

砂岩の強度特性と破壊規準

STRENGTH PROPERTIES AND FAILURE CRITERION OF SANDSTONE

落合 英俊*・林 重徳**・棚橋 由彦***

By Hidetoshi OCHIAI, Shigenori HAYASHI and Yoshihiko TANABASHI

Strength properties of sandstone prepared in cylindrical specimens with different moisture contents were studied using triaxial compression test under confining pressure in the range of 0 to 80 MPa. It is shown that the relations between strength and confining pressure are generally non-linear, and the non-linearity depends on the moisture content of specimen. In order to express these strength properties of sandstone, Lade's failure criterion for soil with curved failure surfaces was extended for including the tensile strength in the criterion and was applied to the test results. As the results, it may be concluded that this failure criterion is available for rock as well as for soil when the value of material parameter related to tensile strength is determined from the uniaxial tensile or compressive strength.

1. はじめに

地盤材料としての土と岩石の破壊規準については古くから実験や理論による研究が数多くなされているが、土と岩石に対してそれぞれ異なる規準式が用いられることが多い。これは、①破壊時のモール応力円に対する包絡線が土では線形的であるのに対して、岩石では強い非線形性を示すこと、②岩石では引張強度を無視できないこと、によるものと考えられる。しかし、現象論的には土と岩石の力学挙動は定性的に何ら異なることはないといわれており¹⁾、上記①、②を考慮した統一的な破壊規準式の確立が望まれる。

土の破壊規準には破壊応力と拘束応力の関係が線形となるもの、すなわち三次元主応力空間における破壊面の母線が直線となる規準が多い。Mohr-Coulombの規準をはじめ、松岡・中井²⁾、橋口³⁾の規準などはその例であり、曲線状破壊包絡線を示す材料には適用できない。これらに対して、破壊面の母線が曲線をなす規準としてLadeの式⁴⁾があり、一次および三次の応力不変量で表

わされている。一方、岩石に対してはGriffithの規準に代表されるように破壊応力と拘束応力の関係を非線形表示した式が多い。また最近、岩石の破壊規準として、足立ら¹⁾、吉中ら⁵⁾はべき関数形の規準式の有用性を強調し、Hoek⁶⁾は放物線関数の実験式を提示している。特に、平均有効主応力と最大せん断応力を拘束応力がゼロのときのそれらの値で除して無次元化し、べき関数表示した吉中らの規準式は広範囲の岩石に対してその強度をよく表わすことができる。しかし、関数形の性質上、砂のような非粘性材料に対する適用は難しい。

本文は、地盤材料としての土と岩石に対する統一的な破壊規準を求める試みとして、土に対して提案され、また、式中のパラメーターによって破壊面の母線の曲率が変わるLadeの式を引張強度を有する岩石に適用できるように拡張し、拘束応力0~80 MPaの範囲で行った砂岩の軸対称三軸圧縮試験結果との比較により、その適用性を検討したものである。

2. 砂岩の強度特性

(1) 供試体と試験方法

試験に用いた砂岩は長崎県仮屋名の古第三紀層より採取した白色細粒砂岩で、粉碎試料の比重は2.65である。供試体は直径50 mm、高さ約120 mmの円柱供試体であ

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学助手 工学部水工土木学科(同上)

*** 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科
(〒852 長崎市文教町 1-14)

り、ブロックサンプルから堆積面に対して直角方向にコアドリルを用いて切り出して作成した。その乾燥密度は2.12~2.17 t/m³である。試験は水浸、吸水によって含水状態を調整した供試体について（供試体中の含水比分布の均一性は確認していない）、毎分約0.2 mmの変位速度で、一軸圧縮試験および排水（気）状態での軸対称三軸圧縮試験を行った。なお、間隙水圧の測定は行っておらず、以下、測定応力をそのまま用いている。

(2) 砂岩の強度特性

一軸圧縮試験では最大圧縮荷重点、三軸圧縮試験では軸差応力が最大値をとる点を破壊時とみなした。

一軸圧縮強度 σ_c と飽和度 S_r の関係は図-1 に示すとおりであり、一軸圧縮強度は乾燥状態から湿潤状態になると急激に小さくなり、飽和度の増加につれて指数あるいは双曲線関数的に減少する。なお、参考のために行った圧裂引張強度についても同様の傾向がみられた。

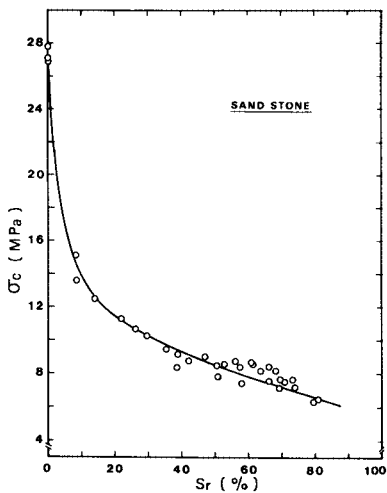


図-1 一軸圧縮強度と飽和度の関係

図-2 は飽和度 $S_r=0\%$ 、 60% 、 70% 、 80% の場合の一軸および三軸圧縮試験における破壊時のモール応力円とその包絡線である。砂岩の強度は三軸応力状態においても含水量の影響を受け、乾燥状態における強度は湿潤状態における値よりも常に大きく、そして両状態における強度の差は拘束応力の増加につれてわずかに大きくなる傾向がある。また、すべての拘束応力において飽和度が高くなるほど強度は小さくなる。モール応力円の包絡線はいずれの飽和度においても強い非線形性を示し、三次元主応力空間における破壊面の母線は曲線となり、その曲率は飽和度が低いほど大きくなる。このような非線形の強度特性を示す砂岩の破壊規準式として、土に対して提案されている Lade の式の適用を試み、その妥当

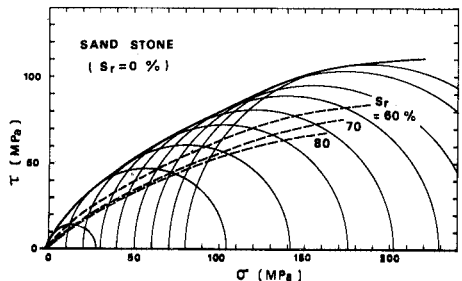
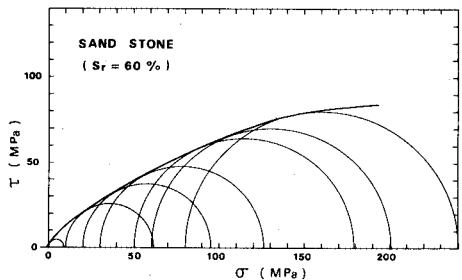
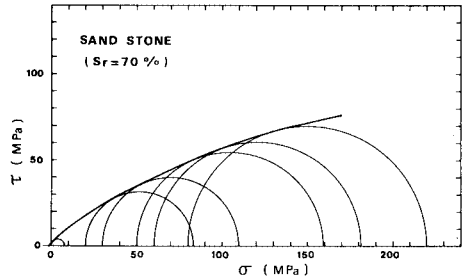
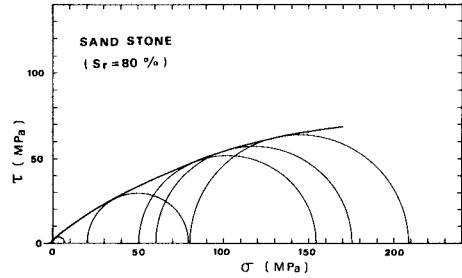


図-2 破壊時のモール応力円と包絡線

性を検討する。

3. Lade の破壊規準と試験結果への適用

(1) Lade の破壊規準

Lade の破壊規準式は、土の強度が平均主応力と中間主応力の影響を受けることを考慮して求められた一種の実験式であり、一次および三次の応力不変量 I_1 、 I_3 および応力と同じ単位で表わした大気圧 p_a を用いて次式で表わされる⁴⁾。

$$(I_1^3/I_3 - 27) \cdot (I_1/p_a)^m = \eta \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \dots\dots\dots (2)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \dots\dots\dots (3)$$

m と η_1 は材料パラメーターであり、標準的な軸対称三軸圧縮試験 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 結果からのみ決定される。すなわち、破壊時の $(I_3^2/I_1 - 27)$ と (p_a/I_1) の値を両対数紙上にプロットして直線表示し、その直線の勾配として m の値を、 $(p_a/I_1) = 1$ における切片の値として η_1 の値が求められる。三次元主応力空間における破壊面の形状はパラメーター m と η_1 の値によって変わる。破壊面の頂点は応力軸の原点にあり、その頂点角は η_1 の値とともに大きくなる。また、破壊面は静水圧軸に向かって常に凸形をなしており、その母線の曲率は m の値によって変わる。 $m \geq 0$ であり、 $m = 0$ の場合には Mohr-Coulomb の規準などと同様に破壊面の母線は直線となり、 $m > 0$ では m の値とともに母線の曲率は大きくなる。

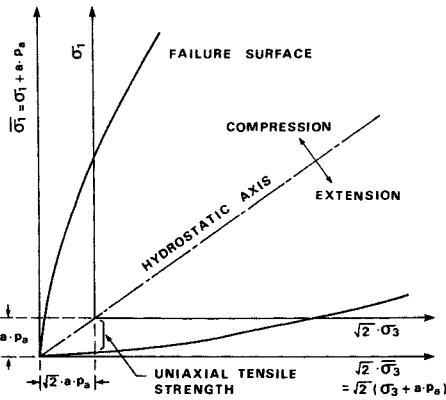


図-3 破壊規準式に引張強度を考慮するための主応力空間の置換

式 (1) による破壊面の頂点は応力軸の原点にあるので、引張強度を有する材料に対しては図-3 に示すように静水圧軸に沿って主応力空間の置換を行う⁷⁾。すなわち、ある一定応力 $a \cdot p_a$ の値を加えた主応力を用いて不変量 I_1, I_3 を算定し、式 (1) に代入する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &= \sigma_1 + a \cdot p_a \\ \bar{\sigma}_2 &= \sigma_2 + a \cdot p_a \\ \bar{\sigma}_3 &= \sigma_3 + a \cdot p_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 a は図-3 から類推されるように、材料の引張強度に関係した無次元のパラメーターである。

(2) 試験結果への適用

引張強度を考慮した式 (1) は 3 個の材料パラメーター a, m, η_1 を含んでいるが、それらの値を決めるにはまず a の値を推定しなければならない。図-3 から知られるように、 $a \cdot p_a$ の値は一軸引張強度よりもわずかに大きな値となるということに基づき、圧裂引張試験

結果を参考にして、 $\log(I_3^2/I_1 - 27)$ と $\log(p_a/I_1)$ の関係が最も適切な直線となるように a の値を定めた。決定した a の値と次式で算定した圧裂引張強度 σ_t との関係は図-4 に示すとおりである。

$$\sigma_t = 2P/\pi D l \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 P は最大圧縮荷重、 D, l は円筒供試体の直径および長さである。本研究で用いた砂岩の a 値は、飽和度によって若干のばらつきはあるが、圧裂引張強度(一軸引張強度とほぼ等しいと考えられる) よりも約 3% 程度大きな値となることがわかる。また、岩石の一軸引張強度は一軸圧縮強度と関係づけられることが多く、 a の値は一軸圧縮強度 σ_c を用いて表示することもできると考えられる。本砂岩に対しては、次のべき関数形式で表わせることがわかった (図省略)。

$$a = 0.50(\sigma_c/p_a)^{0.55}$$

a の値が決定できれば他の材料パラメーター m, η_1 は前述の方法によって求められ、その結果は図-5 に示すとおりである (m, η_1 の値は最小二乗法によって定めた)。飽和度が低いほど、 m, η_1 の値はともに大きくなる。すなわち、飽和度が低いほど主応力空間における破壊面の母線の曲率は大きくなり、また破壊面の頂点角も大きくなる。

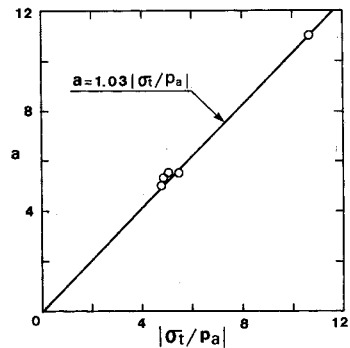


図-4 パラメーター a と圧裂引張強度 σ_t との関係

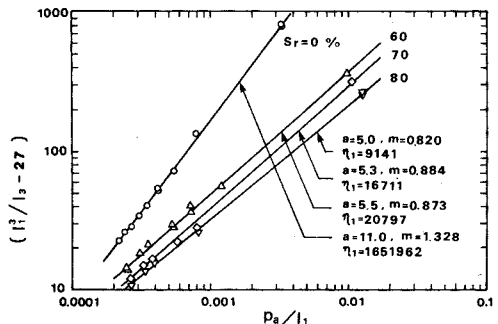


図-5 材料パラメーターの決定

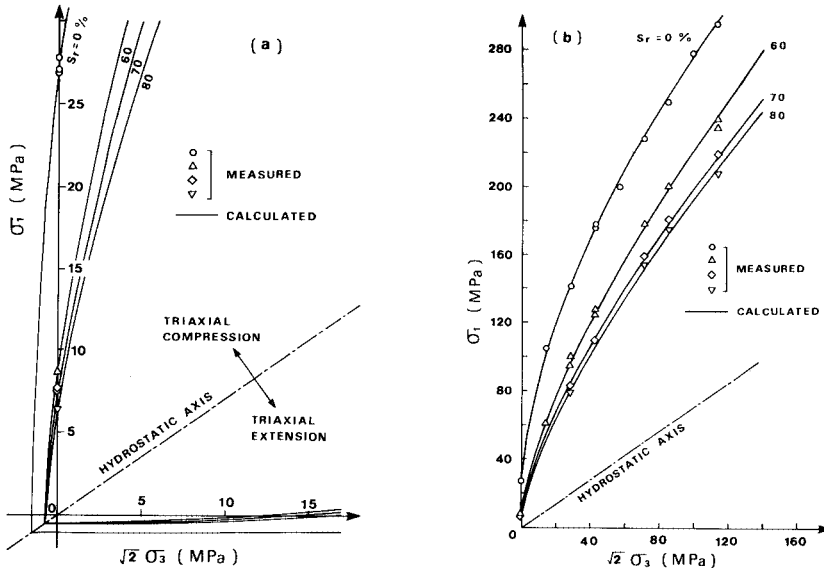


図-6 レンドリック面における実験結果と計算値の比較((a) 原点付近, (b) 全体)

図-6 はレンドリック面における実験結果と式 (1) の破壊規準式による計算値の比較で, (a) は原点付近, (b) は全体の様子である. 計算結果は広範囲の拘束応力下における非線形な実験結果とよく一致しており, 破壊面の母線の曲率や破壊面の頂点角が飽和度によって変わる様子が式 (1) によってよく表現できることがわかる. したがって, Lade の破壊規準式は材料の引張強度に関係したパラメーター a の値を正しく評価できれば, 岩石に対する破壊規準式としても十分な精度で適用できるといえる.

4. ま と め

三軸応力下における砂岩の強度は拘束応力に対して非線形な関係にあり, その非線形性は含水量によって異なる. このような強度特性を示す砂岩の破壊規準式として土に対して提案されている Lade の式の適用を試み, その妥当性を検証した. Lade の式は応力の不変量で表示された一般的な破壊規準式であるが, 実験式であるために理論的なあいまいさを有する反面, 種々の条件の影響を受ける実験結果に柔軟に対応できる利点がある. この規準式は引張強度を有する岩石に対しても新たに導入されたパラメーターの値を正しく評価できれば十分な精度

で適用でき, 土と岩石に対する共通の破壊規準式として用いることができる. なお, 中間主応力の影響に関する実験的検証が今後の課題として残っている.

参 考 文 献

- 1) 足立紀尚・小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊規準, 土木学会論文報告集, 第 295 号, pp. 51~63, 1980.
- 2) 松岡 元・中井照夫：Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stress, 土木学会論文報告集, No. 232, pp. 59~70, 1974.
- 3) 橋口公一：摩擦性塑性体に関する降伏理論, 土木学会論文報告集, 第 199 号, pp. 57~66, 1972.
- 4) Lade, P.V. : Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces, Int. Jour. of Solids and Structures, Vol. 13, pp. 1019~1035, 1977.
- 5) Yoshinaka, R. and Yamabe, T. : Strength criterion of rocks, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 4, pp. 113~126, 1980.
- 6) Hoek, K. : Strength of jointed rock masses, Géotechnique, Vol. 33, No. 3, pp. 187~223, 1983.
- 7) Lade, P.V. : Three-parameter failure criterion for concrete, Proc. of ASCE, Vol. 108, No. EM 5, pp. 850~863, 1982.

(1984. 4. 19・受付)