

均質化法を用いた岩盤の変形強度特性評価

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK MASS

BY

THE HOMOGENIZATION METHOD

京谷 孝史

Takashi KYOYA

1. まえがき

岩盤の力学特性は不連続面や異種岩石が混在した複雑な構造に支配されている。それらの構造は、岩盤全体から見れば微視的なスケールで存在しており、岩盤をひとつの巨視的な材料と見なすときに、その代表要素に含まれる微視的内部構造と位置づけられる。岩盤の力学挙動解析の成否はそうした微視的内部構造の影響をいかに合理的に取り扱うかにかかっている。

しかしながら、そうした内部構造の影響を解析においてどう扱うかは簡単な問題ではない。解析モデルが対象とする岩盤のスケールと、そこに存在する微視的な内部構造のスケールの差が余りにも大きいからである。岩盤の解析モデルが背景とする力学の論理は、岩盤全体を対象とした巨視的スケールを対象とする。その視点のままで、オーダーが全く異なる微細なスケールで存在する内部構造の影響を組み込もうとすれば、どうしても「何らかの理想化・単純化」あるいは「細部の割愛」という作業を行わざるを得ない。

微視的内部構造に支配された岩盤の力学挙動を取り扱うには、岩盤全体の力学モデルの中へ直接的に内部構造の影響を組み込もうとするのではなく、まず、岩盤全体から見れば微視的スケールで存在する内部構造に対して、しかるべき解析を行ってその平均的力学特性を評価し、それを対象岩盤の「要素」の特性として捉え、その後、に所与の境界条件のもとでの巨視的な本来の岩盤の変形破壊挙動を予測評価するという、2段階スケールからのアプローチが有効であると考える。

以下では、均質化法が有する多段階スケールの理論構造を応用して、岩盤の内部構造の正確な画像情報とそれを構成する岩石の力学特性をもとに、岩盤要素の変形強度特性を評価し、それを極限荷重解析に应用することによって、巨視的スケールにおいて岩盤構造物の安定解析までを行うという、2段階スケールで岩盤の力学挙動を取り扱う一連の方法について述べる。

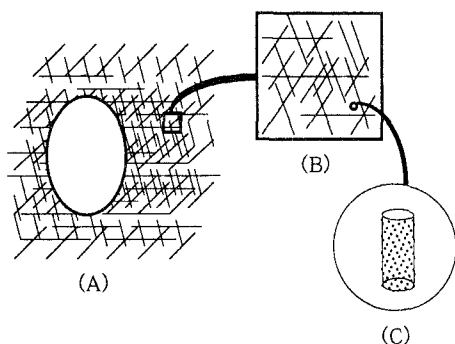


図-1 (A) 不連続性岩盤に掘削される空洞;
(B) 代表的岩盤要素; (C) 岩石供試体

2. 均質化法による岩盤の巨視的平均弾性係数と破壊基準の推定

2・1 均質化法によって評価される岩盤の変形強度特性の意味

図-1 (A)は、無数の不連続面を含む岩盤に掘削される空洞を表している。このような空洞の設計において必要なのは、ひとつの工学材料として岩盤を扱うときの巨視的な変形・強度特性であり、それは同図(B)のような岩盤の「代表要素」が発揮する変形強度特性である。そのような代表要素は、

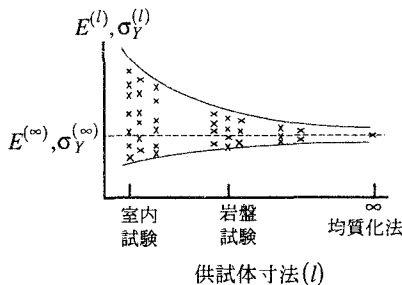


図-2 寸法効果と均質化法による推定値の関係

含む岩盤の平均弾性係数と巨視的強度が評価される。こうして得られた変形強度特性は、寸法効果を説明した図-2において、供試体寸法を無限大とした時の $E^{(\infty)}$ および $\sigma_Y^{(\infty)}$ に相当するものである。

2・2 岩盤の巨視的平均弾性係数の評価

岩盤表面の観察から得られる画像情報をもとに、図-3に示すように、岩盤の典型的な内部構造を表している領域を抜き出して岩盤の基本構造単位（ユニットセル）とする。

このユニットセルの3次元領域を Y 、その内部の点を y とし、点 y に存在する岩石や弱層部分の弾性係数を $E_{ijkl}(y)$ と表す。そして、ユニットセルに関して以下の方程式を周期境界条件のもとで解く。

$$\int_Y E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY \quad \forall v_i \in H^1(Y) \quad (1)$$

式(1)は自由指標 (k, l) の6通りの組み合わせに対応した6つの方程式を表している。左辺は、非均質な弾性体に関する仮想仕事式と同様であり、右辺は異種材料の配置による弾性係数の空間的な分布の仕方に依存して定まる量である。

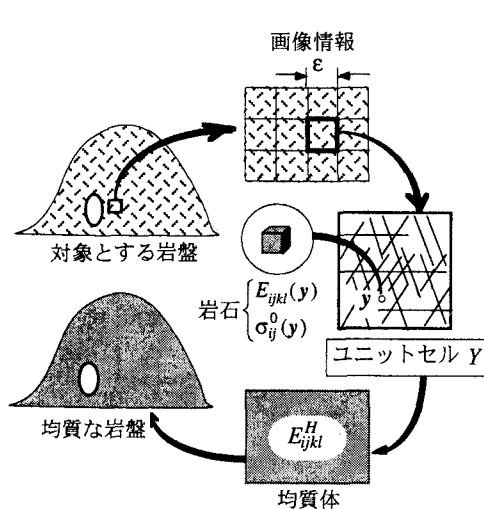


図-3 画像情報と岩石の力学特性による岩盤の均質化のプロセス

岩盤を特徴付ける分布不連続面や何種類かの岩石が混在する複雑な構造を有している。代表要素を含むその構造は、岩盤全体から見れば微視的な内部構造として位置づけられる。このような内部構造によって特徴付けられる岩盤の変形強度特性は、当然のことながら岩石のそれとは異なる。室内試験において扱うことができる岩石供試体の寸法は、岩盤の代表要素よりもはるかに小さいからである（図-1(C)）。

均質化法では、岩盤を特徴付ける微視的内部構造を有した代表要素を基本構造単位（ユニットセル）として、岩盤全体をそのユニットセルが無限に繰り返された一種の複合材料として扱う。そして、そのユニットセルを解析することによって、ユニットセルに代表される微視構造を無数に

式(1)を解いた結果得られる6つのベクトル $\chi_p^{kl}(y)$ は、ユニットセルの特性変形関数と呼ばれ、ユニットセルに単位大きさの一樣な巨視的ひずみ（変位勾配 $\partial u_i^0 / \partial x_j$ ）を与えた時に、ユニットセル内に発生する周期的な変位分布を表す。特性変形関数 $\chi_p^{kl}(y)$ が得られると、岩盤の平均弾性係数 E_{ijkl}^H はユニットセルに関する次式のような積分で与えられる。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(y) - E_{ijpq}(y) \frac{\partial \chi_p^{kl}(y)}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

式(2)の平均弾性係数 E_{ijkl}^H は、ユニットセルが示す基本構造の寸法を無限小としたときの極限值として得られるものであり、 E_{ijkl}^H は供試体寸法を無限大としたときの弾性係数に相当する（図-2 参照）。

平均弾性係数 E_{ijkl}^H を求めたことによって、図-3に示すように、岩盤は一つの均質体に置き換えられる。もちろん、岩相や不連続面分布の様子が異なる領域が混在する場合には、それぞれの領域毎に代表的な構造をユニットセルとして抽出して、各領域毎に上述の計算を行って平均弾性係数を求めればよい。

2・3 岩盤の巨視的破壊基準の評価

岩盤の巨視的破壊基準は、仮に、対象とする岩盤から内部構造を十分に含む巨大な供試体を数多く採取して、様々な応力経路の強度試験を行うことができるならば決定できるであろう。しかし、それは現実には不可能である。ところが、岩盤を構成する岩石の破壊基準が室内試験によって定められていれば、そして、岩盤の内部構造がユニットセルとしてモデル化されていれば、以下に述べるような均質化法を利用した数値実験によって決定することができる。

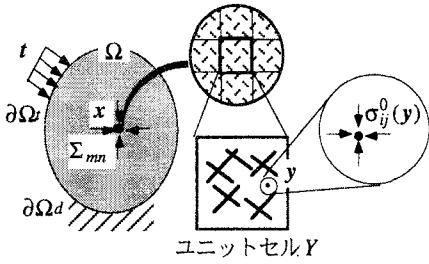


図-4 巨視的平均応力と微視的応力

岩盤を対象としたとき、以上のことは「岩盤内部のある点近傍に作用する巨視的平均応力が Σ_{mn} であるとき、そこに存在する微視的内部構造（ユニットセル）を構成する岩石材料に作用する応力が微視的応力 $\sigma_{ij}^0(y)$ である」ということである（図-3 参照）。

したがって、岩盤のある1点で発生する初期破壊に対する基準を次のように定義することができる（図-4 参照）。

[定義]：岩盤中の点 x の近傍にあるユニットセルの内部において、微視的応力 $\sigma_{ij}^0(y)$ がそこに存在する岩石材料の強度を超えるような点 y が現れれば、岩盤中の点 x において巨視的な破壊が始まる。

この定義のもとで、岩盤に対する巨視的破壊基準は、式(3)を利用した以下のような数値試験によって定めることができる。

まず、岩石の破壊基準は通常の岩石供試体を用いた室内試験によって、例えばDrucker-Prager型の基準

$$f(\sigma_{ij}^0) = \alpha \sigma_{kk}^0 + \sqrt{\frac{1}{2} s_{ij}^0 s_{ij}^0} - K = 0 \quad (4)$$

のように定めておく。次に、平均応力 Σ_{ij} の6次元空間に単位球を考え、その球面上に均等に分布するように、十分な数の単位大きさの平均応力テンソル $\bar{\Sigma}_{mn}$ を準備する（図-5 参照）。

そうして、それらの単位応力 $\bar{\Sigma}_{mn}$ のそれぞれについて、その単位応力をユニットセルに一樣に作用させたときにユニットセル内部に発生する微視的応力 $\sigma_{ij}^0(y)$ を式(3)によって算定する。そして、その微視的応力がユニットセル内のいたるところで式(5)に与えられている岩石材料の破壊基準を超えないよ

うにしつつ、単位応力 $\bar{\Sigma}_{mn}$ を何倍まで大きく出来るかという倍率係数の最大値 $\beta_{\max}$ を求める。

こうして、準備した全ての単位応力に対して同様の操作を行えば、得られた巨視的破壊応力点はその凸領域の境界面上に分布することになる。この凸領域の境界面が岩盤の巨視的破壊基準を与える。したがって、得られた複数の巨視的破壊応力点を通る6次元曲面をしかるべき式で表現すれば「岩盤に対する巨視的破壊基準 $F(\Sigma_{ij}) = 0$ 」が定められることになる。この巨視的破壊基準を式で表現するに際しては、座標変換等の扱いが便利な二次曲面

$$F(\{\Sigma\}) = \{\Sigma\}' [A] \{\Sigma\} + \{b\}' \{\Sigma\} - 1 = 0, \quad \{\Sigma\} = \{\Sigma_x \quad \Sigma_y \quad \Sigma_z \quad \Sigma_{yz} \quad \Sigma_{zx} \quad \Sigma_{xy}\}' \quad (5)$$

を用いることにする。

以上の作業は、「岩盤の代表要素を無数に含んだ巨大な供試体をたくさん準備し、何通りもの応力経路で強度試験を行って破壊基準を定めた」ことに相当する。こうして、得られた破壊基準は寸法効果を説明する図-2における $\sigma_y^{(\infty)}$ に対応する。

2・4 画像情報の利用による微視的内部構造の有限要素モデル化

均質化法による岩盤の変形強度特性の評価は、有限要素法による数値解析によって実現される。その際、岩盤の内部構造をできるだけ正確に表現するために、岩盤の内部構造を表す写真あるいはスケッチ等の画像情報から、画像の

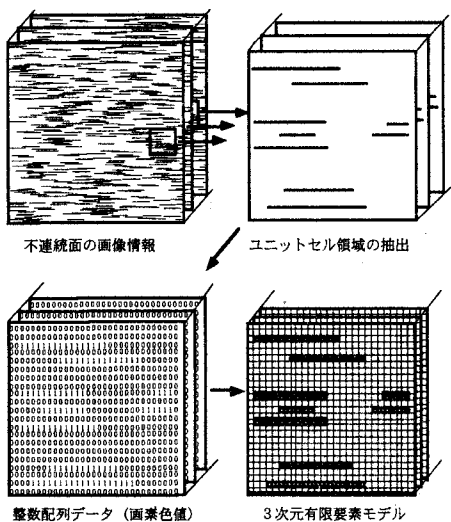


図-6 画像情報を利用したユニットセルの有限要素モデルの作成

き方向にも続くと仮定した擬3次元モデルになる。なお、不連続面についてはZienkiewiczのジョイント要素に習い、画像に現れた黒い線をそのまま薄い弱層としている。

3. 岩盤ブロックせん断試験の数値解析

表-1 岩石の変形強度特性

一軸圧縮強度 σ_c	909 kgf/cm ² (89.1 MPa)
粘着力 c	188.3 kgf/cm ² (18.45 MPa)
内部摩擦角 ϕ	45 度
ヤング率 E	2.6×10^5 kgf/cm ² (25.5 GPa)
ポアソン比 ν	0.12

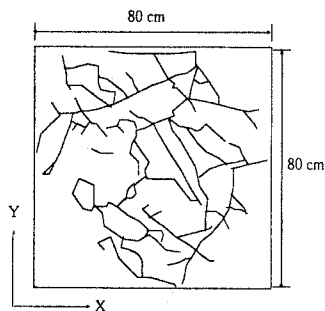


図-7 岩盤のユニットセルの画像

コンピュータ・ディスプレイ上の1画素を1立方体要素とするユニットセルの3次元有限要素モデルを作成している。

まず、現位置岩盤の露頭において撮影された写真やスケッチ等を用いて、その岩盤の代表的内部構造を表すと考えられる不連続面分布や異種岩石の混在を示す領域を決定して岩盤のユニットセルとする。また同時に、対象とした領域を構成している岩石のコアサンプルを採取し、室内3軸試験によって岩石の弾性定数および破壊基準を決定しておく。

次に、図-6に示すように、採取した画像をスキャナーで読み取り、コンピュータ・ディスプレイ上で基本構造単位(ユニットセル)を表す領域を指定して、画素の色値を表す整数値配列データに変換する。提案法では0から255の間の整数値として表している。得られた整数値配列に対し、一つの数値に一つの3次元立方体有限要素が対応するように要素分割を割り当てる。この要素分割はコンピュータ内部で自動的に行われる。このモデル化作業においては、もしユニットセルの奥行き方向の構造が推定できるような画像データが準備できれば、それらを補間することによってユニットセルの3次元的な構造を表現する有限要素モデルが作成できる(図-6参照)。そのような画像データが入手出来なければ、1つの画像データから得られる構造が奥行

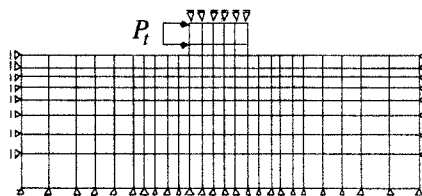


図-8 岩盤ブロックせん断試験の有限要素モデル

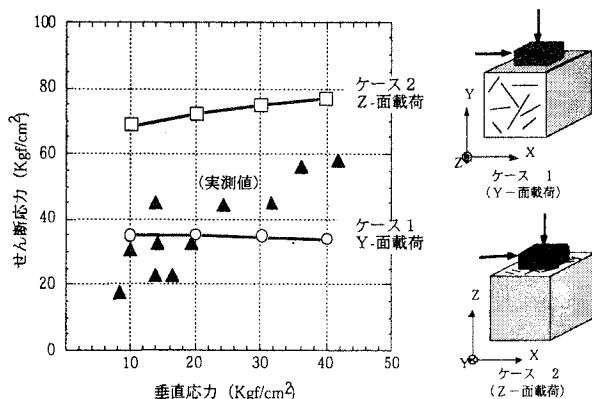


図-9 岩盤せん断試験の実測値と解析値の比較

参考文献

- 1) 京谷孝史, 寺田賢二郎, 欧陽立珠: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集 (投稿中)