

# 鉄筋コンクリート造偏心ピロティ建物の震動実験 (その1) 実験概要

壁谷澤 寿海<sup>1</sup>・金 裕錫<sup>2</sup>・加藤 敦<sup>3</sup>・小川 信行<sup>4</sup>・五十嵐 俊一<sup>5</sup>

- <sup>1</sup>工博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)  
<sup>2</sup>工修 東京大学大学院工学系研究科博士課程大学院生 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)  
<sup>3</sup>工修 独立行政法人防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)  
<sup>4</sup>工博 独立行政法人防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)  
<sup>5</sup>工博 構造品質保証研究所株式会社 (〒102-8220 東京都千代田区九段1-11-5)

Dynamic tests were conducted on reinforced concrete pilotis-type wall-frame structures with eccentricity. The structure was one-third scale two-story frame model, which represented a six-story pilotis building by adding enough weights in the upper two floors. Two structures with the same sectional dimensions and reinforcement details were tested simultaneously on the large shaking table at NIED, Tsukuba. One was a bare reinforced concrete structure following old reinforcement detail practice in Japan, while the other was strengthened before the test with polyester sheet called as SRF. The design of the specimens and the method of the shaking table test are outlined in this paper as Part 1.

*Key Words: reinforced concrete structure, shaking table test, pilotis, torsional response, ultimate seismic safety, seismic retrofit*

## 1. はじめに

建物の耐震設計における最も基本的な目標性能は大地震に対して人命の安全を確保することであり、このために必要な構造性能は大地震後の鉛直荷重支持能力である。現在の設計法による鉄筋コンクリート構造の建物では柱に十分なせん断補強筋(拘束筋)を配筋してせん断破壊を防止することにより塑性変形後も十分な軸力支持能力は維持されると想定されており、設計用地震動による応答の範囲では軸力支持能力の限界はあまり問題にされないできた。しかし、柱のせん断補強筋量が十分でない古い鉄筋コンクリート造建物における地震被害はもとより、現在の設計法による建物でも設計用地震動を大きく超える地震動を受けて大変形が生じる場合の軸力支持能力を喪失する限界については精度の高い予測はできないのが現状である。一方、古い構造物に限らず、高さ方向あるいは平面的に耐震補強要素の偏在している構造物では、塑性域での応答変形の集中により、柱部材には静的な設計法では予測できない大きな変形が生じる可能性がある。既存構造物における鉛直荷重支持能力を十分な余力をもって確保する補強手法、また、不整形構造物で集中する応答変形を十分な精度をもって挙動を予測する手法は、いずれ

も重要な研究課題である。

本研究では、柱のせん断破壊による軸力支持能力の喪失過程および偏心によって生じるねじれ振動の応答性状を把握する目的で、1層に耐震壁が偏在して配置される偏心ピロティ構造物を想定して、2層の試験体2体を同時に加震する震動実験を行った。1体は1970年代の設計法による既存の鉄筋コンクリート構造物の1/3縮小モデルであり、6層程度の建物重量に対応する錘を付加している。もう1体は全く同じ既存構造物のモデルで柱をポリエステル製繊維シートによる補強<sup>1),2)</sup>を行い、同じ入力による加震により補強方法の有効性を立体構造物で検証した。さらに、普及型地震計を構造物のモニタリングおよび地震直後の被災度判定に用いる目的で、試験体には各種の地震計を設置し、加速度記録から層間変形角を精度よく算定しうるかどうかを検証する。

本報告では、試験体の概要および実験方法、入力計画などについて報告し、主な実験結果などを次報に示した。

## 2. 試験体

本実験で用いた試験体は図-1に示すように1階がピロティ構面と耐震壁構面で構成され、2階

は耐震壁構面のみになっている1スパンの1/3縮小モデルである。部材断面詳細は表-1に示す。試験体の高さは構造部材である1階と2階の柱および耐震壁の高さが0.8m、コンクリートマースW1とW2の高さがそれぞれ1.1m、錘が0.8m、基礎およびロードセルの高さが0.74mで、試験部分の高さが4.6m、全体高さは5.34mである。基礎を除いた試験体の重量はW1,W2がそれぞれ142.3KN、付加錘148.3KNおよび構造部材の重量を含め442.6KNであり、この重量によって1階の柱に生じる軸応力度は6階建物に相当する。本研究ではせん断破壊による軸力支持能力の劣化過程を研究するため、1970年代の柱の配筋詳細を想定した。原設計では帯筋60cmx60cmの柱で帯筋D10@100 (pw=0.24%)を想定し、ほぼ等価な補強筋量として1/3モデルではD4@50 (pw=0.25%、表-1、図-3)とした。試験体の製作に用いた材料はコンクリートが $F_c = 18MPa$ の普通コンクリート、鉄筋が柱主筋にD10(SD390)、2階柱補強筋および1, 2階壁筋にD6(SD390)、1階柱補強筋にD4であり、その材料試験結果を表-3, 4にまとめて示す。試験体は1階がピロティ構面と耐震壁で構成され、剛性偏心率と耐力偏心率がそれぞれ0.24, 0.25で、きわめて高い偏心率を持つ試験体である。ここで、剛性偏心率は弾性解析から求めた各構面の剛性を用いて式(1)によって算出した<sup>3)</sup>。耐力偏心率は材料試験から得られた鉄筋およびコンクリートの強度を用いて各構面の耐力を算出し、式(2)より求めた結果<sup>4)</sup>である。柱の曲げ降伏時のせん断力の合計、壁のせん断耐力、および合計のベースシア係数はそれぞれ0.28, 0.97, 1.25程度になっている(表-2)。

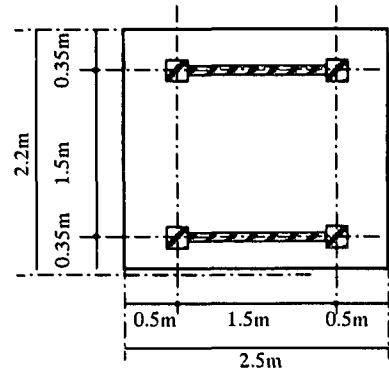
$$R_{ex} = \frac{e_{ex}}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad e_{ex} = \frac{\sum_i k_x \cdot l_y}{\sum_i k_x} \quad (1)$$

ここに、 $e_{ex}$  : 剛性偏心距離、 $k_x$  : 各構面でのx方向弾性剛性、 $\sum_i k_x$  : 各構面x方向剛性の和、 $l_y$  : 構面から重心までの距離、 $a, b$  : 建物長さ

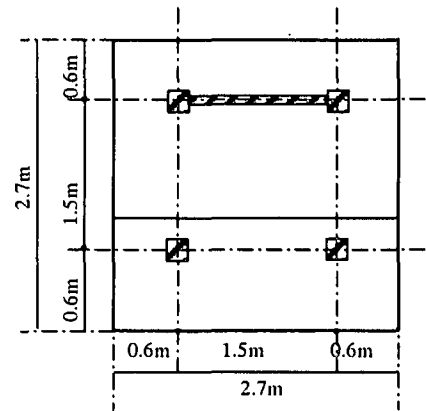
$$R_{ex} = \frac{e_{ex}}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad e_{ex} = \frac{\sum_i q_x \cdot l_y \cdot C_b}{\sum_i q_x} \quad (2)$$

ここに、 $e_{ex}$  : 耐力偏心距離、 $q_x$  : 各構面での降伏耐力、 $\sum_i q_x$  : 各構面x方向降伏耐力の和、 $C_b$  : ベースシア係数

試験体をモード解析した結果、図-4にしめすように1次モードが加震直交方向並進モード、2次および3次モードが回転成分が支配的なねじれモードであることがわかる。このような同一試験体2体を製作し、そのうち1体は1階の柱と壁にポリエステル製繊維シートを貼り付けて補強し、



(a) 2階



(b) 1階

図-1 平面図

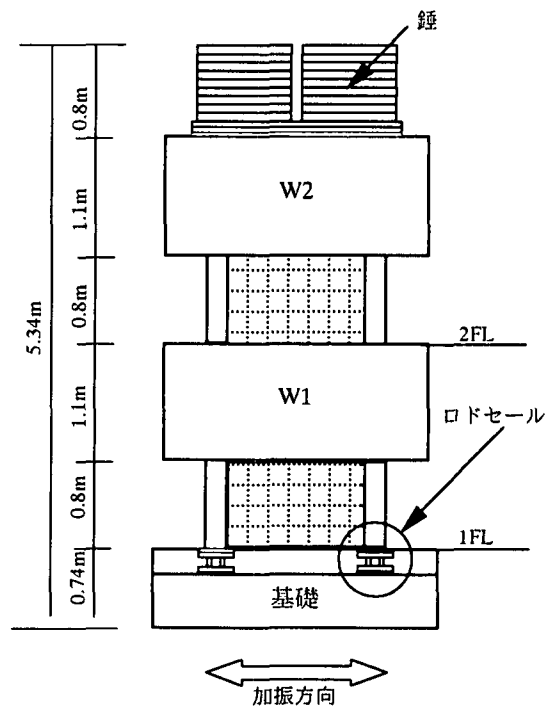


図2-立面図

表-1 部材断面詳細

階	柱	
	2	X×Y
主筋		12-D10
帯筋		2-D6@50
1	X×Y	200×200
	主筋	12-D10
	帯筋	2-D4@50
	壁	
2	壁厚	50
	縦横筋	D6@100
1	壁厚	50
	縦横筋	D6@100

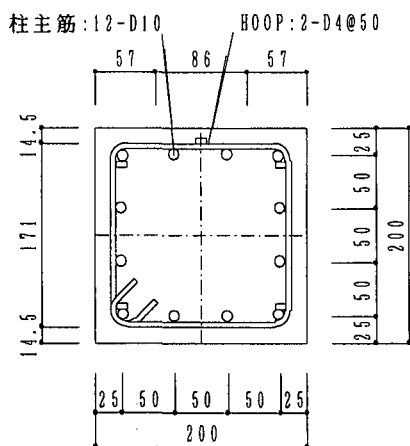


図-3 柱断面(1階)

表-2 偏心率

	ピロティ構面	耐震壁構面
弾性剛性(N/mm)	9.1×10 <sup>4</sup>	4.57×10 <sup>5</sup>
耐力(KN)	125.5(0.28)	429.7(0.97)
ベースシア係数	1.25	
剛性偏心率	0.24	
耐力偏心率	0.25	

・括弧内の数字は2階以上の重さで割った値

表-3 コンクリートの材料特性

試験体部位	$\sigma_b$	$\epsilon_c$	$E_c$	$\sigma_t$	材齢(日)
上部構造	24.1	1894	21556	2.38	86
基礎	25.37	2060	23096	2.22	108

・ $\sigma_b$  : 圧縮強度(MPa),  $\epsilon_c$  : 圧縮強度時歪 ( $\mu$ )

・ $E_c$  :  $\sigma_b/3$  割線剛性(N/mm<sup>2</sup>),

・ $\sigma_t$  : 割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

表-4 鉄筋の材料特性

鉄筋径	$E_s$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$
D4	156490	188.4	1210
D6	185288	439.1	2372
D10	175137	352.4	2011

・ $E_s$  : 初期剛性(N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_y$  : 降伏強度(MPa)

$\epsilon_y$  : 降伏歪 ( $\mu$ )

表-5 相似率

物理量	長さ	面積	体積	応力度	
				水平	鉛直
相似率	1/3	1/3 <sup>2</sup>	1/3 <sup>3</sup>	1	1
物理量	時間	速度	重量	力	
				水平	鉛直
相似率	1/√3	1/√3	1/3 <sup>2</sup>	1/3 <sup>2</sup>	1/3 <sup>2</sup>
物理量	加速度		軸力比	ベースシア係数	
	水平	鉛直			
相似率	1	1	1	1	

残り1台はそのままの状態で行った。補強はピロティ構面の柱を接着剤を使ってポリエステル製繊維ベルトを巻きつけ、耐震壁構面の柱は壁がついているのでその高さにあわせて1枚のシートを巻きつけ、壁に対しては壁の両面にシートを貼り付けた(図-5)。壁側および柱端部ではシートの重ねと接着剤のみによる定着で、特別な詳細は用いていない。施工は簡便であり、3人程度がほぼ半日の作業で終了した。補強の詳細や補強効果の検証に関しては別稿で詳述する。これから

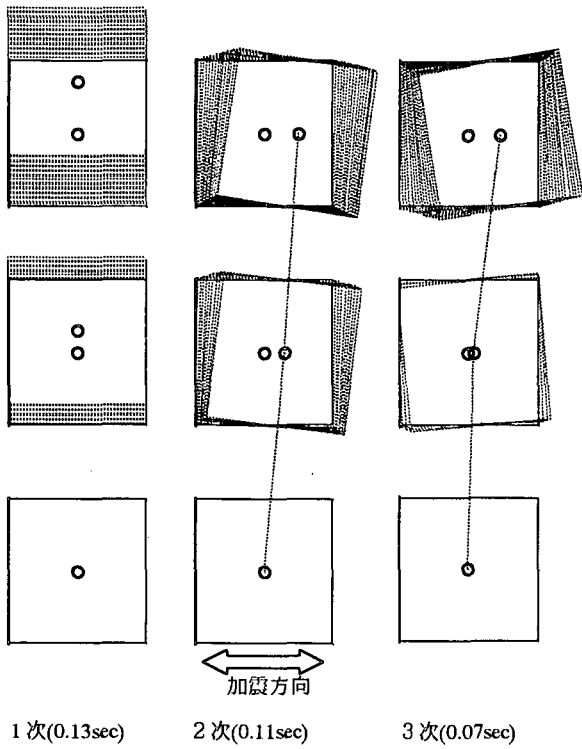


図-4 モード形および卓越周期

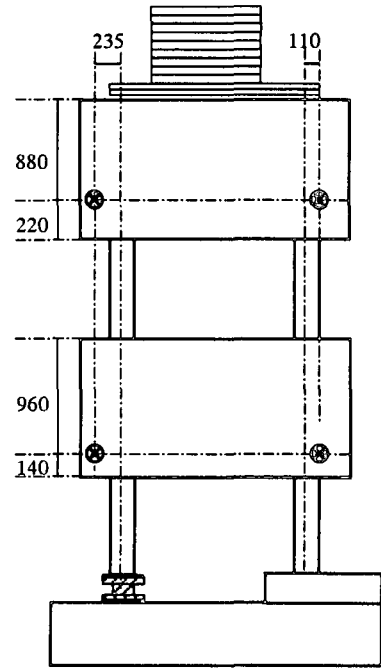


図-7 計測フレームからの計測位置  
(東面、各試験体共通、単位:mm)

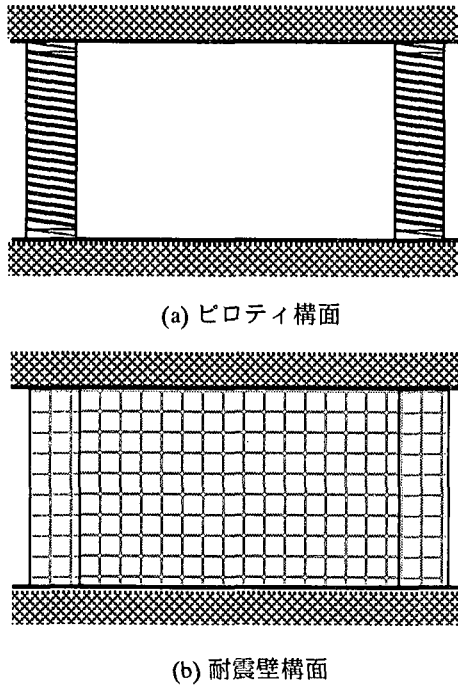


図-5 補強方法

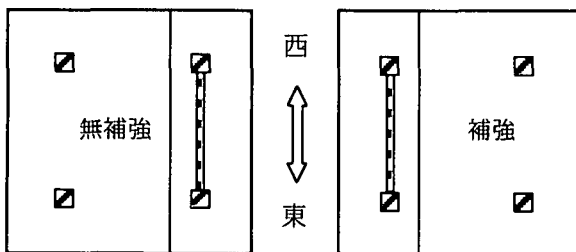


図-6 試験体配置図

2体の試験体をそれぞれ補強試験体と無補強試験体と呼ぶ。

### 3. 相似率

震動実験で用いる試験体はほとんどが縮小モデルなので実際の建物と同一応答性状を再現するためには相似率の適用が必要である。本実験で用いた試験体も1/3縮小モデルであり、6階建物の1階の柱に相当する軸応力度を満足するために試験体重量以外に付加重量が必要であった。それで図-2に示すようにW2の上に鉄の錘148.3kNを取り付けて目標相似率を満足した。それから動的实验である本実験では試験体自体の相似率以外にも入力地震動に対して相似率を適用する必要があったので原地震動の加速度は目標と同じレベル(1倍)、時間軸は $1/\sqrt{3}$ 倍して入力した。表-5に各物理量に対する相似率を示す。

### 4. 計測装置および計測方法

2体の試験体を対称に震動台に配置して(図-6)、同時に同じ入力で加震した。実験の計測装置としては各試験体において加速度計22成分、変位計20成分、ロードセル4成分、歪ゲージ36成分で、合計82成分、2体総計164成分である。計測部位は原則として2体の試験体に対して同一位置にして比較可能にした。加速度計は各階各構面ごとに加震

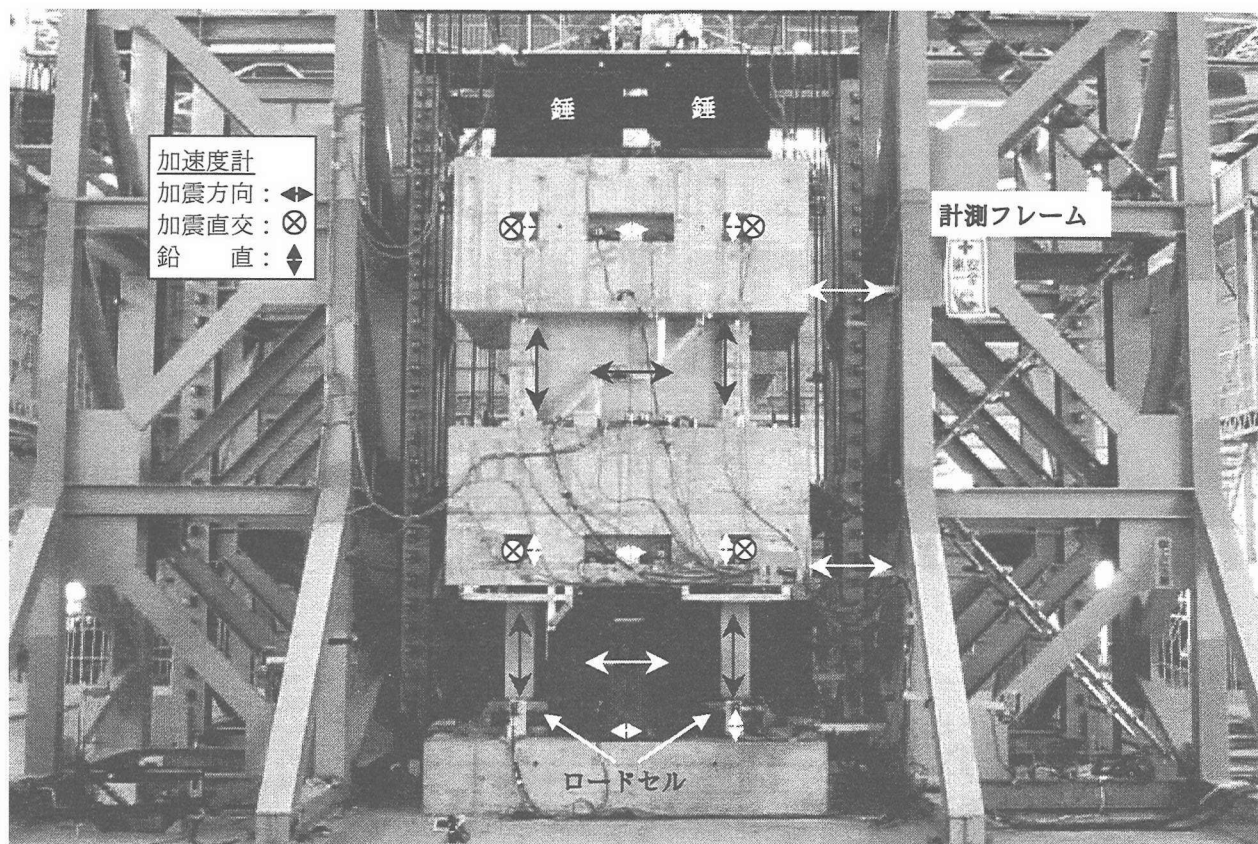


図-8 試験体全景および計測部位

表-6 入力計画

目標最大入力速度レベル (kine)	地震波	原波形に対する倍率	原波形最大加速度 (gal)	原波形最大速度 (kine)	試験体入力最大加速度 (gal)	試験体入力最大速度 (kine)
12.5	TOH	0.3	258.2	40.9	77.5	7.2
25	TOH	0.6	258.2	40.9	155	14.4
37.5	ELC	1.1	341.7	34.8	375.9	21.7
50	JMA	0.6	820.6	85.4	492.4	28.9
50	CHI	0.7	884.4	70.6	619	28.3
125	TAK	1.0	605.5	124.2	605.5	71.6
63	CHI	0.9	884.4	70.6	796	36.4
50	CHI	0.7	884.4	70.6	619	28.3

方向、鉛直方向の成分を計測し、ピロティ構面にはねじれによって生じる加震直交方向の応答を計測する目的で加震直交方向にも設置した。基礎に設置した加速度成分を試験体への入力として用いる。試験体以外にも計測フレームから測る変位の補正のため計測フレームの下部および上部に加速度計を設置した。変位の測定部位も剛性および耐力偏心によって生じる各階のピロティ構面と耐震

壁構面の応答の差を測るため各構面ごとに設置し、加震方向の層間変位を試験体内部で、基礎に対する相対変位を計測フレームから計測した。ここで、計測フレームに設置した変位計による試験体の変位は計測フレームの相対変位（計測フレームの相対加速度を積分して算定）を差し引いて補正して使用する。計測フレームからの変位計計測部位を図-7に、ほかの変位計および加速度計の設置

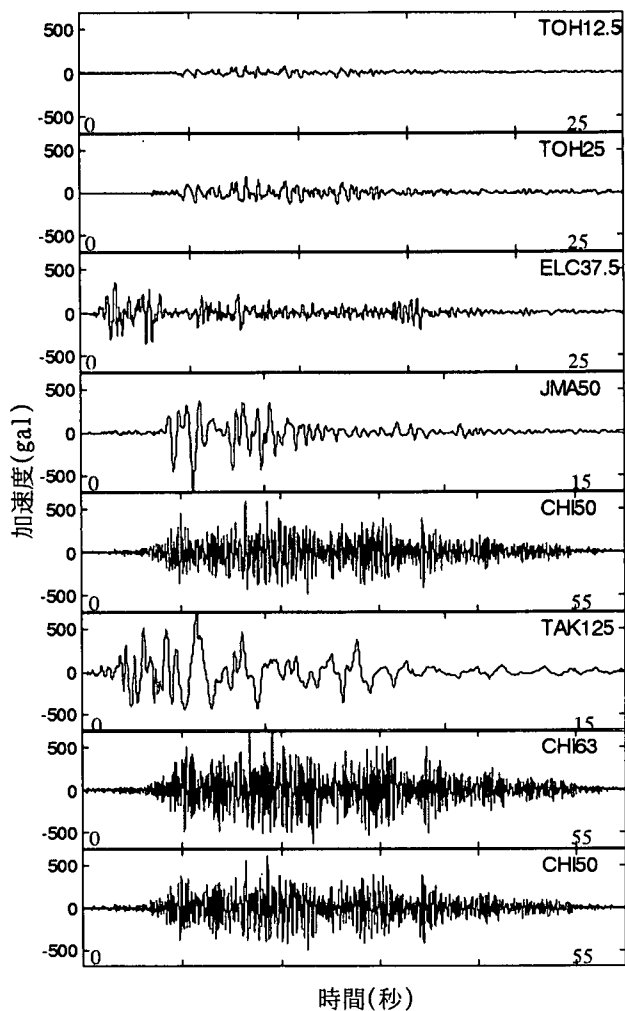


図-9 入力地震動

部位を図-8に示す。図-8にはピロティ構面のみ加速度計および変位計を示しているが、耐震壁構面に対しても加震直交方向の加速度計を除いては対称になる位置に同様に設置した。1階ピロティ構面の柱の脚部にロードセルを設置し、1つのロードセルに対して2成分、すなわち、せん断力と軸力を計測した(図-2)。加速度計により全体に作用する慣性力が算定されるが、これにより1階のピロティ構面と耐震壁構面でのせん断力および軸力の負担も算定できる。

#### 4. 入力計画

本実験の入力地震動としてはTOH(1978年宮城県沖地震、東北大学の記録、NS成分)、ELC(1940年Imperial Valley地震、El Centroの記録、NS成分)、JMA(1995年兵庫県南部地震、神戸海洋気象台の記録、NS成分)、CHI(Chile地震、1985年)、TAK(1995年兵庫県南部地震、JR鷹取駅の記録、NS成分)の5種類を用いた。試験体への入力地震動を図-6に示す。各地震動の入力レベルは、予備解析にもとづいて、表-6に示すレベルになるよう

に設定した。予備解析により無補強試験体はCHI50の段階で破壊するのが予測され、CHI50以後の地震動TAK125、CHI63、CHI50は、無補強試験体を撤去した後、補強試験体のみに入力する目的で設定した。ここで、軸力の低下による試験体の破壊過程を観察することができるように持続時間が長い特徴を持っているCHILEの地震動を試験体の破壊段階で入力した。損傷による試験体の固有振動数の変化を同定する目的で各地震動の入力前後に20galレベルのホワイトノイズを入力、計測した。

#### 5. 倒壊防止フレーム

本実験では、建物が軸力支持能力を喪失して崩壊に至るまで加震する予定であるので、崩壊は生じさせても倒壊に対して安全性を確保するための計画がポイントになる。本実験では、鉄骨フレームに梁を架けてワイヤーを緩めに試験体に繋ぐとともに、1層では鉄骨の梁で軸力を支持するように、二重の安全策を講じた。下の梁ではほぼ20cm程度の軸圧縮変形を許容して、鉄骨梁に軸力が移行するように計画した。さらに鉄骨上面には衝撃緩衝材として硬質ゴムを設置している。

#### 6. まとめ

鉄筋コンクリート建物が地震動により崩壊に至る過程を解明し、また、ポリエステルシートによる補強手法(SRF補強)の有効性を検証するため、震動実験を実施した。試験体は、6層程度の建物を模擬した2層各方向1スパンの1/3縮小モデルで、本報告では、試験体概要および試験体の設計過程について記述した。また、相似率および予備解析にもとづいて、試験体への入力地震動レベルを設定した。また、補強試験体および無補強試験体の応答を比較するために必要な計測方法を示した。

#### 参考文献

- 1) 小泉, 壁谷澤, 田才, 五十嵐(2001): 鉄筋コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 23-1, 937-942.
- 2) 田辺, 大杉, 田才, 壁谷澤(2001): 鉄筋コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 23-1, 943-948.
- 3) 地震荷重—その現状と将来の展望, 日本建築学会, 1987
- 4) 日野泰道, 中野良昭, 鉄骨系架構が偏心された鉄筋コンクリート造骨組のねじれ応答性状に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1998