

第V部門

2024年9月5日(木) 15:10 ~ 16:30 会場 C303(川内北キャンパス講義棟C棟)

物性 (2)

座長：服部 篤史（京都大学）

15:10 ~ 15:20

[V-289] GGBS高含有セメント硬化体の強制炭酸化が空隙や力学的特性に与える影響とその抑制方法に関する検討

*益永 カレン みどり¹、伊代田 岳氏² (1. 芝浦工業大学大学院、2. 芝浦工業大学)

キーワード：強制炭酸化、炭酸化収縮、C-S-H decalcification、高炉スラグ微粉末、セルロースファイバー

ネット・ゼロ・エミッションを達成するために、炭酸化をCCUS技術として用いることを想定し、炭酸化がOPCとGGBS高含有硬化体の質量・長さ変化率、空隙構造に及ぼす影響の評価から、力学的特性および耐久性との関連について考察した。また、その影響を抑制する方法の検討も行った。その結果、OPCでは質量と圧縮強度の増加、空隙率と水分浸透の低下が認められた。一方で、GGBS含有硬化体では質量増加は認められず、収縮と空隙率の増加に伴って、力学的特性と耐久性に重大な影響を及ぼす可能性が示唆された。収縮抑制検討に用いたセルロースファイバーに効果はなかったが、炭酸化によるGGBS硬化体の曲げ強度低下を低減させた。

GGBS 高含有セメント硬化体の強制炭酸化が空隙や力学的特性に与える影響とその抑制方法に関する検討

芝浦工業大学大学院 学生会員 ○Masunaga Karen Midori
芝浦工業大学 正会員 伊代田 岳史

1. はじめに

セメント系材料の炭酸化は、セメント・コンクリート業界でネット・ゼロ・エミッションを達成するため、または資源循環性を確保するために高い可能性があると考えられる。セメント工場の排ガスから CO₂ を回収・再利用し、廃棄コンクリートを含むセメント由来の Ca イオンと反応させることで、化学的に安定した炭酸カルシウム (CC) を生成するからである。その反応が硬化体で起こる場合、CC の充填は空隙率を下げ、硬化体の性能を向上させるという報告は少なくない。しかし、ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) の炭酸化は逆の効果をもたらし、C-S-H の decalcification によって Ca/Si 比が 1.2 以下に低下すると、セメントマトリックスの炭酸化収縮が起こると報告されている¹⁾。そこで本研究では、炭酸化を CCUS 技術として用いる場合を検討し、強制炭酸化させたセメント硬化体の質量および長さ変化を測定した。また、炭酸化反応が空隙構造に及ぼす影響を評価し、材料の力学的特性および耐久性との関連を考察した。さらに、炭酸化収縮の影響を抑制する方法の検討も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料・試験体概要

試験体には普通ポルトランドセメント (OPC) と CO₂ 削減効果のある混和材高含有の高炉スラグ微粉末 (GGBS) 70%置換した高炉セメント C 種相当 (BC) を使用した。空隙率を高めるために W/B は 0.60 とし、モルタルの S/C は 1 とし、ペースト部分を増すことで、炭酸化の影響を高めることを目的とした。細骨材は、吸水率 2.33% の絶乾状態の混合砂を用いた。収縮抑制効果を検討するために、100%パルプ紙を粉碎し加工した模擬セルロースファイバーを 0.5%wt. 砂置換した試験体も



図ー1 模擬セルロースファイバーと CF 硬化体断面

作製した (図ー1)。ファイバーの Water retention value を推定して、練り混ぜ前に重量の 118% まで水を吸水させてから、攪拌と振動を用いて練り混ぜ水に分散させた状態でミキサーに投入した。試験体は打設 1 日後に脱型し、温度 20°C、湿度 60% の恒温恒湿室でラップによる封緘養生を材齢 7 日間まで行った。モルタルの配合を表ー1 に示す。

2.2 試験方法

強制炭酸化は養生終了後、20°C、湿度 60%、CO₂ 濃度 20% の促進中性化槽で行った (以下 CO₂ 環境)。質量変化及び長さ変化 (デジタルダイヤルゲージ法) は角柱試験体 (20x40x160mm) を用いて測定した。同じ温度と湿度、CO₂ 濃度が 0.1% 以下の恒温恒湿室で乾燥環境の試験体の測定も並行に行った (以下 noCO₂ 環境)。

曲げ・圧縮強度は材齢 7 日の養生後と CO₂ 環境、noCO₂ 環境に静置した材齢 101 日の 40x40x160mm 試験体を用いた。空隙率はアルキメデス法で計測し、水分浸透試験は硬化体の乾燥後 (noCO₂ 環境) と炭酸化後 (CO₂ 環境) の空隙構造と飽和状態を評価できるよう絶乾状態にしないで、曲げ試験の半部分の断面を深さ 15mm 程度浸漬させ、最大 60 分質量変化を測定した。

3. 結果と考察

3.1 強制炭酸化による長さ・質量変化率

図ー2 に長さ変化率を示す。NoCO₂ 環境における水分逸散による収縮は、配合に関わらず同じ傾向を表した。一方、CO₂ 環境での GGBS 含有モルタル BC と CF は noCO₂ 環境に比べて 2 倍ほど大きい収縮が測定され、OPC モルタルの挙動とも異なった。図ー3 に質量変化率を示す。NoCO₂ 環境では水分逸散による質量減少は OPC、BC、CF モルタルで確認され、OPC で一番大きかった。

表ー1 モルタルの配合

硬化体	セメント種	W/C	S/C	模擬セルロースファイバー
OPC	OPC	0.60	1	なし
BC	BC			なし
CF	BC			0.5% wt.

キーワード 強制炭酸化, 炭酸化収縮, C-S-H decalcification, 高炉スラグ微粉末, セルロースファイバー
連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学 03-5859-8356 Email: na22504@shibaura-it.ac.jp

それは、GGBS 含有硬化体では水分保持特性がある空隙構造が形成されるからである。しかしながら、CO₂ 環境では CC 生成からの質量増加は OPC 硬化体だけで確認され、逆に BC と CF 硬化体では noCO₂ 環境より若干早い材齢から質量減少が測定された。

今回の実験では、水分逸散が両環境で生じているが、別途実施した XRD 解析から CO₂ 環境の全配合の硬化体の CH が全て消費されていたこと、またはフェノールフタレイン法による中性化深さ測定から、OPC は 28 日、BC と CF は 7 日以内に全面中性化したことが確認されたので、逸散と同時に炭酸化は十分に進んだと考えられる。セメント種によって NoCO₂ と CO₂ 環境の結果に大きな差があったのは CH が少ない状態での炭酸化による C-S-H decalcification がもともと小さいと報告されている Ca/Si 比の値の低下とともに収縮につながったと思われる。一方模擬セルロースファイバーの収縮抑制効果に関しては、両環境で CF モルタルには BC 配合と同じく大きな収縮・質量減少が測定された。

3.2 強制炭酸化が空隙・力学的特性に与える影響

曲げ強度と圧縮強度の結果を図-4に示す。NoCO₂ での曲げ強度は材齢と共に伸びたが、強制炭酸化はセメント種に関わらず曲げ強度に悪影響を与えた。ペースト部分の炭酸化収縮と骨材との内部拘束によって表面から微細なひび割れが生じたと考えられる。模擬セルロースファイバーは曲げ強度の低下を低減させた。今回用いたファイバー自体には高い強度はないと考えられるが、硬化体全体の収縮は抑えられなかったとしても、ひび割れ抑制効果はあったと思われる。その一方、OPC の圧縮強度は炭酸化で向上し、BC と CF では低下した。空隙率の結果を図-5に示し、絶乾状態を Total porosity とした。CO₂ 環境での OPC モルタルの空隙率 (porosity) も絶乾状態の total porosity も減少し、noCO₂ 環境と同程度の含水率 (moisture) が算出されたものの、BC と CF の絶乾状態の total porosity は両環境で同程度でしたが、空隙率 (porosity) は CO₂ 環境で増加し、noCO₂ 環境と比べて含水率は小さくなった。つまり、GGBS 含有モルタルは炭酸化によって内部の水が逸散しやすい空隙構造に変化した。同様に、水分浸透試験結果 (図-6) から炭酸化で OPC では浸透しにくい、BC では浸透しやすい空隙構造に変化したことが確認された。炭酸化による化学組織・空隙の変化は、CC 充填と C-S-H などの decalcification shrinkage のバランスに支配されるという報告がある。

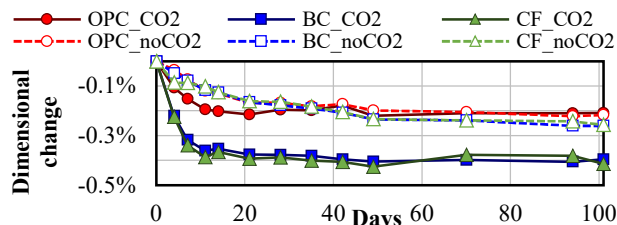


図-2 長さ変化率

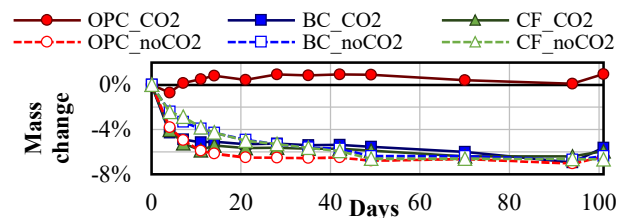


図-3 質量変化率

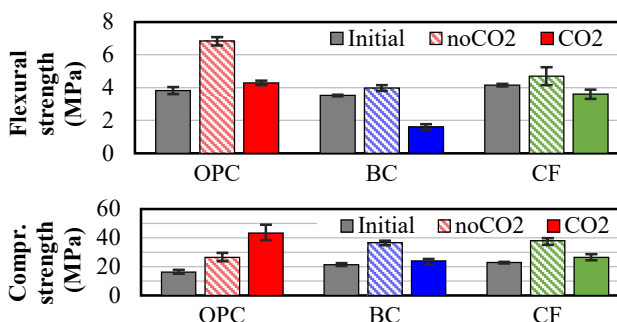


図-4 曲げ強度 (上) と圧縮強度 (下) 試験結果

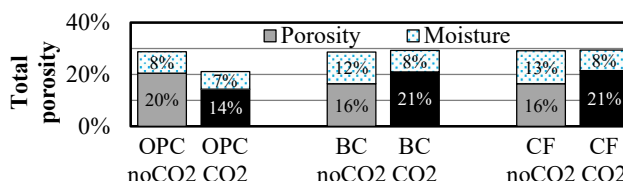


図-5 アルキメデス法による空隙率

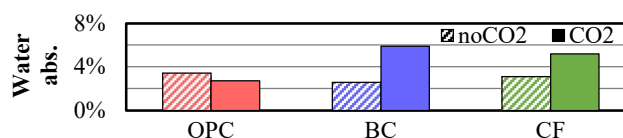


図-6 水分浸透試験結果

4. まとめ

(1) OPC 硬化体の強制炭酸化では質量増加が認められ、空隙率の低下、圧縮強度の増加、水分浸透の低下につながった。GGBS 含有である BC と CF 硬化体では、質量増加は認められなかったものの、大きな収縮が測定され、空隙率の増加とともに力学的特性、耐久性に重大な影響を及ぼす可能性があることが示された。

(2) 本研究で用いた模擬セルロースファイバーに収縮抑制効果はなかったが、強制炭酸化による GGBS 硬化体の曲げ強度低下を低減させた。

参考文献

- 1) Chen, J.J. et al., Decalcification shrinkage of cement paste, Cement and Concrete Research 36 (2006) 801-809.