

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

鉄道構造物の地震に対する危機耐性を評価する

2012年に改訂された鉄道構造物等耐震設計標準・同解説 耐震設計（耐震標準）では、危機耐性という新たな概念が追加されています。これは東北地方太平洋沖地震の教訓から、想定以上の地震における鉄道構造物の損傷を破滅的な被害につなげないために導入されたものです。しかし、構造物が十分な危機耐性を有することを確認する体系は、耐震標準には構築されておらず、耐震構造計画における配慮事項にとどまっていた。そこで、体系構築のための第一歩として、鉄道構造物における危機耐性を定量評価するための方法論を提案しました。



田中 浩平
Kohei Tanaka
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
副主任研究員
【専門分野】地震ハザード・リスク評価、地震工学



坂井 公俊
Kimitoshi Sakai
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
主任研究員
【専門分野】地震工学



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
研究開発推進部
JR部長
【専門分野】地震工学

はじめに

日本では、地震が発生して新しい知見が得られるたびに、種々の技術開発が進められ、耐震設計法も高度化してきました。その結果として、近年の大規模地震における甚大な被害の発生件数は、着実に減少しています。しかし、国内観測史上最大規模の2011年東北地方太平洋沖地震が発生した後、設計における想定規模を超える地震に対して、耐震設計でどう取り扱うべきかという課題を強く認識させられることになりました。

この課題に対して、2012年9月に改訂された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」（以下、耐震標準）¹⁾では、危機耐性（☞参照）という概念が新たに追加されました。

従来の耐震設計と危機耐性の関係をベン図で表現したものを図1に示します。従来の耐震設計では、設定された設計地震動に対して、構造物が所与の

性能（たとえば車両走行安全性、構造物としての安全性、復旧性）を有していることを性能照査により確認します。一方、危機耐性では、これらの耐震設計の補集合、すなわち従来の耐震設計で与えた性能が満足できなくなる領域における構造物の性能を規定します。

設計行為は、構造物を“壊さないようにする”ためのものですが、適切な壊し方や壊れた場合の波及効果についても、高度な設計技術者の判断により考慮されてきました。たとえば、1995年兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート構造物は曲げ破壊型とすることで、地震動が多少大きくなっても即座に崩壊しないように“壊し方”を工夫しています。また、万が一構造物が壊れた場合を想定して、構造物への進入路の確保などの構造物周辺の環境状況についてあらかじめ配慮すること

☞ 危機耐性

想定以上の地震における鉄道構造物の損傷を破滅的な被害につなげないための性質。

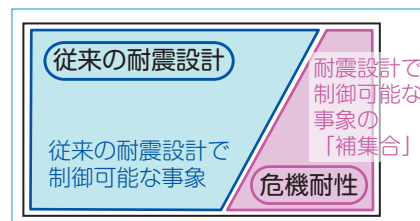


図1 従来の耐震設計と危機耐性

表1 避けたい事態とその例

避けたい事態	具体的な事例
事態Ⅰ：乗客の人命が脅かされる	例Ⅰ-1：乗客に甚大な人的被害が発生する
事態Ⅱ：制御不能な二次災害が発生する	例Ⅱ-1：鉄道構造物の倒壊により、線路周辺で建物損壊や甚大な人的被害が発生する 例Ⅱ-2：鉄道構造物の倒壊により、主要幹線道路などが封鎖される 例Ⅱ-3：余震により、さらなる鉄道の被害が拡大する 例Ⅱ-4：津波により、さらなる鉄道の被害が発生・拡大する
事態Ⅲ：運転再開までに長期間を要する	例Ⅲ-1：鉄道構造物の復旧に長期間を要する 例Ⅲ-2：地震後の状況把握に時間を要する

もあります。このような工夫は、危機耐性の考え方に近く、従来の耐震設計でも考慮されてきたものです。

しかし、構造物が十分な危機耐性を有することを確認する体系は、耐震標準には構築されておらず、耐震構造計画における配慮事項にとどまっています。そこで、体系構築のための第一歩として、鉄道構造物における危機耐性を定量評価するための方法論を提案しました。

定量評価にあたっての基本方針

危機耐性を定量評価するための基本的な方針を理解していただくために、身近な例で危機耐性を考えます。

自分で動き回ることを覚えた生後10か月くらいの赤ん坊を想像してください。赤ん坊は気ままに動き回り、周りのものを手当たり次第に触ったり、口に入れたりします。しかし、こういった危険行為を逐一赤ん坊に注意しても意味がありません。その意味が理解できないからです。そこで親は、身の回りにあるものからどのような危険が起こるかを想像して、危険につながるものを事前に取り除いておきます。

この例はこれまでの議論と少し飛躍があるように思うかもしれませんが、たとえば、遠い未来の設計技術者が、現在の耐震標準に対してどのように考えるかを想像すると、比較的近い状況ではないでしょうか。

現在の耐震技術の成熟度についてさまざまな考えがあるかもしれませんが、災害から得られる新たな知見は今も尽きません。このような災害をいくつも経験した未来の技術者から、現在の耐震標準を見てみると赤ん坊のように映るかもしれません。しかし、当然ながら、現在と未来で意思疎通はできませんので、将来得られる知見を現在の耐震標準に反映することはできません。

ん。では、そのような細部に立ち入らず、未来の技術者が今の耐震標準に付け足すことができるとしたら、どんな文言を入れるでしょうか。

有効と考えられるひとつが、危機耐性の文言なのだと思います。つまり、想定以上の地震における鉄道構造物の損傷が、破滅的な被害につながる可能性も否定できないという視点をもって、危険につながるようなシナリオがあれば事前に何らかの対策を打っておく、ということです。これは、先の例における親の行動に近いものです。

このとき、危機耐性を評価するために必要なのは、鉄道構造物が損傷した場合に、①どのような危険が存在するかを特定すること、②構造物の損傷からどういったつながりで危険に至るかを特定すること、③危険の度合いを定量的な指標で評価することで対策優先度の高い事態を把握すること、です。

一方で、構造物が損傷した原因として地震動の大きさやその発生頻度を具体的に特定することはあまり重要ではありません。これは赤ん坊の例では、その動きを事前に精緻に予測することにあたりませんが、赤ん坊が予想もできないような動きをするのは日常茶飯事ですし、下手な予想をすることで危険を見落とす可能性もあります。

以上の基本方針を踏まえ、以降では、危機耐性を評価するために必要となる3つの情報を整理するために行った以下の検討について説明します。

①鉄道において避けたい事態*i*の抽出

②避けたい事態*i*ごとに、事態に至るまでのシナリオをフォルトツリー解析(☞参照)により特定

③避けたい事態*i*が乗客や社会に与える影響はそれぞれ異なるため、これを各事態の影響度 C_i として評価

情報①：避けたい事態の抽出

鉄道において避けたい事態を抽出する際には、「国土強靱化アクションプラン」²⁾を参照しました。ここには、大規模災害において事前に備えるべき目標や、目標の達成に妨げとなる、起きてはならない最悪の事態が具体的に示されています。これらを参考に鉄道分野で避けたい事態として、表1左側に示す3つの事態を抽出しました。また、それぞれの事態に対して、より具体的な事例を表1右側に示すように整理しました。

情報②：事態に至るシナリオ特定

続いて、避けたい事態に至るシナリオをフォルトツリー解析により特定します。ここでは、例として、事態(I-1)「乗客に甚大な人的被害が発生する」に至るシナリオを特定します。シナリオ特定には、地震に限らず鉄道で甚大な人的被害が発生した国内外の事例や1995年兵庫県南部地震をはじめとする災害調査結果を参考にしました。

☞ フォルトツリー解析

発生が好ましくない事象の発生経路や原因を、フォルトツリー(故障木)を用いて特定するもの。

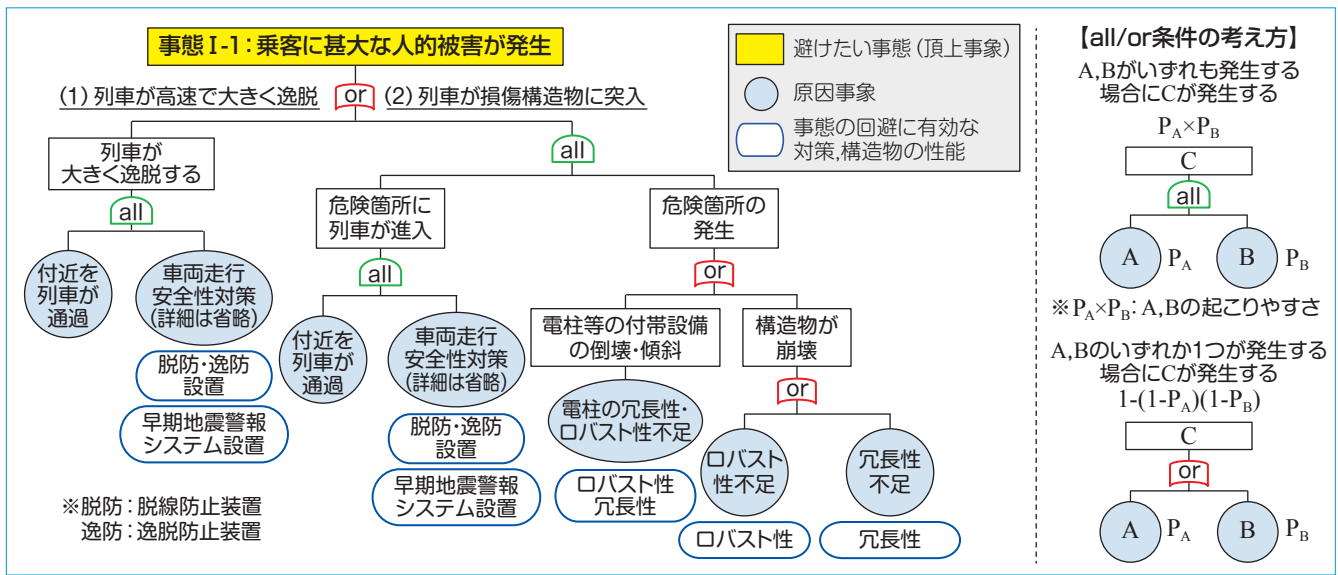


図2 避けたい事態 (I-1) に至るシナリオの概略の特定



図3 主要幹線道路の封鎖の観点からの周辺空間の確保性 r_j

これらの結果から、甚大な人的被害につながる可能性があるシナリオとして、(1)列車が高速で大きく逸脱、(2)列車が構造物や電柱が崩壊した箇所に突入するという2つのシナリオを考えました。そして、事態 (I-1) を最終的な発生事象 (頂上事象) として、発生原因となる根本的な事象 (原因事象) に至るまでをフォルトツリーにより展開しました (図2)。

この展開により、避けたい事態を起こす直接的な原因や、それを回避するために役立つ対策が明確になります。

☞ 早期地震警報システム

沿岸、鉄道沿線の地震計で検知した初期微動 (P 波) により、自動的に列車を運転停止するシステム。

☞ 自重補償機構

柱や橋脚などの部材が損傷しても、はり・スラブや桁を支持するための鉛直支持性能を喪失しない機構。

避けたい事態 (I-1) が発生することを回避するには、フォルトツリーの最下段にある原因事象を起りにくくすることが重要です。図2の例では、具体的には、構造物や電車線柱の性能として、高い冗長性やロバスト性 (地震動のような外乱の変動に対する柔軟性) を付与することが有効です。また、鉄道システムとしての対策は、早期地震警報システム (☞参照) の導入や脱線・逸脱防止装置の導入が有効です。

表1にあげた各事例に対して、これと同様の検討を行い、特定された各原因事象に対して、その起りにくさを構造物の性能状態 r_j (0~1の数値) やシステムとしての対策有無 (有:1, 無:0) として与えます。

たとえば、事態II-2「鉄道構造物の倒壊により主要幹線道路などが封鎖される」では、構造物が倒壊しても道路を封鎖しない「周辺空間の確保性」が必要な性能です。そこで対策状況によ

て図3に示す性能状態 r_j の数値を与えます。落橋防止工や自重補償機構³⁾ (☞参照) を備えた構造物は、空間が確保できますので r_j が高くなります。

回避性能 P_i を算定する際には、ツリーの最下段にある原因事象に構造物の性能状態 r_j や対策の実施状況に応じた0~1の数値を与え、この数値に対して図2右に示す演算を行うと、頂上にある避けたい事態の起りにくさ (回避性能) が算定できます。

情報③：避けたい事態の影響度

表1にあげた各事例は、その内容に応じて乗客や社会への影響度が異なります。この違いを影響度 C_i により表現します。影響度の指標として、その事態による経済損失が考えられますが、人命に関わる事態を金額で測ることに抵抗があるのも事実です。そこで、一例として乗客を対象とした意識調査により定量化しました。意識調査に特有

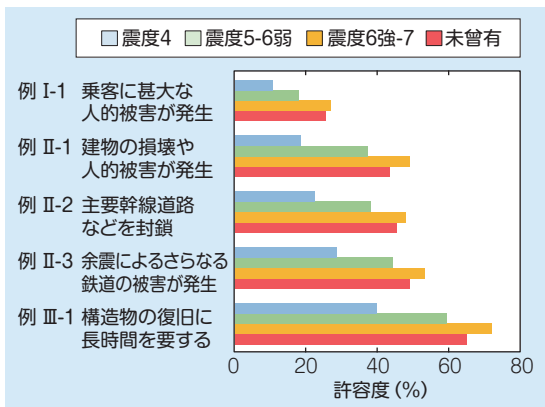


図4 避けたい事態の許容度評価結果

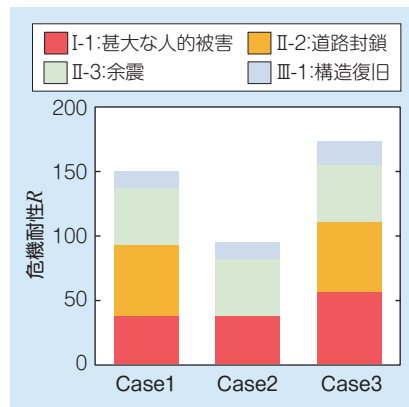


図5 危機耐性の評価結果

のバイアスに注意が必要ですが、経済損失で定量化が難しい場合も対応できる点を重視しました。

調査では、以下の質問を行い、選択肢を回答してもらいました。

- 質問：【想定地震】が発生した場合に鉄道において以下の出来事が起こるとします。このとき、あなたはどのように感じられますか。あなたのお気持ちにもっとも近いものをお選びください。
- 選択肢（許容度）：許容できる、ある程度許容できる、どちらともいえない、あまり許容できない、許容できない

想定地震として4ケース（震度4の地震、震度5～6弱の地震、震度6強～7の地震、未曾有の大地震）を設定しました。地震ごとに異なる回答者（全2532人）から独立に得た回答を整理したものを図4に示します。人命に関わる事態（I-1）がもっとも許容度が低く、事態（II-1, 2, 3）の二次被害の許容度は中程度、事態（III-1）の復旧性がもっとも許容度が高くなりました。想定する地震による違いは小さかったため、未曾有の大地震の許容度を100から差し引いたものを、影響度 C_i として算定しました。

危機耐性の評価例

それでは、これまでに整理してきた情報を用いて、どのように危機耐性を定量評価するかについて説明します。はじめに、情報②で整理したフォルトツリーを用いて、各事態 i の回避性能

P_i を算定します。続いて、情報③で避けたい事態 i ごとに評価された影響度 C_i の値を、回避性能 P_i と掛け合わせます。最後に、情報①で整理した複数の事態でこれを足し合わせることで危機耐性 R を算定します。

$$R = \sum_{i=1}^m C_i \cdot P_i \quad (1)$$

以上の定義から、危機耐性 R は、その構造物が、避けたい事態をどれだけ回避できるかを評価したもので、 R の値が大きいほど危機耐性に優れた構造物であることがわかります。たとえば、この評価を対策前後の構造物で実施し、対策による危機耐性の向上効果を評価することができます。

続いて、危機耐性の評価事例を示します。5径間ラーメン高架橋における危機耐性 R の試算結果です。評価にあたっては、以下に示すような3ケースの構造物条件を想定し、それぞれに対して評価を行いました。

Case1：基本ケース。通常の耐震設計により設計された構造物で、主要幹線道路などの交差がない一般的な条件下における高架橋。

Case2：主要幹線道路と交差する高架橋。他の条件はCase1と同様。

Case3：自重補償機構¹⁾を実装した高架橋。他の条件はCase2と同様。

評価結果を図5に示します。Case1とCase2は、立地条件以外はまったく同様の構造物ですので、従来の耐震

設計では同一の性能と評価されるものです。しかし、万が一構造物が崩壊した場合に、主要幹線道路があるCase2で二次災害が発生するため、危機耐性値 R は小さくなります。また、Case3は主要幹線道路を封鎖しないための対策として自重補償機構を備えている

ため、危機耐性 R が向上します。

これらの結果は、たとえば、一般的な条件となるCase1の危機耐性の値を標準値として考えることで、幹線道路と交差すると危機耐性が63%まで低減するが、自重補償機構を実装することにより16%向上するというような形で解釈することができます。

まとめ

危機耐性の定量評価法について、基本的な考え方と試算例を紹介しました。提案手法を用いることで、設計の想定を超える事象における構造物の被害に対して構造物が保有すべき性能について、社会的な説明性を高めるための客観的な指標を提示することができるようになります。また、構造物ごとの危機耐性の違いを定量的に把握することが可能となり、対策優先度や目標値の設定に活用できます。[RRR]

文献

- 1) 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) 国土強靱化推進本部：国土強靱化アクションプラン2014，2014
- 3) 西村隆義，室野剛隆，豊岡亮洋，寶地雄大：高架橋の危機耐性を高める自重補償機構の地震時挙動に関する実験的検討，平成29年度土木学会全国大会第72回年次学術講演会概要集，2017