

## [28] 鋼繊維補強コンクリートに対する産業副産物の利用

正会員 河野 清 (徳島大学工学部)  
 正会員 ○堀井克章 (徳島大学工学部)  
 大字 徹 (香川県土木部)

### 1. まえがき

省資源・省エネルギーのためあるいは環境保全のために、火力発電所、製鉄所、その他の工場から多量に排出される産業副産物を積極的に利用する研究を進めることは、非常に重要で有意義なことである。セメント・コンクリート用材料としては、従来からフライアッシュや高炉スラグといった産業副産物が使用されているが、その他の副産物については、まだ十分な研究が行われていない。

最近、複合材料として注目されている鋼繊維補強コンクリート (以下SFRCと略記) では、繊維混入率の増加に伴いワーカビリティが著しく低下するという問題がある。このため、所要のワーカビリティを得るのに必要な単位水量及び単位セメント量が増大する。従って、SFRCに対して、混和材として利用可能な産業副産物をセメントの一部に代替して利用できるならば、資源及びエネルギーの節約という点できわめて好都合である。

そこで本研究では、SFRCに対する産業副産物の有効利用及び使用セメント量の低減を目的として、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末及びわが国での研究例がきわめて少ないけい酸質の超微粉末シリカフェームを混和材としてSFRCのセメントの一部に代替して使用し、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの諸性状についての調査を行った。

### 2. 実験の概要

#### (1) 使用材料

鋼繊維は、矩形断面 (□0.21×0.60mm) で長さ25mmのせん断ファイバー (記号SF、比重7.85、アスペクト比62.4、引張強度 $124 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$ ) を使用した。セメントは、普通ポルトランドセメント (比重3.15、ブレン比表面積 $3120 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、28日圧縮強さ $407 \text{ kgf/cm}^2$ ) を用いた。細骨材には、徳島県吉野川産の川砂 (比重2.64、吸水率1.38%、粗粒率2.72)、また、粗骨材には、徳島県阿波郡市場町産の硬質砂岩砕石 (最大寸法15mm、比重2.58、吸水率2.09%、粗粒率6.18) を使用した。また、混和材として用いた産業副産物は、フライアッシュ (記号FA)、高炉スラグ微粉末 (記号BS、以下高炉スラグと略記) 及び超微粉末シリカフェーム (記号CSF、以下シリカフェームと略記) の3種である。ここで、シリカフェームは、金属シリコンやフェロシリコンの製造時に発生するダストを集塵することによって得られる $\text{SiO}_2$ を主成分とする平均粒径 $0.1 \mu\text{m}$ 程度の超微粉末の産業副産物である。使用した3種の産業副産物の主な試験成績を表-1に示す。なお、混和剤としては、リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とする標準型のAE減水剤及び空気量の調節のためのAE助剤を使用し、シリカフェームに関する実験では、ナフタリンスルホン酸系の高性能減水剤の使用も試みた。

表-1 使用した混和材 (産業副産物) の品質

混和材 (産業副産物) の種類	主な化学成分 (%)						比重	比表面積 (ブレン法) ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>		
フライアッシュ (FA)	6.8	48.7	26.5	5.4	1.8	0.6	2.30	3830
高炉スラグ (BS)	41.1	34.2	15.1	0.7	6.2	-	2.90	3900
シリカフェーム (CSF)	1.8	73.8	1.6	2.3	1.3	1.2	2.30	38600

#### (2) コンクリートの配合

本実験では、目標スランプ8cm及び目標空気量5%とし、水セメント比55%の一定で配合設計を行った (表-2参照)。なお、SFRCにおける繊維混入率は、容積百分率で $1.5^\circ/\text{vol}$ の一定とした。

混和材代替率は、セメント重量に対して内割で、フライアッシュは0、10、20及び30%の4種、高炉スラグは0、15、30及び45%の4種及びシリカフェームは0、10及び20%の3種とした。なお、シリカフェームに関しては、高性能減水剤の使用及び繊維を混入しないブレンコンクリート (記号PL) についても、代替率を0、10及び20%の3種に変えて実験を行った。

表-2 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果

配合の種類	粗骨材の最大寸法 Me (mm)	目標スランプ SL (cm)	目標空気量 Air (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 B/A (%)	繊維混入率 Vf (% Vol)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤		試 験 結 果							
							水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	繊維	AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (ml)	コンクリート温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)				
SF1.5-FA 0	15	8	5	55	68	1.5	220	400	0	1056	485	118	0.25	8.0	29.3	7.6	4.2				
SF1.5-FA10							217	355	39									8.3	28.5	8.2	3.7
SF1.5-FA20							214	312	78									8.6	28.6	7.2	2.4
SF1.5-FA30							211	269	115									8.8	28.4	8.8	2.6
SF1.5-BS 0	15	8	5	55	68	1.5	220	400	0	1056	485	118	0.25	16.0	26.0	8.1	5.2				
SF1.5-BS15							219	338	60									16.7	26.4	8.1	5.0
SF1.5-BS30							218	277	119									17.4	26.4	8.5	4.6
SF1.5-BS45							217	217	177									18.1	26.4	8.3	5.0
SF1.5-CSF 0	15	8	5	55	68	1.5	220	400	0	1056	485	118	0.25	14.4	27.3	8.7	5.0				
SF1.5-CSF10							240	392	44									15.7	27.5	10.1	7.7
SF1.5-CSF20							260	378	95									17.0	27.7	8.2	5.8
SF1.5-CSF 0*	15	8	5	55	68	1.5	220	400	0	1056	485	118	0.50*	24.0	25.8	7.4	3.7				
SF1.5-CSF10*							217	355	39				0.85*					21.7	25.7	8.0	6.2
SF1.5-CSF20*							214	312	78				1.20*					19.5	25.8	7.5	6.3
PL-CSF 0	15	8	5	55	50	0	175	342	0	876	857	0	0.25	15.8	26.0	8.1	4.7				
PL-CSF10							190	342	38	840	820			15.2	26.2	10.0	5.8				
PL-CSF20							205	328	82	797	779			16.4	26.5	7.7	4.5				

注) \*印は高性能減水剤を使用。

### (3) コンクリートの練りませと供試体の作製

S F R C の練りませには、容量50ℓの強制練りミキサを用いた。まず、ミキサに細骨材とセメントを投入し、水を加えながら攪拌し30秒間練りませ、次の1分間で、鋼繊維をファイバー散布機で投入しながら練りませた。次に、ミキサを止めて粗骨材を投入し、さらに1分間練りませを行った。ミキサから排出後のフレッシュコンクリートについて、スランプ試験及び空気量の試験を行った。

強度試験用供試体の作製には、□10×10×40cmのはり型枠を用い、1層に詰めて振動台（振幅1mm、振動数6000rpm）で20秒間締固めを行った。締固め成形後、型枠のまま20±2℃の恒温室に移して表面仕上げを行った後、翌日脱型して、所定材令まで20±3℃の水中養生を行った。

### (4) 硬化コンクリートの強度試験

所定材令（7、28及び91日）に達した供試体は、水槽より取り出し、まず、JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）の規定に従って、3等分点載荷法による曲げ強度試験を行った。次に、曲げ強度試験を行ったはりを2つに切断し、長い方ははり折片は、2面せん断試験装置にセットしてせん断強度試験を行い、また、短い方ははり折片は、JIS A 1114（はりの折片によるコンクリートの圧縮強度試験方法）の規定に従って圧縮強度試験を行った。なお、供試体数は1種につき3個とし、それらの平均を試験値とした。

## 3. 実験結果とその考察

### (1) フレッシュコンクリートの諸性状

3種の産業副産物を混和材として用いた場合の、フレッシュコンクリートにおける各試験結果を表-2に示す。

フライアッシュや高炉スラグを用いたコンクリートの色合いは、通常のコンクリートと変わりはないが、シリカフェームの場合は、その代替率の増加に伴って黒みを帯びてくる傾向がみられる。

フライアッシュ、高炉スラグまたはシリカフェームをセメントに代替して用いたコンクリートでは、代替率の増加とともに連行空気量が減少し、所定の空気量を得るためのAE剤量を増す必要があるといわれている<sup>1)2)3)</sup>。本実験でもこの傾向がみられ、いずれの産業副産物の場合も、その代替率の増加に伴い連行空気量が減少するため、目標空気量を得るためのAE助剤量を増す必要があることが、表-2からわかる。

フライアッシュを使用したコンクリートの特性の1つに、ワーカビリティの改善がある。これは、フライアッシュがガラス質の球形を呈していることによるものである。本実験でも表-2から明らかのように、目標スランプを8cmとした場合、フライアッシュの代替率を10%増すと単位水量で3kg、また単位セメント量で6kg程度の低減が可能となり、S F R C に対してもワーカビリティの改善に効果のあることがわかる。また、空気量の測定値は代替率の増加とともに低下しており、目標空気量を得るためにAE助剤量を増すならば、ワーカビリティ改善の効果はさらに大きくなることが予想される。また、高炉スラグの場合も、若干ではあるが、同一スランプを得るための単位水量を低減することができる。これに対して、シリ

カフュームを用いた場合、代替率10%の増加に対して、同一スランプを得るための単位水量はS F R Cで20kg、また、プレーンコンクリートでも15kg増す必要がある。これは、シリカフュームの比表面積が非常に大きく、代替率の増加に従ってコンクリートの粘調性が増し、ワーカビリティーが悪化することによるものと思われる。しかし、単位水量を増すことは単位セメント量を増すことにもなり、本研究の目的に反することになる。そこで本実験では、シリカフュームを用いたS F R Cのワーカビリティー改善のために、セメント粒子の分散性能の高い高性能減水剤の使用を試みたのである。

表-2からわかるように、シリカフューム代替率10%の増加に対して、高性能減水剤の添加量を単位セメント量に対する

重量百分率で0.35%増すことにより、単位セメント量を増すことなく、目標スランプを得ることが可能となる。このことから、シリカフュームを用いるS F R Cでは、ワーカビリティー改善のために高性能減水剤の使用は非常に効果があるといえる。

(2) 硬化コンクリートの諸強度

3種の産業副産物を混和材として用いた場合の、混和材代替率とコンクリートの各強度（圧縮、曲げ及びせん断強度）との

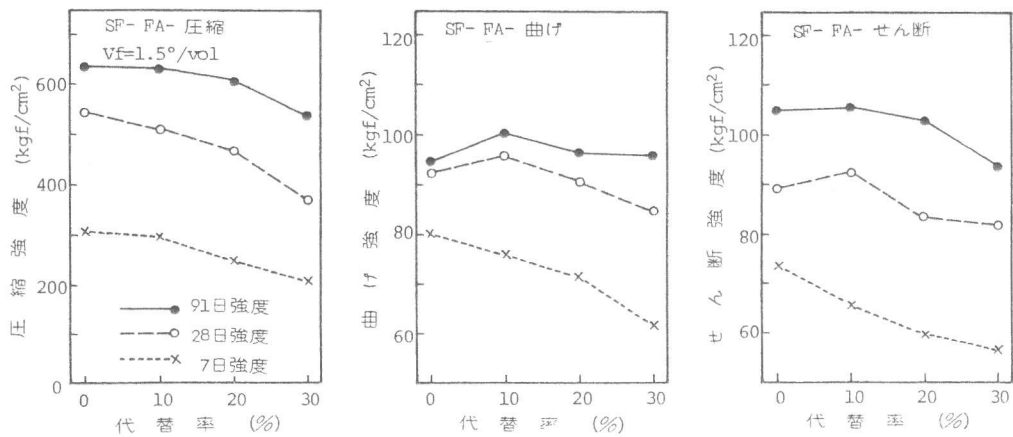


図-1 フライアッシュ代替率とS F R Cの各強度との関係

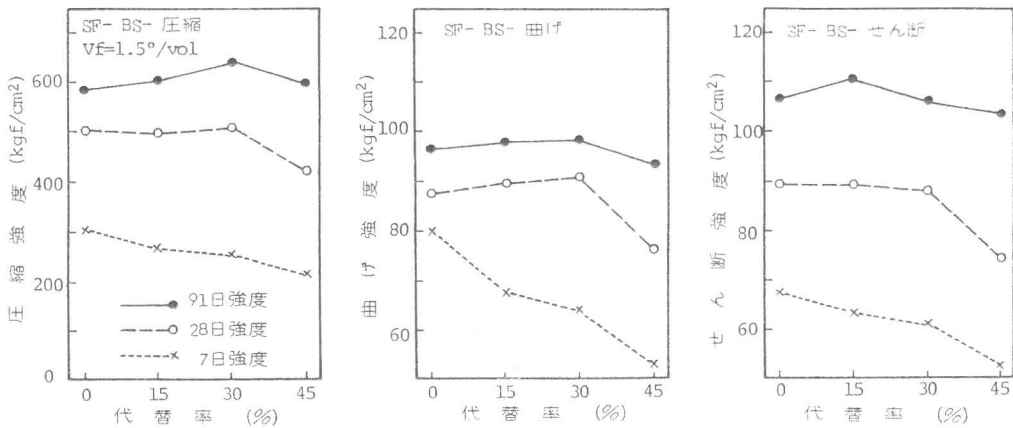


図-2 高炉スラグ代替率とS F R Cの各強度との関係

関係を図-1～図-5に示す。

これらの図から明らかなように、材令7日の各強度は、いずれの産業副産物の場合も、代替率の増加に従って低下する傾向がみられ、代替率20%で、代替率0%のものに比べて15%程度強度が低下する。しかし、それ以降の強度増進率は代替率が高いものほど大きくなっている。材令91日では、本実験で採用した代替率の範囲内であれば、産業副産物を用いたS F R Cの強

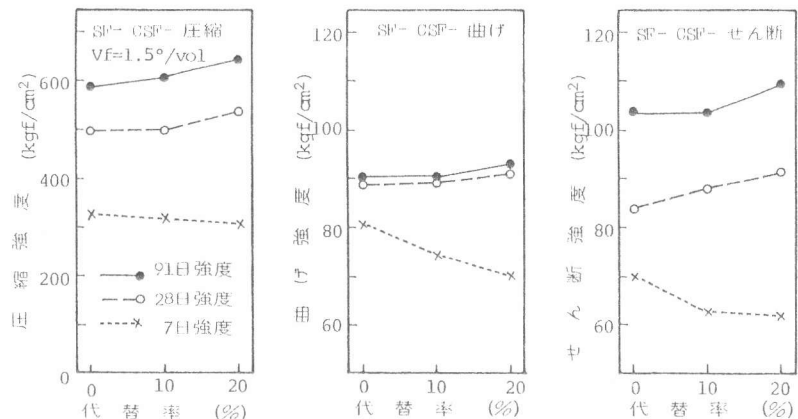


図-3 シリカフューム代替率とS F R Cの各強度との関係

度は、産業副産物を用いないものと同程度かそれ以上の値となっており、長期強度の発現に産業副産物が有効であることがわかる。また、高炉スラグやシリカフェームを用いた場合の強度発現は、フライアッシュに比べ比較的早期よりみられるが、これは、スラグの代替率が45%までであり、その潜在水硬性及び比表面積の非常に大きいシリカフェームのポゾラン反応が、フライアッシュの場合に比べて早期からコンクリートの強度発現に奇与することを示している。

シリカフェームを用いたSFRCに高性能減水剤を利用し、単位セメント量を他の2種の産業副産物の場合と同様に、セメントペーストと骨材との容積比が同じになるまで低減した場合の強度は、高性能減水剤を用いず単位セメント量を大きくした場合の強度とほぼ同様な値を示している。このことから、シリカフェームを使用するSFRCに対する高性能減水剤の有効性が認められる。

#### 4. むすび

SFRCにおいて、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ及びシリカフェームを混和材としてセメントの一部に代替して使用し、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの諸性状について調査した結果を要約すると、本実験の範囲内で次のことがいえる。

- (1) いずれの産業副産物の場合も、その代替率の増加に従ってコンクリートの連行空気量が減少するために、所定の空気量を得るためのAE剤量を増す必要がある。
- (2) フライアッシュは、SFRCのワーカビリティの改善に効果があり、同一スランプを得るために必要な単位水量を低減でき、しかも単位セメント量を節約することが可能となる。
- (3) シリカフェームをコンクリートに使用すると、その代替率の増加に伴ってワーカビリティが著しく悪化する。しかし、高性能減水剤の使用により、このコンクリートのワーカビリティは改善される。
- (4) いずれの産業副産物の場合も、その代替率の増加に従ってコンクリートの初期強度は低下するが、長期材令では、産業副産物を用いないコンクリートと同程度かそれ以上の強度が得られる。

以上のことから、SFRCに対しても産業副産物の利用価値は大きいことが示されたが、より経済的な配合を得るために代替率を高くした場合には、初期材令での強度発現が悪化することや、アルカリ度が低下することにより鋼繊維が腐食し易くなることなどの問題があり、今後もさらに研究が必要である。

#### 【参考文献】

- 1) 大槻ら, セメント・コンクリート, No. 443, 1984, pp. 43~49.
- 2) 小林ら, コンクリート工学, Vol. 14, No. 9, 1976, pp. 23~30.
- 3) Malhotra et al., Concrete International, Vol. 5, No. 5, 1983, pp. 40~46.

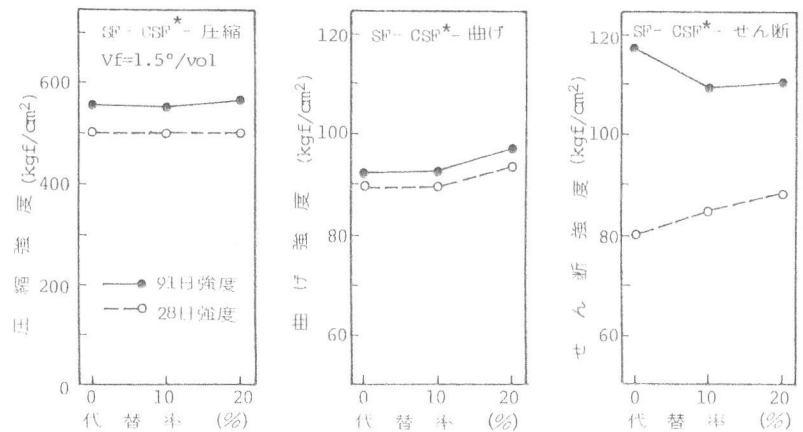


図-4 シリカフェーム代替率とSFRCの各強度との関係(高性能減水剤使用)

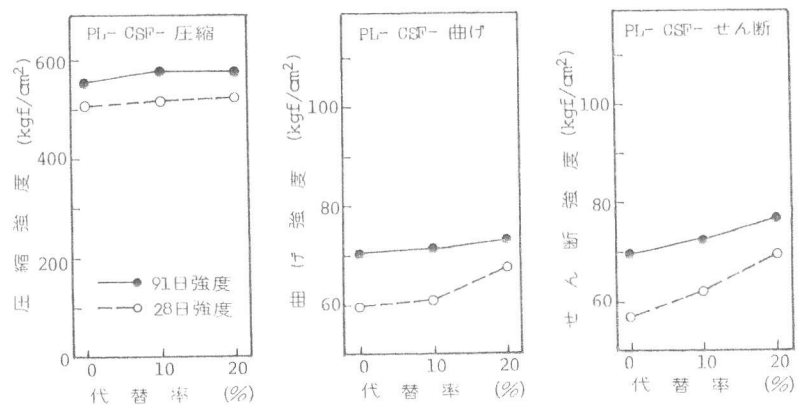


図-5 シリカフェーム代替率とプレーンコンクリートの各強度との関係