

論文 FS コンクリートの基本性状と耐海水性に関する研究

大橋 潤一*1 伊藤 正憲*1 早川 健司*1 田辺 忠顯*2

要旨: FSコンクリートは、細骨材に石炭灰とエージング処理した製鋼スラグを、粗骨材に高炉スラグを使用したコンクリートである。近年、FSコンクリート研究が進められているが、海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物への適用性に関する報告は少ない。本研究は、中部地区から副産した石炭灰と製鋼スラグを使用したFSコンクリートの基本物性と海洋暴露下における、強度性状、塩化物イオン透過性、鉄筋腐食性等について検討した。その結果、FSコンクリートは、普通コンクリートに比べて、長期強度発現性が大きく、塩化物イオン透過性が低く、耐腐食性にも優れていることがあきらかになった。

キーワード: FSコンクリート、製鋼スラグ、フライアッシュ、圧縮強度、海洋暴露試験

1. はじめに

近年、石炭火力発電所（以下、発電所）や製鉄所から石炭灰やスラグ等の産業副産物が、大量に発生している。これらの多くは、セメント原料、道路用路盤材や埋戻し材として利用され、必ずしも付加価値の高い利用方法とは言い難い。

このような背景のもと産業副産物である石炭灰（フライアッシュ）やスラグを利用した新しいリサイクルコンクリートである「FSコンクリート」の研究開発が、運輸省第二港湾建設局や（株）沿岸環境開発資源利用センターを中心として進められている¹⁾。

これらの研究は、消波ブロックや護岸などの、無筋コンクリートへ適用することを目的として行われており、鉄筋コンクリート構造物への適用性に関する報告例は少ない。

このFSコンクリートは、細骨材にフライアッシュ（以下、FA）とエージング処理した製鋼スラグ（以下、SS）、粗骨材に高炉スラグ（以下、GS）を使用したものである。発電所、製鉄所が立地する地域においては、コスト低減が可能な建設材料である。また、天然骨材を使用しないため環境にやさしいコンクリートでもある。

本研究は、伊勢湾沿岸部に立地する発電所と製鉄所から副産する材料を使用した「FSコンクリート」の基本性状および耐海水性をあきらかにし、海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物への適用性を検討することを目的として、実施したものである。

なお、本研究は、FSコンクリートを新たな建設材料として利用することを目的として設立

表-1 使用材料

	使用材料	種類	記号	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	入手先	備考
FS コン クリ ート	セメント	普通ポルト	C	3.16	—	三菱マテリアル	
	細骨材	フライアッシュ	FA	2.20	—	中部電力碧南火力発電所	非JIS品(原粉)
		製鋼スラグ	SS	2.54	8.74	新日本製鐵名古屋製鐵所	膨張率0.2%にエージング
	粗骨材	高炉スラグ	GS	2.49	7.07		JIS品(2005)
普通 コン クリ ート	セメント	普通ポルト	C	3.15	—	太平洋セメント	配合N1, N3
				3.16	—	三菱マテリアル	配合N2
	細骨材	山砂	NS	2.60	1.47	八王子産砕砂, 君津産山砂	配合N1
				2.59	2.12	静岡県掛川産山砂	配合N2
				2.63	2.11	千葉県木更津産山砂	配合N3
	粗骨材	碎石	NG	2.65	1.15	東京都八王子産砕石	配合N1
				2.64	0.64	神奈川県津久井産砕石	配合N2
2.70				0.70	高知県鳥形山産砕石	配合N3	

*1 東急建設（株）技術研究所土木研究部（正会員）

*2 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

された「FSコンクリート研究会」において実施した実験の一部をまとめたものである。

2. 研究概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料と品質の一部を示す。

SSは、製鉄所の製鋼過程で発生し、その製錬工程で生石灰やドロマイト等を副原料とするため遊離石灰が残存しており、水和反応により膨張する性質がある。このため、コンクリート用骨材として使用した場合、この膨張作用がコンクリートに悪影響を及ぼすと考えられ、これまで利用されなかった材料である。

しかし、コンクリート用骨材として使用する前に、膨張を促進エージング(蒸気エージング)処理により進行させたSSを使用し、さらに、FAをSSに対して適切な割合で混合することにより、その膨張を抑制できることが既往の研究よりあきらかとなっている²⁾。

本実験では、蒸気エージング処理により水浸膨張率が、0.2%程度のSSを使用した。

2.2 試験項目および方法

表-2に試験項目およびその方法を示す。

図-1に鉄筋腐食試験供試体の概要を示す。

使用鉄筋はφ9mmの黒皮付きを使用し、かぶりは1cmおよび2cmとした。腐食面積率は、標準養生1ヶ月後から曝露を開始し、曝露期間約150日で測定した。

図-2に急速塩化物イオン透過性試験装置の概要を示す。急速塩化物イオン透過性試験は、AASHTO T 277に準拠して実施した。

本実験においては、塩化物イオンがコンクリートの打設面から透過することを模擬してコンクリート試験体の打設面側のセルにNaCl溶液を、もう一方のセルにNaOH溶液を

表-2 試験項目

試験項目	試験方法
スランブ試験	JIS A 1101に準拠
空気量試験	JIS A 1128に準拠
ブリーディング試験	JIS A 1123に準拠
凝結硬化速度試験	JIS A 6204付属書1に準拠
加圧ブリーディング試験	JSCE-F502に準拠
圧縮強度試験	JIS A 1180に準拠
	① 試験材齢：7, 28, 91, 182日
	② 供試体寸法：φ10×20cm
ヤング係数試験	③ 養生、曝露条件：20℃標準水中養生、20℃海水、飛沫帯、干満帯
	JSCE-G502に準拠 試験は圧縮強度試験と同時に実施
鉄筋腐食試験	試験は割裂した供試体より鉄筋を採取し、透明シートに腐食面積を写し取り、画像解析ソフトにより面積率を測定した。
	① 試験材齢：182日
	② 供試体寸法：φ10×20cm かぶり深さ：1cm, 2cm
急速塩化物イオン透過性試験	③ 曝露条件：20℃海水、飛沫帯、干満帯
	AASHTO T-277に準拠
	① 試験材齢：182日 ② 供試体寸法：φ10×5cm ③ 養生：20℃標準水中養生

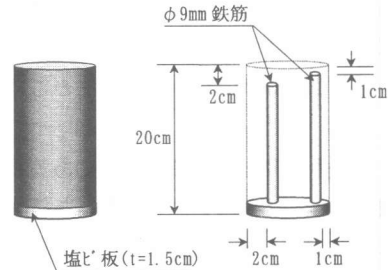


図-1 鉄筋腐食試験供試体概要図

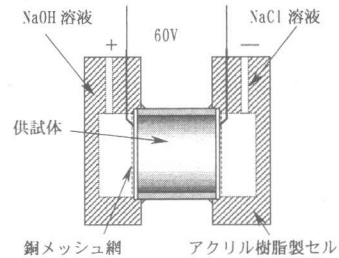


図-2 急速塩化物イオン透過性試験概要図

表-3 配合表

種類	記号	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)									
				W	C	S			G		混和剤		
						NS	SS	FA	NG	GS	Ad1 ^{*1}	Ad2 ^{*2}	Ad3 ^{*3}
普通 コンクリート	N1	67.5	49.3	167	248				954		2.48	1.0%	—
	N2	64.0	49.0	172	269	885			939		0.67	0.5%	2A ^{*3}
	N3	55.0	48.0	155	282	897			997		0.71	0.25%	2A
FS コンクリート	FS1	66.0	50.0	165			693	180		885	1.25	0.5%	8A
	FS2	69.2		173	250		636	221		875	1.25		10A
	FS3	72.4		181		587	255		865	1.25	12A		

*1: AE減水剤, *2: 空気量調整剤 (ボソリス775S), *3: A=C×0.003%

満たした。この状態で一定電圧 60 ± 0.1 ボルトを6時間通電し、流れた電流量(クーロン: $C = 1 \text{ Amp.} \times 1 \text{ sec.}$)を測定した。

2.3 配合

表-3に配合表を示す。

配合は、以下に示す考え方に基づき試験練り実施後決定した。

- ・目標スランプを $12 \pm 2.5 \text{ cm}$, 目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。
- ・FSコンクリートの材齢28日圧縮強度が 24 N/mm^2 程度になるよう, 事前に配合選定, 強度試験を行い, 単位セメント量はFS1, FS2, FS3とも一定量 250 kg/m^3 とした。
- ・FAは細骨材として考えた。
- ・FA単位量は, SS単位量との容積比 (FA/SS) が0.4 (FS2)を基本とし, 0.3 (FS1), 0.5 (FS3)となるよう決定した。
- ・比較用普通コンクリートは, N1; 28日圧縮強度がFSコンクリートと同程度 (24 N/mm^2) の配合, N2; オートクレーブ養生用, N3; 28日圧縮強度 30 N/mm^2 以上を期待した配合の3種類とした。

2.4 練混ぜ方法

N1を除くコンクリートの練混ぜは, 100リットルの強制パン型ミキサを使用した。練混ぜ手順は, 細骨材とセメントを投入して30秒間空練り, 次に練混ぜ水(混和剤含む)を投入した後60秒間練り混ぜてモルタルを作成し, 最後に粗骨材を投入して90秒間練り混ぜる方法とした。

N1の練混ぜは, 実機の2軸強制ミキサ (3.0 m^3) を使用した。練混ぜ方法は, 細骨材・セメント・水を投入5秒練混ぜ, その後, 粗骨材を投入30秒練混ぜとした。

2.5 養生方法

養生条件は, ① 20°C 標準水中養生, ② 20°C 海水養生, ③ 飛沫帯曝露, ④ 干満帯曝露とした。②~④は材齢約1ヵ月まで標準水中養生した後, 運輸省港湾技術研究所において曝露を実施した。図-3に運輸省港湾技術研究所の曝露施設の水位とシャワー散布のサイクルを示す。

飛沫帯曝露供試体は, 施設の水位低下時の1日2回, 各3時間(計6時間)海水を散布した。干満帯曝露供試体は, 供試体を水位 0.75 m の位置に設置し, 1日2回, 各6時間(計12時間)海水中に供した。

また, FSコンクリートの長期安定性を確認するため, オートクレーブ養生後, 圧縮強度試験を実施した。

図-4にオートクレーブ養生条件を示す。

3. 結果および考察

3.1 一般環境下における硬化性状

(1) 圧縮強度

図-5に182日までの材齢と圧縮強度の関係, 図-6に材齢7日強度を「1」とした場合の各材齢における圧縮強度比を示す。

FS1~3はN3に比べ, 材齢7日で 8 N/mm^2 , 材齢28日で 4 N/mm^2 程低い値を示したが, 材齢91, 182日では, N3とほぼ同程度の圧縮強度を得ることができた。また, N1と比較した場合, 材齢

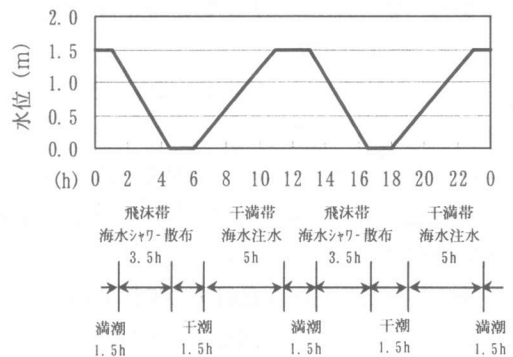
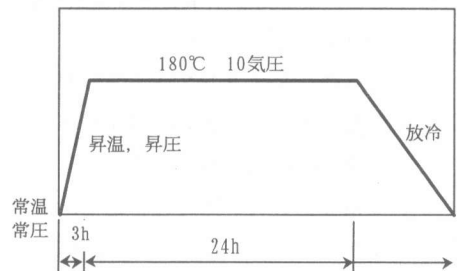


図-3 曝露試験サイクル



オートクレーブ養生は材齢2日で実施し, 強度試験は放冷後, 20°C , 湿度60%で14日養生した後実施した。

図-4 オートクレーブ養生条件

28日までは、ほぼ同様な圧縮強度を示したが、材齢91, 182日では、N1より10N/mm²以上大きな圧縮強度を示した。

図-6より、各コンクリートの材齢7日を基準とした時の材齢に伴う圧縮強度の増加は、N3の場合、材齢28日で約1.7倍、91日で約2.0倍の強度を示した。一方、FS1~3は、材齢28日で約1.7倍、材齢91日で約2.5倍、それ以後も強度が増加し、182日では約2.7倍と長期にわたって強度が増加する傾向にあった。

このように、FSコンクリートの長期強度が増加した理由としては、SSの膨張抑制効果を期待し、細骨材として混合したFAのポゾラン反応によるものと考えられる。

一方、今回の圧縮強度試験においては、FA/SS=0.3, 0.4, 0.5であるFS1~3とも同じような長期強度の増加が確認された。

この原因として、FS1ではFA/SS=0.3, W/C=66%, FS3ではFA/SS=0.5, W/C=72.4%であり、長期強度発現が相殺されたため、FA/SSの違いによる影響が見られなかったものと考えられる。

(2) ヤング係数

図-7に材齢とヤング係数の関係、図-8に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。

図-7より、FS1~3のヤング係数は、それよりも強度が小さいN1とほぼ同じ値を示し、同程度の強度のN3より小さい値となった。

ヤング係数の材齢7日以後の増加傾向は、普通コンクリートとほぼ同等であった。

図-8より、FS1~3のヤング係数は、N1, N3より小さく、また、土木学会の推定式(図中、細線)よりも小さな値となった。

このように、FSコンクリートのヤング係数は土木学会の推定式の値より15%程小さくなることがあきらかになった。これは、FSコンクリートの粗骨材および細骨材容積が、普通骨材コンクリートに比べて小さいことが原因であると考えられる。

(3) オートクレーブ

図-9にFA/SSと σ オートクレーブ/ σ 28(オートク

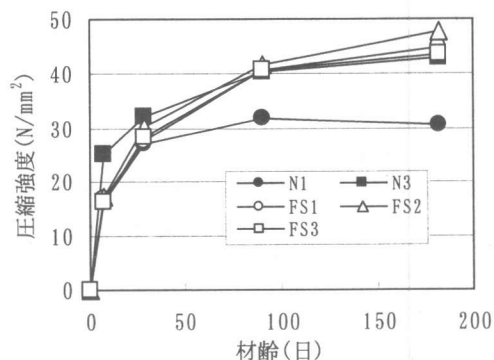


図-5 材齢と圧縮強度の関係

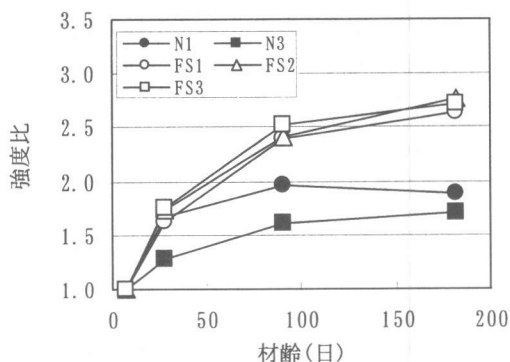


図-6 材齢7日を基準とした各配合の強度比

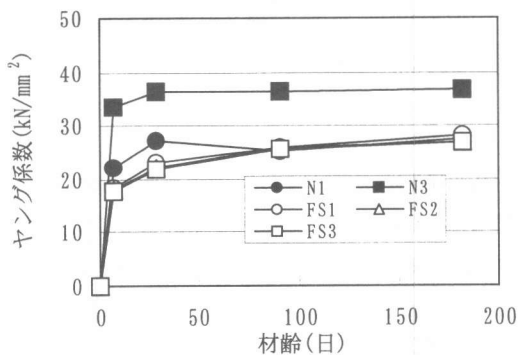


図-7 材齢とヤング係数の関係

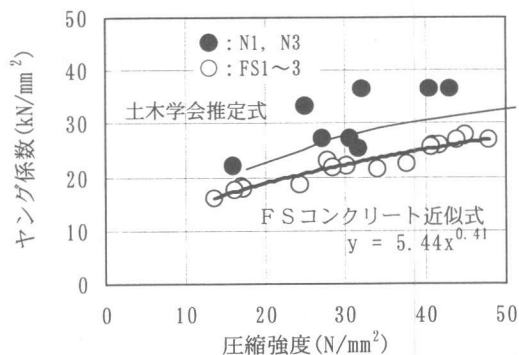


図-8 圧縮強度とヤング係数の関係

レーブ養生後の圧縮強度と標準養生材齢28日圧縮強度との比)の関係を示す。図中には既往の研究例²⁾のデータ(凡例:○)も合わせて示した。既往の報告によると、FA/SSが0.2~0.25以下であるとFAの膨張抑制効果が不十分となり $\sigma_{オートレーブ} / \sigma_{28}$ は1.0以下になり、十分な強度が得られないと報告されている。

本実験におけるFSコンクリートの、 $\sigma_{オートレーブ} / \sigma_{28}$ は、1.28~1.60倍となり、既往の報告より大きくなった。また、FS1、FS2、FS3の回帰勾配も大きくなった。

これは、既往の報告のSSの水浸膨張比が0.49%であったのに対し、今回使用したSSの水浸膨張比が0.20%と小さかったことから、SSの膨張による影響が少なかったことが原因と考えられる。

N2では、材齢28日強度が23.5N/mm²オートクレーブ後が32.2N/mm²となり $\sigma_{オートレーブ} / \sigma_{28} = 1.37$ であった。

3.2 海洋環境下における硬化性状

(1) 圧縮強度

図-10に海洋環境下に182日曝露した各コンクリートの圧縮強度および標準養生供試体の圧縮強度に対する各曝露条件の強度比(折れ線グラフ)を示す。

海水中曝露では、N1が約20%、N3が約5%低下し、FS2では約20%低下した。飛沫帯、干満帯に曝露した場合は、FS2では若干3%ほど低下したが大きな低下は観察されなかった。

このことから、海洋環境下における影響は、普通コンクリートとほぼ同等であると考えられる。

(2) 塩化物イオン透過性

図-11に急速塩化物イオン透過性試験における通電時間と電流量の関係、表-4にASTMの判定表を示す。

塩化物イオンの透過性を表-4のASTMの判定

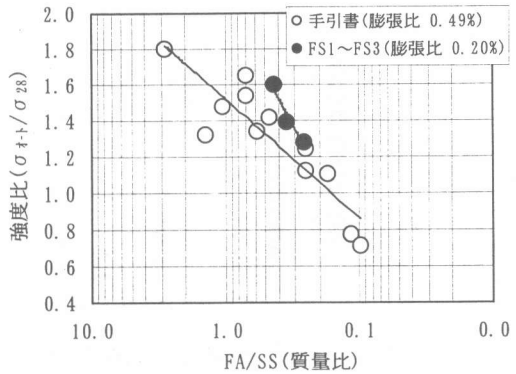


図-9 FA/SSとオートクレーブ強度/ σ_{28} の関係

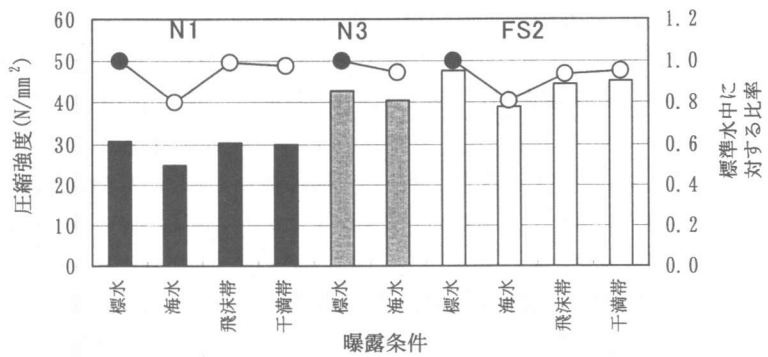


図-10 海洋環境下に曝露したコンクリートの圧縮強度

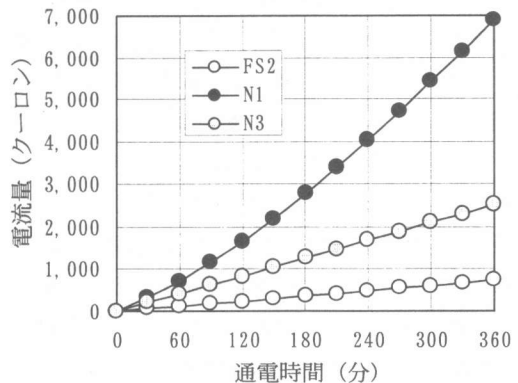


図-11 急速塩化物イオン透過性試験

表-4 電流量による塩化物イオン透過性の評価

電流量 (クーロン)	塩化物イオン透過性	備考
4000~	High	(高)水セメント比(>0.6)普通セメント使用
2000~4000	Moderate	(中)水セメント比(0.4~0.5)普通セメント使用
1000~2000	Low	(低)水セメント比(<0.4)普通セメント使用
100~1000	Very Low	ラテックス混入コンクリート
~100	Negligible	ポリマー含混入コンクリート ポリマーコンクリート

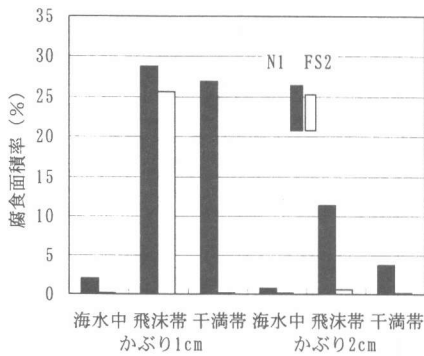


図-12 暴露環境と鉄筋の腐食面積率

表より評価すると、N1は6時間通電量が6,800ケロンで「High」、N3は2,600ケロンで「Moderate」であったのに対し、FSコンクリートは、800ケロン以下であり、その透過性は「Very Low」の判定結果となった。

このことから、FSコンクリートは、塩化物イオン透過性の低いコンクリートであることがあきらかになった。

(3) 海洋環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食試験

図-12に各海洋環境下に曝露した、供試体中の鉄筋(かぶり1cmと2cm)の腐食面積率を示す。

その結果、N1において、鉄筋の腐食は各環境下で進行しており、腐食面積率は「海水中」<「干満帯」<「飛沫帯」の順になった。

FS2かぶり1cmにおいて、飛沫帯の環境下では、N1と同様、鉄筋腐食が進行したが、それ以外の環境(海水中、干満帯)での、腐食はわずかであった。また、かぶり2cmを確保した供試体では、飛沫帯においても0.4%とわずかであった。

前項(2)に述べた急速塩化物イオン透過性試験結果および本曝露試験結果より、FSコンクリートは、塩化物イオンの透過性が低く、鉄筋腐食に対する抵抗性に優れていると考えられる。

4. まとめ

港湾地域の鉄筋コンクリート構造物への適用を目指し、伊勢湾に立地する石炭火力発電所および製鉄所の発生材料を使用したFSコンクリートの基本物性試験および海洋環境下の曝露

試験を実施した結果、以下のことがあきらかとなった。

- 1) FSコンクリートは、フライアッシュのポゾラン反応により、普通コンクリートに比べて、長期強度の大幅な増加が認められ、材齢182日では材齢7日の2.7倍に増加した。
- 2) FSコンクリートのヤング係数は、普通骨材を用いたコンクリートよりも15%程小さい。
- 3) オートクレーブ養生結果より、フライアッシュ・製鋼スラグ比(質量比)を0.25以上とすることにより、強度低下やポップアウト等の異常は観察されず、長期安定性が得られるものと考えられる。
- 4) 海洋環境下における圧縮強度試験、塩化物イオン透過性試験、鉄筋腐食試験の結果より、FSコンクリートの耐海水性は、普通コンクリートと同等以上であることがあきらかになった。

<謝辞>

本研究は、FSコンクリートを新たな建設材料として適用することを目的に設立された「FSコンクリート研究会(委員長:名古屋大学 田辺忠顯教授)」の配合・耐久性ワーキンググループにおいて行った実験の一部を取りまとめたものである。研究会参加企業である(株)宇部三菱セメント研究所、鹿島建設(株)、五洋建設(株)、新日本製鐵(株)、中部電力(株)、三菱商事(株)、三菱マテリアル(株)の関係者の方々、運輸施設整備事業団の渡辺弘子氏、研究会のアドバイザーである(株)沿岸環境開発資源利用センターの堀井昭宏氏、また、曝露試験場を提供していただいた運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室の皆様には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

「参考文献」

- 1) 林・篠原、澤木:天然骨材を全く使用しないFSコンクリートの開発,セメント・コンクリート, No. 630, pp28-33, 1999. 8
- 2) FSコンクリートの利用手引書,(株)沿岸環境開発資源利用センター, 1998. 11