計算工学講演会論文集Vol.9 (2004年5月)　計算工学会

有限要素を用いた３次元簡易斜面安定解析による ダム湛水池斜面の解析

STUDY OF THE THREE-DIMENSIONAL SIMPLIFIED STABLITY ANALYSIS USING FINITE ELEMENT IN RESERVOIR SLOPE

濱崎英作[1)]，竹内則雄[2)]，草深守人[2)]，大西有三[3)]，西山哲[4)]
Eisaku HAMASAKI, Norio TAKEUCHI, Morito KUSABUKA, Yuzo OHNISHI and Satoshi NISHIYAMA

1)アドバンテクノロジー代表取締役(〒980-0013仙台市青葉区花京院2-1-18-403，hamasaki@advantechnology.co.jp)
2)工博　法政大学教授(〒184-8584小金井市梶野町3-7-2，takeuchi@k.hosei.ac.jp)
3)工博　京都大学教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町，ohnishi@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp)
4)博(工)　京都大学助教授（〒606-8501 京都市左京区吉田本町，nisiyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp）

In this paper,The slope stability of the landslide in the dam reservoir was applied to RBSM by this research in consideration of the hydro-pressure and the load of the water in the hydrostatic forces. The mechanism of the movement of the slope in a change of the hydrostatic level was made clear by using the stable three-dimensional analytic technique from this result.

Key Words：*slope stability, RBSM, finite element, 3-dimension, dam reservoir*

1. はじめに

これまで，著者らは，RBSMを用いて簡便的に３次元の斜面安定解析を行う方法を提案してきた[1][2]．この方法はカラム柱の変位モードが，カラム柱相互の関係も考慮された上で表現できるので，より適切な対策工の策定が可能である．本論文では，これらをさらに発展させ，いわゆる間隙水圧として作用する地下水の取り扱いも含め，ダム湛水の斜面安定解析で不可欠な静水圧下の水圧を考慮し，これらのすべてをカラム柱に作用する物体力としてRBSMの定式化に取り込むことで，ダム湛水時の斜面の安定計算をも可能にした．また，実際に斜面の問題を事例研究することで得られる解の特徴について他手法と比較しながら言及した．

２．RBSMによるモデル化

従来のFEM, 弾塑性RBSMでは適切な変形係数等の地盤定数を入力し，離散化極限解析を行えば，すべり面上の表面力が求められるため，これを用いて安全率を求めることも可能である．しかし，この方法では，解析時間がかかることはもちろんのこと，適切な地盤定数や地層状態の調査等が多岐にわたり,この処理のため使い勝手は良くない．また，地すべりなどは特定地質場にあるすべり面がすべり変動をもたらすものが多く，すべり面は必ずしも円弧ではなく，左右非対称であったり，なめらかに連続しないことも多い．このような斜面では，調査はそのすべり面の特定に対して多くの時間と費用が割かれる．このように鑑みれば，決定論的な地すべり解析のにおいて，より簡便で合理的な解析が望ましい．このような視点に基づき，本論文では分割法と同程度の簡便さで解析を行うことを目的とするため，図1に示すようにカラム柱を1つの要素と考え，カラム柱の変形を考慮しない．また，回転自由度を考慮せずに，並進運動のみをとりあげることとして X，Y，Z方向の３自由度のみを考え定式化した．

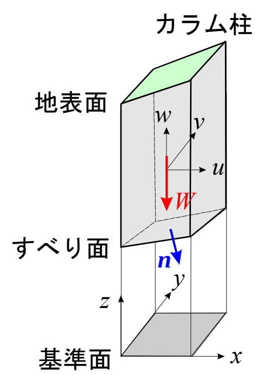

図１　カラム柱の自由度

３．RBSMの定式化

（１）カラム柱側面

RBSMでは，2要素間の相対変位を用いて，要素間に蓄えられるエネルギ-を評価し，剛性行列を誘導する．本手法では，分割法と同じ考え方に基づき要素分割を行うため隣接要素関係は単純になる．x,y方向の隣接要素の相対変位δは接触面積をＡとすると，次のように求めることができる．

$$\delta = B_x u \quad , \quad \delta = B_y u \tag{1}$$

$$\delta = \{\delta_n \quad \delta_{sx} \quad \delta_{sy}\}^T \qquad u = \{u_{\mathrm{I}} \quad \upsilon_{\mathrm{I}} \quad \omega_{\mathrm{II}}\}^T$$

$$B_x = \left[\begin{array}{ccc|ccc} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

$$B_y = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

一方，カラム柱側面間の表面力$\boldsymbol{\sigma}$は，以下のようにペナルティ関数λを用いて求める．

$$\sigma = D_{\mathrm{side}}\delta \,, \tag{2}$$

$$\sigma = \{\ \sigma_n \quad \tau_{sx} \quad \tau_{sy}\ \}^T \quad , \ D_{\mathrm{side}} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

したがって，カラム柱側面に蓄えられるエネルギーは次のようになる．

$$\mathrm{V}_{\mathrm{side}} = \frac{1}{2}u^T \int_A B_x^T D_{\mathrm{side}} B_x \, dA \, u + \frac{1}{2}u^T \int_A B_y^T D_{\mathrm{side}} B_y \, dA \, u \tag{3}$$

（2）すべり面

図２に示すように，あるカラム柱におけるすべり面が

$$Z=Z(x,y) \tag{4}$$

で与えられものとする．このとき，法線ベクトル$\boldsymbol{n}$は次のように表すことができる．

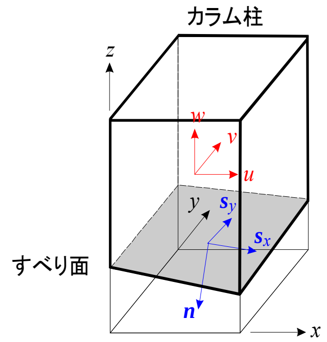

図２　すべり面の法線ベクトル

$$n = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}}\left(-\frac{\partial z}{\partial x}i-\frac{\partial z}{\partial y}j+k\right) \tag{5}$$

同様にして，xおよびy方向の接線ベクトルを求めると次のようになる．

$$s_x = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}}\left(i+\frac{\partial z}{\partial x}k\right) \quad , \quad s_y = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}}\left(j+\frac{\partial z}{\partial y}k\right) \tag{6}$$

ここで，カラム柱の変位ベクトルは

$$u = ui + \upsilon j + \omega k \tag{7}$$

で与えられる．このとき，基盤部の動きはないものと仮定してすべり面上の相対変位を求めると

$$\delta_n = u \cdot n \,, \ \delta_{sx} = u \cdot s_x \,, \ \delta_{sy} = u \cdot s_y \tag{8}$$

となる．したがって，以下の関係が得られる．

$$\delta = Bu \ , \ B = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)\big/L & -\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)\big/L & 1/L \\ 1/L_x & 0 & \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)\big/L_x \\ 0 & 1/L_y & \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)\big/L_y \end{bmatrix} \ , \quad \begin{aligned} L &= \sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \\ L_x &= \sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2} \\ L_y &= \sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \end{aligned} \tag{9}$$

いま，すべり面上の相対変位と表面力の関係を

$$\sigma = D\delta \quad , \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_n & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{sy} \end{bmatrix} \tag{10}$$

とすれば，すべり面上のエネルギーは

$$\mathrm{V}_{\mathrm{slip}} = \frac{1}{2}u^T \int_A B^T DB \, dA \, u \tag{11}$$

と評価される．したがって，系全体のエネルギーは次のようになる．

$$V = V_{side} + V_{slip} \tag{12}$$

以上の関係から剛性行列を誘導することで, RBSMによる三次元離散化解析が可能となる．

４．四辺形要素によるすべり面の定義

前節で述べたように，すべり面の式ｚ＝ｚ(ｘ，ｙ)が求められれば, RBSMを適用して三次元離散化解析が可能となる． 本論文では，四角形要素のすべり面を展開の曖昧さのない双一次アイソパラメトリック四辺形要素を用いて定義する． 図3はこの要素の座標変換の関係を示したもので，自然座標系と物理座標系の間に次の関係が成立している．

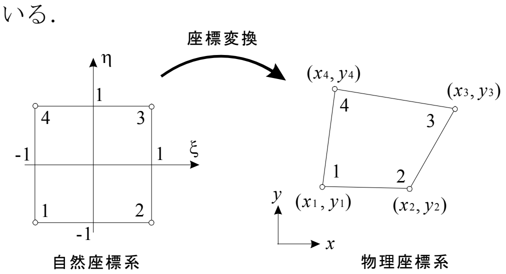

図３　双一次アイソパラメトリック四辺形要素

$$x(\xi,\eta) = \sum_{\alpha=1}^{4} N_\alpha(\xi,\eta) x_\alpha \,, \ y(\xi,\eta) = \sum_{\alpha=1}^{4} N_\alpha(\xi,\eta) y_\alpha \tag{13}$$

ここで，$N\alpha$は形状関数である．アイソパラメトリック要素では座標変換と同じ形状関数を用いて物理量を補間する． ここでは，物理量としてz座標を考え，

$$z(x,y) = z(\ x(\xi,\eta),\ y(\xi,\eta)\ ) = \sum_{\alpha=1}^{4} N_\alpha(\xi,\eta) z_\alpha \tag{14}$$

のように考え面の式を定義する．このとき面傾きは

$$\begin{Bmatrix}\dfrac{\partial z}{\partial x}\\[2mm] \dfrac{\partial z}{\partial y}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{\partial \xi}{\partial x} & \dfrac{\partial \eta}{\partial x}\\[2mm] \dfrac{\partial \xi}{\partial y} & \dfrac{\partial \eta}{\partial y}\end{bmatrix} = \begin{Bmatrix}\dfrac{\partial z}{\partial \xi}\\[2mm] \dfrac{\partial z}{\partial \eta}\end{Bmatrix} = J^{-1}\begin{Bmatrix}\dfrac{\partial z}{\partial \xi}\\[2mm] \dfrac{\partial z}{\partial \eta}\end{Bmatrix} \tag{15}$$

と計算することができる．ここで，Jはヤコビアン行列である．具体的な計算は省略するが，この式(13)～(15)を式(6)に代入すれば矩形領域の面の法線ベクトル等を求めることができる．この関係を式(9)，さらに式(11)に適用すると，数値積分を用いて積分点毎にすべり勾配を求めることができる．濱崎ら[3]は，積分点数を様々に変えて計算を試みており,積分点の中央の1点でも十分な精度が得られたことから本論でも中央1点として勾配を計算した．

５．地下水ならびに水没斜面下の水圧の取り扱い

RBSMにおける水圧の考え方は川上[4]の言う飽和重量法とし図4に示すように，カラム柱の側面，底面，上面にかかるX，Y，Z方向のベクトルに分解し，物体力として取り扱う．

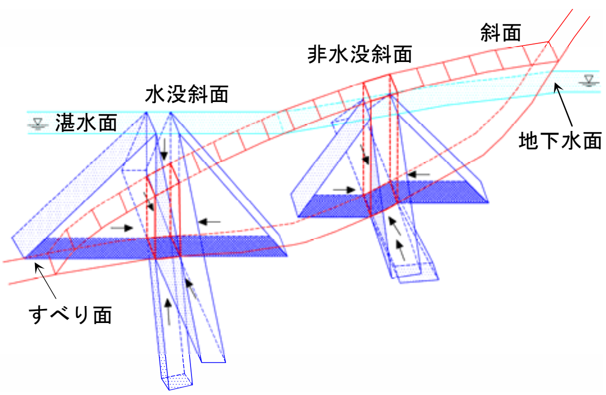

図４　カラム柱にかかる水圧の取り扱い

６．斜面全体の安全率

RBSMによる離散化解析を行うと，各カラム柱のすべり面での法線力(N)と接線力(Tx,Ty)の表面力が求められる．本論文では，この表面力を用いて，式(16)の方法で安全率を求める．

$$Fs = \frac{\sum\{\tan\phi \cdot N + C\cdot A\}}{\sqrt{\left(\sum T_x\right)^2 + \left(\sum T_y\right)^2}} = \frac{R}{D} \tag{16}$$

また，ϕは地盤の内部摩擦角，Cは粘着力（せん断強度），Uは間隙水圧，Aはすべり面の面積を表している．式(16)の分子は，滑りに対する抵抗力(R)を，また分母は滑動力(D)を表している．

７．三次元斜面安定解析例

図5に示すように，斜面高さ50m，斜面勾配30°の単一平行斜面上に半径89.1852mの球面体すべり面を仮定して解析を試みた．ここで，地盤定数は湿潤重量γs=20kN/m3（飽和重量も同じとする）とし，水の重量をγw=10kN/m3，粘着力C=25kN/m3，内部摩擦角25°とした．カラム柱の分割幅はx，yともに5mとした．

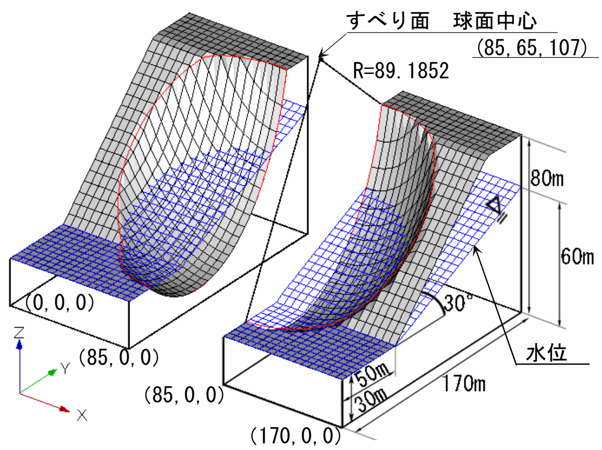

図５　解析モデル図

図6に示すように解析ケースとして，湛水のない自然状態をケースT01とし，T02からT10までを標高30mから70mまで5mごとに湛水位が上昇することとして，基本的に上昇時は湛水面と交差する点まで自然地下水位の面(線)は変化がないものとした．またT11からT18までは逆に標高70mを最高水位として，5mづつ標高30mまで水位を下げるものとした．低下時の地下水残留率は標高70m面もしくは地表面と，低下基準面もしくは自然地下水位面までの50%が残留するものと仮定した．

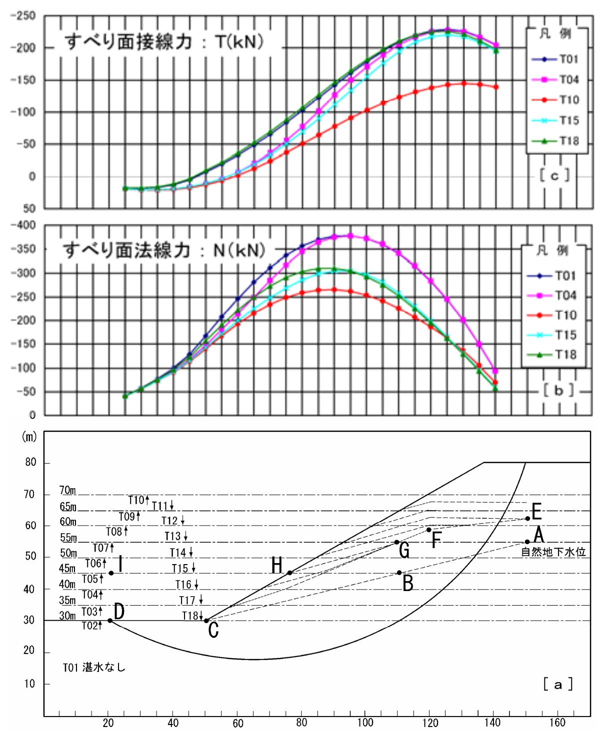

図６　中心断面図における解析ケースと
すべり面接線力(Ｔ)と法線力(Ｎ)の関係

図6の[a]は図5におけるx=85mの中心線断面図であるが，

図に示すように，例えば，自然状態のT01はD-C-B-A，上昇時のT05はI-H-B-Aとなる．一方， 下降時のT15はI-H-G-F-Eとなる．図6の[b][c]に，湛水の変化に伴うすべり面の表面力の変化を示す．図からT01，T04，T10と水位上昇するステージでは斜面下部から増加する水圧の影響でＴとＮが共に減少していく過程が認められる．一方，T10からT18までの水位降下のステージではＴの上昇が大きい割にＮの上昇は少なく，より不安定になっていく過程がわかる．図7,8はxy面上におけるT01，T15時点でのそれぞれのxy面状の変位ベクトルを示している．従来手法であれば個々のカラム柱の表面力がすべり面傾斜方向で計算されるのみである．これは実際の変位を表すものではない.事実水位条件により様々に個々のすべり面変位は変化する．

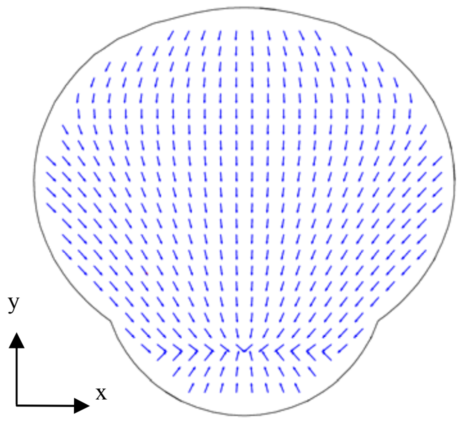

図７　ケースT01(自然水位)時，xy面上変位ベクトル

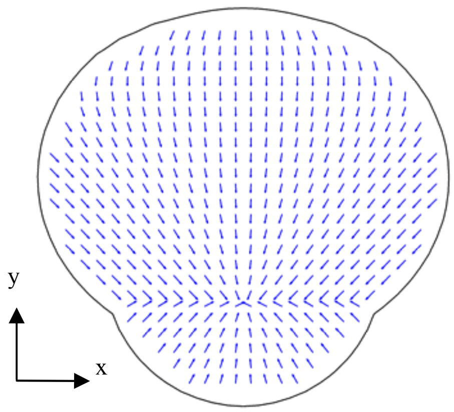

図８　ケースT15(下降時,基準水位 45m)時，xy面上変位ベクトル

なお，上記の各ケースにおける安全率を図9に示した．比較のため，x=85mの主断面位置において， ２次元のRBSMを３次元と同様な定式化のもとで計算した．また，カラム柱の不静定力を考慮した従来手法として，鵜飼[5]による３次元簡易ビショップ法，３次元簡易ヤンブー法でも検討を加えた．ただし，この両者の計算に際しては，水圧を浮力的に扱う有効重量法で検討するとともに，x軸に対するカラム柱の合力を左右対称であることから水平と仮定した．この結果，図9に示すように安全率の変化の傾向は概ね一致した．しかしながら，２次元，３次元共にRBSMでの計算が３次元簡易ビショップ法，３次元簡易ヤンブー法に比べて高めに推移した．これは，従来の手法によると動きが限定(当モデルではｙ軸方向に限定)されるものの，RBSMでは個々のカラム柱相互の関係から拘束効果が現れるためと思われる．結果として，RBSMでのカラム柱の変位は，最大勾配には現れず，動きやすい方向になっていくと判断される．なお，RBSMの２次元と３次元の比較では，２次元の方が変化量が大きく，対策工の策定になどでは，３次元の方がコスト縮減効果が大きいことがわかった．

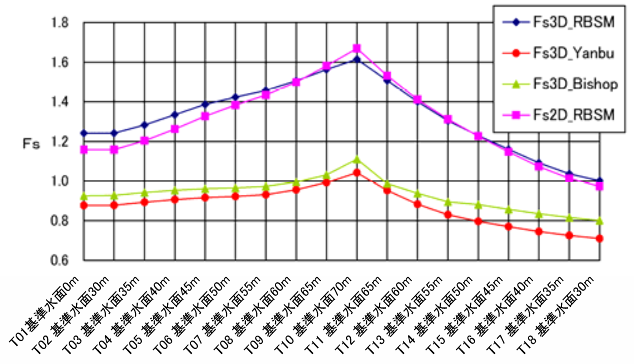

図９　基準水位面の変化ごとの各種安定解析の安全率変化

８．まとめ

決定論的なすべり面解析においては, RBSMによる３次元簡易斜面安定解析は，①カラム柱側面の不静定力を考慮でき，②個々のカラムの変位方向を明らかにすることが可能で対策工策定の上でも非常に有効な手法となり得ることが分かった．さらに，③飽和重量法をとりいれることで，通常の間隙水圧の取り扱いも含め，ダム湛水斜面でも採用可能な安定解析手法となる．今後は，地すべり抑止杭，アンカーなどの対策工を含めた定式化を発展させることで，さらに有効な手法になり得ると考える．

参考文献

[1] 竹内則雄:地盤力学における離散化極限解析，培風 1991
[2] 竹内則雄，濱崎英作，草深守人:有限要素を用いた簡易斜面安定解析，計算工学講演会論文集，Vol. 8，2003
[3] 濱崎英作，竹内則雄，草深守人:すべり面を有限要素で近似した３次元斜面安定解析，第 38 回　地盤工学会研究発表予稿集，2，2003
[4] 川上浩:自然斜面の安定性を評価する上での２，３の問題，土と基礎，vol. 35-11，PP3-8，1987
[5] 鵜飼恵三:分割法による斜面の三次元安定性の検討，土と基礎，vol. 36-5，PP19-24，1988