

耐震規準のグローバル化とわが国の戦略

中島 正愛¹

¹ Ph.D. 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

地球上の社会と人の営みに対するグローバル化は加速の一途をたどっている。比較的ローカリティの高い建設業においても例外ではなく、WTOの戦略にも刺激され、構造設計基準・規準・指針類（以下は規準という単語で代表）の相互承認、国を越えた統一設計規準の準備、各種建設材料、部品、装置に対するISO規格の設定、技術者資格の相互認証、さらにはその前段としての建築・土木関連大学教育認定制度の相互承認に至るまで、日本国内で完結しえない諸問題に追い立てられている。

本稿では、本シンポジウムの主題にも配慮し、もう少し個別的な視点として、耐震研究や技術におけるグローバル化と、それへの速やかな対応が焦眉の課題である日本が採るべき戦略を考えてみたい。具体的な設題として、耐震関連研究・技術に対しては質、量ともに世界の最先端をゆくと自負する日本は、将来にわたってこの自負を保持することができるのか、耐震技術に関わる諸ビジネスにおいて世界に伍して日本は競争力を保持できるのか、を取り上げ、筆者の見聞と経験を軸に、これら設題に対する筆者の思いと私見を次の視点から認める。

- (a) 耐震設計規準における「見かけの違い」と「実質の違い」
- (b) 国を越えた統一的な耐震設計規準の策定における性能設計の位置づけ
- (c) 耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべき耐震施工技術

2. 耐震設計規準における「見かけの違い」と「実質の違い」

国が変われば耐震規準も違う。しかしながら先進諸国の建築構造耐震関連規準（例えば米国IBC2000¹⁾、欧州EuroCode8²⁾）を読み解いてみると、

地震活動度に応じた設計地震力の設定、静的解析における設計地震力の高さ方向分布の設定、構造物の靱性に応じた必要耐力の低減、耐力低減を考慮した設計地震力に対する弾性解析、各部材の強度算定と靱性確保のための構造規定、剛性（変形制限）に対する規定など、耐震設計手順の概要に大差はない。また、これら規準類が定める設計手順の原型の一つは、1978年に米国で刊行されたATC 3³⁾に求めることができる。もう一步踏み込んで、各種設計手順の詳細を見ると、設計地震力を規定する応答スペクトルの形状が異なる、靱性を斟酌する耐力低減係数の値が異なる、部材耐力を定める式が異なる、部材靱性を確保するための構造規定が異なるなど、規準による違いが随所に見えてくる。例えば、耐力低減係数は、日本では D_s 、米国IBCでは R 、欧州EuroCode8では q という記号で表されるが、最も靱性に富む鋼構造建物において、それぞれの規準は、 $D_s=0.25$ 、 $R=8$ 、 $q=6.5$ を与えている。 D_s はその定義から R や q の逆数に匹敵するので、 $1/D_s=4$ が R や q と比べる対象になる⁴⁾。同じ鋼構造建物とは言え、耐力低減係数は1.5～2倍も異なるわけで、ここで耐震設計規準は大いに違うのだという議論が出てくる。

しかしながら、表面上現れる数字や式が大きく異なるからと言って、設計された構造物の真の耐震性能が全く違うとは言えない。極端な例ではあるが、ある耐震設計規準（規準A）が別の耐震規準（規準B）に対して2倍の設計地震力を与えていたとしよう。しかしながら、同じ材料と断面部材をもつ構造物に対して、規準Aが規準Bの2倍の構造耐力を許容しているなら正味の性能に変わりなく、いずれの規準を使おうと同じ構造物が設計されることになる⁵⁾。

筆者らは、米国のUBC規準(1997)（注：IBC2000の一版前の規準）と日本の建築耐震設計規準の見かけの違いを踏まえたうえで、実際に設計されてできあがる構造物がどれほど違うのかを、鋼構造骨組を対象に分析してみたことがある^{4)~7)}。その結果、設

計地震力を定める式の体裁は随分異なるが、実質はそれほど変わらない、靱性を確保するための諸規定（幅厚比制限、細長比制限等）もあまり変わらない、靱性と連動する耐力低減係数は2倍も違う、しかし多くの鋼構造建物は耐力ではなく剛性で部材断面が決定されるので耐力に対しては余裕がある、剛性を支配する層間変形角制限は見かけ上相当異なるが、あれやこれやを考慮すると、鋼構造建物がもつ正味の耐力はそれほど変わらない（日本の方が10～15%程度強い）ことがわかった。

架空の話ではあるが、耐震設計規準国際化の波のなかで日本外交が苦戦し、米国のIBC規準が世界標準になりそうな事態に陥ったとしよう。そのような危機に遭遇しても、上記のように、日本の耐震設計規準と米国のIBC規準との相違を調べ、とくに「実質の違い」を予め詳細に検討しておけばそれほど焦ることはない。わが方が元々安全側の措置を施している項目については、いずれにしても実害はないので目くじらを立てる必要はない。そうではない、つまりわが方の耐震設計規準の方が危険側の設計を許容する項目に焦点を絞り、まなじりを結して自らの妥当性を主張すればよい。将来起こるかもしれない耐震設計規準の世界標準を作成する作業において、日本が不当な不利益を被らないためには、まずわが国と諸外国の耐震規準の相違を注意深く吟味しておくことが肝要である。ただ諸外国の規準を表面的に観察したり鵜呑みするような所業はむしろ害をもたらすところで、見かけではない「実質の違い」をしかと書きとどめておかねばならない。

3. 国を越えた統一的な耐震設計規準の策定における性能設計の位置づけ

耐震設計の多様化と高度化に資する新しいパラダイムとして「性能設計」という言葉が頻出する時代になったが、この言葉に、耐震設計に対するグローバルな規範としての役割を込める向きもある。現在議論の俎上にある性能設計の原型の一つは、カリフォルニア大学バークレー校：V. V. Bertero教授や、カリフォルニアの設計コンサルタント：R. Sharpe氏らが中心となってとりまとめたVision2000⁸⁾に求められる。一方で、“Performance Design”（という言葉）の歴史は以外に古く、昔の“Performance Design”はなんだったのでしょうかと米国構造界の古老に尋ねたところ、それは剛性（変形）設計のことだよと軽いなされた経験がある⁹⁾。しかしこれは本質をついた議論であって、「力（作用力、抵抗力）」を主変

数とした従来の設計法に対して、「変形（要求変形、変形能力）」に着目した設計法として“Performance Design”は位置づいている。

耐震性能設計では、まず想定する地震動をできるだけ精度よく推定し、次いで、想定地震動（力）に対して期待する性能が適切に発揮されるように構造物を組み立てることになる。建築構造物の耐震設計においては、期待する性能（許容すべき損傷）を測る指標として、地震時に建築構造物が被る最大（層間）変形が挙げられ、ここにおいて性能設計の成否は、与えられた地震動（力）に対して最大（層間）変形をどれだけ精度よく予測するかに委ねられる。

耐震性能設計の推進に躍起になっている米国では、弾性限界を超す変形を被る建築構造物の最大変形を推定する手法として、“Displacement Coefficient Method（DCM）”や“Capacity Spectrum Method（CSM）”を新しい設計規準に取り入れることに熱心である^{10), 11)}。前者は、Verestos and Newmark¹²⁾が提唱した最大変位一定則やエネルギー等価則などに代表される、弾性構造物の最大変形を頼りにその構造物が弾塑性的に応答したときの最大変形を推定しようとする流れを汲み、後者は、Caughey¹³⁾やJennings¹⁴⁾が提案した等価線形化法を拡張した方法である。日本においても、建築基準法の改正に伴い、CSMの流れを汲む「限界耐力法」という静的解析から弾塑性構造物の最大（層間）変形を推定する方法が採用されるに至っている。

しかしながら、静的解析に頼る方法は、構造設計において、地震力や構造特性の概略をつかみながら構造体を組み立ててゆく初期設計（Conceptual Design）に役立っても、非定常性の高い地震動を受ける建築構造物の最大（層間）変形を精度よく推定するには無理がある。にもかかわらず、米国がなぜこれらの方法をいまになって耐震規準に導入しようとするのか。それを解く鍵は、米国の耐震設計実践（耐震工学研究ではない）では、耐力低減係数（ R ）を考慮した設計地震力に対して静的弾性解析を実施し、各部材への作用力が部材が有する耐力を上回らないことを確認するという古典的な方法がいまなお多用されているという現実にある^{15), 16)}。裏では弾塑性挙動を斟酌しているものの、表面的には静的弾性解析しか実施しないので、構造物が弾性限界を超えて変形してゆくさまを、構造設計者が理解しにくい（実感しにくい）。この短所を克服しようとするところに、弾塑性変形が陽に現れるCSM等への期待がある。

振り返って日本の建築耐震設計では、高層建築物

や免震建築物などに対して、「構造評定」という仕組みが長年機能してきた。構造評定では、建設地の地震活動度や地盤特性を考慮したうえで設計用の地震動を決め、また設計構造物を多自由度弾塑性系に置換した時刻歴応答解析によって、その構造物がもつ安全性や機能性（最大層間変形角の推定を含む）を確認している。つまり、日本では、耐震性能設計の鍵を握る最大変形推定に対して、（研究ではない）設計実践においても弾塑性時刻歴応答解析という方法が長年にわたって使い続けられているのである。これは「構造評定」を通じて育まれてきた、そして日本が世界に対して誇れる耐震設計技術であることにいささかの疑いもない。事実、米国の一級構造設計者（彼らの多くは日本の事情にも詳しい）らも、弾塑性時刻歴応答解析が耐震設計実践における標準的手法の一つとして定着している日本の構造設計に高い敬意を表している^{16), 17)}。

耐震規準のグローバルゼーションに関わる駆け引き（外交）においては、常に、耐震工学研究ではなく耐震設計実践（技術）の実態を把握しておくことが肝要である。そして、わが国が優位に立つ実践技術（ビジネスチャンス）については、グローバルゼーションの具体がなにであれ、それを認知させるために徹底的なキャンペーンを張らなければならない。日本の蓄積が群を抜く「耐震設計実践のための弾塑性時刻歴応答解析」については、その宣伝と改良への努力を怠るわけにはゆかない。

4. 耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべき耐震施工技術

前節までは、主として耐震設計規準を俎上にあげて議論してきたが、結局のところ、紙上での決め事である耐震設計規準がどのように記述されるかは、実際のものづくり、つまり耐震施工とその関連技術に比べると大きな問題ではない。これを次に示す二つの例から検討してみる。

1995年兵庫県南部地震を契機に、免震建築は飛躍的に増えた。地震前には年に10件程度建設されていたものが、地震直後からは年に150件以上もの建設へと急増した。免震はその後とも衰えず、医療施設等防災拠点を中心としてその適用は全国的な広がりをみせている^{18), 19)}。これは安全性に加えて、免震がもつ高い機能性保持能力に対する信頼が社会に認知された証左である。

さて、1999年台湾集集地震において台湾は手痛い被害を受けた。そしてこの地震被害を通じて、安全

性のみならず、地震後も継続的に機能を保持しうる建物への期待はいやがおうにも高まった。しかしながら台湾では、地震後数年を経たいまに至るまで免震ブームはまったく見られない。なぜか、それは一重に、台湾では免震を建設するインフラが整っていないことによる²⁰⁾。台湾にも免震を設計するための立派な指針（規準）はある。しかし、高品質の免震材料装置を継続的に供給できるメーカーと流通機構の欠如、免震建物の耐震設計に関わる各種ノウハウに熟達した設計者の欠如、そして免震建物を精度よく施工できる技術者や技能者の欠如等、免震建物を（机上で設計するのではなく）実際に造るための技術が欠落しているために、免震が耐震技術の切り札の一つと認識されているにもかかわらず、その実践は進まない。

1995年兵庫県南部地震では、それ以前の地震であまり被害を受けてこなかった、従って耐震能力に優れたと認識されていた鋼構造建物の多くが被害を受けた。兵庫県南部地震に先立つこと一年、1994年米国ノースリッジ地震においても多くの鋼構造建物被害を受けた。両被害ともに、溶接を用いた柱と梁の接合部に損傷が集中するなど、鋼構造建築の設計と施工において日米が弱点を共有する事態となった²¹⁾。これを日米の協調によって克服しようと、両地震後、日米の技術者や研究者は頻繁に会合をもち、被害原因の同定、新規建設にあたって同種の被害を繰り返さないための方策、既存建物の改修方法等を議論しあった。ところが、両者が議論を重ねるほどに、双方の違いが顕在化し、結局のところ、日米は相当異なる解決方法を採用したのである^{22), 23)}。例えば、日本では、従来の接合部ディテール（開先やスカラップ等）を変更した新しいディテールを推奨するに至ったが、これは開先やスカラップを、長年にわたってグラインディング（削りとり）加工機によって加工してきた実績があるからこそ可能になった。一方、これら加工をガス切断に頼りがちな米国では、日本のような凝った加工ができるはずもなく、彼らは、溶接部ディテールはほとんど変えない代わりに、梁の端部から少し内側に入った梁断面の一部を意図的に削ぐことによって、溶接部に作用する応力を減らすという方法を推奨している。この例に見られる日米の違いは、建設技術において問題を解決する手段は一つではなく、多くの選択肢のなかから、（設計ではなく）実際の施工にとって最も許容しやすい手段が選ばれるという、至極当然の理由に起因している。

上に示した二例は、耐震設計規準がどうであれ、

施工技術と、その実践母体である建設インダストリーの技量と意向が、ものづくりを支配していることを物語っている。また、建設インダストリーにとっては、「施工技術の神髄は細部に宿る」のであって、それに比べれば、地震力の設定や応力や変形を算定するための解析等、耐震設計規準の骨子と考えられている部分はそれほど重要ではないことも示唆している。耐震技術を国を越えたビジネスの種（タネ）をとらえ、そしてその主体が、施工を実践する建設インダストリーであることを踏まえれば、耐震技術のグローバリゼーションにおいて、まなじりを結して守らねばならないのは、材料、部品、装置の生産と流通も含めた耐震施工に関する実践技術である。

6. おわりに

本稿では、耐震技術のグローバリゼーションに日本が立ち向かうための戦略について、筆者の思いを認めた。主たる論点は下記の通りである。

- (1) 日本と諸外国の耐震設計規準を見かけではなく実質的な違いに着目して分析し、わが国の規準が他に比べて甘い（危険側の設計を許す）項目については、その背景を詳細に分析し、その合理性に対する理論武装が必要である。
- (2) 耐震工学研究と耐震設計実践の違いを十分に認識しておく必要がある。グローバリゼーションの具体がいかなるものであっても、日本が世界に誇る耐震設計実践技術が適切に反映されるように、外交努力に勤まなければならない。
- (3) 耐震設計と耐震施工とは大きく異なること、建設ビジネスの主役が耐震施工であることを認識し、耐震施工技術において不利益を被らないように外交キャンペーンを展開する必要がある。

参考文献

- 1) IBC (2000). "International Building Code." International Conference of Building Officials.
- 2) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Draft No.1 (2000). European Committee for Standardization.
- 3) ATC3 (1978). "Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings," Applied Technology Council.
- 4) Nakashima, M., Roeder, C. W., and Maruoka, Y. (2000). "Steel moment frames for earthquakes in the United States and Japan," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(8), 861-868.
- 5) 中島正愛(2001): 建築と土木の棲み分けと連携—建築と土木の違い（耐震設計）, 土木学会誌, 86, 26-29.
- 6) 多田元英, 福井智規, 中島正愛, Charles W. Roeder (2001): 鋼構造建築の耐震設計に関する日米比較（モーメント骨組と筋違い骨組の分類と地震荷重）, 鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 8(31), 129-143.
- 7) Tada, M., Fukui, T., Nakashima, M., and Roeder, C. W., "Comparison of Strength Capacity for Steel Building Structures in the United States and Japan," *International Journal of Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Chinese Taiwan Society for Earthquake Engineering, 4(1), 3-14..
- 8) Vision 2000 (1995). Performance-based seismic engineering of buildings, SEAOC 3.
- 9) Personal communication with V. V. Bertero, (1994).
- 10) FEMA273 (1997). "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," Federal Emergency Management Agency.
- 11) ATC40 (1996). "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Applied Technology Council.
- 12) Velesos, A. S. and Newmark, N. M. (1960). "Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions," *Proc. 2WCEE*, 895-912.
- 13) Caughey, T., K. (1963). "Equivalent linearization techniques," *Journal of Acoustical Society of America*, 35(11), 1706-1711.
- 14) Jennings, P. C. (1968). "Equivalent viscous damping for yielding structures," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 94(1), 103-116.
- 15) 中島正愛 (2003): 耐震性能設計高度化におけるピアレビューの効用, 特別セッション, 日本地震工学会年次大会, 48-49.
- 16) Nakashima, M. and Comartin, C. (2004). "Peer review an performed based engineering in Japan and the United States," *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 2004 (accepted for publication).
- 17) Personal communication with J. O. Malley, (2003).
- 18) Clark, W. P., Aiken, I. D., Nakashima, M., Miyazaki, M. and Midorikawa, M. (2000). "The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake as a trigger for the implementation of new seismic design Technologies in Japan," *Lessons Learned Over Time, Learning From Earthquake Series, Vol III*, Earthquake Engineering Research Institute, 79-109.
- 19) Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., and Nakayasu., "Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the Post-Kobe approach," *Journal of Earthquake Engineering*, (accepted for publication)
- 20) Personal communication with K. C. Tsai, (2003).
- 21) 中島正愛（分担）(1996): 鉄骨構造（5.3.2節）, 1994年ノースリッジ地震被害調査報告書, 日本建築学会, 190-202.
- 22) 中島正愛 (1998): 米国ノースリッジ地震との類似点と相異点そして我彼のゆく道の違い, *Structures*, 日本建築構造技術者協会, 65, 47-49.
- 23) 中島正愛 (2000): 透明性の高いコスト計算なくして品質確保はありえるか, *建築技術*, 606, 160-162.