

社会基盤施設の地震安全の論理構築にむけて

地震工学委員会・耐震基準小委員会・地震安全評価WG

2011年東北地方太平洋沖地震では、広域災害の復旧・復興に社会基盤施設の果たす社会的な重要性が再認識された。また、同地震では、設計で直接的に考慮されてこなかった事態への対応の必要性も認識された。このような状況の中、これからのエンジニアには、災害を想定するための最大限の努力をはいつつ、それでも想定しきれない部分が残るという謙虚さをかねそなえた姿勢が求められる。本WGでは、想定外を単なる想定外で終わらせないために、エンジニアとして考える合理性を実現し、社会基盤施設の地震安全を実現するための論理を構築し、具体的な方法論を示すことを試みている。

1. 地震安全の論理構築の基本的な考え方

1.1 東北地方太平洋沖地震の後の地震安全の論理

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震においては、津波による被害や原子力発電所の被災等社会的な影響が甚大である。その一方で、鉄道橋などの地震動による被害は限定的である。阪神大震災への対応の後、様々な努力と取り組みがなされ、耐震設計の技術は高いレベルに達している。東北地震においても、破壊的な被害を免れた事例が多々みられた。しかし、東北地震によって、技術的な課題が浮き彫りになったこともまた事実である。本地震で得られた知見に基づき、耐震設計・地震防災のあらたな展開を目指すことが求められていると考えるべきであろう。

東北地方太平洋沖地震の被災経験からもとめられるのは、いわゆるレベル2を超える非常に大きい地震の有する不確実性への対応であろう。本地震への対応に関しては「想定外」という言葉が安易に連呼されている。それに対応して、設計において、「最悪」のシナリオを想定し、それを超えた場合にも、ねばり強く耐えることをめざすべきであるという発想に基づく提案は数多く見られる。しかし、安全性は、一般に利便性や経済性とトレードオフの関係にある。ある地域で防災対策の充実をはかることが、他の地域の設備の不十分さにつながることもありえる。経済や人口の成長が見込まれない現在の日本において、地震安全にどのように投資していくのかは難しい課題であろう。

翻って、東北地方太平洋沖地震の事例を見てみると、「想定外」を声高に叫ばずとも適切な対応が可能であったと考えられる事例も少なくない。技術者には、冷静で合理的な議論が求められているのではないだろうか。

東北地方太平洋沖地震においては、構造物被害以上に、

社会的な影響が議論されることが多い。福島第一原発の被害は社会的に大きい影響をあたえ、津波による被害は社会やコミュニティの被災という社会問題をもたらした。巨大自然災害は社会の問題であることを改めて認識させられたといえる。同様に、社会基盤施設の地震安全の議論においても、単体を強く作ることに加え、社会の中での位置づけを考慮することが求められる。したがって、社会基盤施設の合理的な地震安全性を実現するためには、構造物を対象とした技術に加え、社会的な環境も視野に含めた検討が必要となるであろう。

一方、社会においては、「想定」を超えた事象にも粘り強く耐える地震安全の実装は容易ではない。技術的な困難があることも事実であるが、それを実装する過程においても様々な難しさがある。

技術者は、想定を超えるような状況への対応に対する必要性を感じ、また、自らの経験や判断にもとづき合理的な決定が可能であると判断できることもある。しかし、コストなどのいわゆる経済的な合理性や、既存構造物との整合性を考慮する必要性などの社会的な制約のため、それを実現することができないことも多い。暗黙知の形で蓄えられている技術も少なくないが、その合理性を客観的に説明することができず、既存の評価体系のフレームワークのなかで、合理的な解に近づける努力をすることも多い。社会的な状況も考慮した上で地震安全性を合理的に評価するためには、より広い範囲の知見を統合する必要があるため、問題はさらに難しいものとなる。

このような状況を改善し、優れた地震安全性能を実現するためには、専門家では無い意思決定者の考えを尊重しつつ、まだ形式知化されていない知見まで幅広く活用できる社会的な環境、つまり、制度的な枠組みが必要である。

従前の技術や体制を十分なものであると強弁するのは愚行であるが、安易に使われる「想定外」というような曖昧な概念に引っ張られ、技術的根拠を見失うことは避けねばならない。既存の技術の範疇を超えるため、十分な対応が難しいという状況をしのぐために、「減災」等のキーワードのもと、不適切な性能の低減を許容するような事態も避けねばならない。

地震学をはじめとする様々な科学の知見に翻弄されるのではなく、それらを利用し、解析や設計、施工の技術の進歩を活用し、安全を合理的に実現していかなければならない。それでもすべての「想定外」に対応できるわけではない。しかし、想定外に真摯に向き合うためには、そのような方法論こそが必要であろう。

1.2 社会基盤施設の“地震安全性”

本討論会では、上述のような点に着目した議論を展開するために、最初に問を提起させていただく。

問 社会基盤施設の“地震安全性”とは何か。

構造物は“静物”であり、その物理的な耐震性能は固定的である。そのため、外力の想定が変わる（一般に大きくなる）たびに、地震安全性は変わる（低下する）ことになる。しかし、実際の構造物の耐震性能と、その形式的な物理表現にはかなりの差がある。実際の性能は、構造細目や技術レベル等の様々な要件により影響を受ける。考慮した設計震度と地震動の（理論的には設計震度に相当する）応答スペクトルを上回る外力が作用したとたんに深刻な損傷をうけるとは限らない。これらの影響は（余力が正である場合）耐震裕度等と呼ばれ、多くの技術者の認識するところであるが、その一方で、定量化は必ずしも成功していない。（「いい逃れ」のようにとられることすらある。）

これは、耐震性能は、技術者の技術的判断によって評価せねばならない面があることを示唆する。そのような技術的判断は、力学などの数理物理学的な知見に加え、実験、被災事例に基づく経験的な知見や、地盤条件などのデータの信頼性やその影響程度など幅広い観点からの判断が必要になる。適切な判断は、耐震性能を高める一方で、このような判断は、情報が極端に閉鎖的な場合に曖昧ななれ合いを許容する事態になるなど、恣意的になる危険性も有する。このような技術者の判断根拠やその内容、さらには、その質を確保する体制などは、間接的には、高い“地震安全性”を実現する要素であると考えることが出来る。

社会基盤施設の地震安全性というより広い概念についても、同様の理論が当てはまる。ただし、定量的に示せ

る範囲はさらに狭まり、専門家や非専門家等の多数の判断に依拠する部分はさらに高まる。維持管理体制、情報の収集・管理・公表の仕組みなど、かなり幅広い要素が、地震安全性に、直接的、間接的に組み込まれることになる。

以上のような議論に鑑み、本稿では、耐震性能を大きく2つの要素から構成されることを陽に考慮するものとした。

1) ハードウェアとしての地震安全性

- ・ 耐震強度などの物理的な構造物の性能
- ・ 適切な条件を想定したうえで、十分な耐震性能を実現するように設計・施工・維持されていること

2) ソフトウェアとしての地震安全性

- ・ 設計思想や制度等の帰結として、社会との相互作用により実現される地震時の安全性
- ・ 技術的に想定される性能の（不）確実性や信頼性等に基づき、当該構造物の物理的性能が社会の地震安全性に対して有する影響が把握されていること

このように定義された耐震性能は、ハードウェアという静的な要素に加え、ソフトウェアという比較的低コストで調整が可能な要素からも構成されるため、設計基準や理学的知見等の社会の認識の変化にも合理的に対応できる可能性がある。ハードウェアそのものを補強しなくとも、その構造物の耐震性能を強化することが可能となる。例えば、想定される地震のみなおしに伴い、入力地震動が大きくなる場合に、復旧体制の充実等を実施することにより、耐震補強等を行わずに構造物の地震時安全性を維持する手法が考えられることになる。

このような考え方を、公共性の高い社会基盤設備の地震安全性を対象として体系化し、技術者を含む様々な方面の知見を地震安全性に反映させることが出来る仕組みが構築されることが望ましいと考える。そのためには、リスクコミュニケーション²⁾や技術者の養成等を含めた広い視野を見据えた戦略が求められよう。

以下では、設計思想、地震動、構造技術、社会制度の各視点から、WGでの議論の一端を紹介したい。

2 設計基準の位置づけ

2.1 設計プロセスと現行の設計基準

構造設計（Structural design）では、構造物が竣工してからその使命を果たすまでの期間、構造物に働くと予想される荷重や外力に対して、構造的に安全であるように設計されていなければならない。そのためのプロセスを簡単に示すと、①調査、②構造計画、③断面設計、④照査、⑤図面、となる。性能規定型の設計体系に移行した

現在の多くの土木構造物の設計基準は、上記プロセスの④に主眼が置かれている。「④照査」は、力学の土俵上で定量的に分析・評価する行為であり、現在の設計基準に記載される柱である。これはマニュアル（設計基準や参考図書）に従い計算することで解が得られるが、これは、設計行為の一部である。現行の設計基準は、狭義の設計基準であり、本来はより上流に位置される構造計画も含めてより広義に捉える必要がある。

2.2 Code writer の責務

構造物の耐震設計は、地震動や地盤など多くの不確定を有する現象を相手にするため、耐震設計という行為は、大きな不確定性の中での意思決定のプロセスそのものであるとも言える。例えば、鉄道や道路の耐震設計には経済性が付きまとうのが現実であり、力学的合理性の追求の過程で、経済性と手を結ぶことになり、社会が容認しうる妥当地震動に対して構造物を設計することになる。つまり、種々の制約条件に基づくあるシナリオの下で安全性を確保しているに過ぎず、どんなに突き詰めても 100%の安全を確保することは困難であり、シナリオを逸脱した事象に対する目配せが必要になる。これを曖昧にするのではなく明確にすることが、Code writer が東北地方太平洋沖地震で学んだことであろう。

「東北地方太平洋沖地震を踏まえて、想定外の地震に対しても壊れない構造物を設計すべきである」という意見もあるが、例えば、経済性を度外視して、地震動を現在よりも数倍も大きくして崩壊しない構造物を設計する行為は、耐震設計に携わる技術者としては無責任であり、少なくとも現在の我国の経済情勢の中では受け入れ難く、今後の方向性とは言えないと思われる。

2.3 あらたな設計基準の枠組み

従来の耐震設計では、想定される地震動（設計地震動）に対して安全性（崩壊しない）を確保することを目的としてきた。この従来の耐震設計の枠組（狭義の耐震設計と言うべきかも知れない）に加えて、耐震設計で制御してきた範囲を超えた不測の事態に対処するための枠組みが必要であり、これを危機耐性と呼ぶことにする（図 1 参照）。後者は耐震設計で制御可能な事象の「補集合」に近いものがあり、耐震設計での守備範囲が広ければ、後者の守備範囲は小さくなり、その逆となれば大きくなる関係にある。このように考えると、今回の地震を経験したとしても、耐震設計（狭義）の基本的な枠組みは現状の耐震設計基準のままでよく、大きな変更は必要ないのではないかと思う。これに加えて、後者を盛り込むことが新しい耐震設計の枠組みに繋がるものと考え

る。L2 を超える地震動の可能性、及びその場合には設計で想定している限界状態を超える可能性を否定せず、このような不測の事態への「配慮」を求めることを考える。それに向けての課題を挙げてみると、以下のようなものが挙げられよう。

図 1 は、耐震設計と危機耐性の関係の概念図。図は二つの領域に分かれている。左側の領域は青色で「耐震設計」とあり、その下に「従来の耐震設計で制御可能な事象」とある。右側の領域はピンク色で「危機耐性」とあり、その下に「耐震設計で制御可能な事象の「補集合」」とある。二つの領域は斜めの線で区別されている。

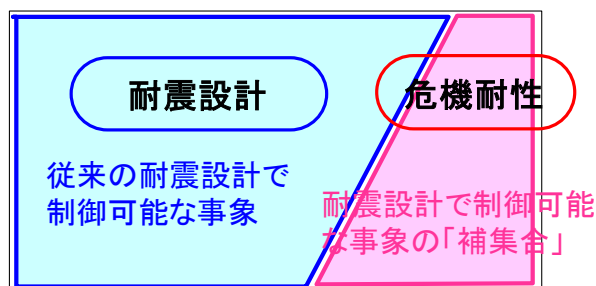


図 1 耐震設計と危機耐性の関係の概念図

（1）解析手法の高度化

安全性を照査するためには、構造物が崩壊しないことを確認しなければならない。しかし、現状の設計で定義している終局は、構造物が崩壊するはるか手前の状態で規定されている。これには、構造物全体の破壊までを表現できる解析手法がないためである。終局限界を超えた状態での議論を行うためには、まずは終局を知る必要があり、早急に構造物の崩壊までを表現可能な解析手法の構築と、終局状態の再定義が必要である。

（2）不測の事態にも破滅的な状態に移行しないという要求性能

L2 地震動を超える地震動に対しては終局限界を超えることを認め、それがシステムとして破滅的な状態に移行しないこと、つまり危機耐性を要求性能の 1 つとするという考えることにする。そのためには、まずは、(i)設計で想定している状態を超える不測の事態が発生した場合に、構造物のダメージの状態（広義にはシステムとしてのダメージかもしれない）を的確に予測しておくこと、さらには、(ii)そのダメージが拡大することを防止することが重要であろう。

前者に対しては、(1)で述べたように耐震設計で利用可能な終局までの解析コードの開発と普及が必要不可欠である。また、想定を超えた状態に対して破壊に至るプロセスが鈍い構造型式とすることが望ましい。これには、まずは曲げ破壊型の構造物を設計することが最も素直な方法として思いつく。その他、ロバスト性などを有する構造型式への誘導や、鈍感な構造系³⁾という概念の導入などの対応が望まれる。

後者については、まずは、路線計画にまで耐震設計の段階で言及することを考える枠組みが必要である。路線計画が決まった段階で、それに見合う構造物を耐震設計するのではなく、耐震設計からみた路線計画のあり方を示すべきであろう。さらには、構造物のダメージを想定し

て、予め構造物への進入路や作業ヤードの確保や構造物下の利用を制限することなどが、重要である。例えば、東北地震では新幹線を早期に復旧することに成功しているが、構造物下の店舗利用がなかった点や、高架橋の側道が利用可能であったことなども功を奏していると思われる。また、2004 年新潟県中越地震では新幹線が脱線したが、その際の復旧では、周辺が田園地帯であったために、大型重機を設置することが出来た。なお、これらは、いわゆる「耐震構造計画」の範疇に含まれるものであり、不測の事態に備えるためには、構造物の周辺環境を含めた計画がいかに重要であるかを示唆しており、過去の事例に学ぶことは多い。

(3) 耐震構造計画の強化

図 1 に示す危機耐性の概念は、抽象的であり曖昧な面を伴っており、数学的にうまく定義できない場合も多い。よって、「照査」体系に乗せるのではなく、「配慮」事項として、設計の上流工程に位置する「②構造計画（耐震構造計画）」で対応するのが現実的である。この「配慮」は暗黙知の類に近い概念も含んでおり、現状の設計基準体系のままでは、一般化しにくい。

例えば、国鉄時代の先輩技術者が、設計では要求されていない項目について、これまでの経験や現場での判断に基づき特別な「配慮」をしている事例が多々ある。

このような配慮（暗黙知）は、個人の設計経験や力量に依存するので、個人差が大きい。また、どの程度の有効性なのかは、結局は地震が起これないとは分からない。そこで、設計でなされた特別な「配慮」とその結果として実際の地震に対してどうであったのかを、設計者が共有できるようなシステムを構築してはどうだろうか。これには、野津・一井が提案する Evidence-Based Design のコンセプト⁴⁾を援用できる。つまり、ある種の審査機関を学会等の第三者機関に設置し、上記の情報を集約させておき、「配慮」結果を審査するという体系があり得る。

(4) 技術者と社会との合意形成

公共構造物の安全性として社会が容認するレベルに関しては、宮路らの調査結果⁵⁾があり参考になる。この調査結果では、土木技術者と社会（利用者）の間には安全性のレベルに関して乖離が少なからずあることが指摘されている。この調査は 2004 年に実施されたものであり、2011 年東北地方太平洋沖地震を受けて、社会が容認するレベルを再調査するのも有意義であると思われる。そして、土木構造物に要求される安全という概念について、社会との合意形成が得られるように表示方法を含めて議論をしていくことが必要である。

3. 地震動研究の成果の活用

3.1 はじめに

最近の強震観測網⁶⁾の充実のおかげで、地震動に対する理解は大きく進んだ。そこで得られた知見を長期的視点に立って活用していけば、（できれば小さいコストで）少しでも地震に強い社会をつくることに寄与できるであろう。

3.2 サイト特性の重要性

一般に、地震による地盤の揺れ（地震動）は震源断層の破壊過程の影響（震源特性）と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響（サイト特性）の三者によって決まる。ここで地震基盤とは S 波速度が 3000m/s を越えるような非常に堅い岩盤のことである。

一般に地震は S 波速度が 3000m/s あるいはそれ以上あるような堅い岩盤内で発生する。地震波は、S 波速度の大きい地層から小さい地層に入って初めて増幅するという性質があるため、S 波速度コントラストが小さい地震基盤内では、地震波は距離とともに減衰する一方である。一方、地震基盤上面から地表にかけては S 波速度コントラストが時には 30 倍もあるので、そこで地震波は大きく増幅する。よって地震基盤上面は地震波が減衰から増幅に転じるターニングポイントとして重要である。

堆積層とは地震基盤上面より上にあるすべての地層を意味しており、工学的基盤面より上の浅部地盤とそれより下の深部地盤の両方を含んでいる。通常のボーリング調査では把握しづらい深部地盤が地震動に与える影響も大きい。なぜなら、地震基盤と工学的基盤との間には 10 倍もの S 波速度コントラストがあり、その分の増幅が見込まれるからである。

地点間の相対的な揺れやすさ、地点毎に卓越しやすい地震動の周期等については、かなりの確実度を持って指摘できるようになってきている。一方、相変わらず分からないのは振幅レベルの方であり、特に上限を示すことは不可能である。ただし、ごく一般的な震源パラメタの下で地震動の振幅レベルがどのようになるかの検討は比較的行いやすい。

3.3 地震動評価のポイント

上述のような地震動研究の現状を踏まえて、その成果を活用する方法について述べる。

[1] 今日、耐震性の不足している構造物を補強するための予算が十分確保できないことは、土木・建築を問わず大きな課題となってきたのではないだろうか。もし筆者がある民間会社の社長で、耐震補強すべき構造物を沢山抱えて悩んでいるとすれば、筆者が真っ先にする

ことは、常時微動計測、短期間の地震観測等の手法を駆使して、サイト特性の影響で揺れやすい場所に立地している構造物とそうでない構造物にグルーピングし、前者を優先的に補強する。もしも全ての施設を耐震補強するための予算の 7 割しか用意できないとしても、3 割の施設が「揺れにくい場所」に立地していれば、「揺れやすい場所」に立地する 7 割の施設はすべて補強でき、それにより事実上すべての施設を耐震補強したような効果が得られると思う。

同じようなことは、耐震補強すべき家屋を多くかかえる自治体等でもぜひ検討されてしかるべきと考える。常時微動観測や地震観測は費用がかかるのではないかと心配する向きもあるかもしれないが、現在ではこれらの調査は驚くほど経済的に実施できるようになってきている。なお、ここで言っている「揺れやすい」「揺れにくい」はあくまでサイト特性に関することである。地震動の生起確率のことではない。地震動の生起確率に基づいてスクリーニングを行うことは時としてミスリーディングでありお勧めできない。

[2] もう少し長期的視野に立って、地震に対してより強い国土を造っていく、ということを考えたときに、特に新しい施設を整備するような機会を捉えて、可能な選択の範囲内で「揺れにくい場所」に施設を計画することを考えるべきであると考え。同じような意味で、病院のような弱者を抱えた施設を、長期的にはできるだけ揺れにくい場所へ誘導していくことは、防災上非常に効果が大きいと考えられる。

ただし、その実現は、必ずしも容易ではない。津波を避けるために病院を高台に移転するという話の分かり易さに比べ、地震時に揺れにくい場所に病院を移転するという話は分かりにくい。目に見える津波と目に見えない地震動の説得力の違いである。しかし、1 個の都市の中でも場所によって（構造物に影響を与える帯域での）地震動が 10 倍も違うこともあるので、地震時に揺れにくい場所に病院を移転するという話は実は十分に割に合う話なのである。筆者を含めた地震動研究者のアウトリーチ活動が重要であると考えている。

[3] 設計に用いる照査用地震動はサイトスペシフィックな地震動とすべき、というのが筆者の立場である。サイトスペシフィックな地震動を照査用地震動とすることのメリットはいくつかある。

(a) 対象地点の揺れやすさをきちんと把握し、それを反映した照査用地震動を設定すれば、揺れやすい場所では大きめの照査用地震動が設定され、揺れにくい場所では小さめの照査用地震動が設定される。それによるメリットとは、まず揺れやすい場所では大きめの照査用地震動が設定されるのでより安全な構造物が整備される。揺れ

にくい場所では小さめの照査用地震動が設定されるというメリットを生かして、そこでの過剰な投資を省く。全体として、耐震強化のために使える限られた予算をより適切に配分することが可能となる。

(b) 照査用地震動の周期特性が対象地点における地震動の卓越周期を反映していれば、設計者は、対象地点により適した構造形式を選択することにより、地震動の卓越周期と構造物の固有周期が一致することのリスクを回避することができる。

ただし、設計標準スペクトルからサイトスペシフィックな地震動への移行は必ずしも容易ではない場合もある。そのような場合、まずは、両者の併用を目指してはどうか。

4 想定外力に対する構造技術戦略

4.1 機能損失に対して鈍感な構造

構造設計において考えるべき荷重の中で、偶発荷重である地震荷重は特に不確定性が高いことはいうまでもない。設計地震力は、実際の地震動が不確定性が高いことを念頭に入れて設定されるものの、構造設計時にはその設計地震動を「想定して」詳細が検討される以上、現実には設計地震動とは異なる特性を持つ地震動が作用するという「想定外」事象は起こりうる。この不確定性の高い地震外力に対し、構造分野はいかに対応すべきか。地震の不確定性が高い以上、それを真正面から対応しては、未知なる地震に対して常に後手にならざるを得ない。鈍構造は、地震外力に鈍感であることで、構造物本来の能力を発揮できる力となる、という思想である^{9,10)}。

鈍構造とは、「構造物が提供する機能の損失に対して鈍感な構造」を意味する。構造物に作用する地震荷重は、地震動の理解度が進むにつれて、外乱に対する予測精度は現状よりも合理的に小さくなる可能性もあるものの、人工物である構造物よりも低いと考えざるを得ず、構造物の外乱は構造物の挙動に比べ、圧倒的に不確定性を持っているといえる。また、構造物自身の非線形動的挙動に関しても、不確定性を有していることは言うまでもない。このような不確定性を有する外力・構造物に対し、構造物の性能を変化させることで高橋は鈍構造を実現するための方法論を、以下の4つに分類する。

(1) 材料からのアプローチ

不確定な外乱に鈍感であるためのひとつの方法は、構造物が外力の不確定幅を圧倒する性能を保有することである。いわば超弾性構造の創造である。これを実現する手法は様々考えられるが、最も直接的な方法としては材料の性能を圧倒的に向上させることである。従来の構造技術の発展も、材料開発に負うところが多い。超弾性構

造を実現すると基礎その他の部位部材に大きな力が作用するため、単に部材の超高強度化ではなく、後で示す構造形態からのアプローチと併用することが必須となる。また超弾性構造を実現するために剛性を高めるとすると、短周期レベルで 10 G を越える地震記録が得られていることを踏まえ、これをも圧倒できる性能向上が必要となる。

一方、損傷しても機能を失うほどの重大時に陥らないことも鈍感の特性の一つである。近年自己修復型材料の開発が積極的に進められているが、これらの材料を効果的に利用できる構造を作り出すことも、鈍構造実現の一つの方法であろう。

もちろん土木構造物は大規模構造であるが故に、基本的には地球上に多く存在する材料 (Fe や Si, C などの元素) を用いてきた。このような制約のもとで構造使用材料の性能を向上させていくこと、あるいは少量の高性能材料により構造全体の性能を向上させることが今後の材料開発を進める上で重要と考えられる。

(2) 構造制御技術からのアプローチ

制震はそもそも地震動の不確定性を認識した上での技術であり、構造制御技術が鈍構造を実現する上で重要な知見を与えてくれることは疑う余地もない。

免震はまさに外乱である地震から構造物を免れることを期待した構造であり、外乱に鈍感な構造の実現事例である。しかし橋梁構造に対する免震技術の適用は、既存の支承部を免震支承に置き換えたものがほとんどであり、地震時変形の増大にジョイント部が対応できるためにも 2 秒程度に周期を設定された構造が多い。あくまで構造物が地震のもつ振動数帯から外れていることが鈍構造であること的前提条件であるものの、地震動の不確定性を考えると 2 秒程度にも大きなパワーを有する地震動は過去の地震記録でも明らかであり、そのような地震動に対しても鈍感であるための超長周期免震を可能とする技術開発を進める必要がある。

また制震技術も現在はダンパーなど単に減衰を付与する技術の採用が中心であるが、パッシブ制震装置の特性を構造物全体系の応答低減の観点から検討するなど¹¹⁾、不確定な外乱に鈍感であるためにも、計測技術やアクティブ／パッシブ制震技術を積極的に活用することは有用である。

(3) 構造計画・設計からのアプローチ

旧来と同じ技術を用いたとしても、計画・設計で設定する計画理念・設計目標 (性能) の設定によって、鈍構造を目指そうというものである。

道路橋示方書によると、耐震設計の基本は、「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行う。」ことである。

また、その解説において、地震後の道路ネットワークの確保等の観点から橋としての機能の回復が速やかに行い得ることが特に求められ想定される地震に伴って生じるリスクについて検討することにもなっており、構造計画の観点から、仮に橋に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も重要であることが述べられている。まさにこれは、構造計画・設計による鈍構造の一つの形態である。

また、動的照査法による耐震性能を検討するに当たっては、通常 3 波形程度の地震動に対し、その応答値の平均で照査することが一般である。そして、例えば鉄筋コンクリート橋脚に対する照査では、動的解析により算出される諸量が、許容応力度「以下」となることを照査する。すなわち、3 波形異なる地震動を用いたとしても、照査においては応答値の平均値だけしか用いられない。平均値だけでなく、応答値のばらつき (分散、変動係数) を積極的に利用し、地震動特性の変化に鈍感な構造 (応答値の変動が小さいこと) を実現しようとする考え方である。一般に、変動が小さいことと、平均値が小さいことは全く関係がない。つまり変動が小さい構造では、通常の耐震設計の指標となる平均値が大きくなることも予想されるが、応答の平均値が大きいことに対しては、従来技術 (強度を大きくすることなど) で対応することが可能であると考ええる。

(4) 構造形態からのアプローチ

構造形態とは構造物の「かたち」と「ありさま」を表す言葉であり、空間を成立させている骨格そのものと、そこに内在する力が共存した言葉である。構造形態はその材料や我々が有する技術と密接な関係があるが、ここでは現在の構造物の構造形態を決定づける構造的骨格 (力学) を考える。現在の構造設計において、その構造的骨格は重力により支配されていると言っても過言ではない。しかし現在は耐震設計において弾性地震荷重は 2 G レベルであり、もはや重力 (1 G) を越えているにも関わらず、構造形態は旧態依然、重力に対する形からなんら変化していない。また、鈍構造を追求することにより、従来の構造形態ではもはや対応できない可能性も高い。構造デザイン的思考の背後に存在する構造と形態の関連性を考えると、不確定地震動に対応した力学的骨格から、新しい形態、造形が生まれてくるのは自然である。

4.2 実験的検討と解析的検討

構造物の動的挙動の不確定性に関しては、材料の不確

定性に基づく信頼性解析に基づく検討はあるものの、定量的評価が可能な構造物レベルのデータが圧倒的に不足しているのが現状である。

実験的検討でも、基本 1 ケース 1 実験が実施されることが通常である。実験では、「実際の」挙動が得られてしまうことから、あたかも「真の挙動に関するデータを得た」と見なししてしまう危険性が高い。そもそも動的・非線形問題に関し、その再現性も含めた議論が出来るデータは少なく、構造物レベルの非線形動的挙動に関しては、16体の RC 柱供試体の一斉加振実験に基づく検討¹¹⁾などに限られている。

一方、解析的検討では、解析技術が向上したといえどもモデル化が前提である以上、モデル化において想定された挙動以外について議論することはできない。想定外に対応するためには、解析手法を高度化することとあわせ、技術者の直感をサポートするためのローテクな解析手法も重要である。構造力学のような初等力学でも、全体構造の挙動をイメージすることは可能であり、特に耐震構造計画段階で威力を発揮する。

4.3 公共構造物の要求耐震性能

性能設計の考え方は既に多くの耐震設計に導入されているが、その原点として、カリフォルニア州構造技術者協会(SEAOC)による Vision 2000¹²⁾が有名である。これによると、兵庫県南部地震クラスの極めて稀な地震に対しては、普通の構造物は崩壊に近い性能で良いと規定している。またより重要な構造物では、より高い目標性能が必要であり、これを満足するように設計される。

宮路・川島は、平成16年に、橋梁の耐震性能目標に関する市民の意識を調査するため、一般市民を対象にアンケート調査を実施した¹³⁾。この調査では、現状よりコストをかけてでも、被害を抑える方向で耐震設計を行うべきであるという回答が、862名の有効回答数のうち80%以上を占めるなどの結果が得られている。東北地方太平洋沖地震でも社会の意識は大きく変わったと考えられる。2.3(4)でも指摘されているように、公共構造物の耐震性能はいかにあるべきか、技術者と社会との合意形成について真剣に議論することが必要である。

5 リスク開示と審査システム

個人の住宅について、建築基準法が改訂されるたびに、家主の自己負担で住宅を補強させることの義務付けは現実的ではない。仮に住宅が倒壊し、家主が亡くなっても自己責任で済ませられるため、この種の構造に既存不適格を認めることへの違和感は小さい。

一方で、土木構造物に同様の扱い(規準が改訂されて

も補強の実施の有無を管理者の判断に委ねる)を認めていることには抵抗を感じる。例えば、飛行機墜落について、その墜落の原因が飛行機の構造的な欠陥にあった場合、他の同型の飛行機を使い続けることは容認されないであろう。仮に事故が起こる前にその欠陥を実験や軽微な故障の事例などを通して航空会社が認知していたにも関わらず放置して、墜落事故が起きたのなら航空会社は厳しく罰せられるのではないだろうか。我が国の旧基準で設計された既存の社会基盤構造物は、欠陥のある飛行機を使い続けているのと同じ状況との批判を免れ得るであろうか。一方で、当然のことながら、全ての既存構造物を現行基準で設計される構造物と同じ性能を有するように補強していくことを要求するのは、非現実的である。予算が限定されていることの現実を踏まえるべきである。土木構造技術者は、その専門知識に基づき、耐震性の低い既存構造物の現在の危うさを認識しつつも、一方で、予算的な制約もあり、むやみに危うさを市民に対して強調することへのためらいなどから、(市民に対しては)無言を貫いているのではないだろうか。この状況を打破するには、「耐震補強の実施の有無を構造物所有者の判断に完全にゆだねる」とこと「既存構造物の全てを現行基準で設計される構造物と同じ性能を有するように強制する」の間を埋めることができる制度的な何かが必要であると感じる。

上記に関連して、コロラド大学の Corotis らの文献¹⁴⁾に幾つかの興味深いヒントを見つけることができる。自然災害に対して脆弱な構造物の補強を実践させる、あるいは補強のための予算確保に必要な手段は何かが論点になっている。安全性が十分でない構造物の補強を進める上でのチャレンジは、low-probability であり high-consequence となる自然災害についての知識、経験が少ない public と decision maker にその必要性を提示することであり、実践するためのキーとして以下の5つが挙げられている。

- public risk perception
- public participation in hazard mitigation planning
- incorporation of community values
- incompatibility of political motivation and long-term planning
- finances of risk and return

5つのキーに関係した幾つかの研究成果等が紹介されている。リスク関係の教科書的な内容も多いが、その中でも Report Card for America's Infrastructure は興味深い取り組みである。アメリカ土木学会(ASCE)によって発刊されているもので、インフラ構造物の現在の状態、あるいは補強対策、さらにはそれに係る費用などが示されている。結果はウェブにて公開されている。一般市民や管理者、あるいは政治家に対して、インフラ構造物の現状や

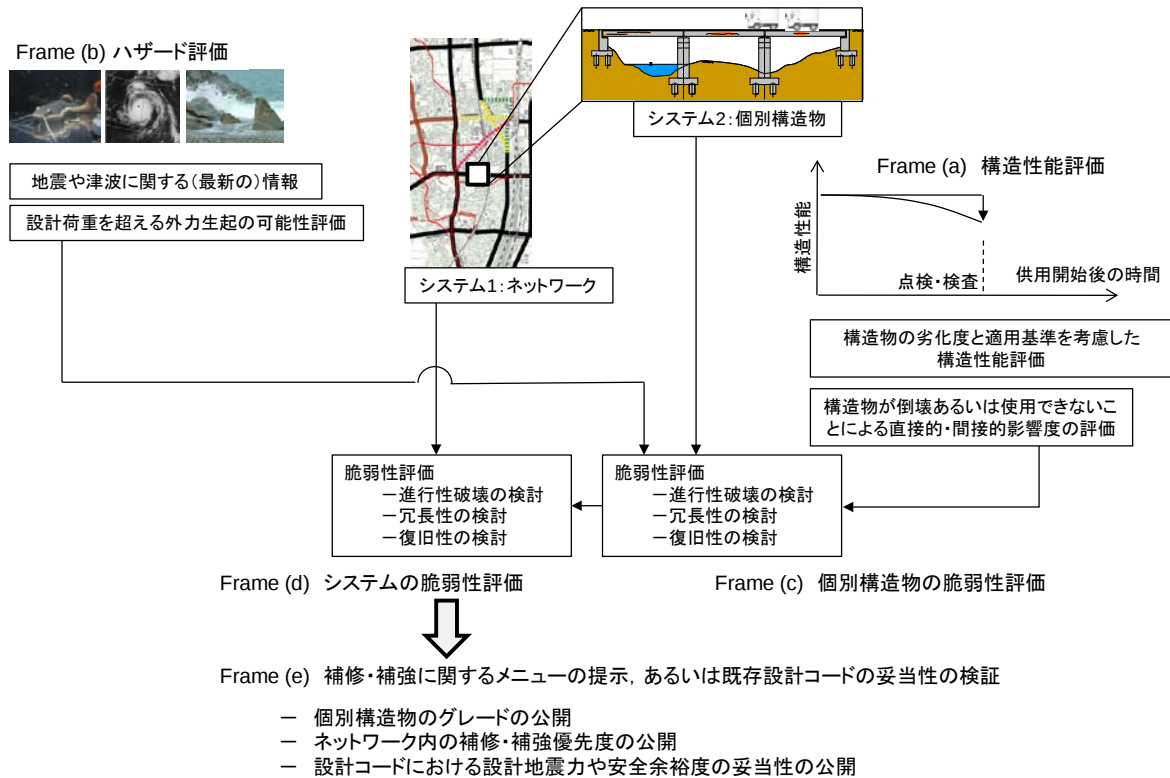


図2 構造物を含むネットワークの脆弱性評価の流れ

リスクを周知し、インフラ構造物の補強に投資することへの理解を求めている。インフラ構造物の現在の状態は、ASCE に所属する各構造物の専門家により評価されている。基本的な手順は、以下のようである。

- 1) 各構造物の情報を収集する。アメリカの場合、例えば橋梁であれば、各州の DOT (Departments of Transportation)、あるいは FHWA (Federal Highway Administration) が設計図面、点検や検査の実施時期とその結果などを一元管理し、既存構造物のデータベースが確立しており、そこから情報提供を受けているようである。
- 2) 各構造物の状態の分析と大まかな状態報告レポートの作成
- 3) 初期グレードの確定とその結果についての意見集約
- 4) 最終グレードの確定とその周知

設計の想定を超える事象への対応、あるいは既存不適格な構造物の現行規準で求める安全性レベルへの整合（耐震補強など）は、本来、構造物管理者に強制的にその実施を求められるものではない。これらを実施するには、土木学会などの第三者が最新の知見に基づき、構造物、あるいは構造物を含むネットワークの脆弱性を公正に評価し、それを市民（パブリック）に対して公開し、そして構造物、あるいは構造物を含むネットワークの安全性レベルを向上させることの必要性を理解させる働き

が必要ではないだろうか？このためには、目標性能の妥当性などを市民や構造物管理者が容易に理解可能な言語（対話言語）が必要であり、土木構造物が有するリスクは、安全性レベルの大きさの是非や耐震補強や維持管理対策の必要性を市民と議論する際の対話言語として欠かせない要素であると感じる。

脆弱性評価は、(1) 既存不適格構造物群の耐震補強の優先度や必要な補強量の推定、(2) 設計地震力を上回る地震作用を受けたときの構造物あるいは構造物を含むシステムで生じるリスク、(3) 活断層あるいは津波の新たな情報など、最新のハザード評価への対応、などに対して行われる。脆弱性評価のフローの概要を図2に示す。このフローは、既存構造物に対してばかりでなく、新設構造物、特に新設構造物の設計で用いられる設計コードの妥当性の検証にも用いられるであろう。設計コードで規定する設計荷重の大きさの妥当性、構造物に与えている安全余裕度の妥当性、さらには、構造物が損壊することによるそれを含むシステムへの負の影響の検証などである。

構造物、あるいは構造物を含むシステムが持つ脆弱性は容認されるレベルにあるのか、それらの安全性を高めるのに必要な具体的な技術と予算はどれほどになるのか、または、設計コードで規定する荷重の大きさは妥当なものであるのか。実現には非常に多くの課題が存在することも事実であるが、これらについて、第三者が審査し、

その結果を構造物利用者（市民）とその管理者に公開するシステムを構築することで、リスクの認知と投資への理解が高まり、結果として、土木技術者として危ういと感じる既存不適格構造物などを減らしていくことに貢献できるのではないだろうか。

6 ロードマップ策定に向けて

本稿では、東日本大震災を受けて、巨大自然災害を考慮することを求められるようになった社会基盤施設の地震安全を実現するための施策について、WG での議論を念頭において紹介した。

ハードウェアの側面に関しては、構造物の設計の想定を超える外力に対応するためには、「想定外」という言葉に踊らされてむやみに性能の高度化を目指すのではなく、理論と実績に根拠づけられた技術に基づいた性能の実現を目指すことが必要であろう。本稿で提案された、設計プロセスにおける構造計画の位置づけの再定義や、強震動地震学の知見の利用、構造物の地震時挙動の評価手法の見直しなどが、その一歩となれればと思う。

また、ソフトウェアの側面については、巨大自然災害を想定した社会基盤施設の地震安全の論理においては、構造物単体ではなく、システムとしてのインフラ、さらには、社会システム全体の中での役割や機能を考慮する必要がある。また、形式知や暗黙知、社会的総意などの様々な形で蓄積された科学的知見や技術を広く反映させる必要があり、そのための社会制度の構築と維持も不可欠な課題となる。本稿で示された設計基準の新たな考え方や、リスク開示と審査システムリスク開示等の制度はそのような仕組みの一環として不可欠であろう。

ここで紹介できた提案の他にも、取り組まねばならない課題は山積している。東日本大震災の経験が無駄にせぬよう、「想定外」に真摯に、且つ、自信を持って向き合うための新たな社会基盤施設の地震安全の論理構築を目指したいと考える。ご支援をいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 宮本崇・本田利器：地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価, 応用力学論文集, Vol.13, pp.577-584, 2010
- 2) 広田すみれ：東日本大震災におけるリスクコミュニケーションと不確実性を巡る問題, 日本リスク研究学会誌21(3), pp.157-164
- 3) 高橋良和：不確定性の高い地震外力に鈍感な橋梁構造システムの提案, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 29-32, 2011.

- 4) 野津厚, 一井康二：性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集
- 5) 宮路健太郎, 川島一彦：市民から見た橋梁の耐震性能目標, 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 303-310 2006.
- 6) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), Seism. Res. Lett., Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 7) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, Y.: New strong-motion observation network: KiK-net, Eos Trans. Am. Geophys. Union, 81, 329, 2000.
- 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 9) 高橋良和：不確定性の高い地震外力に鈍感な橋梁構造システムの提案, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 29-32, 2011.
- 10) 高橋良和・山崎伸介・野呂直以：支承部特性を変化させることによる鈍構造実現に向けた基礎的検討, 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 283-286, 2012.
- 11) 高橋良和・小林望：縮小RC模型16体一斉加振実験による地震応答の不確定性評価, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 269-276, 2011.
- 12) SEAOC Vision 2000 Committee: Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995.
- 13) 宮路健太郎・川島一彦：橋梁の耐震性能目標に関する市民の意識及び橋梁の復旧期間, 第8回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.397-404, 2005
- 14) Ross Corotis, Holly Bonstrom and Keith Porter: Overcoming public and political challenges for natural hazard risk investment decisions, Keynote, Proceeding of the 5th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, Singapore, 2012.
- 15) http://infrastructurereportcard.org/sites/default/files/RC2009_full_report.pdf