

拘束圧を受ける準脆性材料の破壊進行プロセスの再現に関する研究

茨城大学 学生会員 ○根本 忍
 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

ダム基礎, 地下発電所, 高レベル放射性廃棄物地下処分施設などの重要構造物の建設において, 地盤の破壊挙動を定量的に評価可能な数値解析手法が求められている¹⁾.

岩盤や岩石といった材料は, 巨視的に見ると均質等方性材料と扱われるが, 微視的に見れば, 数種類の鉱物の集合体から形成される非均質な材料であり, 準脆性的な破壊挙動を示すことが知られている. 準脆性材料には, 未破壊領域と完全破壊領域の間のクラックの先端部分に微細ひび割れが累積した破壊進行領域が形成されることが考えられている. こうした微細ひび割れ挙動は, 材料の強度・靱性を支配しており重大な影響を与える.

そこで本研究では, 破壊進行領域での破壊挙動を考慮し, 拘束圧を受ける人工岩石を対象に圧縮時の準脆性破壊の再現を試みる.

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することにより, 微視構造のひび割れ解析²⁾を行う.

2.1 解析手法の概要

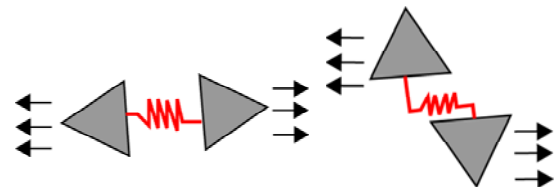
本研究では, 圧縮場における挙動は弾性変形, 微視的な引張破壊, 微視的なせん断破壊の三種類の現象の組み合わせで表現すると考える. 引張破壊とせん断破壊については三角形要素間の法線方向(図-1(a))および接線方向(図-1(b))にバネを設置し, そのバネの内力の大きさによって破壊の判定を行い, その後バネ係数を構成則に従い変化させることにより表現する.

2.3 微細ひび割れの開閉を考慮した弱形式

本研究では, 巨視的な破壊力学モデルである Cohesive crack model (図-2)を微視構造における微細ひび割れにも適用可能であると仮定し, 引張軟化則として次式を与える.

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

ここで, $\|t^{coh}\|$ 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 は最大開口変位である.



(a) 法線方向バネ (b) 接線方向バネ

図-1 接線・法線方向バネ

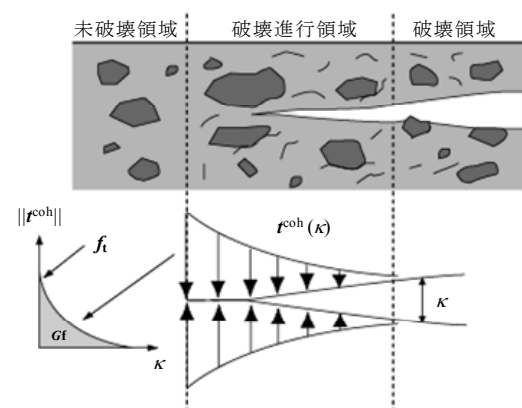


図-2 Cohesive crack model

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, 引張破壊エネルギーをせん断破壊エネルギーに, 最大開口変位 κ を最大すべり変位に置き換え適用する.

微細ひび割れの開閉をバネ(ペナルティ法)による近似で表すと, 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.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta \varepsilon \cdot \sigma \, d\Omega + \int_{\Gamma_{EL}} \delta \mathbf{g} \cdot \bar{\mathbf{P}}_{EL} \mathbf{g} \, d\Gamma + \int_{\Gamma_{PZ}} \delta \mathbf{g} \cdot \mathbf{P}_{PZ} \mathbf{g} \, d\Gamma \\ & = \int_{\Omega} \delta \mathbf{u} \cdot \bar{\mathbf{b}} \, d\Omega + \int_{\Gamma_I} \delta \mathbf{u} \cdot \bar{\mathbf{t}} \, d\Gamma \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, σ は応力ベクトル, $\delta \varepsilon$ は仮想ひずみベクトルである. $\delta \mathbf{g}$ は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_{PZ} は破壊発生後の境界, $\bar{\mathbf{P}}_{EL}$ は未破壊時の弾性係数を表すペナルティバネ係数, $\mathbf{P}_{PZ}$ は微細ひび割れの形成を表すペナルティバネ係数行列, $\mathbf{g}$ は不連続面における相対変位ベクトル, $\delta \mathbf{u}$ は仮想変位ベク

キーワード 破壊進行領域, 微視的破壊挙動, 圧縮破壊, 破壊エネルギー, 拘束圧

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

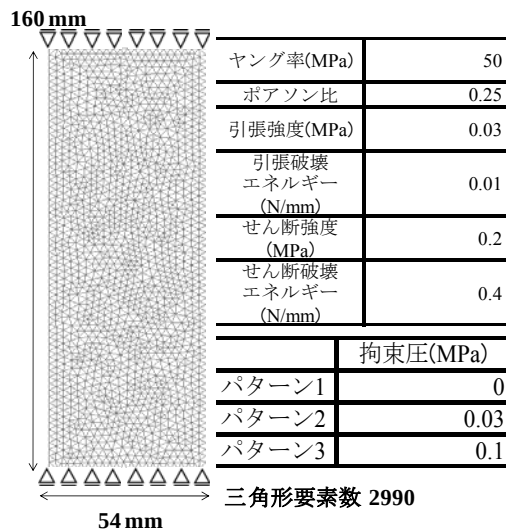


図-3 解析モデル・パラメータ

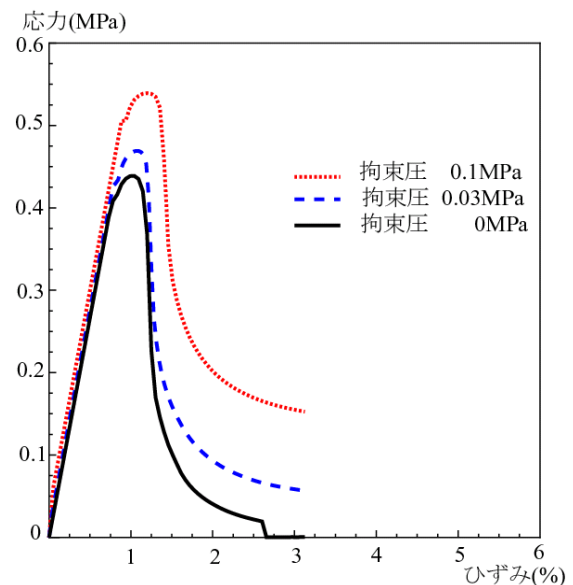


図-4 応力-ひずみ曲線

トル, $\bar{t}$ は表面力ベクトル, $\bar{b}$ は物体力ベクトルである.

(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 λ は, バネの反力として次式のように表せる.

$$\lambda = \begin{Bmatrix} \lambda_n \\ \lambda_s \end{Bmatrix} = \bar{P}_{EL} g \quad (3)$$

ここで λ_n は法線方向内力, λ_s は接線方向内力である. また, 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.

$$\|\lambda_n\| - f_t = 0 \quad (4)$$

さらに, せん断破壊はせん断強度 f_s を設定し,

$$\|\lambda_s\| - f_s = 0 \quad (5)$$

とすることで圧縮・せん断の破壊の判定を行う.

3. 人工岩石の破壊シミュレーション結果

3.1 解析条件

解析モデル・パラメータは図-3 に示す通りである. 解析モデルは三角形要素を使用し, 縦方向に一軸圧縮ひずみ 3 % を 300 ステップで与える. さらに, 拘束圧 0 MPa, 0.03 MPa, 0.1 MPa の 3 パターンによる解析を行う.

3.2 結果と考察

解析結果として, 図-4 に応力-ひずみ曲線, 図-5 に変形図を示す. 今回の解析では拘束圧下での応力ピーク値の上昇傾向を捉える事が出来ていると考える. さらに, 解析による破壊形態が人工岩盤材料の物性値から推定される破壊面 (60 度) となっている²⁾ことが変形図から見て取れる. しかし, 応力-ひずみ曲線において, 実験では拘束圧下の場合, 降伏後に緩やかに応力が下降する¹⁾が, 今回の結果では急な下降となり靱性が表現しきれていない. 今後の課題としてパラメータやモデル化の更なる検討が必要である.

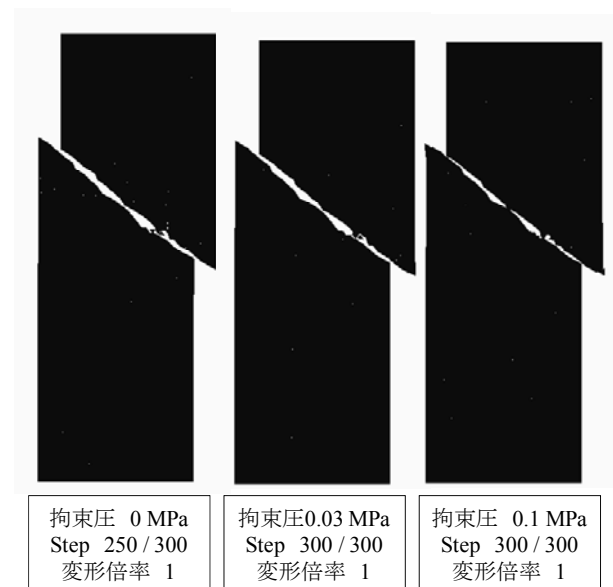


図-5 シミュレーション結果

4. おわりに

本研究では, 人工岩石の破壊シミュレーション結果として, 材料の物性値から推定される破壊面と近い破壊挙動で再現できたと考える. この結果を受け, 今後は初期クラックを想定した不連続面をあらかじめ配置したモデルでの拘束圧下での影響を考慮した人工岩石の破壊挙動を再現し考察する.

参考文献

- 1) 澤田昌考, 石丸真: 不連続面を有する人工岩石材料の破壊進展試験とそれに基づく数値解析手法の適用性評価, 電力中央研究所報告: N11023
- 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.