

0.2～0.3程度の水平震度を用いた震度法による耐震設計の考え方では、どのような大地震に対して構造物のどこに損傷が生じ、最終的に構造物に対してどのようなパフォーマンスを期待しているのかが明確ではない。また、大地震時でも構造物は弾性挙動を示すという錯覚をまねき、どのような構造にすれば耐震性を向上させることができるかといった工夫の必要が求められない。実際の地震時に想定される構造物の挙動を把握することによって初めて耐震性の高い構造物の設計が可能になると考えられる。例えば、地震時には構造物のこの部材に損傷が生じるのでここは靱性に配慮したねばり強い配筋細目しておく必要がある等、具体的な対処が可能になる。

このため、耐震設計の3つのポイント、「地震動条件」、「耐震構造解析」、「性能照査」をそれぞれできるだけ独立かつ明確に設定した耐震設計法の構築が重要と考え

る。もちろん、これらの評価において未解明の部分が残されている点も多々あり、また、構造物の耐震安全性はこれらを総合的に評価した上で判断されることになるが、それぞれが明確な考えに基づいて定められていれば、新たな知見や技術開発がなされるたびに全ての耐震設計法を再構築し直さなくても、新たな知見のみを追加していけばそのまま適用可能な汎用的な耐震設計法と成り得ると考える。

こうした考え方は耐震設計においてあたり前のこととなっているが、筆者は兵庫県南部地震による甚大な被害によって再認識した重要な教訓の一つと理解している。

#### 参考文献

- 1 - 日本道路協会：道路橋示方書 耐震設計編，1996
- 2 - 国土交通省：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書，2001

## 3-2. 耐震設計

### 建築と土木の棲み分けと連携

中島正愛 NAKASHIMA Masayoshi

京都大学教授 防災研究所

#### はじめに

建築と土木の耐震設計を比べてみなさいとの編集部からのご指示だけでも、それではあまりにも広すぎるようだ。「建築」がリーダーシップを発揮する対象も、木造住宅から高層建築物まで多岐にわたり、「土木」でも、道路橋、鉄道構造物、ダム、港湾施設、下水道施設などその対象は千差万別で、それぞれを比べることすら難しい。そこで、比較的近いとおぼしい、鉄筋コンクリートや鋼で造られる一般的な建築物と道路橋を、それぞれ「建築」と「土木」の代表と想像して以下の記述を試みる。また一般的な建築物の耐震設計といっても、その設計法は構造形式に応じて異なる。特別な審査を経る必要がある高層建築物などでは、地域特性を考慮した地震動の設定や多次元入力による弾塑性地震応答解析など、最新技術を駆使した設計が展開される。それに対して中小規模建築物では、適度な安全率を付与したより簡便な設計法が適用される。以下の記述では主として後者の耐震設計を意識した。

建設とはいっても建築と土木は違うはずで、だからこそこの建設の両輪は、大学教育から実践現場に至るまで長年棲み分けてきた。民需が大半を占める建築と、官需が大半を占める土木、建築士という法で決めら

れた資格が必要な建築と、技術者資格が必ずしも明確ではない土木、設計技術者層が底辺にまで広く分布している建築と、官に支援される技術者がもっぱら関与する土木、また「構造物」に限っても、設計が地震力にはほぼ支配される建築と、移動荷重など他の荷重条件により重要な設計要件となることも多い土木、剛な接合部が多く不静定次数が相対的に高い建築、比較的小さな部材（断面）を使う建築と、大きな部材（断面）が要求される土木、構造躯体が非構造部材その他で囲まれている建築と、どちらかと言えば構造体がそのまま剥き出しになっている土木などなど、その違いを挙げればきりが無い。「だからどうした」、それらがなぜ建築と土木を分かつ正当な理由になるのかという反論もあろうけれども、建設が壮大な経済行為であって、建設に関わる多くの局面（材料供給、設計、施工、管理もろもろ）ごとに膨大な産業が存立していることを考えれば、両者が分かれる理由は十分過ぎるほどある。元をただせばさほど変わらなくても、個別的になるほどその違いは際立ち、また産業が膨大であるだけに、その違いをもって特化した業種が確立され、そこでは、私はもっぱら建築に関わっております、私は土木事業に参加していませんと、色分けが進んでゆく。またこれは日本に限ったことではなく、建築技術も土木技術も合わせて土木工学科で

教育を施す諸外国においても、建築と土木はその実践において棲み分けている。

### 耐震設計

本稿の主題である耐震設計についても、その根幹をなす理論において共有するところは少なくないが、建築と土木は独自の道を歩んできた。地震は建築にも土木にも等しく作用するはずで、設計地震力が建築と土木で違うのはおかしいという議論がある。ただ、仮に両者の設計地震力が違ったからといって、建築と土木の安全性が違っていると断ずるのは早過ぎる。簡単な例題として、ある設計法を適用して引張を受ける1本の棒を設計することを考える。この設計法において、設計引張力が2.0 MNと規定され、一方で棒の断面が100 mm × 100 mmであれば2.1 MNの引張力が作用しても壊れないという評価（設計式）が与えられておれば、100 mm × 100 mmの断面を持つ棒で大丈夫という判定を得る。ここで2.0 MNは要求性能（この力には耐えなければならないという量）、2.1 MN（この力には耐えることができるという量）を保有性能と称し、「要求性能 保有性能」という関係が成立することによってその安全は確認される。次に、同じ棒を対象にするけれども、別の設計法を適用してみる。そこでは設計引張力を4.0 MNと先の2倍の力を規定しているとする。これだけを見れば、この設計法の方が先の設計法よりも安全に対して意識が高いように見えるが、棒の断面が100 mm × 100 mmであれば4.2 MNの力には耐えられるという評価（設計式）が同時に与えられておれば、結局、先の設計法を適用した時と同じく100 mm × 100 mmの断面をもつ棒で大丈夫という結果を得る。

これは極端過ぎる例であるが、いささか似た状況が今までの耐震設計基準にも垣間見える。耐震設計における要求性能評価の第一歩である設計地震力の設定は、不確定性が極めて高い大地震を相手にするだけに大変難しい。ただ、不確定性が高いからといって手をこまねいては耐震設計ができるはずもなく、諸事情なども総合的に斟酌しつつ人間の判断を経て設計地震力は設定されてきた。つまり、設計地震力は自然科学が解き明かせることだけを頼りに決めてきたわけではない。要求性能に相対する保有性能について、耐震設計では強度に加えて靱性を積極的に考慮している。強度が多少低くても十分な靱性があれば崩壊を免れえるという事実に基づくもので、具体的には靱性の程度に応じて保有すべき最低強度を減らすこと（強度と靱性のトレードオフ）を許容している。ただ、構造物がもつ靱性（能力）を精度よく同定

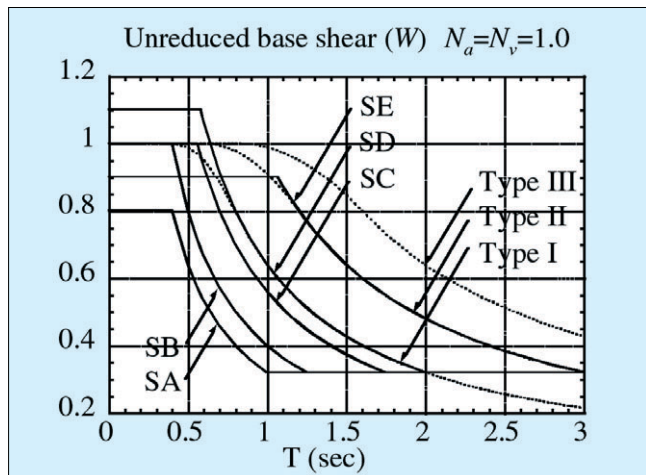


図-1 日米設計地震力（ベースシア係数）の比較（Near Source Factor を含まない場合）

することは決して容易ではなく、その結果、強度と靱性のトレードオフにも不確定性がつきまとい、ここでも総合的な判断によって具体的な数値が決められてきた。

このような事情から、作る主体によって耐震設計基準の見かけが違ふことは十分起こりうる。しかし、見かけだけで両者を比べていても、それぞれの耐震設計が提供する真の安全性の相違を読み取ることができないことは、先の棒の例からも明らかである。耐震設計の見かけと実質の違いを、日本の建築耐震設計<sup>1)</sup>（1997年）と米国の建築耐震設計<sup>2)</sup>（UBC：1997年）を対象に若干考察してみる。ここでは試しに鋼構造を採りあげる。図-1は両国耐震設計で考える設計地震力（Unreduced Base Shear Coefficient）で、弾性構造物に対しては、図-1の縦軸に示される力（ベースシア係数で表示）以上の強度が設計で要求される。ここで図の横軸は、構造物の弾性一次固有周期（秒）で、固有周期の長い構造物（建築物では一般に高くなるほど固有周期は長くなる）ほど小さな強度でよいことになっている。図-1には複数の線が並んでいるが、日本の典型的な地盤である第二種地盤（点線：Type II）と、それにほぼ匹敵する米国のSE地盤（実線：SE）に対する地震力は酷似している。ただ、これをもって日米の建築物が同じ強さをもっているのは早計。最も靱性に富む構造物に要求する強度を、日本では弾性構造物に要求する強度の1/4（ $D_s$ ）までにしか低減させないのに対して、米国ではなんと1/8（1/R）にまで低減できる。ここに強度と靱性のトレードオフに対する日米の考え方の違いが如実に現れている。1/4と1/8を比べて、それでは日本の構造物の方が2倍強いのかというと、実はそれも真実ではない。靱性に富む構造物（ラーメン構造）では、強度だけを考えて設計すると柔らかくなり過ぎる傾向にあり、強度とは別に変形（層間変形角）の制限を設け、構造物にある程度以上の



剛さを要求している。日米ラーメン構造ともにこちらの制限から部材断面などが選ばれることが多く、また剛さを確保するために大きな部材を使うと強度もそれに応じて高くなる。米国の変形制限規定はややこしい体裁をとっているが、それを解きほぐしてみると日米が制限するところはそれほど変わらない。そのほかにも、参照すべき強度として降伏強度と終局強度のいずれを採るか、Near-Source Factors の取り扱いなど細かいところはいろいろ違うが、それらすべてを勘案すると、日米の鋼構造建築物がもつ強度はほぼ同等（± 20% 程度の違い）という結果が出てくる<sup>3)</sup>。このように、要求性能に関する規定、保有性能に関する規定、また、ここでは触れなかったが靱性を確保するための構造諸規定を総合して詳細に評価しなければ、それぞれの耐震設計によって確保しうる真の安全性を見誤ることになる。

### 施工と品質

構造物がもつ真の耐震安全性は、耐震設計を参照しただけでは事足りず、現実のものづくり（施工）における品質を抜きに語ることはできない。世界に誇るべき我が国のものづくり技術に支えられる建築・土木構造物の品質が本質的に低いわけではない。ただ、自動化技術が導入されているとはいえ、なお人間が直接手を下す作業が多い建設構造物において、その品質は建設技術・技能者の技量に左右され、またいかに勤勉で器用な日本人とはいえ、その技量はそれから得る報酬に影響されるはずだ。ここで製作・施工価格が品質を計る一つの物差しとなる。鋼構造に関わることが多い筆者には、トンあたり円で表現される建築鉄骨工事受注価格になじみが深い（このような表現そのものが、品質確保にとっての元凶であるという議論はここでは横に置いておく）。図-2 は、過去 20 年間の建築鉄骨工事受注価格の推移に関する統計資料<sup>4)</sup>である（図中、折れ線が受注価格、棒グラフは建築鉄骨需要量の推移を表している）。不況が続く昨今の受注価格の著しい下落は、ファブリケータ（鉄骨製作・加工業者：鋼材を切ってつないで構造物に組み立てあげる作業に従事する業種）の経営を直撃し、そんな状況下でなお品質を確保し続けることの困難は想像に難くない。このような建築の事情に照らし合わせて、さて土木の事情はいかに。図-2 に相当する土木鉄骨工事受注価格統計を見つけることができなかつたので、複数の橋梁技術者らに土木鉄骨工事価格を尋ねてみた。その回答に多少の開きはあったものの、建築と土木がほぼ同価格であるとか、土木が建築より安いという類の結果はどこか

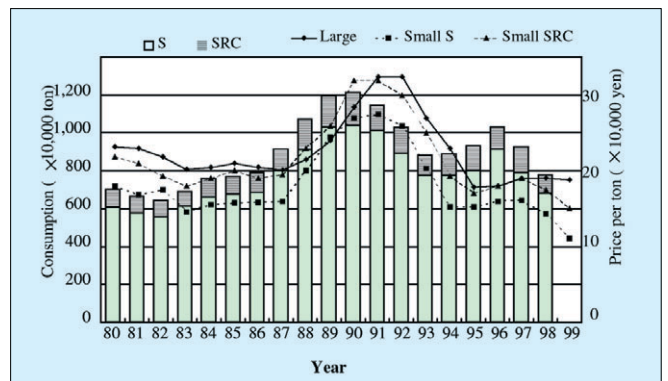


図-2 建築鉄骨工事受注価格の推移<sup>4)</sup>

からも出てこなかった。建築と土木がもつ真の耐震安全性の相違は、品質と価格の問題を抜きに評価しえず、ここでは価格（差）の明示、価格差に対する正当な理由と合意などに関わる真正面の議論が求められる。

### 透明性の高い耐震設計への要求

今まで巧みに棲み分けてきた建築と土木が、これからも仲良く別々に暮らせるかどうかを占ううえで、「性能設計」という旗印の下で再構築が進む耐震設計の最近の動向は見逃せない。設計地震力設定の基盤をなす強震動特性については、関連研究の急速な進歩に伴い、また近年の強震動観測網の充実にも支えられ、一昔前に比べればはるかに高い精度で強震動予測が可能となってきた。強震動の様相が明白になるとともに、設計地震力の設定においても自分勝手が許されなくなる。また、安全限界や損傷限界という、特に構造物の変形に支配される諸限界を陽に表現しようとする気運が高まるなか、耐震設計におけるもう一つの不確定性の代表である構造物の靱性能力・要求についても、それらを量として表示する研究が進んでいる。これらの研究の成果として、強度と靱性とのトレードオフの真実、その根幹をなしてきた古典的諸仮説の適用範囲と限界、さらに所定の靱性能力を確保するための構造（詳細）条件などが明らかとなる。これら一連の流れは、見かけにおいても実質においても耐震設計を一つの（あるべき）方向へと導いてゆくはずで、ここにおいて、建築と土木の耐震設計も互いがしらんぷりというわけにはゆかなくなる。

### グローバル化への対応

グローバル化という大きなうねりのなか、建設技術もその例外ではありえず、その一環として、国を越えた構造（耐震）設計基準策定への動きも活発になってきた。欧州は Euro-code と称する欧州構造設計基準の

整備に長年努め、また米国もここにきて孤立主義と決別し、国内に複数あったモデルコードを統一する動き（International Building Code-2000）を見せるなど、彼らは世界共通基準を視野に入れつつ、そこで自らを主張すべく着々と準備を進めている。このような状況のなか、我が日本を振り返れば、言語の問題は言うに及ばず、建設の両輪である建築と土木が密な提携を欠き続けるようでは、ますます世界の動きから取り残されてしまうという懸念は強い。周知のように、この国際問題に立ち向かうべく両者の連携作業も随所で進展してきた。それ自身は歓迎すべき動きだが、国際問題対応について筆者は、諸外国に対して恐れをなし過ぎる必要はないとの意見をもっている。先にも示したように、耐震設計基準には見かけと実質の違いがあり、真の耐震安全性を左右するのはもちろん実質である。日米基準を比較することから、鋼構造建築物の耐震設計の実質には大きな差がないことを先に示したが、実質さえ同等（以上）であれば、見かけ（体裁）を整えることはたやすいことだ。さらに現実のものづくりに対する技術と品質確保なくして真の耐震安全性を担保することはできない道理を踏まえれば、そして最先端から一般に至るまで、日本のものづくり技術が世界に誇るべきものである事実（と自負）に照らし合わせれば、「耐震設計」と「耐震施工」の両輪が整った日本の耐震技術が世界に伍してゆけないはずがない。

#### まとめ

以上、脈絡を欠くが、「耐震設計の見かけと実質」「品質」「性能設計」「グローバル化」という視点に

たって、建築と土木の耐震設計の相違と両者の連携について思うところを記した。建築と土木の実践に対する幾多の違いを見れば、建築と土木が渾然一体となるとは考えにくく、両者は人とのものを融通しあえるよき隣人であればよいと考える。ただ、性能設計という新しい動きのなかで、建築と土木の耐震設計の実質はもとより、品質（や価格）に至るまで、両者の相違が次第にあからさまになる。一時の混乱と衝突は避けえないだろうけれども、その先には耐震設計（技術）のあるべき姿が待ち受けている（と願っている）。建築と土木が連携して“Common Voice”を形成せずして、グローバル化のうねりに立ち向かうことはできない。日本が有するものづくりに対する高い技術を武器にした、「設計と施工の均整と融合による耐震技術」を前面に押し出した共同対外キャンペーンが、日本の国際プレゼンス確保に資すると信じている。

最後に一言、地震工学の旗の下に建築や土木を含む各分野の技術者や研究者が集う「日本地震工学会」が2001年1月1日に発足した。多分野連携による耐震設計の高度化や、“Common Voice”形成による国内外情報発信において、日本地震工学会がその推進力の核となることが期待される。

#### 参考文献

- 1 - 建築物の構造規定 - 建築基準法施行令第3章の解説と運用 - , 日本建築センター, 1997
- 2 - Uniform building code, Volume 2 : International Conference of Building Officials, Whittier, Calif. , 1997
- 3 - Nakashima, M., Roeder, C.W., and Maruoka, Y : Steel moment frames for earthquakes in the United States and Japan, J. Structural Engineering, ASCE, 126 (8) , pp.861-868, 2000
- 4 - 鋼構造ジャーナル, 1999年7月16日号

### 3-3. 建設マネジメント 土木事業のマネジメントの特徴

小澤一雅 Kazumasa OZAWA  
正会員 工博  
東京大学助教授 新領域創成科学研究科 環境学専攻

#### 土木事業の大半は公共事業

わが国の2000年度の建設投資を発注者別にみると民間部門が全体の約56%、政府部門が約44%を占める。一方、工事別にみると、建築と土木がほぼ二分している。また、民間投資の大半は、建築工事であり、政府投資の大半は土木工事であることがわかる（図1）。民間投資の土木工事も電力・ガス・鉄道などの公益事業者が大部分を占める。土木分野は、建物の建設に比較すると空

間的にも時間的にも大規模な事業が多いばかりでなく、建物以外の主として社会の基盤整備を目的とした公共的色彩の強い事業を対象としており、これが建築とのマネジメントの違いに大きな影響を与えている。

公共事業は、主に税金等の公的資金を財源として、国民の代理人である公共の発注者が実施するものである。したがって、建設事業に関する法体系のもとで事業を実施することが求められており、そのプロセスにおける意思決定については、アカウンタビリティが求められる。