報告　火山ガラス微粉末で高炉セメントB種の一部を置換したモルタルとコンクリートの養生条件と圧縮強度の関係

袖山　研一[*1]・友寄　篤[*2]・野口　貴文[*3]・佐々倉　賢一[*4]

要旨：入戸火砕流堆積物の串良シラスから得た火山ガラス質を粉砕･分級して3種類の火山ガラス微粉末VGPを製造し，高炉セメントB種（BB）の一部をVGPで内割置換したモルタルとコンクリートについて強度試験を行った。VGP20%置換した気中養生28日のBBモルタル試験結果に基づくB/W-F関係式より，配(調)合強度30N/mm^{2}の場合の単位BB削減量を算出し，BBを54～89kg/m^{3}削減できる事を示した。BBをVGP-III種で10%と20%内割置換した水結合材比55%のBBコンクリート試験の結果，BBとVGPで置換した供試体は，蒸気養生1日＋気中養生6日の養生条件で，ほぼ同等の圧縮強度を示した。

キーワード：火山ガラス，高炉セメント，混和材，ポゾラン反応，気中養生，蒸気養生，標準養生

1. はじめに

南九州に広範囲に分布しているシラスは，ポゾラン反応性を持つ混和材としての研究[1)]が重ねられてきた。筆者らは，火山灰を粉砕・分級した混和材である火山ガラス微粉末（VGP）を用いたコンクリートは圧縮強度の強度発現性に優れ，流動性も実用可能な範囲内であることを示した[2)]。そして，2020年3月にJIS A6209「コンクリート用火山ガラス微粉末」が制定され，「火山噴出物を原料とし，選別，分級，粉砕などによって製造されたアルミノケイ酸塩ガラス（火山ガラス）を主成分とする微粉末」と定義された。地下のマグマが噴出し堆積する過程で急冷された火山ガラスは全国に堆積しているが，これまで南九州の異なる採掘場所の入戸火砕流堆積物を原料とした火山ガラス微粉末について各種実験結果が報告され[3) 4) 5) 6)]，実用化された場合の環境負荷低減効果についても試算されている[7)]。2024年3月のJIS A5308「レディーミクストコンクリート」の改正では，火山ガラス微粉末が混和材料として規定された。

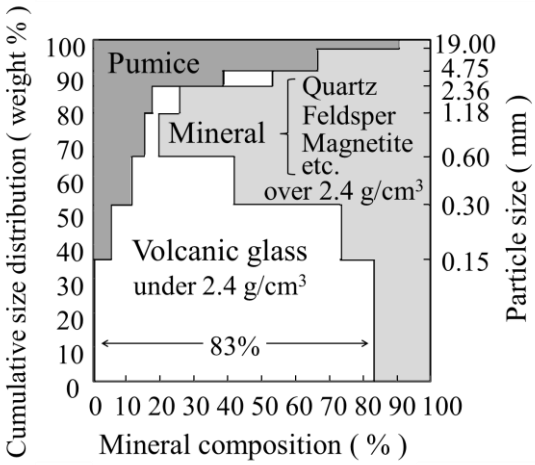
これまでの火山ガラス微粉末を混和材として用いたモルタルやコンクリートの物性は，普通ポルトランドセメントの一部を置換した結果のみで，高炉セメントの一部を置換したモルタルやコンクリートの標準養生と気中養生及び蒸気養生を比較したデータはなかった。

そこで本研究では，南九州産の入戸火砕流堆積物から製造した火山ガラス微粉末の粉体物性を明らかにし，海洋土木向けのほか低炭素化で重宝されている高炉セメントB種を用いて，その一部を火山ガラス微粉末で置換したモルタルとコンクリートを製造し，気中養生，蒸気養生及び標準養生による強度発現について検討を行った。

2. 実験概要

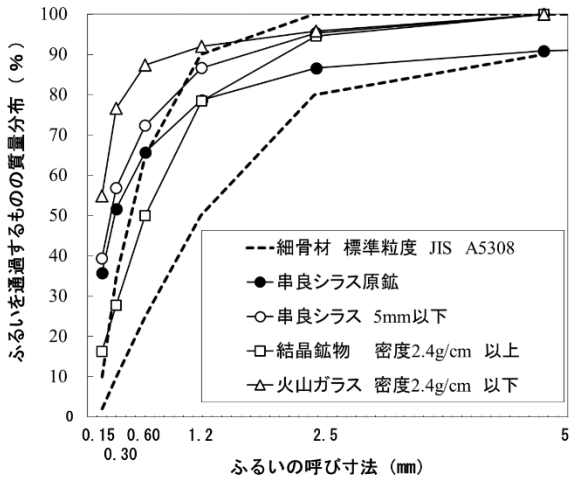
2.1 使用材料

本研究では，鹿児島県鹿屋市串良町産の串良シラスを原鉱とした。重液選鉱法[4)]による粒度別鉱物組成の結果を**図－1**に示す。ここで，重液を用いたシラスの鉱物選鉱については，密度2.4g/cm^{3}以上を結晶鉱物，それ以下を火山ガラスとして分離できることが明らかにされており[8)]，本研究ではさらにJIS A5002の軽量骨材の区分「M」に相当する絶乾密度1.5g/cm^{3}以下（4.75mm以下）の火山ガラスを軽石とした。ガラス含有率は原鉱全体で59.6%，0.15mm以下の粒分では83%である。0.15mm以上では，結晶質と火山ガラス質の軽石の粒度が重なっており，篩選別のみでは比重選別はできない[4)]。0.15mm以下の微粒分は，SiO_2含有率が高い火山ガラス質からなり，非晶質のアルミノケイ酸塩として混和材利用できる成分を多く含む。

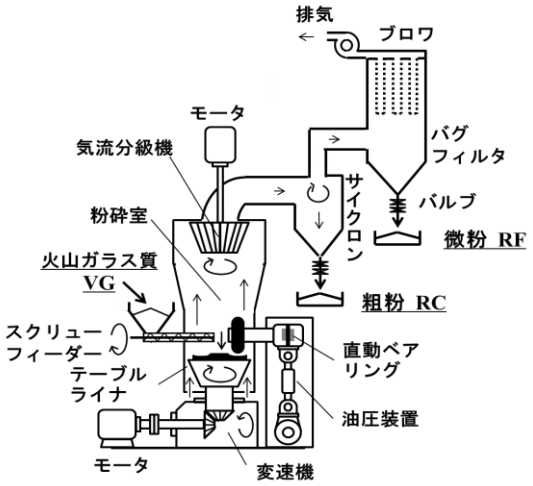


図－1　串良シラスの粒度別鉱物組成

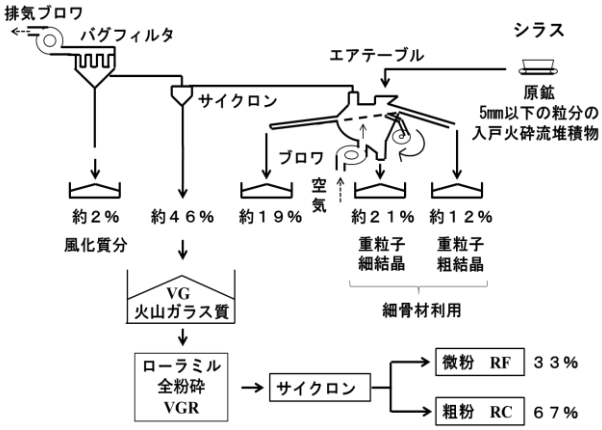
*1 鹿児島県工業技術センター　研究主幹　博士（工学）　(正会員)
*2 東京大学　大学院工学系研究科建築学専攻　助教　博士（工学）　(正会員)
*3 東京大学　大学院工学系研究科建築学専攻　教授　博士（工学）　(フェロー会員)
*4 （株）プリンシプル　専務取締役



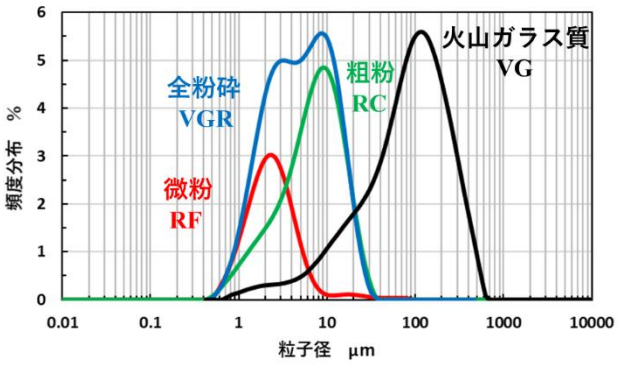
図－2　串良シラス原鉱，結晶，火山ガラスの粒度



図－4　ローラミルとサイクロンを用いた火山ガラス微粉末の製造装置



図－3　火山ガラス微粉末の製造方法



図－5　VG と RF，VGR，RC の粒度分布

図－2 に串良シラス原鉱と重液で鉱物選鉱した火山ガラスと結晶鉱物の粒度分布を示す。串良シラスは，0.15mm 以下の微粒分を 30%以上含むので，これまで JIS 細骨材に不適合とされてきたが，その結晶鉱物だけを選別すると JIS A5308 附属書 A の細骨材の粒度範囲にほとんど収まる [4]。これは，結晶鉱物を選別できれば，細骨材として利用できることを示唆している。

2.2 火山ガラス微粉末の製造方法

試験には，串良シラスの採掘業者から取り寄せた原鉱を振動フルイで選別し，5mm 以下のシラスを袖山らの方法 [5] と同様にエアテーブルによる選別後，全粉砕した微粉末(以下，VGR とする)と，VGR をサイクロン分級した微粉 RF と粗粉の RC の 3 種類の火山ガラス微粉末を用いた。製造方法の概要を**図－3** に示す。粉砕装置のローラミルにサイクロンを直結した装置を**図－4** に示す。ローラミルで全粉砕された VGR の粒分は，直結したサイクロンにより下部へ粗粉が RC として 67%分離・回収され，サイクロンで捕集できなかった微粉がバグフィルタに RF として 33%分離・回収される。ローラミルの全粉砕品である VGR は，**図－4** のサイクロンを取り外して配管を短絡させたローラミルのバグフィルタで回収する。

粉砕前の平均粒径 83.5μm の火山ガラス質 VG と火山ガラス微粉末 RF, VGR, RC の粒度分布を**図－5** に示す。粒度分布は，レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置を用いて測定した。エアテーブルでシラスから分級除去された風化質分は，平均粒径が 4.3μm で化学組成や熱分析などで得られる物性が風化の兆候を示しており，化学混和剤吸着量が多くモルタルフローを低下させることを確認している [9]。串良シラス由来の火山ガラス微粉末 RF, VGR，RC の化学組成と粉体物性を**表－1** に示す。比表面積は，試料を真空中 300℃で 3 時間乾燥した後，窒素ガス吸着装置により測定した。密度は JIS A6207 の全量フラスコを用いたコンクリート用シリカフュームの密度試験方法で測定し，粒度はレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により測定した。測定の前処理は装置付属の超音波（40W）を 1 分間照射し，溶媒は水とした。この串良シラス由来の VGP は，化学組成，比表面積は共に JIS 規格を満たしている。

表－1　串良シラス由来の火山ガラス微粉末の化学組成と粉体物性

VGP-種	VGP 名称	SiO_2 %	TiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na_2O %	K_2O %	P_2O_5 %	Ig. Loss %	密度 g/cm^3	平均粒径 μm	比表面積 m^2/g
VGP-Ⅰ種	RF	73.0	0.2	13.1	2.4	0.1	0.3	1.5	3.6	3.3	0.0	2.5	2.37	2.1	9.7
VGP-Ⅱ種	VGR	73.9	0.2	12.8	1.9	0.1	0.3	1.4	3.8	3.3	0.0	2.3	2.38	4.7	6.0
VGP-Ⅲ種	RC	74.3	0.2	12.6	1.8	0.1	0.3	1.4	3.8	3.4	0.0	2.3	2.40	6.7	3.2

表－2　高炉セメントB種の一部をVGPで置換したモルタル試験とコンクリート試験の条件

混和材		比表面積 BET法 m^2/g	BB 置換率	W/B	養生	評価
無し			BB-Plain	50%，60%，70% モルタル試験 供試体　Φ50×100mm	●気中養生7日 ●気中養生28日	圧縮強度 供試体 3本平均
JISA6209	VGP I 種相当	9.7	RF　20%			
JISA6209	VGP II 種相当	6.0	VGR　20%			
JISA6209	VGP III 種相当	3.2	RC　20%			
無し			BB-Plain	55% コンクリート試験 供試体　Φ100×200mm	●気中養生7日 ●蒸気養生1日 ●蒸気養生1日 ＋気中養生6日 ●標準養生28日	
JISA6209	VGP III 種相当	3.2	RC　10%			
JISA6209	VGP III 種相当	3.2	RC　20%			

2.3 モルタル試験とコンクリート試験

RF，VGR，RC はそれぞれ JIS A 6209 の火山ガラス微粉末 I 種，II 種，III 種に相当する。また RF，VGR，RC は以降 VGP-I 種，VGP-II 種，VGP-III 種と称する。串良シラス由来の**表－1** に示す 3 種類の火山ガラス微粉末の混和実験を行った。モルタルの練り混ぜにはハンドミキサー, コンクリートには強制二軸練りミキサーを用いた。試験練りは**表－2** に示すように VGP-I種, II種, III種で BB の内割 20%置換したモルタル試験と VGP-III種を BB の内割 10%，20%置換したコンクリート試験の 2 系統を行い，いずれもコンクリート二次製品工場の試験室で試験練りを行った。使用材料を**表－3** に示す。火山ガラス微粉末以外は，実出荷に用いている材料とした。

表－3　使用材料

材料	種類	密度 g/cm^3	記号
セメント	高炉セメントB種	3.04	BB
火山ガラス微粉末	表－1のとおり		
砕砂	鹿児島県日置市吹上町産	2.62	S
砕石2005	鹿児島県日置市吹上町産	2.64	G
高性能減水剤	ナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物	－	Ad

3. モルタル試験

3.1　配(調)合条件

モルタル試験は**表－4** に示すように水結合材比 50%，60%，70%にて BB の内割の置換率でⅠ種，Ⅱ種，Ⅲ種の 20%置換で，BB のみとの比較を行った。試験練りではモルタルのフロー値が 200mm程度になるように減水剤量を調整し，フロー値を測定後，φ50mm×100mm の供試体をそれぞれ 6 本作製した。供試体は試験室内に設置し，7 日間と 28 日間，気中養生した後に圧縮強度試験を行った。目標強度として気中養生 7 日で 20 N/mm^2 以上，気中養生 28 日で 30 N/mm^2 以上とした。

表－4　モルタルの配(調)合条件

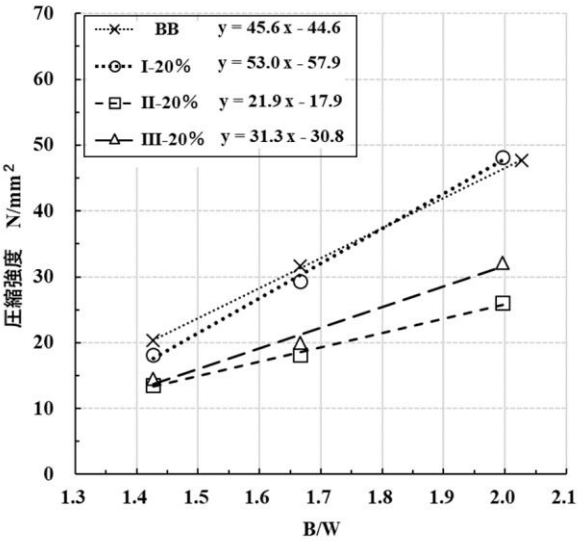
VGP種-BB置換率	W/B %	W kg/m^3	BB kg/m^3	VGP kg/m^3	S kg/m^3	Ad kg/m^3	フロー値 mm
BB	50	262	531	0	1424	4.8	231
	60	285	475	0	1424	4.3	232
	70	300	428	0	1425	3.0	212
Ⅰ-20%	50	266	425	106	1424	7.4	225
	60	285	380	95	1424	6.2	204
	70	300	342	86	1425	5.1	193
Ⅱ-20%	50	266	425	106	1424	5.8	240
	60	285	380	95	1424	3.8	196
	70	300	342	86	1425	3.9	196
Ⅲ-20%	50	266	425	106	1424	4.8	193
	60	285	380	95	1424	3.8	198
	70	300	342	86	1425	3.4	210

3.2　BB モルタルの試験結果と考察

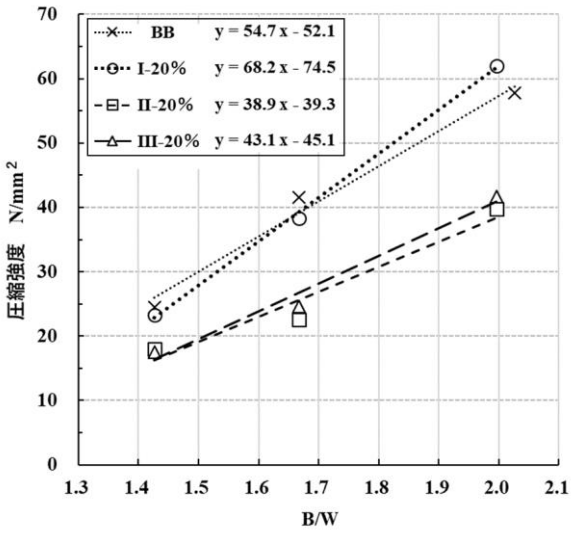
モルタルの配(調)合条件と圧縮強度の結果を**表－5** に示す。気中養生 7 日と気中養生 28 日の圧縮強度の試験結果をプロットし, これを近似直線として得られた B/W-F の関係を**図－6** と**図－7** に示す。各配(調)合における近似直線の傾きは，7 日から 28 日にかけていずれも増大することを確認した。同一 B/W においては，I-20%は，7 日では BB とほぼ同等であるが，28 日では B/W＝2 付近で BB を上回る傾向が見られた。II-20%及びIII-20%では，BB を下回っており，III種とII種は同等の傾向であった。気中養生 28 日において，B/W＝1.4～2.0 の実験した範囲

表－5　モルタルの配(調)合条件と圧縮強

VGP種-BB置換率	W/B %	B/W -	気中養生7日 N/mm²	気中養生28日 N/mm²
BB	50	2.03	47.7	57.8
	60	1.67	31.6	41.5
	70	1.43	20.3	24.5
Ⅰ-20%	50	2.00	48.2	62.0
	60	1.67	29.3	38.3
	70	1.43	18.2	23.3
Ⅱ-20%	50	2.00	26.0	39.7
	60	1.67	18.1	22.5
	70	1.43	13.6	18.0
Ⅲ-20%	50	2.00	32.1	41.7
	60	1.67	20.0	24.6
	70	1.43	14.5	17.5



図－6　気中養生 7 日の B/W-F 関係式



図－7　気中養生 28 日の B/W-F 関係式

表－6　30N/mm² を得るための配(調)合

VGP種－BB置換率	W/B %	S kg/m³	W kg/m³	B kg/m³	VGP kg /m³	BB kg/m³	BB削減量 kg/m³
BB	67	1424	292	439	0	439	0
Ⅰ-20%	65	1424	285	436	87	349	89
Ⅱ-20%	56	1424	270	480	96	384	54
Ⅲ-20%	57	1424	272	474	95	379	59

内で近似直線が交錯する実用的な強度の目安として 30N/mm² を設定し，B/W-F 関係式から算出した 30N/mm² を得るための配(調)合を**表－6** に示す。空気量 2%，細骨材 1424kg/m³ と固定した条件での単位 VGP 量，単位 BB 量と単位 BB 削減量を算出した。VGP で BB の 20%置換することで，BB 単独に比べて BB を 54～89kg/m³ 削減できる。W/B57%においてIII種で 20%置換することによって，BB 単独よりも BB を 59kg/m³ 削減できる。

4. コンクリート試験

4.1　配(調)合条件

モルタル試験で BB 削減量が最大値を示した VGP のI種は，シリカフューム代替用に使用すべきであり，かつI種の製造はコスト高になることから，コンクリート試験は**表－7** に示すように，コンクリートブロックを想定して水結合材比 55%にて VGP-III種相当を BB の内割の置換率で 10%，20%置換して，BB との比較を行った。粗骨材の最大寸法は 20mm で目標強度として蒸気養生 1 日後気中養生 6 日と標準養生 28 日で 21 N/mm² 以上とした。練り混ぜ条件を**図－8** に示す。試験練りで練り上げたコンクリートのフレッシュ性状を測定後，φ100mm×200mm の供試体をそれぞれ 12 本採取した。供試体の打ち込みは，2 層に分けて棒バイブレーターを挿入し締め固めた。本研究では，コンクリート二次製品を想定した気中養生と常圧での蒸気養生と基礎データとしての標準養生を行った。供試体は試験室内に設置して 7 日間，気中養生を行った後に圧縮強度試験を行った。蒸気養生における温度設定を**図－9** に示す。供試体採取後，3 時間以上の前置き時間を設け，15℃/ｈ以内で昇温し，最高温度 60℃±10℃で 4 時間保持し，その後 40℃/ｈ以内で徐冷する。打設から 18 時間後に脱型し強度試験を行った。また，出荷前最終検査を想定して，蒸気養生後に脱型した供試体を試験室内にて 6 日間設置して気中養生を行った後で圧縮強度試験を行った。さらに，標準養生 28 日を行った後で圧縮強度試験を行った。

4.2　BB コンクリートのフレッシュ試験結果

VGP 以外の**表－1** と同一材料を用いて BB コンクリートの二次製品が実出荷されている。モルタル試験の結果，III種の BB 内割置換において低 W/B 比で BB の削減効果

表－7　コンクリートの配(調)合条件

VGP種-BB置換率	W/B %	s/a %	セメント	混和材 VGP	混和材／B %	粗骨材の最大寸法 mm	塩化物量 kg/m³以下	蒸気養生1日＋気中養生6日目標強度 N/mm²	標準養生28日目標強度 N/mm²	スランプ cm	空気量 %
BB	55	43.7	BB	無し	0	20	0.3	21	21	8.0cm±2.5cm	2.0%±1.5%
Ⅲ-10%	55	43.7	BB	Ⅲ種	10	20	0.3	21	21	8.0cm±2.5cm	2.0%±1.5%
Ⅲ-20%	55	43.7	BB	Ⅲ種	20	20	0.3	21	21	8.0cm±2.5cm	2.0%±1.5%

表－8　BB コンクリートの配(調)合条件とスランプ，空気量，コンクリート温度，塩化物量

VGP種-BB置換率	W/B %	s/a -	W kg/m³	BB kg/m³	VGP kg/m³	S kg/m³	G kg/m³	Ad kg/m³	スランプ cm	CT °C	Air %	塩化物量 kg/m³
BB	55.0	43.7	175	318	0	806	1047	1.91	6.0	21	1.2	0.048
Ⅲ-10%	55.0	43.7	175	286	32	806	1047	2.23	6.0	18	1.3	0.037
Ⅲ-20%	55.0	43.7	175	254	64	806	1047	2.54	7.0	19	1.3	0.035

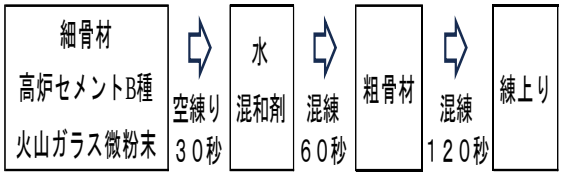
が期待できることから，実出荷に近い配(調)合である W/B55%，s/a43.7%，単位水量 175kg/m³ にて，III種で BB を内割で 10%，20%置換した BB コンクリートの試験練りを行った。コンクリートの配(調)合条件とフレッシュコンクリートのスランプ，空気量，コンクリート温度，塩化物量の結果を**表－8** に示す。塩化物量は電量滴定式塩分計を用いて測定した。フレッシュコンクリートの塩化物量は，BB が 0.048kg/m³ で，III-10%で 0.037 kg/m³，III-20%で 0.034 kg/m³ と VGP 置換率に相反して下がる傾向があり，JIS A5364 の PC 製品の塩化物規定量 0.3kg/m³ を大幅に下回る値を示した。

BB は，高性能減水剤 1.91kg/m³ でスランプ 6.0cm，空気量 1.2%であった。III種を BB 置換するほど硬くなる傾向があったので，高性能減水剤量を調整することで，スランプ 8±2.5cm 空気量 2±1.5%の範囲内に収まり，作業性は良好となった。

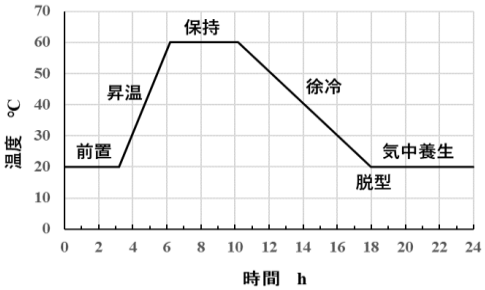
4.3　BB コンクリートの試験結果と考察

気中養生 7 日，蒸気養生 1 日，蒸気養生 1 日後に気中養生 6 日，標準養生 28 日の圧縮強度試験の結果を**図－10** に示す。BB とIII-10%，III-20%の強度は，いずれも気中養生 7 日と蒸気養生 1 日とは，ほぼ同等の強度発現を示した。出荷前最終検査を想定した蒸気 1 日＋気中 6 日では，BB が 28.3 N/mm²，III-10%が 28.8 N/mm²，III-20%が 27.5N/mm² とほぼ同等で目標強度の 21N/mm² を大きく上回る強度発現を示した。標準養生 28 日がそれぞれ最大の強度発現を示し，BB が 37.9 N/mm²，III-10%が 36.0 N/mm²，Ⅲ-20%が 34.2N/mm² と置換率と相反して低下したが，20%置換でも BB 単独の 90%以上の強度発現を示し，いずれも目標強度の 21N/mm² を大きく上回った。

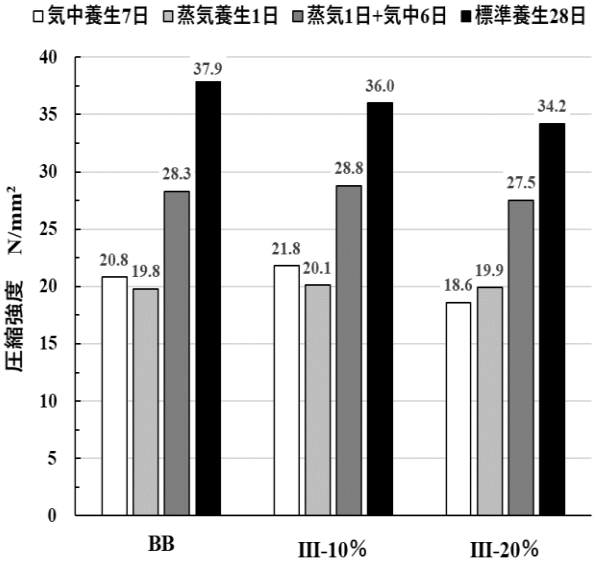
気中養生 28 日の強度は測定していないが，気中養生 7 日から気中養生 28 日への強度増加の知見として，モルタル試験結果の B/W- F 関係式から，W/B55%＝B/W1.82 における BB の増加率は 124%，III-20%は 127%である。



図－8　強制二軸練りミキサーを用いた練り混ぜ条件



図－9　常圧蒸気養生の設定



図－10　BB コンクリートの養生条件と圧縮強度

BB コンクリートの気中養生 28 日の強度は，気中養生 7 日の強度と増加率から，BB は 25.7N/mm^2 程度，III-20%は 23.7N/mm^2 程度と推定される。それらの値は，蒸気養生 1 日＋気中養生 6 日の強度を下回ることから，養生条件と圧縮強度の関係は，（気中養生 7 日）≒（蒸気養生 1 日）＜（気中養生 28 日）≦（蒸気養生 1 日＋気中養生 6 日）＜（標準養生 28 日）の傾向であると考えられる。特に，III-10%，III-20%の BB コンクリートは，蒸気養生 1 日後に気中養生 6 日を行うと，打設から 1 週間以内で目標強度 21N/mm^2 以上に適合する二次製品を製造可能といえる。

次に VGP-Ⅲ種で BB の内割 10%及び 20%置換した BB コンクリートがコンクリート二次製品の強度基準を満たすとして，結合材の CO_2 排出量削減効果について検討した。2022 年度のセメントの LCI データ [10] によると高炉セメント B 種の CO_2 排出量は 437.2kg/t であり普通ポルトランドセメント 755.5kg/t の 57.8%に相当する。一方，VGP の場合は，焼成不要であり天然の火山ガラス質を選別，粉砕して製造され，CO_2 排出量が試算 [11] されている。友寄らの試算 [7] を引用すると VGP の CO_2 排出量は 88.8kg/t となっており OPC の 11.7%に相当する。**表－8** の BB コンクリートの単位セメント量 318kg/m^3 を例にして，OPC と BB を同量用いた場合を基準とした結合材の CO_2 排出量削減率を計算した結果を**表－9** に示す。OPC 単独に対して，III種で 10%BB 置換した結合材の CO_2 排出量削減率は 46.8%，III種で 20%BB 置換した結合材の場合は 51.4%削減となる。

表－9　結合材の二酸化炭素排出量削減率

VGPのセメント置換率		0%	0%	10%	20%
単位量 kg/m^3	OPC	318	0	0	0
	BB	0	318	286	254
	VGP	0	0	32	64
CO_2排出量削減率（%）		0	42.2	46.8	51.4

5. まとめ

- 入戸火砕流堆積物の串良シラスから選別した火山ガラス質を粉砕・分級して，比表面積 9.7m^2/g，6.0m^2/g，3.2m^2/g の 3 種類の火山ガラス微粉末 VGP を製造した。
- 高炉セメント B 種を VGP で内割 20%置換した水結合材比 50%，60%，70%の気中養生 28 日の BB モルタル試験結果に基づく B/W- F 関係式から，配(調)合強度 30N/mm^2 の場合の単位 BB 削減量を算出し，VGP 置換により BB を 54 ～89kg/m^3 削減できることを示した。
- BB を VGP-III種で 10%及び 20%内割置換した水結合材比 55%の BB コンクリート試験の結果，BB と VGP で置換した供試体は，蒸気養生 1 日＋気中養生 6 日の養生条件で，ほぼ同等の圧縮強度を示した。

謝辞

本研究の実施に当たっては，日研高圧平和キドウ株式会社の馬庭秀士統括部長様，上原尚也様，鹿児島県総合政策部総合政策課の宮本裕二技術補佐，大建工業株式会社次世代事業開発部の岡本和之部長様，宮村拓哉次長様にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 武若耕司：しらすを利用したコンクリート混和材の開発に関する研究,「材料」, Vol.48, No.11， pp.1300-1307, 1999
2) 友寄篤，野口貴文，袖山研一，東和朗：比重選別・分級したシラスの活用に関するコンクリート分野における実験的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.72，No.1，pp.580-587, 2016
3) 友寄篤，野口貴文，袖山研一，東和朗：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, 2018.3
4) 袖山研一，友寄篤，野口貴文，東和朗：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，「材料」，Vol.66，No.8，pp.574-581，2017.8
5) 袖山研一，友寄篤，野口貴文，袖山研一，東和朗：火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの鉄筋腐食因子の侵入抵抗性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.137-142, 2020.7
6) 袖山研一，友寄篤，野口貴文，佐々倉賢一：南九州産火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生と標準養生の圧縮強度比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1， pp.241-246, 2024
7) 友寄篤，野口貴文，袖山研一，東和朗：火山ガラス微粉末利用による環境負荷低減に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1， pp.137-142, 2020.7
8) 諫山幸男，陣内和彦，古賀義明：シラスの有効利用に関する選鉱学的研究（第 1 報），九州工業試験所報告，No.2，pp83-91，1969.9
9) 友寄篤，野口貴文，袖山研一，東和朗：火山ガラス微粉末の粉体特性と流動性に与える影響礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.72，pp.438-445, 2018
10) (一社)セメント協会:セメントの LCI データの概要, p8，2024.4
11) 宮本裕二，シラス（火山ガラス微粉末：VGP）を用いた低炭素型コンクリートの活用について，九州技報 75 号，pp.90-93，2024.9