

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360266

研究課題名(和文)高度解析プログラムと載荷実験を統合した建物の連成倒壊挙動シミュレーションシステム

研究課題名(英文) Simulating system for analyzing collapsing behavior of building by unifying sophisticated analytical programs and loading tests

研究代表者

多田 元英 (TADA MOTOHIDE)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 90216979

研究成果の概要：

2004～5年度の科学研究費で整備した「統合化構造解析システム」を発展させ、鋼構造建物が大地震動を受けて完全倒壊する挙動を再現し、別途に実施した震動台実験結果と比較して精度の高さを確認した。また、高度な数値解析に準静的載荷実験を統合して、高精度に建物の倒壊挙動を追跡できるよう従来のシステムを拡張した。それを利用して、筋かいの座屈後破断を伴う鋼構造建物の大地震時挙動をシミュレートし、激震時の建物安全性を高精度に検討するための基礎を作成した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	8,500,000	2,550,000	11,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：耐震，シミュレーション工学，統合化構造解析，ハイブリッド実験，倒壊挙動

## 1. 研究開始当初の背景

建物全体の倒壊挙動や諸座屈の連成挙動を飛躍的に高い精度で解析することを目的として、研究代表者らは以下に示す統合化構造解析システムの構築に2003年に着手した。すなわち、様々な研究者が開発した構造解析プログラムで部分構造の詳細解析を担当し、全体剛性方程式を担当するホストプログラムと数値情報を通信し合うことで、各部分の不安定挙動が連成する効果も考慮した建物

全体の詳細解析を行うというものである。各部分構造の境界自由度に縮約した剛性・変形・復元力をステップ・バイ・ステップでインターネットを介して通信し合うことで増分解析を実現する。互いに提供するのは数値情報だけであり、プログラムやライブラリを交換せずに数値解析のコラボレーションを実現できること、既存プログラムの入出力部分に手を加えるだけで容易に参加できること、などが特徴として挙げられる。

このような統合化構造解析システムの実現性を示すために、研究代表者自らが作成した複数の構造解析プログラムを全国の10機関に分散させ、3階建て鉄骨造建物のプッシュオーバー解析と地震応答解析を行った。これらの論文で実証した本システムの実現性をアピールすることで何人かの賛同者を得、それぞれが開発した詳細解析プログラムを研究代表者が作成した骨組解析プログラム（NETLYS）と統合した構造解析コラボレーションに成功している。すなわち、大神博士（日鐵プラント設計）が開発した板要素の局部座屈解析プログラム（NASP）との統合解析では、角形鋼管柱脚の局部座屈後挙動をNASPで詳細に解析すると同時に、その劣化挙動が骨組全体の挙動に及ぼす影響も考慮してプッシュオーバー解析を行った。さらに、安井博士（長崎総合科学大学）が開発した円形鋼管柱の局部座屈解析プログラムとの統合解析、金尾博士（京都工芸繊維大学）が開発した梁材の横座屈挙動解析プログラム（FERT）との統合解析にも成功している。また、玉井博士（広島工業大学）が開発した露出柱脚の詳細解析プログラム（NETBASE）と研究代表者が開発した合成梁部材の詳細解析プログラム（COMPO）を骨組解析プログラム NETLYS の下で統合した。この解析コラボレーションでは、個々のプログラムを単独で使用した場合には生じない顕著な柱軸力の変動を、複数プログラムを統合することで知り得るという有意義な成果を得ている。

## 2. 研究の目的

これまでに整備した「統合化構造解析システム」を、さらに整備・発展させるのが本研究の主目的である。具体的な目的を以下に記す。

汎用構造解析プログラムを多くの研究者が詳細解析に利用しており、これらを他のプログラムと統合化することの意義は大きく、実現にともなう波及効果も大きい。しかし、これらのプログラムは一般ユーザがソースコードに手を加えられないため、これらを統合化することを今までは諦めていた。ここでは、動的釣合問題に対象を限定し、ハイブリッド実験やオンライン実験で従来使われてきた数値積分法を応用して、これらの汎用プログラムも統合化可能なシステムに発展させる。さらに、本統合化構造解析システムの信頼性を確認するために、鋼構造建物の大地震による倒壊挙動をシミュレートする。（独）防災科学技術研究所では、「E・ディフェンスを活用した鋼構造建物実験研究（部会長：笠井和彦教授，東京工業大学）」において、大型震動台を用いた4階建て建物の完全倒壊実験を行っている。ここでは、その試験体の

倒壊挙動を解析対象に選び、解析結果と実験結果を比較することで本システムの解析精度を検証する。

一方、数値解析と準静的載荷実験とを組み合わせた従来のハイブリッド実験は、弾性挙動をシミュレートするものがほとんどであった。ここでは、建物の倒壊挙動をも明らかにするために、部材の座屈や破断などの強非線形挙動も追跡可能なハイブリッド実験システムの構築も目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 汎用構造解析プログラムの統合と倒壊解析による精度検証

解析対象建物の梁伏図を図1に、軸組図を図2に示す。柱は冷間成形角形鋼管（BCR295）であり、梁はH形鋼（SN490B）である。柱梁接合部は通しダイアフラム形式で接合し、梁端の接合形式はノンスラップ形式としている。屋根は厚さが150mmの鉄筋コンクリートスラブであり、2～4階床は高さが75mmのデッキプレートと厚さが100mmの等厚部からなる合成床版である。鉄骨梁とコンクリートスラブは完全合成梁として機能することが期待される。外壁は縦ばりのALC版である。柱脚は50mm厚のベースプレートとM36のアンカーボルト8本からなる露出形式であり、柱の曲げ耐力に比べて十分な曲げ耐力を有するように設計されている。

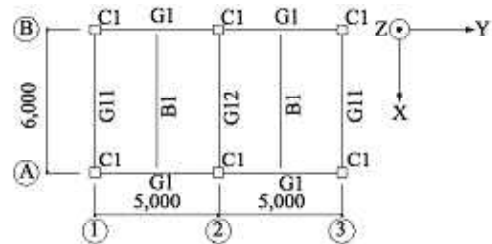


図1 解析対象の梁伏図

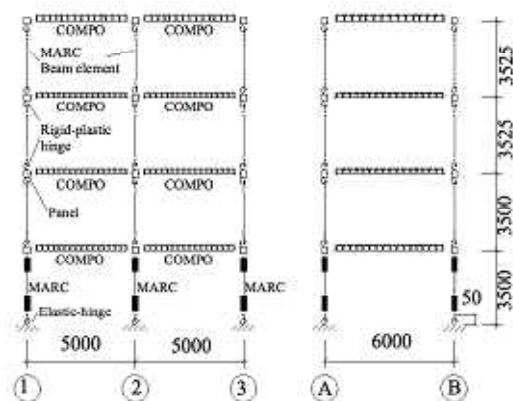


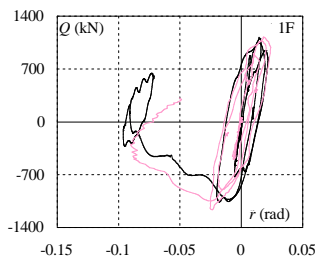
図2 解析対象の軸組図とプログラム編成

本建物に対する統合化構造解析では、全体制御を司るホストプログラムにNETLYSを用いる。NETLYSには、様々なプログラムを統合するために、数値積分法にオペレータ・スプリッティング法(OS法)を使用できる機能を整備した。OS法は復元力のみで求解可能であるので、瞬間接線剛性の情報のやり取りが不要になり、MARCのような汎用解析プログラムをステーションプログラムとして統合できる。本解析では、非線形解析時の安定性に優れている不釣合い力を補正するOS法を用いる。

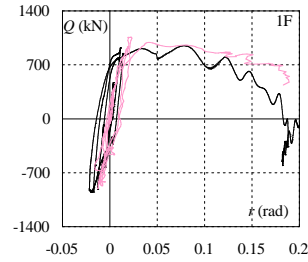
図2に本統合化構造解析で使用するプログラムの編成を示す。合成梁の解析にはCOMPOを用いる。COMPOでは、合成梁の正曲げ時の合成効果や、負曲げ時のコンクリートスラブのひび割れが考慮でき、複雑な合成梁の繰り返し時の履歴を再現できる。角形鋼管柱の解析にはMARCを用いる。1階柱の端部はシェル要素による詳細解析とし、2～4階柱の端部は局部座屈による耐力劣化を表現した単純ヒンジによる簡易解析とする。これは、震動台実験に先立って行った解析において、1階の層崩壊による倒壊をあらかじめ確認したためである。柱梁接合部パネルは、サブルーチンとしてNETLYSに組み込まれている詳細解析プログラムを用いて解析する。露出柱脚の解析には弾性回転バネを用いる。弾性回転バネの回転剛性は、ベースプレートと基礎が離間する前の剛性に設定する。

本建物の固有周期は1次が0.81s(X方向の並進モード)2次が0.78s(Y方向の並進モード)である。

震動台実験時に入力した記録時震動(JR Takatori, 1995)に対する解析結果を以下に示す。図3(a),(b)が1階の層せん断力・層間変形角関係であり、図4が1階の層間変形角のオービットである。実線が統合解析結果を、グレー線が震動台実験結果を示す。



(a) X 方向



(b) Y 方向

図3 1階の層せん断力・層間変形角関係

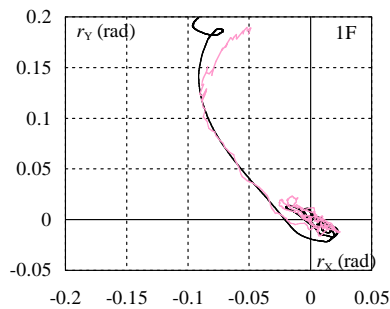


図4 1階の層間変形角のオービット

2サイクル半の主要動で全層にわたる塑性化を経験した後、1階の柱頭と柱脚に局部座屈が発生し、同部の耐力が劣化した。その後、1階に変形が局所化して2～4階が弾性除荷し、最終的に1階の層崩壊によって建物が倒壊した。図3,4において、解析結果の実線と実験結果のグレー線はほぼ重なっており、本統合化構造解析システムの信頼性の高さが確認できる。

#### (2) 座屈と破断をともなうハイブリッド実験

本ハイブリッド実験では、構造物を数値解析部分と載荷実験部分にわけたうち、円形鋼管筋かいを載荷実験部分として扱う。円形鋼管筋かいは、圧縮力を受けた際に局部座屈や屈服を伴う座屈が生じることで局所的に歪が進行し、引張力が生じた際に破断に至る過程が考えられるが、その破断時期は、数値解析により予測することが難しい。このような筋かいの破断をハイブリッド実験により表現した高精度な解析によって、構造物全体の地震応答性状を考察する。

解析対象となる建物は、図5に示す通り、x方向の長さが12m、y方向の長さが6mの3階建てで、x方向は2スパン、y方向は1スパンとする。構造形式はx方向が筋かい付きラーメン構造、y方向がラーメン構造である。本解析対象を、許容応力度等計算法に基づき構造設計した。本骨組のx方向の保有水平耐力に対する筋かいの水平力分担率は比較的大きい(3階が0.73、2階が0.64、1階

が 0.50)。本研究では、x 方向架構の筋かい付きラーメン骨組のみを解析で扱う。後述の地震応答解析結果より、各階の中で 1 階が最も大きく変形し、右方向への変形が大きくなるため、1 階左側の筋かいをハイブリッド実験の荷重実験部分とする。

骨組全体の解析には、前項で詳述の統合化構造解析システムを採用し、解析プログラムには NETLYS を用いる。解析モデルの概要を図 6 に示す。筋かいには、汎用有限要素解析プログラム MSC.Marc を用い、中央部(径の 6 倍の長さ)をシェル要素で構成し、局部座屈や屈服といった挙動が表現できるようモデル化している(図 7 参照)。合成梁の解析には、COMPO を用いる。露出柱脚には、アンカーボルトや基礎部コンクリートをバネに置換した詳細モデルを用いる。柱には、2 次剛性比が 0.75, 3 次剛性比が 0.2 となる tri-linear 型の一般化ヒンジモデルを用いる。また、ハイブリッド実験で荷重対象となる 1 階筋かいの荷重装置は、図 8 の通りである。

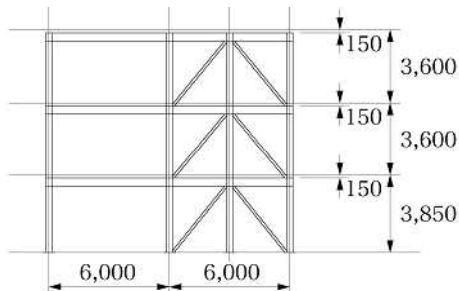


図 5 解析対象骨組(軸組図)

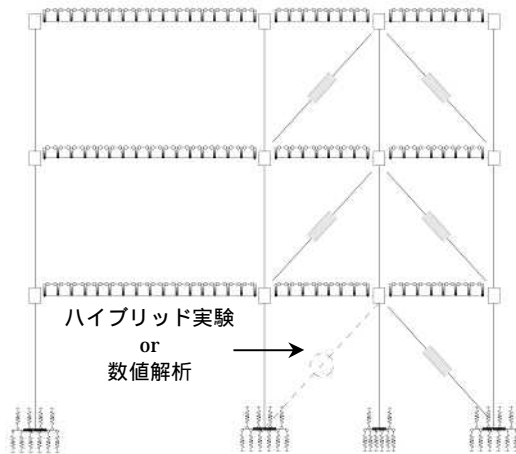


図 6 骨組全体の解析モデル

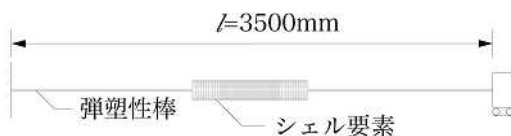


図 7 筋かいの解析モデル

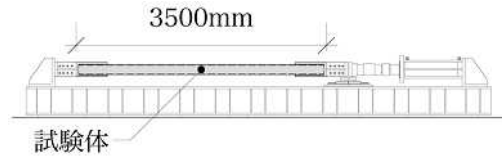
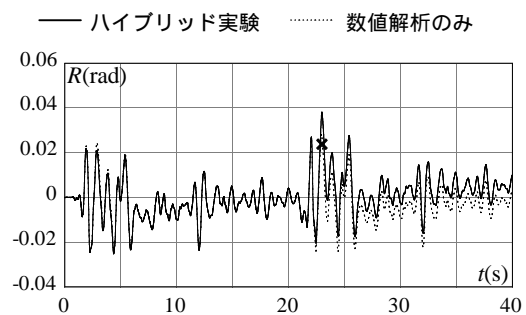


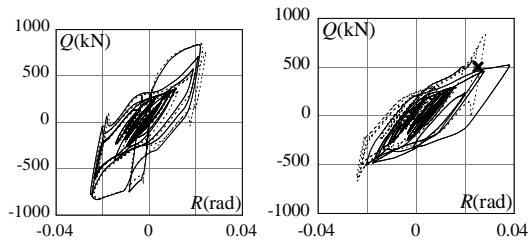
図 8 筋かいハイブリッド実験の荷重装置

入力地震動には El Centro NS (継続時間 20 秒) を用い、その地動最大速度と入力回数の組合せを解析パラメータとし、case1 で 50 cm/s (連続して 3 回で計 60 秒)、case2 で 100 cm/s (連続して 2 回で計 40 秒)、case3 で 150 cm/s (20 秒 1 回) の 3 ケースの地震動を入力する。いずれの解析ケースに対しても、比較対象として、ハイブリッド実験を組み込まず、筋かいを解析モデルのみで構築した数値解析も実施する。

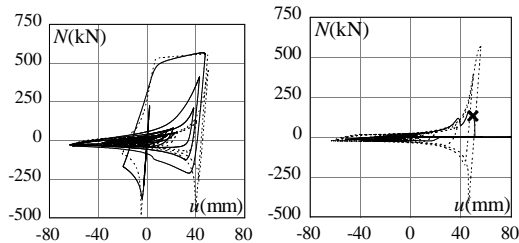
1 階の層間変形角の時刻歴応答、1 階の層せん断力・層間変形角、ハイブリッド実験に供した筋かいの軸力・軸変形関係について、case2 の結果を図 9 にそれぞれ示す。実線はハイブリッド実験結果で、破線は数値解析のみの結果である。case1 では 41.9 秒(3 回目)、case2 では 22.0 秒(2 回目)で筋かいは破断(図中の×)に至ったが、case3 では亀裂が生じているものの破断に至らなかった。ハイブリッド実験を用いた場合と数値解析のみの場合を比較すると、破断以前の応答は殆ど一致している。破断直後には層全体の変形が破断しない場合よりもやや進展するものの、筋かいの耐力劣化後の破断では顕著な応答の違いは見られない。また、この筋かいは、径厚比が大きく比較的破断しやすい形状であるにもかかわらず、1 回分の地震動では地動最大加速度 150cm/s でも破断に至らないことがわかる。



(a) 1 階層間変形角の時刻歴応答



(b) 1階層せん断力・層間変形角関係



(c) 対象筋かいの軸力・軸変形関係  
図9 地震応答解析結果

#### 4. 研究成果

従来の統合化構造解析システムを発展させ、釣合方程式の数値積分法にオペレータ・スプリットング法を使用できる機能を整備したことで、本システムの汎用性を極めて高めることができた。すなわち、種々の汎用構造解析プログラムや準静的載荷実験が統合可能になった。この改良システムを用いて4階建て鋼構造建物の大地震による倒壊挙動を解析し、解析結果が別途に実施した震動台実験結果と精度よく対応することを示した。この研究成果は国内の論文集「構造工学論文集」に掲載されるとともに、中国・北京で開催された第14回世界地震工学会議(The 14th World Congress on Earthquake Engineering)でも発表したことで、国内外にその成果が周知されている。

一方、本統合化構造解析システムで使用可能な実験システムを新たに開発し、それを用いて鋼構造筋かい付き建物の地震時挙動をハイブリッド実験としてシミュレートした。線材骨組解析プログラム、合成梁解析プログラム、汎用構造解析プログラムによる局部座屈解析で数値解析部分を構成し、それに筋かいの曲げ座屈後に破断する載荷実験を組み合わせたハイブリッド実験に成功している。従来のハイブリッド実験のほとんどが平易な弾性挙動を扱っていたのに対し、極めて高度なシミュレーションに成功している。これらの成果は国内の学会で発表している。

#### 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2件)

堀本明伸, 多田元英, 玉井宏章, 大神勝城, 桑原 進, 三谷 淳: 実大4層鉄骨造建物の統合化構造解析システムによる立体倒壊解析, 構造工学論文集 Vol.55B, pp.277-283, 2009年3月, 査読有り

田中俊輔, 多田元英, 向出静司: 正負繰返し曲げを受ける完全合成梁部材の弾塑性解析, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集 第16巻, pp.359-364, 2008年11月, 査読有り

#### [学会発表](計11件)

向出静司, 片岡 大, 多田元英: 円形鋼管筋かいの破断を伴った鋼構造骨組のハイブリッド実験による地震応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 2009年8月, 査読無し

堀本明伸, 三谷 淳, 多田元英, 向出静司, 笠井和彦, 吹田啓一郎, 山田 哲: 完全崩壊試験体の標準3波に対する地震応答性状(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究その41), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 2009年8月, 査読無し

田中俊輔, 堀本明伸, 多田元英, 向出静司: コンクリートスラブの合成効果が鋼構造建物の極大地震応答に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 2009年8月, 査読無し

Motohide Tada, Hiroyuki Tamai, Katsuki Ohgami, Susumu Kuwahara, and Akinobu Horimoto: Analytical Simulation utilizing Collaborative Structural Analysis System, The 14th World Congress on Earthquake Engineering, CD-ROM, October 2008, 査読有り

堀本明伸, 大神勝城, 多田元英, 桑原 進, 玉井宏章, 三谷 淳: 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる擬似立体倒壊解析結果(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その28), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.847-848, 2008年9月, 査読無し

三谷 淳, 大神勝城, 多田元英, 桑原 進, 玉井宏章, 堀本明伸: 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる擬似立体倒壊解析方法(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その27), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.845-846, 2008年9月, 査読無し

堀本明伸, 大神勝城, 多田元英, 桑原 進, 玉井宏章, 三谷 淳: 実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験(その5 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる擬似立体倒壊解析), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.453-456, 2008年6月, 査読無し

片岡 大, 向出静司, 多田元英: 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる平面倒壊解筋かい部材を対象としたハイブリッド実験システムの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1049-1050, 2007年8月, 査読無し

堀本明伸, 多田元英, 玉井宏章, 大神勝城, 桑原 進: 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる平面倒壊解析(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その9), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1071-1072, 2007年8月, 査読無し

多田元英, 山田 哲, 笠井和彦, 松岡祐一: 完全崩壊試験体の統合化構造解析システムによる平面倒壊解析(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1069-1070, 2007年8月, 査読無し

片岡 大, 向出静司, 多田元英: 筋かい部材を対象としたハイブリッド実験システムの構築, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.217-220, 2007年6月, 査読無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田 元英 (TADA MOTOHIDE)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 90216979

### (2) 研究分担者

向出 静司 (MUKAIDE SEIJI)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20423204

### (3) 連携研究者

玉井 宏章 (TAMAI HIROYUKI)  
広島工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 80207224

### (4) 研究協力者

片岡 大 (KATAOKA MASARU)  
大阪大学・大学院工学研究科・大学院生

田中 俊介 (TANAKA SHUNSUKE)  
大阪大学・大学院工学研究科・大学院生

堀本 明伸 (HORIMOTO AKINOBU)  
大阪大学・大学院工学研究科・大学院生

三谷 淳 (MITANI ATUSHI)  
大阪大学・大学院工学研究科・大学院生