

# 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

入 矢 桂 史 郎 竹 田 宣 典  
十 河 茂 幸

## Development of Lower Alkalinity Cement Replaced Mainly by Pozolanic Materials for Nuclear Waste Repositories

Keishiro Iriya Nobufumi Takeda  
Shigeyuki Sogo

### Abstract

Performance assessment for 10,000 years or over is required for TRU waste and High Level Waste repositories, since long live nuclear activities will be deposited there. Although cementitious materials are a candidate for these repositories, the high alkalinity (12.5 or more) of ordinary cement products may alter rock and bentonite, which is a principle engineered barrier and geological barrier. Thus, as an alternative, low-alkalinity cement is required. This study shows that low alkalinity cement containing high pozolanic materials may be applied. Suitable pozolanic materials content is presented as 20% of silica fume and 40% of fly ash. This cement can be applied for actual construction work for self compacting concrete and grouting.

### 概 要

TRU 廃棄物や高レベル放射性廃棄物は半減期の長い核種を含んでおり、それらの廃棄物の処分を行うために、処分システムの性能を 10,000 年以上の超長期にわたって評価する必要がある。セメント系材料は、非常に有望な人工バリアの候補材料であるが、現在市販されているセメントは間隙水の pH が 12 以上あり、長期にわたってこれが維持された場合、周辺岩盤やもう一つの主要人工バリア材であるベントナイトが変質する可能性がある。それを低減させるために通常のコンクリートより間隙水の pH が低いコンクリート（以下、「低アルカリ性コンクリート」）を開発する必要がある。そこで、シリカフュームやフライアッシュなどのポゾランを多量に添加すると、セメント硬化体の浸出液の pH が低下することに着目し、ポゾランを多量に含むセメントの実用化を検討した。その結果、普通ポルトランドセメントの内割でフライアッシュを 40% 以上かつシリカフュームを 20% 混入することによって、浸出液の pH を 11 以下に低下できることを示し、高性能 AE 減水剤と組みあわせてグラウトや締固め不要コンクリートとして実用化が可能であることを明らかにした。

### 1 はじめに

TRU（超ウラン核種）廃棄物あるいは高レベル放射性廃棄物処分場のように、長半減期核種を含む放射性廃棄物の処分施設は、地下深部に建設し、人工的に核種の移行を封じ込める人工バリアと天然の岩盤で構成する天然バリアの組み合わせによる多重バリアシステムにより、超半減期の核種を生物圏から隔離するコンセプトの基に設計される<sup>1)</sup>。人工バリア材料としては、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の複合バリアが最も有力な人工バリアの組み合わせである。

しかし、セメント系材料が長期にわたりベントナイトや岩盤と接触すると、その間隙水が示す高い pH（12 以上）となることの影響により、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。たとえば、ベントナイト中の主要鉱物であるモンモリロナイトは、pH13.0 の溶

液中ではかなり速い速度で溶解し、膨潤性を失い、熱力学上では CSH をへて最終的にはゼオライトなどに変化するとされており、CSH からゼオライトに変わる過程や変質したベントナイトがどのような挙動を示すかについては、現在鋭意検討が進められている<sup>2)</sup>。

一方、セメントの低アルカリ化の研究は、ベントナイトや岩盤の変質を生じさせないようにするという目的で、ベントナイト変質後の性能評価研究と並行して、行われている。これは変質の原因であるコンクリートの間隙水の pH を下げることに着目してセメントの改良を行うものである。ベントナイトや岩盤の高アルカリ変質後の性能評価と変質を生じさせない技術の両方が完成すれば、放射性廃棄物処分場での高アルカリによる人工バリア材の変質の懸念を少なくすることができる。

しかし、建設事業で一般に使用しているセメントは、鉄筋あるいは鋼材と組み合わせた鉄筋あるいは鉄骨コンクリートとして使用されるために、鉄筋腐食を防止するよう

にセメント間隙水の pH を 12 以上の高い値に維持するように造られている。この高い pH を示すのはセメント水和物として水酸化カルシウムが生成されるためであり、セメント間隙水の pH を下げるには、水酸化カルシウムの生成をなくするか、あるいは生成しても違う鉱物の変化させるなどの方法がある。これを理論的に見ると、コンクリートの浸出液の pH はセメント水和物中のカルシウムとシリカの比によって支配されており、これを小さくすればよいことになる。その方法は、セメントのクリンカーをポルトランドセメントと異なる組成にする方法、生成した水酸化カルシウムを消費してシリカ化合物の替える方法などが考えられる。

本研究では、土木・建築工事で古くから用いられているポゾランを使用し、本来ゆっくり反応させるポゾラン反応を早くから生じさせることにより、水酸化カルシウムのカルシウムケイ酸塩水和物への変化を進め、低アルカリ化を目指すこととし、普通ポルトランドセメントにポゾラン材料（シリカフュームおよびフライアッシュ）を 50%以上の多量に混入することにより低アルカリ化を実現するものとした。

本論文では、低アルカリ性セメントの開発の基本的な考え方を示し、放射性廃棄物処分場における性能目標値の設定、目標値を満足するセメントのコンセプト、低アルカリ化の実現および実用性の評価に至るまでの研究開発の成果について報告する。

## 2 ベントナイトの変質に影響するアルカリの定量

### 2.1 変質試験方法

低アルカリ性セメントの pH の目標値を設定するには、ベントナイトが変質しない範囲の pH を求める必要がある。ここでは、セメントの模擬間隙水として pH を 10.5 から 12.5 まで変化させた水酸化カルシウム溶液中におけるベントナイトの変質挙動について、ピーカー内による強制攪拌実験により変質を確認した黒木/久保らの研究成果を引用する<sup>3)</sup>。

ベントナイトの変質に関する評価項目は、ベントナイト

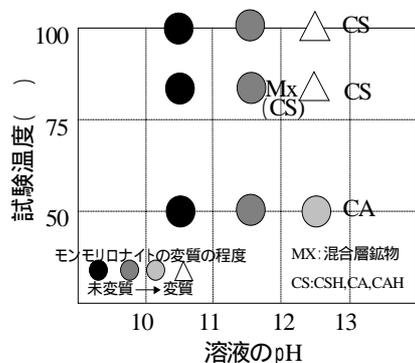


Fig.1 ベントナイトの高アルカリ変質  
Alteration of Bentonite due to Hyper Alkaline Solution

に大きく要求される性能の一つに膨潤による止水性があり、止水性を支配するのはベントナイト中のモンモリロナイトの含有率であること、また、高アルカリ下でどのような新しい鉱物が生成されるかに着目し、)ベントナイトの中にどのような鉱物が生成されるか)ベントナイト中のモンモリロナイトがどの程度消失するかという 2 点とした。実験方法は、水酸化カルシウムを満した溶液にベントナイトを加え 91 日間攪拌し、モンモリロナイトとの含有率の変化と含有鉱物の変質を調べる方法とした。分析方法は、攪拌したベントナイトを取り出し実験のパラメータは、溶液の pH と温度とした。評価項目は、ベントナイト中のモンモリロナイトの減少率と、変質後の生成鉱物とした。新しい鉱物の分析は試料をデシケータで乾燥した後、X線回折により分析した。また、モンモリロナイトの消失については、X線回折による強度とメチレンブルー吸着量の変化を総合して判定した。

### 2.2 変質試験結果と低アルカリ化の目標値

Fig. 1 にベントナイトの水酸化カルシウム溶液中での変質試験結果を示す。pH が高くなるほど、ベントナイト中のモンモリロナイトが消失していることがわかる。また、pH が高くなるほどまた、温度が高くなるほど、ベントナイトが高アルカリの影響を受け CSH や CAH に変質していくことがわかる。CSH や CAH は、それ単体の止水性は低くないが、膨潤性はなく、膨潤止水という人工バリアの要求性能を低下させる可能性がある。本試験では、反応を促進させるために高温下での実験とし常温下での反応の促進という見地から 100 以下の状態で試験したが、温度が促進媒体にならず高温下の反応になっているという可能性は排除できていない。

しかし、pH が 11.0 を超えると明らかにモンモリロナイトが消失し、セメンテーションと呼ばれる CSH 化が生じることが明らかになった。この試験結果から、ベントナイトが健全であるためのセメント間隙水の pH は、10.5 ~ 11.0 であると判断し、pH11.0 を低アルカリ性セメントの間隙水の開発目標値とした。

## 3 低アルカリ性セメントのコンセプト

### 3.1 ポゾランによる間隙水の pH 低下効果

シリカフュームは、その主成分である SiO<sub>2</sub> がポルトランドセメントの水和により生成する水酸化カルシウム Ca(OH)<sub>2</sub> と反応して不可溶の CSH (カルシウムシリケート水和物) を生成する<sup>4)</sup>。また、フライアッシュについても、同じように Ca(OH)<sub>2</sub> と反応して同じようにカルシウムシリケート水和物を生成する。この反応を一般にポゾラン反応と呼ぶ。また、セメント水和物中のカルシウムシリカモル比とセメント間隙水の pH は密接な関係があることは、Greenberg and Chang らが合成した C-S-H ゲルの浸出実験において確認されている<sup>5)</sup>。すなわち、ポゾラン材料を大量に普通ポルトランドセメント (以下

OPC と略記する) と置き換え, ポゾラン反応を生じさせることにより, セメント硬化体の浸出液の pH が低下することが認められている。

### 3.2 浸出液の pH とカルシウムシリカモル比の測定方法

セメントの間隙水の pH を測定する方法は, 間隙水を圧搾する方法があるが, 高い圧力を要することや pH の時間的な変化を求めることが難しいなどの問題点もある。ここでは, 長期的な pH の変化も含めて評価したいことから, 水和したセメントを乾燥させて微粉碎し, 蒸留水に溶出させ飽和平衡に達したことを確認した後, 蒸留水の pH をセメント間隙水の pH とする方法とした。この方法はセメント水和物の溶出試験として一般に用いられるものである。この方法では, 浸出液の pH を測定していることになるが, 容器内で溶液とセメント硬化体が溶解平衡に達していればセメントの間隙中でのセメント水和物と間隙水の平衡の関係に等しいと考え浸出液の pH を間隙水の pH とした。

試験方法は, 水セメント比 150% のセメントペーストを混練し, 分離を防ぐために回転しながら 20 で 28 日間養生した後粉碎し, 20 の条件で固液比 1 : 2 の条件で蒸留水に浸漬攪拌する方法とした。養生攪拌中は, 中にアルミナボールを入れておきセメント水和物を砕きながらできるだけ未水和のセメントが残らないように留意した。水セメント比を 150% とした理由は, 水和中に局部的に生成したセメント水和物の粉碎を容易にし, 未水和セメントを残さないためである。

固相であるセメント水和物の鉱物組成については X 線回折, 熱分析, および鈴木<sup>9)</sup>らが提案するセメントの鉱物組成の定量方法により, カルシウムおよびシリカを分析定量した後, カルシウムシリカモル比を計算した。

### 3.3 シリカフェュームの混合による間隙水の pH の低下

ここでは Greenberg らの研究とは異なり, 実験室内で合成した CSH ではなく, 実際に OPC とシリカフェューム (以下 SF と略記する) の混合割合を変えてポゾラン反応を生じさせ, 実際に CSH を生成させて, 間隙水の pH を

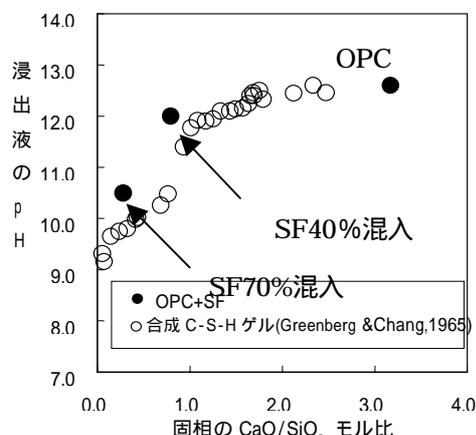


Fig.2 カルシウムシリカモル比と間隙水の pH Relationship between CaO/SiO<sub>2</sub> and pH

測定した。OPC に対するシリカフェュームの混合割合は, 20%, 40%, 70% とした。測定されたセメント間隙水の pH と固相のカルシウム・シリカモル比の関係を上記の Greenberg and Chang の求めた合成した CSH での試験結果と比較して Fig. 2 に示す。図中に黒丸で示した実験結果は, シリカフェュームの混入率を増加するにしたがって, 固相のカルシウム・シリカモル比が低下し, セメント間隙水の pH が低下することを示している。この結果は, Greenberg and Chang が求めた合成 CSH の結果とほぼ同じ値を示しており, シリカフェュームなどのポゾラン混入によりセメント間隙水の pH の低下が可能なが認められた。

### 3.4 低アルカリ性セメントのコンセプト

Fig. 2 に示したシリカフェュームを用いた実験から, ベントナイトの変質から目標値と定めたセメント間隙水の pH11.0 を満足するためには, OPC に対するシリカフェュームの置換率を 70% とする必要がある。しかしながら, シリカフェュームを 70% も添加すると, 固相の CaO/SiO<sub>2</sub> モル比を低下するがフレッシュコンクリートの粘性が増加し, ワークャブルなコンクリートとすることは不可能である。

これを改善し, 実用的な低アルカリ性セメントとするため, ワークャビリティを改善できるフライアッシュ (以下 FA と略記する) をシリカフェュームの一部代替に使用することとした。これらを考えて, 低アルカリ性セメントの候補とした混合セメントを Table. 1 に示す。組み合わせた材料は, 普通ポルトランドセメント (OPC), 早強ポルトランドセメント (HPC) シリカフェューム (SF), フライアッシュ (FA) である。この実験に使用した材料の仕様について Table. 2 に示す。

候補セメントに対するコンセプトは以下のとおりである。

- 1) シリカフェュームセメント (OS40)  
先の実験で pH は 12 程度との結果を得た。実験室内で成形可能な最大シリカフェューム混入量としてこのケースを選定し, シリカフェュームセメントの pH 変化やセメントとしての物理性能を把握するために検討に加えた。
- 2) 普通セメントベースのシリカフェューム・フライアッシュ混合三成分セメント (HFSC1)  
シリカフェュームを多量に添加すると施工性が極端に悪くなることを改良するために, シリカフェュームの使用量を全体の 20% とし, 施工性を大きく阻害しないで, ポゾラン反応を期待できるフライアッシュを加えた。
- 3) 早強セメントベースのシリカフェューム・フライアッシュ混合三成分セメント (HFSC2)  
初期強度を期待し, HFSC1 の OPC を早強セメント (以下 HPC と略記する) に替え早強性を増し, フライアッシュの添加率を多くした。さらに低アルカリ性を目指して HPC の使用量を 30% とし, FA を 50% 使用とした。
- 4) フライアッシュ高含有セメント (OF90)

シリカフュームを使用せず、OPC にフライアッシュを90%と高含有させることによって、低アルカリ化を目指した。低アルカリ性セメントとして実用の可能性は低い、フライアッシュを高含有するときの間隙水のpHを把握する目的でケースを加えた。

3.5 間隙水の pH の変化とセメント水和物の内部組成

放射性廃棄物処分場に使用するコンクリートでは、初期の間隙水の pH と長期的なセメント水和物の水への溶解のプロセスに伴う間隙水の変化を把握する必要がある。ここでは、セメント水和物からの溶出が平衡に達したことを確認した後、蒸留水を交換して pH の変化を測定するとともに、その時のセメント水和物の変化について調査した。セメント間隙水の pH は、蒸留水とセメント水和物との化学平衡を確認した後、蒸留水の pH をもってセメント間隙水の pH とした。水の交換の累積量と溶液の pH の関係を Fig.3 に示す。この試験結果から、OPC の間隙

水の pH は、12.5~13.0 程度と高く、またシリカフューム高含有セメント (OS40) とフライアッシュ高含有セメント (OF90) の間隙水の pH は、11.5~12.0 の範囲であり、フライアッシュを加えた三成分系セメントについては、10.5~11.0 の pH を示すことがわかった。また水交換量が 2000ml 以上となると、OPC は溶出に伴って徐々に pH が低下するのに対して、HFSC1 および HFSC2 はごくわずかな pH の変化にとどまることがわかった。

次に、この pH の変化の理由を把握するために、初期状態と水交換量 10,000ml の時点でセメント水和物の分析を行った。その結果を Fig.4 に示す。OPC では、初期状態では水酸化カルシウム  $Ca(OH)_2$  ができているが、HFSC1 や HFSC2 では CSH のみの生成となっている。このことが、OPC の間隙水は pH12.5~13.0 を示すのに対して、HFSC1 および HFSC2 では 10.5 程度となる要因であることがわかる。また、水交換量 10,000ml でのセメント水和物分析によると、OPC ではセメント水和物の全量が水酸化カルシウムの溶出により 35%にまで質量が減少しているが、HFSC では 30%程度の減少にとどまっていることがわかる。以上から、HFSC はセメント水和物に水酸化

Table.1 候補としたポゾランの混合比  
Candidates of Low Alkalinity Cement

略号	セメント(%)		ポゾラン(%)	
	OPC	HPC	SF	FA
OPC	100			
OS40	60		40	
HFSC1	40		20	40
HFSC2		30	20	50
OF90	10			90

Table 2 使用材料  
Materials for Low Alkalinity Cement

材料名	製造メーカ	仕様	タイプ製造場所
OPC	太平洋セメント	JISR5210	普通
HPC	太平洋セメント	JISR5210	早強
SF	ELKEM	グレード 983	ノルウェー産
FA	関電興業	JIS 種相当品	高砂火力発電所

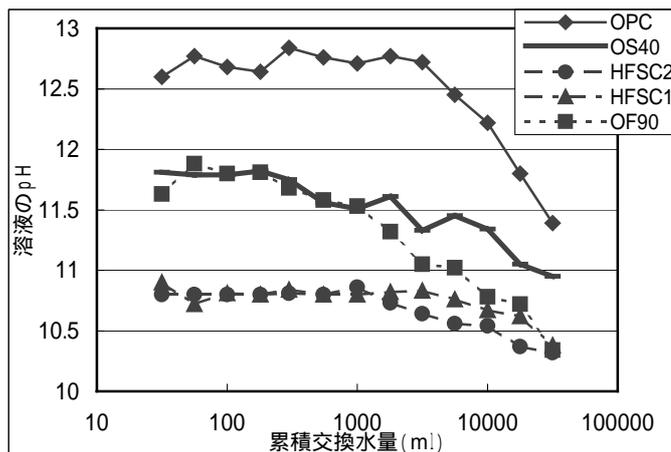
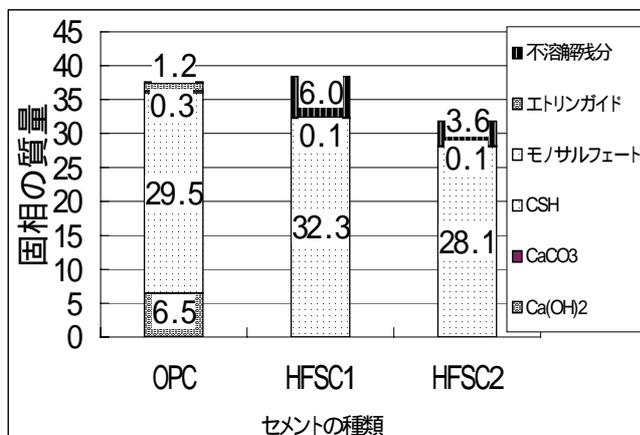
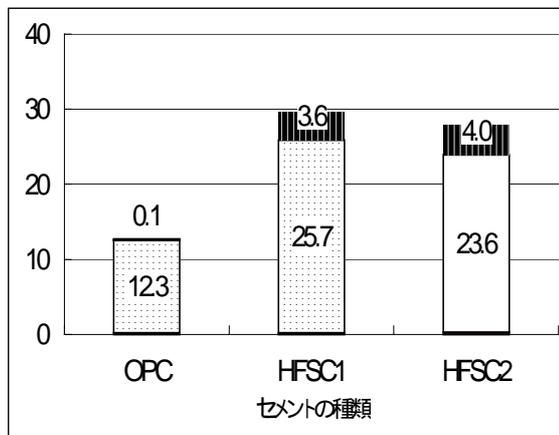


Fig.3 セメントの間隙水の変化  
Relationship between Exchanged Water and pH



溶出試験開始時



水交換 10,000ml 時

Fig.4 セメント水和物組成  
Composition of Cement Hydrate in Leaching Test

カルシウムを生成しないことにより、間隙水が低アルカリ性を示すとともに、溶解性の小さな水和物が主体であるために非常に低溶解性であることがわかった。

### 3.6 セメントとしての物理的性能の確認

HFSCは化学的に低アルカリ性を示し、放射性廃棄物処分場の低アルカリ性セメントとして好ましい性質を示すことは確認できたが、セメントとして規格に合う物理的性質を示すかどうかが問題となる。市販されているセメントの規格としてJISにその試験方法と規格値が定められている。ここでは、各種のセメントに対してJISに定められたセメントの試験を実施して比較した。その結果をTable.3に示す。表には、セメントの規格としてJIS5210に規定される中庸熟ポルトランドセメントの規格値を参考に示した。セメントの物理試験の結果から、OF90は凝結時間が異常に長く、また7日強度が発現しないなど、構造体を使用するセメントとして適用が困難であることが示された。また、OS40は、標準軟度のモルタルを得るために必要な水量がOPCの1.6倍もあり、実用的には施工に必要なワーカビリティを確保するために単位水量の増大を引き起こすなど、弊害が大きくて実用的でない想定される。HFSCについては凝結時間は遅れるものの、その他の性能はJIS5210に定められる中庸熟ポルトランドセメントの規格を十分に満足し、物理性能に関しては適用性に問題ないことが確認された。

### 3.7 低アルカリ性セメントのコンセプトの決定

以上の実験結果から得られた各候補セメントの評価をまとめて、Table.4に示す。フライアッシュとシリカフェュームを加えたセメントHFSCが実用性および低アルカリ性という観点から、優れているという結果になった。

この研究から、放射性廃棄物処分に適用する低アルカリ性セメントとしてのコンセプトは、( )普通ポルトランドセメントにボゾランを加えること、( )ボゾランの使用量はセメント内割りで50%以上であることであり、その内シリカフェュームを20%使用するセメントであることがわかった。以後、HFSC1、HFSC2を低アルカリ性セメントHFSCと称することとする。

## 4 実用性へ向けた予備的検討

### 4.1 グラウト材への適用性の検討

4.1.1 配合選定とモルタルの性能 放射性廃棄物処分場では、岩盤の亀裂や支保と岩盤との隙間および廃棄体まわりの狭い隙間に充填材としてモルタルグラウトを使用する可能性がある。ここでは、低アルカリ性セメントがグラウトに適用できるかどうか検討を行った。隙間を充填し、かつ分離を生じないという観点から、水セメント比は45%とした。高性能AE減水剤はポリカルボン酸タイプを標準添加量2%使用することとし、充填性を確保できるようにコンシステンシーをフロー試験(JISR5201ただし無振動)で400mmおよびP漏斗(JSCEF521)で25秒を目標に単位水量を定めた。

試し練りを行い、決定した低アルカリ性グラウトの配合および注入モルタルの性能をTable.5に示す。

4.1.2 グラウトとしての評価 グラウトとしての要求性能は、( )注入が細かい隙間まで充填できること、( )隙間に充填して強度を発揮することの2点とした。この性能を評価するために、Fig.5に示す1面をアクリル版とし可視可能とした容器にコンクリート用砕石(JIS2005相当品)を充填し、そこに自然流下でグラウトして、充填性と強度を試験することとした。

Table 3 セメントの物理試験結果  
Physical Properties of Low Alkalinity Cement

セメントの種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結		安定性	フロー (mm)	水和熱(J/g)		
			始発 (h-m)	終結 (h-m)			7日	28日	91日
OPC	3.17	3410	2-05	2-43	正常	246	327	369	424
OS40	3.20	8260	1.25	2-48	正常	165	256	297	330
HFSC2	2.46	5940	3-34	6-00	正常	214	176	267	305
HFSC1	2.54	5640	4-52	6-32	正常	211	230	286	321
OF90	2.33	3380	24-05	47-19	正常	300	0	112	190
JISR5210 (中庸熟)	-	2500以上	1h以上	10h以下	正常	-	290	340	-

Table 4 セメントの適用性評価  
Applicability of Low Alkalinity Cement

セメントの種類	低アルカリ性	ワーカビリティ	水和熱
OPC	×		×
OS40	×	×	×
HFSC1			
HFSC2			
OF90	×		×

Table 5 注入モルタルの配合と性能  
Mix-proportion and Fresh Properties of Low Alkalinity Grout

セメントの種類	w/c (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				フロー (mm)	P漏斗時間 (秒)	28日標準養生 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		W	C	S	高性能AE減水剤			
HFSC1	45	400	889	638	2.0	380	21	37.7
HFSC1	45	400	889	606	2.2	380	24	26.4

充填性の評価は、目視と充填後の供試体から直径 10cm のコアを採取して観察評価することとした。採取したコアの状況を Photo.1 に示す。強度は、コアを 20cm の長さで切断し、注入面を上にした圧縮強度試験を行い、コンクリート(プレパックドコンクリート)の圧縮強度として評価した。試験結果を Table.6 に示す。注入モルタルの強度に比べ、注入後のコンクリートとしての強度は 70%程度となっている。また、上部の強度は下部に比べて 95%程度となっている。注入後のコンクリートとしての強度が注入モルタルの強度より低下することは予想されたことであるが、注入モルタルの強度の 70%程度であり、同一水セメント比ではコンクリートに比べモルタルの強度が高いことを考えると、十分注入材として機能を発揮していると評価できる。また、注入後のブリーディングにより、上部強度の低下は懸念されたが、比較的強度低下の幅が小さく良好な結果であると評価できる。

以上の結果から、低アルカリ性セメント HFSC はモルタルグラウトとして十分適用可能であることがわかった。

#### 4.2 構造体コンクリートとしての適用性検討

4.2.1 配合の選定 放射性廃棄物処分場の建設される環境は、地下数百メートル以深の岩盤中でありかつ廃棄物の種類によっては作業員が近づけないことが予想される。また、品質保証の面からも作業員のスキルに影響されないコンクリートが望まれる。また、低アルカリ性セメント HFSC はシリカフュームを多く含むために、作業に必要なコンシステンシーを得るために高性能AE減水剤の使用が不可欠である。この観点から、建設工事で一般に使用している振動締固めを行うコンクリートではなく、自己充填可

能な締固め不要コンクリートが望ましいと考えられる。本研究では、コンクリートのタイプを締固め不要コンクリートに絞って、適用性の検討を実施した。

配合上の仕様として、粉体系の締固め不要コンクリートとする観点から水セメント比を 30%とし、目標のスランブフローを 700mm とした。選定配合を Table.7 に示す。  
4.2.2 適用性の評価方法 HFSC が締固め不要コンクリートとして適用可能かどうかについての評価は、密な鉄筋を有する U 字型の型枠にコンクリートを締固めを行わないで流し込む時の充填度によって評価した。実験に用いた U 字型型枠について概要を Fig.6 に示す。充填実験は締固め不要コンクリートを混練りして一方の壁から流し込み、他方の壁の上部まで振動を与えないで充填することを確認するものである。U 字型型枠はアクリル版で製作し、充填状況が目視観察できる構造とした。

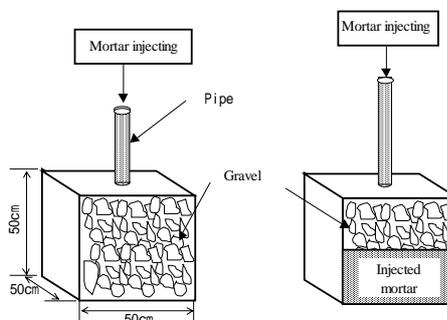


Fig.5 グラウト試験方法  
Test Method of Grouting



Photo 1 注入後のコアの状況  
Cores after Grouting

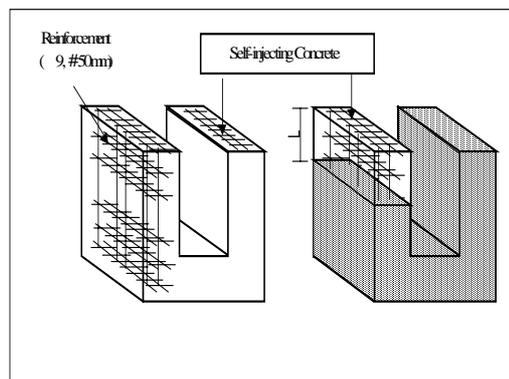


Fig.6 充填性確認試験の供試体  
Specimen for Self Compacting

Table 6 注入後のコアの圧縮強度  
Compressive Strength of Grouting Mortar

セメントの種類	充填性評価	材齢 28 日圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
		コア圧縮強度		標準養生強度
		上部	下部	
HFSC2	空隙ジャンクなし	18.1	19.0	26.4
HFSC1	空隙ジャンクなし	19.2	21.0	37.7

Table 7 コンクリートの配合およびフレッシュ性状  
Mix Proportion of Low Alkalinity Concrete

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )					フロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	SP (C×)		
HFSC1	30.0	55.0	150	500	906	750	3.0%	72.5	1.3
HFSC2	30.0	55.0	150	500	896	741	3.0%	73.5	1.4
OPC	30.0	55.0	150	500	940	803	2.0%	70.0	3.0

4.2.3 試験結果 充填に関しては、HFSC1 と HFSC2 とも締固めを行うことなく他方の壁の天端まで完全に充填することができた。またその際に圧縮強度試験用供試体を作製して、標準養生の圧縮試験と 20 におけるコンクリートの凝結試験を行った。凝結試験結果と各材齢における標準養生供試体の圧縮強度試験結果を Table.8 に示す。コンクリートの凝結試験の結果、HFSC の始発時間は 24 時間を超えており、1 日強度を得ることはできなかった。しかし終結に至るとすぐに強度が発現し、2 日強度では 14N/mm<sup>2</sup> 以上の値となった。これは、フライアッシュを多量に含むことに加えて、高性能 AE 減水剤の使用量が多いことにより、長時間凝結遅延したものと考えられる。しかし、凝結遅延が強度に及ぼす影響は顕著ではなく、28 日以降の圧縮強度は水セメント比が 30% であることもあって、かなりの高強度が得られた。特に HFSC1 における 91 日強度は 100N/mm<sup>2</sup> を超えている。一方、28 日間 20 の恒温室に放置した U 字型供試体のコアの圧縮強度を Table.9 に示す。流入側の壁に比べて流出側の壁のほうが若干強度が高い傾向はあるが、大きな差は認められない。また、コア強度は標準養生強度とほとんど変わらない値を示しており、締固め不要コンクリートとして十分適用できることがわかった。

4.2.4 凝結特性の改善 HFSC は、長期強度は大きいですが凝結時間が長く施工上影響が懸念される。これは多量に含まれるフライアッシュが凝結時間を遅延させているためであると考えられる。ここでは凝結時間を短縮するために改良策として、フライアッシュを JIS 種から最大粒径を 20 μm 以下とした分級フライアッシュ（オノダスーパーフロー）に変えて、凝結試験を実施した。その結果、分

級フライアッシュを使用することによって流動性が増し、所要のスランプフローを得るための高性能 AE 減水剤量も低減できるとともに、凝結時間も 15 時間程度と OPC を使用した高流動コンクリートと近くなった。今後は、フライアッシュとしては分級フライアッシュ（粒径 20 μm 以下）を原則として使用することとした。

4.2.5 乾燥収縮 構造体コンクリートに使用する上では、コンクリートの乾燥収縮ひずみは少なくとも普通コンクリート程度であることが望まれる。HFSC はシリカフェームなどの微粉末を多量に含んでいるために、乾燥収縮ひずみが大きいことが懸念される。

ここでは、JISA1129 モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法に基づき 20 での乾燥収縮ひずみを測定した。供試体は、U 字供試体を作成時に試料を採取し、翌日脱型して 7 日間標準養生を行った後、湿度 60%RH の中に放置し収縮ひずみを測定した。乾燥収縮ひずみの経時変化を Fig.7 に示す。また、全く同一配合の普通セメントを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみと比較した。HFSC の乾燥収縮ひずみは、同一配合の普通セメントを用いたものに比べ若干小さい結果となった。また、HFSC の中では、普通セメントを使用した HFSC1 の方が乾燥収縮ひずみは小さい。これは、ベースとなった OPC の乾燥収縮ひずみが、HPC のひずみより小さいことによるものと考えられる。この試験結果からは、低アルカリ性セメント HFSC を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、OPC を用いたコンクリート比較して若干小さいことがわかり、実用上、乾燥収縮ひび割れの懸念は少ないことがわかった。

4.2.6 クリープ 放射性廃棄物処分場のコンクリートの躯体は、壁厚も厚くかつ長さも長くなるので、セメント水

Table 8 コンクリートの凝結特性と圧縮強度  
Compressive Strength and Setting Period

セメントの種類	凝結 (時間 - 分)		標準養生供試体圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	始発	終結	2 日	7 日	28 日	91 日
HFSC2	26-50	29-05	14.5	32.5	63.4	93.5
HFSC1	25-15	27-40	14.3	38.0	69.4	105.7

Table.9 コアの圧縮強度  
Compressive Strength of Concrete Cores

セメントの種類	材齢 28 日におけるコア圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	流入側	底板	流出側	平均
HFSC2	60.9	58.1	61.0	63.4
HFSC1	65.6	66.9	68.1	69.4

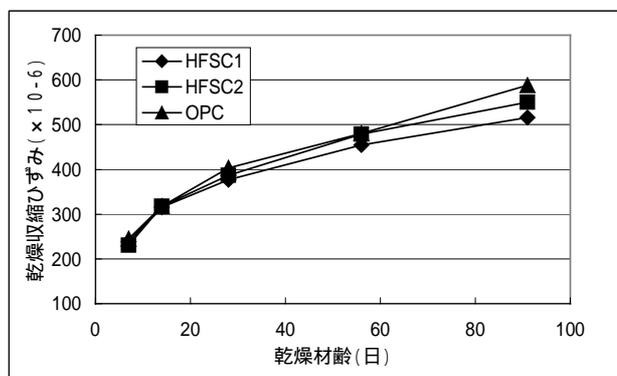


Fig. 7 乾燥収縮ひずみ  
Drying Shrinkage of Low Alkalinity Cement

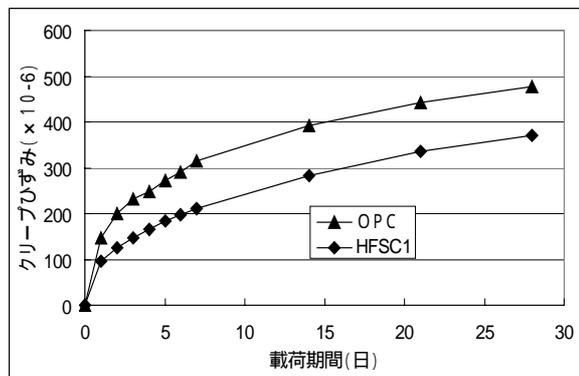


Fig. 8 クリープ試験結果  
Creep Strain of Low Alkalinity Cement

和熱による温度応力によるひび割れの発生が懸念される。温度応力を低くするためには、水和熱を下げることはもちろんであるが、コンクリートのクリープを大きくして、発生した応力を緩和することが有効である。HFSC は多量にポゾランを含んでいるために、クリープは大きいと推定されるが、過去にこのようなコンクリートのクリープは測定されていないので、圧縮クリープ試験を実施した。

クリープ試験機は油圧式のものを用い、コンクリート表面をプロピレンフィルムでシールした後載荷した。載荷時材齢は 28 日で載荷時までは標準養生とした。載荷応力度は、 $10\text{N/mm}^2$  とした。試験結果を Fig.8 に示す。28 日のクリープひずみにおいて HFSC1 では、普通セメントを用いたコンクリートに比べ、ひずみで約  $100\mu$ 、比率で 25% 程度大きくなっている。クリープひずみが大きい理由として、シリカフュームフライアッシュなど密度の小さい微粉末を多量に含むために、ペースト部分の体積が大きいことと組織がち密化していることにより、持続的な変形性が大きくなったものと考えられる。クリープが大きいことは、ひび割れ抵抗性が大きいことにつながり、放射性廃棄物処分場のコンクリートとして好ましい性質と考える。

4.2.7 断熱温度上昇量 セメントの水和熱によるひび割れ抵抗性を評価としてクリープ試験に引き続き、断熱温度上昇試験を実施した。断熱温度上昇試験も他の試験と同様、U 字供試体を打設時に試料を採取して試験を行った。試験装置は空気循環型断熱温度上昇試験装置を使用して、温度測定は 14 日間測定した。測定結果を Fig.9 に示す。HFSC では発熱体であるポルトランドセメントが少ない分発熱が小さい結果となっている。断熱温度上昇値  $Q$  で普通ポルトランドセメントの 60% の値を示した。HFSC1 では 40% のセメントしかないが断熱温度上昇量が普通ポルトランドセメントの 60% あることに関しては、シリカフュームの反応に伴う発熱があることや、少ないながらフライアッシュが発熱していることなどが考えられる。

## 5 まとめ

ポゾランを高含有し低アルカリ性セメント HFSC を用いたコンクリートは、その浸出液の pH が 11 以下になることを示した。さらに、高性能 AE 減水剤を使用することにより、締固め不要コンクリートやグラウト材としての適用できる見通しも得られた。ポゾランを高含有した低アルカリ性セメント開発で得られた知見は次のとおりである。

- i) フライアッシュ、シリカフュームなどのポゾランを 50% 以上かつシリカフュームを 20% セメントの内割りで加えることにより、セメントの間隙水の pH を 11 以下とした低アルカリ性セメントとなる。
- ii) フライアッシュとして  $20\mu\text{m}$  以下の分級フライアッシュを使用することにより、凝結時間を一般に使用される高流動コンクリート程度にすることができる。
- iii) 施工性について、初期の圧縮強度が低いという課題はあるが、充填性は普通セメントに比べ優れている。型枠計画

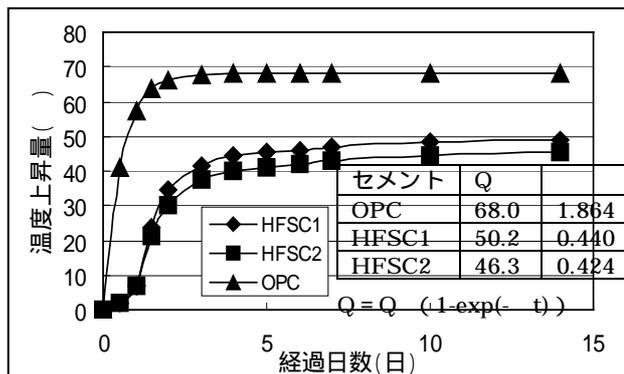


Fig. 9 断熱温度上昇試験結果

Adiabatic Temperature Rising Test of Low Alkalinity Cement

などに工夫が必要であろう。

- iv) 乾燥収縮量および断熱温度上昇量は普通セメントに比べて小さいが、クリープひずみは大きい。この特性からひび割れ抵抗性は普通セメントに比べて高いと考えられる。

しかし、このコンクリートでは、従来の使用経験以上にフライアッシュを使用するため、実際の構造物を施工するに当たっては、フライアッシュの品質がコンクリートの性能に与える影響評価を十分評価しておく必要がある。また、岩盤に密着する部分として吹付けコンクリートへの適用性や低アルカリ環境下での鉄筋の腐食性状についても把握しておく必要がある。現在、このような実構造物への適用を考えた研究を継続中である。

## 謝辞

なお、本研究は、核燃料サイクル開発機構殿よりの委託研究として、(株)大林組が実施したものの成果をとりまとめたものである。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) たとえば土木学会エネルギー土木委員会：土木技術者のための高レベル放射性廃棄物地層処分法の現状と技術的課題，1990 . 1
- 2) 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研究報告，pp.4-24，2002.6
- 3) 黒木泰貴他：放射性廃棄物処分施設のベントナイト系緩衝材に関する研究(その 1)，大林組技術研究所報，No.56，pp.141~144，1998
- 4) 近藤泰夫他監修：コンクリート工学ハンドブック，pp.60，1981.11
- 5) S.A.Greenberg and T.N.Chang: Investigation of the Colloidal Hydrated Calcium Silicates，The Journal of Physical Chemistry, Vol.69, pp.182, 1965
- 6) 鈴木一孝他：コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究，コンクリート工学論文集，34，pp.39-49,1990