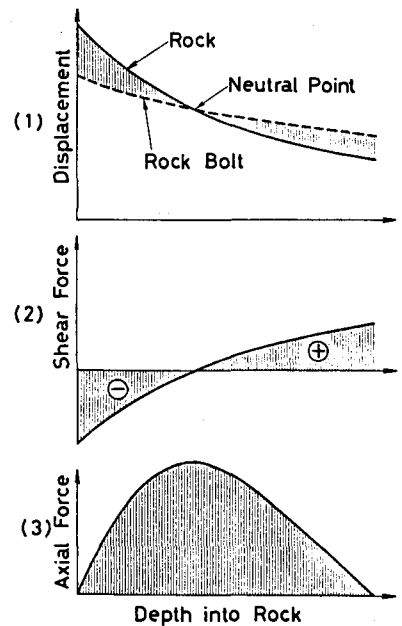


ロックボルト支保の設計に関する基礎的考察

京都大学工学部 ○齋 藤 敏 明
(株)大 林 組 天 野 悟

1. 緒言

近年、全面接着型のロックボルトはいわゆるNATM法の普及などもあって軟岩、硬岩を問わず重要な支保メンバーとして盛んに用いられるようになってきた。これはロックボルトの経済性や施工性にもよるが、その独得の作用効果が認められてきたためと考えられる。しかし、ロックボルトの支保としての効果や合理的な設計法に関しては従来多くの研究があるものの定性的な観点やある特別な条件のもとでの解析が多く、一般性のあるものが少ないように思われる。ここでは、岩盤の変形に対して岩盤とロックボルトの間に生じる相互作用という最も基本的な作用に注目してこれを解析的なモデルで表現し、ロックボルトに生じる軸力分布を求め、これによってロックボルトの作用効果を評価することを試みた。さらに、ロックボルトに蓄えられる弾性ひずみエネルギーを基にその設計法に対する考え方を示した。なお、これらの手法は岩盤変位やロックボルト軸力、内空変位などの諸計測結果を解釈していくうえでも有用であろうと思われる。



第1図 ロックボルトに作用する力と軸力分布

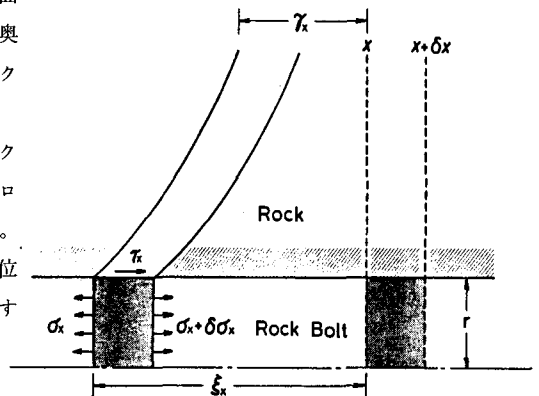
2. ロックボルトと岩盤の相互作用と発生する軸力

岩盤中に打設されたロックボルトは、その後にその周辺の岩盤がロックボルト軸方向に変形しなければ、軸力が発生せずその効果を發揮しない。一方、その効果が發揮されている時には岩盤の変形に応じた軸力がロックボルトに生じていると同時に岩盤もロックボルトから作用をうけ釣り合い状態にあるものと考えられる。このような岩盤とロックボルトの相互作用は次のように考えることができる。すなわち切羽の進行などによって岩盤がロックボルト軸方向に変形した場合岩盤とロックボルトの変形係数が異なるため両者の間には第1図(1)に示すような相対変位が生じると考えられる。この相対変位によってロックボルトの軸方向のせん断力が生じ、その大きさは相対変位に対応するものと考えられ第1図(2)のようになる。この場合相対変位のない点を中立点と呼ぶとこの中立点より壁面に近い側のせん断力はロックボルトを引き抜くように、奥側は岩盤に固定するように働く。また、この結果、ロックボルトに生じる軸力は第1図(3)のようになる。

そこでこのような釣り合い状態にある時の岩盤のロックボルト軸方向の変位 r_x とロックボルトの変位 ξ_x およびロックボルトに発生する軸応力 σ_x の間の関係を考えてみる。ただし、 r_x はロックボルトの影響のない打設後の岩盤変位を指し、軸応力 σ_x は断面内では一様とする。第2図に示す微小部分のつり合いを考えると次式が成り立つ。

$$d\sigma_x / dx = -2\tau_x / r \quad (1)$$

ただし、 τ_x はロックボルトに作用する分布せん断力である。



第2図 ロックボルトに生じる変位と応力

また、応力-ひずみの関係より、ロックボルトのヤング率を E_s とすれば、次式が成り立ち

$$\sigma_x = -E_s (d\xi_x/dx) \quad (2)$$

(1), (2)式より

$$\frac{d^2\xi_x}{dx^2} = \frac{2\tau_x}{E_s r} \quad (3)$$

ここで、せん断力 τ_x は岩盤とロックボルトの相対変位に対応して生じるものとする次の様に置くことができる。

$$\tau_x = c(\xi_x - r_x) \quad (4)$$

c は岩盤やロックボルトおよび充填材の材料特性や接着の程度などによって決まる相互作用の程度を表わす係数である。

(4)式を(3)式に代入すると次式が求まる。

$$\frac{d^2\xi_x}{dx^2} - \alpha^2\xi_x + \alpha^2r_x = 0 \quad (\alpha^2 = \frac{2c}{E_s r}) \quad (5)$$

したがって、岩盤の変位パターン r_x が与えられれば(5)よりロックボルトの変位、さらに τ_x , σ_x の分布を求めることができる。第3図は境界条件をロックボルト両端で軸力を零とし、岩盤変位パターン r_x を与えた時のロックボルトに発生する変位、軸力およびせん断力分布の一例を示したものである。第3図(a)によってもわかるように、岩盤とロックボルトの相対変位のない点、軸力のピーク点およびせん断力が零となる点は一致する。また、せん断力はロックボルト全長にわたって積分すれば零となる。第3図(b)は岩盤が不連続面で集中的に変形した場合の例であるが、この種の変形に対しては不連続面のところで大きな軸力が発生し、せん断力も不連続となることがわかる。

3. 引き抜き試験による相互作用係数 c の決定

ロックボルトの引き抜き試験は通常その定着効果を確認するために行なわれるものであるが、これを用いて(4)式で定義した係数 c の値を求めることができる。引き抜き試験の場合与えられる岩盤の変位 r_x は無いので(5)式は次のようになる。

$$\frac{d^2\xi_x}{dx^2} - \alpha^2\xi_x = 0 \quad (6)$$

これを境界条件として

$$\{\sigma_x\}_{x=0} = P/\pi r^2 = \sigma_0, \quad \{\sigma_x\}_{x=L} = 0$$

として解くとロックボルト変位 ξ_x は次のように決定できる。

ここで、 P は引き抜き荷重、 L はロックボルト長である。

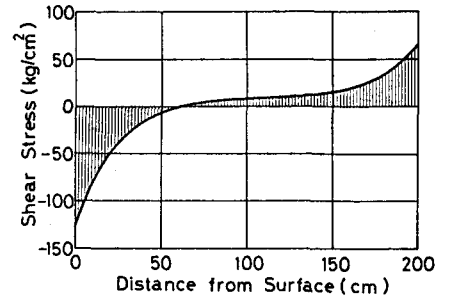
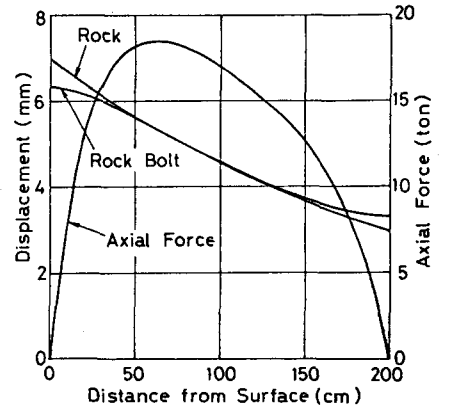
$$\xi_x = \frac{\sigma_0}{E_s \alpha} \frac{e^{\alpha(x-L)} + e^{-\alpha(x-L)}}{e^{\alpha L} - e^{-\alpha L}} \quad (7)$$

壁面での変位 ξ_0 は αL が充分大きいことより次のように書くことができる。

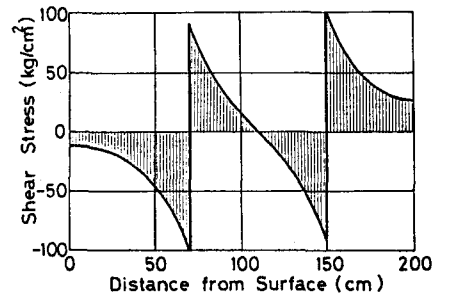
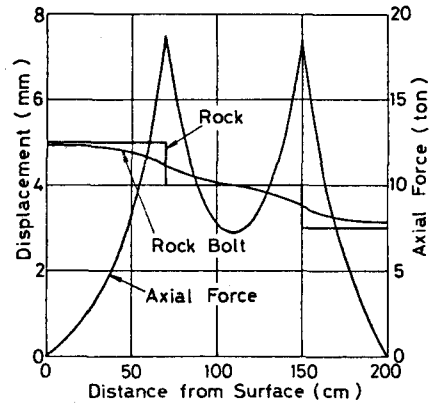
$$\xi_0 = \frac{\sigma_0}{E_s \alpha} \quad (8)$$

したがって、係数 c は次のように求められる。

$$c = \frac{1}{2\pi^2 r^3 E_s} \left(\frac{P}{\xi_0} \right)^2 \quad (9)$$



(a) $r_x = be^{-ax}$ ($a = 4.2 \times 10^{-3}$, $b = 0.7$ cm)



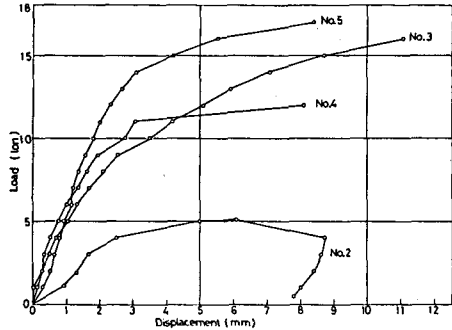
(b) $x = 70, 150$ cm で不連続

第3図 各種の変位パターンに対するロックボルトの挙動

第4図に示したのは充填材の強度を種々変えて引抜き試験を行なったときの口元での変位と引き抜き荷重の関係である。この勾配 P/ξ_0 を(9)式に代入することによって c を決定することができる。充填材の強度は一軸圧縮強度で No.2 が 124 kg/cm^2 、No.5 が 518 kg/cm^2 で順に大きくなっている。図のように係数 c は充填材の影響で変化することがわかる。この方法により求めた No.5 の充填材での c の値は $1.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^3$ 程度となった。なお、この値は P が増加するにしたがって少しずつ低下する傾向を示したが、これは接着の低下などによって生じるものと思われる。

4. ロックボルトの支保効果と設計

前述のように岩盤変形が与えられ、相互作用の係数 c が求められればロックボルト内の軸力分布を知ることができる。一方、ロックボルトが岩盤に作用して効果を発揮するためには少なくとも相互作用によってロックボルト内に軸力が有効に生じている必要がある。したがってロックボルトは軸力が有効に生じるように打設しなければならないことになる。第3図の例でもわかるように軸力のピークは岩盤変形の変化が大きいところに生じることになるから、この箇所にはロックボルトが打設されていると有効に軸力を発生させその効果を発揮させることができる。



第4図 引き抜き荷重と頂部変位の関係

ロックボルト長 L は基本的にはこの考え方によって決定することができよう。いまロックボルト軸力の代わりにロックボルト内に蓄えられている弾性ひずみエネルギー E_R に注目する。これは次のように計算される。

$$E_R = \frac{\pi r^2}{2E_s} \int_0^L \sigma_x^2 dx \quad (10)$$

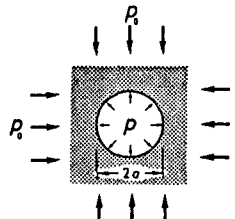
このひずみエネルギーは岩盤から与えられるはずであるから岩盤とロックボルトの相互作用を充分反映するものであろう。ロックボルト長 L は E_R が有効に蓄えられるように選ぶべきで、たとえば次のような関係となれば、もはやその長さを延ばす価値はないと言えよう。

$$\frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{E_R}{L} \right) < 0 \quad (11)$$

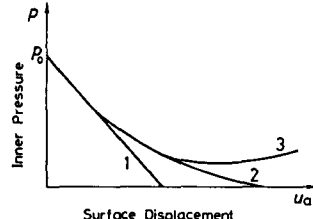
次にロックボルトのパターンや本数などを決定する基本的な考え方について述べる。いま簡単のために第8図に示すような静水圧的な地圧 P_0 を受ける円形坑道を考えてみる。坑道には仮想的に内圧 P が作用しているものとしよう。この坑道を開削するということを準静的に解釈すると、内圧 P を P_0 から減少させて零にすることになる。この時の壁面の変形を u_a とする。この P と u_a の関係を模式的に描くと第6図のように書け、1が弾性的な場合、2が塑性域が発達するような場合、3がゆるみ域などにより P が最小値を持つ場合に相当することになる。いま、弾性的の場合について考えると、 P の変化によって u_a 、岩盤に蓄えられるひずみエネルギー W_e および内圧 P に抵抗して壁面から放出されるエネルギー W_a はそれぞれ次のように書ける。

$$u_a = \frac{(P_0 - P)a}{2\mu}, \quad W_e = \frac{\pi a^2}{2\mu} (P_0 - P)^2, \quad W_a = \frac{\pi a^2}{2\mu} (P_0^2 - P^2)$$

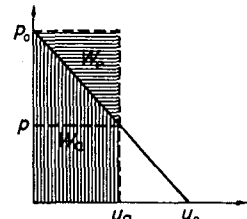
これらを図示すると第7図のようになり $P-u_a$ 曲線の上側の面積に W_e が下側の面積に W_a が対応することになる。このことは内圧 P が減少し u_a が進行するにつれ、連続的に W_a というエネルギーを放出していく必要があることを示して



第5図 静水圧地圧中の円形坑道



第6図 内圧と壁面変形のパターン



第7図 壁面変形と歪エネルギー

いる。この W_a の放出は弾性ばかりでなく塑性やゆるみ域がある場合でも同様に解釈できよう。

つぎに坑道に支保を入れる場合について考えてみる。まずライニングなどの壁面に打設される支保の場合これらの支保は壁面からの荷重に対し変形がどのように生じるか予め知ることができる。したがって、この支保を切羽などに近接して打設しその後の岩盤変形によって生じる反力を知り図示すれば、第8図(a)のように書ける。また、支保内に蓄えられる弾性ひずみエネルギー E_L は図のような面積となる。この支保が作用し釣り合って安定する変位は $P-u_a$ 曲線との交点 u_1 で表わされるがこの条件は次のようにも書ける。

$$\frac{\partial E_L}{\partial u_a} = \frac{\partial W_a}{\partial u_a} \quad (12)$$

これは壁面が変形することによって外部に放出するべきエネルギーより支保に吸収されるエネルギーの方が上回るため、それ以上変形は進まず安定することを意味している。

次にロックボルト支保の場合を考えてみると、内圧 P が与えられと先の例であれば、 $u = -(P_0 - P)a^2/(2\mu r)$ という岩盤内変形が生じる。したがって打設時期がわかれば先に述べた方法によりロックボルトに生じる軸力を計算することができる。さて、この坑道のまわりに単位奥行きあたり n 本のロックボルトが打設してあればロックボルト全体に蓄えられる弾性ひずみエネルギー $\bar{E}_R$ は次のように書ける。

$$\bar{E}_R = nE_R = \sum_i^n (E_R)_i \quad (13)$$

このエネルギーは内圧 P の変化によって計算できるのでライニングの場合と同様に図示すれば第8図(b)のように書けるだろう。すなわちロックボルトの場合は $\bar{E}_R$ は岩盤に蓄えられるエネルギー W_e を増加させるようになると考えることができる。したがって釣り合う点は u_a 軸と交わる u_2 ということになり、釣り合う条件も次のように書ける。

$$\frac{\partial \bar{E}_R}{\partial u_a} = \frac{\partial W_a}{\partial u_a} \quad (14)$$

また、いわゆる換算内圧は P_2' ということになり、壁面変形の減少量は $(u_0 - u_2)$ として表わされる。さらに、吹き付けとロックボルトが併用された場合は第8図(c)のように書け、釣り合いの条件も同様に次のようになる。

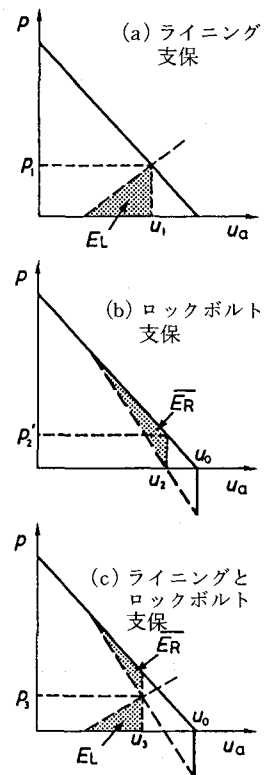
$$\frac{\partial \bar{E}_R}{\partial u_a} + \frac{\partial E_L}{\partial u_a} = \frac{\partial W_a}{\partial u_a} \quad (15)$$

この考えは、より複雑な空洞形状や地山応力条件の場合にも、岩盤変形を知り、壁面変形と内圧との関係が明らかにされておれば適用できるものと思われる。また、塑性変形などを起こす岩盤に対してもこの考え方を拡張すれば釣り合いの点は同じ条件式で決定することができよう。

5. 結言

ロックボルトが岩盤に与える作用をその相互作用によってロックボルト内に生じる軸力あるいは弾性ひずみエネルギーの大きさによって評価することとし、これらの値を岩盤の変形と相互作用を示す係数を用いて解析的に求める方法を提案した。また、引き抜き試験によって相互作用を示す係数 c を求めることができることを示した。

ロックボルトの設計に関しては、その弾性ひずみエネルギーに着目すればライニングなどの設計と同様の考え方で行なえることを示した。



第8図 岩盤と支保のつり合い

FUNDAMENTAL STUDY ON EFFECTS AND DESIGN OF ROCK BOLTING

By Toshiaki SAITO* and Satoru AMANO**

* Kyoto University

** Ohbayashi-Gumi Co. Ltd.

SUMMARY

Lately in Japan, fully-bonded rock bolts are getting popular as one of the main members of tunnel supports. Their adoption may be due to the received effects of rock bolting. However, the mechanism and the design theory of rock bolting are not clarified adequately.

In this paper, at first, the behavior of rock bolt with rock movement around it, is considered based on the fundamental equilibrium of rock bolt and the interaction between rock and bolt. As the results, it is pointed out that the displacement and axial stress in the rock bolt induced by the rock movement, can be obtained analytically by solving the simple differential equation. The distributions of axial stress in the rock bolt induced by various type of rock movements are examined by this equation. The coefficient which represents the effects of interaction between rock and bolt, can be determined by the pull test of rock bolts.

Subsequently, it is considered that the effects of rock bolting is appreciated with the elastic strain energy in rock bolts induced by rock movements. By this idea, the most suitable length of rock bolts can be determined. Further, knowing the variation of the strain energy in rock bolts corresponding to the displacement of the tunnel wall, rock bolting can be designed as well as the concrete linings and steel arch supports, through the strain energy in the supports.