

微視的破壊挙動に着目したコンクリートの 圧縮破壊シミュレーションに関する基礎的研究

茨城大学 学生会員 ○神野真弥 茨城大学 学生会員 鈴木茂成
茨城大学 正会員 車谷麻緒 東北大学 正会員 寺田 賢二郎
中央大学 正会員 檜山和男

1. はじめに

構造物を建造する際の材料として多く使用されているコンクリートは、主に圧縮力を受け持つ材料として用いられている。したがって、コンクリートの圧縮破壊挙動を解明することは、非常に重要な課題である。しかし、コンクリートの圧縮破壊挙動に関しては未だ不明な点が多く、微視的レベルと巨視的レベルとの破壊メカニズムの関係性は明確ではない。こうしたことは、コンクリートの非均質性により巨視的クラックの先端部分に微細なひび割れが累積する破壊進行領域が形成されることで、破壊進行挙動が複雑化することが原因として挙げられる。

この破壊進行領域の力学挙動に関しては、今まで実験による観察・考察は様々行われているものの、数値シミュレーションにより再現し、確認した例は少ない。また、微細ひび割れのような微視スケールを考慮して破壊に至るまでのプロセスを解析した例についてはほとんど存在しない。そこで、本研究では微視的な破壊に着目し、コンクリートの圧縮破壊挙動の再現を試みる。

2. モデル化と解析手法¹⁾

2.1 破壊のモデル化

モルタルは、巨視的に見た場合は剛性や強度は均一として扱われるが、微視的に見た場合は空隙や遷移体といった剛性や強度が周囲よりも弱い部分が存在するため、剛性や強度は均一ではない。そのため、モルタルは図-1(a)左図のように破壊の発生源が不規則に分布していると考えられる。ここで、幾何学的に不規則な形状をしているボロノイ要素を用いてモデル化すると、破壊の発生源は図-1(a)右図のようにボロノイ要素同士の境界で表現される。すると、微細ひび割れの発生は図-1(b)のように表され、その成長による巨視的ひび割れは図-1(c)のように表される。また、ボロノイ要素の境界を2重節点とし、ボロノイ要素を三角形要素で構成すれば、通常の有限要素法が適用できる。

2.2 解析手法

本研究では、微細ひび割れの形成・連結・開閉を考慮したひび割れ進展解析を行うことで、微細ひび割れの形成からその成長による巨視的クラック形成までのプロセスを再現する。なお、本研究では破壊進行領域は弾性変形、引張破壊、せん断破壊の3つの組み合わせで形成されると仮定する。

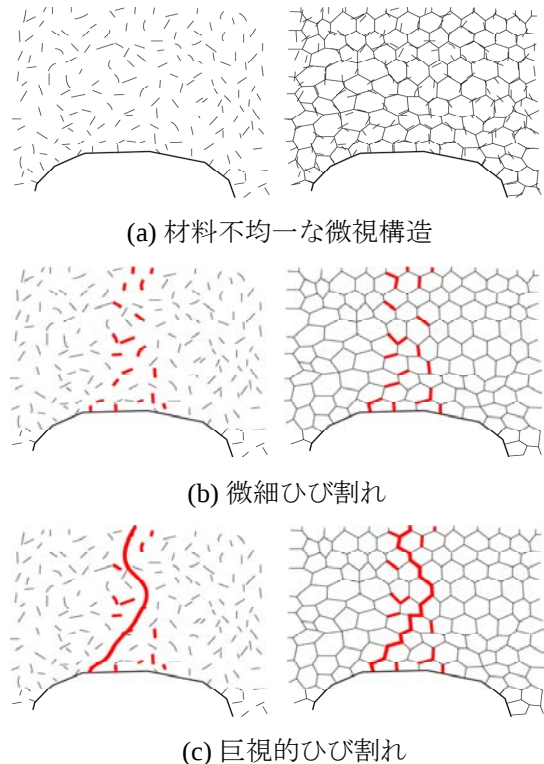


図-1 破壊の捉え方とモデル化

(1) 微細ひび割れの形成を考慮した弱形式

巨視的な破壊力学モデルである Cohesive crack model を微細ひび割れにも適用可能であると考え、引張軟化則として次式を与える。

$$\|t^{\text{coh}}\| = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} \kappa_t\right) \quad (1)$$

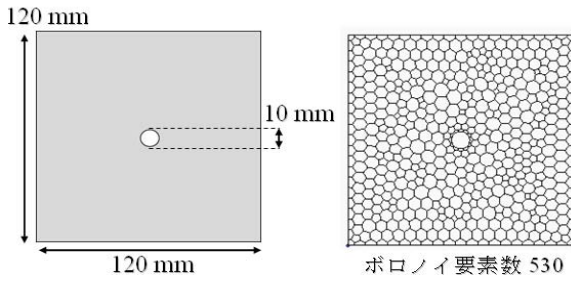
ここで、 $\|t^{\text{coh}}\|$ は結合力ベクトルの大きさ、 f_t は引張強度（微細ひび割れの発生強度）、 G_f は微視的な引張破壊エネルギー、 κ_t は最大開口変位である。

また、本研究では Cohesive crack model を微視的な引張破壊だけでなく、微視的なせん断破壊にも同様に、引張強度をせん断強度 f_s 、引張破壊エネルギーをせん断破壊エネルギー G_s 、開口変位をせん断によるすべり変位 κ_s に置き換えて適用する。

また、微細ひび割れの開閉をバネ（ペナルティ法）による近似で表すことにすると、微細ひび割れの形成を考

キーワード 圧縮破壊, 離散ひび割れ, ボロノイ分割, コンクリート材料

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 茨城大学工学部 TEL: 0294-38-5004 FAX: 0294-38-5268



ヤング率 (MPa)	20000
ポアソン比	0.2
引張強度 (MPa)	1
引張破壊エネルギー (N/mm)	0.01
せん断強度 (MPa)	6
せん断破壊エネルギー	0.04

図-2 空隙を有するモデル

慮した弱形式は次のように表される.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Gamma_{EL}} \delta \mathbf{g} \cdot \bar{\mathbf{p}}_w \mathbf{g} d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_s} \delta \mathbf{g} \cdot \mathbf{p}_s \mathbf{g} d\Gamma + \int_{\Gamma_n} \delta \mathbf{g} \cdot \mathbf{p}_n \mathbf{g} d\Gamma \\ & = \int_{\Omega} \delta \mathbf{u} \cdot \bar{\mathbf{b}} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta \mathbf{u} \cdot \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (2) \end{aligned}$$

ここで, $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ は仮想ひずみベクトル, $\boldsymbol{\sigma}$ は応力ベクトル, $\delta \mathbf{g}$ は微細ひび割れの仮想開口変位ベクトル, $\mathbf{g}$ は不連続面における相対変位ベクトル, Γ_{EL} は未破壊境界, Γ_s は接触を伴う微細ひび割れの境界, Γ_n は接触を伴わない微細ひび割れの境界, $\bar{\mathbf{p}}_w$ は弱層を表すペナルティバネ係数行列, $\mathbf{p}_s$ はせん断破壊を表すペナルティバネ係数行列, $\mathbf{p}_n$ は引張破壊を表すペナルティバネ係数行列, $\delta \mathbf{u}$ は仮想変位ベクトル, $\bar{\mathbf{b}}$ は物体力ベクトル, $\bar{\mathbf{t}}$ は表面力ベクトルである.

(2) 破壊の判定

未破壊時の Γ_{EL} における境界面上の表面力 $\boldsymbol{\lambda}$ は, バネの反力として次式のように表せる.

$$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}_n + \boldsymbol{\lambda}_s = \bar{\mathbf{p}}_w \mathbf{g} \quad (3)$$

ここで, $\boldsymbol{\lambda}_n$ は法線方向内力, $\boldsymbol{\lambda}_s$ は接線方向内力である.

引張破壊の判定はこの表面力を用いて次式のように定める.

$$\mathbf{g} \cdot \mathbf{n} > 0 \quad \text{and} \quad \|\boldsymbol{\lambda}_n\| - f_t = 0 \quad (4)$$

ここで, $\mathbf{n}$ は Γ_{EL} , Γ_{PZ} における外向き単位法線ベクトルである. また, せん断破壊の判定は次式のように定める.

$$\mathbf{g} \cdot \mathbf{n} < 0 \quad \text{and} \quad \|\boldsymbol{\lambda}_s\| - f_s = 0 \quad (5)$$

3. 空隙を有するモルタルの数値解析例

3.1 解析条件

今回は既往の研究結果²⁾と比較するため, 図-2に示すよ

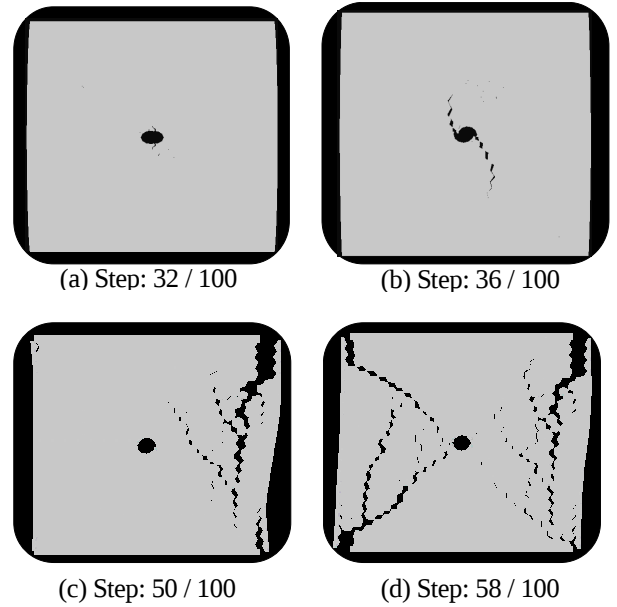


図-3 シミュレーション結果

うな中心に空隙を有するモルタルモデルを対象に, シミュレーションを行った. 材料パラメータは同図に示す通りであり, 縦方向に一軸圧縮ひずみ0.15 %を100ステップで与える.

3.2 結果と考察

シミュレーション結果を誇張して図-3に示す. まず空隙の上下に応力が集中し, そこから荷重軸方向にクラックが発生する (図-3(a)). その後, 斜め方向に脆性的にクラックが発生し, それに伴い初めに荷重軸方向に発生したクラックは閉じる (図-3(b)). そして, 斜め方向に発生したせん断クラックがゆっくりとした速度で成長しつつ, 空隙部以外の部分において荷重軸方向, 斜め方向のクラックが生じている (図-3(c)). その後, 4方向に脆性的にクラックが生じ, 全体が崩壊している (図-3(d)).

これは既往の研究²⁾で報告されている破壊挙動とほぼ同様であり, 実際の破壊挙動に近い挙動を再現できていると言える.

4. おわりに

本研究では, 材料の非均質性に起因する微細ひび割れ挙動をモデル化し, モルタルモデルにおいて既往の実験結果とほぼ同様の破壊挙動を再現することができた. 今回はモルタルモデルにおける検証のみを行ったが, 今後は骨材の配置による影響の考察やパラメータの検討を行っていく必要がある.

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 竹内則雄: 微細ひび割れの形成・連結・開閉に起因した準脆性材料の破壊進行メカニズム, 土木工学会論文集A, Vol.66, No.3, pp505-515, 2010.
- 2) 和泉正哲, 三橋博三, 佐々木達夫: コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第289号, pp.11-25, 1980.