

Ca 溶脱により劣化したセメントペーストの固相の変質と力学特性の関連性評価

名古屋大学 学生会員 ○川口 貴之

名古屋大学大学院 正会員 三浦 泰人, 中村 光

1. はじめに

セメント系材料は Ca 溶脱などの化学的浸食によって変質することが広く知られている. Ca 溶脱は液相中の Ca イオンが外部へと流出することによって, 固液相の平衡状態が乱されることで, 初期に水酸化カルシウム (以下 CH とする) の溶解が起こり, その後 C-S-H 中の Ca の非調和溶解が生じて空隙率が增加する. これが連続的に生じることで表層から深部へと徐々に劣化が進行する.

著者ら¹⁾は, 薄片供試体には Ca 溶脱後の空隙率と力学特性の関係に基づいた, 力学モデルの構築を試みてきた. 水和プロセスにおいては, 空隙率と強度の関係²⁾によって, 物性と力学情報の関係性をモデル化できることが知られている. しかしながら, Ca 溶脱のように空隙構造と固相の変質が生じる場合は, 単に空隙率と強度の関係性を適用することが安易ではないことが問題であった. そこで, 本研究では Ca 溶脱による固相の変質と力学特性の相互関連を見出すために基礎的な実験を行った.

2. 実験概要

本実験では水セメント比の異なるセメントペーストを作製して実験に使用した. 使用したセメントは普通ポルトランドセメントである. 水セメント比は 40, 50, 60% の 3 水準である. 打設では, 材料分離を防ぐために注水からブリーディング水がみられなくなるまで 30 分おきに練返しを行った. その後, 3×10×250mm の型枠にセメントペーストを打込み, CH 飽和溶液にて所定の期間まで 20±1℃ の環境に静置した. 養生期間は 3, 14, 28, 61 日とした.

養生終了後に, セメントペーストを 3×10×60mm に切断し, 浸漬実験に使用する供試体を作製した. 浸漬実験では, 硝酸アンモニウム溶液 (480g/L) を用いて, 供試体ごとに個別の容器にて浸漬させた (図-1). 液固比は 30 とし, 浸漬期間は 0, 2, 5 日間とした. なお, 硝酸アンモニウム溶液による Ca 溶脱の促進試験は Jebli ら³⁾の実験を参考にした.

浸漬終了後に弾性係数, 曲げ強度を同定するため

に 3 点曲げ試験を行った. なお, 同一条件のサンプル数は 6 体であり, 3 点曲げ試験後は速やかにイソプロパノールによる水和停止処理を行った.

さらに, 曲げ試験後の試験体を用いて Ca 溶脱による断面内の劣化分布を確認するために, SEM/EDS によって Ca/Si 比を評価した. 本実験では, セメント中の全 Ca 量と Si 量を対象としていることに注意されたい. 測定範囲は, 表面から 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0mm の深さの 0.5×3.3mm の領域とし, その領域の Ca/Si 比の平均値を測定した. さらに, アルキメデス法により, すべての条件の試験体の空隙率を測定した.

3. 実験結果

3.1 溶脱による固相の変質評価

養生 3 日の試験体の各浸漬期間における Ca/Si 比の深さ方向の変化を図-2 に示す. Ca/Si 比は浸漬前では 2.8 程度で, 浸漬 2 日では 0.6 程度と大幅に低下し, さらに, 浸漬 5 日では若干低下した. また, Ca/Si 比の深さ方向の変化はみられず断面内で様な劣化分布であることが確認できる.

次に, Ca/Si 比と空隙率の経時変化を図-3 に示す. なお, 図-2 より, Ca/Si 比は断面内で均一であることから, Ca/Si 比の経時変化 (図-3(a)) では深さ方向の測定点の平均値を用いた. これをみると, Ca/Si 比は図-2 で述べたように浸漬 2 日で大幅に低下しており, その後は若干低下した. 空隙率の変化 (図-3(b)) をみると, 浸漬前の養生期間が増加するに



図-1 浸漬の様子

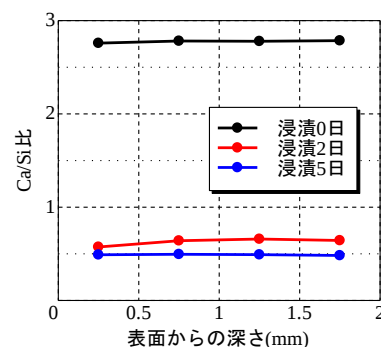


図-2 Ca/Si 比の深さ方向の変化

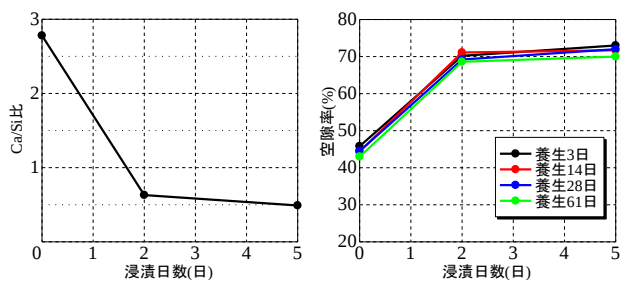


図-3 Ca/Si 比と空隙率の経時変化

たがって、46%から43%まで低下する傾向がみられた。浸漬2日で空隙率が70%程度まで増加し、それ以降は大きな変化はみられない。

一般にC-S-H中のCa/Si比は1.7程度であることが知られている。本実験のCa/Si比はCHやその他の固相のCa量を含むため定量的に評価できないが、浸漬後にCa/Si比が0.6以下に低下していることから、CHは完全に溶解し、C-S-Hの溶解も顕著に進行していることが予想される。このCa/Si比に対応して空隙率が増加していると考えられる。

3.2 溶脱による力学特性の変化

弾性係数と曲げ強度の経時変化を図-4に示す。浸漬前の弾性係数(図-4(a))をみると、養生期間が増加するにしたがって概ね弾性係数が増加する傾向が見て取れる。また、浸漬2日で大幅に低下しており、浸漬5日では若干の低下となっている。養生期間による曲げ強度の変化をみると、養生61日が養生3日より小さいことが確認できるが、曲げ強度はばらつきが大きいことと、弾性係数の養生期間に伴う増加傾向を考えると、養生61日で低下することは考えにくい。これについては、現時点ではこれ以上の詳細な評価は避けることとした。浸漬後の曲げ強度の変化に着目すると、弾性係数の変化と同様に、浸漬2日で大きく低下し、それ以降若干低下することが確認できる。これはCa/Si比の経時変化(図-3(a))の挙動と酷似しておりCa/Si比が力学特性と関連があることが予想される。

ここで、弾性係数、曲げ強度とCa/Si比、空隙率の関係を図-5に示す。これらの図をみると、Ca/Si比と空隙率の変化に伴って弾性係数と曲げ強度が、線形関係にあることがわかる。

Ca溶脱は空隙の増加と固相変質が同時に生じる現象であり、力学特性の低下は、この両者に起因す

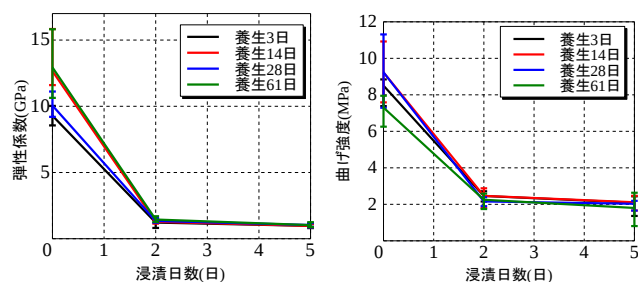


図-4 弾性係数と曲げ強度の経時変化

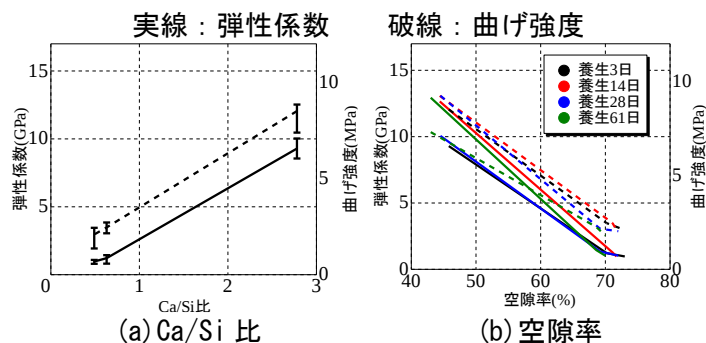


図-5 Ca/Si 比および空隙率と力学特性の関係

ると考えられる。空隙率とCa/Si比が力学特性の変化と強い関係性が予想されることから、空隙の増大による影響を除いて固相の変質による力学特性の変化を考えた場合、Ca/Si比によって力学特性の変化を表現できる可能性がある。

4. まとめ

- 1) Ca溶脱により断面内におけるCa/Si比の様な低下が確認され、それに伴い空隙率が増加した。
- 2) Ca/Si比および空隙率の変化に対応して、弾性係数と曲げ強度が低下することを確認した。
- 3) 力学特性変化に関連する固相の変質の指標として、Ca/Si比が適用できる可能性を示唆した。

5. 参考文献

- 1) Taito Miura and Yasuhiko Sato: Modeling of tensile behavior of mortar immersed in solutions including chloride ions, The 2nd International Composites, No.30, 2012.4
- 2) T. C. Powers: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, Journal of the American Ceramic Society, Vol.41, No.1, pp.1-6, 1958
- 3) Jebli, M. et. al.: Leaching effect on mechanical properties of cement-aggregate interface, Cement and Concrete Composites, Vol.87, pp.10-19, 2018