

論文 全骨材に熔融スラグを用いたコンクリートの物性と品質改善

金子 泰治*1・井上 正一*2・黒田 保*3・吉野 公*3

要旨：熔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、また、熔融スラグの利用が停滞している現状を鑑み、ここでは熔融スラグの多量使用の観点から骨材の全量を熔融スラグとし、熔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、所要のスランブを得るための単位水量の低減、ブリーディングの減少と終了までの時間短縮、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。

キーワード：熔融スラグ骨材, 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推進されている中で、一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を熔融固化したコンクリート用熔融スラグ骨材が JIS 化され、熔融スラグ骨材のリサイクルを具現化する場が整備された。しかし現実をみると、熔融スラグ骨材は JIS 化後においても一部が路盤材として使用されていることを除き、大半は最終処分場に投棄されている。そこで、熔融スラグの適用場が拡大されていないこと、さらには熔融スラグを将来において再々使用していくとの課題に答えようとする、コンクリート品質を落とさないために少量使用して広く分散した形で適用するよりも、限られた場所に集中・多量使用した形で適用する方が合理的となる状況も想定される。

コンクリート用骨材として熔融スラグを用いた既往の研究においては、普通砂ないしは粗骨材の一部を熔融スラグ骨材で置換した研究が多い。それらの結果によると、骨材中への熔融スラグの添加量が増加するに伴って、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¹⁾。そこで、本研究においては、コンクリート中の熔融スラグ骨材量をできる限り多くしたいという立場に立ち、骨材には熔融スラグ骨材のみを用いたコンクリートを対象として、そのようなコンクリートを製造するための配合設計とその配合設計に基づいて製造されたコンクリートのフレッシュおよび硬化後の物性を明らかにすることを試みた。さらに、全骨材に熔融スラグを用いたコンクリートは、一般に品質が劣るため、熔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品質改善についても検討した。なお、この品質改善の検討には、フレッシュ性状、乾燥収縮および凍結融解抵抗性が含まれる。

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 : 3870 cm²/g, 密度 : 3.04 g/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 5000 cm²/g, 密度 2.70 g/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熔融方式の焼却施設から製造された水砕スラグ (以下、Y スラグと称す) ないしは普通砂を、粗骨材には鳥取県 S 広域管理組合に設置された混合熔融方式によるバーナ熔融炉より製造された徐冷スラグ (Y_G スラグと称す) ないしは砕石を用いた。なお、普通砂および砕石は対比用の普通コンクリートを製造するために用いるもので、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。また、熔融スラグ骨材は、JIS A 5031 の規格を満たすものである (表-1 参照)。コンクリートの製造に際しては、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤を、空気量調整剤に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、Y_G スラグと Y スラグを粗・細骨材として用いた熔融スラグコンクリートと骨材に普通砂と砕石を用いた普通コンクリートの 2 種類で、熔融スラグコンクリートには石灰石微粉末を使用しないもの (YY100 と標記) と使用したものを採り上げた。なお、石灰石微粉末の使用基準として、ここでは容積比で細骨材として用いる Y スラグの 10%, 15% 置換したもの (YY100-10, YY100-15 と標記) を選定した。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

*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)

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 (%)	40 tf 破砕値 (%)
碎石	6.79	2.75	2.73	0.61	58.8	—	—	0.0	9.7
Y _G スラグ	6.98	2.65	2.63	0.86	58.9	—	—	0.0	45.6
普通砂	2.74	2.67	2.64	1.29	66.3	—	—	3.7	
Yスラグ	3.18	2.80	2.79	0.32	60.9	55.3	1.7	1.9	
JIS A 5005			2.5 以上	3.0 以下					
JIS A 5031			2.5 以上	3.0 以下		53 以上	10 以下	7.0 以下	

JIS A 5005 : 「コンクリート用碎石及び砕砂」の規格, JIS A 5031 : 「焼却灰を溶融固化した溶融スラグ骨材」の規格

表-2 示方配合

コンクリートの種類	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 Y _G スラグ	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	150	333	—	(719)	(1114)	0.25	6328
	55	42	150	273	—	(776)	(1109)	0.25	3276
	65	44	150	231	—	(830)	(1092)	0.25	2310
YY100	45	46	168	373	—	836	929	0.25	2238
	55	48	168	305	—	903	926	0.25	1220
	65	—	—	—	—	—	—	—	—
YY100-10	45	44	160	356	81	733	984	0.25	3560
	55	46	160	291	88	790	979	0.25	2328
	65	48	160	246	94	842	963	0.25	1476
Y100-15	45	38	160	356	105	598	1089	0.25	4984
	55	42	160	291	120	682	946	0.25	3492
	65	46	160	246	135	762	1000	0.25	2460

※ () は, 細骨材については普通砂, 粗骨材については碎石の単位量を示す。

プを 8±1cm, 空気量を 6±1 % (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 1.5%大きな値を設定) とした。

2.3 試験項目

行った試験は, スランプ (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, 100×100×400 mm 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%のもとで 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 溶融スラグ骨材の粒度分布

容積比で Yスラグの 10, 15% 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 (A) に, 粗骨材の粒度分布を 図-1 (B) 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% のものは細骨材として土木学会の標準粒度からはずれるものである。また, 粗骨材として用いた Y_Gスラグについては, ふるい寸法 15mm

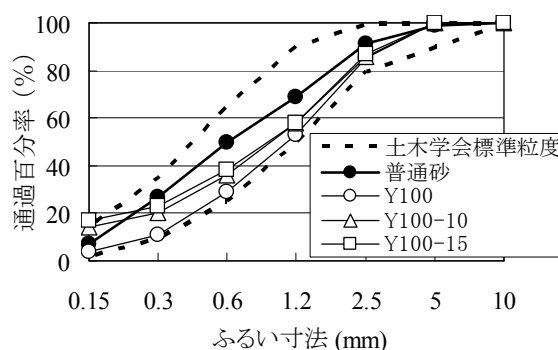


図-1(A) 細骨材 (普通砂とYスラグ) の粒度分布

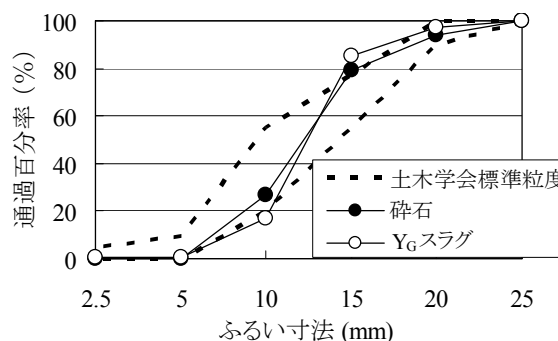


図-1(B) 粗骨材 (碎石とY_Gスラグ) の粒度分布

で土木学会標準粒度からやや外れるものの、砕石に近い粒度分布のものである。

3.2 最適細骨材率（最適 s/a）

最適 s/a を把握するために、単位水量 $W=160\text{kg/m}^3$ 、空気量 $6\pm 1\%$ とし、細骨材率 s/a のみを変化させて練混ぜたコンクリートのスランプを測定した結果を図-2 に示す。図より、普通コンクリートおよび溶融スラグを用いたコンクリートともスランプと s/a との関係は上に凸な形状を示し、各配合毎に最適 s/a が存在することがわかる。なお、Yスラグは普通砂に比べて粗粒率が大きいことや実積率が小さいこともあって、YY100 の最適 s/a は普通コンクリートのそれよりも大きくなっている。また、全骨材に溶融スラグを用いたコンクリートの最適 s/a は、石灰石微粉末の置換率を大きくすることによって小さくなり、さらに W/C が小さくなるに伴って小さくなることもわかる。なお、石灰石微粉末を用いない溶融スラグコンクリート (YY100) においては、 $W/C=65\%$ のようにセメント量 (粉体量) が少ない場合には、配合条件を満たすものは製造できなかった (表-2 参照)。

以下においては、s/a は上記の試験を通して得られた最適 s/a を採用し、スランプ $8\pm 1\text{cm}$ 、空気量 $6\pm 1\%$ のもとで、試練りに基づいて製造されたコンクリート (示方配合は表-2 参照) の結果を述べる。

3.3 単位水量

スランプ $8\pm 1\text{cm}$ 、空気量 $6\pm 1\%$ の配合条件の下で、試練りに基づいて決定された単位水量を表-2 に併記した。表より、いずれの W/C においても普通コンクリートの単位水量は $W=150\text{kg/m}^3$ であるのに対して、骨材の全量に溶融スラグを用いた YY100 コンクリートにおけるそれは $W=168\text{kg/m}^3$ で、普通コンクリートよりも 18kg/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 YY100 のそれよりも少なく、置換率 10~15% の間では 8kg/m^3 減少していることがわかる。このことより、細骨材に溶融スラグを用いたコンクリートの結果²⁾と同様に、骨材の全量に溶融スラグを用いたコンクリートにおいても石灰石微粉末を用いることによって粉体量が増加し、その結果、流動性が增大して単位水量が減少したと考えられる。

3.4 スランプおよび空気量の経時変化

YY100 と YY100-10、YY100-15 および普通コンクリートに対して行ったスランプ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-3、4 に示す。図より、YY100 の練混ぜ後 30 分までのスランプ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によって、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プ保持能力を

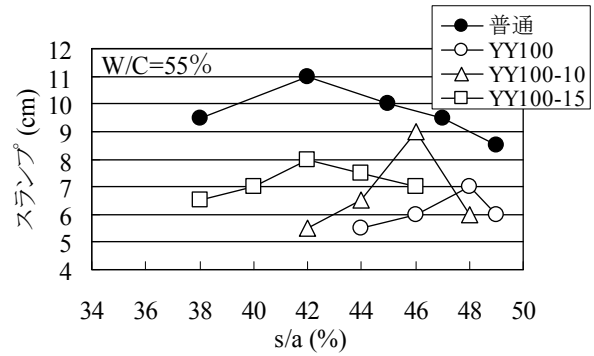


図-2(A) スランプとs/aとの関係

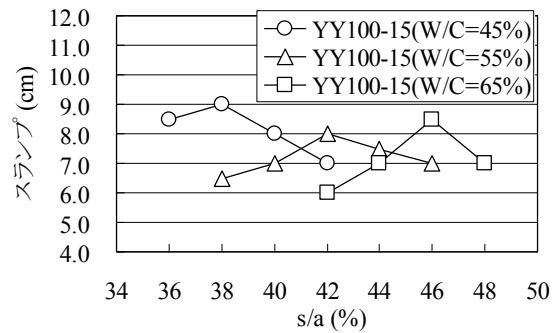


図-2(B) スランプとs/aとの関係

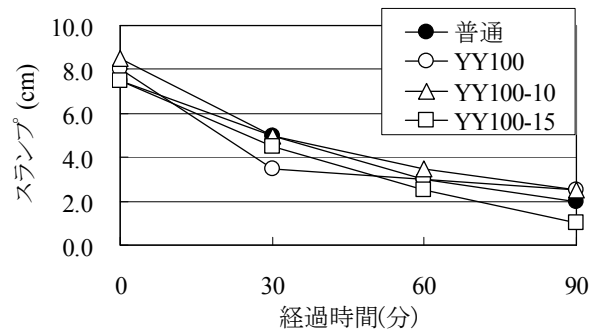


図-3 スランプの経時変化

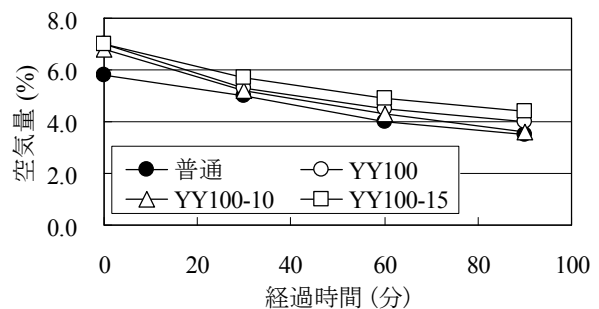


図-4 空気量の経時変化

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った。

また、溶融スラグを用いたコンクリートの空気量の経時変化も、石灰石微粉末を用いない YY100 が他のものよりもやや大きい、石灰石微粉末を添加することによって小さくなり、置換率を 10~15% 程度としたコンクリー

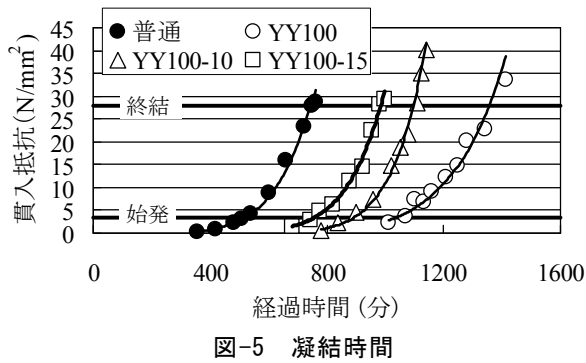


図-5 凝結時間

トでは普通コンクリートと同程度となることわかる。

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-5に示す。YY100の凝結時間は、普通コンクリートに比べ始発で540分、終結で590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わかる。ちなみに、YY100-15ではYY100よりも始発で310分、終結で360分短縮されている。これらのことから、熔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、ブレン比表面積が2600cm²/gでシリカ分82.5%の微粉末を用いた吉田らの研究³⁾においても、細骨材の一部を微粉末で置換した場合には、置換率が大きくなると凝結時間が短くなっており、本研究で使用した石灰石微粉末についても同様の結果が得られた。本研究における石灰石微粉末の置換率の選定範囲は狭いが、凝結時間を短縮するための置換率は10%よりも15%の方がより効果的であるといえる。

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の結果を図-6に示す。YY100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、熔融スラグ細骨材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。YY100と比較すると、YY100-10、-15におけるブリーディング終了時間はYY100のそれよりもそれぞれ150分、180分の短縮、ブリーディング率はYY100のそれよりも4.5%、8.7%低下している。これは、微粒分量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。

なお、ブリーディング率については、鉄筋コンクリー

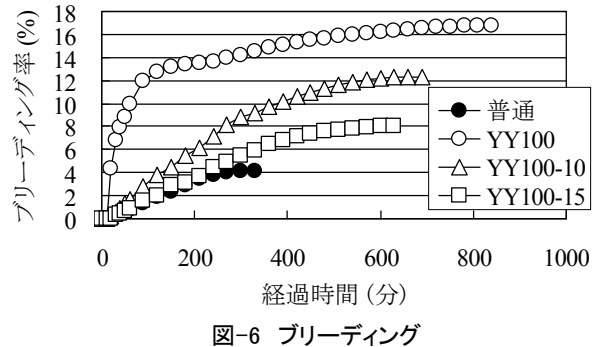


図-6 ブリーディング

ト構造等ではブリーディングは過多でないことが必須で、コンクリート表面のコテ仕上げ、さらには強度の均一さを考慮すると、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%あるいはそれ以上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-7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、熔融スラグ骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、同一C/Wにおける普通コンクリートのそれよりも小さいが、普通コンクリートの場合と同様に圧縮強度とC/Wの間には線形関係が成立することがわかる。また、図-8より、骨材の全量に熔融スラグを用いたコンクリートにおいては、W/Cが55%以上の場合、石灰石微粉末を置換率10~15%用いることによってW/C=65%の配合においては製造不能であったコンクリートが製造でき、かつその圧縮強度は普通コンクリートの85%以上の強度が確保できる。一方、W/Cの小さい(W/C=45%)領域では、セメント由来の粉体量が多くなるために石灰石微粉末量が圧縮強度に及ぼす影響は明瞭でないが、少なくとも微粉末の使用による悪影響はなく、YY100-10、-15の圧縮強度は普通コンクリートのその85%の強度を保持しているYY100と同等あるいはそれ以上の値を示す。なお、W/C=55%のコンクリートの材齢3日における圧縮強度は、普通コンクリートでは10.6 N/mm²、YY100-10、-15コンクリート

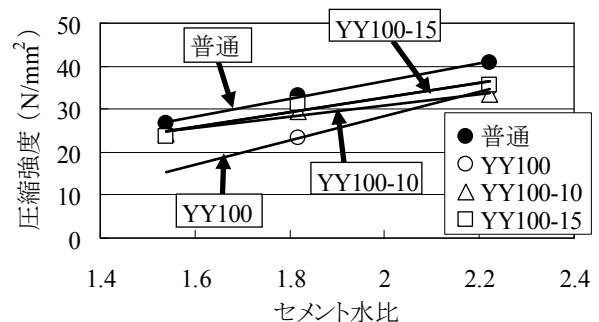


図-7 圧縮強度とセメント水比との関係

では 14.8, 14.4 N/mm² が得られており、石灰石微粉末の使用は初期強度を増加させる効果がある。

以上の結果より、石灰石微粉末の使用は W/C の大きい、すなわち、強度の小さいコンクリートに対してより有効で、かつ初期強度を要求するコンクリート二次製品の製造等に対してより有効であるといえる。

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も併記している。図より、骨材全量に熔融スラグを用いた YY100 コンクリートの静弾性係数は同一強度の普通コンクリートのそれとほぼ等しく、かつ土木学会の提案値に近いことがわかる。一方、熔融スラグ細骨材の一部を石灰石微粉末で置換した熔融スラグ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 YY100 のそれよりも大きくなるが、一方で、置換率が 10~15% の範囲においては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。

3.9 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮試験を行った W/C=55% における結果を図-10 (A) に示す。図より、熔融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かなり小さいこと、熔融スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮は石灰石微粉末の置換率の増加に伴ってやや大きくなる傾向にあるが、実質的には石灰石微粉末の置換率の大小が乾燥収縮に及ぼす影響は小さいことがわかる。また、YY100-15 のコンクリートに対して、W/C が乾燥収縮に及ぼす影響を検討した図-10 (B) より、熔融スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮は W/C が大きくなるに伴ってやや増加するが、W/C の大小が乾燥収縮に及ぼす影響は小さいといえる。また、W/C =65% のコンクリートの単位水量 (W=168 kg/m³) は他の W/C のコンクリートよりも 8 kg/m³ 程度多いが、乾燥収縮はそれほど大きくなっていないことも注目される。

3.10 凍結融解抵抗性

W/C=55% としたコンクリートの凍結融解試験結果を図-11(A) に示す。普通コンクリートの相対動弾性係数は凍結融解 300 サイクルまでほぼ 100% を保持しているのに対して、熔融スラグのみを使用した YY100 コンクリートのそれは凍結融解 150 サイクルに達した時点で相対動弾性係数が 60% を下回った。つぎに、熔融スラグ細骨材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石灰石置換率の増加に伴って大きくなり、置換率 10% では凍結融解 240 サイクルで 60% 以下

()内の数値は、普通コンクリートに対する圧縮強度の比を表す。

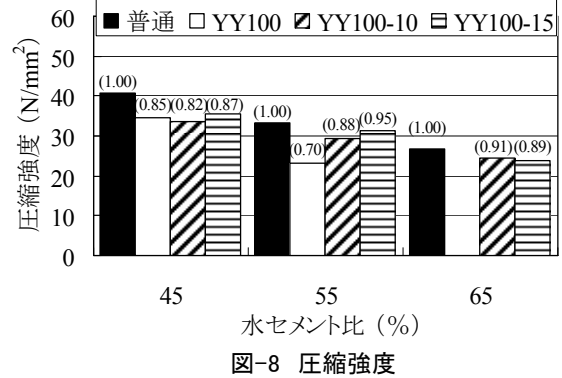


図-8 圧縮強度

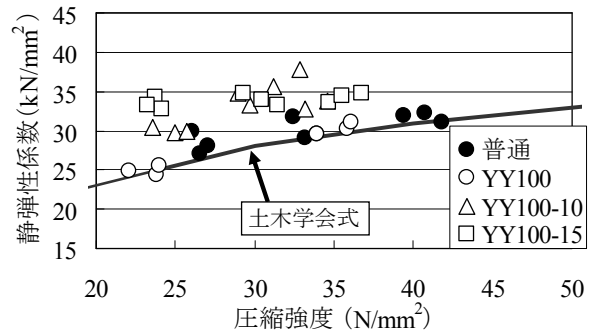


図-9 静弾性係数と圧縮強度との関係

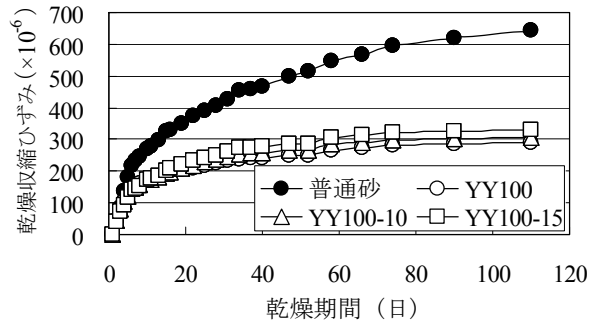


図-10(A) 乾燥収縮ひずみ

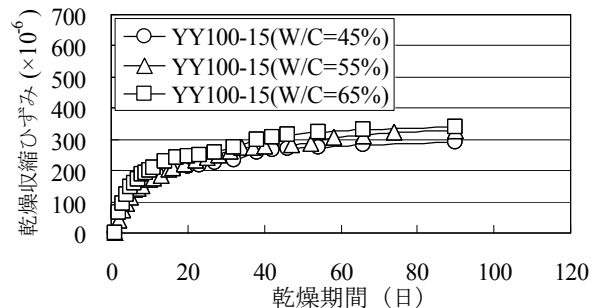


図-10(B) 乾燥収縮ひずみ

に低下していたものが、置換率 15% においては凍結融解 300 サイクルにおいて 60% を上回った。

図-11(B) は、凍結融解 300 サイクルにおける相対動弾性係数が 60% を上回ったコンクリート YY100-15 に

対して、W/C が凍結融解性に及ぼす影響を検討したものである。図より、W/C を小さくすることによって凍結融解 300 サイクル後の相対動弾性係数を大きくできるが、W/C の低減が相対動弾性係数、すなわち、耐凍害性の改善に及ぼす影響はそれほど大きくないといえる。

以上を総括すると、骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートの耐凍害性は、W/C を小さくすることによっても改善できるが、石灰石微粉末を用いる方が改善効果は大きいといえる。このような置換率として、本研究の範囲では、10%よりも15%の方が良好であることが明らかになった。

4. 結論

本研究では、鳥取県内で製造された熔融スラグの細骨材と粗骨材を対象として、骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートに対して、熔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、および硬化後の物性とその品質改善効果および熔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) 骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートにおいては（セメントの外割としてあるいは骨材の一部に）石灰石微粉末も用いることによって所定のスランプを得るための単位水量を低減できる。

(2) 骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートのスランプおよび空気量は、練混ぜ後 30 分までの間でやや大きなロスを生じるが、スラグ骨材の一部を石灰石微粉末で置換することによって解消でき、さらに普通コンクリートと同等の経時変化を示すように改善できる。

(3) 熔融スラグ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率は、それぞれ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、スラグ骨材の一部を石灰石微粉末で置換し、その置換率を大きくすることによって普通コンクリートのそれらに近づけることができる。

(4) 骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートにおいては、骨材の一部（本実験では細骨材の一部として換算）として石灰石微粉末を用いることにより、圧縮強度を大きくでき、その効果は W/C の大きな配合においてより大きい。

(5) 骨材全量に熔融スラグを用いたコンクリートの乾収縮は普通コンクリートよりも小さく、また、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) 骨材の全量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極めて小さいが、骨材の一部として石

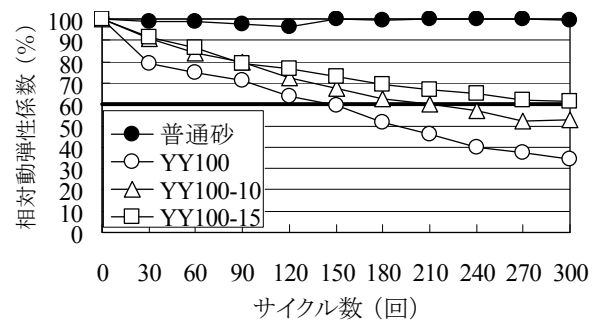


図11(A) 凍結融解試験結果

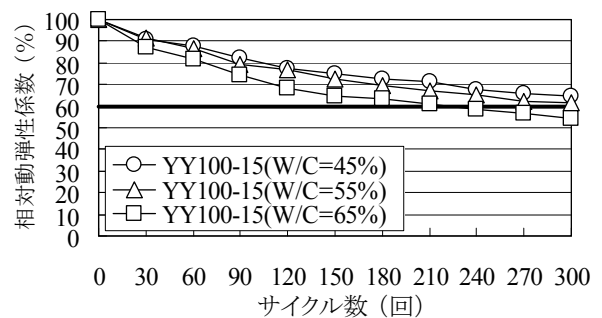


図-11(B) 凍結融解試験結果

灰石微粉末で置換する、ないしは W/C を小さくすることによって改善される。この改善は W/C を小さくするよりも石灰石微粉末の置換率を増加させる方が実用的であるといえる。

以上の結果より、石灰石微粉末を適切に用いることによって骨材の全量に熔融スラグを用いたコンクリートの品質が改善でき、熔融スラグの多量使用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 戸田勝哉ほか: 熔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
- 2) 金子泰治ほか: 石灰石微粉末による焼却灰熔融スラグを用いたコンクリートの品質改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.505-510, 2008
- 3) 吉田弥智ほか: けい砂中の微砂分がコンクリートの性質に及ぼす影響, セメント技術年報, No.63, pp.264-267, 1978
- 4) 平田隆祥ほか: 石灰石粉末の多量添加がコンクリートの強度特性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.204-209, 1995
- 5) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書, 構造性能照査編, pp.28-29, 2002.3