

# 堆積軟岩の強度特性と破壊規準

京都大学防災研究所

正会員 足立紀尚

Univ. of Western Ontario

小川豊和

## 1. はじめに

軟岩を基礎岩盤とする橋梁や軟岩中のトンネル掘削などの土木構造物の建設が計画あるいは実施されるにが増加して、軟岩に関する研究が活発化している。筆者らは理想的堆積軟岩として多孔質凝灰岩である大谷石を選び、実験を行うことにより、軟岩の力学特性の解明に努め、その弾・塑性挙動やダイレイタンスー生、および時間依存性について論じながら、さらに硬岩はもとより土質材料と定性的にはよく似た同様の力学挙動を示すことも確かである。<sup>1), 2)</sup>

本研究はこれまでに同様に大谷石を用い、拘束圧も  $0 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$  の範囲で変え、三軸圧縮試験を行い、その力学特性を特に強度について示し最大ひずみ・残留強度双方に対する破壊規準を提議する。これは強度が拘束圧(直応力)と非線形関係にあるため Mohr-Coulomb 型(粘着力  $C$ 、内部摩擦角  $\phi$  に  $\sigma_3$ ) の破壊規準では表現困難の岩石材料に対して Hobbs<sup>3)</sup> が提唱しているものに、応力とひずみとの関係を付加することにより、軟岩の破壊規準として拡張したものである。

## 2. 試料と実験方法

試料は多孔質凝灰岩である大谷石で、表-1にその物理諸量を与えておく。また、試料はすべて水で飽和させたものを用いた。実験は所定の側圧  $\sigma_3$  で等方圧密した後側圧を一定に保ち、排水ならびに非排水条件でひずみ制御による。用いたせん断速度  $\dot{\epsilon}$  (軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_1$ ) は  $\dot{\epsilon}_1 = 0.025\%/min$  である。なお、実験はすべて  $3 \text{ kg/cm}^2$  のイシヤル・バックプレッシャーを適用した。

表-1

|               |       |
|---------------|-------|
| 間隙比 $e$       | 0.72  |
| 間隙率 $n$       | 0.42  |
| 乾燥密度 $\rho_d$ | 1.44  |
| 湿潤密度 $\rho_w$ | 1.86  |
| 含水比 $w$       | 29.2% |
| 粒子比重 $G_s$    | 2.48  |

## 3. 排水試験による応力-ひずみ関係

ここには排水試験結果のみを与える。圧密排水試験は  $\sigma_3 = 0 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$  の範囲で側圧で行った。図-1はその結果を示す軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  と偏差ひずみ  $\epsilon_1$  ( $\epsilon_1 = \epsilon_1 - \nu/3$ , ここで  $\epsilon_1$ : 軸ひずみ,  $\nu$ : 体積ひずみ) との関係である。また、そのせん断過程における体積変化の様子を図-2に体積ひずみ  $\nu$  と偏差ひずみの関係として示している。これらの結果得られる結論は

- (1) ある拘束圧(この軟岩に対しては  $\sigma_3 = 20 \text{ kg/cm}^2$ ) 以下では過圧密土と同様の挙動を示す。すなわち、せん断するにしかかると応力は増加して最大強度に至るが、その後応力は減少し最終的には残留強度状態に達する。このせん断過程において、体積は初期に圧縮を示すが、最大強度に至る直前から膨張を始めるが、残留強度状態に近づくにつれて次第に膨張変化の減少

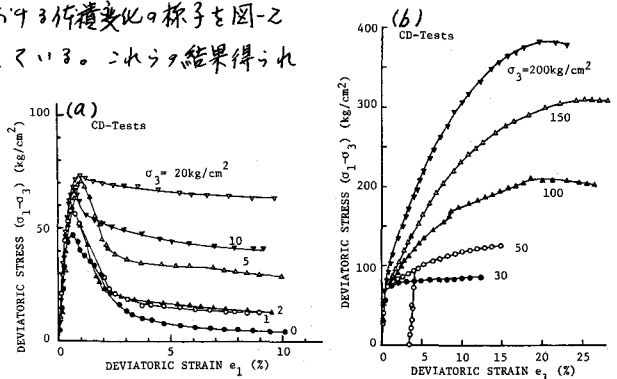


図-1. 軸差応力-偏差ひずみ関係, (a)  $\sigma_3 = 0 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ , (b)  $\sigma_3 = 30 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$

する。

- (2). 一方、その拘束圧以上では軽く過圧密されるが、正規圧密状態にある土と同様の挙動を示す。すなわち、せん断とともに応力は単調に増大し最大強度に達するが、それは残留強度状態でもある。このせん断過程においては何種圧縮が生じ、最大=残留強度状態においてはやはり何種変化はそれ以上生じはく。すなわち、図-2(a), (c)で明らかである、 $\sigma_3 = 100 \text{ kg/cm}^2$  以上では  $v \sim e_1$  関係は拘束圧の影響を受かず一義的関係となり、正規圧密土の変形挙動とまったく同じである。

- (3). 最大強度、残留強度双方とも拘束圧を増大にともなって増加する。

- (4). 残留強度状態は有効応力の何種も変化せず、単にせん断変形が継続する状態である。

- (5). 弾性変形を表わすせん断弾性

係数  $G$  は図-1の応力-ひずみ関係の初期の直線部から  $G = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3e_1$  とし求められる。この材料に対しては  $G = 2.5 \sim 6.5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  と拘束圧とともに大きくなる傾向にある。一方、何種弾性係数  $K$  はこの種々三軸試験 ( $\sigma_3$  を一定、軸方向応力  $\sigma_1$  を増加) における軸方向応力  $\sigma_1$  の  $1/3$  に  $G$  平均有効応力  $\sigma_m$  が増加するに等しいから  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  と何種ひずみ  $e_1$  の図を求め、やはり初期の直線部から  $K = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3e_1$  とし決定し、その値は  $K = 3 \sim 8 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  がこの材料に対して求まっている。なお、ヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  は  $G, K$  とそれぞれ  $E = 9KG / (3K + G)$ ,  $\nu = (3K - 2G) / (2(3K + G))$  の関係にあるからこれから計算できる。ところでポアソン比  $\nu$  はその定義から  $2(1 + \nu) / 3(1 - 2\nu) = e_1 / v$  の関係にあるから、図-2(b), (c)に示す  $v \sim e_1$  関係の初期の比例部分で  $e_1 / v = 1$  が成立するので、それを用いると  $\nu = 1/8 = 0.125$  となり、先の関係式から求まる値の平均値にほぼ等しい。

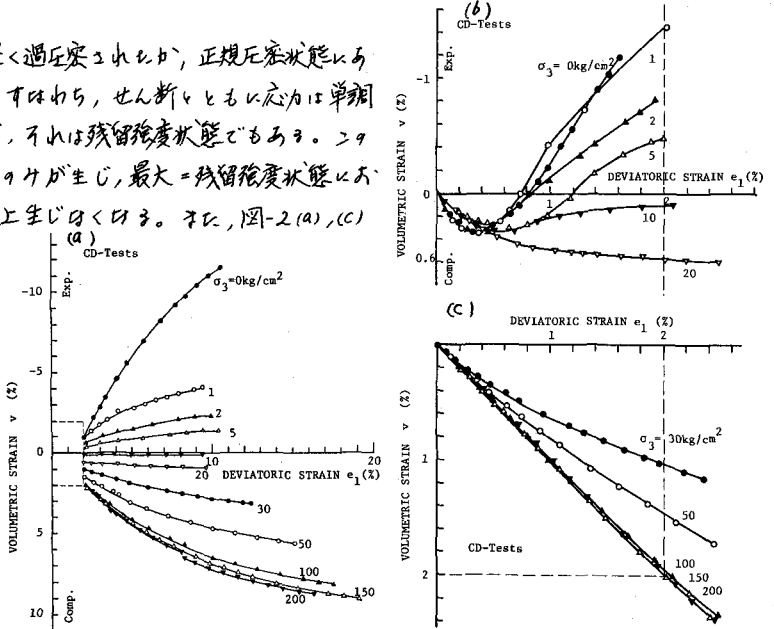


図-2. 何種ひずみ-偏差ひずみ関係、(a)ひずみが大きいときの関係、(b). 低拘束圧における初期段階 (c). 高拘束圧における初期段階

#### 4. 有効応力表示

このような飽和軟弱でも土質力学で用いる有効応力が有効であることを一例をもつて示しておく。図-3は最大ひずみにおける残留強度と拘束圧との関係を全応力と有効応力によって示した比較図である。図中の白印は排水試験結果であるが双方で表示される差は小さい。ところが、黒印で示す非排水試験結果は差が明らかである。すなわち、図-3(b)のように有効応力によれば試験条件にかかわらず強度と拘束圧の関係は一義的に決定される。そこで、図-3(a)は次のように

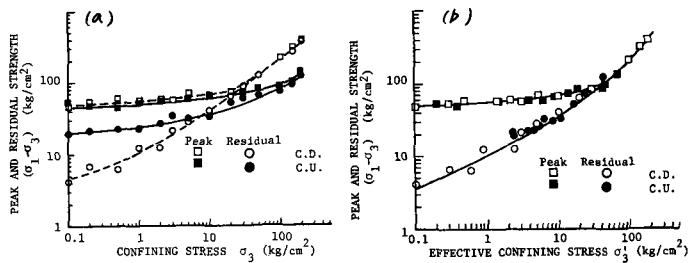


図-3 最大ひずみにおける残留強度と拘束圧との関係  
(a)全応力表示、(b)有効応力表示

読みとれる。同一の拘束圧 $\sigma_3$ でせん断を行なうとき、低拘束圧下においては何種が膨張するから非排水条件であるが、高拘束圧下では、平均有効応力は増加するに連れて、残留強度は排水条件のものより大きく値を示している。一方、高拘束圧では逆に逆のことが生じている。このことは拘束圧が小さいとき、軟岩の強度は非排水条件の満足した短期強度が排水条件と比して長期強度より大きくなることを意味しているので、このような条件にあるときには設計に用いる強度は排水試験によるものを用いることが大切であることを示している。

## 5. せん断過程の有効応力からみた何種変化経路

せん断過程における有効応力経路と平均有効応力-何種 $\sigma_3$ の関係を図-4、図-5に低拘束圧と高拘束圧に分けて示す。以下に示す。

まず、図-4(a)、図-5(a)の細い実線は非排水試験時の、より細い実線は排水試験時の有効応力経路を示している。低拘束圧下では、せん断によって、図-4(a)に示す最大強度 $\sigma_1$ に達した後、 $\sigma_1$ が軟化により応力は次第に減少して最終的には $\sigma_1$ で表わす残留強度状態に達する。この間、排水条件にあっては体積膨張が生ずる様子も図-4(b)に示してある。

さて、高拘束圧下では図-5に示すように最大=残留強度となり、排水条件のもとでは何種 $\sigma_3$ の

縮が生ずるが、最大=残留強度状態において、平均有効応力 $\sigma_m'$ と何種 $\sigma_3$ の間に一義的な関係があることを示している。なお、この材料に対して、最大=残留強度とすることが $\sigma_m' = 50 \text{ kg/cm}^2$ 以上においてである。図-4、図-5に示す太い実線は残留から高拘束圧下では残留=最大強度線を示し、太い実線は低拘束圧下での最大強度線を示している。このように最大強度はもとより、残留強度も有効拘束圧 $\sigma_m'$ と非線形関係にあるため、Mohr-Coulomb型の破壊規準を表わすことができず、よほど近似的に強度定数 $c'$ 、 $\phi'$ と決定して設計に用いると危険側の結果を生ずることになる。そこでよりよい破壊規準は何かということになる。

なお、図-5(b)中の太い実線は等圧状態時の応力-何種 $\sigma_3$ の関係を示している。

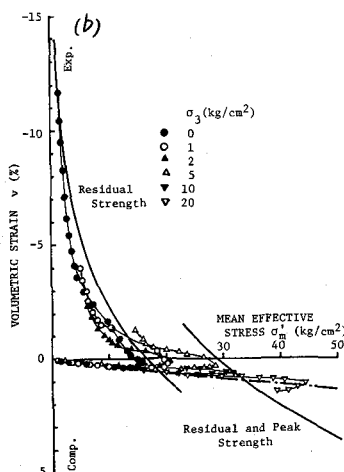
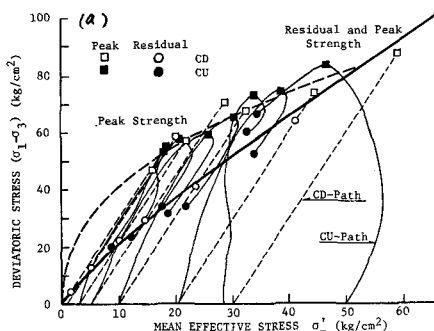


図-4. 低拘束圧下における(a)有効応力経路、(b)平均有効応力-何種 $\sigma_3$ の関係

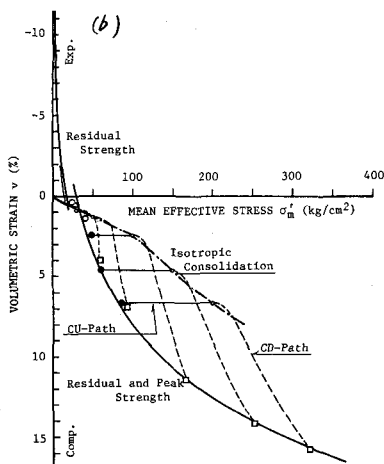
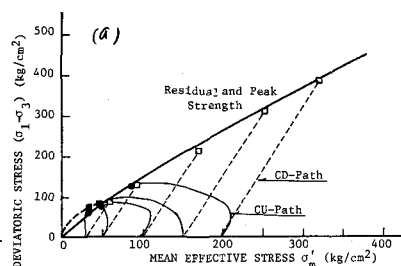


図-5. 高拘束圧下における(a)有効応力経路、(b)平均有効応力-何種 $\sigma_3$ の関係

## 6. 破壊規準

最大主応力 $\sigma_1$ 、残留強度と平均有効応力 $\sigma'_m$ の関係と平均有効応力 $\sigma'_m$ と $\sigma_1$ の関係を半対数紙上に求めたものが図-6、図-7である。

まず、最大強度に対しては $\sigma'_m \leq 50 \text{ kg/cm}^2$ で図-6(a)の直線で表わす直線関係があるから次式で表わされる。

$$(\sigma/\sigma')_{\text{peak}} = \alpha_p (\sigma'/\sigma'_0)^{\beta_p} \quad (1)$$

$\sigma_1$ と $\sigma'_m$ の関係は図-6(b)のように等方圧状態線上にほぼあるから

$$v_{\text{peak}} = C_s \log(\sigma/\sigma') \quad (2)$$

また、 $\sigma'_m > 50 \text{ kg/cm}^2$ では強度、応力変化ともに次に論ずる残留強度状態に等しいから

$$(\sigma/\sigma')_{\text{peak}} = (\sigma/\sigma')_{\text{residual}} \quad (3)$$

$$v_{\text{peak}} = v_{\text{residual}} \quad (4)$$

となる。

残留強度に対しては応力関係は図-7(a)のようにすべて $\sigma'_m$ 範囲において $\sigma_1$ の直線で表わされることばかりである。すなわち、

$$(\sigma/\sigma')_{\text{residual}} = \alpha_R (\sigma'/\sigma'_0)^{\beta_R} \quad (5)$$

ところが、応力変化 $\sigma_1$ は図-7(b)のように拘束圧 $\sigma_3$ の大小によって異なる次の2つの式で表わされる。

$$v_{\text{residual}} = C_R \log(\sigma'/\sigma'_0) - 12.3 \quad (\%) \quad (6)$$

$$v_{\text{residual}} = C_c \log(\sigma'/\sigma'_0) - 22.1 \quad (\%)$$

以上が $\sigma_1$ に提唱する破壊規準であるが、(1)、(5)式に含まれる定数 $\alpha$ は $\sigma'_0 = \sigma'_m = 1 \text{ kg/cm}^2$ における強度比 $\sigma/\sigma'_0$ を意味し、 $\beta$ は拘束圧 $\sigma_3$ によって変化する内部摩擦角と関係づけられるものである。すなわち、 $\beta = 1$ の場合には $\sigma$ と $\sigma'$ は線形関係にあって、 $\sigma_1$ と $\sigma'_m$ の(1)、(5)式はMohr-Coulombの破壊規準に一致する。

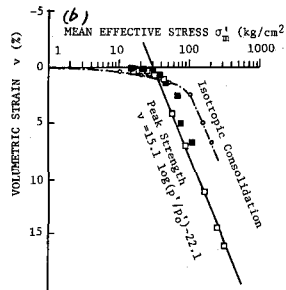
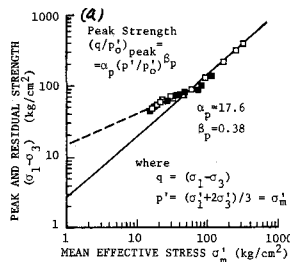


図-6 最大強度  
(a) 応力状態 (b) 平均有効応力 - 応力比

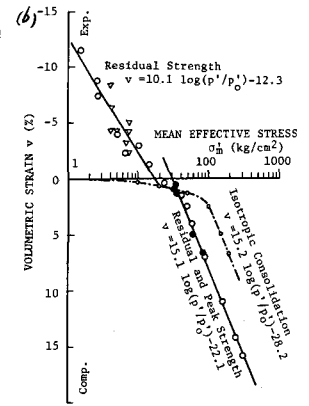
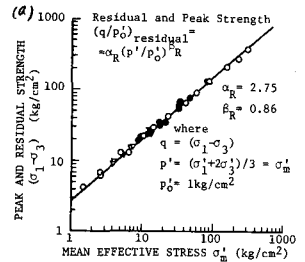


図-7 残留強度

(a) 応力状態 (b) 平均有効応力 - 応力比

## 参考文献

- 1). 赤井, 足立, 西: 堆積軟岩 (多孔質凝灰岩) の弾・塑性挙動, 土木学会論文報告集, No. 271, 1978, pp. 83~95.
- 2). 赤井, 足立, 西: 堆積軟岩 (多孔質凝灰岩) の時効依存性と構成式, 土木学会論文報告集, No. 282, 1979
- 3). Hobbs, D. W.: A study of the behavior of broken rock under triaxial compression and its application to mine road way, Int. Rock Mech. Mining Sci., Vol. 3, 1966, pp. 11~43.

# STRENGTH CHARACTERISTICS AND FAILURE CRITERION OF SOFT SEDIMENTARY ROCK

Toshihisa Adachi and Toyokazu Ogawa

Now in our country, so called soft rocks are distributed at the sites of such big civil engineering projects as Seikan tunnel and Honshu-Shikoku bridge constructions. In order to efficiently and successfully proceed those projects, it is immediate necessity to make clear the mechanical properties of such soft rocks as half solidified sedimentary rocks deposited in Miocene Epoch of Tertiary Period.

The objective of this study is to show the strength characteristics of soft rock and propose the new failure criterion for the material. For the purpose, triaxial tests have been conducted by using Ohya-stone(porous tuff) deposited in Tertiary Period as an ideal soft sedimentary rock.

Throughout this study, the following failure criterion for the material is proposed.

Peak Strength:

$$\begin{aligned} (q/p'_0)_{\text{peak}} &= \alpha_p (p'/p'_0)^{\beta_p} & \text{when } p' < \text{pre-historical pressure} \\ v_{\text{peak}} &= C_s \log(p'/p'_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (q/p'_0)_{\text{peak}} &= (q/p'_0)_{\text{residual}} & \text{when } p' > \text{pre-historical pressure} \\ v_{\text{peak}} &= v_{\text{residual}} \end{aligned}$$

Residual Strength:

$$\begin{aligned} (q/p'_0)_{\text{residual}} &= \alpha_r (p'/p'_0)^{\beta_r} \\ v_{\text{residual}} &= C_r \log(p'/p'_0) - 12.3 \quad (\%) & \text{when } p' < \text{pre-historical pressure} \\ v_{\text{residual}} &= C_c \log(p'/p'_0) - 22.1 \quad (\%) & \text{when } p' > \text{pre-historical pressure} \end{aligned}$$

where

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 = \sigma'_m, \quad q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$$