

鉄道構造物における危機耐性の性能規定化に向けた フレームワーク構築

田中浩平¹・室野剛隆¹・坂井公俊¹・齋藤正人²・本山紘希³

¹正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） 埼玉大学（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

³正会員 元（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、この地域で事前に想定されていなかった日本における観測史上最大規模M_w9.0の地震が発生した。これが広域での津波被害や原子力発電所の被害などを発生させ、設計時に想定していない事象による被害が注目された。

土木構造物は公共性の高いものであり、利用者の安全性確保や機能の維持・迅速な復旧が、地震後の復興活動や社会・生産活動にとって、非常に重要なものである。もちろん、耐震設計において想定する地震動に対して、所要の性能を満足することはもちろんであるが、その枠組みで想定していない事象に対しても性能が完全に失われ、破滅的な状況に陥らないための対応を実施することが重要である。

このような性能を危機耐性と呼び、2012年9月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）¹⁾では、以下のように説明されている。

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

また、土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会・危機耐性WGでも、危機耐性を耐震設計体系に導入するための検討が行われている^{2),3),4)}など。ここでは、危機耐性の概念を以下のように整理しており、これも上記の概念と同様のものである。

狭義の設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が、単体またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質

これらの概念に基づき、土木構造物に対して地震時の危機耐性を確保するための基本的な考え方や具体的な対策法が提案されている。

例えば、鉄道構造物の耐震標準¹⁾では、「直接的に照査する体系はまだ構築されておらず、本標準では耐震構造計画の段階で配慮」とされているが、現行の耐震標準で配慮すべき危機耐性の事例として以下のものが挙げられている。

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、すなわち橋りょう・高架橋に対しては、せん断破壊形態でなく、曲げ破壊型の構造とすることを挙げている。また、構造計画の段階から被害発生による復旧作業の迅速化に配慮し、「構造物の進入路、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」が例として挙げられている。

また、文献³⁾では危機耐性を向上させる対策として以下の5点を挙げている。

- ① 設計計画の充実
- ② 危機耐性を向上させる構造的な対応
- ③ 早期地震警報システムの高度化⁵⁾
- ④ 仮想演習
- ⑤ 避難誘導を含めたソフト対応

このうち、②の構造的な対応としては、車両が脱線後に大きく逸脱することを防ぐための対策⁶⁾、柱や橋脚などの鉛直方向の支持部材が損傷した場合に、上部工を支持する”自重補償機構”⁷⁾、万が一構造物が倒壊した場合に周辺における構造物の損傷や人的被害の発生、幹線道路の封鎖などを極力防ぐために、倒壊方向をコントロールする機構⁸⁾などを提案して

いる。

港湾構造物では、「対津波設計において、既に事実上、危機耐性を考慮した設計が始まっている」³⁾とし、防潮堤の設計において粘り強い構造（腹付工や洗掘防止工など）に配慮し、倒壊後も避難時間を確保することを挙げている。その一方で、「地震動に対する設計という点では、危機耐性を考慮する設計を導入するには至って」おらず、具体的な対策工として耐震スロープの提案⁹⁾や、港湾計画段階での危機耐性への配慮の重要性を挙げている。

道路橋示方書（耐震設計編）¹⁰⁾における危機耐性の設計思想は、下記のものが挙げられている⁴⁾。

- ① 構造設計上の終局状態である耐震性能3の設定
- ② 損傷発見・修復が困難な場合の限界状態の設定
- ③ 過度に耐震性が低い構造物を設定させない配慮
- ④ 構造計画による配慮
- ⑤ 支承部破壊の想定
- ⑥ 落橋防止システム
- ⑦ 耐震性能の確保に特別な配慮が必要となる構造形式の排除
- ⑧ 供用性に対する危機耐性を高める工夫

このような対策の実施により、危機耐性が向上することは勿論であるが、実務設計において危機耐性の導入をより推進していくためには、定性的な議論を超えて、現状の構造物の危機耐性の定量化や、各種対策が対象とする危機耐性の対象の特定、その効果の定量化を行う枠組みが必要となる。

しかし、上記で整理した具体的な対策法から想起される起きてはならない事態は、構造物の被害に限定した場合であっても多種多様である。また1つの危機耐性の対策工であっても、複数の起きてはならない事態の発生を抑制することに寄与する。よって、これらの対策効果を一元的に取り扱うためには、起きてはならない事態の影響の大きさを統一的に表現できるような指標を用意する必要がある。

また、既往の耐震設計で想定する起きてはならない事態に対しては、優先的に危機耐性を付与すべきであるが、その枠組みにとらわれて、多様な事態を想定するという危機耐性の自由度が失なわれてはいけな。危機耐性に配慮する事態は、既往の耐震設計の枠組みで取り扱うような、高度な定量化が可能で想定が容易な事態に限定せず、様々な事態に開かれたものである必要がある。

以上の課題を念頭に置き、本検討では鉄道構造物において危機耐性を定量化するためのフレームワークを構築する。ここでは、危機耐性に関する議論を、起きてはならない事態を網羅的に抽出することから

スタートし、各事態における影響の大きさを統一的に評価する作業を通して、危機耐性を評価する。

なお、これまでの危機耐性の議論で指摘されているように^{2),4)}、危機耐性を評価するためのフレームワークは、リスクマネジメントやクライシスマネジメントの考え方を踏襲する。また、具体的な評価にあたっては、耐震設計のもとに発展してきた地震動評価手法、地盤・構造物の挙動評価手法などを十二分に活用することではじめて実現するものである。

2. 危機耐性の定量化のためのフレームワーク

鉄道構造物の危機耐性を定量化するためのフレームワークを図-1に示す。はじめに、危機耐性の評価にあたっては、破滅的な被害を具体的に特定することが不可欠であると考え、起きてはならない事態の抽出を行う（3章）。なお、事象には様々な段階があり、その中には図-2のRumsfeld-Patrickの分類¹¹⁾で示される、事前に認識できていない事象が存在することが指摘されている。知識はあるが対応事象として認識されていないunknown knowsと、認識も知識もないunknown unknownsがある。前者は、事象として無視されている可能性があり、適切なリスク対応が必要である。後者については、抽出の段階で、できる限りの努力を行うことが技術者として真摯な態度であり、その段階が図-1の①に該当する。

続いて、図-1の①で抽出した起きてはならない事態により、対象構造物で発生する影響の大きさを評価する。この具体的な方法については、4章に詳細を説明する。最後に、②で評価された影響の大きさをもとにして、対象構造物の危機耐性の大きさを定量化する。この内容は5章で説明する。

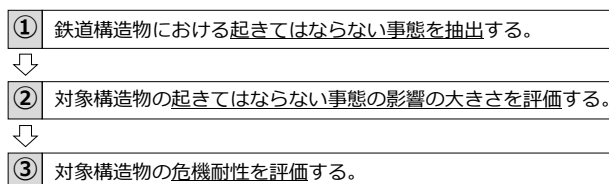


図-1 危機耐性の定量化に向けたフレームワーク

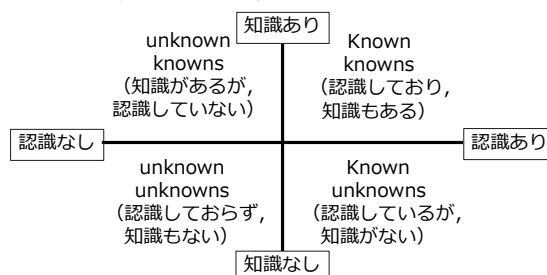


図-2 文献¹¹⁾から作成したRumsfeld-Patrickの分類

3. 鉄道構造物における起きてはならない事態の抽出

本章では、鉄道構造物において地震時に起きてはならない事態を抽出する。この抽出にあたっては、既往の耐震設計で要求性能としていた構造物の安全性や復旧性、車両の走行安全性は勿論であるが、その他の事態もできる限り抽出することが望ましい。

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の各事項を明らかにした「国土強靱化アクションプラン」¹²⁾がある。ここでは、大規模自然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示されており、他分野の事例を水平展開して鉄道分野で起きてはならない事態を想像するのに役立つ。この他に、想定外の事象が発生した場合に「仮想演習」³⁾が可能となる地震災害シミュレータ¹³⁾や、リスク評価におけるイベントツリー解析などが使える。

本検討ではアクションプランを参照し、以下に抽出した最悪の事態の一部と、その事態を4つの起きてはならない事態に類型化したものを示す。これらの事態は、今後も継続的に追加されるものである。また、抽出された最悪の事態のうち、具体的に危機耐性を考慮する項目は、評価の対象範囲（単体構造物、システム全体など）等に応じて、これらの中から適宜選定する。

(1) 起きてはならない事態Ⅰ：大規模地震の発生時に、鉄道利用者の人命が脅かされる。

例Ⅰ-1. 列車が脱線し、多数の死傷者が発生する。

例Ⅰ-2. 列車が脱線し、数名の死傷者が発生する。

例Ⅰ-3. 列車が脱線し、負傷者が発生する。

(2) 起きてはならない事態Ⅱ：大規模地震災害の発生直後に、鉄道利用者への適切な対応がなされない。

例Ⅱ-1. 地震後の構造物の状況を把握するのが遅れ、利用者への情報周知が遅れる。

(3) 起きてはならない事態Ⅲ：大規模地震災害の発生後に、運行再開に時間がかかる。

例Ⅲ-1. 地震後の構造物の状況を把握するのが遅れ、運行再開に時間がかかる。

例Ⅲ-2. 地震時に構造物に甚大な被害が発生し、復旧作業に時間がかかる。

(4) 起きてはならない事態Ⅳ：大規模地震災害の発生後に、制御不能な2次災害が発生する。

例Ⅳ-1. 鉄道構造物が倒壊して、線路周辺で建物の損壊や人的被害が発生する。

例Ⅳ-2. 鉄道構造物が倒壊して、主要幹線道路等を封鎖する。

4. 対象構造物における起きてはならない事態の影響の定量化

(1) 基本的な考え方

続いて、起きてはならない事態の影響の大きさを定量化する。具体的には、3章で抽出した起きてはならない事態により、対象構造物で発生する影響の大きさを定量化する。抽出した事態は、構造物の崩壊に起因する死傷者の発生や機能低下、それに伴う社会的被害、2次被害など様々な性質を有する。もちろん、個別の起きてはならない事態に特化して影響の大きさも評価することもできるが、前述のように、危機耐性の対策効果は、1つの事態に限定されず、複数の事態へ波及するため、その大きさは統一的に評価したい。

複数の事態に対して影響の大きさを統一的に評価できる指標として、一般的には経済損失が用いられる。しかし、あらゆる事態の影響の大きさを経済損失で評価することは現時点では困難であり、対応できる事態が限定されてしまう可能性がある。

本検討では、3章で挙げた起きてはならない事態が発生した場合の影響の大きさを、意識調査により定量化する方法を採用した。もちろん、調査から評価した影響の大きさが、どのような定量的指標（経済損失、発生確率など）に依拠しているかを特定する必要がある。また、意識調査に特有のバイアスが含まれていることにも注意を払う必要がある。しかし、意識調査による評価は比較的容易に実施が可能で、その他の指標で評価が難しい定性的な内容にも対応できる。そこで、本検討では影響の大きさ（危機得点と呼ぶ）を意識調査によって定量化する。

各事態における危機得点の評価の概要を図-3に示す。はじめに、各事態が発生した場合の影響の大き

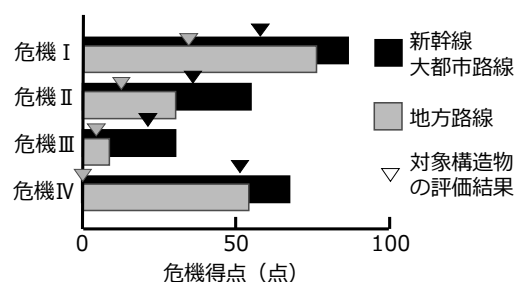


図-3 危機得点の評価の概要

さを意識調査等から評価する（図-3の棒グラフ）。この点数を用いることで、起きてはならない事態の性質が異なる場合でも、相対的な影響の大きさを比較することができる。この具体的な評価結果は、3章(2)で詳細に説明する。なお、本検討では示していないが、この大きさは路線の重要度や想定する地震レベルなどに応じて変化すると考えられる。

続いて、対象構造物に応じて、起きてはならない事態が発生した場合の影響の大きさは異なるため、危機得点が図-3の棒グラフで評価された範囲のどこに位置するかを構造物ごとに評価する（図-3の▽）。ここで、構造物ごとの影響の大きさは、負傷者・死傷者数や利用者の不満度、復旧時間、2次災害の発生確率といった、それぞれの影響を良く表現する指標値を関数として評価する。また、この関数には地震動の大きさといったパラメータも含まれる。この評価イメージは、3章(3)で説明する。

(2) 各危機得点の評価結果

鉄道利用者への意識調査により、地震時に起きてはならない事態が発生した場合の影響の大きさ（危機得点）を評価する。ここでは本格的な調査の前段階として、関東圏で通勤・通学等により日常的に鉄道を利用する120名の一般市民を対象として実施した、小規模な意識調査の結果を参考として示す。調査は平成26年2,3月に2回実施し、起きてはならない事態に関する質問紙を配布、無記名で回収した。

調査では、通勤・通学で利用している鉄道路線の周辺で、想定していない規模の地震が発生したという前提のもと、3章で示した起きてはならない事態の各例が発生した場合に抱く感情を「許せない」、「やむを得ない」の2択で選択してもらった。

回収した回答結果から、項目ごとに選ばれた割合を整理したものを図-4に示す。予備的検討による評

価結果であるため、詳細な考察は避けるが、死傷者の発生に関する事態と二次被害に関する事態において「許せない」と感じる利用者が多いことがわかる。一方で、地震直後の利用者への対応や復旧作業の迅速さに関して「許せない」と感じる割合は低い。なお、この結果には、意識調査時に前提として設定した地震レベルが関係している可能性があり、今後の調査において留意する。

図-4で評価された「許せない」と感じる割合は、各事態における危機得点の大きさを表している。つまり、本調査の結果からそれぞれの事態に対して危機得点の範囲を設定した場合には以下のようになる。ここで、点数が大きいほど影響が大きいことを表す。

起きてはならない事態Ⅰ：0～68点
 起きてはならない事態Ⅱ：0～21点
 起きてはならない事態Ⅲ：0～34点
 起きてはならない事態Ⅳ：0～58点

(3) 対象構造物の危機得点の評価

対象構造物において起きてはならない事態が発生した場合の影響の大きさを個別に評価し、3章(2)に示した危機得点の範囲から該当する点数を評価する方法を説明する。ここでは、以下に示す起きてはならない事態Ⅰを例にして、評価イメージを示す。

起きてはならない事態Ⅰ：大規模地震の発生時に、鉄道利用者の人命が脅かされる。

この影響の大きさを表現する上で適切な指標値として、「負傷者・死傷者数」がある。この数に応じて影響の大きさを評価することが望ましいが、現時点ではその数を解析的に評価することは難しい。よって、地震動の大きさに応じた構造物・軌道の損傷

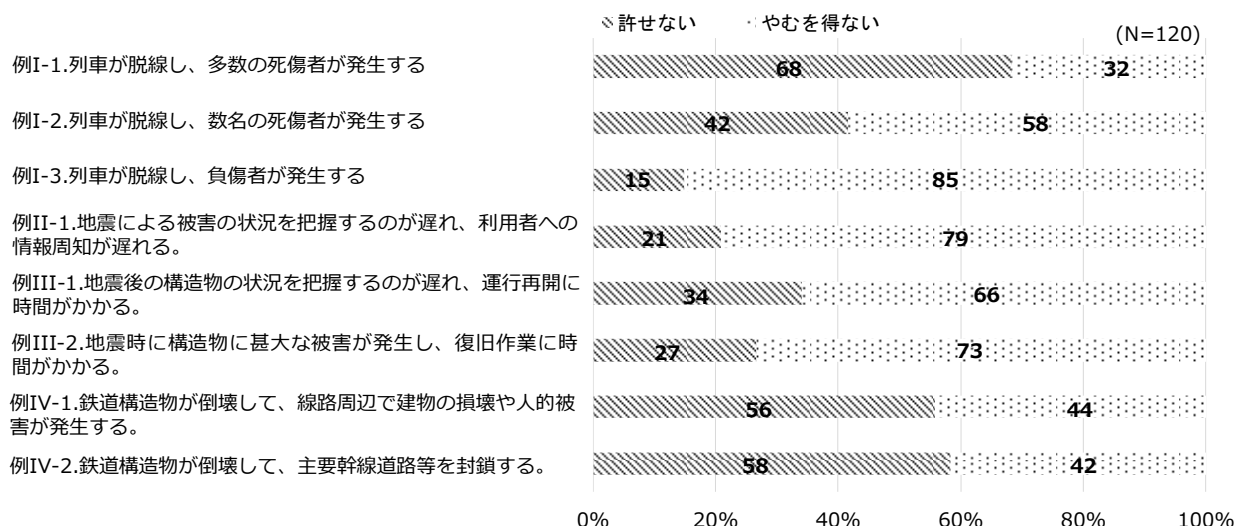


図-4 意識調査に基づく各危機に応じた危機得点の評価例

状態から、負傷者・死傷者の規模について、定性的な評価を行う。具体的には、負傷者・死傷者の発生規模を「負傷者・死傷者なし」、「負傷者の発生」、「数名の死傷者の発生」、「多数の死傷者の発生」の4段階に分類する。そして、地震動の大きさに応じて発生する構造物・軌道の状況や対策工の効果の有無などから、それにより発生する負傷者・死傷者数の発生規模を関連付け、図-5に示すような地震動強さと負傷者・死傷者数の関係の評価する。現時点では、負傷者・死傷者数の発生を4段階に設定しているため、その大きさは地震動強さに応じて階段状に評価される。

この評価を構造物ごとに実施すれば、各構造物が起きてはならない事態Ⅰに対して有する危機耐性について、以下のように把握することも可能である。

構造物A：ある地震動強さを超過すると、事態の影響が最大まで一気に上昇する。

構造物B：ある地震動強さから徐々に負傷者・死傷者数が増加し、最後に急激に増加する。

構造物C：ある地震動強さから負傷者・死傷者が発生するが、あるレベルで収束する。

構造物D：地震動強さが大きくなっても、負傷者・死傷者は発生しない。

A~Dの各構造物に具体的なイメージを与えるとすれば、構造物Aは耐震設計で想定されるレベルぎりぎりに設計され、これを上回ると脆性的な破壊形態となる構造物、構造物Bは耐震設計のレベルを超過しても急激に被害が進まないように配慮した構造物、構造物C、Dは何らかの地震力フリーな対策を講じている構造物となる。

続いて、図-5の負傷者・死傷者数と地震動強さの関係を、危機得点と地震動強さの関係に変換する（図-6）。ここでは、図-4で評価された結果を参考にして、負傷者数・死傷者数を危機得点に読み替える。すなわち、「負傷者・死傷者なし」は0点、「負傷者の発生」は15点、「数名の死傷者の発生」は42点、「多数の死傷者の発生」は68点となる。

以上の評価を、起きてはならない事態Ⅱ~Ⅳに対しても実施し、各事態の危機得点の変化を図-7のように評価する。なお、この図における危機得点は、あくまで各事態の影響の大きさを表したものであり、危機耐性はこの変動傾向から別途評価する必要がある。また、上記で行った起きてはならない事態Ⅰの考察のように、個別の事態に対して危機耐性を評価することも可能であるが、本評価で用いる危機点数

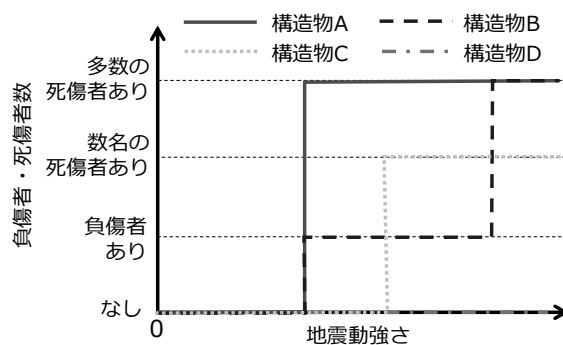


図-5 地震動強さと負傷者・死傷者数の関係の例

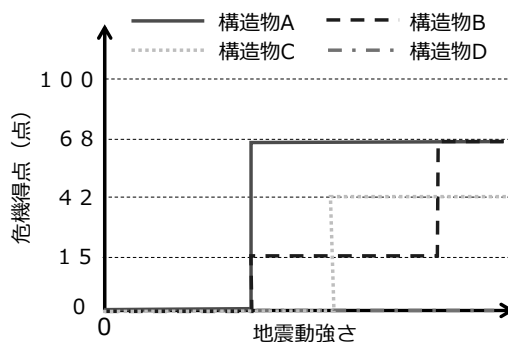


図-6 地震動強さと事態Ⅰの危機得点の関係の例

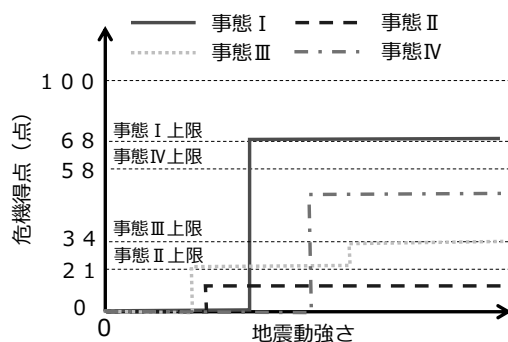


図-7 地震動強さと各事態の危機得点の関係の例

は、性質が異なる事態の影響の大きさを統合できるため、5章では全危機得点を合計したものを対象にして危機耐性を評価する方法について考察する。

5. 対象構造物における危機耐性の定量化

図-7で評価した影響の大きさから、対象構造物の危機耐性を評価する。影響の大きさは、地震動強さごとに4つの危機得点を合計したもので評価される（図-8）。評価された合計点に対して、危機耐性の評価する方法は、目的に見合った方法を採用すべきであり、今後も新たな方法が提案される必要があるが、現時点では以下のようなものが考えられる。

(1) 危機曲線の相対的な比較（定性的な方法）

最も基本的なものとして、複数の構造物で評価さ

れた危機曲線（例えば図-8の構造物A～C）を比較して、危機耐性の大きさを相対的に比較するものである。相対評価であるため、危機耐性の具体的な評価方法を設定しなくても、対策の効果の確認やある路線の中で危機耐性が著しく小さい構造物を抽出することが行える。

(2) 危機曲線の傾き³⁾

危機曲線の傾きが収束傾向か発散傾向かを確認することで、危機耐性の大きさを評価できる。この評価に基づけば、図-8では、構造物A,Bは危機得点の収束傾向が見られるため危機耐性が高く、構造物Cは急激に危機得点が発散するため危機耐性が低い。

(3) ある基準地震動における得点、得点面積

例えば、上限値のような基準的な地震動を設定できる場合には、基準地震動を超過するときの危機得点や、基準地震動までに危機曲線が囲む面積を危機耐性を表す指標値として用いることも考えられる。

(4) 地震動の発生頻度を考慮した危機得点の期待値

図-8に示すように地震動の発生頻度を評価することができる場合には、危機得点の期待値といった指標を危機耐性を表す指標として用いることもできる。

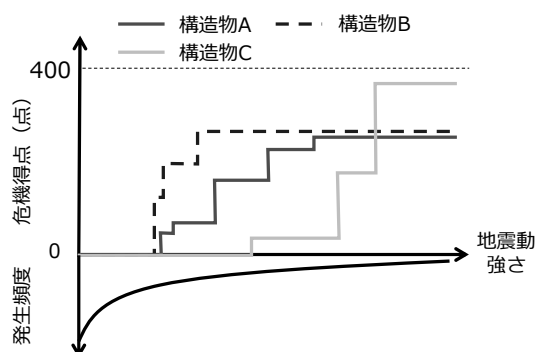


図-8 総合危機得点と危機耐性の評価方法

6. まとめ

本検討では、現状構造物の危機耐性や、対策の効果の定量化を目的として、鉄道構造物における危機耐性を定量化するためのフレームワークを構築することを目的とした検討を行った。評価手順は、①起きてはならない事態の抽出、②その影響の大きさの評価、③危機耐性の評価の3段階に分かれており、それぞれの具体的な方法を説明した。今後は本フレームワークに従い、実際の構造物を対象とした危機耐性の評価を実施して、その適用性を確認する。

謝辞：鉄道構造物における起きてはならない事態に関するアンケート調査において、埼玉大学の学生および土木系コンサルティング会社の職員のご協力を得ました、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 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) 本田利器，秋山充良，片岡正次郎，高橋良和，野津厚，室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系-試案構築にむけての考察-，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.72，No.4，I_459-I_472，2016.
- 3) 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.
- 4) 高橋良和，秋山充良，片岡正次郎，本田利器：国内外の道路橋の設計指針に見られる「危機耐性」の分析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.72，No.4，I_821-I_830，2016.
- 5) 山本俊六，野田俊太：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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 港空研耐震構造研究チーム：耐震強化岸壁の機能を確保するための耐震スロープの提案，2008，http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbnbsi/taisin/eqcount/earthquake_resistant_slope.pdf(2016.6.18参照)
- 10) 日本道路協会編：道路橋示方書：同解説V耐震設計編，丸善出版，2012
- 11) Patrick Lambe：Rumsfeld Ignorance Management framework，Green Chameleon，http://www.greenchameleon.com/gc/blog_detail/introducing_the_rumsfeld_ignorance_management_framework/(2016.6.18参照)
- 12) 国土強靱化推進本部：国土強靱化アクションプラン，2014，http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/k_kap-honbun-h240603.pdf (2016.6.18参照)
- 13) 井澤淳，坂井公俊，本山紘希，室野剛隆：地震災害シミュレータの開発，日本鉄道施設協会誌，Vol.52，No.3，pp.228-230，2013.