

## (56) 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

Application of Impact Analysis Code based on Explicit Time Integration to Shaking Table Test for Three Story RC Frame

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

\*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, 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, 筆者らによる大規模建物の地震応答解析の提案が(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った. 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.

構造物の衝撃解析や地震応答解析を行う場合, 陰解法<sup>2),3)</sup>では精度の良い解が得られる一方, 逐次積分の各ステップで連立方程式を解く必要があり, 自由度の増加に伴い膨大な解析時間を要する傾向にある. また, 非線形解析においては解の収束のための反復計算に膨大な時間を必要とする場合もある. 一方, 陽解法は逐次積分の各ステップで連立方程式を解く必要がないため, 自由度が増加するほど計算時間において陰解法より有利となり, 大規模解析において威力を発揮する. 非線形解析においては解の収束のための反復計算を必要とせず解を求めることが可能であり, また, 要素間の破断や, 要素の消滅を容易に扱うことができ, 構造物の破壊や崩壊を扱う方法として適していると考えられる. しかし, 陽解法では計算時間刻みを十分細かくする必要があることや, 解の妥当性を検証することが必要となる.

そこで本報告では, RC3 層純ラーメン架構 1/4 縮尺モデルの振動台実験<sup>4),5),6)</sup>の解析を行い, 陽解法による RC 構造物の地震応答解析の妥当性を検証するとともに, 材料の構成則, 解析条件の検討や, 地球シミュレータの性

能評価等を行った.

## 2. 地球シミュレータ概要

地球シミュレータ(ES2)は複数の計算 node (NEC SX-9/E)をネットワークで接続することにより並列化し, 計算領域を分担することで大規模な計算を高速に処理することが可能なシステムである. 1node あたり 8 個の CPU から構成されており, メモリが 128GB, 20TB の記憶容量を持ち, 各 node 間は双方向 64GB/秒で通信可能となっている. システム全体は 160node から構成されており, このときのピーク性能は 131TFLOPS となる. 実際に解析実施に使用できる CPU 数には制限があるが, 同じインプットデータを使用して 1CPU のパソコンと 4node 並列 (4node × 8CPU/node = 32CPU)の地球シミュレータとで計算時間の比較をしたところ, パソコンでは約 100 時間かかる計算が地球シミュレータでは約 3 時間で完了することを確認済みである. このような性能向上は実施するプログラムのベクトル化率と並列化率および解析モデルに依存するが, 中でも LS-DYNA<sup>1)</sup>のベクトル化率は 97%を超えている.

計算の実行やデータの送受信は全てネットワーク経由で操作できるが, 前橋工科大学 - 地球シミュレータセンター間の入出力データの転送の場合, 1GB のデータで約 1 時間を要する. 筆者らが用いているデータ転送方法では, 最大同時転送数が 10 であるので, 約 10GB のデータを約 1 時間程度で送受信できることとなる. また, 計算の実行には他の利用者との兼ね合いで実行待ちのため長く 2 日程度かかる. これらの時間を無駄にしないために, インプットデータを事前に充分チェックする必要がある.

### 3. RC3層純ラーメン架構 1/4 縮尺モデルの振動台実験の概要

解析の対象とする実験は、中山ら<sup>4),5),6)</sup>によってなされた水平2方向に地震動を受けるRC3層立体架構の振動台実験である。試験体は1/4縮尺模型で図-1に示すような3層1×1スパンの立体架構で、スパン1,500mm×1,500mm、階高750mmであり、部材断面と部材配筋は各階同一である。試験体は2体作成されており、1体は1方向入力(x方向)、もう1体は2方向入力が行われている。表-1に部材の断面寸法と配筋、表-2に鉄筋の材料試験結果、表-3にコンクリートの材料試験結果を示す。なお、応力度の相似率=1.0を満たすために各階に19kNの鉛インゴットが設置されている。実験試験体の鉛インゴット、基礎部分重量を含めた総重量は134kNである。

入力地震波はEl Centro (1940) (ELと略)とJMA神戸(1995) (JMAと略)記録波形の時間軸を1/2に縮小して用いられており、1方向入力(x方向)ではELのNS成分の最大速度を原波換算で25, 50, 75cm/sに調節して入力した後にJMAのNS成分を原波レベルで入力している。2方向入力ではNS成分、EW成分を同時に入力し、NS成分、EW成分の最大加速度比率は原記録に合わせられている。

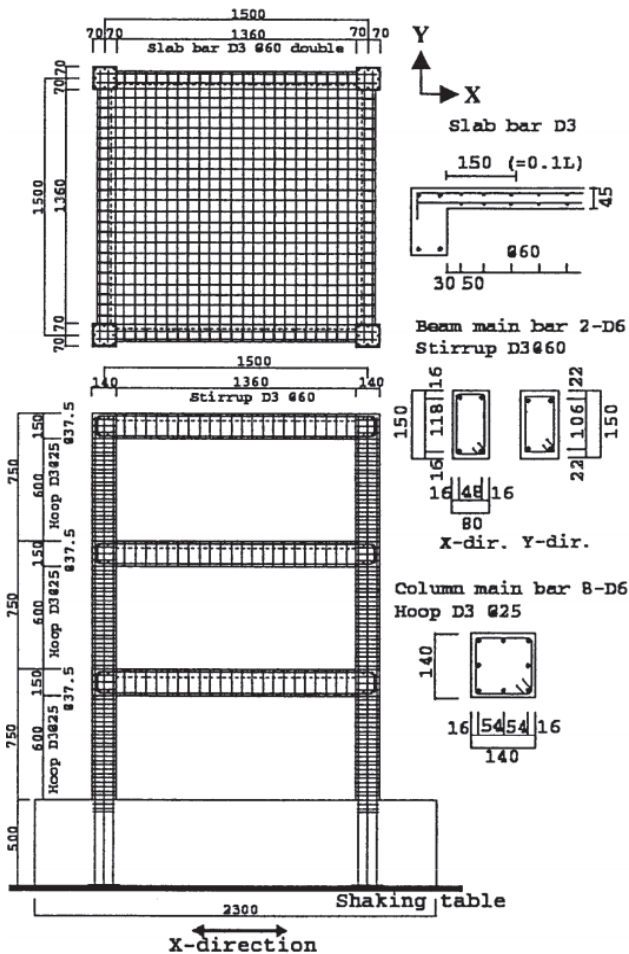


図-1 試験体概要<sup>6)</sup>

表-1 部材の断面寸法と配筋<sup>6)</sup>

部材	柱	梁	スラブ
寸法	140×140mm	80×150mm	t=45mm
配筋	主筋：8-D6 帯筋：D3@25 (接合部@37.5)	主筋：2-D6 (上下とも) 肋筋：D3@60	D3@60 ダブル

表-2 鉄筋の材料試験結果<sup>6)</sup>

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (×10 <sup>-6</sup> )
D6	412	564	212	1946
D3	363	388	236	1539

表-3 コンクリートの材料試験結果<sup>6)</sup>

試験体	層	材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1方向入力	3	64	29.0	2.7	23.4
	2	77	31.9	2.2	22.4
	1	93	36.2	2.4	23.8
2方向入力	3	49	31.1	2.2	22.8
	2	62	33.7	1.9	21.2
	1	78	34.0	2.6	21.7
平均			32.7	2.3	22.6

### 4. 解析概要

#### 4.1 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。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。モデル規模はコンクリートが39,276要素、鉄筋が25,636要素、剛体シェルが2,601要素で計67,513要素であり、総節点数は52,768節点である。材料モデルはLS-DYNA<sup>7)</sup>に実装されているモデルを使用する。図-3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、Ottoosenの破壊基準<sup>8)</sup>、スマートクラック等の特徴を持つ材料モデル<sup>9),10)</sup>を使用し、Ottoosenの破壊基準<sup>8)</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。

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

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

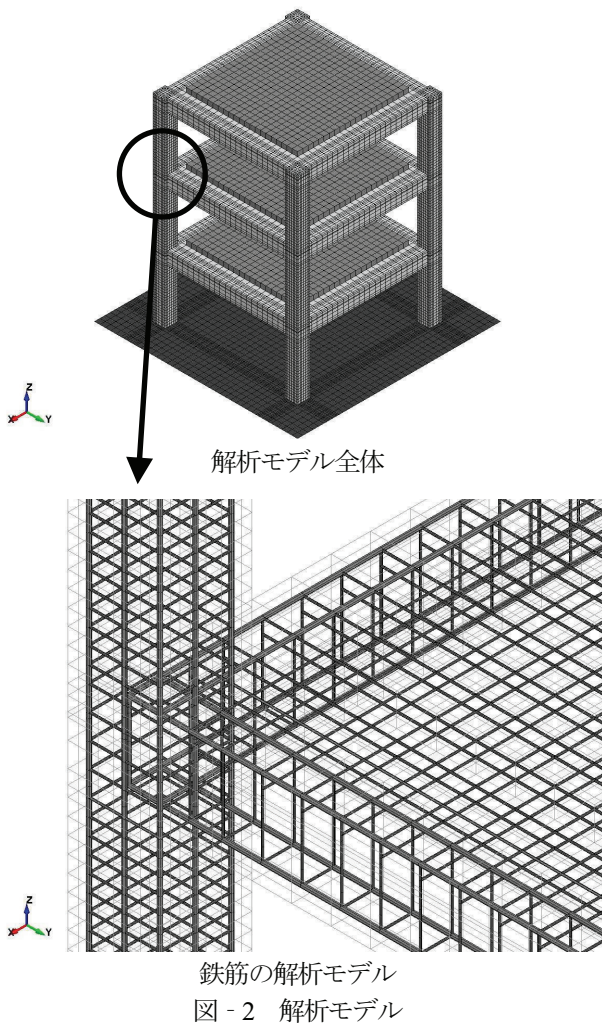


図-2 解析モデル

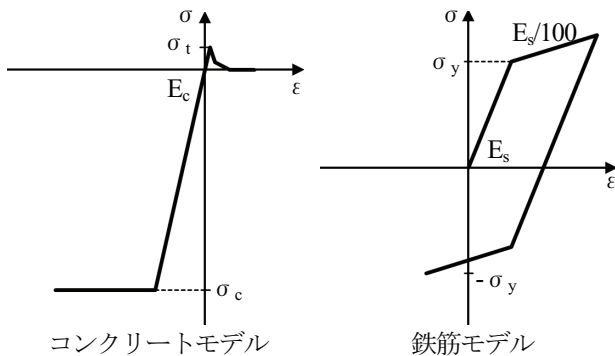


図-3 材料モデル応力 - 歪関係

$\sigma_c$ 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。解析に用いる材料の各パラメータは実験値を採用している。解析モデルの上部構造と鉛インゴットの総重量は72kNであり、基礎部分はモデル化していないが、基礎部

分重量 63.48kN( $2.3\text{m} \times 2.3\text{m} \times 0.5\text{m} \times 24\text{kN/m}^3$ )を加えると、135.5kNである。

#### 4. 2 解析条件

解析では実験の2方向入力を対象とし、地震波はEL75(NS成分最大速度75cm/s)とJMAとした。解析(a)は損傷のないフレッシュな状態の解析モデルにEL75とJMAを入力する地震履歴無しの場合、解析(b)は初期損傷を考慮する地震履歴有りの場合で、地震履歴としてEL75を入力後、5.0sの自由振動を行った後にEL75とJMAを入力した。地震波の継続時間はEL75が8.0s、JMAが5.0sとし、地震波は実験の振動台で計測された最大加速度に合わせて調節した。地震波入力の前に1.0sかけて重力加速度を緩やかに $0\text{m/s}^2$ から $9.8\text{m/s}^2$ まで増加させることで重力加速度を考慮することとした。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を使用し、計算刻みは $1.8\mu\text{s}$ ( $1.8 \times 10^{-6}\text{s}$ )、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は50Hzローパスフィルタ処理を行った。地球シミュレータの4node(4node $\times$ 8cpu/node=32cpu)を使用し計算を行った。

#### 5. 解析結果

図-4にEL75、図-5にJMAのx方向の層間変位 - 層せん断力関係の結果を示す。実験結果の図にはRC基準(1991年)のスラブ協力幅内 $0.1L$ ( $=150\text{mm}$ ,  $L$ :スパン長さ、 $L=1,500\text{mm}$ )のスラブ上端筋を考慮して計算した保有耐力が点線で、スラブ全幅のスラブ上下筋を考慮して計算した保有耐力が実線で示されている。解析での層せん断力は、スラブ重心位置に層の質量が集中すると考え、スラブ重心位置の応答加速度に層の質量を乗じて慣性力とし、各層の層せん断力は対象とする層から上の層の慣性力を累加して算定した。図-4のEL75の場合、初期損傷を考慮しない地震履歴無しの解析(a)では実験結果と比べて変形が小さく、小さめのループを描いていることが分かる。初期損傷を考慮した地震履歴有りの解析(b)では解析(a)と比べて変形がやや大きい結果となっている。解析(b)の1階の負側の最大層せん断力が実験結果と解析(a)に比べて小さい結果となっているが、これは1層の慣性力と上層の慣性力が位相差によりキャンセルしたことによるためである。図-5のJMAの場合、初期損傷を考慮しない地震履歴無しの解析(a)では実験結果と比べて小さい結果となり、初期損傷を考慮した地震履歴有りの解析(b)では実験結果と比べてやや小さめのループであるものの実験に近い結果となっている。

図-6にEL75、図-7にJMAのx方向2階層間変位の時刻歴結果を示す。図-7のJMAの実験結果には1方向入力の結果が細線で、2方向入力の結果が太線で示されており、また、図-7の実験結果の時刻0sは解析に合

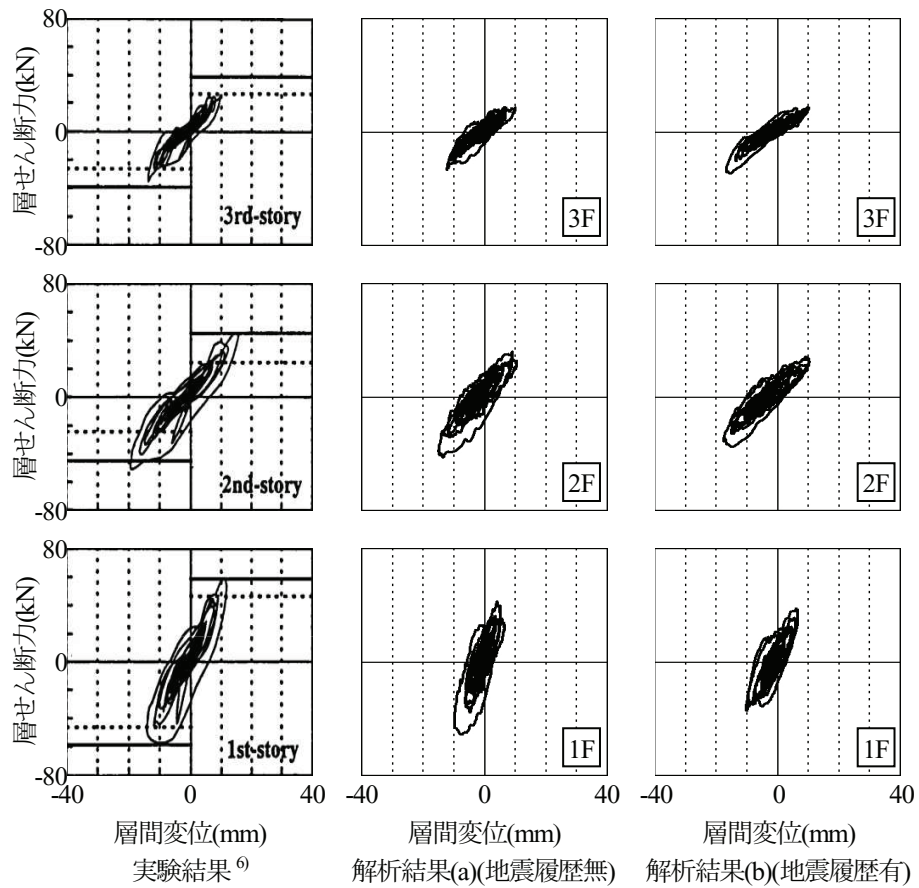


図 - 4 層間変位 - 層せん断力関係(x 方向, EL75)

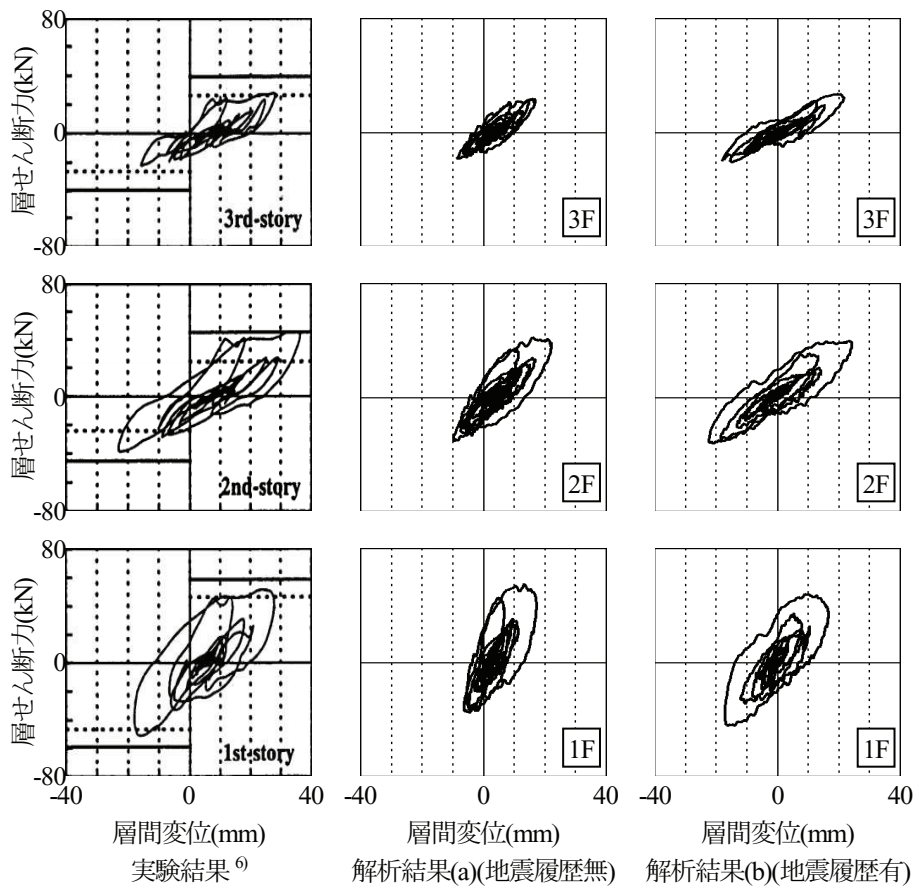


図 - 5 層間変位 - 層せん断力関係(x 方向, JMA)

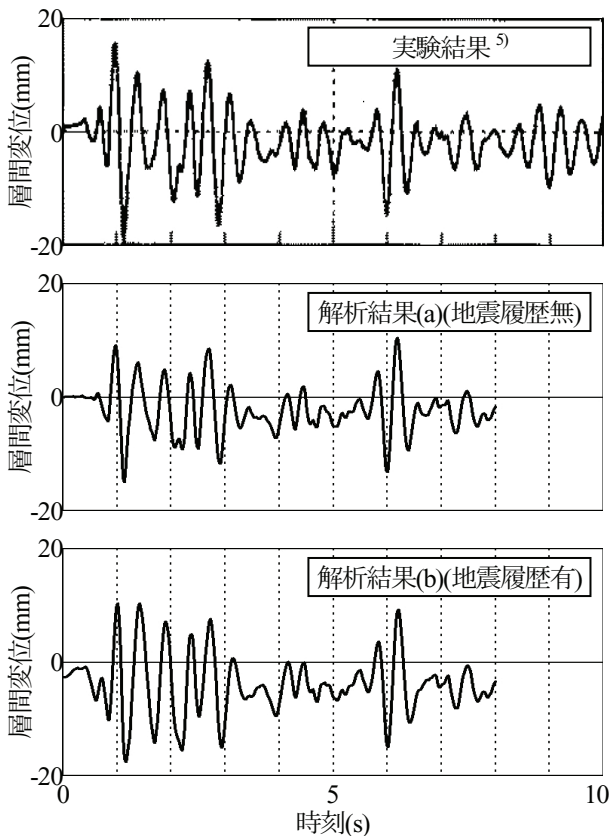


図 - 6 2階 x 方向層間変位(EL75)

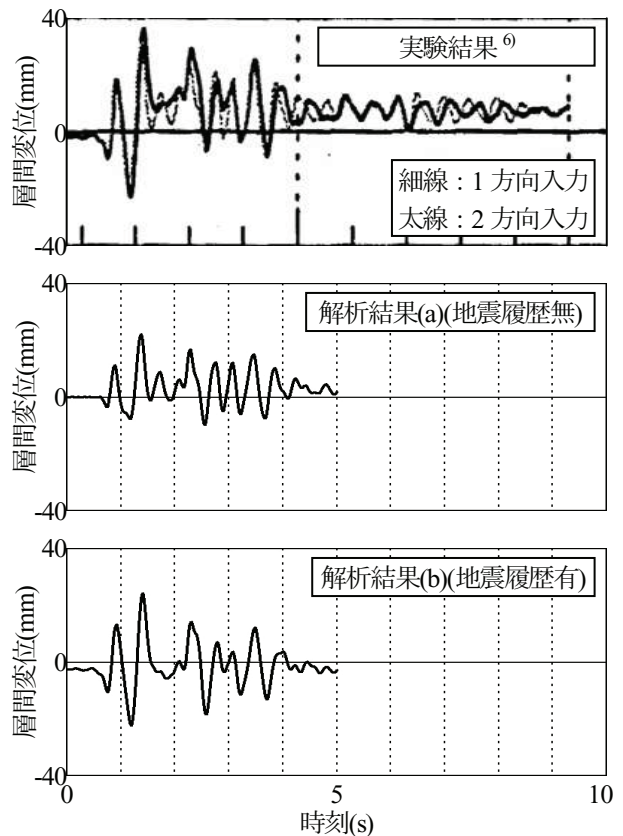


図 - 7 2階 x 方向層間変位(JMA)

わせて修正している。図 - 6 の EL75 の場合、解析(a)では 0s~3.0s 付近では実験結果と比べて変形が小さく、3.0s 以降では実験結果と良い対応を示していることが分かる。解析(b)では地震履歴による初期損傷を考慮したことにより 0s~3.0s 付近で変位振幅が解析(a)と比べて大きい結果となり、3.0s 以降では解析(a)とほぼ似た結果となった。図 - 7 の JMA の場合、EL75 の場合と同様に、解析(a)では実験結果と比べて変形が小さく、解析(b)では実験結果と比べて振幅がやや小さいものの、実験結果に近い応答波形となっている。EL75、JMA ともに初期損傷を考慮しない地震履歴無しの解析(a)では実験結果と比べてやや小さめの結果となっているが、層間変位の振動周期は実験結果と良い対応を示していることが分かる。初期損傷を考慮した地震履歴有りの解析(b)では層間変位の振幅が解析(a)と比べて実験と近い値となっていることが分かる。解析(b)では地震履歴として入力した EL75 の後の自由振動による釣合い位置が実験とやや異なっているため、実験結果と比べて負側に寄った結果となっている。解析結果は実験結果と比べて小さめの変形となっているが、これはコンクリートの構成則が破壊条件を満たすまで線形挙動を示す材料モデルであることやコンクリートと鉄筋の付着を完全付着としているため、解析モデルを実験と比べてやや硬めに評価していることによると考えられる。

次に、図 - 8 に EL75 終了時のクラック図を示す。クラ

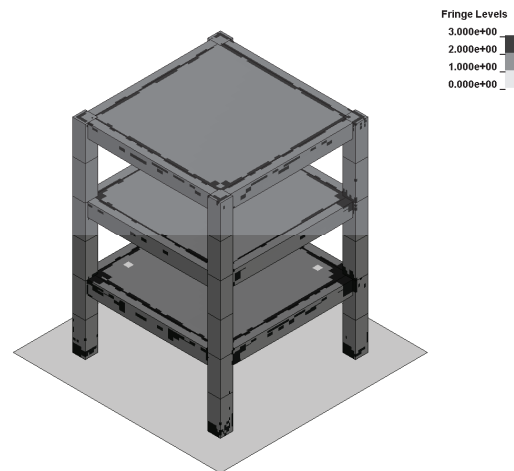


図 - 8 クラック図(2方向入力 EL75 終了時)

ックが発生したコンクリート要素が黒く表示されており、1 階柱脚、柱梁接合部、スラブ端部にクラックが発生していることが分かる。実験では 1 方向入力(x 方向)、2 方向入力とも EL75 入力後、すべての梁端部と 1 階柱脚にクラックが発生しており、2 方向入力では 2 階、3 階の梁端部と 1 階柱脚にコンクリートの剥離が発生している。解析ではクラック発生位置は概ね再現できているが、今回の解析条件ではコンクリートの剥離を表現することはできず、これについては今後の検討課題として挙げられる。

## 6. まとめ

本報告では地球シミュレ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、まず RC3 層純ラーメン架構 1/4 縮尺モデルの振動台実験<sup>4),5),6)</sup>の解析を行い、陽解法による RC 建造物の地震応答解析の妥当性を検証するとともに、材料の構成則、解析条件の検討や、地球シミュレータの性能評価等を行った。

地球シミュレータを使用し、汎用衝撃解析プログラム LS-DYNA<sup>1)</sup>による RC 建造物の地震応答解析の可能性が示され、また、破壊状況の表現について検討の必要があるものの、陽解法を使用し地震履歴による初期損傷も考慮した RC 建造物の振動台実験を再現できる可能性が示唆された。

今後は、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。

## 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) 遠藤久芳, 山田安平, 「2.3 衝突・座礁の CAE(第 2 章造船における CAE)」, 日本造船学会誌(876), pp.763-767, 2003 年 11 月.
- 3) 村田賢, 「大規模建造物の動的解析に関する留意点と数値積分法」, 第 9 回新「シェル・空間構造」セミナー設計への計算機の応用と解析上の留意点, pp.39-46, 2010 年 7 月.
- 4) 中山尚之, 五十嵐克哉, 「RC3 層立体架構の 2 方向振動台実験(その 1 実験結果の概要)」, 学術講演梗概集, B-2, 構造 II, 振動, 原子力プラント, pp.1103-1104, 1999 年 7 月.
- 5) 中山尚之, 「RC3 層立体架構の 2 方向振動台実験(その 2 シミュレーション解析)」, 学術講演梗概集, C-2, 構造 IV, 鉄筋コンクリート構造, プレストレストコンクリート構造, 壁構造・組積構造, pp.699-700, 2001 年 7 月.
- 6) Takashi NAKAYAMA, Katsuya IGARASHI, Hajime HAGIWARA, "BIDIRECTIONAL SHAKING TABLE TESTS OF A ONE-FOURTH SCALE REINFORCED CONCRETE SPACE FRAME", 12th World Conference on Earthquake Engineering, 645/6/A, (8), 2000.
- 7) Livermore Software Technology Corporation (LSTC), "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I, II".
- 8) Ottosen, N.S., "Failure and Elasticity of Concrete", RISO-M1801, July 1975.
- 9) 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).
- 10) 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.