

(27) 不連続性岩盤の調査・解析システム

埼玉大学工学部 正会員 小田 匡寛 山辺 正
大成建設 正会員 亀村 勝美

1 はじめに

石油の地下備蓄を初め、高レベルの原子力廃棄物を岩盤内に封じ込めようとする計画の例にも見られる通り、岩盤内に大型土木工事を施工する必要性は、今後とも益々増えて行くものと予想される。しかし、日本のように地質学的に変動帯に属する地域にあっては、岩盤は断層を初めとする種々の地質不連続面によって縦横に切断されている。従って、岩盤の水理・力学的性質に及ぼす不連続面の影響を正しく理解することは、その中に構築される構造物の安定性を評価する上で、ぜひとも必要なことである。

岩盤力学の歴史は、そのまま地質不連続面との関いの歴史であったと云っても過言ではない。その成果の一部は、例えば、断層のような不連続面を力学的に等価なジョイント要素に置き換え、有限要素法によってその水理力学的効果を解析する手法などに見ることができる。最近では、¹⁾『必要な地質情報さえ完全であれば、解析できない問題は事実上ない』と極論できる程度に数値解析の技術は向上したと考えられている。

数値解析技術の飛躍的な進歩にもかかわらず、それに必要な地質情報の処理システムは、かなり立ち遅れていて、全体としての解析精度は、それほど向上していないのが現状ではあるまいか。例えば、地質不連続面の卓越方向、長さ分布、開口幅などが調査業務の一環として実施されたとしても、その結果が直接的に力学解析に反映されることは少なく、判断材料の一つとして利用されるに止まるケースが多いように見うけられる。地質構造の複雑さを考えれば、現状を打破することの困難さは十分理解できる。しかし、解析に直結する地質情報の不足は、岩盤を対象とした重要構造物への需要の増加を考えた時、黙過できない状況にあると云ってよからう。

この研究は、小田らによって提案されているクラックテンソルの概念を拠り所に、地質調査と解析技術の間の溝を埋める意図を持って始められた。研究はいまだ途上にあるが、不連続性岩盤を対象にした調査・解析のシステムの考え方を公表し、皆様のご批判を仰ぎたい。システムの詳細は、対象となる構造物の種類・規模等によって大きく異なるはずであるが、ここでは一応、規模の大きい重要構造物を念頭に置いて、一般的考察を行なうことにする。

2 望ましい地質調査のあり方

ここでは、地質調査を広義に解釈し、地表踏査はもちろん、物理探査やボーリング検層をも含むことにする。岩盤力学における地質調査の目的は、岩盤の地質構成を三次元的に組み立てると共に、名々の構成単位の水理・力学的性質を明らかにすることにあるが、その結果の整理に当たっては、少なくとも次の事項に関する明確な概念が前提となる。

2.1 構造最小単位 (Representative elementary volume)

岩石は不連続性岩盤の重要な構成要素であるにもかかわらず、その性質は岩盤のそれと著しく異なることが知られている。すなわち、岩盤の水理・力学的性質は、地質不連続面の存在に決定的な影響を受け、岩石の性質は副次的な役割を担うに過ぎない。どのような寸法の岩盤(構造最小単位)を取れば、岩盤の性質を抽出できるのだろうか? 岩盤の構造最小単位が何らかの方法で推定されない限り、たとえ金と時間をかけて現位置の水理力学試験を行なったとしても、それを適切に評価する手立てを失うことになりかねない。

岩石の一軸圧縮強度には、明瞭な寸法効果のあることが知られている。寸法を大きく取っていくと、一軸圧縮強度は低下し、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、ある意味で岩石(岩盤ではない)の構造最小単位とも考えられる。取り得る供試体寸法には限界があって、複雑にからみあった地質不連続

の全てをその中に取り入れることは、不可能に近い。

不連続性岩盤の水理・力学的性質が、内在する不連続面に決定的に依存しているとすれば、構造最小単位は、不連続面の地質調査の結果から推論されてしるべきである。岩盤試験の結果の評価は、従って、地質調査から推論される構造最小単位を踏まえて行なわれるべきである。構造最小単位の寸法での実験が、技術的理由で不可能であれば、その結果の解釈について、明確な指針が提示されねばならない。

2.2 統計的に均質 (Statistically homogeneous)

同じ性質を持つ構造最小単位が集まって、統計的に均質な領域を構成する。領域と領域の境界は、異種岩石の境界のように明瞭な場合を除いて、漸進的である。構造物の種類や規模によっては、全解析領域を一つの均質な場とみなして十分な場合もある。しかし、日本のように地質学的に変化に富む場においては、全領域を均質とみなせる岩盤は、極めて例外的と思って間違いない。

対象となる岩盤を統計的意味で均質な領域に区分することは、地質調査の第一歩であると共に、その水理・力学解析を実行する際、境界条件を設定することと等価である。従ってその判断の拠り所となる規準が必要であり、またその判断を可能にする地質情報の整備も重要となる。

2.3 岩盤の同一性 (Identity) と適切性

統計的に均質の問題と表裏の関係にある岩盤の同一性と適切性について考えてみる。問題を分かりやすくするために、(A)、(B)地点で行なわれる岩盤せん断試験を例にして話を進めてみよう。(A)地点の岩盤は、短い節理を多数含むのに対し、(B)地点のそれは、長い節理を数本含むにすぎない。このような岩盤で行なわれたせん断試験の結果を整理して、必要な判断を下す前に、技術者は少なくとも二つの設問に答えねばならない。1) (A)、(B)地点の岩盤は、同一性の条件を満足するか？ 2) (A)、(B)地点の岩盤は、強度常数を求めるべきサンプルとして適切であるか？ この設問に対する答えによって、せん断試験の結果の解釈は、重要な影響を受けるはずである。しかもその判断は、地質調査の必然的な結果として下されるべき性質のものであって、せん断試験の結果に基づくべきではない。しかし残念ながら、上述した(A)、(B)地点の岩盤の例にもみられる通り、断層・節理の紙料な記載のみでは、判断の材料となり得たとしても不十分であって、判断の規準は別に求めなければならぬ。

上の例は、次のことを意味している。記載によって与えられる地質情報は、なんらかの規準に則して一般性 (general) を持った地質情報に変換されなければならない。

3 不連続性岩盤の力学モデル

地質不連続面を便宜的に二種類に分類しておく。その一つは、対象とする岩盤の全領域を横断する規模の大きい断層である。また構造物の近傍に位置し、その安定性に重要な影響を及ぼすと考えられる、若干規模の小さい断層もこの範ちゅうに入れてよいであろう。この種の不連続面の力学的取り扱いについては、例えば、Goodmanらのジョイント要素としてモデル化できる。

第二のものは、岩盤の代表寸法に比べて、十分小さいとみなせる不連続面で、例えば、節理・亀裂などをあげることができる。石油備蓄や原子力廃棄に関連する問題では、関与する岩盤の領域は地質学的規模となり、従って、数m～数十mの節理・亀裂は、小さな欠陥とみなして処理できる。小さな欠陥は、その一つ一つの効果は無視できても、その全体の系でみると、巨大な断層にも匹敵する水理・力学的効果を岩盤に及ぼすことも可能である。無数にある小さな節理の全てを、不連続面として解析のベースに乗せることは、いかに計算機の大規模化が達成されたとしても、不経済のみならず、非現実的である。従って、この種の不連続面を含む岩盤は、それと水理・力学的に等価な連続体、あるいは多孔質媒体へ変換して処理するのが適当であろう。

4 不連続性岩盤の調査・解析

不連続岩盤の調査・解析システムの望ましい姿については、すでに述べた通りである。完全なシステムの開発は、今後の研究に委ねなければならないが、クラックテンソルを軸とするシステムは、前述の要件をある程度満

足している (Fig. 1)。(Fig. 1のフローチャートは、大雑把な概念図であって、調査・解析の全てを網羅したものではない。)

クラックテンソル E は、複雑にからみあった地質不連続面の幾何学性を、一般性の高い無次元テンソルで記述する目的で提案された。^{2)~4)}

$$E = \frac{p}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^2 t^2 n \otimes n \cdots n E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1)$$

ここで、 p =単位体積あたりの不連続の数； n =不連続面に立てた単位法線ベクトル； r =不連続面の寸法 (r_m :最大値)； t =開口幅； $E(n, r, t)$ =確率密度； Ω =立体角。

(1)の縮約を取ることで、任意の偶数階数のテンソルを定義できる。零階のスカラー F_0 は、間隙率と等価であり、二階のテンソル F_{ij} は、応力・歪テンソルと同様に対称であって、三本の直交する主軸と主値によって特徴づけられる。不連続面に沿う水の流を考えるには、 E に代わって、次のテンソル P が重要となる。

$$P = \frac{\pi p}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^2 t^2 n \otimes n \cdots n E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (2)$$

クラックテンソル E は、Fig. 1との関連性に留意しながら、以下に要約する。

(1) 地質情報がテンソル量で表わされることの利点

1)岩盤の水理・力学的挙動を論ずるには、少なくとも応力、歪、変位、流速などのベクトル、テンソル量を扱わねばならない。従って、地質情報がテンソルとして要約されていれば、それは他のテンソル量と違和感なく共存できる。2)テンソル解析で知られたあらゆる関係式が利用でき、特別の数学的工夫を必要としない。3)岩盤の地質的な特質が、テンソルの不変量の形式で一般的に表現できる。

(2) 幾何学的相似則⁵⁾

不連続面の幾何学に関する相似則は、テンソル E を用いて、次のように定義される。岩盤(A)のテンソル $E^{(A)}$ が、岩盤(B)のテンソル $E^{(B)}$ に適當な座標変換を施すことによって一致すれば、岩盤(A) (B)の不連続面の幾何学は相似である。相似の程度は、テンソル $E^{(A)}$ 、 $E^{(B)}$ の階数によって指定され、階数が高ければ、両岩盤の相似性は高い。後でも述べるように、クラックテンソル E は、不連続性材料の弾性コンプライアンス、降伏条件、透水テンソルなどの諸量とも密接な関係にあることを考えあわせると、幾何学的相似条件は、水理・力学的相似性の一つの必要条件ともなっている。

このようなテンソル E の性質は、1)岩盤の同一性、2)適切性、3)岩盤のモデル化などの判断規準として利用できる。一例として、実岩盤(A)のモデル化を考えてみる。実岩盤の不連続面は極めて複雑な幾何学を示すので、何らかの単純化を行なうことなく、実岩盤をそのまま実験室のモデルに再現することは、不可能である。岩盤(A)のクラックテンソルを $E^{(A)}$ とし、モデル(B)を $F_{ij}^{(A)} = F_{ij}^{(B)}$ を満足するように単純化する。(もちろん、二階以上のテンソルでは、 $E^{(A)} \neq E^{(B)}$ である。また必要ならば、 $F_{ijk}^{(A)} = F_{ijk}^{(B)}$ の相似モデル(C)を導入してもよい。) 実岩

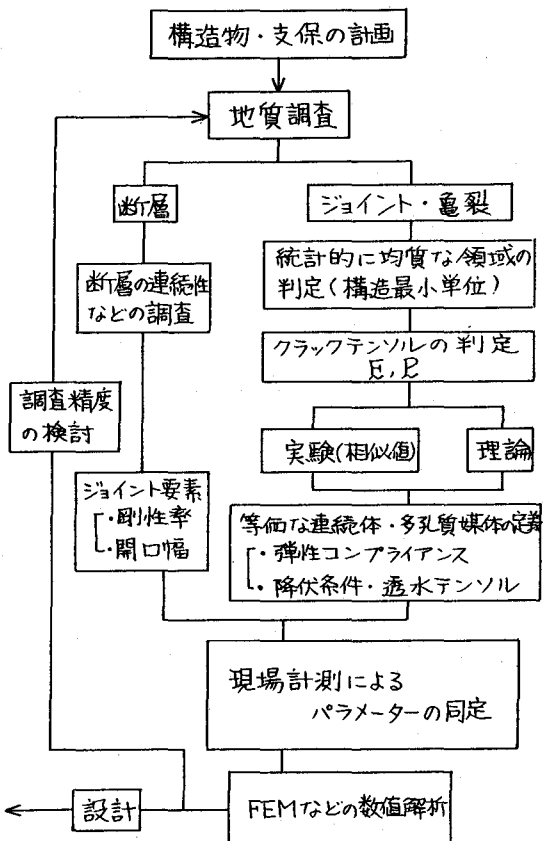


Fig. 1 不連続性岩盤の調査・解析システム

盤(A)とモデル(B)は、二階のテンソルの意味で相似であって、もし対象とする力学量が二階のテンソル F_{ij} によって基本的に支配されているとすれば、相似な力学的挙動をすると期待できる。

(3) 構造最小単位

今、不連続面の長さに対して十分大きい寸法を持つ統計的に均質な領域 V を考える。全領域のクラックテンソルを E とする。 V に属す部分領域 V' を無作為に抽出し、そのクラックテンソル E' を計算する。部分領域から得られた地質情報 E' から全領域の E を推定する時、次の誤差 δE を伴う。

$$\delta E = E - E' \quad (3)$$

部分領域 V' を限りなく V に近づければ、 E' は E に収束し、 $\delta E = 0$ となろう。一方、 V' が小さいと、 δE は大きく、部分領域の観察から得られた地質情報は、全体を測る上で大きな誤差を伴う。偶然に $\delta E = 0$ となったとしても、その偶然を期待するには、危険が大き過ぎる。ではどのような V' を採用すれば、偏りの少ない地質情報を得ることができるであろうか？ この設問は、不連続性岩盤の構造最小単位の決定とも密接に絡んでいる。すなわち、 $\delta E \approx 0$ が常に成立する体積($V = V_c$)を構造最小単位に選び、その体積 V_c を持つ岩盤で必要な水理・力学的諸量を検討すれば、全領域 V に対しての偏りの小さい推定値が得られる。

最近の数値実験の結果によると、 V_c は不連続面の幾何学的性質に依存して変化するようにである。構造最小単位の寸法は、大雑把にいて、次式で定義される平均長さ $\langle r \rangle$ の2～3倍と考えればよさそうである。⁶⁾

$$\langle r \rangle = \left\{ \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr \right\}^{1/3} \quad (\text{三次元}) \quad (4)$$

ただし $f(r)$ は、不連続面の長さ r の密度関数である。

(4) 水理・力学的に等価な連続体・多孔質媒体^{3),4)}

統計的に均質な岩盤を取り出し、そのクラックテンソルを E 、 E' とする。本来不連続な岩盤は、 E 、 E' で特徴づけられた等価な連続体・多孔質媒体とみなされる。その等価連続体の弾性コンプライアンス T_{ijkl} 、透水テンソル k_{ij} は、
$$T_{ijkl} = \left\{ \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (d_{ik} F_{jl} + d_{jk} F_{ie} + d_{ie} F_{jk} + d_{je} F_{ik}) \right\}; k_{ij} = \lambda(F_{ij})(P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (5)$$

ただし、 n 、 g = クラックの垂直・せん断割性に関する量； δ_{ij} = クロネッカーのデルタ； $\lambda(F_{ij}) = F_{ij}$ に依存する無次元のスカラー量。等価連続体の塑性条件についても、 $F(\sigma, E) = 0$ の形式で書けることが、実験的に確かめられている。

(5) 実岩盤のクラックテンソル

実岩盤の E 、 E' を決定するには、地質情報として ρ 、 $E(x, r, t)$ が既知でなければならぬ。しかし、 ρ 、 $E(x, r, t)$ を地質情報として得ることは、不可能ではないとしても、大変に困難な作業を伴う。そこで、 ρ 、 $E(x, r, t)$ を決める代わりに、 E 、 E' を直接的に推定する方法が取られる。

実岩盤で測ることができる量として、例えば、1) x の方向分布、2) 単位長さの測線と交わる不連続面の数、3) 崖や法面で観察されるトレース長さの分布、などがある。これら測り得る量も、最近のステレオロジーの成果を応用すれば、 E と同様に、 ρ 、 $E(x, r, t)$ を用いて定義できる。これらの結果から、テンソル E は、最終的に実岩盤で計測できる量で表現される。⁵⁾

開口幅に関する地質情報は、現在の所非常に限られていて、 E' の推定は、 E のそれと比べて困難な状況にある。しかし、岩盤浸透解析の重要性が認識されて、露頭やボアホールカメラを利用した開口幅の直接測定と共に、ルジオン試験などの間接測定が盛んに実施されている。今後、これらの情報を利用することによって、実岩盤の E をさしたる困難なく推定できることになろう。

実岩盤の E を決定する問題と絡んで、最近、弾性波の速度構造と E との関連性が注目されている。弾性波の速度構造から E が推定できれば、その利用価値は大きく、今後の研究の進展が期待される。

(27) A SYSTEM DEALING WITH FIELD SURVEY TO ANALYSIS FOR JOINTED ROCK MASSES

Saitama University: M. Oda, T. Yamabe

Taisei Corporation: K. Kamemura

Abstract

A system dealing with field survey to analysis for jointed rock masses is discussed on the basis of the crack tensor concept proposed by Oda (1982). The underlying idea is summarized as follows:

Geological discontinuities are classified into two groups; i.e., faults and joints. Faults, which commonly extend through a whole rock mass, are individually modeled in numerical analyses as joint elements developed by Goodman et al. (1968). Individual joints, on the other hand, are not so important, but tends to make a crack system which can play dominant role in the hydro-mechanical response as a whole. However, it is not practical, if not impossible, to replace all visible joints by the joint elements. In such a case, it is recommendable that a rock mass cut by many joints is replced by an equivalent continuum (porous medium) characterized by the crack tensor.

In relation to the proposed system, the following topics are also discussed in detail:

- 1) Representative elementary volume (size effect),
 - 2) Statistically homogeneous rock mass,
 - 3) Representative of rock mass
- and 4) Hydro-mechanically equivalent continuum.

REFERENCES

- 1) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. (1968): Model for the mechanics of jointed rock, J. Soil Mech. Found. Div.(ASCE), Vol.94(SM3), 637-659.
- 2) Oda, M.(1982): Fabric tensor for discontinuous geological materials, Soils and Foundations, Vol.22(4), 96-108.
- 3) 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.
- 4) Oda, M.(1985): Permeability tensor for jointed rock masses, Geotechnique, Vol.35(4).
- 5) Oda, M.(1984): Similality rule of crack geometry in statistically homogeneous rock masses, Mechanics of Materials, Vol.3, 119-129.
- 6) Oda, M., Hatsuyama, Y. and Takano, M.(1986): Minimum size of jointed rock masses to evaluate their hydro-mechanical properties, 18th Symp.on Rock Mech. (JSCE).