

論文 石灰石微粉末による焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの品質改善

金子 泰治^{*1}・井上 正一^{*2}・吉野 公^{*3}・黒田 保^{*4}

要旨：溶融スラグ骨材の使用量が多くなるとコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の品質に悪影響を及ぼすことが指摘されている。この問題への対応策の一つとして、細骨材の全量を溶融スラグとし、その一部を石灰石微粉末で0~18%置換することによるコンクリートの品質改善について検討した。その結果、所要のスランプを得るための単位水量の低減、ブリーディング率の減少と終了時間の短縮、凝結時間の短縮、同一W/Cにおける圧縮強度の増加、凍結融解抵抗性の向上等の改善効果を得られることが明らかとなった。また、その置換率は10~15%程度でよいことから溶融スラグ骨材の多量使用の可能性を確認できた。

キーワード：溶融スラグ骨材, 石灰石微粉末, ブリーディング, 凍結融解抵抗性, 圧縮強度

1. はじめに

「環境基本法」を基本理念とする循環型社会の形成が、廃棄物の発生抑制、適正処理および資源の有効利用（再生利用）の推進によって形成されつつある。このような中で、溶融スラグ骨材（一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材）や再生骨材などが JIS 化され、その品質規格が規定されたことによって、これらのリサイクルはより加速するものと期待されている。一方、コンクリート用骨材については、天然骨材資源の枯渇と骨材品質の低下が叫ばれている中で、再生骨材、スラグ骨材、溶融スラグ骨材などの活用が有望視されている¹⁾。既存の研究では普通砂の一部を溶融スラグ細骨材で置換した研究が多く、置換率の増加に伴って、強度が低下する、ブリーディングが多くなる、耐久性が低下する、等のことが明らかにされている²⁾。

そこで、本研究においては、溶融スラグ骨材の大半が廃棄されている現状を打開する一方策が、溶融スラグを多量に用いたコンクリートの品質確保であると考え、ここでは、細骨材の全量を溶融スラグ骨材とし、その一部を石灰石微粉末で置換することによる溶融スラグを用

いたコンクリートの品質改善についての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには高炉セメント B 種（比表面積：3870cm²/g, 密度：3.04g/cm³）を、石灰石微粉末としては、省エネの観点から、市販品としては比較的粒径の大きいもの（比表面積 5000cm²/g, 密度 2.70g/cm³, 平均粒径 14.5 μm）を使用した。骨材の物理的性質は一括して表-1 に示すが、細骨材には鳥取県 Y 市に設置されたプラズマ溶融方式の焼却施設から製造された水砕スラグ（以下、Y スラグと略記）ないしは普通砂を、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を用いた。なお、普通砂は土木学会の標準粒度範囲内に入るように砕砂と陸砂を質量比 9：1 とした混合砂である。Y スラグは、表-1 に示す JIS A 5031 の規定を満たすもので、モルタルの膨張率試験（JIS A 5031 附属書 1）においても普通セメントで-0.7%、高炉セメント B 種で-0.1%の膨張率となり、規定値 2% 以下を満足している。また、モルタルバー法（JIS A 1164）によるアルカリシリカ反応性試験を継続中であり、3 ヶ月までの結果では膨張率 0.034%となっている。減水

表-1 骨材の物理的性質

骨材	F.M.	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粒形判定 実積率(%)	安定性 (%)	微粒分量 (%)
砕石 (粗骨材)	6.78	2.73	2.71	0.79	59.5	—	—	0.0
普通砂	2.78	2.64	2.59	1.84	66.6	—	—	3.7
Y スラグ	3.04	2.80	2.79	0.32	59.9	55.3	1.7	1.9
JIS A 5031			2.5 以上	3.0 以下		53 以上	10 以下	7.0 以下

*1 (株) 大本組土木本部土木部 (正会員)

*2 鳥取大学工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 鳥取大学工学部土木工学科准教授 工博 (正会員)

*4 鳥取大学工学部土木工学科准教授 工博 (正会員)

剤にはリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を、空気量調整剤としてはアルキルエーテル系 AE 助剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの示方配合を表-2に示す。コンクリートの種類は、細骨材として普通砂のみを使用したもの（以下、普通コンクリートと称す）とスラグコンクリートの2種類で、スラグコンクリートとしては、石灰石微粉末を使用せず細骨材の全量をYスラグとしたもの（以下、Y100と略記）、細骨材としてYスラグの一部を石灰石微粉末で置換し、置換率として容積比でYスラグの5%、10%、15%、18%としたもの（以下、Y100-5、Y100-18などと略記）を選定した。なお、配合設計条件は、水セメント比（W/C）45、55および65%に対して、スランブを8±1cm、空気量を5.5±0.5%（凍結融解抵抗性の向上のため、一般のレディーミクストコンクリートよりも1%大きな値を設定）とした。

2.3 試験項目

行った試験は、スランブ（JIS A 1101）、空気量（JIS A 1128）、凝結時間（JIS A 1147）、ブリーディング（JIS A 1123）、圧縮強度（JIS A 1108）、静弾性係数（JIS A 1149）、乾燥収縮および凍結融解試験（JIS A 1148）で、

それぞれ JIS 規格に基づいて行った。なお、乾燥収縮試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、乾燥開始時の材齢は2日、供試体の保存条件は20℃、相対湿度60%で、JIS A 1129-2のコンタクトゲージ法に準拠して行った。

3. 実験結果と考察

3.1 溶融スラグ細骨材の粒度分布

Yスラグの一部を石灰石微粉末で置換したものを含め、使用した細骨材の粒度分布を図-1に示す。石灰石微粉末で置換した細骨材は、置換率が10%までは土木学会標準粒度の範囲内にあるが、15%以上のものは標準粒度範囲からはずれ、細骨材として JIS 規格に適合しない範疇のものである。

3.2 最適細骨材率（最適 s/a）と推奨細骨材率（推奨 s/a）

最適 s/a を把握するために、単位水量を W=160kg/m³、空気量を 5.5±0.5% として、細骨材率 s/a のみを変化させてスランブを測定した。その一例として、W/C=55%のコンクリートに対して行った結果を図-2に示す。普通コンクリートに対する s/a との関係は上に凸な形状を示すのに対して、スラグの一部を石灰石微粉末で置換した場

表-2 示方配合

	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G	AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (ml)
					石灰石微粉末	Y スラグ			
普通コンクリート	45	40	154	342	—	(711)	1103	0.25	6160
	55	42	154	280	—	(769)	1099	0.25	5040
	65	44	154	237	—	(822)	1082	0.25	4265
Y100	45	44	165	367	—	806	1000	0.25	1754
	55	46	165	300	—	871	997	0.25	1540
	65	48	165	254	—	929	982	0.25	1200
Y100-5	45	42	160	356	38	741	1050	0.25	2133
	55	44	160	291	41	801	1046	0.25	1745
	65	48	160	246	45	893	992	0.25	1477
Y100-10	45	38	156	347	69	642	1134	0.25	4160
	55	42	154	280	79	734	1099	0.25	2764
	65	47	156	240	89	835	1020	0.25	1920
Y100-15	45	36	158	351	97	571	1165	0.25	5969
	55	38	154	280	107	628	1174	0.25	4200
	65	45	154	237	129	758	1063	0.25	3080
Y100-18	45	34	165	367	108	511	1179	0.25	6044
	55	38	160	291	126	597	1158	0.25	4945
	65	42	165	254	141	667	1095	0.25	4185

※ () は普通砂を示す。

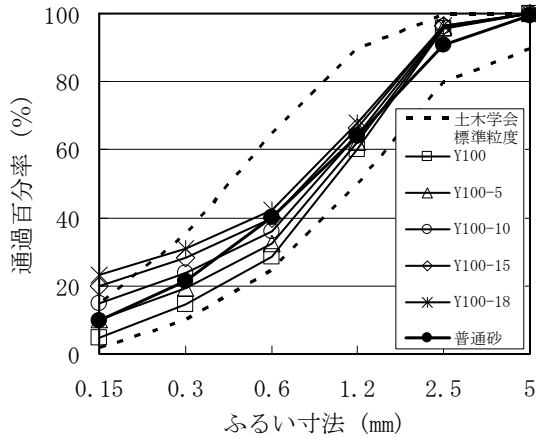


図-1 細骨材の粒度分布

合のそれは明確な上に凸な形状を示さず、かつ、 s/a が小さい場合には分離の傾向（図中の×印で写真-1参照）が見られた。そこで、スランブ測定後にスランブしたコンクリートの底面に敷いた鉄板上を突き棒で10回程度タッピングし、そのときのコンクリートの崩れ方によって分離しない s/a の最小値をもって推奨 s/a とした。

以下においては、 s/a は上記の試験を通して得られた推奨 s/a を用い、試練りに基づいて決定されたスランブ $8 \pm 1\text{cm}$ 、空気量 $5.5 \pm 0.5\%$ のコンクリート（表-2の示方配合表を参照）の結果を述べる。

3.3 単位水量

スランブ $8 \pm 1\text{cm}$ を得るための単位水量と石灰石微粉末の置換率との関係を図-3に示す。図より、普通コンクリートの単位水量は、いずれの W/C においても $W=154$

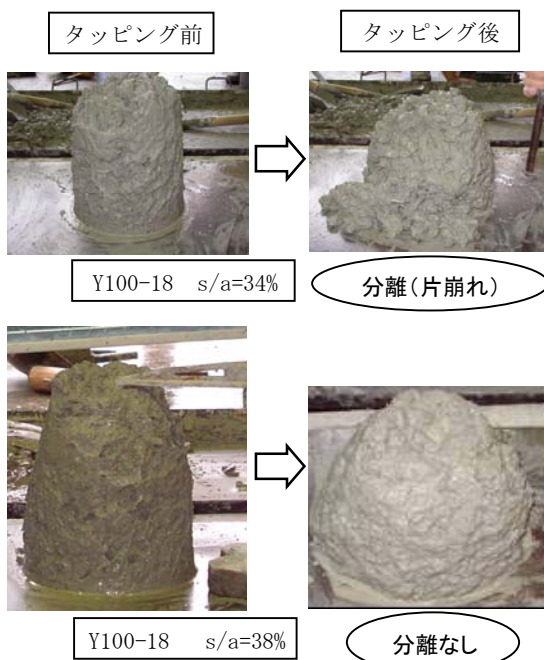


写真-1 タッピングによる推奨 s/a の判定

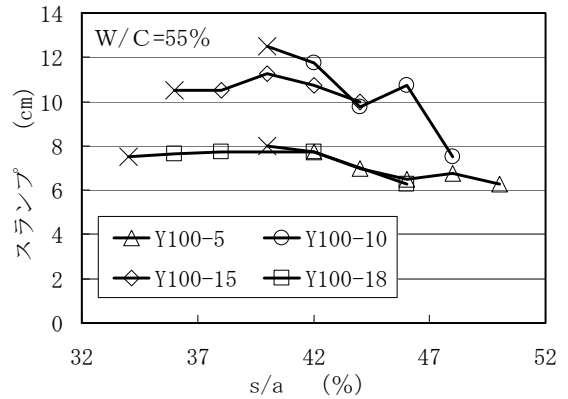


図-2 細骨材率とスランブの関係

kg/m^3 であるのに対して、細骨材の全量をYスラグにしたY100のコンクリートにおけるそれは $W=165\text{kg/m}^3$ で、普通コンクリートよりも 11kg/m^3 の増加となっている。一方、Yスラグの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの単位水量は、いずれの W/C においても置換率10%程度までは置換率の増加に伴って減少し、10~15%の間で最小値を示し、さらに15%を越えると増加することがわかる。このような挙動は、石灰石微粉末の置換率の増加による粉体量の増加によって流動性は増大するが、置換率が大きくなる（15%を越える）と粘性が大きくなって流動性を阻害し、所要のスランブを得るための単位水量が増加するためと考えられる。本実験の範囲内では、石灰石微粉末の置換率が10~15%の間で普通コンクリートと等しい単位水量が達成された。

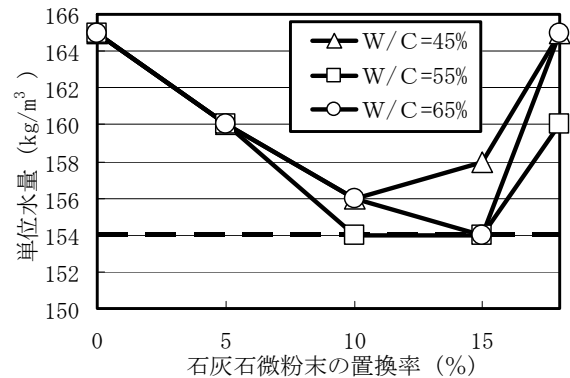


図-3 石灰石微粉末の置換率と単位水量の関係

3.4 スランブおよび空気量の経時変化

Y100 と Y100-5~18 および普通コンクリートについて行ったスランブと空気量の経時変化のうち、水セメント比 (W/C) 55%の結果を図-4、5に示す。図より、Y100の練混ぜ後30分までのスランブロスが他のコンクリートに比べてやや大きい、石灰石微粉末で置換する

ことよって、練混ぜ直後から 90 分経過後まで普通コンクリートと同等のスランブ保持能力を付与できることがわかる。このことは他の水セメント比についても同様である。

一方、溶融スラグを用いたコンクリートの空気量の経時変化は、石灰石微粉末を用いない Y100 が最も少なく、続いて Y100-5、Y100-18 と続き、置換率を 10~15% 程度としたコンクリートでは普通コンクリートと同程度となっている。

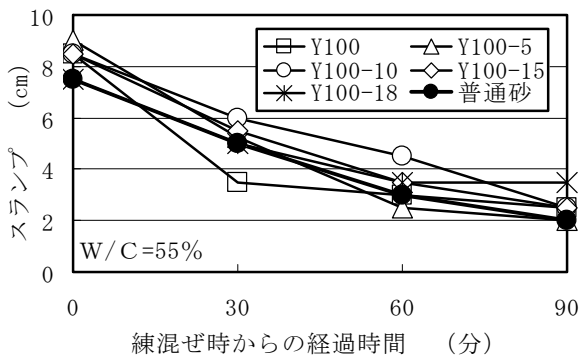


図-4 スランブの経時変化

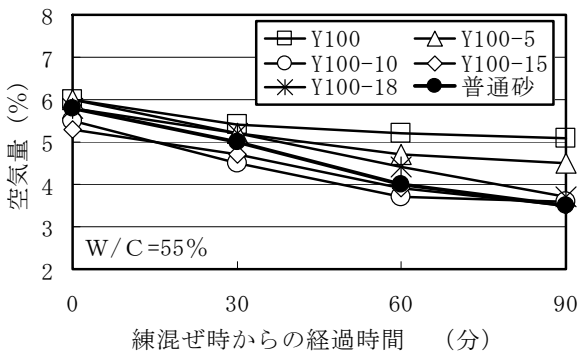


図-5 空気量の経時変化

3.5 凝結時間

W/C=55%としたコンクリートの凝結時間の試験結果を図-6に示す。Y100の凝結時間は、普通コンクリートに比べ始発で510分、終結で650分長くなっているが、石灰石微粉末で置換したコンクリートの凝結時間は、置換率が大きくなるに伴って短縮され、普通コンクリートのそれに近づくことが分かる。ちなみに、Y100-15ではY100よりも始発で400分、終結で520分短縮されている。これらのことから、溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの凝結時間は普通コンクリートのそれよりも長くなるが、石灰石微粉末の置換によって凝結時間は短縮(改善)できるといえる。なお、微粒分量が凝結速度に及ぼす影響を検討した、吉田らの研究でも、W/C=55%

スランブ 7.5cm のコンクリートを対象として、細骨材の一部を微粉末で置換した場合、置換率が大きくなると凝結時間が短くなるのと同様の結果が得られている³⁾。本研究では、凝結時間を短縮するための効果的な置換率は15%であると判断される。

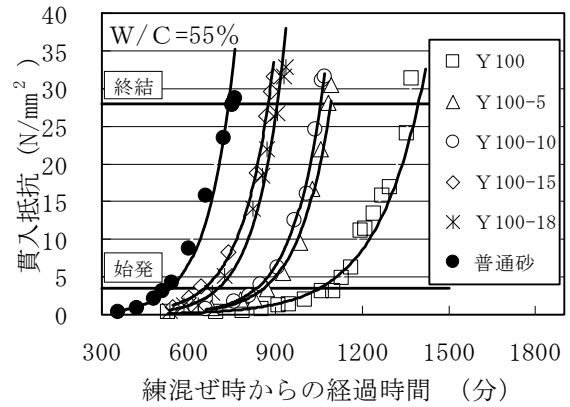


図-6 凝結時間

3.6 ブリーディング

W/C=55%のコンクリートに対するブリーディング試験結果を図-7に示す。Y100コンクリートのブリーディング率は普通コンクリートのそれと比べて極めて大きく、かつブリーディングの継続時間も長い。一方、溶融スラグの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートのブリーディング率は、石灰石微粉末の置換率が増加するに伴って低下し、ブリーディング速度も小さくなる。Y100とY100-15、18を比較すると、ブリーディングの終了時間はY100よりも90分の短縮、ブリーディング率はY100のそれよりもそれぞれ8.4%、12.1%低下している。これは、微粒分の増加に伴ってブリーディング水の移動流路が長くなる、骨材の沈降速度が遅くなる、などの現象によって、微粒分量はブリーディングの低減に効果的であるとの平田らの報告⁴⁾と一致するものである。

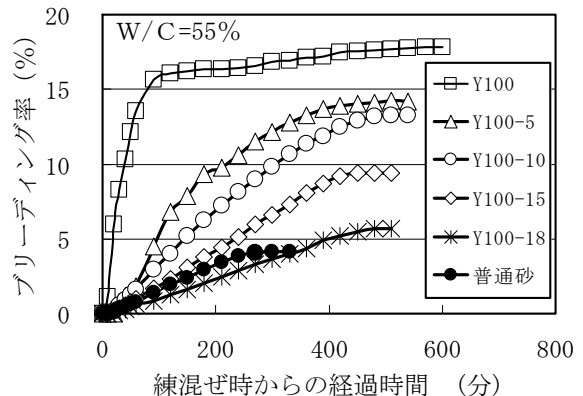


図-7 ブリーディング

なお、ブリーディング率については、鉄筋コンクリート構造等ではブリーディングは過多でないことが望ましいことやコンクリート表面のコテ仕上げ、さらには強度の均一さ等を考慮すると、普通コンクリートに近いブリーディング率が望ましく、そのための微粒分の置換率としては15%~18%が適切であるといえる。

3.7 圧縮強度

材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度と C/W との関係を図-8 に示す。本実験で設定した W/C の範囲 (W/C=45~65%) においては、普通コンクリートと同様に、熔融スラグ細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度と C/W との間にも線形関係が認められる。また、Y100-5~18 のコンクリートの圧縮強度は、いずれの C/W においても Y100 のそれよりも大きくなっていることが分かる。このことから、Y スラグを用いたコンクリートの圧縮強度は石灰石微粉末の置換によって大きくでき、さらに置換率 10% と 15% のコンクリートの圧縮強度は W/C=45~65% の範囲において普通コンクリートのそれと同等以上の強度が得られていることがわかる。

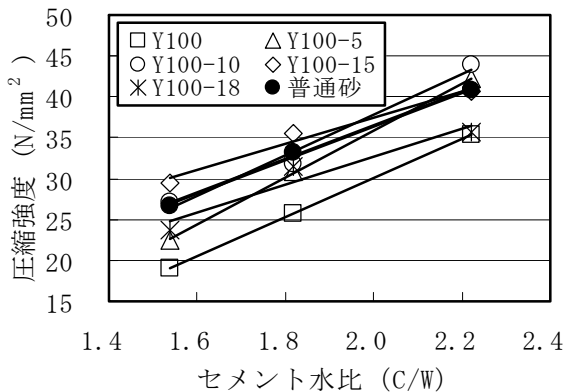


図-8 圧縮強度と C/W の関係

3.8 静弾性係数

材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数 (1/3 割線弾性係数) との関係を図-9 に示す。なお、図には参考のために土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]⁵⁾ に示されている普通コンクリートに対する圧縮強度と静弾性係数との関係を実線で示している。スラグの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの静弾性係数は、同一圧縮強度における普通コンクリートおよび Y100 のそれよりも大きくなるが、一方で、置換率の大小は静弾性係数にほとんど影響を及ぼさないという結果が得られた。

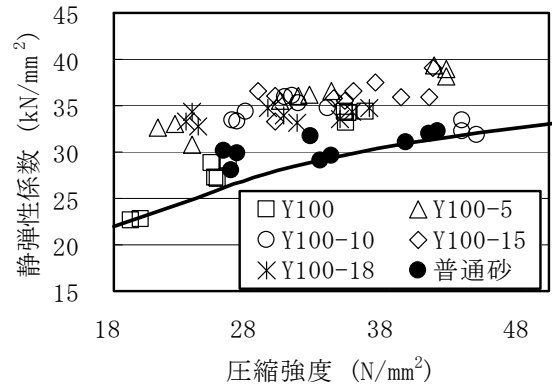


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

3.9 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮試験を行った結果の一例として、W/C=55% における結果を図-10 に示す。図より、スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートのそれよりも小さいこと、さらには石灰石微粉末による置換率の大小が乾燥収縮に及ぼす影響も小さい結果が得られた。

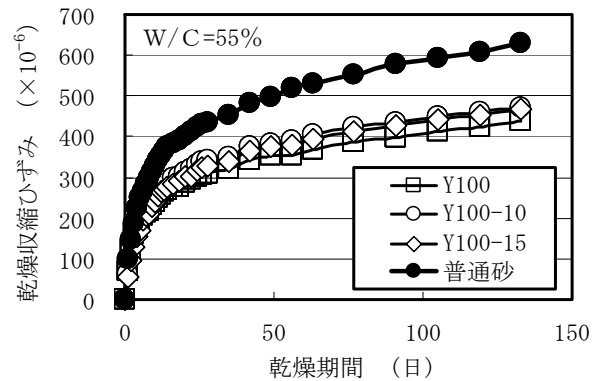


図-10 乾燥収縮試験

3.10 凍結融解抵抗性

W/C=65, 55% としたコンクリートの凍結融解試験結果を図-11 (A), (B) に示す。普通コンクリートの相対動弾性係数は、W/C=65% においても凍結融解 300 サイクルまでほぼ 100% を保持しているのに対して、Y スラグのみを使用した Y100 コンクリートは、W/C=55% においても凍結融解 90 サイクルを越えた時点で相対動弾性係数が 60% を下回っており、耐凍害性に乏しいコンクリートであるといえる。

つぎに、Y スラグの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの相対動弾性係数は、置換率が同一の場合には W/C が小さいほど大きいことがわかる。このことは、細骨材に熔融スラグを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、普通コンクリートと同様に W/C を小さくする

ことによっても改善できるが、溶融スラグ細骨材の一部を石灰石微粉末によって置換する方法が極めて有力な改善方法になることを示している。このような置換率として、本研究の範囲では、置換率として15%程度が望ましいことが明らかになった。また、適切なW/Cと置換率の組合せによって、例えば、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]⁶⁾による最も厳しい凍結融解作用を受ける場合に要求される相対動弾性係数85%以上を達成したい場合には、W/C=55%、石灰石微粉末の置換率を15%とする設定をすることによって溶融スラグを用いたコンクリートの凍結融解性が確保できることになる。

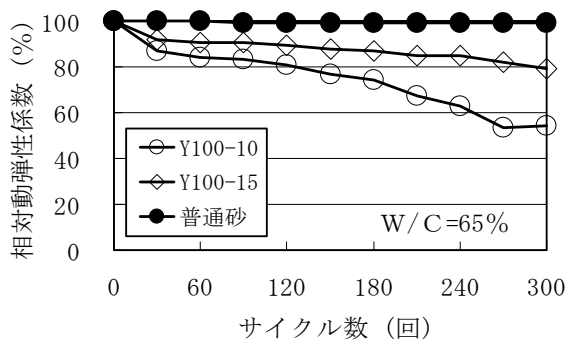


図-11 (A) 凍結融解試験

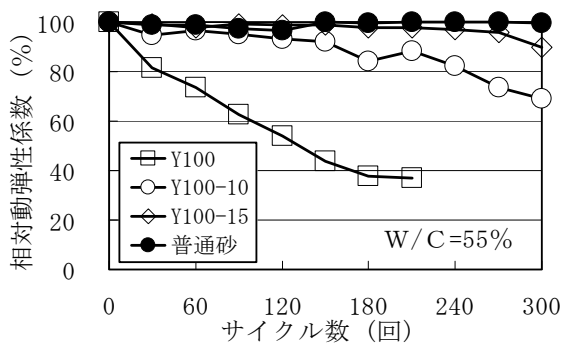


図-11 (B) 凍結融解試験

4. 結論

本研究では、鳥取県Y市で製造された溶融スラグ細骨材を対象として、このスラグ細骨材を用いたコンクリートに対して、溶融スラグ細骨材の一部を石灰石微粉末で置換することによるフレッシュ、および硬化後の品質改善効果と溶融スラグを多量使用する可能性を検討した。以下に、本研究の範囲内で得られた結果を列挙し、結論とする。

(1) 溶融スラグ細骨材の一部を石灰石微粉末で置換することにより、所定のスランブを得るための単位水量

を低減できる。

(2) 石灰石微粉末で置換したコンクリートのスランブおよび空気量のロスは普通コンクリートと同等で、溶融スラグのみを用いたコンクリートで生じる練混ぜ後30分までのやや大きなスランブを解消できる。

(3) 溶融スラグ細骨材のみを用いたコンクリートの凝結時間およびブリーディングの率は、普通コンクリートのそれよりも大幅に遅延する、あるいは大きくなるが、石灰石微粉末で置換することによって改善され、置換率は15%程度で普通コンクリートのそれらに近づく。

(4) 石灰石微粉末で置換することにより、溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度を大きくでき、置換率15%程度にすることによって同一W/Cにおける普通コンクリートのそれと同等ないしは同等以上の強度が得られる。

(5) 溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートよりも小さいが、石灰石微粉末の置換率の大小は乾燥収縮にほとんど影響を及ぼさない。

(6) 溶融スラグ細骨材のみを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は極めて小さいが、細骨材の一部を石灰石微粉末で置換することによって改善される。この改善効果は、置換率の増加に伴って大きくなる。

以上の結果より、溶融スラグ細骨材の一部を石灰石微粉末で置換することによって溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質を改善でき、溶融スラグの多量使用の可能性が示された。

最後に、本研究は科学研究費(基礎研究(C)、課題番号:17560407)で行ったことを明記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 骨材の品質と有効利用に関する研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、pp.3-19、2007.7
- 2) 戸田勝哉ほか：溶融スラグを骨材として用いたコンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1367-1372、2003
- 3) 骨材の品質と有効利用に関する研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、pp.82-85、2007.7
- 4) 骨材の品質と有効利用に関する研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、pp.73-77、2007.7
- 5) 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書、構造的照査編、pp.28-29、2002.3
- 6) 土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書、施工編、pp.28-29、2002