

3.2.4 鉄筋コンクリート建物の多方向入力振動台実験

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 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) 試験体
 - 2) 使用材料
 - 3) 入力波
 - 4) 振動台
 - 5) 計測
 - 6) フレームモデルによる事前解析
 - 7) 実験結果
 - 8) 入力波の再現性
 - 9) FEM 解析
 - 10) スマート AE センサによるひび割れの検知
- (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 16 年度業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 鉄筋コンクリート建物の多方向入力振動台実験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
(株)大林組 技術研究所 建築振動制御研究室 耐震設計・動的挙動グループ	グループ長	勝俣 英雄
(株)大林組 東京本社	職員	白井 和貴
原子力本部 技術部 技術第一グループ	グループ長	圓 幸史朗
東京大学 地震研究所	主任	米山 健一郎
	教授	壁谷澤 寿海
	大学院生	壁谷澤 寿一

(c) 業務の目的

多方向入力時における鉄筋コンクリート造建物の応答・破壊性状を把握するため、および E-ディフェンス実大震動実験の予備実験として、縮小模型を用いた三次元振動台実験を実施し、得られた結果に基づいて検討する。なお、平成 16 年度のみ業務である。

(d) 平成 16 年度業務目的

多方向地震入力を受ける鉄筋コンクリート造建物の応答・破壊性状を把握することを目的として、縮小試験体を用いた三次元振動台実験を実施し、得られた実験結果や各種解析との比較等により検討を行う。さらに、縮小模型実験で得られた知見に基づいて、実験技術の妥当性について検討し、E-ディフェンスにおける多方向地震入力の実大震動実験を行う上での問題点を明らかにする。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

E-ディフェンス実大震動実験の予備実験として、および多方向地震入力の影響により鉄筋コンクリート造建物の破壊性状がどのような違いを示すかを把握するため、縮小試験体を用いた振動台実験を行い、得られた結果に基づいて検討を行った。

試験体は、4 層、1×3 スパン、1/4 縮尺の鉄筋コンクリート造建物模型とし、H17 年度実施予定の E-ディフェンス RC 試験体の各種構造要素（耐震壁、腰壁、短柱など）を取り込んだ。多方向入力の影響により破壊性状がどのように変化するかを検討するため、試験体は同仕様・同寸法の 2 体を用意し、多方向入力地震動の主軸の方向を実験パラメータとした。実験結果に基づき、多方向入力時の RC 建物の応答・破壊性状についての検討を行った。また、各種解析（フレームモデル、有限要素法）との比較や、振動台の加振精度についての検討を行った。さらに、本実験で得られた知見に基づいて、E-ディフェンスにおける多方向地震入力の実大震動実験を行う上での問題点について提言した。

(b) 業務の成果

1) 試験体

多方向地震入力の影響により建物の応答・破壊性状がどのように変化するかを検討するため、試験体は同仕様・同寸法の2体（以降 Case1、Case2 とよぶ）を用意し、多方向入力地震動の主軸方向をパラメータとした実験を行った。2体の試験体に対して多方向入力地震動の主軸の向きを変化させることで、地震動の大きさや累積エネルギーなどの「入力量」を一定とし、「入力方向」の違いによる影響について比較を行った。

試験体は、4層、平面1×3スパン、実大スケールの1/4縮尺の鉄筋コンクリート造壁フレーム模型である。試験体概観を図1に示す。

試験体には、H17年度実施予定のEディフェンス実大RC試験体¹⁾に想定される種々の要素（純フレーム、腰壁付き短柱、袖壁、有開口耐震壁、基礎梁、ロードセル）を組み入れた計画とした。配筋設計は、原則として1982年版の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説²⁾に準じて行った。

試験体の各層、各スパンのスラブ上には鋼板製の付加マスを設置し、単位床面積当たりの重量を実建物の一般的な値に近づけた。基礎梁は4つに分離し、各基礎梁下面の柱直下にロードセル（3分力計）を8台設置した。これにより、個々の構造要素（有開口耐震壁、純フレーム、腰壁付き短柱、袖壁）がそれぞれ負担するせん断力（X軸、Y軸）および軸力（Z軸）を把握することを試みた。ロードセルの下部には、鉄筋コンクリート造の布基礎を設置し、振動台上に布基礎を高力ボルト締め付けにより固定した。

なお、この程度まで不整形性のあるRC試験体の振動台実験は過去に例が少なく、貴重なデータが得られるものと期待される。

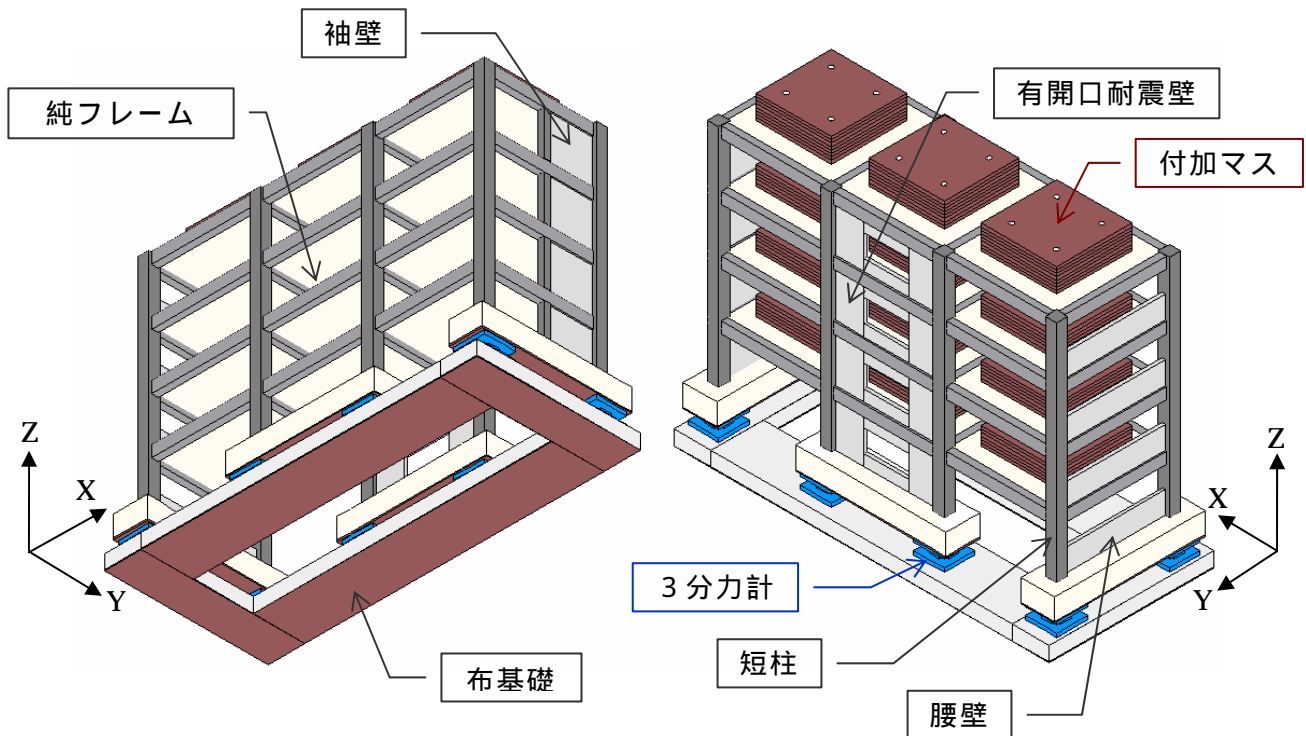


図1 試験体概観

試験体の平面スパンは 1500mm×1500mm、階高は 750mm である。試験体の基準階平面図を図 2 に、試験体の各構面ごとの配筋図を図 3～図 6 にそれぞれ示す。

試験体の破壊は、X 方向については Y1 通りの有開口耐震壁、Y 方向については X4 通りの腰壁付き短柱に生じると想定した。また、X4 通りの腰壁付き短柱は、X1 通りの袖壁とほぼ同程度の剛性を有しているため、耐震壁要素（X1 通りの袖壁、Y1 通りの有開口耐震壁）の重心からのずれによる偏心、およびその結果生じるねじれ振動を十分に抑制することができるものと考えた。

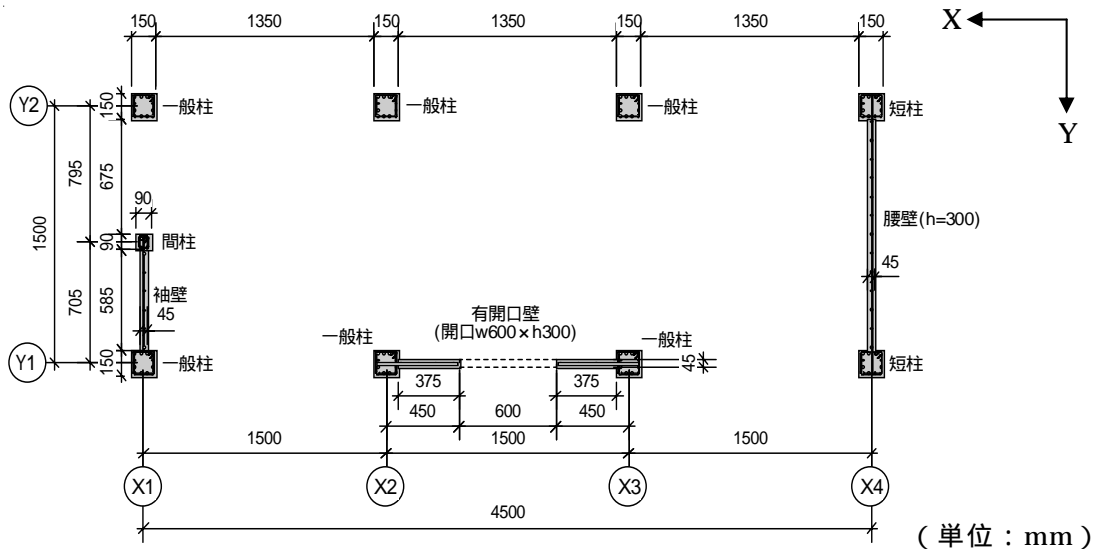


図 2 基準階平面図

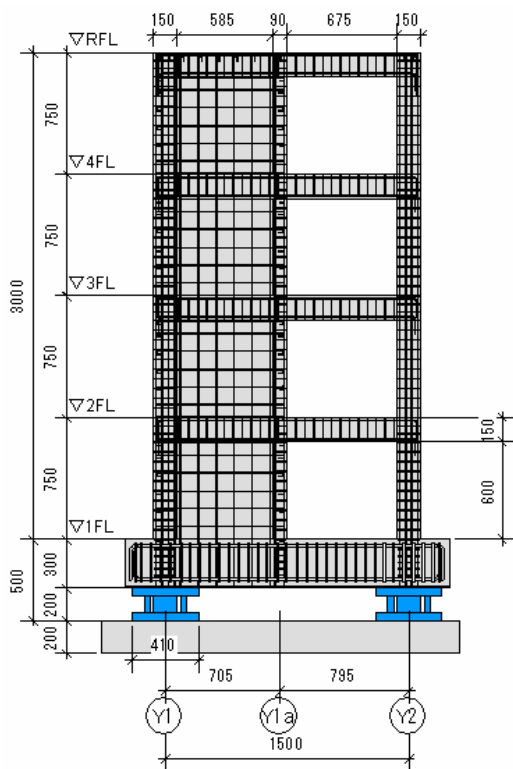


図 3 配筋図 (X1 通り構面)

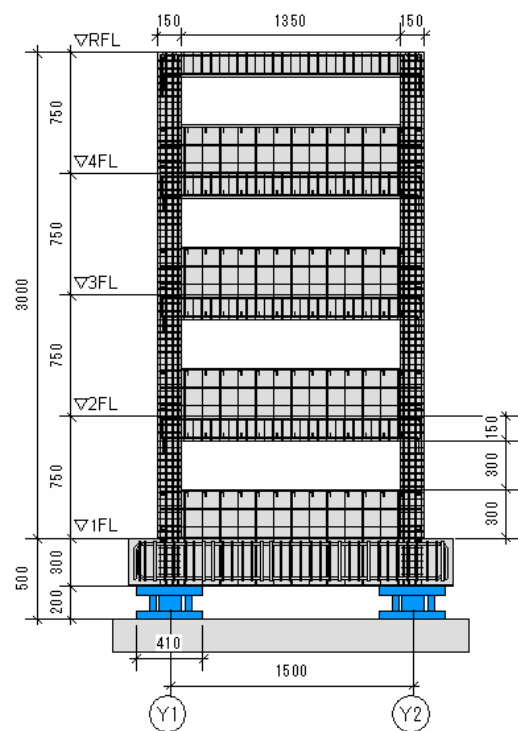
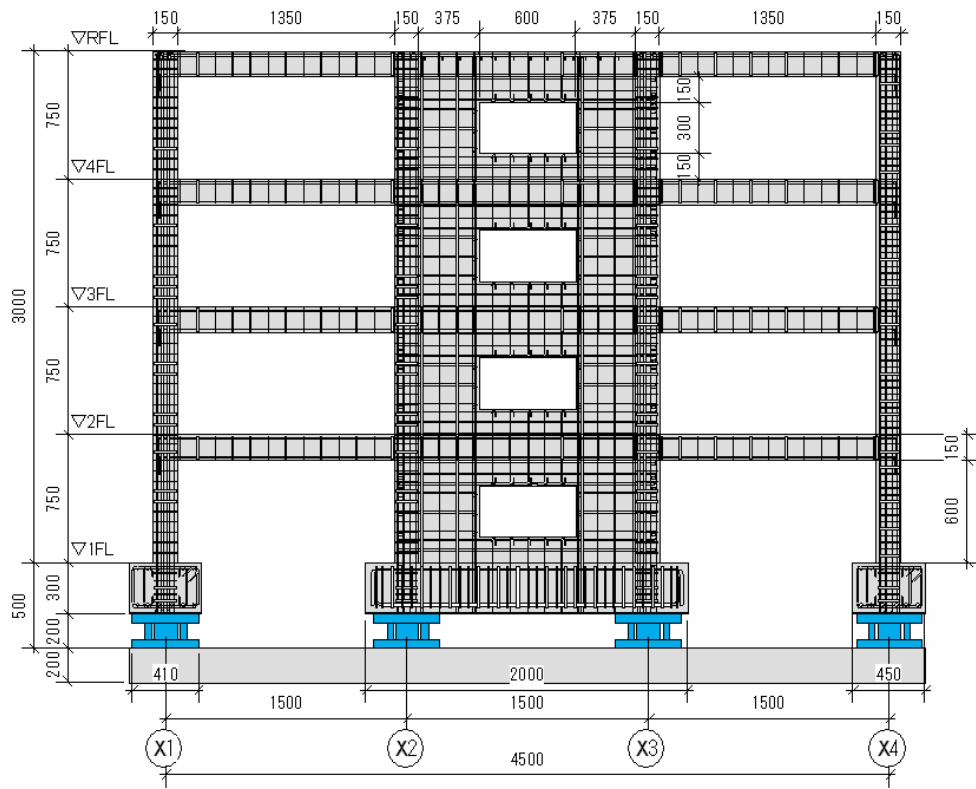
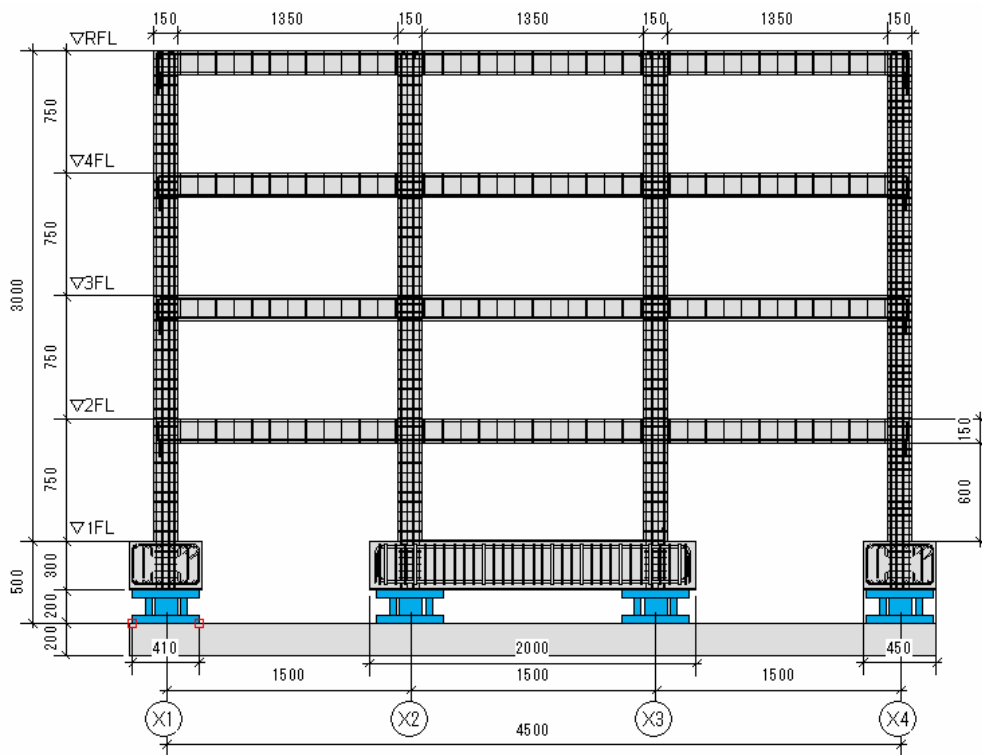


図 4 配筋図 (X4 通り構面)



(单位：mm)

图 5 配筋图 (Y1 通り構面)



(单位：mm)

图 6 配筋图 (Y2 通り構面)

振動台平面図を図 7、試験体概観を写真 1 に示す。写真 1 において、白色部分が RC 試験体、青色部分が付加マス、緑色部分が倒壊防止フレーム、黄色部分が計測フレームおよび各種計測器具である。計測フレームは十分な剛性を確保し、試験体の低次振動数に対して計測フレームの振動数を十分に高くするとともに、計測フレームの変形に起因する変位計測誤差を無視できる範囲まで抑えた。なお計測フレームには、実験準備やひび割れ観察のための仮設足場を必要に応じて適宜設置・撤去して実験を行った。

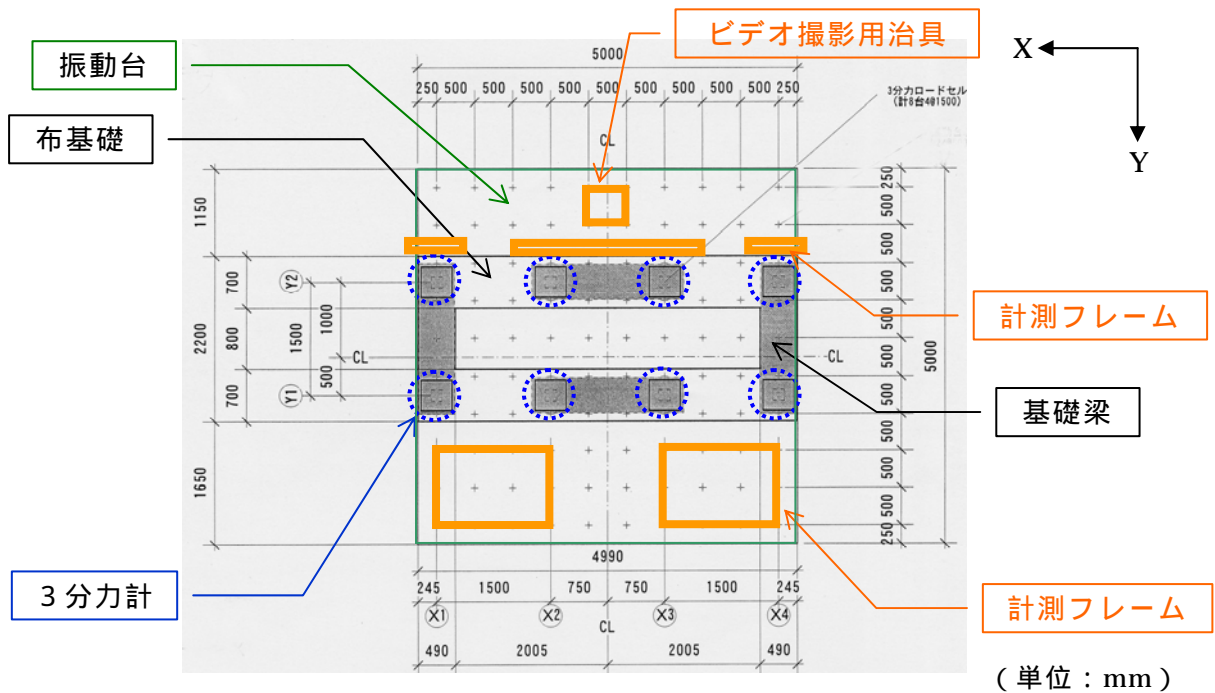


図 7 振動台平面図



写真 1 試験体概観

試験体の各部材の諸元を表1に示す。試験体は実大スケールの1/4縮尺を想定している。各部材の配筋、および鉄筋定着長さや折り曲げ寸法等のディテールについては文献²⁾に準じて設計した。なお、試験体を簡略化するため小梁を省略した。また、付加マスを載せるため、および小梁の省略による影響を緩和するため、スラブ厚さを80mmと大きくした。基礎梁と布基礎の底面には、補強と精度確保のために鋼板を設置した。

表1 各部材の諸元

部位	断面寸法	配筋	
		主筋、スラブ筋、壁筋	帯筋、あばら筋、備考
一般柱	150×150mm	主筋 12-D6 ($p_g=1.71\%$)	帯筋 -D4@60 ($p_w=0.29\%$)
短柱	150×150mm	主筋 12-D6 ($p_g=1.71\%$)	帯筋 -D4@40 ($p_w=0.44\%$)
間柱	90×90mm	主筋 4-D6 ($p_g=1.58\%$)	帯筋 -D4@60 ($p_w=0.49\%$)
大梁 (Y1、Y2 通り)	幅 90 ×せい 150mm	上筋 2-D6 ($p_t=0.54\%$) 下筋 2-D6 ($p_t=0.54\%$)	あばら筋 -D4@110 ($p_w=0.27\%$)
大梁 (X2、X3 通り)	幅 90 ×せい 150mm	上筋 3-D6 ($p_t=0.81\%$) 下筋 2-D6 ($p_t=0.54\%$)	同上
大梁 (X1、X4 通り)	幅 90 ×せい 150mm	同上	あばら筋 -D4@55 ($p_w=0.53\%$)
基礎梁	幅 450 ×せい 300mm	上筋 6-D19 ($p_t=1.41\%$) 下筋 6-D19 ($p_t=1.41\%$)	あばら筋 4-D10@60 ($p_w=1.05\%$) 底面に鋼板 t9.0 を設置
スラブ	スラブ 厚 80mm	両辺とも D4@80 ダブル	
有開口耐震壁 (Y1 通り)	壁厚 45mm	縦横共 D4@110 シングル ($p_s=0.27\%$)	開口幅 600×高さ 300mm (等価開口周比 0.4) 開口補強筋：縦横共 1-D6
袖壁 (X1 通り)	壁厚 45mm	縦横共 D4@110 シングル ($p_s=0.27\%$)	
腰壁 (X4 通り)	壁厚 45mm	縦横共 D4@110 シングル ($p_s=0.27\%$)	腰壁高さ 300mm
布基礎 (Y1、Y2 通り)	幅 700 ×せい 200mm	上筋 8-D16 ($p_t=1.52\%$) 下筋 8-D16 ($p_t=1.52\%$)	あばら筋 4-D13@167 ($p_w=0.43\%$) 底面に鋼板 t9.0 を設置
布基礎 (X1、X2 通り)	幅 490 ×せい 200mm	上筋 6-D16 ($p_t=1.62\%$) 下筋 6-D16 ($p_t=1.62\%$)	あばら筋 4-D13@167 ($p_w=0.62\%$) 底面に鋼板 t9.0 を設置

表 2 に試験体の各階重量を示す。試験体、布基礎、計測フレーム、倒壊防止フレーム等を含めた総重量（振動台上の総積載荷重）は、約 450kN である。

表 2 各階の重量

階	RC 部分(kN)	付加マス (kN)	計 (kN)	単位荷重 (kN/m ²)
R	17.9	73.9	91.8	13.6
4	20.5	55.4	75.9	11.2
3	20.5	55.4	75.9	11.2
2	20.5	55.4	75.9	11.2
合計	79.4	240.1	319.5	11.8
基礎梁	36.0		36.0	-

各階の床面積を 4.5m×1.5m=6.75m² として算定

2) 使用材料

使用した鉄筋の材料特性を表 3 に、コンクリートの材料特性を表 4 に示す。コンクリートの粗骨材の最大寸法は、1～4 階立ち上がりは 10mm(豆砂利)、基礎梁は 13mm(碎石)、布基礎は 25mm とした。

表 3 材料特性（鉄筋）

鉄筋径	公称断面積	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D4	13.2mm ²	371	540	1.95×10 ⁵
D6	31.7mm ²	374	560	2.03×10 ⁵
D19	286.52mm ²	375	584	1.94×10 ⁵

明瞭な降伏点が得られなかったため、降伏強度は 0.2%オフセット値を用いた。

表 4 材料特性（コンクリート）

試験体	部位	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
Case1	4 階立ち上がり	34	31.1	2.21×10 ⁴
	3 階立ち上がり	41	28.4	2.04×10 ⁴
	2 階立ち上がり	48	32.1	2.16×10 ⁴
	1 階立ち上がり	55	31.2	2.19×10 ⁴
	基礎梁	67	46.2	2.85×10 ⁴
	布基礎	34	51.2	2.85×10 ⁴
Case2	4 階立ち上がり	67	33.9	2.16×10 ⁴
	3 階立ち上がり	74	29.3	2.02×10 ⁴
	2 階立ち上がり	81	33.5	2.15×10 ⁴
	1 階立ち上がり	88	33.2	2.19×10 ⁴
	基礎梁	100	49.0	2.82×10 ⁴
	布基礎	67	52.8	2.75×10 ⁴

3) 入力波

入力波は、JMA 神戸波（1995 年兵庫県南部地震）の NS、EW、UD 各成分の加速度記録を元に、試験体の縮小スケールによる相似則を考慮して時間軸を 1/2 倍に圧縮し、さらに試験体 1 体目（Case1）では入力波の主軸を試験体の強軸（長辺方向、X 軸）に対応させて原波形を時計回りに +45 度水平回転させた波形を使用した。一方、試験体 2 体目（Case2）では、入力波の主軸を試験体の弱軸（短辺方向、Y 軸）に対応させ原波形を反時計回りに 45 度（時計回りに -45 度）水平回転させた波形を使用した。各 Case の目標入力加速度の時刻歴と XY オービットを図 8～図 9 にそれぞれ示す。

さらに各 Case とも、入力波の加速度振幅を係数倍して漸増させ、Case1 では Run1～Run7、Case2 では Run1～Run9 の加振を行った。各 Run と入力倍率を表 5 に示す。

このような入力波を用いた理由を以下に示す。

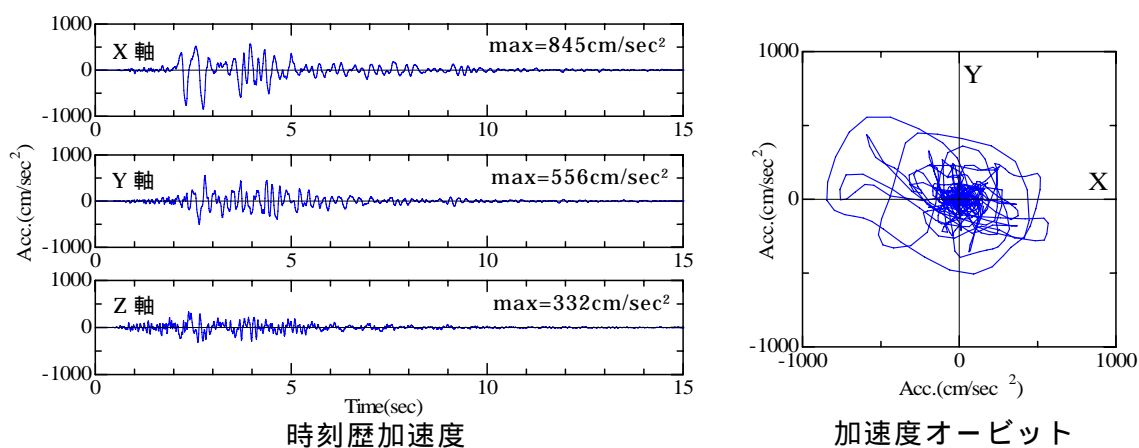


図 8 Case1 入力波（+45 度入力）

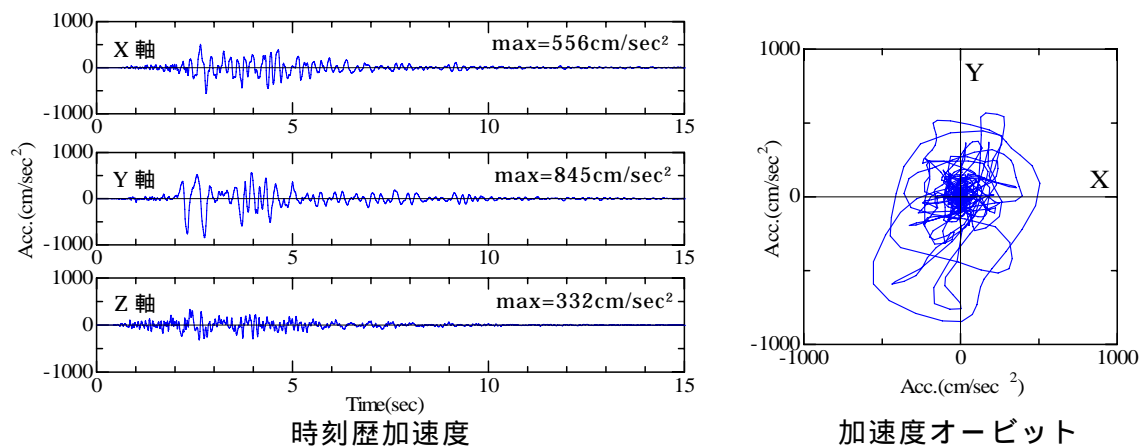


図 9 Case2 入力波（-45 度入力）

表 5 各 Run の入力倍率

	試験体	Run								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
入力倍率	Case1	0.05	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.25	-	-
	Case2	0.05	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.25	1.25	1.25

多方向入力地震動の影響の検討では、1方向入力時と多方向入力時との応答の比較がよく行われる。しかし、明らかに多方向入力時の入力の「量」が大きく、同じ条件の比較とは言えない可能性がある。むしろ、多方向入力地震動の「主軸」を考え、この主軸の向きを構造物の向きに対して変化させれば、「入力量」一定のまま地震力の方向の影響のみが評価できると考えた。実際、震源近傍の地震動は構造物に大きな被害をもたらしてきたが、顕著な方向性が認められており、現実的な多方向地震動の設定といえる。

そこで、方向性のある地震動波形として JMA 神戸 1995 (入力倍率 100%、時間軸 1/2 圧縮) を選び、NS・EW 成分の向きを Z 軸回りに回転させて試験体の非線形地震応答解析を行った。建物長辺方向 (X 方向) に地震動の NS 成分を入力する場合を 0 度方向と定義し、10 度刻みで解析した。建物は線材に置換した立体モデルとし、解析ソフト CANNY を使用した。部材モデルおよび履歴モデルは一般的なものであるが、X4 通り短柱の剛域は腰壁端から 1D (D: 柱せい) 短く設定した。なお、上下動は入力していない。

解析結果のうち、有開口壁構面 (Y1 通り) と短柱構面 (X4 通り) に着目した。図 10 に短柱構面 1 層 Y 方向変位と有開口壁構面 1 層 X 方向変位の比が入力方向によって変化する様子を示した。入力が 30 度、210 度付近で変位比が小さく、100 度、280 度付近で変位比が大きくなり、入力波の主軸方向により構造物の応答が顕著に変化することがわかる。すなわち、入力の主軸方向によって構造物の応答が顕著に変わると言える。この実験では入力方向による応答の変化に着目するので、+45 度方向と -45 度方向の入力とすることとした。

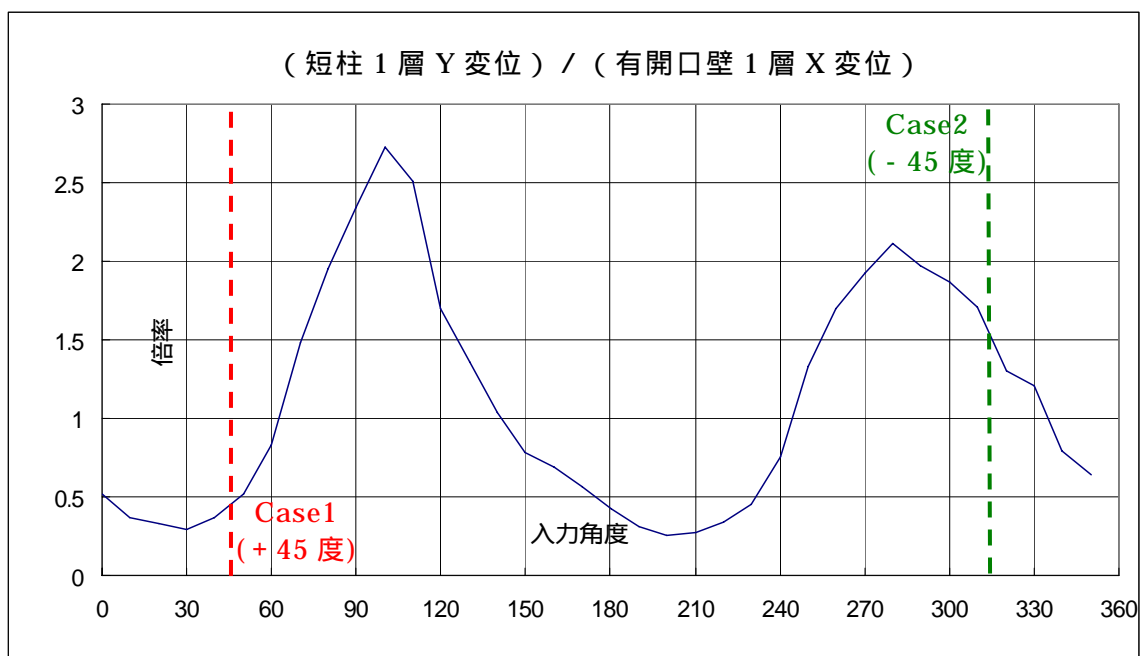


図 10 動的解析結果

4) 振動台

加振には、大林組保有の三次元振動台を使用した。振動台のテーブル寸法は 5m×5m、最大積載重量は 490kN、最大加振加速度は X 軸 3000cm/sec²、Y 軸 2000cm/sec²、Z 軸 1000cm/sec² である。振動台の概観および加振限界曲線（X 軸）を図 11 に示す。

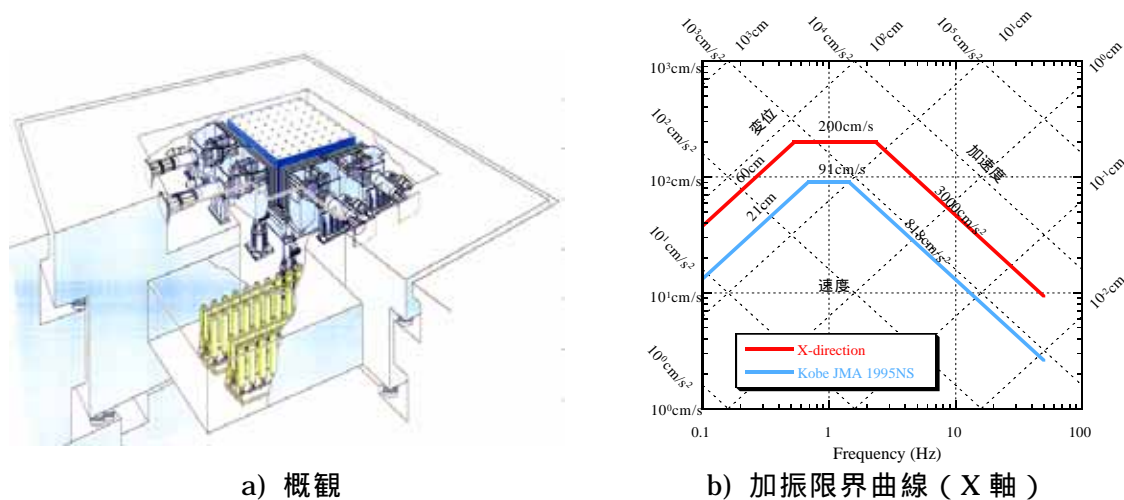


図 11 振動台の概要

5) 計測

計測項目とセンサーの一覧を表 6 に示す。計測は、各層の絶対加速度、各層の層間変形、各層の振動台上からの相対変形、基礎梁下における軸力とせん断力、各鉄筋の歪み、ひび割れの発生の有無について行った。計測には、加速度計、インダクタンス式変位計、高感度歪みゲージ式変位計、レーザー変位計、ロードセル、歪みゲージおよび AE センサーを使用した。

併せて、デジタルビデオカメラや高速度カメラによる加振時映像の撮影を適宜行い、また主要な加振後にひび割れ・破壊状況のスケッチを行った。

表 6 計測項目・センサー一覧

項目	軸	階、層、部位	センサー	CH 数
絶対加速度	XYZ	R、4、3、2、F、T	加速度計	48
層間変形	XY	4、3、2、1	インダクタンス式変位計	17
相対変形	XY	R、4、3、2	インダクタンス式変位計	20
層間変形	XZ	1	レーザー変位計	12
相対変形	XY	F	高感度歪みゲージ式変位計	6
軸力・せん断力	XYZ	F	ロードセル	24
ロードセル変形	XYZ	F	高感度歪みゲージ式変位計	48
鉄筋歪み	-	柱主筋、梁主筋、壁筋	歪みゲージ	60
ひび割れ発生	-	1	AE センサー	8

R は屋上階、F は基礎梁、T は振動台上を表す

6) フレームモデルによる事前解析

加振実験の事前にフレームモデル解析を行い、試験体の基礎的性状について検討した。図 12 に解析モデルを示す。なおここでは、各部材の剛域はフェース位置から 1/4D 短く設定した。弾性時における 1 層の偏心率は、X 方向が 0.12、Y 方向が 0.02 となった。Y 方向については、X1 構面（袖壁）と X4 構面（腰壁付き短柱）の初期剛性が近いいため偏心率が低い値となった。

解析結果の例として、図 13 に主要な固有モード、図 14 に静的プッシュオーバー解析から得られた層せん断力 - 層間変形関係を示す。本試験体は、層数・スパン数が少ないため、一般的な建物と比べてベースシアールが大きくなっている。

解析結果から想定される破壊モードは、X 方向加力時では 1 層 Y1 通りの有開口壁の曲げ降伏後のせん断破壊、Y 方向加力時では 1 層 X4 通りの短柱でのせん断破壊であった。

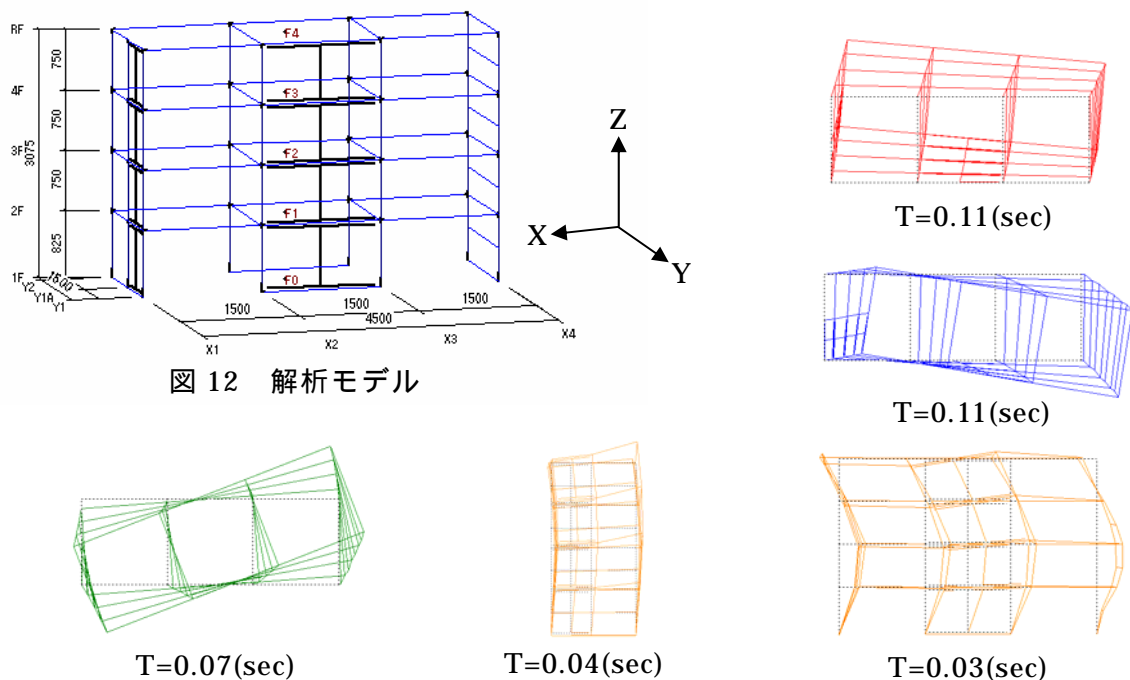


図 12 解析モデル

図 13 固有モード

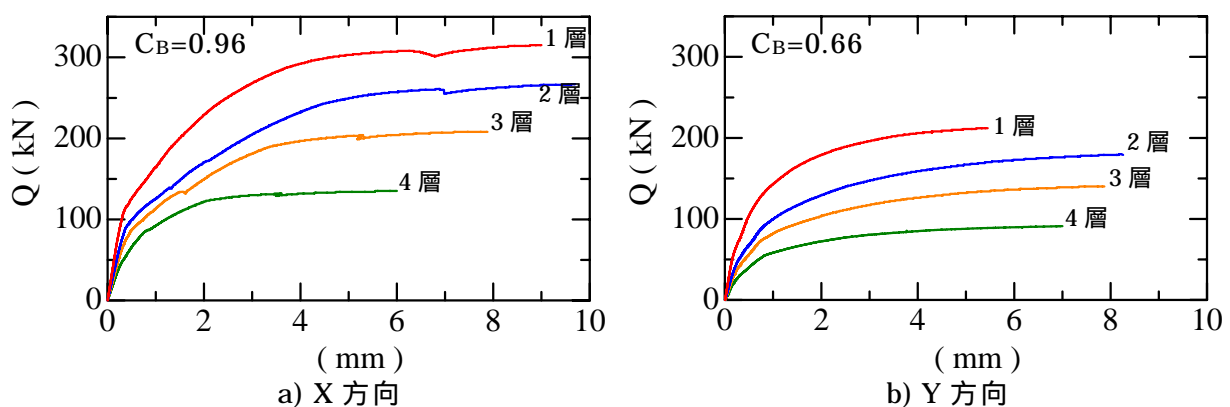


図 14 層せん断力 Q - 層間変形 関係

7) 実験結果

a) 概要

各 Case の実験結果の概要を表 7～表 8 に示す。

Case1 では、当初に想定された通り、最終的に 1 層 Y1 通りの有開口壁が曲げ降伏後にせん断破壊に至った (Run7)。しかし、中盤の Run から X4 通りの腰壁端部の破壊が徐々に進行し、短柱が長柱化することで X4 通り構面の層剛性が低下したため、Z 軸周りのねじれ振動が想定以上に大きくなる結果となった。これは事前の想定とは異なっていた。X1 通りの袖壁は最後まで破壊には至らなかった。これは事前の想定通りであった。

一方 Case2 では、中盤の Run から腰壁の破壊が進行し、Case1 以上にねじれ応答が増大していく傾向を示した。X4 通り構面の短柱については、せん断ひび割れは発生したものの、長柱化したために最後までせん断破壊には至らず、Y1 通りの有開口耐震壁が先行してせん断破壊する結果となった (Run8、Run9)。この腰壁破壊とその影響による他の部位の破壊は、事前の想定とは異なっていた。また、終盤の Run において、X 方向の梁端部に損傷・コンクリート剥落が顕著に生じた。

表 7 Case1 実験結果概要

Run	入力倍率	X 方向層間変形角 (1 層有開口壁位置)	主な損傷、備考
Run1	5%	1/8500	-
Run2	20%	1/1550	1 層腰壁・1 層有開口壁にひび割れ
Run3	40%	1/615	1 層有開口壁にひび割れ
Run4	60%	1/381	2～4 層有開口壁にひび割れ
Run5	80%	1/209	1 層有開口壁の縦筋降伏
Run6	100%	1/124	1～2 層腰壁端部の破壊
Run7	125%	1/32	1 層有開口壁のせん断破壊

表 8 Case2 実験結果概要

Run	入力倍率	Y 方向層間変形角 (1 層短柱位置)	主な損傷、備考
Run1	5%	1/3710	-
Run2	20%	1/1540	1 層腰壁・1 層袖壁にひび割れ
Run3	40%	1/472	1 層有開口壁にひび割れ
Run4	60%	1/155	1 層短柱主筋降伏、1 層短柱にせん断ひび割れ
Run5	80%	1/71	1～2 層腰壁端部に剥落
Run6	100%	1/22	1～3 層腰壁・梁端部破壊、1 層柱脚圧壊
Run7	125%	1/23	
Run8	125%	1/21	短柱に剥落、有開口壁せん断破壊
Run9	125%	1/26	有開口壁せん断破壊

b) 時刻歴応答波形

時刻歴応答波形の例として、Case1、Run6（100%入力時）の振動台実現加速度（入力加速度）および各層の応答層間変形の波形を図15に示す。ここでは図心位置の層間変形を示した。

入力波（JMA神戸）の特性もあるが、XY両方向とも、応答層間変形のピーク時の位相は各層でほぼ揃っており、1次の変形モードが卓越していることがわかる。

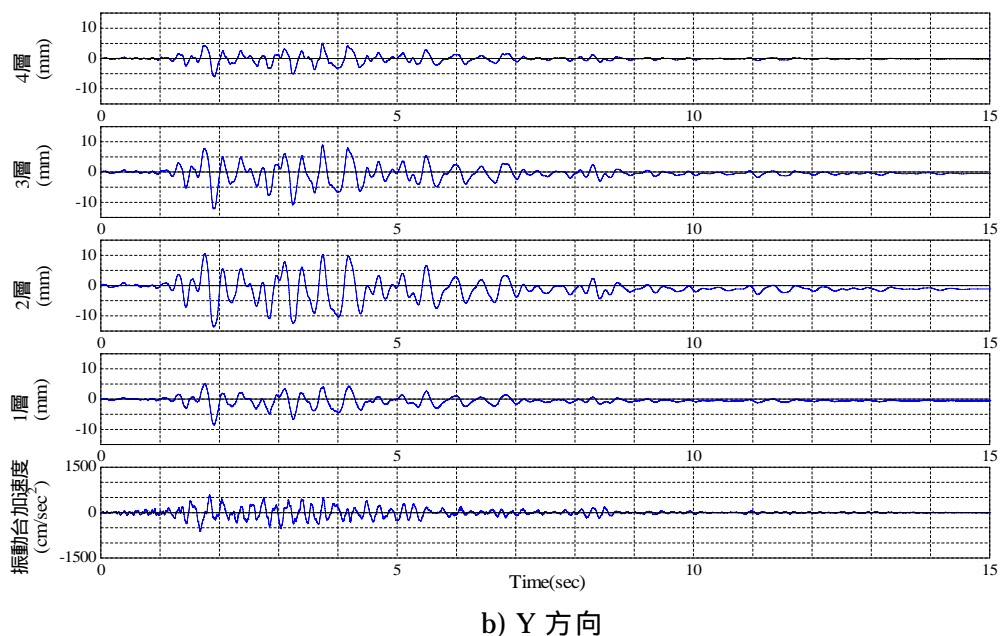
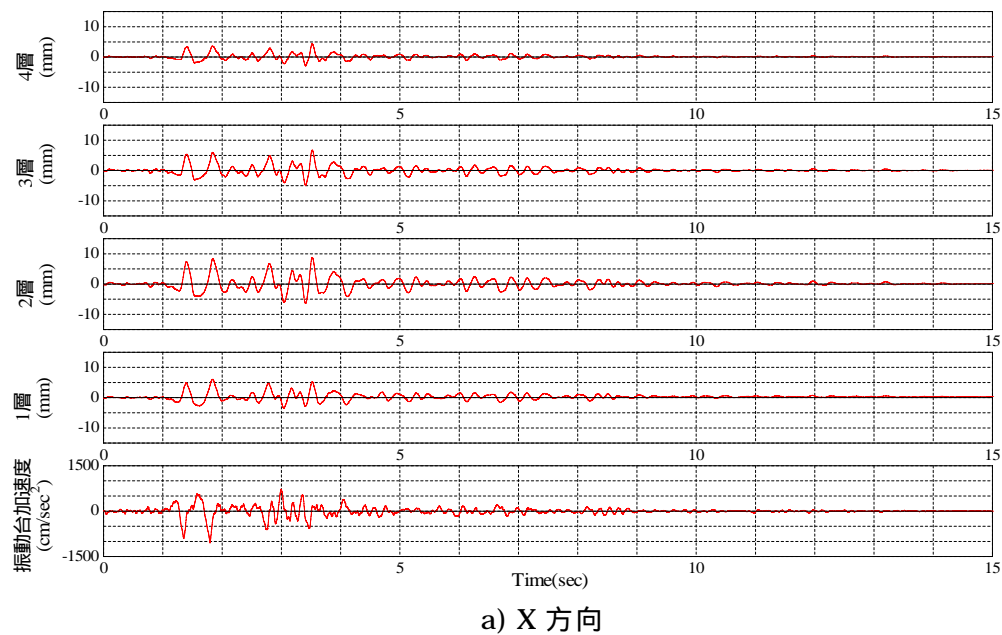


図15 時刻歴応答波形（Case1、Run6）

c) 層せん断力

Case1 各 Run の 1 層の層せん断力 Q - 層間変形 の関係を図 16 ~ 図 17 に示す。ここで、 Q は各層の図心位置における応答加速度と質量から算定したせん断力である。また Δ は各層の図心位置における層間変形を算定して用いている。

X 方向では各 Run ともグラフ第一象限において比較的丸みのある履歴ループを示しているのに対して、Y 方向では第三象限において比較的細いループ形状を示している。

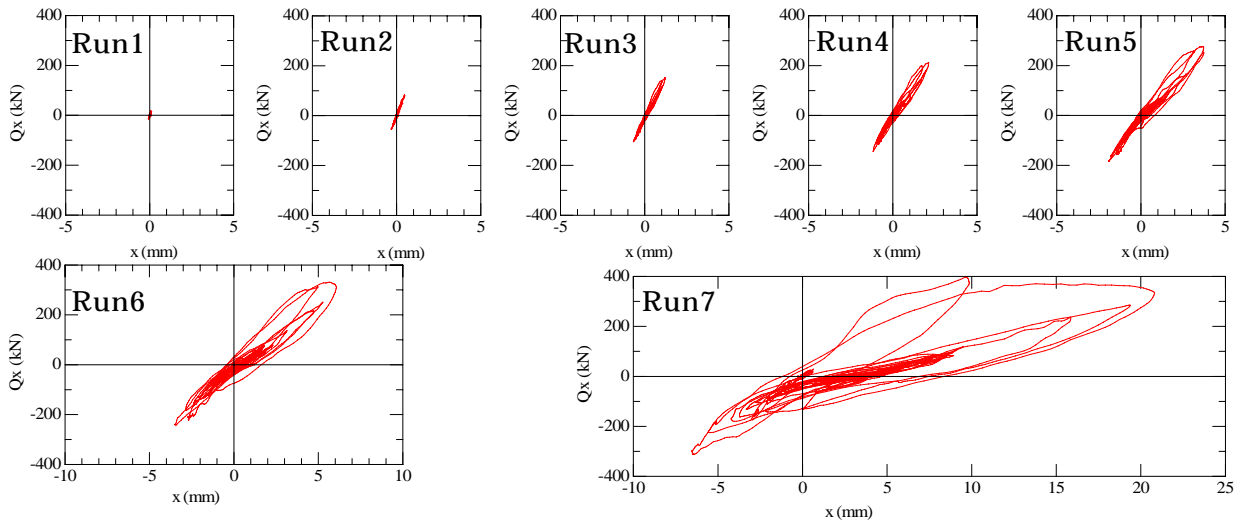


図 16 Q - 関係 (Case1、X 方向)

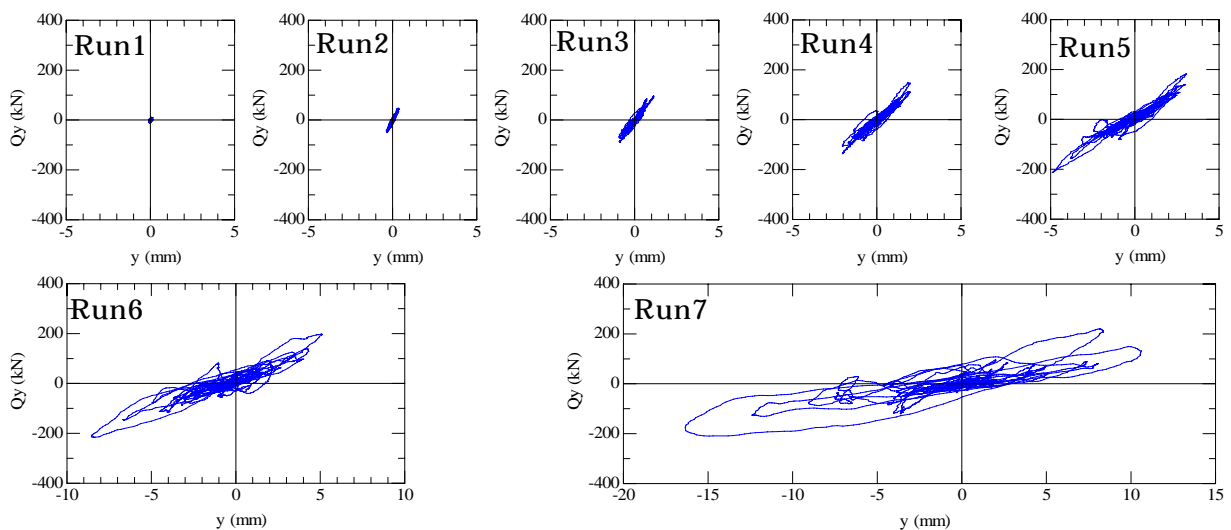


図 17 Q - 関係 (Case1、Y 方向)

Case1 各 Run の 1 層、プラン図心位置における層せん断力 Q - 層間変形 の関係を図 18 に示す。ここで、 Q は各層の応答加速度と質量から算定している。併せて静的プッシュオーバー解析の結果を図 18 に示すが、実験結果のスケルトンカーブは静的解析と概ね対応しているといえる。

Case1 の Run7 について、8 台のロードセルにより測定したせん断力の合計と 1 層層間変形 (図心位置) の関係を図 19 に示す。また、有開口壁の下部に設置したロードセル 2 台の負担せん断力と 1 層層間変形 (有開口壁位置) の関係を図 20 に示す。

ロードセルのせん断力の値は、応答加速度と質量から求めたせん断力(例えば図 18 の X 方向の Q_x)とは大きく異なっており、この差異は直交軸の荷重およびモーメントによる影響によるものと考えられる。この直交軸とモーメントの影響については、今後検定試験などを行って更なる検討を行う必要があるといえる。

しかしながら、図 18 と図 19 の比較によって有開口耐震壁部分の負担せん断力の割合が概ね把握でき、また図 20 のループ形状より有開口耐震壁の負担せん断力は壁板のせん断破壊に伴って低下する状況が確認できる。このように、本実験で実施したロードセルによるせん断力の計測は、定性的には試験体の性状を捉えていたといえる。

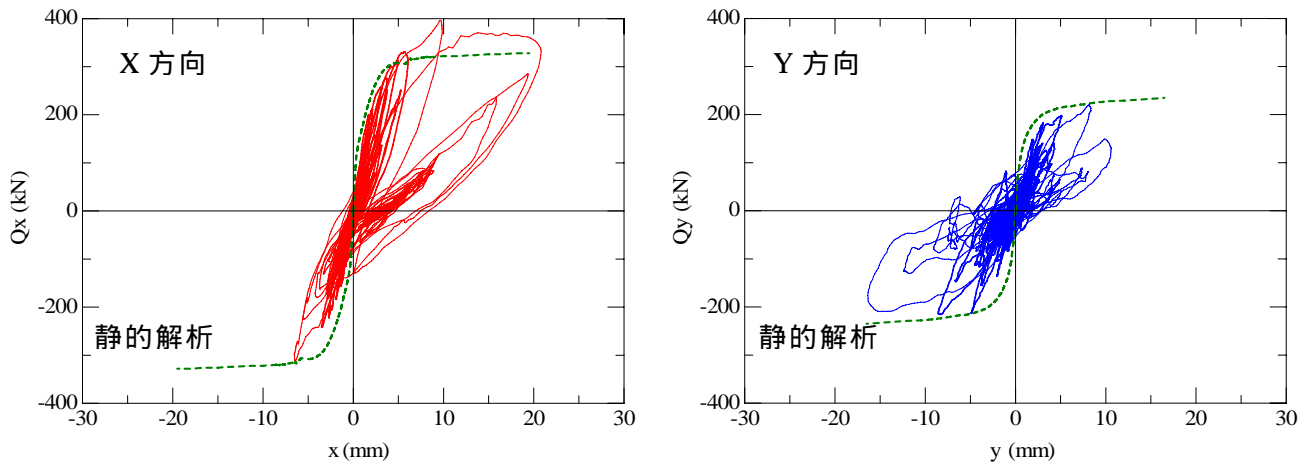


図 18 Q - 関係 (Case1、全 Run)

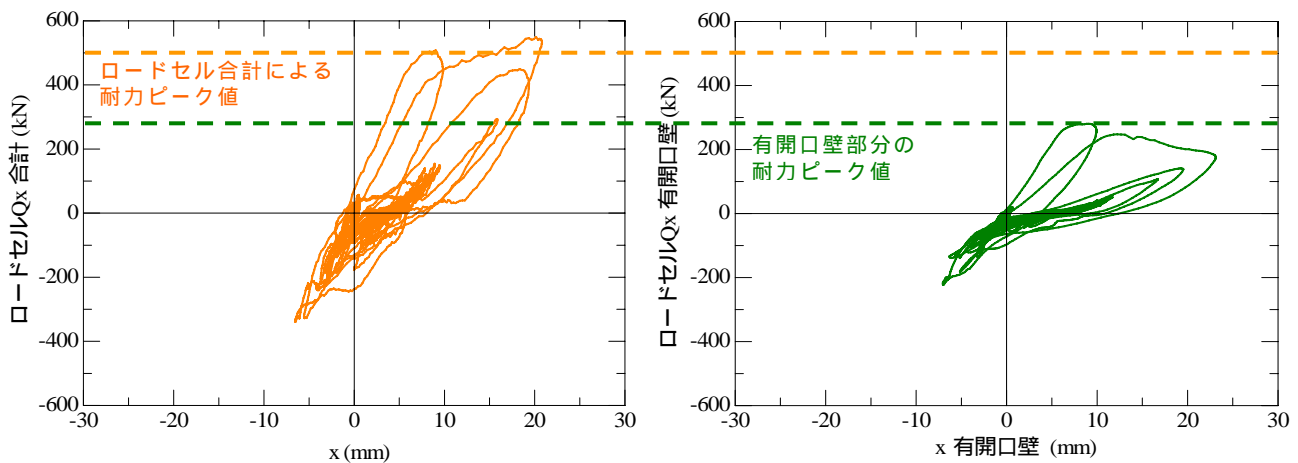


図 19 ロードセルによるせん断力 - 関係 (Case1、X 方向)

図 20 有開口壁部分のロードセルによるせん断力 - 関係 (Case1、X 方向)

Case2 各 Run の 1 層における層せん断力 Q - 層間変形 の関係を図 21 ~ 図 22 に示す。ここで、 Q は各層の図心位置における応答加速度と質量から算定したせん断力である。また は各層の図心位置における層間変形を算定して用いている。

Case1 (図 16、図 17) と比較すると、Case2 の履歴ループは X 方向で細く、Y 方向で太くなっており、入力波の主軸を変化させたことによる違いが明確に現れている。入力的主軸と一致している方向 (Case1 : X 方向、Case2 : Y 方向) では一般の静的加力実験で得