

山岳トンネルにおけるフリクション先受けボルト工法による急速施工 RAPID EXECUTION WITH FRICTION TYPE FOREPILING BOLTS IN TUNNEL

来馬 良幸*・川村 人志*・御手洗 良夫**・松尾 勉**

Yoshiyuki KURUMA, Hitoshi KAWAMURA, Yoshio MITARASHI and Tsutomu MATSUO

Generally various auxiliary methods are adopted to excavate a tunnel safely under the bad geological condition, such as fractured zone or weak ground zone with the water inflow. Among these methods for tunnelling, the forepiling system using fully grouted bolts is a most popular method to keep the unstable face from collapsing. However, when it comes to the shortening of construction period, this method has a disadvantage because it takes much time to complete the whole system. To solve this problem, the forepiling system using friction type bolts is adopted to the weak zone. This paper deals with the result of rapid execution in the soft ground using this system, and evaluates the effect of friction bolt to stabilize a tunnel face.

1. はじめに

連続する破砕帯と多量の湧水により軟弱化した地山におけるトンネル施工では、種々の補助工法が必要とされるが、従来の充填式・注入式のフォアパイルリングにおける問題点を解決し、作業効率をあげるための条件としては、

- ・切羽前方地山の先受け効果を高め、切羽や天端の崩落を確実に防止すること
- ・地山のゆるみの拡大を防止するため、先受け作業の所要時間を短縮すること
- ・崩落性の地山に対し、確実な安全性を確保すること

等があげられる。フリクション式ロックボルトによる先受け工法は、これらの条件を満足する有力な方法の一つであると考えられる。

本報告は、フリクション先受けボルト工法による先受け作業ならびに切羽安定化に伴う掘削作業の時間短縮等施工の効率化について述べるとともに、フリクション先受けボルトの地山締付け作用・圧密作用による先行ゆるみ防止と切羽安定化の効果について考察したものである。

2. フリクションボルトの定着機構

一般のロックボルトは、ボルトと地山との間をモルタル等の定着材で充填する形式がほとんどであるが、フリクションボルトは、円形の鋼管を折り込んで外径を小さくした鋼管を高圧水で膨張させ孔壁に押しつけることにより地山に圧着する、摩擦定着式のロックボルト（鋼管膨張型）である（表-1）。

* (株) 熊谷組北陸支店

** 正会員 (株) 熊谷組土木本部土木技術部

フリクションボルトは、削孔・挿入後直ちに地山に定着できるため、地山に対する早期の支保効果を発揮できること、また、湧水のある地山においては、充填式・注入式ボルトに比べて定着材が流されるなどの懸念がないため、確実かつ短時間で施工でき、品質の確保が容易であること等に大きな特長がある。

削孔されたボルト孔は高水圧を受けた鋼管の膨張により拡大されるが、鋼管の膨張（圧着）完了後に水圧が除去されると収縮し、ボルトを拘束する。図－1は、鋼管の膨張による地山への圧力の伝達状況を示すが、この内圧とそれにより生じる拘束圧（ボルトと地山の間に作用する圧力）によりボルトと地山の摩擦抵抗が増大し地山の変形を拘束する。

こうして、亀裂性の地山に対しては岩塊同士を締め付け摩擦力を高めるほか、ルーズな地山に対してはボルト周辺の地山を圧密し結合力を高めるなどの効果が発揮される。なお、ボルトの引抜き抵抗力およびボルトと地山間の作用圧は、次式により与えられる¹⁾。

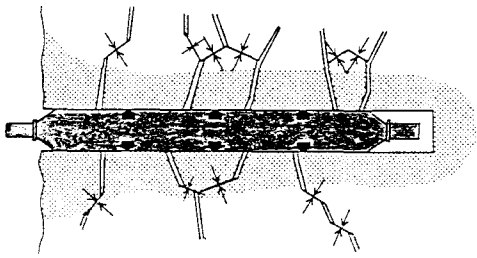
$$F = 2\pi r_i L \mu q \quad \dots\dots (1)$$

$$q = \frac{P_i}{1 + \frac{r_i(1-\nu_r^2)E_r}{t(1+\nu_r)E_s}} \quad \dots\dots (2)$$

F : ボルトの引抜き抵抗力
 r_i , L : ボルト孔の半径, ボルトの定着長
 μ : ボルトと地山間の摩擦係数
 q : ボルトと地山間の作用圧
 P_i : ボルトの内圧
 t : ボルトの肉厚
 E_r , E_s : 地山, ボルトのヤング係数
 ν_r , ν_s : 地山, ボルトのポアソン比

表－1 定着方式によるロックボルトの分類

全面定着方式	充填式
	注入式
摩擦定着方式	スリットバネ型
	鋼管膨張型 (フリクションボルト)
併用方式	先端定着式



図－1 孔壁周辺の圧力の伝達状況

3. フリクション先受けボルト工法による施工の効率化

フリクションボルトは、これまで山はね対策や湧水地山対策として用いられるのが主であったが、最近では、施工性や即効性のある支保効果に着目して、軟弱地山に対する支保としても用いられるなどその適用範囲が拡大してきている²⁾。

磐越自動車道焼山トンネル東工事では、フリクションボルトを先受けボルト（およびパターンボルト）に適用し、軟弱地山における急速施工を図った。以下に、その施工の効率化と効果について述べる。

トンネル周辺の地質は中・古世層の堆積岩類（頁岩）であるが、縦横に多数の断層系が発達しているため、岩石は著しく破碎されており、脆弱化の激しい性状であった。強度も小さく未固結な地山であるため、掘削時には、切羽は崩落・崩壊性に富み、湧水も伴い非常に不安定な状態であった。

掘削時の補助工法は、充填式あるいは注入式フォアパイリングおよび鏡吹付コンクリートが用いられたが、施工性が悪く、作業時間も長くなるなど効果の点でも問題が多く、50m／月程度しか掘削が進行しなかった。このため、以下に示す改善効果をねらいとして、フリクション先受けボルトが適用された。

・先受け効果の確実性

フリクションボルトでは、高水圧でボルトを膨張させることにより、直接的に周辺地山を圧密し、改良してより地山強度をあげるため、切羽天端の崩落・崩壊を防ぐ効果が確実である。

・所要時間の短縮

従来の注入方式では各ボルトの注入量にばらつきがあり所要時間が一定しないが、フリクションボルトでは、高圧水の圧入が瞬時で終わるため、作業時間が短縮できる。

・作業の標準化

フリクションボルトの打設作業は簡単で迅速にできるため、作業が標準化できる。

・安全性の向上

フリクション先受けボルトの適用により切羽や天端付近の崩落がなくなり、また、切羽天端の保護が確実になり安全度が向上するに伴って、先受けだけでなく掘削の所要時間が短縮するなど切羽作業の効率化を図ることができた。

さらに、切羽の安定化にともない1掘進長を1.0mから1.2mに拡げることにより、70m/月以上の掘削の進行を確保することが可能になった。以上の施工の効率化の状況を図-2に示す。

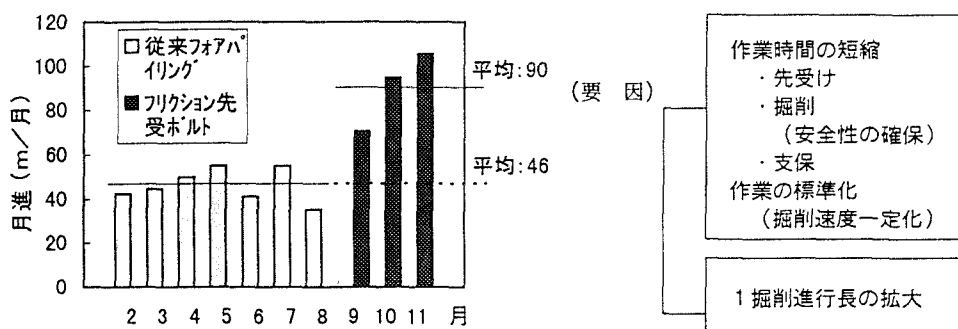


図-2 フリクション先受けボルト工法による施工の効率化

4. フリクション先受けボルトの効果

フリクション先受けボルトを適用した区間と従来のフォアバイリングを適用した区間における計測データより、上半掘削前後の変位が収束するまでの日数とそのときの変位量（天端沈下量）を比較したものを図-3に示す。フリクションボルトを用いた場合には、上半変位の収束日数が小さくこれに伴って変位量も小さい。従来のフォアバイリングは、湧水等で定着材が流出する場合には効果が不十分であるばかりでなく、先受け作業の間および定着材が固結する間に地山のゆるみが増大する傾向があった。しかし、フリクションボ

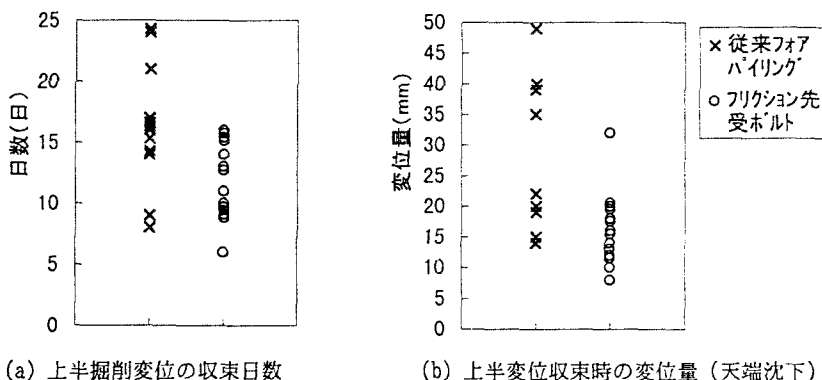


図-3 フォアバイリングの施工区間での変位挙動の比較

ルトは効果も確実に即効性があり地山のゆるみを最小限に抑えることができるという特性が、この計測結果にも表れているものと考えられる。

図-4には代表的な断面での計測変位の経時変化を示すが、上半掘削後の変位の収束日数は、フリクション先受けボルトの断面では7~10日、従来フォアパイリングの断面では15~20日である。これらより、軟弱でルーズな地山に対してもこの先受けボルトの効果が十分に発揮されていることがわかる。

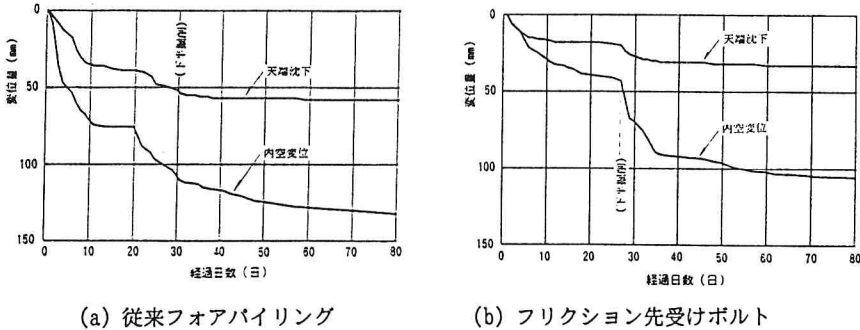


図-4 計測変位の経時変化

フリクション先受けボルトによる効果を検証するために、FEM解析を行った。解析はトンネル横断面の2次元問題として扱い、地山の物性値等は、ヤング係数を従来フォアパイリング断面の計測変位をもとに逆解析により $E=500\text{MPa}$ と求めたほか、以下の値を用いた。ポアソン比: $\nu=0.45$ 、粘着力: $C=1\text{MPa}$ 、内部摩擦角: $\phi=30^\circ$ 、初期応力: $\gamma h=3.5\text{MPa}$ 、支保部材: $E_c=2\text{GPa}$ (吹付けコンクリート)。解析手順は、①初期応力解析、②フリクションボルトの膨張、③上半掘削(応力解放率50%)、④上半支保、の4ステップとした。Step-2では、 $P=30\text{MPa}$ の内圧をボルト孔壁に与えた(なお、この圧は径45mmの孔を54mmまで拡大させるときの圧力にほぼ相当する)。ただし、従来フォアパイリングでの断面の解析時にはこのステップは実施しない。解析結果として地山の応力状態のうち、Mohr-coulombの破壊包絡線に対する安全率を図-5に示す。フリクション先受けボルトを施工した場合の方が、天端および肩部の上方で安全率が向上していることが確認できる。なお、変位については、天端沈下量が従来フォアパイリング断面で39mmである

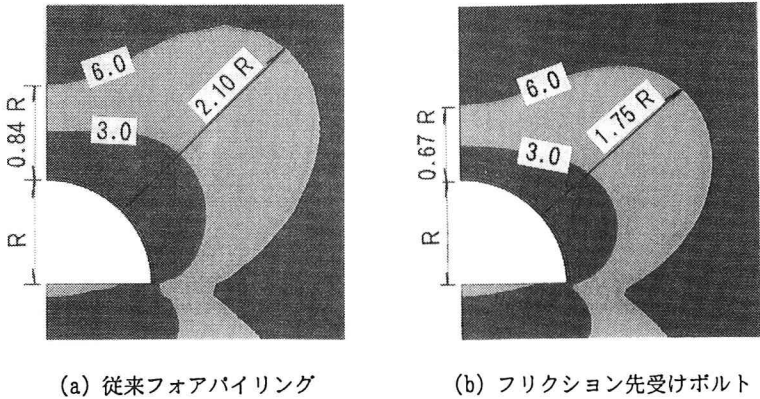


図-5 トンネル周辺地山の安全率分布

のに対し、フリクション先受けボルトを施工する場合には 32mm と 20%ほど小さくなる効果が表れている。

フリクションボルトが膨張する時に地山に与えられる圧力は、地山を圧縮することにより間隙を減少させ地山を密実にするとともに、粒子間の噛み合わせを強固にして内部摩擦角を増加させ、地山のせん断強度を増大させる。この効果がトンネル切羽前方のアーチ周辺に沿って改良領域として発現することにより、ゆるみの拡大防止および掘削時の安定性向上に寄与することとなる。

図-6は、この効果を示すものとして、FEM解析中の step-2 におけるボルト孔周辺の改良状態（安全率分布）を示したものである。隣り合うボルト孔間の地山が内圧による圧縮力を受けることにより、安定性が増加している状況がわかる。図は、これらの領域が孔に沿ってアーチ状に連結し改良ゾーンを形成している様子を示しており、この圧縮力増加により掘削面近傍の地山が安定化する。この解析によれば、改良ゾーンの形成に及ぼす要因としては、地山の初期応力と側圧係数、ヤング係数、ボルトの膨張による内圧などがあり、これらの要因による影響度を追究することにより、フリクション先受けボルトの効果について解析的な面からの評価をより詳細に与えることが可能になると考えられる。

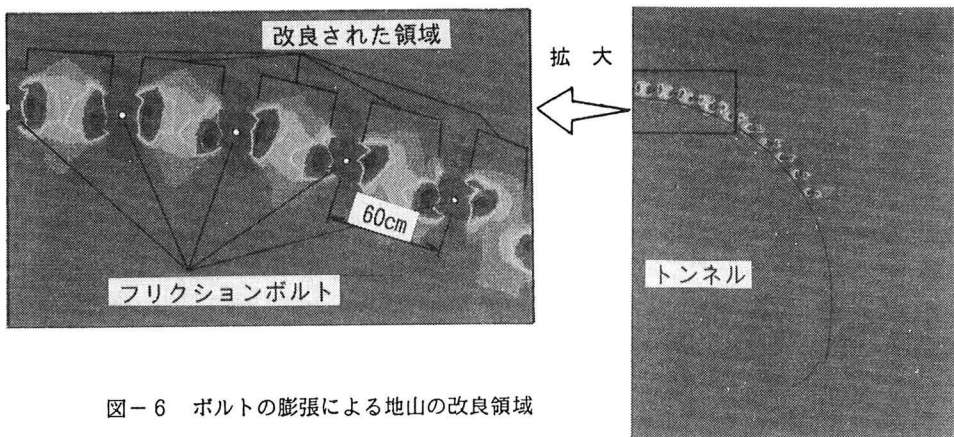


図-6 ボルトの膨張による地山の改良領域

5. あとがき

フリクション先受けボルトは、軟弱地山における山岳工法で重要な支保部材であるロックボルトが初期強度に関して抱えている定着材の充填性および密着度の問題点をほぼ完全に解決できるものであり、実施工においてフリクション先受けボルト工法の効率性や効果が多大であることが確認されたことから、今後の軟弱地山における施工の急速化に大きく貢献できる工法であると考えられる。一方、数値解析による検討においてもフリクション先受けボルトの効果についての評価がある程度でき、また、その適用条件や効果をより明確にするための要因を示すことができたものと考えられる。今後は実績データの蓄積とともに、効果についてのさらなる検討を行うことにより、フリクション先受けボルト工法の適用が拡大することが期待される。

6. 参考文献

- 1) 近藤・伊藤・長い：膨張型鋼管ロック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，1988.2.
- 2) 殿垣内・木曾・高道：鋼管膨張型ボルトで亀裂性地山を掘る，トンネルと地下，1996.7.