

III - 19

均質化法に基づいた不連続性岩盤の支持力解析

 東北大学 学生員○長田 隆信
 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

岩盤は無数の不連続面を含んだ複雑な構造体であり、その強度の評価は極めて難しい。本研究では、極限支持力解析法をベースとした不連続性岩盤の破壊強度を評価する新しい手法を提案する。その際、岩盤の変形特性を均質化法によってそれと等価な異方弾性体に置き換えることにより評価し、強度特性を母岩材の強度と不連続面の摩擦滑りを組み合わせた複合的な破壊基準を導入することによって表現することとした。こうした枠組みで、分布不連続面を含む岩盤構造物の破壊強度がどの程度評価し得るのか、モデル実験を通してその適用性を検討した。

2. 均質化法に基づいた支持力解析

 2.1 均質化法¹⁾

図1に示すような微視的周期構造を有する材料を考える。その単位格子をユニットセルと呼ぶ。このような材料の平均弾性係数および物体力は次式で与えられる。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) dy \quad (1)$$

$$f_i^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y f_i dy$$

ただし、 $|Y|$ はユニットセルの体積であり、 χ^{kl} は特性変位関数と呼ばれ、ユニットセル内で成立する次式を満足するものである。

$$\int_Y E_{ijpq} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy \quad (2)$$

(1)式で計算される均質化弾性係数 E_{ijkl}^H と均質化物体力 f_i^H を用いることで、微視的構造を持つ材料の平均変位場が評価できる。

2.2 極限支持力解析法

弾完全塑性材料からなる物体に荷重を作用させ、ある限界まで増加させると物体は一定荷重のもとで変形が続く塑性崩壊を起こす。そのような荷重を極限荷重と定義する。極限支持力解析は、作用荷重を $\rho(X_i, T_i)$ (X_i : 物体力, T_i : 表面力, ρ : 荷重係数) として、物体が塑性崩壊を起こすときの極限荷重を与える荷重係数 ρ を求めるものである。

荷重系 $\rho(X_i, T_i)$ の作用のもとで物体が弾塑性挙動を生じているとき、物体内の応力 σ_{ij} は、単位荷重系 (X_i, T_i) とつり合う弾性応力成分を σ_{ij}^e として、

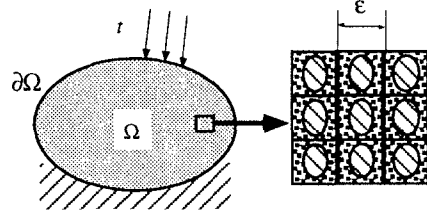


図1 周期的微視構造を有する材料

ρ 倍の弾性応力成分 $\rho\sigma_{ij}^e$ と残留応力成分 σ_{ij}^r によって、

$$\sigma_{ij} = \rho\sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^r \quad (3)$$

のように表すことができる。ここに、

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}^e + X_i = 0 & \text{in } V \\ \sigma_{ij}^e n_j = T_i & \text{on } S_T \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}^r = 0 & \text{in } V \\ \sigma_{ij}^r n_j = 0 & \text{on } S_T \end{cases} \quad (5)$$

すると、(3)式で与えられる応力は静的可容応力であることから、下界定理は次式を保証する。

$$f(\rho\sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^r) \leq 0 \quad (6)$$

2.3 破壊条件の導入

破壊条件は基本的には母岩材の特性に支配されるが、不連続面群の平均方向については、不連続面に沿う摩擦滑りが支配すると仮定する。こうして、母岩材の破壊条件に不連続面の平均方向の摩擦滑り条件を重ね合わせた複合的な破壊条件として与えるものとする。

母岩材の破壊条件は、Drucker-Prager型の条件、 $f = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - \sigma_0$ によって与える。ただし、

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad I_1 = \sigma_{kk}, \quad s_{ij} \text{ は偏差応力成分である。}$$

また、不連続面に沿う摩擦滑りには、Mohr-Coulomb型の条件、 $|\tau| = c - \sigma \tan \phi$ を用いることにする。

この複合的破壊条件面を区分線形近似し、(3)～(6)式に有限要素を適用することにより、次式の線形計画問題として定式化される。

$$\rho_{\text{ult}} = \max \left\{ \rho \mid N^t (\rho \bar{\sigma}^e + \bar{\sigma}^r) \leq R, B^t \bar{\sigma}^r = 0 \right\} \quad (7)$$

ただし、 N は破壊条件面へ向かう単位法線ベクトルを並べたマトリックス、 R はそれぞれの破壊条件面の原点からの距離を並べたベクトル、 B は要素毎の変位ひずみ関係から構成される全体マトリックスである。また、 $\bar{\sigma}^e$ は、(1)式で与えられる

均質化弾性係数を用いた線形解析により評価される。

3. 一面せん断試験の数値解析

川本ら²⁾は、規則的に不連続面を配置した石こうモルタル供試体(15×15×4cm)を用いて、図2に示すような一面せん断試験を実施して不連続面の角度と破壊強度の関係を求めている。石膏モルタルの材料定数を表1に示す。

この石膏供試体に対して、均質化法によって等価な弾性係数を計算し、その弾性係数を用いて、2次元平面応力問題として P_t の単位荷重に対する弾性応力分布を求めた。垂直荷重 P_n については、所定の値を加えたときの応力分布を求めておき、支持力解析の際にこれを初期応力としてその分だけ応力空間における破壊曲面への距離を変化させるようにした。また、不連続面の摩擦滑りに対するMohr-Coulombの基準については、 $c=10.0\text{ kgf/cm}^2$, $\phi=20^\circ$ と $c=5.0\text{ kgf/cm}^2$, $\phi=20^\circ$ の2通りに設定した。

実験結果を図3に、解析結果を図4に示す。 $c=10.0\text{ kgf/cm}^2$, $\phi=20^\circ$ のときの解析結果が拘束圧250kgの場合を除いて実験結果をよく表現している。また、 $c=5.0\text{ kgf/cm}^2$, $\phi=20^\circ$ と不連続面方向の強度を小さくした時には、不連続面が完全につながった積層体の実験結果に非常に近い結果が得られている。この結果から、不連続面方向の局所的な強度を合理的に設定できれば、分布不連続面を含む材料の巨視的破壊強度が推定し得ると考えられる。

表1 石膏モルタルの材料定数

せん断強度 (kgf/cm ²)	33.3
内部摩擦角 (度)	56.3
弾性係数 (kgf/cm ²)	3.73×10^4
ポアソン比	0.16

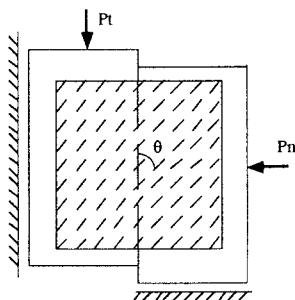
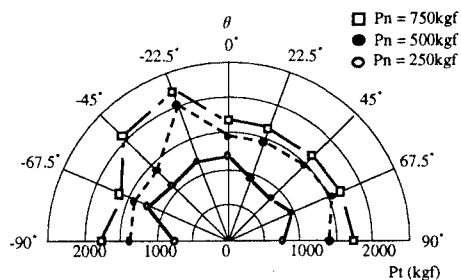
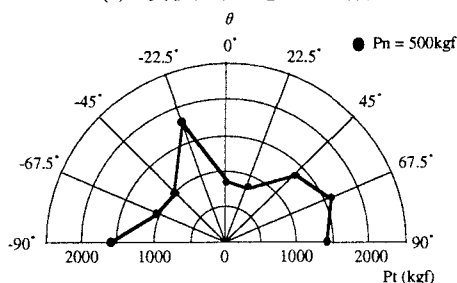


図2 一面せん断試験



(a) 実験結果(亀裂供試体)



(b) 実験結果(積層供試体)

図3 一面せん断試験の結果

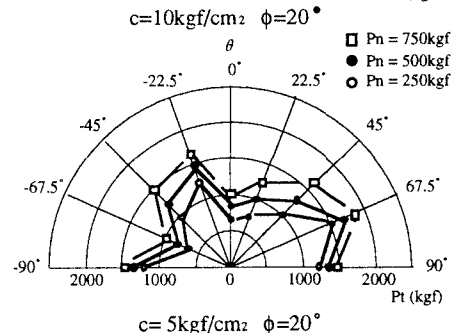
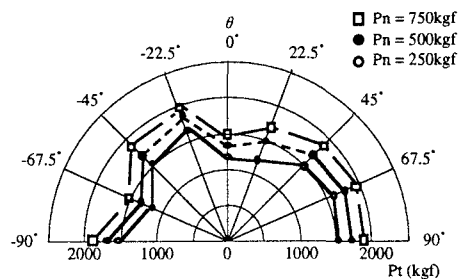


図4 一面せん断試験の解析結果

<参考文献>

- 1) T.Kyoya, T.Kawamoto: Quantitative evaluation of effect of pattern bolting by the homogenization method, A.A. BALKEMA, PP641-646, 1993
- 2) 川本 眈万、吉田 英生: 節理体および積層体の巨視的なせん断破壊性状について, 材料, 17(181), pp.42-49, 1968.