

超高強度セメントペースト微細構造のひび割れ挙動解析と圧縮強度評価

東北大学大学院 学生会員 ○笹川 崇
 東北大学大学院 正会員 車谷 麻緒
 東北大学大学院 正会員 寺田 賢二郎
 鹿島建設技術研究所 関田 徹志

1. はじめに

近年、建築物の高層化や橋梁の大スパン化に伴い、コンクリートの高強度化の研究・開発が盛んに行われている¹⁾。しかしながら、その研究の多くが高強度化したという現象の確認にとどまっており、その強度発現メカニズムに関しては、明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、超高強度セメントペーストの微細構造におけるひび割れ挙動に着目し、これを構成する空隙および未水和セメントが、圧縮強度に及ぼす影響を調査する。

2. ひび割れ進展を考慮した数値材料実験

調査には、ミクロ構造内部でのひび割れ進展挙動²⁾を考慮した、均質化法³⁾に基づく数値材料実験を適用する。また、本研究では、セメントペーストの微細構造を、水和生成物はマトリクス、空隙は孔、未水和セメントは介在物としてモデル化する。

マクロスケールにおけるひずみと応力は、微細構造(ユニットセル)の解析から得られるミクロスケールのひずみと応力の体積平均として次式で評価する。

$$E(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \varepsilon(x, y) dy = \nabla_x^{(s)} U(x) \quad (1)$$

$$\Sigma(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \sigma(x, y) dy \quad (2)$$

ここで、 E はマクロひずみテンソル、 Σ はマクロ応力テンソル、 U はマクロ変位ベクトル、 ε はミクロひずみテンソル、 σ はミクロ応力テンソルである。

ミクロスケールではひび割れ挙動を考慮するため、コンクリートの破壊力学モデルとして、結合クラックモデルを適用する。このとき、解くべきミクロスケールにおける支配方程式は次のようになる。

$$\int_Y \nabla_y^{(s)} \delta u : \sigma dy + \underbrace{\int_{\Gamma_{PZ}} p^{\text{coh}} \delta g \cdot g d\Gamma}_{\text{Cohesive crack term}} = 0 \quad (3)$$

ここで、 g は、不連続面における相対変位ベクトルである。この式と構成則 $\sigma(x, y) = c : \varepsilon(x, y)$ および Y -周期的なミクロ変位場 u を用いたひずみの適合条件式 $\varepsilon(x, y) = E + \nabla_y^{(s)} u(x, y)$ を含めてミクロの境界値問題と定義する。

3. 圧縮強度評価

3.1 圧縮強度指標

実験による圧縮強度の定義は、その試験体の構造体としての変化をも反映したものであり、数値材料実験によりこ

れらに対応づけるのは難しい。そこで本研究では、劣化度 D_{cr} を次の式で定義して、圧縮強度を評価するものとする。

$$D_{cr} = \frac{E_0 - E'}{E_0} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

ここで、 E_0 はひび割れを伴わない弾性解析によるひずみエネルギー、 E' はひび割れ進展に伴うエネルギー損失を考慮したひずみエネルギーである。この劣化度 D_{cr} は、ひび割れにより消費されたエネルギー量を、正規化したもので、エネルギー収支の観点からひび割れ進展量を定量化したものである。

3.2 圧縮載荷による数値材料実験

本章以降で示す解析モデルは、すべてミクロ構造(ユニットセル)である。また、著者らの行った実験では、微細構造におけるひび割れは未水和セメントを避けて進展しているため、本解析では介在物(未水和セメント)内部ではひび割れは発生しないものとし、マトリクスにおけるひび割れのみを対象とする。なお、材料パラメータは、マトリクスが Young 率 40 GPa, Poisson 比 0.2, 引張強度 1.0 MPa, 破壊エネルギー 5×10^{-7} N/mm, 介在物が Young 率 120 GPa, Poisson 比 0.2 とした。

(a) 介在物の影響 まず、介在物の影響を調査するため、解析モデルとして図-1 に示すように孔だけを含む Model A1, それぞれ配置の異なった介在物を 2 つ含む Model A2~A4, 介在物の数を 4 つに増やしランダムに配置した Model A5, A6 を用意し、これらの解析結果として劣化度とマクロ応力の関係を図-2 に示す。

まず、図-2 の Model A1~A4 に着目すると、孔だけの Model A1 と比較して、Model A2 は劣化度が大きく、Model A3 は劣化度が小さい。また Model A4 はほぼ同じ劣化度となっている。このことから、介在物の有無と強度とを関連づけることはできないが、介在物の配置が影響を及ぼすことがわかる。しかしながら、図-2 の Model A5, A6 に着目すると、これらの劣化度は孔だけの Model A1 のものと同程度となっている。これは Model A5, A6 のように介在物を数多く且つランダムに含むことで、介在物の(配置による)影響が打ち消されたためと考えられる。実際の微細構造では、Model A5, A6 より多くの介在物を含んでいるため、その劣化度は孔だけの Model A1 のものに近づくと考えられる。よって、介在物(の有無もしくは数の大小)が、ひび割れのエネルギー消費に着目した圧縮強度に及ぼす影響は非常に小さいと言える。

キーワード：超高強度セメントペースト、強度評価、ひび割れ進展解析、微細構造、均質化法

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL: 022-795-7425, FAX: 022-795-7423, URL: <http://www.mm.civil.tohoku.ac.jp/>

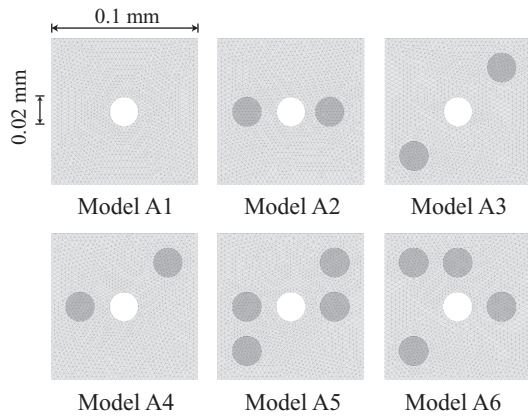


図-1 介在物の影響 (解析モデル)

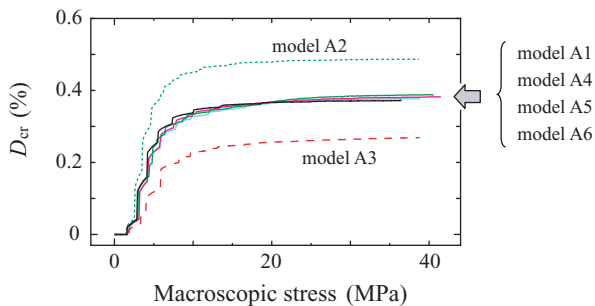


図-2 介在物の影響 (劣化度とマクロ応力の関係)

(b) 孔の体積率の影響 次に、孔の体積率の影響を調べるため、解析モデルとして図-3 に示すように孔の体積率の大きい Model B1, B2 と体積率の小さい Model B3, B4 を用意し、同様の解析を行った。解析結果として、劣化度とマクロ応力の関係を図-4 に示す。

まず、図-4 の Model B1, B2 と B3, B4 を比較すると、孔の体積率の小さい Model B1, B2 の方が、孔の体積率の大きい Model B3, B4 より劣化度が小さいことが見てとれる。これに比べ、Model B1 と B2 を比較すると、ほぼ同じ劣化度を示していることがわかり、これは Model B3 と B4 についても同様である。このことから、前項で述べたように、介在物の数の大小が劣化度に及ぼす影響は非常に小さいことが再度確認でき、新たな結論として、孔の体積率が小さいほど劣化度は小さいと言える。よって、ひび割れのエネルギー消費に着目した圧縮強度は、介在物の数の影響は小さく、孔の体積率に強く依存すると考えられる。

(c) 孔の影響 介在物の影響は非常に小さいことは十分に確認できたので、孔の影響を詳細に調べるため、解析モデルとして図-5 に示すように孔の体積率の小さい Model C1、孔の体積率の大きい Model C2、Model C2 と同じ孔の体積率で孔を小さくし 4 つに分けた Model C3 を用意し、同様の解析を行った。解析結果として劣化度とマクロ応力の関係を図-6 に示す。

まず、図-6 を見てみると、孔の体積率の小さい Model C1 の方が、孔の体積率の大きい Model C2, C3 より劣化度が小さいことがわかる。これに比べ、Model C2 と C3 を比較すると、ほぼ同じ劣化度を示している。このことから、孔だけのモデルについても前項で述べたように、孔の体積率が小さいほど劣化度は小さいと言え、また新たな結論として、孔の体積率が同じであれば孔の大きさが異なっても劣

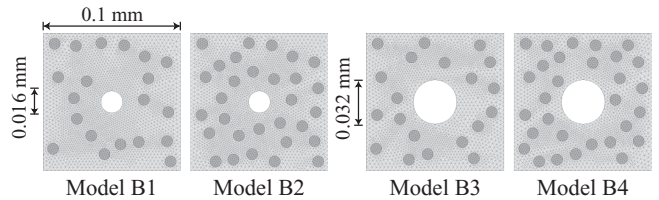


図-3 孔の体積率の影響 (解析モデル)

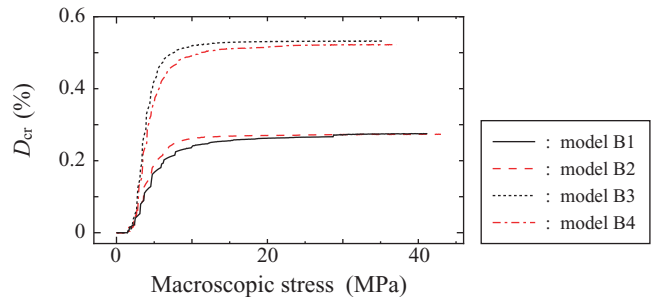


図-4 孔の体積率の影響 (劣化度とマクロ応力の関係)

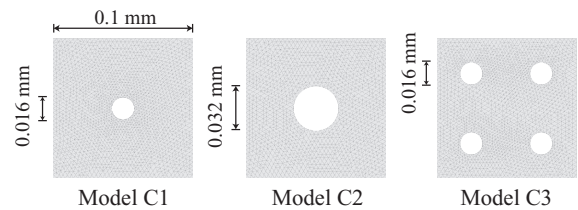


図-5 孔の影響 (解析モデル)

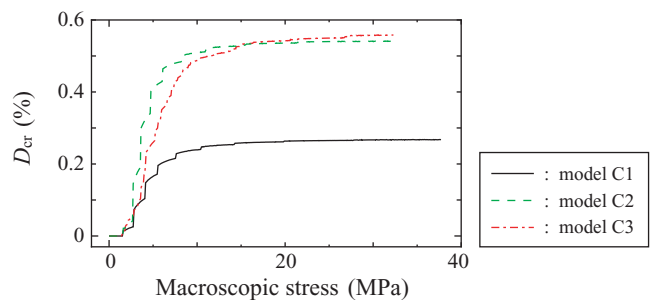


図-6 孔の影響 (劣化度とマクロ応力の関係)

化度は同程度と言える。よって、ひび割れのエネルギー消費に着目した圧縮強度は、孔の大きさの影響は小さく、孔の体積率に強く依存すると考えられる。

4. おわりに

本研究では、セメントペースト微細構造の組成が、ひび割れ挙動および圧縮強度に及ぼす影響を調査した。圧縮強度評価には、ひび割れ形成によるエネルギー消費に着目した指標を用い、その結果から、圧縮強度は未水和セメントの体積率（数）よりも空隙の体積率に強く依存することを示し、空隙の体積率が小さいほど圧縮強度が大きいことを示した。

参考文献

- 1) 平田真也, 今井克明, 亀崎健吾, 高橋達也, 在永末徳: 超高強度コンクリートの高強度化手法について (材料・施工), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 20 巻, pp.29-32, 1997.
- 2) 車谷麻緒, 寺田賢二郎: Cohesive crack モデルに対する陽的近似アルゴリズムの提案とその性能評価, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.3, pp.627-638, 2008.
- 3) 日本計算工学会 (編), 寺田 賢二郎, 菊池 昇 (著): 計算力学レクチャーシリーズ, 均質化法入門, 丸善, 2003.