特集≫≫ 鉄道

新幹線鉄道トンネルの耐震対策急速施工技術の開発と実用化

土屋尚登・下垣正宏・岡村直利

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震により，震源断層に近接した上越新幹線魚沼トンネル等が覆工の崩落等の大規模な被害を受けた。そのため，斯界の学識者を含めた「新潟県中越地震鉄道トンネル被害原因調査等検討委員会」を設置し，鉄道トンネルにおける地震対策の必要性および対策方法等について検討を行い，活断層の近くに位置する，いくつかの新幹線トンネルについて耐震対策を実施することとした。

新幹線における耐震対策工事は，新幹線の運行をしていない深夜の短い時間帯での施工であること，トンネル付近には工事用資材置場がなく約20 kmも離れた保守基地から作業機械を搬入しなければならないこと，新幹線という特別な公共輸送の運行に支障しないよう安全施工を遂行しなければならないこと，より短い工期で耐震対策を完了させることなど，厳しい条件が課せられた。

一方，既存の施工機械ではこの条件に対応できないことから，今回新たに，施工の高速化・効率化，安全性が高い施工体制を目的に，専用施工機械編成群の技術・システムを開発・実用化することとした。

キーワード：新幹線，鉄道トンネル，メンテナンス，耐震対策，急速施工，安全施工

1. 耐震対策の概要

(1) 対策の考え方

(a) 裏込注入工

トンネルの背面に空隙が存在する箇所では，空隙を埋めて，覆工に作用する地圧を分散，均一化させ，局所的な応力集中による覆工の損傷を防ぐことが必要であった。

トンネル覆工表面からの電磁波探査により，覆工背面に空隙が有ると判定された箇所について，可塑性の注入材料（JETMS）を注入する裏込注入工を実施することとした。

(b) ロックボルト工

覆工を地山に縫い付け，覆工塊の大規模な崩落を防止するとともに，覆工と地山を一体化することを目的として，ロックボルト工を計画した。

対策対象は，トンネル覆工ひびわれ等の変状が著しく特に閉合ひびわれが発生している箇所とした。工事誌等の記録から地山が悪く施工が難航した経緯を踏まえ，1晩2時間程度の実施工時間において安全かつ効率的な施工を確実に実施するために，削孔とボルト挿入が同時に出来る自穿孔ロックボルトを採用し，確実な施工と施工速度を上げることとした。長さは4 mを使用，引抜き耐力は100 kN／本以上とし，引抜き試験を実施して耐力確認を行うものとした。

なお，営業中の新幹線トンネルにおいて，夜間間合の短時間に継続してロックボルトを施工するのは初めての工事である。

(c) 当て板工

軸方向ひび割れが覆工に入り，地震時にひび割れ部で覆工が大きくずれる事を防ぐ目的で当て板工を計画した。当て板は，等辺山形鋼75 × 75 × 6以上，アンカーボルトM16以上とした。

平成17年7月に上越新幹線湯沢トンネルにおいて，トンネルの覆工ひび割れ位置をもとに当て板及びアンカーボルトの設置の設計調査を行った。3時間の試験時間で8本程度のマーキングしか出来なかった。さらにアンカーボルトの位置は，他の周辺のクラックを避けて位置決めするため，当て板のボルト孔は現地の写し取りとなり，時間と手間がかかることが分かった。また，当て板は将来の腐食等による落下が懸念されていた。再度検討した結果，当て板を全てロックボルトに変更することとした。

(d) シート工

建設時の設計よりトンネル覆工厚が小さい箇所や，ひびわれ等の変状が広範囲に分散している箇所に対す

る対策は，シート工（AAA 工法）を計画した。

(2) 対策項目設計数量

表―1 に主要な対策項目の設計数量を示す。

表―1　対策項目設計数量

対策エリア	対策項目	単位	概略設計	詳細設計
東北新幹線エリア	裏込注入削孔工	本	3976	3976
	裏込注入工	m³	2385	2385
	ロックボルト工	本	2764	5938
	当て板工	m	5719	0
上越新幹線エリア	裏込注入削孔工	本	3239	3239
	裏込注入工	m³	1943	1943
	ロックボルト工	本	580	4743
	当て板工	m	9219	0

(3) 専用の施工機械の開発

先ずは，本工事を機械製作含め 7 年間で完遂させるという意思決定をした。当初，施工は汎用機械の組合せを検討した。主工事のロックボルト施工は**図―1** に示すようなクローラ式ドリルジャンボ，クローラ式高所作業車を台車に載せて，モータカーで牽引して使用する計画を立てた。しかし，この編成では 1 台当たり 2 本／日の施工しか行えないため多くの編成を同時に入線させて施工することとなるが，保守基地の箇所数や広さも対応困難であるほか，多くの編成を夜間間合いに投入すると他の保守工事に支障をきたしてしまう。また，工期は 9 年以上もかかる。このため，専用の施工機械を開発して迅速・的確・安全な施工体制とすることが得策と考えた。

(4) 施工機械の開発に当たっての制約条件

(a) 全ての施工機械に対する制約条件

1) トンネルの覆工は，無筋コンクリートで構築されており，覆工厚は最大約 1 m である。覆工コンクリートの内部には，線路方向に 0.5 m ～ 1.5 m の設置間隔で鋼製支保工が建て込んである。
2) 施工時間については，概ね 2 時間／日とする。この時間には，跡確認時間も入っている。
3) 施工するトンネルは，新幹線トンネルであり，直線，曲線がある。軌道に 200 mm のカントがついている箇所もある。
4) トンネルの断面は，複線断面であり，片側線路については，別の維持管理工事で使用することがあるため，隣接線の建築限界に入らないことする。
5) 保守基地から施工場所までは車両限界内で移動し，施工位置においては，建築限界内での作業を基本とする。
6) トンネル断面という限られた空間での施工となる。
7) トンネル内には架線やケーブル等の添架物があるが，移設，仮撤去等は行わない。
8) 作業時間を少しでも長く確保するため，高出力で安定走行が可能なモータカーを整備して基地から現場までのアクセス時間の短縮を図る。
9) モータカー故障による新幹線運行への影響を防ぐため，モータカーを前後に配置し，この 2 台を重連制御走行させて，確実に保守基地に帰還できる編成群を構築する。

(b) ロックボルト施工機械に対する制約条件

1) 地山への定着長を 3 m 確保するため，ロックボルト長を 4 m，ロックボルト径は ϕ 32 mm とする。ロックボルトは，**写真―1** に示すような自穿孔ロックボルトを使用する。削孔径は ϕ 50 mm とする。

写真―1　自穿孔ロックボルト

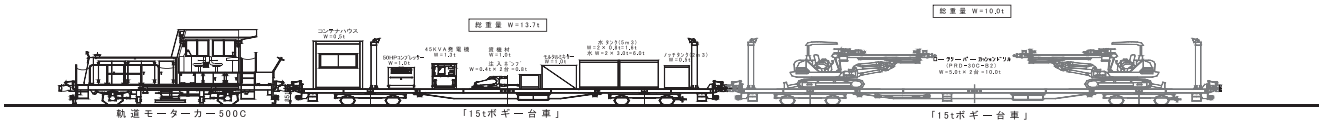
2) 削孔方法としては，**図―2** に示す基本削孔パターンを考えている。ただし，片側線路に居ながらパターン 2 の右の最下段から左の最下段までトンネル中心から放射状に任意の位置の削孔ができることが必要である。
3) ロックボルトは，トンネル覆工面に対し，垂直に施工することを原則とする。

(5) 施工機械の開発

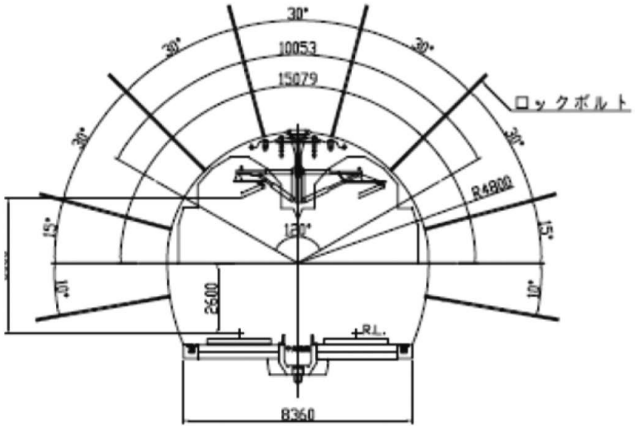
(a) 施工機械の高速化・効率化に向けた対策

1) 自穿孔ロックボルトの施工方法は，覆工コンク

汎用機によるロックボルト施工機械編成



図―1　施工機械編成



図―２　基本削孔パターン

リートをコアドリルで削孔する１次削孔，続いて地山をドリルマシンで削孔する２次削孔の２回の削孔が一般的である。削岩機油圧モータの性能をアップし，自穿孔ロックボルトの１次削孔で覆工コンクリートと地山を一連で削孔することに変更した。

2）既存の汎用ドリルジャンボは新設のトンネル掘削を目的としており，複雑に動く構造となっているため，自由度が大きい一方，本工事で使用した場合はロックボルト施工の位置出しに手間取ることが実機による作動確認試験により判明した。このため，ロックボルトのガイド部分について，ロックボルトの打設に必要な回転と伸縮だけの動きに絞り，ロックボルトの施工に不必要な動きを省いて，迅速的確に位置出しを行える施工機械を開発した。

3）ロックボルトは，トンネル覆工面に対して，常に垂直に施工するため，ガイドセルとブームとの接合位置の回転軸がトンネル断面中心に来た時にランプが点灯し，容易に，確実にガイドセルの回転軸がトンネル中心にセットされるようにした。

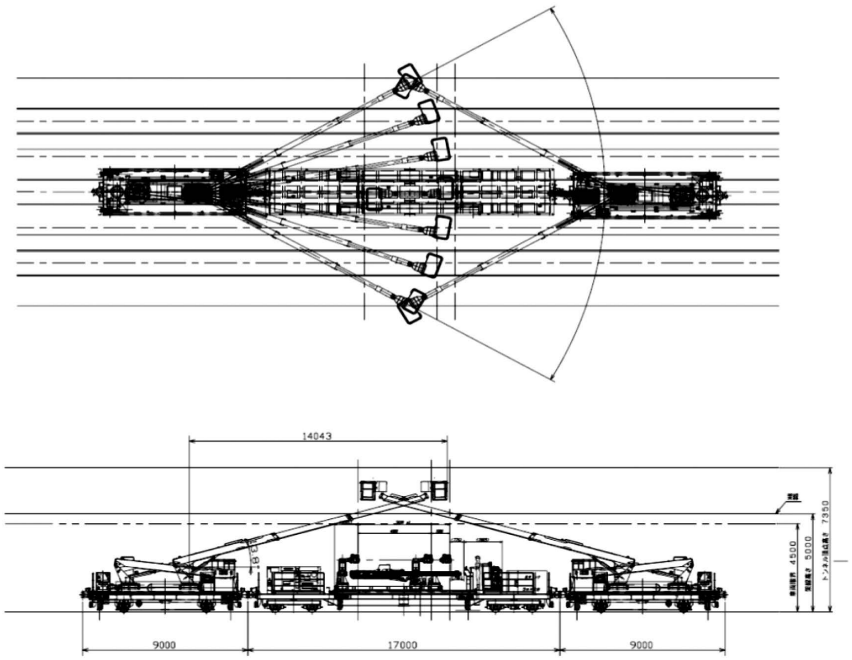
4）削孔位置の位置決めについては，施工機械編成群全体の移動による修正では微妙な位置決めに時間がかかった。ロックボルト施工機械について，施工機械と台車の間に線路方向へ水平に移動する水平移動装置を設けた。一日の施工分の移動については，車両編成群をモータカーで動かすのではなく，その水平移動装置で移動することで施工スピードと安全性を高めた。

5）ロックボルト施工において，削孔時に排出される削孔水，スライムによるトンネル内の汚損を防止するためにマルチリンクドリルの先に削孔水，スライムを吸引するバキューム装置，ロックボルトを施工する台車，ロックボルトの口元での施工を行う作業台車には，**写真**―２に示すような出し入れ容易な巻き取り装置がついた涎掛けタイプの作業用シートを配備し，施工後の掃除時間の短縮と作業員の削減および安全性の向上を図った。

6）ロックボルトの口元での施工を行う作業車について，バスケットを現在の位置から前方の位置へ移動するときには，細かくアームの伸長とアームの水平移動を繰り返すこととなり，時間がかかり，かつ吊下物に接触し，破線する危険性があった。ロックボルトの口元での施工を行う作業車についてもクレーン式高所作業車と台車の間に線路方向へ水平に移動する水平移動装置を設け，機械編成群をモータカーで小移動させるのではなく，その水平移動装置で移動することで施工スピードと安全性を高めた。

7）**図**―３に示すようにロックボルト施工機械を挟むように設置されるロックボルトの口元での施工を行う作業車のバスケットについては，ロックボルト施工機械の水平移動に合わせ，ロックボルトの施工機械がどの位置に居てもどちらのバスケットでも口元作業ができるようにし，ロッ

写真―２　シート巻き取り装置



図―３　高所作業機械施工範囲

クボルト削孔終了とともに一台がロックボルトの口元を固定する作業を行うと同時に他の一台は次のロックボルト打設位置への誘導と安全確認を行い，次の作業への移行時間を削減した。

（b）開発した施工機械

1）STARS（Shinkansen Tunnel Aseismic Repair Staging-car）

写真―３に示すSTARSは，急勾配での低速時牽引力を高性能化し，２軸駆動を用いた全速度域油圧走行方式を採用して低速連続移動作業を可能にした。従来のトルクコンバータ方式のモータカーは，低速走行が不安定で作業性・安全性で劣っていた。また，トンネル耐震対策工事の作業内容を考え，上部作業用のブーム式足場と側部作業用の足場を備えており，ブーム式足場のカーゴは架線等支障物の隙間に入れるような形状とした。STARSは単体でも相応の作業が可能な仕様とした。

2）STAR―WL（Wide Lift）

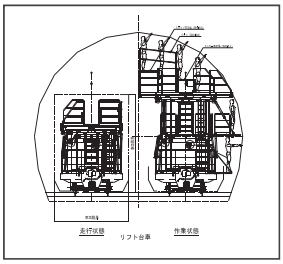
写真―４に示すSTAR―WLは，主に裏込注入工の削孔，シート工，及びロックボルト工の緊張等の高所作業足場として，トンネル覆工面に対し，広範囲な作業床を確保することを目的として開発した。**写真**―５に示すように工事箇所において，昇降する作業床（側方への拡幅スライド機能搭載）を，き電線に支障しないところまで上昇し，油圧により側方にスライドし拡幅させ，その後，最上部においては簡易足場を組み立てる。側部および下部は，折り上げてある作業床を回転させて下ろして，足場とする。広範囲な作業床を，短時間に組立て解体ができることが特長で，工事だけでなく，トンネル検査にも使用可能である。

3）STAR―MD（Multilink Drill）

写真―６に示すSTAR―MDは，き電線等の施工支障となる吊下物を安全かつ迅速に避けるため，ガイドセルの回転軸に，関節を２箇所設けて，軸方向・軸

写真―３　STARS

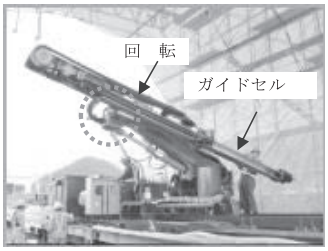
側　面

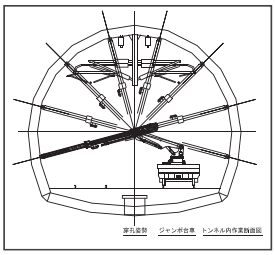


断　面

写真―4　STAR―WL

写真―5　STAR―WL 施工状況

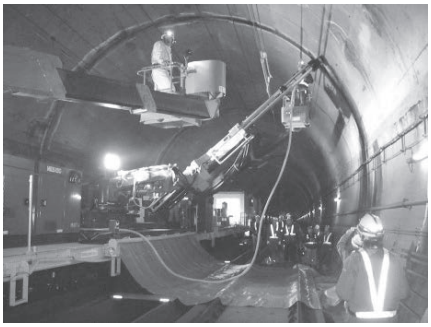




写真―6　STAR―MD

直角方向への回転機能を与え，新幹線の片側線路にいながら，トンネル中心部に回転軸が容易に移動して複線断面を放射状にロックボルト打設が行えることが特長である。

写真―7 に示すように実際の施工では，自穿孔ロックボルトの先端ビットにより，トンネル覆工コンクリートと地山を同時に削孔して，ロックボルトを建込んでいる。削孔時間だけに限れば，覆工コンクリートと地山合わせて，数分で削孔可能である。



写真―7　STAR―MD 施工状況

なお，この台車には転倒防止用のアウトリガーが4台装備され高い安全性を確保している。

4）STAR―SB（Slide Basket）

写真―8 に示す STAR―SB は，き電線等の施工支障となる吊下物を安全に避けながら，裏込注入時には注入の口元に，ロックボルト削孔時には削孔部の口元に，作業員を移動させる目的で製作した。通常の高所作業用バスケットと同様の動きの他，バスケットとブーム本体が台車上を水平移動できるのが特長である。

なお，この台車には転倒防止用のアウトリガーが4台装備され高い安全性を確保している。

(6) 施工機械編成の開発

施工機械編成について，以下に述べる（**図**―4参照）。

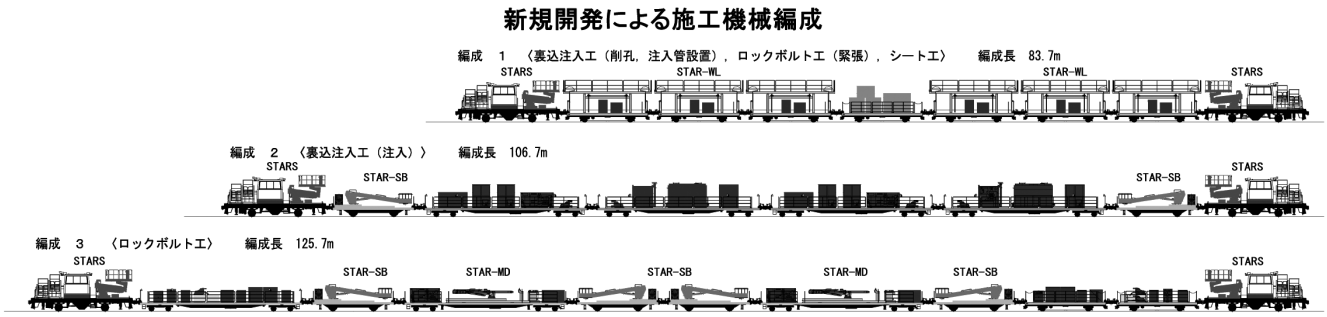
（a）編成1

裏込注入のトンネル覆工の削孔・シート工・ロックボルトの緊張工用で，広い作業床を必要とする工事用である。STAR―WL を連結し，前後に STARS を連結して重連制御走行する編成とした。2編成分を連結して牽引する編成とした。トンネル内で1編成ずつに分割可能である。

（b）編成2

裏込注入工の注入用で，注入機材を載せる平台車2

写真―8　STAR―SB



図―４　施工機械編成

台，注入孔用 STARS，確認孔用 STAR ― SB を使用する（1 編成）。2 編成分を連結して走行する編成とした。トンネル内で 1 編成ずつに分割可能である。

（c）編成 3

ロックボルト工の削孔・注入用で，注入機材を載せる平台車，STAR ― MD，STAR ― SB2 台を使用する（1 編成）。2 編成分を連結し，前後に STARS を連結して走行する編成とした。トンネル内で 1 編成ずつに分割可能である。

(7) 安全性に関する開発

（a）STARS

STARS には，重連制御運転装置を設備し，作業用台車を STARS2 両で両側から挟み込んで走行することにより，一方の STARS が運行不能となっても，もう一方の STARS で走行して保守基地に帰還できる。また，故障診断モニターを搭載して STARS の状態監視を常時行い，異常に瞬時に対応できるようにしている。

（b）STAR ― MD

新規ロックボルト施工機械の操作不慣れによるトンネル内でのき電線，吊下線等の切断，トンネル壁面の損傷が懸念されるため，**写真**― 9 に示す模擬トンネルを保守基地に製作し，**写真**― 10 に示すように作業

写真― 9　模擬トンネル

写真― 10　施工訓練状況

員の訓練を行った。なお，施工訓練を実施したのち，操作試験を行い，その試験に合格したものだけを操作員として認定し，実作業に従事させた。

さらにトンネル内の実施工に先立ち，トンネル内に施工機械編成を持ち込んで，ロックボルト打設の模擬施工を実施して，再度施工の問題点を確認した。

（c）STAR ― MD，STAR ― SB

これら施工機械の台車には，転倒防止用のアウトリガーが 4 台装備されており，アウトリガーを完全に張り出すまでは，ロックがかかっており，マルチリンクドリル，スライドバスケット等が稼動しないように安全装置が設置されており，特にカント部分での転倒を防止している。

（d）STAR ― WL

作業時における足場からの転落を防止するため，作業状況に合わせた手すり，安全帯の親綱を設置している。

工事箇所において，昇降する作業床を，き電線に支障しないところまで上昇し，作業床をり側方に拡幅させ，その後，最上部においては簡易足場を組み立て作業においても，作業時の転落防止を考慮し，手すり先行型足場組み立てとして計画している。

（e）共通事項

すべての建築限界外での作業を行う機器の収納し忘れによる移動時のき電線等の吊下物の破損を防止する

ため，それらの機器が正規の位置に収納することをランプの点灯により確認するとともに移動装置が稼働しないロック機構を装備している。

STARS，STAR ― MD，STAR ― SB，STAR ― WL はいずれも油圧駆動となっているため，油圧機器の故障による車両限界内に収納できない場合は，トンネル内を移動し，保守基地に帰還することができなくなる。これらを補完するために油圧駆動を解除し，人力による収納ができるシステムを組み込んでいる。

また，全ての油圧機器による作業・移動に際して，作業員及び他の機器との接触事故を防止するため，それぞれ異なる音，回転灯の点滅により知らせるシステムを装備している。

2. 開発の経緯

平成 19 年 3 月より施工機械調査，施工機械，施工機械編成群の考え方をまとめ基本設計を行った。その後，平成 20 年 1 月より詳細設計，施工機械の製作を行った。東北新幹線エリア，上越新幹線エリア合わせて，平成 20 年 7 月に**表**―2 に示す台数の機械が完成した。平成 20 年 9 月から新幹線トンネル耐震対策工事を開始した。

表―2 施工機械製作実績

施工機械・台車	単位	製作台数
STARS	台	12
STARS ― MD	台	6
STARS ― WL	台	12
STARS ― SB	台	12
台車	台	44

3. 実績

(1) 施工数量

表―3 に詳細設計時の数量と実績数量を示す。

当初想定していた以上に裏込注入が入り，さらに施工中にロックボルト工の数量が追加された。

表―3 施工数量

対策エリア	対策項目	単位	詳細設計	実績数量
東北新幹線エリア	裏込注入削孔工	本	3976	5414
	裏込注入工	m^3	2385	15969
	ロックボルト工	本	5938	6431
上越新幹線エリア	裏込注入削孔工	本	3239	4188
	裏込注入工	m^3	1943	12268
	ロックボルト工	本	4743	4952

(2) 施工効率

表―4 に詳細設計，および実績の平均日当り施工量を示す。

表―4 平均日当り施工量

対策項目	単位	詳細設計	実績
裏込注入削孔工	本／日	10	16
裏込注入工	m^3／日	14	17
ロックボルト工	本／日	6	12

(3) 工期

工期については，上記の施工効率で，詳細設計時に汎用機械で施工した場合の工期を算出したところ，全体工期として 9 年の工期を要した。トンネル耐震工事を早期に終了することが重要なテーマとなっており，少しでも早く完成するということで目標工期が 7 年と設定された。そこで 6 年の工期で完了できることを想定し，施工方法を見直し，新規施工機械，施工システムの開発により施工効率を改善した。修正設計時から比べると，ロックボルト工および裏込注入が大幅に増えているにもかかわらず，さらなる施工方法の改善等を含め，大幅な施工効率の改善により工事施工としては，平成 20 年 9 月に開始し，平成 25 年度末に完了した。

(4) コスト

ロックボルト施工に伴うコストについては，開発した機械の施工効率の向上，施工方法の改善等により，全体工期が 10 年から 6 年に短縮され，4 割減と大幅なコストダウンを図ることができた。

(5) 安全

吊下線，き電線等の支障物を損傷することなく，また列車運行に支障をきたす事故なく，安全に施工が終了した。開発した機械に対する安全性への配慮が大きく寄与したことは言うまでもないが，日々の管理，月，年単位の定期点検等を確実に実施して故障の芽を事前に潰していたことも見落とすことはできない。さらに定期的に緊急時対応訓練を実施したことも職員，作業員の安全への意識を高め，緊張感の維持につながったと考える。

4. 東日本大震災への対応

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災において，当工事も工事中であり，大きな揺れを受け，緊急

に高架橋，トンネルの点検を行った。高架橋の橋脚，架線柱を中心に大きな被害を受けた。東北新幹線エリアのメイントンネルである蔵王トンネルの進捗率は，裏込注入工，ロックボルト工等ほぼ50％の進捗率であった。蔵王トンネルについては，地震の影響は全く受けず，無傷の状態であった。しかし，その両隣の耐震対策対象外の志賀トンネル，福島トンネルで軽微ではあるが損傷を受けていた。トンネルのアーチ部，側壁部の補強には蔵王トンネルで施工しているこの機械編成群をそのまま両トンネルでの補強工事に使用することができた。さらに両トンネルの被害は，インバートにも及んでおり，その対策のために下向きロックボルト工に改造して使用した。このように東北新幹線の復旧に大きく寄与したと考えている。

5. おわりに

工事が完了し，新幹線運行に支障する運転事故や作業員の傷害事故は皆無であり，工事の途中ではあったが，東日本大震災での影響を受けなかったのは，耐震対策工事の成果であるとともに，蔵王トンネル工事がなされていなければ，両トンネルの復旧には多くの時間を費やしたことと思われる。

開発した機械であるSTARS，STAR―MD，STAR―WL，STAR―SBは，長期的視野に基づいて設計・開発されており，トンネル耐震対策工事だけでなく，トンネルの点検・検査・修繕工事にも有効活用が可能なものである。今後，これらの機械を幅広く活用し，より効果的な検査・工事の施行体制を構築したいと考える。また，本工事で得られた技術・技能は後世に継承していくべきものと考えている。

JCMA

《参考文献》

1）土木学会年次学術講演会 2009 年 9 月：　新幹線トンネル耐震対策工事の考え方および施工機械編成の概要
2）「トンネルと地下」2009 年 10 月号：　大規模機械編成による効率的なトンネル耐震対策
3）「建設機械」2010 年 4 月号：　大規模機械編成による新幹線鉄道トンネルの耐震対策
4）「日本鉄道施設協会誌」2010 年 4 月号：　大編成機械群による効果的なトンネル耐震対策
5）日本鉄道施設協会　総合技術講演会 2010 年 10 月：　大規模な機械編成によるトンネルの耐震対策

［筆者紹介］

土屋　尚登（つちや　なおと）
東日本旅客鉄道㈱
東京支社　耐震補強対策室
室長（担当部長）

下垣　正宏（しもがき　まさひろ）
東日本旅客鉄道㈱
大宮支社　大宮土木技術センター
副所長

岡村　直利（おかむら　なおとし）
東鉄工業㈱
環境本部　ECO_2 推進部長
兼　土木本部　土木エンジニアリング部担当部長
兼　研究開発センター所長