

論文 建築分野へのシラス混合コンクリートの適用に関する実験的研究

崔亨吉*1・野口貴文*2・友寄篤*3・伊藤司*4

要旨: 室内実験としてシラスの諸物性を評価し、シラスの混合率によるコンクリートのフレッシュ性状と強度特性を評価した。その後、実機プラント製造実験を行い、フレッシュ性状、強度、収縮および耐久特性について検討を行った。これらの結果、シラスの混合による有害なアルカリシリカ反応は認められなかった。シラス混合コンクリートのフレッシュ性状、強度、収縮および耐久特性は普通コンクリートと比べ、同一水準と評価され、実機プラントミキサでの製造も何ら問題はないと判断される。また、シラス混合コンクリートの場合、適切な温度管理や十分に養生を行うことで、ひび割れや乾燥収縮の抑制および耐久性の向上をより期待できると判断される。
キーワード: シラス, 活性度指数, アルカリシリカ反応, ポゾラン反応, S値, 乾燥収縮, 耐久性

1. はじめに

最近、コンクリート分野において、未利用資源の有効利用の側面から各種廃棄物や副産物を積極的に活用するための研究が成されている。このような状況のもと、鹿児島県を中心に未利用資源の有効活用の観点から、図-1のように南九州に広く分布している火砕流堆積物の一種であるシラスをコンクリート用細骨材として利用するための検討が成されている^{1,2,3)}。シラスは、鹿児島県本土の面積の約50% (3,427km²) を占め、鹿児島湾周辺で厚さ数10~200mのシラス台地を形成し、その厚さ平均を50mと仮定すると埋蔵量は750億m³ほどと推定される¹⁾。一方、今まで宅地造成による産業廃棄物として処理されたシラスが最近にはポツォラーナとその起源の類似が推測され、長期的な耐久性や耐硫酸性が期待できる事が実証されているため^{4,5)}、鹿児島県では温泉環境に建設される橋脚基礎工事に使用されるなど土木構造物への適用が始まっている^{6,7)}。しかしながら、コンクリート用の細骨材としては、粒度が細かい(150μm以下の微粒分が平均30%)ため粉体量がかなり多くなり、同一の流動性を得るための単位水量が1~2割程度大きくなることや高吸水性、低密度(平均の粒子密度2.4g/cm³)などがJIS A 5308附属書A(規定)の規定に適合しないため、建築物の主要構造部等に用いる場合には大臣認定を取得する必要があることから、これまで建築分野におけるシラスの細骨材としての利用は皆無である。

そこで、本研究では未利用資源の活用という側面だけ

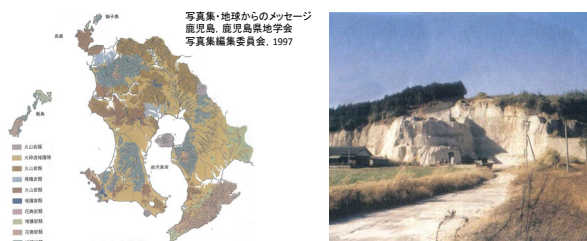


図-1 鹿児島県の火砕流堆積物分布・シラス地山⁷⁾

でなく、高耐久化、自己充填性を目的としてシラスを細骨材の一部に使い、低炭素化を目的として高炉セメントB種、完全リサイクル性、乾燥収縮の低減を目的として石灰碎石・砕砂を用いた建築分野へのシラス混合コンクリート適用のための検討を行った。

2. シラスの諸物性

2.1 実験概要

適用したシラスの化学組成、粒度分布および諸物性を表-1~表-3に示す。今回は2万5千年前の巨大噴火によって噴出した入戸火砕流堆積物を起源とする、呼び寸法5mmの網ふるいを通過するシラスを乾燥したものを用い、アルカリシリカ反応性およびポゾラン反応性について検討した。アルカリシリカ反応は「JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)」に準拠し、40×40×160mmの角柱供試体を用い、膨張ひずみを測定し評価した。活性度実験は「JIS A 6201 附属書2(規定)フライアッシュのモルタルによるフロー値

表-1 シラスの化学組成

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO
1.964	0.292	14.136	71.272	0.063	0.098	0.055	3.978	3.813	0.443	0.119	3.689	0.022	0.042

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 助教 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 教授 博士(工学)(正会員)

*3 アトリエ・天工人(株)

*4 東京エスオーシー(株)

表-2 シラスの粒度分布

ふるい寸法 (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.075
通過率 (%)	100	100	95~100	85~95	80~60	65~45	15~35	0~20

表-3 シラスの諸物性

項目	数値	項目	数値
表乾密度	2.11g/cm ³	粗粒率	1.66
絶乾密度	1.97g/cm ³	塩化物量 (NaCl)	0.001%以下
吸水率	6.86%	微粒分量	19.1%以下
強熱減量	2.14%	三酸化硫黄	0.07%

表-4 実験計画

区分	W/C (%)	シラス混合率 (%) ^{※2}	評価項目
シリーズ I 室内実験	40	50, 70	・フレッシュ性状 ・圧縮強度
	52.5		
	65 ^{※1}		
シリーズ II 実機実験	50 ^{※1}	70	・フレッシュ性状 ・強度特性 (圧縮強度, 構造体補正強度) ・収縮特性 (乾燥収縮, 拘束収縮ひび割れ) ・耐久特性 (促進中性化, 凍結融解)
	60		

※1: 普通コンクリート製作

※2: シラスは細骨材に対して体積比として混合

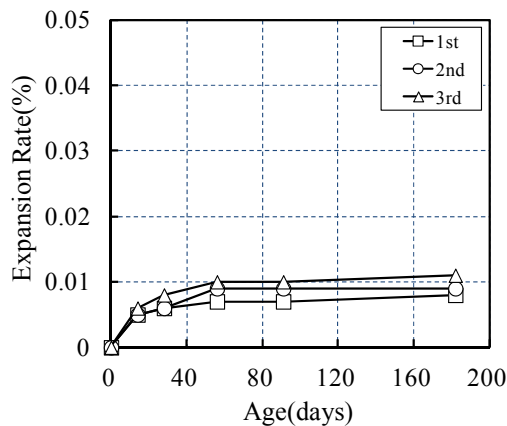


図-2 モルタルバー法による膨張ひずみ

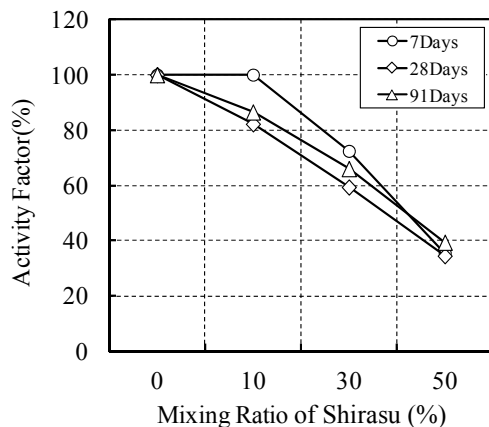


図-3 活性度指数

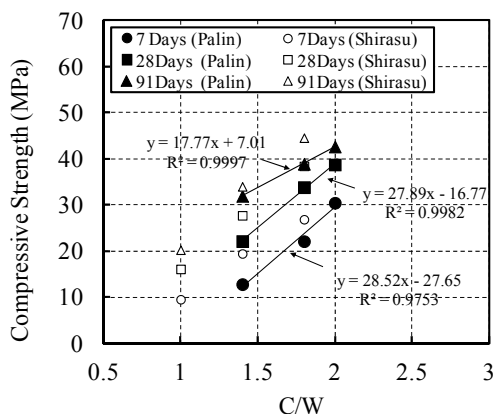


図-4 C/W と圧縮強度の関係

比および活性度指数の試験方法」に準拠し、シラスをセメントに対して内割で 0, 10, 30 および 50%を混入し、モルタル試験体を製作した後、標準養生材齢 7, 28, 91 日に圧縮強度を測定し、活性度指数を算出した。

2.2 実験結果および考察

シラスのアルカリシリカ反応性検討のためのモルタルバー法による膨張ひずみの経時変化を図-2に示す。シラスは潜在的にはアルカリシリカ反応性鉱物に近い物性からなるが、3本の試験体とも材齢182日の時点での膨張ひずみは JIS A 1146 やデンマーク法, ASTM C 1260 に規定されている膨張率 0.1% (=1000×10⁻⁶) を上回る有害な膨張は認められなかった。

シラス混入による活性度指数の算定結果および C/W と圧縮強度の関係を図-3および図-4に示す。シラスをセメントに対して内割で置換したため、シラスの混入により、圧縮強度の低下によって活性度指数は低下した結果となった。しかしながら、同一 C/W から見ると、シラスの混入によって全材齢で圧縮強度は増加され、シラスの混合によって、実用において有害な反応は認められず、長期材齢における強度向上など、ポゾラン反応の効果が期待できると判断される。

3. 細骨材としてシラスを適用したコンクリートの特性

3.1 実験概要

実験計画を表-4に示す。シラスの適用範囲を検討するため、室内実験によりシラスの混合率によるコンクリートのフレッシュ性状および強度特性を評価した(シリーズ I)。その後、実機プラント製造実験を行い、フレッシュ性状、強度特性、収縮特性および耐久特性について検討を行った(シリーズ II)。また、実験は強度補正值が最も厳しいと想定される夏期(2013年08月)に行った。コンクリートの使用材料および調合を表-5および表-6に示す。セメントは高炉セメント B 種、細骨材はシラスおよび石灰岩砕砂を、粗骨材は石灰岩砕石を全量使用した。化学混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。

表-5 使用材料

材料	仕様
セメント	高炉セメント B 種, 密度 3.04 g/cm ³
シラス	鹿児島県東良産, 表乾密度 2.11g/cm ³ , 吸水率 6.86%
細骨材	石灰岩砕砂, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.73%
粗骨材	石灰岩砕石, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.43%
混和剤	高性能 AE 減水剤

表-6 コンクリート調合

区分	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
			セメント	水	細骨材		粗骨材	
					シラス	砕砂		
シリーズ I 室内実験	①	40	42.4	462	185	282	348	961
	②	40	39.3	462	185	366	194	1012
	③	52.5	46.5	352	185	327	404	945
	④	52.5	41.6	352	185	408	218	1031
	⑤	65	50.0	258	168	0	921	948
	⑥	65	43.9	285	185	320	394	1023
	⑦	65	43.9	285	185	447	237	1023
シリーズ II 実機実験	⑧	50	49.2	350	175	0	858	913
	⑨	50	43.5	370	185	424	226	988
	⑩	60	45.3	308	185	456	242	988

コンクリートの目標値は、スランプ 15 cm (シラス 70% 混入コンクリート) および 18 cm (普通コンクリートおよびシラス 50%混入コンクリート), 空気量は 4.5±1.5% とした。

3.2 実験方法

フレッシュ性状としてスランプ, スランプフロー, 空気量, コンクリート温度を測定し, コンクリートの状態を目視した。圧縮強度はコンクリートを材齢 1 日で脱型した後に水中養生 (20°C) を行い, 所定の材齢で行った。一方, 実機プラントからコンクリートを製造した後経過時間 60 分時のフレッシュ性状が良好であることを確認した後, 図-5 のように模擬構造体を製作した。模擬構造体の寸法は, 横 1m×縦 1m×高さ 1m とし, 上下を厚さ 0.2m の断熱材で養生し, 材齢 91 日にコア強度を測定した。乾燥収縮は, 材齢 7 日まで標準水中養生 (20°C) を行った後, 恒温恒湿室 (20±2°C, 60±5%) 内で「JIS A 1129-2 附属書 A (参考) モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠し, 所定の材齢において測定を行った。また, 拘束ひび割れ実験は, JIS A 1151「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験」に準拠し行った。図-6 のように拘束鋼材の中央部にひずみゲージを設置し, ひずみ変化を測定した。材齢 7 日までは, 仕上げ面にポリエステルフィルムを被せ, その上を湿布で覆った状態で養生した。材齢 7 日に脱型した後は, 恒温恒湿室 (20±2°C, 60±5%) 内で気乾養生を行い, 測定した。促進中性化試験は「JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し, 100×100×

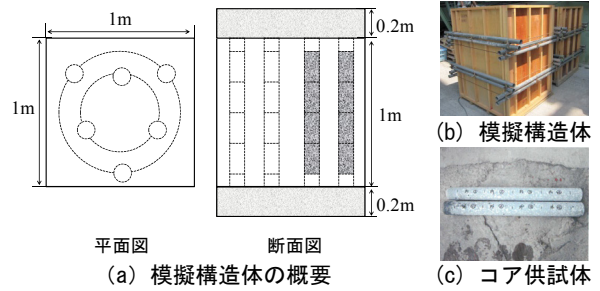


図-5 模擬構造体およびコア供試体

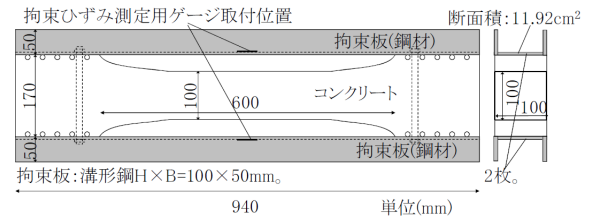


図-6 拘束ひび割れ実験 (JIS A 1151) ⁸⁾

表-7 フレッシュ性状 (室内実験)

区分	W/C (%)	シラス混合率 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	混和剤 C×%
①	40	50	21.0	39.5×39.0	4.7	21	1.0
②	40	70	19.0	30.0×29.5	4.5	21	1.2
③	52.5	50	21.0	38.5×37.5	5.3	21	1.2
④	52.5	70	20.0	34.5×33.5	5.7	21	1.5
⑤	65	0	21.0	37.5×37.0	5.5	21	1.2
⑥	65	50	21.0	37.0×36.5	5.6	21	1.3
⑦	65	70	16.5	29.5×28.5	5.2	21	1.7

400mm の角柱供試体を用い, 所定の材齢に測定した。促進条件は, 温度 20±2°C, 湿度 60±5%, CO₂ 濃度 5±0.2% とした。凍結融解実験は「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法, A 法 (水中凍結融解試験方法)」に準拠し, 凍結温度を -18°C, 融解温度を 5°C とした。1 サイクルを 3 時間とし, 300 サイクルまで行い, 30 サイクルごとの質量変化率と 1 次共鳴振動数による相対動弾性係数および耐久性指数を評価した。

3.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状および強度特性 (室内実験)

表-7 に室内実験におけるコンクリートのフレッシュ性状の測定結果を示す。各水セメント比において, シラスの混合率にかかわらず, 目標スランプおよび目標空気量を満足した。ただ, シラスの混合率による目標とするワーカビリティを得るための高性能 AE 減水剤の量は差があるが, シラスを 70% 混合した場合にも高性能 AE 減水剤 1.2~1.7% の範囲で適用できると判断される。

図-7 には C/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係を示す。

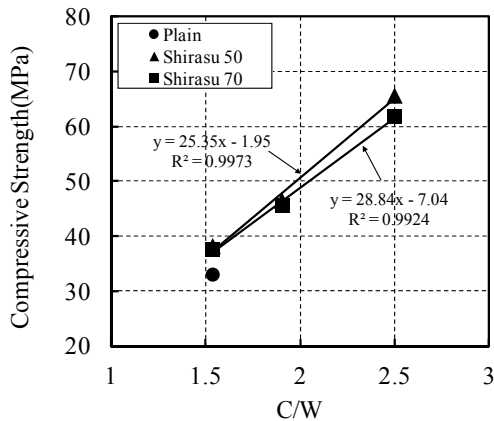


図-7 C/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係

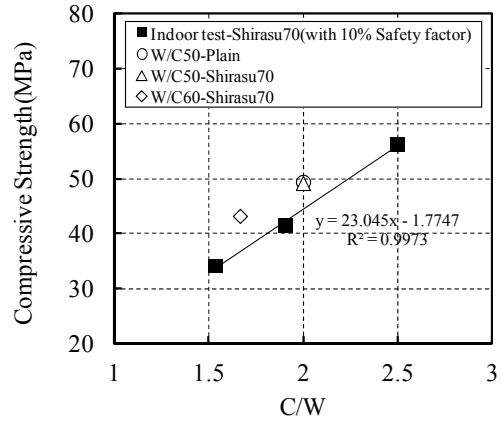


図-9 C/W と圧縮強度の関係

表-8 フレッシュ性状 (実機実験)

区分	W/C (%)	シラス混合率 (%)	スランプ (cm)	スランブプロウ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	混和剤 C×%
⑧	50	0	23.0	46.0×45.5	5.0	32	1.0
⑨	50	70	23.0	46.5×45.5	5.6	33	1.4
⑩	60	70	22.5	43.0×42.0	5.7	31	1.5

表-9 構造体補正強度

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)				²⁸ S ₉₁ 値 (N/mm ²)
	標準養生 28 日	模擬構造体 (コア) 91 日			
		内	外	平均	
W/C50-Shirasu70	49.2	45.4	45.6	45.5	3.7
W/C60-Shirasu70	43.2	39.7	40.9	40.3	2.9

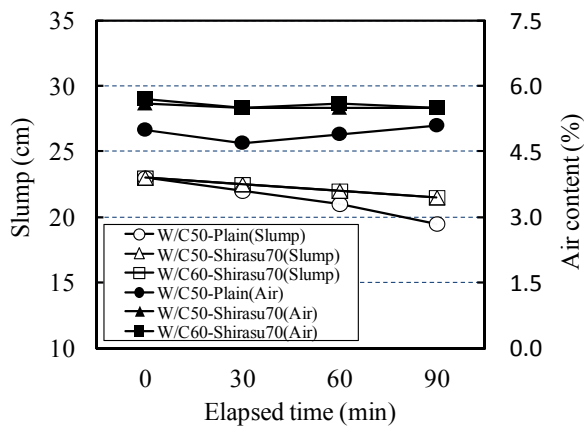


図-8 スランプ、空気量の経時変化

シラス混合コンクリートにおいて、C/W と圧縮強度の関係は直線の変化を見せ、強度低下は見られなかった。シラスを 70% 混合したコンクリートの圧縮強度がシラスを 50% 混合したコンクリートよりやや小さい傾向であるが、その差は小さかった。一方、W/C65% の水準でシラス混合コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートと比べ、同等以上の圧縮強度を発現することが確認できた。

(2) フレッシュ性状および強度特性 (実機実験)

実機実験におけるコンクリートのフレッシュ性状の結果およびスランプ、空気量の経時変化を表-8 および図-8 に示す。練混ぜ直後スランプおよび空気量は目標値を満足した。また、90 分経過後でもシラスの混合による空気量の変化や顕著なスランブロス認められず、目

標値を満足しており、実機プラントミキサーでの製造も何ら問題はないと判断される。図-9 に室内実験から得られたシラスを 70% 混合したコンクリート (②, ④, ⑦) の材齢 28 日の圧縮強度結果に 10% の安全率を考慮した値から求めた C/W と圧縮強度の関係および実機プラントから製造したコンクリートの材齢 28 日の圧縮強度を示す。実機プラントから製造したコンクリートの圧縮強度は、10% の安全率を考慮し求めた C/W と圧縮強度の関係式より安全側となることが確認できた。また、普通コンクリートの圧縮強度の結果と比べても、シラスの混合によるコンクリートの強度低下は認められなかった。

表-9 に構造体補正強度を示す。標準水中養生 (20°C) 28 日とコア強度 91 日の強度差から求めた構造体補正値 (²⁸S₉₁) はそれぞれ 3.7 N/mm², 2.9 N/mm² で、JASS 5-2009 の夏期 S 値 6 N/mm² を満足することが分かる。

(3) 乾燥収縮および拘束ひび割れ実験

乾燥収縮の測定結果を図-10 に示す。シラス混合コンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートと比べ、やや増加する傾向で、これはシラスの混合による単位水量の増加に起因したと考えられる。また、シラス混合コンクリートの場合、単位水量の増加によって、乾燥による質量変化率が普通コンクリートより大きい傾向であるが、コンクリート内部のシラス微粉末の湿潤効果によって初期材齢における乾燥収縮量は普通コンクリートと類似の水準であった。その後、さらにコンクリートの内部が乾燥しながら乾燥収縮量は増加するが、乾燥材齢 140 日の時点で、普通コンクリートとの乾燥収縮量の

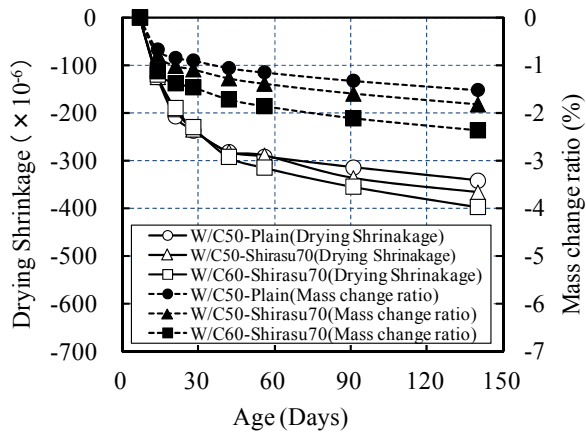


図-10 乾燥収縮および質量変化率

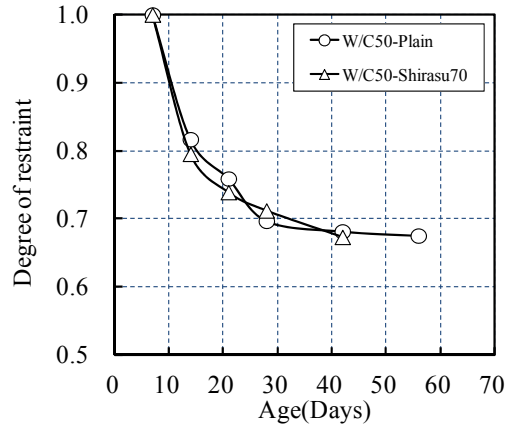


図-13 拘束度算定結果

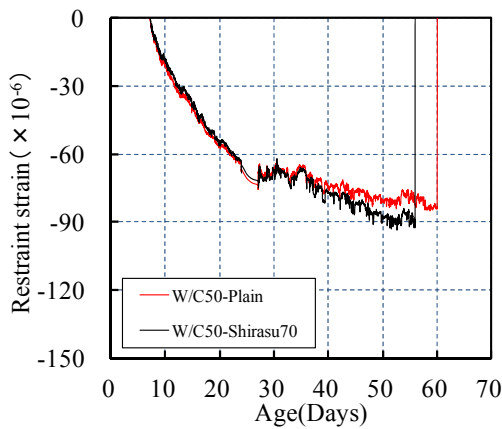


図-11 鋼材の拘束ひずみ

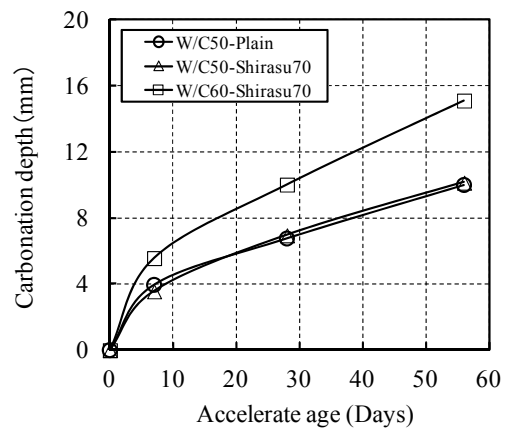


図-14 中性化深さの変化

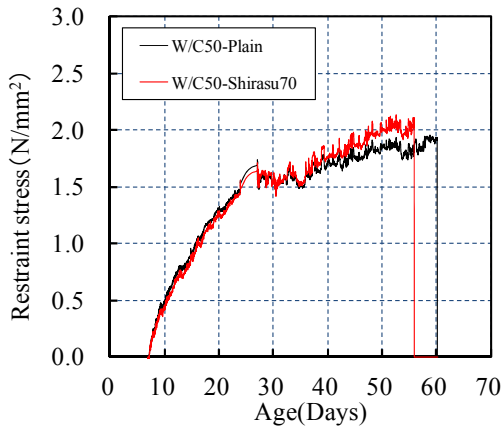


図-12 拘束応力

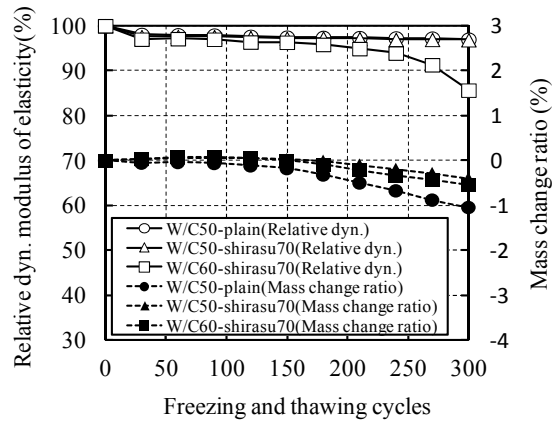


図-15 相対動弾性係数および質量変化率

表-10 ひび割れ発生日およびひび割れ形状

試験体	ひび割れ発生日	ひび割れ形状
W/C50-Plain	60.13日	
W/C50-Shirasu70	55.92日	

差は25 μ と小さかった。

拘束ひび割れ実験による鋼材の拘束ひずみおよび拘束応力の算定結果を図-11および図-12に示す。拘束応力は、拘束鋼材のひずみを用い、コンクリートと拘束鋼材の力の釣り合い条件およびひずみの適合条件より算出した。乾燥の進行により、拘束ひずみの増加によって拘束応力は増加し、表-10のように乾燥開始の数日後にコンクリート表面に貫通ひび割れが発生した。シラス混合コンクリートが普通コンクリートに比べ、ひび

割れが早く発生し、シラスの混合による単位水量の増加および乾燥収縮量が多いことが原因として考えられる。図-13に乾燥収縮量と拘束されたコンクリートの収縮量から計算した拘束度の算定結果を示す。シラス混合コンクリートの拘束度は普通コンクリートと比べ、ほぼ類似な傾向で、シラスの混入によるひび割れ抵抗性は普通コンクリートと同程度と考えられる。

(4) 中性化および凍結融解

中性化深さの変化と相対動弾性係数および質量変化率を図-14および図-15に示す。高水セメント比ほど中性化しやすく、相対動弾性係数は低下するが、同一水準の水セメント比と比較してみると、シラスの混合による中性化深さの変化や相対動弾性係数の変化にはほぼ差がなかった。また、水セメント比50%の場合、普通コンクリートおよびシラス混合コンクリートの耐久性指数は、それぞれ96.9%、97.0%で普通コンクリートと同程度と評価された。凍結融解実験による各供試体の質量変化は、初期から少し小さくなる傾向で、これは凍結融解による内部組織の劣化により、試験体内に水分が流入しやすくなり、スケーリングの進行されていることなどが原因と考えられるが、その量は少量であり、300サイクルの終了後、表面のモルタルが剥離する等の著しいスケーリング劣化は確認されなかった。

一方、既往の研究^{4,5,6)}では、十分に長期養生を行ったシラス混合コンクリートの場合、乾燥収縮の抑制を大幅に期待できることや、特にポズラン反応によるコンクリートの緻密化から耐久性の向上およびひび割れの発生も抑制できると報告されており、シラス混合コンクリートの適用において、十分な養生を行うことにより、乾燥収縮やひび割れ発生抵抗性および耐久性をより向上できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、建築分野へのシラス混合コンクリートの適用に関する実験的研究を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) シラス混合による有害なアルカリシリカ反応は認められなかった。また、長期材齢における強度向上など、ポズラン反応の効果が期待できると判断される。
- (2) シラスの混合によるコンクリートの空気量変化や顕著なスランブロス認められなく、実機プラントミキサでの製造も何ら問題はないと判断される。
- (3) シラス混合コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートと比べ、同等以上の圧縮強度を発現することが確認できた。また、シラス混合コンクリートの構造体補正₂₈S₉₁値は、JASS 5-2009によるS値6N/mm²

を満足した。

- (4) シラス混合コンクリートの乾燥収縮量は、普通コンクリートと比べ、やや大きい傾向であり、乾燥収縮の進行によって拘束応力の増加とともにひび割れ発生時期も早い傾向であるが、その差は小さかった。また、シラスの混合による中性化深さ変化や相対動弾性係数の変化は大きい差がなく、普通コンクリートと同程度と評価された。
- (5) 十分に長期養生を行ったシラス混合コンクリートの場合、長期材齢においてポズラン反応による乾燥収縮の抑制やコンクリートの緻密化による耐久性の向上が期待できると報告されており、コンクリートの適切な温度管理や十分な養生を行うことは、シラス混合コンクリートの適用においてより有効であると考えられる。

参考文献

- 1) かごしま シラス産業おこし 企業ガイドブック (チャレンジかごしま), 鹿児島県工業技術センター, 2012
- 2) 友寄篤, 崔亨吉, 野口貴文, 山下保博, 伊藤司, 武若耕司, 佐藤淳: シラスコンクリートの建築物への適用のための基礎的研究 (その1 室内試験によるシラス及びシラスコンクリート基礎物性評価), 日本建築学会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.317-318, 2014
- 3) 崔亨吉, 友寄篤, 野口貴文, 山下保博, 伊藤司, 武若耕司, 佐藤淳: シラスコンクリートの建築物への適用のための基礎的研究 (その2 実機実験によるシラスコンクリートの強度及び耐久性評価), 日本建築学会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.319-320, 2014
- 4) 武若耕司: シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.38-47, 2004
- 5) 森高康行, 武若耕司, 山口明伸, 多々良勇貴: 温泉環境下に曝露したシラスコンクリート中の劣化モニタリングに関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2071-2076, 2009
- 6) 奥地栄祐, 武若耕司, 清川秀樹, 中尾好幸: 高温環境下へのシラスコンクリートの適用に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.681-686, 2004
- 7) 鹿児島県土木部: 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), 2005
- 8) 都築正則, 酒井正樹, 神代泰道, 平田隆祥: 石灰石骨材および収縮低減材料を使用したコンクリートのひび割れ抑制評価, 大林組技術研究所報, No.76, pp.1-7, 2012