

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ーVII

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

金井 喜一^{*2}, 北野 敦則^{*1}, 関 崇夫^{*1}, 高橋 利恵^{*1}, 坪田 張二^{*2}, 武田 慈史^{*3}, 徐 旭^{*3}

石田 圭^{*3}, 河西 良幸^{*2}, 金野 剛典^{*4}, 工藤 謙輔^{*4}, 丹羽 一邦^{*5}, 竹越 邦夫^{*5}, 平 悠也^{*5}

*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 株式会社 You&You建築設計, *5 株式会社 テラバイト,

令和3年度の研究は、昨年、令和2年度、及び、令和元年度、平成30, 29, 23, 22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。昨年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、実大6層RC建物の実大実験とほぼ同じ条件での地震波の振幅倍率を5, 10, 25, 50%と順次増大させた事前加震、本震100%入力、最後に60%入力の解析と、最後に100%の入力で2回続けての大地震を想定した解析を行い、平成30年度は、更に大きな地震として、本震120%、150%、175%、200%の地震波を入力した解析と、事前加震を簡略化する場合の解析を行った。令和元年度は、今迄の解析について一部条件を変えた追加解析を行い、次の解析対象とする建物の解析データの構築を行った。本年度も昨年度と同じく、継続して解析データの構築等を行なったが、諸般の事情と解析プログラム環境の変化等により、地球シミュレータでの解析利用が思うように出来ず残念な年度となってしまった。今後も、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

本年度も昨年度と同じ建物の解析を継続しているため、本レポートの前半は、昨年、一昨年とほぼ同じ内容を残し全体把握ができるようにする。

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の確認をし、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結果を行った。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29年度は、解析能力が飛躍的に向上したES3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。平成30年度は、更に大きな地震として、本震120%、150%、175%、200%の地震波を入力した解析と、事前加震を簡略化する場合の解析を行った。平成31年・令和元年度は、今迄の解析について一部条件を変えた追加解析を行い、次の解析対象とする建物の解析データの構築を行った。本年度も昨年度と同じく、継続して解析データの構築等を行なったが、諸般の事情と解析プログラム環境の変化等により、地球シミュレータでの解析利用が思うように出来ず残念な年度となってしまった。今後、更に、実験結果との比較検証を続ける必要がある。

2. 実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験の概要

本年、令和3年度も、実大6層RC建物の解析結果の検討を継続しているため、実験の概要を以下に示す。

解析対象とする建物は、E-ディフェンスでの実大6層RC建物である。実験及び建物に関するデータは公開文献^{3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}に基づいている。建物は、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1、図2に示す。図1は、解析モデル全体架構を入力レイヤー色分けで示す。図2は、主架構の鉄筋部材構成モデルを示す。

解析条件については、コンクリートはソリッド要素、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。

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

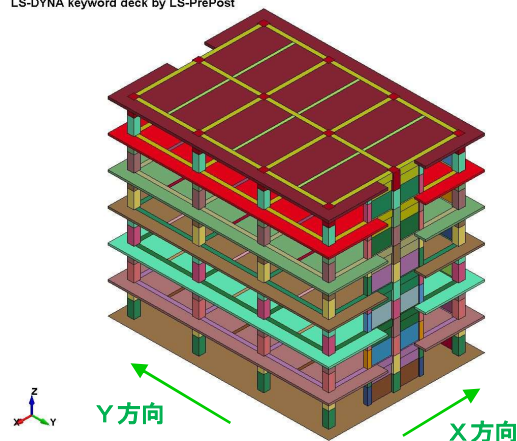


図 - 1 解析建物全体モデル(入力データのレイヤー色分け表示)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

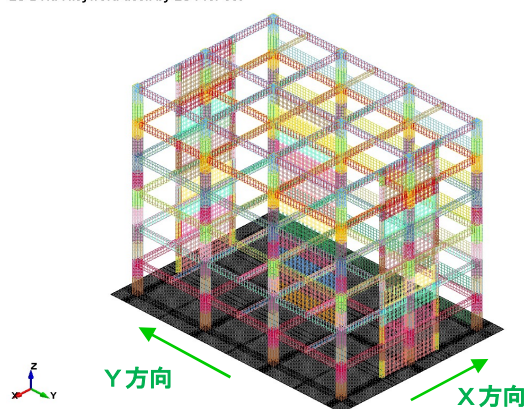


図 - 2 主架構の鉄筋解析モデル(床非表示)

3.2 解析条件

平成29年度に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)の許可を得て、実験と同じ事前加振を順次行う解析を行った。平成30年度は、継続して更に大きな地震を想定しての解析と、事前加震を簡略化する場合の解析を行った。平成31年・令和元年度は、今迄の解析について一部条件を変えた追加解析を行った。令和3年度も2年度と同じく、残念ながらESでの具体的な解析は行っていない。

平成29年度の解析状況は、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、実験と同じ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。平成29年度のLS-DYNAの陽解法での解析状況の概要は下記、①、②である。

①. 実験に沿った解析

- ・振幅倍率 5, 10, 25, 50% の事前加振
- ・リスタート(40秒の解析時間制限)後、100%加振 →60%加振

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

- ・振幅倍率 5, 10, 25, 50% の事前加振
 - ・リスタート(40秒の解析時間制限)後、100%加振 →100%加振
- その他、KCCモデルによる平成22年度の解析との比較解析等の試みを行った。

平成30年度は、上記、①、②に準じて、下記の③~⑨の解析を行った。

- ③. 120%の大地震を想定した解析;事前加振 →120%加振の解析
- ④. 150%の大地震を想定した解析;事前加振 →150%加振の解析
- ⑤. 175%の大地震を想定した解析;事前加振 →175%加振の解析
- ⑥. 200%の大地震を想定した解析;事前加振 →200%加振の解析
- ⑦. 事前加振を簡略化して 100%加振1回とした解析
 - ・振幅倍率 100% の事前加振 →100%加振
- ⑧. 中規模地震連続2回として85%の地震波を想定した解析
 - ・振幅倍率 5, 10, 25, 50% の事前加振
 - ・リスタート(40秒の解析時間制限)後、85%加振 →85%加振
- ⑨. 中規模地震連続2回を想定した事前加振を簡略化する解析
 - ・事前加振として100%加振 →85%加振 →85%加振の解析

昨年、令和元年度は、上記、②、⑧、⑨に準じて、下記の⑩、⑪の解析を行った。

- ⑩. 事前加振後、連続した大地震の2度目を120%とした解析
 - ・振幅倍率 5, 10, 25, 50% の事前加振 →100%加振 →120%加振
- ⑪. 事前加振を簡略化、連続した大地震の2度目を120%の解析
 - ・事前加振として100%加振 →100%加振 →120%加振の解析

本年度(令和3年度)も昨年度と同じく、残念ながらESでの具体的な解析は行えていない。

4. 解析結果と今後方針

平成29年度は、①で、実大実験と同じく事前加振で地震波の振幅倍率を5, 10, 25, 50%と順次増大させて入力し、本震として100%入力、最後に60%の入力を行った解析で、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。次に、②で、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て、最後の60%の入力を100%入力とした解析を行い、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。

平成30年度は、上記①の実大実験に準じた解析の本震が更に

大きな地震の場合を想定した③. 120%、④. 150%、⑤. 175%、⑥. 200%地震の解析を行い、建物が倒壊状態に至る状況の確認を行った。又、⑦. 事前加振を簡略化する為100%加振1回とした解析や、⑧. 中規模地震連続2回として85%の地震波を想定した解析、⑨. 中規模地震連続2回を想定した事前加振を簡略化する解析を行い、①~等と⑦、⑧と⑨との比較で事前加振を1回の加振で置き換える事の妥当性についての検討を行うことができた。

令和元は、⑩. 事前加振後、連続した大地震の2度目を120%とした解析、⑪. 事前加振を簡略化、連続した大地震の2度目を120%の解析を行い、更なる知見が得られた。

本年度(令和3年度)も昨年度と同じく、残念ながらESでの具体的な解析は行えておらず、今迄の解析結果の概要を報告し、加速度応答、層間変位等の報告は、継続して詳細な検討中であり、全体的な検討内容の報告は省略する。検討中ではあるが、下記図-3に、平成30年度に解析した③、④、⑤、⑥の1層(2階床)のY方向の変位を示す。

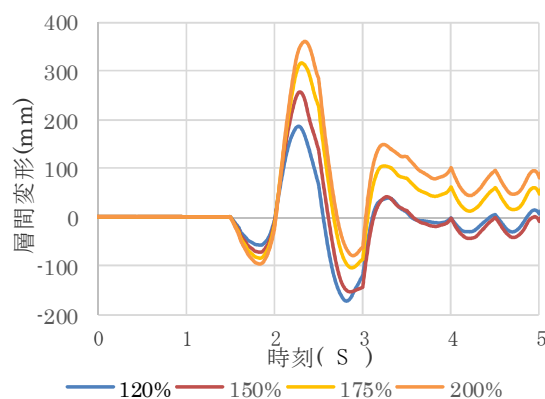


図-3 解析結果の1層Y方向の変位

実験結果の事前加振後、100%加振時の最大変位が100mm程度に対して、上記には示していないが解析では100%加振時の最大変位が125mm程度と大き目になっている。上記に示す、120%加振時の最大変位が190mm程度と過大となっている事等から解析結果の方が大き目になっているので、今後、追加解析を行い更なる検討、分析が必要と考えている。

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。現行の耐震基準で設計されたRC造建物での実験も行われているので、これらについて解析的検討の必要性がある。E-ディフェンスで実験済みの、縮小モデルの6層RC造耐震壁フレーム付建物と、実大高さ27.45m 10層RC造建物の振動実験結果を解析対象とするべく、本年度も昨年度に継続して解析用の建物データの構築を試みている。残念ながらESでの具体的な解析は行えていない。今後、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

本年度も昨年度と同じく、諸般の事情によりESでの解析利用が出来ず残念な年度となってしまい、まとめは昨年度と同様な内容とします。

ESの利用により汎用衝撃解析プログラムLS-DYNA¹⁾を利用での地震時のRC建物の崩壊現象までの解析を行い、実大実験に準じた解析の精度を更に向上させる可能性が得られた。本年度も昨年度と同じく、次なる解析用の建物データの構築と今迄の解析結果の検証を行った。

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込まれ、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、大入力を扱い得るということで、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考えている

文献

- [1] S-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層純ラーメン架構造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, 「鉄筋コンクリート造実大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, 「鉄筋コンクリート造実大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-**VII**

Project Representative

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

Author

Yoshikazu Kanai^{*2}, Atsunori Kitano^{*1}, Takao Seki^{*1}, Toshie Takahashi^{*1}, Haruji Tsubota^{*2},

Shigefumi Takeda^{*3}, Xu Xu^{*3}, Kei Ishida^{*3}, Yoshiyuki Kasai^{*2}, Yoshinori Konno^{*4},

Kensuke Kudou^{*4}, Kazukuni Niwa^{*5}, Kunio Takekoshi^{*5}, Youya Taira^{*5}

*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 You & You Architecture design Co, Ltd, *5 Terrabyte Co, Ltd,

A study in fiscal year 2021 continued the analytical research adopted by Earth Simulator Proposed Research Project in fiscal year 2010, 2011, 2017, 2018, 2019 and 2020. The same as last year, the impact analysis code of the explicit method was applied to the seismic response analysis of the building, and the results of the collapsed building in a shaking table test on a full-scale six-story reinforced concrete building. It modeled in detail, and precise and detailed simulation analysis is performed to visualize and confirm the destruction status of the building. In FY2017, we analyzed under the same conditions as the full-scale experiment by using ES3, which has dramatically improved analysis capability. In FY2018, analysis was performed for 120%, 150%, 175%, and 200% seismic waves as major earthquakes, and analysis for simplifying prior earthquake wave input. In FY2019, we performed additional analysis with some conditions changed from the analysis so far, and constructed analysis data of the building to be analyzed next. This year, just like last year, we created the analysis data for the next building to be analyzed, but due to circumstances, we could not analyze it with ES. In the future, we would like to continue to analyze the newly conducted experimental building at the full-scale 3D vibration fracture experimental facility (E-Defense), and accumulate comparative verification of each result to further enhance it.

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

1. Introduction

Since the same building as last year is also analyzed in this year, the first half of this report will leave almost the same contents as last year so that the whole can be grasped. This study applies an explicit finite element impact analysis code LS-DYNA^[1] to seismic response analysis. Using the results of a shaking table test of a full-scale 6-story RC building conducted at the full-scale 3D vibration destruction test facility (E-defense) of the Hyogo Seismic Engineering Research Center as an example, each member of the frame is modeled in detail, and precision Detailed simulation analysis is performed to visualize and confirm the destruction status of the building. 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.

(For research in fiscal 2010 and 2011 refer to the annual report for that fiscal year.)

In FY2017, using the ES3, whose analysis capability has been dramatically improved, the seismic wave input of a full-scale six-story RC building, which was simplified and analyzed in the previous. The analysis was performed by sequentially increasing the input to 5, 10, 25, 50, and 100% and finally inputting 60%, and the results obtained were as follows, which confirmed the collapse status of the building according to the experiment. In addition, the analysis was performed with the last 60% input being 100% input, and the analysis was performed assuming a case where a large earthquake occurred twice in succession like the Kumamoto earthquake. In FY2018, we input 120%, 150%, 175%, and 200% seismic waves as major earthquakes and

conducted an analysis to simplify pre-excitation. In FY2019, we performed additional analysis with some conditions changed from the analysis so far, and constructed analysis data of the building to be analyzed next. This year, just like last year, we created the analysis data for the next building to be analyzed, but due to circumstances, we could not analyze it with ES. It is necessary to continue comparison and verification with the experimental results in the future.

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

Since we are analyzing a full-scale 6-story RC building in 2021 as well, the outline of the experiment is shown below.

The building to be analyzed is a shaking table test of a full-scale 6-story RC building conducted by E-Defense. Data on experiments and buildings are based on publication [2]. The building is a 6-story, (X direction) 2 x (Y direction) 3 span three-dimensional frame, with each span of 5,000 mm in both the X and Y directions, and a floor height of 2,500 mm on each floor with a total height of 15,000 mm. The test used seismic waves equivalent to those recorded at the Kobe Ocean Observatory of the Japan Meteorological Agency during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, and set the input acceleration coefficients to 5%, 10%, 25%, 50%, and 100%. Is gradually increased and input, and finally 60% is input. The vibration directions are two horizontal directions of X and Y and three vertical directions, and the original wave is rotated by 45°, and the N45W direction is input to the Y direction of the test piece and the N45E direction is input to the X direction. This ensures that the final destruction occurs in the Y direction.

3. Summary of the analysis

3.1 Analysis model

Figure 1 shows the analysis building model. In this model, concrete was represented as solid elements, and reinforcing bars were represented as beam elements as they were in the actual state; the concrete and reinforcement elements have common nodes

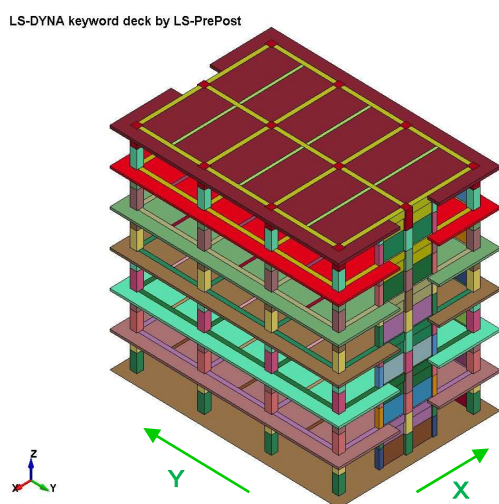


Fig. 1 View of the entire analytical model (Color-coded for input data layer recognition category)

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 FY2017, we obtained the permission to use 200 nodes (800 CPU parallel) of ES, and analysis was performed by sequentially inputting the same seismic waves as in the experiment. In FY2018, analysis was performed for 120%, 150%, 175%, and 200% seismic waves as major earthquakes, and analysis for simplifying prior seismic wave input. In FY2019, we conducted an additional analysis with some conditions changed for the analysis so far.

The analysis status in FY2017 is shown in (1) and (2) below.

- (1). Analysis in accordance with the actual experiment (A preliminary spare excitation, 100% excitation and 60% excitation)
- (2). Analysis for the case where the big earthquake happens twice same as Kumamoto earthquake (A preliminary spare excitation, 100% excitation and 100% excitation)

In FY2018, the following items (3) to (9) were analyzed in accordance with (1) and (2) above.

- (3). Analysis assuming a large earthquake of 120% (A preliminary spare excitation, 120% excitation analysis)
- (4). Analysis assuming a large earthquake of 150% (A preliminary spare excitation, 150% excitation analysis)
- (5). Analysis assuming a large earthquake of 175% (A preliminary spare excitation, 175% excitation analysis)
- (6). Analysis assuming a large earthquake of 200% (A preliminary spare excitation, 200% excitation analysis)
- (7). Analysis that simplified pre-excitation and replaced it with 100% excitation once. (Replace the pre-excitation with one 100% excitation, and analyze the 100% main excitation)
- (8). Analysis assuming 85% seismic wave as two consecutive medium-scale earthquakes. (A preliminary spare excitation, 85% excitation and 85% excitation analysis)
- (9). Analysis that simplifies pre-excitation for two consecutive medium-scale earthquakes. (Replace pre-excitation with one 100% excitation, and analyze 85% excitation, 85% excitation)

In FY2019, the following items (10) and (11) were analyzed in accordance with (2) and (8) and (9) above.

- (10). Analysis with the second major earthquake as 120% (A preliminary spare excitation, 100% excitation and 120% excitation)

(11). Simplify pre-earthquake and analyze 120% of the second consecutive large earthquake. (Replace pre-excitation with one 100% excitation, and analyze 100% excitation, 120% excitation)

This year as well as last year, it was a pity that we could not analyze with ES due to various circumstances.

4. Results of the seismic response analysis and future policy

In FY2017, the results of (1) that confirmed the collapse status of buildings, etc., almost in accordance with the experiment were obtained. In addition, in (2), two consecutive large earthquakes were analyzed, and it was confirmed that the second time resulted in considerable damage. In FY2018, the analysis based on the full-scale experiment of (1) was performed assuming that the main shock was a larger earthquake. Analysis of (3) 120%, (4) 150%, (5) 175%, (6) 200% seismic wave input confirmed that the building was in a collapsed state. In addition, (7) Analysis with 100% excitation once to simplify pre-excitation, (8) Analysis of 85% seismic wave input as two consecutive medium-scale earthquakes, (9) The pre-vibration was simplified and two consecutive medium-scale earthquakes were analyzed. In these analyzes, it was possible to examine the validity of replacing the pre-vibration with a single vibration. In FY2019, (10) Analysis of 100% and 120% continuous large earthquakes after vibration in advance, (11) The pre-earthquake was simplified and 100% and 120% continuous large earthquakes were analyzed. Further findings were obtained from these analyzes. This year, just like last year, due to circumstances, it was not possible to analyze with ES. The details of the analysis results are omitted because they are under consideration, but Fig. 2 shows the displacement in the Y direction of one layer of (3), (4), (5) and (6) analyzed in 2017.

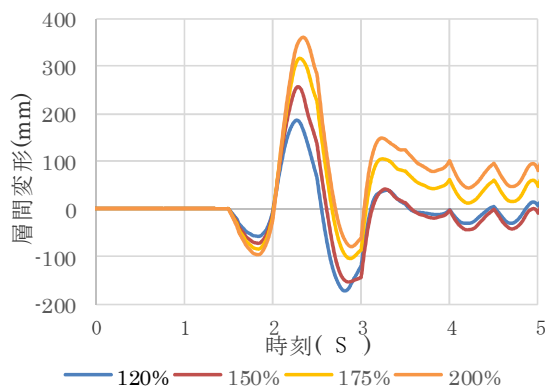


Fig. 2 Y direction displacement of one layer.

After pre-excitation in the experimental results, the maximum displacement at 100% excitation was about 100 mm, but in the analysis, the maximum displacement at 100% excitation was about 125 mm, which is large. The maximum displacement at 120% excitation shown in Fig. 2 is also excessive at about 190 mm. In the future, we believe that additional analysis will be performed and further examination and analysis will be necessary.

The building to be analyzed was designed based on the old seismic standards and was severely damaged by the great earthquake. In the future, in order to improve the analysis accuracy, it is necessary to further analyze the buildings designed by the current seismic standards that have already been tested by E-Defense. It is a building that has been tested by E-Defense, and there is a scale model 6-story RC building with earthquake-resistant wall frame and a full-scale 27.45m high 10-story RC building. Continuing from last year, we are trying to construct analysis data for these two buildings this year, but unfortunately we have not been able to carry out a concrete analysis with ES. In the future, we will analyze these buildings, accumulate further analysis data, and repeat analysis with multifaceted analysis conditions to improve accuracy.

5. Conclusion

This year, just like last year, we have created analysis data for buildings that will be analyzed in the future, continuing from last year. The summary will be similar to last year's report. 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 the future, it will be necessary to accumulate simulation analysis results for other buildings to be analyzed, perform comparative verification based on actual experimental results, and then build a simulation analysis system that enables numerical 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