

中小地震から巨大地震までを対象とした地震対策技術

山本 俊六*

Earthquake Countermeasure Technology for Small to Huge Earthquakes

Shunroku YAMAMOTO

In the field of railway earthquake countermeasures, an earthquake resistant design, an aseismic reinforcement and so on are implemented before earthquakes. On the other hand, an earthquake early warning, an operational restriction and so on are implemented after earthquakes. Those countermeasures before and after earthquakes have been generally combined in proper balance. Though the targets of those countermeasures are basically large earthquakes, new countermeasures for small earthquakes, such as rapid resumption of operation after small earthquake, are strongly expected in present days. In this paper, recent developments of countermeasures for small earthquakes that occur more frequently are described as well as those for large and huge earthquakes on which some pending issues are still unsettled.

キーワード：レジリエンス，強さと回復力，中小地震と大地震

1. はじめに

地震の発生頻度が高い日本において、地震に対する備えはきわめて重要である。あるレベル以上の揺れを伴う地震発生した場合、鉄道の機能は一旦低下し、続いて機能回復が行われる。したがって、地震に対する鉄道のレジリエンス（強靱さ）を向上させるためには、地震直後の機能の低下を少なくすること、そして低下した機能を速やかに機能回復させることの両面からのアプローチが必要となる。図1にこの概念を示す。ここでは機能低下を抑えるための性能を「強さ」、速やかに機能回復するための性能を「回復力」と定義する。強さを向上させるためには、構造物や付帯設備の耐震性能の確保、軌道や車両の脱線・逸脱防止対策などの事前対策が中心となる。また、回復力を向上させるためには、早期地震警報などによる即時対策、早期の被害把握や運転再開判断による初動対応、計画的、戦略的な復旧・復興対策、さらに復

旧しやすい構造物の採用などが考えられる。

図1に示した地震に伴う機能低下とその後の機能回復の流れについては、基本的に地震の大小によらず共通である。ただし、揺れの強さのレベルにより各対策の重要性や具体的な内容は変化する。たとえば、被害の発生しない中小地震の場合、地震に対する鉄道の強さは運転規制の内容に依存し、その後の回復力は運転規制を解除するまでの時間に依存することになる。近年発生した中小地震のうち、鉄道に大きな影響を与えた事例として、2018年6月18日の大阪北部地震(Mj=6.1)が挙げられる。この地震では、震源周辺の一部を除き、揺れによる鉄道の被害は限定的であったが、鉄道事業者が施設の安全確認を完了し運転再開が行われるまでに長い時間を要したケースが多く¹⁾、社会的課題として大きく報じられた。

一般的に、地震の規模と発生頻度の関係はグーテンベルク・リヒター則に従うことが知られており、平均的にはマグニチュードが1小さくなると発生頻度は約10倍となることが知られている。すなわち、中小地震では大地震のような被害は発生しないが、鉄道がその大きさの地震に見舞われる頻度は非常に高くなる。したがって、鉄道機能の安定性が社会から強く求められている現在、中小地震への対応を軽視することは難しい。ただし、これらの中小地震に対する鉄道の強さと回復力を目的とした対策技術はまだ多くないのが実情である。

一方、大地震・巨大地震対策の重要性は言うまでもない。これまでも、大地震の経験によって新たな課題や知見が得られるたびに、精力的に事象の分析や対策技術の開発が進められ、それを受けて耐震設計標準の改訂、既

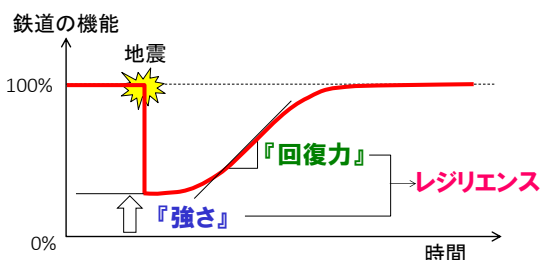


図1 地震時の鉄道の機能の変化

* 鉄道地震工学研究センター長

特集：地震対策技術

設構造物の耐震補強、さらに軌道、車両などの脱線・逸脱防止対策などが実施されてきた。また、早期地震警報の活用や機能拡張などソフト面からの対策も継続的に行われてきた。これらの対策により、現時点において大地震の揺れに対する鉄道の強さと回復力は十分なレベルを確保していると考ええる。ただし、たとえば断層変位や津波などの大地震に随伴する事象への対策、さらに想定を超えた強い揺れに対する構造物の安全性確保などに関する対策についてはまだ検討の余地が残る。

以上の課題を背景に、鉄道のさらなるレジリエンス向上に向けて、中小地震、大地震、さらに想定を超えた地震に対する対応を抜けないようにバランスよく実施することが今後求められる鉄道の地震対策の姿と考える。本解説では、地震の規模という観点から、それぞれの規模の地震を対象として研究開発された対策技術の位置づけとその概要を紹介する。

2. 中小地震に対する対策技術

本章では、中小地震を対象とした、効果的な点検判断のための技術、点検を効率化するための技術について述べる。

2.1 鉄道被害推定情報配信システム（DISER）

前章で触れたように、頻度の高い中小地震に対する鉄道の早期運転再開は鉄道事業者の喫緊の課題の一つである。一般的に地震の揺れの大きさが規定値を超えた場合、一旦、運転規制が行われ、その後、点検により安全確認を行い運転再開が行われる。構造物の被害が発生する可能性の低い中小地震の場合、点検箇所の効果的な絞り込みや優先順位付けが早期運転再開までの時間に大きく影響するが、鉄道事業者の管理する地震計や公的機関の情報のみでは限界があった。

上述の状況のもと、点検箇所の判断に活用できる情報を提供することを目的として、線路に沿った揺れや構造物の被害情報を地震発生直後に配信する鉄道被害推定情報配信システム（DISER）の開発が行われた²⁾。このシステムは防災科学技術研究所の K-NET で記録された地震動指標を入力とし、地盤情報データベースを用いて、地盤の塑性化を評価可能な表層増幅評価手法と空間補間から線路上の揺れを推定する。さらに推定された揺れと構造物データベースを用いて被害推定ノモグラムから構造物の被害ランクを推定する（図 2）。推定情報の表示状況を一例を図 3 に示す。揺れを推定する際の空間メッシュサイズは 500m である。揺れの推定誤差は計測震度で 0.58 程度であり、地震発生後平均 8～9 分程度で揺れの情報を配信することができる³⁾。このシステムは 2019 年 8 月に運用開始されている。

2.2 支承部変位センサー

前節の DISER は、公的機関の地震情報に基づき構造物の被害ランクを推定するが、このような推定情報に加えて、弱点箇所直接観測された情報を組み合わせることにより、より効果的な点検判断が可能と考えられる。たとえば、橋りょうの支承部は高所に位置することが多く、通常、点検に手間と時間を要する。仮に、この点検を遠隔で実施することができれば、点検に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。この課題の解決を目的として、支承部などの変状を直接検知するための変位センサーの開発を行った。開発した変位センサーのシステム構成と設置例を図 4 に示す。

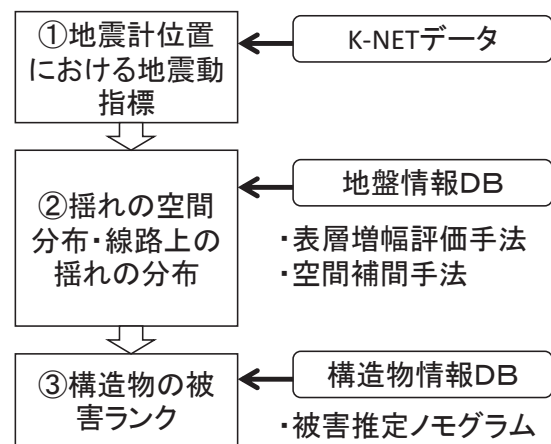


図2 DISER における処理の流れ

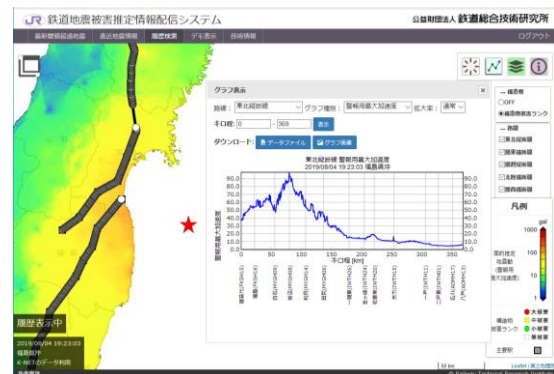


図3 DISER の表示画面例

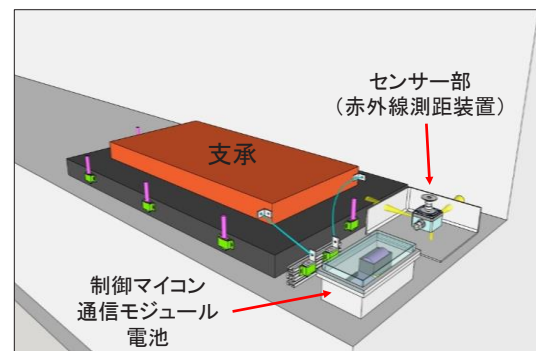


図4 変位センサーのシステム構成と設置例

このセンサーは、非接触でゴムパッド支承および鋼製支承の変状や支承の変状に伴う桁のずれ変位量を、水平1mm、垂直0.3mm程度の分解能で検知することができる。通常、ずれの確認は目視で行っていることを考慮すれば、上述の分解能は実用上十分な性能である。また、ネットワークを介して情報を転送する機能を有するため、高所作業が省略でき、測定値を遠隔で確認することが可能である。さらにバッテリーにより8年以上連続使用可能であり、メンテナンス性も高い。このセンサーを活用することにより、点検時間の短縮化が期待され、現在検証を進めている。

3. 大地震に対する対策技術

ここでは、大地震の随伴事象である津波や断層変位を対象とした技術、想定外の事象に対する技術をそれぞれ紹介する。

3.1 津波浸水域の即時予測

大地震の随伴事象の一つとして津波が挙げられる。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では津波が鉄道設備に大きな被害を与えた。鉄道の津波被害を考慮する際、津波の浸水域が重要な情報となるが、浸水域は発生する地震の断層位置や規模、断層破壊形式などによって変化するため、地震直後に震源情報のみから浸水域に関する精度の高い情報を得ることは困難であった。一方、日本海溝付近、南海・東南海付近では、国により大規模な海底地震・津波観測網が整備され、津波波高が水圧計によりリアルタイムで観測できる状況になった。

そこで津波が鉄道に与える影響を地震発生直後に推定することを目的として、リアルタイムで観測される津波波形情報を用いて津波浸水域を即時的に予測する方法を開発した⁴⁾。この方法では、はじめに震源域付近の海域で観測された津波波形情報と津波伝達関数を掛け合わせるにより、短時間で沿岸付近の津波波形を推定する。次に推定された沿岸付近での津波波高と、事前に計算した浸水域マップ群とのマッチングを行うことにより、短時間で浸水域を予測する(図5)。この方法により津波の浸水域を地震発生直後に精度よく予測することができ

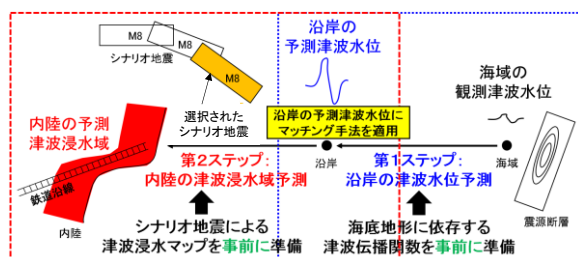


図5 津波浸水域の即時予測の概要

ると考えられ、詳細なシミュレーション結果と本方法による予測結果を比較することにより、精度と時間に関して有効性を確認した。また、この方法で作成する浸水域マップ群は、津波対策のための事前情報としても活用できる。

3.2 断層変位評価と対策

1891年に発生した濃尾地震では地表面に水平最大8m、上下最大2mの断層変位が確認された。また2016年の熊本地震の際も水平最大2mの断層変位が観測されている。鉄道と断層との位置関係によっては、鉄道構造物が断層変位の影響を受ける可能性もある。このため、断層変位が鉄道構造物に与える影響を適切に評価し、その影響を最小限にとどめるための技術を検討することは重要と考える。

上述の事柄を背景に、地表面に現れる断層変位を精度よく評価する手法の開発、および断層変位の影響を受けにくい交差角度や構造形式の検討が進められている。断層変位の評価手法については、本号の特集記事を参照されたい。影響を受けにくい構造形式については、横ずれ断層および縦ずれ断層を対象にそれぞれ検討が行われた。その結果、横ずれ断層に関しては、断層との交差角度が構造物に与える影響が大きく、交差角度を90度以下にすることにより、損傷箇所を交差部のスパンのみに限定できることが示された⁵⁾。また、縦ずれ断層に関しては、張出し式1径間ラーメン高架橋を連続させた構造形式(図6)が、複数径間のラーメン高架橋と比べ、断層変位を受けた場合の部材損傷低減に有効であることが示された⁶⁾。

3.3 危機耐性向上のための倒壊方向制御

巨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「危機耐性」の概念が、平成24年の耐震設計標準において導入された。この概念を構造物の観点から具現化させるための方法として、近年、2種類の手法の検討が行われている。ひとつは自重補償機構、もうひとつは倒壊方向制御である。このうち自重補償機構は本号で後述するため、

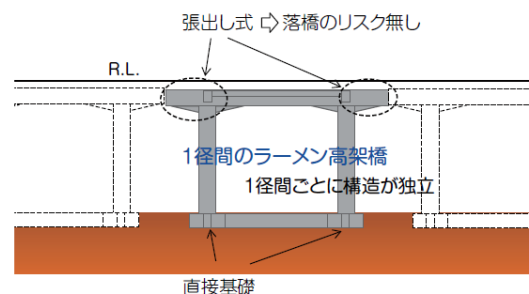


図6 縦ずれ断層に対して効果的な構造形式

特集：地震対策技術

ここでは倒壊方向制御構造⁷⁾について紹介する。

倒壊方向制御構造のコンセプトと具体的な構造形式例を図7(a), (b)に示す。この手法は、ラーメン高架橋を対象とし、仮に構造物が倒壊に至る状況になったとしても、その方向を制御することにより、居住地域あるいは緊急輸送道路などへの支障を防ぎ、最悪の事態を回避することを目的としている。この目的のために、高架橋スラブと柱の間に、ブロックを設置する構造が提案されている。ブロックの高さは対象とする柱の塑性ヒンジと同程度が目安であり、これまで振動台実験や解析などにより、この構造が概ね機能することが検証されてきた。

4. おわりに

地震に対する鉄道の安全性を向上させるために、これまで事前対策、事後対策（即時対策、初動対応、復旧・復興対応）、あるいはハード対策、ソフト対策など時間的あるいは分野的な観点から抜けがないように検討が進められてきた。近年、発生頻度が高い中小地震の際の課

題が注目されており、ここでは、対象とする地震規模の観点から、最近の研究開発を整理し、紹介した。

これまで鉄道における地震対策の多くは、大地震を対象としてきた。これらの対策技術は、中小地震に対しても当然有効に働くものの、中小地震の課題に焦点を合わせた対策を併せて活用することにより、さらに効果的な対応となることが期待できる。また、大地震に関しても、揺れ以外の随伴事象への対策、想定外の事態への対応など、対象とする事象の枠を広げることにより、鉄道の安全性が総合的に向上すると考えられる。

鉄道の地震に対するレジリエンスを向上させるためには、上述したような多角的な観点からの対応が重要である。今後も、より安全な鉄道の実現を目指して、広い視野を持って着実に研究開発を進める所存である。

文 献

- 1) 国土交通省 災害情報：
<https://www.mlit.go.jp/common/001239124.pdf>
(参照日：2019年9月24日)
- 2) 鉄道総合技術研究所 News Release：
https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i000000bt7d-att/20190729_002.pdf
(参照日：2019年9月24日)
- 3) 山本俊六，岩田直泰，坂井公俊，岡本京祐：鉄道用地震情報公開システムの開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.5，pp.41-46，2016
- 4) 津野靖士：鉄道沿線の早期津波浸水予測手法，鉄道総研報告，Vol.33，No.9，pp.35-40，2019
- 5) 室野剛隆，弥勒綾子，紺野克昭：断層交差角度に着目した橋梁の挙動に関する基礎的研究，地震工学研究発表会梗概集，Vol.27，論文番号 80，2003
- 6) 日野篤志，室野剛隆：縦ずれ断層の影響を受けにくい新しいラーメン高架橋形式の提案，鉄道総研報告，Vol.31，No.7，pp.47-52，2017
- 7) 豊岡亮洋，室野剛隆，齊藤正人：高架橋の危機耐性を向上させる倒壊方向制御構造の振動台実験，鉄道総研報告，Vol.32，No.9，pp.47-52，2018

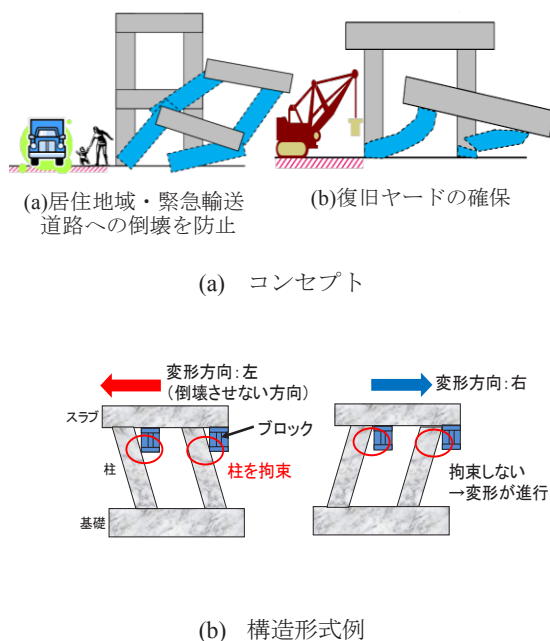


図7 倒壊方向制御のコンセプトと構造形式例