

3章 地震に強い社会基盤システムの構築

3.1 地域社会システムと構造物の耐震性

3.1.1 システム全体系の信頼性向上

土木施設の耐震安全性・信頼性の向上を図るにあたって、個々の構造要素やその集合体より形成される構造系としての耐震性能を向上するだけでなく、システム全体、公共インフラストラクチャー全体、ひいては、都市システム全体としての機能性が、地震時にも著しく損なわれることのないように、十分に配慮されなければならない。

道路施設や河川堤防などのように、線状・面状な広がりを持つシステムにおいては、地震によるわずか一部分の損傷が、システム全体系の機能を大きく損ねる可能性がある。こうした特性を踏まえ、個々の構造要素（例えば、上部構造、支承、橋脚、基礎）やその集合体よりなる構造系（例えば、橋梁、区間、路線）の耐震性能を向上するだけでなく、システム全体（例えば、道路網、鉄道網）の地震時機能性が効率的に向上されるよう、留意する必要がある。また、個別システム機能の間のインターフェース部分における影響波及が盲点となりやすいことに注意が必要である。たとえば、港湾施設や空港施設が健全でも、アクセス道路が損傷を受けると本来の機能を発揮し得ない。施設の管理主体の相違が地震防災性の効率的向上を妨げることのないよう調整を図り、公共インフラストラクチャー全体（例えば、交通運輸体系）、さらには、都市システム全体としての機能性が地震時にも著しく損傷を受けるとのないように、十分に配慮されなければならない。構造要素～構造系の性能規範に関しては、「レベル1地震動」と「レベル2地震動」のそれぞれに対して、所定の耐震性能（使用性、安全性、修復性、損傷度など）を満足するべく、照査項目（保有耐力、残留変形、ひび割れ幅など）を定め、許容被害（外力レベルと施設重要度により定められる許容損傷度）を規定するような体系的手続きが整備されつつある。同様の観点から、システム全体～公共インフラストラクチャー全体～都市システム全体においても、各地震動レベルに対して保持すべき性能規範を明確に規定しておく必要がある。

3.1.2 地震時システム・パフォーマンスの照査

レベル2地震動への対応においては、ハード的な対策とシステム的な対策をバランス良く組み合わせることにより、それぞれが相互補完的な役割を果たすことが重要である。それが実現されていることを確認するため、「地震時システム・パフォーマンスの照査」を行うことが望ましい。

「レベル2地震動」を視野に入れた土木構造物の耐震設計法においては、非常に稀な巨大外力によって生じる損傷は、ある程度やむを得ないものとして許容されるものの、それと同時に、重要構造物では重大な機能損傷を回避することが要求されている。従って、いわゆる「ハード的な対策（構造物の耐震設計および耐震補強）」と「システム的な対策（多重化、代替性の確保など）」をバランス良く組み合わせ、それらに相互補完的な役割を付与することが必要である。すなわち、

- (a) 各構造要素が全体系の中で果たす役割を明確化して、どの程度の耐震性能を保有すべきか、システム特性を考慮しながら検討した結果を構造物の耐震設計にフィードバックすること、
- (b) 構造要素に十分な強度を付与できない場合には、リダンダンシー、バックアップ、ブロック化、フェールセーフなどのシステムの側面から被害軽減に寄与する対策を積極的に活用すること、によって、合理的に耐震性能を向上することが必要である。このためには、構造要素の耐震性能の照査に加えて、いわば「地震時システム挙動の照査」を行い、所要の機能が満足されていることを確認することが望ましい。

3.1.3 耐震性能決定の基本的考え方

- (1) レベル2地震動に対する新設構造物の耐震性能は、その施設の重要度に応じて決定する必要がある。その際、施設の重要度は、施設を取り巻く種々の地域的条件や施設の利用条件などに応じて、費用便益分析の考え方を基礎において決定すべきである。
- (2) レベル1地震動に対して、基本的にはいずれの新設構造物においても「無被害レベル」の耐震性能を要請することは、現時点での技術的及び社会経済的条件を前提としたシビルミニマムの要求とみなされる。
- (3) 既設構造物については、耐力劣化・既存不適格等の問題が存在し、レベル1地震動に対する「無被害レベル」までの耐震補強が急務である。しかし現実問題としては予算と時間が限られており、新設構造物と同様、対象施設・構造物を適切に選定するための客観的かつ定量的な決定方法が必要である。

構造物の耐震化によって得られる（不確定な）損害回避の利得は、構造物の耐震性能や対象とする地震動の大きさや発生確率、その構造物の置かれた地域条件や施設の利用条件、あるいは交通施設などでいえばネットワークの特性、などに応じて大きく変化する。一方で、耐震化のための費用も地震動の大きさや構造物に要求する耐震性能などによって少なからず変化する。したがって、限られた資源を有効に活用していくためには、新設構造物の設計時に要求する耐震性能も、耐震化によって期待される損害回避の社会的利得と、耐震化に必要な費用との比較考量に基づき、状況に応じて決定することが必要となる。

こうした認識に基づいて、「土木構造物の耐震基準等に関する提言」では、構造物の保有すべき耐震性能は、施設の重要度を考慮して決定すべきであることが提言されている。現時点では、この重要度のランクは、各分野毎に工学的経験に基づいて決定しているのが実状である。しかし、上記の考え方に立つならば、施設の重要度、言い換えれば構造物の耐震性能は、上述のような施設の置かれた種々の条件や、対象とする地震動の大きさと発生確率などに応じて、費用便益分析の考え方を基礎に置いて合理的に決定していく方法（例えば、別添資料1）を今後確立し実務に反映していくことが必要である。特に、大きな地震動をもつ反面、発生頻度が低いL2地震動では、構造物の要求耐震性能を慎重に決定することが必要である。これについては、次項8.2 レベル2地

震動に対する新設建造物の耐震性能決定の考え方で述べる。

レベル1地震動は、相対的に地震動が小さく、また建造物の物理的寿命の間に発現する可能性も十分に高い。このため、上記のような被害回避の便益と耐震化費用の比較考量という費用便益分析の考え方に立っても、非常に特殊なケースを除けば、基本的には施設によらず「無被害」レベルの耐震性能が要求されるものと考えられる。(この点は、確認分析が必要ではある。)これは、「現時点での技術的水準や社会経済的条件下で、便益と費用の比較考量を経て、結果として建造物に共通して要求される耐震性能」という意味では、ある意味ではシビルミニマム的な要求とも言える。

本報告では、地震工学的に定められたレベル1地震動とレベル2地震動という二種の設計対象地震動を前提として記述したが、設計対象地震動をどのようにして決定すべきかという問題も、本質的には本報告で設定している問題の上位に位置づけられる重要な課題である。

例えば、「レベル1地震動」は、個々の建造物に破壊が生じないか生じても軽微であり、建造物単体として一定水準以上の機能低下が生じない地震動の最大値と定義し、「レベル2地震動」は、“システムの破壊”とそれに起因する“カタストロフィ”が発生しない地震動の最大値と定義することも考えられる。具体的な地震動レベルとしては、現時点では、現行の設計基準で想定している地震動をもってレベル1地震動とし、阪神淡路大震災あるいはそれを経験することにより高い蓋然性を有すると認識するに至った地震動をもってレベル2地震動とすることが妥当であると考えられる。しかしながら、今後は、設計地震動を適切に設定できるよう、耐震投資とその下でカタストロフィが生じない地震強度の最大値との関係、カタストロフィの回避に関する地域住民の選好、シビルミニマム水準、等に関する知見の蓄積が必要であり、このための研究を推進する必要がある。(別添資料2)

3.2 レベル2地震動に対する新設建造物の耐震性能決定の考え方

- (1) レベル2地震動に対する新設建造物の耐震性能は、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。具体的には、施設の置かれた地域特性や施設の利用特性等に応じて、施設の重要度ランクを判別し、その重要度ランクに応じて建造物に要求すべき耐震性能ランクを判定する、簡便で実用的な手法を早期に開発することが必要である。
- (2) 耐震性能検討の際には、人命・生存への直接的影響、緊急活動や二次災害発生への影響、被災地域住民の生活機能確保への影響、復旧に伴う種々の経済的被害、などを幅広く対象として損害算定する必要がある。
- (3) 希少現象ではあるものの、ひとたび発生すれば極めて甚大な損害をもたらさうるL2地震動に対しては、耐震性能決定の際に、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、限られた資源しか持たない個人や国家にとっての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である。

個々の構造物の耐震性能を決定する際に、その構造物が置かれた地域条件や利用条件、ネットワークの特性などを個々に考慮して、耐震性能に応じた損害回避便益と耐震化費用の比較考量し、確率的效果も含めて純便益が最大となるように耐震性能を個々に決定するのが理屈の上ではベストではある。しかし、これは実際上は設計労力・費用の上から現実的ではなく、何らかの実用的な手法の開発が必要である。

例えば、一つの手法は、次のようなものである。施設特性（周辺地域の土地利用や人口密度などの地域条件、常時の利用者数などの利用条件、発災後の利用条件、周辺関連施設を含めた当該施設のネットワーク性状や代替性、発災後の緊急活動体制・救援体制）を予め類型化しておく。また、耐震性能（機能上も無被害、構造上無被害、構造上軽微な被害、修復可能な被害…、崩壊など）も同様に類型化しておく。そうした類型別にモデルケースを設定して費用便益分析を行い妥当な要求耐震性能ランクを見だし、施設類型 重要度ランク 耐震性能ランク、と繋ぐ設計資料を整えておく。実務的には、この設計資料から、施設の置かれた条件に応じて要求耐震性能ランクが容易に判定できる。

損害回避便益の内容としては、施設特性と耐震性能に応じて変化する、種々の損害内容を算定することが必要である。具体的には下記のような項目があげられる。これらには、金銭的損害から人命の損害など極めて多様なものが含まれる。これらの項目には、定量的な評価が現時点では必ずしも容易ではないものや、あるいは項目間の重み付けについても検討が必要なものもある。定量化のための研究努力が必要であるが、暫定的には定性的であれ考慮していくことが重要である。

- a. 人命・生存への直接的影響
 - 1) 交通施設の走行車両等の利用者に及ぼす損害
 - 2) ガス漏出による危険や感電などによる損害
 - 3) 構造物倒壊等により周辺住民に及ぼす損害など
- b. 緊急活動や二次災害発生への影響
 - 1) 避難・救助・消火など緊急活動に対する交通路確保上の損害
 - 2) 高潮、洪水等二次災害の抑止機能上の損害など
- c. 被災地域住民の生活機能確保への影響
 - 1) ライフライン系・交通系のミニマム確保上の損害など
- d. 復旧に伴う種々の経済的被害
 - 1) 復旧工事の金銭的費用

- 2) 復旧工事に伴う交通阻害
- 3) 復旧までの地域経済損失など

現時点では、カストロフィックな損害の効果を適正に評価する既に十分確立された実用的方法はないが、一方で地震発生確率と損害回避便益を乗じた単なる期待値に準拠して施策・対策を講じるのでは、巨大災害に対する国民の付託に応え得ないことも明確な事実といえる。専門家や市民への意識調査に基づく巨大損害の増幅効果の推定などを含めて、実務的に利用可能な成果を早期に出すことが必要である。

3.3 既設構造物の耐震補強の考え方

既設構造物の耐震補強については、限られた予算と時間の制約条件のもとで補強を要する対象施設及び対象構造物を適切に選定することが重要である。これには耐震補強に関連する要因を網羅的に抽出し、それらを可能な限り定量的に評価した上で、客観的判断を下すことが望ましい。

- (1) 既往の地震による損傷や老朽化に伴う構造物の耐力劣化、内陸活断層によるレベル2地震動への対応の必要性、新たな基準制定に伴う「既存不適格」の発生などから、耐震補強の推進が急務である。しかしながら膨大な構造物群を一律に耐震強化することは不可能であり、限られた財源と時間の制約下で効果的投資を選択的に行わなければならない。そのためには客観的判断のもとに対象施設の優先順位を決定するとともに、費用便益分析を用いて代替案を選択することが適当である。
- (2) 第一次提言においては、土木構造物の保有すべき耐震性能を規定する要因として、「重要度」が定義されている。この「重要度」は、(i) 構造物が損傷を受けた場合に人命・生存に与える影響の度合い、(ii) 発災後の避難・救援・救急活動と二次災害防止に与える影響の度合い、(iii) 地域の生活機能と国際的視野をも含めた経済活動に与える影響の度合い、(iv) 都市機能の早期復旧に与える影響の度合い、の4区分により説明されている。さらに耐震補強の優先順位に関しては、これらに(v) 地震発生の切迫度、(vi) 構造物が構成するシステム全体の地震防災性向上に与える影響度合い、(vii) 経済性、の3区分が加えられた上で、「優先順位の決定に際してはその根拠を明確にしておく必要がある」と明記されている。
- (3) 耐震補強の計画策定にあたっては、どの施設（あるいは地域）を対象とするか、さらに選定された施設（地域）内でどの構造物を対象とするかの判断が重要となる。言い換えると、施設または地域といったシステム間の競合、施設内の要素構造物間の競合が発生する。その測定・評価ならびに優先順位の決定に際して考慮すべき事項として、以下の項目が挙げられる。

- (a) 耐震化効率上の重要度
 - ・「構造要素」「構造系」「システム全体」「公共インフラ全体」「都市システム全体」への影響評価
- (b) 平常時の機能的重要度
 - ・サービス機能の重要度・公共性
 - ・階層的重要度（基幹施設，幹線）
- (c) 緊急時の機能的重要度
 - ・救急医療活動・消防活動・応急復旧活動への影響の回避
 - ・代替機能の有無
 - ・地形的・地理的条件（ネットワーク形態，隘路）
 - ・地震後の被災～復旧フェーズと機能要求水準の変化
- (d) 二次災害波及性の面での重要度
 - ・人命の損失，周辺施設や周辺空間への影響，社会機能への間接的影響の回避
- (e) 復旧効率上の重要度
 - ・復旧の優先順位・復旧戦略（同一システム内，異種システム間）
 - ・復旧の難易度（時間，費用）
- (f) 施設のライフサイクル・コスト
 - ・施設の供用期間と経年，老朽度，取り壊し・再建計画，資産価値
- (g) 地域における地震発生の切迫度
 - ・将来的な地震危険度

- (4) 中長期的な構造物の維持管理計画においては耐震補強は計画目的の一つとして織り込まれる。また既存不適格の解消は都市計画の観点からも継続的に取り組むべき重要課題である。今後，他の計画目的とのすり合わせについても何らかの方法論が必要となろう。

3.4 カタストロフ・リスクの経済評価と費用負担

- (1) 地震災害リスクを制御する方法としては，リスクの生起状態を直接的に制御するリスク・コントロールと地震災害により生じるリスクを社会全体に分散するリスク・ファイナンスがある。例えば，耐震設計はリスク・コントロールの技術であり，地震保険はリスクファイナンスの技術である。地域社会全体での最適な防災計画を立てるためには，バランスのとれたリスク・コントロールとリスク・ファイナンスの役割分担を達成することが必要である。
- (2) 耐震強化投資は地震により生じる巨大な被害（カタストロフ・リスク）を回避する役割を持

っている。その経済効果には、期待被害額の軽減効果とカタストロフ回避効果が含まれる。耐震強化投資の便益が期待被害額のみで計測できるのは、個人の被害額が微小であり、災害による被害が完全に地震保険でカバーされる場合に限られる。耐震強化投資の経済便益を正しく把握するために、カタストロフ回避便益を計測する方法を開発する必要がある。

- (3) 地震による被害が巨大であることや個人が地震リスクを適切に認知することが困難であるため、地震災害リスクをリスク・ファイナンス技術により完全に担保することは不可能である。また、耐震投資の便益や費用、地震災害によって生じる被害は最終的にある特定の人間が負担することになる。したがって、社会的に望ましい耐震投資の費用負担ルール、被害者救済ルールを確立すべきである。

リスクとは一般にその生起確率の客観的な査定を行うことのできるような不確実な現象を意味する（別添資料8-3の1）。さらに、リスクは負の利得（被害）のみが生じる純粹リスクと正負いずれの利得も生じる投機的リスクとに分けることができる。従来リスクマネジメントは純粹リスクのみを対象としてきたが、リスクの多様化やそれらに対するヘッジの手法の多様化が進むなかで、その差別化は意味をなさなくなりつつある。一般に、リスクマネジメントの技術は「リスク・コントロール」と「リスク・ファイナンス」に大別される。地震災害を対象とした場合、耐震工学が提供するハード面の対策は前者に含まれ、地震保険の普及は後者に該当する。ある個人にとっては、両者とも当該個人の被災時の損失を軽減するように機能する（別添資料8-3の4）。しかし、地域社会全体の損失という観点からは、両者が果たす役割は非常に異なる。地震保険は地震によって生じた損害を個人間に分散させることを目的としているが、それが普及しても社会全体の損失が変化するわけではない。保険の役割は、多大な損失を被った個人の損害の一部を、災害により損失を受けなかった個人にも負担してもらうという役割を果たすことになる。一方、防災投資の役割は社会全体の期待損害額を小さくするものであり、災害後の個人間の損失の再分配においては何も働かない。このように、リスク・コントロールとリスクファイナンスの役割は明確に異なっており、望ましい防災計画をたてるためには、両者の間に最適なバランスを確立することが必要となる。

耐震投資の経済便益は、期待被害額の減少効果として計測されることが多い。耐震投資による地震災害リスクの軽減便益が期待被害額の減少効果に一致するためには、1)個人がリスクに対して危険中立的な選好（資料3の5）を持つと同時に、2)被害が生じてもそれが現状に瞬時に回復されることが前提となる。通常、個人は危険回避的な選好を持っているのが通例であり、このような個人は生じるであろう不確実な被害に対してリスクプレミアム（資料3の5）を持っている。いま、地震災害による被害が地震保険によりフルカバーされる場合には、耐震投資の経済便益は期待被害額とリスクプレミアムの変化として計測することができる。

一方、地震災害リスクには次のような特性がある。a) 事象が生起する確率は稀少であるが、ひとたび生起すれば非常に多くの個人や資産に甚大な被害をもたらす(稀少頻度・巨大性・集合性)、b) また、それら起こりうる被害のなかには、人命の損失等、一度遭遇すればもとの状態に戻ることが不可能な被害も含まれている(非可逆的リスクの可能性)、c) 耐震投資による災害リスクの軽減効果の便益が、地震保険や社会保障の制度などリスクファイナンス技術の利用可能性に依存している(経済便益の制度依存性)、d) 災害が稀少現象であることから、家計が防災投資に対する便益を理解しにくい。換言すれば、市場メカニズムに防災投資に対する選好が顕示されにくい(防災投資便益の認知の困難性)、という特殊な性格を持っている。一般に、保険市場が成立するためには「契約者に生起する保険事故の相互独立性」が成立する必要があるが、地震災害リスクは巨大であり保険の成立条件を満足しない。近年、新しい金融デリバティブを導入したような地震保険が開発されつつあるが、このようなリスクファイナンス技術により地震災害リスクは部分的には担保可能になりつつある。しかし、資料に示すような理由により、地震災害リスクを完全に担保することは不可能である。このように地震保険を通じてカバーできないような被害が生じる場合、耐震投資によるカストロフの回避に対して社会全体としての集合的なリスクプレミアムが存在する。したがって、耐震投資の経済便益は、期待被害額とカストロフ回避便益(個人レベルでのリスク回避プレミアムと社会全体としての集合的なリスク回避プレミアムの総和)の和として表現することができる。このようなカストロフ回避便益に関しては研究の緒についたばかりであり、今後の研究の発展が望まれる(別添資料8-3の6)。

人間は(個人間で異なる)ある一定の確率以下の純粹リスクに対しては、それに対応した行動を起こさず無視をする習性があるといわれる(資料3の7)。このことは地震リスクの保険の成立を決定的に困難にしている。さらに、個人の道徳的危険(資料3の8)や無知の問題が潜んでいる。特に、「行政が全て悪い」とする風潮や日本人のお上意識の強さは、最適な災害リスクの分担や予防措置を講じることを極めて難しくしている。今後、「何が自己責任であり」、「何が公共の責任であるのか」という責任の所在について国民のコンセンサスを図ることが重要な課題となろう。しかし、「政府による安全規制を守ったにもかかわらず損害を被った場合の保証はどうすべきか」、「公共が最大限の情報や技術を駆使して施した対策を上回る災害が訪れたときに、被害は公共の責任となるのかどうか」という難しい問題がある。また、政府によるハザードマップ等の情報公開も責任の問題と密接に関係している。また、災害リスクを保険に基づいた「自己責任システム」で解決する方法は公平性の面で新たな問題を生み出す可能性がある。効率性と公平性のトレードオフの問題は非常に多方面から検討する必要があり、慎重な検討が必要である(別添資料8-3の9)。

3.5 耐震性能決定の社会的合意形成のための情報開示のあり方

- (1) 地震災害の特性，既存及び新設構造物のもつ耐震性能，あるいは耐震性能向上に必要な費用やその負担方法を国民に十分分かりやすく示すことが不可欠である．これは，費用便益分析を基礎とする耐震性能決定の前提条件といえる．
- (2) 耐震性能とあわせて，地震災害による損害の補償責任を明確にして国民に示し，社会的な合意を得ることが必要である．

既に述べられた費用便益分析的な考え方に基づく耐震性能の決定方法は，基本的には市民・国民の安全意識や支払い意志に基礎を置くものである．したがって，これは，国民自身が地震現象とその危険性，種々の施策の効果やその費用などを十分に知り，科学的で合理的な判断と行動を行うようになってこそ，意味のある決定基準となりうる．また，構造物の耐震性能の限界を知っておいて初めて，国民は非常時において適切な防災行動をとることが可能となり，翻って地域社会の実質的な安全性向上にもつながる．そうした意味で，国民には地震問題あるいは耐震問題について十分な情報の提供と専門的な解説支援を行うことが極めて重要である．また，耐震性能決定の際の，広域的な損害回避便益や耐震強化費用，及びそれをベースとした検討プロセスなどを公開し，広報していくことが重要であることも当然である．

交通施設は一般市民が日常的に使用し，地震などによる構造物の破壊の性状によっては生死にかかわり，また発災後の生活にも強く影響をもたらす．また，電気・ガス・上下水道・電話などのライフライン施設に関しては，その機能停止がすぐに生死にかかわることは少ないが，一定水準以上の生活の維持のためには欠かせないものである．こうしたことから国民はその耐震性能の高低には極めて関心が高い．ところが，国民は大規模地震や大事故の後では関心も高いが，時間が経つにしたがってその関心も薄れ，防災意識も低下しがちである．こうした点からも，継続・定常的な啓発活動が不可欠である．

一方，わが国の世論においては，公共・公益施設における安全問題は，ディープポケットともいえる官庁を初めとする施設管理者側により大きな責任を要請してきた傾向が否めない．また，建前としては「人命は地球よりも重い」といわれ，安全に関わる問題がともすると「安全か危険か」という二分法で捉えられがちで，これを計量的に捉えることをわが国の社会がタブー視してきたことも事実である．こうした背景の下に従来，国民と施設管理者側が安全の問題に関する本当の意味での対話は著しく欠如していたと言わざるを得ない．この結果，どの程度の規模の地震が起きると，構造物がどのような破壊に至り，走行中の車や列車に何が起こるのかなどといった情報が，広くまた分かりやすく周知され，また，構造物の耐震性能の向上のためにはどのくらい追加の費用が必要でそれをどう負担することになるのかも知らされることが少なかった．こうした情報開示と専門的解説の充実は，負担を含めた社会的な合意を前提として構造物の合理的な安

全設計方法を確立していく上で極めて本質的である。

構造物の耐震性能を有限な範囲で決定しようとすることは、それを超える被害に対して、設計は責任を持たないということである。場合によっては、L2クラスの地震に対しては施設管理者は責任を負わないという判断も考えられる。従来この点が明確でなく、地震などの自然災害の場合であっても、施設管理者側の責任とその後が生じる損害補償も、施設管理者の立場に応じてアドホックに決められるケースが多かった。鉄道事業やあるいは今後増加すると予想されるPFI事業などにおいては、一層の責任の明確化が不可欠となる。いずれにしても明示的に国民に示して社会的な合意を得ることが必要である。