

平成 22 年 4 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（A）
研究期間：2007～2009
課題番号：19206060
研究課題名（和文） 分散型ハイブリッド実験の高度化による大規模構造物地震応答再現手法の開発
研究課題名（英文） Experimental techniques for earthquake response simulation of large-scale structures using advanced distributed hybrid testing
研究代表者
中島 正愛（NAKASHIMA MASAYOSHI）
京都大学防災研究所・教授
研究者番号：00207771

研究成果の概要（和文）：

耐震工学における大型構造実験へのニーズに応えるべく、(1)日本が率先して育ててきたオンライン応答実験手法を基盤とする；(2)サブストラクチャ法の考え方を踏襲し、さらに実験を実施する部分を複数の実験施設で分担する；(3)サブストラクチャ法における解析部にも複数の有限要素法解析コードを有機的に活用する、を特徴とする研究を、「入手が容易な載荷・計測装置の活用」、「汎用解析コードの利用」、「部分の秘匿性保持」、「標準インターネット環境を用いたデータ交換」、「大型構造物地震応答再現の検証」によって達成した。

研究成果の概要（英文）：

This study develops experimental techniques for earthquake response simulation of large-scale structures using the concept of distributed hybrid testing. The study is characterized by (1) use of online testing, (2) implementation of multiple physical tests in different locations simultaneously, and (3) prosecution of multiple numerical analyses using different program codes. These features are realized by “use of conventional loading systems”, “use of general purpose computer codes”, “maximum use of encapsulation concept”, “data exchange using standard input and output environment”, and “applications to a series of actual large-scale tests”.

交付決定額：

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	17,100,000	5,130,000	22,230,000
2008年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究分野： 建築構造・材料

科研費の分科・細目： 5301

キーワード： ハイブリッド構造実験、サブストラクチャ法、分散型実験、汎用有限要素法解析、崩壊、免震建物、セルフセンタリング機構

1. 研究開始当初の背景

大型化する耐震構造実験・・・耐震構造工学において構造実験は、理論や予測の検証手段として、また予測が覆されたときの学習の場として、大きな役割を果たしている。耐震設計において「安全性」はその中核をなし、「過大地震下で構造物が想定以上の損傷を受け完全に崩壊する限界」としての保有性能の定量化は欠かせない。数値解析技術の進歩はめざましいが、最新の数値解析をもってしてもなおこの種の挙動を精度よく追跡することは至難の業である。このようなとき、この限界に対する基礎情報を得るために、また数値解析等予測手法の高度化を促すために、崩壊までの挙動に対する実験情報は欠かせない。ところが崩壊となると、その起点となる材料・部材の塑性化、亀裂、破断等を伴うために、いわゆる縮小モデルを用いてはまことの情報を得ることができない。また建築構造がもつ不静定性は、部材一本の破壊が構造全体の崩壊につながるとは限らず、ここにおいて部材ではなく構造体全体を実験の対象とすることも必要となる。近年、制振構造という言葉に代表される、より高い耐震性能を付与する新しい技術の開発はめざましい。新しい技術（部品、部材、構法等）の妥当性は事前の実験検証によって担保されるが、それでも縮小モデルではなく実際の寸法をもつ試験体を用いた実験が求められる。これらの動きすべては大型構造実験の必要性を訴えている。

多くの人的資源を結集した構造実験研究へのニーズ・・・近年大型構造実験施設の建設や拡充は世界規模で展開されており、その代表として（独）防災科学技術研究所が 2005 年に完成させた実大三次元震動台施設がある。この施設は、従来よりもはるかに大きな試験体の動的挙動を忠実に再現しうる。しかしながら、この施設の利用と実験は極めて高価であり、また実験できる回数も限られているので、究極の検証手段としては有効であるものの、多様な構造システムの地震応答性状を広範に観察・実験するという訳にはゆかない。ここにおいて、幅広い興味と専門性をもつ多くの研究者達が自らの興味と知恵を検証できる実験施設・装置の構築が、上に示したように大型実験が可能となることを条件として切に求められている。

ものづくりの伝統を確保するための若手技術者・研究者の養成・・・多くの研究者が関

与できるという点は、建築構造教育という側面からも極めて重要である。日本は古来技術や技能に高い敬意を払い、「ものづくり」を美德として研鑽し、それが日本の産業を支えてきた。ところが昨今構造実験を経験する学生の数が減っている。この原因として、構造実験には多額の資金と手間ひまがかかる、つまり実験研究成果を発表するのに時間を要するのに、業績としての論文数を雇用や昇進に重用するために、構造実験を伴う研究が減ってきていること、また人員削減の一環として、構造実験等を支えてきた技官・技術員等の退職後の不補充などが挙げられる。「ものづくり」が日本の産業を支えるはずであるのに、それを経験させる最高の場であるはずの構造実験が人材育成・教育の場から消えつつあるというゆゆしき事態を招いている。

2. 研究の目的

大型構造実験に対するニーズの高まり、その実現を阻む大きな初期投資・運営経費、若い人材が構造実験に携わる機会の減少に対する憂慮等に代表される、耐震工学に関わる今日の問題に対して、その処方箋として「分散型ハイブリッド構造実験法」と称する新しい耐震構造実験手法（仮想耐震構造実験施設）を開発することを、本研究の射程とした。またこの開発の帰結として、(1)大型構造物の地震応答を実大規模で再現しうる手法の提示によって耐震工学に貢献する、(2)多くの実験施設を同時に使うことから国内外の研究者を結集できる仕組みを構築する、(3)若手研究者や大学院生等、次代を担うべき人材に構造実験の醍醐味を実感させる、ことを目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、下記を研究の基本方針とした。

- (a) オンライン応答実験や仮動的実験として日本が世界に率先して育ててきた構造物地震応答再現実験手法を基盤とする。
- (b) この手法の展開の一つであるサブストラクチャ法（全体構造物を実験部と解析部に分割、実験部にだけ実際の実験を適用し、解析部は数値解析に委ねる方法）を用いるが、実験を実施する部分を一つではなく多数設け、さらにこの実験を複数の実験施設で分担する。
- (c) サブストラクチャ法における解析部にも複数の有限要素法解析コードを用い、複

数の実験部と併せた全体構造物の運動方程式を解くことからその地震応答を再現する。

上記方針に沿って、具体的な研究項目を、「入手が容易な載荷・計測装置の活用」、「汎用解析コードの利用」、「部分の秘匿性保持」、「標準的なインターネット環境を用いたデータ交換」と定め、また開発したシステムの有効性や限界を、一連の大型構造物地震応答再現によって検討した。

本研究が、わが国が独自に育みそして世界をリードしてきたオンライン応答実験研究の流れに沿うことに鑑みて、本研究成果の国際的認知の促進と、海外研究機関との積極的連携を図るために、下記の海外研究者と連携した。

- P. Benson Shing (平成 19 年度)
University of California at San Diego, USA
- Khalid. Mosalam (平成 19 年度)
University of California at Berkeley, USA
- Gregory L. Fenves (平成 20 年度)
University of California at Berkeley, USA
- Peng Pan (平成 19~21 年度)
Tshinghua University, China

4. 研究成果

4.1 分散型ハイブリッド構造実験システムの開発に関わる成果の概要

入手が容易な載荷・計測装置の活用・・・他のグループでは油圧サーボアクチュエータ利用を前提とした実験システムに特化している。ところが油圧サーボアクチュエータは、初期投資はいうにおよばず、維持管理（油交換等々）にも多額の資金を注ぎ込まねばならないので、大学を始めとする大多数の教育研究機関がこの種の装置を持つことは非現実的である。本研究では、ほとんどの教育研究機関が保有している載荷（準静的ジャッキ）・計測装置やインターネット環境だけを用いる、既存施設・機器最大限利用型の実験システムを構築した。また変位制御によるジャッキと荷重制御によるジャッキを混在させて載荷する「Mixed Control」と、一つのジャッキがあるときは変位制御で他のときは荷重制御で載荷する「Switching Control」を実現することによって、実験の柔軟性を確保した。

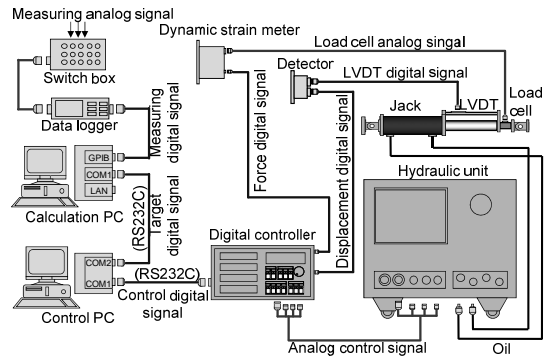


図 1 標準的な準静的載荷装置を活用した実験システム

汎用解析コードの利用・・・サブストラクチャ法を用いた過去のほとんどの実験は、解析部と実験とのデータ交換の必要性等ハイブリッド実験特有な問題に対処するために、修正可能な自前の数値解析コードを用いている。ところが自前の解析コードでは、さまざまな履歴特性に対応しうるオプションが整った市販の汎用解析コード（例えば ABAQUS）ほどの汎用性を欠く。本研究では、複数汎用解析コードを直接用いることによって、解析部の精度確保と解析に対する柔軟性を確保した。

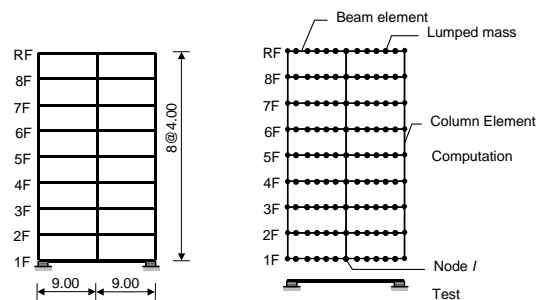


図 2 汎用解析コードを用いたサブストラクチャ解析部分の応答評価

部分の秘匿性（Encapsulation）保持・・・複数の汎用解析コードの利用にせよ、複数の実験にせよ、それぞれの部分は独自の領域を持っており、それは解析コードごとと実験施設（載荷装置）ごとに異なっている。本研究では、独自の特徴・特徴をもつ各実験・解析の独自性、つまり内部の秘匿性を保持しつつも、全体系としての整合を満足させるために、境界部だけの情報交換（境界部での釣合と適合）によって全体系の運動方程式を解くという手法を考案した。

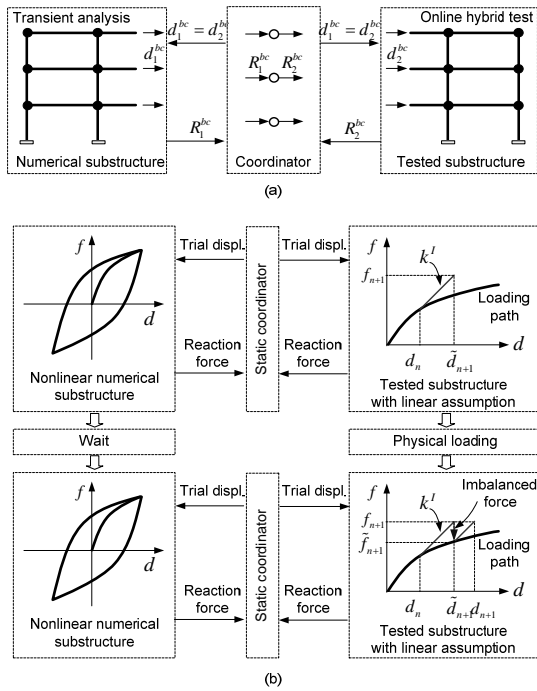


図3 秘匿性を最大限確保した分割とサブトラックチャ間の情報伝達

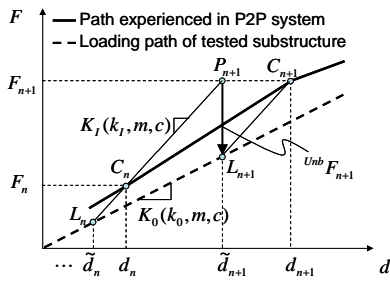


図4 2段階Quasi-Newton法の適用による実験部分の収束処理

標準的なインターネット環境を用いたデータ交換・・・複数の実験施設を用いた実験では、インターネットを介したデータ交換が不可欠となるが、昨今セキュリティチェックは厳しくなるばかりで、他の機関からのデータ受送信は決して容易ではない。既往のほとんどの実験では、特別なIPアドレスを予め指定するなど、事前に特別な手続き等を必要としているが、通信のために特殊な手続きを強要することは汎用化・一般化を狙ううえでは得策ではない。本研究では、IPアドレスとポート番号を組み合わせる通信手段（ソケット通信）を利用することから、簡便かつ確実なデータ受送信を実現した。

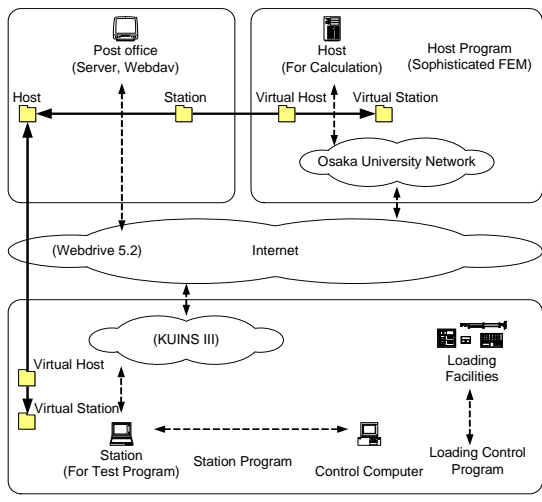


図5 ソケット通信を用いた簡便データ交換スキーム

4.2 分散型ハイブリッド構造実験システムの構築による成果の普及と波及効果

教育研究機関の結集による人材育成・・・本研究の成果である「分散型ハイブリッド構造実験法」の実現によって、数多くの教育研究機関が共同して実験に取り組む仕組ができた。いうまでもなく構造実験には幾多のノウハウが必要で、それを共有・継承してゆくことによって構造実験の成果は挙がってきた。複数の教育研究機関が共同で大きな構造物を実験しようとするこの試みによって、多くの若手研究者や大学院生を同時期同時刻に同じ目標の旗の下に結集することを可能にした。そこでの教員・研究者・大学院生間の密接な会話が、構造実験への興味、習熟、そしてものづくりへの深い理解へと若者達を導いてゆく起爆剤になりうることを確認した。

4.2 分散型ハイブリッド構造実験システムを用いた実験による実証

ロッキングコラムとテンドンから構成されるセルフセンタリング・ダンパー建物に対する実験・・・特定層への変形集中を緩和する外付けの芯柱（ロッキングコラム）と復元力を与える引張材（テンドン）からなる耐震補強法に対して、ロッキングコラムとテンドン部を実験部と、耐震補強の対象となる原建物を解析部とする実験を実施した。複数台（4台）のジャッキに対する同調制御を始めとする多数台载荷の円滑な実施が、本研究がめざす「入手が容易な载荷・計測装置の活用」によって十分に可能であることを検証した。

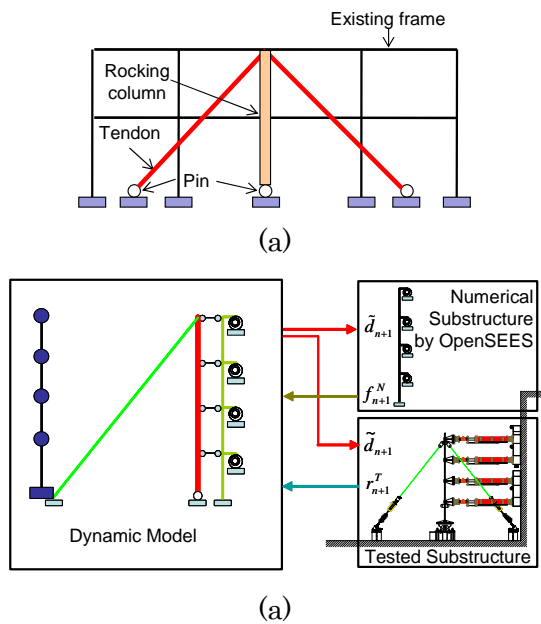


図6 ロッキングカラムとテンドンから構成される建物に対する実験：(a) 対象建物の仕組み；(b) 建物のモデル化と実験装置

周囲の擁壁との衝突を含む免震構造物の応答や上下動を受ける免震構造物の応答に対する実験・・・この実験では免震層を実験の実験部分とし、上部構造を数値解析で処理するサブストラクチャ法を適用した。上部構造には汎用解析コード ABAQUS を用いることによって「汎用解析コードの利用」を果たし、また ABAQUS がもつリスタート機能を繰り返し適用することによって、ABAQUS 内部に立ち入ることを回避することから「部分の秘匿性 (Encapsulation) 保持」を実現した。また上下動を受ける場合の免震層の挙動については、免震層が圧縮を受けるときは剛性が高いので荷重制御を、一方引張を受けるときは剛性が激減するので変位制御を使うという「Switching Control」を適用し、その妥当性を検証した。

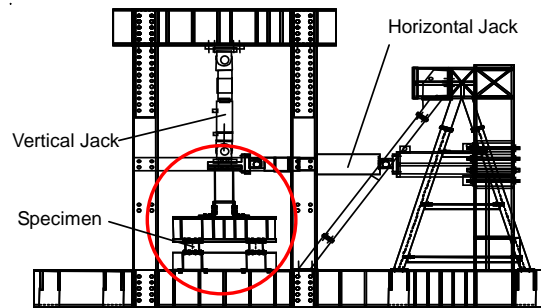


図7 「Switching Control」を用いた免震構造物上下動応答実験における実験装置

SRC 建物とその上に設置された鉄塔からなる連成系に対する実験・・・この実験では、対象とする構造物を、SRC 建物、損傷が集中する鉄塔最下層部、鉄塔上層部の 3 部分に分割し、SRC 建物には合成部材の復元力特性を適切に表現できる”Fiber Model”が充実した、汎用解析コードである OpenSeas を、鉄塔最下層部は実際の実験を、鉄塔上層部には鋼の座屈や非線形挙動を精度よく追跡できる ABAQUS をそれぞれ用いた。それぞれの部分の内部秘匿性を確保するために、標準 I/O だけに頼るデータ交換をリスタート機能駆使して実現するとともに、解析部と実験部のデータ交換を、2 段階 Quasi-Newton 法の適用 (図 4) によって実現した。

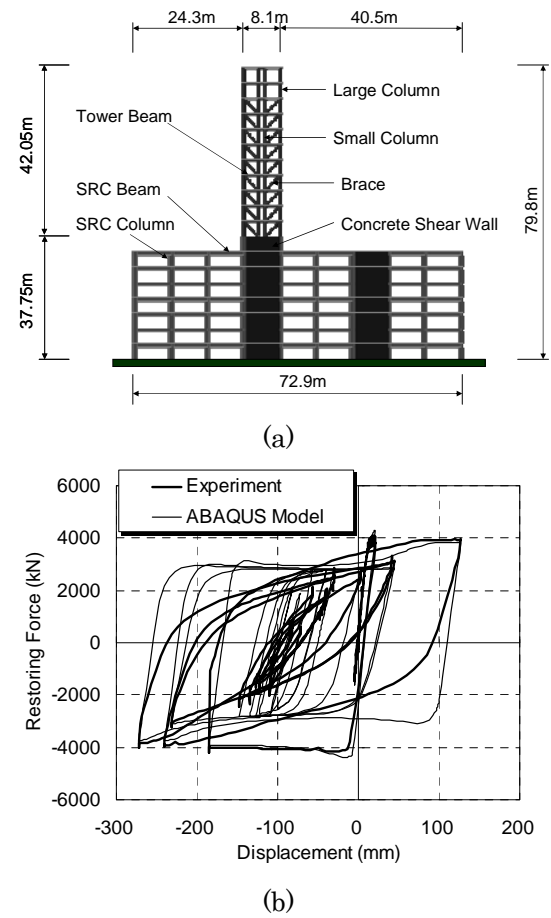


図8 SRC 建物とその上に設置された鉄塔からなる連成系に対する実験：(a) 構造物のモデル化；(b) 実験から得られた鉄塔最下部の復元力特性

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 4 件)
① Ji, X., Kato, M., Wang, T., Hitaka, T.

- and Nakashima, M., “Effect of gravity columns on mitigation of drift concentration for braced frames”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.65, No.12, 2009, pp.2148-2156.
- ② Cui, Y., Nagae, T., and Nakashima, M., “Hysteretic Behavior and Strength Capacity of Shallowly embedded Steel Column Bases”, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers Vol.135, No.10, October 2009, pp.1231-1238.
- ③ 山本遼大, 植村具民, 崔瑤, 吹田啓一郎, 中島正愛: 側柱柱脚実験と浅い埋込み柱脚耐力・剛性評価ー浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能 その 3, 日本建築学会構造系論文集, No.635, 2009年1月, pp.129-136
- ④ 山本遼大, 植村具民, 吹田啓一郎, 中島正愛: 繰返し载荷を受ける浅い埋込み柱脚の復元力特性ーその 2 実験計画と初期剛性, 最大耐力の評価法, 日本建築学会構造系論文集 No.623, 2008年1月, pp.111-118.
- [学会発表] (計 8 件)
- ① Ji, X., Kato, M., Wang, T., Hitaka, T. and Nakashima, M., “Effect of gravity columns on mitigation of story drift concentration,” *Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA)*, August 16-19, 2009, Philadelphia, PA, pp.303-309.
- ② Jacobsen, A., Hitaka, T., Nakashima, M., McCormick, J., Wang, T. and Murata, Y. “Condition Assessment Application of Steel Shear Walls with Slits,” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- ③ Nakashima, M., “Roles of Large Structural Testing for the Advancement of Earthquake Engineering,” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- ④ Cui, Y., Yamamoto, R., Uemura, T., Nagae, T., Hitaka, T. and Nakashima, M., “Hysteretic Behavior and Strength Capacity of Shallow Embedded Steel Column Bases,” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- ⑤ Wang, T., Aburano, H., Matsuoka, Y., Hitaka, T. and Nakashima, M., “Strengthening of Weak Story Moment Frames using a Rocking System with Tendons,” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- ⑥ Wang, T., McCormick, J., and Nakashima, M. “Verification Test of a Hybrid Test System with Distributed Column Base Tests”, *ASCE Structural Congress*, April 2008.
- ⑦ Wang, T., Yoshitake, N., McCormick, J., Pan, P., Murata, Y., and Nakashima, M., “Collapse Simulation of a Four-Story Steel Moment-Resisting Frame by Distributed Online Hybrid Test,” *The Second International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, December 6-8, 2007, Shanghai, China.
- ⑧ Pan, P., Tomofuji, H., Wang, T., Nakashima, M., Ohsaki, M., and Mosalam, K. M., “Design and Implementation of Peer-To-Peer (P2P) Internet Online Hybrid Test System,” *The Second International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, December 6-8, 2007, Shanghai, China.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 正愛 (NAKASHIMA MASAYOSHI)

京都大学防災研究所・教授

研究者番号：00207771

(2) 研究分担者 (平成 19 年度)

連携研究者 (平成 20 年度)

多田 元英 (MOTOHIDE TADA)

大阪大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90216979

吹田 啓一郎 (SUITA KEIICHIRO)

京都大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70206374

大崎 純 (OSAKI MAKOTO)

京都大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40176855

日高 桃子 (HITAKA TOKO)

京都大学防災研究所・准教授

研究者番号：20346828