

コンクリート混和材 JIS A6209 について

2020年3月23日経済産業省通知

別紙資料2により、経済産業省・産業技術環境局・国際標準課より制定に関する通知がなされました。その要旨としては、有数の火山国である我が国から産出される「火山ガラス微粉末」が、コンクリートの混和材として有用な資源である。新市場創造型標準化制度を活用して、コンクリートへの材料としてJISに制定されました。その品質については、表-1及びシリカホワイト化学成分証明書に示されたとおりです。

現在国内で生産されている、火山ガラス微粉末で、比表面積がⅢ種(10,000以上)に該当する混和材は、「シリカホワイト」のみです。

火山国日本においては、同様な火山ガラスが各地で産出されていますが、その品質が同一であるとは限りません。経済産業省より示されている品質基準について、北海道立総合研究機構・地質研究所からのアドバイスをいただき、その定義となることについて問い合わせました。

その回答は

- ① JIS A6209には原材料規定はないこと
- ② JIS A6209の要求事項を満たして適合品
- ③ 火山ガラス微粉末に含有されている二酸化チタン、酸化カリウム、酸化マンガンの規定はされていない
- ④ 活性度指数は90を超えるもの

以上ですが、これらを担保するものとして、登録認証機関によるJISマークの取得があるが、この規格の登録機関がまだ決定されていない。急ぐのであれば「建材試験センター」に問い合わせること

このような観点から、

- ① 要求事項を満たしていれば、適合品となること
- ② ポゾラン反応に有効な成分とそれを阻害する成分について規定している。それ以外は規定していない

更に、このJIS A6209を検証した論文を紹介します。東京大学大学院工学系研究科建築学専攻、鹿児島県工業技術センター及び株式会社プリンシプルの三者による試験による「火山ガラス微粉末の粉末度と置換率が強度発現に及ぼす影響」を添付します。

これによりますと、比表面積と置換率について詳細な報告がされています。BET比表面積15 m²/g火山ガラス微粉末が、最大の効果が発揮されています。比表面積15 m²/g以下でも強度発現がありますが、比表面積がより大きければ強度発現が高く、JIS制定でも、比表面積80,000 (Ⅰ種) 40,000 (Ⅱ種) 10,000 (Ⅲ) に分類されたのもこのような経過からと思います。

また、論文からは以下のような記載がありました。

- ・ JIS の制定に向けて 2017 年に新市場創造型標準化制度に採択された「コンクリート用火山ガラス微粉末」は、ガラス率が 90%、SiO₂ 含有率が約 72% の高純度な非晶質シリカとして天然の火山噴出物から簡易な動力を用いた装置により選別された火山ガラスを原料とする。

※非晶質 体内に蓄積されない

結晶質 アスベストと同類、体内に蓄積され発がんの恐れあり

従いまして、コンクリート特殊混和材「シリカホワイト」が、前述のすべてに合致するため JIS A6209 の適合品といたしました。活性度指数の算定については、「シリカホワイト」活性度指数計算書によるものですが、この基礎数値は、2018 年 3 月 27 日に高強度コンクリートの大臣認定取得に係る、シリカホワイトを混入させた試験練りの数値を活用したものです。

シリカジャパン研究所においては、JIS マークを取得すべく準備を進めています。取得後にはカタログ及びパンフレットで周知いたします。

コンクリート用火山ガラス微粉末の JIS 制定

—純国産火山ガラス微粉末の活用を目指して—

2020 年 3 月 23 日

火山灰を原料とする「火山ガラス微粉末」は、コンクリートに混ぜることで強度・耐久性が向上することがわかっており、高層ビルなど、高い強度が求められるコンクリート材料としての活用が期待されています。

有数の火山国である我が国に存在する火山ガラス微粉末資源の建設分野における活用を進めるためには、その品質や試験方法を定めるなどの環境整備が必要です。

こうしたことから、今般、JIS A6209（コンクリート用火山ガラス微粉末）として制定[※]しました。

※ 新市場創造型標準化制度^{※1)}を活用して JIS 制定に至った。

1. JIS 制定の目的

建築物などに用いるコンクリートには、強度や耐久性の向上のために特殊な微粉末（コンクリート用混和材）を混ぜることがありますが、高層ビルなど、高い強度が求められる場所に用いるコンクリートには、コンクリート用混和材としてシリカフュームと呼ばれる微粉末が混ぜられています。シリカフュームは、ケイ素（金属シリコン）などの精錬過程で発生する副産物で、100%を輸入に頼っており、価格が高く、その輸送段階においてCO₂排出量が多という課題がありました。

こうした課題を克服するため、シリカフュームの代替原材料として、南九州地方に大量に分布している火山灰（図1参照）から火山ガラス微粉末（図2参照）を製造する技術が開発されています。この火山ガラス微粉末は、シリカフュームと比較して30%～50%程度安価で、より少量で、同等以上の高い強度や耐久性が得られていることから普及が期待されています。また、国内生産が可能となるので輸送段階におけるCO₂排出量の削減効果も期待できます。

しかしながら、これまで、コンクリート用火山ガラス微粉末に関する JIS がなかったため、粗悪品が流通するおそれがありました。そこで、今般、火山ガラス微粉末に関する品質や試験方法などを定めた JIS A6209（コンクリート用火山ガラス微粉末）を制定しました。

2. JIS 制定の主なポイント

シリカフュームの JIS である JIS A6207 を参考に火山ガラス微粉末の種類、品質、試験方法などについて規定しました。主なポイントは次のとおりです。

①種類

コンクリートの強度は、火山ガラス微粉末の粒径（比表面積）によって変化するため、コンクリートに求められる強度によって材料を使い分けられるように、比表面積の規定値によって「火山ガラス微粉末Ⅰ種」、「火山ガラス微粉末Ⅱ種」及び「火山ガラス微粉末Ⅲ種」の3種類を規定しました。これにより、火山灰が有効活用され、火山灰の約46%をコンクリート用途として利用可能です。

なお、残りの全量もコンクリートを製造するときの砂利・碎石や砂・砕砂に混ぜて活用することができるため、廃棄物は出ません。

②火山ガラス微粉末中の不純物量（強熱減量）及びその試験方法

火山ガラス微粉末の中にはコンクリートの強度を低下させる不純物が含まれています。この不純物の量は、950℃の加熱で減少した火山ガラス微粉末の重さを測定した「強熱減量」の値で判断しま

す。強熱減量は、加熱後の減少が4%以下と規定しています。

③火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの強度（活性度指数）及びその試験方法

火山ガラス微粉末を混ぜたコンクリート強度の評価方法として、材齢7日、材齢28日^{注2)}の活性度指数を①の種類別に規定しました。具体的には、火山ガラス微粉末を混ぜたモルタル^{注3)}と混ぜていないモルタルについて、圧縮力を加える試験を行い、破壊したときの圧縮力の比(%)で求めます。

注2) コンクリートの強度は、期間の経過によって発現するため、その養生日数(材齢)が経過した後の圧縮強度によって評価する。材齢28日の圧縮強度で評価することが多い。

注3) 通常、コンクリートはセメント、水、骨材(砂利・碎石、砂・砕砂)などを練混ぜて製造されるが、粗骨材(砂利・碎石)を入れず、骨材として、細骨材(砂・砕砂)だけを用いて製造するのがモルタルである。



図1 九州南部の火山灰の分布(灰色部)



図2 火山ガラス微粉末の外観

(出典：岩松 暉、福重 安雄、郡山 榮、地学雑誌、98. 379(1989))

3. 期待される効果

このJISの制定により、火山ガラス微粉末の品質(コンクリートに混ぜたときの強度を含む。)及びその試験方法が統一されました。その結果、市場からの粗悪品の排除、低廉かつ国産原材料への代替が可能となり、コンクリート用混和材料としての普及の促進が期待されます。

※日本産業標準調査会(JISC)のHP(<http://www.jisc.go.jp/>)から、「A6209」でJIS検索すると本文を閲覧できます。

【担当】

経済産業省 産業技術環境局 国際標準課 (03-3501-9277、内線 3423)

(課長)黒田 浩司 (担当)佐野、泉田

注1) 既存の業界団体等では対応が出来ない、複数の関係団体に跨る融合技術や特定企業が保有する先端技術に関する標準化を進めるための制度。一定の要件を満たし、本制度に採択されることで、業界団体等から積極的な協力が得られない場合でも規格制定に挑戦することが可能となる。

4 種類

火山ガラス微粉末の種類は、表 1 に規定する品質によって区分し、次の 3 種類とする。

- a) 火山ガラス微粉末 I 種
- b) 火山ガラス微粉末 II 種
- c) 火山ガラス微粉末 III 種

5 品質

火山ガラス微粉末の品質は、簡条 6 によって試験を行い、表 1 の規定に適合しなければならない。

表 1 - 火山ガラス微粉末の品質

項目	火山ガラス微粉末		
	I 種	II 種	III 種
二酸化けい素	%	70.0 以上	
酸化アルミニウム	%	15.0 以下	
酸化マグネシウム	%	5.0 以下	
三酸化硫黄	%	3.0 以下	
遊離酸化カルシウム	%	1.0 以下	
塩化物イオン	%	0.10 以下	
強熱減量	%	4.0 以下	
水分	%	3.0 以下	
比表面積 (BET 法)	cm ² /g	80 000 以上	40 000 以上
	材齢 7 日	100 以上	95 以上
活性度指数	%	105 以上	100 以上
	材齢 28 日		95 以上
密度	g/cm ³	2.25 以上 2.40 以下	

6 試験方法

6.1 試料

火山ガラス微粉末の粉末度と置換率が強度発現に及ぼす影響

友寄篤^{*1} 野口貴文^{*1} 袖山研一^{*2} 東和朗^{*3}^{*1} 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)^{*2} 鹿児島県工業技術センター 地域資源部 シラス研究開発室(〒899-5105 鹿児島県霧島市華人町小田 1445-1)^{*3} 株式会社プリンシプル(〒890-0063 鹿児島県鹿児島市鴨池 1-17-8)

要旨：新市場創造型標準化制度により JIS 化されることが決定した火山ガラス微粉末について、粉末度と置換率が強度発現に及ぼす影響をモルタル実験により検証した。BET 比表面積と圧縮強度には高い相関が認められ、置換率 20%程度までは比表面積に応じて材齢 4 週まで基準モルタルと同程度の強度増進を示すが材齢 13 週で特に強度発現性能が認められた。置換率 20%以上とすると、粉末度が小さい場合には材齢 1 週の強度が低下するものの、材齢 13 週では基準モルタル以上の圧縮強度を示した。BET 比表面積 15m²/g では材齢 1 週から 13 週まで置換率 30%以下でいずれも基準モルタル以上の圧縮強度となった。

キーワード：火山ガラス微粉末、天然ボゾラン、BET 比表面積、置換率、活性度指数、圧縮強度

1. はじめに

ポルトランドセメントの代替に用いられる混和材として産業副産物が実用化されているが、フライアッシュを副産する石炭火力発電の先行きは不透明であり、高炉スラグ微粉末も世界的に見ればその量には限りがある。一方、天然ボゾランをポルトランドセメントに置換したコンクリートの耐久性が向上することは古くから知られている¹⁾。1000℃を超える地下のマグマが噴出後に急冷された非晶質のアルミノけい酸塩は火山ガラスと呼ばれるが、焼成の必要がなく環境負荷のない自然エネルギーとも言える地球の火山活動による産物である。セメントクリンカー削減や石灰石資源保護の観点からも、国内に豊富に埋蔵する火山性堆積物をコンクリート用混和材として利用することは、資源循環型社会および低炭素社会の実現に貢献すると考えられる。

JIS の制定に向けて 2017 年に新市場創造型標準化制度に採択された「コンクリート用火山ガラス微粉末」は、ガラス率が約 90%、SiO₂ 含有率が約 72% の高純度な非晶質シリカとして天然の火山噴出物から簡易な動力を用いた装置により選別された火山ガラスを原料とする。これを粉砕と分級によって最小平均粒径 1μm 以上、最大 BET 比表面積 18m²/g の任意の粉末度の粉体として乾式製造される微粉末である。

既報²⁾では、南九州に堆積する入戸シラスを原鉱として製造した火山ガラス微粉末及び除去した風化物(粘土質分とその粉砕物)の粉体特性について明らかにした。また、BET 比表面積 15m²/g の火山ガラス微粉末を混和材としてコンクリートに用いた場合には、W/B=20%ではシリカフェームより少ない化学混和剤量で同等以上のスランプフローと強度(材齢 7 日から)が得ら

れることを示し³⁾、W/B=60%では普通ポルトランドセメントに 20%まで置換しても材齢 7 日から優れた強度発現を示した³⁾。さらに実用化に向けて材齢 28 日における C/W-F 関係式に関する検討も行われ⁴⁾、化学組成などが異なる副産物混和材でも一般的に指摘される様に、BET 比表面積が大きいほど初期強度発現性能に優れた実験結果も得られている⁵⁾。

置換率については混和材種類に応じて、強度発現性能における適切な水準が異なることが知られている。ただし、化学組成と非晶質量がほぼ同じで BET 比表面積のみが異なる火山ガラス微粉末については、その粉末度と置換率が強度発現に及ぼす影響について、明確な検討はこれまでになされていない。そこで本研究では、モルタル実験により火山ガラス微粉末の粉末度と置換率が材齢の進行に伴い強度発現にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

既報⁶⁾同様に鹿児島県鹿屋市申良町の採掘業者より前処理なしの入戸シラスを取り寄せ、5mm のふるいを通過した粒分を原鉱とし、含水率 1%以下としてからエアテーブルで 5 種類の成分に分離回収した。回収した火山ガラス質(回収率約 45%、以下 VG とする)と粘土質分(回収率約 2%、以下 CF とする)を Fig.1 に示す通り粉砕・分級した。VG をローラミルで一次粉砕した粉末を VGR とし、原料供給量を 2 水準として粉末度の粗いものを VGR-C、粉末度の細かいものを VGR-F と呼ぶ。VGR-F をジェットミルで粉砕・分級し、集塵機に回収される微粉を RJF とし、サイクロンに回収される粗粉を RJC とす

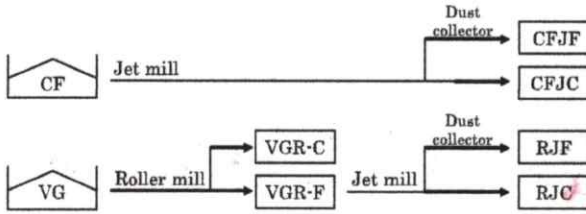


Fig. 1 Manufacturing process of materials

Table 2 Factors and levels of experiment

Factors	Levels
Supplementary cementitious material (SCMs)	VG, VGR-C, VGR-F, RJC, RJF, CF, CFJC, CFJF
Replacement ratio (%)	0, 5, 10, 15, 20 (VG, VGR-C, CF, CFJC, CFJF) 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (VGR-F, RJC, RJF)
W/B (%)	30

Table 4 Mix proportion

W/B (%)	Replacement ratio (%)	OPC (g)	SCMs (g)	S (g)	W + AE (g)
30	0	964.0	0	1350	289.0
	5	907.5	47.8	1350	286.6
	10	852.2	94.7	1350	284.1
	15	798.0	140.8	1350	281.6
	20	744.6	186.1	1350	279.2
	25	692.1	230.7	1350	276.9
	30	640.6	274.5	1350	274.5

る。本研究では、分級していない一次粉砕品の VGR も含めて粉砕方法や粉末度を限定せずに、火山噴出物を原料とし、アルミノけい酸塩ガラス(火山ガラス)を主成分とした微粉末を火山ガラス微粉末と呼ぶ。また、粘土質分 CF とその粉砕物をまとめて粘土微粉末と呼ぶ。使用した材料の物性を Table 1 に示す。これまでの検討結果を踏まえ²⁾、BET 比表面積については前処理温度を 300℃とした結果、ガラス含有率については密度 2.4g/cm³ による重液選鉱法による結果を示した。また、化学組成についてはガラスビード法による測定結果をそれぞれ示した。

2.2 実験概要

「JIS A 6207 コンクリート用シリカフューム 附属書 C (規定)シリカフュームのモルタルによる活性度指数の試験方法」を参考とし、セメントの内割で置換率を 5% 間隔に設定した。Table 2 に実験の要因と水準、Table 3 に使用材料を示す。これまでの実験結果から VGR-F、RJC、RJF の 3 種類については反応性が期待できるため置換率を 5% 刻みで 30% まで、それ以外は同 20% までとした。流動性に悪影響を与えることが示唆された粘土微粉末²⁾についても実験を行った。

JIS A 6207 附属書 C の規定では置換率 10% であるが、30% まで置換するため、Table 4 に示す通り調査は細骨材容積一定とした。練混ぜは強度試験用の供試体数の

Table 1 Chemical composition and LOI

Marks	VG	VGR-C	VGR-F	RJF	RJC	CF	CFJF	CFJC
Density (g/cm ³)	2.35	2.39	2.36	2.35	2.38	2.37	2.17	2.25
BET surface area (m ² /g)	1.50	3.60	6.49	15.0	4.17	31.4	37.1	13.4
Glass content (%)	87.7	82.4	85.7	88.6	87.4	62.2	32.6	72.0
SiO ₂	73.1	73.5	73.6	71.4	73.7	66.0	60.4	69.7
TiO ₂	0.20	0.20	0.19	0.22	0.21	0.29	0.35	0.26
Al ₂ O ₃	12.5	12.20	12.30	12.9	12.20	14.4	16.7	12.8
Fe ₂ O ₃	1.64	1.48	1.49	2.12	1.57	5.96	7.73	4.23
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.07	0.09	0.05
MgO	0.29	0.29	0.25	0.37	0.28	0.69	1.16	0.45
CaO	1.45	1.45	1.35	1.56	1.44	1.40	1.70	1.43
Na ₂ O	3.82	3.82	3.73	3.70	3.64	2.60	1.88	2.98
K ₂ O	4.26	4.26	4.37	4.17	4.38	4.10	3.52	4.65
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.04	0.44	0.03	0.05	0.03
LOI	2.63	2.64	2.68	3.42	2.49	4.47	6.37	3.44

Table 3 Material used

Material	Marks	Properties
Cement	OPC	Ordinary Portland cement Density : 3.16g/cm ³
Fine aggregate	S	Crushed lime (Kochi) Density : 2.66g/cm ³
Chemical admixture	AE	Air-entraining and high-range water-reducing admixture

Table 5 Result of mortar flow change

M.ad	Replacement ratio	Origin (B*%)	Flow (mm)	After (B*%)	Flow (mm)
CF	15%	0.83	111.5	1.09	165.0
	20%	0.83	Unmeasurable	1.64	239.0
CFJF	5%	0.83	188.5	1.26	258.5
	10%	0.83	106.5	1.69	248.0
	15%	0.83	Unmeasurable	2.56	252.0
	20%	0.83	Unmeasurable	3.44	239.0

関係から、JIS の規定に準拠した量の 4 倍、ミキサーも JIS に規定される 4 倍の容量のものを用いた。化学混和剤の量は基準モルタルにおける練混ぜ直後のモルタルフローが 260±10mm になる様に定め、各試験モルタルでも一定の化学混和剤量とし、練混ぜ直後のフローを確認した。モルタルフローが 260±10mm に入らなかった調査については、セメントの分散状態に差が出る可能性を考慮し、フロー値が大きい場合には材料分離を起こさない範囲、小さい場合には成形上問題無いと思われる範囲であれば、供試体を作成した。その範囲を超える水準については、その範囲となる様に化学混和剤量を調整して再試験した。CF の置換率 15% と 20%、及び CFJF の全ての水準で調整した結果を Table 5 に示す。CF の 15% 置換は 10% と近いフロー値に定め、それ以外はメーカーの指定する化学混和剤の限界使用量を超える置換率もあったため、概ね 250mm±10mm とした。供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体とし、20℃水中養生材齢 7、28、91 日に 3 個の圧縮強度を測定し、その平均値から活性度指数を算出した。

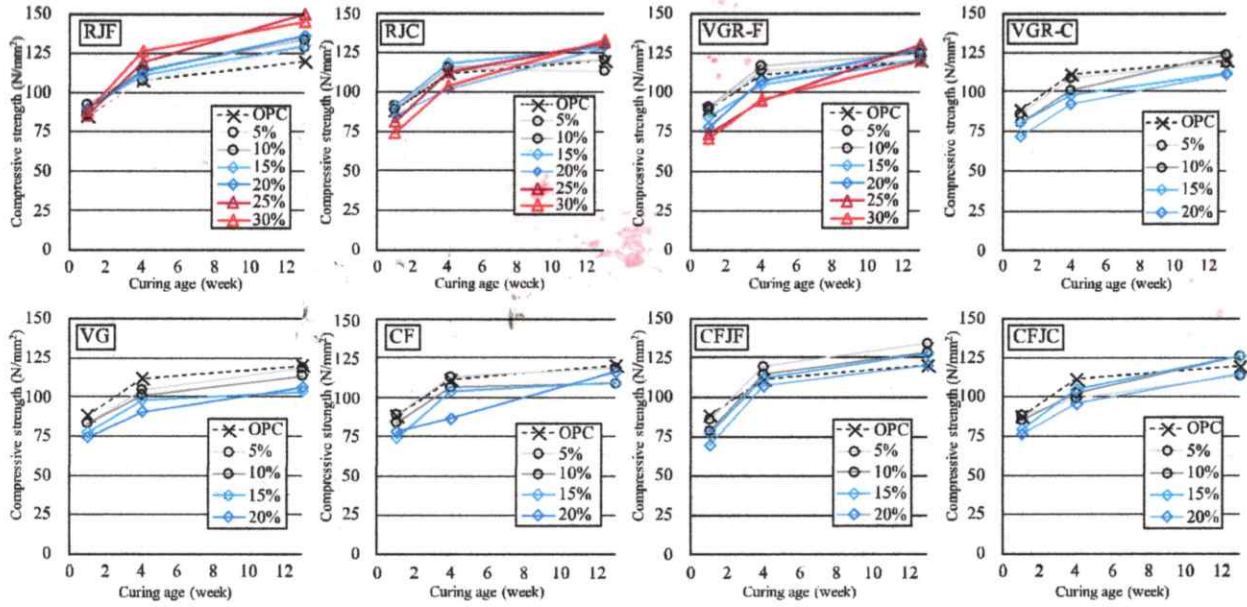


Fig. 2 Compressive strength

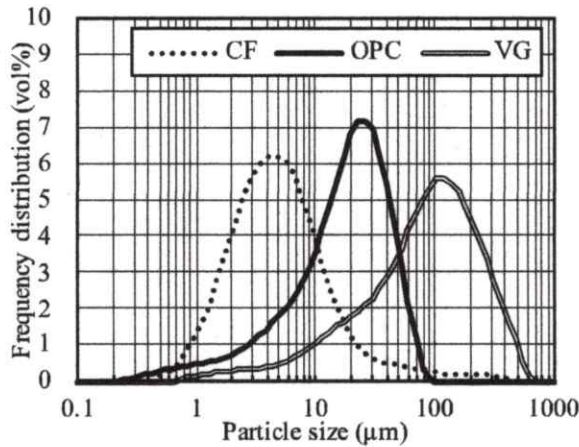


Fig. 3 Particle size distribution

3. 実験結果と考察

3.1 材齢と強度発現の関係及び粘土質分の影響

材齢 13 週までの圧縮強度を Fig. 2 に示す。BET 比表面積 $15\text{m}^2/\text{g}$ の RJF はいずれの置換率でも材齢 1 週から基準モルタルを上回る強度を示し、材齢の進行に伴い置換率が高いほど圧縮強度も高くなる傾向を示した。BET 比表面積 $5\text{m}^2/\text{g}$ 前後の VGR-F と RJC は材齢 4 週までは置換率が高いと圧縮強度がやや低くなるものの、材齢 13 週にかけて伸びる傾向を示した。BET 比表面積 $3\text{m}^2/\text{g}$ 程度以下の VGR-C と未粉碎の VG は材齢 13 週まで基準モルタルを下回り、置換するほど強度が小さくなった。

未粉碎である VG と CF を比較すると、5% 置換では CF の圧縮強度が高い。レーザー回折式粒度分布測定装置による VG、CF、OPC の粒度分布を Fig. 3 に示す。乾式選別であるために粒度は重なっているが、VG の平均粒径 $80\mu\text{m}$ 程度に対して CF は $4\mu\text{m}$ 程度である。OPC の平均粒径は $17\mu\text{m}$ のため、CF5% 置換ではで

マイクロファイラー効果が得られたと考えられる。一方で CF の 20% 置換では材齢 13 週で強度増進しているため、反応による強度発現へ寄与した可能性も考えられる。

入戸シラスに含まれる微粒分である CF は化学混和剤吸着量が多く、火山ガラスが風化したアロフェンに近い特性を持ち、これを粉碎して回収される CFJF は粒子の表面風化層が濃縮している微粒分であることを指摘した²⁾。非晶質粘土であるアロフェンに富んだ火山灰質粘性土壌に対してセメント系固着材により処理すると、他の粘性土を対象とした場合に比べて、強度発現が劣ることが多いとされる。その要因については水和過程で生成するカルシウムイオンが吸着され、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸着量として評価することで説明できるとされる⁷⁾。しかしながら、CFJF の圧縮強度は材齢 1 週では基準モルタル同等以下であるものの、材齢 4 週から 13 週にかけて同等以上に増進している。火山ガラスを同じジェットミルで粉碎回収した RJF に比べると圧縮強度は小さく、重液選鉱法によるガラス含有率は 32% という鉱物組成からはマイクロファイラー効果や鉱物質微粉末効果の可能性も考えられるが、材齢 4 週までの圧縮強度は低い。BET 比表面積 $37\text{m}^2/\text{g}$ という物性から火山ガラス微粉末と同一の強度発現メカニズムとは考えにくいものの、強度発現に寄与する特性を持っていると考えられる。

RJF と同程度の $13.4\text{m}^2/\text{g}$ という BET 比表面積を持つ CFJC は BET 比表面積 $4.17\text{m}^2/\text{g}$ の火山ガラス微粉末 RJC より圧縮強度が小さく、既報²⁾ で指摘した流動性の観点も考えると、粘土質分 CF を除去することでより高性能な混和材料が製造できると言える。

3.2 粉末度が強度発現に与える影響

前項の結果について、BET 比表面積と活性度指数の関係および近似直線を置換率ごとに Fig. 4 に示す。なお、図からは粘土微粉末を除き、シリカフェームの活

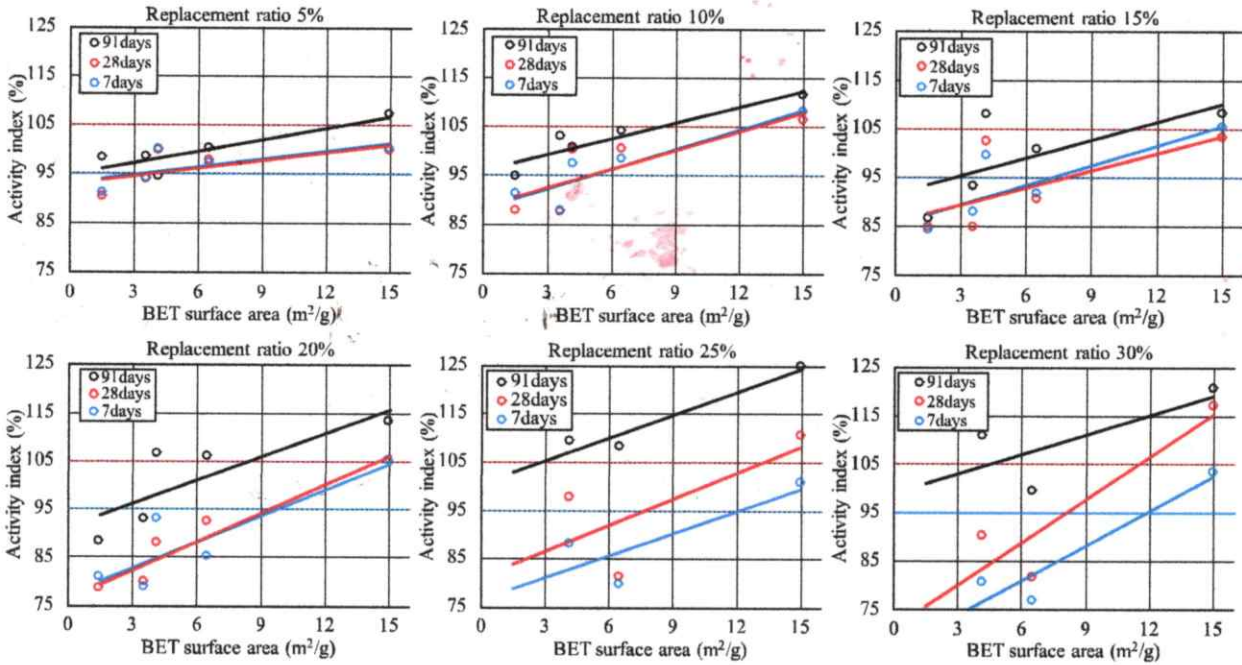


Fig. 4 Relation between BET surface area and activity index

性度指数の基準値である材齢 7 日の 95 % を青点線、28 日の 105 % を赤点線で示した。いずれの結果も BET 比表面積が大きくなるほど活性度指数は大きくなっているため、粉砕により反応性が高まっていることが分かる。また、置換率 5 % ~ 20 % までは材齢 7 日と 28 日の近似直線が概ね重なっており、91 日では活性度指数がこれに比べて高くなっている。置換率 20 % まではいずれの粉末度でも 28 日から 91 日での強度増進が基準モルタル以上となる傾向が示された。

置換率 25 % 以上では材齢 28 日の活性度指数は 7 日より高くなっているため、7 日から 28 日で基準モルタルより強度が増進していることを示している。しかし、BET 比表面積が小さい領域では置換率 30 % で明らかに材齢 7 日の活性度指数が低下しており、28 日までに増進したというよりは 7 日の強度発現が低いとみなせる。しかし置換率 25 %、30 % の材齢 13 週における結果では BET 比表面積が小さい領域でも活性度指数 105 % を超えており、13 週までには十分に反応が進行すると考えられるため、材齢に伴う強度増進は粉末度に加えて置換率の影響を受けることが示された。

シリカフェームの試験方法である置換率 10 % の近似直線から判断すると、7 日の基準値である活性度指数 95 % 以上は BET 比表面積が 5m²/g 以上程度でこれを満たす。これは、初期材齢では JIS に規定されるシリカフェームの BET 比表面積 15m²/g より小さくてもシリカフェームと同等の強度が得られることを意味する。同じく置換率 10 % の 28 日の活性度指数 105 % 以上という基準値は BET 比表面積 12m²/g 程度以上でこれを満たす。BET 比表面積が 12m²/g 以下の火山ガラス微粉末では、材齢 28 日ではいずれの置換率でも SF の活

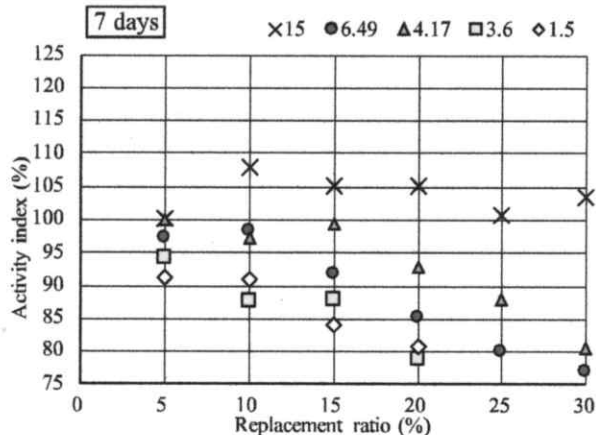


Fig. 5 Relation between replacement ratio and activity index at the age of 7 days

性度指数基準値を満たす結果は得られていないため、比表面積が小さいことでシリカフェームほど反応性が高くないと推測される。

研究用ポルトランドセメントを用いたペーストにおける反応率と CH 量を測定した研究によれば⁸⁾、本研究と同じ水セメント比 30 % の水準では材齢 7 日以降での CH の生成は微量であるとみなすことができる結果が示されている。火山ガラス微粉末より溶出するシリカ成分が CH と反応してケイ酸カルシウム水和物が生成するポゾラン反応が起きているとすれば、30 % 置換程度までは BET 比表面積が小さくても材齢 13 週までに十分な反応が生じていると推測される。

3.3 置換率が強度発現に与える影響

材齢 7 日の結果について、BET 比表面積ごとの置換率と活性度指数の関係を Fig. 5 に示す。BET 比表面積

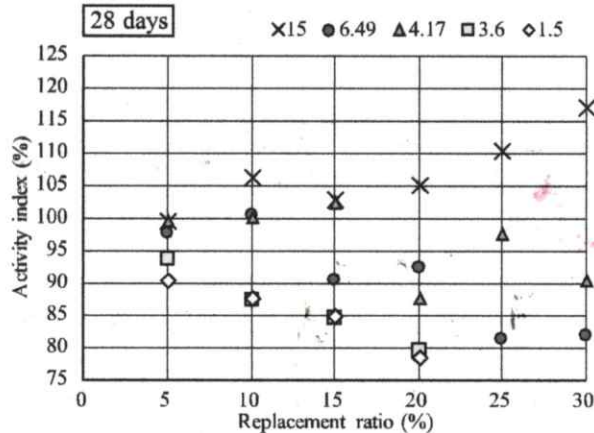


Fig. 6 Relation between replacement ratio and activity index at the age of 28 days

15m²/g の RJF では、置換率による傾向はあまり見られず概ね活性度指数 100 % 以上程度を示す。10 % 置換で最も高い活性度指数を示していることからセメントの水和を促進させるなどの鉱物質微粉末効果の影響も考えられる。一方で BET 比表面積が 4m²/g 以下の粗粉では、置換率の増加に伴い 20 % まで活性度指数が 100 % 以下に低下する傾向を示し、その低下の数値は概ね置換率と同程度となっている。この程度の粉末度では置換率によらず、材齢 7 日では反応が進まず置換した分だけ強度が低下したと考えられる。BET 比表面積 4~7m²/g では置換率が 10 % から 15 % まで活性度指数が 100 % 程度となり、材齢 7 日でも僅かに反応が進んでいることが示唆されているが、それ以上の置換率では低下傾向にあるため置換率が多過ぎると水和するセメント量も少なく、火山ガラス微粉末の反応性も低いと考えられる。

材齢 28 日の関係を Fig. 6 に示す。BET 比表面積 15m²/g の RJF では、置換率 30 % に至るまでの増加に伴い活性度指数が増加する傾向にあり、いずれも 100 % を超える水準となる。置換率 30 % で水和するセメントが少ないにも関わらず、材齢 28 日までは十分なポゾラン反応が進み強度増進していくと考えられる。一方で BET 比表面積が 4m²/g 以下の粗粉では、材齢 7 日と変わらず置換率の増加に伴い 20 % まで活性度指数が 100 % 以下で低下していく傾向を示し、その低下は概ね置換率と同程度となっている。材齢 28 日でも粉末度が小さく反応が進んでいないと考えられる。BET 比表面積 4~7m²/g では置換率が 10 % から 15 % まで活性度指数が 100 % を僅かに超える水準もあり、反応が進んでいることが示唆されているが、それ以上の置換率では低下傾向にある。

材齢 91 日の関係を Fig. 7 に示す。BET 比表面積 15m²/g の微粉 RJF では、置換率 30 % に至るまでの増加に伴い活性度指数が増加する傾向が継続している。28 日までは低下した BET 比表面積が 4m²/g 以下の粗粉では、粉碎した 3.6m²/g の粗粉で 10 % 置換までは反

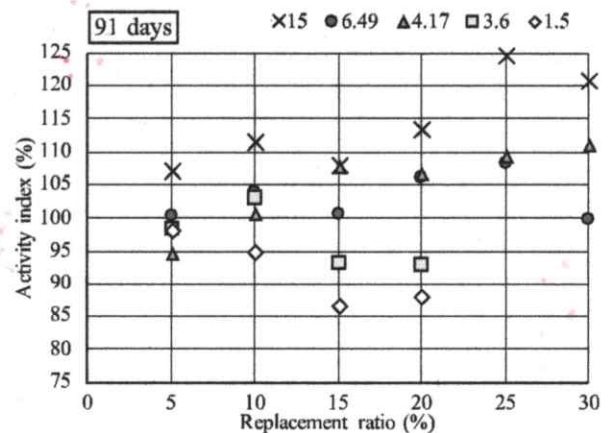


Fig. 7 Relation between replacement ratio and activity index at the age of 91 days

応が進んだことを示しているが、それ以外の未粉碎品も含めては変わらず、置換率の増加に伴い活性度指数が低下する。BET 比表面積 4~7m²/g では置換率 25 % までの増加に伴い活性度指数も 100 % 以上 110 % 以下の範囲で増加しており、28 日から 91 日で反応が進んだことを示唆している。30 % 置換では傾向が分かれたものの、いずれも 100 % 以上を示した。

これらの結果を粉末度ごとに整理すると、BET 比表面積 15m²/g 程度の火山ガラス微粉末は、材齢 7 日でもいずれの置換率でもセメント 100 % を上回る程度の強度発現であるが、材齢 28 日までは置換率 30 % まで置換率が上がるほどに強度発現が得られ、91 日でも継続して強度が増進し置換率 25 % 以上では活性度指数 120 % を超える。

BET 比表面積 4~7m²/g の粉末度では、材齢 7 日では置換率 10 % ~ 15 % 程度とした場合に活性度指数が 100 % 程度となるが、置換率がそれより大きくなると強度が低下する。材齢 28 日では同じ置換率でセメント以上の強度が得られ、材齢 91 日では置換率 30 % としてもセメント同等以上の強度が得られるが、BET 比表面積 15m²/g ほどの強度は得られず、91 日以降の長期材齢で強度発現すると考えられる。

未粉碎もしくは BET 比表面積 3m²/g 以下では、反応性を持っているものの、材齢 28 日までに強度発現に与える影響はほぼ確認できず、材齢 91 日で僅かに強度発現する程度である。

4. まとめ

火山ガラス微粉末の粉末度と置換率が強度発現に及ぼす影響について、モルタル実験で得られた結果からポゾラン反応を仮定して考察した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) BET 比表面積 15m²/g の粉末度であれば 30 % まで置換しても、材齢 7 日からセメント単味以上の強度発現が得られ、材齢の進行に伴い置換率が高いほ

どその性能が発揮される。

- (2) BET 比表面積 $4\sim 7\text{m}^2/\text{g}$ 程度の粉末度では、15% 以下程度の置換率であれば材齢 7 日からセメント単味同等の強度発現が得られ、それ以上の置換率の場合には強度が低下するものの、材齢 91 日までには 30% まで置換しても十分な強度発現性能が発揮される。
- (3) BET 比表面積 $3\text{m}^2/\text{g}$ 程度以下の粉末度、および未粉砕品、原鉱に含まれる粘土質分やその粉砕品は、反応性は認められるものの初期材齢での強度発現性能は十分ではない。

参考文献：

- 1) R. Snellings, G. Mertens, J. Elsen : Supplementary Cementitious Materials, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Vol. 74, pp. 211-278 (2012)
- 2) 友寄篤ほか：火山ガラス微粉末と粘土微粉末の粉体特性と流動性に与える影響、セメント・コンクリート論文集、Vol. 72, pp. 438-445 (2018)
- 3) Atsushi Tomoyose et al. : Utilization of volcanic ejecta as a high-performance supplementary cementitious material by gravity classification and pulverization, RILEM Technical letters, 3, pp. 66-74 (2018)
- 4) 楠元宏治ほか：コンクリート用火山ガラス微粉末の混合によるセメント使用量削減効果の考察及び長期強度発現とそのメカニズムに関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 41, No. 1, pp. 197-202 (2019)
- 5) 友寄篤ほか：コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの基本特性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 40, No. 1, pp. 255-260 (2018)
- 6) 袖山研一ほか：乾式比重選別と粉砕によるシラスの建設材料への全量活用、日本材料学会「材料」、Vol. 66, No. 8, pp. 574-581 (2017)
- 7) セメント協会セメント系固化材技術専門委員会：火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討(アロフェンの影響について)、セメント・コンクリート、No. 780, pp. 3-8 (2012)
- 8) 坂井悦郎ほか：セメント水和の相組成モデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20, No. 1, pp. 354-361 (1998)

EFFECT OF BET SURFACE AREA AND REPLACEMENT RATIO OF VOLCANIC GLASS POWDER ON COMPRESSIVE STRENGTH

Atsushi TOMOYOSE^{*1}, Takafumi NOGUCHI^{*1}, Kenichi SODEYAMA^{*2} and Kazuro HIGASHI^{*3}

*1 UNIVERSITY OF TOKYO, Graduate School of Engineering (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

*2 KAGOSHIMA PREFECTURAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY (1445-1, Oda, Hayato-cho, Kirishima-shi, Kagoshima 899-5105, Japan)

*3 PRINCIPLE CO., LTD. (1-17-8, Kamoike, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0063, Japan)

ABSTRACT : Volcanic glass powder (VGP) is manufactured from pyroclastic flow deposits. This paper reports the effect of BET surface area and replacement ratio of VGP as a supplementary cementitious material on compressive strength. The performance of VGP as a SCM was evaluated by conducting tests on mortar mixture, replacing 0% to 30% by weight of Portland cement by VGP with 0.3 water to binder ratio. VGP mortar with BET surface area of $15\text{m}^2/\text{g}$ showed better results of 7-, 28- and 91-day compressive strength compared to control mortar in all replacement ratio. In particular, VGP demonstrated better strength development in mortar from 28-day to 91 day when replacing 25% and 30% by mass of Portland cement.

KEY WORDS : Volcanic glass powder, Natural supplementary cementitious materials, BET surface area, Replacement ratio, Activity index, Compressive strength