

# 堆積軟岩における含水状態が モール・クーロン破壊基準に及ぼす影響

小砂子 優貴<sup>1\*</sup>・富樫 陽太<sup>2</sup>・畠山 健<sup>3</sup>・川之上 諒<sup>2</sup>・長田 昌彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>埼玉大学工学部環境社会デザイン学科 (〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

<sup>2</sup>埼玉大学大学院理工学研究科 (〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

<sup>3</sup>埼玉大学研究機構総合技術支援センター (〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

\*E-mail: y.kosunago.233@ms.saitama-u.ac.jp

岩盤斜面の安定性評価には、すべり線に作用するせん断応力の評価のため、何らかの破壊基準の設定が必須である。破壊基準の特定には拘束圧を変えた複数の三軸試験が必要だが、変動帯に位置する我が国においては、現場によって地質は様々で、全く同じ性質の供試体を三つ以上準備することが極めて難しい。従って、少ない試験数での破壊基準の特定が必要である。本研究では、簡易な圧裂試験と一軸圧縮試験を用いて、モール・クーロンの破壊基準を想定した粘着力とせん断抵抗角の変化を特定する方法を示す。これは 20cm 弱の様な力学的性質を示すボーリングコアがあれば適用可能である。本報告では、新第三紀の緑色凝灰岩である十和田石を用いて、この方法の妥当性を実験的に議論する。乾燥状態と飽和に近い湿潤状態の実験の結果、次のことがわかった。粘着力は乾燥状態に比べ、湿潤状態の供試体では小さくなったが、せん断抵抗角に大きな差は見られなかった。

**Key Words:** Mohr failure criteria, UCS, tensile strength, moisture content

## 1. はじめに

岩盤斜面の安定性評価には、すべり面に作用するせん断応力の評価のため、何らかの破壊基準の設定が必須である。岩石をはじめとする摩擦性材料の破壊基準の特定には、拘束圧を変えた複数の三軸試験が必要である。一方、変動帯に位置する我が国においては、現場によって地質は様々で、全く同じ性質の標準供試体（直径 50mm、高さ 100mm）を三つ以上準備することが難しい場面が多い。従って、少ない試験数での破壊基準の特定が必要である。

また、堆積岩の力学特性は含水量に応じて著しく変化することが昔から知られている。最新の研究では、新第三紀凝灰岩の乾燥変形実験により連続的な含水変化に伴って、異方性の主軸が回転し、間隙構造の変化が示唆されているが<sup>1)</sup>、そのメカニズムの詳細は明らかでない。特に、乾燥状態に比べ、湿潤状態の強度が著しく低い。長期間の豪雨により岩盤まで水分が浸透し、大規模崩壊に至る事例も確認されている。防災の観点からも、含水に伴う岩盤の強度変化を明らかにすることが欠かせない。

本研究では、簡易な圧裂試験と一軸圧縮試験を用いて、モール・クーロンの破壊基準を想定した粘着力とせん断抵抗角の変化を特定する方法を示す。これは 20cm

弱の様な力学的性質を示すボーリングコアがあれば適用可能である。本報告では、新第三紀の緑色凝灰岩である十和田石を用いて、この方法の妥当性を実験的に議論する。また、乾燥と湿潤状態の破壊基準のパラメータとしての強度特性の変化を議論する。

## 2. 一軸圧縮試験と圧裂試験による破壊基準の特定

端面摩擦の無い理想的な条件を考えると、一軸圧縮試験では、供試体の端面を様に圧縮するため供試体内の応力場は様になる<sup>2)</sup>。一方、圧裂試験では、円柱供試体を横に寝かせ、奥行き方向に線状の圧縮荷重を与えるため、供試体内の応力場は非様になる<sup>3)</sup>。図-1 のやや特殊な極座標系を考えると、圧裂試験における水平  $y$  方向応力の厳密解は次で得られている<sup>4)</sup>。

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi} \left( \frac{\sin^2 \theta \cos \theta}{r} + \frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} - \frac{1}{d} \right) \quad (1)$$

これは図-2 のように供試体断面内での応力場が非様に分布することを意味するので、圧裂試験は要素試験ではない。しかしながら、これまでの検討で、圧裂試験のピーク荷重から推定される引張り強さは、様な引張り応力場を想定する純引張り試験の引張り強さにほぼ等しい<sup>5)</sup>。このことを踏まえ、圧裂試験で純引張り



表-1 試験ケース

| Specimen | Dry or Wet | Test method | Specimen density $\rho_t(\text{Mg/m}^3)$ |
|----------|------------|-------------|------------------------------------------|
| 1        | Dry        | Uni axial   | 2.05                                     |
| 2        | Dry        | Uni axial   | 2.04                                     |
| 3        | Wet        | Uni axial   | 2.19                                     |
| 4        | Wet        | Uni axial   | 2.21                                     |
| 5        | Dry        | Brazilian   | 2.01                                     |
| 6        | Dry        | Brazilian   | 2.01                                     |
| 7        | Wet        | Brazilian   | 2.20                                     |



図-5 载荷試験の様子

それぞれの試験で、ロードセルと供試体の間には球座を設置したが、端面の摩擦をきる工夫はしていない。供試体の変形については、三軸式ロゼットゲージを設置して、载荷軸方向と直交方向のひずみを計測している。

#### 4. 試験結果

図-6 には、一軸圧縮試験の軸応力軸ひずみ関係を比較する。ピーク応力は、湿潤よりも乾燥のケースの方が大きい値を示す。これは既往の知見と合致する。一方で、剛性については、乾燥よりも湿潤のケースの方が大きいことが応力ひずみ曲線の傾きからわかる。図-7 には圧裂試験における荷重と軸ひずみ関係を示す。ピーク応力は、湿潤よりも乾燥のケースの方が大きい、剛性については、乾燥よりも湿潤のケースの方が著しく大きい。これは、ひずみゲージの接着が不十分だったためと考える。ここで得られた力学特性をまとめたものが表-2 である。なお、圧裂供試体の断面中心の軸方向と側方応力は、供試体の直径  $D$  と高さ  $L$  を用いて、応力の厳密解により  $6P/(\pi DL)$  と  $2P/(\pi DL)$  と計算でき<sup>4)</sup>、軸方向と側方ひずみを測定しているの、ヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  が圧裂試験からも評価できる。乾燥供試体では、圧裂試験のヤング率の方が小さい。こ

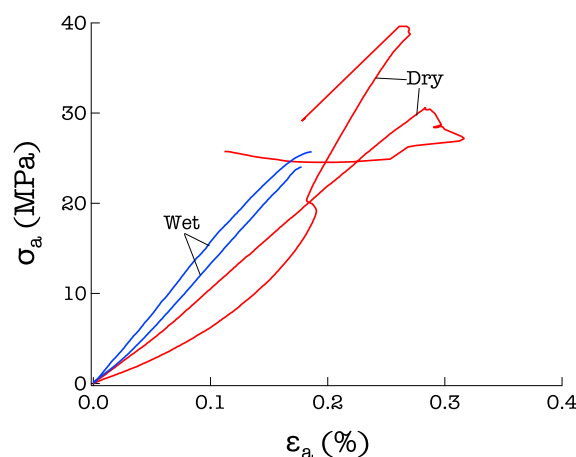


図-6 一軸圧縮試験の応力ひずみ関係

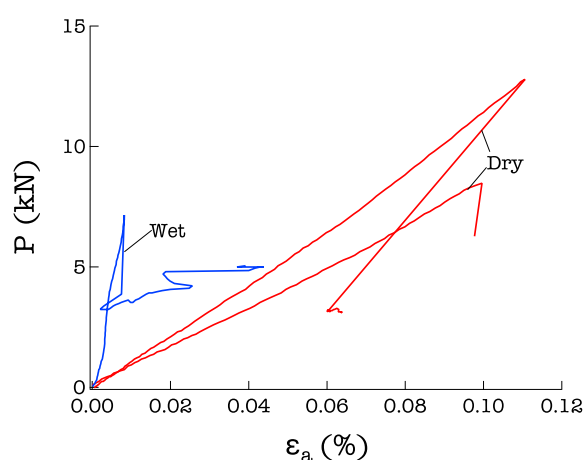


図-7 圧裂試験の荷重と軸ひずみの関係

表-2 十和田石の力学特性の比較

| Specimen | Young's Modulus $E$ (GPa) | Poisson ratio $\nu$ | $q_u$ (MPa) | $\sigma_t$ (MPa) |
|----------|---------------------------|---------------------|-------------|------------------|
| 1        | 10.8                      | 0.42                | 30.6        | —                |
| 2        | 10.5                      | 0.22                | 39.6        | —                |
| 3        | 15.8                      | 0.12                | 25.7        | —                |
| 4        | 13.1                      | 0.19                | 24.0        | —                |
| 5        | 6.24                      | 0.24                | —           | 2.16             |
| 6        | 8.95                      | 0.25                | —           | 3.28             |
| 7        | 76.2                      | 0.31                | —           | 1.89             |

れは、圧裂試験では点（線）载荷によって、载荷初期より端部から破壊が進行するためと考える。なお、Case 7 のヤング率が過大評価されている理由は、ひずみゲージの接着不良である。乾燥と湿潤のケースのそれぞれで、一軸圧縮強さ  $q_u$  に対して、引張り強さ  $\sigma_t$  がおよそ 1/10 の値を示しており、既往の知見とも合致する<sup>7)</sup>。

続いて、式 (2) に基づいて、モールクーロンの破壊基準のせん断抵抗角  $\phi$  と粘着力  $c$  を求めた結果を表-3 に示す。ここでは、 $q_u$  と  $\sigma_t$  にそれぞれ乾燥と湿潤状態における試験ケースの平均値を用いた。せん断抵抗角  $\phi$

表-3 一軸圧縮試験と圧裂試験により特定した  $c$  と  $\phi$

| Case | $\phi$<br>(degree) | Cohesion<br>$c$ (MPa) |
|------|--------------------|-----------------------|
| Dry  | 58.9               | 4.89                  |
| Wet  | 63.9               | 2.87                  |

は湿潤状態と乾燥状態で大差ないが、粘着力  $c$  は明確に湿潤のケースよりも乾燥のケースの方が大きい。なお、ここで特定したモールの応力円と破壊基準の関係は図-8 の通りである。

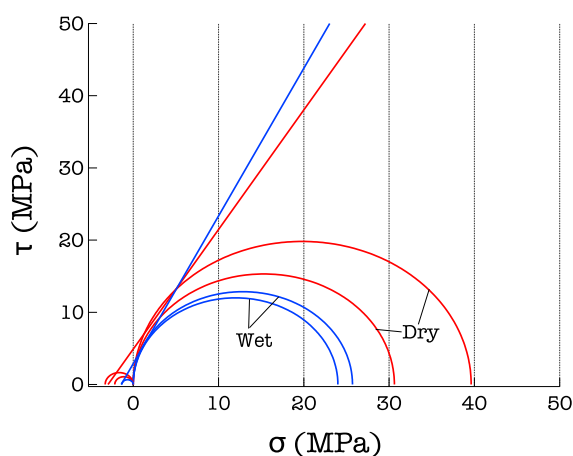


図-8  $q_u$  と  $\sigma_t$  を用いたモールの円と破壊基準の推定

## 5. まとめ

本研究では、簡易な圧裂試験と一軸圧縮試験を用いて、モール・クーロンの破壊基準を想定した粘着力とせん断抵抗角の変化を特定する方法を示した。新第三紀の緑色凝灰岩である十和田石を用い、乾燥と湿潤状態における強度・変形特性を比較した。強度特性は、湿潤よりも乾燥のケースの方が大きい、剛性については、乾燥よりも湿潤のケースの方が大きい。さらに、モール・クーロンの破壊基準におけるせん断抵抗角は乾燥状態と湿潤状態で大差ないが、粘着力は湿潤状態よりも乾燥状態の方が大きいことがわかった。

**謝辞:** 本研究は、NEXCO 東日本の技術研究助成により行われたものです。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Togashi Y, Imano T, Osada M, Hosoda K & Ogawa K: Principal strain rotation of anisotropic tuff due to continuous water-content variation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 138, 104646, 2021.
- 2) 地盤工学会: 岩石の一軸圧縮試験方法 (JGS2521-2009), 2009.
- 3) 地盤工学会: 圧裂による岩石の引張り強さ試験方法 (JGS2521-2009), 2009.
- 4) Timoshenko SP & Goodier JN: Theory of elasticity 3rd eds., McGrawHill, NewYork, 1970.
- 5) 木山英郎: 岩石の圧裂試験に関する研究, 京都大学博士論文, 1969.
- 6) 菅井裕一, 佐々木久郎, 松葉谷治, 中秀男, 田中富士夫: 比内緑色凝灰岩の pH 調整作用と微生物活性化効果に関する検討, 資源と素材, No.121, pp.513-520, 2005.
- 7) R. E. グッドマン: わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版会 1984.

## INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON MOHR-COULOMB FAILURE CRITERIA FOR SOFT SEDIMENTARY ROCK

Yuki KOSUNAGO, Yota TOGASHI, Ken HATAKEYAMA, Ryo KAWANOUE and Masahiko OSADA

To evaluate the stability of rock slopes, it is essential to set a failure criteria to evaluate the shear stress acting on the slip line. Multiple triaxial tests with different confining pressures are required to specify the criteria, but in Japan the geology varies depending on the site, and it is extremely difficult to prepare three specimens with exactly the same properties. In this study, we show a method to identify changes in cohesion and shear resistance angle assuming the Mohr-Coulomb failure criteria by using a Brazilian test and a uniaxial compression test. In this report, The experiments in dry state and a wet state demonstrated that cohesion was smaller in the wet than in the dry.