

「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 —

本田利器¹・秋山充良²・片岡正次郎³・高橋良和⁴・野津厚⁵・室野剛隆⁶

¹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

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

E-mail: akiyama617@waseda.jp

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

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

⁴正会員 京都大学工学系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

⁵正会員 港湾空港技術研究所 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

⁶正会員 鉄道総合技術研究所 (〒 185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: murono@rtri.or.jp

設計で考慮された外力を越える外力に対しても耐性を持つことを要求する「危機耐性」という概念を耐震設計体系に組み込むことが求められている。「危機耐性」は従来の耐震設計で用いられてきた概念とは異なる点も多く、適切な設計指針(コード)化には課題も多い。本稿では、「危機耐性」に基づく耐震設計体系の構築にあたっての課題や問題点を分析し、既存の耐震設計との整合性を確保するための枠組みとして、新たに「カテゴリー2」という概念を導入することを提案し、また、それにもとづく耐震設計体系の枠組みも提案した。さらに、そのような新しい耐震設計体系の実効性を維持するために、行政が考慮すべき社会的条件について、リスクガバナンスの理論枠組みとして考え方をういて整理し、いくつかの基本的な方針を提案した。

Key Words: *Anti-Catastrophe, Seismic Design Codes, Unpresumed Extreme Events, After The 2011 Tohoku Earthquake*

1. 背景

東日本大震災以降、津波被害や福島原発の事例がきっかけとなり、極大災害に対する考慮という視点が大きく掲げられている。その中で、一部のインフラについては、被災後の復旧活動に果たした役割が注目された。

土木学会の報告¹⁾では、東日本大震災の災害対応の事例が紹介されている。例えば、有名な事例となった「くしの歯作戦」²⁾では、震災の直後に、翌日から被災地へのアクセスルートを迅速に確保したことが、多方面から評価されている。また、東北線が被災したことをカバーするため、内航海運、航空機及びトラック等の様々な輸送モードを利用して日本海側のルートを活用して支援物資輸送を実施した「F作戦」^{3),4)}も高い評価を受けている。

これらの事例では、被災による影響が限定的なインフラが、被災後の社会のレジリエンスの向上に資するということが認識されたといえる。

このような背景もあり、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)」⁵⁾では、設計で考慮する事象を越えた事象への対応を考慮する「危機耐性」という概念が提案されている。また、一部は既に鉄道構造物の耐震設計にも導入されている⁶⁾。

設計の想定を越える事態を考慮するということ自体は、技術者にとって、全く新しい概念というわけではない。技術的には、東日本大震災以前から利用可能であったものも少なくない。しかし、これまでは、どこまで実装すべきなのかの判断が難しかった。設計指針の要件として示されていなかったのも、会計検査等に代表される手続き的な合理性との整合性に配慮しつつ、実現するには技術者判断で行うしかなかった。

確かに、インフラ構造物の場合、税金を投じる公共性の高いものであるため、説明責任もある。しかし、従来のように、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では、技術者の負担が過大となり、また、費用が高額となる大規模な対応も難しい。そのため、「危機耐性」を実効性のあるものにするためには、その概念を整理した上で、耐震指針指針等として具体化しておく必要がある。この点を踏ま

²⁻⁶ 第二著者以降は貢献度は同等なので、五十音順に表記した。

え、本稿では、「危機耐性」を実現させるための耐震設計指針や耐震設計基準に求められる点について、その理由とともに整理した。

2. 危機耐性

(1) 「危機耐性」の社会性

「危機耐性」に相当する設計の考え方については、設計で考慮してきたレベルを超えた場合にも「粘り強く」耐える、というように理解される。ただし、それは、単に「壊れないように強くする」というだけではない。

例えば「くしの歯作戦」について、東北地方整備局は、これを実現できた要因として

1. 道路啓開の展開方法を明確にしたこと
2. 災害協定に基づき、迅速に地元業者の協力が得られたこと
3. 橋梁の耐震補強対策が進んでいたことにより、被災の程度が小さかったこと

の3点を挙げている。これは、インフラの被災が致命的でなかった場合に、復興過程において重要な役割を果たしうることを示しており、インフラの「危機耐性」の成果を例示するものである。ただし、構造物の被害を抑えることがその要素としてあげられている一方、それだけでないことに留意すべきである。

また、「F作戦」^{3),4)}においても、災害発生時に、冗長性を有するインフラネットワークが大きな役割を果たすことが示されている。これも、管理者の異なる複数の輸送モードが連携してはじめて可能となっており、インフラが壊れないだけでは実現しなかったことに留意すべきである。

このように「危機耐性」は、社会全体が有する災害対応能力とも関係する概念と考えるべきものである。

(2) 定義

ここでは、耐震設計における「危機耐性」の定義を整理する。「危機耐性」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

と定義することができるだろう。ここで、「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」となる。

東日本大震災をはじめとする事象から明らかになったことは、土木構造物の置かれた環境における不確実性の大きさは深刻なものであるということである。このような不確実性に対処するために、ある程度の余裕

を確保することは過剰な設計とみなすべきではないだろう。しかし、不確実性へ対応と経済的な効率性はトレードオフの関係にある。経済合理性の追求や説明責任の明確化が重視される潮流の中、性能にどの程度の「余裕」を確保するのか、といった意思決定に必要な根拠を明確化することが重要である。

考え得るあらゆる事象に対して万全の対策をとるのは過剰であろう。しかし、様々な不確実性が不可避であり、それを把握することもまた不可能であることを鑑みれば、そのような不確実性に起因する状況においても深刻な被害が生じないように、謙虚かつ真摯にとりくむことは、技術者としての責務であると考えられる。

(3) 対象とする領域の拡張

危機耐性は、従来の耐震性能では明示的に扱ってこなかった面を考慮に入れるものであり、概念を拡張するものである。考え方を整理するために、以下に示すようなa)事象、b)時間、c)空間、という3つの軸が考えられる。

a) 事象の拡張～損傷後の局面の考慮

巨大な津波に対する防潮堤や防波堤の効果についても理解が進み、設計津波を超える規模の津波に対しても、津波減災効果を発揮できる「粘り強い構造」^{7),8)}等が提唱されている。

耐震設計においても、設計で用いる外力よりも大きい外力に対する構造物の応答の重要性は認識されており、「粘りのある構造」⁹⁾等の考え方が提示されている。

これらは、被災・損傷した後のインフラがどのような挙動をみせるかという、従来の設計では明確に考慮していなかった事象を考慮し、それらへの対応をとることを求めるものである。「危機耐性」を考えるにあたって最も重要な考え方の一つである。

b) 時間の拡張～レジリエンスの考慮

東日本大震災後、レジリエンスという言葉がよく聞かれるようになった。しかし、以前から、災害をはじめとする様々な分野で、Resilienceの議論^{10),11),12)}はあった。

地震工学分野ではBruneau et al.¹¹⁾の、社会の地震への対応力(Resilience)を定量的に評価する枠組みの提案があげられる。そこでは、概念として、社会の有するインフラの機能する率を $Q(t)$ と定義し、図-1に示されるように、

$$R_L = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

というResilience Lossの評価関数を設けている。その後、Resilienceそのものを定量化するものとして

$$R = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt \quad (2)$$

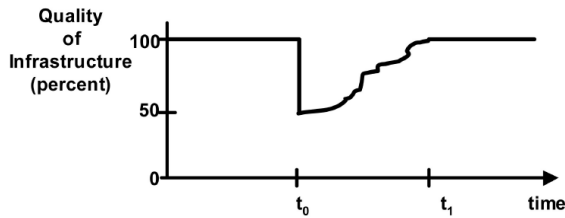


図-1 被災後のインフラの性能(%)の時間的変化の概念図。
 t_0 が被災時を表す。Bruneau et al. (2003)¹¹⁾より引用。

等が提案されている¹³⁾。いずれも定式化はシンプルであるが、「被災後」という時間を明示的に考慮しており、被災後の復旧・復興過程におけるインフラの貢献が評価されている。したがって、それに資する条件を、被災前の設計で認めることが求められると考えられる。

c) 空間の拡張～拡大したシステム領域の考慮

従来の設計において、基本的にインフラ構造物単体について考えていたものを改め、そのインフラの属する地域社会における位置づけや行政組織との関係性など社会的な状況を考慮するという意味での空間的な拡張と、他のインフラとの連携によるインフラネットワークとしての機能を考慮するというシステム領域の拡張、という二面を考えることが必要であろう。

なお、レジリエンスという言葉こそ使われていないが、土木学会の第二次提言¹⁴⁾においては「システムとしての地震防災性」が言及されており、第三次提言¹⁵⁾では「地震動に強い社会基盤システムの構築」が提唱されている。システム領域の拡張という視点はこれらと整合するものである。

この「システム」の範疇はどのような性能を要求するかによって変わる。例えば、落橋防止装置を議論する場合には、橋梁というひとつの構造物をシステムと見なすことになる。防波堤や防潮堤の場合、L2津波の時には、住民が避難することを前提に社会としての危機耐性を評価している。この場合には、避難が前提になっているので、システムは防波堤や防潮堤を含む津波の影響範囲となる。同様に、交通網の代替性を議論する場合には、システムとしては広域な道路ネットワークを考えることになる。

このように、ひとつの構造物に対してでも、複数のスケールでシステムを定義されることがあると考えることが求められる。

(4) 既往の耐震性能との関係

ここでは「危機耐性」と、既存の耐震設計の関係について整理する。

「危機耐性」は、狭義の耐震設計で規定された外力

が、事象的、時間的、空間的に拡張された想定に対して、機能を確保するものである。つまり、「危機耐性」の概念は、従来の耐震性能の構成要素である「安全性」、「使用性」、「復旧性」を高めた性能を内包するものとして定義されることができると考えることができる。「使用性」と「復旧性」は、それぞれ「供用性」と「修復性」ともよばれるが、本稿では「使用性」と「復旧性」の語を使う。

なお、ここで用いられている「安全性」、「使用性」、「復旧性」は、耐震設計の中で、規定された外力に対して要求される性能として具体的に定義されている概念である。つまり、一般的な意味での「安全であること」、「使用できること」、「復旧しやすいこと」ではない。むしろ、「安全性能」、「使用性能」、「復旧性能」と呼ぶほうが適切かもしれない。

若干異なる概念に、同じ「安全性」という言葉を用いているために混乱しやすい表現となってしまうが、落橋防止装置のように、非常に大きい(すなわち設計指針で規定されたものより大きい)地震動が作用した場合に、ある程度の「安全性」を実現する事は、「危機耐性」を実現するものといえる。また、被災後に短期間で供用を再開できるように環境を整備された構造物も、「復旧性」を確保することで、「危機耐性」を有していると言えるだろう。「使用性」についても同様である。ただし、本稿では、一般的な呼称に従い、以下でも「安全性」、「使用性」、「復旧性」と呼ぶこととする。

なお、「危機耐性」は、従来の耐震設計の概念を拡張したところにあるが、従来の概念とは区別されるものである。したがって、「安全性」、「使用性」、「復旧性」とは独立であり、これらに追加される性能と考えるべきである。

つまり、設計では、考慮する状況において、構造物の重要度や特殊性によって、「安全性」、「使用性」、「復旧性」、「危機耐性」を選択的に付与することが可能になる。例えば、「安全性」や「復旧性」は低い、それでも危機耐性は有している構造物もあり得ることになる。そのような構造物は、被災により安全性を失った場合にも、危機耐性によってバックアップされ、一定の機能を果たすことが可能となる。

これは、例えば、補強の難しい既存構造物の「耐震性能」の考え方を議論するうえでは有用になることも期待される。

(5) 類似する他の概念との関係

耐震設計では、言及しているレジリエンス以外にも様々な概念が提案され議論されてきている。本稿で提示している考え方は、当然、それらと矛盾するものではない。しかし、同一であるわけでも無いので関係性を簡単に整理しておく。

前述した Bruneau et al.¹¹⁾ では、レジリエンスを構成する要素として、以下の“4R”を挙げている。

Robustness (ロバスト性) : strength, or the ability of elements, systems, and other units of analysis to withstand a given level of stress or demand without suffering degradation or loss of function.

Redundancy (冗長性) : the extent to which elements, systems, or other units of analysis exist that are substitutable, i.e., capable of satisfying functional requirements in the event of disruption, degradation, or loss of functionality.

Resourcefulness (機略性) : the capacity to identify problems, establish priorities, and mobilize resources when conditions exist that threaten to disrupt some element, system, or other unit of analysis; resourcefulness can be further conceptualized as consisting of the ability to apply material (i.e., monetary, physical, technological, and informational) and human resources to meet established priorities and achieve goals.

Rapidity (迅速性) : the capacity to meet priorities and achieve goals in a timely manner in order to contain losses and avoid future disruption.

(単語の翻訳は著者による。)これらは、その後、White paper on the SDR grand challenges¹⁶⁾ や、Renschler ら¹⁷⁾ に引き継がれ、社会的な能力の評価をめざす方向性へと展開されている。これらの研究では、被災後の回復の速さや被害の程度により、式(2)における R の値が変わる。つまり、被災後のイベントの評価に時間軸を設けていることになり、迅速に復旧を実施すること（それを実施できる能力）等の効果が考慮されることになる。

「危機耐性」の目標にも社会的なレジリエンスの実現は含まれ、上記の4Rはいずれも「危機耐性」を議論する場合にもそのまま用いることができる。

Robustness (ロバスト性) は、様々な不確実要素の影響により設計上規定されている状況を越えた場合にも耐えるという性能であり、不可欠であるといえる。同様に、Redundancy (冗長性) も、被災により損傷した場合でも機能を代替する仕組みを有したり、耐力に余裕を有することで大きな外力の作用する場合でも、機能をすべて失うことのないようにするものであり、「危機耐性」を実現する上で検討すべき性質である。Resourcefulness (機略性) は、災害により生じた状況に対応して、対応戦略や組織体制等を判断することができ、また、それを実現するための人的・物的な資源を有することを意味しており、マネジメントにおいて重要となる。Rapidity (迅速性) は、既存の耐震設計において、復旧性として導入されている考え方に近い。時間的な制約を陽に考

慮しているという違いはあるが、ほぼ同様の考え方である。

“4R”で表される要素は、「危機耐性」を分析する上でも有用である。ただし、「危機耐性」の実現のためには、上記の4つの要素を個別に考えて構造物の機能を担保するというだけでは不十分である。個々の要素を満たすというだけではなく、それらを統合して災害時のインフラの機能性を高めるという視点が求められる。

なお、Resilience は、2.(3)の軸で言えば主に「時間」軸に関するものであるが、「危機耐性」では、事象軸や空間軸での拡張も考慮し、二次災害の防止や復旧・復興への貢献といった社会やコミュニティへの波及影響を考慮して目標を明確にして運用することが求められる。Fail Safe (フェイルセーフ) も挙げられる。耐震設計の場合、考慮すべき事態は、Fail (誤動作等) というものではないので必ずしも同一ではないが、そのような場合を考慮した対策をとるという意味では、「危機耐性」に近いであろう。類似する概念には Fault Tolerance もある。これは、損傷時でも機能を縮小もしくは限定して持続させるという意味であり、Redundancy (冗長性) に近い概念であるといえる。

また、レジリエンスよりも広く普及している概念として、Sustainability (持続可能性) も挙げられる。社会が災害を乗り越えて持続するという意味では、同じ目標を共有している概念である。ただし、両者の関係についての議論では、両者は補完し合う関係にある¹³⁾と考えるのが適当であろう。構造物の劣化のような長期的な事象に対して Sustainability で考慮し、災害による被災のように希に生じる短期的な事象に対しては Resilience で考慮するということになる。

(6) 危機耐性の帰結としての信頼性

危機耐性は、いわゆる「想定外」の事象への対応を考えたものであり、従来よりも設計震度を大きくする、というような従来の耐震設計の延長上にある概念ではない。

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、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。

土木学会の第三次提言¹⁵⁾の解説においては、「現実的な」断層パラメータに基づくレベル2地震動の設定を推奨しており、「最大級」の地震動とは必ずしも極限を意味しない」と述べている。第3次提言におけるレベル2地震動設定の考え方をより具体化した「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁰⁾では、内陸地殻内地震を対象としたレベル2地震動の設定においても、アスペリティの応力降下量としては平均値を用いている。

したがって、それを越える可能性は否定されない。道橋橋示方書²¹⁾や鉄道標準⁹⁾で用いられるレベル2の設計スペクトルも、それを越える可能性はあるものと理解されている。

また、地震動の大きさ以外の要因もある。人工物の場合、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。特に、土木構造物の場合、施工時の状況、使用環境、経年劣化等、多様な不確実性の要素が関与し、また、社会的な要請も時代や非常時の状況により様々に変わりうる。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も考えられる。重要なインフラには、このように様々な不確実要素が存在する環境においても、一定以上の性能が保証されるという信頼性が求められる。これはまさに「危機耐性」が目指す性能である。

このような考え方は、耐震設計に限らず、構造物の設計全般において共有されるべきものであろう。ただし、以下の議論では、具体性を持たせるため、対象を耐震設計に絞るものとする。

3. 危機耐性の実装にあたっての要件

ここでは、「危機耐性」を、耐震設計の指針として具体化する際に考慮すべき要件として重要なものについて述べる。

(1) 性能設計の枠組

インフラ構造物の設計は、仕様規定型ではなく、性能規定型の設計、つまり、性能設計が主流となりつつある。「危機耐性」のための設計も性能設計の枠組みで実現されるべきであろう。ただし、「危機耐性」の考え方は、本来、性能設計と親和性が高いため、特に問題となるわけではない。想定される「危機」において、物理的条件や社会的条件等の様々な条件を考慮したうえで、従来の耐震設計との連続性も考慮しつつ、当該構造物がどのような機能を持つべきかを定めれば、それがすなわち「性能」であるからである。

また、ひとつの「性能」に対して、同等の効果が期待される対策や工法は複数存在し、それらを、社会的環境や物理的な条件等に適合するよう修正し、組み合わせることで効率的にできるだけ高い性能を実現することが求められる。とりうる選択肢は多様となり、仕様を固定化することは、現実的ではない。したがって、設計手法としても、性能設計の手法や枠組みを活用したものとすべきである。

(2) 定性的評価

狭義の設計での想定を越えた局面（フェーズ）での事象については、これを、数値解析や実験により、力学的に、対策の有効性を確認できることが望ましい。ただし、新規性の高い対策については、実践的な検証方法が確立されていない場合もあり、現状の設計技術ですべてを定量的に検証できるとは限らない。そのような場合に技術開発を進めることが重要であることは言を俟たないが、利用できる適当な技術がない場合には、有効性の検証が定性的となることを認めるべきであり、定量的な検討が出来ないことを理由に対策の導入を妨げるべきではない。

(3) 既存の耐震設計との両立性

現行の耐震設計は、過去の地震被害の分析等の様々な知見の蓄積を反映させたものであり、我が国の地震被害を低減させてきたという実績もある。そのような既存の耐震設計体系に対して、新しい概念を導入することで、混乱を生じさせたり、弱体化させたり、というような影響を与えることは望ましくない。「危機耐性」の概念を導入するにあたっては、既存の設計体系との両立性に対して十分な配慮をするべきである。

(4) 客観性

ここまで述べてのように、「危機耐性」を考慮するにあたっては、地震外力の設定の有無、地震外力を考慮する場合のその大きさ、対策の有効性の確認方法等が、指針に明示されていないものとなることが考えられる。その場合に、説明責任を果たせるよう、客観性を確保する仕組みが必要となる。様々な情報の公開や、第三者による審査または評価等を含め、具体的な制度等の導入を検討するべきである。

4. 「カテゴリー」区分

「危機耐性」の考え方の実装として、2.(6)で前述した信頼性という面から考えてみたい。

狭義の耐震設計では、規定された安全性等を実現するための設計が求められる。

一方、「危機耐性」としては、様々な不確実性に対応する信頼性が要求される。従来の設計では特定の外力に対して損傷が限定的であることが求められるが、「危機耐性」では、構造物の劣化など様々な未知の要因に対しても耐えられることが求められる。

前章までの議論をふまえ、2.(3)で挙げた事象、時間、空間の軸等を参考にとすると、危機耐性を考慮した耐震設計は、従来の耐震設計とは以下のような点で異なると考えられる。

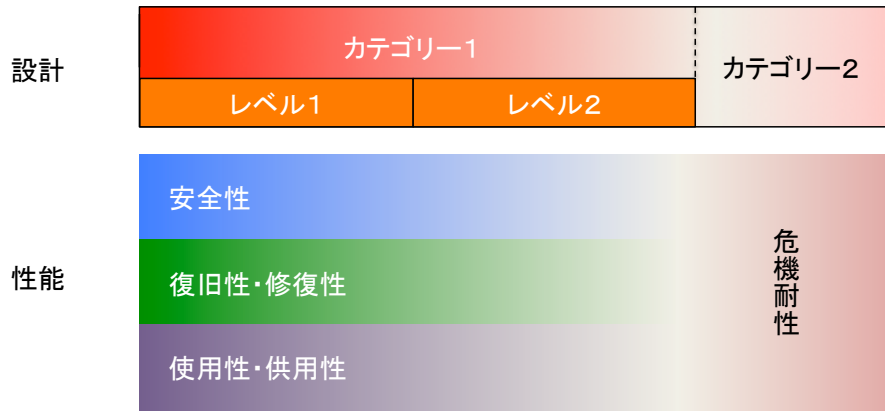


図-2 「危機耐性」と耐震設計カテゴリーの関係性

- 1) 十分な耐震性を実現するとされる耐震設計で考慮する範疇を越えた性能を検討する。しかも、その有効性が定性的に判断される場合も少なくない。
- 2) 被災後の時間枠組みを考える。そのためには、被災後の周辺環境や、当該インフラの被災後の役割等について検討する必要がある。そのためには、さまざまな仮定を設けたシナリオ分析などの検討も必要になる。その検証は上記1)以上に、厳密な根拠を得るのは難しい。
- 3) 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を対象とする。そのためには、耐震設計の「上流」での意思決定を調整する必要がある場合も多い。

このように、従来の設計と、危機耐性のための設計では異なる点も多い。実際の運用においても様々な違いがあることが予想される。そこで、両者の違いを明確にするために、「カテゴリー」という区分を設け、従来の設計を「カテゴリー1」、「危機耐性」等を実現するための設計を「カテゴリー2」と呼ぶことを提案する。

ただし、設計基準に於ける「カテゴリー2」と、耐震性能としての「危機耐性」を同一視すると、現行の耐震設計との不整合が生じる。これは、既往の耐震設計においても、既に、危機耐性の考え方に準ずる技術が入っているからである。そのような技術の例については、既報^{18),19)}で詳細に紹介されているが、それらの技術を適用する設計を、厳格にカテゴリー2に含まれるものと位置づけてしまうと、カテゴリー1に依拠する設計では不要と判断されることになる。カテゴリー2は、すべての構造物に適用するものではないことを踏まえると、現行の耐震設計の体系の中に組み込まれている技術が、「あえて使う必要の無い技術」と認識されてしまうかもしれない。そのような状況は避けねばなるまい。

以上をふまえ、設計の概念における「カテゴリー1」と「カテゴリー2」の境界と、性能の概念における「安

全性」等と「危機耐性」の間の境界は、完全には一致させず、曖昧さを残すことを許容するのがよいと考えられる。

この概念を図に示すと図-2のようになる。図では、上段が実務的な「設計」の区分、下段が「耐震性能」の概念を表している。

下段で、左側は、狭義の耐震設計で考えられている耐震性能をあらわし、それは安全性、復旧性、使用性という3つの要素から構成されている。これらと右側の危機耐性との間は連続的に変化しており、その区別は明確ではない。この下段については、2.(4)における議論と整合していることが確認できる。

一方、上段では設計コンセプトが整理されている。カテゴリー1は、レベル1及びレベル2といわれる設計を包含している。また、カテゴリー1とカテゴリー2を区別する線(図では点線)は、下段の危機耐性の領域上に位置している。これは、危機耐性の一部は、カテゴリー1に含まれうるということを意味している。

実際の設計指針で、カテゴリー1と2の境界をどのような技術レベルに設定するかは、対象とする構造物の種類や重要性、社会的条件(例えば、既存のインフラの耐震性、想定すべき予算規模、等)や物理的条件(想定される地震の規模や発生確率等)によっても変わると考えられる。この点については、設計指針の作成主体、つまり、管理者の判断に委ねられるべきものであろう。

5. 耐震設計の枠組み

ここでは、危機耐性を考慮した耐震設計の体系化を試みる。設計指針そのものではなく、設計指針を作成するための枠組みの提案である。

まず、手順としては以下の5段階が考えられる。

1. 設計条件 要求する性能の規定

2. 状況設定 被害形態や入力地震動の想定
3. 構造計画 設置位置, 構造形式等の設定
4. 構造設計 詳細な設計
5. 評価・検証 上記1~4の各項目が満たされていること, 及び, それらの間の整合性の確認

以下, 上述した5つの段階について述べる.

なお, カテゴリー1は基本的に既往の耐震設計と同じ内容であるが, カテゴリー2の位置づけを明するため, カテゴリー1についても適宜言及する.

(1) 設計条件

危機耐性の考え方は, 性能設計と整合的であると考えられる. 性能設計の枠組みを利用して実現できる. そのために, まず, 構造物で実現すべき性能を規定する.

設計条件は, 設計の根拠となる重要な段階である. 社会的ニーズ等もふまえて設定すべきものであるが, 予算や地理等の諸条件をふまえた実現可能性を持つ必要がある. そのため, 設計条件の段階で, 設計の全工程を検討し, 適切な内容とする必要がある.

まず, 構造物に求められる性能を定めるための前提条件を明確にする必要がある.

「危機耐性」に相当する条件を議論するにあたっては, 経験的な知識だけに依拠するのではなく, 2.(3)で挙げた事象, 時間, 空間の3つの軸なども考慮して理論的に分析した上で, 要件を明確にする必要がある.

ここでは, 重要性, 物理的環境, 社会的環境の3点について考慮する.

重要性 当該インフラの重要性とは, 社会的位置づけであり, 具体的には, 平時や災害時に求められる役割から決まる. 「危機耐性」を考える事態となるときは, 広域的に被災していることも想定される. ローカルな被害とは別に, 広域のレジリエンスという観点からも見なければならない. 例えば, 広域の流通に寄与する幹線交通である場合, その流通系の重要性をふまえたうえで当該インフラの役割や重要性を判断する必要がある.

物理的環境 物理的環境としては, 地震環境や地盤条件等が挙げられる. 従来の設計と大きく異なるものではなく, 活断層の有無や過去の地震記録, 地盤条件や地震動増幅特性, 液状化強度等, 現行の耐震設計でも考慮している要素を考慮する.

社会的環境 社会的環境の考慮は従来の設計と最も異なる点である.

インフラは, 被災後の社会に残存する機能を活用するために必要な機能を保持することが求められる. つまり, 社会の災害対応能力に応じて変化するべきである. 例えば, 復興過程における対象インフラの役割の分析とそれを実現するための要件の確認, さらに, そ

のような性能を維持するための管理戦略や必要な予算措置等の政策の妥当性等も考慮する必要がある.

災害時の役割を明確化するため, 地域防災計画等との関係を吟味することが必要となる. 「危機」が生じるような状況では, 構造物の被災も避けられないため, 迅速に復旧できる社会システムとしての機能を維持もしくは支援することが重要となると考えられる.

復旧性は従来から考慮されてきているが, 「危機耐性」を議論するにあたっては, 社会的環境についても, ある程度までは考慮することを目指すべきであろう. 東日本大震災で「くしの歯作戦」をはじめとする様々な事例で見られた迅速な対応には, 行政の意思決定, 災害協定に基づく民間業者との連携等, 様々な組織的な要素も不可欠であった. 設計時に, そのような社会的な環境も考慮すべきである.

同様に, 平時から構造物の性能を維持するための社会的, 組織的な要件も考慮する必要がある. 例えば, モニタリングデータの有無や品質, 維持管理体制や災害対応体制の有無, 必要な予算等も考慮に入れた耐震性能評価という枠組みを考えることで, 波及効果や外部条件等も「危機耐性」の意味での「耐震性能」として考慮できるようにするのが望ましい.

これらは, 構造物の力学的な挙動とは関係しないものであるが, 4Rとして挙げた要素のうち, Resourcefulness(機略性)にあたる部分であり, 重要であろう.

ただし, あらゆる仮想的な事象に対して, 一律に無疵で耐えるという強度の確保は合理性を欠く. 影響の小さい構造物の場合等に「危機耐性」を考えないという判断も認められるべきであることを確認しておくことが望ましい.

カテゴリー1 従来のL2地震動への対応に相当する耐震性能を考えれば良い. たとえば, 土木学会の第二次提言¹⁴⁾では, 「レベル2地震動に対する耐震性能」として, 「重要な構造物および早期復旧が必要な構造物は, 損傷が発生したり, 塑性変形が残留しても, 地震後比較的早期に修復可能であることを原則とする。」とされており, 構造物の重要性を鑑みたうえで, 物理的環境や社会的環境に適合した性能を与える形となっている.

カテゴリー2 地震環境等の物理的環境や当該構造物の重要性や社会的な役割等をふまえ, 復旧性の確保や非常に高い安全性等の重視する方向性を定め, たうえて, 合理的に予想される被災後の状況を想定して要求性能を設定する. 損傷しても致命的な状況にならないようにするための構造工学的な対策や, 非常に迅速な復旧を可能とする技術の利用可能性, さらに, 必要であれば, インフラの維持管理状態や対応可能な建設業者の確保の可能性等

も考慮に入れることを求めることも考えられる。

(2) 状況設定

従来の設計では、レベル1地震動やレベル2地震動に力学的に対応することが基本であった。「危機耐性」を考える場合、安全性を確保するために設計により外力や構造物の性能を考慮する範囲を超える領域を想定することになる。このとき、事象、時間、空間のそれぞれの軸、または、それらの組み合わせを考慮して、状況を設定する事が出来る。

耐震設計は万全であるが、万が一被災したら対応する、という防災意識ではなく、はじめから、「壊れたときのシナリオ」を考える。そのために、複数の「災害シナリオ」を想定し、被災前から後にかけての一連の流れの中で、当該構造物の被害や復旧等を、なるべく具体的に説明することを求めたい。

設計で想定する領域を越える事象としてどのような状況を想定するのかについては、個別の事案毎に検討する必要があるが、外力の不確実性にせよ、構造物の不確実性にせよ、どのような構造被害が生じるのかを検討することは不可欠であろう。

まず考えられるのは、L2を越える地震動が生じる場合である。例えば、道路橋示方書の解説²¹⁾でも、レベル2地震動を「上回る地震動が生じる可能性もある」と記されているように、現行の耐震設計でも考慮されているが、具体的な対応は必ずしもとられていない。具体的には、非常にシビアな条件で強震動シミュレーションを行い、設計で用いた応答スペクトルを越える地震動を合成し、対象とする構造物の解析に用いることが考えられる。

しかし、そのような状況における構造物の挙動を評価することは容易ではない。実験的に検証することができる事象もあるが、それは限られている。また、数値解析によって評価することも非常に難しい。今後は、そのような事象に対する実用的な技術開発も進められることが求められよう。

ただし、詳細な構造解析等を実施せずとも、構造力学的な考察等から十分な確度で被害形態を推定できるのであれば、それでも十分である。その場合、構造被害を検討するための手段として、考慮すべき地震動を越えた外力が作用した状況を考えることは有効である。構造物の中で弱点となり得る箇所を知り、そこが破損した際に生じる構造被害を推定するためには、大きさを割り増した地震外力を作用させた場合の挙動を解析することも有効である。

これは、相対的に脆弱な箇所を検出するためのストレステストであり、その目的で用いる地震外力は、構造物の管理で考慮する地震外力とは、その意味が全く

異なるものである。若干極端な表現をすれば、大きければ良く、地震学的な根拠を有する必要は無い。もちろん、有意義な検討をするためには、全く科学的な根拠の無い地震動を考慮するよりも、ある程度の科学的な根拠をもって設定された地震動を考慮することが望ましい。したがって、地震学等の知見に基づき、震源断層の諸元や、地盤条件、地下構造などを適切な形で考慮し、強震動シミュレーションによる地震動推定等の技術を活用することが推奨される。しかし、それは「最悪シナリオ」のような有意な実現可能性を示唆する地震外力として見なされるべきものではなく、あくまで、仮想的な外力として位置づけられるべきである。

そのため、安全性等の照査を技術者が義務づけられるのは、L2地震動への対応までとする。「危機耐性」は、あくまで仮想的に、それを逸脱した状況を考えるものであり、この領域で想定される状況に対して、対処義務や管理責任のような法的な責任を求められるものではないと明確に位置づける必要がある。

なお、設計外力と構造評価手法(構造モデル)はセットで考える必要がある。従来の設計震度や設計スペクトルは、設計指針で示されている構造モデルや構造解析手法を念頭において提示されていると解釈すべきである。設計指針で規定されている外力を盲信してそのまま動的解析の入力の設定等に適用することが適当であるとは限らない。例えば、スペクトルフィッティングした波形に対して、スペクトルの「谷」にあたる固有周期を有する構造モデルを用いて動的解析を行う等の「小細工」をすれば、実質的な耐震性能が低い構造物を作ることとも可能となってしまう。そのような穴をつくのは、技術者判断として不適切といわざるを得ず、それを避けるための対策が必要であろう。

上記の目的を明確化するため、設計としては、以下のような分類を考える。

カテゴリー1：従来の知見と工学的判断に基づく詳細設計地震動、すなわち、L1～L2地震動が作用する状況を想定する。

カテゴリー2：工学的判断により、カテゴリー1で考慮した状況を越えて構造被害が生じる状況(被害形態や損傷部位)を想定する。必要に応じて、考えるべき構造被害を検討するための「ストレステスト」を行う。この際には、仮想的な強い地震動を用いた解析を行うことも有効である。また、必要に応じて、広域的な被災を想定して、インフラを単体ではなくシステムとしてとらえた場合の状況も想定することが望ましい。

(3) 構造計画

適切な「危機耐性」を実現するには、詳細設計をする局面での判断や工夫だけではなく、より上位の意思決定の段階で、災害環境、社会環境、設計条件等をふまえ、設計の基本的方針を適切に設定することが必要となろう。

地域防災計画の実現に求められる役割や、予想される被災状態、復旧（供用の再開）に必要な作業や人的・物的資源、ストレステストによるシビアアクシデントの想定、等の検討結果を参考に、計画段階で実施できることを適切に実施する。

概念としては様々なものが考えられる。

- 損傷後も安定性を有する構造：例えば、全自重を支えられる強度を有する落橋防止構造等が考えられる。
- 条件変化に鈍（ロバスト）な構造：外力の変動に対する感度が低いと言う意味での robustness に加え、想定と異なる条件化での挙動の予想が可能という意味での robustness も含む。
- 超高強度構造：例えば、その地域で最大と想定される外力（カテゴリ 1 に相当する。通常、周囲の構造物はこの程度以下の外力に対して設計されていると想定できるだろう。）よりもはるかに大きい外力に対して、弾性挙動で耐える構造物は、事実上、設計の範囲を越えた状況に対応できると判断できる。

地域防災計画、当該インフラの役割、社会環境、物理的条件、地理的条件等を踏まえ、カテゴリ 1、カテゴリ 2 のそれぞれに対して定められている性能の実現を後押しするための条件を整理する。そして、構造強度に期待する性能、被災後の挙動における機能と性能、復旧のための要件等をふまえ、建設場所や構造形式、留意すべき点などを明確化する。

カテゴリ 1：従来の耐震設計に求められる性能（基本的には、「使用性」・「安全性」・「復旧性」から構成される耐震性能）を実現するための条件（構造形式等）を明確化する。

カテゴリ 2：万が一、設計指針で要求されている耐震性能を失った場合の性能（「危機耐性」と、それを効率的に実現するための要件を明確化する。

(4) 構造設計

実質的には、既往の設計の作業に近い。構造や流体を含む様々な力学的考察に基づき、上で規定された「性能」として構造物に求められる機能を実現するように、詳細部分までを設計する。

カテゴリ 1：基本的には、従来の設計と同じである。設計で想定した耐力を実現するための技術等の適

用を実現するものである。ただし、「危機耐性」的な性格を有するが、現在の耐震設計でも既に広く受け入れられている技術（例えば、落橋防止装置等）については、カテゴリ 1 の設計技術として示し、その採用を積極的に勧めるようにすることが望ましい。

カテゴリ 2：当該の構造物の被害が、構造力学的もしくは社会的にみて、深刻な局面へと進展するのを防ぐために機能する手段を提案する。最新の科学技術に基づく先端的技术を、十分な信頼性を担保しつつ、導入していくことが期待される。そのような技術には、技術者の有する形式知化されていない知見、またはそれに基づく技術者判断を活用した技術等も含まれる。

そのような技術の有効性を検証する方法の基本的な考え方や手法の枠組みは提示されていることが望ましい。中には、力学的な定量的評価ができないもしくは困難なものもあるが、本当に有効であると考えられる技術は、その導入を妨げるべきではない。何らかの根拠を示して導入できるような仕組みを用意するべきであろう。

(5) 評価・検証

この段階は、意図した通りの設計が実現できているかを判断するものであり、現行の設計で、力学的特性が条件を満たしていることをチェックする「照査」に相当する。ただし、カテゴリ 2 で扱う要素については、構造力学的な検証だけではない。設計の (1)~(4) までの各段階の整合性や信頼性を確認する事が求められる。例えば、(1) の「設計条件」で提示した復旧性の実現可能性に対して、技術的、組織的な観点からの判断をしたり、(2) の「状況設定」で危機として想定した破壊モードに対する対策の有効性についての力学的判断をしたりすることが求められる。

なお、優れた技術者の判断や技術が構造物の耐震性を高める事例は少なくないが、なかには定量的に評価しにくいものもあるため、これを、しっかりとした検証の上で導入するための制度的枠組み仕組みを設けることも重要である。

社会的条件については、費用便益分析等の定量的な手法が数多く提案されている。土木学会第三次提言¹⁵⁾においても、「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」としたうえで、「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、「カストロフ回避便益を適切に評価する方法を開発する」ことを求めている。ただし、現時点でカストロフ回避便益を評価

する方法論は開発されておらず、定量的に評価することは難しいと言わざるを得ない。

震災後の方針としても、「施設の重要度や費用対効果等を踏まえて」(防波堤の耐津波設計ガイドライン⁷⁾)や、費用便益分析を重視することの言及は続いている。しかし、カテゴリ-2で導入されるような技術に対して定量的な評価は難しい。当面は、考えられる状況を反映したシナリオに基づき、定性的評価も活用して意思決定をするべきであろう。

カテゴリ毎に、満たすべき性能が大きく異なるため、その評価/検証方法も異なる。

カテゴリ-1 : いわゆる「照査」であり、規定された外力に対して、力学的な手法に基づき、定量的に検証する。

カテゴリ-2 : 危機耐性に関する諸条件が整合的であり、当該の案が実現可能かつ有効である事を、力学的、工学的、実務的な考察等に基づいて確認する。力学的観点から想定される損傷シナリオや、復旧活動や避難等の社会への波及効果等を考えたシナリオなど、複数のシナリオを想定し、そのなかで、有効性を評価、確認する。

(6) 設計手順について

設計条件から評価・検証までの段階は、基本的には、この順番に行われるものであろう。ただし、それは、作業上の手戻りを妨げるものではない。これらすべての段階は互いに整合のとれたものである必要があり、そのような整合性を実現するためには、他の段階を修正することも必要である。

例えば、求める「性能」を規定する「設計条件」は、いわば設計の要旨である。それは、努力目標であるかのように扱われてはならない。「設計条件」をみれば当該構造物の「耐震性能」が分かるように、両者は一致していることが必要である。詳細な設計の段階で、当初設定した「設計条件」を満たすことができないことが判明した場合には、再度検討し、整合のとれる「設計条件」に修正したうえで、設計全体の整合性を再度確認する必要がある。

実際の運用にあたっては、最終アウトプットについておおよその見積もりを持ちつつ、各段階の検討を行うことが必要になる。

6. 運用について～リスクガバナンスの視点から

(1) リスクガバナンス

「危機耐性」は、従来の設計と異なり、構造物の被災・損傷を認めるところから議論が始まる。つまり、社

会にリスクを共有することを求めるものである。したがって、そのリスクを正しく理解してもらい、受容してもらう必要がある。

また、「危機耐性」のための設計手法は、従来の手続き的合理性を重視できた設計体系と異なり、自由度が高く、定量的な根拠だけによらない判断に依拠する点も多い。誤った運用をすれば負の効果をもたらすという危険性もある。

このようなリスクを克服しつつ、「危機耐性」を実効性のあるものとするには、行政が管理をして耐震性を保証するという従来の枠組みとは異なり、社会全体が判断して、必要な安全基準を設定、実現していくという内生的(endogenous)な仕組みが必要となる。実際の運用にあたっては、ステークホルダーの合理的な判断に基づく意思決定が不可欠であり、その判断基準は社会的に受け入れられることが重要である。

リスクマネジメントについては、組織論的なアプローチとして、Reason²⁴⁾らの研究をはじめとして多くの研究がある。近年では、Hollnagelら^{25),26)}が、より内生的なメカニズムを重視した、Resilience Engineeringを提唱している。Resilienceを、

The intrinsic ability of a system to adjust its functioning prior to, during, or following changes and disturbances, so that it can sustain required operations under both expected and unexpected conditions.

と定義し²⁶⁾、災害発生時への対応を含め、社会を維持するための役割を発生させるための内生的なメカニズムの形成と維持の重要性を説いている。また、社会の自発的行動も考慮した考え方であり、リスクコミュニケーションやリスクマネジメント等を包含した概念としては、リスクガバナンス²⁷⁾が提唱されている。本稿ではこの考え方に依拠する。

International Risk Governance Council (IRGC) はコンセプトを紹介するレポート²⁸⁾の中で、リスクガバナンスのもたらす効果として、以下のような問題を回避(最小化)することが可能となるとしている。

- Inequitable distribution of risks and benefits between countries, organisations and social groups (社会におけるリスク分担や利益配分の不公平性)
- Differing approaches to assessing and managing the same risk (同一のリスクに対していくつもの異なった対応をとることの無駄)
- Excessive focus on high profile risks, to the neglect of higher probability but lower profitable risks (影響が大きいと思われるリスクの過大評価～影響の小さいリスクは確率が高くとも無視される)

- Inadequate consideration of risk trade-offs (リスクに関するトレードオフの不適切な考慮)
- Failure to understand secondary effects and linkages between issues (複数の事象間の関連性や副次的効果の理解不足)
- Cost of inefficient regulations (非効率な規制というコスト)
- Decisions that take inappropriate account of public perception (一般社会のリスク認知を誤解した意思決定)
- Loss of public trust (公共に対する信頼の失墜)

いずれも、「想定外」と称されるような極大事象のリスクを議論するときには重要な点である。なお、()内の訳は著者によるものである。

リスクガバナンスの実践枠組みとしては以下の5段階が考えられる²⁸⁾。

1. Pre-assessment (リスクと社会環境の事前調査)
2. Appraisal (リスクの評価)
3. Characterisation and evaluation (リスクの性質の理解)
4. Management (リスクマネジメント)
5. Communication (リスクコミュニケーション)

ここでも()内の訳語は著者によるものである。

以下では、それぞれについて、危機耐性を考慮した耐震設計を念頭においてそれぞれの内容を簡単に例示する。なお、示されている内容は、基本的な例であり、詳細については今後の検討が求められる。

a) Pre-assessment (リスクと社会環境の事前調査)

社会の認識として、インフラ構造物が被災をするという事象がどのように理解をされているのかを把握することは重要である。設計を超えた事象がありえること、また、その時に壊滅的な被害になってしまうのか、というような不安があり、それは必ずしも適切に理解されていない、等の点が挙げられよう。

b) Appraisal (リスクの評価)

残余のリスクがあることに対して社会が不安を有することを理解したうえで、万が一、本当に設計を超えた災害が発生した場合に、何が起こりどのような危機が生じるのかを責任を持って把握しておくことが求められる。そのような場合でも、社会が破綻はしないと思われるので有れば、根拠を持っておくことが重要であろう。

c) Characterisation and evaluation (リスクの性質の理解)

上記の危機的な状況で何が生じるのか、その状況の具体的かつ精緻な分析を行い、その影響についても理解し、できれば定量的な評価をしておくことが求められる。

d) Management (リスクマネジメント)

「危機耐性」で想定する性能を以下に担保するのか、また、実際に、設計の想定を越えた災害が生じたときに、インフラの機能回復等の社会的要請に対して、行政はどのように対応するのか、何ができるのか、等について十分な検討をすることが重要である。

例えば、形式的な「縦割り」により、適切な処置のなされないニッチな危険要因が残るようなことは避けねばならない。上記の3ステップに比較して実践性が強く、実現可能性をふまえた具体的な戦略を有していることが求められる。

e) Communication (リスクコミュニケーション)

社会とのコミュニケーションは、信頼を確保する為にも不可欠である。特に、常に双方向の情報交流を持続することで、行政としても改善を図ることができ、また、一般社会のリスク認識の洗練や自覚の醸成にもつながると考えられる。それは、例えば、インターネットや一部のメディア等で、根拠の希薄な鼓舞だけを目的とした情報が拡散するのを防ぐ、というような効果も期待されよう。

(2) 運用について

上記のような点をふまえ、「危機耐性」を考慮した耐震設計を実際に運用する際の方向性について考察する。以下では、主に、リスクガバナンスという観点から、いくつかの施策を提示する。ただし、これらは網羅的な提案とはなっていない。他にも検討すべき課題は多々存在する。

a) 適用対象や工法の適切な選定

「危機耐性」は、狭義の耐震設計で規定されている基本的な安全性等の条件を満たしているインフラにたいして、様々な要素の不確実性に対する信頼性を高めるという高い品質を実現するものである。したがって、すべての構造物の設計において考慮する必要はない。

当該構造物の社会的な影響などをふまえ、必要である構造物の設計においては適用するが、必要の無い構造物についてはあえて適用しない、という方針を適切に運用することが重要であろう。その際には、Pre-assessment(リスクと社会環境の事前調査)、Appraisal(リスクの評価)及び、Characterisation and evaluation(リスクの性質の理解)に基づき、根拠を明確にした判断が求められる。「危機耐性」を形骸化しないためには重要な要素であり、広範な知見に基づく検討が求められる。ただし、実際には、類型化等の対応により、ある程度まで負担を軽減することができると考えられる。

「危機耐性」の概念を採用しないと耐震性の低い設計と判断される、ということを懸念して、重要性の低い構造物にまで一律に「危機耐性」を導入するという

ような方針をとったり、逆に、「危機耐性」を満たすために過剰なまでに保守的な設計をする、というのは、いずれも、「危機耐性」のための耐震設計体系に対する信を損なうことに繋がるだろう。

b) 第三者機関によるチェック

「危機耐性」のための耐震設計では、定性的な根拠に基づいて構造物の挙動を想定することも多いため、恣意性が高い。したがって、客観性を保ちつつ、その手法の適切性を評価する説明責任が生じる。

例えば、ストレステストで用いられる外力は、自由度が高いため、意図的に「弱い」入力を設定することも可能である。このような問題を防ぐためには、設計地震動の設定指針を設定するなどの技術的な対策をとるのに加え、第三者機関等による検証等の方策をとることが有効であろう。これは、Management（リスクマネジメント）の一例と位置づけられる。

c) 情報公開

情報公開は、Management（リスクマネジメント）及びCommunication（リスクコミュニケーション）の観点から重要である。設計で想定した社会状況や、それをふまえて設定した「性能」規定等の情報を公開し、共有できるようにすることを推奨する。

例えば、活断層調査等による地震危険度の評価値の変更、点検により明らかになった構造物の劣化、等の技術的な条件や、インフラ整備状況の変化による重要性の変化、設計基準の改定による要求性能の改定、等のいわば社会的な条件が変化することは、構造物の供用期間中にあり得ることである。

インフラ構造物の場合、このような変化に対して迅速に追従するのは非常に難しい。また、そのような情報を公開すれば、社会から様々な非難を浴びることもあるため、管理者は情報の公開には消極的となることも少なくない。しかし、そのような情報を共有した上で、解決に向けた議論をすることこそが、リスクガバナンスとして重要な要素である。

また、カテゴリー2の設計では、想定地震動等が多少大きくなっても、根本的な設計変更をせずに対策できる課題が多いと思われるため、従来のものよりは、情報公開に対する障壁は低いはずである。

d) 社会との連携の強化

リスクガバナンスの要素のひとつである Pre-assessment（リスクと社会環境の事前調査）は、社会でのリスクの認知やそれに伴う課題等を明確にし、行政がそれを理解することである。また、Risk Communication（リスクコミュニケーション）は、その情報を、社会と行政が双方向の情報交換を通して共有し、成果に反映させていくことである。

このようなプロセスを明確にしていくためには、様々

なステークホルダーとの対話が求められる。例えば、地域防災計画等との連携において、双方向的な情報提供による協働体制を構築し、フィードバック等を得ることで社会の災害対応力を高める事などが考えられる。そのような広域的システムの災害対応能力を、個々のインフラ構造物の耐震性能として考慮できる枠組みを構築できれば、例えば、既存不適格構造物等に対する合理的な対策につながることも期待される。

7. まとめ

「危機耐性」を考慮した耐震設計を実装するための基礎的な事項について考察し、試案を提示した。議論したのは基礎的なことのみであり、「危機耐性」を普及させ、手法としての信頼性を高めるためには、この他にも、様々な政策が求められよう。

また、今後、このような高品質なインフラの供給を持続させていくためには、様々な要素が求められる。例えば、以下のような点が挙げられる。

技術開発 5.で示した概念を実現するための具体的な工法や、設定する性能の定量的評価軸の開発が必要である。

人材育成 設計、維持管理、関連技術、経営等を総合的に判断でき、構造計画を含む上流に参画できる構造技術者を育成することが必要である。

国際基準化 我が国が優位性を有する技術基準として、新たな品質保証の枠組みとして、国際基準化することを検討することが可能であると思われる。

当然、上記以外にも様々な事案が考えられる。これらは、政策的に働きかけて促進しなければならない面もあるが、リスクガバナンスで挙げた内容が実現すれば、社会の合理的な判断として自発的に生じうる方向性でもあったと考えられる。「危機耐性」の導入を単なる設計指針の改訂にとどめず、現在の社会におけるインフラに期待される役割に応えるための技術開発を促すものと位置づけられることが期待される。

謝辞: 本論文の内容は、土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会・危機耐性WGでの議論の一部である。このような機会を設定していただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Tokuyama, H.: Learning from Japan's ordeal, Public Roads, Vol. 75, No. 6, pp. 24-32, 2012.
- 3) 国土交通省 関東運輸局 交通環境部：災害時における鉄道、内航海運、航空機及びトラックの活用実態の整理, 2014. https://www.tb.mlit.go.jp/kanto/koutuu_

- seisaku/sien_kouchiku/date/1/siryou2_2.pdf (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
- 4) 厲国権・鈴木崇正: 東日本大震災で見直された鉄道貨物輸送の重要性, RRR, 第 69 巻第 3 号, pp.10-13, 2012.
 - 5) 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), 公益社団法人土木学会, 2013. http://committees.jsce.or.jp/2011quake/system/files/teigen_0.pdf (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 6) 室野剛隆: 新しい耐震設計標準, RRR, 第 70 巻第 3 号, pp.16-19, 2013.
 - 7) 国土交通省 港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013. <http://www.mlit.go.jp/common/001012142.pdf> (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 8) 国土交通省 港湾局: 港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計ガイドライン, 2013. <http://www.mlit.go.jp/common/001020131.pdf> (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 9) 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.
 - 10) Chang, S.E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001.
 - 11) Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi R. T., Lee, G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M. Tierney, K., Wallace W.A., and von Winterfeldt, D.: A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
 - 12) Boin, A and McConnell, A.: Preparing for critical infrastructure breakdowns: the limits of crisis management and the need for resilience, Journal of Contingencies and Crisis Management, Vol.15, No.1, pp.50-59, 2007.
 - 13) Bocchini, P., Frangopol D. M., Ummenhofer, T. and Zinke, T.: Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol.20, No.2, 04014004, 2013.
 - 14) 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> (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 15) 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」解説, 2000. <http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3/> (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 16) Bruneau, M., Filiatrault, A., Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M. and Tierney, K.: White paper on the SDR grand challenges, MCEER, 2007
 - 17) Renschler, C. S., Frazier, A., Arendt, L., Cimellaro, G.-P., Reinhorn, A. M. and Bruneau, M., A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework, MCEER, 2010.
 - 18) 野津厚, 室野剛隆, 本山紘希, 本田利器: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(2) 鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」, 第 35 回地震工学研究発表会, 2015.
 - 19) 高橋良和, 秋山充良, 片岡正次郎, 本田利器: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(3) 道路橋示方書から読み取る「危機耐性」と国内外の動向を踏まえた課題の整理, 第 35 回地震工学研究発表会, 2015.
 - 20) 国土交通省港湾局監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007 年版), (社)日本港湾協会, 2007. (改訂や修正はインターネット上で情報提供している.) http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000017.html (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 21) 日本道路協会(編纂): 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.
 - 22) 内閣官房: 国土強靱化基本計画, 2014. http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 23) ISO 2394: 2015, General principles on reliability for structures, 2015.
 - 24) Reason, J.: *Human Error*, Cambridge University Press, 1990.
 - 25) Hollnagel, E., Leveson N. and Woods, D. D.: *Resilience engineering: Concepts and precepts*, Ashgate Publishing, Ltd., 2007, 邦訳: 北村 正晴(翻訳): レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科技連出版社, 2012. (原著の Prologue が, <http://erikhollnagel.com/onewebmedia/Prologue.pdf> で入手可能, 平成 27 年 11 月 5 日閲覧)
 - 26) Hollnagel, E., Paries, J., David, D. W. and Wreathall J.: *Resilience engineering in practice: A guidebook*, Ashgate Publishing, 2010, 邦訳: 北村 正晴(翻訳): 実践レジリエンスエンジニアリング社会・技術システムおよび重安全システムへの実装の手引き, 日科技連出版社, 2014.
 - 27) Renn, O.: *Risk governance: coping with uncertainty in a complex world*, Earthscan, 2008.
 - 28) International Risk Governance Council(IRGC), *An introduction to the IRGC Risk Governance Framework*, 2012. <http://www.irgc.org/publications/core-concepts-of-risk-governance/> (平成 27 年 11 月 5 日閲覧)

(2015.11.6 受付, 2016.1.13 修正, 2016.2.20 受理)

SEISMIC DESIGN METHOD TO CONSIDER “ANTI-CATASTROPHE” CONCEPT — A STUDY FOR THE DRAFT OF DESIGN —

Riki HONDA, Mitsuyoshi AKIYAMA, Shojiro KATAOKA, Yoshikazu TAKAHASHI,
Atsushi NOZU and Yoshitaka MURONO

It is requested to implement the concept of “anti-catastrophe” property in the seismic design codes. It is not, however, a straight forward task because “anti-catastrophe” concept has various significant differences from existing design codes. This paper identifies problems of the development of “anti-catastrophe”-oriented seismic design codes, and proposed a new concept of “category 2.” A framework of design code with “category 2” is also presented. We also discussed conditions required for the society and government to make such new design codes effective, based on theoretical framework of risk governance and proposed several practical policies.