

III-299 ロックボルトのせん断補強特性の数値解析法への導入

埼玉大学 正員 吉中 龍之進

例熊谷組 正員 清水 昭男 ○新井 元 西村 良司

1. はじめに

著者らは、岩盤不連続面に対するロックボルトのせん断補強効果・メカニズムを解明するため、一連のモデル実験と解析を通して研究を進めている。ここでは、実験結果の解析から求めたロックボルトのせん断補強特性を地盤の数値解析法(RBSM)へ導入する方法について述べる。

RBSM(剛体バネモデル)では連続体の変形をバネで近似するが、不連続面の存在による変形性の変化を、連続体のバネと不連続面のバネとを(せん断バネ、垂直バネとも)直列につなぐことにより表現できる。連続体(弾性体)のバネおよび剛性方程式は文献1)等)に示される一般的なものを用いた。

2. 不連続面の強度変形特性のモデル化

不連続面のせん断応力～せん断変位関係を初期剛性 K_{si} と極限強度 τ_{ult} を用いて、次の双曲線式で近似する。(図1参照)

$$\tau = \tau_{ult} \cdot K_{si} \cdot U / (\tau_{ult} + K_{si} \cdot U) \quad (1)$$

ここに τ は不連続面のせん断応力、 U は不連続面のせん断変位を表す。増分型の解析において、 $\tau = \tau_0$ のときせん断剛性 K_{st} は次式による。

$$K_{st} = K_{si} (1 - \tau_0 / \tau_{ult})^2 \quad (2)$$

初期剛性 K_{si} は、不連続面の垂直応力 σ_n を用いて

$$K_{si} = K_{so} \{ \sigma_n / (a_1 + a_2 \cdot \sigma_n) \}^m \quad (3)$$

ここに、 K_{so} 、 m 、 a_1 、 a_2 は不連続面の粗さに関連した定数で、 $a_1 + a_2 \cdot \sigma_n$ は、不連続面の接触率を表す。極限強度 τ_{ult} は基底摩擦角 ϕ 、割増係数 C_1 を用いて次式で表す。

$$\tau_{ult} = C_1 \cdot \sigma_n \cdot \tan(\phi + i) \quad (4)$$

$$i = i_0 \cdot \log_{10} (\sigma_c / \sigma_n) \quad (5)$$

ここに、 i はダイレイタンス角、 σ_c は母岩の一軸圧縮強度、 i_0 はBartonのJRCに相当する角度の次元を持った量である。不連続面の垂直応力～圧縮変位(δ)関係を初期垂直剛性 K_{ni} と圧縮変位限界 δ_1 を用いて、次の双曲線式で近似する。(図2参照)

$$\sigma_n = \delta_1 \cdot K_{ni} \cdot \delta / (\delta_1 - \delta) \quad (6)$$

増分型の解析において $\sigma_n = \sigma_{no}$ のとき、垂直剛性 K_{nt} は次式による。

$$K_{nt} = K_{ni} \{ 1 + \sigma_{no} / (\delta_1 \cdot K_{ni}) \}^2 \quad (7)$$

K_{st} 、 K_{nt} は不連続面の単位面積当たりのバネの強さを表す。

3. ダイレイタンスの考慮

せん断変位増分 ΔU に対するダイレイタンス増分を次式で表す。

$$\Delta v = \Delta U \cdot \tan \{ i \cdot b_2 / \sqrt{U + b_1} \} \quad (8)$$

ここに、 b_1 、 b_2 は不連続面の粗さに依存した定数である。この垂直変位の等価荷重 F を次式より求める。

$$F = \Delta v \cdot K_{nt} \cdot A \quad (9)$$

ここに、 A は二つのブロックで構成される不連続面の面積である。不連続面の垂直応力に、予め圧縮応力 F/A を加算し、図3のように F を両側の剛体に载荷する。

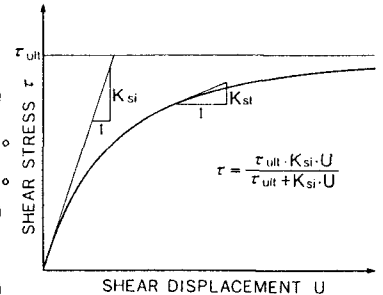
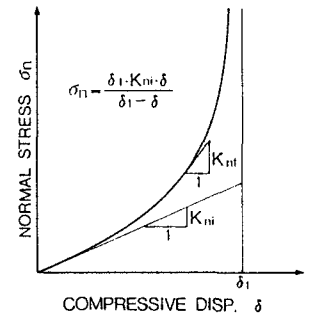
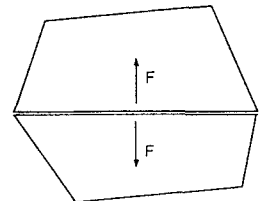
図1 不連続面の $\tau \sim U$ 関係図2 不連続面の $\sigma_n \sim \delta$ 関係

図3 等価荷重の载荷模式図

4. ロックボルトのせん断補強効果の考慮

ロックボルトを考慮する手法として、そのせん断補強効果を不連続面のバネに含めることも考えられるが、それでは、ボルト軸力の不連続面直角方向成分による不連続面の垂直応力の増加、すなわち、二つのブロックを引き寄せ合わせる効果を表現できないという欠点があるため、以下のような直接的な方法を採用した。

図4のように、任意のせん断変位Uに対するロックボルトの変形状態が決まり、ボルト軸力Nとボルトせん断力S、ボルトと不連続面のなす角 ω が計算できるものとする（文献2）参照）

载荷段階iでの増分荷重に対し、まずボルトを無視して解析し、累積の剛体変位から不連続面のせん断変位Uとダイレイタンス v を求め、 N_i 、 S_i 、 ω_i を計算する。ボルトから両側の剛体に働く不連続面直角方向力の増分 ΔP および不連続面方向力の増分 ΔQ （図5）は次式により求める。

$$\begin{aligned} \Delta P &= (N_i \sin \omega_i + S_i \cos \omega_i) - (N_{i-1} \sin \omega_{i-1} + S_{i-1} \cos \omega_{i-1}) \\ \Delta Q &= (N_i \cos \omega_i - S_i \sin \omega_i) - (N_{i-1} \cos \omega_{i-1} - S_{i-1} \sin \omega_{i-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、添字 i-1はiの直前の载荷段階を表す。

$\Delta P, \Delta Q$ を（ダイレイタンスに係わるFも同時に）構造全体にわたって計算し、全体系の荷重に換算して、剛性マトリックスは変えずにi段階の二回目の解析を行う。

5. 計算例

本手法の妥当性を検証するため2、3の実験ケースの数値シミュレーションを行った。表-1に実験に用いた主な入力定数を、図6に解析結果と実験値との比較を示す。初期剛性は実験誤差が大きいので K_{so} は調整してあるが、実験値と解析値は比較的よい一致を示している。

表-1 入力定数

不連続面のモデル化にはまだまだ検討の余地があるが、本手法はロックボルトで補強した不連続面を含む地下空洞掘削解析等に適用できるものと考えられる。なお、本手法ではボルトの破断も容易に考慮することが可能である。

参考文献

- 1) 石橋, 松本: ひずみ軟化特性を考慮した極限解析法によるトンネル掘削問題の解析 土木学会論文報告集第 331号, p103~111, 1983
- 2) 吉中, 清水, 新井, 加藤, 蟻坂: 不連続面のせん断補強に供するロックボルトの変形特性 第43回土木学会年次学術講演会講演概要集 (Ⅲ), 1988

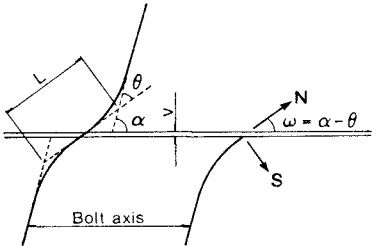


図4 ボルトの変形と不連続面に働く力

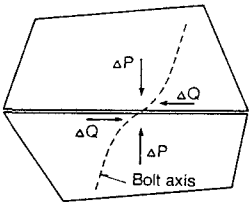


図5 ボルトの増分荷重

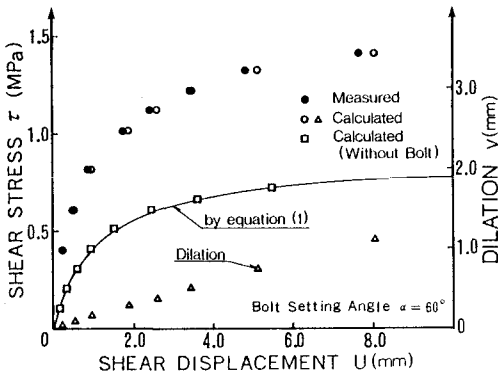
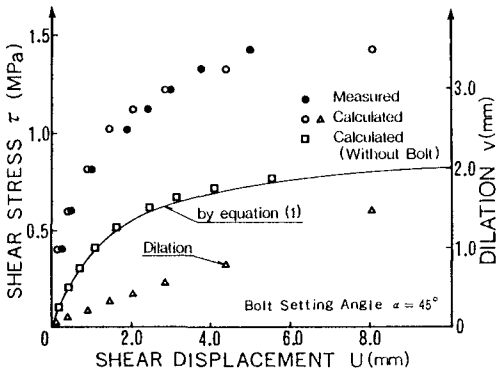


図6 解析結果と実験値との比較