

Ⅲ-B167

ロックボルトのせん断補強効果に関する考察

(株) クレアテック 正会員 鄭 光司
 同上 三根 茂
 相鉄建設(株) 山菅 正人

1. はじめに

ロックボルトの作用効果は、地山との力のやりとりを考えると、軸力効果および曲げ・せん断効果に大きく分けることができる。軸力効果、あるいは曲げ・せん断効果のいずれが卓越するかは、地山とロックボルトの剛性比や強度比、およびロックボルトと不連続面との交差角等により複雑に影響されると思われる^{1), 2)}。本文では、地山およびボルトの両方が極限つりあい状態にあると仮定した場合におけるロックボルトの効果について、簡単なボルト/不連続面モデルによりケーススタディを行うものとする。

2. 検討モデル

図-1 に不連続面(亀裂面強度 $\phi=40^\circ$ 、 $c=0\text{tf}/\text{m}^2$ 、亀裂面角度 $\beta=60^\circ$ 、ボルト交差角 θ 、亀裂面長 l) に打設された1本のロックボルトのモデルを示す。地山ブロック重量を W 、ロックボルトに発生する軸力を P_{ax} 、せん断力(軸直角方向力)を P_s とすると、地山ブロック重量のすべり安全率 F_s は以下のように求まる。

$$F_s = \frac{W \cos \beta \tan \phi + cl}{W \sin \beta} + \frac{P_p}{W \sin \beta} \left[\frac{P_{ax}}{P_p} (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta) + \frac{P_s}{P_p} (\cos \theta - \sin \theta \tan \phi) \right] \quad (1)$$

上式において右辺第1項は地山(亀裂面での)強度による F_s 、右辺第2項はボルト効果による F_s であり、 P_p はロックボルトの軸方向降伏耐力である。ここでは $W=5\sim 6\text{tf}$ 程度、 $P_p=15\sim 20\text{tf}$ 程度として、 $P_p/W=3$ と仮定する。Jewell ら²⁾ が提案している降伏モーメント M_p を考慮したボルト材の降伏条件式(2)を(1)式に代入すると(3)式が得られる。ここで、図-2 に示すように D はボルト直径、 l_s は特性長(active length)と呼ばれるパラメータであり、地山がボルトに比較して相対的に硬いと l_s は小さく、軟らかいと大きくなる傾向にある。ちなみに硬岩では後述するように $l_s/D=1\sim 3$ 、軟岩・土砂では $5\sim 10$ 以上となるものと思われる。

$$P_s = 4 \frac{M_p}{l_s} \left[1 - \left(\frac{P_{ax}}{P_p} \right)^2 \right] \quad (2) \quad F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{cl}{W \sin \beta} + \frac{P_p}{W \sin \beta} \left[\frac{P_{ax}}{P_p} (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta) + \frac{8}{3\pi} \frac{1}{(l_s/D)} \left[1 - \left(\frac{P_{ax}}{P_p} \right)^2 \right] (\cos \theta - \sin \theta \tan \phi) \right] \quad (3)$$

3. 検討結果

図-3 にボルト交差角 θ とすべり安全率 F_s の関係を、発生ボルト軸力 $P_{ax}/P_p=0.1$ と 0.9 のケースについて示す。図-3 より、ボルト軸力が小さくボルトせん断力が卓越する $P_{ax}/P_p=0.1$ のケースにおいては、硬岩地山 ($l_s/D=1$) では F_s が大きいのにに対し、軟岩・土砂地山 ($l_s/D=5\sim 15$) においては全ての θ において非常に小さな F_s にとどまっており、ボルトの効果は小さい傾向にある。これに対し、ボルト軸力が大きく発生しボルトせん断力が小さい $P_{ax}/P_p=0.9$ のケースでは軟岩・土砂地山では大きな F_s が得られているが、逆に硬岩地山では $P_{ax}/P_p=0.1$ のケースに比較して F_s が低下している。軸力が卓越する $P_{ax}/P_p=0.9$ のケースでは、最も F_s が大きくなる交差角 θ は、いずれの地山においても $40\sim 45^\circ$ 程度である。これらの結果から、ボルトの軸力レベル P_{ax}/P_p と地山強度 l_s/D によって、地山ブロックのすべり安全率 F_s が大きく影響されることがわかる。すなわち、硬岩地山においては不連続面のすべりに対してボルトのせん断力の効果が大きいのにに対し、軟岩・土砂地山においてはボルトの軸力が非常に大きな効果を発揮することが認められる。図-4 に、ボルトの降伏条件式から得られる P_{ax}/P_p と P_s/P_p の関係について示す。これより、硬岩地山 (l_s/D が小) で補強工法、不連続面、ロックボルト、せん断

はせん断力 P_s の効果が軸力 P_{ax} に比べて相対的に大きいことがわかり、硬岩地山では P_s を積極的に考慮・利用する必要があることを示している。逆に軟岩・土砂地山においてはせん断力 P_s の効果は非常に小さく無視できるとともに、ボルト軸力 P_{ax} のみを考慮した設計を行うことが妥当であると思われる。なお、ボルトを亀裂面以深に支持される弾性床上的はりと仮定した場合、(4) 式が得られる。ここで、 K_s および $E=2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ はそれぞれ地盤反力係数、ボルトの弾性係数である。図-5 に計算結果を示すが、これより K_s が大きい硬岩地山ではおおむね $l_s/D=1-3$ 、軟岩・土砂地山では $l_s/D=10-15$ 程度となることが推定される。

$$\frac{l_s}{D} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\pi E}{K_s D}} \quad (4)$$

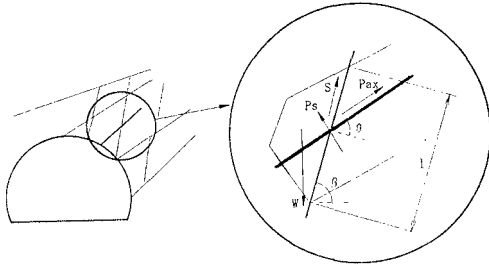


図-1 地山ブロックのすべりモデル

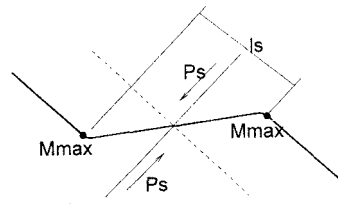


図-2 ロックボルトの active length l_s

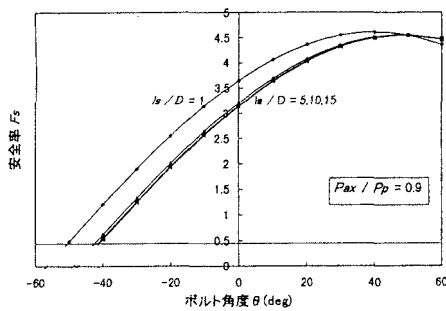
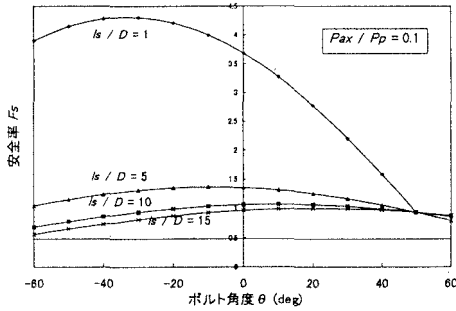


図-3 ロックボルト傾斜角 θ と F_s の関係

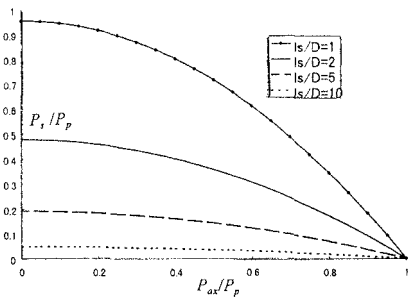


図-4 P_{ax}/P_p と P_s/P_p の関係

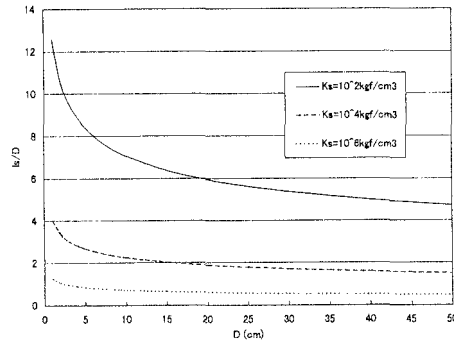


図-5 弾性状態における D と l_s/D の関係

4. 謝辞

考察にあたって多くのご教示をいただいた(社)日本トンネル技術協会 支保幹事に謝意を表します。

参考文献

- 1) 平松、吉中、蟻坂：不連続面におけるせん断特性のロックボルトによる補強効果に関する考察、第52回JSCE年講、1997、
- 2) Jewil.R.A.,Pedley M.J.:Soil nailing design: The role of bending stiffness. OUEL Peport,No.1813,1990