

(66) 地山との相互作用を考慮した膨張型鋼管ボルトの設計・施工

(株) 青木建設 正会員 永井 哲夫
正会員 國村 省吾
正会員 ○池尻 健

Design and Installation of Swellex Rock bolts Considering Rock Mass - Rock bolt Interaction

Tetsuo Nagai, Aoki Corporation
Shogo Kunitamura, Aoki Corporation
Takeshi Ikejiri, Aoki Corporation

Abstract

Rock bolting is the most effective and the most economical means of supporting excavations in civil engineering applications. Rock bolts can be used to control all types of instabilities except those involving extremely weak and soft ground such as that which may occur in a major fault zone. Accordingly, in recent years, a number of different types of rock bolts have been used and the range of applications has widened. Also, the development of new rock bolt concepts has led to the use of rock bolts in non-traditional applications.

Therefore, the engineer who must design rock reinforcement systems today is faced with an increasing demand to optimize his design with respect to both safety and economic considerations. However, there seems to be no reliable design method presently available for dimensioning the rock bolt support system.

In this paper, we consider the anchoring mechanism of Swellex rock bolt, which is one of the friction anchored rockbolts. A method which is capable of dimensioning frictional forces is proposed, then a way to install Swellex rock bolts based on design concept is discussed here.

1. はじめに

NATMが山岳トンネルのみならず都市トンネルなど種々の地山条件下に適用されるようになり、標準タイプの全面定着型モルタル充填式以外にも、さまざまなタイプのロックボルトが実際に使用されるようになってきている。経験的には、このように地山の状況に応じたロックボルトの施工がなされる段階に達しているが、理論的には、地山との相互作用を考慮してロックボルトの作用効果を定量的に評価し、合理的に設計を行えるという段階には未だ達していない。そのため、一般にロックボルトの設計・施工は経験的方法に頼らざるを得ない。最近では、ロックボルトがトンネルのみならず斜面・法面、立坑の補強にも積極的に用いられるようになってきている¹⁾。そこで、過去の事例や熟練技術者の経験に加えて、地山の状況に応じた各種ロックボルトの定量的評価方法を確立させることにより、さらに合理的な設計・施工を行うことが望まれる。

本研究では、フリクション式ロックボルトの一つである膨張型鋼管ボルト (Swellex Rock bolts) に焦点を当て、地山との相互作用を考慮してその作用効果を定量的に評価する方法について考察を行う。この膨張型鋼管ボルトについては、著者の一人が既に硬岩地山を対象に定着機構および評価方法に関する考察を行っている²⁾。このロックボルトは、軟岩や土砂地山など硬岩地山以外に用いられるケースもあるが³⁾、その効果を十分に評価する方法はない。ここでは、軟岩から硬岩まで岩盤を対象として、地山との相互作用を考慮した膨張型鋼管ボルトの定着力の定量的評価方法を示し、それをもとに合理的に設計・施工を行うための要点について考察を行う。

2. 全面定着型ロックボルトの定着力と作用効果

地盤補強におけるロックボルトの作用効果は、補強対象となる地盤やロックボルトの種類により異なる。いま、これをロックボルトの定着方式という観点から分類すると、先端定着型と全面定着型に大別できるが（表-1）、最近各方面で積極的に使用されているのは後者に属するものである。全面定着型のロックボルトの場合、周辺地山と全面にわたって定着することによりその効果が有効に発揮される。そのため、設計という観点からは、ロックボルトと周辺地山の相互作用を考慮して作用効果を評価すること、施工という観点からは、ロックボルトが全面

で確実に定着し効果を最大限に発揮できるようにすることが重要な課題となる。

一方、補強対象となる地盤を岩盤に限定すると、軟岩よりなる岩盤と節理などの不連続面の特性によりその力学的挙動が支配される不連続性岩盤に大別できる。前者においては岩石実質部が、後者においては不連続面がそれぞれ全面定着型ロックボルトにより変形／変位を拘束され、その結果岩盤構造物は安定性を保持できると考えられる。両者の間では、支保機構は大きく異なるにもかかわらず、ともに全面で周辺地山と十分に定着しなければその効果を有効に発揮できない⁵⁾という点では共通している。このようなことから、モルタルなどの定着材を用いるロックボルトを対象に、その定着機構に関する研究⁶⁾や定着効果の定量的評価に関する研究⁷⁾が行われているものの、未だ十分な方法は確立されていないようである。

これに対して、膨張型鋼管ボルトの場合、ロックボルトと岩盤の間に定着材が介在せず、両者の相互作用を利用して定着力が得られている。そのため、この相互作用を補強対象の岩盤に応じてどのように評価するかは重要な問題であるが、これまで十分に検討されていなかった。本研究は、この点に関して考察を行うものである。

3. 補強対象の岩盤に対応した膨張型鋼管ボルトの定着力の評価

膨張型鋼管ボルトと地山の定着状況は図-1のようになり、定着のメカニズムを要約すると次のようになる。

- ① 削孔がボルトから内圧を受けて若干拡張され、圧着完了後に水圧を除去すると削孔中心方向に収縮する。このとき、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は拘束される。
- ② 高圧水（約 30 MPa）の注入により、厚さ 2 mm の膨張型鋼管ボルトが岩盤に圧着されるため、削孔壁面の不規則な形状に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って岩盤の変形は拘束される（図-3）。

これらのメカニズムを定量的に評価するために、適切なモデル化が必要となる。ここでは、事象②は事象①における摩擦抵抗を考える際の摩擦係数の増加として取り扱えると仮定し、事象①について定量的評価を試みる。

表-1 ロックボルトの分類⁴⁾（一部改変）

定着方法による分類		
先端定着型	機械式	
	接着式	
全面定着型	充填式	モルタル
	カプセル式	セメントカプセル系 樹脂カプセル系
	注入式	セメントミルク系 樹脂系
	フリクション式	水圧利用、鋼の反発利用
併用型		

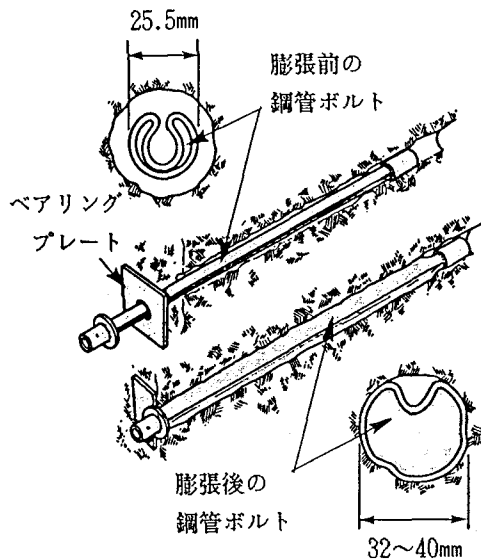


図-1 膨張型鋼管ボルトの定着状況

膨張型鋼管ボルトは、鋼管を冷間加工して図-1のような形状に成型したものであり、それに高圧水をかけさらに塑性変形させることにより、岩盤との定着効果を発生させている。その際、膨張型鋼管ボルトの断面形状が凹部を持って定着するように適切な削孔径を確保できれば、その部分が見かけ上バネのような働きをして地山の収縮に追随し定着力を発揮する(図-2)と考えられる。

このように複雑な挙動を示す膨張型鋼管ボルトであるが、その挙動をこれと等価な外径を有する弾性体の鋼管の挙動を用いて表現できることを著者の一人が既に示している²⁾。そして、膨張後に岩盤から収縮圧を受けた膨張型鋼管ボルトの弾性的収縮変形量(U_s)は次のように求められている。

$$U_s = \frac{(1 - \nu_s^2) q a^2}{E_s h} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 a は削孔径、 q は収縮圧、 E_s および ν_s は鋼管の弾性係数およびポアソン比を表す。

一方、岩盤に注目すると、それを構成する岩石実質部が硬岩のように十分な強度を有する場合、膨張型鋼管ボルトから作用する内圧に対して岩盤は十分抵抗できるため、先の研究²⁾に示したように岩盤も等価な弾性体としてモデル化することができる。そのとき、水圧除去後に岩盤の弾性体の性質に起因して示される岩盤の収縮変形量($U_{r1} - U_{r2}$)は次式で与えられる。

$$U_{r1} - U_{r2} = \frac{(1 + \nu_r) a}{E_r} (p - q) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 p は岩盤に作用する内圧、 E_r および ν_r は岩盤の見かけの弾性係数およびポアソン比を表す。

しかし、ある程度強度が低い軟岩を構成岩石とするような岩盤の場合、削孔壁面に作用する内圧がある程度大きくなると、壁面に引張破壊によるクラックが発生し始めそれが進展していく。そうすると、クラック発生開始圧以上の内圧をかけても岩盤に有効には作用しない。そのため、前述の場合とは別の取り扱い方を検討する必要がある。ここでは、クラック発生開始圧を膨張型鋼管ボルトが岩盤を変形させるのに有効な圧力(有効圧力)と定義し、岩盤をこの有効圧力以上の応力を受けると塑性挙動を示す完全弾塑性体にモデル化して考える。

まず、クラック発生開始圧について検討する。削孔壁面に内圧(p)が作用したときの壁面での半径および接線方向応力(σ_r および σ_θ)は弾性論から次のように表せる。

$$\sigma_r = -\sigma_\theta = p \quad \dots\dots (3)$$

そして、初期地圧測定法の一つである水圧破碎法では、削孔壁面における接線方向応力が岩盤の一軸引張強度(σ_T)に等しくなると一次の引張亀裂が生じるとしている⁸⁾。これに対して、Wijk⁹⁾は、岩盤ブロックを用いた水圧破碎に関する実験的研究により、少なくとも岩盤の引張強度の4倍の水圧がクラック発生開始には必要であることを示している。これらのことから、クラック発生開始圧(p^*)は次のように表すことができる。

$$p^* = |\sigma_T| \quad : \quad \text{水圧破碎法の考え方} \quad \dots\dots (4)$$

$$p^* = 4 |\sigma_T| \quad : \quad \text{Wijk による実験結果} \quad \dots\dots (5)$$

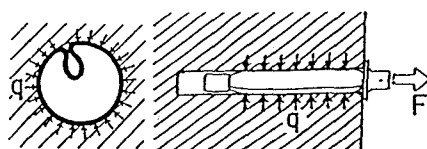


図-2 岩盤からの収縮圧(事象①)

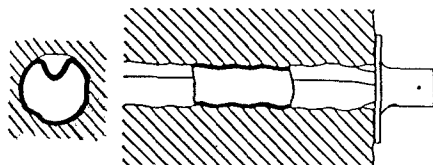


図-3 削孔壁面へのなじみ(事象②)

過去の研究⁹⁾によると、クラック発生開始圧として後者の方が妥当であると考えられることから、本研究ではこれを採用する。式(5)は一軸引張強度に関するものであり、実際の設計を考えるならば何らかの破壊基準式を用いて一軸圧縮強度に関するものに変換した方がよい。そこで以下に、Hoek & Brown¹⁰⁾の経験的破壊基準式(式(6))を用いた変換を示す。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + S \sigma_c^2)^{1/2} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 σ_1 および σ_3 は、それぞれ最大、最小主応力、 σ_c は岩石実質部の一軸圧縮強度、 m および s は材料定数を表す。

式(6)において、 $\sigma_1 = 0$ 、 $s = 1$ として σ_3 を求めると次のようになる。次式では、 σ_3 が一軸引張強度に相当し、これが一軸圧縮強度と材料定数により表されている。

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_c \{m - (m^2 + 4)^{1/2}\}}{2} \quad \dots\dots (7)$$

そこで、式(5)および(7)を用いると、クラック発生開始圧つまり有効圧力は一軸圧縮強度の関数として次のように表せる。

$$p^* = 4 \left| \frac{\sigma_c \{m - (m^2 + 4)^{1/2}\}}{2} \right| = 2 \left| \sigma_c \{m - (m^2 + 4)^{1/2}\} \right| \quad \dots\dots (8)$$

上式より、膨張型鋼管ボルトを打設する地山の一軸圧縮強度が分かれば、クラック発生開始圧が容易に求められる。そして、膨張型鋼管ボルトから地山に作用させる内圧がそれ以下であれば、地山は弾性体的挙動をすると考えられ、式(2)をそのまま用いて地山の収縮変形量を求めることができる。一方、クラック発生開始圧以上の内圧が作用する場合、式(8)を用いて得られる有効圧力が地山に作用することになる。そのときの地山の収縮量は、式(2)において p の代わりに p^* を用いて求めることができる。

以上のようにして、軟岩から硬岩まで岩盤を対象とした場合、水圧除去後に地山が示す収縮変形量を得ることができる。膨張型鋼管ボルトと岩盤が一体となって挙動することから、式(1)と(2)でそれぞれ算出される変形量は等しくなければならない。そうすると、収縮圧(q)および定着力(F)は次のように求められる。

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

$$F = 2 \pi a L \mu q \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 L はボルトの有効定着長、 μ は事象②を考慮したボルトと岩盤の間の摩擦係数、 h はボルトの管厚を表す。

これまでの、地山の強度特性によって膨張型鋼管ボルトから地山に作用する内圧が変化することを考慮して、定量的に定着力を評価する方法を検討してきた。軟岩よりなる岩盤を対象とするような場合、削孔壁面にクラックが発生し始めそれが進展していくと削孔径が増加し、図-2に示したようにそれを適切な範囲に保持することが難しくなる。そこで、最後にこのような削孔径の増加の程度を完全弾塑性体を仮定して誘導した結果を表すと次のようになる。

$$\Delta a = a \left\{ 1 - \left(\frac{1 - e_{av}}{1 + C} \right)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots (10)$$

4. 現場での引抜試験結果との比較

前章では、軟岩から硬岩まで岩盤を対象に、地山と膨張型鋼管ボルトの相互作用を考慮して、その定着力を評価する簡易式を提案した。ここでは、いくつかの現場における引抜試験の結果と提案式による計算結果を比較することにより、提案式の妥当性の検証を行う。いま、比較結果の一部をまとめると下表のようになる。この結果から、簡単なモデルにもかかわらずある程度の値を推定できており、提案式を誘導する際に設けた仮定がある程度妥当であったこともうかがえる。しかし、比較例が非常に少ないため、今後データを蓄積してさらに検討を行う必要がある。また、ここでは結果を挙げていないが、式(10)により削孔径の増加量を求めたところ、表-2の軟岩のケースであればだいたい2~2.5mm程度であった。膨張型鋼管ボルトは、図-2のところでも述べたように削孔径の管理が非常に重要であり、適切な削孔径を確保するためには、このような削孔の変形量に関する予測データなどが有効であると考えられる。また、膨張型鋼管ボルトを軟岩などの地山で有効に利用するためには、ロックボルト孔の穿孔の段階から孔径管理をする必要があり、この点が今後に残された大きな課題であろう。

表-2 現場引抜試験結果と提案式による計算結果

岩石 分類	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	有効定着長 (m)	試 験 結 果 (tonf)	計 算 値 (tonf)
硬岩	1500	0.5	11.0、9.7、9.8 (全てボルトすべり、平均10.2)	7.9 (すべり)
		1.0	11.5、11.5、11.5 (全てボルト破断、平均11.5)	15.9 (破断)
軟岩	60~100	2.0	12.0、12.3、11.0、12.0 (全てボルト破断、平均11.8)	7.2~12 (一部すべり)
軟岩	113	3.0	10.0以上、11.5(破断)、10.0以上	29.3 (破断)

【参考文献】

- 1) 塩月隆久・田中尚史・田中平内・太田 章・大橋哲二：斜面補強工による大規模法面の施工—ロックボルトと吹付モルタルによる斜面補強工—，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第6部，pp.202-203，1988.
- 2) 近藤武夫・伊藤 実・永井哲夫：膨張型鋼管ボルトの定着機構と設計方法についての考察，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.219-223，1988.
- 3) 大沢英夫・佐藤靖夫・永井哲夫：先打ちボルト工を駆使して破砕帯を突破 長沢蒲郡線長沢トンネル，トンネルと地下，pp.45-51，1986.
- 4) (社)日本トンネル技術協会：上信越自動車道 山岳トンネルのロックボルトの施工に関する調査研究報告書(日本道路公団東京第二建設局委託)，1990.3.
- 5) 永井哲夫：ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学学位論文，1992.
- 6) Farmer, I. : Stress Distribution along a Resin Grouted Rock anchor, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.12, pp.347-351, 1975.
- 7) 川本眺万・アイダン オメル：ロックボルトの支保機構について，電力土木，No.214, pp.3-13, 1988.
- 8) 土木学会：初期地圧測定法の現状と課題，1992.6.
- 9) Wijk, G. : Simple Strength Tests on and Hydraulic Fracturing of Rock Material, Stiftelsen Svensk Detonikforskning Report, 1982.10.
- 10) Hoek, E. and E.T. Brown : Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.