III－17

粒状要素法を用いた岩塊崩落モデルの構築

東北大学　学生員○神田　隆真
東北大学　正　員　岸野　佑次
東北大学　学生員　林　　直宏

1．はじめに

岩盤斜面における岩塊崩落は重大な被害をもたらす危険性があるが，その発生を事前に予測することは極めて困難である．従来，岩塊崩落の予測を行うために，現地調査データの統計的処理に基づく判別法が模索されているが，このような手法と併せて，岩塊崩落発生の力学的メカニズムを明らかにすることが重要であると考えられる[1]．

本研究は，岩塊剥離部における破壊メカニズムを明らかにする目的で，粒状要素法[2]を応用したシミュレーションモデルを構築することを目的とするものである．本文においては，このモデルの基本的な考え方を示す．具体的には割れ目の幾何学形状や力学特性を表現するために岩塊剥離部をの粒状要素モデルとし，岩塊本体は剛体とするハイブリッドモデルの提示を行う．

2．岩塊崩落モデルの基本的考え方

不均一材料の微視的変形メカニズムを調べるためには離散モデルによる解析が有効である．しかし，本研究で対象とするような岩塊のとり扱いについては，その全てを離散要素の集合で表すことは，解析時間の問題もあり，得策ではない．そこで節理中における結合力の低下や亀裂の進行が生じると予測される部分にのみ離散要素を配置し，その他の部分は剛体であると仮定したハイブリッドモデルを用いることにより解析をよりスムーズに行うことが可能であると考えられる．

図1はこのような考え方に基づく斜面上の岩塊のモデル化の概念図である．岩塊本体は剛体とし剥離部にのみ粒状要素を配置して解析を行う．剥離部が剛体に接する部分には境界粒子と称する粒子を配置し，移動は岩塊と一体とし，剥離部内の粒子から受ける力の合力が岩塊の及ぼす力とモーメントに平衡を保たせるように制御する．岩塊本体のデータとしてはその重心位置と重量のみを与えればよく，形状そのものは問題とする必要がない．一方，剥離部の斜面側にも境界粒子を配置し，これらは移動と回転を拘束する．

3．粒状要素法による境界の制御

剥離部内の着目する粒子Gとこれに接触する粒子G'との接触点をCとする．両粒子間の相対変位の法線，接線方向成分をu_nおよびu_t，接触力の法線および接線方向成分をp_nおよびp_tとおくとき，相対変位増分ベクトルは次式で与えられる．

$$\Delta \mathrm{U}_C = \mathrm{T}_C \Delta \mathrm{x}_G \qquad (1)$$

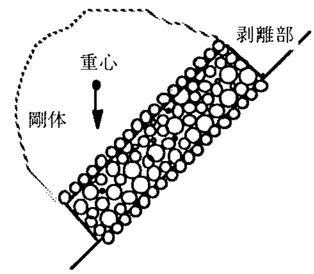

図1　岩塊のモデル化の概念図

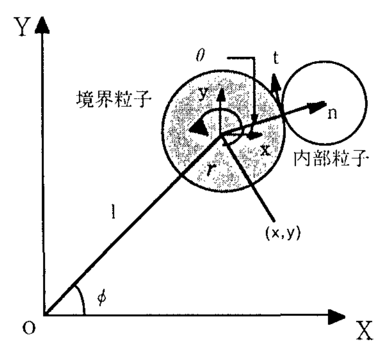

図2　境界粒子と座標系

$\Delta \mathrm{U}_C = \left(\Delta u_n, \Delta u_t\right)_C^t$　：接触点相対変位増分

$\Delta \mathrm{x}_G = \left(\Delta x, \Delta y, r\Delta z\right)_G^t$：粒子変位と回転の増分

$\mathrm{T}_C = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 1 \end{bmatrix}_C$　：変換行列

さらに，接触力増分は次式で与えられる．

$$\Delta \mathrm{P}_C = \mathrm{S}_C \Delta \mathrm{U}_C \qquad (2)$$

$\Delta \mathrm{U}_C = \left(\Delta u_n, \Delta u_t\right)_C^t$：接触力増分

$\mathrm{S}_C = \begin{bmatrix} c_n & 0 \\ 0 & c_t \end{bmatrix}$　：接触点剛性行列

接触点剛性行列中のc_nは法線方向バネ剛性，c_tは接線方向バネ剛性である．G粒子の不釣り合い力とモーメントは次式のように表すことができる．

$$\mathrm{f}_G = \sum_c \mathrm{T}_c^t \mathrm{P}_c - \mathrm{B} \qquad (3)$$

ここに，

$\mathrm{f}_G = \left(f_x, f_y, m\right)$：不釣り合い力とモーメント

$B=\left(b_x,b_y,b_z\right)$：粒子重心に作用する物体力

また，接触点における接触力増分と変位増分の関係は

$$\Delta P_C = S_C T_C \Delta x_G \qquad (4)$$

と表される．したがって，ある粒子に関するすべての接触力による不釣り合い力増分は

$$\Delta f_G = S_G \Delta x_G \qquad (5)$$

と表すことができる．ここに，S_Cはある粒子に関する接触剛性行列であり

$$S_G=\Sigma_C T_C^t S_C T_C \qquad (6)$$

と表すことができる．

次に境界粒子の制御方法を示す．境界粒子は岩塊本体と一体となって移動すると仮定する．境界粒子の並行移動量と回転について，回転量を粒子重心のまわりで表した場合のベクトル

$$\Delta x_G=\left(\Delta x,\Delta y,r\Delta z\right)_G^t$$

と回転量を原点Oのまわりで表した場合のベクトル

$$\Delta X_G=\left(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z\right)_G^t$$

とは以下のように関係づけることができる．

$$\Delta x_G = T' \Delta X_G \qquad (7)$$

$$T'=\begin{bmatrix}1 & 0 & -l\sin\phi\\ 0 & 1 & l\cos\phi\\ 0 & 0 & r\end{bmatrix}$$

同様に不釣り合い合力とモーメントについて，モーメントを粒子重心まわりで表した場合のベクトルΔf_Gとモーメントを原点Oまわりで表した場合のベクトルΔF_Gの関係は

$$\Delta F_G = T'^t \Delta f_G \qquad (8)$$

となる．したがって，式(5)～(8)から次式を得る．

$$\Delta F_G = T'^t S_G T' \Delta X_G \qquad (9)$$

上式をすべての境界粒子について重ね合わせることにより次の剛性関係式を得る．

$$\Delta F_R = S_R \Delta X_R \qquad (10)$$

ここに，

$\Delta F_R=\left(F_x,F_y,M\right)_R^t$：岩塊本体の物体力と原点$O$のまわりのモーメント

$\Delta X_R=\left(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z\right)_R^t$：岩塊重心の並行移動量と原点$O$のまわりの回転量

また，

$$S_R=\sum T'^t S_G T' \qquad (11)$$

は岩塊を移動させるための剛性行列である．

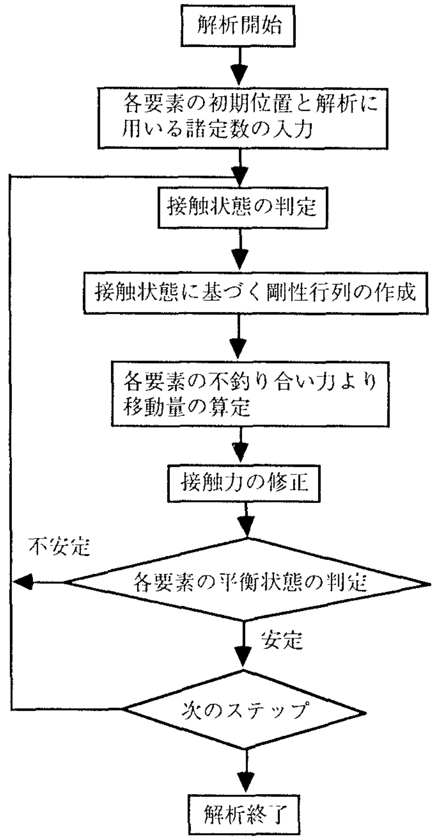

図３　解析の流れ

式(10)より岩塊の並行移動量および回転量を求めることができ，さらに境界粒子の移動量を次式により求めることができる．

$$\Delta x_G = T' \Delta X_R \qquad (13)$$

この境界粒子の移動量に対して剥離部内部の粒子に対して図３に示すような手順により全粒子の釣り合い位置を求める．粒子移動により新たな不釣り合い状態が生じるので，始めの岩塊の移動のステップに戻って全体的な釣り合い状態が得られるまで繰り返し計算を行う．

なお，解析例については当日発表の予定である．

参考文献

1)土倉　泰，深澤哲也，村上幸利：モデル化した岩盤斜面の安定解析に対する粒状要素法の適用，土木学会論文集，No523/III-32,41-48,1995

2)岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析，土木学会論文集，No.406/III-11,pp.97-106,1989