

報告 鉄筋コンクリート造実大6層壁フレーム構造の震動実験概要

松森 泰造*¹・壁谷澤 寿海*²・白井 和貴*³・勝俣 英雄*³

要旨：文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ（震動台活用による耐震性向上研究）」では、独立行政法人防災科学技術研究所の「実大三次元震動破壊実験施設（E-Defense）」による最初の鉄筋コンクリート建物実験として、実大6層耐震壁フレーム構造の震動実験を実施した。神戸海洋気象台観測波（1995）による加振に対し、1層短柱のせん断破壊と連層耐震壁の壁脚せん断すべり破壊により試験体は大破し、さらにその後の余震想定加振により、1層長柱も曲げ破壊し1層の層崩壊に至った。本報では、その実験の概要について報告する。

キーワード：振動台，地震応答，連層耐震壁，短柱，せん断破壊，崩壊

1. はじめに

独立行政法人防災科学技術研究所は、2004年10月、兵庫県三木市に「実大三次元震動破壊実験施設（通称：E-Defense）」を完成させ、2005年10月より本格的な運用に入っている。

E-Defenseは世界最大の3次元震動実験装置であり、その震動台床面積20m×15m、試験体の最大許容高さ20m、最大搭載質量1,200tである。1,200t搭載時の震動台水平方向の最大加速度、速度および変形はそれぞれ9.0m/sec²、2.0m/secおよび1.0mであり、垂直方向の最大加速度、速度および変形は15.0m/sec²、0.7m/secおよび0.5mである。したがって、E-Defenseを用いることにより非常に大きな地震動入力によって実大中層鉄筋コンクリート構造物を崩壊させることが可能となる。

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）Ⅱ. 震動台活用による耐震性向上研究」¹⁾では、2002年度より行ってきたE-Defense震動実験の予備研究としての、縮小モデルの震動実験、静的および動的载荷による部材性能実験、部材解析モデルの開発、特にせん断破壊後の軸崩壊挙動のシミュレーションなどの成果と、現在考えられる研究課題を吟味し、

2005年度のE-Defense震動実験の試験体として6層鉄筋コンクリート造壁フレーム構造物を選択し、2006年1月にE-Defenseによる震動実験を実施した。本報では、その実験方法および実験結果の概要について報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

2005年度のE-Defenseによる実験では、最初に行う実大規模実験として、以下のような要求項目が挙げられた。

- (1) 試験体は「実大」「三次元」とし、E-Defenseでしかできない規模とする。
- (2) 構造物の崩壊までの過程を対象とする。
- (3) 長期的な実験シリーズの一部とする。
- (4) 研究本意のみならず、民間に耐震設計の重要性を啓蒙できるものとする。

大大特鉄筋コンクリート建物実験委員会（主査：壁谷澤寿海）では、上記の要求項目と、現在の鉄筋コンクリート造建築構造物の耐震工学における一般的な研究課題を吟味した上で、2005年度に行うE-Defense震動実験の試験体として、実大6層、長手3スパン、短手2スパンという規模を選択し、(1)整形な建物、(2)壁フレ

*1 独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 博士（工学）（正会員）

*2 国立大学法人東京大学地震研究所教授 工博（正会員）

*3 株式会社大林組技術研究所（正会員）

ーム構造、および(3)既存の比較的脆弱な建物を対象とすることとした。震動実験の研究目的としては、特に、以下の項目を設定した。

- (1) ほぼ整形だが耐震壁、短柱、長柱が混在してやや複雑な3次元挙動、崩壊過程の実験的な解明。
- (2) 動的な効果によるせん断力上昇と変形増大によるせん断耐力低下に起因する層崩壊の再現。
- (3) 耐震壁と柱の負担せん断力を計測。
- (4) 部材の耐力低下、層降伏などを含む崩壊過程（ポストピーク）を最新の解析手法によって再現可能であるかどうかの確認。

2.2 試験体の形状

試験体は6層構造物で長手方向（Y方向）は3スパン、その直交方向（X方向）は2スパンとした。試験体の基準階伏図および軸組図を図-1に示す。全景写真を写真-1に示す。

実験結果からより多くの知見を得ることを目的として、1つの建物に性質の違う複数の構面を混在させ、各構面においてそれぞれ異なる損傷・破壊性状が観察できるような計画とした。すなわち、試験体中央部には長手方向に1層から最上階まで境界梁を介した連層耐震壁を配置した。また、長手方向の構面のうちの1構面の梁に腰壁を設置することで、柱の内法高さを短くし、比較的脆性的な柱のせん断破壊を可能にした。直交方向には外端構面の中央に1層から最上階まで連層の袖壁、スパン中間には袖壁の側柱として間柱を配置し、直交方向のフレーム変形を拘束している。

柱は、全層すべて共通で、断面を500×500mm、主筋を8-D19（全鉄筋比0.92%）、横補強筋を2-D10@100mm（横補強筋比0.29%）とした。梁断面は部位ごとに異なるが、2階梁では断面を300×500mm、主筋は上端を3-D19、下端を2-D19（全鉄筋比0.96%）、横補強筋を2-D10@200mm（横補強筋比0.24%）とした。

連層耐震壁および袖壁では、壁板の厚さを150mm、壁筋は縦横ともD10@300mmをダブル

配筋（せん断補強筋比0.32%）とした。腰壁は高さを1,000mm、壁板の厚さを120mm、壁筋は縦横ともD10@200mmをシングル配筋とした。

床スラブは、厚さを2～6階で150mm、最上階のみ190mmとし、上下ともD10@100mmとした。

2.3 試験体の重量

計測用治具類を含む試験体の計算重量は、各階1.23MN、1層柱より上で7.35MNである。

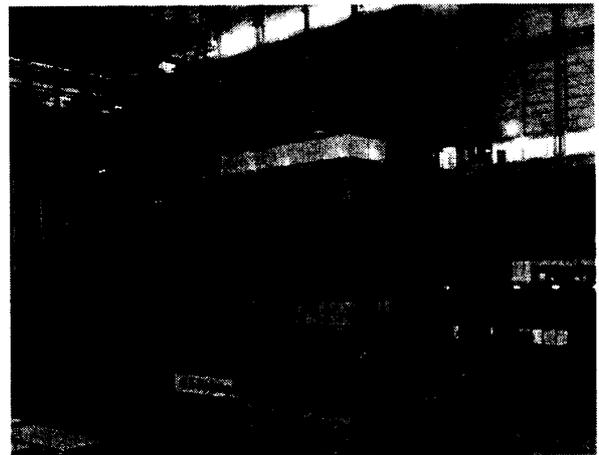


写真-1 全景

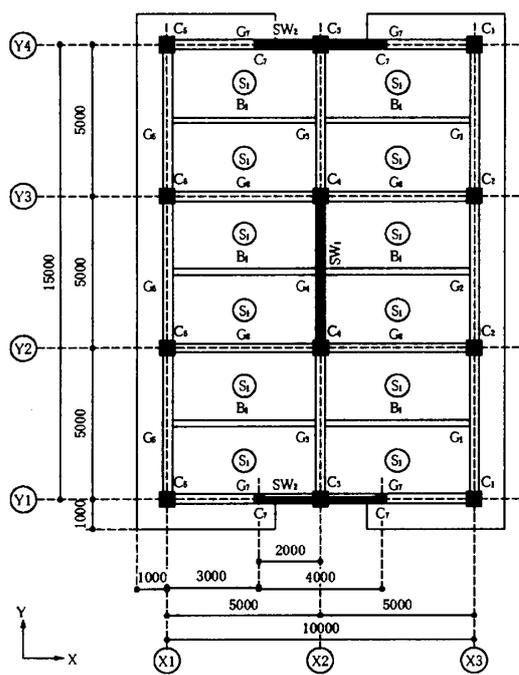
2.4 材料特性

コンクリートの設計基準強度は $F_c = 18 \text{ N/mm}^2$ とした。ただし、加振当日の圧縮強度試験結果は、1層で 31.7 N/mm^2 、6層で 22.8 N/mm^2 であった。鉄筋は、D16以上の異形鉄筋はSD345とし、D16未満の異形鉄筋はSD295とした。

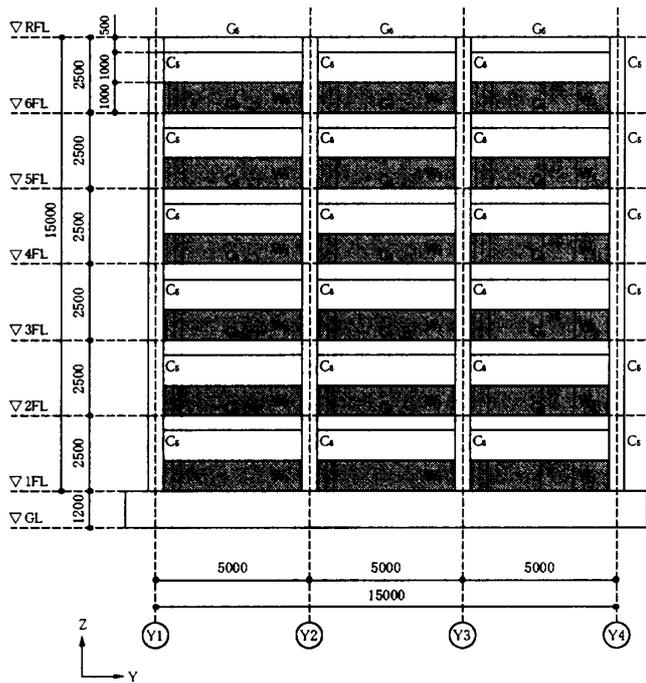
2.5 試験体の設計

試験体は1970年代当時の一般的な構造設計手法により設計された鉄筋コンクリート構造物を想定し、1975年版の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、および1970年代当時の建築基準法・同施行令に原則として従って行った。

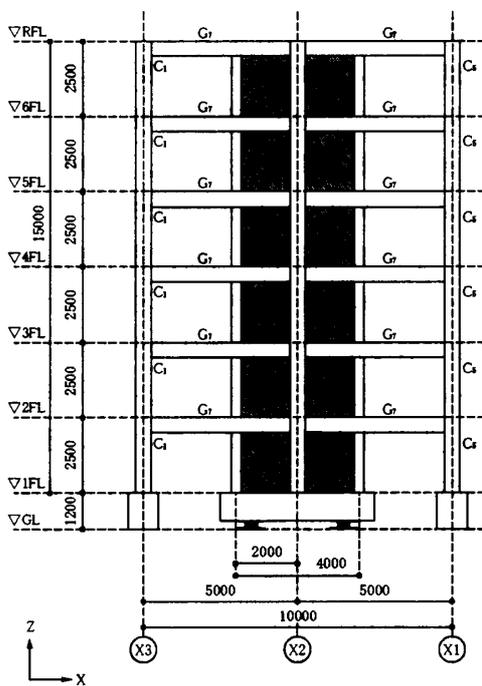
柱および大梁の断面算定は曲げ理論と許容応力度設計に基づいて行った。各断面の配筋は、(1)長期荷重時ラーメン応力の算定、(2)地震荷重時ラーメン応力の算定、それぞれから得られた応力から柱・大梁の断面算定を行い、これらと(3)必要最小限の鉄筋量、のうち最も鉄筋量の多い断面を採用した。



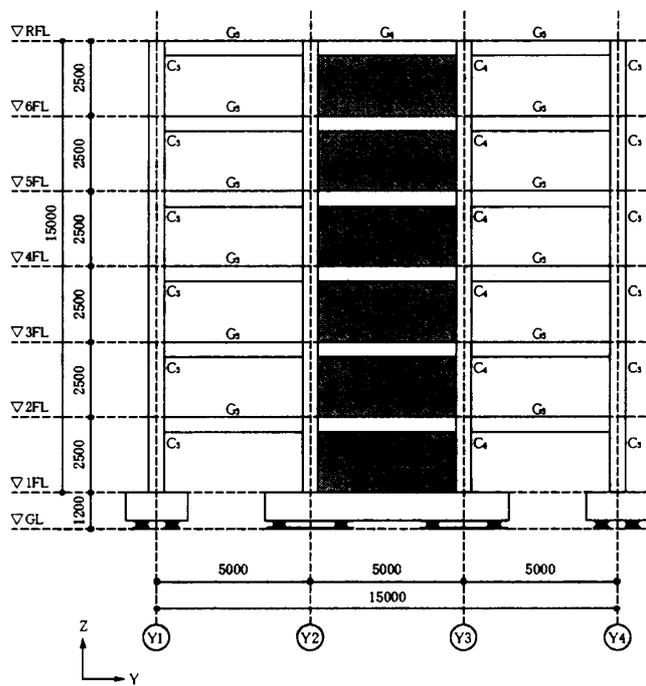
(1) 基準階伏図



(2) X₁ 通り軸組図



(3) Y₁, Y₄ 通り軸組図



(4) X₂ 通り軸組図

図-1 試験体の基準階伏図および軸組図 (つづく)

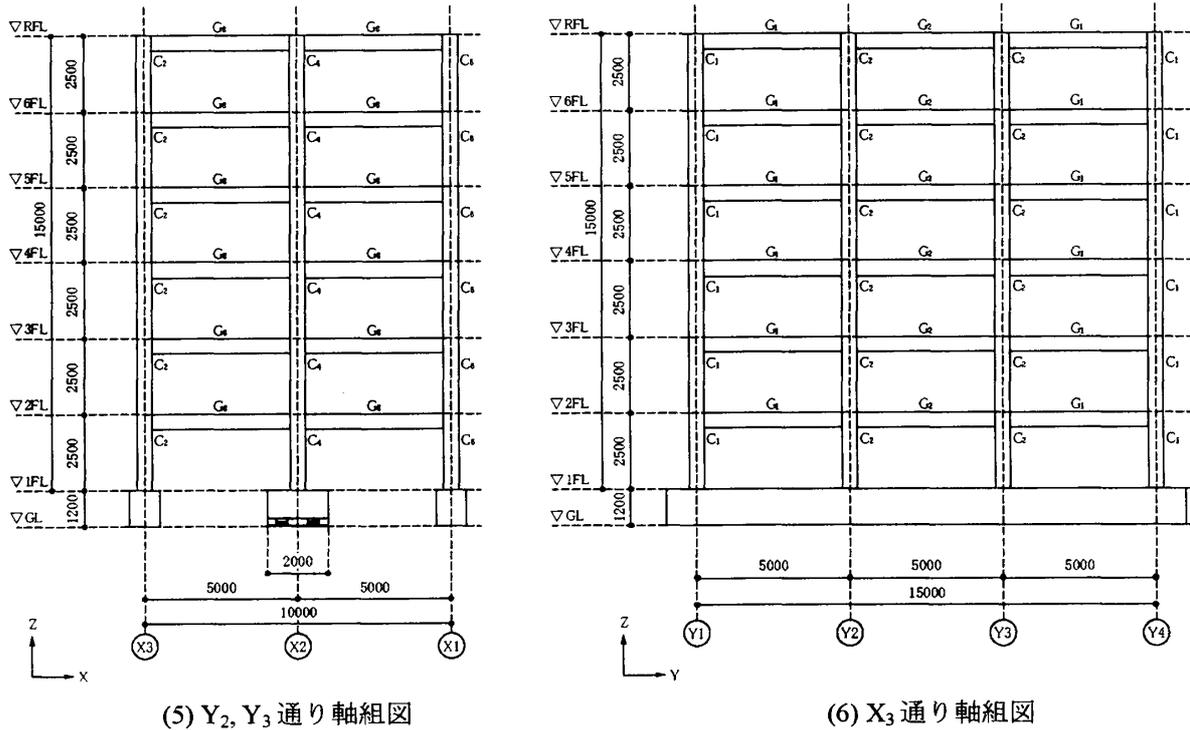


図-1 試験体の基準階伏図および軸組図

腰壁については、荷重のみを考慮し、剛性・耐力への寄与は無視した。X₁ 通りおよび X₄ 通りの袖壁は構造部材として考慮した。

2.6 基礎の形状

1 層の柱および壁の負担せん断力を計測するため、連層耐震壁および袖壁付き柱の下の基礎梁の下にロードセルを設置した。負担せん断力を分離するために、X 方向の基礎梁を設けず、Y 方向についても、X₂ 通りの Y₁-Y₂ 間および Y₃-Y₄ 間には基礎梁を設けていない。

基礎部詳細は本稿では割愛する。

2.7 仕上げ・非構造部材

試験体の 2 階と 5 階の一区画では、非構造壁の設置と内装および外装の仕上げを施している。これらについて、本稿では詳細を割愛する。

2.8 計測計画

震動台テーブル上に設置した鉄骨計測架構に対する 2 階床の変位、各層の層間変位、部材の変形、鉄筋のひずみ、基礎部に設置したロードセルによる軸力およびせん断力、各階床の重心位置の絶対加速度など、合計 888 成分の計測を行った。サンプリング周波数は 1 kHz とした。

3. 実験結果の概要

3.1 加振内容

主な地震波入力加振の内容を表-1 に示す。各加振とも神戸海洋気象台観測波 (1995) を用い、振幅倍率を変えて順次入力した。実験における加振方向は、水平 2 方向+鉛直方向の 3 方向であるが、主たる加振方向（最終的に破壊させる方向）が試験体の長手方向 (Y 方向) となるよう、原波の N45W 方向を試験体の Y 方向に、N45E を X 方向に入力することとした。振幅倍率 100% 時の入力加速度を図-2 に示す。なお、地震波形の再現性を高めるために、各加振は繰り返し入力補償法と呼ばれる加振方法としたため、目標の 40% レベルの試加振を本加振の前に 2 回ないし 3 回ほど行っている。

同表には、Y 方向について、目標最大応答加速度と震動台テーブルで計測された最大加速度の比較も合わせて示している。なお、表中に示した波形誤差は式(1)による。

$$e = (\Sigma(A_{rsp} - A_{tgt})^2 / \Sigma A_{tgt}^2) \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここに、 A_{rsp} : 応答加速度時刻歴波形 (m/sec²),
 A_{tgt} : 目標加速度時刻歴波形 (m/sec²) である。

表-1 地震波入力加振の内容

加振番号	実施日	地震波名称	振幅倍率	X方向目標最大加速度	Y方向目標最大加速度	Y方向計測最大加速度	波形誤差
1	2006/01/07	神戸海洋気象台観測波(1995)	5%	0.279 m/sec ²	0.423 m/sec ²	0.469 m/sec ²	14%
2	2006/01/07		10%	0.560 m/sec ²	0.847 m/sec ²	0.916 m/sec ²	21%
3	2006/01/10		25%	1.40 m/sec ²	2.12 m/sec ²	2.99 m/sec ²	40%
4	2006/01/11		50%	2.80 m/sec ²	4.24 m/sec ²	4.74 m/sec ²	32%
5	2006/01/13		100%	5.60 m/sec ²	8.47 m/sec ²	11.40 m/sec ²	39%
6	2006/01/16		60%	3.36 m/sec ²	5.08 m/sec ²	5.40 m/sec ²	38%

すべての加振において、最大加速度は目標値を大きく上回るが、これは短周期成分によるものである。しかし、試験体の塑性化後の波形誤差は40%程度と小さい値ではなく、実際に入力された地震力については今後詳しく検討する必要がある。

各地震波入力加振の前後には、ランダム波(周波数成分0.1~40 Hz, 最大加速度20 cm/s²程度)による周波数特性把握加振を行なった。

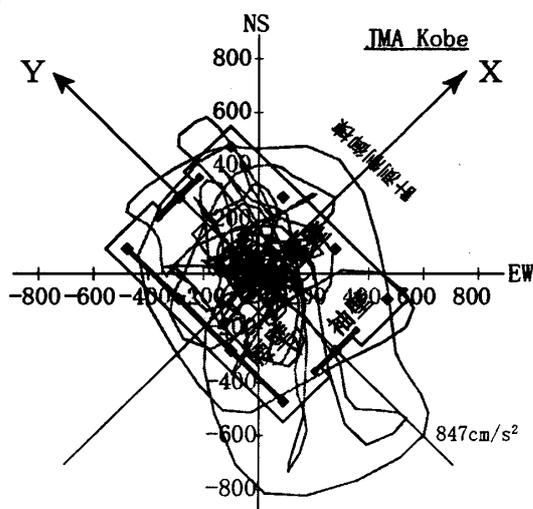


図-2 振幅倍率100%時の入力加速度

3.2 損傷経過

各加振における概況は以下のとおりである。

- 1) 加振1: ひび割れの発生は見られなかった。
- 2) 加振2: X₃ 通り長柱および X₂ 通り連層耐震壁側柱の1層柱脚で曲げひび割れが発生した。
- 3) 加振3: 各階梁端で曲げひび割れが発生した。被害は軽微であり、貼付した歪みゲージによれば鉄筋の降伏は見られなかった。

- 4) 加振4: 柱端・梁端の曲げひび割れが多数発生し、X₁ 通り腰壁付短柱のうち、柱 X₁Y₂ および X₁Y₃ では、腰壁が取付く高さ付近で曲げひび割れが発生した。X₂ 通り連層耐震壁の1層でせん断ひび割れが発生した。残留ひび割れ幅は0.2mmであった。側柱の脚部では鉄筋の降伏が見られ、ジャンカ補修モルタルの剥離・圧壊が見られた。
- 5) 加振5: X₁ 通り腰壁付短柱のうち、X₁Y₂ 柱および X₁Y₃ 柱では、短柱部でせん断破壊し、軸方向に約40mmの沈下が生じた。X₂ 通り連層耐震壁は、1層脚部でせん断すべり破壊し、壁パネル部脚部ではコンクリートの崩落により壁の向こう側が見える状態になった。斜めのせん断ひび割れ面での大きな残留ずれは生じることはなかった。加振後も試験体は自立状態であり、全体的な鉛直支持能力は失われていなかった。
- 6) 加振6: 加振5でせん断破壊した X₁Y₂ 柱および X₁Y₃ 柱では鉛直支持能力が完全に失われる程度まで破壊が進行し、X₁Y₁ 柱では柱頭側で接合部破壊、X₁Y₄ 柱では腰壁が分離し腰壁高さ付近で柱がせん断破壊した。X₂ 通り連層耐震壁は、1層脚部で滑りを生じる性状を示した。X₃ 通り長柱は、いずれも1層脚部で曲げ圧縮破壊を生じた。X₁ 通り側の2階床の沈下量は100mm程度に達し、試験体は崩壊寸前であったが辛うじて自立状態であった。

3.3 1層せん断力-2階変位関係

各階床の重心位置の各加振方向の加速度の計測値と各階の質量の計算値をもとに1層せん断力を算出した。各階のすべての質量が、加速度

の計測点に集中するものと仮定した。1層せん断力は、各階に働く慣性力の総和とし、減衰力は無視した。1層せん断力-2階変位関係を図-3に示す。

加振4以前では、剛性の低いX方向の変位の方が大きい。加振5以降にX方向およびY方向の変位量の大小関係は逆転している。これは、Y方向の方が応答スペクトルのピークが長周期側にもあるためである。

Y方向については、加振5において最大せん断力に達し、最大は7.27MN（ベースシア係数0.99）であった。加振5においてはこの値をほぼ維持し、せん断破壊した X_1 通り短柱および X_2 通り連層耐震壁から、 X_3 通り長柱へと負担せん断力が遷移していることが推察される。次第に、主たる水平抵抗要素は X_3 通り長柱のみとなり、加振6において剛性は著しく低下し、加振5よりも小さい入力に対して、著しく大きな水平変位を生じている。

4. まとめ

防災科学技術研究所の震動台 E-Defense による最初の鉄筋コンクリート建物実験として6層壁フレーム構造を選択し、2006年1月に震動実験を実施した。実験では、1層の腰壁付短柱のせん断破壊、連層耐震壁の脚部のせん断すべり破壊を伴い、試験体は1層で層崩壊した。今後、実験結果の詳細な分析を行う予定である。

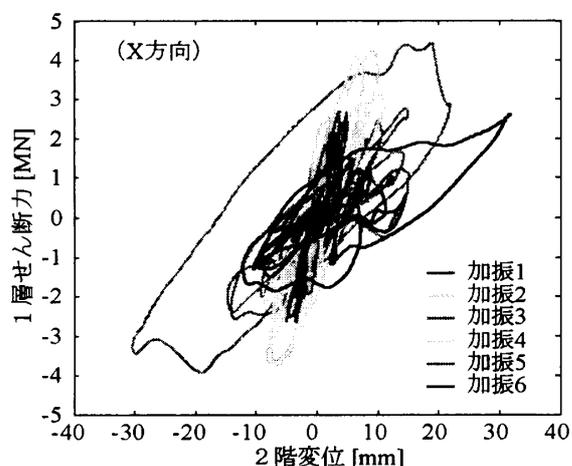


図-3 1層せん断力-2階変位関係

参考文献

- 1) 文部科学省研究開発局，独立行政法人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 震動台活用による建造物の耐震性向上(平成16年度)研究成果報告書，2005.5.

謝辞 実験実施にあたり、大大特鉄筋コンクリート建物実験委員会委員の皆様には数多くのご助言をいただいた。加振制御においては、鹿島建設技術研究所・五十嵐克哉氏のご指導をいただき、実験時の試験体損傷調査では、東京大学地震研究所、豊橋技術科学大学、京都大学の教職員および大学院生の方々にご協力いただいた。また、実験終了後の撤去移動のための試験体の応急補強は、構造品質保証研究所株式会社のSRF工法によった。ここに記して謝意を表します。



写真-2 1層短柱のせん断破壊（加振5後）
（左： X_1Y_3 柱，右： X_1Y_2 柱）

