

危機耐性の向上 — 想定を超える巨大地震への対応 —

室野 剛隆*

Improvement of Anti-Catastrophe Performance
— Measures for Unanticipated Earthquake —

Yoshitaka MURONO

How to respond to unanticipated earthquakes has become a social concern after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The seismic design standard for railway facilities therefore requires designs to assume the occurrence of an earthquake on an unanticipated scale, and to prevent such an earthquake from causing catastrophic damage. This concept is called “anti-catastrophe”. In addition to the conventional “improvement of seismic performance”, “improvement of anti-catastrophe” is required to minimize the damage from huge earthquakes through seismic design. In this paper, some techniques to improve anti-catastrophe performance 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

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。東北から関東にかけての東日本一帯に甚大な被害をもたらした。この地震の経験は、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させる結果となった。今後もこのような巨大地震の発生が危惧されており¹⁾、これに対して、社会がレジリエンスを有することが重要であるとされている。このレジリエンスとは、地震を含む自然災害に対して、社会システムの機能が停止しても、柳の枝のように折れることなく、しぶとく災害から立ち直ることを意味している²⁾。地震に焦点を絞ると、「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）」を併せ持つことがレジリエンス構築には必要であることを意味している。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、危機耐性を確保することが重要となる。危機耐性とは、2012年に改訂された鉄道構造物等設計標準・耐震設計編（以下、耐震標準）³⁾の中で初めて示された概念であり、設計

* 鉄道地震工学研究センター 研究センター長

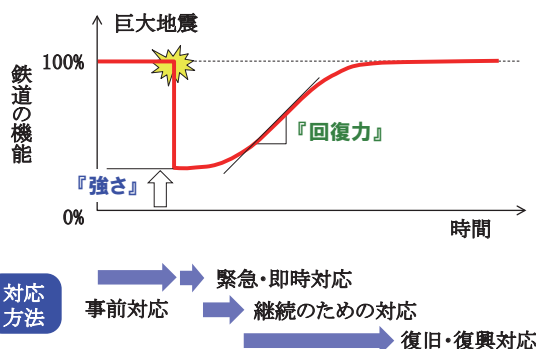


図1 巨大地震に対する『強さ』と『回復力』

想定地震に対して安全性を確保した上で、さらに、「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。津波を例にすると、高い防潮堤を設計・建設することが耐震設計であり、それでも万が一その防潮堤を越える津波が発生することを前提に、津波避難ビル等を予め用意しておくことが危機耐性ということになる。「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り、鉄道では早期地震警報システムを開発しており、既に導入・実用化されている⁴⁾。「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、地震後速やかに、揺れの大きさや被害に関する高品質な情報が必要不可欠である。そのためのツールの一つとして、鉄道総研では、平成27年6月から、鉄道用地震情報公開システムの運用を開始した⁵⁾。本システムは、地震後数分で沿線の揺れを推定・公開すること

特集：地震防災・耐震技術

で、運転再開や点検巡回の際に活用できるものと考えている。「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。

これらの各対応のうち、耐震設計や耐震補強、さらには早期地震警報については、これまでも多くの内容や事例が紹介されてきたので、本報告では省略し、ここでは、「危機耐性」に着目し、危機耐性を高めるための取組みについて紹介する。

2. 危機耐性

耐震標準では、L2 設計地震動を“最大級の地震動”と定義しており、物理的に発生可能な最大の地震動ではなく、高度な工学的判断により設定することとしている³⁾。

また、設計で考慮する L2 地震動を超える地震動の発生を否定していない。2011 年東北地方太平洋沖地震以降は、想定を越えた地震に対してどう対応するべきか、ということが重要な関心事項になっており、耐震標準では、設計で考慮している限界状態を超える可能性を否定せず、このような不測の事態への「配慮」を求めている。これが危機耐性である。危機耐性をもう少し分かりやすく解説する。従来からの耐震設計と危機耐性の関係を表したのが図 2 である。設計地震動に対して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、耐震設計で制御できない補集合の部分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的対応も含まれる。

巨大地震に対しては、従来通り耐震設計・耐震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、完全に耐震設計の補集合の部分をゼロにすることは不可能である。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」の両者が必要なのである。



図 2 耐震設計と危機耐性の関係

3. 危機耐性の向上に向けて

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った単純な考え方を意味している訳ではない。例えば、橋脚を例に、地震作用の増大に伴う橋脚の構造物断面やコストの変化の試算を行ったところ、地震作用が 2

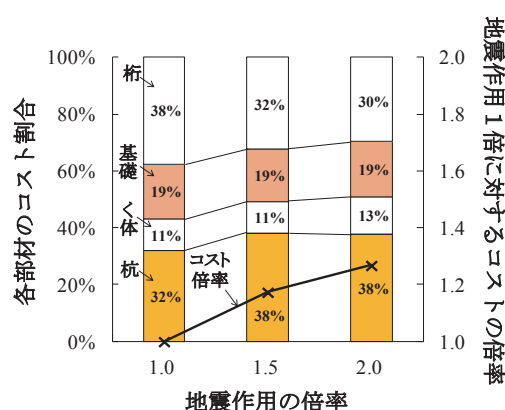


図 3 想定する地震の大きさと建設コストとの関係

倍になると、橋脚断面積が約 1.7 倍になることが分かった。工事費については、図 3 に示すように全体工事費に対する桁の工事費の割合が高いため、設計地震力と費用との関係は 1:1 ではないものの、2 倍の地震作用を想定した場合には全体工事費は 30% 程度増加することが分かる。ラーメン高架橋であれば、その感度はさらに大きくなる。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えない。図 4 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。

危機耐性を高めるためには、4 章で示すハード対応以外に、ソフト対応も有効である。例えば、危機に遭遇する可能性を事前にできるだけ少なくする努力がまずは必要である。路線計画の決定には社会的な側面や経済的な側面など多くを勘案しなければならないが、例えば活断層の存在が認められた場合は、ある程度の距離を保つように路線計画を設定することが危機耐性の観点からも有益である。また、構造計画の段階で「構造物の周辺環境について、復旧性の面から配慮」することも危機耐性の

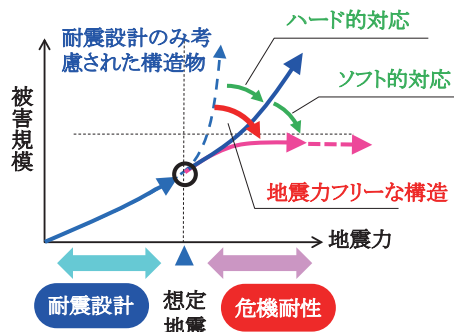


図 4 危機耐性を向上させる技術

観点からは有益である³⁾。具体的には、過去の鉄道地震被災事例に鑑みると、高架橋の側道の利用や高架下の利用状況が復旧に大きく影響していたことから、「構造物への進入路、作業ヤードの確保」や「構造物の損傷想定箇所を点検や修復工事が実施しやすい箇所に想定すること」が考えられる。

4. 危機耐性を向上させる新しい技術

耐震標準が発刊された以降の取組みを含めて、危機耐性を向上させるためのハード対応について考える。レジリエンスの構築に際しては、可能性のある全ての事象に対応するのではなく、想定を越えた不測の事態が発生した場合に“避けなければならない危機”に対して対応すべきである。例えば、平成26年に閣議決定された国土強靱化基本計画⁶⁾では、4つの基本目標を設定するとともに、起きてはならない最悪の事態を回避するための「国土強靱化アクションプラン2014」⁷⁾が提案されている。この中では、交通施設等の大規模倒壊等による死傷者発生、など色々な例が示されている。

4.1 例1：既にある危機耐性向上技術

(a) 破壊モードの制御

危機として、想定を超える地震に対して、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⁷⁾。このような危機に対する構造的な対応として、破壊に至るプロセスを緩やかにすることが望ましい。その意味で、耐震標準では、危機耐性に配慮した構造的対応として、「構造物全体系として脆性的な破壊状態となるものを避ける」こと、つまり曲げ破壊型の構造とすることを示している³⁾。1995年兵庫県南部地震以降、新設構造物はもちろん、既設構造物についても鋼板巻き補強等が順次実施され、鉄道全体としてこの点の取組みがなされてきた。

(b) 逸脱防止装置

危機の1つとして、地震時に車両が脱線して死傷者が発生するというシナリオが考えられる。2004年新潟県中越地震の発生により、新幹線が脱線したが、脱線した際、先頭車に取り付けている台車排障器と車輪との間にレールを挟みこんだ状態となり、車両が大きく逸脱することなく停止し、死傷者はゼロであり被害を最小限に抑えることができた⁸⁾。このことから、新幹線車両が地震などにより脱線した場合には、車両が軌道面から大きく逸脱することを防ぐことが被害拡大を防ぐために有効であることが分かる。地震時の車両の走行安全性については、変形をある一定レベルに抑えることにより、その性能を確保することが行われているが⁹⁾、その上で、万一が一脱線した場合にも大きく逸脱することを防止する目的

で、図5に示すように軌道側に逸脱防止ガードを設置する方法¹⁰⁾や、車両側で対応する方法¹¹⁾などが開発され、導入されている。これは、不測の事態に対する対応策であり、危機耐性の範疇に入る具体的な取組み例の1つと言える。



図5 逸脱防止装置の例¹⁰⁾

4.2 例2：自重補償機構

構造物が倒壊する危機に対して、より強力な対策として“自重補償機構”が考えられる。自重補償機構とは、想定を越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6に示すようなラーメン高架橋が考えられる。2種類の柱から構成されており、図中の水色の柱を“通常部材”，ピンク色の部材は“自重補償部材”とここでは呼ぶ。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、通常部材が想定を越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。

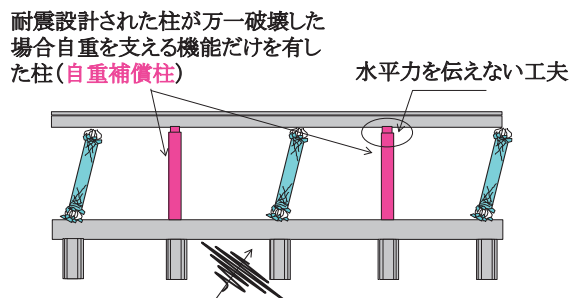


図6 自重補償機構を有するラーメン高架橋

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¹²⁾、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地震時慣性力が増大するため、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(表1)。

表1 自重補償構造の設計試算例

構造型式	通常部材の配筋	
	引張鉄筋	帯鉄筋
通常の耐震構造	D32 × 5本	D19-1組 - 150ctc
自重補償構造	D32 × 7本	D19-1組 - 100ctc

注) 柱寸法 0.85m × 0.85m で高さは 5.5m

4.3 例3：倒壊方向制御機構

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をコントロールする機構（埼玉大学・齊藤正人教授との共同研究）の付与が有効である（図7参照）。その機構の詳細は参考文献¹³⁾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。

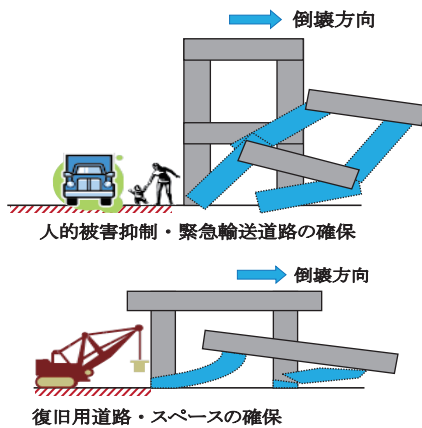


図7 倒壊方向の制御

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。レジリエンスを向上させるためには、様々な取組みが考えられるが、本報では、危機耐性に着目したハード対策に関する取組みについて紹介をした。実際には、これらの対策と早期地震警報システムと組み合わせることで、よりレジリエンスは向上する。

また、このようなハード対策を適切に実施するためには、想定外の地震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（「仮想の演習」）しておくこ

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、想定を越えた地震に対して想像力豊かに訓練するのが難しい。このような問題に対しては、各種のシミュレータが大いに貢献できると思われる。著者らは、仮想演習の道具として、「鉄道地震災害シミュレータ」を既に構築済みである¹⁴⁾。今後は、ハード・ソフトを連携させ、総合的な視点から対応策を提案していきたい。

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) 一般社団法人レジリエンス協会：
<http://www.resilience-japan.org/aboutus/greeting>（参照日：2016年3月1日）
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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，pp.41-46，2016
- 6) 国土強靱化基本計画ー強くて，しなやかなニッポンへー，2014
- 7) 国土強靱化推進本部：国土強靱化アクションプラン 2014，2014
- 8) 国土交通省航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，2007
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位標準），丸善，2004
- 10) 柳川秀明：軌道における地震時の新幹線脱線対策，第210回鉄道総研月例発表会講演集，2008
- 11) 梶谷泰史，加藤博之，浅野浩二：車両逸脱防止L型ガイドの開発，JR EAST Technical Review，No.29，pp.27-30，2009
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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