

論文 ポゾラン高含有低アルカリ性吹付けコンクリートの施工性

入矢桂史郎*¹・中山雅*²・小西一寛*³・三原守弘*⁴

要旨：数千年以上の半減期を持つ核種を含む放射性廃棄物を処分する施設に適用するために、普通ポルトランドセメントより浸出水の pH が低くなるフライアッシュを高含有したシリカフュームセメントを開発した。放射性廃棄物処分施設の建設では吹付けコンクリートに適用することも考えられているが、凝結時間や初期強度などに課題がある。本研究では、ポゾランの混合割合や水結合材比および急結剤の種類を適切に選定することで、トンネル支保工としての適用が可能であることを示した。

キーワード：低アルカリ、ポゾラン、フライアッシュ、シリカフューム、吹付け

1. はじめに

数千年以上の半減期の核種を含む放射性廃棄物処分施設の人工バリア材料としては、処分施設操業時の力学的性能に着目したセメント系材料と膨潤に伴う自己シール性とコロイドなどのフィルトレーションに優れたベントナイト系材料との複合バリアの検討が行われている¹⁾。

しかし、セメント系材料が数千年以上の長期にわたりベントナイトや岩盤と接触すると、その浸出水が示す高い pH (12.5 以上) の影響により、ベントナイトや周辺岩盤を変質させることが懸念されている^{2), 3)}。このため、筆者らは普通ポルトランドセメント (以下 OPC) を用いたコンクリートに比べ浸出水の pH が低い“低アルカリ性セメント” (フライアッシュ高含有シリカフュームセメント, 以下 HFSC) を開発した。開発した低アルカリ性セメントはフライアッシュ (以下 FA) やシリカフューム (以下 SF) などのポゾラン材料を多量に使用し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ をカルシウムケイ酸塩水和物 (CSH ゲル) とすることにより、浸出水の pH が 11 程度以下を目標とした⁴⁾。ここで、浸出水とは、セメント硬化体と溶

解平衡に達した水のことであり、コンクリート中から地下水に浸出する水を想定している。

独立行政法人日本原子力研究開発機構が北海道幌延町に建設を進めている幌延深地層研究センターの地下施設では、堆積岩を対象とした放射性廃棄物処分に必要な建設技術の実証が行われる予定であり、地下研究坑道建設時の支保工として低アルカリ性コンクリートの施工試験が行われる計画である。このため、本研究では HFSC を NATM 工法で構築されるトンネル支保工に適用するために、吹付けコンクリートとしての施工性について検討した。

2. ポゾランの混合比率と浸出水の pH

HFSC は OPC, SF および FA を組み合わせたもので、その混合比率により表-1 に示す 3 種類の配合を検討対象とした。各混合比率における

表-1 HFSC の種類

結合材 略号	混合割合		
	OPC	SF	FA
HFSC226	20%	20%	60%
HFSC325	30%	20%	50%
HFSC424	40%	20%	40%

*1 (株) 大林組技術研究所土木材料研究室 博士(工学) (正会員)

*2 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究ユニット 博士(工学)

*3 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 地層処分基盤研究開発ユニット 博士(工学) (正会員)

*4 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 地層処分基盤研究開発ユニット 修士(工学) (正会員)

浸出水の pH の変化について、水結合材比 0.27 のセメントペーストを用いて試験を行った。供試体は、ペースト混練後、直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体に整形し、28 日間 20℃で水中養生し、その後取り出して 2cm 厚さの円板状にスライスし、所定の材齢まで浸漬した。その後、0.5mm 以下に微粉碎したものを液固比が重量で 2:1 となるように、蒸留水中に浸漬し、溶解平衡に達したことを確認した後、ガラス電極法により pH を測定した。図-1 に液相の pH の変化を示す。表-2 に浸漬期間 819 日における液相の化学組成と pH を示す。pH は浸漬期間とともにほぼ直線状に低下しており、浸漬 819 日で HFSC226 の pH は 11.5 程度に、HFSC424 では、11.7 まで低下した。写真-1 に水中で 819 日浸漬した HFSC ペースト固相の EPMA による Ca/Si モル比の分析結果を示す。Ca/Si モル比は概ね 0.4 程度と推定される。一方、写真-2 は同一材齢、同一水セメント比の OPC の Ca/Si モル比の測定結果であり、2.0~2.5 と推定される。また HFSC について示差熱分析を実施したところ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は検出されなかった。以上から HFSC においては、ポゾラン反応の進行とともに、水酸化カルシウムが消費され、CSH 中の Ca/Si モル比が低下することにより浸出水の pH が低下することが確認された。

3. 吹付けコンクリートの室内試験

3. 1 使用材料および配合

吹付けコンクリートに使用した材料を表-3 に示す。支保工として使用する吹付けコンクリートには、低アルカリ性のほかに圧縮強度、低透水性および吹付け施工性が要求される。これらの性能に及ぼす HFSC

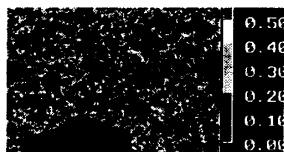


写真-1 HFSC424

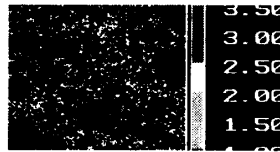


写真-2 OPC

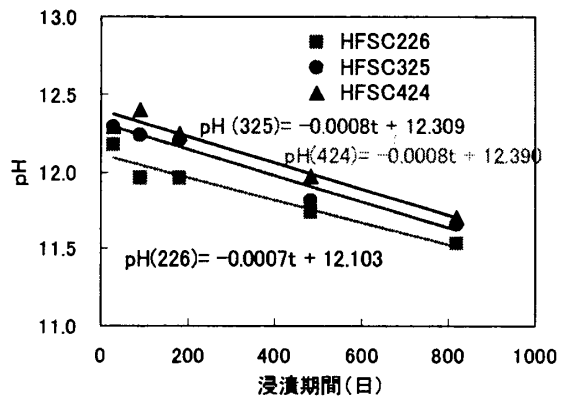


図-1 pH の変化

表-2 液相の分析結果

HFSC 種別	液相分析結果(mol/L)					pH
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
HFSC 226	13.3	51.0	15.8	0.26	0.54	11.53
HFSC 325	17.5	44.8	13.2	0.24	0.47	11.66
HFSC 424	22.4	41.0	11.6	0.23	0.43	11.70

表-3 使用材料

材 料	メーカー等	規格等	備考
OPC	D 社製	JIS5210	
FA	厚真発電所産	JISA6201Ⅱ種	
SF	ノルウェー	JSCED106	Grade 940
細骨材	姫川水系砂	密度 2.60g/cm ³	FM =2.90
粗骨材	糸魚川産	密度 2.64g/cm ³	6号 碎石
減水剤	F 社製高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	
急結剤	D 社製	カルシウムサルフォ アルミネート系	

表-4 ベースコンクリートの配合

セメント の種類	W/B	s/a (%)	単位量(kg/m³)						
			OPC	SF	FA	W	S	G	AD (%)
OPC	0.60	60	360	-	-	216	1053	708	-
HFSC 226	0.60	60	72	72	216	216	1006	676	0.5
	0.55		72	72	216	198	1035	695	1.4
	0.50		80	80	240	200	1006	676	1.4
	0.45		90	90	270	203	970	652	1.2
HFSC 325	0.5	60	120	80	200	200	1006	646	1.5
HFSC 424	0.50	60	160	80	160	200	976	663	1.2
	0.45		180	90	180	203	976	663	1.2
	0.40		200	100	200	200	950	645	1.1
	0.35		220	110	220	193	931	632	1.1

の配合上の要因は各結合材の比率と水セメント比である。ポゾランの比率を少なくすれば圧縮強度は大きくなるが、pHの低下速度が小さくなる。また圧縮強度は水結合材比にも影響を受ける。ここでは急結剤を入れる前のコンクリート強度に与える各要因の影響を把握するため、OPCおよび材料比率を変えた3種類のHFSC(226, 325, 424)について、水結合材比を変化させ、それらの要因が圧縮強度に与える影響について検討した。HFSCは、シリカフュームを20%含んでいるため粘性が高いことから、ワーカビリティを得るために高性能AE減水剤を使用した。骨材の最大寸法は施工性を考慮し10mmとした。ベースコンクリートの配合を表-4に示す。

3. 2 強度発現性

材齢28日における各配合の圧縮強度の試験結果を図-2に示す。HFSCにおいても水結合材比にほぼ比例して強度低下が認められるが、その低下割合は、FAの含有率が少ないほど大きくなっている。すなわちFAを40%含むHFSC424では、水結合材比を小さくすることによって高強度が期待できるが、FAを60%含んだHFSC226では、水結合材比を小さくしても強度増加は期待できない結果となった。図-2より、水結合材比0.6において、3種類のHFSCの圧縮強度を推定して、OPCの同一水セメント比の圧縮強度と比較すると、いずれもOPCより小さい値となる。一般にトンネル支保工として要求される圧縮強度を 18N/mm^2 とすると⁵⁾、HFSC226では水結合材比を小さくしてもその値を満足することは困難である。また、幌延深地層研究センターに建設中である地下施設の水平坑道の支保工は、設計基準強度が 36N/mm^2 の高強度仕様で設計されており、材料変動等を考慮して目標強度を 46.8N/mm^2 とすると、HFSCを用いた吹付けコンクリートの配合設計はとして、セメントの種類をHFSC424、水結合材比を0.4以下とする必要があるという結果となった。

4. 吹付けコンクリート施工試験

4. 1 コンクリートの配合

吹付けコンクリートの施工性および強度は実際の施工状況によって大きく影響される。OPCおよびHFSC(226および424)において、模擬トンネルを用いて 2m^3 程度を連続的に吹き付ける吹付け施工試験を実施し、施工性と吹き付けたコンクリートの強度特性等の評価を行った。試験に用いたコンクリートの配合は、普通強度対応および高強度対応の配合をベースコンクリートの中から選定した。急結剤はカルシウムサルフォアルミネート系の高強度タイプを使用した。施工性試験を行った配合を表-5に示す。

4. 2 施工方法

コンクリートは急結剤を除いて、レディミクストコンクリート工場で練混ぜ、トラックアジテータ車に積み込み、30分間かけて吹付け施工場所に運搬した。現場では、コンクリートポンプでノズルまで圧送し、ノズル先端で急結剤と混ぜて吹き付ける湿式方式とした。吹付け厚さは支保工を想定して30cmとし、強度試験用の型

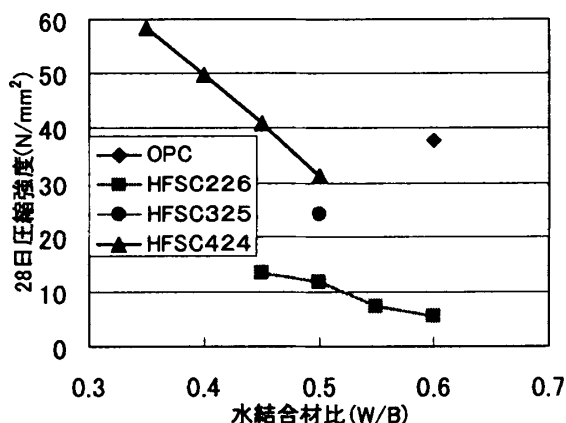


図-2 水結合材比と28日圧縮強度の関係

表-5 吹付け施工試験を行ったコンクリート

No	セメントの種類	スランプ (cm)	空気 量 (%)	G _{max} (mm)	W/B	s/a (%)	急結 剤 (%)
1	OPC	10	2.5	10	0.60	60	7
4	HFSC226	18			0.50		10
7	HFSC424				0.50		
9					0.40		

枠およびトンネル壁面に吹き付けた。2m³を吹付けるのに要した時間は約 10 分間であった。施工状況を写真-3 に示す。

4. 3 試験方法

吹付け試験では、①施工性評価②リバウンド率③圧縮強度④透水係数の 4 項目について試験および評価を行った。施工性については 3 名以上の専門家により粉塵や付着状態などの 6 項目について 5 点満点での評価を行った。リバウンド率の測定は、JSCE-F563-2005「吹付けコンクリートのはね返り率試験方法(案)-実構造物による吹付け-」に基づいて行った。圧縮強度は、24 時間までの初期強度については JSCE-G561-1999 に規定されるプルアウト法により測定し、7 日以降の圧縮強度は吹付けたコンクリートからコアを採取して試験を行った。透水試験は圧縮強度同様、材齢 28 日でコアを採取しアウトプット法にて試験を行った。

4. 4 試験結果

(1) 施工性

HFSC の天端付近の吹付け状況を写真-4 に示す。専門家による施工性評価の結果を表-6 に示す。OPC に比べて HFSC では、シリカフュームの効果が大きく、粉塵、付着状態などが大幅に改善された。リバウンド率については OPC が 14.5%であり、HFSC424 が 13%であった。一般に水結合材比が 0.4 以下になると OPC では粘性が増し、ポンプ圧送性が悪くなると言われているが⁵⁾、HFSC では高性能 AE 減水剤と組み合わせることにより、シリカフュームおよびフライアッシュの効果により粘性が増加することなくスムーズに圧送できた。高強度に対応可能な HFSC424 の水結合材比 0.4 では、吹付け施工性について高い評価が得られた。

(2) 圧縮強度

24 時間までの初期強度について図-3 に示す。HFSC の 24 時間までの初期強度は、急結剤の性能に依存しており、フライアッシュやシリカフュームとの相性がポイントとなる。強度に

関して要求される水準として、例えば日本道路公団設計要領では高強度吹付けコンクリートと



写真-3 HFSC の吹付け試験状況



写真-4 頂部付近への施工状況

表-6 吹付け施工性評価

セメントの種類	OPC	HFSC 226	HFSC 424	
水結合材比	0.6	0.5	0.5	0.4
①混合状態	4.8	5	5	5
②脈動状態	4.8	4.5	4.4	5
③ノズルだれ	3.3	3.3	4.2	4.3
④急結状態	4.1	4.3	4.5	4.5
⑤粉塵	2.8	4.8	4.2	5
⑥付着状態	3.5	4.5	4.2	5
平均	3.9	4.4	4.4	4.8

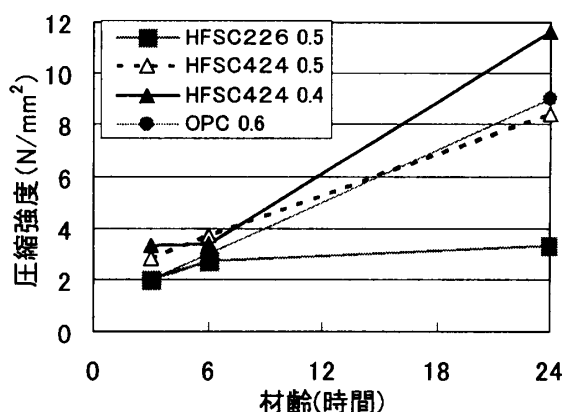


図-3 24 時間までの圧縮強度

して3時間で 2N/mm^2 、24時間で 10N/mm^2 および28日で 36N/mm^2 を要求している。本試験結果では24時間強度に関してHFSC424の水結合材比0.4のみが、この基準を満足する結果となっている。28日までの強度について試験結果を図-4に示す。HFSC226では強度の伸びが小さく、急結剤を混入した吹付け施工でも 20N/mm^2 に達しなかった。強度的に見ると吹付けに適するHFSCのタイプはHFSC424であった。

(3) 透水係数

幌延深地層研究センターの地下施設の水平坑道は、設計上覆工コンクリートなしで施工される予定であり、支保工として母岩相当の透水性（透水係数 10^{-5}cm/sec ）が要求される。また、通常のトンネル施工に使用されているOPCの水セメント比0.6程度の水密性が要求される。吹き付けたコンクリートから $\phi 15\text{cm}$ のコアを採取して、吹付け方向に通水させる透水試験を行った。採取したHFSC424水結合材比0.5のコアの状態を写真-5に示す。また、透水試験結果を表-7に示す。

透水係数においても圧縮強度と同じ傾向が見られ、HFSC226の水結合材比0.5の透水係数はOPCの水セメント比0.6の配合に比べ、3オーダー大きい結果となった。一方HFSC424の水結合材比0.5では、OPCと比べ1オーダー小さい透水係数となった。この原因を調べるためHFSC226とOPCの吹付け供試体の総細孔量を水銀圧入法により測定した。その結果HFSC226では総細孔量24.9%に対してOPCでは18.3%であり、HFSC226の方がポーラスであった。HFSC226はOPC量が少ないために、フライアッシュが反応せずに多く残っていることが原因と推察される。HFSC424では水結合材比0.5で総細孔量が14%となりOPCよりも小さな値を示した。

5. HFSCの品質変動

HFSCはFAを40%~60%含むため、FAの性状の変化によって、フレッシュコンクリートの性状

や圧縮強度が影響を受ける可能性が考えられる。ここでは、吹付け施工試験に用いたFAと同一の発電所で生産されるFAを、燃焼炭が異なる4ロットから採取し、採取したFAを使用したベースコンクリートの強度試験を実施した。また、4回の内2回は吹付け施工試験を行い、コア強度の比較を行った。表-8にFAの品質のばらつきを示す。粉末度が高いもの、シリカを多く含むものなどがみられ、値はばらついている。各FAを使用した場合のHFSC325および424の水結合材比0.5におけるフレッシュコンクリート性状およびベースコンクリート、吹付けコンクリートの1日強度と28日圧縮強度の試験結果を表-9に示す。この結果から、吹付けコンクリートの

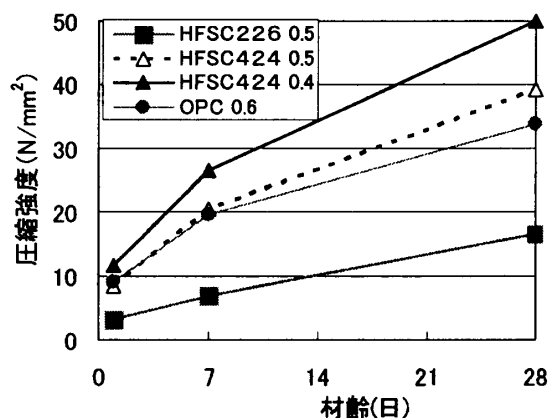


図-4 圧縮強度の変化

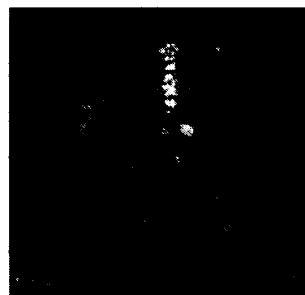


写真-5 HFSC424のコア

表-7 透水係数

セメントの種類	水結合材比	透水係数 (cm/sec)
OPC	0.6	2.6×10^{-8}
HFSC226	0.5	1.4×10^{-5}
HFSC424	0.5	1.8×10^{-9}

性状に対するフライアッシュの品質の変動の影響は大きいものではなく、HFSC の吹付けコンクリートは、十分施工に耐えられるものであると判断できる。

6. まとめ

本研究で得られた知見は次のとおりである。

- (1) HFSC 硬化体からの浸出液の pH は、ポゾラン含有量が多いほど、小さな値を示す。819 日材齢の pH は 11.53～11.70 となった。
 - (2) HFSC の初期の強度発現は、カルシウムサルフォアルミネート系の急結剤を使用することによって、HFSC424 で 3N/mm^2 程度の初期強度を発現できる。
 - (3) HFSC の吹付けコンクリートの施工性はシリカフェームが寄与し良好である。また、水結合材比を小さくすることでさらに改善される。
 - (4) HFSC226 では、水結合材比を小さくしても強度増進が小さく、通常の吹付けコンクリートに要求される材齢 28 日 18N/mm^2 を満足することが難しい。
 - (5) HFSC424 では、水結合材を小さくすると強度が大きく増進する。水結合材比を 0.4 とすることにより設計基準強度 36N/mm^2 を満足する吹付けコンクリートが得られる。
 - (6) HFSC226 の透水係数は大きいですが、HFSC424 とすることによって OPC と同等以上となる。
- 以上から、HFSC を用いた吹付けコンクリートでは、HFSC424 を使用し、水結合材比を 0.4 から 0.5 程度まで変化させることで、目標強度を達成でき、支保工としての利用が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会：TRU 廃棄物処分技術検討書，JNC TY1400 2005-013，2005.9
- 2) 久保博他：ベントナイト系緩衝材のコンク

リート間隙水による長期変質の基礎研究，地盤工学会誌，1998.10.

- 3) 大和田仁他：アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動，JNC TN8400 2000-027，2000.8
- 4) 入矢桂史郎他：ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.185～190，2003.6
- 5) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案)，コンクリートライブラリー121，pp.13～pp.47，2005.6

表－8 試験に用いた FA の品質

分析項目		試験値			
		第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回
二酸化けい素(%)		64.9	56.7	69.6	70.2
湿分(%)		0.05	0.23	0.08	0.05
強熱減量(%)		0.8	3.5	1.7	1.5
密度(g/cm³)		2.19	2.33	2.31	2.27
粉末度	比表面積ブレン値(cm²/g)	3220	4210	4580	4360
	45µm フルイ残分(%)	26	4.0	1.0	1.0
メチレンブルー吸着量(mg/g)		0.36	0.62	0.56	0.60
フロー値(%)		112	109	107	108
活性度指数	28 日	86	77	82	96
	91 日	90	92	92	102

表－9 コンクリートの物性に関する試験結果

セメントの種類	採取回数	スランブ(cm)	空気量(%)	圧縮強度 (N/mm^2)			
				1 日	2 日	3 日	28 日
HFSC 325	1	20.5	3.5	1.3	3.7	8.5	24.9
	2	20.5	3.2	1.1	3.1	7.5	22.8
	3	19.5	3.1	1.3	3.9	8.7	25.1
	4	19.5	3.3	1.4	3.8	9.2	23.2
HFSC 424	1	20.5	2.7	2.0 (2.6)	5.8 (8.4)	12.6 (21.1)	32.3 (40.3)
	2	20.0	2.7	1.8	5.8	12.3	31.4
	3	16.0	3.1	2.0 (2.8)	5.9 (8.4)	13.0 (20.2)	31.8 (39.2)
	4	18.5	3.7	2.2	5.9	13.0	29.2

注)カッコ内は吹付けコンクリートコアの値