

前橋工科大学研究紀要, 第14号, 平成23年3月

# 陽解法衝撃解析コードの実大6層鉄筋コンクリート建物の 振動台実験結果への適用 その2<sup>†</sup>

武田慈史<sup>\*1</sup> 金井喜一<sup>\*2</sup> 眞鍋慶生<sup>\*3</sup> 丹羽一邦<sup>\*3</sup> 成田悠<sup>\*4</sup> 坪田張二<sup>\*5</sup> 河西良幸<sup>\*5</sup>

## Application of Impact Analysis Code based on the Explicit Time Integration to the Shaking Table Tests of Full-Scale Six Story RC Building, Part 2

by

Shigefumi Takeda<sup>\*1</sup>, Yoshikazu Kanai<sup>\*2</sup>, Yoshio Manabe<sup>\*3</sup>, Kazukuni Niwa<sup>\*3</sup>,  
Yu Narita<sup>\*4</sup>, Haruji Tsubota<sup>\*5</sup> And Yoshiyuki Kasai<sup>\*5</sup>

This study was performed for purpose of developing a simulation analysis system for computing the collapse phenomenon of RC structure subjected to earthquakes. Earth Simulator belonging to JAMSTEC(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) is a highly parallel vector supercomputer and could be utilized by Maebashi Institute of Technology in FS 2010. A vast quantity of analytical data could be processed for modeling RC structure in detail by the finite element. Earthquake response analysis for the shaking table tests of full scale six stories RC building executed at the E-defense were computed by using impact analysis code based on the explicit time integration. As a result, good simulation for the shaking table tests of the RC building was successfully realized. In addition, dynamic response characteristics of the RC building over the design input levels were determined by parametric studies due to several large input levels.

*Key Words*: Earthquake response, Shaking table test, RC frame, Earth simulator, Parallel, Supercomputer, FEM

### 1 はじめに

平成22年度, 筆者らの研究提案が独立行政法人海洋研究開発機構の地球シミュレータ(大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータ)公募プロジェクトに採択され, 膨大な解析データの処理が可能となり, 陽解法衝撃解析コードLS-DYNA<sup>1)</sup>を使用して, 地震時の鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete, 以下RC)建物の崩壊に近い現象までの解析が可能となるように, 実大RC建物の振動台実験結果を例にしてシミュレーション解析システムの構築を試みた。

はじめに, RC3層純ラーメン架構の解析<sup>2)</sup>を試み, 材料の構成則, 解析条件の検討, 地球シミュレータの性能評価等を行った。次に<sup>3)</sup>, 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層鉄筋コンクリート建物の振動台実験データを基に, 架構各部材を詳細にモデル化して, 損傷の無いフレ

ッシュな状態の解析モデルに地震波を入力する地震応答解析を行った。解析結果<sup>3)</sup>の加速度応答は実験結果と良く一致することを把握したが, 解析結果の変位振幅は実験結果に比べて小さい結果であった。その要因のひとつとして振動台実験では地震波の入力レベルを段階的に増加させる加振計画となっており, 解析の対象とした地震波(建物が倒壊するような大きな地震波)入力の前に実験試験体にはある程度の累積損傷が発生していたことによるものと考えた。そこで, 既加振による累積損傷を考慮した解析を行ったところ, 実験結果と比較的良好な対応が得られたので, その結果について報告する。

### 2 実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験の概要

解析の対象とする実験は, 「大都市大震災軽減化特別プロジェクトII振動台活用による構造物の耐震性向上研究」として行われた, E-ディフェンスでの実大6層鉄筋コ

<sup>†</sup> 原稿受理 平成23年3月1日, Received March 1, 2011.

\*1 建築学専攻大学院生(Graduate Student, Department of Architecture)

\*2 環境・情報工学専攻大学院生(Graduate Student, Department of Environmental and Information Engineering)

\*3 株式会社テラバイト(Terrabyte Co, Ltd.)

\*4 建築学科大学生(Student, Department of Architecture)

\*5 建築学科(Department of Architecture)

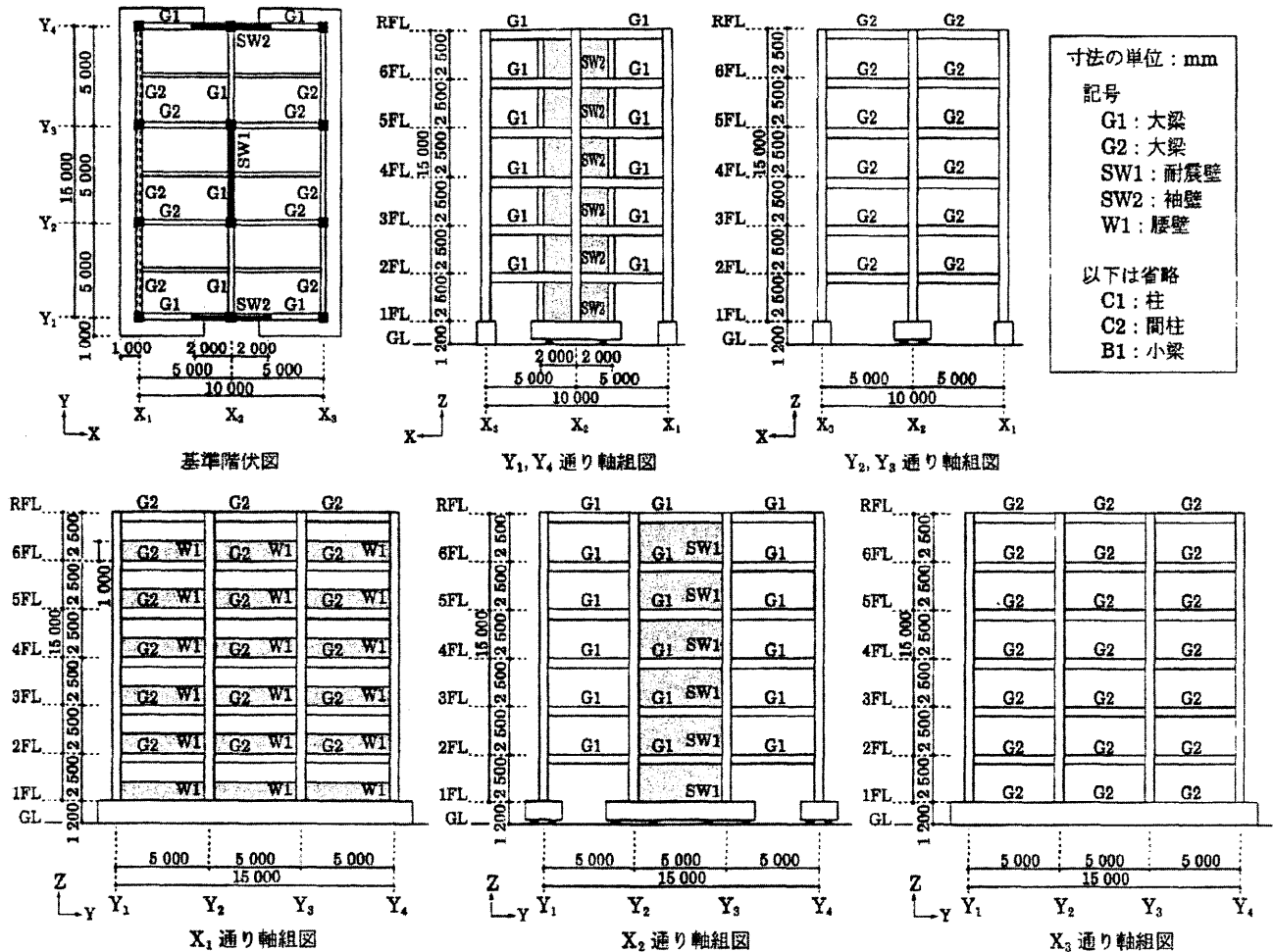


Fig.1 Typical floor plan and framing elevation<sup>10)</sup>

コンクリート建物の振動台実験である。実験及び建物に関しては公開文献<sup>4)-10)</sup>に基づいている。試験体は実大架構でFig.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、各スパンはX、Y方向共に5,000mm、階高は各階共に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、せん断補強筋を2-D10@100、耐震壁は150mm厚、配筋は縦筋、横筋共にD10@300ダブル、大梁は一部を除いて、上端筋3-D19、下端筋2-D19、せん断補強筋2-D10@200mmとしている。文献<sup>7)</sup>よりコンクリートの圧縮強度は1階から6階まで各々31.7, 30.7, 28.2, 27.3, 25.2, 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。実験では阪神・淡路大震災時の気象庁神戸海洋気象観測波を用いて、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。

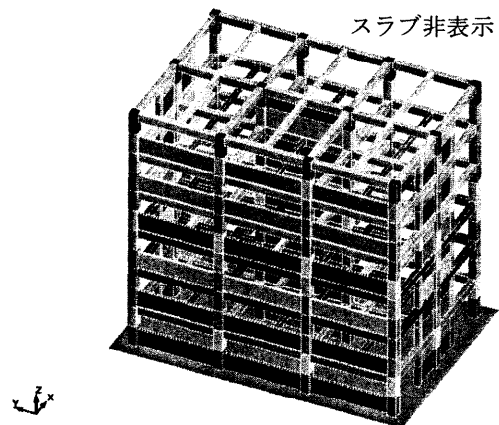


Fig.2 FEM analytical model

### 3 解析概要

#### 3.1 解析モデル

解析モデルをFig.2に示す。Fig.2は解析モデル全体の主架構部を部材種別及び階ごとに色分けして示したものである。

RC3層純ラーメン架構振動台実験の解析<sup>2)</sup>、実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験の解析<sup>3)</sup>と同様に、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、柱脚固定条件とし、地震応答解析の際はこの剛体シェル要素に地震波を入力することとした。解析モデル規模はコンクリートが約148万要素、鉄筋が約57万要素、剛体シェルが約3万要素で合計約208万要素であり、総節点数は約179万節点である。材料モデルは、RC3層の解析検証<sup>2)</sup>と同様にLS-DYNA<sup>11)</sup>に実装されているモデルを使用する。Fig.3に使用する材料モデルの応力 $\sigma$  - 歪 $\epsilon$ の関係を示す。コンクリートの材料モデルは非拘束1軸圧縮引張の場合である。

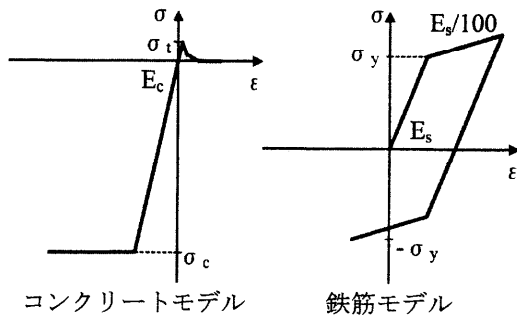


Fig.3 Material model

コンクリート要素には歪速度効果、Ottosenの破壊基準<sup>12)</sup>、スマードクラック等の特徴を持つ材料モデル<sup>13), 14)</sup>を使用し、Ottosenの破壊基準<sup>12)</sup>は(1)式のように表現される。

$$A \frac{J_2}{\sigma_c^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{\sigma_c} + B \frac{I_1}{\sigma_c} - 1 = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ は次のように表される。

$$\lambda = K_1 \cos \left\{ \frac{1}{3} \cos^{-1} (K_2 \cos 3\theta) \right\}, \quad (\cos 3\theta \geq 0)$$

$$\lambda = K_1 \cos \left\{ \frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \cos^{-1} (-K_2 \cos 3\theta) \right\}, \quad (\cos 3\theta < 0)$$

$\sigma_c$ は一軸圧縮強度、 $J_2$ は偏差応力の2次不変量、 $I_1$ は応力の1次不変量、 $A$ 、 $B$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ は引張強度 $\sigma_t$ と一軸圧縮強度 $\sigma_c$ の比 $\sigma_t/\sigma_c$ から決まる係数、 $\theta$ は偏差平面上の位置を表す量である。引張側の応力低下は破壊エネルギーとクラック幅によって決定される。

鉄筋要素には移動硬化を考慮した等方弾塑性体モデルを使用し、降伏後の塑性硬化係数を弾性係数の1/100とするバイリニア型とした。

解析に用いる材料の各諸元は実験値を採用し、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10)によると、RC躯体の体積にRC部材(普通コンクリート)の比重2.4を乗じて算出しており、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であり、本解析モデルの各階重量は1.22MN、1階柱の中央高さより上部の合計重量は7.30MNである。

## 3.2 解析条件

### 3.2.1 プッシュオーバー解析条件

動的陽解法によるプッシュオーバー解析を行う。y方向を対象とし、Ai分布に基づく荷重分布形を用いた荷重制御による方法とした。重力加速度の負荷を0~0.6sの間で0m/s<sup>2</sup>から9.8m/s<sup>2</sup>まで緩やかに増加させることで考慮することとし、0.6sから水平力を作用させる。Y<sub>1</sub>通りの各階スラブ位置付近の節点群に荷重を与えるが、本解析では動的載荷による方法をとるため載荷時の振動を抑制するため、荷重増分は緩やかに増加させることとしている。1階柱脚位置に配置した剛体シェル要素の変位・回転を拘束し、柱脚固定条件として解析を行った。

### 3.2.2 地震応答解析条件

解析に用いる地震波は、阪神・淡路大震災時に神戸海洋気象台で観測された地震波<sup>15)</sup>を使用する。解析では損傷の無いフレッシュな状態の解析モデルに地震波の振幅倍率を100%(a)、120%(b)、150%(c)、200%(d)とした地震波を入力する地震履歴無しの場合と、地震履歴として振幅倍率100%の地震波を入力した後に、もう一度100%の地震波を入力する累積損傷の影響を考慮した地震履歴有りの場合100%-100%(e)を行った。地震履歴を考慮する場合の解析(e)では、地震履歴として入力した地震波の後に、5秒間の自由振動解析を行い、その後100%の地震波を入力することとした。先の研究<sup>3)</sup>では、損傷の無いフレッシュな状態の解析モデルに振幅倍率100%の地震波の入力(a)を行っており、加速度応答の状況は解析により実験結果をほぼ再現できていることを報告している。一方、解析による変位振幅は実験に比べて小さい結果であり、その要因のひとつとして、実験では地震波の振幅倍率を5、10、25、50%と順次増大させて与え、その後100%の入力を行っており、解析の対象とする振幅倍率100%の地震波入力の前にコンクリート部分に若干の損傷が生じており、解析においてもその影響を考慮する必要があるためと考えられる。そこで本報告では、振幅倍率100%の地震波入力の前に行われている5、10、25、50%の複数回の加振の影響を計算時間の節約のために1回の加振で考慮することとする。衝撃荷重の研究ではあるが、玉井らの研究<sup>16)</sup>による「繰り返し衝突が作用するRC部材の累積損傷の評価として累積入力エネルギーが同一であれば部材損傷の簡易的な指標である累積残留変位はほぼ同じ値を示す」との知見を参考にして、5、10、25、50%の複数回の加振と等価な地震波の振幅倍率として100%を設定した。

本解析では動的陽解法による計算法を採用し、プッシュオーバー解析と同様に地震波入力の前に重力加速度の負荷を0~0.6sの間で0m/s<sup>2</sup>から9.8m/s<sup>2</sup>まで緩やかに増加させることで考慮することとし、地震波は0.6sから作用させる。本解析対象の6層RC建物は解析データ量が大きく、地球シミュレータの16node(128CPU)を使用した場合、地震作用初期の計算では1.0s解析するために約2時間程度を要し、その後は、塑性および破壊の計算負担増大のためか1.0s解析するために約3時間を要する。地球シミュレータ使用の際には1回の計算に対して12時間を上限とし

た時間制限が設けられているため、16node(128CPU)を使用して6層RC建物の解析を行う場合、1回の計算投入(12時間)で約4.0sの解析ができることとなる。そのため解析対象時間(地震履歴無しの場合は4.6s、地震履歴有りの場合は13.6s)に達するまでリスタート解析を試み、繰り返し計算の投入を行うこととした。減衰は質量比例型とし減衰定数3%を考慮する。計算法は時間積分の計算を、中心差分による陽解法<sup>1)</sup>を使用し、計算刻みは約 $3.8 \mu s$ ( $3.8 \times 10^{-6}s$ )、データ出力間隔は1.0ms( $1.0 \times 10^{-3}s$ )とした。

#### 4 解析結果

##### 4.1 プッシュオーバー解析結果

Fig.4に各階のy方向せん断力 - 層間変位関係を示す。Fig.4の下目盛は層間変位(mm)、上目盛は層間変形角(rad)を示しており、解析対象建物の階高は1階から6階まで2,500mmで同一である。Fig.4には1階の層間変形角が1/200, 1/100, 1/50時の各階の結果も示している。変位は各階スラブの中心(耐震壁頭中心)の変位結果を用いている。結果をみると、1階層間変形角が1/100から1/50まで変形する間では1階の変形が他の階に比べて大きくなっていることが分かる。更に荷重を増加させると1階の変形の増加が更に顕著になることを把握している。

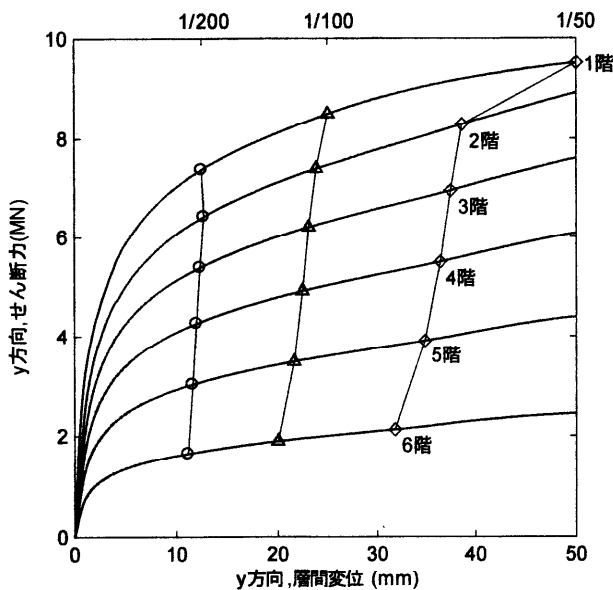


Fig.4 Result of pushover analysis

##### 4.2 地震応答解析結果

Fig.5にy方向1階層間変位の時刻歴の解析結果を入力加速度及び実験結果<sup>9)</sup>と共に示す。入力加速度に示す①と③が阪神・淡路大震災時の神戸海洋気象台観測波形の特徴とされる衝撃的な地震波形部分で、①は761gal、③は845galである(原波を45°回転させた場合の値)。解析結果の最大層間変位(括弧内は最大層間変形角)は100%(a)が31mm(1/80)、120%(b)が72mm(1/35)、150%(c)が131mm(1/19)、200%(d)が155mm(1/16)、100%-100%(地震履歴有)(e)が75mm(1/33)であった。地震波の振幅倍率100%、120%の解析結果は実験結果より小さい結果であるが、

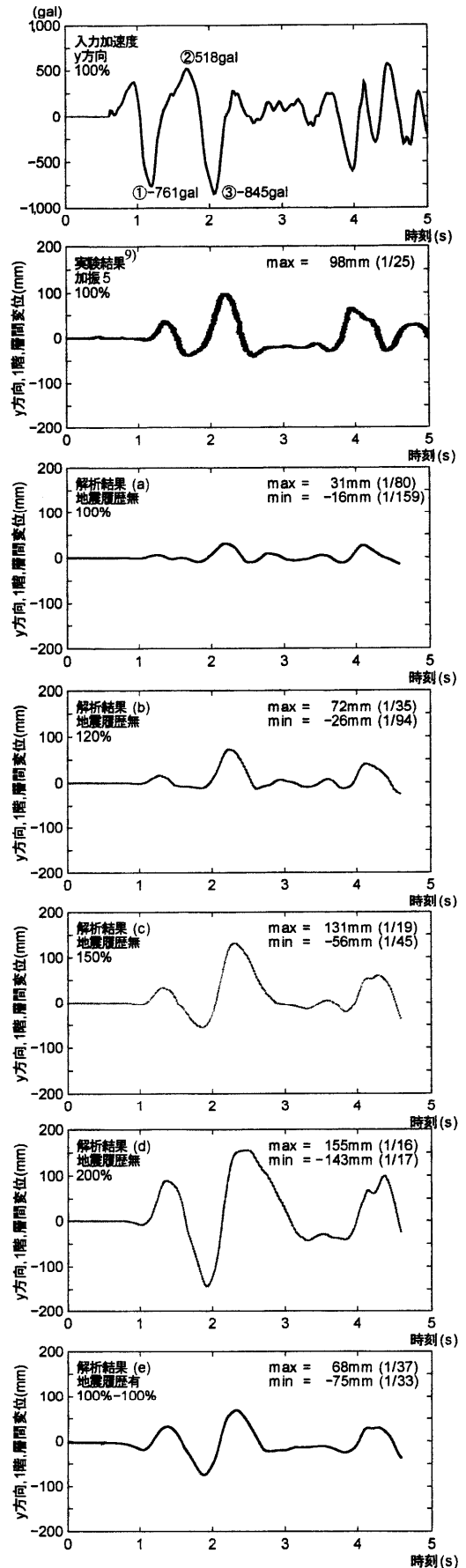


Fig.5 Story drift time history

振幅倍率150%の地震波による解析では実験値を上回る結果となっており、累積損傷を考慮しないフレッシュな解析モデルに対する地震波入力では、振幅倍率120%と150%の中間の入力が実験結果と対応するものと考えられる。累積損傷の無いフレッシュな解析モデルに100%を入力した場合(a)と累積損傷を考慮して100%を入力した場合(e)の結果を比べると、累積損傷を考慮(e)することで累積損傷無し(a)の場合より変位振幅がかなり大きくなっており、実験結果の変位振幅に近づく結果となっていることが分かる。

Table.1にy方向1階の最大層間変形角の実験<sup>10)</sup>と解析の結果を示す。実験<sup>10)</sup>の加振5の100%入力では最大層間変形角が1/25で、1層崩壊型で倒壊に近い大きな損傷を受けており、加振6の60%入力では最大層間変形角が1/17で、崩壊寸前であった。解析の地震履歴の無いフレッシュな解析モデルに地震波を入力する場合では、100%(a)で1/80、120%(b)で1/35、150%(c)で1/19、200%(d)で1/16であり、実験結果の最大層間変形角を参考にして解析結果の損傷状況を判断すると、地震履歴の無いフレッシュな解析モデルでは150%入力(c)により崩壊寸前に近い損傷状態に達していること、200%入力(d)では倒壊寸前もしくは倒壊状態に達していることが判断される。

Table 1(a) Experiment<sup>10)</sup>

実験の加振	y方向1階 最大層間変形角 (rad)	被災度区分 判定結果
加振4, 50%	1/270	小破
加振5, 100%	1/25	大破
加振6, 60%	1/17	倒壊

Table 1(b) Analysis

地震履歴の無い フレッシュな解析 モデルへの入力	y方向1階 最大層間変形角 (rad)	損傷状況の 判断
100%(a)	1/80	/
120%(b)	1/35	
150%(c)	1/19	倒壊寸前
200%(d)	1/16	倒壊状態

Fig.6にy方向1階のせん断力 - 層間変位関係を実験結果<sup>4)</sup>と共に示す。なお、解析でのせん断力は各層の床スラブ重心位置の応答加速度結果にその層の質量を乗じ、対象とする層より上の層のせん断力を累加することにより算定している。地震波の振幅倍率の増加に伴い履歴ループが大きくなっていること、また、累積損傷を考慮(e)することで累積損傷を考慮しない場合(a)より大きい履歴ループを描くことが分かる。

FEMによる詳細解析を行うことの最大の利点は各部材の応力状況、損傷状況等が数値的かつアニメーションとして認識できることであり、実験結果で損傷の大きかった腰壁付短柱部分、耐震壁脚部について、応力の状況、

コンクリート躯体の変形状況、鉄筋の変形状況等を変形量を拡大してFig.7に示す。Fig.7(a), (b), (d)~(f)はMisesの相当応力を示したコンター図で、寒色側が応力の小さい部分で暖色側にいくに従い応力が大きくなっている。Fig.7(c)では短柱部分の柱主筋がせん断補強筋の拘束力ではらみながら変形して地震時の荷重に対して耐えている様子が確認できる。このように詳細解析では、鉄筋の状況のみを取り出して確認すること、部材中央部の切断部での応力状態を取り出し確認する等、細部にわたって必要に応じた状況確認が自在に可能である。

## 5 まとめ

本研究は、地球シミュレータ(大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータ)を使用した汎用衝撃解析プログラムLS-DYNA<sup>1)</sup>による地震時のRC建物の崩壊に近い現象まで解析が可能となるようなシミュレーション解析システムの構築を試みることを目的として、RC3層純ラーメン架構1/4縮尺モデルの解析<sup>2)</sup>、実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験についての解析<sup>3)</sup>を行い、そして本報告において実験時の累積損傷の影響を考慮する解析検討を行った。

地球シミュレータ(ES2, Earth Simulator 2)という現在日本で使用できる最高性能とその能力を生かし得る陽解法の有限要素プログラム(LS-DYNA)を用いて実大RC建物の振動台実験の解析と実験結果との検証を行った。その結果、陽解法を使用し地震履歴による初期損傷も考慮したRC構造物の振動台実験を再現できる可能性が示唆された。

既往のRC建物のフレーム解析では、コンクリートや鉄筋の配置等から柱、梁、壁等の復元力特性が評価され、陰解法に基づく計算が行われているが、本解析では、コンクリートと鉄筋の材料的特性を与え、あとは構造の配置、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される。更に、損傷や破壊が実際と同じようにコンピュータアニメーションとして表現され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のため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、今後の更なる発展が期待される大規模ベクトル並列型スーパーコンピュータのメリットを發揮できる手法であり、今後とも解析事例の増加と実験結果との検証を進めていく必要があると考える。

本解析ではある程度累積損傷の影響が反映された解析結果が得られ、今後更なる解析データの蓄積を行い、多角的な視点での検討を行う必要があると考える。例えば、静的漸増解析を行い、コンクリートひび割れ時、鉄筋降伏時、最大層間変形角1/100時等の初期損傷レベルの相違による地震応答の評価や、建物基礎と地盤とのすべりを考慮した地盤連成建物モデルによる入力地震動、基礎部の固定度と支持状況、上部構造の地震応答の評価等が挙げられる。また、本研究での解析モデルやコンク

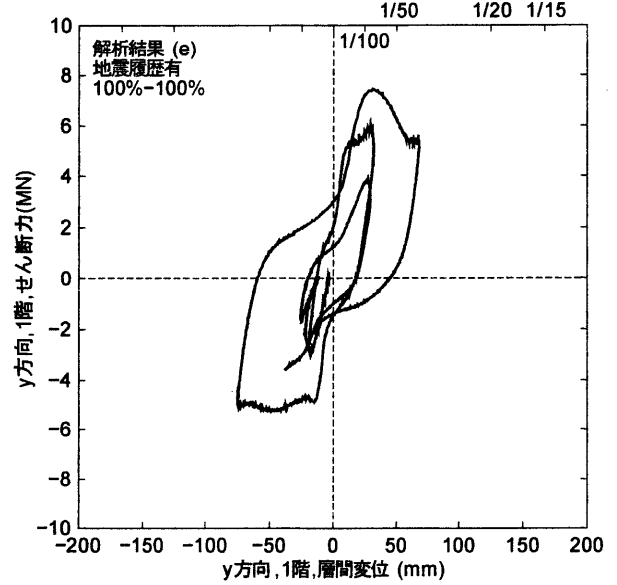
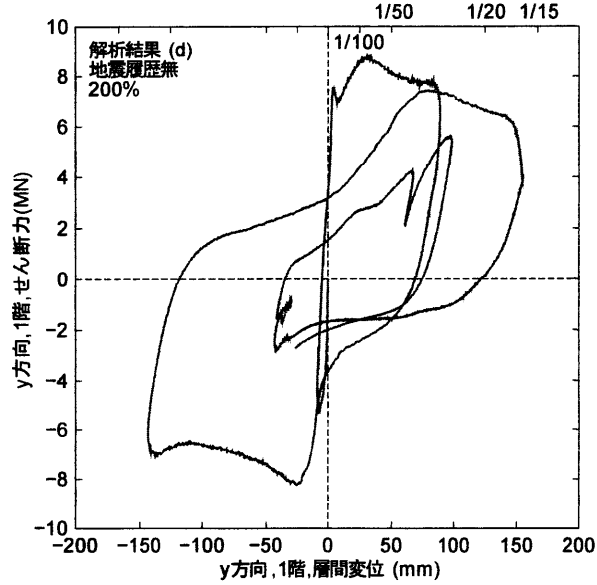
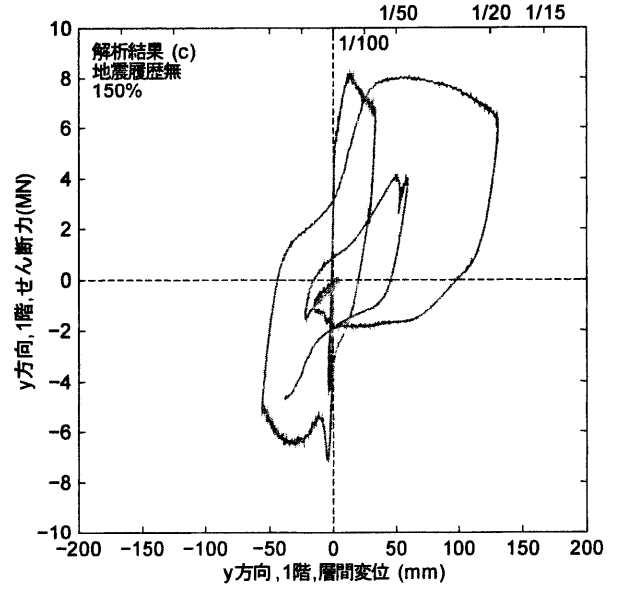
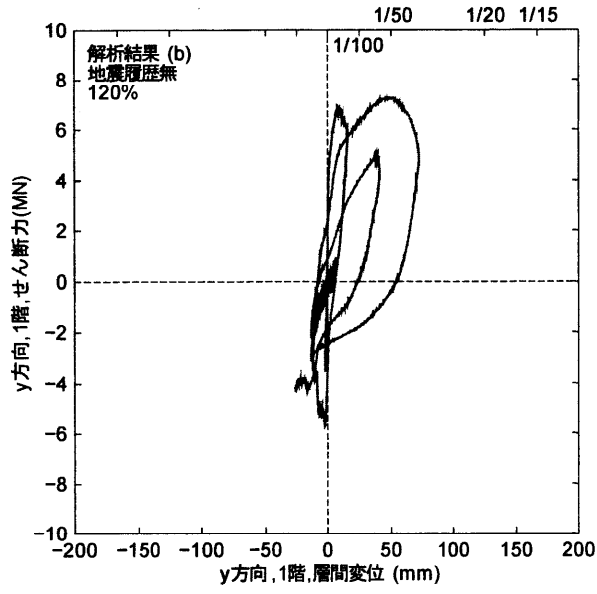
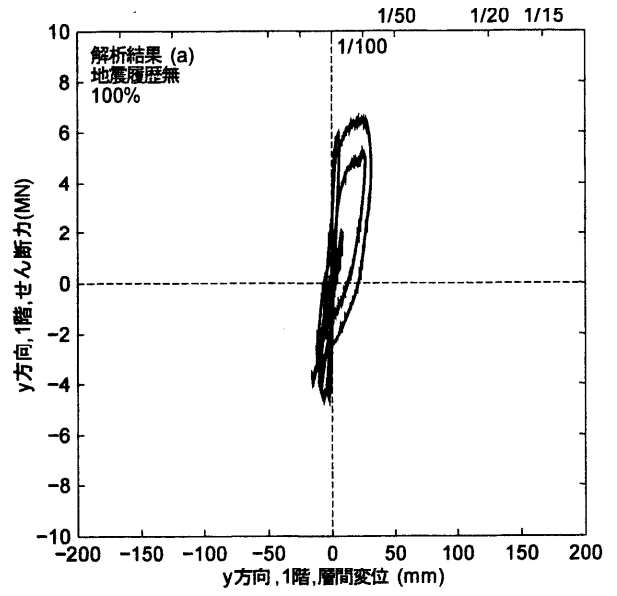
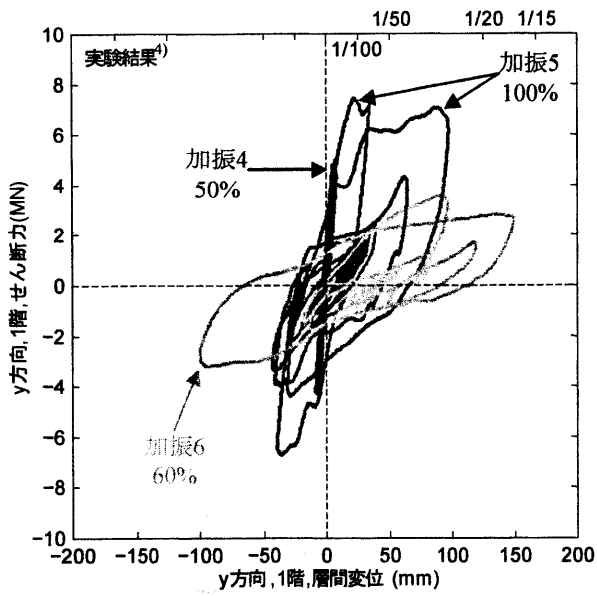
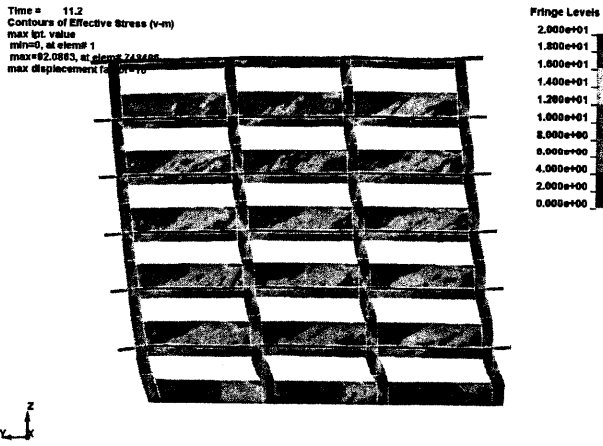
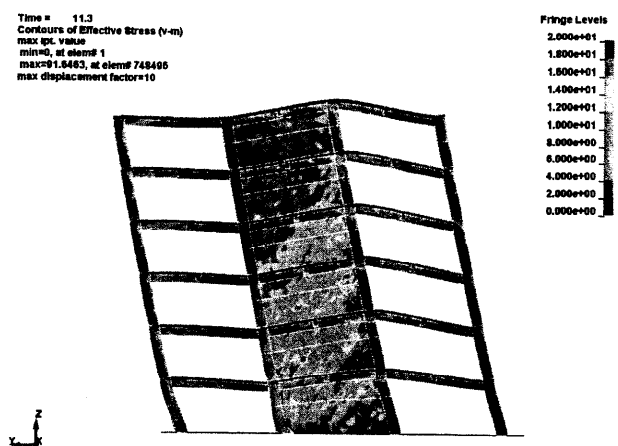


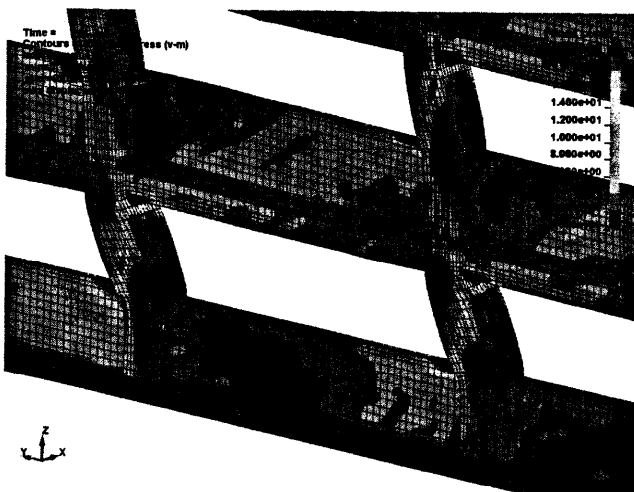
Fig.6 Shear force - Story drift



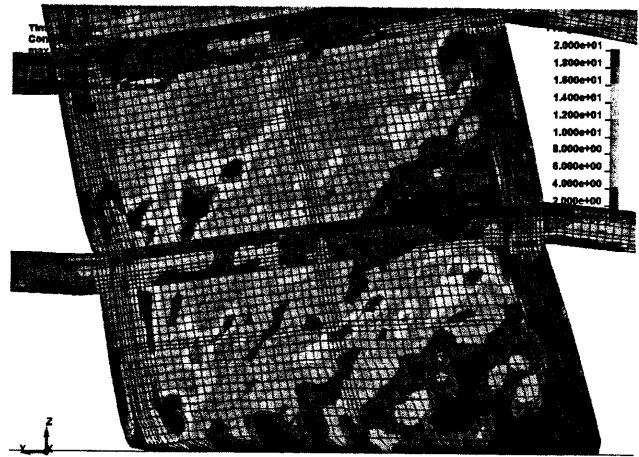
(a) Mises stress contour at  $X_1$  frame



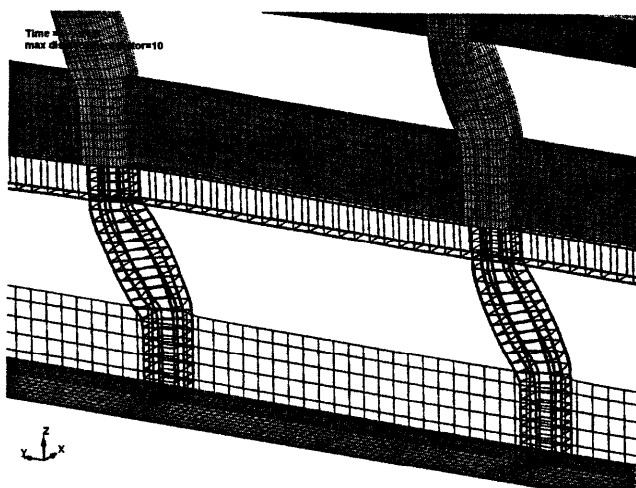
(d) Mises stress contour at  $X_2$  frame



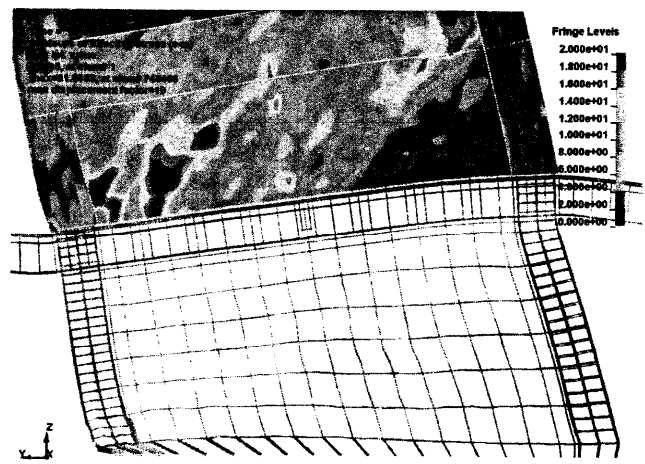
(b) Mises stress contour at  $X_1$  frame (enlargement)



(e) Mises stress contour at  $X_2$  frame (enlargement)



(c) Displacement at  $X_1$  frame reinforcement bar



(f) Mises stress contour at  $X_2$  frame (enlargement)

Fig.7 FEM simulation analytical result (displacement is enlarged by 10 times)

リートの構成則からみて、変形がやや小さめに計算される傾向があるので、将来実施されるであろうフレッシュな試験体での大入力加振実験の実施やその結果を対象とした精密かつ詳細な解析が望まれる。このような詳細・精密解析を行うことで建物の地震応答についての評価レベルが更に向上し、社会基盤の安全性確保の一助になればと考える。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、平成22年度、独立行政法人海洋研究開発機構の地球シミュレータ公募プロジェクト採択により地球シミュレータの使用が許可されたこと、独立行政法人科学技術振興機構、研究成果最適展開支援事業フィージビリティスタディ(F S)ステージ、検索タイプ平成22年度採択課題での支援を頂いたこと、大阪大学の橋英三郎教授、東京大学地震研究所の壁谷澤寿海教授に有益な御示唆を頂いたこと、また、地球シミュレータ操作、解析データ構築にあたり株式会社テラバイトの石塚道氏、佐藤啓介氏、前橋工科大学学部生の渡邊祐介君に御協力して頂いたことについて、ここに記し謝意を表します。

### 参考文献

- 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) 金井喜一, 武田慈史, 眞鍋慶生, 丹羽一邦, 河西良幸, 「陽解法衝撃解析コードの実大6層鉄筋コンクリート建物の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.
- 4) 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・レポリューション・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.
- 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 - 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.
- 6) 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.
- 7) 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・レポリューション・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的解析システムの開発, pp.325-358, 2007年5月.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Livermore Software Technology Corporation (LSTC), "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I, II".
- 12) Ottosen, N.S., "Failure and Elasticity of Concrete", RISO-M1801, July 1975.
- 13) Broadhouse, B.J., "The Winfrith Concrete Model in LS-DYNA3D", Report: SPD/D(95)363, Structural Performance Department, AEA Technology, Winfrith Technology Centre, U.K. (1995).
- 14) Broadhouse, B.J., Neilson, A.J., "Modelling Reinforced Concrete Structures in DYNA3D", Safety and Engineering Division, United Kingdom Atomic Energy Authority, Winfrith, AEEW-M 2465, 1987.
- 15) 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.
- 16) 玉井宏樹, 篠崎誠, 「繰返し衝突が作用するRC部材の累積損傷に関する一考察」, 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.