

(株) 間 組 正 員 西尾 朗
 京都大学 工学部 正 員 島 昭治郎
 京都大学 工学部 正 員 谷本 親伯

1. はじめに

岩盤は、本質的に不連続性に起因する異方性と不均一性を呈するため、岩盤を対象とする原位置試験結果はばらつくのが普通であり、従来のように岩盤を等方弾性体と仮定する解析手法では岩盤の力学特性を一意的に評価することはできない。そこで、岩盤内の不連続性を前提とした解析手法の確立が急務となる。本論文では、ボアホールジャッキ試験が、多方向载荷によって岩盤の異方性を評価でき、しかもボアホールテレビ観測との組み合わせによって不連続面の分布状況等の情報を試験結果の解析に反映させ得ることに着目して、ボアホールジャッキ試験結果から岩盤の変形特性を不連続性を考慮して定量的に評価する手法について提案する。また、原位置試験を実施して本手法の現場への適用性を検討する。

2. 不連続性を考慮した解析手法

不連続面の主な特性として、幾何学的特性と力学特性があり、前者は不連続面の位置、方向、間隔等によって、後者は Goodman によって提案された不連続面の剛性 k_n 、 k_s によって定量的に表現される。図1のように不連続面が規則正しく配列（接合構造）する岩盤において、東から北へ反時計方向に θ 傾いた方向の単軸応力状態における巨視的な変形係数 $D(\theta)$ を上記の特性を考慮して次式のように求めた、

$$D(\theta) = \left[\frac{1}{E} + \frac{A_3}{h} \left\{ \frac{1}{k_s} (A_1 + A_2) + \frac{1}{k_n} A_3 \right\} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$A_i = (a_{i1} \cdot \cos \theta + a_{i2} \cdot \sin \theta) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cdot \cos \beta & \sin \alpha \cdot \sin \beta & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \cdot \sin \beta & \sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

なお、図中の鉛直方向に削孔されたボーリング孔を利用してボアホールジャッキ試験を行う場合、 θ 方向に载荷して得られる変形係数 $D_j(\theta)$ は岩盤を構成する岩石と不連続面の両者の変形量を反映したもので (1) 式の $D(\theta)$ に相当すると考えられる。図2～5は接合構造の岩盤に (1) 式を適用して $D(\theta)$ と剛性との関係を示したものである。また、 $D(\theta)$ の最大値と最小値の比 $D(\theta)_{\max} / D(\theta)_{\min}$ (方向係数比と便宜的に呼称) は次式で与えられる。

$$e = k_n / k_s \geq 2 \text{ かつ } \sin^2 \beta \geq \frac{e}{2(e-1)} \text{ のとき}$$

$$\frac{D_{\max}}{D_{\min}} = 1 + \frac{E}{k_n} \frac{\sin^2 \beta}{h} = 1 + \frac{E}{k_n} \frac{n \sin^2 \beta}{\cos \beta} \quad (4)$$

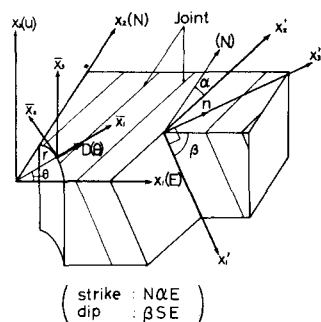


図-1 規則的かつ平行に配列した節理系を持つ岩盤モデル

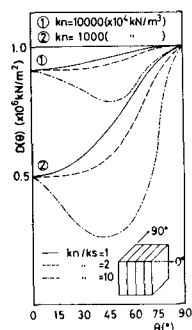


図-2 不連続性岩盤の変形特性

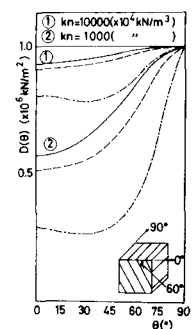


図-3 不連続性岩盤の変形特性

$$e < 2 \text{ あるいは } \sin^2 \beta < \frac{e}{2(e-1)} \text{ のとき}$$

$$\frac{D_{\max}}{D_{\min}} = 1 + \frac{E}{k_n} \frac{\sin^2 \beta}{h} \{ (e-1) \cos^2 \beta + 1 \} \quad (5)$$

3. 原位置試験結果の評価

調査の対象とした原位置岩盤の地質は、主に輝緑凝灰岩から構成されている。この岩盤に数本の鉛直ボーリング孔を削孔し、ボアホールジャッキ試験とボアホールテレビ観測を行った。载荷試験は不連続性岩盤の異方性を評価するために、採取されたコアの肉眼観察およびテレビ観測から孔壁に存在する不連続面がほぼ平行な一組の節理系を成している区間を選定して、4方向に単調载荷で実施した。その結果の一例を図6に示す。変形係数は荷重範囲 3~5(MPa)の荷重-変位曲線の直線部分から算定した。同図より载荷方向の違いによるD_jの変動が顕著に認められる。また、観察結果から载荷地点の孔壁はボーリングによる擾乱も少なく、このD_jの変動は、主に不連続面の諸特性に起因していると考えてよい。そこで(1)式に基いて整理する。なお、载荷重は低応力レベルであり、不連続面の垂直およびせん断方向の荷重-変位関係が線形関係として近似でき、剛性k_n, k_s(本来は応力依存性を示す)が一定値をとるものとする。また、種々の不連続面を含む凝灰岩を対象とした実験から、初期せん断剛性と垂直剛性がほぼ等しいことが確認されており、ここでは簡単のため、k_n=k_s(e=1)と仮定する。図2~5からも明らかのように、変形係数は不連続面の走向方向で最大値、傾斜方向で最小値をとり方向係数比は(5)式より次式で与えられる。

$$\frac{D_{\max}}{D_{\min}} = 1 + \frac{E}{k_n} \frac{e^2}{4(e-1)} \cdot \frac{1}{h} \quad (6)$$

図7は、4方向に载荷して得られたD_jの方向係数比: D_{jmax}/D_{jmin}と不連続面の幾何学的特性を示す指標: n·sin²β/cosβ(亀裂影響度)の関係を示したものである。これより(6)式に対応した相関関係が見られるもののがばらつきが目立つ。このばらつきは、不連続面の開口度、ラフネス、風化度や充填物等の複雑な性状に支配される剛性や岩石の変形係数に起因していると推察される。同図に(4)式に対応する上限と下限の直線l₁, l₂を引けば、この直線の傾きは(6)式のE/k_nに相当する。今、岩石の変形係数をE=10000MN/m²とおけば、不連続面の最小値と最大値が概略次のように求められる。

$$k_{n1}(\min) = k_{s1}(\min) = 0.6 \times 10^4 (\text{MN/m}^2)$$

$$k_{n2}(\max) = k_{s2}(\max) = 1.7 \times 10^5 (\text{MN/m}^2)$$

このようにして、広範囲で数多くの地点の不連続面の剛性が推定できれば、対象とする岩盤の変形挙動を定量的に予測することができる。

4. 参考文献

- 1) R.E.Goodman; Introduction to Rock MECHANICS pp.135-210, John Wiley & Sons.

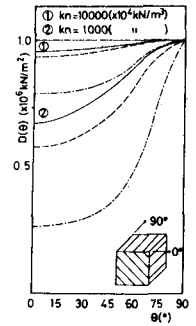


図-4 不連続性岩盤の変形特性

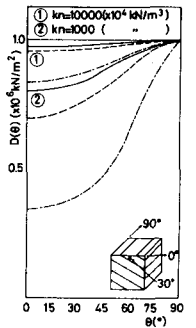


図-5 不連続性岩盤の変形特性

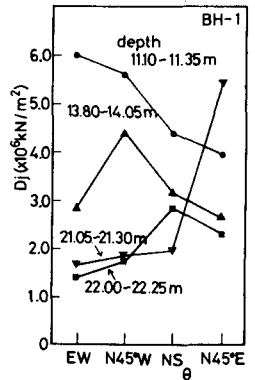


図-6 原位置試験結果

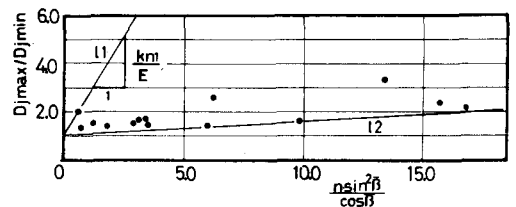


図-7 方向係数比とき裂影響度の関係