# STUDY ON DAMAGE TO ROADBED OF RAILWAY MOUNTAIN TUNNEL CAUSED BY EARTHQUAKE IN 2011 AND SEISMIC RETROFIT OF TUNNEL

宮崎 真弥1・水野 光一朗1・木村 博憲2・鈴木 尊3

Shinya MIYAZAKI<sup>1</sup>, Koichiro MIZUNO<sup>1</sup>, Hironori KIMURA<sup>2</sup>, Takashi SUZUKI<sup>3</sup>

This paper outlines seismic damage to Shinkansen tunnels caused by earthquake in 2011 and seismic retrofit to prevent heavy damage to mountain tunnels.

Some tunnels had suffered seismic damage from earthquake on March, 2011. Although the earthquake caused large-scale damage to structures, JR East's tunnels did not suffer fatal damage. And, the damaged areas were confined to limited parts of each tunnel. The most typical damge was heaving of roadbed.

Through detailed investigation of tunnels and ground properties around tunnels, authors confirmed the cause of the seismic damage. Considering the structural properties of damaged tunnels, the roadbed structure was weak compared to the structure of lining. And, from the consideration about ground condition, we believe that the heaving was caused by the geological and structural weakness, comparing with the properties where damage was not observed.

Although the damage was not fatal, JR East needed to prevent similar damage in preparation of another strong earthquake in the future. With knowledge obtained from the detailed analysis, the authors determined tunnels requiring seiscmic retrofit to roadbed from among existing tunnels in JR East's area. Futhermore, reffering to the damage analysis, the principle idea of seismic retrofit to roadbed of tunnels is considered to be integration of tunnel roadbed by installation of rockbolts.

Key Words : seismic damage, seismic retrofit, roadbed, heaving, railway structure, tunnel, earthquake

# 1. はじめに

2011年3月11日に発生した 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<sup>1)</sup>.本稿では被害を受けたトンネルのうち郡山・ 福島間に位置する福島トンネル(図-1)の路盤部の被害 状況と原因,復旧の概要,および,現在計画している新 幹線トンネルの路盤部の耐震対策について報告する.

### 2. 被害概要

### (1) トンネル諸元

 自石蔵王 福島 (震央から153km) 新自河 都山 新自河

図-1 被害トンネルの位置

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.図-2に示すように被害 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ル工法、底設導

| キーワード:鉄道,トンネル,地震,耐震,路盤隆起 |             |   |
|--------------------------|-------------|---|
| 1正会員                     | 東日本旅客鉄道株式会社 | 構造技術センター East Japan Railway Company (E-mail:shinya-miyazaki@jreast.co.jp) |
| 2正会員                     | 東日本旅客鉄道株式会社 | 鉄道事業本部 設備部 East Japan Railway Company                                     |
| 3正会員                     | 東日本旅客鉄道株式会社 | 長野支社 長野土木技術センター JR East Consultants Company                               |



図-2 路盤部の被害位置

坑先進上部半断面工法で施工された. 被害箇所の支保工 はH175, ctcl.3m, 覆工厚は50cm, 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.

#### (2) 被害概要

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、地震による覆エコンクリートの崩 落やアーチ部および側壁部の顕著なひび割れは確認され なかった.路盤部の被害概要を図-2、3 に示す.

#### a) 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や底版損傷の被害を生じた.

当該箇所では、中央通路底面の排水溝の蓋やトンネル 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.

# b) 路盤部の隆起に伴う軌道変状

242k351m~242k511m 間において,軌道の変状が生じた.当該区間の水準測量による軌道の高さの測定結果 (以下,高低データ)を図-4,5 に示す.図中,横軸が キロ程,縦軸が 242k297m を基準とした水準測量による 軌道の相対的な高さを示す.

高低データから、下り線は 242k447m 付近、上り線は 242k400m 付近を中心に前後の軌道が隆起している. ま



図-3 路盤部の被害概要



た,下り線の高低データの結果からは,左右レールの高 低差である水準変位量は最大で 67mm であった.これは, 中央通路側が側壁側に比べ,相対的に高くなっているこ

# とを示している.

# c) トンネル内空断面

路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた区間は,建築限 界の確認のため,図-6に示すようにトンネル断面測定 器の計測結果(以下,断面データ)を用いて,SL.付近 の内空断面幅の確認を行った.

財産図上の SL付近の内空断面幅は 9,600mm であるが, 施工時には施工余裕を考慮し,大きめな断面で施工され るのが一般的である.このため,本来であれば,被災前 の断面データと比較すべきである.しかしながら,被災 前の断面データがなかったため,軌道の隆起が相対的に 小さい箇所と比較することとした.

その結果,242k332m 付近の軌道の隆起が相対的に小 さい箇所と242k447m 付近の下り線の軌道の水準変位が 最大となった箇所の S.L.付近の内空断面幅では175mm 縮小が確認された.

# d) コア削孔による路盤部の調査

路盤部の隆起に伴い,路盤コンクリートとりょう盤コ ンクリートとの打継ぎ目,あるいは、りょう盤コンクリ ートと地山との間に空隙が生じたことが想定された. そ こで、コア削孔( $\phi$ 100)による空隙調査を行った. 図-7にコア削孔による調査位置を示す.

コア削孔による調査は、下り線軌道の水準変位が最大 となった242k437m付近および242k442m付近、上り線につ いても同様に242k407m付近の3地点とした.それぞれの 地点において、中央通路側と側壁側の2箇所の計6本の コア削孔を行った.

なお, コア削孔による調査を行った3地点とも, 財産 図上の路盤コンクリート厚は200mm, りょう盤コンク リート厚は300mmである.

242k437m 付近の下り線のコア削孔の結果を図-8 に示 す.中央通路側のコア削孔の結果,路盤面からの深さ 460mmの位置で 50mm程度の空隙が確認された.さらに コンクリートは,その先も深さ方向に 610mm にわたっ て続き,りょう盤コンクリートと地山との空隙は 80mm であった.一方,側壁側については,路盤面から 480mm の深さまでコンクリートコアが得られ,りょう 盤コンクリートと地山との間に空隙は確認されなかった.

242k442m付近の下り線のコア削孔結果を図-9に示す. 中央通路側では,路盤面から450mmの位置で50mmの空 隙が確認された.その後400mmコンクリートが続き地山 に達した. 側壁側については,路盤面から約480mmの深 さまでコンクリートコアが得られ,りょう盤コンクリー トと地山との間に空隙は確認されなかった.

242k407m付近の上り線のコア削孔結果を図-10に示す. 中央通路側では,路盤面から深さ480mmの位置で50mm の空隙が確認された.さらにその下,深さ920mmまでコ ンクリートが確認されたが,地山との間に5mm程度の空















隙が確認された(図-10). 側壁側については,路盤面から440mmの深さまでコンクリートコアが得られ,りょう盤コンクリートと地山との間に空隙は確認されなかった.

# 3. 被害原因の推定

被害箇所の調査の結果,以下の特徴があった.

### (1) 地質

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,図-2 で示すように泥岩であり, 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.

# (2) 構造

図-2 より,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ことがわかる. 242k497m より終点方のインバート区間は,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.

#### (3) 既往変状

被害を受けた区間の覆工面には東北地方太平洋沖地震 の以前より、軸方向のひびわれが存在し既往変状が発生 していた.被害を受けた区間はひびわれ数が相対的に多 い状況であった.

以上により、被害原因を推定すると、今回被害を生じ た区間は、被害を生じなかった区間と比較し、地山の強 度が弱い地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.

# 4. 復旧概要

# (1) 復旧の方針

早期の復旧を目指し、営業線運転再開までに行う応急 工事と運転再開後に行う本復旧工事に区分することとし た.復旧方針として、応急復旧工事は、りょう盤コンク リートの下部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を主な工種とした.本復旧工事は、 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 打設を主な工種とした.

#### (2) 応急復旧工事

福島トンネルの被害に対する応急復旧の主な内容を以



図-11 1次充填後のコア削孔による確認結果



図-12 セメントミルクの充填状況(242k472m)



図-13 コア削孔によるセメントミルク充填確認(242k442m)



図-14 路盤コンクリートはつり範囲

下に示す.

# 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.セメントミルク の充填は,コア削孔調査時の孔( $\phi$ 100mm, 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.路盤部の空隙を充填することは,軌道を支持す る上で最も重要と判断し,運転再開までに確実に実施す ることが求められ,充填状況の確認を徹底した.

 1次充填量は約 9.8m<sup>3</sup>であり、コア削孔(φ 50mm, ctc5.0m)により充填状況の確認を行った.1次充填後の
充填状況の確認結果を図-11 に示す.事前に確認されて
いた空隙へセメントミルクは充填されたが、充填確認の ○……
コア削孔で、空隙が確認された箇所については2次充填

# c) 路盤コンクリート面のはつりによる盤下げ

当初,路盤部の隆起に伴う軌道変位については,軌道 の応急復旧工事として,スラブ盤の置換え,CAモルタ ルの打換え,軌道パッド調整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.しかしながら, 開通後の作業量が多くなるため,応急復旧工事の段階で, 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.

検討の結果,図-14 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,CA モルタル厚 50mmの場合,600mm,深さ 30mmの範囲で路盤コンクリート面をはつり,盤下げを 行った.

# d) 計測監視

路盤部および側壁部へのロックボルトを打設する本復 旧工事が終了するまでの間,内空断面計測と路盤コンク リートの水準測量による監視を行うこととした.

### (3) 本復旧工事

本復旧工事は、242k352m~242k507m 間の路盤部およ び側壁部へ図-15 に示すようにロックボルトの打設を行 うこととした. ロックボルトの仕様は、路盤部、側壁部 ともに図-16 に示す φ = 32mm、長さ4m とし、作業性









図-17 路盤部のロックボルトの打設状況

を考慮して自穿孔タイプとした.

路盤部の打設は、上下線のスラブ軌道の両側に各2本 とし、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.路盤部のロックボルトの打設状況を図 -17に示す.側壁部の打設は、支保工間隔の倍の間隔と し、SL.より下側に千鳥配置で2段設置した.

# 4. 路盤部の今後の耐震対策

# (1) 耐震対策の基本的な考え方

福島トンネル等の東北地方太平洋沖地震で被害を受け たトンネル<sup>1</sup>の被害原因の推定から、ここでは今後のト ンネルの路盤部の耐震対策の基本的な考え方を示す.被 害を受けたトンネルでは、以下の条件が該当していた.

①地質や地層構造の条件が悪い区間

②構造上の特徴がある区間

③既往変状が発生している区間

これらの条件より,①は,複雑な地質・地層構造や,施工時に切羽の崩落,多量の湧水等の難航した箇所を想 定している.②は、りょう盤コンクリートまたは、東北 地方太平洋沖地震で同じく被害を受けた志賀トンネル<sup>10</sup> の条件から、半径の大きいインバートコンクリート構造 や、巻厚、支保工の種別・間隔の支保構造の急変箇所を 想定している.また、③は、覆工のひび割れ状況や覆工 背面の空洞状況、東北地方太平洋沖地震で軽微な軌道変 位が発生した箇所を想定している.

### (2) 耐震対策の範囲の抽出

対策範囲は、上記の路盤部の耐震対策の基本的な考え 方より、①地質や地層構造の条件が悪い区間、②構造上 の特徴がある区間の特徴から範囲を絞り込み、さらに現 地調査や電磁波探査により③既往変状が発生している区 間を確認し、抽出することとした.

# (3) 耐震対策の工法の検討

対策工法は、東北地方太平洋沖地震での本復旧工事と 同様に路盤部や側壁部へのロックボルト対策を考えてい る.また、トンネル構造の安定を考慮し過去の耐震対策 <sup>0</sup>で行われた裏込注入工やアーチ部のロックボルトも、 必要により実施することを考えている.

曲線区間では、スラブコンクリートが中央通路側に偏 って設置されていることから、ロックボルトの打設箇所 が直線区間と比較し、狭隘になっていることや、また、 既設の設備の配置により、現在計画しているロックボル トの径や打設間隔では施工が困難な箇所があると想定さ れる.そのため、ロックボルトの径や打設間隔を変化さ せて、標準的なロックボルトの仕様と同等の効果が得ら れるように解析的な検討を行い、施工の仕様を検討して いる.

# 5. おわりに

東北地方太平洋沖地震で被害を受けたトンネルの被害 原因を推定した.今後のトンネル路盤部の耐震対策につ いては、東北地方太平洋沖地震で被害を受けた箇所の類 似箇所を対象として、被害箇所における復旧工事の内容 を参考に検討を進めている.施工に向けて様々な現場条 件を考慮し、対策工法の仕様を検討を行うことで、速や かな対策を実施することが可能となり、鉄道の安全輸送 に貢献できると考えている.

#### 参考文献

- 東日本旅客鉄道株式会社:JR東日本技報(SED),特 集「東北太平洋沖地震と鉄道構造物」No.37, pp.67-73, pp.125-129, 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
- 4) 松沼政明,齋藤貴: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,第22回トンネル工学研 究発表会,2012.10
- 5) 松沼政明,齋藤貴: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,土木学会第67回年次学 術講演会,2012.9
- 小野桂寿,森山智明,石川健一:鉄道トンネルにお ける耐震対策,土木学会第64回年次学術講演会, 2009.9
- 7) 宮崎真弥,鈴木尊,金子建児,橘内真太郎:東北地 方太平洋沖地震における新幹線トンネルの被害原 因と今後の耐震対策について、土木学会第73回年次 学術講演会、2018.8