

幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の適用性確認

中山雅*1 丹生屋純夫*2 南出賢司*3

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設において、坑道の空洞安定性確保や周辺岩盤のゆるみ領域の抑制、掘削に伴う湧水量の抑制のため、セメント系材料を用いた吹付けコンクリートやグラウトが検討されている。これらの材料の影響で坑道周辺の地下水の pH が高アルカリ化することにより、緩衝材を構成するベントナイトや周辺の岩盤を変質させ、人工バリアおよび天然バリアとしての性能に影響を与えることが懸念されている。このような影響を低減するために、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構では、普通ポルトランドセメントにポゾラン材料を混合した低アルカリ性セメント（以下、HFSC）を開発し、化学的特性、機械的特性、施工性などについて検討を実施してきた。本報告では、HFSC を吹付けコンクリートとして、幌延深地層研究センター地下施設の深度 350m 調査坑道の施工に適用し、施工性について確認した。その結果、HFSC が現地のプラントを用いて製造可能であること、地下施設的设计基準強度を上回る強度発現が可能であること、および地下施設の通常の施工に使用されているセメント系材料と同等の施工性を有することが確認され、HFSC の地下坑道への適用性が確認された。

Keywords: 幌延 URL, 低アルカリ性セメント, ポゾラン材料, 吹付けコンクリート, 地層処分

In Japan, high-level radioactive waste repository will be constructed in a stable host rock formation more than 300m underground. Tunnel support is used for safety during the construction and operation, so, shotcrete and concrete lining are used as the tunnel support. Concrete is a composite material comprised of aggregate, cement, water and various additives. Low alkaline cement has been developed for the long term stability of the barrier systems whose performance could be negatively affected by highly alkaline conditions arising due to cement used in a repository. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has developed the low alkaline cement, named as HFSC (Highly fly-ash contained silicafume cement), containing over 60wt% of silicafume (SF) and Fly-ash (FA).

JAEA is presently constructing the underground research laboratory (URL) at Horonobe for research and development in the geosciences and repository engineering technology.

HFSC was used experimentally as the shotcrete material in construction of part of the 350m deep gallery in the Horonobe URL in 2013.

The objective of this experiment was to assess the performance of HFSC shotcrete in terms of mechanics, workability, durability, and so on. HFSC used in this experiment is composed of 40wt% OPC (Ordinary Portland Cement), 20wt% SF, and 40wt% FA. This composition was determined based on mechanical testing of various mixes of the above components. Because of the low OPC content, the strength of HFSC tends to be lower than that of OPC in normal concrete. The total length of tunnel constructed using HFSC shotcrete is about 112m at 350m deep drift. The workability of HFSC shotcrete was confirmed by this experimental construction. In this report, we present detailed results of the in-situ construction test.

Keywords: Horonobe Underground Research Laboratory, low alkaline cement, pozzolanic material, shotcrete, geological disposal

1 緒言

高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）の処分施設は、地下 300m 以深に建設されることから、坑道の空洞安定性確保や周辺岩盤のゆるみ領域の抑制、掘削に伴う湧水量の抑制のため、セメント系材料を用いた吹付けコンクリートやグラウトが検討されている。また、坑道埋め戻し時に設置されるプラグのうち、埋め戻し材に混合されるベントナイト等の膨潤応力に対する反力を確保するための力学プラグについてもコンクリートの使用が想定されている[1]。HLW 処分施設の建設に用いられる支保工に関する要求性能については、Table 1 のようにまとめられている[2]が、設計要件のうち、力学安定性と施工性は、通常のトンネル工事での支保工においても要求される事項であり、化学的安定性は HLW 処分施設に特有な要件である。

セメント系材料として、生産量が最も多い普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement; 以下、OPC）は、セメント硬化体の細孔溶液中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 KOH 、

NaOH などのアルカリ成分により、pH が 13 程度の高アルカリ性を呈する。この特性は、鉄筋コンクリート中の鉄筋の表面に不動態皮膜を生成し、鉄筋の耐腐食性を高め、鉄筋コンクリートが長期にわたりその性能を保持するために必要な条件となっている。

一方、HLW 処分施設では、上記のセメント硬化体中に含まれる高アルカリ成分が地下水に溶出した場合、緩衝材を構成するベントナイトや周辺の岩盤を変質させ、人工バリアおよび天然バリアとしての性能に影響を与えることが懸念されている[3]。このため、国内外の各機関においてコンクリートからの浸出水の pH を 10.5~11 程度に抑える低アルカリ性セメントの開発が行われているとともに、高アルカリ性のセメント系材料からの浸出水が、緩衝材や岩盤の性質に与える影響がさまざまな研究機関で検討されている[4,5]。また、セメント系材料は、水和生成物の地下水への溶脱などによる劣化に伴い発生した空隙が核種移行経路となる可能性もあることから、セメントの長期挙動特性を把握することも重要であるとされている[6]。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、セメント系材料の低アルカリ性を担保する材料として、OPC の 50% 以上を、シリカフューム（Silicafume; 以下、SF）およびフライアッシュ（Fly-ash; 以下、FA）で置換した低アルカリ性セメントである、HFSC（Highly Fly-ash contained Silicafume Cement）を開発している[7]。

Confirmation of the applicability of low alkaline cement-based material in the Horonobe Underground Research Laboratory by Masashi NAKAYAMA (nakayama.masashi@jaea.go.jp), Sumio NIUNOYA, Masashi MINAMIDE.

*1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター
Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

*2 株式会社大林組 Obayashi Corporation
〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟

*3 大成建設株式会社 Taisei Corporation
〒060-0061 札幌市中央区南 1 条西 1 丁目 4 番地 大成札幌ビル

(Received 11 November 2015; accepted 23 February 2016)

Table 1 Requirements for concrete support [2]

設計要件	概要
力学安定性 (本来的に必要な機能)	建設～閉鎖までの期間において、周辺岩盤を安定に保持
化学的安定性 (人工バリアを保護する機能)	コンクリートと緩衝材の接触により、緩衝材が許容限度を超えて劣化することを回避 コンクリートの劣化により、支保工部分が許容限度を超えた高透水ゾーンとなることを回避
施工性 (付随して期待する機能)	地山の安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択

HFSC は、ポゾラン材料である、SF や FA のポゾラン反応により、セメント水和物中で高アルカリ性を示す $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を珪酸カルシウム水和物（以下、CSH）などの難溶性の水和物に変化させ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量を減少させるとともに、カルシウムシリカモル比（以下、C/S）を OPC のみの場合よりも低下させることにより、pH を低下させることを指向した材料である。これまでに、HFSC を実際の坑道に適用するために、最適配合の検討、強度発現性、模擬トンネルに対する吹付け施工性の確認などを実施してきた [8]。

HFSC を用いた吹付けコンクリートについては、幌延深地層研究センター地下施設（以下、幌延 URL）の深度 140m および 250m 調査坑道における原位置施工試験を実施している [9,10,11]。その結果、HFSC を用いた吹付けコンクリートは、現場のバッチャープラントで作製可能であり、幌延 URL の坑道の支保工として使用可能であることが確認された。また、坑道での施工に際しては OPC よりも粉塵の発生量が少ないことなどが確認された。本研究では、HLW 処分施設（深度 300m 以深）での使用を想定した場合に考えられる、地圧が増加することによる変位拘束効果などへの対応や、移送距離の増加に伴うポンプ圧送性などの施工性への対応などが、HFSC を用いた吹付けコンクリートの品質や施工性へ影響するのかどうか、などに関する知見を蓄積するために深度 350m 調査坑道において実施した原位置施工試験について述べる。

2 原位置施工試験

2.1 概要

原位置施工試験は、幌延 URL の水平坑道である、深度 350m 調査坑道 (Fig. 1) の掘削サイクル内で実施するため、試験により施工される吹付けコンクリートには、空洞安定のための十分な力学特性、施工性を有していることが求められる。

万が一、力学特性、施工性などが不十分であった場合には、幌延の地下施設工の安全性確保や工程に重大な影響を与える可能性がある。そのため、深度 140m および 250m 調査坑道における原位置施工試験の際には、坑内での試験施工に先立ち、実際に工事で使用するバッチャープラントおよび吹付け機器などを用いて、地上で型枠への吹付け試験を実施し、HFSC 吹付けコンクリートが十分な強度および施工性を有することを確認した [9,10,11]。深度 350m 調査坑道における HFSC 吹付けコンクリートの施工範囲を Fig. 2 に赤色で示す。HFSC を施工する坑道の延長は西連絡坑

道で 37m、試験坑道 2,3,4 で各 25m の合計 112m である。

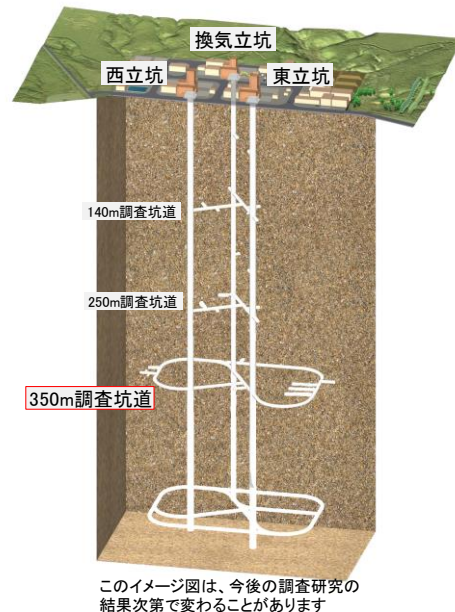


Fig. 1 Layout of the Horonobe URL

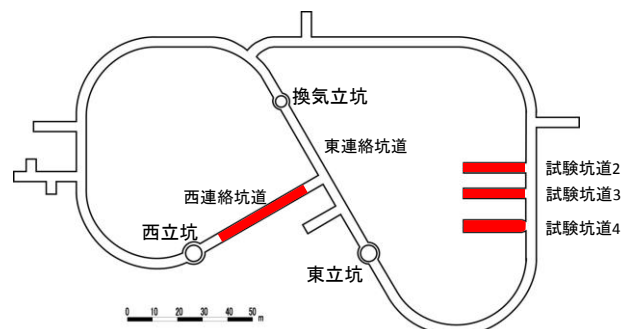


Fig. 2 Layout of the drift used HFSC shotcrete at the 350m gallery

2.2 吹付け施工試験

2.2.1 調査坑道の施工手順

調査坑道の掘削は、小型バックホウにブレイカを取り付け、ブレイカにより岩盤を破碎することにより行った。なお、地下施設の建設対象としている地層（声間層および稚内層）中に存在する地下水には可燃性のメタンガスが溶解しており、掘削に伴い、メタンガスが発生する。したがって、作業安全のために、掘削に当たって事前にガスチェックボーリングを行い、ガス濃度の測定を行った。また、切

羽において作業に使用する重機、電気機器類に対しては防爆仕様を義務付けた。裸坑の状態では坑道壁面の観察（写真撮影、壁面のスケッチなど）を行った後、当該施工サイクルにおける後続の作業の安全を確保するために1次吹付けコンクリート工（厚さ5cm）を実施し、鋼製支保工を設置した。鋼製支保工の間の坑道壁面全面に溶接金網を設置し、2次吹付けコンクリート工（厚さ15cm）を行った。なお、調査坑道の交差部などの応力集中が生じやすい場所においては、ひび割れ防止のためにコンクリートに繊維補強材を添加するとともに、長期の空洞安定性を確実にするために、坑道壁面への溶接金網の再度の設置と3次吹付けコンクリート工（厚さ5cm）を行った。Fig. 3に、HFSCの吹付け施工試験を実施した坑道の標準断面図を示す。試験坑道2は円形、試験坑道3、4および西連絡坑道は三心円馬蹄形であり、さらに試験坑道4は堆積岩における堅置き式の処分坑道の断面[12]とした。

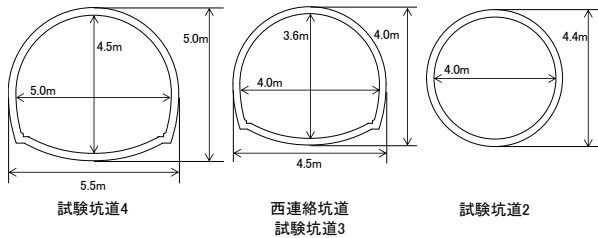


Fig. 3 Typical cross section of the test gallery

2.2.2 使用材料および配合

HFSCを吹付けコンクリートとして使用した材料をTable 2に示す。使用する材料は深度250m調査坑道での施工試験と同様であり、基本的に幌延URLの建設工事で使用している材料（以下、現地材料）とした。地下施設建設工事ではOPCではなく、高炉セメントB種（以下、BB）を用いているため、Table 2中のOPCおよびSF以外が現地材料である。

これらの材料を用いて、Table 3に示す配合で試験練りを行い、テストピース（φ100mm×200mm）を作製し圧縮強度試験（材齢7日、28日、91日）を実施し、設計基準強度（材齢28日、36N/mm²）を満足することを確認した後に、地下での実施工を実施した。試験結果については後述する。

2.2.3 地下での実施工

深度350m調査坑道の施工方法は、他の調査坑道と同様であり、標準断面（坑道代表幅4m）の形状は三心円馬蹄形である（Fig. 3参照）。吹付け方式は湿式吹付けであり、コンクリート吹付け機（アリバ285、吹付け能力：6-21m³/hr、最大送り距離：60m）は地上からのコンクリート移送の利

便性を考慮し、東立坑のスcaffold下の底盤部（深度350m）に設置した。調査坑道の掘削が進展することにより送り距離が長くなり、コンクリート吹付け機の圧送能力が低下した場合には、ピストン式コンクリートポンプ（160-40-8コンクリートポンプ、理論吐出量：1-10m³/hr）に変えてコンクリートを圧送し、吹付け施工を行った。ただし、HFSCの吹付け施工試験においては、ピストン式コンクリートポンプのみの使用であった。Fig. 4に施工のイメージ図を示す。

施工後にコンクリートおよび周辺岩盤のコアや地下水などのサンプリングに備え、繊維補強材を配合しない区間を設定した。なお、繊維補強材を配合しない区間では、定着材の化学的影響を避けるために、摩擦式のロックボルトを使用した。

Table 2 Material used to make HFSC

Material	Spec
OPC	Density=3.16 Mg/m ³
Silicafume	Microsilica 940, Density=2.20 Mg/m ³
Fly-ash*	JIS-II grade, Density=2.20 Mg/m ³
Sand*	F.M.=2.78, Density=2.66 Mg/m ³
Aggregate*	Diameter;5-13 mm, Density=2.66 Mg/m ³
Water Reducing Agent*	SP8SV (Polycarboxylic Acid Based)
Set Accelerating Agent*	Natmic Type-10, 10% of Binder (Calcium Sulphoaluminate Based)
Fiber*	Barchip M-K, Density=0.91 Mg/m ³ (Polypropylene Based)

*: Local Procurement Material

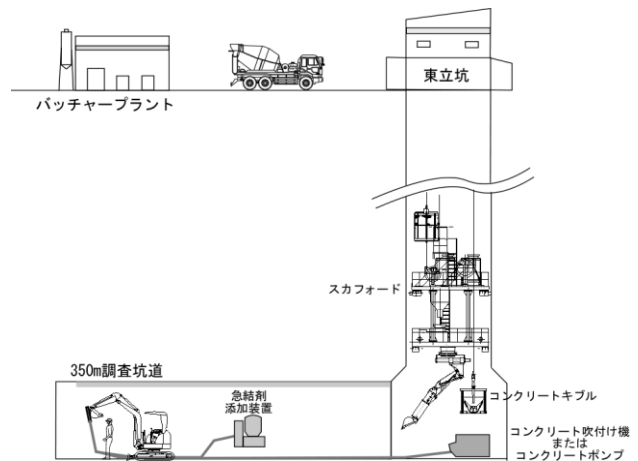


Fig. 4 Construction of the gallery used HFSC shotcrete

Table 3 Mixed proportion of HFSC shotcrete using for 350m drift of the Horonobe URL

Type of cement	Water-Binder Ratio W/B (%)	Sand Ratio s/a (%)	Water W	Unit weight (kg/m ³)					
				Binder B			Fine Aggregate S	Coarse Aggregate G	Super Plasticizer (SP8SV) Ad
				OPC	SF	FA			
HFSC	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	3.25(0.65%)

3 試験結果

3.1 圧縮強度試験

地下施設の建設工事で使用しているバッチャープラントを用いて Table 3 に示した配合でテストピース、(φ100mm×200mm) を作製し、圧縮強度試験(材齢7日, 28日, 91日)を実施した。Fig. 5 に試験練りおよび吹付け時のバッチから作製したテストピースの結果を示す。比較のため、地下施設建設工事で通常使用している BB の試験結果の一例(材齢7日, 28日)を合わせて示す。これらのテストピースは、コンクリート製造設備で練り混ぜたコンクリートを地下に運搬する前に、トラックミキサー車から採取したコンクリートをモールドに入れ作製したものであり、材齢1日で脱型し、その後試験材齢までは標準養生した。

Fig. 5 から、HFSC を用いた吹付けコンクリートが深度350m 調査坑道の設計基準強度(HFSC, BB 共通, 材齢28日で 36N/mm²以上)を満たしていることがわかる。また、ポゾラン材料が多く配合されている HFSC の特徴として、材齢28日から材齢91日にかけても強度が増加していることがわかる。HFSC の強度に見られるばらつきについては、コンクリート混練時の外気温や練り混ぜ量の違いなどが考えられる。地下施設の建設工事で実施した BB の強度試験においても、材齢28日の時点で最大 15~20N/mm²のばらつきが見られたことから、現場製造でのばらつきの範囲内であるといえる。

以上より、HFSC は現場のバッチャープラントで十分製造可能と考えられる。

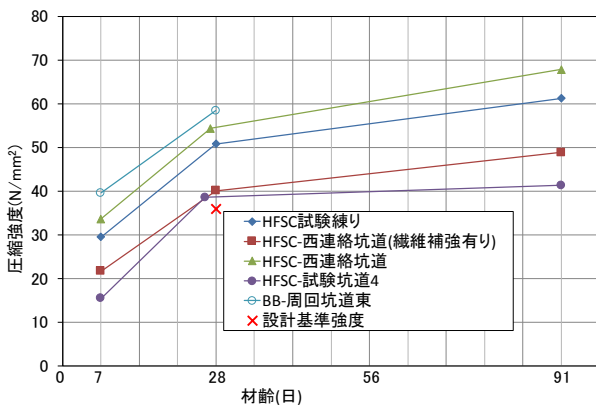


Fig. 5 Uni-axial compressive strength with time

3.2 吹付け施工性

地下での実施工における施工性については、混合状態、脈動状態、ノズルだれ、急結状態、粉塵、付着状態について、吹付け施工時にトンネル工事の経験の多い技術者の目視により確認し、5点満点で点数を付けることで評価を行った。Table 4 に判断基準を、Table 5 に深度350m 調査坑道での評価結果、これまでに実施した深度140m および250m 調査坑道での評価結果、さらに比較のために深度140m および250m 調査坑道で実施した OPC および BB の吹付け施工性の評価結果[9,10,11]を合わせて示す。Table 5 から、HFSC の施工性について、混合状態や脈動状態は OPC や BB と同じ点数(4点)で同等と評価された。また、粉塵および付着状態では HFSC (4点)の方が OPC や BB (3点)より点数が高くなり、よりよい評価となった。実際の粉塵濃度およびはね返り率の測定値においても、目視判定結果と同様に OPC および BB に対して HFSC は同等あるいは良好な値が得られた (Table 6)。HFSC に対する評価点は、全体的に3点または4点であり、OPC および BB と同等の施工性であることが確認された。

Table 5 Workability of HFSC shotcrete compared with that of OPC and BB shotcrete

Item	Evaluation(point)				
	350m	140m [9,10]	250m [11]	OPC (140m) [9,10]	BB (250m) [11]
Mixing state	4	4	4	4	4
Pulsed condition of pipes	4	4	4	4	4
Drips from nozzle	4	3	4	4	4
Quick-setting state	4	4	4	3	4
Dust	4	4	4	3	3
Adherent state	4	4	3	3	3

3.3 空洞安定性

深度350m 西連絡坑道の施工中から、定期的に内空変位の計測を実施した結果を Fig. 6 に示す。横軸は支保工 No.6 での測定開始時点からの経過日数であるため、測定区間によって測定開始の時期にずれが生じている。縦軸は、測定

Table 4 Criteria for visual judgement of workability of HFSC shotcrete

Item	Score of visual judgement				
	5 (Good)	4	3 (Normal)	2	1 (Bad)
Mixing state	ノズルから吐出されるコンクリートと急結剤の混合状態から判断する。				
Pulsed condition of pipes	マテリアルホースの脈動、あばれの状況から判断する。				
Drips from nozzle	ノズルの先端から配管内のノロが落ちる状態から判断する。				
Quick-setting state	壁面付着後の急結状態を吹付け後の触指で判断する。天端部では、吹付けエアによる下地コンクリートの「捲られ」などの動きで判断する。				
Dust	粉じんの多少を判断する。通常の工区 (OPC または BB) と HFSC の相対的比較で判断する。				
Adherent state	リバウンド・たれ・圧送エアによる「捲られ」や、吹付け表面の平滑さを含む総合的な付着状態を判断する。ただし、急結性の判断は含まない。				

Table 6 Dust concentration and rate of rebound of HFSC shotcrete compared with those of OPC and BB shotcrete

Item	350m	140m [10]	250m [11]	OPC (140m) [10]	BB (250m) [11]
Dust concentration (mg/m ³)	7	16	11	16	19
Rate of rebound (%)	21.3	22.5	24.4	37.8	27.5

開始時点からの変位量を表しており、膨張を正、収縮を負としている。内空変位の計測点は、およそ 5m 間隔に配置されており、図中の No.6, 46, および 51 が通常の施工である BB の吹付け区間で、その他は HFSC による吹付け区間を示しており、凡例に「-Fi」とある区間は繊維補強材を配合したことを示している。Fig. 7 に測定区間、HFSC 施工範囲および繊維補強材の配合範囲を示す。

幌延 URL の深度 350m 調査坑道は、珪質泥岩である稚内層に位置しており、地上からの調査において深度 350m 調査坑道は、断層と交差することが予想された。そのため、掘削に伴い湧水が増加する可能性が懸念されたことから、坑道の掘削前に深度 250m 調査坑道から湧水抑制対策（グラウト工）を施している。しかしながら、坑道掘削時には本報告における計測範囲において、想定した断層との交差は確認されておらず、顕著な湧水量の増加なども確認されなかった。

Fig. 6 から、No.46 および No.51 をのぞいて、HFSC および BB のどちらも数十日で変位は安定し、変位量はおよそ 2~6mm 程度に収まっているのに対し、No.46 および No.51 では、掘削後の変位量が他の区間に比べて大きく、変位が安定するまでに 150 日程度かかっていることがわかる。この違いは、東連絡坑道の掘削完了から西連絡坑道の掘削まで約 10 ヶ月が経過しており、No.6 近傍の岩盤の変位がすでに安定していたのに対し、西立坑が GL-350m に到達して約 1 週間以西連絡坑道との接続部が掘削されたため、No.51 近傍では、西立坑の掘削の影響が強く残っていたためと考えられる。また、No.41, No.46 および No.51 では、測定開始後およそ 350 日を越えたところで、西立坑の深度 350m ~365m の掘削に起因すると思われる変位量の増加が見られる (Fig. 6 の赤点線で示した区間)。

以上より、空洞安定性の指標とした内空変位は、接続する西立坑近傍では立坑掘削の影響を受けるものの、その影響は問題のない範囲であり、総じて HFSC は、空洞安定性においても BB と同等の性能を示すことが示唆された。

4 まとめ

原子力機構が坑道周辺の地下水の高アルカリ化を抑制することを目的に開発した、低アルカリ性セメント (HFSC) を用いて幌延深地層研究センターの深度 350m 調査坑道において吹付けコンクリートを施工した。その結果、HFSC を用いた吹付けコンクリートにおいて、通常のセメント (普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種) と比較

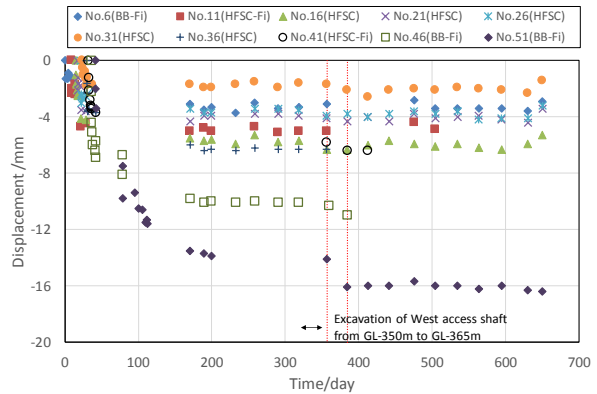


Fig. 6 Chronological change of convergence at the West Connecting Gallery

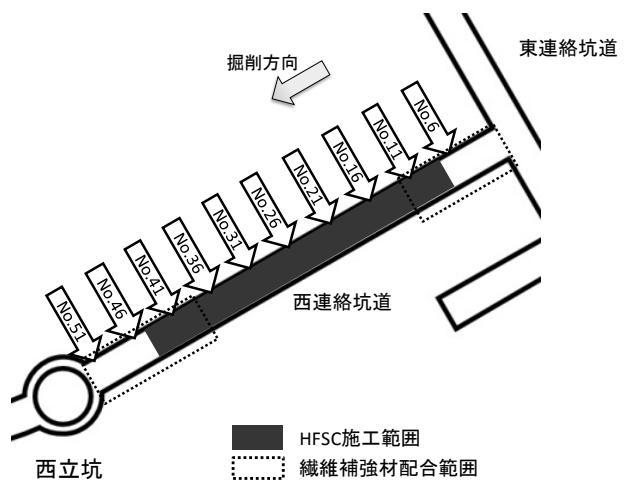


Fig. 7 Measurement line of convergence at the West Connecting Gallery

しても、混合状態、粉塵濃度および付着状態などにおいて同等以上の施工性を示した。また、施工後の空洞安定性についても、内空変位測定および高炉セメント B 種の施工区間との比較を行い、同程度の変位で収束していることを確認した。これらの結果から、HFSC は従来のセメントと同等またはそれ以上の品質および施工性を持つと判断される。

今後は、深度 140m および 250m 調査坑道からの採取試料に対して実施している、周辺岩盤および地下水への影響評価試験を深度 350m 調査坑道からの採取試料に対しても実施し、通常セメントの施工部分との比較を通じて、HFSC が周辺の地質環境に与える影響についても考察する計画である。

参考文献

[1] 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 一平成 17 年取りまとめ一 分冊 2 工学技術の開発, JNC TN1400 2005-015 (2005).

[2] 原子力発電環境整備機構: 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, NUMO-TR-04-01 (2004).

- [3] NUMO: Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, Nuclear Waste Management Organization of Japan, 14-16, April, 2004, Tokyo, Japan, NUMO-TR-04-05 (2004).
- [4] Cama J. et al.: Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 2701-2717 (2000).
- [5] 大和田仁 他: アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動, JNC TN8400 2000-027 (2000).
- [6] 土木学会原子力土木委員会地下環境部会: 高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性の向上に向けて—土木工学に関わる技術を中心として— (2004).
- [7] 三原守弘, 入矢桂史郎: 放射性廃棄物処分場用セメント系材料, 特許公報, 第 2941269 号 (1999).
- [8] Nakayama, M. et al.: Development of Low Alkaline Cement Considering Pozzolanic Reaction for Support System in HLW Repository Construction, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.932* (2006).
- [9] Nakayama, M. et al.: Low Alkaline Cement used in the Construction of a Gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory, *Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010*, Tsukuba, Japan, October 3-7, 2010, ICEM2010-40038 (2010).
- [10] 中山雅 他: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性—140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, JAEA-Research 2010-055 (2011).
- [11] 中山雅 他: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性—250m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, JAEA-Research 2012-023 (2012).
- [12] 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— 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC-TN1400 99-022 (1999).