

鉄鋼スラグ水和固化体の応用技術に関する研究



所属名：岡山大学
廃棄物マネジメント
研究センター
発表者：綾野 克紀

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメントや天然骨材を全く用いることなく、通常のセメントコンクリートと同程度の強度を発現可能な建設材料である¹⁾。鉄鋼スラグ水和固化体は、コンクリート用材料としての使用実績の低い製鋼スラグを、コンクリートの骨材として用いることに特色があり、大量の産業副産物を活用できる環境負荷低減型材料として期待されている。鉄鋼スラグ水和固化体は、通常のセメントコンクリートと比べ、密度が1割程度大きいこと、リンや鉄を多く含み生物付着性に富むこと等から、主に護岸工事用ブロック、河床の根固めブロック等、無筋構造物を対象に、その開発が行われている。平成15年には、財団法人沿岸開発技術研究センターより「鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルー製鋼スラグの有効利用技術ー」が発刊され、試験施工も数多く行われている。

本研究は、現在、海洋構造物への適用を目的に開発された鉄鋼スラグ水和固化体を河川構造物あるいは陸上構造物への適用拡大を目的とするものである。このためには、鉄鋼スラグ水和固化体の高強度化および高耐久性化、とくに耐凍害性を向上させることが必要となる。本研究では、鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性が劣る原因とその改善方法を示す。また、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの特徴とその予測方法を示す。鉄鋼スラグ水和固化体の用途拡大を目指し、天然資源の保護、環境負荷低減、とくに二酸化炭素排出量の低減を実現する。

2. 実験概要

鉄鋼スラグ水和固化体の配合は、単位水量 150kg/m^3 、単位結合材容積 2190m^3 、細骨材率 50.0%を一定とする条件で決定した。結合材には、高炉スラグ微粉末(密度: 2.89g/cm^3)、フライアッシュ(密度: 2.20g/cm^3)、石灰集塵微粉末(密度: 3.14g/cm^3)および普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm^3)を用いた。骨材には、溶銑予備処理スラグ細骨材(密度: 3.22g/cm^3 、吸水率:4.93%)、溶銑予備処理スラグ粗骨材(密度: 2.93g/cm^3 、吸水率:4.62%)、川砂(密度: 2.58g/cm^3 、吸水率:1.95%)および碎石(密度: 2.74g/cm^3 、吸水率:0.95%)を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、陰イオン形 AE 剤および消泡剤を用いた。凍結融解試験は、JIS A 1178 に規定される方法に従って行った。なお、特に示さない限り凍結融解試験は、水中凍結融解方法(A法)により行っている。乾燥収縮ひずみ試験は、温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $65\pm 5\%$ の条件で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性とその改善

図-1は、鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解試験結果を示したものである。いずれの方法においても早期に劣化しており、耐凍害性が著しく低いことが分かる。図-2は、川砂および碎石を骨材に用い、高炉スラグ微粉末のみを結合材に用いた水和固化体の AE 剤の添加量とフレッシュ時における空気量の関係を示したものである。この図から、高炉スラグ微粉末のみを用いたペーストでは、AE 剤による空気量の連行が期待できないことが分かる。図-3は、高炉スラグ微粉末および天然骨材を用いた水和固化体において、高炉スラグ微粉末の一部をセメントに置き換えた場合の、AE 剤の添加量とフレッシュ時における空気量の関係を示した図である。この図から、セメントの使用に伴い、AE 剤の効果が表れ、空気が連行されやすくなることが分かる。図-4は、セメントを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解試験結果を示したものである。この図から、セメントの使用に伴い、耐凍害性が向上することが分かる。しかし、100 サイクルを超える耐凍害性は得られていない。図-5は、細骨材の一部に、カルシウムイオンの溶出の少ない高炉スラ

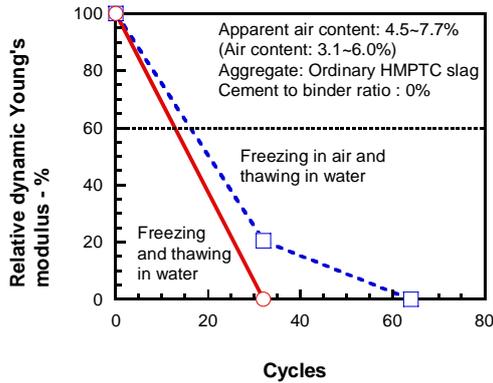


図-1 鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性

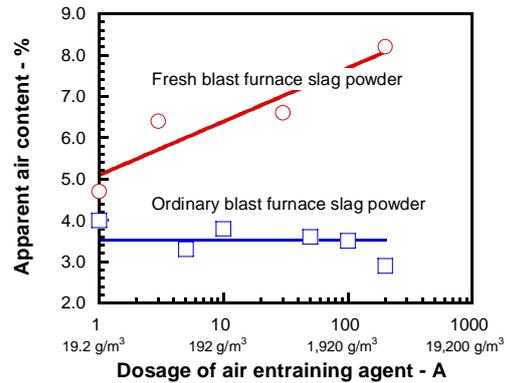


図-2 高炉スラグ微粉末における AE 剤の効果

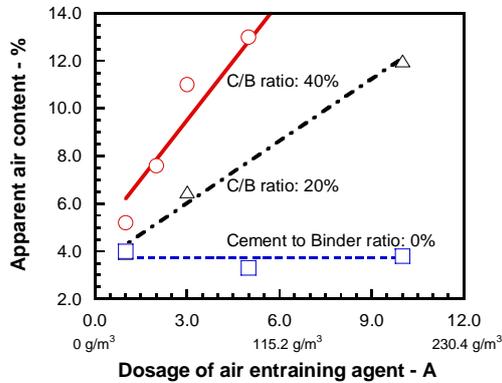


図-3 セメントの使用が AE 剤の効果に及ぼす影響

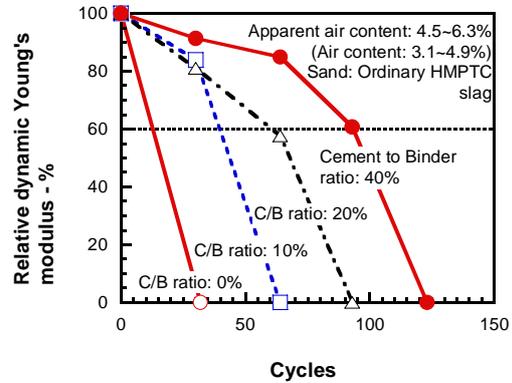


図-4 セメントを添加した鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解試験結果

グ細骨材を用いた結果を示したものである。細骨材の全てを高炉スラグ細骨材に置換することで耐凍害性が著しく向上することが分かる。しかし、250 サイクルを超える耐凍害性は、得られていない。図-6 は、結合材の一部にフライアッシュを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解試験結果を示したものである。この図から、フライアッシュを結合材の30%使用した場合が、最も耐凍害性に優れていることが分かる。

3.2 鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみ予測

図-7 は、鉄鋼スラグ水和固化体とセメントコンクリートの乾燥収縮ひずみを比較したものである。乾燥初期では、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみは、セメントコンクリートに比べて小さいのに対し、乾燥期間が100日を超える長期に至ると、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの方が、セメントコンクリートよりも大きくなり、乾燥期間が長くなるにつれ、その差はより大きくなる。図-8 は、式[1]により求めた製鋼スラグ骨材中の水分量 $\Delta\omega$ が鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響を示したものである。

$$\Delta\omega = \frac{S \cdot Q_s}{100 + Q_s} + \frac{G \cdot Q_G}{100 + Q_G} \quad [1]$$

ここに、 S は単位細骨材量(kg/m^3)、 Q_s は細骨材の吸水率(%), G は単位粗骨材量(kg/m^3)、 Q_G は粗骨材の吸水率(%)である。

この図から明らかなように、製鋼スラグ骨材の吸水率を下げ、骨材に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を少なくすることで、乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなる。図-8中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]²⁾に示される乾燥収縮ひずみの予測式を用いて、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収

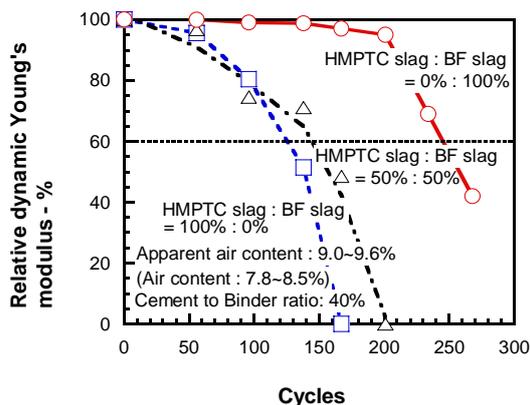


図-5 細骨材の種類が鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性に及ぼす影響

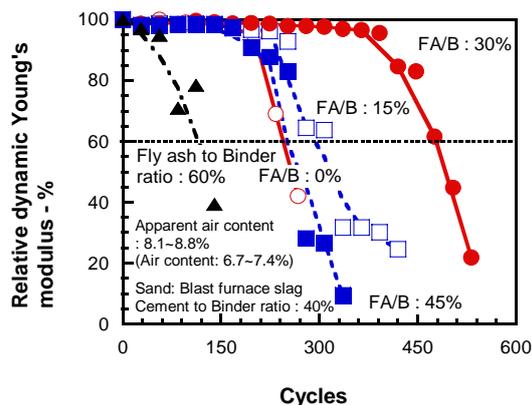


図-6 フライアッシュとセメントを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性

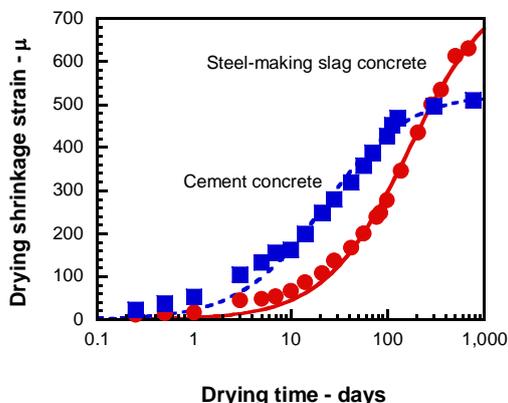


図-7 乾燥収縮ひずみの比較

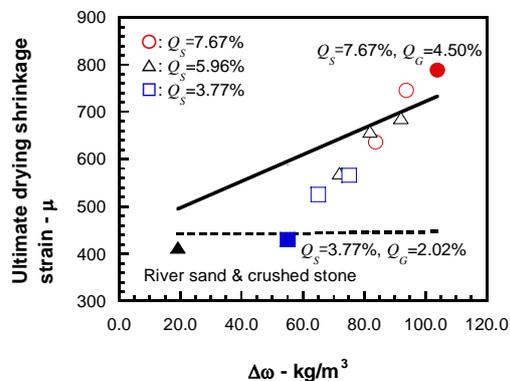


図-8 Δωが乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響

縮ひずみの最終値を予測した結果である。図-9は、結合材に占めるセメントの割合が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響を示したものである。図-8中に示される破線の計算には、結合材の種類の影響を考慮し、セメントの種類の影響を表す係数 α を、セメント結合材比の関数とした $\alpha=11 \times (0.788 + 0.212 \cdot C/B)$ を用いて求めた。

一方、図中の実線は、土木学会コンクリート標準示方書に示される乾燥収縮ひずみの予測式中の単位水量 W の項を、骨材中に含まれる水分量も考慮した全水量 $(W + \Delta\omega)$ で置き換えて乾燥収縮ひずみの最終値の予測を行ったものである。この図から明らかなように、吸水率の高い製鋼スラグ骨材を用いた場合には、製鋼スラグに含まれる水分量 $\Delta\omega$ を考慮することで、予測値と実験値がよく一致することが分かる。

図-10は、鉄鋼スラグ水和固化体およびセメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を土木学会コンクリート標準示方書に示される予測式を用いて計算した結果である。ただし、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値の計算には、単位水量 W の代わりに全水量 $(W + \Delta\omega)$ を用いて求めている。この図から、セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化は、予測値とよく一致しているのに対し、鉄鋼スラグ水和固化体の結果は、とくに乾燥初期において予測値よりも小さいことが分かる。

図-11に鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化を双曲線 $(\varepsilon - \varepsilon_{\infty}) / (\beta + t)$ により回帰し求めた β の値と、骨材中の水分量 $\Delta\omega$ の関係を示す。なお、図中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書に示される単位水量 W に、骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を加えた全水量 $(W + \Delta\omega)$ を用いて β を計算した結果である。この図に示されるように、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化を表す β の値は非常に大きいことが分かる。図-11中の実線は、式[2]を用いて計算した結果である。すなわち、土木学会コンクリート標準示方書に示される経時変化特性を示す項 β の予測式の右辺に、骨材中の水分量の影響を加えた式である。

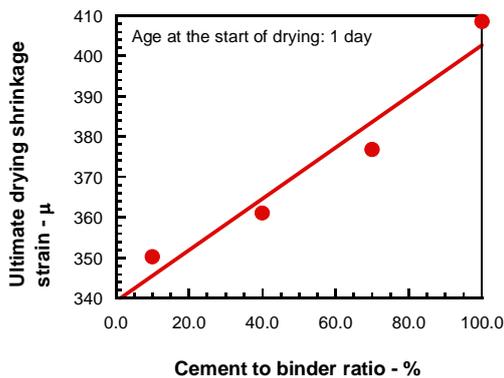


図-9 結合材が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響

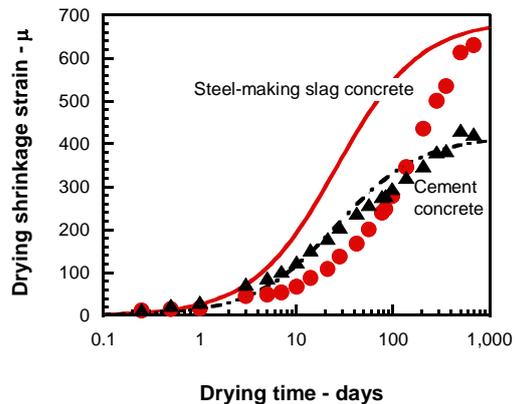


図-10 乾燥収縮ひずみの経時変化

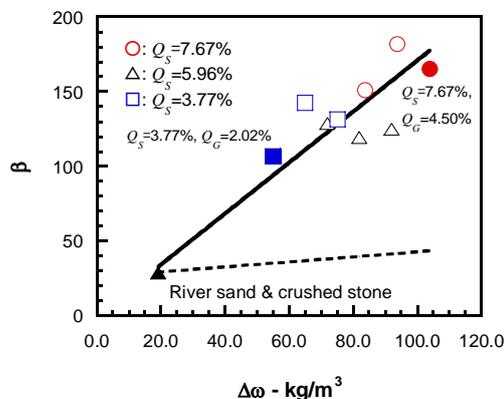


図-11 Δωが乾燥収縮ひずみの経時変化に及ぼす影響

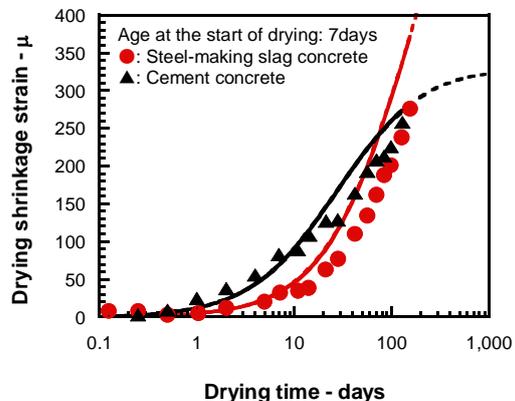


図-12 提案する手法による予測の精度値

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} + 1.71 \cdot (\Delta\omega - 19.2) \quad [2]$$

図-12 は、式[2]を用いて、種々の鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化を計算した結果を示したものである。図中の●および▲が実験値を、実線が予測値を示している。この図から、乾燥収縮ひずみの経時変化は、予測値とよく一致していることが分かる。

4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体の耐凍害性を改善するためには、AE 剤の効果を高めるために、結合材の一部にセメントを用い、多量に析出する水酸化カルシウムをフライアッシュで消費させる必要がある。また、細骨材にも、カルシウムイオンの溶出の少ない高炉スラグ細骨材を用いることが必要である。鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみは、セメントコンクリートに比べて大きく、さらに最終値に達するまで長い時間を要する。乾燥収縮ひずみの最終値を予測する場合には、土木学会コンクリート標準示方書の予測式に含まれる単位水量 W の項の代わりに全水量 $(W + \Delta\omega)$ を用い、また、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す式には、単位水量 W の影響とは独立に製鋼スラグ中の水分量 $\Delta\omega$ を考慮した式を用いることで、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみを予測可能であることを示した。

〈参考文献〉

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルー製鋼スラグの有効利用技術一、沿岸開発技術ライブラリー、No.16, 2003.3
- 2) 土木学会コンクリート委員会：2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]、土木学会、pp.28~34, 2002.3