

岩盤不連続面のせん断強度による斜面安定性の検討

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 正会員 ○平岡 伸隆, 吉川 直孝
 東京都市大学 学生会員 佐野 瑠星, 岩崎 夏美, 正会員 伊藤 和也

1. はじめに

不連続性岩盤の設計基準について、未崩壊・崩壊事例から決定した経験的な手法によって、設計法面勾配を決定しているが、工事中の勾配や不連続面の強度の力学的な評価については、一般の設計基準類においてほとんど記載がみられない。不連続性岩盤の破壊基準については、室内試験による強度定数から種々の検討がなされているが、その結果を用いた斜面安定性までを検討した事例は少ない。本稿では、岩盤不連続面の一面せん断試験結果から得られた地盤強度を用いて、遠心力模型実験結果の斜面安定性を評価できるか検討を行った。

2. 遠心力模型実験と室内土質試験

人工軟岩材料を用いて不連続性岩盤斜面を模擬し、遠心力模型実験を実施した。人工軟岩材料は既往研究¹⁾を参考にセメント、石灰石砕砂、石灰石微粉末、水、混和材（質量比 52:825:825:373:1）の混合剤とした。岩盤不連続面は、基盤層と表層を別々に打設することで再現した。土槽の概略図を図1に示す。表層と基盤層の境界には、表層打設前に層境界を明確にするために朱液を塗り、またセメント材の水分が基盤層へ染み込みづらくするためにワセリンを薄く塗布した。本模型を用いて遠心加速度を徐々に上昇させたところ 28.9 G で崩壊した（図2）。これはプロトタイプスケールで斜面高さ 8.13 m に相当する。遠心力模型実験に用いた人工軟岩の物性を調べるため、岩石の一軸圧縮試験および岩盤不連続面の一面せん断試験を実施した。インタクトな供試体の一軸圧縮強度は7日養生で 0.484 MPa であった。岩盤不連続面の一面せん断試験は、遠心模型の作製方法に合わせて供試体を作製した。一面せん断試験から得られた垂直応力とせん断強度の関係を図3に示す。モール・クーロン則に従って地盤強度を求めると、粘着力 $c=30.3$ kPa, 内部摩擦角 $\phi=41.0^\circ$ となった。

3. 極限平衡法による斜面安定解析

表層と基盤層の不連続面における平面ひずみ状態を仮定し、滑動力と抵抗力から安全率を求める。滑動力は自重によるものとし、抵抗力はせん断強度と不連続面の面積の積から算出した。以下に式を示す。

$$F_s = \frac{\tau A}{W \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、 τ はせん断強さ[kN/m²], A は不連続面積[m²], W は表層土塊の重量[kN], α は不連続面傾斜角である。せん断強さを決定するために破壊基準が必要となるが、本稿では古典的な4手法を適用し、それぞれの結果を比較した。また、全てにおいてモール・クーロン則の内部摩擦角 ϕ をすべり面上の摩擦角 ϕ_μ や残留摩擦角 ϕ_r とし、 $\phi=41.0^\circ$ とした。

Patton の式²⁾: Patton は定型歯形モデルにおける垂直応力とせん断強さの関係を双一次関数によって表現した。定型歯形の勾配を i とすると低拘束圧下のせん断強度は次式となる。

$$\tau = \sigma \tan(\phi_\mu + i) \quad (2)$$

一面せん断試験のせん断変位と垂直変位より、ダイレイタンシー角は 6° とした。Patton の式のように原点を通る線形の破

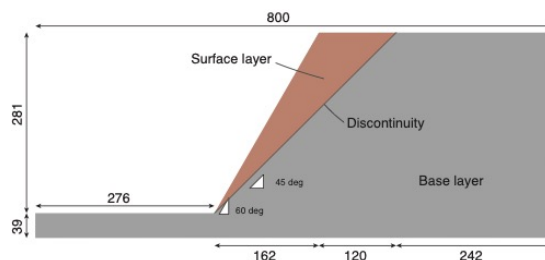


図1 遠心力模型実験の概略図



図2 崩壊した模型斜面

キーワード 岩盤不連続面, 遠心力模型実験, 斜面崩壊, せん断強度

連絡先 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 (独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 TEL:042-491-4512

壊基準の場合、幾何学的な条件で安全率が決定され、遠心加速度の増加による安全率の変化は起きない。

Jaeger の経験式³⁾ : Jaeger は連続的に変化する以下の経験的なせん断強度式を提案した。

$$\tau = c_j (1 - e^{-b\sigma}) + \sigma \tan \phi_r \quad (3)$$

式のパラメータを評価する簡単な図式法を示唆している。これは τ - σ 座標にプロットされたピーク強度データに漸近線を引いて、その漸近線との各プロットとの差からパラメータ b 、 c_j および ϕ_r を求めるものである。モール・クーロン則での内部摩擦角を ϕ_r とし、 c_j はもともと正の外れ値であるプロットから算出した。それらの ϕ_r および c_j をもちいて最小二乗法によって b を求めた。

Ladanyi and Archambault の式⁴⁾ : Ladanyi and Archambault は摩擦、ダイレイタンシーおよび不連続面のかみ合わせ分布をせん断強度に組み込みこんだ。

$$\tau = \frac{\sigma(1 - a_s)(\dot{\nu} + \tan \phi_\mu) + a_s S_R}{1 - (1 - a_s)\dot{\nu} \tan \phi_\mu} \quad (4)$$

$$S_R = q_u \frac{\sqrt{1+n}-1}{n} (1 + n\sigma/q_u)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$a_s = 1 - (1 - \sigma/q_u)^{k_1} \quad (6)$$

$$\dot{\nu} = (1 - \sigma/q_u)^{k_2} \tan i \quad (7)$$

一軸引張り強度は既往文献¹⁾を参考とし、 $n = 8$ とした。

Ladanyi ら⁴⁾より、定数 $k_1=1.5$ および $k_2=4$ とした。

Barton and Choubey (1974) の式⁵⁾ : Barton らは経験的なせん断強度基準を式(8)のように示している。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \left\{ \text{JRC} \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma} \right) + \phi_b \right\} \quad (8)$$

ここに、 ϕ_b は基本摩擦角、 σ は垂直応力、JRC はジョイント粗さ係数 (Joint Roughness Coefficient) である。JRC 値の決定方法は、種々の方法が検討されている。本稿では Barton の JRC 値と粗さの断面図例から選ぶ方法によって JRC=2、一面せん断試験結果からの逆算法によって JRC=12.7 とした。

それぞれの式による破壊包絡線を図 3 に示す。クーロンの破壊基準が低拘束圧下でせん断強度を過大評価し、危険側の計算となることがわかる。また、これらの式から求めたせん断強度から安全率を計算し、遠心加速度と安全率の関係を図 4 に示す。Barton の式 (JRC=2) を除いた結果が、せん断強度を過大評価し、危険側の判定となった。なお、Barton の式において JRC=2.7 とすると 28.9 G で崩壊する計算結果となる。

4. まとめ

不連続性岩盤のせん断強度を求める古典的な 4 手法を用いて、遠心模型実験結果の斜面安定性計算を実施した。その結果、概ねせん断強度を過大評価し、危険側の評価となった。手法によって結果が大きく異なり、安定計算への適用にはさらなる検証が必要である。

参考文献 1) 関口陽ら : 人工軟岩と不連続性岩盤斜面模型の作製方法に関する検討, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp. 1721-1722, 2017. 2) Patton : Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. ISRM, Vol. 1, pp. 509-513, 1966. 3) Jaeger : Friction of rocks and the stability of rock slope, Geotechnique, Vol. 21, No. 2, p.97-134, 1971. 4) Ladanyi and Archambault : Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. Proc. 11th Symp. Rock Mech., pp. 105-125, 1970. 5) Barton and Choubey : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, No. 1-2, pp. 1-54, 1977.

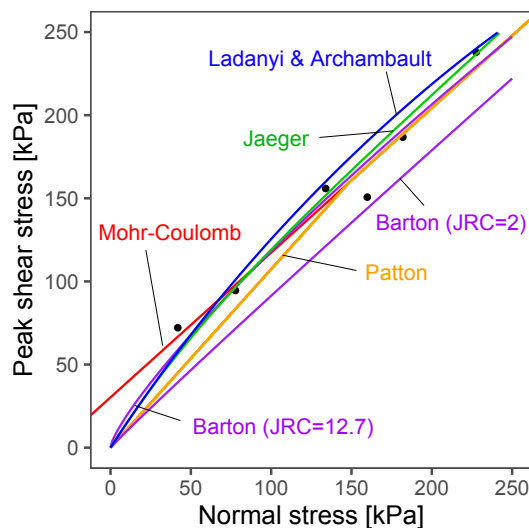


図 3 せん断強度と各手法による破壊包絡線

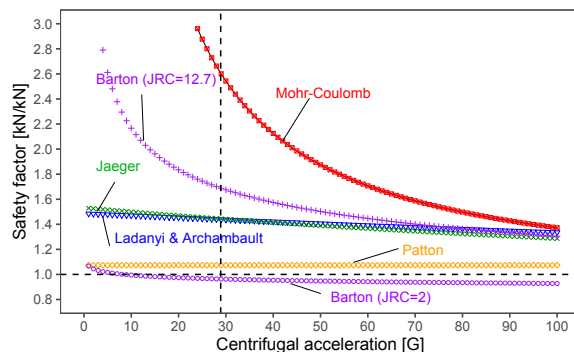


図 4 载荷遠心加速度と安全率の関係