高炉スラグによるコンクリートの凍結融解抵抗性向上効果に関する研究

岡山大学 学生会員 ○徐 凌
岡山大学 正会員 藤井 隆史
岡山大学 フェロー 綾野 克紀

１．はじめに

高炉スラグは，セメント用材料やコンクリート用骨材として用いられている．高炉スラグを用いたコンクリートは，凍結融解抵抗性が向上すること [1]が報告されているが，そのメカニズムは不明確な部分が多い．本研究では，モルタル小片を用いた凍結融解試験，細孔径分布の測定およびモルタルからのカルシウムイオン溶出量の測定を行い，高炉スラグをモルタルに用いることによる凍結融解抵抗性向上のメカニズムについて検討した．

２．実験概要

モルタルの配合は，JIS A 1146 に示される配合を参考に，水：結合材：細骨材を質量比で 1：2：4.5 の割合で用いた．結合材には，普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm^3，ブレーン値：3,350cm^2/g，以下，OPC）および高炉スラグ微粉末 6000（密度：2.91g/cm^3，ブレーン値：5,860cm^2/g，石こう添加有り，以下，GGBS）を用いた．細骨材には，硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.61g/cm^3，吸水率：2.98%，粗粒率：3.03，以下，砕砂）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.73g/cm^3，吸水率：0.30%，粗粒率：2.09，以下，BFS）を用いた．凍結融解試験は，JSCE-C507 に従って行った．モルタルの細孔径分布は，水銀圧入法により測定を行った．モルタル中の水酸化カルシウム量は，熱重量示差熱同時測定装置によって測定した．モルタルからのカルシウムイオン溶出量の測定では，凍結融解作用を受けていないモルタル小片 6 個を 50mL の 5%塩水に浸漬させて 20±2℃の恒温室に静置し，7 日ごとに塩水を全量抜き取って入れ替え，抜き取った塩水中に含まれるカルシウムイオンの量を原子吸光光度法で定量した．

３．実験結果及び考察

図 1 に，材齢 28 日まで水中養生を行ったモルタル小片の凍結融解試験の結果を示す．高炉スラグを用いた場合，モルタルの凍結融解抵抗性が向上している．とくに，BFS を用いた場合に，より凍結融解抵抗性が向上する．モルタル中の直径 100~1,000nm の空隙内部に存在する水は，凍結膨張により硬化体組織を破壊し，6~20nm の空隙内の水は，-43℃まで凍結しないといわれている [2]．そこで，各モルタルの 100~1,000nm および 6~20nm の材齢 42 日における総細孔容積を比較した．**図 2** および**図 3** に，それぞれ，モルタル中の 100~1,000nm および 6~20nm の総細孔容積を比較したものを示す．GGBS を用いると，OPC を用いた場合に比べ，100~1,000nm の総細孔容積は減少している．一方で，6~20nm の総細孔容積は増加している．また，BFS を用いると，砕砂を用いた場合に比べ，100~1,000nm の総細孔容積は増加し，6~20nm の総細孔容積は減少している．以上より，GGBS を用いる場合には，6~20nm の細孔の増加が凍結融解抵抗性を向上する一因であると考えられる．一方で，BFS を用いた場合の細孔構造の変化は，凍結融解抵抗性が低下する傾向を示しており，細孔構造の変化で BFS による凍結融解抵抗性の向上は説明できない．**図 4** に，材齢 42 日のモルタルの水酸化カルシウム含有量の測定結果を示す．GGBS を用いた場合，OPC を用いた場合に比べ，水酸化カルシウムの含有量が少なくなっている．これは，GGBS を OPC と置換したことで，OPC による水酸化カルシウムの生成量が減少し，さらに GGBS の水和反応によって水酸化カルシウムが消費されたためと考えられる．一方，BFS を用いた場合，砕砂を用いた場合と水酸化カルシウムの含有量に大きな差はみられない．**図 5** に，材齢 28 日まで水中養生を行ったモルタル小片から塩水に溶出したカルシウムイオン量の測定結果を示す．GGBS を用いた場合，OPC を用いた場合に比べ，カルシウムイオンの溶出量が少なくなっている．これは，**図 4** に示した水酸化カルシウムの含有量の違いによると考えられる．一方で，BFS を用いた場合，砕砂を用いた場合に比べ，カルシウムイオンの溶出量が少なくなっている．**図 4** より細骨材の種類による，水酸化カルシウム含有量に大差はなく，BFS によってカルシウムイオンの溶出が抑制されていると考えられる．一般に砕砂を用いた場合，セメ

キーワード 凍結融解抵抗性，高炉スラグ，水酸化カルシウム，細孔径
連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1 岡山大学大学院環境生命科学研究科 綾野・藤井研究室 TEL 086-251-8920

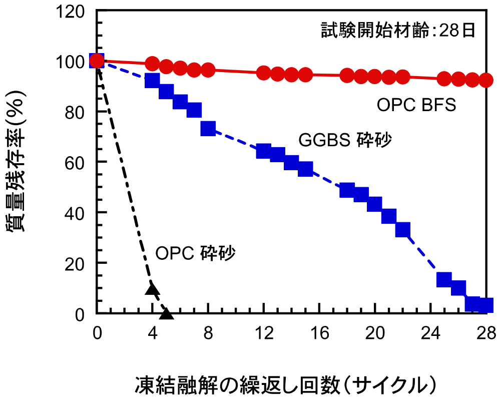

図１　材齢 28 日のモルタルの凍結融解抵抗性

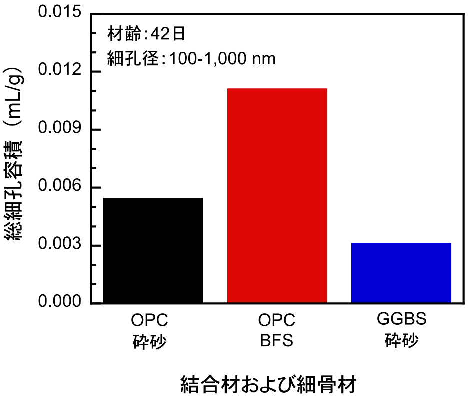

図２　100～1,000nm の総細孔容積の比較

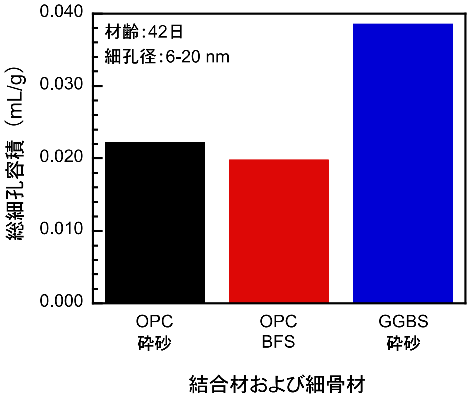

図３　6～20nm の総細孔容積の比較

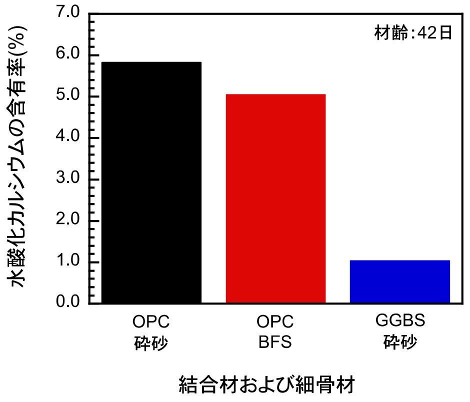

図４　モルタルの水酸化カルシウム含有量

ントの水和反応により生じた水酸化カルシウムが骨材周辺に集積することで脆弱な層を形成すると言われている[3]．凍結融解作用により，その水酸化カルシウムが溶出し，できた空隙に新たな水分が入り込み，凍結膨張することでモルタルが劣化すると考えられる．一方で，BFS を用いると，BFS とセメントペーストとの界面に反応層が生成し緻密化するといわれている[1]．骨材周辺の水酸化カルシウムの脆弱な層が少なくなることで，凍結融解抵抗性が向上したと考えられる．

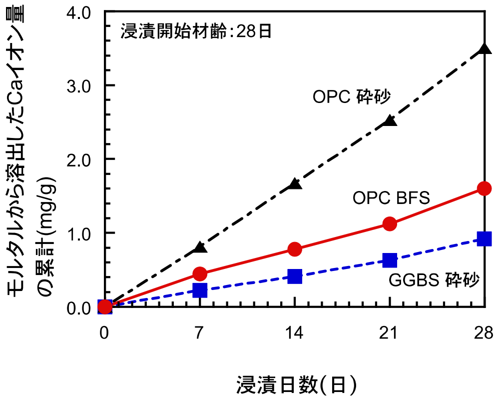

図５　モルタルから溶出したカルシウムイオン量

４．まとめ

高炉スラグを用いることで，モルタルの凍結融解抵抗性が向上した．GGBS を用いた場合には，凍結融解抵抗性を低下させる 100~1,000nm の総細孔容積が減少し，-43℃まで内部の水が凍結しない 6~20nm の総細孔容積は増加した．また，高炉スラグを用いると，モルタルからのカルシウムイオン溶出量が減少した．このことが，高炉スラグを用いたモルタルの凍結融解抵抗性が向上する一因と考えられる．

参考文献

1) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会（354 委員会）成果報告書，コンクリート技術シリーズ，No.117，2018

2) 羽原俊裕，沢木大介：硬化コンクリートの空隙構造とその物性，石膏と石灰，Vol.1992，No.240，pp.314-323，1992.9

3) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造･組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33，No.9，pp.5-17，1995.9