

T0101-4-6 セメントペースト硬化体のイメージベース圧縮強度解析

Digital-Image-Based Simulation for Compressive Strength Prediction of Hardened Cement Pastes

○正 永井 学志 (岐阜大)

胡桃澤 清文 (北海道大)

Gakuji NAGAI, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu City, 501-1193

Kiyofumi KURUMISAWA, Hokkaido University, Kita 8, Nishi 5 Kita-ku, Sapporo, 060-0808

To predict the macroscopic compressive strengths of hardened cement paste, a digital-image-based finite element procedure for damage evolution due to local tension is developed and its applicability from practical viewpoint is studied through numerical experiments. In the procedure, microscopic three-dimensional geometries of hardened cement paste are assumed to be periodic and each phase is randomly generated by using auto-correlation function evaluated from a two-dimensional SEM image of specimen. Nonlocal isotropic damage model is employed to represented crack evolutions in the geometries. Predicted macroscopic uni-axial compressive strengths are qualitatively consistent with experimental results in terms of water-cement ratio and material age.

Key Words: Two-scale analysis, 3D digital image, Periodic boundary, Nonlocal isotropic damage

1. はじめに

コンクリートは土木・建築構造物の主要材料であり、主に圧縮に対して抵抗する脆性材料である。その基本的な構成は骨材、セメント、水、空気であるが、近年では機械的性能の向上はもちろんのこと、打設時の作業性や凍結融解に対する抵抗性等の向上を目的として、これらの構成に工業副産物であるスラグ粉末やフライアッシュ等、また界面活性剤等の混和材料を添加することが一般的である。これらからインクルージョンである骨材を除いたマトリックスはセメントペーストとよばれ、これが複雑な水和反応により硬化・結合することで、材料としての機械的強度を発現している。

したがって、まずは結合材としての基本的なセメントペーストの硬化体について、機械的挙動を理解・予測できることは重要である。コンクリートの圧縮強度が水セメント比 (w/c) と材齢の2パラメータを用いて設計されていることからわかるように、セメントペースト硬化体の圧縮強度にもこれらが本質的に関わっている。また、セメントペースト硬化体に対する視点をマイクロにしていくとき、まずは μm オーダーで4相 (未水和セメント粒子、水酸化カルシウム、C-S-H、粗大空隙) に分けることが一般的である。これらの空間分布や物性値は上述の2パラメータに依存することが知られているが、その定量化は未だに部分的なものに留まっている。

筆者等は、このような現状認識に基づきセメントペースト硬化体について、その4相の幾何構造を周期性のある3次元マイクロ構造と仮定したうえで、各相の幾何形状と物性がマクロ的な圧縮強度に与える影響を調べようとしている。具体的には、この目的に適した数値解析法を構築するとともに、その計算結果と実験結果との比較を進めている¹⁾。そこで、本稿ではこの概要について述べる。

2. 数値解析法の概要

セメントペースト硬化体の幾何構造を3次元マイクロ構造として容易に取り扱うために、その形状表現に3次元デジタル画像を用いる。これにより、圧縮強度解析のための形状モデル作成が極めて容易化できるほか、実物の撮影画像を用いたり、各種の画像解析により幾何学的な特徴量を抽出したりできる。本研究では、硬化体のある断面のSEM画像から各相の2次元空間分布に関する自己相関関数を得て、この関数を3次元に拡張することで3次元マイクロ構造モデルを統計的に再構成する。

なお、3次元マイクロ構造に周期性を課す理由は、主に次の2点にある。すなわち、a) μm オーダーの視点からは、通常

の $\phi 30 \times 60$ 試験体は巨大過ぎて、現状では全体計算ができないということ、b) 最大荷重までの破壊挙動は、試験体という「構造」よりも「複合材料」としての挙動が卓越していると考えられるためである。

マイクロ構造における各相の空間分布を3次元デジタル画像で与えるため、その1画素を1つの8節点立方体要素とみなすボクセル有限要素解法を用いる。また、各相の構成則には、破壊エネルギー G_f を考慮した等方損傷型の引張軟化モデルを用いる。このモデルを用いる理由は、空間分布の不均一さによる引張で破壊後に軟化していくという現象を表現したいためである。しかし、ボクセル有限要素解法の構成則として軟化型のものを用いる場合、要素分割への強い依存性の生じることがわかっている。そこで、この問題を簡便に回避するために、ポスト処理として非局所化のフィルタ処理を行う。すなわち、釣り合い方程式の求解過程とは別に、ひずみ場から損傷量を評価する際に、注目する要素だけでなく便法としてその近傍要素との重み付き平均をとる。

非線形解法には割線剛性法と静的陽解法を、大規模となる連立1次方程式の求解には規則格子の特徴を活かしたFFT前処理付きの共役勾配法を用いる。

3. 数値実験

3.1 3次元マイクロ構造モデルの統計的再構成と物性値

混和材料を含まない普通ポルトランドセメント (密度: 3.17g/cm^3 , 比表面積: $3340\text{cm}^2/\text{g}$) を使用し、w/c = 30, 45, 60% のセメントペーストを複数作製し、それぞれ材齢 28 日、10ヶ月まで水中養生を行った。SEM 観察には、これらから5mm角程度に切り出したものをエポキシ樹脂に含浸させ、硬化後に表面を研磨した試料を用いた。200 \times 150 μm の測定領域を640 \times 480画素 (1画素の辺長は約0.32 μm) として取り込んだ。各相への分離は輝度分布の極小点で行い、輝度の高いほうから順に未水和セメント粒子、水酸化カルシウム、C-S-H、粗大空隙とした。この2次元画像から各相の自己相関関数を得て、この関数を満たすようにマイクロ構造の3次元デジタル画像 (辺長32 μm , 100³画素) を統計的に再構成する。Fig. 1に各w/cと各材齢において再構成されたマイクロ構造を示す。

未水和セメント粒子と水酸化カルシウムそれぞれのYoung率とPoisson比は、材齢によらず117.6GPa, 42.3GPa, 0.314, 0.324とした。一方でC-S-H相には、一般的にSEM画像の分解能以下の微細空隙 (数nm \sim) が含まれているので、そのYoung率はw/cと材齢に大きく依存する。そこで、C-S-H相についてマイクロインデンテーション法によりYoung率を

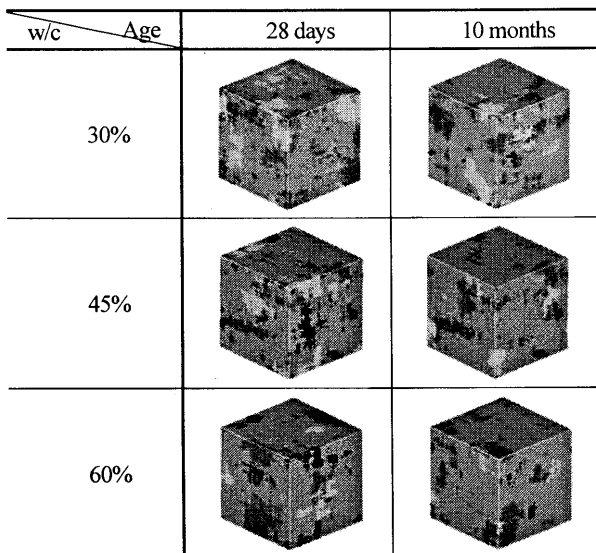


Fig. 1 Geometrical models generated by statistical method

Table 1 Experimental C-S-H Young moduli (median) (GPa)

w/c	Age	28 days	10 months
30%		28.9	35.4
45%		19.4	26.1
60%		12.6	15.4

10 μ m ほどの 10 \times 10 の格子点で評価し、その中央値を入力値とした (Table 1)。ここで、Poisson 比は 0.25 とした。また、損傷開始規準の等価 1 軸引張りひずみ ϵ_u を全相に対して一律に $\epsilon_u = 100\mu$ (引張強度換算で Young 率の 10⁻⁴ 倍)、引張破壊エネルギーも一律に $G_f = 10^{-5}$ N/mm とした。これらの材料パラメータについては、いずれ実験等により同定する必要があるが、ここでは経験的に妥当と考えうる値を用いた。

以上の設定を用いて、圧縮強度解析における周期性の仮定やポスト処理としての非局所化の工学的な妥当性について確認するとともに、静的陽解法におけるマクロひずみの適切な増分を見積もったが、これらについては割愛する。

3.2 圧縮強度の再現可能性 (部分的なバリデーション)

鉛直方向にマクロひずみを規定して増分計算を行う。Fig. 2 に各 w/c と各材齢におけるマクロ視点の鉛直応力-鉛直ひずみ関係を示す。このグラフは、全体として圧縮強度に関するよく知られた傾向 — 一般に低 w/c ほど、また高材齢ほど、圧縮強度が高くなる — を定性的に再現している。まだ同定すべき材料パラメータ ϵ_u , G_f を残したままであるが、本解法は w/c と材齢による圧縮強度差を再現できる可能性があると考えられる。参考までに、 ϵ_u を 5 倍したときの圧縮強度は、 $\phi 30 \times 60$ 試験体の 1 軸圧縮実験の結果と数割の違いで一致を見た。ただし、前提としてこれらの寸法と境界条件が異なることに注意しておく必要がある。

この計算結果は C-S-H 相の微細空隙の影響を構成則に反映するために、Table 1 に示した実測 Young 値を用いたものである。もし、w/c と材齢に関わらず C-S-H 相の Young 率を一律に 22.4GPa とした場合には、Fig. 3 を得る。この図は、自己相関関数の違いが圧縮強度に及ぼす影響の程度を示している。C-S-H 相の Young 率に比べて自己相関関数の圧縮強度への影響は大きくないものの、先ほどと同様、よく知られた傾向を再現している。高材齢のほうが高圧縮強度となる傾向に

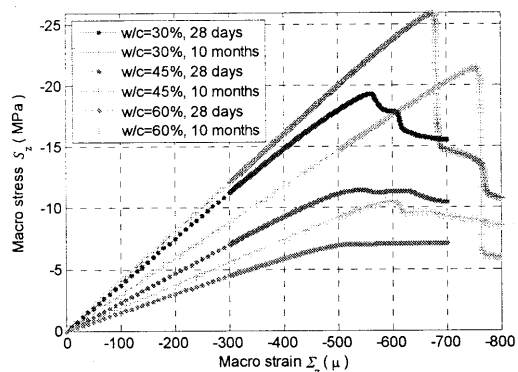


Fig. 2 Macroscopic stress-strain relations in vertical Dir. (C-S-H Young moduli : Table 1)

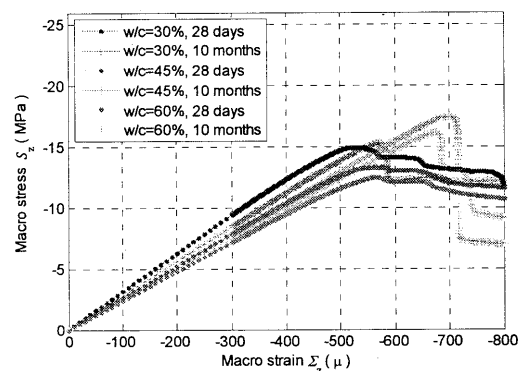


Fig. 3 Macroscopic stress-strain relations in vertical Dir. (C-S-H Young moduli : 22.4GPa)

ついては、高材齢で粗大空隙と未水和セメント粒子が減少することに対応づけられる。

念のため、同一 w/c、同一材齢における幾何形状のばらつきの影響が無視できることを確認するため、前節と同様に材齢 28 日で w/c ごとに 3 モデルを再構成した。同一 w/c における圧縮強度の差は最大でも 7% であり、Fig. 2 中における w/c 間の圧縮強度の差 20% 程度より明らかに小さいので、自己相関関数の違いに比べて幾何形状のばらつきは無視できるといえる。

4. おわりに

本稿では、混和材料を含まない基本的なセメントペースト硬化体に対して、圧縮強度解析のための数値解析法とその再現可能性について述べた。今後は実験とより詳細に比較するとともに、実験とできる限り適合するように数値解析法も修正することを予定している。

謝辞

試料作製及び圧縮強度の測定に関しては、経済産業省より公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターに委託された「平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発」で取得したデータの提供を受けた。

参考文献

- 永井, 池田, 胡桃澤: 硬化セメントペーストの圧縮強度評価に対する非線形ボクセル有限要素解法とその適用可能性, 計算工學論文集, 2010 (掲載決定)