

鉄道地震工学研究センターの役割と 地震関連技術の研究動向

室野 剛隆*

Role of Center for Railway Earthquake Engineering Research and Recent Research of Earthquake-related Technology

Yoshitaka MURONO

Railway Technical Research Institute opened the Center for Railway Earthquake Engineering Research on April 1, 2014. There is increasing concern about the risk of seismic disasters particularly caused by huge earthquakes. The disasters by huge earthquakes spread wider and become more complex. In order to achieve safer railway systems by coping with these issues, the center was established as a unique “base site” for railway-seismic technology in Japan. The center also integrates RTRI’s research resources on quake-motion, seismic design and countermeasure, and early alarming. In this report, the role of CREER and recent research of earthquake-related technology are introduced.

キーワード：鉄道地震工学研究センター，耐震裕度，危機耐性

1. はじめに

構造物の耐震性に関して科学的な考察が行われるようになったのは、我が国では1891年濃尾地震以後であり、1923年の関東地震を契機に本格的な耐震設計が導入された。鉄道でも、橋梁標準設計（1930年、鉄道省建設局制定）が制定され、「自重および土圧に対し水平震度0.2を考慮すること」が示された。これは「震度法」と呼ばれる設計法であり、その後も、地震が発生して新しい知見が得られる度に、震度法は姿を少しずつ変えながら、耐震設計の基本として長きにわたり使われてきた。しかし、1995年兵庫県南部地震での鉄道構造物の被害に鑑み、耐震設計法が飛躍的に進歩するとともに、種々の耐震化技術が提案され対策が進められてきた¹⁾。また、構造的な対策のみならず、地震を早期に検知し、必要に応じて警報を出すことで列車を減速・停止させる早期地震警報システムが導入された。第1世代の早期地震警報システムであるユレダスは1988年の青函トンネル開通時に初めて導入された。このユレダスは、地震がどこで発生したかという情報を、指令に表示する機能のみを有していた。その後、ユレダスは改修され、1992年に東海道新幹線「のぞみ」導入に伴い警報判定機能を有するユレダスが世界で初めて実用化された。さらに、1998年に北陸新幹線開業時に、初期微動検知手法を改良したコンパクトユレダスが導入された。2004年よりアルゴリズムの見直しが行われた現行のシステムに置き換えられている²⁾。

このような状況下で、2011年東北地方太平洋沖地震が

* 鉄道地震工学研究センター センター長

発生した。モーメントマグニチュードMwが9という我が国史上最大の地震であった。いわゆる「想定外」に対する残余のリスクがあることを強く認識する結果となった。

中央防災会議によると、南海トラフ連動型の最大クラスの地震・津波の想定がなされ、Mw9.0との暫定値が発表された³⁾。広い地域で震度6強～7の揺れが想定されている。Mw8以上の巨大地震に関して言うなら、今後30年間で発生確率が60～70%と公表されており⁴⁾、鉄道においても巨大地震の発生を織込んでいくことが強く求められている。

一方、巨大地震では地震被害が広範化かつ複雑化する。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域および南海トラフ沿いの地震の想定震源域は、長さは400km以上であり、日本全土が地震の影響を受ける。また、2004年新潟県中越地震での新幹線の脱線、東北地方太平洋沖地震での電車線柱の被害など、構造物と車両、電車線柱等が複雑に相互作用系を形成し被害が発生している。

このような巨大地震に対処し、より安全な鉄道を実現するために、地震工学に関わる鉄道総研の研究リソースを『集約』するとともに、わが国唯一の鉄道地震工学の『拠点』として、鉄道総研では新たに「鉄道地震工学研究センター」を、平成26年4月1日に設置した。本報告では、鉄道地震工学研究センターの活動内容と役割、さらには地震関連技術の開発動向について紹介する。

2. 鉄道地震工学研究センターの活動

2.1 活動方針

地震に対する各種の研究開発については、従来は各研

特集：地震防災・耐震技術

究部が実施してきたが、研究リソースを鉄道地震工学研究センター（以下、地震研究センター）に集約することにより、鉄道の地震リスクの軽減と強靱化を目指した最先端の研究を、より高品質に、よりスピーディーに実施する。地震研究センターでは、地震に関わる様々な研究課題に取り組むことになる。現在、①鉄道地震災害シミュレータの構築に係る研究開発、②巨大地震に対する安全性向上に係る研究開発、③早期地震警報に関連する研究開発、④新しいシミュレーション技術の開発、⑤電柱・車両の地震時走行安全性に係る研究開発（関連研究部と連携）、⑥耐震設計の技術支援、等に取り組んでいる。さらには、今後は、i) 地震リスクマネジメント、ii) 津波や地表断層などの地震随伴事象の問題などにも取り組んでいく予定である。

一方、鉄道地震工学の拠点としての取組みとして、①地震に関連した積極的な情報発信、②地震発生時の災害復旧拠点、③震災リスク軽減技術を実践展開できる鉄道技術者の育成支援、等を推進していく。特に①については、平成27年4月の配信を目処に地震情報配信システムを整備しており、4章に詳細を示す。

2.2 体制

地震研究センターは、地震解析、地震動力学、地震応答制御の3研究室から構成されている。各研究室の担当分野は表1を目安とするが、耐震設計に関することや地震被害推定に関することなどは総合問題であり、全研究室が一丸となって取り組むことになる。

表1 鉄道地震工学研究センターの組織

研究室	研究内容
地震解析	早期地震検知、および、それに関連すること
地震動力学	地震動、液状化など地盤挙動に関すること
地震応答制御	構造物、車両、電車線路設備等の地震応答、免震・制震に関すること

3. 近年の研究開発動向

3.1 耐震設計と危機耐性

2011年東北地方太平洋沖地震以降は、想定を越えた危機（地震）に対してどう対応するべきか、ということが社会的な関心になっている。そこで、耐震標準⁵⁾では、想定以上の地震が発生することを前提とし、その影響が破局的な状態に至ることを回避し、全体系機能の回復を早期に可能となるように設計上配慮することが示された。このような概念を『危機耐性』と呼んでいる。従来からの耐震設計と危機耐性の関係を表したのが図1である。耐震設計では、L1地震やL2地震に対して安全性や復旧性を確保できるように設計・照査する。一方で、耐震設計で制御できない現象を考慮することが危機耐性

であり、構造的な対応以外に、構造計画を含めたソフト対応も考え合わせることになる。耐震設計・耐震補強を強化して、耐震裕度を向上させることがまずは必須事項であるが、どんなに強化しても、完全に耐震設計の補集合の部分でゼロにすることは不可能であり、巨大地震に対して被害を最小化するためには、耐震設計による「耐震裕度の向上」と「危機耐性の向上」の両者が必要である。

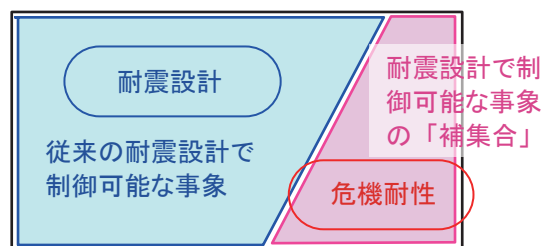


図1 耐震設計と危機耐性の関係

3.2 耐震裕度を高める研究開発動向

耐震裕度を高めるためには、まずは、①精度の高いシミュレーションにより地震動や構造物の挙動を正確に予測する。その上で構造物の耐震設計・耐震補強を実施するが、具体的な技術としては、高架橋を例にすると、想定地震に対して、②構造物（柱）を崩壊させない技術、③構造物の応答を抑える技術、④極力、脱線させない技術が必要であり、鉄道総研では技術開発を進めてきた。

想定地震に対して柱を崩壊させない技術には、(i) 部材増厚工法、(ii) 補強材被覆工法、(iii) 部材増設工法、(iv) 高性能材料の適用などがある。このうち、(ii)に該当する鋼板巻き立て補強は、鉄道で最も実績がある補強技術であり、せん断破壊を防止し、変形性能を向上させるために開発された。国交省の指導により、せん断耐力が曲げ耐力よりも小さい高架橋の柱や開削トンネルの中柱に対して、新幹線を中心に鋼板巻き立て補強が順次施された。

構造物の応答を抑える技術としては、各種の制振装置や免震装置が開発された。これまでも建築分野や道路橋への適応を前提に、様々な装置が開発されてきたが、鉄道総研では、より免震効果を高めるための工夫の1つとして負剛性摩擦ダンパーの開発を進めている（図2）⁶⁾。これは、負剛性を有するダンパーを免震支承に組み込むことで、より剛性を低下させて長周期化させるとともに、摩擦ダンパーにより減衰も付加させる装置である。

最近では、超連続基礎⁷⁾の開発も進められている。これは、基礎を数百mにわたり連続化させるものである。図3にその概念図を示す。大きなフーチングの採用により大きな支持力が期待できるので、杭基礎を省略または本数や杭長を減らすことができる。また、各基礎位置での有効入力が低減されるとともに平準化されるので、高架橋の応答も平準化・低減される。その結果、高架橋上の電柱や走行性が向上する。

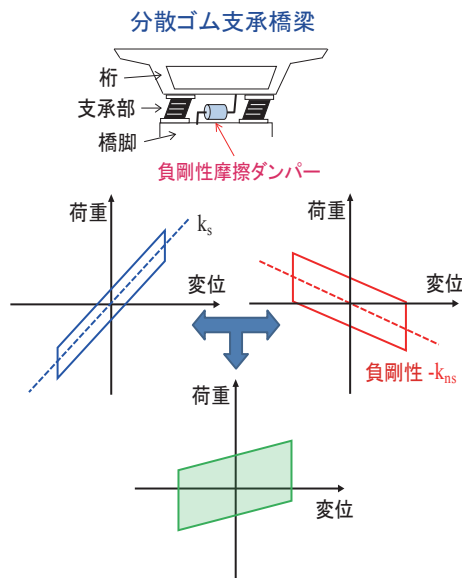


図2 負剛性摩擦ダンパーの概念

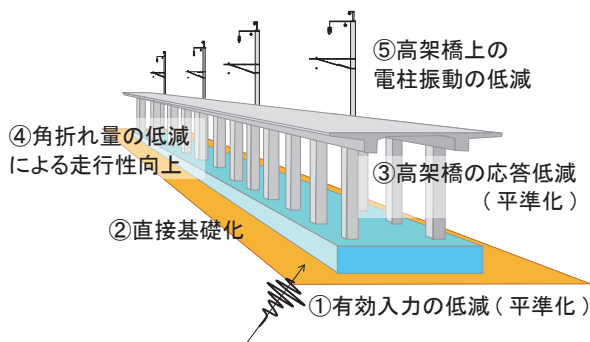


図3 超連続基礎の概念図

3.3 危機耐性を高める研究開発動向

危機耐性を高める技術には、①構造的な対応、②早期地震警報、③仮想演習、④避難誘導を含めたソフト対応、などが考えられる。

①危機耐性を向上させる構造的対応

起きてはならない最悪の事態の1つとして、鉄道構造物が倒壊することで死傷者が発生するというシナリオが考えられる。このような危機に対する構造的な対応として、“自重保障機構”が考えられる。自重保障機構とは、万が一、想定を超える地震に対して構造物を支える柱部材が破壊したとしても、ある機構により自重だけは支えて倒壊を防ぐものである。自重保障機構の1つとして、図4に示すようなラーメン高架橋を提案している。(i)地震に対して抵抗する通常の部材(図中の水色の柱)と、(ii)想定外の地震により万が一通常部材が破壊した場合にのみ、効果が発揮されて構造が倒壊するのを防ぐ部材(自重保障部材：図中のピンク色の柱)に分けて考える。通常部材は、従来の耐震設計により設計される。一方、自重保障部材には地震力による荷重が作用しない構造と

耐震設計された柱が万一破壊した場合自重を支える機能だけを有した柱(自重保証柱) 水平力を伝えない

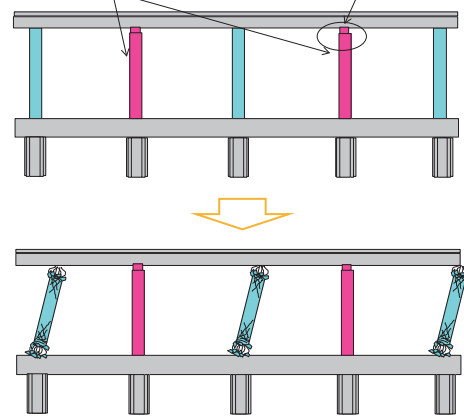


図4 自重保障機構を有するラーメン高架橋

し、想定外の地震力を受けた際にも応力を負担せず、無損傷とする。

②早期地震警報システムの高度化

起きてはならない最悪の事態の1つとして、強い揺れにより高速のまま脱線して死傷者が発生、または、構造物が損傷・倒壊した箇所に列車が突入して死傷者が発生、というシナリオが考えられる。このシナリオを回避するためには、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生し、列車の速度を速やかに低下または停止させる、早期地震警報有効である。現在運用されている早期地震防災システムは、P波初動部2秒の加速度の成長から震央距離を求めている(B-Δ法)。求められた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する(図5)。

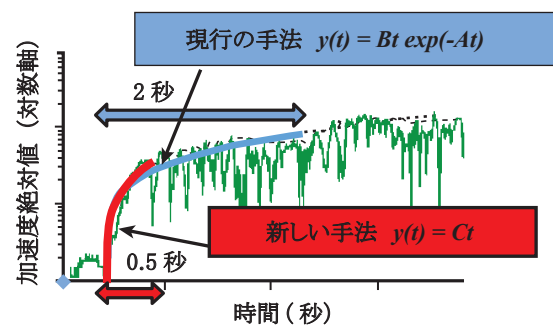


図5 新しい震央距離推定手法と現行の手法の比較

危機耐性を高めるために、鉄道総研では、①より精度の高い警報を出すこと、②より早い警報を出すことに取り組んでいる。より精度の高い警報を出すために、B-Δ法に替わるアルゴリズムとして新たにC-Δ法⁸⁾を開発した。P波初動部0.5秒程度における加速度成長を用いて、これを以下の1次関数で近似することで震央距離を求めている(図5)。新しい手法により震央距離の推定精度

特集：地震防災・耐震技術

が約13%向上し、また推定に用いるデータ長は従来の2秒から0.5秒に短縮された。

より早い警報を出すため、(i) 海底地震観測網を活用すること、(ii) 地下地震計を活用すること、に取り組んでいる。海溝型地震の場合には、海底地震計を活用することで、大幅に余裕時間を増加させることができる。海底地震計は防災科学技術研究所や海洋研究開発機構などが整備を進めている。また、直下地震の場合には、防災科学技術研究所が整備している地下地震計を用いることで、わずかではあるが余裕時間を増やすことができる。

③ 仮想演習

起きてはならない最悪の事態を回避するためには、想定外の事象が発生したら何が起こるのか、という想像力を高めて事前に訓練、つまり「仮想の演習」をする必要がある。ただし、過去の知見や経験だけを基にした仮想演習だけでは、想定を越えた地震に対して想像力豊かに訓練するのが難しい。そこで、鉄道総研では、『地震災害シミュレータ』を構築中であり、仮想演習の道具としての活用が期待できる(図6)。

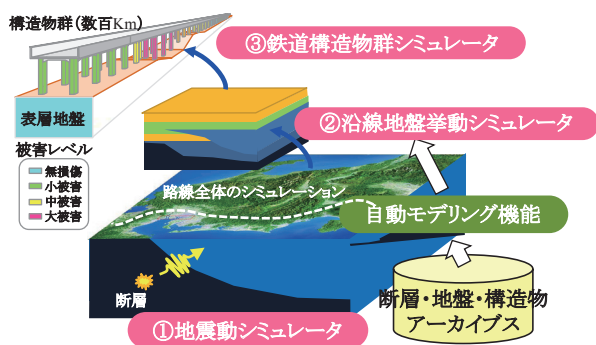


図6 鉄道地震災害シミュレータ

これは、任意の位置で任意の規模の地震を発生させることが可能であり、そのような地震が発生した場合の地震波の伝播を日本全土レベルで解析し、数百キロ区間の表層地盤や構造物群の挙動を解析することが可能なシミュレータである。解析結果については、リアリティのある可視化を行っており、様々な主体が想像力豊かに仮想演習できるようになっている。

4. 地震情報配信システム

公的な機関で公開された強震記録データを鉄道総研に早期に集約し、例えば地表面の最大加速度分布やSI値などを計算し、鉄道路線に沿って展開することにより、鉄道路線の揺れがどのようなものであったかを、地震後数分で提供するシステムを開発中である。図7にシステムの概念図を示す。鉄道沿線の強震記録データや、地盤

条件、構造物の条件を活用することで、より高精度化すると共に、構造物の被害予測までも早期に提供可能となる。これにより、早期の運転再開や復旧に大きく貢献できると考えている。

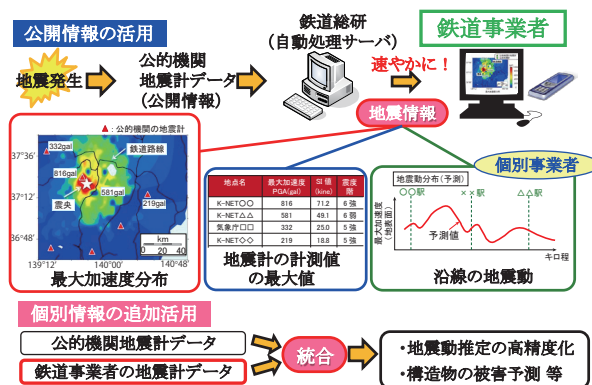


図7 地震情報配信システム

5. おわりに

鉄道は社会経済活動の基盤であり、今後想定される巨大地震に対しても、鉄道がレジリエンス性を発揮することが期待されている。そのために、鉄道地震工学研究センターは、研究開発および拠点化活動の両面から貢献することを目指していく所存である。

参考文献

- 1) 室野剛隆：地震荷重の変遷と展開（その4）鉄道施設，地震工学振興会ニュース No.193, pp.24-29, 震災予防協会，2003
- 2) 山本俊六，佐藤新二：鉄道における早期地震警報システムの変遷，RRR, pp.16-19, 2010
- 3) 内閣府・中央防災会議「南海トラフの巨大地震モデル検討会」：中間とりまとめ，2011
- 4) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版），2013
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012
- 6) 豊岡亮洋他：独立型負剛性摩擦ダンパーの開発および載荷試験による検証，土木学会 第17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論文集，2014
- 7) 田中浩平，室野剛隆：超連続基礎を有する高架橋の提案とその効果確認の検討，土木学会 第17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論文集，2014
- 8) 山本俊六，野田俊六：早期地震警報システムにおけるP波を用いたより高精度な震央推定手法，JREA, Vol.56, No.6, pp.15-18, 2013