

3.2.8 実大鉄筋コンクリート建物の3次元動的解析システムの開発

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 構造解析手法
 - 2) 1/3縮小2層耐震壁の動的破壊実験の解析検証
 - 3) 耐震壁を含む縮小立体フレーム構造の一方向加振実験の解析
 - 4) 実大鉄筋コンクリート建物の実験の予備解析
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成17年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 実大鉄筋コンクリート建物の3次元動的解析システムの開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター	特別研究員	陳 少華	sh_chen@bosai.go.jp

(c) 業務の目的

実大三次元鉄筋コンクリート建物の震動破壊実験の予備解析研究および実験破壊シミュレーションを行うため、三次元地震動による鉄筋コンクリートフレーム構造解析システムのフレームワークを作成し、建物の崩壊まで追跡できる柱、梁、耐震壁などの部材モデルを開発し、鉄筋コンクリートフレーム構造の三次元非線形動的解析システムを開発する。柱、梁部材モデルでは、軸力と曲げモーメントの相互作用を考慮し、耐震壁部材モデルは、2軸応力状態を考慮できるものとする。

(d) 5ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

解析システムのフレームワークを作成し、鉄筋コンクリートの平板の構成則に基づく耐震壁部材のモデルを組み込んだ。2層耐震壁の実験データにより、部材モデルの精度を検証した。当耐震壁モデルは、崩壊に至るまで追跡できることを確認した。

2) 平成15年度：

繰返し載荷による耐力の低下を表現できる柱、はり部材の解析モデルを開発した。片持ちはり部材の実験結果を用いて、提案した解析モデルを検証した。耐力や繰返し載荷による軸方向の伸び現象などを一定の精度で再現することができた。

3) 平成16年度：

耐震壁、柱、梁の部材モデルを用いて、3次元解析システムを完成し、耐震壁を含む立体フレーム構造の縮小モデルの振動破壊実験により、解析システムの解析精度を検証した。構造が崩壊するまで追跡できることが確認された。さらに、実大実験試験体の予備解析を行い、試験体のベースシアと変形角の関係を示した。

4) 平成17年度：

- a) 実大試験体の予備解析に関する研究を行う。
- b) 実大三次元震動台E-ディフェンスによる実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的破壊実験結果を用いて三次元動的解析システムの精度を検証する。

5) 平成18年度：

- a) 立体フレーム構造の3次元解析システムの可視化処理機能を開発する。
- b) 実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的破壊実験結果を用いて三次元動的解析システムの詳細的な精度検証を行う。

(e) 平成16年度業務目的

平成15年度までは、部材モデルの開発及び部材の静的繰り返し載荷実験による解析の検証を行った。平成16年度は、三次元動的解析システムの開発を完成し、1/3縮小2層耐震壁の動的破壊実験、耐震壁を含む縮小立体フレーム構造の破壊実験の結果を用いて、三次元動的解析システムの解析検証を行い、実大鉄筋コンクリート建物実験の予備解析に関する研究を行う。

(2) 平成16年度の成果

(a) 業務の要約

鉄筋コンクリート建物の地震応答解析において、構造が崩壊するまでの破壊過程を予測または再現することが困難とされている。さらに、袖壁、腰壁、開口壁などが含まれる構造については、部材のモデル化も容易ではない。平成16年度の研究では、これまでに開発した柱、梁及び耐震壁の部材モデルを用いて、直接積分法による耐震壁を含む立体フレーム構造の三次元動的解析システムを開発した。

本研究では、フレーム要素^{1), 2)}と平面パネル要素³⁾を用いて、鉄筋コンクリートフレーム構造の部材（柱、梁、耐震壁、袖壁、腰壁、開口壁、床など）をモデル化し、1/3縮小2層耐震壁の動的破壊実験と耐震壁を含む縮小立体フレーム構造の破壊実験の結果を用いて、三次元動的解析システムの解析検証を行った。当解析システムは、構造の崩壊まで追跡することができた。さらに、平成17年度に実施される鉄筋コンクリート建物の実大実験の予備解析を試みた。

(b) 業務の成果

1) 構造解析手法

本研究では、直接積分法（Newmark β 法と Wilson θ 法）を用いる。節点の自由度は、三次元6自由度とし、各自由度に対して非拘束自由度（完全自由）、固定自由度（変位が0）、変位拘束自由度（非拘束自由度の変位に従属する）、無効自由度（考慮しない）の4種類の拘束条件が設定できる。直接積分法は、地震応答解析で最も使われている手法であり、説明を省略するが、当解析研究における減衰定数の設定を次に述べる。

当解析システムでは、Rayleigh型減衰を用いる。つまり、減衰マトリックスを質量マトリックスと剛性マトリックスの一次結合とする（式（1））。

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (1)$$

この場合、振動モード減衰定数 h は、次の式で表される。

$$h^{(j)} = \frac{1}{2} \left(\frac{a_0}{\omega^{(j)}} + a_1 \omega^{(j)} \right) \quad (2)$$

一般的には、鉄筋コンクリート建物の減衰は、5%程度とされている。本研究では、減衰係数 $a_0=0.005$ 、 $a_1=0.002$ を用いる場合、精度の良い解析結果が得られた。鉄筋コンクリートの固有周期または周波数は、建物の高さより概算できるため、 $a_0=0.005$ 、 $a_1=0.002$ とする場合、減衰定数と建物の高さの関係を考察してみる。

鉄筋コンクリートの1次モード周期を建物の高さの1/30または1/50とする場合、1次モードの減衰定数と建物の高さの関係を図1に示す。低い建物では、1次モードが主要であり、高い建物では、高次モードの影響が大きくなる。減衰係数 $a_0=0.005$ 、 $a_1=0.002$ を用いる場合、地震波の周波数特性は、一般的に数Hzの調和振動成分が主要であり、建物の地震応答解析では、減衰定数 h が数%の範囲にあると推測される。

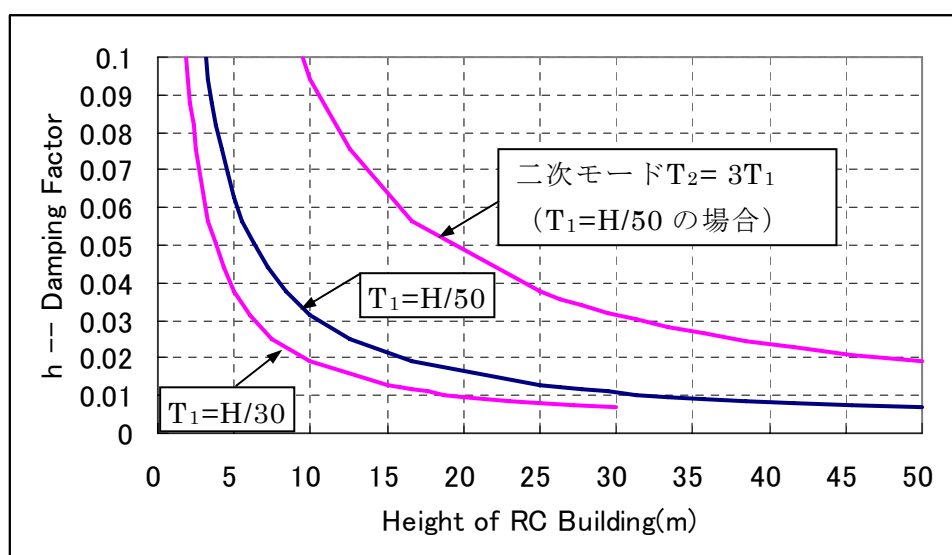


図1 建物高さと減衰定数の関係

2) 1/3縮小2層耐震壁の動的破壊実験の解析検証

a) 実験概要

当実験の試験体⁴⁾は、6層建物の連層耐震壁の下層2層に相当する構造である。解析の入力地震波(表1)は、試験体の基礎上面で計測した加速度データを用いた。

表1 入力地震波リスト

目標最大 入力速度 (kine)	地震波	原波形対 する倍率	原波形 最大加速度 (gal)	原波形 最大速度 (kine)	試験体入力 最大加速度 (gal)	試験体入力 最大速度 (kine)
25	TOH	0.6	258.2	40.9	154.9	14.4
37	ELC	1.1	341.7	34.8	375.9	21.4
50	JMA	0.6	820.6	85.4	492.4	28.9

75	JMA	0.9	820.6	85.4	738.5	43.3
60	CHI	0.9	884.4	70.6	796.0	34.6
100	JMA	1.2	820.6	85.4	984.7	57.7

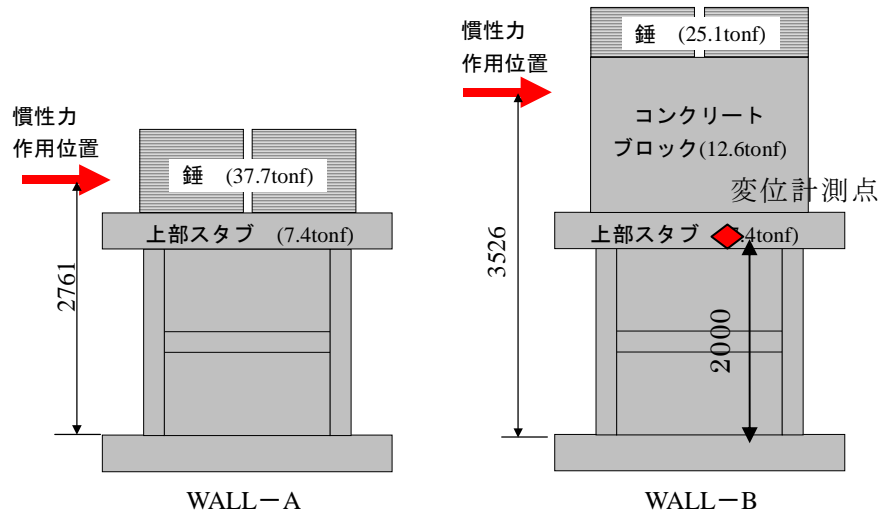


図 2 試験体の略図

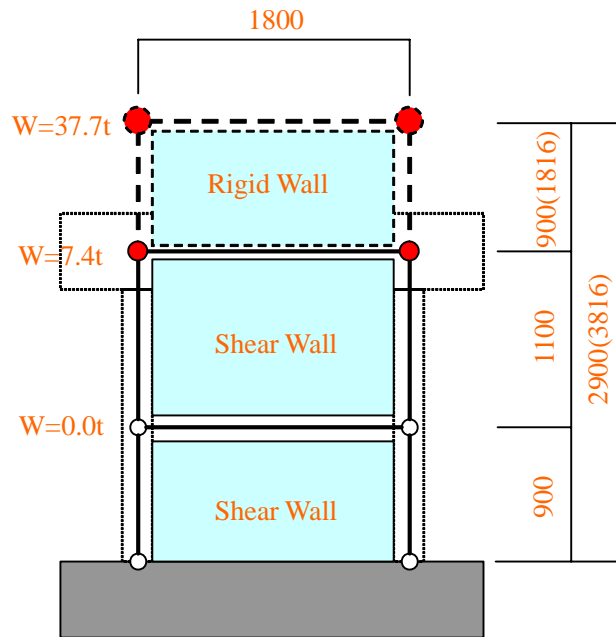


図 3 試験体の解析モデル

b) 解析結果と実験結果の比較

解析は、表 1の地震波を連続入力して行った。試験体WALL_Aと試験体WALL_Bの解析結果と実験結果の比較を図 4と図 5に示す。入力地震波の順でそれぞれの入力波に対応するせん断力と上部スタブの水平変位の関係を表している。試験体の剛性や耐力について、試験体WALL_A、WALL_Bとも各加振で精度の良い解析結果が得られた。

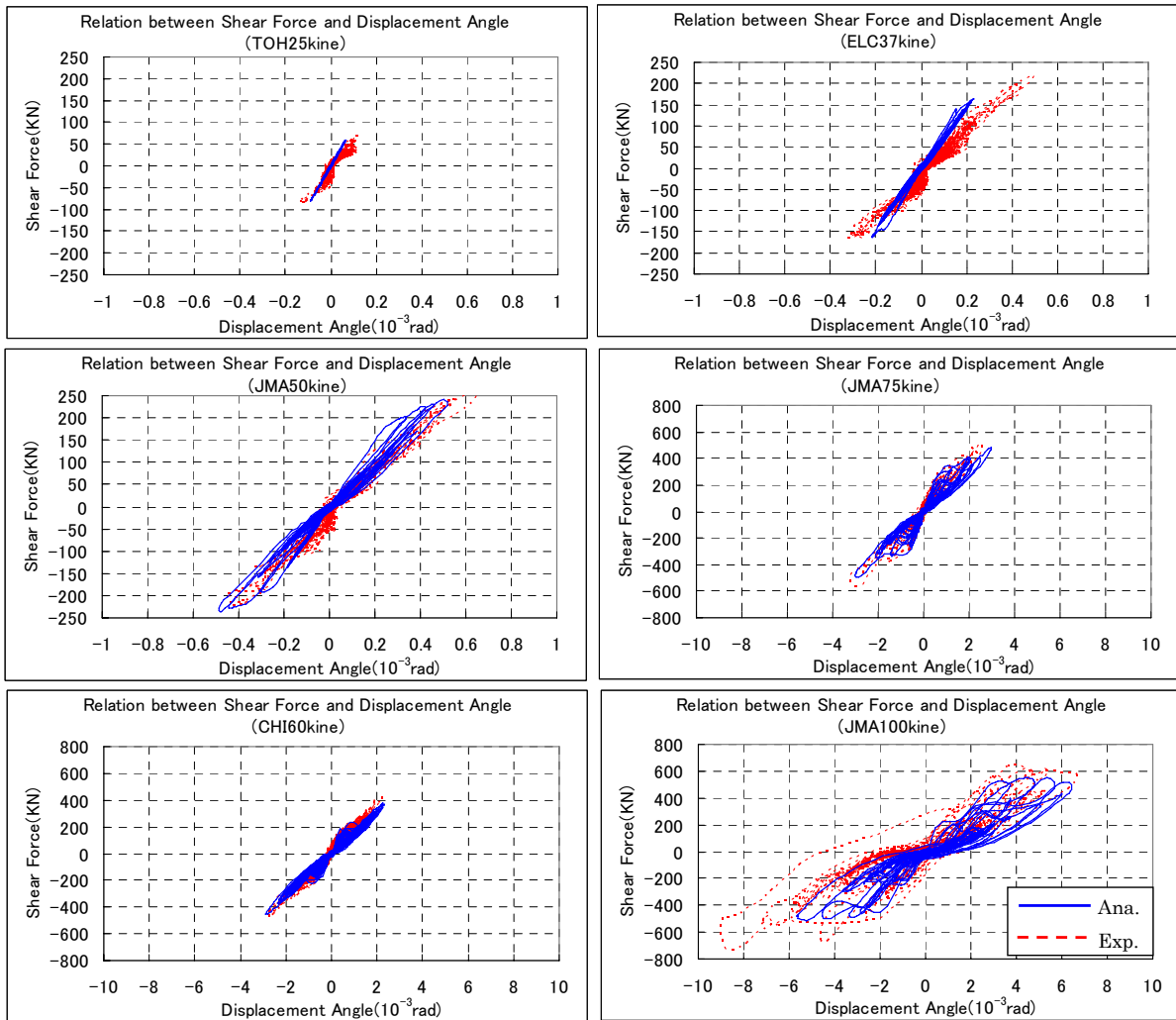
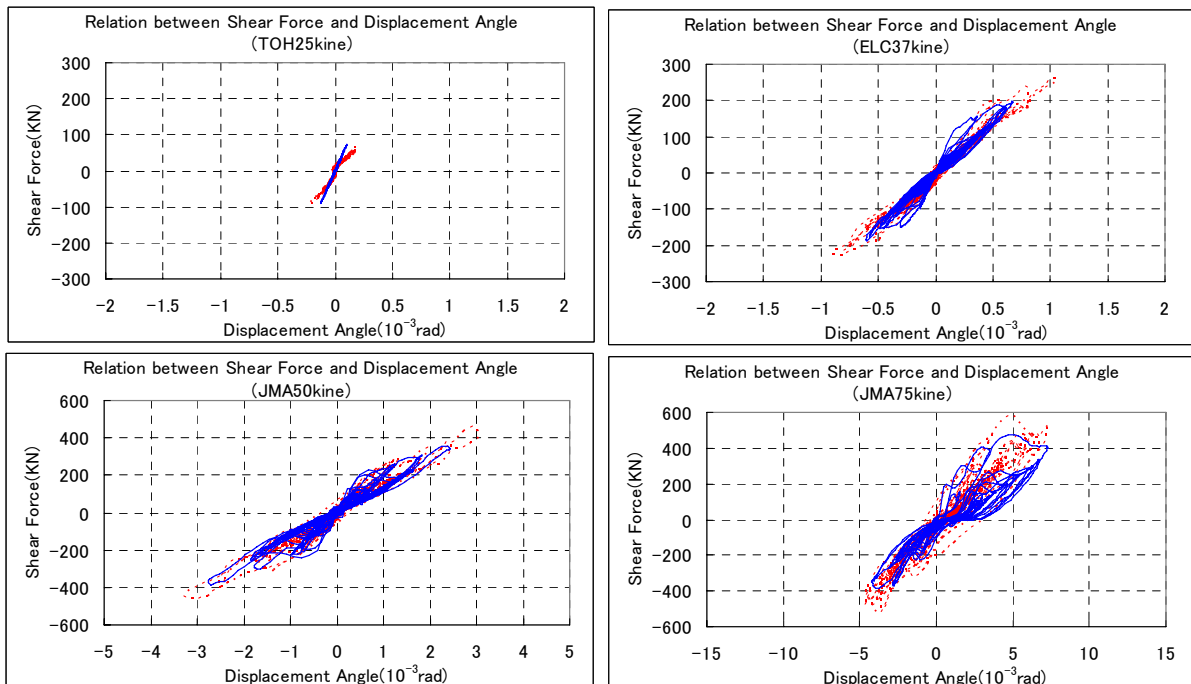


図 4 試験体 WALL_A の解析結果と実験結果の比較



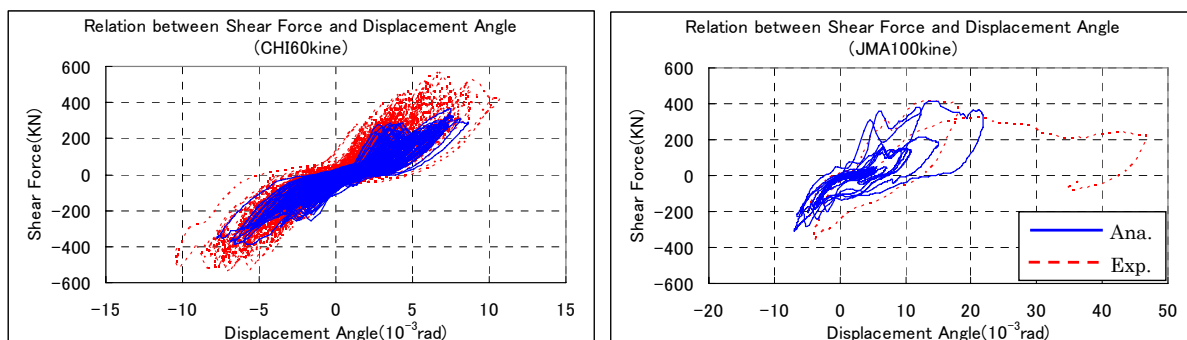


図 5 試験体 WALL_B の解析結果と実験結果の比較

3) 耐震壁を含む縮小立体フレーム構造の一方向加振実験の解析

a) 実験概要

平成 16 年度に実施された 6 層鉄筋コンクリート建物の 1/3 縮小モデルの一方向加振実験（本報告の 3.2.1 章を参照）の解析を行った。実験の加振履歴は、表 2 に示す。解析では、振動台から計測した加振方向の加速度データを入力地震波として、El Centro NS 50kine を 15 秒間連続 2 回、JMA Kobe NS 85kine を 10 秒間入力した。なお、実験より測定された試験体の初期周波数は、1 次モードで 5Hz、二次モードで 19.2Hz であり、JMA Kobe NS 85kine 加振前は、1 次モードで 3.4Hz、二次モードで 14.9Hz であった。本研究で提案した減衰係数により、1 次モードの減衰定数は 2.1-3.1%、二次モードの減衰定数は 9.4-12.1% になる。

表 2 実験の加震履歴（振動台の計測値）

目標最大 加速度 (gal)	地震波	計測 最大加速度 (gal)	計測 最大速度 (kine)	実時間換算 最大速度 (kine)
240	El Centro NS 25kine 1 回目	239(247)	15.3	26.5
240	El Centro NS 25kine 2 回目	254(568)	15.7	27.2
480	El Centro NS 50kine 1 回目	439(556)	27.5	47.7
480	El Centro NS 50kine 2 回目	391(489)	26.1	45.2
810	JMA Kobe NS 85kine	991(1021)	51.7	89.6
640	El Centro NS 67kine	563(559)	35.8	62.0
810	模擬地震波 140kine	895(906)	81.4	140.1

* : () 内の数値は、基礎スタブ上で計測された最大加速度である。

b) 解析結果と実験結果の比較

解析結果と実験結果の比較を図 6、図 7 と図 8 に示す。最初の El Centro NS 25kine の 2 回の加振を行っていないため、解析の剛性が実験より高い。また、解析の入力加速度は、振動台の加速度データを用いたため、変位の応答も実験値より小さくなっているが、ベースシア値（耐力）は良い精度で再現されている。

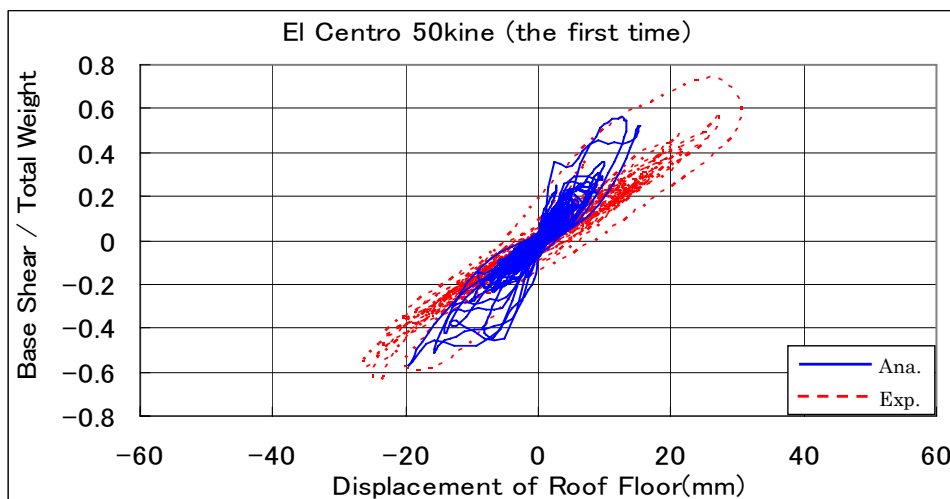


図 6 El Centro NS 50kine 1 回目の最上階変形とベースシアの関係

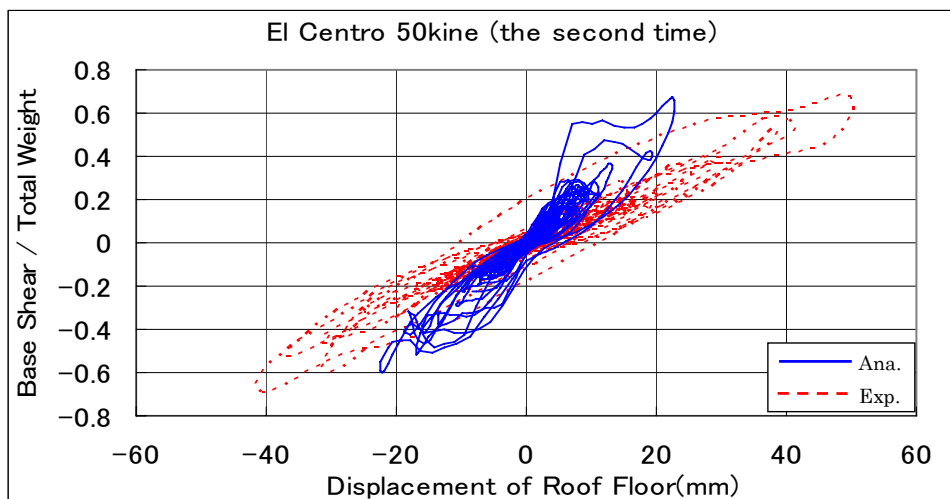


図 7 El Centro NS 50kine 2 回目の最上階変形とベースシアの関係

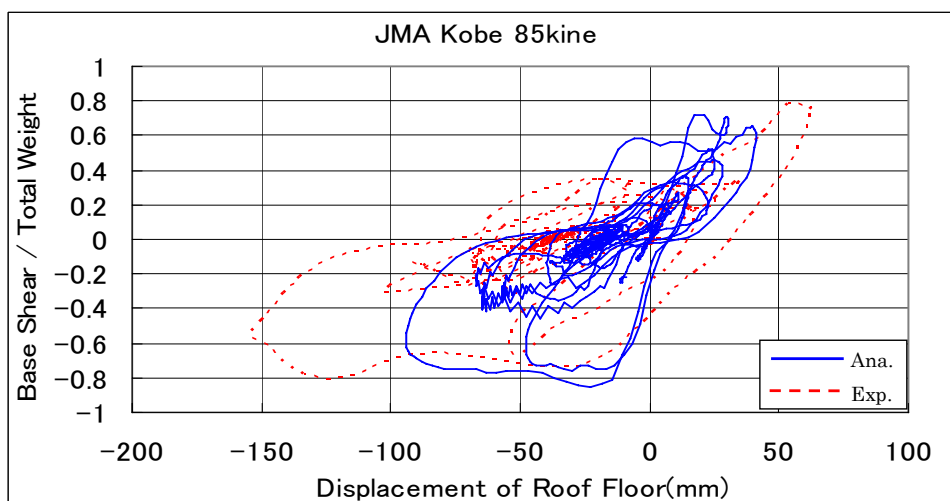


図 8 JMA Kobe NS 85kine の最上階変形とベースシアの関係

4) 実大鉄筋コンクリート建物の実験の予備解析

a) 試験体概要

実大鉄筋コンクリート建物の実験の設計計画は、3.2.10章を参照する。試験体の設計図及び節点の設置は、図 10、図 11と図 12に示す。材料の強度は、上限強度解析として設計強度との関係を表 3に示す。試験体の重量は、表 4に示す。

表 3 材料強度 (MPa)

材料	設計基準強度	上限強度解析用強度
コンクリート	18	$18 \times 1.3 = 23$
SD295	300	$300 \times 1.3 = 390$
SD345	350	$350 \times 1.25 = 430$

表 4 試験体重量 (tonf)

	自重	附加マス	合計	床単位荷重(150 m ² 計算)
R 階	96.2	30	126.2	0.84
2~6 各階	116.2	10	126.2	0.84
基礎	121.5	—	121.5	—
総質量	798.7	80	878.7	—

入力地震波は、Y軸を主加振軸とし、JMA Kobe波の-45° 方向とした。入力地震波のオービットは、図 9に示す。解析は、JMA Kobe波の3成分の0.8倍と1.0倍を連続入力した。

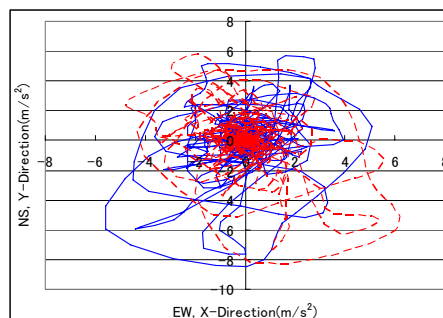


図 9 入力地震波オービット

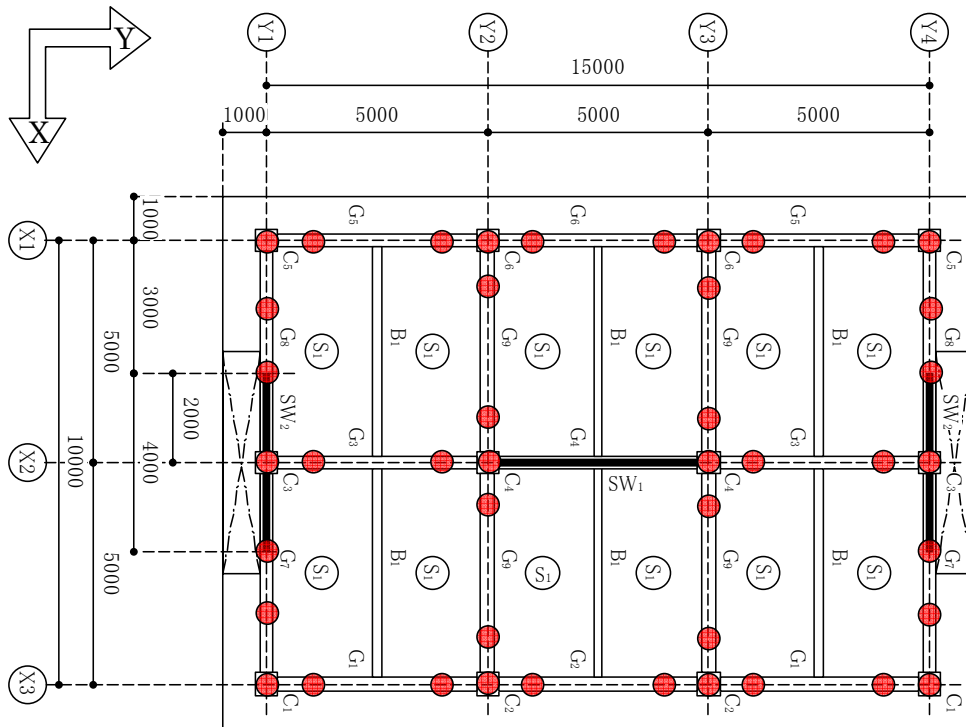


図 10 平面上の節点設定

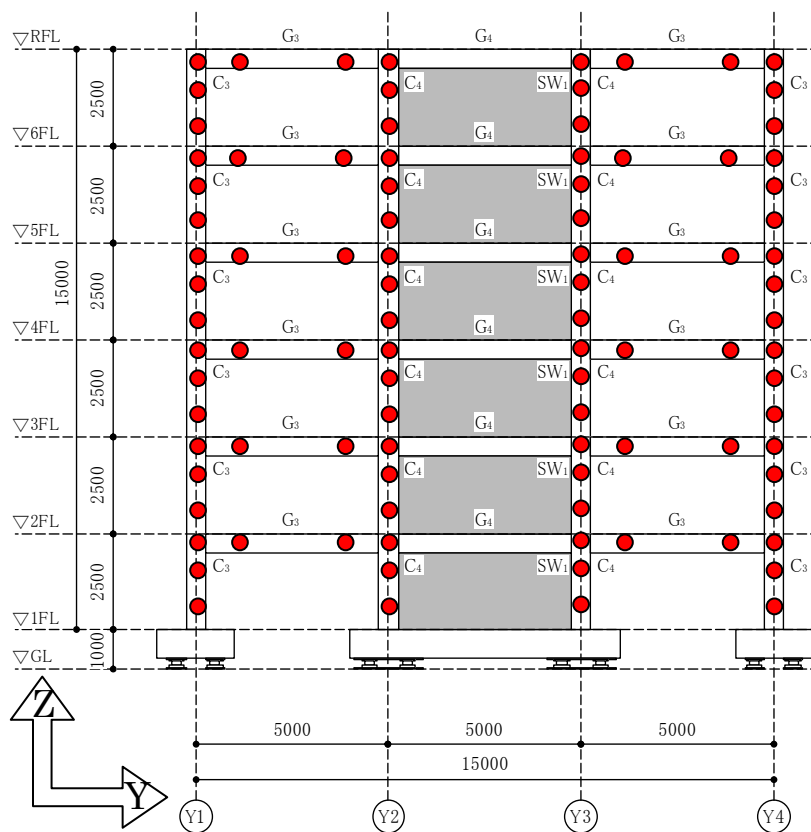


図 11 長辺方向 (Y 方向) の節点設定

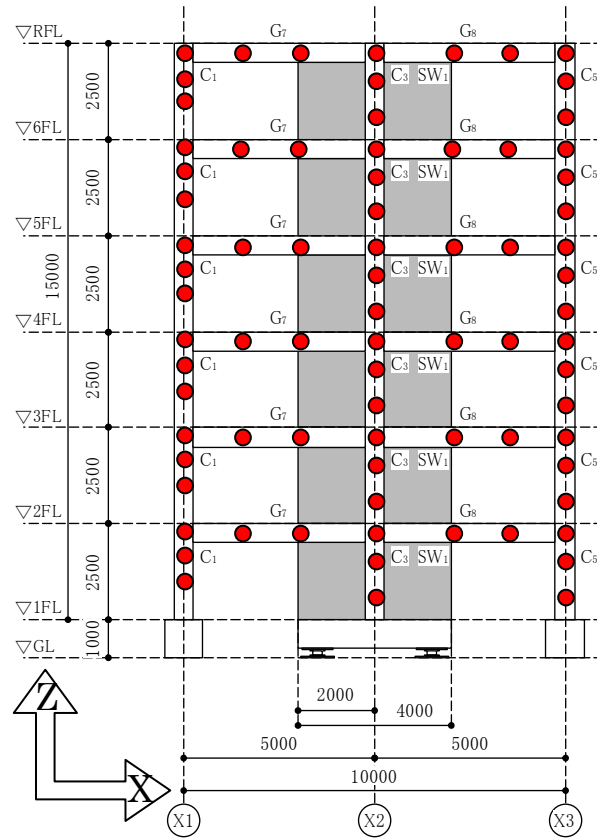


図 12 短辺方向 (X 方向) の節点設定

b) 解析結果

解析の結果は、最上階及び1階の変形角とベースシアの関係を用いて、X方向とY方向をそれぞれ図 13、図 14と図 15、図 16に示す。主加振方向のY方向の最大ベースシア係数は、0.8程度であり、X方向の最大ベースシア係数は0.6程度である。Y方向の最上階の最大変形角は、JMA Kobe波の0.8倍の加振では1/100程度となり、1.0倍の加振では1/40程度に達する。Y方向の1階の最大変形角は、2回の加振でそれぞれ1/80と1/20程度となり、耐力はおおよそ最大値の0.5倍まで低下する。

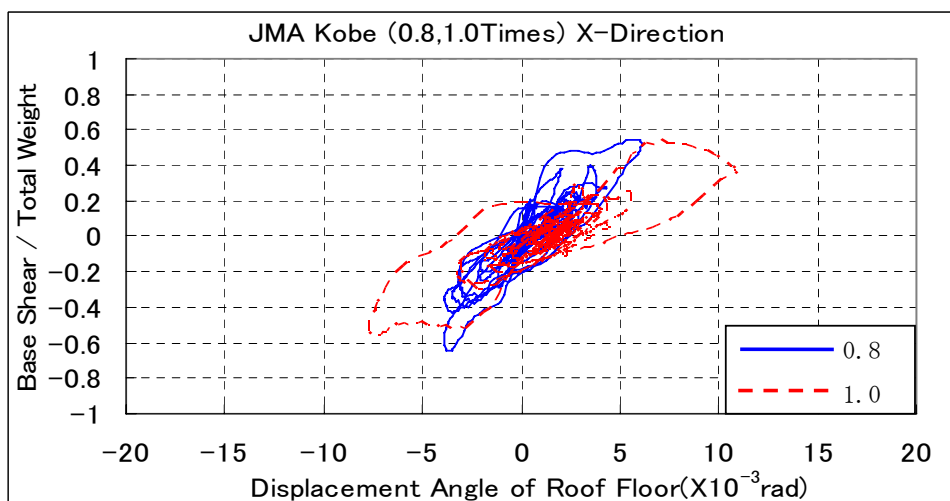


図 13 最上階の変形角とベースシアの関係 (X 方向)

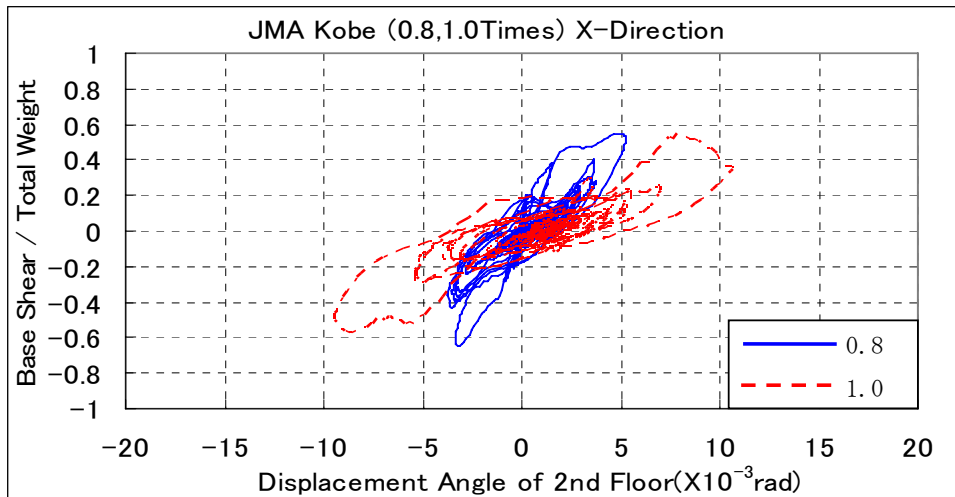


図 14 1 階の変形角とベースシアの関係 (X 方向)

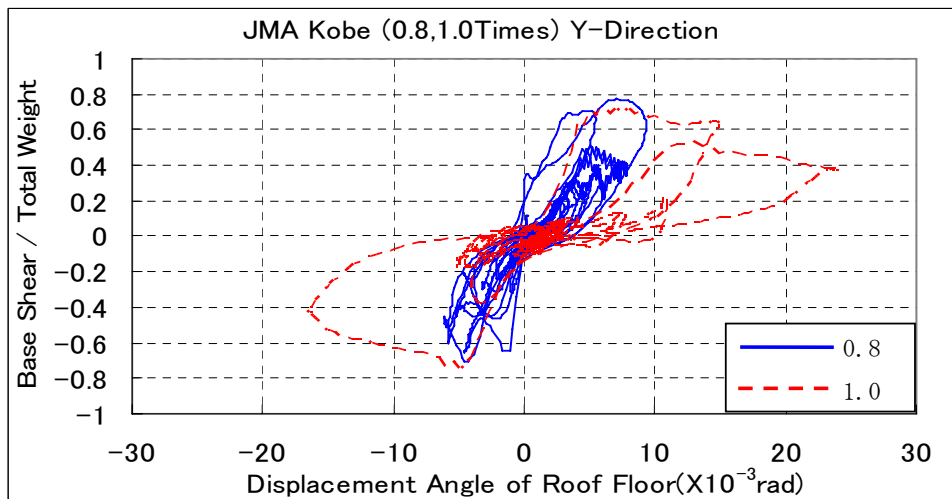


図 15 最上階の変形角とベースシアの関係 (Y 方向)

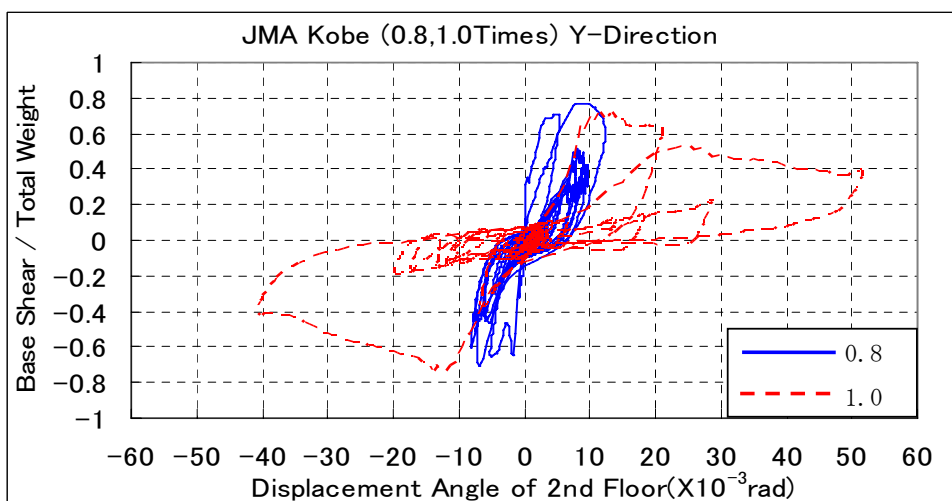


図 16 1 階の変形角とベースシアの関係 (Y 方向)

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究を次のようにまとめられる。

- 1) 縮小試験体の実験を用いて、三次元動的解析システムの解析検証を行った。
- 2) 当解析システムが構造崩壊まで再現することが可能である。
- 3) 鉄筋コンクリート建物の実大実験の予備解析を試みた。
- 4) 材料の強度、試験体質量、入力地震波などをパラメーターとして、鉄筋コンクリート建物の実大実験の予備解析を更に詳細に展開したい。
- 5) 三次元動的解析システムの可視化などにより使いやすさを改善したい。

(d) 引用文献

- 1) 陳 少華、壁谷澤 寿海：曲げ変形のみを考慮する RC 柱梁部材のマクロ FEM モデルの開発、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 26、2004 年 7 月
- 2) Shaohua CHEN and Toshimi KABEYASAWA: AVERAGE STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF STEEL BARS EMBEDDED IN CONCRETE, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 1-6 August, 2004. (Paper Number: 3290)
- 3) 陳 少華、壁谷澤 寿海：鉄筋コンクリート建物の構造解析における耐震壁のモデル、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 22、2000 年
- 4) 松井 智哉、壁谷澤 寿海、加藤 敦、梶原 浩一、倉本 洋、長島一郎：鉄筋コンクリート造耐震壁の動的実験、Vol. 49B、pp. 459-464、2003 年 4 月

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
陳 少華 壁谷澤 寿海	曲げ変形のみを考慮する RC 柱梁部材のマクロ FEM モデルの開発	コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 26	2004 年 7 月
Shaohua CHEN Toshimi KABEYASAWA	AVERAGE STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF STEEL BARS EMBEDDED IN CONCRETE	13 th World Conference on Earthquake Engineering	1-6 August, 2004

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
耐震壁を含む立体フレーム構造の三次元解析システム	① 静的荷重による初期解析(節点荷重) ② 静的非線形増分解析(変位増分、荷重増分) ③ 三次元地震動入力による動的非線形応答解析

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成17年度業務計画案

実大鉄筋コンクリート建物の3次元動的解析システムの開発は、平成16年度でほぼ完成した。平成17年度の作業としては、次のように計画する。

実大試験体の予備解析に関する研究を行う。材料の強度、試験体質量、入力地震波などをパラメーターとして、試験体がひび割れ、降伏し、崩壊するまでの破壊過程を予測する。また、部材のひび割れ、降伏及び圧縮破壊に対応する加振レベルを予測する。なお、材料強度については、上限強度（設計基準強度の1.25-1.3倍）を用いる上限強度解析とそれより低い強度（設計基準強度の1.1-1.2倍）を用いる予測強度解析の2通りを行う。

また、実大三次元震動台E-ディフェンスによる実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的破壊実験結果を用いて三次元動的解析システムの詳細的な精度を検証する。実験から計測された振動台または基礎の加速度データを用いて、三次元動的解析システムより構造、部材の破壊過程を再現し、解析システムの有効性と解析精度を検証する。

他には、立体フレーム構造の3次元解析システムの使いやすさを改善するため、システムの前処理と後処理などの可視化を検討する。