

ロックボルトの設計について

（株）熊谷組技術研究所第1部長 大塚本夫

○上野正高

まえがき

ロックボルトの施工効果を説明する方法としては、従来色々な説が発生されているが、これらを大別すると、1. 「つりさげ」効果、2. 「梁形成」効果、3. 「掘削面に発生する諸応力に対しての支保工としての補強」¹⁾ に分類できる。ロックボルトの施工を合理的に行うためには、ロックボルトの施工効果の解明と施工される岩盤の物性をできるだけ詳細に知る必要がある。

ここでは、合理的ロックボルトの施工に対して、上記諸問題につき考察したものである。

1. 岩盤強度と応力のつり合い

ロックボルトの施工に地山が通しているかどうかについて、岩盤の圧縮、引張、せん断強度等が参考になる。圧縮、引張、せん断強度の関係をモールの応力円で表示する²⁾と、図-1に示すとおりである。

a). せん断強度

せん断強度と圧縮、引張強度の関係²⁾は図-1より

$$S_s = \frac{1}{2} \sqrt{S_c \cdot S_t} \quad \text{----- (1)}$$

b). 内部摩擦角²⁾

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{4S_s^2 - S_t^2}{4S_s \cdot S_t} \right) \quad \text{----- (2)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{S_c}{4S_s} - \frac{S_s}{S_c} \right) \quad \text{----- (3)}$$

c). 主応力のつり合い³⁾

掘さく面に生ずる主応力のつり合いは、図-2で示される。

図-2より

$$\sin \phi = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{\sigma_t + \sigma_r + 2S_s \cot \phi} \quad \text{----- (4)}$$

$$\sin \phi = \frac{S_c}{2S_s \cot \phi + S_c} \quad \text{----- (5)}$$

$$S_s \cot \phi = \frac{S_c}{2} \frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi} \quad \text{----- (6)}$$

(4), (5), (6)式より

$$\sigma_r = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} (\sigma_t - S_c) \quad \text{----- (7)}$$

(7)式は、掘さく面に生じた接線応力が岩盤の圧縮強度を越える場合に、トンネル支保 σ_r なる掘さく面に、法線応力が必要であることを示すものである。

2. 岩盤の応力

岩盤のフリーア曲線⁴⁾

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0 t}{3\eta m} + \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-Ekt/3\eta K}) \quad \text{----- (8)}$$

力学的模型で図示すると

図-3に於けるトンネル掘さく時の模型の作動は、

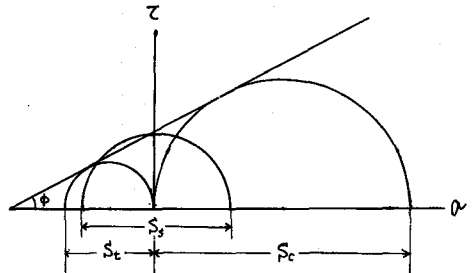


図-1. 圧縮、引張、せん断強度とモールの応力円

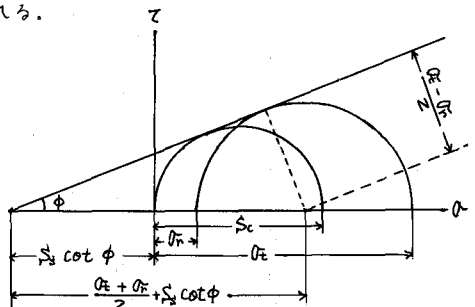


図-2. 主応力とモールの応力円.

ϕ : 岩盤の内部摩擦角.

S_c : --- 圧縮強度.

S_t : --- 引張強度.

S_s : --- せん断強度.

σ_r : 掘さく面の法線応力.

σ_t : --- 接線応力.

α). 掘さく直後 : 掘さく直後の切羽附近の表面は爆発等の瞬時の応力開放により E_m のみしか作動しないものと考えられる。

α). 切羽より後方 : 切羽より後方は切羽よりの爆発の影響、切羽の延長、時間の要素等で E_k 、 q_m が作動すると考えられる。

α). その他 : 切羽の影響のなくなった個所では、 E_k 、 q_m 、 q_k が時間の要素で作動し、時間の経過にしたがい q_k の作動要素が多くなり、一定値に近づくものと考えられる。

岩盤のクリープ曲線式 (8) を利用することにより、岩盤のクリープ曲線や動的試験方法により、 E_m 、 E_k 、 q_m 、 q_k の定数を求めさえすれば、クリープ曲線、応力-ひずみ線図から岩盤の時間的ひずみの変化及び応力を求めることができる。

3. ロックボルトの長さ

ロックボルトの長さは、掘さく面のクリープの大きさによってきまる。 E 、 $TINCELIN$ の経験によれば、ボルトで止められた岩盤が 2%⁵⁾ 以内であるならば、点荷重ボルト施工効果が十分であると述べている。(8) 式によりクリープを求め、ボルト長を検討することができる。

ここでは、別の方法として、BERRY が求めた掘さく面の変形量⁶⁾を用いると

$$\frac{u_a(t)}{a} = f(t) p_z (1 + k_0) + g(t) p_z (1 - k_0) \cos 2\theta \quad \text{----- (9)}$$

$$\text{但し、} \quad f(t) = \frac{1 + \nu}{2E} \quad , \quad g(t) = -\frac{1 + \nu}{2E} (3 - 4\nu)$$

$u_a(t)$: 半径 a なるトンネルの時間的変形量

p_z : 自然の内部応力

a : トンネル半径

E : 地山のヤング率

k_0 : 垂直荷重及び水平荷重の比

ν : ポアソン比

したがって、ロックボルトの長さ l は次式から求めることができる。

$$l = 50 a u_a(t) \quad \text{----- (10)}$$

4. ロックボルトの密度及び締め付け

ロックボルトの単位面積当りの所要締め付けは、岩盤の圧縮強度と掘さく面に生ずる接線応力により定まり (7) 式により求めることができる。 A 、 C 、 $KYPNCBKO$ によるボルトの支持力⁷⁾は、 $f = 3 \sim 7$ の岩盤の場合

$$P = 1.85 f - 1.2 \quad \text{----- (11)}$$

$f = 8 \sim 12$ の岩盤の場合

$$P = 18.1 - 0.627 f \quad \text{----- (12)}$$

P : ボルトの支持力

f : 岩盤の強度指数

(11)、(12) 式より岩盤強度に対するボルトの支持力を計算することができる。(7) 式の値を考慮することによりボルトの密度を求めることができる。さらに岩種別のロックボルトアンカーの近似支持力⁸⁾は

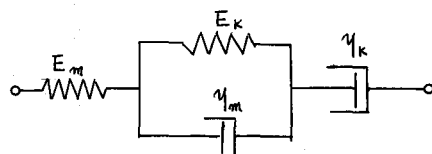


図-3. 岩盤のクリープ曲線の力学的模型。

岩 盤 の 種 別	近似ロックボルトアンカー支持力 (tons)
大成岩(花崗岩、玄武岩等)	20 ~ 30
砂岩、珪石等	15 ~ 22
石灰岩、大理石等	12 ~ 18
硬砂質頁岩、石膏	10 ~ 15
頁岩	8 ~ 12
湿った弱い頁岩、石炭	3 ~ 6
湿った弱いばうばうの岩	0 ~ 3

5. 岩盤の特性曲線とボルトのつり下げ効果⁹⁾

岩盤の特性曲線は次式で示される。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = a \sigma_3^n + s_c \quad \text{----- (13)}$$

σ_1, σ_3 : 主応力

a, n : 岩盤の固有な定数

s_c : 岩盤の圧縮強度

(13)式は主応力間の関係において破壊を定義し、破壊後は D. W.、HOBBBS の研究によれば

$$\sigma_1 - \sigma_3 = a \sigma_3^n \quad \text{----- (14)}$$

さらに D. W.、HOBBBS は破壊範囲と弾性範囲の境界を r_2 とし、次式で表わした。

$$a \left\{ (1-n) \log \frac{r_2}{r_1} \right\}^{\frac{n}{1-n}} + 2 \left\{ (1-n) a \log \frac{r_2}{r_1} \right\}^{\frac{1}{1-n}} = 2 \sigma_0 \quad \text{----- (15)}$$

但し r_1 : 掘さく半径

r_2 : 破壊範囲の半径

(13)、(14)、(15)式により主応力間のつり合いと破壊範囲を求めることができる。特に破壊範囲を求めることによりロックボルトの必要長及びつり下げ効果の検討とすることができる。

6. おわりに

本論文では、ロックボルトの合理的設計法に関する提案を行った。即ち、先ず

① 岩盤の圧縮、引張、せん断強度を求めることにより、内部摩擦角を求めて、掘さく面に生ずる接線応力として、弾性体地山に掘さくされたトンネル周辺応力を求める方法が、或いはクリープ曲線、応力-ひずみ図から応力を求める。掘さく面に生ずる応力が地山の圧縮強度よりも超過する場合には (7) 式により所要支保力を求めることができる。次に

② (9) 式により掘さく面の変形量を求め、変形量の制限量をボルト長の 2% に限定すると、(10) 式より所要のボルト長が求められ

③ (11)、(12) 式と岩盤強度よりボルトの密度を求めることができる。

④ さらに岩盤のジャッキテスト及び三軸試験を行うことにより、主応力のつり合い、破壊範囲を求めることができるから、より正確にロックボルトの設計を行うことができる。

参考文献

- 1). "MANUAL ON ROCK BLASTING" by EDWARD M. THOMAS. MAGNUS SIEDEBERG.
- 2). "ROCK MECHANICS AND THE DESIGN OF STRUCTURES IN ROCK" OBEKT. DUVAL. p 281~289.
- 3). "STATIK DES TUNNEL UND STOLLENBAUES" von HERMANN KASTNER. p 75~76.
- 4). "ROCK MECHANICS AND THE DESIGN OF STRUCTURES IN ROCK" OBEKT. DUVAL. p 169.
- 5). "ロックボルティングの初め" E. TINCENLIN. p 17.
- 6). "DESIGN OF TUNNEL LINERS AND SUPPORT SYSTEMS" DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY OF ILLINOIS.
- 7). "ЭМПИРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАКРЕМЛЕНИЯ ЗАМКОВ КЛИНОВ. ЕЛЕВЫХ ШТАНТ" А. С. КУРИСЬКО.
- 8). "ROOF CONTROL AND MINE BOLTS" GEORGE W. ALLEN.
- 9). "QUELQUES PROBLEMES DE MECANIQUE DES ROCHES TOUES PAR LE TUNNEL DU MONT BLANC" M. PANET. p 1980.

Design of Rock Bolts

Motoo Otsuka, Institute of Construction Technology Kumagai Gumi Co., Ltd.

Masataka Ueno, " " " "

1 Introduction

Use of rock bolts as a means of support in the wall rock surrounding tunnel openings has increased considerably in the last few years. Construction work has shown that rock bolting costs will be about one-half of the cost for supporting the same excavation with direct support. We can anticipate an ever increasing use of the rock bolt for rock tunneling supports. Conventional methods of supporting rock assume that a certain amount of rock acts on the support as a dead load. Rock reinforcement by rock bolting helps the rock to provide its own support. Speaking broadly, rock bolts can be said to be useful for holding rock in place by the following ways: (1) By suspension. (2) By beam building. (3) By reinforcement of skin areas of an opening. (4) By reinforcement of walls. In this paper theory of rock bolting is based on the general physical characteristics of the rock.

2 The general physical characteristics of rock.

a) Strength of rock and Mohr's circles. $S_s = 1/2 \cdot S_c \times S_t$ - - - - (1) where S_s : shear strength S_c : compression strength S_t : tension strength b) Strength of rock and internal frictional angle. $\phi = \tan^{-1} \frac{4S_s - S_t}{4S_s \cdot S_t}$ - - - (2) $\phi = \tan^{-1} \frac{S_c}{(4S_s - S_c)}$ - - - (3) where: internal frictional angle

3 Principal stress and Mohr's circles.

σ_r = normal stress, σ_t = tangential stress, S_c = compressive strength $\sigma_r = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} (\sigma_t - S_c)$ - - - (4)
 $\sigma_1 - \sigma_3 = a \sigma_3^n + S_c$ - - - - (5) σ_1, σ_3 : principal stress, a, n : coefficient

4 Elastic zone and failure zone. r_1 : tunnel radius.
 $a \left[(1-n) \log \frac{F}{F_0} \right]^{1/n} + 2 \left[(1-n) a \log \frac{F}{F_0} \right]^{1/n} = 2 \sigma_0$ - - - - (6) r_2 : failure radius.

5 The length of rock bolt, l.

$l = 1/50 \left\{ (1 + K_0) + (3 - 4\nu)(1 - K_0) \cos 2\theta \right\} \cdot r \cdot p \cdot \frac{1 + \nu}{2E}$ - - - - (7) l : rock bolt length.
 K_0 : coefficient of pressure at rest $K_0 = P_h/P_z$

6 Rock bolt anchor and rock strength.

$(f = 3 \sim 7) \quad P = 1.85f - 1.2$ - - - - (8) $(f = 8 \sim 12) \quad P = 18.1 - 0.627 f$ - - - (9)

p : anchor strength. F : the resistance factor of Protodyakonov. Type of rock and approx. anchor strength, (tons). (1) Igneous rock (granite, basalt, etc.) - - - 20~30. (2) sandstone, quartzite, etc. - - - - 15~22. (3) Limestone, marble, etc. - - - - 12~18. (4) Firm sandy shale, gysum - - - - 10~15. (5) Shale - - - - 8~12. (6) Wet or weak shale, coal - - - - 3~6. (7) Weak, wet, unconsolidated material - - - - 0~3.

7 Conclusions.

(1) Theoretical analysis of the stress situation around an excavation supported by rock bolts has been developed by Mohr's circles and principal stress. (2) The Mohr's circles and principal stress are applied to determine the general nature of the stresses in the rock around the excavation. (3) The length of rock the bolt to be determined by the deformations of the tunnel wall. (4) The spacing and No. of rock bolts will be determined by the supporting strength of individual anchor bolts and the characteristics of the surrounding rock.