

実大鉄筋コンクリート造建物の振動台実験の精密・詳細シミュレーション解析システムの開発 – III

課題責任者

北野 敦則 前橋工科大学 工学部 大学院工学研究科

著者

北野 敦則^{*1}, 関 崇夫^{*1}, 高橋 利恵^{*1}, 坪田 張二^{*2}, 金井 喜一^{*2},
狩野 昇真^{*3}, 四ツ谷 翔平^{*3}, 河西 良幸^{*4}, 武田 慈史^{*5}, 金野 剛典^{*6},
丹羽 一邦^{*7}, 竹越 邦夫^{*7}, 平 悠也^{*7}

*1 前橋工科大学 工学部 大学院工学研究科, *2 前橋工科大学, *3 前橋工科大学 大学院工学研究科, *4 群馬県建築構造技術センター, *5 株式会社アルテス, *6 株式会社 You & You 建築設計, *7 株式会社テラバイト

平成 29 年度の研究は、平成 22、23 年度に地球シミュレータ公募課題に採択された解析的研究を継続して行った。前回と同じく陽解法の衝撃解析コードを建物の地震応答解析に応用し、実大鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete, 以下 RC) 建物に関わる振動台実験での建物倒壊状況の結果を例に、対象建物を詳細にモデル化し、精密・詳細なシミュレーション解析を行い建物の破壊状況を可視化して確認可能とするものである。平成 29 年度は、解析能力が飛躍的に向上した ES を利用することで、前回は地震波の入力条件を簡略化して解析していた状況を実大実験と同じ条件で解析した。実大 6 層 RC 建物の実験では、地震波の振幅倍率を 5, 10, 25, 50, 100% と順次増大させて入力し最後に 60% の入力を行っている。本年は、実験と同じく地震波の振幅倍率を順次増大させて入力して解析を行った。解析により、ほぼ実験に準じた建物の崩壊状況等が確認できる解析結果が得られたが、更に多角的な解析条件を設定して解析を重ね精度の向上を図る必要がある。又、近年、実大三次元振動破壊実験施設 (E-ディフェンス) で新たに行われた実大実験建物を対象に解析を行い、各結果の比較検証を積み重ね更なる充実を図りたい。

キーワード：地震応答, 振動台実験, 鉄筋コンクリート骨組, 地球シミュレータ, FEM シミュレーション

1. はじめに

自動車等の衝突解析に有効性を発揮している陽解法の衝撃解析コード LS-DYNA¹⁾ を建物の地震応答解析に応用し、兵庫耐震工学研究センターの実大 3 次元振動破壊実験施設 (E-ディフェンス) で行われた実大 6 層 RC 建物の振動台実験結果を例にして、架構各部材を詳細にモデル化し、精密・詳細なシミュレーション解析を行い建物の破壊状況を可視化して確認可能とするものである。このシミュレーション解析システムの構築により、実大振動実験に準じた数値振動実験を可能とし、これをもとに建物の重要な因子を変化させた発展性のある数値実験を可能とし、実大実験等にかかる膨大な費用の軽減を図ることを目的とする。

平成 22 年度の解析では、解析プログラムの解析環境を確認する目的で、最初に RC3 層純ラーメン架構縮尺モデルでの振動実験を例に解析²⁾ を行なった。次に、主テーマとして実大 6 層 RC 建物の振動台実験結果を例にしての解析を行った。当時の ES での与資源量を有効に利用する為、実大実験で行っている地震波の振幅倍率を 5, 10, 25, 50, 100% と順次増大させて入力している実験を簡略化して解析した。まず、5, 10, 25, 50% の加振履歴を考慮せず、直接 100% 加振の解析を行った。想定された通り加振履歴が反映されていないので損傷が少ない解析結果となった。

次に、5, 10, 25, 50% の加振履歴を 1 回の 100% 入力で考慮する、100% 加振→自由振動→100% 加振の解析を行い、実験結果と比較的良好な対応が得られた。次に、加振履歴を考慮せず直接 120% 加振、150% 加振、200% 加振の解析を行い、120% 加振と 150% 加振の中間位が実験結果に近い結果を得た。

平成 23 年度は、実大 6 層 RC 建物の解析についての詳細検討と、水平力を段階的に増加させたプッシュオーバー解析を行い建物の基本的な特性であるせん断力と層間変位の関係を求めた。次に、実大 6 層 RC 建物に基礎と層厚 10m の地盤データーを設定して解析し、基礎と地盤との間の滑り、浮き上がり等の再現を試み、実際の現象に近づけた解析を行った。次に、同じく実大実験が行われた実大 3 層 RC 学校建物の耐震補強無し、補強有りの比較解析を行った。実験では建物下周辺に地盤を設けていたが、これについては省略して解析した。最後に、免震建物の実大実験結果を例に、建物周囲の裏込め土、RC 擁壁を設け、長周期パルスが観測された地震波による解析を行い、周辺擁壁への衝突現象が生じると免震性能の低下が生じる結果を得た。(平成 22, 23 年度については、アニュアルレポート参照。)

平成 29 年度は、解析能力が飛躍的に向上した ES を利用することで、前回は簡略化して解析した実大 6 層 RC

建物の地震波の入力を、実大実験と同じく振幅倍率を5, 10, 25, 50, 100%と順次増大させて入力し最後に60%の入力を行った解析を行い、ほぼ実験に準じた建物の崩壊状況等が確認できる結果が得られた。更に、最後の60%の入力を100%入力とした解析を行い、熊本地震のように2度続けて大地震が発生した場合を想定した解析を行った。今後、多角的な解析条件を設定して解析を重ね、精度の向上を図る必要があると考える。

2. 実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験の概要

平成29年度は、解析能力が飛躍的に向上したESで実大6層RC建物の解析を主に行ったので実験の概要を以下に示す。

解析の対象とする建物の実験は、E-ディフェンスでの実大6層RC建物の振動台実験である。実験及び建物に関してのデータは公開文献^{3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}に基づいている。試験体は実大架構で図1に示すように、6層、(X方向)2×(Y方向)3スパンの立体架構で、X、Y方向共、各スパンは5,000mm、階高は各階共2,500mmで総高さ15,000mmである。部材断面サイズは各階同一で、主柱500×500mm、間柱300×300mm、大梁300×500mm、小梁200×400mmである。各部材の配筋状況は、各階の

柱の主筋を8-D19, HooP 2-D10@100, 耐震壁は150mm厚、タテ、ヨコ共D10@300ダブル、一部を除いて大梁は、上筋3-D19、下筋2-D19、あばら筋2-D10@200mmとしている。文献6)、p.329の材料試験結果より、コンクリートの強度は、1階から6階までそれぞれ31.7, 30.7, 28.2, 27.3, 25.2と22.8MPaで、鉄筋の降伏強度は、D19は398MPa、D10は369MPaである。各階の重量は約1.25MNで、1階柱の中央高さより上部の合計重量は7.50MNである。実験は、阪神・淡路大震災時の気象庁神戸海洋気象台観測波(震度6強相当の揺れ)を用いて、振幅倍率を5, 10, 25, 50, 100%と順次増大させて入力し、最後に60%の入力を行っている。加振方向は、X、Yの水平2方向と鉛直方向の3方向で、原波を45°回転させ、N45W方向を試験体のY方向に、N45E方向をX方向に入力している。これにより最終的な破壊がY方向で生じるようにしている。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

解析モデルを、図2、図3に示す。図2は、解析モデル全体架構を入力レイヤー色分けで示す。図3は、主架構の1層分を取り出した鉄筋部材構成モデルを示し、耐震壁部分、短柱部分、袖壁部分を拡大鉄筋モデルで示す。

解析条件については、コンクリートはソリッド要素、

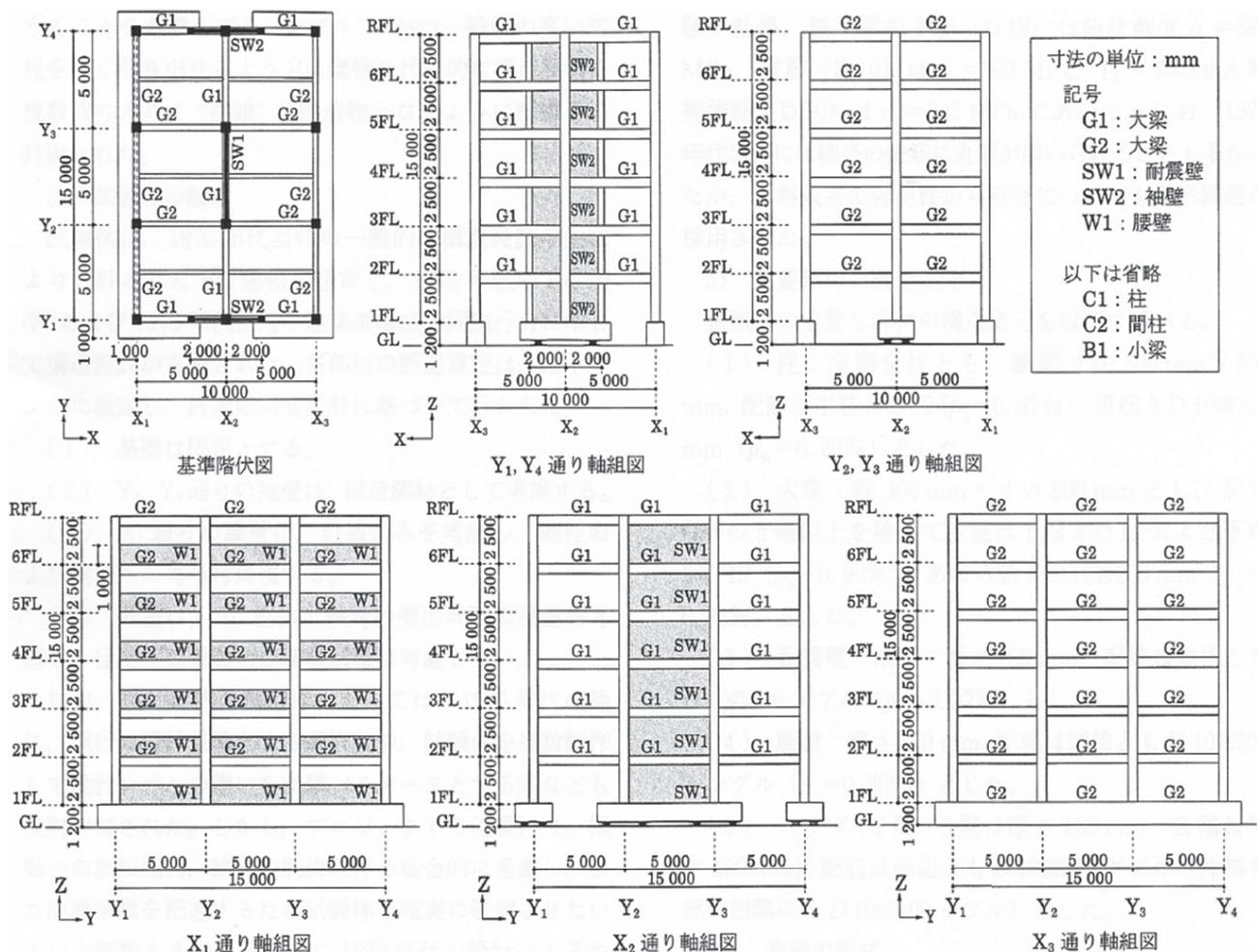


図1 実大6層RC建物試験体概要

鉄筋はビーム要素でモデル化し、両者は節点を共有し完全付着とした。基礎部分はモデル化せず柱脚位置に剛体シェル要素を配置し、実験に準じて柱脚固定とし、この剛体シェル要素に地震波を入力することとした。モデル規模は概略コンクリートが1,480,000要素、鉄筋が570,000要素、剛体シェルが30,000要素で合計約2,080,000要素で、総節点数は約1,790,000節点である。材料モデルは、KCCモデルを採用しデフォルト設定を基本とした。

解析に用いる材料の各諸元は実験値を採用している。使用鉄筋はD19, D10で、鉄筋直径は公称直径19.1mm (D19)、9.53mm (D10)を採用した。実験時の建物重量は、文献9によると、RC躯体の体積の計算値にRC部材(普通コンクリート)の比重2.4を乗じて算出し、各階の重量は1.25MN、1階柱の中央高さより上部の合計重量は7.50MNで、基礎梁、鉄骨計測架構等を含む振動台上の総重量は9.70MNとなっている。本解析では基礎部分のモデル化は行っていないが、コンクリート、鉄筋を上部構造の詳細なモデル化により重量を精査した結果、各階の

重量は1.22MN、1階柱の中央高さより上部の合計重量は7.30MNとほぼ実験時に近い重量となっている。

3.2 解析条件

本年度は、解析能力が飛躍的に向上したESでのベクトル化率の検討等解析環境の確認を行い、申請をして200node (800CPU 並列可能)の許可を頂き、実験と同じ事前加振を順次行う解析を行った。

最初に、平成22,23年度と同じく地震波入力の前に重力加速度の負荷を0~0.6sの間で0m/s²から9.8m/s²まで増加させることで建物の自重計算を行った。その後、0.6sから順次地震波を作用させた解析を試みた。解析での地震波は、気象庁の「87型電磁式強震計波形データ」1995年1月17日5時46分神戸観測波¹⁰⁾データより、3方向地震波として8.0秒間準備した。事前の検討解析で800CPU, 24Hoursの計算では、1度の解析で40秒程度まで行えることが確認できたので、一連の計算をリスタートをはさみ2回で計算した。LS-DYNAによる陽解法での解析設定の状況を下記に示す。

- ①. 実験に沿った解析;事前加振→100%加振→60%加振
 - ・0 ~ 0.6s 重力加速度を負荷させた建物自重計算。
 - ・0.6s ~ 4.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 5%
 - ・4.6s ~ 9.6s 5秒間自由振動
 - ・9.6s ~ 13.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 10%
 - ・13.6s ~ 18.6s 5秒間自由振動
 - ・18.6s ~ 22.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 25%
 - ・22.6s ~ 27.6s 5秒間自由振動
 - ・27.6s ~ 31.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 50%
 - ・31.6s ~ 37.6s 6秒間自由振動
 - ☆リスタート (40秒の解析時間制限)
 - ・37.6s ~ 41.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 100%
 - ・41.6s ~ 49.6s 8秒間自由振動 (余振動の収束想定)
 - ・49.6s ~ 53.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 60%
- ②. 熊本地震のように2度の連続した大地震を想定した解析;事前加振→100%加振→100%加振の解析

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

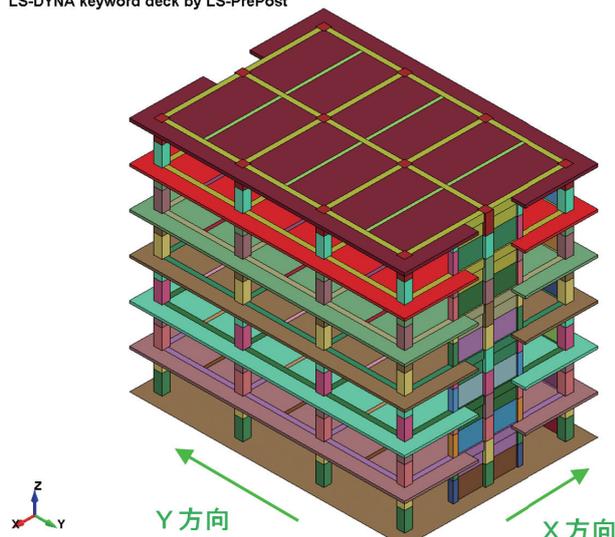


図2 解析建物全体モデル (入力データのレイヤー色分け表示)

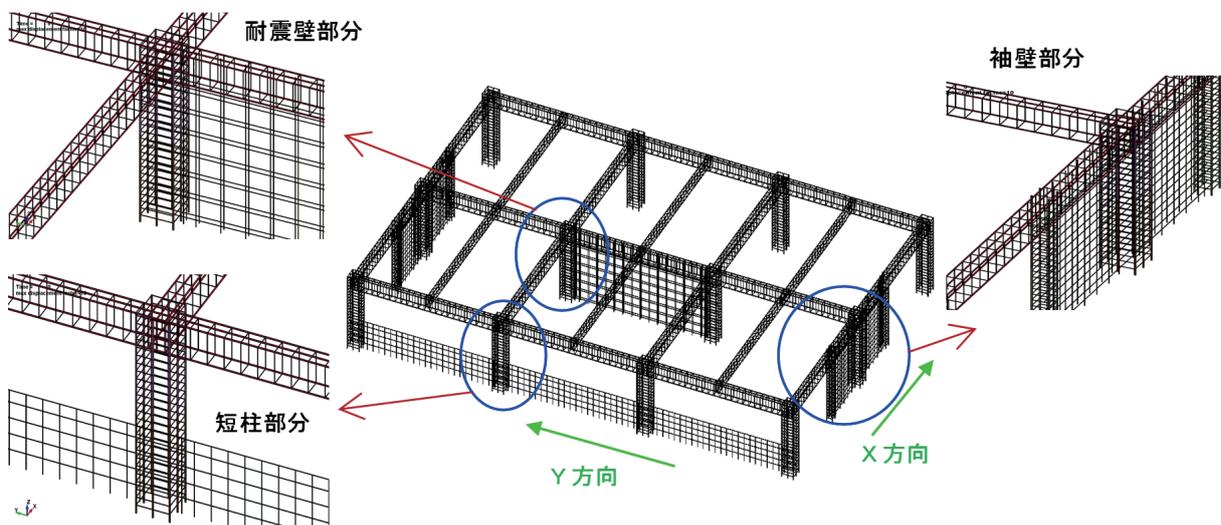


図3 鉄筋の解析モデル (1層分取り出し)

☆リスタート前は上記①と同じ。

- ・37.6s ~ 41.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 100%
- ・41.6s ~ 49.6s 8秒間自由振動 (余振動の収束想定)
- ・49.6s ~ 53.6s 4秒間地震動 ★振幅倍率 100%

③. その他、KCCモデルによる平成22, 23年度の解析との比較解析等を行った。

4. 解析結果

図4、図5に、実大実験と同じく地震波の振幅倍率を5, 10, 25, 50, 100%と順次増大させて入力し、最後に60%の入力を行った解析による建物の損傷状況を示す。ほぼ実験に準じた建物の崩壊状況等が確認できる結果が得られたと判断している。図6、図7に、最後の60%の入力を100%入力とした、熊本地震のように2度続けて大地震が発生した場合を想定した解析を行った。想定したように、こちらの方が1, 2階の損傷がかなり大きい結果となった。本年度は、これらの解析結果の概要を報告する。加速度応答、層間変位の状況等の応答グラフによる実験値との比較については、追加解析も含めて今後詳細な検討を継続して行う予定である。本年度解析対象とした実大6層RC建物は旧耐震基準で設計されたもので、大地震時には大きな損傷が生じることを想定した建物である。事前に耐震診断基準に従った耐震診断が行われており、実験による損傷状況と耐震診断基準での評価との比較も視野に入れての実験と判断される。その後、E-ディフェンスにおいては、現行の耐震基準で設計されたRC造建物の崩壊余裕度定量化研究として6層RC造耐震壁フレーム建物の振動実験と、高さ27.45m 10層RC造建物の振動実験等が行われており、これらを解析対象として解析的研究を進

め、更なる解析データの蓄積と、多角的な解析条件を設定した解析を重ね精度の向上を図る必要があると考える。

5. まとめ

解析能力が飛躍的に向上したESを利用し、汎用衝撃解析プログラムLS-DYNA¹⁾による地震時のRC建物の崩壊現象までの解析を行い、今後、ESの利用により実大実験に準じた解析の精度が更に向上する可能性が得られた。実大実験建物をほぼあるがままにモデル化し、比較的単純な材料特性を与えて地震応答解析を行い、耐震性能の確認、構造形式なりの建物の崩壊状況の確認等を行うことで、実験に準じた建物の性能確認を解析上で行えるようにしたい。本解析手法は、コンクリートと鉄筋の材料的特性を与え、各部材要素の配置、寸法等によって自ずと力学的な特性が取り組まれ、大入力に対する大変形までの弾塑性特性が評価でき、更に、損傷や破壊がコンピュータアニメーションとして表現できるという優れた面を持つ手法である。陽解法というアルゴリズムに基づく方法による為に、計算精度や解析結果の検証という過程が必要であるが、大規模モデル、大入力を扱えるということで、今後更に解析事例の蓄積、実験結果との比較検証を進め、数値振動実験をシミュレーション解析システム上で行えるようにしたい。これにより、振動台実験では入力が不可能な大入力加振の場合を評価し得ることができ、東日本大震災や熊本地震のような従来想定できなかったような過大な地震条件での耐震安全性の評価が可能になり、社会基盤の安全性確保の一助になればと思う。

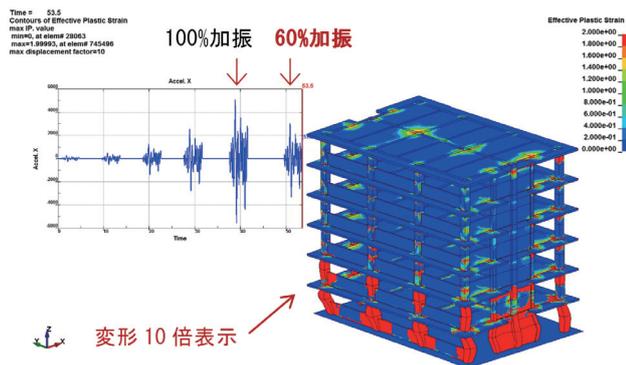


図4 実験に沿った事前加振→100%加振→60%加振の解析結果

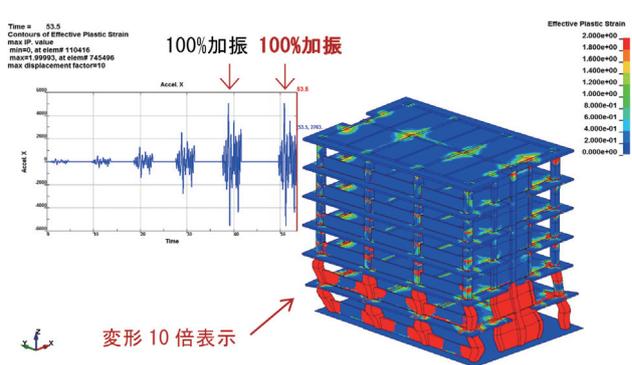


図6 連続した大地震を想定:事前加振→100%加振→100%加振の解析結果

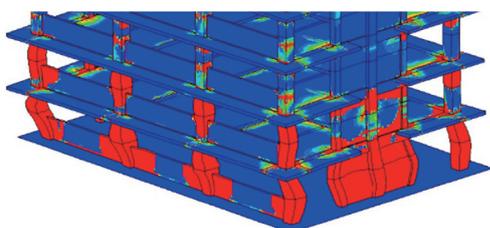


図5 図4 (事前加振→100%加振→60%加振) の拡大図

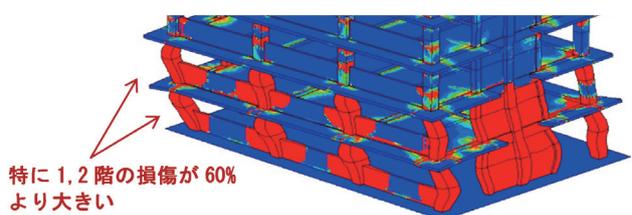


図7 図6 (事前加振→100%加振→100%加振) の拡大図

文献

- [1] LS-DYNA(general purpose transient dynamic finite element program), Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- [2] 武田慈史, 金井喜一, 眞鍋慶生, 丹羽一邦, 河西良幸, 「陽解法衝撃解析コードのRC3層純ラーメン架構振動台実験結果への適用」, 第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2010年12月
- [3] 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所, 「科学技術振興費 主要5部門の研究開発委託事業 新世紀重点研究創生プラン～リサーチ・レボリューション・2002～大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 震動台活用による構造物の耐震性向上研究(平成17年度)成果報告書」, 3.2 鉄筋コンクリート建物実験 3.2.1 鉄筋コンクリート建物の三次元震動破壊実験, pp.313-360, 2006年5月.
- [4] 松森泰造, 白井和貴, 壁谷澤寿海, 「大型振動台による鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の耐震性に関する研究 - 実大6層試験体と3次元振動台実験結果の概要 - 」, 日本建築学会構造系論文集, 第614号, pp.85-90, 2007年4月.
- [5] 松森泰造, 白井和貴, 壁谷澤寿海, 「大型振動台による鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の耐震性に関する研究 - 曲げ降伏後せん断破壊する耐震壁の負担せん断力 - 」, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第623号, pp.95-101, 2008年1月.
- [6] 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所, 「科学技術振興費 主要5部門の研究開発委託事業 新世紀重点研究創生プラン～リサーチ・レボリューション・2002～大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 震動台活用による構造物の耐震性向上研究(平成18年度)成果報告書」, 3.2 鉄筋コンクリート建物実験 3.2.2 実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的解析システムの開発, pp.325-358, 2007年5月.
- [7] 白井和貴, 松森泰造, 壁谷澤寿海, 「鉄筋コンクリート実大6層壁フレーム構造の震動実験に基づく加速度応答性状」, コンクリート工学年次論文集, 29(3), pp.283-288, 2007年.
- [8] 松森泰造, 白井和貴, 壁谷澤寿海, 「鉄筋コンクリート実大6層壁フレーム構造の震動実験に基づく層間変位応答性状」, コンクリート年次論文集, 29(3), pp.277-282, 2007年.
- [9] 白井和貴, 松森泰造, 壁谷澤寿海, 「震動台E-ディフェンスを活用した実大6層鉄筋コンクリート建築構造物の破壊実験」, コンクリート工学, 45(6), pp.28-34, 2007年6月.
- [10] 気象庁, 「87型電磁式強震計波形データ 1993年～1997年3月(CD-ROM)」, 1995年1月17日5時46分神戸観測波.

Development of Sophisticated Simulation Analysis Method of Actual Reinforced Concrete Building by Shaking Table Test-III

Project Representative

Atsunori Kitano Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering, Maebashi Institute of Technology

Authors

Atsunori Kitano^{*1}, Takao Seki^{*1}, Toshie Takahashi^{*1}, Haruji Tsubota^{*2}, Yoshikazu Kanai^{*2}, Shoma Kanou^{*3}, Shohei Yotsuya^{*3}, Yoshiyuki Kasai^{*4}, Shigefumi Takeda^{*5}, Yoshinori Konno^{*6}, Kazukuni Niwa^{*7}, Kunio Takekoshi^{*7} and Youya Taira^{*7}

*1 Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering, Maebashi Institute of Technology, *2 Maebashi Institute of Technology,

*3 Graduate school of Engineering, Maebashi Institute of Technology, *4 Gunma-ken building construction technical center,

*5 Artes Corporation, *6 You & You Architecture design Co, Ltd, *7 Terrabyte Co, Ltd.,

A study in fiscal year 2017 continued the analytical research adopted by Earth Simulator Proposed Research Project in fiscal year 2010 and 2011. This study conducted a sophisticated simulation analysis and visualized fracture mode of building, based on the detailed model of the target building, taking the result of a shaking table test of full-scale six-story RC (reinforced concrete) building, by utilizing an explicit finite element impact analysis code for seismic response analysis, as it was in the last study. Due to the progressive improvement in analytical capability of ES (Earth Simulator), this study was able to analyze the situation by the same condition as the full scale actual experiment, although the input condition of seismic waves had to be simplified in the previous study. In the experiment of the actual scale six-story RC building, the intensity of the input waves increased in steps (5%, 10%, 25%, 50%) to 100%. In this research, a simulation analysis was performed under the same condition as the experiment. The analysis generated the result which shows a situation of building destruction almost similar to that from the experiment. However, the precision of the analysis should be improved by more simulations under further multiple conditions. This simulation analysis method should be further sophisticated by the comparative verification based on other results of analyses with the full-scale buildings which were tested at a full-scale vibrational destruction laboratory of three dimensions (E-defense) in recent years.

Keywords: Seismic response, Shaking table test, RC frame, Earth simulator, FEM simulation

1. Introduction

This study applies an explicit finite element impact analysis code LS-DYNA[1] to seismic response analysis. Based on the result of a shaking table experiment of the full-scale six-story RC building performed at an full-scale vibrational destruction laboratory of three dimensions in Hyogo earthquake engineering research center (E-defense), the authors aim to model each wall-frame in detail, to conduct a sophisticated simulation analysis and to visualize fracture mode of building so that it should be identifiable. The purpose of this study is to reduce the enormous cost for a full scale experiment by establishing the simulation analysis system that enables a numerical experiment which approximates a full scale shaking experiment and conducts other applied numerical experiments where important factors of buildings could be controlled.

Utilizing ES, the study in fiscal year 2010 conducted simulation analysis of a scale model of the three-story rigid frame and a full-scale six-story RC building. Furthermore, the

study in fiscal year 2011 conducted an additional analysis of a full-scale six-story RC building and the other analysis of a full-scale three-story RC school building with seismic strengthening and a full-scale five-story RC building with quake-absorbing structure. (Refer to an annual report regarding the studies in fiscal year 2010, 2011.)

This study in fiscal year 2017 utilized ES whose analytical capability was dramatically improved. In the simulation analysis of a full-scale six-story RC building, the acceleration factor of the input waves increased in steps (5%, 10%, 25%, 50% and 100%) and decreased to 60% as the full scale actual experiment, although these conditions had to be simplified in the previous study. The result shows the situation of the building collapse that approximates the result of actual experiment. Furthermore, additional simulation analysis set the last intensity of the input waves to 100% instead of 60% in order to simulate the case of the 2016 Kumamoto earthquakes where severe earthquakes occurred twice. In future, the precision of the analysis should be

improved by more simulations with further multiple conditions.

2. Outline of shaking table test of a full-scale six-story RC building

This study in fiscal year 2017 mainly focused on the analysis related to a full-scale six-story RC building by use of ES, which has dramatically improved its analytical capability. The outline of the experiment is as follows.

The experiment that was analyzed was a shaking table test of the full-scale six-story RC building conducted in E-Defense. The data for the test conditions and the building used for the analysis were taken from a published report. [2] The structure of the building used for the analysis was a six-story, three-dimensional framework consisting of two spans in the x-direction and three spans in the y-direction, and each span had a dimension of 5,000 mm, a floor-to-floor height of 2,500 mm, and an overall building height of 15,000 mm. The test was conducted with seismic waves equivalent to those recorded at the Kobe Marine Observatory of the Japan Meteorological Agency during the 1995 Kobe-Awaji earthquake increasing the input acceleration factor in steps of 5%, 10%, 25%, 50%, and 100%, respectively, and finally at 60%. Shaking was applied in three directions horizontally, the x- and y-directions and in the vertical direction, with the original seismic waves rotated 45°, the N45W direction in the y-direction of the building under test, and the N45E direction in the x-direction. Based on such an application, the intention was that the ultimate fracture of the building would take place in the y-direction.

3. Summary of the analysis

3.1 Analysis model

Figure 1 shows the outline of the model used in the analysis. In this model, concrete was represented as solid elements, and reinforcing bars were represented as beam elements as

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

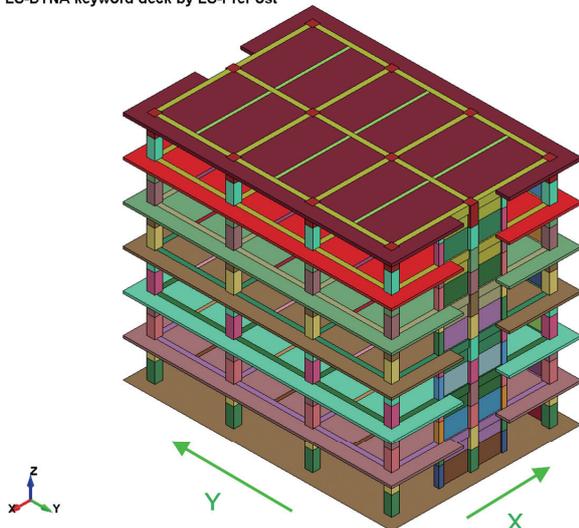


Fig. 1 View of the entire analytical model (Color-coded for input data layer recognition category)

they were in the actual state; the concrete and reinforcement elements have common nodes assuming full adhesion between them. The foundation of the building was not represented in the model but represented as rigid shell elements where the bases of the columns were anchored. Input of the seismic waves was applied at the rigid shell elements in the analysis of the seismic response. The size of the analysis model was about 1,480,000 elements for concrete, about 570,000 elements for reinforcing bar, and about 30,000 elements for the rigid shell for total of about 2,080,000 elements, and the total number of nodes was about 1,790,000. The KCC model under the default settings was adopted as a material model. Each specification of the material used for an analysis was extracted from the data from experiments.

3.2 Conditions of seismic response analysis

In this fiscal year, after considering the conditions for the analysis by ES, which has greatly enhanced its analytical capability, the authors applied for use by 200node (800CPU). After being approved, the simulation analysis was conducted, inputting waves in steps at the same conditions as an actual experiments. In an analysis calculation was implemented twice in the restricted access. (See below)

- (1). Analysis in accordance with the actual experiment (A preliminary spare excitation, 100% excitation and 60% excitation)
 - 0 ~ 0.6s Prudent calculation by the gravity.
 - 0.6 ~ 4.6s 4 second seismic motion ★Seismic waves 5%
 - 4.6 ~ 9.6s 5 second free seismic motion.
 - 9.6 ~ 13.6s 4 second seismic motion ★Seismic waves 10%
 - 13.6 ~ 18.6s 5 second free seismic motion.
 - 18.6 ~ 22.6s 4 second seismic motion ★Seismic waves 25%
 - 22.6 ~ 27.6s 5 second free seismic motion.
 - 27.6 ~ 31.6s 4 second seismic motion ★Seismic waves 50%
 - 31.6 ~ 37.6s 6 second free seismic motion.
 - ☆ Additional calculation (An analysis time limit: 40 seconds)
 - 37.6 ~ 41.6s 4 second seismic motion ★Seismic wave 100%
 - 41.6 ~ 49.6s 8 second free seismic motion.
 - 49.6 ~ 53.6s 4 second seismic motion ★Seismic waves 60%
- (2). Analysis for the case where the big earthquake happens twice as Kumamoto earthquake (A preliminary spare excitation, 100% excitation and 100% excitation)
 - ☆ Additional calculation {Conditions before the restart are the same as the above (1)}
 - 37.6 ~ 41.6s 4 second seismic motion ★Seismic wave 100%

- 41.6 ~ 49.6s 8 second free seismic motion.
 - 49.6 ~ 53.6s 4 second seismic motion ★Seismic wave 100%
- (3). The other analyses such as comparative analysis with the previous analysis by KCC model.

4. Results of the seismic response analysis

First, Fig. 2 and 3 shows the damage situation of the building by an analysis of the above (1). The authors considered that the result approximated the collapse situations of the building from the actual experiment. Second, figure 4 and 5 shows the result of the analysis with the last 100% excitation instead of 60%, simulating the case where the big earthquake happens twice as Kumamoto earthquake. As expected, the calculated damages of the 1st and 2nd floor were greater than those in (1). The authors will report the outline of these analysis results and intend to continuously address more detailed research in future.

5. Conclusion

By use of ES whose analytical capability has been improved, this study showed the possibility that analysis precision could be further improved. This study succeeded in modeling a full scale

experiment building as it was in the actual state, performing seismic response analysis with relatively simple materials property, and identifying aseismic performance and the fracture mode of specific building.

In future, a simulation analysis system that enables a numerical experiment should be established, after accumulating results of simulation analysis and proceeding comparative verification based on the results of actual experiments. Such system will help evaluate the earthquake-proof safety under excessive seismic conditions, which have not expected in the past, and secure the safety of social infrastructure.

References

- [1] LS-DYNA (general purpose transient dynamic finite element program), Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- [2] Y.Kim, T.Kabeyasawa, T.Matsumori, and T. Kabeyasawa, “Analytical Studies on A 6-Story Full-Scale Reinforced Concrete Wall-Frame Structure to Collapse”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

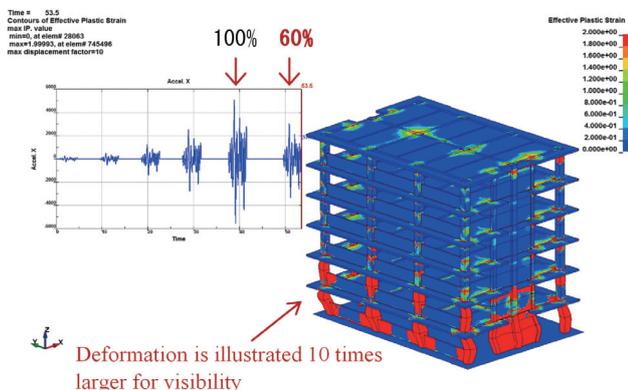


Fig. 2 Analysis in accordance with the actual experiment (A preliminary spare excitation, 100% excitation, 60% excitation).

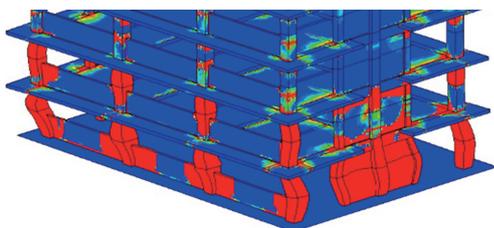


Fig.3 Expansion indication of Fig. 2.

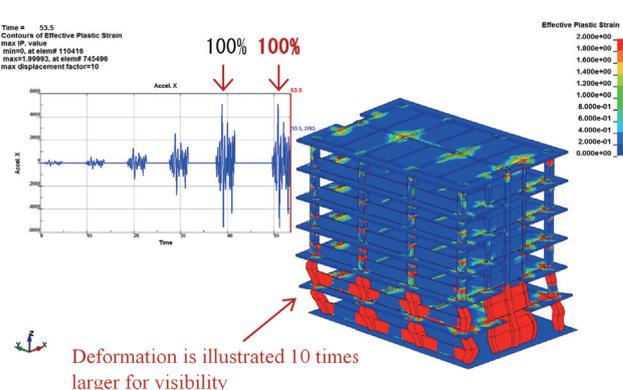


Fig. 4 Analysis for the case where the big earthquake happens twice (A preliminary spare excitation, 100% excitation, 100% excitation).

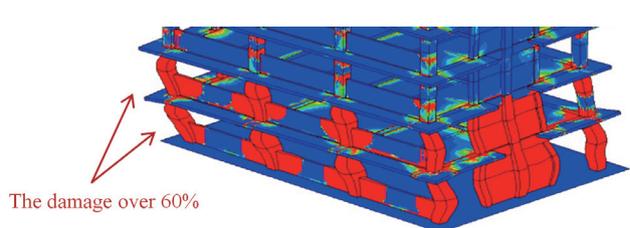


Fig.5 Expansion indication of Fig. 4.