

(1) 不連続性材料の降伏・破壊規準

埼玉大学 大学院 学員 鈴木 健一郎

埼玉大学 工学部 正員 小田 匡寛

1. はじめに

岩盤のような、節理・断層といふ、不連続面を含む材料の力学的性質は、それら不連続面(クラックと呼ぶ)に依存する事がよく知られている。不連続性材料の力学的性質の支配要因は大きく分けて、その基質部の力学的性質、クラックの幾何学性、そしてクラックの物理性・力学性(剪断・垂直剛性、摩擦係数等)の3者であるといえる。天然の岩盤におけるその複雑さ故、密度、大きさ、方向性が相互に依存しているクラックの幾何学性については統一的・定量的把握が困難とされて来たが、テンソル量をもってその幾何学性を表現したクラック・テンソルがこれまでの一連の理論的・実験的研究により、不連続性材料の力学特性を述べる上で有効である事が確かめられて来た。本報告では、より一般的な応力状態(平面応力状態)において更にその有効性の確認を行うと共に、クラックの幾何学的相似条件が材料基質部の強度も考慮する事で任意の材料に適用できる事、7. 幾何学的相似条件が力学的相似条件を満足する為には、クラックの物理性(主にクラック面の摩擦係数)がどのような型と含まれるものであるかの実験的検討を行い、それらを基に、クラックの幾何学性と考慮した不連続性材料に関する一つの破壊規準を提案するものである。

2. 実験概要

供試体及び二軸圧縮試験については前報又は他の文献¹⁾と参照されたい。二軸圧縮試験は図1のような装置を用い、まず所定の側圧 σ_2 で鉛直方向の応力 σ_1 と水平方向の応力 σ_2 と等方的に載荷した後、更に σ_1 を増加させて軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_2$ を測定した。上下・左右の剛体加圧板はテフロン加工を施し、更に左右の加圧板と供試体との間には、ケリースを塗付したメンブレンを挿入しその間の摩擦抵抗を緩和した。

図2(a)は、天然の岩盤中に存在するクラックとその面全体に対してオープンではなく、部分的に上下面が接触している事を考慮して用いたクラックのモデルである。クラックの物理性の強度への影響を通常用いているモデルクラック(図2(b))と比較する為に、図2(a)のクラックを等方的に含んだ供試体について一軸圧縮試験を行った。図2(b)のクラックとは、スノーマット面と石膏面の間の摩擦係数 $\mu(b)$ が小さくそれらの間の剪断抵抗はほぼ無いと考えられるが(a)の場合は、穴の部分で連続している石膏により面全体の剪断抵抗は(b)より大きくなっている。即ち(a)のクラック面の摩擦係数を $\mu(a)$ とすると $\mu(a) > \mu(b)$ である。

材料基質部の強度の異なる供試体についての一軸試験結果は文献²⁾に報告されているが、今回はA.I.T.で小野寺らによって行われた実験結果を用いる事により、材料基質部の強度において広範囲確認を行った。(データは文献³⁾による)

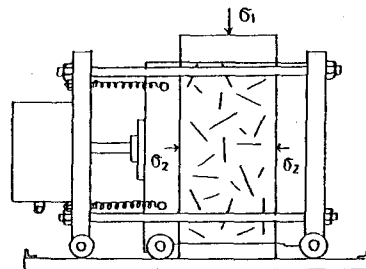


図-1

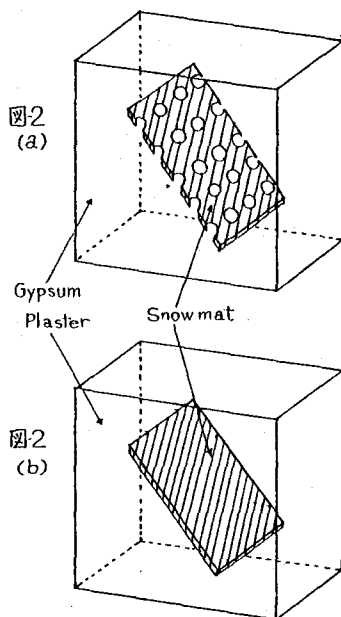


図2
(a)

図2
(b)

3. 実験結果と考察

はじめに、図3はこれまでに行なわれた2階のクラック・テンソル F_{ij} の意味と等方的幾何学性と有す等方性材料の一軸圧縮強度と、岩盤の間隙率と等価な意味を持つ0階のクラック・テンソル F_0 との関係を示したものである。等方性材料の一軸圧縮強度と $\log F_0$ との間に線型な関係がある事がある。次に A. I. T. を行なわれた基質部材料の異なる供試体の一軸圧縮試験結果を図3と同様に、縦軸にクラックを含まない供試体の強度を無次元化した強度比と、横軸にクラック密度及びクラックの大きさの3乗に比例する量で不連続性の程度と相対的に表わすと考えられる0階のクラック・テンソル F_0 の対数をとった座標上にプロットしたものが図4である。供試体材料の種類とクラックを含まないその一軸圧縮強度は表1に示す通りである。表よりわかるように基質材料の強度において最小と最大で40倍以上もの範囲にある供試体の結果が図4に反映されているにもかかわらず各種の強度比は皆同様に $\log F_0$ の増加に対して線型的な減少傾向を示している。即ち、0階のクラック・テンソル F_0 で表わした幾何学的な相似条件 $F_0^{(a)} = F_0^{(b)}$ (詳細は文献4)を参照されたい)は、基質部の強度をクラックを含む全体の強度と無次元化する事により強度の相似条件も満足する事がわかる。又、 F_0 が 10^{-2} 以下になるとクラックの存在が強度に影響を与えなくなる事もわかる。

次に図2(a)のモデルクラックと等方的に含む供試体についての一軸圧縮試験結果を図3, 4と同じ座標上にプロットすると図5のようになる。

$\log F_0$ の増加に伴い、その強度は線型的に減少しているが、直線の傾きは図3や4のものより小さい。クラックの状態が変わる事で直線の傾き、又は、クラックが強度に影響する最小の F_0 が 10^{-2} と等しいので、一軸圧縮強度が0となる時の F_0 の値が変化しており、その時の F_0 を F_{0max} と書くと、 F_{0max} は倒えはクラック面の摩擦係数 μ の関数 $F_{0max} = f(\mu)$ と表わす事ができると思われる。 $f(\mu)$ の関数形については触れられないが、幾何学的相似条件が強度の相似条件と満足する為には、クラックの物理性とする摩擦係数のようなものが内部変数として F_{0max} 等に含まれるべきである事が認められた。

以上の結果をまとめると、
・不連続性材料の一軸圧縮強度 q_u は、その材料基質部の強度 $q_u^{(0)}$ と無次元化する事により $\log F_0$ と線型な関係となる。
・クラックの状態により直線の傾きが変化する。— $\log F_0$ 切片は変化する。

これらに基づき q_u と F_0 の関係を定式化すると

$$q_u/q_u^{(0)} = -\frac{1}{n} \log (F_0/F_{0max}) \quad (1)$$

$$n = \log (F_{0max}) - \log 10^{-2} \quad (2)$$

ここで $q_u^{(0)}$ はクラックを含まない供試体の一軸圧縮強度、 F_{0max}

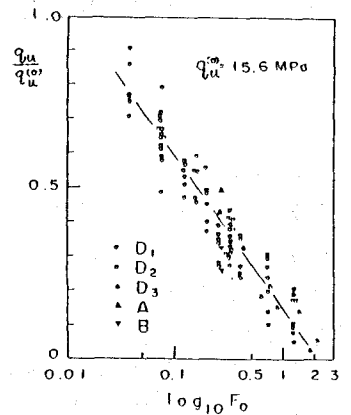


図-3

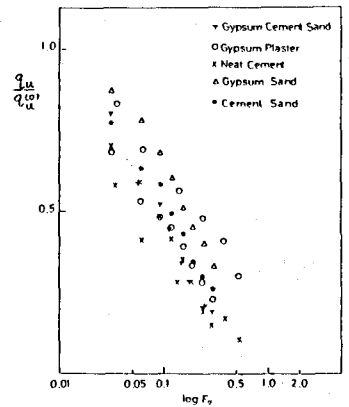


図-4

Gypsum Plaster Specimen	Neat Cement Specimen	Gypsum Sand Specimen	Cement Sand Specimen	Gypsum Cement Sand Specimen
26.5 kg/cm ²	498 kg/cm ²	12.6 kg/cm ²	265.9 kg/cm ²	70.0 kg/cm ²

表-1

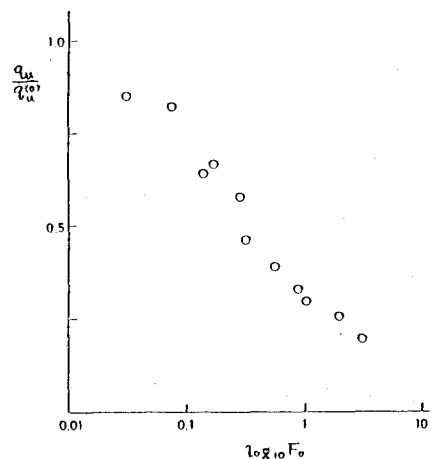


図-5

は先に述べたようにクラックの状態に依存する材料定数である。式(2)の右辺第2項の 10^{-2} はクラックの強度に影響を与えなくなる時の F_0 の値と、 $(10^{-2}, 1)$ が規準点となっている。

次に F_0 が0.5, 1, 2, 4という4種類の等方性供試体について図1に示したような二軸圧縮試験を行なった。図6は、側圧 $\sigma_2 = 5.8 \text{ kg/cm}^2$ の応力～歪曲線である。 F_0 の増加、即ち不連続性の程度が高くなるに伴いそのピーク強度は減少している。応力～歪曲線が初期直線部から偏り始める応力レベルで最初のクラックが入り、又その進展の始点にある供試体作製時に挿入されたクラックの傾きには法則性に無い事、クラック進展の観察より認められた。図7は、 $F_0 = 2$ の供試体の側圧の変化による応力～歪曲線と示している。側圧 σ_2 の増加に伴い、ピーク強度も増加するが、側圧がある程度大きくなると強度の増加度が減って来ているのは、Mohrの包絡線が側圧の大きい領域で非線型になる事を示している。従って以後の議論では側圧を包絡線の直線領域に限る事にする。まずその破壊時の鉛直応力 σ_1 と対応する側圧を $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ と $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ に対してプロットした時の特性を認め易いように理想化して示したのが図8である。図8は、岩盤の間隙率と等価な意味を持つ F_0 が変化すると内部摩擦角には影響がなく、その粘着力が変化することを意味している。そこで実際のデータを個々の F_0 に対応する一軸圧縮強度 q_u で割り、 $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2q_u}$, $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2q_u}$ にプロットし直すと、大きくない側圧の範囲で、図9のような一本の直線に近似できる。この直線は、

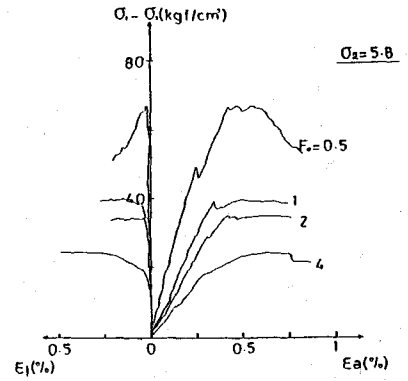


図-6

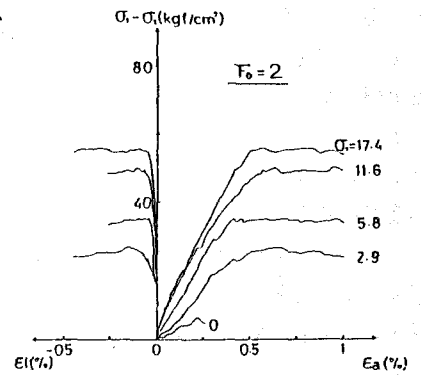


図-7

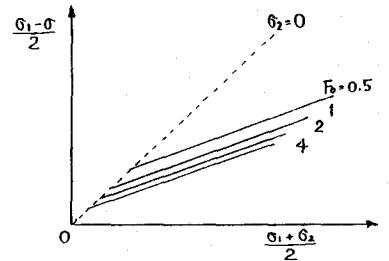


図-8

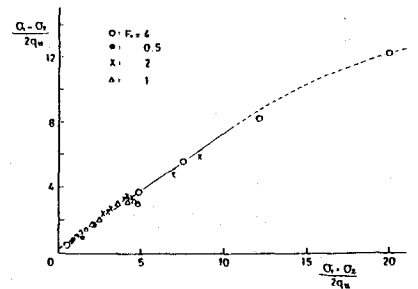


図-9

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2q_u} = k \cos \phi + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2q_u} \right) \sin \phi \quad (3)$$

のように表わせる。ここで k, ϕ は F_0 には無関係で材料固有の定数と考えられる。今、 q_u は F_0 の関数で式(1)のような関係が一軸圧縮試験結果から得られてゐるの式(3)は

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = k \cos \phi q_u^{(0)} \left(-\frac{1}{n} \log \frac{F_0}{F_{0max}} \right) + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \sin \phi \quad (4)$$

となる。7は、破壊時の τ と σ を用いて

$$\tau = k q_u^{(0)} \left(-\frac{1}{n} \log \frac{F_0}{F_{0max}} \right) + \sigma \tan \phi \quad (4')$$

となり、等方性不連続材料の破壊規準は、その内部摩擦角 ϕ が一定で粘着力が F_0 の関数となっている事がわかる。 F_0 は間隙率と等価であるので、(緒形らの実験によると、断層破砕帯の幅はその大きさに比例している。この結果を用いると F_0 は岩盤の間隙率と等価である事が証明できる。)4) Hvorslevが粘土の破壊規準に対して、有効粘着力が間隙比 e_f の関数として決まるという考え方から提案した

$$\tau = C_{eo} \exp(-B e_f) + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

という規準と同じ形式である事がわかる。ここで C_{eo} は初期圧密曲線上の基準点 (e_0, C_0) から決まる定数で B も定数である。応力は有効

応力を用いている。即ち、等方性不連続性材料の力学的挙動は、粘土のそれと非常に類似している事が明らかとなった。

次に異方性材料の二軸試験結果を述べる。用いた供試体は全て $F_0 = 1$ で、クラックと σ_2 方向の成す角 θ が $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ に卓越した5種類である。図10は側圧 $\sigma_2 = 2.9$ 試験の時の5種類の供試体各々の応力～歪曲線である。そのピーク強度が θ によって異なる、即ち強度異方性がみられる。他の側圧の場合でもその傾向は同じである。図11に θ と強度の関係と側圧をパラメータとして示す。 θ が 90° の時、即ち図11の中の略図と示されるようにクラックが σ_2 方向と平行に並ぶ時に最大強度を示し、それが 30° から 45° の間で最小となっている。このような強度異方性と説明する為に、不連続面の摩擦角を考慮して、その面上での滑りの起こる条件を用いる方法が一般的であり、粘板岩における強度への異方性の実験結果とも対応させている。5) しかし、本実験の結果と比較すると、図11における最小強度と与える θ に違いがある。その理由として、粘板岩のような岩中の弱面は閉じており、その面の摩擦角が強度の異方性に影響を与えるが、実際の岩盤中にある節理や断層とは、化学的風化作用に伴う粘土のような周囲の岩と比べて圧縮性の高い充填物が面間に存在するの一般的であり、本実験で用いた供試体はそのような岩盤をモデル化したものとあるので強度に及ぼす異方性の影響が粘板岩のようなものとは異なると思われる。

今回、異方性材料の強度特性についての議論は以上に留めるが、今後、その力学的挙動を明らかにしていく上で、等方性の場合のような既存の破壊規準に不変量の形でクラック・テンソルと陽に組み込む方法と、テンソルという性質を利用して応力テンソルとの混合不変量という形にして整理していく方法を検討していく方針である。

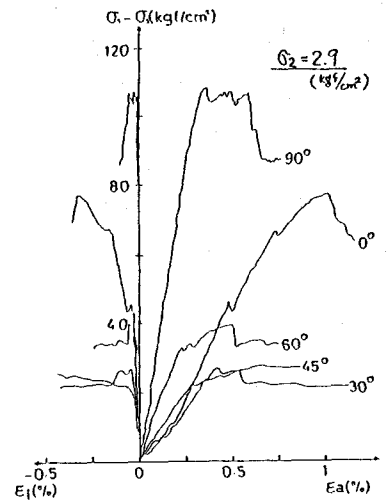


図-10

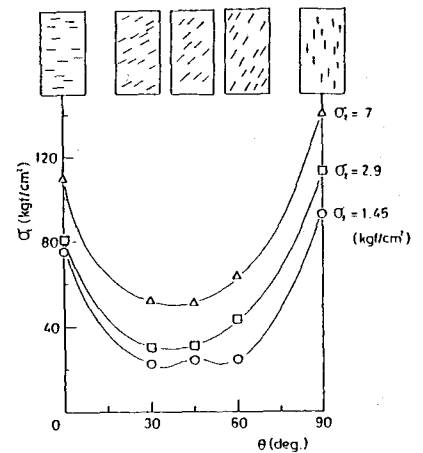


図-11

謝辞

この研究費の一部は、一般研究A(代表:久保慶三郎)によった。記して感謝の意を表します。
材料基質部の強度の影響と調べるに当たって用いたA.I.T.のテークと、小野寺教授の指導によるNissanka, K. Silva氏の修士論文から借用させて頂いた事とここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) "Elasticity of rock-like materials with random cracks—Theory and Experiment" Oda, Suzuki (1983) Geomechanics AMD-Vol. 57 P23-28
- 2) "不連続性材料における強度異方性とクラック・テンソル" 鈴木, 小田, 星, 大和田 (1983) 土木学会年講 II-(31)
- 3) "Effect of flaws on Strength of rock-like materials" N. K. Silva (1978) thesis for the degree of Master of Engineering
- 4) "不連続面の幾何学性に関する相似則について" 小田 (1983) 土木学会年講 II-(30)
- 5) "Underground excavations in rock" E. Hoek, E. T. Brown p157-163

(1) Yield or failure criterion for discontinuous materials

Saitama University Kenichiro Suzuki
Masanobu Oda
(Department of Foundation Engineering,
Saitama University)

The applicability of crack tensor as an index measure for crack geometry of discontinuous geological materials has been proved by the results of uniaxial compression tests on gypsum plaster samples with random cracks. In order to extend its applicability, biaxial compression tests on gypsum plaster samples and uniaxial compression tests on samples made of some different kinds of matrices and on gypsum plaster samples with partly closed cracks are reported with the following conclusions.

- 1) Similarity condition for crack geometry in terms of crack tensor gives mechanical similarity for discontinuous materials normalized by the strength of each matrices.
- 2) In order to express mechanical behavior of discontinuous materials more precisely, for example, crack tensor should be a function of coefficient of friction on crack surface.
- 3) Proposed failure criterion which takes account of above conclusions offers an explanation for the behavior of isotropic discontinuous materials in a limited range of stress conditions.