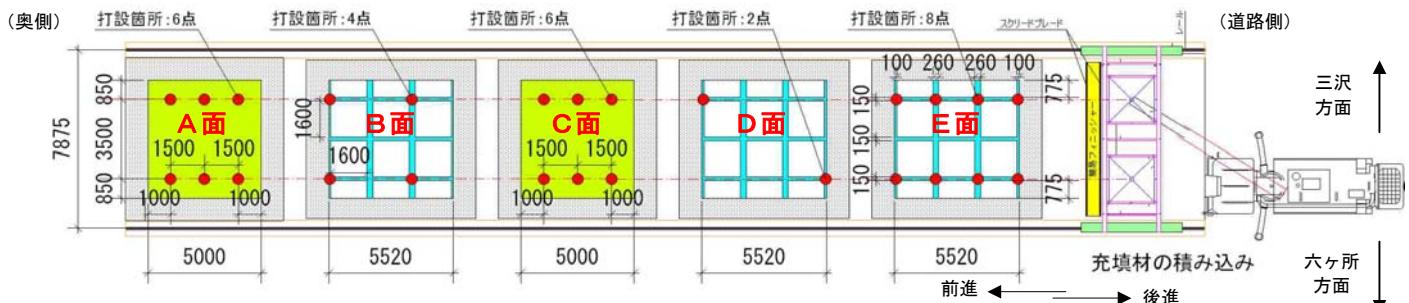


図-3 試験ヤード全体図

Fig.3 In-situ experimental-fields formed in this study

表-2 充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの配合

Table1 Mix proportions of the filling mortar and the upper shield concrete

種別	目標スラブプロード(mm)	目標空気量(%)	W/B (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤(P×%)				
					W	粉体P			SI	GI	SP1	SP2	Ad	As	
						LPC	FA	LEX							
充填モルタル	825±75*	2.5±1.5	45	28	230	358	153	0	307	1207		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°C環境で60分間、その後20°C, 40°C, 60°C環境いずれにおいても60分間保持可能

** 20°C環境で120分間保持可能

バルブを開き充填材を打設する。⑤同バルブを閉じる。⑥(③～⑤)を必要回数繰り返す。⑦移動式バケットを起点位置に戻す。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、簡易フィニッシャーを用いて平坦仕上げを行う。

2.4.2 打設速度

充填材の打設速度は余裕深度処分施設操業時の打設想定速度を模擬し、充填モルタルでは移動式バケットに原則 2.0m^3 搭載し 60 分で 1 往復、上部遮蔽コンクリートでは原則 4.0m^3 搭載し 60 分で 1 往復とした。

2.4.3 管理基準目標値

充填材の出来形高さには明確な管理基準値の規定がないことから、本研究では参考となる以下の制約条件を考慮して管理基準値を設定した。

上部遮蔽コンクリートでは、廃棄体から放出される放射線への遮蔽厚確保の観点から設計厚 100cm に対し 96cm 以上（基準値-4cm）の厚さが必要である。同時に、同部材上に設置するピット頂版下面鉄筋のかぶり厚確保の観点から基準値+5cm 以内という制約条件が課せられる。また、JASS5N⁴⁾ に従うとすれば、垂直方向の部

材位置精度の許容値は基準値±3cm 以内という規定が存在する。

そこで、本研究では JASS5N よりもさらに厳しく目標値を設定し、充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの出来型高さの管理基準を、基準値±2cm (=最大高低差 4cm) として、無人化施工により許容値以内を達成できる施工技術の確立を目指す方針とした。

2.4.4 計測項目

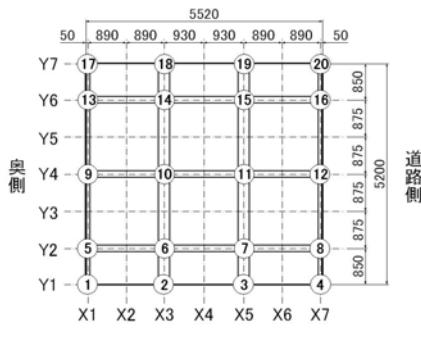
打設時の計測項目と計測頻度を表-3 に、充填モルタルおよび上部遮蔽コンクリートの充填高さの計測点を図-4 にそれぞれ示す。

スケールによる高さ計測では、各点の型枠天端高を事前にレベル計測し、型枠天端高からの下がりをスケールで計測することにより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う。ただし、上部遮蔽コンクリートについては、型枠が外周部しか存在しないことから外周部 16 点（図-4 右図のハッチ部以外の点）のみの計測としたが、C 面については面全体の充填高さを計測する目的で試験面上部に 3D スキャナを設置し、同頻度で高さを計測した。一方、硬化後については全計測点の充填高さをレベルにより直接計測した。

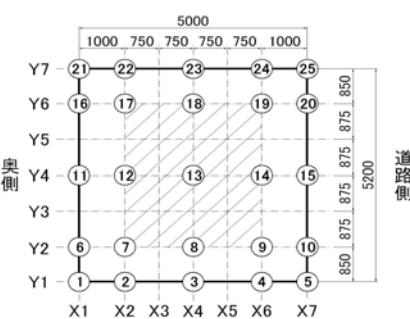
表-3 充填材打設時の計測項目
Table3 List of the measurements performed in the filling tests

計測項目	計測点／内容	計測頻度
気象データ	温度、湿度、気圧	30 秒間隔でサンプリング
充 填 高 さ 計 測	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 3 D 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 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 サイクルタイム ・バケットへの充填材投入時間 ・バケットの移動時間、充填材排出時間	・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* ・硬化後 1 サイクルごと

* 上部遮蔽コンクリートの場合に実施



充填モルタルの計測点



上部遮蔽コンクリートの計測点

図-4 充填高さの計測点

Fig.4 Points of the measurement of the filled-formation height

3. 試験結果

3.1 気象データ

C面の打設日を除き小雨を記録した時間帯があり、打設時の外気温は3~10°Cであった。一方、C面打設日は終日晴天であり日中20°C程度まで気温が上昇した。

3.2 打設ケースおよび出来形結果

昨年度国プロ確証試験での充填材の流動勾配実績を参考に打設ケースを計画した。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求め、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、まず基本とする打設間隔を決定した。

3.2.1 充填モルタル

充填モルタルの打設ケース、実施目的、打設数量等を表-4に示す。また、各打設ケースにおける現場到着時のスランプフローの平均値、打設手順、打設完了時の出来形結果を図-5に示す。

昨年度国プロ確証試験での流動勾配実績に基づき決定した「①基本打設ケース」では、最終の最大高低差は30mmとなった。これは管理基準目標値である基準値±2cm(平均値±2cm)を満足する結果である。このことから、①に対しさらに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」について検討を行った。その結果、両者の最終出来形に大差はなく、二点打設でも管理基準目標値を達成できることが確認でき

表-4 充填モルタルの打設ケースと実施目的
Table4 Cases of the filling mortar tests and their respective purposes in this study

ケース	名称／実施面	実施目的	最大流動距離	許容流動勾配	打設数量(m ³)
①	基本打設ケース／予備試験B面	基本打設間隔での流動勾配を確認し、以後の本試験で実施する打設パターンに反映する。	3.2m=廃棄体 2辺相当	1/80 以下	2.0*
②	二点打設ケース／本試験D面	打設間隔の合理化を検討する。	4.0m=廃棄体 2.5辺相当	1/100 以下	5.0
③	多点打設ケース／本試験E面	多点かつ千鳥打設によるセルフレベリング性の改善を確認する。	2.4m=廃棄体 1.5辺相当	1/60 以下	5.0

* 打設数量が少ないため、移動式パケットには1.0m³搭載とした

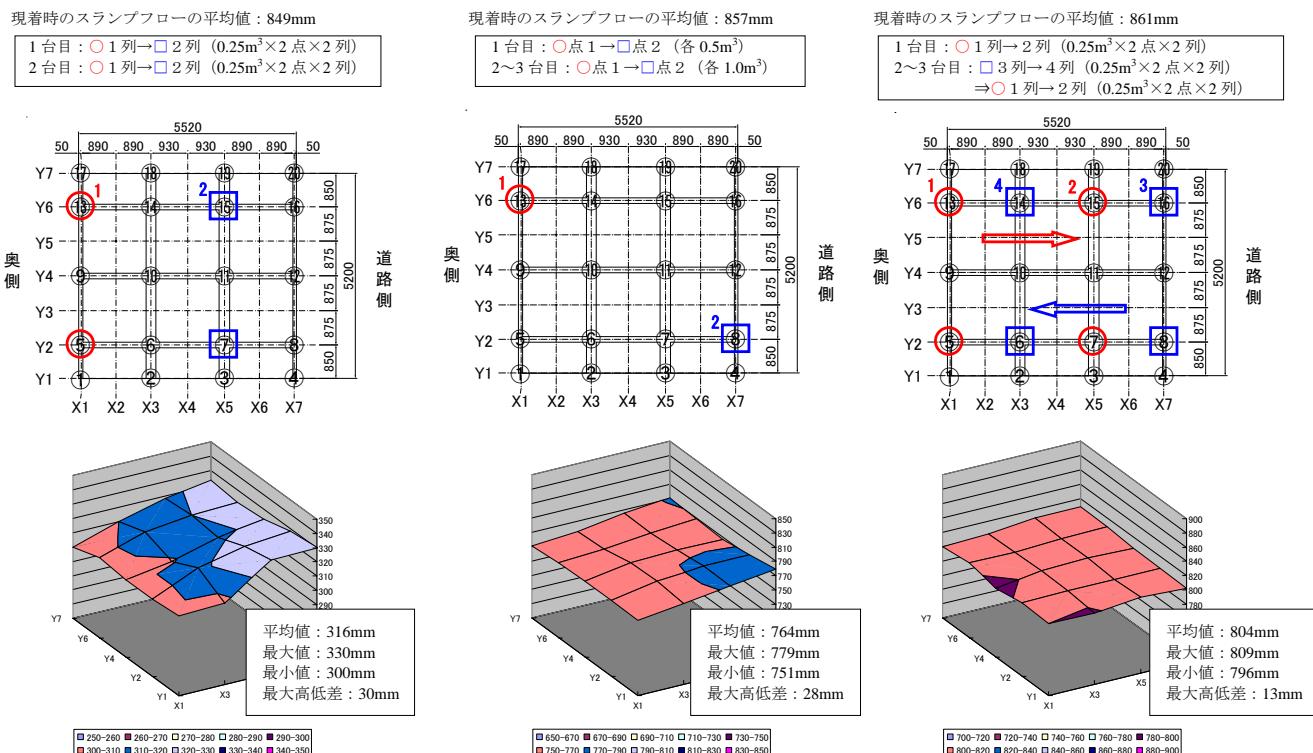


図-5 各ケースの打設手順と出来形結果
Fig.5 Filling procedure and the formation result in each case

た。また、打設数量の違いが最大高低差へ及ぼす影響も見られなかった。一方、充填高さはあとから打設する側が高くなる傾向があることから、「③多点打設ケース」では多点かつ千鳥打設によるセルフレベリング性の改善効果について検討した。その結果、図-5に示すように、多点かつ千鳥打設とすることによりほぼ平坦な仕上がりが達成できることを確認した。

以上の結果は、移動式バケットを用いた施工法では、仕上がり時の平坦性の要求レベルに応じて、また環境条件や材料品質などの変動要因により充填材のフレッシュ性状に変化が生じた場合においても、打設間隔や手順を調整することにより状況に則した合理的な施工が可能であることを示唆していると考えられる。

なお、「②二点打設ケース」、「③多点打設ケース」は、実施工操業時を想定した場合、それぞれ図-6の打設パターンに相当する。本試験結果より、いずれの打設ケースでも管理基準目標値を満足する施工が可能であることを確認したことから、実施工において現行目標スランプフローの充填モルタルを適用した場合には、今回の施工装置と同様にレール横断方向にバケットを移動させる機構は必要ないと考えられる。

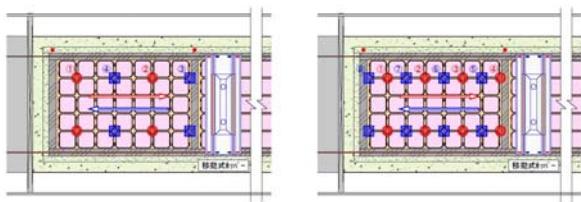


図-6 操業時に想定される打設パターン

Fig.6 Expected filling patterns corresponding to the actual operation in the intermediate-depth radioactive waste repository

3.2.2 上部遮蔽コンクリート

上部遮蔽コンクリートの打設ケース、実施目的、打設数量等を表-5に示す。また、各打設ケースにおける

現場到着時のスランプフローの平均値、打設手順、フィニッシャーによる仕上げ実施前後の出来形結果をそれぞれ図-7～図-9に示す。なお、図-7、図-8の仕上げ前のコンタ図では外周部16点の計測値を用いた作図であるため中央部は平坦となっているが、図-9(C面)の結果においては3Dスキャナによる計測値を用いて中央部の値を補完している。

図-7、図-8の結果を比較すると、片押し打設を双方向打設に変更することによるセルフレベリング性の改善効果は見られなかった。また、図-7、図-9の結果を比較すると、同じ片押し打設で打設数量が増加しても、最大高低差に顕著な違いは見られなかった。以上のことから、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。

いずれの打設ケースにおいても、仕上げ前の最大高低差はおよそ50～100mmの範囲であった。したがって、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については、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。また、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、いずれの打設ケースにおいても最大高低差が許容値以下となる結果が概ね得られたが、前進側に装着した排土板形状のスクリードブレードの前面を使って、押しながら表面を剥ぎ取るように仕上げたケース⑤の性状が最も良好であった。

今後の課題としては、仕上げ前の高さが低いエリアにはフィニッシャーをかけても材料が十分に行き届かず低いエリアとしてそのまま残る不具合が挙げられる。この点については今後装置の改良が必要である。また、晴天日に試験を実施したC面では、直射日光の影響により急激に乾燥し、流動面にこわばりが発生した。一方、実施工では廃棄体から熱影響を受ける状況が想定されることから、同様にこわばりが発生する可能性が考えられる。こわばりの発生は遮蔽材として部材の一

表-5 上部遮蔽コンクリートの打設ケースと実施目的
Table5 Cases of the upper shield concrete tests and their respective purposes in this study

ケース	名称／実施面	実施目的	最大流動距離	許容流動勾配	打設数量(m ³)
④	片押し打設、フィニッシャー引き仕上げ／予備試験A面	<ul style="list-style-type: none"> ・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する。 ・簡易フィニッシャーの引きによる平坦仕上げ性状を確認する。 	1.9m	1/48以下	14.0
⑤	双方向打設、フィニッシャー押し仕上げ／本試験B面上部	<ul style="list-style-type: none"> ・双方向打設によるセルフレベリング性の改善を確認する。 ・簡易フィニッシャーの押しによる平坦仕上げ性状を確認する。 			11.0
⑥	片押し打設、フィニッシャー往復仕上げ／本試験C面	<ul style="list-style-type: none"> ・片押し打設によるセルフレベリング性を確認する。 ・簡易フィニッシャーの往復による平坦仕上げ性状を確認する。 			26.0

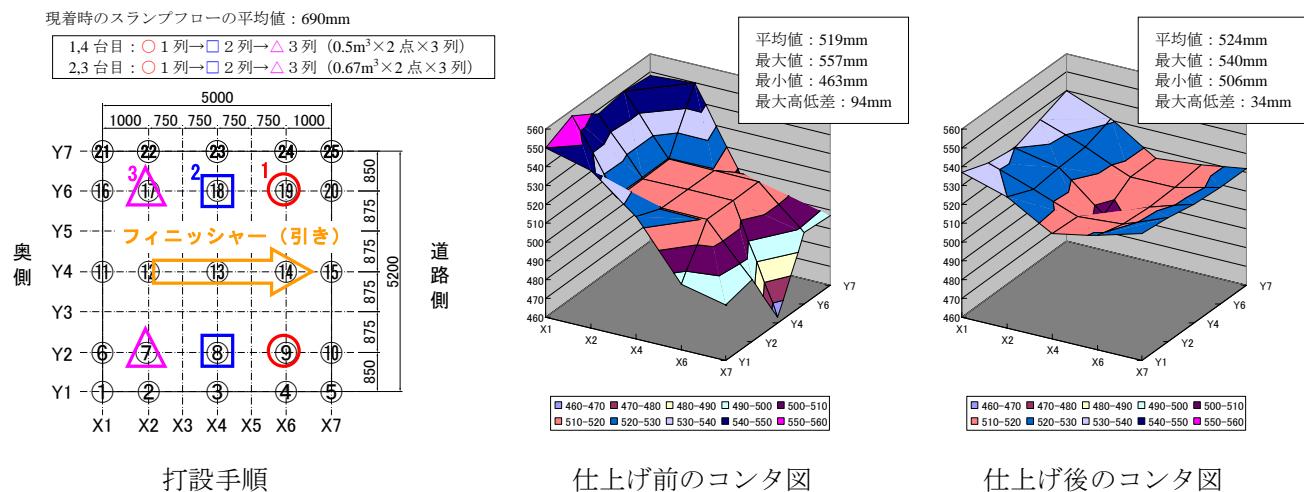


図-7 ケース④の打設手順と出来形結果：A面

Fig.7 Filling procedure and the formation result of Case 4

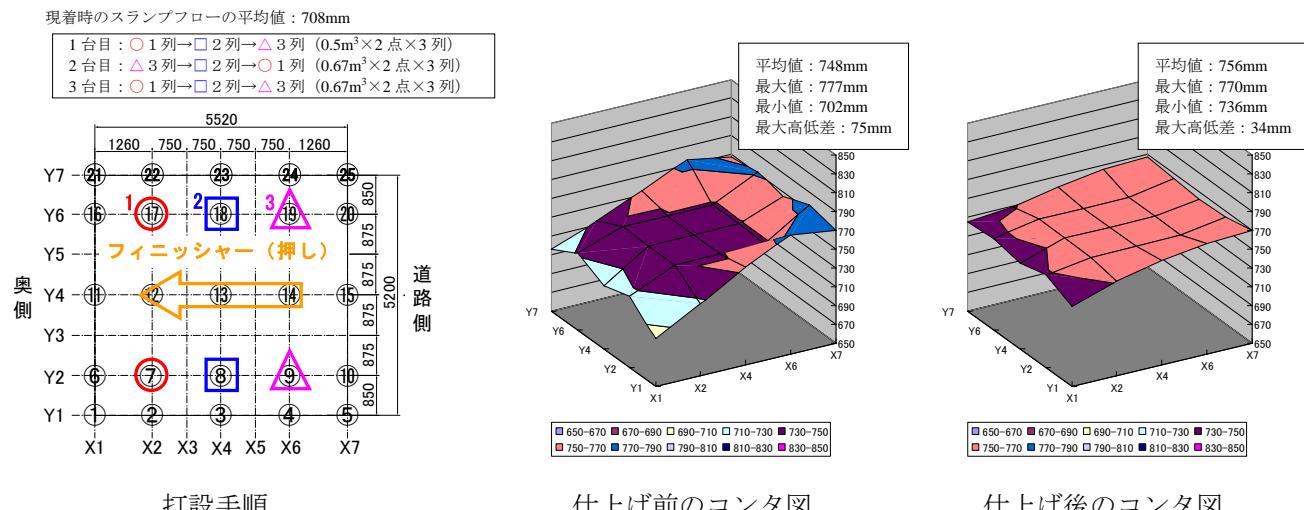


図-8 ケース⑤の打設手順と出来形結果：B面上部

Fig.8 Filling procedure and the formation result of Case 5

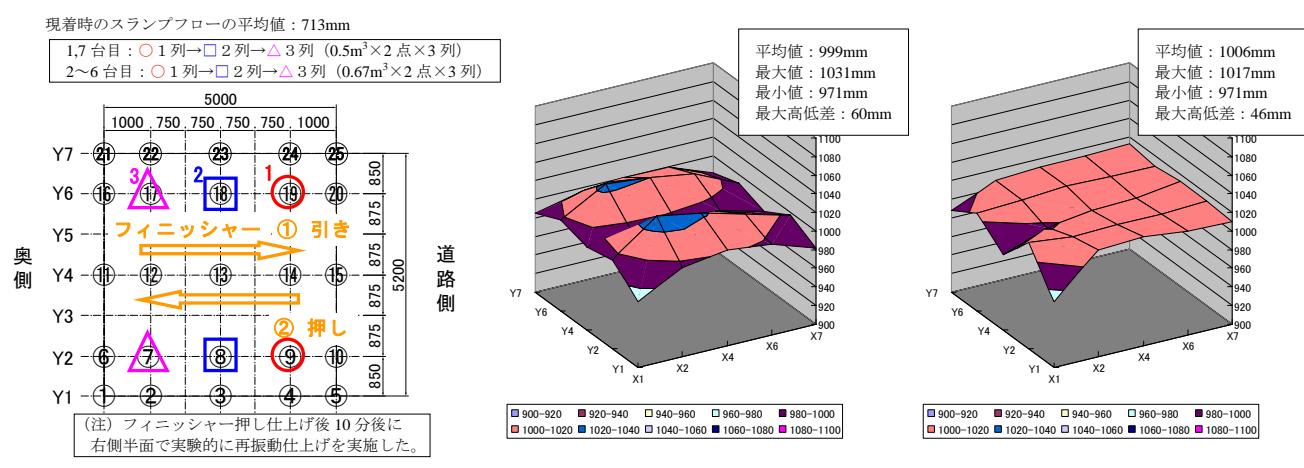


図-9 ケース⑥の打設手順と出来形結果：C面

Fig.9 Filling procedure and the formation result of Case 6

体性を阻害する恐れがあることから、今後上部遮蔽コンクリートについても高温環境下におけるフレッシュ性状の改善を図る必要があると考えられる。

3.3 サイクルタイム計測結果

サイクルタイムの計測結果を図-10に、また計測結果より算出したバケット積み込み速度およびバケット1基当たりの排出速度を図-11にそれぞれ示す。

図-10に示す計測結果より、1サイクルに占めるバケットへの積み込み時間の割合が大きいことが確認できる。一方、図-11左図よりバケットへの積み込み速度は、充填モルタル、上部遮蔽コンクリートとともに $20\text{m}^3/\text{h}$ 程度であり、現状の積み込み速度に対しポンプ車の圧送能力は余力を有していると考えられる。したがって、今後は生コン車を2台づけにして材料供給能力を上げ、また分岐管等を用いて両バケットへ同時に積み込むなどの対策を実施することにより、サイクルタイムの短縮を図ることができると考えられる。

次に、充填モルタルについて打設点数がサイクルタイムに及ぼす影響を考察する。図-10において、「多点打設したE面」と「二点打設したD面」のサイクルタイムを比較すると、2台目と3台目を対象にした「バケットへの積み込み時間」および「起点から、および、起点への移動時間」を除いた平均所要時間は、いずれの面でも約6.5分であった。したがって、多点での排出と多点間のこまめな移動が合計時間に及ぼす影響は見られないことから、打設点数を増やすことによるサイクルタイムへの影響は小さいと考えられる。この結果は、セルフレベリング性の向上を意図した多点打設の実施工への適用妥当性を検討する上で、経済的側面からのインセンティブとして期待できる。

また、図-11右図においてバケット1基当たりの排出速度に着目すると、上部遮蔽コンクリートではバケット内の残容量が少なくなるにつれて排出速度が遅くなる傾向が見られる。これは自重による押し出し作用が小さくなること、また排出までのバケット内での待機時間が長くなり流動性が低下することなどが要因であると考えられる。一方、充填モルタルではこのような傾向は見られないが、これは高温環境下で高い流動性を保持するために添加した超遅延形減水剤の遅延効果により流動保持性が優れているためであると考えられる。なお、バケットからの排出時間、排出速度を改善する方法としては、バケット形状（容量・角度）の変更、バケット吐出口径の拡大や口数増、バケット内面のコーティング加工により内面の粗度係数を低減するなどの対策が今後の検討項目として考えられる。

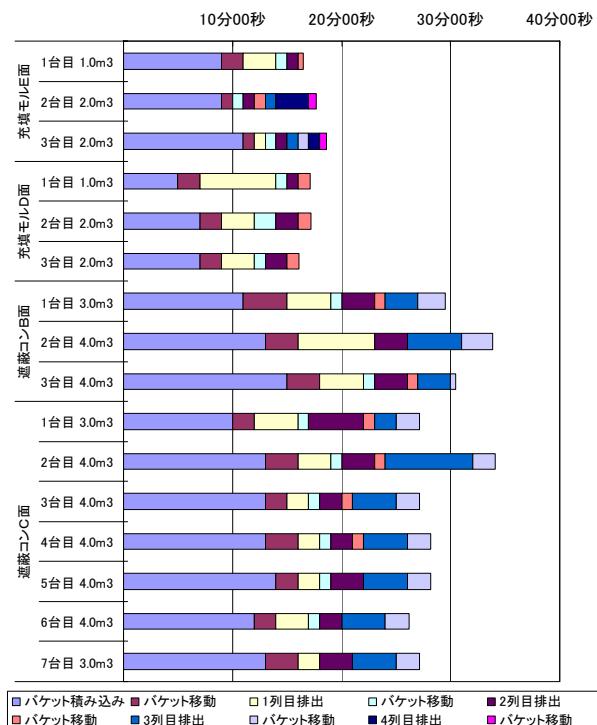


図-10 サイクルタイム計測結果の比較

Fig.10 Comparison of the cycle-time among the different filling tests

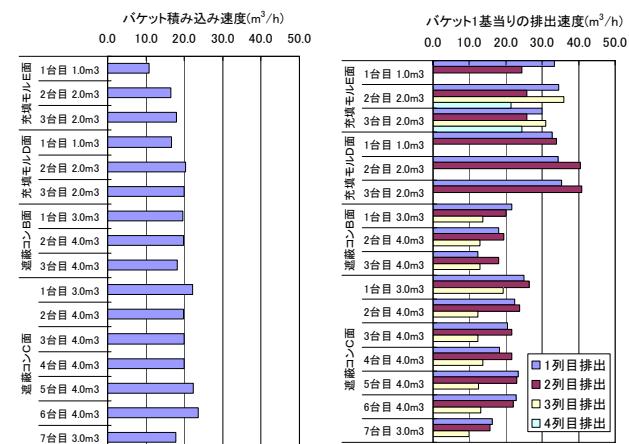


図-11 バケット積み込み速度およびバケット1基当たりの排出速度の比較

Fig.11 Comparison of the speed measured on pouring filling materials into both buckets on the mobile apparatus and the discharged speed from one bucket

4. 品質事後調査

材齢30日経過後、主にB面～E面を対象に品質事後調査として表面ひび割れ進展観察、コア採取によるひび割れ深さ観察、トレント法による表面透気試験⁵⁾、圧縮強度試験、乾燥単位容積質量試験を実施した。

調査結果の詳細については現在とりまとめ中であり、今後別途の報告とする。

5.まとめと課題

本研究では無人化施工による充填材の確実な充填、および出来形の平坦性を確保できる新たな施工技術の確立を目指し、余裕深度処分施設への適用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と打設から平坦仕上げまでを遠隔操作で行う施工装置を組み合わせることにより、無人で管理基準目標値を達成できる施工法について確立の見通しを得ることができた。

本研究により得られた成果および今後の課題を以下に示す。

5.1 充填モルタルの施工

- ・ 移動式バケットを用いた施工法では、平坦性の要求レベルや施工時の変動要因に応じて、遠隔操作による打設間隔や手順の調整により状況に則した合理的な施工が可能である。

5.2 上部遮蔽コンクリートの施工

- ・ 双方向打設に変更してもセルフレベリング性の改善効果は見られないことから、片押し打設を基本手順として考えてよい。
- ・ 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では、仕上げ前の最大高低差はおよそ50～100mmの範囲となることから、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
- ・ 最大高低差10cm程度の不陸であれば概ね平坦な仕上げが可能であることを確認した。今後さらに大きな不陸に対しても対処可能とするためには、打設表面を深く剥ぎ取ることができるようスクリードブレードのブレード高を厚くするなど装置の改良が必要である。
- ・ また配合面でも、廃棄体からの熱影響を考慮した高温環境下におけるフレッシュ性状の改善検討を実施する必要がある。

5.3 サイクルタイムへの影響

- ・ バケット積み込み時間の短縮がサイクルタイムの短縮に大きく寄与するが、同時間の短縮は積み込み方法の工夫により対処可能である。
- ・ 充填モルタルについては打設点を増やすことによるサイクルタイムへの影響は小さい。この結果は、多点打設の実施工への適用妥当性を検討する上で経済的側面からのインセンティブとして期待できる。
- ・ バケット排出時間はバケットの詳細仕様を変更することにより短縮できると考えられる。最適なバケット仕様の検討については、今後の課題である。

謝辞

本研究の計画策定にあたっては、群馬大学大学院辻幸和教授、東京大学大学院前川宏一教授、東京工業大学大学院坂井悦郎教授にご指導を賜りました。ここに謝意を表します。

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) 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
- 5) RILEM Technical Committee 189-NEC, Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover, R. Torrent and L. Fernandez Luco, 2007