

層状岩盤の破壊解析手法の検討 A method of failure analysis for layered rock masses

○西山竜朗* 長谷川高士**

○Tatsuro Nishiyama* and Takashi Hasegawa**

1 目的

ダム基礎の強度評価において岩盤の破壊機構をより妥当に反映させることを最終目的として、ここでは有限要素法による層状岩盤の破壊解析手法に対する検討を行った。

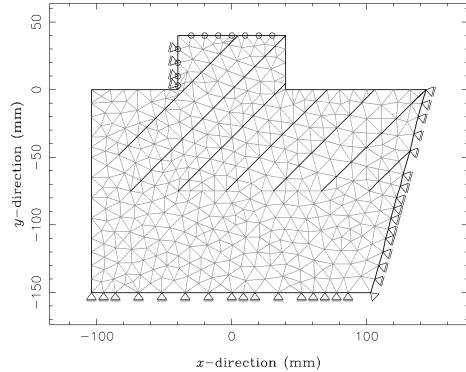
2 手法

層状岩盤基礎における岩盤せん断試験を模した石膏模型実験¹⁾を解析対象とした。模型の初期状態を定みずみ三角形要素を用いて表し、層状構造を形成する初期不連続面を二重節点によって表した(図1)。载荷過程を増分解析によって再現しながら、基質の局所破壊を界面内蔵要素²⁾への置き換えによって表現した。载荷に相当する増分として、岩盤せん断試験における垂直荷重に相当する境界条件を第1荷重ステップにおいて等分布荷重として与え、第2ステップ以降において傾斜荷重に相当する境界条件を変位増分として与えた。基質の局所破壊の規準には、石膏の物性値を代入したHoek-Brownの破壊規準³⁾を用いた。これらの手順は初期不連続面の存在以外は既報⁴⁾に同じであり、詳細は割愛する。

二重節点を模式的に図2に示す。各二重節点上では節点力 t_I^i の値に応じた連続条件⁵⁾を与えることとし、その際には次のような処理を用いた。すなわち、系の全体剛性方程式が $K_{lm}U_m = F_l$ であるとき、 $U_i = U_j$ であれば次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix}
 K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1i} + K_{1j} & \cdots & K_{1j} & \cdots & K_{1n} \\
 K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2i} + K_{2j} & \cdots & K_{2j} & \cdots & K_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\
 K_{i1} & K_{i2} & \cdots & K_{ii} + K_{ij} & \cdots & K_{ij} & \cdots & K_{in} \\
 +K_{j1} & +K_{j2} & \cdots & +K_{ji} + K_{jj} & \cdots & +K_{jj} & \cdots & +K_{jn} \\
 \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\
 K_{j1} & K_{j2} & \cdots & K_{ji} + K_{jj} & \cdots & K_{jj} & \cdots & K_{jn} \\
 \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{ni} + K_{nj} & \cdots & K_{nj} & \cdots & K_{nn}
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 U_1 \\
 U_2 \\
 \vdots \\
 U_i \\
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 U_n
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 \vdots \\
 F_i + F_j \\
 \vdots \\
 F_j \\
 \vdots \\
 F_n
 \end{Bmatrix}$$

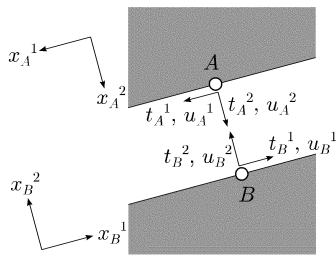
上式において、 $U_i = U_j$ の値が未知、 $F_i + F_j$ の値が既知、 F_j の値が未知であれば、通常の求解によってすべての未知数の値を得ることができる。上式の (U_i, U_j, F_i, F_j) として、固着の場合は $(u_A^1, -u_B^1, t_A^1, -t_B^1)$ および $(u_A^2, -u_B^2, t_A^2, -t_B^2)$ が、すべりの場合は $(u_A^2, -u_B^2, t_A^2, -t_B^2)$ が対応する。すべりにおける x_I^1 方向および口開きに対しては、通常の荷重境界条件と同じ処理を行った。ただし実際の計算では、一度固着条件下で得られた値から余分な節点力を除くという手順を用い、対応する増分または残差力に対して上記の演算を適用した。



弾性係数：3,697 MPa, Poisson比：0.35, 圧縮強さ：16.56 MPa, 引張強さ：-2.844 MPa; 平面ひずみ, 初期節点数：500, 要素数：780. 丸印は载荷に相当する境界条件を与えた節点を表す。要素境界のうち、黒色が外部境界および初期不連続面を、灰色がその他の要素隣接境界を表す。

図1: 解析条件 Numerical model.

* 愛媛大学農学部 Faculty of Agriculture, Ehime University; ** 京都大学名誉教授 Professor Emeritus, Kyoto University; 岩盤力学, 構造物の設計手法, 数値解析

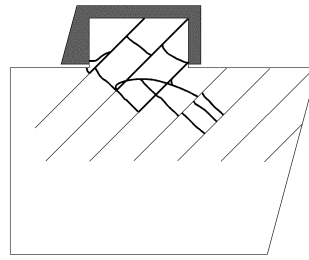


固着 : $t_A^1 - t_B^1 = 0,$
 $t_A^2 - t_B^2 = 0,$
 $u_A^1 + u_B^1 = 0,$
 $u_A^2 + u_B^2 = 0.$

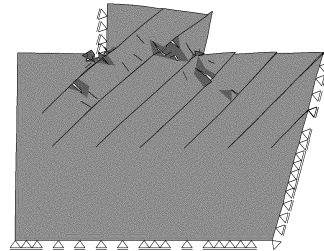
すべり : $t_A^1 - t_B^1 = 0,$
 $t_A^2 - t_B^2 = 0,$
 $|t_I^1| = \mu |t_I^2|,$
 $I = A \text{ or } B,$
 $u_A^2 + u_B^2 = 0.$

口開き : $t_A^1 = t_A^2$
 $= t_B^1$
 $= t_B^2$
 $= 0.$

ただし、 t_i^j は節点力、 u_i^j は節点変位、 μ は摩擦係数を各々表す。



模型実験¹⁾：太線が亀裂およびすべりを表す。



計算 ($\mu = \tan 12^\circ$, 初期垂直応力 $\sigma_n = 2.5 \text{ MPa}$): 変位を 30 倍で強調表示。濃い灰色は破砕された領域を表す。

図 2: 二重節点における連続条件⁵⁾ Continuity conditions at double nodes.⁵⁾

図 3: 破壊点後の模型の様子 Crack distributions after the peaks.

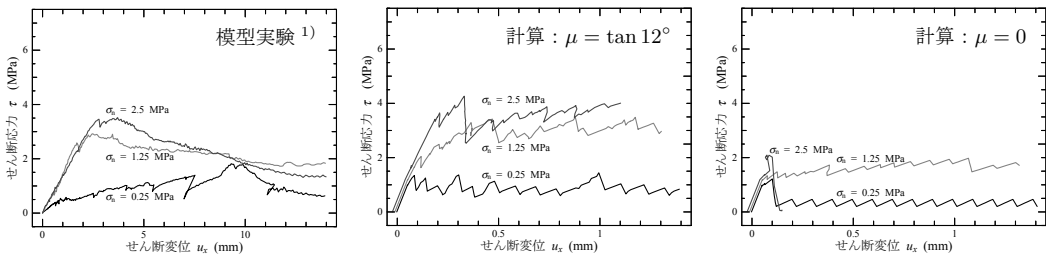


図 4: せん断変位—せん断応力関係 Relation between shear displacement and shear stress.

3 結果

せん断抵抗発現時すなわち破壊点の後、破壊様式の特徴が顕著に現れた時点における模型の様子を図 3 に、せん断変位—せん断応力関係を図 4 に、各々示す。なお、計算においては、初期不連続面の摩擦係数 μ として実測値である $\tan 12^\circ$ を用いた場合と、なめらかすなわち $\mu = 0$ とした場合の双方を比較した。破壊機構としてはいずれの計算においても模型実験に類似した結果が得られ、 μ による影響も小さいと考えられる。しかしながら、せん断変位—せん断応力関係においては、 $\mu = \tan 12^\circ$ の下ではせん断応力の最大値を妥当に再現しているが、 $\mu = 0$ の下では明らかに過小評価となっている。また、 $\mu = 0$, $\sigma_n = 2.5 \text{ MPa}$ のケースでは計算が不安定となり、明らかに有意でない状態に至った。したがって、 $\mu = \tan 12^\circ$ は摩擦係数として決して大きくないと思われるものの、層状構造を解析する場合には結果に有意な影響を与えると言える。変位についてはいずれにおいても安定して過小評価となっており、変位の再現性については今後も注意を払いたい。

4 結論

特に不連続面の挙動に注目しながら、岩盤せん断試験を模した石膏模型実験に対する有限要素解析を実施し、破壊機構と発現強度について妥当と考えられる結果が得られた。今後、計算ケースの網羅とその結果整理により、強度評価に関する考察を進めたい。

参考文献 1) Nishiyama T, Hasegawa T and Murakami A (2005) *Prediction, Analysis and Design in Geomechanical Applications* 2 159–166. 2) Bolzon G (2001) *Computational Mechanics* 27 463–473. 3) Hoek E (1983) *Géotechnique* 33 185–223. 4) Nishiyama T and Hasegawa T (2010) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 10 012084. 5) 日本機械学会 編 (1986) 固体力学におけるコンピュータアナリシス、コロナ社。