



フライアッシュ高含有シリカフュームセメントの実用性の検討

大和田 仁 三原 守弘 入矢桂史郎*
松井 淳*¹

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
* 株式会社大林組
*¹ 株式会社オーテック

資料番号：6-5

A Study on the Practicability of Highly Containing Fly Ash and Silica Fume Cement

Hitoshi OWADA Morihiro MIHARA Keishiro IRIYA*
Jun MATSUI*¹

Waste Isolation Research Division, Waste Management and fuel Cycle
Research Center, Tokai Works

* Obayashi Corporation

*¹ OTEC Co. LTD.

高レベル及びTRU廃棄物の地層処分においては、セメント系材料の使用が想定されている。そのため、セメント系材料によって生じる高アルカリ浸出液の処分環境への影響が問題点としてあげられている。本研究ではこの問題点を解決する1方法として開発した低アルカリ性セメント（浸出液のpHが11程度）の適用性を評価した。

開発した低アルカリセメントを用いた場合、粗骨材を充てんした模擬構造物へのモルタルの充てん性ならびに鉄筋を配した模擬構造物へのコンクリートの充てん性は良好であった。また、JIS法により作製した供試体及び模擬構造物から採取したコアの圧縮強度はいずれの場合も60MPa以上であり、普通ポルトランドセメントと同等であった。これらの結果から、開発した低アルカリ性セメントの機械的特性及び施工特性は、JIS普通ポルトランドセメントと同程度以上であり、十分に実用可能なものであることがわかった。

Cementitious materials have been planned to be used for the geological disposal of high-level radioactive waste and TRU waste. Degrading of host rock and buffer material induced by high pH leachate, however, is pointed out as one of technical issues.

The authors have been developing a low alkalinity cement (the pH of the leachate of this cement is about 11) as an enhanced material to reduce the effect of the high pH problem.

In this study, the applicability of low alkalinity cement developed to solve this problem was evaluated.

The fluidity of the mortar was sufficient to fill the aperture in a structure filled with coarse aggregate. The concrete using the low alkalinity cement was also enough to fill a structure with the reinforcing steel. The compressive strength of a test-piece produced by the JIS method and of a core collected from the trial structure were over 60MPa. These evaluation results show that developed low alkalinity cement had higher performances in mechanical properties and execution characteristics than JIS ordinary Portland cement.

キーワード

放射性廃棄物、地層処分、高レベル廃棄物、TRU廃棄物、セメント、高pH、浸出、実用性、機械的特性、ワーカビリティ、施工性、作業性

Radioactive Waste, Geological disposal, High level Waste, TRU Waste, High pH, Leaching, Cement, Mechanical Properties, Workability

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（HLW）及びTRU廃棄物（TRU）の処分方法として、地下数100～1000mの安定した地層中に処分坑道を掘削し廃棄体を埋設する方法（地層処分）が検討されている。この

方法においては、処分坑道の支保工を初めとした構造材料やTRUの一部の固化材等の充てん材として、セメント系材料の使用が想定されている。

セメント系材料からの浸出液はpHが12.5以上

の強いアルカリ性を示す¹⁾。そのため、HLWのオーバーバックの腐食挙動が変化し、また、緩衝材として用いられるベントナイトや周辺岩盤が変質することが知られている^{2, 3)}。そこで、これら問題を解決または軽減する方策のひとつとして、普通ポルトランドセメント（OPC）と比較して浸出液のpHが低い（11以下）セメント（低アルカリ性セメント）の使用が考えられている。

著者らはこれまでに、ボゾラン材料であるシリカフューム（SF）をポルトランドセメントに多量に添加したセメントペーストによって浸出液のpHを低下させることが可能であることを報告した⁴⁾。また、モルタルを用いた評価によって、SFだけでなくフライアッシュ（FA）を多量に添加したセメントで、一般にセメントに要求されるワーカビリティを満足できることを報告した⁵⁾。また、カナダ原子力公社（AECL）も、低発熱高強度コンクリート（LHHPC）に関して同様の報告を行っている⁶⁾。

セメント系材料の性質は、使用する原材料（セメント、細骨材、粗骨材及び混和剤等）によって異なる。そのため、供給者または使用者が試験を行って配合を決定しなければならない。したがって、セメント系材料の配合が評価上適切であると判断されたとしても、それは、即処分場建設において採用可能であることを意味するものではない。しかし、施工性、機械的強度の観点からは、実用可能な配合の目安を示し、実用の目処をたてておくことが必要である。そこで本研究では、既報^{4, 5)}において特性が良好であった、フライアッシュ高含有シリカフュームセメント（HFSC）を用いて、以下の項目に着目し、50×50×50cm程度の模擬構造物を用いた試験を行った。

HFSCモルタルの充てん用途への適用性

HFSCコンクリートの構造材用途への適用性

本報ではその結果について報告する。

2．使用材料とセメントの配合

本研究には表1に示す各材料を用いた。HFSCの性状は、セメント、SF及びFAの配合割合によって変化する。そこで、本研究では既報において流動性及びモルタルの強度に関して良好な値を示したHFSCとして、HSF（配合するセメントとして早強ポルトランドセメントを使用したもの）及びOSF（配合するセメントとしてOPCを使用したもの）の2配合（表2参照）を選択した。

表1 本研究で使用した原材料

材 料		比重	備 考
セメント	HPC	3.16	秩父小野田社製 ^{注1)}
	OPC	3.14	秩父小野田社製 ^{注1)}
混和材	SF	2.22	ノルウェー産 エルケム社製
	FA	2.21	関西電力高砂発電所産
細骨材	陸砂（5mm以下）	2.59(表乾)	静岡県小笠産
粗骨材	碎石 20mm～5mm	2.64(表乾)	茨城県岩瀬産
混和剤	高性能AE減水剤	-	日本製紙社製 サンフロ-HS-700 (ポリカルボン酸塩系)

注1：現在の社名は太平洋セメント(株)

表2 本研究に用いたHFSCの配合

配合名	配合比（％）			
	OPC	HPC	SF	FA
OSF	40		20	40
HSF		30	20	50

3．HFSCモルタルの充てん用途への適用性の検討

3.1 目的

セメント系材料を固化材や注入材として用いる場合、あるいは廃棄体間の空隙に充てんする場合などには、粗骨材を含まないモルタルが使用される。このような用途に用いられるモルタルは、微細な空隙まで均一に充てんされなければならない。このため、以下の流動特性を満たす必要がある。

狭い間隙を長い距離流動できる流動性

材料を均一に保つための分離抵抗性

一般に、これら特性はモルタルに適当な粘性を付与することによって調整できるとされている。また、これらの性質の調整は、モルタルの配合（単位水量、水／セメント比（W/C）、混和剤添加率等）の調節によって行われる。

一方、これらの性質の適正值の範囲は用いるセメントの種類によって異なる。また、1章で述べたとおり、セメントの配合は実際に用いる原材料によって最適化されなければならない。そのため、本研究で検討する配合は、充てん性を満足する配合の可能性を示すこと及び充てん性試験に用いるモルタルの配合を決定することを目的としており、実用のための配合を決定するものではない。

実用性を評価するためには、流動特性に加え、充てん性や強度に関する試験も必要となる。

本研究では、上記用途に適用できるHFSCの配合の存在を示す目的で、以下の各項目について確

認することとした。

HFSCモルタルについて流動特性試験を行って、上記用途に適用できる配合が存在することを確認する。

で検討した配合のHFSCモルタルを用いて、簡易充てん性試験及び充てん性試験（あらかじめ粗骨材を充てんした模擬構造物にモルタルを流し込み、目視により充てん性を確認する試験）を行って充てん性を確認する。

凝結試験及び圧縮強度試験を行い、充てんしたセメント系材料の硬化時及び硬化後の特性を確認する。

3.2 実験

モルタルの組成

W/C及びに混和剤の添加量は既報⁵⁾に従った。W/Cは45%とした。混和剤の添加量は、後述するフロー試験を予備的に行った結果から、セメントの配合量に対してOSFでは2.0%、HSFでは2.2%に決定した。単位水量はおのおのについて3水準を設定した。

流動特性試験

適切な流動性と分離抵抗性をもったHFSCモルタルの配合が存在することを確認し、充てん性試験に用いる配合を決定するために、流動特性試験としてフロー試験とP漏斗試験とを行った。

フロー試験は円筒にモルタルを充てんして引き上げた際のモルタルの拡がり測定する試験であり、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準じて行った。フローが大きいことは力を加えなくとも流動化することを示している。

P漏斗試験は図1の漏斗にモルタルを充てんしたのち流出させ、流下時間を測定する方法であり、流下時間から流動性と分離抵抗性を推定することができる。スラリーが漏斗を通過しなければ流動性が不足しており、また、流下時間が極端に短ければ粘性の不足から分離抵抗性が不足する傾向にある。この試験はJSCE-F521「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法」に準拠して行った。

簡易充てん性試験及び充てん性試験

簡易充てん性試験及び充てん性試験はそれぞれ図2及び図3に示す方法で行った。

充てん性の判定は、それぞれ以下に示す方法による。簡易充てん性試験では流し込み時の充てん状況を目視で観察し、隙間なく充てんされているかどうかを基準として行った。また充てん性試験では、流し込み時の観察に加え、28日間型枠内

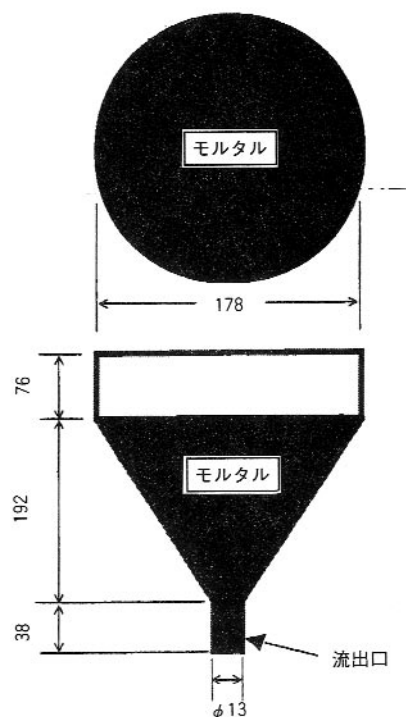


図1 P漏斗試験装置

で養生した後に脱型し、硬化後の状況を目視により観察した。

凝結試験及び圧縮強度試験

モルタルの凝結時間は、JIS A6204「コンクリート用化学混和剤」付属書1「コンクリートの凝結試験方法」に従って測定した。圧縮強度は、JIS A1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に従って作成したφ5×10cmの圧縮強度試験片を用いて、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って測定した。また、プレパックドコンクリート（粗骨材をあらかじめ充てんした後、モルタルを流し込んだコンクリート）の強度データを得ることを目的として、充てん性

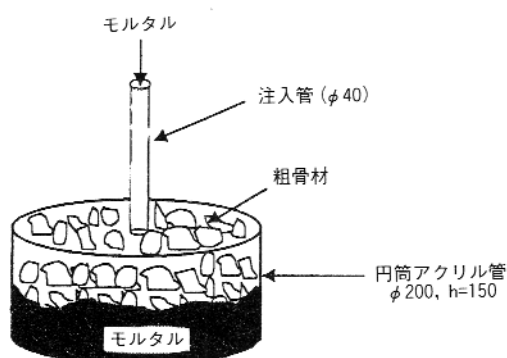


図2 簡易充てん性試験の模式図

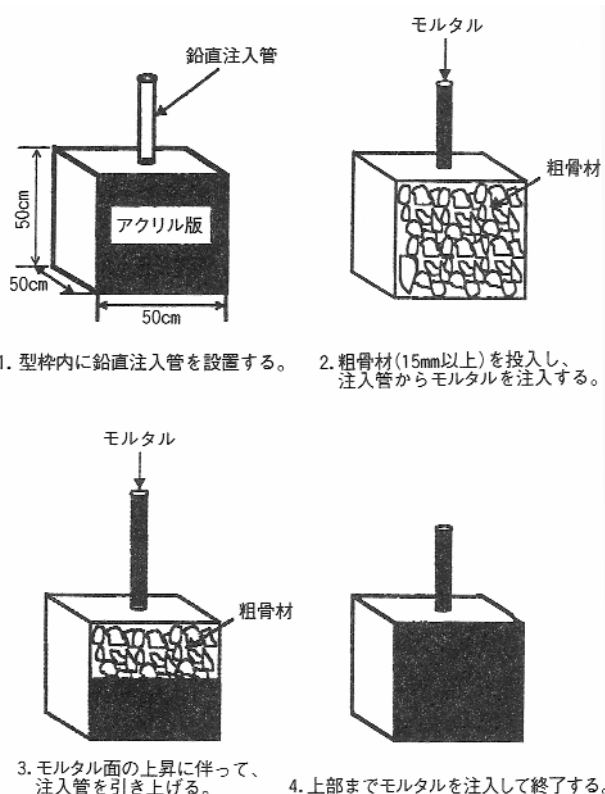


図3 プレパックドコンクリートモデル構造物へのモルタル式充てん試験の概要図

試験後の供試体から、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 圧縮強度試験片をコア抜きし、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って圧縮強度を測定した。

3.3 結果

HFSCモルタルの流動特性と充てん性

表3に流動特性試験の結果をまとめる。OPCを用いたモルタルのフロー値及びP漏斗の流下時間の適正值はそれぞれ250mm以上、16~20秒とされている。表3に示すように、本研究で作成したHFSCモルタルはいずれの水準においても、P

表3 モルタルの流動性試験結果

セメント	W/C比 (%)	単位量 (kg/m ³)			水和剤 添加率 (C×%)	結 果		
		水 W	セメント C	細骨材 S		フロー (mm)	P漏斗 流下時間 (sec)	簡易充てん 性試験の 評価*
H S F	45	300	667	1102	2.2	315	58	C
	45	350	778	854		355	45	B
	45	400	889	606		385	30	A
O S F	45	300	667	1126	2.0	305	59	C
	45	350	778	882		340	48	B
	45	400	889	638		360	34	A

*: A: 目視による判断で、充てん性が良好かつ空隙も少ない
B: 充てん性は良好であるが、空隙が一部に見られる
C: 充てん性が悪く、全体に充てんできない

漏斗の流下時間がこの値と比較して長かった。しかし、P漏斗の流下時間を短くする配合が必ずしも適切な配合であるとは限らない。なぜならば、HFSCでは粉体の粒度分布や水との反応速度が異なるため、同一の流下時間では、一般的なセメント系材料を用いたモルタルと比較して、分離抵抗性が劣る反面、球形の粒子であるFAを多量に含むため流動性が高いことが考えられるためである。

一方、単位水量の増加に伴い、フロー値は上昇し、P漏斗の流下時間は短縮した。この結果から、単位水量を増加させると粘性が低くなることがわかった。

簡易充てん性試験では、充てん時の注入管でHSFが閉塞する傾向が認められたものの、単位水量を 400kg/m^3 としたものでは模擬構造物のすみずみまでモルタルが行きわたっていた。したがって、HFS及びOSFのいずれにおいても、本研究における配合により充てん可能な流動性を得られることが分かった。この結果に基づいて、単位水量 400kg/m^3 のOSF並びにHSFについて充てん性試験を行った。28日材齢での模擬構造物の外観から充てん状況を観察したところ、いずれのセメントでも良好な充てん状況であった。

図4は充てん試験供試体から採取したコアの外観写真である。コアの外観を観察したところ、骨材下面にブリージング（材料の分離により水がしみ出る現象）によると考えられる微細な空隙が認められた。

モルタルの凝結時間及び圧縮強度

モルタルの凝結時間及び圧縮強度を表4に示す。HFSCを用いたモルタルの凝結時間はHFS、OSFともに24時間以上であった。

凝結時間が長いために初期の圧縮強度は低いものの、91日材齢においては35から50MPaとOPCを用いた一般的なモルタル（30MPa以上）と同程

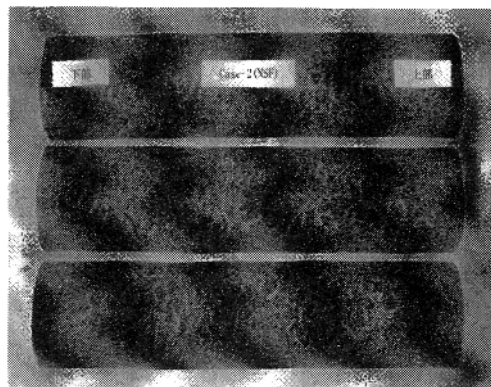


図4 充てん性試験供試体から採取したコアの外観写真

表4 HFSCモルタルの凝結時間及び圧縮強度

セメント	凝結時間(時-分)		圧縮強度 (MPa)				
	始発	終結	材齢 2日	材齢 3日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日
HSF	28-20	32-10	5.7	8.2	12.3	26.4	39.8
OSF	26-50	31-40	5.1	8.5	16.7	37.7	50.0

表5 充てん試験供試体から採取したコアの材齢28日における圧縮強度

セメント	圧縮強度 (MPa)	
	上部より採取	下部より採取
HSF	18.1	19.0
OSF	19.2	21.0

度の値を示した。これに対して、充てん試験供試体から採取したコアの圧縮強度は表5に示すとおり28日材齢で18～21MPaであった。また、コンクリート上部より採取した供試体では、下部からのそれと比較して低い圧縮強度を示した。

3.4 考察

3.3節で述べたように、本研究においてHFSCを用いて作製した模擬構造物で、骨材下面に微少な空隙が見られた。しかし、一般的に用いられる細骨材は2.5mm以下のものであるのに対し、本研究ではそれより大きい5mm以下のものを使用しており、より材料の分離が起こりやすく、流動性を付与しにくい条件となっている。骨材下部を除いて充てん性が良好であることを考えると、固化材や注入材などの用途に使用できるHFSCモルタルを配合することは可能であると考えられる。

凝結時間はOSF、HSFともに24時間以上であるが、実用されている低発熱セメントを用いた水中コンクリートの凝結時間（始発30時間⁷⁾）と比較して短く、モルタルとしての施工が可能と考えられる。早強ポルトランドセメントを用いたHSFの凝結時間がOPCと比較して短くないのは、添加したSF、FAのボゾラン反応（ケイ酸塩質とカルシウムとが反応して凝固する反応）の反応速度がセメント鉱物の水和反応の速度と比較して低いためと考えられる。

また、充てん試験用供試体から採取したコアの強度はモルタルのそれと比較して低かった。これは3.3節で述べた骨材下部の微少な間隙の影響と考えられる。また、上部より採取したコアの方が下部よりのそれと比較してわずかながら低い強度を示したのは、わずかに材料の分離が起こった

可能性があることを示している。

上述のように、充てん試験用供試体では、材料の分離抵抗性の不足から骨材下部の空隙や、構造物中の位置による強度の差異が観察された。しかし、本節の冒頭で述べたように、本研究で用いたモルタルには5mm以下の細骨材を使用しており、モルタルの充てんには厳しい条件となっている。したがって、通常使用される2.5mm以下の細骨材を用いることにより、適切な流動特性の付与を容易にすることが可能と考えられる。このことから、HFSCモルタルの配合の調整によって、よりモルタルに近い強度を得ることや、部位による強度の不均一の防止が可能と考えられる。

4 HFSCコンクリートの構造物用途への適用性の検討

4.1 目的

地層処分において、セメント系材料は前章で述べた充てん用途の他、支保工や構造躯体などの構造物材料への使用が考えられている。

コンクリートは鉄筋を配した型枠中に流し込まれるが、粒径が5mm以上の粗骨材を含むため、モルタルと同じ配合では十分な流動特性を得ることは難しい。

流動特性は、モルタルのそれと同様に配合を調節することによって調整される。また、用いるセメントの種類や原材料によっても調節が必要である。したがって、3.1節で述べたと同様に、本研究で検討した配合が直ちに実用時に適用可能ではない。

しかし、コンクリートとして打設した際の機械的特性（圧縮強度）や硬化時の特性などを明らかにし、その実用性（従来のセメント系材料と同様に扱えるかどうか）を確認することが必要である。

そこで本研究では、流し込みによって打設可能な締め固め不要コンクリートに適用できるHFSCの配合が可能であることを示すことを目的として、以下の各項目について検討した。

流動特性試験による打設試験用コンクリートの配合の検討

模擬構造物への打設による充てん性の検討

コア試料の観察による均一性の検討

凝結時間及び圧縮強度の検討

乾燥収縮及び温度上昇の検討

本章では、その結果について述べる。

4.2 実験

流動特性試験による配合の検討

3.3節の結果を基に、W/Cを45%、混和剤添加

表6 HFSCコンクリートのスランプフロー及びOロート試験結果

セメント	W/C (%)	細骨材率 s/(s+G) (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 添加率 (c×%)	流動性	
			水 w	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	混和剤 Adm.		スランプ フロー (cm)	Oロート 流下時間 (sec)
HSF	45	50	160	356	879	889	7.83	2.2	56.0	8.1
	45	50	170	378	854	864	8.32	2.2	62.0	3.7
	45	50	180	400	829	839	8.80	2.2	68.5	3.0
	45	50	175	389	841	851	8.56	2.2	62.0	3.3
	45	55	175	389	926	766	8.56	2.2	61.5	3.2
	45	60	175	389	1010	681	8.56	2.2	59.0	2.7
OSF	45	50	160	356	885	896	7.12	2.0	48.5	7.0
	45	50	170	378	861	871	7.56	2.0	59.5	3.0
	45	50	180	400	836	846	8.00	2.0	64.5	2.1
	45	50	180	400	836	846	8.00	2.0	63.0	2.7
	45	55	180	400	920	761	8.00	2.0	59.5	2.8
	45	60	180	400	1004	677	8.00	2.0	56.5	3.1

量をOSFに対しては2.0%、HSFに対しては2.2%とした。粗骨材及び細骨材の単位量は表6のように設定し、細骨材率は50～60%、単位水量は160～180kg/m³の範囲でそれぞれ3水準とした。流動性試験では、細骨材率及び単位水量をパラメータとしてコンクリートスラリーの流動特性の変化を調べ、その結果から充てん性の検討に用いるコンクリートの配合を決定することとした。

流動特性試験はスランプフロー試験及びO漏斗試験⁹⁾からなる。

スランプフロー試験は円錐台形のスランプコーンにコンクリートスラリーを充てんし、コーンを上方に引き抜いたときのスラリーの拡がりから流動性を測定する試験であり、土木学会基準「水中不分離性コンクリート設計施工方針」に従って行った。スランプフローの大きさは、流動性（流動しやすさ）の目安となる。

O漏斗試験は、O漏斗をコンクリートスラリーが通過する時間（流下時間）から、スラリーの粘性（流動性と分離抵抗性）とを推定する試験である。試験は図5に示すO漏斗を用い、以下の手順に従って行った。

コンクリートを図5に示すO漏斗に注ぎ、漏斗上面をへらで平らにならす。

流出口を解放し、コンクリートを流下させる。

上部よりコンクリートが流下し、漏斗を通して下が見える瞬間までに要する時間（流下時間）を測定する。

模擬構造物への打設による充てん性の検討

充てん性の検討は、項の結果から決定した配合のHFSCコンクリートについて行った。

試験項目は、図6に示すL字型構造物及び図7に示すU字型構造物への打設試験とした。いずれ

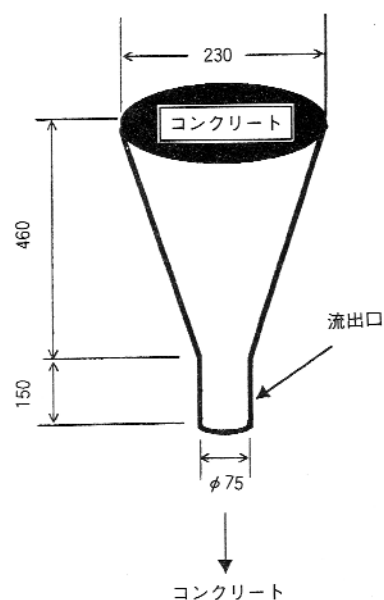


図5 Oロート試験装置の模式図

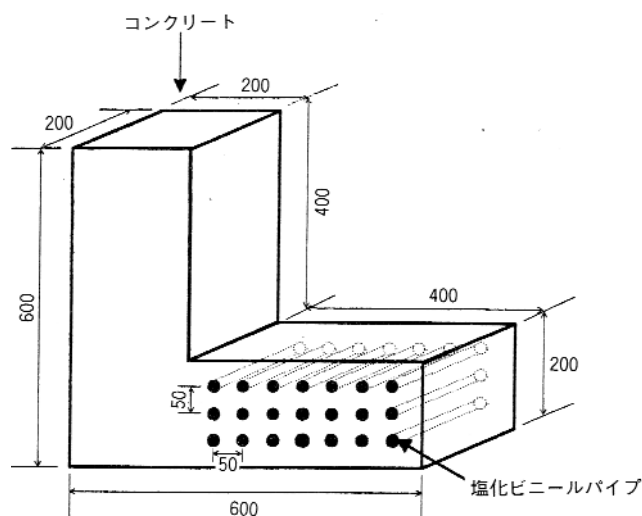


図6 コンクリートの充てん性試験に用いたL字型構造物の模式図

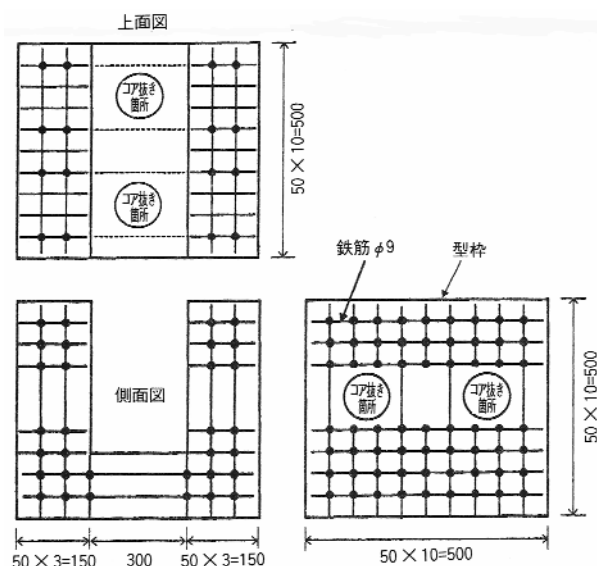


図7 充てん性試験に用いたU字型構造物の3面図

の試験においても、打設時にコンクリートが隙間なく行きわたっているか、ボイドが発生していないかを観察した。また、U字型構造物については、U字の一方から打設した際にもう一方のどの高さまでコンクリートが到達するかもあわせて観察した。

均一性の確認

鉄筋を配した構造物への打設において、骨材が均質に流動しているかどうか確認した。

U字型構造物への打設試験で用いた供試体から材齢28日でコアを採取しコア試料とした(図7参照)。均一性の確認は、コア試料の側面において、目視で粒径5mm以上の骨材を粗骨材とし、その面積の総和を全面積で除して求めた粗骨材面積率の比較によって行った。

凝結時間及び圧縮強度の測定

凝結時間は、3.2節と同様の方法で測定した。また、圧縮強度は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の試験片とコア試料とについて、3.2節と同様の方法で測定した。

乾燥収縮及び温度上昇試験

大型の部材を打設した際には、硬化時の寸法変化及び発熱により、部材にひび割れが発生することがあるため、乾燥収縮試験及び断熱温度上昇試験を行った。

乾燥収縮試験にはJIS A1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に従って作製した $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体を用いた。寸法変化率は、7日間20℃で水中養生した時の寸法を基準として、以後20℃相対湿度60%で養生したときの各時点での寸法から計算した。供試体の寸法は、JIS

A1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に従って測定した。

断熱温度上昇試験は、 $\phi 40 \times 40\text{cm}$ 供試体を用い、空気循環式断熱温度上昇試験装置を用いて行った。

4.3 結果

HFSCコンクリートの流動特性

表6にスランプフロー及び○漏斗試験の結果を示す。また、図8に、流動特性の概念図を示す。流動特性試験に用いた $W/C = 45\%$ のHFSCでは、一般的な締め固め不要コンクリートの要求特性(スランプフローが $65 \pm 5\text{cm}$ 、○漏斗流下時間が7~15秒)と比較して、全体に○漏斗流下時間が短いことが分かった。

コンクリートが均一に長い距離を流動するためには、骨材の分離を抑制しつつコンクリートスラリー自身の流動を促すために、適切な粘性と流動性とを付与することが必要である。

一般的に、コンクリートの配合における各パラメータは、図8に示すような効果を及ぼすので、模擬構造物への打設試験に用いるコンクリートの配合は、○漏斗流下時間を長くすることを目的として、 W/C を小さくすることとした。 W/C を小さくする際には、単位水量を低くするかセメント量を増加させることになる。そのいずれの場合に於いてもスランプフローの低下が予測される。これを補うために、混和剤添加量を調節する必要がある。そこで、充てん性の確認のための打設試験

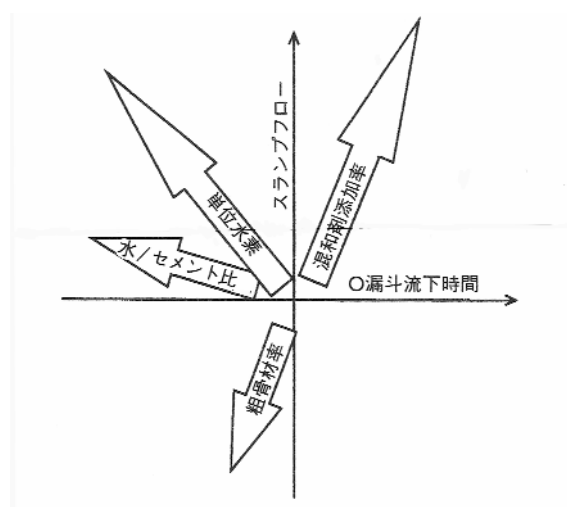


図8 各パラメータに対する流動特性の変化の概念図

図中 矢印の方向はそこに記したパラメータを増加させた時の○漏斗流下時間及びスランプフローの変化の傾向を示し、その大きさは本研究における影響の大きさを概念的に示す。

は、以下の条件で混和剤量をパラメータとして行うこととした。W/C及び単位水量は、それぞれ混練可能な限界である30%、150kg/m³とした。細骨材率についてはその影響が小さかったことから55%に固定した。

HFSCコンクリートの充てん性

打設試験の結果を表7に示す。

混和剤添加率が2.4%及び2.8%のものでは、L型構造物の先端まで十分に隙間なく充てんすることができず、また、U字型構造物については、5cm間隔の鉄筋を通過することができず、ともに打設不可能であった。

これに対して、混和剤添加率を3.0%とした水準では、○漏斗流下時間は短かったが、L字型構造物、U字型構造物ともに、目視にて均一に隙間なく充てんされていることを確認できた。特に、U字型構造物への打設試験では、5cm間隔の鉄筋を配しているにもかかわらず、U字の片側から打設したコンクリートは、もう一方の上端からHSFでは9cm、OSFでは21cmの高さまで打設することができた。圧縮強度試験に用いるコアの採取を可能にするため、このときコンクリートが到達しなかった部分には、その上部よりコンクリートを打設し、U字型構造物を作製した。

硬化後のU字型構造物は、ひび割れ、隙間等も見られず、また気泡も少なかった。

HFSCコンクリートの均一性

表8に各コア試料の表面の粗骨材面積率を示す。

表7 L字型及びU字型構造物への打設試験結果

セメント	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		混和剤 添加率 Adm. (c × %)	流動性 スランブ フロー (cm)	Oポート 流下時間 (sec)	L字型 構造物 への充 てん性*	U字型 構造物 への充 填性
		水 W	セメント C					
HSF	30.0	150	500	12.0	2.4	62.0	4.1	B
				14.0	2.8	66.0	4.5	B
				15.0	3.0	73.5	6.0	A
OSF	30.0	150	500	12.0	2.4	59.0	4.1	B
				15.0	3.0	72.5	5.9	A

細骨材率：55%、細骨材単位量：HSFに対して896kg/m³、OSFに対して906kg/m³とした。

*: A: 充てん性が良好であった B: 遠くまで流動しなかった

表8 U字型構造物から採取したコア表面の粗骨材面積率

セメント	粗骨材面積率 (%)			
	流入側	底面	流出側	平均
HSF	18.1	16.1	11.0	15.1
OSF	22.2	16.8	15.1	18.0

流入側に対して流出側での粗骨材表面積率が明らかに低下しており、流動に伴い組成が変動していることが分かった。

HFSCコンクリートの凝結時間及び圧縮強度

表9にHFSCコンクリートの凝結時間及び各材齢における圧縮強度を示す。

モルタルと同様に凝結時間は24時間以上であった。

圧縮強度は28日材齢で60～70MPaと高い値を示した。また、図7に示すコア試料の圧縮強度は、表10に示すようにいずれも約60MPaであり、平均値では標準供試体との差異はみられなかったが、流入側に対して流出側の強度が高くなる傾向がみられた。

HFSCコンクリートの乾燥収縮

表11に、HFSCコンクリートの乾燥収縮試験の結果を示す。また、比較のため、OPCを用いた高流動高強度コンクリートの乾燥収縮試験の結果⁹⁾を併記した。

表より明らかなように、HFSCを用いた場合でも、OPCを用いた場合とほぼ同程度の乾燥収縮を示した。

HFSCコンクリートの断熱温度上昇

図9に、HFSCコンクリートの断熱温度上昇曲線を普通コンクリートのそれとともに示す。

OSF、HSFともにOPCの温度上昇量を下回ることが分かった。

表9 HFSCコンクリートの凝結特性及び圧縮強度

セメント	凝結 (時 - 分)		圧縮強度 (MPa)				
	始発	終結	材齢 2 日	材齢 3 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
HSF	26-50	29-05	14.5	21.3	32.5	63.4	93.5
OSF	25-15	27-40	14.3	22.8	38.0	69.4	105.7

表10 U字型構造物から採取したコア試料の圧縮強度

セメント	圧縮強度 (MPa)				
	流入側	底面	流出側	平均	標準供試体
HSF	60.9	58.1	61.0	60.0	63.4
OSF	65.6	66.9	71.9	68.1	69.4

表11 HFSCコンクリートの乾燥収縮試験結果

セメント	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		長さ変化率 (× 10 ⁻⁴)			
		水	セメント	材齢 7 日	材齢 14 日	材齢 28 日	材齢 91 日
HSF	30.0	150	500	-2.31	-3.18	-3.87	-5.50
OSF	30.0	150	500	-2.39	-3.16	-3.77	-5.16
OPC	30.0	170	567	-2.45	-3.18	-4.03	-5.88

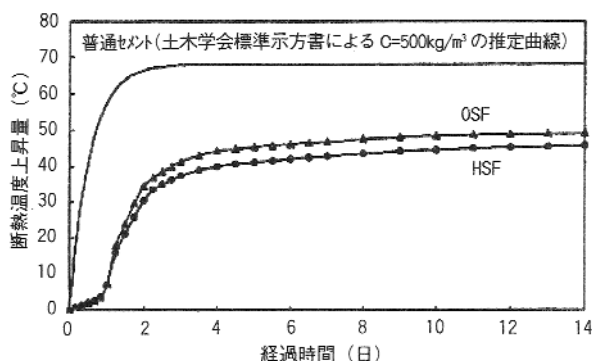


図9 HFSC及びOPCの断熱温度上昇曲線

4.4 考察

打設時の施工性（流動特性及び充てん性）

4.3節で述べたように、HFSCコンクリートは遠方まで流動させるための流動性を付与すると分離抵抗性が不足する傾向にあった。これは、微粒子であるSFを多量に含むためと考えられる。しかし、W/Cを30%とし、混和剤添加率を3%とすることで、L字型及びU字型構造物への充てんが可能で、良好な充てん性を得られた。また、一般的なコンクリートでのスランプフロー及び漏斗流下時間の範囲を外れたにもかかわらず良好な流動性・充てん性を得られたのは、HFSCでは流動性を改善させる目的でFAを添加しているため⁵⁾と考えられる。

一方、流し込み方法によっては流動距離によって組成が変動する可能性が粗骨材面積率及びコア試料の圧縮強度の採取位置による違いから示唆された。したがって、充てん性が十分であっても、均一性を保つためには打設時の流動距離を短くすることが必要であることが分かった。

本研究においては、流動特性試験において適切な配合の選定を十分に行うことができなかった。そのため、充てん性試験においてはW/C並びに単位水量を限界まで低くしたものに対して混和剤量を調節したので、必ずしも適切な配合を選定できたとはいえない。しかし、それにもかかわらず、鉄筋を配したL字型及びU字型構造物に隙間なく充てんすることが可能であった。このことから、一般の高流動コンクリート並の充てん性を示す配合をHFSCで実現することは可能と考えられる。

標準供試体並びにコア試料の圧縮強度はOPCを用いた高強度コンクリート並の60MPaであり、実用に供するに十分な強度を有しているものと考えられる。

HFSCコンクリートの凝結時間は24時間以上と長かった。これは、混和剤量が普通コンクリートと比較して多いこと、及び添加したFA、SFのポズラン反応がセメント鉱物の水和反応に対して遅いことに起因していると考えられる。しかし、HFSCの凝結時間は既に実用に供されている低発熱セメントを用いた水中コンクリートのそれ⁷⁾と比較して短いことから、この用途での施工上の問題とはならないものと考えられる。一方、吹きつけコンクリートをはじめとした、急結性を要求される用途に応用するためには、凝結時間の短縮が必要であり今後の課題となっている。

硬化時の寸法変化及び発熱

大型の部材にコンクリートを打設した際には、その発熱によるコンクリートの寸法変化や乾燥収縮が亀裂の発生原因となる場合がある。したがって、乾燥収縮及び発熱量はできるだけ小さいことが望まれる。

4.3節で示したとおり、HFSCの乾燥収縮量は、施工実績のあるOPCを用いた高流動・高強度コンクリートと同等であり、実用上問題のないレベルであるといえる。また硬化時の発熱については、4.3節で述べたようにOPCより低く抑えることができる。処分坑道の建設、操業の期間においては、坑道内の温度をコントロールすることが必要であると考えられる。したがって、HFSCのように発熱量の小さいコンクリートの使用が望ましいと考えられる。

HFSCコンクリートの実用性

で述べたように、HFSCを用いたコンクリートにおいて、打設可能な流動性を持つ配合が可能であり、また、その硬化体の圧縮強度もOPCを用いたコンクリートと比較して遜色のないものであった。また、で述べたように、その他の性質に於いても実用可能なレベルにあることが確認できた。したがって、HFSCにおいても、OPCと同様に流し込みによって施工できる配合が可能であることが示された。

5. おわりに

HFSCを用いたモルタル及びコンクリートについて打設時の特性を中心にその実用性確認試験を行った。

その結果、充てん用途に用いるモルタル、及びに構造物用途に用いるコンクリートのいずれにおいても、良好な流動性、充てん性を示す配合を実現することが分かった。また、それぞれの硬化体の圧縮強度もOPCを用いたモルタル及びコン

クリートのそれと同等以上の値を示した。さらに、大型部材の打設時に求められる寸法の安定性及び低発熱性においても、HFSCではOPCと同等以上の特性を示すことが明らかとなった。

OPCは広く土木建築分野で使われた実績のある材料である。HFSCを用いたモルタル及びコンクリートに、同等以上の特性を示す配合が存在することがわかった。これらのことから、HFSCを用いて、実用に供することのできるモルタル、コンクリートを得ることは十分に可能であることが示された。

今後は、本研究で明らかとなった課題である、凝結時間の短縮の他、長期材齢での安定性などの、処分場への適用性の確認を行う必要がある。また、HFSCの打設にはOPCと比較してより多くの混和剤を使用することから、セメントから浸出する混和剤成分の影響についての検討も必要である。

参考文献

- 1) A. Atkinson, N. M. Everitt et al., : The Dependence of pH in a Cementitious Repository, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., No.127, p.439 (1989).
- 2) 久保 弘, 黒木泰貴 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, Vol.46, 10, 31(1998).
- 3) D. Savage, K. Bateman et al.: Rate and Mechanism of the Reaction of Silicates with Cement Pore Fluids, Appl. Clay Sci., No.7, pp.33-45 (1992).
- 4) 三原守弘, 入矢桂史郎 他: シリカフェームを混合したセメントペーストの浸出試験とモデル化, 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.2, 71, (1997).
- 5) 入矢桂史郎, 新村 亮 他: ボゾラン材料を高含有したセメント系材料の検討, 日本原子力学会「1998春の年会」, L2, 586, (1998).
- 6) M.N.Gray and B.S.Shenton: For better concrete, take out some of the cement., 6th ACI/CAN/MET Symposium on the Durability of Concrete, Bangkok, Thailand, (1998).
- 7) 曾根徳明: マスコンクリート及び高強度コンクリートを対象としたセメントの低発熱化に関する基礎的研究(東京理科大学学位論文), (1995).
- 8) 大池 武, 中根 淳 他: 高流動コンクリートを用いた鋼管柱中詰めコンクリートのポンプ圧入施工, 1995年日本建築学会大会講演梗概集, (1995).
- 9) 秩父小野田株式会社(現在の社名は太平洋セメント株式会社): <技術資料> ハイフローセメント(高流動・高強度コンクリート用), pp.20(1996).