

不連続性岩盤の構成式について

(株) 青木建設 技術本部研究所 正会員 ○永井哲夫

" " 正会員 孫 建生

神戸大学 工学部建設学科 正会員 櫻井春輔

1. はじめに

不連続性岩盤においては、力学的挙動が構成岩石の力学特性よりも不連続面の特性によって支配されるため、その予測に際しては不連続面の影響を適切に評価しなければならない。このことを考慮して、本研究では不連続性岩盤の力学的挙動を推定するため、それと等価な連続体の応力-ひずみ関係を誘導する。そして、不連続面の数をテンソル量として取り扱うことにより、この応力-ひずみ関係が構成式になることを明らかにする。最後に、過去に行われたモデル実験の結果との比較をもとにその妥当性の検証を行う。

2. 不連続性岩盤の応力-ひずみ関係

不連続面の分布特性に関する従来の研究¹⁾から、節理性岩盤における不連続面は卓越した方位を持つ数組の不連続面群に分類できることが分かっている。そこで本研究では、不連続性岩盤として節理性岩盤を取り上げ、これを図-1(a)のようにモデル化する。この不連続体モデルは、その要素内に不連続面が数多く存在する場合、巨視的には連続体として取り扱えると考えられる。そこで、このモデルと力学的に等価な挙動を示す連続体を想定し、その応力-ひずみ関係を誘導すると2次元平面ひずみ状態では次のようになる²⁾。

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (1+\nu_i) \{ (1-\nu_i) \sigma_x - \nu_i \sigma_y \} / E_i \\ &\quad + \sum_{j=1}^N (N_{xj} \sigma_{nj} \sin \theta_j / dL K_{nj} - N_{xj} \tau_j \cos \theta_j / dL K_{sj}) \\ \varepsilon_y &= (1+\nu_i) \{ -\nu_i \sigma_x + (1-\nu_i) \sigma_y \} / E_i \\ &\quad + \sum_{j=1}^N (N_{yj} \sigma_{nj} \cos \theta_j / dH K_{nj} + N_{yj} \tau_j \sin \theta_j / dH K_{sj}) \\ \gamma_{xy} &= 2(1+\nu_i) \tau_{xy} / E_i \\ &\quad + \sum_{j=1}^N (-N_{yj} \sigma_{nj} \sin \theta_j / dH K_{nj} + N_{yj} \tau_j \cos \theta_j / dH K_{sj} \\ &\quad - N_{xj} \sigma_{nj} \cos \theta_j / dL K_{nj} - N_{xj} \tau_j \sin \theta_j / dL K_{sj}) \quad \dots (1)\end{aligned}$$

ここで、 E_i, ν_i : 岩石実質部の弾性係数およびポアソン比、 dL, dH : 不連続体モデルの x 軸および y 軸方向の長さ、 N_{xj}, N_{yj} : dL および dH 部分を横切る第 j 群の不連続面の数、 θ_j : 第 j 群の不連続面の角度、 K_{nj}, K_{sj} : 第 j 群の不連続面の垂直およびせん断剛性(式(2)参照³⁾)をそれぞれ示す。

$$K_{sj} = K_j \gamma_w (\sigma_{nj} / P_a)^{n_j} \quad \dots (2)$$

ここに、 K_j, n_j : 不連続面のせん断剛性数および剛性指数、 γ_w, P_a : 水の比重および大気圧(K_j を無次元化するためのパラメータ)をそれぞれ表す。また、 σ_{nj} および τ_j はそれぞれ第 j 群の不連続面に作用する垂直およびせん断応力であり、モデル境界の応力 σ_x, σ_y および τ_{xy} と次のような関係にある。

$$\begin{aligned}\sigma_{nj} &= \sigma_x \sin^2 \theta_j + \sigma_y \cos^2 \theta_j - \tau_{xy} \sin 2\theta_j \\ \tau_j &= \{ (-\sigma_x + \sigma_y) / 2 \} \sin 2\theta_j + \tau_{xy} \cos 2\theta_j \quad \dots (3)\end{aligned}$$

3. 不連続性岩盤の構成式

一般に、構成式においては、ある座標系でその材料定数を決定できれば、あとは座標変換を施すことにより任意の座標系における構成式を得ることができなければならない。そのため、式(1)の応力-ひずみ関係が構成式であるためには、それを座標変換して得られる式と変換後の座標系に対して求めた応力-ひずみ関係が等しくなければならない。そこで、図-1に示すような任意の2つの座標系および要素を用いて検討

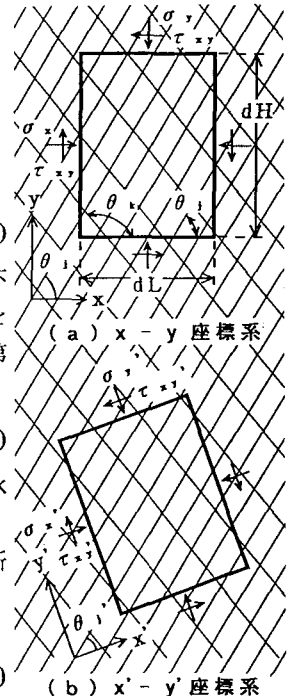


図-1 モデルと座標系

する。いま、 N_{xj} および N_{yj} がスカラー量であるとして考えると式(1)は構成式にならないことから、座標系により変化するものとして取り扱う。ここでは、 $x-y$ 座標系におけるそれを N_{xj} および N_{yj} 、 $x'-y'$ 座標系におけるそれを N_{xj}' および N_{yj}' とそれぞれ定義する。そのとき、式(1)が構成式であるためには次式が常に成立しなければならない。

$$\begin{Bmatrix} N_{xj}' \\ N_{yj}' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j - \theta_j') & -dL \sin(\theta_j - \theta_j') / dH \\ dH \sin(\theta_j - \theta_j') / dL & \cos(\theta_j - \theta_j') \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_{xj} \\ N_{yj} \end{Bmatrix} \quad \cdots (4)$$

上式は不連続面の数がテンソル量であることを示すもので、このように考えると式(1)の応力-ひずみ関係は構成式になることが分かる。そして、第 j 群の不連続面の数($\{N_{xj} \ N_{yj}\}^T$)が、図-2に示すように局所座標系(1-2座標系)においては、その不連続面の間隔(dS_j)を用いて $\{0 \ dH/dS_j\}^T$ と表せることから、上式を逆変換して N_{xj} および N_{yj} が次のように得られる。

$$\{N_{xj} \ N_{yj}\}^T = \{(dL/dS_j) \sin \theta_j \ (dH/dS_j) \cos \theta_j\}^T \quad \cdots (5)$$

式(3)および式(5)を式(1)に代入して整理すると、対象となる不連続性岩盤の構成式は次のように表せる。

$$\{\epsilon\} = [C] \{\sigma\}$$

ここで、 $\{\epsilon\}$ および $\{\sigma\}$ は、それぞれ $x-y$ 座標系でのひずみベクトル($\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$)および応力ベクトル($\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}^T$)を示している。また、 $[C]$ はコンプライアンスマトリックスであり、その各成分 C_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)は次のように表される。

$$\begin{aligned} C_{11} &= (1 - \nu_i^2) / E_i + \sum_{j=1}^M (\sin^2 \theta_j / K_{nj} + \cos^2 \theta_j / K_{sj}) \sin^2 \theta_j / dS_j \\ C_{12} = C_{21} &= -\nu_i (1 + \nu_i) / E_i + \sum_{j=1}^M (1 / K_{nj} - 1 / K_{sj}) \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{13} = C_{31} &= \sum_{j=1}^M \{-2 \sin^2 \theta_j / K_{nj} - (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{22} &= (1 - \nu_i^2) / E_i + \sum_{j=1}^M (\cos^2 \theta_j / K_{nj} + \sin^2 \theta_j / K_{sj}) \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{23} = C_{32} &= \sum_{j=1}^M \{-2 \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{33} &= 2(1 + \nu_i) / E_i + \sum_{j=1}^M \{4 \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j)^2 / K_{sj}\} / dS_j \end{aligned}$$

最後に、過去のモデル実験結果との比較をもとに本構成式の妥当性を検証する。ここでは、単一群の不連続面を規則的に設けた不連続供試体による三軸圧縮試験の結果⁴⁾をもとに、最大軸差荷重の50%応力時の見かけの弾性係数を求め、本構成式による計算値と比較した(図-3)。この図から、本構成式により単一群の不連続面を含む不連続体モデルの見かけの変形特性をよく表現できることが分かる。

【参考文献】

- 1) 菊池ら：土木構造物基礎岩盤中の節理分布性状の定量的評価に関する検討，電力土木，No.154, 1978.
- 2) 永井哲夫：不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学学位論文，1992.
- 3) Kulhawy, F.H. : Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, Engineering Geology, Vol.9, pp.327-350, 1975.
- 4) Arora, V.K. : Strength and Deformational Behaviour of Jointed Rocks, Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology, New Delhi, India, 1987.

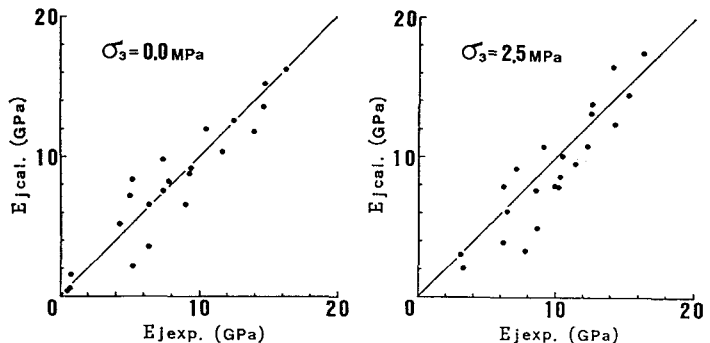


図-3 実験値⁴⁾と計算値 (Agra sandstone)