

セメントペースト微細構造のひび割れ挙動解析と強度評価

○ 東北大学工学部 学生会員 笹川 崇
 東北大学大学院 正会員 寺田 賢二郎
 法政大学大学院 正会員 車谷 麻緒
 東北大学大学院 正会員 京谷 孝史
 鹿島建設技術研究所 正会員 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・高靱性化の研究・開発が盛んに行われている．しかしながら，コンクリートの高強度化の研究に関しては，そ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．コンクリートの更なる超高強度化を実現するためにも，今後は，強度発現メカニズムを解明していく必要があり，数値解析技術の果たす役割は大きいといえる．そこで，本稿では，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，有限要素法により，セメントペーストの非均質性を考慮した均質化法に基づく数値材料実験を行うことで，微細構造を構成する空隙および未水和セメントが，強度に及ぼす影響を検討する．

2. ひび割れ進展を考慮した数値材料実験

ミクロ構造内部でのひび割れ進展挙動を考慮した，均質化法に基づく数値材料実験の方法を説明する．

マクロスケールにおけるひずみと応力は，ミクロスケールの体積平均により以下のように与えられる．

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

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

また，結合力クラックモデルは，コンクリートの軟化挙動を破壊進行領域における不連続面間の結合力でモデル化したものである．この結合力クラックモデルを適用した，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， p^{coh} および g は，不連続面での表面力 t^{coh} および変位ベクトル $u^{[a]}$ ， $u^{[b]}$ を用いて， $p^{\text{coh}} = \|t^{\text{coh}}\|/\|g\|$ ， $g = u^{[a]} - u^{[b]}$ である．

式 (3) と構成則 $\sigma(x, y) = c : \varepsilon(x, y)$ および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なる．

3. 引張強度評価

引張強度評価の一例として，以下では介在物におけるミクロ構造の寸法効果を紹介する．

解析モデルは，図-1 に示すように，それぞれ介在物を1つ含んでおり，介在物の体積率は等しく，ミクロの寸法を変化させた3つのモデルである．

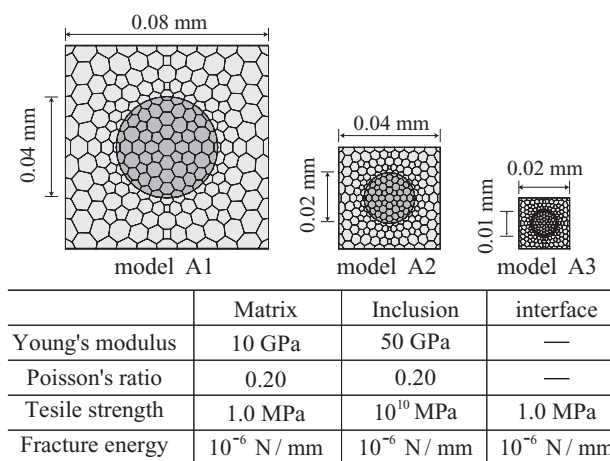


図-1 解析モデル（介在物の寸法効果）

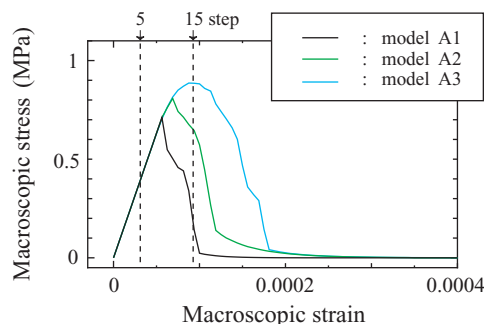


図-2 マクロの応力 - ひずみ関係（介在物の寸法効果）

解析結果として，マクロの応力 - ひずみ関係を，図-2 に示し，Model A1 および A3 の荷重ステップ 5/100，15/100 における y 方向応力分布と変形図を，図-3 にまとめた．

マクロの応力 - ひずみ関係から，ミクロ構造が小さいほど，ピーク応力つまり引張強度が大きい傾向が見てとれる．図-3 を見ると，荷重ステップ 5/100 では，Model A1，A3 ともにひび割れ発生前であるため，同様の応力分布および変形図となっており，この荷重ステップでのマクロの応力 - ひずみ関係を見ても，Model A1，A3 ともに同じ応力を示している．荷重ステップ 15/100 になると，Model A1 は，すでにひび割れが貫通している．一方，Model A3 は，ひび割れは発生しているものの貫通はしていないため，Model A1 より大きい応力分布を示している．このときのマクロの応力 - ひずみ関係をみると，Model A1 はピーク応力を過ぎ，軟化現象が進行している．一方，Model A3 は，ちょうどピーク応力となっている．これは，ミクロ構造の寸法が小さくなることにより，単位体積あたりのひび割れ面積が増加したことで，ひび割れが進展しにくくなったためと考えられる．

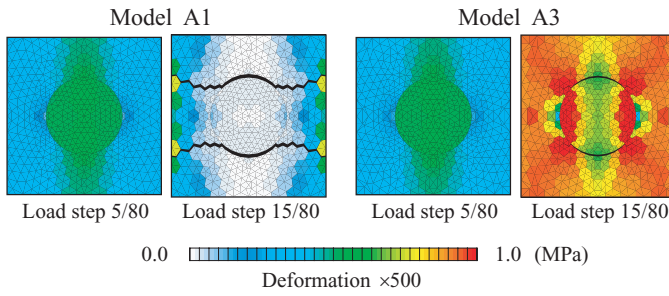


図- 3 y 方向応力分布と変形図

4. 圧縮強度評価

4.1 圧縮強度指標

実験による圧縮強度は、その試験体の構造に強く依存することから、数値材料実験により直接評価することは難しい。そこで本研究では、次の式で定義される劣化度 D_{cr} を用いて、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' はひび割れ進展による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表したものである。

4.2 圧縮数値材料実験

(a) 介在物の配置による影響 解析モデルを図-4 に示し、解析結果として、劣化度 - 応力関係を図-5 に示す。

図-5 を見ると、孔だけの Model B1 と比較して、Model B2 は劣化度が大きく、Model B3 は劣化度が小さくなっていることから、介在物の有無が強度に与える影響を一概には言うことができず、介在物の配置による影響が存在するといえる。また、Model B4 が Model B1 と同等の劣化度を示したのは、2 つある介在物が、それぞれの配置による影響を打ち消しあったと考えられる。

(b) 孔および介在物の影響 解析モデルは、図-6 に示し、解析結果として、劣化度 - 応力関係を、図-7 に示す。

図-7 を見ると、Model C1 と C2、C3 と C4 がそれぞれ同じような曲線を示していることがわかる。このことから、劣化度は介在物の数よりも孔の大きさの影響が大きく、孔が小さいほど劣化度も小さいことがわかる。これは、介在物のある程度数、ランダムに配置することにより、介在物の配置による影響は、Model B4 のようにほとんどが打ち消され、孔の影響が大半を占めることになったと考えられる。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、孔の寸法に強く依存すると考えられる。

5. おわりに

本研究では、引張荷重下で、セメントペーストの微細構造における空隙・未水和セメントの寸法および体積率が、強度に及ぼす影響を明らかにした。また、圧縮荷重下での

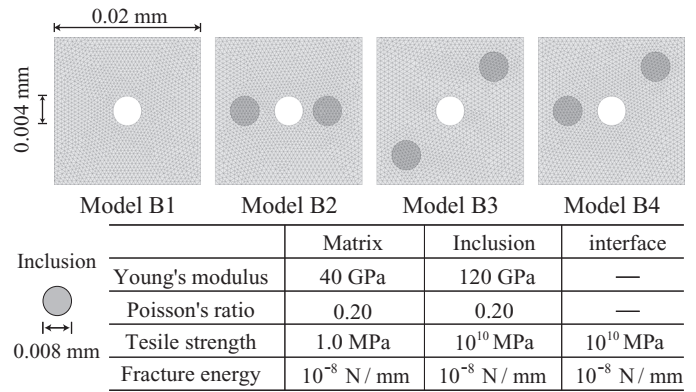


図- 4 解析モデル

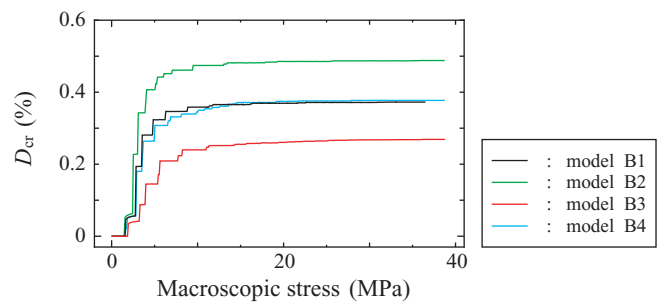


図- 5 劣化度 - 応力関係

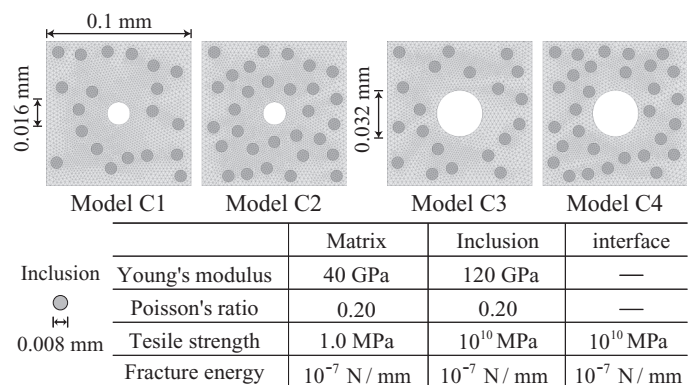


図- 6 解析モデル

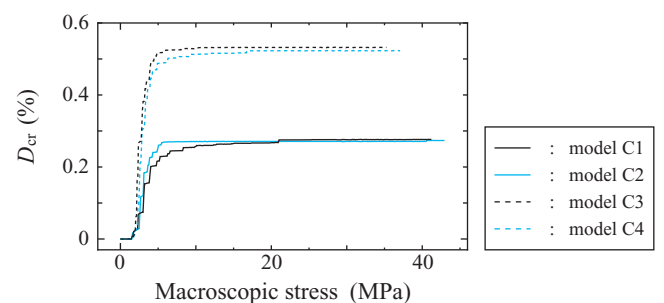


図- 7 劣化度 - 応力関係

ひび割れ挙動を解明し、エネルギー消費に着目して圧縮強度評価を行った。これにより、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確認できた。