

国内外の道路橋の設計指針にみられる 「危機耐性」の分析

高橋良和¹・秋山充良²・片岡正次郎³・本田利器⁴

¹正会員 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

²正会員 早稲田大学理工学術院創造理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akiyama617@waseda.jp

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: kataoka-s92rc@nilim.go.jp

⁴正会員 東京大学大学院新領域創成科学研究科国際協力学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

東日本大震災以降、設計で考慮する事象を超えた事象への対応についての関心が高まり、「危機耐性」という概念が共有されるようになってきた。しかしながら、その理念は理解されつつあるものの、それを如何に耐震設計体系に実装すればよいのか、まだ試行段階にある。一方で、危機耐性のような考え方は、技術者にとって全く新しい概念ではなく、例えば道路橋示方書では、地震時にも支承部が安定して挙動することを求めながらも、支承部の破壊を前提として機能する落橋防止システムの採用が記載されている。本論は、平成24年道路橋示方書を対象に、危機耐性に資することができる概念、事例を抽出し整理するとともに、国内外の動向を踏まえ、危機耐性に配慮した設計に対する課題を整理する。

Key Words : highway bridge, design code, anti-chatastrophe

1. はじめに

土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会・危機耐性WGでは「危機耐性」を考慮した耐震設計体系の構築に向けた検討が行われている¹⁾。そこでは「危機耐性」を「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、破壊的な状況に陥らないような性質」と定義している¹⁾。ここで「狭義の設計」とは、レベル1、レベル2等の設計地震動に対して構造物が要求性能を満足していることを照査で確認する設計^{2,4)}のことである。

危機耐性を考慮した設計が必要とされる理由として第一に挙げられるのは、狭義の設計時に想定していたレベル2地震動を越える地震動が構造物に作用する可能性は常に存在しているという点である。もちろん、従来の耐震設計においても、レベル2地震動を上回る地震動が発生することは予測されているものの、構造技術者は、レベル2地震動に対して構造物の安全性を照査するものの、それを越える地震動に対し、構造物がどのように壊れるのかを考えることは稀であった。しかし、2011年東日本大震災による津波被害の経験か

ら、設計上の想定を越える作用に対する配慮の重要性が強く意識されるようになってきた。また、作用した地震動がレベル2以下の場合でも、地滑り等、設計時に想定していなかった挙動が構造物に生じ被害に結びつく可能性はある。道路は交通の用に供するものであるため、安全性への懸念から長期に通行止めをせざるを得ないような状態も致命的な状態と考えられる。こうした不測の事態への対処を構造設計においても考慮しようというのが危機耐性である。

危機耐性を考慮した設計では、はじめから「壊れたときのシナリオ」を考える¹⁾。そして、構造物単体の挙動ではなく、社会環境を含む複数のスケールでのシステムの挙動を考慮し¹⁾、それに対処するため、構造計画および構造設計の段階でそれぞれ可能な対策を実施する¹⁾。例えば、交通網の代替性を議論する場合は広域な道路ネットワークをシステムとして考慮することになる¹⁾。そして、被災した後のレジリエンスを考える¹⁾。構造物が壊れた場合のシステムの応答を構造物の設計者自身が計画段階・設計段階で考慮するという点が危機耐性を考慮した設計の新しい点であり、これにより、計画段階・設計段階で適切な対策をとることが可能に

なる。

さて、構造物の設計は許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が進んでいる。平成14年道路橋示方書に対する改定作業が進められる中で、平成22年には、より合理的に評価できる基準体系への移行として、限界状態設計法である部分係数設計法の導入に関する議論が進められてきた。しかし、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、直ちにその対応が迫られたことから、従来の許容応力度設計体系を踏襲し、平成24年に改定されている。海外では、限界状態設計法から、さらにその次のステージへの議論が盛んになされている。また、東日本大震災以降、想定を超える作用を受ける構造設計の必要性が認識されるようになってきている。本稿では、危機耐性に関する今後の議論の活性化に資する目的で、海外を含む構造設計法に関する考え方を整理し、道路橋における設計指針の動向を概観するとともに、許容応力度設計体系の中においても、危機耐性への配慮と見なすことのできる事例を取りあげ整理し、危機耐性に配慮した設計の今後の展開に関するいくつかの考えを述べる。

2. 構造物の設計法と安全確保の考え方の変遷

(1) 概説

構造物の設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法、そして性能設計法に移行してきた。構造物に要求する性能を決定する段階から設計者が関わることを可能にする性能設計の枠組みは、危機耐性を考慮した耐震設計体系を受け入れるものである。

地震や津波などの将来予測には、依然として圧倒的な不確実性を伴っており、現状の技術レベルでは、これらに対して確かな安全を保証することはできない。断面や部材レベルで安全を確保できない場合には、構造物、あるいは構造物を含むネットワークが機能麻痺に陥ることを避け、さらに可能な限り短時間でイベント前の状態に機能を回復させる配慮が設計段階で求められる。想定した限界状態を生起させないように、あるいは生起する可能性を許容値以下に抑えようとする、旧来の限界状態設計法では、レジリエンスや危機耐性の考えを包含することはできない。設計上の限界状態を超える事態が生じたときを設計者が想定し、影響度の評価や機能の回復までに要する時間などを算定することを設計者に要求する枠組みへの転換が必要である。

本章では、今後、危機耐性を考慮した耐震設計体系を構築していくための諸課題を明らかにするため、設計法や安全確保の考え方の変遷について、諸外国の活動を交えてレビューする。

(2) 限界状態設計法における安全確保とその課題

許容応力度設計法から限界状態設計法への移行により、構造物がライフタイム内に受ける様々な大きさの作用や荷重に対して、確保したい構造物の状態を直接的に照査できるようになった。コンクリート標準示方書⁵⁾では、限界状態設計法に用いる照査の一般形として次式を定めている。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 S_d 、 R_d : 設計応答値と設計限界値、 γ_i : 構造物係数。

土木構造物は、他の工業製品に比べて、極端に長いライフタイムを考慮しなければならず、かつ、主に自然現象に対して安全性や耐久性を確保しなければならない。100年にわたって、その間に発生する大地震などの自然現象を予測し、構造物の安全性や耐久性を確保することには大きな不確かさを伴うことは避けられない。このような圧倒的に不確かな情報のもとで意思決定し、構造材料や構造諸元を決めていく作業が土木分野における構造設計の大きな特徴であり、他の工業製品に係る設計との根本的、かつ本質的な違いである。限界状態設計法においては、この不確かさをどのように考え、定量化し、その不確かさのもとでも確かな安全性を確保できるように式(1)で用いる部分係数(安全係数)を定めなければならない。コンクリート標準示方書では、 S_d の算定過程で作用係数と構造解析係数、および R_d の算定過程で材料係数と部材係数の主に4つの部材係数を用いることで式(1)の照査に関わる不確かさに対処している。

これに対して、欧米では、不確からしさを確率・統計的に表現し、部分係数を定めることも行われている。例えば、American Society of Civil Engineers (ASCE) の Structural Engineering Institute (SEI) においては、Technical Administrative Committee on Structural Safety and Reliability (TACSSR) があり、このほかにも fib, IABSE, RILEM などの構造分野に関係する主要な国際学会の連合委員会として作られた Joint Committee on Structural Safety (JCSS) などが長らくこの問題を扱ってきた。構造物に付与する安全性の大きさや、それを限界状態設計で用いる部分係数にどのように反映させるのかについての長い議論があり、JCSS モデルコード⁶⁾や ISO2394「構造物の安全性と信頼性に関する一般原則 (General Principles on Reliability for Structures)」⁷⁾など、実務基準への適用を想定した体系化が既になされている。これらは、ライフタイム内の構造物の破壊の可能性をある許容値以下に抑えるように設計する、いわゆる信頼性設計法を基礎としている。一般の設計者が破壊の可能性を定量化す

ることは困難であるので、式(1)を用いて通常の限界状態設計を行えば、破壊の可能性がある許容値以下となるように部分係数の値が調整されている。

なお、部分係数が確定的、あるいは確率・統計的に決定されていても、結局のところ、設計者は式(1)を用いて部材や構造物の強度(抵抗)が作用や荷重により生じる応答を上回ることを確認するのみである。今後生じる地震や津波を確かに予測できない現状では、仮にこの照査式を満足することを確認したとしても、構造物が有している安全性を100%保証することはできない。結局のところ、限界状態設計法の枠組みの中では、想定した状態を超える事象が生じたときに引き起こされるシナリオを描くことが難しい。なお、3.で紹介するように、現行の道路橋示方書においても完全な安全を確保できていないことは認められており、橋を致命的な状態に至らせることをできるだけ回避できるような対策について、設計段階で配慮することを求めている。今後、危機耐性を考慮した設計体系の構築に向けては、設計時に想定した状態を超えたときに何が起こり、それに対して具体的にどのような対策をしているのか、事前に想像力を高めておくことが重要となる。

(3) 設計時に想定した限界状態を超える事象への対応の模索

設計時に想定した限界状態を超える事象への対応を考える上で、主に2000年以降、欧米で進められている限界状態設計法の次の設計体系の構築に向けた活動が参考となる。例えば、ASCEのSEIでは、TACSSRの後、Technical Council on Life-Cycle Performance, Safety, Reliability and Risk of Structural Systemsが動いている。レジリエンスを主題としたInfrastructure Resilience Divisionも2014年に創設された。また、ISO2394の作成に携わった研究者・技術者も、後継のISO基準としてISO13824「構造物の設計の基本 - 構造物を含むシステムのリスクアセスメントに関する一般原則 (Bases for design of structures - General principles on risk assessment of systems involving structures)」などを出版している。2015年には、信頼性の考えに基づく限界状態設計法に主眼を置いたISO2394もリスクやレジリエンスの考えを取り入れられるように改訂された⁹⁾。これは、限界状態設計法を照査手段とするPerformance-based designから、Risk-based designやResilience-based designへの移行の模索とも言える。前記したように、構造物の安全性の程度を定量化し、それを許容値以下に抑えるようにコントロールしたとしても、式(1)を用いて照査をする限り、想定した限界状態を上回る作用が生じたときに、構造物、あるいは構造物を含むネットワークや社会に何がもたらされるのかを設計者が評価することはない。想定を上回る作用

や荷重を受けたときに、どのような影響(consequence)が生じるのかを評価し、構造物が持つ破壊の可能性(probability)を見直したり、構造物が役割を果たせなくなってもネットワークの機能低下を最小化するように冗長性(redundancy)を持たせたりすることを検討する。つまり、構造物の安全性は100%確保できないことを前提に、その一方で、安全でない状態になったときの影響を最小化するような手段を講じるのである。

想定した限界状態を超える事態が生じたとしても、構造物が引き金となり、構造物利用者や構造物周辺の住民の生命にかかわることは生じさせない、あるいは社会に壊滅的な影響を及ぼさせないことを照査・確認するうえで、このようなリスクの考えは有用である。また、想定した限界状態を超える事態によりどのような機能低下が生じ、それから正常な状態までに回復するのに要する時間を検討する際には、レジリエンスの視点から、災害復旧過程を議論することも有効である。ただし、橋梁、あるいは橋梁を含む道路ネットワークを対象としたリスクやレジリエンスに関する研究や検討例は、被害金額の算定や復旧時間の予想など、アセスメントに特化したものがほとんどである。アセスメントの結果を受けて、リスクを低減したり、災害後の復旧時間を短縮するための対策や設計段階での具体的な配慮に言及したものはほとんどみられない。危機耐性を考慮した耐震設計体系の構築に向けてはリスクやレジリエンスの考えを参考にしながら、想定した限界状態を超える事態とそれが引き起こすシナリオの作成手順、さらには、そのシナリオを回避、あるいはシナリオに従い生じる影響を低減するためのハード・ソフト対策のメニューの充実、などが必要である。

3. 道路橋の設計指針と「危機耐性」

本章では道路橋を対象として設計標準の考え方を概観するとともに、既存の設計体系で危機耐性をどのような形で取り込んでいるのかを概観する。

(1) 道路の定義と技術基準

a) 道路法と道路構造令

道路法における「道路」とは、第2条において『一般交通の用に供する道』と定義されており、その効用を全うする施設の一つに、道路橋がある。

その目的を全うするため、第29条において、道路の構造は、通常の衝撃に対して安全で、安全かつ円滑な交通を確保できるものでなければならないことが原則とされており、第30条により、道路構造の技術的基準は政令で定めることになっており、道路を新設し、又

は改築する場合における道路の構造の一般的技術的基準として、道路構造令が定められている。

道路構造令第35条において、橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路の構造の基準に関し必要な事項は、国土交通省令で定めることになっており、これらの法令が示すところの「技術(的)基準」であり、国土交通省都市・地域整備局長、道路局長より「橋、高架の道路等の技術基準」として通達されるものが道路橋示方書である。

b) 道路橋示方書

道路橋に関する技術基準は、明治19年に制定された我が国初の道路構造の基準である「国県道の築造標準」の中に設計活荷重が規定されて以来、自動車交通の発展や橋梁技術の進歩等に対応して逐次整備されており、昭和14年に「鋼道路橋設計示方書案」が道路橋単独の技術基準として初めて定められ、それ以降、橋梁構造別や部材別の基準が順次整備、改定されてきた。昭和47年から55年にかけて、これら基準がとりまとめられ、「Ⅰ共通編」「Ⅱ鋼橋編」「Ⅲコンクリート橋編」「Ⅳ下部構造編」「Ⅴ耐震設計編」かならなる道路橋示方書の体系が形作られた。

道路橋示方書は、技術の変遷や社会事情を考慮しおおむね7, 8年ごとに改定が進められている。平成5年には道路構造令の改正に伴う設計活荷重等の見直し等のため、平成8年には兵庫県南部地震を契機とする耐震設計の強化等のため、平成14年には性能規定型の技術基準を目指した要求性能の明確化等のため改定された。そして約10年後の改定に向け、要求性能水準について定量的評価や信頼性の解釈を導入するため、要求性能の見直しと同時に部分係数設計法の導入に関する検討が重ねられていた。特に耐震設計編としては、部分係数設計法導入に関し、信頼性指標や部分係数値の試算・試設計を進めるとともに、レベル2地震動に対する抵抗係数の考え方、また耐力階層化係数の設定に関する検討課題が取り上げられていた。しかし、平成23年に東北地方太平洋沖地震が発生したことから、従来の許容応力度設計体系を基本とし、地震被害を踏まえた対応や維持管理に関する内容を充実させることを優先し、平成24年に改定された。

(2) 耐震設計の理念と手法

橋の設計において、橋全体に要求される性能を確保する上で常に留意しなければならない事項として、「道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編」⁹⁾では、使用目的との適合性、構造物の安全性、維持管理の確実性や容易さなどを設計で考慮することが求められている。設計の中でこれらを考慮するための方策が道示に規定されているが、平成14年以降の道路橋示方書は性能規定型

設計法が採用されているため、各規定の構成は基本的に、要求する事項とその要求する事項を満たすと考えられる具体的な方法などの規定をともに条文として規定する構成となっている。

このため、規定される方法に従うことで所要の性能を満たすとする設計が可能である一方で、要求される事項を満たすことが検証されるならば、規定される内容に厳密に従わない方法による設計も採用できる。ただし、示方書では要求する事項を満たすか否かの判断基準や方法を記載していないため、同等以上の性能を有することを一つの目安として、理論的な妥当性や実験等による検証等適切な知見に基づいて設計を行うことが規定されている。つまり、理論的に性能や信頼性の検証が困難な新しい技術や実績の乏しい方法であっても、例えば実際の架橋条件や施工条件を比較的忠実に再現できる現地において試験的に施工することや、相当規模の実験を行うことなどによって性能を評価することも可能であり、採用することができる設計体系となっている。

(3) 耐震設計の基本的な考え方

a) 耐震設計の基本

道路橋の耐震設計は、「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」¹⁰⁾(以下、道示Ⅴと呼ぶ)に準拠して行われる。最新の耐震基準は、平成24年に改定された。この道示Ⅴでは設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを目的として耐震設計を行うことを基本とし、設計で想定する地震動にはレベル1地震動とレベル2地震動がある。

レベル1地震動とは、「橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動」、レベル2地震動は「橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動」と定義されている。

要求される耐震性能は、橋全体系の挙動を踏まえ、耐震性能1～3が設定されており、耐震性能1は「地震によって橋としての健全性を損なわない性能」、耐震性能2は「地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能」、そして耐震性能3は「地震による損傷が橋として致命的とならない性能」と定義されている。設計地震動と目標とする橋(重要度が標準的な橋、特に重要度が高い橋をそれぞれ「A種の橋」、「B種の橋」と呼ぶ)の耐震性能を表-1に、そして各耐震性能を耐震設計上の「安全性」、「供用性」そして「修復性」の観点から整理したものを表-2に示す。

b) 設計地震動

耐震設計では、構造物の性能を照査するために、地震という極めて不確定性の高い自然現象を取り扱う必

表-1 設計地震動と目標とする橋の耐震性能

設計地震動		A種の橋	B種の橋
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能(耐震性能1)	
レベル2地震動	タイプⅠの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	地震による損傷が橋として致命的とならない性能(耐震性能3)	地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能(耐震性能2)
	タイプⅡの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)		

表-2 耐震性能の観点

橋の耐震性能	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1: 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2: 地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である
耐震性能3: 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—

要がある。構造物の耐震性を検討するにあたっては、対象となる構造特性を把握し、その構造にとって不利となる作用を選択することが基本である。

1995年兵庫県南部地震以降、地震動に関する知識が深まり、平成14年道示Vでは、建設地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地下構造に関する情報、建設地点の地盤条件に関する情報、既往の強震記録等を考慮して建設地点における地震動を適切に推定することができる場合には、これに基づいて設計地震動を設定することが規定されていた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震では、これまでの情報において想定されていなかった三陸沖、宮城県沖、福島県沖及び茨城県沖の震源域の連動により極めて大きなマグニチュードの地震となったこと、2008年岩手・宮城内陸地震等では、事前にその一部又は全体の存在が明らかにされていなかった活断層の活動による地震が発生したことなど、プレート境界型の地震が連動するメカニズムやその規模が明らかになっているわけではないこと、日本国内には存在が明らかになっていない活断層もあること、この示方書が日本国内の各地に建設される道路橋の耐震設計に適用されることに鑑み、個別の建設地点における地震動を適切に推定することができる場合に対する対応を条文として規定することはせず、東北地方太平洋沖地震のような東北地方の太平洋沖の連動型の地震や東海地震、東南海地震、南海地震及び日向灘地震が連動する場合等を含む日本近海のプレート境界で発生する可能性がある大規模な地震の影響を考慮したうえで、設計地震動は加速度応答スペクトルに基づいて設定す

ることとしている。

レベル2地震動については、兵庫県南部地震で道路橋に破壊的な影響を与えた地震動が観測されていることから、これらの加速度応答スペクトルを基本とした標準加速度応答スペクトルが設定されている。一方、これを上回る地震動が生じる可能性もあることは指摘されており、条文からは外れたものの、設計地震動の設定にあたっては、プレート境界で発生する地震の情報や活断層情報など、設計地震動を設定する際に必要となる情報に関する今後の調査研究の進展に応じて適切に対応していくことが、解説中に記載されている。

動的解析に用いる地震動としては、設定した加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整した加速度波形を用い、道示Vでは、タイプⅠの地震動として、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた強震記録のように継続時間が長い特性を、またタイプⅡの地震動については、1995年兵庫県南部地震で得られた強震記録のように継続時間が短いが構造物の非線形応答に与える影響が大きい特性を有する波形が用意されている。

(4) 道示における危機耐性の実装

現行の設計指針ではレベル2地震動を念頭においた対応策が示されているが、その中でも危機耐性に資することができる概念、事例が実装されている。本節では、これら危機耐性に相当する概念がどのような形で取り込まれているのを整理する。

a) 共通編に示される危機耐性

危機耐性の実現には設計プロセスの上位から関与する必要がある¹⁾。道示では、全体に関わる事項を共通編で整理しており、平成24年道示では維持管理に関わる事項に加え、設計上の配慮事項として、一部の部材の損傷等が原因となつて、橋の崩壊などの致命的な状態となる可能性について配慮して構造設計することが新たに規定された。本論で用いている危機耐性と同様の考え方を示方書の中に取り込んだとみることができる。

構造設計上の配慮事項の解説として、橋の設計では、設計時点で考慮する供用期間中に橋のおかれる状況や作用による影響が考慮されることになるが、供用期間中に設計では考慮されない不測の外力を受けることや、損傷を生じる可能性も否定できないことが指摘され、このような場合に対しても、橋が致命的な状態となることをなるべく回避できるような配慮を行うということが重要であるとされている。ただし、橋全体が致命的な状態に至る事態になることを統一的な評価基準に基づいて照査できる手法が確立されていないことから、道示では具体的な照査基準については条文に示していない。ただし、橋全体の性能が大きく損なわれること

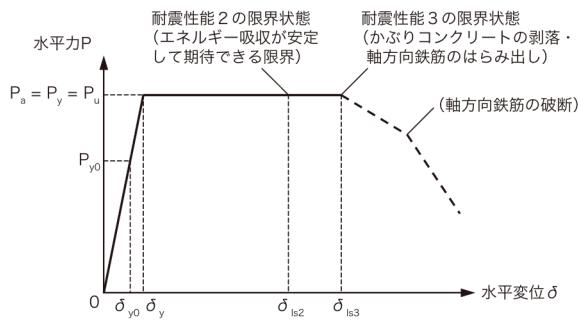


図-1 曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の水平力-水平変位関係と限界状態

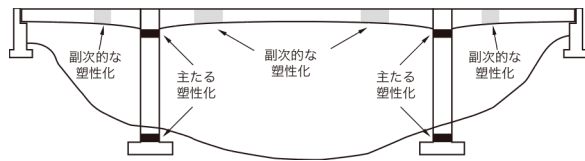


図-2 ラーメン橋の塑性化部材組み合わせの例

の影響を設計段階から念頭におくとともに、必要な場合には、橋を致命的な状態に至らせることをできるだけ回避できるような対策について、設計で考慮することが望ましいことを定められたことから、照査を必要とする設計行為の他に、危機耐性の観点からの配慮をすることが記載されたと見ることができる。

b) 耐震設計編に示される危機耐性

共通編に示される危機耐性の考え方を、耐震設計に特化・具体化したものが、耐震設計編で記載されている。

実際には極めて強烈な地震動が発生する可能性があるとしても、構造設計において、実地震動をモデル化した設計地震動が設定され、耐震性能を照査するため、構造解析を伴う詳細設計が行われる。この工程を狭義の設計段階と呼ぶとすると、本論でいう「危機耐性」とは、「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」と定義する¹⁾。これを道路橋に当てはめてみると、耐震安全性という観点では、耐震性能3を超える状態が危機にあたり、このような状況を回避し、耐震性能3に留めるための考え方が危機耐性に当たる。一方、3.(1)で示したように、一般交通の用に供するのが道路であり、その効用を全うする施設のの一つが道路橋である。共通編にも記載されているが、安全性への懸念から長期に通行止めをせざるを得ないような状態も致命的な状態と定義しており、この定義からすると、耐震性能3であっても供用性は確保できていないことから、危機ともいえる。特に重要度が高い橋は耐震性能2を満足することが求め

られていることから、耐震性能2に留めるための考え方が危機耐性に当たる。

4. 道路橋示方書に示される危機耐性の事例

(1) Bruneau et al.の4R

Bruneau et al.は、レジリエンスを構成する要素として Robustness (ロバスト性), Redundancy (冗長性), Resourcefulness (機略性), Rapidity (迅速性) の4つを挙げている(以下ではこれらを“4R”と称する)。これらはそれぞれ危機耐性の構成要素ともなり得るものである¹⁾。前章では、道路橋示方書における危機耐性の実装について、その基本的考え方を整理した。本章では、その具体的な記述・事例を紹介するとともに、これら事例を4Rとの関連性にも着目して整理する。

(2) 構造設計上の終局状態である耐震性能3の設定

道示Vにおける耐震性能3を象徴的に表した図として、曲げ破壊型の単柱式鉄筋コンクリート橋脚の水平力—水平変位関係を図-1に示す。道示では、地震の影響を支配的に受ける部材については、「破壊形態が明らかであり、破壊形態に応じて破壊に対する安全性が確保できること」を満たすことが明らかでなければならない。つまり、地震による損傷が橋として致命的とされない性能である耐震性能3を単柱式鉄筋コンクリート橋脚に当てはめた場合、かぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋のはらみ出しが顕著になると、水平力の低下が顕著となり、安定して耐力が確保されなくなる。この状態を耐震設計上の終局状態である耐震性能3の限界状態と設定し、橋が重力に抵抗する能力を失う最終的な破壊状態までの範囲を耐震余裕度として、破壊に対して適切な安全性を確保しようとしており、危機耐性に配慮した構造的対応の1つと言え、4Rの中ではRobustnessに対応する。

一方、表-2では、耐震性能3については耐震設計上の供用性、修復性は照査することが求められていない。3.(4)で示したように、照査基準としては条文に示されていないものの、致命的な状態を回避できるような配慮を行うことが望ましいとされているため、耐震性能3の供用性、修復性に対しては、4RのRapidityとしての危機耐性を確保することが求められていると言える。

(3) 損傷発見・修復が困難な場合の限界状態の設定

また、図-2にラーメン橋の塑性化部材の組み合わせの例を示す。このように、耐震性能2や3に対しては、橋脚の基部を塑性化させ、基礎部や上部構造は副次的な塑性化に留めることを基本としている。これはキャ

パシティデザインを具現化した例である¹¹⁾。キャパシティデザインは、Eurocodeなど、諸外国の耐震設計基準で広く採用されている。背景には、地震動の予測には極めて大きな不確定性があり、設計上想定した終局限界状態を超える応答が生じる可能性は否定できないことから、(1) 強震動を受けた後、損傷箇所の発見や修復の容易さを考慮して保有水平耐力の最弱部（ヒンジ箇所）を選定する（通常は、橋脚の基部）、(2) ヒンジを設ける部材では、限界状態を超えても、ただちに崩壊などの被害につながらないように、脆性的な破壊モード（せん断破壊）を防ぎ、繰り返し載荷に対して安定してエネルギー吸収が期待できる曲げ破壊型となるように設計する、ことが基本である。設計において塑性化する部位を確実にするためにも、耐力階層化に関する規定の整備が重要である。

なお、道示Vでは、常に橋脚を塑性化させることを許容している訳ではない。「地震後に速やかな点検及び修復ができない場合には、制約条件を踏まえて限界状態を適切に設定する必要がある」ことが記載されており、これは例えば渓谷部や大水深のダム湖に建設される橋のような場合には、構造計画の段階で損傷の発見及び修復の方法について十分検討し、困難と判断される場合には、橋脚といえども塑性化を許さない限界状態を設定することを意味しており、危機耐性を高める配慮である。これらは災害時に対応できるようにするための配慮であると考え、4RのうちResourcefulnessやRapidtyの向上に資する方策といえる。

(4) 過度に耐震性が低い構造物を設定させない配慮

設計水平震度を算出するにあたっては、設計する構造物の固有周期や地域別補正係数、地盤種別により決定されるが、いずれも下限値が設定されている。これは、周期が長い構造物では設計水平震度が極端に小さくなる場合が生じるものの、このような場合にも構造物に一定以上の耐力を付与し、耐力が過度に低い構造物が設計されないことに配慮するためである。この規定は、構造物を長周期化することのメリットを損なうものともなり得るものの、最低限の耐震性能を確保するための危機耐性的工夫と読み取れることもでき、4RのRobustnessを確保するための方策ともいえる。ただし、示されている下限値そのものが危機耐性の観点から十分な配慮と言えるかどうかの議論は今後必要である。

(5) 構造計画による配慮

道示の耐震設計で考慮している事象は、これまでの強い地震動による地震被害の経験やそれに関連する調査研究に基づいて設定されている。つまり、橋に被害をもたらしたという観点でこれまでに観測された地震

動の中で最も強い地震動を設計で考慮したとしても、これを上回る地震動が将来発生する可能性は否定できず、その他大規模な津波や断層変位、地滑りなどにより橋が影響を受ける場合もあるものの、これらの事象の予測技術として工学的に確立したものがないことや、極めて大きな作用が生じるレベルとなると、構造体として合理性を失わない範囲で対応できる対策にも限界があることから、これらの事象を具体的に橋の耐震設計には考慮していない。

しかしながら、これら耐震設計で考慮していない事象、すなわち危機に対しても、路線計画の段階において検討し、そのようなリスクが小さくなるような計画とすることや、道路ネットワークの多重化による補完性を確保するような計画とすること等、当該地域の防災計画と一体となって検討することが平成24年道示に記載された。その上で、構造計画の観点から、仮に橋の機能的な損失が生じて、できる限り早期に復旧できるような構造形式を採用しておくこと、またその復旧のための計画や資材等の整備について事前に検討を実施しておく等の配慮を講じることの重要性が、耐震設計の基本方針として記載され、これは4RのResourcefulnessやRapidtyの向上を期待した危機耐性を高めるための構造計画的配慮である。

(6) 支承部破壊の想定

これまでの地震被害の経験より、橋において支承部が破壊されることが多いことが明らかとなっている。そのため、構造設計においては、支承部は免震支承を除いて力学的特性が弾性域を超えない限界の状態、すなわち耐震性能1に留まるよう規定されているものの、橋にとっての最も重大な危機、すなわち上部構造の落下を防止する観点より、支承部破壊が発生することを想定した各種配慮がなされている。

まず、支承部を取り替え可能な構造とすることが規定されたことが、支承部の破壊を想定していることを意味している。その上で、構造的工夫として、慣性力を複数の下部構造に分担させる地震時水平力分散構造やラーメン構造を採用し、支承部の破壊すなわち上部構造の落下につながらない構造形式にすることや、支承部が損傷した後に機能する桁かかり長の確保や落橋防止構造の設置が挙げられる。これはフェールセーフとしての対策であり、典型的な4RのRedundancyの向上に寄与するものである。

さらに、上下部構造が剛結された「橋台部ジョイントレス構造」が追加された¹²⁾が、これは支承や伸縮装置が不用とする構造であり、地震時の落橋リスクも軽減できることが期待できる。

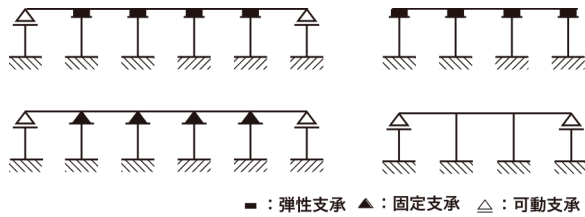


図-3 危機耐性が高い橋梁システムの例

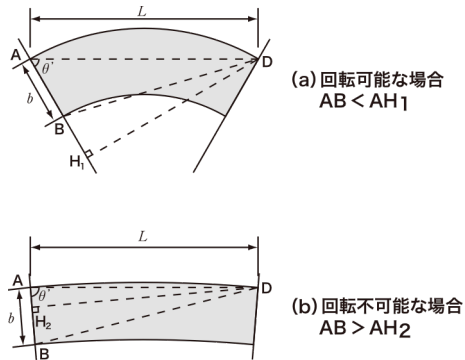


図-4 曲線橋が回転できる条件¹⁰⁾

(7) 落橋防止システム

(6) 支承部破壊の想定と関連するが、下部構造が倒壊等の致命的な状態に至っていない段階に対して、支承部の破壊によって上部構造と下部構造が構造的に分離し、これらの間に大きな相対変位が生じる場合にも上部構造の落下を防止する目的で、落橋防止システムは設置される。

落橋防止システムとして、支承が破壊したときに、上部構造が下部構造の頂部から逸脱することを防止する機能を有する「桁かかり長」、支承部が破壊したときに、橋軸方向の上下部構造間の相対変位が桁かかり長を超えないようにする機能を有する「落橋防止構造」、そして支承部が破壊したときに、橋の構造的要因等によって上部構造が橋軸直角方向に変位することを拘束する機能を有する「横変位拘束構造」から構成される。落橋防止システムは、フェールセーフという点に着目すれば4RのRedundancyの向上に寄与する対策といえる。

平成24年道示Vでは、橋軸方向に大きな変位が生じにくい構造特性を有する橋では、レベル2地震動に対して設計された支承部により上部構造が支持され、また桁かかり長も確保されることから、支承部の破壊に対する補完性又は代替性が一般には高く、その結果、落橋に対する安全性が高いため、橋軸方向の落橋防止構造を省略してもよいことを規定している。逆にいうと、省略してもよいと示されている3つの構造システムは、危機耐性の高い構造形式とすることができる(図-3)。

- ・ 両端が橋台に支持された一連上部構造を有する橋
- ・ 橋軸方向に4基以上の下部構造において弾性支持又は固定支持される一連の上部構造を有する橋
- ・ 2基以上の下部構造が剛結される上部構造を有するラーメン橋

(8) 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

1923年関東地震以降の大地震による落橋事例を分析した結果、上部構造が幾何学的に回転可能な構造形式の採用は避けるよう、過度に斜角の小さい斜橋や過度に曲率半径が小さい曲線橋は、できるだけ避けるよう配慮することが求められている。ただし、設計の与条件を踏まえ橋の構造計画を総合的に検討した結果として、上部構造が幾何学的に回転してしまうような構造(例えば図-4)を採用せざるを得ない場合、支承部の破壊に対する補完性又は代替性を高めることによって、落橋しにくい構造系を計画したり、横変位拘束構造を設置するとともに、回転しない橋のケースよりも桁かかり長を長く確保する等して入念な落橋防止対策を検討することが求められている。斜角橋や曲線橋など、地震時の挙動が複雑となる橋梁に対する4RのRobustnessを確保するための方策である。

(9) 被災後の供用性を高める工夫

これまでの事例は、耐震安全性に対する危機耐性を高めるための配慮や工夫について整理したが、ここでは供用性に対する危機耐性を高める工夫の一つとして、道路橋と道路との境界部である橋台部の各種対応策がある。路面の連続性確保の観点より、新たに橋台背面アプローチ部が定義されたが、橋本体の損傷が軽微でも橋台背面に著しい段差が生じ、通行できない事例が多くみられたため、踏掛版の設置等の対策を講じることが求められている。これらは構造物に比べて背面土の信頼性が低いことを考慮しつつ、災害時の交通を確保しようとするものであるため、4RのうちRobustnessやRapidityの向上に資する方策といえる。

5. 危機耐性を考慮した耐震設計体系構築に向けた課題

(1) 要求性能の多様化

前記したように、道路橋示方書では、レベル1地震動に対しては橋としての健全性を確保し、レベル2地震動に対しては、橋の重要度に応じて、橋としての機能の回復が速やかに行い得る、あるいは橋として致命的にならない性能の付与を求めている。橋の重要度、

地震動の生起頻度と大きさ、および橋の状態を組み合わせ、性能マトリクスが作られている。

しかし、危機耐性を考慮した耐震設計体系を構築していくためには、構造物に要求する性能を設計者や発注者がある程度自由に選択できるように改めていく必要がある。より多様な性能マトリクス、あるいは性能の組み合わせが認められることが望ましい。今後、既存構造物の耐震補強や維持管理を進めていく上でも、柔軟に性能マトリクスを見直せることには利点がある。設計耐用期間が100年程度の新設橋梁と、既に数十年間にわたり供用された既存橋梁の要求性能を同じにすることは合理的と思えない。要求する安全性レベルの下限は明示しておき、その他のメニューは対象橋梁が置かれる環境(路線の重要度・地震環境・設計耐用(あるいは残存供用)期間など)に応じて選択できると良い。

例えば、危機耐性を踏まえ、以下のような要求性能を定めることが考えられる。もちろん、現時点では、個々の照査技術が未熟であり、要求性能が確保されることを確かめることはできないが、これらの性能確保を橋梁エンジニアが目指す流れを作ることが重要と考える。これにより、橋梁、あるいは橋梁を含む道路ネットワークが危機に陥る事態は避けられるし、さらには、より高いレベルの安全性を付与できる耐震部材やデバイスの開発を促すことにもつながると期待される。

- 何らかの理由により対象橋梁が流出したとしても、その橋梁を含むネットワークは、所定の交通量を確保することができる。
- 何らかの理由により軸力を支える柱部材の幾つかが消失したとしても、上部構造の落下を防ぐことができる。
- 現行のレベル2地震動の数倍の地震力を受けたとしても、上部構造の落下を防ぐとともに、数週間以内に地震発生前に有していた機能を回復できる。
- 現在のレベル2地震動に対しても、即時の供用再開を確保できる。

(2) Bruneau et al.の4Rの考慮

危機耐性やレジリエンスを有する橋梁構造の設計法の開発は途上であり、今後も様々な観点から検討される必要はあるが、両者に共通しているのは、安全性を確保するために設定された設計上の終局限界状態を超える応答が生じたとしても、即座に倒壊などの重大な事態に陥らないようにする配慮を求めていると言える。このような配慮の例は、リダンダンシーやロバストネスの確保であるが、従来、構造設計においてそれらが陽に考慮されることはなかった。このため、例えば静定構造の単柱式橋脚と不静定構造のラーメン橋脚につ

いて、設計地震動に対する安全性照査を満足した場合には、両者は同じ耐震安全性を有していると評価されることになる。しかし、本来は、倒壊につながる限界の状態に対しては、ラーメン橋脚の方が高い安全性を有していると期待される。fibモデルコード2010では、ロバストネスに関する規定が設けられている¹⁹⁾。今後は、例えばレベル2地震動に対して終局限界状態を満足できる2つの構造形式があった際に、それらを単に経済性などで比較するのみではなく、4Rの視点を持ち、終局限界状態以降の挙動の違いを考慮して最適な構造形式が選択されることが望ましい。

6. まとめ

本論文では、「危機耐性」を考慮した耐震設計体系の構築に向け、道路橋示方書から読み取る危機耐性に準ずる思想や対応策を整理するとともに、国内外の構造設計における動向を踏まえた課題を抽出しようとするものである。本論文で得られた知見を以下に列挙する。

- 国内外の構造設計体系は、許容応力度設計法から限界状態設計法を照査手段とする性能設計法へと移行しつつあるが、限界状態設計法の枠組みの中では、想定した状態を超える事象が生起したときに引き起こされるシナリオを描くことが難しい。Risk-based designやResilience-based designへの移行が模索されている。
- 平成24年に改定された道路橋示方書では、設計上の配慮事項として、一部の部材の損傷等が原因となつて、橋の崩壊などの致命的な状態となる可能性について配慮して構造設計することが共通編の中で新たに規定された。これは、本論で用いている危機耐性と同様の考え方を示方書の中に取り込んだとみることができる。
- 耐震設計編における危機耐性を向上させる設計思想は、当該地域の防災計画と一体となった道路ネットワークの多重化や損傷を念頭においた復旧計画などの計画レベルの記述に加え、設計レベルとして、設計上の終局状態(耐震性能3)の設定、損傷発見・修復性を考慮することによる限界状態の設定、過度に耐震性の低い構造物設計可能性の排除、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、そして支承の破壊を念頭においた構造システムの選定と落橋防止システムの採用、に見ることができる。本論文ではこれらの技術と「危機耐性」の関係について、Bruneau et al.の4Rを用いて整理・分析した。
- 危機耐性を考慮した耐震設計体系の構築に向けては

リスクやレジリエンスの考えを参考にしながら、想定した限界状態を超える事態とそれが引き起こすシナリオの作成手順、さらには、そのシナリオを回避、あるいはシナリオに従い生じる影響を低減するためのハード・ソフト対策のメニューの充実、などが必要である。

- ・ 危機耐性に対する配慮をより実効性の高いものとするための課題として、より多様な性能マトリクス、あるいは性能の組み合わせが認められることが望ましい。また、リダンダンシーやロバストネスの確保を構造設計において陽に考慮するための手法の開発、などが挙げられる。

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 (1) 試案構築にむけての考察, 第 35 回地震工学研究発表会講演論文集, 講演番号 A11-824, 12p., 2015.
- 2) 土木学会 耐震基準等基本問題検討会議: 土木構造物の耐震基準等に関する提言 (第一次提言), 1995, <http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo1.html> (2016 年 1 月 14 日閲覧)。
- 3) 土木学会 阪神・淡路大震災対応技術特別委員会: 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996, <http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo2.html> (2016 年 1 月 14 日閲覧)。
- 4) 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, <http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3.html> (2016 年 1 月 14 日閲覧)。
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2012.
- 6) JCSS: Probabilistic Model Code, ISBN 978-3-909386-79-6, 2001.
- 7) ISO 2394: General principles on reliability for structures, International Standards Organization, Geneva, 1998.
- 8) ISO 2394:2015 (2015) General principles on reliability for structures, International Standards Organization, Geneva, 2015.
- 9) 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 丸善出版, 2012.
- 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) Bruneau, M., S.E. Chang, R.T. Eguchi, G.C. Lee, T.D. O'Rourke, A.M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W.A. Wallace and D. von Winterfeldt: A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 12) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, Wiley, 1996.
- 13) 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 丸善出版, 2012.
- 14) 土木学会: コンクリート構造物の安全確保のためのシステムに関する研究小委員会報告書, 2015.

(2015. 11. 9 受付, 2016. 1. 14 修正, 2016. 2. 20 受理)

ANALYSIS OF “ANTI-CATASTROPHE” PROPERTY IN JRA AND FOREIGN DESIGN SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES

Yoshikazu TAKAHASHI, Mitsuyoshi AKIYAMA,
Shojiro KATAOKA and Riki HONDA

As the lessons from severe damage of civil infrastructures due to Tsunami and ground motion in the 2011 Great East Japan Earthquake, “Anti-Catastrophe” concept can be a paradigm shift in structural / seismic design method. In a conventional design, seismic safety of a structural system is verified against “design” ground motion. But “Anti-Catastrophe” concept requests for structural designers to concern the possibility of catastrophic event caused by severe action unestimated in the design method. JRA Design Specifications for Highway Bridges was revised in 2012 and a principle similar to “Anti-Catastrophe” concept was adopted. In this paper, “Anti-Catastrophe” concept in the specifications is summarised and challenges are considered to produce effective measure in seismic design method based on the review of recent domestic and foreign trend of structural design.