

ハザマ 正会員 ○玉城喜章
 東北大学工学部 正会員 京谷孝史
 名古屋大学工学部 正会員 林 良嗣

1 はじめに

岩盤構造物の安定解析には、岩盤の巨視的なせん断強度を知ることが重要である。しかし岩盤は多くの不連続面(亀裂)を有する複雑な構造体であり、そのせん断強度は不連続面の状態、岩盤構造物が置かれている境界条件および不連続面との関係によって実現する或る「結果」である。本研究では、極限支持力解析をベースに岩盤の強度を支配する要因である岩石と不連続面の強度特性および不連続面の分布性状から、連続体力学の範囲内で、岩盤のせん断強度を評価することの可能性を検討するものである。

2 亀裂性材料のモデル化と極限支持力解析

弾完全塑性材料に対する極限支持力解析は、降伏面の区分線形近似と有限要素離散化により、単位荷重 F に対して亀裂性材料が破壊する極限の荷重係数 α を求める問題として、次式のような線形計画問題に書き換えることができる[1]。

$$s = \max \{ \alpha | N^T(\alpha \sigma^E + \bar{\sigma}^R) \leq K, B^T \bar{\sigma}^R = 0 \} \quad (1)$$

あるいは、

$$k = \min \{ K^T \lambda | (N^T \sigma)^T \lambda = 1, Bu = N \lambda, \lambda \geq 0 \} \quad (2)$$

ここに、 N ：図-1における区分線形近似した降伏面の外向き法線ベクトルからなるマトリクス、 K ：せん断力の大きさを表すベクトル、 σ^E ：荷重に対する弾性応力、 $\bar{\sigma}^R$ ：荷重に無関係な残留応力である。(1)式は、加えた荷重 αF

に対するつりあい式 ($B^T(\alpha \sigma^E) = \alpha F$) を満足する弾性応力 $\alpha \sigma^E$ と、それ自身でつり合う ($B^T \bar{\sigma}^R = 0$) 残留応力 $\bar{\sigma}^R$ の和 $\sigma = \sigma^E + \bar{\sigma}^R$ が、降伏基準 ($N^T(\alpha \sigma^E + \bar{\sigma}^R) - K \leq 0$) を満たすようにしながら、荷重係数 α を最大化することを意味する。(2)式は、(1)の双対形式である。

亀裂性材料は、変形が異方的であるような $c\phi$ 材であるとする。さらに、不連続面上の応力が不連続面上での滑りを表す別のモール・クーロンの破壊基準に従うものとし、 $c\phi$ 材(ブラガー・ドラッカーの降伏関数)と不連続面と平行な弱面(モール・クーロンの降伏基準)を重ね合わせた降伏関数(図-1)で評価されたとする。また、変形の異方性は弾性応力 σ^E で評価される。

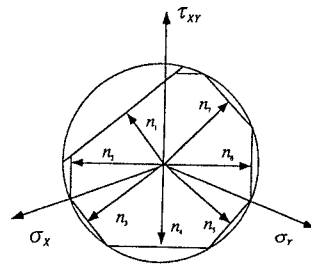


図-1 区分線形降伏近似

3 一面せん断試験の数値解析

川本らは、表-1に示するような材料物性を持つ石こうモルタルを用い、図-2に示するような一面せん断試験を行って、不連続面と仮想せん断面(図-2の波線部)の角度および垂直荷重 P_n を変えた場合のせん断破壊荷重 P_T の変化を求めている。また、層高が2.0cmの積層供試体に対しても同様の試験も行っている[2]。このせん断試験に対して、図-3に示するような境界条件のもとで提案法による解析を行う。解析定数を表-2に示す。簡単のため2次元ひずみ条件とし、降伏関数は、 $c\phi$ 材において外接する16面体からなる区分線形降伏関数を

用いる。荷重は、 $F = P_N = 120 \text{ kgf}$ を単位荷重とした。弾性応力 σ^E の計算には、図-4に示すような周期的に不連続面を配置した材料を、均質化法で評価した等価弾性係数を用いる。そして、弱面の方向を時計方向に 90° 、 $\pm 67.5^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 22.5^\circ$ 、 0° の8通りに回転させてそれぞれの極限荷重係数 α を求めた。また比較のため弾性応力 σ^E に、等方弾性体として計算した応力を用いた場合についても極限荷重係数 α を求めた。

実験結果および解析結果を図-5に示す。不連続面の分布による変形の異方性を弱面の異方性を併せて考慮したモデルでは、実験と同様の差し目（ $-90^\circ < \theta < 0^\circ$ ）と流れ目（ $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ）による強度の変化の傾向が表現できることがわかる。これに対して、変形の異方性を考慮したモデルでは差し目（ $-90^\circ < \theta < 0^\circ$ ）と流れ目（ $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ）の違いが表現できていない。

予測値と実験値の大きさのずれは不連続面の強度の評価にずれがあったことに起因すると考えられる。

表-1 材料物性値

圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張り強度 (kgf/cm^2)	せん断強度 (kgf/cm^2)	内部摩擦角 (度)	弾性係数	ポアソン比
218.8	15.8	33.3	56.3	3.73×10^5	0.16

表-2 解析定数

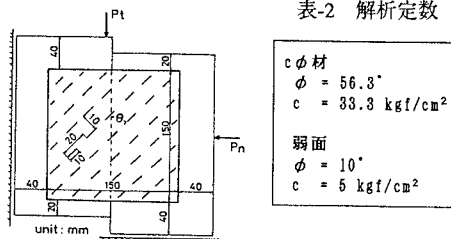


図-2 不連続面を配置した石こうモルタル供試体の一面せん断試験

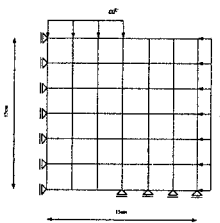


図-3 有限要素分割図

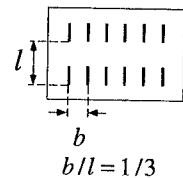


図-4 材料モデル

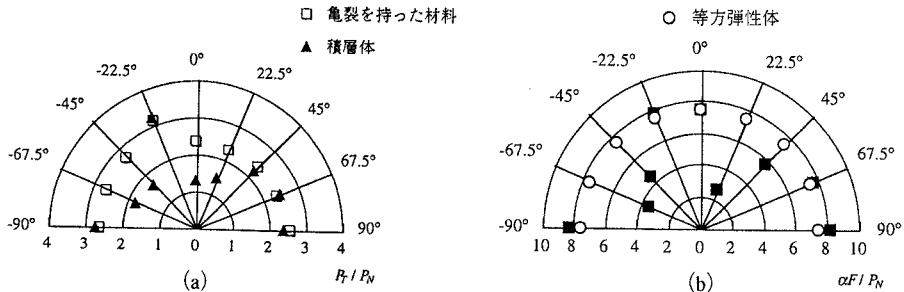


図-5 $\theta \sim P_T/P_N$ の関係および $\theta \sim \alpha F/P_N$ の関係；(a) 実験結果；(b) 解析結果

4 おわりに

不連続面あるいは成層面のような弱面が分布する材料の強度は、弱面の存在による変形の異方性（例えば均質化法によって）と強度の異方性とを適当に定めることができれば、極限支持力解析法により連続体力学の範囲内で十分な精度を持って予測できることがわかった。またこのことから、亀裂の分布状況、構成岩石の力学特性に支配される亀裂性岩盤についても同様の手法により安定性を評価できる可能性が示された。

5 参考文献

[1] G. Maier, Collapse Load Analysis, Proc. of the NATO Advance Study Institute, Engineering Plasticity by Mathematical Programming, chap. 5, pp.93-105(1977)

[2] 川本 眺万、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)、1968、pp.42-49.