

(14) 軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響

京都大学防災研究所 ○足立 紀 尚
富山県庁 林 正 之

1. はじめに

理想的な堆積軟岩として多孔質凝灰岩である大谷石を選んだ軟岩の力学特性を調べたところ、硬岩や土質材料と力学特性が定性的には何ら変わらないことが明らかとなった。さらに対象とする岩石特有の拘束圧（先行履歴応力）以下では応力-ひずみ関係が必ず硬化-軟化型となり、最大強度、残留強度双方が工学的に重要な意味を有することを示した。すなわち、残留強度とは有効応力も荷重もそれ以上変化しない、単にせん断変形のみが継続する状態であり、せん断破壊によって生じた破断面に沿ってすべっている状態の応力をいう。この状態で供試作中に生じている破断面は最大主応力の作用方向に対して最もすべり易い方向にあるから、残留強度は不連続面（弱面）をもつ岩盤の強度としてその最小値に等しいと考えられる。換言すると、岩盤の強度の下限値は岩石の残留強度に一致するはずである。図-1はこのことを模式的に示したもので、不連続面や弱面を持つ岩盤の強度は上限値を岩石の強度に、下限値を岩石の残留強度にとり、一般的にはその範囲内にあることを表わしている。この考えに対しては資料の集積や既存の不連続面を有する供試作を用いた実験を行い定量的に把握する必要がある。

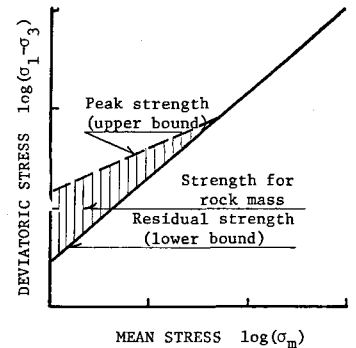


図-1. 岩石の強度と岩盤の強度

本研究はこれらと同等、大谷石を用いた不連続面が軟岩の力学特性に及ぼす影響を考察したものである。それは軟岩といふことも対象とするのは地質分断面を含む岩盤であって、不連続面の影響を解明することは重要であり、かつ硬岩から成る岩盤も定性的には類似の挙動を示し、一般的には岩盤の力学挙動を併せて把握するために役立つ資料が求まると考えられている。すなわち、岩盤が岩石と不連続面の組合せであることを理想的に表現するため、軸荷重方向に対して種々の角度をもつ切断面をあらかじめ与えた円柱形供試作を準備して拘束圧を変えた三軸圧縮試験を行い、既存の不連続面が変形挙動に及ぼす影響を及ぼすか、強度特性がどのような影響を受けるかを調べ、図-1に示す考え方を検討することにより、岩石試験結果を用いて岩盤の強度を推定する方法を確立することを試みた。

切断面を与えて行うこの種の研究は多い。しかし、大半は強度特性、特に最大強度に関するものであって、残留強度さらには変形特性にまで言及したものは限られている。その間隙を有する水で飽和した軟岩を対象としたものは見当たらない。

2. 実験方法

供試作は直径5cm、高さ10cmの円柱形である。試験には軸荷重（最大主応力 σ_1 ）作用面と種々の角度 α を成す切断面を入れた供試作と切断面の供試作を用いた。水で飽和した軟岩を対象とするから、供試作を容器内に水浸せし24時間以上サクションをかけて脱気を行い飽和させた。

実験は3kg/cm²のバツフプレッシャーのもとで、有効側圧を $\sigma'_3 = 1, 3, 5, 6, 10, 20$ kg/cm²と変化させ、ひずみ制御($\dot{\epsilon}_1 = 0.027\%/min$)による排水せん断試験である。

3. 切断面を有する軟岩の力学挙動

切断面の角度に応じた拘束圧と破壊形態

切断面をもつ供試体がどのように破壊するかをみてみよう。図-2は破壊形状を示すが図中の点線は既存の切断面も、実線は破壊すべり面を与えている。図から低側圧 ($\sigma_3 \leq 10 \text{ kg/cm}^2$) の場合、 $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ の切断面をもつ供試体は切断面をもちたがりと同様切断面に関係なく、約 60° のすべり面を生じて破壊するが、 $\alpha = 45^\circ, 60^\circ$ の場合には既存の切断面に沿って破壊できるとがわかる。ところが、 $\alpha = 45^\circ$ では 10 kg/cm^2 以上、 $\alpha = 60^\circ$ では 20 kg/cm^2 と拘束圧が高くなるに従って他の角度の場合と同様に既存の切断面に関係なく 60° に近い新断面のすべり面が生ずるが、びや棒形の供試体全般に渡るせん断破壊を示すようになる。すなわち、大谷石で有効側圧が $\sigma_3' = 20 \text{ kg/cm}^2$ の場合、せん断破壊時の応力は先行履歴応力 ($\sigma_m = 50 \text{ kg/cm}^2$) 近傍にあり、既存の切断面に影響を受けない応力状態に至るからといえる。

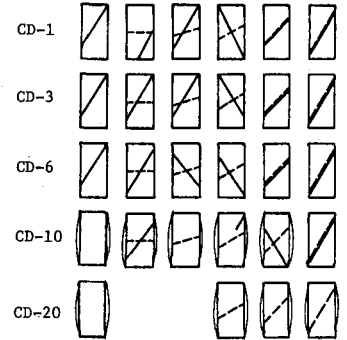
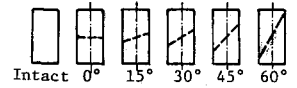


図-2. 切断面と破壊すべり面

応力-ひずみ関係

大谷石は先行履歴応力 $\sigma_m = 50 \text{ kg/cm}^2$ を境い、それ以下ではひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ関係を、それ以上ではひずみ硬化型の関係を示す。図-3, 4 は得られた応力-ひずみ関係を (a) に軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) ~ 偏差ひずみ $e_1 (e_1 = \epsilon_1 - \nu/3)$ 関係とし、(b) に体積ひずみ ν ~ 偏差ひずみ関係としてそれぞれ示している。図-3は有効側圧 $\sigma_3' = 1 \text{ kg/cm}^2$ (CD-1) と表示、図-4は $\sigma_3' = 20 \text{ kg/cm}^2$ の結果である。

実験結果得られるところをまとめると以下のようなものである。

- (1). 拘束圧が先行履歴応力以下の場合、 α が 45° と 60° を除いて intact rock と同様、顕著なひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ関係を示し、既存の切断面とは無関係にせん断面が新たに生じ、体積膨張を伴って破壊

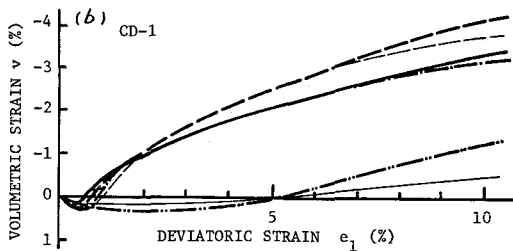
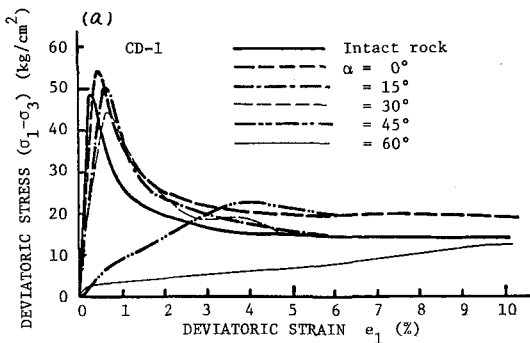


図-3. 応力-ひずみ関係 ($\sigma_3' = 1 \text{ kg/cm}^2$)

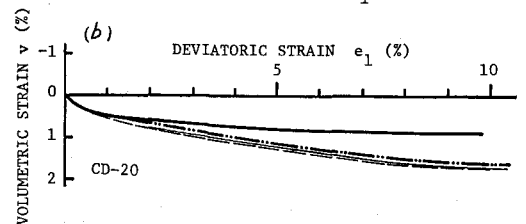
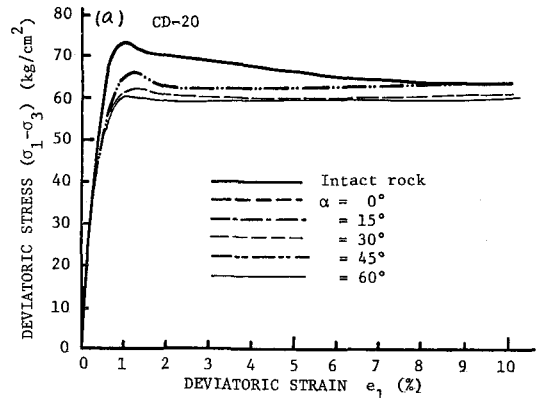


図-4. 応力-ひずみ関係 ($\sigma_3' = 20 \text{ kg/cm}^2$)

する。しかし、 $\alpha=45^\circ, 60^\circ$ では既存の切断面に沿うすべり破壊となり、弾-完全塑性型に近いが、単調な力の硬化型の応力-ひずみ関係を示し、作損膨張度合も他と比較して小さい。

(2). 拘束圧が先行履歴応力に近いが、それ以上に与ると既存の切断面は力学挙動に影響を与えはく。

切断面の弾性係数に与える影響

切断面の存在とその角度によって、せん断弾性係数 G と作損弾性係数 K がいかに影響を受けるかを調べてみた。種々の角度をもつ不連続面が内在すると岩石の力学特性には方向性(異方性)が現れる。しかしここでは岩石を等方性材料と仮定して弾性係数を決定する方法を適用し、その結果求まる値の差は異方性が生じたと考える。

軸対称三軸試験の場合、軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim$ 偏差ひずみ ϵ_1 関係の初期の勾配からせん断弾性係数 G は次式で決定できる。

$$G = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / 3 \Delta \epsilon_1 \quad (1)$$

作損弾性係数は平均有効応力 $\sigma_m \sim$ 作損ひずみ ϵ_1 関係の初期の勾配より次式で求められる。

$$K = \Delta \sigma_m' / \Delta \epsilon_1 \quad (2)$$

図-5は図-3の式と(1)式を適用して決定したせん断弾性係数 G を *intact rock* の弾性係数 G_c で標準化して、角度 α をパラメータとして(a)に $\sigma_3' = 1 \text{ kg/cm}^2$, (b)に $\sigma_3' = 6 \text{ kg/cm}^2$, (c)に $\sigma_3' = 20 \text{ kg/cm}^2$ の場合を示している。

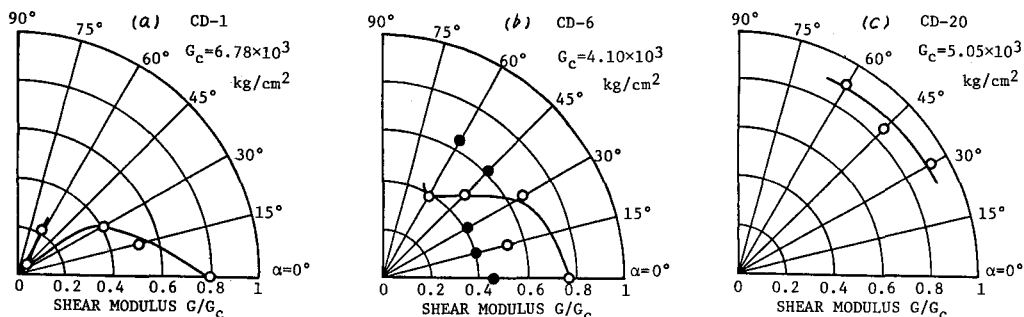


図-5. せん断弾性係数 G に及ぼす切断面の影響 (a) $\sigma_3' = 1 \text{ kg/cm}^2$, (b) $\sigma_3' = 6 \text{ kg/cm}^2$, (c) $\sigma_3' = 20 \text{ kg/cm}^2$

得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1). せん断弾性係数 G は切断面の存在とその角度によって変化し、 $\alpha=45^\circ$ 近傍で最小値となる。しかし、拘束圧が大きくなると切断面の存在と角度による差異は小さくなる。 G が $\alpha=45^\circ$ で最小値をとる理由は $\alpha=45^\circ$ で残留強度が大きくなることと表裏をなすものである。すなわち、供試体中の最大せん断応力は常に 45° 面内に作用するから、 $\alpha=45^\circ$ に弱面があるとせん断初期に最も変形し易く、従ってせん断弾性係数は小さい値となる。
- (2). ここには示していないが、作損弾性係数 K は *intact rock* の K_c と比較すると小さい値となっており、切断面の角度による影響は G より小さい。
- (3). 図-5(b)中に黒丸で示す値は $\epsilon_1 \approx 5\%$ 近傍で除荷-再載荷を行なった際の再載荷時の勾配から求めた弾性係数 G である。 $\alpha \leq 30^\circ$ では白丸で与える初期の弾性係数と比較して小さいが、オーダー的には変わらない値となることは注目に値する。

切断面の最大ひずみで残留強度に及ぼす影響

図-3などの応力-ひずみ関係から最大強度が切断面の角度による異なる値をとることが明らかである。図-6は

intact rock の最大強度 q_c を規準化し、角度 α をパラメータに最大強度を与えているが、図中の黒丸は残留強度で、赤点線が示す円弧は intact rock の残留強度である。

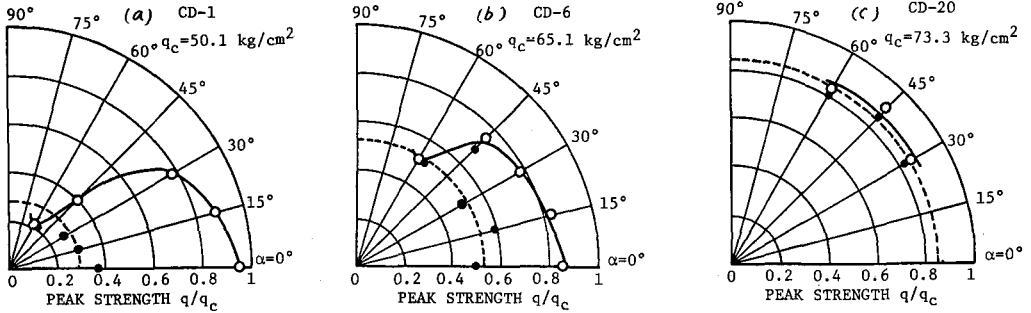


図-6. 最大円弧に残留強度に及ぼす切断面の傾斜 (a) $\sigma'_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$, (b) $\sigma'_3 = 6 \text{ kg/cm}^2$, (c) $\sigma'_3 = 20 \text{ kg/cm}^2$

図からの結論は以下のようになる。

- (1). 最大強度は切断面の角度により影響され、 $\alpha = 60^\circ$ で最小値をとり、その値は他の角度の残留強度にほぼ等しい。しかし、側圧が増加すると切断面の有無に関係なく最大と残留強度が近似的に等しい値となる。
- (2). 残留強度は intact rock の残留強度と変らず切断面の角度に影響されず、 $\alpha = 45^\circ$ の残留強度は他と比較してやや大なる値となる。

4. 不連続面を有する軟岩の破壊規準

先に軟岩の破壊規準として Hobbs が岩石材料に対して提唱するベイズ関数型破壊規準が応力間、条件式に、それに応力と傾斜の中間には土壌材料の critical state に対して成立する条件式が入れられ適用できることを示し、新たに軟岩の最大円弧に残留強度双方に対する破壊条件式を提案した。この破壊条件式、とくにベイズ関数型の破壊規準が不連続面を有する軟岩の破壊条件式として適用できるかどうか検討したところ図-7 のように成立することが明らかになった。破壊規準は最大円弧に残留強度それぞれに対して次式で与えられる。

$$(\sigma_1/20\sigma'_3)_{\text{peak}} = \alpha_p^* (\sigma'_n/\sigma'_{m0}) \beta_p^* \dots (3), \quad (\sigma_1/20\sigma'_3)_{\text{residual}} = \alpha_R^* (\sigma'_n/\sigma'_{m0}) \beta_R^* \dots (4)$$

ここに $\sigma = (\sigma_1 - \sigma_3)$, $\sigma'_{m0} = 1 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma'_n = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, $\alpha_p^*, \beta_p^*, \alpha_R^*, \beta_R^*$ は材料定数である。図-7 は各切断面の角度に対して決定した(3)式を1つの図にとめてあり、図-19 考之方を裏証するものである。(3), (4)式に含まれる強度定数 $\alpha_p^*, \beta_p^*, \alpha_R^*, \beta_R^*$ と切断面の角度 α の関係を検討すると、例えば α_p^*, α_R^* に対して図-8 が求まる。 β_p^*, β_R^* についても同様の図を求めると、 α_p^*, β_p^* は α の関数で与えられる、 α_R^*, β_R^* は一定と考之うことがわかる。 α_p^*, β_p^* の α に関する関数形を手とすると(3), (4)式は確定するようになる。

参考文献
①足立、小川、堆積軟岩の力学特性と破壊規準、土木学会論文報告集、No. 295, 1980. 3.

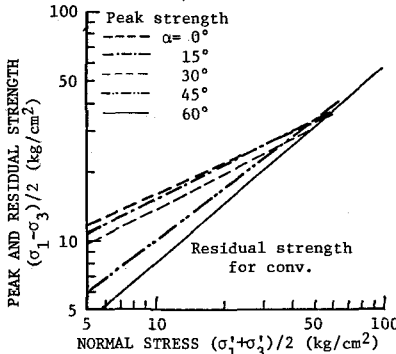


図-7. 最大強度の破壊規準

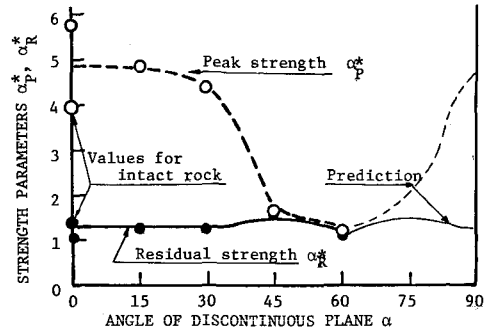


図-8. 切断面の角度 α と強度定数 α_p^*, α_R^* の関係

EFFECTS OF JOINTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SOFT ROCKS

Toshihisa ADACHI and Masayuki HAYASHI

Since even for soft rock mass they contain the geological discontinuities, it is required to clarify the effects of the discontinuities on the mechanical properties of soft rock mass. In order to ideally simulate the mechanical behaviors of rock consisting of intact rocks and discontinuities, triaxial compression tests are conducted by using specimens each of which has a saw cut plane with various angle α to the maximum principal stress plane.

Throughout this investigation, the following conclusions are summarized.

- (1). Under the confining pressure less than the prehistorical pressure, the stress-strain relations are affected by the existence of discontinuity and the angle α between the discontinuity plane and the maximum principal stress plane. When, however, the confining pressure becomes higher than the prehistorical pressure, the mechanical behaviors do not depend on the existence of discontinuities.
- (2). The shear modulus G changes the value with the angle of discontinuity, but the bulk modulus K is not so much influenced by the angle. The elastic moduli of the specimen having discontinuity are smaller than of the intact rock specimen, but the values remain in the same order.
- (3). When the confining pressure is less than the prehistorical pressure, the peak strength value changes with the angle α and takes its minimum value for the angle $\alpha=60^\circ$. The residual strength, however, is not influenced by the existence of discontinuity and has the same value of the residual strength of intact rock specimen. The peak strengths of the specimens with discontinuities lie between the peak and residual strengths of the intact rock as the upper and the lower bound, respectively.
- (4). The peak and residual strength criteria for the specimens with discontinuities are given as following relations.

For peak strength

$$(q/2\sigma'_{no})_{\text{peak}} = \alpha_p^* (\sigma'_n/\sigma'_{no})^{\beta_p^*}$$

For residual strength

$$(q/2\sigma'_{no})_{\text{residual}} = \alpha_r^* (\sigma'_n/\sigma'_{no})^{\beta_r^*}$$

in which $q/2 = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$, $\sigma'_n = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ and σ'_{no} may be say 1 kg/cm².

The material constants α_p^* and β_p^* for the peak strength are functions of the discontinuity angle α , but α_r^* and β_r^* for the residual strength take approximately constant values.