

論文 RC造4層壁フレーム構造の多方向入力振動台実験

白井 和貴^{*1}・壁谷澤 寿一^{*2}・勝俣 英雄^{*3}・壁谷澤 寿海^{*4}

要旨：多方向地震動入力を受ける RC 建物の応答・破壊性状を把握するため、1/4 スケールの4層 RC 壁フレーム試験体を用いた三次元振動台実験を実施した。実験では、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て、入力方向の違いによる影響を検討した。実験の結果、同じ加振段階で比較すると、入力方向の違いによって異なる応答・破壊性状を示したが、最終的には両試験体とも有開口壁と腰壁が破壊に至った。また、腰壁の破壊により短柱が長柱化し、ねじれ振動が顕著に励起された。

キーワード：振動台実験，多方向入力，RC 壁フレーム，有開口壁，腰壁

1. はじめに

多方向地震動入力を受ける鉄筋コンクリート (RC) 建物の応答・破壊性状は未だ不明な点が多く、特に耐震壁、袖壁、腰壁、短柱、ねじれ等の種々の要素が混在する構造物の地震時挙動については更なる知見の蓄積が必要である。また地震応答解析技術の検証と精度向上のため、振動台実験によるデータの取得が望まれている。

そこで本研究では、多方向地震動入力を受ける RC 建物の応答・破壊性状を把握することを目的とし、RC 壁フレーム試験体を用いた三次元振動台実験を実施した。実験では、2 体の試験体に対し多方向入力地震動の主軸の向きを変化させ、入力方向の違いによる影響について検討した。本論では実験の計画と結果について述べる。

なお本論では扱わないが、本実験で使用する破壊した試験体に対して種々の手法により耐震補修・補強を施し、再度加振実験を行うことで、被災 RC 建物を補修・補強した際の耐震性能に関する検討も併せて実施している¹⁾。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は、4 層、1×3 スパン、1/4 スケールの

RC 壁フレーム模型である。平面スパンは 1500×1500mm、階高は 750mm である。図-1 に試験体の概念図を、写真-1 に試験体の概観を示す。

試験体数は、同仕様・同寸法の 2 体(以降 Case1, Case2 とよぶ)とし、入力波の主軸の向きをパラメータとした加振実験を行った。

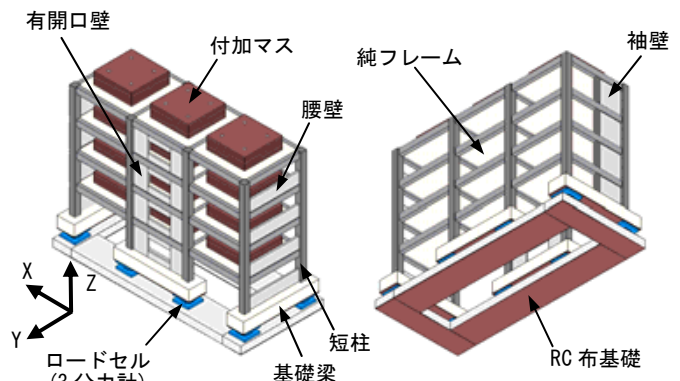


図-1 試験体概念図

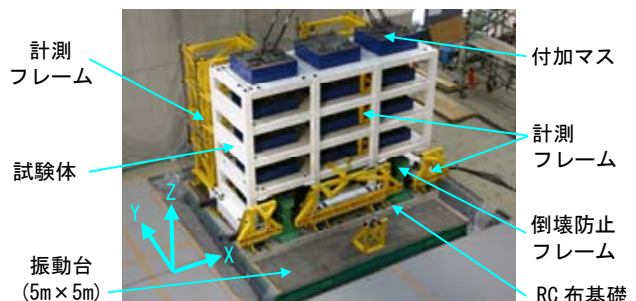


写真-1 試験体概観

*1 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 外来研究員 工修 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 建築振動制御研究室 室長 工修 (正会員)

*4 東京大学 地震研究所 地震火山災害部門 教授 工博 (正会員)

試験体は、平成 17 年度 E-ディフェンス実大 RC 建物の三次元震動破壊実験²⁾に想定される種々の要素(純フレーム、耐震壁、腰壁付き短柱、袖壁、基礎梁、ロードセル)を組み入れた計画とし、配筋設計は原則として文献³⁾に準じて行った。試験体の基準階平面を図-2、主要な構面の概要を図-3、各部材の諸元を表-1、各階の重量を表-2、使用材料の特性を表-3、表-4に示す。

試験体の破壊は、Case1 については X 方向 Y1 通りの有開口耐震壁が、Case2 については Y 方向 X4 通りの腰壁付き短柱がそれぞれ先行して破壊に至ると想定した。また、X4 通りの腰壁付き短柱と X1 通りの袖壁に同程度の剛性を持たせることにより、耐震壁要素（袖壁、有開口壁）の偏在から生じるねじれ振動が抑制されるもの

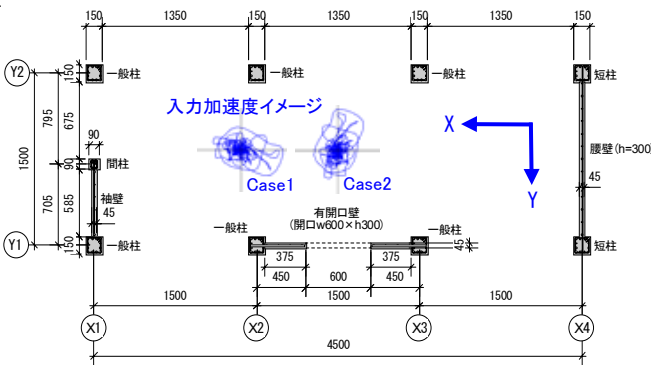


図-2 基準階平面

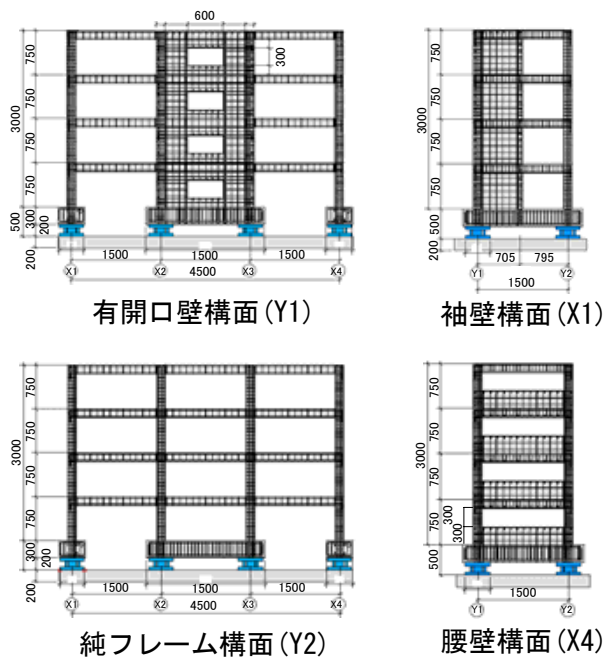


図-3 主要な構面の概要

と考えた。実際、後述のように Y 方向の偏心率は小さい。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。

固有値解析および静的 1 方向プッシュオーバー解析の結果を図-4、図-5 に示す。試験体の層数とスパン数が少ないため、一般的な実建物と比べて各層のせん断力係数が大きくなった。

表-1 各部材の諸元

部位	断面寸法 (mm)	配筋	
		主筋, スラブ筋, 壁筋	帯筋, あばら筋, 備考
一般柱	150 × 150	12-D6 (pg=1.71%)	□-D4@60 (pw=0.29%)
短柱	150 × 150	同上	□-D4@40 (pw=0.44%)
間柱	90 × 90	4-D6 (pg=1.58%)	□-D4@60 (pw=0.49%)
大梁 (Y1, Y2)	幅 90 × せい 150	上筋 2-D6 (pt=0.54%) 下筋 2-D6 (pt=0.54%)	□-D4@110 (pw=0.27%)
大梁 (X2, X3)	幅 90 × せい 150	上筋 3-D6 (pt=0.81%) 下筋 2-D6 (pt=0.54%)	同上
大梁 (X1, X4)	幅 90 × せい 150	同上	□-D4@55 (pw=0.53%)
基礎梁	幅 450 × せい 300	上下共 6-D19 (pt=1.41%)	4-D10@60 (pw=1.05%) 底面に PL9.0 設置
スラブ	厚 80	両辺共 D4@80 ダブル	—
有開口壁	厚 45	縦横共 D4@110 シングル (ps=0.27%)	開口幅 600×高さ 300 (等価開口周比 0.4) 開口補強: 縦横共 1-D6
袖壁, 腰壁	厚 45	縦横共 D4@110 シングル (ps=0.27%)	腰壁高さ 300

表-2 各階の重量

R 階	92kN (13.6kN/m ²)	基礎梁	36kN
4～2 階	76kN (11.2kN/m ²)	振動台上の総積載重量	450kN
R～2 階計	320kN (11.8kN/m ²)		

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D4	371 (0.2%オフセット値)	1.95 × 10 ⁵
D6	374	2.03 × 10 ⁵

表-4 コンクリートの材料特性

試験体	層	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
Case1	1 層	31.2	2.19 × 10 ⁴
	2～4 層平均	30.5	2.14 × 10 ⁴
Case2	1 層	33.2	2.19 × 10 ⁴
	2～4 層平均	32.2	2.11 × 10 ⁴

弾性時の 1 層の偏心率は、X 方向が 0.12、Y 方向が 0.02 である。

2.2 加振計画

本実験では、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加振計画を採用した。これは、従来の多方向入力実験に多い 1 軸と 2 軸の比較では地動ベクトルの大きさに差異が生じるが、主軸回転ならば地動ベクトルの大きさは不変であり、入力方向の影響のみが抽出できる点などを勘案したことによる。

入力波(図-6)は、JMA 神戸波(1995)の NS, EW, UD 各加速度記録を基に、相似則(試験体の縮尺スケールが 1/4)を考慮して時間軸を 1/2 倍に圧縮し、Case1 では入力波の主軸を試験体の長辺方向(X 軸)に対応させて原波形を Z 軸回りに+45 度水平回転、一方 Case2 では試験体の短辺方向(Y 軸)に対応させ-45 度回転させた波形をそれぞれ使用した(図-6 b)。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 Run1~7, Case2 で Run1~9 の加振を行った。

なお、入力方向の影響を事前に検討するため、入力波の主軸を Z 軸回りに 0 度~360 度まで回転させて動的地震応答解析(100%入力、非線形立体線材モデル)を行った。この解析による、腰壁付き短柱構面(X4 通り)の 1 層 Y 方向変位と、有開口壁構面(Y1 通り)の 1 層 X 方向変位の比を図-6 c)に示す。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。この事前検討などから各 Case における主軸の回転角を決定した。

2.3 計測計画

計測は、各層の絶対加速度・層間変形・振動台上からの相対変形、鉄筋の歪み等について行った。また、基礎梁下に設置したロードセルによりせん断力と軸力を、柱・壁に貼り付けた AE センサによりひび割れ発生の有無を測定した⁴⁾。

3. 実験結果

3.1 加振経過

有開口壁：等価開口周比でせん断剛性・耐力を低減して考慮
腰壁：腰壁構面の柱脚部の剛域高さ(Y 方向)により考慮

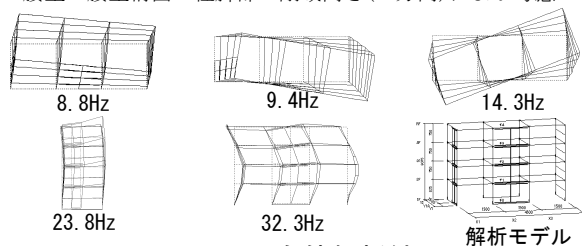


図-4 固有値解析結果

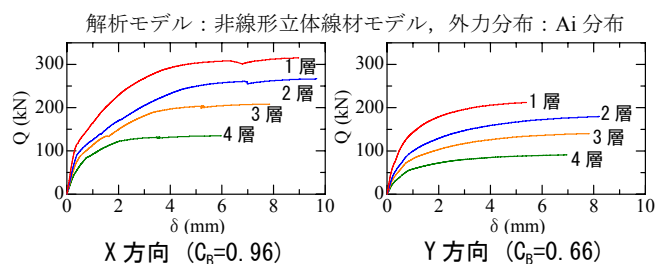


図-5 静的プッシュオーバー解析結果

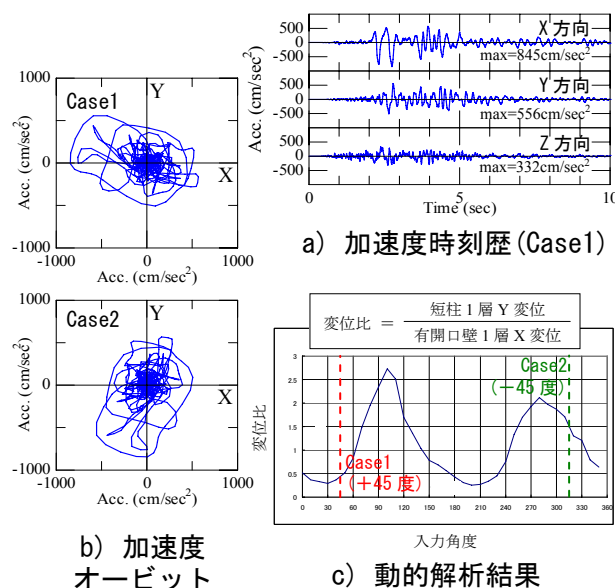


図-6 入力波

実験結果の概要を表-5 に示す。

Case1 では、当初の想定通り、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 (Run7)に至った。また X1 通りの袖壁は最後まで破壊しなかった。しかし、X4 通りの腰壁構面については事前の想定とは異なる結果を示した。すなわち、中盤の加振(Run3)から腰壁端部の破壊が徐々に進行して短柱が長柱化し、腰壁構面の剛性低下により Z 軸回りのねじれ振動が想定以上に大きくなった。

一方 Case2 では、Case1 以上に腰壁構面の損傷

表-5 加振経過

Run	入力倍率	Case1		Case2	
		R 開口壁 ^{*1}	主な損傷	R 腰壁 ^{*2}	主な損傷
Run1	5%	1/8500	—	1/3710	—
Run2	20%	1/1550	1 層腰壁・有開口壁にひび割れ	1/1540	1 層腰壁・袖壁にひび割れ
Run3	40%	1/615	1 層有開口壁にひび割れ	1/472	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	1/155	1 層短柱主筋降伏, 1 層短柱にせん断ひび割れ
Run5	80%	1/209	1 層有開口壁の縦筋降伏	1/71	1～2 層腰壁端部に剥落
Run6	100%	1/124	1～2 層腰壁端部の破壊	1/22	1～3 層腰壁・梁端部の破壊, 1 層柱脚に圧壊
Run7	125%	1/32	1 層有開口壁のせん断破壊	1/23	
Run8	125%			1/21	短柱に剥落, 有開口壁のせん断破壊
Run9	125%			1/26	有開口壁のせん断破壊

※1 有開口壁構面での 1 層 X 方向の最大層間変形角(rad), ※2 腰壁構面での 1 層 Y 方向の最大層間変形角(rad)

が激しく、ねじれ応答が増大していく傾向を示した。X4 通りの短柱については、せん断ひび割れは発生した(Run4)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 通りの有開口壁が先行してせん断破壊した(Run8, Run9)。この腰壁の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た。

3.2 固有振動数の推移

各 Run 終了後に実施したホワイトノイズ加振から得られた 1 次固有振動数の推移を図-7 に示す。固有振動数は、加振前の約 8Hz から最終的に 2Hz 前後まで低下しており、損傷の進行に伴う剛性の低下が確認できる。

3.3 層せん断力-層間変形関係

各 Case の $Q-\delta$ 関係の例を図-8 に示す。ここで Q は各層図心位置の応答加速度と質量から算定したベースシア、 δ は 1 層図心位置の層間変形である。両 Case を比較すると、Case1 では有開口壁が破壊した Run7 において X 方向の変形が大きく進展し、一方 Case2 では Run6 において Y 方向の大変形応答が先行して生じた。また Case2 ではねじれ振動により乱れた履歴ループ形状を示す傾向がみられた。

Case1 の全ての Run の $Q-\delta$ 関係と静的 1 方向プッシュオーバー解析の比較を図-9 に示す。静的解析の結果は、実験結果のスケルトンカーブと概ね対応している。

また、基礎梁下の全ロードセル測定値の合計から求めたベースシア Q_L と δ の関係の例を図-10 a) に、有開口壁部分のロードセル 2 台の負担せん断力 Q_{LW} と有開口壁位置の 1 層層間変形

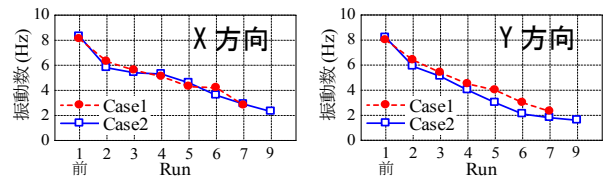
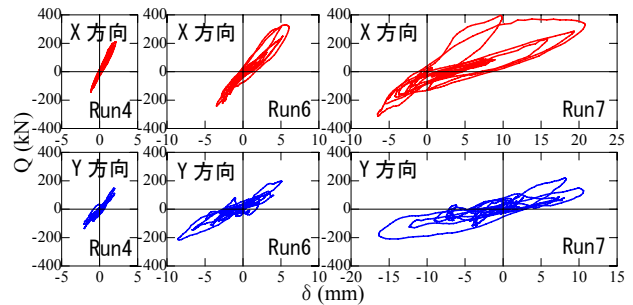
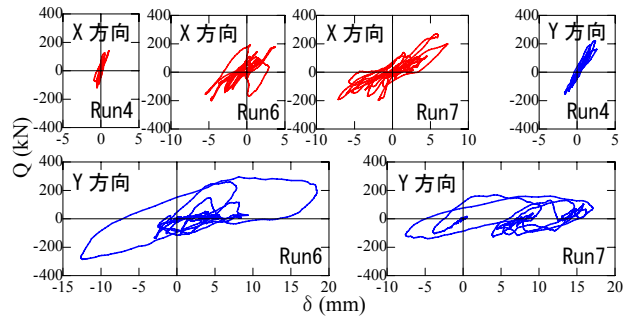


図-7 固有振動数の推移



a) Case1



b) Case2

図-8 $Q-\delta$ 関係

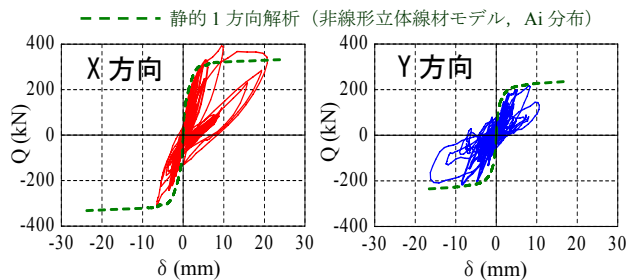


図-9 静的解析との比較 (Case1)

δ_w の関係の例を図-10 b) に示す。a) と b) の各

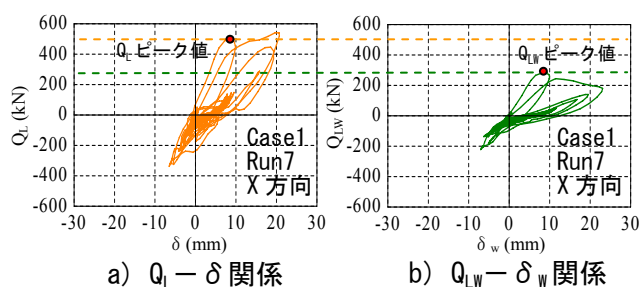


図-10 ロードセルによるせん断力の比較

ループの耐力を比較すると、有開口壁が負担するせん断力のおよその割合が把握できる。なお b) より、 Q_{LW} が最大となった点における δ_w は、層間変形角で約 $1/83\text{rad}$ ($\approx 1.2\%$) であった。

3.4 損傷・破壊状況

各 Case、各構面の損傷状況の比較の例(Run6 100%加振後)を図-11 に示す。

X 方向が入力波の主軸である Case1 では、損傷が有開口壁にやや集中する傾向がみられた。一方、Y 方向が入力波の主軸である Case2 では、袖壁、腰壁および短柱に損傷が発生し、さらに X 方向の梁の腰壁側端部にも損傷が生じた。このように、同じ Run で比較した場合、入力方向の違いにより異なる損傷・破壊状況を示した。

しかし最終的(Case1 Run7, Case2 Run9)には両試験体とも有開口壁と腰壁が破壊に至った。Case2 の最終破壊状況を写真-2 に示す。Case2 では、Y 方向の大変形応答に伴い耐力低下が生じた(図-8 b) Run6~7)が、軸崩壊には至らなかった。そのためその後の繰り返し加振(Run8~9)でも Y 方向の応答はほとんど増大せず、X 方向の有開口壁が先行して破壊したといえる。

3.5 各層の最大応答値

Case1 の Run3~Run7 について、各層の図心位置における応答加速度 Acc.および層せん断力 Q の最大値の分布を図-12 に示す。Run が小さい範囲では、各層の最大応答加速度の分布は、等分布と A_i 分布の概ね中間的な形状を示している。

3.6 各構面の最大層間変形

各層・各構面の最大層間変形の比較(Run3~Run7)を図-13 に示す。有開口壁と純フレーム構面については X 方向、袖壁と腰壁構面について

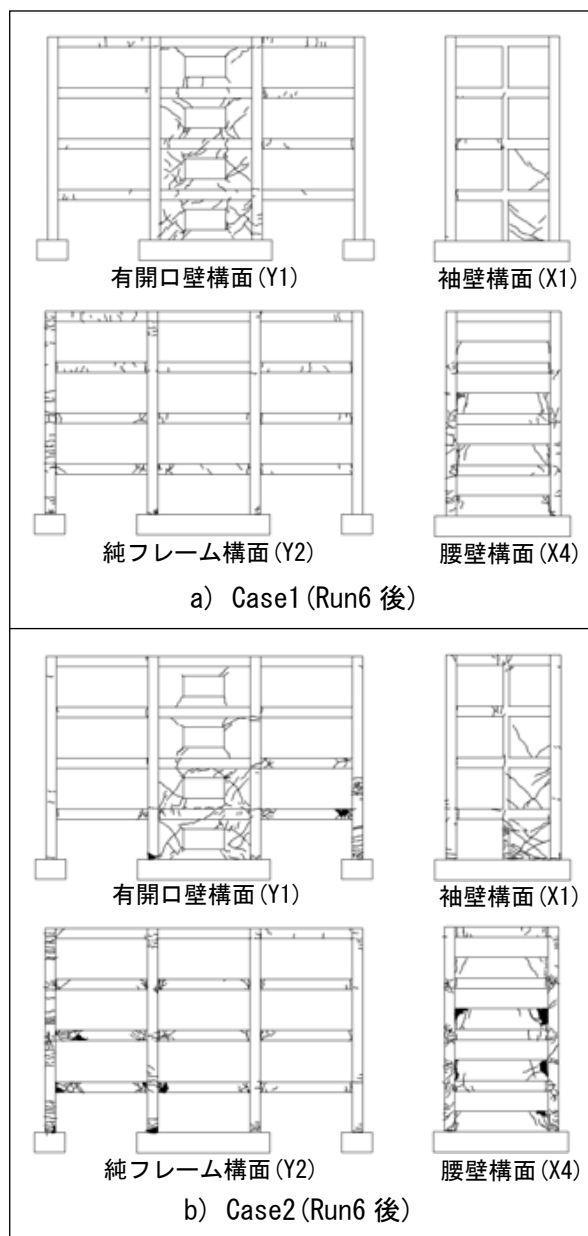


図-11 損傷状況の比較

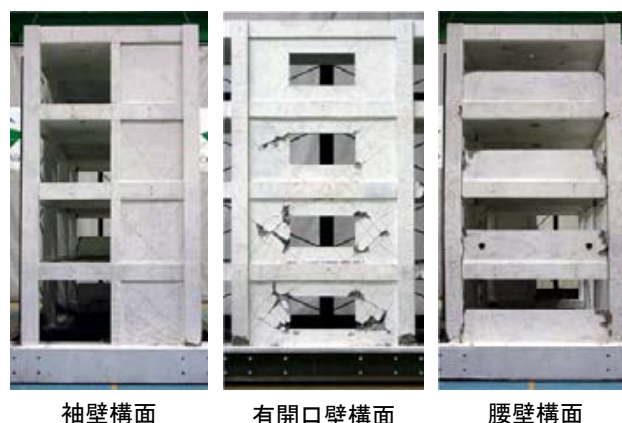


写真-2 最終破壊状況 (Case2)

は Y 方向変形についてそれぞれ示している。

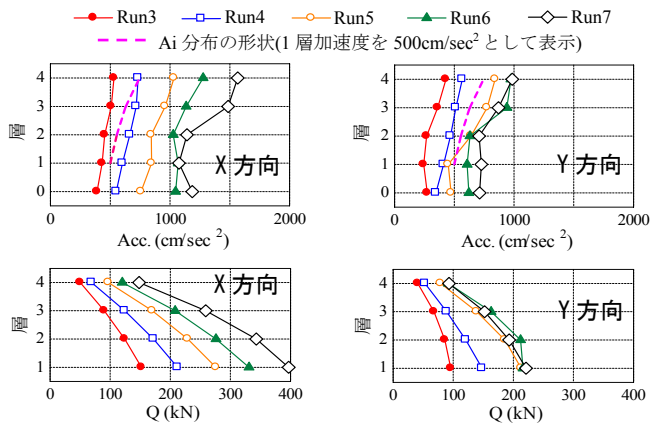


図-12 各層の最大応答値 (Case1)

全般的に、X 方向では有開口壁構面よりも純フレーム構面の方が(ただし有開口壁がせん断破壊した Case1 Run7 は除く)、また Y 方向では袖壁構面よりも腰壁構面の方が各層の層間変形が大きくなった。これより、ねじれ振動によって純フレーム側および腰壁側が大きく振られている状況が確認できる。特に、腰壁構面の Y 方向変形は、Run の進行に伴う増加量が他の構面より大きい。腰壁端部の破壊が進展したことを考慮すると、腰壁の破壊により短柱が長柱化し、剛性・耐力のバランスが不均一になりねじれ振動が増大したことがわかる。

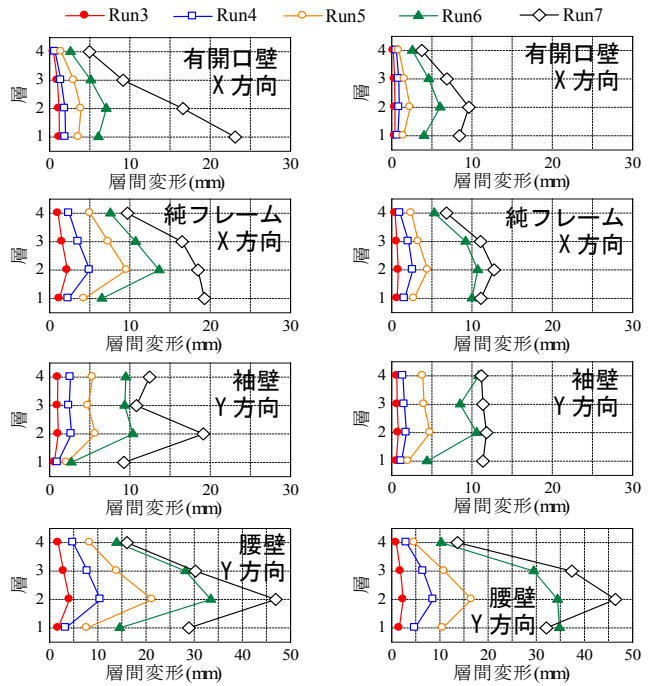
なお、概して 2 層で各構面の層間変形が最大となる傾向がみられた。これは腰壁の損傷が 1 階と比べ 2~3 階でより進展(図-11)し、2 層のねじれが顕著になったことが一因と考えられる。

4. まとめ

2 体の RC 壁フレーム試験体 (Case1, Case2) に対して多方向入力地震動の主軸の向きを変化させた振動台実験を実施した。実験結果から得られた知見を以下にまとめる。

1) 同じ加振段階で比較すると、入力方向の違いにより 2 体の試験体は異なる応答・破壊性状を示した。Case1 では X 方向の有開口壁の破壊が、Case2 では Y 方向の大変形応答が、それぞれ先行して生じた。

2) 最終的に両試験体とも有開口壁と腰壁が破壊に至った。Case2 では Y 方向の大変形応答に



a) Case1

b) Case2

図-13 各構面の最大層間変形

伴い耐力低下が生じたが軸崩壊には至らず、その後の加振で X 方向の有開口壁が先に破壊した。

3) 腰壁の破壊により短柱が長柱化し、剛性・耐力の分布が不均一になってねじれ振動が顕著に励起された。

本研究は、文部科学省が推進している「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) The First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures, 2005.7
- 2) 文部科学省, 防災科学技術研究所: 大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 震動台活用による構造物の耐震性向上研究(平成 15 年度)成果報告書, 2004.5
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1982, 1982
- 4) 柳瀬, 米山, 池ヶ谷, 勝俣, 白井, 圓, 中村: スマート AE センサを用いた RC 建物の構造ヘルスマonitoring (その 1~3), 日本地震工学会大会-2005 梗概集, pp.406-411, 2005.11