放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる 区画内充てん材の施工品質の評価

武地 真一¹・横関 康祐²・新保 弘³・
寺田 賢二⁴・秋山 吉弘⁴・矢田 勤⁴・辻 幸和⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 東北支店 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27)
E-mail: takechishinichi@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)
E-mail: yokozeki@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30 KIビル)
E-mail: shimbo@kajima.com

⁴正会員 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター (〒104-0052 東京都中央区月島1-15-7)
E-mail: terada@rwmco.or.jp

⁵フェロー会員 前橋工科大学 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460)
E-mail: tsuji@maebashi-it.ac.jp

地下空洞型放射性廃棄物処分施設に用いる区画内充てん材は、崩壊熱により高温環境となる可能性がある廃棄体の周囲に直接打ち込まれることから、その充てん性や硬化性状への悪影響が懸念される。また、区画内充てん材は放射線環境下での施工となるため、遠隔操作による無人化施工で所定の施工品質を確保する必要があるなど、施設特有の課題もある。

本論文では、高温環境を模擬した充てん性試験により区画内充てん材の配合を選定し、高温養生試験を行ってその硬化性状への温度の影響を明らかにした。さらに、実規模試験により、ポンプ圧送と移動式バケット方式による無人化施工を実現可能とした。

Key Words : radioactive wastes, filler, disposal facility, temperature influence, unmanned construction

1. はじめに

放射性廃棄物の地下空洞型処分施設は、原子力発電所の廃棄物の余裕深度処分として、具体的な検討が行われている¹⁾。余裕深度処分とは、地下利用に十分余裕をも

った深度(表層から50~100m)に廃棄物を処分するのである。これまで、余裕深度処分施設の設計と品質管理の考え方は、土木学会²⁾等により検討されてきた。図-1に余裕深度処分施設に適用が検討されている施設構成を示す。施設は要求性能に応じた様々な部材で構成され

図-1 地下空洞型処分の施設構成 (土木学会²⁾より一部改変)

写真-1 区画内充てん材の打込み箇所全景

ており、廃棄体の周囲には「区画内充てん材」が配置される計画である。土木学会²⁾では、「区画内充てん材」は一般部（廃棄体間または廃棄体とコンクリートピット間）と上部（廃棄体上部）を分割施工する場合を想定している。本論文では一般部のみを対象としており、以下これを「区画内充てん材」として記述する。

写真-1は、実規模試験により模擬廃棄体間に充てんした区画内充てん材の全景である。区画内充てん材の施設特有の施工条件に関する課題としては、廃棄体の発熱による環境温度の上昇が及ぼす影響、荷卸し場所からの放射線管理区域の場内運搬方法、廃棄体間の間隙寸法に対する充てん性があつた。

本稿では、これら課題に対して室内および地下空洞を利用した実規模試験により検討した結果を報告する。

2. 区画内充てん材の概要と課題

余裕深度処分施設の部材毎の要求機能は、土木学会²⁾によりまとめられている。区画内充てん材の要求機能は、施設の建設操業時の遮へい性と埋戻し後の移行抑制としての放射性核種の収着性である（表-1）。このうち、遮へい性は部材厚さと材料の単位容積質量、圧縮強度で決定される²⁾。JASSN⁴⁾によれば、原子力発電所施設の遮へい性を必要とするコンクリートにおいては、乾燥単位容積質量が要求性能の主要なファクターとなる。

区画内充てん材特有の施工条件として、廃棄体発熱による環境温度、荷卸し場所からの放射線管理区域における場内運搬、放射線管理下での施工が挙げられる。そのため、区画内充てん材には、施工上要求される機能として施設特有の施工条件を考慮した流動性や自己充てん性、材料分離抵抗性などの施工性を考える必要がある。それらの課題について以下に示す。

(1) 環境温度の影響

地下空洞型放射性廃棄物処分施設では、発熱性の廃棄体を空洞内に高い密度で集積して定置するため、廃棄体の表面温度が上昇することが考えられる。参考として、新保ら⁵⁾の検討では、空気温度+10℃程度の上昇が想定されている。廃棄体の間隙をセメント系充てん材で充てんする際、高温の廃棄体に触れることにより流動性が低下

すること、養生温度が変わることで硬化体に悪影響を与えることが懸念される。したがって、高温環境でも流動性が保持される材料が求められるとともに、硬化体を与える諸品質への影響を確認する必要がある。

(2) 放射線管理区域での場内運搬方法

区画内充てん材は、図-2に示すように、アジテータ車からの荷卸し場所から施工場所までの放射線管理下において、150～250m程度の比較的長い場内運搬が必要となる。場内運搬方法は、配管敷設によるポンプ圧送あるいは移動式バケットによる運搬が考えられる。ポンプ圧送の場合、圧送機に負荷される圧力や材料分離抵抗性を含めた圧送性が必要である。また、移動式バケットによる方法では、遠隔操作を考慮した施工方法の確立が求められる。

(3) 自己充てん性

廃棄体の間隙幅は、150mmと260mmの格子状が想定されている。区画内充てん材は、廃棄体間の間隙および廃棄体とコンクリートピットといった狭隘な空間において

表-1 区画内充てん材の要求機能²⁾

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

図-2 区画内充てん材施工時の断面イメージ

表-2 本試験の検討項目と実施内容

検討項目		実施内容
(1)	廃棄体の発熱を考慮した配合選定	設定した温度環境での流動性確認試験を室内にて実施
(2)	高温環境で養生された硬化体の物性	養生温度を変化させ、圧縮強度、長さ変化等を室内試験で確認
(3)	長距離圧送性	地上ヤードで配管を敷設し、圧送試験を実施
(4)	場内運搬方法をポンプ圧送とした自己充てん性	ポンプ車を用いて空洞内で実規模の施工試験を実施
	場内運搬方法に移動式バケットを想定した自己充てん性	移動式バケットを想定した仮設を構築し、空洞内で実規模の施工試験を実施
(5)	打込み時の側圧が他部材へ与える影響	空洞内で 6m の高さを一度に打込み、側圧および隣接部材の挙動を計測

隙間無く充てんされることが要求される。区画内充てん材の打込みは放射線管理下であるため、材料には直接的な作業を極力必要としない自己充てん性が要求される。

(4) 打込み時の他部材への影響

区画内充てん材をピット内において一括で打ち込みした場合、打込み時の側圧が隣接する部材であるピットの壁部材にひび割れの発生等の影響を与える可能性がある。

3. 検討項目および実施内容

前述のように、区画内充てん材には地下施設特有の施工条件（長距離の場内運搬）や廃棄体の発熱、放射線管理下の施工に課題があった。これらの課題に対して、本研究での検討項目と実施内容を表-2に整理し、以下に検討した内容について個別に述べる。

4. 廃棄体の発熱を考慮した配合選定

区画内充てん材は、自己充てん性が求められる材料である。ここで、余裕深度処分施設では流動性や充てん性に優れた高流動モルタルを用いた低拡散層の研究が先行している^{6), 7)}。

本研究では、この低拡散層の配合（表-3）を基本として、充てん性の向上と高温環境でも充てん性が損なわれない配合を検討した。また、硬化体の諸性能のうち圧縮強度は、一般構造物と同程度の 30N/mm^2 を目安とすることとした。使用材料を表-4に、試験方法を表-5に示す。室内試験では、容量50リットルの水平二軸ミキサで練混ぜた。

練混ぜ時間と投入材料は次のとおりである。

表-3 低拡散層の配合³⁾

W/B (%)	LP/B (%)	単位量(kg/m^3)							SP1 P×%
		W	LPC	FA	LEX	LP	S		
45	50	230	338	153	20	307	1197		0.68

スランブフロー $65\pm 5\text{cm}$ 、空気量 $2.5\pm 1.5\%$

LEX=膨張材, 結合材B=LPC+FA+LEX, 粉体量P=B+LP

表-4 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 $=3.22\text{ g/cm}^3$ 、比表面積 $=3,530\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	石灰石砕砂（八戸松館産） 密度 $=2.66\text{g/cm}^3$ 、FM=2.79、 $\text{CaCO}_3=98\%$
石灰石微粉末	LP	宮城産、密度 $=2.70\text{g/cm}^3$ 、 比表面積 $=5,050\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{CaCO}_3=97\%$
フライアッシュ	FA	フライアッシュII種、密度 $=2.18\text{g/cm}^3$ 比表面積 $=3,790\text{cm}^2/\text{g}$
混和剤	SP1	高性能AE減水剤： カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	SP2	高性能AE減水剤： ポリカルボン酸エーテル系化合物
	SP3	高性能AE減水剤：ポリカルボン酸エーテル系化合物と配合ポリマーの複合体
	SP4	高性能AE減水剤： カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	Ad	減水剤 遅延型：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-5 試験方法

項目	方法
スランブフロー	JIS A 1150
漏斗流下時間	JSCE-F512モルタル用V漏斗 (排出口 $30\times 30\text{mm}$)
流動性確認試験	充てん対象間隙を模擬して製作した試験装置による
凝結試験	JIS A 1147

図-3 混和剤添加率とスランブフロー

＜空練り10秒練混ぜ→水(+混和剤)投入後180秒練混ぜ→静置5分→モルタル排出＞

図-4 V漏斗流下時間とスランプフロー

(1) 目標スランプフローの設定

ここでは、材料分離が生じない範囲で、充てん性と流動性の向上を目的とした目標スランプフローの設定を行った。スランプフローの設定に用いる混和剤は、練混ぜ直後のフレッシュ性状が混和剤種により有意な差異が見られなかったことから、高性能AE減水剤 (SP1) のみを用いた。SP1の添加量を調整することにより、スランプフローを65cm～95cm程度の範囲で変動させて、各試験を実施した。混和剤添加率とスランプフローの関係を図-3に示す。

スランプフローは、高性能AE減水剤の添加量の増加に伴って増加した。なお、スランプフローが90cm以上の場合には、モルタル表面にペーストの浮きや細骨材の沈降といった材料分離が観察された。したがって、材料分離しない範囲として、目標スランプフローの上限を90cmと判断した。

図-4にV漏斗流下時間とスランプフローの関係を示す。スランプフローが減少するとV漏斗流下時間が長くなる傾向であった。スランプフローが72cmの場合には、V漏斗流下時間が約19秒で、粘性の高さから流動性が損なわれていた。

本材料はモルタルであるが、参考として併用系高流動コンクリートのV漏斗流下時間の目標値⁹⁾ (7～20秒) と比較すれば、この値はほぼ上限値である。また、スランプフロー65cmの場合にV漏斗流下時間が短い、理由は不明である。これらのことから、スランプフローの下限は75cmと判断した。

以上より、目標スランプフローを75cm～90cm (82.5±7.5cm) に設定した。

(2) 混和剤の流動性に関する温度依存性

廃棄体に接する区画内充てん材では、廃棄体の発熱により、養生時の環境温度が高まることが想定される。普通ポルトランドセメントと高ビーライト系セメントのモルタルについて、40～90℃で高温蒸気養生した坂部らの

図-5 スランプフローの経時変化 (20°C)

図-6 スランプフローの経時変化 (60°C)

研究⁹⁾によれば、圧縮強度は普通ポルトランドセメントでは60～70℃を境に強度発現性が低下する傾向を示している。

このセメントの水和に影響を与える可能性がある温度である60℃は、坑道の温度環境の上限値の一つの目標となることが想定される。スランプフロー試験での環境温度は20℃および60℃とした。なお、流動性確認試験では、施工時の温度変化等を考慮し、環境温度80℃の試験を追加した。ここで、流動性確認試験とは、廃棄体間隙 (15cm) と流動距離を模擬して製作した試験装置により、モルタルの流動性を確認する試験である。

20℃の環境温度下でのスランプフローの経時変化を図-5に示す。低拡散層で使用しているSP1は予備試験で高温環境下でのスランプフローロスが大きかったため、本試験ではフレッシュの保持性を特徴とする混和剤 (SP2, SP3, SP4) を用いて試験した。このうちSP3およびSP4は、遅延型の減水剤を併用することで、フレッシュの経時保持性を期待した。20℃の環境温度下では、SP3とSP4が120分までスランプフローの変化が非常に小さく、SP2では、スランプフローが120分まで増加し、90分後において

写真-2 流動性確認試験装置

図-7 流動性確認試験状況

図-8 流動性確認試験での流動勾配

表-6 選定した区画内充てん材の配合

W/B (%)	単位量(kg/m ³)					SP3 P×%	Ad P×%
	W	LPC	FA	LP	S		
45	230	358	153	307	1198	0.85	0.30

スランプフロー82.5±7.5cm, 空気量2.5±1.5%
結合材B=LPC+FA

て規格値を満足しなかった。

60°Cの環境温度下でのスランプフローの経時変化を図-6に示す。60°Cの試験条件は、運搬時間や廃棄体の高温環境を考慮した次に示す条件とした。モルタルの練上りから60分までは運搬を想定した20°Cの環境温度下で、その後120分までは廃棄体の発熱環境を想定した温度が60°C、湿度が60%の条件である。60°Cの環境温度下では、SP2とSP4において60°Cの環境温度下である60分から90

図-9 流動性確認試験での流動勾配

図-10 凝結時間

分の間に約10cm程度のスランプフローの低下があり、SP4では規格値を満足しなかった。一方で、SP3は高温環境下に静置した後60分間でのスランプフローの低下が約5cmと優れた経時保持性を示した。

環境温度が20°Cと60°Cについて、流動性確認試験を実施した。試験装置を写真-2に、図-7にモルタルの流動状況を示す。モルタルは図-7の右上に示す投入位置から30L/分の速度で投入し、1回の試験で160Lのモルタルを約5分間で投入した（打込み速度=1.8m³/h）。また、温水を試験装置の外周に注水することで、任意の温度を保つ仕様とした。

流動性確認試験による流動勾配の比較を図-8に示す。流動勾配は、モルタル投入完了後、流動が停止したことを確認し、流動距離と投入位置での充てん高さを測定して算出した。試験時のスランプフローは80.5～85.0cmの範囲であった。流動性確認試験では、20°Cと60°Cのいずれの環境温度下でも、SP3を使用した場合に流動勾配が最も小さくなった。また、いずれの混和剤を用いた場合も、20°Cの環境温度下に比べ60°Cの環境温度下では流動勾配が大きくなったが、SP3は温度変化による影響が最も小さかった。

以上のことから、本試験では高性能AE減水剤SP3と遅延型減水剤Adを組み合わせる混和剤として用いる配

合を選定した。選定した配合を表-6に示す。

選定した配合を用いた流動性確認試験を環境温度が40℃と80℃について追加実施し、また同様の環境温度で凝結試験を実施した。流動性確認試験での流動勾配を図-9に、凝結時間を図-10に示す。20℃から60℃の範囲では、温度が流動勾配に与える影響は非常に小さいが、80℃では流動勾配が小さくなった。

凝結時間は20℃から60℃の範囲では、温度が高いほど早まる結果となったが、80℃では凝結が大幅に遅くなる結果となった。20℃から60℃の傾向は、高温時にセメントの水和が早まる一般的な傾向であると考えられる。

遅延型の混和剤は主として、C₃Sの表面に遅延成分が吸着し、C₃Sの水和を遅らせる。このC₃Sの吸着層は、水和の進行に伴って、次第に水和生成物中に取り込まれ水和抑制効果を失っていく¹⁰⁾。80℃の環境温度下で凝結時間が遅くなった原因は、何らかの要因によりこの水和抑

制効果が水和反応に比べて極端に卓越したことにあると考えるが、この要因についてはさらなる検討が必要である。

5. 高温環境で養生した区画内充てん材の硬化物性

高温環境で養生して圧縮強度などの硬化物性を取得した。試験方法を表-7に示し、それらの結果を以下に示す。

(1) 圧縮強度

試験室内で20℃と60℃で水中養生した供試体と、処分施設の換気設備の異常等によって高温となる場合を想定し、極端な条件として、105℃環境で気中養生した供試体での試験を実施した。試験材齢は7, 28, 91, 182, 365日である。試験結果を図-11に示す。60℃の水中養生では、20℃の水中養生と比較して早期に圧縮強度の発現が見られ、材齢7日、28日では20℃の水中養生より圧縮強度が高くなった。ただし、その後の強度発現は遅く、材齢91日で20℃の水中養生と60℃の水中養生は同等の値となり、182日以降では20℃の水中養生の方が高

表-7 硬化物性の試験方法

項目	方法
圧縮強度試験	JIS A 1108
静弾性係数試験	JIS A 1149
固相分析	鈴木・西川 ¹³⁾ による方法を参考
自己収縮試験	JCISQA5
乾燥単位容積質量	JASSNT-602 ⁹⁾

図-11 養生温度と圧縮強度 (室内)

図-13 養生温度と静弾性係数 (室内)

図-12 積算温度と圧縮強度

図-14 静弾性係数と圧縮強度

い結果となった。養生温度が高い場合には初期強度が速やかに発生する一方で、長期材齢時の強度の伸びが小さいという傾向は、一般的な暑中コンクリートでの傾向と同じである¹¹⁾。

一方 105℃の気中養生では、若材齢から時間経過に伴う変化は小さく、35N/mm²程度の発現に留まった。105℃の気中養生での養生は乾燥炉内であることから、水分の蒸発により水和が進行しなかったものと考えられる。ただし、水和反応に対して著しく悪いこの条件でも、本試験で目標とした 30N/mm²を超えることが確認された。

本試験では、実規模試験時の品質管理として採取した標準養生供試体（製造時にプラントで作製）と現場水中養生供試体（現場荷卸し時に作製）、構築された構造体から採取したコア、配合選定時に採取した室内試験で作製した供試体による試験を実施している。なお、プラント、現場水中養生の品質管理供試体はいずれも同一のジェネータ車から採取した。

これらの供試体について環境温度の履歴による積算温度と圧縮強度の関係を、図-12に整理した。高温条件以外の圧縮強度は積算温度と非常に強い相関が見られる。この傾向はほぼ同じ配合である低拡散層で試験した既往の報告³⁾および庭瀬らの研究¹²⁾に示された傾向と同様である。一方、高温条件での傾向は常温環境での傾向と大きく異なり、養生温度が高い場合には、圧縮強度が積算温度の関数で一元的に表現できない可能性を示した。

(2) 静弾性係数

静弾性係数は、圧縮強度と同一供試体により試験した、室内での試験結果を図-13に示す。60℃の水中養生では、20℃の水中養生と比較して早期に静弾性係数の発現が見られる。その後の増加は緩やかとなり、材齢 365 日では 20℃の水中養生とほぼ同等の値を示した。また、105℃の気中養生では、圧縮強度と同様に、若材齢から時間経過に伴う変化は小さかった。

圧縮強度と静弾性係数の関係について図-14に整理した。静弾性係数は圧縮強度と非常に強い相関が認められた。養生温度が高まることで強度発現性は異なる傾向を示すものの、圧縮強度と静弾性係数の関係は保持されている。

(3) 固相分析

コンクリートの分析で一般に知られる鈴木・西川¹³⁾の提案する方法、フライアッシュの反応率は小早川ら¹⁴⁾の方法を参考に、モルタルの固相分析を行った。分析は、打込みから 20℃と 60℃で 91 日養生したモルタルを対象とした。XRD による定性結果を表-8に、DSC と TG-DTA を組み合わせて定量した結果を表-9に示す。60℃

表-8 XRDによる定性結果

養生 温度	定性鉱物						
	Ca(OH) ₂	C-S-H	AR	AFm	カト アイ ト	FA	CaCO ₃
20℃	○	○	—	○	—	○	◎
60℃	—	○	—	—	△	○	◎

◎：ピーク強度が強く、含有量が多いと推測

○：ピーク強度が弱く、含有量が少ないと推測

△：ピーク強度が非常に弱く、含有量が極めて少ないか、含まれていないと推測

—：ピークが確認されない

Ca(OH)₂：水酸化カルシウム

AR：エトリンサイト

C-S-H：ケイ酸カルシウム水和物

AFm：モノカーボネート

CaCO₃：炭酸カルシウム

FA：フライアッシュ

主に石灰石骨材と石灰石微粉末

表-9 XRD, DSC, TG-DTAによる定量結果

養生 温度	水和物の分析結果(%)							CS	FA 反応率 (%)
	Ca(OH) ₂	シリカ ゲル	AR	AFm	付着水	FA	C-S-H		
20℃	45	03	33	63	49	166	64.1	1.7	30.7
60℃	0.0	0.5	0.5	0.0	3.7	10.1	85.3	1.8	59.5

で水中養生した場合には、20℃で生成が確認された水酸化カルシウム、モノサルフェートが含まなかった。

60℃で水中養生した場合には、20℃の場合と比較して、フライアッシュ反応率が約 2 倍となっている。また、水酸化カルシウムが減少し、C-S-H は増加している。一般に、フライアッシュを混入したモルタル・コンクリートでは、フライアッシュに含まれる Si 成分が水酸化カルシウムと反応し、C-S-H が生成する。その後、さらにフライアッシュの反応が進み、水酸化カルシウムが消失すると、フライアッシュに含まれる Si 成分が C-S-H に取り込まれる形で C-S-H のカルシウムシリカ比 (C/S) が低下していく。フライアッシュのポゾラン反応は温度依存性が高く、養生温度が高い場合に促進される¹⁴⁾。本モルタルも養生温度が高いことにより、フライアッシュのポゾラン反応が促進されたと考えられる。本試験結果では、20℃、60℃いずれの養生条件においても、CS は同程度あるが、60℃の養生条件では水酸化カルシウムが消失している。このことから、材齢 91 日まで 60℃水中養生した試料は、フライアッシュの反応が進み、水酸化カルシウムが消失した直後の状態であったと推察される。

(4) 乾燥単位容積質量

試験方法は、コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法 (JASS5N T-602) に準拠した。試験は 105℃の乾燥炉にて 3 日間の質量減少が 0.5g 以内になるまで乾燥させ、その質量を計測するものであり⁴⁾、φ 100×200mm の円柱

供試体とした。約4か月の乾燥の結果、本モルタルの乾燥単位容積質量 2.119t/m^3 が得られた。JASS5N では、乾燥単位容積質量はフレッシュコンクリートの単位容積質量と相関があり、乾燥単位容積質量は単位容積質量に対して 0.1t/m^3 程度低いことが示されている⁴⁾。本モルタルのフレッシュな単位容積質量は 2.246t/m^3 でその差は 0.127t/m^3 であり、これと同様の傾向を示した。

JASS5N における乾燥単位容積質量の設計値は、標準偏差の3倍を下回らないように設定される⁴⁾。例えば九州電力玄海4号原子力発電所では、データ数が173個の乾燥単位容積質量の平均値は 2.244t/m^3 、標準偏差は 0.014t/m^3 に対して、設計乾燥単位容積質量は 2.18t/m^3 が与えられている⁴⁾。本モルタルでの乾燥単位容積質量の設計値は 2.0t/m^3 程度が目安となるものと考えるが、設計値を設定するに当たっては、今後データを蓄積する必要がある。

図-15 圧送試験の概要

図-16 加圧ブリーディングの比較¹⁶⁾

表-10 ポンプ圧送試験で併用した試験方法

項目	方法
加圧ブリーディング	JSCE-F502
スランプフロー	JIS A 1150
漏斗流下時間	JSCE-F512モルタル用 (排出口 30×30mm)
空気量	JIS A 1128
単位容積質量	JIS A 1116

6. ポンプ圧送試験結果

区画内充てん材は、図-2に示したようにアジテータ車からの荷卸し場所から施工場所まで150～250m程度の場内運搬が想定される。本試験ではモルタルのポンプ圧送性を確認することを目的に、圧送管を水平換算距離¹⁵⁾で300mとなる長さに配置して圧送試験を実施した。試験には、世界最大級の圧送能力を持つポンプ車(Putzmeister BSF2107-HP：最大吐出圧力22.0MPa)を用い、図-15のように配置した。試験配合は、室内試験により選定した表-6に示すものである。

事前に室内で実施した加圧ブリーディング試験結果を、

図-17 圧送前後のスランプフロー

図-18 圧送前後のV漏斗流下時間

図-19 圧送前後の空気量

図-20 圧送前後の単位容積質量

図-21 空気量と単位容積質量

図-22 吐出量とポンプ車のピストン前面圧

土木学会指針¹⁵⁾で示される標準曲線と併せて図-16に示す。加圧ブリーディング試験は、フレッシュコンクリートのポンプ圧送性を評価する試験方法であり、標準曲線内であれば、ポンパビリティーが良好な条件とされるものである。図により、標準曲線内に入ることが示され、本モルタルのポンパビリティーは良好と考えられる。

圧送試験は、吐出圧と圧送性の確認を目的として、吐出量を6~31m³/hに変化させた。吐出量は筒先付近に配置した流量計(明昭(株)MGR2000A-100)で計測した。試験方法を表-10に示す。試験はアジテータ車からの荷

卸し時と水平換算距離が150mの位置および筒先での試料を用いて実施した。水平換算距離が150mの位置の試料は、該当位置にバルブを設けて圧送中に採取した。試料は、吐出量が少なめ(10.8m³/h, 12.0m³/h)の時点と多め(21.6m³/h, 23.4m³/h)の時点でそれぞれ採取した。

図-17に圧送前後のスランプフローを示す。荷卸し時のスランプフローは目標値を満たしたものの、圧送後のスランプフローはいずれも上昇して、一部で目標値を少し上回った。スランプフローは吐出量が少ない場合には、水平換算距離が150mで大きく、吐出量が多い場合には、筒先で大きくなった。図-18には圧送前後のV漏斗流下時間を示す。V漏斗流下時間は圧送後に小さくなった。

モルタルの塑性粘度は、ポンプ圧送後に低下する傾向を示す場合がある¹⁶⁾。本モルタルにおけるスランプフローとV漏斗流下時間の圧送後の傾向も、塑性粘度の低下がスランプフローの上昇とV漏斗流下時間の低下に影響を与えたと推察される。

図-19に圧送前後の空気量を、図-20に圧送前後の単位容積質量を示す。圧送後の空気量は小さくなり、単位容積質量は大きくなった。空気量の減少は、圧送によりモルタルが圧縮されたためと考えられる。図-21に単位容積質量と空気量の関係について整理した。単位容積質量は空気量の減少と相関があると考えられる。遮へい性能が要求される区画内充てん材においては、質量は大きい方が望ましく、単位容積質量の増加はむしろ良い傾向であると考えられる。

吐出量とポンプ車のピストン前面圧の関係を、図-22に整理した。土木学会指針¹⁵⁾によれば、ポンプ車が圧送可能と判断する限界は最大理論吐出圧力の80%を基準としている。図には、本試験で使用したポンプ車と一般に高出力機種として使用される汎用機(ニイガタNCP13FB-364:最大吐出圧力7.1MPa)の最大吐出圧力の80%を図示した。

図に示すように、ポンプ車の前面圧は吐出量の増大とともに大きくなった。汎用機では、吐出量14m³/h程度で圧送限界となり、施工量が制限されるが、超高压タイプのポンプ車を用いれば、圧送可能であることが示された。ただし、超高压タイプのポンプ車は国内で数台の希少機種であることに注意が必要となる。

7. 実規模充てん性確認試験結果

区画内充てん材の実規模試験は、図-23の断面図で示すように、試験の目的に応じた3つのブロックで実施した。試験は、充てん性を確認することを目的とした場内運搬方法として(1)ポンプ車を用いた試験と、(2)移動式バケットを模擬した試験並びに(3)打込み時の側圧が他部材へ与える影響を確認することを目的として打込み高

図-23 実規模試験断面図

図-24 ポンプ方式による充てん性確認試験平面図(A-A)

図-25 移動式バケット方式模擬、側圧確認試験平面図(B-B)

さを模擬した試験である。図-24と図-25に平面図を示す。

実規模試験では、最大容量 3m^3 のミキサで練混ぜた。練混ぜ時間と投入材料は次のとおりである。

＜空練り30秒→水(+混和剤)投入後90秒練混ぜ→モルタル排出＞

写真-3 ポンプ方式の状況

写真-4 バケット方式の状況

(1) 充てん性確認試験 (ポンプ方式)

廃棄体間の間隙に対する充てん性を確認するに当たり、模擬廃棄体を製作し設置した。隣り合う模擬廃棄体の間隔は空洞の軸方向には 260mm 、横断方向には 150mm とした。模擬廃棄体は一边が 1.6m の立方体であり、厚さが 9mm の鋼製の外枠に普通コンクリートを充てんしたものである。

区画内充てん材の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-24中の○部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。打込み状況を写真-3に示す。模擬廃棄体の定置状況および打込み完了時の写真は、本稿冒頭に示した写真-1のとおりである。

図-24中の矢印の経路の流動勾配を図-26に示す。打込み時のスランプフローは $76\sim 82\text{cm}$ (目標値 $70\sim 90\text{cm}$)である。間隔幅が広い(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、間隔幅が狭い(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、間隔幅の異なる経路が交

図-26 吐出量と流動勾配

図-27 バケット方式による流動勾配

図-28 硬化後の高低差

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。

(2) 充てん性確認試験 (バケット方式)

バケット方式による試験は、二つの排出口を持つ移動式バケットが、坑道の軸方向(図-24と図-25を参照)に移動して排出することを模擬している。ここでの模擬廃

棄体は、普通コンクリートを現場で打ち込んで製作し、間隙幅は前記と同様に260mmと150mmとした。移動の模擬は、コンクリート用バケットを図-25と写真-4に示すように4個配置して順番に排出することで模擬した。バケットは積載量が1m³のものを使用し、排出口は直径が300mmの円になるように加工した。

打込み順序は、図-25中に示す1(図中では丸数字)の2つのバケットから同時に排出した後、2の2つのバケットから排出した。バケット1の打込み量は1.78m³×2、バケット2は1.34m³×2であり、バケット1の排出速度は477m³/h、バケット2は16.5~69.5m³/hである。バケット1の排出速度はバケットの排出口が全開時の排出速度であり、バケット2は打込み量の調整のために排出口を絞った結果である。打込み時のスランブフローは、83~89cm(目標値70~90cm)であった。

図-25の平面図の△で示した位置で測定した1回目と、2回目の排出後の高さを図-27に示す。排出されたモルタルは排出位置と近い側の壁際が高く、遠い側の壁際まで一定の勾配がついている。排出位置よりも壁際が高い理由として、排出されたモルタルが排出位置の周囲に充てんされた後、充てん量の少ない逆側の壁へ向かって流動したことが考えられる。また、2回目の打込みにより高低差は逆転し、1回目の勾配よりも2回目の勾配が小さくなった。このことから、バケットの移動(排出位置)と排出量の適切な管理により、仕上がり面の高低差は低減させることが可能と考える。

図-28には、硬化後に測定したモルタル高さを、排出位置直下の高さとの差として経路長で整理した。測定位置は、間隙の交差部およびその中点である。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、排出速度が大きく異なるにもかかわらず、ほぼ同じとなった。筆者らは、同様のモルタル(低拡散層)を用いて幅が70cmを対象とした壁部材に打込みを行った結果として、排出速度を大きくした場合に流動勾配が低減することを報告している³⁾。しかしながら、本試験のような間隙幅、間隙の配置条件では、モルタルの流動性は、排出速度よりもモルタル自体の流動性と排出位置の移動による影響が強く作用するものと考えられる。

ポンプ方式の勾配とバケット方式1回目の勾配は、室内で実施した流動性確認試験(20℃)の勾配(1/95)とも同程度であり、排出条件が異なるこれらの勾配が同程度であることから、このモルタル材料が持つ流動性の指標としての勾配は1/100程度と考えることができる。また、排出位置を移動させたバケット方式での高低差の最大値は63mmであり、ポンプ方式では119mmであったことから、56mm低減された。

図-29 計測器位置 (部材中央付近の断面)

表-11 計測器の仕様

計測器	型式	測定範囲
有効応力計	GK-10N-505	10N/mm ²
土圧計	GE400kPa-B	400kPa
温度計	RT-100	-10~80℃

※：計測器は全て(株)東横エルメス製

図-30 打込み時の側圧

表-12 側圧の関連データ

位置	液圧 相当値 [A] kPa	側圧 最大値 [B] kPa	[B]/ [A] %	最大ま での時 間 min	打込み 速度 m/hr	凝結 始発
上段	46	45	98	140	0.87	11:24
中段	87	81	93	200	1.15	
下段	127	103	81	190	1.67	
低拡散層	169	68	40	130	1.85	7:25
ピット	132	72	54	90	2.51	7:55

注 1)液圧相当値：計器位置における打込み完了時点の高さ相当の液圧計算値，注 2)最大までの時間：打込み面が計器高さに達してから側圧最大値となるまでの時間，注 3)打込み速度：計器位置から最大側圧値となるまでの打込み面上昇速度，注 4)低拡散層：左側側部低拡散層下段²⁰⁾，注 5)ピット：側部コンクリートピット下段²⁰⁾，注 6)凝結始発：凝結の始発時間²⁰⁾

(3) 打込み時の側圧が他部材へ与える影響

区画内充てん材の打込み時の側圧が側部コンクリートピットや側部低拡散材へ与える影響を確認することを目的に、高さが6.14mの部材に一括打込みを行った。図-29に充てん時の側圧測定用の土圧計と、側部コンクリートピット、側部低拡散層の計測器の位置を示す。計測器の仕様は表-11に示すとおりである。

図-30に土圧計による側圧測定結果を示す。図には、側圧が液圧で作用するものとした計算値を併せて示した。測定した側圧は、同様の高流動モルタル、高流動コンクリートで試験した既往の報告^{17), 18)}と同様に、一定時間までは液圧で作用し、その後落ち着く傾向にある。側圧値と関連があるデータを、表-12に示す。中段と下段の側圧は、打込み面が計測器に達した190~200分後に最大値に達し、計算した液圧相当値の81~93%程度となる。上段と中段の液圧計算値と測定値との割合の差の要因は、最大値に達する時間までに上昇する打込み高さが異なることが影響していると考えられる。上段では、打込み終了まで液圧で作用しているが、落ち着く時間前に打込み面が最上部に達したためと言える。

表-12に示すように、区画内充てん材は、低拡散層、コンクリートピットよりも液圧で作用する時間が長い。これは、区画内充てん材には遅延型減水剤を配合しており、凝結の始発時間が約4時間長かったことが影響している。

コンクリート標準示方書【施工編】¹⁹⁾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。遅延型の混和剤を用いた場合や冬期施工など凝結が遅い場合には特に、液圧での設計が必須となる。

側部コンクリートピットと側部低拡散層の計測器による測定結果を図-31~図-34に整理した。区画内充てん材の打込みに要する時間は4時間50分であり、打込み時の区画内充てん材のモルタル温度は平均27℃であった。

図-31に側部コンクリートピットと側部低拡散層に埋設した有効応力計による軸方向の応力を示す。側部コンクリートピットの応力は打込み終了時まで引張側に遷移する。その後、応力は圧縮側に移行し、その応力は打込み時よりも大きくなる。側部低拡散層の応力は、打込み開始から打込み終了以降も引張側を示す。

図-32に側部コンクリートピットの温度データを、図-33に側部低拡散層の温度データを示す。区画内充てん材の打込み開始からコンクリート温度が上昇した。この温度上昇は区画内充てん材の水和によるものと考えられ、内側の区画内充てん材側が高温になった。ここで、区画内充てん材に近い側部コンクリートピット内側と側部低拡散層外側の温度差について、図-34に整理した。温度差は打込み開始から大きくなり、打込みから2日後には

図-31 部材軸方向の応力

図-32 側部コンクリートピットの温度

図-33 側部低拡散層の温度

図-34 部材横断方向の温度差

落ち着いた。また、温度差は約5日後に最大値の8.5°Cを示した。

側部コンクリートピットに生じる応力変化は打込み時と比較して、打込み終了後の方が大きい。区画内充てん材の打込みによる影響は、側部コンクリートピットの応力と温度上昇の傾向を見れば、側圧による影響は小さく、打込み後の温度による影響が大きいと言える。側部コンクリートピットに生じる応力は打込み終了以降に温度応力による圧縮力が支配的であり、側部低拡散層の応力は引張側を示す。

以上のように、区画内充てん材の打込みにより、側部低拡散層はひび割れを引き起こす側に応力が作用する。側部低拡散層の応力は打込み直後と33時間後に0.22N/mm²を示すが、側部低拡散層の引張強度は材齢7日で1.88N/mm²、91日で5.51N/mm²であり²⁰⁾、区画内充てん材の施工が、側部低拡散層のひび割れの主要な因子とはならないものと考ええる。

8. まとめ

地下空洞型放射性廃棄物処分施設の設計と建設に向け、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施設の施工に関わる試験を実施している。このうち本稿は、廃棄体の周囲に充てんされる区画内充てん材について示したものである。本試験で得られた知見は、次のとおりである。

- 1) 廃棄体の発熱を想定した60°Cの高温環境条件でも、充てん性が損なわれない区画内充てん材の配合を選定した。
- 2) 高温環境での圧縮強度は、20°C環境の発現性と異なる傾向を示すが、105°Cの養生条件でも材齢91日で33N/mm²を示し、目標圧縮強度の30N/mm²を超えた。
- 3) 実際の配管長を想定したポンプ圧送試験により、超高圧タイプのポンプ車を用いれば、区画内充てん材は圧送可能であることが示された。
- 4) 充てん性を確認する実規模試験では、排出位置の移動により高低差を低減することができた。排出速度や排出方法が区画内充てん材の流動勾配に与える影響は小さく、充てん性の向上のためには排出位置を移動させることが有効である。
- 5) 区画内充てん材の打込みが、隣接部材である側部コンクリートピット、側部低拡散層に与える影響は、打込み時の側圧よりもその後に発生する温度応力による応力の方が大きく、側部コンクリートピットでは圧縮方向に、側部低拡散層では引張方向に作用する。ただし、側部低拡散層の引張強度は材齢7日で1.88N/mm²²⁰⁾、に対し、

発生する応力は 0.22N/mm^2 で、区画内充てん材の施工が、側部低拡散層のひび割れの主要な因子とはならないものと考えらる。

本施工確認試験により、区画内充てん材の施工性の確認と施工に伴う施設の品質の確認ができたと考えられる。これらの結果は、低レベル放射性廃棄物の発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分をはじめ、TRU廃棄物の余裕深度処分の共通的基盤技術として幅広く反映できるものである。

謝辞：本報告は経済産業省の委託により実施した管理型処分技術調査等事業「地下空洞型処分施設性能確認試験」の結果の一部をとりまとめたものである（平成20～22年度）。試験の計画および試験結果の評価にあたっては、専門家からなる「地下空洞型処分施設性能確認試験検討委員会」を設け、関連する知見や意見等を幅広く取り入れた。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 坪谷隆夫，寺田賢二，松村勝秀，大沼和弘，窪田茂：地下空洞型処分施設性能確認試験－計画概要－，土木学会第 62 回年次講演会，CS5-073，pp.305-306，2007.
- 土木学会：余裕深度処分の地下施設の設計，品質管理および検査の考え方，2009.
- 高柳達徳，横関康祐，新保弘，武地真一，根木政広，杉橋直行，秋山吉弘，矢田勤，山田淳夫：低発熱型セメントを用いたコンクリートおよびモルタルの長期材齢における諸性状，土木学会第 68 回年次講演会，CS11-031，pp.61-62，2013.
- 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，pp.161-162，2001.
- 新保弘，戸梶慎一，武地真一，木ノ村幸士，根木政広，杉橋直之，秋山吉弘：発熱廃棄物の表面温度に関する検討－地下空洞型処分施設性能確認試験－，土木学会第 65 回年次講演会，CS7-004，pp.7-8，2010.
- 千田太詩，杉山大輔：フライアッシュ混合セメント硬化体中における有機炭素およびヨウ素の拡散挙動，電力中央研究所報告，2008.
- 庭瀬一仁，杉橋直行，辻幸和：低レベル放射性廃棄物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.
- 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.232，2012.
- 坂部大，名和豊春，大久保正弘：高ビーライト系セメントを用いたモルタルの蒸気養生における強度発現性，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.1，pp.469-474，1995.
- 高田誠，岡沢智，松尾茂美，阿合延明：超遅延性減水剤の凝結遅延機構と性能評価，エヌエムビー研究所報，No.9，pp.57-67，1992.
- Portland Cement Association: Design and Control of Concrete Mixtures, 14th edition, pp.226, 2002.
- 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.
- 鈴木一孝，西川直宏：コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組成の分析手法に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.34，pp.39-49，1990.
- 小早川真，黄光律，羽原俊祐，友澤史紀：水比，混合率および養生温度がフライアッシュのボゾラン反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.21，No.2，pp.121-126，1999.
- 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針，pp.4，2000.
- 小平伸彦，熊野知司，大西隆雄，西岡真帆：高流動コンクリートのポンプ圧送による品質変化に関する現場計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1157-1162，2006.
- 田中俊行，小林裕，福田勝美，広中良和，村上利一，枝松良展，川崎康司：余裕深度処分におけるセメント系人工バリアの現場施工に関する検討（その 3）－高流動モルタル打設時の側圧に関する考察－，土木学会第 62 回年次講演会，CS05-035，pp.229-230，2007.
- 新保弘，金澤亮一，福田勝美，窪田茂，杉橋直行，根木政広，寺田賢二：地下空洞型処分施設性能確認試験におけるコンクリートピット等施工確認試験に関する検討，土木学会第 64 回年次講演会，CS5-022，pp.177-178，2009.
- 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.236，2012.
- (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地下空洞型処分施設性能確認試験報告書，2010.

(2012.12.11 受付)

EVALUATION ON CONSTRUCTION QUALITY OF PIT FILLER MATERIAL OF CAVERN TYPE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY

Shin-ichi TAKECHI, Kosuke YOKOZEKI, Hiroshi SHIMBO,
Kenji TERADA, Yoshihiro AKIYAMA, Tsutomu YADA and Yukikazu TSUJI

The pit filler material of the underground cavern-type radioactive waste disposal facility, which is poured directly around the radioactive waste packages where high temperature environment is assumed by their decay heat, is concerned to be adversely affected on the filling behavior and its hardened properties. There also are specific issues that required quality of construction must be achieved by unmanned construction with remote operation, because the pit filler construction shall be done under radiation environment.

In this paper, the mix proportion of filler material is deliberated with filling experiments simulating high temperature environment, and also the effect of temperature on hardened properties are confirmed with high temperature curing test. Subsequently, the feasibility of unmanned construction method of filler material by pumping, and by movable bucket, are comparatively discussed through a real size demonstration.