

鉄道構造物における危機耐性の定量評価法の提案(その1 基本概念の説明)

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○田中 浩平 坂井 公俊 室野 剛隆
埼玉大学 正会員 齊藤 正人

1. はじめに

鉄道構造物では、1995年兵庫県南部地震の被害を契機に、耐震設計の高度化や既設構造物の耐震補強が積極的に実施されている。その結果、近年の大規模地震では甚大な被害の発生件数が低下している。このように耐震設計で制御可能な領域が拡大する一方、2011年東北地方太平洋沖地震では領域外の事象が存在することを強く再認識させられた。この教訓から、平成24年鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計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」が導入されている。構造物の被害が鉄道システムや社会全体の災害に波及し、災害規模を増幅する可能性がある以上、耐震設計の領域外で起きる被害であっても、何らかの配慮を行うことが求められている。2011年以降、危機耐性に関する議論²⁾などが活発に行われているが、危機耐性を定量的に評価する手法はほとんどない。そこで本論文では、鉄道構造物における危機耐性の定量評価法を提案する。その1では提案手法の基本概念を説明し、その2ではRCラーメン高架橋を対象とした場合の試算例を示す。

2. 危機耐性の定量評価法の提案

本手法では、「起きてはならない事態(危機的事態)」を、構造物の性能によりどれだけ回避することができるかを定量的に評価し、これを危機耐性とする。具体的には、危機耐性 R は、鉄道において起きてはならない事態の影響度 C_i と、起きてはならない事態に対する構造物の回避能力 P_i の積により、式(1)で算定する。

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

ここで、 m は起きてはならない事態の数を表し、評価対象に応じて漏れなく抽出する。 r_j は、起きてはならない事態を回避するために構造物が保有すべき性能指標を表し、その達成度が数値として与えられる。回避能力 P_i は、 r_j の値に応じて評価する。式(1)に基づく危機耐性 R の評価手順を図1に示し、その詳細を以下に説明する。

- ① 達成度の評価: 構造物に必要な性能指標を抽出し(図1①のチャート軸)、達成度 r_j を0~1の範囲で定量評価する。危機耐性の評価では想定外の事象を取り扱うため、通常の耐震設計と異なり、設計作用の設定や設計応答値の算定が困難である。よって、これらの達成度は、機能の一部が失われた前提で評価する。例えば、「冗長性」の達成度 r_1 は、柱に甚大な被害が発生する前提で、構造体が成立する範囲で最大限除去することができる柱本数で評価する。「周辺区間の確保」の達成度 r_3 は、地震時に構造物が崩壊するという前提で、これが周辺に与える影響に基づいて評価する。これらの具体的な評価事例はその2に示す。
- ② 回避性能 P_i の評価: 達成度 r_j からFault Tree解析に基づき起きてはならない事態の回避能力 P_i を評価する。このTreeは起きてはならない事態を頂上事象とし、この事象に至るシナリオを起因事象まで展開したものである。性能指標と起きてはならない事態を関連付けており、このTreeは関数 $P_i(r_j)$ と同じ扱いである。
- ③ 影響度 C_i の評価: 起きてはならない事態は多種多様であり、その全てに適切に対処することは困難である。そこで各事態の影響度 C_i を定量的に評価し、対策の優先地点や効果的な対策を抽出できるようにした。この影響度は、例えば損失コストによる評価も可能であるが、コスト計算が可能な対象は限られる。そこで本検討ではあらゆる事態に適用可能な手法として、鉄道利用者を対象とした意識調査により、各事態が発生した場合に感じる許容度を評価し、許容度を100から引くことで影響度を評価した(図1③の棒グラフ)。
- ④ 危機耐性 R の評価: 上記②、③の結果を式(1)に代入し、危機耐性 R を評価する(図1④の棒グラフ)。ここで得られた結果について、地点毎や対策前後の比較を行うことで、対策の優先箇所や各種対策の効果、その内訳を確認することが可能となる。

3. 鉄道で起きてはならない事態と性能指標の抽出

提案手法を鉄道構造物に適用するために実施した検討について簡単に説明する。はじめに、鉄道で起きてはならない事態を文献3)を参考に抽出した。構造物の安全性や復旧性、車両の走行安全性に関する事態はもちろんのこと、これまでの耐震設計で陽に考慮されていない2次災害のような事態も抽出した。抽出した事態を以下に示す。

キーワード 危機耐性, Fault Tree 解析, 国土強靱化, 鉄道構造物, 鉄道標準
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2丁目8-38 TEL:042-573-7394

事態I：乗客の人命が脅かされる（例I-1：乗客の生死に関わる人的被害の発生，例I-2：乗客に負傷者が発生）

事態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甚大な人的被害の発生，例Ⅱ-２：幹線道路の封鎖，例Ⅱ-３：余震によるさらなる被害の発生，例Ⅱ-４：津波によるさらなる被害の発生）

事態Ⅲ：運転再開までに長期間を要する（例Ⅲ-1：構造物復旧，例Ⅲ-2：地震後の状況把握に時間を要する）

続いて、これらの事態に至るシナリオを **Fault Tree** 解析により特定することで、構造物が保有すべき性能指標を抽出する。一例として、「例I-1：乗客の生死に関わる人的被害の発生」に至るシナリオについて作成した **Tree** を図 2 に示す。その結果、事態を回避するために「冗長性」や「ロバスト性」の性能指標を抽出した。その他の事態からは、線路周辺での被害や幹線道路の封鎖といった 2 次災害を防ぐために必要となる「周辺空間の確保」、余震でのさらなる被害の発生を防ぐために必要となる「耐余震」性能、復旧の迅速さを表現する「構造復旧性」を抽出した。

4. おわりに

本論文では危機耐性を定量的な評価手法の基本概念を説明した。この方法を用いることにより、危機耐性の定量評価が初めて可能となり、その結果、対策優先個所や実施すべき対策項目を決定できるようになる。本論文に続く**その2**では提案手法に基づく危機耐性の試算例を示す。

参考文献 1) 鉄道総研編：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，室野，本山，本田：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，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_kyoujinka/pdf/ap2017.pdf，2018年3月29日参照

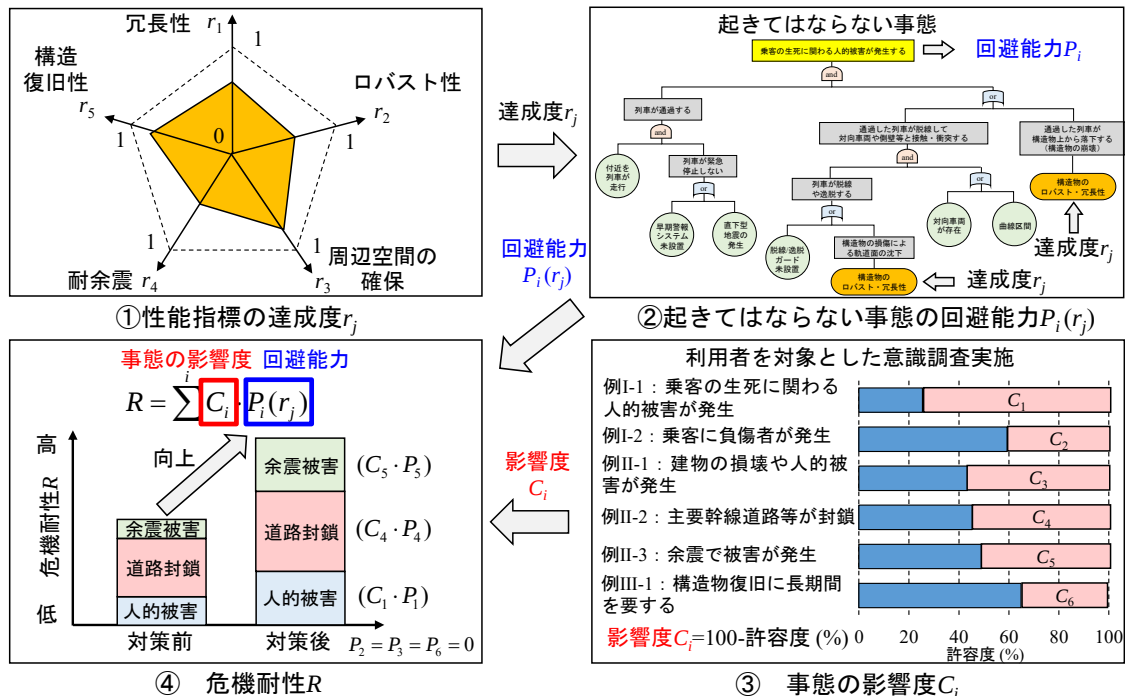


図 1 鉄道構造物の危機耐性 R の評価手順

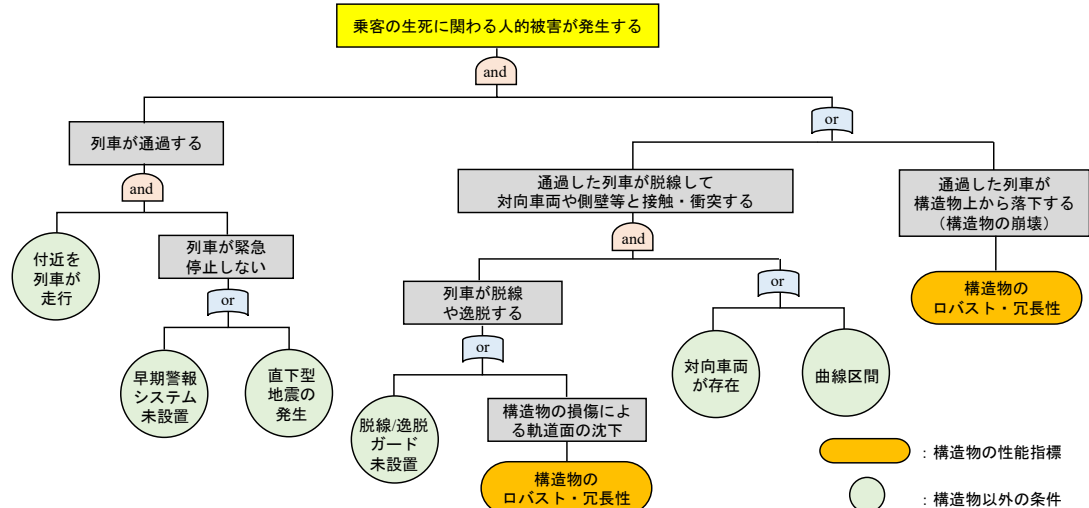


図2 起きてはならない事態に至るシナリオ・性能指標の特定