

[75] 低品質シリカフュームを用いた製品用コンクリートに対する蒸気養生の影響

正会員 ○ 堀井克章 (阿南工業高等専門学校)

正会員 河野清 (徳島大学工学部)

正会員 天羽和夫 (阿南工業高等専門学校)

1. まえがき

シリカフュームは、フェロシリコンやシリコンメタルの製造時に排出される活性シリカ質の超微粒子で、コンクリートの材料分離抵抗性、強度、水密性、耐久性などの諸性状改善に効果のある優れたポゾラン質混和材料として注目されている産業副産物である。しかしシリカフュームには、価格がセメントに比べて高いこと、運搬や練りませ方法などが確立されていないこと、品質のばらつきが大きいことなどの問題点がある。シリカフュームに関する既往の研究では、比表面積 20万cm²/g程度で SiO₂含有率80%以上のシリカフュームを取り上げて、これをコンクリート製品を対象とした高強度コンクリート用の混和材として利用することを目的とした研究が多い^{1)、2)、3)}。シリカフュームの有効性は、その特性である高い粉末度や SiO₂含有率によるところが大きく、現実にはこれらの値が上記した値に比べてかなり小さいものも副産されており、このような低品質シリカフュームを有効利用することは経済性からも有意義であると思われる。

本研究では、低品質シリカフュームを取り上げ、これを一般的なコンクリート製品及びガラス纖維補強コンクリート（以下 G F R C と略す）製品を利用する際の基礎的資料を得ることを目的として、シリカフュームを混和材としてセメントの一部に代替使用した場合のフレッシュコンクリートの諸性状及び蒸気養生を中心として各種の方法で養生した場合の硬化コンクリートの諸性状について実験により検討を行った。

2. 実験概要

本実験で取り上げた一般製品用の硬練りコンクリート及び特殊製品用の G F R C に用いた材料を表-1に、また配合を表-2に示す。使用したシリカフュームは、四国産で、通常のものに比べて比表面積と SiO₂含有率の小さい低品質のものである。なおシリカフュームの結合材中に占める割合（代替率）は、重量で、0.10及び20%とし、また結合材の比重を考慮して、単位結合材ベースト容積及び単位骨材容積を一定量として配合設計を行った。

コンクリートの練りませは、強制練りミキサを用いて図-1に示す方法で行った。

フレッシュコンクリートの試験は、練り上がり直後のコンクリートで行った。

採用した試験は、スランプ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)、VB試験(BS 1881)、締固め係数試験(BS 1881)及びブリージング試験(JIS A 1123)である。

硬化コンクリートの試験は、所要の型枠にコンクリートを詰めて振動台で締固め、表面仕上げを行って作製し、図-2に示す各種の方法で所定期間まで養生した供試体を行った。採用した試験は、硬練りコンクリートの圧縮強度試験(JIS A 1108、Φ10×20cm 円柱供試体)、長さ変化試験(JIS A 1129、□10×10×40cm はり供試体)及び透水試験(外圧式、Φ15×30cm 円柱供試体)と、G F R C のはり折片圧縮強度試験(JIS A 1114)、はり折片2面せん断強度試験(JCI-SF 6)、曲げタフネス試験(JCI-SF 4)及び長さ変化試験(JIS A 1129)で、G F R C ではいずれも □10×10×40cm はり供試体を使用した。なお供試体数は、各条件で各3個とした。

表-1 使用材料

分類	材 料	主 要 な 性 質									
		比重	アーレー比表面積3200cm ² /g	比重	アーレー比表面積22700cm ² /g, SiO ₂ 含有率76%	比重	吸水率1.38%	粗粒率2.90	比重	吸水率2.06%	粗粒率6.58, 最大寸法20mm
結合材	普通セメント 四国産シリカーム	3.15, 2.27	アーレー比表面積3200cm ² /g, SiO ₂ 含有率76%	2.64, 2.69	吸水率1.38%, 粗粒率2.90	2.58, 2.69	吸水率2.06%, 粗粒率6.58, 最大寸法20mm	2.58, 2.69	吸水率1.43%, 粗粒率6.26, 最大寸法15mm	2.70, 2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm
細骨材	吉野川産川砂	2.64	吸水率1.38%	2.64	粗粒率2.90	2.64	吸水率2.06%	2.64	粗粒率6.58, 最大寸法20mm	2.64	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm
粗骨材	徳島県産砕石	2.58	吸水率2.06%	2.58	粗粒率6.58, 最大寸法20mm	2.58	吸水率1.43%, 粗粒率6.26, 最大寸法15mm	2.58	吸水率1.43%, 粗粒率6.26, 最大寸法15mm	2.58	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm
繊維材料	日本産ガラス繊維	2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm	2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm	2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm	2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm	2.70	繊維長25mm, 吸水率1.33, 粗粒率4.5, 最大寸法15mm
混和剤	製品用高性能減水剤 AE剤	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系	比重1.13, 液体, 高縮合ワジン系

表-2 コンクリートの配合

配 合	粗骨材 最大寸法 Ms (mm)	細骨材 目標 粒径 SI (cm)	目標 空気量 Air (%)	水結合 材 W/C (%)	細骨材 比 率 s/a (%)	織 繩 混入率 Vf (%)	水 W	単 位 重 (kg/m ³)			混和剤 Ad (ml/m ³)
								結合材 セメント シリカ ム Sf	細 骨 材 骨 材 G	粗 骨 材 骨 材 Gf	
硬 SF0% 練 SF10% り SF20%	20	5	5	50	47	0	150 148 145	300 265 233	0 30 58	875 964	0 0
GF SF0% RC SF10% SF20%	15	7	5	55	68	1.0	265 261 258	482 428 375	0 48 94	937 449	27 27 7140

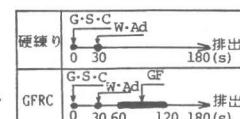


図-1 練りませ方法

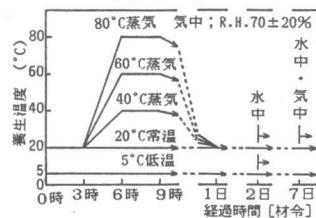


図-2 養生方法

3. 実験結果と考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの各試験結果を表-3に示す。超微粒子のシリカフュームを用いることにより、コンクリートは粘性が高くなり、コンシスティンシーが低下することが考えられるが、表-3及び配合を示した表-2からわかるように、シリカフューム代替率の増加に伴い、多量添加可能な高性能減水剤の添加量を増すことで、所要のスランプ値と同程度のVB値を得ることができ、シリカフュームを用いるコンクリートのコンシスティンシー改善に高性能減水剤の利用が有効であると思われる。

コンクリートのブリージング率の経時変化を図-3に示す。この図からわかるように、シリカフューム代替率の増加に伴い、2種のコンクリートはいずれもブリージング率が激減する傾向があり、代替率20%でブリージングはほとんど生じなくなる。またシリカフュームのブリージング抑制効果は、単位水量が多くブリージング水が多量に生じやすいG F R Cの方が普通硬練りコンクリートに比べて大きくなる傾向がある。使用した低品質シリカフュームがコンクリートのブリージングの抑制に効果があるのは、その粉末度が通常のものに比べて低いといふもの、セメントなどと比べればはるかに高く、保水性が良く水などの移動が困難になることなどによるものと思われる。またこのことから、コンクリートの材料分離抵抗性の改善にシリカフュームの使用が有効であると考えられ、高性能減水剤を多量使用する場合や単位水量を多くしたり水セメント比を大きくする場合のブリージングを含めた材料分離の抑制に、粉末度の比較的小さい低品質シリカフュームでもきわめて効果があるものと思われる。なおシリカフュームを用いると、コンクリートのブリージング終了時間は、これを用いないものに比べて若干長くなる傾向がある。

(2) 硬化コンクリートの性状

1) 強度

各種養生を行った硬練りコンクリートのシリカフューム代替率と圧縮強度との関係を図-4に示す。この図からわかるように、コンクリートの圧縮強度は、全般的に、シリカフュームを用いたものの方がこれを用いないものに比べて高くなる傾向がある。これは、用いたシリカフュームが低品質ではあるものの、セメントやフライアッシュなどの他の結合材と比べると粉末度や SiO_2 含有率の高い優れた活性シリカ質超微粒子の結合材であり、ブリージングを含めた材料分離が抑制されること、コンクリート中の微細な空隙が充填されること、ポゾラン反応が早期材令から進行することなどによるものと思われる。

シリカフュームを用いることによる強度改善の効果は、図-4からわかるように、材令1日では養生温度が高いほど大きく、また材令1年では逆に養生温度が低いほど大きくなる傾向がある。シリカフューム代替率20%のコンクリートの圧縮強度は、最高温度80°Cの蒸気養生を行った材令1日で384kgf/cm²となり、これは同じ養生条件でシリカフュームを用いないものの約1.5倍の値であり、また5°C低温養生を続けた材令1年で765kgf/cm²となり、これは同じ養生条件でシリカフュームを用いないものの約1.3倍の値である。これらのことからシリカフュームは、蒸気養生を行う場合の初期強度発現及び低温または常温で養生する場合の長期強度増進に非常に効果があるものと思われる。なお材令7日以降空気中乾燥状態に移したコンクリートの圧縮強度は、湿潤養生を続けたものの値と比べて、材令28日では5~20%程度大きくなるものの、それ以降の伸びが小さく、材令1年では逆に2~15%程度小さくなる傾向がある。

各種養生を行ったG F R Cのシリカフューム代替率と圧縮強度及びせん断強度との関係をそれぞれ図-5

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	コンクリート温度 (°C)	25℃ [○] 値 (cm)	空気量 (%)	VB値 (s)	締固め係数 [CF値]
硬 SF0%	14.0~17.7	4.1~6.2	4.4~5.8	14~16	0.86~0.87
練り SF10%	14.0~17.7	4.6~5.5	4.2~5.2	13~15	0.87~0.91
り SF20%	14.0~17.6	4.6~6.2	4.2~5.4	11~16	0.89~0.91
GF SF0%	14.6~18.7	5.9~7.9	4.5~5.8	24~62	0.94~0.95
RC SF10%	15.0~18.4	7.1~8.1	4.6~5.5	25~51	0.94~0.95
SF20%	15.0~18.5	6.7~8.1	4.7~5.8	37~44	0.94~0.95

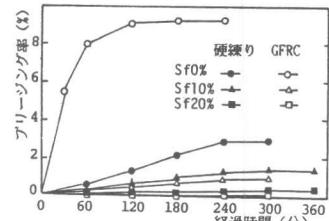


図-3 ブリージング率の経時変化

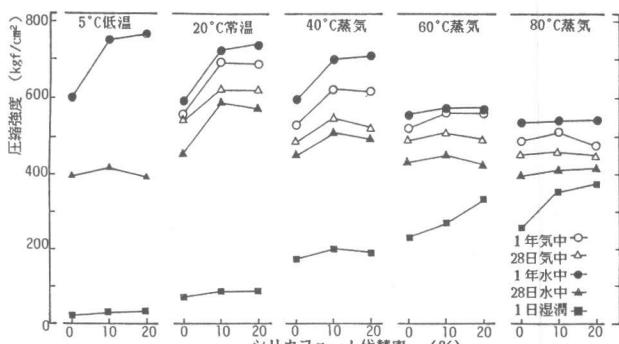


図-4 硬練りコンクリートのシリカフューム代替率と圧縮強度との関係

及び図6に示す。GFR Cに対するシリカフュームの利用目的としては、優れたポゾラン質混和材料としてコンクリートマトリックスの材料分離抵抗性、強度、水密性、耐久性などを改善することに加えて、現在生産されているGFR C用の耐アルカリ性ガラス繊維の耐アルカリ性が完全でなく、繊維がコンクリート中の強アルカリ成分である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などに侵食されるというGFR C特有のガラス繊維のアルカリ劣化を抑制することが考えられる。

図5及び6からわかるように、材令1日では、養生温度が高いほど、またシリカフューム代替率が高いほど、圧縮強度が大きくなる傾向がある。これは、温度上昇によるセメントの水和反応の促進と共に伴うシリカフュームのポゾラン反応の促進、シリカフュームのブリージング抑制効果及び微粉末効果などによるものと思われる。しかしせん断強度では、シリカフュームの強度発現効果は見られるものの、養生温度について見ると、60°C蒸気養生強度に比べて80°C蒸気養生強度の方が小さくなる傾向がある。これは、高温で活性化するセメントの水和反応により生じる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量が一時的に急増すること、熱による膨張収縮量の大きい自由水が多量存在することなどの悪影響によるものと思われる。

図5及び6からわかるように、材令28日及び1年での水中湿潤養生強度は、全般的に、シリカフュームを用いたGFR Cの方がこれを用いないものに比べて大きくなる傾向があり、シリカフュームの使用による強度増進効果が認められる。しかし材令28日から1年にかけて、シリカフューム代替率の大小にかかわらず強度が低下する傾向がある。これは、ガラス繊維のアルカリ劣化などによるものと思われる。従ってシリカフューム代替率20%程度の使用では、ガラス繊維のアルカリ劣化の抑制策として不十分であると思われる。また材令7日以降空気中乾燥状態に移したGFR Cでも強度低下の傾向はあるものの、材令28日及び1年強度は、いずれも同材令の水中湿潤養生強度に比べて高い値を示しており、GFR Cの強度には比較的早期材令で湿潤状態から乾燥状態へ移すことが有効であると思われる。

2) その他の性状

GFR Cのじん性評価のための曲げタフネス試験より得られた換算曲げ強度を図7に示す。この図からわかるように、換算曲げ強度は、シリカフューム代替率が高いほど高い値を示すこと、材令28日から1年にかけて値が低下すること、材令1年では空気中乾燥状態に移した方が水中湿潤状態を続けるよりも高い値を示すことなど前述した強度の場合と同様な傾向があり、シリカフュームを用いることの効果、アルカリ劣化に伴う品質低下、乾燥状態へ移すことの効果などが、GFR Cのじん性に関してもあるものと思われる。なお材令28日換算曲げ強度は、水中湿潤状態に比べて空気中乾燥状態の方が低い値となる傾向があるが、これは乾燥によるコンクリートマトリックスの収縮を繊維が拘束するために生じていると思われる潜在的な引張応力による影響などによるものと思われる。

硬練りコンクリートのシリカフューム代替率と透水試験より得られた透水係数との関係を図8に示す。この図からわかるように、シリカフューム代替率の増加に伴い、透水係数が激減する傾向があり、シリカフュームの使用はコンクリートの水密性改善にきわめて効果があると思われる。これは、シリカフュームのブリージング抑制効果、微粉末効果、強度増進効果などによりコンクリートの内部組織が緻密になるこ

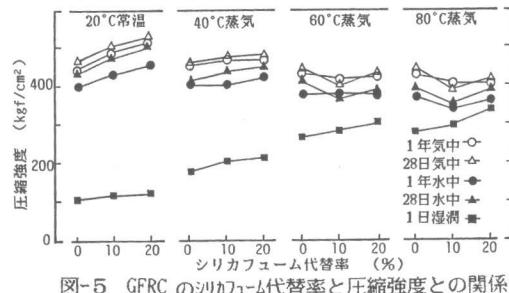


図5 GFR C のシリカフューム代替率と圧縮強度との関係

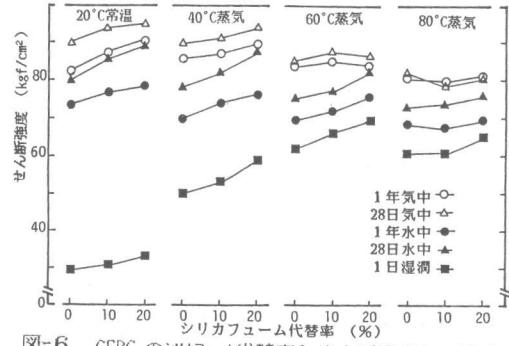


図6 GFR C のシリカフューム代替率とせん断強度との関係

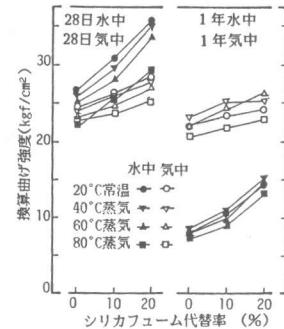


図7 GFR C のシリカフューム代替率と換算曲げ強度との関係

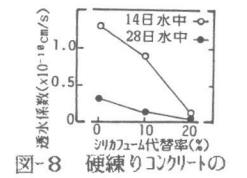


図8 硬練りコンクリートのシリカフューム代替率と透水係数との関係

などによるものと思われる。

それぞれ20°C常温養生及び60°C蒸気養生を行った硬練りコンクリート及びG F R C の長さ変化試験より得られた乾燥収縮率の経時変化をそれぞれ図-9及び10に示す。これらの図からわかるように、常温養生を行ったコンクリートの場合、早期材令では、シリカフューム代替率の増加に伴い乾燥収縮率が大きくなる傾向があるが、材令とともにその傾向は薄れ、特にG F R C では乾燥材令5週以降シリカフュームを用いたものの方がこれを用いないものに比べて小さくなる傾向がある。また蒸気養生を行った場合、各コンクリートの乾燥収縮率は、常温養生したものに比べて小さくなる傾向があり、その傾向はシリカフューム代替率が高いほど強くなっている。シリカフュームを用いるコンクリートの乾燥収縮の抑制に蒸気養生の採用が有効であると思われる。なおこれらの現象については、養生条件によるセメントの水和反応やシリカフュームのポゾラン反応の進行程度、単位水量やブリージング水量に関係するコンクリート中の残留自由水量などが影響するものと思われる。

4. むすび

一般製品用の硬練りコンクリート及び特殊製品用のガラス繊維補強コンクリートに、四国産の比表面積やSiO₂含有率が通常のものに比べて小さい低品質シリカフュームを混和材としてセメントの一部に代替使用した場合のフレッシュコンクリートの諸性状、及び蒸気養生を中心に各種の条件で養生を行った場合のシリカフュームを用いた硬化コンクリートの諸性状について実験により検討を行った本研究より得られた結果を要約すると、本実験の範囲内で以下のようになる。

- 1)シリカフュームの使用は、硬練りコンクリート及びガラス繊維補強コンクリートのコンシステンシーを悪化させる。しかし多量添加可能な高性能減水剤の併用によりこれを改善することができる。
- 2)シリカフュームの使用は、硬練りコンクリート及びガラス繊維補強コンクリートのブリージングの抑制にきわめて効果がある。またその効果は、特に単位水量の多いガラス繊維補強コンクリートで顕著となる。
- 3)シリカフュームの使用は、硬練りコンクリート及びガラス繊維補強コンクリートの圧縮強度の改善に効果がある。またその効果は、初期材令では養生温度が高いほど、長期材令では養生温度が低いほど大きい。
- 4)蒸気養生は、硬練りコンクリート及びガラス繊維補強コンクリートの初期圧縮強度発現に効果があり、その効果は、シリカフューム代替率が高いほど大きい。しかしガラス繊維補強コンクリートでは、80°C蒸気養生の方が60°C蒸気養生に比べてせん断強度が低くなるので、蒸気養生温度を低めにするのが良い。
- 5)ガラス繊維補強コンクリートの圧縮強度、せん断強度及びじん性は、材令28日以降低下し、また材令1年では材令7日以降空気中乾燥状態へ移す方が水中湿潤養生を続けるよりも高い値となるので、ガラス繊維補強コンクリートでは、早期材令で湿潤状態から乾燥状態へ移すのが良い。
- 6)シリカフュームの使用は、硬練りコンクリートの水密性の改善にきわめて効果がある。
- 7)常温養生の場合には、硬練りコンクリートの乾燥収縮は、シリカフュームの使用により若干大きくなり、ガラス繊維補強コンクリートでも材令が短い間は若干大きくなる。しかし蒸気養生を行った場合には、これらのコンクリートの乾燥収縮は、シリカフュームの使用により逆に若干小さくなる。

【参考文献】

- 1) Malhotra et al., Concrete International, Vol.5, No.5, 1983, pp.40-46.
- 2) 長瀧ら, コンクリート工学, Vol.23, No.5, 1985, pp.5-15.
- 3) 田沢, セメント・コンクリート, No.465, 1985, pp.20-26.

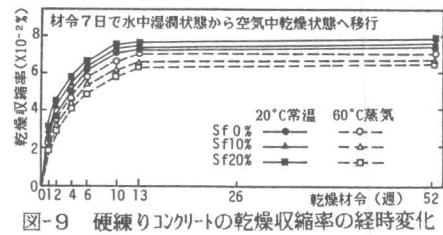


図-9 硬練りコンクリートの乾燥収縮率の経時変化

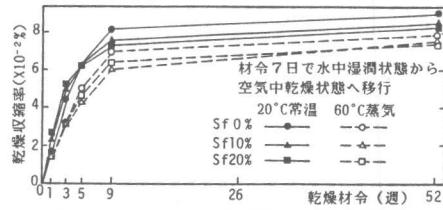


図-10 G F R C の乾燥収縮率の経時変化