

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

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 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 18 年度業務目的

(2) 平成 18 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 実大 6 層鉄筋コンクリート建物震動破壊実験の検証解析
 - 2) 実大 3 層鉄筋コンクリート建物震動実験の予備解析
 - 3) MS モデルを用いたシミュレーション解析
 - 4) 高速度カメラ映像の動態解析
- (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

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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

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

(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	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 ヶ年の年次実施計画（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、三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った。

5) 平成18年度：

a) 立体フレーム構造の三次元解析システムの後処理として、解析結果の動画作成機能を開発する。

- b) 実大 6 層鉄筋コンクリート建物震動実験結果を用いて、三次元的解析システムの詳細な精度検証を行う。
- c) 実大 3 層鉄筋コンクリート建物震動実験の予備解析を行う。
- d) マルチスプリングモデルを用いたシミュレーション解析を実施し、解析モデルの適用性を検証する。
- e) 柱の破壊状況の把握・解明のために高速度カメラによる映像の動態解析を行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

鉄筋コンクリート建物の三次元的解析システムを開発し、震動実験結果と比較することにより、解析精度の高い数値シミュレーションシステムを構築することを目的とする。平成 18 年度は、平成 17 年度までに開発した三次元的解析システムに関して、平成 17 年度に E-Defense で行われた実大 6 層鉄筋コンクリート建物震動実験結果を用いて精度の検証を行うとともに、平成 18 年度に行われる予定の実大 3 層鉄筋コンクリート建物震動実験の無補強試験体の予備解析を行う。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 17 年度に E-Defense で実施された実大 6 層鉄筋コンクリート建物震動実験の検証解析を行った。また、平成 18 年度に行われた実大 3 層鉄筋コンクリート建物震動実験の無補強試験体に関する予備解析を行った。

平成 17 年度に行われた実大 6 層鉄筋コンクリート建物震動実験の検証解析では、実験で記録された実際の入力地震動 6 成分(並進 3 成分、回転 3 成分)を用いて解析を行った。解析では、1 階層間変形角 2.0% 程度で Y 方向 1 層せん断力が顕著に低下し、1 層の層崩壊が発生したが、実験では変形角 4.0% 程度まで Y 方向 1 層水平耐力を保持していた。実験では耐震壁の脚部の損傷が上部に比べて激しく、1 パネル要素のみで耐震壁をモデル化した解析の変形は実験と比べて小さかった。上下 2 個のパネル要素を用いて耐震壁をモデル化することによって、1 パネル要素のみと比べてせん断変形が増大し、実験結果により近い解析結果が得られることが分かった。

平成 18 年度に行われた実大 3 層鉄筋コンクリート建物震動実験の無補強試験体の予備解析は、基礎固定条件、周辺埋め戻し土のヤング係数をパラメータとし、基礎のスウェイ変位、試験体の応答挙動を予測した。基礎のスウェイ変位による建物への入力地震動の低減効果が解析で確認された。

また、別業務として、マルチスプリングモデルを用いたシミュレーション解析を実施し、解析モデルの適用性を検証し、柱の破壊状況の把握・解明のために高速度カメラによる映像の動態解析を行った。

(b) 業務の成果

1) 実大6層鉄筋コンクリート建物震動実験の検証解析

a) 試験体概要

試験体は、2×3スパン6階建て、各層の重量は125tonf、上部構造の総重量は750tonfである。試験体は、耐震壁、袖壁、腰壁と短柱が混在する。平面図を図1に示す。

柱は、断面寸法が50×50cmであり、配筋は8-D19である。梁は、断面寸法が幅30×高50cmである。配筋を表1に示す。耐震壁と袖壁は、壁厚が15cm、配筋はD10@300のダブル配筋である。腰壁は、壁厚が12cm、配筋はD10@200のシングル配筋である。袖壁の端部には間柱を設け、その断面寸法は20×20cm、配筋は4-D19である。

表1 梁の配筋

		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
5階～ 屋上	上部	2D19	2D19	3D19	3D19	2D19	2D19	2D19	2D19
	下部	2D19							
2階～ 4階	上部	3D19							
	下部	2D19							

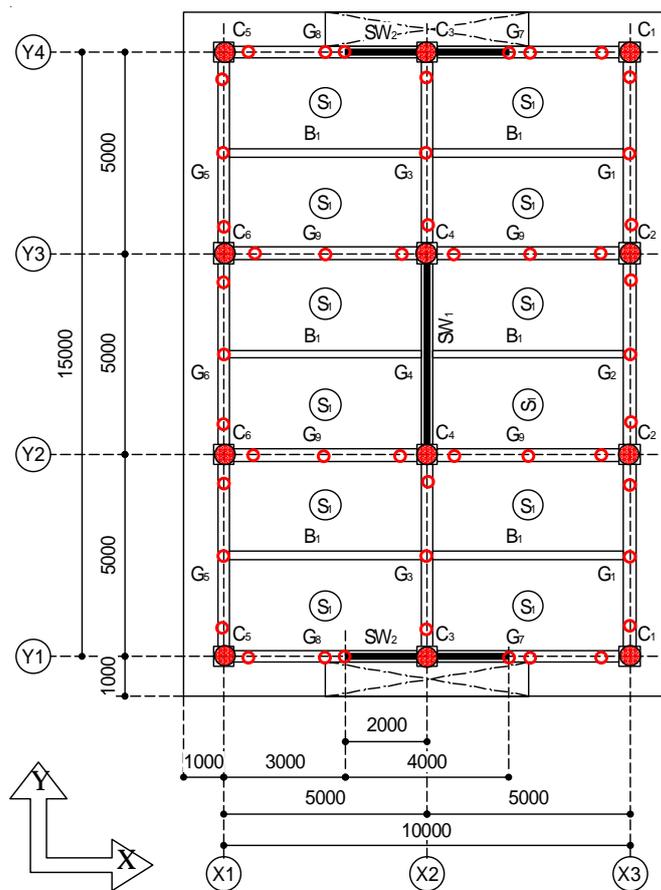


図1 試験体平面図

b) 解析モデル及び解析条件

部材モデルについては、柱と梁は曲げ変形のみを考慮したフレーム要素^{1)、2)}を採用し、各部材をそれぞれ4個のフレーム要素に分割した。耐震壁、袖壁及び腰壁には4節点パネル要素³⁾を用いた。試験体全体の解析モデルと節点配置を図2に示す。耐震壁は、1階の耐震壁を1個のパネル要素とした場合と2個のパネル要素とした場合の2ケースとし、その他の階は各1個のパネル要素にモデル化した。

材料試験により、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であり、鉄筋の降伏強度は、D19は398MPa、D10は369MPaである。

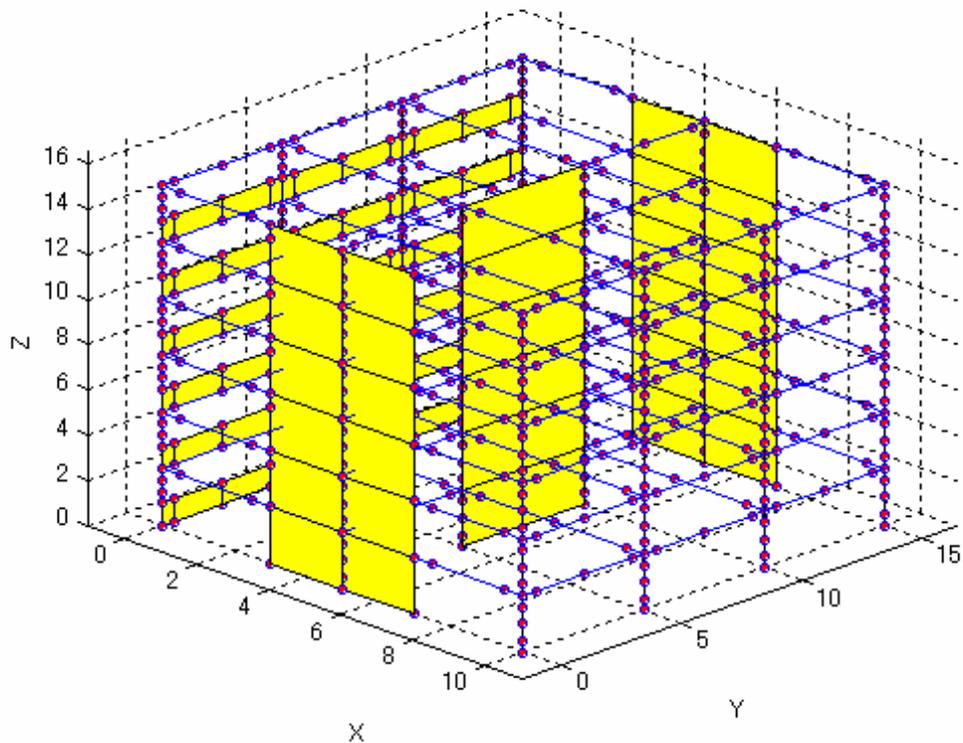


図2 解析モデル

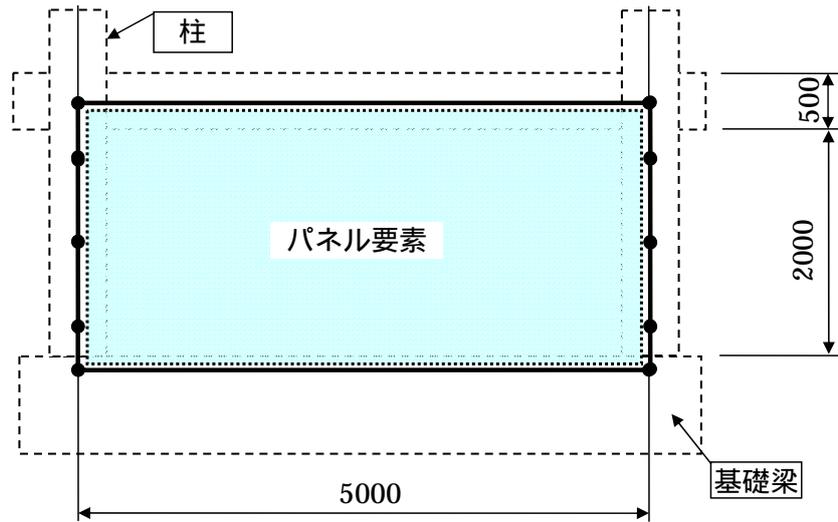


図 3 1階の耐震壁を1個のパネル要素にモデル化

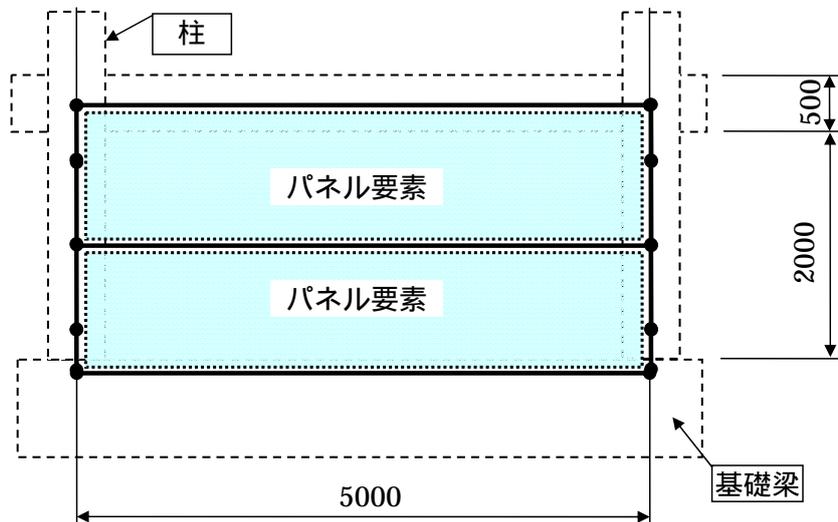


図 4 1階の耐震壁を2個のパネル要素にモデル化

検証解析における入力波は、JMA Kobe 波 25%、50%と 100%の加振実験時に計測された震動台加速度の3次元6自由度（並進3成分と回転3成分）とした。入力地震波はそれぞれ主要な 24 秒間とし、3波連続で動的非線形解析を行った。100%加振時の震動台の加速度の並進3成分と回転3成分の記録を図 5～図 10 に示す。

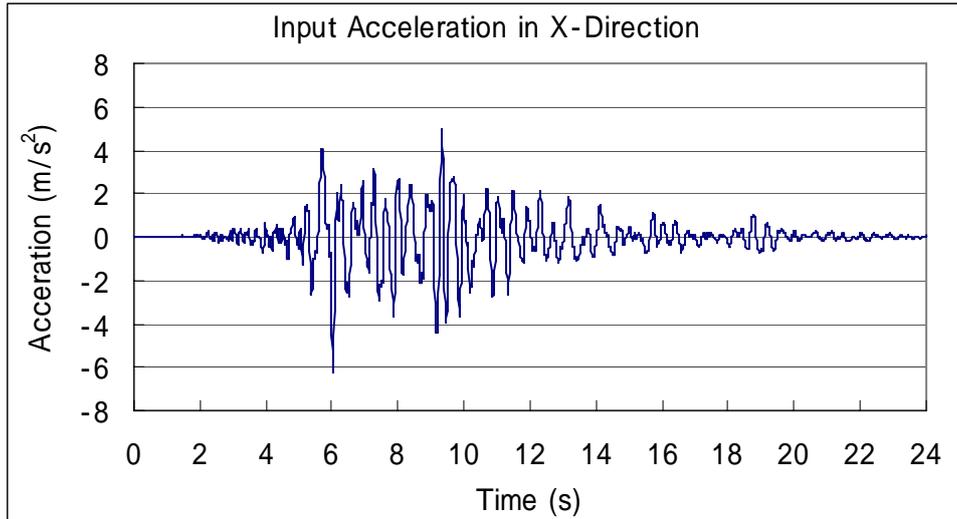


図 5 JMA Kobe 波 100%加振時の X 方向並進加速度

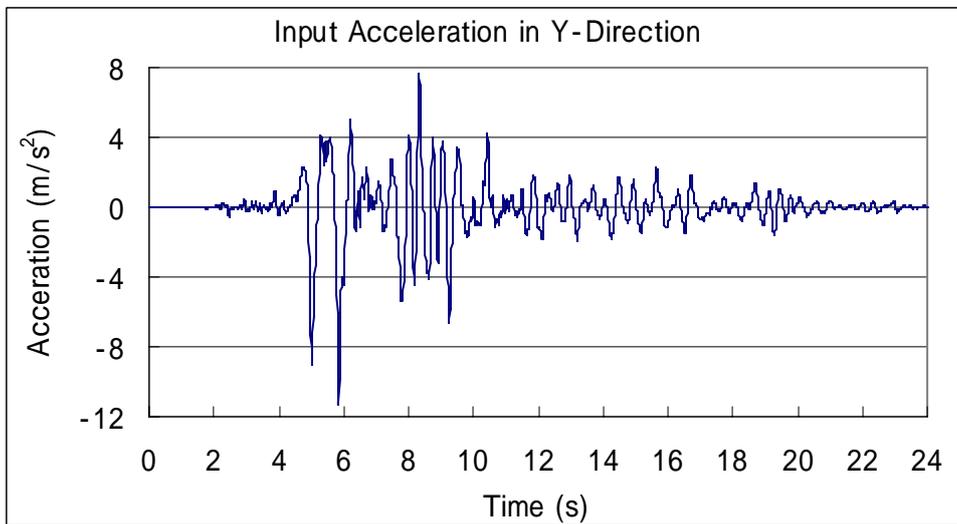


図 6 JMA Kobe 波 100%加振時の Y 方向並進加速度

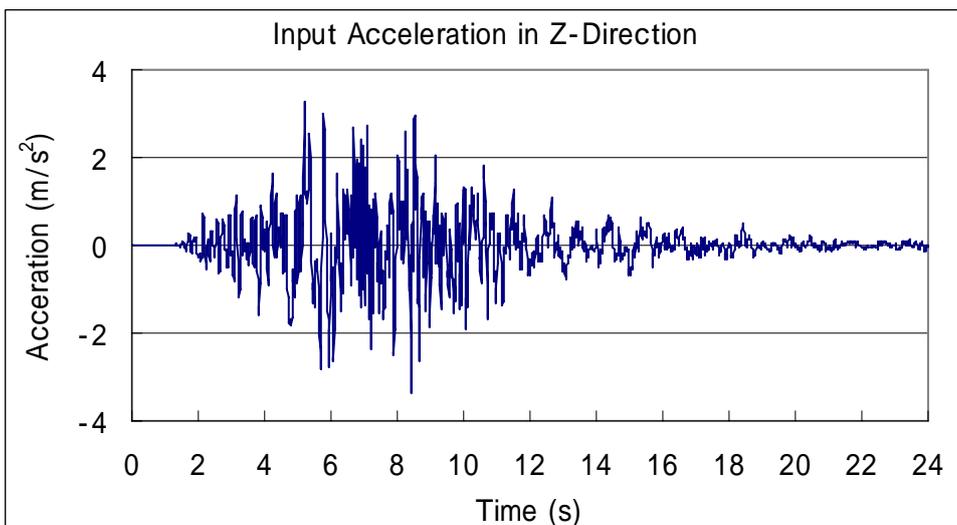


図 7 JMA Kobe 波 100%加振時の Z 方向並進加速度

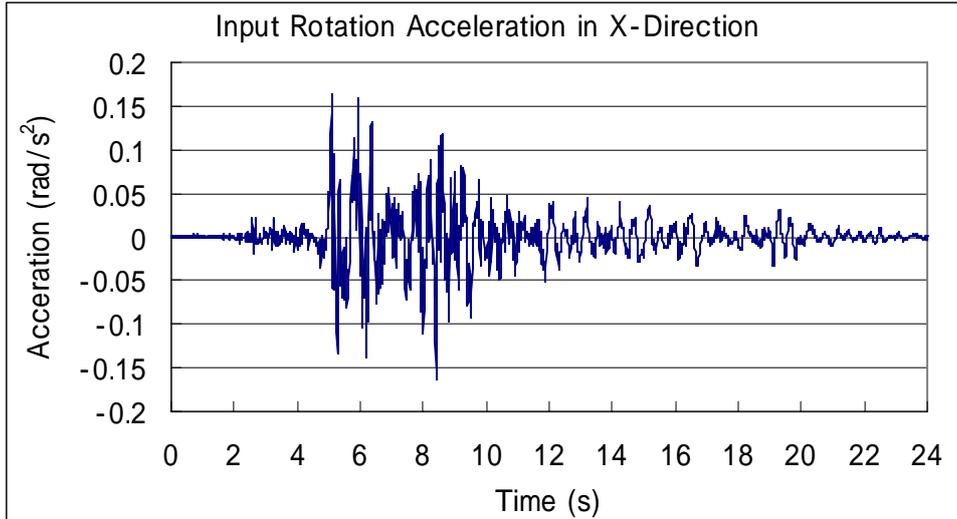


図 8 JMA Kobe 波 100%加振時の X 軸回転加速度

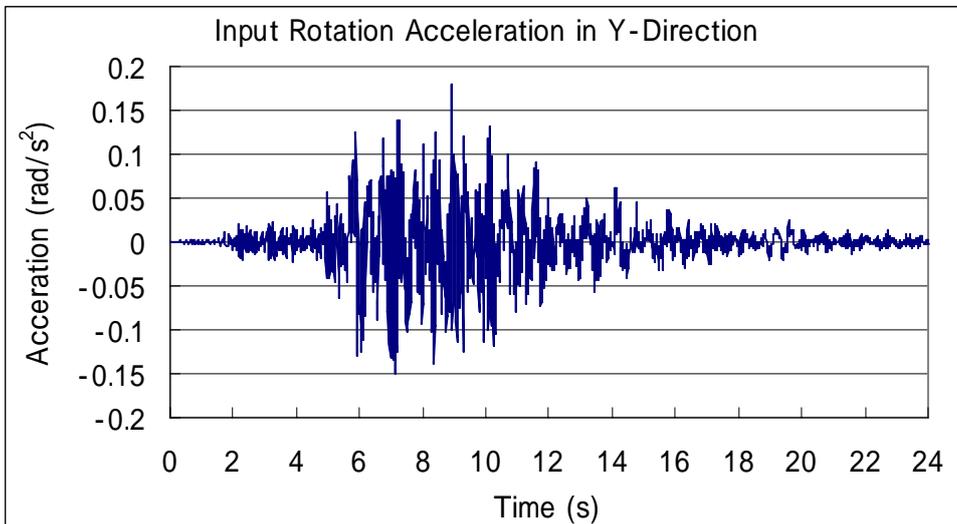


図 9 JMA Kobe 波 100%加振時の Y 軸回転加速度

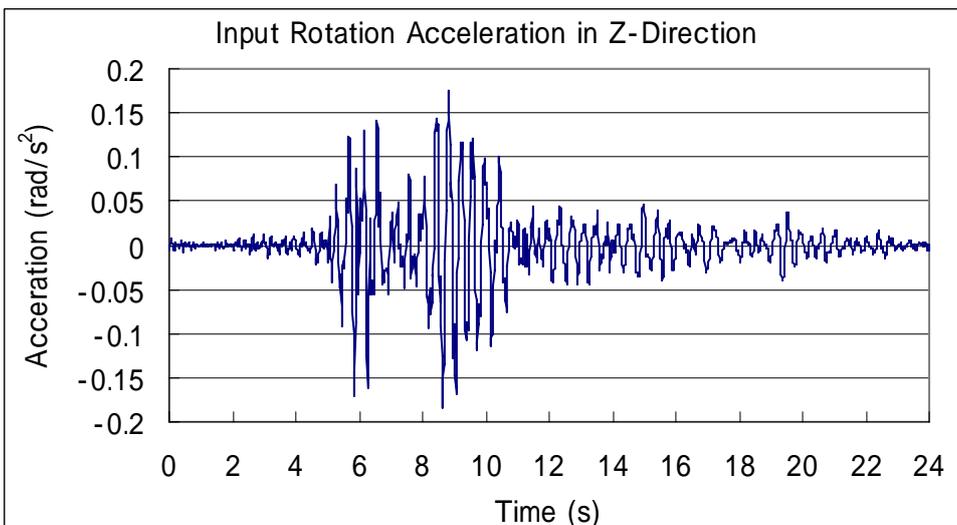


図 10 JMA Kobe 波 100%加振時の Z 軸回転加速度

d) 1パネル要素と2パネル要素による解析結果比較

まず、1パネル要素と2パネル要素による解析結果を用いて、主加振方向であるY方向の応答を考察する。Y方向について1階ベースシアと層間変形の関係を図11および図12に示す。

図11は、1階の耐震壁を1個のパネル要素にモデル化した場合の解析結果である。ベースシア最大値は6.35MNで、1階の最大層間変形は38.4mmである。図12は、1階の耐震壁を2個のパネル要素にモデル化した場合の解析結果である。ベースシア最大値は6.18MNで、1階の最大層間変形は52.9mmである。2要素に分割する場合、1要素とした場合に比べて最大ベースシアは170kN低くなり、変形は14.5mmを増大した。

次に、1階の層間変形の曲げ変形成分とせん断変形成分について比較する。50%と100%加振時の曲げ変形の比較を図13および図14に、せん断変形の比較を図15および図16に示す。

上記の解析結果を表1に纏めた。括弧内の数値は、1パネル要素と比較した場合の2パネル要素による解析結果の増減を表わしている。最大曲げ変形はわずか1.0mm程度(10%程度)の増加に留まったのに対し、最大せん断変形は100%加振時に約13mm増大し、増加率は53%となった。また、1階のトータルの変形については、100%の加振では38%増大したのに対し、損傷の少ない50%の加振では、せん断変形、曲げ変形、1階のトータルの変形とも1パネル要素と2パネル要素で差が微小であった。

表2 1パネル要素と2パネル要素の解析結果比較

最大値比較	1パネル要素	2パネル要素
ベースシア	6.35MN	6.18MN (-3%)
1階層間変形	38.4mm	52.9mm (+38%)
曲げ変形	50% Input: 3.6mm 100% Input: 13.4mm	50% Input: 4.0mm (+11%) 100% Input: 14.6mm (+9%)
せん断変形	50% Input: 5.0mm 100% Input: 25.1mm	50% Input: 5.8mm (+16%) 100% Input: 38.3mm (+53%)

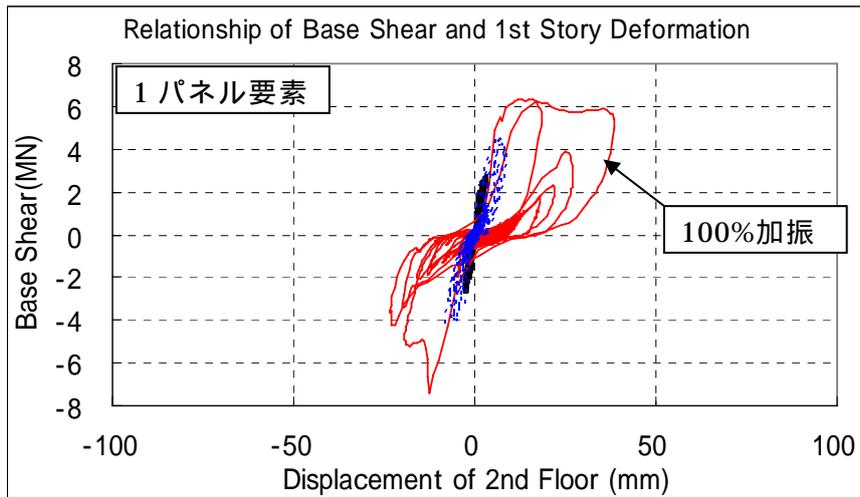


図 11 Y 方向 1 階のベースシアと層間変形の関係 (1 要素)

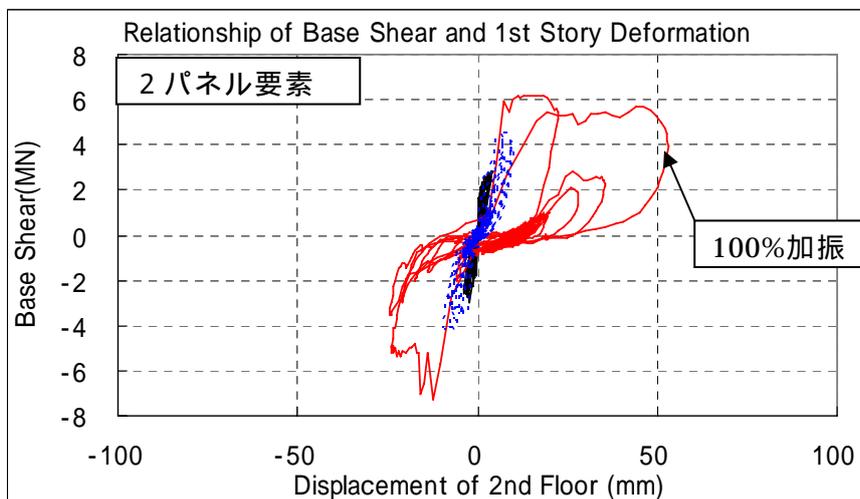


図 12 Y 方向 1 階のベースシアと層間変形の関係 (2 要素)

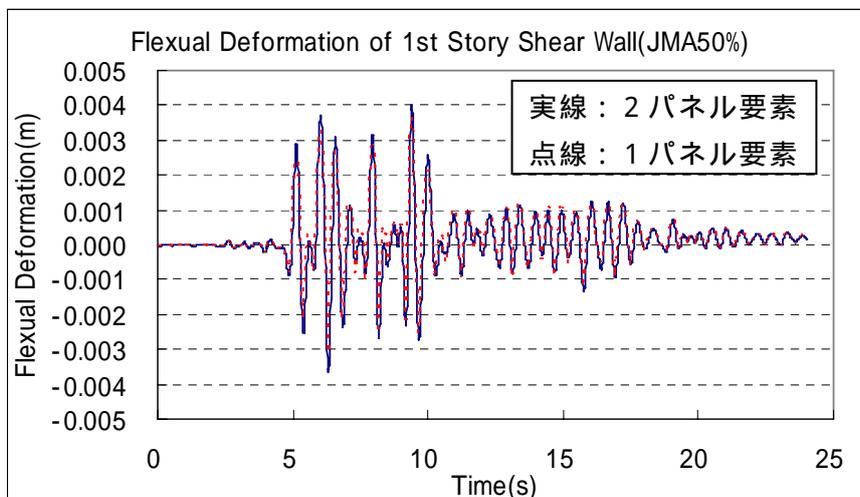


図 13 曲げ変形の比較 (JMA Kobe 波 50%入力時)

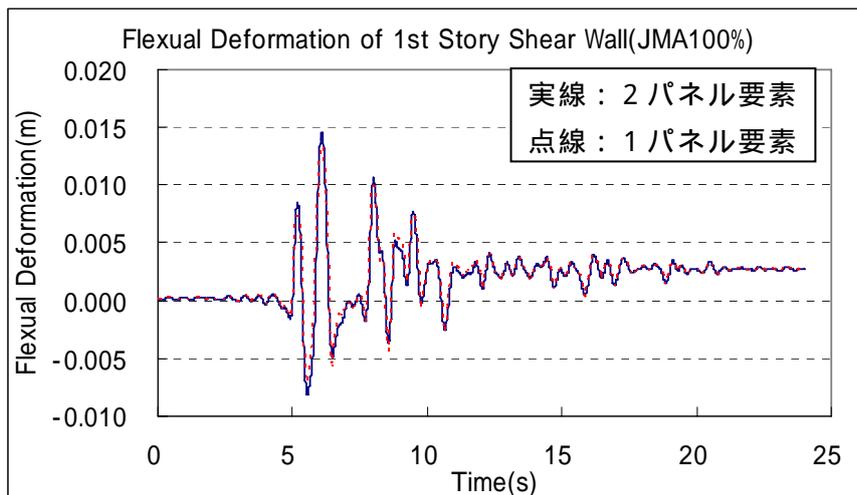


図 14 曲げ変形の比較 (JMA Kobe 波 100%入力時)

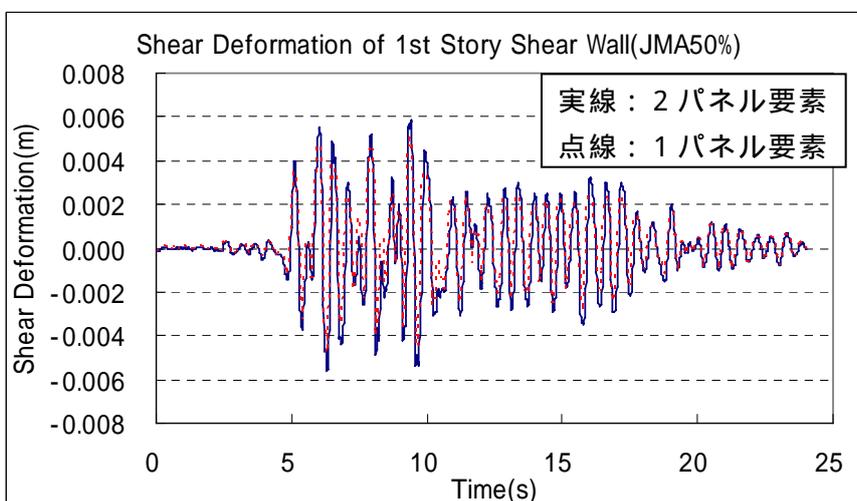


図 15 せん断変形の比較 (JMA Kobe 波 50%入力時)

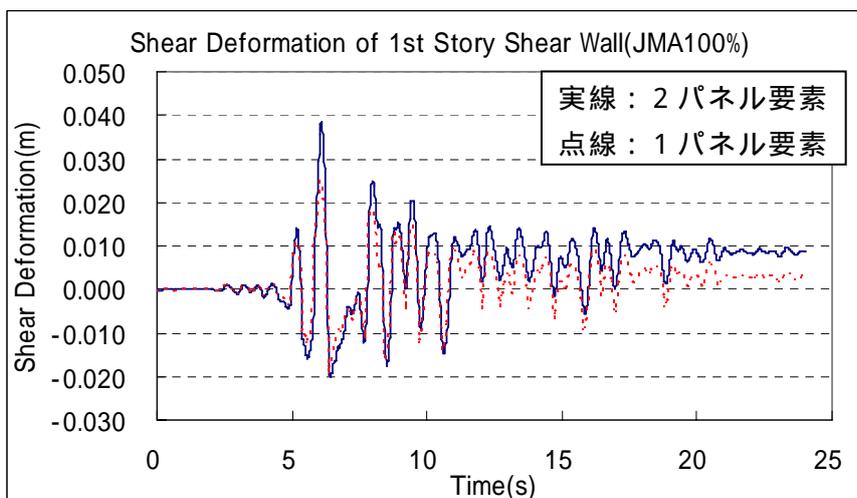


図 16 せん断変形の比較 (JMA Kobe 波 100%入力時)

e) 2 パネル要素による解析結果と実験結果の比較

2 パネル要素による解析結果と実験結果の比較により、主加振方向である Y 方向の応答を考察する。各加振レベルについて、Y 方向のベースシアと 1 階の層間変形の間を関図 17 ~ 図 19 に、1 階の耐震壁のせん断力と水平変形の間を関図 20 ~ 図 22 に、1 階の層間変形の時刻歴を関図 23 ~ 図 25 に示す。Y 方向ベースシア、耐震壁のせん断力、1 階の層間変形に関して、解析結果と実験結果の比較を表 3 に示す。

25%加振 (図 17、図 20、図 23) は、実験では 10%の加振があったため、初期剛性は解析結果の方が実験より大きくなっているが、最大変形、最大耐力、変形の時刻歴などについては良い精度で実験結果を再現している。ベースシア、耐震壁のせん断力、1 階の層間変形の最大値の解析誤差 (表 3) は、それぞれ-15%、-17%、+3%である。

50%加振 (図 18、図 21、図 24) は、ベースシアと 1 階層間変形の間、耐震壁のせん断力と水平変形の間、変形の時刻歴などについて、良い精度で実験結果を再現している。ベースシア、耐震壁のせん断力、1 階層間変形の最大値の解析誤差 (表 3) は、それぞれ-8%、-10%、+6%である。

100%加振 (図 19、図 22、図 25) は、1 階の層間変形の誤差が大きいだが、最大ベースシア、耐震壁の最大応答せん断力、変形の時刻歴波形などに関しては、良い精度で実験結果を再現している。ベースシア、耐震壁のせん断力、1 階層間変形の最大値の解析誤差 (表 3) は、それぞれ-17%、+7%、-46%である。

100%加振時の 1 階層間変形を除き、全ての加振において、ベースシア、耐震壁のせん断力、層間変形の解析結果と実験結果の誤差は、+7%から-17%の範囲内に収まっている。1 階層間変形の誤差は、実験における耐震壁脚部の施工品質や鉄筋の抜け出しによる脚部のすべりの増大が大きな要因と考えられる。このすべり量を解析で再現するためには、耐震壁脚部に接合要素を設ける必要がある。

表 3 2 パネル要素による解析結果と実験結果の比較

加振 レベル	2 パネル要素による解析結果			実験結果		
	Y 方向 ベースシア (MN)	耐震壁 せん断力 (MN)	1 階 層間変形 (mm)	Y 方向 ベースシア (MN)	耐震壁 せん断力 (MN)	1 階 層間変形 (mm)
25%	2.84 (-15%)	1.51 (-17%)	4.07 (+3%)	3.34	1.82	3.96
50%	4.54 (-8%)	2.42 (-10%)	9.77 (+6%)	4.93	2.68	9.22
100%	6.18 (-17%)	3.82 (+7%)	52.9 (-46%)	7.41	3.58	98.3

注：括弧内の数値は、実験結果と比較して、2 パネル要素による解析結果誤差を表示している。

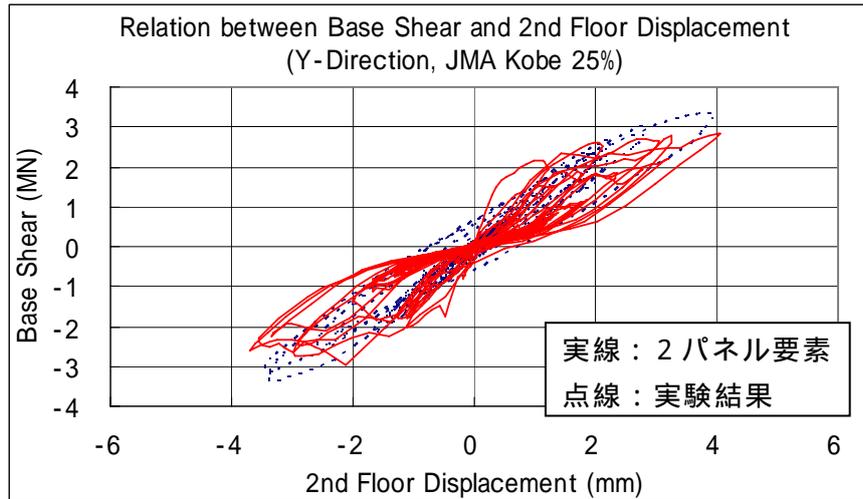


図 17 Y方向のベースシアと1階層間変形の関係（25%入力時）

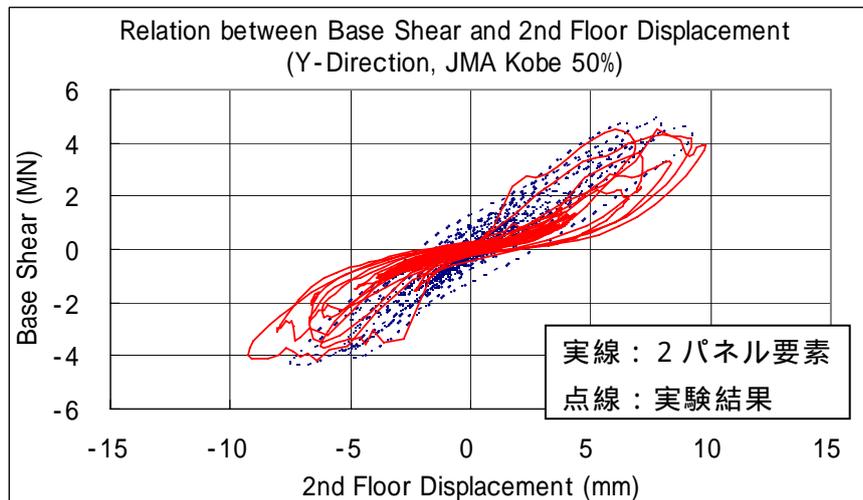


図 18 Y方向のベースシアと1階層間変形の関係（50%入力時）

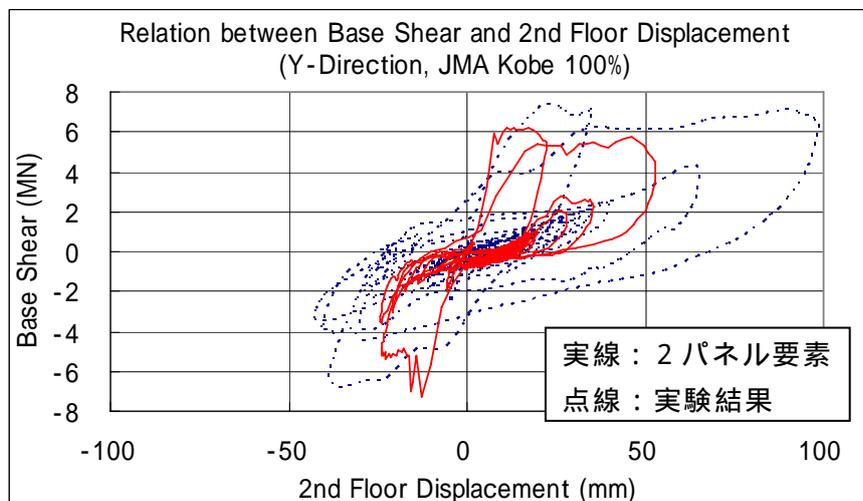


図 19 Y方向のベースシアと1階層間変形の関係（100%入力時）

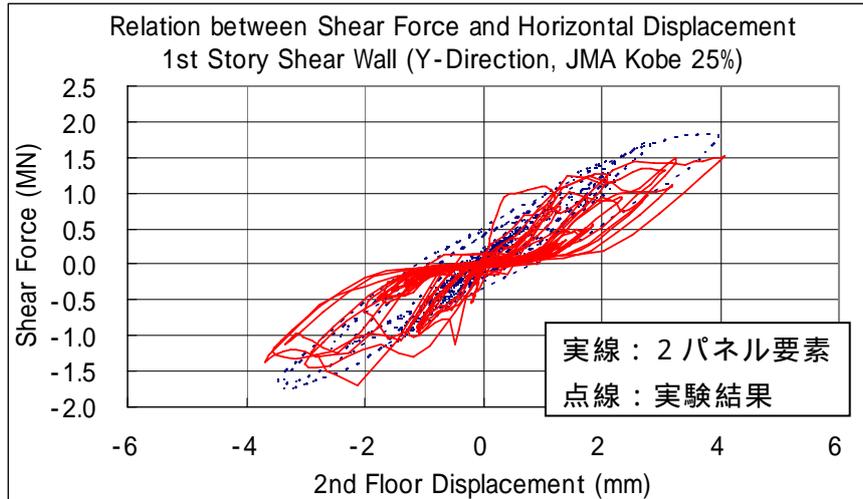


図 20 1階耐震壁のせん断力と層間変形の関係（25%入力時）

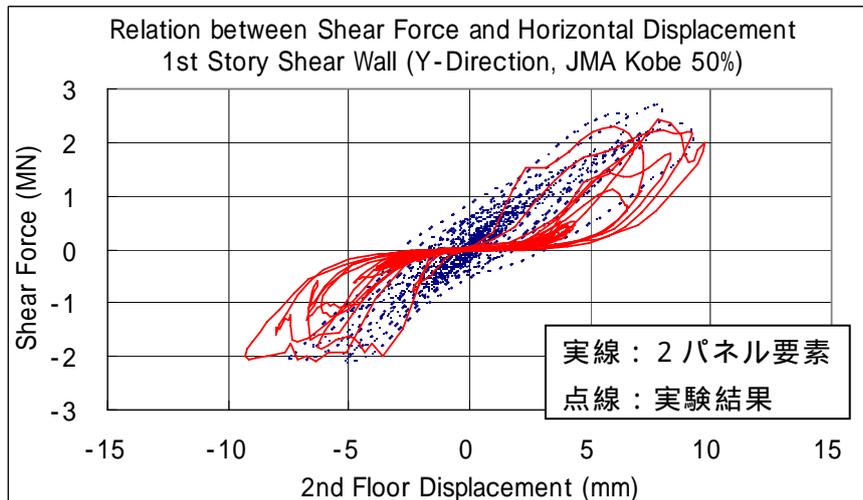


図 21 1階耐震壁のせん断力と層間変形の関係（50%入力時）

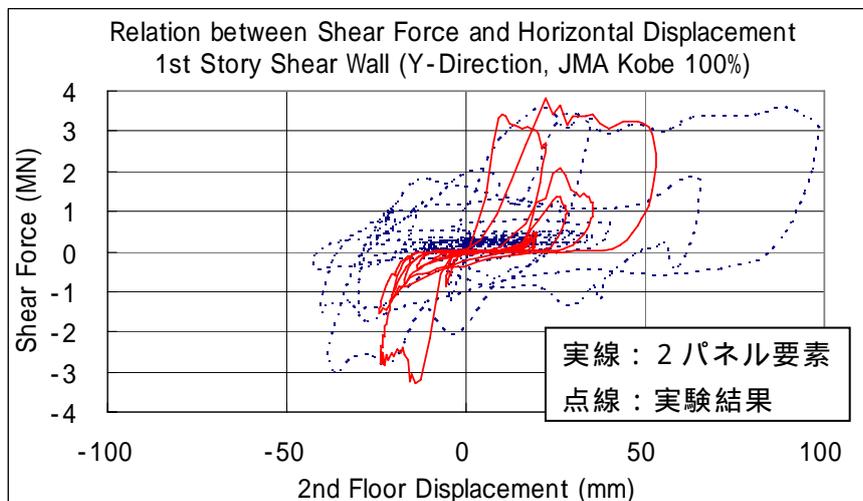


図 22 1階耐震壁のせん断力と層間変形の関係（100%入力時）

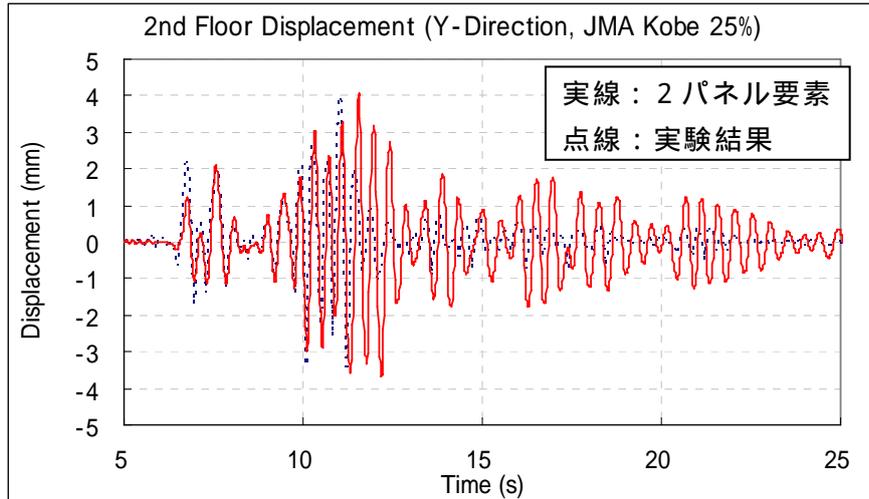


図 23 1階Y方向層間変形時刻歴(25%入力時)

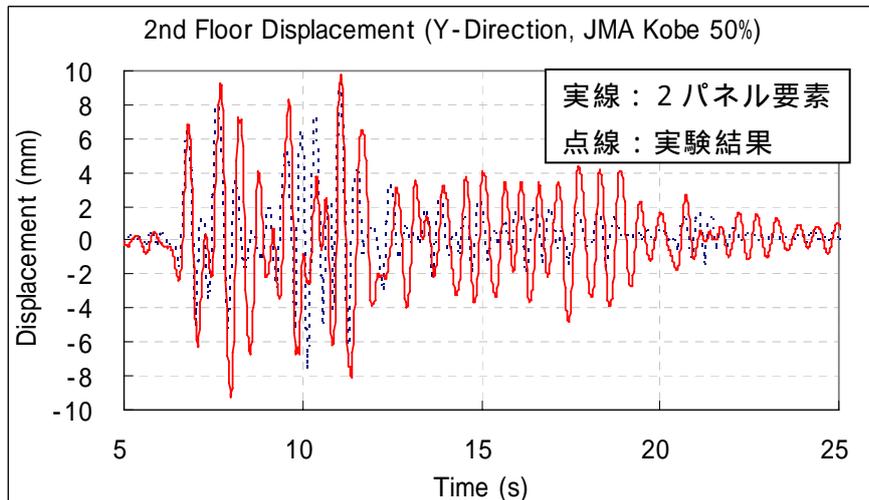


図 24 1階Y方向層間変形時刻歴(50%入力時)

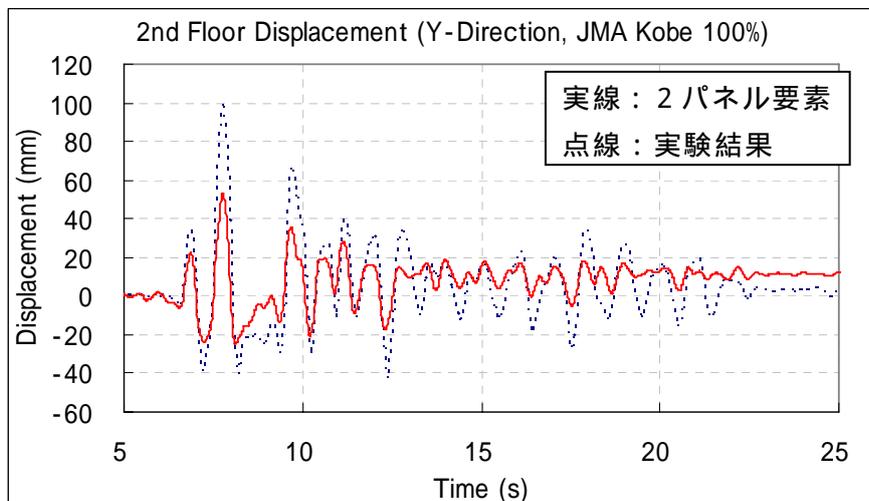


図 25 1階Y方向層間変形時刻歴(100%入力時)

2) 実大3層鉄筋コンクリート建物震動実験の予備解析

a) 試験体の概要

試験体は、1970年代に設計された既存鉄筋コンクリート学校校舎を想定した3階建て建物である。試験体の質量は約370ton（屋上の錘、計測器具などを含む）、試験体を受ける台座は約335ton、試験体と台座の間には約74tonの埋め戻し土を側方土として締め固め、振動台上の総積載質量は約780tonである。今回の実験の大きな特徴の一つは、一般的に行われてきた基礎固定実験と異なって、試験体基礎は台座に固定していないため、実際の建物が置かれる状況に近い基礎底面の摩擦と周辺の埋め戻し土側圧だけによる地震動伝達機構を再現し、スウェイ現象が再現されることである。試験体の寸法などを図26～図29に示す。

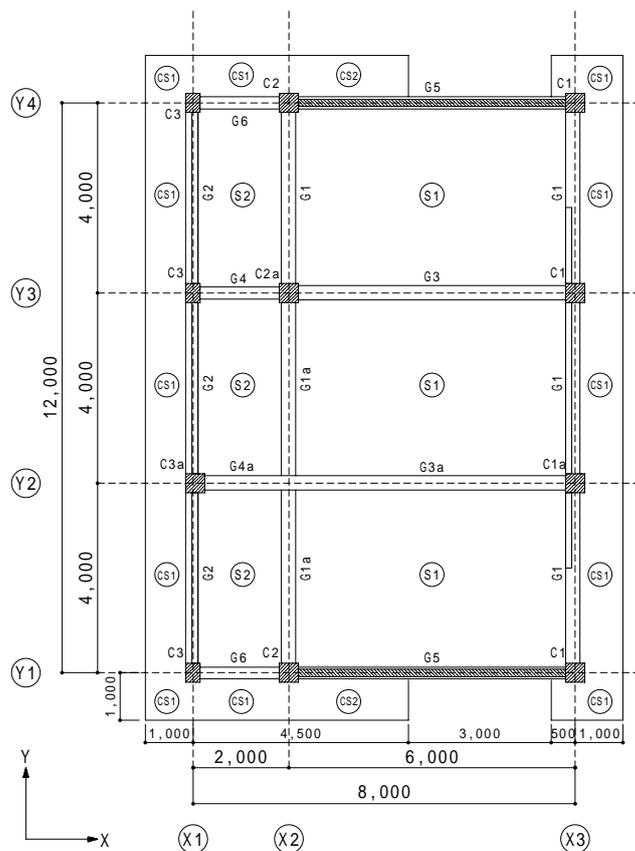


図 26 3層建物試験体の平面図

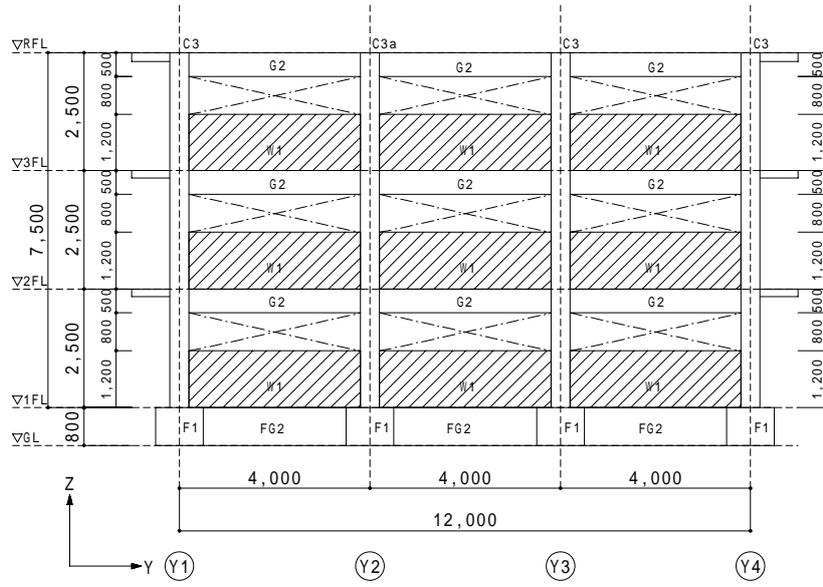


図 27 X1 軸組図

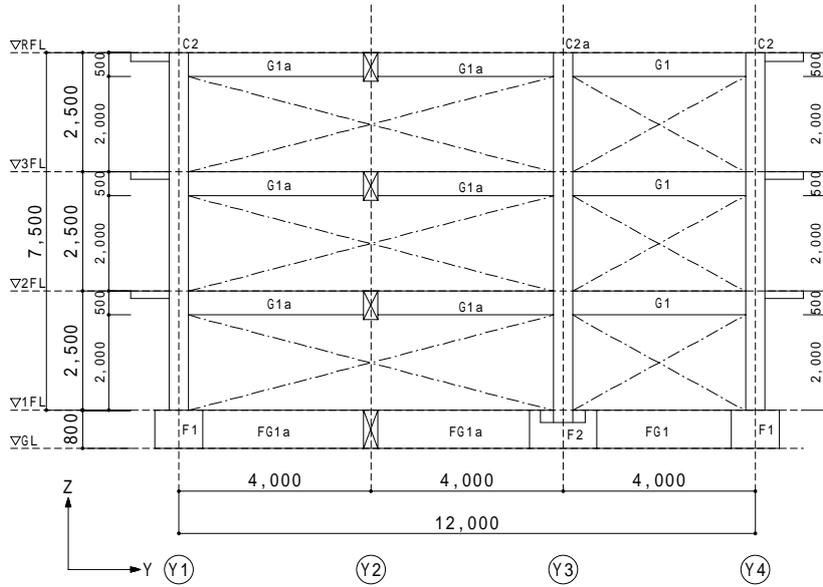


図 28 X2 軸組図

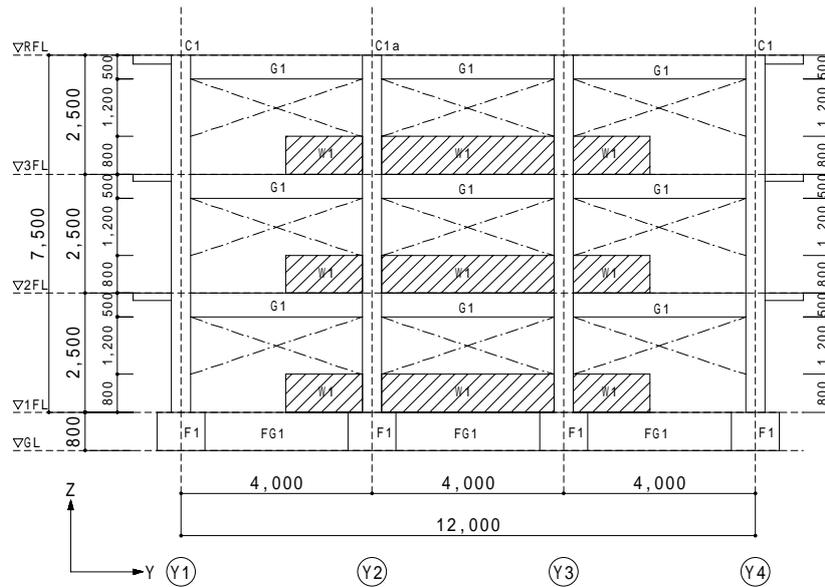


図 29 X3 軸組図

b) 解析条件

解析条件：

コンクリート圧縮強度 28MPa

鉄筋の降伏強度 SD295 = 360MPa SD345 = 400MPa

外力及び入力地震波：

JMA Kobe 波 3 成分の 80%、100%と 125%の連続入力による三次元動的解析

主加振方向の Y 方向逆三角形外力分布による静的解析

基礎の固定条件：

ケース 1：基礎は、完全固定とする。

ケース 2：鉛直と転倒回転を固定とし、X 方向と Y 方向の水平すべりを許容する。

地盤ヤング率を「建築基礎構造設計指針」の $E_s = 2.8N = 10^4 KPa$ とする。

ケース 3：鉛直と転倒回転を固定とし、X 方向と Y 方向の水平すべりを許容する。

地盤ヤング率を上記数値の 0.4 倍とする。

摩擦と地盤のバネの考慮：

バイリニアモデルとし、降伏点は摩擦力（試験体総重量は 400ton、摩擦係数は約 0.7 を想定）とし、降伏後は埋め戻し土による抵抗を考慮する。

解析モデル：

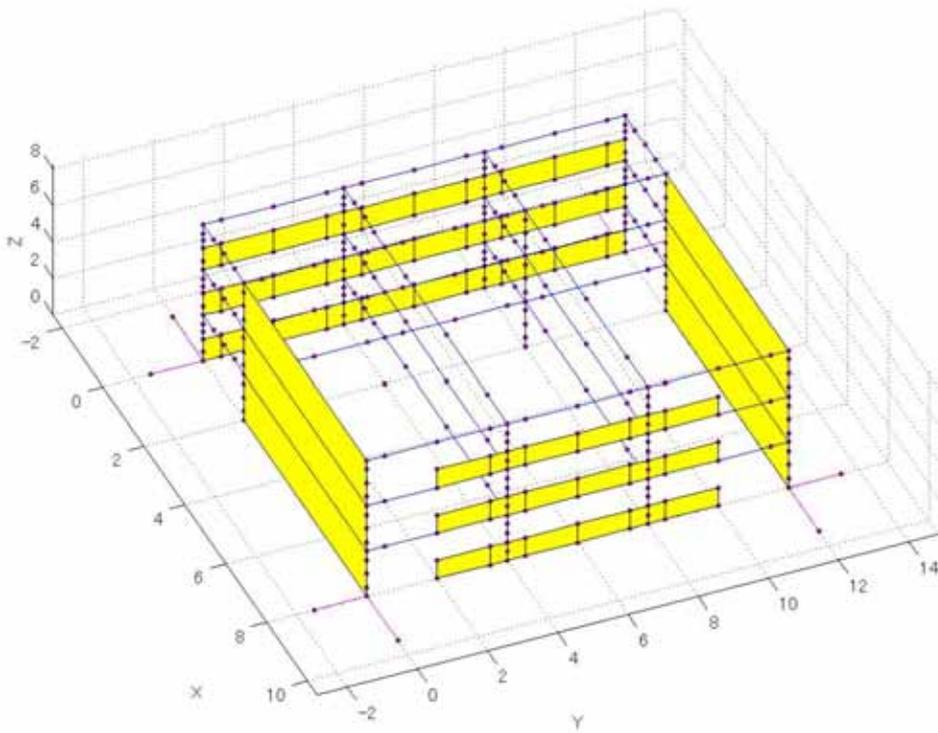


図 30 解析モデル図

c) ケース 1：基礎固定とする場合の解析結果

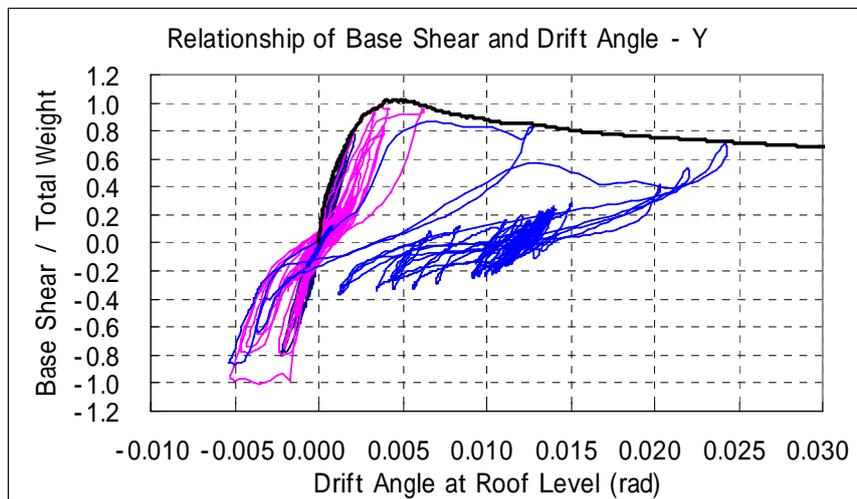


図 31 Y方向のベースシア係数と全体変形角の関係（基礎固定）

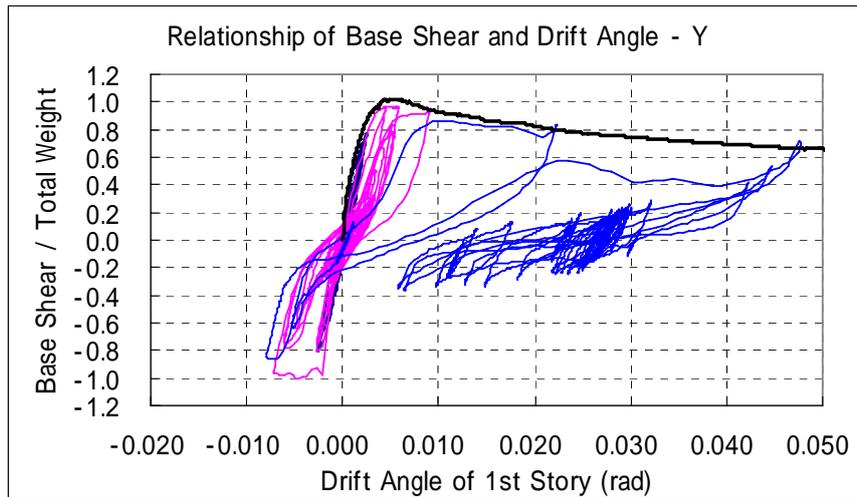


図 32 Y方向のベースシア係数と1階層間変形角の関係（基礎固定）

d) ケース 2：基礎の水平滑動を許容する場合（ $E_s = 2.8N = 10^4 KPa$ ）の解析結果

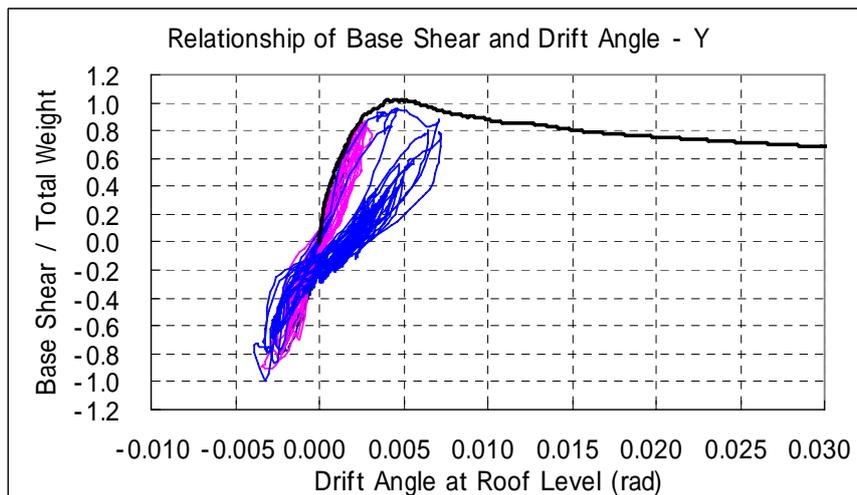


図 33 Y方向のベースシア係数と全体変形角の関係（基礎滑動）

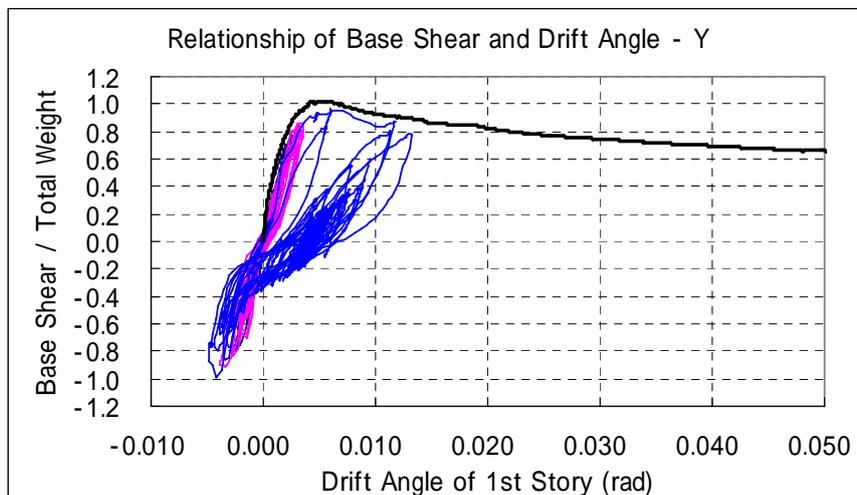


図 34 Y方向のベースシア係数と1階層間変形角の関係（基礎滑動）

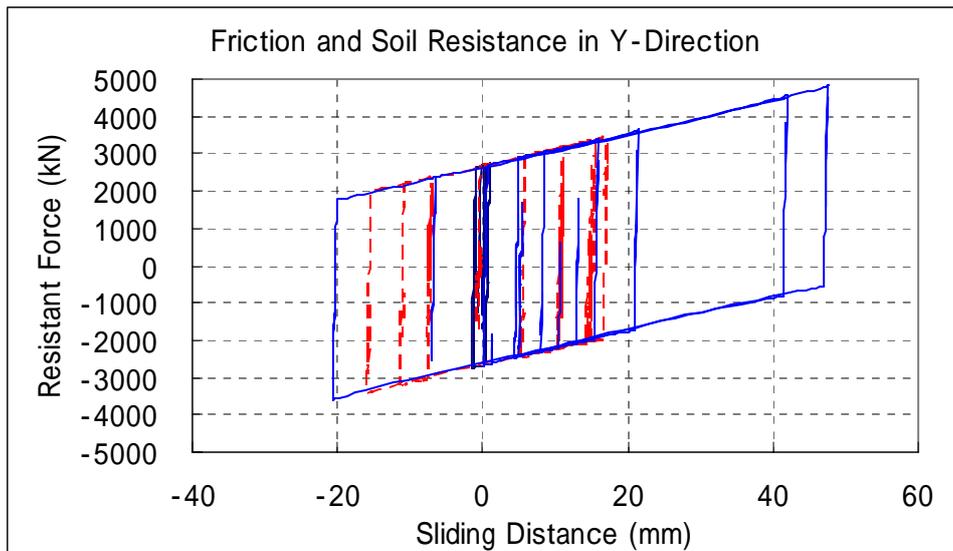


図 35 Y方向の基礎滑動変位

e) ケース 3 : 基礎の水平滑動を許容する場合 ($E_s = 2.8N = 4000KPa$) の解析結果

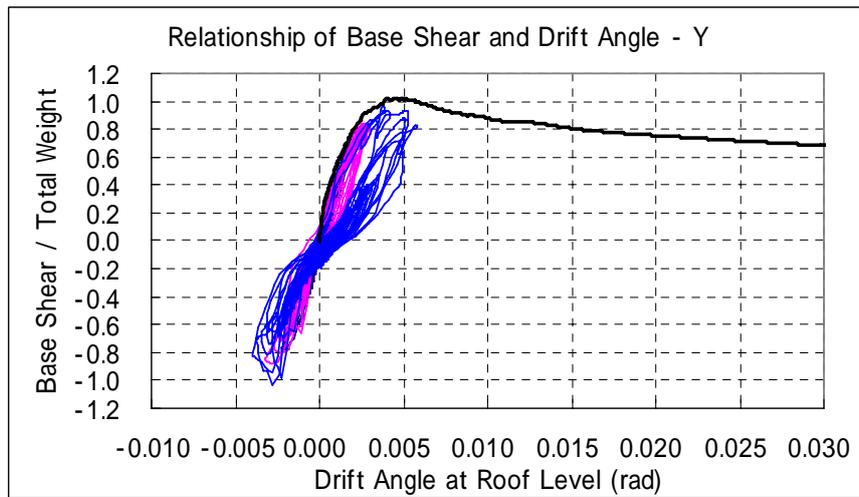


図 36 Y方向のベースシア係数と全体変形角の関係 (基礎滑動)

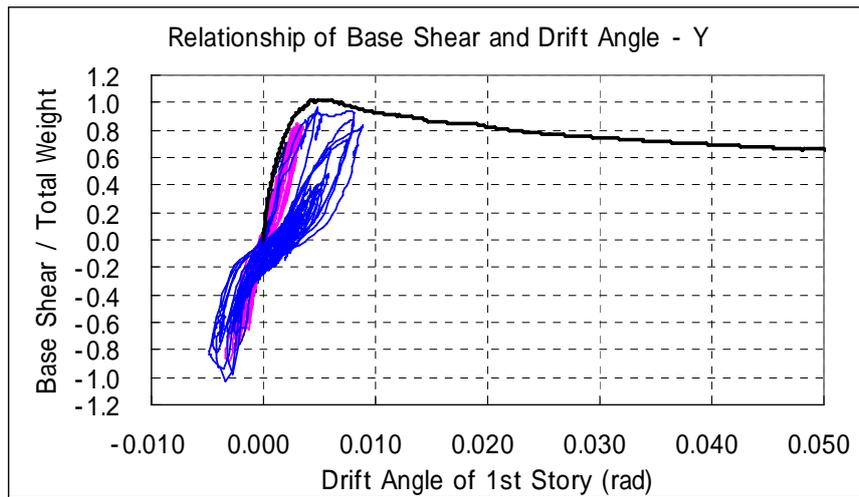


図 37 Y方向のベースシア係数と1階層間変形角の関係（基礎滑動）

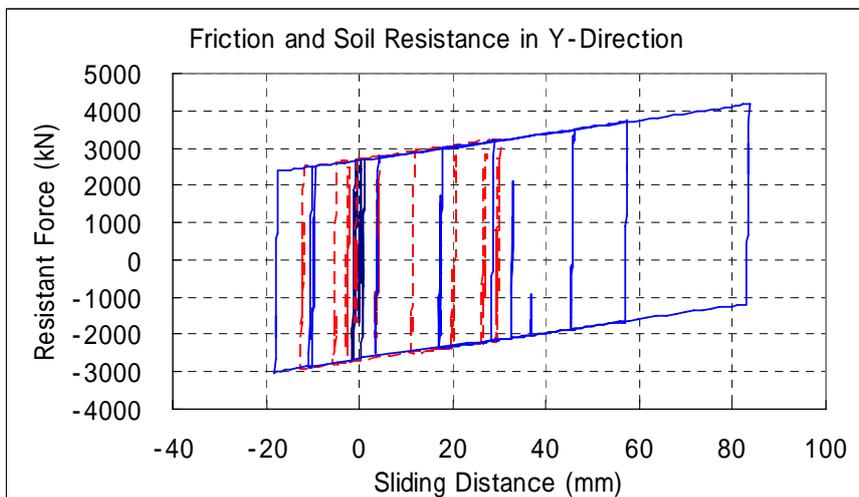


図 38 基礎のY方向滑動変位

f) 解析結果のまとめ

3 ケースの解析結果を表 4 に示す。

ケース 1（基礎固定）の場合、JMA Kobe 波 100%の加振では、1 階 Y 方向の最大応答層間変形角は 1.0%未満であり、ベースシアの低下も生じず、試験体は崩壊に至らない。JMA Kobe 波 125%を入力した場合、1 階最大応答層間変形角は 1/20 程度に達し、ベースシアも最大値の 60%程度に低下し、1 階の層崩壊に至る。

ケース 2（基礎の滑動許容）の場合、Y 方向の最大滑動変位は 4.7cm であり、1 階 Y 方向の最大応答層間変形角は約 1/75 である。降伏領域に達するが、ベースシアは低下領域には至らず、試験体は崩壊しない。

ケース 3（基礎の滑動許容）の場合、概ねの傾向はケース 2 と同様であり、Y 方向の最大滑動変位は 8.3cm に達する。1 階 Y 方向の最大応答層間変形角は約 1/115 であり、降伏領域に達するが耐力低下領域には入らず、試験体は崩壊しない。

表 4 解析結果のまとめ

	ベースシア 係数	1階の層間 変形角	全体変形角	基礎すべり 量(mm)	崩壊判定
ケース 1	0.96	1/20	1/40	-	JMA Kobe125%入力 時1階層崩壊
ケース 2	0.95	1/75	1/140	47	崩壊しない
ケース 3	0.93	1/115	1/170	83	崩壊しない

3) M S モデルを用いたシミュレーション解析

a) 業務の概要

平成 17 年度に E-Defense で実施された実大 6 層鉄筋コンクリート建物実験を対象に、マルチスプリングモデル (M S モデル) を用いた数値シミュレーション解析を実施し、破壊挙動の原因分析の精度向上をはかると共に、解析モデルの適用性を検証した。

b) M S モデルの概要

M S モデルの概要を図 39 に示す。M S モデルは、部材の両端部に想定されたヒンジ断面を 2 方向の曲げ回転および軸方向の伸縮変形ができる M S 要素に置き換え、両 M S 要素およびその間の弾性線材から構成する 3 次元の部材モデルである。その M S 要素は、ヒンジ断面の鉄筋およびコンクリートを分割して複数の軸方向バネに置き換えた多バネ要素である。部材の 2 方向曲げおよび軸方向の復元力は個々のバネの応力を合成して算出できる。通常の RC 部材では、鉄筋は 1 本単位で 1 つの軸方向バネ、コンクリートは約 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 単位で 1 つのコンクリートバネに置き換える。個々のバネの軸方向伸縮変形の関係は、断面における平面保持変形を仮定する。バネの剛性特性は、ヒンジゾーンを仮定し、部材モデル全体の初期剛性とオリジナル部材の弾性剛性が等しくなるよう決定する。バネの非線形力学挙動として、鉄筋の引張および圧縮降伏、コンクリートのひび割れ、圧縮剛性低下と耐力低下を表現させる。このようなモデルにより、部材の 2 方向曲げおよび軸方向力の間の連成効果を表現することができる。

c) 解析の概要

実大 6 層鉄筋コンクリート建物試験体に関して、梁、柱、壁およびフロア面内に剛体変形する床スラブから構成する立体骨組にモデル化した。剛床を仮定し、試験体全体の捩れ振動応答を考慮に入れる。梁部材は、フレーム面内の 1 軸の非線形曲げとせん断変形を考慮して従来の 1 軸バネモデルによる曲げ回転バネおよびせん断バネでモデル化した。鉛直部材の柱、壁要素は、M S モデルを用いた場合と、従来の 1 軸バネモデルを用いた場合の 2 ケースの解析モデルを作成した。従来の 1 軸バネモデルを用いる場合は、2 軸曲げとせん断変形、および軸方向変形はそれぞれ独立となる。M S モデルを用いる場合にも、1 軸バネによるせん断バネを用いてせん断変形の非線形挙動を近似して表現する。

d) 固有周期

上記のようにモデル化した骨組の固有振動周期は表 1 にまとめて示す。モデルの初期剛性とオリジナル部材の弾性剛性と等しくなるよう M S モデルのパラメータを決定しているため、M S モデルと 1 軸モデルの弾性周期はほぼ一致している。ただし、後述の 1 回目入力による損傷後の振動周期は、両モデルの結果に差が生じるようになる。

e) 解析結果

両骨組モデルに対して、仮想の地震動入力による地震応答解析を行った。2 回にわたって入力することを想定し、1 回目は El Centro 1940 の NS、EW および UD 記録波のオリジナル加速度波形 (最大速度 NS 成分 33.5cm/sec 相当)、2 回目の入力は 1995 年兵庫県

南部地震の NS、EW および UD 記録波のオリジナル記録に対する入力スケール約 45%(最大速度 41cm/sec (NS 成分)) とした。いずれも、NS、EW および UD 記録波をそれぞれ X 方向 (短辺方向)、Y 方向 (長辺方向)、および Z 方向 (鉛直方向) に入力する。減衰は X 方向と Y 方向それぞれの 1 次モードに対して剛性と質量比例の減衰定数 5% と仮定した。

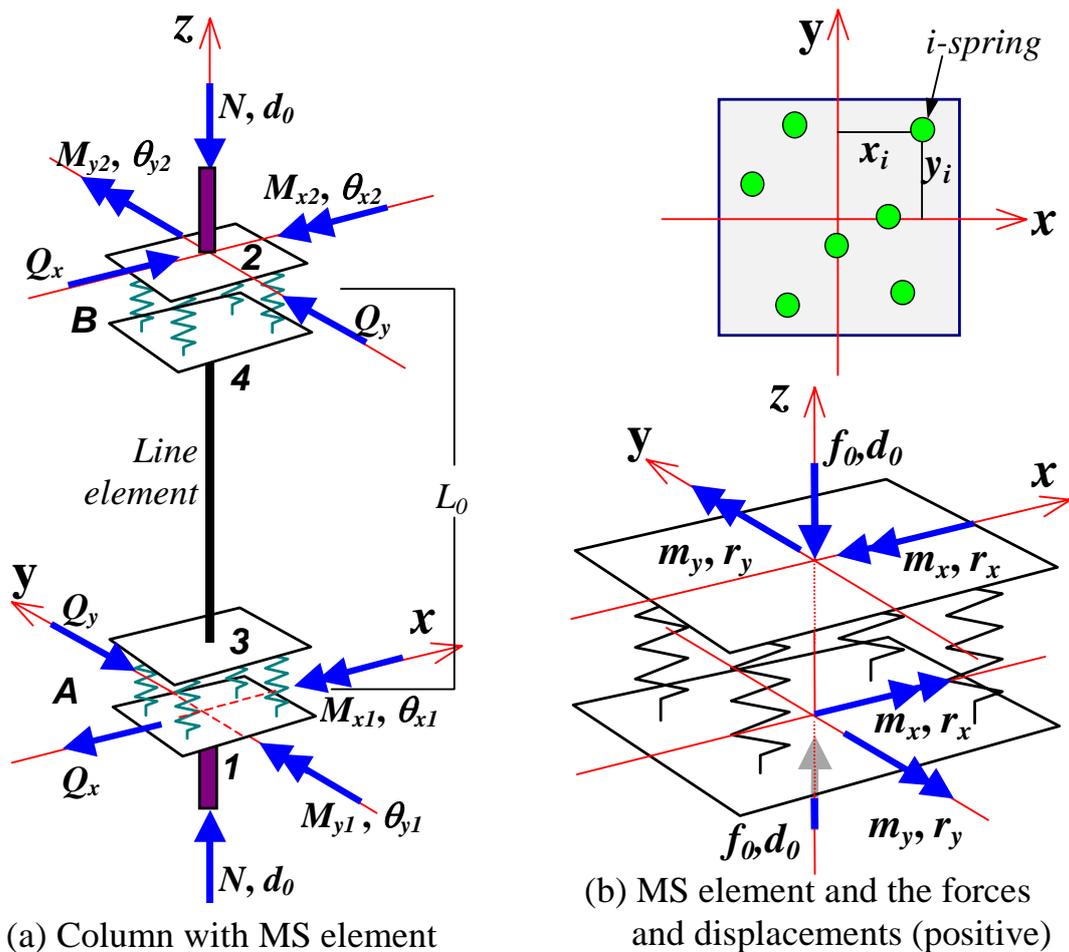
MS モデルを用いた解析によれば、上記のような入力に対し、ほとんどの梁および一部の柱には曲げひび割れが発生した。1 回目の入力では、一部の梁、および X 方向の 1 階袖壁脚部で曲げ降伏が発生し、最大塑性率が 1.2 程度に達した。2 回目の入力では、一部の梁と X 方向の 1 階袖壁脚部で曲げ降伏、および一部の梁にはせん断ひび割れが発生する応答結果となった。屋上フロアの重心位置での応答変位の時刻履歴を図 40 に示す。降伏する部材の曲げの最大塑性率は梁で 2.3、1 階袖壁脚部で 3.9 程度に達した。

比較のために実施した従来型の 1 軸バネモデルを用いた解析に関しては、1 回目入力では、損傷が部材の曲げひび割れに留まっている。2 回目の入力では、梁部材の曲げ降伏が発生し、最大塑性率 1.9、X 方向 1 階袖壁脚部の曲げの最大塑性率は 3.7、一部の梁部材ではせん断ひび割れ発生した。1 軸バネモデルによる屋上フロア重心位置での応答変位時刻履歴は図 41 に示す。このように系の微小損傷の挙動を示す応答では、MS モデルと従来型の 1 軸バネモデルでは最大応答変位に若干の差があるが、正負合計振幅の差は表 6 に示す通りわずか 1~2% であった。振動応答の履歴形状にも大差が無い結果であったが、MS モデルによる応答は部材の損傷程度が若干激しくなる傾向を示した。これは、MS モデルでは軸力変動の影響を取り入れられるためである。

両モデルによる最大層せん断力の高さ方向の分布を図 42 および図 43 に示す。両者の最大応答値には若干の差があり、大小関係は地震動と X Y 方向により様々であった。2 回目の入力において、1 層の最大応答層せん断力は、Y 方向では MS モデルの方が 10% 程度上昇し、鉛直部材が降伏した X 方向では逆に MS モデルの方が低下した。2 回目入力では、特に、MS モデルにより 1 層耐震壁の負担せん断力が上昇している。また、両モデルとも、高さ方向の分布形状はよく似ていた。

f) まとめ

MS モデルと従来型の 1 軸バネモデルに関して、曲げひび割れおよび曲げ降伏を若干超える程度の応答結果を比較した結果、両者の応答は非常に近い結果となったが、部材の損傷程度が激しくなる、最大応答層せん断力が上昇したり減少したりする場合もある、耐震壁の負担せん断力が上昇する、などの若干の差が見られた。これらの差は、構造物の降伏後の大変形を生じさせる入力ではより拡大すると予想できる。ただし、MS モデルを用いた場合の大加速度入力の解析は今後の課題であり、実験結果との比較検討により、どちらが構造物の非線形挙動をより正確にシミュレーションできるかを確認する必要がある。



(a) Column with MS element

(b) MS element and the forces and displacements (positive)

図 39 MSモデルの概要

表 5 骨組モデルの固有振動周期 (単位: 秒)

モード形	弾性時		1回目入力損傷後	
	MSモデル	1軸モデル	MSモデル	1軸モデル
X方向1次モード	0.2121	0.2123	0.2874	0.2921
Y方向1次モード	0.2025	0.2026	0.2405	0.2526
捩れ卓越モード	0.1591	0.1591	0.1909	0.2000
X方向2次モード	0.0592	0.0592	0.0685	0.0692
Y方向2次モード	0.0583	0.0583	0.0620	0.0632

表 6 MSモデルと1軸バネモデルの応答変位最大振幅の比較

入力	MSモデル	1軸モデル	最大振幅の差
1回目 (El Centro 1940)	3.005 cm	3.041 cm	-1.2%
2回目 (JMA Kobe x 0.45)	6.236 cm	6.061 cm	+2.9%

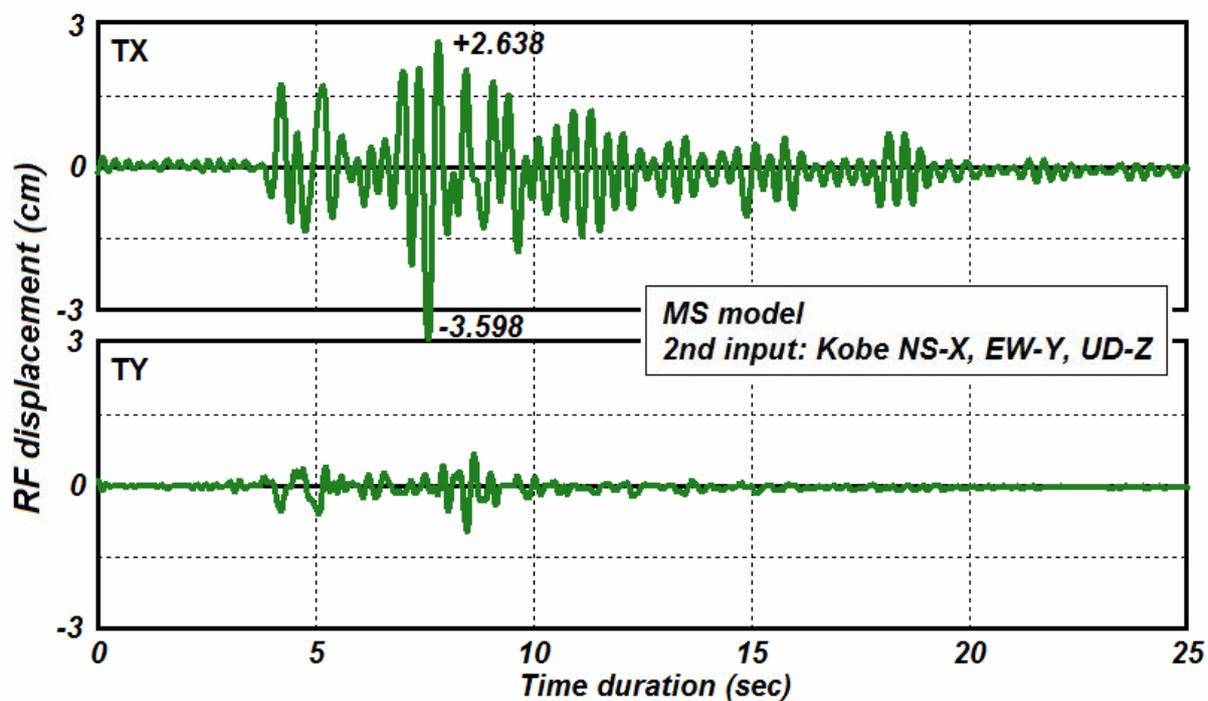
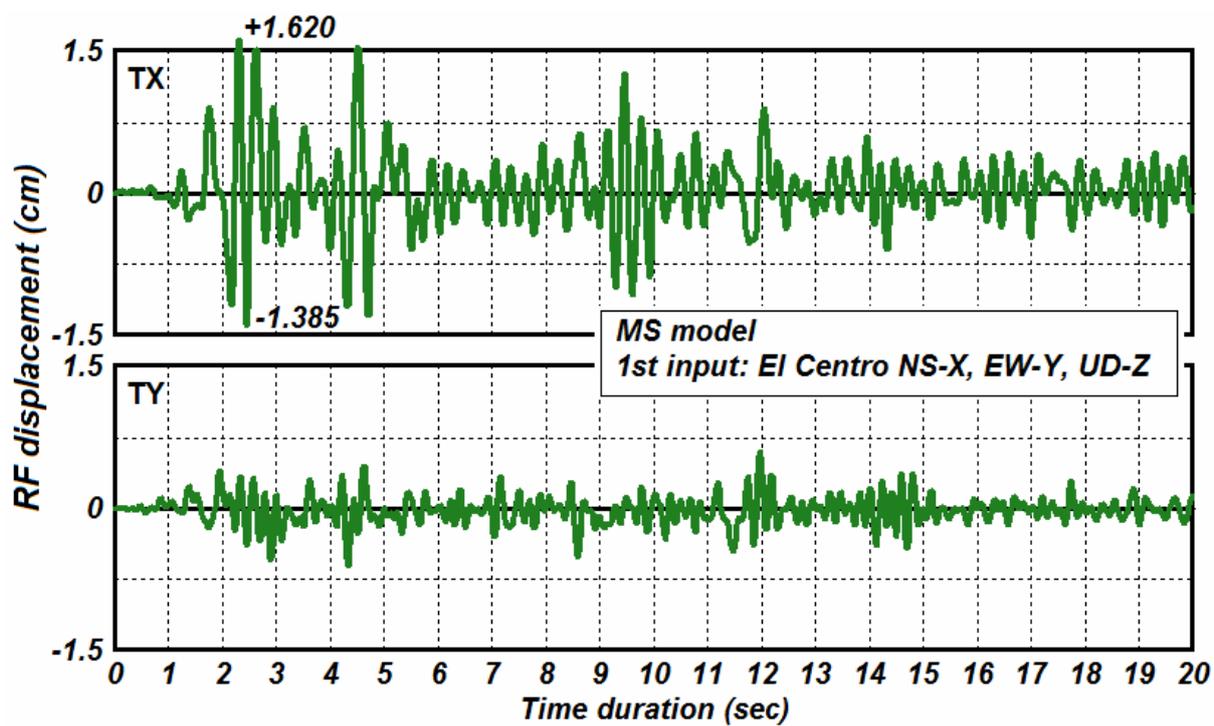


図 40 MSモデルによる最上階応答変位波形

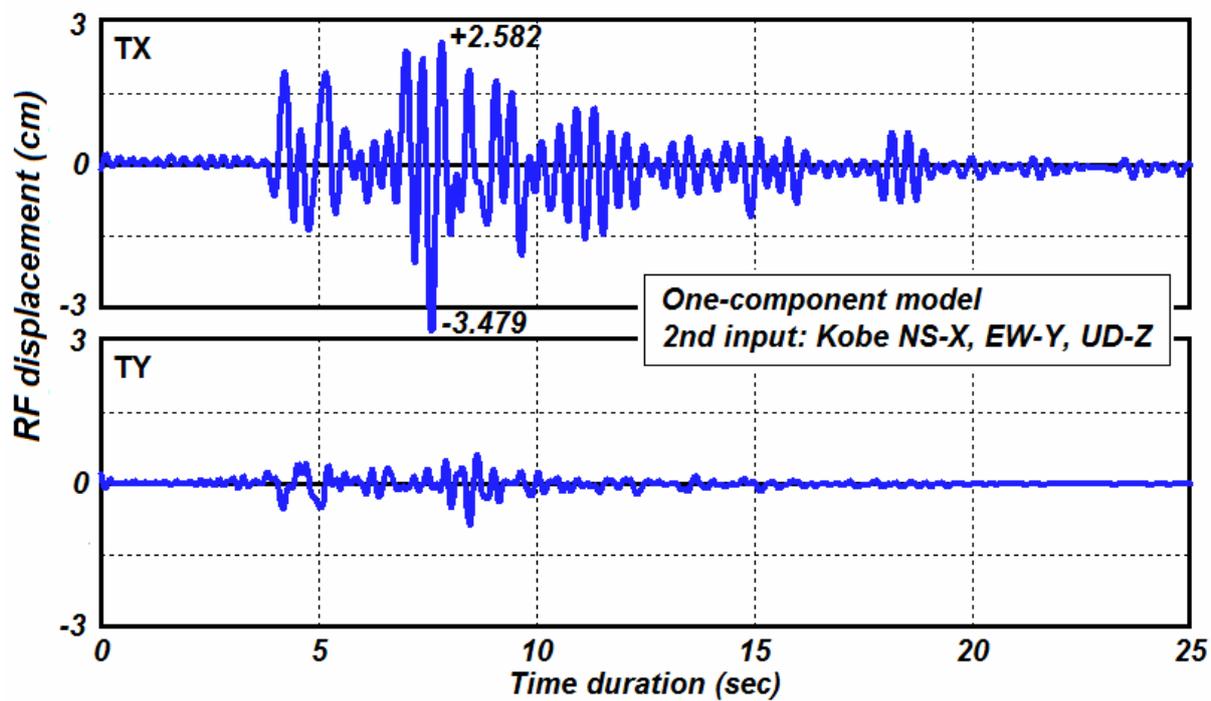
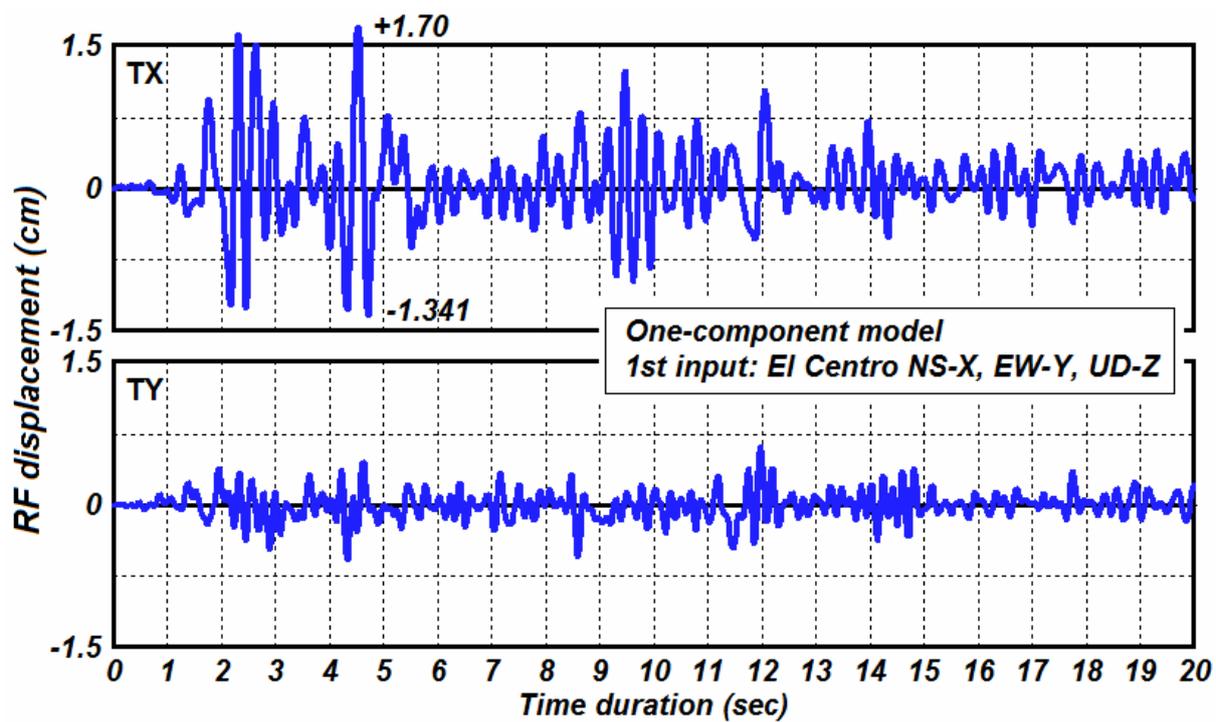
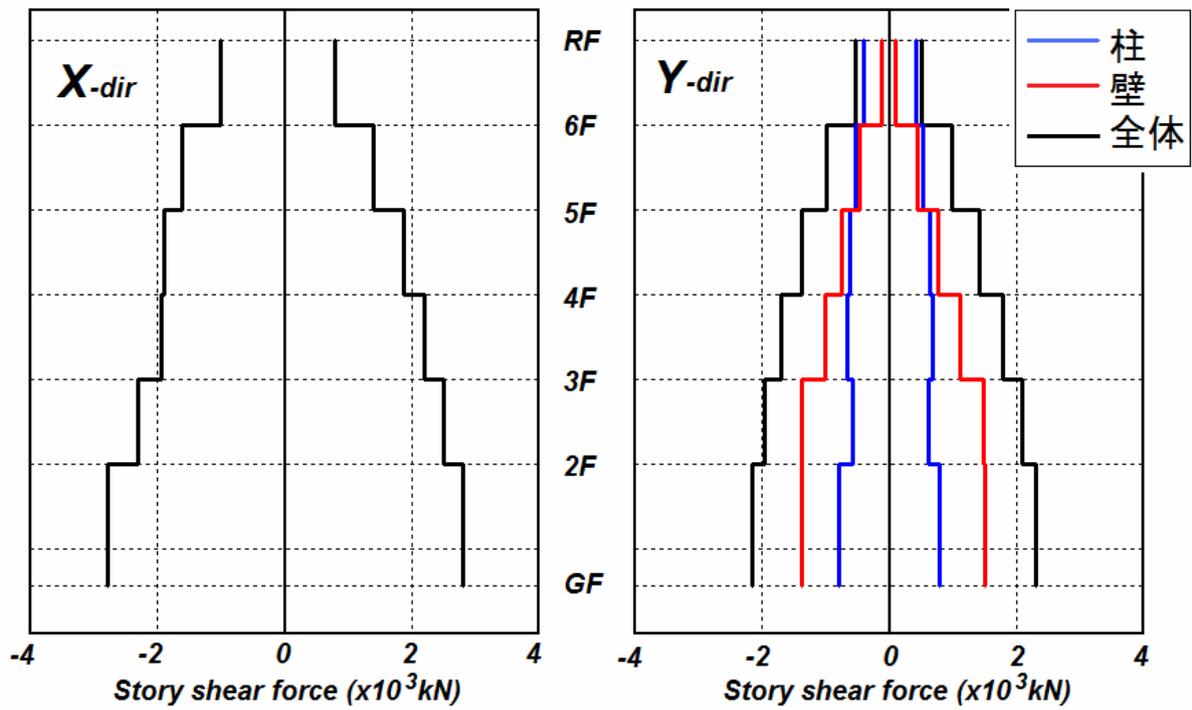
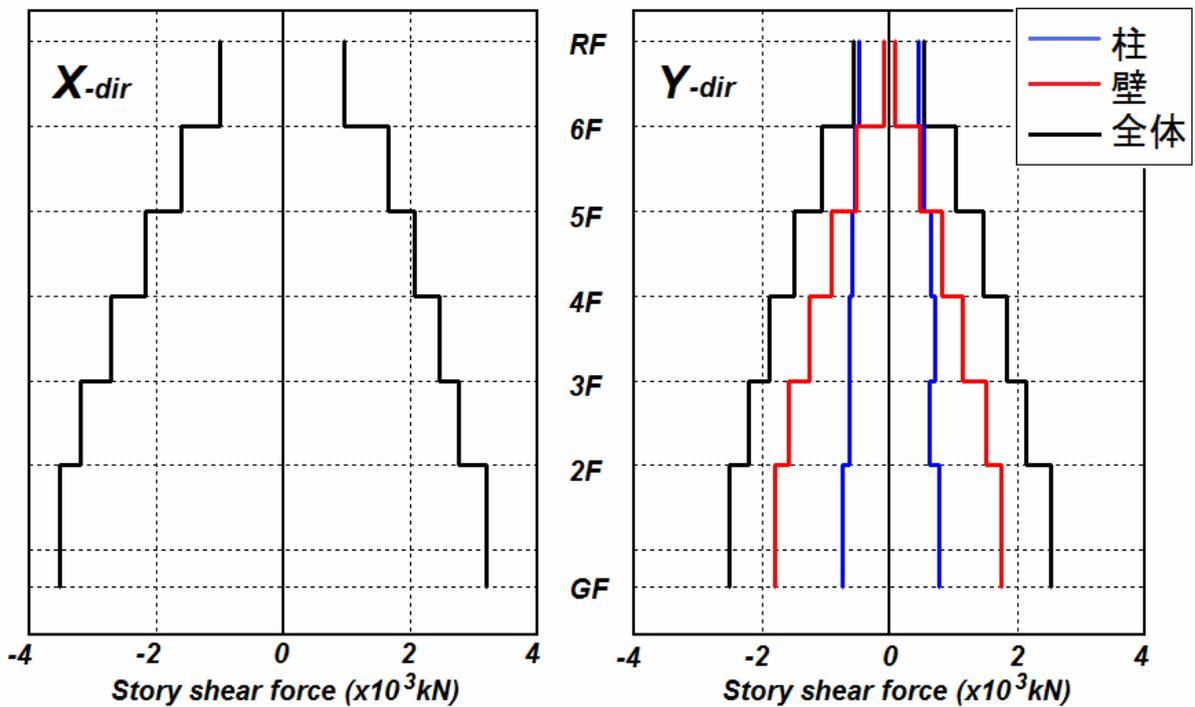


図 41 1軸バネモデルによる最上階応答変位波形

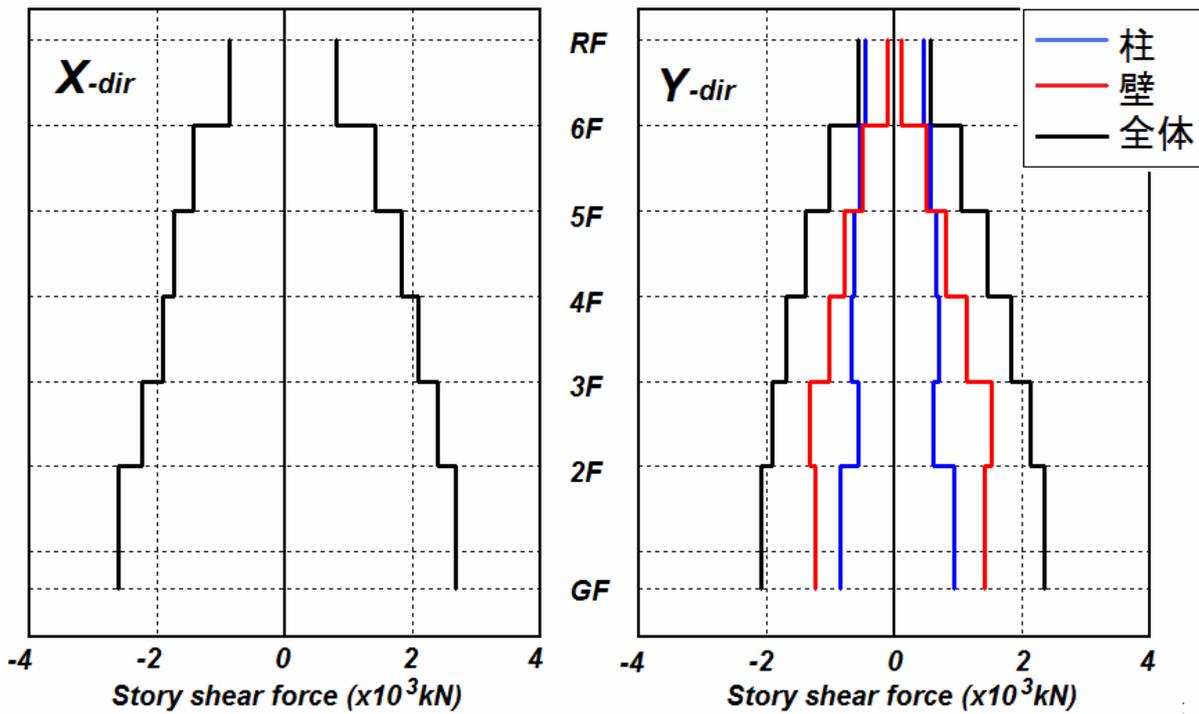


(a) 1 回目入力 (El Centro 1940)

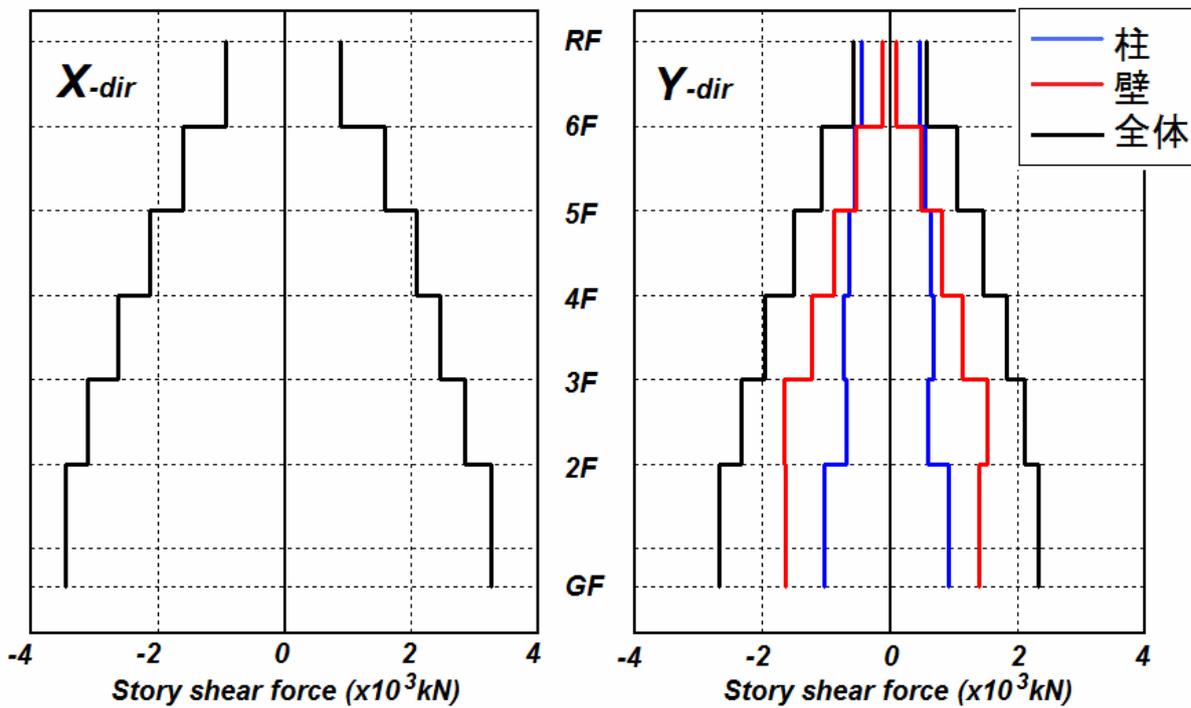


(b) 2 回目入力 (JMA Kobe 1995 × 0.45)

図 42 MSモデルによる応答層せん断力分布



(a) 1 回目入力 (El Centro 1940)



(b) 2 回目入力 (JMA Kobe 1995 × 0.45)

図 43 1 軸バネモデルによる応答層せん断力分布

4) 高速度カメラ映像の動態解析

a) 業務の概要

短柱の破壊状況を把握・解明するため、高速度カメラによる映像の動態解析を行った。解析対象は、平成17年度にE-Defenseで実施された実大6層鉄筋コンクリート建物試験体の震動破壊実験でせん断破壊した1層の短柱X1Y2である。解析対象加振は、JMA Kobe波100%加振とした。解析に用いた高速度カメラ映像は、毎秒250フレームで撮影した。解析に用いた高速度カメラ映像（静止画として保存したもの）を図45に示す。

b) 動態解析の概要

2次元動態解析ソフトウェアを用いることにより、指定した各ポイントを追尾（トラッキング）することによりそのポイントの変位・速度などの2次元情報を得ることができる。ソフトウェアでは、まず、追尾対象ポイントを囲む範囲（追尾範囲）とサンプリング周期内で対象ポイントが移動すると予測される範囲（探査範囲）を指定する。探査範囲内を1ドットずつずらしながら、前画面の追尾範囲との相関係数を求める。もっとも相関係数が大きい（濃度パターンが一致していると思われる）部分の中心座標を追尾座標とする。求めた追尾座標を次画面での探査範囲の中心において探査範囲を設置し、同様の処理を繰り返していく。図45にソフトウェア画面を示す。柱X1Y2内の10点を選び、動態解析を行っている。図の左側が高速度カメラ映像、右上が各点の変位、右下が各点の速度である。

b) 動態解析の概要

動態解析により得られた柱X1Y2柱頭（梁付け根）の変位を図46に示す。

実験で撮影した映像の解像度は1ピクセルあたり約2.80mmであり高精細とは言い難いが、大破し、応答が約100mmに達した柱の水平変位の解析には足りる解像度である。図46(a)によれば、柱頭の最大水平変位は87.09mmに達している。一方、腰壁内の高さ750mmの点では12.52mmであり、柱の変形の大部分は腰壁より上で生じているのがわかる。また、図46(b)によれば、柱頭の鉛直変位は次第に沈下する方向で増加しており、最終的に約45mmの沈下を生じている。このように、変位計による計測では得られない柱の詳細な変形状況を把握することができた。一方、同様にせん断破壊した隣接する柱X1Y3において、インダクタンス式変位計により計測した柱頭の最大応答水平変位は91.48mmであり、高速度カメラ映像による解析ではこれと近い最大値が得られていると言える。



図44 動態解析に用いた高速度カメラ映像（静止画として保存したもの）

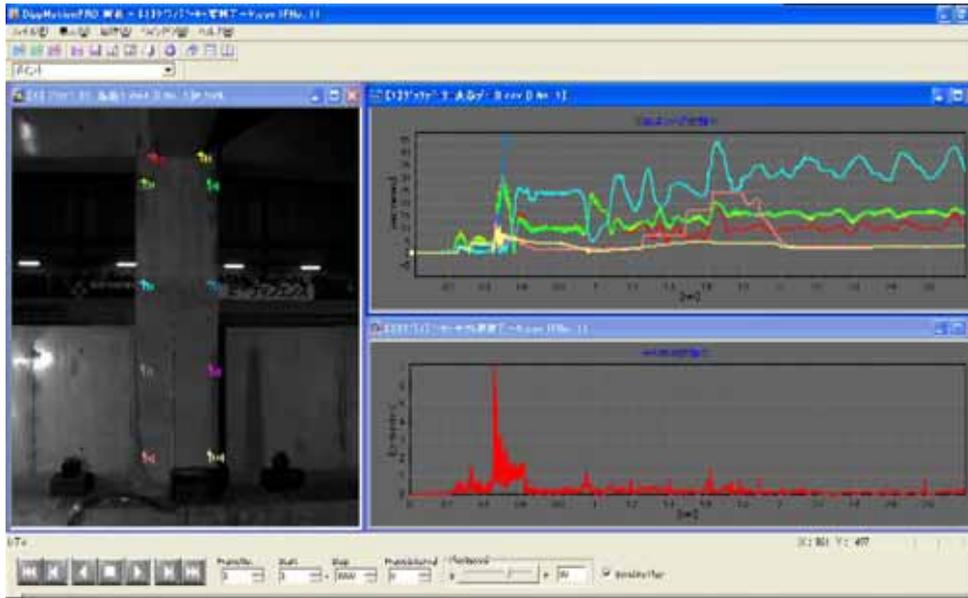
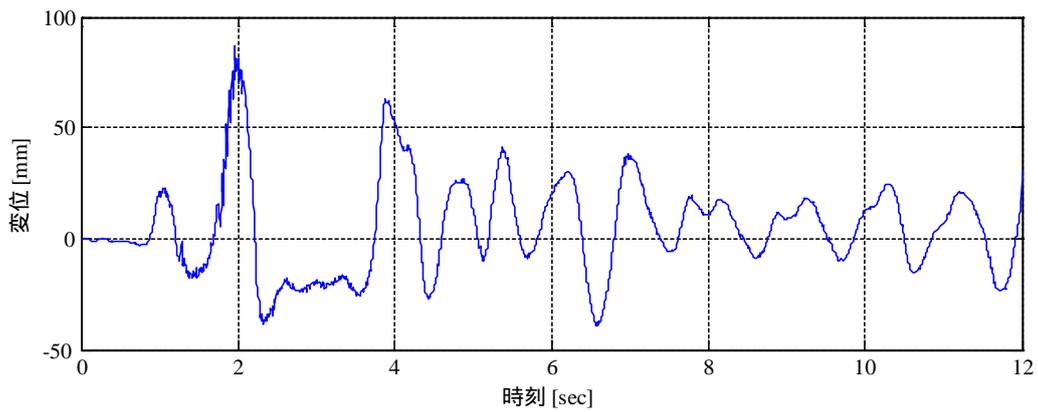
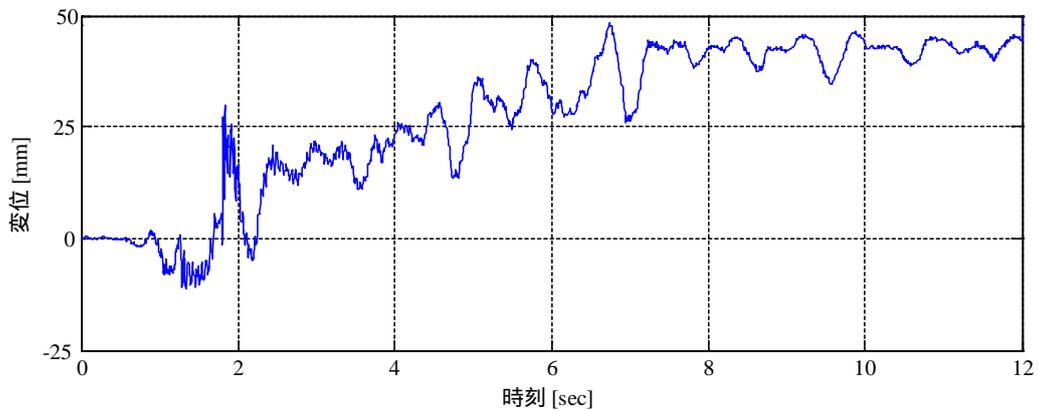


図 45 ソフトウェア画面（MS Windows 画面）
 高速度カメラ映像（左）と柱各部位の変位（右上）・速度（右下）の解析



(a) 水平変位



(b) 鉛直変位（下向きを正とする）

図 46 柱 X1Y2 柱頭（梁付け根）の変位

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究は次のようにまとめられる。

1) 平成17年度に E-Defense で実施された実大6層鉄筋コンクリート建物震動実験の検証解析によれば、1階の耐震壁を1要素とした場合はせん断変形が過小評価され、2要素に分割することによりせん断変形をより適切に評価できる。また、主加振方向であるY方向について、最大加振時の1階層間変形の最大値を除き、ベースシア、耐震壁の水平耐力などの誤差は最大で-17%と、実験結果を良く再現することができた。ただし、実験で観測された1階耐震壁脚部のすべり変位を再現するためには、接合要素を設ける必要がある。

2) 平成18年度に行われた実大3層鉄筋コンクリート建物震動実験の無補強試験体に関する予備解析によれば、基礎固定で125%JMA Kobe波を入力する場合、1階の層間変形角が1/20程度になり、試験体は1階の層崩壊により崩壊に至る。基礎を固定しない場合、5.0~8.0cm程度の水平滑動変位(スウェイ)を生じ、JMA Kobe波125%を入力しても崩壊には至らない。

3) MSモデルによれば、軸力の変動により最大応答層せん断力が増大する場合がある。ただし、MSモデルによる大加速度入力への解析は今後の課題である。

4) 高速度カメラ映像を動態解析することにより、変位計による計測では得られない柱の詳細な変形状況を把握することができた。

平成14年度から平成18年度までの5年間に渡り、3次元動的解析システムの研究開発を行った。各年度の研究成果を次に纏める。

平成14年度は、平面応力状態における耐震壁のマクロパネル要素モデルを提案し、耐震壁部材の静的繰返し載荷解析機能を開発し、耐震壁部材実験の実験結果による検証を行った。

平成15年度は、はり、柱部材のフレーム要素モデルを開発し、繰返し載荷による耐力の劣化現象を再現し、はり部材の静的繰返し載荷実験の実験結果による検証を行った。

平成16年度は、3次元構造の静的、動的解析機能を開発し、縮小試験体の動的実験による検証解析を行った。また、E-Defenseで行われる実大6層鉄筋コンクリート建物実験の予備解析を行った。

平成17年度は、材料強度、入力地震波レベルをパラメータとし、E-Defenseで行われる実大6層鉄筋コンクリート建物実験の静的、動的解析を行った。解析は、試験体の地震応答挙動、耐力、変形、崩壊形式などが良い精度で再現できた。

平成18年度は、3次元6成分(並進3成分、回転3成分)入力による解析を可能にし、E-Defenseで実施された実大6層鉄筋コンクリート建物実験の検証解析を行い、システムの解析精度を検証した。また、平成18年度に実施された実大3層建物実験の予備解析を行った。

本業務においては、鉄筋コンクリート建物の3次元動的解析システムを開発し、建物が崩壊に至るまでの挙動を良い精度で再現することができた。

(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

(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 T. KABEYASAWA	Average Stress-strain Relationship of Steel Bars Embedded in Concrete	13 th World Conference on Earthquake Engineering	1-6 August, 2004
Shaohua CHEN Tomoya Matsui Taizo Matsumori T. KABEYASAWA	Collapse Analysis of Reinforced Concrete Structure under Earthquakes	The First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures	6-8 July, 2005
Shaohua CHEN Tomoya Matsui Taizo Matsumori T. KABEYASAWA	Analytical Research of Full-Scale Reinforced Concrete Structure Test on E-Defense	100th Anniversary Earthquake Conference, 8th US National Conference on Earthquake Engineering	17-21 April, 2006
陳 少華 松森 泰造 松井 智哉	E - ディフェンスによる実大6層 鉄筋コンクリート建物実験 その5 耐震壁の挙動に関する解析	日本建築学会、2006年度大 会	2006年9月

(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	静的荷重による初期解析(節点荷重) 静的非線形増分解析(変位増分、荷重増分) 三次元地震動入力による動的非線形応答解析