

既設トンネルの変状対策工としての膨張型鋼管ボルトの適用

APPLICATION OF SWELLEX ROCKBOLTS TO THE REINFORCEMENT OF DETERIORATED TUNNELS

永井哲夫*・孫 建生*・國村省吾**・池尻 健**

Tetsuo NAGAI, Jian-Sheng SUN, Shogo KUNIMURA, Takeshi IKEJIRI

Recently, some tunnels have been deteriorating in Japan. Rockbolting is a useful method of ground reinforcement around deteriorated tunnels. Conventional bolts (Mortar and resin grouted bolts) have been used with some success in such cases, but there may be large variations in installation quality. However, it is considered that the anchoring mechanism of Swellex rockbolts enables them to be used with success. In this paper, the authors discuss applicability of Swellex rockbolts to the reinforcement of deteriorated tunnels from both design and installation points of view.

Keyword : swellex rockbolts, deteriorated tunnels, reinforcement, design and installation

1. はじめに

近年、供用中のトンネルにおいて、覆工のクラックや変形などの変状発生事例が多く見られるようになっている。道路トンネルを対象として、変状の実態と対策に関するアンケート調査結果を分析した報告¹⁾によると、第三紀層などの軟岩地山に、矢板工法などのNATM以外のトンネル工法で施工されたトンネルにおいて、変状が発生する件数は多くなっている。そして、変状対策工としては、吹付けコンクリートやロックボルトがよく利用されているようである。そのとき、ロックボルトとして標準タイプの全面定着型モルタル充填式のものを用いると、施工性が悪く確実な定着力を得られないことが多い。また、設計に際しては、ロックボルトと地山の定着力を定量的に評価することが困難である。

それに対して、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 rockbolts)の場合、変状を生じている地山においても簡単に施工でき全面で確実に定着させることが可能であり、対策工としては有効であると考えられる。膨張型鋼管ボルトは、当初は硬岩地山のトンネル支保部材として用いられていたが、最近では軟岩、土砂および粘土地山のトンネルや斜面にも適用されるようになってきた²⁾。しかし、既設トンネルの変状対策工として施工された例はない。そこで本報文では、その対策工としての膨張型鋼管ボルトの適用性について、設計および施工の両面から検討を行う。

* 正会員 博士(学術) (株)青木建設 技術本部研究所 土木研究室

** 正会員 (株)青木建設 技術本部研究所 土木研究室

2. 既設トンネルの変状および対策

猪熊ら¹⁾は、日本道路協会が実施した道路トンネルの変状に関するアンケート調査結果を分析し、わが国における道路トンネルの変状の実態と対策を報告している。それを要約すると次のようになる。ただし、ここでは漏水と変状を区別して、漏水はあるものの覆工などが健全なトンネルは変状トンネルとは呼ばず、覆工のクラックや変形、剥離・剥落、路面の盤ぶくれや路肩側溝の変形・破壊などを変状と定義している。

- ①変状発生件数は、矢板工法などのNATM以外のトンネル工法で施工されたトンネルにおいて多い。
- ②変状トンネルの支保部材として、鋼製支保工の使用件数が最も多く、ロックボルトの使用件数は少ない。
- ③土盛りが小さい箇所や第三紀層などの軟岩地山に設けられたトンネルにおいて変状発生件数が多い。
- ④変状対策工として、吹付けコンクリートやロックボルトの使用頻度が高い。

また、吉川ら³⁾は、わが国における鉄道トンネルを対象に、変状の状況、原因および対策などについて調査を行い、変状の形態や進行状況には変状原因ごとに特徴があること、実施されている変状対策のうちいくつかについてはその役割や効果がある程度明確化できることを示している。

既設トンネルの維持管理においては、トンネルに関するきめ細かい点検により変状を早期発見し、変状が発生しているトンネルに関しては調査などによりその原因を推定して、必要に応じて原因に対応した対策を施すことが重要である⁴⁾。それに対して、より効率的にかつ的確にトンネルの変状を把握する方法に関する研究^{5)・6)}や覆工に生じる変状の原因に関する研究^{7)・8)}などが行われているものの、変状対策工に関してはあまり研究がなされていない⁹⁾。

ロックボルトは、変状トンネルの覆工背面の地山を直接補強できることから、前述のように対策工としてよく使用されているようである。しかし、ロックボルトとして標準タイプの全面定着型モルタル充填式のものを用いる場合、その設計および施工においては次のような問題がある。

- ・設計に際して、ロックボルトと地山の定着力を定量的に評価することが難しい。
- ・変状トンネルの場合、ロックボルトは覆工コンクリート、空隙、矢板、地山など非均質で複雑な部分を貫くため、引抜試験を行ってもロックボルトと地山の定着力を十分に評価できない。
- ・変状トンネルでは漏水のある場合が多く、覆工背面や矢板裏などに空隙が存在するため、施工性が悪く定着に関する信頼性は低い。

そこで本報文では、ロックボルトとしてユニークな定着機構の膨張型鋼管ボルト (Swelllex rockbolts) に焦点を当て、既設トンネルの変状対策工としての適用性について以下検討を行う。

3. 膨張型鋼管ボルト

3.1 概要

膨張型鋼管ボルトは、鋼管に冷間加工を施して図-1のような形状に成型したロックボルトである。これを削孔に挿入した後、図-2のようなポンプユニットを用いてボルト内部に30MPa程度の高圧水を注入し、瞬時にボルトを地盤に圧着させることにより地盤を補強するもので、従来のロックボルトとは全く異なる定着機構を有している。

3.2 定着機構

膨張型鋼管ボルトは、地盤との相互作用を利用して定着力が得られているため、補強の対象となる地盤に応じてそ

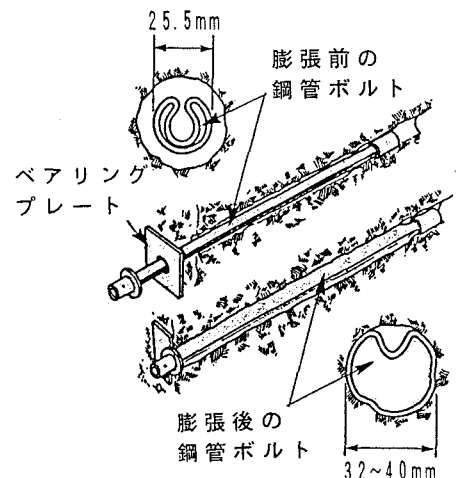


図-1 膨張型鋼管ボルトの概要

の評価方法を考えなければならない。当初、このボルトは硬岩地山のトンネル支保部材として用いられていたことから、硬岩より成る岩盤を対象とした定着機構および評価方法に関する考察は行われている^{10)・11)}。この場合、ボルトからの内圧に対する岩盤の反発的挙動、つまり岩盤の弾性的性質を利用してボルトの定着力が得られる。これに対して、軟岩、土砂および粘土地山の場合、できる限り削孔径を小さくしてボルトを挿入するか、または機械的に地山に直接ボルトを打ち込み、その後の膨張変形を通して周辺地山を締め固めて定着力が得られると考える程度で、定着機構および評価方法については十分に検討されていなかった²⁾。そこで、著者らは、軟岩より成る岩盤を対象として、定着機構に関しては基本的に硬岩の場合と同様に考えられること、定着力の評価に際しては“有効圧力”という概念を用いればよいことを既報において示した¹²⁾。そうすると、軟岩から硬岩まで岩盤を対象として、膨張型鋼管ボルトの定着力を統一的に評価することが可能になる。

3.3 岩盤を対象とした定着力の評価方法

詳細については既報¹²⁾において述べているので、ここでは要点のみをまとめて示す。まず、軟岩から硬岩まで岩盤を対象として、膨張型鋼管ボルトの定着機構を要約すると次のようになる。

- ①削孔周辺の岩盤はボルトから内圧を受けて若干拡張され、圧着完了後に水压を除去すると削孔中心方向に収縮する。このとき、ボルトの断面形状が凹部を保持し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岩盤の収縮に追随し、岩盤から収縮圧(q)を受けた状態でバランスする(図-3)。この収縮圧によりボルトと岩盤の摩擦抵抗が増大して岩盤の変形は拘束される。この場合、内圧に対する岩盤の反発的挙動つまり岩盤の弾性的性質を利用してボルトの定着力が得られている。
- ②高圧水の注入により薄肉の鋼管が岩盤に圧着されるため、ボルトは削孔壁面の不規則な凹凸形状にある程度なじみ岩盤と一体になる(図-4)。これによりボルト全面にわたって岩盤の変形が拘束される。
- ③硬岩より成る岩盤の場合、ボルトから削孔壁面に作用する内圧を全て有効に利用できる。しかし、ある程度強度が低い岩盤の場合、内圧により壁面に引張破壊によるクラックが発生し進展していく。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の反発的挙動を有効には利用できない。クラック発生開始圧を岩盤の弾性的性質を利用できる限界の圧力(有効圧力)と定義すると、軟岩地山の場合、この“有効圧力”に見合った定着力がボルトに生じる。

このように膨張型鋼管ボルトは複雑な挙動を示すが、これを膨張後のボルトと等価な外径を有する弾性鋼管の挙動によりモデル化し(図-5)、定着力に関して導いた理論

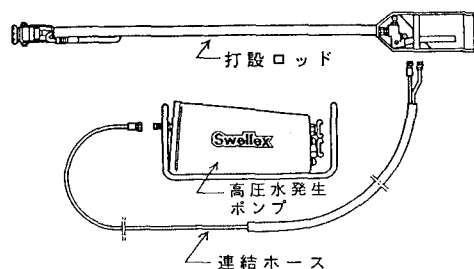


図-2 高圧水発生ポンプユニット

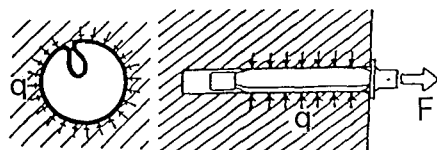


図-3 岩盤の弾性的性質による収縮圧

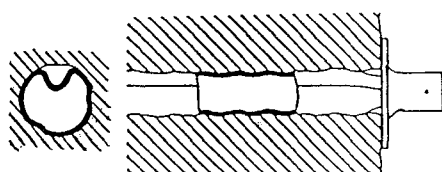
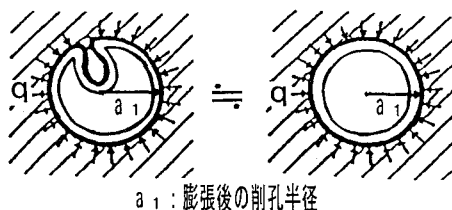


図-4 削孔壁面へのなじみ



a_1 : 膨張後の削孔半径

図-5 膨張型鋼管ボルトのモデル化

解をまとめると次のようになる。

有効圧力 (p^*)

$$p^* = 2 \sigma_c \{ (m^2 + 4)^{1/2} - m \} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 σ_c は岩盤の一軸圧縮強度、 m は **Hoek & Brown** の経験的破壊基準式における材料定数を表す。

岩盤の弾性的性質による収縮圧 (q)

a) $p \leq p^*$ のとき

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

b) $p > p^*$ のとき

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

ここで、 p はボルトから削孔壁面に作用する内圧、 E_s および ν_s は等価弾性鋼管の弾性係数およびポアソン比、 E_r および ν_r は岩盤の弾性係数およびポアソン比、 a は削孔半径、 h はボルトの管厚を表す。

なお、 p にはポンプからボルトに注入した水压をそのまま用いるのではなく、その水压から **10MPa** だけ差し引いた圧力を使う。これは、図-6 に示すようにボルトを膨張変形させるのに約 **10MPa** の内圧が必要となるからである。

膨張型鋼管ボルトの定着力 (F)

$$F = 2 \pi a L q \mu \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 L はボルトの有効定着長、 μ は削孔壁面へのなじみを考慮した見かけの摩擦係数である。

これらの式の妥当性を検証するために、軟岩および硬岩を対象とした膨張型鋼管ボルトの引抜試験結果と提案式による計算値の比較検討を行った。その結果の一例を表-1 にまとめて示す。ここでは、ボルトの定着力をその表面積で除して求めた最大摩擦力をパラメータとして、これを岩質に対応させて整理している。なお、従来式というのは、硬岩より成る岩盤を対象として得られた膨張型鋼管ボルトの定着力の評価式^{10), 11)} であり、式 (2) に対応している。実験結果から、一軸圧縮強度では硬岩に比べて $1/20$ 程度である軟岩の場

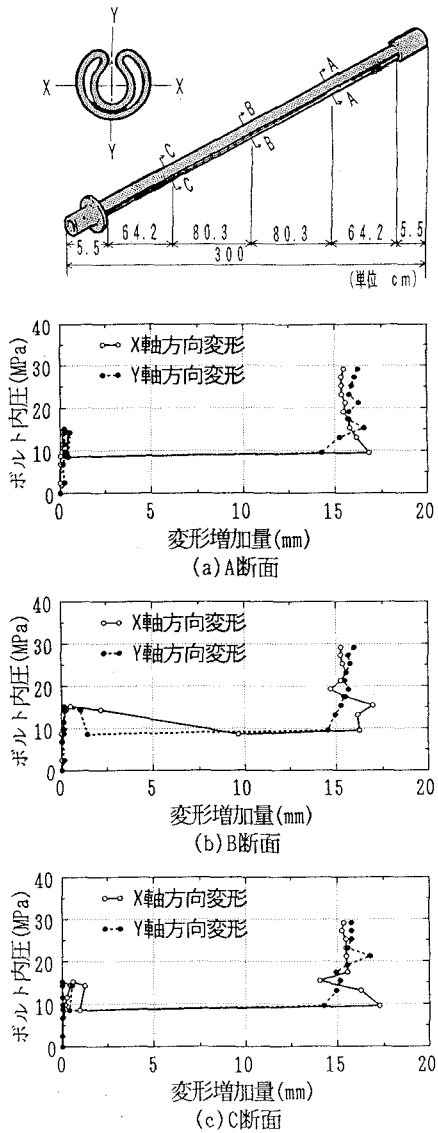


図-6 膨張型鋼管ボルトの変形特性
表-1 実験値と計算値の比較

岩 質	一軸圧縮強度 (MPa)	最大摩擦力 (MPa)		
		実験値	従来式	提案式
花崗岩	151.8	1.13	1.00	1.00
		1.06		
		1.01		
硬質泥岩	147.0	1.81	1.30	1.30
		1.61		
		1.59		
凝灰岩	7.45	0.61	2.92	0.62
		0.61		
		0.58		

(最大摩擦力 = $F / 2 \pi a L$)

合、最大摩擦力は硬岩に比べて1／3～1／2程度となっている。このことは、軟岩においても膨張型鋼管ボルトが補強効果を発揮できることを表している。そして、この提案式を用いることにより、軟岩から硬岩まで岩盤を対象として、膨張型鋼管ボルトの定着力を統一的に評価できることが分かる。また、従来式を用いて軟岩地山におけるボルトの定着力を評価すると、過大に見積もる傾向があるため注意を要する。

3.4 ボルトからの内圧による削孔径増加量

岩盤を対象とする場合、内圧に対する岩盤の弾性的性質を利用して膨張型鋼管ボルトの定着力が得られる。そのとき、ボルトの断面形状が図-3に示すように凹部を保持して定着するようになしなければならない。硬岩より成る岩盤の場合、内圧による削孔径増加量は微小であるが¹⁰⁾、軟岩の場合は十分に検討されていない¹²⁾。

そこで、図-7に示すようなモデルを用いて弾塑性理論解析を行い、削孔径増加量について検討した。ここでは、解析において弾塑性半径（境界）を求める際、図-8のように削孔周辺の微小部分のつり合い状態を考えている。検討の結果、軟岩の場合でも内圧による削孔径増加量は削孔径に比べて十分小さいことが分かった。

3.5 有限要素解析によるシミュレーション

理論解析の妥当性を検証する目的で、有限要素解析によりシミュレーションを実施した。解析には、汎用プログラムの“SIGNAS”を用いた。膨張型鋼管ボルトをはり要素でモデル化し、岩盤を完全弾塑性体でモデル化して、2次元平面ひずみ状態で弾塑性解析を実施した。その解析結果の一例を理論解析結果と合わせて表-2に示す。これから、図-5のように膨張型鋼管ボルトをモデル化することは妥当であることが分かる。また、有限要素解析の結果と理論解析のそれがよい対応をなしていることが分かる。

4. 変状対策工としての適用性

ロックボルトの設計においては、対象となる地山において、一本当たりどの程度の定着力を見込めるかをすることが重要である。第2章でも述べたように、標準タイプの全面定着型モルタル充填式ロックボルトの場合、変状トンネルにおいてその定着力を定量的に評価することは非常に難しい。それに対して、膨張型鋼管ボルトの場合、前章で示した理論解を用いると、変状トンネルにおいても引抜試験を実施することなく定着力を定量的に評価できることから、設計においては有利である。なお、式(1)により有効圧力を算出する場合、材料定数mを求めなければならない。そこで、**Hoek & Brown** が岩盤分類に対応させて設定しているm（表-3）を利用することが考えられる。同表には、参考までに式(3)を用いる目安となる岩盤の一軸

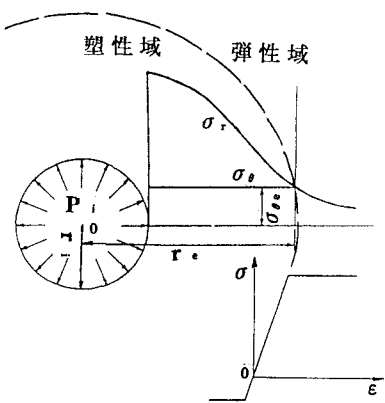


図-7 解析モデル

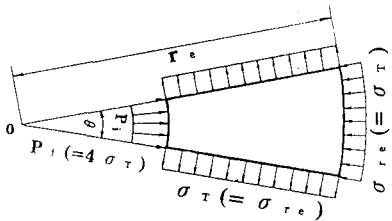


図-8 微小要素のつり合い

表-2 解析結果

岩 種	有効圧力 (MPa)		有限要素解析		理論解析 (提案式)
			Swellx	等価鋼管	
硬 岩 $\sigma_c=150$ (MPa)	20.00	Δa	0.016	0.015	0.013
		q	9.87	9.30	7.65
軟 岩 $\sigma_c=6.3$ (MPa)	5.37	Δa	0.224	0.236	0.178
		q	2.79	2.81	3.67

(Δa : 削孔半径増加量(mm)、q: 収縮圧(MPa))

圧縮強度 (σc^*) も示してある。

膨張型鋼管ボルトの場合、断面形状が凹部を保持して定着する必要があり、削孔径の管理が重要となる。前章の検討結果から分かるように、内圧が孔径に及ぼす影響は小さい。そのため、穿孔に際して適切な孔径を確保することが大切である。

表-3 岩盤分類と m

	ドマ什 石灰岩 大理石	泥岩 シルト 頁岩	砂岩 珪岩	安山岩 粗粒玄武岩 流紋岩	花崗岩 ノーライ 斑れい岩
m	7	10	15	17	25
σc^* (MPa)	35.0	49.5	73.8	83.6	123

5. おわりに

著者らは、わが国に膨張型鋼管ボルトの導入を始めた頃より、さまざまな角度からその適用性について検討を行ってきた^{11), 12)}。膨張型鋼管ボルトは、簡単に定着でき、確実な定着が得られ、打設後直ちに効果を発揮するという施工面での長所に加えて、岩盤との相互作用を考慮してその定着機構を比較的容易に評価できることから、設計面から考えても従来のロックボルトに比べて有利である。ただし、その定着力が削孔径に大きく依存することから、ロックボルト孔の穿孔が難しいような地盤に対しては十分に補強効果を発揮できない。この点が今後検討されるべき課題の一つであると思われる。

最後に、既設トンネルの変状対策工としての膨張型鋼管ボルトの適用性について研究を行うきっかけは、応用地質(株)の笹尾 禎氏の助言であった。末筆ながら、誌面を借りて感謝の意を表しむすびとする。

6. 参考文献

- 1) 猪熊 明・稲野 茂：道路トンネルの変状と対策，土木技術資料，34-8，pp.42-47，1992。
- 2) McKinnon, S.D. : Extending the traditional role of rock reinforcement, Construction Industry International, Vol.16, No.8, pp.28-33, 1990.
- 3) 吉川恵也・北川修三・川上義輝・馬場富雄：トンネル変状の傾向(2)，鉄道技術研究報告，No.1293，1985.3。
- 4) 藤本 昭：道路トンネルの維持管理，道路，pp.37-39，1990.12。
- 5) 安田 亨・谷口親平・亀和田俊一・岡野吾一：老朽トンネルにおけるクラック診断システムの開発，土木学会論文集，第435号/V-15，pp.139-144，1991。
- 6) 曾根好徳・前川 聡：多チャンネル方式地下レーダー探査による既設トンネルの健全度評価の試み，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.176-180，1993。
- 7) 朝倉俊弘・松本吉雄・小島芳之・川上義輝：トンネル覆工の力学挙動解析，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.219-224，1990。
- 8) 岩崎好規・橋本 正・今西 肇・山内淑人：トンネル覆工のひび割れ調査とその発生原因の推定，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第1巻，pp.223-228，1991。
- 9) 弘中義昭・岩藤正彦・坂下文夫・伊東良浩・石橋哲夫：トンネル内張補強材料としての吹付けコンクリートの適用性について，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第1巻，pp.233-238，1991。
- 10) Wijk, G. and B. Skogberg : The swellex rock bolting system, Proc. 14th Canadian Rock Mech. Sympo., No.20, 1982。
- 11) 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一考察，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。
- 12) 永井哲夫・國村省吾・池尻 健：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，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.316-320，1993。