

ロックボルトによる既設トンネル 補強工法の開発

小泉 悠¹・山本 拓治²・伊達 健介³・横田 泰宏⁴
井本 厚⁵・岡部 正⁶・田中 祐介⁷

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail: koizumyu@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail: yamataku@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail: datek@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail: yokotaya@kajima.com

⁵正会員 株式会社 ケー・エフ・シー 技術部（〒347-0010 埼玉県加須市大桑一丁目19）
E-mail: imoto.atsushi@kfc-net.co.jp

⁶正会員 株式会社 ケー・エフ・シー 技術部（〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4-1 B館11F）
E-mail: okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

⁷株式会社 ケー・エフ・シー 技術部（〒347-0010 埼玉県加須市大桑一丁目19）
E-mail: tanaka.yusuke@kfc-net.co.jp

我が国において、老朽化した社会インフラの維持管理が重要な課題となる中、著者らは新設トンネル工事に開発された支保工・補助工法に関する技術の応用による、トンネルの補強工法の開発に取り組んでいる。本報告はロックボルトに関する2技術の研究開発成果を報告するものである。1件目では、従来の摩擦式ロックボルトを改良した二重管式鋼管膨張型ロックボルトについて、その特性を考察した。現場で試験施工した結果、良好な施工性と引抜き耐力が確認された。2件目では、過去に切羽補強用に開発した高付着型縞付き鋼管について、路盤の隆起抑制やインバート開削時の覆工の変位抑制を目的とした適用法を提案した。数値解析によってその効果を検証した結果、従来のツイストボルトによる補強以上の変位抑制効果が示された。

Key Words : tunnel, repair, steel pipe expansion type rock bolt, high friction steel pipe

1. はじめに

我が国では、1964年の東京オリンピック開催時に整備された首都高速1号線や東海道新幹線に代表されるように、高度経済成長期に多くの社会インフラが整備された。そのため、これら社会インフラの老朽化が今後急速に進んでいくことが懸念される。トンネルに関しては、現在、全国に約1万本存在するうち、建設後50年を経過するものの割合は2013年3月時点で約20%であるものの、20年後の2033年には約50%に至ると算出されている¹⁾。2012年12月には、中央自動車道笹子トンネル（1977年に供用開始）にて、天井板が落下し、死亡者・負傷者が発生した。社会インフラの老朽化に対し、国民の不安が高まる中、

政府は2013年11月に「インフラ長寿命化基本計画」を制定し、損傷が軽微である早期段階に予防的な修繕等を実施することで機能の保持・回復を図る「予防保全型維持管理」²⁾の導入を推進する方針を示した。

著者らは、これまで主にトンネルの新設工事における支保工や補助工法の開発に取り組んできた。しかし、インフラの維持管理が我が国の重要な課題となる中、新設工事に開発した技術の応用による、トンネルの維持管理技術の開発にも取り組んでいく所存である。本報告では、既設トンネルの補強に適用できる施工技術2件を報告する。

1件目は「二重管式鋼管膨張型ロックボルト」の開発についてである。トンネルの支保工として、従来より用

いられている鋼管膨張型ロックボルトを老朽化したトンネルの補強現場に適用することを考慮し、二重管式へと改良した。これにより、本ロックボルトは孔崩れするような軟質な地山や湧水のある地山を含む、あらゆる地山条件下で有効に機能することとなる。第2章では、試作品の室内試験結果、トンネル現場での試験施工結果について報告する。

2件目は「高付着型縞付き鋼管によるインバート部の補強」についてである。これまでに著者らは、トンネルの切羽補強工用に縞付きの鋼管を開発し、実験及び解析により、付着性能の高さとその効果を評価した³⁾。第3章では、同鋼管のインバート部の補強への適用を提案し、数値シミュレーションによる効果検証結果について報告する。

2. 室内及び現場試験施工による二重管式鋼管膨張型ロックボルト補強工の適用性検証

(1) 開発の背景と目的

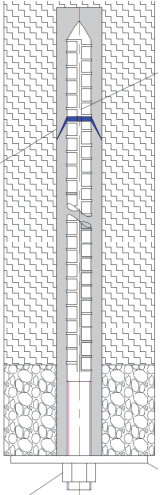
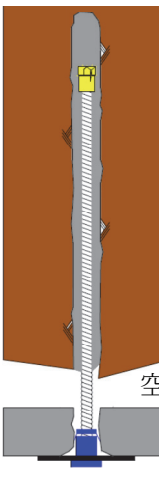
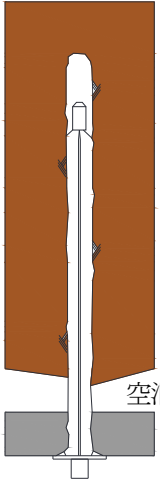
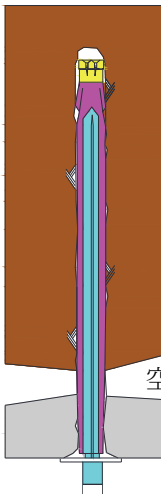
トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説⁴⁾において、ロックボルトの効果として、①地山の補強効果（吊下げ効果・縫付け効果・地山物性改良効果）、②内圧効果、③吹付け支持効果が示されている。新設トンネルのみならず、老朽化したトンネルにおいても、同様の効果が期

待できるものと考え、ロックボルトによる補強を検討することとした。なお、③吹付け支持効果に対応する覆工支持・剥落防止効果に関しては、あくまで副次的な効果であり、剥落防止対策は別途実施されるものである。また、裏込め注入を実施した後にロックボルトを打設するのが通常であるが、最近では、ひび割れが多く、覆工厚の薄いトンネルもあり、ロックボルトで覆工を吊り下げた状態で裏込め注入を実施する例もある。

ここで、補強を要する老朽化したトンネル現場の特徴として、以下の4条件を想定した。

- ① 老朽化したトンネルのほとんどは、矢板工法により施工されたトンネルである。覆工背面に空洞が存在することが多く、周辺の地山はゆるみにより劣化している。また、補強を要する箇所は、基本的に地質不良部である。ロックボルト打設のための削孔時、孔壁は自立せず、崩れる可能性が高い。
- ② トンネル周辺地山の劣化が進行しており、その要因として地下水が存在する。削孔により湧水が生じる。
- ③ 覆工の巻厚不足、覆工自体の劣化、ひび割れの発生等により覆工に変状が発生している。裏込め注入等により、覆工に高い圧力を作用させることが出来ない場合もある。
- ④ 補強工事は夜間のみの施工に限定される場合が多い。迅速性、早期の補強効果の発現が求められる。また、開通時にモルタルの流出や列車等、振動影響が無い

表-1 各種ロックボルトの崩孔性地山での施工性及び耐湧水性の評価

ロックボルトの種類	定着材先充填型	自穿孔後注入型	鋼管膨張型	二重管式鋼管膨張型
模式図				
崩孔性地山での施工性	×	○	×	○
耐湧水性	×	×	○	○
	(モルタル流出)	(モルタル流出)		

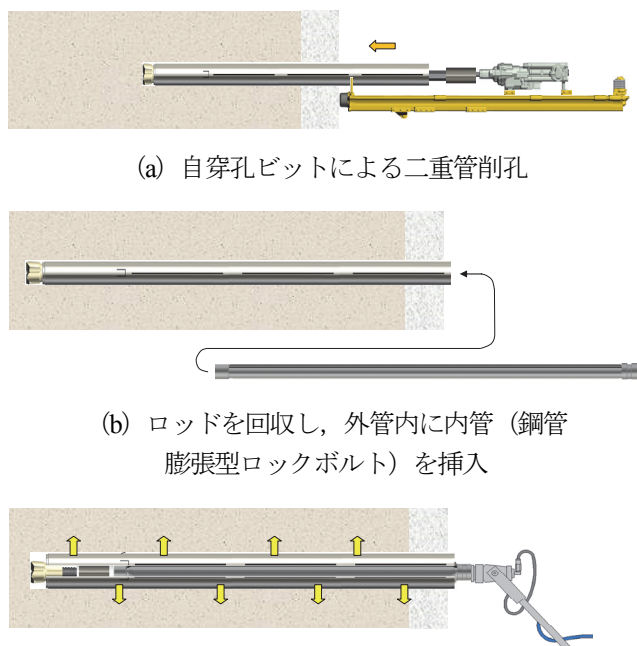


図-1 二重管式鋼管膨張型ロックボルトの施工手順

工法が求められる。

通常の定着材先充填型のロックボルト、条件①・②への対応として適用され得る自穿孔後注入型のロックボルト、鋼管膨張型ロックボルト、本報告で提案する二重管式鋼管膨張型ロックボルトを対象に、表-1にて、崩孔性地山における施工性（条件①）、耐湧水性（条件②）について評価した。通常の定着材先充填型及び鋼管膨張型は、削孔後、孔崩れする地山に対し、ボルトを挿入することができず、崩孔性地山における施工性は低いと評価した。また、通常の定着材充填型及び自穿孔後注入型は、定着材として一般にモルタルを使用する。湧水条件下では、モルタルが硬化前に流出してしまう可能性があり、これより耐湧水性は低いと評価した。これに対し、本報告で提案する二重管式鋼管膨張型のロックボルトについて、はじめに施工手順を図-1に示す。外管の先端に取り付けられたビットにより自穿孔で削孔した後、内管を挿入する。そして、内管を水圧により膨張変形させ、その変形を外管に伝えて外管を膨張させることで、地山と外管間で摩擦を得て、引張抵抗を発現させるロックボルトである。外管により孔を防護しながら削孔するため、崩孔性地山に対応可能であり、定着材を用いないために耐湧水性も高い。自穿孔ビット及び内外管を地山内に残置するため材料費は高価となるが、ビットや外管を引き抜かないため施工時間を短縮でき、膨張後、補強効果が即座に発揮される。迅速性が高く、地山条件を問わない汎



写真-1 二重管式鋼管膨張型ロックボルトの膨張後状況

表-2 膨張前後の鋼管径

従来/新	ロックボルト種別	膨張	鋼管径 (mm)
従来	鋼管膨張型	前	36
		後	54
新	二重管式鋼管膨張型	前	48.6
		後	58.6

表-3 室内引抜き試験結果

従来/新	ロックボルト種別	No.	引抜き耐力 (kN)	引き抜け時の変位 (mm)
従来	鋼管膨張型	1	56.3	2.14
		2	63.0	3.07
		3	57.6	2.56
		平均	59.0	2.59
新	二重管式鋼管膨張型	1	63.8	2.02
		2	56.7	1.78
		3	57.7	1.98
		平均	59.4	1.93

用性の高いロックボルトであることから、条件④にもよく対応するロックボルト工法であると期待できる。

(2) 試作品の製作及び室内引き抜き試験

a) 試作品の製作

図-1に示す内管は従来の鋼管膨張型ロックボルトを用いることとし、外管に関して複数の試作品を製作した。内管の膨張変形によく追随するよう外管には縦スリットを設け、鋼管外径はφ48.6mmとした。製作した長さ4.0mの試作品を膨張させた試験後状況を写真-1に、膨張前後での鋼管径を表-2に示す。

b) 室内引き抜き試験及びその結果

試作した二重管式鋼管膨張型ロックボルトが、従来の鋼管膨張型ロックボルトと同等の引抜き耐力を示すか否かを検証するため、室内引き抜き試験を実施した。従来の鋼管膨張型用に内径50.5mmの鋼管を、新型の二重管式膨張型ロックボルト用に内径53.5mmの鋼管を用意し、ボアホールを模擬することとした。いずれも表-2に示す膨張後の鋼管径よりも3～5mm小さい鋼管を選定した。鋼管にロックボルトを挿入し、膨張させた後、油圧ジャッキにより引き抜きながら、荷重と変位をロードセルと



写真-2 ドリルジャンボによる二重管式膨張型
ロックボルトの打設状況



写真-3 挿入した内管の加圧膨張状況

表-4 現場試験施工における打設手順、所要時間、引抜き耐力

従来/新	ロックボルト 種別	No.	打設手順	打設所要 時間(分)	引抜き耐力 (kN)
従来	鋼管膨張型	1	ドリルジャンボによりφ50のボアホールを削孔後、ロックボルトを人力で挿入し、膨張させた。	4	180
		2		4	180
新	二重管式 鋼管膨張型	1	ドリルジャンボに二重管式膨張型ロックボルトを搭載し、自穿孔でφ55のボアホールを削孔した。その後、内管(鋼管膨張型ロックボルト)をドリルジャンボにより挿入し、内管を膨張変形させることで外管を膨張させた。	22	180
		2		14	180
		3		12	180
		4		8	180

ダイヤルゲージにより計測した。試験数量は、従来の鋼管膨張型(長さ2.0m)を3本、提案する二重管式鋼管膨張型(長さ2.0m)を3本としたところ、6供試体いずれも一定の荷重下で摩擦による付着が切れ、引き抜けた。その時の荷重と変位を表-3に示す。同表より、二重管式鋼管膨張型と従来の鋼管膨張型とで、引抜き荷重は同等で、変位は二重管式の方が小さかった。以上より、新たに開発した二重管式鋼管膨張型ロックボルトが、従来の二重管式でない鋼管膨張型と同等の性能を有することが確認できた。

(3) 現場試験施工及びその結果

次にトンネル現場での施工性を検証するため、現場試験施工を実施した。従来の鋼管膨張型ロックボルト2本に加え、新たに開発した二重管式鋼管膨張型ロックボルト4本を、トンネル現場の側壁に対し、ドリルジャンボを用いて削孔・打設し、施工に要する時間及び引抜き耐力を測定した。なお、施工対象とした地質は黒色泥岩であり、一軸圧縮強度1～5MPa程度と軟質であるが、孔崩れするほどではなかった。また、試験区間で顕著な湧水はなかった。試験施工状況を写真-1～写真-2に示す。打設後すぐに、室内引抜き試験と同様の手順で引抜き試験を行った。現場での打設手順、打設所要時間、引抜き耐

力を表-4に示す。

従来の鋼管膨張型が1本4分程度で打設できたのに対し、二重管式鋼管膨張型は、坑夫にとって初めて扱うロックボルトであったこともあり、1本目は22分を要した。しかし、その後の習熟により、2本目以降で所要時間は大幅に短縮され、4本目は8分となった。引抜き試験では、引抜き荷重がいずれも引抜き耐力の設計値である180kNに到達したため、その時点で試験を中断した。上述した通り、今回、施工対象となった地山は、孔崩れが無く、湧水も無かったものの、新たに開発した二重管式鋼管膨張型ロックボルトが、ドリルジャンボ実機によって問題なく削孔・打設でき、十分な引抜き耐力があることが示された。

3. 数値解析による高付着型鋼管を用いたインバート補強工の適用性検証

(1) 開発の背景と目的

トンネルの経年劣化に対する補修・補強対策が課題となる中、地質年代の比較的新しい堆積岩等で長期的な地圧がトンネルに作用するケースや、膨張性を呈する地山条件下で、盤ぶくれ現象に伴う路盤の隆起等が生じ、建

築限界への影響や走行の安全に支障を及ぼすケース等が報告されている。対策工として、インバートの新設や補修が行われるが、インバートが設置できない場合や、インバートを新設・補修する際の舗装版の撤去や地山開削時の荷重除荷によって周辺地山がゆるみ、覆工への影響が懸念される場合等においては、ロックボルトやマイクロパイル等でインバート部や側壁部等を補強することもある。ただし、これらインバート部補強工の効果や設計法は、現在各機関で検討中であるものの、現段階では必ずしも明確に示されていない。

そこで著者らは、既設トンネルの盤ぶくれ対策として、新設トンネル掘削時の切羽補強工に用いられる小口径鋼管である「高付着型縐付き鋼管」の適用を提案し、数値解析手法によりその補強効果を検証することとした。

(2) 高付着型縐付き鋼管の概要³⁾

高付着型縐付き鋼管は、鏡部の押出し対策工として開発された小口径の特殊鋼管であり、付着耐力の向上を目的として、表面は縐状に突起加工されている。孔壁が自立しない場合、二重管削孔も可能であり、鋼管打設後にインサートホースによりモルタル系材料を注入する。

「高付着型鋼管」の概要図を図-2に、諸元を表-5に示す。

(3) 解析条件

今回の解析では、盤ぶくれが生じ得る地山条件下で、①インバートが設置できない場合の盤ぶくれ対策、②インバート設置工におけるインバート部開削時の覆工の変位抑制対策の2ケースについて、数値シミュレーションを行った。それぞれのケースで再現した補強概要図を図-3に示す。

解析モデル図を図-4に示す。使用する解析コードはFLAC3D（有限差分法）とした。地山の入力物性値を表-6に示す。また、比較対象とした対策工のケースを表-7に、各対策工で用いられる各種ボルトの入力物性値を表-8に示す。

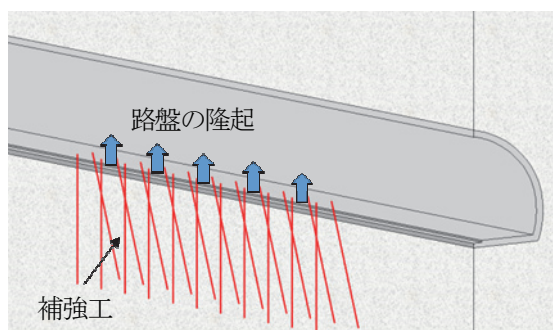
地山の入力物性値に関しては、老朽化したトンネルの解析的評価を行う場合、時間依存性を考慮し、地山の経年劣化をモデル化する必要がある。モデル化の手法については、野城ら⁹⁾により提案された「地山劣化モデル」



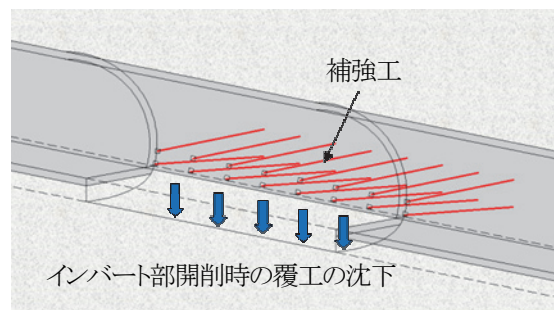
図-2 高付着型鋼管の概要図

表-5 高付着型縐付き鋼管の諸元

項目		値
管径	mm	76.3
厚さ	mm	4.5
付着強度	kN/m	400



(a) インバート部の補強：盤ぶくれ対策



(b) インバート部開削時の補強：覆工の沈下対策

図-3 インバート部の補強・インバート部開削時に問題となり得る現象とその補強対策案

表-6 地山入力物性値

項目		値
単位体積重量	kN/m ³	20
変形係数	MPa	50
ポアソン比	—	0.35
粘着力	kPa	200
内部摩擦角	deg	30
強度低下速度係数	1/年	0.115

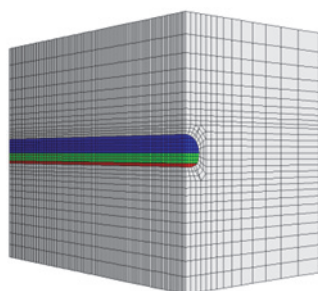


図-4 解析モデル

を用いた。同モデルでは、地山のせん断強度を低下させることで、周辺地山の変形を表現し、内空変位や路盤鉛直変位等の実測値から強度劣化の速度係数 α を求める。今回の解析では、速度係数は、凝灰岩を対象とした参考値⁵⁾ 0.115を用いることとした。強度を劣化させる範囲は、トンネルモデルの中間部40m間とした。断面方向の範囲は、天端より下の領域のみ粘着力を低減させ、粘着力は10年後で63kPa、20年後で20kPaとした。

(4) 数値シミュレーション結果

a) インバート部の補強対策

各ケースにおける変位量分布を図-5に示す。対策工を施すことにより路盤隆起量を抑制することができた。また、特に「高付着型鋼管」による対策工は、ツイストボルトに比較して、路盤変状をより効果的に抑制できることが解析的に示され、マイクロパイルによる補強と同等の効果が示された。無対策の場合、路盤変位の最大値は、脚部付近に集中している。これは側壁側から底盤部に回り込むような変形モードとなった。ひずみが脚部付近に集中したためと考えられる。

b) インバート部開削時の補強対策

インバート設置区間は2スパンとし、文献⁶⁾に示される割付及び施工順序の例を参考に、図-6に示すように、覆工継ぎ目部より開削・インバート設置を繰り返す解析を

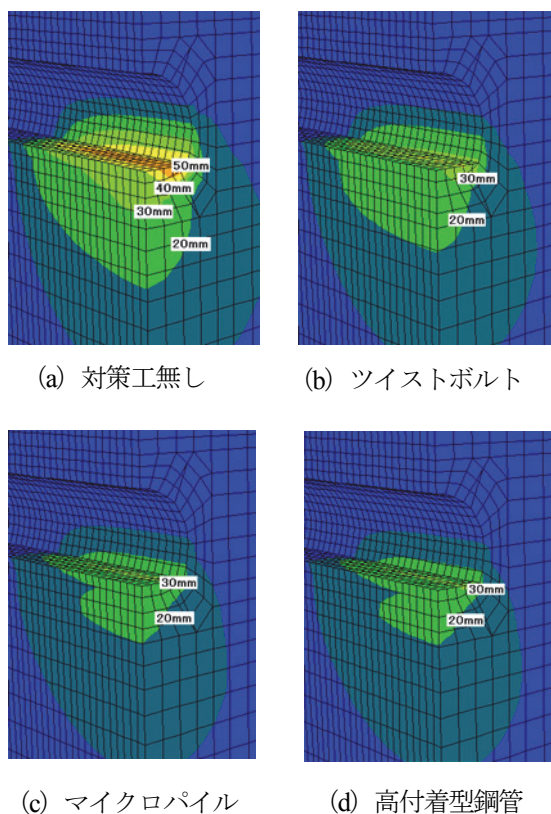


図-5 地山変位量分布図
(①インバート部補強ケース)

表-7 対策工比較ケース

シミュレーションケース	対策工	仕様	打設本数
①インバート部の補強	対策工無し	—	—
	ツイストボルト	TD24, L=6m	4 (1.0m ² ℳチ)
	マイクロパイル	φ114.3, L=6m	3 (1.5m ² ℳチ)
	高付着型鋼管	φ76.3, L=6m	3 (1.5m ² ℳチ)
②インバート部開削時の補強	対策工無し	—	—
	ツイストボルト	TD24, L=6m	2 (1.0m ² ℳチ)
	高付着型鋼管	φ76.3, L=6m	2 (1.0m ² ℳチ)

表-8 各種ボルト入力物性値

項目	ツイストボルト	マイクロパイル	高付着型鋼管
仕様 (mm)	23.8 (公称径)	114.3 (t=4.5)	76.3 (t=4.5)
付着強度※ (kN/m)	70	75	141

※「風化岩」の周面摩擦及びモルタルと補強部材の付着強度のうち、小さな値を採用した。

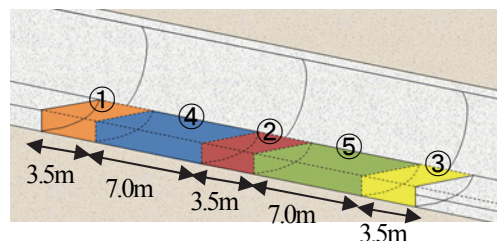


図-6 インバート新設施工順序

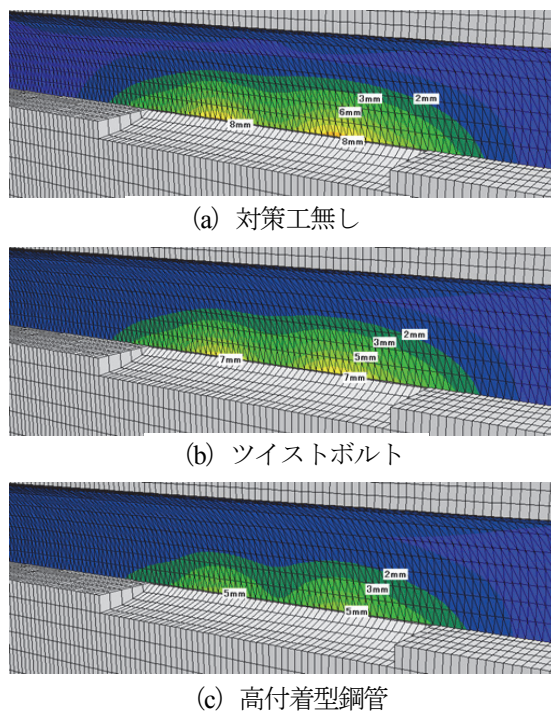


図-7 インバート設置後の覆工の変位量分布図
(②インバート部開削時補強ケース)

実施した。供用後20年経過時におけるインバートの設置や改築を想定し、インバート部を開削した際の覆工コンクリートの変位量分布（数値解析結果）を図-7に示す。同図より、高付着型鋼管による補強により、無対策はもちろん、ツイストボルトによる補強以上に下半側壁部覆工の変位を抑制できることが示された。インバート部の開削時においては、下部地山の隆起現象による周辺地山のゆるみがトンネル構造へ影響を及ぼすことも考えられる。今後はインバート部下方向への対策との併用についても検討していく所存である。

4. 結論

本報告では、新設工事に開発されたロックボルト技術の応用による、老朽化したトンネルの補強技術2件について報告した。

1件目の二重管式鋼管膨張型ロックボルトの開発では、はじめに、老朽化し補強を要するトンネル周辺の地山条件と、それに伴うロックボルトの要求性能を整理した。そして、その要求性能を満たすロックボルトとして、二重管式鋼管膨張型ロックボルトを試作し、室内試験により、従来の鋼管膨張型と同等の引抜き耐力があることを確認した。現場試験施工により、ドリルジャンボで削孔・打設できることを確認し、設計値を満たす引抜き耐力があることを確認した。今後は、崩孔性地山を対象とした試験施工を経て、補強を要する実現場に適用すべく、改良と展開を進めていきたい。

2件目の高付着型縞付き鋼管によるインバート部の補強については、①インバートを設置できない現場条件下

で、ボルトにより路盤の隆起を抑制するケース、②インバート新設のためインバート部を開削するに当たり、事前にボルトでトンネル側壁部を補強するケースの2ケースを対象に数値シミュレーションを行った。その結果、切羽補強用に開発した高付着型縞付き鋼管が、両ケースにおいても変位抑制に有効であり、従来のマイクロパイプやツイストボルトによる補強と比較して、同等かそれ以上の補強効果があることが示された。

第1章でも述べた通り、社会インフラの老朽化問題が、今後、時間の経過とともに顕在化していくことが懸念される。新設トンネル工事のみならず、トンネルの維持管理工事も視野に、今後、著者らも点検・補修・補強等、維持管理に関わる技術の開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省編：国土交通白書 平成25年度年次報告，pp.28-30，2014.
- 2) 国土交通省編：国土交通白書 平成25年度年次報告，pp.92-105，2014.
- 3) 岡部正，井本厚，横田泰宏，伊達健介，山本拓治：高付着鋼管による切羽補強工の効果に関する施工実績と解析的評価，トンネル工学報告集第21巻，pp.175-181，2011.
- 4) 土木学会編：トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説，丸善出版(株)，pp.79-86，2006.
- 5) 野城一栄，嶋本敬介，中西祐介，小島芳之：山岳トンネルの路盤隆起補強工の効果とその設計手法，鉄道総研報告書，Vol.26，No.4，pp.41-46，2012.
- 6) 東日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)：設計要領，第三集，トンネル編，トンネル本体工保全編（変状対策），pp.134，2014.

(2015.8.7 受付)

NEW REPAIR TECHNIQUES FOR OLD EXISTING TUNNEL BY BOLTING

Yu KOIZUMI, Takuji YAMAMOTO, Kensuke DATE, Yasuhiro YOKOTA,
Atsushi Imoto, Tadashi Okabe and Yusuke TANAKA

It has become more important to inspect and repair old existing infrastructures including tunnels in Japan. According to the report by the Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, more than half of the existing tunnels in Japan are going to be over fifty years old after 2033. The authors have developed various types of techniques to construct new tunnels more safely and rapidly. However, hereafter, we also research the applicability of the techniques developed for new tunnels to old existing tunnels, which needs repairing. In this paper, we report two techniques related to bolting; the one is the development of double tube steel pipe expansion type rock bolt. This newly developed bolt, which is an upgraded version of normal expansion type rock bolt, would be applicable for the poor ground even where boreholes would easily collapse. The bolts were tested at an actual tunneling construction site, and they showed sufficient pull-out capacity. The other is the application of high friction steel bolt, developed originally for stabilizing the face of a tunnel, to the bottom of a tunnel. The effect of this repair method was investigated by numerical simulation. As a result, the bolts restrained the upheave of the bottom of a tunnel and the deformation of lining concrete significantly.