

# 構造物の免震に関する研究 (その1)

—積層ゴムとPC鋼棒を用いた免震装置—

武田 寿一      渡辺 清治      角田 智彦  
岡田 宏      寺村 彰      中村 嶽  
関 松太郎      野畑 有秀

## Study on Seismic Base Isolation System for Structures (Part 1)

—Isolation System Composed of Laminated Rubber Pads and Prestressing Steel Bars—

Toshikazu Takeda    Seiji Watanabe    Tomohiko Tsunoda  
Hiroshi Okada      Akira Teramura    Takashi Nakamura  
Matsutaro Seki     Arihide Nohata

### Abstract

An experimental study on a base-isolated frame subjected to earthquake ground motion is described. A base isolation system, as one technique in earthquake-resistant design, has a merit in the aspect that a reduction in input ground motion to the structure is possible. The system used in the study reported consists of laminated rubber pads and prestressing steel bars (PC steel bars) which suppress excessive response deformation through energy absorption at the inelastic stage. This experimental study consists of static tests, dynamic tests, and earthquake response tests. As a result of these tests, the following concluding remarks are obtained (1) it is possible to ascertain the relationship between static and dynamic characteristics through these tests, (2) the effectiveness of the base isolation system is recognized through earthquake response tests, and (3) through the response analysis based on the characteristics of the individual component elements, namely, laminated rubber pads and PC steel bars, it is possible for earthquake response tests to be approximately simulated.

### 概要

耐震設計の一手法としての免震構造法は、地上構造物への入力地震動の低減が可能となる点にメリットがある。しかしながら、国内外において、免震構法に関する研究<sup>1)~5)</sup>や実際の構造物に適用された事例は少ない。本報告は、このような状況下において、積層ゴムとエネルギー吸収により過大な変形を制御し得るPC鋼棒とから成る免震装置を考案し、これの静的および動的な基本性状と、この装置によって支持された鉄骨フレームの地震応答時の免震効果を、それぞれ実験および解析により検討した。

その結果、(1) 静的および動的実験により両者の特性の関連が把握し得る。(2) 地震応答実験により免震装置の有効性を認め得る。(3) 単体の特性に基づいた応答解析により地震応答実験をほぼ再現し得ることなどを確認した。

## 1. 全体計画

### 1.1. 目的

耐震設計の一手法である免震構造法として、積層ゴムと、減衰機としてエネルギー吸収により過大な変形を制御するPC鋼棒とから成る免震装置を考案し、この静的および動的な基本性状と、装置によって支持された鉄骨フレームの地震応答時の免震効果を、それぞれ実験およ

び解析によって調べることを意図する。

実験の全体計画を表1-1に示す。内容を分類すると下記の三つに大別される。

(1) 静的実験 免震装置を構成する積層ゴムと、減衰機能をより効果的にするPC鋼棒の、静的実験を行なう。(表1-1中の分類 No. A-I, B-I, D-I)

(2) 動的・基本特性実験 積層ゴムと、これにPC鋼棒を配した場合の動的特性を調べ静的特性との比較を

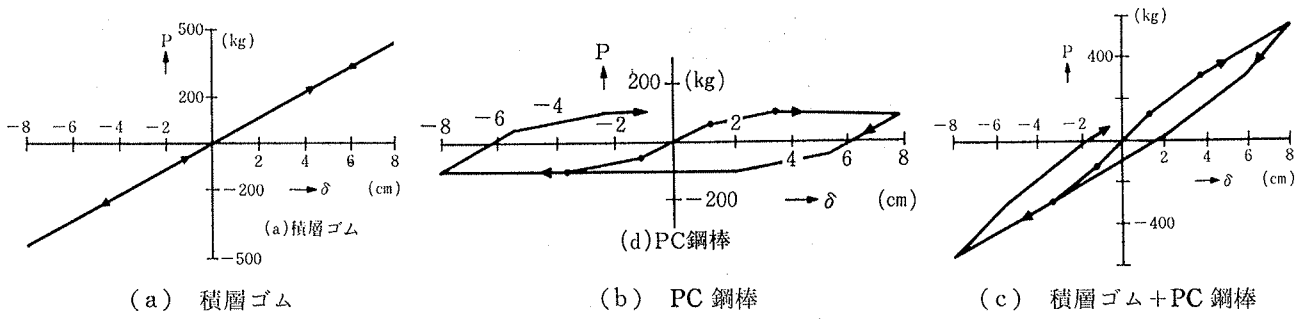


図-1-1 復元力特性 (設計値)

行なう。また、免震装置で支持された鉄骨フレーム全体架構の周期、剛性、減衰定数、振動モードなどの動的基本特性を、振動台による加振実験により調べる。(表-1-1中の分類 No. A-II, C-II, D-II, E-II, F-II)

ゴムの種類	天然ゴム
ゴム単位圧	2.5mm
ゴム積層枚数	65枚
内挿鉄板厚	0.8mm
鉄板径	150mm

表-1-2 積層ゴムの寸法など

(3) 地震応答実験 免震装置で支持された鉄骨フレームの免震効果を、実地震記録波を入力する振動実験により調べる。(表-1-1中の分類 No. C-II, F-II)

1.2. 試験体の設計

地震応答実験に用いる免震装置(積層ゴム+PC鋼棒)付き鉄骨フレーム全体架構の設計条件を以下に示す。

- (1) 全体架構の1次固有周期を約1.5秒とする。
- (2) 水平変形約2cm程度を与えたとき免震装置のPC鋼棒が塑性挙動域に入る。
- (3) 塑性域で免震装置が消費する履歴エネルギーは、等価粘性減衰定数にして10%弱とする。これらの設計条件は、以下に示す鉄骨フレーム、積層ゴムおよびPC鋼棒の特性に基づいて設定したものである。

(1) 鉄骨フレーム 振動実験後に屋外での自然地震観測にも用いることを前提に、当技術研究所敷地地盤の卓越周期がほぼ0.3秒付近にあることを考慮して、一次固有周期を0.33秒(3Hz)とする。

(2) 積層ゴム 免震装置付き架構全体を長周期化することを目的とし、かつ振動台の積載荷重能力等も考慮して設計軸力を5ton、水平方向固有周期を2秒とした。ゴムの寸法他、基本物性、外観をそれぞれ表-1-2, 表-1-3, 写真-1-1に示す。なお、許容限界変形は約8cm(部材角で1/2.67程度)である。

(3) PC鋼棒 積層ゴムの変形限界の1/4の約2cmで降伏し、それ以降の塑性域での減衰性をより効果的とすることを目的とし、架構全体の長周期化、大変形領域までの変形能力の保持なども考慮して、PC鋼棒の曲げ効果によるエネルギー吸収に期待する片持梁形式

分類	試験体	実験内容	試験体名
単体実験	① 積層ゴム	静的 繰返し加力	A-1-2.5 A-1-5 A-1-10
		動的 自由振動共振	A-II
単体実験	① PC鋼棒	静的 繰返し加力	B-1-0
		動的 自由振動共振 地震入力	C-II
組合せ実験	① 積層ゴム ② PC鋼棒	静的 繰返し加力	D-1-5
		動的 正弦波入力	D-II
組合せ実験	① 鉄骨フレーム ② 積層ゴム	動的 自由振動共振 地震入力	E-II
		動的 自由振動共振 地震入力	F-II

表-1-1 全体計画

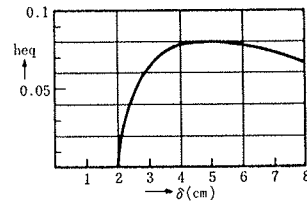


図-1-2 等価粘性減衰定数(設計値)

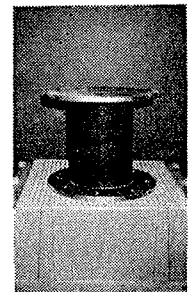


写真-1-1 積層ゴム

硬度*1	25%応力(kg/cm <sup>2</sup> )	破断伸び*2	引張強さ(kg/cm <sup>2</sup> )	Gせん断係数(kg/cm <sup>2</sup> )	Eヤング係数(kg/cm <sup>2</sup> )
40±5	3.4±1	>500	>200	5.6	11.5

\*1 JIS=A \*2 JIS-K

表-1-3 ゴムの基本特性

とした。

積層ゴムとPC鋼棒の各設計用復元力特性およびこれ

らを組合わせた免震装置としての復元力特性を図一1-1に、また等価粘性減衰定数 ( $h_{eq}$ ) を図一1-2に示す。

1.3. 実験方法の概略

(1) 静的実験 積層ゴムは軸方向力を実験パラメータとし、変形振幅漸増の繰返し载荷とした。実験装置を写真一1-2に示す。

(2) 動的基本特性実験 実験の種類は、正弦波入力による応答変位一定の共振実験、自由振動実験、動的载荷速度(エンベロープ波)による積層ゴムとPC鋼棒の特性実験などである。

(3) 地震応答実験 実記録地震波を用いて振動実験を行なう。本報告ではEL-CENTRO 1940NS波を用いた結果を述べる。実験装置を写真一1-3に示す。

以下、本免地震装置に関する実験および解析結果を記す。

2. 静的実験

2.1. 目的

免震装置を構成する積層ゴムと減衰機(PC鋼棒)の静的実験により、復元力特性、減衰性能などを調べ、その結果について解析的検討を加え、免震装置の設計用基礎資料を得ることを目的とする。

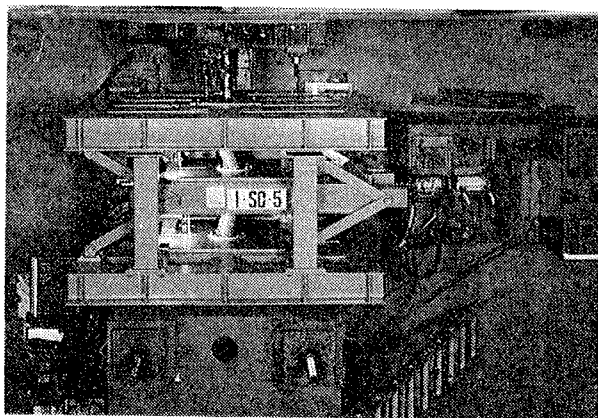
2.2. 実験装置

(1) 実験装置 図一2-1に静的加力装置の概略および主な測点を示す。加力装置は一对の試験体(積層ゴム、PC鋼棒)を取りつけ、一定の軸力を载荷した状態で、試験体に水平変位を与えるよう設計されている。測定内容は、軸力と水平力(ロードセルの出力)、試験体の軸方向と水平方向の変位およびPC鋼棒の歪などである。

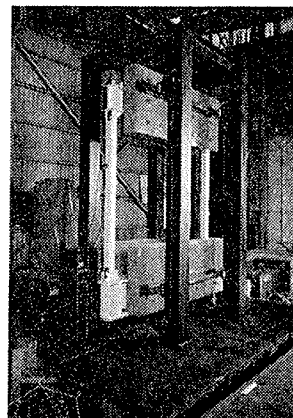
(2) 積層ゴム(株)ブリジストン製) 設計軸力5 ton、水平方向固有周期を約2秒としており、高さ約24 cm、直径約15 cmの寸法で、2.5 mm厚のゴム65層と0.8 mm厚の鉄板(SS41)64層より構成されている。

(3) 減衰機 機構の簡潔さおよび力学的性状の明白さを考慮し、減衰機として長さ20 cmのA種11φ PC鋼棒の曲げ変形による塑性エネルギー吸収を期待した片持梁形式を採用した。PC鋼棒には軸力は働かないように設計している。図一2-7にPC鋼棒の歪の測点を示す。

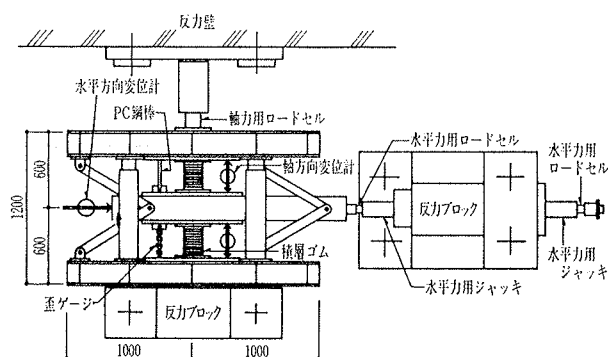
静的実験方法は、変位振幅漸増(±10, ±20, ±40, ±60, ±70, ±80 mm)の水平加力両振り試験とし、積層ゴムに関しては軸力をパラメータ( $P_n=2.5, 5.0, 10.0$



写真一1-2 静的実験装置



写真一1-3 振動実験装置



図一2-1 静的加力装置概略平面図および主な測点

種別	試験体名	軸力	水平剛性	
			実験値	設計値
積層ゴム	A-1-2.5	2.5ton	59kg/cm	56kg/cm
	A-1-5	5.0ton	55kg/cm	
	A-1-10	10.0ton	37kg/cm	
減衰機(PC鋼棒)	B-1-0	—	45kg/cm	50kg/cm
積層ゴム+減衰機(PC鋼棒)	D-1-5	5.0ton	107kg/cm	106kg/cm

※) 水平剛性は水平変位10mm迄の平均初期剛性

表一2-1 剛性

ton) としている。

2.3. 実験および解析結果

2.3.1. 水平荷重-水平変位曲線 図一2-2に積層ゴムの荷重-変位曲線、図一2-3にPC鋼棒の荷重-変位曲線、図一2-4に免震装置(積層ゴム+PC鋼棒)の荷重-変位曲線を示す。これらの図中には、後述する解析より求めた荷重-変位曲線も破線で示してある。

図一2-5に積層ゴムに関して、軸力をパラメータにしたときの荷重-変位曲線を示す。

以上の各試験体の荷重-変位曲線より求めた水平変位10 mm迄の平均水平剛性を、表一2-1にまとめて示す。その結果、以下の事項が考察される。

(1) 積層ゴムの特性 定格荷重(5 ton)時における積層ゴムの初期水平剛性は設計値とほぼ対応しており、水平変位限界は約8 cmである。なお図一2-5におい

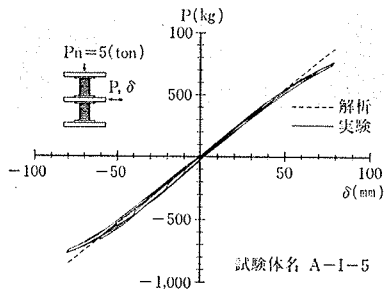


図-2-2 積層ゴムの荷重-変位曲線 (積層ゴム 2個分)

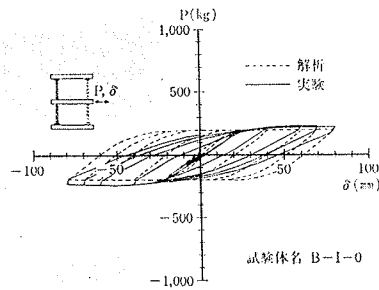


図-2-3 PC 鋼棒 (2本分) の荷重-変位曲線

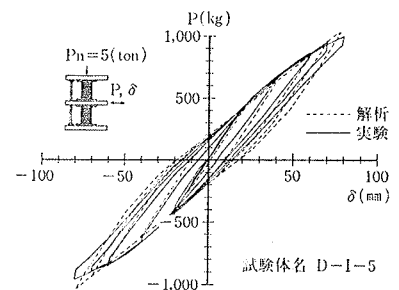


図-2-4 免震装置の荷重-変位曲線 (積層ゴム 2個分 + PC 鋼棒 2本分)

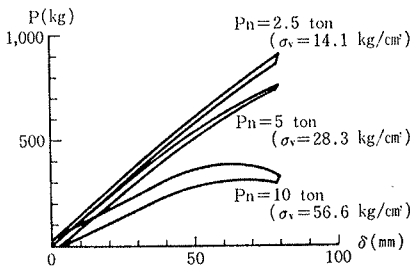


図-2-5 積層ゴムの荷重-変位曲線 (積層ゴム 2個分, 軸力パラメータ)

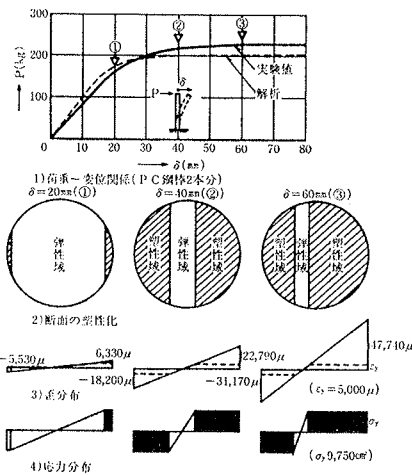


図-2-8 PC 鋼棒の断面方向の塑性化 (固定端より 10 mm 位置)

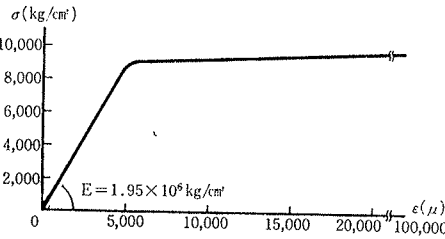


図-2-6 PC 鋼棒の応力-歪関係

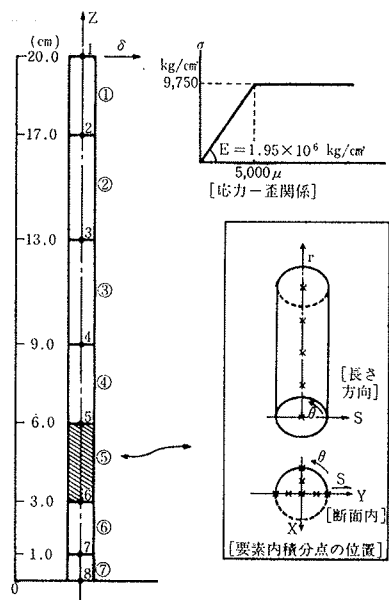


図-2-9 PC 鋼棒の解析モデル

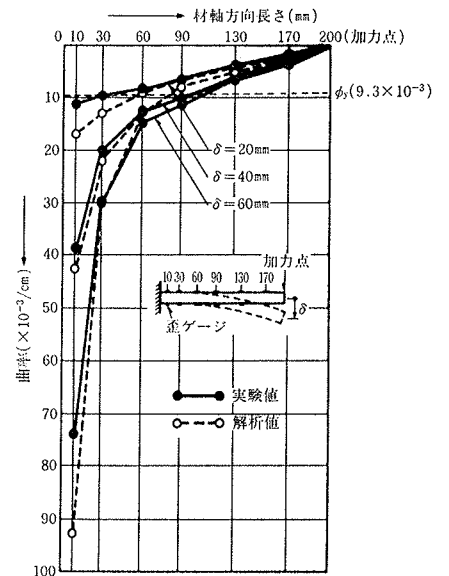


図-2-7 PC 鋼棒の材軸方向の塑性化

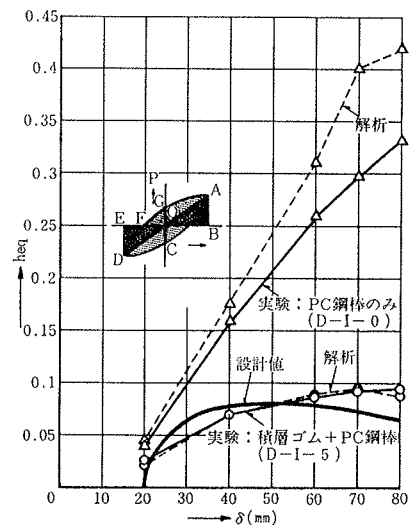


図-2-10 等価粘性減衰定数  
係数0.5 I: 断面二次モーメント h: ゴム1層の高さ (0.25 cm)  
h<sub>T</sub>: 積層 (ゴム+鉄板) 1層の高さ (0.33 cm)

ては、軸力をパラメータとした初期水平剛性の変化と変形に伴う剛性の低下が見られる。これらは軸力に伴う P-δ 効果や変形に伴う有効受圧面積の変化等に起因するものと推定される。

軸方向力と水平力をうける積層ゴムの解析による復元力特性に関しては、Haringx<sup>6)</sup> や、Gent<sup>7)</sup> らによって検討されている。本報告では、Haringx 理論により、積層ゴムの復元力特性を求めた。剛性は、次式によって求まる。

$$K = \frac{Q}{y} = \frac{P}{L} \left[ \left( 1 + \frac{P}{K'} \right) \cdot \frac{\tan(qL/4)}{qL/4} - 1 \right]^{-1} \dots\dots(1)$$

ここに、Q: 水平力 y: 水平変形 P: 軸力 (5t)  
K': せん断剛性 L: 積層ゴムの総高さ (21.37 cm)

$$q^2 = \frac{P}{T'} \left( 1 + \frac{P}{K'} \right)$$

T': 曲げ剛性  
 $T' = EI \times (1B + S^2)$   
 $\times h_T/h = 4.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$

ここに、S: 形状係数 B: 設計値  
 解析  
 実験: PC 鋼棒のみ (D-1-0)  
 実験: 積層ゴム + PC 鋼棒 (D-1-5)

A: 断面積 (167.6 cm<sup>2</sup>)

以上の値を式(1)に代入すると,  $K=54 \text{ kg/cm}$  を得る。解析による積層ゴムの復元力を図-2-2中に破線で示す。なお, 積層ゴムの剛性に関しては, 若干の製品的な個体差が見受けられる。

(2) 減衰機(PC鋼棒) 図-2-6に, 減衰機に使用したPC鋼棒の引張試験により得た応力-歪関係を示す。

図-2-3の減衰機の復元力特性は安定した紡錘形を示している。また, 図-2-7に減衰機の変形増加に伴うPC鋼棒の材軸方向の曲率分布の変化を, 図-2-8にPC鋼棒の断面方向の塑性化の変化を示す。これらより, 水平変位約2cmでPC鋼棒の固定部に塑性域が生じ, 変形の増加に伴って, 断面と材軸方向に塑性化が広がること判る。

図-2-9に材料非線形を考慮したFEM(汎用非線形解析プログラムADINA<sup>®</sup>)を使用)によるPC鋼棒の解析モデルおよび解析に用いたPC鋼棒の応力-歪関係を示す。変位増分法による静的解析で求めた減衰機のP- $\delta$ 関係を図-2-3と図-2-8中に破線で示す。解析値は実線で示す実験値とほぼ対応している。

2.3.2. 等価粘性減衰定数 PC鋼棒(B-I-0)と積層ゴム+PC鋼棒(D-I-5)のそれぞれの荷重-変位曲線より求めた等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  を, 図-2-10に実線で示し, また解析による荷重-変位曲線より計算した  $h_{eq}$  も図中に破線で示す。

免震装置(D-I-5)の実験値の  $h_{eq}$  は解析値と良く対応しており, ほぼ設計値どおりである。

写真-2-1にD-I-5の最大水平変位8cmの変形状態を示す。

## 2.4. まとめ

免震装置の静的実験により以下の結果を得た。

(1) 積層ゴムに関しては, 定格荷重(5ton)において, 変位8cmまでほぼ直線性のある荷重-変位曲線が得られ, 水平剛性は設計値および解析値とほぼ対応する。なお積層ゴムの水平剛性は軸力や水平変位の大きさに影響されることが伺われる。

(2) 減衰機(PC鋼棒)に関しては, 必要な性能を有するものを設計することが可能であることが確かめられた。

(3) 積層ゴムとPC鋼棒を組み合わせた免震装置は, それぞれの単体の特性値から設計できることが実験および解析により確かめられた。

## 3. 動的な基本特性実験

### 3.1. 目的

2章で検討した免震装置の静的特性調査に引き続き,

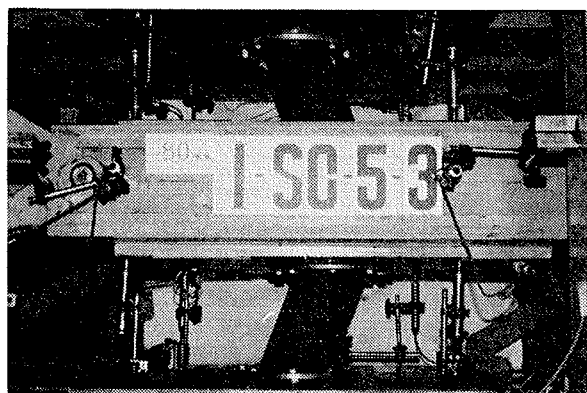


写真-2-1 変形状態

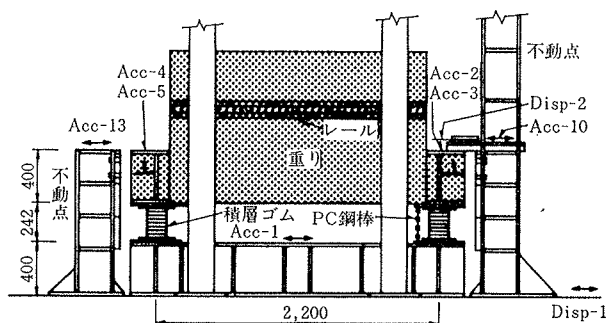


図-3-1 免震装置単体実験用試験体

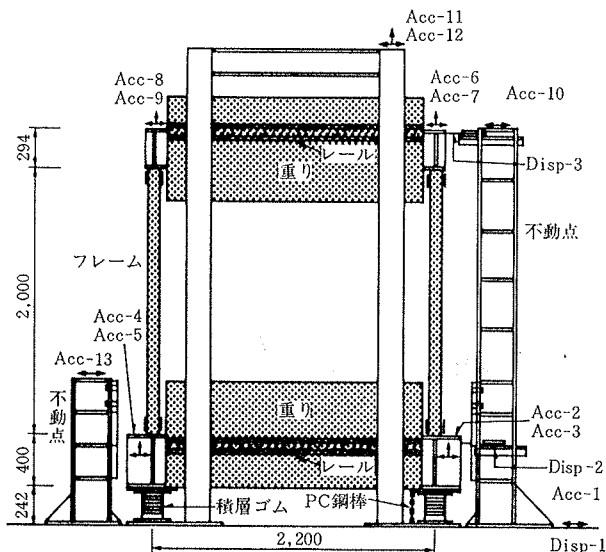


図-3-2 免震装置+フレーム実験用試験体

ここでは, 振動台を用いて免震装置の動的な基本特性を把握し, 静的特性との比較検討を行ない免震装置の設計方法の検討を行なう。さらに, 一層フレーム単体に免震装置を取り付けた時の動的な基本性能を把握することを目的とする。

### 3.2. 実験方法

技術研究所の振動台はテーブル寸法  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  で, 入力源としては規則波, 地震波などが可能である。使用可能な周波数範囲は  $\text{DC} \sim 50 \text{ Hz}$ , 最大加速度  $3 \text{ G}$ , 最大速

度 50 kine, 最大変位 ±100 mm である。計測は, 当社の振動計測車を用い, オンラインでデータ処理を行なった。図-3-1 に免震装置実験用の試験体 (分類 No. A-II, D-II), 図-3-2 に一層フレームと免震装置の組合せ実験用の試験体 (分類 No. E-II, F-II), および測点を示す。各々の試験体の寸法, 重量を表-3-1 に示す。使用した計器はサーボ型加速度計, 差動トランス型変位計であり, 測定としては振動台, 1 FL (フレーム基礎レベル), 2 FL (フレーム上部レベル) 各々の変位と加速度, またフレームおよび PC 鋼棒の歪, さらにチェック用として面外運動拘束用ガイドフレームおよび不動点の加速度である。

実験種類としては, 自由振動実験, 正弦波加振 Q-δ 実験, エンベロープ波実験, 共振実験であり, 各実験で固有周期, 減衰定数を確認することとした。また正弦波実験は, 2.2 sec の定常加振で Q-δ (層せん断力と変形) 曲線を測定し, 対角剛性からばね定数を, ループ面積から減衰定数を求めている。

### 3.3. 実験結果

3.3.1. 免震装置の特性 図-3-1 の試験体で実施した積層ゴム単体と積層ゴム+PC 鋼棒の固有周期, ばね定数, 減衰定数の測定結果を表-3-2 にまとめて示す。

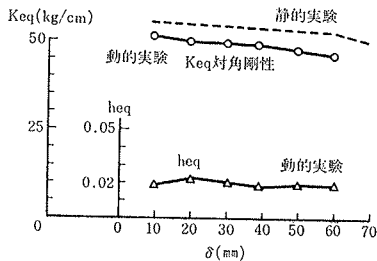


図-3-3 積層ゴム単体の相対変位に減衰定数 (heq) とばね定数 (Keq)

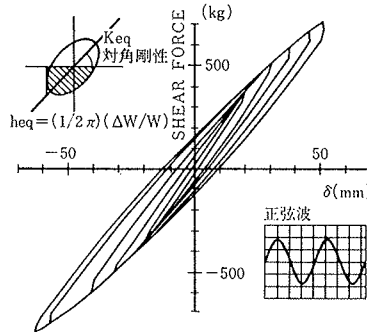


図-3-4 Q-δ 曲線 (1)

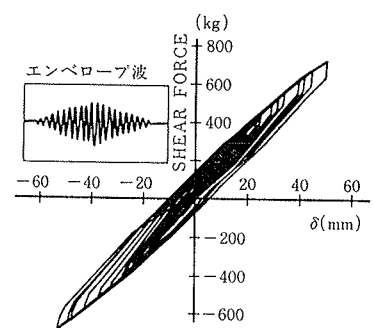


図-3-5 Q-δ 曲線 (2)

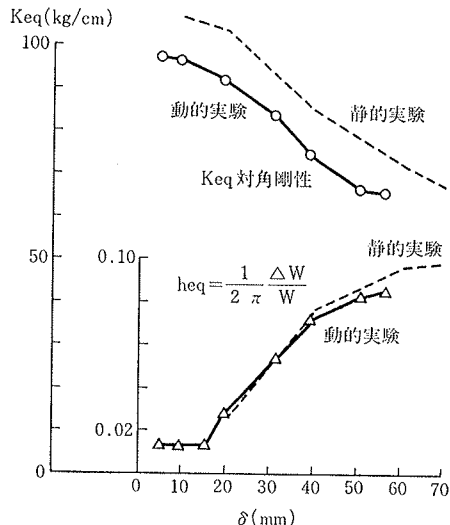


図-3-6 免震装置 (積層ゴム+PC 鋼棒) の相対変位による減衰定数 (heq) とばね定数 (Keq)

す。この表で変位レベルの小さい約 10 mm 位では実験方法が異なっても得られる諸定数の差が少ないことを確

Steel BLOCKS	800×700×2,000mm	W=8.78ton
Steel GIRDER	H-400×400×2,000 (2,600)	W=0.79ton
合計	(その他 plate 金物含む)	ΣW=9.63ton

分類No. ㉔-㉞, ㉟-㊱, ㊲-㊴		
2ND FLOOR		
Steel BLOCKS	800×350×2,000 (mm)	W=4.40ton
Steel GIRDER	H-294×200×2,340 (mm)	W=0.13ton
1ST FLOOR		
Steel BLOCKS	800×350×2,000 (mm)	W=4.40ton
Steel GIRDER	H-400×400×2,600 (mm)	W=0.45ton
COLUMNS	□-100×100×6.0 (mm)	W=0.05ton
RUBBER	φ-154×214 (mm) Rub-2.5mm×65枚, S-0.8mm×64枚(ss41)	

表-3-1 試験体の寸法, 重量

	積層ゴム単体				積層ゴム+PC 鋼棒			
	変位 mm	周期 sec	ばね定数 kg/cm	減衰定数 h*	変位 mm	周期 sec	ばね定数 kg/cm	減衰定数 h*
自由振動実験	10.	2.00	(48.5)	0.021	10.	1.43	(94.3)	0.017
共振検索実験	10.	1.94	(51.5)	0.019	10.	1.42	(95.6)	0.017
正弦波加振実験 (Q-δ)	9.9	(1.94)	51.42	0.019	9.6	(1.46)	96.39	0.013
	19.9	(1.96)	50.02	0.022	19.5	(1.45)	91.53	0.021
	30.8	(1.97)	49.61	0.020	31.1	(1.52)	83.32	0.054
	38.5	(1.98)	49.05	0.018	39.1	(1.61)	74.63	0.072
	50.0	(2.02)	47.38	0.019	51.3	(1.70)	66.62	0.083
	60.2	(2.05)	45.80	0.019	56.9	(1.70)	66.33	0.085

\* 減衰定数は自由振動対数減衰定数, 共振曲線および Q-δ ループ面積より得た。また ( ) 内は, 固有周期あるいはばね定数測定値からの換算値である。

表-3-2 免震装置の固有周期, 減衰定数の測定結果

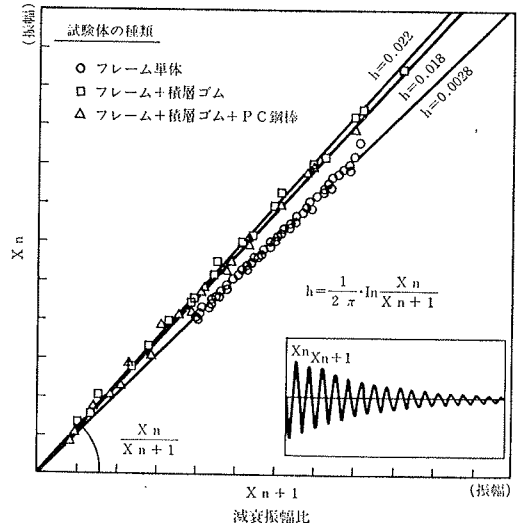


図-3-7 一層フレームと免震装置の組合せにおける自由振動試験

認した。

変位レベルが大きくなると、積層ゴムは図-3-3に示す様にバネ定数の変位依存性がわずかではあるが観察される。積層ゴム+PC鋼棒に関しては、図-3-4に正弦波実験の各振幅レベルでのQ- $\delta$ 曲線を重ね書きして示す。また、図-3-5に同図の左上に示すようなエンベロップ波を入力した時の振幅増加時、減少時の連続的なQ- $\delta$ 曲線を示す。これらの結果から整理して求めた対角剛性、等価粘性減衰定数は、図-3-6の様に変位依存性が顕著に観察される。同図で応答変位が約2cmを越えると減衰が増加し、同5.7cmで8.5%であり、ほぼ静的実験と同じエネルギー吸収効果があることが認められる。

**3.3.2. 免震装置とフレーム** フレーム単体およびフレームと免震装置との組合せによる各試験体の固有周期、減衰定数、振動モードは自由振動実験と共振実験より求め、弾性範囲の測定結果を表-3-3に示す。なお、各試験体の自由振動実験における減衰定数は、図-3-7に示す減衰振幅比より求めている。また、図-3-8に積層ゴム単体と、積層ゴムとPC鋼棒との組合せによる変位約10mmの弾性範囲内の共振実験、および変位約40mm一定として加振した共振実験より得た加速度応答倍率曲線を各々○、△印で示す。40mm一定加振の共振実験ではPC鋼棒が塑性域で変形することによる周期変動と減衰効果が確認できる。

**3.4. まとめ**

- (1) 自由振動実験、正弦波実験および共振実験で得られた動的定数は、弾性域で各々良く対応していることが確認された。
- (2) 変形が大きくなるにつれて塑性域での期待通りのエネルギー吸収効果が確認された。
- (3) 静的実験より得られた変位に応じたはね定数、減衰定数は、動的結果と良く対応し、動特性は静的実験でも推定が可能であることが確認された。

**4. 地震応答実験**

**4.1. 目的**

積層ゴムとPC鋼棒とで構成される免震装置と1層フレームの静的動的性状がほぼ明らかになったので、ここでは1層フレーム単体を比較対象の試験体として、免震装置を組み込んだときの地震波入力振動台実験を行ない、その結果と応答解析とから免震効果を検証する。

**4.2. 実験方法**

試験体は図-3-2の免震装置付フレーム(分類 No. F-II)と、免震装置を取り除きフレーム下部を振動台に直接固定したフレーム単体(分類 No. C-II)を用いる。

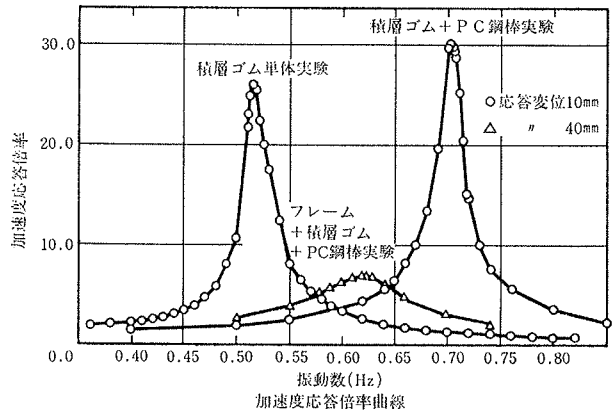


図-3-8 共振実験結果

	フレーム	フレーム+積層ゴム+PC鋼棒		
		1st	2nd	3rd
PERIOD SEC	0.333 (0.333)	1.450 (1.453)	0.243 (0.242)	— (0.103)
DAMPING h=Ce/C	0.0028	0.018	0.0087	—
MODE	1.000 (1.00)	1.039 (1.061)	-0.956 (-0.942)	— (-0.988)
2ND FLOOR	—	1.000 (1.00)	1.000 (1.00)	1.000 (1.00)
1ST FLOOR	—	0.085 (.003)	-0.065 (-.081)	— (3.3)
ROTATION ×10 <sup>-2</sup>	—	—	—	—

( )内は計算値

表-3-3 固有周期、減衰定数と固有モードの実験値計算値 ( )

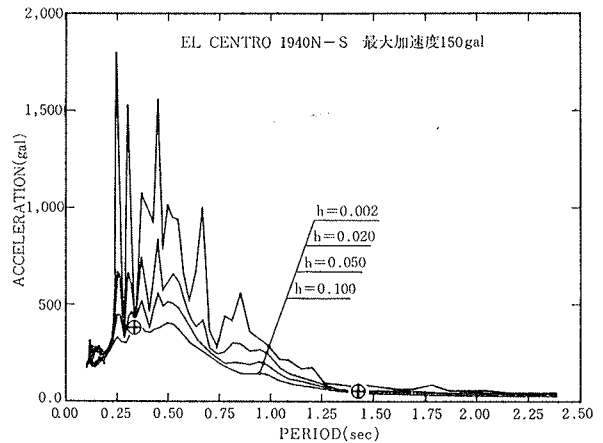


図-4-1 振動台上入力波加速度スペクトル

EARTHQUAKE RESPONSE	EL CENTRO 40 NS				
	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
フレーム X cm	0.39 (0.35)	0.61 (0.69)	1.11 (1.04)	—	—
フレーム ACC gal	137.0 (122.0)	200.0 (244.1)	352.3 (366.1)	—	—
積層ゴム単体 柱脚の歪 ×10 <sup>-6</sup>	192.	282.	556.	—	—
積層ゴム単体 層せん断力係数C	約0.1	約0.2	約0.4	—	—
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 2FL X2 cm	1.20 (1.67)	2.20 (2.40)	3.00 (3.56)	4.00 (4.09)	4.90 (5.20)
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 1FL X1 cm	1.10 (1.49)	2.10 (2.26)	2.90 (3.41)	3.80 (3.90)	4.70 (4.95)
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 X2-X1 cm	0.061 (0.092)	0.127 (0.144)	0.16 (0.173)	0.173 (0.200)	0.266 (0.230)
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 2FL ACC gal	26.0 (30.0)	46.1 (47.5)	62.0 (56.4)	74.0 (68.8)	105.0 (86.2)
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 柱脚の歪 ×10 <sup>-6</sup>	34.	58.	79.	94.	128.
フレーム+積層ゴム+PC鋼棒 層せん断力係数C	約0.03	約0.05	約0.06	約0.07	約0.11

( )内は計算値

表-4-1 地震波入力への応答最大値に関する実験結果と解析結果

入力地震波は本報では EL-CENTRO 1940 NS で代表し、その最大加速度は、約 100 gal 入力で PC 鋼棒が塑性域へ入るといふ予備実験結果をもとにして、50 gal から 50 gal きざみで 250 gal までとした。

4.3. 実験結果

実験時に振動台上で測定した加速度波形の 1 質点系加速度応答スペクトラムを図-4-1 に示す。この入力波特性のもとで最大加速度が 150 gal で測定したフレーム単体の代表的な応答波形を図-4-2 に、また、免震装置付フレーム試験体の層間変位等の応答波形を図-4-3 に示す。このフレーム単体および免震装置付の最大加速度は、図-4-1 に⊕印で示す様に、フレーム単体の応答倍率が約 2.3 倍であるのに対して、免震装置付フレームでは 0.4 倍であった。

以上の地震波入力実験の最大応答値の測定結果をまとめて表-4-1 に示す。

4.4. 解析方法

積層ゴムの設計許容変形は約 ± 80 mm である。実験の結果、変形量は 60 mm まで弾性で 60 mm を越えるところから若干の剛性低下が観察された。解析では実用範囲内として 60 mm 以下の線形範囲の定数を用いることとする。

PC 鋼棒は、変形量が約 20 mm を超えると塑性化する設計であり、実験の結果、ほぼ設計通りの特性が確認されている。解析にあたっては、(イ) 簡単な bilinear 型 P-δ ループを基本とし、(ロ) ループ面積を実験値に対応付けることを基本方針に検討した。各種の解析検討の結果、図-4-4 に示す様な bilinear 型を若干修正した trilinear 型ループ形状を得た。この変位が順次増加する過程をナンバー 0→1→10 で表わす。phase 1 (C<sub>1</sub>) は初期剛性、phase 2 (C<sub>2</sub>) は降伏後の剛性 (今回 C<sub>2</sub>=0)、phase 3 (C<sub>3</sub>) は減力時の剛性 (今回、C<sub>3</sub>=1.15×C<sub>1</sub>) であり、次のステップの phase 4 (C<sub>4</sub>) はせん断力 Q の符号が反転する時点で剛性が変位量 δ<sub>i</sub> (変数) に応じて決まり、座標 (-δ<sub>y</sub>, -Q<sub>y</sub>) あるいは座標 (δ<sub>y</sub>, Q<sub>y</sub>) を目指すループとしている。このループの形状と面積とは図-2-3 の静的実験結果にほぼ対応し、等価粘性減衰定数の相違が少ないことが確認された。

動的解析にあたっては、以上の積層ゴム、PC 鋼棒の特性と、個材の動的実験で明らかになった表-4-2 に示す定数を用いる。

免震装置付の試験体の振動モデルは、図-4-5 に示す。M<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> はそれぞれフレームの上部質量、柱の等価せん断ばね定数、下部質量、柱の減衰係数であり、K<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> は積層ゴムの水平ばね定数と減衰係数、また、K<sub>v</sub>, C<sub>v</sub> は積層ゴムの鉛直ばね定数と減衰係数である。

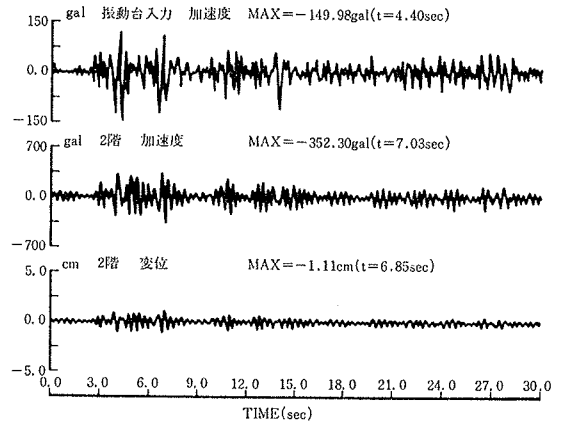


図-4-2 フレーム単体の EL-CENTRO 150 gal 入力振動台実験波形

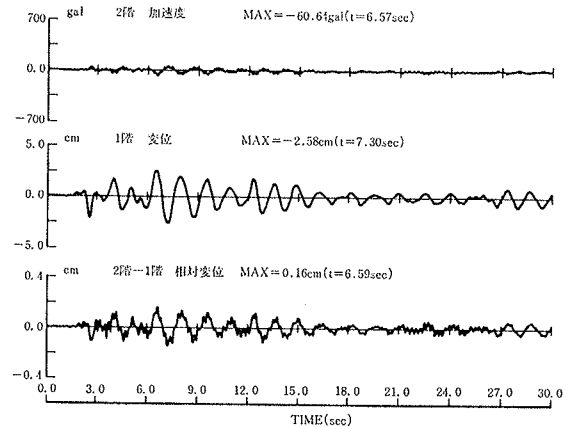


図-4-3 免震装置付フレームの EL-CENTRO 150 gal 入力振動台実験波形

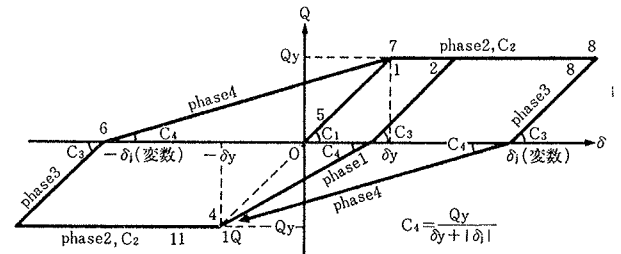


図-4-4 PC 鋼棒の Q-δ 解析用復元力特性

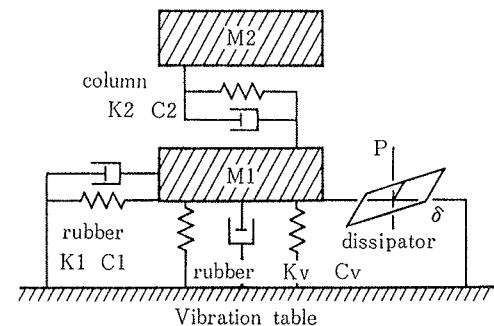


図-4-5 振動モデル

さらに PC 鋼棒の復元力特性 (Q-δ) が積層ゴムの水平自由度に並列している振動モデルである。振動モデルの運動方程式は次式である。



$$[M_{ij}] \{\ddot{X}_i\} + [C_{ij}] \{\dot{X}_i\} + [K_{ij}] \{X_i\} + Q(x_i) = -[M_{ij}] \ddot{y}_0$$

ここで、

$X_i$ :  $X_1, X_2, \theta$

$X_1$ : フレーム下部の水平変位

$X_2$ : フレーム上部の水平変位

$\theta$ : 積層ゴムの鉛直剛性によるロッキング回転角

$Q(x_i)$ :  $i=1$  に作用する PC 鋼棒の復元力特性 ( $Q-\delta$ )

$\ddot{y}_0$ : 振動台入力加速度

$$[M_{ij}] = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & I \end{bmatrix},$$

$$[K_{ij}] = [\alpha_{ij}]^{-1} = \begin{bmatrix} \beta_{1j} + H_1 H_j / K_r & H_1 / K_r \\ H_1 / K_r & H_2 / K_r \\ H_1 / K_r & H_2 / K_r & 1 / K_r \end{bmatrix}$$

$H_i$ : 重心高

$K_r$ : 積層ゴム鉛直剛性による回転ばね定数

$\beta_{1j}$ :  $k_1, k_2$  を考慮した柔性係数

$[C_{ij}]$  も  $[K_{ij}]$  と同様であるが、各材の減衰係数  $c_i$  は、

$$c_i = \alpha_i m_i + \beta_i k_i$$

ここで

$$\alpha_i = \frac{2(\omega_{i1} \cdot h_{i1} - \omega_{i2} \cdot h_{i2})}{(\omega_{i1}^2 - \omega_{i2}^2)}$$

$$\beta_i = \frac{2\omega_{i1} \cdot \omega_{i2} (\omega_{i1} \cdot h_{i1} - \omega_{i2} \cdot h_{i2})}{(\omega_{i1}^2 - \omega_{i2}^2)}$$

とし、今回はフレーム ( $i=2$ ) の減衰は 1 次  $h_{21} = 0.0028$ , 2 次  $h_{22} = 0.0167$  の粘性減衰タイプとし、積層ゴム ( $i=1$ ) の減衰は、振動数に依存せず  $h = 0.02$  という実験結果から 1 次  $h_{11} = 0.02$ , 2 次  $h_{12} = 0.02$  とする。

#### 4.5. 解析結果

振動モデルの固有値計算結果は表-3-3の( )内に示す。応答解析波形はフレーム単体の場合を図-4-6、免震装置付きの場合を図-4-7に示し、最大応答値は表-4-1に測定値と比較して( )内に示す。以上の結果、解析値はほぼ測定値に対応付き、動的解析は各装置単体の静的あるいは動的データに基づき実施できることが確認された。

#### 4.6. 免震効果について

フレーム単体と免震装置付フレームとの最大変位、最大加速度を比較して、図-4-8、図-4-9に示す。また、フレームの応答だけに着目して、2FL 加速度と層間変位を比較した結果を、図-4-10に示す。

以上の結果、免震装置の変形量は大きいものの、フレームの加速度、層間変位等は大幅に減少するという免震効果が確認された。

### 5. 結論

1章~4章を通じて以下の知見を得た。

2 FLOOR		4.555ton
W 2	K 2	1.65 ton/cm
	h 2	0.0028
1 FLOOR		4.935ton
W 1	K 1 (RUBBER)	2個×51.5kg/cm
	h 1 (RUBBER)	0.02
	K v (RUBBER)	2個×5.90×10 <sup>4</sup> kg/cm
	h v (RUBBER)	0.02
	PC 鋼棒 P-δ	K = 2本×47.8kg/cm
		δy = 2.0cm

表-4-2 計算諸定数

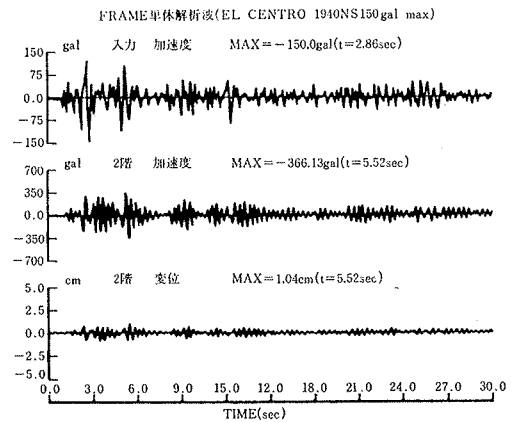


図-4-6 フレーム単体の EL-CENTRO 150 gal 入力解析波形

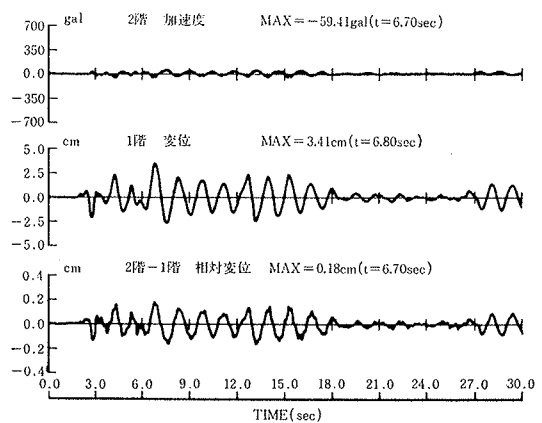


図-4-7 免震装置付フレームの EL-CENTRO 150 gal 入力解析波形

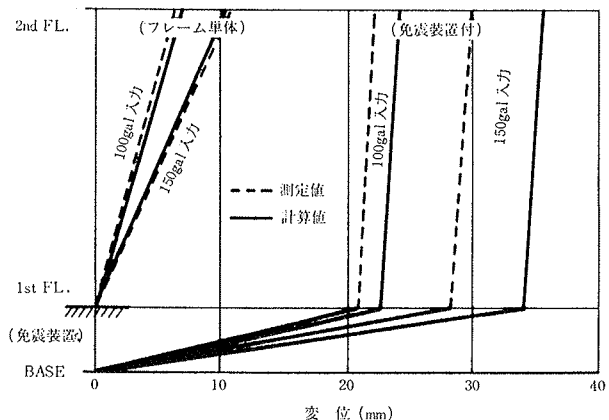


図-4-8 EL-CENTRO 地震波入力に対する最大応答変位

(1) 本報告では減衰機として(i)長い年月に渡り安定した特性を保持し, (ii)力学的性質が明解で, (iii)製作費が安価である, 等の条件を満たすものとして鋼棒を使用する方法を提案した。片持梁形式の PC さらに, この PC 鋼棒の静的加力実験を行なった結果, これらの条件を満たし実用に耐える減衰機であることが確認された。

(2) 積層ゴムは静荷重 5 ton, 周期 2 秒で設計された。このゴムの静的・動的な基本特性を調べる各種実験を行ない, 積層ゴムの基本性状が把握された。

(3) 積層ゴムと PC 鋼棒を組合わせて静的, 動的実験を行なった結果, 剛性, 耐力, 減衰定数等の諸特性はほぼ対応した。従って本免震装置は当初の設計目標値を満足し, フレームを含めた全体系の動的設計手法の確立が可能となった。

(4) 地震波入力振動台実験で免震装置付フレームと免震装置がないフレーム単体との応答値を比較検討した結果, 例えば EL-CENTRO 1940 NS 入力最大加速度 150 gal に対する応答倍率は, フレーム単体では約 2.3 倍であるのに対して免震装置付フレームでは 0.4 倍であり, 顕著な免震効果が確認された。

(5) 免震装置付フレームの地震応答解析に際し, 復元力特性としては, 積層ゴムの水平および鉛直バネを線型に, PC 鋼棒を trilinear 型にそれぞれ近似し, また減衰は鉄骨フレームと積層ゴムの各部減衰系とした。これらの解析モデルを用いた地震応答結果は実験値にほぼ対応した。

なお, 地震波入力振動台実験は, 他に数種の記録地震波でも実施し, 同様に免震効果が確認された。また, 同じ形状の試験体を用いて屋外で地震観測を実施し, 現在観測されつつある。これらの結果については後日に報告する予定である。

謝辞

本研究の遂行に際して, 東京大学技術研究所 藤田助教より貴重な御教示を戴きました。ここに記して深く感謝します。

参考文献

- 1) 藤田隆史, 他: 積層ゴムによる重量機器の免震支持, 生産研究, 第34巻, 9号, (1982)
- 2) 多田英之, 他: Aseismic Isolator に関する研究 (その4), 実大 Isolator の静的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和56.9)
- 3) J. M. Kelly, 他: A Practical Soft Story Earthquake

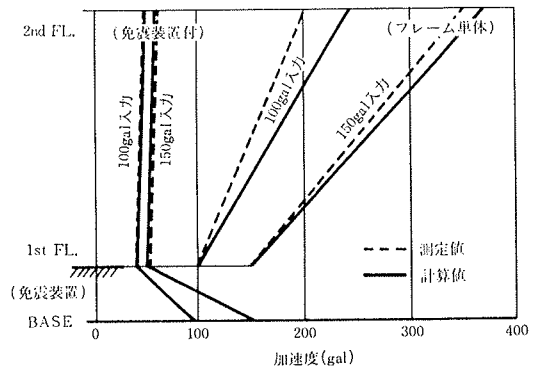


図-4-9 EL-CENTRO 地震波入力に対する最大応答加速度

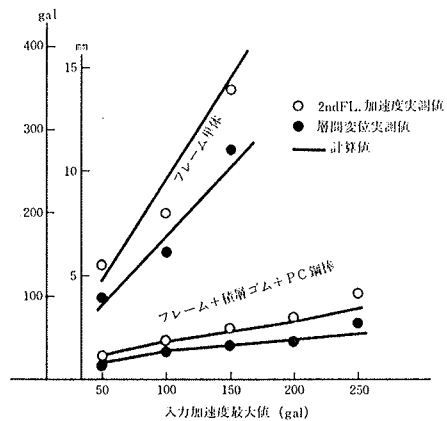


図-4-10 フレームに関する応答値(○ 2nd FL. 加速度, ● 層間変位)の比較 (EL-CENTRO 地震波)

Isolation System, UCB/EERC-77/27, (Nov. 1977)

- 4) R. I. Skinner, 他: A Practical System For Isolating Structures form Earthquake Attack, Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, (1975)
- 5) 池田昭男, 他: 免震機構に関する研究 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和56.9)
- 6) Haringx, J. A.: On Highly compressible helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings, I, Philips Res. Rep.(1948. 3), II, III, (1949. 4)
- 7) Gent, A. N.: Elastic Stability of Rubber Compression Springs, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 6, No. 4, (1964)
- 8) Bathe, K. J.: ADINA-A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, Report 82448-1, Acoustics and Vibration Lab., Mechanical Engineering Dept., M. I. T., (Sept. 1975)