

巨大地震に対する鉄道の取組み

強さと回復力を有する地震対策を目指して

室野 剛 隆

今後想定される巨大地震に対しては、鉄道の「強さ」と「回復力」が求められる。そのためには、地震発生前、発生時、発生直後の各フェーズにおいて、適切な対応をとることが重要である。本報では、鉄道総研の取組みとして、『強さ』を高める「事前対応」策としての新たな耐震化技術をまず紹介する。その後、『回復力』を高める「事前対応」策としての危機耐性向上技術、「緊急・即時対応」としての早期地震警報システム、「継続のための対応」策としての鉄道地震情報公開システムについて、それぞれ概説する。

キーワード：巨大地震、危機耐性、自重補償機構、早期地震警報システム、地震情報公開システム

1. はじめに

2011年3月11日、太平洋三陸沖を震源として、東北地方太平洋沖地震が発生した。地震規模を表すモーメントマグニチュードが9という日本の観測史上最大の地震であった。この地震では、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こととなった。今後もこのような巨大地震の発生が危惧されており¹⁾、鉄道の運営においても、その影響を織り込んでいくことが求められている。そのためには、鉄道がレジリエンスを有すること、つまり、「ある程度の地震に耐える強さ」と、「万が一災害・危機の影響を受けてもすぐに回復する力（回復力）」を併せ持つことが重要である。図-1にその関係性を概念的に示す。

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ように構造計画や耐震設計を行なうことである。「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、各フェーズにおける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

鉄道構造物の耐震設計は、鉄道構造物等設計標準・同解説「耐震設計」（以下、耐震標準）²⁾に基づき行われている。性能設計法が採用されており、L1地震動に対して列車の走行安全性、L2地震動に対して安全性を、重要構造物については復旧性を満足するように設計することが規定されており、飛躍的に安全性は向上している。このことは、耐震標準（H11年版）で設計された構造物は近年の地震でも大きな被害を受けなかったことから明らかである。また、設計想定地震に対する耐震性能を高める技術開発も進められてお

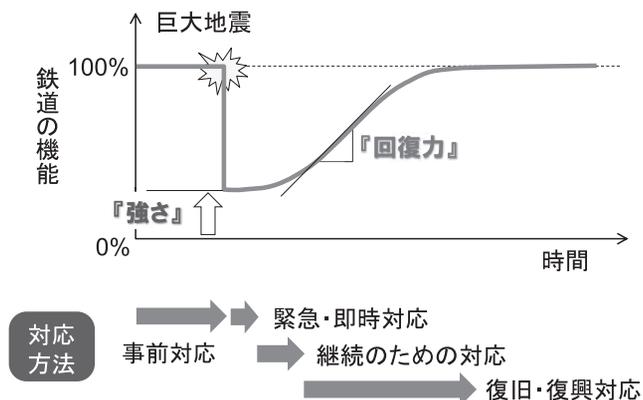
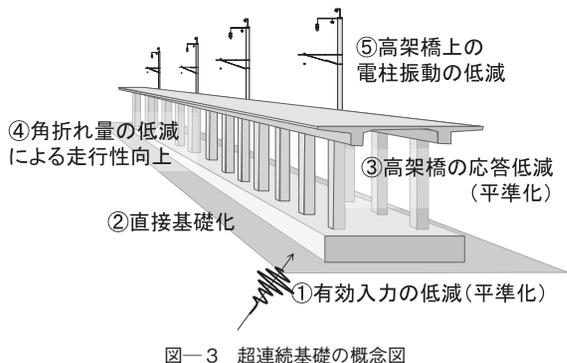
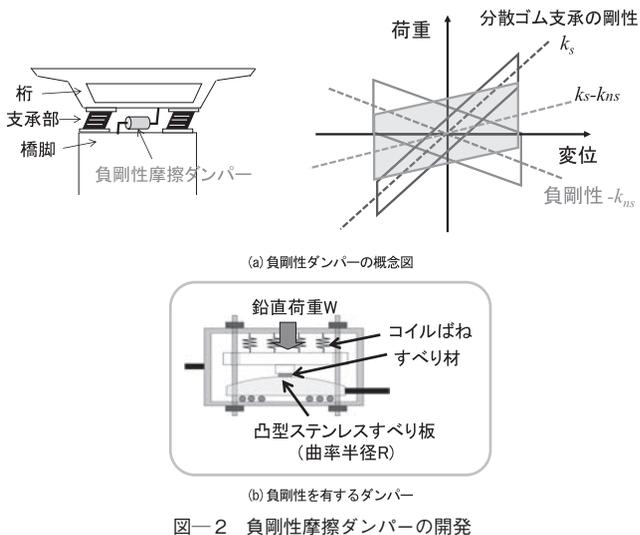


図-1 巨大地震に対する「強さ」と「回復力」

り、既に実用化されているものも多い。例えば、鋼板巻き立て補強は、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、鉄道で最も実績がある補強技術である。ここでは、少し先を見据えた新しい技術について紹介する。

建築や道路分野では、制振装置や免震装置により構造物の応答を抑えるための技術開発が盛んであるが、鉄道では、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³⁾。例えば、分散ゴム支承を有する場合を考えると、一般には、分散ゴム支承の剛性に依存して、桁と橋脚の相互作用力が発生し、場合によっては大きな力が橋脚に作用する。これに対して、負の剛性を有するダンパーを併用することで、ゴム支承の剛性を見かけ上低剛性化でき(図-2 (a))、長周期化させて、支承部の相互作用力を低減できるとともに、摩擦ダンパーにより減衰も付加させることができる。この負剛性を実現するデバイスとして、図-2 (b)を開発した。その有効性については、ハイブリッド試験により検証済みで、現在は、実大規模でのデバイスの検証を行っている。

また、全く新しい概念の構造型式として、超連続基礎の開発も進めている⁴⁾。これは、基礎を100m～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、フーチングを連続化させることで、各基礎位置での入力動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ことが数値計算により確かめられている。

3. 地震に対する回復力を高める取組み

(1) 事前対応

(a) 危機耐性

設計の段階で、地震に対する回復力を高めるものとして、「危機耐性」という概念が近いと思われる。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²⁾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」とこととされている。危機耐性をもう少し分かりやすく解説したものが図-4である。設計地震動に対して強さを付与(安全性や復旧性などの要求性能を満足)させる行為が耐震設計であり、強さ以上の外力が作用した状況(耐震設計で制御可能な事象の補集合)に対応することが危機耐性である。危機耐性に対しては、構造的な対応以外にも、構造計画なども含めたソフトの対応も含まれる。巨大地震に対しては、従来の耐震設計・補強を最大限強化することがまずは必要不可欠であるが、どんなに強化しても、耐震設計の補集合の部分に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、耐震設計と危機耐性の向上の両者が必要である。

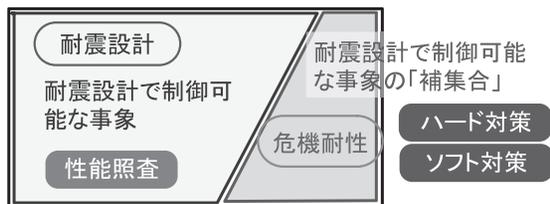
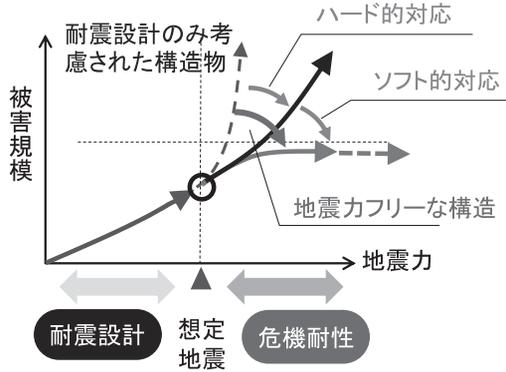


図-4 耐震設計と危機耐性の関係

危機耐性を向上させることは、設計地震動の数倍の大きさの地震動を想定し、構造物に大きな安全率を持たせるという単純な考え方を意味している訳ではない。大きな地震動を想定し、それに耐える構造物を設計するという従来の耐震設計の考え方では、コストが右肩上がりに増大し現実的ではない。そもそも、想定外の地震として、何倍の大きさの地震動を想定すれば

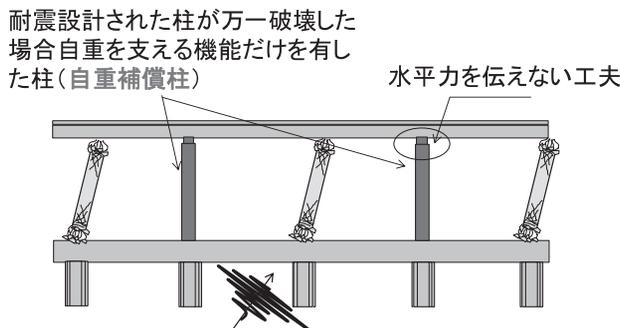


図一五 危機耐性で目指すもの

よいのか、という問いに対して明確に答えることはできない。これでは、危機耐性に配慮したとは言い難い。図一五に示すように、想定地震に対して想定した被害になるように被害をコントロールしつつ、想定を超えた不測の事態に対しても、被害規模をある程度で飽和させたい。それが危機耐性で目指すものである。

(b) 危機耐性を向上させる新しい技術

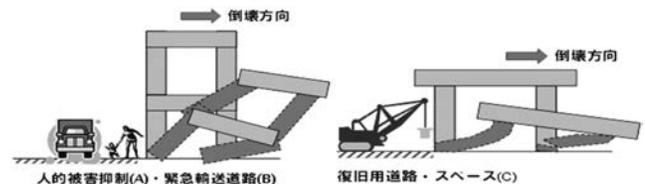
構造物の倒壊という危機に対する強力な対策として“自重補償機構”が考えられる。自重補償機構とは、想定を超える地震に対して柱や橋脚などの鉛直方向の部材が破壊しても、上部工等を支持するための鉛直支持性能の喪失を防ぐことで、倒壊を防止するというコンセプトである。その1つとして、図一六に示すようなラーメン高架橋を考えている。“通常部材”と“自重補償部材”の2種類の柱から構成されている。通常部材は、従来のように、L2地震に対して性能を満足するように耐震設計された柱である。一方、自重補償部材は、鉛直荷重のみを分担し、地震力による水平荷重は作用しない構造とし、想定外の地震力を受けた際にも応力を負担せず無損傷とする。その結果、通常部材が想定を超えた地震で破壊しても、無損傷の自重補償部材が少なくとも上部工を支えてくれる。1層5径間のラーメン高架橋を対象に試算を行った結果⁵⁾、例えば、10本ある柱のうち4本を自重補償部材に変更すると、L2地震に対して通常部材が負担すべき



図一六 自重補償機構を有するラーメン高架橋

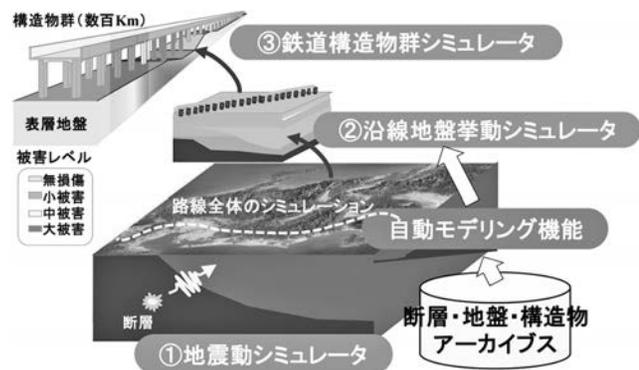
地震時慣性力が增大するため、従来よりも通常柱の耐力を増加させる必要があるが、その量は引張鉄筋数本程度であることが分かった。

一方、想定を超える地震動により、構造物が万が一倒壊した場合、その波及効果として倒壊に伴う人的被害の拡大、復旧性の著しい低下・喪失を予見して対応することも重要である。これに対しては、倒壊する方向をコントロールする機構の付与や倒壊の広がりやコントロールする機構⁶⁾の付与が有効である(図一七参照)。その機構の詳細は参考文献⁶⁾に譲るが、これにより、歩行者や周辺施設の利用者、緊急輸送道路などの災害復旧時における重要ルート、構造物を復旧するための専用道路やスペース等の確保が可能となり、危機耐性を向上できる。



図一七 倒壊方向の制御⁶⁾

危機耐性を高めるためには、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」をすることも重要である。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、想定を超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』を構築した⁷⁾。仮想演習の道具としての活用が期待できる(図一八)。これにより、様々なシナリオに対する事前の演習が可能である。任意の地点・任意の規模の地震を想定す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、数百キロ区間の線区全体の構造物群の挙動を解析することが可能である。



図一八 鉄道地震災害シミュレータ

(2) 緊急・即時対応

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。鉄道では、1992年に東海道新幹線「のぞみ」導入に伴い世界で初めて実用化され（当時はユレダスと呼ぶシステム）、2004年にはアルゴリズムの見直しが図られた現行のシステムに置き換えられている。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（図-9）。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、鉄道への被害の可能性を即座に判断し、必要に応じて警報を発生し、列車を停止させる⁸⁾。

現在は、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法を開発した⁸⁾。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震央距離を求めている。新しい手法により震央距離の推定精度が約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。

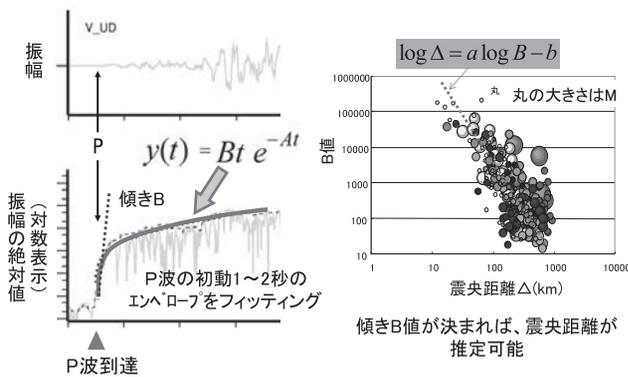


図-9 早期地震警報における震源情報推定アルゴリズム

(3) 継続のための対応

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と言われている。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」⁹⁾の実運用を開始し、既に100以上の地震に対して情報を公開した。

本システムは、公的機関が地震直後に発表する地震情報、地震波データに基づき、詳細な揺れの空間分布を即時に計算し、公開するものである。システムにおける処理の流れを図-10に示す。システムは、気象庁から配信される緊急地震速報の最終報を受信し、これが事前に定めた起動条件を満たす場合に処理を開始する。次に自動取得したK-NET波形データと事前に用意した地盤の増幅特性に関するデータを用いて揺れの空間分布を推定する。さらに、これらの推定結果に基づきホームページを更新し、登録されたユーザーに対してホームページ更新のメールを送信する。公開されるホームページ画面の一例を図-11に示す。画面左側には推定された揺れの空間分布図が表示される。揺れの空間分布図で用いる地震動指標は鉄道事業者によく利用される警報用最大加速度、SI値、計測震度の3種類である。この他、各観測点での所要降伏震度スペクトルなどが表示可能であり、耐震標準で規定されたスペクトルと比較できるようにしている。

地震動の空間分布を求める際には、地盤の塑性化を考慮できる増幅率の評価手法¹⁰⁾を用いた。この手法を用いることにより、基盤に入力する地震が小振幅のレベルから大振幅のレベルまで増幅率を適正に扱うことが可能となる。本システムにおける揺れの推定精度を検証するために、過去に発生した様々な地震を対象

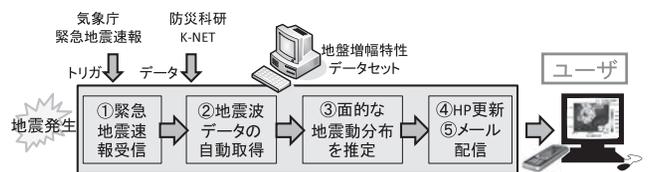


図-10 鉄道用地震情報公開システムの処理の流れ



図-11 鉄道用地震情報公開システム

にシステムによる推定値と K-NET 以外の地震計による観測値とのブライントテストを行った。その結果、全データにおける誤差の平均は 0.61 であり、計測震度で ± 1 以内の誤差に収まっていることが分かった。

4. 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。

JCMA

《参考文献》

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 5) 西村隆義，室野剛隆，本山紘希，五十嵐晃：危機耐性を高める自重保障構造の提案と成立性，第 70 回土木学会全国大会概要集 CD-ROM, 2015.
- 6) 齊藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，第 70 回土木学会全国大会概要集 CD-ROM, 2015.
- 7) 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（印刷中），2016.
- 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.
- 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，鉄道総研報告 Vol.30, No.5（印刷中），2016.
- 10) 野上雄太，坂井公俊，室野剛隆，盛川仁：表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No.1, pp.191-201, 2012.

【筆者紹介】

室野 剛隆（むろの よしたか）
（公財）鉄道総合技術研究所
鉄道地震工学研究センター長

