

地震時の鉄道構造物における危機耐性評価法の構築

田中 浩平* 室野 剛隆** 坂井 公俊*

Proposal of Evaluation Method for Anti-catastrophe for Railway Structures

Kohei TANAKA Yoshitaka MURONO Kimitoshi SAKAI

After the occurrence of 2011 Tohoku Earthquake, how to deal with the “unexpected large earthquake” in the seismic design has been actively debated. In the seismic design standard of the railway facilities revised in 2012, the concept of “Anti-catastrophe” was first introduced. However, at the time a method to evaluate the degree of “Anti-catastrophe” for structures was not proposed it was supposed to correspond to this concept at the structure planning stage. Therefore, a method to evaluate “Anti-catastrophe” was developed in this study. First, we identify the crisis situations which should be avoided in the railway system. Next, the avoidance ability and the impact of each crisis situation are quantitatively evaluated. Finally, how much the crisis situations can be avoided is evaluated based on the product of the avoidance ability and the impact, and the product is adopted as the value of “Anti-catastrophe”.

キーワード：地震時，鉄道構造物，耐震設計，想定外地震，危機耐性

1. はじめに

鉄道システムを支える重要な要素である鉄道構造物では、1995年兵庫県南部地震における被害を契機に、耐震設計の高度化および既設構造物の耐震補強を積極的に実施している。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、確実に減少している。このように、耐震設計で制御可能な領域が徐々に拡大していることは事実であるが（図1）、2011年東北地方太平洋沖地震の発生により、これらの事象の補集合として、設計での対応が困難な領域が存在することも再認識させられた。

こうした中で、平成24年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、想定以上の地震に対しても破滅的な被害に繋がらないような性質として「危機耐性」という新たな性能を導入している。近年、土木構造物において、この危機耐性を向上するための対策が各種提案され始めている²⁾などが、危機耐性を照査する体系は耐震標準の改訂段階では構築されておらず、各構造物が有する危機耐性の程度や、対策により向上する危機耐性を定量的に評価した事例も見当たらない。

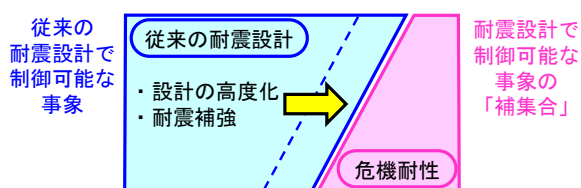


図1 耐震設計で考慮すべき事象の分類

そこで、鉄道構造物において危機耐性を定量的に評価するための方法を開発したので報告する。提案手法を用いて構造物ごとに評価した危機耐性の値を比較することで、対策優先箇所の抽出や、優先箇所で開催すべき対策項目等の選定が、合理的に実施できるようになる。

2. 鉄道構造物における危機耐性評価法の開発

2.1 危機耐性評価法の概要

本節では危機耐性の評価法について説明する。はじめに具体的な例として、幹線道路を跨ぐ構造物Aと幹線道路が周辺に無い構造物Bの危機耐性を考える。これらの構造物において、その他の環境条件や構造物諸元は全く同一であると考えられる。構造物A、Bの耐震性能は、従来の耐震設計ではもちろん同一となるが、想定外地震が発生した場合には、構造物が崩壊することも考えられる。このとき、構造物Aが崩壊した場合には、幹線道路を封鎖する可能性があるため、想定外地震を考慮した性能は構造物A < 構造物Bとなる。これが危機耐性を導入することで評価したい性能の違いである。

つまり、鉄道構造物の危機耐性として、従来の耐震設計で想定しない構造物の崩壊等が発生した場合にも、「鉄道で起きてはならない事態（危機的事態）を、どれだけ回避することができるか」を評価する。具体的には、鉄道において起きてはならない事態の影響度 C_i と、その事態に対する回避能力 P_i の積により、回避できる危機的事態の量を式(1)で算定し、これを危機耐性 R とする。

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

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター

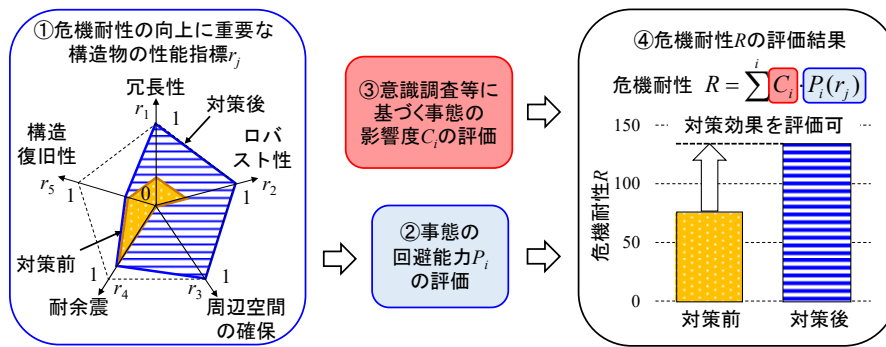


図2 鉄道構造物の危機耐性 R の評価の流れ

ここで m は、危機耐性の評価にあたって想定した、起きてはならない事象の数を表す。また P_i は、危機耐性の向上に重要な性能指標の達成度 r_j の関数として表現される。

式(1)に従って危機耐性 R を評価する手順を図2に示す。各段階における具体的な実施内容は以下の通りである。

- ① 性能指標の達成度 r_j の評価：鉄道で起きてはならない事象を抽出する (2.2 節)。さらに、これらの事象を回避するために重要となる性能指標を特定する (2.3 節)。構造物ごとに、各性能指標の達成度 r_j を 0～1 の範囲で定量評価する (2.4 節)。
- ② 事象の回避性能 P_i の評価：各性能指標の達成度 r_j の値に応じて、回避能力 P_i を評価する。提案手法では、達成度と回避能力の関連付けを、起きてはならない事象を頂上事象とするフォルトツリー解析を行い、これを用いて回避能力 P_i を算出する (4 章)。
- ③ 事象の影響度 C_i の評価：起きてはならない事象の影響度の大きさ C_i を評価する。提案手法では、鉄道利用者を対象とした意識調査から起きてはならない事象の許容度を把握し (3 章)、この許容度を 100 から引くことで、影響度 C_i を評価した。
- ④ 危機耐性 R の評価：上記②、③の結果を式 (1) に代入して、危機耐性 R を評価する。

上記のように「起きてはならない事象を回避する」という目的を実現するために、構造物が保有すべき機能要求として性能指標を特定し、この達成度を構造物ごとに評価する。つまり、基本的には通常の性能設計と同じ評価を行っている。しかし、危機耐性が対象とする想定外事象においては、適切な作用の設定や応答値の算定が困難である。よって、性能指標の達成度を評価する場合には、これらの手順を経ることなく、機能の一部が失われた前提 (例：構造物が崩壊する) で評価を実施しており (2.4 節)、この点が通常の設計手順と大きく異なる。

2.2 鉄道において起きてはならない事象の抽出

鉄道において起きてはならない事象の抽出を行う。こ

れらの事象としては、構造物の安全性や復旧性、車両の走行安全性に関する事象、また、これまで陽に考慮されていない事象も漏れなく抽出する。

抽出のための参考資料として、国土強靱化のための主要施策を示した「国土強靱化アクションプラン」³⁾ がある。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象が示されている。これらの事例を参考に、鉄道分野における起きてはならない事象を下記のように抽出した。

事象 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 (乗客の生死に関わる被害)

事象 II：制御不能な 2 次災害が発生する

- 例 II-1 線路周辺で建物損壊や人的被害が発生する
- 例 II-2 主要幹線道路等の封鎖が発生する
- 例 II-3 余震によるさらなる鉄道の被害が発生する

事象 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

2.3 危機耐性を表現する性能指標の特定

鉄道構造物の危機耐性を向上するために重要となる性能指標を特定する。そのために、2.2 節で抽出した起きてはならない事象を頂上事象とした、フォルトツリー解析を行い、その事象に至るシナリオを特定する。ここでは一例として例 I-1 の事象に対して、その事象に至るシナリオを展開した結果を示す (図 3)。

近年発生した地震では乗客の人的被害が存在しないため、地震に限らず鉄道で甚大な人的被害が発生した事例を国内外で収集した。これらの結果から、(a) 列車が線路から大きく逸脱、(b) 付帯設備に衝突、(c) 構造物上から落下という 3 つのシナリオで、甚大な人的被害に繋がる可能性があることがわかった。そこで、頂上事象をこれらのシナリオで分岐し、起因事象に至るまでを展開した。その結果、構造物の崩壊や構造物の損傷による軌道面の沈下を防ぐ必要があり、構造物が保有すべき性能

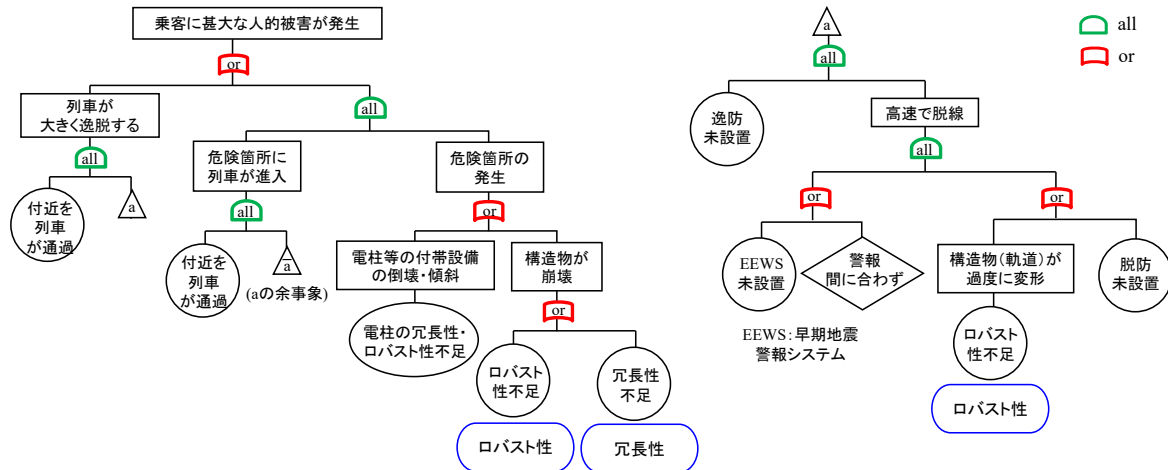


図3 起きてはならない事態に至るシナリオの特定例（乗客に甚大な人的被害が発生する事態）

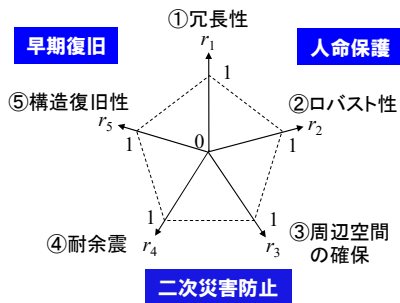


図4 危機耐性を表現する5つの性能指標

指標として、「冗長性」と「ロバスト性」を特定した。

これ以外の事態として、例 II-1, 2 の事態が発生するシナリオは、「線路周辺に建物や主要幹線道路等の2次災害要因が存在すること」と「構造物が2次災害を発生させる方向に崩壊すること」が考えられる。これらのシナリオを回避するためには、構造物の「冗長性」と「ロバスト性」に加えて、構造物の崩壊方向において建物や幹線道路が存在しない必要があり、「周辺空間の確保」が性能指標として挙げられる。例 II-3 は、本震後の残存耐力（耐余震）を性能指標とする。例 III-1 は、構造物単体での復旧性能（構造復旧性）を、性能指標とする。最終的に、図4に示す5つの性能指標を抽出した。

2.4 性能指標の達成度の評価

2.3節で抽出した性能指標に対して、構造物ごとに達成度 r_j を0～1の数値で評価する。ここでは、各評価手法の概要について述べる。また、これらの達成度はあらゆる鉄道構造物について評価できるが、ここでは新幹線の橋梁・高架橋を対象とした場合の評価方法を説明する。

はじめに、①冗長性の達成度 r_1 は、「耐震補強による耐力向上」といった頑強性を評価するのではなく、「柱や梁のような構造部材の一部が損傷した場合に構造体として成立するか」という観点で評価する。具体的には、構造物の損傷度と自重保持性能の関係を評価し、損傷が

進んでも自重保持性能が高い構造物の達成度が高い。例えば柱が複数本存在するラーメン高架橋や、西村・室野らが提案する“自重補償機構”⁴⁾を設置することで、冗長性の数値は大きくなる。一方、1本柱橋脚では0となる。

②ロバスト性の達成度 r_2 は、ロバスト性関数を用いて評価する⁵⁾。ここでは、想定外の外力を考えているため、外力の変動を確率的に論じるのではなく、外乱変動に対して、制約条件を満足するパラメータの最大変動幅を測り、その変動幅をロバスト性の尺度とする。

③周辺空間の確保の達成度 r_3 は、「構造物の崩壊時にさらなる2次災害が発生するか」という観点で評価する。例えば、周辺建物や幹線道路が存在しない場合には、崩壊しても2次災害は発生しないため、達成度 r_3 は1.0となる。一方、これらが存在し、その方向に構造物が倒壊する場合には、達成度 r_3 が1.0より小さくなる。このような地点で達成度を向上するための構造的な対応としては、齊藤・室野らが提案する“倒壊方向制御機構”^{6) 7)}がある。建物や幹線道路が存在する側への崩壊を回避するような制御ができるため、達成度が向上する。

また、④耐余震の達成度 r_4 は、本震を経験した後に、余震に対してどの程度の残存耐力が残されているかを、西村・室野が提案する耐震性能残存率⁸⁾により評価する。

最後に、⑤構造復旧性の達成度 r_5 は、図5に示す利用支障 UD の大きさに応じて評価する。地震発生直後には列車運行が停止されるが、その後、点検や復旧作業を経て徐々に運行が再開する。これらの復旧過程における経過時間と復旧率の関係を復旧曲線 $S(t)$ と呼ぶ。一方、利用者の運行停止に対する充足度（運行停止をやむを得ないと考える割合）は、地震直後は100%に近いが、時間の経過とともに徐々に低下する。この経過時間と充足度の関係を充足度曲線と呼ぶ。

復旧曲線 $S(t)$ が復旧度100%を下回る面積を機能低下量 S として、構造復旧性の達成度を S で評価する方法⁹⁾もある。ここでは能島らの方法¹⁰⁾を参考に、復旧曲線 $S(t)$ が

特集：地震対策技術

復旧度 100% を下回った面積に利用者の非充足度 $1-A(t)$ で重み付けしたものを利用支障 UD とし、式 (2) で定義した。

$$UD = \int_0^{\infty} (1-A(t))(1-S(t))dt \quad (2)$$

これは、図 5 における斜線部分の面積に相当する。そして、構造復旧性の達成度は、利用支障 UD を機能低下 S で正規化した式 (3) のように定義する。

$$r_3 = 1 - \frac{UD}{S} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} (1-A(t))(1-S(t))dt}{\int_0^{\infty} (1-S(t))dt} \quad (3)$$

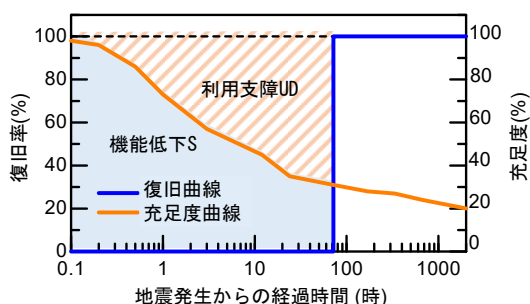


図5 復旧曲線と充足度曲線の関係と利用支障

3. 起きてはならない事態の影響度評価

鉄道で起きてはならない事態は複数存在し、それぞれに影響度は異なる。ここで、影響度が小さい事態を数多く回避できたとしても、危機耐性の高い構造物とは言えない。危機耐性を適切に評価するためには、これらの影響度の違いを把握し、評価に取り込む必要がある。

影響度を統一的に評価する指標として、事態が発生した場合の経済損失を金銭価値で表現することが考えられる。しかし、2.2 節で抽出した事態には、人的被害の発生や輸送機能の低下、2 次被害による社会的損失の発生など、多種多様である。経済損失の評価をあらゆる事態に対して行うことは現時点では困難であり、対象とする事態が限定されてしまう可能性がある。そこで、本検討では鉄道利用者を対象とした意識調査に基づいて定量化することとした。この方法では、意識調査に特有のバイアスに注意が必要だが、本検討では金銭価値で定量化が難しい事態にも比較的簡単に対応できる点を重視した。

本検討では、鉄道利用者に対して以下に示す質問を行い、5つの選択肢（許容できる、ある程度許容できる、どちらとも言えない、あまり許容できない、許容できない）の中から最もあてはまるものを選択してもらった。

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。それぞれあなたのお気持ちに最も近いものをお選びください。

※ 想定地震：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

回答に際しては、想定地震として4ケースの質問文を設定した。この質問を、設問毎にそれぞれ異なる633人の回答者（全2,532人）に行い、独立に回答を得た。また、回答結果から得られた知見を以下に示す。起きてはならない事態ごとに、「どちらとも言えない」を選んだ人を除き、「許容できる」か「ある程度許容できる」を選んだ割合を許容度とした。さらには、この許容度から、各事態の影響度を評価したものを図6に示す。

その結果、例 I-1「乗客に甚大な人的被害が発生」が最も影響度が大きく、例 II-1, 2, 3の2次被害の影響度は中程度、例 III-1の構造復旧性が最も影響度が小さいことがわかった。また、震度4の地震を除く3つの想定地震では影響度の違いはあまり見られなかった。

本検討では想定外の地震を考えているため、図6の結果で使用される影響度は、未曾有の大地震のものとする。

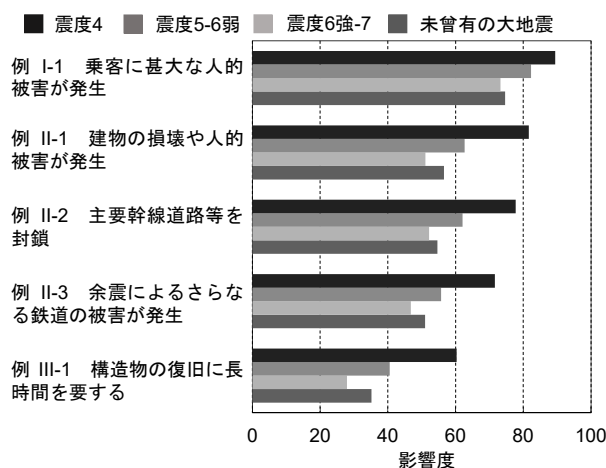


図6 起きてはならない事態の影響度評価

4. 鉄道構造物の危機耐性の定量評価

ここでは、提案手法を用いた鉄道構造物の危機耐性の試算結果を示す。対象とした構造物は、新幹線に建設された5径間のRCラーメン高架橋(固有周期0.5秒)とし、以下3つのケースを想定して危機耐性を評価した。

Case1：基本ケースであり、道路交差や線路脇に何も無い一般的な条件下における高架橋とする。ただし、早期地震警報システムは全ての新幹線に既の実装されていること、また、脱線防止装置や逸脱防止装置も着実に設置が進められていることを勘案して、全て「設置済」とした。

Case2：主要幹線道路と交差する場合。他の条件はCase1と同様である。

Case3：Case2と同様の条件であるが、自重補償機構⁴⁾を実装した高架橋とする。

はじめに、各性能指標の達成度を2.4節で説明した方法で評価した。評価結果を表1、図7に示すとともに、各指標の算定根拠について簡単に説明する。なお、2.1節で述べたように、これらの数値はいずれも構造物に甚大な損傷が発生した前提で評価を行ったものとなる。

冗長性 r_1 : Case1, Case2 は柱を複数本有するラーメン高架橋であり、これらの損傷度と自重保持性能の関係から $r_1=0.33$ と評価した。一方、Case3 では自重補償機構の採用により崩壊しないため、 $r_1=1.00$ とした。

ロバスト性 r_2 : Case3 では自重補償機構の採用により崩壊しないため、 $r_2=1.00$ とした。

周辺空間の確保 r_3 : 周辺に幹線道路が無いCase1は $r_3=1.00$ 、幹線道路沿いであるが対策をしていないCase2は $r_3=0.00$ 、自重補償機構を採用したCase3は $r_3=1.00$ となる。

耐余震 r_4 : Case1, Case2 は構造物周期に基づき評価した耐震性能残存率から、 $r_4=0.86$ とした。Case3 は本震で倒壊しないが、余震に対しては損傷拡大の可能性があるため、Case1, Case2 と同じ値とした。

構造復旧性 r_5 : Case1, Case2 では式(3)から、 $r_5=0.37$ となる。Case3 の自重補償機構では、落橋等の被害が発生せず、復旧時に桁のジャッキアップが不要となるため、復旧時間が短くなることが予想される。この効果を反映して、 $r_5=0.53$ とした。

みを与え、重みが確定できない事象には0.50を与える。その結果、Case1, Case2 の場合は回避能力 $P_1=0.51$ 、Case3 の場合は回避能力 $P_1=0.75$ となる。これを全ての事態に対して行い、回避能力を評価した結果を表2に示す。「例I-1 甚大な人的被害の発生」に関する回避能力は、自重補償機構による冗長性の増加により、Case3 で最も大きくなる。「例II-2 幹線道路の封鎖」については、幹線道路沿いにあるが特別な対策を行わないCase2 で最も小さくなる。例II-3, 例III-1については、それぞれ達成度の値が回避能力となっている。

評価された回避性能と影響度との積により危機耐性を評価した結果を、表2および図9に示す。通常の耐震設計(図1で言う従来の耐震設計)では、Case1 とCase2 は同一の性能と評価されるが、周辺空間の確保性に差があるために、危機耐性値 R は異なっている。また、この

表1 各Caseにおける達成度の評価結果

性能項目	達成度		
	Case1	Case2	Case3
冗長性 r_1	0.33	0.33	1.00
ロバスト性 r_2	0.11	0.11	1.00
周辺空間確保 r_3	1.00	0.00	1.00
耐余震 r_4	0.86	0.86	0.86
構造復旧性 r_5	0.37	0.37	0.53

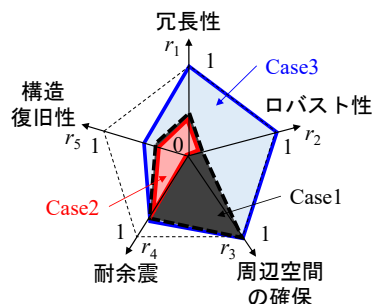


図7 達成度のチャート図

続いて、これらの達成度から、各事態に対する回避能力を評価する。回避能力は、図3に一例を示したフォルトツリーの各起因事象に重み付けを行い、頂上事象の重みを評価する。例として、乗客に甚大な人的被害が発生する事態の回避能力を評価した結果を図8に示す。起因事象となる性能指標には、達成度を1から引いた重

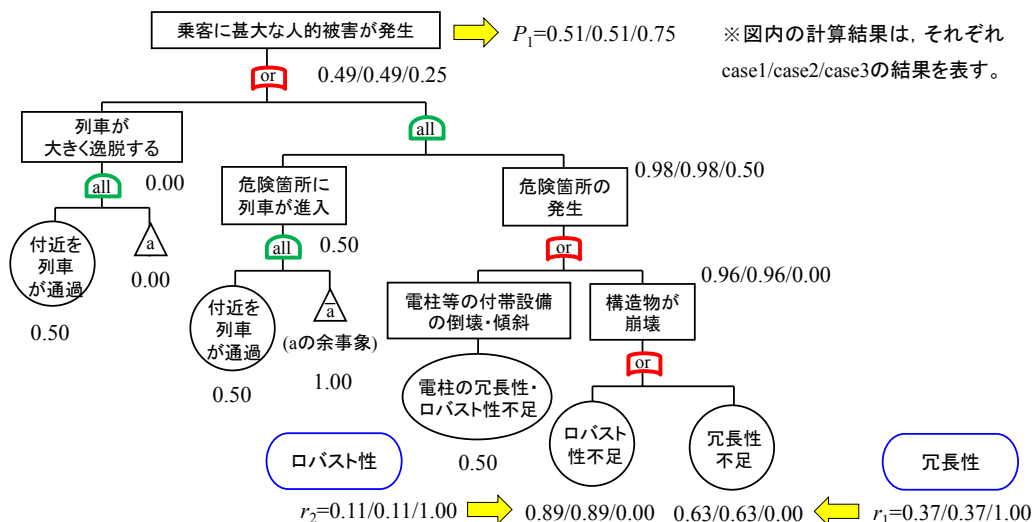


図8 構造物の回避能力の評価事例(乗客に甚大な人的被害が発生する事態)

特集：地震対策技術

図から、通常の耐震設計のみで設計された構造物も危機耐性はある程度は有しているとも言える。

また、Case2 と Case3 を比べることで危機耐性向上策の効果を見ることができ、危機耐性はあくまで配慮事項であり、より高品質な設計を目指す場合の性能である。よって、 R がいくつ以上なければならない、という絶対評価に用いるものではない。そこで、結果の1つの解釈としては、標準的な地点に建設された Case1 の危機耐性の値を標準値として、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、116%まで向上する、という評価の仕方をするのがよい。

表2 回避能力 P_i と危機耐性 R の評価結果

起きてはならない事態	影響度 C_i	回避能力 $P_i (C_i * P_i)$		
		Case1	Case2	Case3
例 I-1 甚大な人的被害	75	0.51 (38)	0.51 (38)	0.75 (56)
例 II-2 幹線道路の封鎖	55	1.00 (55)	0.00 (0)	1.00 (55)
例 II-3 余震による被害拡大	51	0.86 (44)	0.86 (44)	0.86 (44)
例 III-1 復旧の長期化	35	0.37 (13)	0.37 (13)	0.53 (19)
危機耐性 R		150	95	174

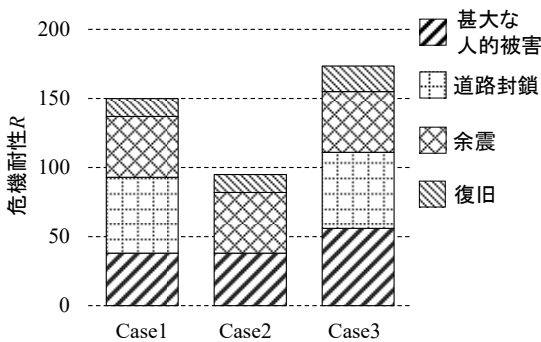


図9 危機耐性の評価結果

5. まとめ

鉄道のレジリエンスを向上させるために、鉄道構造物の危機耐性を高める必要がある。本検討では、危機耐性を定量的に評価するための方法を開発した。具体的には、鉄道構造物の危機耐性 R を、構造物の回避能力 P_i と起きてはならない事態の影響度 C_i の積で評価する。

この方法を適用するための要素技術として、構造物の回避能力 P_i の評価方法や、危機耐性を表現する性能指標の特定やその定量評価法、鉄道利用者を対象とした意識調査による事態の影響度 C_i の評価を行った。また、提案手法による危機耐性の試算例の提示を行い、危機耐

性の大小を定量的に評価できていることを確認した。

今後、危機耐性の評価方法や具体的な向上策の開発が精力的に各方面で進められると思うが、本手法がその1つの方向性を示すものであると考える。より深い検討が必要なものも含まれており、今後は実用化に向けた有効性の確認や、要素技術の高度化を行う必要がある。特に、この手法の有効性を示すために、例えば、兵庫県南部地震や新潟県中越地震の際に甚大な被害を受けた鉄道構造物において、地震が来る前の状態に対して本手法を適用して、危機耐性と被害の実態との関係を整理する予定である。

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) 野津厚，室野剛隆，本山紘希，本田利器：鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.4，I_448-I_458，2016
- 3) 内閣官房国土強靱化推進本部：国土強靱化アクションプラン 2017，http://www.cas.go.jp/seisaku/kokudo_kyo-ujinka/pdf/ap2017.pdf，2018年2月23日参照
- 4) 西村隆義，室野剛隆，豊岡亮洋，實地雄大：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，第72回土木学会年次学術講演会講演概要集 CD，2017
- 5) Y. Kanno and Y. Ben-Haim：Redundancy and Robustness, or When is Redundancy Redundant?, Journal of Structural Engineering, Vol.137, pp.935-945, 2011.
- 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回土木学会年次学術講演会講演概要集 CD，2015
- 7) 豊岡亮洋，室野剛隆，實地雄大，齊藤正人：危機耐性に優れた倒壊方向制御構造の振動台実験，第72回土木学会年次学術講演会講演概要集 CD，2017
- 8) 西村隆義，室野剛隆：複数の地震動を受ける構造物の残存耐力評価方法に関する研究，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，pp.287-292，2014
- 9) Michel Bruneau, Stephanie E. Chang, Ronald T. Eguchi, George C. Lee, Thomas D. O' Rourke, Andrei M. Reinhorn, Masanobu Shinozuka, Kathleen Tierney, William A. Wallace, and Detlof von Winterfeldt: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.733-751, 2003.
- 10) 能島暢呂，亀田弘行，吉川徹志：ライフライン地震被害による居住生活支障の評価に関する研究，第21回地震工学研究発表会講演概要集，pp.329-332，1991