

(株)熊谷組技術研究所 正会員 大塚 本夫
〇上野 正高

1 はじめに ロックボルトはトンネル支保、とくに山岳トンネルを中心に発展してきたが、最近では、都市土木や切土斜面の安定支保として用いられる機会もしばしばある。これらの問題に対して、ロックボルトの施工効果および設計法が明確でない状態である。都市土木においては、バックアンカーとしてアースアンカーが用いられる場合があるが、我々の研究は、ロックボルトがこれらの問題に対して十分に適用されるかどうかについて検討したものである。

2 垂直切土面の安定 切土面の安定を考察するために、Fig-1 のモールの応力円を用いる。今、 h の深さにある応力状態を考えると、垂直方向の地山の応力は (1) 式で示される。

$$\sigma_v = r \cdot h_0 \quad \text{----- (1)}$$

ただし、 σ_v : 地山の垂直応力、 r : 地山の単位体積重量、 h : 地表面からの深さである。

垂直方向応力がモールの応力円で、 $\sigma_v = 2r$ の範囲内である場合には、水平方向の拘束力なしで地山は自立できるものとする。Fig-1 において、

$$OA = c_0 \cdot \cot \varphi \quad \text{----- (2)}$$

$$\sin \varphi = r / (r + c_0 \cot \varphi) \quad \text{----- (3)} \quad \text{ただし、} \quad c_0: \text{地山の粘着力}$$

$$\sigma_y = r \cdot y = 2r \quad \text{----- (4)} \quad \varphi: \text{地山の内部摩擦角}$$

の関係がそれぞれ得られるから、垂直切土の自立範囲の限界は、結果として (5) 式となる。

$$H_{\max} = (2c_0/r) \cdot \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) \quad \text{----- (5)}$$

自立範囲の限界を越えた深さについては水平土圧が発生し、(6) 式で示されるものになる。

$$P_h = r \cdot \cot^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) \cdot \{h - (2c_0/r) \cdot \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})\} \quad \text{--- (6)}$$

ただし、 P_h : 自立の限界範囲を越えた水平土圧、 h : 自立範囲を越えた深さである。

(5) 式は、地山の内部摩擦角および粘着力によって、垂直切土の自立範囲の理論的限界を示したものである。

3 斜面の安定 Fig-2 に示されるように、 θ なる傾きを有する斜面に W なる重量の物体があるとき、斜面方向の分力 H は $W \sin \theta$ 、斜面に直角な分力 N は $W \cos \theta$ である。物体間の摩擦力 F は $W \cos \theta \tan \varphi$ である。

$$H = W \sin \theta, \quad N = W \cos \theta, \quad F = W \cos \theta \tan \varphi \quad \text{--- (7)}$$

平面すべり面を仮定した斜面の安定は、次式で示される。

$$H_0 = \frac{4C}{r} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \cos \varphi}{1 - \cos(\theta - \varphi)} \quad \text{----- (8)}$$

(8) 式によつて、粘着力 C 、摩擦角 φ が与えられた場合の斜面の傾斜角 θ と、斜面の限界高さ H_0 との関係が示される。

Fig-3 では、垂直面の場合に対して、安定領域と不安定領域の境界が (8) 式で示される。

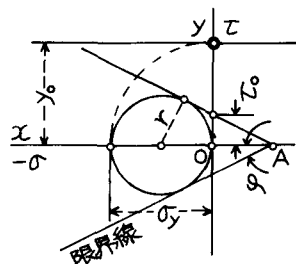


Fig-1 モールの応力円による自立の限界

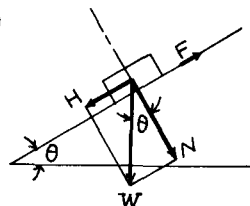


Fig-2 斜面における物体のつり合い

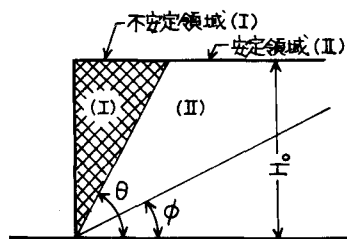


Fig-3 不安定および安定領域

4. ロックボルトの設計 地山にロックボルトが施工されると、地山の物性値が増加するので、次式が考えられる。

$$C = C_g + C_a \quad \text{-----(9)}$$

ただし、 C ：ロックボルトによって改良された粘着力、 C_g ：ロックボルトが施工される以前の地山の粘着力、 C_a ：ロックボルトによる粘着力の増加量である。ロックボルトの直径を 24 mm とし、1 m² 当り 1 本施工した場合に、粘着力の増加量は次式で示される。

$$C_a = 0.6 \cdot \sigma_c \quad \text{-----(10)}$$

(ロックボルトの直径 24 mm を使用の場合は、 $\sigma_c = 20 \text{ t/m}^2$ とする)

ロックボルトが施工された領域とそうでない領域は、Fig-4 で示される。領域(I)と領域(II)に関して、限界斜面上の安定性についてそれぞれ検討することにより、ロックボルトの長さや 1 m² 当りに必要な本数を求めることが可能である。

5. 計算例 地山の物性値は、次のとおりである。

粘着力： $C_g = 3 \text{ t/m}^2$ 、摩擦角： $\varphi = 20^\circ$ 、単位体積重量： $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$

垂直切取面 20 m に対して、ロックボルト直径 24 mm を 1 m 当り 1 本施工するものとし、ロックボルトの必要長さを求める。 C_a は (10) 式により、 $C_a = 12 \text{ t/m}^2$ である。

(8) 式に物性値を入れて斜面の安定領域と不安定領域を求める。安定傾斜角は (8) 式により、 $\theta = 60^\circ$ である。ロックボルト長 3 m を使用した場合の領域(I)の不安定領域安定計算は、

$$W_1 = 104.4 \text{ t}, \quad H_3 = W_1 \sin 60^\circ = 90.41 \text{ t}, \quad F_3 = W_1 \cos 60^\circ \tan 20^\circ + l_3 \times C = 109.0 \text{ t}$$

$$W_2 = 126.54 \text{ t}, \quad H_3' = W_2 \sin 60^\circ = 109.59 \text{ t}, \quad F_3' = W_2 \cos 60^\circ \tan 20^\circ + l_3' \times C = 74.33 \text{ t}$$

$$\therefore \begin{cases} H = H_3 + H_3' = 200.0 \text{ t} \\ F = F_3 + F_3' = 183.33 \text{ t} \end{cases}$$

ゆえに、 $H = 200.0 > F = 183.33$ で不安定である。

ロックボルト長 6 m を使用した場合は、

$$W_1 = 177.66 \text{ t}, \quad H_6 = 153.86 \text{ t}, \quad F_6 = 212.33 \text{ t}$$

$$W_2 = 53.33 \text{ t}, \quad H_6' = 46.19 \text{ t}, \quad F_6' = 43.0 \text{ t}$$

$$\therefore \begin{cases} H = H_6 + H_6' = 200.05 \text{ t} \\ F = F_6 + F_6' = 258.52 \text{ t} \end{cases}$$

ゆえに、 $H = 200.05 < F = 258.52$

$$F_s = \frac{F}{H} = 1.29$$

ロックボルト長 7 m を用いれば、十分と思われる。

6. 結論

前述のような計算方法を用いることにより、円形以外の立坑および切取斜面のロックボルトの適用が可能であると考えられる。ロックボルトは、切取斜面等の設計計算方法が確立するにしたがって、今後ますます都市土木、あるいはトンネル以外の斜面等への適用範囲が広まっていくのではないかと考える。

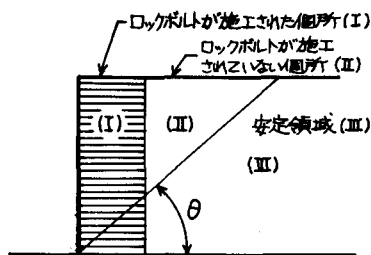


Fig-4 不安定領域に対するロックボルトの施工