

平成22年 4月 1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560461

研究課題名（和文） 鉄鋼スラグ水和固化体の高性能化に関する研究

研究課題名（英文） Durability improvement of steel-making slag concrete

研究代表者

綾野 克紀 (AYANO TOSHIKI)

岡山大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：10212581

研究成果の概要（和文）：製鉄副産物を主原料に製造される鉄鋼スラグ水和固化体は、環境負荷低減が大いに期待される材料である。本研究では、現在、無筋の海洋ブロック等に用いられている鉄鋼スラグ水和固化体の適用範囲を地上構造物等へ拡大することを目的に、ひび割れの原因となる乾燥収縮ひずみの予測手法および凍結融解抵抗性改善について検討を行ったものである。鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性が劣る原因を解明し、改善方法を示した。また、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみを予測する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Steel-making slag concrete is made of ground granulated blast furnace slag and hot metal pretreatment slag that are by-products at ironworks. This type of construction materials is called environmental conscious material in Japan. This study shows that the strength of steel-making slag concrete depends on pH of steel-making slag concrete after mixing. It also shows that the resistance to carbonation and steel rod corrosion of steel-making slag concrete is high for a long time due to calcium hydroxide leaching from hot metal pretreatment slag. However, resistance to freezing and thawing of steel-making slag concrete is quite low. In this paper, the method to enhance the resistance to freezing and thawing is shown.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体、凍結融解抵抗性、乾燥収縮ひずみ、水酸化カルシウム、ポゾラン、全水量

1. 研究開始当初の背景

「鉄鋼スラグ水和固化体」は、セメントおよび天然骨材を全く使用せず、製鉄スラグ（転炉スラグ、溶銑スラグ等）や高炉スラグ微粉末等の精錬過程で生じるスラグ類や、フライ

アッシュ等のリサイクル材料で構成される固化体であり、従来コンクリートと同等の強度を有するものである。従来のセメントコンクリートに比べて一割程度密度が大きいいため、構造安定性に優れる特徴をもっている。また、

表 1 鉄鋼スラグ水和固化体の配合

| G _{max} (mm) | W/B (%) | s/a (%) | Air (%) | Unit content (kg/m ³) | | | | | Admixture | |
|--------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------|--------|---|---|
| | | | | W | Binder | | HMPTC slag ^{*3} | | HRWRA ^{*4} (kg/m ³) | AE ^{*5} (g/m ³) |
| | | | | | GGBS ^{*1} | LD ^{*2} | 0-5mm | 5-20mm | | |
| 20 | 23.4 | 50.0 | 4.5 ± 1.5 | 150 | 562 | 78 | 943 | 858 | 7.68 | 64.0 |

*1 GGBS: Ground granulate blast furnace slag *2 LD: Lime dust

*3 HMPTC slag: Hot metal pre-treatment crushed slag

*4 HRWRA: High range water reduce agent *5 AE: Air entraining agent

pHが低く、鉄分を多く含むため、海洋における生物付着性も良好であり、港湾工事における消波ブロックや被覆ブロック等に適用されている。鉄鋼スラグ水和固化体の適用範囲をさらに拡大するためには、鉄鋼スラグ水和固化体の高強度化、高耐久性化、また、この素材の特徴を生かした用途開発が必要である。本研究では、有効利用できる可能性がありながら、利用先が明確でなく埋立て処分されてきた製鉄の過程で生じる製鋼スラグをコンクリート用骨材として有効に活用するための技術開発を行う。

2. 研究の目的

鉄鋼スラグ水和固化体は、原料の全てにリサイクル材を用いながら、通常のセメントコンクリートと同程度の20~50N/mm²の強度を発現可能な建設材料である。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体は、通常のセメントコンクリートに比べ、凍結融解抵抗性が劣る場合があることも知られており、その改良が求められている。本研究では、環境負荷低減が期待される鉄鋼スラグ水和固化体を、温暖な地域の根固めブロック等だけでなく、寒冷地や大型の消波ブロックや護岸壁等の構造物へも適用範囲を広げることを目的に、凍結融解抵抗性の改善、ひび割れの原因となる乾燥収縮ひずみの検討を行った。

3. 研究の方法

(1)鉄鋼スラグ水和固化体の配合

鉄鋼スラグ水和固化体の配合の一例を表1

に示す。高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206に規定されている高炉スラグ微粉末4000（密度：2.89g/cm³）を用いた。アルカリ刺激材には、石灰集塵微粉末（密度：3.14g/cm³、平均粒径：10μm）を用いた。骨材には、エージング処理を行いJIS A 5015附属書2による水浸膨張比が1.1%以下になった溶銑予備処理スラグ細骨材（密度：3.22g/cm³、吸水率：4.93%）および溶銑予備処理スラグ粗骨材（密度：2.93g/cm³、吸水率：4.62%）を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン形AE剤および消泡剤を用いた。

(2)凍結融解抵抗性の改善

鉄鋼スラグ水和固化体の結合材をすべて高炉スラグ微粉末と、細骨材および粗骨材を川砂（密度：2.58g/cm³、吸水率：1.95%）および碎石（密度：2.74g/cm³、吸水率：0.95%）と体積一定で置換した水和固化体を作成し、高炉スラグ微粉末のみのペーストでのAE剤の効果を確かめた。結合材の一部を体積一定で普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）と置換し、セメントの使用がAE剤の効果に与える影響を検討した。また、ペースト中で過剰になるカルシウムの析出を抑制するために、細骨材の一部または全部を高炉スラグ細骨材（密度：2.71g/cm³、吸水率：1.38%）に、結合材の一部をJIS A 6201に規定されているフライアッシュII種（密度：2.20g/cm³）と体積一定で置換し、効果を検討した。

(3) 乾燥収縮ひずみ

試験には、100 × 100 × 400mmの角柱供試体を用い、コンタクトゲージ法によりひずみの測定を行った。コンクリートは、打設後24時間まで型枠内で養生し、試験開始まで水中で養生を行った。なお、乾燥開始時材齢が1日のものは、脱型直後から測定を開始した。乾燥収縮ひずみ試験は、温度20 ± 2℃、相対湿度65 ± 5%の恒温恒湿度室内で行った。

4. 研究成果

(1) 凍結融解抵抗性の改善

図1は、鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性を示したものである。図中の○は、水中凍結融解方法(A法)による結果を、□は、気中凍結水中融解方法(B法)による結果を示している。結合材には、高炉スラグ微粉末のみを用い、セメントは用いていない。A法に比べ、B法の方が、条件が穏やかであるにも拘わらず、いずれの方法においても鉄鋼スラグ水和固化体は、早期に劣化しており、凍結融解抵抗性が著しく低いことが分かる。

写真1は、鉄鋼スラグ水和固化体の硬化後の断面を示したものである。溶銑予備処理スラグ骨材の周りに大きな径の気泡が生じ、ペースト中に気泡が分散していないことが分かる。これは、溶銑予備処理スラグ骨材から溶出するカルシウムイオンがAE剤と反応しているためで、AE剤の添加量を増加しても、ペースト中には、気泡が形成されず、骨材の周りに形成される気泡の径がさらに大きくなるだけである。

図2は、セメントをアルカリ刺激材として用いた鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性を示したものである。セメントの使用量に伴い、凍結融解抵抗性が高くなる。しかし、セメントを質量比で結合材の40%用いた場合においても、100サイクル以内に供試体は破壊に至っている。

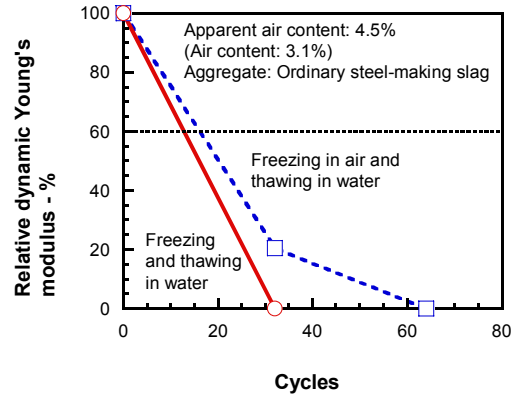


図1 鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性

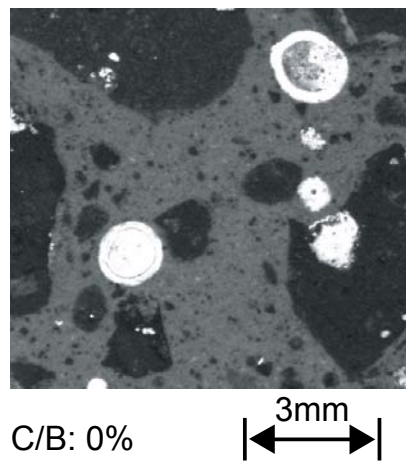


写真1 セメントを用いていない鉄鋼スラグ水和固化体の気泡分布

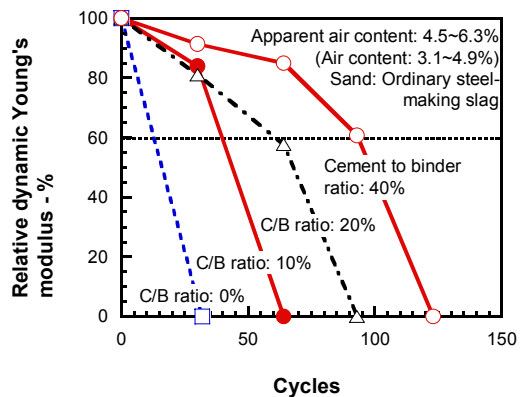


図2 セメントを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性

図3は、鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性により大きな影響を及ぼす細骨材の一部に、水酸化カルシウムの溶出の少ない高

炉スラグ細骨材を用いた実験結果を示したものである。製鋼スラグ細骨材の50%を高炉スラグ細骨材と置換した場合には、凍結融解抵抗性に大きな変化が見られないのに対し、細骨材の全てを高炉スラグ細骨材とした場合には、著しく凍結融解抵抗性が向上していることが分かる。

写真2は、骨材に溶銑予備処理スラグを用い、セメントを質量比で結合材の40%用いた鉄鋼スラグ水和固化体の断面を撮影したものである。骨材周辺で白く析出しているものが水酸化カルシウムである。骨材周りに集積する水酸化カルシウムが多くなると、強度低下やひび割れの発生につながる場合がある。図4は、結合材の一部にボゾラン材料であるフライアッシュを用い、製鋼スラグ周辺に集積する水酸化カルシウムを消費させることで、鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性を改善させた結果である。フライアッシュを結合材の30%使用したものは、450サイクルを超えても破壊に達していない。

鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗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。

(2) 乾燥収縮ひずみ

図5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。図中の○は、鉄鋼スラグ水和固化体の結果を、△は、セメントコンクリートの結果を示している。乾燥初期においては、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

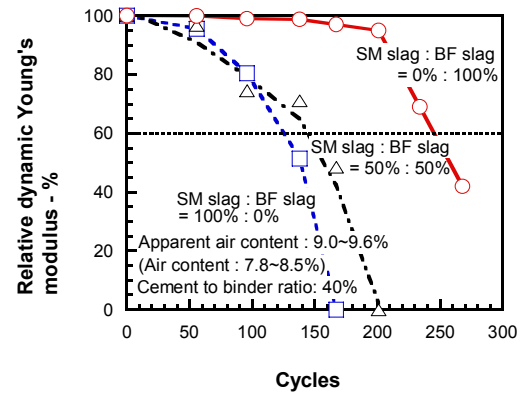


図3 細骨材の種類が鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性に及ぼす影響

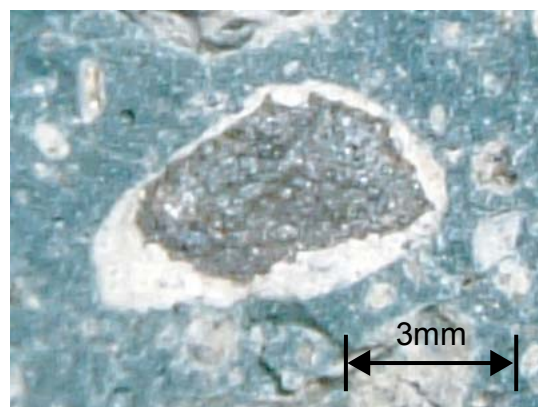


写真2 製鋼スラグ骨材周辺に集積する水酸化カルシウム

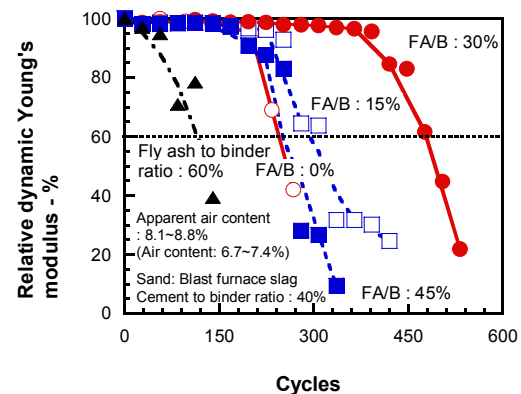


図4 フライアッシュを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性

の方が、セメントコンクリートよりも大きくなる。さらに乾燥期間が長くなるにつれ、その差はより大きくなることが分かる。図6は、ロサンゼルス試験機によって、製鋼スラグの

脆弱部を取り除き、吸水率を下げた製鋼スラグを骨材に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値を示したものである。図の横軸は、製鋼スラグ骨材中の水分量 $\Delta\omega$ を、縦軸は、乾燥収縮ひずみの最終値の関係を示している。骨材中の水分量 $\Delta\omega(\text{kg}/\text{m}^3)$ は、式(1)により求めた値である。

$$\Delta\omega = \frac{S \cdot Q_S}{100 + Q_S} + \frac{G \cdot Q_G}{100 + Q_G} \quad (1)$$

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。図中の \square は、ロサンゼルス試験機によって吸水率を最も下げた製鋼スラグ骨材を用いた結果で、 \blacktriangle は、骨材に川砂および砕石を用いたセメントコンクリートの結果である。また、 \circ は、通常の吸水率の製鋼スラグを骨材に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の結果である。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ことが分かる。図6中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕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縮ひずみの最終値を予測した結果である。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7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。

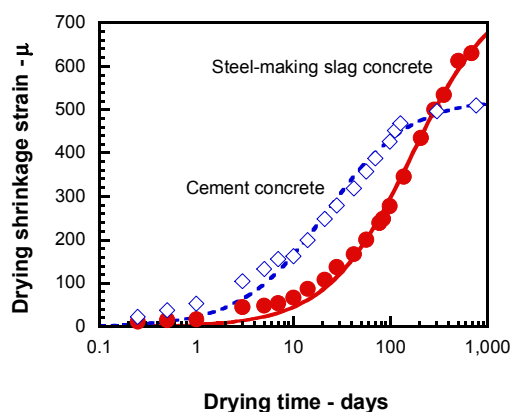


図5 鉄鋼スラグ水和固化体とセメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの比較

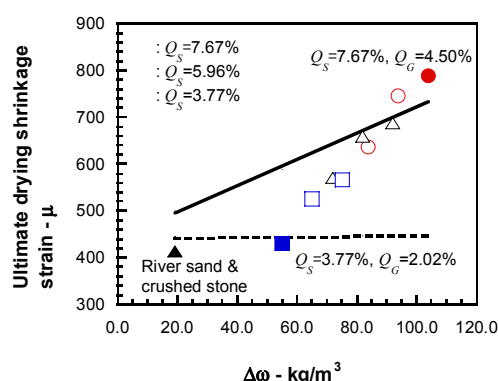


図6 骨材中の水分量 $\Delta\omega$ と乾燥収縮ひずみ最終値の関係

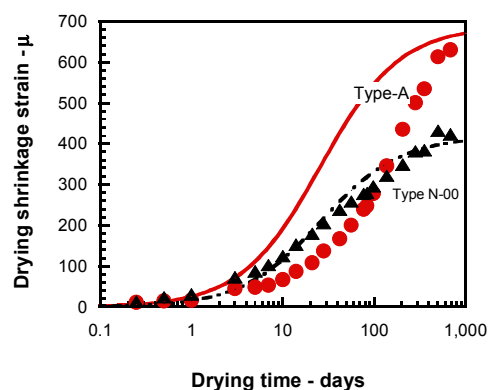


図7 乾燥収縮ひずみの経時変化と予測値の精度

る。この図から明らかなように、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8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式(1)を用いて回帰し求めた 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8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。

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

図9は、式(2)を用いて、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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

T. Ayano, T. Fujii & K. Sakata, Drying shrinkage of recycled concrete, Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures, Vol.1, pp.805-810, 2008.9, 査読有

Toshiki AYANO, Takashi FUJII and Kenji SAKATA, RESISTANCE TO FREEZING AND THAWING OF STEEL-MAKING SLAG CONCRETE,

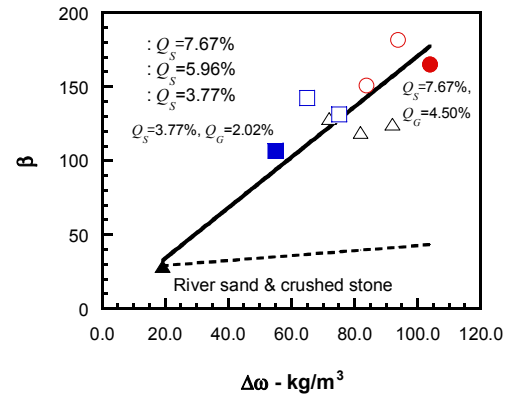


図8 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項の値と骨材中の水分量 $\Delta\omega$ との関係

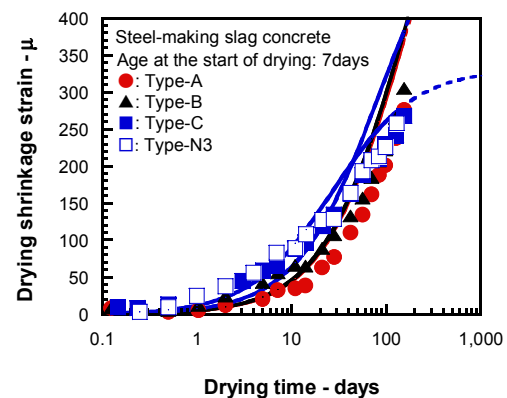


図9 本論文で提案する予測手法の精度

Proceeding of consec'07 Concrete Under Server Conditions Environment and Loading, pp.717-724, 2007. 6, 査読有 [学会発表] (計3件)

T Fujii, Drying shrinkage of steel-making slag concrete, Proceeding on 33rd Conference on Our World In Concrete & Structures, 2008.8, Singapore

6. 研究組織

(1)研究代表者

綾野 克紀 (AYANO TOSHIKI)
岡山大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：10212581

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし