

平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		なかしま まさよし					
研究代表者氏名		中島 正愛		所属研究機関・部局・職		京都大学・防災研究所・教授	
研究課題名	和文	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					
	英文	Development of Reliability-based Seismic Design in Explicit Consideration of Variability of Structural Demand and Capacity					
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		22,800	30,100	13,300	10,100	4,500	80,800
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
中島 正愛	京都大学・防災研究所・教授	耐震構造学	研究の総括・梁接合部能力定量化・柱能力定量化・安全確率分析・崩壊確率分析				
井上 一郎	京都大学・大学院工学研究科・教授	鉄骨構造学	安全確率分析・崩壊確率分析				
吹田 啓一郎	京都大学・防災研究所・助教	鉄骨構造学	梁接合部能力定量化・柱能力定量化				
森 保宏	名古屋大学・大学院環境学研究科・助教	信頼性解析学	安全確率分析・崩壊確率分析				
川口 淳	三重大学・工学部・講師	鉄骨構造学	柱能力定量化				
桑原 進	大阪大学・大学院工学研究科・助手	鉄骨構造学	梁接合部能力定量化				
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>建物の崩壊は、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）の大小関係によって支配される。建物を構成する柱や梁の塑性変形能力はばらつきを有するのでその集合体である建物の保有性能は不確定性を伴う。また要求性能を支配する地震動が本質的に有する不確定性に呼応して、要求性能の評価にも不確定さがつきまとう。これら不確定性の程度を定量化するとともに、それを反映させた耐震設計の整備が、地震に対してより安全で安心な社会の構築に貢献するとの確信に従って、本研究の目的を「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」とし、下記に示す研究課題を展開する。</p> <p>(A) 鋼構造梁接合部が有する塑性変形能力の不確定性とその定量化（梁接合部能力）</p> <p>(B) 鋼構造柱が有する塑性変形能力とその不確定性の定量化（柱能力）</p> <p>(C) 地震動の不確定性を考慮した鋼構造骨組の安全確率の定量化とその評価手法の提案（安全確率）</p> <p>(D) 鋼構造部材の破壊を考慮した鋼構造骨組の崩壊確率の定量化（崩壊確率）</p> <p>上記研究課題のうち、課題(A)と(B)は、鋼構造骨組の保有性能を支配する主要部材（柱、梁、接合部）がもつ塑性変形能力とその不確定性を定量化するもので、既往実験データに対するデータベースの構築とその分析、実大構造実験、実験結果を再現しうる精緻な数値解析から構成される。課題(C)では、鋼構造骨組への要求性能をその不確定を考慮した上で定量化するとともに、この情報と(A)と(B)で得た情報を信頼性理論に基づいて融合させ、地震動レベルに応じて鋼構造骨組が安全である確率を“Fragility”曲線として提供する。課題(D)では、一部の破断（局部不安定）を考慮した鋼構造骨組地震応答解析から、地震動レベルに応じた崩壊確率を求めるとともに、課題(C)で得る安全確率と課題(D)で得る崩壊確率の差を、鋼構造骨組が過大地震下において有する余裕度指標として表示する。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

本研究で設定した(A：梁接合部能力)、(B：柱能力)、(C：安全確率)、(D：崩壊確率)の4研究課題を、下記に示す小課題群に分類し、下記チャートに記す年度計画を立案した。

(A.1) = 梁塑性変形能力データベース整備；	(A.2) = ロバスト性の高い梁接合形式同定；
(A.3) = 梁接合部実大載荷実験実施；	(A.4) = 梁塑性変形能力解析による不確定性分析；
(B.1) = 柱実大載荷実験実施；	(B.2) = 柱塑性変形能力データベース整備；
(B.3) = 柱変形能力解析による不確定解析	
(C.1) = 強振動記録の分類；	(C.2) = 一般化骨組モデルを用いた不確定性分析；
(C.3) = 安全確率評価	
(D.1) = 損傷劣化モデルの導入；	(D.2) = 崩壊確率評価

< 年次計画 >

小課題	(A:梁接合部能力)				(B:柱能力)			(C:安全確率)			(D:崩壊確率)	
	(A.1)	(A.2)	(A.3)	(A.4)	(B.1)	(B.2)	(B.3)	(C.1)	(C.2)	(C.3)	(D.1)	(D.2)
H14	■	■	■					■			■	
H15	■		■	■	■	■	■		■		■	■
H16				■	■	■	■		■	■		
H17					■	■	■		■			■
H18									■			■

本研究は上記年次計画にほぼ沿って進行し、5年計画のうち最初の2年が終了した段階にある。各年度で実施した研究は下記のように要約できる。

< 平成 14 年度 >

課題(A)については、過去10年間に世界各国で実施された実験情報を収集し、それをデータベースとして整備することから、梁接合部塑性変形能力とその不確定性を接合形式毎に定量化した。また典型的な梁接合部要素に対する動的実大実験を実施し、梁接合部要素がその抵抗力を完全に失うまで（完全破断）の挙動を忠実に記録し、課題(D)への基礎資料とした。課題(B)に対しては、作用する軸圧縮力の大きさを変数とした柱要素に対する予備模型実験を実施し、柱が鉛直荷重保持能力を完全に喪失するまでの挙動を再現することから、課題(D)への基礎資料とした。課題(C)については、全世界（とりわけ米国と台湾）で記録された地震動群を収集し、それを地震規模、震源距離、表層地盤条件等に分類し、課題(C)への布石とした。課題(D)に関しては、部材破壊を考慮できる弾塑性骨組解析コードの開発に着手し、ボルト破断等による接合部の耐力劣化特性を再現しうる段階にまで到達した。

< 平成 15 年度 >

課題(A)については、平成14年度に整備した塑性変形能力に関するデータベースに、最近実施された米国の情報を組み込んで内容の充実をはかった。また梁の局部座屈、横ねじれ座屈、溶接梁端部の亀裂と破断、RC床スラブとの合成効果やその連成が、梁接合部の塑性変形能力に及ぼす影響を総合的に評価するために、3層実大鋼構造骨組に対する準静的載荷実験を実施した。課題(B)に対しては、平成14年度の予備実験を参考にして、角形鋼管柱に対する準静的実大実験を、柱軸力と鋼管の径厚比の変数として実施、柱が鉛直支持能力を完全に失うまでの挙動を再現することから、次年度以降の解析評価への布石とした。課題(C)については、一般化骨組モデルを用いて、建物階数、柱梁耐力比、地震動タイプ、地震動強さを変数とした一連の数値解析を実施し、骨組に要求される最大層間変形角を中央値応答と84パーセントイル応答として表示するとともに、これら応答を一次と二次の低次応答から予測する方法の原型を構築した。課題(D)に関しては、平成15年度に整備した、フランジ破断・ボルト破断を考慮できる梁復元力特性モデルを一般化骨組モデルに組み込み、その数値安定性や適用性を検討した。

特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

海外共同研究者との密接な日本鋼構造協会論文賞の受賞

鋼構造接合部設計施工と溶接梁接合部の塑性変形能力に関する調査や、既往の実験他によって得られた結果を参照して、ロバスト性の高い梁接合部設計施工法（課題(A)に関連）を論じた論文（研究成果発表：(18)）が、2004年度日本鋼構造協会論文賞を受賞した（表彰は2004年6月予定）。実際の施工実態を適切に踏まえたうえで接合部に付与すべき特性を明らかにしたこと、非破壊検査がもつ精度とそれに要するコストのバランスを考えた品質確保法を分析したことが高い評価を受けたものである。

梁の塑性変形能力に及ぼす幅厚比と細長比の影響評価と耐震設計規準への反映

本研究における課題(A)（梁塑性変形能力）は、梁の塑性変形能力を支配する因子として、溶接部もしくはその近傍からの破断、局部座屈の進展による耐力劣化、横座屈の発生と構面外変形の卓越による耐力の劣化、それらの連成などがある。1994年米国ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震で相次いで露見した被害が、主として溶接部もしくは近傍からの破断であったことから、その後の研究は早期破断をどう防ぐかに焦点が置かれた。両地震後10年を経たいまでは破断しにくい接合方法が提案されているが、破断が防げたとすればその次に問題になるのは、局部座屈や横座屈に関わる不安定である。本研究では、横座屈や局部座屈という不安定現象を適切に反映できる解析コードを整備することから、この種の不安定による耐力劣化特性を分析するとともに、現在の耐震設計で梁に要求される繰返し塑性変形に対しても、不安定挙動を起こさせないための耐震設計要件（幅厚比制限と細長比制限）を提案した（研究成果発表：(3、6、8、9)）。この成果は、米国の代表的鋼構造設計規準：AISC-LRFDに関わる”Committee of Seismic Provisions (Chair: J. O. Malley)”の興味を得るところとなり、昨年来彼らと共同研究を実施している。現在改定中で2005年に出版される”AISC Seismic Provisions”に、本研究の成果が反映される予定である。学術成果の社会（実践への）還元例である。

一般化骨組モデル（Generic Frame Model）の国外への普及と耐震解析への適用

本研究開始以前に研究代表者や分担者が提案し、本研究における解析（課題(C)、(D)）の核となっている一般化骨組モデル（研究成果発表：(10)）は、海外共同研究者等（スタンフォード大学：C. A. Cornell教授他）との共同研究過程において彼らの高い認知を受けるところとなった。ある層に属するすべての柱を一本の代表柱で、ある床レベルに属するすべての梁を一つの回転バネで置換するという簡略化を施しつつ、多層多スパン鋼構造骨組がもつ特性を精度よく再現しうる一般化モデルの特長が、耐震設計における性能検証手段として高いポテンシャルをもつことが認められた結果、米国の”Applied Technology Council”が準備中のATC55（耐震設計における動的解析法ガイドライン）において、推奨解析法の一つとして言及される予定である。当該学術成果が国を越えて認知された証拠となっている。

鋼構造実大実験の実施

平成15年度には、梁の塑性変形能力定量化（課題(A)）の一環として、床スラブとの合成効果や、一つの梁の破断や不安定が、多数の梁や柱から構成される鋼構造骨組全体の塑性変形能力に及ぼす影響を詳細に検討するために、実大3層鋼構造骨組（2スパン×1スパン）に対する準静的繰返し載荷実験を実施した。またこの実験の最終段階では、実験骨組が耐力を失い崩壊してゆく様子を詳細に観察し、関連する実験データを蓄積した。最終的には、層間変形角にして0.13radまで載荷し、耐力が最大耐力の40%に低下するまでの挙動の再現に成功した。（縮小模型ではない）実大実験、（柱や梁単体ではない）不静定次数が高い骨組の挙動、（柱梁からなる構造体だけではなく）床スラブや外装材等をも配した実際の建物への載荷実験、（通常想定する層間変形角：0.02～0.03rad程度ではなく）層間変形角にして0.13radまで載荷した大変形という点において、他にほとんど例を見ない貴重な実験情報を提供できた。この実験結果は、構造物の弾塑性解析手法の精度や適用限界を測るベンチマークとして、国内外の注目を集める結果となっている。

連携による研究成果の普及

本研究では、同種の研究との補完による本研究の促進、研究成果の国外への速やかな普及を意図して、海外の第一級の研究者を共同研究者として招き共同研究を実施している。平成14年度には、S. A. Mahin教授（カリフォルニア大学バークレー校）、M. D. Engelhardt教授（テキサス大学オースティン校）、C. A. Cornell教授（スタンフォード大学）が、また平成15年度には、H. Krawinkler教授（スタンフォード大学）、C. C. Comartin氏（コマーティン事務所）が来日し、研究の方向と進捗を打ち合わせた。また共同研究の証として、Cornell教授、Engelhardt教授とは共著論文を著した。平成14年には、R. Tremblay教授（カナダ：エコーポリテクニク）、E. Mele準教授（イタリア：ナポリ大学）をJSPS外国人研究者短期招聘プログラムにより日本に招聘、本研究に関連する事項について研究交換を進めるとともに、本研究課題について彼らとも共同研究を実施することを企画しはじめた。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)
の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会
等における発表状況について記入してください。)

< 主たる発表論文：論文に対して複数名の査読を受けた後、国内外学術誌や学会誌に掲載されたもの >

- (1) Nakashima, M. and Liu, D., "Instability and Complete Failure of Steel Columns Subjected to Cyclic Loading," **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE (accepted for publication).
- (2) 金尾伊織, 中島正愛, 竹原創平: 座屈・破断を考慮したブレース付骨組モデルと断層近傍強震動下の応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 577 号, pp.117-122, 2004.
- (3) Nakashima, M., Liu, D., Kanao, I., "Lateral-Torsional and Local Instability of Steel Beams Subjected to large Cyclic Loading," **Journal of Steel Structures**, Korean Society of Steel Construction, Vol.3, No.3, pp.179-189, 2003.
- (4) Nakashima, M. and Chusilp, P., "A Partial View on Japanese Post-Kobe Seismic Design and Construction Practices," **International Journal of Earthquake Engineering and Engineering Seismology**, Chinese Taiwan Society for Earthquake Engineering, Vol.4, No.1, September 2003, pp.3-14.
- (5) 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 Vol.4, No.1, pp.37-50, 2003.
- (6) 劉大偉, 金尾伊織, 中島正愛: 繰返し載荷を受ける H 形鋼梁の塑性変形能力に及ぼす局部座屈の影響, 鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 第 10 巻, 37 号, 2003 年 3 月, pp.61-70.
- (7) Liu, D., Nakashima, M., and Kanao, I., "Behavior to Complete Failure of Steel Beams Subjected to Cyclic Loading," **Journal of Engineering Structures**, Vol.25pp.525-535, 2003.
- (8) Nakashima, M., Kanao, I., and Liu D., "Lateral Instability and Lateral Bracing of Steel Beams Subjected to Cyclic Loading," **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol.128, No.10, pp.1308-1316 2002.
- (9) 金尾伊織, 中島正愛, 劉大偉: 繰返し載荷を受ける鋼標準梁・RBS 梁の必要横補剛条件, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.131-137, 2002.
- (10) Nakashima, M., Ogawa, K., and Inoue, K., "Generic Frame model for Simulation of Earthquake Responses of Steel Moment Frames," **Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol.31, No.3, pp.671-692, 2002.
- (11) 吹田啓一郎, 狩野直樹, 井上一朗: 高力ボルト接合されたパネル降伏型 H 形断面柱梁接合部の耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.219-224, 2002.
- (12) 李相周, 吹田啓一郎, 井上一朗: 穿孔による RBS 工法を用いた H 形断面梁の塑性変形能力, 鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 第 9 巻, 36 号, pp.47-54, 2002.
- (13) 吹田啓一郎: 鋼構造ラーメン骨組の耐震設計における梁端接合部の耐力要求値, 日本建築学会構造系論文集, 第 567 号, pp.165-171, 2003.
- (14) 森 保宏, 山中貴司, 中島正愛: 降伏後のモード形を考慮した鋼構造骨組の変位応答評価法, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.50B, pp.425-434, 2004.
- (15) 森 保宏, 加藤隆広: 劣化影響係数を用いた構造物の実用的な信頼性評価手法, 構造物の安全性および信頼性, JCOSSAR '2003 論文集, Vol. 5, pp.497-502, 2003.
- (16) Luco, N., Mori, Y., Funahashi, Y., Cornell, C. A., and Nakashima, M., "Evaluation of Predictors of Nonlinear Seismic Demands using "Fishbone" Models of SMRF Systems," **Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol.32, 2003, pp.2267-2288, 2003.
- (17) 森 保宏, 橋本善和, 渡辺豊和: 地震の活動履歴とモデルの不確定性を考慮した地震危険度の解析的評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 569 号, pp.15-22, 2003.
- (18) 川口淳, 桑原進, 中島正愛: 建築鉄骨工事検査技術の現状と問題, 鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 第 10 巻, 37 号, pp.15-29, 2003.
- (19) 山本貴正, 川口淳, 森野捷輔: コンクリート充填円形鋼管短柱の軸圧縮特性に及ぼす寸法効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp. 237-244, 2002.
- (20) Uchida, Y., Kawaguchi, J., and Morino, S., "Dynamic Response of Steel Beam-Columns with Square Hollow Section- Shaking table tests of steel beam-columns subjected to biaxial bending (Part 1) " 日本建築学会構造系論文集, 第 577 号, pp.123-130, 2004.
- (21) 向出静司, 桑原進: 鋼構造ラーメン骨組の梁と接合部パネルに要求される変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, pp.163-170, 2002.

< 国際学会等での主な発表：研究代表者分 >

台湾集集地震 5 周年記念国際シンポジウム(2004 年 9 月)招待講演(予定): Characterization of Ultimate Collapse of Steel Moment Frames under Severe Ground Motions.

13 回世界地震工学会議(2004 年 8 月)口頭発表(予定): Full-Scale Test of Three-Story Steel Moment Frames for Examination of Extremely Large Deformation and Collapse Behavior

第 7 回環太平洋鋼構造会議(2004 年 3 月)口頭発表: Test on Collapse Behavior of 3D Full-Scale Steel Moment Frames Subjected to Cyclic Loading.

地震被害シミュレーションに関する日台ワークショップ(2003 年 11 月)招待講演: Post-Kobe Seismic Design and Construction Practices of Steel Building Structures.

第 16 回米国土木学会応用力学年次講演会(2003 年 7 月)口頭発表: Instability and Complete Failure of Steel Columns Subjected to Cyclic Loading.

第 4 回耐震鋼構造国際会議(2003 年 6 月)口頭発表: Test on Complete Failure of Steel Columns Subjected to Cyclic loading.

2003 年度米国土木学会構造工学会議(2003 年 5 月)口頭発表: Issues to be Resolved in Practical Implementation of Real-Time Hybrid Testing.