

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信 情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

トンネルの耐震技術

地中にあるトンネルは、地震被害を受けにくい構造物です。しかし、最近の大規模地震では比較的大きな被害を受けたトンネルもあり、復旧に多大な労力と時間を要した例もいくつか見られます。ここでは、代表的な3タイプのトンネル、すなわち、開削トンネル、シールドトンネル、山岳トンネルに分けて、これまでの鉄道トンネルの地震被害例、既設トンネルの耐震補強法、耐震設計法、最近の耐震技術に関する鉄道総研の研究成果の一端を紹介します。

はじめに

地盤に囲まれたトンネルは、橋りょうや盛土などに比べて地震被害を受けにくい構造物です。実際、2011年東日本大震災ではトンネルの被害は軽微でした。しかし、1995年兵庫県南部地震で開削トンネルの一部で甚大な被害が生じ、2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震で比較的多くの山岳トンネルに被害が生じるなど、トンネルの耐震性が問題となったこともあります。

トンネル内は狭く長い空間なので、地震被害が生じると復旧に長い期間と高い費用を要します。また、地下鉄はもちろんのこと新幹線などでは路線延長に占めるトンネルの割合が高いことから、適切な耐震性評価と場合によ

ては耐震性の向上が求められています。

ここでは、図1¹⁾に示す開削、シールド、山岳の3タイプに分けて、地震被害例や耐震補強法、耐震設計法、鉄道総研の研究成果の一端を紹介します。

トンネルの被害例

開削トンネル

開削トンネルで著しい地震被害が生じたのは、兵庫県南部地震による地下鉄の中柱と側壁部でした²⁾。神戸高速鉄道大開駅(図2)が代表的なもので、中柱のせん断破壊とともにトンネルが崩壊し、地上から掘削して復旧したため開通まで約7ヶ月を要しました。この事例が鉄道開削トンネルにおける唯一の甚大な地震被害例で、これを契機として、開削トンネルの耐震設計法の



小島 芳之
Yoshiyuki Kojima
構造物技術研究部
トンネル研究室
室長
【専門分野】トンネル工
学、土木地質学



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員
【専門分野】トンネル工
学、地盤工学



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
構造物技術研究部
耐震構造研究室
室長
【専門分野】地震工学

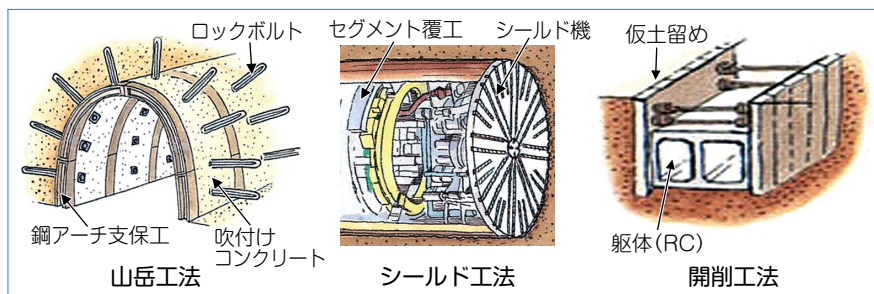


図1 トンネルの代表的な施工方法(文献¹⁾を加筆修正)



図2 兵庫県南部地震における大開駅の被害状況²⁾



鋼板巻立て補強

添え梁補強

図4 開削トンネル中柱の耐震補強例(東京地下鉄(株)提供)

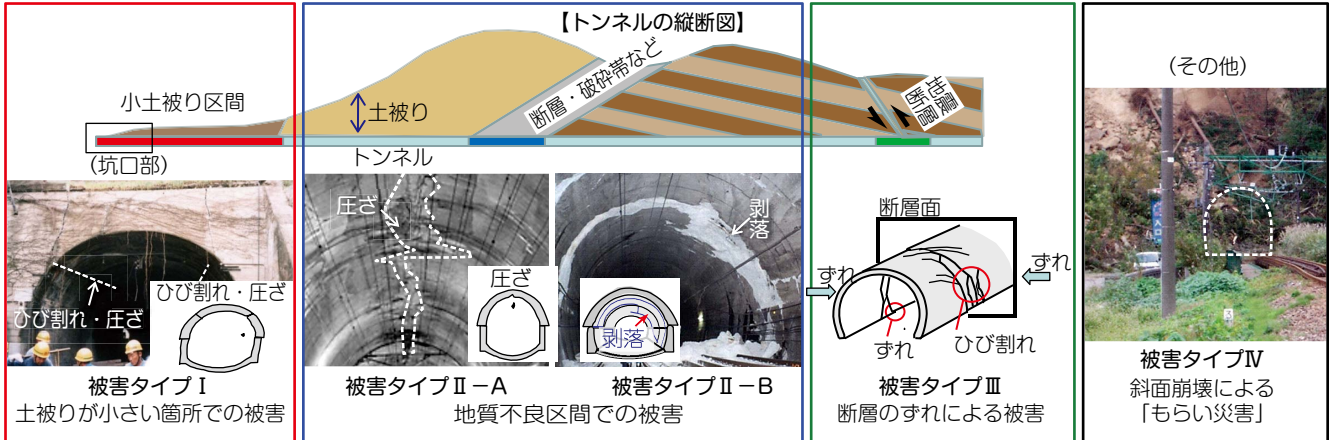


図3 山岳トンネルの地震被害タイプ

見直しと耐震補強が実施されました。
シールドトンネル

シールドトンネルでは、深刻な地震被害が生じたことはありません。これは、トンネル形状が力学的に有利な円形で、セグメントを組み立てた変形に追従できる覆工構造であるためです。兵庫県南部地震では、鉄道シールドトンネルの被害は皆無でした。ほかのインフラのシールドトンネルも、二次覆工コンクリートのひび割れ、リング間ボルトの破断、鉄筋コンクリートセグメントの被りコンクリートの剥落、立坑側壁コンクリートのひび割れなどの軽微な被害で済みました。

山岳トンネル

山岳トンネルは岩盤中に建設されているので、地表部で深刻な被害が生じていても、無被害あるいは復旧に時間を要さない軽微な被害で済むことがほとんどです。しかし、地震規模が大きく震源距離が短い場合で、地形・地質条件に問題があり、トンネル構造などに特殊要因(背面空洞などの構造欠陥、ひび

割れなどの変状)が介在する場合は、運転再開までに長い期間を要する被害を受けることがあります。例えば、新潟県中越地震では、上越新幹線魚沼トンネルにおける覆工コンクリートの大規模な崩落と路盤隆起に対する復旧に2ヶ月を要し、新幹線の運転再開時期を左右したことは記憶に新しいことです。

山岳トンネルの地震被害は、図3に示すような被害タイプI~IVの4種類に分類できます。タイプIは、土被りの小さい坑口部で見られる被害で、アーチ肩部のひび割れ・圧ざ(大きな曲げモーメントにより生じた圧縮破壊)が特徴的です。タイプIIは、トンネルが断層や破碎帯のような地質不良区間で見られる被害で、トンネル上端部に圧ざが生じる形態(タイプII-A)、輪切り方向のひび割れや大規模な剥落を伴う形態(タイプII-B)などがあります。また、活断層がずれるタイプIIIもまれながらあります。さらに、斜面崩壊による「もらい災害」であるタイプIVは、坑口部で多く生じる被害形態です。

既設トンネルの耐震補強法

開削トンネル

前述の兵庫県南部地震の被害を受けて、1995年7月26日鉄道施設耐震構造検討委員会の「既存の鉄道構造物に係わる耐震補強の緊急措置について」の基本方針に基づき「大規模な地震に対しても構造物が崩壊しない」よう耐震補強を行うこととなり、鉄筋コンクリート構造の中柱に関する耐震診断と鋼板巻立てや添え梁などによる中柱の補強(図4)が行われてきました。補強工事は限られたトンネルの空間内で行うので、苦勞が伴います。

シールドトンネル

シールドトンネルでは、常時状態で構造耐力に影響を及ぼす変状がみられる場合に対策が行われており、これが耐震性確保につながると考えられます。

山岳トンネル

山岳トンネルでも、シールドトンネルと同様に常時の変状対策を基本とすることで耐震性の確保につながりますが、事前に地震対策が講じられた例も

あります。旧国鉄時代に実施された東海沖地震対策(図5)³⁾や、新潟県中越地震の被害を受けて平成17年度以降に実施された新幹線トンネル活断層対策が挙げられます。地震対策工としては、一般に表1のようなものがあります。

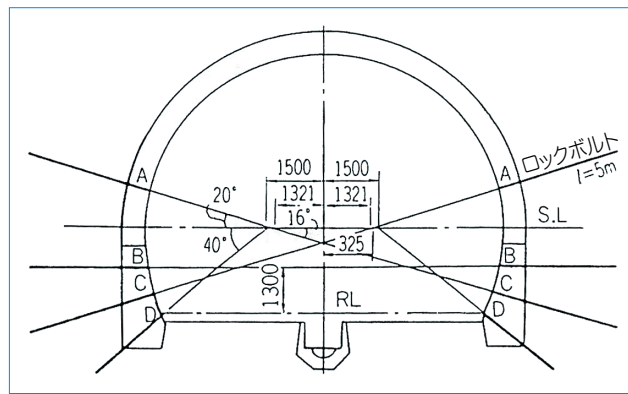


図5 山岳トンネルの地震対策例(ロックボルト)³⁾

耐震設計法

鉄道トンネルの耐震設計法は、橋りょうなどのほかの鉄道構造物とともに「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」(2012年, 鉄道総研)に示されています。ただし、耐震設計の位置付けは各工法の特성에応じて多少異なります。

開削トンネル

開削トンネルでは、前述した兵庫県南部地震の被災実績を踏まえてL1,L2地震動を考慮した耐震設計法が定められました(「鉄道構造物等設計標準・同解説(開削トンネル)」(2001年))。検討は一般に応答変位法により行われており、応答速度スペクトル法や地盤応答解析などにより求めた地震時の地盤変位を地盤ばねを介して骨組解析モデルに入力することによりトンネルの構造計算を行います。現在、鉄道総研では、地震時も含めた性能照査型設計法に移行する改訂作業に着手したところです。

シールドトンネル

シールドトンネルでは、軟弱地盤や立坑との接合部、地質急変部などの場合に必要に応じて地震の影響を検討することになります。検討は一般に応答変位法によって行われ、検討方向は縦断方向が多く、中柱を有する場合などには横断方向の検討も行われます。

なお、設計法は、現在のところ「鉄道構造物等設計標準・同解説(シールドトンネル)」(1997年)に基づいて許容応力度法が一般的ですが、L2地震動を検討するために限界状態設計法が用いられた例もあります。2006年

表1 山岳トンネルの耐震補強工法

補強区間	対策工
①覆工背面に空隙のある区間 (特に、坑口部や地質不良箇所)	裏込注入
②不安定な斜面中の坑口部 (特に、斜面災害のおそれある場合)	ロックボルト、内巻または内面補強(繊維シート、鋼板など)、インバート、抱きコンクリート、斜面安定工
	トンネルの延伸、覆い工、砂防堰堤など
③地質不良箇所(特に、既変状の場合)	ロックボルト、内巻または内面補強(繊維シート、鋼板など)、インバート

度に改訂された土木学会「トンネル標準示方書(シールドトンネル編)」では、限界状態設計法が併記され、L2地震動の検討に言及しています。今後、鉄道でも限界状態設計法を取り入れて性能照査型設計法に移行することが必要であると考えられます。

山岳トンネル

都市部(都市NATM)と一般の山岳部とで設計法が異なるのが現状です。

都市NATMの覆工は、限界状態設計法によって設計されています(「鉄道構造物等設計標準・同解説(都市部山岳工法)」(2002年))。通常は比較的硬い地盤に建設されるため、耐震性の照査が行われることは少ないのですが、地質が特に軟らかい場合、地盤剛性が急変する場合、偏圧斜面の場合は、応答変位法などによる耐震設計が行われます。

一方、一般の山岳トンネルの設計は、地山分類基準によって等級を決め、その等級毎に定められている標準設計を適用して設計を行う方法によるのが通例です。この方法は一般の山岳トン

ネルには合理的であり、今後も主流となるものと考えられます。通常、覆工は無筋コンクリート構造の化粧巻きで、耐震設計は行いません。ただし、地震の影響を受けやすい坑口部や断層、破砕帯などの地質不良区間では、インバートの設置、RCや繊維補強コンクリートの採用などにより耐震性を向上させる構造とします。しかし、山岳トンネルの耐震設計法は確立されていないのが現状です。今後、耐震設計を要する条件を明確にし、ほかの構造物の設計に近づける必要があると考えられます。

最近の研究成果

開削トンネルの免震

開削トンネルの補強は、中柱については前述の鋼板巻き補強などで的確に対処できます。しかし、地盤に接する側壁については片面の補強しかできず、合理的な補強が難しい状況でした。

そこで、地震時の地盤変位によるトンネルく体の応力増加に対して、く体の外側にポリマー材による免震層を

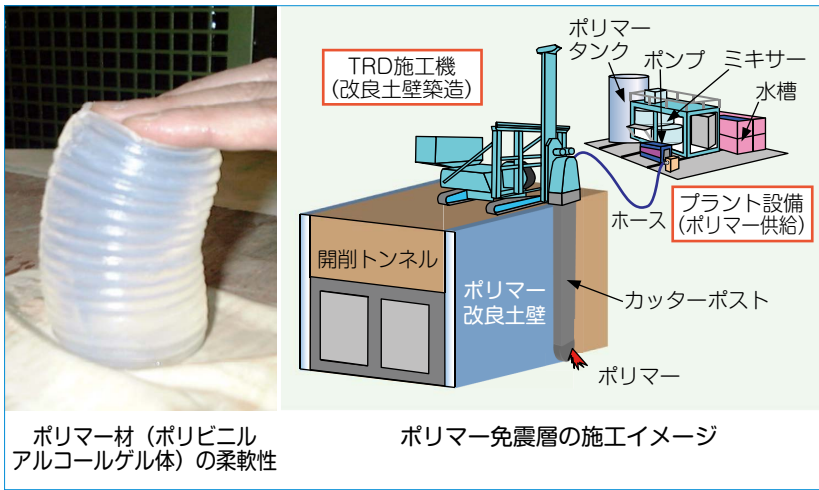


図6 開削トンネルの免震工法の概要⁴⁾

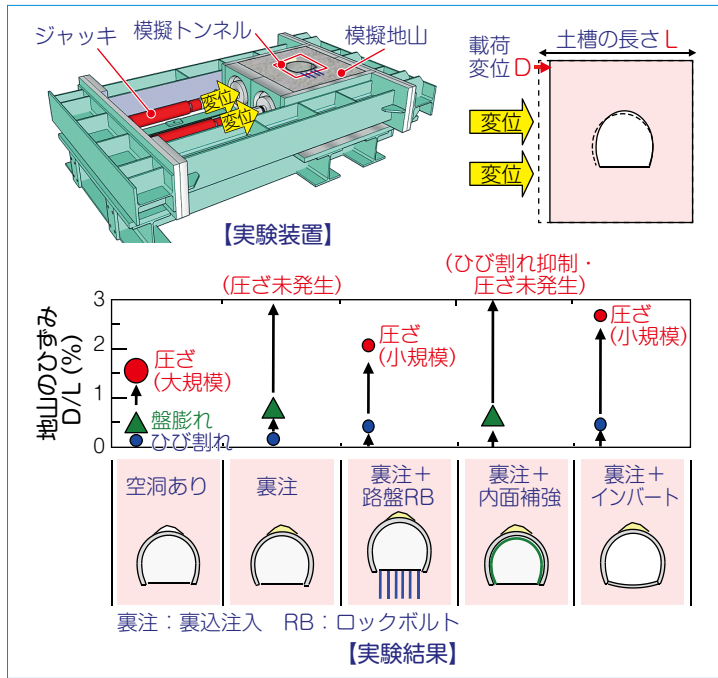


図7 模型実験における山岳トンネルの耐震性能の比較⁵⁾

設置する耐震対策工を提案しました(図6)⁴⁾。開発したポリマー材(ポリビニールアルコールゲル体)は、変形性、環境への適合性、耐久性に優れており、地盤変位の緩衝材(免震材)として十分な特性を有しています。ポリマー免震層の効果を地震応答解析や模型振動実験で検証した結果、ポリマー免震層と地盤の強度(Vs)比を1/100、免震層の厚さを40cmとした場合、側壁のせん断応力が約50%低減できました。本工法は、従来から地盤改良で用いられている連続横引き工法による施工が可能で、その他の一般的な地盤改良用施工機でもセメントミルクをポリ

マー材に代えるだけで施工できます。なお、地下鉄の現場を想定した試算を行ったところ、本工法の工費と工期は従来の片面鋼板補強工法に比べてともに約1/2であることを確認しています。**山岳トンネルの地震対策** 山岳トンネルの地震対策としては、裏込め注入、内面補強、路盤ロックボルト、インバートがあります。これらの工法は、従来から変状対策として用いられているものの、補強効果について定量的な検討が行われていませんでした。そこで、模型実験や数値解析によってその効果を比較してみました。図7⁵⁾は各種対策工の効果を比較し

たもので、覆工の圧ざと路盤隆起の観点から、各々の変状が初めて生じる地点のひずみを示したものです。なお、実験ではひずみ2%まで作用させましたが、これは相当大きな変形量です。裏込め注入を施工することにより、圧ざが発生しなくなります。地震時被害としては圧ざがよく見られますので、圧ざを抑制することができる裏込め注入は、最も優先して実施すべき対策工といえます。それに加えて、路盤ロックボルトやインバートを施工することにより、路盤隆起を防止できます。このような研究成果をもとに、鉄道総研では「事前対策工」と「震災復旧工」の2編からなる「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案)」(2010年)をまとめました。

おわりに

トンネルの地震被害例や耐震補強、耐震設計法、鉄道総研の研究成果を紹介しました。トンネルの耐震性は、開削、シールド、山岳の各々の特性を踏まえつつ共通の観点で評価することが必要であり、この視点に立って耐震技術を確立することが求められています。

RRR

文献

- 1) 土木学会：ものしり博士のドボク教室 <http://www.jsce.or.jp/contents/hakase/index.html>, 1999
- 2) 鉄道総研：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告，特別第4号，p.158, 1996
- 3) 吉川恵也，朝倉俊弘，小倉隆雄：既設トンネルの耐震健全度評価，トンネルと地下，Vol.21，No.2，pp.23-27, 1990
- 4) 室野剛隆，桐生郷史，籠山勝，小林正介：ポリマー材を用いた開削トンネルの免震工法，土木学会地震工学論文集，Vol.28, 2005
- 5) 野城一栄，嶋本敬介，小島芳之：地質不良区間における既設山岳トンネルの地震対策工の選定法，鉄道総研報告，Vol.25，No.2，pp.53-58, 2011