

ポゾラン反応性微粉末がセメント硬化体の圧縮強度および C-S-H 生成に及ぼす影響

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

近年利用実績が増加傾向にある超高強度コンクリートでは低水結合材比を実現するためにシリカフェューム(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(CH)と反応し水和物を生成することが知られている。しかし SF はコストが高価であるため火山ガラス微粉末(VG)が安価な代替材料として期待され、2020 年に JIS A 6209 が制定された。セメントやポゾラン反応性微粉末(以降 PZ 微粉末)の水和反応から生成される水和物は一般にケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)と呼ばれ硬化体内の空隙を充填し圧縮強度発現に寄与することが知られている。また既往の研究¹⁾では生成された C-S-H は各材料により異なることが示されているが、硬化体内は各材料由来の C-S-H が混在するため区別が困難である。本研究では C-S-H の密度に注目し硬化体の C-S-H をセメントの生成 C-S-H と PZ 微粉末の生成 C-S-H に区別する事で PZ 微粉末の C-S-H の生成割合と圧縮強度に与える影響を検討した。

2. 研究概要

本試験で使用した材料を表-1、モルタル(M)配合を表-2、使用した PZ 微粉末の化学組成を表-3 に示す。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 PZ 微粉末の混和率を 10~50%の各 7 種と未混和の 1 種とした。相組成を求めるためのセメントペースト(CP)試料の配合は、M 配合より細骨材を除いたものとした。圧縮強度用 M 供試体は φ50×100mm 型枠、相組成用 CP 試料は 250ml ポリ瓶に打設した。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。硬化体の圧縮強度は JISA 1108 に準拠して測定した。CP の相組成は佐藤らの研究¹⁾を参考に圧縮強度最大値付近の混和率の各 3 水準と未混和水準について作成した。相組成で生成された非晶質水和物はすべて C-S-H であると仮定した。ここで PZ 微粉末の反応

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)
PZ 微粉末	シリカフェューム	SF	フェロシリコン系(ρ=2.20g/cm ³)
	火山ガラス微粉末	VG	火山ガラス微粉末 I 種 串良産(ρ=2.32g/cm ³)
練り混ぜ水		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=2.21g/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剤

表-2 配合表

略称	W/B	PZ微粉末 混和率 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP混和量 (B×%)	DEF混和率(B ×%)
			W	B			S		
				C	CH	SForVG			
PZ0	15	0	160	1276	0	0	1066	2.0	0.25
SF10		10	154	1128	0	113	1066		
SF15		15	152	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		
SF50		50	145	771	0	386	1066		
VG10		10	137	1157	0	116	1066	4.0	
VG15		15	135	1096	0	164	1066		
VG20		20	225	1745	0	208	1066		
VG25		25	223	1661	0	248	1066		
VG30		30	221	1585	0	284	1066		
VG40		40	131	868	0	347	1066		
VG50		50	129	801	0	400	1066		
SF100		100	326	0	828	828	0		
VG100		100	253	0	845	845	0		

表-3 使用ポゾラン反応性微粉末の化学組成

	化学組成(mass%)						BET比表面積 (m ² /g)
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	その他	
SF	-	97.3	1.3	0.3	0.2	0.9	18.0
VG	10.6	79.1	4.2	2.1	3.0	1.1	13.8

により生成される C-S-H 密度を測定するため、PZ 微粉末と CH を 1:1 で混合して作成した試料を作製した。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。各水準の C-S-H 密度(ρ_{C-S-H})は田中らの研究²⁾を参考に ρ_i および既知の各セメント鉱物及び水和物の密度²⁾から算出した。次に(1)式を用い、セメント(C)由来の C-S-H(ρ_{C-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。

$$\alpha = \frac{\rho_i - \rho_{SForVG-C-S-H}}{\rho_{C-C-S-H} - \rho_{C-S-H}} \times 100 \quad (1)$$

ここに α : C 由来の C-S-H の存在割合(%)

- ρ_i : 各 PZ 微粉末混和率の硬化体密度(g/cm³)
- ρ_{C-S-H} : 各 PZ 微粉末混和率の C-S-H 密度(g/cm³)
- ρ_{C-C-S-H} : C 由来(PZ0)の C-S-H 密度(g/cm³)
- ρ_{SForVG-C-S-H} : PZ 微粉末由来の C-S-H 密度(g/cm³)

キーワード 超高強度コンクリート、シリカフェューム、火山ガラス微粉末、ケイ酸カルシウム水和物、水和物密度

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 03-3259-0687

3. 試験結果および考察

図-1 に PZ 微粉末混和率とモルタルの圧縮強度の関係を示す。圧縮強度の最大値は SF 配合では混和率 20% にて 220.7MPa, VG 配合では混和率 25% にて 219.3MPa となり, SF 配合と VG 配合の最大値は同等となった。

図-2 に PZ 微粉末の混和率と反応率の関係を示す。PZ 微粉末反応率は混和率の増加に伴い低下した。VG 配合の反応率は SF 配合に比べ約 20% 小さくなったが, それは SF と VG の比表面積の差が原因であると考えられる。

図-3 に PZ 微粉末混和率と CH 量の関係を示す。CH 量はどちらの PZ 微粉末でも混和率 25% 以上で 0mass% となった。以上よりセメント硬化体中の CH はボゾラン反応により消費され, 混和率 25% 以上では PZ 微粉末が余剰であると考えられた。

図-4 に PZ 微粉末混和率と C-S-H 密度の関係を示す。各材料から生成された C-S-H の密度(ρ_{CSH})は, C 由来(PZ0)が $\rho_{C-CSH} = 2.77\text{g/cm}^3$, SF 由来(SF100)が $\rho_{SF-CSH} = 2.20\text{g/cm}^3$, VG 由来(VG100)が $\rho_{VG-CSH} = 1.68\text{g/cm}^3$ となった。 ρ_{VG-CSH} は, ρ_{SF-CSH} に比べ小さくなったが, それ VG が SF に含有しない Al_2O_3 を含むため C-S-H に Al が置換された C-A-S-H が生成していることが原因であると考えられた。各 PZ 微粉末混和率の ρ_{CSH} は, PZ 微粉末混和率の増加に伴い低下し, SF 配合で $\rho_{CSH} = 2.54 \sim 2.40\text{g/cm}^3$, VG 配合では $\rho_{CSH} = 2.29 \sim 2.16\text{g/cm}^3$ の範囲となり, VG 配合が SF 配合に比べ 0.25g/cm^3 程度小さくなった。

図-5 に PZ 微粉末混和率と C-S-H 生成量(vol.%)の関係を示す。SF 由来の C-S-H 生成量は, 混和率の増加に伴いが多くなった。一方, VG 由来の C-S-H 生成量は, 混和率 25% がピークを迎えた。これは VG 配合の混和率 30% では VG 量が過剰な事が原因だと考えられた。

以上のことから VG 配合は SF 配合に比べ PZ 微粉末反応率が低い低密度な C-S-H を生成, 空隙を充填し SF 配合と同程度の圧縮強度を発現したと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果から, VG は SF に比べ低密度な C-S-H(C-A-S-H)を作る事で空隙を充填し, SF に比べ反応活性が低い同等の圧縮強度が得られることが分かった。

謝辞

本実験にて使用した火山ガラス微粉末は鹿児島県工業技術センター袖山様よりご提供いただきました。ここに感謝の意を示し, 謝辞といたします。

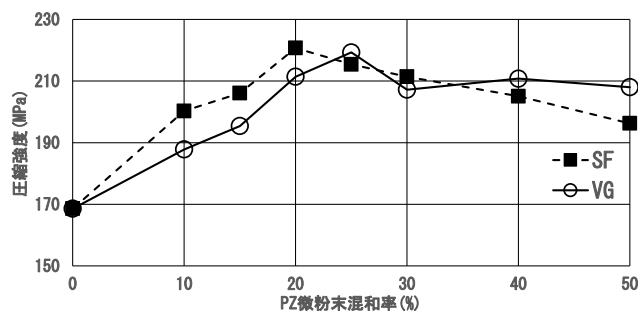


図-1 PZ 微粉末混和率と圧縮強度の関係

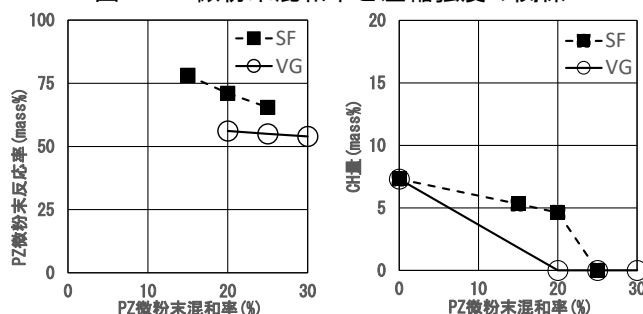


図-2 PZ 微粉末の混和率と反応率の関係

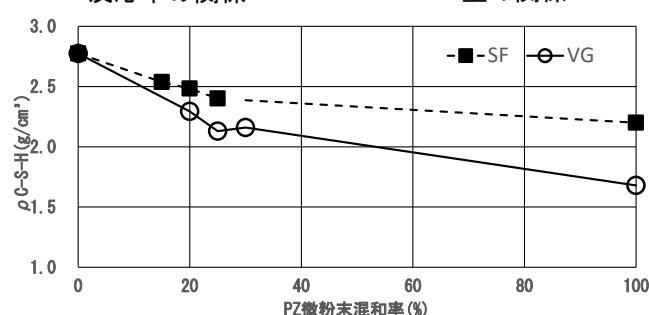


図-3 PZ 微粉末混和率と CH 量の関係

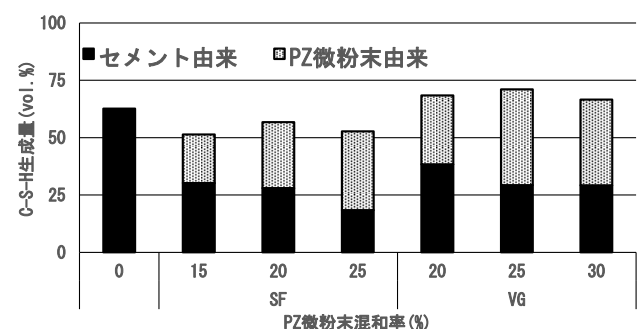


図-4 PZ 微粉末混和率と C-S-H 密度の関係

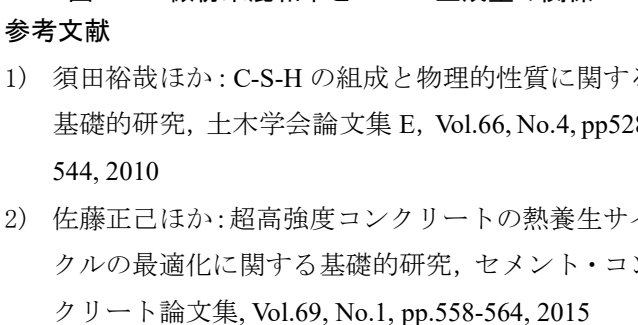


図-5 PZ 微粉末混和率と C-S-H 生成量の関係

参考文献

- 1) 須田裕哉ほか: C-S-H の組成と物理的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp528-544, 2010
- 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, No1, pp70-76, 2009