

[29] コンクリートへのシリカ・フュームの有効利用について

正会員 関 慎 吾 (日本大学理工学部)

正会員 ○山 根 伸 俊 (日本大学大学院)

1. はじめに

近年、材料関係の話題として、アモルファス スチール、シリコン等の新材料が発表され、土木・建築の分野においても、高性能減水剤、流動化剤等の混和剤やポリマーの導入、さらに各種ファイバーの混入等、次々と新材料が登場してきた。Silica-Fume もその一つであり、特に最近は、省資源、省エネルギーの観点から産業副産物のコンクリートへの有効利用が注目されている。一時期、コンクリート混和材として注目されたフライアッシュにとって替る混和材として、欧米はもちろん我国においても、種々研究されつつある¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。また、コンクリート界においては、プレストレスト コンクリートの発展に伴い、コンクリートの高強度化が進んできており、さらにコンクリートポンプ工法の普及、耐震設計による鉄筋量増加、補修工事等により、流動化コンクリートの需要が増々高まっているのが現状である。

そこで本研究は、産業副産物 Silica-Fume をコンクリートへ混入することにより、セメントの水和に際して析出する多量の遊離石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と Silica-Fume の大部分の成分である二酸化珪素 SiO_2 を結合させ、二次的に珪酸石灰水和物を造り⁵⁾、コンクリートの高強度化を試みた。さらに、コンクリートのポンプ工法を考慮し、スラング 1.5 cm 程度の流動化コンクリートを造り実験を行い、Silica-Fume の有効利用について報告する。

2. 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用し、その化学成分を表-1に示す。

表-1 普通ポルトランドセメントの化学成分 (%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TOTAL
22.2	5.4	2.9	64.3	1.4	2.1	98.3

Silica-Fume は、フェロシリコンを製造する際に生じる副産物で、平均粒径 $0.3 \sim 0.2 \mu$ と非常に微細であり、溶解性が高い。化学成分を表-2に示す。

表-2 Silica-Fumeの化学成分 (%)

SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	TOTAL
88.6	0.39	0.03	2.36	91.38

骨材は、粗骨材として最大寸法 20 mm の阿武隅川産砂利(比重 2.67, FM 6.54)、細骨材として黒磯戸田地区より採取した川砂(比重 2.55, FM 2.89)を用いた。

減水剤として、 β -ナフタリン高縮合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。

3. 供試体の作製および実験方法

実験に用いた配合は、表-3に示すものであり、Silica-Fume は、セメント重量に対し外割で混入した。また、コンクリートの練り混ぜに際して Silica-Fume は、練り混ぜ水にあらかじめ溶解し、スラリー状になるまで攪拌したものを用いた。

実験に使用した供試体は、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体であり、コンクリートの強度試験用供試体の作製方法は、JIS A 1132 に準じて行った。

脱型は、供試体成形後、約 24 時間後に行った。

養生は、水中養生と温水養生の2種類について行い、水中養生は、脱型後材令まで 20℃ の水中で養生を行った。温水養生は、脱型後 24 時間 20℃ の水中で前養生を行ったのち、5 日間 65℃ の温水で養生し、その後は材令まで 20℃ の水中で養生を行った。

表-3 コンクリートの配合

Mix No.	W / C (%)	Silica-Fume Content (%)	s / a (%)	W.R.A (%)	Mix Proportion (kg / m ³)						Slump (cm)
					Water	Cement	Silica-Fume	Fine agg.	Coarse agg.	W.R.A	
A-S	24.0	26.0	38.0	2.0	168	700	182	498	845	14	21.0
A-N		0					0	557	944		21.0
B-S	26.1	26.0			157	600	156	550	933	12	23.0
B-N		0					0	601	1019		22.0
C-S	36.0	26.0			144	400	104	645	1093	8	21.0
C-N		0					0	678	1150		18.5
D-S	72.0	26.0			144	200	52	727	1233	4	16.5
D-N		0					0	744	1261		14.5

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行った。

4. 実験結果とその考察

表-4 に実験条件を示す。

表-5 に圧縮強度試験結果および強度増進効果 (材令7日) を示す。

図-1 に圧縮強度とC/Wとの関係を示す。図-1によると、実験条件AとBを比較すると、各配合とも、Silica-Fume 混入による強度増進は、約100kgf/cm²程度の増加がみられた。また、実験条件BとCを比較すると、各配合とも400kgf/cm²程度の増加がみられた。これは、温水養生することにより、Silica-Fume と遊離石灰との結合反応が促進されるため、強度の増加につながったものと考えられる。

図-2 に強度増進効果とC/Wとの関係を示す。図-2によると、Silica-Fume による強度増進効果は、食配合になるにしたがって、すなわち、水セメント比が大きくなるにしたがい大きくなる傾向を示した。これは、水セメント比が大きくなると、セメントと水との間の拡散反応が活発になり、水和速度が速くなるため、セメントから析出される遊離石灰の量が多くなり、その量に比例してSilica-Fume と結合することにより生成される珪酸石灰水和物の生成量が多くなり、強度増進効果が増大したものと考えられる。

表-4 実験条件

実験条件	Silica-Fume 混入率 (%)	養生温度 (°C)
A	0	20
B	26	20
C	26	65

表-5 圧縮強度試験結果および強度増進効果

Cement Content	W/C	Compressive Strength (kg f / cm ²)			Strength development		
		Silica-Fume Content			Ratio		
		0 %	26 %		σ_B/σ_A	σ_C/σ_B	σ_C/σ_A
		Curing Temp. 20°C		65°C			
(kg / m ³)	(%)	σ_A	σ_B	σ_C			
700	24.0	866	962	1367	1.11	1.42	1.58
600	26.1	765	870	1295	1.14	1.49	1.69
400	36.0	440	561	1037	1.28	1.85	2.36
200	72.0	97	157	525	1.62	3.34	5.41

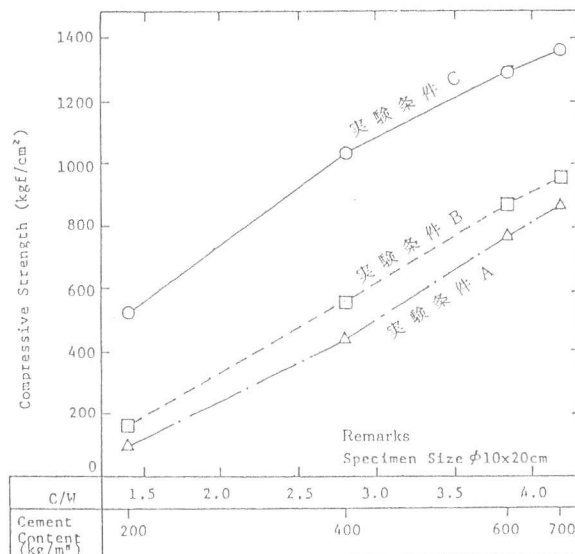


図-1 圧縮強度とC/Wとの関係
(材令7日)

フライアッシュの場合も、これと同様な現象と結果が報告されている。

表-6 に圧縮強度試験結果および強度増加率を示す。表-6 によると、温水養生の場合、材令7日以降の強度増加は、比較的小さかったのに対し、水中養生の場合は、温水養生に比べ材令による強度増加は大きくなっており、このことより、Silica-Fume は、水中においても、長期間の間に反応が進むものと思われる。

図-3 は、応力-ひずみ曲線の実測結果の一例である。(配合A-S, 養生温度 65℃)

高強度コンクリートの場合、弾性的性状は大きく、最大応力に達するまで著しく直線的であり、最大応力に達すると急激に破壊する挙動を示した。

表-7 に圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を示す。ここで、弾性係数は1/3割線係数である。表-7 によると、圧縮強度が大きくなるにしたがって、弾性係数は大きくなる傾向が認められたが、一般に高強度コンクリートの弾性係数は、圧縮強度800~1000 kgf/cm²の場合、約 4.0×10^5 kgf/cm²前後であると言われており、本研究の範囲内では、それより低い値を示した。これは、コンクリート1 m³中に含まれるセメントペーストの量が多量であるために、弾性係数は小さくなったものと推察される。⁸⁾

最後に、非常に良質の骨材を使用することにより本研究の範囲内での最高圧縮強度は、単位セメント量=700 kg/m³, W/C=24%, Silica-Fume 混入率=26%, スランブ=18cm, 養生温度65℃にすることにより、材令7日で1497 kgf/cm², 材令28日で1502 kgf/cm²と非常に高い値を得た。

また、本研究では割裂試験についても一部実施したが、詳細は省略し、養生温度65℃の場合、配合B-Sで61.9 kgf/cm², D-Sで42.5 kgf/cm², 養生温度20℃の場合、配合B-Sで49.2 kgf/cm², D-Sで21.0 kgf/cm²であったことを付記しておく。

5. まとめ

産業副産物 Silica-Fume のコンクリートへの有効利用について検討を行った結果を要約すると、本研究の範囲内では、次のことが言える。

- (1) Silica-Fume は、コンクリートの水セメント

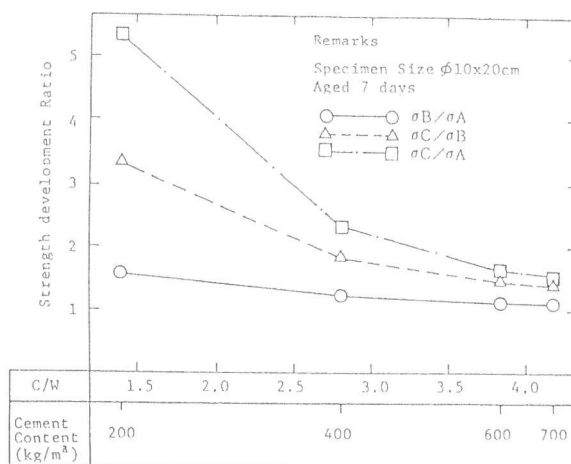


図-2 強度増進効果とC/Wとの関係

表-6 圧縮強度試験結果および強度増加率

Mix No.	Curing Temp. (°C)	Compressive Strength		Strength Ratio σ_{28} / σ_7
		Aged 7 days σ_7 (kgf/cm ²)	Aged 28 days σ_{28} (kgf/cm ²)	
A-S	20	962	1047	1.09
	65	1367	1370	1.00
B-S	20	870	1012	1.16
	65	1295	1310	1.01
C-S	20	561	883	1.57
	65	1037	1136	1.10
D-S	20	157	326	2.08
	65	525	590	1.12

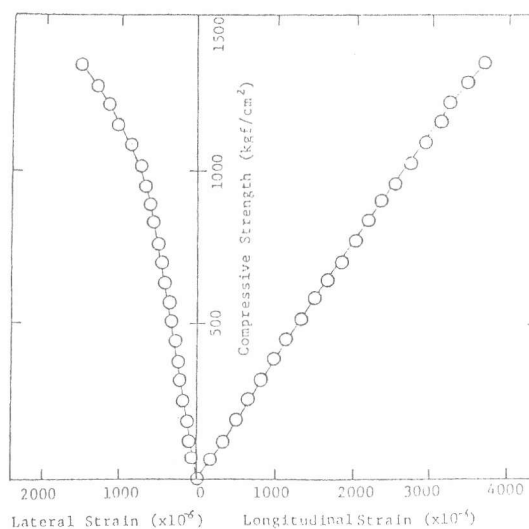


図-3 応力-ひずみ曲線

(配合A-S, 養生温度65℃, 材令7日)

比が大きくなるにしたがって、強度の増加に有効に作用するものと思われる。

(2) 初期材令において、十分に高い圧縮強度が要求される場合、温水養生することが望ましいと思われる。

(3) 従来、初期材令において、 1000 kg f/cm^2 程度の圧縮強度を得るためには、オートクレーブ養生が通例であったが、Silica-Fume を混入し、温

水養生を行うことにより、材令 7 日において圧縮強度 1000 kg f/cm^2 程度を持つコンクリートの製造が可能である。

(4) Silica-Fume 混入による強度増進効果は、水中養生の場合、初期材令においてあまり効果はみられないが材令とともに効果があらわれ、たとえば、貧配合コンクリート（単位セメント量 $= 200 \text{ kg/m}^3$ ）の場合、材令 9 1 日において、約 600 kg f/cm^2 程度の圧縮強度をもつコンクリートが得られるものと思われる。

(5) Silica Fume 混入コンクリートは、プレストレスト コンクリート構造物の定着部、コンクリートパイルの頭部および先端部、コンクリートセグメントの接合部等に使用することにより、大きな効果が期待できる。

表-7 圧縮強度、弾性係数、ポアソン比（材令 7 日）

mix No.	A-S	B-S	C-S	D-S
Compressive Strength (kg f/cm^2)	1 3 6 7	1 2 9 5	1 0 3 7	5 2 5
Modulus of Elasticity $E_{1/3}$ (kg f/cm^2)	3.88×10^5	3.64×10^5	3.53×10^5	3.23×10^5
Poisson's Ratio	0.23	0.22	0.22	0.21

6. 謝 辞

本研究は日本大学理工学部交通土木工学科卒研生、浅地 渉、奥野 徹、古坊善浩、新村剛生君、ならびに、(財)電力中央研究所土木研究所材料構造研究室、青柳征夫、河角 誠、笠原 清、栗山武雄の諸氏の協力を得て行ったものであり、心から感謝致します。また、良質の骨材をいただいた東北ボール株式会社に心から感謝致します。

参考文献

- 1) V. M. Malhotra and G. G. Carcette : Silica Fume Concrete-Properties Applications, and Limitations, CONCRETE INTERNATIONAL, pp. 40~46, MAY 1983.
- 2) Theodor A. Bürge : 14,000 psi in 24 hours, CONCRETE INTERNATIONAL, pp. 36~41, SEPTEMBER 1983.
- 3) 長滝重義, 米倉重州夫, 横田 弘 : 高温養生したコンクリートの力学的性状に及ぼす活性シリカの効果, セメント・コンクリート, №387, pp. 8~15, 1979. 3.
- 4) 高木宣章, 明石外世樹, 角田 忍 : 超微分末ボラン材料（シリカヒューム）を混入したモルタルの基礎的特性について, 第 37 回セメント技術大会, pp. 118~119, 1983. 5.
- 5) 永井彰一郎 : セメント概論, pp. 161~163
- 6) SHINGO SEKI, KIYOSHI KASAHARA, TAKEO KURIYAMA, and MAKOTO KAWASUMI : Relation Between Compressive Strength of Concrete and the Effective Cement-Water Ratio Calculated from the Hydration Rate of Cement, ACI JOURNAL, MARCH 1969.
- 7) 関 慎吾, 河角 誠, 笠原 清, 栗山武雄 : マスコンクリートのクリープセメントの水和, 電力土木, №185, pp. 87~97, 1983. 7.
- 8) A. M. Neville : Creep of Concrete as a Function of its Cement Paste Content, Magazine of Concrete Research, MARCH, 1964.