

- 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

鉄道の地震レジリエンスを高める研究開発



山本 俊六
Shunroku Yamamoto
鉄道地震工学研究センター
研究センター長
[専門分野] 地震工学

近年、災害対策・対応に関するタイムライン（時間軸）的な検討が積極的に進められています。地震は突発的に発生するものですが、発生を前提として、地震前に行う「事前対策」、地震発生時に行う「即時対策」、地震後に行う「初動対応、復旧対策」を準備、計画し、抜けがないように備えることは、鉄道の地震レジリエンスを向上させるために重要です。また、上記の各段階における対策・対応を連携させることによって、地震に対するレジリエンスをより効果的に向上させることが可能になると考えます。以上の観点から、ここでは地震に対する最近の研究成果とそれぞれの関連について紹介します。

はじめに

近年、さまざまな分野で災害の対策・対応について、タイムラインの検討が積極的に進められています¹⁾。この場合、タイムラインとは、ある災害を対象に、防災・減災のために、いつ、だれが、何をするかを、災害発生前から発生後までの時間軸上に落とし込んだ計画を意味します。

タイムラインを作成することのメリットは、それぞれの対策・対応のタイミング、役割、連携を明確にできることです。現状の対策・対応についてタイムライン的な分析をすることによって、たとえば、ハード対策、ソフト対策の連動はうまくいっているか、

各対策間の情報やデータの共有によってさらに効果的なものにならないか、などの検討が可能になってきます。

地震についても、地震が発生することを前提として、対策・対応に関するタイムライン的な整理をすることが可能です。具体的には、図1に示したように、地震前に行うこと（事前対策）、地震発生時に行うこと（即時対策）、さらに地震後に行うこと（初動対応、復旧対策）などに分類して、整理することができます。

鉄道の地震に対するレジリエンスとは、図2に示すように、地震が発生しても鉄道の機能を可能な限り落とさないうで継続する力です。そして、このレ

ジリエンスは地震発生時の機能低下を抑える「強さ」と、その後低下した機能を速やかに正常の状態に復帰させる「回復力」により支えられています。タイムライン上の各対策・対応の役割（「強さ」あるいは「回復力」）を明確にし、さらにそれらを密接に連携させることにより、より効果的な地震対策が可能になると考えます。

ここでは、上記のことがらを念頭に、鉄道の地震レジリエンスを向上させるための、地震前、地震発生時、地震後の対策・対応について最近の研究成果とそれらの役割や連携について紹介します。

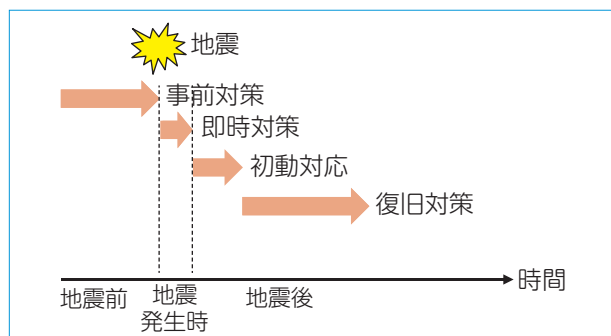


図1 地震対策のタイムラインのイメージ

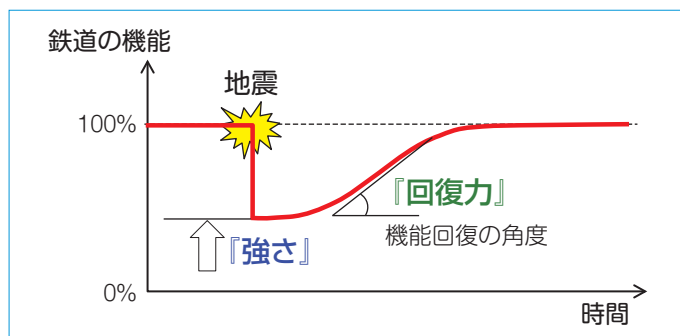


図2 鉄道の地震レジリエンスを支える強さと回復力

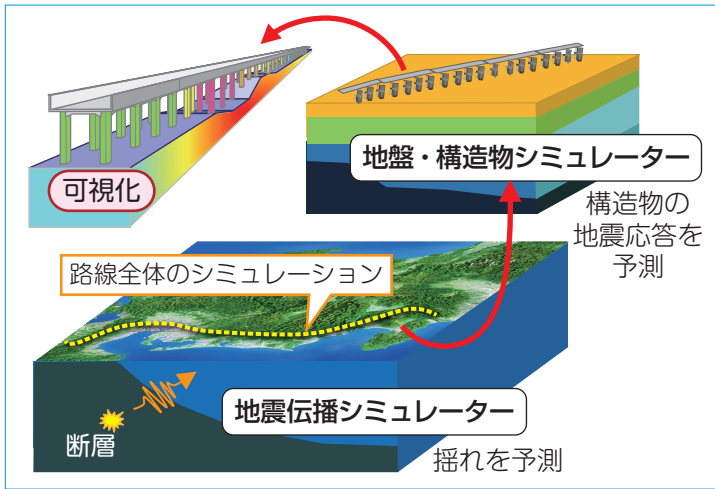


図3 鉄道地震災害シミュレーターの概要

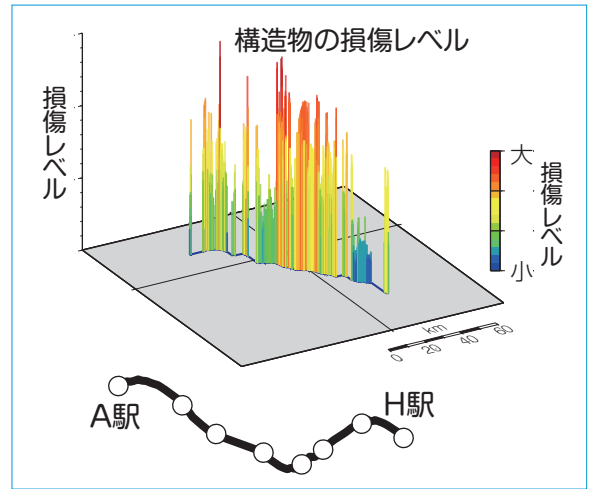


図4 個別の地震に対する全線被害予測のイメージ

地震前の対策に向けて

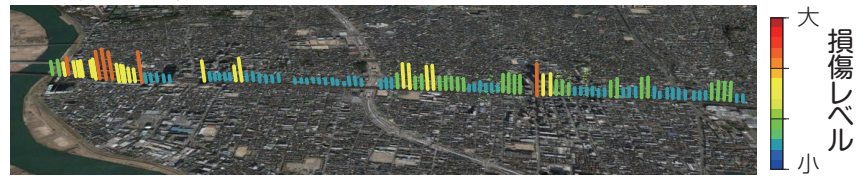
(1) 事前に被災イメージを知る

地震が発生した際に、鉄道施設がどのような被害を受けるかを事前にイメージすることは重要です。弱点箇所を知ることができれば、該当箇所を優先して補強することにより「強さ」を向上させることができます。また、弱点箇所付近に地震計や被害確認用のセンシング機器を設置したり、弱点箇所の存在を前提として点検マニュアルや復旧計画を準備したりすることにより「回復力」を向上させることができます。

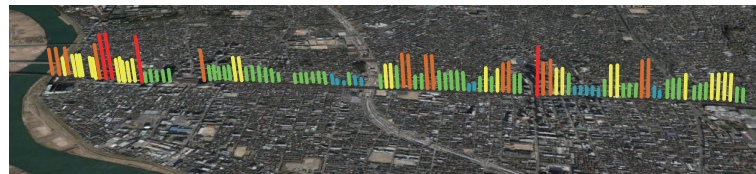
鉄道はさまざまな構造物や設備から構成され、それらが変化に富んだ地盤上に長距離にわたって展開されています。したがって、全線の被害予測を短時間で実施するには限界がありました。この課題を解決するために、鉄道地震災害シミュレーターが開発されました²⁾。

図3に示すように鉄道地震災害シミュレーターは地震による揺れの伝播を予測する地震伝播シミュレーターと、線路上の構造物群の地震応答を予測する地盤・構造物シミュレーターから構成されています。このうち、地盤・構造物シミュレーターでは、インベントリー法³⁾とよばれる技術を活用しています。

震度5程度の損傷レベル



震度6程度の損傷レベル



震度7程度の損傷レベル

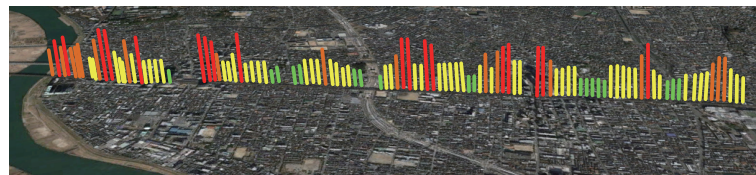


図5 全線を対象としたストレステスト

インベントリー法では300万ケースの鉄道構造物係数を収めたデータベースから近似構造物を抽出し、この構造物の主要な特性のみを用いて、地震応答を評価します。これを全構造物に対して実施することで、従来より短い時間で全線評価が可能となります。

鉄道地震災害シミュレーターの活用方法として、①個別地震に対する全線被害予測、②全線を対象としたストレステスト、があげられます。①では、特定の地震に対する被害予測を行います。図4に線路に沿った構造物の損傷レベ

ル予測のイメージを示します。このように実際の被災のイメージに近い評価が可能になるため、仮想演習や地震時の対応マニュアルを作成する際の情報として活用でき、「回復力」を向上させることに役立ちます。

一方、実際の地震は、想定した条件とは異なるかもしれません。②では、鉄道全線に入力する地震動の強さを一律に段階的に増加させていき、どの構造物がどの程度の強さを持っているのかを評価します。図5では地震動の強さを震度5～7まで変化させた場合の

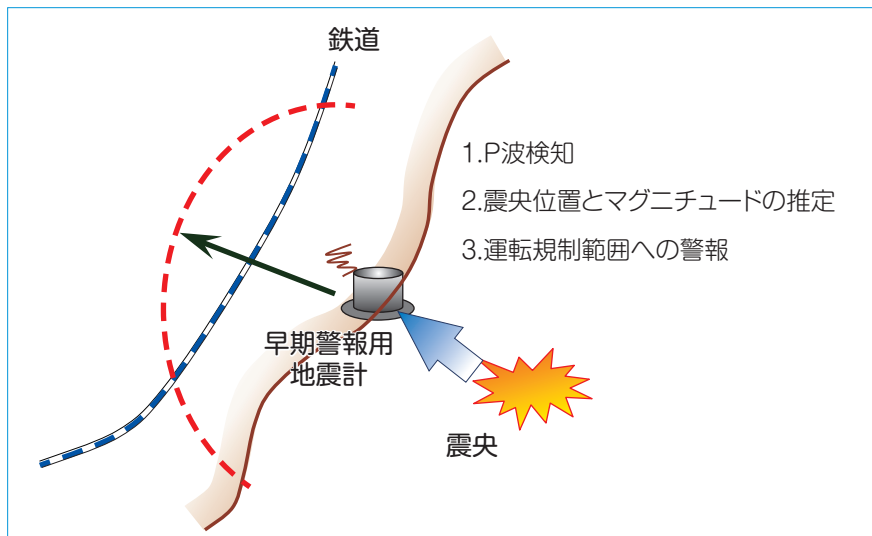


図6 P波警報の概念

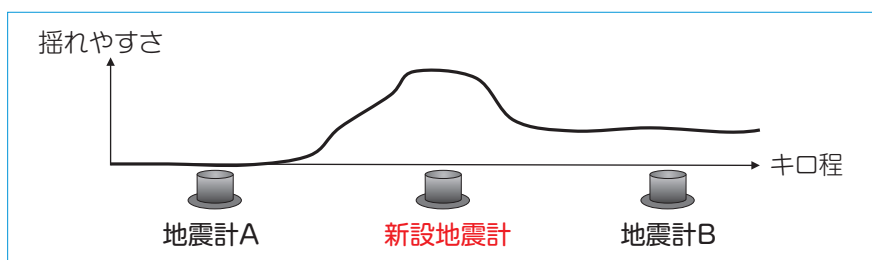


図7 地震計設置箇所の適正化

構造物の損傷レベルを示します。それぞれの構造物の強さを同じ土俵で比較することができるため、弱い構造物を客観的に抽出し、その限界レベルを知ることができます。したがって、耐震補強を実施する際の優先順位づけ用の情報として利用可能であり、「強さ」を向上させる情報として役立ちます。

(2) 想定外に備える

現在の、鉄道構造物は、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（耐震標準）で規定された地震動レベルに対して性能を満たすように設計されています。耐震標準ではこれまでの地震工学の知見を反映し、構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動を扱っていますが、今後これを上回る地震動が構造物に作用しない保証はありません。このような事態においても構造物が破局的な状態に至ることを回避する考えを危機耐性とよび、平成24年の耐震標準からこの概念が導入されています。

危機耐性は「強さ」を限りなく求めるものではなく、むしろ「回復力」を考慮した概念と考えることができます。仮に大きな破壊を受けたとしても、より被害が少なく、回復が容易な状態となることを目指した考えです。ただし、新しく導入された概念であるため、その評価方法やこれを具現化する構造形式提案・開発は現在進行中です。それらの成果の一部を、本号の「鉄道構造物の地震に対する危機耐性を評価する」（20～23ページ）と「新しい構造で高架橋の地震に対する危機耐性を高める」（24～27ページ）で紹介します。

地震発生時の対策に向けて

地震は前触れもなく突然発生するため、地震発生時に実施できることには限りがあります。このような状況のなかで、運転規制はもっとも重要な対策です。運転規制を行い、列車を減速、停止させることにより、脱線発生の可

能性を低減させることが可能です。また、場合によっては、被災箇所列車が侵入することを未然に防ぐことにより2次被害の発生を抑えることも可能です。このように地震発生時の運転規制は、鉄道機能の「回復力」の向上に役立つことがわかります。

運転規制を即時的に、人の手を介することなく実施するものとして、新幹線で使用されている早期警報用地震計⁴⁾があげられます。この地震計は、大きな揺れを検知して警報を出力するS波警報と、地震動の初期微動を利用して警報を出力するP波警報の機能をもっています。このうち、より即時性が高いものがP波警報です。P波警報は、図6に示すように、推定された震央位置やマグニチュードに基づき、線上に展開された鉄道のうち規制が必要な区間のみ警報を出力するため、効率よく運転規制を実施できるメリットもあります。

一方、P波警報においては、震央位置やマグニチュードの推定時間や推定精度が警報の性能に大きな影響を与えます。このため、性能向上を目指した推定手法の改良がこれまで何度か実施されてきました。現行の地震計では、震央距離をP波到達後0.5秒で、震央方位を平均0.58秒で推定可能です。マグニチュードをさらに早く推定することを目指した最新の成果については本号の「より早くマグニチュードを推定する」（8～11ページ）で紹介します。

また、鉄道では、一般的に地震計を、①列車の停止、②点検要否の判断、のために活用しています。①の目的のためには、地震計を震源の近くに設置することが効果的であり、②の目的のためには、各区間の揺れを確実に捕捉できる箇所、または弱点箇所に設置することが効果的です。しかし、対象とする地震を事前に特定することは難しく、

また各区間の揺れやすさを事前に調べ、きめ細かく数多くの地震計を設置することは容易ではありません。したがって、現在、多くの地震計は線路上に一定間隔で設置されています。

一方、前章で記述した鉄道地震災害シミュレーターでは揺れやすさの分布や弱点箇所を評価することが可能です。よって、これらの情報を参考に、②の目的のため、適切な地震計配置を検討することができます。

図7にそのイメージを示します。図の曲線は線路に沿った地盤の揺れやすさを示します。この場合、地震計Aと地震計Bのみでは中央部の大きな揺れを見落とす可能性があります。仮に中央部に地震計を新設することができれば、より安全な点検要否の判断が可能となります。このように地震計の配置に関連しても、地震前、地震発生中、地震後の各対策を連動させることができます。この連動により「回復力」がさらに向上すると考えられます。

地震後の対応・対策に向けて

地震後は、被害がないようであれば速やかに運転再開することが望まれています。このために、まずは地震の影響について、現状把握が必要になります。全線がどのように揺れ、鉄道構造物や車両がどのようなレベル被害を受けているかを知り、必要に応じて一刻も早く、適切な初動対応をとることが重要です。

地震直後から、自社の地震計の情報、現場からの報告、公的機関の地震情報、さらにはSNSなどのさまざまな地震関連情報が収集可能になります。ところが多くの場合、それらの情報は、“点”の情報であり、状況の全体像を知ることが容易ではありません。そこで、被害の全体像を速やかに把握するための情報を提供する、鉄道地震被害推定情

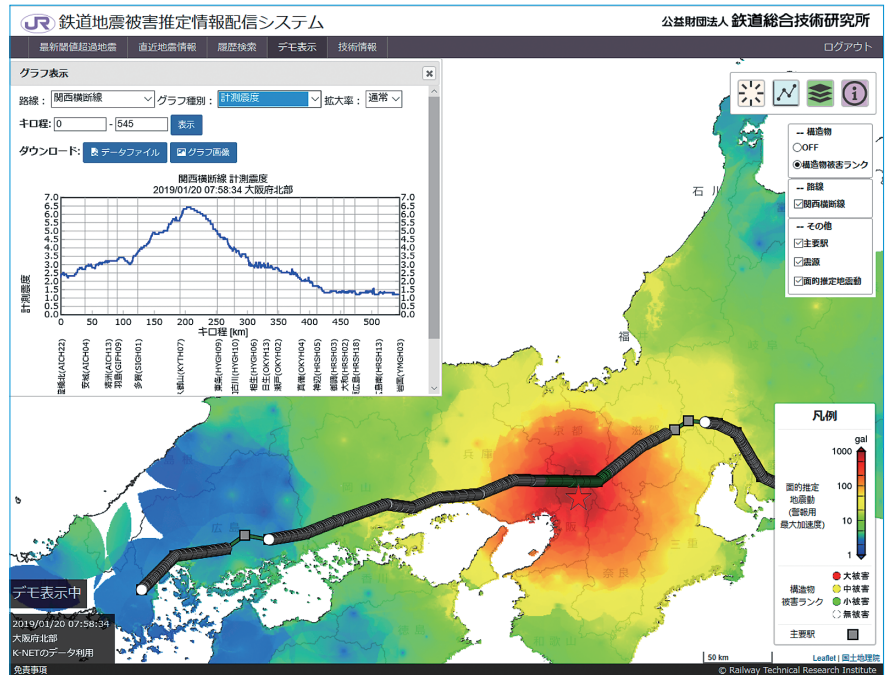


図8 鉄道地震被害推定情報配信システムの画面例

報配信システム (DISER) が開発されました。

DISERは地震直後に、線路に沿った揺れの情報と、構造物の被害推定情報を提供します。情報の一例を図8に示します。DISERの情報は、点検箇所の絞り込みや、点検内容を判断する際に参考となる情報であり、鉄道の「回復力」の向上に貢献するものと考えます。DISERで扱う、地盤や構造物のデータは鉄道地震災害シミュレーターと共有できます。また、鉄道地震災害シミュレーターにより抽出された弱点箇所付近をDISERにより重点監視することも可能です。さらに沿線に設置された地震計やセンシングデータを併用することによりDISERの推定精度を向上させることもできると考えます。DISERの詳細は本号の「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」(12～15ページ)で紹介します。

おわりに

ここでは、鉄道の地震レジリエンスを向上させるための対策・対応を時間

軸で整理し、それらの役割と連携について、具体例をあげて紹介しました。レジリエンス(強さと回復力)を向上させるためには、これらの対策を連動させ、抜けがないように実施する必要があります。個別の対策技術の高度化、また効果的な技術の連携に関する技術提案を進め、鉄道のレジリエンスをさらに高めるように、今後も努力してまいります。[RRR]

文献

- 1) たとえば、国土交通省：タイムライン、<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/> (入手日2019/11/24)
- 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) 日野篤志, 室野剛隆, 和田一範：インベントリーデータベースを用いた構造物のリスク評価手法の提案, 土木学会全国大会第72回年次学術講演会, 2017
- 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