

Ⅲ-33 不連続面の摩擦開閉を考慮した岩盤のマルチスケール解析

東北大学 学生員○西岡 英俊

東北大学 正 員 京谷 孝史

東北大学 正 員 岸野 佑次

1. はじめに

不連続面を多数含む不連続性岩盤の力学特性は、その不連続面による複雑な構造に支配されている。寺田・京谷は、無数の微視亀裂が存在する物体に対して2段階スケールからアプローチする「マルチスケール応力変形解析法」としてそのことを実践的に示した¹⁾。

本研究の目的は、分布不連続面を有する岩盤に対する均質化理論による力学モデルとして、周期微視構造となる亀裂の初期開口、閉合および摩擦挙動を直接取り扱う解析手法を提案、開発することにある。このような均質化理論による力学モデルに開閉、摩擦を取り込んだモデルは本研究で初めて示されるものである。

2. 接触摩擦問題

ここでまず亀裂の接触摩擦問題の解法と例を示す。仮想仕事式

$$\int_{\Omega} D_{ijkl} \frac{\partial \delta u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} dx - \int_{\Omega} \delta u_i f_i dx - \int_{\partial \Omega_T} \delta u_i t_i ds - \int_{\partial \Omega_C} (\delta^b u - \delta^a u) \cdot (q_l^b N_l + q_f^b N_f) ds = 0 \quad (1)$$

幾何学的接触条件

$$\int_{\partial \Omega_C} \delta \lambda_1(x) p(x) ds = 0 \quad (2)$$

$$\int_{\partial \Omega_C \setminus \partial \Omega_{Cs}} \delta \lambda_f(x) s(x) ds = 0 \quad (3)$$

上式を同時に満足する変位場 u を求めるものとして接触摩擦問題が定式化される。

不連続面に対する直接せん断試験を想定し、図-1に示すモデルに、垂直応力 $\sigma = 8\text{MPa}$ とし、せん断変位 u_x を剛板に与える純粋せん断を变位制御により与えた。せん断変位 u_x せん断応力 τ および供試体上端の垂直変位 u_y を図-2に示す。弾性解析でありながら、残留せん断強度が生じている。不連続面のせん断に伴うダイレイタンシー特性は初めは減少し、その後せん断変位 $u_x = 0.3\text{mm}$ 前後から増加に転じていることもわかる。これは不連続面がいったん滑ることでかみ合わせがよくなるということが表現できているといえるであろう。

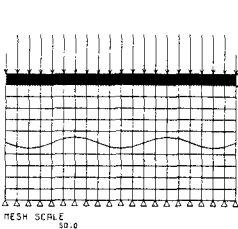


図-1 直接せん断試験モデル

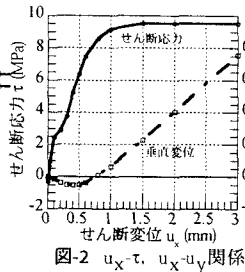


図-2 u_x - τ 、 u_x - u_y 関係

3. マルチスケール応力変形解析

以下のマクロ場とミクロ場の式を同時に解く作業により、微視構造を含む構造体の挙動を記述する $u^0(x)$ と $u^1(x, y)$ を求めることができる。

(巨視スケールの問題：マクロ場)

$$\int_{\Omega} \left[D_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k^0}{\partial x_i} + \frac{\partial u_l^1}{\partial y_j} \right) \right]_Y \frac{\partial w_i^0}{\partial x_j} dx = \int_{\Omega} [f_i]_Y w_i^0 dx + \int_{\partial \Omega_T} t_i w_i^0 dx, \quad \forall w^0 \in V \quad (4)$$

(微視スケールの問題：ミクロ場)

$$a'(u^1, v^1 - u^1) + j'(u^1, v^1) - j'(u^1, u^1) \geq l'(v^1 - u^1), \quad \forall v^1 \in K_Y$$

$$a'(u^1, v^1 - u^1) = \int_Y D_{ijkl} \frac{\partial u_k^1}{\partial y_i} \frac{\partial (v_j^1 - u_j^1)}{\partial y_j} dy \quad (5)$$

$$j'(u^1, v^1) = \int_{\partial Y_{Cs}} [q_f(u^1)] s(v^1) dy$$

$$l'(v^1 - u^1) = - \int_Y D_{ijkl} \frac{\partial (v_j^1 - u_j^1)}{\partial y_j} \frac{\partial u_k^0}{\partial x_i} dy$$

このように微視構造に亀裂が存在しミクロ場が変分不等式としてのみ記述される問題においては、点 x における巨視ひずみ E_{ij} (巨視変位勾配 $\partial u_i^0 / \partial x_j$) が与えられた時に、微視支配方程式(5)を利用してユニットセル内部の微視変位 $u_i^1(x, y)$ を求めることはできる。

さらに、得られた $u_i^1(x, y)$ と平均変位 $u_i^0(x)$ を

$$\sigma_{ij}^0(x, y) = D_{ijkl}(x, y) \left(E_{kl} + \frac{\partial u_k^1(x, y)}{\partial y_l} \right) \quad (6)$$

に用いれば、ユニットセル内の微視応力分布 $\sigma_{ij}^0(x, y)$ を求めることが可能になる。すなわち、局所化プロセス: $u_i^0(x), E_{ij}(x) \Rightarrow u_i^1(x, y) \Rightarrow \sigma_{ij}^0(x, y)$ が可能である。

逆に上述の局所化プロセスによって得られた微視応力 $\sigma_{ij}^0(x, y)$ から巨視応力 $\Sigma_{ij}(x)$ を定める均質化プロセス: $\sigma_{ij}^0(x, y) \Rightarrow \Sigma_{ij}(x)$ は、

$$\Sigma_{ij}(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \sigma_{ij}^0(x, y) dy \quad (7)$$

によって実現できる。

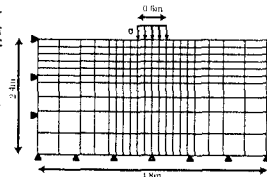


図-3 原位置試験巨視構造モデル

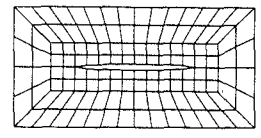


図-4 亀裂ユニットセルモデル

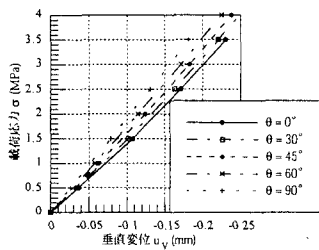


図-5 u_y - σ 関係

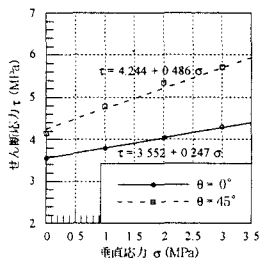


図-6 ブロックせん断試験結果

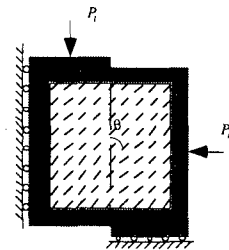


図-7 石膏一面せん断試験

4. 巨視的破壊基準の定義

微視構造を含む材料の巨視空間上のある1点での破壊開始の基準を次のように定義する：

[定義]：材料内部の点 x の近傍にあるユニットセルの内部において、微視応力 $\sigma_{ij}^0(x, y)$ が構成材料基質部分の強度を超えるような点 y が現れれば、構造体の点 x において巨視的な破壊が始まる。

これは物理的・工学的に許容できる安全側の考え方である。この定義のもとで、所望の巨視的破壊基準に達する巨視応力 Σ_{kl} が式(5),(6),(7)より数値的に求めることができ、さらに2次凸曲面で近似することで極限支持力解析により巨視構造の強度評価が可能になる。

5. マルチスケール解析例

(1) 平板載荷試験

まず実岩盤の変形特性を知る目的で広く行われている平板載荷試験の解析を行う。実際の亀裂性岩盤に対する平板載荷試験においては、「ゆるみ」により初期の剛性が低く、亀裂の閉合に伴い剛性が上昇するという現象が現れる。

ここでは亀裂が1方向に周期的に分布する岩盤をモデル化し、その亀裂配向角度を水平から反時計回りに 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° として本解析手法を適用した。亀裂面での摩擦係数は0.6、平面ひずみ条件とし、基質部岩石は花崗岩の値を用いた。有限要素モデルを図-3,4に示す。荷重は応力制御平板載荷試験を想定して応力制御で与えた。載荷応力と載荷中心点の沈下量を図-5に示す。

亀裂の閉合に伴う剛性上昇を表現できていることがわかり、配向角度が小さいものほど、初期の剛性が低く、剛性の上昇も遅れている。また上昇後の剛性は配向角度によらずほぼ同一の値を示している。これらの挙動は、マルチスケール解析に微視開口亀裂の接触摩擦解析を取り込んだ本解析手法において初めて表現し得た挙動である。

(2) ブロックせん断試験

ブロックせん断試験を本手法でモデル化し、強度解析例を示す。平板載荷試験のモデルと同様なモデルで、垂直応力 σ を0.1, 2.3MPaとし、極限支持力解析により得られたせん断応力 τ との関係を図-6に示す。拘束圧

依存性が表現できていて、ほぼ線形関係が得られている。岩盤としての粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ は亀裂配向角度 $\theta=0^\circ$ で $c=3.552\text{MPa}$ 、 $\tan\phi=0.247$ より $\phi=13.87^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ で $c=4.244\text{MPa}$ 、 $\tan\phi=0.486$ より $\phi=25.92^\circ$ が得られた。 $c=20.6\text{MPa}$ 、 $\phi=60^\circ$ である岩石単体から、亀裂の存在により低下していることがわかる。また亀裂の配向角度による強度の異方性も表現できているといえるであろう。

(3) 石膏一面せん断試験

亀裂の配向角度がせん断強度に及ぼす影響を調べるため、図-7のような石膏供試体による1面せん断試験が行われている。その $P_n=7.35\text{kN}$ での実験結果、連続体弱層モデル²⁾、本解析手法の結果を図-8に示す。本解析手法が定性的にも定量的にも実験結果に近い評価を得られることがわかる。

6. 結論

以上の成果から、本研究で開発した評価手法が不連続性岩盤に対する力学的モデルとして従来手法にない特徴を有し、岩盤構造物の設計や岩盤斜面の安定性評価として有用な手法になりうるだけでなく、不連続面に対する力学的特性を研究する有力な手法であるとの結論を得た。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎・京谷孝史：無数の亀裂を有する物体のマルチスケール応力変形解析法，土木学会論文集，No.619/I-47，pp. 23-34，1999。
- 2) 京谷孝史・寺田賢二郎・欧陽立珠：岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価，土木学会論文集，No.631/III-48 pp. 131-150，1999。

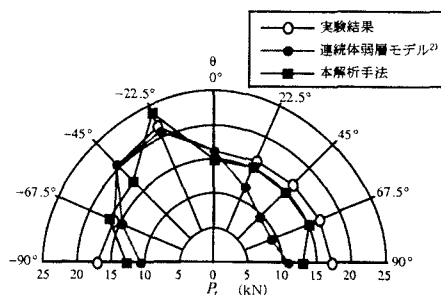


図-8 亀裂配向角度とせん断強度の関係