

ベレア砂岩の不飽和力学特性の実験的検討

埼玉大学工学部環境社会デザイン学科	正会員	○小砂子	優貴
埼玉大学大学院理工学研究科	正会員	富樫	陽太
埼玉大学研究機構総合技術支援センター	非会員	畠山	健
埼玉大学大学院理工学研究科	非会員	川之上	諒
埼玉大学大学院理工学研究科	正会員	長田	昌彦

1. 研究の背景と目的

2011年に紀伊半島で発生した土砂災害のように、深層岩盤の崩壊によって起こる大規模災害の事例が多数報告されている。これは、降雨が深層岩盤まで浸透し強度低下したため発生したと考えられており、その原因である「堆積軟岩の含水による強度変化」の要因は、①粘土鉱物の膨潤、②間隙構造の変化、③サクシオンなどが考えられている。また、岩盤の不均質な性質による含水に伴う強度変化は、岩盤力学の極めて難しい課題とされているため、含水状態が変化する岩盤の不飽和強度特性が明らかにできれば、大規模崩壊の発生を未然に検知することができる可能性がある。本研究では、含水による強度変化の影響が顕著な堆積軟岩を対象として不飽和強度特性を特定することを目的とする。

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要である。本研究では、簡易な圧裂引張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、不飽和状態における堆積軟岩の粘着力 (c) とせん断抵抗角 (ϕ) の変化を特定していく。

2. 一軸圧縮試験と圧裂引張試験による破壊基準の特定

一軸圧縮試験は要素試験であり、一軸圧縮強さ (q_u) より、半径 $q_u/2$ のモール円が圧縮側に広がる。一方、圧裂引張試験は非要素試験であるが、得られる引張り強さ (σ_t) は、純引張り試験 (要素試験) にほとんど等しいらしい¹⁾。そのため、破壊時には引張り方向に純引張り相当のモール円が広がる。想定されるモールの応力円の幾何的な条件から粘着力 (c) とせん断抵抗角 (ϕ) を次式で得られる。

$$\phi = \arcsin\left(\frac{q_u - \sigma_t}{q_u + \sigma_t}\right) \quad c = \frac{q_u}{2\cos\phi}(1 - \sin\phi) \quad (1)$$

3. 供試体と試験条件

供試体に用いる試料は、石炭紀のベレア砂岩 (アメリカ) を用いる。ベレア砂岩は淘汰の良い石英粒子が主体の砂岩で、かなり硬い岩である。自然含水

比 $w_t = 0.034\%$ 、土粒子密度 $\rho_s = 2.59 \text{ g/cm}^3$ 、間隙率 $n = 12.8\%$ である。円柱供試体の寸法は、一軸圧縮試験で直径50mm、高さ100mm、圧裂引張試験で直径50mm、高さ50mmとした。供試体は、ブロックをコアリングしてカットし、端面を極力平行になるように研磨している。自然状態の供試体を、シリカゲルを敷き詰めたゲージの中に置き、乾燥状態にした供試体の質量・体積を測定。その後、質量変化が認められなくなるまで浸水させ、質量を計測する。飽和状態の岩石供試体を徐々に気乾させ、電子天秤で測定した質量変化から含水量の連続的な変化を特定する。今回研究では、飽和度100%から75, 50, 25, 0%のデータを計測する。

供試体の変形については、三軸式ロゼットゲージを一軸圧縮試験の供試体には側面に120°間隔で3箇所貼り付け、圧裂引張試験の供試体には底面に貼り付けて載荷軸方向と直交方向のひずみを計測している。

4. 実験結果及び考察

図1(左)に一軸圧縮試験の応力軸ひずみ関係、図1(右)に圧裂引張試験の荷重と軸ひずみ関係を示す。ピーク応力の値は、飽和度が低いほど大きい。剛性については、概ね飽和度が低いほど大きいことが曲線の傾きからわかる。またどちらの試験においても飽和度100%のケースで大きな値を示すものがある。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1である。同様に、飽和度が大きいほど強度特性 (一軸圧縮強さ・引張り強さ) が小さくなる。また、飽和度とポアソン比の関係からは明瞭な相関は見られない。特に圧裂引張試験のポアソン比については、一軸圧縮試験よりもバラつきが多い。これは、圧裂引張試験が非要素試験なので進行性破壊の影響である。各飽和度のケースで、一軸圧縮強さに対して、引張り強さがおおよそ1/10~1/15の値を示しており、既往の研究とも合致する³⁾。

せん断抵抗角については、飽和度が変化しても大差はないが、粘着力は明確に飽和度が低いケースの方が大きい。

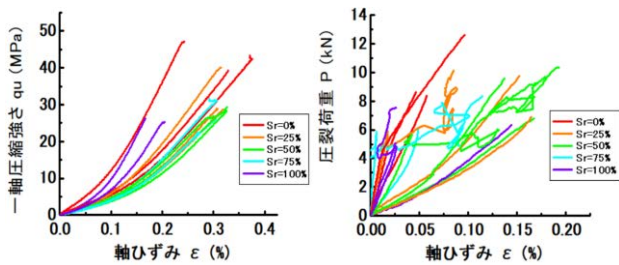


図1 一軸圧縮試験の応力ひずみ関係(左)
圧裂引張試験の荷重と軸ひずみ関係(右)

表1 ベレア砂岩の力学特性の比較

S_r (%)	q_u (MPa)	σ_t (MPa)	c (MPa)	ϕ (deg)
0	43.22	2.494	5.19	62.98
25	32.51	2.263	4.29	60.44
50	28.17	2.260	3.99	58.37
75	26.65	1.835	3.50	60.59
100	25.81	1.595	3.21	62.08

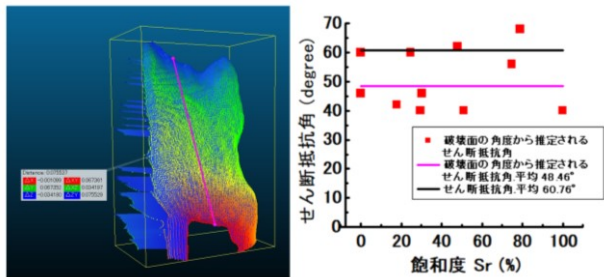


図2 せん断抵抗角の妥当性の検討

図2(左)に一軸圧縮試験後の破壊面の様子、図2(右)に破壊面の角度から推定できるせん断抵抗角を示して提案方法の妥当性を検討している。実験値と比較すると、ややせん断抵抗角は過大評価と考えられるが、本研究の妥当性を十分に示している。

5. ベレア砂岩の水分特性曲線のモデル化への土質力学理論の応用

従って、ベレア砂岩における含水の影響は平均応力の変化だけで記述できる。また、粘土鉱物の膨潤は無く、間隙構造の変化が小さいと仮定すれば、ベレア砂岩の不飽和力学特性はサクシジョンの変化 (Bishopの有効応力⁴⁾ (式2)) を不飽和ケースのモール円に寄与するだけで表現可能である。

$$\sigma' = \sigma - u_a + X(u_a - u_w) \quad (2)$$

ここで、 σ' : 有効応力, σ : 全応力, u_a : 間隙空気圧, u_w : 間隙水圧, X : 実験パラメータ (0~1) である。

実験の結果から、飽和の破壊基準を設定し、Bishop

キーワード 堆積軟岩, 不飽和, モール・クーロンの破壊基準, サクシジョン, 水分特性曲線
連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 TEL:048-858-3571

の有効応力式を用いて、等方的なサクシジョンを求め、水分特性曲線にBrooks and Coleyモデル⁵⁾を想定すれば、今回の実験結果を最小二乗回帰して水分特性曲線が次式で特定できる (図3)。

$$S_s = \frac{q_u}{2} \sqrt{\tan\phi_{wet}^2 + 1 - c_{wet}} + \frac{q_u}{2} \quad (3)$$

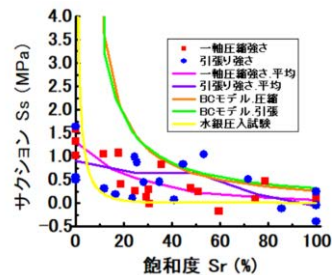


図3 BC式に基づいたサクシジョン S_s の試行結果

6. まとめ

石英粒子が主体のベレア砂岩を用いて、乾燥から湿潤まで各飽和度での強度の比較を行った。ベレア砂岩は、含水によって粘着力は小さくなるが、せん断抵抗角に差は見られない。

粘土鉱物や間隙構造の変化がないと仮定し、Brooks and Coleyモデルを想定した保水性曲線を求めた。この結果は既往検討と比較して同程度のサクシジョンと飽和度の関係を示す。従って、ベレア砂岩の不飽和強度特性は、Bishopの有効応力で規定可能である。

参考文献

- 1) 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
- 2) Timoshenko S.P. and Goodier J.N. Theory of elasticity. 3rd eds. Mc Graw Hill, New York, 1970.
- 3) R. E. グッドマン：わかりやすい岩盤力学，鹿島出版会 1984.
- 4) Bishop, A.W. and G.E. Blight : Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, Geotechnique, 13. 3, 177~197, 1963.
- 5) Brooks, R., and T. Corey. "Hydraulic properties of porous media." Colorado State University 24 (1964).