

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

鉄道構造物の地震レジリエンスを強化する

東北地方太平洋沖地震の発生から10年が経過しました。鉄道は、橋りょう・高架橋、トンネル、土構造物から駅施設までさまざまな構造物によって構成されていますが、防災・減災・早期復旧の観点から「地震レジリエンス」の強化が注目されています。そこで、これまで鉄道総研が取り組んできた鉄道構造物の地震レジリエンスの強化策である、被災前の診断・耐震補強技術、地震発生直後の早期地震警報と即時地震動・被害推定、および被災発生後の復旧支援と早期復旧技術を総括して紹介します。



神田 政幸
Masayuki Koda
構造物技術研究部長



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
鉄道地震工学研究センター長

はじめに

過去10年間、鉄道施設に被害を及ぼした地震には、東北地方太平洋沖地震（2011年）、熊本地震（2016年）、大阪府北部地震（2018年）や北海道胆振

東部地震（2018年）があります。過去10年間の鉄道施設の災害被害総額2,332億円のうち、災害発生回数は、豪雨災害と比較して少ないものの、地震災害被害額が総額の半分以上を占めています（図1）。国土交通省の調べでは、被害程度により復旧時間は異なるものの、過去の実績として鉄道橋りょう・高架橋の被災の場合、10日から数年程度を、鉄道盛土や斜面の被災の場合、数か月程度を要するといわれています¹⁾。

東北地方太平洋沖地震は、モーメントマグニチュード9.0という未曾有の巨大な海溝型地震でした。兵庫県南部地震以降の高架橋柱の補強対策や落橋対策の効果により、鉄道構造物の倒壊などの壊滅的被害はなかったもの

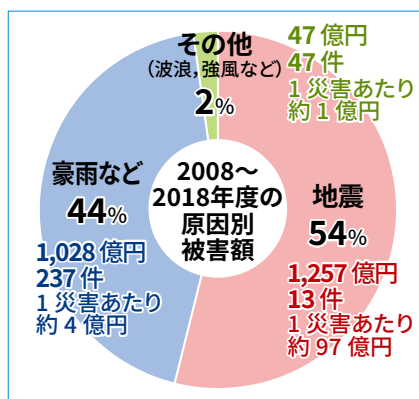


図1 自然災害によるこれまでの鉄道施設の被害額・被害件数（文献1をもとに作成）

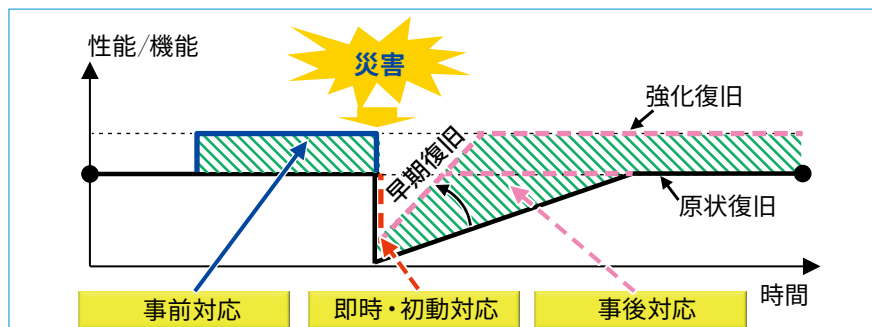


図2 被災前後の構造物の性能・機能²⁾



図3 鉄道構造物の耐震補強の例

の、広域での電柱折損や高架橋柱の損傷、度重なる余震による再被害の発生や、首都圏で発生した地盤の液状化被害、東北地方沿岸部の甚大な津波被害など大地震の特徴的被害が発生しました。熊本地震においても、本震や多発する余震のくりかえしの影響が、熊本平野から南阿蘇地域の広範囲に及び、大地震の特徴が表れています²⁾。

地震レジリエンスの強化策

被災前後の構造物の性能や機能は、被災直後に急激に低下し、復旧とともに回復します(図2)²⁾。同図において、「壊滅的な状態の回避(赤破線の最小化)」および「全体系機能の早期復旧・強化復旧(桃色破線の急速化)」の両者は、「地震レジリエンス」と定義されま

す。鉄道構造物の地震レジリエンスの強化には、【事前対応】、【即時・初動対応】や【事後対応】が必要となり、同図の緑

色の斜線部分を拡大させることを意味します。事前対応は、路線の弱点箇所を抽出し、耐震性の高い構造に変更する補強技術であり(事前の診断技術と耐震補強技術)、即時・初動対応は、地震のリアルタイム情報を活用し、徐行・停止などの列車運行の制御のほか、路線全体の被害推定技術があり、これらは減災のほか、事後対応を円滑に進捗させる効果があります(早期地震警報と即時地震動・被害推定)。事後対応は、個々の被災構造物に対して、列車運行に支障がない軽微な被害を見極め、早期に運行再開につなげる一方、補強により再供用可能か、あるいは構造物の再構築・取替を要するか、即判断・実行することです(早期復旧技術)。

事前対応

(1) 事前の診断技術

鉄道構造物には、建設年代が比較的

古くその路線延長が他の構造物と比較して長い盛土や擁壁、斜面などの土構造物のほか、橋りょうや高架橋、トンネルが連なる線状構造物であるため、路線の一箇所が損傷・崩壊すると鉄道機能を失います。兵庫県南部地震以降、都市部の鉄道や新幹線の橋りょうや高架橋、開削トンネル、駅を対象として耐震補強が行われてきました。一方、鉄道延長の大半を占める土構造物の耐震補強を鉄道事業者に促す施策として、東北地方太平洋沖地震以降、国土交通省は鉄道土構造物の中から耐震診断や補強設計を優先的に進める箇所選定のための参考資料として、「鉄道土構造物の耐震診断の手引き(概略診断編)」³⁾を取りまとめました。また、鉄道総研はこれに合わせて、「鉄道土構造物の耐震診断の手引き(詳細検討編)」⁴⁾を整備しています。

このほか2013年の「特定鉄道施設

等に係る耐震補強に関する省令（耐震省令）や「建築基準法施行令」などの一部改正にとまひない、鉄道総研は「鉄骨造旅客上家の耐震診断指針」⁵⁾や「鉄道駅における耐震天井設計資料」⁶⁾を整備し、鉄道駅の耐震診断の技術支援を行っています。なお、これらの文献^{3)～6)}は鉄道技術推進センターHP <<https://www.rtri.or.jp/tecce/>>で公開されています。

(2) 耐震補強技術

鉄道総研では、東北地方太平洋沖地震後、早期の鉄道の復旧・復興、および今後の都市部の鉄道の耐震化を図る技術提案として、「鉄道の震災復旧・復興に向けた技術提案」を取りまとめました（図3）。同図は、鉄道総研の最新の研究成果を反映したものにしています。事前の診断結果を踏まえて、都市部の鉄道構造物の弱点箇所を優先的に選定し、耐震性の高い構造に変更することを推奨しています。

即時・初動対応

(1) 早期地震警報技術

即時・初動対応の代表的な技術として、早期地震警報があげられます。これは地震動の主要動であるS波が沿線に到達する前に列車を制御するものです。鉄道では具体的な警報手法として、①地震動の初期微動を利用した警報（P波警報）、②地震動の規定値超過警報（S波警報）などが用いられています。

このうち、警報効果の高いP波警報に関連する技術の1例として、1台の地震計の観測データのみを利用した震央距離推定手法があげられます。この手法は、2004年に初めて新幹線の早期地震警報システムに導入された時点で2秒間のデータから震央距離を求めることが可能でした。その後、研究開発が進み、2018年に実用化された改良手法⁷⁾では0.5秒で震央距離が得ら

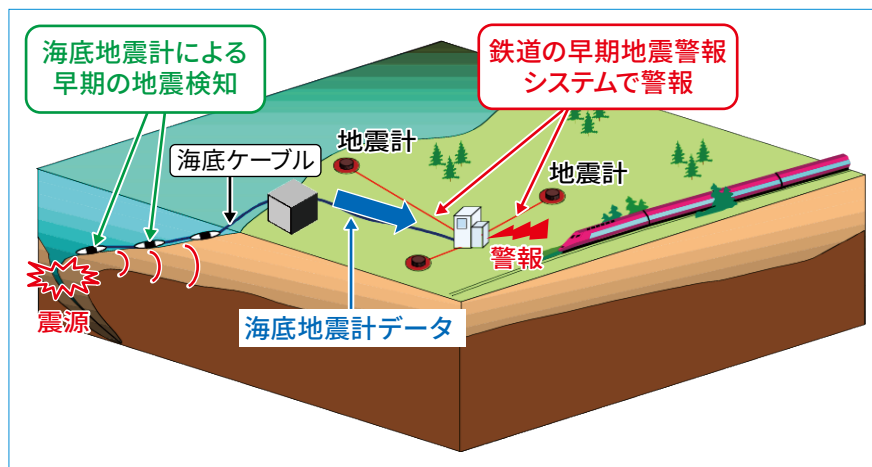


図4 海底地震計データを用いた早期地震警報

れ、さらに推定精度も向上しました。

一方、S波警報に関連して、海底地震計を用いた新たな警報手法を開発しました。従来、鉄道では陸地に設置された地震計のみを使用していたため、海域で発生する地震については、素早く検知することができませんでした。海底地震計を活用することにより、海域で発生する地震の検知がさらに早くなります。そこで、海底地震計観測網の開発・管理に関わる防災科学技術研究所、海洋研究開発機構と連携し、海底地震計データを活用した鉄道の早期地震警報の研究開発を進めました。開発されたシステムには、海底地震計のデータ特性を考慮した警報判断手法、リアルタイムでのデータ品質監視手法、複数の観測点の情報を利用した誤警報防止手法などの技術が導入され、2017年以降新幹線で実用化されています（図4）⁸⁾。

(2) 即時地震動・被害推定技術

2018年の大阪府北部地震では、鉄道の運行再開に時間を要したことが課題となりました。これは駅間で停止した列車のお客様救済や鉄道施設の点検などに時間を要したことが原因と考えられます。上述の課題克服を目指して、早期運転再開を支援する即時地震動・被害推定に関する技術開発を進めています。

具体的には、防災科学技術研究所のK-NETの観測データと鉄道総研の地盤データベースを利用して、沿線の揺れを求めるものです。また、事前に準備した構造物データベースと被害推定ノモグラムから構造物の被害ランクを求めることも可能としました。これらの研究成果は、鉄道地震被害推定情報配信システム（DISER）として2019年から実用化されています⁹⁾。

事後対応

(1) 復旧支援

鉄道総研は、被災直後から鉄道事業者への復旧支援に努めています。2016年4月14日に発生した熊本地震では、九州新幹線の新玉名・新八代間のRCラーメン高架橋の柱や支承部が損傷しました。その数は1,000箇所を優に超え、当時、被害箇所の調査、復旧計画策定、復旧に長期間を要することが懸念されました。そこで、運行再開前に補修が必要か否か、列車運行への支障の有無で損傷をランク分けし、徐行での運行再開、その後徐行解除を行う区間別・損傷ランク別の段階的復旧方針を策定しました（図5）。この結果、2016年4月23日（被災後9日）に博多・熊本間で運行再開し、4月27日には九州新幹線全線で運行再開につながりました¹⁰⁾。



図5 熊本地震により被災した九州新幹線高架橋の診断¹⁰⁾

(2) 早期復旧技術

被災構造物の復旧では、早期に運行再開し、その後段階的に強化が可能な技術が求められます。鉄道総研では、被災した鉄道盛土に対して、かご枠を使用した復旧構造を採用することで盛土の復旧速度を向上させ、仮復旧後の追加の補強を行い本復旧する早期・強化復旧技術を開発しました(図6)¹¹⁾。

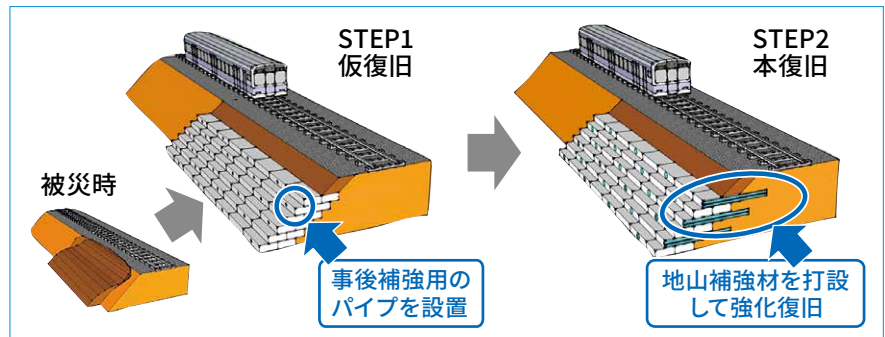


図6 かご枠と地山補強材を用いた被災盛土の早期・強化復旧法¹¹⁾

おわりに

さらなる鉄道構造物の地震レジリエンス強化には、広域の地震被害の推定精度の向上や各種耐震化策の開発、即時地震動・被害推定情報を用いた補強設計・耐震化策への反映や被災構造物の診断技術の向上を、継続的に実施する必要があると考えられます。鉄道総研では、平素の打ち合わせや研究開発と課題について幅広く意見交換する場である「鉄道地震工学研究センターアニュアルミーティング」などの機会を通して、鉄道事業者の皆様と情報共有しつつ、鉄道構造物の地震レジリエンスの強化に寄与する研究開発を継続、発展させ、実務展開を図る予定です。

文献

- 1) 国土交通省：平成30年度政策レビュー結果(評価書) 鉄道の防災・減災対策(平成31年3月), <https://www.mlit.go.jp/common/001281980.pdf> (入手日: 2021/12/15)
- 2) 神田政幸：鉄道構造物の災害からの復旧技術, 地盤工学会誌, Vol. 68, No. 5, pp. 5-8, 2020
- 3) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道土構造物の耐震診断の手引き(概略診断編), 2016
- 4) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター：鉄道土構造物の耐震診断の手引き(詳細検討編), 2016
- 5) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター：鉄骨造旅客上家等の耐震診断指針, 2017
- 6) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター：鉄道駅における耐震天井設計資料(暫定版), 平成29年度鉄道技術推進センター講習会「鉄骨造旅客上家の耐震診断及び駅舎天井の耐震設計に関する講習会」, 2018
- 7) 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏, 野田俊太：早期地震防災システムで迅速かつ確実に列車を止める, RRR, Vol. 73, No. 3, pp. 12-15, 2016
- 8) 是永将宏, 山本俊六, 青井真：海底地震計データを早期地震警報に使う, RRR, Vol. 76, No. 3, pp. 8-11, 2019
- 9) 岩田直泰, 坂井公俊, 山本俊六, 室野剛隆, 青井真：鉄道地震被害推定情報配信システム(DISER)を利用して素早く運転を再開する, RRR, Vol. 77, No. 2, pp. 12-15, 2020
- 10) 神田政幸：鉄道構造物の災害対策と早期復旧, 第30回鉄道総研講演会要旨集, pp. 22-28, 2017
- 11) 中島進, 佐藤武斗：被災盛土の早期・強化復旧工法, 鉄道総研報告, Vol. 35, No. 1, pp. 47-52, 2021