高炉スラグ細骨材の磨鉱処理がモルタルの電気抵抗率に与える影響

東北大学　学生会員　○橋 雄飛
東北大学　正会員　皆川 浩　宮本 慎太郎　久田 真
JFE スチール(株)　正会員　田 恵太　松永 久宏

1. 背景と目的

天然骨材の採取規制が厳しくなったことによる代替の細骨材の確保，環境保護のための産業副産物の活用，高速道路のコンクリート床版の更新事業に代表されるコンクリート部材の高耐久化が要求されている．

藤井ら[1]は，高炉スラグ細骨材（以下，BFS）を使用することで，コンクリートの塩化物イオン浸透性，中性化の進行および乾燥収縮ひずみが抑制されることを報告している．また，綾野ら[2]は，BFS を用いると砂質砂岩砕砂を用いたときと比較してモルタルの凍結融解抵抗性が向上することを報告している．このように，BFS はコンクリート構造物の耐久性を向上させる細骨材として期待されるが，藤田ら[3]は，その程度は BFS の品質に影響を受けることを指摘している．

本研究では，BFS の製造プロセスで実施される磨鉱処理に着目し，BFS の磨鉱処理の有無が BFS を用いたモルタルの基礎物性に及ぼす影響を把握することを目的として，その電気抵抗率と空隙率を測定した．ここで，電気抵抗率を測定したのは，電気抵抗率が塩化物イオンの拡散係数と一定の相関を有し，ある程度の確度で簡便にモルタルの遮塩性を評価できるためである．

2. 実験概要

2.1　使用材料と配合

結合材は普通ポルトランドセメント（密度 3.13 g/m^3）を使用した．細骨材の原材料は，JIS A 5011-1:2018 を満足することを企図して製造した高炉スラグを用いた．原材料の高炉スラグは，105 °C 乾燥（ほぼ絶乾状態），50 °C 乾燥，風乾の計 3 水準の乾燥処理を施した後，高速転動方式による球形整粒機（マルメライザー：(株)ダルトン製）を用いて磨鉱処理した．**図−1** に磨鉱処理のなし／あり−風乾の BFS の有姿試料の粒度分布を示す．さらに，供試体の作製に用いた BFS は，「モルタル小片試験体を用いた塩水中での凍結融解による高炉スラグ細骨材の品質試験評価方法(案)(JSCE-C 507-2018)」に規定されている粒度に準拠して有姿試料の粒度を調整して使用した．配合も JSCE-C 507-2018 の規定に準拠し，W/C = 0.5，S_{BFS}/C = 2.25 とした．

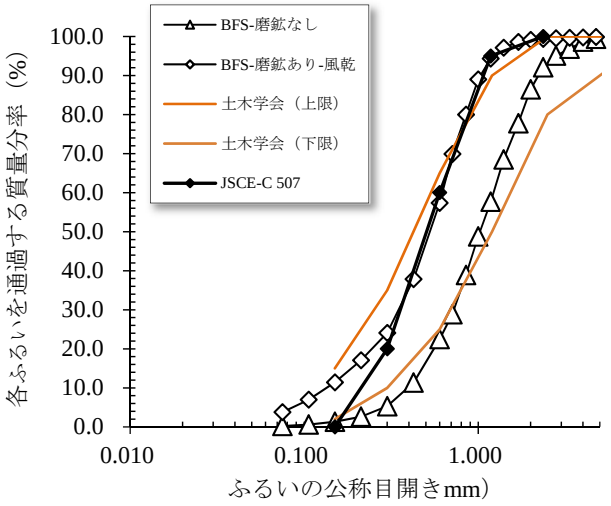
2.2　供試体の作製

JIS R 5201 に準拠してモルタルを練り混ぜ，内寸法 40 × 40 × 160 mm の鋼製型枠に打ち込んだ．打込み後およそ 24 ± 2 時間で脱型し，室温 20 °C に保たれた恒温室で水道水による水中養生を施した．

2.3　測定項目

(1) 電気抵抗率

モルタルの電気抵抗率は「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法(案)(JSCE-G 581-2018)」の四電極法 B 法に準拠して，水中養生直後の供試体を対象に測定した．電極間隔は 50 mm，周波数は 40 Hz であり，セル定数は JSCE-G 581-2018 の 附属書 1(参考)の附表 1-1（有限要素法で求めた四電極法 B 法のセル定数（参考））に基づいて，k = 31.7 m^{-1} とした．



図−1　使用した BFS の粒径加積曲線

(2) 空隙率

40 × 40 × 160 mm の角柱供試体から，40 × 40 × 20 mm の試料をモルタルカッタにて切り出し，重量差法に基づき式(1)により試料の空隙率を算定した．なお，試料の乾燥方法は，105 °C 乾燥と 40 °C 乾燥の 2 水準であり，それぞれ 105 °C 乾燥空隙率と 40 °C 乾燥空隙率と定義する．また，本研究では各水準につき 2 つの試料を用い，これらから得た値の平均を測定値とした．

$$\varepsilon = \frac{(W_2 - W_1)/\rho_w}{(W_2 - W_3)/\rho_w} \times 100 \qquad (1)$$

ここで，ε：空隙率(%)，W_1：絶乾状態における試料の気中重量（g），W_2：表乾状態における試料の気中重量（g），W_3：表乾状態における試料の水中重量（g），ρ_w：水の密度(g/cm^3)である．

3. 実験結果と考察

3.1　磨鉱の有無の影響

図−2 に電気抵抗率および材齢 7 日の測定結果に対する電気抵抗率の比の経時変化を示す．**図−2** より，材齢 7 日を除き，磨鉱ありの水準の方が，電気抵抗率は大きいことがわかる．また，電気抵抗率比の経時変化に着目すると，磨鉱ありの水準は材齢の経過に伴う電気抵

キーワード　高炉スラグ細骨材　磨鉱　遮塩性　電気抵抗率　空隙率

連絡先　〒980-8579　宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院土木工学専攻　　TEL　022-795-7427

抗率の増加率が高いことがわかる.既往の研究[4]より，モルタル中の細骨材表面積が同等であるとき，BFS の反応性が高いほど，モルタルの電気抵抗率は大きくなることが示されている．これらの結果を踏まえると，BFS の反応性は磨鉱の影響を受ける可能性がある．ただし，導電率の経時変化を示した**図-3** より，磨鉱の有無が導電率に及ぼす影響は 0.84～0.97 倍程度である．導電率と塩化物イオンの拡散係数に正の相関があることを踏まえると,磨鉱による遮塩性の向上は 1.03～1.20 倍程度であると考えられる．

図-4 に材齢 28 日における 105 °C 乾燥空隙率と 40 °C 乾燥空隙率を示す．**図-4** より，105 °C 乾燥空隙率には磨鉱処理の違いがほとんど現れていないことがわかる．しかし，40 °C 乾燥空隙率は，磨鉱ありの水準の方が小さくなっていることがかわる．105 °C 乾燥空隙率より 40 °C 乾燥空隙率の方がキャピラリー空隙の量との相関が強いことを考慮すると，磨鉱ありの BFS を用いると物質移動抵抗性は増加すると考えられる．このことは，**図-2** に示した磨鉱の有無が電気抵抗率に及ぼす影響の結果と矛盾しない．

3.2 磨鉱処理前の乾燥処理の違いの影響

図-2 より，磨鉱ありの水準で乾燥処理の違いに着目すると，材齢 30 日程度までは電気抵抗率に及ぼす乾燥処理の影響はわずかであったが，材齢の経過に従いその差は大きくなった．本研究の範囲では，電気抵抗率は 105 °C 乾燥＜風乾＜50 °C 乾燥の順に大きくなった．

4. 結論

(1) 磨鉱ありの BFS を使用した方がモルタルの電気抵抗率は高くなり，40 °C 乾燥空隙率は減少する傾向が得られた．

(2) 材齢 28 日時点で，BFS の磨鉱処理前の乾燥処理が電気抵抗率や空隙率に及ぼす影響は小さいが，材齢が経過すると電気抵抗率の差異が観察されるようになり，電気抵抗率は 105 °C 乾燥＜風乾＜50 °C 乾燥の順で大きくなった．

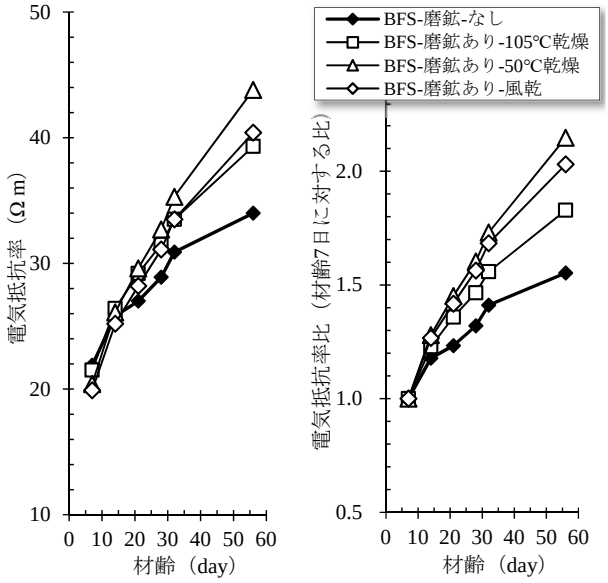
参考文献

1) 藤井隆史，細谷多慶，杉田篤彦，綾野克紀 : 高炉スラグを使用したコンクリートの中性化，塩化物イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 637-642，2015.

2) 綾野克紀, 藤井隆史 : 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）, Vol. 70, No. 4，pp. 417-427，2014.

3) 藤田亮，皆川浩，宮本慎太郎，久田真，細谷多慶 : 高炉スラグ細骨材の物性が硬化後のモルタルの基礎物性に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 17，pp. 345-350，2017.

4) 皆川浩，藤田亮，宮本慎太郎，久田真 : 高炉スラグ細骨材を使用したモルタルの遮塩性向上メカニズムに関する基礎的研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 75，No. 2，pp. 106-124，2019.



(a) 電気抵抗率　　(b) 電気抵抗率比

図-2　電気抵抗率と電気抵抗率比の経時変化

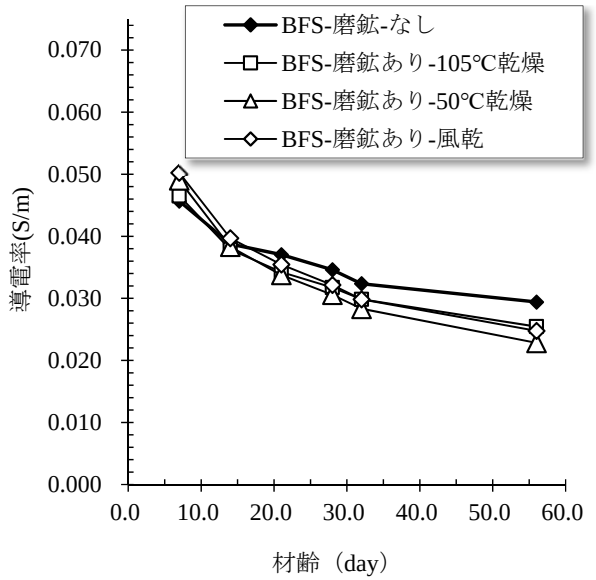


図-3　電気抵抗率から算出した導電率

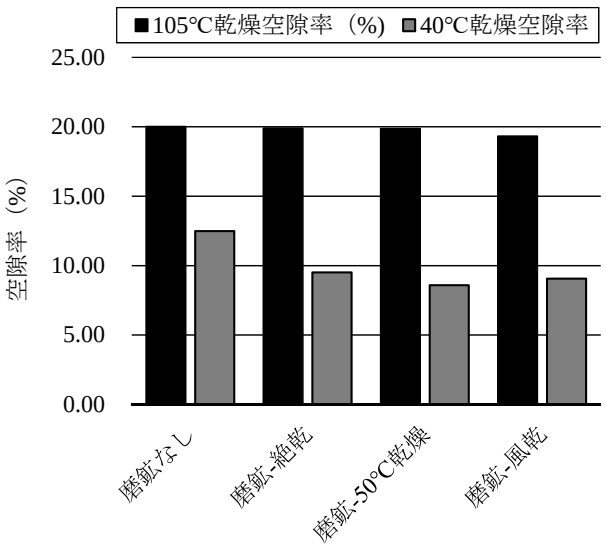


図-4 空隙率（材齢 28 日）