

III-367

2系統の不連続面を有する岩盤におけるロックボルトの補強効果

㈱ニュージェック 正会員 ○北條 明 中村 真
 関西電力㈱ 正会員 打田靖夫 吉田次男
 神戸大学工学部 正会員 櫻井春輔

1. まえがき

トンネルや地下発電所などの施工において、不連続性岩盤の補強工としてのロックボルトの効果は、広く認められている。通常、ロックボルトで補強された不連続性岩盤の力学的挙動を解析する際には、まずその岩盤を連続体としてモデル化し、モデル化した連続体中にロックボルトがあるとして解析を行う。しかしこのようなモデル化では、硬岩ではロックボルトの効果はあまり見られず、軟岩に対してやっとその効果がみられる程度¹⁾である。

本研究では、ロックボルトによる岩盤の補強効果を不連続面の剛性の向上と考え、2系統の不連続面を有する岩盤を等価な連続体としてモデル化する方法により、岩盤の応力-ひずみ関係を導いた。そして、ロックボルトを梁要素で、不連続面をジョイント要素で表現したFEM解析の結果と比較、検討した。

2. 応力-ひずみ関係

ロックボルトを含む不連続面をそれと等価な不連続面に置き換えるにあたり、永井ら²⁾は不連続性岩盤におけるロックボルトの役割は、不連続面の変形の拘束にあるとして、その不連続面の等価な垂直剛性 K_n^* およびせん断剛性 K_s^* を求め、ロックボルトにより不連続面の変形が拘束される効果を次式により表現した。

$$E_{j1}^* = 1 / (1/E_1 + N \cos^3 \theta / d H K_n^* + N \cos \theta \sin^2 \theta / d H K_s^*) \cdots (1)$$

ここで、 E_1 は岩石実質部の弾性係数、 $d H$ はモデルの高さ、 θ および N は不連続面の角度と本数である。

本研究では、ロックボルトにより補強された2系統の不連続面を有する岩盤モデルに対し、ロックボルトの作用効果を取り込んだ応力-ひずみ関係におけるみかけの弾性係数 E_{j2}^* を次式のように導いた。

$$E_{j2}^* = 1 / (1/E_1 + N_1 \cos^3 \theta_1 / d H K_n^* + N_1 \cos \theta_1 \sin^2 \theta_1 / d H K_s^* + N_2 \cos^3 \theta_2 / d H K_n^* + N_2 \cos \theta_2 \sin^2 \theta_2 / d H K_s^*) \cdots (2)$$

3. ジョイント要素を用いたFEM解析結果との比較

図-1にシミュレーション解析で用いたモデルを、表-1には使用した物性値を示す。図-2に示すようにロックボルトは梁要素とし、岩盤とロックボルトの間にも付着特性を表現するために、ジョイント要素を用いている³⁾。境界条件は、底面は鉛直方向固定、水平方向自由(右端は固定)として、上辺に鉛直方向の強制変位を1ステップ0.1mmで20ステップまで与えた。シミュレーションモデルの変形図を図-3に示す。

図-4には、式(2)を用いて求めた軸方向応力-軸方向ひずみ関係とシミュレーション結果の比較を示す。図-4において、実線で示したシミュレーション結果に比べて式(2)を用いて算出した破線の結果の方が、剛性が大きくなっている。その原因を探るため、シミュレーショ

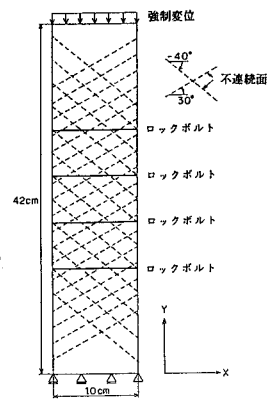


図-1 解析モデル

表-1 使用した物性値

岩石実質部	弾性係数	$E_1 = 10,780 \text{ MPa}$
	ポアソン比	$\nu_1 = 0.2$
不連続面	せん断剛性	$K_s = 1,500 \sigma_j \text{ GN/m}^2$
	垂直剛性	$K_n = 100 \text{ GN/m}^2$
ロックボルト	弾性係数	$E_b = 205,800 \text{ MPa}$
	断面積	$A_b = 0.0071 \text{ cm}^2$
	断面2次モーメント	$I = 0.000384 \text{ cm}^4$
付着要素	せん断剛性	$K_{ab} = 1,000 \text{ GN/m}^2$
	垂直剛性	$K_{nb} = 1,000 \text{ GN/m}^2$

* : $\phi 3 \text{ mm}$ のボルトを奥行き 100 mm ピッチで配置したモデルを想定した。
 σ_j の単位 : GN/m^2

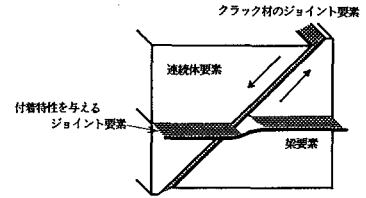


図-2 ロックボルトのモデル化

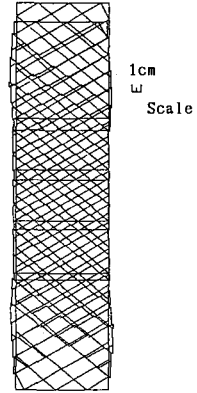


図-3 シミュレーションモデルの変形図
 $(\sigma_y = 9.3 \text{ MPa 時})$

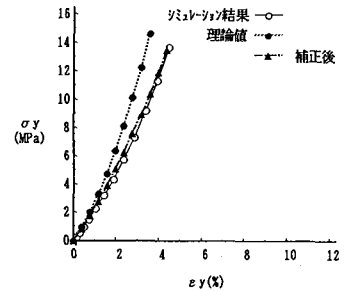


図-4 シミュレーション結果との比較

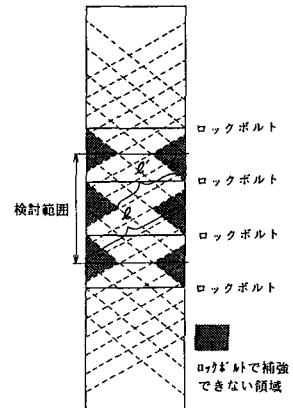


図-5 ロックボルトで補強できない領域

ン結果のロックボルト周辺の応力分布を調べたところ、シミュレーション結果では応力をほとんど負担していない領域と、応力集中している領域が存在していることがわかった。応力を負担していない領域は、図-5の薄墨色で示した位置に出現するが、不連続面のせん断剛性は垂直応力の関数となるため、この領域の不連続面のせん断剛性は非常に小さくなる。このため、シミュレーションではモデル全体としての剛性も低くなったものと思われる。

そこで、式(2)を用いた計算では、不連続面の長さを l とし、図-5に示した応力をほとんど負担しないと思われる薄墨色の領域を通る部分を除いた長さを l' とし、 l' / l だけ不連続面の剛性率を低減した。これより、図-4において一点鎖線で示すように、上記の補正をして求めた応力-ひずみ関係とシミュレーション結果はかなりよく一致するようになった。

4. あとがき

本研究では、ロックボルトの効果を不連続面の剛性が増すものとして応力-ひずみ関係に取り込むことにより、ロックボルトと不連続面を忠実にモデル化した解析手法と同等の結果が得られることを示した。ここで示した考え方を基に構成式を導けば、ロックボルトを打設した岩盤を等価な連続体に置き換えてFEM解析を行なうことも容易である。

（参考文献）

- 1) 川本 脩万・アイダ・オメル : ロックボルトの支保機能について, 電力土木, No.214, pp.3~13, 1988.
- 2) 永井 哲夫・櫻井 春輔 : ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の挙動に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 10-B, pp.1~12, 1992.
- 3) 北條 明・原田 俊之・打田 靖夫・櫻井 春輔 : 不連続性岩盤におけるロックボルトの作用効果について, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.361~365, 1993.