

危機耐性を指向した耐震設計の実装に向けた 考察

本田利器¹

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

¹正会員 東京大学 国際協力学専攻 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

耐震設計での想定を越える状況における性能を考える「危機耐性」という概念が議論されるようになってきているが、定義については、曖昧なところも多い。本稿では、危機耐性を指向した設計の考え方について考察した。親和性の高いレジリエンスの研究との比較などから、コミュニティレジリエンスとの連携の重要性等を示した。また、設計手順についても述べ、ストレステストのための仮想的な外力としての地震動や、コミュニティと技術者の情報共有を促しうる体系のあり方について考察した。また、危機耐性を指向した設計を実装するにあたってリスクガバナンスが重要であることを示した。また、設計指針ではなく認証制度としての実装することを提案した。

Key Words: *Anti-Catastrophe, Seismic Design, Community Resilience, Input Ground Motion, Risk Governance*

1. はじめに

東日本大震災以降、設計で陽に考慮している範囲を超えた事象に対する対策として「危機耐性」の議論¹⁾がなされている。著者らも危機耐性の実装に向けた議論を提示した²⁾。このような概念自体を否定する意見は限られているが、逆に、従来の考え方と変わるところがないという意見もある。著者らも同様の概念は既存の設計体系の中に組み込まれていることを示しており^{3),4)}、全く新しい概念であるとは考えていない。必要なことは、それをいかに実装し実効性を有するものとするかである。しかし、そのためには、曖昧な面がある危機耐性の定義自体についても議論しなければならない。本稿では、そのような背景を鑑み、危機耐性の考え方を整理し、実装または技術開発に向けた論点の整理を試みる。

2. レジリエンス研究

危機耐性に近い概念としては、レジリエンスが挙げられる。欧米では、当然、危機耐性という言葉はつかわれておらず、resilience-based design 等が広く議論されている。

ASCE Structural Engineering では、2016年に、Resilience-Based Analysis and Design of Structures and Infrastructure Systems と題した Special Issue を組んでいる⁵⁾。そこで対象とされている範囲は多岐にわたる。

Echevarria et al.⁶⁾ は、Concrete-filled fiber reinforced

polymer (FRP) tube (CFFT) により補強された橋脚の耐震性能について検討している。また、Chandrasekaran et al.⁷⁾ は、地震だけではなくマルチハザードを対象として、橋脚の補強材料を変えたときの性能を比較している。Rodgers et al.⁸⁾ は、大きい外力にも損傷無く耐える Damage Avoidance Design (DAD) に関する実験と数値解析を用いた基礎的な研究を行っている。

これらのような構造に関する研究に加え、レジリエンス性能の定量的な評価法についての議論も多い。Cimel-
laro et al.⁹⁾ では、自身が過去に提案した手法¹⁰⁾に基づき、水道管網の復旧を扱っているが、これは Bruneau et al.¹¹⁾ のレジリエンスカーブで計算されている。同様にネットワークを考慮しているものとして、交通ネットワークの劣化に対するレジリエンスを議論している Alipour et al.¹²⁾ がある。Reed et al.¹³⁾ は、電力供給のライフラインのレジリエンスについて、System の構成要素を SDOF でモデル化することで表現するアプローチを用いて議論している。Quiel et al.¹⁴⁾ は、より多面的な面から復旧プロセスを評価する方法を提案しているが、定量化においてはやはり Bruneau et al.¹¹⁾ のレジリエンスカーブを積分する手法をとっている。これらは、インフラをシステムとしてとらえ、また、多様なハザードに起因するリスクを念頭に置いている。

これらの議論では、レジリエンスの性能を高めるために、基本的に、復興を効率的にするという視点で議論されている。インフラの性能向上の効果もその枠組みで、定量化されている。これは、換言すれば、復旧

へのリソースは供給されうるのでそれを前提に最適化を図るという問題設定であることを意味する。

しかし、大規模広域災害、特に、経済活動の中核が深刻な被害をうけた場合、そのようなリソースが供給されず、最適解は実現できない可能性もある。例えば、東日本大震災後の復興に寄与した「くしの歯」作戦は、迅速に被災地へのアクセスを提供したことが効率性の観点からも高く評価されている。ただし、その対処方法や効果を事前に定量的に評価できたとは考えにくい。

同じことが起これば同様の対応が有効かもしれない。しかし、過去の大災害においては、常になんらかの新しい課題が出現し、コミュニティ¹は対応を迫られてきた。いわば「想定外」が災害が深刻化する大きな因子であるといえる。

「想定外などあるべきではない」という論も見かけますが、想定していたにせよ、いないにせよ、ありとあらゆる災害事象に対して完璧な対応を準備することは不可能であり、めざすべきことではない。

危機耐性は、そのような場合も視野に入れて、深刻な構造物被害の生じた状況への耐性を議論するものであり、レジリエンスの概念と多くを共有しつつも、若干の違いも見られる。危機耐性のための理論体系が必要であると考えられる。しかし、レジリエンスに関する様々な研究の蓄積との整合性は視野に入れるべきであろう。

危機耐性の議論においては、レジリエンスの議論と比較して、構造に着目した議論が多い傾向が見られる。

「くしの歯」作戦においては、地元建設業者らの協力も重要な要素であった。そのようなコミュニティとの連携も重要である。上述した特集号でも Burton¹⁵⁾ や McAllister¹⁶⁾ は、コミュニティレジリエンスの考え方に基づく提案をしている。特にレジリエンスの効果を定量的に評価する際に f に顕著のように、インフラシステムやコミュニティへの影響を明示的に扱い、その重要性を強調している点は参考にすべき本質的な点であると考えられる。また、カタストロフィックな事態に対して、コミュニティで対応する能力があることの重要性についての議論もなされている¹⁷⁾。

3. 危機耐性再考

(1) 対象とする事象

インフラの建造においては、自然を対象に大規模な構造物を現地生産することが多く、耐震設計においても、地盤条件や入力地震動の周波数特性や位相特性、液化強度の空間分布、RCの劣化程度など、様々な不確実

性の要因がある。しかし、それらの不確実性の下でも、深刻な問題を生じさせないことは、土木の本質である。

そのための対応として安全率がある。シンプルな発想であるが効果は大きい。危機耐性はその概念の高度化、一般化であるといえる。ただし、不確実性の揺らぎ幅がはるかに大ききことを踏まえた議論が必要となる。

例えばRC橋脚には、曲げ先行破壊の要件があり、ここまでは現行の耐震設計でも考慮されている。この性能を高めることは重要である。しかし、それを超えた場合についても考察を進めることが求められる。

危機耐性で考えるのは、低頻度だが深刻な事象である。いわゆる設計での想定を超えた被害ということになる。ただし、どの程度の頻度であるか、つまり、確率については主たる関心事としない。

危機耐性を定義すれば、いわば「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」である。

既報²⁾では、対象とする領域の拡張を考える軸として、事象、時間、空間を挙げた。

時間についての拡張は、被災直後及び復旧過程における状況を考慮することであり明らかである。空間についての拡張は、広域的な災害対応やネットワークの考慮であり、ASCEの特集号⁵⁾でも複数の論文で議論されているように、その意図は明快である。

以下では主に、事象についての拡張に関して述べる。

対象とするのは、万が一、発生すると大被害を引き起こしうるが、原則として発現しないと考えられるほど低頻度であるため、それを完全に防ぐことはコストや使用性などの制約から事実上不可能な事象である。このような事象の発生や深刻化を防ぐことで、負担可能な程度のコストで実現することが本質である。

そのため、大きな被害につながる連鎖を初期段階で防ぐことが求められる。その場合、もし被害が生じても、コミュニティが何らかの対応をすることで効率的な回復や復興がなされる、すなわち、レジリエンスが発揮されることが期待できる。様々な被災シナリオに共通するトリガーイベントを防ぐことは効率的である。たとえば、単体の構造物を対象とする場合でも、インフラネットワークや社会への影響が波及しうる被害の発生を抑制することや、損傷が発生した場合にも必要に応じて速やかに復旧が可能となるように備えることが有効であろう。

¹ Community は、「人々の集まり」（「コミュニティ」というよりも広くインフラなども含めた「社会」に近い意味であり、本稿でもそれに従う。

(2) 情報

レジリエンスの研究では、発生確率の低い地震までも考えるようにした、というものも少なくない。しかし、危機耐性とは、外力を20%増加させて設計する、というようなことではない。

危機耐性で扱う危機とは、危機発生前とは本質的に異なる事象である。つまり、「危機」の前後で、何らかの意味で支配的なメカニズムが変わるものと考えられる。

すなわち、危機とは、システムとしての相 (phase) が変わることに相当する。すると、危機耐性とは相転移 (phase transition) を生じさせないことになる。

そのためには、転移後の相 (next phase) を同定し、そのうち、深刻化するものを選定し、その発現を妨げる仕組みを実現することが必要となる。なお、この相転移を防ぐ仕組みは、外力や構造物の条件の変化があっても、ロバストに機能するものであることが必要である。

以上の議論に基づくと、危機耐性を試行する設計に必要な情報は、転移後の相、つまり、回避したいシナリオの性質である。相転移がどのような条件で生じるのか、また、転移した後の相がどのようなものであるのか、等を判断する必要がある。これを知るためには、メカニズムの理解に基づき、損傷後の状況を明らかにする必要がある。そのためには、構造力学的な仕組みや現在の状態 (劣化程度など) の情報は有用である。

シナリオについては、発生する可能性は否定できず、考慮に値するだけの影響を持つものであることが確認できればよい。一方、被害の期待値や確率特性については、詳細に評価する必要性は低いと考えられる。

したがって、本稿では、危機耐性について、「低頻度だが大きな外力」への対策という側面ではなく、「影響の大きい不確実性」への対策という面に着目して議論する。この場合、危機耐性を実現するとは、不確実性を減じることに相当すると考えられる。つまり、点検やモニタリングを行うことで情報が増えるため、物理的な補強をおこなわずとも、危機耐性を高めることにつながることになる。

4. 危機耐性を指向する耐震設計

(1) 基本概念

上述の議論に基づくと、危機耐性を指向する耐震設計とは、単に靱性を大きくすることではない。地震の発生時に、何らかの理由により設計上守りうる範囲を超えた場合に、回復する機会を確保することと考えられる。

無数に想定しうる next phases のうち、どれを対象にするかは、その被害から波及する影響の深刻さ、コミュ

ニティへの影響の大きさ等を鑑みて決定することになる。マルチスケールで考え、それぞれで着眼点を設ける必要がある。例えば、橋梁構造物のスケールでは桁の落下という事象を考える場合でも、その橋梁が属する交通ネットワークのスケールでは、被災後の経済活動のためのアクセスの確保等を考えることになる。

なるべく確度の高い事象に還元して、その事象に対処することが実効性のある耐震設計となる。したがって、設計上は、単にもっとも大きい損傷を防ぐことを目指すのではなく、クリティカルな不確実性因子を同定し対処することを指向すべきである。これは、個別の要素の相互依存関係を把握して、合理的な対策を構築するものであり、考慮すべき範囲も広く高度な技術が求められる。様々な要素技術を統合するための技術的な検討を可能とする体系が必要である。

ハードウェアによる対策が難しいときはソフトウェアによる、というのが近年の流れであるが、この場合でも、ハードウェアとソフトウェアを切り分けるべきではない。ソフトウェア的な対応がメインとなるような状況に於いても、ハードウェアが貢献できることは大きい。例えば、復旧作業の迅速化を考えても、ハードウェアとしての耐震性能、復旧性能を向上させることの効果は大きい。そのためには、ソフトウェアを担うコミュニティが、ハードウェアを活用する能力を有する必要がある。ハードウェアがどのような性能を有しているのかを理解したうえで、有事に備えることが求められる。

一方で、上記のような高度に技術的な議論をコミュニティが理解することは (そして、その逆も) 現実的でないため、技術者とコミュニティ間での情報の共有を促す体系が求められる。

(2) 設計手続き

設計手順としては下記の5段階を想定している。

危機耐性能の規定： 前提とする社会的条件も明記し、被災シナリオとそこで構造物の挙動が満たすべき条件を、平易に記述する。

状況設定： 損傷シナリオの想定と対策。基本的には入力地震動を求めない。使う場合も、検証用の仮想的な外力と位置づける。

構造計画： 経済的条件や地理的条件までを含む広い視点から大局的な方針を設定する。

詳細設計： 先端技術を活用した具体的な設計をする。

検証と妥当性確認： 危機耐性能が保障されることを確認する。

これらの関係性を図-1に示す。技術者とコミュニティの情報の共有を資する構造となることが意図されている。「状況設定」、「構造計画」、「詳細設計」がコアとなる

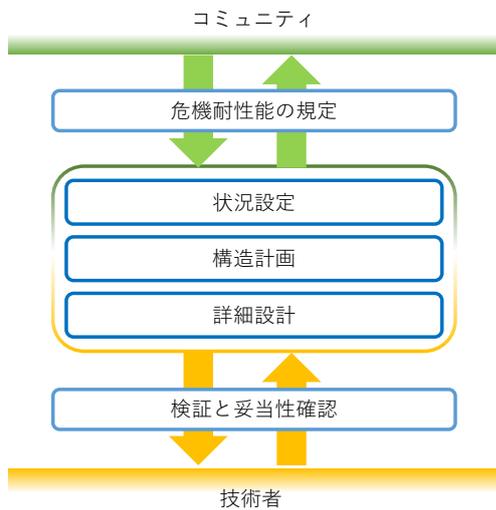


図-1 コミュニティと技術者の情報共有に資する設計体系の概念図

設計作業であるが、それは専門的な技術的なものとなる。危機耐性は、コミュニティとの協働も重要な要素である。そのため、設計により実現される性能を、「危機耐性能の規定」において平易に記述することで、構造物の危機耐性についての情報を、コミュニティと共有できるようにする。

一方、必ずしも確立されていない技術や、定性的な検討に基づく技術的判断なども含まれることになるため、その技術的な適切性を「検証と妥当性確認」において確認する。このような構造により、設計者らの高度な技術的知見がコミュニティと共有され、構造物の危機耐性が有効に活用されることが期待される。

(3) 要求される危機耐性能

これは、危機耐性能の規定で定められ、以下のような点についての記述が求められよう。

a) 危機耐性の必要性

平時、非常時の当該構造物の重要性に鑑み、当該構造物に、危機耐性を付与する必要性を説明する。まず、対象構造物の選定根拠を明確にすることが必要である。既設構造物の場合、設計に用いた指針や維持管理状態等も考慮して性能評価もするべきである。

b) 要求する危機耐性能の定義

そのうえで、物理的及び社会的な環境を考慮し、当該構造物に危機耐性を付与することの必要性を示すとともに、求められる性能（危機耐性能）を規定する。なお、ここで設定される規定では、後述するリスクガバナンスのためにも過度に専門的な表現は避け、広く理解されるものとする必要がある。

地震環境等を踏まえ、被災、復旧シナリオに於いて

想定される構造物の機能、役割等も踏まえ、要求される危機耐性能を定義する。

この項目だけを見て、構造物に付与する性能の程度、意義が理解できるようにすること。危機耐性能の設定にあたっては、以下を踏まえたものとするのが求められるよう。

地震環境： 前提としている地震や活断層等の科学的な情報や行政が提示する地震危険度や被害想定等を記述する。

社会的環境： 危機耐性は社会のレジリエンスに資するものであり、また、社会的な支援が無ければ実現不可能であるため、社会的条件の考慮は必須。例えば、地域防災計画、広域防災計画、維持管理体制や計画、災害協定の有無やその内容、被災後の復旧技術（技術的困難さ）、等が挙げられる。また、インフラの復旧を担う人的・物的資源も重要である。例えば、地域の建設業界の経営状態、業務実績、業者数、労働者数、重機数などを調査して、それを前提条件として明記することが考えられる。

被災・復興シナリオ： 一般的な地震外力の想定に基づき、被災時及び復旧時のシナリオを設定する。具体的には、クリティカルな不確実性因子の同定とそれに起因する被災シナリオの策定により、レベル2までの設計で想定されている設計条件を超えたとしたら何が起こるのか（next phase）を考える。

そのために、まず、脆弱性を生じさせうる留意点（被害形態、損傷箇所）を整理する。それらを考慮し、想定すべき被災シナリオつまり損傷が発生する過程や、復旧シナリオつまり機能を回復するのに必要な作業や資源、について整理する。定性的な記述でかまわないが、力学的、社会的、経済的など多面的にみて十分な合理性を有するものとする必要がある。

(4) 構造設計

危機耐性は、相転移を防ぐものであるとすると、その本質は大きな外力に耐えることでは無い。深刻化する破壊形態や回復が難しい損傷を開始させないことである。倒れつつあるものを止めるのは、倒れ始めるのを防ぐよりも難しいだろう。

被災時の支配的メカニズムを把握し、そのうえで、それが生じるダイナミクスとその階層性をふまえて因子を特定する。そのロジックを整理することで、「根源的要因」を同定することが、効率的な防御を図るために重要である。

情報の不確実性を考慮することも必要である。根源的要因となりうる「根源的な不確実因子」を抽出することも必要である。例えば、液状化する地層の対策を考えることは重要だが、危機耐性の考え方においては、

もし液化化したら大きな被害につながる地層の液化化危険度に不確実性が大きいことを把握することが本質的である。

提案では、構造計画および詳細設計の2段階を設けている。それぞれの役割は、近年検討されている設計体系（例えば、土木学会共通示方書^{18),19)}に沿うものであり、特段に新規なものではない。ただし、技術的には高度な議論が要求される。

a) 構造計画

地盤環境や構造の考察にもとづき考慮すべき因子を検討し、設置位置の選定、調整などをふくめ、構造物全体の形式等を決める。危機耐性の実効性を高めるために回避すべき被害形態や地盤条件等をふまえ、採用すべき構造形式等を選定し、その根拠を説明する。そのため、経済性や復旧性など、従来であれば構造設計よりも前段階で検討されることも多かった事項についてもこの段階で同時に考慮することが望ましい。

本来、設計の目的は、事象を再現することではなく、満たすべき性能（耐震設計の場合、被害が生じないこと）を実現することである。しかし、構造解析手法の高度化にともない、再現性も高まっていると考えられている。その結果、対応の余力（つまり安全率）を削ることが正当化されることもありうる。しかし、深刻な損傷の場合、事象の複雑性が高く、初期値や諸条件への依存性（感度）も高いため、予測自体が非常に困難である。したがって、危機耐性を論ずる際、精緻な解析だけで判断することは不適切である可能性もある。危機耐性で考慮する next phase の被災メカニズムは条件パラメタに影響されないロバストなメカニズムに基づく必要がある。パラメタなどの不確実性を揺らがせた場合にも共通して生じるメカニズムに着目し、それに対応すべきである。

想定する不確実性の幅に対して、共通して出現する力学構造は、比較的単純なものになると考えられる。しかし、それこそが代表的事象である。将来的には、モンテカルロシミュレーションのような多数の解析にもとづき、共通のより複雑なメカニズムを把握することも可能となることも期待されるが、現時点では、ある程度、直観的に理解できるメカニズムを考えることになろう。

b) 詳細設計

具体的な詳細な設計であり、既存の設計手法が適用可能な事項が多いと思われる。しかし、大変形や深刻な被害を考えるので、従来の設計法や検証法がそのまま適用できるかどうかは自明ではない。そのような場合でも、新技術の導入を過剰なコストをかけることなく導入できるようにすべきである。最新の知見に基づく技術は、性能の保証や検証の方法が確立していな

い場合もあるが、そのような形式的理由で利用を躊躇すべきではない。科学的な根拠に基づき十分な信頼性があると判断できれば採用を拒む必要は無い。ただし、その詳細な検討の妥当性を第三者が判断できるように整理することを求める必要がある。

(5) 入力地震動

耐震設計では入力地震動が重要であった。地盤特性や周波数特性などの相対的な値（卓越周波数の増幅程度等）についての知見を得ることは十分に可能であり、また、設計上も有用な情報である。

しかし、入力の不確実性は不可避である。東北地方太平洋沖地震で、予想よりもはるかに大きいエネルギー（マグニチュード）の地震が発生したことから示唆されるように、地震の大きさ（絶対値）については予測が難しい。

危機耐性を考える際には、基本的には、構造物の被害形態を中心にすえた議論がなされる。したがって、入力地震動は必ずしも必要ではない。そのため、「外力設定」ではなく、「状況設定」という項目が設定されている。

しかし、外力を考慮することもありえる。以下に、外力を用いる場合の考え方について述べる。

a) 外力発生源（震源）の next phase

もし、非常に大きい外力に対しても無損傷で耐える構造物があるとすると、構造上の支配的メカニズムに変化は無いため、損傷メカニズムの next phase は同定ができないことになる。単に振幅を n 倍にする、というような対処も可能であるが、それでは n をいくつにすべきなのかという判断の根拠を提示するのは難しい。

このような場合の危機耐性を定義づけるものとして、地震発生メカニズムの next phase を考慮することが考えられる。地震外力にも、断層パラメタやマグニチュード、地盤条件など、設計上の「想定」がある。それを超える状況として、複数断層が連成する場合や、地下構造などが想定と大きく異なる状況等を考慮して外力を設定することは可能であろう。

b) ストレステスト用の仮想的な外力

地震動を評価する際には、断層パラメタや地震環境等の不確実性を考慮することは不可避である。地震環境や観測記録を踏まえることで精度を高めることはできるが、不確実性は残る。危機耐性のための設計では、そのような不確実性に起因する next phase として想定すべきシナリオをふまえて、対処をすることが必要である。そのため、あえて大きい外力を与えて、何が次のフェーズであるかについての示唆を得るというストレステストも有効であろう。その場合には、大きい仮想的な外力を考慮することになる。

仮想的とはいえ、地震動としての特質と乖離してい

ないものを考慮することが好ましい。欧州で検討されている critical infrastructure の STREST^{20),21)}をはじめとして、実際にあり得る地震パラメタを設定して地震動を作成することも多い。

従来の耐震設計で用いられる地震外力は、その外力をわずかにでも超えたら構造物が倒壊してもよいと判断するためのものではない。耐震設計で実現される裕度を考慮すると、およそ生じうる地震動に対して適切な耐震性を実現するであろうと考えられる設計外力である。そのため、設計用の入力地震動のシミュレーション用のパラメタ設定において、構造物にとって厳密に最もシビアな条件を考えない場合も少なくない。この点を踏まえると、ストレステスト用に用いる地震動として、最もシビアな状況を設定して想定される地震動を用いることも可能である。

ただし、その役割は、構造物被害の next phase を推定することであり、位置づけとしては仮想的な外力と考えるべきである。したがって、例えば、当該構造物にとってより厳しい外力となるように、時間周波数特性や空間的な分布などを人為的に操作して作成した時刻履歴信号を仮想的な地震動として用いることもあり得ると考えられる。

(6) 検証と妥当性確認

設計が、冒頭で規定した危機耐性能を実現することを保障するものとなっていることを確認するための項目である。

検証 設計手順の各段階が適切に実施されていることを確認する。例えば、構成則や力学的パラメタなどが適切に設定されていることを調べる。

妥当性確認 全段階が整合性をもって、規定された危機耐性能を保障していることを確認する。例えば、被災もしくは復旧シナリオの適切性や、抽出された損傷メカニズムやその発言を抑止するメカニズムの実効性等を検討する。

具体的には、新規性の高い技術の性能の検証なども含め、各段階で考慮すべき不確実性の影響を踏まえ、「残余のリスク」が適切に評価され、許容できる程度以下であることを確認する。また、全体を総合的に俯瞰したうえで、複数の項目の残余のリスクが全体の挙動において深刻なリスクとならないことを確認する。

客観性を確保するため、できれば、第三者である専門家が実施することが望ましい。

この作業を適切に行うことにより、コミュニティが、当該構造物の危機耐性能を信頼できることとなり、合理的な意思決定が促されることになると考えられる。

5. リスクガバナンス

(1) コミュニティレジリエンス

レジリエンスを考えるうえでは、コミュニティとしてのレスポンスや能力が重要となる。NISTではライフラインを対象に community resilience の考え方を提唱している^{22),23)}。我が国でも、内閣府の国土強靱化計画²⁴⁾では、コミュニティレジリエンスの実装に向けた政策がとられている。ASCEの structural engineering などのいわゆるハード系の resilience 研究においても、前述の特集号⁵⁾のように、道路やライフラインのネットワーク等のインフラシステムとしての機能に着目した評価や、コミュニティレジリエンスに着目した検討がなされており、構造物単体の議論ではないものも多い。このような現況に習うと、インフラの危機耐性を効果的に発揮させるためには、インフラシステムやコミュニティとの連携をはかることを念頭に置くことも、危機耐性にとって重要であるといえる。

(2) リスクガバナンス

危機耐性の実装において、上記のようなコミュニティレジリエンスを考慮するためには、コミュニティと様々な情報を共有して、社会の理解を得ることが必要である。

まず、コミュニティが、危機耐性の正確な理解をもつことが必要である。危機耐性を考えるのはインフラの耐震性能が不十分であるから、というような誤解は避けねばならない。

インフラの災害時の信頼性を高めるものであることが理解されれば、危機耐性を有するインフラの利用可能性を前提としたコミュニティの災害対策などの行動を促しうる。民間企業にも、災害に強いインフラを前提としたマーケティングや投資、BCP戦略の策定等を促せる可能性もある。特に、建設会社が、被災時への対応を視野にいれた備えをすることは、インフラの品質保持や災害復興に大きな意味がある。いずれも、もし実現すれば、インフラの危機耐性が実質的に高まることにつながる。

一方で、災害時のリスクに関する情報の共有は、コミュニティに不安や過剰反応を引き起こす可能性もある。いたずらに不安感を刺激するのではなく、適切なリスクとして認知され対応されるようバランスをとったリスクガバナンスが必要である。

6. 認証制度（カテゴリー2）

既報²⁾では、危機耐性を設計体系に組み込む際の枠組みとして、「カテゴリー2」を設定し、従来の設計を包含する「カテゴリー1」から独立させることの必要性

を示した。このカテゴリー2の位置づけを考える。

危機耐性の検証では、入力地震動を設定せず、また、新規技術であるがために必ずしも定量的な検証はできない。そのよう状況では、現行の耐震設計で行われているような「照査」は難しい。

また、危機耐性の重要な構成要素である社会的な要件等は時間と共に変化する。構造物の維持管理状態や、建設会社数等の社会的な環境の変化を考えると、10～20年に一度程度の確認が求められよう。さらに、危機耐性に関する技術については、今後も様々な新規技術の開発が見込まれるため、迅速な対応も求められる。

したがって、危機耐性については設計時に一度確認するだけでは無く、定期的に確認されることが望ましい。

また、このような評価は、公平性や客観性を有する組織が担当するべきであるが、国の指針として規定化されなければならないという必要性は低い。公共性の高い組織が担えば十分に正当性を担保できる。

このような性質を考慮すると「カテゴリー2」は、認証制度化されることが適当であると考えられる。例えば、学会等の組織や機関が参画して、認証する組織を構築することも可能であろう。

7. おわりに

(1) まとめ

本稿では、危機耐性を指向した設計を実装することを念頭において、その考え方などについて考察した。

まず、親和性の高いレジリエンスの研究との関係性をふまえ、コミュニティとの関係性をふくめ、対象を広げることの可能性を示唆した。そのうえで、危機耐性を、大きな外力ではなく不確実性への対処として捉える考え方を提示した。この場合、情報を収集することも危機耐性の向上に資することとなる。そして、それらを踏まえ、設計手順について述べた。ストレステストのための仮想的な外力としての地震動や、コミュニティと技術者の情報共有を促しうる体系のあり方について考察した。最後に、危機耐性を指向した設計を実装するにあたって必要となる制度的な要件として、リスクガバナンスと認証制度について短く述べた。

(2) これからの課題

危機耐性を試行する設計体系を構築したとしても、それを社会的に定着させていくためには課題も多い。

ハードウェアの研究としては、レジリエンスの研究と同様に、今後、地震災害だけに限らず、劣化なども含めたマルチハザードの考慮も重要となると考えられる²⁵⁾。

実効性を高めるためには、契約制度の設計も重要に

なると考えられるが、現状では未成熟で課題も多い²⁶⁾ため検討が必要である。さらに、危機耐性におけるコミュニティとの協働の重要性を鑑みると、建設業界の状況も重要な因子である。有事の際の協定は多々なされているが、建設業界の高齢化や規模縮小が深刻化する将来における実効性については不確実性も大きい。レジリエンスや危機耐性の定量的評価等の検討を踏まえ、重機の確保に必要なコストの負担などについても検討が可能であろう。

また、国際展開戦略も重要であろう。日本では「質の高いインフラ」が海外展開方針として示されている。「危機耐性」はまさにインフラの質を高めるものであるが、それを具体的に示す手段や制度が検討されていない。ISO2394等で信頼性についての議論はなされているが、危機耐性で対象とするような深刻な不確実性への対処についての議論は限定的であるため、好機であると考えられる。

謝辞

土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会危機耐性WGでの議論も一部参考にさせていただいた。記して謝意を表す。ただし、本稿の議論は著者の私見であり、同WGの公式な見解ではない。同WGでは今後も議論を進める予定である。

参考文献

- 1) 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), Technical report, 土木学会, 2013.
- 2) 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-試案構築にむけての考察-, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.1.459-1.472, 2016.
- 3) 野津厚・室野剛隆・本山紘希・本田利器: 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(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.1.448-1.458, 2016.
- 4) 高橋良和・秋山充良・片岡正次郎・本田利器: 国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.1.821-1.830, 2016.
- 5) Cimellaro, G. P., Dueñas-Osorio, L., and Reinhorn, A. M.: Special issue on resilience-based analysis and design of structures and infrastructure systems, 2016.
- 6) Echevarria, A., Zagheri, A. E., Christenson, R., and Accorsi, M.: Cfft bridge columns for multihazard resilience, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015002, 2015.
- 7) Chandrasekaran, S. and Banerjee, S.: Retrofit optimization for resilience enhancement of bridges under multihazard scenario, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015012, 2015.
- 8) Rodgers, G. W., Mander, J. B., Chase, J. G., and Dhakal, R. P.: Beyond ductility: parametric testing of a jointed rocking beam-column connection designed for damage avoid-

- ance, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015006, 2015.
- 9) Cimellaro, G. P., Tinebra, A., Renschler, C., and Fragiadakis, M.: New resilience index for urban water distribution networks, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015014, 2015.
 - 10) Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M.: Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Engineering Structures*, Vol.32, No.11, pp.3639–3649, 2010.
 - 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) Alipour, A. and Shafei, B.: Seismic resilience of transportation networks with deteriorating components, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015015, 2016.
 - 13) Reed, D., Wang, S., Kapur, K., and Zheng, C.: Systems-based approach to interdependent electric power delivery and telecommunications infrastructure resilience subject to weather-related hazards, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015011, 2015.
 - 14) Quiel, S. E., Marjanishvili, S. M., and Katz, B. P.: Performance-based framework for quantifying structural resilience to blast-induced damage, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015004, 2015.
 - 15) Burton, H. V., Deierlein, G., Lallemand, D., and Lin, T.: Framework for incorporating probabilistic building performance in the assessment of community seismic resilience, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015007, 2015.
 - 16) McAllister, T.: Research needs for developing a risk-informed methodology for community resilience, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.8, pp.C4015008, 2015.
 - 17) Park, J., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M., and Linkov, I.: Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems, *Risk Analysis*, Vol.33, No.3, pp.356–367, 2013.
 - 18) 土木構造物共通示方書 – 性能・作用編, Technical report, 土木学会, 2016.
 - 19) 土木構造物共通示方書 – 基本編/構造計画編, Technical report, 土木学会, 2016.
 - 20) Esposito, S., Stojadinović, B., Babič, A., Dolšek, M., Iqbal, S., Selva, J., and Giardini, D.: Engineering risk-based methodology for stress testing of critical non-nuclear infrastructures (stress project), *16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago*, 2017.
 - 21) Mignan, A., Giardini, D., Cotton, F., Iervolino, I., Stojadinovic, B., and Pitilakis, K.: Harmonized approach to stress tests for critical infrastructures against natural hazards (stress), *16th World Conference on Earthquake, Santiago paper*, No. 4205, 2017.
 - 22) Applied Technology Council (ATC): Earthquake-resilient lifelines: Nehr research, development and implementation roadmap, Technical Report NIST GCR 14-917-33, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2014.
 - 23) Applied Technology Council (ATC): Critical assessment of lifeline system performance: Understanding societal needs in disaster recovery, Technical Report GCR 16-917-39, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2016.
 - 24) 内閣官房: 国土強靱化基本計画, 2014.
 - 25) Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., and Zinke, T.: Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.20, No.2, pp.04014004, 2013.
 - 26) 小川智弘・中洲啓太・尾浦猛人: 先行事例における技術提案・交渉方式の効果と課題, 2017.

(2017.9.1 受付)