

(26) 不連続性岩盤の水理・力学的性質を評価するために 必要な最小供試体寸法について

埼玉大学工学部 小田匡寛・羽出山吉裕 高野正明

1 はじめに

節理や断層などの地質不連続面（クラックと総称する）によってその水理・力学的性質が決定づけられる岩盤を、不連続性岩盤と呼ぶことにする。岩石は不連続性岩盤の重要な構成要素であるが、その性質は巨視的な水理・力学的挙動に副次的な影響を及ぼすに過ぎない。

日本のように、地質学的に変動の激しい地域にあっては、岩盤の性質も場所毎に著しく変化している。変化の著しい岩盤の水理・力学解析を実行するためには、それを統計的に均質とみなせる領域に分割し、その領域毎の物理定数を決定する作業から始めねばならない。例として、統計的に均質とみなせる領域の物理定数を、現位置試験から求める場合について考えてみよう。岩石片の寸法での実験が、不連続性岩盤の性質を把握する目的として不十分であることは、広く知られている。「では、どの寸法の供試体を選べば目的に適した実験と云えるであろうか？」全領域と同じ巨視的性質を持つ最小単位を、「構造最小単位」と便宜的に呼ぶとすれば、上述の設問は、「どのような規準で不連続性岩盤の構造最小単位は決められるであろうか？」と読み換えられる。

岩石の一軸圧縮強度には、¹⁾ 明瞭な寸法効果のあることが知られている。寸法を大きくすると、強度は低下し、ある停留値に収束する傾向を示す。この停留値を示す供試体寸法は、岩石（岩盤ではない）の構造最小単位を与えると考えられる。しかし、取り得る供試体寸法には限界があって、複雑に絡みあったクラックの全てを供試体に取り込むことは不可能である。

不連続性岩盤の水理・力学的性質が、内在するクラックに決定的に依存しているとすれば、構造最小単位は、クラックの地質調査から推論されてしかるべきである。しかし、ただ単なるクラックの記載のみでは、構造最小単位の判定にとって不十分であることもまた事実である。この小論は、不連続性岩盤をクラックテンソル $\mathbf{F}$ によって等価な連続体に変換できるとの立場に立って、その構造最小単位を明らかにしようとするものである。

2 不連続性岩盤の構造最小単位

2・1 統計的に均質な領域

クラックの位置をその図心の座標で示すこととし、その図心の位置が統計的にランダムな仕方で領域 V に分布しているものとする。クラックの寸法、方位が、クラ

ックの位置座標によらないならば、この領域 V を統計的に均質な領域と呼ぶことにする。（このようなクラック分布のランダム性は、必ずしも偏りのないことを意味しない。むしろ、統計的な意味での偏りは、常に伴われると考えねばならない。）

節理・断層のような地質不連続面が、上述したランダム性を満たすような仕方分布しているであろうか？ 残念ながら、悲観的な結論に終りそうである。実際、新しく形成されるクラックは、既存のものに影響を受けるはずであり、従って、そのクラックの中心位置、寸法、方位が空間的に無作為に分布するとは考えにくい。しかし、実岩盤のクラックの幾何学性を、従来しばしば²⁾ であったように、Fig. 1 に示す規則的な節理モデルに単

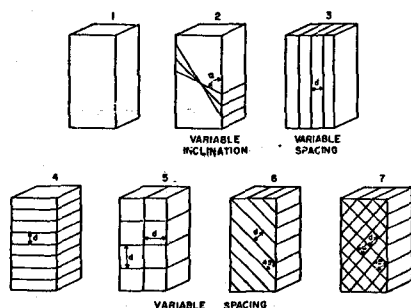


Fig. 1 Systematic crack pattern (Einstein, 1973).

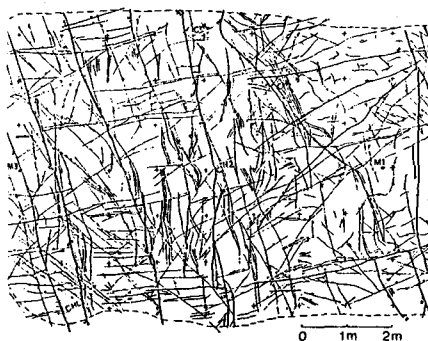


Fig. 2 Traces of joints in Stripa mine (Thorpe, 1979).

純化してしまうのも、正しい道とは云えないのではあるまいか。少なくとも、“統計的に均質”の仮定は、Fig.1のモデル化に代る有力な単純化の一手法であると云って間違いないさそうである。

Fig.2のスケッチは、Stripa 鉱山の横坑から得られたものであり、節理が坑壁となす交線(トレース)を表している。³⁾トレースの中心は、必ずしもクラックの中心を意味しない。しかし、領域さえ適切に分割されていれば、クラックの中心がランダムに分布するとする仮定は、Fig.2のトレース分布と調和的であると思われる。少なくとも、Fig.2の観察記録を用いて、Fig.1に示すような規則モデルに変換する作業は、不可能ではないとしても、大変な困難を覚悟せねばなるまい。

2. 2 クラックテンソルと等価連続体

クラックテンソル $\underline{F}$ は、複雑な様相を呈する地質不連続面の幾何学的特徴を表現する目的で導入された無次元のテンソルであり、次式で定義される。

$$\underline{F} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^r \int_{\Omega} \underline{n} \otimes \underline{n} \otimes \dots \otimes \underline{n} E(\underline{n}, r) d\Omega dr \quad (1)$$

ここで、 ρ = 単位体積あたりのクラック数； $\underline{n}$ = クラックの主面に立てた単位法線ベクトル； r = クラックの寸法； $E(\underline{n}, r)$ = クラックの寸法、方向に関する分布を与える密度関数； Ω = 立体角； $\otimes$ = テンソル積。

今、統計的に均質な岩盤を取りだし、そのクラックテンソルを $\underline{F}$ とする。小田らは、⁴⁾⁵⁾最近の研究結果を踏まえて、不連続性岩盤は、 $\underline{F}$ で特徴づけられた等価な連続体に変換でき、また、その弾性コンプライアンス、降伏条件、透水テンソル等の諸定数は、 $\underline{F}$ を含む形式で書けると、主張している。この等価連続体の概念は、少なくとも、断層を除く地質不連続面の力学性をモデル化する方法として有力なことが、最近の実験的研究からも裏づけられている。この小論では、等価連続体の立場から、不連続性岩盤の構造最小単位について考えてみることにする。

2. 3 誤差テンソル

今、クラックの平均寸法 $\bar{r}$ に比較して十分大きい寸法を持ち、また、統計的に均質な領域 V を考える。全領域 V のクラックテンソルを $\underline{F}$ とし、また V に属する部分領域 V' を無作為に抽出し、そのクラックテンソルを $\underline{F}'$ とする。部分領域から得られる情報 $\underline{F}'$ から、全領域の情報を推定しようとする時、次の誤差を覚悟せねばならない。

$$\delta \underline{F} = \underline{F} - \underline{F}' \quad (2)$$

部分領域 V' を限りなく V に近づければ、 $\underline{F}'$ は $\underline{F}$ に収束し、最終的に $\delta \underline{F} = 0$ となる。一方、 V' が小さいと $\delta \underline{F}$ は統計的な偏りのために大きくなり、 $\underline{F}' = \underline{F}$ を前提とする推論は、危険側の判断をもたらす可能性がある。

不連続性岩盤が $\underline{F}$ で特徴づけられる等価連続体に変換できるとの立場に立てば、 $\delta \underline{F} \neq 0$ が成立する部分領域 V' は、構造最小単位となる。そこで、(2)で定義される誤差テンソル $\delta \underline{F}$ の大きさを評価してみよう。評価すべきは、絶対誤差ではなく、むしろ $\underline{F}$ に対する $\delta \underline{F}$ の相対的な大きさであることに注意すると、誤差の指標として、

$$E^{(2n)} = \frac{(\delta F_{1m \dots n} \delta F_{1m \dots n})^{1/2}}{(F_{ij \dots k} F_{ij \dots k})^{1/2}} \quad (3)$$

を用いるのが適当である。ここで上つきの指標 $(2n)$ は、テンソル $F_{ij \dots k}$ の偶数の階数である。定義から $E^{(2n)} \geq 0$ が常に成立する。二階のテンソル F_{ij} は、クラックの幾何学を近似的に表す上で特に重要である。そこで、この小論では、誤差の指標として、 $E^{(2)}$ を採用することとする。

3 数値実験

3. 1 実験方法

十分大きい領域(二次元)内に、乱数を発生させて、クラックの中心位置の座標を指定する。クラックの長さ r と方位 $\underline{n}$ は、同様に、所定の確率密度を用いて無作為に抽出し各クラックの中心に割り付ける。このようにして、統計的に均質な領域 V を二次元平面上に発生させる

(Fig.3~8のクラックパターン)。その全領域のクラックテンソル F_{ij} を計算すると共に、その中から、位置を異にする多数の部分領域 V' (一辺の長さを L とする正方形領域)を取りだし、その各々の F_{ij}' 及び誤差の指標 $E^{(2)}$ を計算して求める。Fig.3~Fig.8は、このようにして得られた全ての数値実験の結果をとりまとめたものであって、縦軸に $E^{(2)}$ を、また横軸にクラックの平均長さ $\bar{r}$ で無次元化された部分領域の寸法 L を取っている。なお $\bar{r}$ として、単純平均に代って、

$$\bar{r} = \left\{ \int_0^{r_m} r^2 f(r) dr \right\}^{1/2} \quad (\text{二次元}) \quad (4)$$

が使われた。ただし、 $f(r)$ は、全領域 V で定義される寸法の密度関数であり、 r_m は最大寸法である。(4)の定義は、長いクラックに比重を置いた平均の取りかたに相当している。また図中の F_0 、 ξ の記号は、それぞれ、クラックの平均密度とクラックパターンの異方性を測る指標であって次式で定義される。

$$F_0 = \bar{F}_{ii} \quad (5)$$

$$\xi = \sqrt{2} \{ (F_y - \frac{1}{2} F_0 \delta_{yy}) (F_y - \frac{1}{2} F_0 \delta_{yy}) \} / F_0 \quad (6)$$

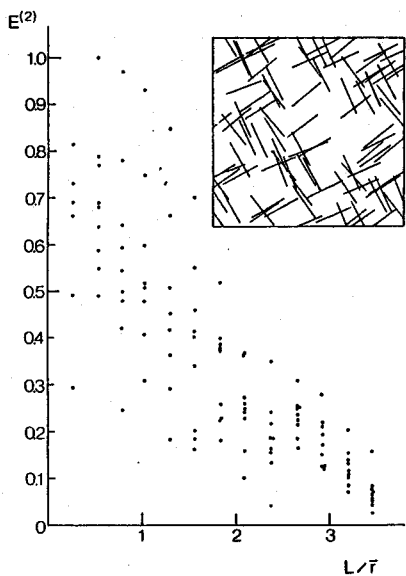


Fig. 3 Crack pattern ($F_0=3.25$, $\xi=0.08$) and decrease of error $E(2)$ with increase of size.

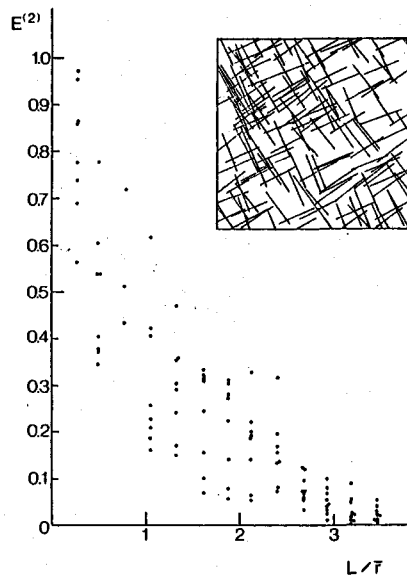


Fig. 4 Crack pattern ($F_0=6.27$, $\xi=0.07$) and decrease of error $E(2)$ with increase of size.

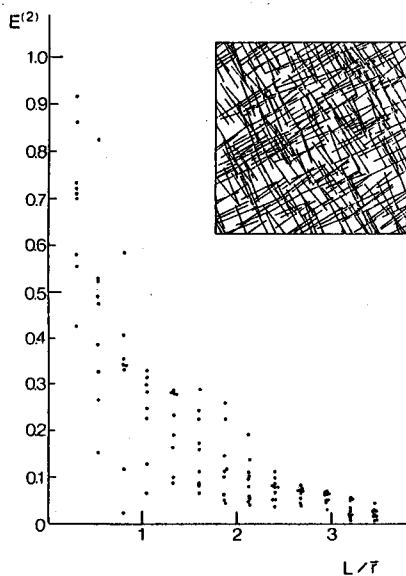


Fig. 5 Crack pattern ($F_0=14.44$, $\xi=0.03$) and decrease of error $E(2)$ with increase of size.

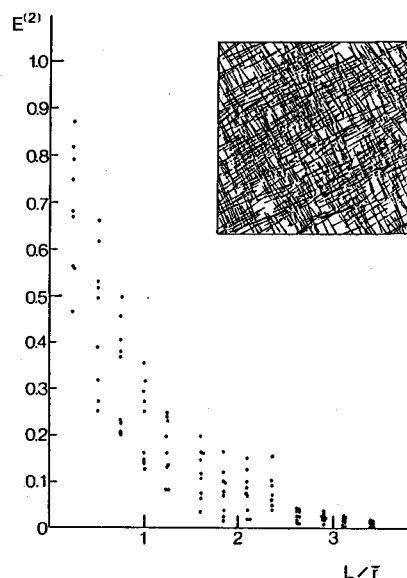


Fig. 6 Crack pattern ($F_0=31.0$, $\xi=0.05$) and decrease of error $E(2)$ with increase of size.

数値実験で採用されたクラックパターンの F_0 、 ξ は、それぞれ、 $3.25 \leq F_0 \leq 31.0$ 、 $0.03 \leq \xi \leq 0.97$ の広い範囲にあるので、その広範な幾何学的特徴が再現されたことになる。

3. 2 数値実験の結果

これから述べる数値実験の結果は、当然のことながら、クラックが統計的に均質に分布する理想化された岩盤にのみ適用されるべきである。(このように理想化された岩盤モデルの性質を論ずる立場は、まず理想気体の性質を論じ、その結果を踏まえて、実存気体の特質を説明しようとする立場に似ている。)数値実験の結果は、次のように要約できる。

- 1) クラックパターンのいかんによらず、部分領域 V' の寸法を大きくすると、誤差の指標 $E^{(2)}$ は零に収束する。
- 2) Fig.3 から Fig.6 は、異方性の指標 ξ を一定に固定しクラック密度 F_0 を3.25から31.0へ大きくした場合の $E^{(2)}$ を示している。クラック密度の大きいものは $E^{(2)}$ は早く零に収束する傾向にある。また、Fig.5,7,8は、同じ F_0 で異方性の指標 ξ を異にする二つのクラックパターンについて、 $E^{(2)}$ の収束傾向を比較している。異方性の程度による顕著な差は、両方の図に認められない。
- 3) 誤差 $E^{(2)}$ をどの程度許容するかは、要求される問題の性質や精度に依存している。ここでは一応の目安として許容誤差を $E^{(2)} \leq 0.1$ に設定してみる。すなわち、この設定は、求めるべきクラックテンソル F_{ij} の1割以内に誤差の大きさを止めることに相当する。この許容誤差を認めれば、クラックの平均寸法の2~3倍が、不連続性岩盤の構造最小単位寸法として採用できる。
- 4) 3)で述べた構造最小単位はクラック分布の統計的均質性を前提に導かれた。もしこの前提が十分に満たされない実岩盤の場合、さらに大きい寸法の構造最小単位が必要であり、この意味で $(2 \sim 3) \times \bar{L}$ は、考え得る最小値であると結論してよい。

4 終りに

クラックテンソルで定義される等価連続体の考え方を基礎として、不連続性岩盤の構造最小単位について考察した。今後、結果の妥当性を実岩盤で吟味する必要がある、その方向で研究を深めて行く予定である。

参考文献

- 1) Bieniawski, Z.T. (1968): The effect of Specimen size on compressive strength of coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 5, 325-335
- 2) Einstein, H.H. and Hirschfeld, R.C. (1973): Model studies on mechanics of jointed rocks, J. Soil Mech. Fund. Div., Vol. 99 (SM3), 229-248.

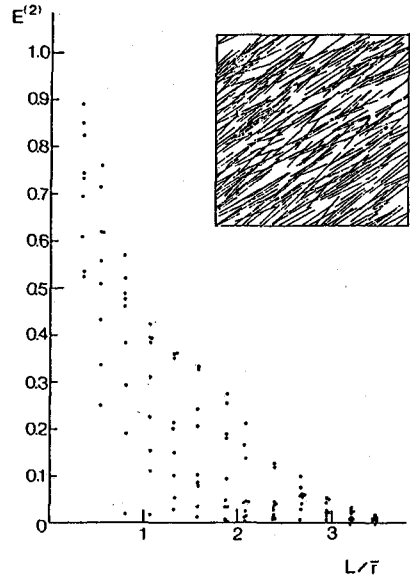


Fig. 7 Crack pattern ($F_0=13.58$, $\xi=0.97$) and decrease of error $E^{(2)}$ with increase of size.

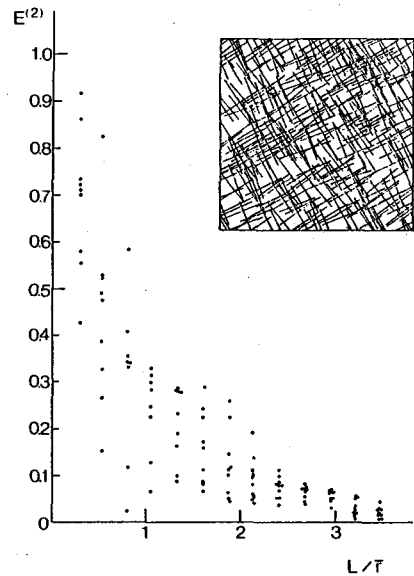


Fig. 8 Crack pattern ($F_0=14.44$, $\xi=0.03$) and decrease of error $E^{(2)}$ with increase of size.

- 3) Thorpe, R. (1979): Characterization of discontinuities in the Stripa granite-Time-scale heater experiment, LBL-7083, SAC-20
- 4) Oda, M., Suzuki, K. and Maeshibu, T. (1984): Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, Soils and Foundations, Vol. 24 (3), 27-40.
- 5) Oda, M. (1985): Permeability tensor for jointed rock masses, Geotechnique, Vol. 35 (4).

(26) MINIMUM SIZE OF JOINTED ROCK MASSES
TO EVALUATE THEIR HYDRO-MECHANICAL PROPERTIES

Saitama University: M. Oda, Y. Hatsuyama and M. Takano

Abstract

It is well-known that the hydro-mechanical properties of jointed rock masses depend seriously on the size of tested samples (size effect). In treating such a material, it is necessary to assume that, with increasing the size, we finally reach a representative elementary volume which is a minimum size showing representative properties identical to the whole mass. Undoubtedly, answering the following question is essential to evaluate the experimental work on rock masses: Is there any general method to determine the representative elementary volume?

In this paper, the representative elementary volume of jointed rock masses is discussed on the basic idea that jointed (discontinuous) rock masses can be replaced, as a first approximation, by an equivalent continuum characterized by the crack tensor F . As a result of numerical experiments, it is shown that the size of the representative elementary volume is two to three times larger than the average size r of crack defined by