

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

Experimental study on the fundamental properties of concrete using volcanic glass powder

瀬能 一馬*

Kazuma Seno

木村 仁治*

Yoshiharu Kimura

長井 智哉**

Tomoya Nagai

中村 雄太*

Yuta Nakamura

ボンマハーサイ パラミ*

Phommahaxay Palamy

要 約

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ボゾランであり、それを精製・粉砕したものを火山ガラス微粉末と呼ぶ。火山ガラス微粉末をセメントと置換することで、コンクリートの強度および耐久性が向上することが報告されている。2022年度より、火山ガラス微粉末を使用した普通強度～高強度領域におけるコンクリートについて、フレッシュ性状や硬化性状等を室内実験により確認してきた。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。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. 実験対象および VGP の特徴

§ 3. 普通強度領域における基礎的性状（シリーズ①）

§ 4. 高強度領域における基礎的性状（シリーズ②）

§ 5. まとめ

§ 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。筆者らは、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 種相当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。

* 技術研究所 建築技術グループ

** 本社 建築技術部 技術課

そこで、脱炭素化社会の実現に向けて期待される新たなコンクリート用混和材として、火山ガラス微粉末（以下、VGP と呼ぶ）に着目した。VGP は、火山堆積物を由来とする天然ボゾランである火山ガラスを、精製・粉砕したものである。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、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。

VGP は、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ューム（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 VGP 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。

表一1 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%）	—	—	○	◎	◎

§ 2. 実験対象および VGP の特徴

VGP は、JISA 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、VGP 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、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。なお、本実験で使用するⅠ、Ⅱ、Ⅲ種相当の VGP をそれぞれ VGP1、VGP2、VGP3 と表す。

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は共に 99% であり、わずかに JIS 規格値(100%以上)を下回ったが、今回は本試料を採用した。

§ 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、普通ポルトランドセメント(以下、N と呼ぶ)の一部を VGP に置換した際のフレッシュ性状、硬化性状を確認した。表―3 に使用材料を示す。これらの使用材料は、シリーズ①、②で共通である。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。また、表―4 にコンクリートの調合(シリーズ①)を、表―5 に試験項目(シリーズ①)を示す。シリーズ①では、水結合材比(W/B)を 50% で統一し、VGP2 および VGP3 を、混合率 10~70% の範囲で N と置換した。各 VGP 調合名末尾の数 911 字は、VGP の混合率を表している。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 日と 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 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。フ

レッシュ試験は、いずれも練上がり直後に実施する計画としたが、N+VGP2-70 および N+VGP3-70 では、SP1 の使用量が多くなり、粘性が強かったため、十分に SP1 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。

表―2 VGP の品質試験結果

項目	試験値			JIS 規格値		
	VGP1	VGP2	VGP3	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種
二酸化けい素 (%)	73.2	74.0	74.2	70.0 以上		
酸化アルミニウム (%)	13.4	13.2	13.1	15.0 以下		
強熱減量 (%)	2.8	2.4	2.7	4.0 以下		
比表面積 (BET 法) (cm ² /g)	96,400	50,700	38,200	80,000 以上	40,000 以上	10,000 以上
活性度指数 (%)	材齢 7 日	99	95	94	100 以上	95 以上
	材齢 28 日	107	99	98	105 以上	100 以上

表―3 使用材料

材料	記号	産地・銘柄	密度 (g/cm ³)
水	W	上水道水	1.00
セメント	N	普通ポルトランドセメント	3.16
	M	中庸熟ポルトランドセメント	3.21
混和材	VGP1	火山ガラス微粉末 Ⅰ種相当 (鹿児島県産)	2.40
	VGP2	火山ガラス微粉末 Ⅱ種相当 (鹿児島県産)	2.40
	VGP3	火山ガラス微粉末 Ⅲ種相当 (鹿児島県産)	2.40
	SF	シリカフェューム (ノルウェー産) SiO ₂ 含有量: 95.3%	2.20
細骨材	S1	山砂 (万田野産)	2.63
	S2	硬質砂岩砕砂 (桜川産)	2.62
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (桜川産)	2.64
混和剤	SP1	高性能 AE 減水剤 標準型Ⅰ種 (ポリカルボン酸系)	—
	SP2	高性能 AE 減水剤 標準型Ⅰ種 高強度用 (ポリカルボン酸系)	—

表―5 試験項目(シリーズ①)

シリーズ①	試験内容		試験方法
	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 静弾性係数	JIS A 1108 (φ 100×200mm) JIS A 1149 標準養生 (材齢 1,3,7,28,56,91 日)

表―4 コンクリートの調合(シリーズ①)

調合	結合材混合率（％）			W/B（％）	かさ 容積 (m ³ /m ³)	s/a (％)	単位量（kg/m ³ ）						
	N	VGP2	VGP3				W	B [*]			S1	S2	G
								N	VGP2	VGP3			
N-100	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

※ B=N+VGP2 or VGP3

スランプの目標値 ($18 \pm 2.5\text{cm}$) および空気量の目標値 ($4.5 \pm 1.5\%$) はいずれも満足した。SP 使用量は、VGP 混合率が 30% までは N-100 と同程度だったが、それを超えると、混合率の増加に伴い、増える傾向となった。N+VGP2 と N+VGP3 では、SP 使用量に大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 混合率と圧縮強度の関係を示す。N+VGP2 および N+VGP3 とともに、材齢 7 日では混合率の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向となった。材齢 28 日以降では、N+VGP2 の混合率 30% まで、N+VGP3 の混合率 10% までの範囲において、混合率と圧縮強度の関係の傾きが緩やかとなった。しかし、それ以外の範囲では、N+VGP2 および N+VGP3 とともに、VGP 混合率が大きくなるにつれ、圧縮強度が低下した。また、図-2 に各調合の N-100 に対する圧縮強度比を示す。N+VGP2-10 は、材齢 7 日を除く全材齢で N-100 の強度を上回った。N+VGP2-20 および N+VGP2-30 では、材齢 28 日までは N-100 と比較し圧縮強度が低下するが、材齢 56 日以降は N-100 と同等の圧縮強度となった。一方、材齢 91 日において N-100 に対する圧縮強度比は、N+VGP2-50 では 0.8 程度であり、N+VGP2-70 では 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、N+VGP3-10 では材齢 56 日以降に N-100 と同等の圧縮強度が確認されたものの、全体的に N+VGP2-10 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っていく傾向を示しており、特に材齢 7 日以降で強度が大きくなっていることから、ポズラン反応が生じていたと考えられる。以上より、VGP は長期的な強度発現性に優れている可能性があるものの、材齢 91 日までは活性度の低下が影響し、VGP 混合率の増加に伴い強度が低下する傾向があると考えられる。

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ①) 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、計算値よりもわずかに高い値で推移しているが、概ね N-100 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として、市販のシリカフェウムプレミックスセメントを参考に、中庸熱ポルトランドセメント (以下、M) の 10%~30% を VGP に置換し、フレッシュ性状、硬化性状等を確認した。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、モルタルによる実験も行った。表-7 に、モルタルおよびコンクリートの調合 (シリーズ②) を示す。W/B は 20% で統一した。コンクリートの品質目標値は、スランプ

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果 (シリーズ①)

記号	SP1	AE	スランプ	空気量	コンクリート温度
	B ^{*1} ×%	A ^{*2}	cm	%	℃
N-100	0.70	1.5	19.5	3.9	21
N+VGP2-10	0.65	2.0	20.0	3.7	21
N+VGP2-20	0.65	2.5	20.5	4.8	21
N+VGP2-30	0.65	2.5	19.0	4.3	21
N+VGP2-50	0.85	3.0	19.5	4.8	21
N+VGP2-70	1.15	3.5	18.5	3.1	21
N+VGP3-10	0.65	2.5	20.5	4.4	21
N+VGP3-20	0.65	3.0	20.0	4.6	21
N+VGP3-30	0.65	3.5	19.5	5.4	21
N+VGP3-50	0.85	4.5	20.0	4.6	21
N+VGP3-70	1.20	6.0	20.5	3.5	20

*1 B=N+VGP2 or VGP3 *2 1A=B×0.001%

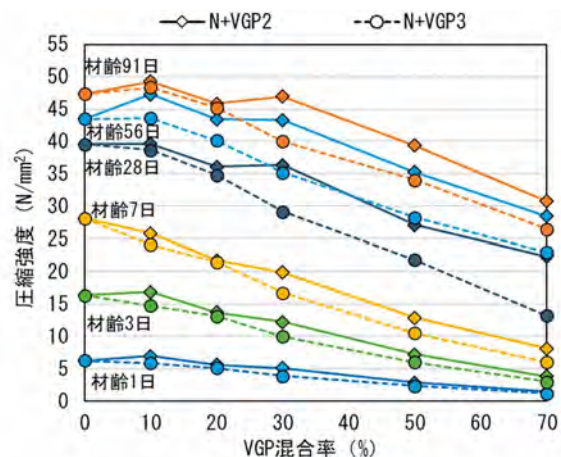


図-1 VGP 混合率と圧縮強度の関係 (シリーズ①)

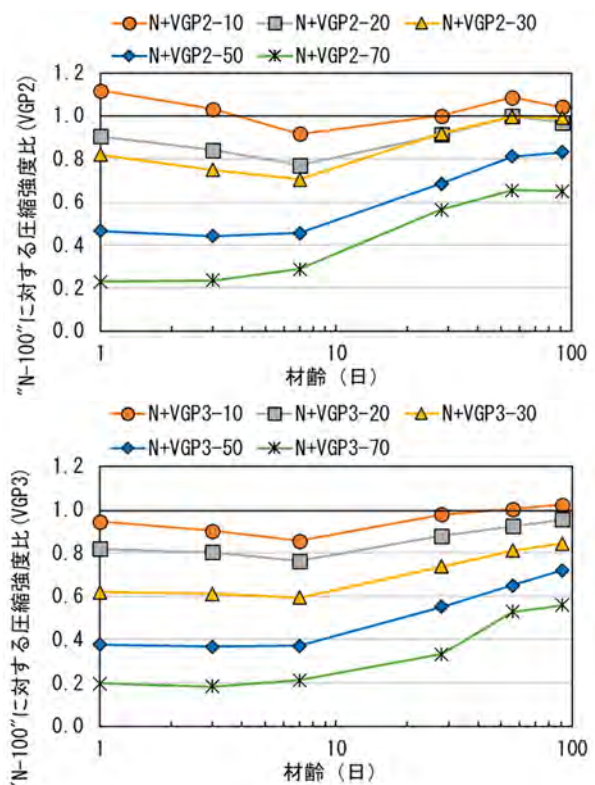


図-2 N-100 に対する圧縮強度比 (シリーズ①)

ローを 65±10cm, 空気量を 1.5±1.5% とした. 表―8 に試験項目 (シリーズ②) を示す. 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.

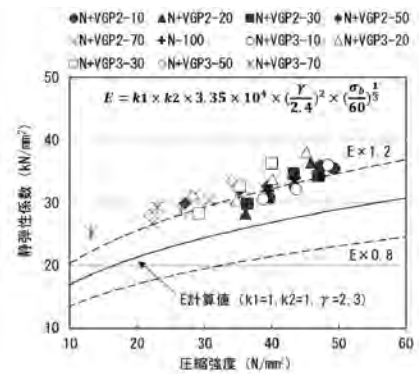
4-2 実験結果

(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 (シリーズ②) を示す. M-100 と比較し, M+VGP1 はその混合率に依らず, 0 打フローは同程度であった. 一方, 20cm 到達時間は, 7.9s である M-100 に対し, M+VGP1 は 3.2~3.7s であり, 半分以下まで短くなった. また, モルタルの練混ぜ時間についても, 8min である M-100 に対し, M+VGP1 は 3min であり, 半分以下まで短くなった. M+VGP2 では, M+VGP1 ほどではないものの, 20cm 到達時間や練混ぜ時間は短くなった. これは, VGP は比表面積が大きく, マイクロファイラー効果により流動性が向上したことが影響したと考えられる.

(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 SF 及び VGP 混合率とモルタルの圧縮強度の関係を示す. M+VGP1 の材齢 7 日においては, 標準養生, 35℃ 温水養生ともに VGP 混合率が多くなると, 強度が低下する傾向にあるが, 材齢 28 日以降はいずれの混合率でも M-100 (混合率 0%) よりも圧縮強度が大きくなった. M+VGP1 の圧縮強度は, 標準養生の場合, 材齢 56, 91 日において M+SF よりも小さいが, 35℃ 温水養生の場合, 材齢 7 日を除いて M+SF よりも大きくなった. これは, VGP は養生温度を上げることでポズラン反応が活性化するためであると考えられる. 一方, M+VGP2 は, 標準養生, 35℃



図―3 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ①)

表―8 試験項目 (シリーズ②)

試験内容			試験方法
モルタル	フレッシュ	フロー	JIS R 5201 0 打モルタルフロー、 20cm 到達時間、停止時間
		単位容積質量、空気量	JIS A 1116
シリーズ② コンクリート	硬化	圧縮強度	JIS A 1108 (φ 50×100mm) 標準養生 (20℃) 温水養生 (35℃)
		スランプフロー	JIS R 1150 スランプフロー、 50cm 到達時間、停止時間
	フレッシュ	空気量	JIS A 1128
		コンクリート温度	JIS A 1156
		O 漏斗流下時間	JSCE-F512-199
	硬化	圧縮強度 静弾性係数	JIS A 1108 (φ 100×200mm) JIS A 1149 標準養生 (材齢 7,28,56,91 日)

表―9 モルタルのフレッシュ試験結果 (シリーズ②)

記号	SP2	0 打フロー	平均	フロー時間		空気量	モルタル温度	練混ぜ時間
				20cm 到達	停止			
	B×%	cm	cm	s	s	%	℃	min
M-100	1.40	29.2	29.1	29.0	7.9	78.9	1.4	8
M+SF-10	1.60	23.6	23.5	23.5	7.6	44.9	2.3	3
M+VGP1-10	1.50	33.6	32.5	33.0	3.7	101.0	2.3	3
M+VGP1-15	1.40	31.7	31.3	31.5	3.2	83.8	1.4	3
M+VGP1-20	1.30	26.8	26.5	26.5	3.7	55.0	2.4	3
M+VGP1-30	1.40	27.0	27.0	27.0	3.6	46.5	3.3	3
M+VGP2-10	1.40	31.2	31.0	31.0	6.8	98.8	2.7	6
M+VGP2-20	1.35	28.7	28.5	28.5	6.8	76.9	2.2	6

表―7 モルタルおよびコンクリートの調合 (シリーズ②)

分類	調合	結合材混合率（％）				W/B [*] （％）	かさ 容積 （m ³ /m ³ ）	s/a （％）	単位量（kg / m ³ ）						
		M	VGP1	VGP2	SF				W	B				S2	G
										M	VGP1	VGP2	SF		
モルタル	M-100	100	-	-		20	-	-	160	800	-	-	-	684	-
	M+SF-10	90	-	-	10			-	160	720	-	-	80	655	-
	M+VGP1-10	90	10	-	-			-	160	720	80	-	-	663	-
	M+VGP1-15	85	15	-	-			-	160	680	120	-	-	650	-
	M+VGP1-20	80	20	-	-			-	160	640	160	-	-	638	-
	M+VGP1-30	70	30	-	-			-	160	560	240	-	-	618	-
	M+VGP2-10	90	-	10	-			-	160	720	-	80	-	663	-
	M+VGP2-15	85	-	15	-			-	160	680	-	120	-	650	-
	M+VGP2-20	80	-	20	-			-	160	640	-	160	-	638	-
コンクリート	M-100	100	-	-		20	0.52	44.9	160	800	-		-	684	845
	M+VGP1-10	90	-	-	10			43.9	160	720	-	-	80	655	845
	M+VGP1-15	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

※ B=M+VGP (SF)

温水養生ともにいずれの混合率でも M-100 (混合率 0%) より強度が低下する傾向となった。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。標準養生に対する 35℃温水養生の圧縮強度比について、M+SF-10 は、比較的早い材齢 (材齢 7, 28 日) で圧縮強度比が大きいのにに対し、M+VGP1 および M+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 (シリーズ②) を示す。空気量はすべて目標値 ($1.5 \pm 1.5\%$) を満足したものの、M-100 および M+VGP2-20 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 SF 及び VGP 混合率とフレッシュ性状の関係を示す。M+VGP1 の VGP10% 混合では、練混ぜ時間、50cm 到達時間、O 漏斗流下時間のいずれも M+SF の SF10% 混合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、M+VGP1 の VGP 混合率が大きくなるにつれ、50cm 到達時間はわずかに短くなる傾向となったが、練混ぜ時間、O 漏斗流下時間ともに混合率によらずほぼ一定であった。M+VGP2 についても、50cm 到達時間および O 漏斗流下

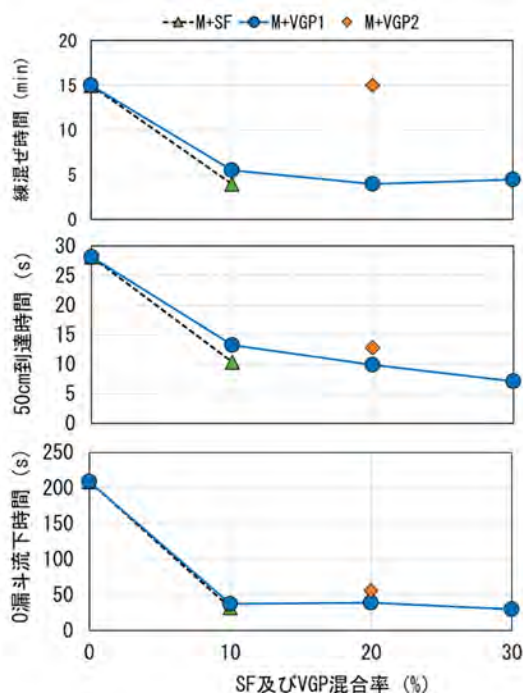


図-6 SF 及び VGP 置換率とフレッシュ性状の関係 (シリーズ②)

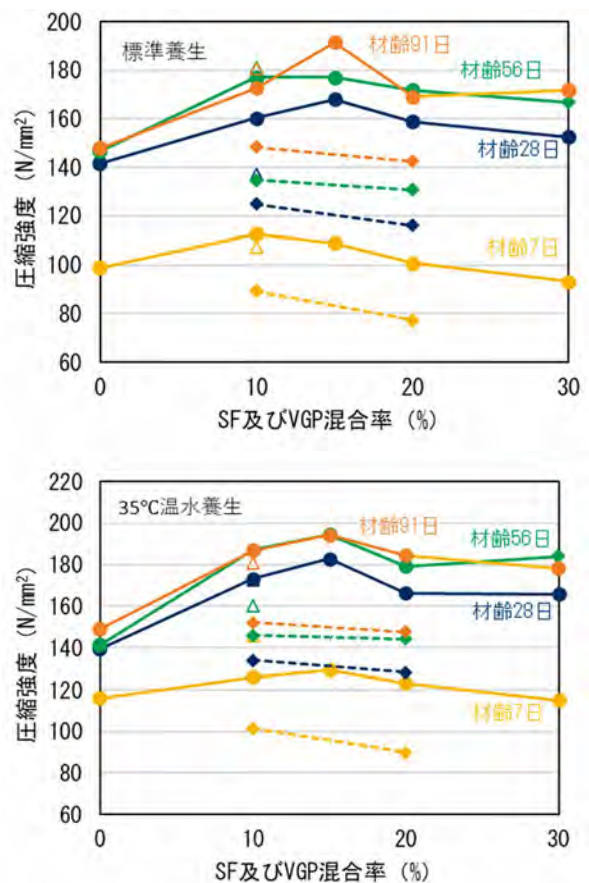


図-4 SF 及び VGP 混合率とモルタル圧縮強度の関係 (シリーズ②)

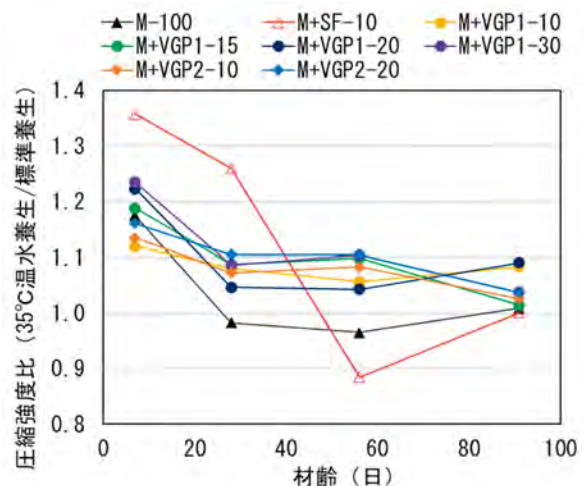


図-5 標準養生に対する 35℃温水養生の圧縮強度比 (シリーズ②)

表-10 コンクリートのフレッシュ試験結果 (シリーズ②)

記号	SP2 B×%	スランプ フロー cm	フロー時間		空気量 %	コン クリ ート 温 度 ℃	O 漏 斗 流 下 時 間 s	モル タル 練 り 時 間 min
			50cm 到達 s	停止 s				
M-100	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	5.5
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	4.5
M+VGP2-20	1.35	75.5	12.8	180.0	0.8	23	56.2	15

時間は、M+VGP1と同程度まで低減したが、練混ぜ時間はM-100（混合率0%）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SF及びVGP混合率と圧縮強度の関係を示す。M+VGP1は、材齢7日ではVGP混合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日にはいずれの混合率でもM-100と同等の圧縮強度となり、材齢56日以降はM-100よりも圧縮強度が大きくなる傾向となった。M+VGP2では、材齢28日までは同混合率のM+VGP1よりわずかに強度が低いですが、材齢56日以降はM+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7日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。これより、標準養生においては、VGPはSFよりもポズラン反応の活性化がしやすいと考えられる。図-9に圧縮強度と静弾性係数の関係（シリーズ②）を示す。高強度領域における静弾性係数は、JASS5等でも示されている評価式⁶⁾に概ね一致しているものの、普通領域と違い、計算値よりもわずかに小さい値で推移した。また、M-100と比較すると、概ね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。

§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。本実験により、コンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に対して、火山ガラス微粉末がセメントおよびシリカフュ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正值の確認等を行っていく予定である。

謝辞. 本報は、戸田建設との共同研究成果の一部である。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長井智哉, 木村仁治, 中村雄太, ポンマハーサイパラミ：環境配慮型コンクリート（高炉セメントA種相当コンクリート）の開発, 西松建設技報, VOL.45, 2022
- 2) 中村雄太, 木村仁治, 長井智哉, ポンマハーサイパラミ：環境配慮型コンクリート（高炉セメントC種相当コンクリート）の開発, 西松建設技報, VOL.46, 2023
- 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

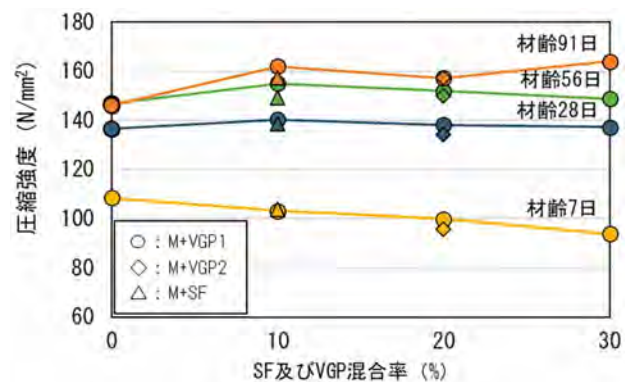


図-7 SF 及び VGP 混合率と圧縮強度の関係 (シリーズ②)

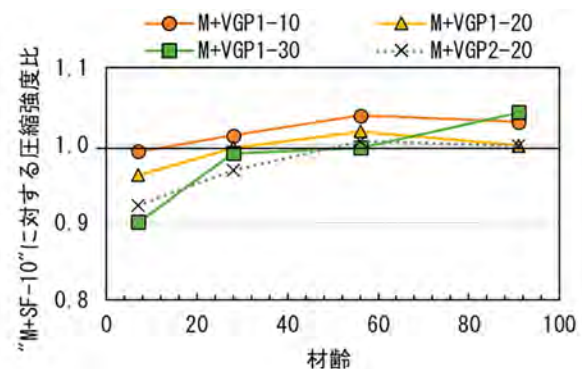


図-8 M+SF-10 に対する圧縮強度比 (シリーズ②)

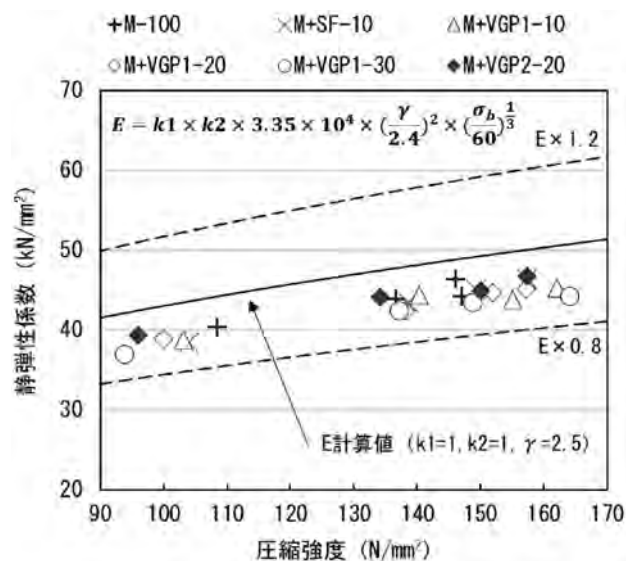


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ②)

- 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