

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  
 Effect of pozzolanic reactive fine powder on compressive strength and C-S-H formation of hardened cement

東條真士<sup>1</sup>, 梅村靖弘<sup>2</sup>, 佐藤正己<sup>2</sup>

\*Masashi Tojo<sup>1</sup>, Yasuhiro Umemura<sup>2</sup>, Masaki Sato<sup>2</sup>

Abstract: Silica fume (SF) is used to achieve a low water-binder ratio in ultra-high strength concrete, but SF is expensive and volcanic glass powder (VG) is expected to be an alternative material. The hydrate that hardens concrete is generally called calcium silicate hydrate (C-S-H), and it is known that the properties of C-S-H vary depending on the material. In this study, C-S-H was differentiated from each material by the density of C-S-H, and the effects on the formation rate and compressive strength were investigated. As a result, it was found that the compressive strength of VG was comparable to that of SF due to the formation of C-S-H, which has lower reaction activity but higher filling effect than SF.

1. はじめに

シリカフェーム(SF)や火山ガラス微粉末(VG)等のポゾラン反応性微粉末(以降 PZ 微粉末)は、セメントとのポゾラン反応により水和生成物を作りコンクリートの硬化体内の空隙を充填し緻密化に寄与することが知られている。VG はコストが高い SF の安価な代替材料として 2020 年に JIS A 6209 が制定された。一方、セメントや PZ 微粉末の反応により生成される水和物は、既往の研究<sup>[1]</sup>でケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)とされ各材料により結晶構造が異なることが示されている。しかし、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

本試験の使用材料を Table 1. モルタル(M)配合を Table 2.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、CP 試料は 250ml ポリ瓶に打設した。養生は佐藤らの研究<sup>[2]</sup>を参考に打設後 20°C、前置き時間 48 時間、最高温度 90°C、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 JIS A 1108 に準拠し測定した。CP の相組成は圧縮強度最大値付近の混和率の各 3 水準と未混和条件について作成した。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 微粉末と水酸化カルシウム(以降 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<sub>i</sub>)を乾式密度計により測定した。各水準の C-

Table1. Specifications of materials

Material	Sign	Specifications
Cement	C	Low heat portland cement(ρ=3.25g/cm <sup>3</sup> )
Silica fume	SF	Ferrosilicon(ρ=2.20g/cm <sup>3</sup> )
Volcanic glass	VG	JIS 6209 Grade 1(ρ=2.32g/cm <sup>3</sup> )
Water	W	Distilled water
Sand	S	ISO standard sand(ρ=2.63g/cm <sup>3</sup> )
Calcium hydroxide	CH	Reagentfor chemical(ρ=2.21g/cm <sup>3</sup> )
Super plasticizer	SP	Polycarboxylic acid based super plasticizer
Defoamer	DEF	Polyester based defoamer

Table2. Mixture proportion of pastes

Sample name	W/B (%)	Mix rate (%)	Mix proportions(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	B			S	SP (B×%)	DEF (B×%)
				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	0		
VG100	100	253	0	845	845	0			

S-H 密度(ρ<sub>C-S-H</sub>)は田中らの研究<sup>[3]</sup>を参考に ρ 及び既知の各セメント鉱物及び水和物の密度から算出した。算出した密度及び(1)式により各材料由来の 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<sub>i</sub> : 各 PZ 微粉末混和率の硬化体密度(g/cm<sup>3</sup>)

ρ<sub>C-S-H</sub> : 各 PZ 微粉末混和率 C-S-H 密度(g/cm<sup>3</sup>)

ρ<sub>C-C-S-H</sub> : C 由来(PZ0)の C-S-H 密度(g/cm<sup>3</sup>)

ρ<sub>SForVG-C-S-H</sub> : PZ 微粉末由来 C-S-H 密度(g/cm<sup>3</sup>)

3. 試験結果および考察

Figure1.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。

Figure2.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と考えられる。

Figure3.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 はポズ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。

Figure4.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( $\rho_{CSH}$ )は, C 由来(PZ0)が  $\rho_{C-S-H} = 2.77g/cm^3$ , SF 由来(SF100)が  $\rho_{SF-C-S-H} = 2.20g/cm^3$ , VG 由来(VG100)が  $\rho_{VG-C-S-H} = 1.68g/cm^3$  となった。 $\rho_{VG-C-S-H}$  は, $\rho_{SF-C-S-H}$  に比べ小さくなったが, VG が SF に含有しない  $Al_2O_3$  を含むため, C-S-H に Al が置換された低密度な 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  $\rho_{CSH}$  は, PZ 微粉末混和率の増加に伴い低下し, SF 配合で  $\rho_{CSH} = 2.54 \sim 2.40g/cm^3$ , VG 配合で  $\rho_{CSH} = 2.29 \sim 2.16g/cm^3$  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。

Figure5.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。また VG 配合の C-S-H 生成量は, SF 配合に比べ反応率が低いにもかかわらず多くなった。これは生成物が低密度であるため硬化体内を占める生成物の体積割合が多くなったと考えられる。以上の結果から, 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 に比べ低密度な生成物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。

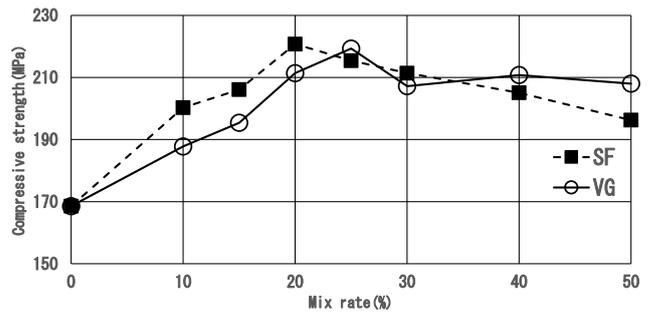


Figure1. Compressive strength of mortar

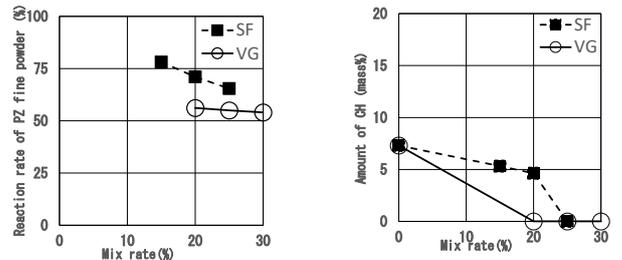


Figure2. Relation of mixing rate and reaction rate  
Figure3. Relation of mixing rate and amount of CH

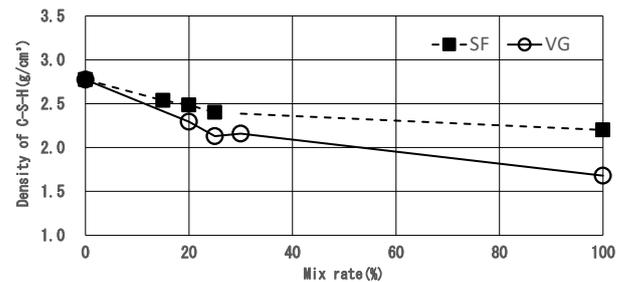


Figure4. Relation of mixing rate and density of C-S-H

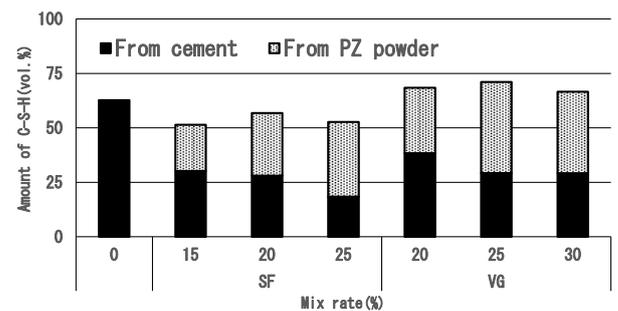


Figure5. Relation of mixing rate and amount of C-S-H

5. 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熟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