

Ⅲ-A357

ロックボルトによる岩盤不連続面の変位拘束効果のモデル化

清水建設技術研究所 正会員 多田浩幸

1. はじめに

岩盤の補強工であるロックボルトの補強効果を定量的に評価するために、様々なロックボルトのモデル化手法が提案されている。規模の小さな不連続面を多数含む岩盤にロックボルトを規則的に打設した場合、岩盤中に設置するロックボルトを直接モデル化して解析するかわりに、ロックボルトで補強された不連続性岩盤を等価な連続体に置き換えて解析する方法の適用が考えられる。本研究では、不連続面に対するロックボルトの補強効果は、不連続面に生じる変位を拘束する効果であると考え、ロックボルトによる不連続面の変位拘束効果のモデル化を行い、不連続性岩盤を等価な連続体に置き換える解析手法に取り入れた。そして、本解析手法による数値実験を行い、変位拘束モデルの適用性について検討した。

2. 解析手法の概要

ロックボルトで補強された不連続性岩盤を等価な連続体としてモデル化する方法には、Oda¹⁾によって提案されたクラックテンソルによる不連続性岩盤の応力～ひずみ関係を用いた。クラックテンソルによる不連続性岩盤の応力～ひずみ関係は式(1)のように定式化される。

$$\varepsilon_{ij} = \left[\frac{1}{E} \left\{ (1+\nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl} \right\} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik}F_{jl} + \delta_{jk}F_{il} + \delta_{il}F_{jk} + \delta_{jl}F_{ik}) \right] \sigma_{kl} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 E, ν は岩盤基質部の弾性係数、ポアソン比、 h, g は不連続面の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ、 $F_{ij,kl}$ は不連続面の幾何学性を示す2階、4階のクラックテンソル、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。 h, g は垂直とせん断の方向の2つスプリングから成る不連続面のスプリングモデルから求められる²⁾。

3. 変位拘束効果のモデル化

単一不連続面に打設した全面接着ボルトの室内せん断試験^{3),4)}から、ロックボルトの補強効果は、不連続面のせん断に伴うロックボルトの軸力効果とせん断抵抗の和で表されることが知られている。そこで、不連続性岩盤におけるロックボルトの補強効果は、ロックボルトの軸力とせん断抵抗によって不連続面に生じる変位を拘束する効果であると考え、不連続面の垂直剛性とせん断剛性にロックボルトによる剛性を付加することによって、ロックボルトによる変位の拘束効果を表現した。以下に、変位拘束モデルの特徴を示す。

(1)ボルトと交差する不連続面のモデル化：岩盤中に分布する不連続面のうち、図1に示すボルトと交差する不連続面は、不連続面のスプリングモデルにボルトの軸方向とそれに垂直な方向のスプリングから成るボルトのスプリングモデル⁵⁾を組み合わせることによりモデル化する。なお、ボルトと交差する不連続面は大きさが等しく、同一方向に分布する不連続面群とする。

(2)ボルトのスプリングモデル：各スプリングは図2に示す変形強度特性を示すものとする。

(3)ボルトと交差する不連続面の剛性：ボルトの剛性を付加した不連続面の垂直剛性 H とせん断剛性 G はEggerら⁶⁾の研究を参考にすると式(2)、(3)で表せる。

$$H = \frac{1}{r} \left\{ (1-p)H_j + prH_b \right\} = \frac{1}{r} h' \quad \cdots \cdots (2)$$

$$G = \frac{1}{r} \left\{ (1-p)G_j + prG_b \right\} = \frac{1}{r} g' \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 r は不連続面を円で置換した時の直径、 p はボルトの不連続面に対する面積比、

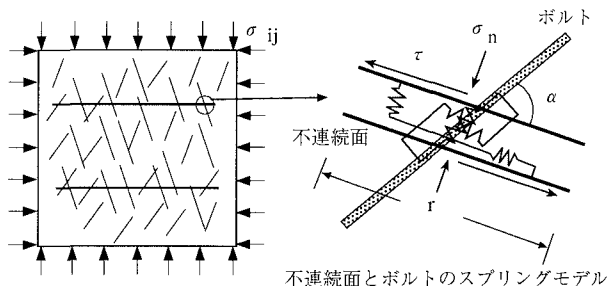


図1 変位拘束効果のモデル化

キーワード：不連続性岩盤、ロックボルト、補強効果、等価連続体、クラックテンソル

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 TEL 03-3820-5520 FAX 03-3820-5955

H_j, H_b は不連続面とボルトの垂直剛性、 G_j, G_b は不連続面とボルトのせん断剛性である。また、 $H_j = h_0$ 、 $H_b = (ka^2 \sin^2 \alpha + ks^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}$ 、 $G_j = g_0 + g_1 (\sigma_{nj} + \sigma_{nb})$ 、 $G_b = (ka^2 \cos^2 \alpha + ks^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$ と導かれる。ここで、 h_0, g_0, g_1 は実験で求めるパラメータ、 σ_{nj} は不連続面に作用する垂直応力、 ka, ks は図2に示すボルトの軸剛性、せん断剛性、 α は不連続面とボルトの交差角、 σ_{nb} はボルトのせん断変形に伴って生じる不連続面に作用する垂直応力増分である。

(4)等価連続体解析への導入：式(1)の h, g に式(2)、(3)の h', g' を用いることにより、ボルトで補強された不連続性岩盤を等価な連続体に置き換える。

4. 数値実験

式(1)~(3)を有限要素解析プログラムに組み込み、図3に示す不連続面を含む供試体のモデルを用いた数値実験を実施した。解析はボルトを打設しない場合と打設する場合について行った。荷重条件は平面ひずみ状態において、側圧 $\sigma_3 = 0.2 \text{ MPa}$ を作用させ、 σ_1 方向に载荷するものとした。不連続面のせん断挙動については、モール・クーロンの破壊基準に従い、破壊前はせん断剛性の垂直応力依存性を考慮し、破壊後は初期せん断剛性の $1/100$ の一定として非線形特性を表現した。ボルトを打設した場合の不連続面の強度 τ_p については次式を用いた。

$$\tau_p = c_j + (\sigma_{nj} + p \sigma_{by} \sin \alpha) \tan \phi_j + p (\sigma_{by} \cos \alpha + \tau_{by} \sin \alpha) \dots \dots (4)$$

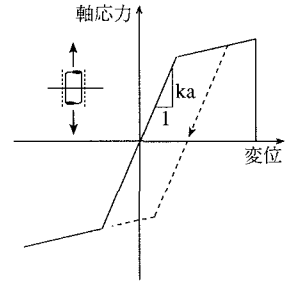
ここで、 c_j, ϕ_j は不連続面の粘着力と内部摩擦角、 σ_{by} はボルトの降伏応力、 τ_{by} はボルトのせん断降伏応力である。解析に用いたパラメータは $E = 78 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.25$ 、 $h_0 = 5 \text{ GPa}$ 、 $g_0 = 109 \text{ MPa}$ 、 $g_1 = 141 \text{ MPa}$ 、 $c_j = 0 \text{ MPa}$ 、 $\phi_j = 40^\circ$ 、 $p = 0.0005$ 、 $ka = 572 \text{ GPa/m}$ 、 $ks = 146 \text{ GPa/m}$ 、 $\sigma_{by} = 700 \text{ MPa}$ 、 $\tau_{by} = 60 \text{ MPa}$ と設定した。なお、ボルトの物性に関しては既往の研究^{5),6)}を参考にした。解析結果の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸変位の関係を図4に示す。同図より、ボルトがある場合はボルトがない場合に対して、変形係数(ピーク強度における割線の傾き)が1.7倍、強度が2.4倍となり、ボルトの打設による変形係数ならびに強度の改良効果が表現できている。

5. まとめ

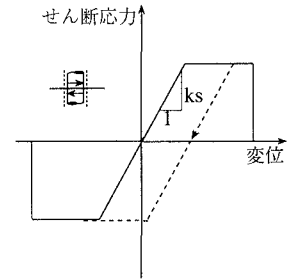
本研究では、ロックボルトによる不連続面の変位拘束効果のモデル化を行い、不連続性岩盤を等価な連続体に置き換える解析手法に取り入れ、不連続面を含む供試体モデルの数値実験に適用した。その結果、本モデルによりロックボルトの補強効果を表現できることが分かった。

今後は、模型実験等により本モデルの検証を行い、実規模の問題へ適用していく予定である。

参考文献：1) Oda, M. : An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988. 2) 山辺正, 原夏生, 小田匡寛 : クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究, 土木学会論文集, No.382/Ⅲ-7, pp.121-130, 1987. 3) Bjurström S. : Shear strength of hard rock jointed reinforced by grouted untensioned bolts, Proc. 3rd ISRM Cong., Denver, USA, pp.1194-1199, 1974. 4) 吉中龍之進, 清水昭男, 新井元 : 岩盤不連続面に対するロックボルトの補強効果, 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.2, pp.177-186, 1988. 5) Lorig, L.J. : A Simple Numerical Representation of Fully Bonded Passive Rock Reinforcement for Hard Rocks, Computers and Geotechnics, 1, pp79-97, 1985. 6) Egger P., Pellet F. : Numerical and experimental investigations of the behaviour of reinforced jointed media, Proc. Int. Conf. on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, USA, pp.277-282, 1992.



(a)軸挙動



(b)せん断挙動

図2 ボルトの応力～変位関係

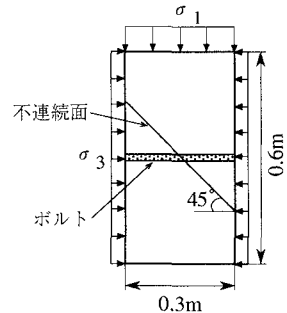


図3 数値実験のモデル

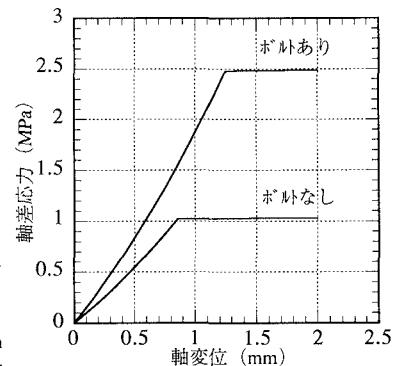


図4 解析結果