

# 橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察

武田 篤史<sup>1</sup>・西村 隆義<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640）

E-mail: takeda.a@obayashi.co.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング 構造技術部（〒186-0002 東京都国立市東 1-4-13）

E-mail: t\_nisimura@jrseg.co.jp

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対する設計の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、実際の構造物において、その意図が反映されていないと考えられる例もみられる。

そこで、本論文では橋梁の耐震設計に危機耐性を導入することを目的として、危機耐性の概念を整理した。また、実務における運用を意識した危機耐性の考慮方法や具体的な方策を示し、これらを導入するにあたって必要な技術と課題について考察した。

**Key Words:** *anti-catastrophe, seismic design for Bridges, beyond design basis event, collapse controll, redundancy*

## 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が提唱されている<sup>1)2)</sup>。危機耐性とは、設計基準に示される地震動を超える地震動に対する耐震性能など、設計基準において照査の対象とされていない部分についても、対策をとろうとするものである。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に対して設計で想定していなかったからやむを得ないという考え方、すなわち「想定外」という考え方との訣別が大きな動機であろう。

一方で、これまでの設計基準類においても、危機耐性という用語で語られてはいないものの、設計照査の範囲外についても、想定されてきたという事実はある。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、関東地震による震度を 0.4 程度と見込み、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からである<sup>4)</sup>。また、1995 年兵庫県南部地震では、既往観測波形最大レベルの設計震度 2.0 程度が採用された。ここで、設計震度の設定において、将来のより大きな地震の発生も想定しなかったわけではない。説明性のわかりやすさから設計用地震動を既往観測波形最大レベルとはするが、曲げ破壊モードを

基本とすることや限界状態の設定方法、安全率などにより、一定の冗長性を確保することとした。

しかし、このようなコードライターの意図は、必ずしも設計者に伝わっていたとは言い難い。震度法のみが用いら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するととらえ、震度 0.2 を超える挙動に対しての想像がなくなっていくと推測される設計が多く残されていると川島は指摘している<sup>4)</sup>。また、現在でも、設計基準に示される照査を満たすことで、耐震性能は十分であると考えられているケースが多くみられる。

このような中で、危機耐性という考え方を導入する意義としては、以下の 2 点があげられる。1 つ目は、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」を明示することであり、2 つ目は「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」を促すことである。

1 つ目の「設計基準はバーチャルである」ということにおいて大切なのは、設計基準に示される設計計算等の目的である。すなわち、正確に挙動を再現することではなく、不確定な部分も含みながらも全体として要求性能を満足することに主眼が置かれているということある。例えば前述のように、設計用地震動は実際に起こりうる地

震動を全て網羅しているわけではないが、設計用地震動以上の地震動に対しても対応できるようにしている。また、鉄筋コンクリート梁の最大曲げ耐力計算において、土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>などで用いられている等価応力ブロックの考え方は現実の応力分布とは異なっていることは明らかであるが、様々な要素を考慮したうえで工学的には等価とされている。

この「設計基準はバーチャルである」ということが前提として認識されずに、「設計基準はリアルである」と考えた場合、前述のような設計用地震動を発生しうる最大規模の地震動との誤解が生じるし、また、トータルとしての安全性を検討することなく、複数の基準を織り交ぜて用いるような設計が生じてしまう。

2つ目の「設計事象を超える事象への備え」ということは、1つ目の「設計基準はバーチャルである」が前提である。設計基準に従って構造計算を行っても、必ずしもリアルが得られるわけではないから、それ以外の部分について、設計者がイメージーションを働かせて、設計事象を超える事象へ備えるのである。

本論文では、橋梁耐震へ危機耐性を導入することを目的として、危機耐性の概念を整理するとともに、「設計事象を超える事象への備え」に関する方策や課題を考察した。

## 2. 危機耐性の考え方

### (1) 既往の定義

土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会では、危機耐性を考慮した耐震設計体系の構築を目標として検討が進められている。その成果として、本田ら<sup>1)</sup>は、耐震設計における危機耐性の概念について、「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」と提唱している。ここで、「狭義の設計」とは、従来の耐震設計のことを指し、定義をすれば「考慮すべき設計地震動、及び、それに対する性能が規定されていて、照査が義務付けられているもの」だとしている。

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では、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）<sup>2)</sup>において、地震、津波に対する性能として従来の「安全性」に加え、新たに「危機耐性」として、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を提案している。ただし、原子力構造物の設計においては、危機耐性につながる考え方である「残余のリスク」という考え方がもともと取り入れられている。これ

は、地震学的見地からは設計用に策定された地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できないとして、原子力安全委員会が平成 18 年の発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針<sup>6)</sup>で示したものである。「残余のリスク」とは、策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことのリスクと定義されている。施設の設計に当たっては、策定された地震動を上回る地震動が生起する可能性に対して適切な考慮を払い、基本設計の段階のみならず、それ以降の段階も含めて、この「残余のリスク」の存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきであるとしている。

鉄道構造物等設計標準<sup>3)</sup>では、「最大級の地震動」と表現して想定を超える地震動の可能性について示唆しており、危機耐性についても付属資料において、その概念を示している。これに対応する方法は、未だ構築されていないとしながらも構造計画等に対応すべき旨が示されている。また室野<sup>7)</sup>は、鉄道構造物等設計標準における危機耐性の考え方を解説しており、その中で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の考慮することが危機耐性である、としている。

一方、土木学会構造工学委員会では、土木構造物共通示方書（性能・作用編）<sup>8)</sup>の中で、「危機耐性」という言葉を用いてはいないものの、危機耐性と同様の概念について示している。条文のタイトルは、「設計事象を超える事象への対応」としており、「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」ことを規定している。

### (2) 橋梁を想定した再定義

前節に示す4つの既往の定義は、本質的な指向に違いはないと考えられるが、橋梁を対象構造物ととらえたうえで、前章に示した危機耐性導入の意義とも照らし合わせ再定義を行う。これら既往の定義は、どのような事象に対して、どのような状況を目指するか、ということで示されているが、再定義においてもその基本的な枠組みは変更せずに、対象事象と目標とする状況についてそれぞれ考察する。

表-1 BDBE の例

| 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                       |

まず、対象事象について考察する。対象事象に関しては、設計用地震動を超える地震動が注目されがちであるが、地震動以外の設計で想定していなかった事象に対しても、等しく配慮すべきである。例えば、東北地方太平洋沖地震で破断したゴム支承の変形性能の低下に言及した報告がある<sup>9)</sup>が、このような事象も想定して準備しておくべきだからである。

既往の定義においても、例えば、本田らは「何らかの事由により、設計通りの性能が実現されとは限らない」例として、「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」などを挙げている<sup>1)</sup>。

このような設計で想定していた以外の事象全体を表す用語として、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)がある。危機耐性において対象事象をさす場合は、この「BDBE」を用いることが適当だと考える。既往の定義の中で多く用いられている「想定」という言葉を用いた場合、設計基準策定時におけるコードライターの「想定」と、設計時における設計者の「想定」の両者が存在するため、混乱を招くことを危惧したためである。

BDBE の具体は、設計照査と照らし合わせて、「作用」「応答」「抵抗」に分類するとわかりやすい。表-1 に BDBE の例を示す。

次に、目標とする状況に関して考察する。例えば本田らは、「破滅的な状況に陥らない」ということを挙げている<sup>1)</sup>。この破滅的状況を、橋梁にあてはめて具体化した時、まず最初に挙げられるのは、落橋による人命の喪失である。人命の喪失に対して最大限の配慮を行わなければならないのは論を待たないが、完全に落橋を防ぐことが不可能であることは、明確にしておく必要がある。これは、バーチャルの世界である設計計算において十分な安全性を達成したとしても、様々な BDBE を考慮するとリアルの世界では 100%安全でないことを認識する

ためにも重要である。この認識が欠けた場合、設計者は設計照査のみにとらわれ、イメージネーションを働かさなくなることが危惧される。従って、橋梁という単独の構造物に着目した場合、「破滅的な状況に陥らない」という状況を目指すのは適切でない。

構造物が崩壊することは受容した上で、できるだけ避けたい状況を具体化すると、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が考えられる。前述の通り、これらを完全に避けることは不可能ではあるが、重要なのは、これら社会に対する影響を小さくすることであろう。

一方で、危機耐性の付与と過大設計は紙一重の関係にある。社会への影響を「できるだけ小さく」とすると、徒に性能を上げることとなり、危機耐性能も向上するが過大設計と言わざるを得ない。大切なのは、設計基準に示される科学的かつ社会的に合理性がある耐震性能を目標として、さらにイメージネーションを働かせて BDBE に備えることである。従って、社会への影響は、「より小さく」していくことが目標になると考えられる。そこで、目標とする状況は、「社会への影響がより小さくなること」を提案する。

以上より、危機耐性の定義として、「BDBE に対しても、社会への影響をできるだけ小さくする性質」とすることを提案する。この定義は、本田らの定義<sup>1)</sup>を起点として、橋梁に落とし込んで検討したものであるが、他の構造物に対しても適用可能であると考えられる。

なお、ここまで、耐震設計における危機耐性を考察してきたが、当然のことながら、地震以外の作用に対しても同様に考える必要がある。作用に関する BDBE としては、活荷重の変化、気象条件、海象条件などがあるが、応答や抵抗に関する BDBE は地震を考慮した場合と同様の事象を考慮することとなる。

### (3) 危機耐性を実現する方法論

危機耐性を実現するための具体的な方法については、3 章に示すが、本節では方法論の考え方について考察する。

「社会への影響をより小さくする」という目標を達成するためには、前節に示した「できるだけ避けたい状況」を低減するということである。このためには、3 つの段階に分けて考えることができる。

1 つ目は、落橋などの致命的な崩壊を防ぐことである。2 つ目は、落橋などの致命的な崩壊が起こる場合にその様態をより好ましい方向へ制御することである。3 つ目は単独構造物に生じた致命的な崩壊の影響が広く波及することを抑制し、社会への影響をより小さくなるようにすることである。

以下の各項に、これらの 3 つの段階について詳述する。

### a) 第1段階：致命的な崩壊の防止

BDBEが生じたときにあっても、直ちに崩壊に至りにくくするためには、単に余裕度を上げるだけでも成し遂げることは可能である。しかし、そのような方法は、合理的な判断によって決定された設計基準における要求性能を超えることとなるため、過大設計となる。そこで、単なる余裕度の増加だけでない冗長性（リダンダンシー）を付与する方法が必要となる。

冗長性の付与には、多重化に着目する手法と余裕度に着目する手法がある。

多重化に着目する方法としては、例えば不静定次数を大きくし、一部の部材が破壊したとしても、力の再分配により他の部材で補える形式があげられる。また、現行基準に示されている落橋防止構造も、支承の不具合や過大応答などの BDBE に対して、多重化に着目している手法の一つである。

余裕度に着目する手法としては、例えば、一般的に行われている RC 構造物を曲げ破壊に誘導することがあげられる。曲げ破壊は設計上の限界点（終局変位）を超える応答が生じたとしても、直ちに崩壊とはならない。また、単に設計上の構造性能を向上させるだけでなく、各材料やデバイスのばらつきを低減し、信頼性を上げることも一方策である。

なお、外力に対して応答の変化を小さくするロバスト性の付与なども、過大入力に対する崩壊確率を低減し、余裕を確保するという意味で広く冗長性としてとらえることができる。

### b) 第2段階：崩壊様態の制御（コラプスコントロール）

BDBE を考慮した場合、構造物が崩壊する可能性が残ることは受容しなければならない。しかし、その崩壊する様態を制御することで、社会への影響を低減することは可能である。この崩壊様態の制御は、コラプスコントロール（崩壊制御）と呼ばれる<sup>10)</sup>。

ここで、従来より用いられているダメージコントロール（損傷制御）とコラプスコントロールの差異を明らかにしておく。ダメージコントロールは、崩壊に至らないことを目的として、損傷箇所と損傷度合を制御しようとするものである。一方、コラプスコントロールは崩壊が生じ得ることを前提として、崩壊するときの様態を制御しようとするものである。

コラプスコントロールを実現する方策としては、4章に示す自重補償構造<sup>11)</sup>や倒壊方向制御<sup>12)</sup>なども提案されている。また、建築構造物に関しては、ピロティ構造のソフトランディング補強<sup>13)</sup>が提案されている。しかし、全体としては検討の緒についたところであり、具体的なコラプスコントロールの技術について、より活発な技術開発が望まれる。

一方で、このような新技術に頼らなくても、2016年



a)全景



b)拡大

図-1 阿蘇長陽大橋の被害

熊本地震の被害から学ぶことも可能である。阿蘇長陽大橋は、図-1に示すように、大規模な地滑りにより橋台が移動沈下して支点としての機能を失ったが落橋には至っていない。これは、片持ちとなっても崩壊しない余力が上部構造にあったからである。おそらく、危機耐性を考慮しての余力ではなく、架設時に必要な性能から生じたものであるが、このことは、コラプスコントロールにも応用が可能である。すなわち、連続橋において、いずれかの支点を除去しても崩壊しない性能を上部構造に与えておけば、いずれかの下部構造や支承が崩壊しても落橋には至らず、社会への影響をより小さくすることが可能となる。

### c) 第3段階：影響波及の抑制

橋梁の供用目的は、交通やライフラインなどであり、そのほとんどは線状構造物の一部である。従って、橋梁が供用できなくなった場合、孤立集落が形成されたり、ライフラインの途絶が発生したりする。個別の橋梁が崩壊した際の影響が広く波及するということは、このような事態をさす。

影響波及を抑制する方策としては、「ネットワークの利用」と「復旧性の確保」が考えられる。

ネットワークの利用とは、複数の経路を構築することで、システムとして多重性や補完性を付与するというものである。その際、構造物特性や地盤特性の異なるルートがあれば、同時に被災する可能性を低減可能である。例えば、曲線が多く構造物区間の少ない等高線に沿って構築された旧道に対し、直線的で構造物区間の多いバイパスを新設する場合においても、旧道を維持管理していくことは多重性の面から重要である。

復旧性の確保とは、構造物が供用できない期間をできるだけ短くすることにより、影響波及を小さくしようとするものである。そのためには、工事用地を維持管理用施設として残すこと、入手性のよい資材の選定、設計時における崩壊から復旧までを考慮したストーリーの構築などが必要となる。

### 3. 実務における危機耐性の考慮

前章においては、危機耐性の考え方を示したが、これを橋梁に実装するためには、実務においてどのように運用するかが非常に重要となる。

そこで、本章では、実務においてどのように危機耐性を考慮していくべきかを示すとともに、具体的な対応の例について、提案されている構造や事例を示す。

#### (1) 建設時における危機耐性

橋梁は建設にあたり、その目的に応じて計画され、計画された性能を達成できるよう設計され、設計の意図を反映して施工される。完成後は、計画・設計された性能が損なわれないように維持管理される。このように、橋梁の有する性能は、計画、設計、施工、維持管理の各段階において、その意図が共有される必要がある。

これは、危機耐性を考慮する場合も同様である。しかし、危機耐性目標を「社会への影響をより小さくする」としており、定量的・具体的な照査が困難である。そこで、橋梁に考慮する危機耐性の計画が重要となる。すなわち、危機耐性のストーリーを構築することと、この意図を設計、施工、維持管理の各段階で共有することである。ここで、危機耐性のストーリーというのは、想定する BDBE やそれに対する対策、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る。

以下に、橋梁建設時実務における危機耐性の考慮の方法を示す。なお、本論文においては、橋梁建設までの段階を、路線計画、構造計画、詳細設計、施工の4段階に分けて考察した。

表-2 BDBEを想定する段階

| 段階       | BDBEの内容         |
|----------|-----------------|
| 普遍的なBDBE | 一般材料のばらつきや劣化、外力 |
| 路線計画段階   | 地理的条件           |
| 構造計画段階   | 特殊材料のばらつきや劣化    |
| 詳細設計段階   | 設計モデルのばらつき      |
| 施工段階     | 施工時に判明したこと      |

#### a) BDBEの想定と低減

BDBEの想定は、可能な限り早い段階で行うのが良い。従って、各段階で決定した事項に関して BDBE を想定するというのである。各段階で想定する BDBE を表-2 にまとめる。

まず、各段階に入る前に、普遍的な BDBE がある。例えば、地震動の性質に関する BDBE は、その多くが各橋梁の条件によらないものであることから、普遍的な BDBE と言える。また、通常コンクリートや通常鋼材などの一般材料に関する特性のばらつきや劣化なども、普遍的な BDBE である。

地形・地質・地盤条件、周辺の断層、周辺の状況、気象条件、海象条件など、地理的条件に関する BDBE は、サイトを定めることで明らかになるため、サイトを定める路線計画時に想定しておかなければならない。

高強度材料やゴム支承など、特殊材料に関する特性のばらつきや劣化は、その材料の使用を計画した段階、すなわち構造計画段階で想定する。

設計モデルに関するばらつきは、設計モデルを選定した詳細設計段階で想定する。

また、施工時においても、地盤条件や周辺状況など、施工して初めて明らかとなる BDBE も存在する。

これらの BDBE を想定した際、同時に BDBE の低減を検討する必要がある。ただし、BDBE を完全に排除することは不可能であるとともに、BDBE の低減のために著しく不合理な構造となることも避けなければならない。危機耐性の付与に要するコストに関しては4章において考察するが、BDBE の発生確率が非常に低いということを認識しておくことも必要である。

想定して可能な範囲で低減した結果残った BDBE は、前段階から伝達された BDBE とあわせて、確実に後段階に伝達しなければならない。この伝達は基本的に図面で行うのが確実である。この結果、施工を終えて維持管理段階に移行するにあたっては、想定した全ての BDBE が竣工図に明示されることになる。

#### b) BDBEに対する対応

想定された BDBE に対しては、おもに、構造計画段階および詳細設計段階で対応する。

構造計画段階では、冗長性の付与とコラプスコントロール



ールの両方を考える必要がある。

ここで言う冗長性の付与は、BDBE に対して影響を受けにくい構造を計画するということである。これは、道路橋示方書<sup>14)</sup>や鉄道構造物等設計標準<sup>3)</sup>などに示される構造計画の留意点が参考になるが、それだけで十分とせず現地の条件に即して設計者がイメージーションを働かせることが大切である。

コラプスコントロールは、どのような崩壊形態になるかを想定し、それが社会への影響が大きいかどうかを評価することから始まる。そのうえで、社会への影響をより小さくすることが可能かどうかを検討する。しかし、現状では可能なコラプスコントロールには限りがあるため、有効な対策をとることは困難である可能性も高い。その場合においても、後述する対応シナリオを立案するためには、崩壊形態の想定し、その形態となるように設計することが重要である。なお、異なる BDBE に対しては想定する破壊形態も異なるため、様々な BDBE に対してそれぞれ異なったコラプスコントロールが必要となることにも注意しなければならない。

詳細設計段階において実施する対応は、構造計画段階で考慮した冗長性やコラプスコントロールを具現化するほか、詳細設計段階で明らかとなった BDBE に対して対応することである。ここで、是非ともなすべきことは、BDBE に対する感度を把握することである。例えば、材料のばらつきが BDBE として想定されるときは、材料のばらつきが応答に与える影響を把握する。もし、応答に与える影響がわずかであるなら対応は不要であるし、影響が大きいのであれば、余裕を大きくしたり影響が出ていくような諸元に変更する必要がある。

施工時に明らかになった BDBE に関しては、設計にフィードバックし、必要があれば、設計変更やデバイスの付与などにより対応する。

想定された BDBE と、これに対する対応方法は、前段階から伝達された対応とあわせて、確実に後段階に伝達しなければならない。各段階での作業は、前段階で考慮している対応を意識してなされるべきである。

### c) 対応シナリオの構築

対応シナリオとは、崩壊した影響の波及を最小限に抑えるためのシナリオである。前述の通り、影響波及を抑制する方策としては、「ネットワークの利用」と「復旧性の確保」が考えられる。

ネットワークの利用に関するシナリオは、路線計画段階で策定しなければならない。システムとして多重性や補完性が備わっているかを確認し、必要によっては、他路線の計画も行う。また、システムとして、復旧に許容できる時間を策定するのもこの段階である。

復旧のシナリオは、構造計画段階で策定する。想定する崩壊形態をもとに、路線計画段階で策定した許容でき

る時間内に復旧できるような復旧シナリオとする。このとき、橋梁本体だけでなく、復旧工事用地の確保や復旧が容易な材料を用いることも重要である。

対応シナリオについても、前段階から伝達された対応とあわせて、図面などによって確実に後段階に伝達しなければならない。

## (2) 維持管理における危機耐性

橋梁は共用期間中、要求性能を発揮できるように維持管理されるが、危機耐性についても同様に、危機耐性のストーリーが成立するように維持管理する必要がある。従って、危機耐性のストーリーを管理者が理解している必要がある。

ただし、共用期間中に構造物の周辺環境が変化することは頻繁に生じる。周辺環境の変化には、構造物周辺の利用方法が変化する等の構造的な変化や、構造物の劣化による変化等がある。もし、新設時に構築した危機耐性のストーリーを維持することが不可能な場合は、危機耐性のストーリーを再構築し、そのストーリーに合わせて対策を施す必要がある。

維持管理において、設計時の想定を理解しておくのが重要だとの教訓を残した例として、2004 年新潟県中越地震における、上越新幹線の第三和南津高架橋のせん断破壊がある。本高架橋は、直接基礎形式の 3 径間 1 層ラーメン構造（鉄筋コンクリート造）であり、柱は曲げ破壊型として設計されていた。しかし、被災時には、柱高さ約 8m の半分程度となる 4m が埋め戻され、埋め戻しの上に厚さ約 15cm の土間コンクリートを敷設した消雪設備機器室が設置されていた。この土間の拘束によりせん断破壊したと想定されている<sup>15)</sup>。

このように、構造物の管理者に危機耐性のストーリーを伝達し、このストーリーに基づいて構造物の検査や補修等を実施するとともに、周辺環境の変化に合わせて危機耐性のストーリーを再構築することによって危機耐性は維持され得る。

## (3) 既設構造物に対する危機耐性

既設構造物は、設計基準の更新に伴い、現行設計基準が要求する耐震性能を満足しない状態になることがある。このような場合は耐震補強が必要である。しかし、既設構造物は新設構造物と比べて、元の構造諸元や施工条件などに制約を受けるため、設計基準が要求する性能を満足する補強ができない場合も存在する。

このように、要求性能を満足できない場合は、特に危機耐性の考え方が重要である。すなわち、設計基準に示される照査方法では要求性能を満足しないとの結果になったとしても、冗長性を付与することでできる限り崩壊を防ぎ、それでも生じうる崩壊に対してコラプスコント

ロールを行い、さらに崩壊した場合の影響が波及することのないような備えを行う必要がある。

ただし、危機耐性の付与は、狭義の耐震設計を満足していることを前提とするのが基本である。危機耐性を考慮しておけば、例えば崩壊のリスクを下げられるため構造物の性能は向上している、ということではない。あくまでも設計基準が要求する性能を高めた上で危機耐性について検討するべきであろう。

#### (4) 具体的な対応方法の例

危機耐性を設計段階で考慮する方法は確立されていないものの、道路橋示方書<sup>14)</sup>や鉄道構造物等設計標準<sup>3)</sup>に構造計画において配慮すべき旨は示されている。道路橋示方書<sup>14)</sup>では、「耐震設計にあたっては、地形・地質・地盤条件、立地条件、津波に関する地域の防災計画等を考慮した上で構造を計画するとともに、橋を構成する各部材及び橋全体系が必要な耐震性を有するように配慮しなければならない」と規定し、配慮事項を列記している。鉄道構造物等設計標準<sup>3)</sup>では、付属資料において危機耐性の概念を示しており、本編において構造計画で対応すべき配慮事項が示されている。危機耐性を考慮する上では、これらの設計基準に示される配慮事項に留意して、危機耐性のストーリーを構築するのが第一である。

一方、危機耐性について、新しく提案されている方法や、危機耐性に特に配慮された事例も存在する。ここでは、これらの事例を紹介する。

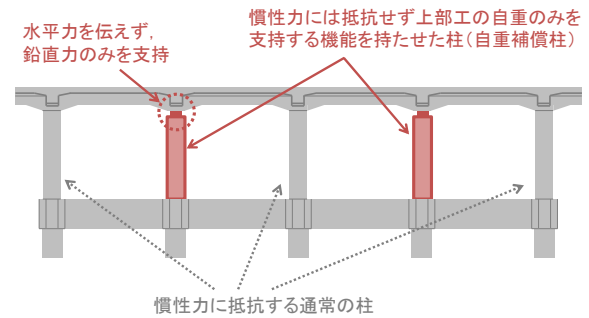
##### a) 提案されている危機耐性を向上させる方法

危機耐性を向上させる方法として、自重補償構造<sup>11)</sup>や倒壊方向制御構造<sup>12)</sup>が提案されている。

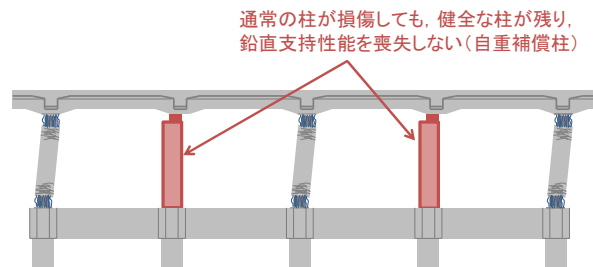
自重補償構造は、地震時に損傷しないように配慮された「自重補償柱」を設けることで、柱や橋脚などの鉛直方向の部材に著しい損傷が生じて上部構造等を支持する機能を喪失せず、崩壊を回避するように計画された構造形式である。

橋脚や高架橋では、桁等の上部構造を支持する橋脚や柱は、規定されたレベルの水平方向の地震作用に対して耐震性能を確保するように設計されている（ここでは「通常柱」と呼ぶ）。自重補償柱とは、通常柱が鉛直支持性能を保持している時には上部構造等の水平慣性力を負担しないよう水平変位から分離された状態で設置され、通常柱が著しく損傷し鉛直支持性能が低下あるいは失われた状態になった場合に代わって鉛直支持機能を発揮する柱部材をいう。通常柱が受け持っている上部構造等の自重による鉛直荷重を支持する機能を補償することで、構造物が崩壊することを防止するための部材である。

図-2 にラーメン高架橋における適用例を示す。まず、自重補償柱がないものと仮定して通常の耐震設計を行う。



a) 自重補償構造の適用例



b) 地震時の挙動イメージ

図-2 自重補償構造の適用例

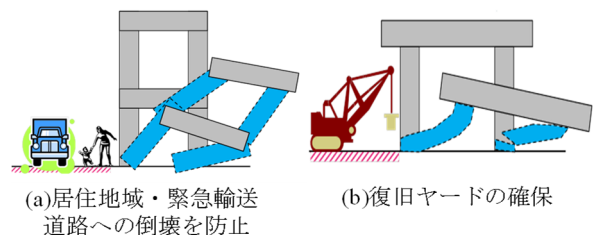


図-3 倒壊方向制御構造のイメージ

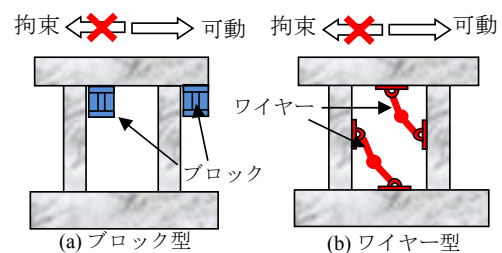


図-4 倒壊方向制御構造のデバイス

ここで言う通常の耐震設計とは、「狭義の耐震設計」を意味しており、設計地震動に対して通常柱のみで安全性等の耐震性能を満足するように設計する。自重補償柱（図-2 中の赤い柱）は地震時に上部構造の水平慣性力が伝達しないように設計する（例えばすべり支承を配置することで、上端の水平変位を上部構造の水平変位から分離する）。自重補償柱は地震時に水平慣性力を負担しないので、想定を超える大きさの地震作用により通常柱が著しく損傷しても、自重補償柱は健全な状態で代替機

能を発揮し始め、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可能である。

倒壊方向制御構造は、倒壊が仮に生じたとしても、図-3のように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、というコンセプトのもと、ラーメン高架橋を主な対象とし提案されている。まさに、コラプスコントロールを具現化した構造である。

ラーメン高架橋が倒壊に至るメカニズムは、せん断補強が十分に行われていることを前提とすれば、柱の上下端に塑性ヒンジが形成され、倒壊に至るモードが想定される。しかし、倒壊する方向は入力特性や材料特性によりばらつきが生じるため、事前にこれを予測することは困難である。そこで、人為的に非対称性を設けることで、最終的に倒壊する方向を確実に制御使用としたものである。一方で、方向によって剛性や耐力に差をつけると、応答変位が一方に累積していくため、狭義の設計における耐震性能を低下させる懸念があるため、適切ではない。

このような要求を実現するデバイスとして、図-4に示されるようなブロック型およびワイヤー型のデバイスが提案されている。ブロック型は、高架橋スラブにブロックを設置することで、想定する倒壊方向と逆方向に構造物の変位が設計終局変位を超えて進行した場合、ブロックが柱と接触して挙動を制限し、変位を抑制する。ワイヤー型は、高架橋スラブと柱をワイヤーで接続し、想定する倒壊方向と逆方向に構造物の変位が設計終局変位を超えて進行した場合、ワイヤーがスラブと柱間の挙動を制限し、変位を抑制する。これらのデバイスは、シンプルな構造で安価に製作できるため、多数の構造物に導入することが可能であると考えられる。

#### b) 危機耐性に配慮された事例

危機耐性に配慮された事例として、新神戸駅の例<sup>16)</sup>と阿蘇長陽大橋<sup>17)</sup>の復旧事例を示す。

新神戸駅は、活断層への対策が実施された構造物の例である。山陽新幹線は、神戸付近では市街地を避けて計画され、その結果、新神戸駅の予定設置箇所は六甲山に寄り添うような地点になった。この地点の地盤は、山側が花こう岩、海側が沖積層と異なっており、地盤の剛性や支持力が不均衡となることが問題と認識されていたが、さらに地盤調査の結果から構造物直下に断層が存在することが明らかとなった。

この断層は、路線との交差角度が約7度と浅く、駅舎となる構造物全域で影響を受けることが懸念されるとともに、地質調査や文献調査より活断層であり、耐用期間内に想定される断層変位は5cm程度と推定された。したがって、構造物の設計にあたっては、地盤の不均衡さによる問題とともに、断層変位についても対処する必要

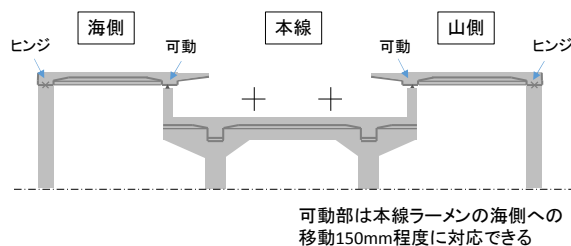


図-5 新神戸駅の構造物の接続部の概要

があった。

構造物は、駅舎部の設備の関係からラーメン高架橋で設計された。地盤の不均衡さに対しては、同一の構造物が出来るだけ一つの地盤にのみ設置されるように計画された。具体的には、山側ホーム構造物は花こう岩、海側ホーム構造物は沖積層に支持され、本線構造物のみが断層粘土を含む地盤に支持されるように設計された。

断層変位に対しては、図-5に示すように本線構造物とホーム構造物の接続部を滑動できるようにし、ホームの逆側の端部はヒンジとなるようにして、本線構造物が自由に変形できるように設計された。このように設計すると、線路は有道床であるため、仮に断層変位が生じて本線構造物とホーム構造物との間に相対変位が生じて、軌道の位置を修正できることから復旧も容易となる。さらに、修正のためのジャッキ設置位置も配慮されている。

新神戸駅は、平成7年の兵庫県南部地震において被害が大きかった地域に存在するといえるが、構造物自体の被害は報告されていない。被害が生じなかった理由として、上記のように設計時において断層変位やその他の事象について十分検討がなされたことも一因として考えられる。

阿蘇長陽大橋は、2016年熊本地震において斜面崩壊に伴って橋台が沈下し、通行不能となった。落橋に至らなかったという面ではラーメン橋梁のメリットが発揮されたと言えるが、崩壊しうる斜面に橋台を設置した面では、より危機耐性に配慮する余地があったと考えられる。この橋梁の復旧において、斜面の崩壊に対し十分に配慮した計画がなされているため、ここに紹介する。

阿蘇長陽大橋は、橋長276mの4径間PCラーメン箱桁橋であり、昭和55年の道路橋示方書により設計され、平成5年に架設されている。被災状況は、図-1に示すように、斜面崩落に伴いA1橋台が大きく沈下するとともに、橋台の直下だけでなく橋台に接続する道路も斜面崩落で損傷を受けたものであった。被災後、A1橋台及びこれに接続する道路周辺について調査した結果、地表面に開口クラックが確認されるとともに、建設時にA1橋台の支持層とされていた玄武岩層にも亀裂・ゆるみが確認された。

このような状況に対して危機耐性を考慮した復旧が行



われた<sup>17)</sup>。上部構造はPC ラーメン橋であり、A1 橋台の復旧において、桁端部を支持する橋台前面側の平面的な位置を変更することは困難であったが、斜面変状のリスクを抑えるため、地質調査で特定された亀裂等を有するゆるんだ地盤は除去し、現地で確認しながら支持層位置が設定された。その上で、周辺の斜面変状に対して構造全体が変位しにくく、仮に変位が生じたとしても構造安全性を保持して最低限の供用性が確保されるように多点支持のラーメン構造が採用された。ここで、ラーメン構造の背面側はゆるみが確認された範囲の外側の位置まで伸ばし、構造的なりダンダンシーが発揮できるように十分配慮されている。また、橋台前面の斜面は、再度の崩落のリスクを抑えるため、アンカー等による対策も行われている。さらに、河川に沿う斜面の変状リスクを回避するため、道路の線形は斜面から離す方向へ変更された。

本構造の設計段階においては、何十センチの斜面変位が生じたら橋がどのようなのかを高度な解析で計算をして対策をしたということや、斜面对策を十分に施して橋への影響はもう生じないようにしたというような説明シナリオはない。危機から回避をする構造計画を立案するとともに、そこで思考停止することなく仮に危機の状況となった場合でも容易には最悪な状態とはなりにくい構造形式を考える、さらにその上で、事後の復旧に配慮するという危機耐性の考え方が実践されている例である。

#### 4. 危機耐性導入への課題

危機耐性の導入は、落橋防止構造をはじめとしたコードライターの意図により、現状でもある程度実現されている。しかし、ここで示す危機耐性の導入とは、橋梁ごとに必要な要素を洗い出し、設計で想定していなかった事象とその結果を想定し、崩壊や復旧までを見据えたシナリオを作成することである。

そこで本章では、危機耐性を考慮した橋梁を実現するための課題として(1)危機耐性導入に必要な技術、(2)社会的コンセンサスの形成、(3)危機耐性を導入する枠組み、の3項目を挙げて考察した。

##### (1) 危機耐性導入に必要な技術

危機耐性導入に必要な技術開発課題は、どのような構造を、どのように設計し、どのように評価するかという各段階に分けてあげることができる。つまり、構造形式、設計法、評価手法である。

##### a) 構造形式

一般に、危機耐性の高い構造物として、建築構造物の

ように不静定次数が高い構造物があげられる。一部の部材が終局限界に達したとしても、構造物としての終局限界にはならないためである。例えば、前述の通り 2016 年熊本地震において阿蘇長陽大橋は大規模な地滑りにより橋台が移動して支点としての機能を失ったが、落橋には至らなかった。橋台の移動は設計で想定した破壊モードではなかったと想定されるが、ラーメン橋梁という不静定次数が高い形式だったために、一部の部材が終局状態に至っても橋梁全体の終局状態につながらなかった。

また、鈍構造という考え方が高橋・日高から提案されている<sup>18)</sup>。鈍構造とは、「地震作用による機能損失に鈍感な構造システム」と定義されており、材料（超弾性材料、自己修復型材料など）／構造制御技術（免制震技術）／構造形態（地震荷重に対する構造的骨格の検討）／構造計画・設計（計画理念、設計目標の設定）の4つのアプローチを示している。この考え方も、危機耐性の高い構造として参考になるものである。

一方で、これら危機耐性の高い構造物として挙げたものは、「倒壊しにくい構造」であり、「倒壊しない構造」ではない。当然のことながら、地震動の上限が不明である中で、倒壊しないことを保証することは不可能であり、倒壊に対するコラプスコントロールを考えておくことが必要である。例えば、急激に倒壊をしない構造であれば、橋上および近隣の人命の喪失を防げる可能性が高くなる。これらは、構造の考え方を示したに過ぎないが、柔軟な発想により、危機耐性の高い構造の開発が望まれる。

##### b) 設計法

本論文では、「コラプスコントロール」をキーワードとして挙げており、確実なコラプスコントロールを行うためには、破壊までをシミュレート可能な解析技術が望まれる。

しかし、現状においては最大耐力から破壊まで（ポストピーク）を正確にシミュレーションすることは困難である。DEM（個別要素法）で構造物の崩壊までをシミュレートしようとする試みもある<sup>19)</sup>が、計算量が非常に大きいことから要素数に限界があるとともに、十分な信頼性を有するレベルまで達しているとは言い難い。

一方で、解析、実験、震災調査などに関する十分な経験とスキルを有した技術者であれば、崩壊の状況について想定は可能である。特に、兵庫県南部地震以降の数々の地震による被災や、E-Defense を用いた実大 RC 橋脚の実験<sup>20)</sup>などを経て、技術者の「想定するレベル」は大幅に向上した。そこで、暫定的ではあるが、コラプスコントロールの評価として、このような技術者の想定を取り入れることを提案する。当然のことながら、定性的な評価にとどまるとともに、客観的なエビデンスはないが、複数の技術者による合議であればある程度の範囲内に収束するのではないかと予想される。本来、設計は定量

的・客観的であるべきであるが、定量的・客観的に表現することが困難のためにコラプスコントロールの導入ができないのであれば、本末転倒である。

### c) 評価指標

現状においては、危機耐性を定量的に評価する指標がない。危機耐性の性能を定量的に扱えるようになると、以下のようなメリットが生じる。

- ・ コストに対する説明性が明確になり、社会的コンセンサスを得やすくなる。
- ・ 危機耐性能に関する信頼性を向上できる。
- ・ 目標とすべき性能を明示することが可能となるため、より実際の提案や技術開発が可能となる。

危機耐性能の定量的な評価として、曲げ破壊型の橋脚であれば、変形性能による表現が考えられる。図-6に示す荷重-変位関係のように、狭義の設計においては、設計応答変位が設計限界変位を上回らないことによって照査される。そのため、狭義の設計における余裕は、(設計応答変位) / (設計限界変位)の大きさで表現されることが一般的である。一方で、橋脚が自立できなくなるのは、荷重が0になった点であり、構造物の耐力が、幾何学的非線形によって生じる  $P-\delta$  効果による曲げモーメントを下回った点である。従って、危機耐性の範疇における余裕は (設計応答変位) / (自立限界変位) とすることが可能である。しかし、この方法の問題点は、外力がどの程度大きくなったら自立限界に達するのかが不明確なことである。設計限界変位を超えた後の負剛性領域においては、外力の増加に比して応答の増加は大きくなるため、(設計応答変位) / (自立限界変位) の値のイメージほど余裕がないことに注意しなければならない。

地震動の大きさと変形性能の関係を直接的に扱った手法としては、IDA(Incremental Dynamic Analysis, 漸増動的解析)<sup>20) 22) 23)</sup>がある。本手法は、入力地震動の倍率 (Scale Factor) を漸増させ、多数の非線形動的応答解析を行うことによって、図-7に示すような構造物の非線形応答値 (例えば変形量) と入力地震動の強さ (図では Scale Factor) の関係、すなわち IDA 曲線を求め、構造物の耐震性能、破壊の順序、動的安定性を評価する手法である。本手法によれば、余裕の大きさを入力地震動の大きさで把握することができる。

さらに、複数の地震動を用いて IDA を行い、その結果を地震動の大きさ (例えば SI 値) と破壊確率の関係として表したフラジリティカーブ (Fragility Curve, 破壊曲線) による評価も考えられる。単一の地震動を用いた IDA では、地震動の性質について考慮することができないが、地震動をパラメーターとしたフラジリティカーブであれば、様々な性質の地震動に対する性能を確率的に見ることが可能である。ただし、この方法によっても、振動数特性など地震動の性質における地震動の大きさに

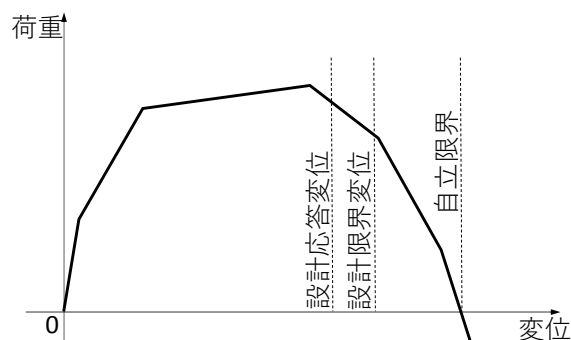


図-6 曲げ破壊型構造物の変形性能

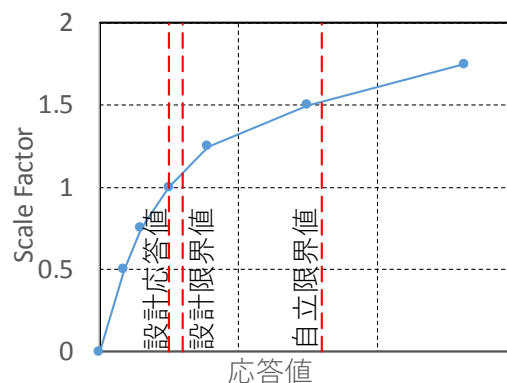


図-7 IDA曲線の例

に対する依存性は考慮できない。

また、ここまで挙げた性能の表現方法は、全て余裕度、すなわち冗長性に着目したものである。ダメージコントロールとしての損傷部位については特定できるものの、コラプスコントロールとしてのどのように壊れるかについては着目されていない。コラプスコントロールについても、性能を表す指標は必要と考えられる。

現状の技術レベルにおいて定性的であっても危機耐性を考慮した設計を進めていくことは必要であるが、将来的には、危機耐性を定量的に評価して、危機耐性能が要求性能を満たしているかどうかを照査できることが本来の姿であると考えられる。

## (2) 社会的コンセンサスの形成

危機耐性を実装させるためには、社会的コンセンサスの形成が重要な課題である。公共構造物に対して新たなコストを費やす以上は、説明責任が生じるためである。その上で、大きな技術的な課題となる、以下の2点について考察する。

- ・ 危機耐性を付与するための適当なコスト
- ・ 一般市民に対する説明

### a) 危機耐性を付与するために費やす適当なコスト

レベル2地震動に対する耐震性能を付与させるためのコストについて、土木学会が2000年に行った「土木構

造物の耐震基準等に関する第三次提言」<sup>24)</sup>では「レベル2地震動に対する新設構造物の耐震性能は、損害回避便益と耐震化費用に基づく費用便益分析を基礎として決定すべきである。」と提言され、さらに費用便益分析について、「単に地震発生確率と損害回避額の積をもって損害回避便益を評価するのでは不十分であり、被害のカタストロフィックな効果などを考慮に入れることが不可欠」とされている。すなわち、レベル2地震動のような極大地震の発生確率は非常に小さく（ $\approx 0$ ）、一方でカタストロフィックな損害は非常に大きい（ $\approx \infty$ ）ため、損害回避便益の計算が困難だとするものである。

危機耐性の考慮においては、極大地震以外の BDBE も考慮するが、同様に発生確率が非常に小さなものを扱っているため、費用便益分析が困難であることも同様である。

しかし、カタストロフ回避便益を適切に評価する方法の開発はほとんどなされておらず、現在においても、その端緒すら掴めていないのが現実である。従って、現状においては、論理的、定量的に費やすべきコストを示すところまで、技術的に追いついていない。今後、可能な対策案を積み重ねていくとともに、その対策でどこまでが可能かということや、その対策にどれだけのコストが必要か、ということを明らかにしながら進めていかざるを得ない。

#### b) 一般市民への説明

耐震性能に関する市民への説明という観点で、興味深い論文として、宮路・川島の2編の論文<sup>25,26)</sup>があげられる。宮路・川島は、対象を一般市民としたアンケート調査と、土木技術者としたアンケート調査を別途行い、復旧期間の試算結果等と併せて考察を行っている。その中で、特徴的であるのは、一般市民が求める耐震性能は「現状よりもっとコストをかけてでも、被害を抑える方向で耐震設計を行うべきだ」という考えが80%以上を占めていることである。2004年に実施したアンケートであり、一般市民の意識としては阪神大震災の被害に対するものであったかもしれないが、橋梁設計の実務において設計基準を満足したうえでコストが最重要視されている風潮とは若干差異があるように感じられる。

危機耐性を説明するためには、まずは、現状の耐震設計で目標としている性能を丁寧に説明することが大切である。この時、「阪神大震災クラスの地震に耐えられる」というポジティブな表現だけではなく、「現実には阪神大震災クラス以上の地震は存在するし、そのような地震が発生した場合には、倒壊することもありうる」というネガティブな表現も必要となる。危機耐性を説明するうえで、「倒壊がありうる」との認識が必須であるからである。また、設計用地震動の位置づけについても、広く理解を促す必要がある。設計用地震動は、設計という

作業においては基準が必要であるための便宜的なものであり、最大の地震動を把握することは、現状では困難と言わざるを得ない。このことが理解されないと、危機耐性の必要性を理解することはできない。

危機耐性の必要性和同時に、危機耐性の効果に関する説明が必要である。この説明も非常に困難である。「危機耐性の付与により、倒壊を防止できる」というのは、明らかに虚偽であるし、「危機耐性を付与することによって、倒壊しにくくなります」というのは曖昧過ぎる。

上記をまとめると、現状の耐震設計における要求性能（Performance Matrix）を、一般市民が理解できるように示すことが大事であり、その中で狭義の設計と危機耐性それぞれの位置づけを示すことが必要と考える。そのうえで、危機耐性の効果をわかりやすく示す必要がある。

### (3) 危機耐性を導入する枠組み

危機耐性を導入するためには、これを受け入れる枠組みが必要となる。これを本論文では、1)技術開発に対するインセンティブ、2)計画段階における危機耐性考慮の制度化、3)危機耐性導入に適した発注方式の3種類に分類して考察する。

#### a) 技術開発に対するインセンティブ

危機耐性の導入が促進されるための一つの要素として、多数の具体的工法が存在が挙げられる。具体的な工法がなければ危機耐性の導入は進まない。そのためには、民間企業における危機耐性に関する技術開発が必要である。

民間企業は、目標が明確であり、需要が見込まれるのであれば開発に取り組む。しかし、危機耐性については、設計段階で考慮する方法は確立されていない状態であり、目標とする性能を明示できない。また、性能の検証も難しい状態である。

そこで、民間企業が積極的に開発に参入できるよう、性能や考え方の整理することが必要である。

#### b) 計画段階における危機耐性考慮の制度化

路線計画段階から危機耐性を考慮していくことの必要性は3章で示したが、現実には、路線計画段階では耐震性に関してはほとんど検討されない。これは、設計基準で要求される耐震性能を満足することは、路線に関係なく構造計画段階や詳細設計段階で十分に可能であるとの認識に基づくものだと考えられる。

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報告<sup>10)</sup>では、設計業務等共通仕様書<sup>27)</sup>における設計業務の成果が、「設計業務の条件、特に考慮した事項、コントロールポイント、検討内容、施工性、経済性、耐久性、維持管理に関すること、美観、環境等の要件」であり、危機耐性はおろか耐震設計に関するものも入っていない状況であることを

が指摘しており、設計業務等共通仕様書への追記を提案している。

このように危機耐性を計画の初期段階から考えることを促す制度の確立も重要である。

### c) 危機耐性導入に適した発注方式

現在においても、価格以外の要素を評価して落札者を決定する方式として、総合評価落札方式などが用いられている。しかし、これらの方式の中で、危機耐性についての提案は困難であると考えられる。発注者が、考慮すべき危機耐性のレベルを、条件として明確にすることが困難であるため、提案者が危機耐性のレベルとコストのバランスをどのように取るかを考えねばならず、その結果、提案の良否だけではなく、発注者の感覚に近いレベルのものが落札することになるためである。

そこで、発注方式の一例として、価格固定型入札方式が考えられる。価格は、発注者の予定価格で固定し、最も優れた提案を行った提案者が落札するものである。現状では危機耐性を定量的に評価することは困難であるが、危機耐性レベルの比較であれば十分可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本論文においては、橋梁耐震へ危機耐性を導入することを目的として、危機耐性の概念を整理するとともに、実務における危機耐性の考慮の方法と課題を示した。

これまで、コードライターが暗に考慮していたのみであった BDBE に対する対応を、それぞれの橋梁条件に応じて設計者が考慮することにより、橋梁の危機耐性能を向上すると考えられる。

**謝辞：**本論文は、著者らが WG 主査・WG 幹事を務めた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・性能設計 WG での検討<sup>10)</sup>を参考に、再検討したものである。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 にはオブザーバー参加させていただき、有益な議論をさせていただいた。ここに、関係各位に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 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一試案構築にむけての考察一, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.1\_459-I\_472, 2016.
- 2) 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.

- 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) 川島一彦: 地震との戦い, 鹿島出版会, 2014.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編(2017 年制定), 2017.
- 6) 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.
- 7) 室野剛隆: 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, pp.11-16, Vol.41, No.5, 2013.
- 8) 土木学会: 土木構造物共通示方書(性能・作用編), 2016.
- 9) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 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.
- 10) 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.
- 11) 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, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, p.1-145, 2015.
- 12) 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, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, p.1-144, 2015.
- 13) 中村 聡 宏, 勅使川原正臣, 渡邊友雄, 仲村崇仁, 楠浩一, 福山洋: ソフトランディング耐震補強実用化に関する実験的研究 ソフトランディング補強用免震装置を設置した柱の性能確認実験, 構造工学論文集, Vol.55B, pp.345-350, 2009.
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 24 年 3 月, 2012.
- 15) 藤原寅士良, 渡邊康夫, 津吉毅, 石橋忠良: 新潟県中越地震における柱中間部を拘束された鉄道ラーメン高架橋の被害検証, 土木学会 地震工学論文集, Vol.29, pp.363-370, 2007 年 8 月.
- 16) 森重龍馬: 山陽新幹線の特殊工事, 構造物設計資料, No.23, pp.907-914, 1970.
- 17) 澤田 守・今村隆浩・中川量太・星隈順一: 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, 2018.2.
- 18) 高橋良和, 日高拳: 不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4, (地震工学論文集第 33 巻), pp.1\_535-I\_544, 2014.
- 19) 古川愛子, 木村翔太, 清野純史: 個別要素法を用いた構造物の動的解析における減衰のモデル化に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp.1\_89-I\_100, 2014.
- 20) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦, 佐々木智大, 運上茂樹, 堺淳一, 高橋良和, 幸左賢二, 矢部正明: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-1 橋脚) 震動破壊実験研究報告書一1970 年代に建設された基部曲げ破壊タイプの RC 橋脚震動台実験一, 防災科学技術研究所研究資料第 331 号, 2009.
- 21) Dimitrios Vamvatsikos, C.Allin Cornell: Incremental



- Dynamic Analysis, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.13, issue 3, pp.491-514, 2002.
- 22) 谷口惺, 五十嵐晃, 木田 秀人: 漸増動的解析(IDA)に基づく長大橋の耐震性能評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.I\_323-I\_333, 2014.
  - 23) 党紀, 蛭沢佑紀, 五十嵐晃: 水平 2 方向地震動を受ける免震橋の応答特性に関する漸増動的解析 (IDA), 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I\_719-I\_732, 2016.
  - 24) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会: 土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」, 2000.
  - 25) 宮路健太郎, 川島一彦: 橋梁の耐震性能目標に関する市民の意識および橋梁の復旧期間, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005.
  - 26) 宮路健太郎, 川島一彦: 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物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006.
  - 27) 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 299 号 平成 29 年 3 月 16 日), 2017.

## A STUDY FOR INTRODUCING THE CONCEPT “ANTI- CATASTROPHE” TO SEISMIC DEIGN OF BRIDGE

Atsushi TAKEDA and Takayoshi NISHIMURA

The concept of “Anti-Catastrophe” has been proposed after The 2011 Tohoku Earthquake. This concept is not necessarily a new idea for seismic design, it is considered in existing design code in various parts. However, there are many parts that are not expressed explicitly, examples that do not reflect intent of this concept are also found in actual structures.

This Paper is organized for the purpose of introducing this concept into seismic design for bridges, we discuss feasible methods and problems to realize this concept.