

地山改良型ロックボルトの 軸力分布とトンネル変形の抑制効果

嶋本 敬介^{1*}・中根 利貴¹・森瀬 喬士²・中村 裕哉³・岡部 正⁴

¹公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²元 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³中央開発株式会社 ソリューションセンター探査・計測部 (〒332-0035 埼玉県川口市西青木3-4-2)

⁴株式会社ケー・エフ・シー 技術部 (〒105-0011 東京都港区芝公園2-4-1 芝パークビルB館11F)

*E-mail: shimamoto.keisuke.00@rtri.or.jp

供用中の山岳トンネルの変形対策として使用されるロックボルトについて、筆者らは、確実に地山に定着するとともに緩んだ地山の物性値を向上させることを目的とした地山改良型ロックボルトを開発した。開発したロックボルトでは、プレストレスの導入時期をロックボルトの頭部側の注入前に実施することができるため、プレストレスの導入時期をパラメータとした数値解析を実施した。さらに、鉄道単線トンネルで試験施工を実施し、施工性、長期的な軸力の変化等を整理した。その結果、地山改良型ロックボルトが優れた先端定着力を発揮すること、長期的にも従来工法よりも地山改良型ロックボルトは軸力低下が小さく抑えられること等を確認した。

Key Words : mountain tunnels, deformed tunnels, rock bolt, urethane, prestress

1. はじめに

山岳トンネルでは、地質や地形によってはトンネル完成後、塑性圧、偏圧といった外力が作用し、トンネルの変形が徐々に進行することがある。トンネル完成後に作用する塑性圧とは、経年に伴い地山の強度が低下し、それに伴い、地山の塑性化が進行してトンネル覆工に外力として作用するものであり、地山強度比が小さいとともに、膨張性粘土鉱物を含み吸水劣化しやすい岩石からなる地質で発生しやすい。

塑性圧によって発生する変状現象としては、側壁の押出しや盤ぶくれがある。単線鉄道トンネルでは、縦長で側圧に弱い形状であることから側壁の押出しの変状事例が多く存在する^(例えば1)~3)。側壁の押出しが進行すると、側壁のひび割れが進行するとともに、天端内面には圧縮ひずみが蓄積し、いずれ圧ざ、剥離、剥落に繋がっていく危険性があるため、早めに対策を実施し、内空変位速度を抑制することが望まれる。

単線鉄道トンネルの塑性圧対策としては、裏込注入がまず第一に行われるが、それでも内空の縮小傾向が止まらない場合は、ロックボルトや内巻工が実施される。ただし、内巻工に関しては、ケーブルの付け替え等を伴い、工事也大規模となること、単線鉄道トンネルは建築限界

の余裕が少ないことなどから適用しにくい場合も多い。よって、ロックボルトは変状トンネルの補強工として多くの実績がある。

ただし、ロックボルトについては、文献4)では、地山が極端に軟質な場合は定着力を確保できないため、適用対象外であることが示されている。

一般的に完成後の変状トンネルに適用されるロックボルトは、削孔→ドライモルタルの充填→鉄筋棒の挿入、というNATMによるトンネル掘削時に支保として使用されるロックボルトと同様のものが用いられている。この場合、文献4)で指摘されている通り、地山が軟質な場合、十分な定着力を確保できず、効果を十分に発揮できないと考えられる。また、定着力が確保されていたとしても、一般的なロックボルトでは、ロックボルト施工後も地山の劣化が続き、地圧作用自体は増加し続けるため、ロックボルトにより完全に変形を抑止させることは難しい。

そこで筆者らは、確実に地山への定着するとともに、緩んだ地山の物性値を向上させることを目的とした、地山改良型ロックボルトを開発し、試験施工や数値解析により評価を進めている^{5,7)}。

本稿では、地山改良型ロックボルトの実用化に向けて実施した鉄道単線トンネルでの試験施工およびその軸力の長期計測結果について示す。また、それに先立って、

試験施工で着目したプレストレスの導入時期について、数値解析で検討した結果についても示す。

2. 地山改良型ロックボルトの概要

(1) 概要と特徴

側壁の押出しといった変状が発生するトンネルでは、一般的にトンネルから離れた地山は比較的健全であるものの、トンネル近傍の地山は劣化して緩んでいる。図-1に従来のロックボルトと地山改良型ロックボルトの比較概念図を示す。

従来のロックボルトは、特に長尺の場合には先端で充填不足になりやすい。また、緩んだ地山の領域では、地山が劣化しており付着切れを起こしやすいため、定着不良となりやすい。一方で、開発した地山改良型ロックボルトは、中空のロックボルトとパッカーと2種類の定着材（膨張モルタル、ウレタン）を用いることにより、効率的に効果を発揮させるものである。すなわち、先端側の健全な地山に対しては流動性が高く硬化時にやや膨張するモルタルをパッカーを用いて加圧注入することで、確実に地山に定着させ、定着力を確保する。頭部側の緩んだ地山に対しては、亀裂、割れ目が多いことが想定されるため、モルタルで定着を取ることはせず、ウレタン系の注入材料で地山を改良する。これにより、緩んだ地山の物性値を向上させるとともに地山劣化そのものを抑制することが期待でき、山岳トンネルの長寿命化のための効果的な補強工法になると考えられる。

なお、通常、地圧を受ける山岳トンネルをロックボルトで補強する場合には、調査ボーリングを実施し、コア観察により緩み領域を把握する。工事規模が大きい場合には、ロックボルト軸力計や地中変位計を設置してより正確に緩み領域を把握することもある。ロックボルトの長さやパッカーの位置は、このようにして把握した緩み領域から選定することを想定している。

(2) 施工手順

地山改良型ロックボルトの施工手順を図-2に示す。図に示す通り、①削孔、②ロックボルト挿入、③膨張モルタル注入、④モルタルリーク確認、⑤口元パッカーへのウレタン注入、⑥緩んだ地山へのウレタン本注入、の手順で行う。

③の膨張モルタル注入においては、膨張モルタル注入用ホースにパッカー位置で穴が開いており、パッカー内にモルタルが充填され膨らんだ後に先端部に膨張モルタルが注入され始めるようになっている。その後、ロックボルト先端に空いた孔から中空ロックボルト管内を通して口元に到達するモルタルでリーク確認を行う。

④の終了後、あるいは⑥の終了後にプレストレスを導

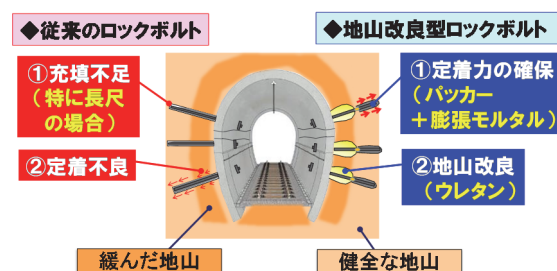
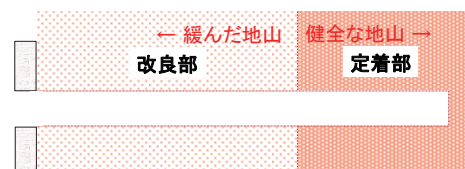
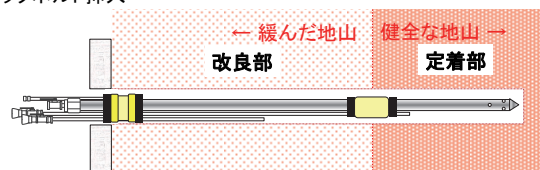


図-1 従来のロックボルトと地山改良型ロックボルトの比較

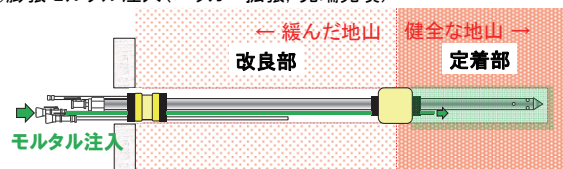
①削孔



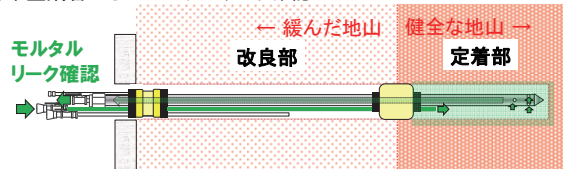
②ロックボルト挿入



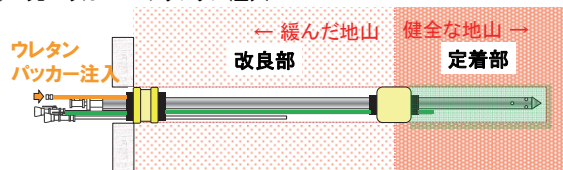
③膨張モルタル注入（パッカー拡張、先端充填）



④中空鋼管からのモルタルリーク確認



⑤口元パッカーへのウレタン注入



⑥緩んだ領域へのウレタン本注入

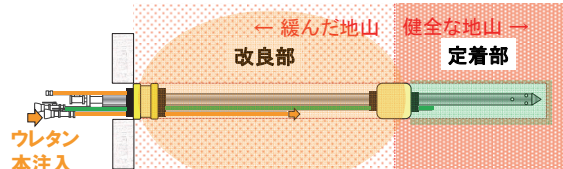


図-2 地山改良型ロックボルトの施工手順

入することもできる。ロックボルトのプレストレスに関しては、文献4)では早期に効果を発揮させるために導入することを基本としているが、その効果や導入時期が与える影響については不明確な点も多い。

そこで次章では、ロックボルトのプレストレスをパラメータとして実施した数値解析の結果を示す。

3. 数値解析によるプレストレスに関する検討

本章では、塑性圧による覆工の押出しが徐々に進行するトンネルに対して適用するロックボルトについて、プレストレスの導入時期等がロックボルトの効果に与える影響を数値解析により検討する。

(1) 解析手法

a) 解析モデル

解析には有限差分コードFLAC3Dを使用した。解析モデル図を図-3に示す。解析領域は横断方向40m（半断面）、鉛直方向60m、奥行き方向0.5m（1要素）とした。土被りは200mとし、解析領域外の地山はモデル上面に荷重として与えることで表現した。側面、下面はローラー支持とした。SL高さに長さ6mのロックボルトを水平に1本モデル化した。トンネルは新幹線トンネルの標準断面（インバートなし）で、覆工巻厚は40cm（支保工なし）とした。

解析は以下の手順で行った。

- ①自重解析を行い、初期応力状態を得る。
- ②掘削部分の地山要素を取り除く。
- ③トンネル覆工をモデル化する。
- ④全地山要素のせん断強さを1ステップ当たり4%ずつ、50ステップにわたって低下させる。

b) 入力物性値

解析の入力物性値を表-1、表-2に示す。地山は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化した。地山の物性値は、地山強度比を2.0として一軸圧縮強さを設定し、他の物性値は軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値の相関関係を参考にして設定した。ロックボルトは Cable 要素で表現しており、入力物性値は表-2の通り設定した。座金部は、ロックボルトと覆工との相対変位が発生しないように十分大きな物性値とした。覆工部と地山部の α_g は覆工、地山のせん断強さから周面付着力を算定し設定した。

c) 解析ケース

解析は図-4に示す5ケースを実施した。Case3は、地山改良型ロックボルトで、先端部に膨張モルタルを注入した後、プレストレスを導入し、その後にウレタンを注入することを想定しているが、本章の解析では、全ケースにおいて、頭部側も先端側もモルタル定着として物性値を設定している。プレストレス導入の表現は、Cable要素頭部を所定荷重で引張り、その反力をCable要素頭部に近接する覆工の節点に与えることで表現している。

(2) 解析結果

ロックボルト対策工をしない場合のCase0における、ステップ50の時の塑性領域を図-5に示す。赤色の要素は塑性化（せん断破壊）が発生している領域である。SL位置の側方の塑性領域は覆工内面から3.15mとなった。

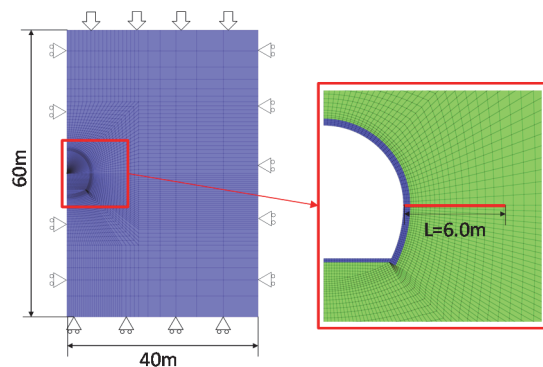


図-3 解析モデル

表-1 地山、コンクリートの解析入力物性値

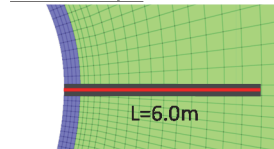
	地山	コンクリート
変形係数 E (MPa)	1135	22,000
ポアソン比 ν	0.30	0.2
粘着力 c (MPa)	初期: $c_i=2.31$ 最終: $c_f=0.30$	6.35
内部摩擦角 ϕ (°)	30	30
引張強さ α (MPa)	1.0	1.75 引張破壊後 0.03

表-2 ロックボルトの解析入力物性値

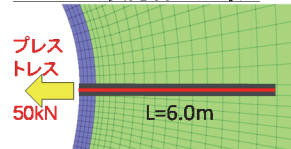
項目	単位	座金部	覆工部	地山部
弾性係数 E	GPa	210	210	210
せん断ばね剛性 k_g	MN/m ²	2.0×10^6	5750	5.75
付着強さ c_g	kN/m	4.7×10^{10}	1001	472
摩擦角 ϕ_g	°	0	0	0
降伏応力 σ_t	MPa	407	407	407

Case0: ロックボルトなし

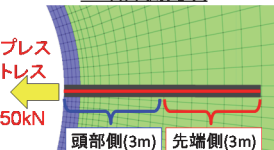
Case1: PSなし



Case2: 全長充填⇒PS導入



Case3: 先端側充填⇒PS導入
⇒頭部側充填



Case4: 先端側充填⇒PS導入
(頭部側3mは自由長)

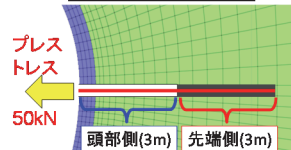


図-4 解析ケース

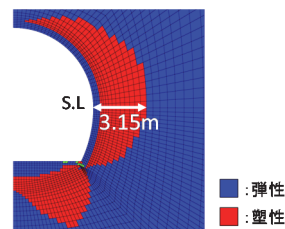
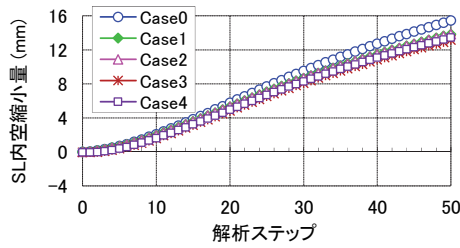
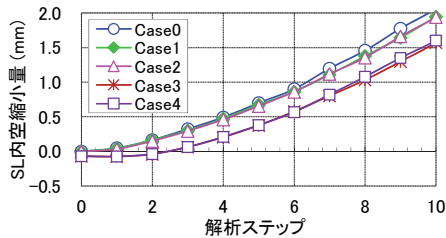


図-5 SL位置の水平内空縮小量

なお、強度低下ステップの前は、塑性領域は発生していなかった。ステップ毎のSL位置の水平内空縮小量を図-6、ステップ50における同縮小量を図-7に示す。



a) ステップ0～50



b) ステップ0～10抜き出し

図-6 SL位置の水平内空縮小量

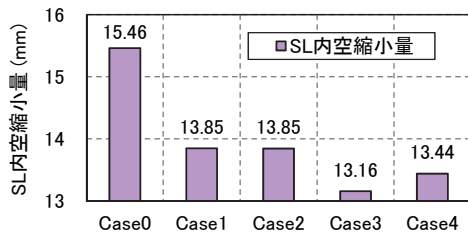
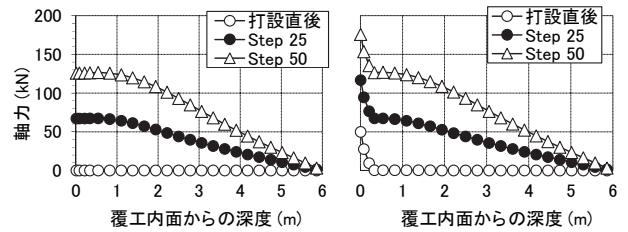


図-7 ステップ50におけるSL内空縮小量

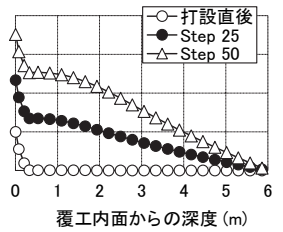
図-6より、特に解析ステップが大きくなる、すなわち経年により強度低下が進行するにつれて、ロックボルトによる変位抑制量が大きくなっているが、Case1（プレストレスなし）とCase2（全長充填後プレストレス導入）の変位抑制効果はほとんど変わらないことがわかる。一方、適切にプレストレスが導入されたCase3とCase4は図-6 b)より、特にロックボルト打設後すぐに変形抑制効果が大きく、即効性が発揮されていることがわかる。

各ケースにおける打設直後、ステップ25、ステップ50の時の軸力分布を図-8に示す。これより、Case2では、地山内ではCase1とほぼ同じ軸力分布をしているものの、覆工部で最初に導入した50kNのプレストレスを保持しているため、ステップ50では口元部で降伏耐力近くまで軸力が大きくなっていることがわかる。ボルト口元の覆工部まで定着材を充填した後にプレストレスを導入することは、プレストレスによる変位抑制効果が得られないばかりか、ボルト材の降伏、破断時期を早めてしまう危険性もあると考えられる。

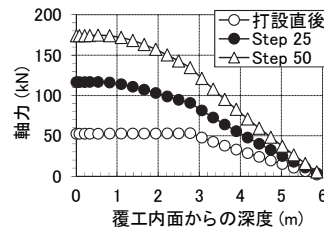
図-7より、Case3が最も大きな変位抑制効果を発揮していることがわかる。図-8より、Case3は大きな軸力を覆工および地山部に伝達できている軸力分布となっており、先端側を充填してからプレストレスを導入し頭部側を充填することでロックボルトが最も大きな効果を発揮することが確認できた。



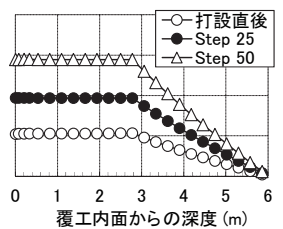
a) Case1 PSなし



b) Case2 全長充填後PS導入



c) Case3 PS導入後頭部側充填



d) Case4 PS導入後頭部側自由長

図-8 各ケースの軸力分布

4. 試験施工概要

試験施工は北海道旅客鉄道株式会社の協力を得て、休止線となっている在来線単線トンネルで実施した。

(1) トンネル概要

試験施工を実施したトンネルは、内空幅約4.8m、内空高さ約5.4m、設計巻厚45cmの単線トンネルである。

試験施工は、坑口から80-90m程度入った位置の側壁で実施した。当該箇所には、長さ15m、幅2～5mmの開口ひび割れが見られる。

地質は、新第三紀中新世の泥岩で、岩石試験を実施したところ、一軸圧縮強さは9.0～16.1MN/m²（地山強度比12～22程度）、スレーキング指数は2～3、陽イオン交換容量は20.6～25.8meq/100gであった。RQDは50～100%の割れ目の少ない塊状泥岩層である。地山改良型ロックボルトを適用するには緩み、亀裂が少ない地山である。

(2) 試験ケース

地山改良型ロックボルトの施工性と定着性能に加え、プレストレスの導入時期に着目するとともに、比較検討のため一般的なロックボルトも含めて、トンネル側壁に対して表-3に示す3ケースを実施した。3ケースとも、削孔径はφ70mm、ボルト長さは6m（3mのボルト2本を連結）とした。

(3) 施工方法およびプレストレス導入時期

① Case1（一般的ロックボルト）

ボアホール先端にモルタル圧送用ホースを挿入した後、同ホースを引抜きつつボアホールをドライモルタルで充填する。充填後ツイストボルトを挿入して全面定着させる。モルタル硬化後、プレストレスを導入する。

② Case2, Case3（地山改良型ロックボルト）

図-2に示すように、中間部にパッカーのあるロックボ

表-3 試験施工ケース

	略称	頭部側材料	先端側材料	ボルト種類	プレストレス導入時期
Case1	一般的RB	ドライモルタル		ツイスト	モルタル充填後
Case2	地山改良型(ウレタン後PS)	ウレタン	膨張モルタル	中空	ウレタン注入後
Case3	地山改良型(PS後ウレタン)	ウレタン	膨張モルタル	中空	ウレタン注入前

ルトを挿入し、ボルトに付属の充填用ホースにてボルト先端側を膨張モルタルで充填する。充填後、ボルトに付属の注入用ホースにてウレタン注入を行って地山を改良させる。Case2はウレタン注入後、Case3はウレタン注入前に、プレストレスを導入する。

各ケースともにプレストレス導入前に引抜き試験を実施している。なお、全ケースについて、覆工とロックボルトは定着させておらず、覆工部では自由長となっている。

(4) 引抜き試験方法

引抜き試験の最大引抜き荷重は文献4)に基づき100kNとした。試験方法は地盤工学会基準ロックボルト引抜き試験方法(JGS3731-2012)を参考に、以下の通りとした。

① 載荷：

10kN/minのペースで荷重増加させ、10kN荷重増加後、4分間荷重保持という5分サイクルを10回繰り返すことで100kNに到達させた。

② 除荷：

10kN/minのペースでゆっくりと除荷し、10kN除荷後、1分間荷重保持という2分サイクルを10回繰り返すことで完全に除荷した。

(5) プレストレス導入方法

引抜き試験の除荷後、10kN/minのペースで再度引抜き荷重を増加させ、100kN到達後、ナットを締めることで100kNのプレストレスを導入した。

5. 試験施工結果

(1) 施工性の確認結果

狭小断面であったが、側壁へのロックボルトの施工は問題なく実施できた。膨張モルタルは全ケースにおいて所定量が充填できた。ウレタンは、改良径45cmと考えた時の設計注入量が24.5kgなのに対して、地山に亀裂が少ないこともあり、Case2で6.0kg、Case3で9.4kg注入したところで、Case2はパッカーを通り越してトンネル内へ漏出、Case3では圧上昇のため、注入を終了している。

(2) 試験結果

① 引抜き試験結果

引抜き試験の時点では、頭部側はCase2ではウレタン



写真-1 試験施工完了状況

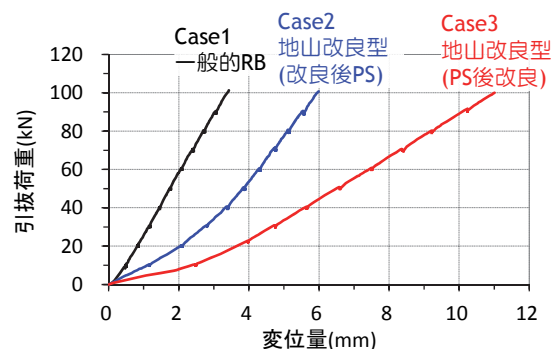


図-9 引抜き試験結果

があり、Case3は自由長となっている。図-9より、引抜き試験の結果、全ケースにおいて引抜き耐力が100kN以上確保できていることが確認できた。ただし、ウレタンの剛性はモルタルの剛性よりも低いため、引抜き荷重－引抜き変位曲線の傾きはCase1>Case2>Case3の順となっている。

② プレストレス導入後の軸力分布

図-10に100kNのプレストレス導入時の軸力分布を示す。Case1とCase2の軸力分布形状から、頭部側がモルタルであってもウレタンであっても大差なく、ウレタンであってもボルト軸方向にモルタルと同程度のせん断力が得られていることがわかった。Case3については、先端側において膨張モルタルにより定着しているが、1m当たり113kN/mの大きな付着力が得られていることがわかる。

また3章より、自由長がある状態でプレストレスを導入し、後から注入する方が、変位抑制効果が大いことが確認されており、Case3は変位抑制効果に有効な軸力分布であるといえる。

(3) プレストレス導入後の軸力の長期計測

図-11にプレストレス導入後から約半年間の、ボルト頭部から約0.5m位置のボルト軸力とボルト表面温度の経過を示す。これより、温度が低下すると軸力も低下していることがわかる。冬を越し、温度が上がってくると軸力も回復してきている。Case3が最も軸力低下率が低く、優れた軸力保持性能を有していることがわかる。なお、冬季は当該箇所は-10℃を下回っており、その時期に軸力が大きく発生しており、凍上圧が作用した可能性も考えられる。ただし、試験施工中、地中変位計により覆工変位を計測していたが、顕著な挙動は確認できなかった。

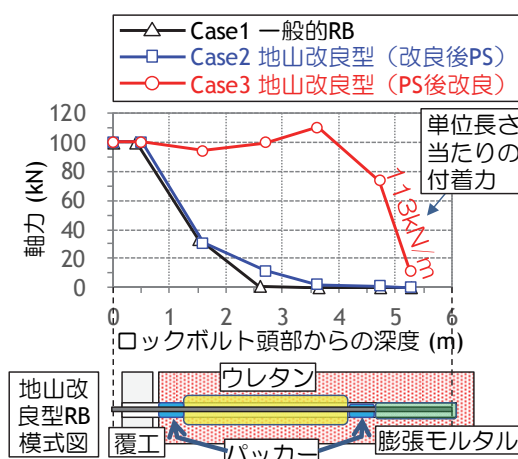


図-10 プレストレス導入後の軸力分布

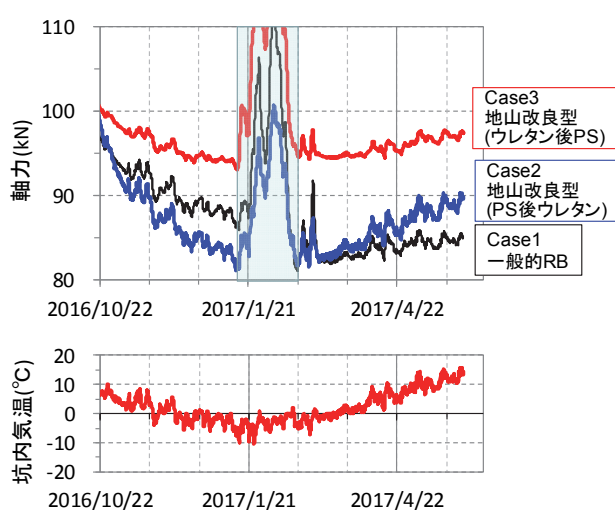


図-11 軸力経過図（ボルト頭部から約0.5m位置）

5. おわりに

数値解析により、プレストレスの導入時期がトンネル変形抑制効果に与える影響を検討した上で、単線鉄道トンネルで地山改良型ロックボルトの試験施工を実施した。

得られた結果を以下にまとめる。

- 1) プレストレス導入後にロックボルトの頭部側を充填することにより、変位抑制の即効性が得られると共に、その効果も大きくなる。
- 2) 覆工部まで定着材を充填した後にプレストレスを導入することは変位抑制効果が得られないばかりか、ボルト材の降伏、破断時期を早める危険性がある。
- 3) 開発した地山改良型ロックボルトの試験施工を実施し、狭小な単線トンネルで良好に施工ができた。
- 4) 長期計測の結果、地山改良型ロックボルトの良好な軸力保持性能が確認できた。

※本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 野澤伸一朗, 伊藤忠八, 竹内定行: 既設トンネルの膨圧を克服, 只見線 田子倉トンネル, トンネルと地下, Vol.23, No.10, pp17-22, 1992.10
- 2) 名波良弘, 川元隆史: 内空変位に動きが見られるトンネルの維持管理, 土木学会第63回年次学術講演会, VI-078, 2008.9
- 3) 岩橋寛臣, 塩谷敦, 鈴木秀門: 地圧を受けた在来線トンネルの内空変位対策 旧北陸本線 倶利伽羅トンネル, トンネルと地下, Vol.47, No.1, pp.45-51, 2016.1
- 4) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.89-96, 1998.
- 5) 森瀬喬士, 嶋本敬介, 野城一栄: 地山改良型ロックボルト補強工の施工性と定着性能に関する基礎的研究, 第14回岩の力学国内シンポジウム 講演集講演番号090, 2017.1
- 6) 森瀬喬士, 嶋本敬介, 野城一栄, 鈴木丙午, 中村裕哉: 地山改良型ロックボルト補強工の試験施工, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1369-1370, 2017.7
- 7) 森瀬喬士, 嶋本敬介, 岡部正, 井本厚, 田中祐介: 変状トンネルに対するロックボルト補強工のプレストレスに関する研究, 第51回地盤工学研究発表会, pp.1472-1473, 2016.9

AXIAL FORCE DISTRIBUTION AND INHIBITORY EFFECT OF DEFOMATION OF ROCK BOLT WITH THE FUNCTION OF GROUND IMPROVEMENT

Keisuke SHIMAMOTO, Toshiki NAKANE, Takashi MORISE,
Yuya NAKAMURA and Masashi OKABE

Regarding the rock bolt used as a countermeasure against the deformation of the mountain tunnel under service, the authors developed the rock bolt with the function of ground improved and reliable fixation to the ground. Numerical analysis was carried out taking prestress introduction timing as a parameter since the developed rock bolt can change the timing. In addition, trial construction on railroad single track tunnel was carried out to confirm construction feasibility, long-term changes in axial force, etc. As a result, it was confirmed that the developed rock bolt demonstrates excellent front bond stiffness, and according to the long term measurement, the developed rock bolt can suppress the decrease in axial force compared with the conventional rock bolt.