

- 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

鉄道における地震対策と地震情報の活用



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
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

地震に対する対応には、事前対応、緊急・即時対応、初動対応、復旧対応の4つのフェーズが考えられます。事前対応や復旧対応では耐震設計や耐震補強・補修などハード的な地震対策が有効です。一方、緊急・即時対応や初動対応などは、地震時に列車をいち早く停止させたり、早期運転再開を目指した点検や復旧戦略の策定など、地震情報を活用したソフト的な対応が有効です。ここでは、両者の必要性和その最新成果について紹介します。

はじめに

最近、レジリエンスという言葉を目にする機会が多くなりました。レジリエンスという言葉に固定的な概念があるわけではありませんが、一般的には、好ましくない状況を「跳ね返す力」というイメージで使われています。地震工学の分野においても、2011年の東北地方太平洋沖地震以降、地震で大きな被害を受けてもギブアップせず、元の状態になるべく早く回復させるという意味で、レジリエンスの強化に関心が集まっています。

地震に対して鉄道がレジリエンスを発揮するためには、「強さ」と「回復力」

を持つことが重要です(図1)。地震に対する「強さ」を高めるには、「事前対応」が最も重要です。地震に強い構造物や設備を設計・建設すること、もしくは既存構造物を耐震補強することが必要です。ただし、これらのハードウェアの事前対応を有効なものとするためには、弱点箇所を事前情報としてきっちりと把握しておく必要があります。

地震に対する「回復力」を高めるためには、事前対応と事後対応(緊急・即時対応、初動対応、復旧・復興対応)があります。「事前対応」としては、仮に想定以上の地震が発生した場合であっても、ある程度の被害は許容しつつ破局的な状態に至るのを防がなければなりません。「緊急・即時対応」としては、地震が発生して強い揺れが到来する前に警報を出して、鉄道の利用者や社員の避難や安全を確保することが有効です。「初動対応」とは、巡回

計画、復旧計画、要員・資材調達計画などを含めた対応であり、揺れの大きさや被害推定に関する情報を地震後速やかに入手・活用することが有効です。「復旧・復興対応」とは、実際に行われる復旧作業のことです。

このように、「強さ」と「回復力」を高めるためには、ハードウェアによる対策とともに、情報などのソフトウェアによる対策を適切に組み合わせることが重要です。そこで、ここでは、鉄道工学分野の最近の取り組み事例について紹介します。

地震に対する「強さ」を高める取り組み

(1) 事前に構造物を「強く」する

強さを高める取り組みとしては、新設構造物の耐震設計および既設構造物の地震対策を着実に実施しなければなりません。

新設構造物の耐震設計については、平成24年に耐震設計標準が改訂されました¹⁾。ここでは、設計地震動や解析方法の見直しなどが図られ、マグニチュード7の活断層地震が直下で発生

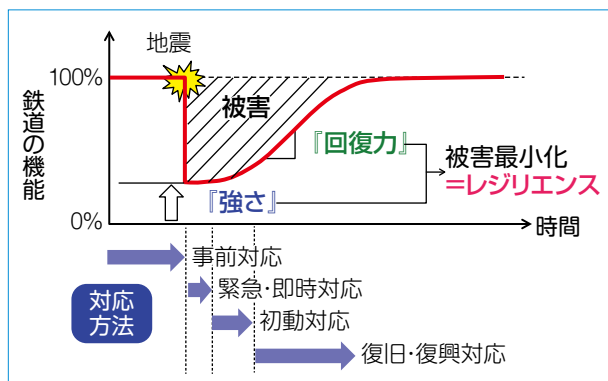


図1 地震に対する『強さ』と『回復力』

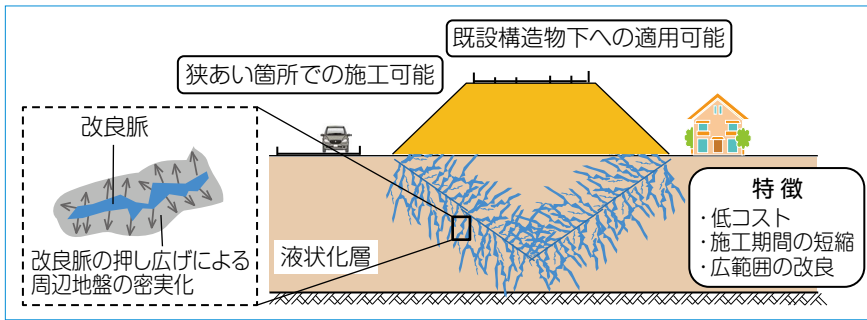


図2 脈状液状化工法のイメージ図

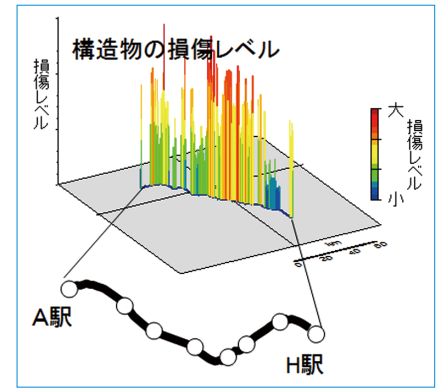


図3 シミュレーション例

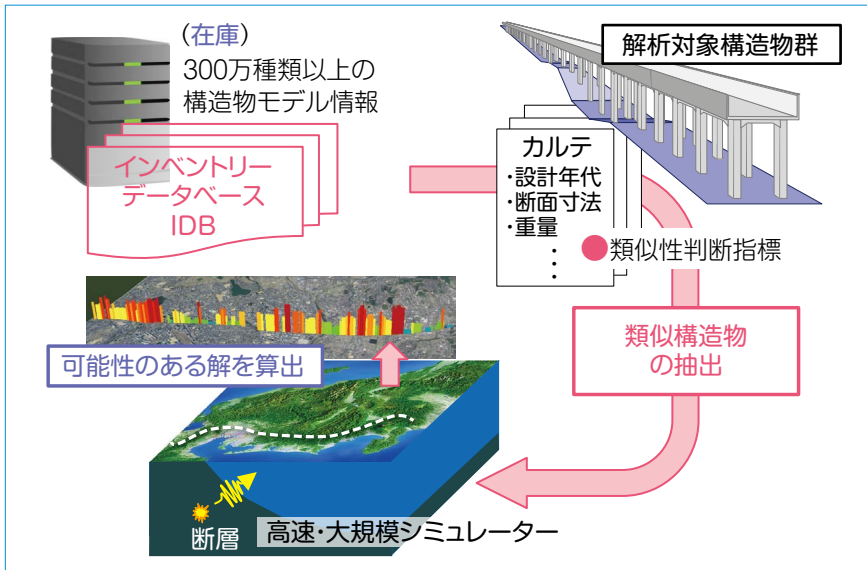


図4 鉄道地震災害シミュレーター

した場合やマグニチュード8の地震が海溝で発生した場合であっても、安全性を確保することが要求されており、新設構造物の安全性はきわめて高いものとなりました。

既設構造物の耐震補強については、1995年の兵庫県南部地震以降、国土交通省からの通達に基づき、鉄道事業者で精力的に実施されています。おもに、鉄筋コンクリート構造物のせん断破壊を防止する目的から、鋼板巻き立て補強を中心とした対策が実施されています。さらに、近年では、河川橋りょうなどで巻き立て補強が困難な箇所に対して各種制震ダンパーを適用する事例も徐々に増えてきました²⁾。

また、昨年発生した北海道胆振地震での液状化被害は記憶に新しいと思います。構造物を強化しても、構造物を支える地盤が液状化をしてしまったら、

構造物は大きく傾斜してしまい、鉄道輸送の機能は停止します。液状化を防止する工法としては、これまで多くが開発されていますが、コストが高かったり、線路際での狭あいな場所での施工が難しいものがほとんどでした。そこで、低注入率で液状化被害の軽減が可能な脈状注入による液状化対策工法を開発しました(図2)³⁾。本工法は、薬液の固まる時間や粘性などを適切に調整して注入することで、地盤内に脈状の改良体(改良脈)を構築し、周辺地盤を締め固め、液状化抵抗を増加させるものです。この改良脈をさまざまな方向に作製することができるため、対象域の地盤全体を改良することが可能となります。その結果、低注入率でも十分に改良でき、従来工法と比較してコスト削減や施工期間の短縮を可能にしました。また、地表面の隆起量や

不同変位(構造物境界のずれ)が小さいため既設鉄道構造物直下に施工可能なこと、施工機械が小型であるため狭あい箇所などでも適用可能であることから、適用範囲の広い工法といえます。

(2) 事前に弱点箇所を想定して「強く」する

(1)で述べたように、地盤や構造物を強くする技術はさまざまに開発をされています。しかし、鉄道は線状に長いシステムなので、弱点箇所をしっかりと把握して、効率的に対策をしなければなりません。これに対して、有効なのがシミュレーションです。

そこで、地震対策を考えるうえでの共通基盤技術として、『地震災害シミュレーター』を構築しています。このシミュレーターは、任意の位置で任意の規模の地震が発生した場合の地震波動の伝播を日本全土レベルで解析し、数百キロ区間の地盤の揺れや構造物群の揺れを解析することが可能です(図3)。当然、解析領域が広範囲におよびますので、計算時間の観点からスーパーコンピュータの活用は必須になりますが、それにも増して重要なのが、解析対象の路線に含まれる膨大な数の構造物群をどのようにモデル化するか、ということです。そこで、このシミュレーターでは、インベントリー法(インベントリーとは「在庫」を意味します)というものを開発し、実装しています(図4)⁴⁾。

まず、数百万個の構造物モデル(在庫)を格納した「インベントリー・データベース (IDB)」を構築しました。IDBに格納された構造物モデルは、比較的入手しやすい構造物の特性を表す8つのパラメーターにひもづけられています。解析対象路線の構造物群に対して、8つのパラメーターを記載したカルテを用意して、台帳と照合することで、IDBの中から対象とする構造物に最も類似したモデルを抽出し、動的解析をすることが可能となります。この手法を用いることで、構造物のモデル化作業を大幅に省力化することができるだけでなく、モデル化に必要な情報がすべてそろわない場合でも、抽出結果のばらつきは大きくなるものの、鉄道路線全線の評価を行うことが可能となります。

このシミュレーターを利用すると、全線の中でどこが弱点箇所か効率的に抽出することができ、その箇所をどの程度まで強くすればよいのか把握することができます。

地震に対する「回復力」を高める取り組み

(1) 想定外地震に対して事前に「回復力」を高める

地震に対する「強さ」を高める取り組みにより、構造物を強化したとしても、設計段階で想定した地震動を超える地震が発生することは否定できません。このような想定を超える地震に対する回復力を事前に高めるものとして、「危機耐性」という概念があります。危機耐性とは、鉄道構造物の耐震標準の中で初めて導入された概念であり、「想定以上の地震が発生した場合にも破局的な状態に至るのを回避する」ことです¹⁾。危機耐性を向上させる構造として2種類の方法を開発しています。

想定を超える地震に対して、万が一、柱や橋脚などの鉛直方向の部材が破壊

しても、自重補償柱でスラブの荷重を受け換えることで、構造物の完全な倒壊を防止する「自重補償機構」を開発しました(図5(a))。本構造の有効性を検証するために、自重補償柱を有するラーメン高架橋のモデルを作成して倒壊防止効果を確認したところ、倒壊を防止できることを確認できました。

また、想定を超える地震動に対して、万が一構造物が倒壊するとしても、居住地域や緊急輸送道路、復旧スペースなどを支障する方向には倒壊させない「倒壊方向制御機構」を開発しました(図5(b))。倒壊方向の制御を実現する簡易な装置として、ブロック型およびチェーン型の2タイプの装置を開発しています。有効性について、震動実験により検証しました。

(2) 地震発生時に「回復力」を高める

地震発生時の緊急・即時対応には、地震の揺れをできるだけ早期に検知し、構造物が大きく揺れる前に警報を発し、列車の速度を速やかに低下または停止させる、早期地震警報システムの活用が有効です⁵⁾。現在運用されている早期地震警報システムは、P波初動部2秒程度の加速度の成長から震央距離を求め(B-Δ法)、その震央距離と観測された変位振幅から距離減衰式を用いてマグニチュードを算出します。このように推定されたマグニチュードと震央距離の組み合わせに応じて、鉄道への被害の可能性を即座に判断し、必要に応じて警報を発出し、列車を停止させています。このシステムはすべての新幹線に導入されています。B-Δ法に替わるアルゴリズムとして新たにC-Δ法

を開発しました(図6)。P波初動部0.5秒程度における加速度の成長を用いて、これを1次関数で近似することで、その傾きである値(C値)から経験的に震央距離を求めます。推定に用いるデータ長は従来の2秒から0.5秒に短縮されるとともに、震央距離の推定精度も従来法に比して約13%向上しました。なお、この新しいアルゴリズムを実装した地震計の実路線への配備も進められています。

(3) 地震直後に「回復力」を高める取り組み

巡回計画、復旧計画などを含めた初動対応には、揺れが収まった後に、いち早く地震の揺れや被害の大きさに関する情報を取得することが重要です。現在、各鉄道事業者は地震計設置位置での計測震度やSI値(※参照)などの地震情報に基づき巡回の必要性や範囲を判断していますが、それは「点」

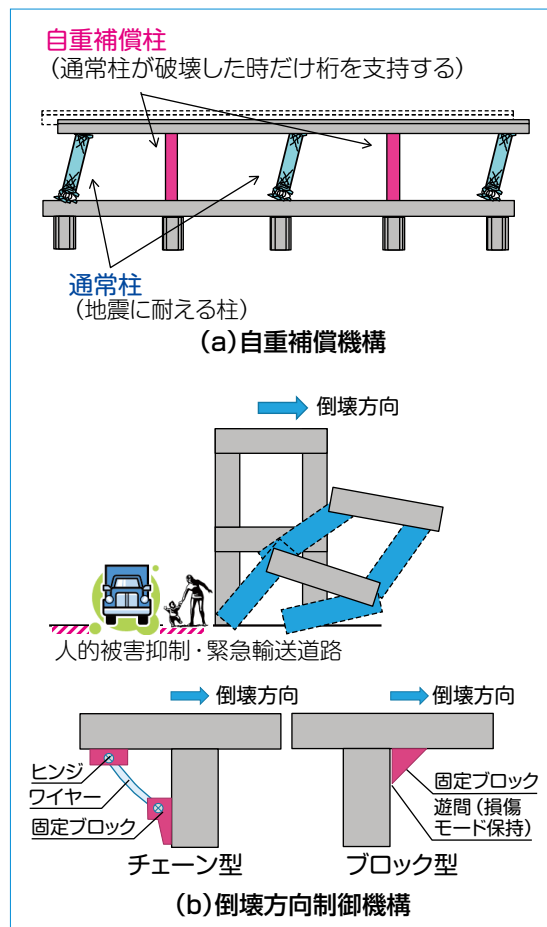


図5 危機耐性を高める方法

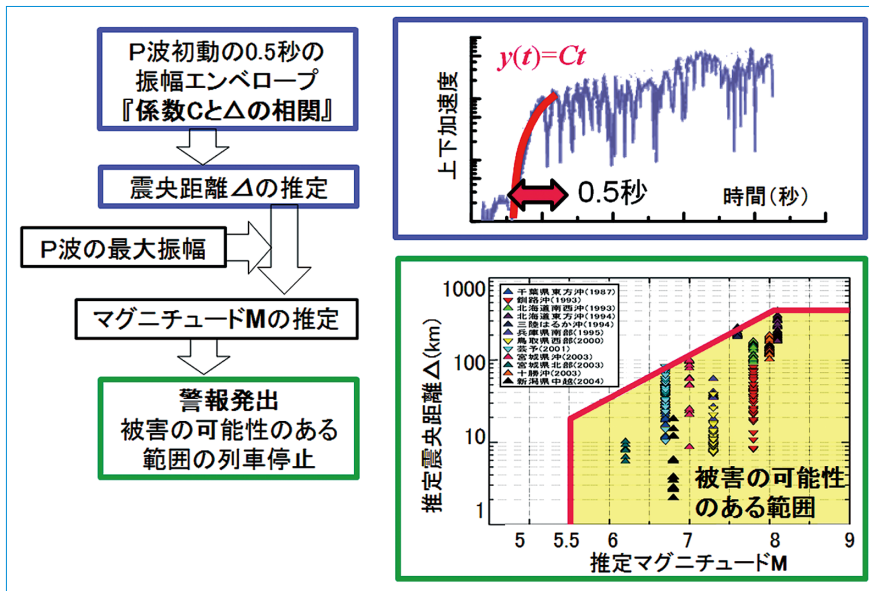


図6 早期地震警報システム(C-Δ法の例)



図8 ハードとソフトの組み合わせの重要性

情報を提供することを目的に、本システムの改良を行っており、来年の夏頃には、各路線に沿った揺れに加えて、構造物の被害予測の情報についても提供できる予定です。

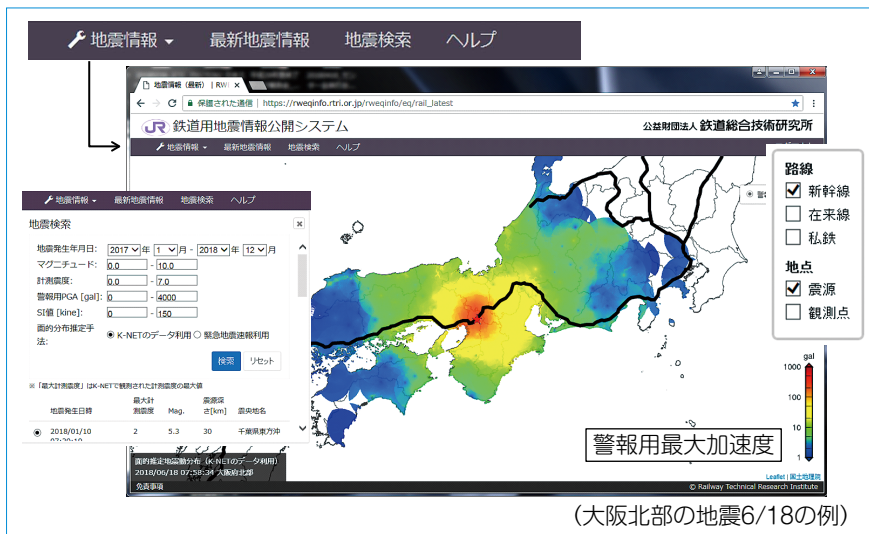


図7 鉄道用地震情報公開システム

の情報であり、沿線の揺れを必ずしも表しているわけではありません。「点」に代わり「線」の情報を活用できれば、より効果的な運転再開と早期復旧が可能となります。そこで、鉄道総研では、2015年6月1日より「鉄道用地震情報

公開システム」の実運用を開始しました。現在のシステムは、(国研)防災科学技術研究所が運営する地震観測網K-NETで観測された地震記録を提供いただき、日本全国の揺れを500mメッシュで計算し、揺れの分布図を登録していただいた方々に無償で公開しています。これまでの実績では、平均して地震発生から10分以内で情報を発信しており、精度も計測震度で±0.5程度の高い精度を確保しています。2018年6月18日の大阪北部地震や9月6日の北海道胆振東部地震でも、情報を的確に発信しました(図7)。

鉄道事業者にとって、もっと有用な

おわりに

鉄道は社会経済活動の基盤であり、今後想定される地震に対して鉄道がレジリエンス性を発揮することが期待されています。そのためには、時間的・分野的に途切れなく、ハード対策・ソフト対策を組み合わせることが重要です。たとえば、図8に示すように、ナビが搭載されていると車は目的地に早く・効率的に到達でき、その性能を思う存分発揮できるのと似ているのではないのでしょうか。[RRR]

文献

- 1) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善出版, 2012
- 2) 豊岡亮洋, 古屋卓稔, 中田裕喜, 宇野匡和: 免制震構造を活用した大規模鉄道PC橋りょうの耐震補強, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2016
- 3) 井澤淳, 大西高明, 藤原寅士良, 舘山勝: 低コストで液状化地盤を改良する, RRR, Vol.74, No.6, pp.8-11, 2017
- 4) 小野寺周, 和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆: 構造物データベースで地震リスクを求める, RRR, No.3, pp.24-27, 2019
- 5) 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

計測震度

震度計によって測定された、地表のゆれの強さの程度を数値化した震度。

SI値

アメリカのHousner博士によって提唱され、地震によって一般的な建物にどの程度被害が生じるかを数値化したもの。