

焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの品質改善に及ぼす石灰石微粉末の影響

(株)大本組 正会員 ○金子泰治 東京工業大学大学院 学生会員 大石峻也
 鳥取大学 正会員 黒田 保 鳥取大学 正会員 吉野 公
 鳥取大学 正会員 井上正一

1. はじめに

循環型社会の形成が進められている中で、一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材が JIS 化された。その有効利用の促進は、廃棄物最終処分場の逼迫対策として期待されている。焼却灰溶融スラグ骨材（以下、溶融スラグという。）を用いた既存の研究では、骨材の一部を溶融スラグ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¹⁾。そこで、本研究においては、溶融スラグを多量に用いたコンクリートの品質確保を目的に、細骨材と粗骨材の全量を溶融スラグとし、その細骨材の一部を石灰石微粉末で置換することによって、コンクリートの品質改善に及ぼす石灰石微粉末の影響について検討を行った。

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、普通炭酸カルシウム（比表面積 5000cm²/g、密度 2.70g/cm³、平均粒径 14.5 μm）を使用した。骨材の物理的性質を一括して表-1 に示す。細骨材には鳥取県内の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、粗骨材には同県内のバーナー溶融方式の焼却施設から製造された徐冷スラグ（以下、Y_Gスラグと略記）ないしは最大寸法 20mm の碎石を使用した。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

表-1 骨材の物理的性質

| 細・粗骨材 | F.M. | 表乾密度 (g/cm ³) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 実積率 (%) | 40tf 破砕値 (%) | 微粒分量 (%) |
|----------------------|------|---------------------------|---------------------------|---------|---------|--------------|----------|
| 普通砂 (混合砂) | 2.74 | 2.67 | 2.64 | 1.29 | 66.3 | — | 3.7 |
| Yスラグ | 3.18 | 2.80 | 2.80 | 1.55 | 60.9 | — | 1.5 |
| JIS A 5005 (砕砂) | — | — | 2.5 以上 | 3.0 以下 | — | — | 7.0 以下 |
| JIS A 5031 (MS5) | — | — | 2.5 以上 | 3.0 以下 | — | — | 7.0 以下 |
| 碎石 (粗骨材) | 6.79 | 2.75 | 2.73 | 0.61 | 58.8 | 9.7 | 0.0 |
| Y _G スラグ | 6.98 | 2.65 | 2.63 | 0.86 | 58.9 | 45.6 | 0.0 |
| JIS A 5005 (碎石) | — | — | 2.5 以上 | 3.0 以下 | — | — | 1.0 以下 |
| JIS A 5031 (MG20-05) | — | — | 2.5 以上 | 3.0 以下 | — | — | 1.0 以下 |

9:1 とした混合砂である。Yスラグ及び Y_Gスラグは、表-1 に示す JIS A 5031 の規定を満たすものであるが、Y_Gスラグは、表-2 に示すようにモルタルの膨張率試験 (JIS A 5031 附属書 1) による膨張率の規格値 2% 以下を満足しないものである。

表-2 膨張率試験の結果

| 骨材 | 膨張率 (%) | |
|--------------------|------------|--------------|
| | 高炉セメント B 種 | 普通ポルトランドセメント |
| Yスラグ | 1.7 | 1.7 |
| Y _G スラグ | 4.5 | 4.0 |
| JIS A 5031 | 2.0% 以下 | |

減水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

コンクリートの種類は、細骨材として普通砂、粗骨材として碎石のみを使用したもの（以下、普通コンクリートと称す）と溶融スラグを用いたコンクリートの 2 種類である。溶融スラグを用いたコンクリートとし

ては、石灰石微粉末を使用せず細骨材の全量をYスラグ、粗骨材の全量を Y_Gスラグとしたもの（以下、YY100 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10%、15%としたもの（以下、YY100-10 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 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）、3+0.5%（レディーミクストコンクリート工場で空気量の下限値付近で納入された場合を想定して設定）とした。表-3 に実験要因の組合せを示す。

表-3 実験要因の組合せ

| 要因 | 水準 |
|------------|------------------------------|
| 細骨材の種類 | 溶融スラグ(Yスラグ)、普通砂 |
| 粗骨材の種類 | 溶融スラグ(Y _G スラグ)、碎石 |
| 水セメント比 (%) | 45, 55, 65 |
| 空気量 (%) | 6±1, 3+0.5 |
| 石灰石微粉末の置換率 | 0, 10, 15 |

2. 3 試験項目

本研究で実施した試験は、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. 実験結果及び考察

3. 1 溶融スラグの粒度分布

使用した細骨材の粒度分布を Y スラグの一部を石灰石微粉末で置換したものを含め、図-1 に、粗骨材の粒度分布を図-2 に示す。Y スラグで、石灰石微粉末の置換率を 15% としたものと Y_G スラグは標準粒度範囲からはずれ、骨材として JIS 規格に適合しない範疇のものである。

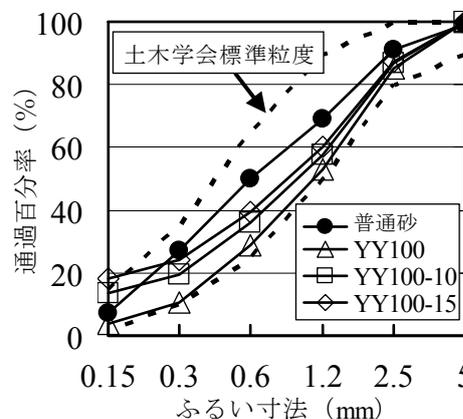


図-1 細骨材の粒度分布

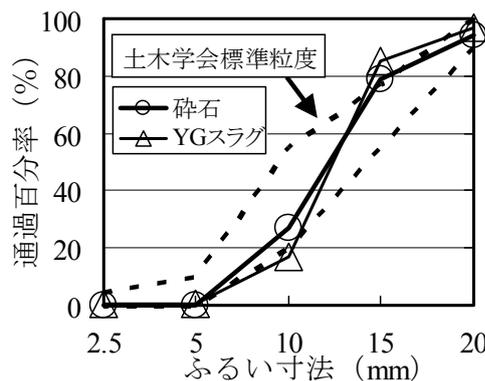


図-2 粗骨材の粒度分布

3. 2 石灰石微粉末の置換率と空気量の違いがコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

1) 単位水量

s/a を最適 s/a として、スランブ 8±1cm を得るために必要となる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。いずれの空気量、W/C においても普通コンクリートでは単位水量が 150kg/m³ であるのに対し、溶融スラグのみの YY100 では単位水量が 168 kg/m³ と大きくなった。これに比べ石灰石微粉末で置換したものは空気量 6±1% の場合、どの W/C においても単位水量は 160 kg/m³ となり 8kg/m³ 低減している。しかし、空気量 3+0.5% で W/C=55% の場合では、置換率によらず低減効果が見られない結果となった。

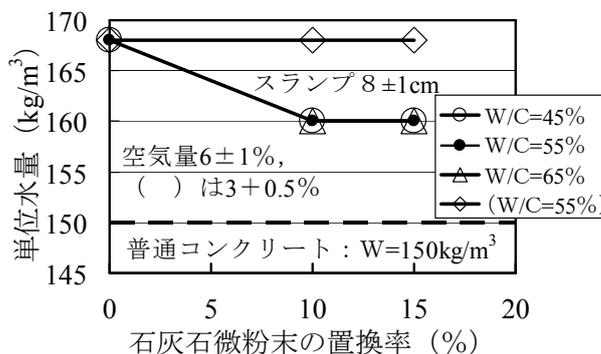


図-3 石灰石微粉末の置換率と単位水量の関係

2) スランブ及び空気量の経時変化

水セメント比（W/C）を 55% とした YY100 と YY100-10, 15 及び普通コンクリートのスランブと空気量の経時変化を図-4, 5, 6 に示す。図-4 は空気量 6±1%, 図-5 は空気量 3+0.5% の結果である。こ

これらの図を見比べると、空気量の大小によらず、どちらの場合にも YY100 の練混ぜ後 30 分までのスランプロスは他のコンクリートに比べてやや大きい。しかし、石灰石微粉末で置換することによって普通コンクリートに近づき、練混ぜ後 30 分程度

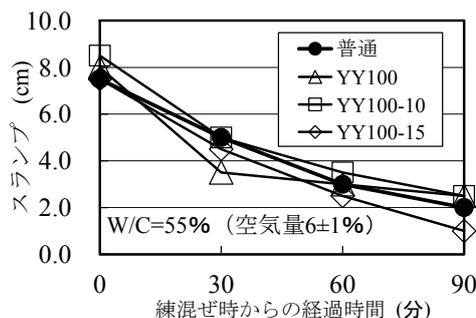


図-4 スランプの経時変化

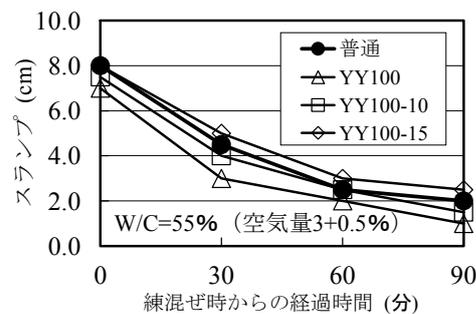


図-5 スランプの経時変化

までのスランプロスを低減(改善)できることが確認できる。一方、空気量は図-6に示すように空気量 6±1%のコンクリートの経時変化の傾きは、空気量 3+0.5%のそれよりも大きい、いずれの空気量としたコンクリートにおいても経過時間とともに少しずつ減少し、石灰石微粉末の置換率の違いによる明確な差は認められない。

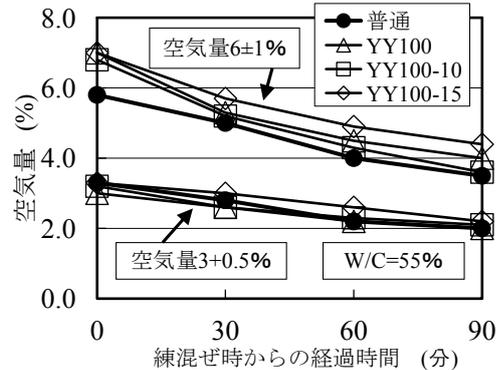


図-6 空気量の経時変化

3) 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-7に示す。YY100の凝結時間は普通コンクリートに比べて長く、凝結時間を空気量 6±1.0% (図の白印)、3+0.5% (図の黒印)の場合と比較すると、それぞれ始発で 540分、1290分、終結で 590分、1470分と空気量の少ない方がより長くなっている。また、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従って短縮され、普通コンクリートに近づくことが分かる。空気量 3+0.5%、置換率 15%の YY100-15では、YY100よりも始発で 690分、終結で 810分短縮(改善)されている。これらのことから溶融スラグ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。

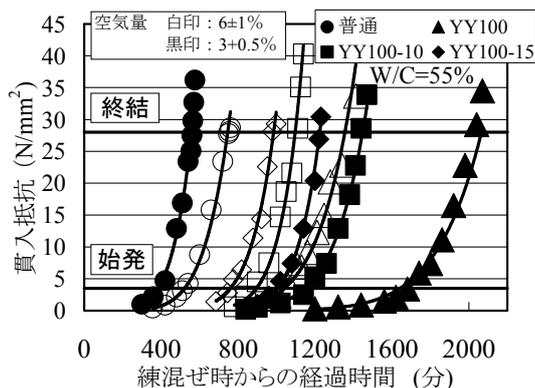


図-7 凝結時間

4) 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-8に示す。図より、普通コンクリートに比べ、溶融スラグを用いたコンクリートのブリーディング率は大きくなり、終了時間は長くなることが分かる。また、空気量 6±1%の場合で比較すると、石灰石微粉末で置換することによりそれらが低下し、置換率が大きくなるに従い普通コンクリートのそれに近づく結果となっている。空気量 6±1%では、YY100-15はYY100に比べブリーディング率は約 8.5%程度小さく、約 1/2 となり、終了時間は、150分程度短縮(改善)されている。一方で、

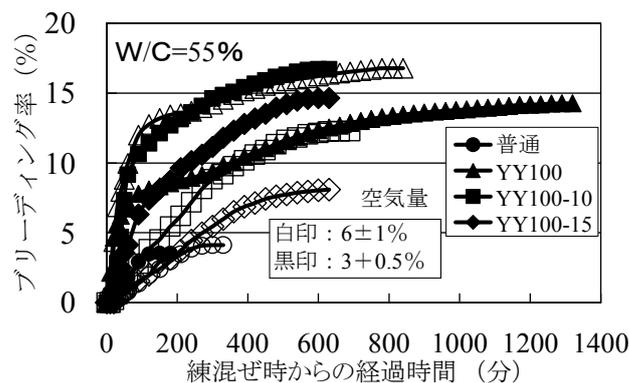


図-8 ブリーディング

空気量 3+0.5%の場合には石灰石微粉末で置換することにより、終了時間は短縮されるもののブリーディング率については、空気量 6±1%の様な大きな低減効果は認められず、空気量による違いが見られる。

3. 3 石灰石微粉末の置換率が硬化後の物性に及ぼす影響

1) 圧縮強度

図-9、10に材齢 28 日までの圧縮強度の試験結果を示す。図-9より、本実験で設定した W/C (45~

65%)においては、溶融スラグを使用したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度と C/W との間にも線形関係が認められる。また、普通コンクリートよりも圧縮強度は小さいが、石灰石微粉末の置換率が大きくなるに従い強度の増加(改善)が見られる。圧縮強度を材齢別に比較した図-10より、石灰石微粉末で置換したコンクリートは、材齢 3 日までの強度増進が大きくなり、材齢 7 日までは普通コンクリートよりも圧縮強度が大きいことが確認できる。

2) 乾燥収縮

溶融スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮は図-11のように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は小さい結果となっている。

3) 凍結融解抵抗性

図-12では、溶融スラグを用いた YY100 は凍結融解 150 サイクルで、土木学会コンクリート標準示方書に示されている相対動弾性係数の最小限界値の内、最も小さい値である 60%を下回る結果となっているが、石灰石微粉末の置換により相対動弾性係数が増加し、YY100-15 では凍結融解 300 サイクル経過後でも 60%を保つ結果となった。このことから溶融スラグを用いたコンクリートは石灰石微粉末の置換によって耐凍害性を改善できることが明らかとなった。

4. まとめ

鳥取県内で製造された溶融スラグを全量骨材とする空気量 6±1%、3+0.5%のコンクリートについて、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検討を行った。その結果、①空気量 6±1%の場合、所定のスランプを得るための単位水量を低減できる、②空気量によらず、練混ぜ後 30 分程度までのスランプロスを低減できる、③空気量の大小によらず凝結時間を短縮できる、④ブリーディング終了時間を短縮でき、空気量 6±1%の場合では、石灰石微粉末の置換率を大きくするに従い、ブリーディング率は小さくなった、⑤石灰石微粉末で置換しないものに比べ、同一 W/C における圧縮強度が大きくなる。また、普通コンクリートに比べ材齢 3 日までの圧縮強度が大きく、材齢 7 日までの強度が大きくなった、⑥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は小さい、⑦耐凍害性が改善できた、等の品質改善効果が明らかにされた。

本研究は科学研究費(基盤研究(C)、課題番号:17560407)で行ったことを明記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 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

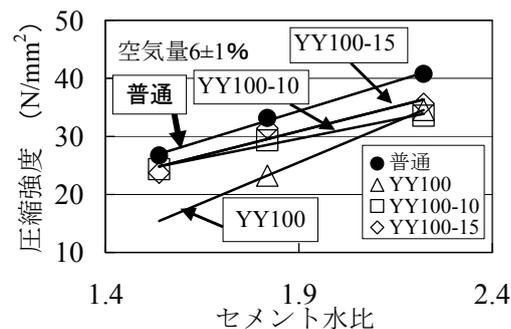


図-9 圧縮強度と C/W の関係

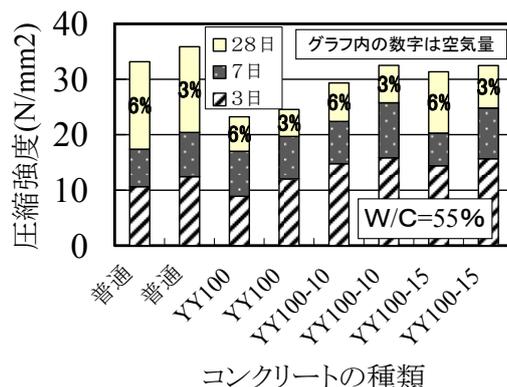


図-10 材齢と圧縮強度の関係

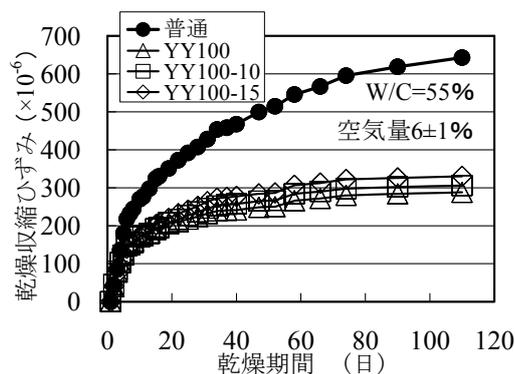


図-11 乾燥収縮試験

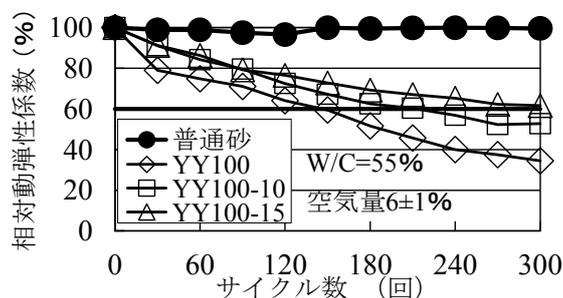


図-12 凍結融解試験