

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

高炉水砕スラグのプレキャストコンクリート製品用細骨材としての利用拡大に関する研究

熊本大学大学院自然科学教育部 工学専攻 社会環境マネジメント教育プログラム

(主任指導 尾上 幸造 教授)

論文提出者 橋本 涼太

主論文要旨

我が国の建設業において、若手技術者の減少と熟練技術者の大量離職による人材不足が今後加速度的に進行することが見込まれている。一方、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化ならびにそれらの維持管理が問題となっている。このように、建設業界では「現場の生産性向上」および「構造物の長寿命化」が目下重要な課題である。

2016 年、国土交通省は建設業における現場の生産性向上を目指す「i-Construction」の推進を打ち出した。i-Construction のうち、「全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）」で取り組むべき事項の一つにコンクリート工のプレキャスト化が記されており、プレキャストコンクリート（PCa）製品を活用する機運が高まっている。

一方、製鉄所で銑鉄を製造する際に副産される高炉水砕スラグは、セメントの混合材やコンクリートの混和材として用いられる高炉スラグ微粉末（GGBS）およびコンクリートの細骨材に用いられる高炉スラグ細骨材（BFS）の原料となる。高炉水砕スラグはガラス質でアルカリ環境下での潜在水硬性を有しており、GGBS や BFS を用いたコンクリートはセメントペーストおよび骨材界面の組織が緻密化され、一般的なコンクリートに比べて長期的な強度や耐久性に優れることが知られている。GGBS と BFS はいずれも JIS 規格に規定されているが、利用実績に関しては高炉水砕スラグの全用途に占める GGBS（セメント利用）の割合が 9 割以上であり、BFS は 1 割未満にとどまっている。

2017 年、内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）における「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」部門のプロジェクトに対応する形で、土木学会コンクリート委員会にて「SIP 対応 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート部材に関する研究委員会」が設置された。同委員会では、PCa 製品の細骨材に BFS を適用するための設計・製造・施工の方法が議論され、2019 年、その活動の成果が「高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針（案）」にまとめられた。

このような背景から、近年、BFS を用いた PCa 製品を社会実装するための研究が活発に

展開されているが、コンクリートの凍結融解、硫酸浸食、塩分浸透といった劣化現象あるいは乾燥（自己）収縮特性に関するものが多く、ひび割れ抵抗性の観点から BFS コンクリートの力学特性および耐久性を調査した研究は少ない。また、最近では PCa 製品で懸念される劣化リスクとして遅延エトリンサイト生成 (DEF) による膨張が注目されているが、DEF に及ぼす BFS の影響を調べた報告はきわめて限定的である。さらに、BFS の反応性を確認するために土木学会規準として定められている品質評価試験（案）の試験にかかる労力・コストや試験結果の再現性、および BFS の使用による過剰なブリーディングの発生などが普及への課題となっている。

BFS コンクリートの PCa 製品としての活用は建設現場の生産性向上、コンクリート構造物の長寿命化、天然骨材の節約、建設廃棄物量の削減、およびそれらの複合的な効果としての CO₂ 排出量削減につながることから社会的な波及効果が大きい。そこで本研究では、当該技術の普及に向けた課題解決、ひび割れ自律治癒などの新たな付加価値の創出、および将来的な海外展開に向けた外国産 BFS を用いたコンクリートに関するデータ収集を主な目的とした。本論文の概要は以下の通りである。

第 1 章 序論

我が国の建設業において課題となっている現場の生産性向上について言及し、その施策として国土交通省が推進する「i-Construction」に記される PCa 製品の導入と土木学会コンクリート委員会で取り組まれた BFS を用いた PCa 製品に関する検討事例を紹介した。それらを踏まえ、本研究の目的を明らかにし、本論文の構成および各章の概要を示した。

第 2 章 高炉スラグ細骨材の概要および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本特性

既往の文献により報告されている知見をもとに、BFS の概要および BFS コンクリートの基本特性について整理した。

第 3 章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性

BFS コンクリートのひび割れ抵抗性について実験的に検討した。曲げ応力下の破壊エネルギーおよび圧縮応力下のひび割れ進展エネルギーに着目し、圧縮強度試験、静弾性係数試験、三点曲げ載荷試験、圧縮繰返し載荷試験を実施した。その結果、BFS コンクリートは、天然山砂を用いたコンクリートと比較し、特に長期材齢において、破壊エネルギーが大きくひび割れ進展エネルギーが小さい傾向となり、ひび割れ抵抗性に優れていることを示した。

第 4 章 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの遅延エトリンサイト生成 (DEF) による膨張劣化に対する抵抗性

BFS モルタルを DEF の促進条件にて製造し、経時的な膨張挙動に加えて圧縮強度および曲げ強度の変化を調べた。また、遅延性のエトリンサイトが再生成されているかどうか確認するために、SEM 観察と XRD 分析を行った。その結果、BFS を用いることで、DEF の促進条件であっても BFS モルタルの経時的な膨張量および質量の増加が大幅に抑制され、材齢 28 日と 91 日時点の強度も十分に保持されることがわかった。さらに、BFS を用いた場合にはモルタル内部組織の変状がみられなかった。すなわち、BFS モルタルは DEF による膨張劣化に対する抵抗性に優れることが明らかとなった。

第 5 章 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルのひび割れ自律治癒性能

BFS の新たな特長を見出すために、BFS モルタルのひび割れ自律治癒性能について検討した。あらかじめひび割れを導入したモルタルを対象に、気中、水中、飽和水酸化カルシウム水溶液中の 3 つの再養生条件下で通水試験を実施し、ひび割れからの通水量の経時的な変化を測定した。その結果、BFS モルタルと比較用の砕砂モルタルは、水中および飽和水酸化カルシウム水溶液中で再養生した場合にひび割れが閉塞した。特に、飽和水酸化カルシウム水溶液中で再養生した場合、BFS モルタルでは再養生期間の初期における通水量の減少量が砕砂モルタルよりも大きかった。また、水中あるいは飽和水酸化カルシウム水溶液中で再養生することにより、細骨材の種類にかかわらず、初期ひび割れ幅が 0.4 mm 以上でもモルタルのひび割れが閉塞することが示された。

第 6 章 高炉スラグ細骨材の品質評価試験（案）の省力化に向けた試験方法の改善

BFS の反応性を確認するための品質評価試験方法（案）として定められている JSCE-C 507-2018（凍結融解試験）および JSCE-C 508-2018（硫酸浸漬試験）の試験方法の改善を目的として、実験計画法により各種試験条件が試験結果に及ぼす影響を評価した。その結果、有意な因子とそれほど重要でない因子が統計的に判別され、それに基づき試験方法を一部変更することで、試験結果の再現性を保ちながら省力化が可能となることを示した。

第 7 章 ドイツ産の高炉スラグ細骨材を用いたモルタルのブリーディングおよび若材齢強度に対する石灰石微粉末の影響

海外においてコンクリートに BFS が使用された事例は少なく、今後、当該技術を海外展開する上で基礎的なデータの収集が必要となる。そこで、ドイツ産 BFS を用いたモルタルについて、石灰石微粉末の置換によるブリーディングの抑制および若材齢強度の増進について検討した。その結果、BFS モルタルに石灰石微粉末を置換することで、水セメント比が大きい場合に材料分離およびブリーディング量が抑制された。一方、若材齢での圧縮強度および曲げ強度に対する石灰石微粉末の効果は小さかった。また、水セメント比が小さい場合に打設後 24 時間時点の自己収縮量に対して石灰石微粉末によるポジティブな効果が確認された。

第 8 章 結論

第 3 章～第 7 章で得られた結果を総括するとともに、それを踏まえて今後の展望を記し、本論文の結論とした。