

東北地方太平洋沖地震による 新幹線トンネルの被害と復旧

松沼 政明¹・齋藤 貴²

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)
E-mail: masaaki-matsunuma@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)
E-mail: tk-saito@jreast.co.jp

2011年3月の東北地方太平洋沖地震において、東北新幹線の一部のトンネルが被害を受けた。被災トンネルのうち特に被害が大きかったのは福島トンネルと志賀トンネルである。当該地震におけるトンネルの特徴的な被害は、トンネルの一部区間における路盤部の隆起であった。復旧方法として、早期の運転再開を図るために、路盤部の空隙充填、軌道スラブの据えなおしによる応急復旧を行い、運転再開後に路盤および側壁下部へのロックボルト打設による本復旧を実施した。

応急復旧による運転再開にあたり、路盤部および内空変位の計測監視を実施した。その結果、ロックボルトの打設により変位の収束が確認された。なお、現在も、列車運行上問題となる変位は生じていない。

Key Words : Earthquake, damage, Shinkansen, roadbed, rock bolt

1. はじめに

2011年3月に発生したMw9.0の東北地方太平洋沖地震において、東北新幹線の一部のトンネルが被害を受けた。被災トンネルのうち特に被害が大きかったのは福島トンネルと志賀トンネルである¹⁾²⁾(図-1)。本稿では、これら2トンネルの被災概要および復旧の概要、断面計測による変位の推移について述べる。

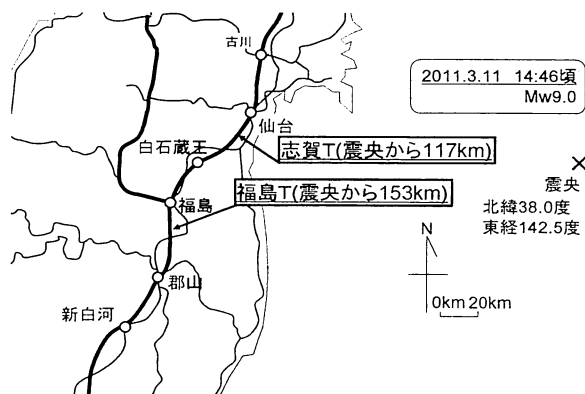


図-1 被災トンネル位置図

2. 福島トンネルの被害概要

(1) トンネル諸元

福島トンネルは、東北新幹線郡山～福島間に位置する延長11,705mのトンネルである。被害を生じた区間の代表地質は、凝灰岩、泥岩であり、しゅう曲構造の泥岩層と凝灰岩との互層から成る地層構造である。掘削工法は、上部半断面先進レー尔工法、底設導坑先進上部半断面工法で施工され、支保工はH175,ctc1.3m, 覆工厚は50cm, 70cm, 路盤構造は、りょう盤コンクリートであり、1976年(昭和51年)4月に竣工した。なお、震央からの距離は153kmである。図-2に福島トンネルの地質縦断面図および被災箇所位置図を、図-3に福島トンネルのトンネル断面図を示す。

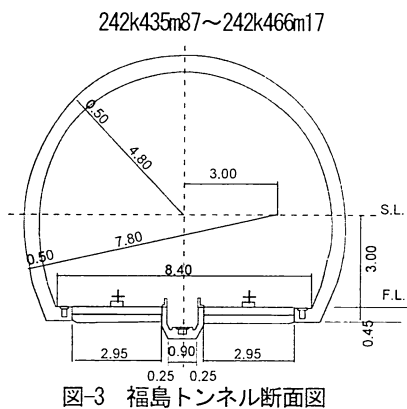
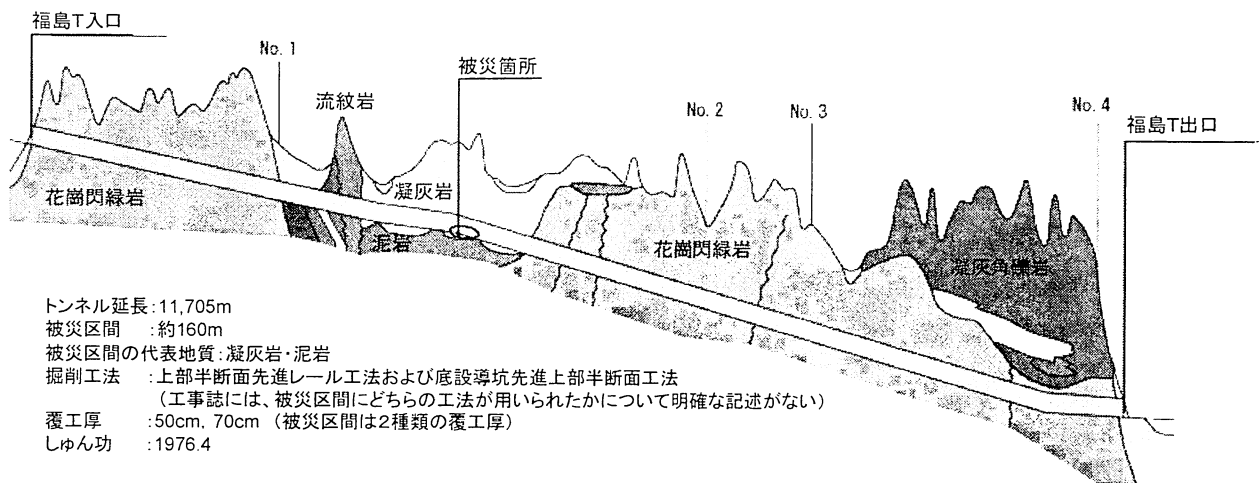
(2) 被害概要

当トンネルにおける主な被害は、242k370m～242k500m間の中央通路部の損傷、242k351m～242k511m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状である。なお、覆工コンクリートの崩落は確認されなかった。

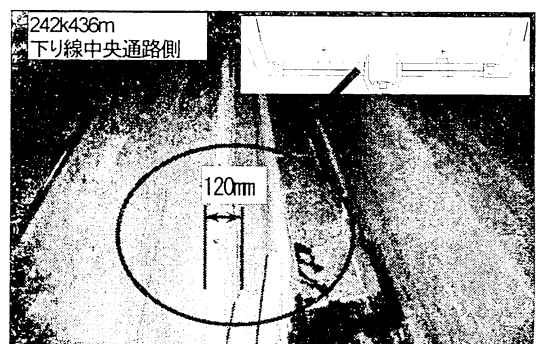
(3) 中央通路部の損傷

242k370m～242k500m間において、上下線間の中央通路部に側壁傾斜、底版損傷等の被害を生じた。

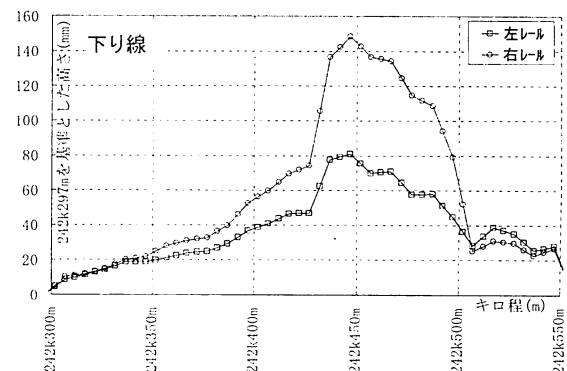
写真-1に、242k436m付近の下り線中央通路部の被害状況を示す。当該箇所では、中央通路底面のサブドレーンの



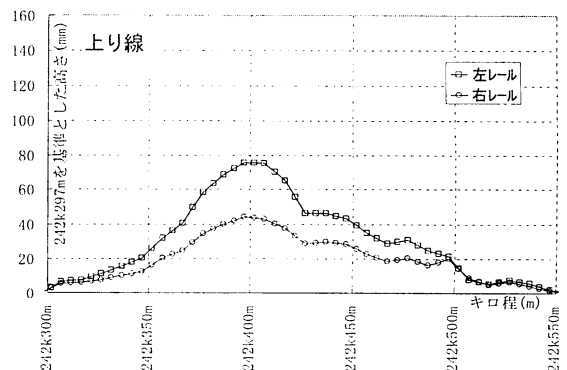
蓋やトンネル巡回車の走行路部分が損傷した。また、下り線の路盤コンクリートと中央通路との間に120mmの開口を生じた。



中央通路と路盤コンクリートとの間の開口は、上り線側でも生じ、開口量は最大50mmであった。



(4) 路盤部の隆起に伴う軌道変状



(5) 被害原因の推定

中央通路部に損傷を生じた242k370m～242k500m間、路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた242k351m～242k511m

間の地質は泥岩であり、しゅう曲構造の泥岩層と凝灰岩との互層からなる地層構造である（図-2）。また、242k497m付近に、りょう盤コンクリートとインバートの路盤構造の変化点がある。242k497mより終点方のインバート区間においては、路盤部の変状は少なく、起点方のりょう盤コンクリート区間に変状が発生した。

今回被害を生じた区間は、地盤全体が動く中で、被害を生じなかった区間と比較し、弱い層にひずみがたまり、トンネル構造上の弱部となっている路盤部に被害を生じたものと想定される。

3. 志賀トンネルの被害概要

(1) トンネル諸元

志賀トンネルは、東北新幹線白石蔵王～仙台間に位置する延長3,502mのトンネルである。被害を生じた区間の代表地質は、泥岩や頁岩、凝灰岩、凝灰角礫岩などの堆積岩、および安山岩などの火成岩から構成され、火山活動等に伴う安山岩の貫入により各々の地質が複雑に組み合わせられた地質、地層構造となっている。掘削工法は、側壁導坑先進上部半断面工法のほか、2段サイロットやスプリングサイロット工法が用いられ、支保工はH200、

ctc0.9、1.0m、覆工厚は、50、70、80cm、インバート構造であり、1976年（昭和51年）3月に竣工した。なお、震央からの距離は117kmである。図-6に志賀トンネルの地質縦断面図および被災箇所位置図を、図-7に志賀トンネルのトンネル断面図を示す。

(2) 被害概要

志賀トンネルの主要な被害は、福島トンネルと同様に路盤部の隆起に伴う軌道変状であり、軌道計測の結果明らかとなった変状である。路盤の隆起は、309k545～310k177m間において発生した。

(3) 路盤部の隆起に伴う軌道変状

309k545～310k177m間の上下線軌道の高低データを図-8,9に示す。図中、横軸はキロ程（m）、縦軸は309k502mを基準とした軌道の高低（レベル測量による相対高さ）を示す。

309k545～310k177m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状箇所は、下記の3箇所で見られた。

- ①309k570m付近（309k545m～309k615m：A区間）
- ②309k800m付近（309k775m～309k850m：B区間）
- ③310k120m付近（310k080m～310k150m：C区間）

なお、水準変位は最大で16mmとなった。

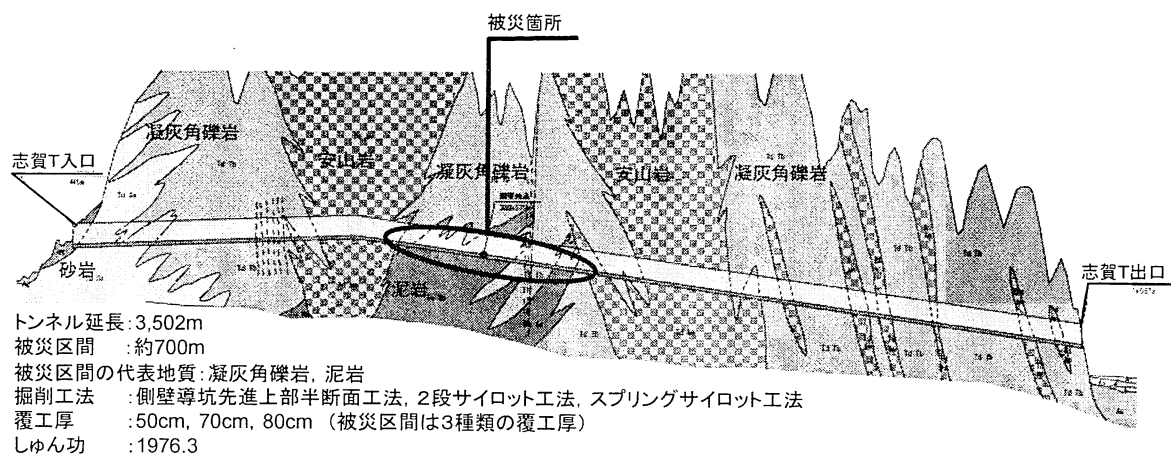


図-6 志賀トンネル地質縦断面図および被災箇所位置図

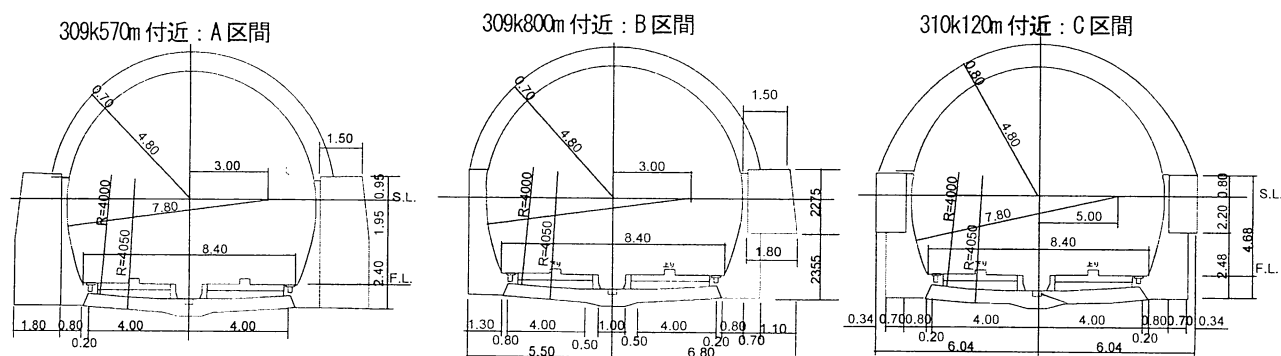


図-7 志賀トンネル断面図

(4) 被害原因の推定

工事記録³⁾によると、309k460m～310k200mの約700m間は、複雑な地質構造であり、膨張性粘土鉱物を含む軟弱層であり、湧水（200～400l/min）の多い箇所もあった。この区間の掘削工法は、2段サイロットやスプリングサイロットなどの特殊な掘削工法により、8種類の掘削断面が用いられたものの、導坑の変状、支保工の変形、沈下など、工事が非常に難航した記録が残されている。

今回、路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた309k545m～310k177m間は、工事が難航した区間とほぼ合致する。また、軟弱層であったため路盤構造としては、インバートが採用されているものの曲率が小さい（曲線半径R=40m）。地震に伴い地盤が動いている中で、地質上の弱い層にひずみがたまり、トンネル路盤部が構造上の弱部となり変状が生じたものと推定される。

4. 復旧概要

(1) 復旧方針概要

復旧方針として、運転再開前の応急復旧と本復旧とにわけて実施する方針とした。応急復旧の主な工種は、路盤のはつりおよびスラブ据えなおし、ならびにりょう盤コンクリート下の地山等への空隙および開口部へのセメントミルクおよびモルタルの充填である。また、本復旧の主な工種は、営業運転再開後に路盤部および側壁部へのロックボルト打設である。

(2) 福島トンネル応急復旧

福島トンネルの被害に対する応急復旧の実施項目は、中央通路損傷部の補修、路盤部の空隙および開口部の充填、路盤コンクリートの盤下げの3項目である。

a) 中央通路損傷部の補修

242k370m～242k500m間の上下線間の中央通路部に発生した側壁傾斜、底版損傷、隅角部のひび割れ等については、損傷部の補修、止水および注入を実施した。

b) 路盤部の空隙および開口部の充填

242k352m～242k512m間の地山とりょう盤コンクリートあるいは路盤コンクリートとりょう盤コンクリートの打継ぎ目部の空隙、中央通路と路盤コンクリートとの開口部にセメントミルクの充填を行った（写真-2）。

セメントミルクの充填は、コア削孔調査時の孔（φ100mm、ctc5.0m）および路盤コンクリートと中央通路の開口部からも充填を行った。1次充填量は約9.75m³であり、コア削孔（φ50mm、ctc5.0m）により充填状況の確認を行った。1次充填後の充填状況確認のコア削孔結果を写真-3に示す。事前に確認されていた空隙へ、セメントミルクが充填されたが、確認コア削孔により空隙が確

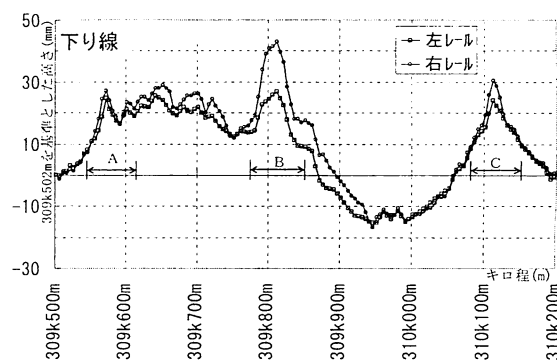


図-8 下り線軌道高低データ（レベル測量）

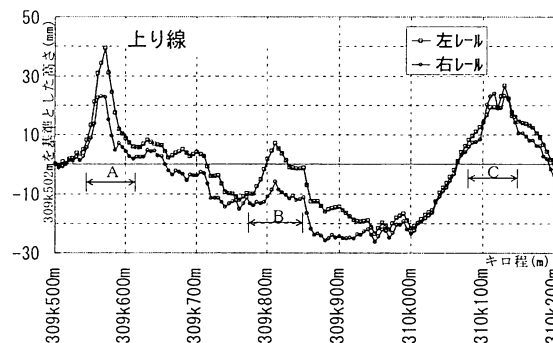


図-9 上り線軌道高低データ（レベル測量）



写真-2 セメントミルク充填状況 (242k472m)

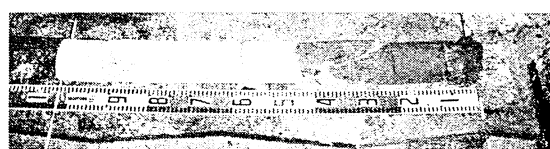


写真-3 コア削孔によるセメントミルク充填確認 (242k442m)

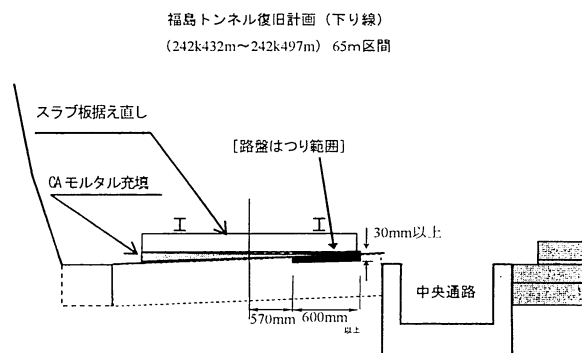


図-10 路盤コンクリートはつり範囲
(路盤コンクリート下部の被災状況は推定)

認された箇所については2次充填（約1.20m³）を行った。2次充填後に、242k342m～242k522m間において、再度コア削孔（φ50mm、ctc2.5m）により充填状況の確認を行い、空隙が確認された箇所については3次充填（約7.80m³）を行った。

c) 路盤コンクリートの盤下げ

当初、路盤部の隆起に伴う軌道変状については、軌道側にて応急復旧として、スラブ盤の置き換え、CAモルタルの打ち換え、軌道パッド調整等により軌道の擦り付けを行い、徐行により開通させる計画であった。開通後、通常速度での運転再開に向け、本復旧として引き続き夜間作業にて、軌道の補修を行う計画であった。しかしながら、開通後の作業量が多くなるため、応急復旧の段階で、一部路盤コンクリート面をはつり、盤下げを行い、軌道の擦り付け範囲を削減することとした。軌道側と調整した結果、図-10に示すように、242k432m～242k497m間の水準変位量の大きかった下り線65m区間について、幅600mm、深さ30mm（CAモルタル厚50mmの場合）の範囲で路盤コンクリート面をはつり、盤下げを行うこととした。

なお、応急復旧は2011年3月14日から開始し、2011年3月23日に終了した。

(3) 福島トンネル本復旧

本復旧として、242k352m～242k507m間の路盤部および側壁部へロックボルト打設を行うこととした（図-11）。使用したロックボルトは、路盤部および側壁部ともにφ=32mm、長さ4mの自穿孔タイプである（図-12）。

路盤部へのロックボルト打設は、上下線のスラブ軌道の両側にそれぞれ2本ずつ、1断面あたり4本打設することとした。また、延長方向には、1.67m間隔（1スラブ当たり6本）にて打設することとした。側壁部のロックボルト打設は、支保工ピッチの倍ピッチとし、スプリングラインより下側に千鳥配置で2段設置することとした。写真-4に福島トンネル側壁部におけるロックボルト打設状況の写真を示す。なお、本復旧は2011年6月から開始し、2012年2月に終了した。

(4) 志賀トンネル応急復旧

志賀トンネルにおける応急復旧の実施項目は、インバート部の空隙へのセメントミルクの充填、路盤コンクリート面のはつりによる盤下げの2項目である。

a) インバート部の空隙充填

A～Cの3区間において発生した路盤部の隆起に伴う軌道変状に対し、上下線の軌道の隆起量を勘案し、中央通路底盤部より309k545m～309k595m間（上り線側）、309k775m～309k850m間（下り線側）、310k080m～310k150m間（上り線側）のインバート部の空隙へのセメ

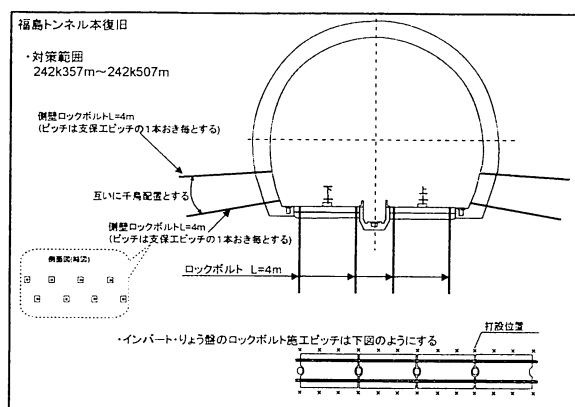


図-11 路盤部および側壁部ロックボルト打設位置図

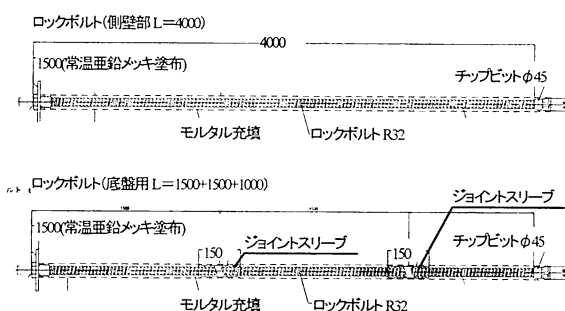


図-12 自穿孔ロックボルト詳細図

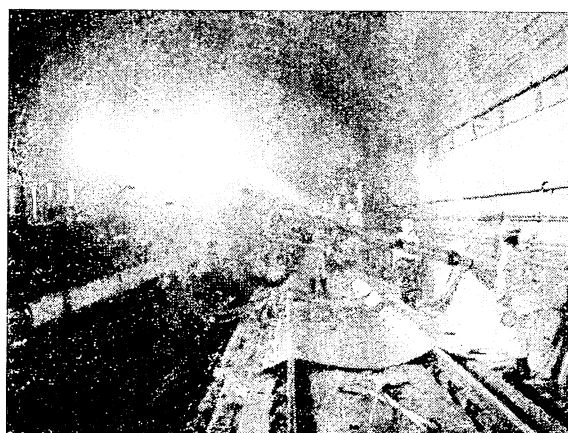


写真-4 側壁部ロックボルト打設状況

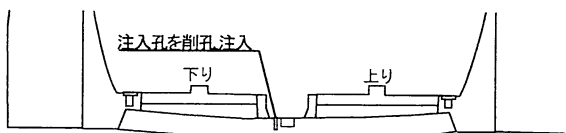


図-13 中央通路底盤部 注入孔削孔位置図

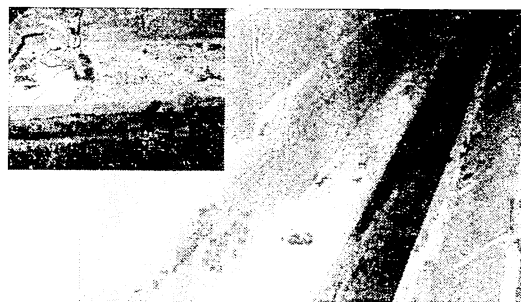


写真-5 セメントミルク充填状況（C区間）

ントミルクの充填を行った（図-13, 写真-5）。充填はドリル削孔（φ36mm, L=0.2m, ctc5.0m）による孔から行い、充填孔間で空隙の確認を行いながら3回に分けて行い、合計充填量は2,257（L）であった。図-14は、インバート部の空隙への充填実績であり、横軸がキロ程（m）、縦軸が充填量（L）、奥行きが充填回数である。

インバート部の空隙への充填は、2011年3月21日から開始し、2011年3月30日に終了した。

(5) 志賀トンネル本復旧

本復旧として、309k545～310k177m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた区間において、路盤部へのロックボルト打設を行うこととした（図-15）。また、309k690m～309k983m間のアーチ部および310k080m～310k136m間の側壁部についてもロックボルト打設を行うこととし、打設位置は現地調査により決定した。

使用するロックボルトは、φ=32mm、長さ4mの自穿孔タイプである。路盤部のロックボルトの配置は、上下線のスラブ軌道の両側に各々2本ずつ、1断面あたり4本打設し、延長方向には、1.67m間隔（1スラブ当たり6本）にて打設を行うこととした。

なお、側壁部の下側1段目のロックボルトについては、側壁コンクリート厚を考慮し長さ6mとし、支保工ピッチの倍ピッチにて打設を行うこととした。側壁部のロックボルト打設状況を写真-6に示す。

アーチ部に発生したひび割れに対しては、既往変状（ひび割れ）と併せた閉合ひび割れ、湧水等の影響を考慮し、ひび割れをはさみ1m程度離れた位置にロックボルト打設を行うこととした（図-16）。

なお、路盤部、側壁部およびアーチ部へのロックボルト打設は、2011年5月に開始し、2012年2月に終了した。

5. 計測監視

(1) 計測監視の目的および概要

応急復旧による運転再開から本復旧までの間に、異常な変位が発生していないことを確認するために、内空変位および路盤高さの計測監視を実施することとした。

測定位置は福島トンネルが、242k342m、402m、437m、447m、482m、507mの6断面であり、志賀トンネルが、309k500m、570m、750m、810m、960m、310k120m、200mの7断面である。測定項目は、トンネル内空変位、路盤コンクリート水準測量の2項目である（図-17）。測定頻度は、運転再開まで2回/週とし、運転再開後は、1回/週の測定を2回/月程度、1回/月程度と測定頻度を減らしていくこととした。

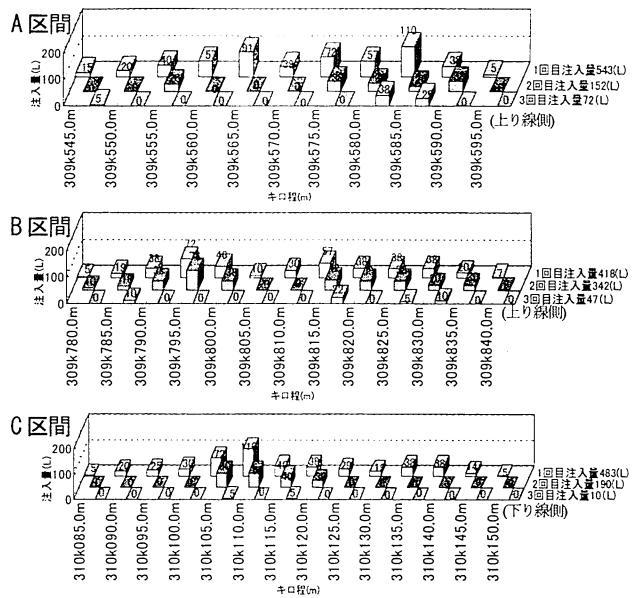


図-14 インバート部の空隙への充填実績

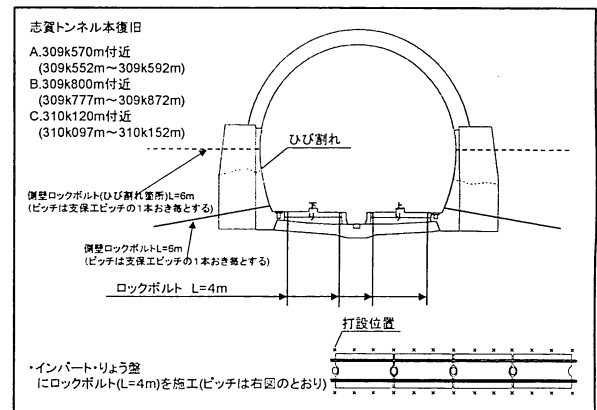


図-15 路盤部および側壁部ロックボルト打設位置図



写真-6 側壁部ロックボルト打設状況

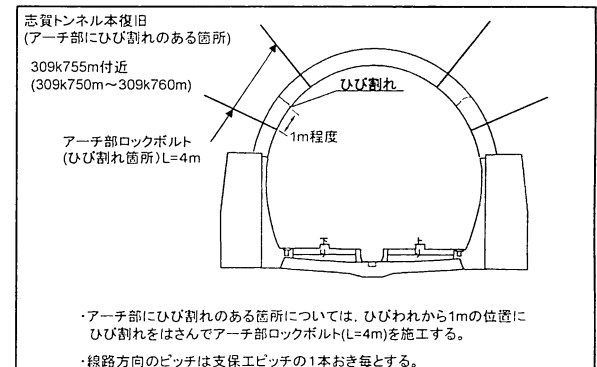


図-16 アーチ部ロックボルト打設位置図

(2) 福島トンネルの計測結果

図-18に、242k437m付近の内空変位の測定結果を示す。縦軸が内空変位であり、横軸が時間軸である。側壁ロックボルトの打設後は内空変位量が安定する傾向がみられた。

図-19に、242k447m付近下り線側の突起コンクリート上における路盤測定結果を示す。縦軸が路盤高さであり、横軸が時間軸である。福島トンネルの路盤部ロックボルトの設置前後における路盤高さの変化の傾向はほとんどみられない。

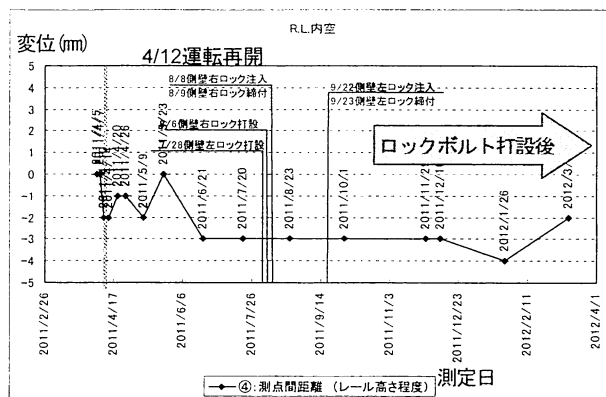


図-18 福島トンネル内空変位 (242k447m R.L. 高さ)

(3) 志賀トンネルの計測結果

図-20に、309k810m付近の内空変位測定結果を示す。縦軸が内空変位であり、横軸が時間軸である。内空変位は縮小傾向がみられる。しかしながら、側壁ロックボルトの打設後は内空変位が安定する傾向がみられた。

図-21に、309k810m付近下り線中央通路側の路盤コンクリート高さの測定結果を示す。縦軸が路盤高さであり、横軸が時間軸である。志賀トンネルの当該測定点において、運転再開後から8月前後までは、概ね隆起傾向がみられた。しかしながら、路盤部ロックボルト打設後は隆起がおさまる傾向がみられる。

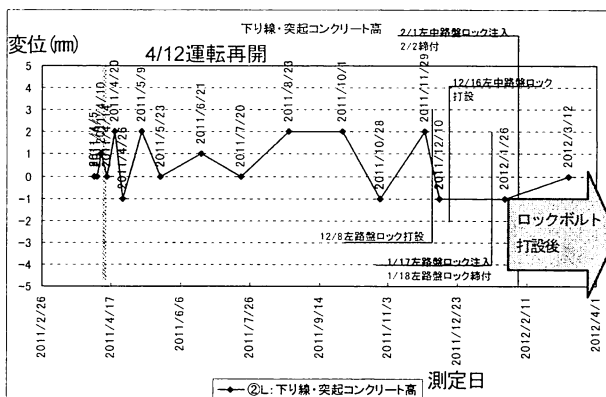


図-19 福島トンネル路盤高さ測定例 (242k447m 下線突起コンクリートにおける路盤高さ)

6. まとめ

2011年3月の東北地方太平洋沖地震において、東北新幹線の一部のトンネルが被害を受けた。当該地震におけるトンネルの特徴的被害は、一部区間における路盤部の隆起であった。

復旧方法として、早期の運転再開を図るために、路盤部の空隙充填、軌道スラブの据えなおしによる応急復旧を行い、運転再開後に路盤および側壁下部へのロックボルト打設による本復旧を実施した。

応急復旧による運転再開にあたり、路盤部および内空変位の計測監視を実施した。その結果、本復旧のロックボルト打設により変位の収束が確認された。なお、現在も、列車運行上問題となる変位は生じていない。

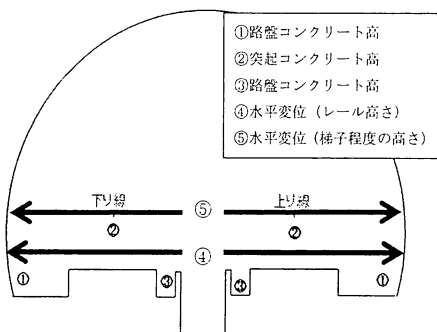


図-17 断面計測位置図

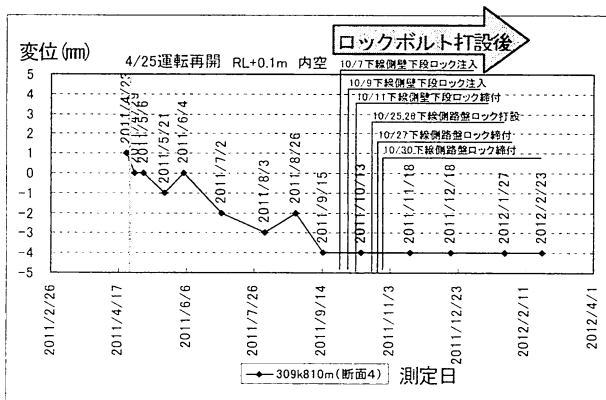


図-20 志賀トンネル内空変位 (309k810m 付近 R.L. 上 0.1m)

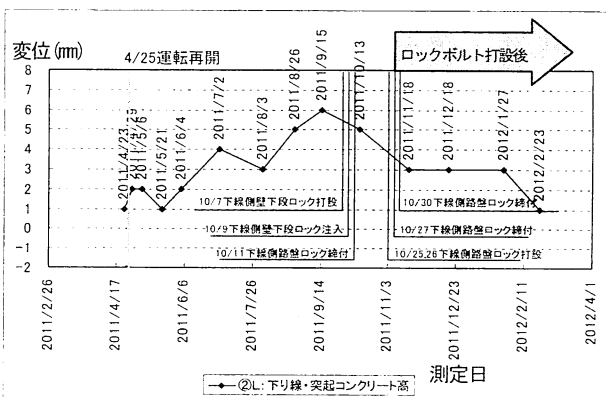


図-21 志賀トンネル路盤高さ測定例 (309k810m 付近 下り線中央通路側路盤コンクリート)

参考文献

- 1) JR 東日本：SED, 特集「東北太平洋沖地震と鉄道構造物」No.37, 2011.11
- 2) 松沼政明, 齋藤貴：東北地方太平洋沖地震における新幹線トンネルの被害と復旧, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012.7
- 3) 田中康雄：軟弱地質の下半掘削, トンネルと地下, 1962.12

(2012.9.3 受付)

SHINKANSEN TUNNEL DISASTER EARTHQUAKE OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU, 2011 AND THEIR RESTORATION

Masaaki MATSUNUMA and Takashi SAITO

Some Shinkansen tunnels were damaged in the Earthquake off the Pacific Coast of Tohoku, 2011. The Fukushima Tunnel and the Shiga Tunnel were the most seriously damaged. The typical damage was deterioration of the central passage and track deformation.

As the primary restoration (emergency restoration), we carried out the backfill grouting under the concrete roadbed for the purpose of resuming Shinkansen operation earlier. The secondary restoration (full-fledged restoration) is the rock-bolting. As the result, the tunnel measurement showed that level irregularity calmed down.