

免震構法研究開発第二期共同研究（その2）
最終報告書
（研究報告）

1999年5月

核燃料サイクル開発機構
株式会社 大林組

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194.

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

免震構法研究開発第二期共同研究（その2）
最終報告書
（研究報告）

瓜生 満 *1	寺田 修司*1
塩谷 功 *1	中山 一彦*1
山崎 敏彦*1	寺村 彰 *2
中村 嶽 *2	鳥井原 誠*2
野畑 有秀*2	近藤 俊成*3
橋村 宏彦*3	細谷 寿 *4

要 旨

民間建設会社が開発した免震構法は、平成10年現在、国内で500棟あまりの建物に適用されており、地震観測等により上部構造物への地震入力低減効果が確認されている。

民間技術の有効性と限界を把握し、非常に厳しいクライテリアを要求される核燃料施設にこの免震構法を適用するために昭和63年から平成3年にかけて実施した共同研究（第一期）に引き続き、天然ゴム系積層ゴムと過多変形時の荷重支持装置（ソフトランディングという）による免震構造縮小モデルを更新（8ton→90ton）し、平成4年から平成10年にかけて動力炉・核燃料開発事業団（現 核燃料サイクル開発機構）と(株)大林組が第二期共同研究として、地震観測データを取得した。

さらに、地震観測記録のシュミレーション解析、免震構造モデル振動台試験、第4紀層地盤の室内土質試験等を実施した。

* 1 核燃料サイクル開発機構
* 2 (株)大林組
* 3 (株)ベスコ
* 4 検査開発(株)

目 次

1. まえがき	1
2. 90ton の免震モデルによる地震観測とシミュレーション解析	2
2.1 ソフトランディング免震装置の基本概念	2
2.2 免震モデルの概要	6
2.2.1 90ton モデル概要	6
2.2.2 地震観測センサー配置	6
2.3 積層ゴムの概要	10
2.3.1 積層ゴムの動特性	10
2.3.2 積層ゴム単体の沈み込み特性と鉛直ばね定数	10
2.4 ソフトランディング装置	13
2.4.1 使用材料と設計方針	13
2.4.1.1 使用材料	13
2.4.1.2 設計方針	13
2.4.2 材料特性予備実験	14
2.4.2.1 素材の圧縮実験	14
2.4.2.2 成形案の圧縮実験	14
2.4.3 ソフトランディング装置の特性実験	15
2.4.3.1 ソフトランディングの形状と圧縮応力の検討	15
2.4.3.2 鉛直加力試験	15
2.4.3.3 水平加力試験	15
2.5 積層ゴム+ソフトランディングの特性解析	29
2.5.1 $P \sim \delta$ 特性の計算式	29
2.5.2 $Q_s \sim \delta_H$ 特性の計算式	29
2.5.3 複合系の基本特性	29
2.5.4 ソフトランディングにプレロードを付与することによる影響	30
2.5.5 水平方向のばね定数と鉛直方向のばね定数	30
2.5.6 $Q \sim \delta_x$ の等価減衰定数	30

2.5.7	上下動に関する検討	31
2.5.8	環境温度による影響	31
2.5.9	積層ゴムのクリープによる影響	31
2.6	ロッキング、スウェイ振動の動特性	37
2.6.1	ロッキング固有振動数	37
2.6.2	ロッキングモード形	37
2.6.3	正弦波入力に対するロッキング応答	38
2.6.4	ロッキング振動に対するまとめ	38
2.7	地震応答計算	40
2.7.1	振動解析モデルと諸定数	40
2.7.2	地震観測記録のシミュレーション解析	40
2.7.3	サイト観測地震波入力に対する応答予測	40
2.7.3.1	ソフトランディングと積層ゴムの複合系の特性	40
2.7.3.2	応答計算結果	40
2.7.3.3	90ton モデルの等価減衰定数	41
2.7.4	EL-CENTRO NS 記録地震波入力に対する応答計算	41
3.	免震構造モデル振動台試験	51
3.1	試験概要	51
3.1.1	目的	51
3.1.2	内容	51
3.2	試験体の概要	53
3.2.1	積層ゴム	53
3.2.2	ソフトランディング装置	54
3.2.3	免震構造体	55
3.3	積層ゴムとソフトランディング装置の静的加力試験	56
3.3.1	積層ゴムの静的加力試験	56
3.3.1.1	積層ゴムの種類	56
3.3.1.2	試験方法	56

3.3.1.3	試験結果	56
3.3.2	ソフトランディング装置の静的加力試験	58
3.3.2.1	試験方法	58
3.3.2.2	試験結果	58
3.3.3	免震構造体の静的加力試験	61
3.3.3.1	試験方法	61
3.3.3.2	試験結果	61
3.4	免震構造体の振動台試験	66
3.4.1	試験目的	66
3.4.2	試験方法	66
3.4.3	計測方法	66
3.4.4	免震構造体の共振振動数, モード, 減衰定数	72
3.4.4.1	固有振動数	72
3.4.5	振動性状	81
3.4.6	地震波入力応答特性	91
3.4.7	限界試験	103
3.4.7.1	正弦波加振による限界特性	103
3.4.7.2	入力加速度と構造体の応答変位, 応答加速度の関係	108
3.5	解析	114
3.5.1	解析方法	114
3.5.1.1	解析モデル	114
3.5.1.2	解析モデルによる動的基本性状	117
3.5.2	解析結果	122
4.	第四紀層地盤の室内土質試験	127
4.1	目的	127
4.2	土質試験	127
4.3	攪乱試料の供試体作成方法	129
4.4	各試料の物理的試験結果	129
4.5	C D試験結果	129
4.6	C U試験結果	130

4. 7	液状化試験結果	130
4. 8	変形試験結果	131
5.	まとめ	133
5. 1	90ton の免震モデルによる地震観測とシュミレーション解析	133
5. 2	免震構造モデル振動台試験	134
5. 3	第四紀層地盤の室内土質試験	135
6.	あとがき	135
別紙 1	第二期共同研究（平成 6 年度）責任分担表	136

1. まえがき

動力炉・核燃料開発事業団（現 核燃料サイクル開発機構）東海事業所内の地震観測建家に積層ゴムで支持された重量 90tonの免震モデル4（以下、免震モデルと呼ぶ）が平成4年3月に新設された。この免震装置には免震モデルの過大変形を防護するためのバックアップシステムとしてソフトランディング装置が取り付けられている。本報告書はこのような免震装置と免震モデルの動的特性に関して検討したものであり、内容として、主に、1) ソフトランディング装置の計画、2) 積層ゴムとソフトランディング装置とで構成される免震装置と免震モデルの動的特性の検討、3) サイト記録地震波入力に対する免震モデルの応答予測等について述べる。

原子力施設への免震構法導入のための研究開発の一環として、動力炉・核燃料開発事業団（現 核燃料サイクル開発機構）と㈱大林組は、積層ゴムをバックアップするためのソフトランディング・システムに関して共同研究を実施してきた。平成4年度～6年度の第二期共同研究においては、準実用規模に拡張して、積層ゴムΦ340mm4体で支持した90t RC造免震構造モデルを用いて、動的諸特性の確認試験の後、自然地震観測を東海事業所で実施した。本モデルでは積層ゴムに初期変位100mmを与えてランディングし易くしている。しかし、大変形時のソフトランディングの動的性能を真に実証するレベルの強震が観測されていない。

平成6年度は、このような免震構造の限界性能を調べる目的で、小型の積層ゴムΦ70mmで、16t RC造免震構造体を支持した状態で、正弦波、ELCENTRO記録地震波、および、東海事業所サイトの人工地震波入力に対する積層ゴムの限界特性試験、および、ソフトランディング装置を付与した積層ゴムの限界試験を、振動台を用いて実施した。さらに、今後の核燃料施設建物の第四紀層地盤立地のための基礎資料とするため、第四紀層地盤の力学特性および変形特性を確認した。

2. 90tonの免震モデルによる地震観測とシミュレーション解析

2.1 ソフトランディング免震装置の基本概念

積層ゴムは過大変形の破壊試験を行うと、図2.1.1に示す様に、高さ／直径の比が小さい場合に著しいハードニングが生じ、また、高さ／直径の比が大きい場合には座屈を生じる。

ソフトランディング装置はこれらの過大な変位域に達しても本来の免震機能を継続させるためのバックアップ装置である。この基本的な考え方は次の通りである。モデル重量を支持する積層ゴムは水平方向の変位に伴って沈み込む性質がある。この沈み込み量に応じてソフトランディング装置への着地度合いも強まり、ソフトランディング装置はモデル重量を順次負担する機構である。この荷重移行の結果、積層ゴムの鉛直荷重負担量（軸歪による引張応力）が、順次、少なくなってゴムの歪応力の余裕度合いが高まり、終局的には積層ゴムは単に水平変位に対する復元機能のみ保てば良いことから、図2.1.2に示す様に、設計可能な変位域が拡大する。

また、ソフトランディング装置はランディング（着地）面に滑り機構を持つことから、モデルの水平変位に依存するこの装置の負担荷重×一定摩擦係数という変位斬増型摩擦抵抗力というダンパー機能もソフトランディング装置は保持する。

適用に当たり、2つの考え方がある。

イ) ランディング装置

ロ) ソフトランディング装置

イ) ランディング装置は、従来の積層ゴムとダンパーから構成される免震装置のために、積層ゴムとダンパーの特定変位以上の過大変位に対してのみバックアップ装置として適用する場合である。この概念を図2.1.3に、水平変位に対する支持荷重、沈み込み変位、せん断力の各特性として示す。

ロ) ソフトランディング装置は、単に滑り方式のランディング（着地）機能ばかりでなく、鉛直方向に弾性特性を保つ。この弾性特性は着地時の鉛直衝撃力を緩和するのに役立ち、積層ゴムの季節変化による伸縮にも対応する。さらに、積層ゴムの経年変化による静的沈み込みであるクリープも吸収出来ると良い。この概念を上記と同様の特性について図2.1.4に示す。

本計画は、後者のソフトランディング概念を取り上げ、さらに、研究的観点から、ダンパーを無くしてその減衰性を滑り摩擦抵抗で得る試みから、図2.1.4に示すように、水平変位が零の状態で若干タッチさせて自然地震観測を行い、免震性能の検証を試みるものである。

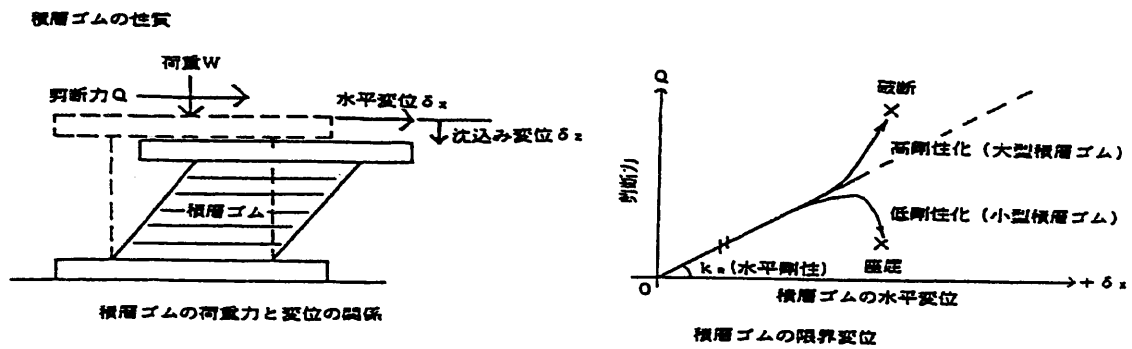
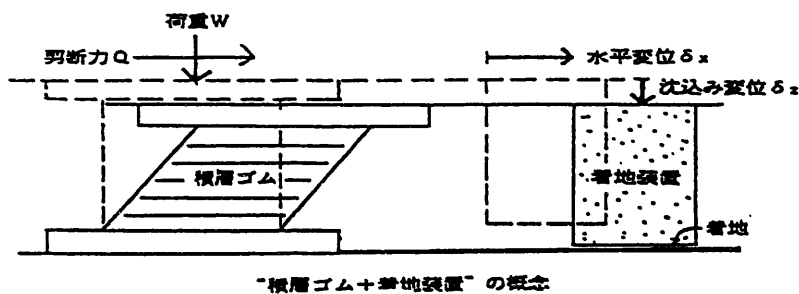
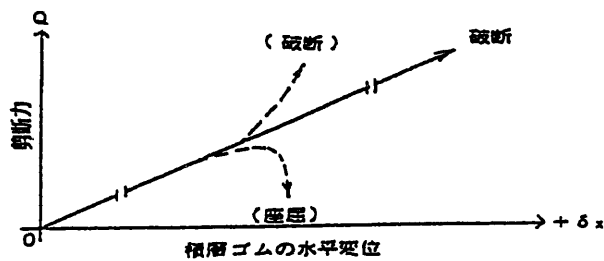


図2.1.1 積層ゴムの限界変位



“積層ゴム+着地装置”の概念



積層ゴムの限界変位の増加

- 荷重低減
- ↓
- 軸歪低減
- ↓
- 許容剪断歪増大
- ↓
- 許容水平変位増加

図2.1.2 ランディング概念

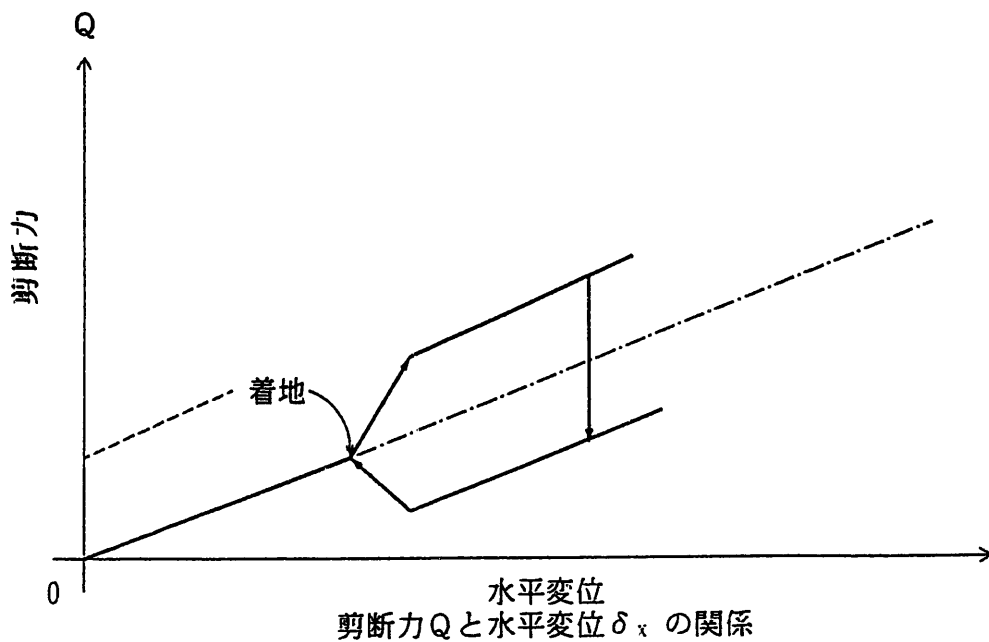
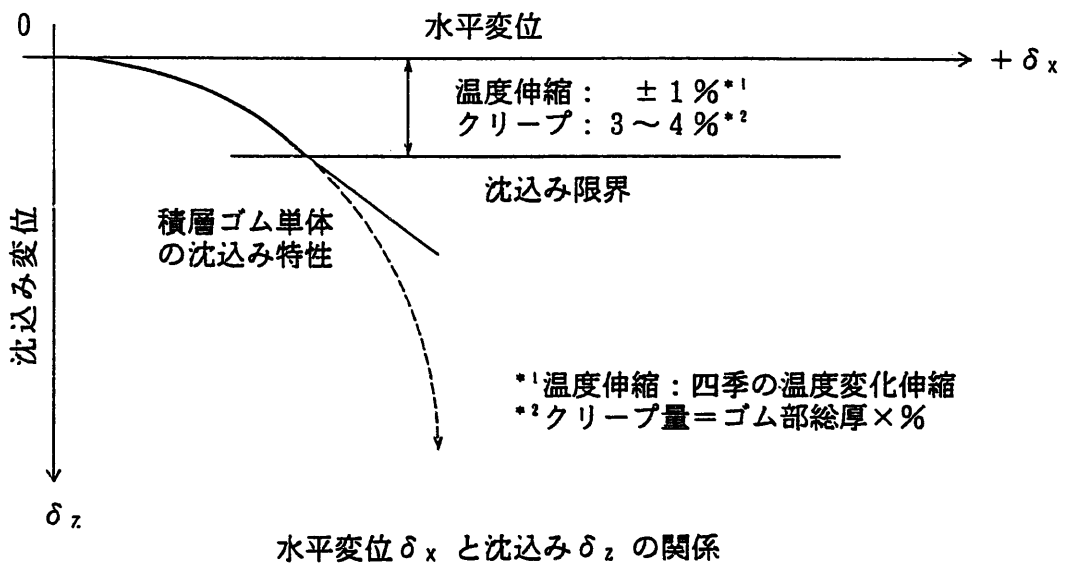
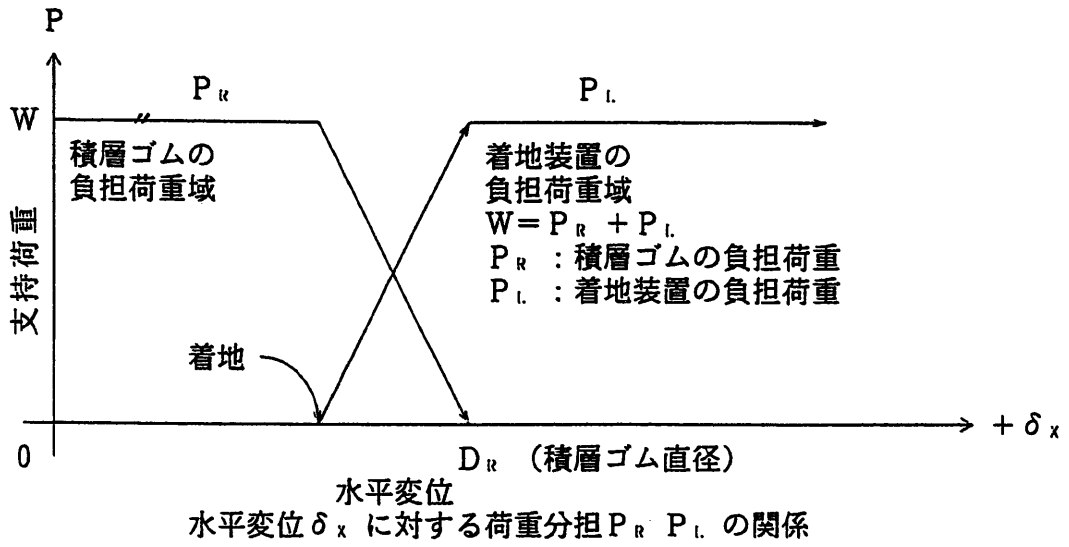
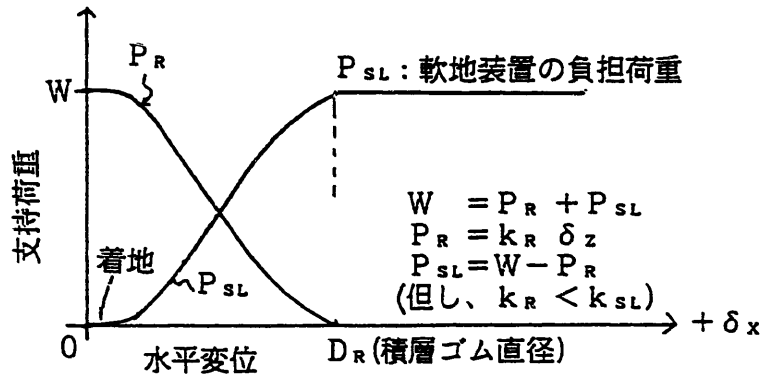
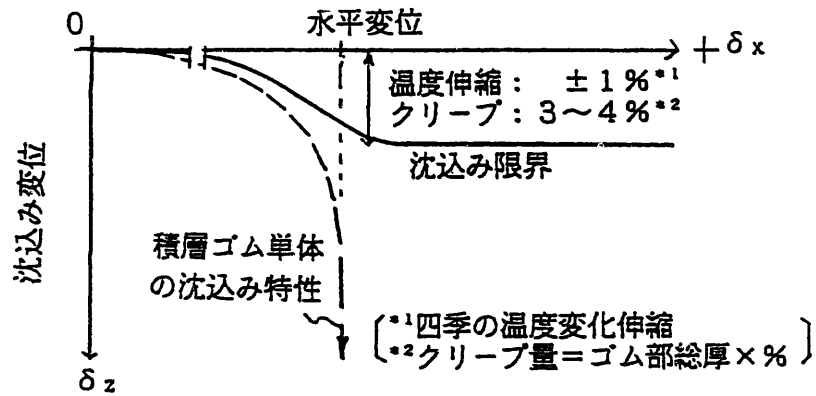


図2.1.3 積層ゴム+ランディング装置の特性

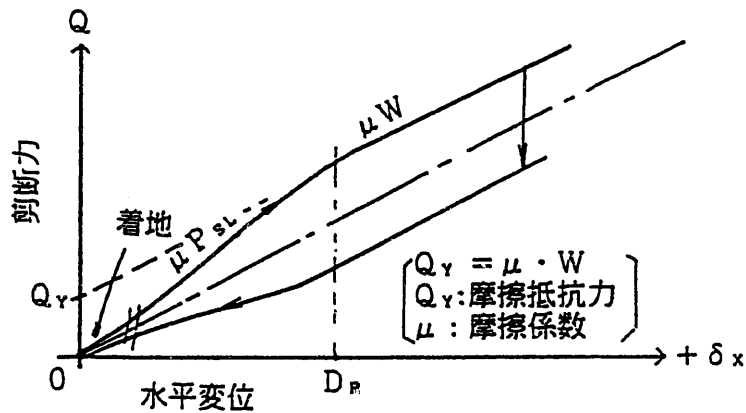
積層ゴム+軟着装置の特性



水平変位 δ_x に対する荷重分担 P_R P_{SL} の関係



水平変位 δ_x と沈込み δ_z の関係



剪断力 Q と水平変位 δ_x の関係

図2.1.4 積層ゴム+ソフトランディング装置の特徴

2.2 免震モデルの概要

2.2.1 90ton モデル概要

図2.2.1に免震モデルの地震観測室の配置を示す。図2.2.2に免震モデルとその基礎平面形状を示す。

図2.2.3に免震モデルの形状寸法を示すと共に、褶動装置（90 t コンクリートマスの下側）と水平加力治具（モデルの両側）の概要も示す。なお、褶動装置は免震モデルの長辺方向に積層ゴムを互いに引き寄せる方法で、積層ゴムに初期変位を与える装置である。

本計画では、設計支持荷重40 t用積層ゴム4個で、重量90 tの免震モデルを支持するため、効果的な免震性能を得るには重量的に不足すること、また、従来の積層ゴムの設計概念ではよほど大きな強震を経験しない限りランディング現象を検証できないことなどを考慮して、積層ゴムに初期変位を与えて過大变形状態を保つことができるようにしている。

2.2.2 地震観測センサー配置

図2.2.4に地震観測のための地震計設置場所の概要を示す。

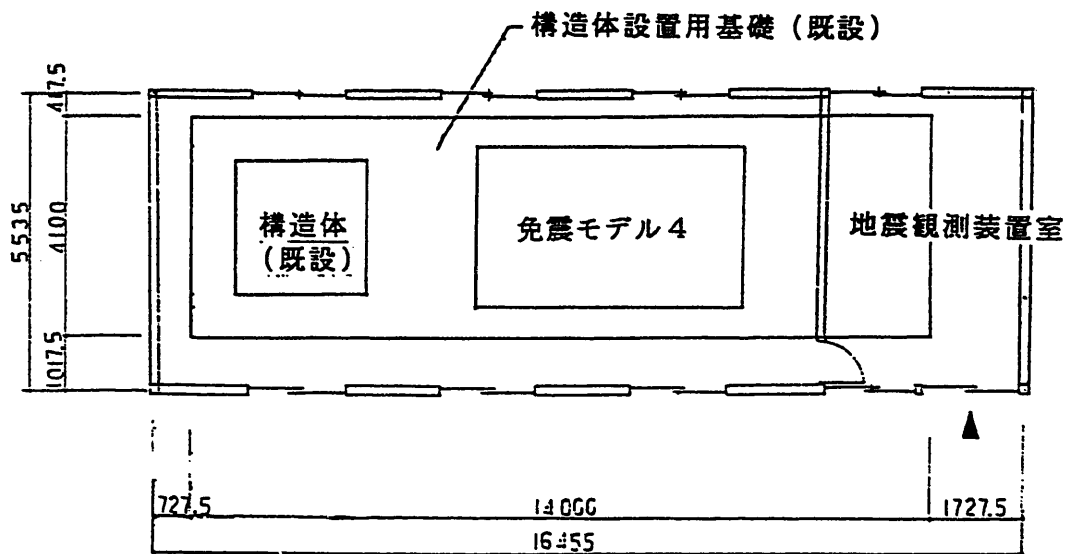


図2.2.1 地震観測室平面図

- ⊕ 積層ゴム
- ⊙ ソフトランディング装置 (1軸荷重計付)
- ソフトランディング装置 (3軸荷重計付)

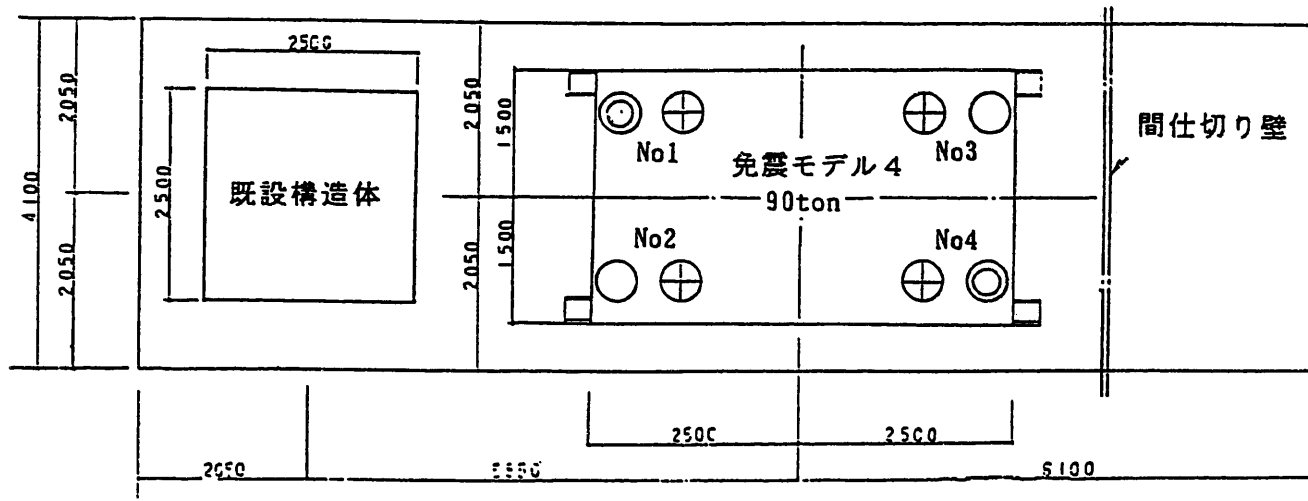


図2.2.2 地震観測用構造体配置図

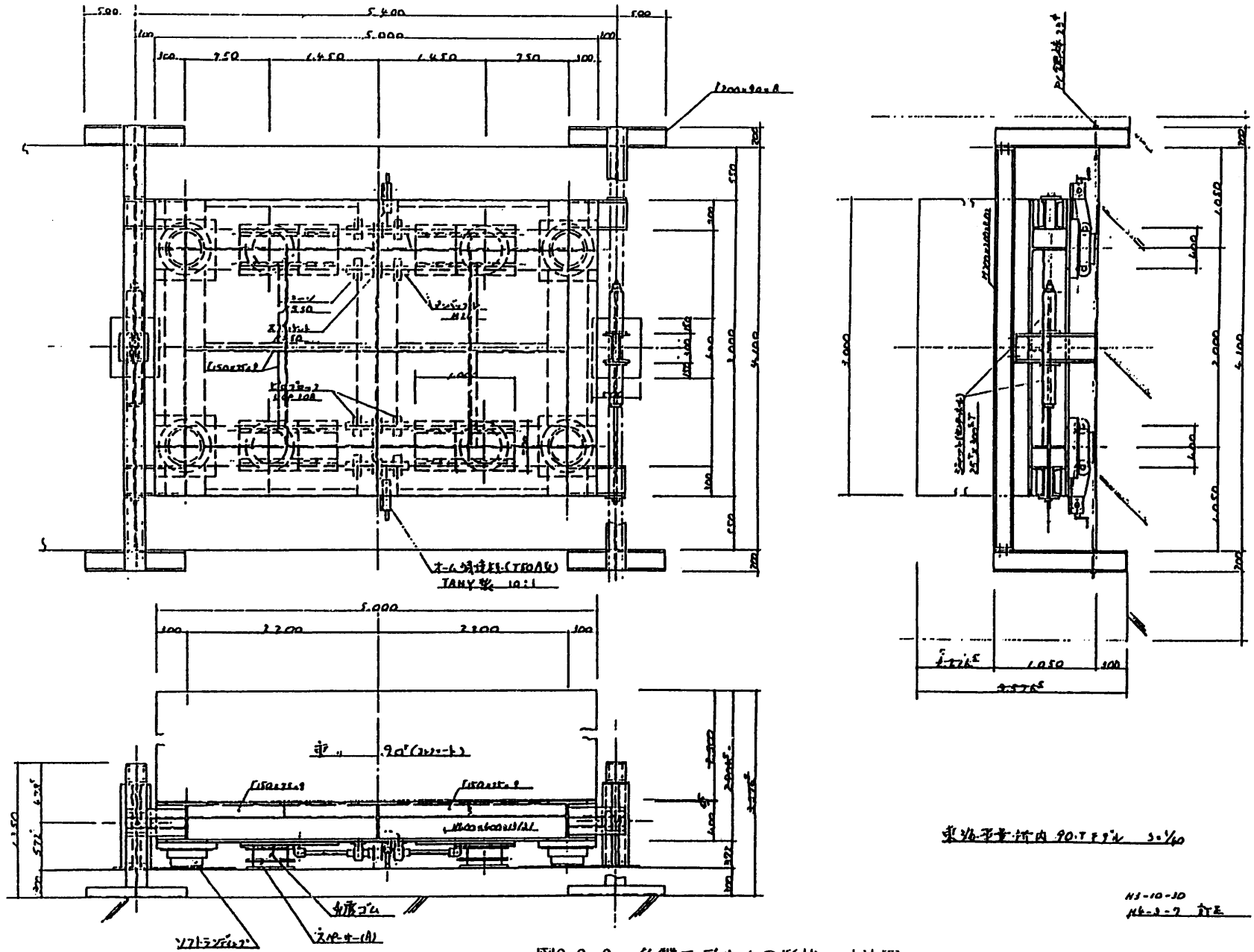


図2.2.3 免震モデル4の形状、寸法図

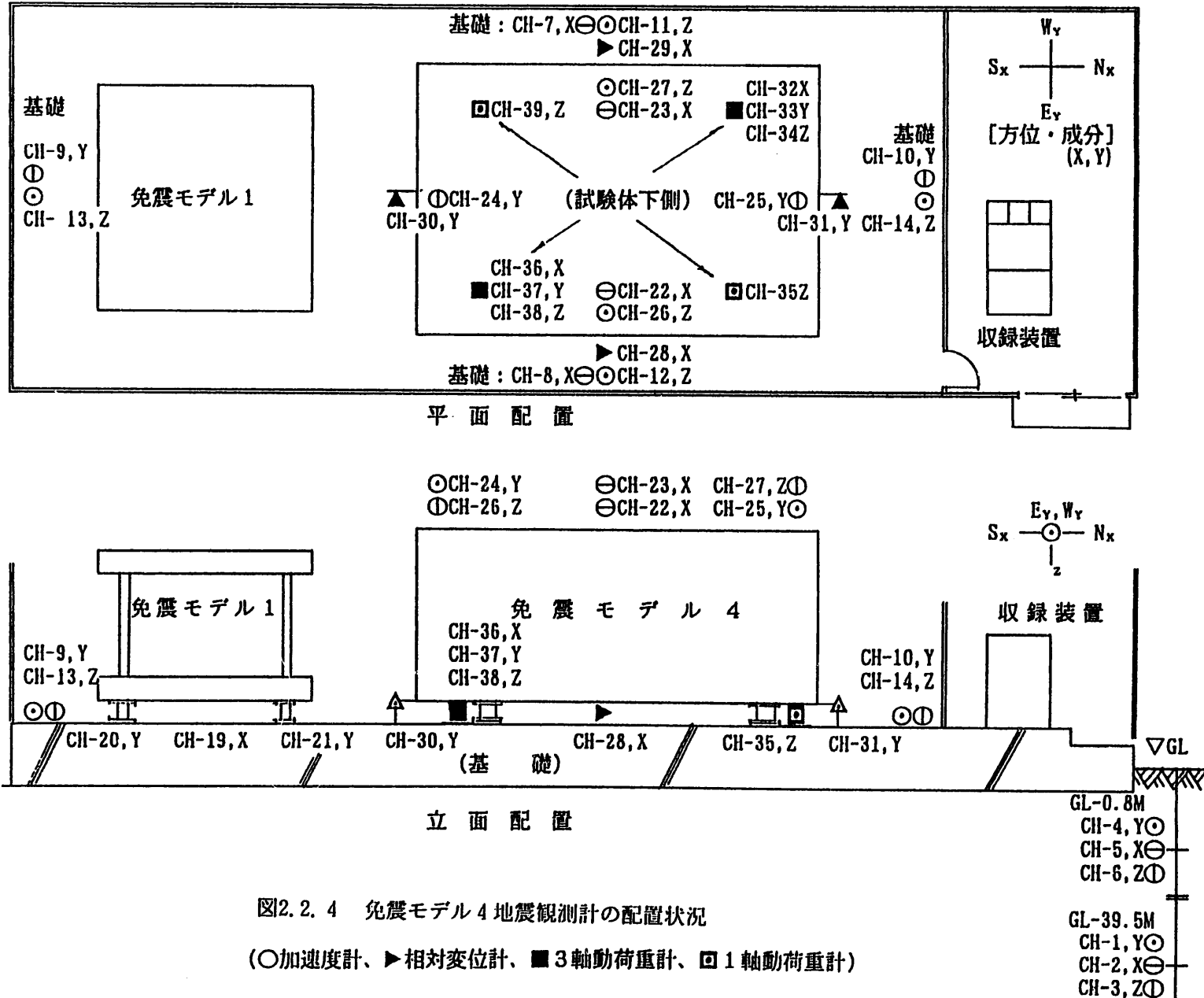


図2.2.4 免震モデル4地震観測計の配置状況
(○加速度計、▶相対変位計、■3軸動荷重計、□1軸動荷重計)

2.3 積層ゴムの概要

2.3.1 積層ゴムの動特性

図2.3.1に、免震モデルを支持する40t用積層ゴムの諸定数、形状等の概要を示す。

図2.3.2に基本物性を示す。

2.3.2 積層ゴム単体の沈み込み特性と鉛直ばね定数

図2.3.3に、積層ゴムの弱剛性化状態を形成するための積層ゴムの直径Dと積層ゴムに与える初期変位 δ_y の概念を示す。初期変位 δ_y により、積層ゴムの下面(点線)に対して上面(太実線)がずれて、上部モデルを支持するゴムの有効面積 A_R が減少し、鉛直剛性が表-2.3.1に示すように低下する。

$$A_R = 0.5 D^2 [\cos^{-1} \{ (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2} / D \} - 0.5 D (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2} \sin \{ (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2} / D \}]$$

$$K_R = A_R E_{sp} / (nt)$$

表2.3.1 積層ゴムの初期変位 δ_y と鉛直ばね定数 K_R

	単 位	$\delta_y - K_R$			
		0.0	0.1 D	0.3 D	0.5 D
δ_y	cm	0.0	0.1 D	0.3 D	0.5 D
K_R	t/cm	411	342	198	112

この鉛直剛性の低下に伴う積層ゴムの水平変位(δ_y, δ_x)と沈み込み変位の関係を図2.3.4に示す。尚、メーカーが提示しているこの積層ゴムの許容変位は $\delta = 15\text{cm}$ (ゴム直径の44%)である。

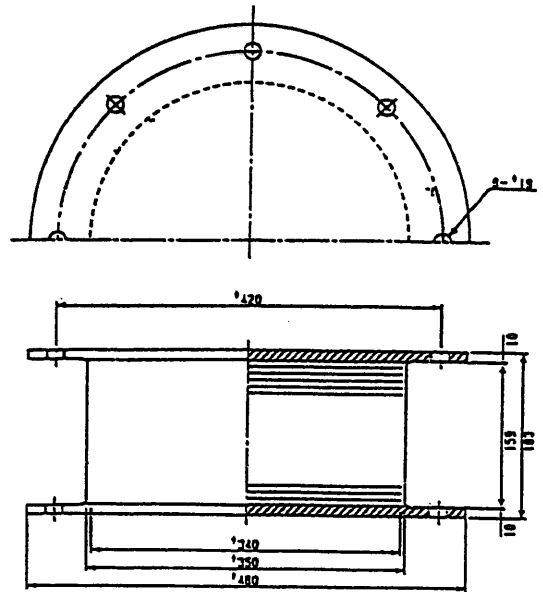
積層ゴムの諸元

積層ゴム名称	40t積層ゴム (MR040Z)
設計支持荷重	40ton
ゴム材質	天然ゴム系
構成	Rubber : 5.6mm×22枚=127.6mm Steel : 1.5mm×21枚=31.5mm

性能

項目	水平方向びね定数	鉛直方向びね定数	水平許容変位
	(tonf/cm)	(tonf/cm)	cm
規格値	0.404 ± 20%	347 ± 20%	15 (最大軸力80ton)
測定値	0.366 ~ 0.372	411 ~ 416	-

積層ゴムの形状



RUBBER 5.6 × 22 = 127.6
STEEL 1.5 × 21 = 31.5

図2.3.1 免震モデル4を支持する40ton用積層ゴムの諸定数、形状等の概要

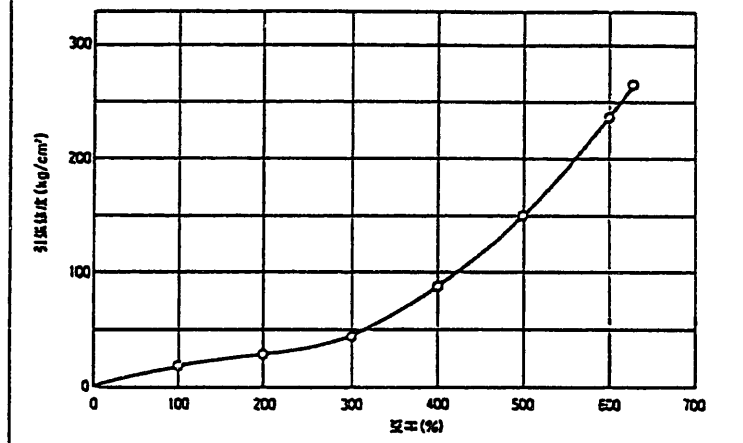
ゴムの基本物性

MRBのゴムは特に性能の安定性、長期耐久性を考慮して天然ゴム、カーボンブラック、加硫剤などの特殊な配合によって作られ、優れた物性を誇ります。そのためMRBは、大変位に対する復元の吸収能力、長期の耐久性、大荷重性能など、免震部材として必要な諸特性をすべて備えています。

(ゴム基本物性)

硬さ (JIS A)	25%定力 (kgf/cm ²)	伸び (%)	引張強度 (kgf/cm ²)
40±5	3.4±1	>500	>200

ゴムS曲線



ゴムの長期クリープ特性

MRBは、長期間にわたりに荷重を受けるためゴムのクリープ現象が起きます。ブリヂストンでは、MRBの長期クリープ実験を行った結果、約36年間で1.1%のクリープ量と極めて小さいものであることが実証されています。

ゴムの長期クリープ特性

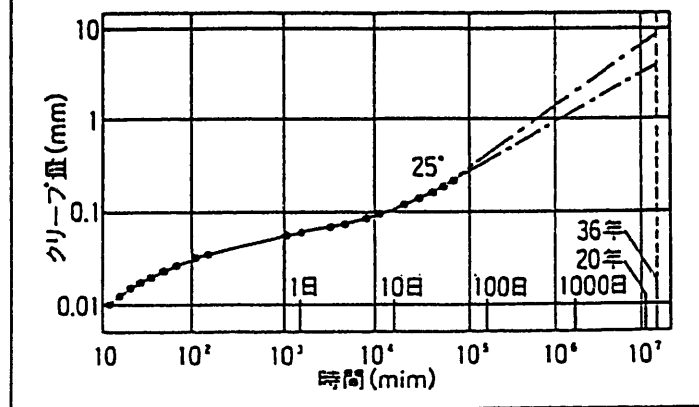


図2.3.2 ゴムの基本物性

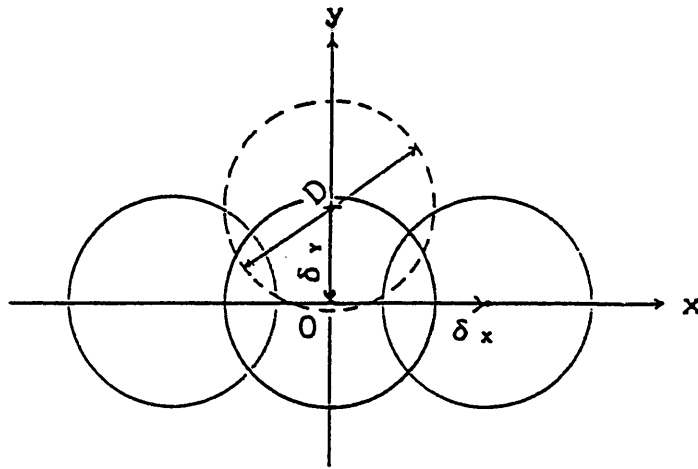


図2.3.3 積層ゴムの初期設定変形 δ_y と動的水平変形 δ_x の関係

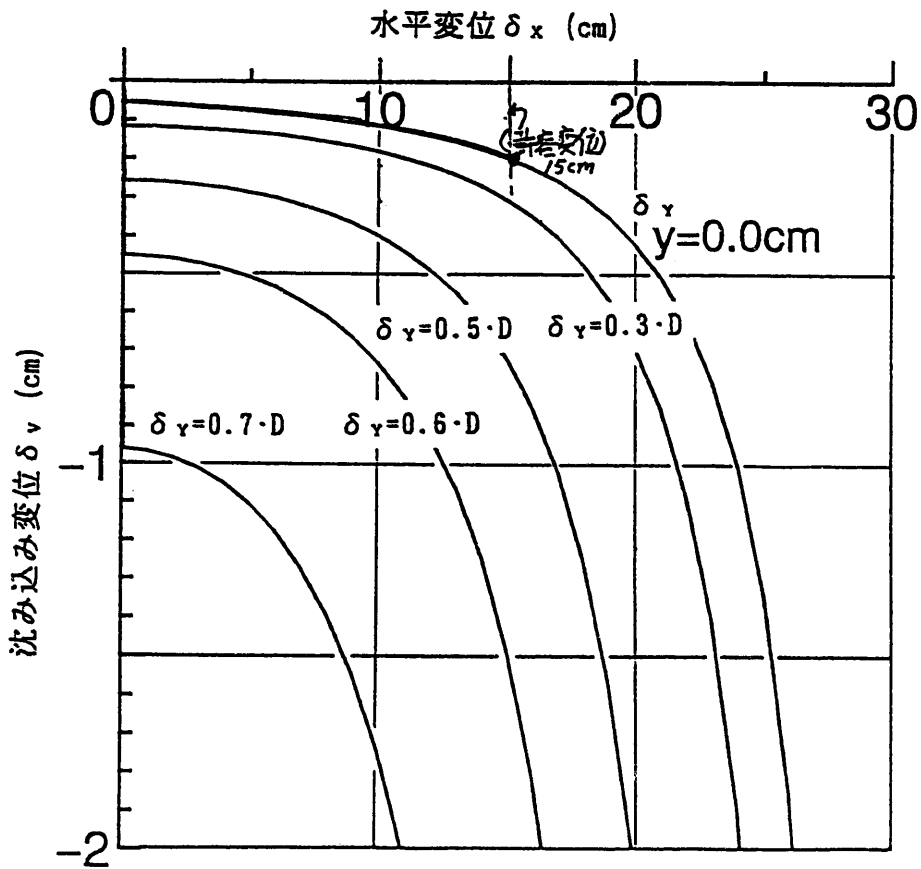


図2.3.4 積層ゴムの水平変位と沈み込み変位の関係

※ 40ton用積層ゴムは、 $90\text{t}/4=22.5\text{t}$ を支持しており、 $\delta_y=0.3D$ がほぼ 22.5t用積層ゴムに相当すると考える。

2.4 ソフトランディング装置

2.4.1 使用材料と設計方針

2.4.1.1 使用材料

ソフトランディング材料は最大負担重量であるモデル重畳 $90\text{t}/4 = 22.5\text{t}$ を支持する耐力を有し、積層ゴムの鉛直剛性より低剛性の弾性材料であること、また、適度の滑り摩擦係数を有する材料であることが望ましい。今回、モデル重量が小さいので今までに経験してきた四弗化樹脂（テフロン）を使用する場合について計画する。

テフロンの基本物性等を表2.4.1 に示す。

表2.4.1 四弗化樹脂（テフロン）の特性

名 称	四弗化樹脂（テフロン）		
比 重	2.14 - 2.20	衝撃強さ	16 kg・cm/cm
吸 水 率	0.01以下	硬度（ロックウェル スケール）	D-50 - D-55
引張り強さ	140 - 350 kg/cm ²	摩耗度	9mg/1000回
伸び破断	200 - 400 %	熱変形温度（4.6 kg/cm ² ）	121 °C
圧縮強さ	120 kg/cm ²	線膨張係数	$1.0 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$

2.4.1.2 設計方針

ソフトランディング装置の設計に当たり、期待する機能と対処法の考え方を整理すると次のとおりである。

1. 過大変形時の鉛直荷重支持機能

テフロン材料の許容圧縮応力度を満たす。

2. 四季の温度変化による積層ゴムの伸縮に対する追随性

テフロンのクリープ特性と弾性特性で対処する。

3. 大変形時の過大な沈み込みの防止（上下動）

テフロンの鉛直剛性により沈み込み量の制限を設ける。

4. ランディング時の衝撃の軽減

テフロンの弾性特性により水平成分と上下成分の衝撃を吸収する。

5. 積層ゴム60年クリープによる沈み込み対応機能

テフロンのクリープ特性と弾性特性で対処する。

6. ダンパー機能（過大変形時のダンパー機能継続）

滑り摩擦抵抗の適正化

以上の通り今回はテフロン材料の若干のクリープ特性と粘弾性特性を利用することで検討する。

2.4.2 材料特性予備実験

2.4.2.1 素材の圧縮実験

テフロン荷重支持性能を調べるために、テフロン単体の圧縮試験を行った。

形状： 直径 $D=170\text{mm}$ ，長さ $L=90\text{mm}$ の素材

弾性率： 図2.4.1より、鉛直バネ定数はほぼ $K=160\text{t/cm}$ であり、これより換算される弾性率 E ， G は次のとおりであった。

$$E=4.63\text{t/cm}^2$$

$$G=1.54\text{t/cm}^2$$

弾性限界荷重： 使用最大荷重は 22.5ton であるが、更に、荷重 $P=40\text{ton}$ までの沈下量 δ_v 曲線を図2.4.2のように得た。 $P=30\text{ton}$ まではほぼ線形特性を保ち、以後非線型性が強く表れる。このデータより、実用の弾性限界をほぼ $P=30\text{ton}$ ($\sigma_{\max}=0.13\text{t/cm}^2$)，設計限界を $P_{\max}=35\text{ton}$ ($\sigma_{\max}=0.15\text{t/cm}^2$)とする。

クリープ特性： 鉛直荷重 $P=22.5\text{ton}$ 一定載荷状態で、時間経過と沈下量の関係を調べた結果、図2.4.3を得た。載荷直後の沈下 $\delta_v=1.7\text{mm}$ が、載荷継続15分後に $\delta_v=2.45\text{mm}$ (0.75mm 増)まで進行し、載荷解除後約12時間経て $\delta_v=1.35\text{mm}$ (1.1mm 減)まで復帰した。

2.4.2.2 成形案の圧縮実験

目的： 上記実験による鉛直バネ定数はほぼ $K=160\text{t/cm}$ であったが、テフロンの鉛直剛性は、表2.3.1に示した積層ゴムの鉛直バネ定数 $K=198\text{t/cm}$ ($\delta_v=0.3D$)， $K=112\text{t/cm}$ ($\delta_v=0.5D$)に比べ低剛性であることが望ましい。よって、最大 $K=100\text{t/cm}$ 程度を目標にして、図2.4.4に示す通り、直径 D を $D=135\text{mm}$ に減じて試験体を作り、1回目と約12時間後の2回目の圧縮実験を行った。

試験体： 本試験体は内径 $D=170\text{mm}$ ，内高 $H=95\text{mm}$ の鉄製容器に、実直径 $D=135\text{mm}$ ，長さ $L=115\text{mm}$ のテフロン試験体を内蔵し、容器の上端から 20mm 張り出す試験体である。

結果と考察： この結果、図2.4.5に示す $P\sim\delta_v$ 曲線が得られ、鉛直バネ定数の目標値の $K=100\text{t/cm}$ が達成された。しかし、非線型性が強く表れた。この非線型性は、特に1サイクル目の処女載荷時に顕著である。なお、1回目の実験終了後継続してほぼ12時間後 δ_v を計測した所、 δ_v は約 1mm ($5.4\text{mm}\rightarrow 4.3\text{mm}$)復帰した。

以上の結果、素材の圧縮試験体で用いた直径 $D=170\text{mm}$ の方が特性上、安定している傾向にあると判断し、免震モデルに適用することとした。

2.4.3 ソフトランディング装置の特性実験

2.4.3.1 ソフトランディングの形状と圧縮応力の検討

形状：90 tモデルに適用するソフトランディング装置の形状を図2.4.6に示す。

テフロン成形材は外径 $\phi = 164\text{mm}$ ，厚さ 106mm の円柱形であり，2.4.2.1で述べた形状にほぼ相当する。また，テフロン成形材の底には，2.4.3.2に述べるが，低剛性を図るためのゴムシート $t = 3\text{mm}$ を敷いている。

許容応力度の検討：積層ゴムに大変形が生じたときに積層ゴムは荷重を支持する機能が喪失し，この全荷重をソフトランディング装置が全面的に負担することになる。この全荷重に対するテフロンの圧縮応力度をチェックすると，次のとおりである。

テフロン厚さ $t = 107\text{mm}$ ，直径 $D = 164\text{mm}$ ，断面積 $A = 211\text{cm}^2$ ，

形状係数 $S = D / 4t = 0.38$ ， $E_{\text{テフロン}} = 5.0\text{kg/cm}^2$ ，鉛直バネ定数 $K_s = 100\text{ t/cm}$

負担荷重 $P = 90\text{ t} / 4 = 22.5\text{ t}$ ， $\delta_{s,1} = 0.22\text{cm}$ より，圧縮歪 $(\varepsilon) = -0.22 / 10.7$

$$= -0.021, \quad A(\varepsilon) = 1 / 3 [(1 + \varepsilon) - (1 + \varepsilon)^2] = -0.021$$

$$\sigma = P / A = E_{\text{テフロン}} \times A(\varepsilon) = 5.0 \times (-0.021) = 0.10\text{ t/cm}^2$$

となり，'2.4.2.1 素材の圧縮実験'で述べたテフロンの弾性限界圧縮応力度 $\sigma = 0.13\text{ t/cm}^2$ 以下である。

2.4.3.2 鉛直加力試験

テフロン成形材の鉛直方向の圧縮特性を調べる実験は，50 tアムスラーで鉛直荷重 P ，～沈み込み変位 δ_v の関係を計測する方法で行った。

圧縮試験結果

図2.4.7にテフロン成形材No.1～No.4単独の圧縮実験で測定された $P \sim \delta$ 特性を示す。4個の成形材がほぼ同じ特性であることが分かる。

図2.4.8～図2.4.9に鋼製円筒棒にNo.1, No.2テフロン成形材を入れて行った圧縮実験結果を示す。ここで，'ゴムシート無し' 'ゴムシート $t = 1\text{mm}$ ' 'ゴムシート $t = 3\text{mm}$ 'はそれぞれ低剛性を図るためにその傾向を見たものである。鉛直剛性約 $K = 100\text{kg/cm}$ が得られたゴムシート $t = 3\text{mm}$ の場合を90 tモデルに適用した。

2.4.3.3 水平加力試験

試験方法

水平加力試験は'積層ゴム+ソフトランディング装置'の状態で行った。実験は積層ゴムで支持された90 tモデルにテフロン成形材を納めたソフトランディング装置を図2.2.2に示す所定の場所に4個取り付けて，また，モデルの両側の短辺方向

に油圧ジャッキ2台を設置して、変位制御法で2台同時に水平加力する方法で行った。測定用に、油圧ジャッキの水平荷重計2台、モデル両側の水平短辺方向変位計2台、ソフトランディングに内蔵された3軸荷重計2台と同1軸荷重計2台、積層ゴム近傍の鉛直方向変位計4台を使用した。

試験内容

水平加力試験ケースを表2.4.2に示す。

表2.4.2 水平加力試験ケース

	ランディングの タッチ状態	変位 δ_y	変位 δ_x
ケース1	(積層ゴムのみ)	0.0cm	0→±18cm
ケース2	$\delta_y = 0.0$ で面タッチ	0.0cm	0→±18cm
ケース3	同, 面タッチ	10.0cm	0→±5→10→±15cm
ケース4	同, 面タッチ	10.0cm	0→±15cm 5回繰り返し

ここで、‘ $\delta_y = 0.0$ で面タッチ’とは水平変位 $\delta_y = \delta_x = 0$ の状態では鉛直荷重計の値を0として、厚さ0.2mmライナーの挿入が不可の状態である。また、‘ $\delta_y = 0.0$ で面タッチ、 $\delta_y = 10.0\text{cm}$ ’とは、‘ $\delta_y = 0.0$ で面タッチ’の状態にした後、初期変位 $\delta_y = 10.0\text{cm}$ を与えている。従って、初期変位 $\delta_y = 10.0\text{cm}$ 変形による沈み込み分の荷重がソフトランディングに生じている。この状態を得て後に、 δ_x に関する強制加力実験を行っている。

試験結果

ケース2～4の試験結果を図2.4.10a)～d)、～図2.4.12a)～d)に示す。それぞれ、a) 水平変位 δ_x ～沈み込み変位 δ_y 、b) 水平変位 δ_x ～ソフトランディングの鉛直荷重 P_s 、c) 水平変位 δ_x ～ソフトランディングの水平摩擦せん断抵抗力 Q_s 、d) 水平変位 δ_x ～“合計せん断力 $Q = Q_s + \text{積層ゴムせん断力} Q_R$ ”である。なお、 δ_x はモデル両側の2台の変位計の平均値、 δ_y は積層ゴム部各々計4台の鉛直変位計の平均値、 P_s はソフトランディング1軸荷重計と3軸荷重計の鉛直4成分の平均値、 Q_s はソフトランディング3軸荷重計2台の水平成分の平均値である。

以上の結果を考察すると以下のとおりである。

ケース2の試験結果の図2.4.10a)～d)より、水平剛性変位 δ_x に応じて、

グに鉛直荷重 P_s , c)同, 水平摩擦せん断抵抗力 Q_s , d)せん断力 $Q = Q_s + Q_k$ の発生が確認される。量的には, 沈み込み予測値 δ_v

$$\delta_v = W / (4 K_k + 4 K_s) = 90 / (4 \cdot 112 + 4 \cdot 115) = 0.099 \text{ cm}$$

に対して実測値 1 mm 前後であり, ほぼ対応している。また, 摩擦係数 μ の測定値は $\mu = P_s / Q_s = 0.12$ 程度である。

ケース 4 の試験は, テフロン繰返しに関する安定性を調べると共に, 積層ゴムの δ_v の温度依存性に対するソフトランディング特性の変化を, 多少ではあるが調べたものである。繰返しによる特性の相違はほとんど見られない。また, 温度差に関して, 積層ゴムの a) 沈み込み変位 $\delta_v = \text{約} 0.1 \text{ mm}$ が顕著に表れているものの, しかし, ソフトランディングの $\delta_x \sim Q_s$, 及び, 全体系の $\delta_x \sim Q$ においてほとんどその影響が見られないことなどが明らかになった。

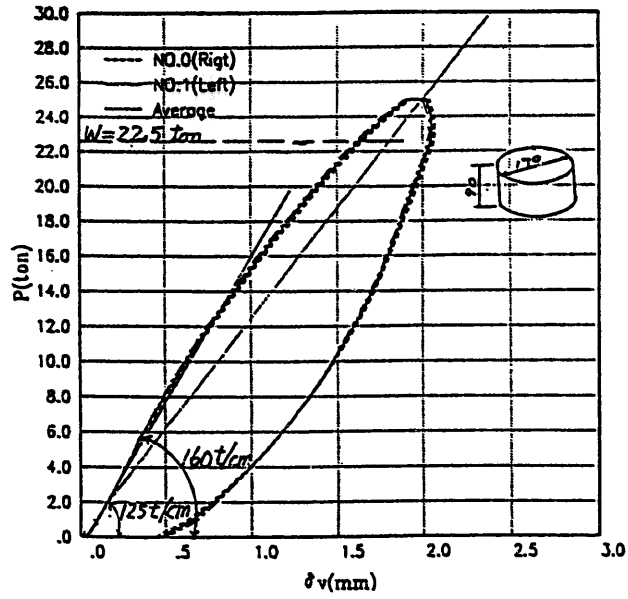


図2.4.1 テフロン $P \sim \delta v$ 特性

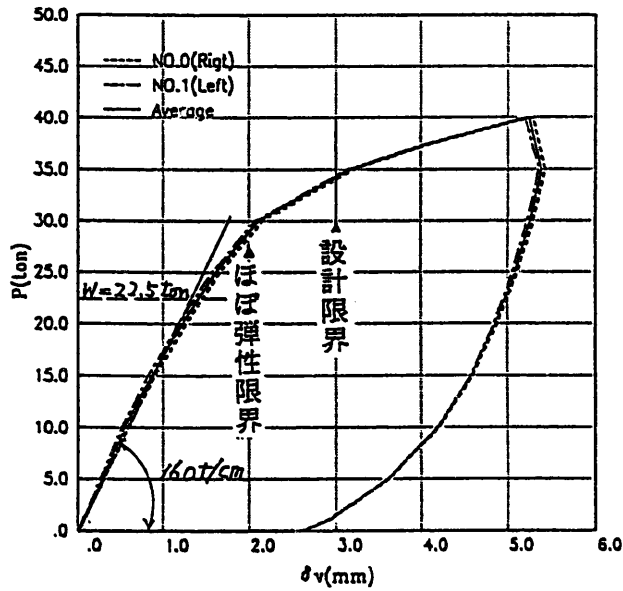


図2.4.2 テフロン $P \sim \delta v$ 特性 (使用荷重以上の特性)

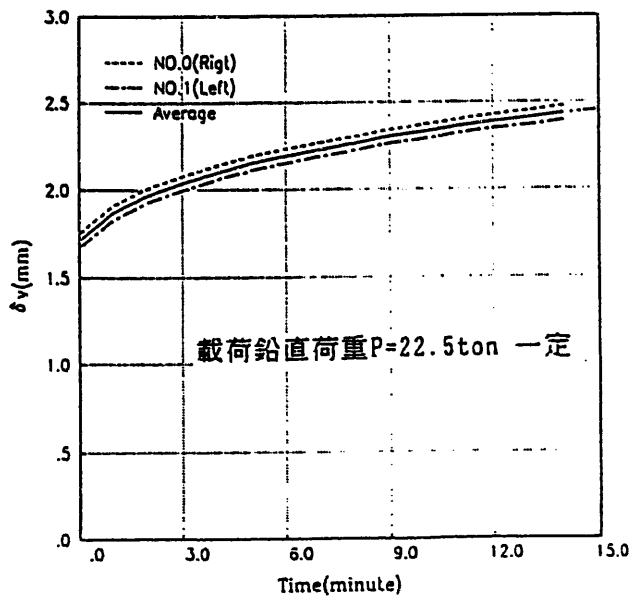


図2.4.3 クリープ特性試験

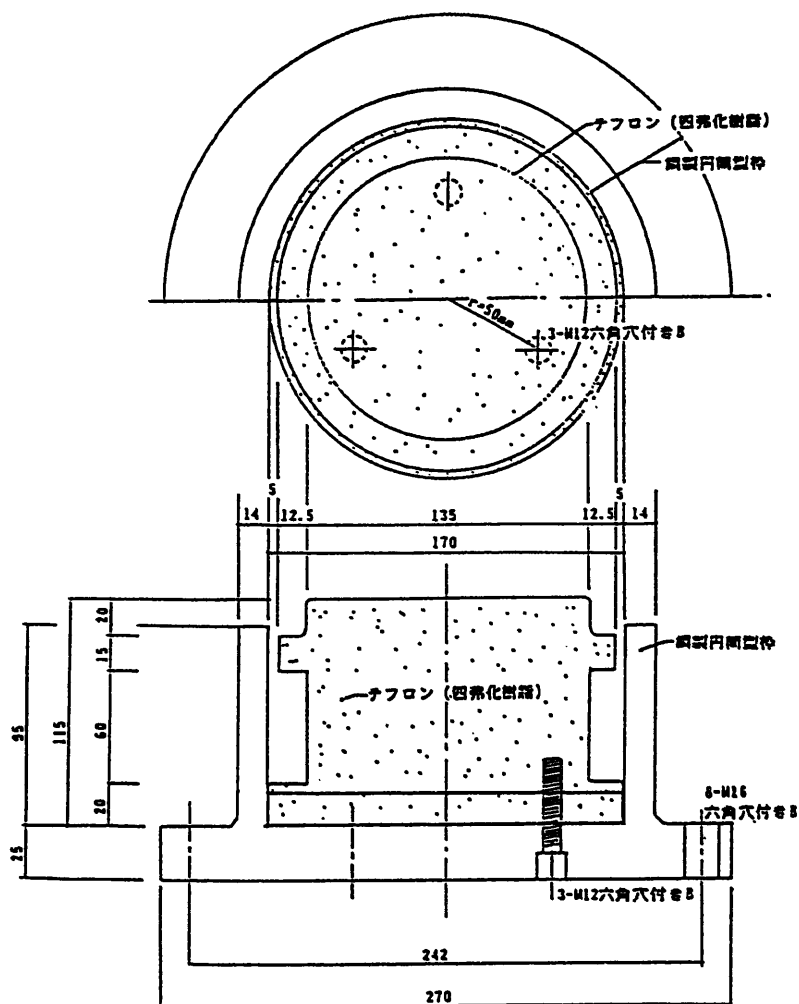


図2.4.4 II型(ソフト)ランディング装置試験体

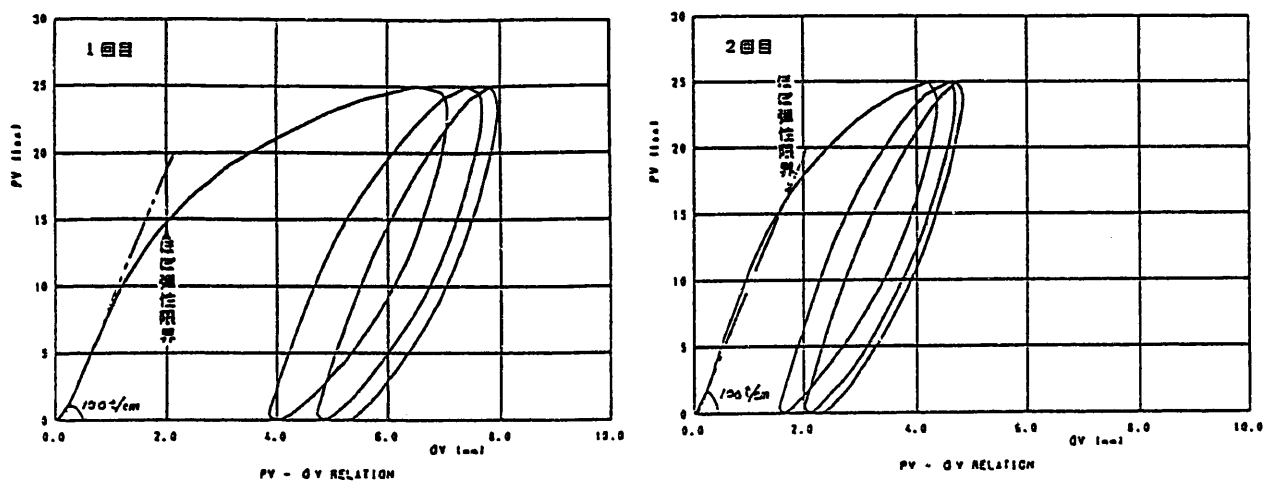


図2.4.5 II型(ソフト)ランディング装置試験体の鉛直荷重P ~沈下 δv 曲線

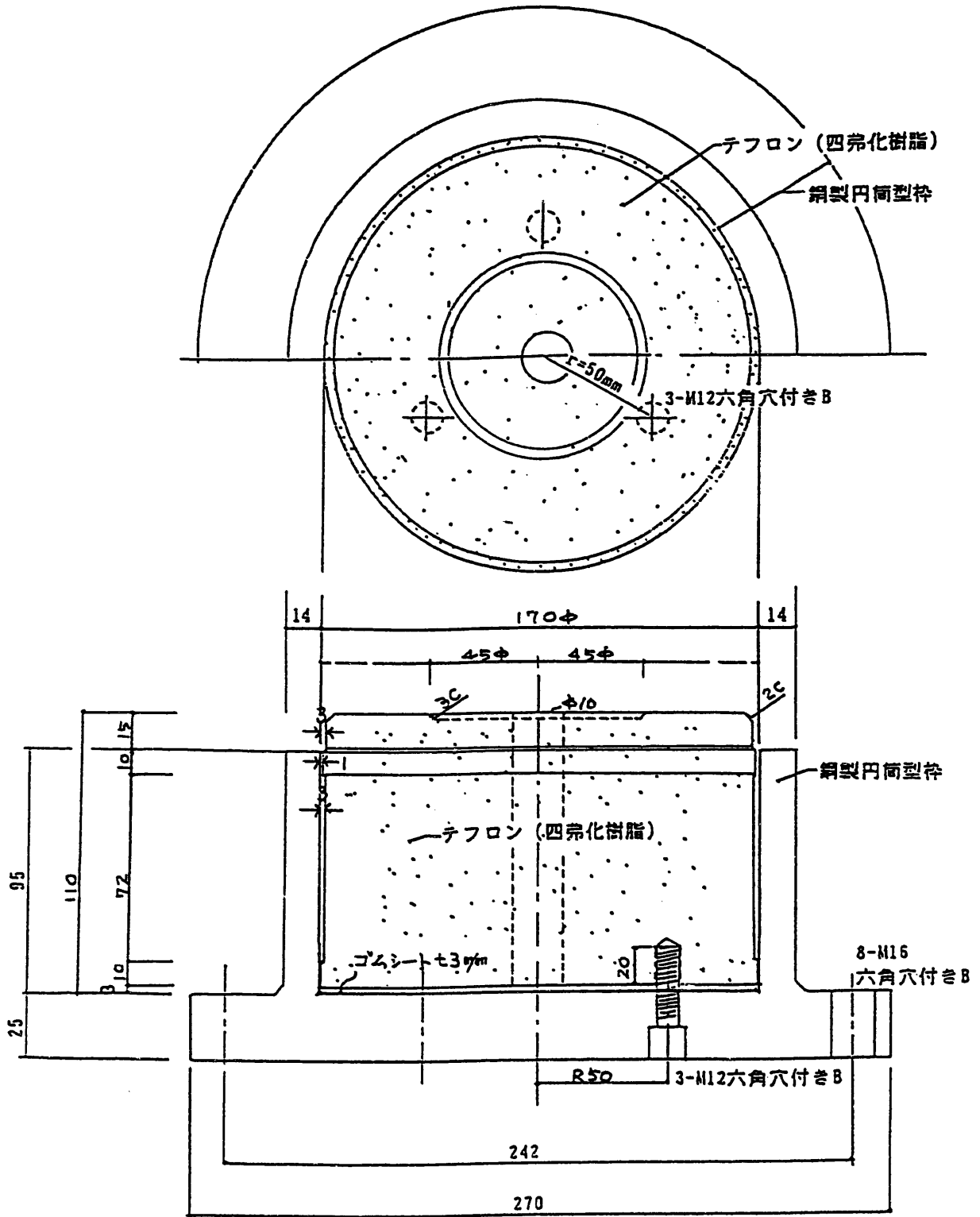


図2.4.6 II型(ソフト)ランディング装置試験体(90tonモデル)

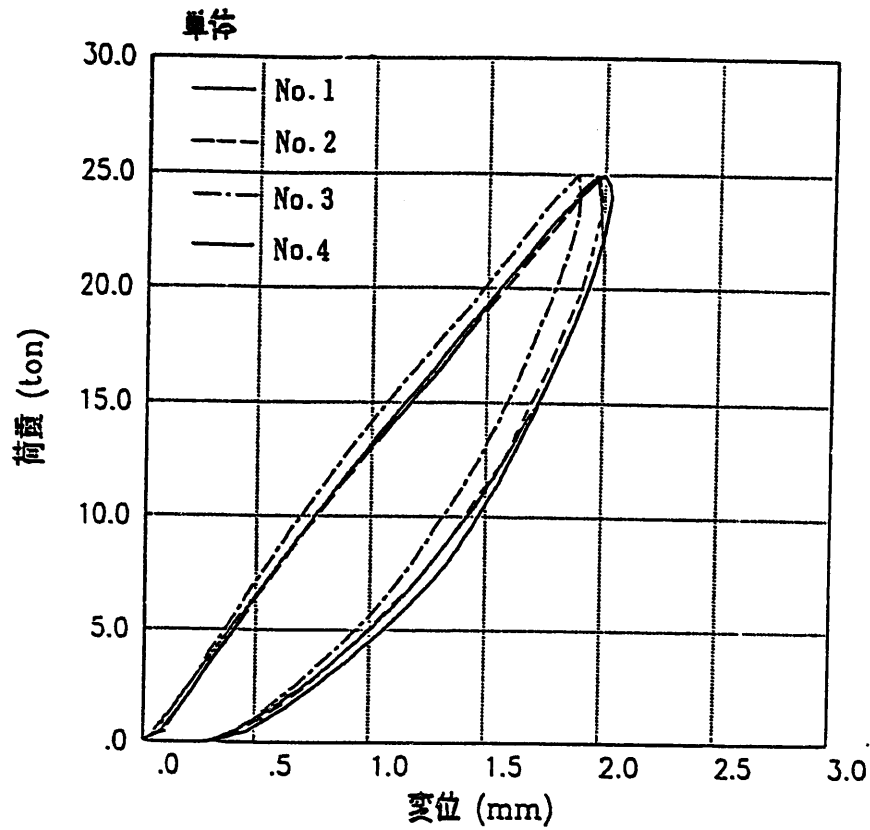


図2.4.7 テフロン成型材(No. 1, No. 2, No. 3, No. 4)の圧縮
荷重 P_z ～変位 δz 試験結果(200ton アムスラー)

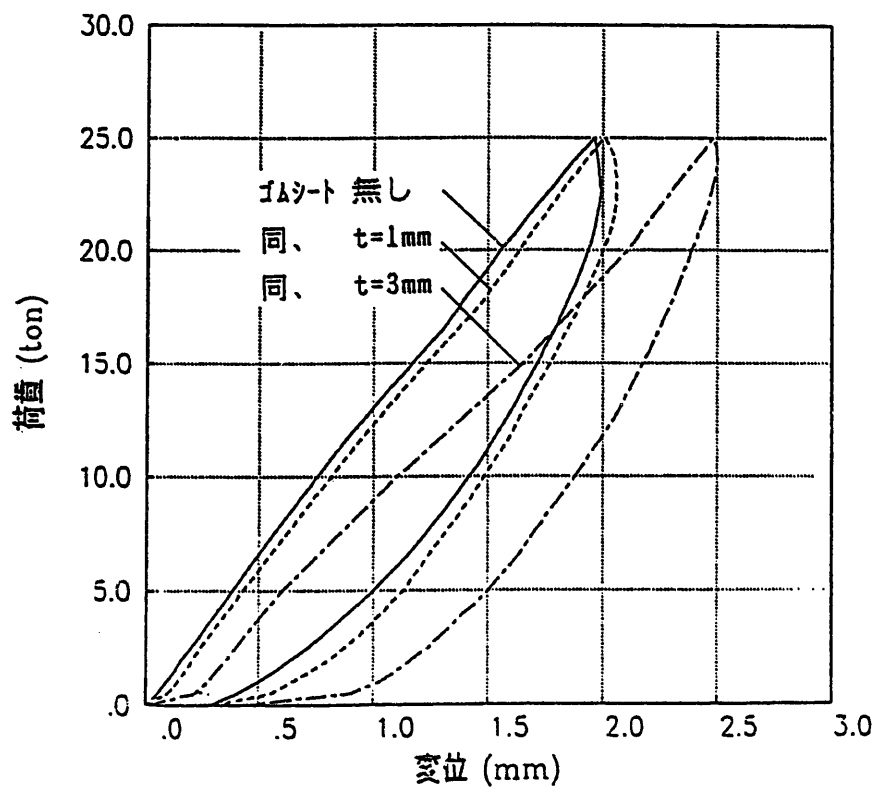


図2.4.8 ゴムシート挿入後のテフロン成型材(No. 1) の圧縮
荷重 P_z ～変位 δz 試験結果(200ton アムスラー)

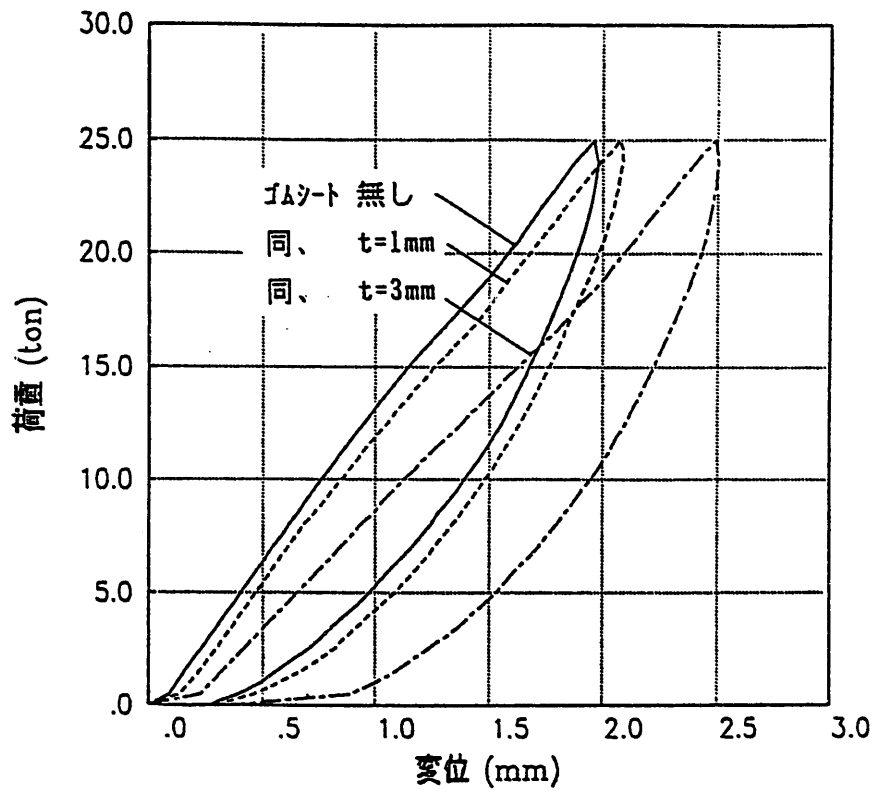
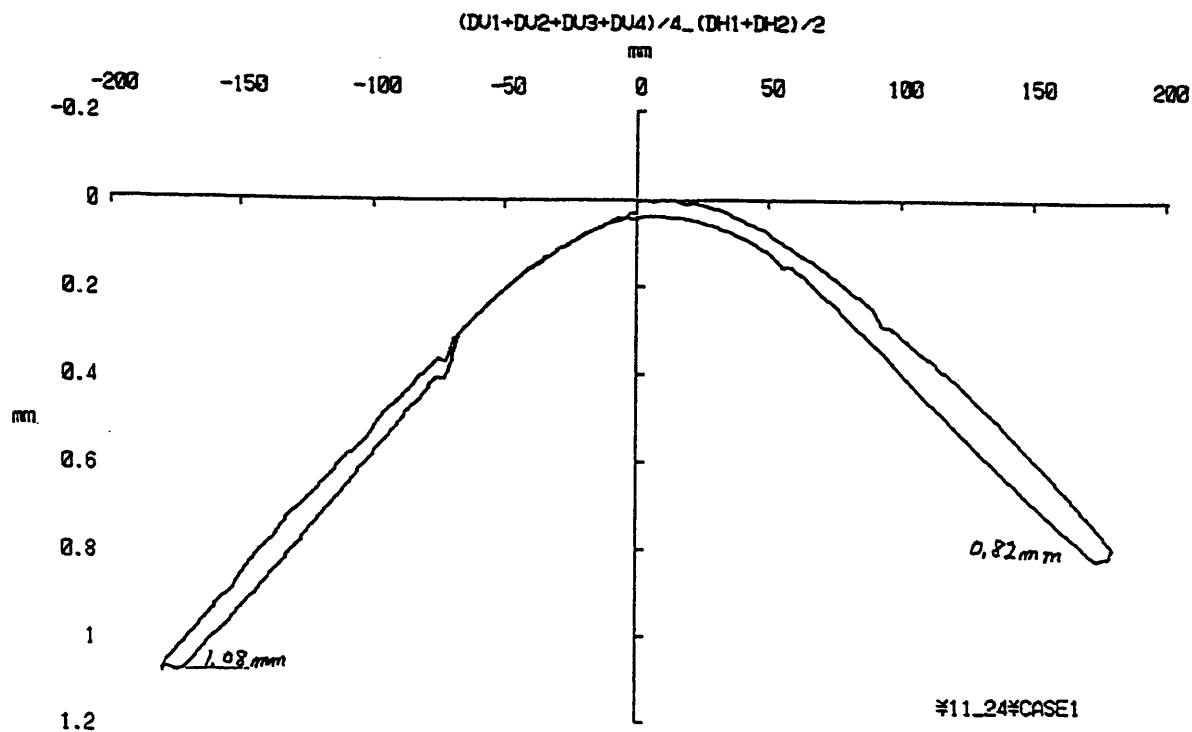
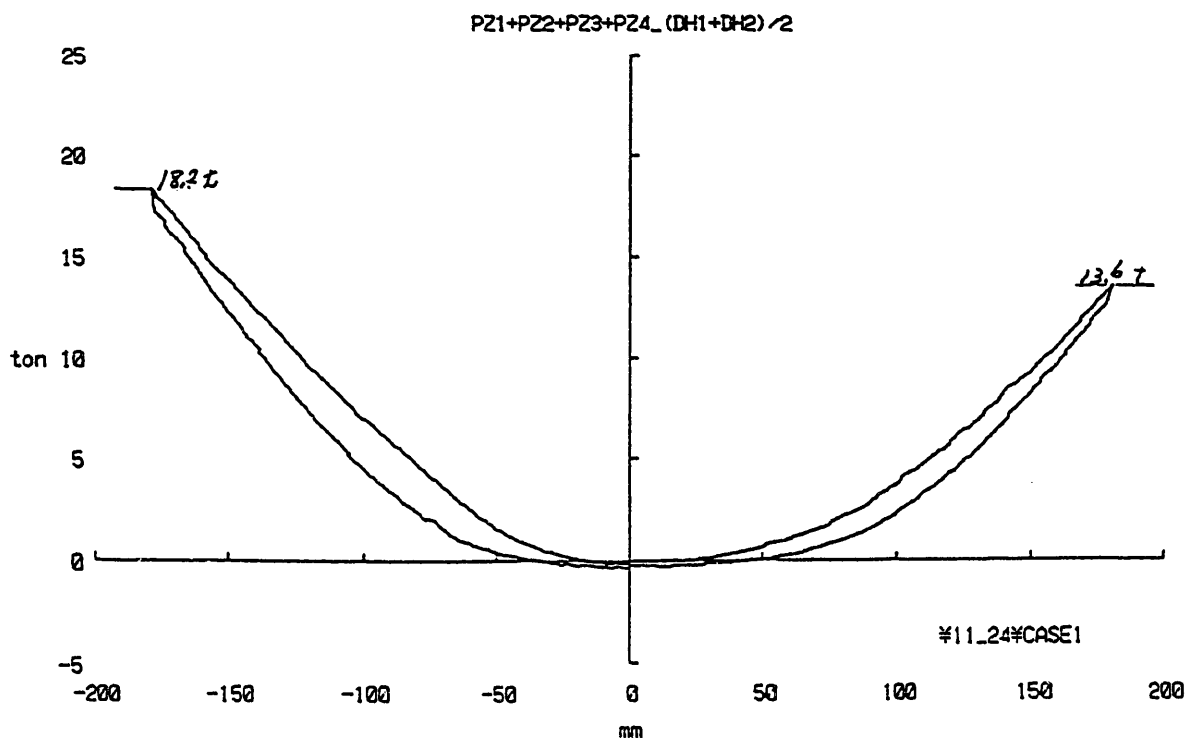


図2.4.9 ゴムシート挿入後のテフロン成型材(No. 2) の圧縮
荷重 P_z ～変位 δ_z 試験結果(200ton アムスラー)

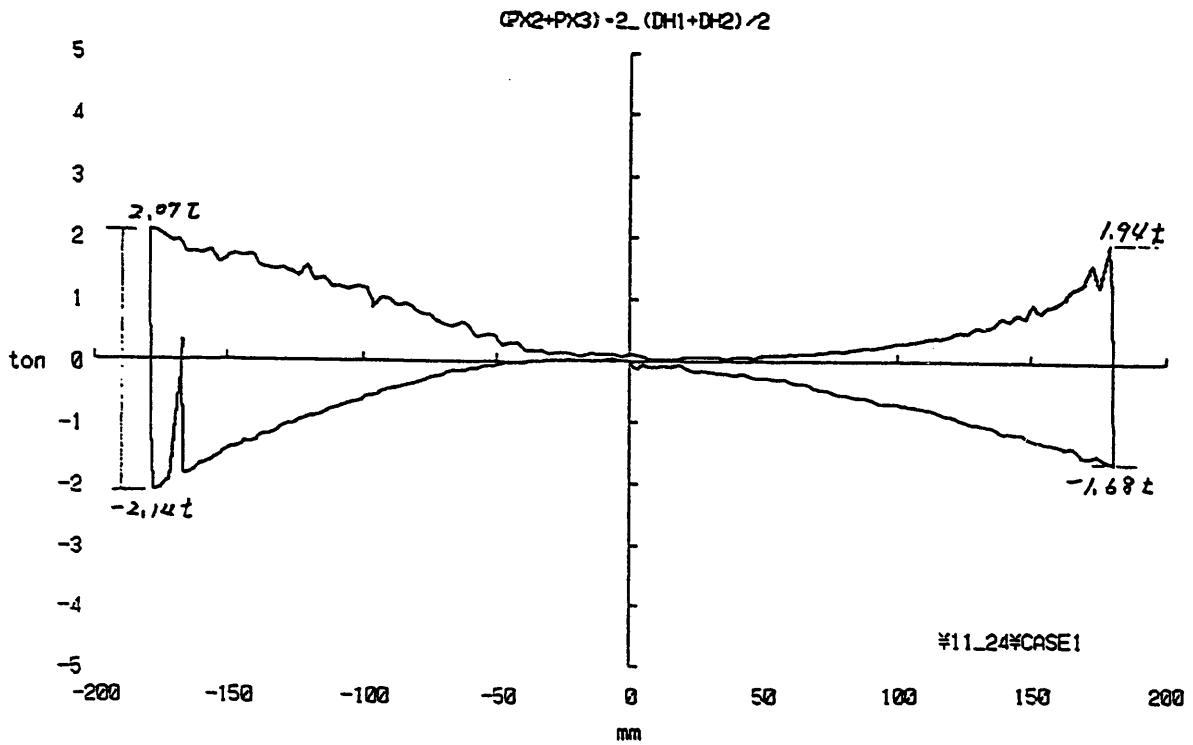


a) 水平変位 δ_H ~ 沈み込み変位 δ_v

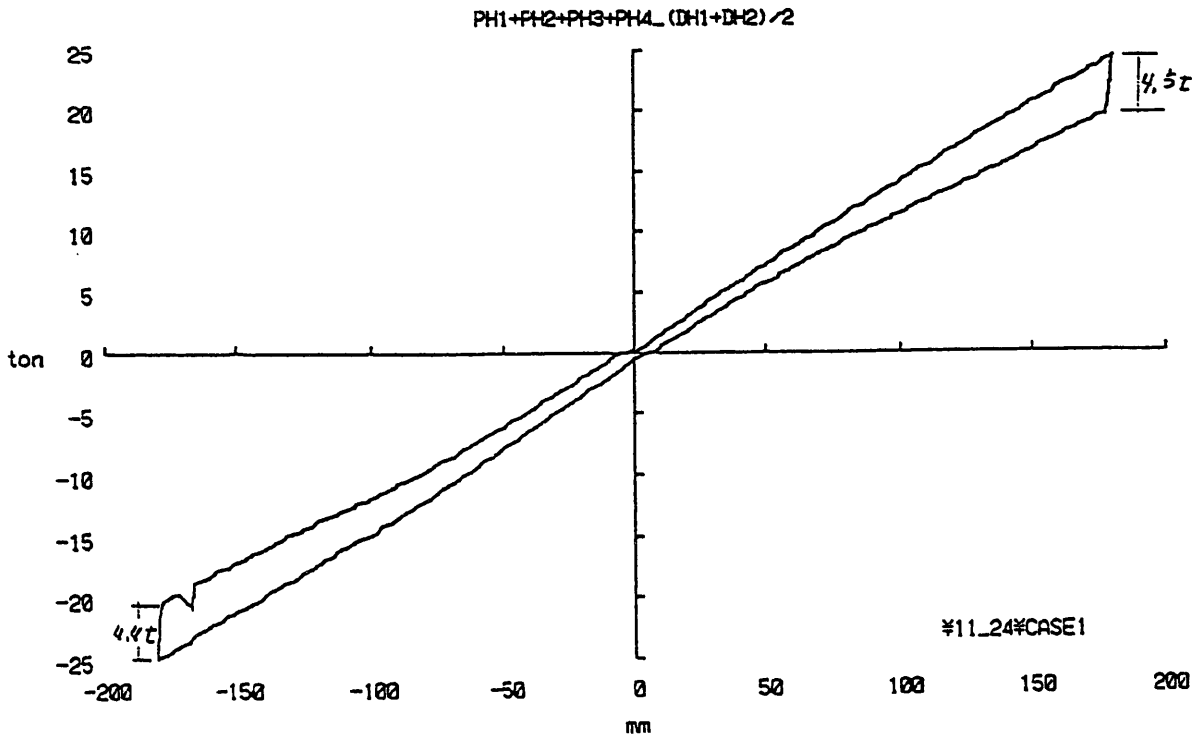


b) 水平変位 δ_H ~ ソフトラジィング鉛直荷重 P_s

図2.4.10 ケース2($\delta_v = 0\text{cm}$, 面タッチ)の実験結果

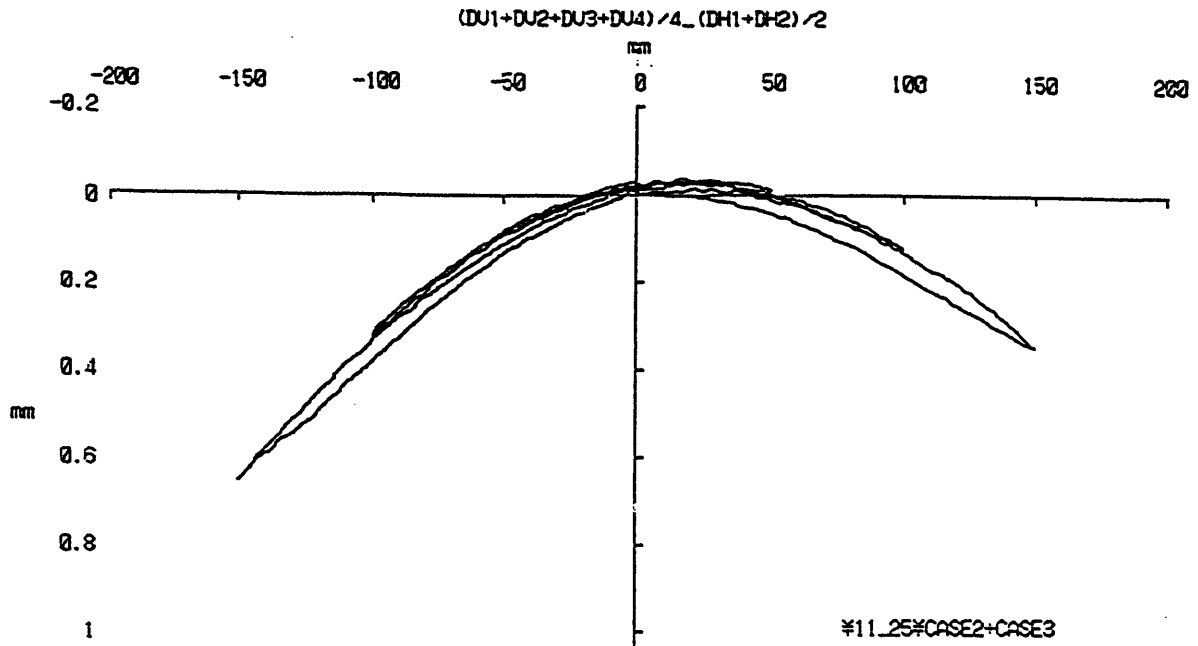


c) 水平変位 δ_H ~ ソフトランディング水平せん断力 Q_s

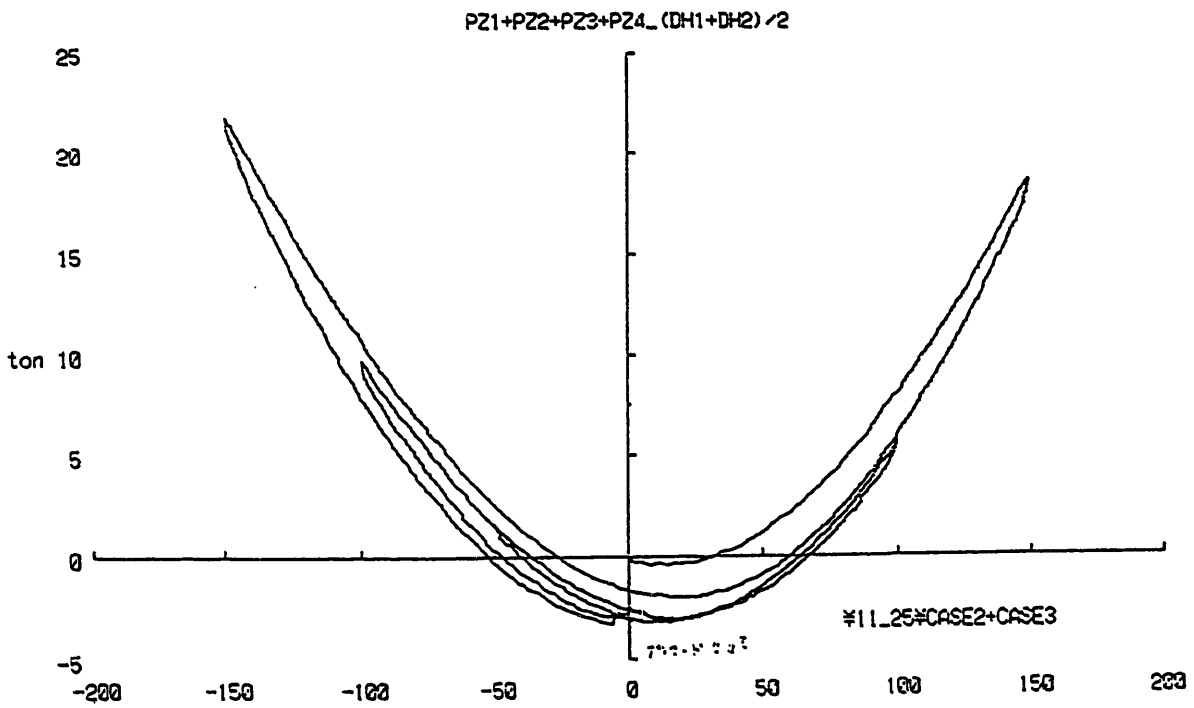


d) 水平変位 δ_H ~ “積層 ΔQ_R + ソフトランディング Q_s ” のせん断力 Q

図2.4.10つづき ケース2 ($\delta_Y = 0\text{cm}$, 面タッチ) の実験結果

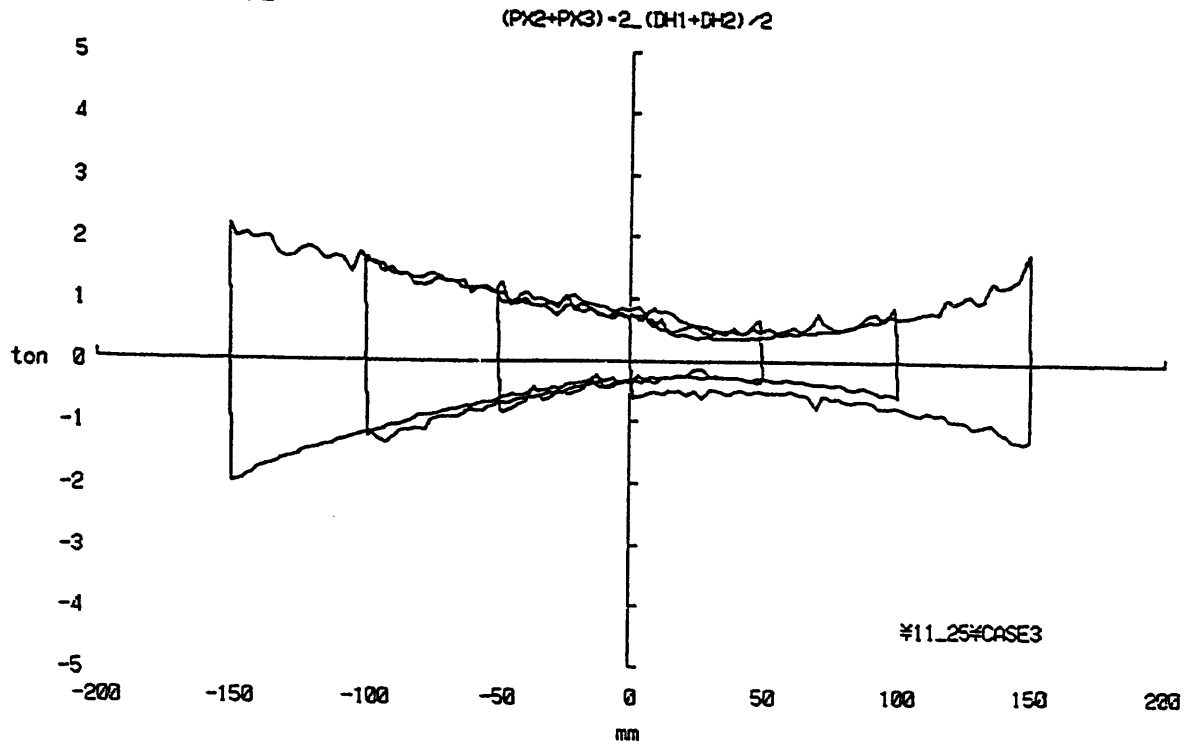


a) 水平変位 δ_H ~ 沈み込み変位 δ_v

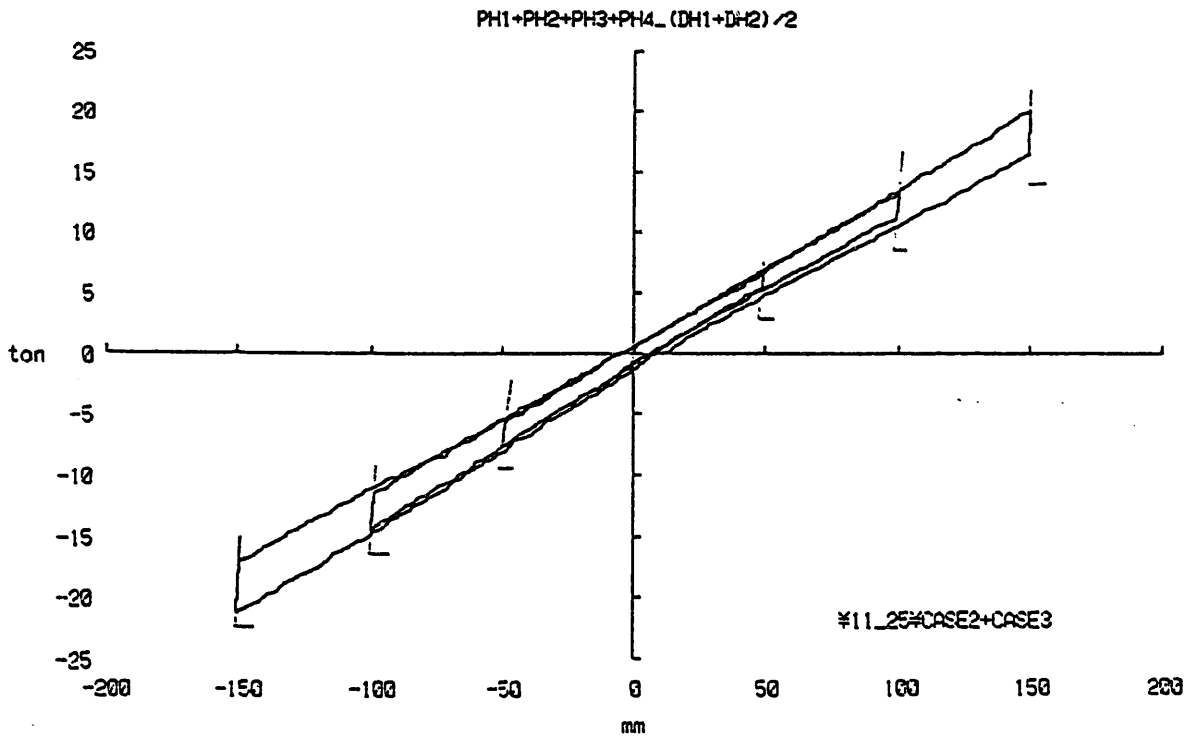


b) 水平変位 δ_H ~ ソフトニング鉛直荷重 P_s

図2.4.11. ケース3($\delta_v = 0\text{cm}$ で面タッチ、後 $\delta_v = 10\text{cm}$ 初期変位)の実験結果

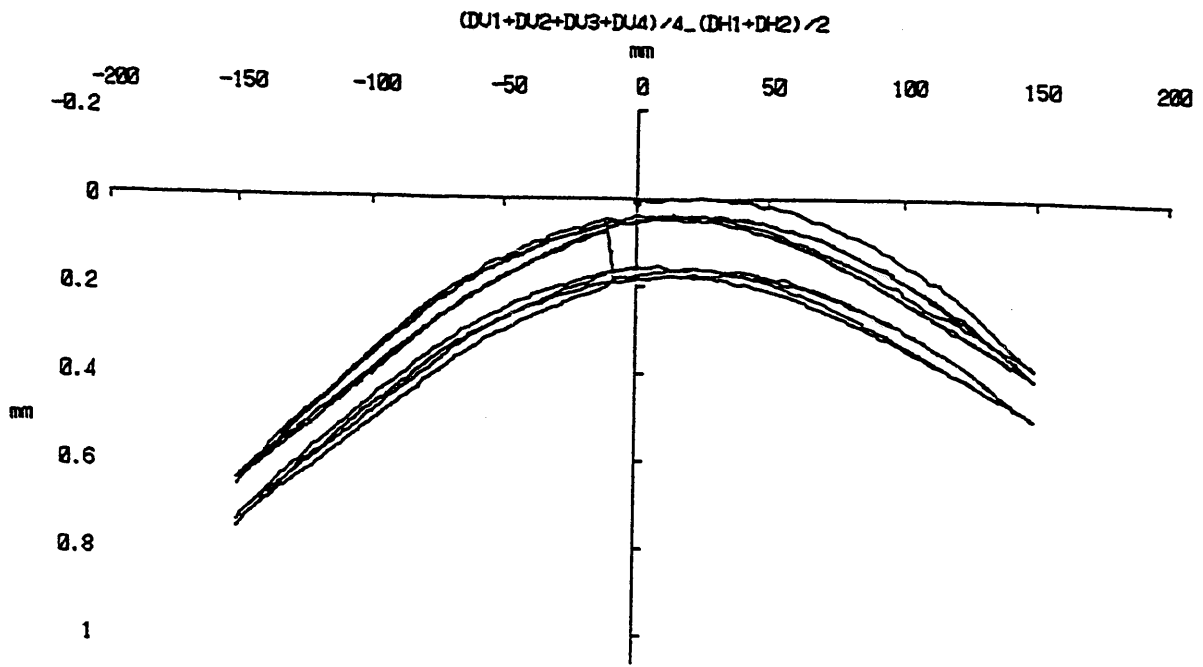


c) 水平変位 δ_H ~ ソフトランディング水平せん断力 Q_s

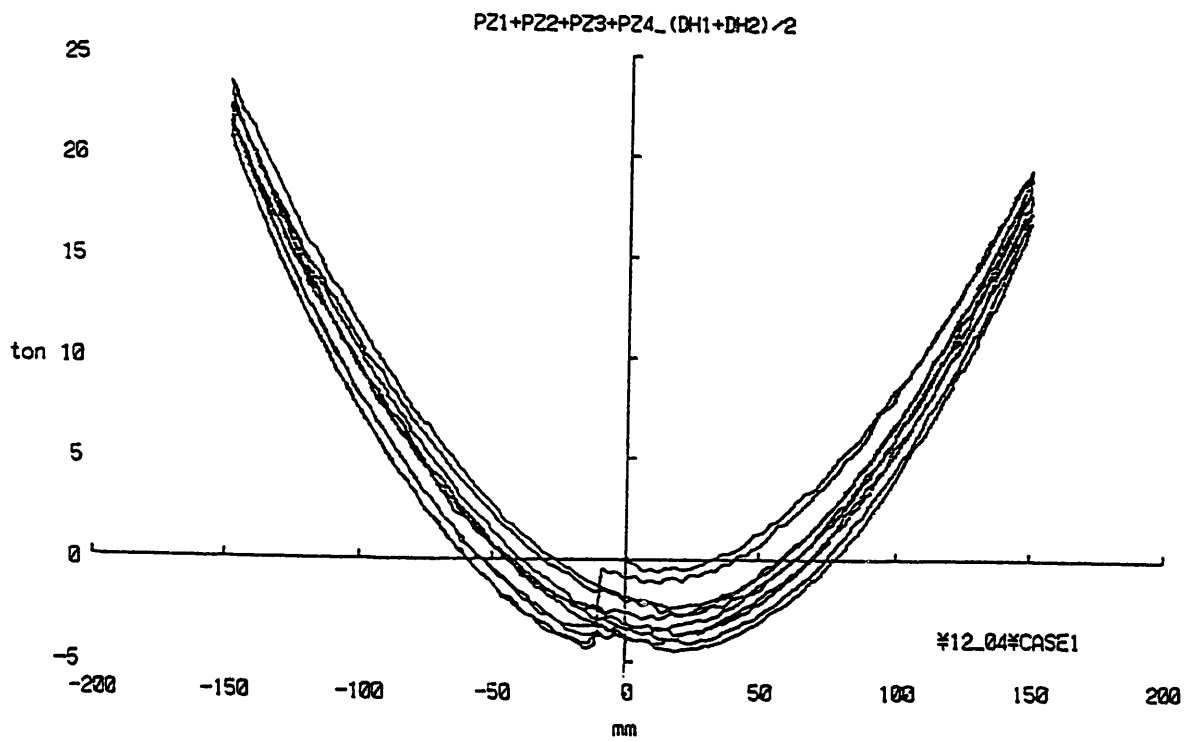


d) 水平変位 δ_H ~ “積層 ΔQ_R + ソフトランディング Q_s ” のせん断力 Q

図2.4.11つづき ケース3($\delta_v = 0\text{cm}$ で面タッチ、後 $\delta_v = 10\text{cm}$ 初期変位) の実験結果

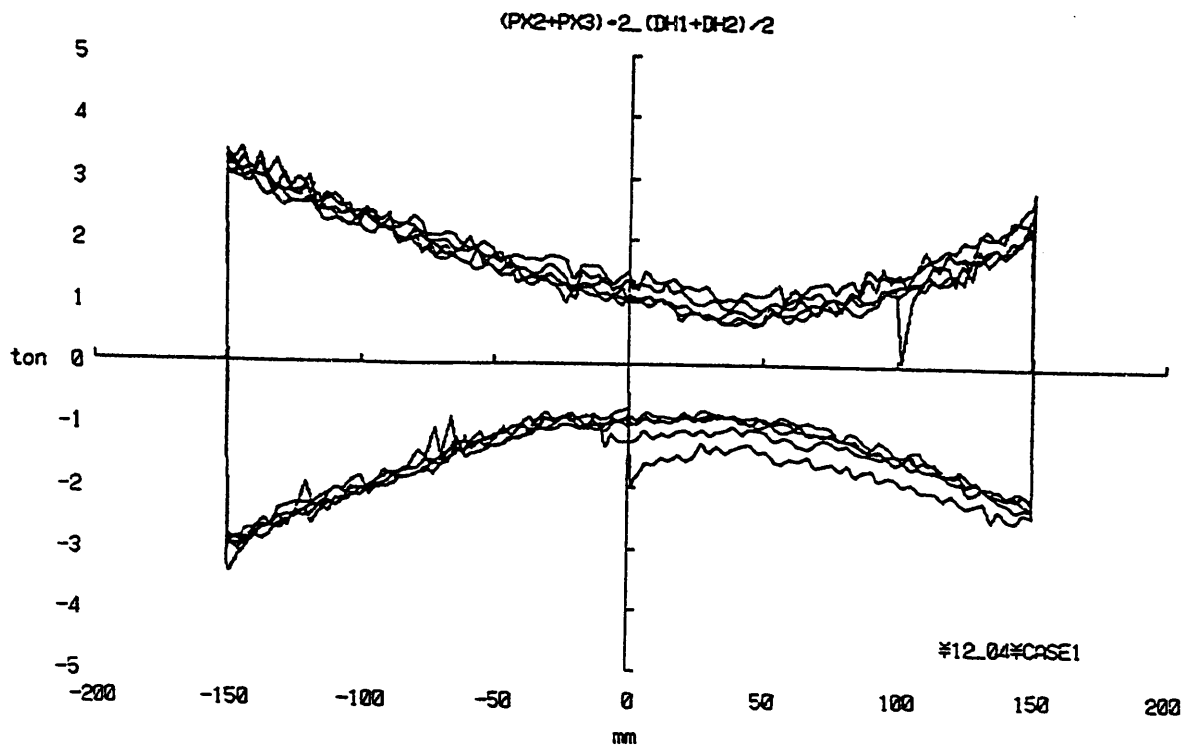


a) 水平変位 δ_H ~ 沈み込み変位 δ_V

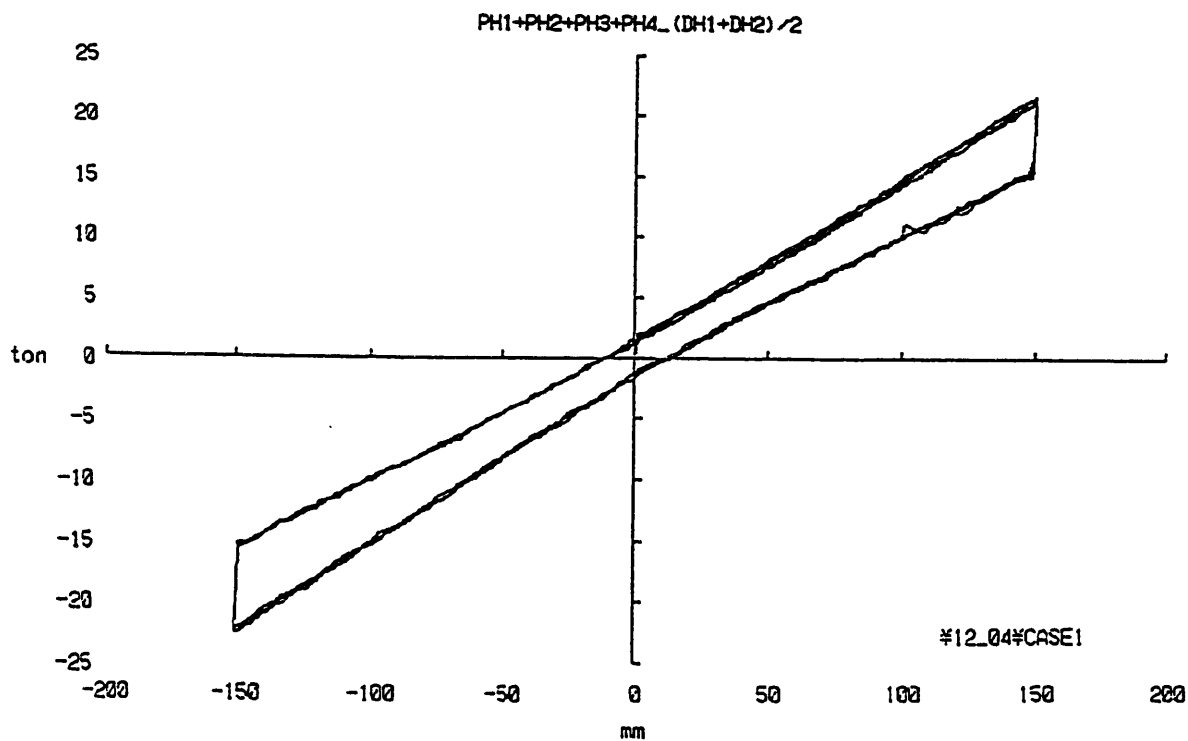


b) 水平変位 δ_H ~ ソフトランディング鉛直荷重 P_s

図2.4.12 ケース4($\delta_V = 0\text{cm}$ で面タッチ、後 $\delta_V = 10\text{cm}$ 初期変位、5 回繰返し) の実験結果



c) 水平変位 δ_H ~ ソフトランディング水平せん断力 Q_s



d) 水平変位 δ_H ~ “積層 ΔQ_R + ソフトランディング Q_s ” のせん断力 Q

図2.4.12つづき ケース4($\delta_v = 0\text{cm}$ で面タッチ、後 $\delta_v = 10\text{cm}$ 初期変位、5回繰返し)の実験結果

2.5 積層ゴム+ソフトランディングの特性解析

2.5.1 P～δ 特性の計算式

ソフトランディングの鉛直方向の荷重 P_s と沈み込み δ_v の解析モデルを図2.5.1に示す。この $P_s \sim \delta_v$ 曲線で $\delta < \delta_0$, $P < P_0$ の範囲は一定面圧を受けるまでテフロン本来の鉛直剛性が発揮されない領域であり2次特性で近似する。

複合特性に関する積層ゴムの負担荷重 P_R と、ソフトランディングの負担荷重 P_s の関係の基本式を次式とする。

$$P_R + P_s = W \quad (5.1)$$

$$P_R = K_R (X, Y) \times \delta_v \quad (5.2)$$

$$P_s = \{(0.5 \cdot K_s)^2 / \sigma A_s\} (\delta_v + t - \delta_{st})^2 \quad P_s \leq P_0 \quad (5.3)$$

$$= K_s (\delta_v - \delta_0) + P_0 \quad P_s \geq P_0 \quad (5.4)$$

ここで、 W : モデル重量, K_R : 水平成分 X, Y に依存する積層ゴムの鉛直バネ定数, δ_v : 積層ゴムの無積載時を基準とした沈み込み量, K_s : ソフトランディング鉛直バネ定数, t : プレロードに相当するレベル調整厚さ, δ_{st} : $\delta_x = 0.0$ (静止) の沈み込み量 (静的沈み量), σ : 密着状態に達する時の面圧, である。

2.5.2 $Q_s \sim \delta_H$ 特性の計算式

ソフトランディング材料テフロンの $Q_s \sim \delta_H$ 特性の解析モデルを図2.5.2に示す。この特性は、上記の荷重 P_s を用いて、摩擦抵抗力 $Q_s = 90 \text{ t} / 4 \text{ 個} = 22.5 \text{ t}$ から $Q_s = 0.12 \times 22.5 = 2.7 \text{ t}$ となる。積層ゴムも含めて複合系に関する水平方向のせん断力 $Q \sim$ 変位 δ_x の計算式は次式である。

$$Q_R = {}_H K_R \times \delta_x \quad (5.5)$$

$$Q_s = \mu \times P_s \quad (5.6)$$

$$Q = Q_R + Q_s \quad (5.7)$$

ここに、 Q_R , ${}_H K_R$: 積層ゴムの復元力と水平バネ定数, Q_s , μ : ソフトランディングの復元力と摩擦係数, Q : 複合系のせん断力である。

2.5.3 複合系の基本特性

積層ゴム初期変位 δ_y とランディング鉛直剛性 ${}_s K_v$ が、複合系の復元力特性などに及ぼす影響を調べる目的でパラメータスタディを以下のように行った。

D を積層ゴム直径として、初期設定変形 δ_y (単に y とする) $= 0.3 \cdot D = 10.2 \text{ cm}$ の場合と $y = 0.5 \cdot D = 17.0 \text{ cm}$ の場合について計算結果を以下に示す。なお、式(5.3)の P_s 式の厚さ $t = 0$ の場合である。

図2.5.3(a)に、水平変位 δ_x と積層ゴム負担荷重 P_R の関係を示す。水平変位 x に関する積層ゴムの負担荷重 P_r の減少率は、当然のことながら、初期設定変形 $y=0.3D$ の場合より $y=0.5D$ の場合の方が大きい。

図2.5.3(b)に、 δ_x と沈み込み量 δ_v の関係を示す。この図より、ソフトランディング鉛直剛性 ${}_sK_v$ は沈み込み限界量 Z_{max} を支配することが分かる（ ${}_sK_v=100\text{t/cm}$ ： $Z_{max}\approx 2.25\text{mm}$ ， ${}_sK_v=50\text{t/cm}$ ： $Z_{max}\approx 5\text{mm}$ ， ${}_sK_v=25\text{t/cm}$ ： $Z_{max}\approx 9\text{mm}$ ）。

図2.5.3(c)に δ_x とせん断力 Q の関係を示す。 $Q\sim\delta_x$ の履歴特性はソフトランディング鉛直剛性 ${}_sK_v$ に起因する相違は比較的少ない。

2.5.4 ソフトランディングにプレロードを付与することによる影響

y 方向の初期変位 $y=0.5D$ （ D ：積層ゴム直径），ランディング鉛直剛性 ${}_sK_v=50\text{t/cm}$ の時に、プレロード P_s が無い場合（ $P_s=0.0\text{ton}$ ）と、ある場合（ $P_s=1.45\text{ton}$ ）とのソフトランディングの特性計算値を図2.5.4に示す。変位 $x=0.0\text{cm}$ においてソフトランディングに軸力 P_s は作用するが、プレロードの有無による $Q\sim X$ 履歴特性等への大きな相違は比較的少ない。

前記のソフトランディング特性に、積層ゴムの特性を含めた複合特性を図2.5.5に示す。同図の計算は、プレロードなし（ $t=0$ ）， $P_s=0.73\text{ton}$ （ $t=0.25\text{mm}$ ）， 1.45ton （ $t=0.5\text{mm}$ ）の場合であるが、見方を変えれば、クリープ、あるいは、温度変化による積層ゴムとテフロンとの静的相対沈み込み量とみても同様である。この意味で計算上挿入薄鉄板厚さ t で表示することとした。同図より、 t が $Q\sim X$ 履歴特性等へ及ぼす影響は比較的少ないと言える。

2.5.5 水平方向のバネ定数と鉛直方向のバネ定数

水平変位 δ_x に関する積層ゴムとテフロンとの複合系の水平方向のバネ定数 K_H と鉛直方向のバネ定数 K_v を、水平変位 δ_x に対する変化として図2.5.6に示す。

水平バネ定数は積層ゴムにのみ依存する。鉛直バネ定数 K_v は積層ゴムの K_r （ x, y ）が δ_x の増加とともに弱剛性化し、テフロンの鉛直バネ K_s に収れんする。同図では、 y 方向の初期変位 $\delta_y=0.0\text{cm}$ ， $0.3D\text{cm}$ ， $0.5D\text{cm}$ （ D ：積層ゴム直径），テフロンの鉛直バネ定数 $K_s=100\text{kg/cm}$ ， 50kg/cm ， 25kg/cm をパラメータとして示す。

2.5.6 $Q\sim\delta_x$ の等価減衰定数

積層ゴムの弾性特性にソフトランディングの滑り摩擦抵抗力が加算された図2.5.5の $Q\sim\delta_x$ 履歴曲線から次式により等価減衰定数 h を得る。

$$h = (1/\pi) (\nabla W/W)$$

W : 弾性エネルギー

∇W : 損失エネルギー

積層ゴムの等価減衰定数 $h_R = 0.025$ に等価減衰定数 h を加算した減衰定数を水平変位 δ_x との関係で図2.5.7に示す。等価減衰定数 h はほぼ $h = 6 \sim 10\%$ である。

2.5.7 上下動に関する検討

積層ゴムが大変形してモデルに生じる最大上下動は、モデル荷重がソフトランディングに全面的に作用した時の変位量から、概略、次の通りである。

振動数：約1.55Hz

振 幅：ソフトランディング 剛性 $K_s = 100\text{t/cm}$ $\delta_v = \pm 0.113\text{cm}$ $\text{Acc} = 10.7\text{cm/sec}^2$

ソフトランディング 剛性 $K_s = 50\text{t/cm}$ $\delta_v = \pm 0.225\text{cm}$ $\text{Acc} = 21.3\text{cm/sec}^2$

ソフトランディング 剛性 $K_s = 25\text{t/cm}$ $\delta_v = \pm 0.450\text{cm}$ $\text{Acc} = 41.3\text{cm/sec}^2$

2.5.8 環境温度による影響

積層ゴム、及び、テフロン温度による伸縮量は、

伸縮量 = 総厚 \times 線膨張係数 \times 温度変化、

より、

積層ゴム $\delta_R = 127.6 \times 3 \times 10^{-4} \times \pm 20^\circ\text{C} = \pm 0.76\text{mm}$

テフロン $\delta_s = 110.0 \times 1 \times 10^{-4} \times \pm 20^\circ\text{C} = \pm 0.22\text{mm}$

であり、相対伸縮量は $\pm 20^\circ\text{C}$ の温度変化に対して $\pm 0.54\text{mm}$ ($P_s = 1.5\text{ton}$) である。

積層ゴムの線膨張係数 3×10^{-4} は測定の結果も参考にすると、 $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ 程度である。テフロン材料は積層ゴムの伸縮に半分程度追随できるものと推察される。

2.5.9 積層ゴムのクリープによる影響

積層ゴムのクリープ量は、メーカー資料によれば36年間で総厚の $2 \sim 4\%$ (図2.3.2参照) である。今回、クリープ量 $\delta_R = 127.6 \times 4\% = 5.1\text{mm}$ である。(尚、本来の免震ビルの耐用年数60年では $3.3 \sim 6.7\%$ として $4.2 \sim 8.5\text{mm}$ 程度に推定される。) 積層ゴムのクリープに対応する1つの案として、テフロン材料のクリープ特性に一部を期待し、残り部をテフロンの弾性範囲内で設計するという条件を設ける。

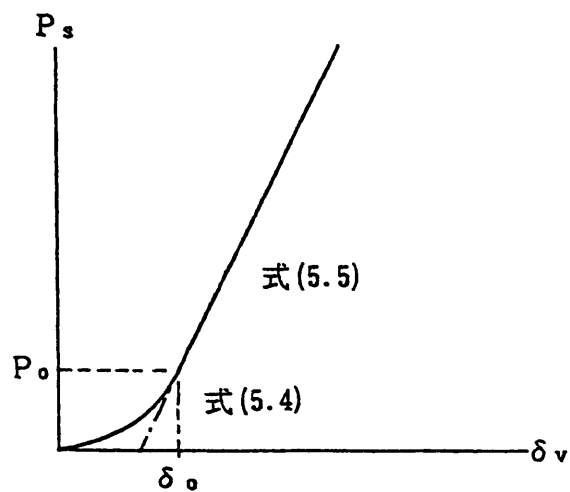


図2.5.1 ソフトランディングの鉛直方向の荷重 P_s ～変位 δ_v 特性モデル

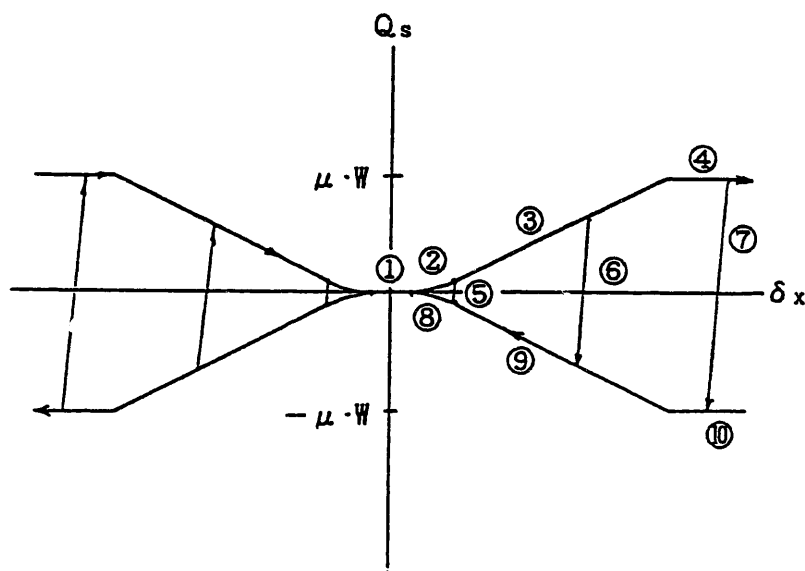
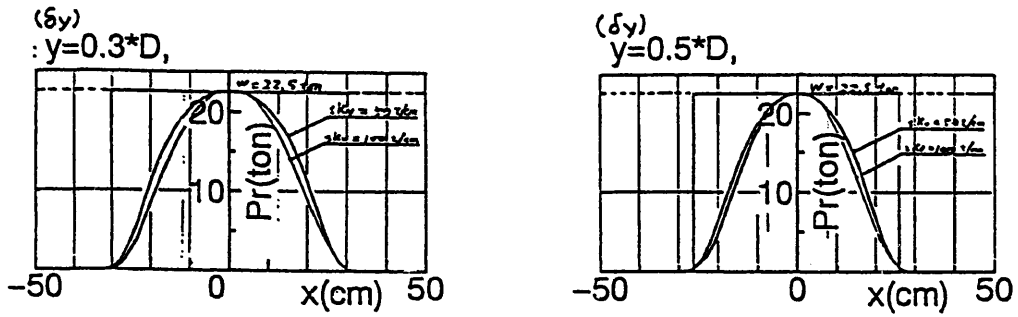
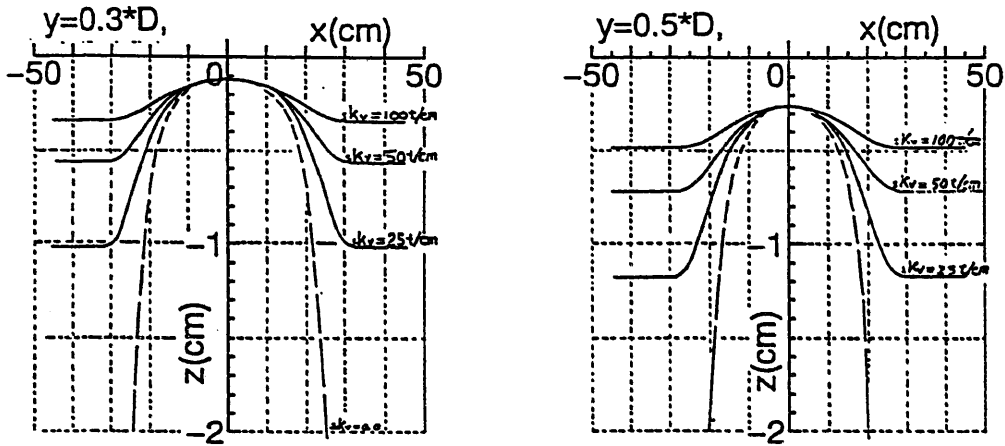


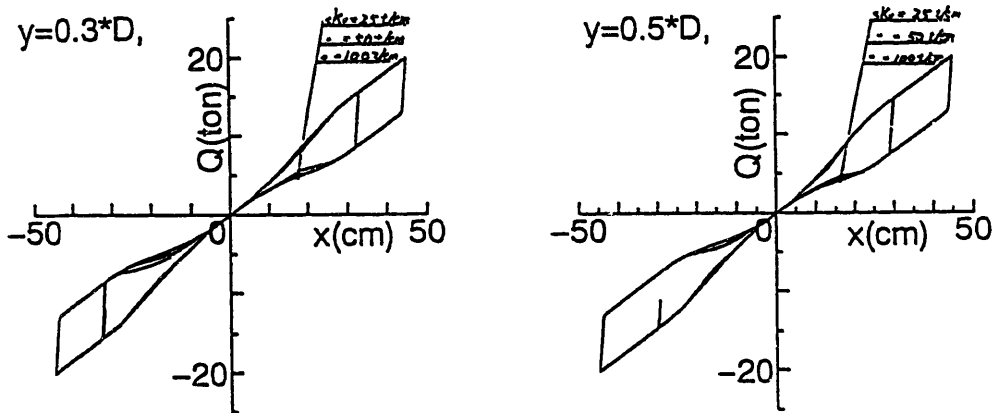
図2.5.2 ソフトランディングの水平方向の荷重 Q_s ～変位 δ_x 特性モデル



a) 水平変位 x と積層ゴムの負担荷重 P_r の関係

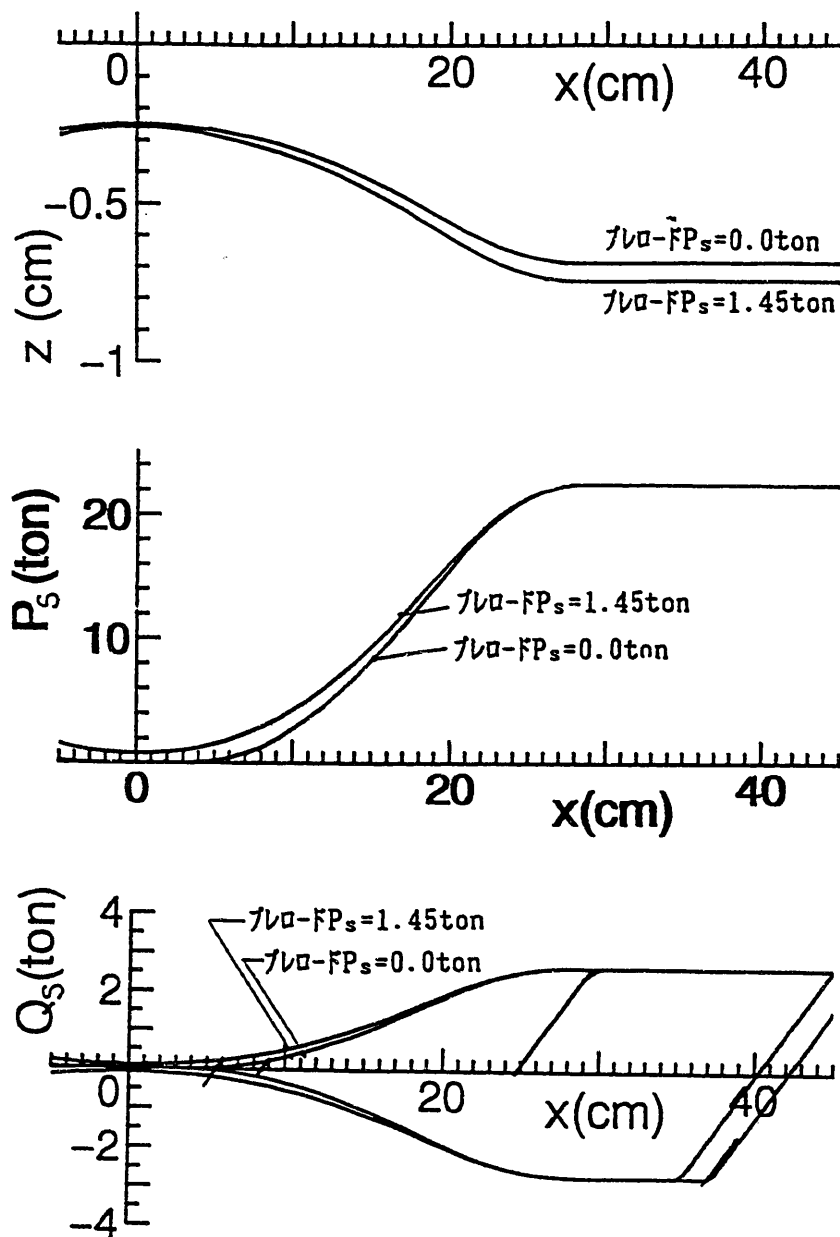


b) 水平変位 x と沈み込み z の関係



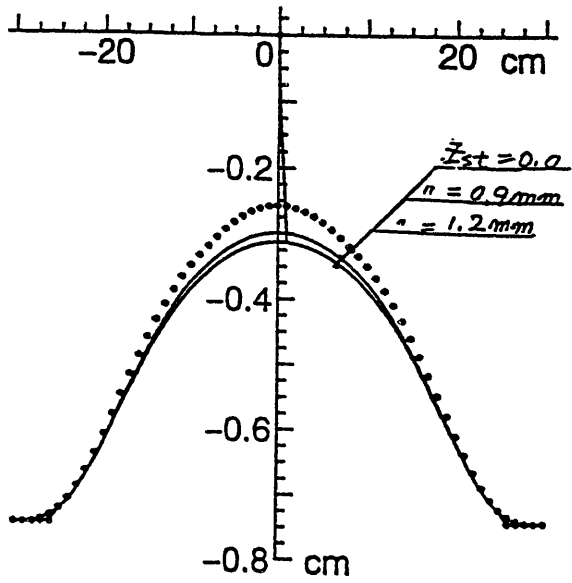
c) 水平変位 x とせん断力 Q の関係

図2.5.3 初期変位 δy とソフトランディング鉛直剛性 sK_v をパラメータにした時の積層ゴムの負担荷重 P_r , 沈み込み z , せん断力 Q の特性

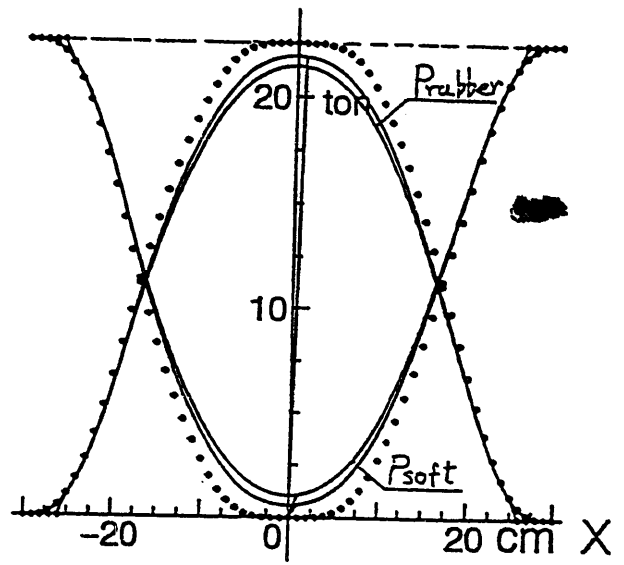


characteristics of soft landing
 $y=0.5D, K_s=50\text{t/cm},$

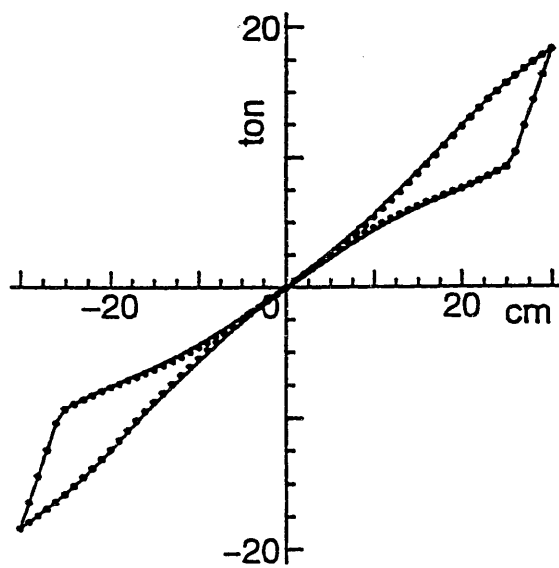
図2.5.4 ソフトランディング特性



Z - X ($Z_{st}=0.00, Z_{st}=0.09, Z_{st}=0.12 \text{ cm}$)



X - Prubber and Psoft - X
 $Z_{st}=0.0, 0.09, 0.12 \text{ cm}$



Q - X ($Z_{st}=0.00, Z_{st}=0.09, Z_{st}=0.12 \text{ cm}$)

図2.5.5 積層ゴムとソフトランディングの複合特性

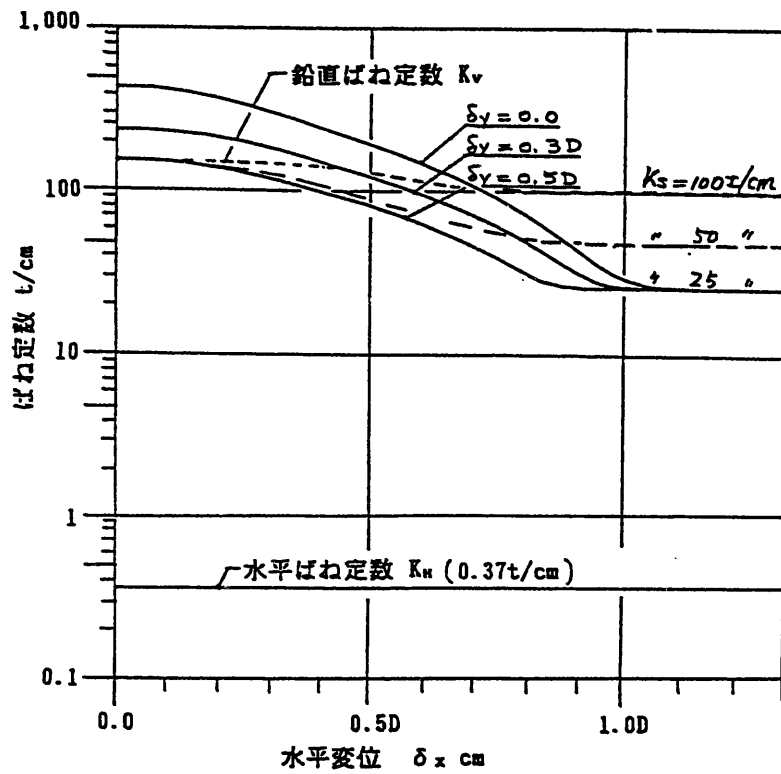


図2.5.6 積層ゴムとソフトランディング複合系の水平・鉛直ばね定数と水平変形 δ_x , δ_{yn} の関係

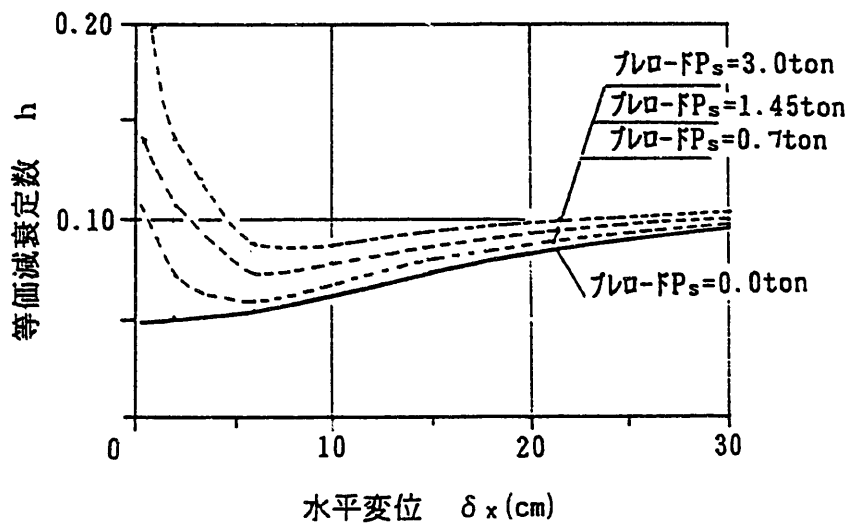


図2.5.7 水平変位 X と等価減衰定数 h の関係

2.6 ロッキング・スウェイ振動の動特性

免震モデルの地震観測の主方向は短辺方向としている。このため短辺方向のロッキング・スウェイ振動の動特性と、免震モデルの転倒に対する安全性について検討する。

2.6.1 ロッキング固有振動数

ロッキング・スウェイ連成系の振動モデルを図2.6.1に示す。固有振動方程式を次に示す。

$$m\ddot{u} + k_H u - k_H \times S \times \theta = 0$$

$$I_G \ddot{\theta} + (K_R + K_H \times S^2) \theta - K_H \times S \times u = 0$$

ロッキング固有振動数の1次 f_{R1} 、2次 f_{R2} は、鉛直バネ K_v が非線型バネであるために定数化できないので、代表的に $\delta_v = 0.5 D$ 、 $\delta_x = 0.0 \text{ cm}$ ($K_R = 114 \text{ kg/cm}$)と $\delta_x = 1.0 D$ ($K_s = 26.3 \text{ kg/cm}$ とする)について求めた。この結果、下表に示す通り、ロッキング1次 f_{R1} は水平 f_H とほとんど変わらず、ロッキング2次 f_{R2} が低下してくる。

表2.6.1 ロッキング・スウェイ固有振動数

固有振動数		$\delta_x = 0.0$	$\delta_x = 1.0 D$
ロッキング	1次 f_{R1}	0.64Hz	0.64Hz
ロッキング	2次 f_{R2}	12.0Hz	4.53Hz
参 考	水 平 f_H	0.64Hz	0.64Hz
	上 下 f_v	$\delta_v = 0.0$ $\delta_v = 0.5 D$ 5.35Hz	5.35Hz 5.35Hz

2.6.2 ロッキングモード形

$\delta_v = 0.5 D$ の場合の固有モード形を表すロッキングの中心(図2.6.2参照)距離を表2.6.2に示す。この結果、ロッキング1次回転中心 Z_1 は、 δ_x が大きくなるにつれて K_v が小さくなるために上昇してくるが、しかし量的には、 $\delta_v = 0.5 D$ 、 $\delta_x = 0.86 D$ (ソフトランディング反力抵抗のみ)においても剛体重心位置から下方46mにある。したがって、剛体の挙動は大半が水平方向のスウェイ振動である。

表2.6.2 ロッキング中心距離

$\delta_v = 0.5 D$		
$\delta_x \text{ cm}$	$Z_1 \text{ m}$	$Z_2 \text{ m}$
0.1 D	326	-0.006
0.5 D	176	-0.010
0.86 D以上	46	-0.030

2.6.3 正弦波入力に対するロッキング応答

運動方程式：

$$m \ddot{u} + K_H U - K_H S \theta + C_H \dot{u} - C_H S \dot{\theta} = -m \ddot{y}_0$$

$$I_G \ddot{\theta} + (K_R + K_H S^2) \theta - K_H S u + (C_R + C_H S^2) \dot{\theta} - C_H S \dot{u} = 0$$

$$\ddot{y}_0 = a \cdot \sin(\omega t)$$

応答：

$$頂部の水平変位 u_T = \theta_1 (Z_1 + H/2) + \theta_2 (Z_2 + H/2)$$

$$低部の水平変位 u_B = \theta_1 (Z_1 + H/2) + \theta_2 (Z_2 + H/2)$$

$$側面の上下変位 u_s = (\theta_1 + \theta_2) B$$

ここで、Hはモデルの高さ、Bはモデルの幅の1/2、 θ_1 は1次ロッキング回転角、 θ_2 は2次ロッキング回転角である。

$\delta_y = 0.5 D$ 、 $\delta_x = 0.86 D$ を代表して計算をすると、入力加速度 $a = 100 \text{cm/sec}^2$ 、 $h_H = 10\%$ 、 $h_R = 9\%$ で、各部の応答を求めると次の通りである。

$$頂部の水平変位 u_T = 32.57 \text{ cm}$$

$$重心の水平変位 u_G = 31.51 \text{ cm}$$

$$低部の水平変位 u_B = 30.45 \text{ cm}$$

$$側面の上下変位 u_s = 1.03 \text{ cm}$$

以上の結果、ロッキング・スウェイ比は

$$\frac{u_T - u_B}{u_T} = 0.065(6.5\%), \quad \frac{u_G - u_B}{u_G} = 0.034(3.4\%)$$

となり、回転成分は比較的小さい。圧肉積層ゴムを使用した免震ビルにはほぼ相当する量であろう。また、静的なロッキング・スウェイ解析では、表2.6.3に示す通り重心位置に関する回転成分による増加は3.8%であり、上記の動的計算値3.4%にほぼ対応する。

$$u_G = u_B + u_R = m\alpha / K_H + m\alpha \times (H/2)^2 / K_R$$

$$\therefore \frac{u_G}{u_B} = 1 + \frac{u_R}{u_B} = 1 + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \times \frac{K_H}{K_R}$$

2.6.4 ロッキング振動に対するまとめ

以上の結果、水平に対する回転応答量増分は、かなり小さいのでロッキング振動による免震モデルの転倒に対する安全性は十分であると判断する。

表2.6.3 ロッキング・スウェイ比

δ_x	u_G / u_B
0.0	1.0045
0.0 D	1.0086
0.86 D以上	1.0380

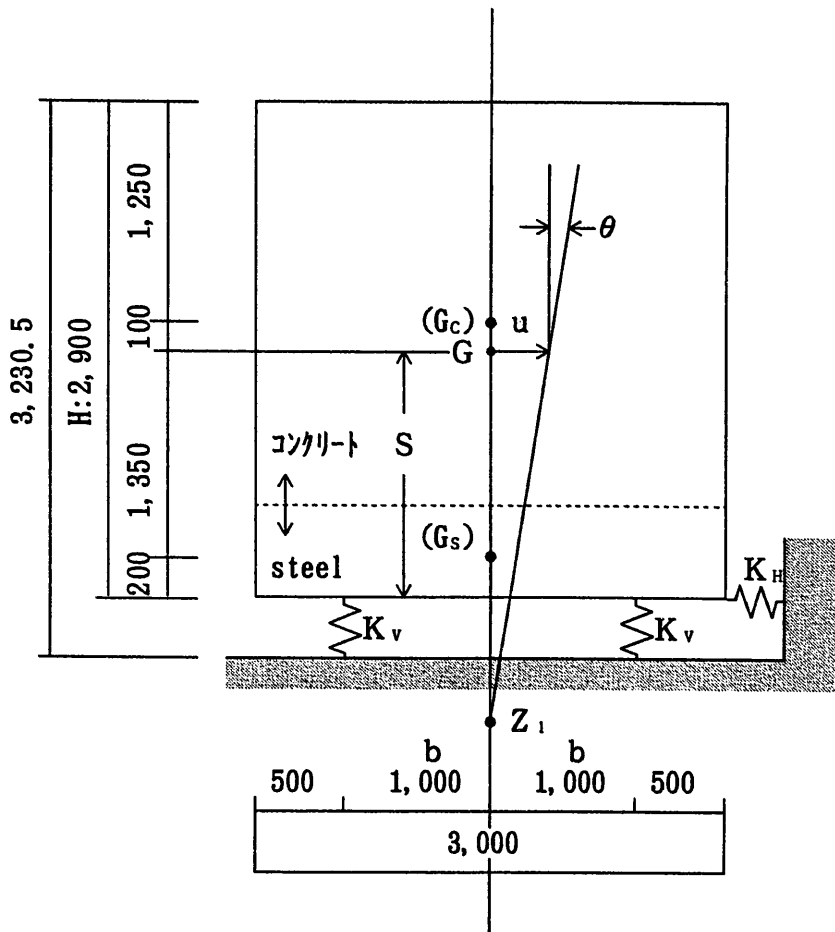


図2.6.1 ロッキング振動モデル

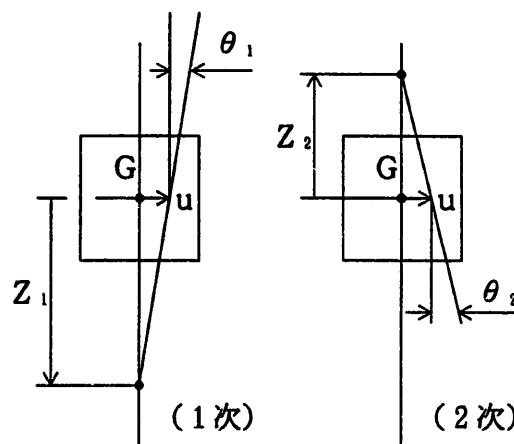


図2.6.2 ロッキング固有モード (Z_1 , Z_2)

2.7 地震応答計算

2.7.1 振動解析モデルと諸定数

以上の諸検討等々に基づいた地震応答計算の振動モデルを図2.7.1, その諸定数を表2.7.1に示す。

2.7.2 地震観測記録のシミュレーション解析

90 t モデル新設後, 40 t 積層ゴム単独支持状態で地震記録が観測された。

'92年6月1日: 基礎 max 25gal, モデル max 14gal, 変位 max 0.29cm

図2.7.2に6月1日地震の記録波形 (Observed) と計算波形 (Response) を示す。

固有振動数は, F F T解析の結果, 1次 $f_1=0.77\text{Hz}$ (1.29 sec) (計算値 $f_1=0.78\text{Hz}$), 2次 $f_2=10.45\text{Hz}$ (0.096sec), 3次 $f_3=20.69\text{Hz}$ (0.043sec) である。以上の結果, 40 t 積層ゴム4個に支持された90 t モデルに関する振動解析モデルの妥当性がほぼ確認された。

2.7.3 サイト観測地震波入力に対する応答予測

2.7.3.1 ソフトランディングと積層ゴムの複合系の特性

図2.7.3のa)~e)に, 応答計算に適用したソフトランディングと積層ゴム複合系の水平変位 X に対する, a)沈下 Z , b)積層ゴム負担荷重 P_{rub} , c)ランディング負担荷重 P_{soft} , d) $Q_{soft}=\mu \times P_{soft}$, e)複合系せん断力 Q などの各種特性を示す。なお, 2種類の特性は, 各々, プレロードをかけない場合と, プレロード $P=1.45\text{ton}$ をかけた場合とである。

2.7.3.2 応答計算結果

応答計算の入力波は'92.6/1地震の基礎の記録波形から最大加速度100galに変更した波とし, モデル系は, i. 積層ゴムだけの場合, ii. プレロード $P_p=0.29\text{ton}$ ($t_{p,i}=0.1\text{mm}$) の場合, iii. プレロード $P_p=1.45\text{ton}$ ($t_{p,i}=0.5\text{mm}$) の場合である。応答加速度波形, 応答変位波形と, 水平変位~せん断力の関係を図2.7.4~図2.7.6に示す。また, 入力最大加速度を22gal ~200galに変えたときの最大応答加速度と同変位を図2.7.7に示す。

プレロード P_s が応答に及ぼす影響を考察する。

- i) $P_s = 0.29\text{ton}$ ($t_{p,11} = 0.1\text{mm}$) の場合、積層ゴムだけの場合と比較して加速度、変位が減少する。
- ii) $P_s = 1.45\text{ton}$ ($t_{p,11} = 0.1\text{mm}$) の場合、変位がさらに減少するものの、加速度波形に短周期成分が卓越する。これは図2.7.6より、初期剛性に起因する。
- iii) 入力最大加速度をパラメータにする最大応答値は、図2.7.7より、 $P_s(t_{p,11})$ が大きいと、小さい加速度入力に対して加速度が大きくなる。

2.7.3.3 90ton モデルの等価減衰定数

90ton モデルのソフトランディングにかけたプレロード P_s は

$$P_s = 3.8\text{ton} / 4 \text{個} = 0.95\text{ton}$$

であり、上記の中間的な値である。摩擦抵抗力 F は、

$$F = \mu \times 4 P_s = 0.12 \times 3.8 = 0.456\text{ton}$$

である。一方、摩擦抵抗力 F が、水平変位 X と次式の関係にあるとすると、

$$h = 0.456 / 4.4 = 0.10$$

となって $h = 10\%$ である。

2.7.4 EL-CENTRO NS 記録地震波入力に対する応答計算

最後に、耐震設計で使用される EL-CENTRO NS 記録地震波入力に対する応答計算結果を参考までに示す。図2.7.8に元波形 $\text{max}341.7\text{gal}$ 入力に対する応答加速度 Acc 、水平変位 X 、沈み込み変位 Z の波形を示す。また、図2.7.9に入力加速度が 50Kine に相当する $\text{max}510.8\text{gal}$ 入力に対する同様の結果を示す。

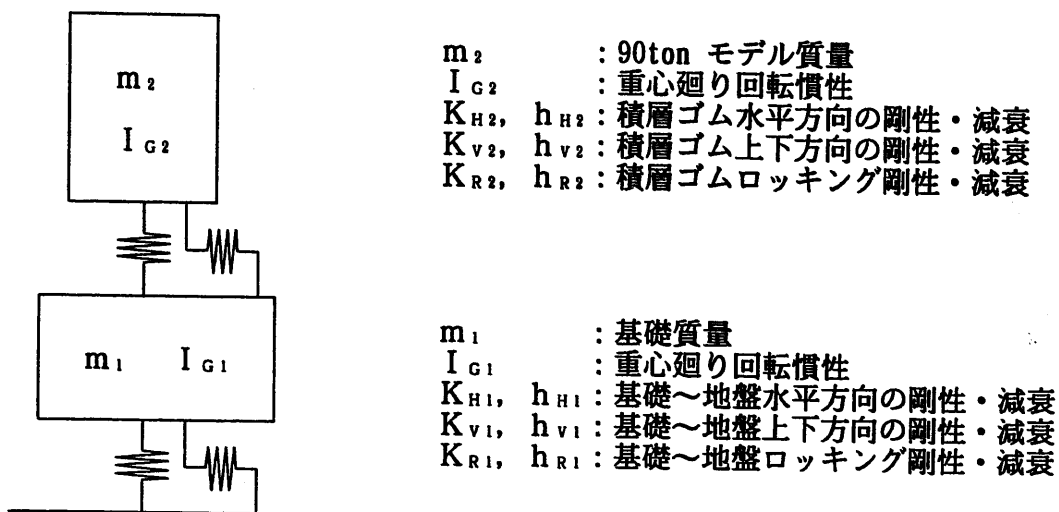


図2.7.1 応答計算の振動モデル

b. 諸定数

表2.7.1 振動モデルの諸定数

	重量	バネ定数			回転慣性	質点高	
	m g ton	K_H ton/cm	K_V ton/cm	K_R ton·cm	I_G	H_i cm	
モデル 積層ゴム 1ヶ ランディング1ヶ	90	0.55	411 114*1	$4.56 \cdot 10^6$	$1.332 \cdot 10^3$	215	*1Y=0.5D
		(16.0) (32.0)	50 100	$2.00 \cdot 10^6$ $4.00 \cdot 10^6$			
基礎 地盤	45	205.0		$8.31 \cdot 10^7$	$0.680 \cdot 10^3$	20	
減衰定数	1次モード $h_1=0.025$ 2次モード $h_2=0.05$ 3次モード $h_3=0.10$						モード 減衰

尚、積層ゴムとランディングとのバネ定数は1ヶ当たりの定数である。

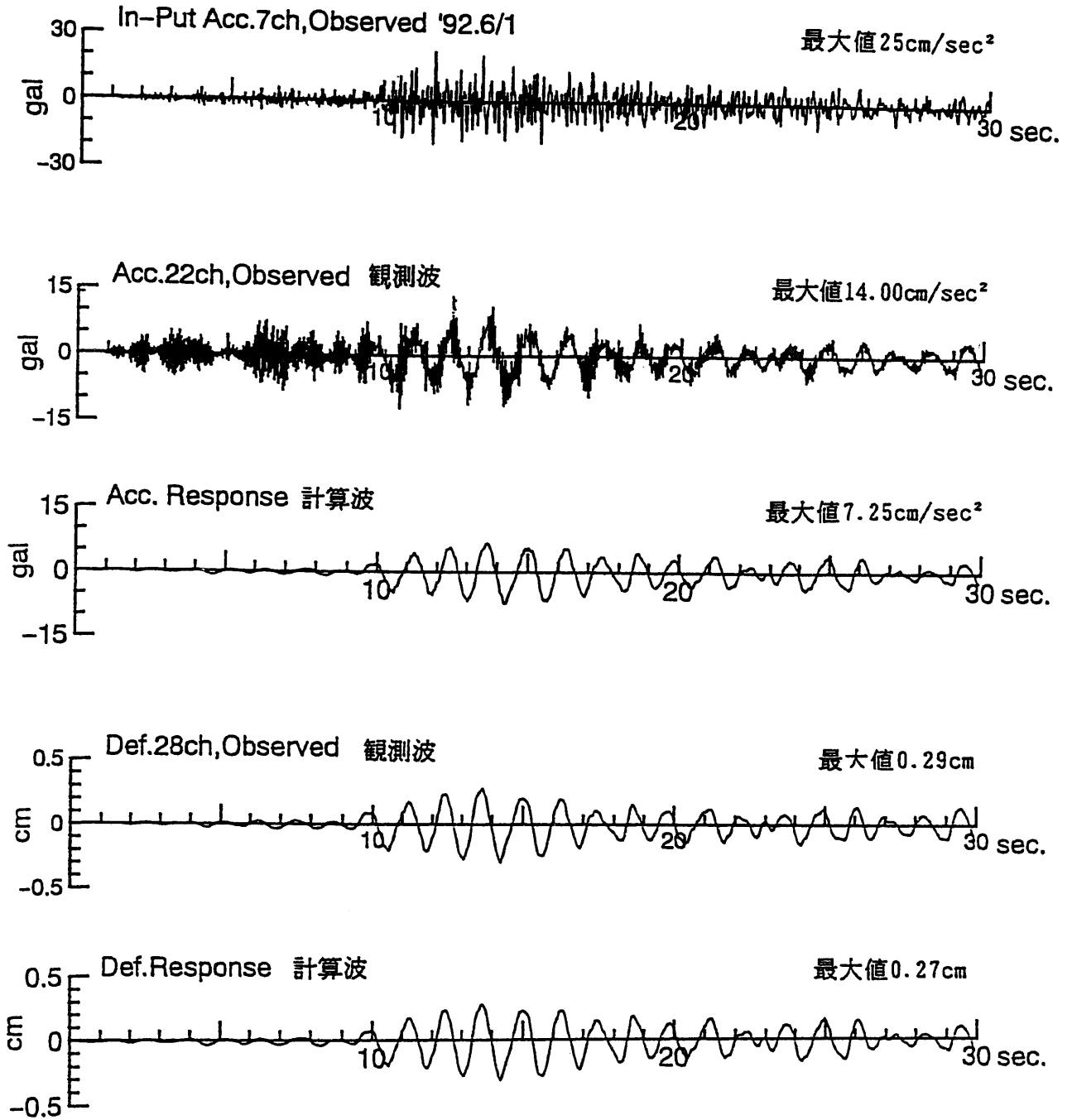
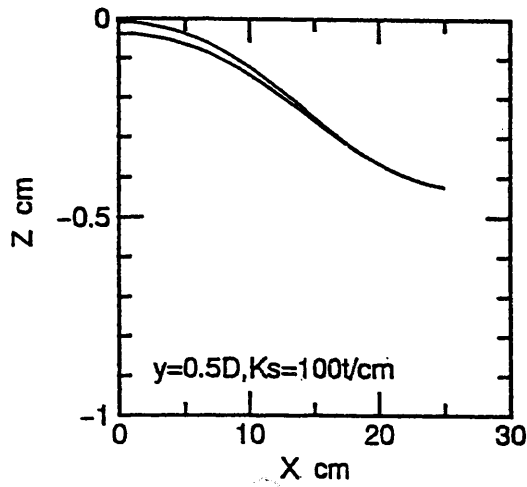
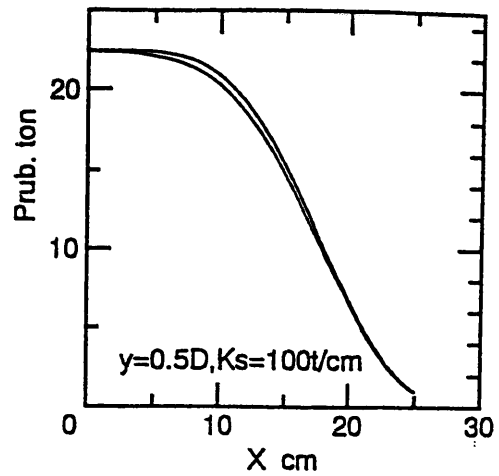


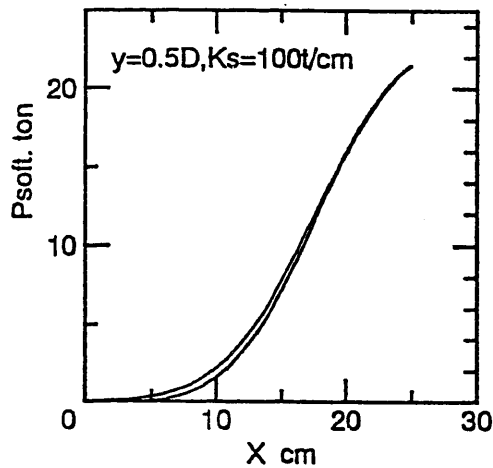
図2.7.2 観測波('92.6/1) 入力に対する積層ゴム支持の
免震モデル4のシミュレーション解析



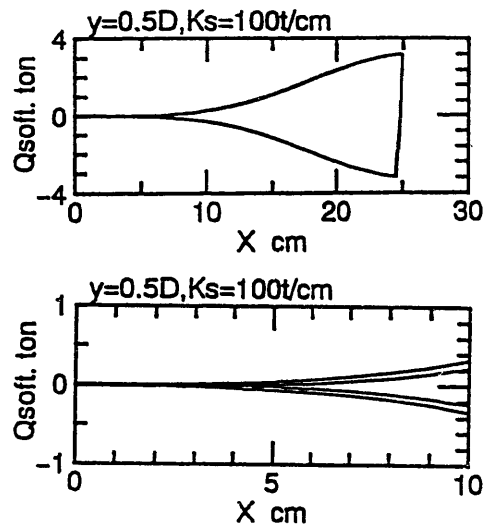
a) 水平変位 X ~ 沈下 Z の関係



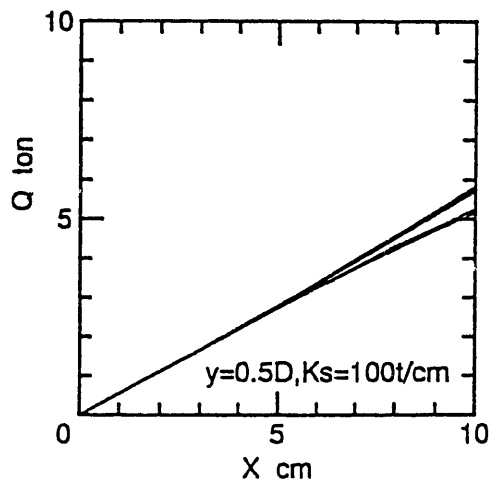
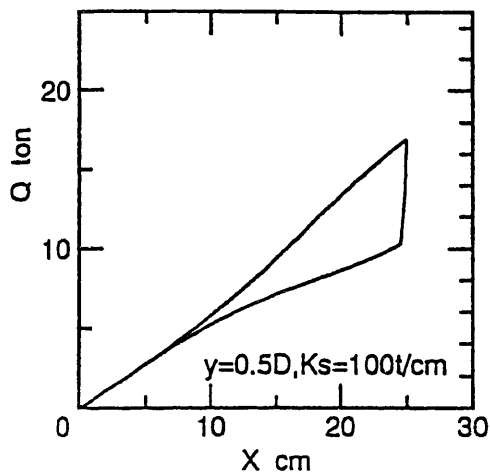
b) 水平変位 X ~ 積層ゴム負担荷重 P_{rub} の関係



c) 水平変位 X ~ ランディング負担荷重 P_{soft} の関係



d) 水平変位 X と、 $Q_{soft} = \mu \times P_{soft}$ で表されるソフティング剪断力 Q_{soft} の関係



e) X ~ 複合系剪断力 Q の関係 (右図詳細)

図2.7.3 応答計算に適用したソフトランディングと積層ゴムの複合系の特性

積層ゴムと軟着装置 (ソフトラディング) で構成される免震装置に関する
90ton モデルの応答予測

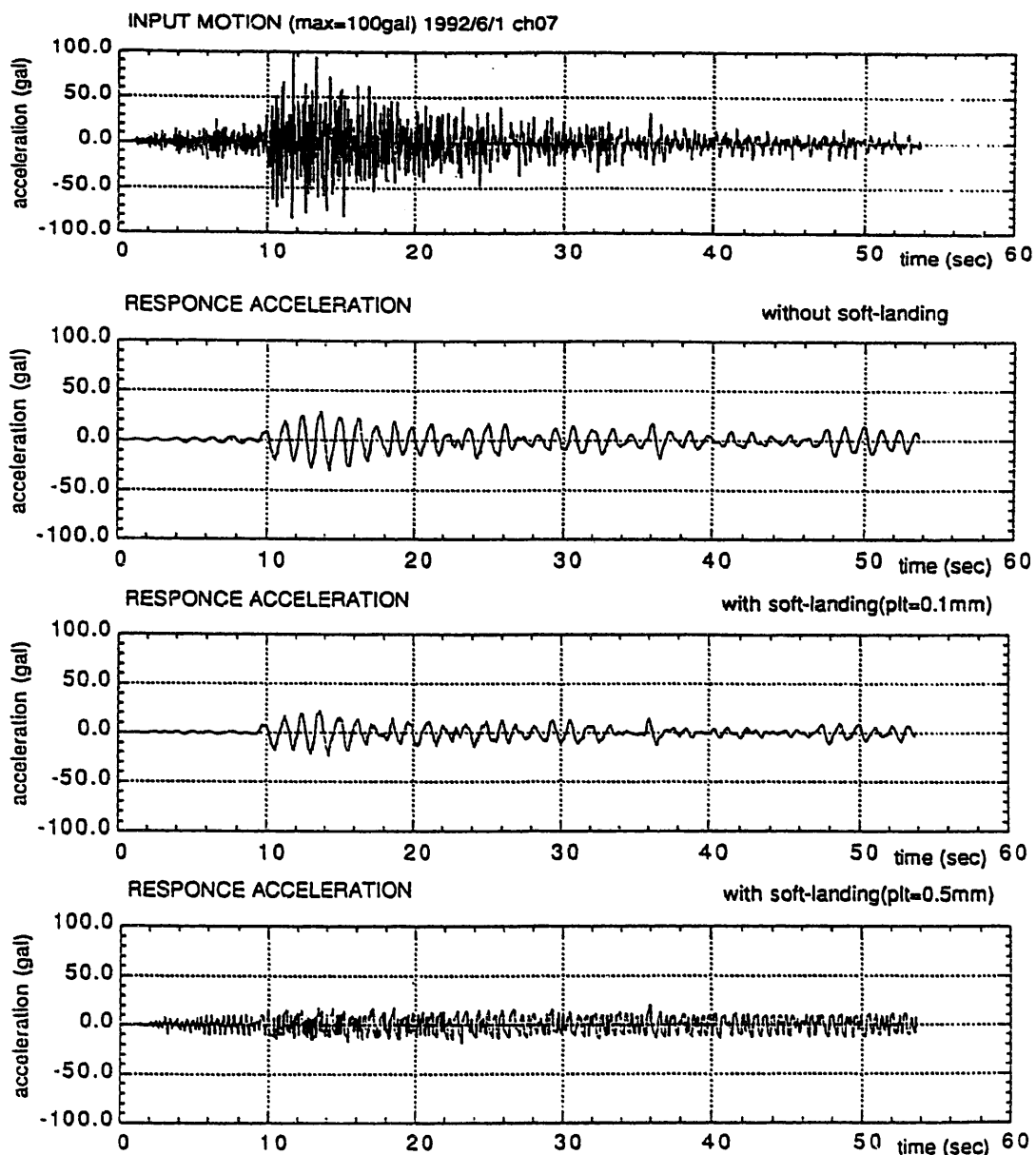


図2.7.4 観測波入力max100gal に対する応答計算値
(その1: 応答加速度波形)

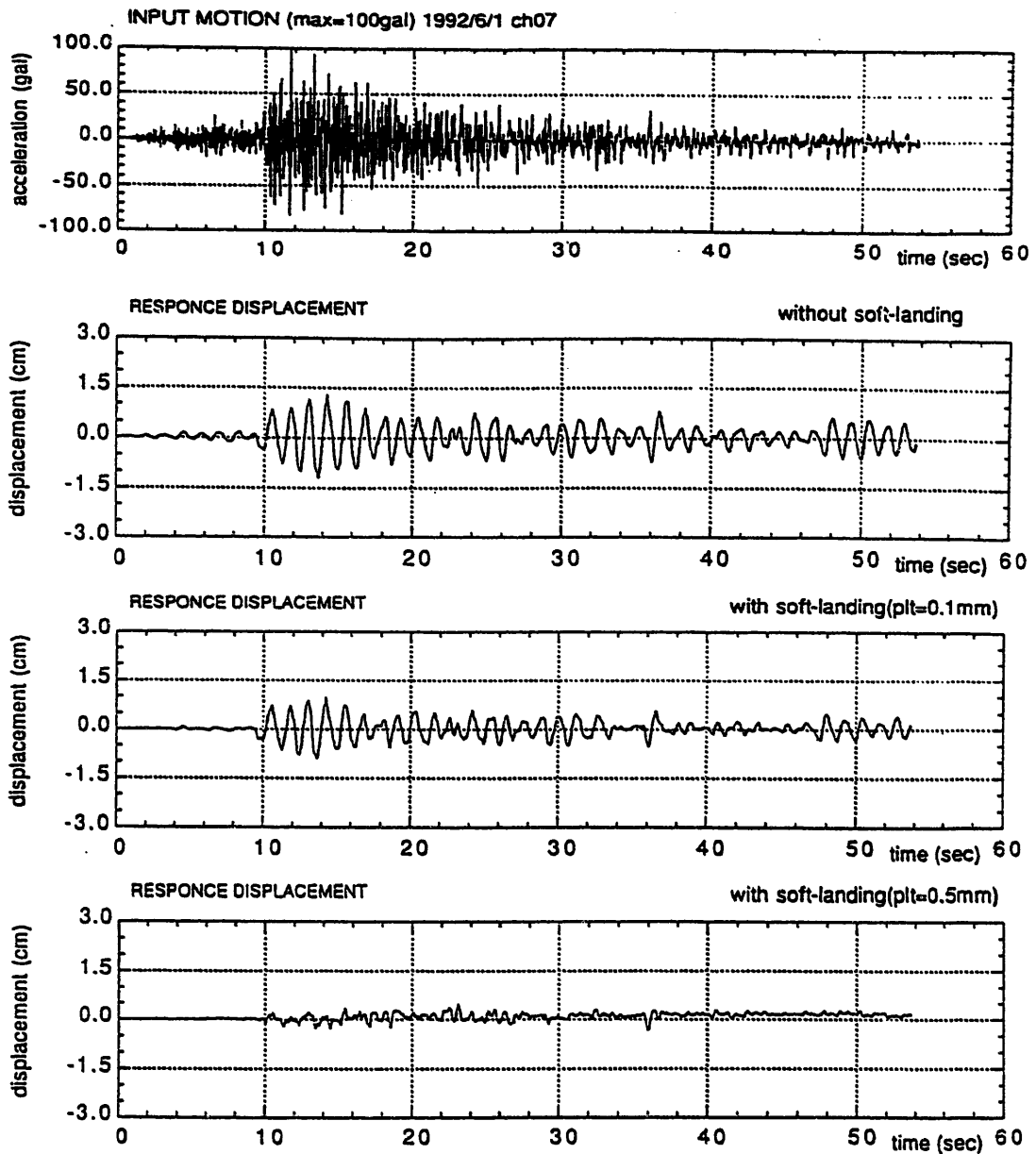
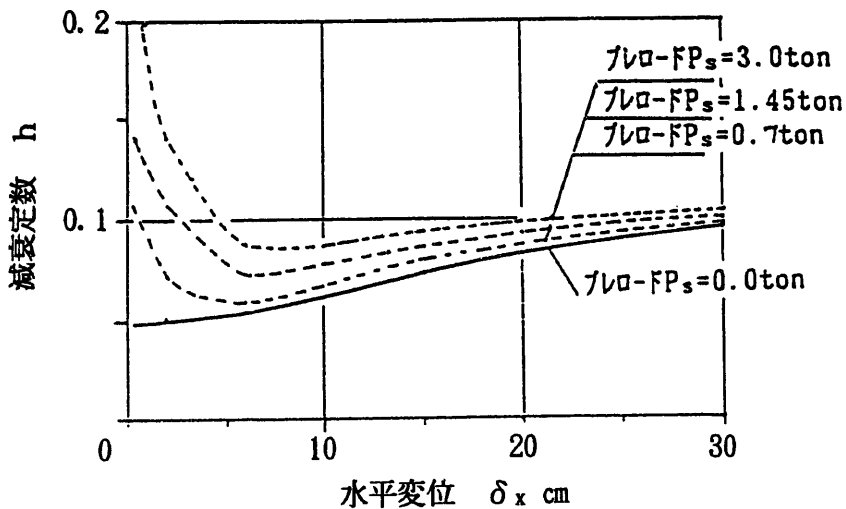
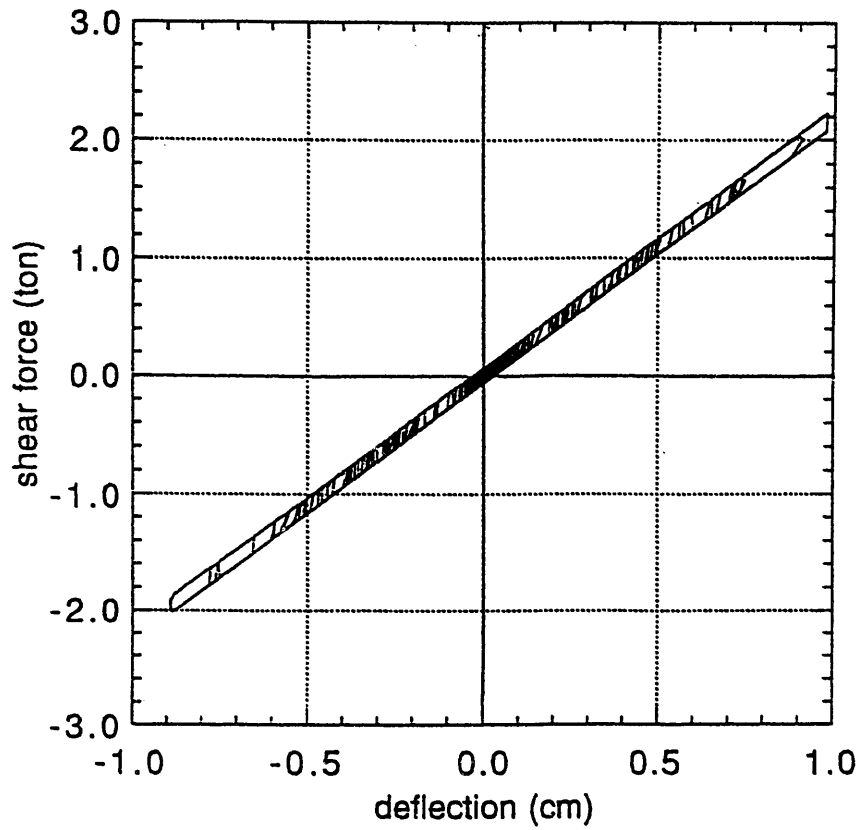


図2.7.5 観測波入力max100gal に対する応答計算値
(その2: 応答変位波形)



水平変位X と等価減衰定数h の関係

a) Q-DELTA CURVE with rubber & soft-landing(plt=0.1mm)



b) Q-DELTA CURVE with rubber & soft-landing(plt=0.5mm)

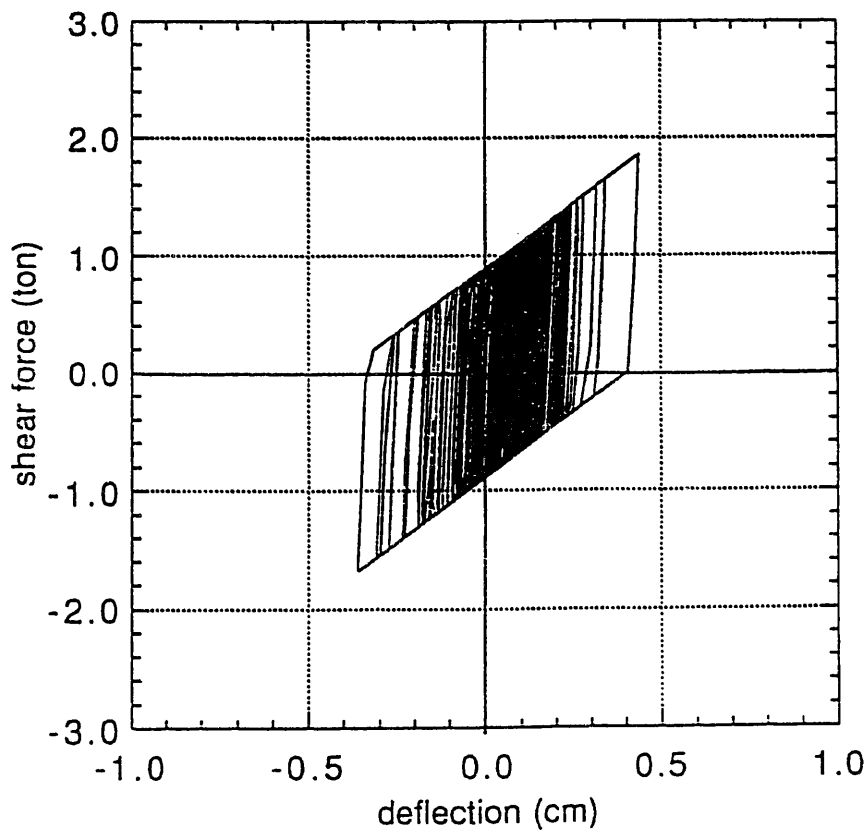
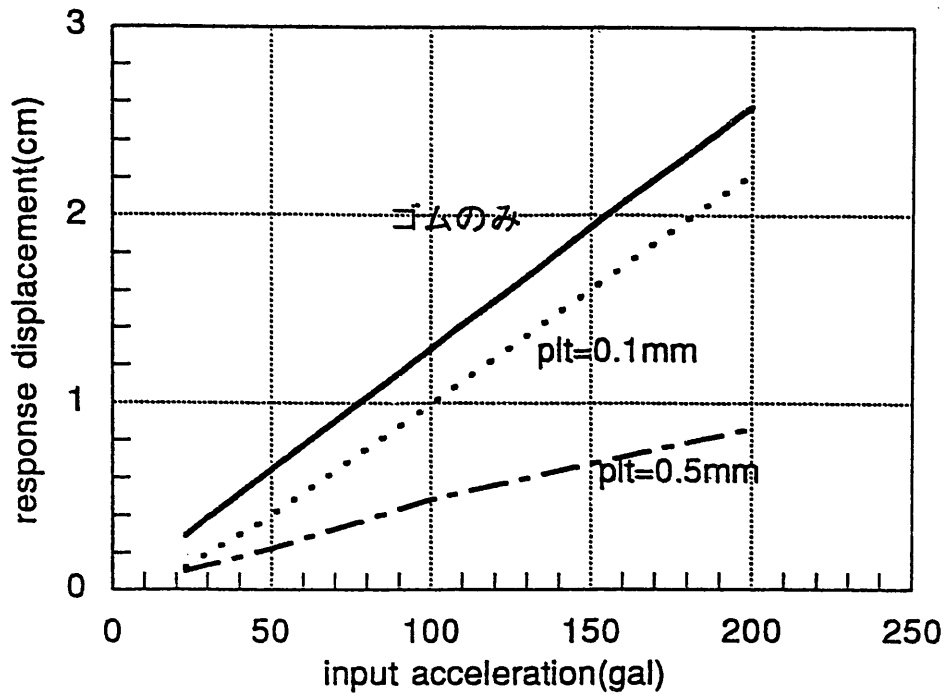
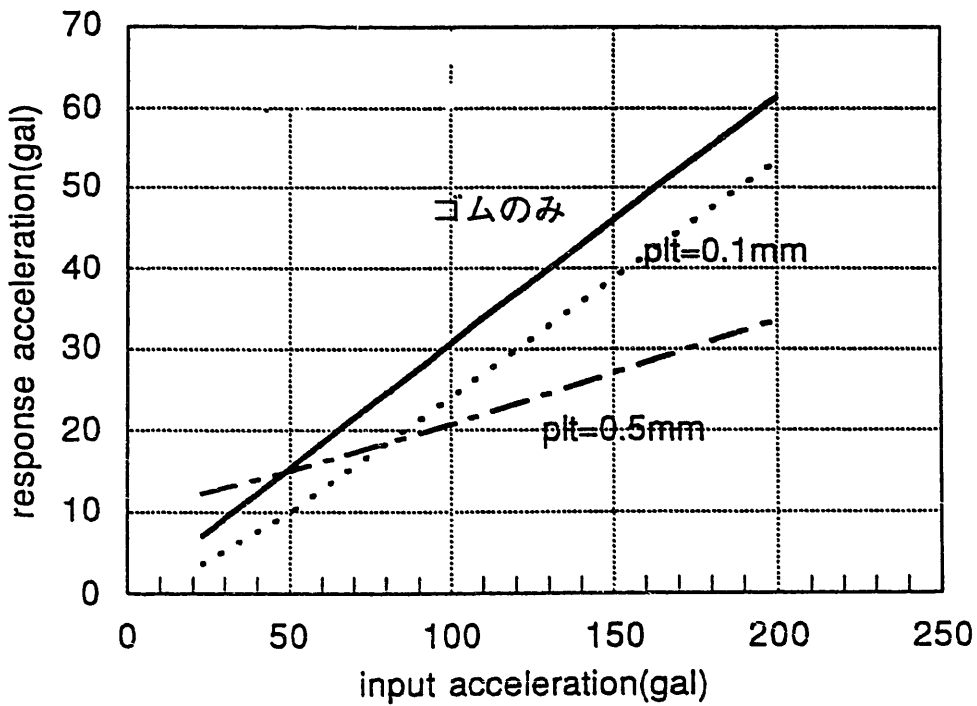


図2.7.6 観測波入力max100gal に対する応答計算値
(その3:Q ~ δ特性)



a) 入力加速度と応答変位



b) 入力加速度と応答加速度

図2.7.7 観測波の最大加速度をパラメータにした軟着装置付きモデルの応答最大値特性

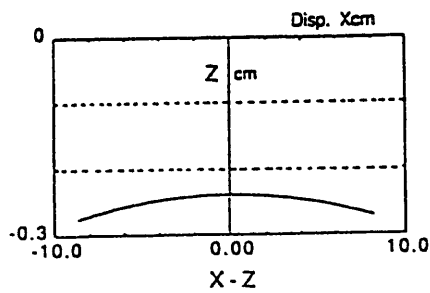
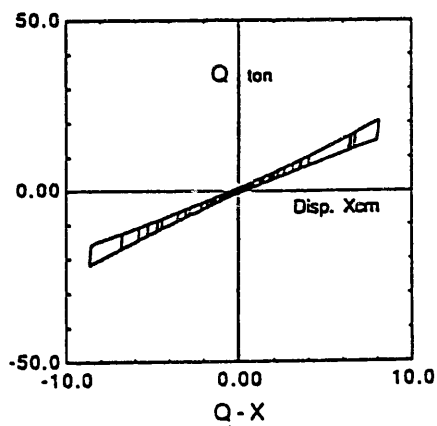
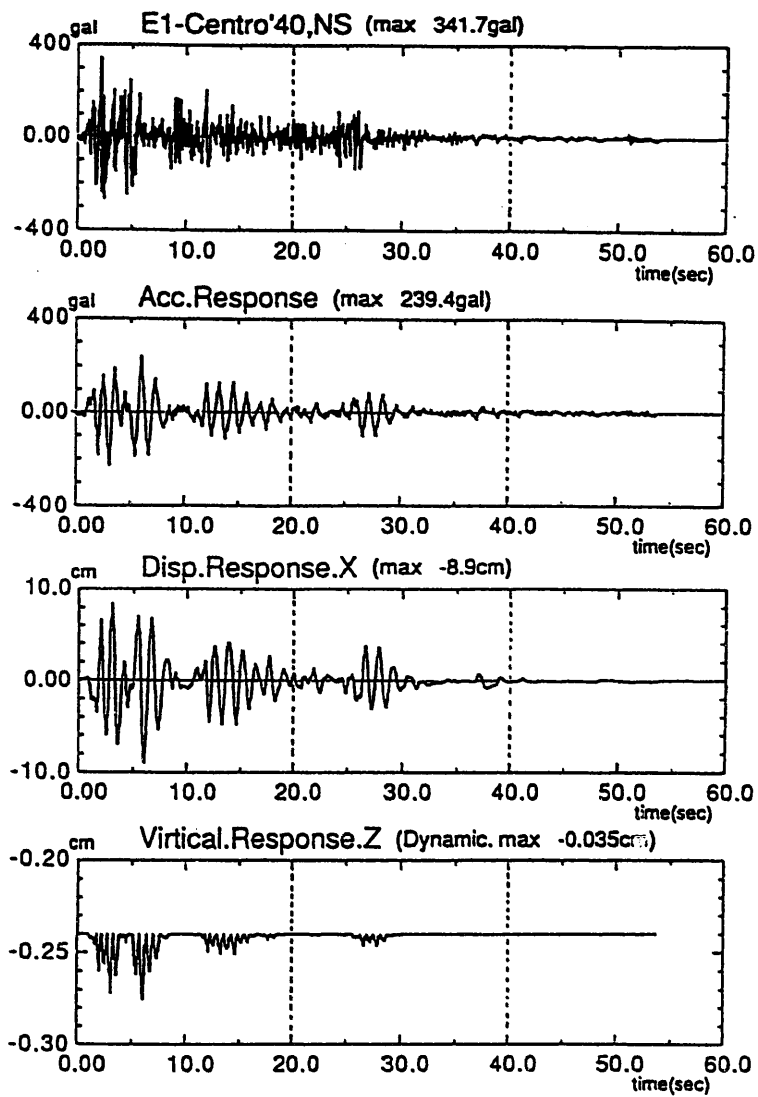


図2.7.8 E1-Centro'40, NS 波(max341.7cm/sec²) に対する応答計算結果

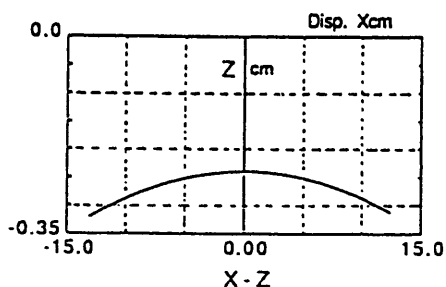
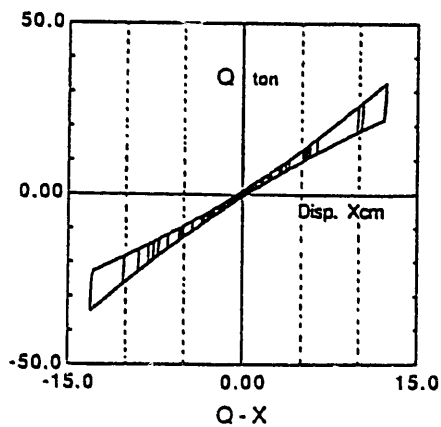
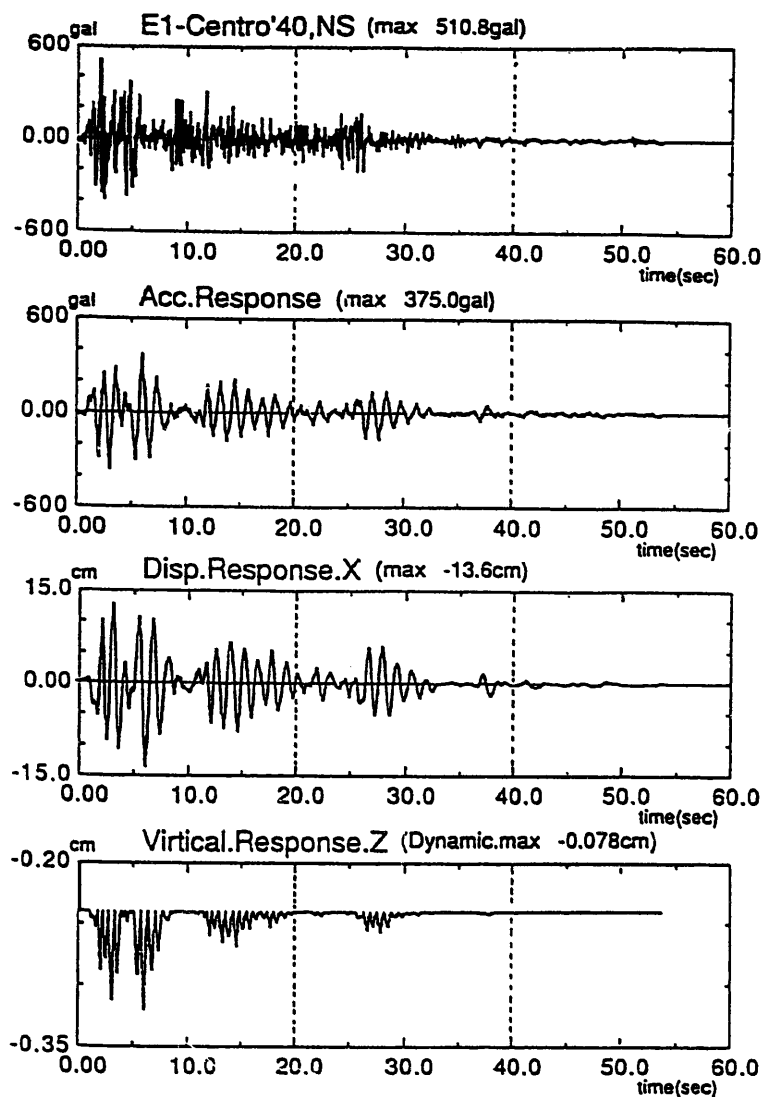


図2.7.9 El-Centro'40, NS 50kine入力(max510.8cm/sec²) に対する応答計算結果

3. 免震構造モデル振動台試験

3.1 試験概要

3.1.1 目的

免震構造物においては、その耐震安全性は免震装置に全面的に依存することとなる。したがって、万一、想定する設計用入力地震動を上回る巨大地震や、やや長周期の卓越した地震が発生した場合には、過大な変形の発生によって、免震装置が破壊される可能性がないとは言えない。この場合、免震構造物には、他に余力を期待できないことから、構造物全体として、一挙に崩壊に至る可能性が発生する。

特に、耐震重要度の高い原子力施設においては、このような万一の場合も、その耐震安全性を損なう事態は許されないため、免震装置が破壊に至る前に、その免震機能をバックアップするフェールセーフな機能が要求されると考えられる。

本共同研究では、積層ゴムとバックアップシステムとしてのフェイルセーフ装置を組み合わせた免震装置を適用して、試験体を製作して、大型振動台により、免震装置の変形限界特性試験を実施し、ソフトランディング装置による免震構造の安全余裕度について検討するものである。

3.1.2 内容

平成6年度の研究内容は、次のとおりである。

1)免震構造体の設計製作

単位面積当たり約 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ で支持する実機積層ゴム $\phi 500\text{mm}$ を対象として、この1/7縮小モデルとして16 t RC造試験体、積層ゴム、ソフトランディング装置を設計製作する。

2)積層ゴムとソフトランディング装置の基本特性調査

積層ゴム、ソフトランディング装置各々静的加力試験を行い、諸定数を把握する。

3)積層ゴム、ソフトランディング装置、16 t RC構造体からなる免震構造体の基本特性調査

免震構造体を組立後、積層ゴム+16 t RC構造体 および、積層ゴム+ソフトランディング装置+16 t RC構造体の静的加力試験を実施し、免震構造体の基本特性を把握する。

4)免震構造体の動的性能調査

免震構造体を振動台に組み立てて、正弦波入力、地震波応答試験を行い、免震構造体の限界性能を把握する。

5)シミュレーション解析

免震構造体の動的性能調査結果をシミュレーション解析し、ソフトランディング装置を有する免震構造体の性能の検証を行う。

3. 2 試験体の概要

免震構造試験体は、周期3秒、積層ゴムφ500mm、同面圧 100kg/cm² の実機を対象として、この1/7 縮小モデルとして計画したものである。

3.2.1 積層ゴム

積層ゴムは、図3.2.1に示すとおり、直径φ70mm、ゴム層厚1mm×14層=14mmで、1次形状係数約18、2次形状係数約5、面圧は約100kg/cm² で設計されている。昭和電線電纜株式会社の製品である。

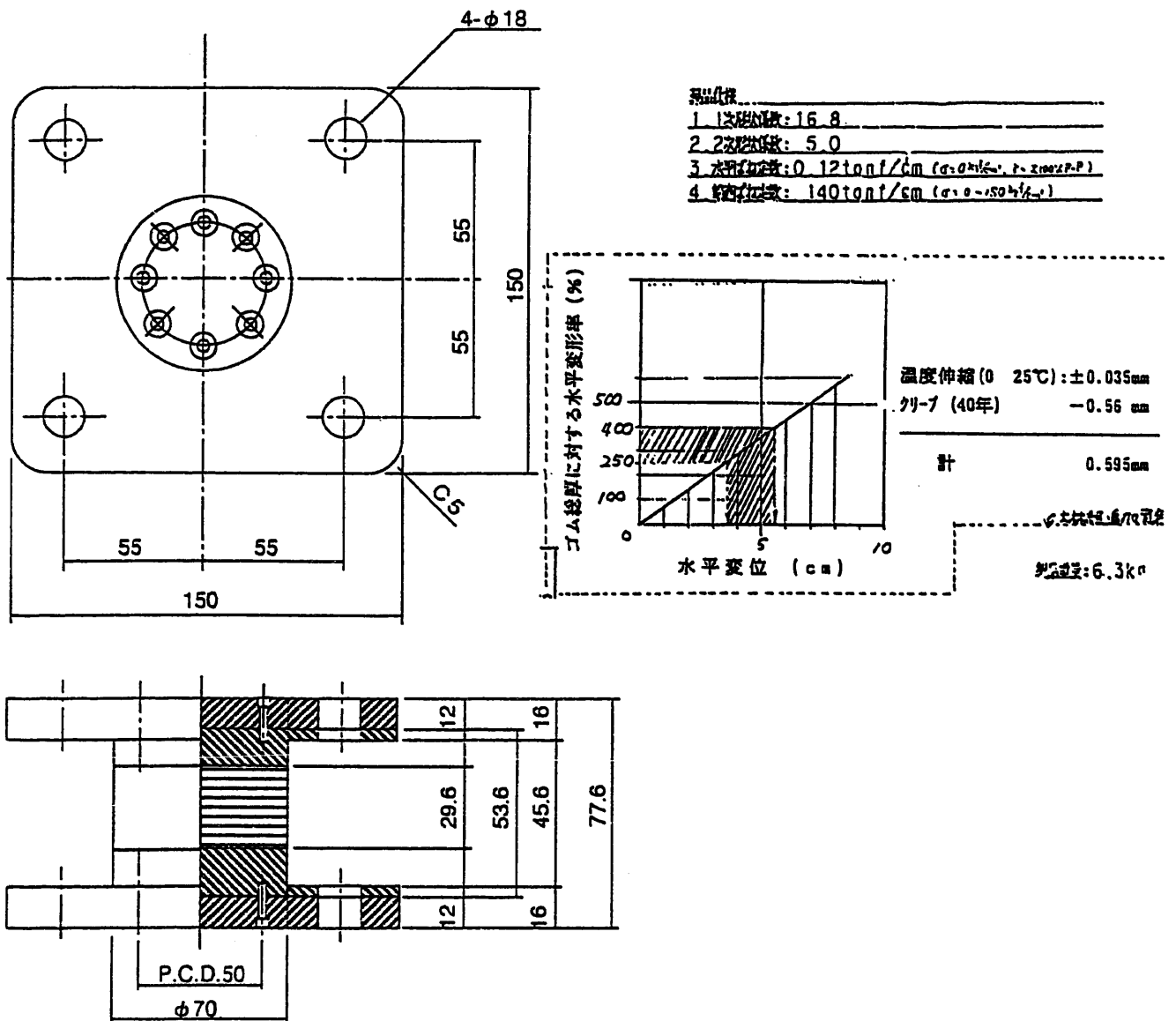


図3.2.1 積層ゴム概要図

3.2.2 ソフトランディング装置

図3.2.2にソフトランディング装置の形状を示す。ソフトランディング装置はRC造構造体側に取りつけられ、下側に開放した鉄製容器内に、滑り材料としてのテフロン、荷重計などが収納されたものである。テフロンの滑り部は厚さ30mm、 $\phi 106\text{mm}$ 部分であり、厚さ $t=3\text{mm}$ のステンレス板上を滑る構造である。なお、ソフトランディングの鉛直剛性は、計画時の数値計算より目標値約 55 t/cm とし、また、積層ゴムの温度伸縮(0~25°C) : 0.035mm と、クリープ量(40年) : -0.56mm の合計 0.595mm の鉛直歪み変動に追従できることを目標としてテフロン厚さとゴムシートによる弾性特性(この性質をソフトランディングと呼ぶ)を期待して製作したものである。

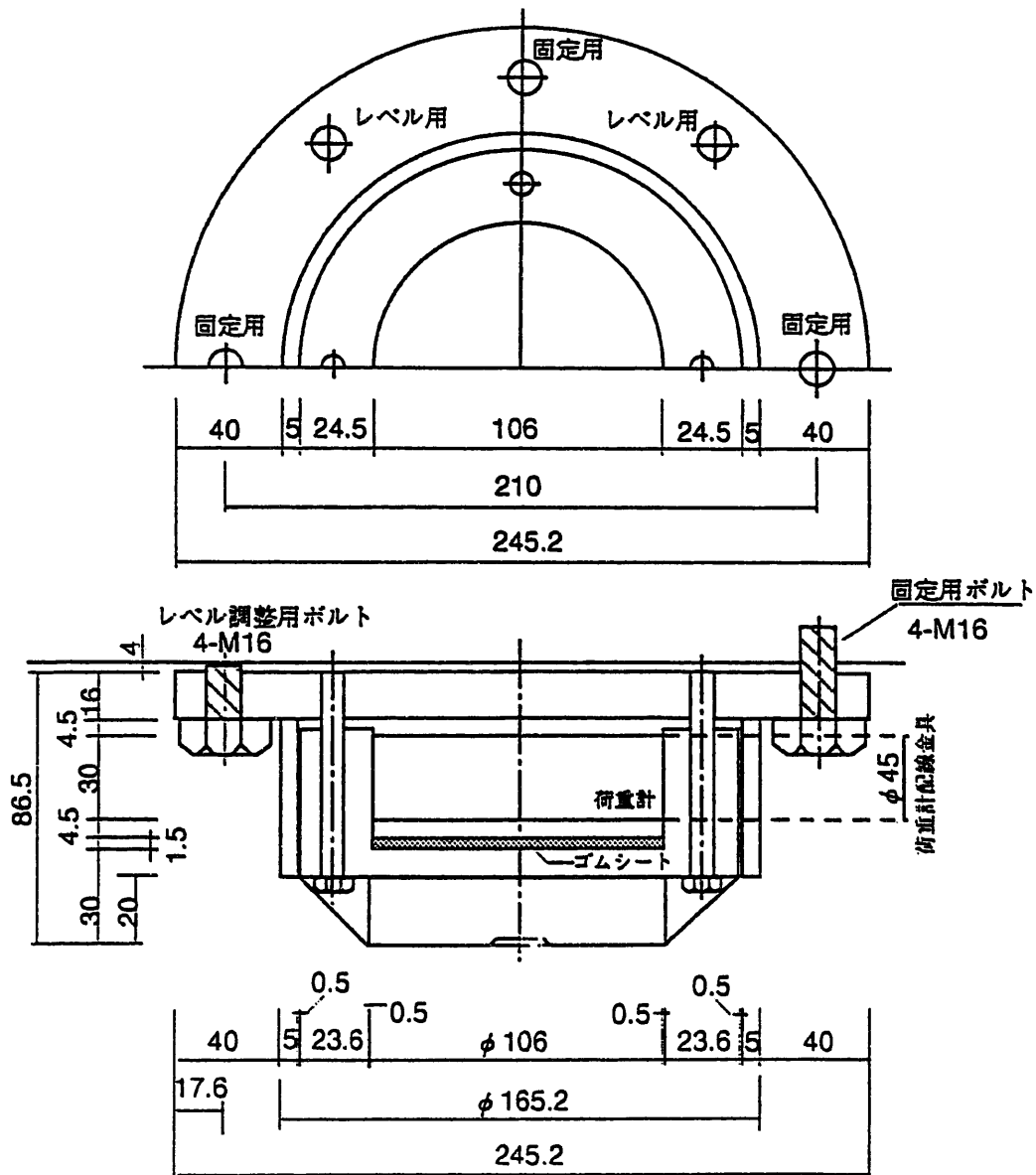


図3.2.2 ソフトランディング装置形状図

3.2.3 免震構造体

免震構造体は、図3.2.3に示すとおり、積層ゴム4体とソフトランディング装置4体で支持される。構造体は平面寸法2m×2m、最高部高さ2mのRC造剛体、重量9.6tと、鉄板ウエイト6.4tを載荷して合計重量16tである。鉄板ウエイトは、点線で示すように、上部あるいは下部に載荷できるが、上部載荷の場合の方が構造体のロッキング振動が卓越するので、試験は安全性を確認した後、主に上部載荷の場合とした。

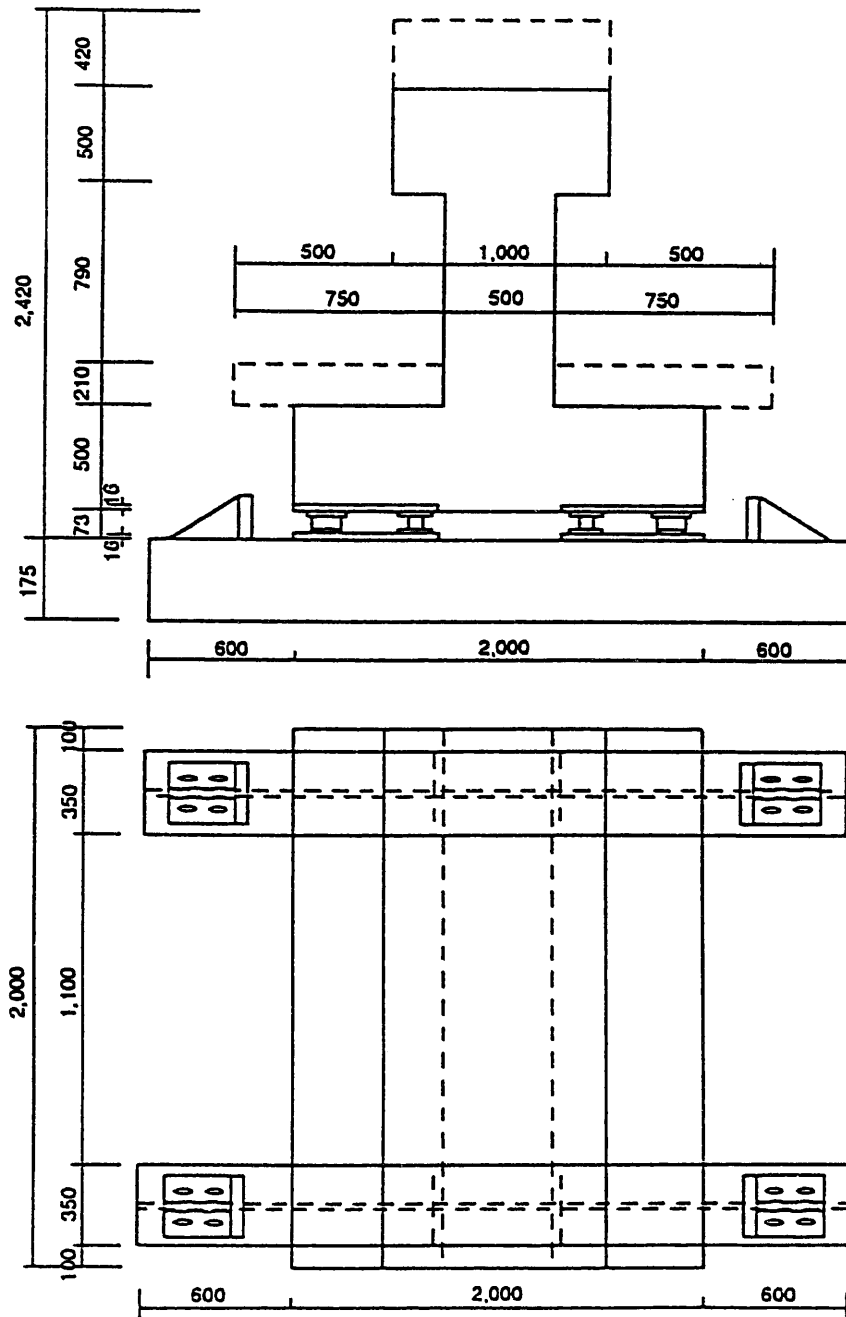


図3.2.3 免震構造体全体図

3.3 積層ゴムとソフトランディング装置の静的加力試験

3.3.1 積層ゴムの静的加力試験

3.3.1.1 積層ゴムの種類

積層ゴムは表3.3.1 に示す同一ロッドで調合し製造された計14体である。試験分類は水平方向にゴム総厚に等しい14mmせん断変形させる場合を100%、28mmせん断変形させる場合を200%としている。

表3.3.1 積層ゴムの種類

試験分類	積層ゴム No.	備考
100%試験	V71, V72, V73, V74	(Vシリーズ) 計4体
"	VS71, VS72, VS73, VS74	(VSシリーズ) " 4 "
200%試験	P71, P72, P73, P74	(Pシリーズ) " "
400%試験	B71, B72	(Bシリーズ) " 2 "

3.3.1.2 試験方法

試験の方法は以下のとおりである。

1)100 %試験

水平剛性試験 面圧0.0kg/cm² で、±100 %せん断歪みを与え、3回目の履歴カーブより±50%、±100 %における割線剛性を水平剛性として求める。

鉛直剛性試験 面圧150kg/cm² まで載荷し、3回目の履歴カーブ往路より面圧50, 100, 150kg/cm² 相当の荷重変位より求める。

2)200 %試験

水平剛性試験 面圧0.0kg/cm² で±250%せん断歪みを与え、3回目の履歴カーブより±50%、±100%、±150%、±200%、±250%の割線剛性を求める。

鉛直剛性試験 面圧200kg/cm² まで載荷し、3回目の履歴カーブ往路より面圧100, 150, 200kg/cm² 相当の荷重変位より鉛直剛性を求める。

3)400 %以上試験 面圧0.0kg/cm²で、水平方向に200%、300%、400%までのせん断歪みを3回与えた後、400%以上の単調載荷により破断まで荷重を負荷する。

3.3.1.3 試験結果

積層ゴムの試験は、昭和電線電纜株式会社が製品検査として実施したものである。

この結果、概略、次の通りである。

1)100%試験より、水平剛性は、設計値0.12ton/cmに対して検査値0.112 ~0.125 ton/cm
 であり、また、鉛直剛性は、設計値55ton/cmに対して検査値64.08 ~70.86 ton/cmである。

積層ゴムのせん断破壊は、積層ゴムNo. B71が水平力1.935ton, 変位78.5mm (560 %) で
 生じ、同No. B72が水平力1.360ton, 変位65.0mm (464 %) で生じた [図3.3.1]。

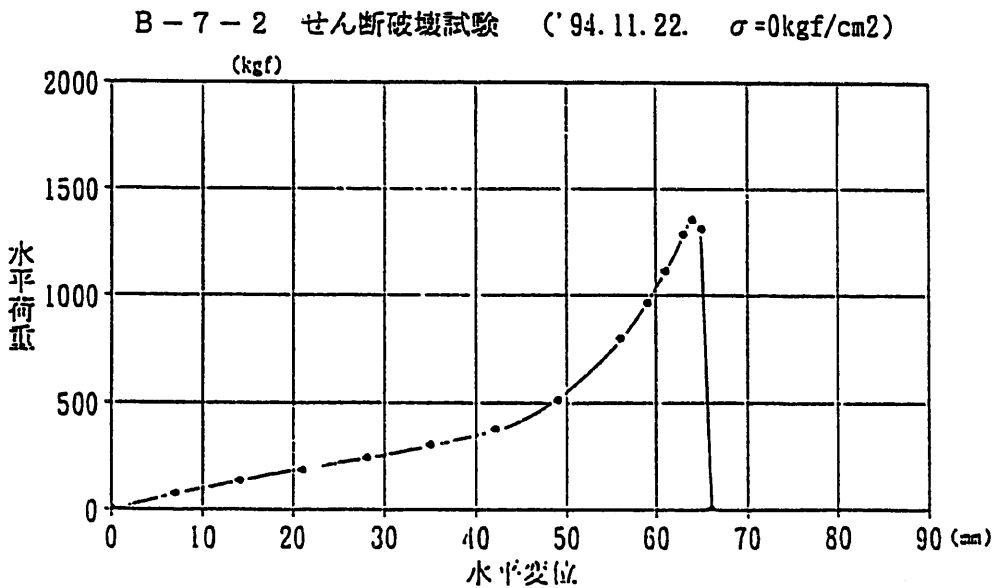
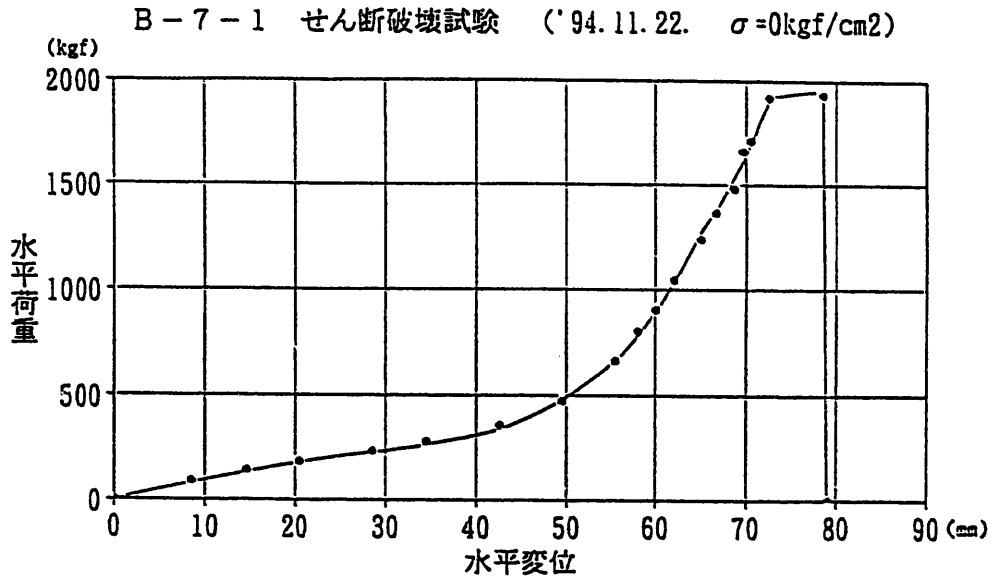


図3.3.1 積層ゴムのせん断破壊試験結果

3.3.2 ソフトランディング装置の静的加力試験

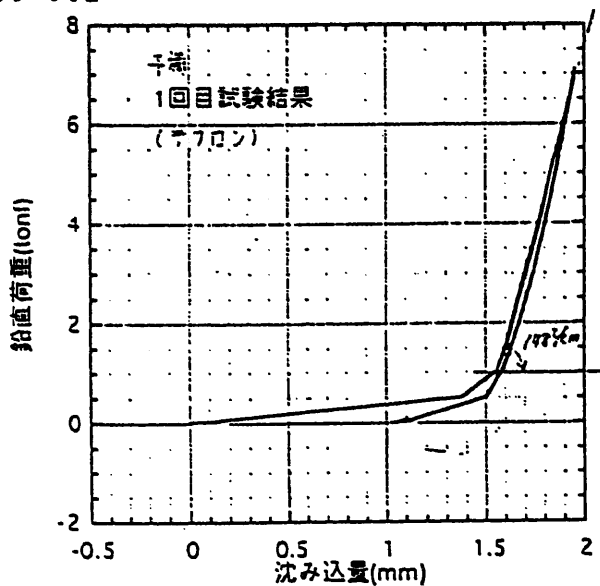
3.3.2.1 試験方法

ソフトランディング装置は、鉛直剛性約55t/cmを得ることを目標として、10ton アムスラー試験機で圧縮加力試験を次のように実施した。まず、予備のテフロン成形材を用いて単純圧縮試験を実施し鉛直剛性を調べ、次に、ゴムシート弾性材 $t = 3\text{ mm}$ と、 6 mm を挿入して鉛直剛性を調べた。この結果、ゴムシート 6 mm が目標を満たし適切であると判断し、最終的に、試験で使うソフトランディング装置4体（名称：S71，S72，S73，S74）の鉛直剛性圧縮試験を行った。

3.3.2.2 試験結果

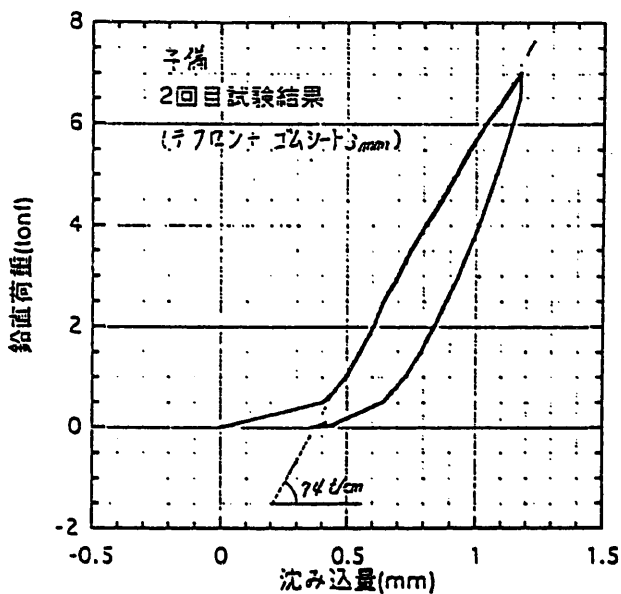
図3.3.2にテフロン成形材の鉛直荷重と変位（沈み込み）の関係を示す。荷重約1.0ton までなじみのための非線型領域があり、1.0tonを超えると剛性約148t/cmではほぼ線形特性となる（図3.3.4）。図3.3.3にゴムシート厚さ $t = 3\text{ mm}$ 、図4.4に同 $t = 6\text{ mm}$ 挿入後の鉛直荷重と変位の関係を示す。この結果、 $t = 3\text{ mm}$ の場合約94t/cm、同 $t = 6\text{ mm}$ の場合約54.4 t/cmでありほぼ目標値が満たされた。

図3.3.5に試験に使うソフトランディング装置No.1～No.4の初載荷から3往復（サイクル分の荷重と変位の関係を示す。3サイクル目の往路から求める鉛直剛性は、荷重0 t～3 t 範囲で40t/cm、同0 t～4 t 範囲で45t/cm、同0 t～7 t 範囲で70t/cmである。



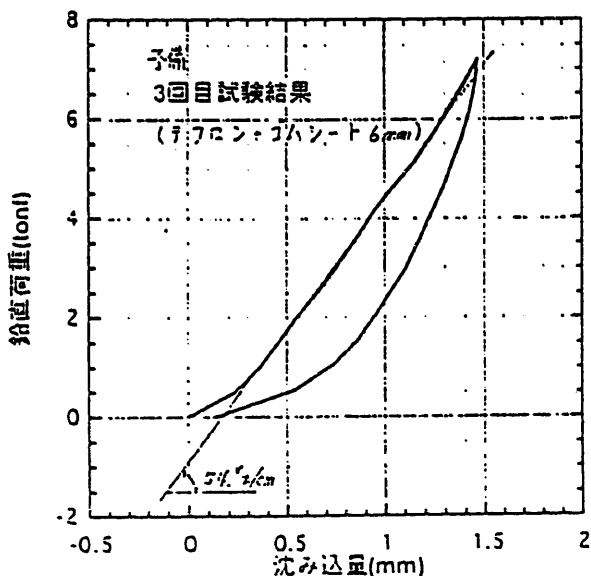
ソフトランディング単体試験

図3.3.2 テフロン成形材の鉛直荷重と変位の関係



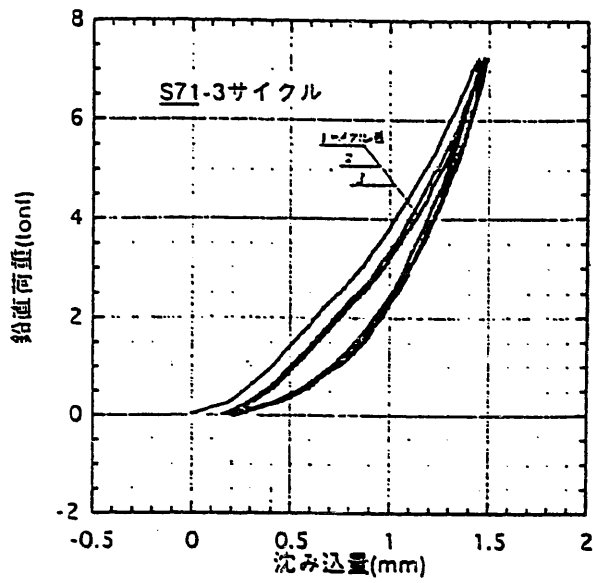
ソフトランディング単体試験

図3.3.3 ゴムシートt=3mm 挿入後のソフトランディング鉛直剛性

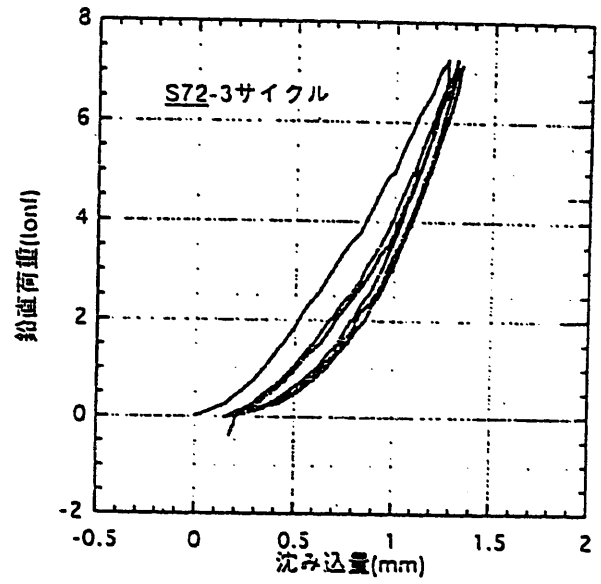


ソフトランディング単体試験

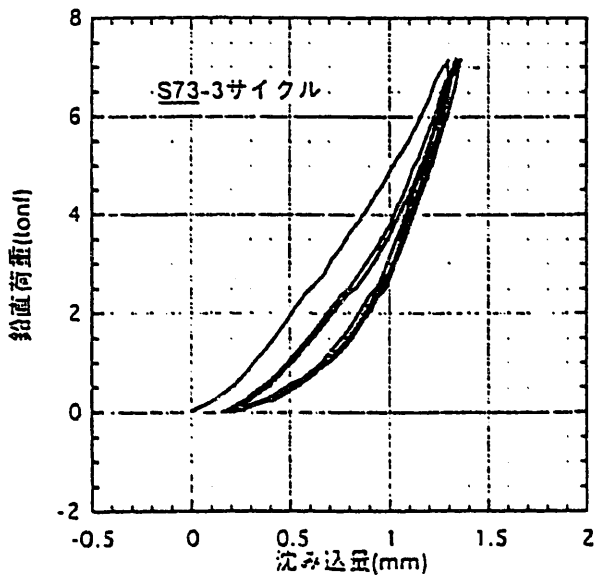
図3.3.4 ゴムシートt=6mm 挿入後のソフトランディング鉛直荷重と変位の関係



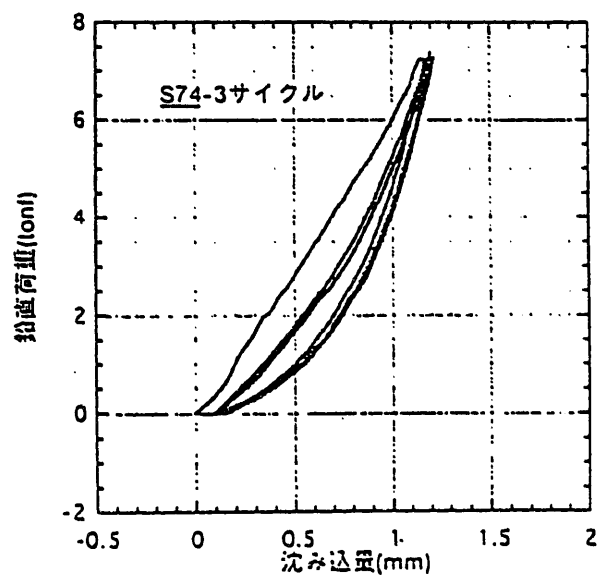
ソフトランディング単体試験



ソフトランディング単体試験



ソフトランディング単体試験



ソフトランディング単体試験

図3.3.5 ソフトランディング装置S71～S74 鉛直荷重-鉛直変位の関係

3.3.3 免震構造体の静的加力試験

3.3.3.1 試験方法

振動台上に16ton 構造体を組み立てた後、1)積層ゴムと構造体、2)積層ゴム、ソフトランディング装置と構造体の状態で、それぞれ油圧ジャッキにより静的水平加力試験を行った。

3.3.3.2 試験結果

図3.3.6に、1)積層ゴムと構造体の場合の水平変位と水平力の関係、図3.3.7に水平変位と鉛直変位（沈み込み）の関係を示す。

また、図3.3.8に、2)積層ゴム、ソフトランディング装置の場合の水平変位と水平力の関係、図3.3.9に水平変位と鉛直変位の関係、図3.3.10に水平変位とソフトランディング装置の鉛直荷重の関係を示す。なお、ソフトランディング装置は水平変位0にて初期荷重200kgを作用させ早期のランディング（着地）効果を計っている。

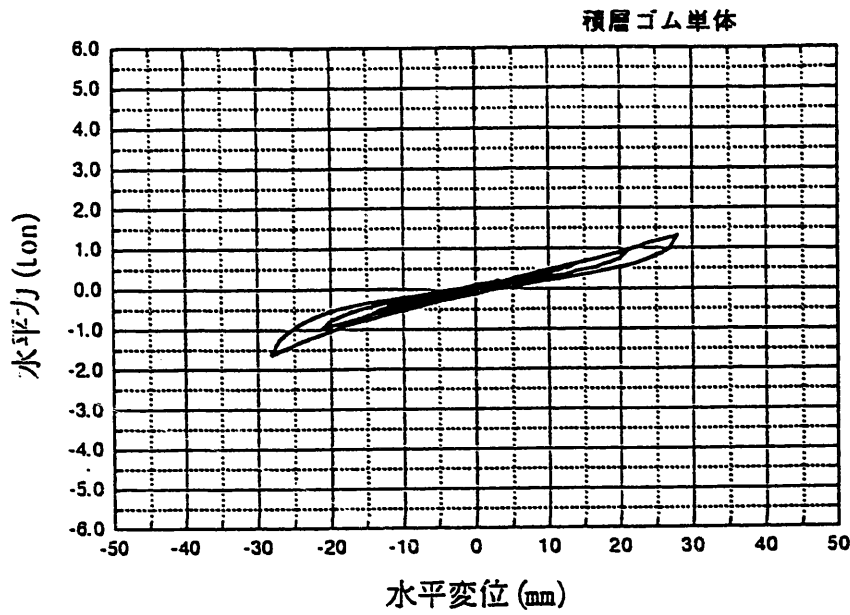


図3.3.6 積層ゴム+16 t 構造体の水平変位と水平力の関係

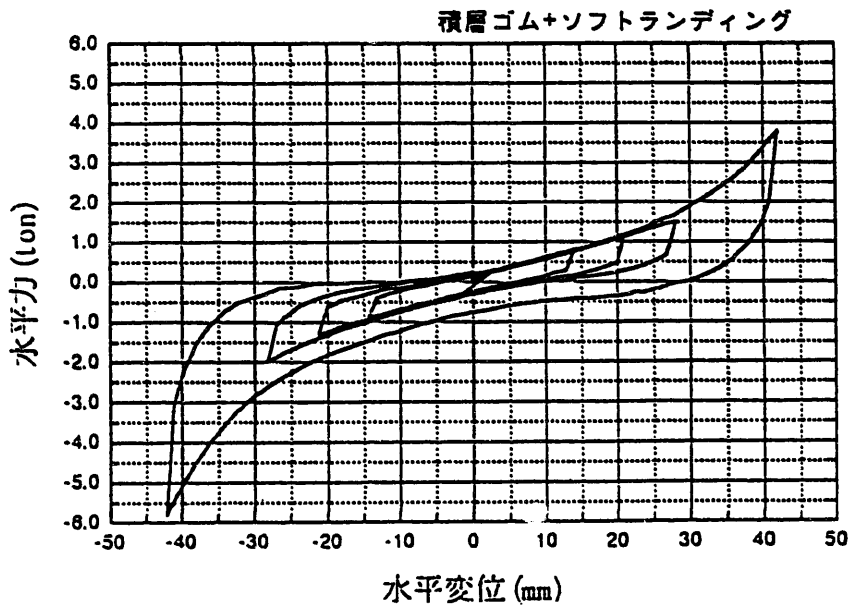


図3.3.8 積層ゴム+ソフトランディング装置+16 t 構造体の水平変位と水平力の関係

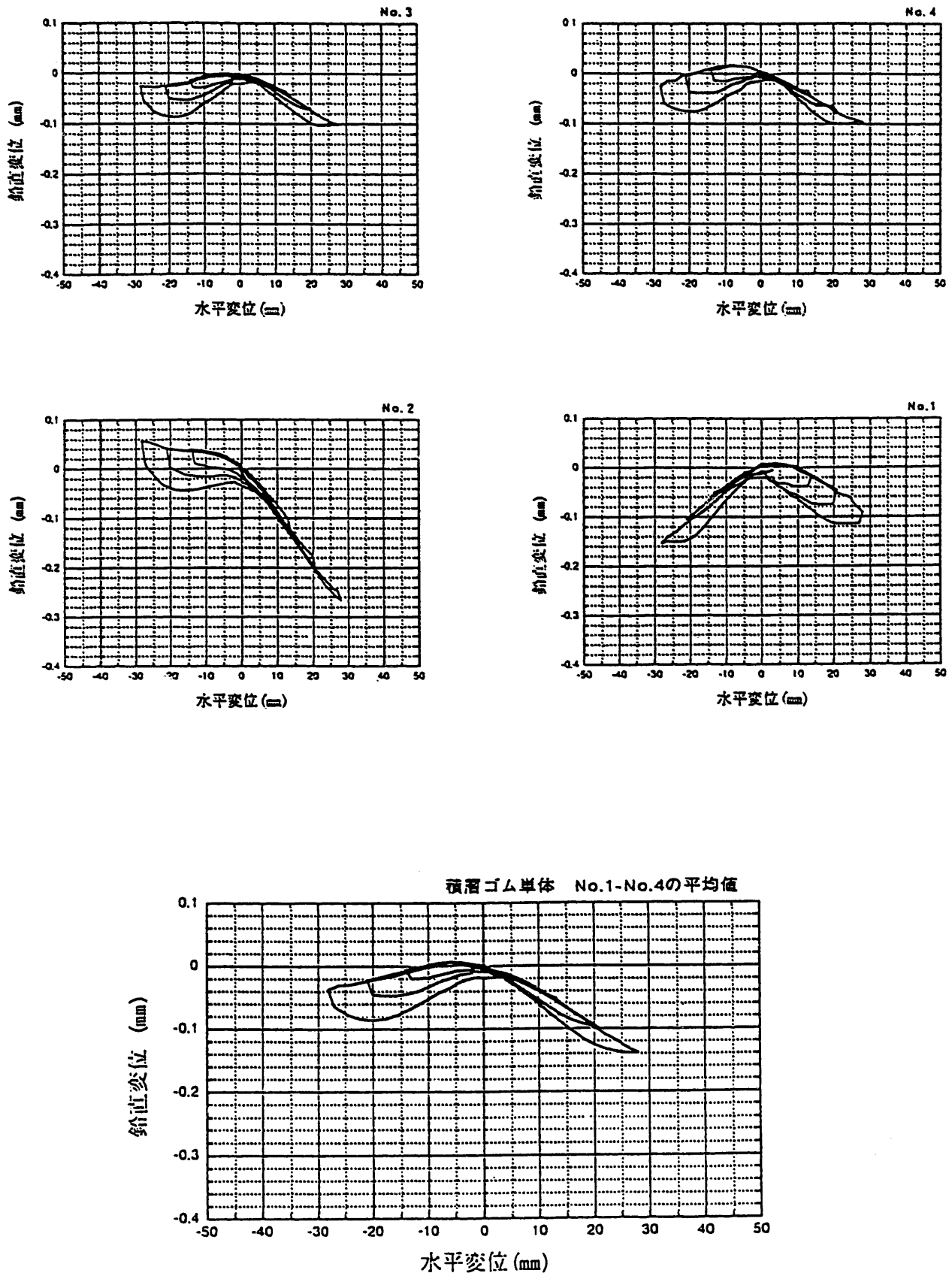


図3.3.7 積層ゴム+16 t 構造体の水平変位と鉛直変位の関係

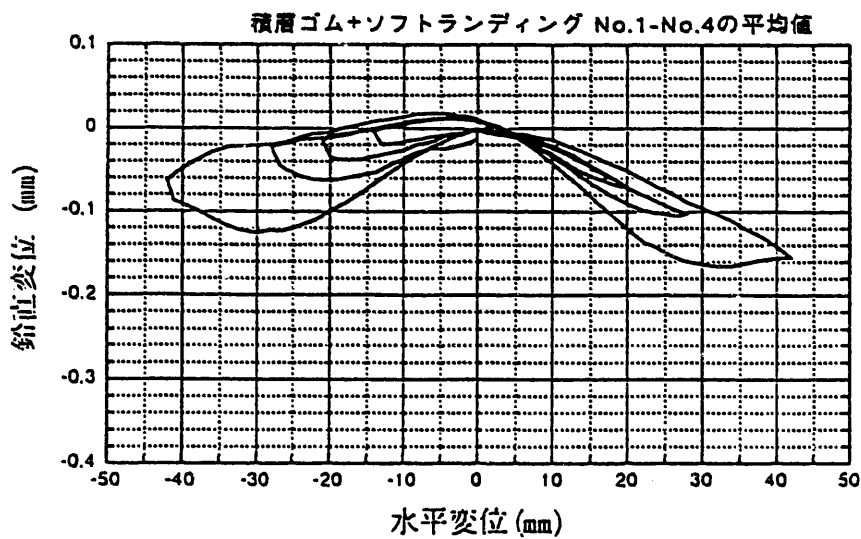
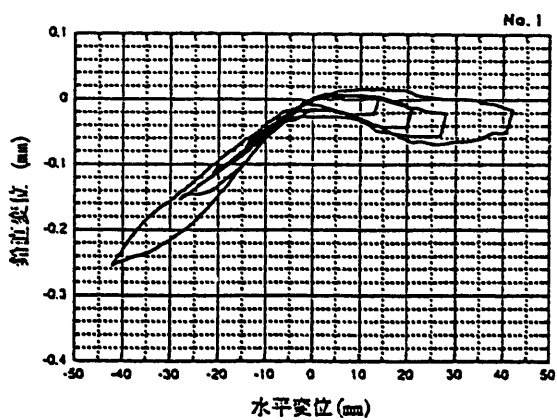
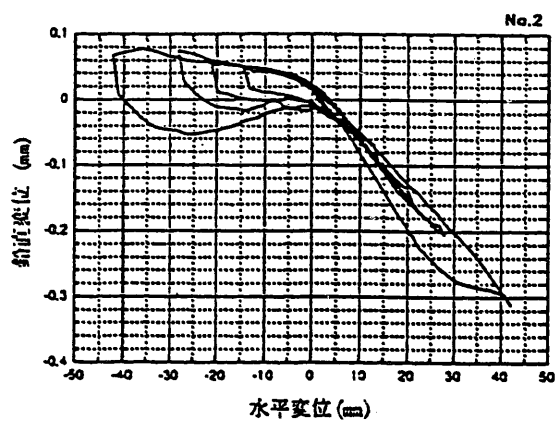
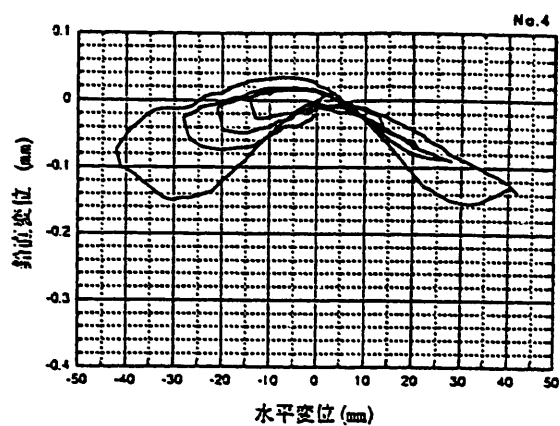
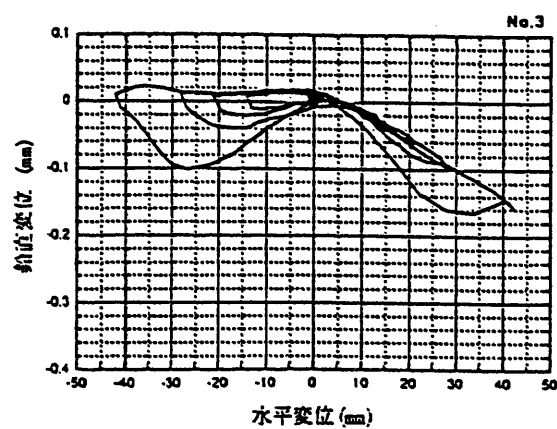


図3.3.9 積層ゴム+ソフトランディング装置+16 t 構造体の水平変位と鉛直変位の関係

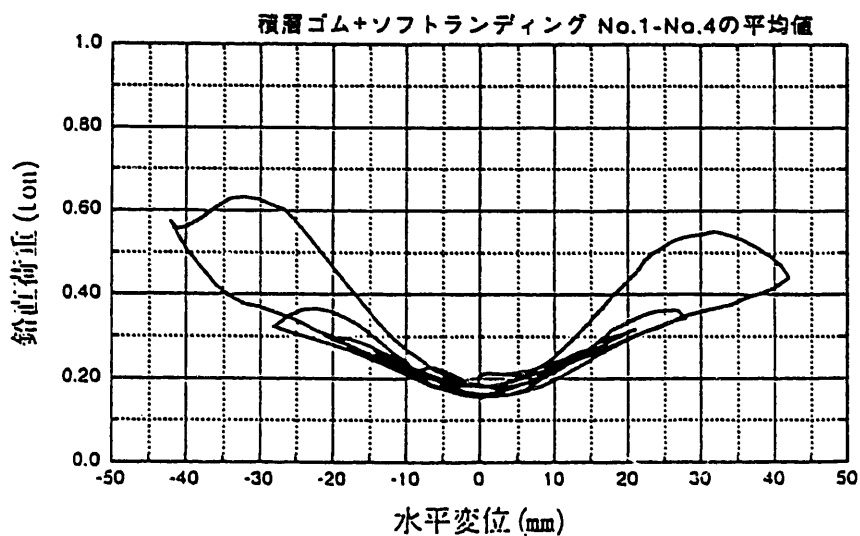
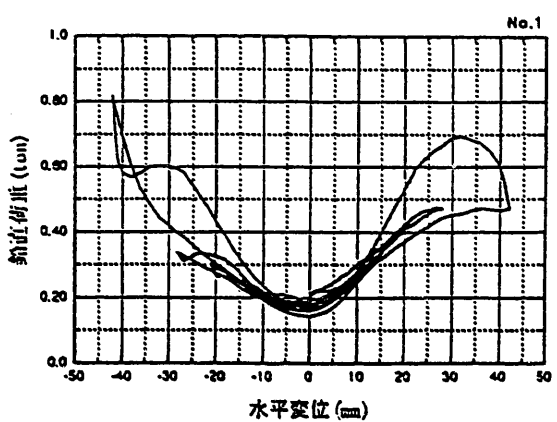
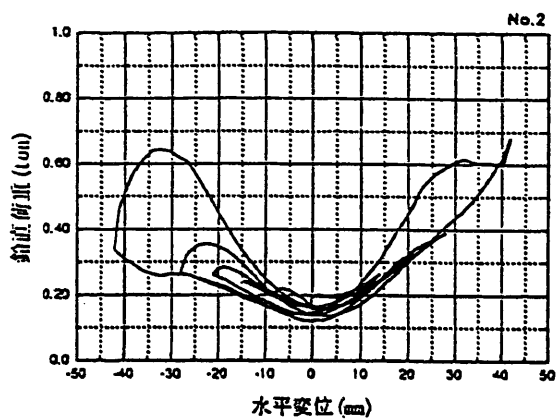
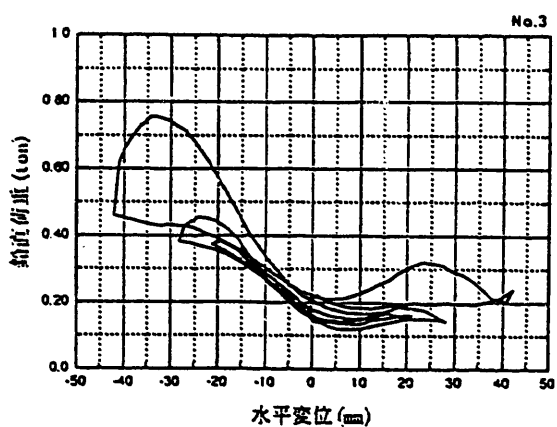
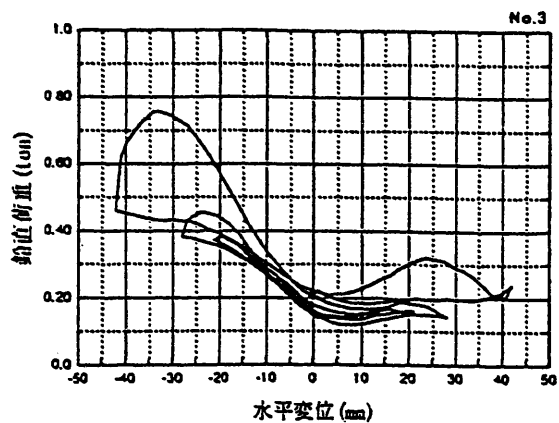


図3.3.10 積層ゴム+ソフトランディング装置+16t構造体の水平変位とソフトランディング鉛直荷重との関係

3.4 免震構造体の振動台試験

3.4.1 試験目的

振動台試験は、16 t 免震構造体の固有値、動的特性、地震波入力応答特性、免震層の積層ゴムの終局状態である限界特性を知ることが目的とする。

3.4.2 試験方法

試験ケースは大別して 1) ”積層ゴム+16 t 構造体” の場合と、 2) ”積層ゴム+ソフトランディング+16 t 構造体” の場合であり、表3.4.1に振動台試験の種類と内容を示す。それぞれ免震層の水平方向のせん断変形を歪み%で目標を設けて、低歪みから高歪み試験へとケース分けしている。

入力波の種類は、共振振動数とモード検索試験、振動性状試験、限界特性試験を正弦波 (Sine波) で、地震波応答試験を、1/7 縮尺モデルに対応して、時間軸を $1/\sqrt{7}$ に短縮したEL-CENTRO NS波形と、応答スペクトルを図3.4.1に示すようなサイト人工地震波の2波である。なお、各試験ケースに使用した積層ゴムNo. を表3.4.2に示す。

3.4.3 計測方法

表3.4.3に加速度計、変位計等のセンサーの種類、図3.4.2に計測システムとセンサー配置図を示す。

表3.4.1 振動台試験の種類と内容

	CASE	せん断歪み	目的	入力波 (max:cm/s ²)	備考
16 t 構造体 + 積層ゴム	CS01	100%(14mm)	共振振動数と モードの検索	Sine	重り下部
	CS011	100 %	同 上	Sine	重り上部
	CS02				以下上部
	CS46	0 ~400 %	振動性状	Sine (100)	
	CS56	400 %	振動性状	Sine (159)	
	CB36	300 %	地震波応答	Elcentro(445)	
	CA47	400 %	地震波応答	Art. (551)	
	CA57	500 %	地震波応答	Art. (773)	
	CS58	破壊まで	限界特性	Sine (121)	
16 t 構造体 + 積層ゴム + ソフトラディング	CS08	100%(14mm)	共振振動数と モードの検索	Sine	Landing 面圧 200kgf
	CS42	0 ~400 %	振動性状	Sine (122)	200kgf
	CB46	400 %	地震波応答	Elcentro(853)	200kgf
	CA46	400 %	地震波応答	Art. (902)	200kgf
	CA51	400 %	地震波応答	Art. (1, 120)	200kgf
	CS47	0 ~400 %	応答性状	Sine (130)	500kgf
	CS48	0 ~400 %	応答性状	Sine (155)	1,000kgf
	CS59	破壊まで	限界特性	Sine (280)	200kgf

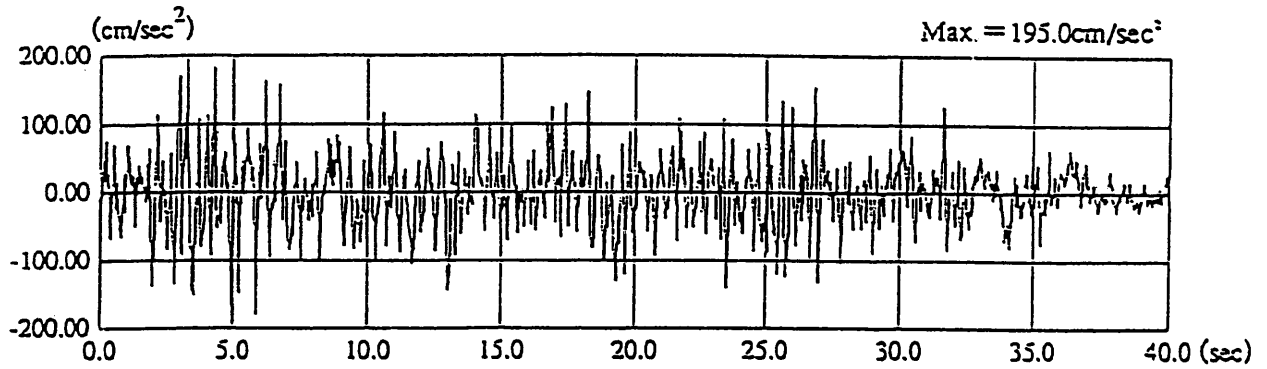
表3.4.2 試験CASEに使用した積層ゴムNo.

CASE	配置場所			
	1	2	3	4
CS01	VS-7-1	VS-7-2	VS-7-3	VS-7-4
CS011	P-7-2	P-7-3		
CS02 CS46 CE36 CA47 CA57	P-7-2	P-7-3	P-7-4	P-7-3
CS58	V-7-1	P-7-1	V-7-2	V-7-4
CS08	VS-7-1	VS-7-2	VS-7-3	VS-7-4
CS42 CE36 CA46 CS47 CS48	P-7-2	P-7-3	P-7-4	P-7-3
CS59	VS-7-4	VS-7-1	VS-7-2	VS-7-3

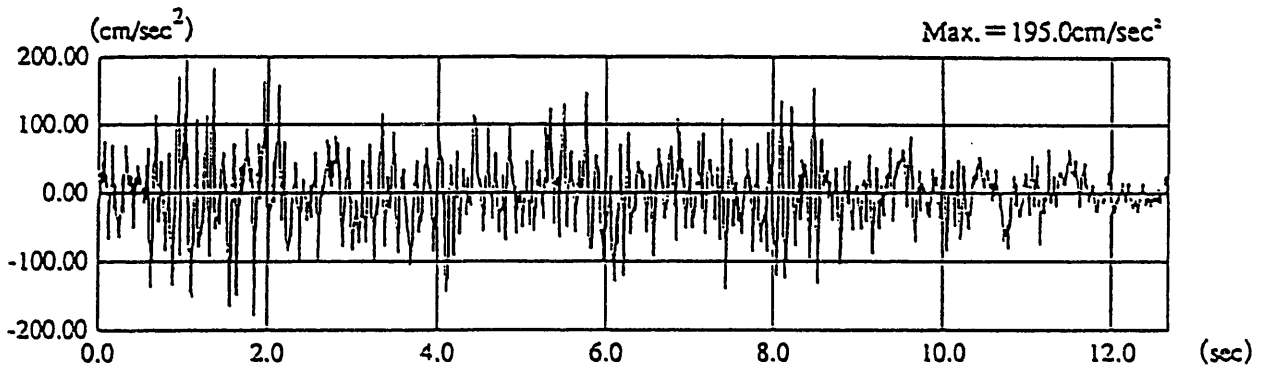
表3.4.3 計測センサー

場所	センサー番号	計測内容
試験体頂部	TAX1, TAX2	水平加速度計
同, 下部	BAX1, BAX2	水平加速度計
同, 下部	BAY1, BAY2	水平直交方向加速度計
同, 下部	BAZ1, BAZ2, BAZ3, BAZ4	上下加速度計
積層ゴム	SDZ1, SDZ2, SDZ3, SDZ4	上下変位計
ソフトラディング	SPZ1, SPZ2, SPZ3, SPZ4	圧力計

試験用基準地震波の時刻歴波形



設計検討用模倣波



試験用基準地震波

図3.4.1-(1) サイト人工地震波

試験用基準地震波の応答スペクトル (h=2%)

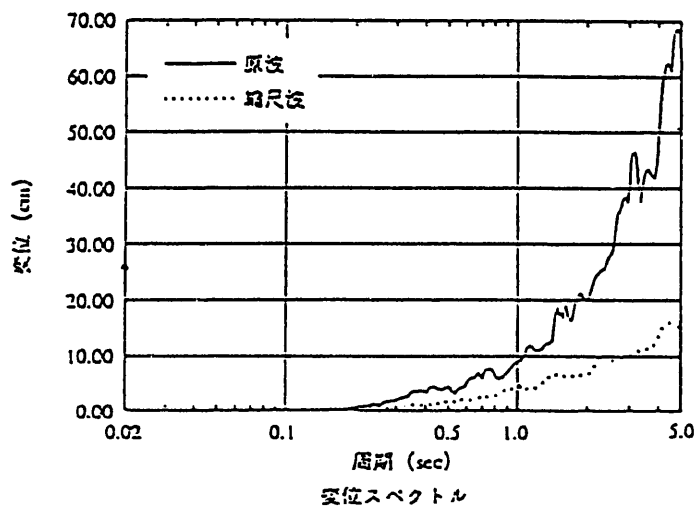
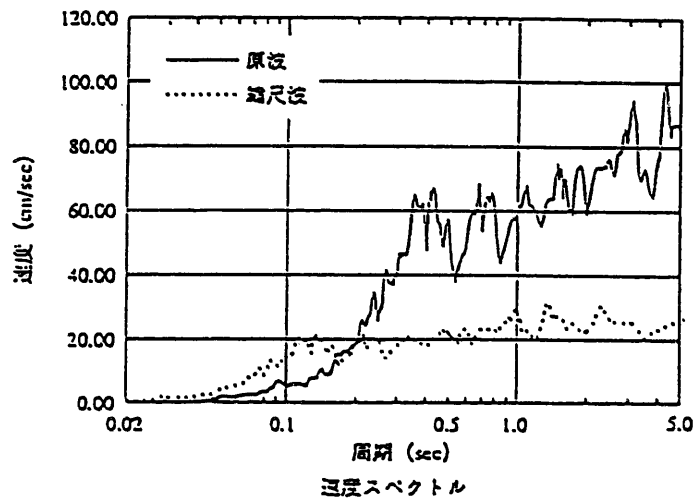
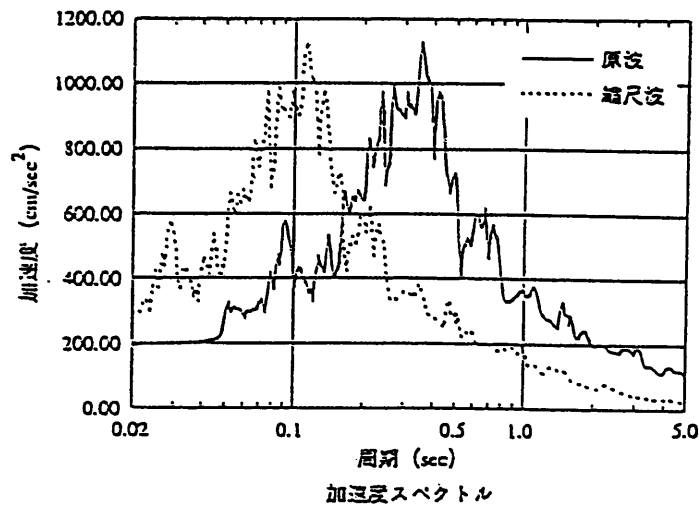


図3.4.1-(2) サイト人工地震波の応答スペクトル

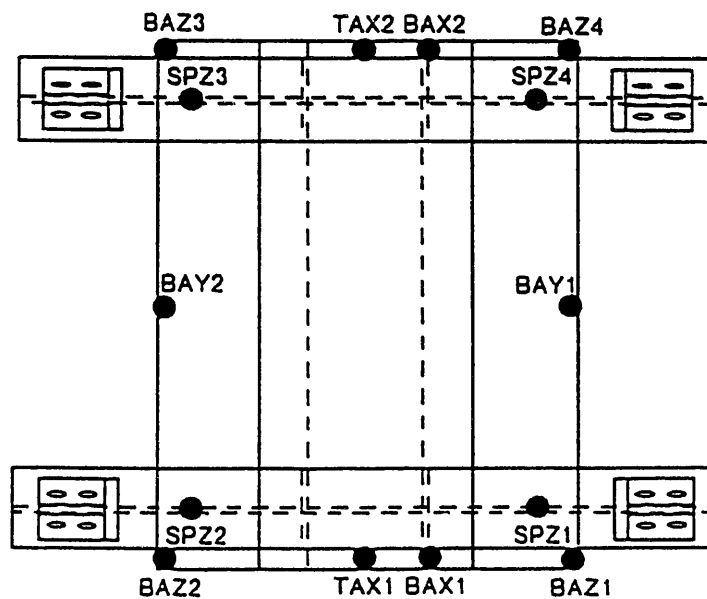
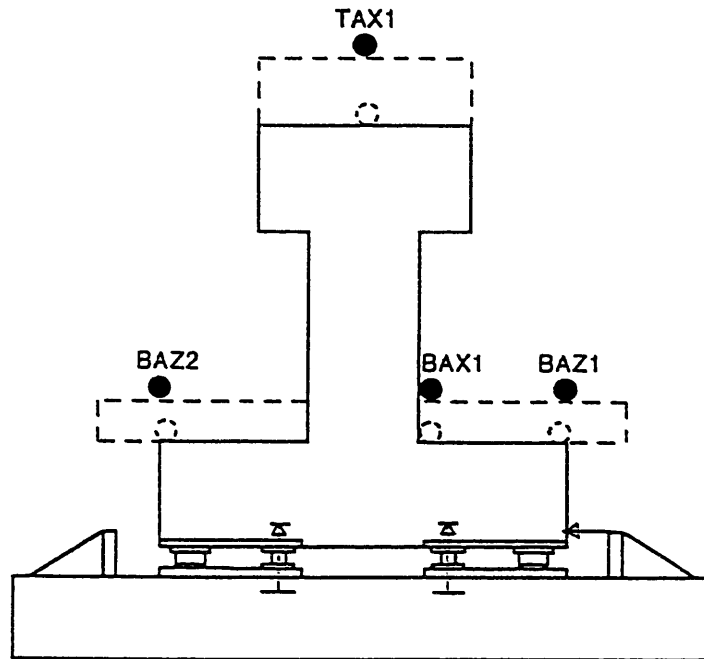
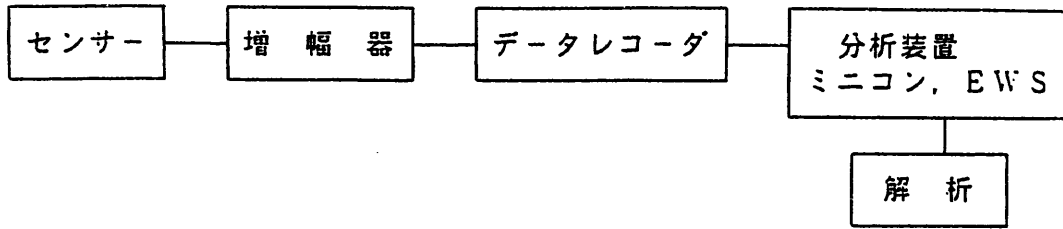


図3.4.2 計測センサー配置図

3.4.4 免震構造体の共振振動数、モード、減衰定数

3.4.4.1 固有振動数

”積層ゴム-16 t 構造体”の重り下部、および、重り上部の共振曲線を図3.4.3および図3.4.4に示す。重り下部の場合の図3.4.3にて2つのピークの内、0.75Hzはねじれ振動であり、対象とする並進スウェイ・ロッキング振動は0.82Hzである。重り上部の場合にはねじれ振動が低減し、スウェイ・ロッキング振動は0.83Hzである。せん断歪み100 %試験の両者の振動モード形を図3.4.5に示す。ロッキング回転角は、積層ゴム部の鉛直変位計より重り下部 $\theta = 0.00036\text{rad}$ 、重り上部 $\theta = 0.00083\text{rad}$ 程度である。以降の試験は、安全上問題ないので、重り上部の場合について行うこととした。

なお、当初の計画ではせん断歪み100 %、200 %、... 試験として順次実施する予定であったが、共振試験で積層ゴムの繰り返し数が多くなりゴムシートがこねられてはらみ出しが生じる等の損傷が生じたため、積層ゴムを取り替えると同時に、試験ケースを表3.4.1に示したように、400 %まで速やかに加振することとした。この取り替え後の共振曲線(CASE:CS02)を図3.4.6に、免震構造体の1次、2次ロッキング振動性状を図3.4.7、図3.4.8に示す。以上の試験の共振振動数と減衰定数をまとめて表3.4.4に示す。

また、”積層ゴム+16 t 構造体”の場合と、”積層ゴム+ソフトランディング装置+16 t 構造体”の場合について、共振振動数で振動台加振を順次大きくしていく過程で計測した水平対角剛性の変化と、履歴減衰定数の変化を図3.4.9、図3.4.10に示す。ここで、履歴減衰定数は $h = (\Delta W / W) / 2\pi$ 、 ΔW : 損失エネルギー、 W : 弾性エネルギーである。両図より、水平対角剛性と履歴減衰定数は表3.4.5に示すように、変位依存性のあることが分かった。

表3.4.5 積層ゴム+16 t 構造体の共振振動数と減衰定数

CASE	共振曲線		回帰分析	
	振動数Hz	減衰定数 %	振動数Hz	減衰定数 %
CS01 重り下部	0.82	7.58	0.776~0.830	4.97~5.54
CS011 重り上部	0.83	4.41	0.844	4.23
CS02 重り上部	1次	4.13	0.997	4.58
	2次	14.2	14.1	1.81

表3.4.5 水平剛性と減衰定数

	積層ゴム +16 t 構造体	積層ゴム+ソフトランディング 装置+16 t 構造体
水平対角剛性	0.45~0.90 t/cm	0.65~1.00 t/cm
履歴減衰定数	5.0 ~9.0	15.5~24.0%

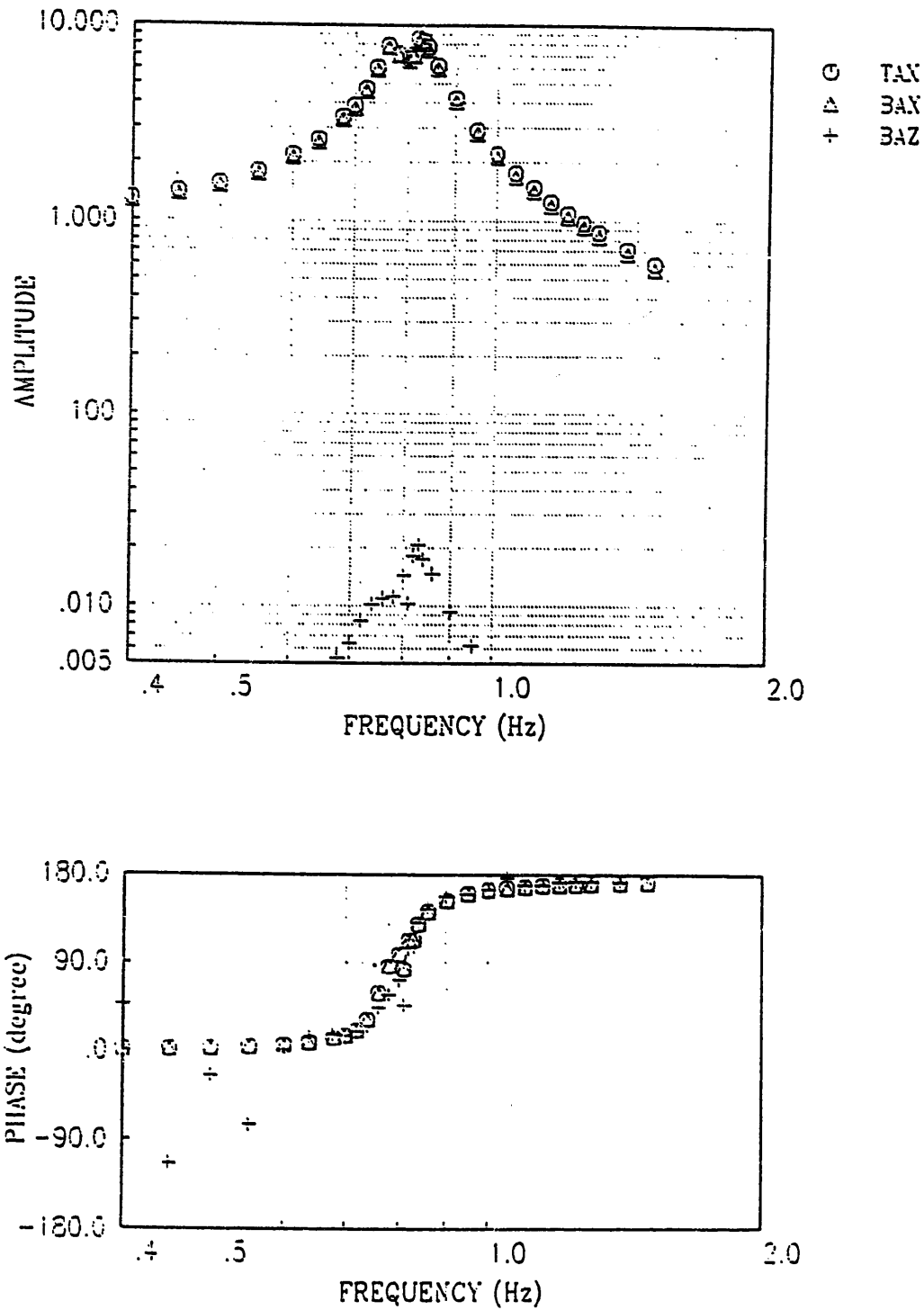


図3.4.3 おもり下部免震構造体の共振曲線 CS01

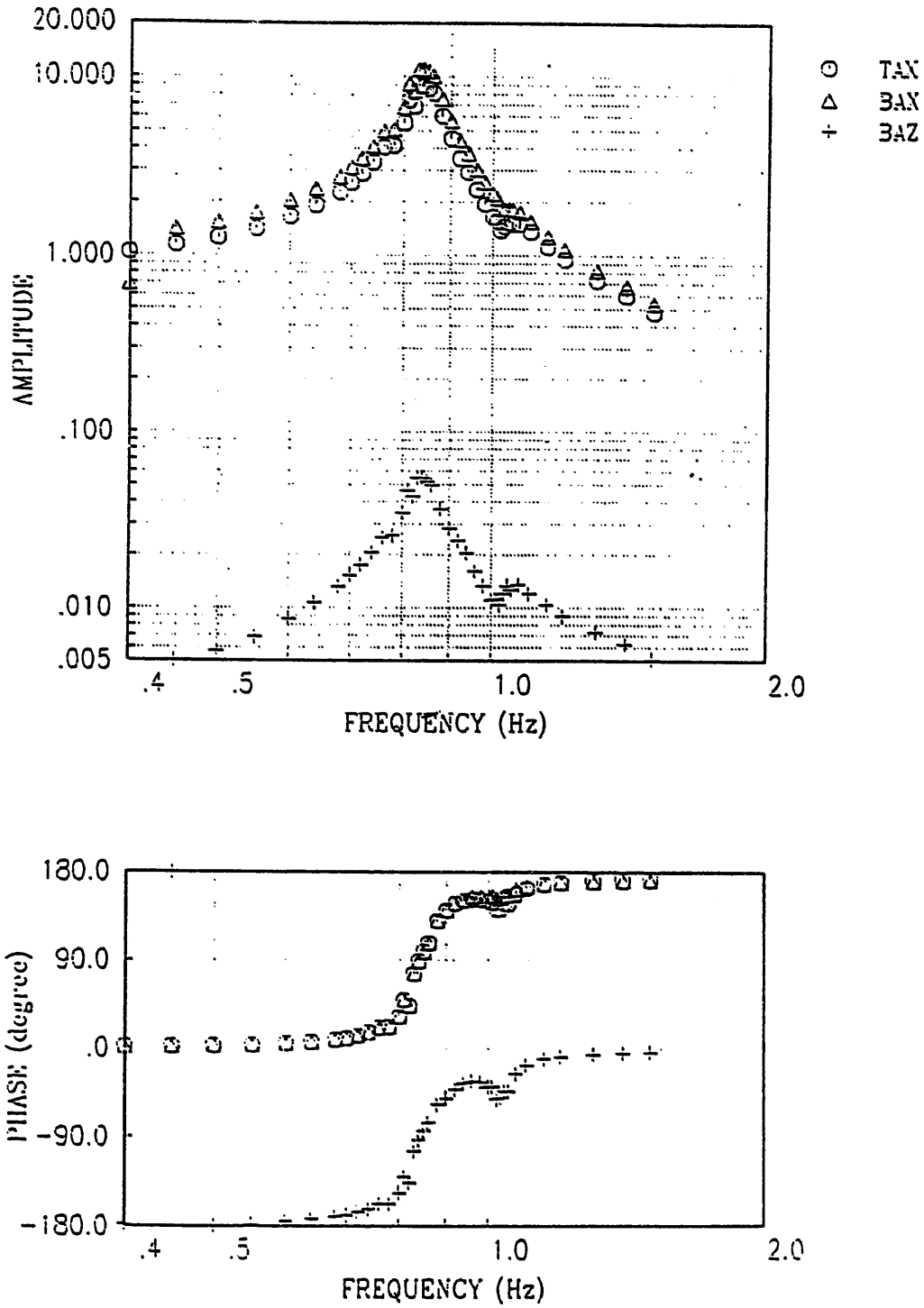


図3.4.4 おもり上部免震構造体の共振曲線 CS011

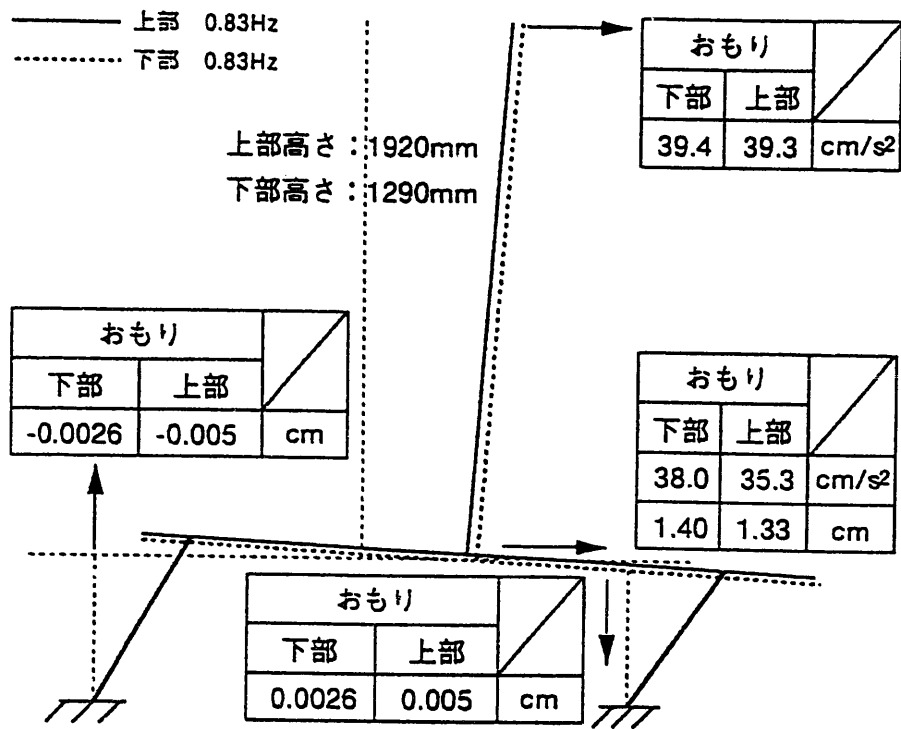


図3.4.5 振動モード形(CS01, CS011)

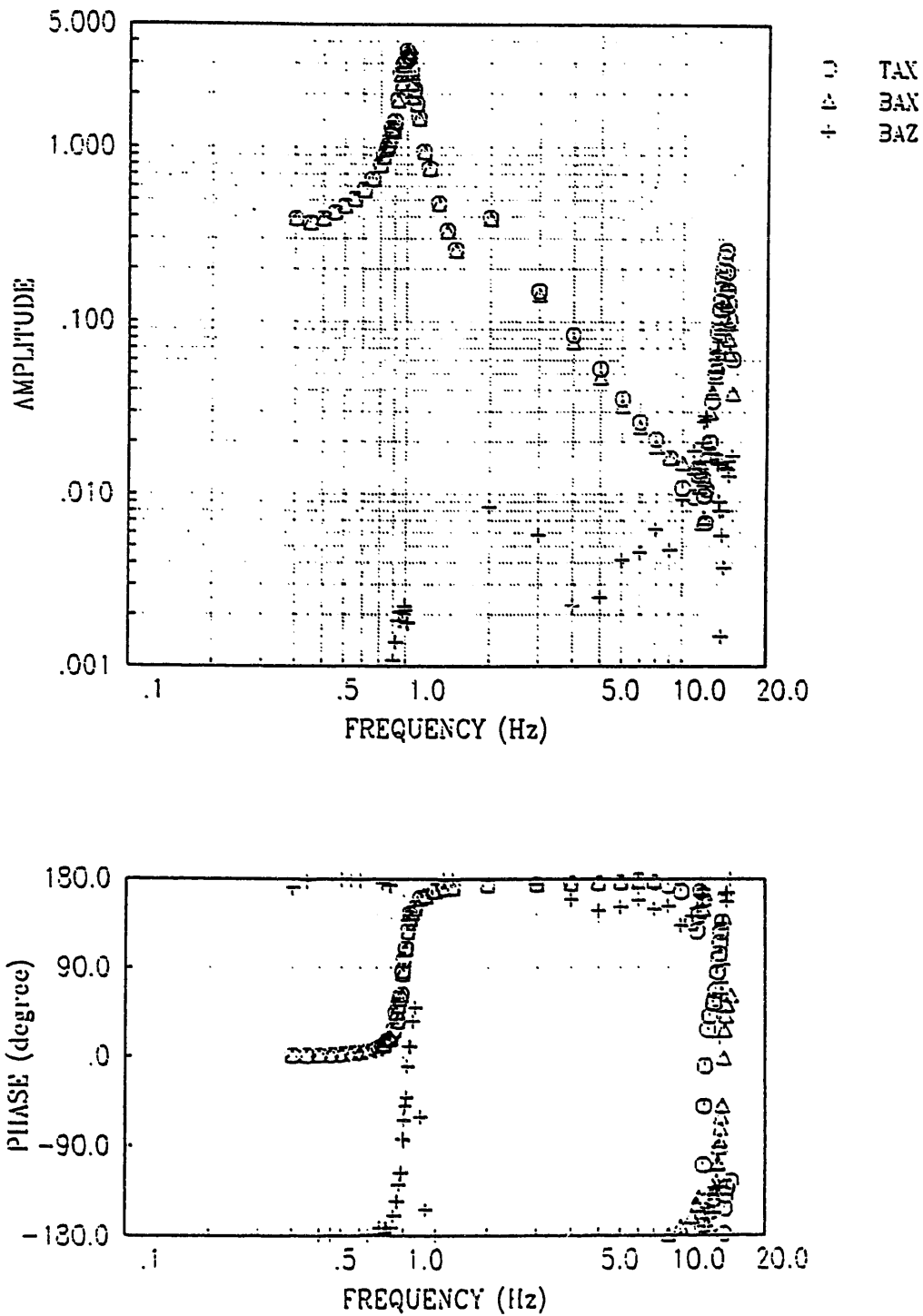


図3.4.6 免震構造体の共振曲線 (CS02)

($f = 0.995 \text{ Hz}$)

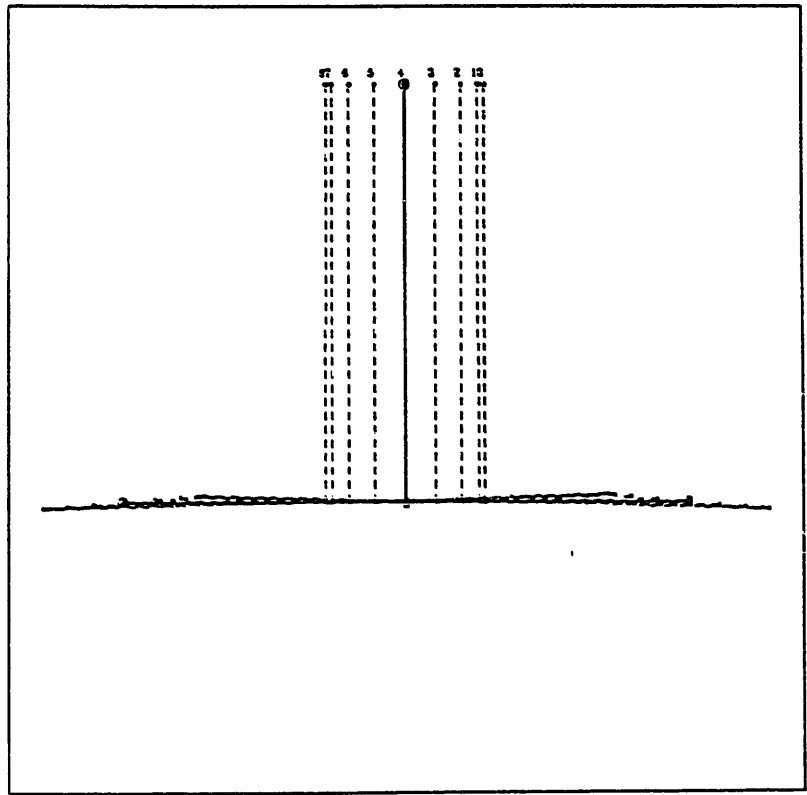
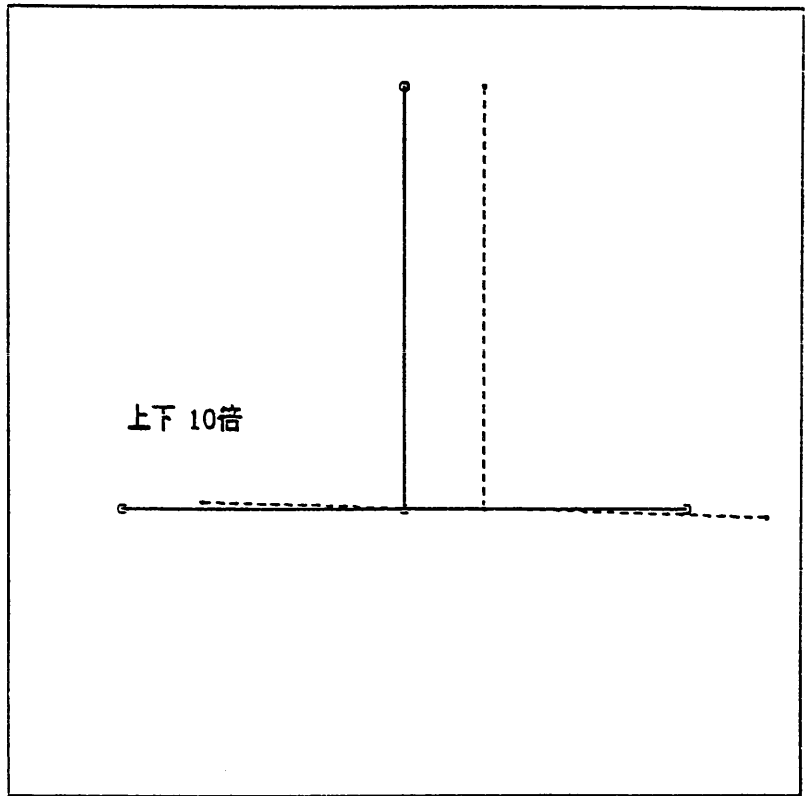
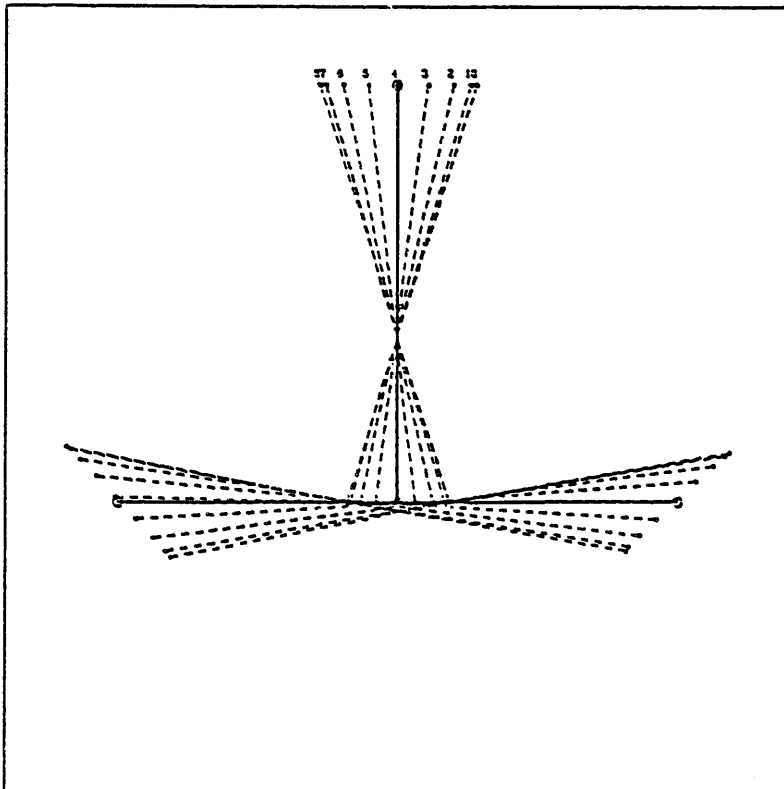
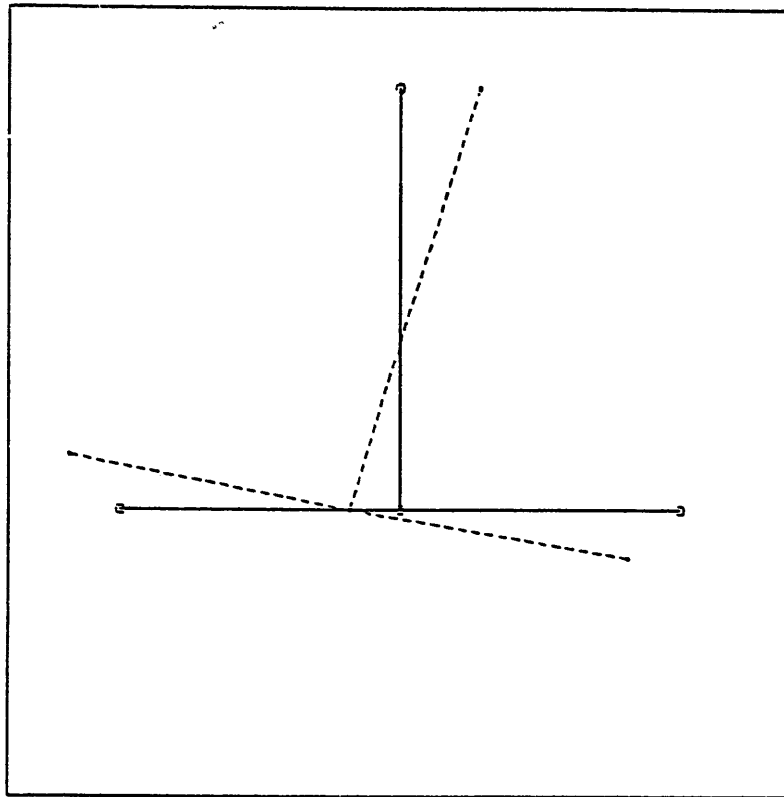


図3.4.7 免震構造体の1次振動モード形(CS02)

(f = 14.20 Hz)



SC= .257

Z
Y X

図3.4.8 免震構造体の2次振動モード形(CS02)

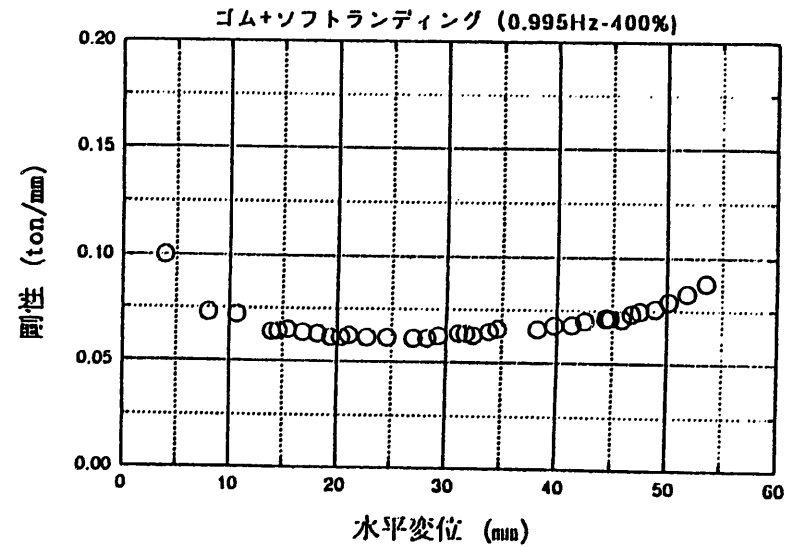
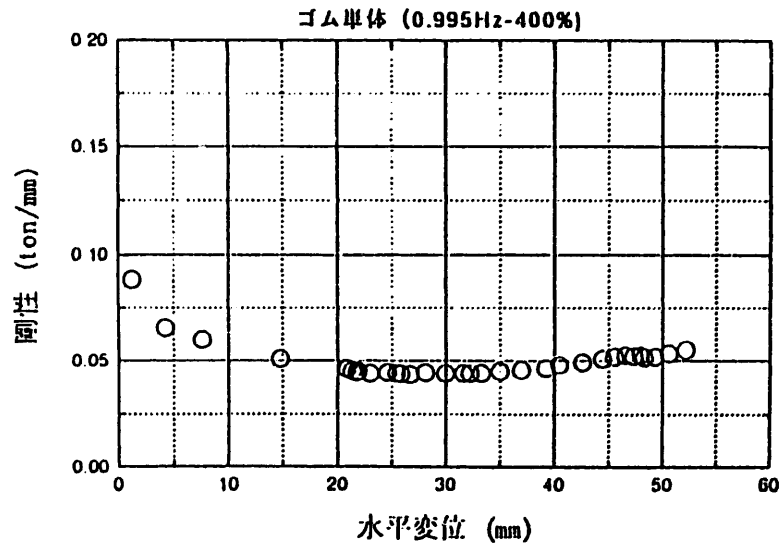
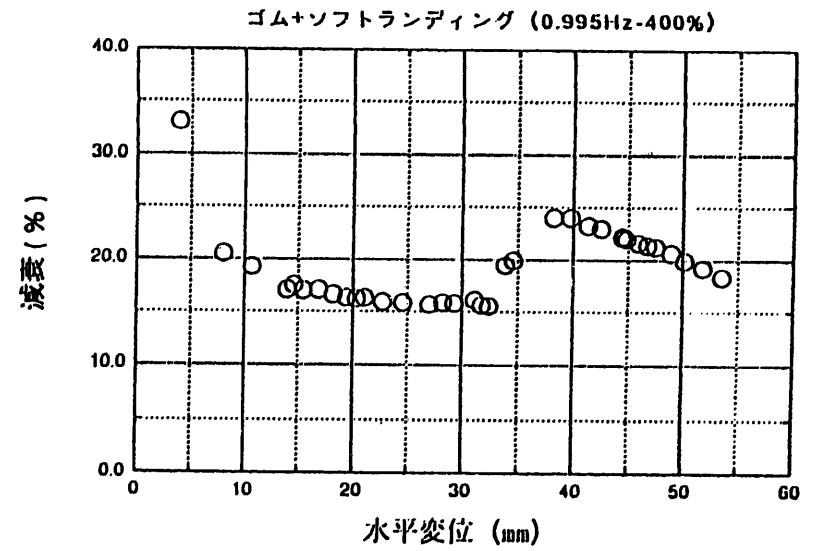
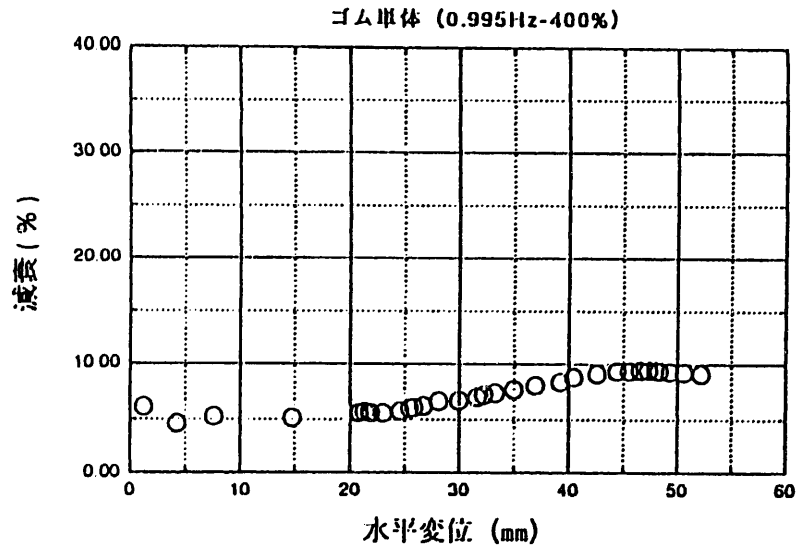


図3.4.9 積層ゴム16t 構造体水平変位と、減衰定数、水平剛性の関係

図3.4.10 積層ゴム+ソフトランディング装置+16t構造体水平変位と、減衰定数、水平剛性の関係

3.4.5 振動性状

積層ゴムと、積層ゴム+ランディングの場合についてそれぞれ共振振動数で免震層のせん断歪み400 %まで振動台入力を順次大きくしていき、この過程の応答波形および水平変位と水平力（せん断力）、鉛直変位などの関係データを計測した。表3.4.1 試験ケースでCS46, CS42に相当する。

図3.4.11～図3.4.12に、積層ゴム+構造体の場合の応答変形および水平変位と水平力、鉛直変位4ヵ所、同平均（AVE）の関係を示す。

図3.4.13～図3.4.15に、積層ゴム+ランディング+構造体の場合の、上記に対応するデータに加えて水平変位とソフトランディング鉛直荷重の関係を示す。このときのソフトランディング初期面圧荷重は1装置当たり200 kgである。参考までにこの初期面圧荷重を変えた場合も実施し、図3.4.16～図3.4.17に1装置当たり500 kg、図3.4.18～図3.4.19に1,000 kgの場合も示す。

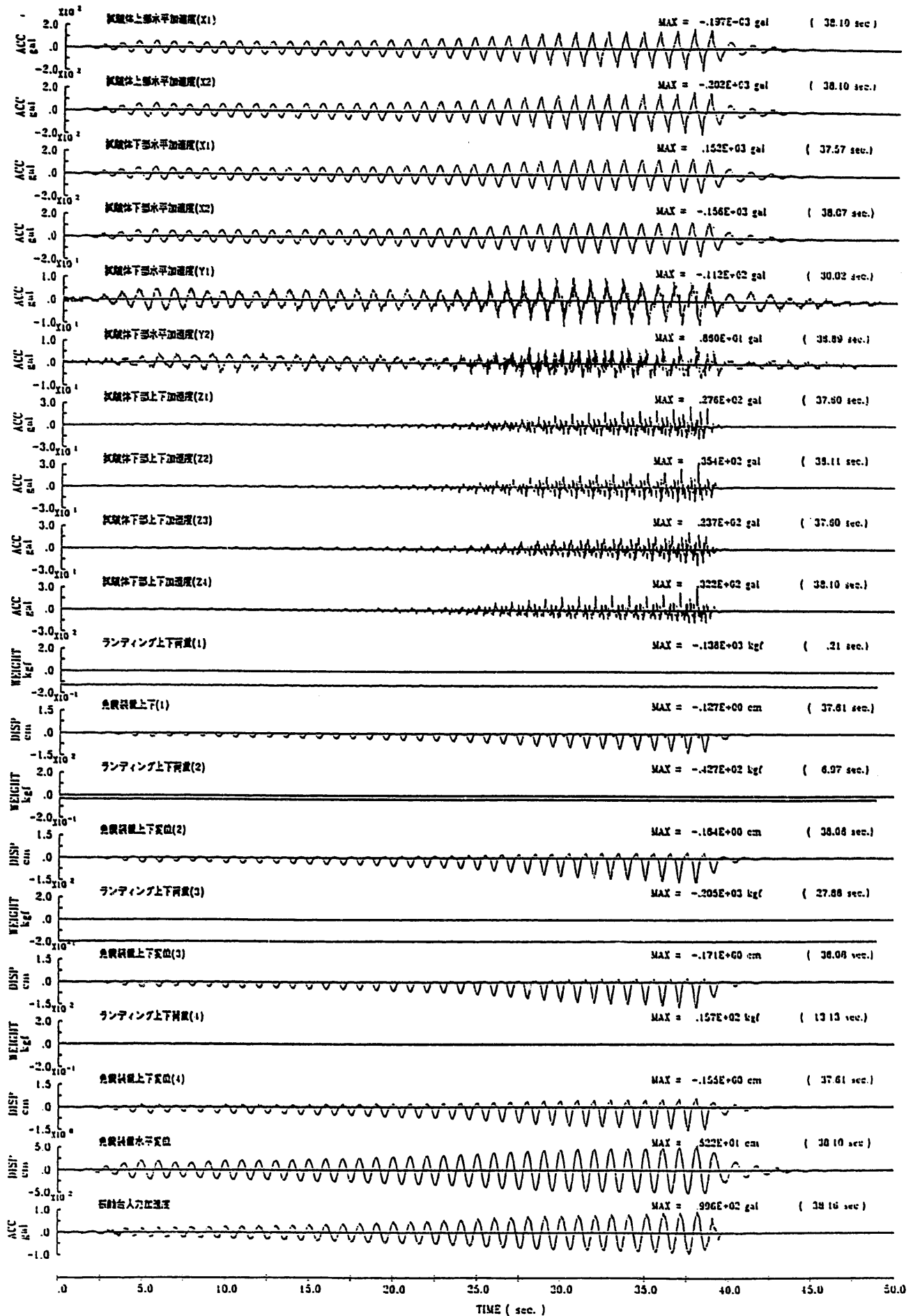


図3.4.11 試験日:1994 12/21 試験名:CS46

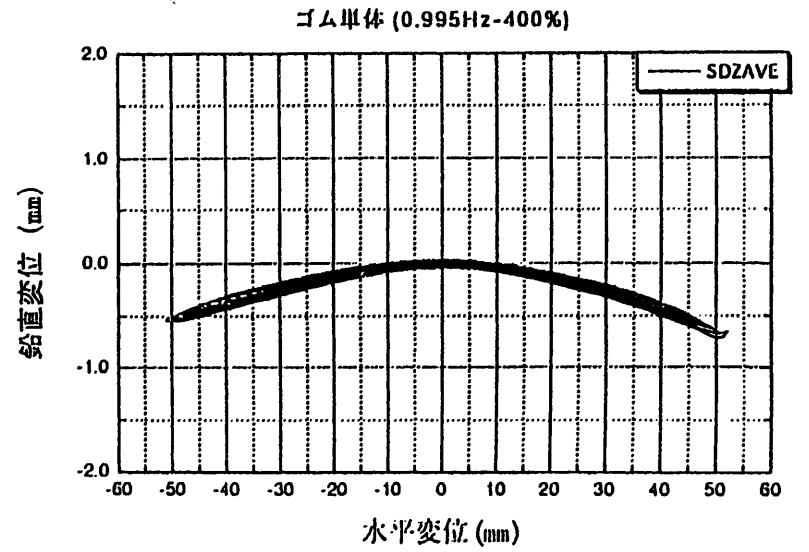
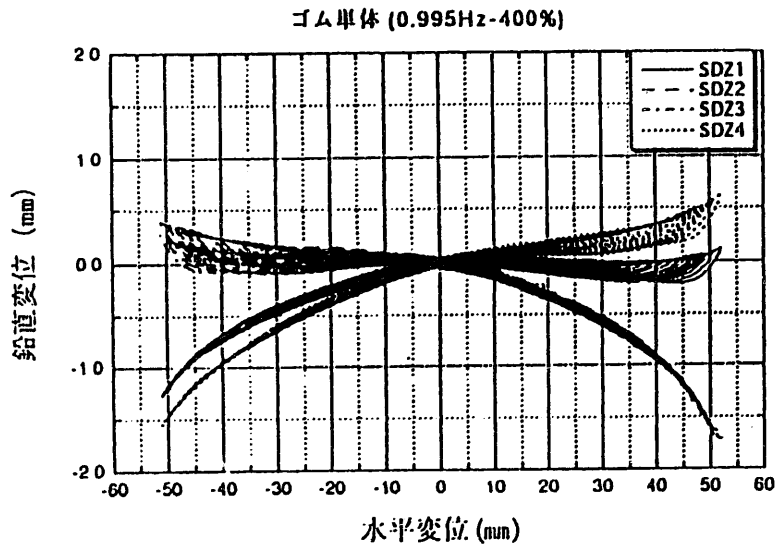
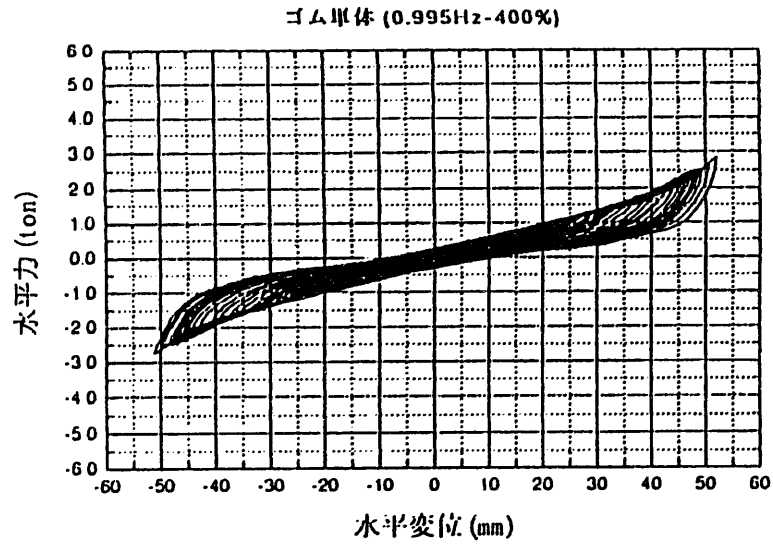


図3.4.12 積層ゴム+16t構造体、正弦波入力、CS46

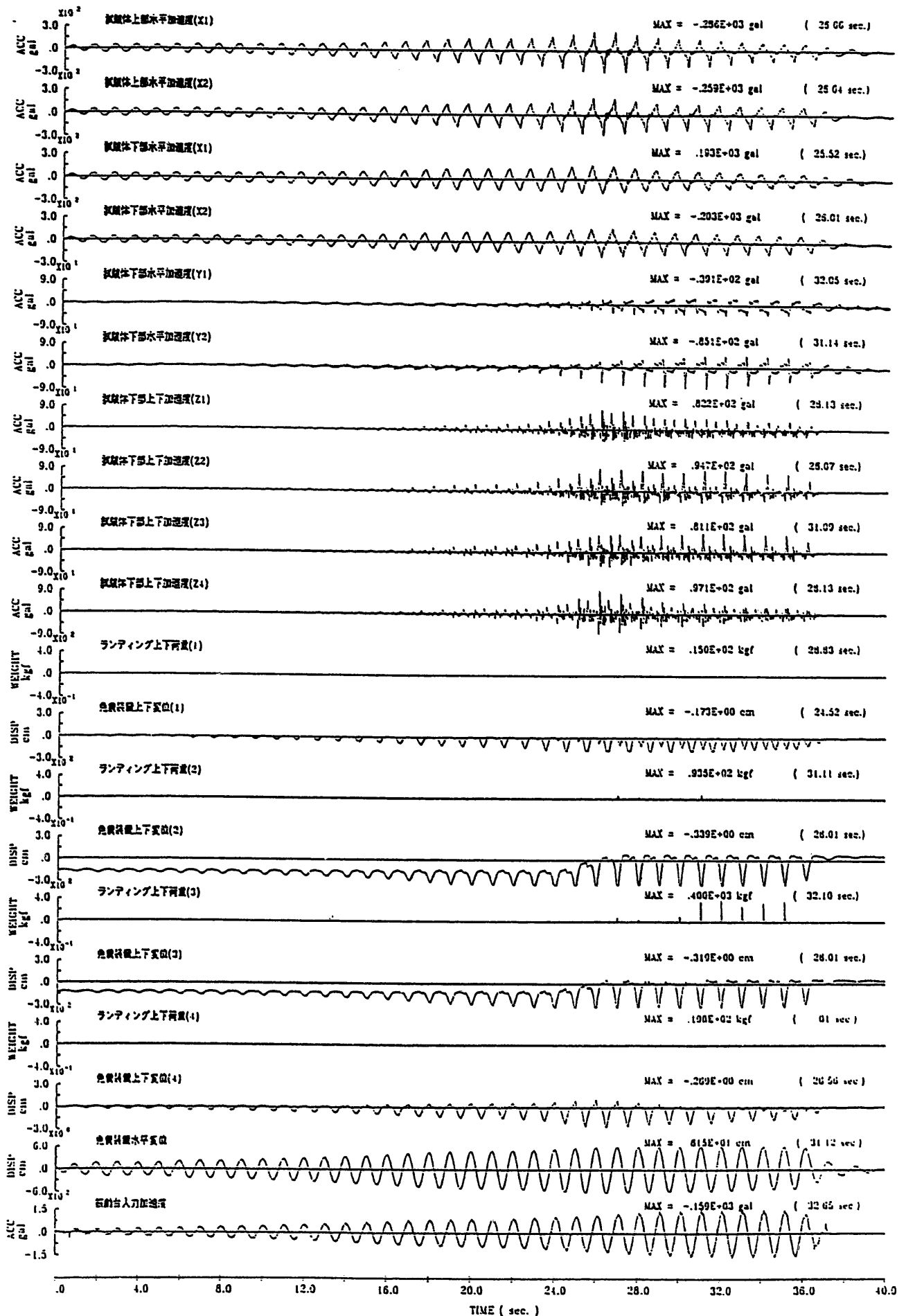


図3.4.13 試験日:1994 12/22 試験名:CS56

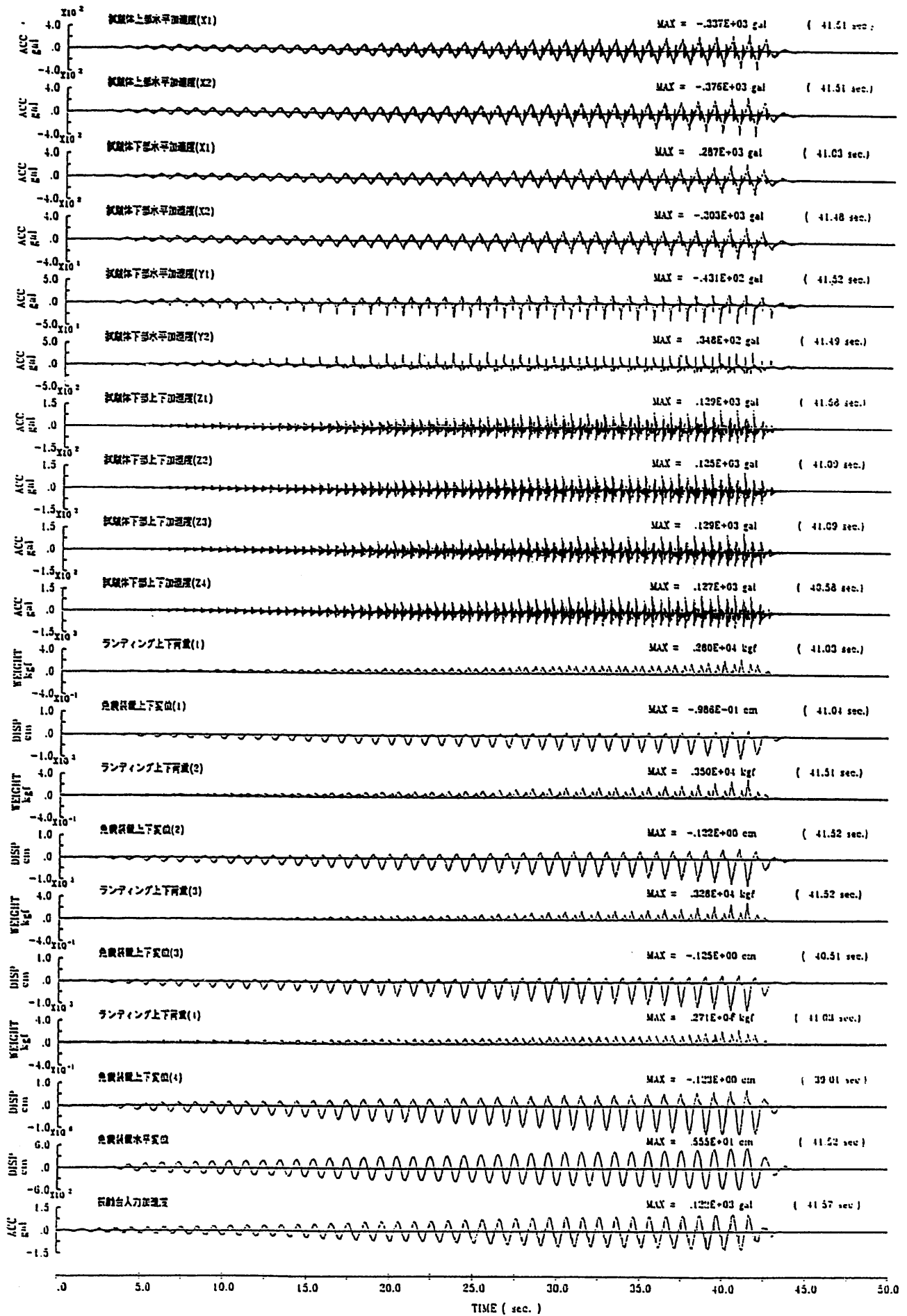


図3.4.14 試験日:1994 12/20 試験名:CS42

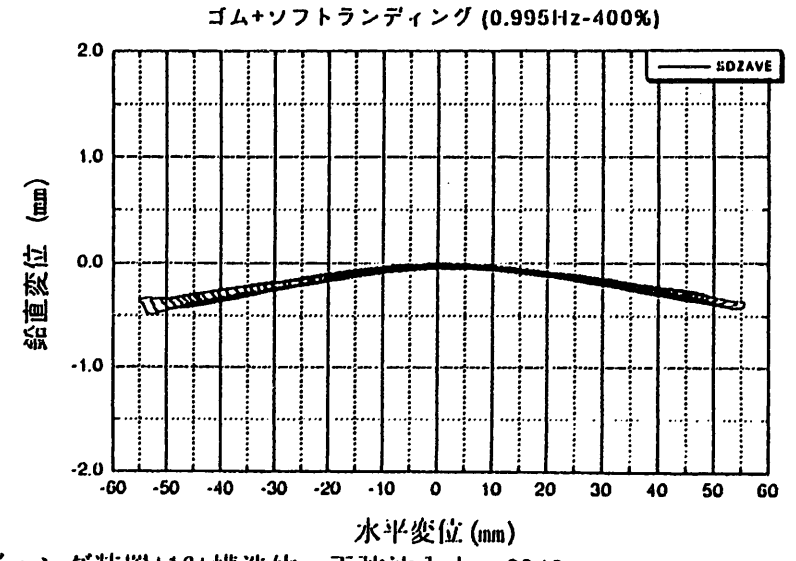
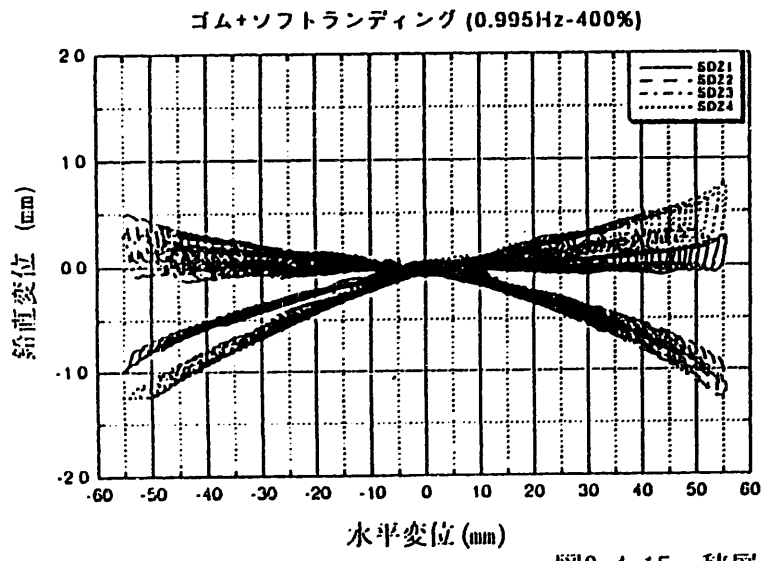
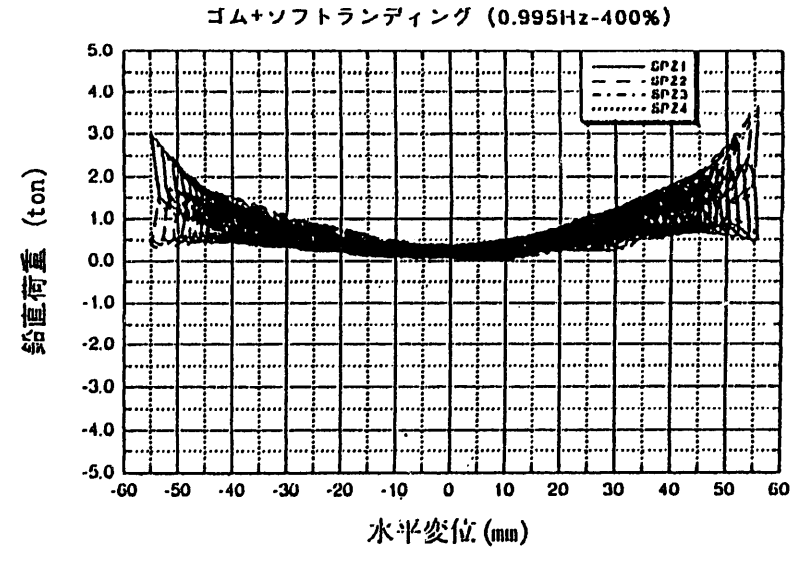
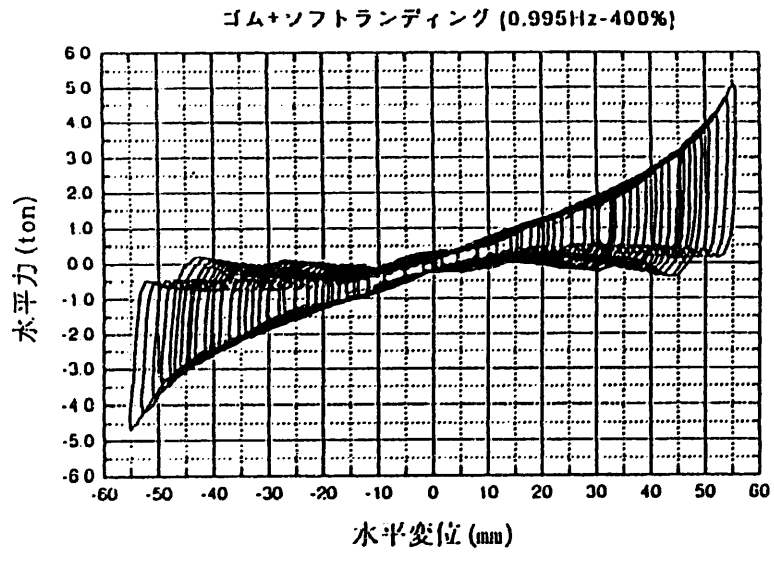


図3.4.15 積層ゴム+ソフトランディング装置+16t構造体、正弦波入力、CS42

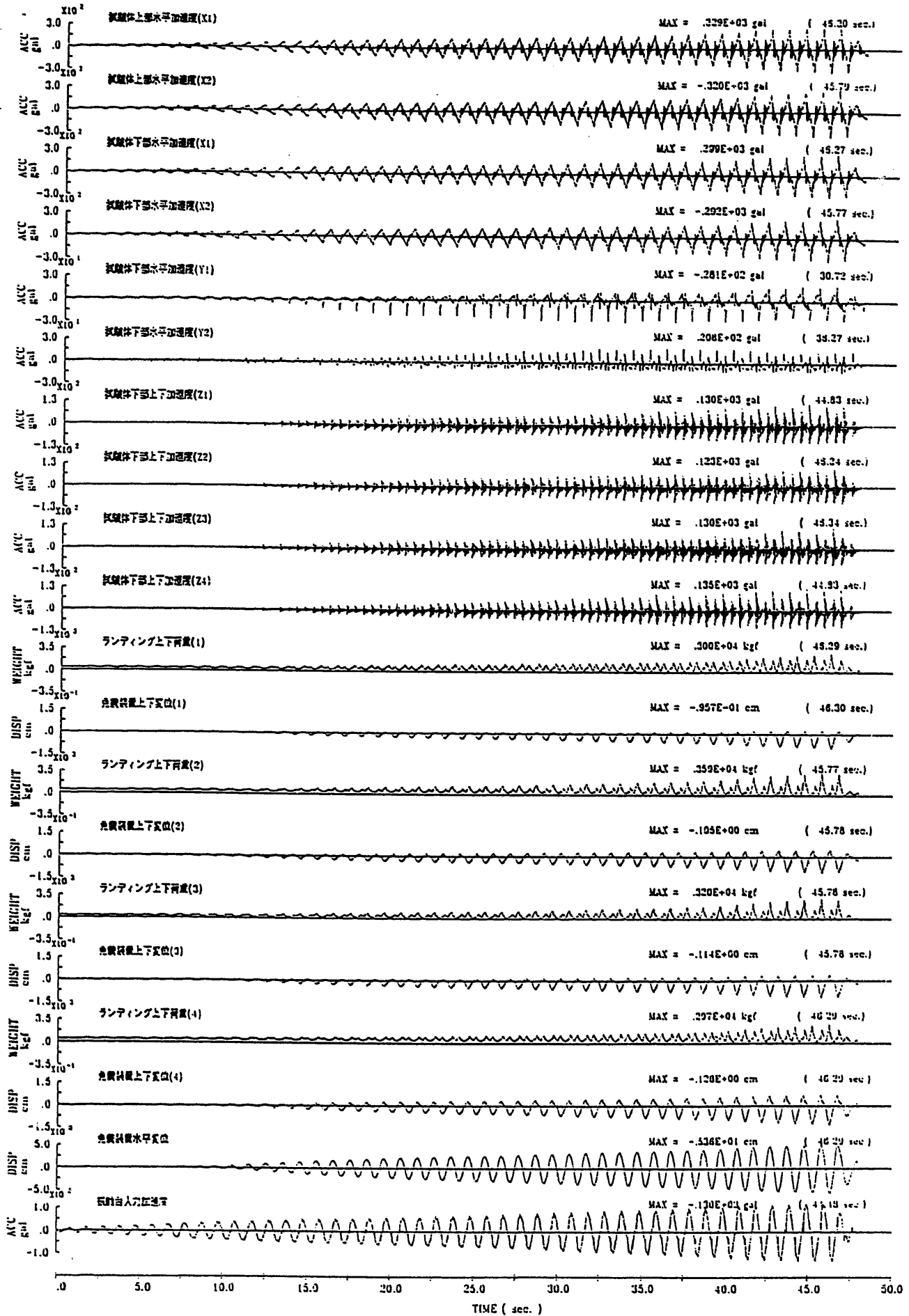


図3.4.16 試験日:1994 12/21 試験名:CS47

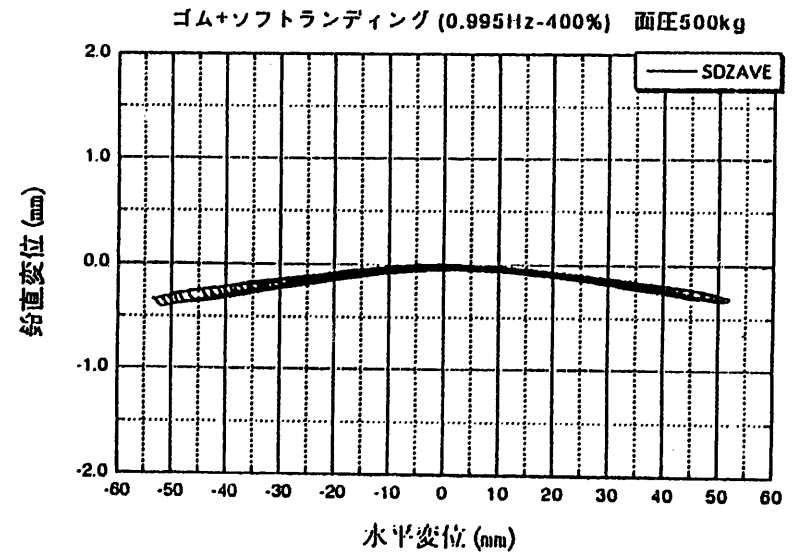
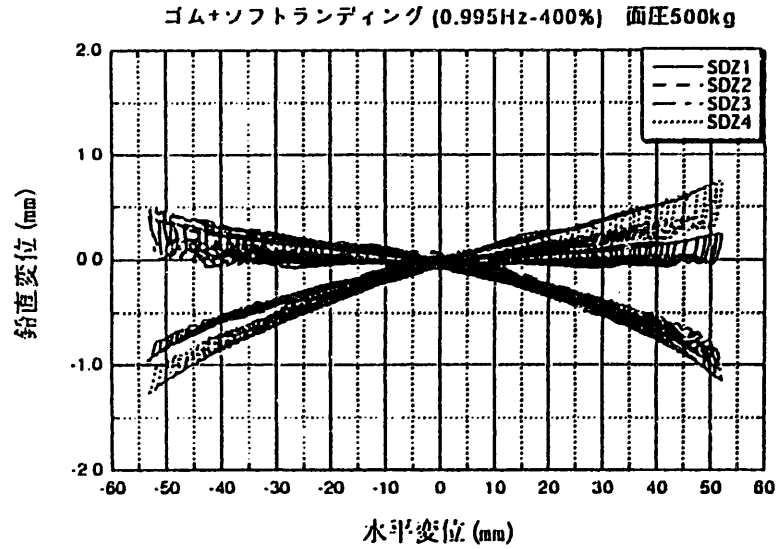
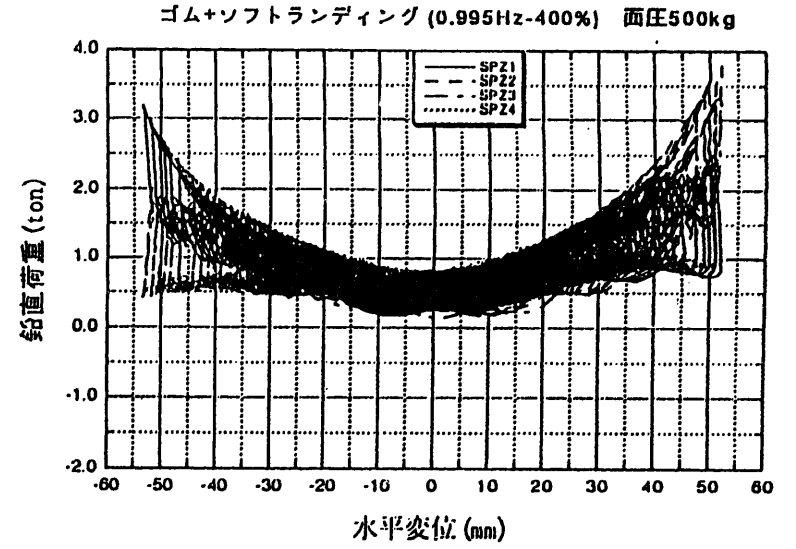
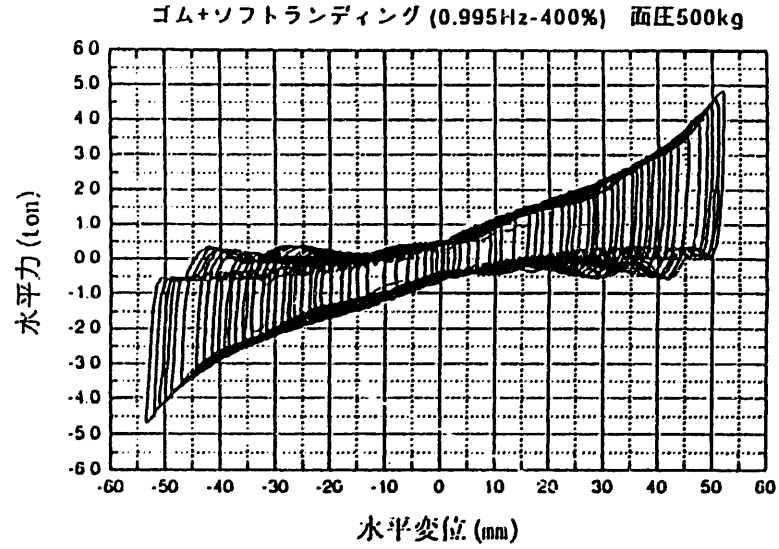


図3.4.17 積層ゴム+ソフトランディング装置(面圧500kg)+16t構造体、
正弦波入力、CS47

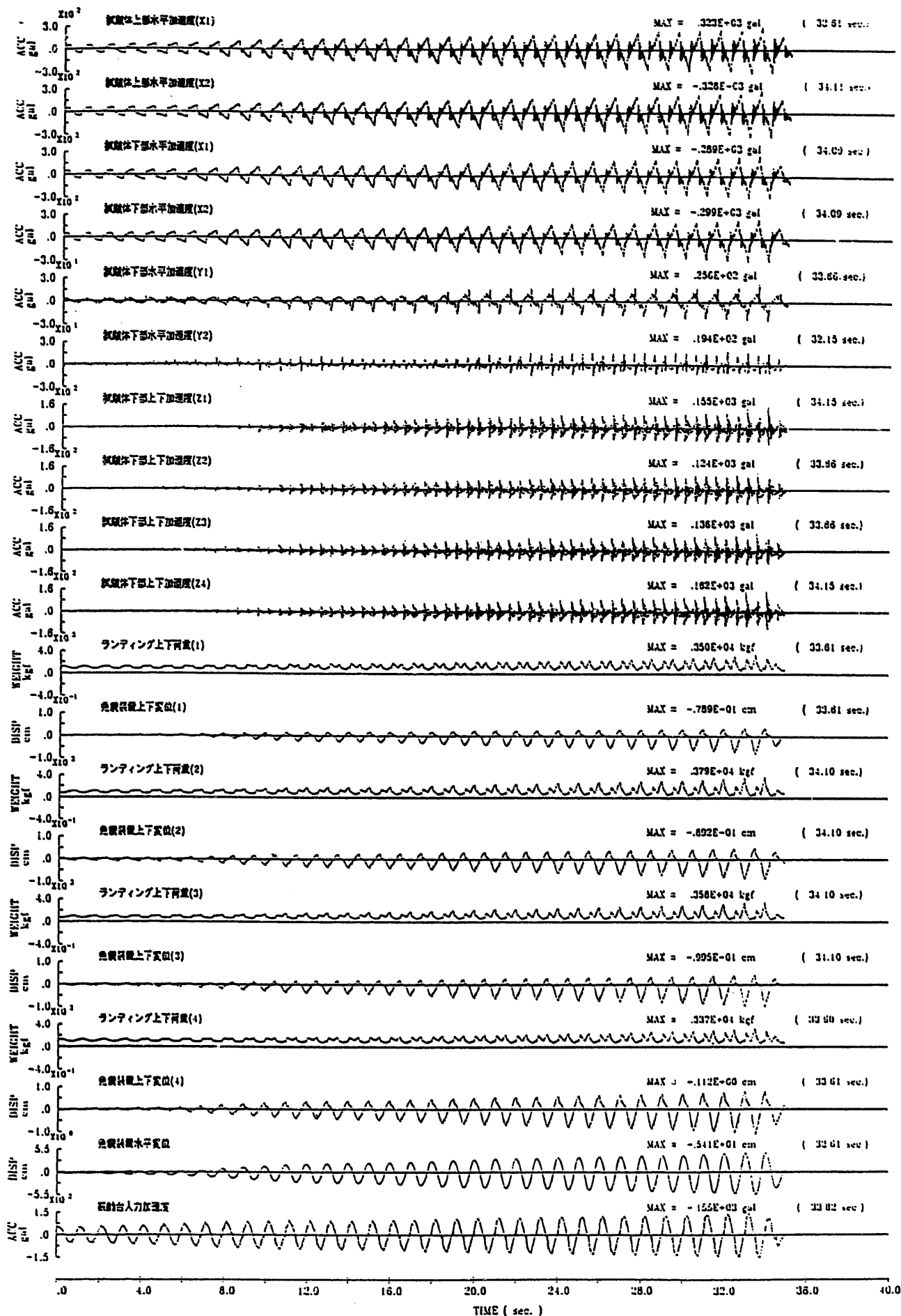


図3.4.18 試験日:1994 12/21 試験名:CS48

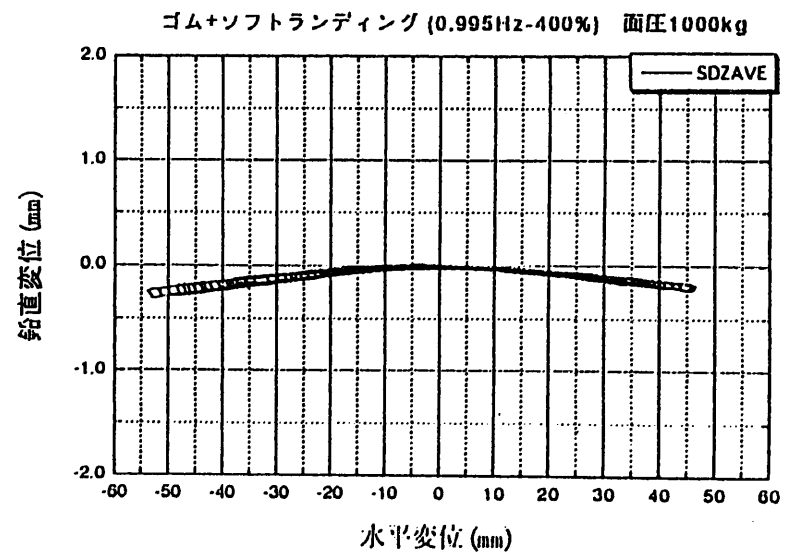
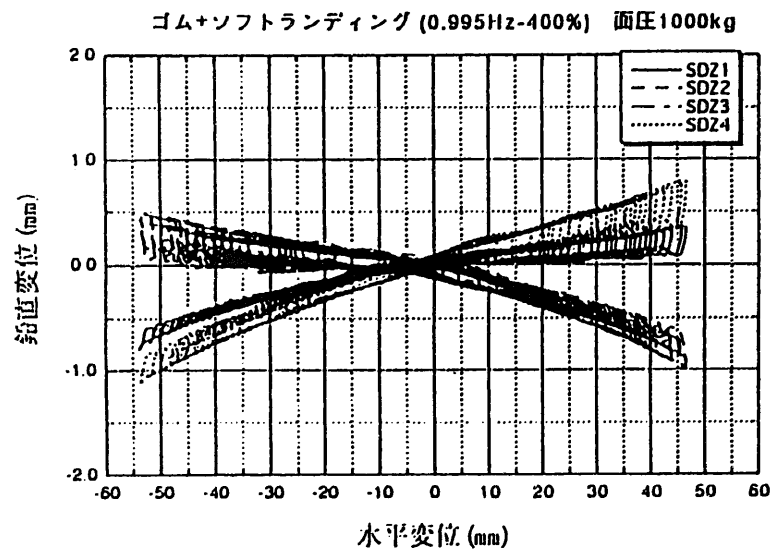
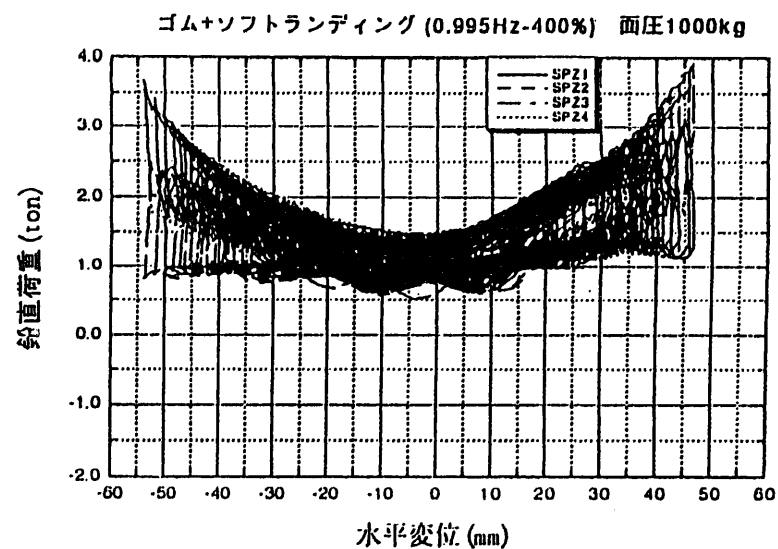
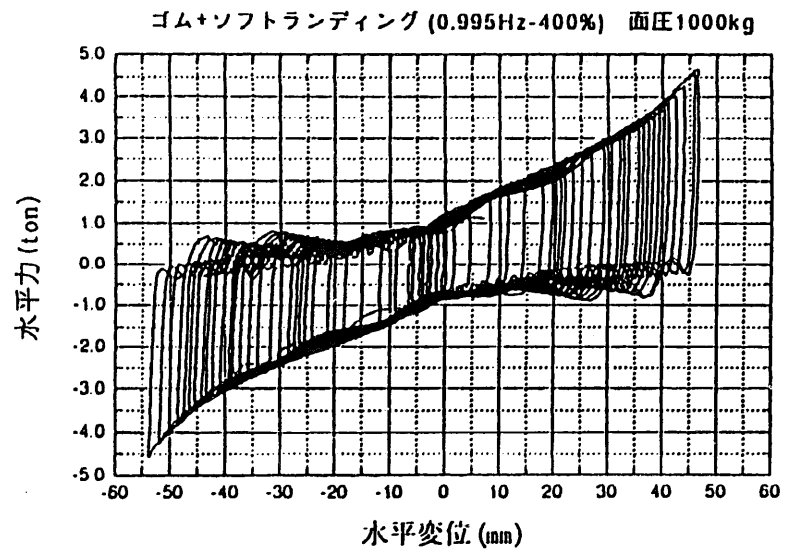


図3.4.19 積層ゴム+ソフトランディング装置(面圧1000kg)+16t 構造体、
正弦波入力、CS48

3.4.6 地震波入力応答特性

1) 積層ゴム+16t構造体の試験ケース(表3.4.1)CE36, CA47, CA57の応答波形および水平変位と水平力(せん断力), 鉛直変位, 同左平均値の関係を図3.4.20~図3.4.26に示す。

CE36は, せん断歪み300%, Elcentro NS max445cm/s² 入力に対する測定値, CA47は, 歪み400%, 人工地震波ART max 551 cm/s² に対する測定値, CA57は, 歪み500%人工地震波ART max 773 cm/s² に対する測定値である。

この最後のケースCA57の水平変位60mm付近で配置場所No.1の積層ゴムにはらみだし損傷が認められた。

2) 積層ゴム+ソフトランディング装置+構造体の試験は, 上記と同一積層ゴムの使用であるが, 上記試験に先立ち実施したものである。この試験ケース(表3.4.1)CE46, CA46の応答波形および水平変位と, 水平力, 鉛直変位, 同左平均値, 鉛直荷重の関係を図3.4.27~図3.4.30に示す。CE46はせん断歪み400%, Elcentro NS max853cm/s² に対する測定値, CA46は, せん断歪み400%, 人工地震波ART max902cm/s² に対する測定値である。

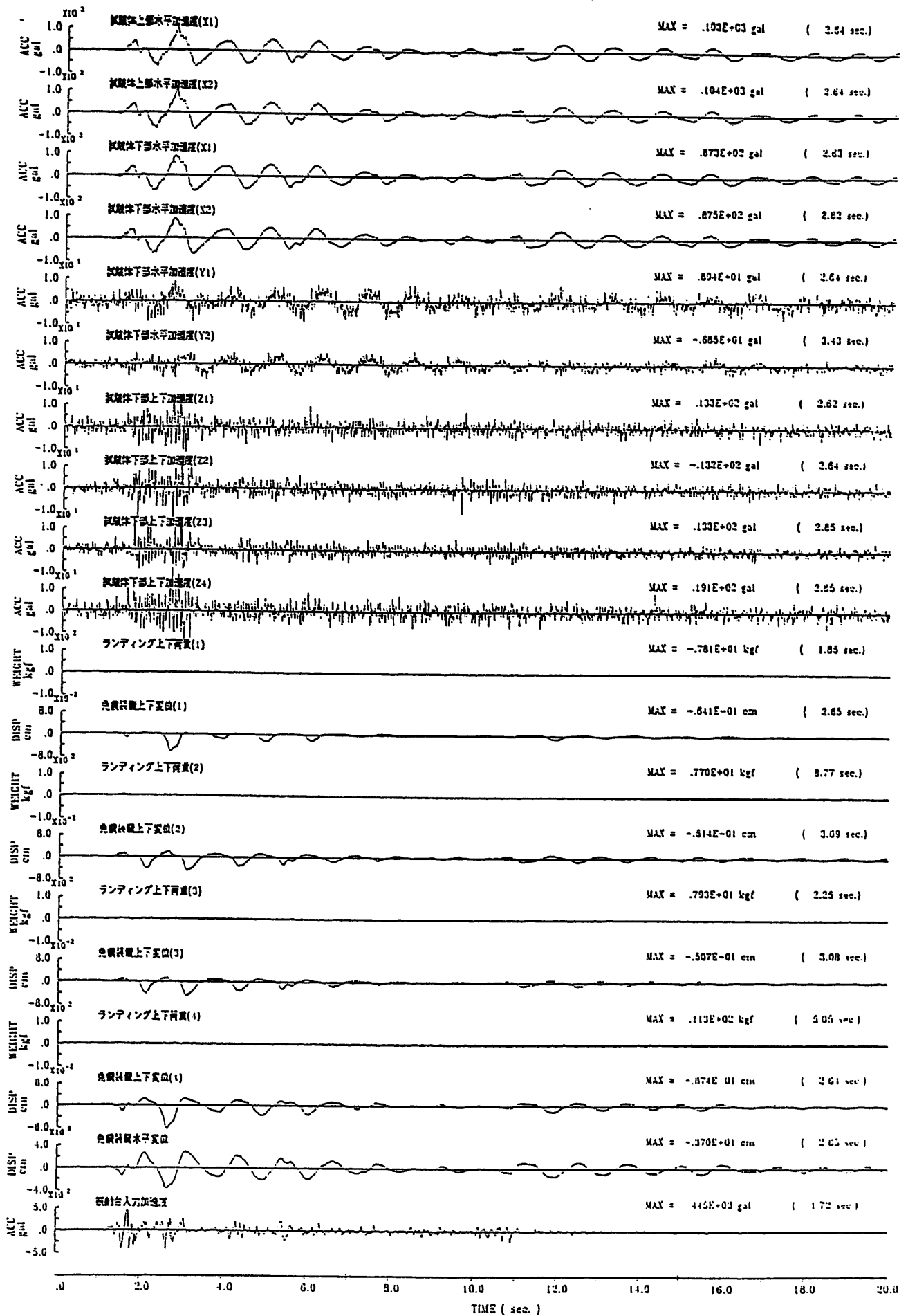


図3.4.20 試験日:1994 12/22 試験名:CE36

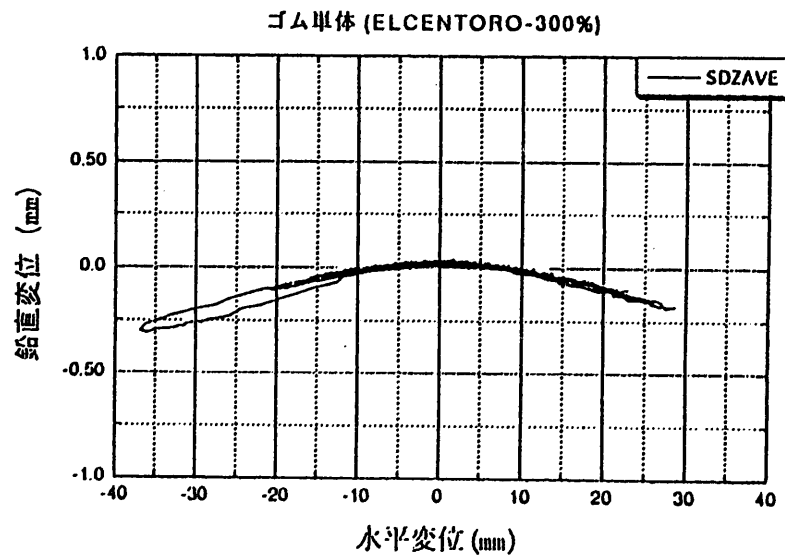
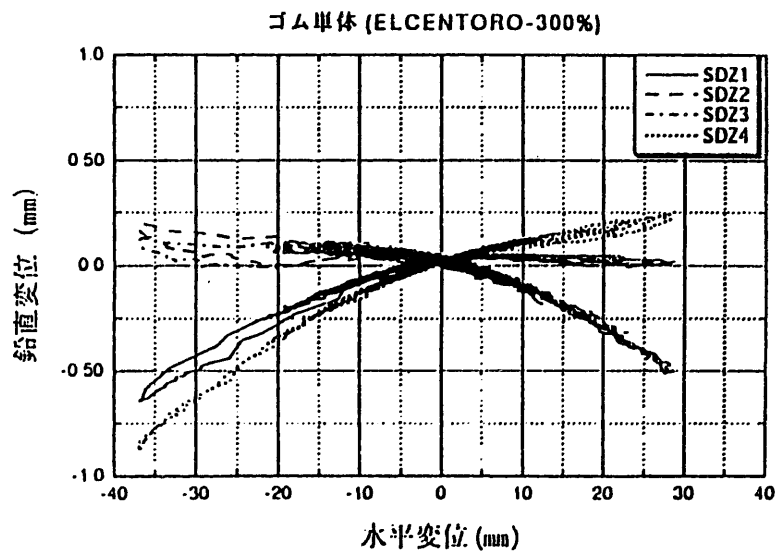
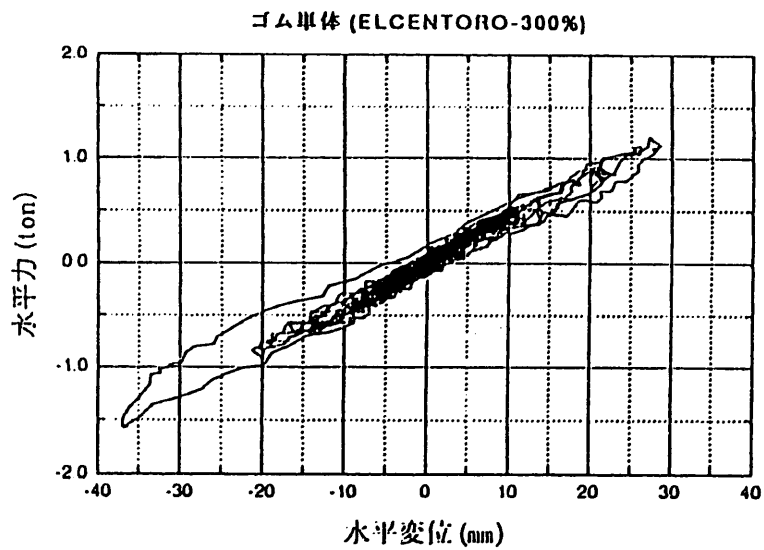


図3.4.21 積層ゴム+16t構造体、ELCENTORO、CE36

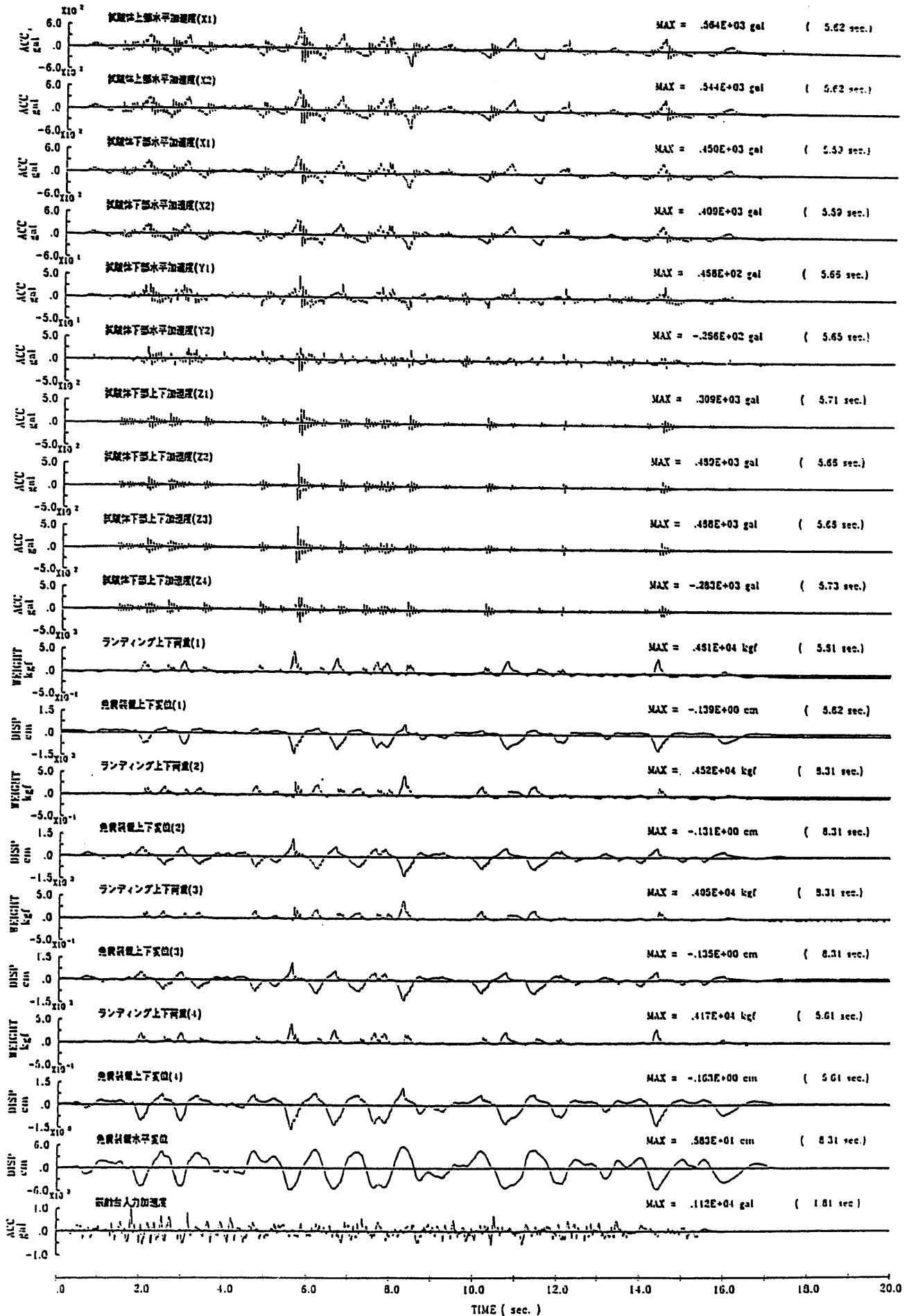


図3.4.22 試験日:1994 12/22 試験名:CA51

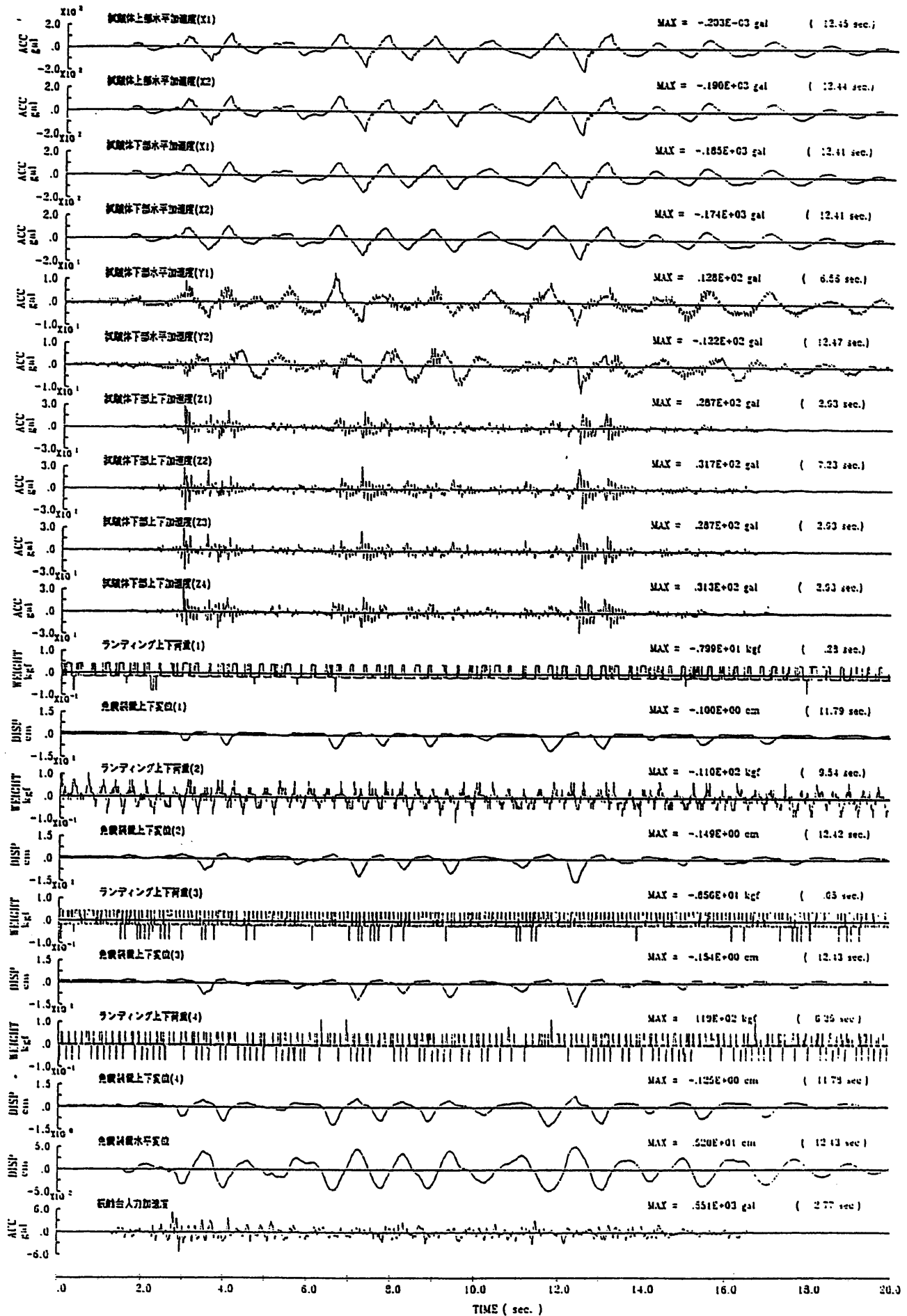


図3.4.23 試験日:1994 12/22 試験名:CA47

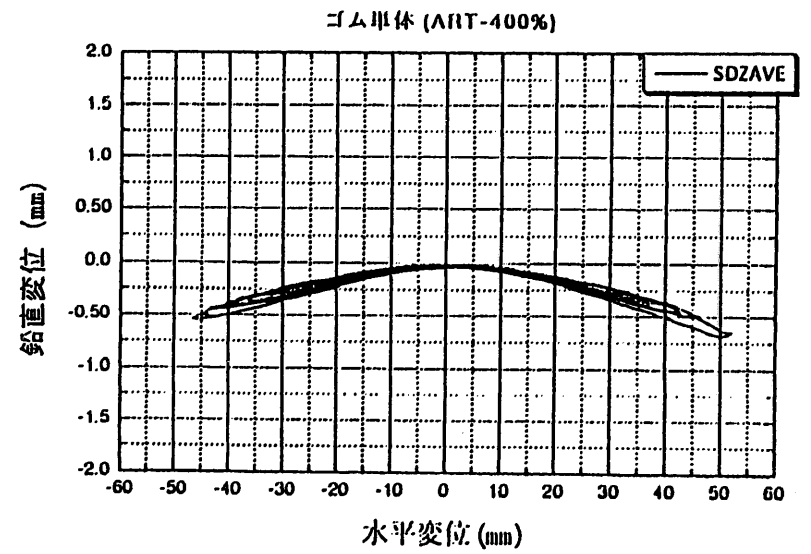
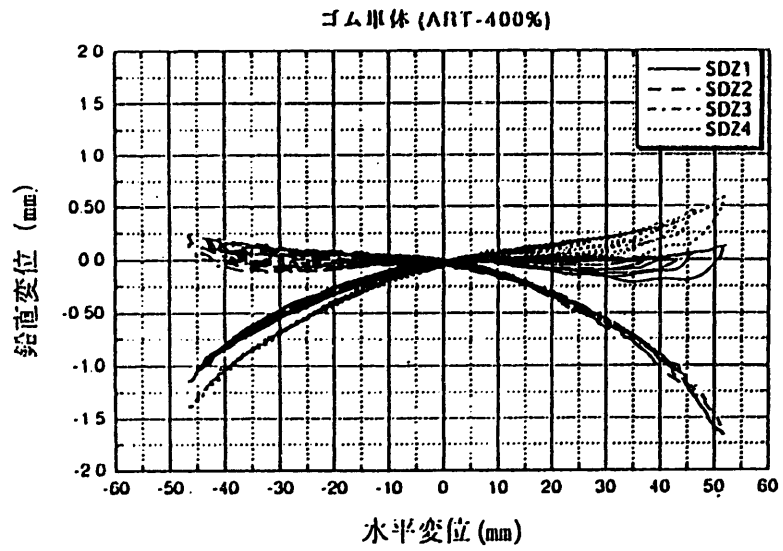
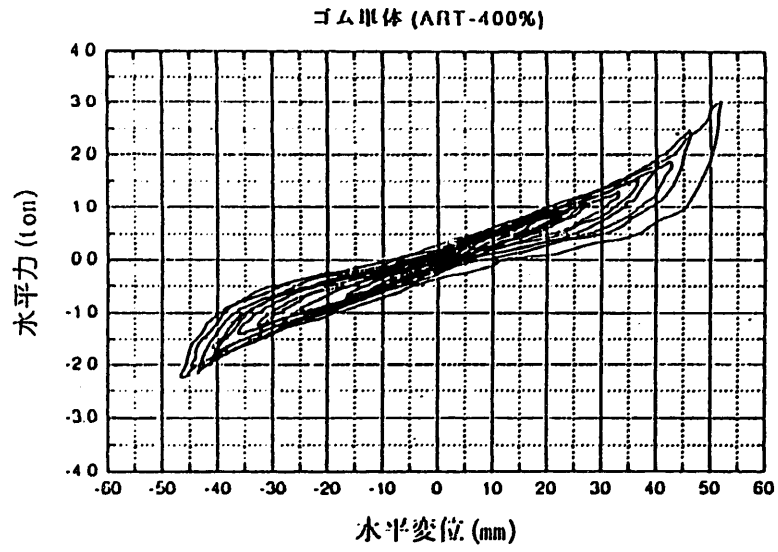


図3.4.24 積層ゴム+16t構造体、ART 地震波(400%)、CA47

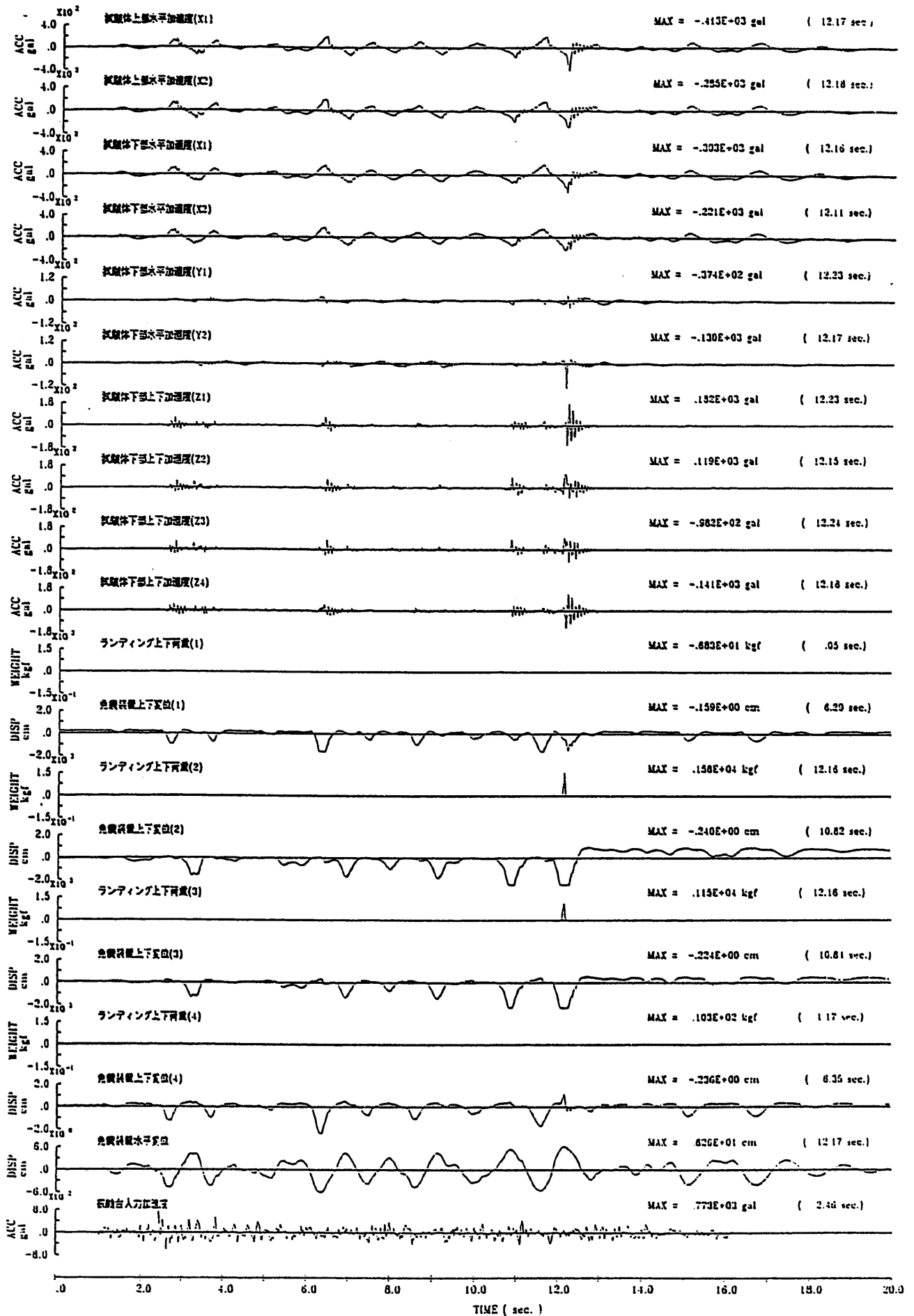


図3.4.25 試験日:1994 12/22 試験名:CA57

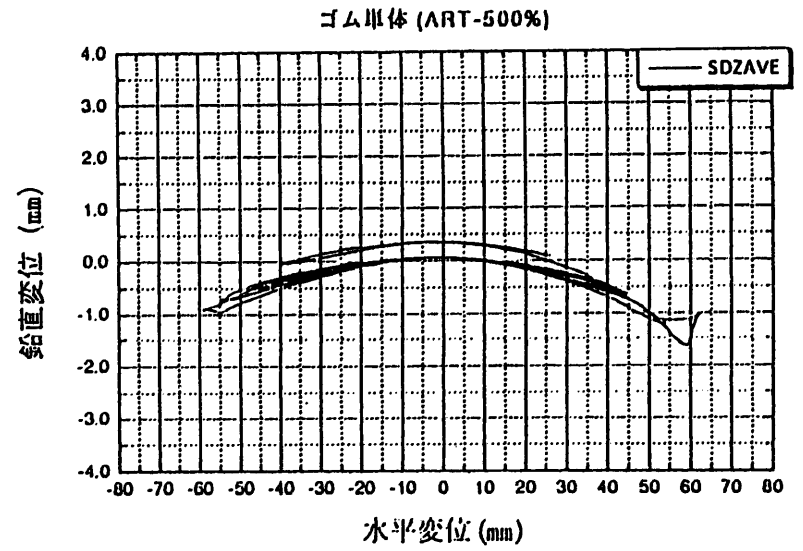
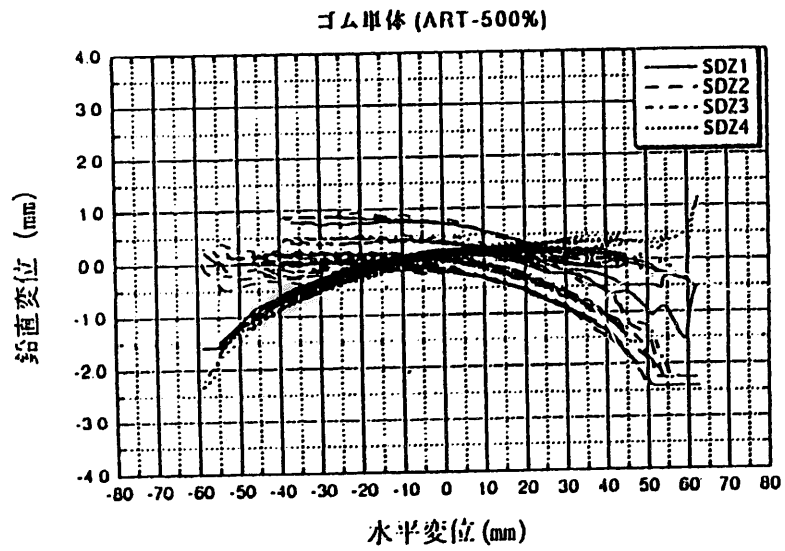
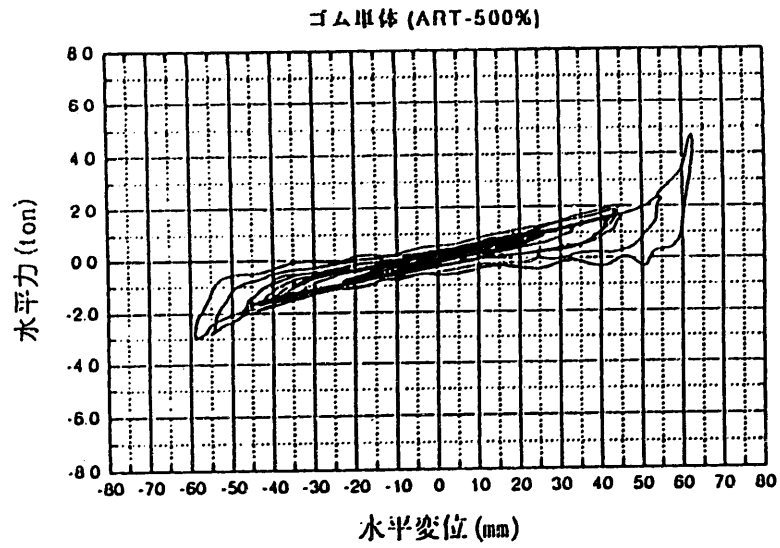


図3.4.26 積層ゴム+16t構造体、ART地震波(500%)、CA57

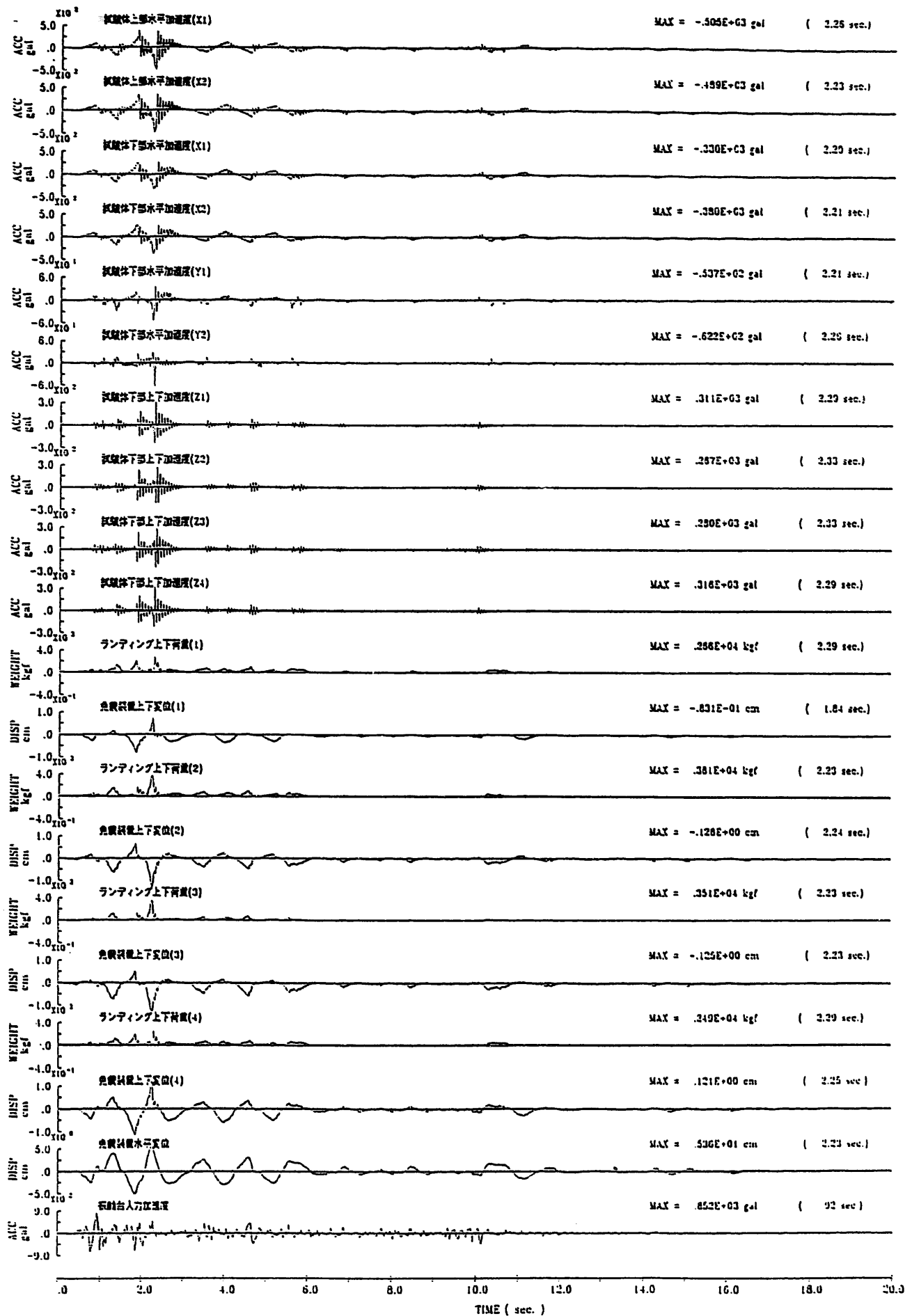


図3.4.27 試験日:1994 12/20 試験名:CE46

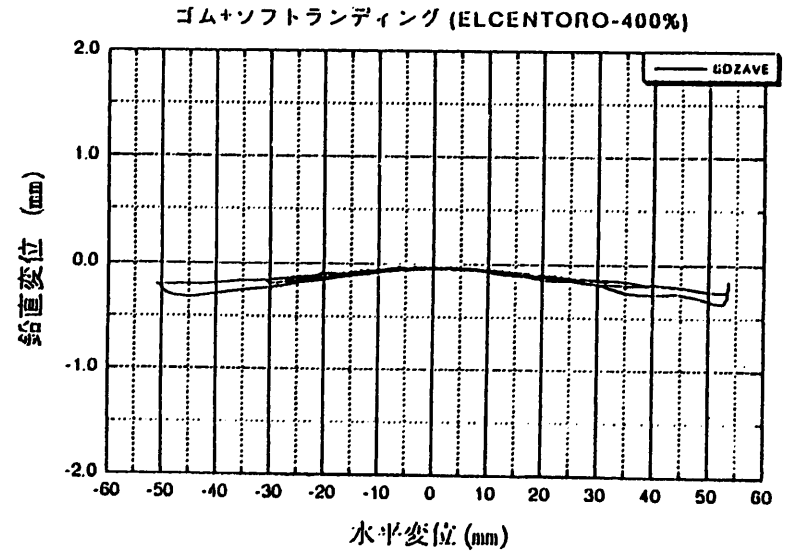
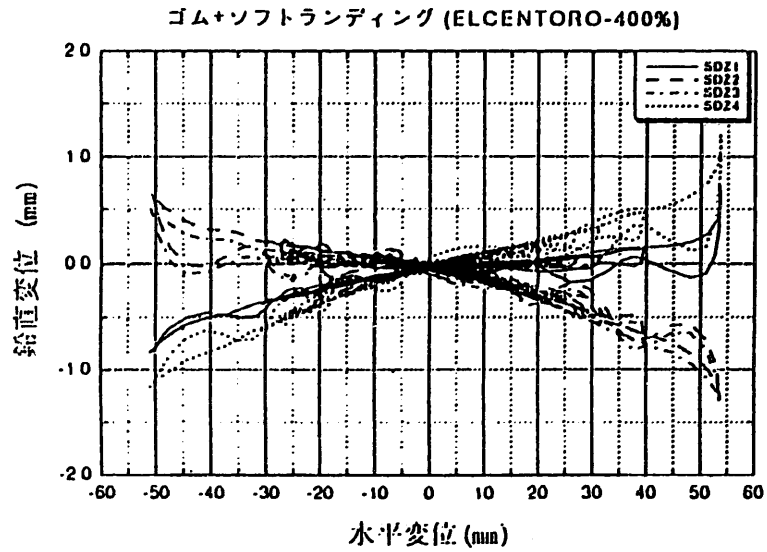
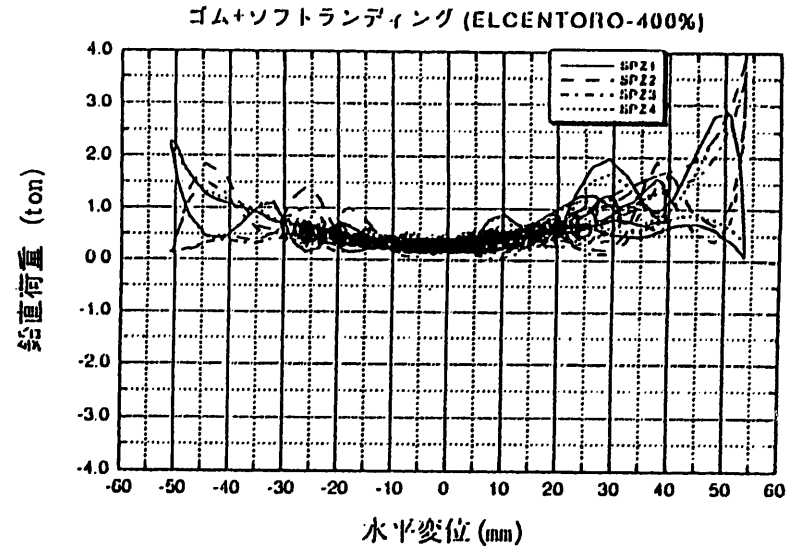
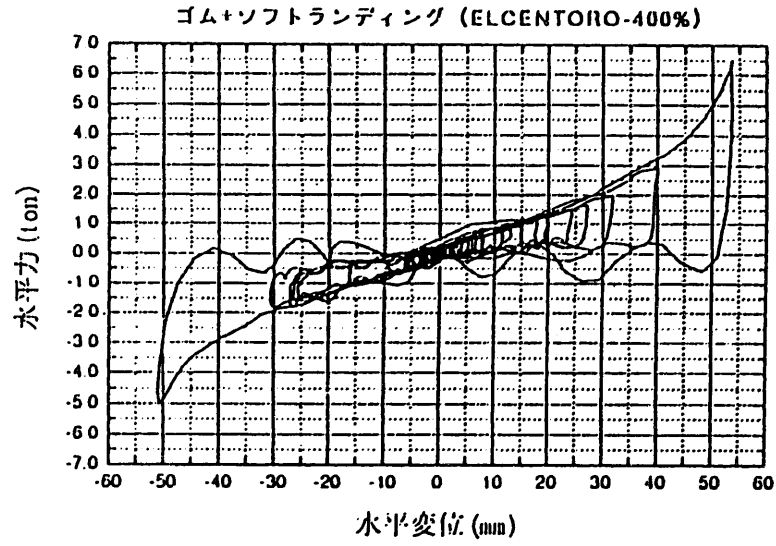


図3.4.28 積層ゴム+ソフトランディング装置+16t構造体、ELCENTORO(400%)

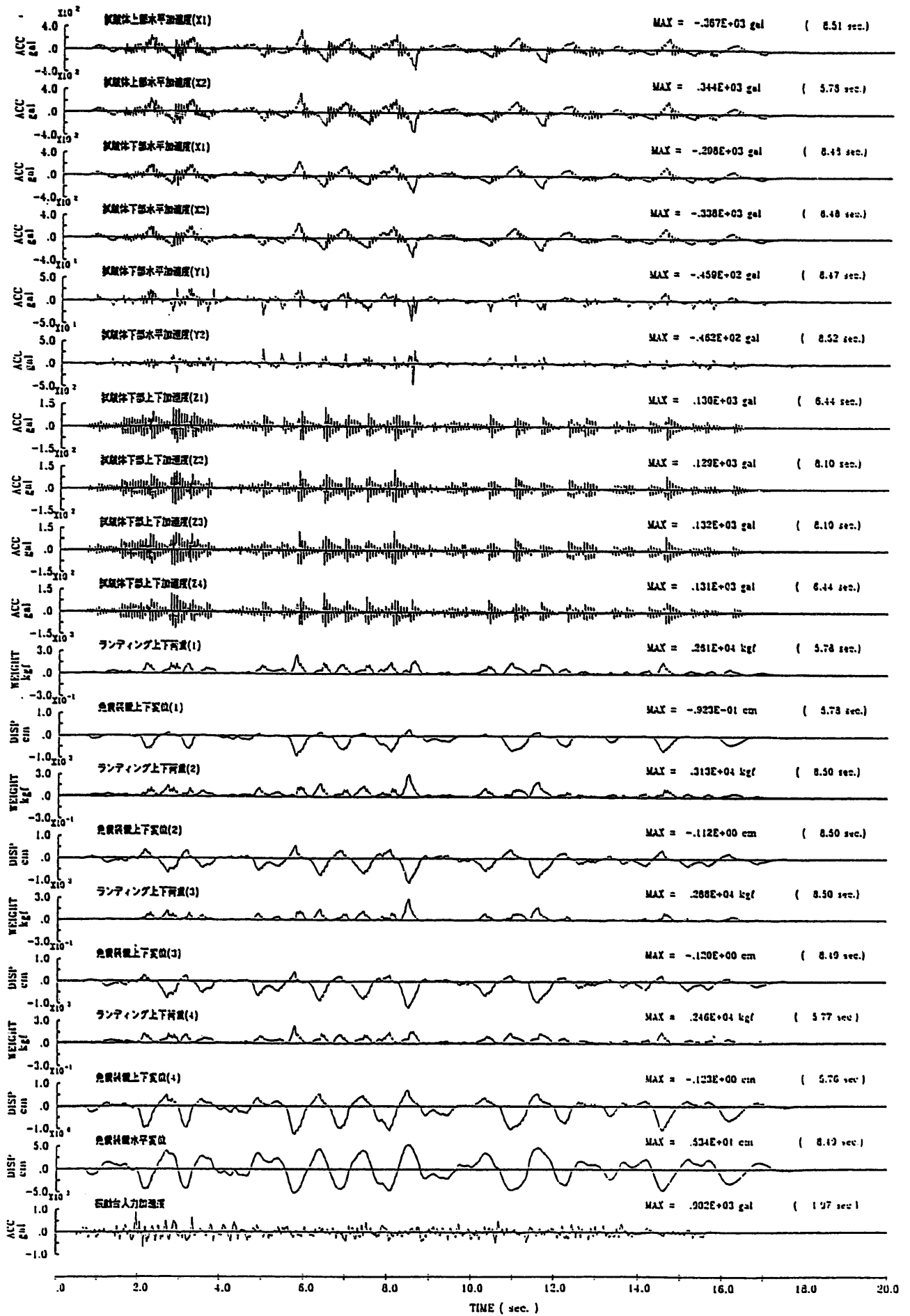


図3.4.29 試験日:1994 12/20 試験名:CA46

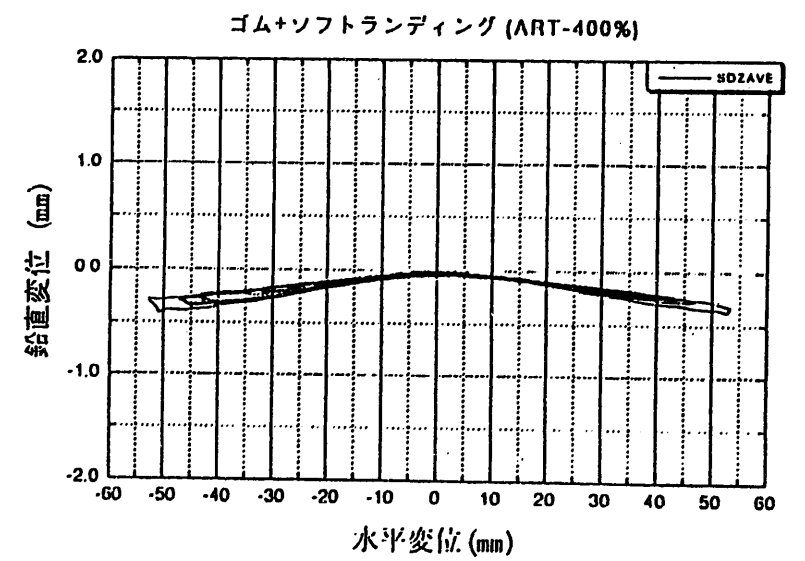
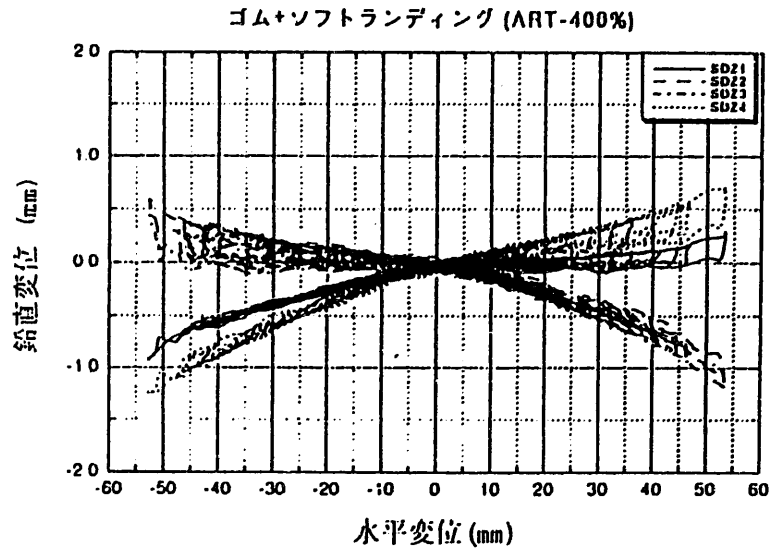
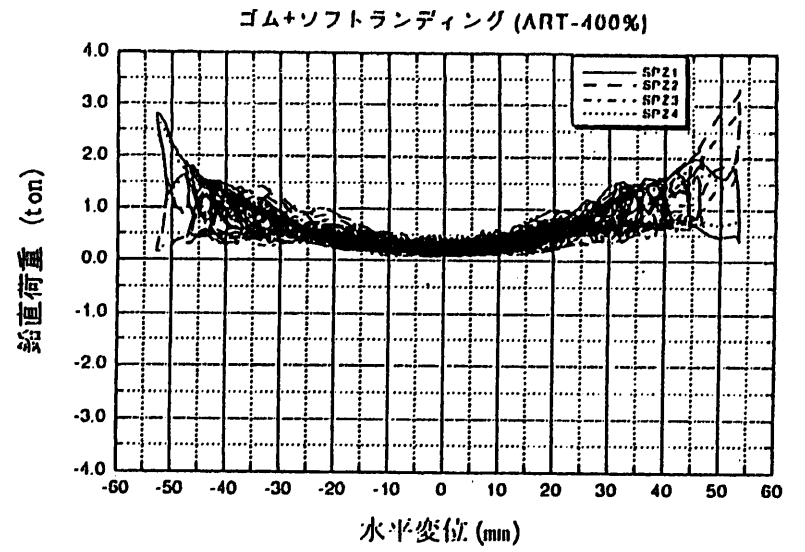
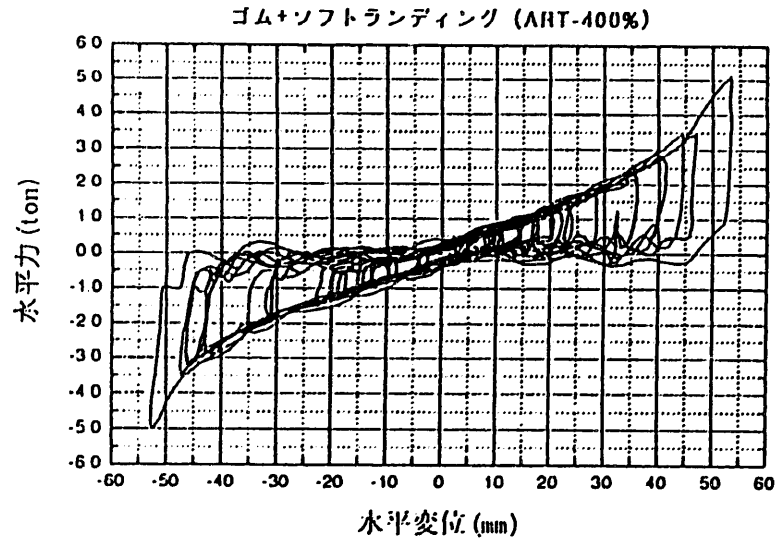


図3.4.30 積層ゴム+ソフトランディング装置+16L構造体、ART地震波(400%)

3.4.7 限界試験

3.4.7.1 正弦波加振による限界特性

免震構造体の限界特性の調査の試験は、振動台を正弦波加振し、この入力加速度を順次大きくして、計測と共に積層ゴムの挙動を監視する方法で実施した。

積層ゴム+構造体の場合の計測波形と、水平変位と水平力の関係を図3.4.31、図3.4.32に示す。

入力加速度 80cm/s^2 、水平変位62mmにて配置場所No.3の積層ゴムが破断し、かつ、他の積層ゴムが座屈破損し、構造体および積層ゴムは原点復帰できなくなった。

積層ゴム+ソフトランディング装置+構造体の場合の計測波形と、水平変位と水平力、ソフトランディング装置の鉛直荷重の関係を図3.4.33、図3.4.34に示す。水平変位 $(80+62)/2=71\text{mm}$ 以上で鉛直荷重は約7 t一定値となり、更に大きく変位して、入力加速度 198cm/s^2 、水平変位 $(93+73)/2=82\text{mm}$ で配置場所No.1, No.2の積層ゴムが大きな音を発し破断した。

以上の結果、積層ゴムの限界値は表3.4.6となる。

表3.4.6 最大応答値

	積層ゴム +16 t 構造体	積層ゴム+ソフトランディング装置+16 t 構造体
正弦波入力最大加速度	80cm/s^2	198cm/s^2
免震装置最大応答変位	62mm (442 %)	82mm (585 %)

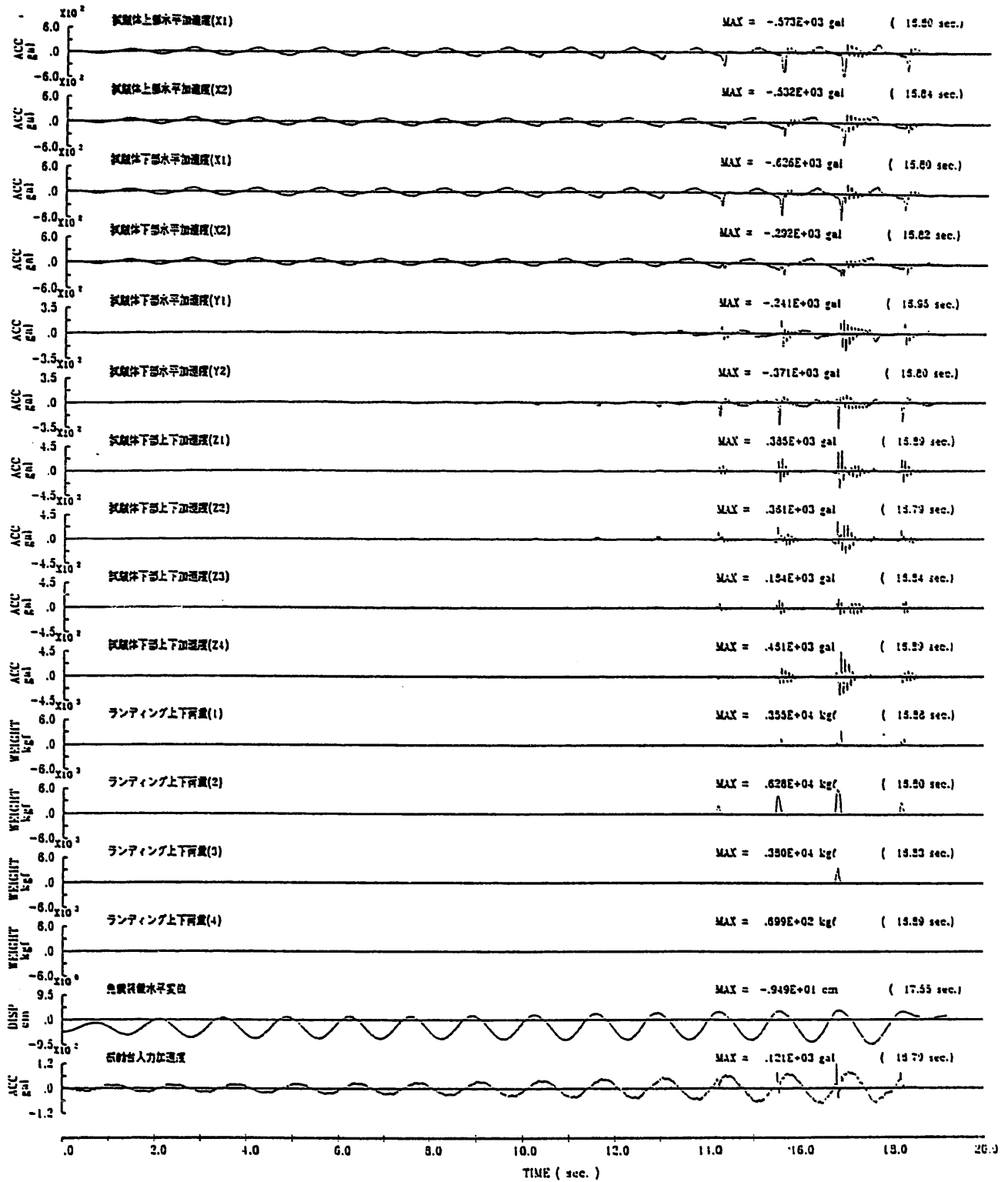


図3.4.31 試験日:1994 12/22 試験名:CS58

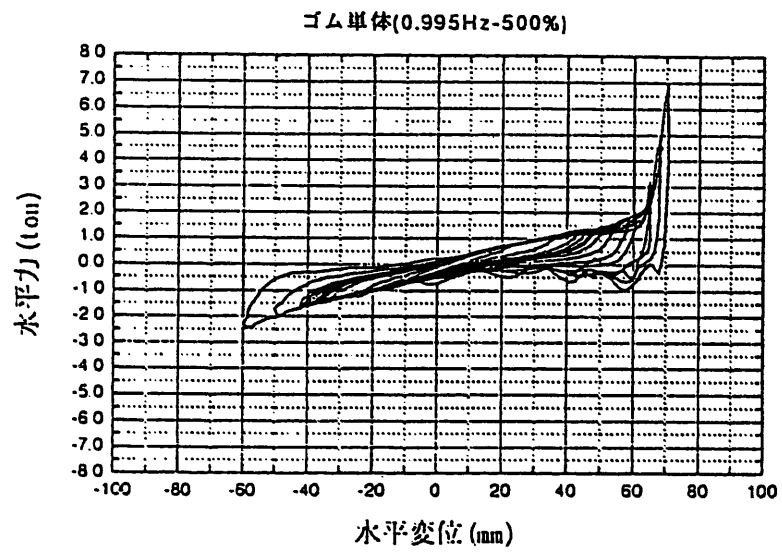


図3.4.32 積層ゴム+16t構造体、限界試験、CS58

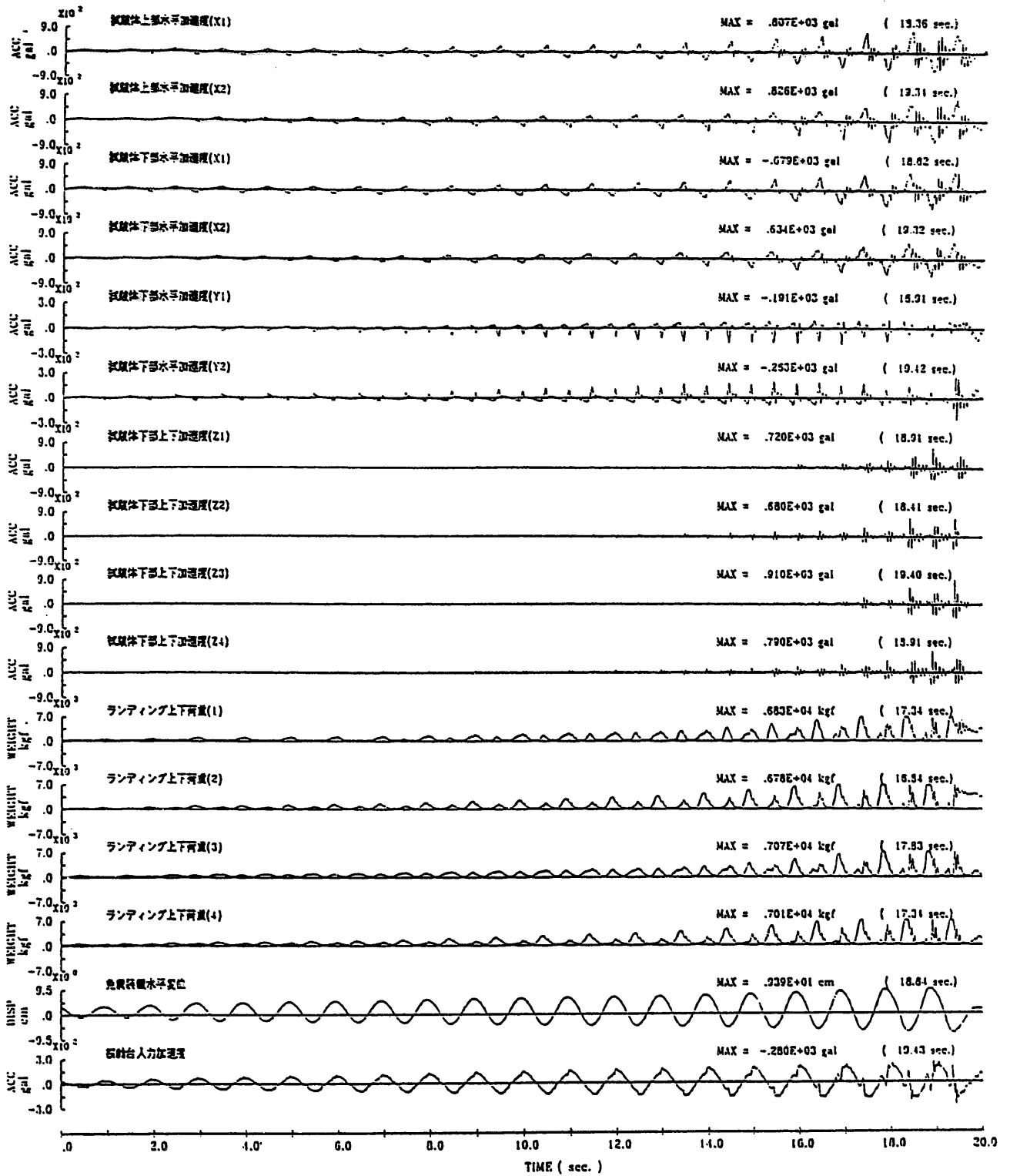


図3.4.33 試験日:1994 12/28 試験名:CS59

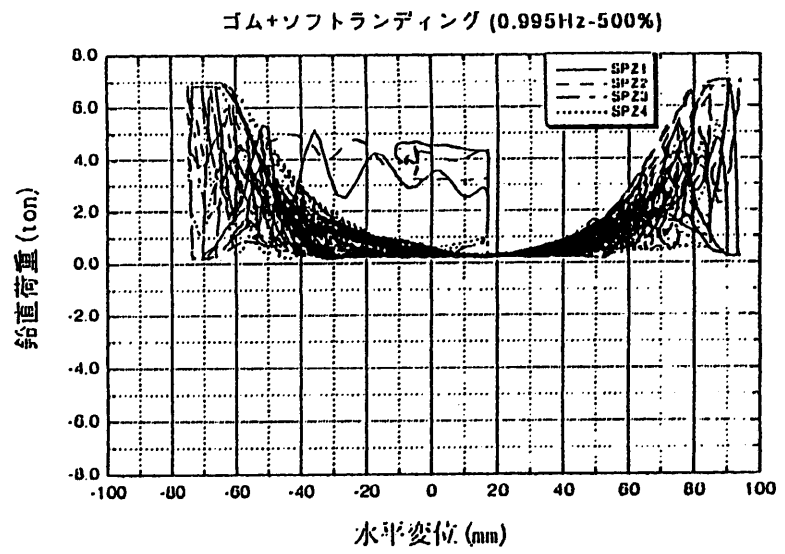
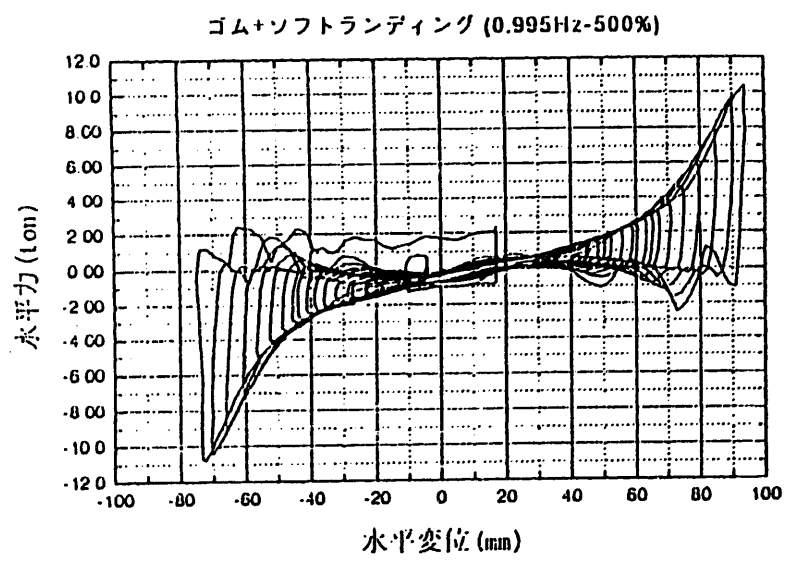


図3. 4. 34 積層ゴム+ ソフトランディング装置+16t構造体、限界試験、CS59

3.4.7.2 入力加速度と構造体の応答変位，応答加速度の関係

限界特性に関連する資料として，正弦波入力，地震波入力の代表的な試験ケースを選び出して，振動台の入力加速度と，応答変位，応答加速度の関係を整理してみた。

これらの結果を図3.4.35～図3.4.39に示す。

この結果，

- (1)限界値は積層ゴムの水平変位約60mm（せん断歪み約430 %）で定まる。
- (2)このときの正弦波共振振動数での入力加速度は，ケースにより異なるものの 100cm/s^2 強（試験値 $80\sim 150\text{cm/s}^2$ ）である。
- (3)Elcentro NS 地震波入力試験では，変位60mmまで実施していないが，人工地震波ART では，積層ゴムの場合に約 700cm/s^2 ，ソフトランディング装置付与の場合に $1,200\text{cm/s}^2$ で変位60mmに達する傾向にある。

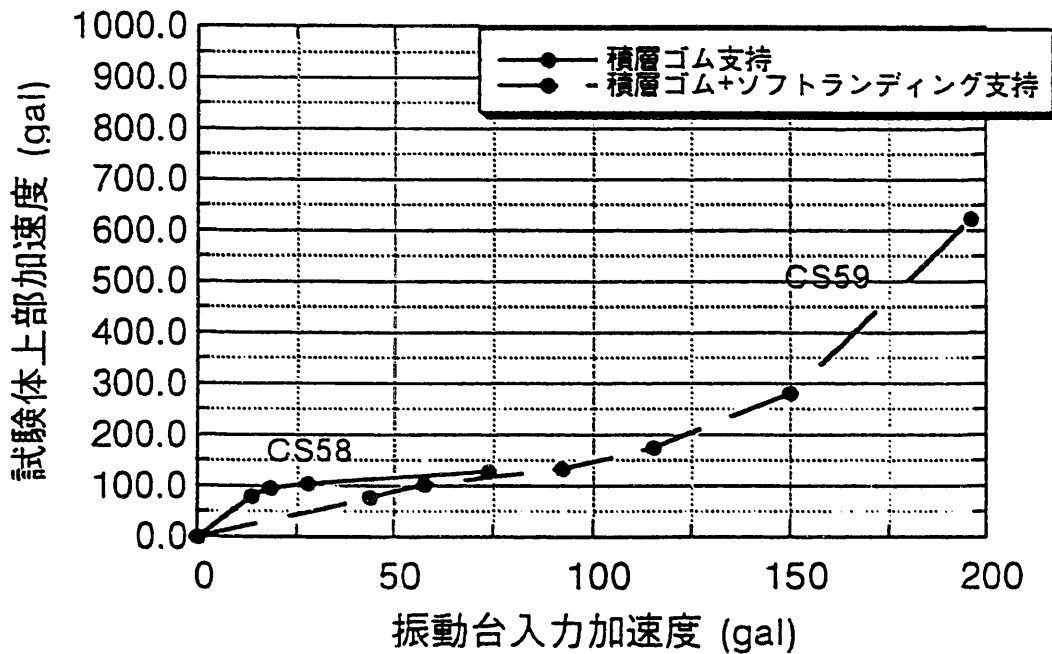
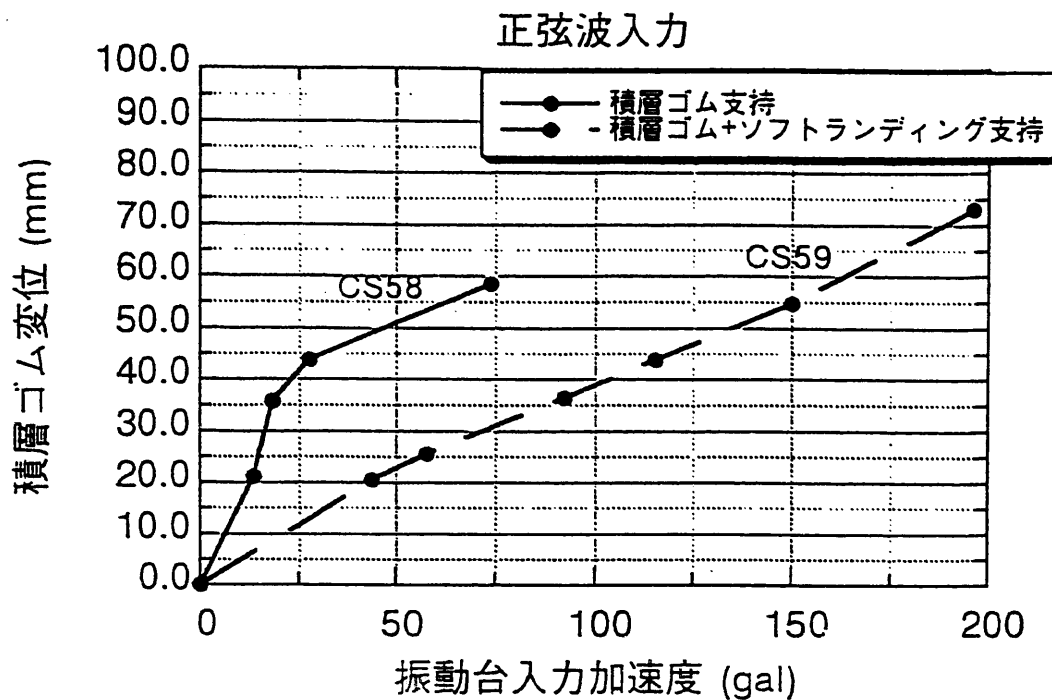


図3. 4. 35 振動台加速度と応答相対変位、応答加速度の関係

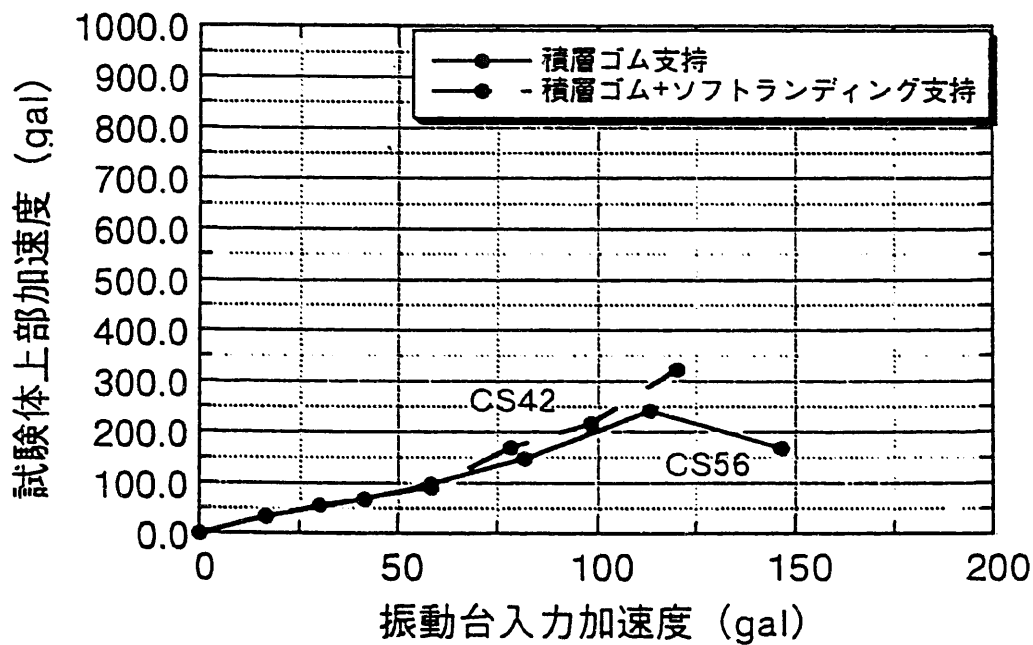
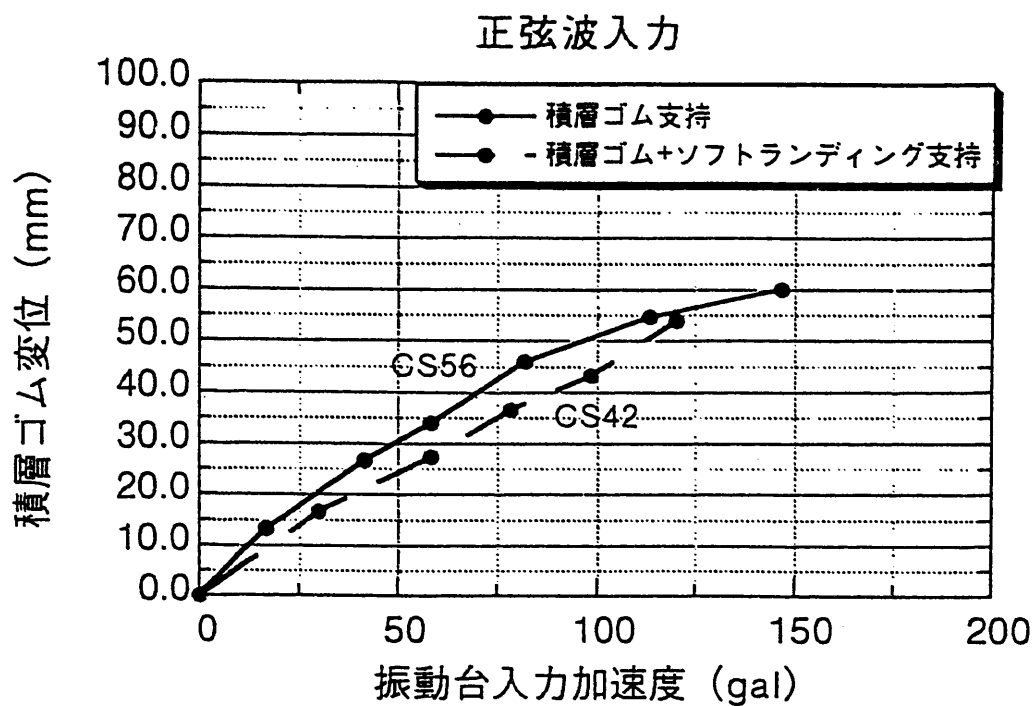


図3. 4. 36 振動台加速度と応答相対変位、応答加速度の関係

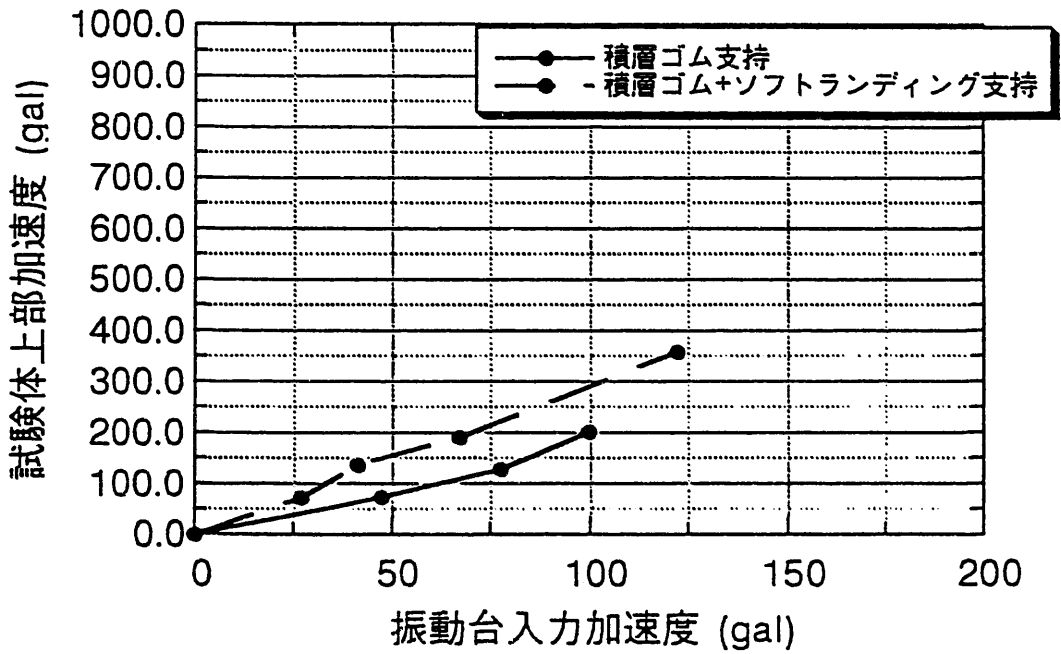
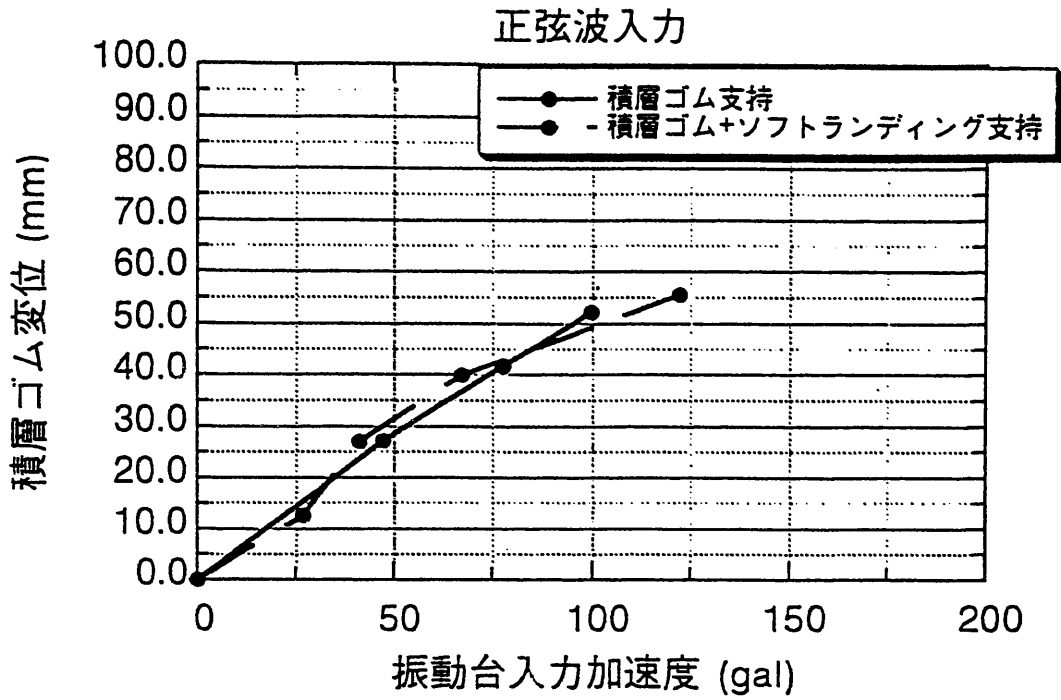


図3.4.37 振動台加速度と応答相対変位、応答加速度の関係

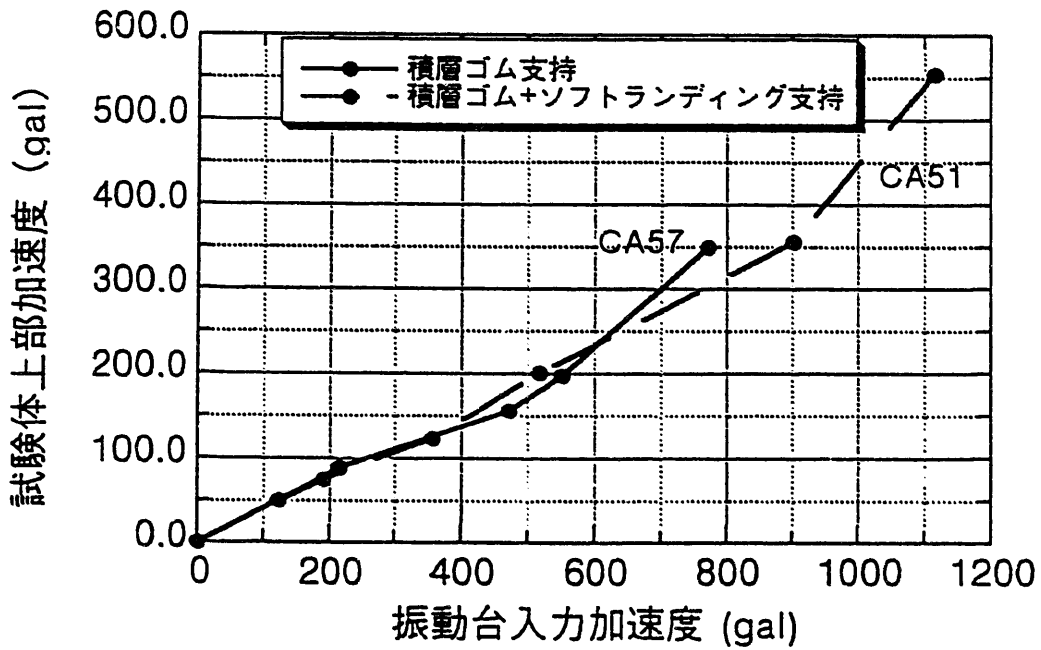
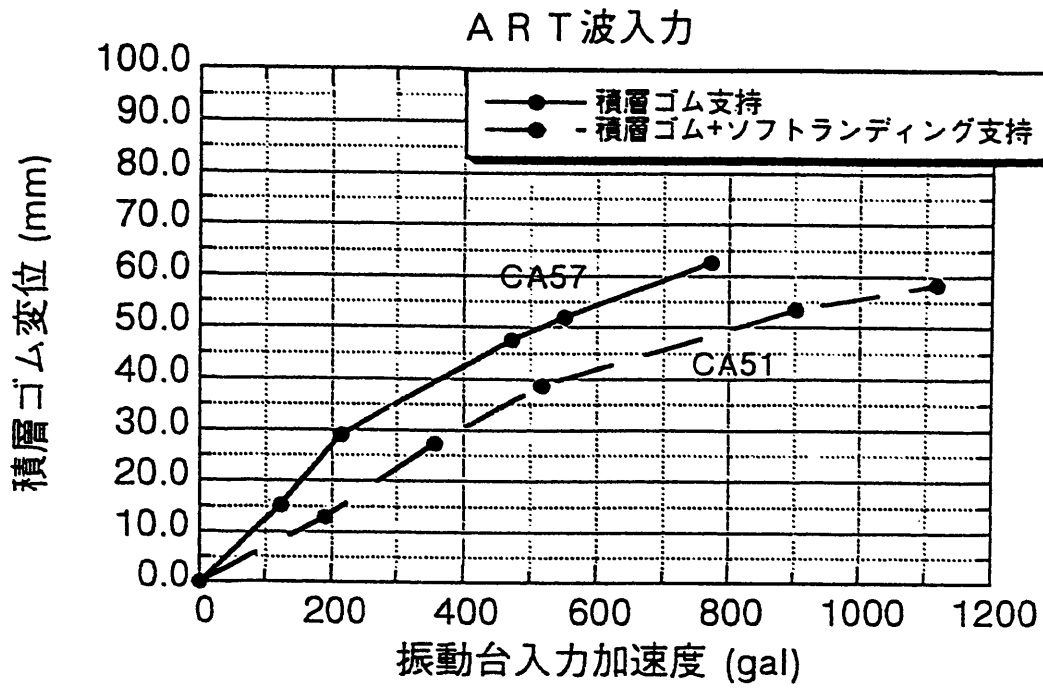


図3.4.38 振動台加速度と応答相対変位、応答加速度の関係

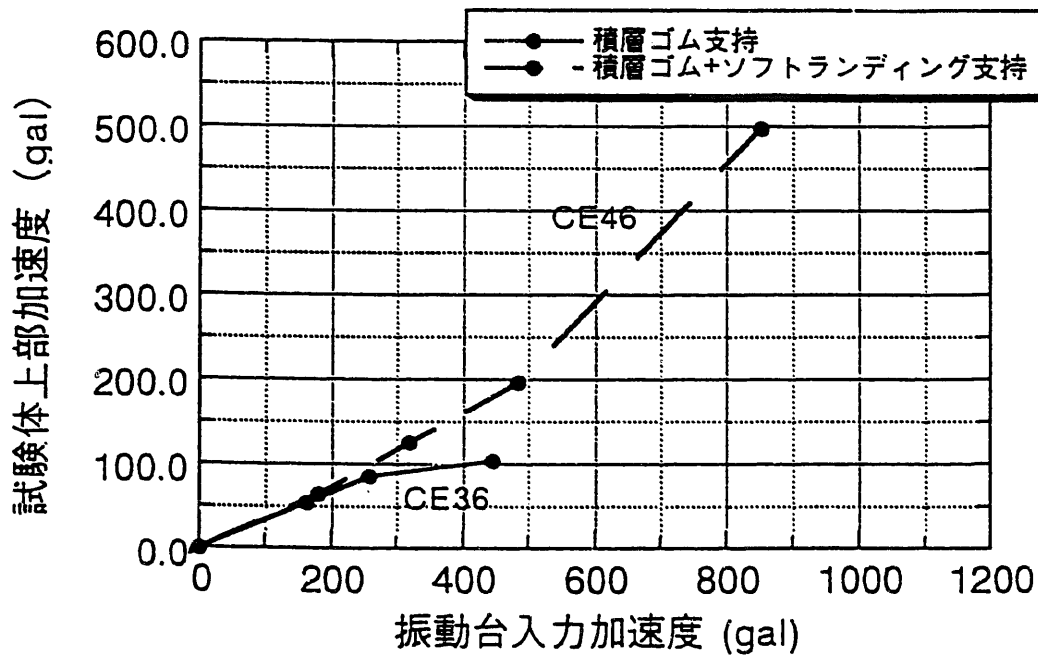
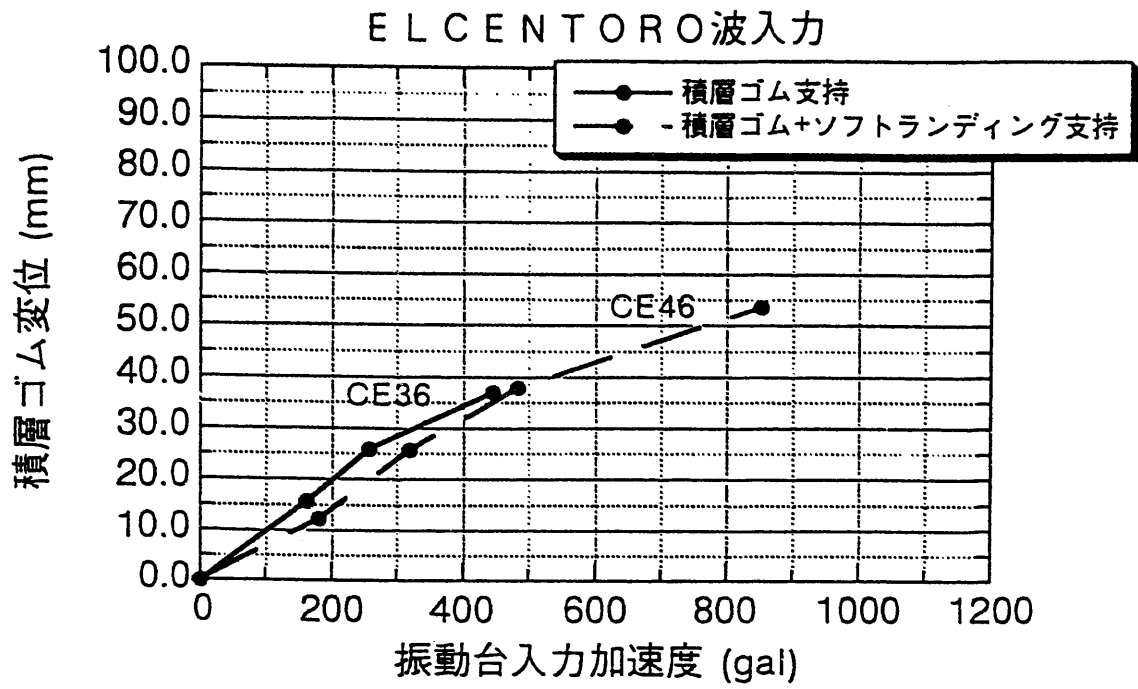


図3.4.39 振動台加速度と応答相対変位、応答加速度の関係

3.5 解析

3.5.1 解析方法

3.5.1.1 解析モデル

本試験結果を考察するために、シミュレーション解析を行う。解析モデルは以下のよう
に仮定した。

上部コンクリート試験体は、剛性が非常に高い ($f_0 = \text{約}60\text{Hz}$) ため剛体とした。また今
回の解析では、水平1方向及び回転のみを考慮するために、測点1及び2側の半分を1質
点系にモデル化した。試験体の重量は、試験体を振動台設置する時に測定した実際の重量
16.39ton (コンクリート9.83ton, 鉄板6.56ton) の半分の8.195tonとし、重心位置及び
回転慣性は、試験体形状より計算し、上部に鉄板を載せた場合、各々136.8cm (試験体下
部より), $71 = 142/2 \text{ton} \cdot \text{cm}^4/\text{sec}^2$ (重心廻り) とする。図3.5.1に解析モデル図を示す。
このコンクリート試験体の底版に積層ゴム (水平バネ+鉛直バネ) とソフトランディング
(水平バネ+鉛直バネ) の2組を取り付けたモデルである。ただし、鉛直方向の慣性力は
無視している。

積層ゴムの剛性のモデル化は、免震構造設計指針及び飯塚ほか (1994:AIJ) を参考とし
た。水平剛性は、軸力を考慮しないせん断バネを採用した。即ち、

$$K_s = \left\{ 1 + a \left(\frac{X}{h} \right)^2 \right\} G A$$

ここに

X : ゴムの水平変形量

h : ゴムの全層厚

G : ゴムのせん断弾性係数

A : ゴムの断面積

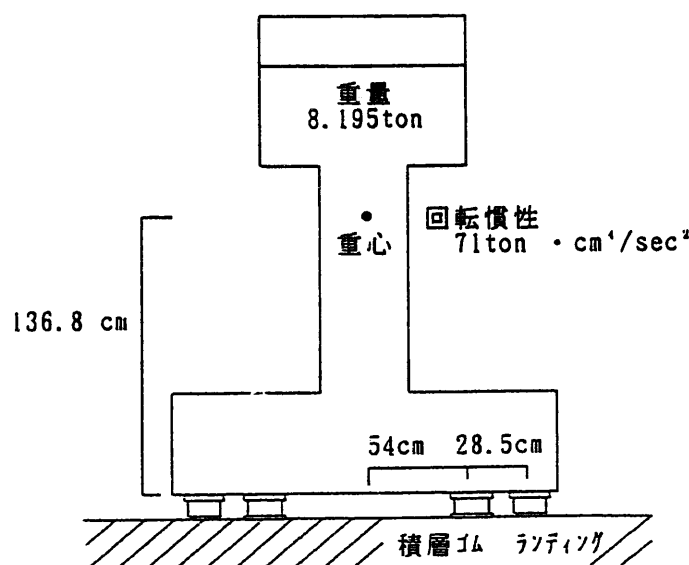


図3.5.1 試験体モデル図

a_1 : ハードニング性状を規定するパラメータ (本解析では0.01)

a_2 : ハードニング性状を規定するパラメータ (本解析では0.01)

で表現される。鉛直剛性は、

$$K_v = E_{ap} \times \frac{A}{h}$$

$$E_{ap} = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_b}\right)}$$

$$E_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_{a0}} + \frac{1}{E_\infty}\right)}$$

$$E_{a0} = (1 + 2ks_1^2)E$$

$$E_b = \frac{\sigma_{cr}}{G\left(\frac{X}{h}\right)^2}$$

ここに、

E_∞ : 体積弾性率

k : ゴム硬度によって定まる定数 (本解析では0.825)

s_1 : 1次形状係数

E : ゴムの弾性係数

σ_{cr} : 単純圧縮载荷時の座屈応力

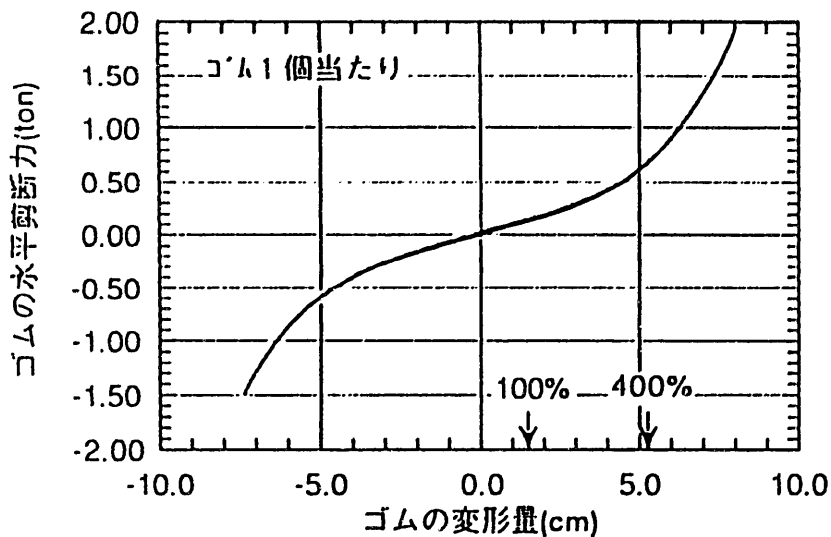
で表現される。

試験結果より、本積層ゴムに履歴特性が存在することは明らかであるが、本解析では、図3.4.9より、水平バネ及び、減衰を応答振幅レベルによって求め、等価な線形バネに置き換えることにより計算を行っている。

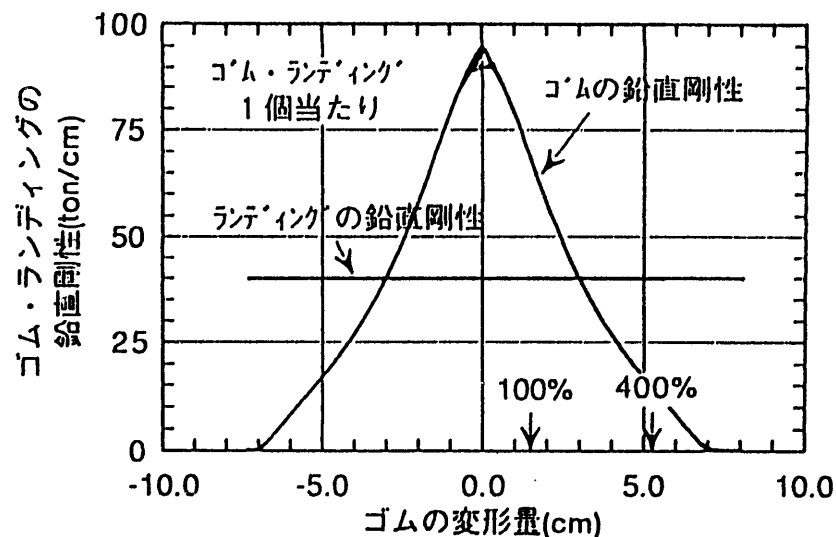
また、 E_∞ は、ゴムのみの振動試験結果のロッキング2次の固有振動数が14.2Hzであり、その振動数を表現できるように7 ton/cm²とした。

ソフトランディングは、昨年度までの共同研究の報告より、テフロン動摩擦係数を0.15として、解析を行っている。鉛直剛性は、静加力試験より0～3 ton 範囲での剛性40ton/cmを用いる。

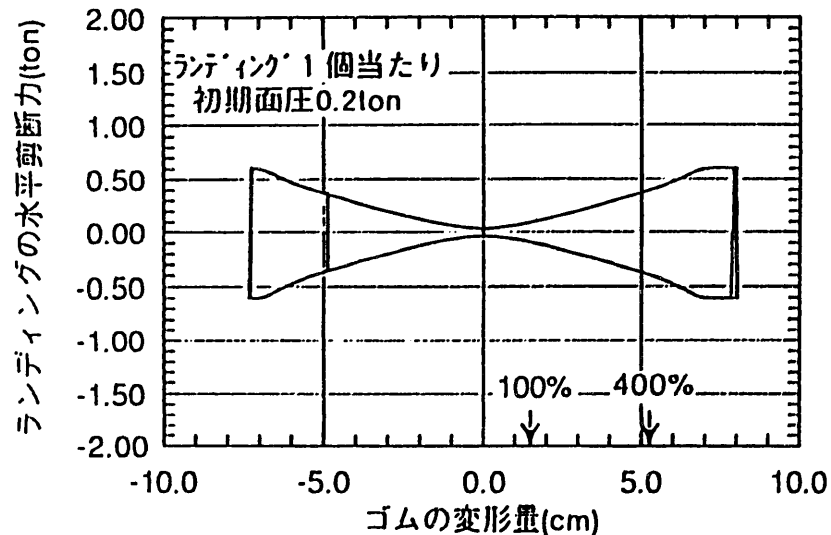
本解析で用いる積層ゴムとランディングの基本特性を図3.5.2に示す。(a)は、積層ゴムの水平せん断力とゴムの変形量を示す。本図は、試験結果の400%変形時での剛性 ($G = 3 \text{ kg/cm}^2$) を用いて示したものである。(b)は、ソフトランディングのせん断力とゴムの変形量を示す。(c)は、ゴムの変形に伴う鉛直剛性の変化を示す。(d)は、ゴム及びランディングの鉛直荷重負担分を示す。ゴムの特性は、水平方向はハードニング効果は考慮するが履歴ループは描かないモデルであり、鉛直剛性は、直径である7 cmを超えるとほぼ0 kg/cmとなるモデルである。初期鉛直剛性は、静的試験結果 (約60ton/cm) に比べ、95ton/cmと高く評価しているが、その理由は、前述したようにロッキングの2次振動数を説明できる剛性としたためである。またゴムの鉛直剛性の変動に伴い、ランディング荷重負担が変動 [(d)図参照] し、ランディングの水平力は(b)図に示すような履歴を描く。



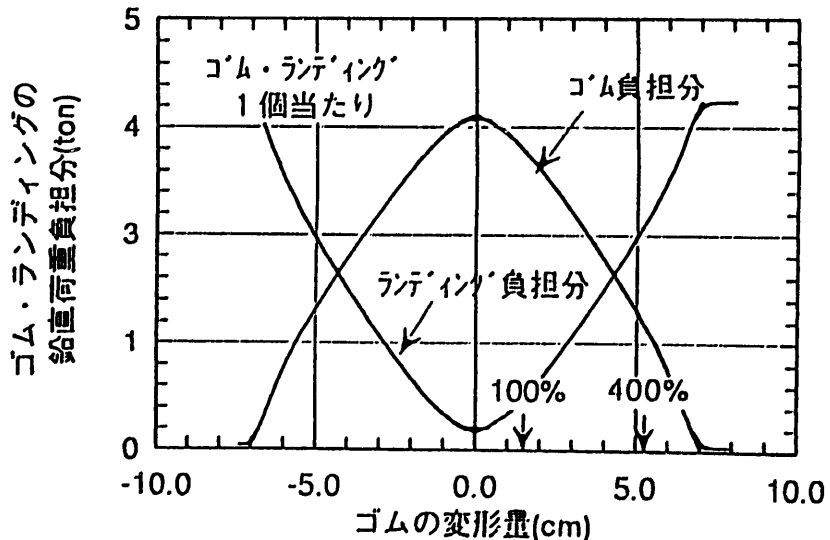
解析で用いたゴム特性のモデル化



解析で用いたゴム・ランディング特性のモデル化



解析で用いたランディング特性のモデル化



解析で用いたゴム・ランディング特性のモデル化

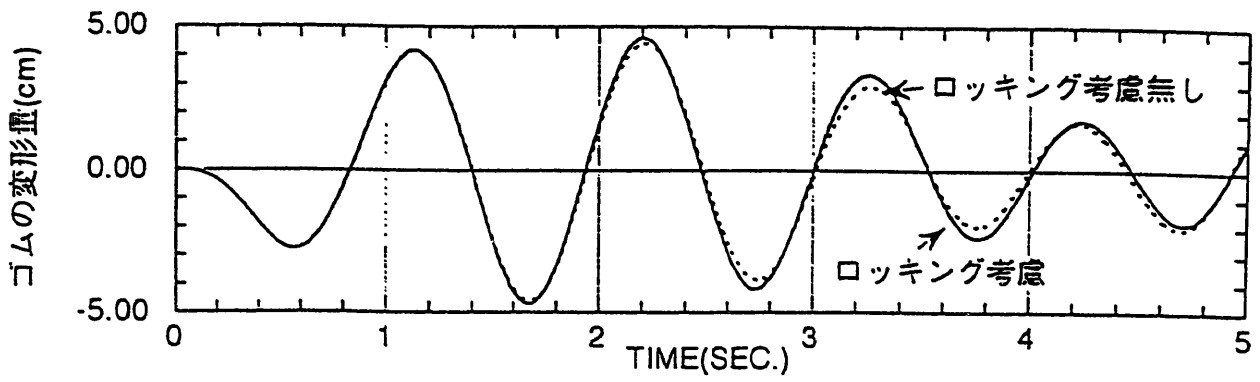
図3.5.2 ゴムおよびランディングの基本特性

3.5.1.2 解析モデルによる動的基本性状

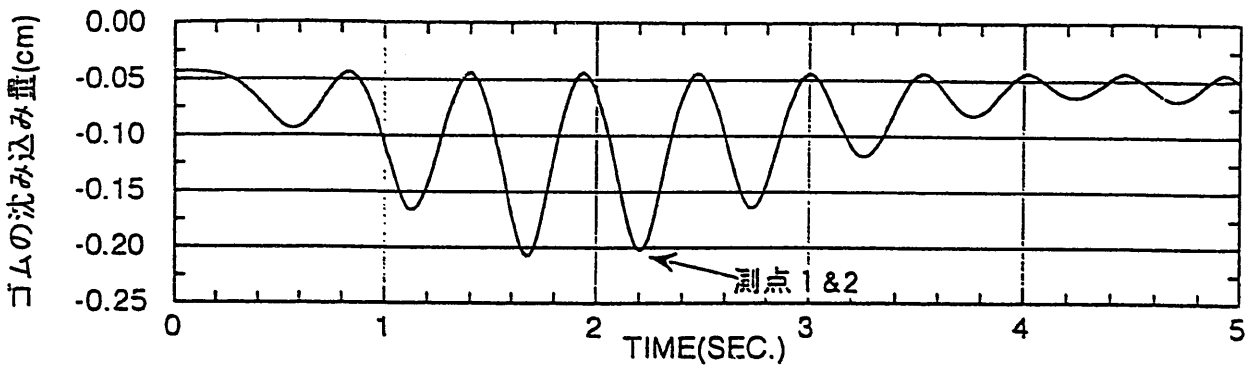
本解析モデルに1Hzの正弦波を入力することにより、動的基本性状を確認する。

積層ゴムのみで支持された場合の応答波形を図3.5.3に、ゴムの変形量とせん断力及び沈み込み関係を図3.5.4に示す。ロッキングを考慮したモデルと考慮しないモデルでは、ゴムの水平変形量に変化が見られる。また、沈み込み量では、回転成分の影響により、左右のバネ位置で違いが生じる。即ち、純粋な沈み込みは、水平1波の間に2波生じ、回転による沈み込みは1波であるため、水平変形の正と負で沈み込み量に違いが現れる。従って、応答波が定常状態になった場合は、正負間の沈み込み量の差がロッキング成分による上下変動を表す。

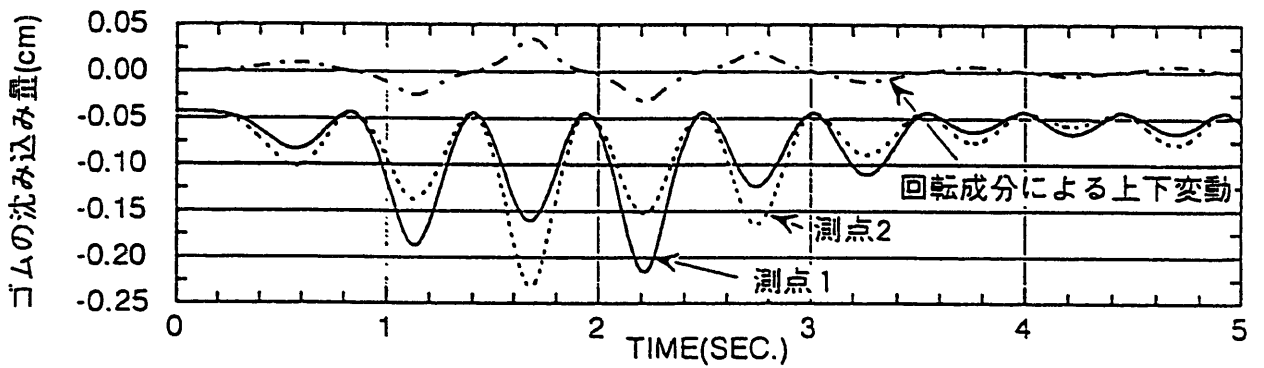
同様に、ランディングを付加させた（初期面圧0.2ton）場合の応答波形を図3.5.5に、ゴムの変形量とせん断力、ランディングの鉛直荷重負担及び沈み込みの関係を図3.5.6に示す。ゴム部の応答解析は、ゴムだけの応答に比べて差異が無くなり、ランディングにより、ロッキングの影響を抑制していることがわかる。しかしながら、沈み込みに関しては、左右（測点1と測点2）で違っており、ロッキング成分の影響が見られる。これに伴い、鉛直荷重負担量も変化し、左右の免震装置部（ゴム+ランディング）の水平せん断抵抗も変化することがわかる。



ロッキングを考慮しないモデルとしたモデルでの応答量の差異



ロッキングを考慮しないモデルでの沈み込み量



ロッキングを考慮したモデルでの沈み込み量

図3.5.3 ゴムの場合の正弦波入力応答計算波形

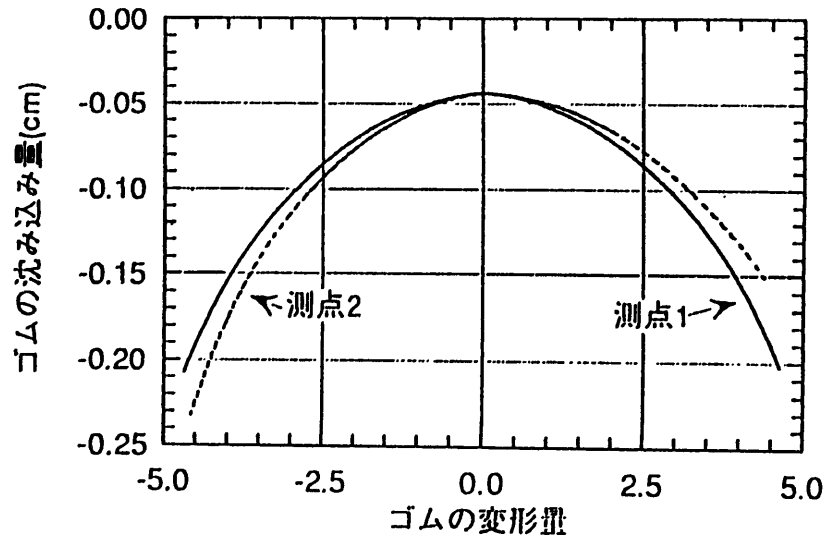
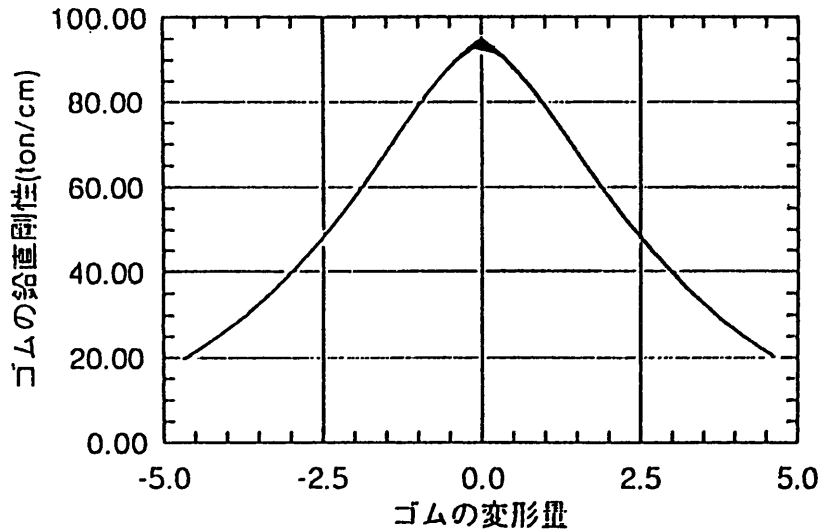
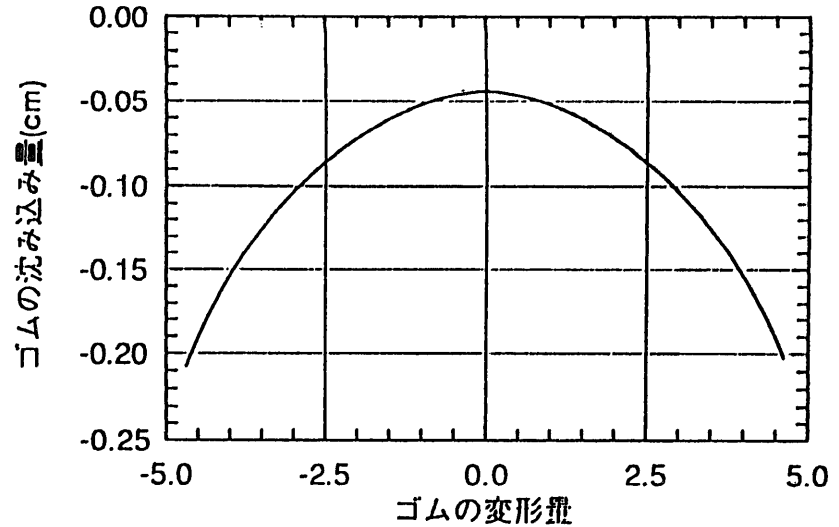
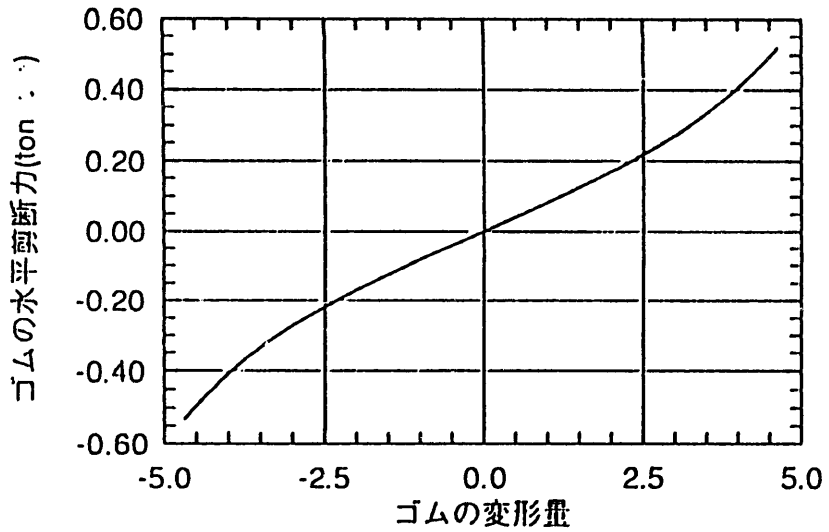
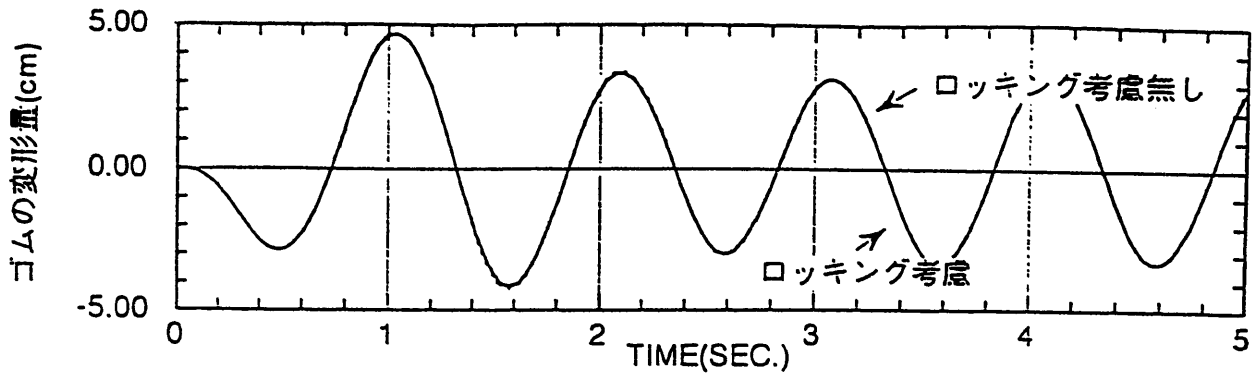
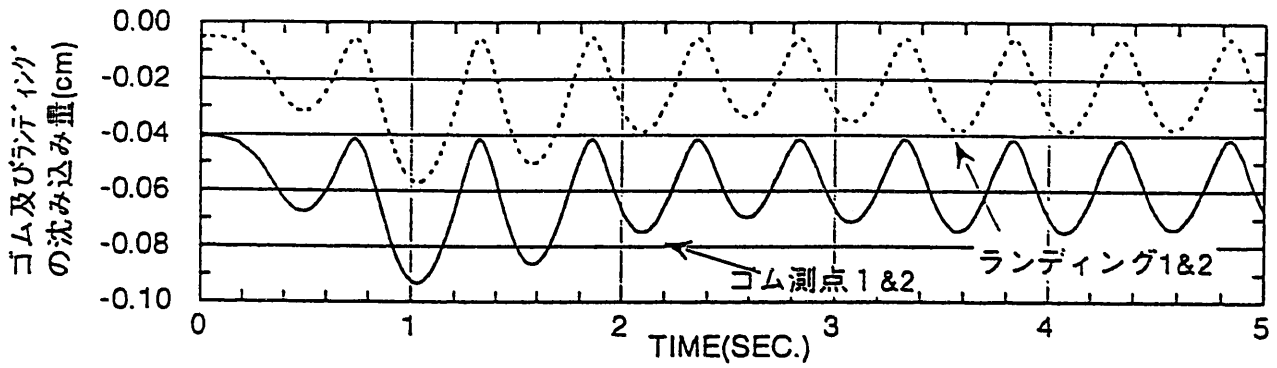


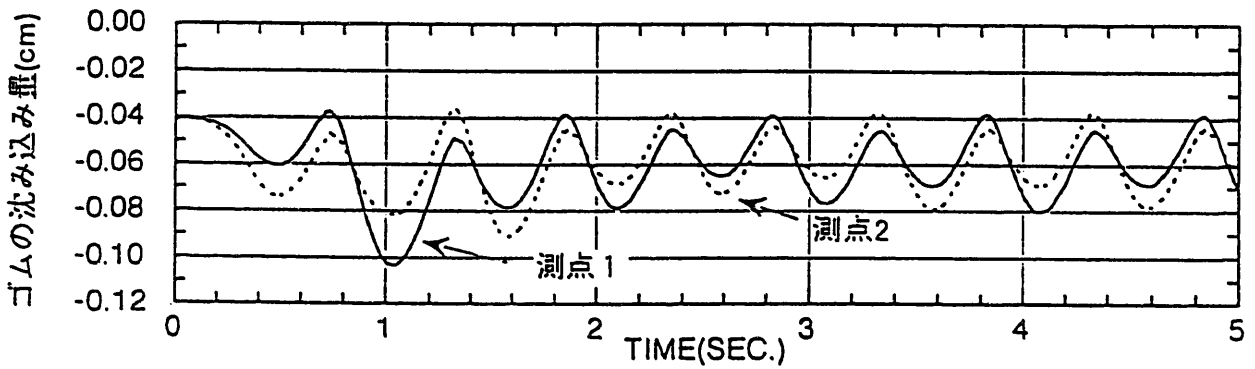
図3.5.4 ゴムのみの場合の正弦波入力解析例



ロッキングを考慮しないモデルとしたモデルでの応答量の差異

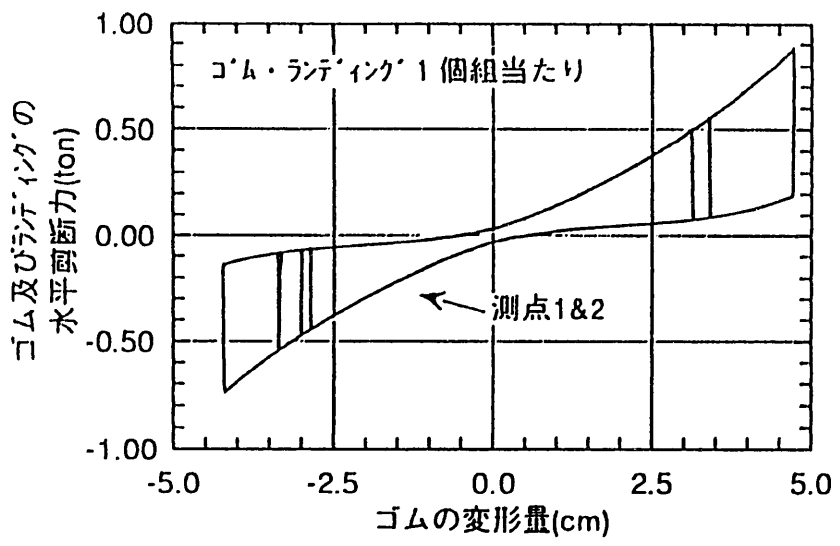


ロッキングを考慮しないモデルでの沈み込み量

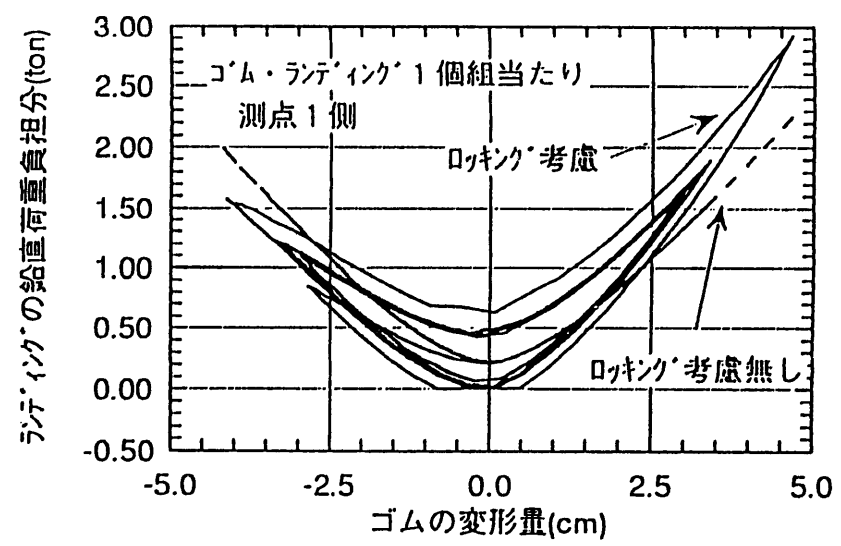


ロッキングを考慮したモデルでの沈み込み量

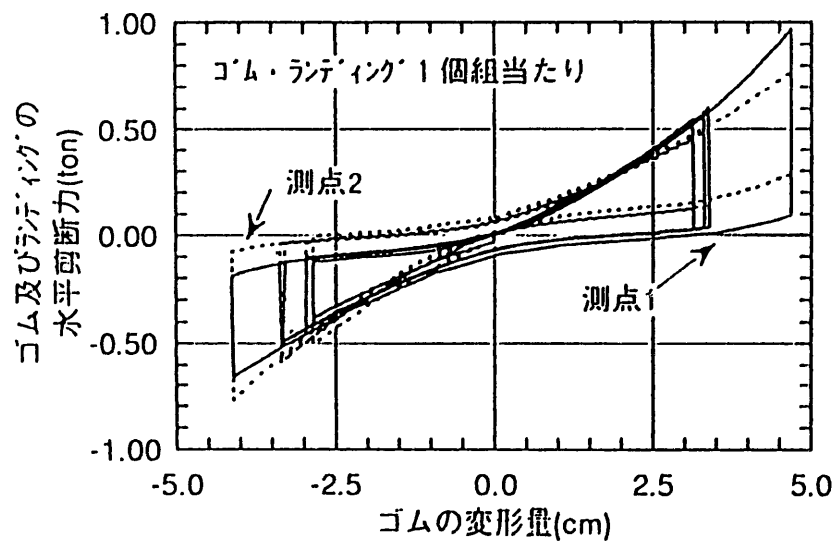
図3.5.5 ゴム+ソフトランディングの場合の正弦波入力応答計算波形



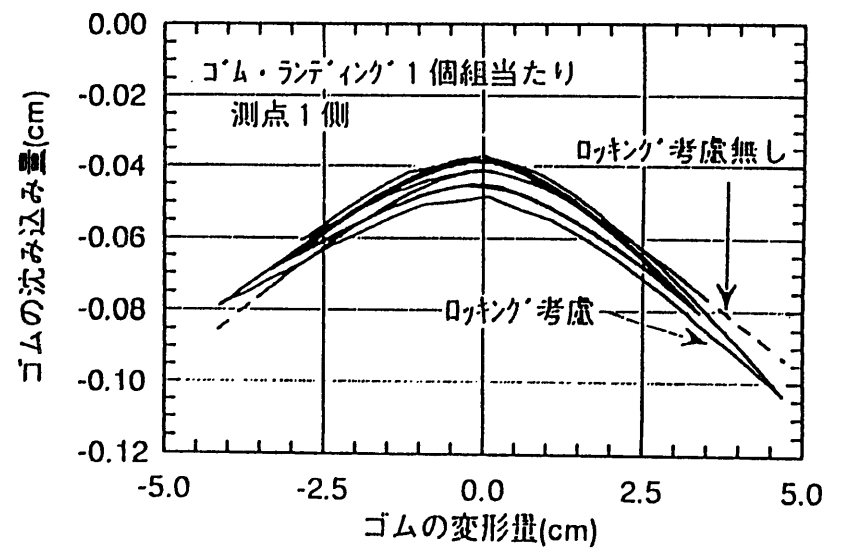
ロックを考慮しないモデル



ロックを考慮しないモデルとしたモデルでの応答の差異



ロックを考慮したモデル



ロックを考慮しないモデルとしたモデルでの応答の差異

図3.5.6 ゴム+ソフトランディングの場合の正弦波入力解析例

3.5.2 解析結果

代表的な試験例として、サイト人工地震波を入力の場合の応答解析を行う。また、ケースとしては、ゴムの変形量約400 %のケースを採用した。

積層ゴムのせん断弾性係数は 3 kg/cm^2 、初期水平バネ定数として、 0.8 ton/cm を用い、減衰は、モード減衰で与え、1次を8%、2次を共振検索結果より1.4%を用いた。

最初に、ゴムだけのケースCA47の場合を示す。図3.5.7に時刻歴波形を、図3.5.8に水平変位とせん断力及び沈み込みの関係を示す。水平方向の応答加速度、変位は、等価線形化的手法でも比較的良く一致する。上下方向の応答は、解析値の方が試験値に比べ大きくなっている。これは、積層ゴムの鉛直剛性評価が小さく、ロッキング及び純沈み込み量が大きくなったためと考えられる。

次に、ランディングと組み合わせたケースCA46の場合を図3.5.9及び図3.5.10に示す。水平方向の波形の形状は、ほぼ再現できているが、解析値の方が小さくなっている。またゴムだけの場合と反対に、上下方向の応答も解析値の方が小さく、ロッキングの抑制効果を最大評価している。この傾向は免震装置部の水平変位との各関係図にも見られる。この原因として、以下の問題点が考えられる。

- ・ソフトランディングの鉛直剛性が、振動台試験時は、静的試験時よりも柔らかくなっていた。
- ・ソフトランディングの摩擦係数の適切な評価。
- ・積層ゴムの水平バネを、履歴ループで与えず、剛性を落とし、減衰を付加することで評価した。

また前述したゴムだけの試験結果より

- ・水平変位下での積層ゴムの鉛直剛性評価の再検討

今後、これらの問題点を再検討して、解析を行う必要がある。

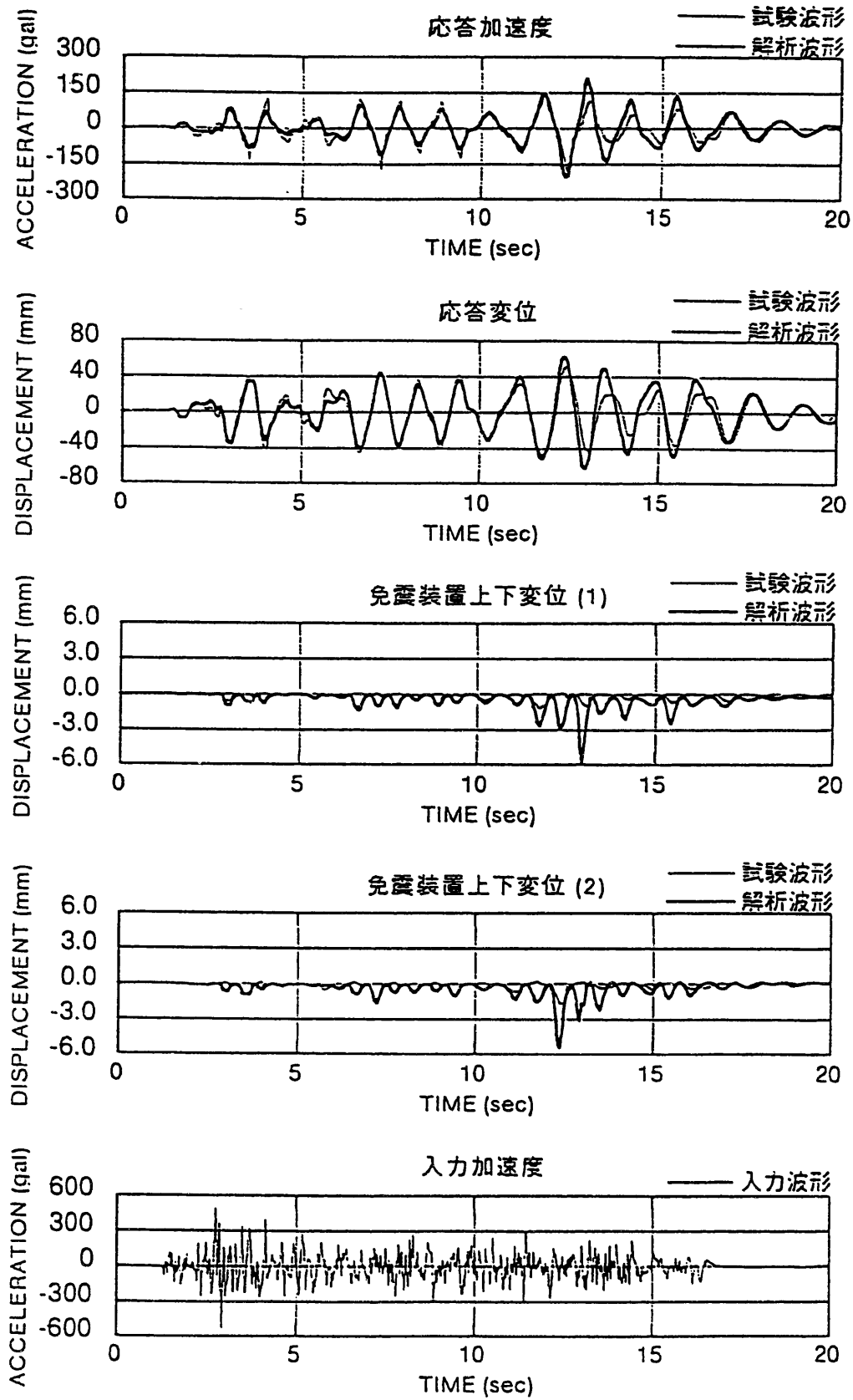


図3.5.7 ゴムのみ (CA47) の解析結果と試験結果の比較(1)

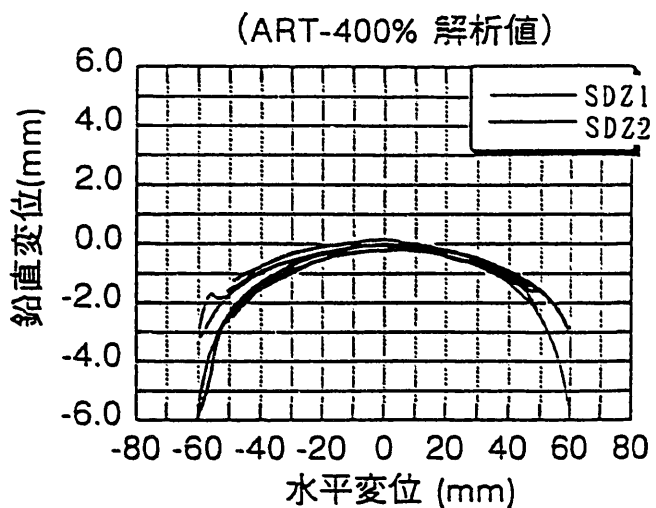
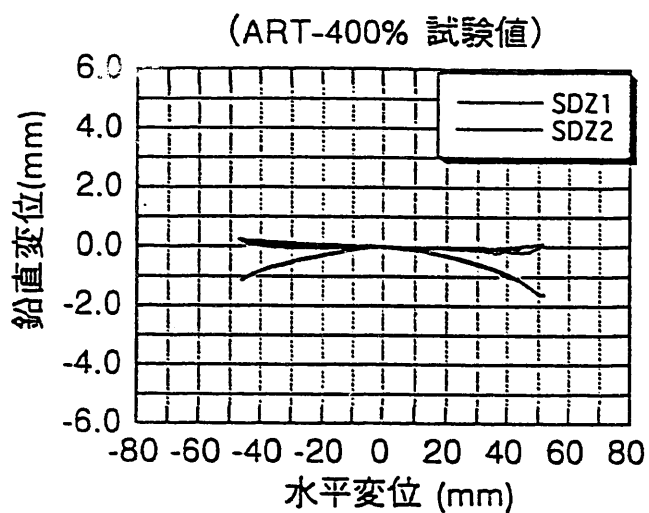
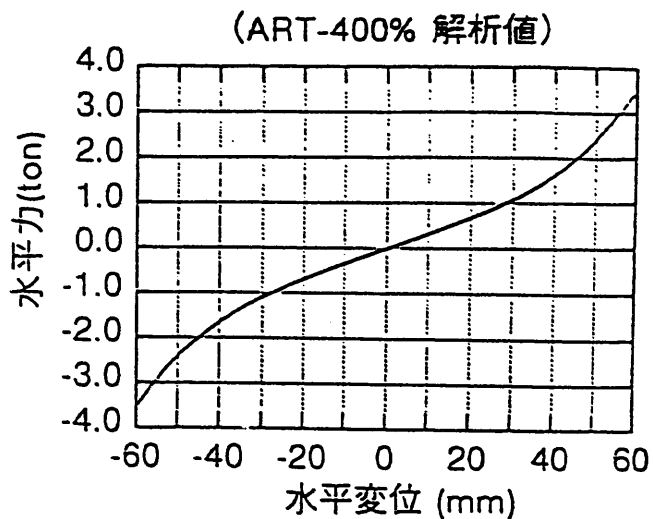
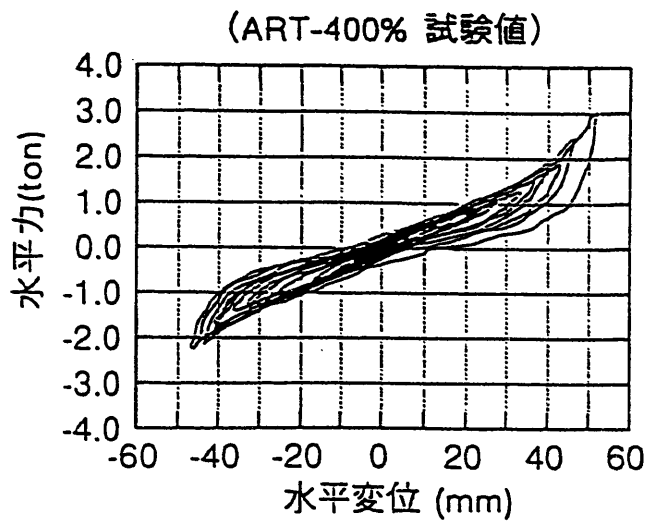


図3.5.8 ゴムのみ (CA47) の解析結果と試験結果の比較(2)

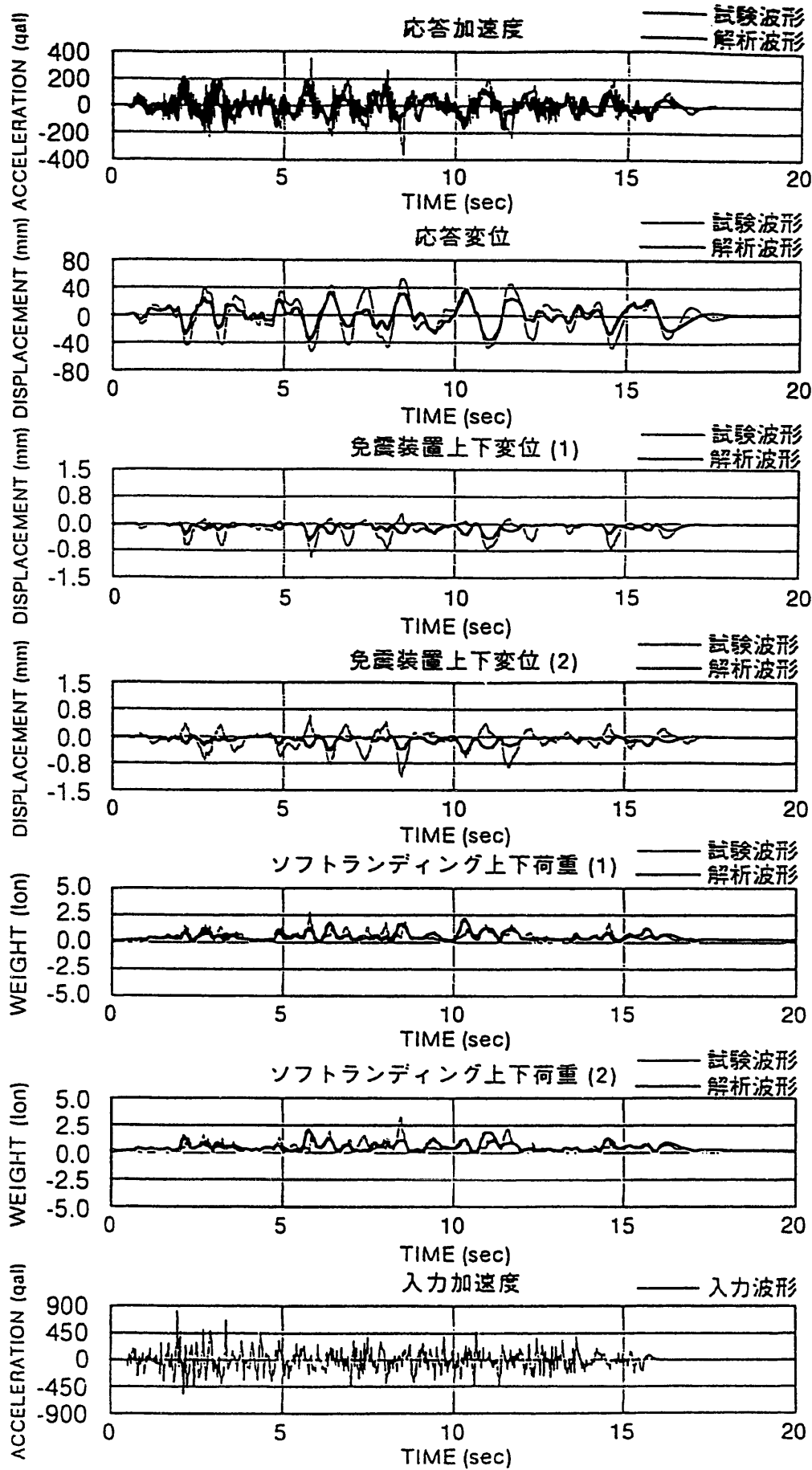


図3.5.9 ゴム+ソフトランディング (CA46) の解析結果と試験結果の比較(1)

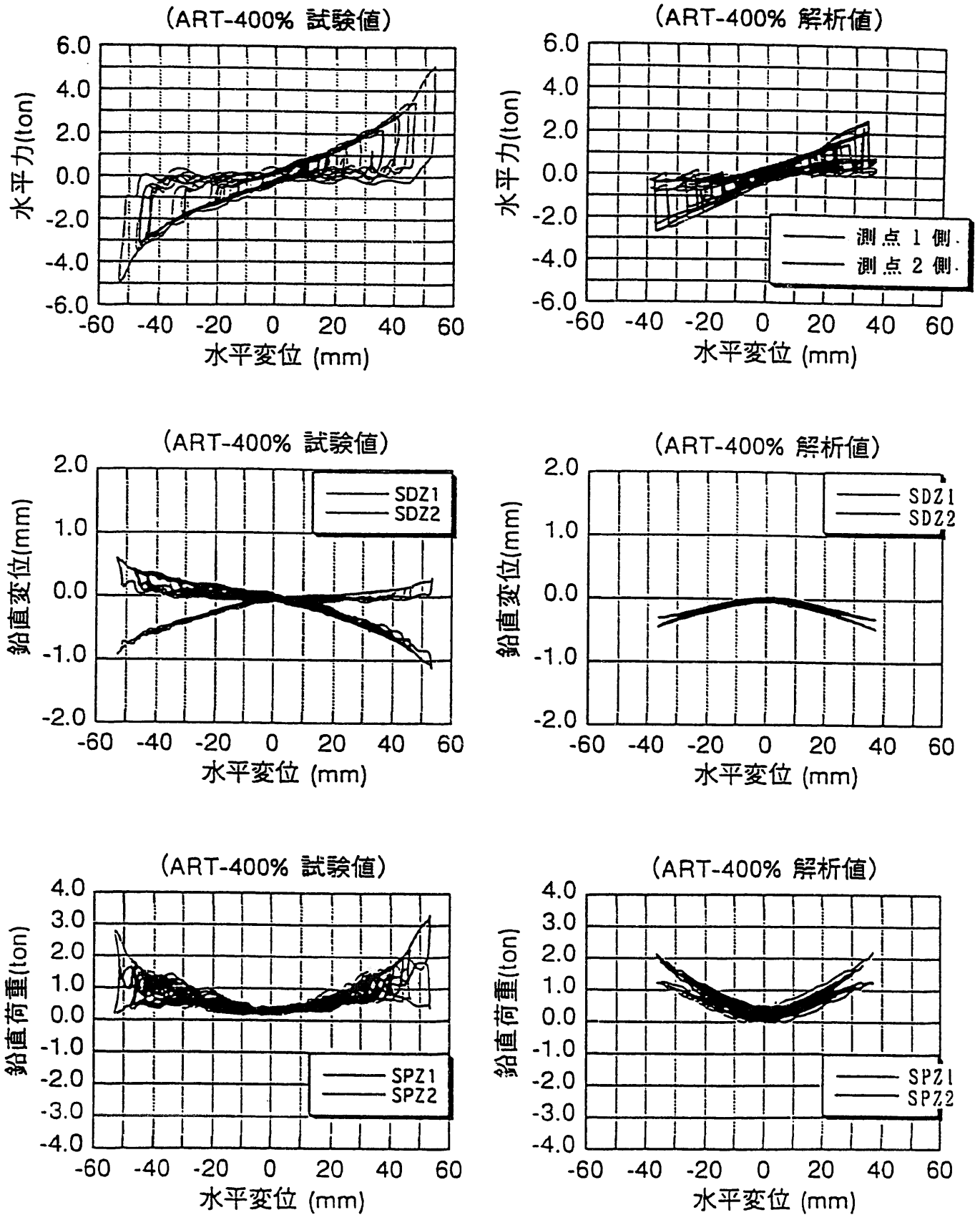


図3.5.10 ゴム+ソフトランディング (CA46) の解析結果と試験結果の比較(2)

4. 第四紀層地盤の室内土質試験

4.1 目的

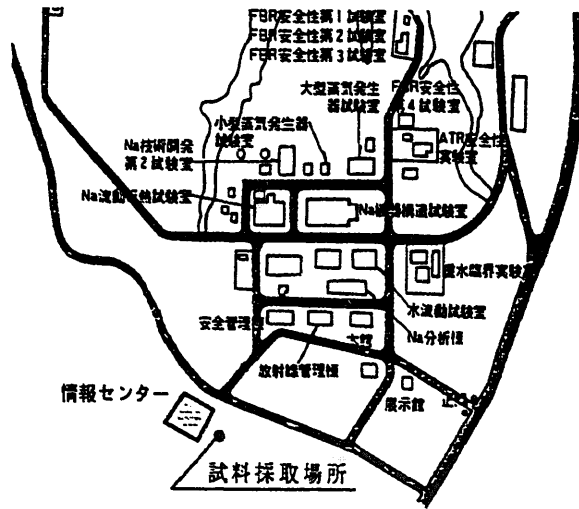
第四紀層地盤の力学特性及び変形特性を確認し、今後の核燃料施設建物の第四紀層地盤立地のための基礎試料とすることを目的とする。

4.2 土質試験

ボーリングによる資料採取及び直接法による不攪乱資料の採取を行い、表4-1に示す土質試験を行う。また、図4-1に試料採取位置図を、図4-2に地盤構造を示す。

表4-1 室内土質試験一覧

試験項目 サンプリング名称		三軸CD試験		三軸CU試験		動的疲労 (液状)試験		三軸変形試験		大型三軸試験		比重・粒度・最大最小密度他
		小型φ50	小型φ100	小型φ50	小型φ50	小型φ100	小型φ50	液状化				
No.6ボーリング	B6-1							●			●	
	B6-2			●				●			●	
	B6-3				●			●			●	
	B6-4				●			●			●	
第四紀層ボーリング	S-2							●			●	
	S-4							●			●	
	S-5							●			●	
ブロックサンプリング (モールド採取)	(上部) BL-1	●	●		●	●					●	
	(下部) BL-2	●			●						●	
攪乱試料	BL-1, BL-2	●	●	●	●	●	●	●	●	●		



大洗工学センター

図 4 - 1 試料採取位置図

地質区分	深度 (GL-m)	ρ (g/cm^3)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	
第四紀	ローム層	-3.4	1.50	1510	120
	見和層	-29.6	1.55 ~1.70	1440 ~1700	310 ~610
	石崎層	-96.7	1.60 ~1.90	1560 ~1710	350 ~440
第三紀	久米層 相当層	-169.5	2.00 ~2.20	1720 ~1850	500 ~600
	多賀層 相当層		2.15	2010	810

図 4 - 2 地盤構造

4.3 攪乱試料の供試体作成方法

ブロックサンプリング試料 (BL-1、BL-2) の攪乱試料作成方法を示す。各試料ともにブロックサンプリング試料試験等の圧密後乾燥密度と攪乱試料の圧密後乾燥密度が一致することを目標として実施した。密度調整の方法を以下に示す。

表4-2 供試体作成方法

小型 (φ50×h100)、中型 (φ100 ×h200)	大型 (φ300 ×h600)
供試体を2層に分けて所定量を投入し、モールドの外側をたたいて所定の高さに合わせる。	1層10kgとし、振動締固めによって所定の高さに合わせる

4.4 各試料の物理試験結果

各試料の平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 、均等係数 U_c 、土質分類を表-3に示す。

表4-3 物理試験結果

試料種類	ブロックサンプリング		第四紀層ボーリング			No. 6ボーリング				
	試料名	BL-1	BL-2	S-2	S-4	S-5	B6-1	B6-2	B6-3	B6-4
平均粒径 D_{50} (mm)		0.382	0.354	0.338	0.412	0.338	0.373	0.012	0.298	0.152
細粒分含有率 F_c (%)		15.1	17.8	17.8	13.0	16.4	13.9	98.4	3.7	14.0
均等係数 U_c		14.1	44.3	129.0	23.4	23.7	28.5	15.6	3.1	8.3
土質分類		SF	SF	SF	S-F	SF	S-F	CL	SP	S-F
深度 GL(-m)		3.9	4.8	4.9	6.5	7.3	8.5	15.9	20.5	32.0

SF：砂質土 S-F：細粒土まじり砂 SP：粒度のわるい砂 CL：粘質土

4.5 CD試験結果

ブロックサンプリング試料 (BL-1、BL-2) のCD試験を小型 (φ50×h100)、中型 (φ100 ×h200) の三軸試験機を用いて実施した。試験は供試体を飽和させて実施し、攪乱試料の試験は、圧密後の乾燥密度がなるべく不攪乱試料と一致するようにした。また、内部摩擦角は粘着力を0として求めた。表4-4に試験結果を示す。

表 4 - 4 CD試験結果

試料名	試験種類	圧密後乾燥密度	内部摩擦角 ϕ
BL-1	不攪乱 (小型)	1.623(g/cm ³)	40.2 (°)
	攪乱 (小型)	1.704	37.7
	不攪乱 (中型)	1.264	30.4
	攪乱 (中型)	1.443	31.6
BL-2	不攪乱 (小型)	1.642	40.5
	攪乱 (小型)	1.558	36.2

4.6 CU試験結果

No.6ボーリング試料のB6-2および攪乱試料 (BL-1、BL-2) についてCU試験を実施した。試験機は小型 ($\phi 50 \times h100$) の三軸試験機を用い、拘束圧は各試料の推定される土被り圧とした。また、初期ヤング率の測定にはLDTを用いた。試験結果を表4-5に示す。

表 4 - 5 CU試験結果

試料名	拘束圧	圧密後乾燥密度	最大軸差応力	初期ヤング率E
No.6ボーリング (B6-2)	2.0(kgf/cm ²)	1.448(g/cm ³)	4.096(kgf/cm ²)	1970(kgf/cm ²)
攪乱試料 (BL-1)	0.6	1.512	0.357	1220
攪乱試料 (BL-2)	0.8	1.633	3.136	2000

4.7 液状化試験結果

ブロックサンプリング試料 (BL-1、BL-2) とその攪乱試料及びNo.6ボーリング試料 (B6-3、B6-4) について液状化試験を実施した。各試料の液状化強度 (R_{20}) を表4-6に示す。

表4-6 液状化試験結果

試料名		小 型		中 型		大 型	
		R ₂₀	乾燥密度	R ₂₀	乾燥密度	R ₂₀	乾燥密度
No. 6ボーリング	B6-3	0.29	1.482g/cm ³	—	—	—	—
	B6-4	0.29	1.438	—	—	—	—
ブロックサンプリング	BL-1	0.28	1.515	0.29	1.590	—	—
	BL-2	非液状化	1.565	—	—	—	—
攪乱試料	BL-1	0.15	1.583	0.14	1.632	0.14	0.172
	BL-2	0.19	1.636	—	—	0.17	1.646

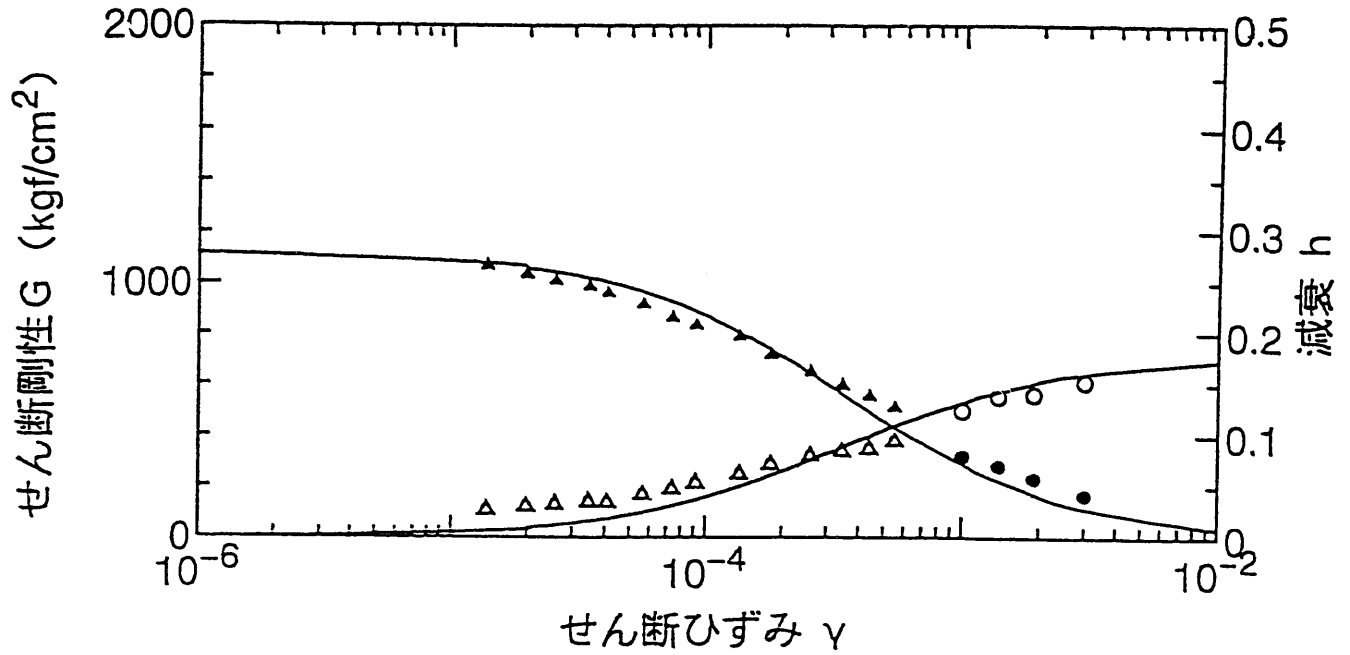
4.8 変形試験結果

表4-7に各試料の変形試験結果を、図4-3に振動三軸変形試験結果（No. 6ボーリング B6-1, B6-3）を示す。拘束圧は各試料の推定される土被り圧とし、地下水位より下にある試料については飽和させて実施した。また、攪乱試料は、ブロックサンプリング試料の含水比に調節した。初期せん断剛性Gは、ポアソン比0.5を仮定して求めたものである。

表4-7 変形試験結果

試料名		試験条件	拘束圧 (kgf/cm ²)	乾燥密度 (g/cm ³)	初期ヤング率 E(kgf/cm ²)	初期せん断剛性 G(kgf/cm ²)
No. 6ボーリング	B6-1	飽和	1.4	1.596	3360	1120
	B6-2	飽和	2.0	1.129	810	270
	B6-3	飽和	2.5	1.532	8550	2850
	B6-4	飽和	3.5	1.372	6300	2100
第四紀層ボーリング	S-2	不飽和	0.8	1.774	1830	610
	S-4	不飽和	1.0	1.758	1500	500
	S-5	不飽和	1.2	1.617	2460	820
攪乱試料 (小型)	BL-1	不飽和	0.6	1.499	1170	390
	BL-2	不飽和	0.8	1.642	2340	780
攪乱試料 (大型)	BL-1	不飽和	0.6	1.408	1350	450

振動三軸変形試験 (NO6ボーリング B6-1)



振動三軸変形試験 (NO6ボーリング B6-3)

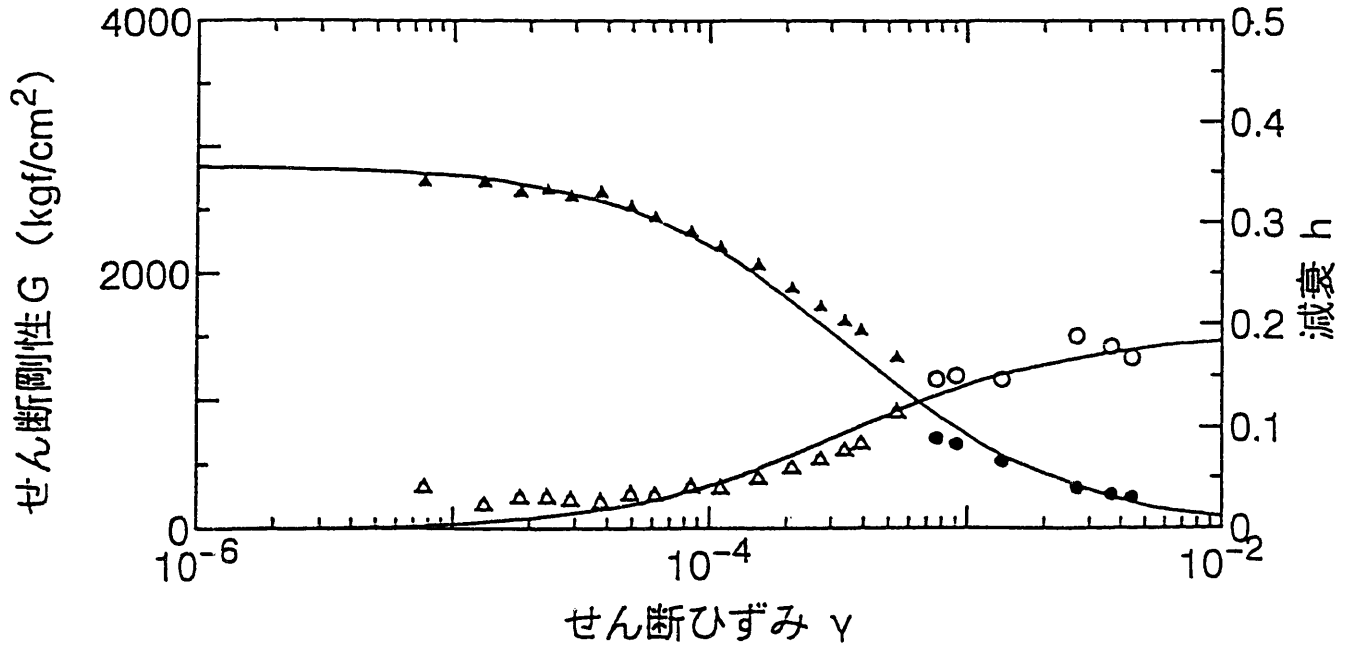


図4-3 振動三軸変形試験 (NO.6ボーリング B6-1, B6-3) 結果

5. まとめ

5.1 90ton の免震モデルによる地震観測とシュミレーション解析

ソフトランニング免震装置の概要を示すと共に、その特性を明らかにした。

(試験)

- ①テフロン単体の圧縮試験を行った。沈下が $\delta v=2.45\text{mm}$ で載荷を解除後、12時間後に $\delta v=1.35\text{mm}$ まで復帰した。
- ②ソフトランディング装置の鉛直加力試験の結果、低剛性化を図るためのゴムシートを 3mm とすると、鉛直剛性は約 $K=100\text{ton/cm}$ が得られた。
- ③水平加力試験により積層ゴムの沈み込みが発生し、ソフトランディングに鉛直荷重が移行する結果が得られた。この時水平力はソフトランディングの摩擦せん断抵抗力として負担する様になり、水平加力試験では $\mu=0.12$ 程度であった。
- ④水平加力試験によりソフトランディング内のテフロンの繰返し及び温度差による $Q\sim\delta$ (水平変位)特性の相違はほとんど見られなかった。

(解析)

- ⑤解析の結果、ソフトランディングの鉛直剛性が $100\text{ton/cm} \sim 25\text{ton/cm}$ に対し、沈み込み量が $2.25\text{mm} \sim 9.00\text{mm}$ となった。鉛直剛性が沈み込み量を支配している。
- ⑥ソフトランディングの鉛直剛性による $Q\sim X$ (水平変位)履歴特性の相違は比較的少ない。
- ⑦ソフトランディングのクリープや温度変化による $Q\sim X$ (水平変位)履歴特性の相違は比較的少ない。
- ⑧積層ゴムとテフロンの複合系の水平バネ定数は積層ゴムにのみ依存し、鉛直バネ定数は水平方向の変形の増加と共に弱剛性化し、テフロンの鉛直バネに収れんする。
- ⑨積層ゴムの弾性特性にソフトランディングの滑り摩擦抵抗力が加算された時の等価減衰定数は $6 \sim 10\%$ であった。
- ⑩積層ゴムの大変形によるモデルの上下動はソフトランディングの鉛直剛性に依存する。
- ⑪温度変化 $\pm 20^\circ\text{C}$ による伸縮量は、積層ゴムは $\pm 0.76\text{mm} \sim \pm 0.51\text{mm}$ であるが、テフロン材料は $\pm 0.22\text{mm}$ で半分程度追従できると推察される。
- ⑫積層ゴムのクリープに対しては、テフロン材料のクリープ特性と、残りをテフロンの弾性範囲内になるように設計する。
- ⑬ロッキング・スウェイ振動においての剛体の挙動は回転成分は比較的小さく、大半が水平方向のスウェイ振動であることがわかり、ロッキング振動による免震モデルの転倒に対する安全性は十分にあると判断した。

⑭プレロードをかけると初期剛性に起因して加速度や水平変位が変化する。このようにプレロード特性、言い換えれば環境温度やクリープによる積層ゴムの沈み込み量が免震性能に影響することが類推された。

5. 2 免震構造モデル振動台試験

小型の積層ゴムφ70mmで16tonRC 構造体を支持した状態で、免震構造体の動的特性と限界性能を振動台試験により調査した。

(試験)

- ①静的加力試験の結果、積層ゴムの水平剛性は設計値0.12ton/cmに対し検査値0.112～0.125ton/cmであり鉛直剛性は設計値55ton/cmに対し検査値64.08～70.86ton/cmであった。また、せん断破壊は450%～550%前後で生じた。
- ②静的加力試験の結果、ソフトランディングの鉛直剛性はゴムシートt=3mmの場合、約94ton/cm、t=6mmの場合約54.4ton/cmであり、ほぼ目標値が達成された。
- ③免震構造の水平対角剛性と履歴減衰定数は水平変位依存性のあることが分かった。また、減衰定数はソフトランディングのある場合は3倍程大きくなる。この増加が大きな加速度入力を可能にしている。
- ④積層ゴムの水平変位の限界値は、積層ゴム単体ではゴム層厚の442%、ソフトランディングを付加すると585%まで変形可能であった。
- ⑤人工地震波ARTによる入力試験では、積層ゴムの場合に約700cm/s²で、ソフトランディング装置付加の場合に1200cm/s²で積層ゴム単体の限界変位60mmに達する傾向にある。

(解析)

- ⑥解析モデルの沈み込みは、外力の水平1波の間に純粋な沈み込み量は2波生じ、回転によって1波生じるため、水平方向の正と負で違いが現れた。
- ⑦ソフトランディングを付加させたモデルでロッキングを考慮すると、ゴム部の応答解析はゴムだけの応答に比べて差異が無くなり、ソフトランディングによりロッキングの影響を抑制しているが、沈み込みでは正負で違っており、ロッキング成分の影響が見られた。
- ⑧人工地震波による応答解析の結果、応答波形の傾向は試験値にほぼ対応したが、積層ゴム単体の場合、上下方向の応答は解析値の方が試験値に比べ大きくなった。積層ゴムの鉛直剛性評価が小さいためと考えられるが、ソフトランディングを組み合わせたケースでは上下方向、水平方向共に解析値が小さくなっている。ソフトランディングによるロッキングの抑制効果を最大評価しているためと考えられる。鉛直剛性・摩擦係数の適切な評価が今後の課題である。

5.3 第四紀層地盤の室内土質試験

解析結果と観測された地震波との整合性等を確認するために、大洗工学センター内で採取した第四紀層地盤の土質試験を実施した。

その結果を要約すれば以下の通りである。

- ①標準貫入試験の結果、表層のローム層に覆われて見和層以下の地層が分布している。この結果の中で、段丘レキ層、見和層下部は分布していなかった。また、標高15m～20m前後を上限とする更新統見和層中部の砂礫層が存在し、30t/㎡程度の地耐力は期待できると思われる。
- ②力学試験より得られた弾性係数は、一部下がっているものもあるが、全体的に見て、深度方向に増大する傾向にあり、深部に向かうに従って地盤強度が増大している。
- ③見和層中部の動的な液状化試験結果より、液状化強度は0.28～0.29が得られ、また、攪乱試料では0.15～0.2程度となっている。いずれにしても、十分なN値があるので問題はないと思われる。

6. あとがき

非常に厳しいクライテリアを要求される核燃料施設に免震構法を適用するために、昭和63年から平成3年にかけて実施した共同研究（第一期）に引き続き、第二期共同研究では天然ゴム系積層ゴムと過剰変形時の荷重支持装置（ソフトランディング）の縮小モデルにより、地震観測データの取得やそのシュミレーション解析、免震構造モデル振動台試験等を行い、ソフトランディングの特性を明らかにすると共に、ソフトランディングを組み合わせた免震構造体の安全性を追求した。また、本研究での研究成果は逐次建築学会等へ投稿するなど積極的に外部発表を行ってきた。

本研究により蓄積された地震情報、試験結果、解析結果により、免震構造体の安全性が確認され、核燃料施設のための免震構法の開発を進めることが可能となった。

いずれにせよ、ここまで研究が進展し、一定の成果を挙げることができたことは、関係者の尽力だけでなく、研究を支援していただいた方々並びに各種実験の実施などで研究に協力していただいた多くの方々のおかげであり、ここに、深甚なる感謝の意を表してあとがきとする。

別紙1 第二期共同研究(平成6年度)責任分担表

項目	分担者	甲	乙	備考
1. 振動台試験				
① 上部構造体		○	—	総重量約16t
② 積層ゴム		○	—	
③ ソフトランディング装置		○	—	ロードセル内蔵
④ 振動台試験		—	○	
⑤ 計測		—	○	
⑥ データ収録, 整理		—	○	
2. 積層ゴム限界特性試験				
① 積層ゴム		○	—	
② 静的加力試験		—	○	
③ データ収録・整理		—	○	
3. 地震観測				
① 速度計・アンプ		○	—	
② 観測小屋		—	○	
③ つなぎこみ調整		○	—	
④ データ収録・整理		○	○	その都度
4. 解析, 評価, 報告書作成				
① 解析		○	○	
② 評価		○	○	
③ 報告書作成		○	○	