

岩盤内部における先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション

琉球大学大学院 学会員 ○ 江戸 孝昭
琉球大学 正会員 松原 仁
琉球大学 正会員 原 久夫

1. はじめに

岩盤内部には多数の先在き裂が存在する．それらの先在き裂は斜岩盤崩落等に影響を及ぼすため，先在き裂を考慮し，力学的特性等の評価することは極めて重要である．しかしながら，岩盤内の先在き裂はランダムに分布しており，不均質かつ不確実であるため，これらを考慮し評価を行うことは難しい．また，岩盤等の脆性材料の破壊パターンは様々な様子を呈するため，その力学的挙動を精度よく評価することは難しく，現在も様々な手法が提案されている．

そこで本研究では，岩盤内部の先在き裂を考慮できる離散き裂進展解析手法の開発を目的とし，先在き裂がき裂進展挙動に与える影響について検討を行う．

2. 回転自由度有する一般化有限要素法

本研究では，岩盤中の先在き裂をき裂ネットワークモデル¹⁾にて表現し，き裂を三角形要素の境界で直接考慮する．このとき岩盤内は極めて複雑な構造を有することが予想されるため，図-1に示す，回転自由度を有する三角形要素²⁾を用いることとした（以下，本要素を“RGNT”と記す）．

RGNTの変位場は次式にて表わされる．

$$\begin{aligned} u_{RGNT} &= \sum_{i=1}^3 \{u_i - (y - y_i)\theta_i\} N_i \\ v_{RGNT} &= \sum_{i=1}^3 \{v_i + (x - x_i)\theta_i\} N_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， u_{RGNT} ， v_{RGNT} は x 方向， y 方向変位場， u_i ， v_i ， θ_i は節点 i の並進方向変位ならびに回転自由度， x ， y は要素内における任意の座標値， x_i ， y_i は要素の頂点座標， N_i は定ひずみ三角形要素における節点 i の形状関数である．したがって，RGNTの剛性マトリックスは（ $\mathbf{K}_{RGNT}$ ）は，仮想仕事の原理より次式のように求めることができる．

$$\mathbf{K}_{RGNT} = t \int_0^1 \int_0^{1-\zeta_1} \mathbf{B}_{RGNT}^T \mathbf{D} \mathbf{B}_{RGNT} \det J d\zeta_1 d\zeta_2 \quad (2)$$

ここで， t は厚さ， $\mathbf{B}_{RGNT}$ はRGNTのひずみ-変位マトリックス， $\mathbf{D}$ は応力-ひずみマトリックス， $\det J$ はヤコビアン， ζ は面積座標である．

3. MLSMに基づく剛性マトリックス

本研究では，図-2に示すように，ある三角形要素の辺がき裂である場合，重心点と衛星節点がき裂面を介して関連付くことはないものとする．このとき，連続場で定義されるRGNTを用いることが不可能であるため，要素の境界がき裂面である場合，移動最小自乗法（MLSM：Moving Least Squares Method）³⁾に基づいた変位場を用いて解析を行

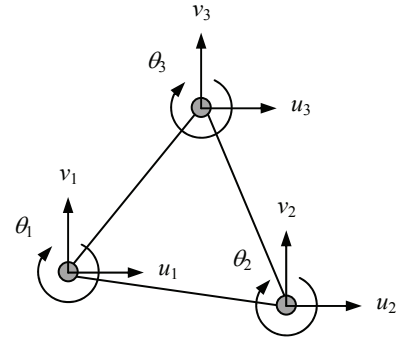


図-1 RGNTの概念図

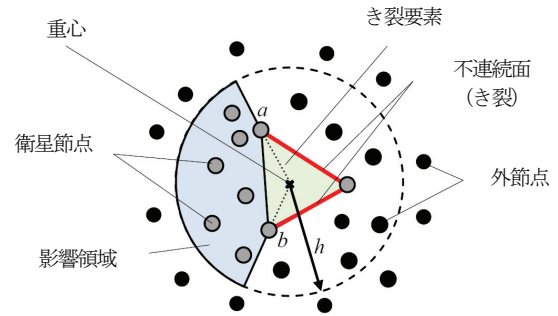


図-2 き裂発生箇所の変位場

ことにした．基づいた変位場 $\mathbf{u}_{MLSM}(\mathbf{x})$ は，三角形の重心を中心とする円領域内部にある衛星節点の値を用いて，次式の重み付自乗和を最小にすることが出来る．

$$J = \sum_{I=1}^n w(r_I, h) (\mathbf{u}_{MLSM}(\mathbf{x}_I) - \mathbf{u}_I)^2 \quad (3)$$

ここで， J は残差の自乗和， n は三角形の重心を中心とする円領域内部にある衛星節点の数， $w(r_I)$ は重み関数， r_I は重心と節点 I の距離， h は円領域の半径， $\mathbf{u}_I$ は節点 I の変位である．なお，重み関数は，影響領域内にて4次のスプライン関数を仮定した（影響領域外では $w(r_I) = 0$ となる）．

変位場 $\mathbf{u}_{MLSM}(\mathbf{x})$ を次式にて定義する．

$$\mathbf{u}_{MLSM}(\mathbf{x}) = \mathbf{a}^T \mathbf{p}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

ここで， $\mathbf{a}$ は未定乗数， $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ は任意の定である．式(5)を式(3)に代入すると， J の停留値条件により未定乗数は次式により得られる．

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (5)$$

ここで，

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^n w(r_I, h) \mathbf{p}(\mathbf{x}_I) \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_I) \quad (6)$$

$$\mathbf{B}^T(\mathbf{x}) = \{w(r_1, h)\mathbf{p}(\mathbf{x}_1), \dots, w(r_n, h)\mathbf{p}(\mathbf{x}_n)\} \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}^T \quad (8)$$

である。よって、式(5)を式(4)に代入すると次式を得る。

$$\mathbf{u}_{MLSM}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \phi_i(\mathbf{x}) u_i \quad (9)$$

$$\phi_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{x}) (\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{x}))_{ji} \quad (10)$$

ここで、 m は $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ における多項式の項数である。したがって、式(2)同様に仮想仕事の原理より、MLMS に基づく剛性マトリックスは次式となる。

$$\mathbf{K}_{MLMS} = t \int_0^1 \int_0^{1-\zeta_1} \mathbf{B}_{MLMS}^T \mathbf{D} \mathbf{B}_{MLMS} \det J d\zeta_1 d\zeta_2 \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{B}_{MLMS}$ は式(10)の空間微分することで得られる変位-ひずみマトリックスである。

よって本手法では、ある要素の辺が全てき裂でない場合は式(2)、それ以外の場合は式(11)に基づき剛性マトリックスを組み立てることで、着目している三角形領域が完全な連続性を満足する状態から、完全に独立した状態に至るプロセスを解析することが可能となる。またき裂の発生箇所に関して、すべての要素の辺上における最大主応力の内、最も高い値の箇所をき裂の発生箇所とした。

4. 数値解析結果

先在き裂がき裂進展挙動に及ぼす影響について検討を行う。本問題では Anupan ら¹⁾が用いたき裂セットを用い、先在き裂の幾何学特性として、き裂長さを 10~50mm とし、き裂長さの分布は次式に示す、べき乗分布に従うものとした。

図-3 に、圧縮荷重を受ける一辺が 100m の正方形岩盤モデルを示す。図-4 に 1 種類のき裂セットからなる岩盤モデル (Model1) を示し、図-5 に 3 種類のき裂セットからなる岩盤モデルを示す。

図-6 に各 Model のき裂進展挙動を示す。同図(a)より、き裂は斜め方向に進展し、ある箇所でき裂が集中的に発生すると、その箇所から集中的に進展する様子が見受けられた。同図(b)に示すように、3 つの先在き裂の方位角を用いた場合、様々な箇所でき裂が発生し、複数の箇所でき裂が集中的に発生する様子が見られた。このことから、き裂の進展挙動は岩盤内部に存在する先在き裂の方向に影響を受けるということを数値解析の上でも示すことができた。

5. おわりに

本研究では、岩盤内部の先在き裂を考慮したき裂進展解析手法を提案した。本研究で得られた知見に関して、以下に列記する。

- (1) 回転自由度を有する三角形要素と MLMS に基づいた、離散き裂進展解析法の定式化を行った。
- (2) 先在き裂を有する岩盤の圧縮問題に関して、岩盤内部の先在き裂を考慮したき裂進展解析が可能となった。

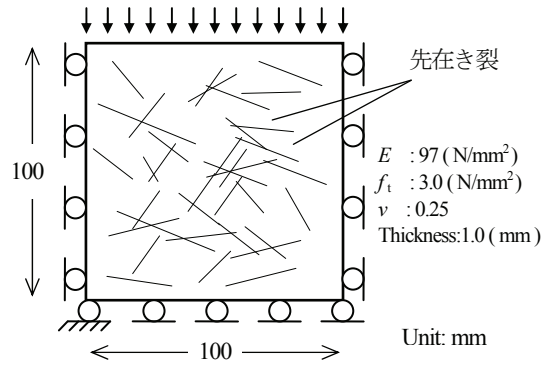


図-3 岩盤内における先在き裂の概念図

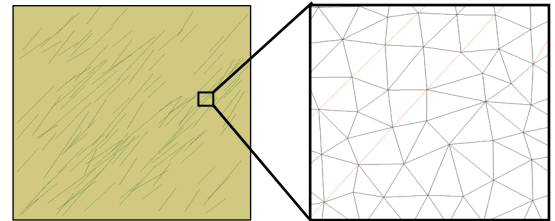


図-4 き裂セット1を用いた岩盤モデル (Model 1)

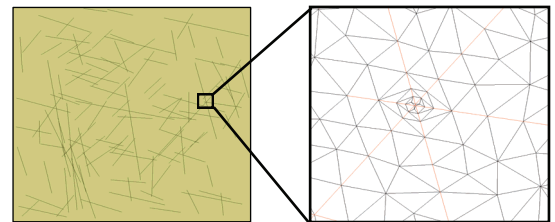
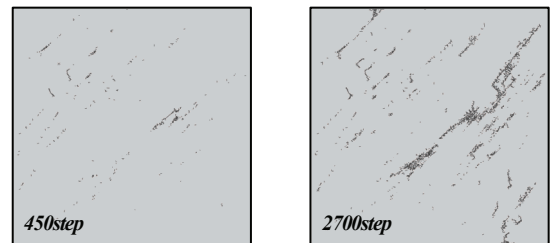
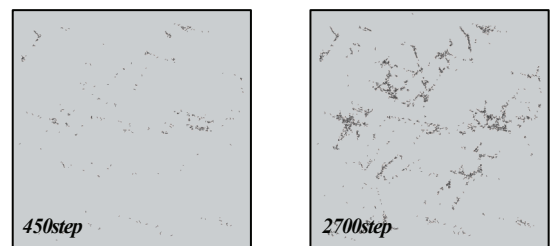


図-5 き裂セット1-3を用いた岩盤モデル (Model 2)



(a) Model 1



(b) Model 2

図-6 き裂進展の様子

謝辞

本研究は科学研究費補助金（課題番号：23760428）の助成を受けたものである。ここに記して心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) Anupan, A.: Effective properties of multi-scale fracture networks: hierarchical modeling of fractures for naturally fractured reservoirs, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010.
- 2) 松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤, 山城建樹, 入部綱清: 回転自由度を有する関口・菊池要素と Cook 要素の比較, 応用力学論文集, Vol. 7, pp.431-440, 2001.
- 3) Lancaster, P. and Salkauskas, K.: Surfaces generated by moving least squares methods, Mathematics of Computation, Vol.37, No.155, pp.141-158, 1981.