

水抜き効果と注入機能を併せ持つ 新しいボルトシステムの開発

Development of New Rock Bolt System with the Functions of Drainage and Grouting

秋田勝次¹・北原秀介²・井浦智実²・阿波宏司³・平野健吉⁴

Katsuji Akita, Shusuke Kitahara, Tomomi Iura, Hiroshi Awa and Kenkichi Hirano

¹正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 新幹線部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

E-mail: k.akita@jr-tt.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 (株)ケー・エフ・シー 技術部 技術研究所 (〒347-0011 埼玉県加須市大桑1-19-1)

⁴正会員 電気化学工業(株) セメント・特混事業部 (〒103-8338 東京都中央区日本橋宝町2-1-1)

In case of the tunnel excavation by NATM, drainage method has been generally adopted for the purpose of securing the face stability and tunnel supports. However, there is often the case that drainage method is not effective for a complicated geological feature condition in unconsolidated ground. For the solution of such a problem, we continue development of the new rock bolt system having drainage and injection functions. This paper reports the summary of the new rock bolt system, test executions in the construction of Shinkansen tunnels and provided results.

Key Words: tunnel, new rock bolt system, steel pipe expansion type, drainage method, grouting

1. はじめに

山岳工法により地下水位以下の条件でトンネルを掘削する場合、一般に水抜きボーリングやウェルポイント等の湧水対策工を用いて、切羽の安定性が確保できるレベルまでトンネル周辺地下水位を低下させるのが基本である。しかしながら、未固結な砂質土や粘性土の互層あるいは低強度の砂岩層等、とくに地下水の存在が問題となるような地山においては、複雑な地質条件に起因し、地下水位低下工法による効果が発揮されにくい場合もある。

そのような中、上記の問題に対処するため、より効率的で確実性が高く経済性を追求した湧水対策技術の確立を目的に、写真-1に示すような新しいボルトシステムを開発した。この新しいボルトシステムは、従来の鋼管膨張型ロックボルトとストレーナー管を組み合わせた構造を基本としており、ロックボルトとしての機能と同時に、自然排水と強制排水の両方に適用可能な水抜き効果を併せ持つものである。また、薬液注入機能を有しており、先受け工や脚部

補強工のように地盤補強効果を期待する補助工法としての応用も可能であり、機能性の高いものといえる。本稿は、新しいボルトシステムの概要と整備新幹線トンネル工事において実施した施工試験の内容および開発を通して得られた成果と今後の検討課題について報告するものである。

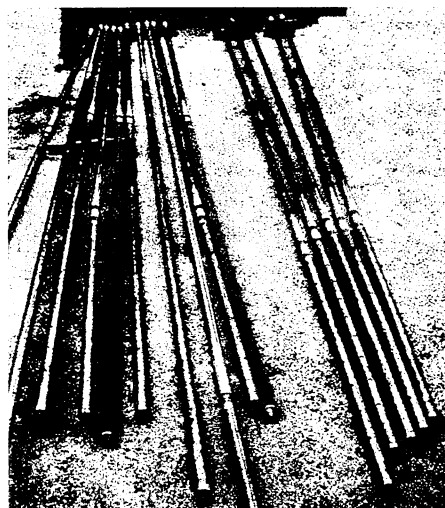


写真-1 新しいボルトシステム

2. 新しいボルトシステムの開発

(1) 開発の経緯

未固結な砂質土や粘性土の互層あるいは低強度の砂岩層等、とくに地下水の存在が問題となるような地山において、十分な地下水位低下が図られない場合、残留地下水の影響によって路盤の泥濘化や地耐力低下に伴う沈下の増大が生じる。写真-2に上半盤の泥濘化状況を示す。このような場合、施工性の大幅な低下のみならず、トンネルの構造安定性が損なわれることも懸念される。一般的には地上からのディープウェルや坑内からの水抜きボーリングによって地下水位低下を図っているが、地山自体の透水性が小さい、あるいは難透水性のシルト層がレンズ状に介在するというような複雑な地質条件に起因し、十分な地下水位低下効果が得られない状況が生じている。そのような場合には、応急的に坑内からのウェルポイントを多用し、局部的に水抜き工を実施することで対応している。しかしながら、このような条件下では吸引管の口元周囲のパッカー効果が低く十分なシール性が確保できないことが多い。その結果、吸引管と地山間において漏気が発生し、吸引時の負圧が低下するためウェルポイントの機能が十分発揮されず、コストに見合った効果が得られにくいという問題がある。

このような問題に対処するため、未固結地山等の比較的地盤剛性が小さく残留地下水の影響を受けやすい地質条件を対象として、より効率的で確実性が高く、機能性にも優れる経済的なボルトシステムを開発するに至った。

(2) ボルトシステムの概要

新しいボルトシステムの概要を図-1、写真-3、4に示す。ボルトシステムは、鋼管膨張型ロックボルトとストレーナー管からなる構造を基本としている。前者を止水および空気遮断のためのパッカー部とし



写真-2 残留地下水による上半盤の泥濘化

て機能させ、後者により水抜き効果を得るものである。従来、鋼管膨張型ロックボルトは、大量湧水対策¹⁾や山はね対策²⁾、変状トンネル対策³⁾等で多くの採用実績がある。定着方式が地山と鋼管との摩擦によるものであるため湧水等に施工性が左右されず、鋼管の膨張後直ちに効果を発揮するという特徴がある。開発にあたっては、鋼管膨張型ロックボルトのそのような特徴に着目した。また、ストレーナー管には、有孔のPVC管あるいは鋼管を使用し、水抜きに伴う細粒分の流出が懸念される場合は、フィルター機能を容易に付与できる構成となっている。

(3) ボルトシステムの施工手順

ボルトシステムの施工手順を図-2に示す。以下にボルトシステムの施工手順について述べる。

①ドリルジャンボにより所定の位置に穿孔する。

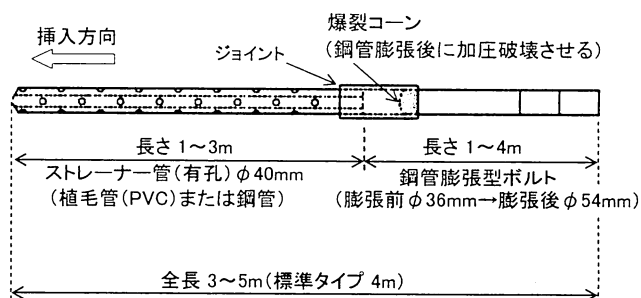


図-1 ボルトシステム概要図

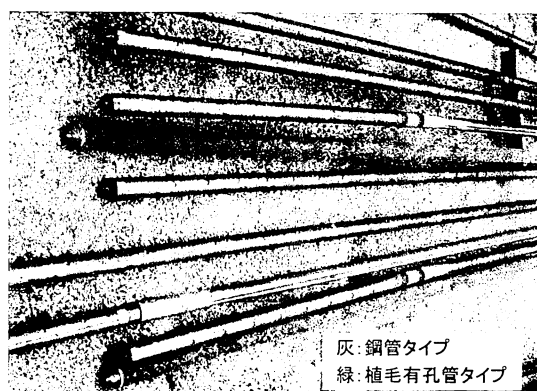


写真-3 先端部分(ストレーナー部)



写真-4 口元部分(膨張前のパッカー部)

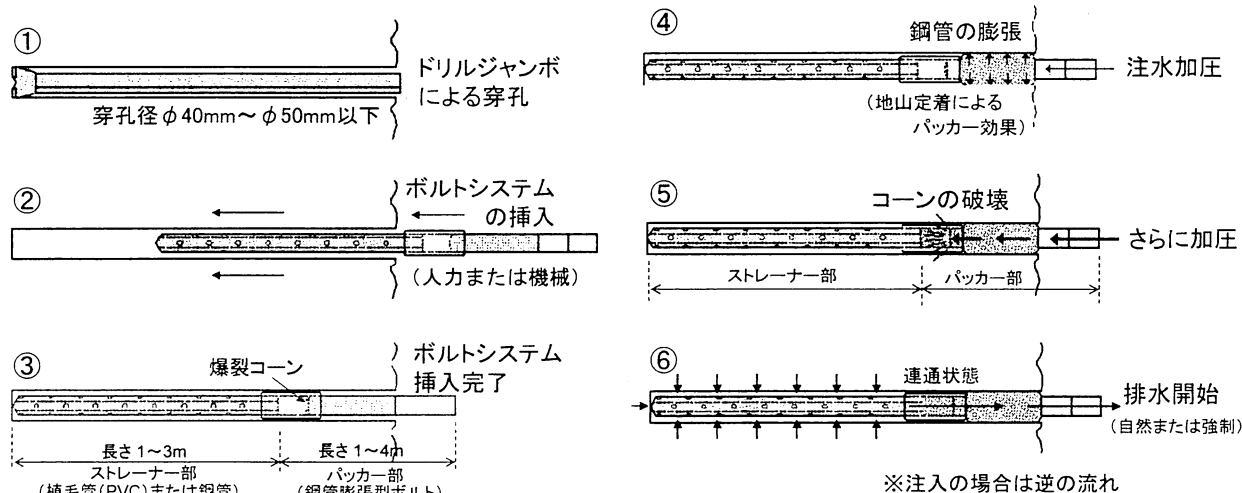


図-2 ボルトシステムの施工手順（設置～水抜き開始まで）

その際、孔荒れ等が生じ穿孔径が50mm程度を超えてしまうと、鋼管膨張（最大径54mm）によるパッカー効果が低下する可能性がある。また、穿孔による孔荒れやスライム処理が不十分な場合は、ボルトシステムの挿入が困難になるため注意を要する。

- ②穿孔後、速やかに人力によりボルトシステムを挿入する。人力による挿入が困難な場合は機械による圧入あるいは打撃によって挿入する。
- ③所定の位置に設置したことを確認する。
- ④注水ポンプを用いて加圧注水（10～20MPa程度）し、パッカー部（鋼管膨張型ボルト）を膨張させ地山に確実に定着させる。
- ⑤鋼管の膨張後さらに加圧し、爆裂コーンを破壊することにより、ストレーナー部とパッカー部を連通させる。
- ⑥自然排水あるいは真空ポンプを用いた強制排水を開始する。

(4) ボルトシステムの構造的特徴

a) 爆裂コーン

パッカー部に鋼管膨張型ロックボルトを使用しているため、膨張後に鋼管が確実に地山に密着している必要がある。その一方で、地山からの排水あるいは地山への薬液注入を行う際は、ストレーナー部とパッカー部が連通状態となる必要がある。そのため、鋼管の膨張が完了するまでの加圧力には耐え、それ以上の加圧力で確実に破壊するような特殊な構造が必要となる。そのような特殊性を有する構造として「爆裂コーン」を開発し、パッカー部の先端に設置することとしている。写真-5に示す爆裂コーンは、鋼管膨張が完了するまでは封止の役割を果たし、膨

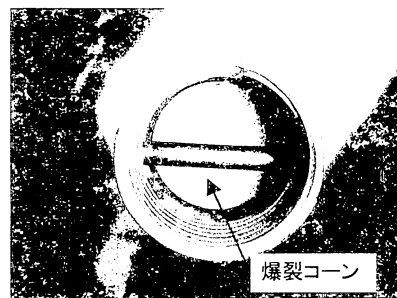


写真-5 加圧により破壊する爆裂コーン

張完了後の加圧力により確実に破壊しストレーナー部とパッカー部を連通させるという役割を担っており、ボルトシステムの最も重要な構成要素といえる。

b) ストレーナー部とパッカー部

ボルトシステムの基本長は4mとしており、目的機能や施工条件等により、ストレーナー部とパッカー部の長さを自由に組み合わせることが可能である。ストレーナー部は1～3m、パッカー部は1～4mを選択可能であり、条件に応じてそれぞれの機能バランスを考慮して決定する。

また、地山からの細粒分の流出を抑制することを目的として、ストレーナー部の孔にフィルター材としてステンレス金網（最小開目約0.077mm）を設置している。

(5) ボルトシステムの適用性

本ボルトシステムの高い機能性を生かすことにより、以下に示すような幅広い適用が考えられる。

a) ロックボルトへの適用

パッカー部に鋼管膨張型ロックボルトを使用しているため、一般的なパターンボルトとして採用されているモルタル充填式ロックボルトの代替として適用することが可能である。

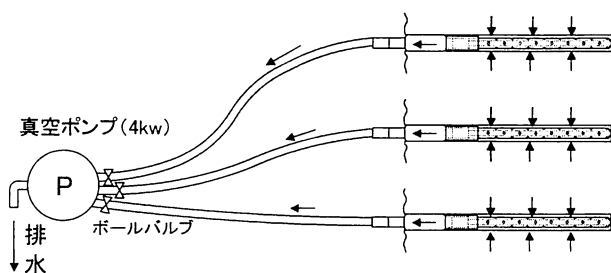


図-3 ウェルポイントへの適用

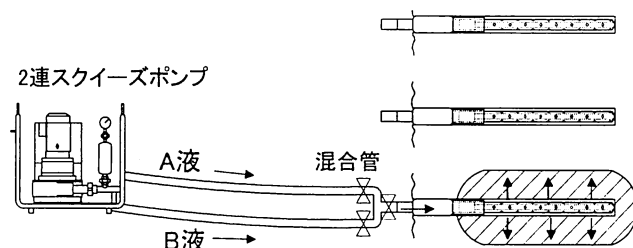


図-4 薬液注入への適用

b) 水抜き工への適用

ボルトシステムを設置することにより、地山からの湧水がある場合は自然排水を行うことができる。さらに、積極的に排水を行う場合は、図-3に示すように真空ポンプを接続することでウェルポイントとしての強制排水が可能となる。その際問題となる鋼管口元周りの漏気発生については、鋼管膨張型ロックボルトのパッカー機能により地山との密着性を確保することで解消する。

c) 薬液注入への適用

ボルトシステムにより十分な排水効果が得られた後に不要となった場合の後処置や、地盤改良効果を得ようとする場合には、図-4に示すように所定の設備を接続することにより薬液注入への適用が可能となる。ベンチカット工法による掘削時には、ボルトシステムをウェルポイントとして上半盤から脚部に向けて斜め下向きに設置し、その後に薬液注入を実施することで下半掘削時の脚部補強工としての効果を期待することができる。また、切羽から天端斜め前方へ設置することで、先受け工（注入式フォアポーリング）への応用もでき、幅広い活用が望める。

3. 北陸新幹線第2魚津トンネルにおけるボルトシステムの施工試験

(1) 試験内容

新しいボルトシステムの施工性と水抜き効果の確認を行うことを目的とし、工事中の北陸新幹線第2魚津トンネルにおいて施工試験を実施した。

- ・ 目的：①ボルトシステム設置の施工性確認
- ②ボルトシステムの水抜き効果の検証

- ・ 試験内容：①ボルトシステムの設置～排水までの施工性検証
- ②引抜き試験の実施によるロックボルト機能の確認
- ③自然排水および強制排水による水抜き効果の確認

・ 施工場所：下半盤側壁部

・ 計画数量：ボルトシステム設置13本

(P : 1m + S : 3m) × 6本

(P : 2m + S : 2m) × 6本

(P : 3m + S : 1m) × 1本

※P：パッカー部，S：ストレーナー部

・ 設置方向：水平方向やや上向き（仰角2～5°）

・ 地質：新第三紀鮮新世室田累層（低固結度のシルト岩と砂岩の互層）

(2) 試験結果

a) 施工性の検証試験

試験区間の地質条件は、比較的軟質なシルト岩と砂岩の互層であり、穿孔後の孔壁の自立性の低さが懸念されたが、全てのボルトシステムを所定の位置に挿入することができた。一部人力による挿入が困難であったが、ハンマー打撃あるいはドリフタ圧入により対処した。

パッカー部については、全てのボルトシステムを所定圧力にて膨張させることができた。また、最も重要な爆裂コーンの破壊については、ボルトシステム内での破裂音の有無および地山からの湧水の通水



写真-6 注水ポンプによる鋼管の加圧状況

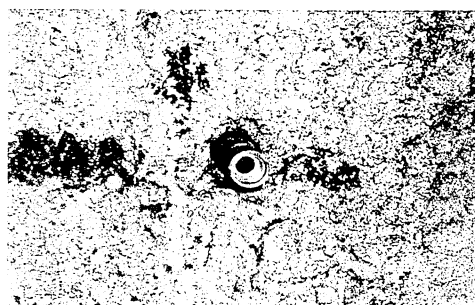


写真-7 ボルトシステム設置完了状況

により判断することとした。全数で管内の破裂音が確認され、地山からの自然排水が認められたため、爆裂コーンが確実に破壊されたと判断される。注水ポンプによる鋼管の加圧状況を写真-6に、ボルトシステムの設置完了状況を写真-7に示す。

b) ロックボルト引抜き試験

設置した13本のうち3本を対象に引抜き試験を実施し、ロックボルト機能の評価を行った。しかしながら、ジャッキにより引抜き力を作用させたボルトシステムの鋼管口元部分が吹付けコンクリート背面に引っ掛かった状態となり、正確なデータを収集することが困難であった。その原因としては、穿孔時の影響により吹付けコンクリート部分よりも地山部分のボアホール径が大きくなっており、両者間でパッカー部の膨張具合に微妙な差が生じていることが考えられる。

c) 水抜き効果確認試験

設置後のボルトシステムの内、自然排水が認められたのは2本のみであった。また、真空ポンプによる強制排水では、水量にばらつきがあるものの13本中11本から0.15～2.2リットル/分の少量の吸引排水が確認された。その際、全ての口元で吸気音が確認されたため、パッカー部に漏気が発生していることが判明した。

(3) 考察

a) 施工性

穿孔後にボルトシステムを所定の位置に挿入することができ、パッカー部の膨張と爆裂コーンの破壊も確実に行われたことから、ボルトシステムの一連の施工性については良好な結果が得られたと判断される。

b) ロックボルト引抜き試験

穿孔時のロッドのぶれの影響により、吹付けコンクリートに近い地山部分ほどボアホールの拡大が生じていると推察される。吹付けコンクリートと地山では剛性に差があるため、吹付けコンクリート面と地山間で孔径に差が生じるのは避けられない。引抜き試験を実施する際は、あらかじめ吹付けコンクリート部だけを若干大きめに穿孔しておくなど、ロックボルトの引抜き耐力を正確に評価するための工夫が必要と考えられる。

c) 水抜き効果確認試験

施工試験箇所の地質は、シルト岩と砂岩の互層が主体で透水性が比較的低く、吹付けコンクリート面にも滲水が認められる程度であった。また、下半掘削から相当日数が経過しているため、地山からの湧水が少ない状況と考えられ、水抜き効果としての評

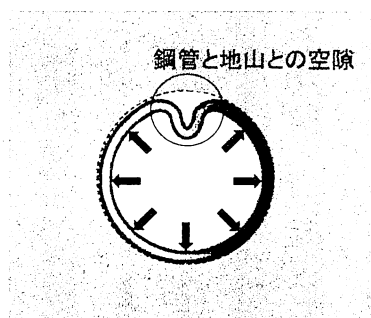


図-5 パッカー部の漏気発生要因

価が難しい条件であった。

強制排水時のパッカー部からの漏気発生については、鋼管膨張型ロックボルトの構造的な特徴に起因するものと考えられる。膨張前の鋼管は折りたたまれた状態となっており、膨張後はボアホール径に応じて密着する。その際、鋼管周長とボアホール周長に差があるため、鋼管余長分の付近には図-5に示すように地山との空隙が存在することとなる。ウェルポイントによる強制排水や薬液注入時に確実なパッカー効果を得るためには、この点を改善し漏気を効果的に防止する必要がある。

(4) パッカー部の改良

前述のパッカー部における漏気を解消するため、パッカー部の改良を行った。パッカー部である鋼管膨張型ボルトの凹部に沿って事前に樹脂を充填し、さらに水膨潤タイプのシール材をパッカー部に巻くことにより二重の漏気対策とした。写真-8に樹脂お



写真-8 パッカー部の改良状況

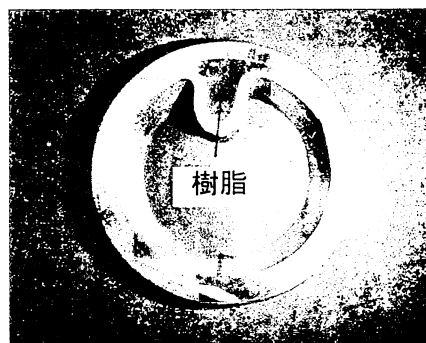


写真-9 樹脂による隙間充填状況

よび水膨潤シールによる改良型ボルトシステムを、写真-9に膨張試験後のシール性確認試験の状況を示す。試験の結果、樹脂の良好な充填性が確認されている。

4. 北陸新幹線金山トンネルにおける改良型ボルトシステムの施工試験

(1) 試験内容

パッカー一部改良型のボルトシステムの施工性とロックボルト機能および水抜き効果の確認を行うことを目的とし、工事中の北陸新幹線金山トンネルにおいて施工試験を実施した。

- ・ 目 的：①改良型ボルトシステムの施工性確認
②改良型ボルトシステムのロックボルト機能の確認
③改良型ボルトシステムの水抜き効果の確認
- ・ 試験内容：①改良型ボルトシステムの設置～排水までの施工性検証
②引抜き試験の実施によるロックボルト機能の確認
③強制排水時のパッカー機能の検証
- ・ 施工場所：上半盤側壁部（ウェルポイント）
下半盤側壁部（引抜き試験）
- ・ 計画数量：ボルトシステム設置15本
上半（ウェルポイント用）
（P：1m+S：3m）× 2本
（P：2m+S：2m）× 5本
（P：3m+S：1m）× 2本
（P：4m+S：1m）× 1本
下半（引抜き試験用）
（P：3m+S：1m）× 5本
※P：パッカー一部，S：ストレーナー部
- ・ 設置方向：上半 脚部方向（斜め下方45°）
下半 水平方向やや上向き（仰角5°）
- ・ 地 質：新第三紀鮮新世名立層（上半 礫岩層，
下半 砂岩優勢層）

(2) 試験結果

a) 施工性の検証試験

試験区間の地質条件は、上半が玉石混じりの礫岩層主体、下半が砂岩層主体であった。上半区間では、ウェルポイントとしてボルトシステムを斜め下方45°で設置する予定であった。しかしながら、穿孔中にロッドが玉石にぶつかることによる孔荒れの発生や、下向き穿孔によるスライムの排出不良が原因となり、穿孔後にボルトシステムを所定の位置に挿

入することが不可能であった。やむをえず設置角度を水平やや上向きに変更し再設置を試みた結果、スライム排出が促進され、穿孔の施工性がやや改善された。しかしながら、ボアホール径が50mmを超えるほどに拡大してしまい、結果的にパッカー効果が得られない状況が生じた。一方、下半では水平方向やや上向きに穿孔したため、比較的スムーズにボルトシステムの設置が可能であった。最終的に設置が可能であったのは、上半で2本、下半で9本であり、穿孔とボルトシステム挿入の施工性に地質要因が大きく影響した結果となった。

b) ロックボルト引抜き試験

下半盤側壁部に水平に設置したボルトシステムのうち5本を対象として、ロックボルトの引抜き試験を実施した。試験にあたっては、第2魚津トンネルでの施工試験時に生じた不具合を改善するため、吹付けコンクリートの穿孔径を50mmとし、地山の穿孔径（45mm）よりもやや大きくする対策を実施した。引抜き試験状況を写真-10に、引抜き試験結果を図-6に示す。No.1とNo.2の引抜き耐力がそれぞれ50kN、60kNであり、目安である100kNを満足できなかった。残りの3本については、良好な結果が得られている。No.1とNo.2において引抜き耐力が確保できなかったのは、スライム排出を促進する目的で穿孔時間を長めに設定した影響によりボアホール径が大きくなってしまったことが原因と考えられる。

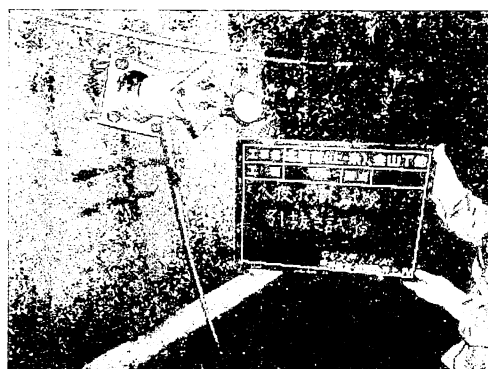


写真-10 下半盤側壁部での引抜き試験結果

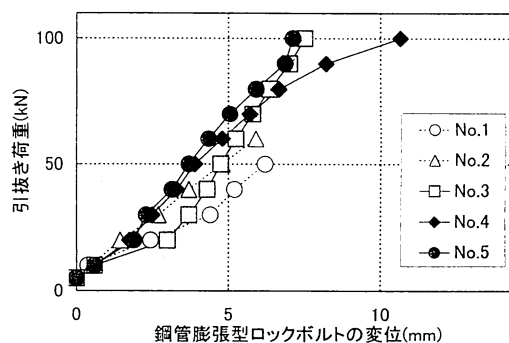


図-6 引抜き試験結果（荷重-変位曲線）



写真-11 ウェルポイントの実施状況

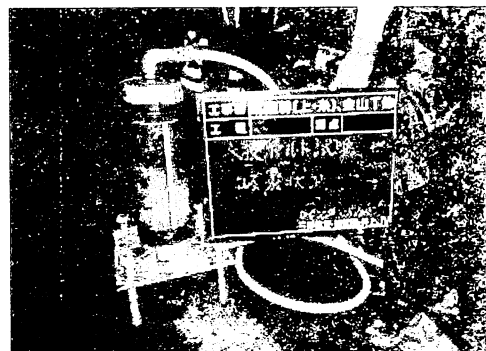


写真-12 排水量測定状況

c) 水抜き効果確認試験

施工試験箇所は、第2魚津トンネルと同様に比較的透水性が低い地質であり、下半掘削から相当日数が経過しているため、地山からの湧水が少ない状況であった。ボルトシステム設置後の自然排水は条水程度であり、時間経過に伴う変化も認められなかった。

強制排水では、上半盤に設置した2箇所では水抜き効果が得られず、下半盤に設置した9本はウェルポイントとして機能し水抜き効果が確認された。上半盤の2本については、前述のとおり穿孔時に孔荒れを生じており、真空ポンプの負圧計が0MPaを示していたことから、パッカー効果が得られなかったことが原因と考えられる。一方、下半盤の9本については、全てにおいて真空ポンプ負圧計が-0.08MPaを示し、十分なパッカー効果が確認された。排水量は0.20～0.94リットル/分で、十分な水抜き効果が確認された。写真-11にウェルポイントの実施状況を、写真-12に排水量測定状況を示す。

(3) 考察

a) 施工性

金山トンネルにおける試験施工では、地質的な要因により、穿孔がスムーズに実施できなかった。そのため、ボルトシステムの挿入が困難な場合や、挿入が可能であった場合でもボアホールの孔荒れ等によりパッカー効果が発揮されず、結果としてボルトシステムの水抜き効果が得られない場合もあった。

この点は、穿孔後の孔壁自立性に期待し、後から挿入するという本ボルトシステムの弱点と考えられる。そのため、今回のケースのように穿孔が問題となるような地質条件に対しても適用可能な自穿孔方式等の技術を導入する必要があると判断される。

b) ロックボルト引抜き試験

引抜き試験の結果、穿孔に問題がなくボルトシステムをスムーズに設置できた場合は、所定の引抜き耐力が確認されたため、ロックボルトの機能としては良好な結果が得られたと考えられる。

c) 水抜き効果確認試験

試験の結果、穿孔に問題がなくボルトシステムをスムーズに設置できた場合は、十分な水抜き効果が得られた。また、強制排水時のパッカー部からの漏気対策については、樹脂と水膨潤シールを利用した改良型ボルトシステムの有効性が現地施工においても確認され、ウェルポイントとしての十分な機能が認められた。以上より、ボルトシステムの水抜き効果が自然排水および強制排水の両面について確認されたといえる。

5. まとめ

(1) 現時点までの成果

新しいボルトシステムの開発における現時点での成果としては以下の点が挙げられる。

- ①施工性については、穿孔、ボルトシステム挿入、鋼管膨張による定着、排水という一連の施工フローが実現現場においても問題なく適用可能であるということを確認した。ただし、穿孔に問題があるような地質条件では、スライムの排出不良、ボアホールの拡大や孔荒れによって、ボルトシステムの挿入に支障を来すだけでなく、挿入できた場合でもパッカー効果の低下等の問題につながる事が明らかとなった。
- ②ボルトシステムが正規に設置された場合は、十分な引抜き耐力を確保することが可能で、ロックボルトとして十分機能することが確認された。
- ③ボルトシステムが正規に設置された場合は、鋼管膨張型ボルトのパッカー効果が発揮され、ストレーナー管を通して地山からの湧水を排水可能であり、自然排水と強制排水の両方において十分な水抜き効果を発揮することが確認された。

(2) 今後の検討項目

①自穿孔方式の適用検討

穿孔に問題があるような地質条件に対応するため、自穿孔方式のボルトシステムの適用について検討

を進める必要がある。

②薬液注入機能の確認と脚部補強工等への応用

ボルトシステムに負圧を与えるウェルポイントへの適用が可能であれば、そのパッカー効果を期待した薬液注入への適用も可能であると考えられる。しかしながら、現段階では実現場における施工試験を実施していないため、今後薬液注入機能の確認を進めていく必要がある。また、ボルトシステムの注入機能を確認した後に、脚部補強工や先受け工への応用を図り、坑内計測等を通して、その効果の定量的評価を実施していく予定である。

なお、本稿で報告した新しいボルトシステムは、(独)鉄道・運輸機構、(株)ケー・エフ・シーおよび電気化学工業(株)の三者による共同開発の成果である。

謝辞：これまでの開発を進めるにあたり、現地施工試験に御尽力を賜った工事関係者に深胆なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 湧水多量地山における国内最大級の斜坑掘削，清水建設土木クォーターリー，No.103, pp.29-42, 1994.
- 2) 望月常好，穂刈利夫，斉藤義信，桑田俊男：土かぶり200mで山はね現象に遭遇 国道140号雁坂トンネル，トンネルと地下，Vol.21, No.9, pp.27-36, 1990.9.
- 3) 永井哲夫，孫 建生，國村省吾，池尻 健：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，トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻，pp.131-136, 1993.