

引張強度と破壊エネルギーに着目した微視的破壊進行挙動の数値解析

茨城大学 学生会員 ○神野真弥
茨城大学 正会員 車谷麻緒

1. はじめに

コンクリートはその非均質な構造からクラックの先端部分に破壊進行領域と呼ばれる微細ひび割れが累積した領域が形成される。この破壊進行領域の力学挙動について、今まで実験による観察・考察は多く行われているが、数値シミュレーションにより再現し確認した例は少なく、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、本研究ではコンクリートを対象に微視構造モデルを作成し、破壊進行領域における微細ひび割れの力学挙動をシミュレートすることで、微細ひび割れの集積から巨視的ひび割れへの成長過程を再現し、破壊のメカニズムについて考察することを目的とする。

2. モデル化と解析手法

(1) 破壊のモデル化¹⁾

モルタルは空隙や遷移帯といった弱い部分（弱層）が多く存在する。これを図-1(a)の左図のように破壊の発生源がランダムに分布していると考え、モデル化には幾何学的なランダム性に優れるポロノイ分割を利用する。すると、微細ひび割れの発生は図-1(b)のように表され、微細ひび割れの集積による巨視的ひび割れは図-1(c)のように表される。また、ポロノイ要素は三角形要素で構成されており、破壊を表現するポロノイ境界は2重節点にしているため、解析には普通の有限要素法を用いている。

(2) 解析手法

本研究では¹⁾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均質化法²⁾に基づくミクロ解析に適用することによって、微視構造のひび割れ解析を行う。

(a) 微細ひび割れの開閉を考慮した弱形式

巨視的な破壊力学モデルである Cohesive crack model を微視構造における微細ひび割れにも適用可能だと考え導入し、引張軟化則として次式を与える。

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

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

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、微視構造における微細ひび割れ

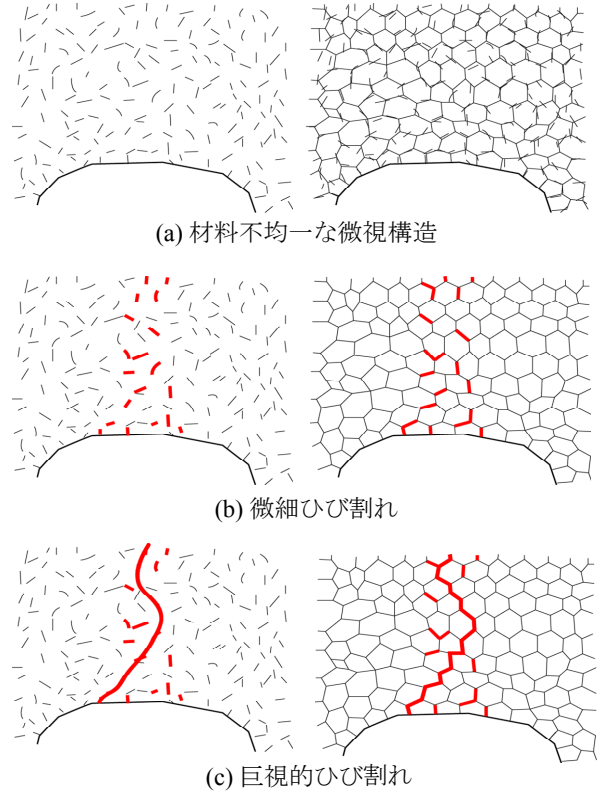


図-1 破壊の捉え方とモデル化

の開閉を考慮した弱形式は次のように表される。

$$\begin{aligned} & \int_Y \nabla_y^{(s)} \delta u : \sigma \, dy \\ & + \underbrace{\int_{\Gamma_{EL}} \delta g \cdot \bar{p}_w g \, d\Gamma}_{\text{Penalty term}} + \underbrace{\int_{\Gamma_C} \delta g \cdot \bar{p}_c g \, d\Gamma}_{\text{Contact term}} \\ & + \underbrace{\int_{\Gamma_{PZ}} \delta g \cdot p^{\text{coh}} g \, d\Gamma}_{\text{Cohesive crack term}} = 0 \end{aligned}$$

ここで、 y はマクロ座標系を x としたときにミクロ構造の大きさを表すパラメータ ε によって $y = x/\varepsilon$ と関連付けられるミクロ座標系、 δu はミクロ仮想変位ベクトル、 σ はミクロ応力テンソル、 $\nabla^{(s)}$ は勾配テンソルの対称成分を作る演算子、 g は微細ひび割れの開口変位ベクトル、 δg 微細ひび割れの仮想開口変位ベクトル、 Γ_{EL} は未破壊境界、 Γ_C は微細ひび割れの接触境界、 Γ_{PZ} は接触を伴わない微細ひび割れの境界、 $\bar{p}_w$ は弱層を表すペナルティバネ係数行列、 $\bar{p}_c$ は微細ひび割れの接触を表すペナルティ

キーワード 破壊進行領域、ひび割れ進展解析、微視構造、引張強度、破壊エネルギー

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 茨城大学日立キャンパス TEL: 0294-38-5004 FAX: 0294-38-5268

バネ係数行列, p^{coh} は微細ひび割れの開口を表すペナルティバネ係数行列である. 上式は周期境界条件を与えることにより解くことが可能となる.

(b) 破壊の判定

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

$$\lambda = \bar{p}_w g$$

破壊の判定はこの表面力を用いて次式のように定める.

$$\lambda \cdot n > 0 \quad \text{and} \quad \|\lambda\| - f_t = 0$$

n は Γ_{EL} , Γ_{PZ} における外向き単位法線ベクトルである.

3. 引張強度, 破壊エネルギーに関する検証

(1) 検証条件

解析に用いるパラメータの内, コンクリートの挙動を表現するために重要な破壊エネルギーや, 破壊の判定に用いる引張強度は, 微視的なモルタルや骨材界面においては計測できず, 不明である. そこで, 引張強度, 破壊エネルギーを変化させシミュレーションを行うことにより, 考える様々なパターンの破壊進行領域内の破壊挙動を再現した. 今回は引張強度をモルタル 2.0 MPa, 骨材界面 1.0 MPa とした場合について, モルタルの破壊エネルギーを 0.01 N/mm とし, 骨材界面の破壊エネルギーを 0.001 N/mm, 0.01 N/mm, 0.1 N/mm と変化させた 3 つのケースについてシミュレーションを行った. モデルはコンクリートの断面画像をもとに作成した, 図-2 に示すものを使用し, また, 材料パラメータは表-1 に示す通りであり, 縦方向に一軸引張ひずみ 0.0002 を 120 ステップで与えた.

(2) 検証結果と考察

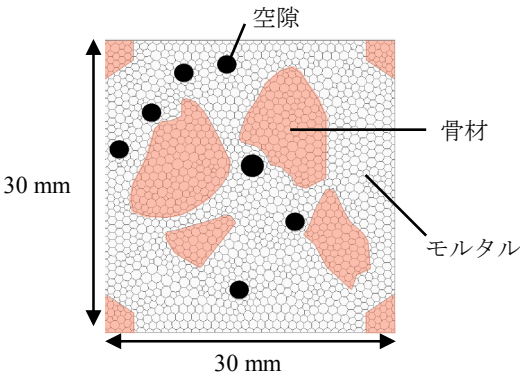
図-3 に微細ひび割れが発生した境界とその開口変位の大きさを誇張して表したシミュレーション結果を示す. 結果を見ると, 同じステップ数でも界面の破壊エネルギーが大きいほどひび割れの開口が小さく, 破壊に至るまでに大きな荷重を必要とすることが分かる. また, 界面の破壊エネルギーが大きくなるにつれて界面の剥離している部分が増えており, 空隙からの微細ひび割れの量が増えることが分かった. 特に, 界面の破壊エネルギーを 0.1 N/mm とした場合では四隅の骨材からのひび割れの進展が著しかった. これらは, 界面の破壊エネルギーを大きく設定したために, 界面の破壊が主に成長している部分の剥離があまり進展しなくなり, エネルギーの解放がその部分以外で起きたためと考えられる.

4. おわりに

本研究では, 実際のコンクリート断面画像から作成した微視構造モデルにおいて, 引張強度, 破壊エネルギーに着目し, 考えるコンクリートの破壊挙動を再現した. この結果をもとに, 今後は実際に観察される結果も参照し, コンクリートの破壊のメカニズムについて考察する.

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, No3, pp.505-515,



ポロノイ要素数1874

図-2 コンクリート微視構造モデル

表-1 材料パラメータ

	モルタル	骨材	界面
ヤング率(GPa)	16	55	—
ポアソン比	0.2	0.2	—
引張強度(MPa)	2	—	1
破壊エネルギー(N/mm)	0.01	—	0.001, 0.01, 0.1

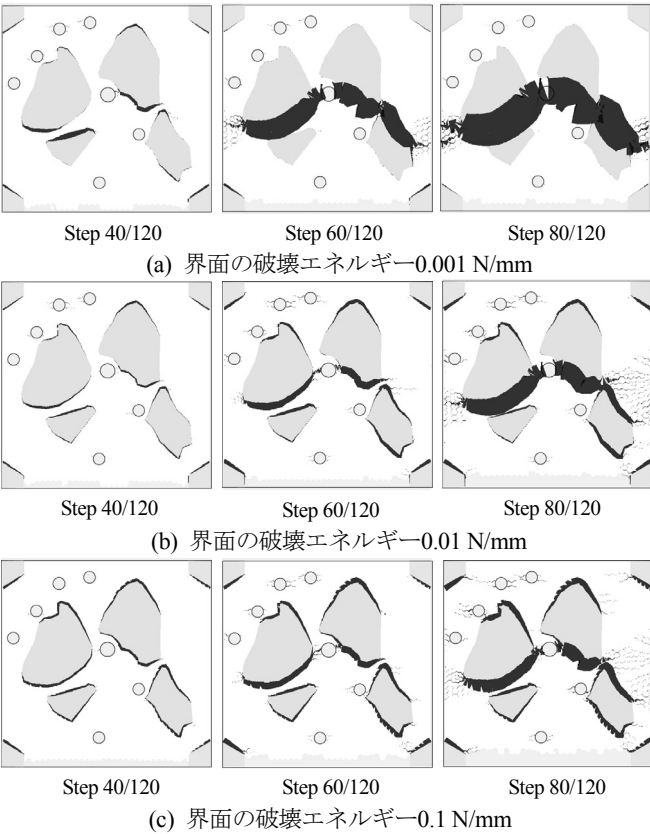


図-3 シミュレーション結果

2010.

2) 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 1, 均質化法入門, 丸善, 2003.