

危機耐性を指向した橋の耐震設計 —性能設計WG 中間報告—

武田篤史¹・西村隆義²

¹正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所（〒1204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²正会員 工修 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
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、橋梁等多くの構造物に被害が発生した。これは、構造物の破壊に対する知見が不足したこともあったが、設計地震動を上回る地震動が発生したことが大きな要因である。そのため、設計地震動は大幅に引き上げられることとなった。

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波によって多くの被害が発生した。特に、あらかじめ津波対策を行っていた地域においても防波堤の流出や防潮堤の越流・破損が生じている。この結果、防潮堤の嵩上げなどが行われている。なお、この地震では、地震動による橋梁被害は大きくはなかったものの、その規模（マグニチュード）は設計地震動で想定しているものを遥かに超えるものであった。

2016年熊本地震では、非常に大きな地震動が2回発生したことにより、1995年以降に設計された家屋であっても倒壊が発生したとされている^{例えは1)}。

このように、地震工学は地震被害が発生するたびに、対応を行って地震被害の低減に努めてきたが、地震という自然現象に対して完全に予測することが困難であり、被害と対策がいたちごっことなっている。

これに対して、平成24年鉄道構造物等設計標準耐震設計²⁾（以降、耐震標準と呼ぶ）や、土木学会の原子力安全土木技術特定テーマ委員会「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）」³⁾など⁴⁾⁵⁾では、「危機耐性」という概念が提案されている。

危機耐性とは文献6)において、「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」と定義されている。ここでいう「狭義の設計」とは、従来の耐震設計の事を指し、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、照査が義務づけられているもの」とされている。

このような動きに対して、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（委員長：矢部正明）では、性能設計WGを設置し、危機耐性を指向した橋の耐震設計について議論を進めることとした。本稿は、WGにおける議論の内容と、報告書へ向けての方向性を紹介するものである。

2. 橋の耐震設計における危機耐性

橋梁の耐震設計における危機耐性は、新しい耐震性能と位置付けられる。しかし、危機耐性の要求性能や適用方法は確立しておらず、議論がなされている段階である。また、従来の耐震設計にも地震動の危機耐性に相当する配慮が見られる記述も存在する。そこで本章では、橋梁の耐震設計における危機耐性の考え方、従来の耐震設計との関係、その実現方法についての議論内容と挙げられている課題を示す。

(1) 危機耐性の概念

2011年の東北地方太平洋沖地震の規模は、従来の想定地震規模を超えるものであった。設計地震動を超える地震動が生じる可能性については以前から指摘されていたことであるが、地震の不確定性を考えれば最大の地震を設定することや、この発生確率を

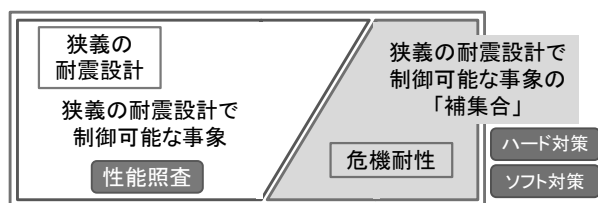


図-1 狭義の耐震設計と危機耐性の関係(文献7より)

算定することは困難である。なお、設計地震動(L2地震動)は、耐震標準では「最大級の地震動」と表現されており、想定を超える地震動の可能性について示唆している。

危機耐性は、従来の耐震設計において想定以上の地震動に対しても構造物またはシステムが破滅的な状況に陥らないような性質である。文献7)では、図-1に示す概念図で危機耐性の概念を説明している。これによれば、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。

「最大地震動」を設定することや、その発生確率を算定できない以上、制御不可能な部分は必ず生じる。設計地震動を「想定内」とすれば、危機耐性は「想定外」に対応することである。ただし、これは現状では定量的な評価が難しいと考えられることから、想定や配慮によって対応することになる。すなわち、危機耐性とは「想定外を想定する」ことだと考えられる。

想定外を想定することは、構造物の壊し方を考えることである。ここで想定外、つまり設計地震動を超過する地震動が生じた時に、想定される危機を整理することは重要である。

危機耐性を考える上での危機の考え方は、構造物の用途、重要度等によって異なり、さらに要求すべき性能についても様々な意見が存在する。想定すべき危機については後述するが、「危機」の最も基本的なものは人命の損失だと考えられる。前提として狭義の耐震設計が実施され復旧性にも配慮されていることを考えれば、危機耐性は想定外の事象に対しても安全性に配慮する。

一方、人命は勿論、経済活動や救助活動等に支障をきたすことも「危機」と捉えれば、危機耐性は復旧性についても配慮して構造物の壊し方を想定する必要がある。

上記のように、危機耐性の要求性能については考え方は複数存在し、本WGでも議論されている部分である。

(2) 従来の設計と危機耐性の関係

従来の耐震設計では、危機耐性に相当する用語は陽に用いられてはいないが、危機耐性への配慮に相当する部分は存在する。これは、設計地震動を超える地震動が生じる可能性が以前から指摘され、その配慮として存在するものが多い。

例えば、落橋防止構造は、鉄道構造物等設計標準コンクリート構造物⁸⁾や道路橋示方書⁹⁾では、支承部において地震時に予想外の力が作用する場合を考慮して、照査結果に関わらず設置することとされており、危機耐性に配慮されたものといえる。

同様に、耐震標準²⁾や道路橋示方書⁹⁾において、各部材の破壊形態をせん断破壊型ではなく曲げ破壊型となるように誘導されていることも、危機耐性に配慮されたものと捉えることができる。これは、たとえ応答値が設計時よりも大きくなったとしても、急激に耐力を失わないためであり、現行に改訂される前の耐震標準¹⁰⁾に記載されている、構造物全体系として脆性的な破壊状態を避ける方針を具現化するものである。

また、構造物にロバスト性やリダンダンシーを持たせることも推奨されてきた。リダンダンシーを有する構造物として代表的なものはラーメン構造物であり、鉄道構造物では一般的に用いられる構造形式である。耐震標準では限界状態設計法の手法を適用し、構造部材が一つでも限界状態に達した状態を構造物全体系における限界状態とみなしている。しかし、実際にはラーメン構造物は不静定構造であるため、構造物全体系としての終局に対しては安全余裕度を有していると考えられる。このような構造が推奨されているのも、危機耐性に配慮されたものと捉えることができる。

今後、危機耐性を考慮した設計方法を確立するためには、具体的に記載されていない記述についても勘案した上で整理されるのが望ましい。

(3) 想定すべき危機

危機耐性を考える上では、回避すべき危機をどう想定するかが重要となる。

回避すべき危機として最初に想定されるのは、人命の損失である。橋梁において人命の損失が生じる事象を考えれば、落橋や崩壊が挙げられる。このように事象を想定して危機耐性の向上を考えれば、落橋や崩壊を生じさせないような構造物を構築することになる。また、道路であれば対向車との衝突、鉄道であれば脱線も人命の損失につながる事象であり、

想定されるべきものである。

一方、橋梁の損傷による経済活動・医療活動等の遮断も、回避すべき危機と考えられる。特に、地域間の流通を一手に担うような橋梁であれば、この橋梁が破壊した状況が続けば、流通等が寸断されるため地域経済に与える影響は甚大である。また、地震直後の救助活動等に支障することもあると考えられるため、人命の損失にもつながる。このような事象を想定して危機耐性の向上を考えれば、復旧性についても検討が必要である。

このように想定される危機は、構造物の重要度や置かれている環境によっても異なる。危機耐性の向上を考える上では、構造物の条件を考慮した上で危機を想像し、回避する具体的な方法を考え、これを実現する耐震設計を実施することが重要となる。

(4) 危機耐性を考慮する段階と方法

危機耐性をどの段階で考慮するのか、どのような方法で考慮するのかについても議論が必要である。

危機耐性を考慮する段階としては、構造形式等を決定する構造計画の段階と、適切な方法で応答値を算定し照査する構造設計の段階があげられる。

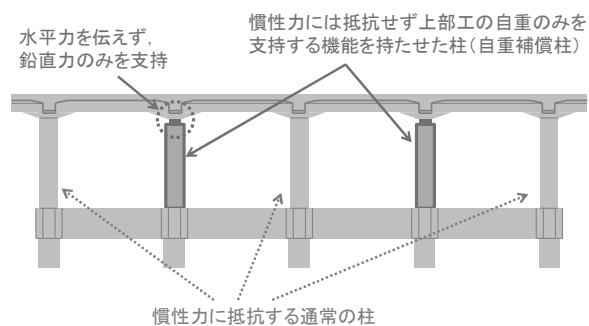
これらのうち構造設計の段階では、危機耐性の要求性能や、その評価方法も確立されておらず、考慮することは困難な状態が現状である。耐震標準でも、設計地震動を超える事象に対して破滅的な状況に陥らないための設計方法について直接的に照査する体系は構築されておらず、耐震構造計画の段階で配慮することと示されている。したがって、現状では、構造計画の段階で適切に考慮することが望ましい。

しかし、橋梁の構造計画の段階では、危機耐性はおろか耐震設計に対しても配慮されることも少なく、建設費や維持管理等のコスト縮減に主眼が置かれているのが現状である。

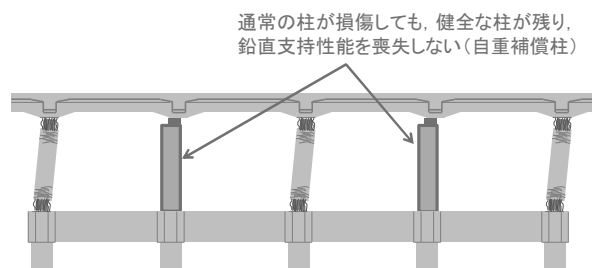
今後、危機耐性を考慮するにあたっては、構造計画の段階でコストだけではなく耐震性能と危機耐性にも言及できるように配慮されるべきと考えられる。なお、地震で落橋もしくは崩落した構造物の中には、地震時に周辺地盤が崩落するような不適切な地形に構築されていた事例も存在する。これらは、構造計画の段階で危機耐性に配慮されていれば計画が変更されていた可能性がある。

(5) 危機耐性を考慮した事例

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、これまで実施されてきた耐震補強工法にも危機耐性の向上に寄与すると考えられる方法



a) 自重補償構造の適用例



b) 地震時の挙動イメージ

図-2 自重補償構造のラーメン構造における適用例

や、新しく提案されている方法が存在する。ここでは、主に構造的な方法の事例を紹介する。

文献7)では、危機耐性を向上させる方法として、仮に地震力フリーな構造が実現できれば最も良いが、これが実現できない場合はソフト的な対策とハード的な対策を組み合わせで対処すべきと示されている。

あらゆる地震動に対して地震力フリーな構造物を構築することは現実的に不可能であるが、想定する危機を橋梁の落橋や崩壊とした場合、フェールセーフとして機能する構造はこれに近いと考えられる。落橋防止構造は最もわかりやすい事例である。

また、新しい対策として自重補償機構¹¹⁾が提案されている。自重補償機構は、想定を超える地震が生じて柱や橋脚など鉛直部材が破壊しても、上部工等を支持するための鉛直支持性能の喪失を防ぐことで崩壊を防止するというコンセプトである。図-2に、ラーメン構造物に自重補償機構を適用した例を示す。ラーメン構造物では、一般にすべての柱が慣性力に抵抗するが、この例では柱のうち数本を、慣性力には抵抗せず自重のみを支持する柱、すなわち地震力フリーな柱（自重補償柱）としている。想定を超える地震が生じて、慣性力に抵抗する柱が破壊しても自重補償柱は健全な状態で残るため、鉛直支持性能の喪失を防止できる。なお、慣性力に抵抗していた柱を自重補償柱に替えると慣性力に抵抗する柱の負担は増加するが、試算では慣性力に抵抗する柱の鉄筋量を多少増加させることで、狭義の耐震設計における照査を満足できることを確認している。

想定する危機に復旧性の低下も考慮した場合の新しい対策として、倒壊方向を制御する方法¹²⁾が提案されている。この方法は、高架橋が仮に崩壊するとしても倒壊する方向を制御することで、地震力に依存せずに構造物周辺の人的被害の防止や緊急輸送路の確保に寄与できるため、危機耐性を向上させる方法である。

地震力には依存するものの、ハード的な対策としては、鋼板巻き立て工法のように柱の破壊形態を曲げ破壊形態にすることは危機耐性の向上と捉えることが可能である。また、免震構造や制震構造は、構造物の長周期化や減衰を増大させる効果により、応答の低減が期待できる。これらの効果は、一般論としては期待できるが、デバイスの特徴に依存するため、危機耐性に配慮された設計が実施される必要がある。

3. 危機耐性を考慮する枠組みの課題

橋梁等のインフラストラクチャーは基本的に公共事業であり、危機耐性を導入するにあたっては、設計基準等の枠組みが必要となる。そこで、本章では、「危機耐性を考慮する枠組み」を議論する中で、挙げられている課題を示す。

(1) 要求性能の明確化

危機耐性を考慮する枠組みの中で、もっとも大切なのが、要求性能を明確にすることである。要求性能が明確にならずに危機耐性を導入しても、構造物ごとの差が大きくなり、社会全体として危機耐性を高めることにつながらないためである。

しかし、「危機耐性」と「要求性能の明確化」は親和性が低いと言わざるを得ない。例えば、要求性能を「設計地震動以上の地震に対しても落橋・崩壊しないこと」と定めた場合、その性能を照査するためには、危機耐性照査用の地震動が必要となる。ところが、照査用地震動を定めた時点であらゆる地震への対応が不可能となり、もはや危機耐性ではなく狭義の設計の範囲になってしまう。また、あらゆる地震動に対して「落橋・崩壊しない」構造物を構築することは、現実的に不可能である。

現実的な方策としては、現行の設計基準に示されている落橋防止工のように、危機耐性を高めるための方策を列記し、その中から、橋梁の条件に適合するものを選択していくという方法もある。しかし、この方法では、本来の性能が明確にはならないし、何よりも、より良い方策を考え出すインセンティブ

を失ってしまうという問題がある。

また、要求性能は、前章に示す「想定する危機」と対応するものであるべきである。従って、「想定する危機」に対するコンセンサスを得ることが必要となる。さらに、現実的に対応ができない被害は甘受せざるを得ないため、その線引きもまた非常に困難である。

このように、危機耐性に対する要求性能をどのように示すかは今後の課題として議論を深める必要がある。

(2) 効果の表現方法

公共事業としての橋梁を考慮した場合、導入した危機耐性の効果を、一般市民に説明していく責任が生じる。しかし、その表現方法は課題である。

狭義の設計においては、例えば「阪神淡路大震災と同等の地震に対しても、壊れません」という表現を行うことができる。しかし、危機耐性は、想定地震動を定めることが適切ではないし、落橋や崩壊とそれにつながる人命の損失も許容せざるを得ない。

そこで、例えば、「危機耐性を取り入れることで、想定される死者の数を半数にしました」といった表現は可能かもしれない。その場合、いわゆる「安全神話」を崩すことが可能となり、一般市民の地震に対する意識を高める効果はあるかもしれない。しかし、危機耐性の効果を死者数だけで図ることは困難であるし、何よりも、安全・安心な社会の構築を目指すべき技術者の、単なる責任逃れとなってしまっただけは危機耐性導入の意義がなくなってしまう。

(3) コスト

危機耐性にどのようなコストを費やすかということも、議論が必要である。

狭義の設計においては、人命が前提となり、そのうえで費用便益分析などを行って費やすべきコストを示すことも可能である。しかし、危機耐性に関しては、最悪の事態を免れることに力点が置かれるため、費用便益分析を行うことは困難である。

そもそも、危機耐性を耐震設計上の「配慮」と考えるのであれば大幅なコスト増加を許容すべきではないとなるし、危機耐性を耐震設計上の重要な「性能」と考えるのであれば、大幅なコスト増も許容されるであろう。このことは、どのレベルの被害までを甘受すべきかという点の違いに帰することになると考えられ、結局は危機耐性に対する根幹の部分のコンセンサスが得られないと結論を出せないものと考えられる。

(4) 実装するためのインセンティブ

民間会社が危機耐性を実現させようとするインセンティブも、重要なこととして認識していく必要がある。

例えば、設計会社や建設会社が危機耐性に対する技術提案や技術開発を行おうとしても、危機耐性に対する評価基準が明確化されていないのであれば、採用される見通しが立たず、力を入れることが困難である。そこで、危機耐性の評価基準を明確にする必要があるが、狭義の耐震設計の様に「照査」できるわけでない場合も多く、簡単ではないと考えられる。

また、危機耐性の方策を評価するためには、想像力と高度な技術的力による裏付けが必須となる。そのため、全ての事業者がインハウスエンジニアのみで評価しようとしても困難である。現在でも特殊な構造物に対して組織される有識者による委員会などの利用も考えられるが、全ての構造物に対して有識者委員会を作ることは現実的ではない。

民間会社が事業者と一体となって、良い知恵を出し合えるような関係となるような体制づくりが、危機耐性を進めていくうえで重要な課題である。

4. おわりに

巨大地震による震災が発生するたびに、地震工学は一般市民に対して「想定を超える地震動」と説明をしてきた。しかし、地震工学を行っているものは、

設計地震動を超える地震が発生しうることを当然のものとして認識している。つまり、本当の意味での「想定外」ではなく、現実的な理由から設計地震動を超える地震に対して目をつぶらざるを得なかったと言える。危機耐性の考えかたはそのような状況から脱却し、全ての地震に対して完璧な安全は不可能かもしれないが、少しでも被害を小さくしようとするものである。

本WGでは、設計地震動以上の地震動にどのように対応するかを議論し、様々な考え方を集めて、危機耐性の実装に寄与しようとしている。なお、本稿はWGの議論の途中のものを中間報告としてまとめたものであり、WGとしての結論には至っていない。このため、本論文は執筆者の考えを中心に記載しており、WGメンバーのコンセンサスが得られているわけではない。今後も本WGにおいて議論を重ね、最終的には、図-3に目次案を示す報告書としてまとめていく予定である。

付録 WG名簿

本論文は、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（委員長：矢部正明）の性能設計WGにおける議論をもとに示すものである。以下に、WG委員名簿を付記する。

矢部 正明：小委員会委員長，星隈 順一：WG主査（～2016.3），武田 篤史：WG主査（2016.3～），
本山 紘希：WG幹事（～2016.3），西村 隆義：WG幹事（2016.3～），大住 道生（2016.3～），大場 宏樹，
川西 智浩（2016.3～），杉岡 弘一，高橋 良和，
崔 準ホ，党 紀，中谷 隆生，名古屋 和史，
西原 史和，栢木 正喜（2015.7～），姫野 岳彦，
福井 次郎，前原 康夫，松井 隆行（～2015.7），
松崎 裕，松永 昭吾，水谷 司，森 敦，渡辺 忠朋

参考文献

- 1) 土木学会・地震工学委員会：平成28年（2016年）熊本地震 地震被害調査結果 速報会資料，2016.4.
- 2) 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，2012.9.
- 3) 災害対応マネジメント特定テーマ委員会（土木学会東日本大震災フォローアップ委員会）東日本大震災の災害対応マネジメント，土木学会，2012.11.
- 4) 土木学会・地震工学委員会・耐震基準小委員会・地震安全評価WG，社会基盤施設の地震安全の論理構築に向けて，第32回地震工学研究 発表会論文集，2012.10.

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. 東日本大震災での教訓を踏まえた
 これらの橋の耐震設計2. 現状の耐震設計およびその問題点の整理<ol style="list-style-type: none">2.1 耐震設計の変遷および到達点2.2 耐震設計の問題点3. 危機耐性を考慮した耐震設計の考え方<ol style="list-style-type: none">3.1 危機耐性の概念3.2 本報告書で対象とする危機耐性4. 橋の耐震設計における危機耐性<ol style="list-style-type: none">4.1 想定される回避すべき被害4.2 危機耐性の考慮の方法4.3 危機耐性を実現する事例5. 危機耐性を考慮するための枠組みの構築<ol style="list-style-type: none">5.1 危機耐性を導入する上での障壁5.2 危機耐性導入に向けての取組み6. 今後の課題 |
|---|

図-3 報告書目次案

- 5) 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, 2013.5.
- 6) 本田利器・他：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(1)試案構築にむけての考察，第35回地震工学研究発表会，2015.10.
- 7) 野津厚・他：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(2)試案構築にむけての考察，第35回地震工学研究発表会，2015.10.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，2004.4.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3.
- 10) 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，1999.8.
- 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，第70回土木学会全国大会概要集CD-ROM，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，第70回土木学会全国大会概要集CD-ROM，2015.