

報告 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

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新城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、混和材に用いたコンクリートの蒸気養生と標準養生の強度比較を行った。W/B50%では比表面積 8.4m²/g と 4.1m²/g の VGP を用い、W/B24.4%では 10.0m²/g の VGP とシリカフェーム (以下 SF と称す) を用いた。8.4m²/g の VGP はセメント置換率 10% でセメントと同等以上、置換率 20% では標準養生でセメントの 96% の強度を発現した。10.0m²/g の VGP は、セメント置換率 11% の標準養生で SF の 98% の強度を発現した。これらの VGP と SF について、標準養生 28 日基準における蒸気養生の強度発現率を明らかにした。

キーワード: 火山ガラス, 混和材, シリカフェーム, ポズラン反応, 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、ポズ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の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 JISA6209「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、これまで南九州に堆積する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)}、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⁶⁾。火山ガラス微粉末の製造において、火山灰の風化質分を分級除去できることから、火山灰の産地の違いによる品質の変化を低減できると考えられ、北海道産火山灰を原料とした火山ガラス微粉末の混和材の実験結果が報告されている⁷⁾。

これまでの火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの物性は、標準養生の結果のみで、二次製品を想定した蒸気養生や標準養生と比較したデータはなかった。また、入戸火砕流堆積物は、噴出源の始良カルデラから採掘場所までの距離で物理的特性が変わるとされている⁸⁾が、VGP を製造した場合にも採掘場所の違いで混和材としての強度発現性がどう変わるかを検討した事例はない。これまでの南九州産の火山ガラス微粉末の原料としては、カルデラ壁から内陸側へ約 13km の位置にある鹿児島県

鹿屋市串良町産の串良シラスのみを用いていた。そこで本研究では、噴出源のカルデラ壁から 1km 以内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、コンクリート二次製品やコンクリートパイプを想定した蒸気養生と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、鹿児島県垂水市新城産の新城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/cm³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⁹⁾、本研究ではさらに JISA5002 の軽量骨材の区分「M」に相当する絶乾密度 1.5g/cm³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

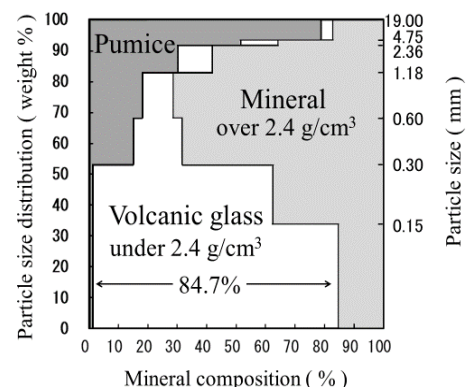


図-1 新城シラスの粒度別鉱物組成

*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

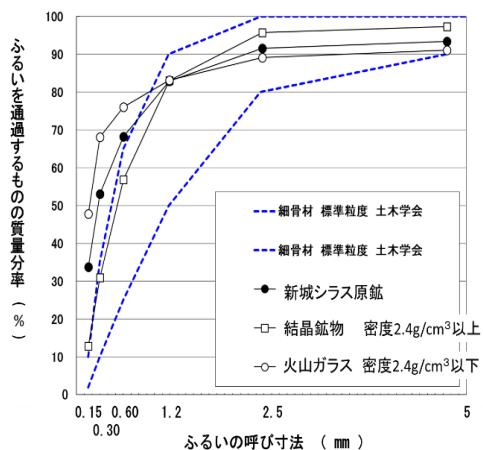


図-2 新城シラス原鉱，結晶，火山ガラスの粒度

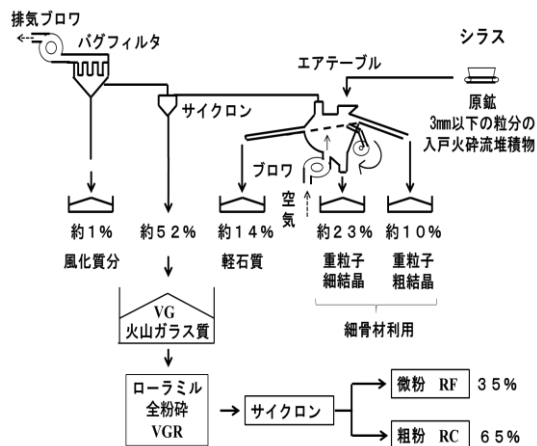


図-3 火山ガラス微粉末の製造方法

59.8%，0.15mm以下の粒分では84.7%，0.15mm-0.30mmの粒分では62.6%であった。0.15mm以下の微粒分は、SiO₂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。串良シラスのガラス含有率は原鉱全体で59.6%，0.15mm以下の粒分では83%であり⁴⁾、新城シラスも同等な鉱物組成であることを確認した。図-2に新城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JISA5308 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、串良シラスの場合と同様であり結晶鉱物を選別できれば、無塩の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

原鉱をトロンメルで3mmのふるいを通した粒分を採掘業者から取り寄せ原料とした。3mm以下のシラスを袖山らの方法⁵⁾と同様にエアテータブルによる選別後、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。

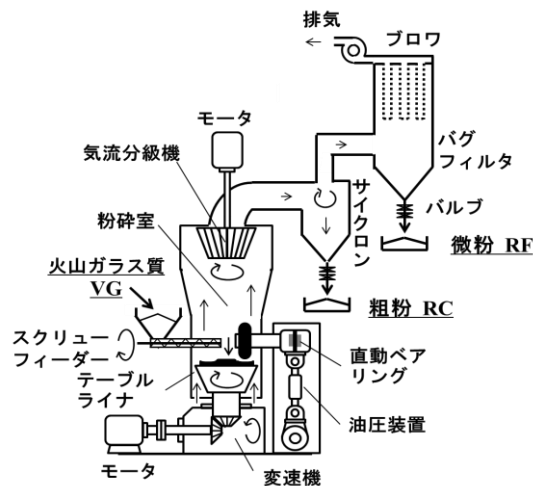


図-4 ローラミルとサイクロンを用いた火山ガラス微粉末の製造装置

粉砕前の平均粒径86μm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。分級除去された風化質分の平均粒径は3.8μmで、串良シラスの場合と同様にエアテータブルにより風化質分が除去されていることを確認した。全粉砕VGRが、サイクロンにより微粉RFと粗粉RCに分離されていることがわかる。

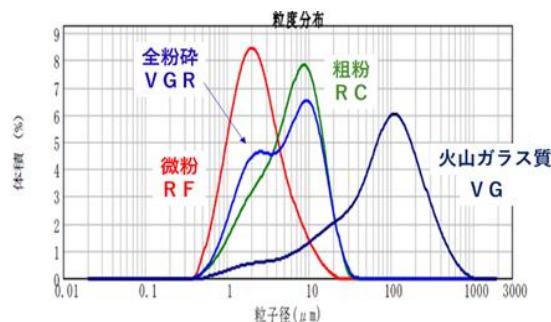


図-5 VGとRF、VGR、RCの粒度分布

新城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。串良シラス由来のVGPの化学組成と粉体物性を表-2に示す⁴⁾。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JISA6207の全量フラスコを用いたコンクリート用シリカフェ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。微粉が多く含まれる火山ガラス微粉末の火山ガラス含有率は、前述の重液分離法⁴⁾において1万回転30分間の遠心分離により求めた。新城シラス由来のRF、VGR、RCの化学組成と粉体物性は、串良シラスと類似している。新城シラス由来のVGPは、活性度指数試験は未実施であるが、串良シラス由来のVGPと同様に化学組成、比表面積は共にJIS規格を満たしている。新城シラス由来の火山ガラス質VGの火山ガラス含有率は86%であり、RFの火山ガラス含有率が73.1%と低くなったのは、最も細かい微粉であることから重液で遠心分離し難くなったことが原

因と考えられる。

2.3 コンクリート試験

新城シラス由来の表-1に示す3種類の火山ガラス微粉末について実験を行った。練り混ぜには強制二軸練りミキサーを用いた。使用材料を表-3に示す。コンクリート二次製品工場の試験室で試験練りを行い、火山ガラス微粉末とSF以外は、実出荷に用いている材料とした。試験練りは表-4に示すように2系統で行い、シリーズAでは水結合材比50%にてセメントの内割の置換率で火山ガラス微粉末VGR、RCの10%置換と20%置換で、OPCのみとの比較を行った。粗骨材の最大寸法は13mmで脱型時に必要な強度として蒸気養生1日で20N/mm²以

表-1 新城シラス由来の火山ガラス微粉末の化学組成と粉体物性

	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Ig. Loss %	比表面積 m ² /g	密度 g/cm ³	平均粒径 μm	火山ガラス含率 %
RF	72.7	0.2	13.1	2.1	0.1	0.3	1.5	3.3	3.0	0.0	3.6	10.0	2.38	2.2	73.1
VGR	73.2	0.2	13.6	2.1	0.1	0.3	1.5	3.1	3.2	0.0	2.7	8.4	2.36	5.3	79.0
RC	74.1	0.2	12.9	1.8	0.1	0.2	1.4	3.0	3.4	0.0	2.9	4.1	2.37	6.5	86.2

表-2 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

	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Ig. Loss %	比表面積 m ² /g	平均粒径 μm
RF	73.0	0.2	13.1	2.4	0.1	0.3	1.5	3.6	3.3	0.0	2.5	10.4~11.6	1.8~1.9
VGR	73.9	0.2	12.8	1.9	0.1	0.3	1.4	3.8	3.3	0.0	2.3	6.3~6.7	4.2~4.3
RC	74.3	0.2	12.6	1.8	0.1	0.3	1.4	3.8	3.4	0.0	2.3	2.7~3.5	5.6~5.8

表-3 使用材料

			密度 g/cm ³	記号
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	OPC
	火山ガラス微粉末	表-1のとおり		
	シリカフェウム	BASF製 マスターロックMS610 比表面積17.7m ² /g SiO ₂ : 95.29%	2.25	SF
細骨材	砕砂	鹿児島県日置市吹上町産	2.62	S
粗骨材	砕石1305	鹿児島県日置市吹上町産	2.64	G1
	砕石2005	鹿児島県日置市吹上町産	2.64	G2
化学混和剤	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

表-4 コンクリートの調査条件

シリーズ	W/B %	s/a %	セメント	混和材	混和材 /B %	粗骨材 の最大 寸法 mm	塩化物量 kg/m ³ 以下	蒸気養生材齢1日 目標強度 N/mm ²	蒸気養生材齢1日 気中養生材齢6日 目標強度 N/mm ²	標準養生材齢28日 目標強度 N/mm ²
A	50.0	51.1	OPC	無し	0	13	0.3	20	30	30
	50.0	51.1	OPC	VGR、RC	10	13	0.3	20	30	30
	50.0	51.1	OPC	VGR、RC	20	13	0.3	20	30	30
B	24.4	38.1	OPC	SF、RF	11	20	0.3	70	85	85

上、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30N/mm²以上とした。シリーズBでは、コンクリートパイルを想定して水結合材比24.4%にてSFと火山ガラス微粉末RFをセメントの内割の置換率で11%置換して比較を行った。粗骨材の最大寸法は20mmで脱型時に必要な強度として蒸気養生1日で70N/mm²以上、目標強度として蒸気養生1日後気中養生6日と標準養生材齢28日で85N/mm²以上とした。両シリーズの練り混ぜ条件を図-6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9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常圧での蒸気養生と標準養生を行った。

蒸気養生における温度設定を図-7に示す。供試体採取後、3時間以上の前置き時間を設け、15°C/h以内で昇温し、最高温度60°C±10°Cで4時間保持し、その後40°C/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20°C±5°Cで6日間恒温室内にて気中養生を行った後で圧縮試験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートのフレッシュ試験結果

試験練りを行ったコンクリートの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-5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、SF-11が0.101kg/m³で、VGR、RC、RFの火山ガラス微粉末は0.088kg/m³以下であり、JISA5308の塩化物規定量0.3kg/m³を大きく下回った。

シリーズAは、W/B50%、細骨材率51.1%で行った。OPCのみのPlainは、高性能減水剤4.9kg/m³でスランプ6.5cmと低めであるが、空気量2.3%で、取り扱いしやすい柔らかさであった。VGRをセメントの内割で10%置換したフレッシュコンクリートは、高性能減水剤4.9

kg/m³ではスランプが6.5cm未満と硬くなったので、6.0kg/m³に増量した結果、スランプ12cm、空気量1.8%となり取り回しが良好であった。ほかのVGR20%置換、RC10%置換、20%置換についても高性能減水剤6.0kg/m³で混練した結果、スランプ8±2.5cmの範囲内に概ね収まり、作業性は良好であった。

3.2 水結合材比50%のコンクリート試験結果

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-8に示す。シリーズAのPlainに対する圧縮強度比を図-9に示す。VGR-10%はセメント置換率10%で蒸気養生と標準養生でPlainと同等以上の圧縮強度66N/mm²を発現し、標準養生の置換率20%のVGR-20%では59N/mm²となり、Plainに対して96%の強度を発現した。RC-10%とRC-20%ではセメント置換するほど置換率程度の強度が低下したが、10%置換および20%置換は、いずれも蒸気養生1日<蒸気養生1日後気中養生6日<標準養生28日の順で圧縮

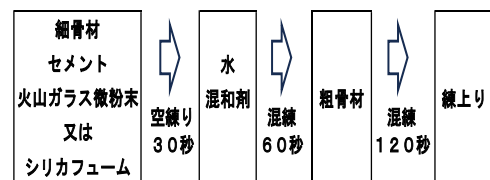


図-6 強制二軸練りミキサーを用いた練り混ぜ条件

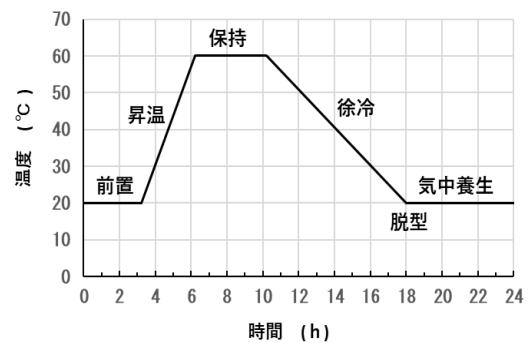


図-7 常圧蒸気養生の設定

表-5 コンクリートの調合条件とスランプ、空気量、コンクリート温度、塩化物量

シリーズ	W/B	s/a	記号	OPC	混和材	水	S	G1	G2	Ad	スランプ	CT	空気量	塩化物量
	%	%		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³				
A	50.0	51.1	Plain	350	0	175	938	898	0	4.9	6.5	17	2.3	0.050
	50.0	51.1	VGR-10%	315	35	175	938	898	0	6.0	12.0	17	1.8	0.045
	50.0	51.1	VGR-20%	280	70	175	938	898	0	6.0	6.5	17	1.8	0.039
	50.0	51.1	RC-10%	315	35	175	938	898	0	4.9	6.5	17	2.0	0.055
	50.0	51.1	RC-20%	280	70	175	938	898	0	4.9	10.0	18	1.8	0.051
B	24.4	38.1	SF-11%	490	59	134	676	0	1097	10.8	4.5	21	1.6	0.101
	24.4	38.1	RF-11%	490	59	134	676	0	1097	10.8	8.0	21	1.5	0.088

強度が大きくなり、蒸気養生 1 日後気中養生 6 日及び標準養生 28 日で目標強度の 30N/mm²を上回り、標準養生 28 日が最大強度を発現している。標準養生後の圧縮強度を比較すると強度特性も単良シラスの場合と同様に VGR が RC よりも高い傾向を示している。RC は、VGR に含まれる微粉成分を気流分級により除去したものであり、ポズラン反応性の高い微粉成分が VGR より少ないため強度発現性が劣っていると考えられる。VGR は、セメントの内割で 10%置換であれば、OPC100%と同等以上の強度発現が期待できるが、それ以上の置換率や RC での内割で 10~20%の置換では OPC 以下の強度発現に留まった。すべての配合において、蒸気養生 1 日と蒸気養生 1 日後気中養生 6 日での圧縮強度は、標準養生 28 日には及ばない。これら 2 条件の蒸気養生では、養生期間も短く水和反応に必要な水分が十分に供給されなかったと考えられる。

3.3 水結合材比 24.4%のコンクリート試験結果

シリーズ B は、W/B24.4%，細骨材率 38.1%で行った。SF11 %置換は、高性能減水剤 10.8 kg/m³でスランプ 4.5cm と低めであるが、空気量 1.6%で、粘性を感じないほど取り扱いしやすい柔らかさであった。コンクリートパイル用のフレッシュコンクリートは、スランプは低めで遠心成形するので、この条件で火山ガラス微粉末の RF も同じ条件で試験することとした。このフレッシュコンクリートは、スランプ 8cm，空気量 1.5%となり、スランプは大きくなったが粘性が高いものとなった。

蒸気養生 1 日、蒸気養生 1 日後気中養生 6 日、標準養生 28 日の圧縮強度試験の結果を図-10 に示す。セメント置換率 11%の RF は、蒸気養生 1 日で 89 N/mm²を示し、目標強度の 85N/mm²を上回った。蒸気養生 1 日後気中養生 6 日では 93N/mm²となり、強度の伸びは小さかった。標準養生 28 日では、113 N/mm²となり、圧縮強度比の図-11 に示すとおり SF の 98%の強度を発現した。

W/B24.4%でも W/B50%のシリーズ A と同様に蒸気養生 1 日<蒸気養生 1 日後気中養生 6 日<標準養生 28 日の順で圧縮強度が大きくなり、2 条件の蒸気養生では水分の供給が不十分であったと考えられる。RF は、標準養生では SF と強度が同等であったにもかかわらず、蒸気養生では SF よりも強度が低くなった。

3.4 蒸気養生と標準養生の比較

シリーズ A と B の各配合における標準養生 28 日の圧縮強度を 100 とした場合の蒸気養生 1 日、蒸気養生 1 日後気中養生 6 日の強度発現率を図-12 に示す。脱型強度で重要な蒸気養生 1 日の標準養生 28 日に対する強度発現率は、OPC54%，VGR46~52%，RC48~50%，SF83%，RF78%となり、OPC 及び VGR と RC は約 5 割、RF と SF は約 8 割の強度発現率を示した。出荷前最終検査を想

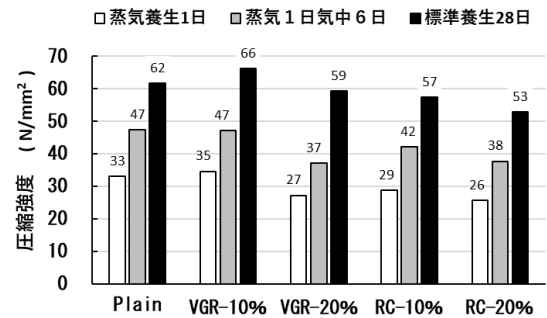


図-8 シリーズ A の養生条件と圧縮強度の関係

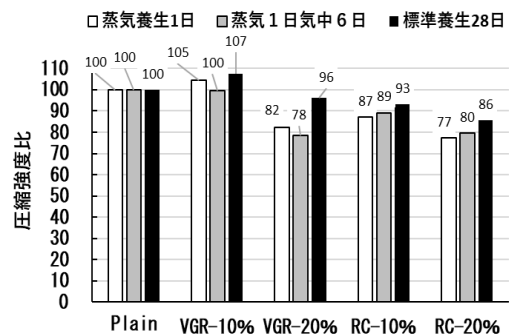


図-9 シリーズ A の Plain に対する圧縮強度比

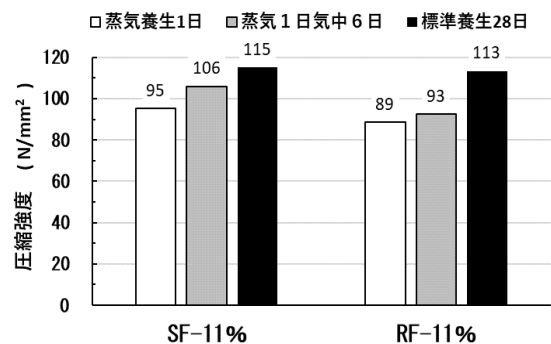


図-10 シリーズ B の養生条件と圧縮強度の関係

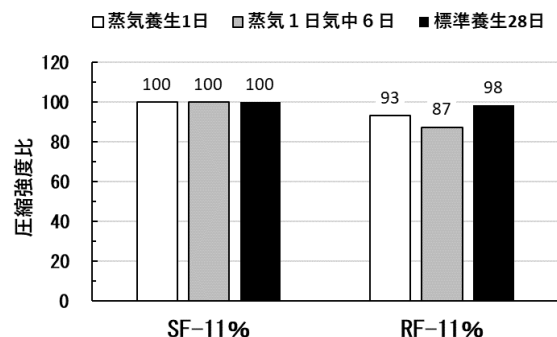


図-11 シリーズ B の SF に対する RF の圧縮強度比

定した蒸気養生 1 日後気中養生 6 日の強度発現率は、OPC77%，VGR63~71%，RC71~74%，SF92%，RF82%となった。

W/B50%の場合、OPC 及び VGR と RC は、2 条件の蒸

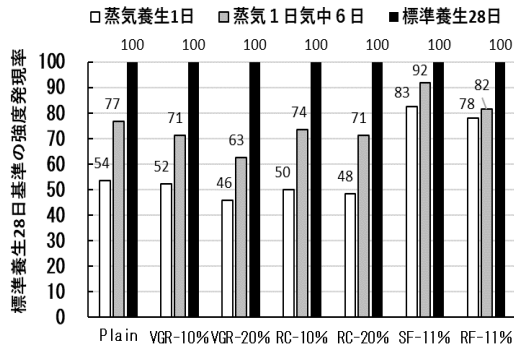


図-12 両シリーズの標準養生 28 日基準の強度発現率

気養生では標準養生 28 日の強度発現に必要な水分が 8 割未満しか供給できていないと言える。2 条件の蒸気養生では水分の供給が不足しており、標準養生 28 日では水和反応に必要な水分が十分に供給されたためポズラン反応が促進したものと考えられる。

W/B24.4%の場合、標準養生 28 日では SF と RF の強度発現率は同等であったが、2 条件の蒸気養生では RF の方が SF より 5~10%低めになる傾向があった。RF の蒸気養生では、水分の供給が不十分であったと考えられ SF とは反応に対する温度依存性が異なるとも言えるので、蒸気養生の温度や保持時間を検討する必要がある。

4. まとめ

- 入戸火砕流堆積物の噴出源のカルデラ壁から 1km 以内に位置する新城シラスの結晶鉱物の粒度は、JISA5308 の附属書 A の細骨材の粒度範囲にほぼ収まった。軽石質を含む火山ガラス含有率は 59.8%であった。
- 新城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 10.0m²/g, 8.4m²/g, 4.1m²/g の 3 種類の火山ガラス微粉末 VGP を製造した。いずれも串良シラス由来の VGP と同等の粉体が得られた。
- 水結合材比 50%のコンクリート試験では、8.4m²/g の VGP はセメント置換率 10%で蒸気養生と標準養生でセメントと同等以上の圧縮強度を発現し、置換率 20%では標準養生 28 日でセメントの 96%の強度を発現した。
- 水結合材比 24.4%のコンクリート試験では、10.0m²/g の VGP は、蒸気養生では同置換率の SF の 9 割程度、標準養生 28 日では SF の 98%の強度を発現した。
- 標準養生 28 日の圧縮強度を 100 とした場合の常圧 60°C4 時間保持した蒸気養生 1 日の強度発現率は、W/B50%の OPC 及び 8.4m²/g と 4.1m²/g の VGP では約 5 割であり、W/B24.4%の 10.0m²/g の VGP と SF では約 8 割であった。

謝辞

本研究の実施に当たっては、大建工業株式会社社世代事業開発部の岡本和之部長様、宮村拓哉次長様、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

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 友寄篤, 袖山研一, 谷口 円, 野口貴文：北海道産火山灰を原料とした火山ガラス微粉末に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.143-148, 2021
- 鹿児島県土木部：[2005 年制定] シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル (案), 鹿児島県建設技術センター, 2006
- 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