

# 地震レジリエンス向上に向けた最近の研究開発

山本 俊六\*

## Recent Research and Development for Improvement of Earthquake Resilience

Shunroku YAMAMOTO

In order to increase earthquake resilience for railways, it is important to simultaneously improve “strength” and “recovery” in well-balanced way. “Strength” is defined as the performance to prevent the decrease in railway functionality during earthquakes and “recovery” is the capacity to rapidly recover the functionality after earthquakes. In this paper, first, recent research and development for improving strength and recovery are introduced with common core technologies. Then the recent essential trends on research are summarized particularly for recovery, which are “utilization of external information”, “merging of estimation and observing information”, and “combination of strength and recovery”

キーワード：地震レジリエンス，強さ，回復力

### 1. はじめに

鉄道の地震レジリエンスを向上させるためには、これを支える2つの要素である地震に対する鉄道の「強さ」と「回復力」をバランスよく高めることが重要である。ここで、強さとは耐震設計、耐震補強、耐震性を高める構造形式・デバイスなどであり、回復力とは、素早かつ確かな運転規制、早期運転再開、危機耐性の高い構造などが関連する。地震レジリエンスに影響を与える各要素のうち、強さに関する対策は従来より重要性が認識されており、さまざまな対策が着実に積み上げられてきた。これに対して回復力については、巨大津波が甚大な被害をもたらした2011年の東北地方太平洋沖地震以降、広く社会に認識されたと言える。さらに、回復力の概念は巨大地震のみに適用されるものではないことも明らかになってきた。たとえば、2018年に発生した大阪府北部地震では、被害を受けなかった線区であっても運転再開までに長い時間を要したことが問題となった。これについては、駅間で停止した列車の乗客の救済や線路に沿った施設の点検などに時間を要したことなどが原因であったとの報告がある<sup>1)</sup>。このような事例は、鉄道の回復力を考える際には中小地震も対象になることを示したものと考える。

鉄道総研では、地震レジリエンスの総合的な向上を目標に、「強さ」や「回復力」について抜けが生じないように意識しながら各種対策の研究開発と提案を行っている。本報告では、はじめにこれら最近の研究開発の事例について、「強さ」、「回復力」、これらを支える「基幹技術」

の観点で整理して紹介する。次に、このうち「回復力」に関連する研究に共通する近年の動向について概説する。

### 2. 地震レジリエンスを高めるための研究開発

本章では、最近の研究開発の状況を「強さ」、「回復力」、「基幹技術」の観点から紹介する。

#### 2.1 強さを支える研究開発

地震レジリエンスを支える各要素と鉄道の機能との関係を図1に示す。強さは地震時の機能低下を抑えることが目的であり、回復力は地震発生後、より短い時間で機能回復を図ることを目的とする。このため、強さを高めるための対策は主に地震前に実施される設計的なもの、ハードウェア的なものを中心となる。これに関連して近年では、①強震動予測、②地盤挙動・液状化評価、③動的相互作用評価、④耐震設計・補強、⑤免震・制振、⑥新しい構造形式などの研究開発が行われている。

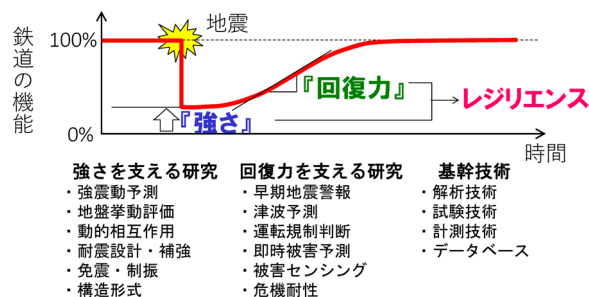


図1 地震レジリエンス向上のための研究・技術

\* 鉄道地震工学研究センター長

このうち①に関連して、「不整形地盤箇所における設計地震動の簡易評価手法」、「逐次非線形解析に基づく基盤入力地震動の推定手法」の開発を行った。これらの成果により設計地震動の実務的な扱いが容易になること、地震被害箇所の地表面地震動の評価の精度が高まることなどが期待される。これらの詳細は本号の特集論文3, 4で紹介する。また④に関連し、「地震動レベルに応じた応答値算定のための地盤ばね設定手法」、「損傷過程を追跡可能な盛土の耐震性能評価手法」などが開発された。鉄道総研ではこれらの成果を今後の耐震設計に反映することを検討している。詳細は本号の特集論文5, 6で紹介する。

## 2.2 回復力を支える研究開発

回復力に関連する対策は、主に地震発生後の対応に関係するものであり、オペレーションに影響を与えるものが多い。これに関連して近年では、①早期地震警報、②早期津波予測、③運転規制基準値設定、④被害予測・被害センシング、⑤危機耐性などの研究開発を実施している。

このうち①に関連し、「早期震央位置推定の精度を向上する地震計位置の選定方法」、「S波/P波の振幅比を利用したP波規定値超過検出手法」が開発された。これらの成果により、適切な地震計位置の設定、精度の高いP波規定値警報が可能になると考える。これらの成果は本号の特集論文1, 2で紹介する。また④⑤に関連し、「グラウンドアンカーの抵抗・破壊メカニズムを反映した地震時変位量評価法」、「変位センサーによる支承部の地震後損傷推定手法」の開発が行われた。これらの成果により、地震時の変状の高精度な評価や変状の直接的なモニタリングが可能となる。上述の内容については特集論文7, 8で紹介を行う。

## 2.3 基幹技術に関する研究開発

研究開発や地震対策を支える基幹技術として、①解析技術、②試験技術、③計測技術は不可欠である。また、④各種データベースの存在も重要である。

このうち①に関する成果の集大成として、鉄道地震災害シミュレータが開発された<sup>2)</sup>。このシミュレータでは、断層から地表面までの地震動の伝播を考慮した上で路線に沿った構造物の応答を、目的に応じた精度や計算時間で求めることができる。このシミュレータは現在、地震対策の優先順位付けや地震後の構造物被害の推定などに活用されているが、入力データの扱いをより容易にするための手法の開発<sup>3)</sup>など、シミュレータを高度化するための研究が継続して進められている。

## 3. 回復力向上に向けた研究開発の動向

本章では、回復力向上に関連する研究について、最近の潮流や共通する方向性を述べる。具体的には、「部外情報の積極的活用」、「推定情報と実測情報の融合」、「強さと回復力の融合」の観点から整理を行い、これらの内容について概説する。

### 3.1 部外情報の積極的活用

ICTの発展や情報に対するニーズの高まりにより、鉄道以外の環境でも、防災に関わるさまざまな情報がリアルタイムあるいは準リアルタイムで公開されるようになってきた。これらの情報の特性を把握した上で、効果的に活用することにより鉄道の回復力をさらに向上させる可能性がある。ここでは地震に関連する代表的な部外情報として、気象庁の緊急地震速報、防災科学技術研究所（以下、防災科研）の海底地震計情報、K-NET情報の活用について述べる。

#### (1) 緊急地震速報

地震発生時に地震の被害を最小に留め、速やかな運転再開や復旧に繋げるためには、地震直後に素早く列車を停止させることが重要である。鉄道総研ではこのような目的のために、大きな揺れが到達する前に、列車の制御を行う早期地震警報の開発を行い、新幹線などに導入してきた<sup>4)</sup>。このシステムの特徴は単独の地震計データに基づいて警報を出力する点にある。

これに対し、緊急地震速報は、全国に展開された約1000箇所の地震観測点のデータをサーバに集めた後、地震諸元や揺れの強さを推定し、配信するものである。緊急地震速報で用いる地震計は鉄道事業者の所有する地震計とは異なるため、緊急地震速報を事業者の地震計情報と併用することにより、地震計の数を実質的に増加させる効果がある。すなわち地震計密度が高まることによりさらに早いタイミングで警報を出力する可能性が高まると考える。また、緊急地震速報と鉄道の早期地震警報システムはそれぞれ異なる地震諸元推定アルゴリズムを用いているため、アルゴリズム面での冗長性を高め、信頼性を向上させる効果がある。鉄道総研では、緊急地震速報の地震諸元を、既存の鉄道システム中で扱うアルゴリズムを開発し、両者の情報を効果的に併用することを可能とした。

以上のように部外情報を併用することにより、早期警報の即時性と信頼性を高めることが可能となった。

#### (2) 海底地震計

一方、鉄道事業者では観測が難しい情報を、部外から入手することにより安全性を向上させる方法もある。海底地震計による情報の活用はその代表と言える。鉄道の地震計は陸域のみに設置されており、上述した緊急地震

速報もこれまでは基本的に陸域に設置された地震データに基づいて処理をしてきた（現在は海底地震計データも利用）。このため、海域で発生した地震について、従来は地震波が陸域に到達するまで検知することができなかった。例えば2011年の東北地方太平洋沖地震の場合、P波が陸域に到達したのは地震発生後約20秒後である。この時、仮に震源直上に海底地震計が設置されていれば、検知までの時間をP波で約16秒、S波でも約12秒短縮できた可能性がある。

近年、海洋研究開発機構や防災科研により、南海トラフや日本海溝に大規模な観測網が整備され、リアルタイムでの地震計データ取得が可能となってきた。これを受け、鉄道総研は防災科研と連携し、鉄道の早期地震警報に向けたデータ処理方法や通信方法などを開発<sup>5)</sup>し、2017年より鉄道事業者のデータ活用が実現した。これにより、該当海域で発生する地震に対する警報の即時性は大幅に向上したと考える。一方、海底地震観測網データの防災への活用は、緒に就いたばかりである。現在、鉄道総研では、巨大地震の際に素早く広域警報を出力するための手法の開発、光ファイバーケーブルや水圧計データなどの情報活用の検討など、海底地震観測網のデータをさらに有効に活用するための研究開発を行っている。

### (3) K-NET

早期運転再開に向けても部外情報の活用は効果的である。鉄道総研では、部外の地震情報を用いて、沿線の揺れと構造物の被害を即座に推定するための技術開発を実施している。部外情報の代表としてK-NETデータが挙げられる。防災科研のK-NETは全国に展開された地震観測網である。約1000点の観測点から構成され、鉄道沿線に比較的近接する観測点も多い。このK-NETのデータを準リアルタイムで受信し、処理することにより、地震直後に沿線の揺れや構造物の被害を推定し、運転再開を支援することが可能となる。上記を実現するために、鉄道総研は防災科研と連携し2019年より鉄道地震被害推定情報配信システム（DISER）を実用化した<sup>6)</sup>。このシステムは、地震発生後平均8分程度で、鉄道事業者へ情報を配信している。

これに関連し、部外情報による沿線の揺れの推定精度を向上させるために、効果的な空間補間方法、推定値の補正方法の開発などを行っている。また揺れの推定を行うための基礎情報となる地盤データベースの高精度化に関する研究も実施している。さらに、被害推定の対象となる構造物の種類拡大や、被害推定精度向上に関連する開発も進めている。

今後、センシング技術の発達や通信環境の高性能化により、さらに多様な防災情報がリアルタイムで入手可能になると予想している。防災の観点から広域な監視範囲が要求される鉄道システムにおいて、リアルタイム

や準リアルタイムで入手可能な部外情報を利用する流れはこれからも続くと考えられる。

## 3.2 推定情報と実測情報の融合

3.1節(3)で述べたDISERに代表されるように、今後、早期運転再開に向けて、推定情報が有効活用されるケースが多くなると考えられる。一方、これらの推定情報を用いて鉄道事業者が運転規制や運転再開の判断を行うには、推定された情報の誤差の検証や推定情報による運転規制基準値の決定手法などを整理することが不可欠と考える。また推定情報を扱う場合も実測情報の持つ重要度に変化はないため、鉄道事業者が推定情報と実測情報を同時に扱うケースが多くなることが予想される。その際、情報をどのように統合するのかを検討する必要がある。これらを受け、鉄道総研では、推定情報の誤差の扱い、推定情報と実測情報の融合（データ同化）に関する研究開発を積極的に進めている。

### (1) 推定誤差の扱い

推定情報を扱う場合、誤差評価に関する検証が必須であることは言うまでもない。一方、地震の発生頻度を考慮すると大地震に関連する実測情報による検証が容易でないことは明らかである。特に構造物被害の事例は限られているために、実測情報による統計的な検証が困難になるケースがある。この問題を回避するため、シミュレーションを活用し、その結果で実測情報を補う方法が考えられるが、さまざまなばらつきを考慮してシミュレーションにより分析を行うためには、膨大な回数の計算が求められるケースが多い。このような課題を解決するため、はじめに効率よくシミュレーションを実施するための手法の開発を行い、次にその成果を用いて、上述の誤差評価を行う流れで研究開発を進めている。

また、鉄道事業者が推定情報を運転規制に導入する場合、推定誤差の存在を考慮の上、運転規制基準値を設定する必要がある。一般に実測情報を用いて運転規制を行う場合であっても、各種誤差（ばらつき）を安全率として扱い、最終的に運転規制基準値が決められていることが多い。そのため、推定情報を運転規制に用いる場合は、従来の安全率における構成因子を分析し、推定情報の利用により更新可能な因子を明確にした上で安全率の再設定を行い、運転規制基準値を決定することが望ましい。以上のような手続きで、安全率を過度に切り詰めることなく、合理的に運転規制基準値を決定することができる。これに関連する具体的な方法論の確立は、今後、推定情報を用いて運転規制を行う際に重要と考え、現在、検討と実証を行なっている。

### (2) データ同化

リアルタイム、準リアルタイムで情報を利用する場合、情報が逐次更新されることが多く、一旦推定を行なった

後に、新しい情報を用いて再び推定を行う場合がある。このような場合のデータ同化の方法は今後考慮すべき項目である。例えば空間的に点在する各地点からの情報を用いて空間補間を行うケースを考える。実測情報のみが逐次更新される場合、その扱いは比較的容易である。一方、各地点の実測情報と推定情報が混在して更新される場合には、情報の性質・信頼性などに応じて、適切な処理手法を選択する必要がある。処理手法によっては同一地点での実測情報と推定情報が異なる結果を示すケースも考えられ、情報の活用目的や活用形態も考慮しながら処理手法を検討することが重要である。このようなデータ同化に関しては、現在、物理的なモデルに基づく方法、機械学習を用いた方法など複数のアプローチで検討を行っている。

鉄道事業者が自社の情報や部外情報などを活用する際、さまざまなタイミングで性質と信頼性の異なる情報が更新されることは今後十分起こりえる事象である。データ同化に関する研究開発の重要性は高いと考える。

### 3.3 強さと回復力の融合

#### (1) 耐震性と運転規制

これまで、耐震設計などの「強さ」の向上に関する事前対策と運転規制などの「回復力」の向上に関わる対策は、必ずしも密接にリンクした形で進められてこなかった。例えば、構造物の耐震性向上を、運転規制基準値の引き上げに即座に反映させることは、現時点でハードルが高い。この理由として、耐震設計の性能の目標と実際の地震動レベル、運転規制における判断基準が一致していないことなどが挙げられる。

以上のような課題は、今後、設計において運転規制判断と関連付けられる性能を導入することにより、解決の方向に向かう可能性がある。耐震設計と運転規制のリンクが明確になれば、運転規制のボトルネックが構造物の耐震性である場合、構造物の耐震性の向上によってさらに安全かつ合理的な運転規制基準値の設定が可能になると考える。このような背景から、現在、運転規制レベル（震度5弱～5強）程度の地震動に対する構造物応答評価手法の確立を検討している。具体的には、精度の高い応答解析手法の開発、構造物パラメータ設定方法の検討や、上述の概念を耐震設計に導入する際の課題に関する検討を実施している。

耐震性と運転規制の融合による、地震対策の合理化、経済化の影響は大きく、今後の重要な研究開発テーマと考えられる。

#### (2) 危機耐性

危機耐性の概念は、平成24年の耐震設計標準において導入されたものであり、大地震などにより設計で想定した以上の地震作用を受けた場合においても、破滅的な

被害を防止する概念である。鉄道総研では、これまで、危機耐性を具現化する構造形式の提案<sup>7)</sup>とともに構造物の持つ危機耐性の性能を評価する指標の提案<sup>8)</sup>などを行ってきた。地震に対して十分な強さを持ち、かつ想定外の外力が加わった場合でも破滅的な被害を受けない構造物は、強さと回復力を融合した理想的な形のひとつと言える。このような概念の具体的な扱いについて、さらに検討を進めることを考えている。

## 4. おわりに

本報告では、地震レジリエンス向上に向けた最近の研究開発の具体事例を「強さ」、「回復力」、「基幹技術」の観点で整理して紹介した。また回復力に関連する最新の研究の動向として「部外情報の積極的活用」、「推定情報と実測情報の融合」、「強さと回復力の融合」を概説した。

鉄道は社会の重要なインフラであり、地震発生頻度の高い日本では地震レジリエンスを高めることが強く求められている。今後も地震レジリエンス向上に向け、着実に研究開発を進める所存である。

## 文 献

- 1) 国土交通省：大阪北部地震における運転再開等に係る対応に関する連絡会議資料，<https://www.mlit.go.jp/common/001247910.pdf>（参照日：2021年3月1日）
- 2) 本山紘希，坂井公俊，井澤淳，室野剛隆：鉄道地震災害シミュレータの開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.5，pp.5-10，2016
- 3) 小野寺周，和田一範，坂井公俊，室野剛隆：インベントリー法による橋りょう・高架橋の被害推定法，鉄道総研報告，Vol.33，No.12，pp.29-34，2019
- 4) 岩田直泰，山本俊六：高度化されたアルゴリズムを搭載した早期警報用地震計の開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.5，pp.11-16，2016
- 5) Korenaga, M., Yamamoto, S., and Noda, S. “Earthquake Early Warning Using Ocean Bottom Seismic Data for Railways,” QR of RTRI, Vol.60, No.2, pp.134-139, 2019.
- 6) Yamamoto, S., Murono, Y., Iwata, N., Sakai, K., Aoi, S., Nakamura, H., and Suzuki, W. “Real-time Estimation of Earthquake Damage on Railway,” The 17<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 6a-006, 2020.
- 7) 豊岡亮洋，室野剛隆，布川博一：高架橋の危機耐性を向上させる自重補償構造の振動台試験，鉄道総研報告，Vol.33，No.12，pp.41-46，2019
- 8) 田中浩平，室野剛隆，坂井公俊：地震時の鉄道構造物における危機耐性評価法の構築，Vol.32，No.9，pp.17-22，2018