

[31] シリカフュームを用いた高強度人工軽量骨材コンクリートの基本特性

正会員 田沢 雄二郎 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 ○信田 佳延 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 石井 明俊 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

シリカフュームは、フェロシリコン、シリコンメタルの製造時に副産物として製造される超微粒活性シリカ質粉末(平均粒径約 $0.1\mu m$ 程度, SiO_2 を主成分とする)であり、北欧・北米を中心にコンクリート材料としての特性について、研究が進められている。これらの研究結果⁽¹⁾⁽²⁾によると、シリカフュームはポゾラン反応によって硬化するとともに、シリカ質粉末がコンクリート中の微細な空隙を埋めることにより、コンクリートの強度増加・耐久性向上・鉄筋に対する防食性向上、等に効果があるとされている。

我が国においては、シリカフュームをコンクリート混和材として使用した実績は少なく、シリカフュームがコンクリートの物性に及ぼす影響について基礎研究が始まった段階であると考えられる。

本報文は、シリカフュームの有する強度増加・耐久性向上効果に着目し、海洋コンクリート構造物への利用を目標として、シリカフュームを用いた高強度人工軽量骨材コンクリート(設計基準強度 $400\sim 500kgf/cm^2$ を対象とする)の基本物性を把握するために行った室内実験結果について述べるものである。

2. 実験方法

(1) 実験因子と水準

シリカフュームがコンクリートの物性に及ぼす影響は、シリカフュームの添加率によって異なる他、シリカフュームの粒径分布・組成、等が製造条件・方法によって異なることから、製造メーカーの相異によってコンクリートの物性が変化する可能性があると考えられる。また、海洋コンクリート構造物では耐久性の観点から単位セメント量、水セメント比、空気量等、配合上の規定値が設けられている。

これらの条件を考慮し、今回の実験では実験要因として下記の6因子をとりあげ、直交配列表L₂₇(3¹³)を用いて実験を行った。

- ・シリカフュームの種類(メーカーの相違)
- ・シリカフュームの添加率(SF/C+SF, C: 単位セメント量 SF; 単位シリカフューム量)
- ・水結合材比(W/C+SF, W; 単位水量)
- ・単位結合材量(C+SF)
- ・細骨材率(S/a)
- ・AE助剤添加率

各実験因子の水準及び直交表への割付けは、それぞれ表-1及び表-2に示すとおりである。

(2) 使用材料

実験に使用した材料は表-3に示すとおりである。ここで、人工軽量骨材には、含水率21.4%の市販造粒型人工軽量骨材を用いた。

また、シリカフュームは、国内産(2社)及び外国産(1社)の3種類である。シリカフュームの代表的特性を表-4に示す。なお、シリカフュームは粉体のまま使用した。

(3) 練混ぜ方法

表-1に示す配合条件によると、単位水量は $120 kg/m^3$ (C+SF=400 kg/m^3 , W/c+SF=30%)から、

表-1 実験因子と水準

要 因	水 準		
	1	2	3
A: シリカフュームの種類 (メーカー)	A ₁ : W	A ₂ : X	A ₃ : Y
B: シリカフューム添加率 (%) SF/C+SF	B ₁ : 0	B ₂ : 5	B ₃ : 10
C: 水結合材比 (%) W/C+SF	C ₁ : 30	C ₂ : 36	C ₃ : 42
D: 単位結合材量 (kg/m ³) C+SF	D ₁ : 400	D ₂ : 450	D ₃ : 500
E: 細骨材率 (%) S/a	E ₁ : 39	E ₂ : 42	E ₃ : 45
F: AE助剤添加率 (%) x(C+SF)	F ₁ : 0	F ₂ : 0.006	F ₃ : 0.012

表-2 直交表への割付け

列 番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
主効果 及び 交互作用	B	A	AxB	AxB	F	BxF	BxF	C	D	E	e	e	e
	シリカフューム添加率	シリカフュームの種類	交互作用	交互作用	AE助剤添加率	交互作用	交互作用	水結合材比	単位結合材量	細骨材率		誤差	

210kg/m³ (C+SF=500 kg/m³, W/c+SF=42%)まで変化する。そこで、目標スランブを20±2.5cm(一定)とし、これを満足できない配合については、高性能減水剤及び流動化剤を使用した。スランブの目標値は、実構造物における施工性を考慮して定めた。

練混ぜは、空練り(60秒、セメント+骨材+シリカフューム)→加水(水+A E減水剤+A E助剤+高性能減水剤)→練混ぜ(90秒)の順とし、流動化剤を使用する場合にはさらに60秒の練混ぜを行った。使用したミキサーは、強制攪拌型(容量100ℓ)である。

(4) 試験項目

試験項目を以下に示す。

- ・圧縮強度(φ10×h20 cm, 材令3日, 7日, 28日, 91日)
- ・引張強度(割裂強度, φ10×h20 cm, 材令28日)
- ・曲げ強度(3等分点載荷, 10×10×40cm, 材令28日)
- ・弾性係数(割線弾性係数, コンプレッソメータ法, φ10×h20 cm, 材令28日)
- ・耐凍結融解性(ASTM C 666, 水中急速凍結融解)

3. 実験結果

(1) 圧縮強度に対する要因効果

図-1は圧縮強度に対する各実験因子(6因子)の要因効果を示したものであり、結果をとりまとめると以下のとおりである。

(a) 水結合材比

一般のコンクリートと同様、圧縮強度に及ぼす水結合材比の影響は大きく、材令にかかわらず、有意水準1%で有意となっている。

(b) シリカフュームの添加率

各材令ともに、シリカフュームの添加率が増すにつれて、圧縮強度が増加する結果を示した。シリカフュームの添加率の相違による圧縮強度の差は、材令7日以降では、有意水準1%で有意であった。また、同一材令における圧縮強度の比率は、シリカフュームを用いない時を1とすると添加率5%の場合に1.06~1.09, 添加率10%の場合1.16~1.20であった。

なお、図-2に示すとおり、シリカフュームの添加率が10%になると連行空気量が小さくなる傾向にあることから、上記の結果は、

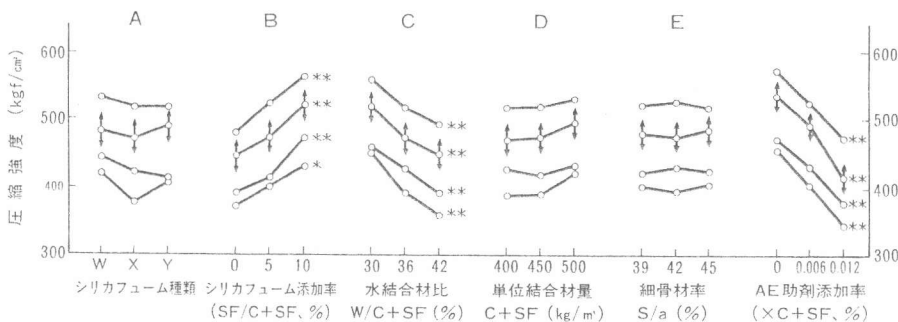


図-1 圧縮強度に対する要因効果

表-3 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント, 比重=3.14
細骨材	富士川産, 比重=2.62, FM=2.80
粗骨材	人工軽量骨材(造粒型), 含水率=21.4%, 総乾比重=1.28, FM=6.58
シリカフューム	外国メーカー産を含む3社の製品, 比重=2.2~2.3
A E減水剤	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。
A E助剤	変性ロジン酸塩を主成分とする。
高性能減水剤	高縮合芳香族スルホン酸塩を主成分とする。
流動化剤	メラミンスルホン酸塩系複合物を主成分とする。

表-4 シリカフュームの代表的特性

項目	外国産	国内産
CaO (%)	0.06-0.53	1.5-2.5
SiO ₂ (%)	93.3-97.6	74-84
Al ₂ O ₃ (%)	0.09-0.32	0.9-1.7
MgO (%)	0.11-0.46	2.8-3.8
Fe ₂ O ₃ (%)	0.02-0.41	1.6-5.0
K ₂ O (%)	0.23-0.81	1.5-3.0
Na ₂ O (%)	0.08-0.25	1.3-2.2
Total C (%)	0.88-3.08	1.2-3.5
Loss on Ignition (%)	1.15-3.44	0.9-3.8
比表面積 (N ₂) (m ² /g)	21.0-27.9	-----
平均粒径 (μm)	0.15	-----

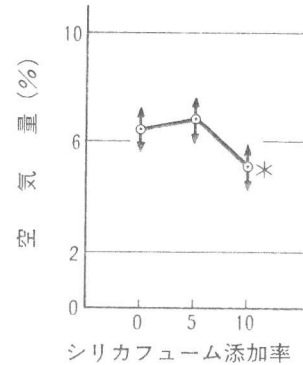


図-2 (X+C+SF, %) 空気量に対するシリカフューム添加率の要因効果

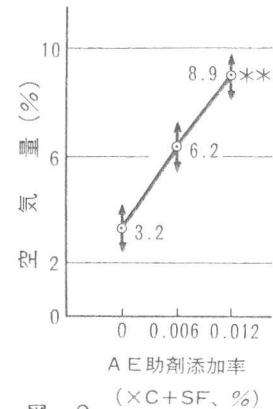


図-3 空気量に対するA E助剤添加率の要因効果

シリカフェーム自体の効果に加え、空気量が少ないことの影響を含んだ値であると考えられる。

(c) A E 助剤添加率

A E 助剤の添加率は、直接、空気量に反映し、図-3に示すとおり、今回の実験では、空気量はA E 助剤添加率0%の時に 3.2%, 添加率 0.006及び 0.012%の時にそれぞれ 6.2%, 8.9%であった。このように空気量のある程度、変動させたことによりA E 助剤添加率の要因効果は、材令にかかわらず有意水準1%で有意となった。空気量1%の変化に対する圧縮強度の減少率は約 3~5%であり、これは普通コンクリートにおいて一般的に言われている値と同程度であった。

(d) シリカフェームの種類(メーカーの相違)

シリカフェームの種類が圧縮強度に及ぼす影響については、図-1に示すとおり、強度発現に異なった傾向が認められるが、有意な差とはならなかった。

(e) 単位結合材量

単位結合材量が増加するに伴って圧縮強度は増加する傾向にあったが、有意な差は認められなかった。

(2) 圧縮強度推定のための重回帰式

圧縮強度に及ぼす要因効果として有意となった水結合材比、シリカフェームの添加率及びA E 助剤添加率(空気量)の3因子を用い、圧縮強度(材令28日)との関係を重回帰分析により回帰式を求めると以下のとおりである。

$$\sigma_{28} = 386 + 64.4 \times (C+SF/W) + 1.10 \times (SF) - 18.6 \times (AIR)$$

ここで、 σ_{28} : 材令28日圧縮強度(kgf/cm²)

C+SF/W: 水結合材比の逆数

SF: シリカフェーム添加量(kg/m³)

AIR: 空気量(%)

寄与率 $R^2 = 0.83$

重相関係数 $R = 0.91$

残差の標準偏差 33.0 kgf/cm²

上式による圧縮強度の算定値と実験値との比較を示すと図-4のとおりである。ある程度の誤差(標準偏差33.0 kgf/cm²)は含むものの、強度予測式として適用できる寄与率を有しており配合設計の際に有用と考えられる。

(3) 引張強度

図-5は圧縮強度と引張強度の関係を示したものである。圧縮強度が 400~600 kgf/cm²における圧縮強度と引張強度の比は12~16程度であった。図-5中には、参考のため、普通コンクリートの場合の関係式を示したが、今回の実験結果では、普通コンクリートと大きな相違は認められなかった。

(4) 引張強度と曲げ強度の関係

図-6に引張強度と曲げ強度の関係を示す。引張強度に対する曲げ強度の比率は、約 1.4~ 1.6程度であり、普通コンクリートの場合と同程度の値となっている。ばらつきはあるが、図中に示す既往の関係式によっても今回の実験結果を表現できるように思われる。

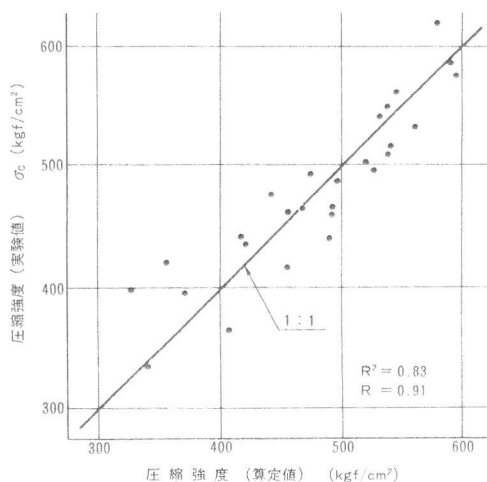


図-4 重回帰式による圧縮強度の算定値と実験値の比較

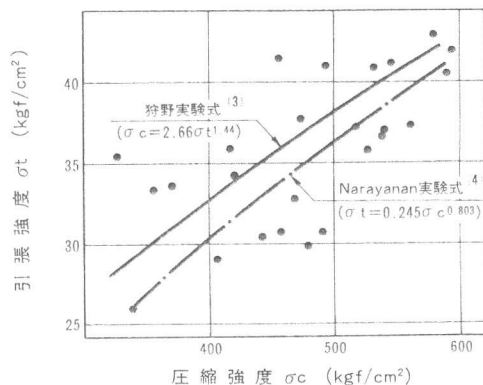


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

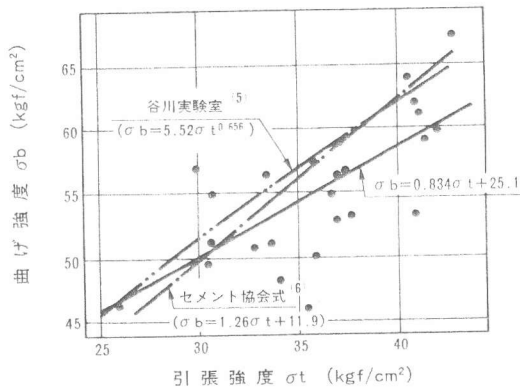


図-6 引張強度と曲げ強度の関係

(5) 弾性係数

図-7は弾性係数と圧縮強度及び単位容積重量との関係を示したものである。同図に示すとおり、実験データの分布はほぼACI Building Codeによる算定式で近似できるものと考えられる。

コンクリートの弾性係数は、一般に普通コンクリートより小となる。今回の結果は圧縮強度が400~600kgf/cm²の普通コンクリートと比較すると、約70%程度の値と考えられる。

(6) 耐凍結融解性

人工軽量骨材コンクリートの耐凍結融解性は、強度・空気量に加え、骨材自身の吸水量によって左右される。図-8は今回の実験のうち、代表的な例として、W/C+SF=36%、C+SF=450kg/m³、シリカフュームの添加率10%、空気量4.9%の場合の実験結果を示したもので、100サイクル以下で相対弾性係数が60%以下に低下している。シリカフュームの種類、添加率、強度、空気量など他の条件が異なった場合もほぼこの結果と同様のものではなかった。これらの結果から、今回の実験に用いた人工軽量粗骨材の吸水率の範囲(吸水率が20%以上)では、シリカフュームの添加による耐凍結融解性の向上は認められなかった。

4. まとめ

海洋コンクリート構造物への利用を目標として、シリカフュームを用いた高強度人工軽量骨材コンクリートの基本特性を把握するため、実験計画法によるコンクリート室内実験を行った。結果の概要をとりまとめると以下のとおりである。

- (1) シリカフュームの種類(メーカーの相違)によって、各材令の強度発現は異なった傾向を示すが、その差による影響は有意とは判定されなかった。
- (2) シリカフュームの添加率(SF/C+SF)が10%までは、添加率が増すと圧縮強度も増加し(有意水準1%で有意)、シリカフュームを用いない場合に比較すると、シリカフューム5%添加で約6~9%、10%添加で約16~20%程度の強度増加を示した。
- (3) 水結合材比、シリカフューム添加率及び空気量の3因子を用いた圧縮強度(材令28日)の推定式($R^2 = 0.83$)を示した。
- (4) 圧縮強度が400~600kgf/cm²における圧縮強度(σ_c)引張強度(σ_t)及び曲げ強度(σ_b)の3者の関係は $\sigma_c / \sigma_t = 12 \sim 16$, $\sigma_b / \sigma_t = 1.4 \sim 1.8$ であった。
- (5) 弾性係数(E_c)と圧縮強度(σ_c)単位容積重量(γ_c)の関係はACIの関係式 $E_c = 4310 \times \gamma_c^{1.5} \sqrt{\sigma_c}$ と比較的良く一致した。
- (6) 市販の人工軽量骨材(含水率20%以上)を用いた場合の耐凍結融解性は非常に劣り、シリカフューム添加による耐凍結融解性は向上は認められなかった。

<参考文献>

- (1) ACI; Proceedings of the CANMET/ACI 1ST International Conference on the Use of Fly ash ..., SP-79, 1983
- (2) L.Hjorth; Microsilica in Concrete, Nordic Concrete Research Pub.No.1, 1982
- (3) 狩野; コンクリートの引張りに関する研究, 日本建築学会論文集
- (4) R.Narayanan; The Tensile Strength of Concrete by the Split Test, Indian Concrete Journal
- (5) 谷川ほか; 構造材料実験法, 森北出版, 1980
- (6) セメント協会; 舗装用コンクリートの曲げ強度及び引張強度, セメントコンクリート, 1971, 4
- (7) ACI; Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318-83, 1983, 11.

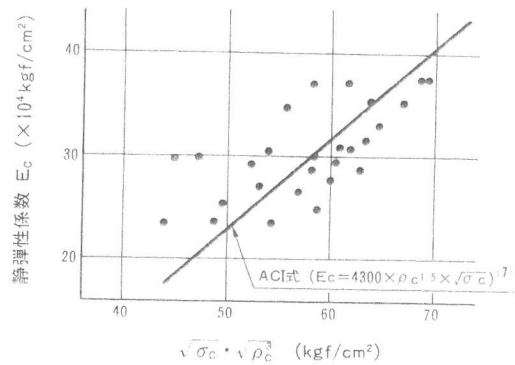


図-7 弾性係数と圧縮強度・単位容積重量との関係

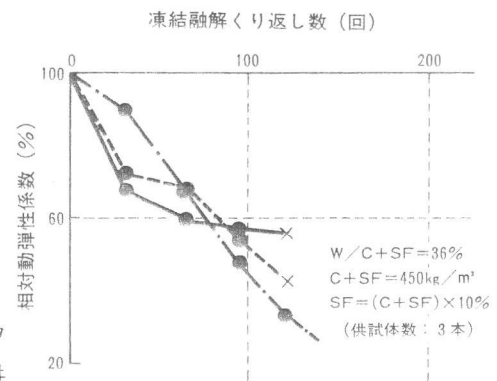


図-8 凍結融解試験結果の1例