

SF セメントペーストの混合割合が圧縮強度および C-S-H に及ぼす影響

日本大学大学院

学生会員

○東條 真士

日本大学理工学部

正会員

梅村 靖弘

日本大学理工学部

正会員

佐藤 正己

1. はじめに

近年、超高強度コンクリート（以降 UHSC）の利用実績が増加傾向にある。UHSC は低水結合材比を実現するためにシリカフューム(以降 SF)が用いられている。SF は、セメントの水和反応により生成される水酸化カルシウム(以降 CH)と反応し緻密化が測られることが知られている。一方、セメント中のシリケート相と SF から生成される水和物は、一般的にケイ酸カルシウム水和物(以降 C-S-H)と呼ばれるが、非晶質であり化学構造が未解明である。既往の研究¹⁾では C-S-H の評価指標として、CaO/SiO₂ モル比、密度、比表面積、吸着試験による細孔構造などが示されている。本研究では UHSC の緻密化メカニズムを C-S-H の密度に着目し、セメント硬化体密度から各材料由来の生成 C-S-H に分類することにより生成割合と圧縮強度の関係について検討した。

2. 研究概要

本試験で使用する材料を表-1、モルタル配合を表-2 に示す。後述のセメントペースト(CP)試料についてはモルタル配合より細骨材を除いた配合とした。水結合材比(W/B)は 15%一定とし、低熱ポルトランドセメント(C)に対して SF の混和率を 0%,10%, 15%, 20% 25%, 30%, 40%の 7 種とした。また、SF のポゾラン反応により生成される C-S-H 密度を知るために SF と CH を 1:1 で混合して SF 混和率 100%の試料を作製した。圧縮強度用モルタル供試体はφ50×100mm 型枠、水和反応解析用 CP 試料は 250ml ポリ瓶に打設した。硬化体の養生は、佐藤らの研究²⁾を参考に打設後 20℃、前置き時間 48 時間、最高温度 90℃、最高温度継続時間 48 時間の熱養生を行った。供試体の圧縮強度は JISA1108 を参考に測定した。水和反応解析は佐藤らの研究²⁾を参考にに行い相組成を作成した。

本研究では水和停止後試料の密度(ρ_i)を乾式密度計により測定した。各 SF 混和率の C-S-H 密度(ρ_{C-S-H})は、田

表 1 使用材料

材料	記号	諸元
セメント	C	低熱ポルトランドセメント (ρ=3.25g/cm ³)
シリカフューム	SF	フェロシリコン系 (ρ=2.20g/cm ³)
練混ぜ水	W	蒸留水
細骨材	S	ISO標準砂 (ρ=2.63g/cm ³)
水酸化カルシウム	CH	試薬：化学用 (ρ=2.21 g/cm ³)
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系超高強度用減水剤
抑泡剤	DEF	ポリエーテル系抑泡材

表-2 配合表

略称	W/B (%)	SF混和率 (%)	単位水量 (kg/m ³)					SP添加量 ×%	B DEF添加量B ×%
			W	B			S		
				C	CH	SF			
SF0	15	0	160	1276	0	0	1066	2.0	0.25
SF10		10	156	1128	0	113	1066		
SF15		15	154	1066	0	160	1066		
SF20		20	152	1011	0	202	1066		
SF25		25	151	961	0	240	1066		
SF30		30	150	916	0	275	1066		
SF40		40	147	837	0	335	1066		
SF100		100	326	0	828	828	0		

中らの研究²⁾を参考に ρ_i および既知の各セメント鉱物および水和物の密度³⁾から算出した。次に(1)式を用い、C 由来の C-S-H(ρ_{C-S-H})の存在割合(α)を求め、各材料由来の C-S-H に区分した。

$$\alpha = \frac{\rho_i - \rho_{SF-C-S-H}}{\rho_{C-S-H} - \rho_{CSH}} \times 100$$

(1)

- ここに α : C 由来の C-S-H の存在割合(%)
- ρ_i : 各 SF 混和率の硬化体密度(g/cm³)
- ρ_{CSH} : 各 SF 混和率の C-S-H 密度(g/cm³)
- ρ_{C-S-H} : C 由来(SF0)の C-S-H の密度(g/cm³)
- ρ_{SF-C-S-H} : SF 由来(SF100)の C-S-H の密度(g/cm³)

3. 試験結果および考察

図-1 に SF 混和率とモルタルの圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、SF 混和率 20%で最大値となった。本試験の範囲では SF 混和率のピークを超えた SF 混和率 25%以上が 20%未満よりも高くなった。

図-2 に SF 混和率と反応率の関係、図-3 に SF 混和率と CH 生成量の関係を示す。SF 反応率は、SF 混和率の増加に伴い低下した。また、SF 混和率に対する SF 反応率の傾きは、混和率 25%を境に大きくなった。一方、

CH量は、SFのポズラン反応により消費されSF混和率10～20%で2～5mass%程度に減少し、25%以上で存在しなかった。このことから、SF混和率25%以上ではCの水和で生成されたCHがすべて消費され、SFが余剰であることが示された。

図-4にSF混和率とC-S-H密度の関係を示す。C由来のC-S-H密度(ρ_{C-S-H})が2.80g/cm³、SF由来のC-S-H密度(ρ_{SF-S-H})が2.20g/cm³となった。本試験で測定したC-S-H密度は須田らの知見¹⁾で示されたエーライトから生成された密度2.10g/cm³と比較して非常に大きくなった。本試験は超高強度コンクリートを模擬しておりW/Bが極めて低く、非常に高温かつ長時間の熱養生を施しているため、既往の研究と異なる結果となったと考えられる。その理由は硬化体中の自己乾燥の影響でC-S-Hの結合水が少なくなったこと、野澤らの研究⁴⁾で80℃以上の熱養生によりAFt相が非晶質化することが述べられており、C-S-H(非晶質)に非晶質化したAFt相が含まれることなどが推察された。各SF混和率のC-S-H密度(ρ_{C-S-H})は、SF混和率の増加に伴い低下した。

図-5にSF混和率と各材料由来のC-S-H生成量の関係を示す。C-S-H生成量は、混和率10～20%が若干低くなったが、SF混和量にかかわらず約60%程度となった。これはSF由来のC-S-Hは、密度が小さいため同じ反応率の場合、生成C-S-Hの占める体積が大きくなるのが原因であると考えられた。各材料由来のC-S-H生成量はSF混和率の増加に伴いSF由来のC-S-Hが増加し、SF混和率25%以上ではSF由来がC由来を上回った。以上の結果から、SF混和率20%未満とSF混和率25%以上を比較するとSF混和率25%以上の圧縮強度が高くなった。これは体積の大きいSF由来のC-S-H(低密度のC-S-H)生成による空隙充填が原因であると推察され、圧縮強度発現に空隙充填効果が大きく寄与していることが分かった。

4. まとめ

本研究よりはC-S-H生成される材料により圧縮強度への影響が異なり、SF由来のC-S-Hは密度が低く、空隙の充填効果に優れ、圧縮強度発現に大きく寄与することが分かった。

参考文献

- 1) 須田 裕哉ほか: 各種セメント硬化体の相組成と圧縮強度に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, pp159-166, 2012

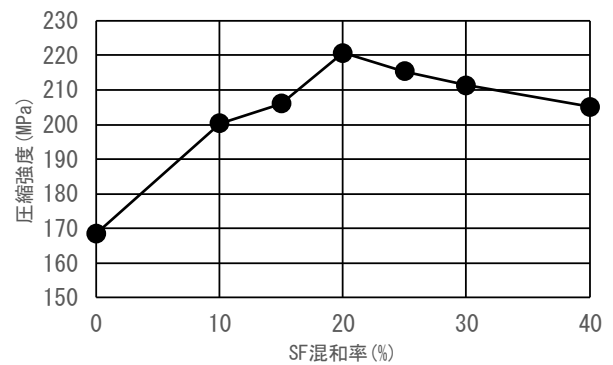


図-1 SF混和率と圧縮強度の関係

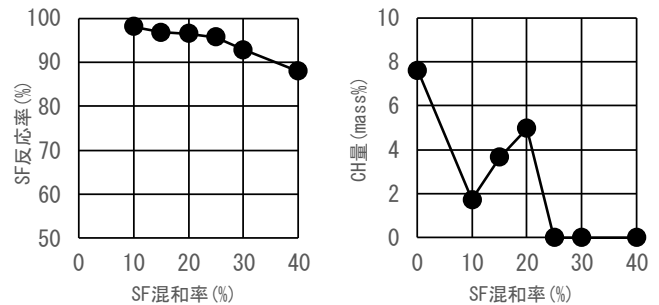


図-2 SFの混和率と反応率の関係

図-3 SF混和率とCH量の関係

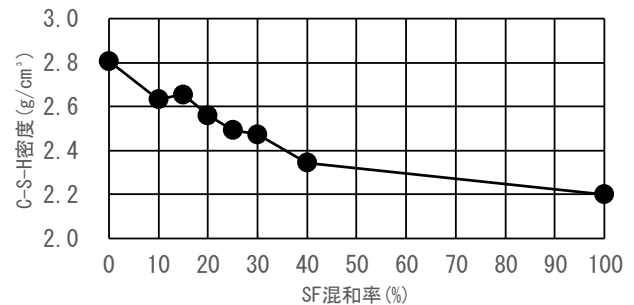


図-4 SF混和率とC-S-H密度の関係

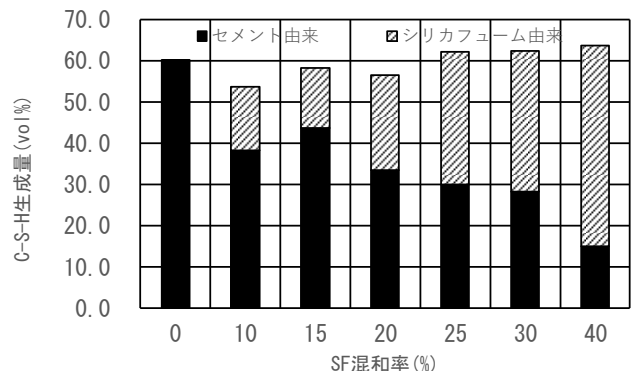


図-5 SF混和率とC-S-H生成量の関係

- 2) 佐藤 正己ほか: 超高強度コンクリートの熱養生サイクルの最適化に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.558-564, 2015.
- 3) 田中 洋介ほか: C-S-Hの密度に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp70-76, 2009.
- 4) 野澤 里渚子ほか: 乾燥条件および温度履歴がエトリンライト結晶中の水分状態に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, No.1, pp2-8, 2016