

既設鉄道トンネルにおける耐震対策

小野 桂寿¹・森山 智明¹・石川 健一²

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事部 構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)
E-mail:keiji-ono@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) 水戸土木技術センター (〒310-0015 茨城県水戸市宮町1-1-20)

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トンネルが覆工崩落等の大規模な被害を受けた。鉄道輸送の安全性を確保するために、中越地震と同程度の地震に耐え得る耐震対策を実施し、トンネルの安全性の向上を図ることとした。

耐震対策を実施する箇所は、新潟県中越地震の被害分析の結果や現地調査等により抽出した。耐震対策工は、「裏込め注入工」、「ロックボルト工」、「内面補強工」の3工法とした。対策の実施にあたっては、優先順位の高い新幹線トンネルについて対策をすることとした。

今回の耐震対策の主要な工法であるロックボルトによる対策は、新幹線トンネル内の夜間の限られた作業時間帯での施工になる。そのため、ロックボルトの脱落防止対策をはじめ施工管理を徹底した。

Key Words : existing railway tunnel, seismic retrofit, lock bolt

1. はじめに

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震により、上越新幹線魚沼トンネルや妙見トンネル等、震源断層に近接したトンネルが覆工崩落等の大規模な被害を受けた¹⁾(写真-1)。鉄道輸送の安全性を確保するためには、発生した被害実態の把握、変状原因の調査および分析を行い、今後の対策に反映させる必要がある。そこで「新潟県中越地震鉄道トンネル被害原因調査等検討会」(以下:検討会)を立ち上げ、変状原因について調査、分析し、今後の鉄道トンネルにおける地震に対する補強の必要性、方法等について検討を行ってきた。

検討の結果、中越地震と同程度の地震が発生した場合に、トンネル内部での覆工コンクリート崩落等の被害を防止することを目的として、鉄道トンネルの耐震対策を実施することとした。

本稿では、耐震対策を実施する対象箇所の選定方法や、耐震対策の概要と、主要な耐震対策工であるロックボルトによる対策について報告する。

2. 被害原因の推定と耐震対策箇所の抽出

(1) 被害原因の推定

新潟県中越地震は内陸型地震であり、覆工コンクリー

トの崩落など、大きな被害は、震源断層に近い上越新幹線の2トンネルと在来線の1トンネルに集中した。

検討会では現地の被害状況を詳細に調査した結果、既往の知見や地震情報等をふまえ、被害の著しい箇所は以下のような特徴を併せ持っていることがわかった。

- ① 想定震源断層より平面距離で概ね5km以内に位置している。(距離条件)
- ② 緩み範囲が大きいクラック帯の交差箇所や低強度の地山箇所であり、地質上の問題が存在した箇所である。(地質条件)
- ③ クラウン部付近の覆工背面に空洞が存在しており、トンネルの構造上問題のある箇所である。(構造条件)

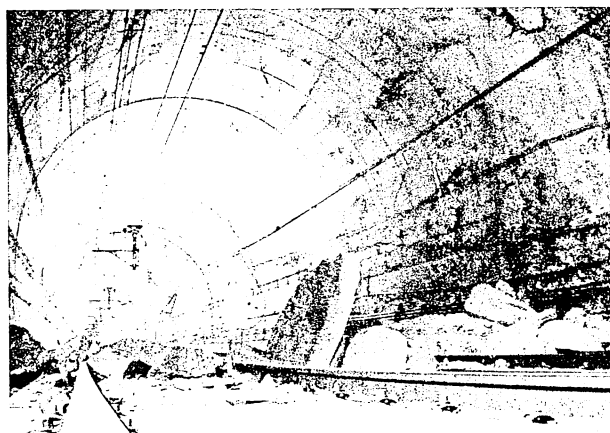


写真-1 魚沼トンネルアーチ部崩落

以上から、検討会におけるトンネル耐震対策の基本的な方向性として、新潟県中越地震と同程度の規模の地震が発生した場合に、トンネル内部での覆工コンクリート崩落等の大規模な被害を防止することを目的とした。

(2) 耐震対策箇所の抽出

2. (1) 被害原因の推定で示した条件を満たすトンネルでは、地震に対する補強が必要であるとして、耐震対策を実施することとした。具体的な対策箇所の選定方法を以下に示す。

なお、耐震対策の実施にあたっては、優先順位の高い新幹線トンネルについて対策をすることとした。

a) 1次抽出

地震発生の可能性が高いと考えられる活断層より、平面距離で5km以内に入るトンネルを抽出した。地震発生の可能性が高いと考えられる活断層は、確実度Ⅰ（活断層であることが確実なもの）、かつ活動度B（平均変位速度 0.1m/千年以上～1.0m/千年未満）²⁾以上の断層とした（図-1）。

b) 2次抽出

1次抽出されたトンネルにおいて、地山不良区間やトンネルの構造に問題がある区間を抽出する。また、地山が良区間であっても、施工時に切羽崩壊や異常出水等のトラブルが発生した区間、および、現在のトンネルにひびわれ等の既往変状が発生している区間については、地震時に損傷する可能性が高いとして、耐震対策を検討す

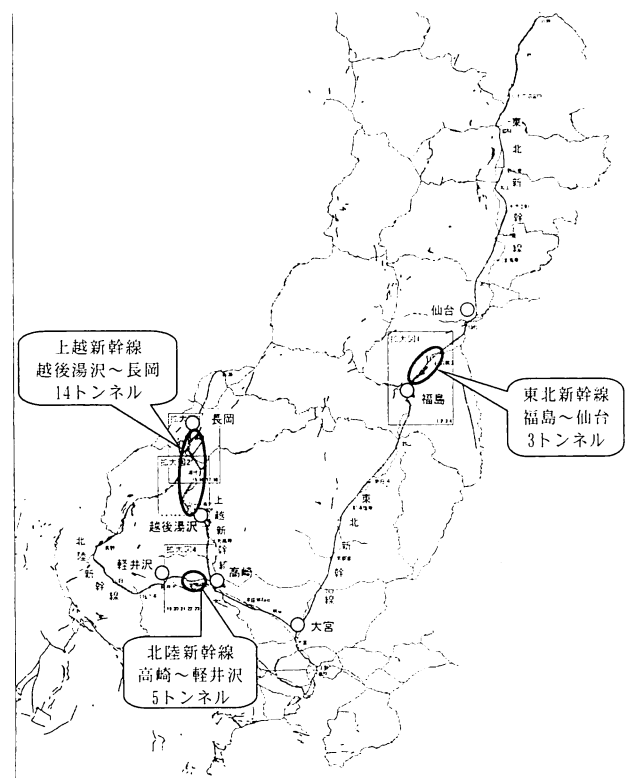


図-1 活断層に近接するトンネルの抽出（1次抽出）

る区間に加えた。

上記の抽出条件により、抽出された耐震対策を検討する区間について現地調査を実施し、最終的に対策箇所と対策内容を判断した³⁾。

3. トンネル耐震対策工の概要

耐震対策工は、「裏込め注入工」、「ロックボルト工」、「内面对策工」の3工法とした。耐震対策工の概要について以下に述べる。

(1) 裏込め注入工

a) 対策の目的

トンネル背面に空洞が存在する場合、地山が大きく変形した際に覆工に局所的な変形が生じ、破壊に至る恐れがある。そこで、トンネルの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を目的とした。

b) 対策箇所

2. (2) b) 2次抽出より抽出されたトンネルにおいて、電磁波探査を実施し、空洞が確認された範囲の中で、以下のいずれかに該当する区間は裏込め注入を実施することとした。

- ・現地調査により既往変状が確認された区間
- ・土被りが30m未満の区間
- ・覆工厚が設計厚の2/3未満の区間
- ・地山対応覆工厚（地山の種別から定まる標準的な覆工厚をいう）が小さい区間

c) 対策の内容

該当区間の覆工背面の空洞に裏込め材を充填する。裏込め注入用の充填孔は、1断面あたり横断方向は天端部および左右60度の3箇所、軸方向は3m間隔を基本とし、空洞箇所に応じて、適宜充填孔を設けることとした。

充填材は、必要な箇所に対して限定的な充填が可能で、水があっても施工可能な可塑性裏込め材を採用した。

(2) ロックボルト工

a) 対策の目的

覆工に発生している既往変状が大規模な場合、地震時に覆工が大きな塊で落下する恐れがある。そこで、ロックボルトにより覆工を地山へ縫い付け、覆工と地山を一体化させることを目的とした。

b) 対策箇所

2. (2) b) 2次抽出より抽出されたトンネルにおいて、覆工に大規模な既往変状が発生している箇所とした。具体的には以下のいずれかに該当する区間に対して、ロッ

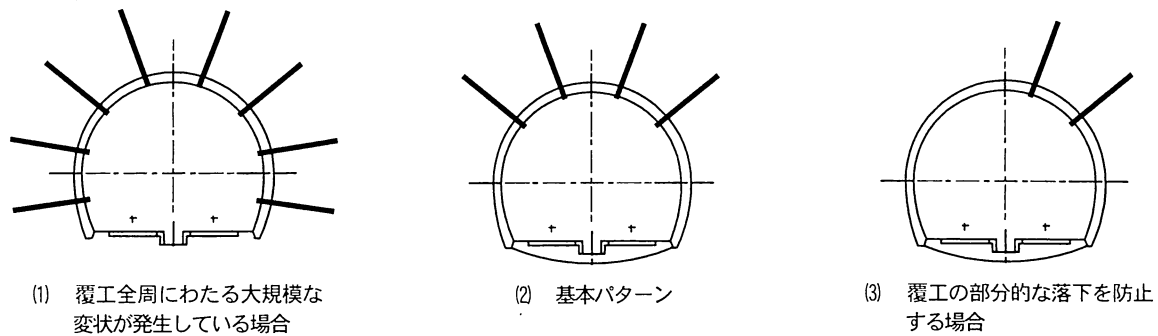


図-2 ロックボルト工対策概要図

クボルトを打設することとした。

- ・既往変状が複雑でアーチ全体にわたり発生しており、当て板工法や繊維シート工法では、地震時に想定される塊の落下を押える事が困難な箇所
- ・大きな閉合ひびわれが発生している箇所
- ・トンネル建設時の1施工ブロック長さ（概ね10m）以上にわたり、開口幅1mm以上のトンネル軸方向ひびわれが発生している箇所

c) 対策の内容

ロックボルトによる対策の概要図を図-2 に示す。覆工に打設するロックボルトの本数は、ロックボルト1本あたりの引き抜き耐力を考慮して、1断面あたりアーチ部片側2本ずつ、合計4本を基本的なパターンとした（図-2 (2)）。

上記に加えて、覆工全体にひびわれが複雑に入組んでいる場合は、トンネル全体の機能が低下していると考え、ロックボルトを覆工全周にわたって打設することとした（図-2 (1)）。

トンネルに発生している変状のうち、トンネル軸方向に1施工ブロック長さ以上に発生しているひびわれや、閉合ひびわれについては、覆工の部分的な落下を防止することを目的として、ロックボルトを部分的に打設することとした（図-2 (3)）。

(3) 内面対策工

a) 対策の目的

内面対策工は、設計値より覆工厚が小さい箇所や覆工変状箇所に対して覆工を内面から補修（補強）し、覆工の安全性を向上させることを目的とした。

b) 対策箇所

2. (2) b) 2次抽出より抽出されたトンネルにおいて、アーチ部より覆工片がはく落しそうな箇所、設計値より覆工厚さが小さい箇所等、覆工を内面から補修（補強）する必要のある箇所とした。

対策範囲は、変状の内容と規模により異なるため、各々の変状ごとに範囲を決定した。具体的な対策範囲は、次に示す箇所とした。

- ・覆工に建設時や補修時の不具合等により、覆工片のはく離、はく落を起こしそうな箇所
- ・覆工厚が設計厚の2/3未満の箇所
- ・地山対応覆工厚（地山の種別から定まる標準的な覆工厚をいう）が小さい箇所

c) 対策の内容

地震時に覆工片がはく離、はく落が想定される箇所や、覆工厚さが少ない箇所については、当該箇所にアラミド製の繊維シートを設置することとした。ただし、漏水が発生している箇所については、鋼材やFRP等による当て板を設置することとした。

また、覆工背面に空洞が確認された箇所については、裏込め注入も併せて実施することとした。

4 新幹線トンネル耐震対策の施工概要

(1) トンネル耐震対策で使用する施工機械

トンネル耐震対策工事は、夜間の短時間の作業時間帯で効率的に施工し、所定時間内で作業を完了させることが絶対条件である。そのため、モーターカーや施工機械等のトラブルにより、新幹線の運行の阻害や、傷害事故を発生させないために、施工専用の機械を新たに設計、製作した。

本施工機械の総数は、モーターカー12両、作業用台車44両という大きな編成である。そのため、施工機械の留置、点検整備や資材積込のために、トンネル耐震対策工事を実施するエリア内にある既存の新幹線の保守用基地の構内配線を延伸して、施工機械を留置できるようにした。

施工機械編成を以下に示す。

a) 作業用足場編成（編成 1）

裏込め注入のためのトンネル覆工の削孔、繊維シート貼り付け、ロックボルトの緊張作業用で、広い作業床を必要とする工事用編成である。リフト付の足場台車を複数連結し、前後に作業台リフト付モーターカーを連結して牽引する編成とした。実際の施工時には、前後に作業台リフト付モーターカーを連結して牽引する編成とし、トン

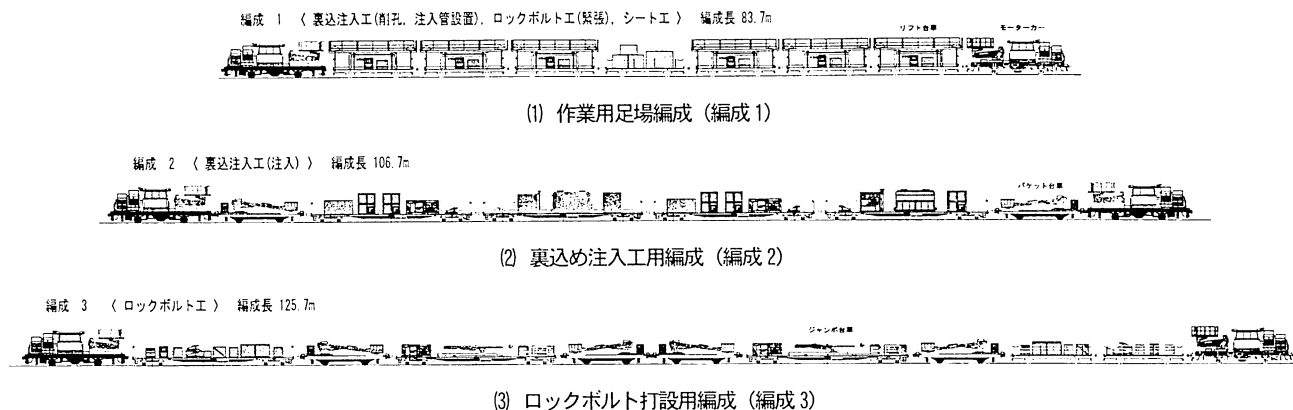


図-3 トンネル耐震対策における施工機械編成

ネル内で編成を分割し、分割後の編成がそれぞれ独立して施工できるようにした(図-3(1))。

b) 裏込め注入工用編成(編成 2)

裏込め注入工の注入用の編成で、注入機材を載せる平台車2台、注入孔用作業台リフト付モーターカー、確認孔用スライドバスケット付台車により編成されている。実際の施工時には、前後に作業台リフト付モーターカーを連結して牽引する編成とし、トンネル内で編成を分割し、分割後の編成がそれぞれ独立して施工できるようにした(図-3(2))。

c) ロックボルト打設用編成(編成 3)

ロックボルト工の削孔(挿入)、および注入用の編成で、注入機材を載せる平台車、ロックボルト削孔機(ドリルジャンボ)付台車、スライドバスケット付台車2台により編成されている。実際の施工時には、前後に作業台リフト付モーターカーを連結して牽引する編成とし、トンネル内で編成を分割し、分割後の編成がそれぞれ独立して施工できるようにした(図-3(3))。

以上のように、各編成に作業台リフト付モーターカーを前後に連結した編成とすることで、分割と併合の手間にかかるが、保守基地からトンネルまでの移動が1編成で済むため、複数編成による移動に比べて、実作業時間を多く取れる利点がある。

(2) ロックボルトによる耐震対策

a) ロックボルトの仕様

ロックボルトの打設は、新幹線が営業運転を行っていない夜間の作業時間による施工となる。夜間の作業時間は、実作業時間が1.5時間程度と施工条件が厳しい。そこで、削孔とロックボルトの挿入を同時に行える、自穿孔ロックボルト(R32)を使用して、ロックボルトの打設時間を短縮することにした。

ロックボルトは、地山への定着長を3m以上とし、覆工厚さ(最大で90cm程度)を考慮して全長を4mとした。

なお、使用するロックボルトは全面定着方式とした。

ロックボルトは、長期耐久性の観点からトンネル覆工面側から1.5m範囲で、塗布による常温亜鉛めっきを施すこととした。また、覆工面から突出するボルトとナット、およびベアリングプレートについても、同様に防錆対策を実施することとした。

b) ロックボルトの品質管理

ロックボルトの品質管理事項を以下に示す。

・ 定着材の充填確認

ロックボルトの定着材の充填確認は、覆工面の口元からの定着材のリーク(漏出)を確認する。

・ 引抜き試験

ロックボルトの引抜き試験は、対策範囲のトンネル延長10m当り100kN/本以上の引抜き耐力を有していることを確認する。

・ ナットの締めつけ確認

引抜き試験を実施しない箇所については、ロックボルトの確実な定着の確認として、全数50kN/本以上のプレストレスを導入することとした。なお、プレストレスはナットの締めつけトルクにより管理することで、ナットの締めつけについても管理する。

c) ロックボルトのアーチ部分の打設位置

既設の新幹線トンネルのアーチ部分には、電気設備等の添架物が数多くあり、ロックボルトの打設位置を慎重に決める必要があった。

また、ロックボルトの4本もしくは8本のパターンボルト区間においては、縦断方向は支保工間隔の打設としている。しかし、トンネルによっては支保工間隔が1mに満たない箇所も存在し、既変状を避けてロックボルトを打設すると、トンネル横断方向に対して、トンネル縦断方向のロックボルトの打設ピッチが密になることがわかった。

以上の課題を解決すべく、実際のトンネルで添架物の位置とロックボルトの打設位置を調査し、ロックボルト

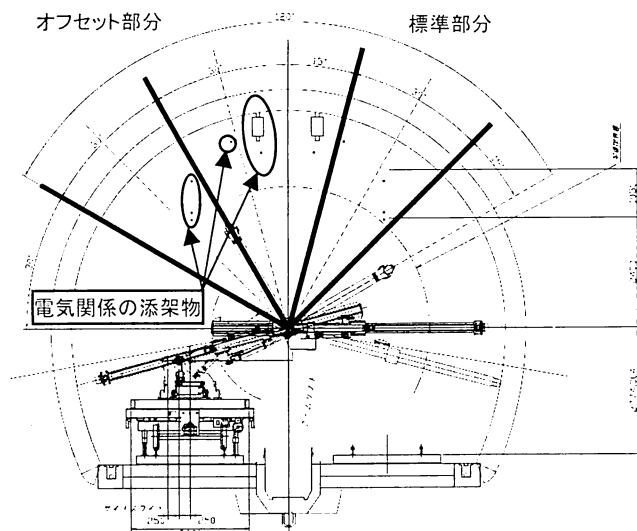


図-4 アーチ部のロックボルトの千鳥配置

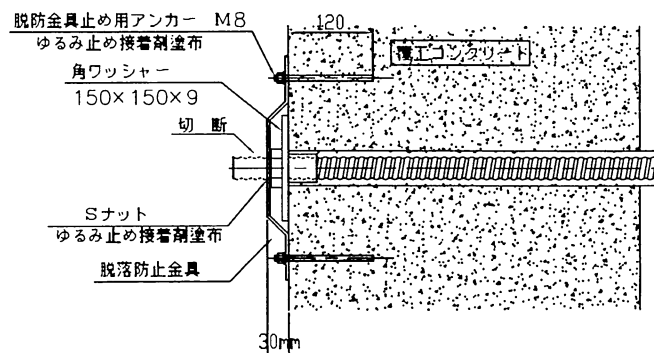


図-5 ロックボルト脱落防止対策

を打設する位置を決定した。なお、アーチ部分のロックボルトは、1断面ごとに打設位置をずらす千鳥配置とした（図-4、写真-2）。

d) 脱落防止対策

自穿孔ロックボルトは、穿孔、ロックボルト挿入、定着材の注入の順で行う。しかし、限られた夜間の作業時間内で、効率的に施工を進めるためには、穿孔と定着材の注入を別パーティーで行うことも想定される。また、営業線下の新幹線トンネル内において、ロックボルト本体や付属物の落下により、列車の安全運行を脅かすことはあってはならない。

そこで、ロックボルトの挿入直後から、注入材注入後の定着強度が発現するまでの間に、ロックボルトを鋼材とアンカーボルトにより仮留めする脱落防止対策を実施することにした。ロックボルトの脱落防止対策を図-5に示す。

5. おわりに

新幹線のトンネル耐震対策工事は、2008年度から着手し、現在施工中である。

新幹線トンネル耐震対策工事は、毎月の施工日数が同じではなく、電気や軌道等の他の保守工事との競合を避けて施工する。つまり、トンネル耐震対策の遂行には、柔軟な施工体制や効率的な施工が必須条件である。

今後、施工機械の編成や、施工サイクルを工夫していくことで、安全かつ効率的な施工体系を構築していく所存である。

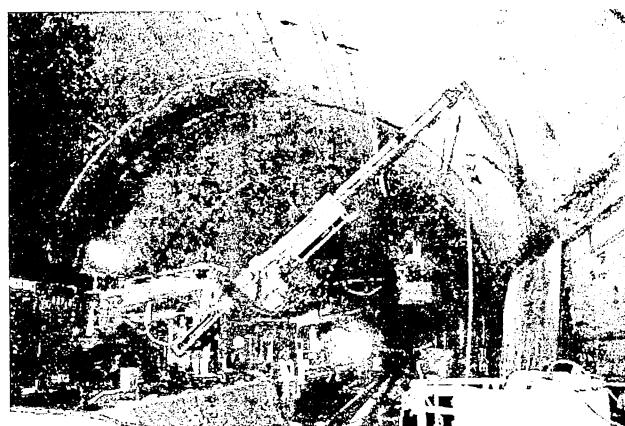


写真-2 ロックボルト打設状況

参考文献

- 1) 清水 満, 末松 史朗, 鈴木 尊, 安東 豊弘, 栗栖 基彰: 新潟県中越地震による鉄道トンネルの被害, トンネル工学報告集, 第15巻, pp.257-264, 2005.
- 2) 東京大学出版会: 「新編」日本の活断層 分布図と資料 活断層研究会編, pp.9-14, 1991.
- 3) 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回年次学術講演会講演概要集, IV-229, pp.455-456, 2009.

SEISMIC RETROFIT EXISTING RAILWAY TUNNEL

Keiji ONO, Tomoaki MORIYAMA, and Kenichi ISHIKAWA

The tunnel of Jouetsu Shinkansen was struck by the Mid Niigata Prefecture Earthquake that had been generated in October, 2004. Our company executed seismic retrofit in the Shinkansen tunnel.

It was assumed that seismic retrofit was able to endure the large-scale earthquake was executed as a result of the examination, and the improvement of the safety of the tunnel was attempted. The seismic retrofit assumed three industrial methods "Back-fill grouting", "Lock bolt", and "Inside reinforcement". When seismic retrofits were executed, it was assumed that measures of the Shinkansen tunnel where the priority level was high were done.