

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 17 年度業務目的

(2) 平成 17 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 18 年度業務計画案

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 17 年度業務目的

平成 16 年度までは、部材モデルの開発を開発し、三次元動的解析システムの開発を完成した。平成 17 年度は、三次元動的解析システムの解析検証を用いて、E-Defense で行われる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 17 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 17 年度の本研究では、E-Defense で実施される実大 6 層鉄筋コンクリート建物試験体の震動破壊実験の挙動を予測するため、試験体の予備解析研究を行った。

実大鉄筋コンクリート造 6 層建物試験体は、1970 年代建設マンションを想定し、平面は 2×3 スパン (10m×15m) であり、層高さは 2.5m であり、総重量は約 1000tonf に達する。試験体には、柱、梁と耐震壁などの構造部材以外に袖壁と腰壁が含まれているが、スリットが設けていないため、予備解析では袖壁と腰壁を構造部材として考慮した。

予備解析では、当研究で開発した三次元動的解析システムを用いて、静的外力によるブッシュオーバー解析と JMA Kobe 波による動的時刻歴応答解析を行った。動的解析では、阪神淡路地震の JMA Kobe 波 (3 成分) を入力地震波とし、原波の 100%入力レベルで 1 階の耐震壁は曲げ降伏後コンクリートの圧縮破壊によりせん断破壊が発生し、1 階の総水平耐力が急激に低下し、1 階の層崩壊により試験体が崩壊した。

(b) 業務の成果

1) 試験体概要

試験体は、2×3 スパンの 6 階建てであり、各層の重量は 125tonf で、上部構造の総重量は 750tonf である。試験体は、耐震壁、袖壁、腰壁と短柱が混在し、平面図を図 1 に示す。また、各フレームの軸組図は、図 2, 3 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 であり、配筋は表 1 に示す。耐震壁と袖壁は、壁厚が 15cm であり、配筋は D10@300 のダブル配筋である。腰壁は、壁厚が 12cm であり、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、断面寸法は 20×20cm であり、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	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19
2 階 ~ 4 階	上部	3D19	3D19	3D19	3D19	3D19	3D19	3D19	3D19
	下部	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19	2D19

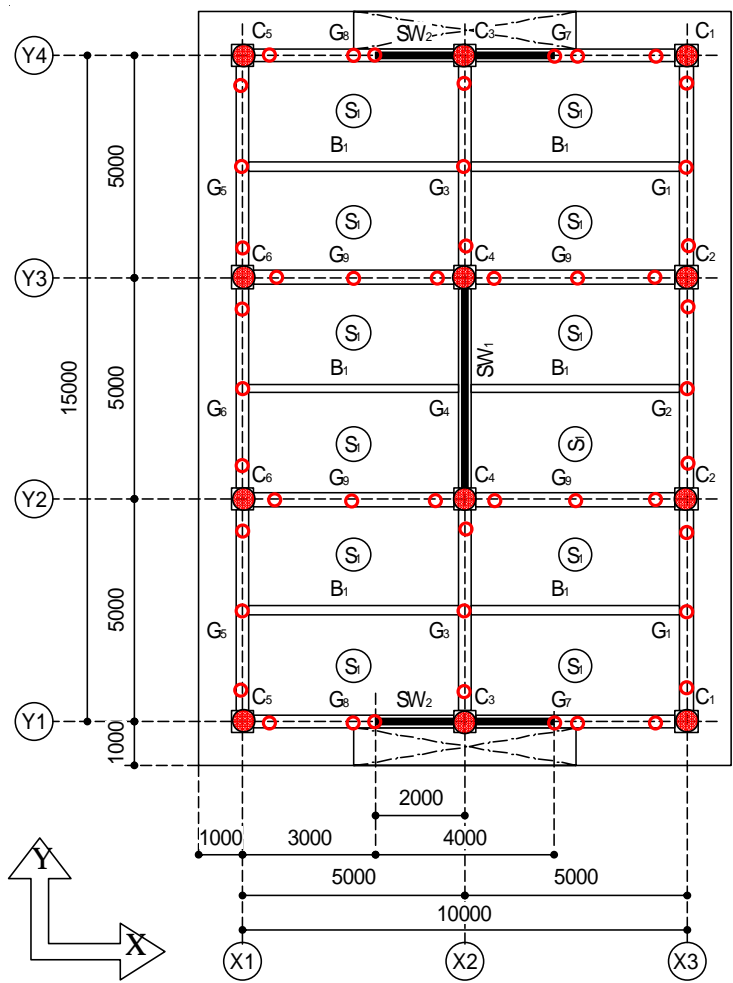


図 1 試験体平面図

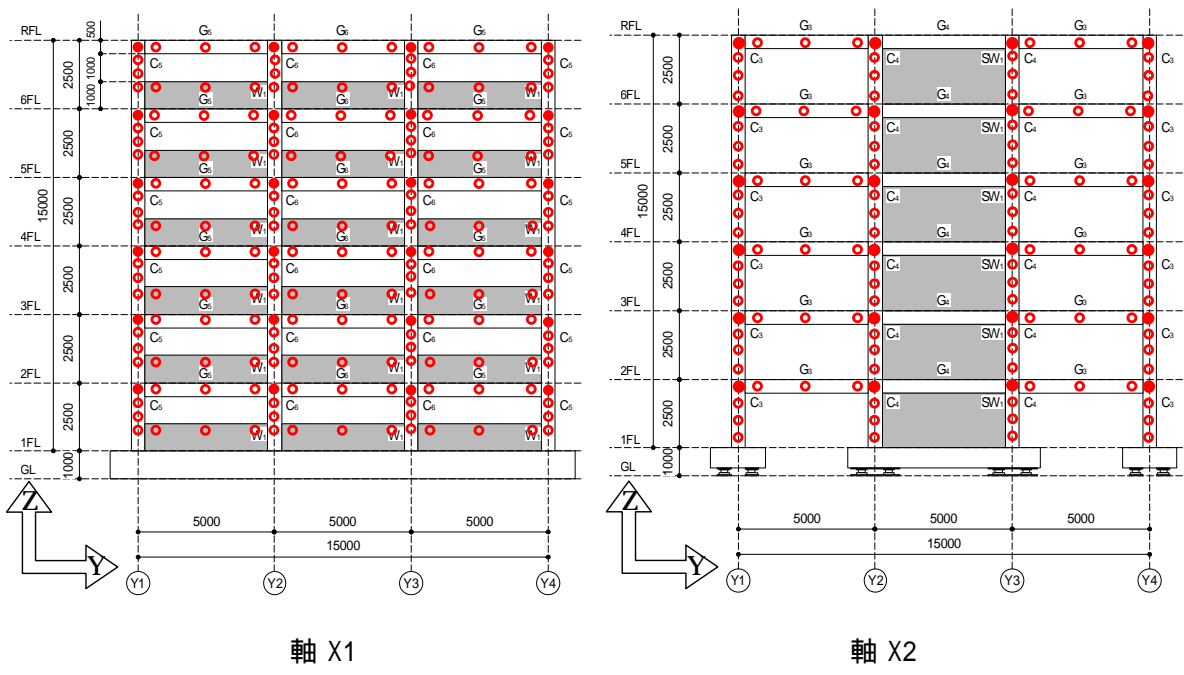


図 2 軸 X1、X2 の軸組図

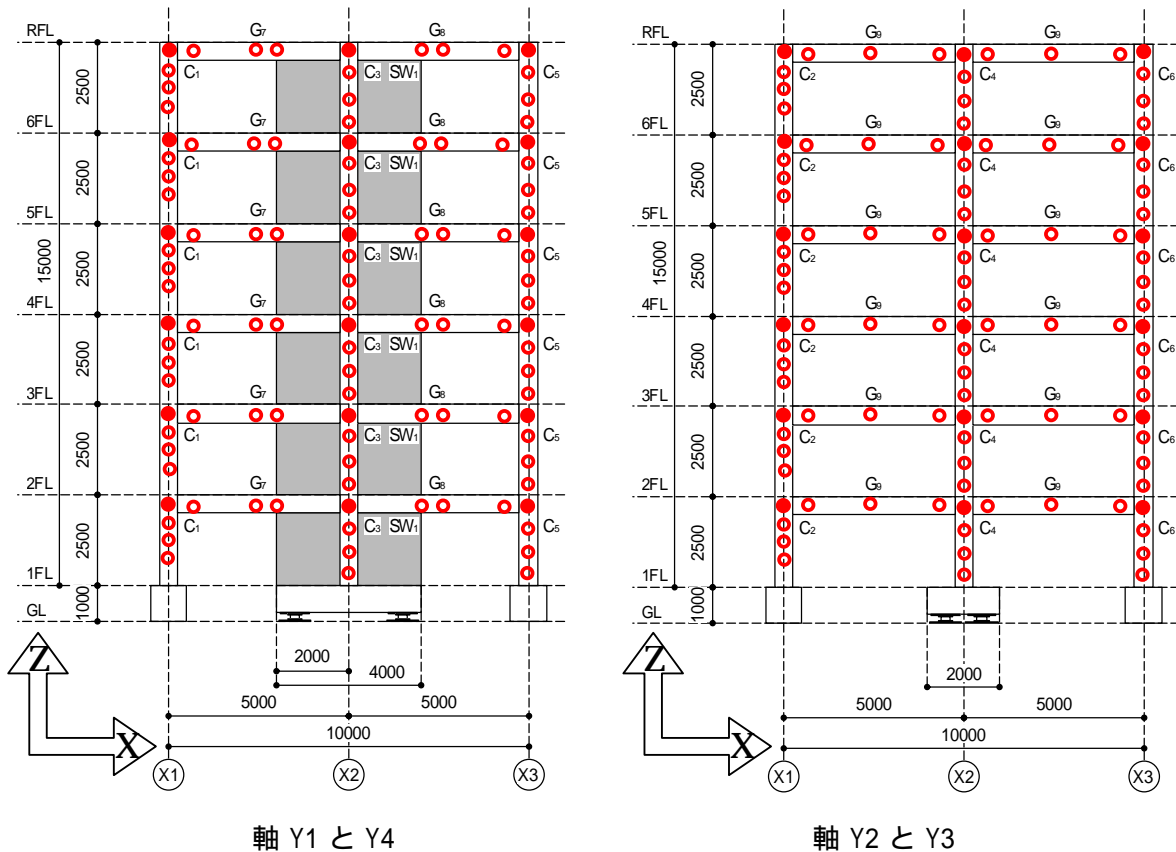


図 3 軸 Y1 と Y4、Y2 と Y3 の軸組図

2) 解析モデル及び解析ケース

a) 解析モデル

予備解析では、試験体が崩壊するまでの過程を予測することを目的とし、材料の力学特性に基づく部材モデルを用いて行った。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、耐震壁、袖壁及び腰壁には4節点パネル要素³⁾を用いた。

試験体全体の節点配置は、柱と梁を4個のフレーム要素に分割し、耐震壁は各階を1個のパネル要素にモデル化し、図4に示す。また、腰壁、袖壁の詳細的なモデル化は、周辺の柱、梁を含めて、図5、6に示す。

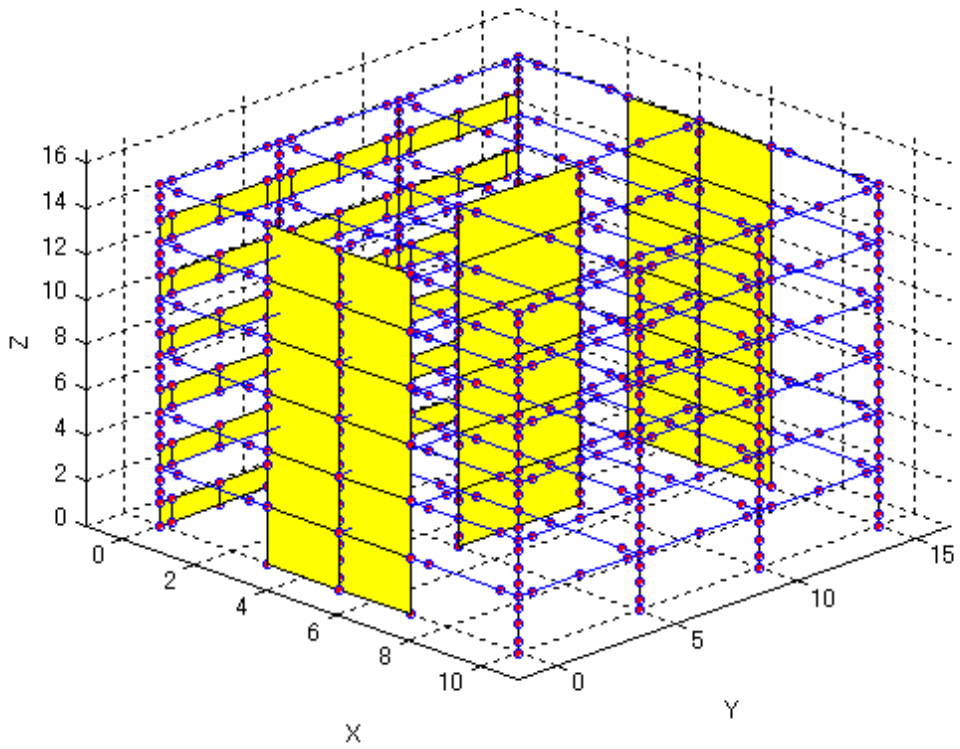


図 4 解析モデル

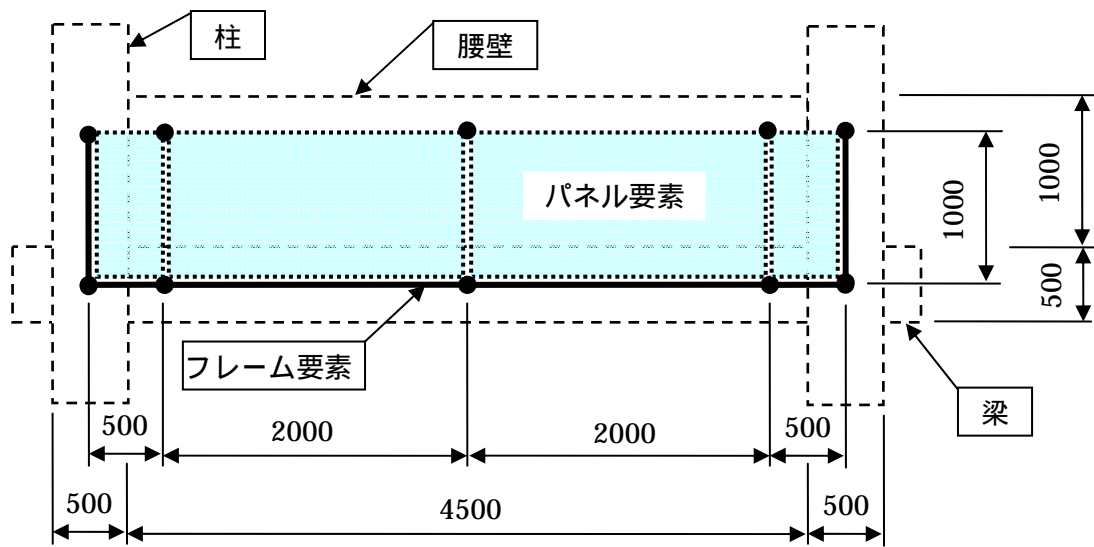


図 5 腰壁のモデル化

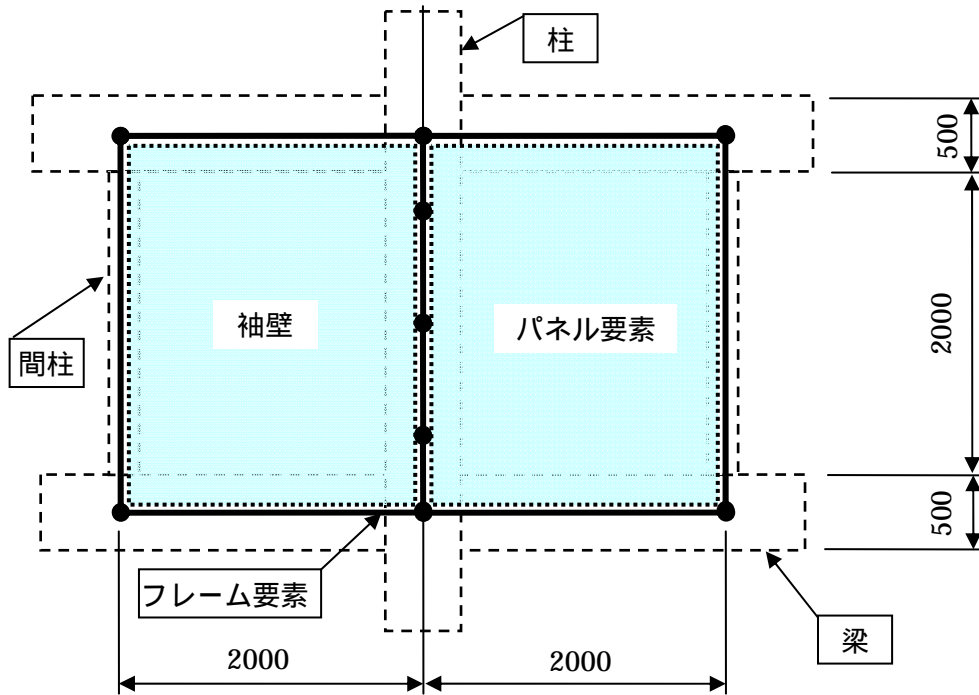


図 6 袖壁のモデル化

b) 解析ケース

予備解析では、JMA Kobe 波を入力地震波とし、原波の低いレベルから高いレベルの順での加振を想定し、それぞれの加振は 24 秒間とし、連続解析を行った。解析ケースは、コンクリートの強度（実験と同日に材料試験を行うため、予備解析では予測値を使用する）と入力レベルの組み合わせの 3 ケースを表 2 に示す。加振方向は、水平 2 方向と鉛直 1 方向とし、Y 方向を主加振方向とし、JMA Kobe 波の水平成分を -45° 回転する(図 7、図 8)。比較のため、逆三角形分布外力による静的プッシュオーバー解析を行った。

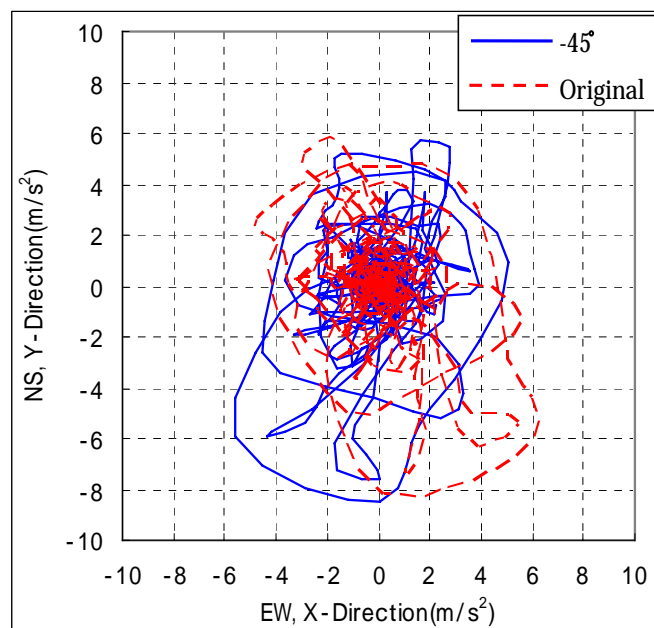


図 7 入力地震波の水平成分オービット図

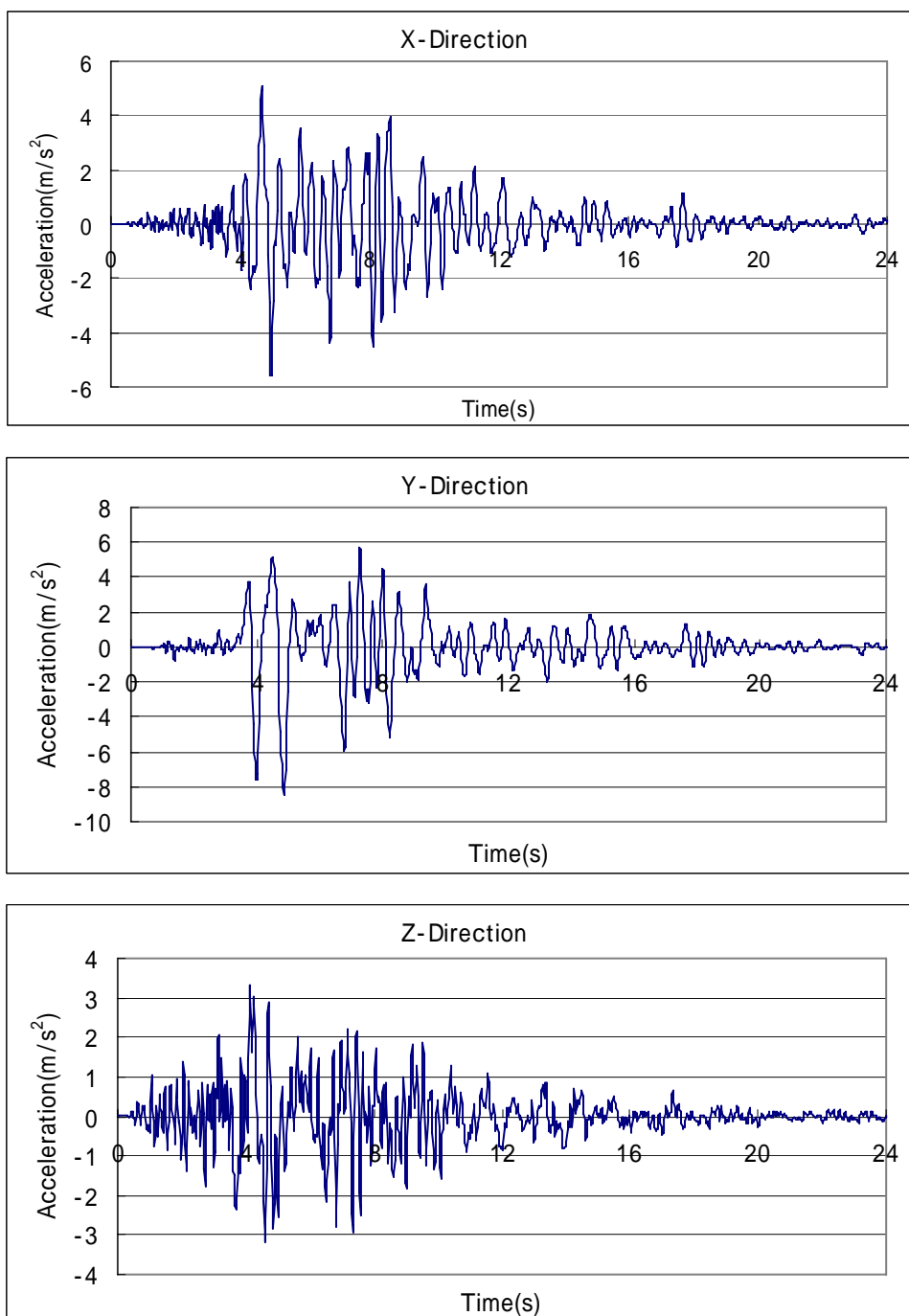


図 8 入力地震波 JMA Kobe (- 45 ° 回転後)

表 2 解析ケース一覧表

ケース	コンクリート強度 (MPa)	連続入力する地震波レベル (%)
CASE-1	2 4	2 0 - 4 0 - 1 0 0
CASE-2	2 4	4 0 - 6 0 - 8 0 - 1 0 0
CASE-3	3 0	4 0 - 6 0 - 8 0 - 1 0 0

3) 解析結果

a) CASE-1 の解析結果

主加振方向の Y 方向のベースシアと変形角の関係を図 9 と図 10 に示す。JMA Kobe 波の 40% までの動的解析では、Y 方向のベースシア係数最大値が 0.4 程度に留まり、JMA Kobe 波の 100% 入力の場合は、Y 方向の最大ベースシア係数が 0.86 に達する。最上階の Y 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角最大値は 1.4% であり、1 階の層間変形角最大値は 2.2% に達する。

X 方向のベースシアと変形角の関係を図 11 と図 12 に示す。JMA Kobe 波の 40% までの動的解析では、X 方向のベースシア係数最大値が 0.4 程度に留まり、JMA Kobe 波の 100% 入力の場合は、X 方向の最大ベースシア係数が 0.7 に達する。最上階の X 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角最大値は 1.1% であり、1 階の層間変形角最大値は 0.96% に留まる。

1 階の耐震壁のコンクリートの応力 ひずみ関係は、耐震壁のパネル要素のガウス積分点 (9 点) を用いて図 14 に示す。1 階耐震壁の中央から下部へ、コンクリートが圧縮破壊され、最大変位時の耐震壁のせん断耐力が最大値の半分程度に低下する (図 13)。

1 階の袖壁 (Y1 軸と Y4 軸) の水平せん断力と層間変形角の関係は、図 15 図 16 に示す。袖壁は、曲げ降伏が発生した後に顕著な耐力の低下はなく、崩壊には至らない。

X 方向、Y 方向の試験体全体変形角及び屋上階のねじれ変形角の時刻歴は、それぞれ図 17、図 18 と図 19 に示す。最上階のねじれ回転角最大値は、1% を越える。

また、試験体の高さに沿う水平変位分布は、図 20 図 21 に示す。X 方向変位分布は、試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布し、特定の層での変形集中がない。Y 方向変位分布は、JMA Kobe 波の 40% レベルまでの入力では試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布するが、JMA Kobe 波の 100% 入力時には、全体変形の約 35% が 1 階に集中し、1 階の層崩壊が発生する。

なお、図 9~13 には、試験体の高さ方向に逆三角形分布の静的外力によるプッシュオーバーの解析結果を太い実線で表示している。静的解析結果は、1 階の総せん断力と試験体の変形角の関係について概ね動的解析の結果を包絡している。

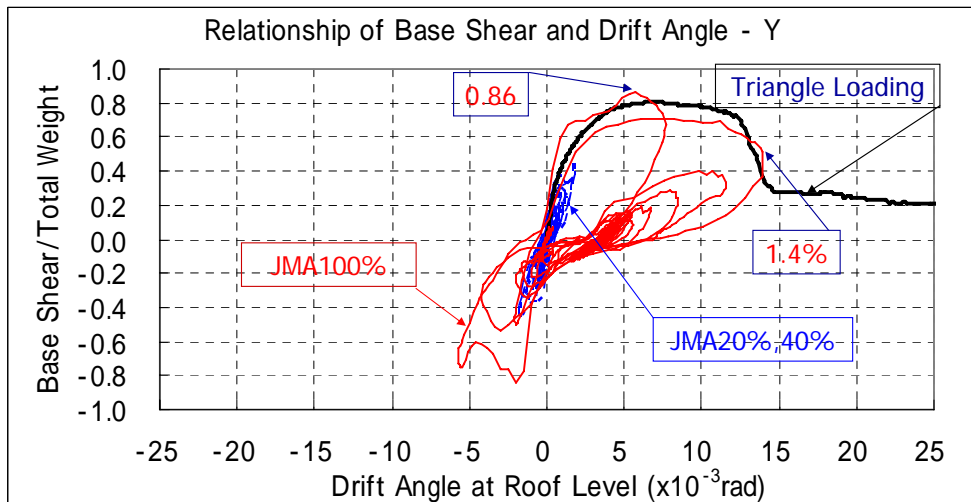


図 9 1階のY方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

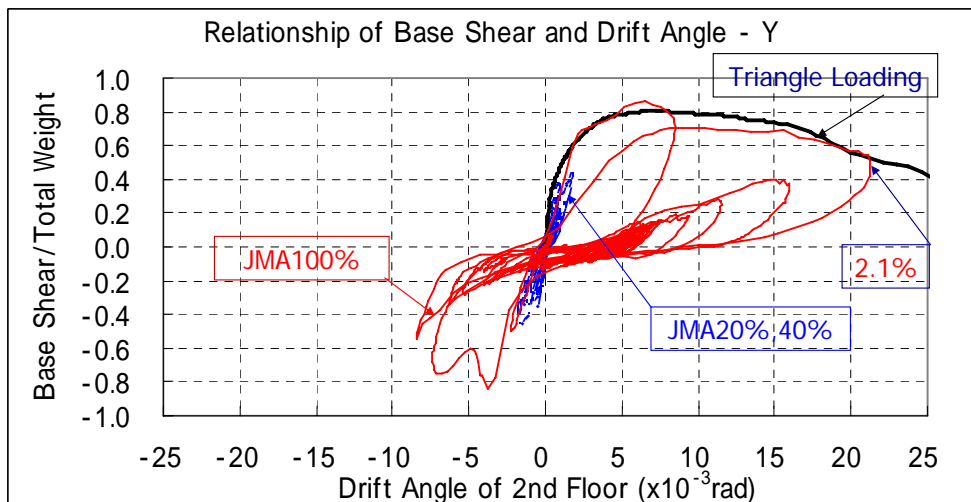


図 10 1階のY方向総せん断力と1階の層間変形角の関係

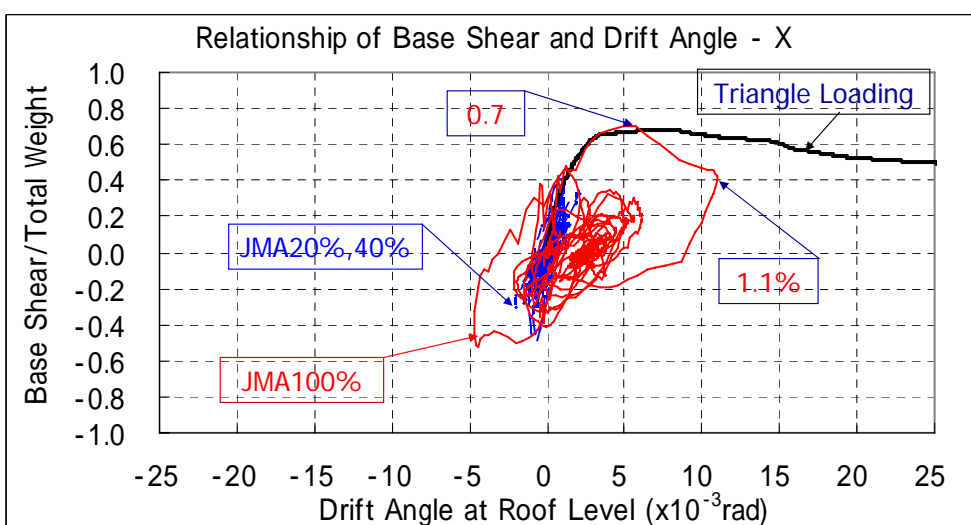


図 11 1階のX方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

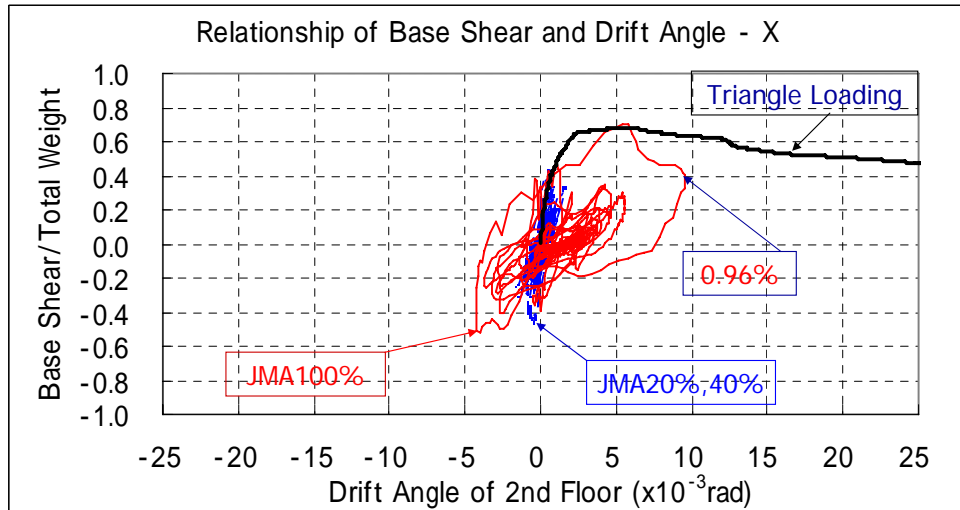


図 12 1階のX方向総せん断力と1階の層間変形角の関係

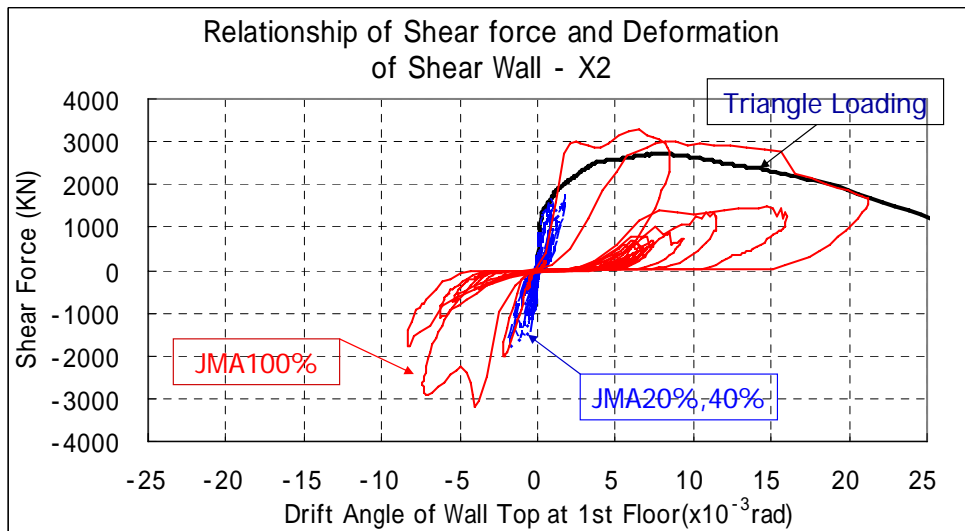


図 13 1階の耐震壁の水平せん断力と層間変形角の関係

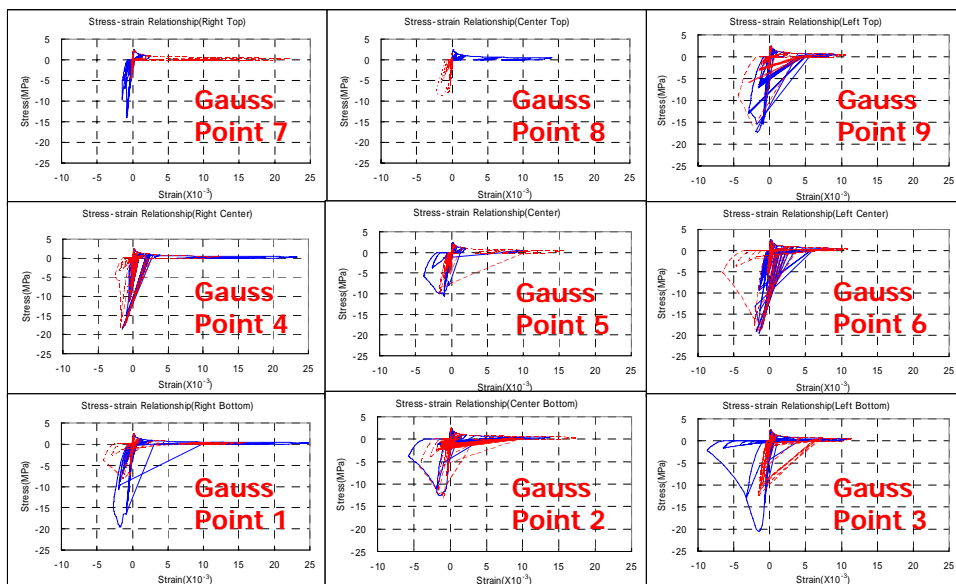


図 14 耐震壁の Gauss 積分点におけるコンクリートの応力 - ひずみ関係

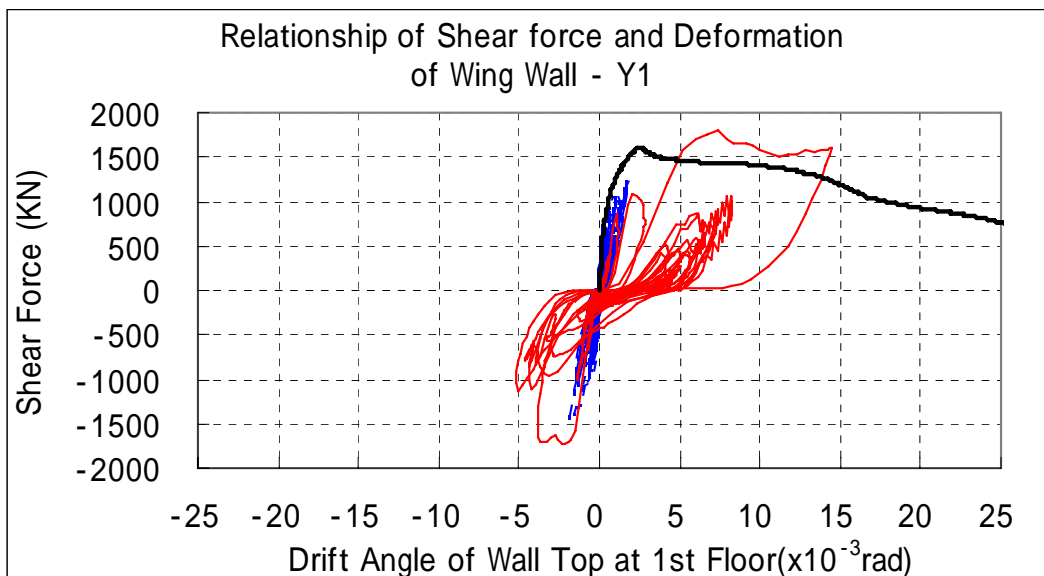


図 15 1階 Y1 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

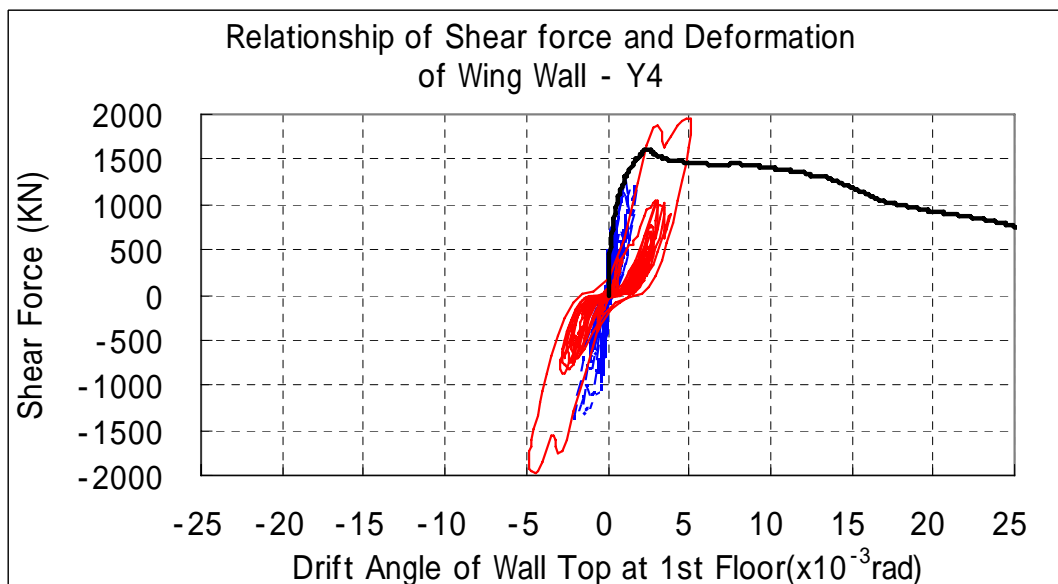


図 16 1階 Y4 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

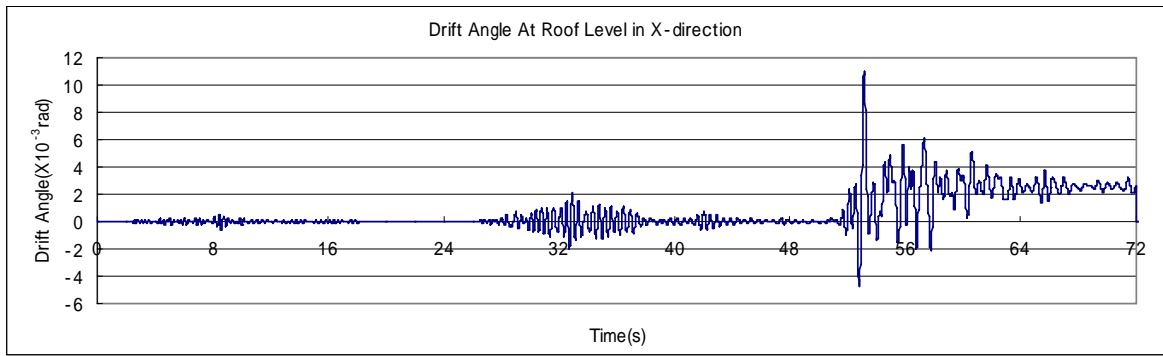


図 17 試験体の X 方向全体変形角時刻歴

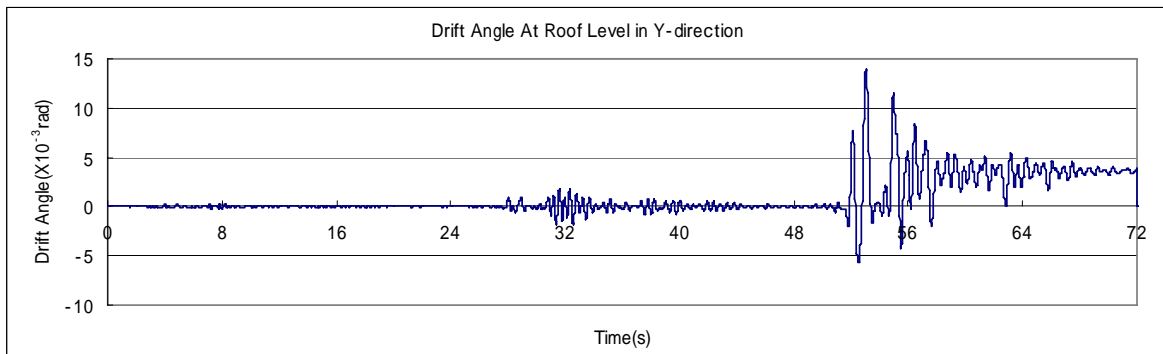


図 18 試験体の Y 方向全体変形角時刻歴

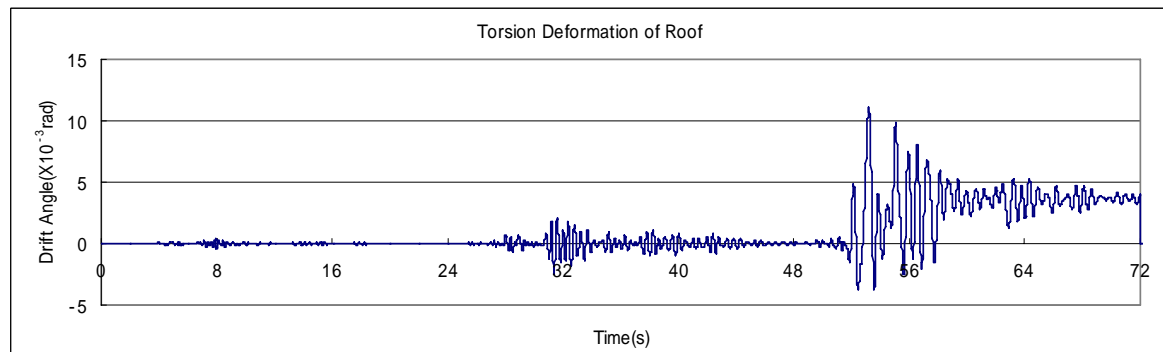


図 19 最上階のねじれ変形角時刻歴

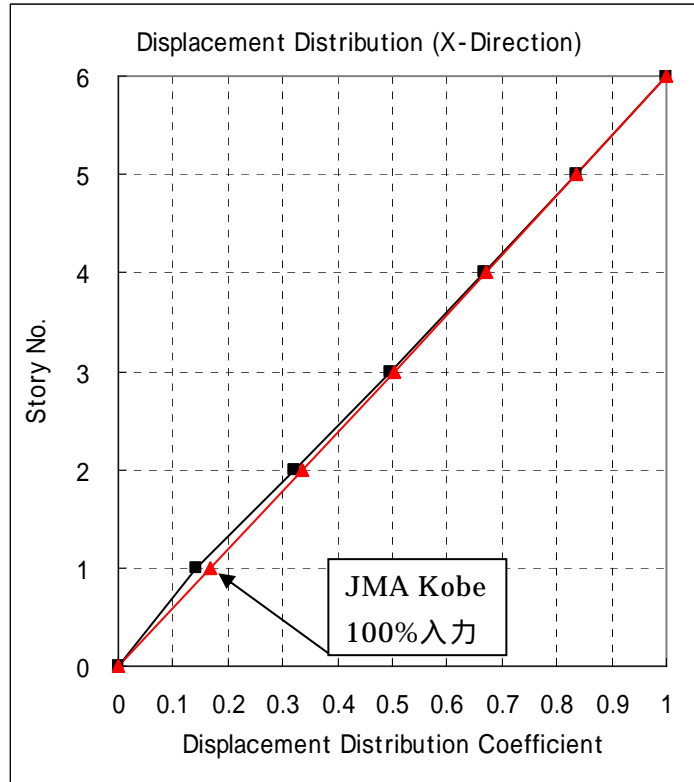


図 20 試験体高さに沿う X 方向変位分布

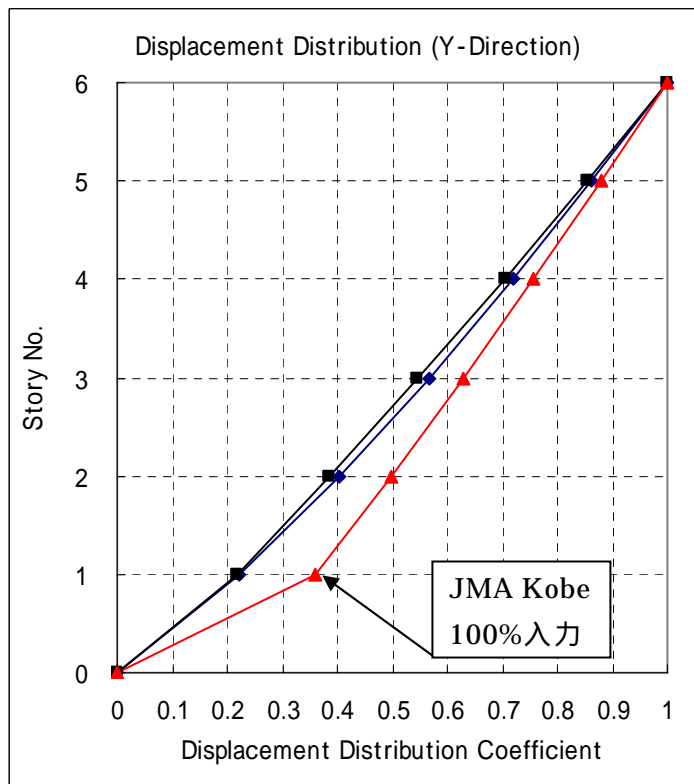


図 21 試験体高さに沿う Y 方向変位分布

b) CASE-2 の解析結果

主加振方向の Y 方向のベースシアと変形角の関係を図 22 と図 23 に示す。JMA Kobe 波の 60% までの動的解析では、Y 方向のベースシア係数最大値が 0.7 程度に達し、試験体は降伏域に入る。JMA Kobe 波の 80% 入力の場合は、Y 方向の最大ベースシア係数が 0.76 に達し、試験体の崩壊には至らない。JMA Kobe 波の 100% 入力の場合は、試験体がポストピーク領域に入り、耐力が顕著に低下し、試験体が崩壊する。最上階の Y 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角最大値は 2.2% であり、1 階の層間変形角最大値は 4.3% に達する。

X 方向のベースシアと変形角の関係を図 24 と図 25 に示す。JMA Kobe 波の 60% までの入力では、X 方向のベースシア係数最大値が 0.4 程度に留まり、JMA Kobe 波の 100% までの入力では、X 方向の最大ベースシア係数が 0.66 に達する。最上階の X 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角は 1.3% であり、1 階の層間変形角は 1.2% に留まる。

1 階の耐震壁のコンクリートの応力 ひずみ関係は、耐震壁のパネル要素のガウス積分点 (9 点) を用いて図 27 に示す。1 階耐震壁の全体のコンクリートが圧縮破壊され、最大変位時の耐震壁のせん断耐力が殆ど失われる (図 26)。

1 階の袖壁 (Y1 軸と Y4 軸) の水平せん断力と層間変形角の関係は、図 28 図 29 に示す。袖壁は、曲げ降伏が発生した後に顕著な耐力の低下はなく、崩壊には至らない。

X 方向、Y 方向の試験体全体変形角及び屋上階のねじれ変形角の時刻歴は、それぞれ図 30 図 31 図 32 に示す。最上階のねじれ回転角最大値は、2% 程度に達する。

また、試験体の高さに沿う水平変位分布は、図 33 図 34 に示す。X 方向変位分布は、試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布し、特定の層での変形集中がない。Y 方向変位分布は、JMA Kobe 波の 80% レベルまでの入力では試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布するが、JMA Kobe 波の 100% 入力時には、全体変形の約 33% が 1 階に集中し、1 階の層崩壊が発生する。

なお、図 22 ~ 24 には、試験体の高さ方向に逆三角形分布の静的外力によるプッシュオーバーの解析結果を太い実線で表示している。静的解析結果は、1 階の総せん断力と試験体の変形角の関係について概ね動的解析の結果を包絡している。

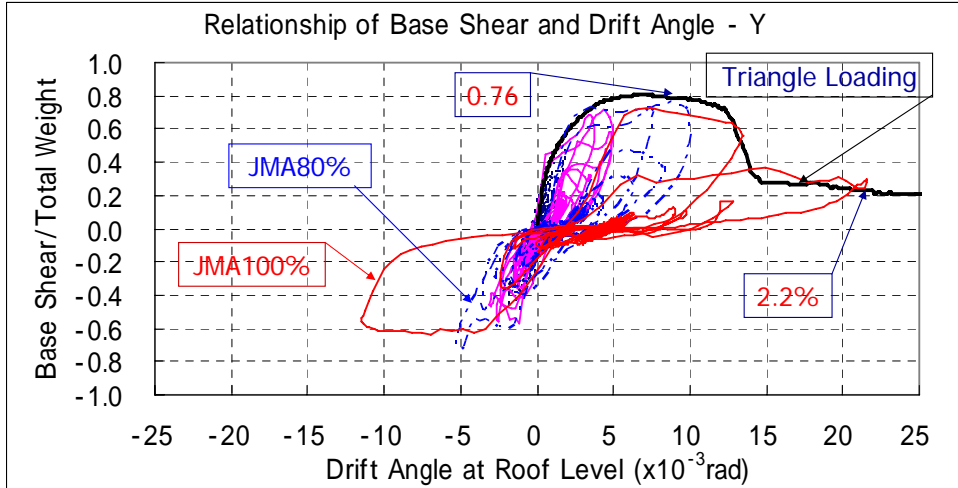


図 22 1階のY方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

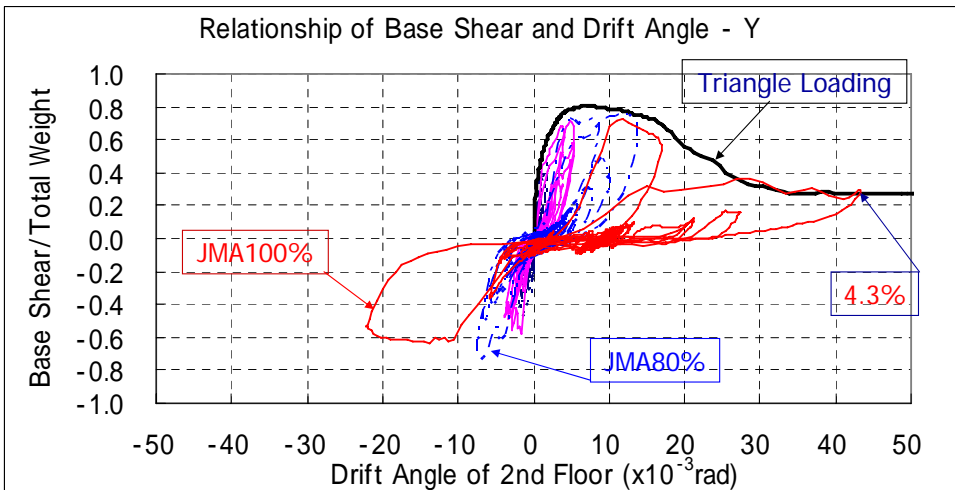


図 23 1階のY方向総せん断力と1階の層間変形角の関係

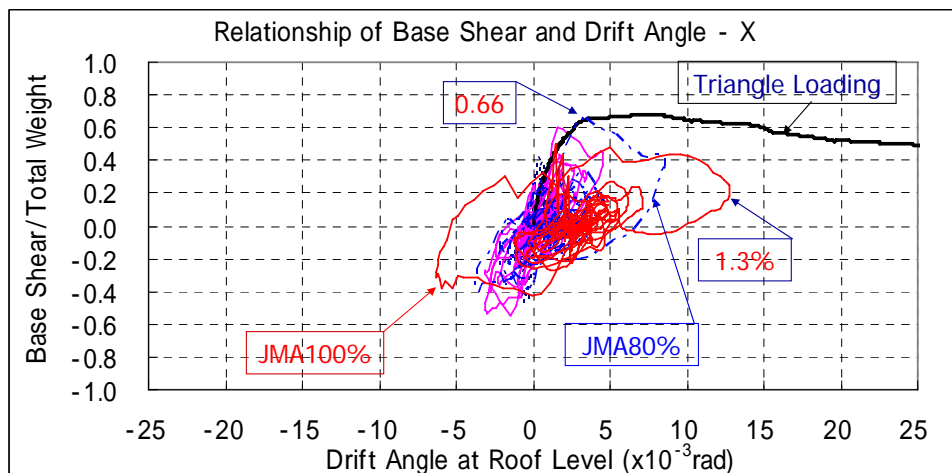


図 24 1階のX方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

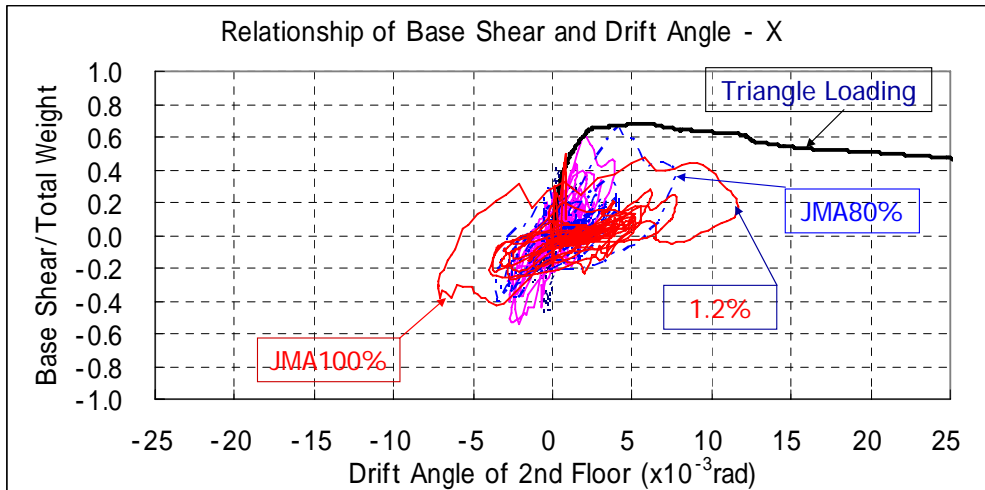


図 25 1階のX方向総せん断力と1階の層間変形角の関係

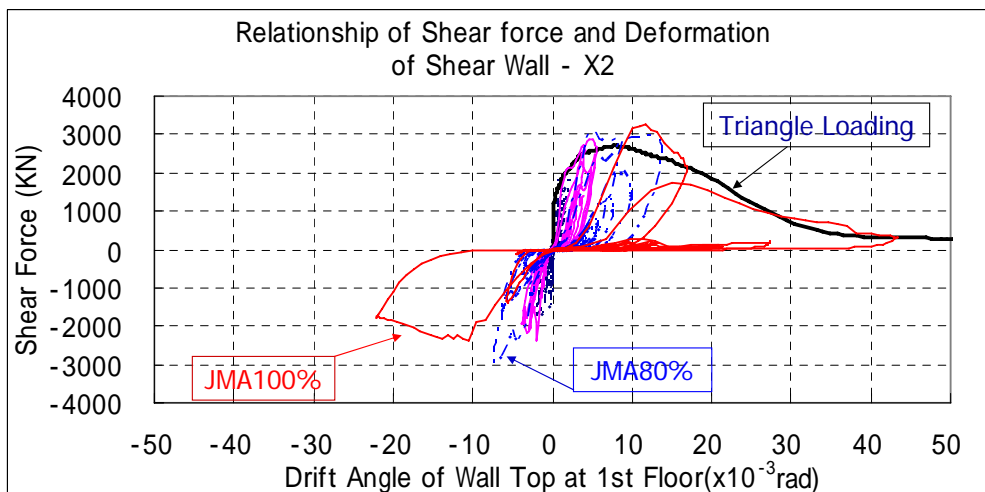


図 26 1階の耐震壁の水平せん断力と層間変形角の関係

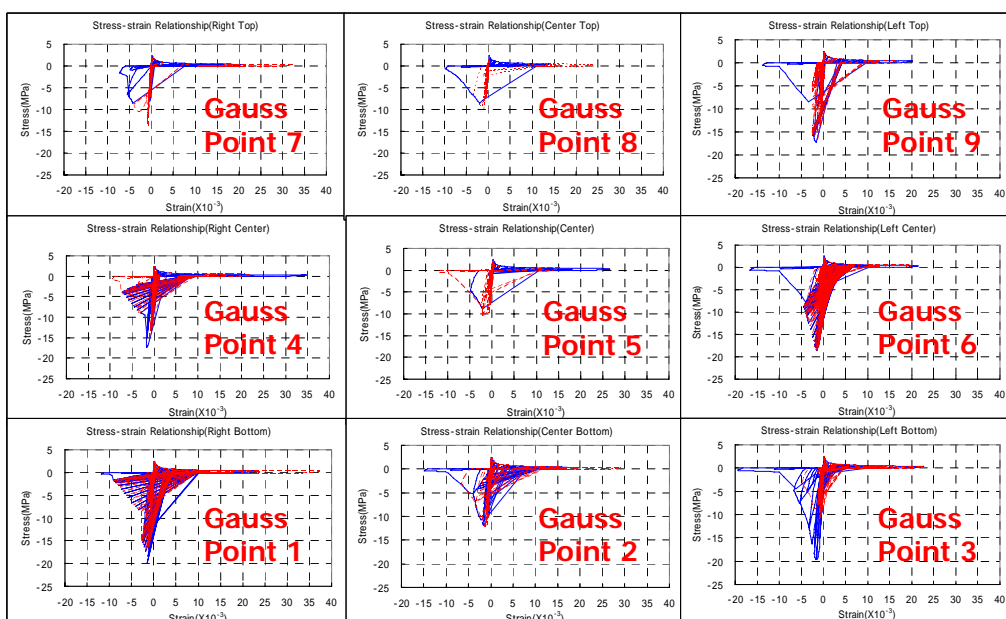


図 27 耐震壁の Gauss 積分点におけるコンクリートの応力 - ひずみ関係

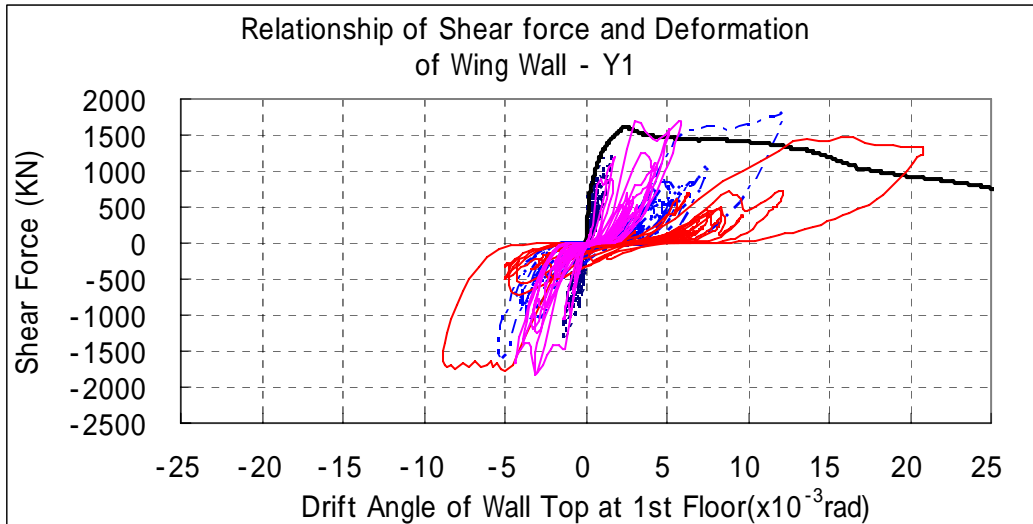


図 28 1階 Y 1 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

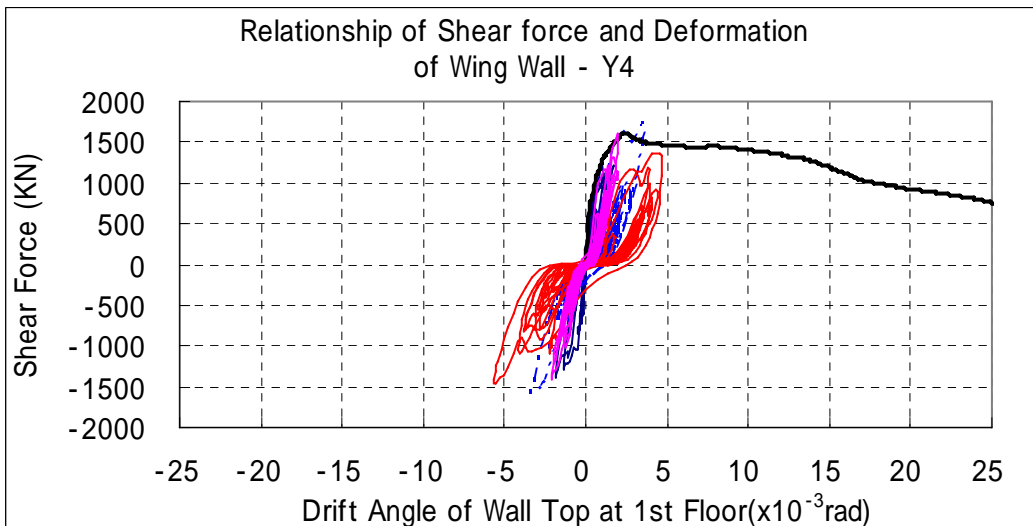


図 29 1階 Y 4 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

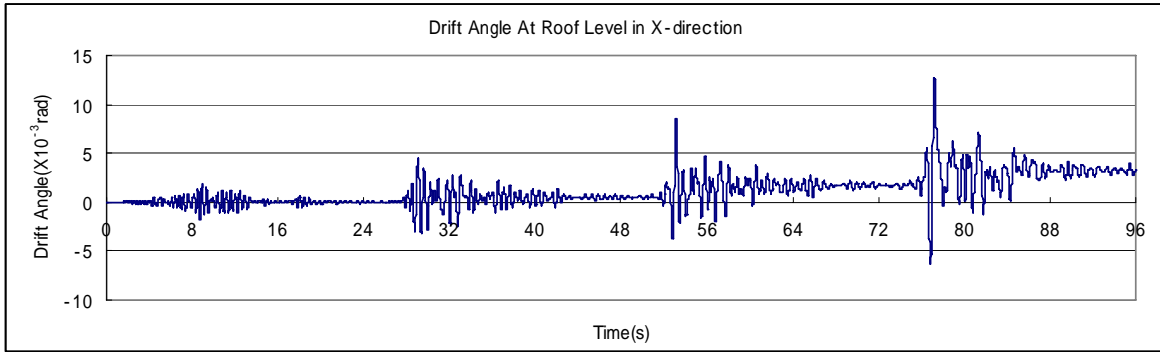


図 30 試験体の X 方向全体変形角時刻歴

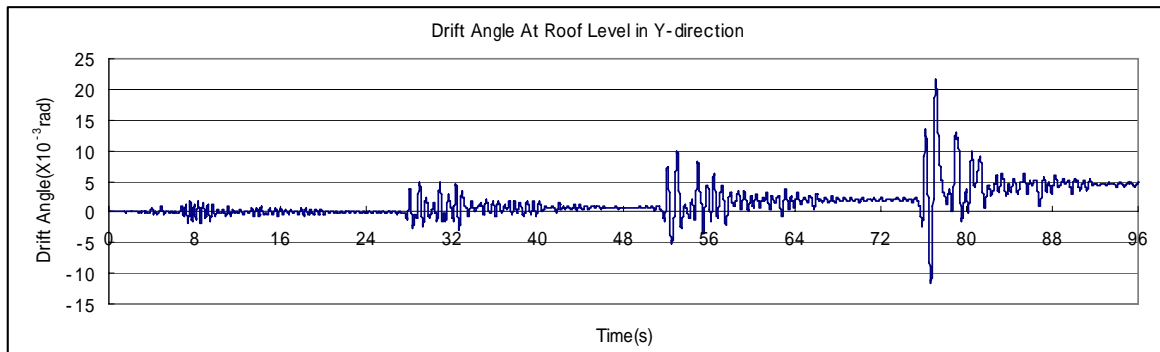


図 31 試験体の Y 方向全体変形角時刻歴

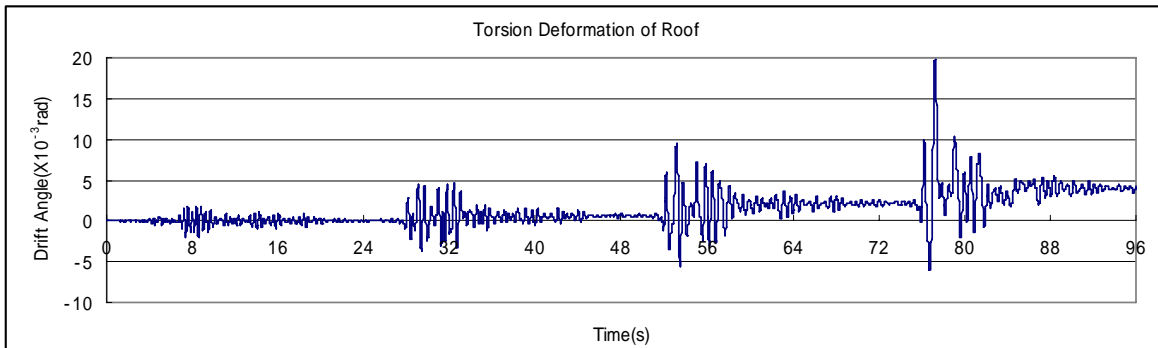


図 32 最上階のねじれ変形角時刻歴

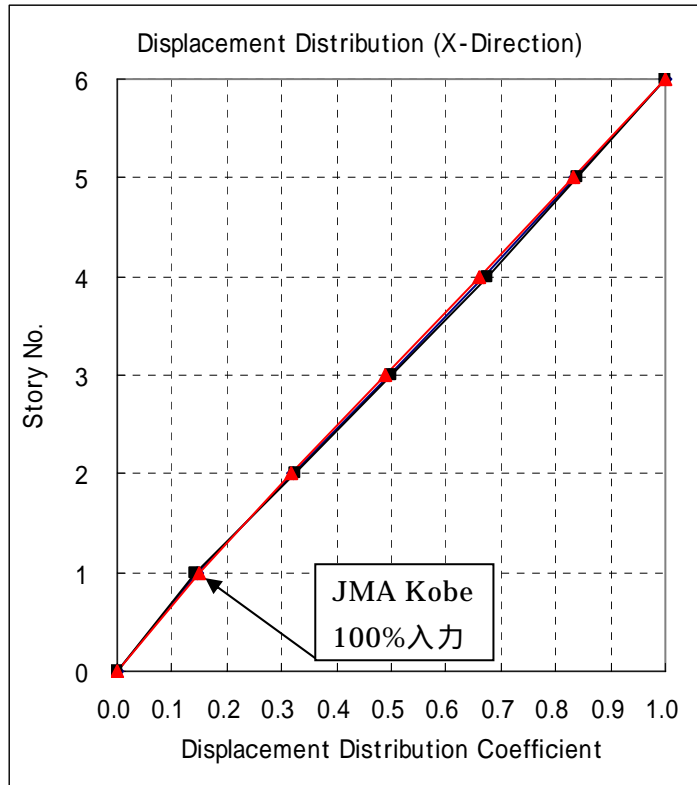


図 33 試験体高さに沿う X 方向変位分布

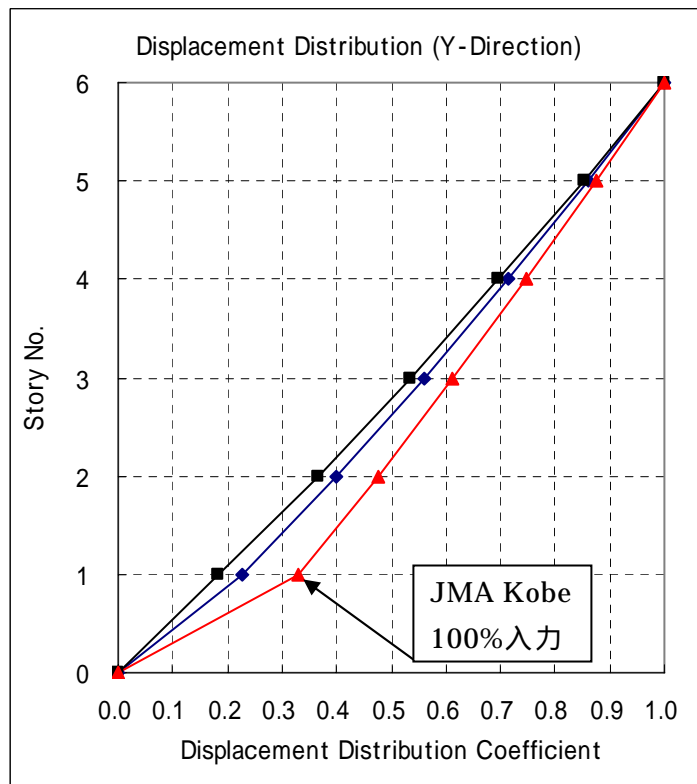


図 34 試験体高さに沿う Y 方向変位分布

c) CASE-3 の解析結果

主加振方向の Y 方向のベースシアと変形角の関係を図 35 と図 36 に示す。JMA Kobe 波の 60% までの動的解析では、Y 方向のベースシア係数最大値が 0.7 程度に達し、試験体は降伏域に入る。JMA Kobe 波の 80% 入力の場合は、Y 方向のベースシア係数最大値が 0.83 に達し、試験体の崩壊には至らない。JMA Kobe 波の 100% 入力の場合は、Y 方向のベースシア係数最大値が 0.94 に達した後にポストピーク領域に入り、耐力が顕著に低下し、試験体が崩壊する。最上階の Y 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角最大値は 1.7% であり、1 階の層間変形角最大値は 2.6% に達する。

X 方向のベースシアと変形角の関係を図 37 と図 38 に示す。JMA Kobe 波の 60% までの入力では、X 方向のベースシア係数最大値が 0.6 以下に留まり、JMA Kobe 波の 100% までの入力では、X 方向の最大ベースシア係数が 0.8 に達する。最上階の X 方向水平変形が試験体の高さに対する変形角は 1.2% であり、1 階の層間変形角は 1.1% に留まる。

1 階の耐震壁のコンクリートの応力 ひずみ関係は、耐震壁のパネル要素のガウス積分点 (9 点) を用いて図 40 に示す。1 階耐震壁の中央から下部のコンクリートが圧縮破壊され、最大変位時の耐震壁のせん断耐力が最大値の 1/3 に低下する (図 39)。

1 階の袖壁 (Y1 軸と Y4 軸) の水平せん断力と層間変形角の関係は、図 41 図 42 に示す。袖壁は、曲げ降伏が発生した後に顕著な耐力の低下はなく、崩壊には至らない。

X 方向、Y 方向の試験体全体変形角及び屋上階のねじれ変形角の時刻歴は、それぞれ図 43 図 44 と図 45 に示す。最上階のねじれ回転角最大値は、1.5% 程度に達する。

また、試験体の高さに沿う水平変位分布は、図 46 図 47 に示す。X 方向変位分布は、試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布し、特定の層での変形集中がない。Y 方向変位分布は、JMA Kobe 波の 80% レベルまでの入力では試験体高さ方向に沿ってほぼ均等に分布するが、JMA Kobe 波の 100% 入力時には、全体変形の約 33% が 1 階に集中し、1 階の層崩壊が発生する。

なお、図 35 ~ 35 には、試験体の高さ方向に逆三角形分布の静的外力によるプッシュオーバーの解析結果を太い実線で表示している。静的解析結果は、1 階の総せん断力と試験体の変形角の関係について概ね動的解析の結果を包絡している。

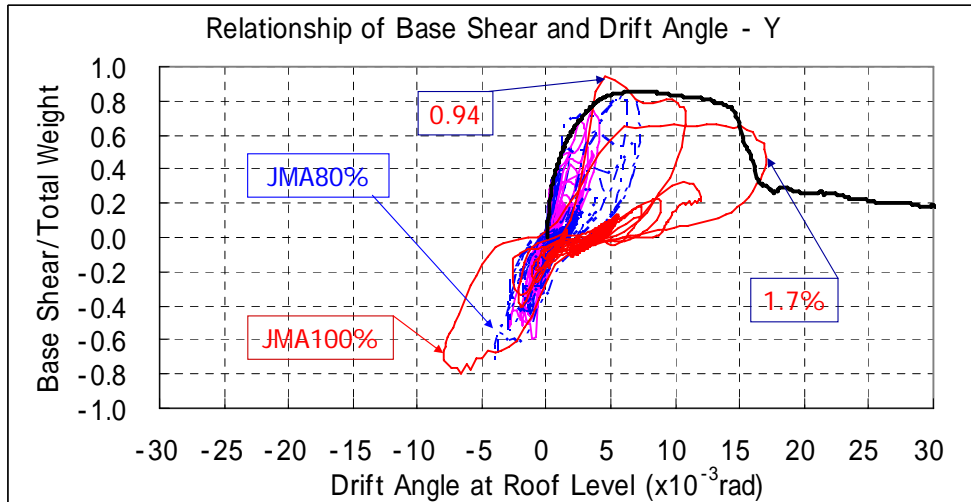


図 35 1階のY方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

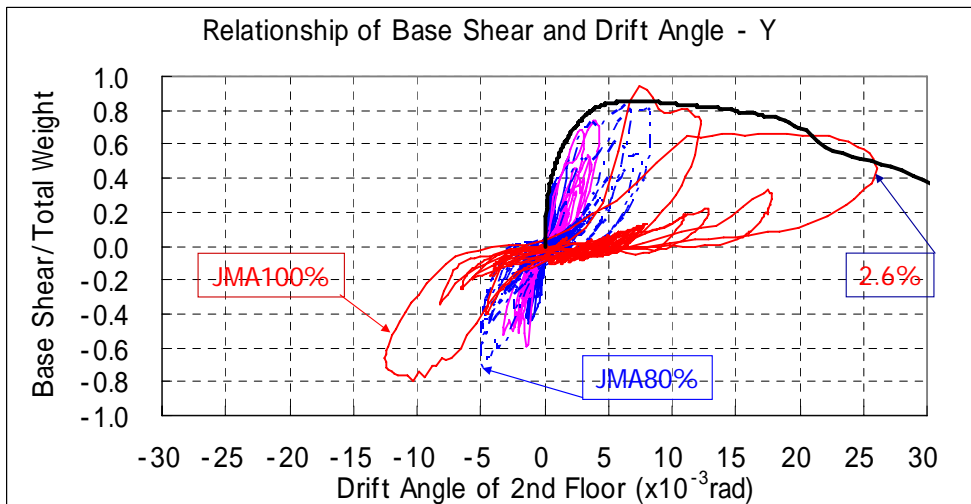


図 36 1階のY方向総せん断力と1階の層間変形角の関係

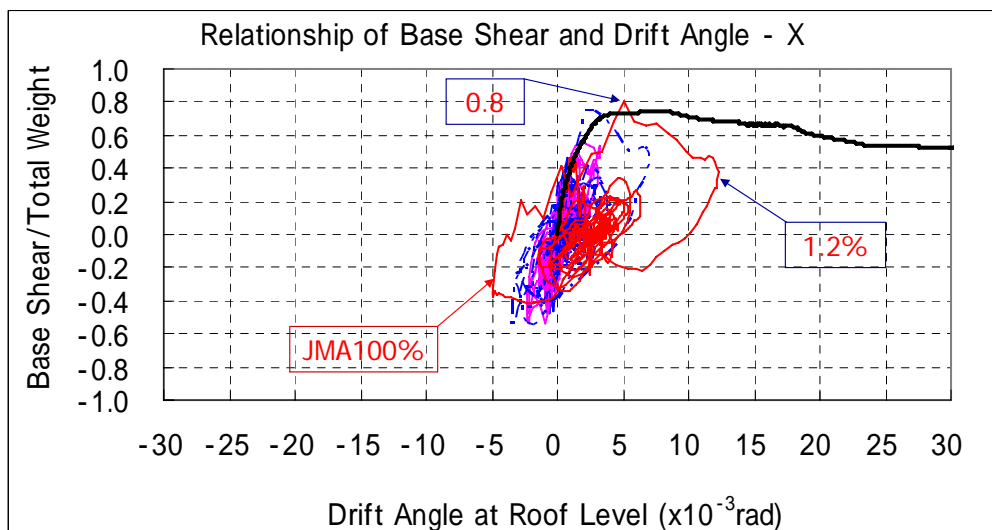


図 37 1階のX方向総せん断力と試験体全体変形角の関係

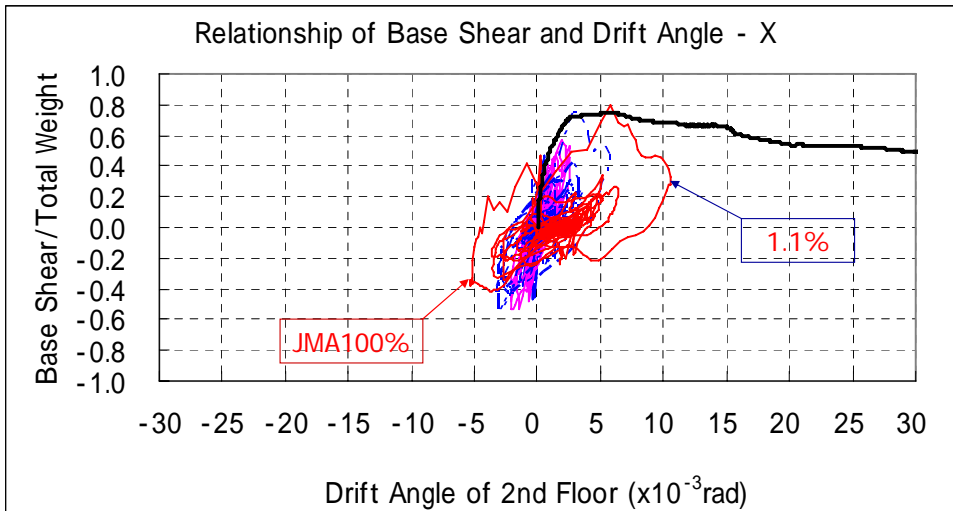


図 38 1 階の X 方向総せん断力と 1 階の層間変形角の関係

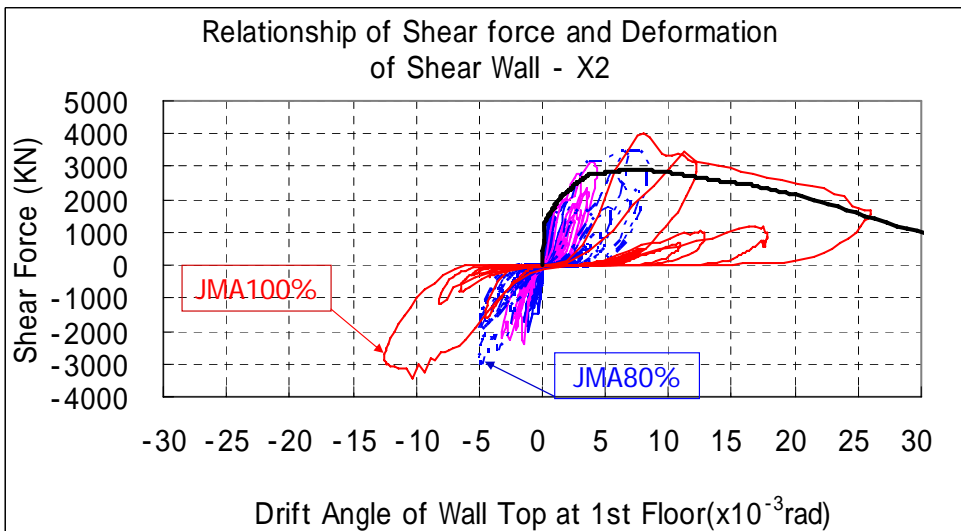


図 39 1 階の耐震壁の水平せん断力と層間変形角の関係

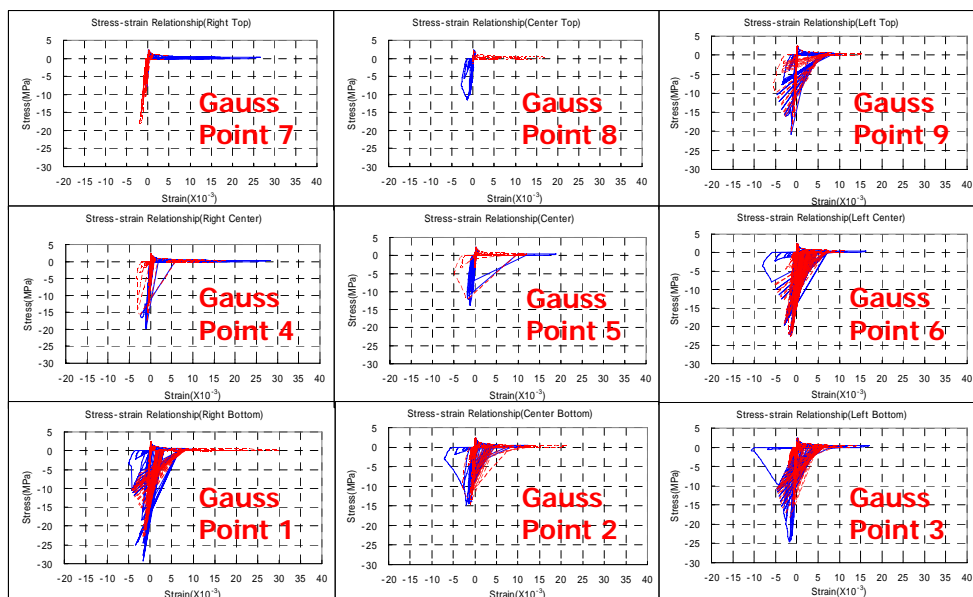


図 40 耐震壁の Gauss 積分点におけるコンクリートの応力 - ひずみ関係

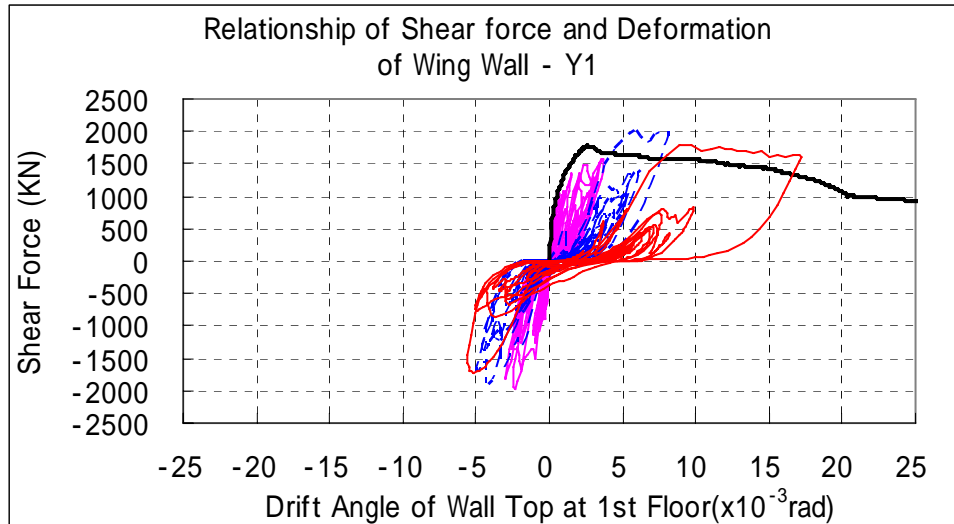


図 41 1階 Y 1 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

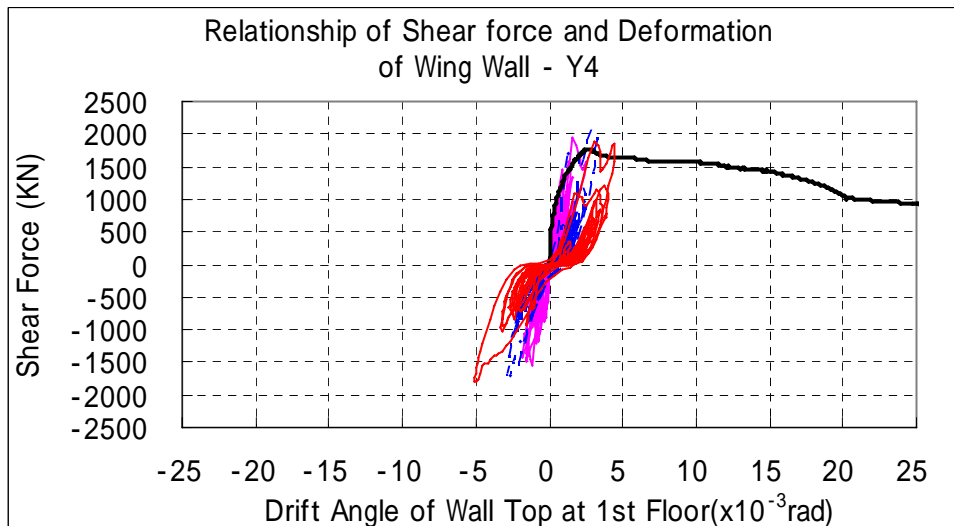


図 42 1階 Y 4 軸袖壁の水平せん断力と層間変形角の関係

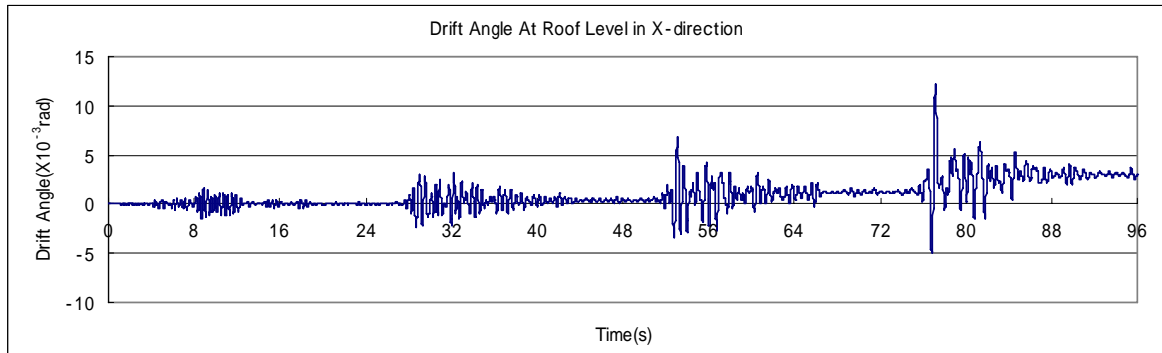


図 43 試験体の X 方向全体変形角時刻歴

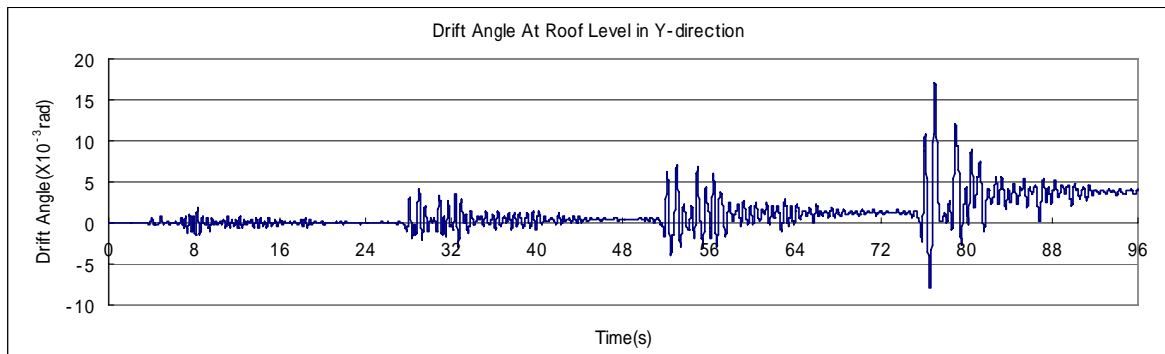


図 44 試験体の Y 方向全体変形角時刻歴

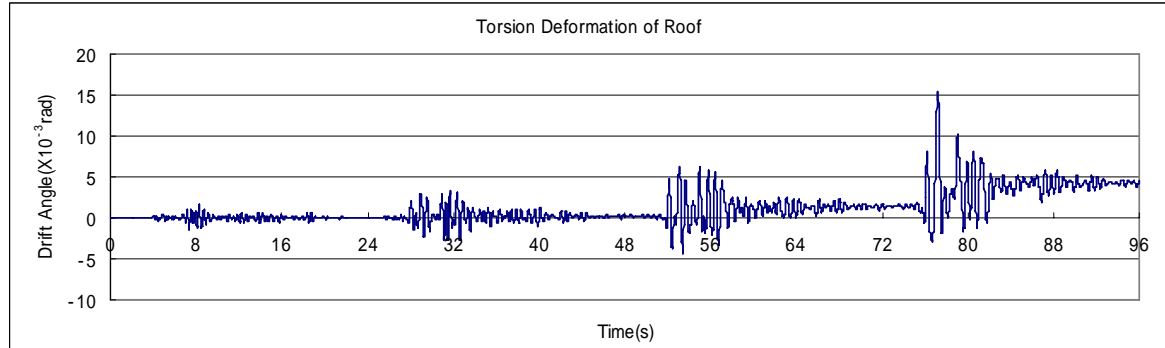


図 45 最上階のねじれ変形角時刻歴

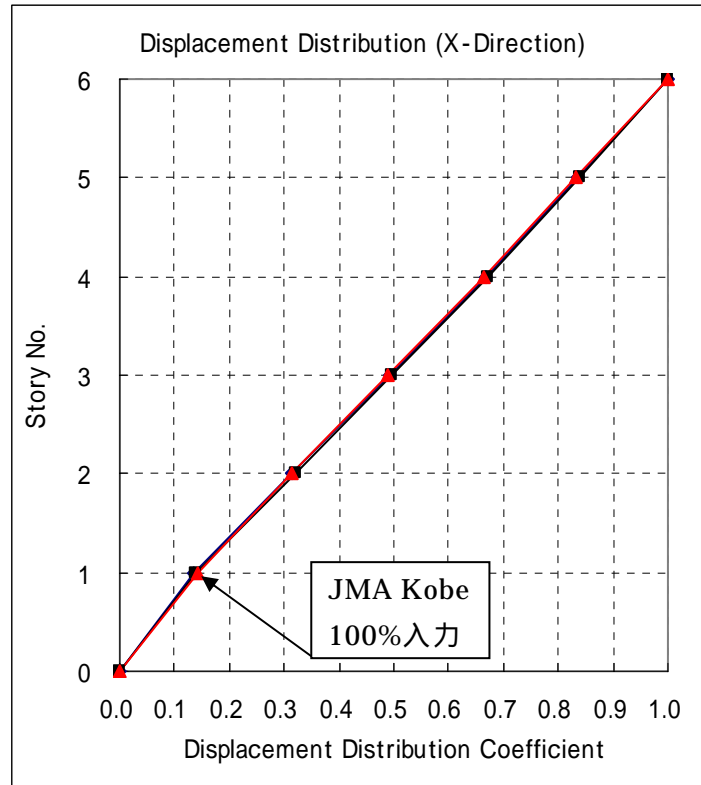


図 46 試験体高さに沿う X 方向変位分布

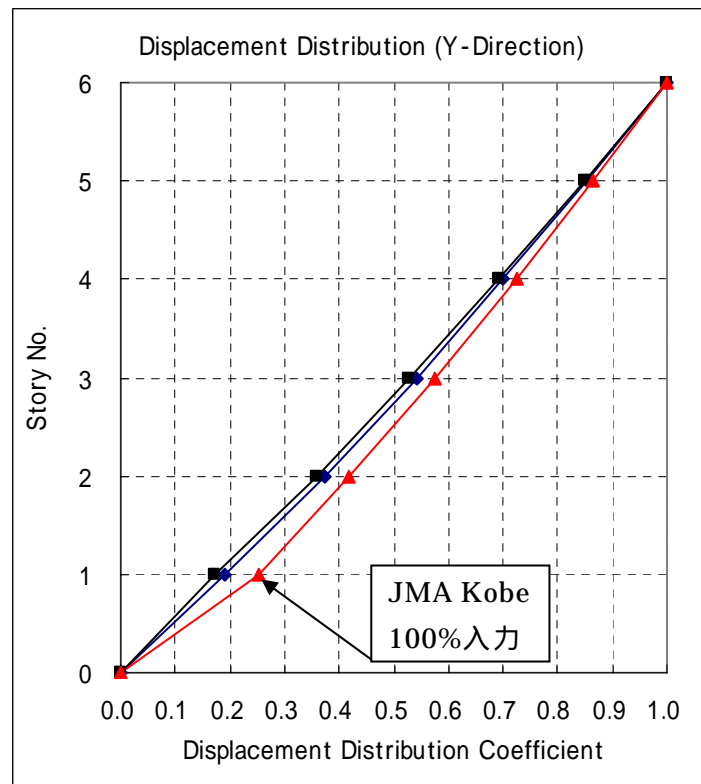


図 47 試験体高さに沿う Y 方向変位分布

(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) 試験体は、JMA Kobe 波の 100%入力で主加振方向の Y 方向に 1 階の層崩壊により崩壊すると予測する。1 階の Y 方向の水平層間変形角の最大値は、2%を超える。X 方向全体水平変形角及び 1 階の層間変形角の最大値は 1.5%以下である。

2) Y 方向の最大ベースシア係数は、CASE-1、CASE-2 と CASE-3 の場合でそれぞれ 0.86、0.76 と 0.94 である。

3) X 方向の最大ベースシア係数は、CASE-1、CASE-2 と CASE-3 の場合でそれぞれ 0.70、0.66 と 0.80 である。

4) 1 階の耐震壁は、曲げ降伏後コンクリートの圧縮破壊によりせん断力が低下し、いずれのケースで崩壊に至る。

5) 1 階の袖壁は、曲げ降伏が発生するが、崩壊には至らない。

6) 最上階のねじれ変形角は、1 ~ 2 %程度である。

(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 Toshimi 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 Toshimi 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

(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

(3) 平成18年度業務計画案

実大6層鉄筋コンクリート建物の震動破壊実験の予備解析及び実験が完了した。平成18年度の作業としては、次のように計画する。

実大6層鉄筋コンクリート建物の震動破壊実験の検証解析に関する研究を行う。まず、震動台の回転成分を考慮するため、3方向6自由度の地震動入力による動的応答解析を可能にする。6自由度の地震動入力データは、空間3軸の並進加速度と各軸回りの回転角加速度を用いる。

また、実大6層鉄筋コンクリート建物の震動破壊実験の実験結果を用いて、三次元動的解析システムの詳細的な精度を検証する。耐震壁及び袖壁の基礎回転を考慮し、実験から計測された振動台の加速度データを用いて、本研究で開発した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簡単な可視化機能を開発する。