

要求・保有性能の不確定性を陽に考慮した  
鋼構造建物信頼性耐震設計法の構築  
Development of Reliability-based Seismic Design in Explicit  
Consideration of Variability of Structural Demand and Capacity

中島 正愛 (NAKASHIMA MASAYOSHI)  
京都大学・防災研究所・教授



研究の概要

強震動を受ける鋼構造建物に対する耐震設計法の高度化をめざし、建物部材がもつ耐力と変形性能（保有性能）の不確定性、地震応答下で建物に要求される変形性能（要求性能）の不確定性を明らかにしたうえで、建物の安全と崩壊余裕度を定量化する手法を開発するとともに、実用にも供しうる一連の設計情報を提示した。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／建築学・建築構造・材料／鋼構造・崩壊・信頼性設計・耐震設計・実大実験

1. 研究開始当初の背景・動機

地震時の建物崩壊は、建物が保有する耐震能力（保有性能）と、地震時に建物が崩壊しないために要求される性能（要求性能）の大小関係に支配される。建物の耐力と塑性変形能力がもつ不可避なばらつき、地震動が本質的に有する不確定性に呼応する要求性能のばらつき、の双方を考慮することが、耐震設計の高度化に不可欠である。

2. 研究の目的

要求・保有性能の不確定性を陽に考慮した信頼性耐震設計法を、鋼構造建物に対して構築することを目的に、保有性能については、構造部材と骨組の構造実験を中心に、要求性能については、確率手法に基づいた数値解析を中心に、それぞれの定量化をはかり、両者の不確定性を考慮できる耐震性能評価法を提示する。

3. 研究の方法

下記に示す 4 研究課題を展開する。

- (A) 鋼構造梁と梁接合部が有する耐震保有性能の定量化
- (B) 鋼構造柱と柱脚が有する耐震保有性能の定量化
- (C) 地震動の不確定性を考慮した鋼構造骨組の安全性評価
- (D) 鋼構造部材の破壊を考慮した鋼構造骨組の崩壊評価

(A)と(B)では、鋼構造骨組の保有性能を支配する主要部材がもつ保有性能とその不確定性の定量化をはかる。課題(C)、(D)では、鋼構造骨組が安全（健全）であるための要求性能と崩壊の限界を、その不確定性を考慮した上で評価するとともに、ここで

得る情報と(A)と(B)で得た情報を融合させ、地震動レベルに応じた鋼構造骨組の安全度と余裕度を評価する。

4. 研究の主な成果

**鋼構造梁と梁接合部が有する耐震保有性能**

鋼梁に対する一連の繰返し載荷実験と、材料・幾何学的非線形性を陽に考慮した有限要素法解析から、梁に十分な耐力を要求する変形量に応じて、それを確保するための横補剛間隔制限と幅厚比制限を、材料特性のばらつきや横ねじれ座屈と局部座屈の連成を考慮したうえで、設計式として提示した。また床スラブの存在が柱梁接合部に及ぼす影響を、鋼梁と RC 床スラブからなる実寸部分骨組に対する繰返し載荷実験から検討するとともに、超大変形における性状を明らかにした。さらに、コンクリートの塑性化と繰返し変形解析を考慮した汎用有限要素法解析コードを用いて、RC 床スラブを有する合成梁や柱梁接合部の繰返し載荷挙動を、従来から比べれば飛躍的に大きな変形領域まで追跡できることを明らかにした。

**鋼構造柱と柱脚が有する耐震保有性能**

軸力比や鋼管幅厚比を変数とした一連の実験を実施し、鋼柱が十分な耐力を保持することが要求される変形量に応じて、それを確保するための軸力比と幅厚比制限を、両者の相関を陽に考慮した設計式として提示した。また、RC 床スラブを上乗せした露出柱脚を対象に、一連の繰返し載荷実験を実施し、床スラブの弾性剛性上昇効果と耐力上昇効果を直接的に反映できる設計式を提案した。さらに、角形鋼管柱の鉛直荷

重支持能力限界を同定する実験を実施し、圧縮軸力の存在によって亀裂や破断が抑制されること、一方で局部座屈は徐々に成長してゆくが、ある限界を超すと座屈面が密着し、再び鉛直支持力が上昇し、そして次の局部座屈を促す、という現象を繰り返し、いわゆる象の脚座屈現象が生じることを明らかにした。有限要素間の接触を考慮できる有限要素法解析を実施し、局部座屈が極端に進行し座屈面同士の接触が生じる領域になると、接触要素を用いることによって解析はなお続行できるものの、その精度は実用上極めて不十分に留まっていることを実証した。

#### 地震動の不確定性を考慮した鋼構造骨組の安全性評価

地震動や構造特性の不確定性を考慮したうえで、鋼構造骨組の安全性を評価する手法を検討した結果、サイトスペシフィックな地震動を複数選択し、それらを用いて時刻歴応答解析を実施し、そこから得られる最大層間変形や部材回転角を陽に求め、それを統計処理して要求変形（回転）量とし、部材の保有耐震性能と比べることから、鋼構造骨組の安全を評価する方法を提案した。さらに、等価1自由度系に対する弾塑性スペクトルを基本として、多層鋼構造骨組の最大層間変形を推定する手法を提示し、この手法の精度を、“bias”と“dispersion”という2つの指標を用いて評価した。

#### 鋼構造部材の破壊を考慮した鋼構造骨組の崩壊評価

実大3層鋼構造骨組を対象とした、超大変形下の準静的繰り返し載荷実験を実施し、崩壊解析のキャリブレーションに不可欠な実験情報を蓄積するとともに、超大変形下における崩壊形の変化と崩壊の助長という現象を実証した。また、鋼構造骨組の弾塑性挙動解析に頻用される塑性ヒンジ法が有する追跡精度を検討し、部材劣化を含む挙動に対しても、部材劣化開始点とその後の不安定勾配を適切に選択すれば、超大変形領域においても耐力差として20%以内の精度が確保できることを確認した。次いで、各部材に耐力劣化を含む履歴特性を仕込んだ解析モデルを用いた入力地震動増分型時刻歴応答解析法によって、崩壊余裕度を定量化する方法を考案した。また、この方法を用いて、特に1層柱脚の復元力特性と耐力劣化が、骨組の崩壊に最も支配的な要因であることを突き止め、低層骨組では、柱脚の耐力を上昇させるだけで、崩壊余裕度は相当向上することを明らかにした。

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

「破壊・完全崩壊に至るまでの実挙動に対する情報の獲得」、「鋼構造部材の破壊を考慮した鋼構造骨組の崩壊評価法、余裕度評価法の提示」、「鋼構造耐震設計指針類への成果反映」において、科学技術とその実践に貢献した。

#### 6. 主な発表論文

（研究代表者は太字、研究分担者には下線）本研究の成果は、35編の学術論文（論文が複数名の査読者によって審査され、その後学会誌・国際学術誌等に発表された論文）に掲載された。このうち、19編は英文で、またそのうち15編は、SCI(Science Citation Index)ジャーナルに発表されている。これらに加えて、14編の論文を、国際会議で、78編の論文もしくは梗概を、国内学会・シンポジウムで発表した。

#### 代表論文：

- 1 Okazaki, T., Liu, D., **Nakashima, M.**, and Engelhardt, M. D., “Stability Requirements for Beams in Seismic Steel Moment Frames,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.35, No.8, August 2006, pp.1334-1342.
- 2 Zhou, F., Mosalam, K. M., and **Nakashima, M.** “Finite element analysis of a composite frame under large lateral cyclic loading,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE (in press).
- 3 **Nakashima, M.** and Liu, D., “Instability and Complete Failure of Steel Columns Subjected to Cyclic Loading,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.131, No.6, June 2005, pp.559-567.
- 4 **Nakashima, M.**, Matsumiya, T., Suita, K., and Liu, D., “Test on Full-Scale Three-Story Steel Moment Frames and Assessment of Numerical Analysis to Trace Inelastic Cyclic Behavior,” *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.35, No.1, January 2006, pp.3-19.
- 5 Kurata, M., **Nakashima, M.**, and Suita, K., “Effect of Column Base Behavior on the Seismic Response of Steel Moment Frames,” *Journal of Earthquake Engineering* Vol. 9, Special Issue 2, January 2006, pp.415-438.

ホームページ

<http://www.steel.dpri.kyoto-u.ac.jp/>