

(57) 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

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

金井喜一\*, 武田慈史\*\*, 眞鍋慶生\*\*\*, 丹羽一邦\*\*\*\*, 河西良幸\*\*\*\*\*  
Yoshikazu Kanai, Shigefumi Takeda, Yoshio Manabe, Kazukuni Niwa, Yoshiyuki Kasai

- \*工修, 前橋工科大学大学院, 工学研究科大学院生 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地の 1)
- \*\* 前橋工科大学大学院, 工学研究科大学院生 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地の 1)
- \*\*\*工修, (株)テラバイト, 第一技術部 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3 丁目 21 番地 4 号第 1 三倉ビル 4F)
- \*\*\*\*工修, (株)テラバイト, 取締役 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3 丁目 21 番地 4 号第 1 三倉ビル 4F)
- \*\*\*\*\*工博, 前橋工科大学大学院, 工学研究科教授 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地の 1)

Key Words: Earthquake response, Shaking table test, RC frame, Earth simulator, FEM simulation

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

平成 22 年度, (独)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, 汎用衝撃解析プログラム 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る。

始めに, RC3 層純ラーメン架構の解析<sup>2)</sup> を試み, 材料の構成則, 解析条件の検討等を地球シミュレータにて行った。次に, 兵庫耐震工学研究センターの実大三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もとに, 架構各部材を詳細にモデル化して地震応答解析を行った。

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 層鉄筋コンクリート建物の振動台実験である。以下の実験, 及び建物に関しては公開文献<sup>3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)</sup> にもとづいている。試験体は実大架構で図-2 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 × 500 mm, 間柱 300 × 300 mm, 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 7), 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, 気象庁神戸海洋気象台観測波を用いて, 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。図-1 に, 文献 3), p.332 より実験の振幅倍率 100% 時の入力加速度を示す。

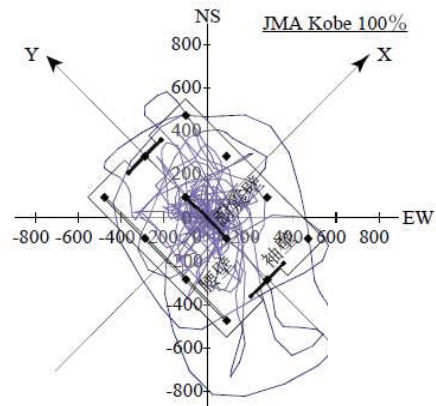


図 - 1 振幅倍率 100% 時の入力加速度<sup>3)</sup>

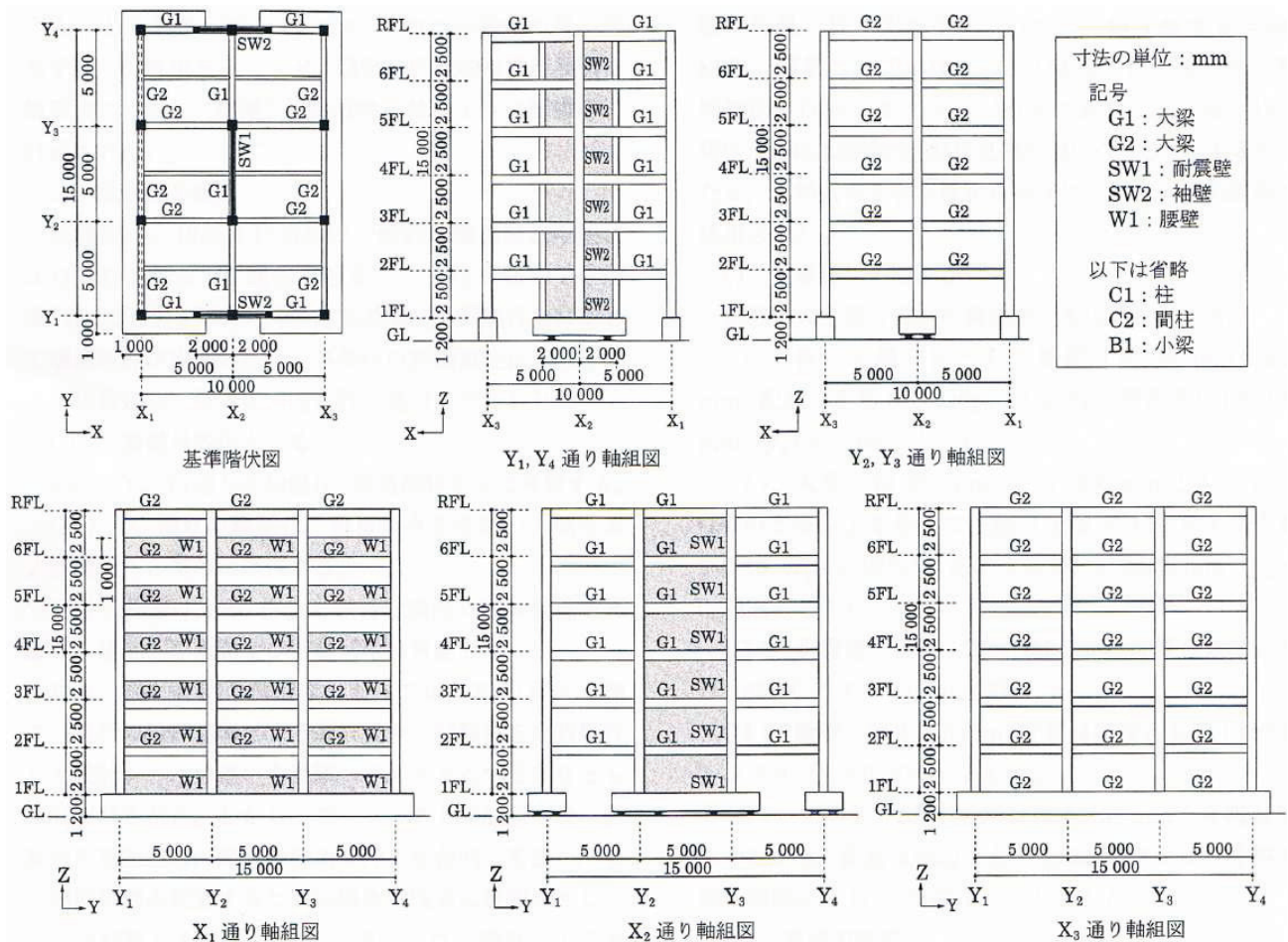


図-2 実大6層試験体 概要<sup>9)</sup>

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

解析モデルを、図-3、図-4、図-5、図-6に示す。解析条件については RC3 層純ラーメン架構振動台実験の解析<sup>2)</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、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要素であり、総節点数は、約1,790,000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。図-7に材料モデルの応力-歪関係を示す。コンクリートモデルは非拘束1軸圧縮引張の場合である。コンクリートは歪速度効果、Otosen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)</sup>、<sup>14)</sup>を使用し、Otosen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。

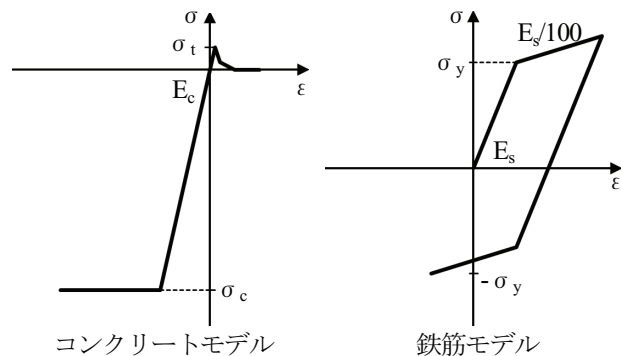


図-7 材料モデル応力-歪関係

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

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<sup>10)</sup> データより、3 方向地震波として 8.0 秒間準備して入力した。解析は損傷のないフレッシュな状態の解析モデルに、上記地震波の振幅倍率 100% 入力とした。地震波入力の前に、Heavyside 関数による調整を行いなが

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

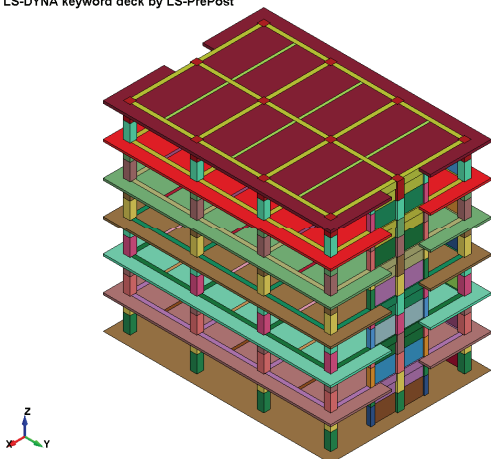


図 - 3 解析モデル全体  
(色分けは入力データのレイヤー認識区分)

ら重力加速度の負荷を 0~0.6s の間で  $0\text{m/s}^2$  から  $9.8\text{m/s}^2$  まで増加させることで考慮し、地震波は 0.6s から作用させた。本解析対象の 6 層 RC 建物は解析データ量が大きく、地球シミュレータでの 4 ノード、12 時間の利用制限内では、最初の計算で約 2 秒程度の解析、その後は、塑性および破壊の計算負担増大のためか 1 回での計算は約 1 秒程度となり、他の利用者との兼ね合いで時間待ちを行いつつリスタートを試み、解析は計 4.0s まで行った。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を使用し、計算刻みは  $3.8\mu\text{s}$  ( $3.8 \times 10^{-6}\text{s}$ )、データ出力間隔は、 $1.0\text{ms}$  ( $1.0 \times 10^{-3}\text{s}$ ) とし、実験と同様に出力データの計測サンプリング周波数は 1kHz (0.001s)。計算は RC3 層と同じく地球シミュレータの 4node (4node  $\times$  8cpu/node = 32cpu) を使用して行った。

解析モデルを下図に示す。図-3 は、解析モデル全体架構を入力レイヤー分けて示す。図-4 は、主架構の鉄筋部材構成モデルを示す。図-5 は、主架構接合部の拡大鉄筋モデルを示す。図-6 は、X2 通り耐震壁架構 1、2 階部分の鉄筋モデルを示す。

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

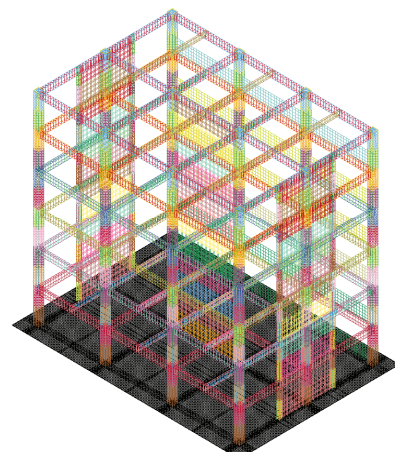


図 - 4 主架構 鉄筋解析モデル

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

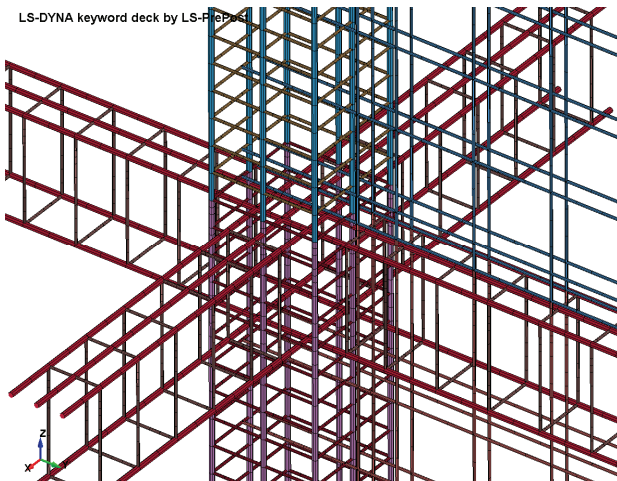


図 - 5 主架構 鉄筋解析モデル 拡大図

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

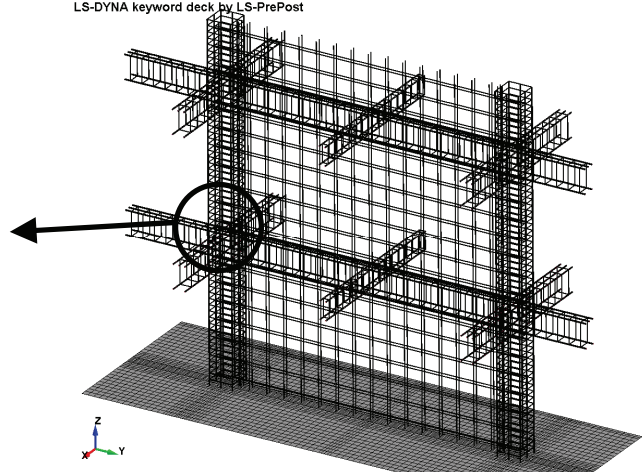


図 - 6 耐震壁部 鉄筋解析モデル

#### 4. 解析結果

図-8, 9, 10, 11 に地震波入力後 2.0s での解析結果のクラックの発生状況を示す。クラックの発生状況をコンクリート要素の色分けで表示している。赤く表示されている部分はクラックが完全開口の状態であることを示している。X2 通り耐震壁 1 階脚部 (図-8, 10 参照), X1 通り腰壁付短柱部 (図-9, 11 参照) に完全開口状態のクラックが発生していることが分かる。実験の振幅倍率 100% での加震後のクラック発生位置の状況を図-12, 13 に示す。解析は 4.0s まで行ったが、クラックの解析結果

図は解析クラックの状況が見やすい 2.0s での表示としている。  
本解析で用いた地震波は振動実験と同じではない。変位については実験値との対応は十分ではないが、加速度応答の状況についてはおおむね再現できているので、図-14, 15, 16, 17 に解析結果を実験値と比較して示す。

(クラック色分け表示 凡例)

- 青：ひび割れ幅が小さい。
- 緑：ひび割れ幅が大きい、完全開口には至っていない。
- 赤：完全開口した。

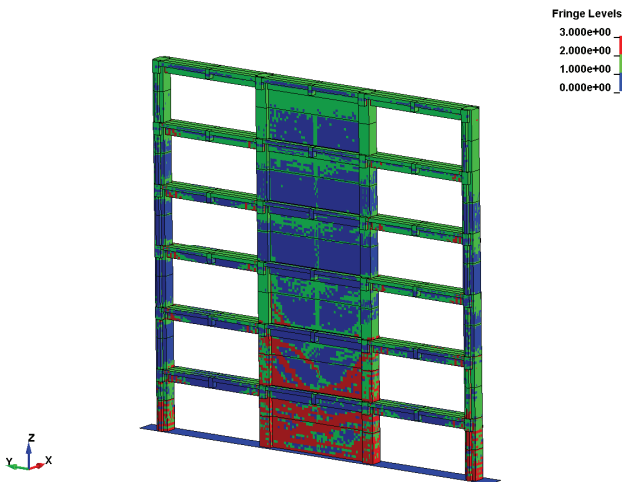


図-8 X2 通り 耐震壁架構クラック図

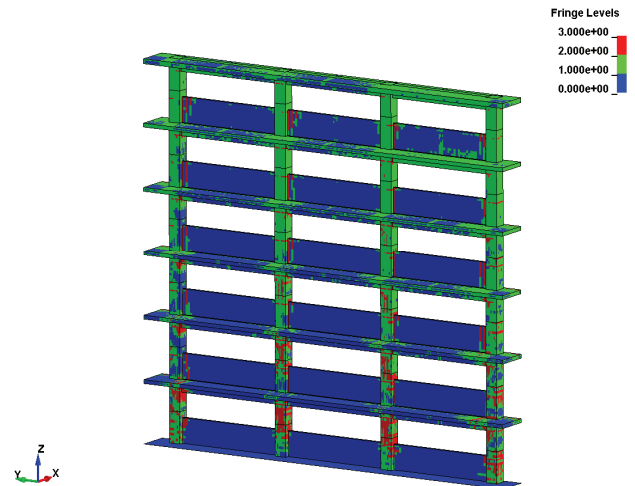


図-9 X1 通り 短柱架構クラック図

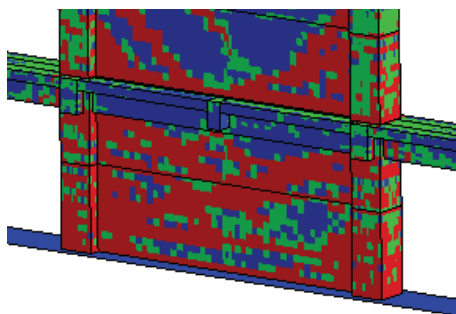


図-10 X2 通り 耐震壁架構クラック拡大図

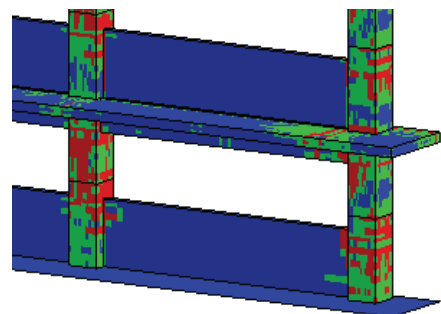


図-11 X1 通り 短柱架構クラック拡大図

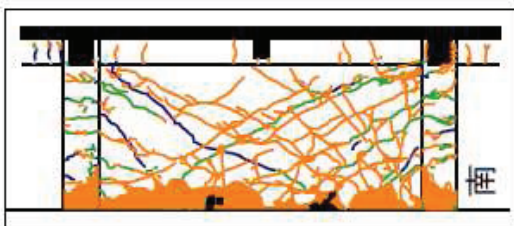


図-12 実験結果: X2 通り 耐震壁架構クラック図, 文献3) p.346

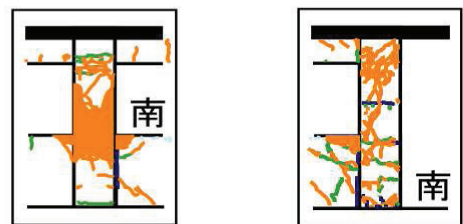


図-13 実験結果: X1 通り 短柱架構クラック図, 文献3) p.346

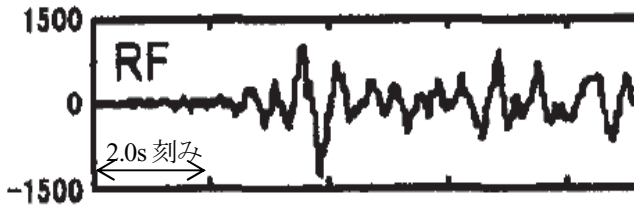
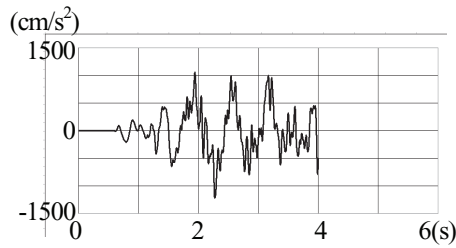


図 - 14 X方向 R階加速度応答  
(上) 解析値  
(下) 実験値<sup>9)</sup>, (2.0s 刻みは加筆)

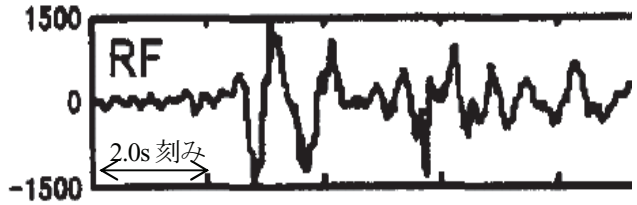
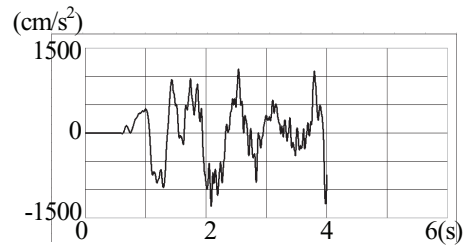


図 - 15 Y方向 R階加速度応答  
(上) 解析値  
(下) 実験値<sup>9)</sup>, (2.0s 刻みは加筆)

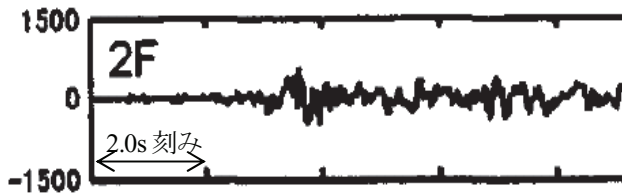
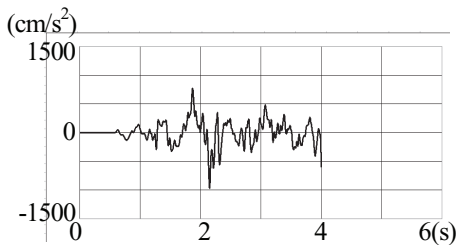


図 - 16 X方向 2階加速度応答  
(上) 解析値  
(下) 実験値<sup>9)</sup>, (2.0s 刻みは加筆)

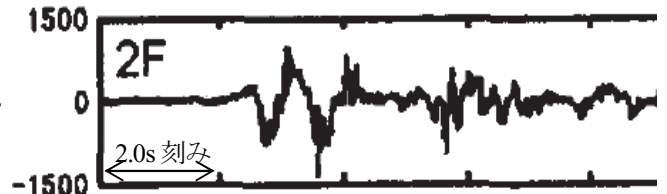


図 - 17 Y方向 2階加速度応答  
(上) 解析値  
(下) 実験値<sup>9)</sup>, (2.0s 刻みは加筆)

地球シミュレータを使用して4.0sまでの本解析は、損傷のないフレッシュな状態で地震波を入力しているため変位が小さめに出ていると考えられる。今後の対応として、RC3層の解析<sup>2)</sup>で試みた初期損傷を考慮した解析の検討が必要と思える。

## 5. まとめ

本報告で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>に続いて、実大6層鉄筋コンクリート建物の振動台実験について、架構各部材の詳細なモデル設定により解析を行った。今回の解析は、損傷のないフレッシュな状態で振幅倍率100%の地震波を入力して行った。既加震による影響等は考慮できていない解析結果ではあるが、実験結果とクラックの発生状

況、加速度応答解析結果についてはおおむね対応していることがわかった。

今後の課題として、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）を使用して、次の3点についての検討を予定している

- ・RC3層純ラーメン架構1/4縮尺モデルの解析<sup>2)</sup>での試みと同じく、既加震による損傷の影響をより考慮できる解析の試み。
- ・今回の解析より大きな入力地震波に対しての建物への影響についての解析。
- ・建物と地盤の連成モデルによる相互作用についての解析。

これらの解析を行うことにより、建物の地震応答等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思う。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、平成22年度、(独)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)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【FS】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、また、地球シミュレータ操作、解析データ構築にあたり(株)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成田悠氏、渡邊祐介氏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) 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.
- 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.