

埼玉大学 正員 吉中 龍之進 坂口 聡

" 腰塚 憲一

熊谷組 正員 清水 昭男 ○新井 元

## 1. はじめに

本研究は、節理性岩盤に対するロックボルトの補強効果を解明するための基礎研究である。現実の節理面の形状は複雑であり定量的考察が困難なため、これを最も単純化した定角度の粗さを用いて一連のモデル実験および解析を進めている。本文は、実験結果に基づき、ボルトを含む岩盤節理モデルのせん断応力～せん断変位関係の定式化を試みたものである。

## 2. 応力～変位関係の近似

図-1に岩盤節理モデル(実験供試体)の平面図を示す。実験結果を(せん断変位/せん断応力)～せん断変位の形で整理すると図-2のようになる。いずれの場合も良い線形性を示し、双曲線近似が可能なことがわかる。初期の乱れは、節理の閉塞と母岩の弾性変形の影響と考えられる。

上記2要因を除く接触面上のスベリは次式で表現される。

$$\Delta\tau = K_{st}\Delta U_s, \quad K_{st} = K_{si}(1 - \tau/\tau_{ult})^2 \quad (1)$$

ここで $\Delta\tau$ はせん断応力増分、 $\Delta U_s$ はスベリによるせん断変位増分、 $K_{st}$ は接線せん断剛性、 $K_{si}$ は初期せん断剛性、 $\tau$ はせん断応力、 $\tau_{ult}$ は $\tau$ の極限值である。

ボルトを含まない場合、 $K_{si}$ と $\tau_{ult}$ は次式により求める。

$$K_{si}^R = \alpha (\sigma/Pa)^\beta / \cos^2 i \quad (2)$$

$$\tau_{ult} = \sigma_n \tan(\phi + i) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ は実験より求まる定数、 $Pa$ は大気圧、 $\sigma$ は接触面の垂直応力、 $i$ は接触面の傾角、 $\sigma_n$ は垂直応力、 $\phi$ は接触面の摩擦角である。

## 3. ロックボルトの寄与の評価

## (1) 最大強度に対する寄与

図-3にボルトの効果の模式図を示す。ボルトを含めた節理面の最終強度は次式により求められる。

$$\tau_{ult} = (\sigma_n + N/A \sin \theta) \tan(\phi + i) + (N \cos \theta + S_b)/A \quad (4)$$

ここで、 $N$ はボルト軸力、 $\theta$ はボルトとせん断方向のなす角、 $S_b$ はボルトのせん断力のせん断方向成分、 $A$ はせん断面の面積である。 $\theta$ はボルトと母岩の剛性、せん断変位等の多くの要因により決まる量で、今回は実験値を用いる。 $N$ は、ボルトの応力 $\sigma_b$ とボルト断面積 $A_b$ を乗じて求めるが、 $\sigma_b$ は降伏応力と破断強度の間の値をとり、引張りずみのレベルに応じて定められる。 $S_b$ はボルトせん断応力 $\tau_b$ を用いて、

$$S_b = \tau_b A_b \sin \theta \quad (5)$$

で与えられる。 $\tau_b$ の値は高々ボルトのせん断降伏応力である。

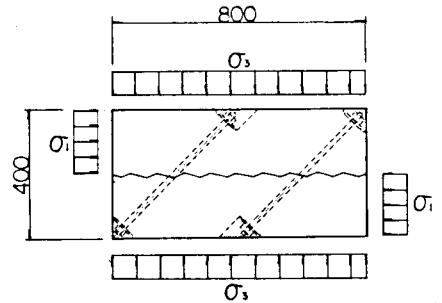


図-1 岩盤節理モデルの平面図

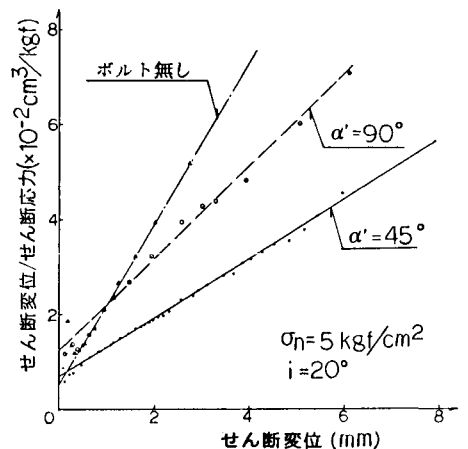


図-2 (せん断変位/せん断応力)～せん断変位の関係

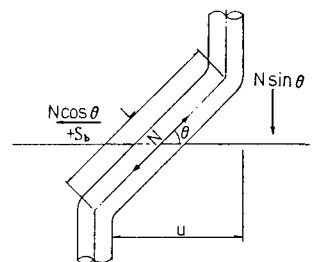


図-3 ボルトの強度効果の模式図

## (2) 初期剛性に対する寄与

図-4に载荷初期のボルトの模式図を示す。軸力効果による初期剛性に対する寄与 $K_{si}^N$ は次式により求める。

$$K_{si}^N = N' / u \cdot (\sin \alpha' \tan(\phi + i) + \cos \alpha') / A \quad (6)$$

$$N' / u = A_b \cdot C \cos(\alpha' - i) / \cos i \quad (7)$$

ここで、 $N'$ は初期ボルト軸力、 $u$ はせん断変位、 $\alpha'$ はボルト敷設角、 $C$ は、既成の論文より、ボルトヤング率 $E_b$ 、ボルト半型 $R$ 、付着バネ係数 $C_0$ を用いて、次式のように求められる。

$$C = \sqrt{2E_b \cdot C_0 / R} \quad (8)$$

せん断効果による寄与 $K_{si}^S$ は次式（Changの式）により求める。

$$K_{si}^S = 2E_b I / A \cdot (K_H B / (4E_b I))^{3/4} \cdot \sin(\alpha' - i) / \cos i \quad (9)$$

ここで、 $I$ はボルトの断面二次モーメント、 $K_H$ は横方向の岩盤の反力係数、 $B$ はボルト直径である。 $K_H B$ は次式（Vesicの式）により求める。

$$K_H B = 0.65E / (1 - \nu^2) (E_b^4 / (E_b I))^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 $E$ 、 $\nu$ は母岩の弾性定数である。

## 4. 計算値と実験値の比較

上記の方法に従って、実験のシミュレーションを行い、実験値と比較した。計算に用いた数値を表-1に示し、応力～変位曲線を図-5に示す。

$\alpha = 45^\circ$ のケースについては、比較的良好一致を示すが $\alpha = 90^\circ$ のケースは、初期剛性が実験の方がかなり低い。これは、ボルトをセットする際にできる節理面の微小な開きが、ケースによって差があり、かつ $\alpha = 90^\circ$ の場合は、その影響が $45^\circ$ の場合に比べて非常に大きいためと考えられる。

## 5. あとがき

今回、節理の閉塞と母岩の弾性変形の影響は除外したが、これについては一応の目処が立っている。最大強度発生時の $\theta$ と $N$ の定式化および節理面の開きの影響の評価は今後の課題である。なお本文の計算法は歯形の切断以前を取り扱ったものである。

最後に、本文をまとめるに当たって、多大な御協力を頂いた（株）熊谷組 加藤恵三氏に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 吉中、坂口ら、低拘束圧下における不連続面のロックボルトによる補強効果に関する実験的研究、第18回岩盤力学に関するシンポジウム、P96~100、1986
- 2) 吉中、加藤ら、不連続岩盤モデルにおけるロックボルトの変形特性に関する一考察、第41回土木学会年次学術講演会（Ⅲ）、1986

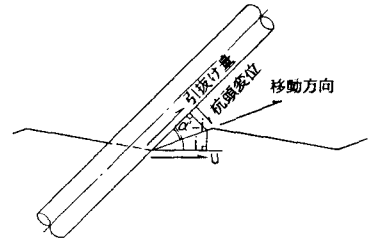


図-4 载荷初期のボルトの模式図

表-1 計算用数値表

| 項目        | 単位   | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| $i$       | deg. | 0     | 0     | 20    | 20    |
| $\alpha'$ | deg. | 45    | 90    | 45    | 90    |
| $\phi$    | deg. | 45    | 42    | 42    | 42    |
| $\theta$  | deg. | 32.2  | 70.5  | 42.5  | 71.7  |
| $N$       | kg   | 17870 | 11920 | 15890 | 11920 |
| $S_b$     | kg   | 1460  | 2590  | 1860  | 2620  |

| 項目         | 単位                 | 1~4  | 項目    | 単位                 | 1~4              | 項目    | 単位                 | 1~4    |
|------------|--------------------|------|-------|--------------------|------------------|-------|--------------------|--------|
| $\alpha$   | deg.               | 70   | $A$   | $\text{cm}^2$      | 1600             | $R$   | cm                 | 0.795  |
| $\beta$    | deg.               | 0.65 | $A_b$ | $\text{cm}^2$      | $2 \times 1.986$ | $I$   | $\text{cm}^4$      | 0.314  |
| $p_a$      | $\text{kg f/cm}^2$ | 1.0  | $E_b$ | $\text{kg f/cm}^2$ | 2100000          | $E$   | $\text{kg f/cm}^2$ | 170000 |
| $\sigma_n$ | $\text{kg f/cm}^2$ | 5    | $C_0$ | $\text{kg f/cm}^2$ | 618.2            | $\nu$ |                    | 0.168  |

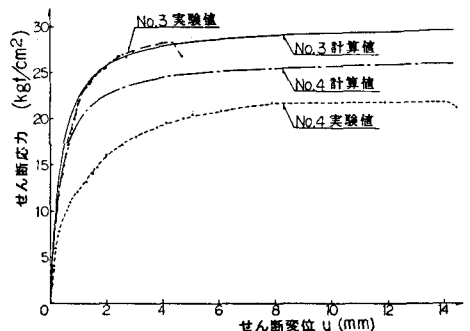
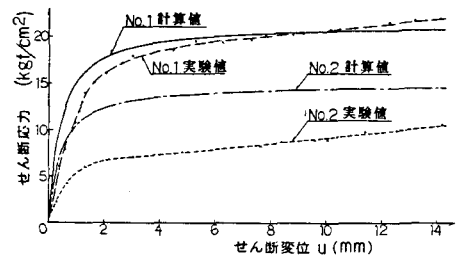


図-5 せん断応力～せん断変位曲線