

微視的な引張強度と破壊エネルギーに着目したコンクリートの破壊進行シミュレーション

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

コンクリートの破壊のメカニズムに関して実験による観察・考察は多く行われている。例えば上田ら¹⁾はコンクリートの直接引張試験を行い、コンクリートの破壊はまず、骨材の剥離から発生し、その後剥離の端からモルタルクラックが生じ、破壊に到る。また、骨材は大きいほど引張応力の集中が大きく、破壊の起点となり易い。破断面外でも部分的に剥離は発生する、と考察している。反面、数値シミュレーションによりコンクリートの破壊挙動を再現し確認した例は少ない。

そこで、本研究ではコンクリートの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ションし、実験結果との比較により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²⁾

2.1 破壊のモデル化

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ボ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、ボロノイ要素は三角形要素で構成しており、ボロノイ境界は2重節点にしているので、解析には普通の有限要素法を用いている。

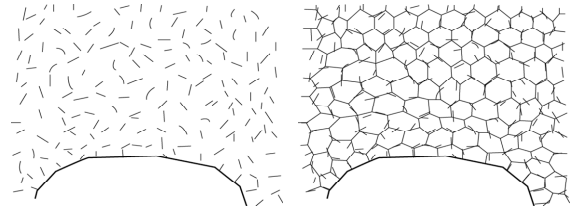
2.2 解析手法

(1) 微細ひび割れの開閉を考慮した弱形式

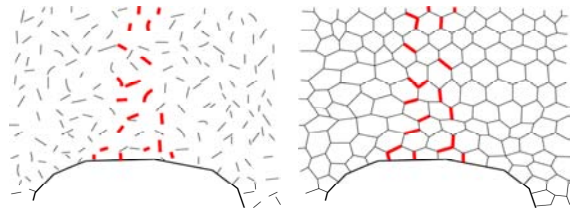
巨視的な破壊力学モデルである結合力クラックモデルを微視構造における微細ひび割れにも適用可能だと考え導入し、引張軟化則として次式を与える。

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

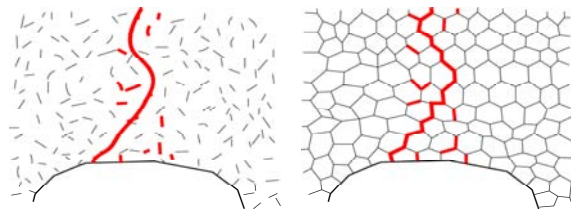
ここで、 $\|t^{\text{coh}}\|$ は結合力ベクトルの大きさ、 f_t は微細ひび割れの発生強度、 G_f は微視的な破壊エネルギー、 κ は載荷履歴における最大開口変位である。



(a) 材料不均一な微視構造



(b) 微細ひび割れ



(c) 巨視的ひび割れ

図-1 破壊の捉え方とモデル化

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。

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

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、 $\delta \mathbf{u}$ はミクロ仮想変位ベクトル、 $\boldsymbol{\sigma}$ 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、 $\mathbf{g}$ は微細ひび割れの開口変位ベクトル、 $\delta \mathbf{g}$ 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

キーワード 破壊進行領域、微視構造、破壊エネルギー、ひび割れ進展解析

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

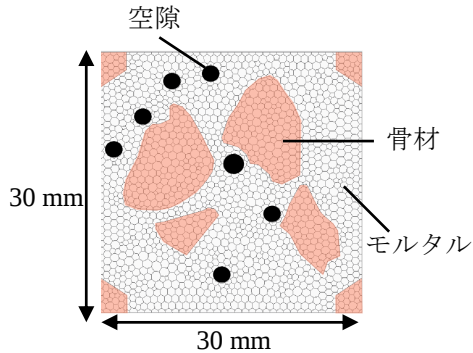


図-2 微視構造モデル (ボロノイ要素数 1874)

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	2	-	1
破壊エネルギー (N/mm)	0.01	-	0.0001, 0.01

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バネ係数行列, $\bar{p}^{\text{coh}}$ 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.

(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 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

3.1 検証条件

解析に用いるパラメータの内, 破壊エネルギーや, 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ないため, 値を変化させることで, 考える様々なパターンの破壊進行挙動を再現した. 今回は表-1 に示すパラメータを用い, 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, 縦方向に一軸引張ひずみ 0.0002 を 120 ステップで与えた. なお, 骨材は破壊しないとしている.

3.2 検証結果と考察

図-3 にシミュレーション結果を示す. 結果を見ると, 界面の破壊エネルギー 0.0001 N/mm, 0.01 N/mm の両方のケースにおいて, まず界面の剥離が発生し, その後,

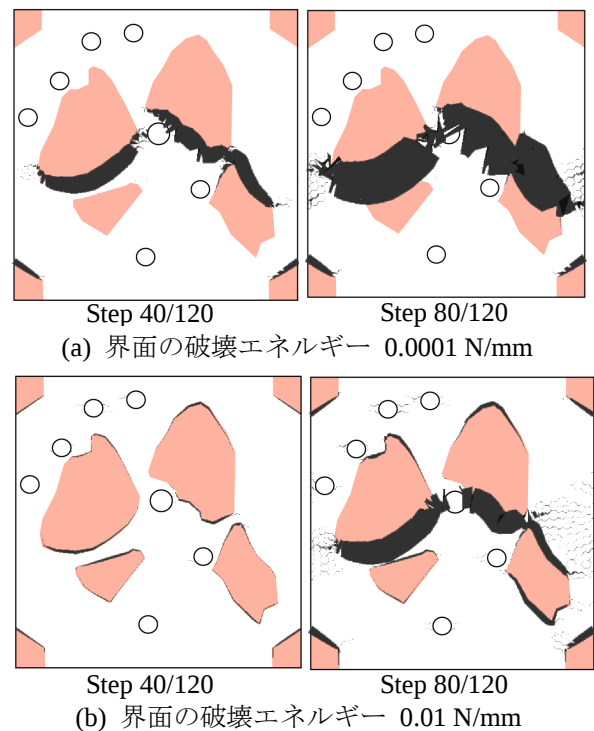


図-3 シミュレーション結果 (界面の引張強度 1.0 MPa)

剥離の両端からモルタルにクラックが発生し, 比較的大きな骨材剥離から生じたひび割れが成長している様子がわかる. また, 成長しているひび割れ周辺以外の骨材にも剥離が見られるなど, 実験による推察と同様の傾向を示した. また, 破壊エネルギーが大きい方が, 空隙からのひび割れの量や骨材の剥離部分が多い. これらは, 破壊エネルギーが大きいほど界面の剥離が進展しにくく, エネルギーの解放があらゆる部分で起きるためと考えられる.

4. おわりに

今回行ったシミュレーションでは, コンクリート微視構造モデルにおいて, 実験による推察と同様の挙動を再現することができた. したがって, 今回のシミュレーション結果はコンクリートの破壊進行領域での挙動に近い可能性があると言える.

参考文献

- 1) 上田 稔, 長谷部 宣男, 佐藤正俊, 奥田宏明: コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究, 土木学会論文集, Vol.466, pp.69-78, 1993.
- 2) 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, 2010.