

られるような復元力特性を示している。一方、入力の主軸と一致していない方向 (Case1 : Y 方向、Case2 : X 方向) では、エネルギー消費が比較的少ないといえる。また、直交軸の入力の影響により損傷が進行して同じせん断力に対して変形が増大すると考えられる。

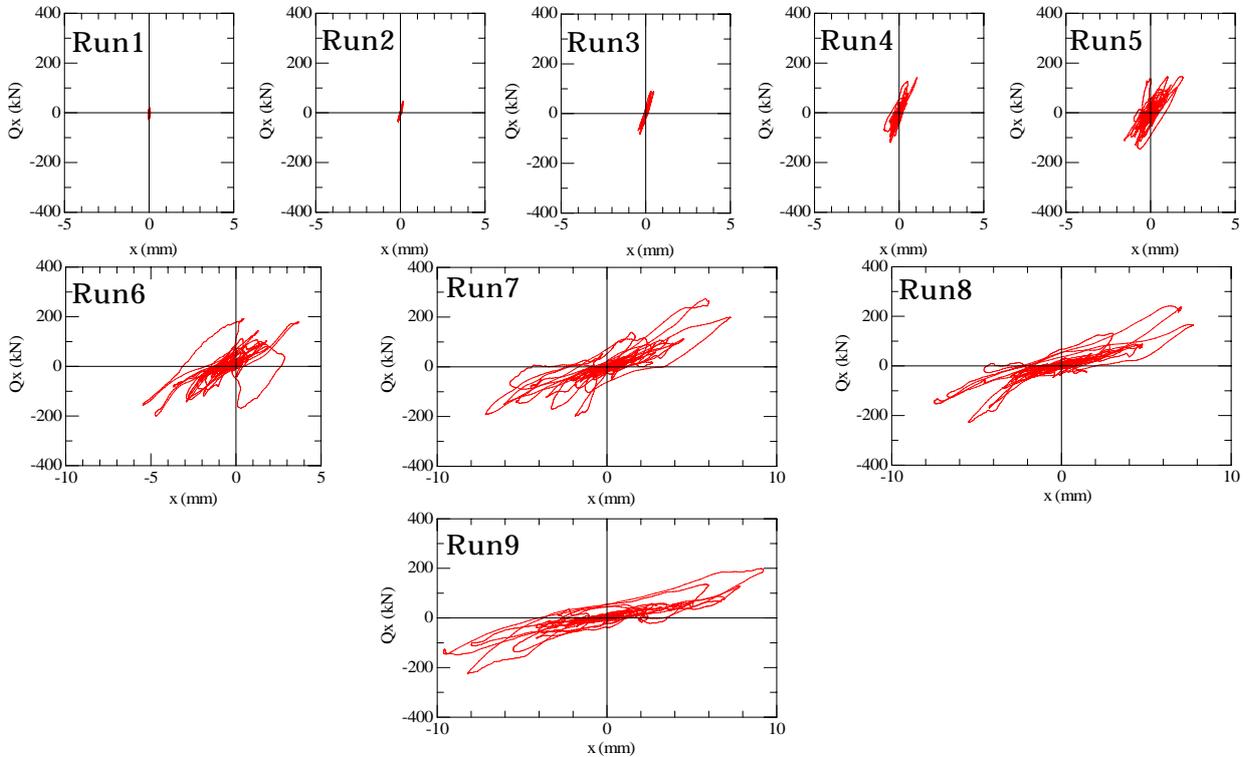


図 21 Q - 関係 (Case2、X 方向)

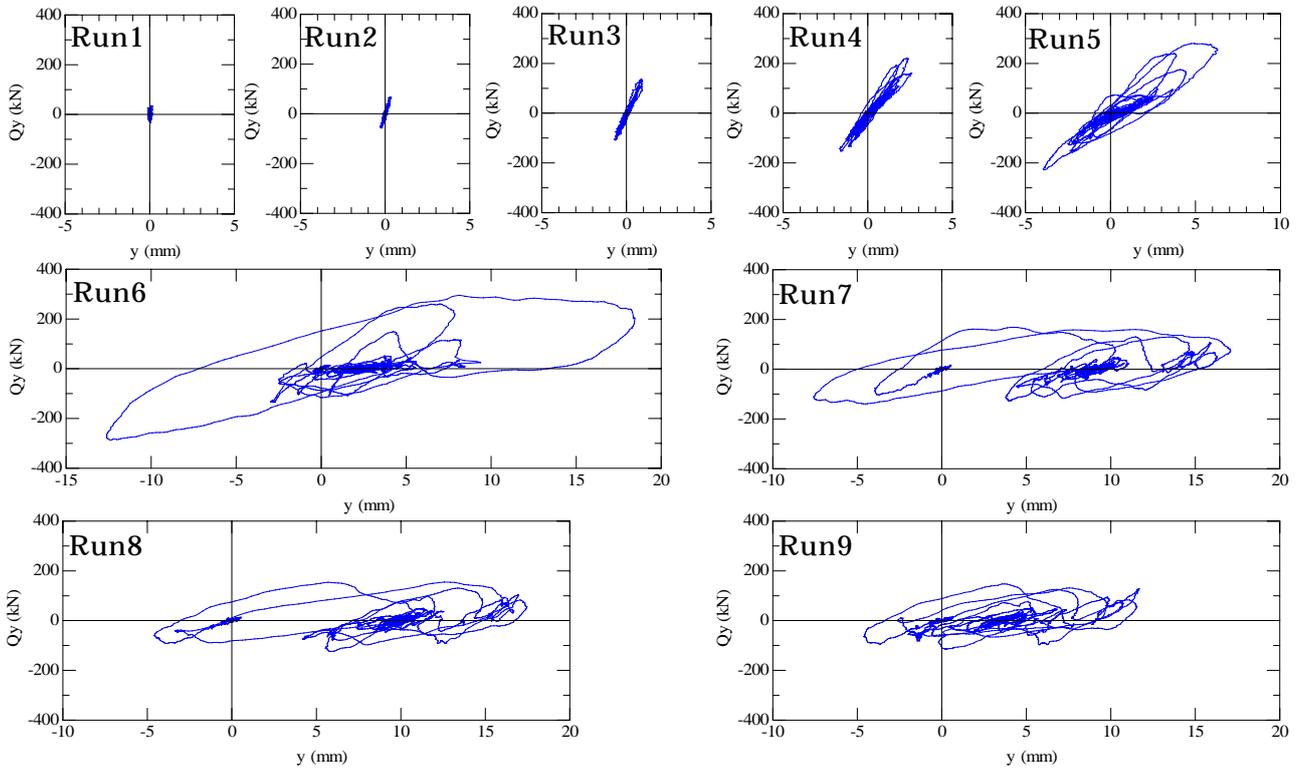


図 22 Q - 関係 (Case2、Y 方向)

d) オービット

振動台加速度、1層図心位置の層間変形、ベースシアアの、X - Y オービットの例を図 23 ~ 図 24 に示す。

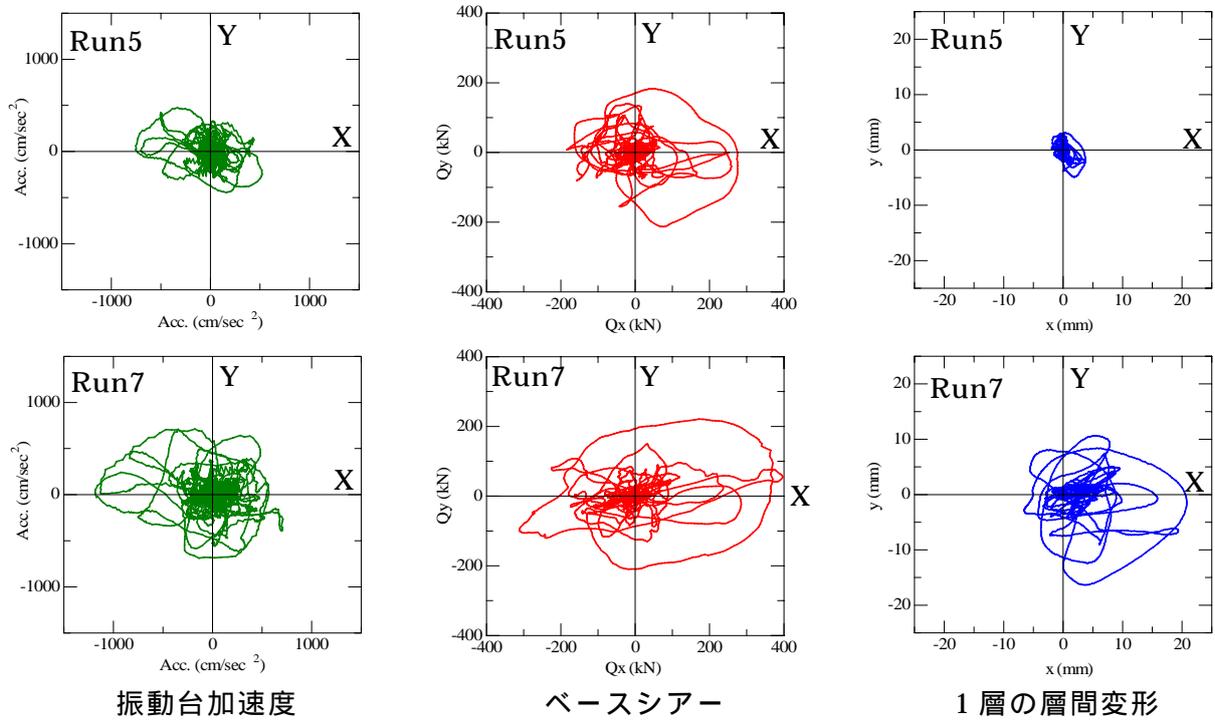


図 23 X - Y オービット (Case1)

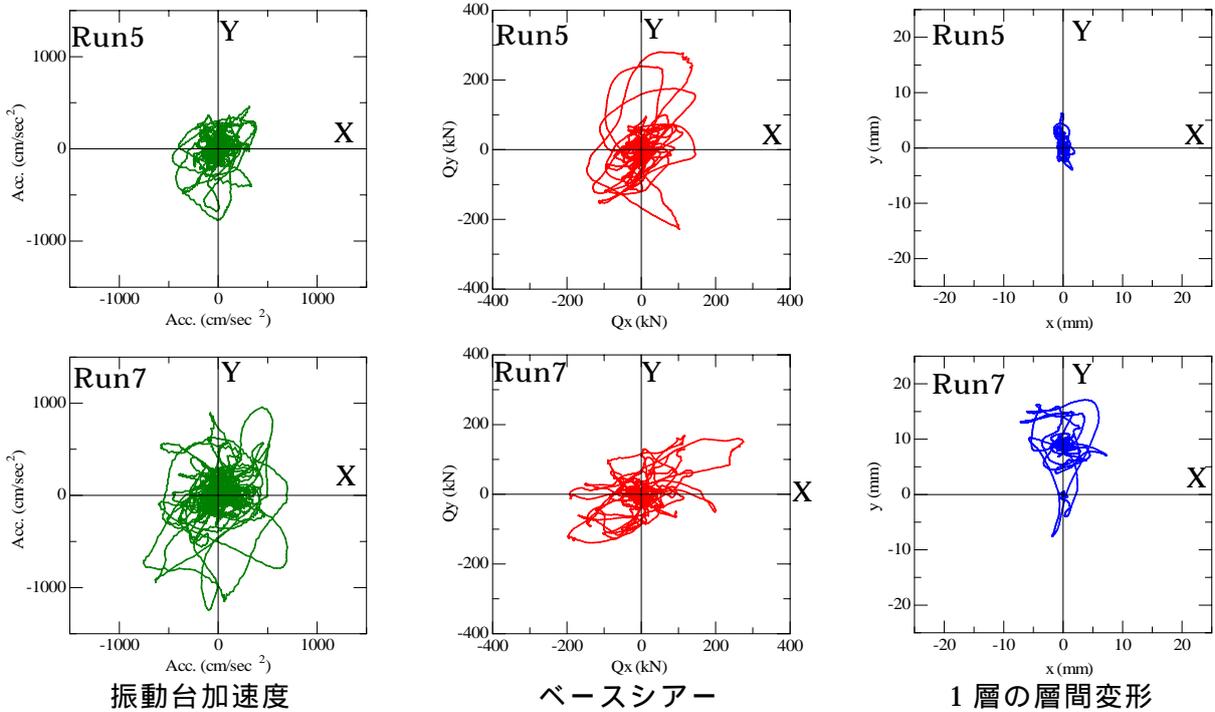


図 24 X - Y オービット (Case2)

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。

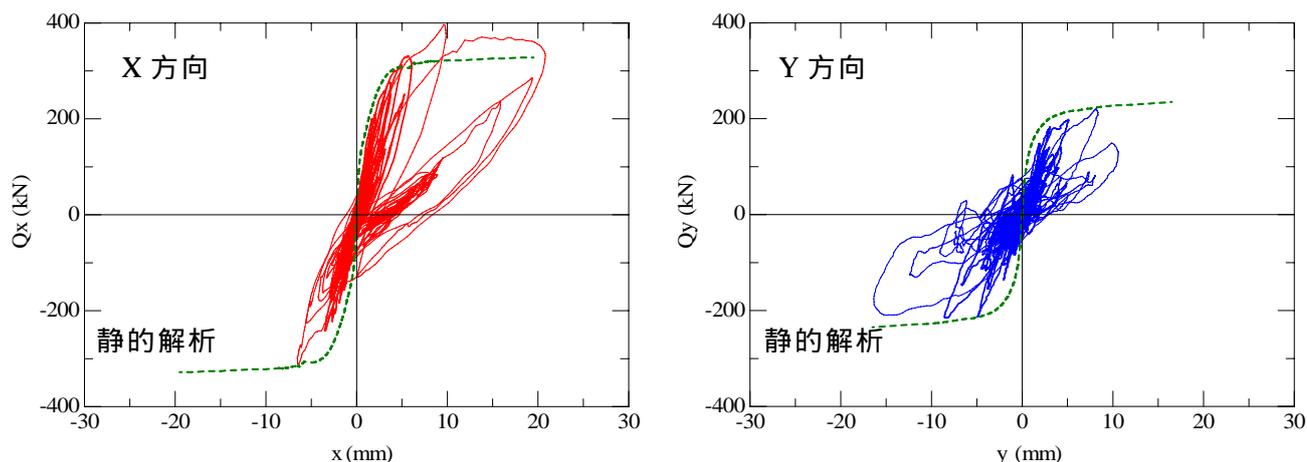


図 18 Q - 関係 (Case1、全 Run)

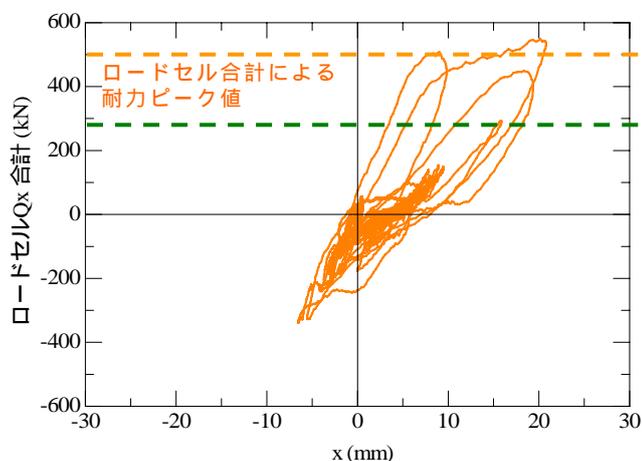


図 19 ロードセルによるせん断力 - 関係 (Case1、X 方向)

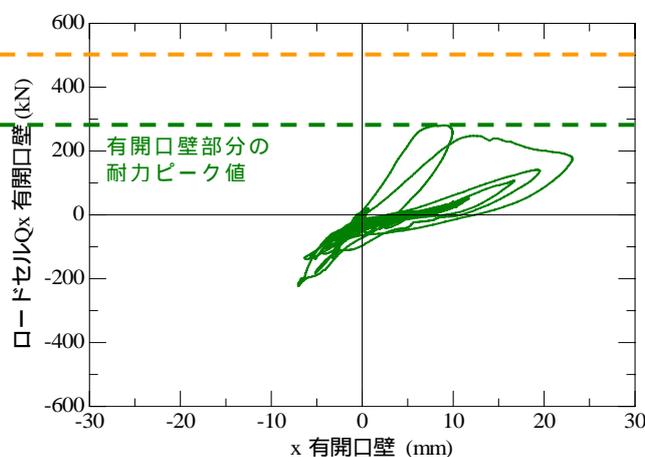


図 20 有開口壁部分のロードセルによるせん断力 - 関係 (Case1、X 方向)

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

e) 破壊状況

Case1 の Run6 (100%入力) 加振後、および最終加振 (Run7、125%入力) 後のひび割れ・破壊状況を図 25 に、Run7 終了後の最終破壊状況を写真 2 に示す。

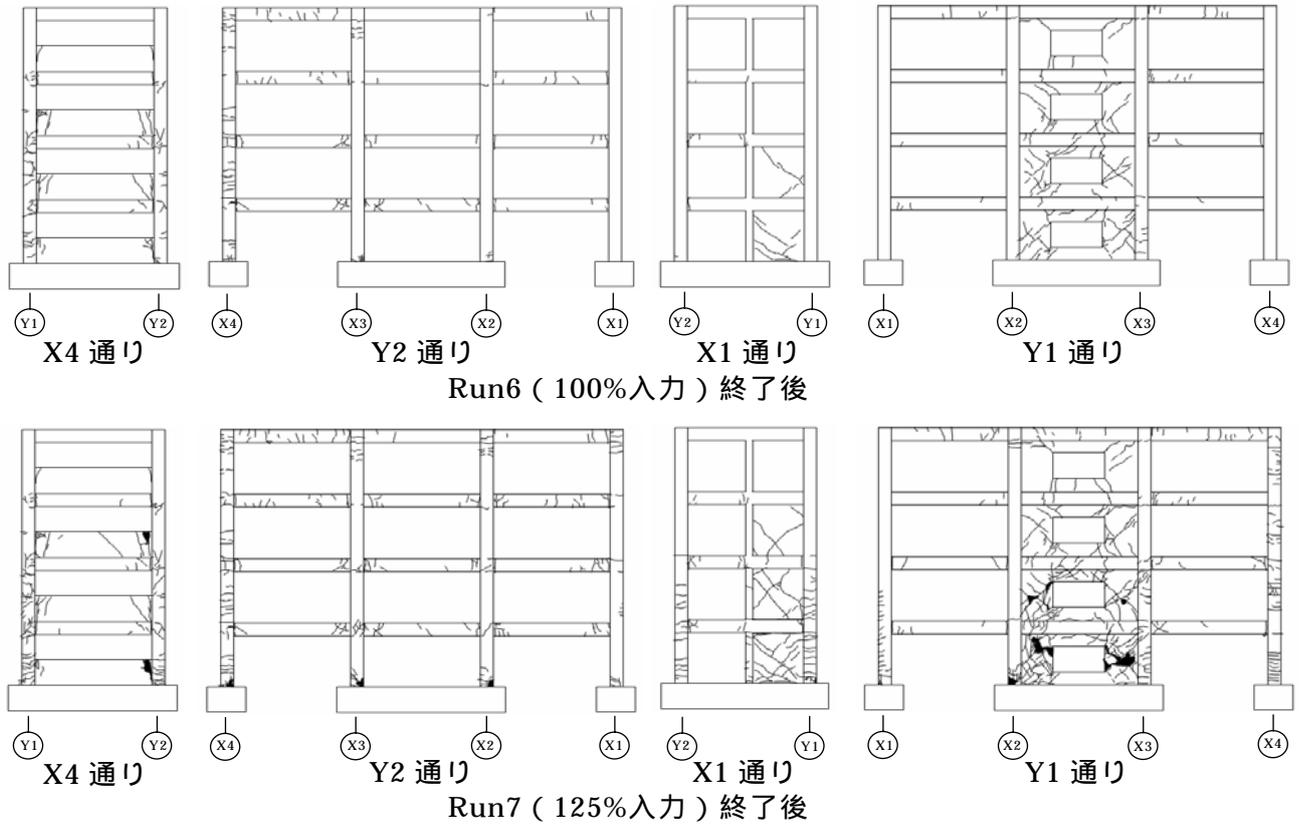


図 25 Case1 ひび割れ・破壊状況



写真 2 Case1 最終破壊状況 (Run7 終了後)

同様に、Case2 の Run6 (100%入力) 加振後、および最終加振 (Run9、125%入力 3 回目) 後のひび割れ・破壊状況を図 26 に、最終破壊状況を写真 3 に示す。

X 方向が入力波の主軸である Case1 では、有開口壁に損傷が多く発生した。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集中し、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。

しかし最終的には (Case1 Run7、Case2 Run9)、両試験体とも有開口壁と腰壁が破壊に至った。ただし、Case2 における有開口壁の破壊は、途中の Run による損傷過程を考慮すると、まず面外 (Y 方向) の力により側柱の脚部の損傷が進展し、壁板に対する面内 (X 方向) への拘束効果が低下したことで、壁板の破壊に至ったものと推察される。

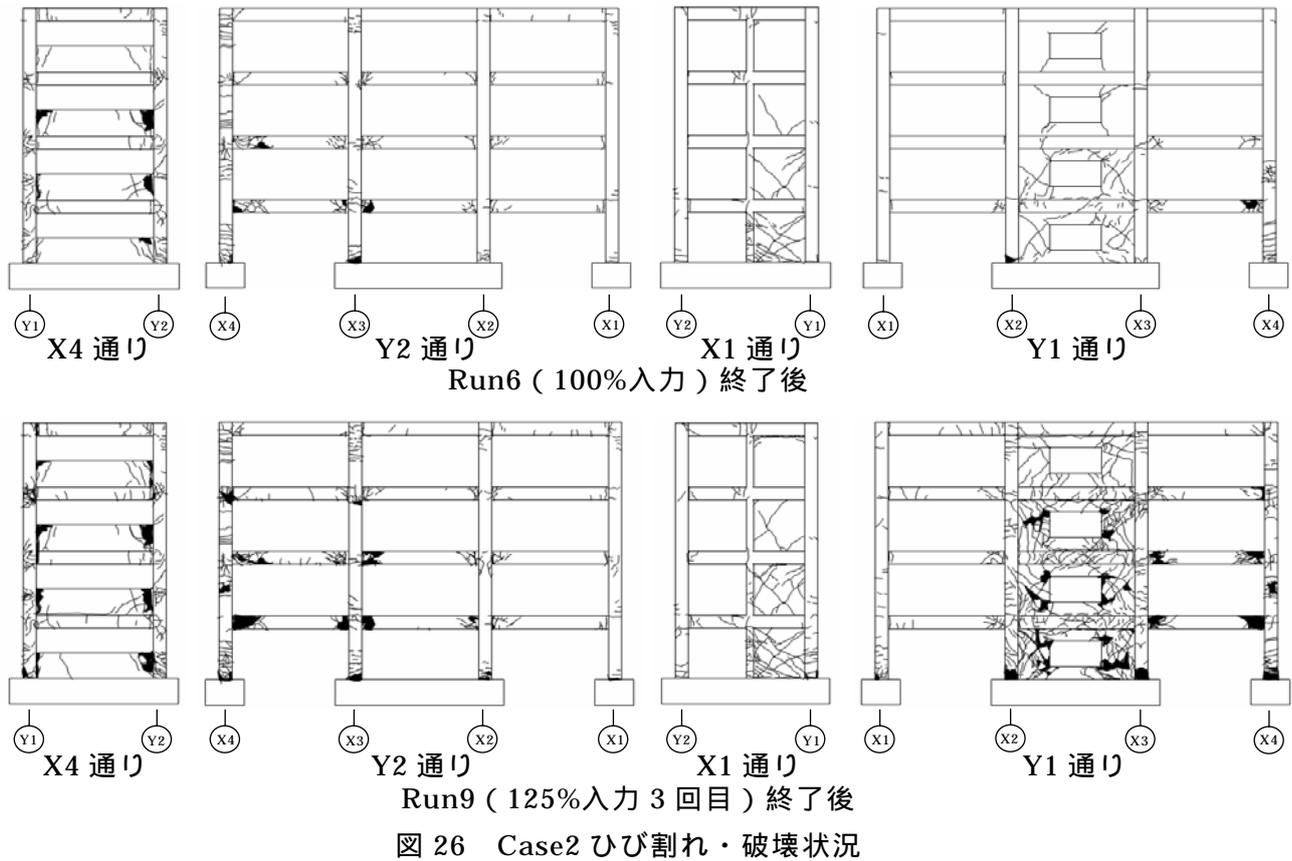


写真 3 Case2 最終破壊状況 (Run9 終了後)

f) 各層の最大応答値

Case1、Run3～Run7 についての、各層図心位置における最大応答絶対加速度 (Acc.) および最大層せん断力 (Q) を図 27 に示す。層せん断力 Q は、各層図心位置の加速度と質量から求めている。概して、Run が小さい範囲では、各層の最大加速度は等分布と A_i 分布の概ね中間的な形状を示しているといえる。

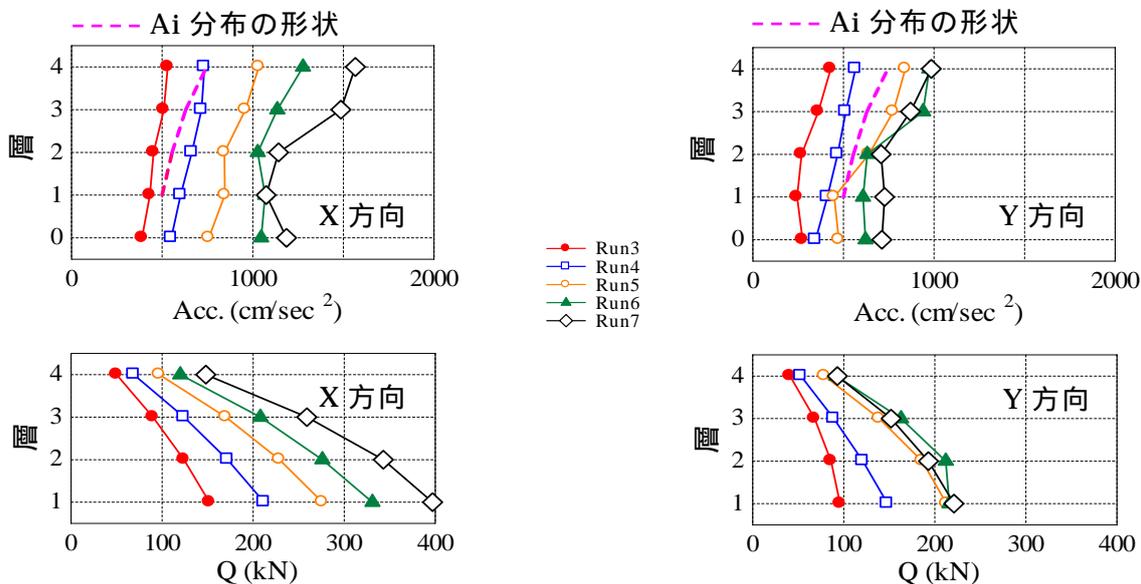


図 27 各層の絶対加速度と最大層せん断力 (Case1)

次に、各層の最大層間変形、および各層の Z 軸回りの回転角 (れじれ変形角) を図 28 に示す。および層間回転角はともに図心位置で求めている。

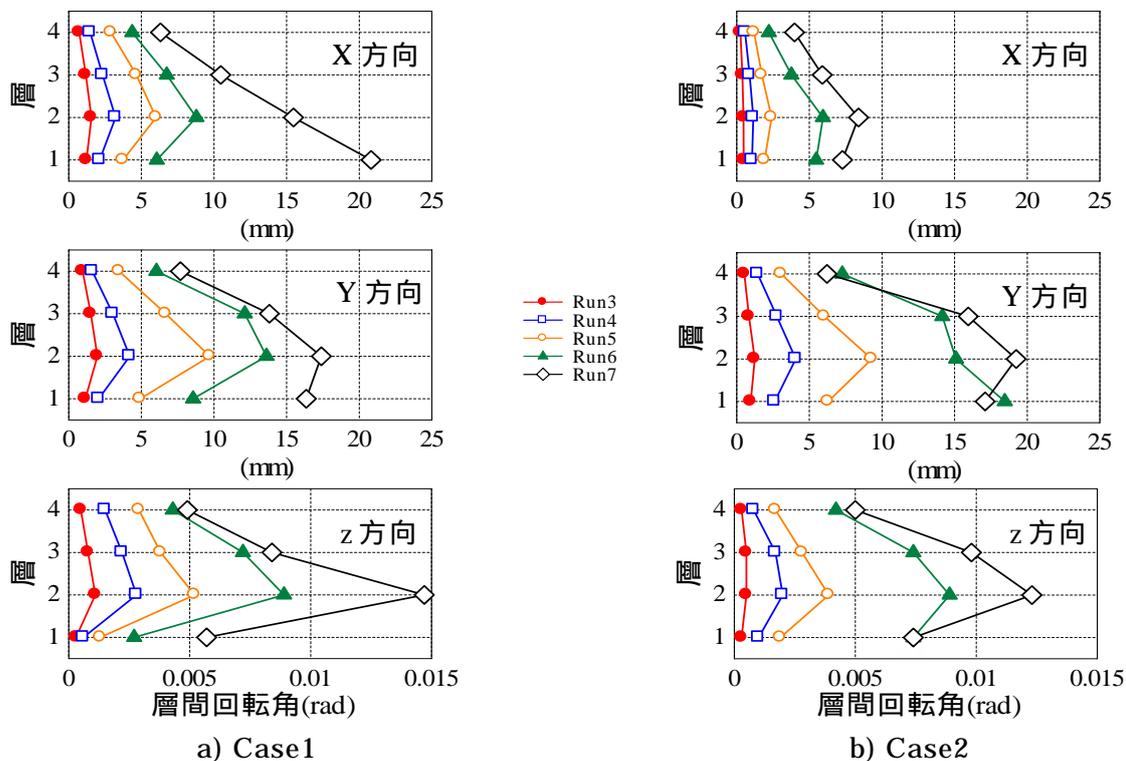


図 28 各層の最大層間変形

また、各層・各構面の最大層間変形の比較(Run3～Run7)を図 29 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はY方向変形をそれぞれ示した。

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、Y方向では袖壁構面よりも腰壁構面の方が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えると、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、層について比べると全般的に2層の層間変形が最大となる傾向がみられた。

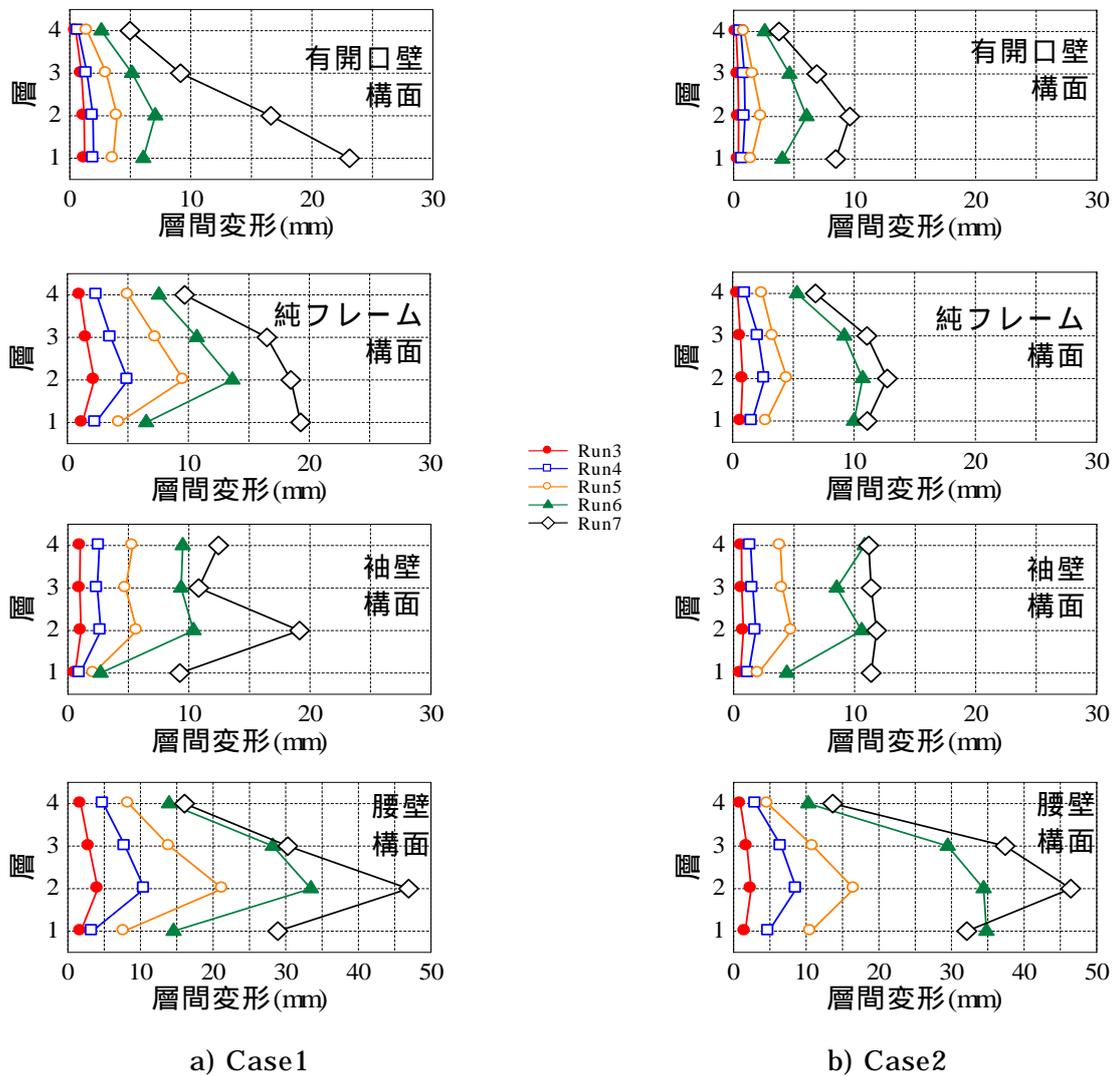


図 29 各層・各構面の最大層間変形

g) 固有値の変動

各 Case 各 Run の前後に、ホワイトノイズ 30gal 入力による固有値検索加振を実施した。ホワイトノイズ加振から得られた各 Case 試験体の 1 次固有振動数と 1 次固有周期を表 9 に示す。各加振によって徐々に 1 次固有周期が長くなっており、損傷・破壊の進行に伴う剛性の低下が確認できる。

表 9 試験体の固有振動数と固有周期

試験体	Run	X 方向		Y 方向	
		F (Hz)	T (sec)	f (Hz)	T (sec)
Case1	Run1 前	8.1	0.12	8.0	0.13
	Run2 後	6.3	0.16	6.4	0.16
	Run3 後	5.6	0.18	5.4	0.19
	Run4 後	5.1	0.20	4.5	0.22
	Run5 後	4.3	0.23	4.0	0.25
	Run6 後	4.2	0.24	3.0	0.33
	Run7 後	2.8	0.36	2.3	0.43
Case2	Run1 前	8.3	0.12	8.2	0.12
	Run2 後	5.8	0.17	5.9	0.17
	Run3 後	5.4	0.19	5.1	0.20
	Run4 後	5.3	0.19	4.0	0.25
	Run5 後	4.6	0.22	3.0	0.33
	Run6 後	3.6	0.28	2.1	0.48
	Run7 後	2.9	0.34	1.8	0.56
	Run9 後	2.3	0.43	1.6	0.63

h) 入力方向の違いによる影響

既に述べたが、入力方向の違いによる影響を以下にまとめる。

) 層せん断力

- ・入力波の主軸方向：
履歴ループは太く、一軸の静的加力実験と概ね似通った性状を示した。
- ・入力波の主軸と直交する方向：
履歴ループは細く、他方向の入力により損傷が進むことで変形が大きくなった。

) 損傷状況

同じ Run において比較すると、入力方向の違いにより異なる損傷状況を示した。ただし最終的には両試験体とも腰壁と有開口壁が破壊し、袖壁は壊れない点は、同じであった。有開口壁の損傷状況に着目すると、

- ・面内主軸加振のとき：壁板が単純に面内のせん断力によって破壊した。
- ・面外主軸加振のとき：側柱が面外力により損傷し、壁板の拘束が低下したことで、壁板が破壊した。

8) 入力波の再現性

振動台実験においては、一般に、試験体と振動台の相互作用による入力波の再現性低下が問題となる。そこで本実験では、各 Case の主要な Run を実施する前に、伝達関数の取得（インパルス波加振）および入力補償加振（目標 Run の 1/5 ~ 1/3 程度の入力倍率で 3 回加振）を行った。例として Case1 の目標入力波(Target)と振動台実現波(Resp)の加速度応答スペクトルの比較を図 30 に示す。試験体にひび割れが発生して剛性が急変した Run3 では Y 軸の再現性がやや悪化しているが、全体的には目標波と実現波の応答スペクトルは概ね合致しており、精度良く加振を遂行できたといえる。この逆伝達関数を用いた入力補償は一般的な振動台制御技術であり、本実験のように入力レベルを徐々に増大させながら複数回の加振を行う場合には、特殊な制御を必要としないことを意味している。

また、上下加振が可能な振動台では、上下方向の加振機の剛性不足による振動台の回転の影響が懸念される。本実験では、試験体の 1 次固有振動数が十分に低いため、振動台の回転を引き起こす転倒モーメントが比較的小さくなり、振動台の回転が実用上無視できる程度に収まった。

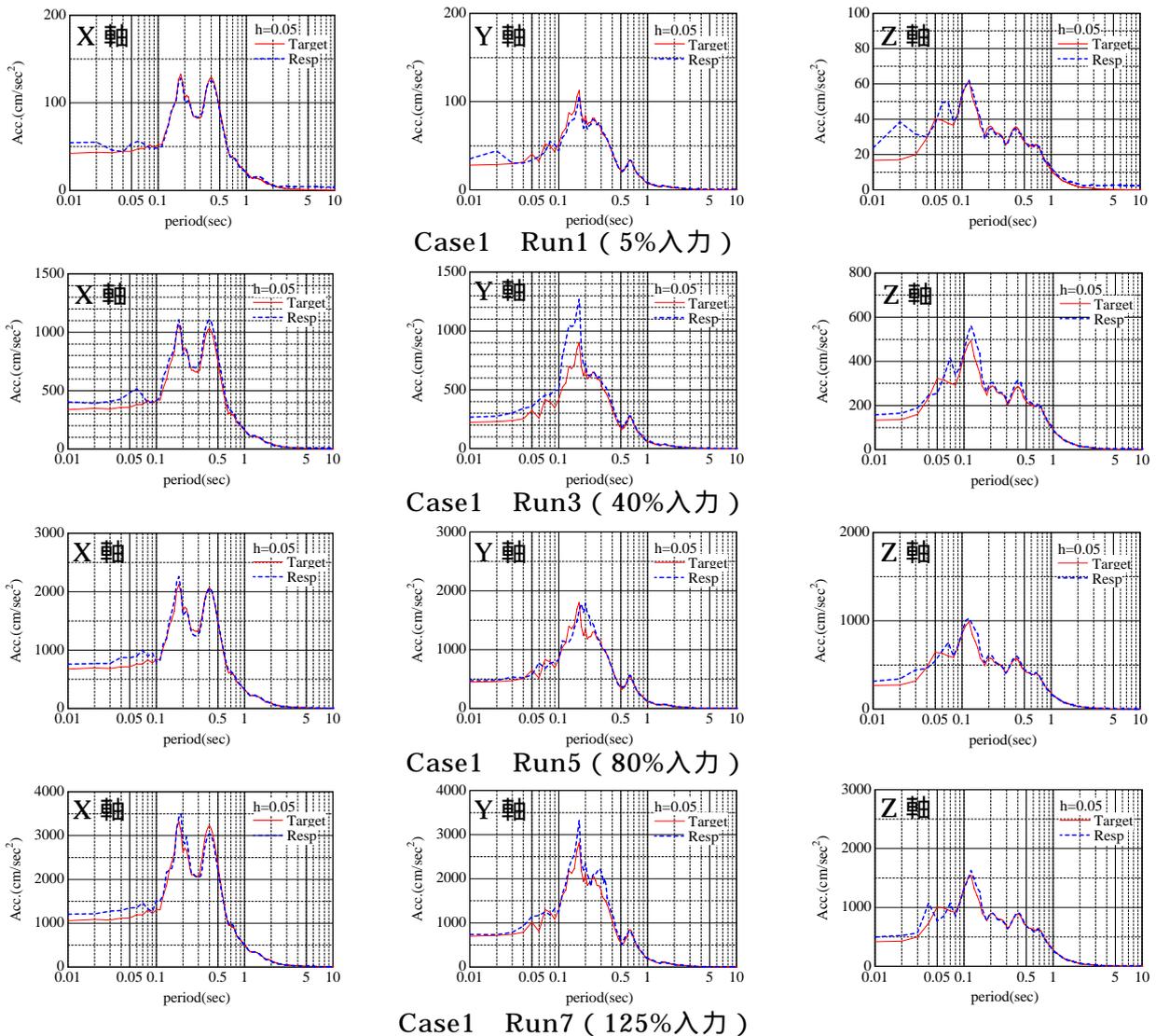


図 30 加速度応答スペクトルの比較

9) FEM 解析

a) 目的

躯体の破壊経過を予測し、ひび割れ観察やスマート AE センサによる計測計画に反映することを主目的として三次元非線形 FEM 動的解析を実施した。

b) 解析概要

) 概要

解析には(株)大林組で開発した三次元非線形 FEM 解析プログラム「FINAL」を使用した。FINAL の信頼性は、さまざまな実験データにより検証されており、複雑で大規模な構造物の挙動のシミュレーションの実績も多い。

本解析は事前予測を目的としたため、実験前に解析をほぼ終了しており、実験後の修正は、わずか(コンクリート物性および乾燥収縮ひずみ考慮のみ)である。

) 建物モデル

本解析では大まかなひび割れ範囲の推定が主目的であるため、建物モデルにはソリッド要素は用いず、主要な挙動の目安を付けられる程度の簡素化を図った。具体的には、構造部材ごとに面材(壁・床)はシェル要素に、線材(柱・梁)ははり要素とした。

なお、基礎梁及びロードセルも上部躯体脚部の固定度を等価に評価したシェル要素としてモデル化した。建物モデルを図 31 に示す。その他、建物モデル・荷重条件の詳細は省略する。

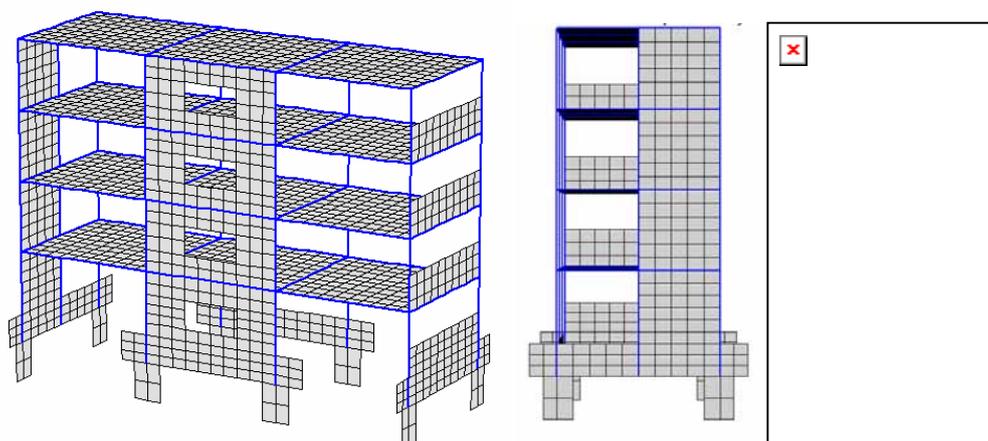


図 31 建物モデル

) 材料定数および構成則

解析に用いた材料定数は表 3、表 4 の材料試験結果に基づいて与えた。材料構成則の概要は文献³⁾に示されている。

) 入力地震動

入力地震動は振動台実験と同様に、1995 年神戸海洋気象台における水平観測波(NS、EW)を Z 軸周りに $\pm 45^\circ$ 回転補正した波形を用いた。ただし、加速度振幅レベルは観測記録波の 1.0 倍(実験での Run6 に対応)とした。

) 初期ひずみ

試験体の乾燥収縮を考慮し、初期ひずみとして 300μ を与えた。

躯体の乾燥収縮ひずみは一般的に $100 \mu \sim 300 \mu$ であるという知見が既往の研究から得

られている。今回の場合、試験体が縮小モデルであることから、乾燥収縮の影響が比較的大きいと判断して、初期ひずみの設定値を 300μ として解析を行った。

c) 解析結果

1 体目実験との破壊モードの実験結果(左)と解析結果(右)を図 32 に比較して示す。腰壁破壊が先行し各構面とも壁の破壊が主となっている。解析によるひび割れ範囲も実験結果と概ね対応している。

d) まとめ

比較的簡易なモデルを用いた FEM 解析により、今回の実験における躯体の破壊性状・範囲を精度よく予測することができた。

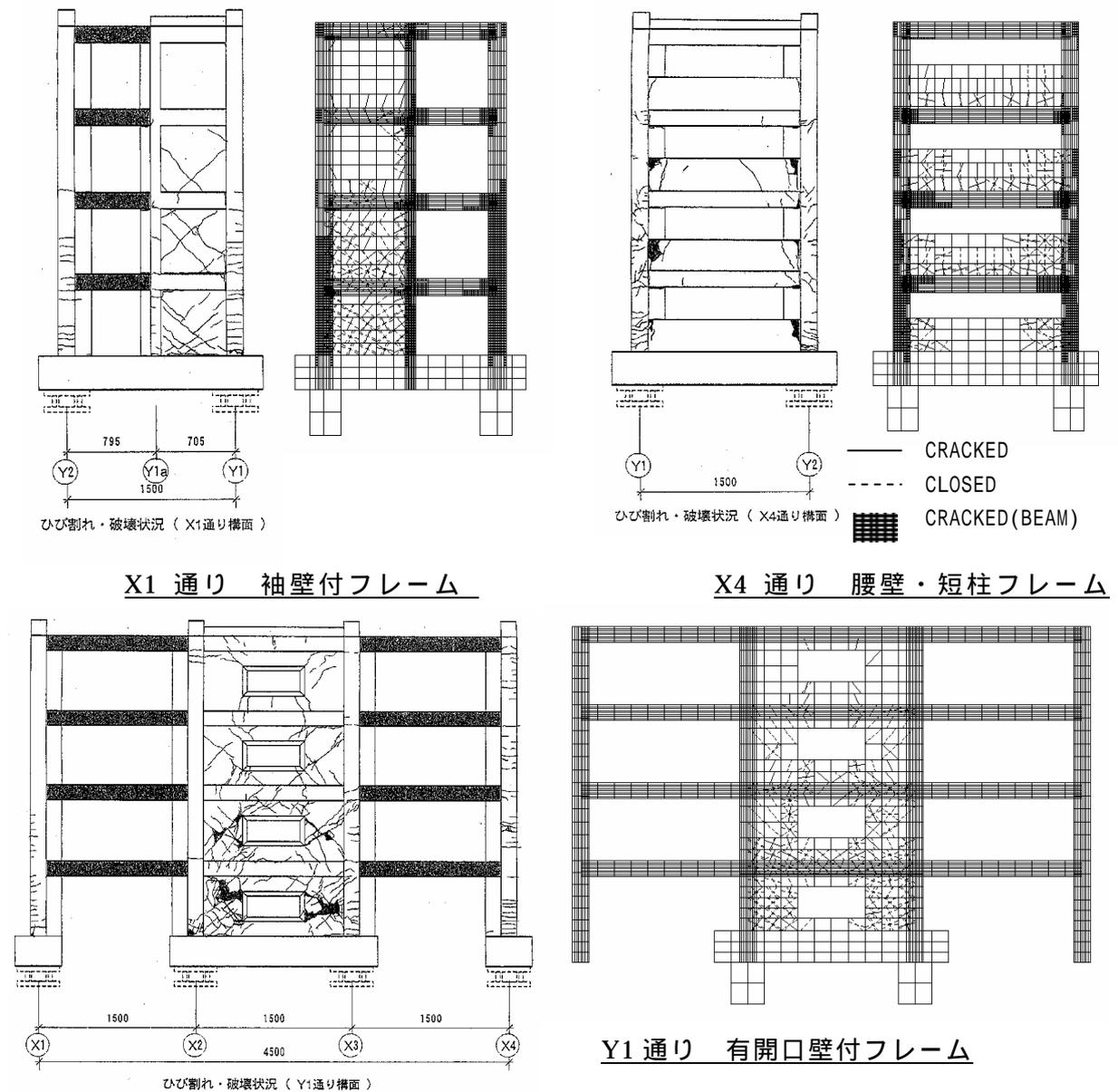


図 32 破壊モードの比較(2/2)

10) スマート AE センサによるひび割れの検知

a) スマート AE センサの概要

従来の AE センサで測定できる情報は、信号の大きさ、周波数成分、信号の発生頻度、各センサへの信号の到達時間の差である。あまり多くないセンサを配置して、AE 発生源を特定し、信号の大きさから亀裂から開放されたエネルギーを推定し、発生頻度から進展状態を推定することが行われていた。

しかしながら、このような AE センサシステムは、外来ノイズとの弁別・発生位置の同定・進展状況の推定に、かなり高価で複雑なハードやソフトを必要とした。

それに対して、建築構造物では損傷が発生する可能性が高い箇所がかなり特定できることから、ある閾値を超える信号の頻度だけで評価を行う AE センサシステム（図 33）で十分な成果が得られる。

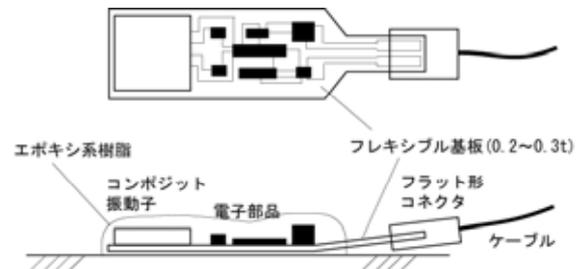


図 33 スマート AE センサ

b) 目的

実験では加速度などの物理量は加速度計など他のセンサで測っており、これらと別の原理に基づくスマート AE センサを採用し適用性について検討することにした。実建物の劣化調査や静的加力試験での適用例はあるものの、動的試験での適用は今回が初めてであり、今後の構造ヘルスマモニタリングへの汎用性拡大に資するデータ取得を主目的とした。

c) 計測概要

前述の FEM 解析結果からひび割れが多く発生すると予想された 1 層の壁・柱脚部にスマート AE センサを設置した。実験 Case2 における AE センサの設置位置を図 34 に、AE センサの概観を写真 4 に示す。

スマート AE センサの収録ステップは 1/10,000 秒であり、AE カウント数は図 34 の青色のもので 0.1 秒、赤色のもので 1.0 秒間毎の頻度として出力した。なお、閾値は 4 段階に設定した。

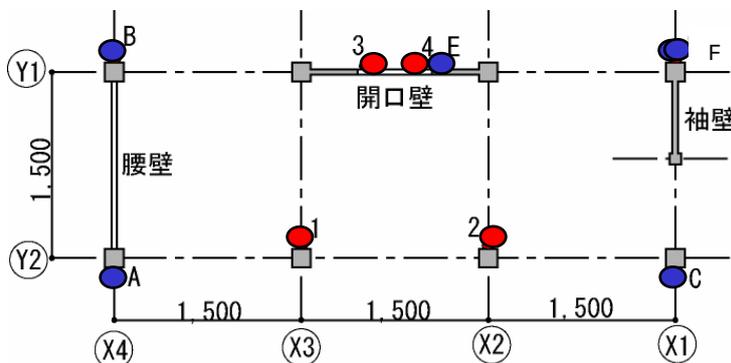


図 34 AE センサ設置位置 (Case2)



写真 4 AE センサ概観

d) 計測結果 (Case2)

例として実験 Case2 におけるスマート AE センサの検知結果を図 35、図 36 に示す。各加振ステップでの AE カウント数は、加振レベルの上昇に応じて Run6 または Run7 まで

は増加したが、大きな亀裂が多数生じた以降はカウントが減少した。これは、大きな亀裂の発生により AE 波の伝播を遮る箇所が増加したことが要因として考えられる。

ひび割れが早期に生じた腰壁(A、B)、開口壁(E)の AE カウントが多く、損傷が少ない袖壁フレーム(C、F)では AE カウント数が少なかった。また、腰壁端部に亀裂の生じた部位に設置されたセンサ B のカウント数は既に Run5 以降から減少傾向を示した。

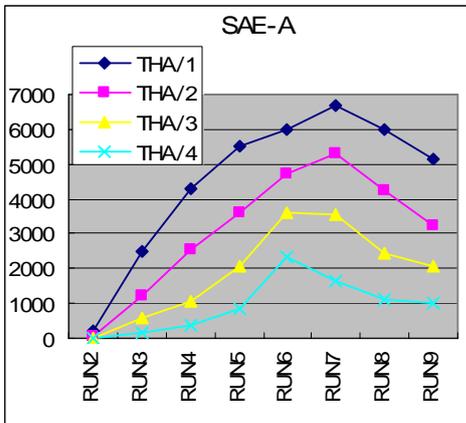


図 35 AE カウントの推移(センサ A)

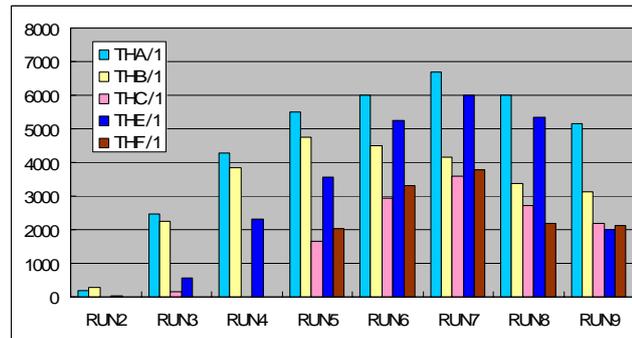


図 36 設置位置による差異

壁せん断履歴と AE カウントの関係を図 37 に示す。図 35 と同様に変形の大きなステップで AE カウントが多くなっている。除荷時においても AE カウントが多いステップが見られることから、新規ひび割れ発生時だけでなく、ひび割れ閉鎖時(摩擦)も AE 波を検知していることが分かる。

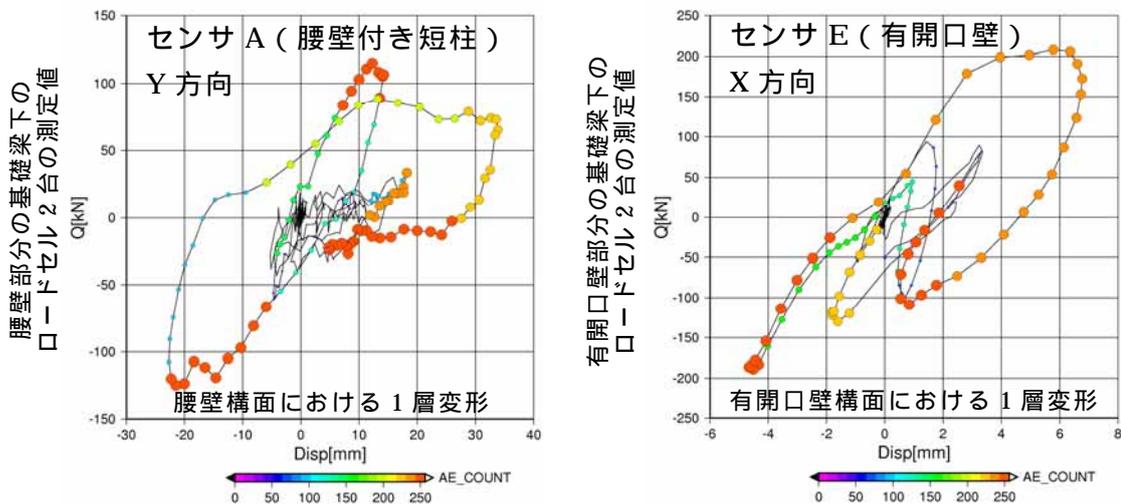


図 37 AE カウントとせん断力 変形関係 (Case2、Run6 100%入力時)

e)まとめ

今回の実験により、スマート AE センサの動的挙動時のモニタリング適用性及びセンサの性能・仕様を確認できた。また、他のセンサによる計測結果との対応についての検討を通じ、貴重なデータを得ることができた。今回のデータが、今後の構造ヘルスマニタリングの適用に向け、その展開に大いに活用できるものとする。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 2体のRC壁フレーム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。

- a) 同じ加振段階で比べると、入力方向の違いにより異なる応答・破壊性状を示した。
- b) 最終的に両試験体とも有開口壁と腰壁が破壊に至った。
- c) 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。
- d) 最大耐力など破壊が進行する前の挙動については事前解析と概ね対応した。この範囲では現状の解析方法はマクロに見れば妥当であった。ただし、以下に関しては今後の解析的研究、および既存建物の耐震診断・補強や新築建物の設計の実務において反映させる必要がある。
 - ・腰壁が取り付く柱の解析や設計では、腰壁が破壊する可能性を考慮する必要がある。
 - ・連層耐震壁は、解析による事前の予測、および既往の研究による類推のとおり、曲げ降伏後のせん断破壊を示した。
 - ・破壊の進行によって建物のねじれ振動が誘起される。
- e) ねじれはEディフェンスの実大RC震動実験ではあまり考慮しない計画であるため、建物振動実験のデータとして貴重である。

2) また、建物の多方向地震入力実験技術に関しては、以下の知見を得た。

- a) 上下加振可能な振動台では、上下方向加振機の剛性不足による振動台の回転の影響が懸念される。今回の4層建物試験体では回転を引き起こす転倒モーメントに大きな寄与を持つ1次の固有振動数が十分に低かったため、回転は無視できる程度に収まった。
- b) 使用する振動台は異なるが、特殊な制御方法を用いず、通常の制御方法によってもH17年の実大6層建物実験の加振が可能であろうという感触を得た。
- c) H17年の実大6層建物実験でも腰壁付き短柱が組み込まれる計画であるが、腰壁の破壊に十分注意して設計する必要があることがわかった。
- d) 解析では2層の壁の変形が大きいですが、過去の実験と同様に1層の壁がせん断破壊した。安全対策上、1層の落階に留意する必要があることが再認識できた。
- e) 実験準備・ひび割れ観察の作業では労働災害防止の観点から、安全な作業足場が必要であるが、振動台上に足場を設置することは実験工程上、難しいことが再認識できた。実大6層建物試験体計画に対して跳ね出しスラブを設け、前述の作業足場を兼ねることを提言したい。
- f) 建物基礎部に3分力計を設置して連層耐震壁や腰壁構面の負担せん断力等を計測した。3分力計で計測した値は定性的に壁の破壊現象を捉えていたが、定量的には他の計測センサから算出される値と乖離があった。実大6層建物実験でも壁の基礎に3分力計を設置する計画であるが、計測精度を向上させるため、実験で経験された載荷経路を模擬した検定を行うことによって校正値を見直す必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 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 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
- 2) 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
- 3) 長沼一洋, 栗本修, 江戸宏彰: 鉄筋コンクリート壁体の FEM による正負繰返し及び動的解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 544 号, pp.125-132, 2001.6

(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
勝俣英雄、壁谷澤寿一、白井和貴、壁谷澤寿海、関松太郎	鉄筋コンクリート造 4 層壁フレーム模型の多方向入力振動台実験(その 1 実験計画、その 2 実験結果)	2005 年度日本建築学会大会学術講演梗概集	平成 17 年 9 月(予定)
圓、池ヶ谷、米山、白井、勝俣、長沼、柳瀬、中村	スマート AE センサを用いた RC 建物の構造ヘルスマニタリング実用化研究(1/1~1/3)	2005 年度日本建築学会大会学術講演梗概集	平成 17 年 9 月(予定)

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務のまとめ

本業務は、平成 16 年度のみ業務である。

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 RC 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い、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。