

### 3.2.4 実大構造物の振動台実験における地震時損傷モニタリング

## 目 次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 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) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) 非構造部材の地震被害の特徴
  - 2) 振動台実験における非構造部材・仕上げの損傷
  - 3) 非構造部材・仕上げの地震時損傷モニタリング
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 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

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 実大構造物の振動台実験における地震時損傷モニタリング

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
独立行政法人建築研究所	上席研究員	福山 洋
	上席研究員	斉藤大樹
	主任研究員	加藤博人
	主任研究員	楠 浩一
	研究員	向井智久

(c) 業務の目的

実大構造物の振動台実験、静的破壊実験、サブストラクチャー・スードダイナミック加力実験を実施し、非構造部材の損傷の分析、腰壁付柱の損傷過程、破壊性状等を解明し、設計法や解析法の高度化に役立つ知見を取りまとめる。

(d) 2 ヶ年の年次実施計画

1)平成 17 年度：

実大構造物の振動台実験において、非構造部材の損傷の分析を行う。また、構造物の一部を取り出した静的破壊実験を実施し、振動台による動的な破壊性状との比較や詳細な損傷モニタリングを行い、設計法や解析法の高度化に役立つ知見を取りまとめる。

2)平成 18 年度：

腰壁付柱のサブストラクチャー・スードダイナミック加力実験を行い、構造物の応力分担、損傷過程、破壊性状等を計測し、実験後に計測結果の分析を行う。また、振動台による動的な破壊性状との比較を行い、極短柱の靱性向上設計や解析法の高度化に役立つ知見を取りまとめる。

(e) 平成 17 年度業務目的

実大構造物の振動台実験において、非構造部材の損傷の分析を行う。また、構造物の一部を取り出した静的破壊実験を実施し、詳細な損傷モニタリングを実施する。

## (2) 平成 17 年度の成果

### (a) 業務の要約

- 1) E-ディフェンスにおいて実施された実大鉄筋コンクリート 6 階建て建物の振動台実験において、非構造部材・仕上げの損傷を記録し、被害の分析を行った。
- 2) 非構造部材の損傷を詳細に調べることを目的に、構造物の一部を取り出した静的破壊実験を実施し、損傷モニタリングを実施した。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 振動台実験における非構造部材・仕上げの損傷分析

E-ディフェンスにおいて実施された実大鉄筋コンクリート 6 階建て建物の振動台実験で得られた非構造部材の損傷記録（写真）から、被害の分析を行った。

#### 2) 非構造部材・仕上げの地震時損傷モニタリング

集合住宅の玄関周りを再現した実大の試験体を用いて、静的破壊実験を実施し、地震時の非構造部材・仕上げの損傷を詳細に調査・記録した。

### (c) 業務の成果

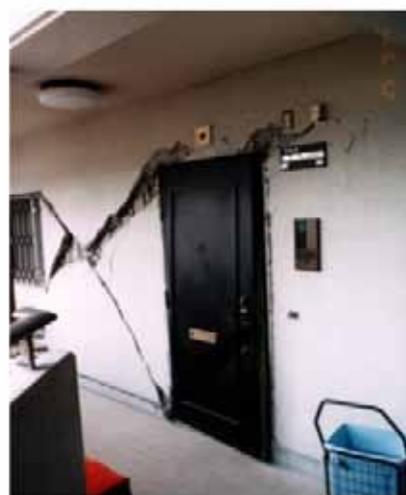
#### 1) 非構造部材の地震被害の特徴

1995 年兵庫県南部地震では、新耐震基準で建設された建物でも、非構造部材が損傷し、結果として建て替えを余儀なくされたケースが数多くみられた（写真 1 参照）。



#### 外装材の被害

(1995年兵庫県南部地震 写真:建築研究所)



#### ドア周囲の被害

(1995年兵庫県南部地震 写真:建築研究所)

写真 1 1995 年兵庫県南部地震における非構造部材の被害



窓ガラスの破損  
(1995年兵庫県南部地震 写真: 日本建築学会)



引き違い窓のガラスはあまり壊れない  
(1995年兵庫県南部地震 写真: 建築研究所)

写真1 1995年兵庫県南部地震における非構造部材の被害

建築研究所では、1979年以降、日米共同大型耐震実験研究として、実大規模の建築物の耐震実験（静的破壊実験）を行ってきた。

- ・ 1979～1981年 鉄筋コンクリート造研究
- ・ 1981～1984年 鉄骨造研究
- ・ 1984～1989年 組積造研究
- ・ 1989～1993年 プレキャスト造研究
- ・ 1993～1998年 ハイブリッド構造研究
- ・ 1998～2003年 高知能建築構造システム

写真2に、非構造部材の損傷状況を示す。また、実験結果を元に、変形角と損傷の発生状況をまとめた結果を図1に示す。

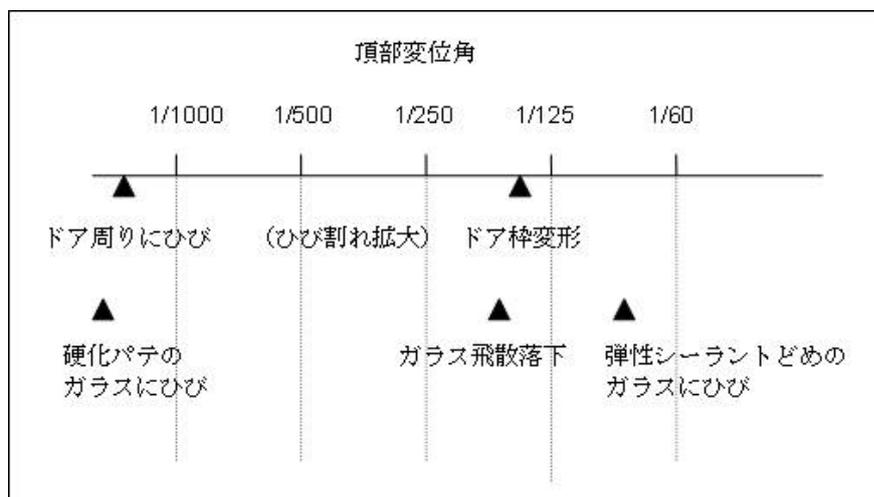
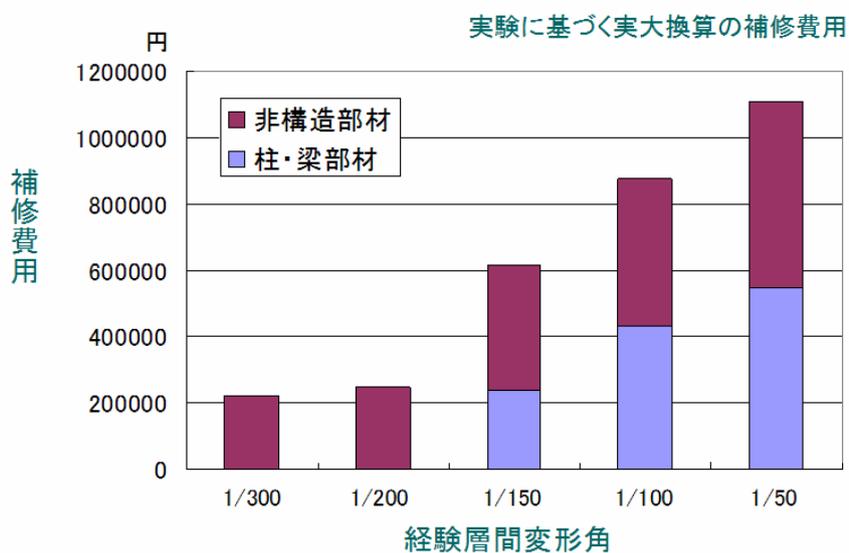


図1 変形角と非構造部材・仕上げの損傷発生の関係



写真2 実大建築物の静的破壊実験における非構造部材の損傷

図2は、経験層間変形角と補修費の関係を示したものである。大地震の応答に相当する1/100の層間変形角までは、非構造部材の補修費の方が柱・梁部材の補修費を上回る傾向にある。このことから、非構造部材の損傷を抑えることが、費用の観点からきわめて重要であることが指摘できる。



日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説」(2004)より

図2 経験層間変形角と補修費の関係

## 2) 振動台実験における非構造部材・仕上げの損傷

平成 18 年 1 月 7 日～16 日にかけて、実大 6 層鉄筋コンクリート造建物の震動台実験が兵庫県三木市の「E-ディフェンス」で実施された。仕上げをほどこしたのは 2 階と 5 階の一角である（図 3）。また、2 階の腰壁側の一角のみ窓サッシが設けられた。詳しい仕様については、震動台実験の報告書を参照されたい。

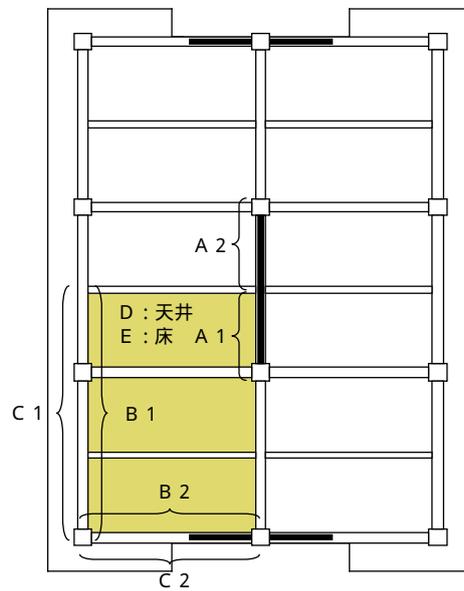


図 3 仕上げ箇所（2階と5階）

非構造部材・仕上げの損傷状況を写真3、写真4に示す。

写真		
備考	<p>加振：JMA Kobe 波 40%、場所：5階 室内では、コップが散乱したが、家具の移動はほとんど見られなかった。</p>	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：5階 室内では、背の高い家具や椅子が転倒し、天井の照明器具が落下した。</p>
写真		
備考	<p>加振：JMA Kobe 波 40%、場所：5階 内装材（防火用石膏ボード）上部に亀裂。</p>	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：5階 内装材（防火用石膏ボード）がはがれた。</p>
写真		
備考	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：5階 照明器具の金具部分が変形した。</p>	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：5階 天井パネルのたわみ（最大で2cm程度）</p>

写真3 非構造・仕上げの損傷状況（その1）

写真		
備考	<p>加振：JMA Kobe 波 40%、場所：2 階 腰壁上部のタイルに浮きが見えた。窓サ ッシやガラスには損傷はなかった。</p>	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：2 階 腰壁上部のタイルが剥落した。羽目殺し の窓が割れ、別の窓ではシーリング材が はずれた。</p>
写真		
備考	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：1 階 腰壁付き短柱がせん断破壊した。</p>	<p>加振：JMA Kobe 波 100%、場所：1 階 壁付き短柱がせん断破壊した。</p>

写真 4 非構造・仕上げの損傷状況（その 2）

### 3) 非構造部材・仕上げの地震時損傷モニタリング

#### a) 試験体概要

試験体平面図および立面図を図4に示す。試験体は、柱中心間スパン 5,300mm、基礎上面からの高さ 2,750mm である。柱と梁の枠の中に、スリットなしの厚さ 120mm の非構造壁が付いており、窓に相当する部分には開口を設けており、ドア部分には鋼製ドアを設置している。また、仕上げとして圧着貼りのタイルをスパン半分に付けている。

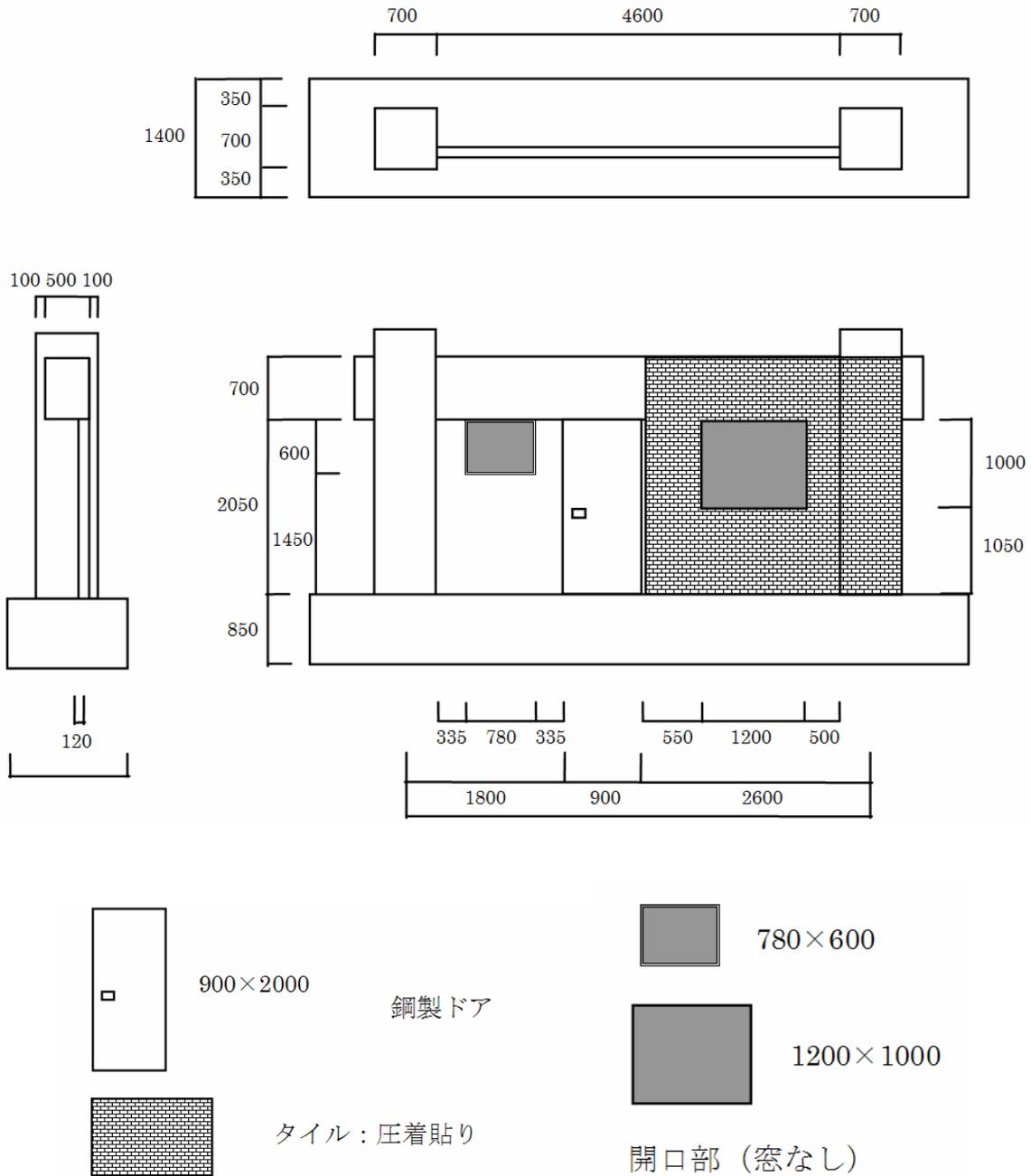


図4 非構造壁試験体（平面図および立面図、単位 mm）



写真5 試験体写真（タイル設置面）

#### b) 試験体の設計方針

2005年福岡県西方沖地震において、新耐震規準により建設された集合住宅の非構造部材が大きな被害を受けた（参考文献32）。とくに、玄関周りの被害が激しく、ドアがゆがんで開閉ができなくなるなど、生活の継続に支障を及ぼした。また、損傷の修復には多大な費用がかかった。こうした非構造部材の損傷性状を詳細に捉えることは、被害が及ぼす建物の使用継続性や修復性を定量的に評価するうえで極めて重要である。

そこで、本研究では、福岡県西方沖地震被害を基に、とくに玄関周りの非構造部材や仕上げの被害に着目することとし、1980年以前の旧耐震基準により建設された公団集合住宅の玄関を含む1スパン分を再現した試験体を設計した。

実際の集合住宅と同様に、非構造壁と周囲の柱・梁との間にスリットは設けられていない。なお、構造的な挙動に影響しない窓サッシは取り付けしていないが、避難に影響するドアは設置して、ドア枠の変形とドアの開閉性の関係を調べることにした。また、タイルを半面にのみ貼ることとし、非構造壁の損傷と仕上げタイルの損傷の関係を調べることにした。

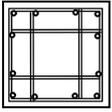
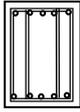
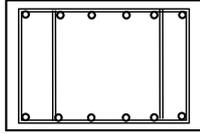
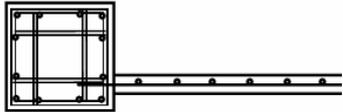
部材の配筋については、実際の集合住宅の柱は曲げ強度が低く、せん断破壊先行型となるが、非構造部材の被害に着目するために、あえて柱・梁の配筋を実際よりも増やして、曲げ強度とせん断強度を十分に持たせることにした。これによって、損傷を非構造部材に集中させるとともに、実験後には、損傷した非構造壁を取り除いて、残った柱・梁を再利用することで、別の非構造壁（スリットあり）の実験を可能にする。

表1および図5に、柱・梁・非構造壁の断面配筋図を示す。コンクリートの設計基準強度は20MPa、鉄筋の規格降伏点は $y=295\text{N/mm}^2$ を用いた。軸力は柱頭位置に設置された2台のアクチュエータにより加える。また、水平力は梁端位置に設置された2本のアクチュエータにより加える。アクチュエータ取り付け位置を図6に示す。

軸力は、アクチュエータの性能限界が100ton(=980kN)であることから、それぞれの柱頭において90ton(=882kN)の一定値とした。このときの梁および柱の降伏曲げモーメント $M_u$ はそれぞれ、梁： $M_u=638\text{kN}\cdot\text{m}$ 、柱： $M_u=981\text{kN}\cdot\text{m}$ となった。また、非構造壁の影響を無視した場合において、崩

壊メカニズムは、両方の梁端と柱脚に曲げ降伏が発生し、試験体の保有水平耐力は、1447kN となった。

表 1 断面配筋図

部材	柱	梁	直交基礎梁
断面			
サイズ	700 × 700	500 × 700	1400 × 850
主筋	12-D29	上端 5-D29 下端 5-D29	上端 6-D29 下端 6-D29
補強筋	2-D13@60	4-D13@100	4-D13@100
部材	非構造壁		
断面			
サイズ	壁厚 120		
配筋	縦筋 D13@250 横筋 D13@250		

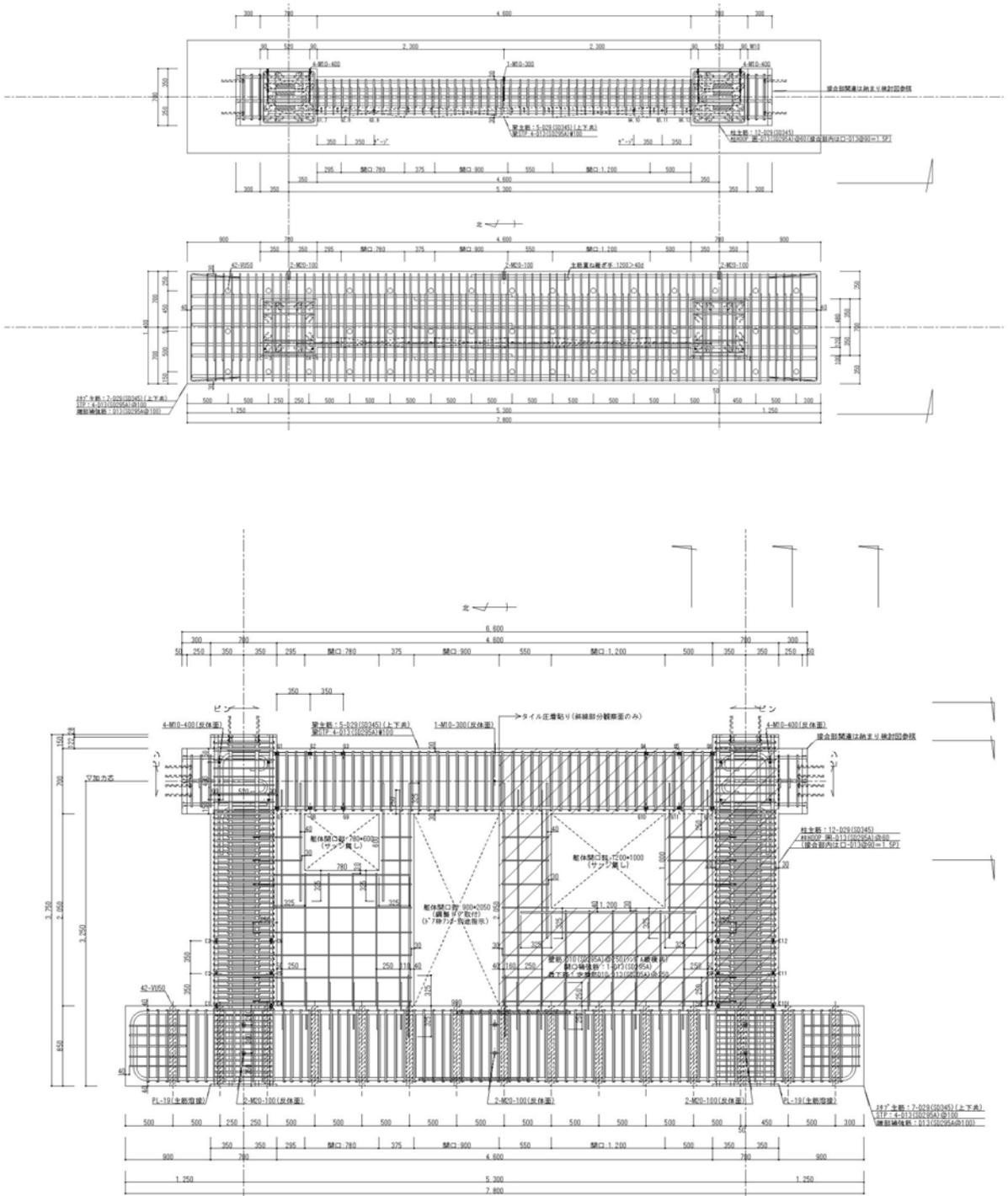


図5 部材の断面配筋図

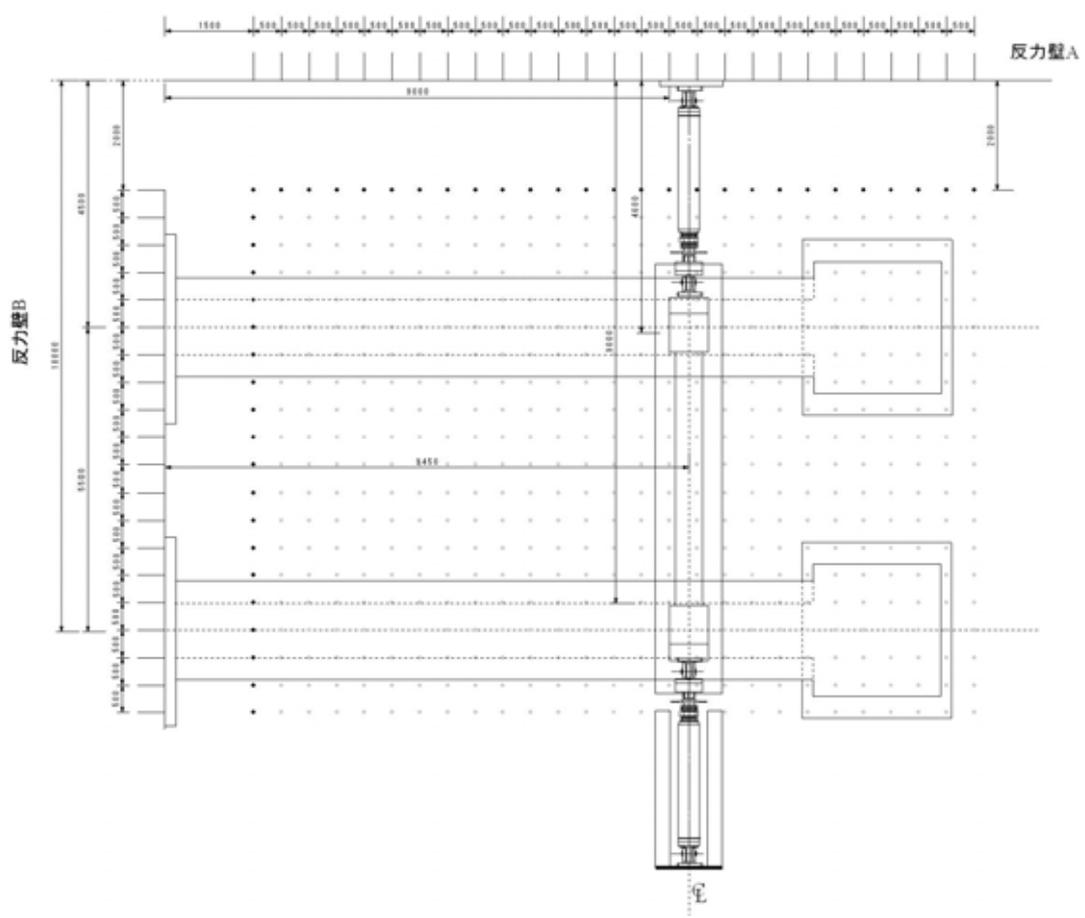
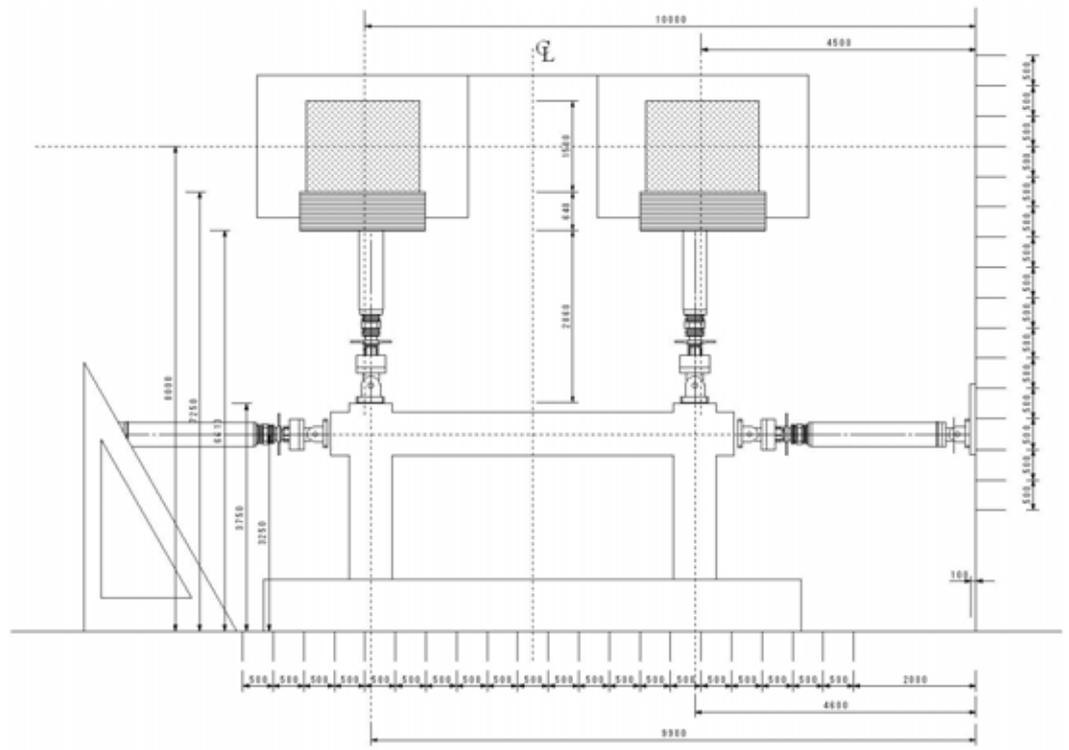


図6 アクチュエータ取り付け位置

c) 計測計画

変位計の設置位置を図7に示す。梁および柱端の曲げとせん断変形、開口部およびドアの周囲のせん断変形に着目して変位計を設置した。また、梁および柱端の主筋、非構造壁の壁筋脚部に、歪ゲージを貼付した。また、図8に示すように、梁中央位置の水平変形を、不動点タワーからマグネスケールにより計測し、水平アクチュエータを制御した。写真6に、アクチュエータ設置後の試験体（計測面）を示す。

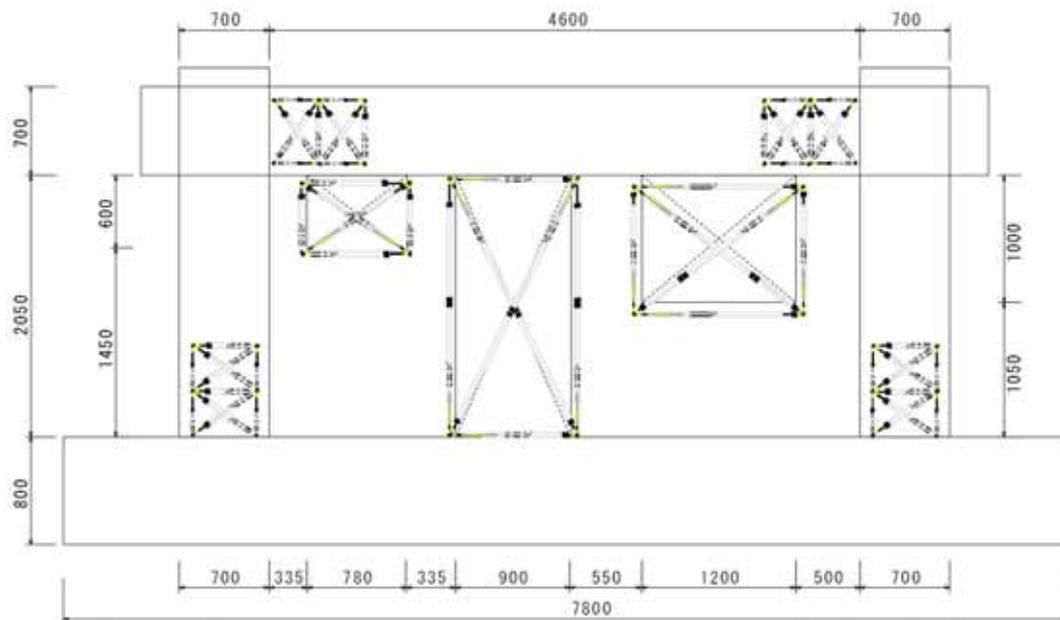


図7 計測計画（変位計設置位置）

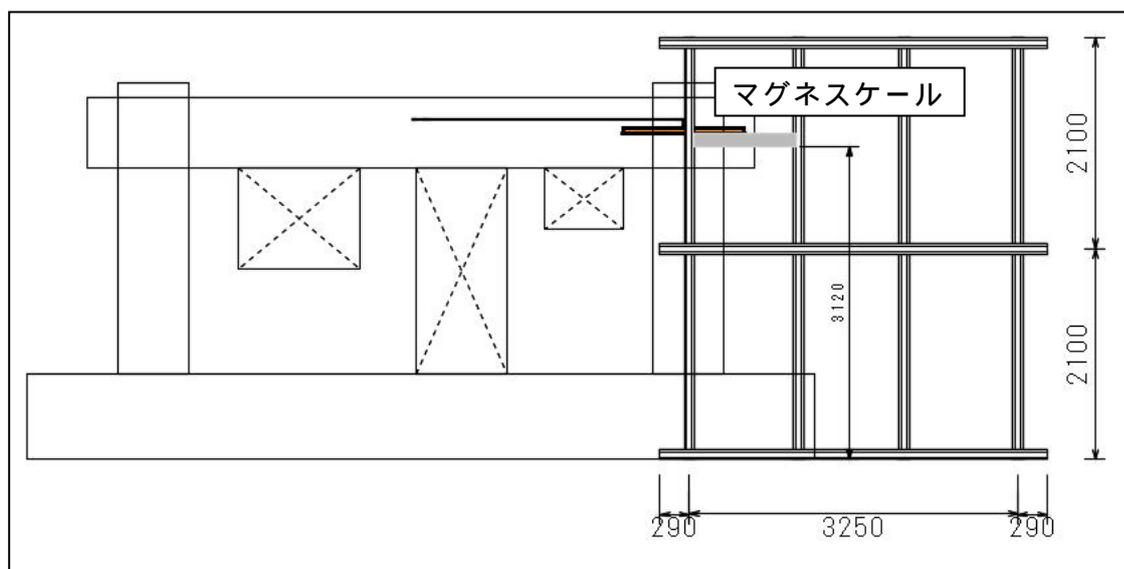


図8 不動点タワー設置位置



写真6 試験体全景（計測面）

d) 加力プログラム

実験では、非構造壁に発生するひび割れを詳細に観察し、その後の補修費用算定に役立つことを目的に、変形角  $1/1600$  の水平変形の静的繰り返しから開始して、変形角  $1/300$  の繰り返しまでの加力を行った。加力プログラムを図9に示す。

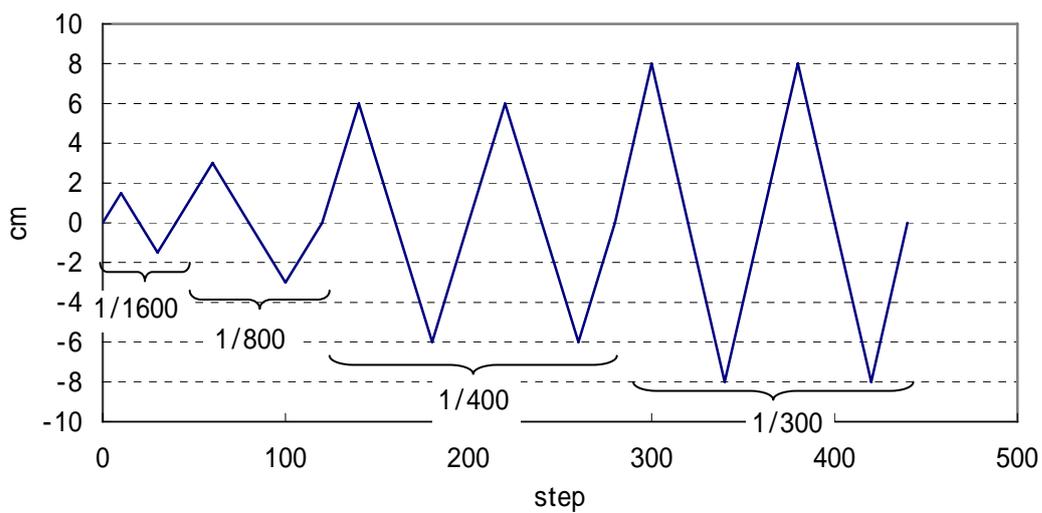


図9 加力プログラム（水平変形目標値履歴）

e) 実験結果

実験より得られた水平力 - 変形角関係を図 1 0 に示す。変形角 1/300 における耐力は、非構造壁を無視した場合の予想耐力である 1447kN(=147ton)を超えており、非構造壁の寄与が大きいことが分かる。また、図 1 1 に、ひび割れ図を示すが、変形角 1/300 の時点で、非構造壁全体にせん断ひび割れが分布しているものの、最終的な破壊には至っていないことがわかる。

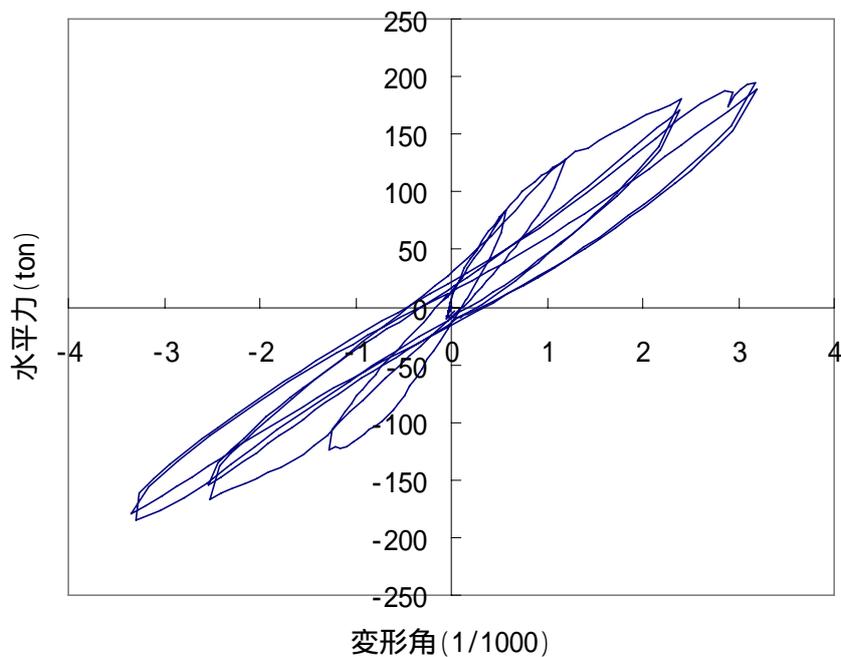


図 1 0 水平力 - 変形角関係

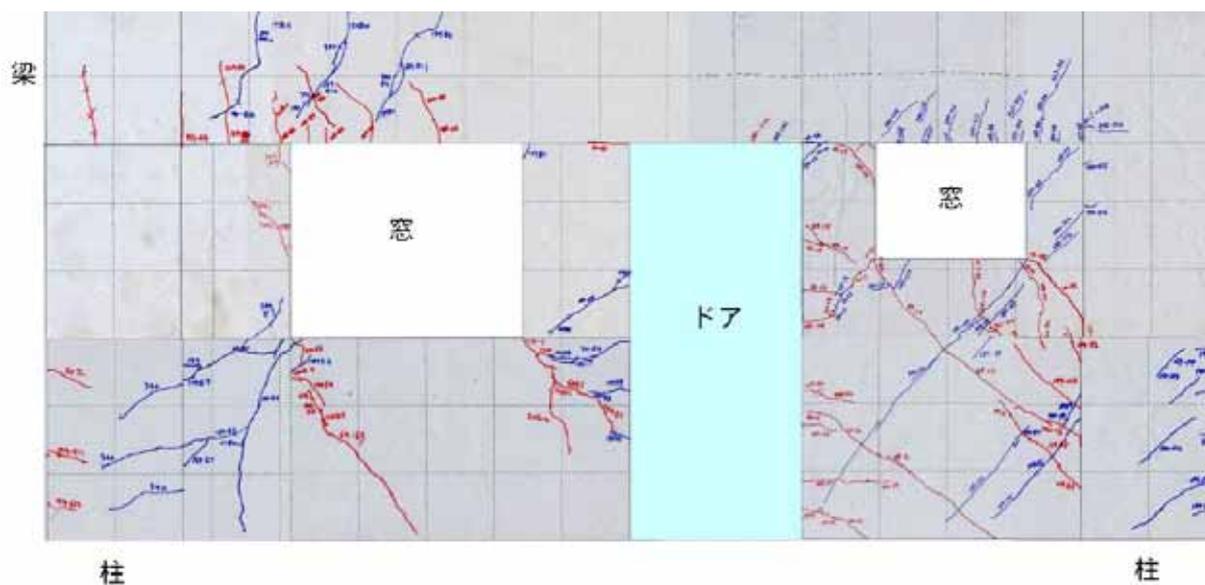


図 1 1 ひび割れ分布図 (変形角 1/300 の加力終了時点)

表2は、加力のピーク時と除荷時におけるドアの開閉状況をまとめたものである。数字は、ドア周囲のクリアランスの大きさである。ピーク時には、1/400に達した時点で、ドアの左上（蝶番の反対側）のクリアランスが小さくなり、開閉が不可能になった。蝶番と反対側のクリアランスが小さくなるのは、ほぼ共通の傾向である。除荷時では、1/300の変形を経験したあとに開閉が困難になった。このことは、比較的中規模の地震の終了後に、ドアが開閉困難になる危険性を示唆している。

表2 変形角とドアの開閉状況

変形角\計測箇所	左上		右上		左下		右下		ドアの開閉について
	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	
加力前	5	5	5	5	5	5	5	5	-
1/1600	4	3	4	3	3	3	5	5	可能
除荷	3	4	3	4	3	5	5	5	可能
-1/1600	3	3	3.5	3	3	5	4	4	可能
除荷	3	3.5	4	3	2	4	4	4	可能
1/800	3.5	6	3	3	2	2	4	5	可能
除荷	3.5	4	3	3	3	4	4	5	可能
1/800	3	1.5	4	3	1	6	5	5	可能
除荷	3	4	4.5	3	2	4	5	5	可能
1/400	2.5	0.1	3.5	3	2	0.5	5	5	不可能(力を入れれば開くかも)
除荷	3	3.5	3.5	3	3	4	5	5	可能
-1/400	0.35	7	6	3	2	7	5	5	不可能
除荷	2	3	4	3	2	4.5	6	5	可能
1/400	2	0.15	3.5	3	2	0.95	5	5	不可能
除荷	2	3	5	3	2	4	4.5	5	可能
-1/400	0.35	7	7	3	2	8	5	5	不可能
除荷	1.5	3	5	3	2	5	5	4	可能
1/300	3	0.15	3	3	2	0.5	4	4	不可能
除荷	2	3	5	3	2	4	5	5	可能(かなり困難)
-1/300	0.15	0.15	7	4	2	7	6	4	不可能
除荷	1.5	3	5	3.5	2	4	5	5	可能(かなり困難)
1/300	2.5	8	3.5	3	3	0.2	5	5	不可能
除荷	1.5	4	6	3	2	3	5	4	可能(かなり困難)
-1/300	0.15	0.2	7	4	3.5	8	5	4	不可能
除荷	2	3.5	4.5	3	2	3.5	5	4	可能

(d) 結論ならびに今後の課題

実大構造物の振動台実験結果を元に、1981年以前の旧耐震設計法により建てられた集合住宅の玄関周りを再現した実大試験体を作成した。試験体には、ドア、窓、外壁タイルを付け、地震時の非構造部材の損傷をモニタリングするための変位計、歪ゲージを設置した。

破壊実験は、地震時を想定した静的な繰り返し加力を試験体に与えて、徐々に加力を上げていき、非構造部材のひび割れ、剥落、ドアの開閉度などを逐次計測した。また、損傷状況を高解像度のデジタルカメラで撮影し、補修費用の算定の資料を蓄積した。解析結果は、振動台実験と比較して、動的な破壊性状との比較を行った。

これらのデータは、今後、非構造部材の破壊性状の力学モデルの作成や地震時損傷と補修費用に基づく修復性能の評価指針の作成などに用いる。

(f) 引用文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, (社)日本建築学会, 1991.10
- 2) 耐震設計法Q & A集, (社)日本建築士事務所協会連合会, 1999.6
- 3) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, (社)日本建築学会, pp.245~249, 1997.7
- 4) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, (社)日本建築学会, 1981.6
- 5) X形配筋部材の設計と施工, (社)日本建築士事務所協会連合会, 1990.8
- 6) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, 1990.10
- 7) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, (社)日本建築学会, 1981.6
- 8) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, p.391,
- 9) 中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説 1987年版, (財)日本建築センター, 1987.10
- 10) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, pp393~396, 1990.10
- 11) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, p397, 1990.10
- 12) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, p401, 1990.10
- 13) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, pp399~400, 1990.10
- 14) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, (社)日本建築学会, pp245~249, 1997.7
- 15) 建築基準法施工令第1条第3号
- 16) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), (社)日本建築学会, pp138~140, 1990.10
- 17) 構造目地を設けた鉄筋コンクリート造二次壁に関する研究資料(社)日本建築学会, 1988.3
- 18) 芳村学・岩淵一徳: 1995年兵庫県南部地震により崩壊したピロティを有する鉄筋コンクリート建物の非線形解析, 日本建築学会論文報告集, No.486, 1996.8
- 19) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災調査報告建築編-5 非構造部材 材料・施工, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 2000.5
- 20) 平石久廣・川島俊一ほか: 鉄筋コンクリート造腰壁付き柱に設けたスリットの効果に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.362, 1986.4
- 21) 塩屋晋一: 構造目地を有する鉄筋コンクリート腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究(その2: 腰壁付き梁の力学特性と曲げ強度評価式), 日本建築学会論文報告集, No.416, 1990.10
- 22) 大久保全陸・塩屋晋一: 構造目地を有する鉄筋コンクリート腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.380, 1987.10
- 23) 市之瀬敏勝・青山博之: 腰壁を切断した鉄筋コンクリート造はり柱接合部の実験的研究, コンクリート工学, Vol.20, No.7, 1982.7
- 24) 甲斐芳郎・市之瀬敏勝・小林裕・青山博之: 腰壁を切断した鉄筋コンクリート造はり柱接合部の実験的研究; 第6回日本地震工学シンポジウム, pp.809~816, 1982

- 2 5 ) 田中康公：完全縁切り目地を設けた腰壁・垂れ壁付き梁の応力・変形集中に関する研究，日本建築学会論文報告集，1997
- 2 6 ) 辻本誠：1995 年日本建築学会大会研究協議会資料 - 兵庫県南部地震時の火災被害から何を学ぶか - （防災設備の被害状況），1995.8
- 2 7 ) 後藤哲郎・広沢雅也：低層鉄筋コンクリート造の構造性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1986
- 2 8 ) 広沢雅也・後藤哲郎・平石久廣・芳村学：高層（6～8層）壁式鉄筋コンクリート造の標準化を目的とした実大建物の耐震破壊実験，コンクリート工学，1981.4
- 2 9 ) 中田慎介・上之園隆志・芳村学・岡本伸：鉄筋コンクリート造実大7層建物の補修後実験 - 日米共同耐震実験研究その4 - ，日本建築学会論文報告集，No.388，1988.6
- 3 0 ) 後藤哲郎・広沢雅也ほか：15階壁式ラーメン構造集合住宅を対象とした建物の地震加力破壊実験（その1：実験計画，その2：実験結果の概要，その3：二次壁の破壊性状，その4：メカニズムと直交部材の効果，その5：保有水平耐力） - 高層壁式ラーメン構造に関する研究 - ，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988
- 3 1 ) 住宅・都市整備公団：公団住宅標準配筋詳細図集第4版2刷，1998.2
- 3 2 ) 日本建築学会：2005年福岡県西方沖地震被害調査報告，2005.9

(g) 成果の論文発表・口頭発表等

1)論文発表

なし

2)口頭発表、その他

なし

(h) 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 18 年度業務計画案

腰壁付柱のサブストラクチャー・スードダイナミック加力実験を行い、構造物の応力分担、損傷過程、破壊性状等を計測し、実験後に計測結果の分析を行う。また、振動台による動的な破壊性状との比較を行い、極短柱の靱性向上設計や解析法の高度化に役立つ知見を取りまとめる。