

論文 火山ガラス微粉末を使用したコンクリートの基礎的性状に関する実験的研究

右田 周平*1・久須美 真悟*1・中村 雄太*2・長井 智哉*3

要旨: 火山ガラスは、火山国である日本国内に広く分布する火山堆積物を由来とする天然ポゾランであり、セメントと置換することで、強度および耐久性が向上することが報告されている。筆者らは、コンクリート用火山ガラス微粉末を使用した普通強度領域および高強度領域におけるコンクリートについて、フレッシュ性状や強度性状等の基礎的物性を室内実験により確認した。実験結果から、適切な置換率で火山ガラス微粉末を使用することで、フレッシュ性状の改善や圧縮強度の増進効果が得られることを確認した。

キーワード: 火山ガラス微粉末, シリカフェーム, ポゾラン反応, フレッシュ性状, 圧縮強度

1. はじめに

近年、環境配慮の観点から CO₂ 排出量の多いポルトランドセメントを産業副産物である高炉スラグやフライアッシュに置換して製造するコンクリートが注目されている。筆者らも普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合使用する高炉 A 種相当コンクリートや、普通ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種と高炉スラグ微粉末を混合使用する高炉 C 種コンクリートに関する研究・開発を行ってきた^{1,2)}。しかし、高炉スラグやフライアッシュは産業副産物であり、その製造量は鉄鋼業や石炭火力発電の情勢に左右される。環境配慮型コンクリートの需要増大により、コンクリート用混和材として安定的な供給が難しくなる可能性も考えられる。そこで、脱炭素化社会の実現に向けて期待される新コンクリート用混和材として、火山ガラス微粉末（以下、VGP）に着目した。VGP は、2020 年に JIS A 6209（コンクリート用火山ガラス微粉末）として制定され、また、2024 年に改正された JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）にも使用材料として追加された。さらに、JASS5³⁾でも、コンクリート用混和材として 2022 年の改定で追加された。

火山ガラスは、火山国である日本国内に広く分布する火山堆積物を由来とする天然ポゾランであり、セメントと置換することで、強度および耐久性が向上することが報告されている⁴⁾。また、海外からの輸入に頼っている高強度コンクリート用シリカフェーム（以下、SF）の代替材料としての活用も期待されている⁴⁾。そこで、本研究ではコンクリート用火山ガラス微粉末を使用した普通強度領域および高強度領域におけるコンクリートについて、フレッシュ性状や強度性状等の基礎的性状を確認した。

2. 実験対象および VGP の特徴

VGP は、JIS A 6209 において、その比表面積や活性度指数によって I～III 種に分類されており、表-1 のように、その使用目的が示されている。本実験では、それらの特徴をふまえて、普通強度領域のコンクリートを対象とし、II 種、III 種の VGP をセメント代替として使用した実験（シリーズ①）と、高強度領域のコンクリートを対象とし、I 種、II 種の VGP を SF 代替として使用した実験（シリーズ②）を実施した。

本実験で使用した VGP について、表-2 に品質試験結果を示す。VGP1 の材齢 7 日、VGP2 の材齢 28 日における活性度指数が、わずかに JIS 規格値を下回った。後述の圧縮強度試験結果も同様の傾向を示しており、VGP は長期的な強度発現性は優れているものの、初期材齢時の活性度が低下する傾向があると考えられる。なお、本実験に使用した VGP は全て鹿児島県の同一産地の材料を使用し、製造している。

3. 普通強度領域における基礎的性状（シリーズ①）

3.1 実験概要

普通強度領域のコンクリートを対象に、普通ポルトラ

表-1 VGP の使用目的

種別(置換率)	使用目的				
	流動性の改善	超高強度化	長期強度の向上	アルカリシリカ反応の抑制	塩化物イオンの浸透抑制
火山ガラス微粉末 I 種(10%)	○	◎	—	◎	◎
火山ガラス微粉末 II 種(20%)	—	○	—	◎	◎
火山ガラス微粉末 III 種(20%)	—	—	○	◎	◎

*1 戸田建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 西松建設（株） 技術研究所

*3 西松建設（株） 建築技術部（正会員）

ンドセメント（以下、OPC）の一部をVGPに置換した際のフレッシュ性状、強度性状を確認した。表-3にコンクリートの使用材料を、表-4にコンクリートの調合を示す。また、表-5に測定項目を示す。シリーズ①では、水結合材比（W/B）は50%で統一し、VGP2およびVGP3を、OPCの10～70%置換した。フレッシュコンクリートの品質目標値は、スランブを $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。圧縮強度試験は、材齢1、4、8、13週その他、施工計画にも関わる若材齢時の強度発現性を確認するため、材齢1、3日でも実施した。

3.2 フレッシュコンクリートの試験結果

表-6にコンクリートのフレッシュ試験結果およびSP1の添加量を示す。フレッシュ試験は、いずれも練り上り直後実施する計画としたが、VGP2-70およびVGP3-70はSPの使用量が多くなり、粘性が強かったため、十分にSPの効果が出るように、練上がりから5分間静置した後に実施した。スランブおよび空気量はいずれも目標値を満足した。SP使用量は、VGP置換率が30%まではNと同程度だったが、それを超えると、置換率の増加に伴い増える傾向となった。VGP2とVGP3では、SP使用量に大

表-2 VGPの品質試験結果

項目		試験結果および規格値		
		VGP1	VGP2	VGP3
鹿児島県産VGP	二酸化ケイ素 %	73.2	74.0	74.2
	酸化アルミニウム %	13.4	13.2	13.1
	強熱原料 %	2.8	2.4	2.7
	比表面積（BET法） cm^2/g	96,400	50,700	38,200
	活性度指数 %	材齢7日	99	95
材齢28日		107	99	98
JIS規格値	二酸化ケイ素 %	70.0以上		
	酸化アルミニウム %	15.0以下		
	強熱減量 %	4.0以下		
	比表面積（BET法） cm^2/g	80,000以上	40,000以上	10,000以上
	活性度指数 %	材齢7日	100以上	95以上
材齢28日		105以上	100以上	95以上

きな違いはなかった。

3.3 硬化コンクリートの試験結果

図-1に各試験材齢におけるVGP置換率と圧縮強度の関係を示す。また、図-2に各調合のNに対する圧縮強度比を示す。VGP2およびVGP3ともに、材齢7日では置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向となった。材齢28日以降では、VGP2の置換率30%まで、VGP3の置換率10%までの範囲において、置換率と圧縮強度の関係の傾きが緩やかとなった。VGP2の置換率10%では、材齢7日を除く全材齢でNの強度を上回った。VGP2の置換率20%および30%では、材齢28日まではNと比較し圧縮強度が低下するが、材齢56日以降はNと同等の圧縮強度となった。VGP2の置換率50%および70%では、材齢91日においてもNに対する圧縮強度比はそれぞれ

表-3 使用材料

材料	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
	MPC	中庸熟ポルトランドセメント、密度 $3.21\text{g}/\text{cm}^3$
混和材	VGP1	鹿児島県産VGP I種相当
	VGP2	鹿児島県産VGP II種相当
	VGP3	鹿児島県産VGP III種相当
	SF	シリカフェーム、密度 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S1	万田野産山砂、表乾密度 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$
	S2	桜川産硬質砂岩砕砂、表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	G	桜川産硬質砂岩砕石、表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$
混和剤	SP1	高性能AE減水剤 標準型I種
	SP2	高性能AE減水剤 標準型I種 高強度用

表-5 測定項目（①）

測定項目		備考	
シリーズ①	フレッシュ	スランブ	JIS A 1101
		空気量	JIS A 1128
		コンクリート温度	JIS A 1156
	硬化	圧縮強度	JIS A 1108
		静弾性係数	JIS A 1149
			標準養生

表-4 コンクリートの調合（①）

調合	混合率(%)			W/B (%)	かさ容積 (m^3/m^3)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)						
	OPC	VGP2	VGP3				W	OPC	VGP2	VGP3	S1	S2	G
N	100	-	-	50	0.56	50.0	170	340	-	-	523	348	911
N+VGP2-10	90	10	-			50.0	170	306	34	-	518	346	911
N+VGP2-20	80	20	-			49.0	170	272	68	-	515	341	911
N+VGP2-30	70	30	-			49.0	170	238	102	-	508	338	911
N+VGP2-50	50	50	-			48.0	170	170	170	-	497	330	911
N+VGP2-70	30	70	-			48.0	170	102	238	-	487	325	911
N+VGP3-10	90	-	10			50.0	170	306	-	34	518	346	911
N+VGP3-20	80	-	20			49.0	170	272	-	68	515	341	911
N+VGP3-30	70	-	30			49.0	170	238	-	102	508	338	911
N+VGP3-50	50	-	50			48.0	170	170	-	170	497	330	911
N+VGP3-70	30	-	70			48.0	170	102	-	238	487	325	911

0.8程度と0.6程度にとどまった。VGP2に比べ比表面積の小さいVGP3では、置換率10%では材齢56日以降にNと同等の圧縮強度が確認されたものの、全体的にVGP2の同置換率の圧縮強度を下回る結果となった。また、いずれの調合も既往の研究⁵⁾と同様、材齢が進むほど圧縮強度比が大きくなる傾向を示しており、強度に寄与するだけのポズラン反応が生じていたと考えられる。図-3に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は、JASS5等でも示されている評価式⁶⁾に概ね一致し、計算値よりもわずかに高い値で推移しているが、概ねNと同程度の値を示しており、VGPによる影響は確認されなかった。

4. 高強度領域における基礎的性状 (シリーズ②)

4.1 実験概要

高強度領域のコンクリートを対象に、市販のシリカフェュームプレミックスセメントを参考に、中庸熟ポルトランドセメント (以下、MPC) の10%をVGPに置換し、フレッシュ性状、強度性状等を確認した。なおコンクリートの調合を決めるための予備実験として、モルタルによるフレッシュ性状、強度性状の確認を行った後、コンク

表-6 コンクリートのフレッシュ試験結果 (①)

調合	SP1 (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(℃)
N	0.70	19.5	3.9	21
N+VGP2-10	0.65	20.0	3.7	21
N+VGP2-20	0.65	20.5	4.8	21
N+VGP2-30	0.65	19.0	4.3	21
N+VGP2-50	0.85	19.5	4.8	21
N+VGP2-70	1.15	18.5	3.1	21
N+VGP3-10	0.65	20.5	4.4	21
N+VGP3-20	0.65	20.0	4.6	21
N+VGP3-30	0.65	19.5	5.4	21
N+VGP3-50	0.85	20.0	4.6	21
N+VGP3-70	1.20	20.5	3.5	20

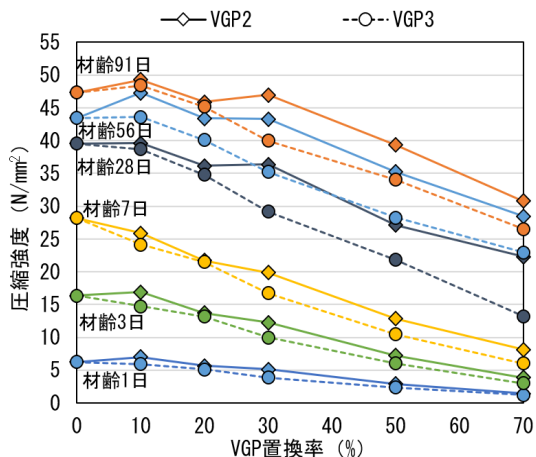


図-1 VGP置換率と圧縮強度の関係 (①)

リートによる実験を行った。表-3にコンクリートの使用材料を併せて示す。また、表-7にモルタルおよびコンクリートの調合を、表-8に測定項目を示す。W/Bは20%で統一し、VGP1およびVGP2をセメントの10~30%置換した。コンクリートの品質目標値は、スランプフローを65±10cm、空気量を1.5±1.5%とした。シリーズ②では、モルタル供試体の圧縮強度試験として、標準養生供試体の他、VGPのポズラン反応の程度や温度依存性を確認するため、35℃温水養生供試体でも実施した。また、フレッシュコンクリートでは、スランプフローや空気量の他、O漏斗流下時間も測定した。

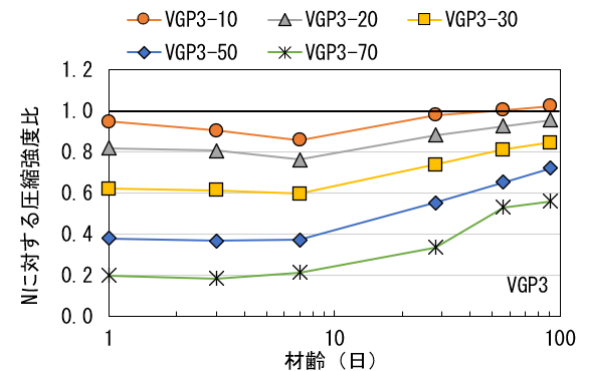
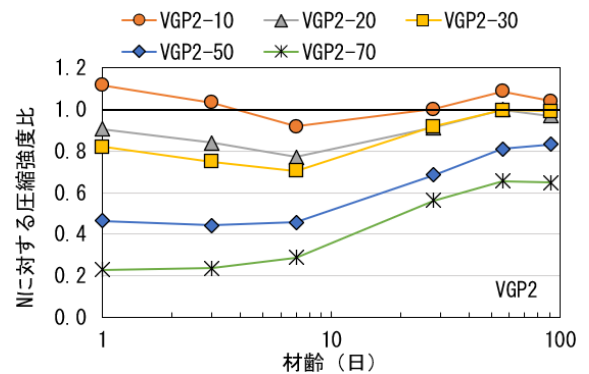


図-2 Nに対する圧縮強度比 (①)

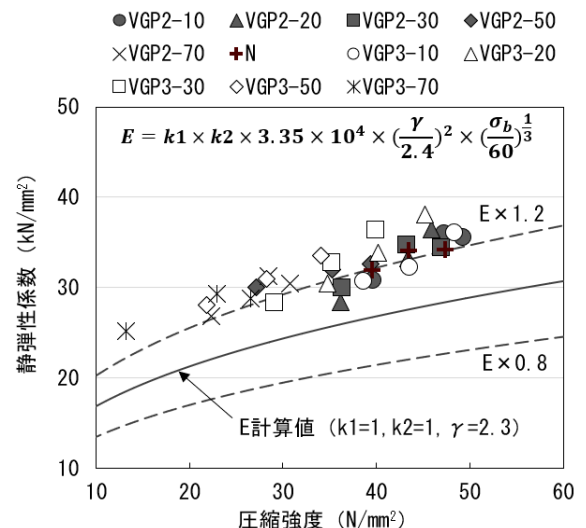


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係 (①)

4.2 モルタルの実験結果

(1) モルタルのフレッシュ性状

表-9 にモルタルのフレッシュ試験結果および SP2 の添加量、注水からモルタル練上りまでの時間（練混ぜ時間）を示す。M と比較し、VGP1 はその置換率に依らず、0 打フローは同程度であるが、20cm 到達時間やモルタルの練混ぜ時間は半分以下まで短縮した。また、VGP2 でも、VGP1 ほどではないものの、20cm 到達時間や練混ぜ

表-8 測定項目 (2)

測定項目			備考
モルタル	フレッシュ	フロー	JIS R 5201 0 打モルタルフロー
		空気量	JISA 1116
シリーズ② コンクリート	フレッシュ	スランブフロー	JISA 1150
		空気量	JISA 1128
		コンクリート温度	JISA 1156
		O 漏斗流下時間	JSCE-F512
	硬化	圧縮強度	JISA 1108 標準養生/35℃温水養生
		静弾性係数	JISA 1149 標準養生

表-9 モルタルのフレッシュ試験結果 (2)

調査	SP2 (B×%)	0 打フロー (cm)	フロー時間(s)		空気量 (%)	モルタル温度 (°C)	練混ぜ時間 (min)
			20cm 到達	停止			
M	1.40	19.5	7.9	78.9	1.4	28	8
M+SF_10	1.60	20.0	7.6	44.9	2.3	23	3
M+VGP1_10	1.50	20.5	3.7	101.0	2.3	24	3
M+VGP1_15	1.40	19.0	3.2	83.8	1.4	24	3
M+VGP1_20	1.30	19.5	3.7	55.0	2.4	23	3
M+VGP1_30	1.40	18.5	3.6	46.5	3.3	24	3
M+VGP2_10	1.40	20.5	6.8	98.8	2.7	27	6
M+VGP2_20	1.35	19.5	6.8	76.9	2.2	26	6

時間は短縮した。

(2) モルタルの圧縮強度試験結果

図-4 に標準養生および 35℃温水養生における混和材置換率とモルタルの圧縮強度の関係を示す。また、図-5 に標準養生に対する 35℃温水養生の圧縮強度比を示す。VGP1 は、若材齢時に置換率が多くなると、強度が低下する傾向にあるが、28 日以降はいずれの置換率でも M

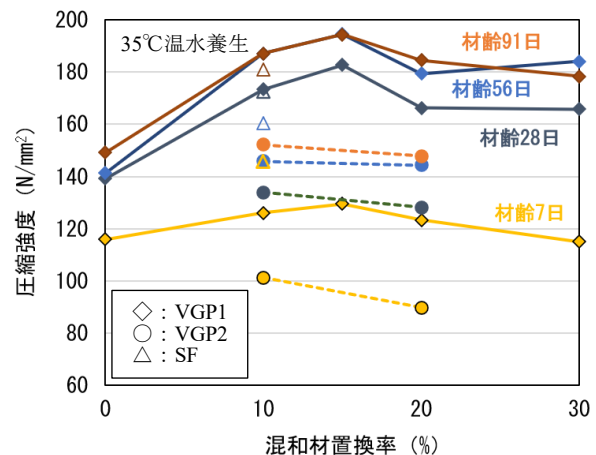
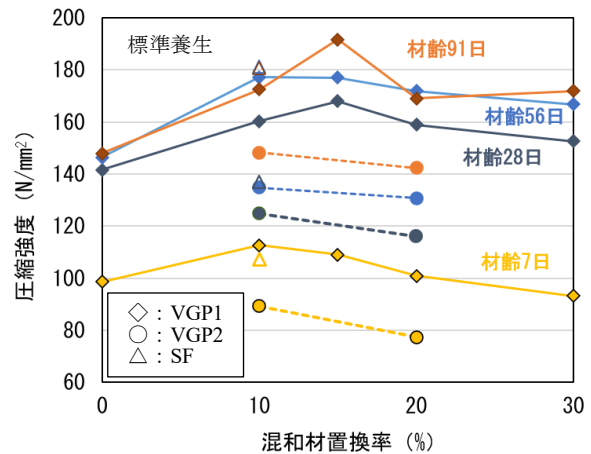


図-4 混和材置換率とモルタル圧縮強度の関係 (2)

表-7 コンクリートおよびモルタルの調査 (2)

分類	調査	混合率(%)				W/B (%)	かさ容積 (m³/m³)	s/a (%)	単位量(kg/m³)							
		MPC	VGP1	VGP2	SF				W	MPC	VGP1	VGP2	SF	S2	G	
モルタル	M	100	-	-	-	20	-	45.0	160	800	-	-	-	684	-	
	M+SF_10	90	-	-	10				44.0	160	720	-	-	80	655	-
	M+VGP1_10	90	10	-	-				44.0	160	720	80	-	-	663	-
	M+VGP1_15	85	15	-	-				44.0	160	680	120	-	-	650	-
	M+VGP1_20	80	20	-	-				43.0	160	640	160	-	-	638	-
	M+VGP1_30	70	30	-	-				42.0	160	560	240	-	-	618	-
	M+VGP2_10	90	-	10	-				44.0	160	720	-	80	-	663	-
	M+VGP2_20	80	-	20	-				43.0	160	640	-	160	-	639	-
コンクリート	M	100	-	-	-	20	0.52	44.9	160	800	-	-	-	684	845	
	M+SF-10	90	-	-	10				43.9	160	720	-	-	80	655	845
	M+VGP1-10	90	10	-	-				44.2	160	720	80	-	-	663	845
	M+VGP1-20	85	15	-	-				43.2	160	640	160	-	-	638	845
	M+VGP1-30	80	20	-	-				42.4	160	560	240	-	-	618	845
	M+VGP2-20	80	-	20	-				43.2	160	640	-	160	-	638	845

りも圧縮強度が大きくなり、その効果は SF と同程度であった。一方、VGP2 は、いずれの置換率でも M より強度が低下する傾向となった。標準養生に対する 35℃温水養生の圧縮強度比について、SF は、比較的早い材齢で圧縮強度比が大きいものに対し、VGP1 および VGP2 では、材齢 7 日でわずかに大きくなるものの、材齢 28 日以降も 1.0 から 1.1 程度の範囲で推移した。このように、VGP は SF と同様に養生温度を上げることでポズラン反応は活性化し、強度が増進するが、その反応性の高さや温度依存性は、SF 程は大きくないと考えられる。

4.3 コンクリートの試験結果

(1) コンクリートのフレッシュ試験結果

表-10 にコンクリートのフレッシュ試験結果および、注水からコンクリート練上りまでの時間（練混ぜ時間）を示す。空気量はすべて目標値を満足したものの、M および VGP2 では、練混ぜが可能となるまで SP を添加したため、結果的に過添加となったためか、スランプフローが 75.0cm を超え、やや材料分離の傾向が見られた。図-6 に混和材置換率とフレッシュ性状の関係を示す。VGP1 を 10%セメントに置換することで、練混ぜ時間、50cm 到達時間、O 漏斗流下時間のいずれも SF と同程度まで低減され、粘性低減、流動性の改善が確認された。また、VGP1 の置換率が大きくなるにつれ、50cm 到達時

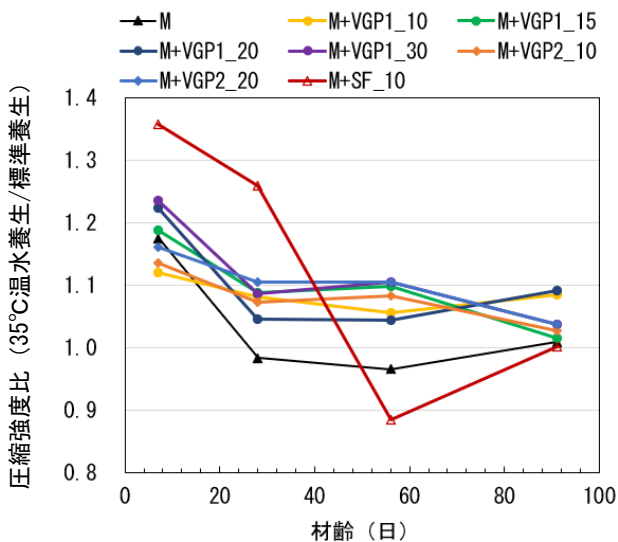


図-5 35℃温水養生/標準養生の圧縮強度比 (②)

間は僅かに短くなる傾向となったが、その他では置換率によらずほぼ一定であった。VGP2 についても、50cm 到達時間および O 漏斗流下時間は、VGP1 と同程度まで低減したが、練混ぜ時間は M と同程度となった。

(2) コンクリートの圧縮強度試験結果

図-7 に各試験材齢における圧縮強度と混和材置換率の関係を示す。VGP1 は、材齢 7 日では置換率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が見られたが、材齢 28 日にはいずれの置換率でも M と同等の圧縮強度となり、材齢 56 日以降は M よりも圧縮強度が大きくなる傾向となった。VGP2 では、材齢 28 日までは同置換率の VGP1 よりわずかに強度が低いが、材齢 56 日以降は VGP1 と同等の強度となった。図-8 に M+SF-10 に対する圧縮強度比を示す。VGP を使用した調合では、いずれも材齢の初期では圧縮強度比が低くなるものの、28 日以降は圧縮強度比が大きくなる傾向を示し、材齢 56 日以降は M+SF-10 と同等以上の圧縮強度比となった。図-9 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は、JASS5 等でも示されている評価式⁹⁾に概ね一致しているものの、シ

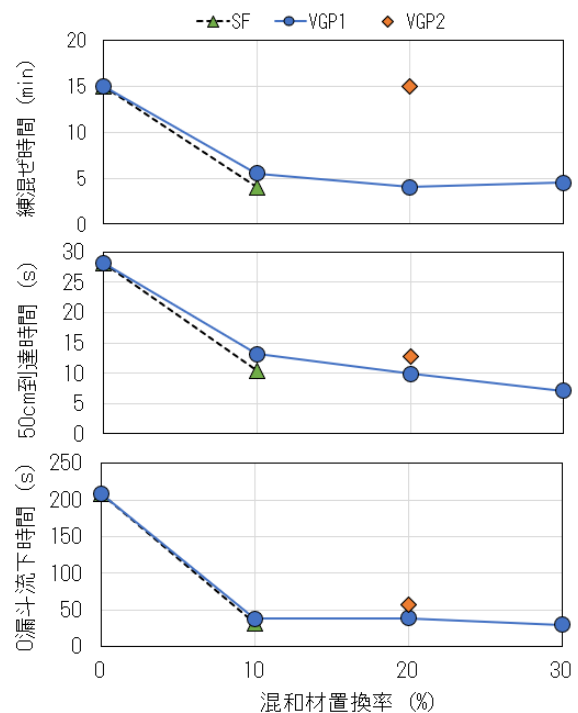


図-6 混和材置換率とフレッシュ性状の関係 (②)

表-10 コンクリートのフレッシュ試験結果 (②)

調合	SP2 (B×%)	スランプフロー (cm)	フロー時間(s)		空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	O 漏斗流下時間 (S)	練混ぜ時間 (min)
			50cm 到達	停止				
M	1.35	76.0	28.2	180.0	1.1	23	208.7	15
M+SF-10	1.55	63.0	10.4	67.6	0.8	23	31.8	4
M+VGP1-10	1.25	67.5	13.2	117.4	1.4	22	37.5	6
M+VGP1-20	1.20	60.0	9.9	62.9	1.3	22	38.8	4
M+VGP1-30	1.40	64.0	7.1	63.7	1.2	23	29.4	5
M+VGP2-20	1.35	75.5	12.8	180.0	0.8	23	56.2	15

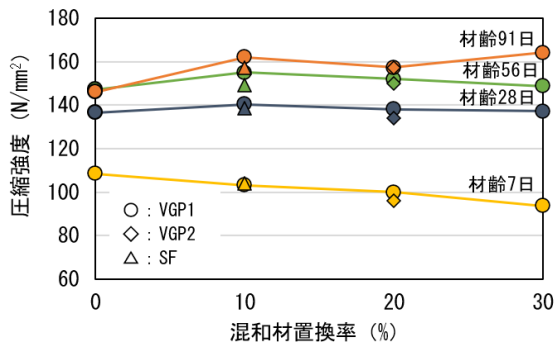


図-7 混和材置換率と圧縮強度の関係 (②)

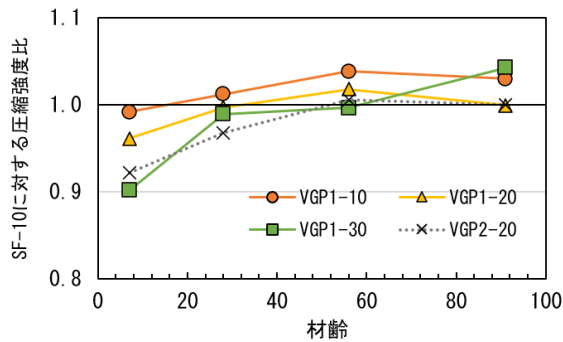


図-8 M+SF-10 に対する圧縮強度比 (②)

リーズ①と違い、計算値よりもわずかに小さい値で推移した。高強度領域では、モルタルによる影響も大きくなり、混和材による修正係数が必要になると考えられる。

5. まとめ

火山ガラス微粉末を使用した普通強度および高強度領域のコンクリートについて、2 シリーズの室内実験を実施した。実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 普通強度領域のコンクリートについて、火山ガラス微粉末Ⅱ種、Ⅲ種の置換率が30%を超えると、一般的なコンクリートと比較して、同一スランプを得るのに必要となる化学混和剤量が増える傾向となる。
- 2) 普通強度領域のコンクリートについて、火山ガラス微粉末Ⅱ種では置換率が30%程度、Ⅲ種では置換率10%程度までの範囲であれば、一般的なコンクリートと同程度の強度発現性を得られる。
- 3) 高強度領域のコンクリートについて、火山ガラス微粉末Ⅰ種の置換率が10~30%の範囲において、シリカフェームと同様、練混ぜ時間の短縮、粘性低下や流動性改善効果が得られる。
- 4) 高強度領域のコンクリートについて、火山ガラス微粉末Ⅰ種の置換率が10~30%の範囲において、若材齢時の強度は低下するものの、材齢が進むごとに強度が増進し、材齢56日以降はシリカフェームを10%置換した調査と同等以上の圧縮強度となる。
- 5) 火山ガラス微粉末は、本実験の範囲において、養生

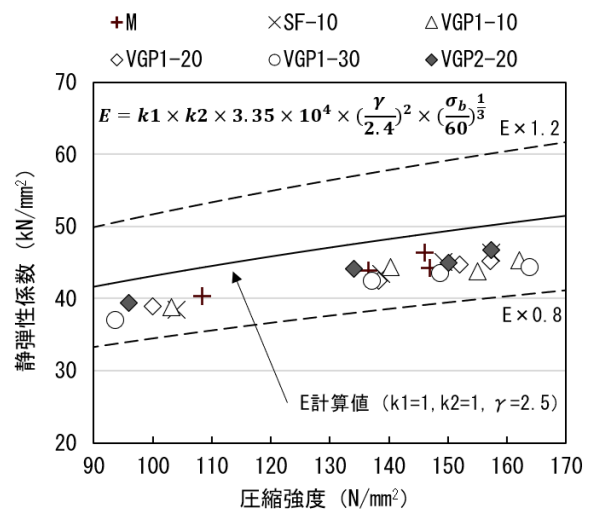


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (②)

温度を上げることでポゾラン反応が活性化し、コンクリートの圧縮強度が増進する。

本実験により、コンクリートのフレッシュ性状や強度性状に対して、火山ガラス微粉末がセメント代替品、シリカフェームの代替品として十分な性能を有していることを確認した。今後は耐久性能や構造体強度補値の確認等を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 右田周平, 久須美真悟, 木村仁治, 長井智哉: 異種セメントを混合して製造した高炉A種相当コンクリートの性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.856-861, 2022
- 2) 久須美真悟, 梅本宗宏, 右田周平, 木村仁治, 中村雄太, 長井智哉: 高炉セメントを使用した環境配慮型コンクリートの性状に関する実験的研究 (その6 高炉セメントC種相当コンクリートについての室内実験ならびに実機実験の結果), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.585-586, 2022
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2022
- 4) 友寄篤, 野口貴文, 袖山研一, 東和朗: 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, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, No.1, pp.465-470, 2019
- 5) 楠本宏治, 野口貴文, 友寄篤, 袖山研一: 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
- 6) 建設省: 建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」報告書, 1999