

橋梁耐震における危機耐性導入の動き

武田 篤史

State-of-the-art Report Regarding “Anti- Catastrophe” Concept for Seismic Engineering of Bridges

Atsushi Takeda

Abstract

The “anti-catastrophe” concept has been proposed after the 2011 Tohoku–Pacific Ocean Earthquake. This concept is not new in seismic design and is considered in various aspects of the existing design code. However, many aspects are not expressed explicitly, and actual structures exist that do not reflect the intended purpose of this concept. Herein, existing anti-catastrophe interpretation and recent related studies are summarized with emphasis on the seismic engineering of bridges.

概 要

東北地方太平洋沖地震における原子力発電所事故や巨大津波被害などを契機に、設計で想定した以外の事象にも対応しようとする概念として危機耐性が提唱されている。危機耐性の考え方は必ずしも新しい概念ではなく、従来の設計基準でも様々な形で考慮されてきた。しかし、その考え方が陽に表現されていない部分も多く、その意図が反映されていないとみられる構造物も多くあるとされている。本報告では橋梁の耐震を念頭に置き、危機耐性に関する既往の考え方をまとめるとともに最近の研究を紹介した。

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震以降、危機耐性という考え方の導入が提唱されている¹⁾²⁾³⁾。危機耐性とは、2.2節に示す通り様々な定義がなされているものの、概括すると「設計基準において照査の対象とされていない事象によって生じる危機にも耐える性質」である。この動きは、東北地方太平洋沖地震における原子力発電所事故や巨大津波被害などを設計で想定していなかったことに帰着させる考え方、すなわち「想定外」という考え方との訣別が大きな動機となっている。

危機耐性の考え方は、巨大地震に対して被害を完全になくすことはできなくても、社会への影響を小さくすべく最善を尽くそうとするものであり、技術者の責務であると考えられ、すでに設計基準類にも取り込まれつつある⁴⁾⁵⁾。しかし、現状では必ずしも広く理解されてはいないものと考えられる。

そこで、本報告においては、危機耐性の考え方に対する理解が深まることを期待して、危機耐性に関する既往の考え方をまとめるとともに最近の研究を紹介する。なお、危機耐性はあらゆる構造物のあらゆる作用に対して考慮すべきであるが、ここでは橋梁の耐震を中心に示す。

2. 危機耐性の概念

2.1 危機耐性導入の目的

危機耐性の概念を理解する上では、まず、危機耐性を導入する必要性を明らかにしなければならない。

設計基準類においては、危機耐性という用語が用いら

れていないものの、設計照査の範囲外についても、古くから配慮されてきた⁴⁾⁵⁾。例えば、1923年関東地震の後に導入された震度法では設計震度0.2が採用された。これは、関東地震による構造物の応答震度を0.4程度と見積もり、設計震度に対して許容応力度以内にとどめればその2倍程度の地震動に対しても致命的な被害は避けられるとの見込みによるものである⁶⁾。また、1995年兵庫県南部地震後には、より大きな地震の発生も想定されたが、設計震度として既往観測波形最大レベルの2.0程度が採用された。これは、説明のわかりやすさから設計用地震動を既往観測波最大レベルとするが、曲げ破壊モードを基本とすること、限界状態や安全率の設定方法に配慮することなどにより、構造物の設計において一定の冗長性を確保することとしたものである。

また、より進んだ概念として、原子力安全委員会⁷⁾では、「残余のリスク」として設計用地震動以上の地震動によるリスクを示している。

一方で、これらの設計基準類に対して、課題が2つ挙げられている。1つ目(課題1)は、土木学会・地震工学委員会・性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会⁸⁾(以降、性能橋梁委員会と称す)による指摘で、「L2 より大きな地震が発生する可能性があること、およびそのような地震により人的被害等が生じる可能性があることが明示的に説明されていなかった。」というものである。つまり、「設計照査の範囲外への配慮やその意図が、必ずしも設計者に伝わっていたわけではない」ということである。その例として、川島⁹⁾は以下のように指摘をしている。「関東地震後の設計震度0.2が採用されていた時代において、設計者が設計震度0.2を満たすこと

で耐震性能が満足されると理解し、震度0.2を超える挙動に対しての想像がなされなかったと推測される設計の構造物が多く残されている」。2つ目(課題2)は、土木学会・原子力安全土木技術特定テーマ委員会¹⁾(以降、「原子力テーマ委員会」と称す)による、「設計地震動、設計津波を上回る事象に対して、どのような対策が現実的に適切であるかという認識が社会で共有されていなかった。」という指摘である。つまり、具体的な対策が各設計者任せになっていたということである。

危機耐性の導入は、これら2つの課題に対する解決策として提案されているが、Fig.1に示すように、課題が異なるため導入の目的も異なっている。

前者の課題1に対しては、武田・西村⁹⁾が示す危機耐性導入の目的が合致している。武田・西村⁹⁾は「設計者に対して、『設計基準はバーチャルであり、それを満足するだけではリスクが残っていること』を明示したうえで、『照査内容以外についてもイメージーションを働かせて設計事象を超える事象への備えとして足りないものを補うこと』を促すこと」を導入の目的としている。同様の考え方は、土木学会・コンクリート委員会・鉄筋コンクリート設計システム研究小委員会¹⁰⁾(以降、「RC設計システム委員会」と称す)でもなされており、設計者が想定外に対して求められることとして以下のように示している。「①設計者は「想定外」で引き起こされる事態を「想定」した上で、何を防ぎ、何を許容したのか、それによるコスト増も含めて表明し、できることとできないことを明確にしなければならない。②設計作業においては、構造物の機能あるいは、安全性がどのような形態で喪失するのかについて、設計者は明確なイメージを持ち、必要に応じてそれを示す必要がある。」

後者の課題2に対しては、本田²⁾が示す危機耐性導入の目的が合致している。本田²⁾は、「個々の技術者が自身の判断を根拠に、説明責任までを含めて対応するのは、技術者の負担が過大となる」ことから、「耐震指針等として具体化しておく必要がある」を導入の目的としている。

前者で設計者の責務範囲を広げる方向であるのを受けて、後者ではその責務に対する負担を軽減しようとするものであると考えれば、両者をつなげて考えることができる。

2.2 危機耐性の定義

危機耐性という概念は、提唱されてから間がなく、まだ定義が定まっていない。Table 1に、危機耐性および危機耐性に類する事項の考え方をまとめる。

これらのうち原子力テーマ委員会¹⁾の定義は、対象が原子力に絞られていることから異質であるが、その他は本質的な方向性は同様でありながらも差異を含んでいる。そこで、危機耐性において「対象とする事象」と「目標とする状況」に分けて整理する。

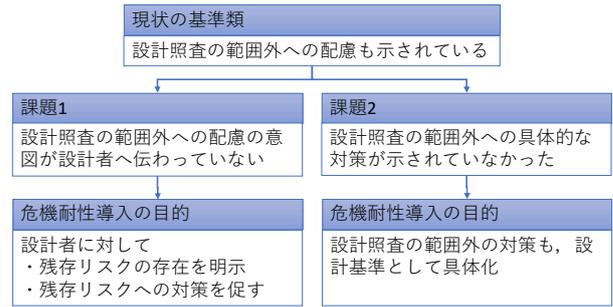


Fig. 1 危機耐性導入の目的
Purpose of Introducing "Anti- Catastrophe"

Table 1 危機耐性とそれに類する事項の定義・考え方
Definitions of Anti- Catastrophe and Similar Concepts

事項	出典	考え方
危機耐性	原子力テーマ委員会 ¹⁾	安全性が損なわれたとしても原子力発電所のシステム全体として危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能
	本田 ²⁾	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
	室野 ¹¹⁾	地震における全事象に対して、狭義の耐震設計で制御可能な事象については性能を確保しつつ（つまり従来の耐震設計を実施することは前提としながら）、狭義の耐震設計で制御ができない補集合の部分を考慮すること
	性能橋梁委員会 ⁸⁾	以下の3項目の実施により付与されるもの ① 設計地震動を超える地震動や、地盤変位、斜面崩壊、その他の作用が発生することを認識する ② 作用が設計で想定した範囲内かどうかにかかわらず、経時劣化、上載物、周辺環境などの影響により、設計計算で想定した応答を上回る可能性や想定した抵抗を下回る可能性があることを認識する ③ 前記の作用・応答・抵抗が設計範囲外であったことにより崩壊へ至るプロセスを考慮し、社会への影響がより小さくなるように配慮すること
	武田・西村 ¹²⁾	BDBE に対しても、社会への影響をより小さくする性質
設計事象を超える事象への対応	本田 ¹³⁾	十分な耐災害性能を有する構造系が、何らかの理由により、想定範囲を逸脱する状態になった場合にも、社会としてのレジリエンスに資することができるようにするための品質
	土木構造物共通示方書 ¹⁴⁾	設計で対象としている事象を超えることにより、構造物またはそれを含むシステムの機能や安全性が損なわれた場合でもその損傷が社会に重大な影響を及ぼす可能性を十分に小さくするような配慮を講じることを原則とする

2.2.1 対象とする事象 危機耐性について説明する場合、対象とする事象として設計用地震動を超える地震動を例示することが多い。これは、その存在や結果について最もイメージしやすいからである。しかし、いずれの定義も、対象を設計用地震動以上の地震動に留めず、

地震動以外の設計で想定していなかった事象を含めている。

対象とする事象をわかりやすく表現したものとして、Fig. 2に示す室野¹¹⁾の補集合の考え方がある。地震における全事象のうち狭義の耐震設計(いわゆる従来の設計照査)で制御ができない補集合の部分を危機耐性の対象事象としたものである。

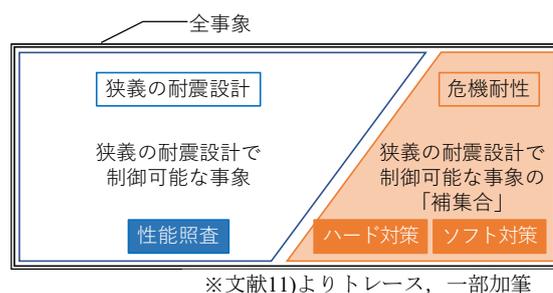
また、武田・西村⁹⁾は、設計で想定していなかった事象を指す言葉として、原子力関連施設に関して用いられている「BDBE (Beyond Design Basis Event = 設計基準外部事象)」という用語を用いている。これは、本田ら²⁾や本田¹³⁾の定義にある「想定」という言葉を用いた場合、設計基準策定時において明示されていないものの考慮されている「想定」と、設計時における設計者の「想定」の両者の間で混乱を招くことを危惧したためとされており、性能橋梁委員会⁸⁾でも用いられている。本報告においても、設計で想定していなかった事象を指す言葉として、BDBEを用いることとする。

BDBEの具体的内容については、設計用地震動を超える地震動のほか、「免震デバイスが十分に機能しない、材料強度の不均質性が大きい、経年劣化により局所的に脆弱な部位が生じる、地盤条件の空間的ばらつきが大きい等、設計時に想定していなかった様々な事象」などの例が挙げられている²⁾が、Table 2に示す武田・西村¹²⁾の分類を行うことで考えやすい。これは、性能橋梁委員会⁸⁾の定義を整理したものであり、設計照査と照らし合わせて「作用」「応答」「抵抗」に分類するとともに、「支承の破壊」のように原因にかかわらず考えるべき「状態」を加えたものである。

2.2.2 目標とする状況 危機耐性を考慮した結果、構造物あるいは社会がどのようにあるべきかということは、様々なBDBEを考慮する上ではあいまいにならざるを得ない面がある。

このような中で、性能橋梁委員会⁸⁾では、「構造物が崩壊することは受容しなければならない」としたうえで、「人命の喪失、財産の喪失、交通ネットワーク機能の喪失、2次被害、社会経済的損失」など社会への影響を低減することを目標としている。

一方、本田¹³⁾は「社会としてのレジリエンス」を目標としている。「レジリエンス」という用語は、もともとは心理学で用いられていた用語である⁸⁾ことから地震工学上の定義は定まっていないが、内閣府は「災害をもたらす外力からの「防護」にとどまらず、国や地域の経済社会に関わる分野を幅広く対象にして、経済社会のシステム全体の「抵抗力」、「回復力」を確保すること¹⁵⁾としている。このレジリエンスを検討する上で欠かせない考え方とし、Fig. 3に示すBruneauら¹⁶⁾の"Resilience Curve"がある。時刻 t_0 に発災した後のインフラ性能を概念的に表したものであり、 $R(\text{loss of resilience})$ によりレジリエンス性能を評価しようとするものである。本田¹³⁾も一つの

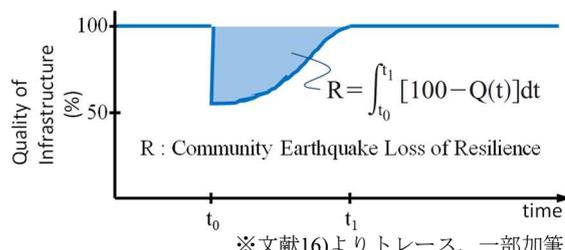


※文献11)よりトレース，一部加筆

Fig. 2 室野による補集合の考え方¹¹⁾
Idea of Complement by Muro

Table 2 BDBEの分類¹²⁾
Categorization of BDBE

分類	BDBEの例
作用	地震動の性質(強さ, 継続時間, 振動特性, 位相特性, 回数など), 断層変位, 地盤沈下, 地盤変位, 斜面崩壊, 津波, 活荷重の変化, 気象条件, 海象条件
応答	材料劣化(剛性変化など), 周辺環境の変化(付属構造物, 地形など), 地盤条件の不確定性, 材料剛性の不確定性, 設計モデルの不確定性
抵抗	材料劣化(強度低下, 断面減少など), 地盤条件の不確定性, 材料強度の不確定性, 設計モデルの不確定性
状態	支承の破壊, 橋脚の破壊, 過大な残留変位, 橋梁の崩壊



※文献16)よりトレース，一部加筆

Fig. 3 Bruneauによるレジリエンスカーブ¹⁶⁾
Resilience Curve by Bruneau

指標として取り上げている。

「危機耐性」と「レジリエンス」の関係については、議論が定まっていないが、重なる部分が多いものの異なるものであると考えられる。異なる点は、1)「危機耐性」は破滅的な状況に陥ることの回避に主眼が置かれており必ずしも短期での回復を目指していない点、2)「レジリエンス」はBDBEのみならずDBE(Design Basis Event = 設計基準内部事象)も対象としているのに対し「危機耐性」は相当に深刻な状況を対象としているという点、の2点である。

3. 危機耐性の考慮方法

3.1 BDBEへの対応方法

BDBEへの具体的な対応方法は、各種基準類にも示さ

れている^{4),5)}。例えば、道路橋示方書¹⁷⁾においては「2章・橋の耐震設計の基本」の中で、鉄道標準³⁾においては「2章・耐震設計の基本」の中で、それぞれ耐震設計上配慮すべきことが列記されている。しかし、これらは本文ではなく解説として示されており、照査対象ともなっていないことから、必ずしも実務に活かされているとは言い難い。また、危機耐性においては、それぞれの橋梁ごとに、立地条件、構造条件、供用条件などに応じて生じるBDBEを見極めて対応することが非常に重要である。

このような中、性能橋梁委員会⁸⁾では、対応方法を1)コラプスコントロール、2)冗長性、3)ネットワークの利用の3通りに整理している。さらに、武田・西村¹²⁾は、これに「BDBEの回避と低減」を加えて再考し、Table 3に示す4段階に整理している。第1段階の「BDBEの回避と低減」は、例えば、斜面崩壊や断層変位の影響など回避・低減可能なBDBEに対して、立地の選定において危機耐性を考慮するものである。第2段階の「構造機能の冗長性確保」は、BDBEが生じて、各部位が保持すべき機能が喪失しにくくなるように冗長性を確保するものである。第3段階の「コラプスコントロール(崩壊制御)」は、崩壊する様態を制御することで、崩壊時の社会への影響を低減しようとするものである。第4段階の影響波及の抑制は、橋梁単体の崩壊による直接的な被害にとどまらずその影響が広く波及することをシステムとして抑制するものである。BDBEとして地震強度を考慮したときの、第2段階から第4段階までのイメージをFig. 4に示す。設計地震動まではDBE(Design Basis Event=設計基準内部事象)として崩壊の発生確率がある程度に抑えられている。それを超える地震動に対しては、まずは第2段階の冗長性確保で対応し、それでも残る崩壊の可能性に対しては、コラプスコントロールで対応する。一方、第4段階の影響波及の抑制に関しては、DBE内での損傷発生からBDBEの範囲にかけて連続的に考慮することとなる。

このような段階に分ける考え方は、Table 4に示す原子力施設の安全性に対するDID(Defence In Depth, 深層防護)という考え方¹⁸⁾と似たものである。原子力施設は多くの設備を含む点、オペレーションに主眼を置いている点などのほか、放射能という要因があるため、段階数も内容も異なるが、基本的な考え方は同様である。

なお、「コラプスコントロール」という用語は、性能橋梁委員会⁸⁾で始めて用いられた言葉であるが、「設計時には最終的な崩壊様態まで把握すべき」との意見は、本田¹³⁾やRC設計システム委員会¹⁰⁾でも示されている。損傷を一定の範囲内に収めようとする「ダメージコントロール」とは根本的に異なることに注意が必要である。

3.2 実務において危機耐性を考慮するステージ

実構造物へ危機耐性を導入するためには、実務におけるどのステージで危機耐性を考慮するかが重要な問題となる。

Table 3 BDBEへの対応方法の整理¹²⁾
Steps against BDBE

段階	内容	対応例
1	BDBEの回避と低減	・断層や斜面崩壊を避けた立地
2	構造機能の冗長性確保	・曲げ破壊への誘導 ・不静定次数の高次化
3	コラプスコントロール(崩壊制御)	・落橋防止構造の採用 ・連続桁やラーメン橋梁の適用
4	影響波及の抑制	・交通ネットワークの利用 ・復旧シナリオの策定

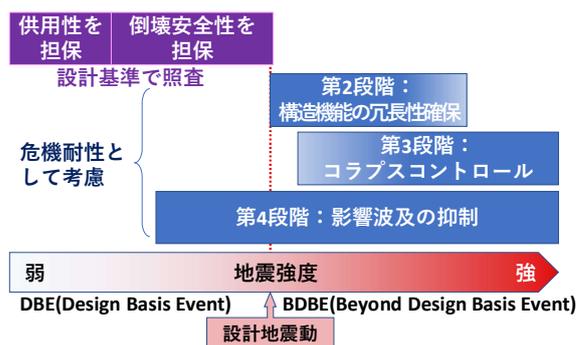


Fig. 4 危機耐性への対応段階のイメージ
Image of Steps for Anti-Catastrophe

Table 4 原子力分野におけるDID¹⁸⁾
DID in Nuclear Field

Levels of Defence	Objective
LEVEL 1	Prevention of abnormal operation and failures
LEVEL 2	Control of abnormal operation and detection of failures
LEVEL 3	Control of accidents within the design basis
LEVEL 4	Control of severe conditions including prevention of accident progression and mitigation of the consequences of a severe accident
LEVEL 5	Mitigation of the radiological consequences of significant external releases of radioactive materials

設計基準類^{3),14),17)}や本田ら²⁾、本田¹³⁾は、主に構造計画で危機耐性を考慮し、それを詳細設計で具現化する流れを示している。これは、構造計画から詳細設計までの「構造物設計」の範囲を対象とした基準や論文であるためと考えられる。

これに対して、性能橋梁委員会⁸⁾では、構造物設計のステージのみならず、路線計画のステージでの危機耐性考慮の重要性を説いている。これは、立地によるBDBEの回避・低減など、路線計画のステージでしかできない対応が多くあるためである。なお、現状では、土木設計業務等共通仕様書¹⁹⁾の中で路線計画に該当する「道路設計」の業務内容に、耐震性に関する検討が示されていない。そのため、路線計画のステージにおいては危機耐性はおろか耐震性についてすら検討されていない場合が多い。性能橋梁委員会⁸⁾では、「道路設計」の業務内容として危

機耐性を加えることを提案している。

さらに、性能橋梁委員会⁸⁾では危機耐性を考慮するステージとして、先述の路線計画のほか、施工、維持管理、既設構造物の補強時の各ステージまでを想定したライフサイクル全般における対応を提案している。さらに武田・西村⁹⁾は、これらの全てのステージで、危機耐性のストーリーを共有することの重要性を説いている。危機耐性のストーリーとは、想定するBDBEやそれへの対処、崩壊時の対応計画までを含む、危機耐性の一連の流れであり、本田¹³⁾が用いている「被災・復旧シナリオ」と概ね同様である。施工時の設計変更や、供用時の土地利用変更などにおいても当初想定した危機耐性を実現するためには、危機耐性のストーリーを共有して行くことが非常に重要である。

4. 危機耐性に資する最近の研究

4.1 危機耐性に資する構造形式の研究

RC構造は、適切な配筋を行えばそれ自体が大きな変形性能とエネルギー吸収性能を有しており、一定の危機耐性を有する構造であるが、さらに変形性能を伸ばそうとする試みが行われている。石橋ら²⁰⁾は、危機耐性が提唱される以前より内巻きスパイラル構造を開発している。これは、柱コアコンクリート内にスパイラル筋を埋め込むなどした構造で、すでに多くの構造物に適用されている。五島ら²¹⁾は柱コアコンクリート内にメナーゼヒンジを埋め込むことで変形性能向上の試みをしている。藤倉ら²²⁾はコアコンクリート内にCFTを埋め込んで変形性能の向上を図るとともに、地震後の軸方向鉄筋取替が容易である構造を提案している。

免震構造は、地盤からの振動を構造物に伝えにくくすることからロバスト性を有する構造¹⁰⁾とされ、危機耐性にも有効である。一方で、東北地方太平洋沖地震で破断したゴム支承に関して変形性能の低下に言及した報告²³⁾があるなど、必ずしも長期安定性が確認されているとは言えない。これに対し松崎ら²⁴⁾は、地震強度や免震支承の経年劣化の影響を受けにくくなるように、橋脚と支承の耐力階層化に着目した設計手法を提案している。また、熊崎・武田²⁵⁾は、Fig. 5に示す免震支承を用いない免震橋脚を提案している。本構造は橋脚を細い4本の柱に分割し長周期化するとともに、柱の間に摩擦型ダンパーとしてブレーキダンパー²⁶⁾を設置した構造であり、不静定次数を高めることでも危機耐性を高めている。

鋼構造に関しては、中尾ら^{27),28)}がアーチ橋に関して、アーチリブ基部の支承の損傷制御をすることで、崩壊し難くなる方法を提案している。

ここまで示してきた構造形式は、全て構造機能の冗長性を高めるものであったが、コラプスコントロールに着目した研究もなされている。西村ら²⁹⁾が提案するFig. 6に示す自重補償構造は、水平慣性力に抵抗する通常柱と、

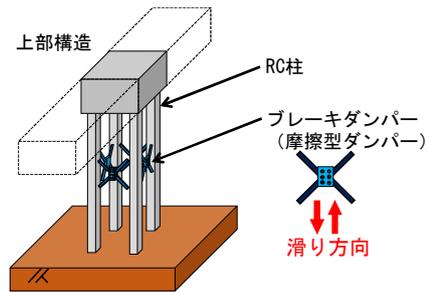


Fig. 5 摩擦型ダンパーを用いた免震橋脚²⁵⁾
Seismic Isolation Pier with Friction Slip Damper

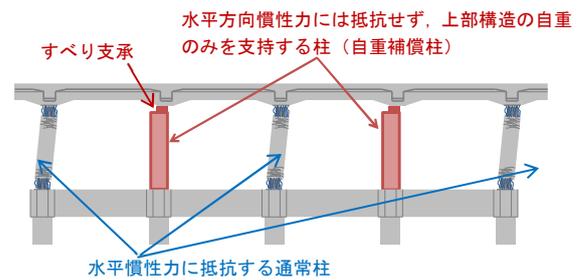


Fig. 6 自重補償構造²⁹⁾
Dead Weight Compensation Structure

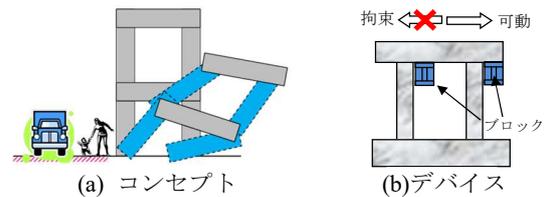


Fig. 7 倒壊方向制御構造³¹⁾
Collapse Direction Control Structure

滑り支承などで上部構造と連結し水平慣性力に抵抗しない「自重補償柱」の種類で構成される。地震時において過大応答が生じ通常柱が著しく損傷しても、自重補償柱は健全な状態で自重を支持するため、構造物全体系として鉛直支持性能を喪失しない状態を保つことができる。水野ら³⁰⁾は、上路式鋼トラス橋の上部構造崩壊を、落橋防止構造から着想したケーブルにより防止しようとする試みを行っている。豊岡ら³¹⁾は、「倒壊が仮に生じたとしても、居住地域や緊急輸送道路、復旧スペース等を支障する方向には構造物を倒壊させないことで、人命の損失を回避し、構造物の復旧性を高める」というコンセプトで、Fig. 7に示す倒壊方向を制御する構造を提案している。

BDBEは様々であることから、構造形式の選択肢は多いことが望ましい。今後も様々なアイデアが提案されるものと考えられる。

4.2 危機耐性能の定量評価と設計方法に関する研究

危機耐性を実装するためには、その性能、つまり危機耐性能を定量的に評価できることが望ましい。その研究は緒についたところであり、まだ多くはないが、着々と進められている。

RC橋脚の極大地震に対する冗長性の評価に関して、中尾・大住³²⁾は、設計上の終局限界状態に至った後の耐荷能力およびエネルギー吸収性能を実験及び解析で検討している。また、松崎ら³³⁾は制震橋梁を対象に、解析的に冗長性の評価を試みている。

構造性能を直接的に評価するのではなく、その影響から危機耐性能を評価しようとする試みもある。大場³⁴⁾は、落橋防止システムの効果を、Bruneauの指標¹⁶⁾を用いることで定量化している。また、田中ら^{35),36)}は「鉄道構造物として起きてはならない事態」を抽出し、その許容度から点数化することで、被災・復旧に関する危機の度合いを定量化している。

危機耐性能の評価ではないが、極大地震に耐えられるようにした場合の、コストを検討した研究もなされている。宮地・川島³⁷⁾は、道路橋において設計水平震度を2.8倍まで大きくしても、橋梁全体の建設コストは3割程度の増加であるとの試算を示している。一方、實地・室野³⁸⁾は鉄道橋梁の初期建設コストに関して、設計地震動の倍率の0.7~1.0倍のコスト増加があるとしており、宮地・川島³⁷⁾の検討との間に差がみられる。

危機耐性能の定量評価が完全でない中でも、設計に取り込もうとする提案もなされている。篠原ら³⁹⁾は、超過作用に対する破壊プロセスの確認とリダンダンシーの確保を目的とした設計手法を提案している。本手法は、危機耐性能の評価手法が完全でない中であっても実用性が高く、実務への適用が期待される。また、大住・中尾⁴⁰⁾は、極大地震に対する崩壊直前の状態までを包括した安全余裕度の考え方を整理している。

危機耐性の定量化は困難ではあるが、社会への説明性を高めるためには必須である。今後も、継続して検討されることが望まれる。なお、定量化が困難であることを理由に危機耐性の導入に躊躇してはならない。篠原ら³⁹⁾のように、現状の技術に即して進めていくのが良いと考える。

4.3 危機耐性を考慮した事例

2016年熊本地震の復旧に当たっては、危機耐性を考慮したとの報告がなされている。

阿蘇長陽大橋は、Photo 1に示すように熊本地震において斜面崩壊に伴ってA1橋台が沈下し、通行不能となった。さらに、橋台に接続する道路も斜面崩落で損傷を受けた。復旧にあたっては、不確定要因を多く含んでいることを認識し、冗長性の高い構造形式を採用するとともに、斜面崩壊時への対策という面からコラプスコントロールがなされた。さらに、周辺道路も含めた対策などを通して、



Photo 1 阿蘇長陽大橋の被害
Damage of Aso-Choyo Great Bridge



Photo 2 阿蘇大橋の崩壊
Collapse of Aso Great Bridge

復旧方法にも配慮されている⁴¹⁾。

阿蘇大橋は、Photo 2に示すように熊本地震において大規模な斜面崩落に伴って落橋した。そのため、架橋位置の変更が行われたが、横ずれが支配的な活断層を跨ぐルートを選定せざるを得なかった。そこで、計画・設計に当たっては、断層変位が橋の性能に及ぼす影響を小さくするための構造的な配慮や工夫がなされた。さらには被災後の機能回復までが考慮されている⁴²⁾。

5. まとめ

本報告においては、橋梁の耐震を念頭に、危機耐性に関する既往の考え方をまとめるとともに最近の研究を紹介した。本報告に示した内容を以下にまとめる。

- 1) 危機耐性導入の必要性と、危機耐性の定義を整理した。
- 2) 実務における危機耐性の考慮方法を、BDBEへの対応方法の面と、危機耐性を考慮するステージの面から整理した。
- 3) 危機耐性に資する最近の研究を、構造形式、危機耐性能の定量化および設計法の面から紹介するとともに、危機耐性を考慮した事例として熊本地震の復旧について示した。

橋梁等の耐震へ危機耐性を導入することには、まだ課題もあり困難な面もあるが、事例に示すように現状でも可能なことが多くある。実務に携わる技術者が、想像力を駆使して様々なBDBEを考えて配慮していくことで、より良い構造物の建設につながるものとする。

参考文献

- 1) 土木学会 東日本大震災フォローアップ委員会 原子力安全土木技術特定テーマ委員会原子力土木委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言（土木工学からの視点），2013
- 2) 本田，秋山，片岡，高橋，野津，室野：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系一試案構築にむけての考察一，土木学会論文集A1，Vol. 72，No. 4，pp. I_459-I_472，2016
- 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，2012
- 4) 高橋，秋山，片岡，本田：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，Vol. 72，No. 4，pp. I_821-I_830，2016
- 5) 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，pp. I_448-I_458，2016
- 6) 川島：地震との戦い，鹿島出版会，2014
- 7) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，2006
- 8) 土木学会 地震工学委員会 性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会：性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会 活動報告書，2018
- 9) 武田，西村：橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察，土木学会論文集A1，Vol. 75，No. 4，pp. I_688-I_700，2019
- 10) 土木学会 コンクリート委員会 鉄筋コンクリート設計システム研究小委員会(340委員会)：鉄筋コンクリート構造物の設計システム -Back to the Future II-，コンクリート技術シリーズ104，土木学会，2014
- 11) 室野：耐震標準の概要と改訂のポイント，基礎工 特集鉄道設計標準（耐震・基礎・土留め）の改訂，Vol. 41，No. 5，pp. 11-16，2013
- 12) 武田，西村：橋梁耐震を対象とする危機耐性の概念整理，土木学会安全問題討議会'19，講演概要集，2019
- 13) 本田：危機耐性を指向した耐震設計の実装に向けた考察，土木学会論文集A1，Vol. 74，No. 4，pp. I_1078-I_1086，2018
- 14) 土木学会：土木構造物共通示方書(性能・作用編)，2016
- 15) 内閣府：平成25年版 防災白書，2013
- 16) Bruncau et al. : A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, Earthquake Spectra, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752, 2003
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成29年3月，2017
- 18) International Nuclear Safety Advisory Group : Defence in Depth in Nuclear Safety, INSAG-10, 1996
- 19) 国土交通省：土木設計業務等共通仕様書（建設省技調発第92号の1 昭和62年3月31日）（一部改定 国官技第375号 平成31年3月12日），2019
- 20) 石橋，菅野，木野，小林，小原：軸方向鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験，土木学会論文集，No. 795/5-68，pp. 95-110，2005
- 21) 五島，植村，高橋：大変形時における塑性ヒンジを保証する有メナーゼヒンジRC柱の実験的検討，第21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講演論文集，pp. 349-356，2018
- 22) 藤倉，忍田，臼井，NGUYEN，中島，浦川：レベル2地震損傷後に修復可能なRC橋脚の提案および実験的検証，土木学会論文集A1，Vol. 75，No. 4，pp. I_591-I_601，2019
- 23) 曾田，山田，木水，広瀬，鈴木：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，Vol. 59A，pp. 516-526，2013
- 24) 松崎，小野寺，津村，鈴木：免震支承一RC橋脚間の耐力比および免震支承の経年劣化と免震橋における地震時損傷部材の関係に関する基礎的研究，第19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講演論文集，pp. 265-268，2016
- 25) 熊崎，武田：摩擦型ダンパーを用いた免震橋脚の減衰力に関する解析的検討，第21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講演論文集，pp. 265-272，2018
- 26) 武田，佐野：皿バネボルトセットを用いた摩擦型ダンパーの性能評価，構造工学論文集，Vol. 58A，pp. 492-503，2012
- 27) 中尾，宮田，大住：超過外力に対するアーチ橋の損傷制御に関する解析的研究，第20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講演論文集，pp. 57-64，2017
- 28) 横山，宮田，中尾，大住：構造条件の違いが超過作用による橋梁の終局挙動に及ぼす影響に関する解析的検討，第21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講演論文集，pp. 365-370，2018
- 29) 西村，室野，豊岡，五十嵐：危機耐性を向上させる自重補償機構の大変形時における鉛直支持機能に関する実験的検討，土木学会論文集A1，Vol. 75，No. 4，pp. I_569-I_578，2019
- 30) 水野，後藤，王，鈴木：上路式鋼トラス橋を対象とした崩壊制御設計に用いるケーブル式崩壊防止装置の有効性に関する検討，第22回橋梁等の耐震設計シン

- ポジウム講演論文集, pp.313-320, 2019
- 31) 豊岡, 布川, 小野寺, 室野: ブロック型倒壊方向制御構造を有するラーメン高架橋柱の静的載荷試験, 土木学会論文集A1, Vol. 75, No. 4, pp. I_408-I_415, 2019
- 32) 中尾, 大住: 限界状態3に至った後のRC橋脚の耐荷能力に関する研究, 第21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講演論文集, pp. 55-62, 2018
- 33) 松崎, 久保, 武田, 運上: 橋台-桁間に履歴型ダンパーを適用した制震橋梁の極大地震動に対する非線形応答特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 188-199, 2019
- 34) 大場: 地震発生直後における緊急輸送道確保のための橋梁部の対策の事例, 第21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講演論文集, pp. 63-66, 2018
- 35) 田中, 室野, 坂井, 齋藤, 本山: 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, 第19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講演論文集, pp. 53-58, 2016
- 36) 田中, 坂井, 室野, 齋藤: 鉄道構造物における危機耐性の定量評価に関する試算例, 第20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講演論文集, pp. 65-72, 2017
- 37) 宮路, 川島: 市民から見た橋梁の耐震性能目標, 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 303-310, 2006
- 38) 實地, 室野: 設計地震動を超える外力に対する鉄道橋梁の成立性と初期建設コストに関する研究, 第19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講演論文集, pp. 41-44, 2016
- 39) 篠原, 鬼木, 田崎: 超過作用に対する破壊プロセスに基づく耐震設計法の高度化の検討, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 99-104, 2019
- 40) 大住, 中尾: 道路橋の設計における安全余裕度の考え方に関する一提案, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 105-110, 2019
- 41) 澤田, 今村, 中川, 星隈: 熊本地震で被災したPCラーメン橋の復旧とモニタリングの活用, 土木技術資料, 60-2, pp. 36-39, 2018
- 42) 星隈, 今村, 西田: 阿蘇大橋(仮称)の計画及び設計における地盤変状の影響への配慮, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 85-90, 2019