

(45) 膨張型鋼管ボルトの定着機構と設計方法についての一考察

(株) 青木建設 技術本部研究所

近 藤 武 夫

(株) 青木建設 技術本部研究所

伊 藤 実

(株) 青木建設 技術本部研究所 正会員 ○ 永 井 哲 夫

1. はじめに

ロックボルトは鉱山の補強部材として20世紀当初よりヨーロッパにおいて使用されはじめ、近年では山岳トンネル、都市トンネルのみならず大規模地下空洞、斜面、法面、立坑などの補強部材としても広く応用されてきている。これはロックボルトが有する次のような特徴を評価されてのことであると思われる。

- ・地盤と一体となって地盤自身の持つ支保能力を積極的に利用できる。
 - ・地盤の状態に応じて施工方法（ロックボルトの長さ、打設ピッチ等）の調整が容易である。
- しかしその反面、設計・施工に関して下記のような問題点が残されている。
- ・ロックボルトの地盤における支保効果に関して不明確な部分が多く残されており、それを設計に定量的に反映させるのが困難である。
 - ・モルタル、レジン等の定着材を必要とするため、施工性あるいは定着効果の発揮に問題がある。

著者らは上記の問題点を解決する一つの方法として、膨張型鋼管ボルト（最近欧米を中心に普及され有効性を認められている¹⁾）の研究を進めており、既報において概要、実験結果、国内での施工例および従来のロックボルトシステムとの対比等を報告した²⁾。そこで本文では、膨張型鋼管ボルトと岩盤の相互作用を考慮した定着機構および定着力に関する理論的考察を述べる。そして、これまでの現位置岩盤における実験、実施時の各データと比較検討することにより、地盤補強工として施工する際の設計への反映方法について一提案を示す。

2. 膨張型鋼管ボルトと岩盤の相互作用

2.1 定着機構

膨張型鋼管ボルトは厚さ2mmの鋼管を加工して成形されたロックボルトで、高圧水をボルト内部に注入することにより削孔壁に圧着され（図1）、岩盤と一体となって岩盤自身の持つ支保能力を積極的に利用するものである。従来のロックボルトのようにボルトと岩盤の間に定着材を介在せず、ボルトと岩盤の相互作用により定着力が得られる所に特徴がある。定着の機構には主として次のような事象が考えられる。

①削孔がボルトから内圧を受けて若干拡孔され、圧着完了後内圧を除去すると削孔中心方向に収縮する。この時ボルトは岩盤から収縮圧（ q ）を受けた状態でバランスする（図2）。この収縮圧によりボルトと岩盤の摩擦抵抗が増大し岩盤の変形を拘束する。

②高圧水（約30MPa）の注入により厚さ2mmの鋼管ボルトが岩盤に圧着されるため、削孔壁の不規則な形状に

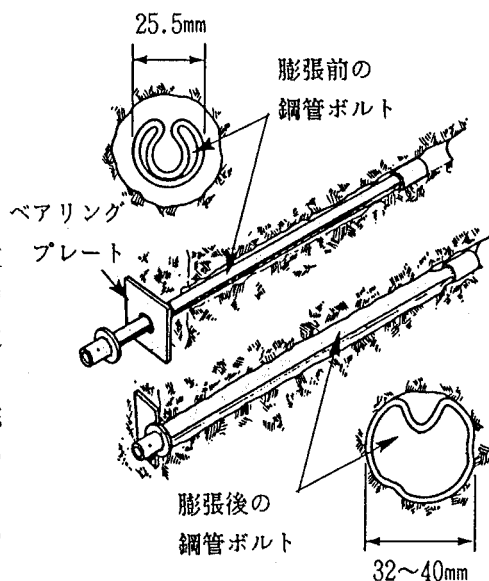


図1. ボルトの定着状況

ある程度なじみ岩盤と一体になる。これによりボルト全面にわたり岩盤の変形を拘束する(図3)。

2.2 定着機構のモデル化と理論解析

前述の定着機構をモデル化するにあたり、事象②は事象①における摩擦抵抗を考慮する際の摩擦係数の増加として取り扱えると仮定をする。そして、事象①を下記のステップに簡略化して理論解析を進める³⁾。

[ステップ1] ボルト内部に高圧水(p')を注入するとボルトより削孔壁に内圧(p)が作用して削孔が若干拡張される。これにより削孔半径(a)が $a_1 (= a + U_{r1} |_{r=a})$ になる(図4-b)。

[ステップ2] 圧着完了後水圧を除去すると削孔が削孔中心方向に収縮し、ボルトと岩盤の間には収縮圧(q)が作用した状態でバランスする。これにより削孔半径 a_1 が $a_2 (= a + U_{r2} |_{r=a})$ になる(図4-c)。

[ステップ3] 岩盤からの収縮圧によりボルトと岩盤の摩擦抵抗力が発生し、その際の摩擦係数の項に事象②を取り込む(図4-d)。

「解析内容」

①ステップ1およびステップ2における岩盤および鋼管ボルトの半径方向変位が、ボルトと岩盤の境界上において釣り合うという状態を、2次元弾性体の平面ひずみ問題として取り扱い収縮圧(q)を求める。

・岩盤の半径方向変位 ($dU_r^r |_{r=a}$)

$$U_{r1} = \frac{(1+\nu_r)pa^2}{E_r r}, \quad U_{r2} = \frac{(1+\nu_r)qa^2}{E_r r}$$

$$\begin{aligned} dU_r^r |_{r=a} &= U_{r1} |_{r=a} - U_{r2} |_{r=a} \\ &= \frac{(1+\nu_r)a}{E_r} (p-q) \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

・ボルトの半径方向変位 ($dU_r^s |_{r=a}$)

$$\begin{aligned} dU_r^s |_{r=a} &= \frac{(1+\nu_s)qa_1 \{ (1-2\nu_s)a_1^2 + (a_1-h)^2 \}}{E_s \{ a_1^2 - (a_1-h)^2 \}} \\ &\approx \frac{(1-\nu_s^2)qa^2}{E_s h} \quad (\because a \gg h \gg U_{r1}, U_{r2}) \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

いま $dU_r^r |_{r=a} = dU_r^s |_{r=a}$ であるから式(1), (2)を用いて収縮圧(q)は次式で得られる。

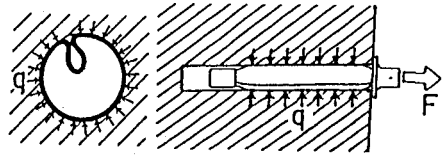


図2. 岩盤からの収縮圧 (事象①)

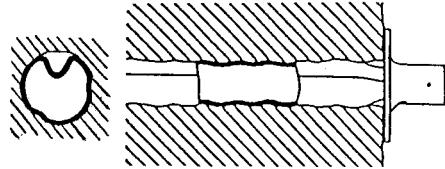
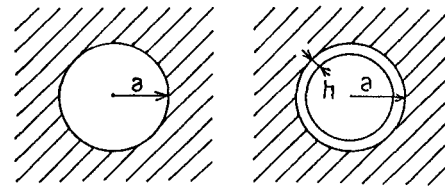
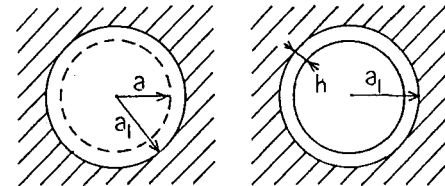


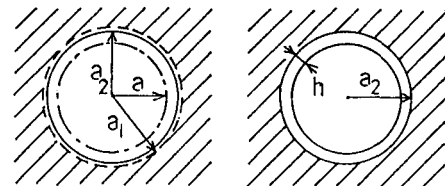
図3. 削孔壁へのなじみ (事象②)



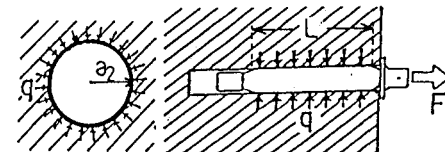
(a) 岩盤へ内圧が作用する直前



(b) 岩盤へ内圧 p が作用 (ステップ1)



(c) 収縮圧 q が発生 (ステップ2)



(d) 摩擦抵抗力発生 (ステップ3)

図4. ボルトと岩盤の相互作用モデル

$$q = \frac{p}{1 + \frac{(1-\nu_s^2)E_r a}{(1+\nu_r)E_s h}} \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 E_r 、 E_s : 岩盤および鋼管ボルトのヤング係数 (GPa)

ν_r 、 ν_s : 岩盤および鋼管ボルトのポアソン比

U_{r1} 、 U_{r2} : 内圧 p および内圧 q による半径方向変位 (mm)

p : ボルトから岩盤へ作用する内圧 (MPa) (ただし、 $p = p' - 10$ (MPa))

p' : ボルトに注入する水圧 (ポンプ圧) (MPa)

q : 岩盤からボルトに作用する収縮圧 (MPa)

a : 削孔の半径 (mm) (ただし、 $32\text{mm} < 2a < 40\text{mm}$)

h : 鋼管ボルトの管厚 (mm)

②岩盤から鋼管ボルトに収縮圧 (q) が等分布力として作用すると考え、ボルトと岩盤の間に発生する摩擦抵抗力の総和 (F (kN)) は次式のように得られる (図4-d)。

$$F = 2\pi a_2 L \mu q \equiv 2\pi a L \mu q \quad \text{----- (4)}$$

ここで、 L : ボルトの有効定着長 (m)、 μ : 事象②を考慮したボルトと岩盤間の摩擦係数

2.3 鋼管ボルトによる定着力の推定

鋼管ボルトによる岩盤への定着力は、式(3)、(4)より得られる摩擦抵抗力の総和 (F) と同等であると考えられる。そこで次にこの定着力に関して若干考察を述べる。

式(3)、(4)において、 E_s 、 ν_s 、 h ----- 鋼管ボルトの材料に関する定数 (既知量)

a 、 p' 、 L ----- 施工時に制御する要因

E_r 、 ν_r 、 μ ----- 施工対象岩盤の材料特性に関する値 (未知量)

であることを考えると、 F は E_r 、 ν_r および μ により決まることがわかる。さらに ν_r および μ については以下のような事から仮定しても差し支えない。

- ・ ν_r が取り得る値は0.1 ~ 0.4 程度であり、この範囲では式(3)、(4)から F に及ぼす ν_r の影響度は小さいことが明らかである。そこで $\nu_r = 0.25$ と仮定する。
- ・ μ は対象とする岩盤の材料特性よりもむしろ削孔の形状、状態により決まる値である。そこで定数として取り扱い $\mu = 0.15$ と仮定する。

結局、鋼管ボルトの定着力 (F) は次式で与えられることがわかる。この関係式はボルトによる定着力が、その岩盤のヤング係数により推定できる可能性のあることを示している。

$$F = f(E_r) = \frac{0.3\pi a L p}{1 + \frac{0.91E_r a}{525}} \quad \text{----- (5)}$$

3. 現位置岩盤での実験データからの考察

これまで述べてきた鋼管ボルトの定着力に関して、現位置岩盤で実施した引抜実験結果をもとに検討を行う。実験方法は式(5)において示した施工時に制御する要因 { a (削孔半径)、 p' (ポンプ圧)、 L (ボルトの有効定着長)} を変化させ、各種岩盤において定着させたボルトの引抜きを行うというものである (図5)。

引抜実験においてボルトが破断せず抜け出した場合の定

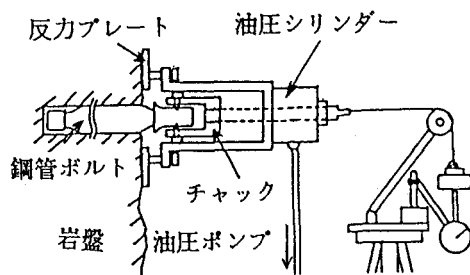


図5. 引抜実験方法

着力 (F') と式(5)による定着力の推定値 (F) との比を岩種別にプロットすると図6のようになる。ここで、実験においては岩盤のヤング係数の測定を行っていないため、 E_r として一般的な岩石のヤング係数⁴⁾を用いた。そのため、推定値 (F) はある範囲を持った値となっているが、図より実測値と推定値がよい対応を示していることがわかる。このことはまた、抜け出すように a , p' , l を設定して現位置地盤において引抜試験をすることにより、その位置における地盤のヤング係数を逆算し推定できる可能性のあることをも示しており、非常に興味深い。

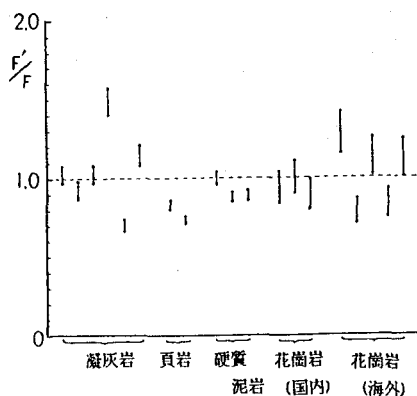


図6 定着力の実測値と推定値の比

4. 地盤補強工としての設計方法に関して

一般に地盤補強工におけるロックボルトの作用効果は、施工対象となる地盤の条件により次のよう大別することができる。

- (a) 力学的な不連続面の状態が地盤の挙動を支配する場合 (岩盤の亀裂、斜面のすべり等)、ボルトは個々の不連続部分を縫い合わせ地盤の一体性を高める。
- (b) 地盤の強度が地盤の挙動を支配する場合 (軟岩地山など)、ボルトは各部分で地盤内応力に影響を与え地盤を三軸状態にして地盤内変位を拘束する。

そこで、地盤補強工として膨張型鋼管ボルトを用いる場合は以下のように考えて設計すればよい。

- i) (a) のような場合、設計にはボルトと周辺地盤の周面摩擦力をもとに、地盤の不動域におけるボルトの引抜き抵抗力を求める必要がある。この周面摩擦力は過去の実績や経験に基づいて定められるのが一般的である。しかし鋼管ボルトの場合、調査や逆解析により得られた地盤のヤング係数を式(5)に代入すると対象地盤での引抜き抵抗力を容易に求められる。
- ii) (b) のような場合、設計にはボルトにより地盤に与えられる内圧を求める必要がある。従来この内圧は定着材が瞬時に完全に効くとしてボルト材の材料極限強度のみから求められていた⁵⁾。しかし鋼管ボルトの場合、調査や逆解析により得られた地盤のヤング係数を式(5)に代入すると対象地盤での定着力 (F) が求まり、この定着力をボルト一本が負担する面積で除して内圧を容易に求めることができる。

5. おわりに

定着材を介在してボルトと地盤が一体化されるタイプのロックボルトの場合は、ボルト、定着材、地盤の相互作用が複雑で、定着材の効果発現には時間的遅れがあり、施工に関しても設計通りに行かないため、その支保効果を評価するのが難しい。しかし鋼管ボルトの場合は以上の考察からその評価を容易にできる可能性のあることがわかる。このように設計と施工をより近づけるようなロックボルトの研究を進めることは、合理的、経済的設計・施工という観点から今後さらに必要になると思われる。

参考文献

- (1) たとえば、Ing. S Muller ; Austrian road tunnel supported by water-expanded bolts, Tunnels & Tunnelling, March, 1987. (2) 吉田, 河上, 永井; 膨張型鋼管ボルトによる岩盤支保, 第19回岩盤力学シンポ, 1987. (3) Gunnar Wijk, Bo Skogberg; THE SWELLEX ROCK BOLTING SYSTEM, 14TH CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 1982. (4) たとえば、西村, 藤井; 土木材料, 1975. (5) たとえば、谷本; トンネル支保の基本的概念, NATM-1, 1984.

(45) SOME CONSIDERATIONS TO THE FUNCTIONS AND THE WAY TO DESIGN OF SWOLLEN ROCKBOLTS

Takeo KONDO
Minoru ITO
Tetsuo NAGAI

(Institute, Technology Research Headquarters, Aoki Corporation)

ABSTRACT

In recent years the range of applications for rockbolts to ground reinforcement has widened. Although there are still some problems to be solved on those design and execution of work. They are the followings.

- There are some unknown functions of rockbolts to be investigated on ground reinforcement. Moreover it is difficult to reflect them on the design quantitatively.
- It's a long time for fully grouted rockbolts to function effectively. And it is difficult to install them according to the design.

Then we considered swollen rock reinforcement system as one of the way to solve those problems and investigated it. And we met with good results. Thus we report them with the following content.

- (1) The interaction between swollen rockbolts and a rock mass
 - Fixing mechanism
 - Model of fixing mechanism and theoretical analysis
 - Estimation of fixing force by swollen rockbolts
- (2) Some considerations from experimental data measured in field
- (3) The way to design swollen rockbolts as the members of ground reinforcement

From these discussions we have concluded that the fixing force by swollen rockbolts is given easily (in the following equation) and we can reflect the functions of swollen rockbolts on the design quantitatively. Therefore it becomes easy to install rockbolts according to the design. We think that the study of rockbolts filling a gap between design and execution of work is important for rational and economic execution of work.

$$F=f(E_r)=\frac{0.3\pi a L p}{1+\frac{0.91 E_r a}{525}}$$