

3.2.4 耐震壁浮き上がり挙動を再現する振動台実験に用いる動的試験デバイスの開発

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施計画
- (e) 平成15年度業務目的

(2) 平成15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) 研究概要
 - 2) 数値モデルを用いた構造物の動的解析
 - 3) 浮き上がり挙動を再現する動的試験デバイス「積層ゴム」に関する実験
- (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16年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

耐震壁浮き上がり挙動を再現する振動台実験に用いる動的試験デバイスの開発

(b) 担当者：

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学 防災研究所	教授	田中仁史	tanaka@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院 建築学専攻	助教授	河野 進	kono@archi.kyoto-u.ac.jp
	大学院生	坂下雅信	rc.sakashita@mail.archi.kyoto-u.ac.jp
	大学院生	渡邊有香子	rc.watanabe@archi.kyoto-u.ac.jp

(c) 業務の目的

鉄筋コンクリート造建物における連層耐震壁の浮き上がり挙動を再現する振動台実験において、地盤や杭基礎をモデル化した動的試験用デバイスの開発

(d) 3カ年の年次実施計画

1) 平成 14 年度（実施業務）：

鉄筋コンクリート造中高層アパートの張間方向耐震壁の下層二層分、基礎スラブ、基礎梁、基礎杭からなる現実に近いモデルを用いた静的水平加力実験を行った。これにより、杭頭から基礎梁への応力伝達機構、基礎梁から基礎スラブへの応力分散機構、壁脚のせん断力伝達メカニズムの推移などを明確にすることを試みた。それらの成果をもとに建物の地震応答と同等な応答を振動台上で再現するための動的試験デバイスに要求される基本性能を検討した。

2) 平成 15 年度（実施業務）：

杭基礎で支持された鉄筋コンクリート造建物のうち耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。本装置の主な構成要素は、杭基礎バネを模擬する積層ゴム部と、CLB(Cross Linear Bearing)部である。

3) 平成 16 年度（実施計画）：

平成 15 年度において開発した動的デバイスの力学的特性は、地盤・杭・基礎梁・上部構造をモデル化した有限要素解析により求めたが、同モデルの改善を行う。それにあわせて、動的デバイスの性能改善を図る。

(e) 平成 15 年度実施業務

杭基礎で支持された鉄筋コンクリート造建物のうち耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。本装置の主な構成要素は、杭基礎バネを模擬する積層ゴム部と、その鉛直剛性を上部構造の水平変位に関係なくできるだけ一定に維持するための CLB(Cross Linear Bearing)部である。なお、上記デバイスに求められる性能

は、地盤・杭・基礎梁・上部構造をモデル化した有限要素解析により求めた。また、サーボアクチュエーターを用いた一方向繰り返し載荷実験を通して、デバイスとして用いる積層ゴムの動的荷重下における構造特性を確認した。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

杭基礎で支持された建物における耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。動的試験デバイスの開発は以下に示す 4 つの手順に従った。想定建築物の地盤・基礎・上部構造をモデル化し、有限要素解析により上部構造の応答を求めた。解析の結果を正解と仮定し、その応答結果を模擬できるようなスウェイ-ロッキングバネ要素モデルをつくった。即ち、両者の応答解析結果が同等となるようにスウェイ-ロッキングバネ定数を同定した。なお、スウェイバネは基礎梁両外端に、ロッキングバネは耐震壁側柱直下に配置した。動的試験デバイスとして、求めたバネ定数を再現できるように厚みを変化させたゴムシムを CLB (Cross Linear Bearing: 十字型直動転がり支承) に挿入したデバイスを 4 体製作した。サーボアクチュエーターによる動的載荷試験を実施し、動的デバイスとしての性能を評価した。

(b) 業務の成果

1) 研究概要

現在の中高層アパートは、場所打ちコンクリートおよびプレキャストコンクリートを用いた鉄筋コンクリート(以下 RC)造構造となる場合が最も多く、構造形式は桁行き方向を純ラーメン・梁間方向を連層耐震壁・杭基礎構造とするのが一般的である。その個々の構造要素については地震荷重に対する耐力・変形性能評価の十分な研究がなされており、設計手法もある程度確立されているといえる。しかしながら梁間方向連層耐震壁構造の地震時における各構成要素の相互連成挙動については未だ十分な研究がなされておらず、設計手法も合理的でない点が残されている。たとえば基礎構造は、上部構造の必要保有水平耐力に見合う水平耐力を確保するものとして設計するが、その際、建物と地盤の動的相互作用効果は考慮されず、下部構造に入力する水平力の妥当性が不明である。

このような不合理をなくした設計方法を確立し、また耐震安全性を適切に評価するためには、地盤から基礎構造へ、基礎構造から上部構造へと伝えられる地震力を具体的に明らかにし、構造物の地震時の挙動を正しく把握する事が極めて重要である。

しかしながら、現在行われている振動実験においては、基本的に振動台に基礎梁および上部構造物を直接設置して振動を与えており、基礎と上部構造の動的相互作用については全く考慮されていないものがほとんどである。より実際に近い条件で実験を行うためには、地震時の基礎杭から基礎梁を通した耐震壁を含む上部構造への地震入力を模擬できる装置の工夫が必要となる。

本研究では、杭基礎で支持された建物のうち耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。本装置の主な構成要素は、杭基礎バネを模擬する積層ゴム部と、その鉛直剛性を上部構造の水平変位に関係なくできるだけ一定に維持するため

の CLB(Cross Linear Bearing)部である。

解析的研究では、耐震壁の浮き上がり挙動の再現するために必要なデバイスに求められる性能を地盤・杭・基礎梁・上部構造をモデル化した有限要素解析により求めた。また、サーボアクチュエーターを用いた一方向繰り返し載荷実験を通して、デバイスとして用いる積層ゴムの動的荷重下における構造特性を確認した。

動的試験デバイスの開発手順は、以下のとおり。

建築物の地盤・基礎・上部構造をモデル化し、有限要素解析により上部構造の応答を求める。

上記の解析結果を正解と仮定し、その応答結果を模擬できるようなスウェイ-ロッキングバネ要素モデルをつくる。即ち、両者の応答解析結果が同等となるようにスウェイ-ロッキングバネ定数を同定する。なお、スウェイバネは基礎梁両外端に、ロッキングバネは耐震壁側柱直下に配置するものとする。

動的試験デバイスとして、求めたバネ定数をもとに、それを再現できるよう厚みをいろいろ変化させたゴムシムを CLB (Cross Linear Bearing : 十字型直動転がり支承) に挿入したデバイスを4体製作する。

サーボアクチュエーターによる動的載荷試験を実施し、動的デバイスとしての性能を評価する。

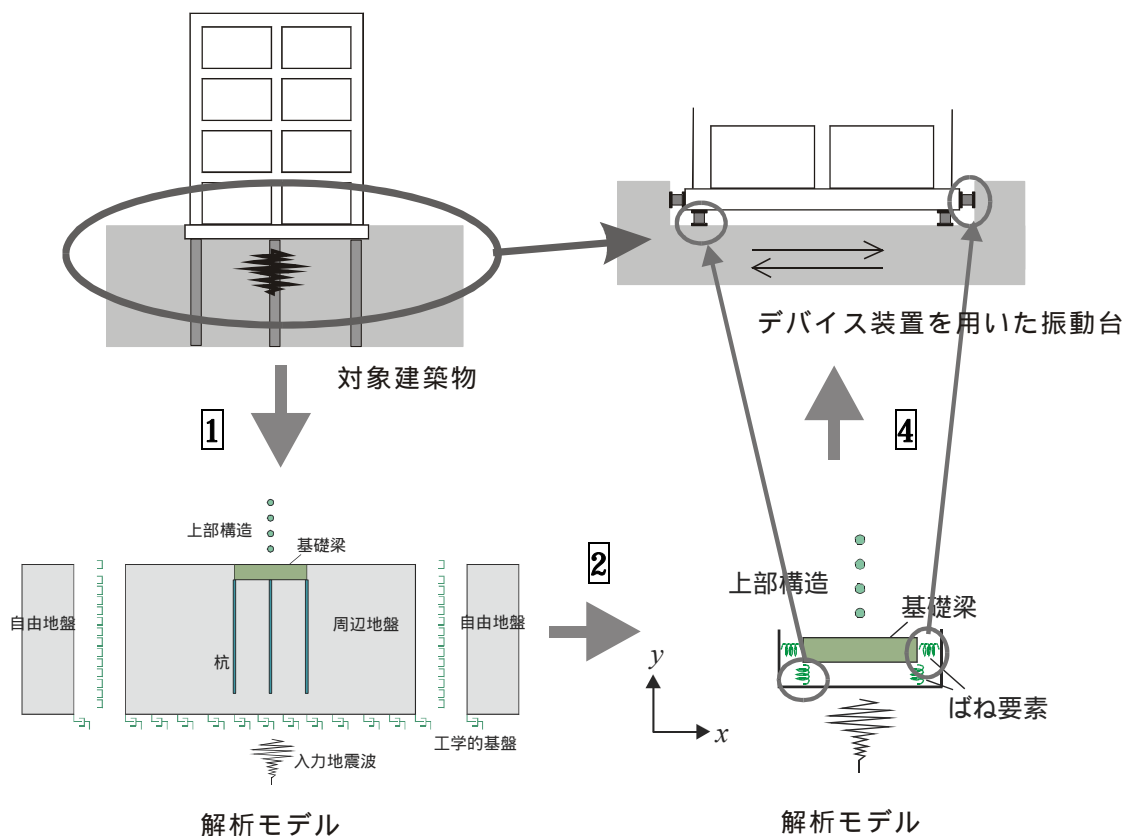


図 1 デバイス開発の流れ

2) 数値モデルを用いた構造物の動的解析概要

a) 使用した解析モデル

解析は、下記の2つの解析を通して、デバイスに求められる構造特性を決めるものとする。

地盤・杭・基礎梁・上部構造をモデル化し、有限要素法により上部構造の応答を求める。(図2)

デバイス・基礎梁・上部構造を振動台に設置した状態のモデルを、有限要素により上部構造の応答を求める。(図10)

b) 解析 で用いたモデルの説明

i) 解析モデル の概要

解析モデル は、村松らによる研究¹⁾に用いられたモデルを参考にした2次元モデルであり、図2に示す上部構造・基礎梁・杭・地盤から成る。

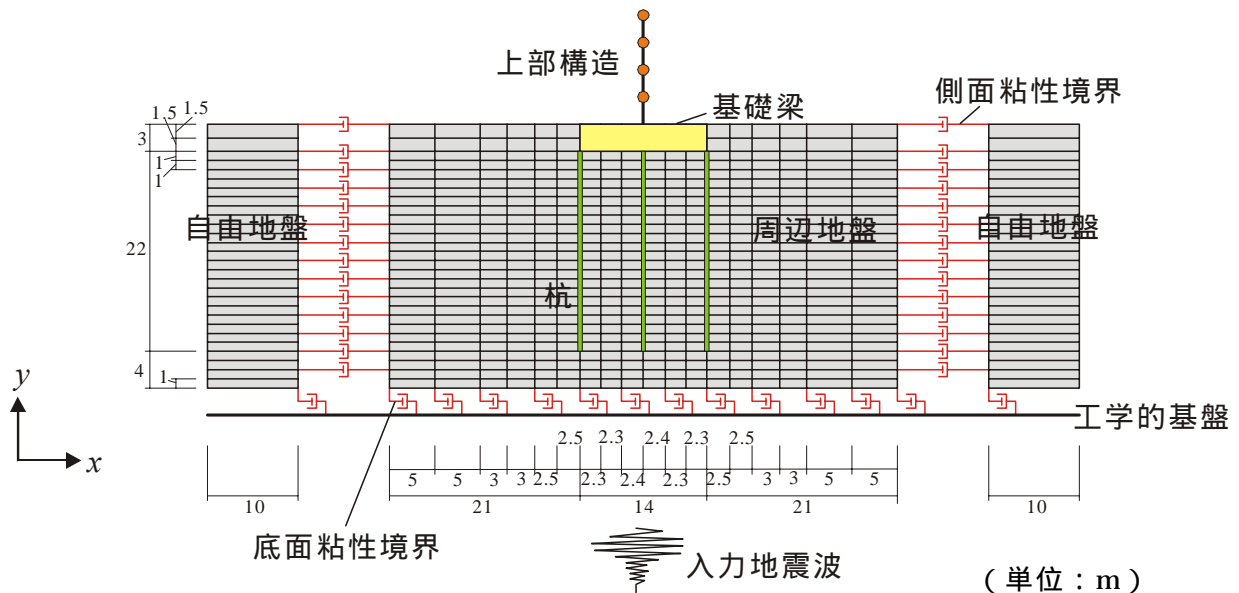


図2 解析モデル

解析モデル 概要：上部構造 質点系（質点および梁要素）

- 杭 梁要素
- 地盤 4節点アイソパラメトリック要素
- 自由地盤と周辺地盤の間、および両地盤と工学的基盤の間 粘性境界
- 自由度は x 方向のみ
- 動的相互作用による基礎梁のロッキング 上部構造 1階柱脚 - 基礎梁間に回転ばねを挿入することにより考慮
- 上部構造の減衰は $h = 0.03$ ，地盤については履歴減衰のみ

解析 では、動的相互作用効果を考慮した上部構造の応答を得ることを目的とした。

ii) ~ vi) で解析モデル の各要素のモデル化について詳しく述べる。

ii) 上部構造のモデル化

上部構造は2スパン4層RC構造物を想定し、梁要素と質点から成る質点系の曲げせん断型モデルとする。各諸元を表1に示す。柱および梁の断面詳細を表2および表3に示す。質点系にモデル化した各階の力学的特性を、表4に示す。梁要素の復元力特性は、曲げに関しては弾性、せん断に関しては非弾性とする。曲げによる変形は、曲げ剛性 EI を一定として各節点におけるモーメントから x 方向変位を算出する。せん断変形の復元力特性は、図3に示すバイリニア型を取るものとする。剛性変化点の変位およびその変化量は、上記の断面に基づく弾塑性増分解析により定めた。各階の質量は質点に代表させ、梁要素は質量を持たないものとする。また、梁要素は $h = 0.03$ の剛性比例型減衰を持つ。

表1 上部構造諸元

階高 [mm]	桁行 [mm]	質量 [kg]		コンクリート強度 F_c [MPa]
		2~4階	R階	
3000	7000	12000	13200	30

表2 梁断面詳細

梁断面					
階	B [mm]	D [mm]	上端筋	下端筋	材種
R	400	700	4-D25	4-D25	SD345
4	400	700	4 + 2-D25	4 + 2-D25	SD345
3	400	700	4 + 2-D29	4 + 2-D29	SD345
2	400	700	4 + 2-D29	4 + 2-D29	SD345

表3 柱断面詳細

階	B [mm]	D [mm]	主筋	材種
4	600	600	16-D29	SD345
3	600	600	16-D29	SD345
2	600	600	16-D29	SD345
1	600	600	16-D29	SD345

表4 上部構造柱の力学的特性

階	弾性係数 E [MPa]	せん断 弾性係数 G [MPa]	ポアソン比 ν	断面積 A [mm ²]	断面2次 モーメント I [mm ⁴]
4	30600	12750	0.2	117000	2.957×10^{15}
3	30600	12750	0.2	43900	2.664×10^{15}
2	30600	12750	0.2	38600	2.338×10^{15}
1	30600	12750	0.2	37600	1.749×10^{15}

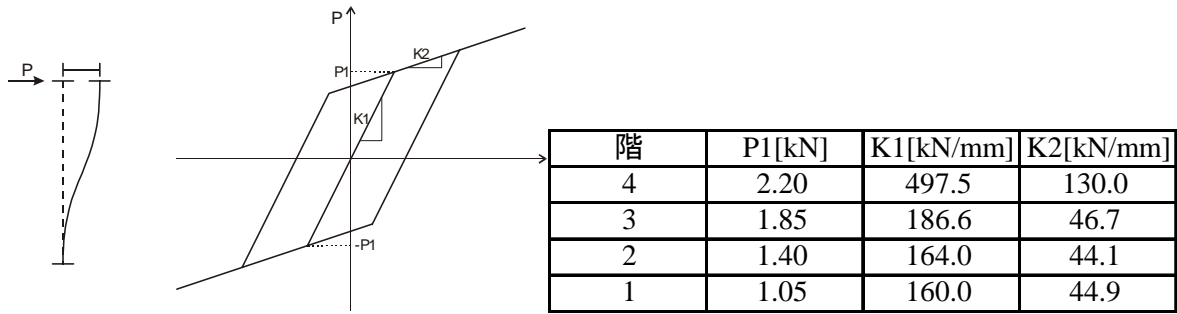


図 3 バイリニア型せん断復元力特性

iii) 基礎梁のモデル化

基礎梁は、長さ（ x 方向）14m×梁せい（ y 方向）3m×梁幅（ z 方向）0.8mの完全な剛体とする。上部構造1階柱脚は、回転ばねにより外部の不動点に接合する。ばね剛性は、動的な効果を考慮して、杭の鉛直剛性×外側杭のスパン長さを3倍したものをを用いた。なお、杭の鉛直剛性は「道路橋示方書・同解説 下部構造編」²⁾より式(1)で求めた。

$${}_{\rho}k_V = a \cdot (A_p \cdot E_p / l) \quad \text{式(1)}$$

ただし、

$$a = 0.022 (l / B_p) \quad 0.05 \quad (\text{場所打ちコンクリート杭})$$

ここに、 ${}_{\rho}k_V$: 杭の鉛直剛性, A_p : 杭の断面積, E_p : 杭の弾性係数, l : 杭の長さ, B_p : 杭の直径である。杭諸元を表5に示す。よって回転ばねの剛性 K は以下となり、これにより動的相互作用による基礎梁のロッキングの影響が上部構造の応答に反映される。

$$K = 3.840 \times 10^8 \text{ [kN/mm]}$$

iv) 杭のモデル化

杭は、図2に示すように基礎梁下部の両端および中央から y 方向深さ25mまでとする。各諸元を表5に示す。外側杭の剛性が左右で異なるのは、左側を引張の作用する場合、右側を圧縮の作用する場合と想定しているためである。各杭は、地盤要素の深さと同じ長さ（各1m）の22個の梁要素に置換する。曲げおよびせん断の復元力特性は、いずれもバイリニア型の非弾性とする。曲げ変形は図4に、せん断変形は図3に示す。各復元力特性および質量密度の値を表6に示す。杭頭と基礎梁は回転ばねで接続する。回転ばねの復元力特性は図5に示す非線形弾性とした。

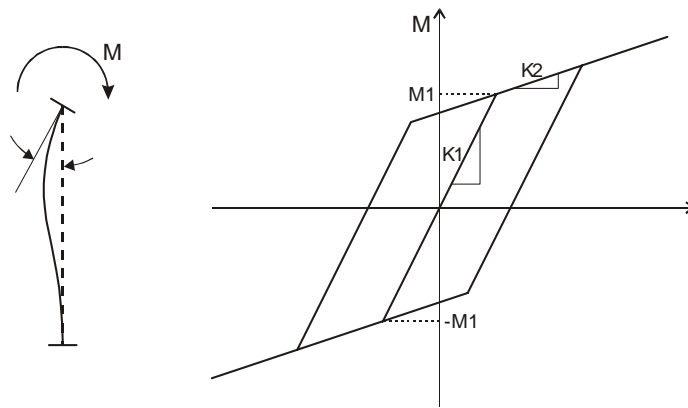


図 4 バイリニア型曲げ復元力特性

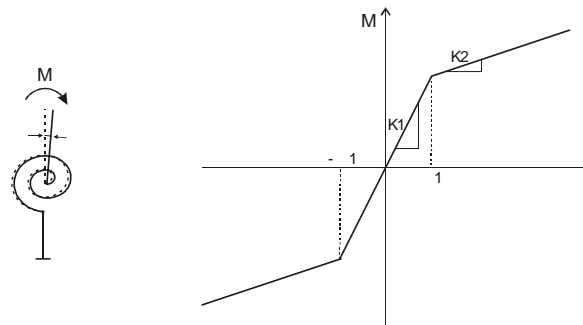


図 5 杭頭回転ばね復元力特性

表 5 杭諸元

	径 ϕ [mm]	弾性係数 E [MPa]	せん断 弾性係数 G [MPa]	断面積 A [mm ²]	せん断 断面積 A_s [mm ²]	断面2次 モーメント I [mm ⁴]
左	800	16900	10800	5.027×10^3	4.524×10^3	2.011×10^{10}
中央	900	33000	10800	6.362×10^3	5.726×10^3	3.221×10^{10}
右	800	37000	10800	5.027×10^3	4.524×10^3	2.011×10^{10}

表 6 杭の力学的特性

杭位置	θ_1 [rad]	K_1 [kN·m]	K_2 [kN·m]
左	3.321×10^{-4}	7.119×10^4	1.002×10^3
中央	4.518×10^{-4}	1.724×10^5	2.589×10^3
右	6.091×10^{-4}	1.615×10^5	6.004×10^3

v) 地盤のモデル化

地盤は第2種地盤を想定し、 y 方向深さは29m、4節点平面応力要素でモデル化する。図2に示すように、周辺地盤は厚さ(z 方向)7mとし、 y 方向には基礎梁下部分・基礎梁両側各21mの範囲をそれぞれ6分割する。鉛直方向には深さ0~3mまでを1.5m深さに2分割、3~29mまでは深さ1mごとに26分割する。自由地盤の厚さ(z 方向)は周辺地盤の1000倍、すなわち7000mとする。工学的基盤は剛とする。自由地盤および周辺地盤の復元力特性は、図6に示すRamberg-Osgood型とし、具体的な数式を式(1)~式(3)に示す。各係数は、図7に示す告示第1457号のせん断ひずみ-剛性低減係数、減衰係数関係に基づき、砂質土は $\gamma_y = 0.00043$, $\alpha = 2.9697$, $\beta = 1.5703$, 粘性土は $\gamma_y = 0.00105$, $\alpha = 2.6040$, $\beta = 1.3807$ とする。表7に地盤の力学的特性を示す。

$$\tau_y = G_0 \gamma_y \tag{1}$$

Initial Loading Curve (A B)

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^\beta \right)$$

$$G_t = G_0 / \left(1 + \alpha (\beta + 1) \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^\beta \right)$$

式(2)

Unloading Curve (B C) Reloading Curve (C A)

$$\gamma - \gamma_R = \frac{1}{G_0} (\tau - \tau_R) \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau - \tau_R}{2\tau_y} \right|^\beta \right)$$

$$G_t = G_0 / \left(1 + \alpha (\beta + 1) \left| \frac{\tau - \tau_R}{2\tau_y} \right|^\beta \right)$$

式(3)

ここに、

γ_y : 降伏ひずみ

G_0 : 初期剛性

α, β : γ_y 以上のひずみに対して、非線形の度合いを規定する定数である。

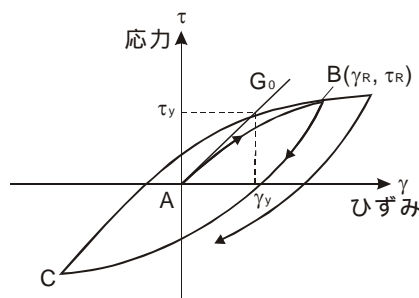
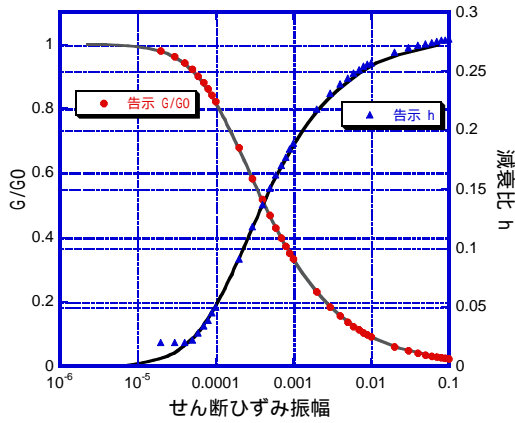
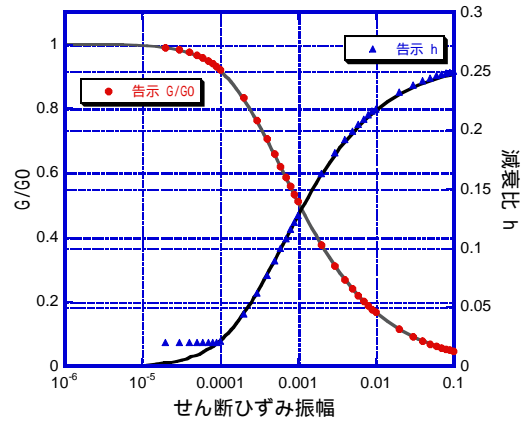


図6 Ramberg-Osgood型の復元力特性



(a) 砂質土



(b) 粘性土

図 7 告示せん断ひずみ - 剛性低減係数, 減衰係数関係

表 7 地盤の力学的特性

深度 [GL- m]	土質	せん断波 速度 V_s [m/sec]	質量密度 ρ [kg/m ³]	初期せん断 弾性係数 G_0 [MPa]	ポアソン 比 ν	Ramberg-Osgoodモデル		
						γ_y	α	β
0 ~ 1.5	細砂	110	183.7	21.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
1.5 ~ 3	細砂	110	183.7	21.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
3 ~ 4	細砂	10	183.7	21.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
4 ~ 5	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
5 ~ 6	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
6 ~ 7	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
7 ~ 8	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
8 ~ 9	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
9 ~ 10	粘土	150	163.3	36.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
10 ~ 11	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
11 ~ 12	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
12 ~ 13	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
13 ~ 14	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
14 ~ 15	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
15 ~ 16	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
16 ~ 17	細砂	210	183.7	79.4	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
17 ~ 18	粘土	150	173.5	75.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
18 ~ 19	粘土	150	173.5	75.0	0.465	0.00105	2.6040	1.3807
19 ~ 20	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
20 ~ 21	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
21 ~ 22	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
22 ~ 23	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
23 ~ 24	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
24 ~ 25	細砂	260	183.7	121.7	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
25 ~ 26	砂礫	390	183.7	273.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
26 ~ 27	砂礫	390	183.7	273.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
27 ~ 28	砂礫	390	183.7	273.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703
28 ~ 29	砂礫	390	183.7	273.8	0.465	0.00043	2.9697	1.5703

vi) 粘性境界のモデル化

周辺地盤と自由地盤の間および両地盤と工学的基盤の間には、粘性境界を設ける。粘性係数は、周辺 - 自由地盤間では図 8 における τ_{xy} および σ_{xx} を式 (4) のように定める。

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= a\rho V_s (\dot{U}_y^2 - \dot{U}_y^1) \\ \sigma_{xx} &= b\rho V_p (\dot{U}_x^2 - \dot{U}_x^1)\end{aligned}$$

式 (4)

ただし、

$$\begin{aligned}V_s &= \sqrt{G/\rho} \\ V_p &= V_s \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}\end{aligned}$$

である。また、実際の粘性定数は第 1 接点側に接続される平面ひずみ要素から計算される負担面積を乗じたものとする。同様に地盤底面では、図 9 における τ_{xy} および σ_{xx} を式 (5) のように定める。

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \rho V_s \dot{U}_x \\ \sigma_{xx} &= \rho V_p \dot{U}_y\end{aligned}$$

式 (5)

ただし、

$$\begin{aligned}V_s &= \sqrt{G/\rho} \\ V_p &= V_s \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}\end{aligned}$$

である。

また、実際の粘性定数は接続される平面応力要素で決まる負担面積（基盤に接する辺の負担長さ × 要素厚）を乗じたものとする。

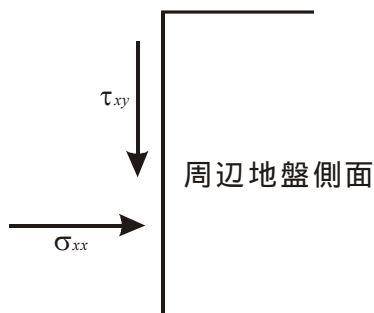


図 8 側面粘性要素

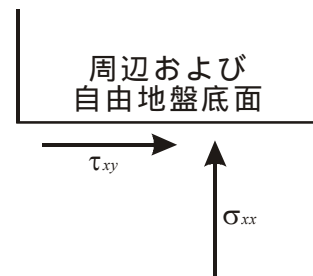


図 9 底面粘性要素

c) 解析 で用いたモデルの説明

i) 解析モデル の概要

ここでは図 10 に示す上部構造・基礎梁・ばね要素から成るモデルについて説明する。このモデルは解析モデル から上部構造および基礎梁のみを取り出し、杭および地盤の代わりにばね要素を接続したものである。

解析モデル 概要：上部構造 質点系（質点および梁要素）

- 杭 梁要素
- 鉛直および水平ばね ばね要素
- 自由度は x および y 方向
- 減衰については考慮しない

解析 では、解析 の結果と同様の応答が得られるような鉛直および水平ばね要素の剛性を同定することを目的とする。以下では解析モデル の各要素について詳しく述べる。

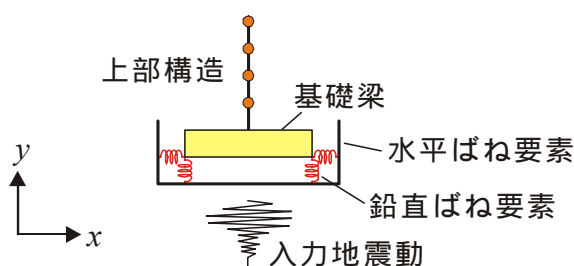


図 10 解析モデル

ii) 上部構造および基礎梁のモデル化

上部構造および基礎梁には解析モデル と同じ要素・特性を用いる。ただし、上部構造 1 階柱脚と基礎梁上面の接合は回転ばねではなく剛とする。

iii) 耐震壁の浮き上がり挙動を再現するためのデバイスとして用いたばね要素

図 10 に示すように、基礎梁と周囲の境界間のデバイスには鉛直・水平方向各 2 本ずつ、計 4 本のばね要素を用いる。鉛直ばねは基礎梁下部の両端に、水平ばねは基礎梁側面下端に接合する。ばね要素は弾性であり、軸方向の変形に対してのみ作用する。直交方向の変形はばねの力に影響しない。水平ばね端部の基礎梁に接合しない側は、2 点とも同じ x 変位を持つものとし、ここに水平方向の地震動を入力する。鉛直ばね端部の基礎梁に接合しない側は、 x 方向にのみ自由度を持つものとする。

iv) AIJ「入門・建物と地盤との動的相互作用」で提案される水平・鉛直バネの剛性について

簡易な置換法により、求められるバネ剛性の範囲（1 種～3 種地盤でモデル を想定した場合）について述べる。地盤のスウェイばね剛性 K_s 、ロッキングばね剛性 K_r は、地盤のみの場合の剛性と、杭の効果による剛性を加算し式 (6)、式 (7) のように求める。

$$K_S = (3/4) \cdot \{ \rho K_S \cdot (1 + H_0 / r_S) + \rho K_S \}$$

式 (6)

$$K_R = \{ \rho K_R \cdot (1 + 2.5 H_0 / r_R) + \rho K_R \}$$

式 (7)

ここに、 H_0 ：埋込み深さ， $r_S = (A / I)^{1/2}$ ：スウェイに対する矩形基礎の等価半径，
 A ：建築物の底面積， $r_R = (4I / I)^{1/4}$ ：ロッキングに対する矩形基礎の等価半径，

I ：建築物底面の断面 2 次モーメント， ρK_S ， ρK_R ：地盤のみのスウェイ，
 ロッキングばね定数，

ρK_S ， ρK_R ：杭の効果によるスウェイ，ロッキングばね定数

地盤のみの場合のばね定数 ρK_S ， ρK_R は、円形基礎に対する静的ばね定数を用いる。ロッキングばねに関しては動的効果を表す補正項を加える。

$$\rho K_S = \{ 8 / (2 \dots) \} \cdot (\dots / g) \cdot V_{eq}^2 \cdot r_S$$

式 (8)

$$\rho K_R = [8 / \{ 3 (1 \dots) \}] \cdot (\dots / g) \cdot V_{eq}^2 \cdot r_R^3 \cdot (1 - 0.05 a_R)$$

式 (9)

ここに、 ν ：ポアソン比， γ ：単位体積重量， g ：重力加速度， V_{eq} ：等価せん断波速度，
 $a_R = \dots \cdot r_R / V_{eq}$ ：ロッキングに関する無次元固有円振動数， ω ：連成系の固有円振動数

単杭の水平剛性 ρK_S は Chang の式を用いる。

$$\rho K_S = E_p \cdot I_p \{ E_S / (E_p \cdot I_p) \}^{3/4}$$

式 (10)

ここに、 E_S ：地盤の弾性係数， E_p ：杭の弾性係数， I_p ：杭の断面 2 次モーメント

一つのフーチングの下に杭が n 本ある場合は群杭効果を考慮し、単杭の水平剛性を \sqrt{n} 倍して用いる。各々の杭の水平剛性を累加して杭全体の水平剛性 ρK_S とする。単杭の鉛直剛性 ρK_V は「道路橋示方書・同解説」²⁾ の次式により計算する。

$$\rho K_V = a \cdot (A_p \cdot E_p / l)$$

式 (11)

ただし、

$$a = 0.022 (l / B_p) - 0.05 \quad (\text{場所打ちコンクリート杭})$$

ここに、 ρK_V ：杭の鉛直剛性， A_p ：杭の断面積， E_p ：杭の弾性係数， l ：杭の長さ， B_p ：杭の直径

個々の杭の鉛直剛性を建築物平面の重心線回りの回転剛性に変換し、すべての杭について累加して杭全体の回転剛性 ρK_R とする。

上に示した方法により求めた K_S 、 K_R を、モデル の水平・鉛直ばねにそれぞれ置換する。

水平ばね： $K_S / 2$ [kN/mm]

鉛直ばね： $K_R / 700^2$ [kN/mm]

解析モデル のばね剛性を妥当な範囲で変化させて比較するために、地盤の等価せん断波速度 V_{eq} を 100 m/sec , 300 m/sec に変化させ、その他の条件は解析モデル で用いた地盤および杭の諸元から求めて、2組のばね剛性を算出した。

仮定および計算に用いた諸数値は以下である。

1) 仮定

-) 基礎は杭基礎とし、支持層は深さ 25 m のせん断波速度 $V_s = 390$ m/s とする。
-) 地盤の単位堆積重量及び地盤の弾性係数は、層数の重みをつけて平均した値とする。
-) K_R 算定の際、 $(1 - 0.05a_R)^2$ 1 とする。

2) 地盤、基礎、杭の諸数値

地盤のポアソン比 $\nu = 0.465$

地盤の単位体積重量 $\gamma = (1.8 \times 4 + 1.6 \times 6 + 1.8 \times 7 + 1.7 \times 2 + 1.8 \times 6) / 25 = 1.74$ [tf/m³]

地盤の弾性係数

$$Es = (474 \times 4 + 1265 \times 6 + 2530 \times 7 + 1423 \times 2 + 4111 \times 6) / 25 = 2188 \text{ [tf/m}^2\text{]}$$

地盤の等価せん断波速度 $V_{eq} = 100$ または 300 [m/sec]

基礎梁埋め込み深さ $H_0 = 3$ [m]

スウェイに対する基礎の等価半径 $r_s = \sqrt{14 \times 0.8 / \pi} = 1.89$ [m]

ロッキングに対する基礎の等価半径 $r_R = \{4 \times (14^3 \times 0.8 / 12) \pi\}^{1/4} = 3.91$ [m]

杭の弾性係数 (左) $E_{Pl} = 1\,726\,000$ [tf/m²]

(中央) $E_{Pm} = 3\,366\,000$ [tf/m²]

(右) $E_{Pr} = 3\,773\,000$ [tf/m²]

杭の直径 (左) $B_{Pl} = 0.8$ [m]

(中央) $B_{Pm} = 0.9$ [m]

(右) $B_{Pr} = 0.8$ [m]

杭の断面積 (左) $A_{Pl} = 0.503$ [m²]

(中央) $A_{Pm} = 0.636$ [m²]

(右) $A_{Pr} = 0.503$ [m²]

杭断面 2 次モーメント (左) $I_{Pl} = 0.00204$ [m⁴]

(中央) $I_{Pm} = 0.00326$ [m⁴]

(右) $I_{Pr} = 0.00204$ [m⁴]

杭の長さ $l = 23$ [m]

以上より求めた $V_{eq} = 100, 300$ 時の水平・鉛直ばね剛性を表 8 に示す。

表 8 水平・鉛直ばね剛性

	水平ばね剛性 [kN/mm]	鉛直ばね剛性 [kN/mm]
$V_{eq} = 100$ [m/sec]	222	8610
$V_{eq} = 300$ [m/sec]	1560	18400

d) 動的解析で用いた入力地震動

今回は大きな地震波の代替として、NTTビル地下3階のNS方向観測記録（兵庫県南部地震，1995）を解析モデルの工学的基盤に作用させた。図11に加速度履歴を示す。これにより、上部構造4階質点と1階柱脚の相対水平変位応答を得る。

次に、解析で上部構造の応答と同時に得られた自由地盤上面における水平方向の加速度履歴を、解析モデルの境界部に入力する。これにより上部構造4階質点と1階柱脚の相対水平変位応答を得ることができるが、これが解析モデルの応答と近くなるようばね定数を同定する。

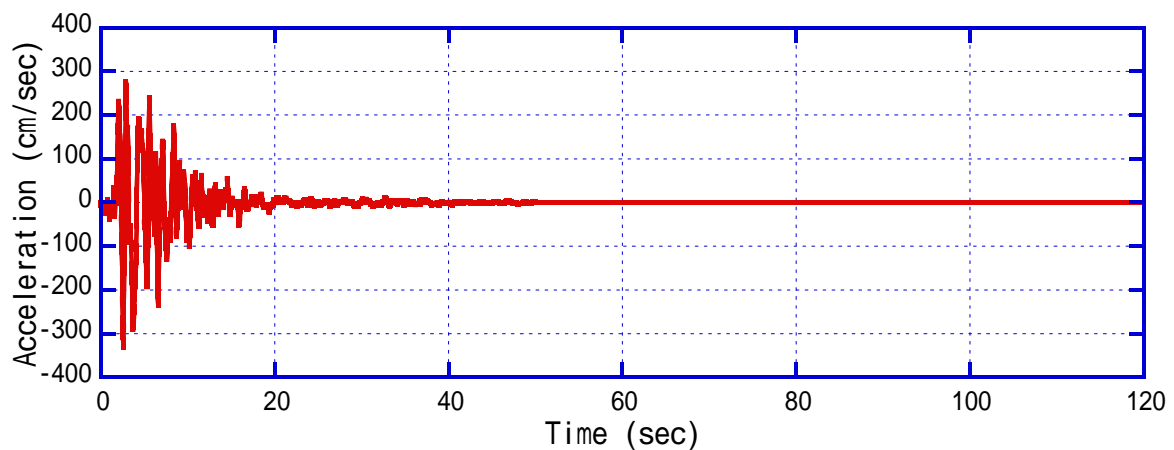


図 11 NTT B3 NS 加速度履歴

e) 解析結果

i) 解析結果

解析モデルにおける上部構造変位応答（4階質点位置）、自由地盤上面加速度応答、基礎梁下面加速度応答を図12～図15に示す。

ii) 解析結果

解析では、ばね剛性をiv)で示した2種類に設定し、解析を行った。 $V_{eq} = 100$ [m/sec]の解析をA、 $V_{eq} = 100$ [m/sec]の解析をBとする。以下に解析結果を図16～図19を示す。

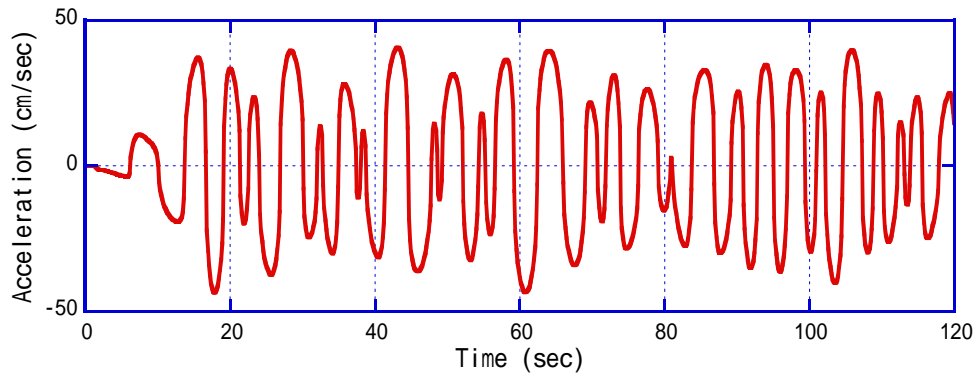


図 12 自由地盤上面加速度応答履歴

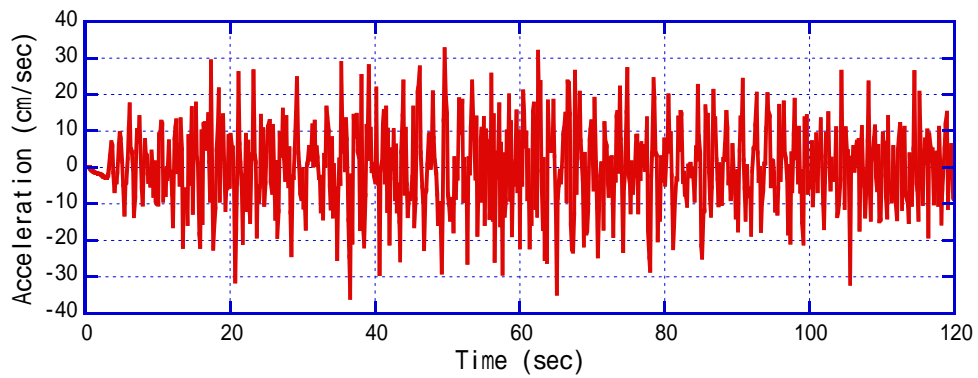


図 13 基礎梁下面における加速度応答履歴

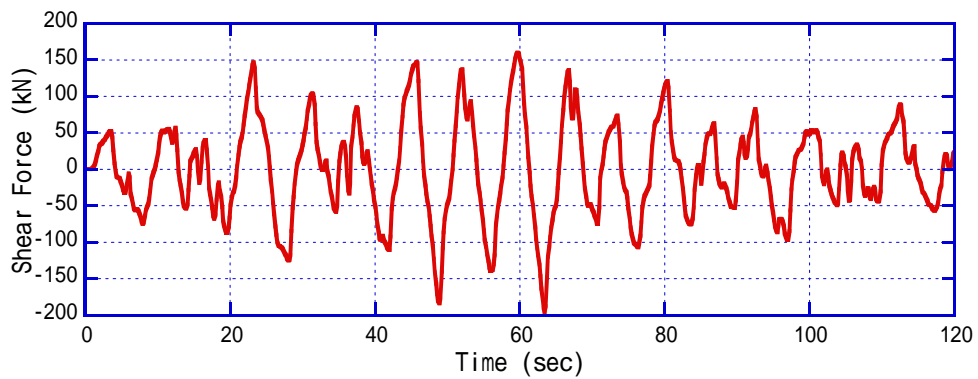


図 14 1階柱脚におけるせん断力履歴

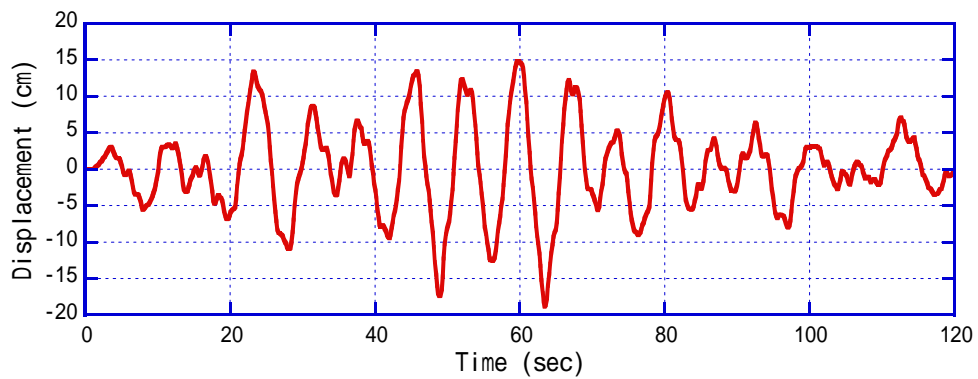


図 15 4階床位置における変位応答履歴

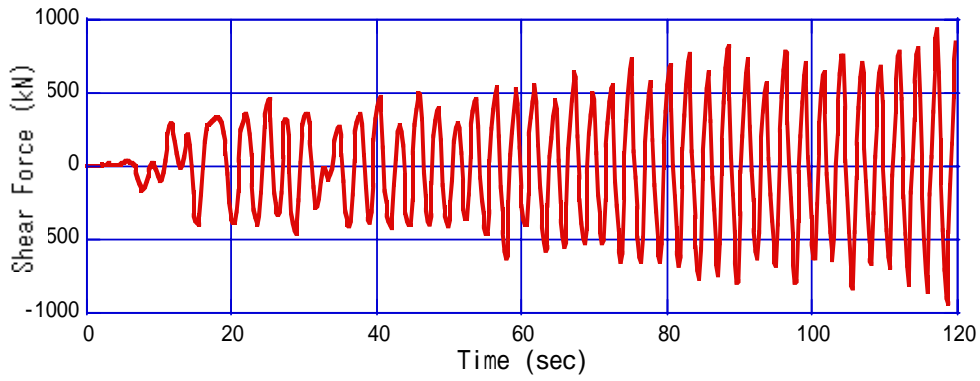


図 16 1階柱脚におけるせん断力履歴 解析 A

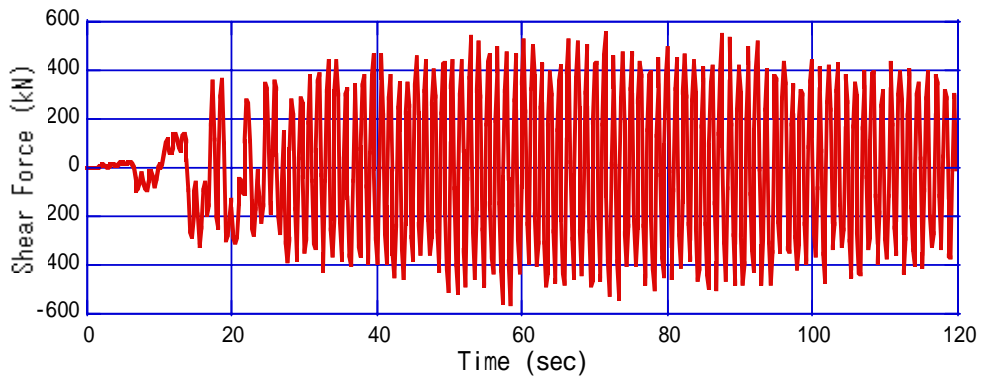


図 17 1階柱脚におけるせん断力履歴 解析 B

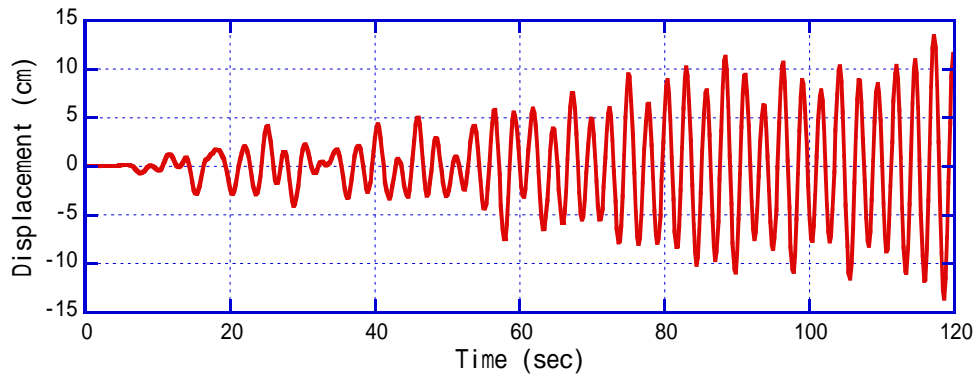


図 18 4階床位置における変位応答履歴 A

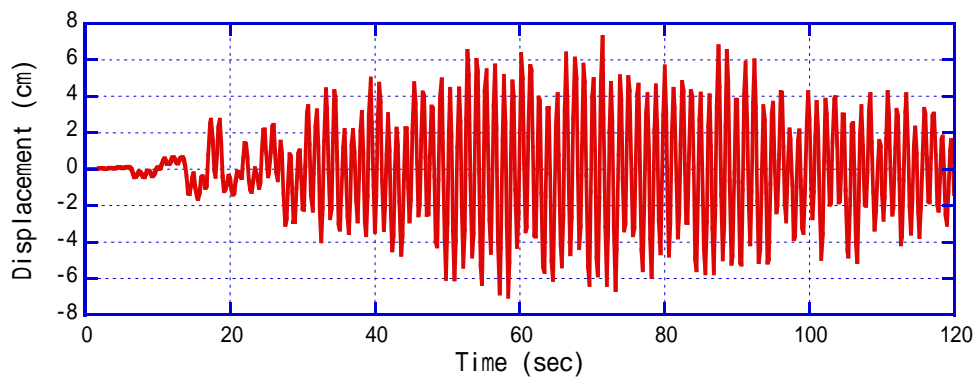


図 19 4階床位置における変位応答履歴 B

3) 浮き上がり挙動を再現する動的試験デバイス「積層ゴム」に関する実験概要

a) 実験概要

i) 実験変数

実験変数は、試験体種類（4種類）と载荷条件（初期荷重、荷重振幅、载荷速度）である。以下に、試験体および载荷条件を述べる。

ii) 試験体について

今回のデバイスには、十字型直動転がり支承（Cross Linear Bearing を略して、以下 CLB と呼ぶ：(株)免制震デバイス）を用いた。水平面内の X・Y 方向にスライダが組み込まれており、任意の水平方向に自由に移動が可能である。つまり、デバイスの中で変形を吸収するゴム部分がせん断変形せずに、常に鉛直方向のみの変形を受けることで、比較的安定した線形挙動が得られる。実験で用いた CLB は、実大実験時の約 1/5 モデルであり、ゴムを変える事で、ばね特性を 4 種類に変化させた。試験体の種類は 4 種類で、ゴムの形状・寸法が異なる。ゴム断面が矩形のものは、ゴムの厚みが 3 種類存在する。1 層が 21 mm のものを重ねて厚みを変化させており、試験体それぞれの名称を 1 層（ゴム厚さ 21 mm）、2 層（ゴム厚さ 42 mm）、3 層（ゴム厚さ 63 mm）とした。断面が円形のものは、1 種類のみであり、試験体名称は円形とした。試験体は、図 20 に示す装置中で、ゴム部分のみを取り替えた。つまり、滑り支承部分は、4 体とも共通である。製品仕様書から抜粋したゴムの諸元を図 23 に示す。

iii) 载荷条件

動的载荷に先立ち、試験体に大きな変形が目視にて確認されるまで静的载荷を行い、荷重 - 変位関係を求めた。これに基づき、動的载荷では、初期荷重を静的に導入後、振幅・振動数を変化させて動的载荷を行った。表 9 に初期荷重、振幅および振動数の組み合わせを示す。

荷重と速度が大きい組み合わせの载荷では、载荷装置の限界能力に近く、これ以上の速度や荷重における性能は確認できていない。表 10 に示す最大荷重まで静的に载荷、その後除荷して荷重 - 変位関係を測定した。

iv) 载荷装置と測定項目

図 24 に载荷装置を示す。計測は、アクチュエーターに内蔵された変位計およびロードセルにより、それぞれ変位および荷重を計測した。

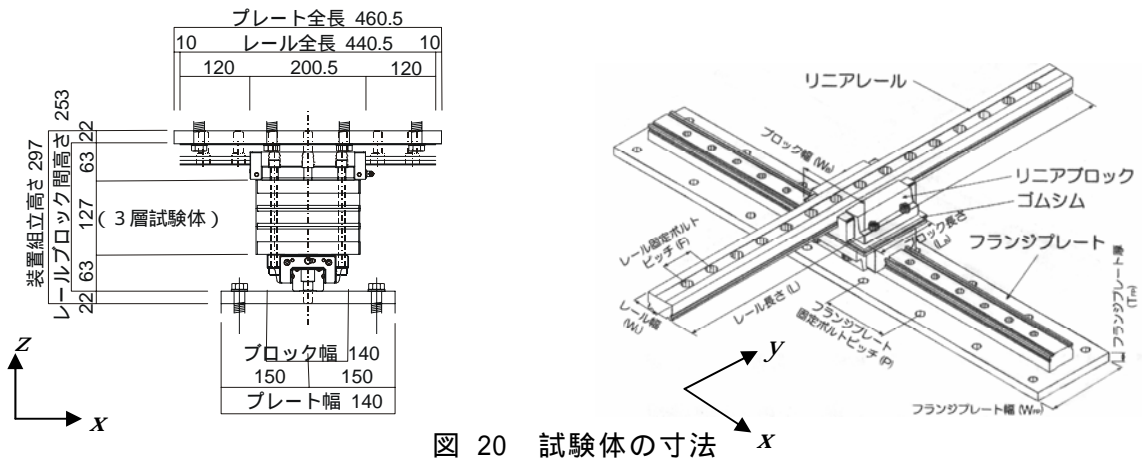


図 20 試験体の寸法

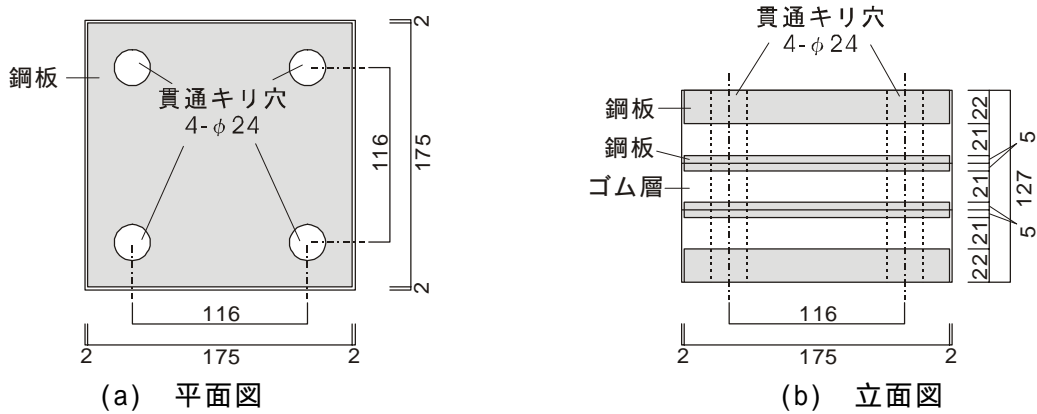


図 21 矩形ゴムの寸法 (3層の場合)

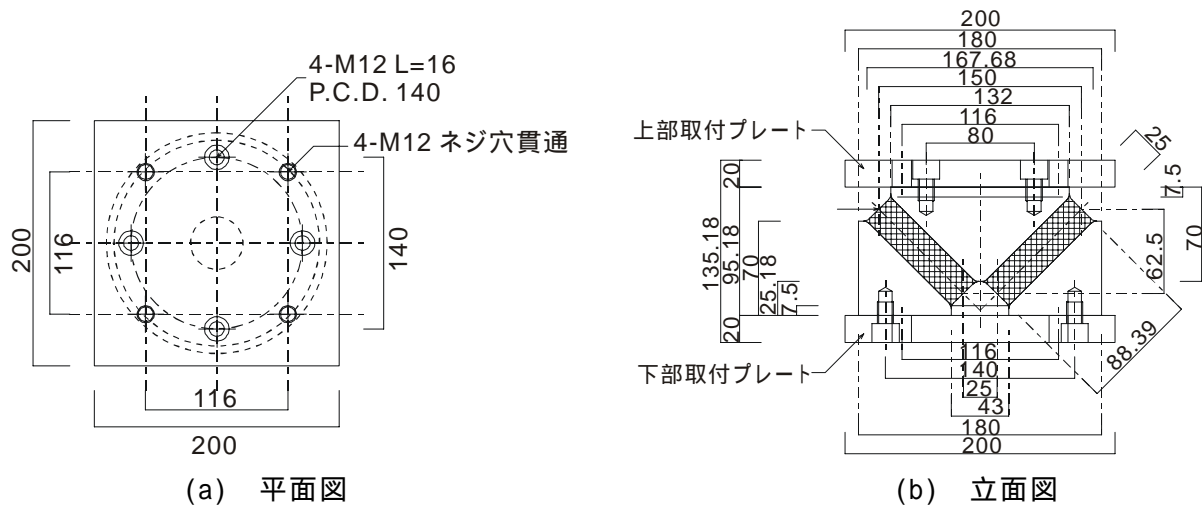
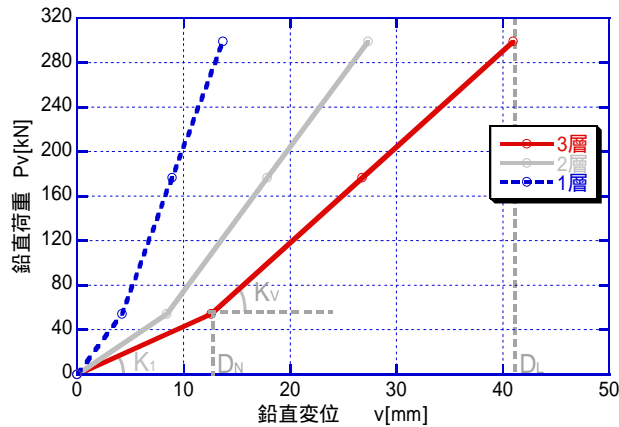


図 22 円形ゴムの寸法



試験体名称	1層	2層	3層
ゴムG値[N/mm ²]	0.8		
ゴム層厚[mm]	21×1	21×2	21×3
形状[mm]	-175×175		
初期鉛直剛性 K _i [kN/mm]	12.9	6.5	4.3
線形限界変位 D _n [mm]	4.2	8.4	12.6
設定鉛直剛性 K _v [kN/mm]	25.8	12.9	8.6
設定鉛直剛性 限界変位 D _L [mm]	13.6	27.3	40.9

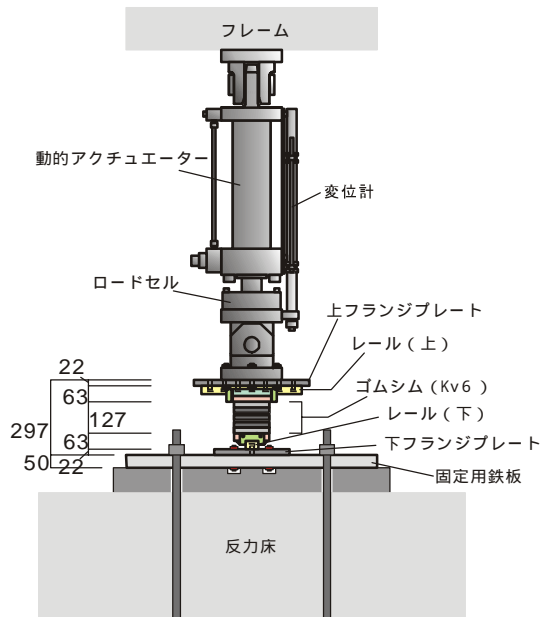
図 23 実験に用いたゴムの圧縮力 - 縮み関係 (矩形ゴムのみ)

表 9 載荷に用いた初期荷重、振幅および振動数の組み合わせ。(印のみ実験を実施)

試験体名称	初期荷重 [kN]	振幅 [kN]	振動数 [Hz]											
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0			
1層	150	100												
	200	50												
	200	100												
	300	100												
	350	50												
2層	150	100												
	200	50												
	200	100												
	300	100												
	350	50												
3層	150	100												
	200	50												
	200	100												
	300	100												
円形	100	50												
	150	100												
	200	100												
	250	100												

表 10 静的載荷最大荷重

試験体名称	最大荷重[kN]
1層	450.0
2層	400.0
3層	606.0
円形	300.0



(a) 立面図



(b) 試験装置全景

図 24 載荷装置

b) 実験結果

i) 静的載荷

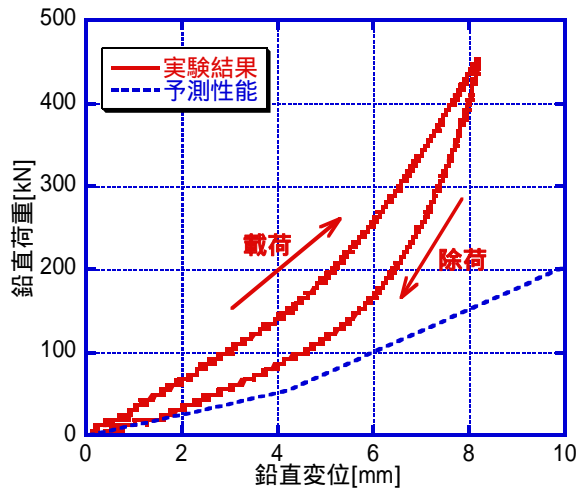
動的実験前に予め行った静的載荷実験の荷重 - 変形関係を図 25 に示す。なお、図 25 (a) (b) (c) に示す予測性能は、材料特性から予想される計算値であり、図 25 (d) に示す性能試験曲線は製品出荷前に行った実験結果を示す。いずれも、三井住友建設株式会社・免制震事業部免制震技術部の資料による。

- 1) 各試験体とも、載荷時と除荷時の経路が異なり、載荷時の方が除荷時よりも高い剛性を示した。
- 2) 図 25(a) ~ (c) より、1 層、2 層、3 層試験体では得られた荷重 - 変位関係は予測性能よりも高い剛性を示し、特に予測性能の第 2 勾配との差が大きいことがわかる。また、いずれの試験体も性能表に示された第一折れ点の荷重より大きな荷重 150kN あたりで第 1 折れ点が現れた。振動台デバイスとして用いる CLB では、第 2 勾配部分を想定しているのので、角型のゴムをデバイスに用いる場合、性能表の値を直接用いることは妥当ではない。
- 3) 図 25(d) より、円形試験体は製品出荷前に行われた性能試験結果よりも低い剛性を示した。また、第 1 折れ点は、矩形断面より低めの 80kN 付近であった。しかし、図 25(e) より、1 層、2 層、3 層試験体に比較して、円形試験体は、載荷時と除荷時の経路が近接している。動的試験においてもほぼ同じような荷重 - 変位関係が得られると仮定すると、円形試験体のほうが振動台デバイスとしてはより適切であると考えられる。

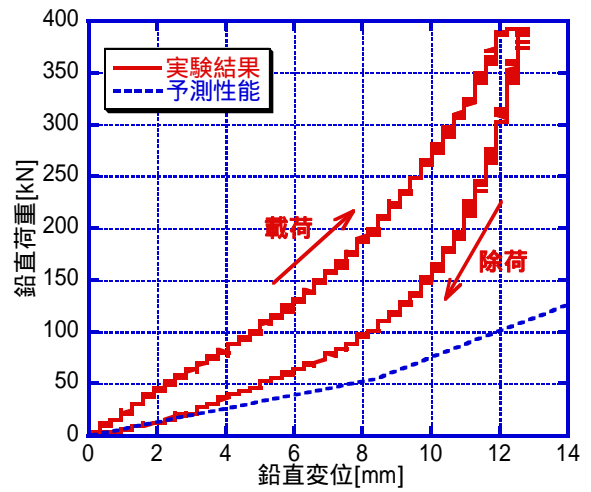
ii) 動的載荷

動的載荷実験の結果を、1層試験体は図 26 に、2層試験体は図 27、3層試験体は図 28、円形試験体は図 29 に示す。各図中、5～6個のプロットが描かれている。各プロットに示された複数の曲線は、載荷速度のみが異なり、他の条件は同一のものである。

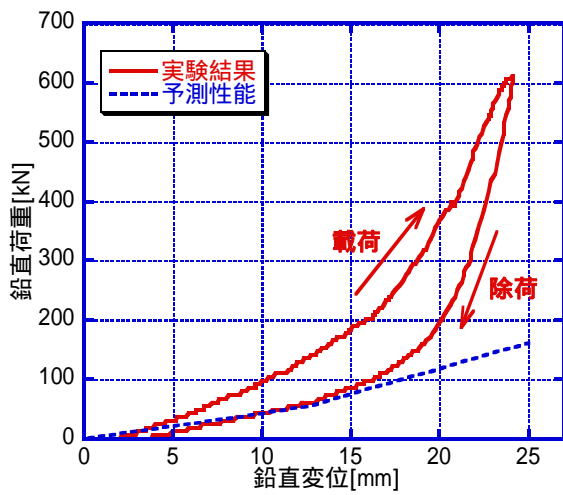
- 1) 各試験体とも、初期荷重・振幅が同じであれば、振動数を変化させてもほぼ同一の履歴が得られた。また、初期荷重が大きいほど、載荷と除荷の経路が近接し、履歴は直線的になった。ただし動的アクチュエーターの性能限界により、振動数 2 Hz および 5 Hz の場合には振幅が小さくなっているものがあるが、剛性は他の振動数の剛性とほぼ等しい。
- 2) 各図の最後のプロットに、振動数は 0.1 Hz で、初期荷重・振幅が異なる実験結果を示した。これらの図より、動的載荷で得られた履歴曲線は静的載荷で得られた荷重 - 変位関係曲線内にほぼ収まる。また、3層試験体を除けば、初期荷重が大きいほど動的載荷履歴は静的載荷履歴の除荷時の曲線側に近づく傾向が見られた。
- 3) ゴムシム鉛直剛性をモデル化するため、各図の最後のプロットに、1～3層試験体では $300\text{kN} \pm 100\text{kN}$ 、円形試験体では $250\text{kN} \pm 100\text{kN}$ の載荷履歴に対する線形近似式をそれぞれ示した。



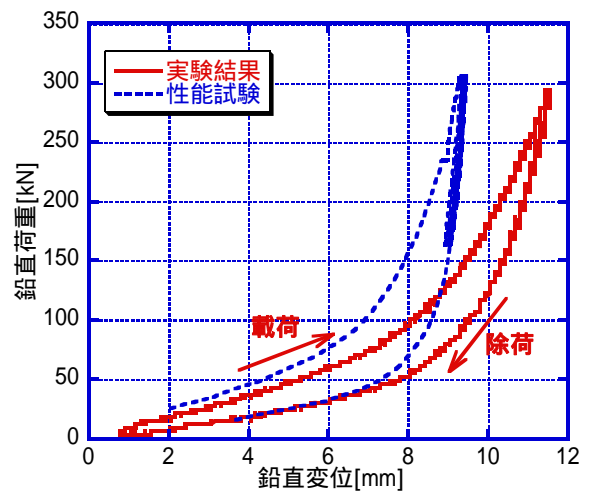
(a) 1層



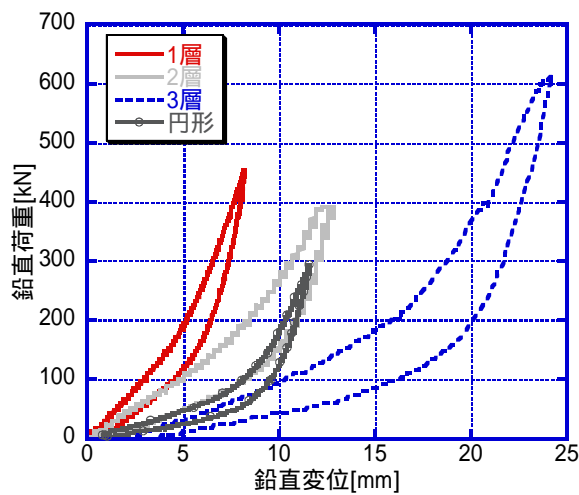
(b) 2層



(c) 3層

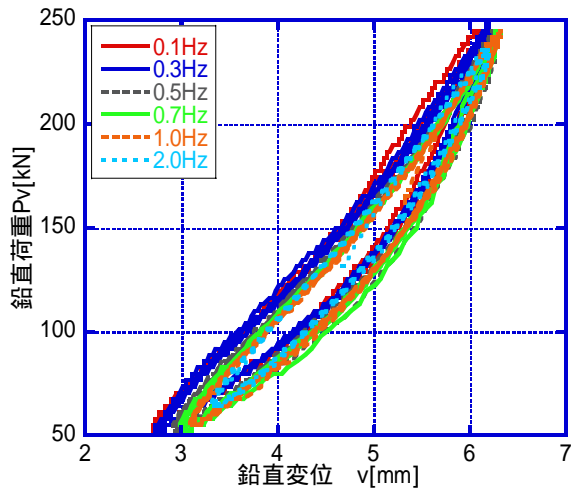


(d) 円形

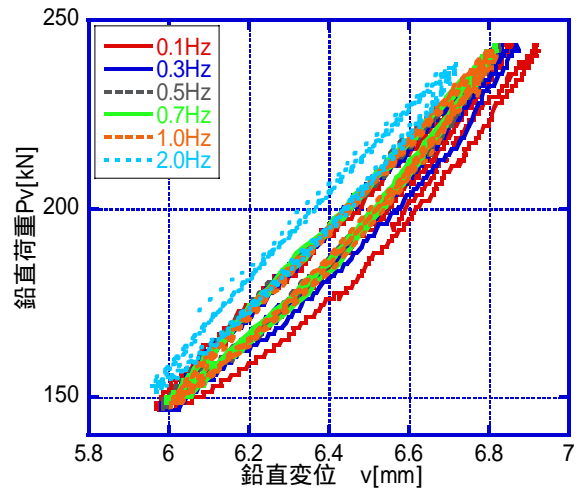


(e) 4体の比較

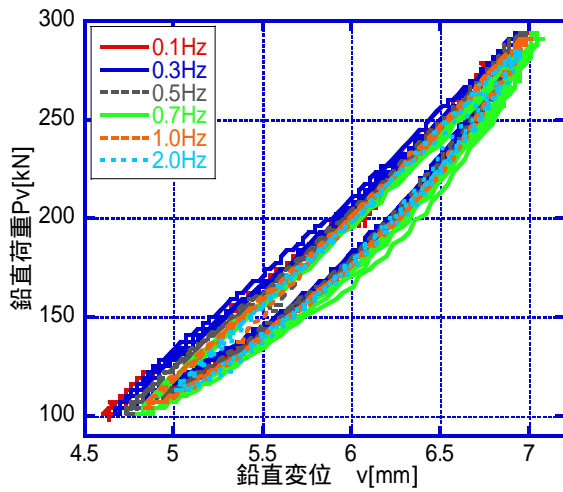
図 25 静的載荷実験結果



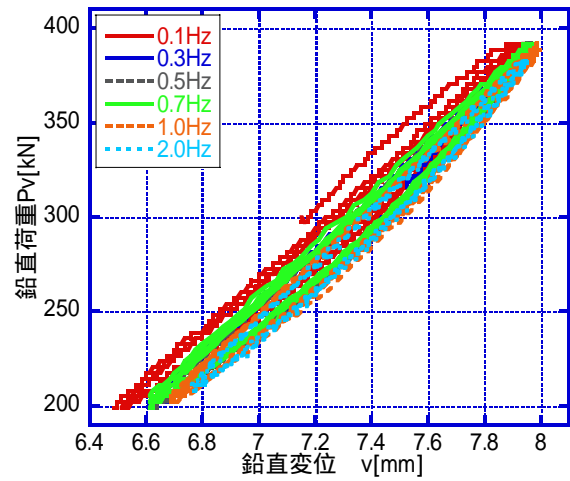
(a) 初期荷重 150kN - 振幅 100kN



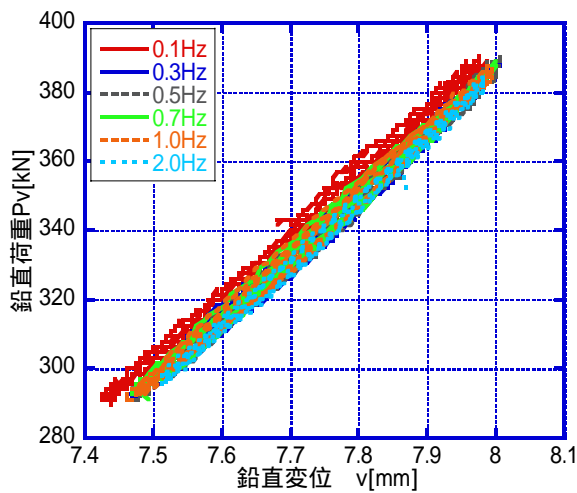
(b) 初期荷重 200kN - 振幅 50kN



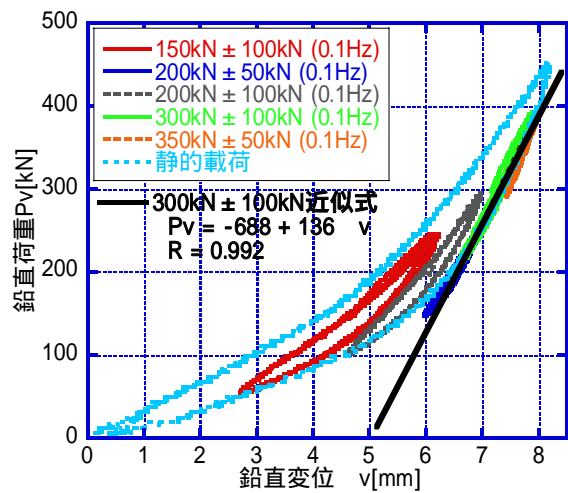
(c) 初期荷重 200kN - 振幅 100kN



(d) 初期荷重 300kN - 振幅 100kN

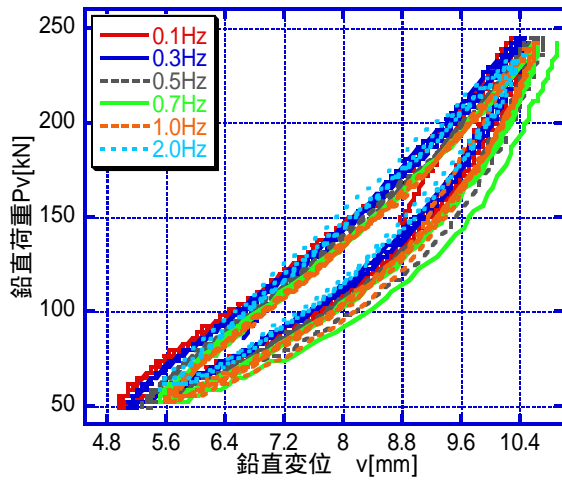


(e) 初期荷重 350kN - 振幅 50kN

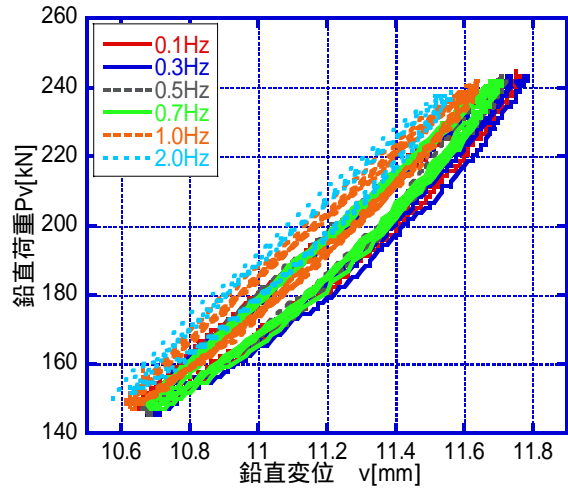


(f) 結果比較 (0.1Hz のみ)

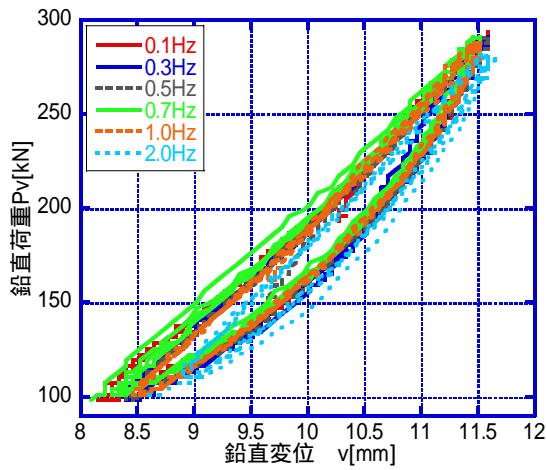
図 26 動的載荷実験結果 (1層)



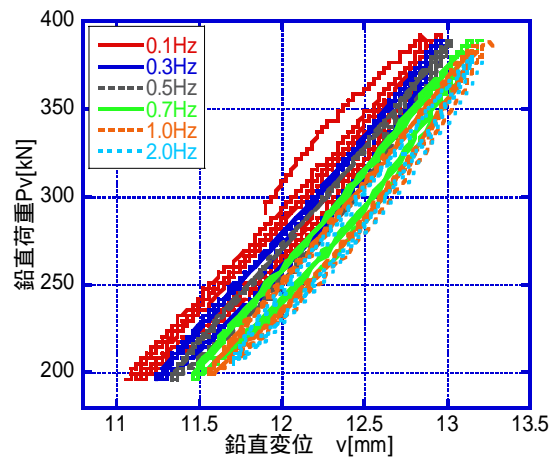
(a) 初期荷重 150kN - 振幅 100kN



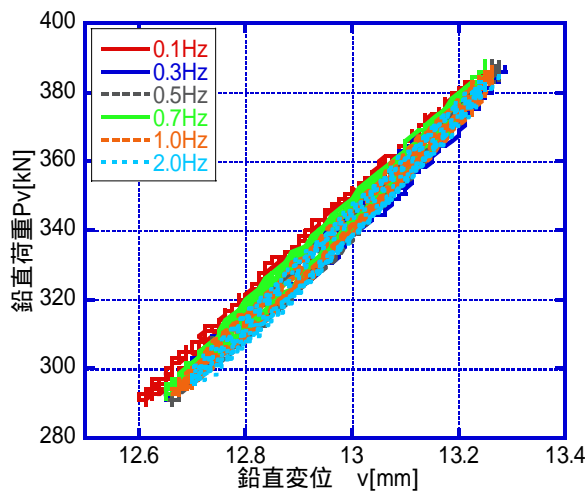
(b) 初期荷重 200kN - 振幅 50kN



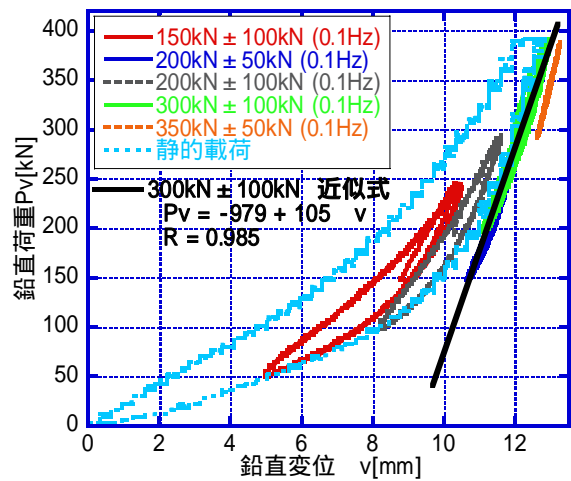
(c) 初期荷重 200kN - 振幅 100kN



(d) 初期荷重 300kN - 振幅 100kN

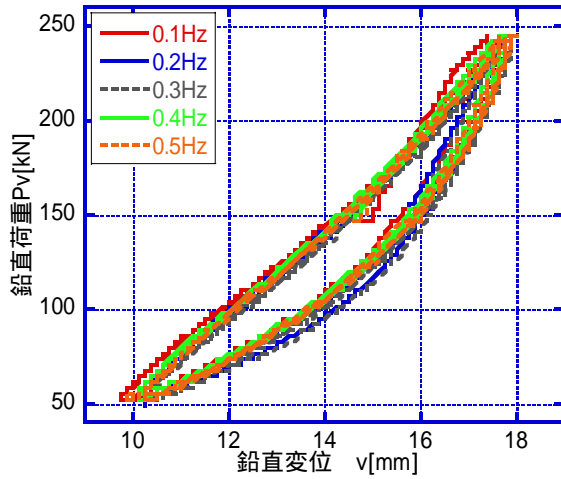


(e) 初期荷重 350kN - 振幅 50kN

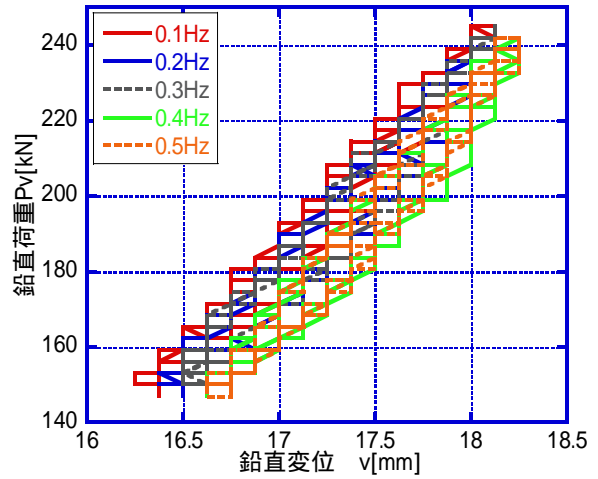


(f) 結果比較 (0.1Hz のみ)

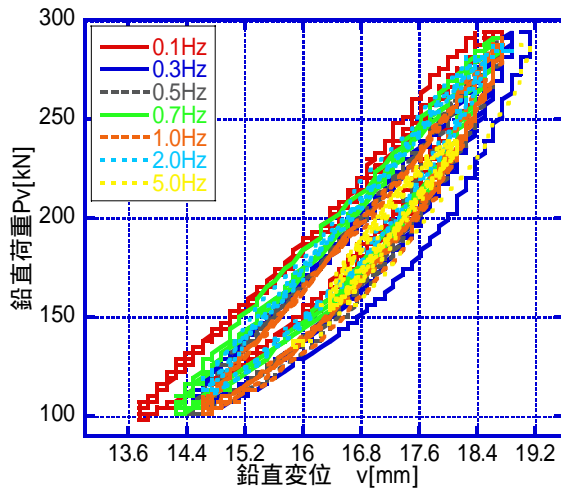
図 27 動的載荷実験結果 (2層)



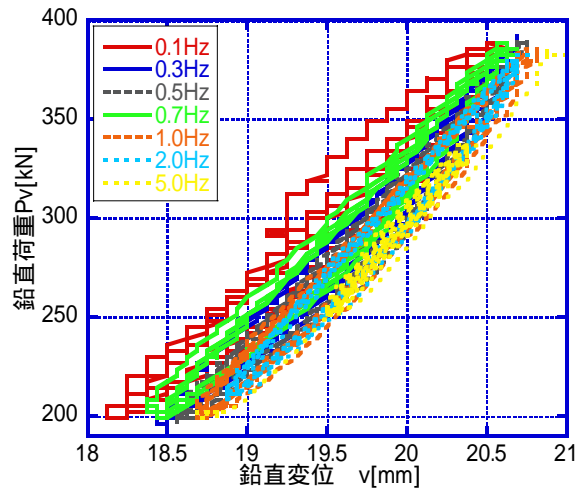
(a) 初期荷重 150kN - 振幅 100kN



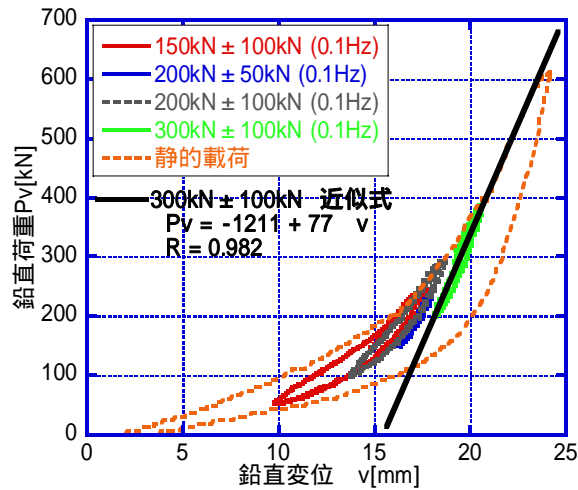
(b) 初期荷重 200kN - 振幅 50kN



(c) 初期荷重 200kN - 振幅 100kN

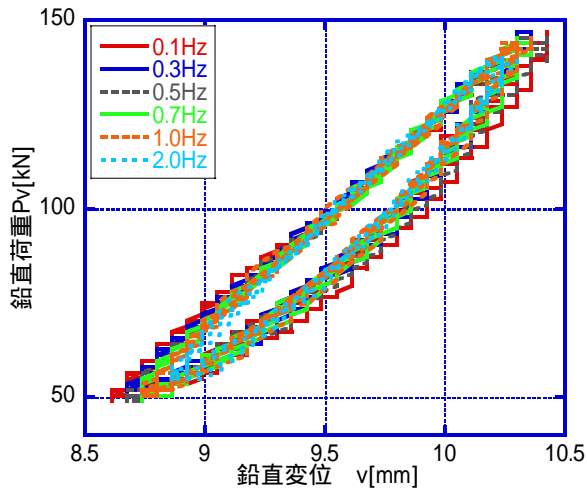


(d) 初期荷重 300kN - 振幅 100kN

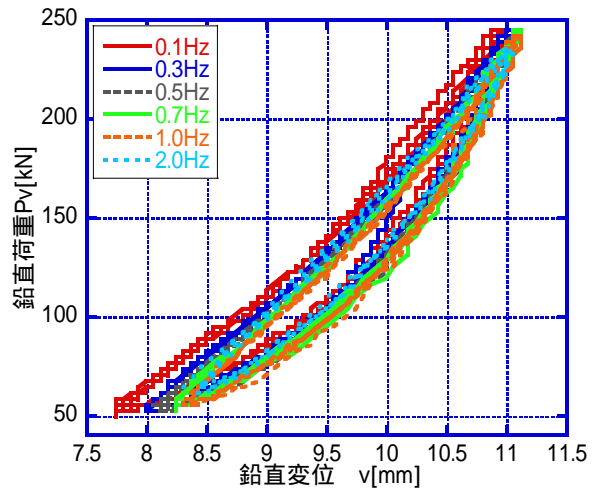


(e) 結果比較 (0.1Hz のみ)

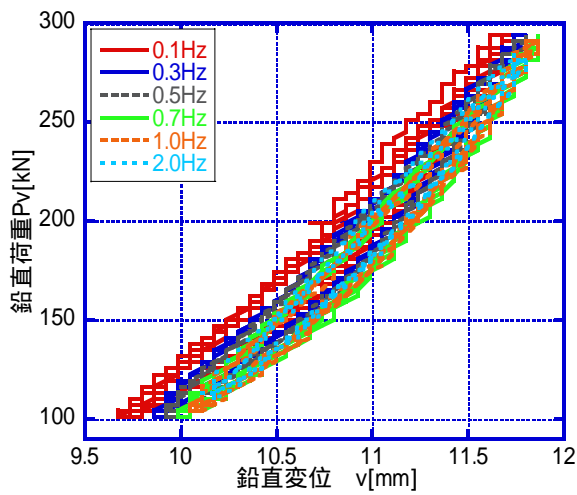
図 28 動的載荷実験結果 (3層)



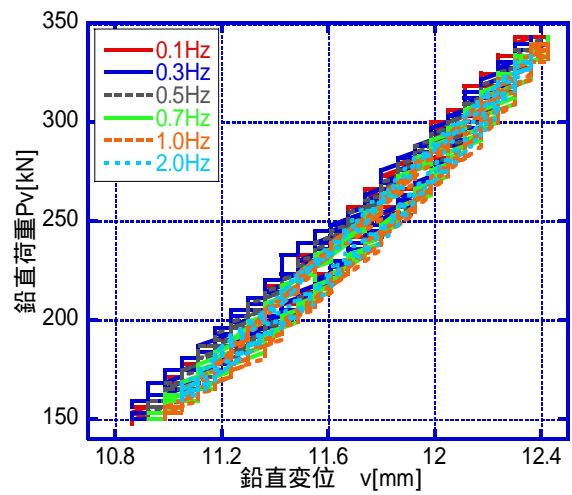
(a) 初期荷重 100kN - 振幅 50kN



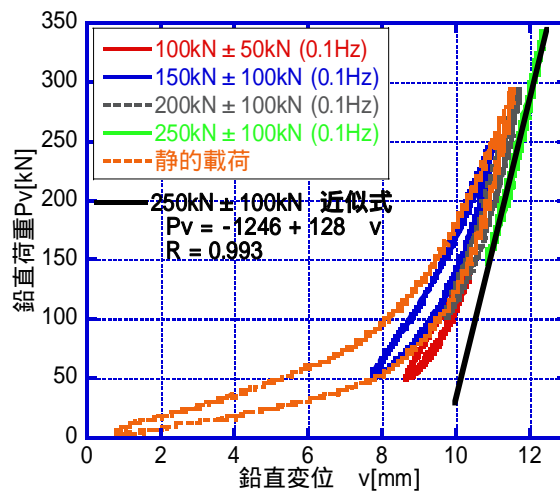
(b) 初期荷重 150kN - 振幅 100kN



(c) 初期荷重 200kN - 振幅 100kN



(d) 初期荷重 250kN - 振幅 100kN



(e) 結果比較 (0.1Hz のみ)

図 29 動的載荷実験結果 (円形)

c) 実験における結論

i) ゴムシム鉛直剛性

初期荷重が大きければゴムはほぼ線形に挙動し、その剛性は静的載荷除荷時の荷重 - 変位曲線における剛性に近い。つまり、初期荷重が十分に大きく、荷重振幅を小さくすれば、CLB をほぼ線形としてモデル化でき、動的デバイスとして振動台実験に用いることが可能と考える。なおその際のゴムシム鉛直剛性 K_v は、実験結果の近似式により表 11 のようになる。相関係数を見るとモデル化の精度は良いと言うことができるが、ゴムシム設計時の設定鉛直剛性とは値が大きく異なる結果となった。

ii) 他のゴムシム鉛直剛性試験例

以下は、三井住友建設免制震デバイス開発設計室により、本実験の試験体製作に先立って行われたゴムシムの鉛直剛性試験結果報告である。

試験体： $D \times W \times t = 175\text{mm} \times 175\text{mm}, 21\text{mm}$ ゴムせん断弾性率：G8 6体

試験条件：鉛直荷重 240kN 静的載荷・除荷

鉛直剛性の評価は、主に戻り勾配（下弦）の接線剛性とする。

試験結果：試験結果として

表 12 に測定値一覧を、図 30 に鉛直荷重 - 鉛直変位関係グラフを示す。

この報告では、設計荷重域での K_v は設計剛性 K_d から全く離れたもの（約 10 ~ 15 倍）となったことが述べられている。本実験で用いたゴムシムでは改善が見られるものの、表 11 に示したように K_v と K_d の値にはまだ大きな開きがあることがわかる。

表 11 ゴムシム鉛直剛性

試験体名称	実験結果			設定鉛直剛性 K_d [kN/mm]	K_v/K_d
	近似式	相関係数 R	鉛直剛性 K_v [kN/mm]		
1層	$P_v = -688 + 136\delta_v$	0.922	136	25.8	5.3
2層	$P_v = -979 + 105\delta_v$	0.985	105.3	12.9	8.2
3層	$P_v = -1211 + 77\delta_v$	0.982	77.4	8.6	9.0
円形	$P_v = -1246 + 128\delta_v$	0.993	127.8	-	-

表 12 測定値一覧

製品No.	1990	1991	1992	1993	1994	1995
初期剛性 K_1 [kN/mm]	25.0	23.6	23.1	24.0	23.1	23.1
最大変位 [mm]	5.0	4.8	5.2	5.1	5.4	5.1
設定荷重域の K_v [kN/mm]	240.0	260.0	312.5	357.1	278.0	357.1
K_v/K_d	9.8	10.6	12.7	14.5	11.3	14.6
K_d/K_1	0.98	1.03	1.06	1.02	1.02	1.06

* ここに、設計鉛直剛性 $K_d=24.5$ [kN/mm]

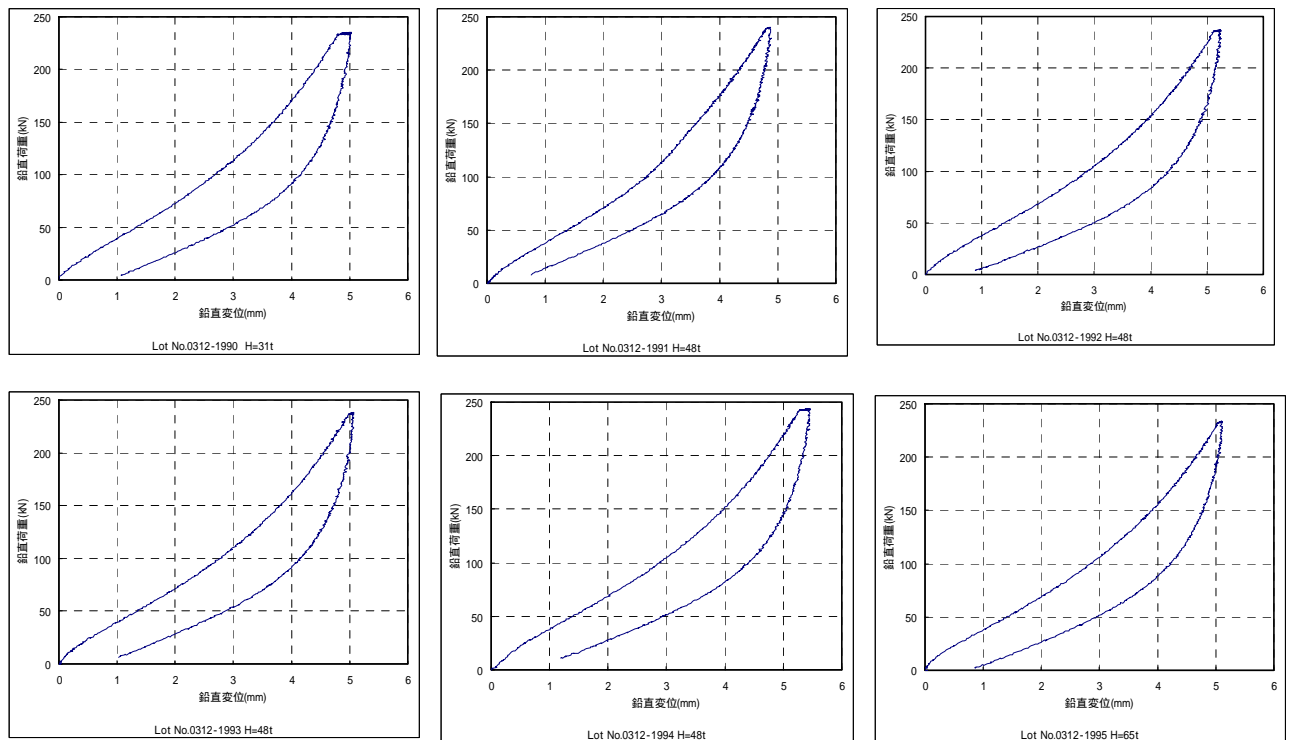


図 30 鉛直荷重 - 鉛直変位関係

(c) 結論ならびに今後の課題

製作した動的デバイスの実験結果からは、初期荷重が十分に大きく、また荷重振幅が小さい場合は荷重変形関係を線形としてモデル化することが可能であり、動的デバイスとして振動台実験に用いることができる。ただしデバイス鉛直剛性の設計範囲には限界があり、振動台実験における想定地盤および上部構造の性状によってはデバイスの製作が困難となる可能性もある。

(d) 引用文献

- 1) 村松晃次, 小室努 他: 主筋を基礎に定着させない場所打ちコンクリート杭の構造性能, 日本建築学会, 2002 年度大会(北陸) 学術講演梗概集 C-2 構造, pp.191-194, 2002.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 下部構造編, pp.269-270, 2002.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

(g) 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年度業務計画案

本動的試験デバイスの開発手順のうち、最初に想定建築物の地盤・基礎・上部構造をモデル化し、有限要素解析により上部構造の応答を求めるが、その応答結果は必ずしも妥当なものと判断し難く、同モデルの改良が必要と考えられる。

また、平成15年度に製作した動的デバイスにおいては、デバイス設計時剛性と動的試験結果とはかなり異なるので設計方法の改良を行う。さらに、動的試験結果では、予想より履歴ループが膨らむ結果となったので、より線形性の高い材料およびゴムの積層方法について検討を行い、必要に応じて追加実験を行う。