

時間的・分野的にシームレスな地震対策の実現を目指した技術開発

室野 剛隆*

Technological Development to Realize Seamless Earthquake Countermeasures in Terms of Time and Field

Yoshitaka MURONO

It is important to raise the “strength” and “recovering ability” for railways to be resilient against the anticipated earthquakes. It is, therefore, important to respond to the earthquake in four steps (prior response before the earthquake occurrence, emergency response at the time of the earthquake, initial response immediately after the earthquake and restoration/ recovery response after the earthquake) from view point of time. Further, since the railway system is composed of various facilities, it is necessary to consider the seismic countermeasures for the whole field including the civil engineering structures, the electrical poles and the vehicles. We have to respond uninterruptedly both in time and in the technical fields, in other words, seamlessly. Therefore, in this report, we introduce the latest technology that enables the establishment of seamless earthquake countermeasures.

キーワード：シームレスな地震対策，強さと回復力

1. はじめに

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ある(図1)。地震に対する「強さ」を高めるには、「事前対応」が重要であり、地震に強い構造物等を設計・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ある。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, 継続のための対応, 復旧・復興対応)がある。「事前対応」としては、仮に想定以上の地震が発生した場合には、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ぐことである。「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、利用者や社員の避難や安全を確保することが有効である。「継続のための対応」とは、巡回計画, 復旧計画, 要員・資材調達計画などを含めた初動対応であり、主には情報地震後速やかに、各種の情報を活用することが有効である。「復旧・復興対応」とは、実際に行われる復旧作業のことである。

本報では、「強さ」と「回復力」を高めるための鉄道総研の最近の取組み事例について紹介する。

2. 地震に対する「強さ」を高める取組み

(1) 揺れに対する「強さ」を高める

強さを高める取組みとしては、新設構造物の耐震設計

* 鉄道地震工学研究センター 研究センター長

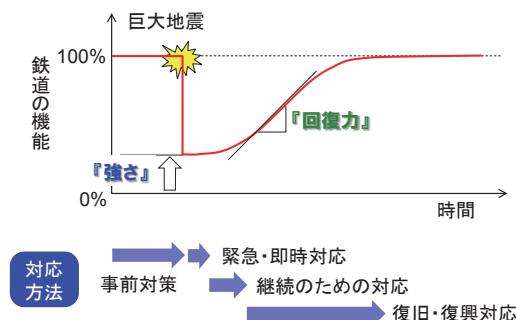


図1 巨大地震に対する『強さ』と『回復力』

および既設構造物の地震対策を着実に実施することが効果的である。耐震設計については、平成24年に構造物等設計標準(以下、耐震標準)が改訂され¹⁾、新たに設計される構造物の安全性は極めて高いものとなっている。

既設構造物の耐震補強については、1995年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行われている。主に、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、鋼鈑巻き立て補強を中心とした対策が実施されている。さらに、近年では、河川橋梁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た。これを受けて、採用例の多い摩擦型ダンパーを対象にした設計手法の整備を行った²⁾。また、より効果の高いものとして、負剛性型摩擦ダンパーの開発も進めている³⁾。

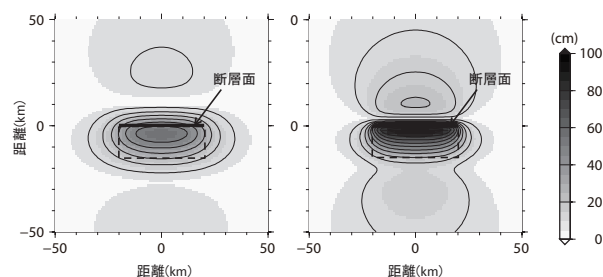
(2) 地表断層変位に対する「強さ」を高める

耐震標準では、地震時の作用としては「揺れ」を想定

特集：地震防災・耐震技術

している。一方、大きな地震では岩盤内に生じた断層のズレが、堆積層を突き抜けて地表に現れることがあり(地表断層変位)、これが直接の原因となる構造物の被害も報告されている。このような地表断層変位については、耐震標準では地震随伴事象として整理されており、現在の技術水準を勘案して、明確な照査対象とせず配慮事項とされている¹⁾。このような背景に鑑み、地表断層変位に対する取組みを開始した。

過去の内陸活断層地震における地表断層変位の大きさを調査したところ、モーメントマグニチュード Mw7.0 程度の場合には平均で 1m 前後、Mw7.5 程度になると 3m を超える場合があることを確認した。また、均質地盤における地表断層変位を理論的に算出する手法を整備した。地震規模として Mw7.0 の逆断層を想定し、断層面のすべり量を一様とした場合の試算結果を図 2 に示す。断層直上位置の変位量は概ね 1m 程度となっており、上記の結果と調和的な傾向を示すことを確認した。また地震規模は同一でも、断層深さが浅いほど最大の変位量が大きくなる一方で影響範囲は狭くなるのが分かった。



(a) 断層上端深さ10km (b) 断層上端深さ3km

図2 地表断層変位量の評価結果

これに対して、橋梁・高架橋の挙動については、横ずれ断層と縦ずれ断層の場合に分けて検討を進めている。横ずれ断層の場合には、断層との交差角度の影響が大きいことが数値解析・実験から分かった。交差角度が 90 度以下の場合には、断層を跨ぐスパンにのみ落橋や支承部の損傷が集中するのに対して、90 度以上になると損傷箇所は広範囲に及ぶことが分かった⁴⁾。

縦ずれ断層の場合には、(i) 地中梁の存在の影響が大きく、地中梁がないと小さな断層変位でも上層梁に大きなダメージを受けてしまうこと、(ii) 落橋リスクをなくすという観点から張り出し式が有効であること、などを明らかにした⁵⁾。

(3) 液状化に対する「強さ」を高める

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た(図3)。本工法は、薬液の固まる時間や粘性等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ある。本工法

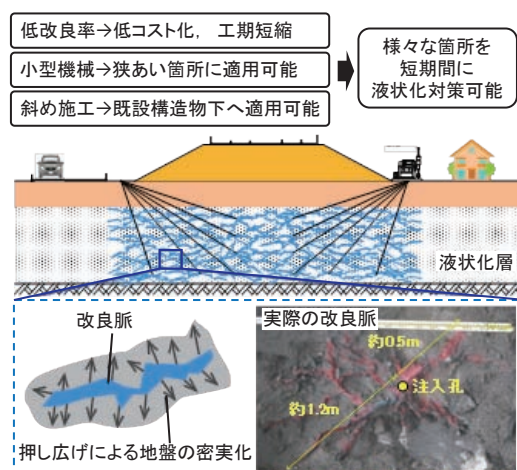


図3 脈状液状化対策工法

では、この改良脈を様々な方向に形成することが出来るため、対象域の地盤全体を改良することが可能となる。

注入率 10% (従来工法の 1/3 程度の注入率) で施工した結果、地盤の堅さを表す Nd 値や密度、側方からの圧力を表す静止土圧係数が脈状注入により増加したことが分かった。この結果を用いて、液状化に至る可能性や液状化被害の程度を試算した結果、構造物に与える液状化の影響を無視できるレベルまで、液状化程度を低減出来る。

このように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工期短縮が可能である。また、地表面の隆起量や不同変位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言える。

3. 地震に対する回復力を高める取組み

(1) 想定外地震に対して事前に「回復力」を高める

設計の段階で、想定を越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」という概念がある。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¹⁾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」ことである。設計地震動に対して必要な性能を付与させる行為が従来の耐震設計であり、強さ以上の外力が作用した状況に対応することが危機耐性である。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る。

想定を越える地震に対して、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」を開発した(図4)。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模型を作成し、倒壊防止効果を確認する静的荷重試験を

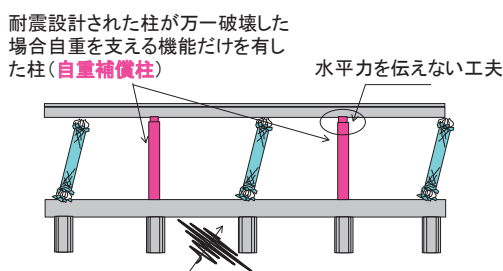


図4 自重補償機構を有するラーメン高架橋

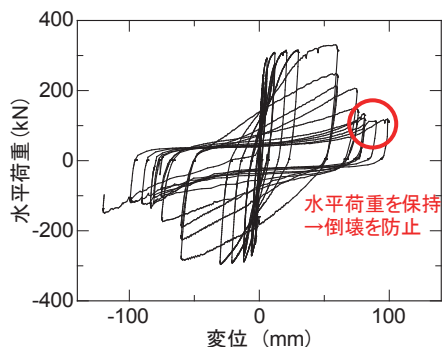


図5 自重補償機構の荷重～変位関係

行った。本来の構造物の終局変位を大きく超過し、本体構造の柱が損傷した後に自重補償柱が構造物の鉛直支持機能を発揮し、塑性率 50 以上の大変形領域まで倒壊を防止できることを本試験により確認できた (図 5)。

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、復旧スペース等を支障する方向には倒壊させない「倒壊方向制御機構」を開発した。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る (図 6)。有効性を検証するために、倒壊方向制御機構を有するラーメン高架橋模型を作成し、振動台による破壊試験を実施した。試験では、倒壊方向がそれぞれ左側・右側となるように倒壊方向制御機構を組み込んだ 2 体の試験体を同時に振動台上に設置し、共振領域で正弦波漸増加振を行った。その結果、ブロック型およびチェーン型いずれについても、模型の振動挙動に非対称性が導入され、想定する方向に倒壊が生じることを確認した (図 7)。

(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、早期地震警報システムの活用が有効である。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する。このように推定されたマグニチュードと震央距離の組合せに応じて、鉄道への被害の

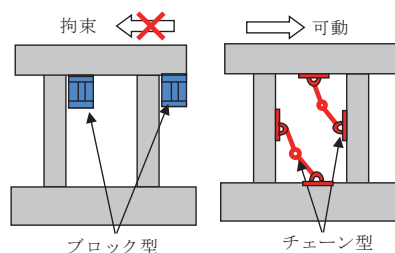
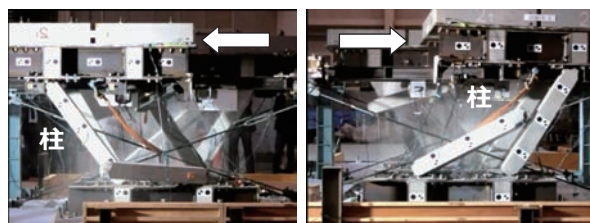


図6 提案する倒壊方向制御機構



(a) 左方向に倒壊制御 (b) 右方向に倒壊制御

図7 倒壊方向制御機構の振動台実験結果

可能性を既往の即座に判断し、必要に応じて警報を発生し、列車を停止させる。

B-Δ 法に替わるアルゴリズムとして新たに C-Δ 法を開発した⁷⁾。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 1 次関数で近似することで、その傾きである C 値と震央距離の関係式を過去に観測された実地震記録から経験的に求めた。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% 向上した。また、この C 値は、物理的には地盤の不均質構造の影響を大きく受けると考えられることから、地域ごとの地盤の速度構造の不均質性を考慮して、C 値と震央距離の関係式の見直しを行ったところ、震央距離の推定誤差はさらに 40% 改善された⁸⁾。本アルゴリズムを搭載した地震計のプロトタイプ型も完成しており、実路線への実装準備を進めている。

(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、要員・資材調達計画などを含めた初動対応には、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最も重要である。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るが、それは「点」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ない。「点」に変わり「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る。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」の実運用を開始した。詳細は、文献 9) を参照頂きたい。現在のシステムは、公的な情報のみを用いて、揺れの空間分布 (警報用最大加速度、震度、SI 値) を推定しているが、各鉄道事業者が所有する構造物のデータを用いることで、構造

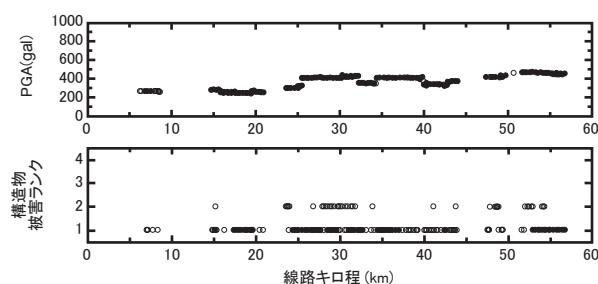


図8 鉄道情報公開システムによる被害予測

物の被害予測についても情報として提供できるように改良している。現在、プロトタイプを製作し、検証作業をしているところである。図8は、サンプル路線に対して、ある地震による沿線の最大加速度（PGA）と構造物の被害の大小（ランク1～4で表示）の予測結果を示したものである。

4. 共通基盤技術としてのシミュレータ

地震対策を考える上での共通基盤技術として、『地震災害シミュレータ』を構築し、継続的に刷新を続けている。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動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。鉄道は長い線状の施設であり、土木構造物や電柱、車両など様々な要素から構成されており、どこにどのようなリスクが潜んでいるのか見つけるのが難しい。本シミュレータを用いることにより、弱点箇所の抽出や対策優先度の設定などを判断することが可能である。従来のリアルタイム版と動的解析版に加えて、新たな方法として、インベントリー法を開発した（図9）¹⁰。

構造物モデルを8つの構造物パラメータに紐づけて格納した「インベントリー・データベース（IDB）」を構築した。格納する構造物モデルは、各種調査による実測値に基づくものであってもよいし、網羅的に作り出し

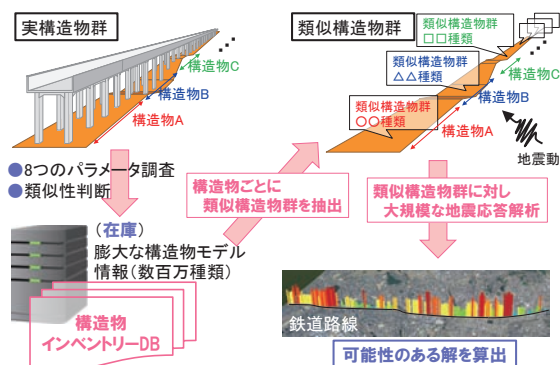


図9 インベントリー DB を用いた全線評価

たものでもよい。現状においては、約300万ケースのモデルが格納されている。IDBを活用することで、対象とする路線の構造物群に最も類似した構造物モデルを抽出し、動的解析をすることが可能となる。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（短時間化、低解析コスト化）することができるだけでなく、モデル化に必要な情報が欠損した場合においても、抽出結果のばらつきは多くなるものの、鉄道路線全線の評価を容易に行うことが可能となる。

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、鉄道総研は、研究開発および情報発信の両面から貢献していく所存である。

文献

- 1) 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
- 2) 豊岡亮洋，實地雄大：応答塑性率を制約条件とした摩擦型ダンパーの設計手法の開発，鉄道総研報告，Vol.31, No.7, pp.53-58, 2017
- 3) 豊岡亮洋，本山紘希，河内山修，岩崎雄一：絶対応答低減のための独立型負剛性摩擦ダンパーの開発，鉄道総研報告，Vol.29, No.3, pp.35-40, 2015
- 4) 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特性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
- 5) 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
- 6) 井澤淳，荒木豪，小島謙一，館山勝，大西高明，藤原貞士良：効率的な液状化対策が可能な脈状地盤改良工法の開発概要，鉄道総研報告，Vol.30, No.5, pp.23-28, 2017
- 7) 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
- 8) 岡本京祐，津野靖士：P波伝播の地域性を考慮した早期地震警報の高精度化手法，鉄道総研報告，Vol.31, No.7, pp.11-16, 2017
- 9) 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概要，鉄道総研報告，Vol.30, No.5, pp.41-46, 2016
- 10) 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，第72回土木学会年次学術講演会（投稿中），2017