

免震用渡り配管振動台試験報告書

(試験報告)

1999年3月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

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

1999年3月

免震用渡り配管振動台試験報告書

瓜生 満* 篠原 孝治* 寺田 修司*

山崎 敏彦* 富田 恒夫* 近藤 俊成**

要 旨

免震建物を採用する場合、建物の上部構造と下部基礎版間には、地震時に相対変位（応答変位）が生じるため、両間を渡る渡り配管は、その変位吸収策として伸縮管継手等を組み合わせた配管系が採用されている。

しかし、原子力施設の設計に用いるような大規模想定地震（設計用限界地震における加速度約500gal、応答変位量約30cm）に対応した渡り配管の使用実績はなく、また、このような地震下での実物大配管モデルによる耐震性評価の実施例もなかった。

本試験は、平成8年11月から同年12月にかけて三菱重工業(株)技術本部高砂研究所の振動台試験機を用いて実物大の配管配置寸法に基づく渡り配管の耐震性確認試験を実施するとともに、試験結果と本試験体をモデル化したシミュレーション解析結果について比較評価を行い、シミュレーション解析モデルによる評価の妥当性を確認することができたので、それらについて報告する。

* 建設工務管理部
** (株)ペスコ

目 次

	頁
1. 目 的	1
2. 試験内容	1
2.1 試験体及び試験装置	1
2.2 試験条件	2
2.3 試験項目	2
2.4 計測項目	3
2.5 確認項目	3
3. 試験結果	13
3.1 振動特性試験	13
(1) 試験ケース1	13
① 建家系（ランダム波加振試験）	13
② 配管系（正弦波掃引試験）	13
③ 全体系（ランダム波加振試験）	14
④ 全体系（正弦波掃引試験）	14
(2) 試験ケース2	14
① 配管系（正弦波掃引試験）	14
② 全体系（ランダム波加振試験）	15
③ 全体系（正弦波掃引試験）	15
3.2 地震応答試験	15
(1) 試験ケース1	15
① 最大値リスト（代表測定点）	15
② 建家モデルの応答変化と応答加速度の履歴曲線	16
(2) 試験ケース2	16
① 最大値リスト（代表測定点）	16
② 建家モデルの応答変化と応答加速度の履歴曲線	16

目 次

	頁
3.3 シミュレーション解析	16
(1) 試験ケース1	16
(2) 試験ケース2	17
 4.まとめ	 54
4.1 振動特性試験	54
4.2 地震応答試験	54
4.3 シミュレーション解析	54
 5. 試験に係る予備解析	 55
5.1 建家モデル重量の検討	55
5.2 建家モデルの復元力特性の検討	56
5.3 振動台用模擬入力波の検討	59
 6.付録	 62
6.1 試験実施体制	62
6.2 伸縮管継手概略図	63
6.3 試験装置写真	64

1. 目的

再処理施設では既存のユーティリティ設備（冷却水設備、圧縮空気設備等）の経年変化に伴い、これらを一括更新するため、新たに免震構造を採用した建物（以下、免震建物）を国内原子力施設としては初めて建設する計画である。

免震建物を採用する場合、建物の上部構造と下部基礎版間には、地震時に相対変位（応答変位）が生じるため、両間を渡る渡り配管は、その変位吸収策として伸縮管継手等を組み合わせた配管系が採用されている。

これらの継手を含む配管系の地震時の健全性については、通産省の委託を受け、(財)電力中央研究所が、FBR免震設計技術の確立を目指して、高速増殖炉免震設計技術指針（案）の策定に資することを目的として、約1/2縮小モデルによる振動台試験^{(1), (2)}を実施しており、試験と解析手法の検討がなされている。

一方、動燃事業団においても、静的変形性能確認試験⁽³⁾を実施し、水圧の有無、継手の変形角等をパラメータとして伸縮管継手の回転バネについてJIS B 2352による設計値との比較検討及び最大変形能力の確認を行った。

本試験は、静的変形性能確認試験に加えて、振動台を用いた実物大の配管配置寸法に基づく渡り配管の耐震性確認試験として位置づけるとともに、試験結果と本試験体をモデル化したシミュレーション解析結果を比較評価し、シミュレーション解析モデルによる評価の妥当性を確認することを目的として実施する。

2. 試験内容

2.1 試験体及び試験装置

実物大の渡り配管の配置寸法に基づき、免震建物からパイプ固定台までの部分を取り出した試験体とする。実機の配管径は、圧縮空気 125A、冷却水 300A 及び 350A であるが、試験体としては 150A を用いることとした。

配管圧力は、通常運転時で約 $1 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、供給ポンプの吐出側で最大 $3.7 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ がかかるため、安全側にこれと同等な静水圧 ($4 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$) を付与し、内圧による継手及び配管に対する静的力並びに流体の配管に対する付加質量を模擬することとした。

図2-1に試験装置の概略を示す。

免震建物の上部構造からは、免震装置に支持された上部構造の固有振動数と減衰比等に支配されるやや長周期成分の地震力が入力され、パイプ固定台からは、下部基礎版からの

地震力が入力される、いわゆる多入力状態となる。

本試験体では、実際の免震建物と同等な応答特性となるように、10t程度の锤りを積層ゴムと鋼棒ダンパーで支持した1質点系モデルの模擬免震建家（以下、建家モデルという）を作成し、これに配管系の一端を取付ける構成とした。

図2-2に建家モデルの詳細図を示す。

建家モデルの锤りは、鉄板を積み重ね、リニアローラウェイ上を滑動させ、側面には多段積層ゴムと鋼棒ダンパーを設置する構造とした。

図2-3に積層ゴムを、図2-4に鋼棒ダンパーを示す。

振動台試験機は、三菱重工業株技術本部高砂研究所の大型三次元振動台を使用する。

試験機仕様は、5.3項の別添試料-1に示す。

2.2 試験条件

- (1) 入力波 ランダム波、正弦波、免震設計用入力地震動 S_2^* （以下、 S_2^* 波という）
- (2) 入力レベル 3段階
- (3) 振動台の加振方向 Y方向加振
(振動台は、水平Y方向のストロークは±300mmであるが、X方向が±50mmであるため、X+Y同時加振不可。)
- (4) 配管軸方向 図2-1参照（試験ケース1、試験ケース2）
- (5) 内圧 4 kg/cm²G
- (6) 建家モデル 固定、作動

2.3 試験項目

表2-1に試験項目を示す。

(1) 振動特性試験

ランダム波加振試験、正弦波掃引試験により、試験体の固有振動特性を把握する。

入力レベルは3段階とする。共振振動数と減衰比の入力依存性を把握する。

なお、あらかじめ、建家モデルを固定した状態の配管系振動特性を把握しておく。

(2) 地震応答試験

S_2^* 波を用いて全体モデルの地震応答特性を把握する。

入力レベルは3段階とする。ただし、振動台の限界性能を考慮して振動系の応答に影響

を及ぼさない範囲で入力地震動の周波数特性を調整（フィルタをかける）する。

S_2^* 波の加速度及び応答スペクトル並びに入力レベル3段階（ $1/3, 2/3, 3/3 S_2^*$ ）の加速度波形を図2-5に示す。

表2-1 試験項目

	試験体	入力波	入力レベル	内圧 (kg/cm ² G)	試験ケース
振動特性試験	建家系	ランダム波	3段階	—	試験ケース1
	配管系 ^{*1}	正弦波	3段階	4.0	試験ケース1 及び 試験ケース2
	全体系	ランダム波 正弦波	3段階	4.0	
地震応答試験	全体系	S_2^* 波	3段階	4.0	

*1：配管系は、建家モデルを固定する。これ以外は、建家モデルを固定しない。
また、Z方向（試験ケース1）のみの加振も実施する。

2.4 計測項目

図2-6に計測点の一覧を示す。

- ・配管 …… 加速度、歪（応力）、変位
- ・免震建家 …… 加速度、変位
- ・内圧
- ・ジンバル型、ヒンジ型伸縮管継手……アーム部の歪からピンの応力を算出する
- ・振動台 …… 加速度

2.5 確認項目

(1) 振動特性試験

- ① 建家系 水平1方向 … 加速度伝達関数、変位応答
- ② 配管系 水平2方向 … 加速度伝達関数、共振振動数、減衰比の入力依存性
- ③ 全体系 水平2方向 … 加速度伝達関数、共振振動数、減衰比の入力依存性

(2) 地震応答試験

- 全体系 水平2方向 …・継手回転角、免震建家とエルボ部の相対変位及び加速度
 •継手のアーム応力、配管応力のこれら応答の代表点の値と入
 力依存性

・代表点の時刻歴波形

(3) シミュレーション解析

本試験体をモデル化したシミュレーション解析モデルにより地震応答解析を実施する。

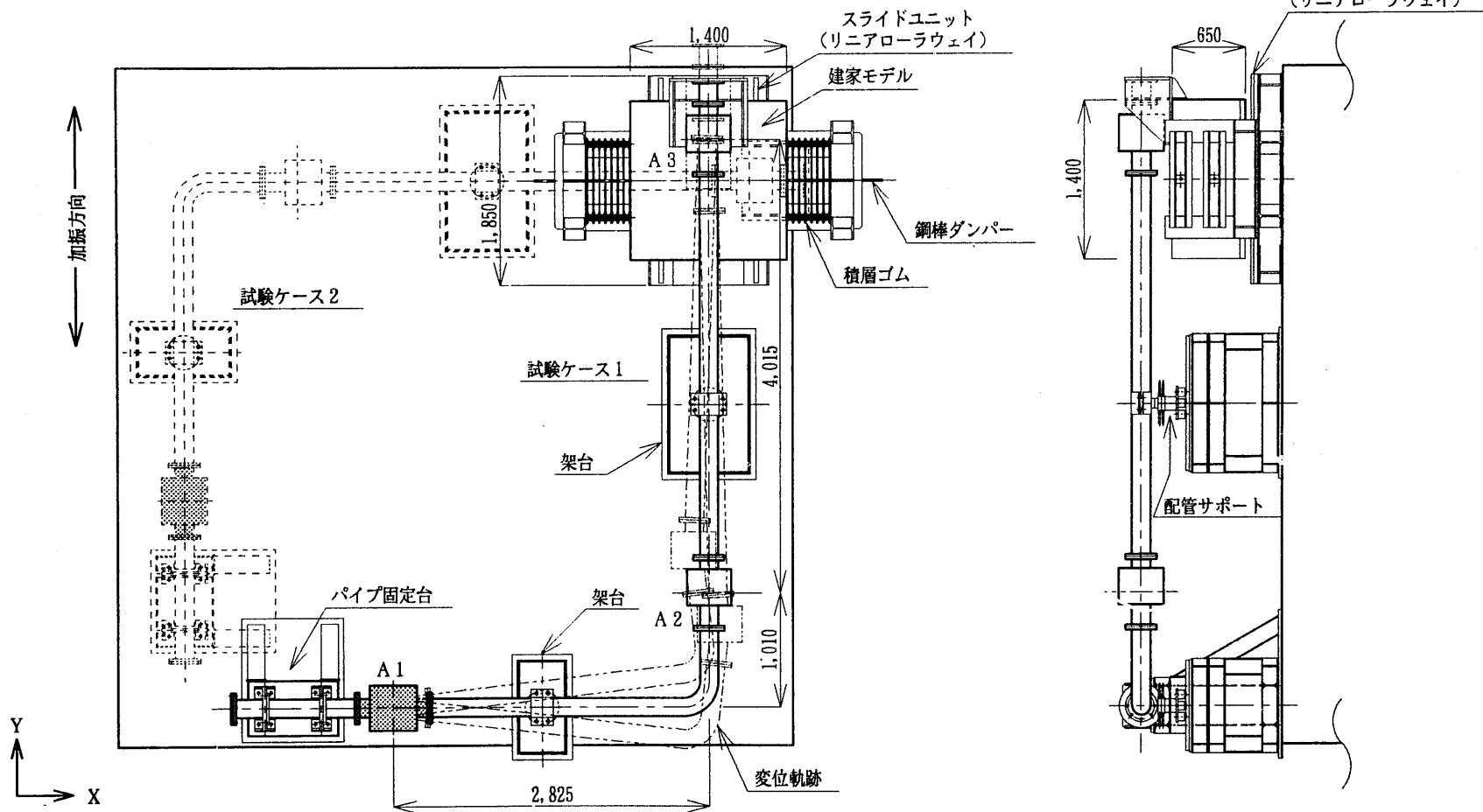
図2-7にシミュレーション解析モデルを示す。

解析モデルは、試験装置と同様な寸法配置の梁モデルとし、17質点、13要素にて各質点部の加速度、応答変位を解析し、地震応答試験結果と比較評価を行い、シミュレーション解析モデルによる評価の妥当性を確認する。

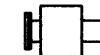
建家モデルの復元力特性は、本試験の建家モデルと同等にしている。

なお、解析には、構造解析プログラムRESPを用いて実施する。

以上の結果を総合的に解析・評価して、渡り配管の地震時の健全性を確認するとともに、試験結果と本試験体をモデル化したシミュレーション解析モデルによる評価の妥当性を確認する。



凡例

 : ジンバル型伸縮管継手
 : ヒンジ型伸縮管継手

配管径 : 150 A

図2-1 免震用渡り配管の振動台試験装置概略図

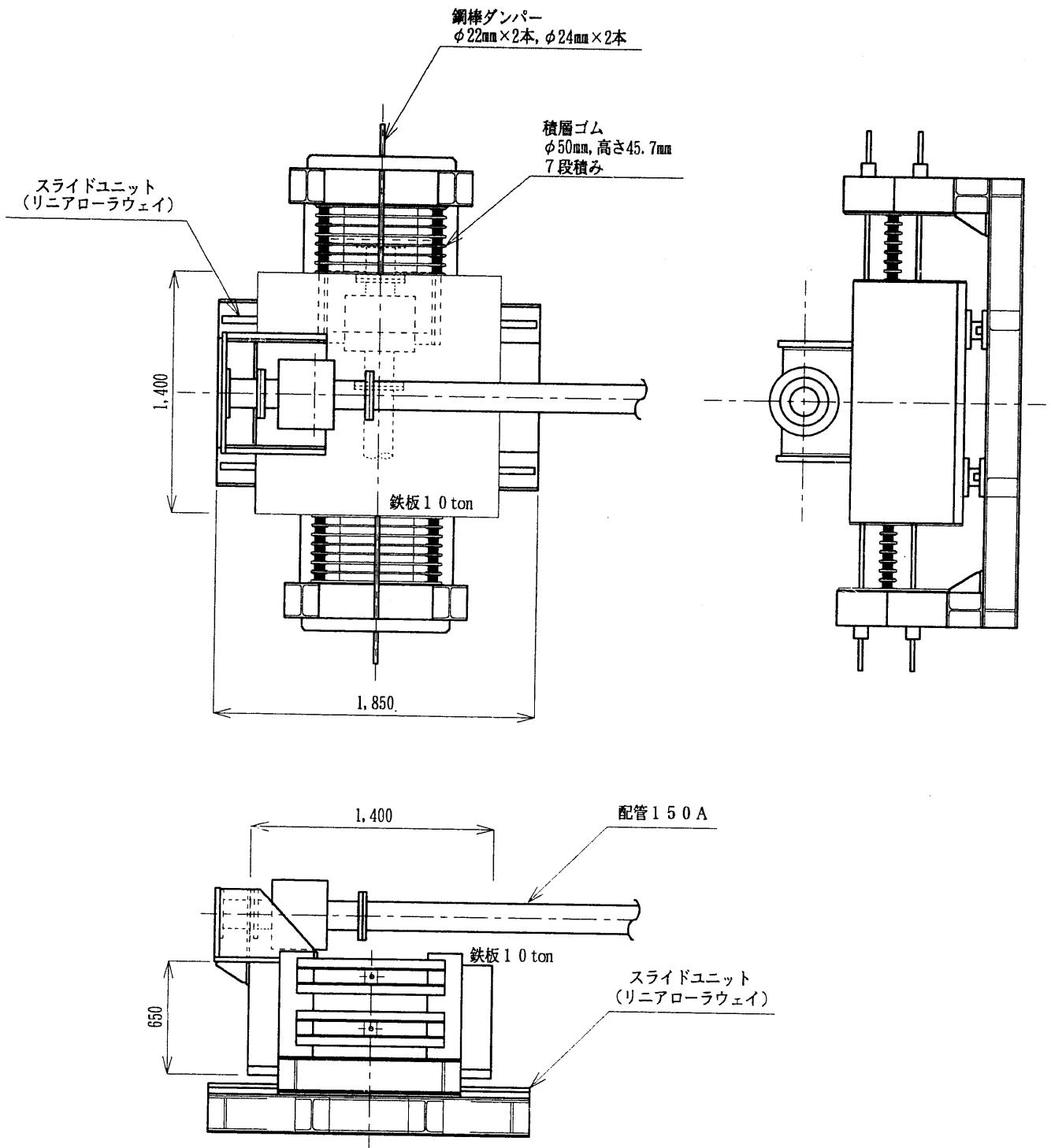
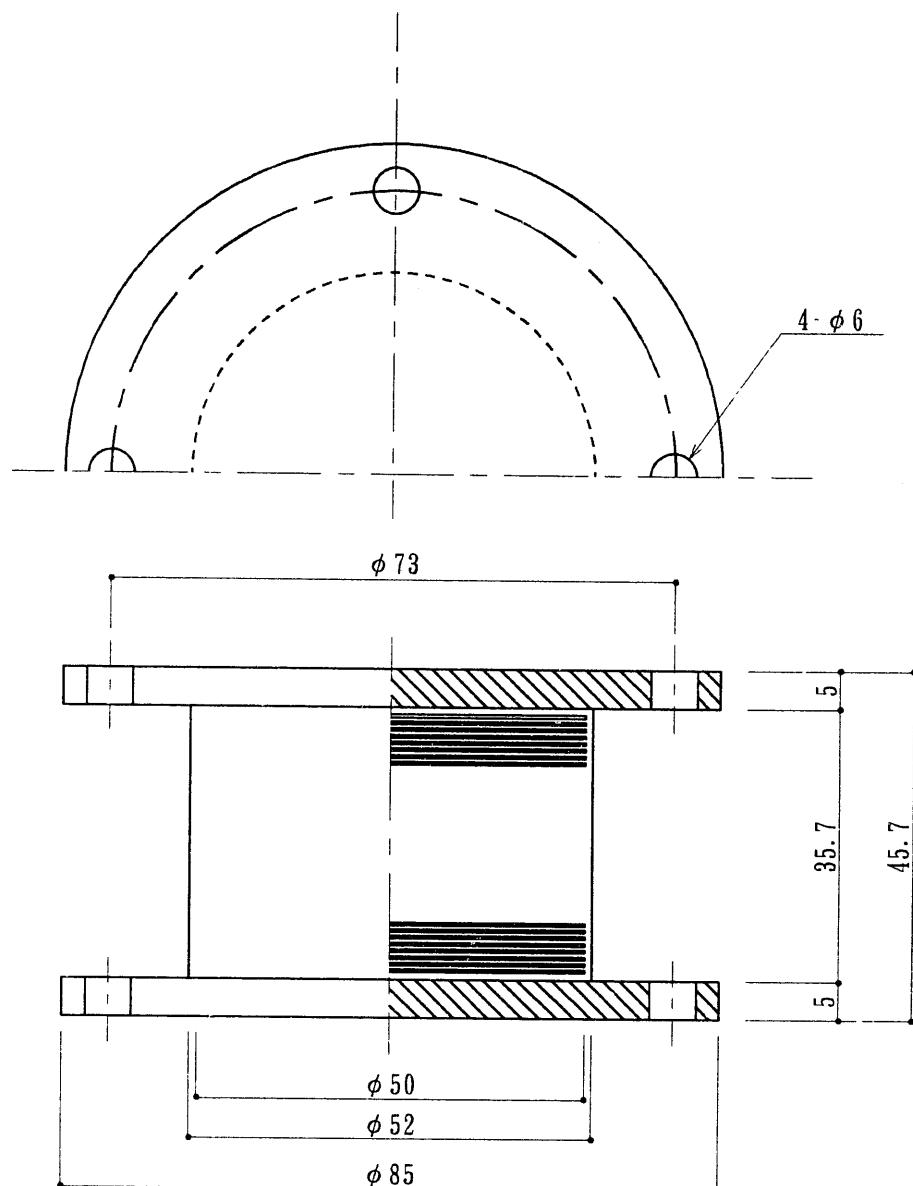
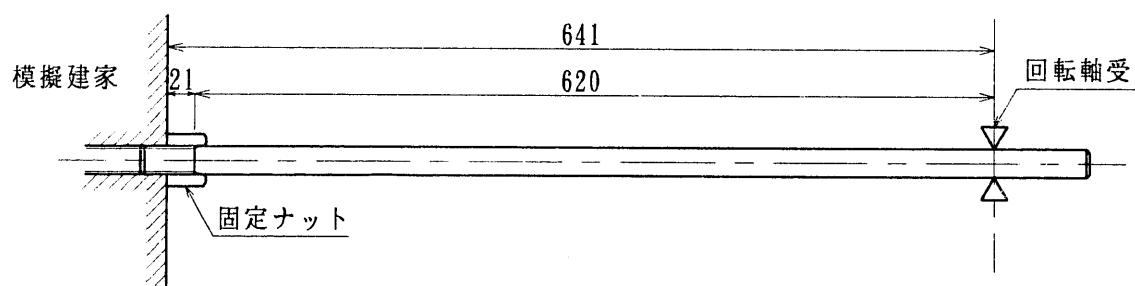


図2-2 建家モデル詳細図



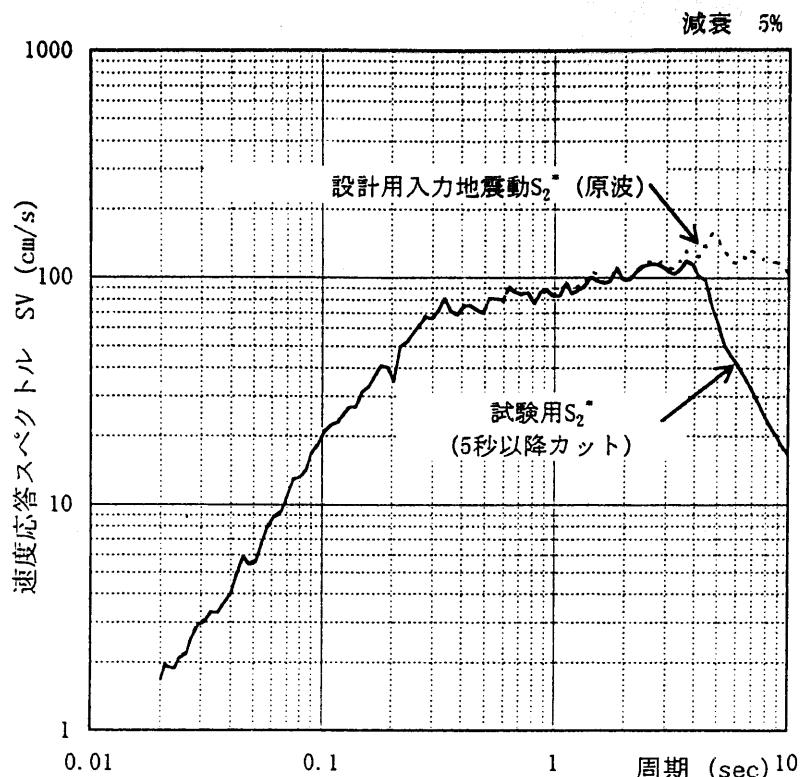
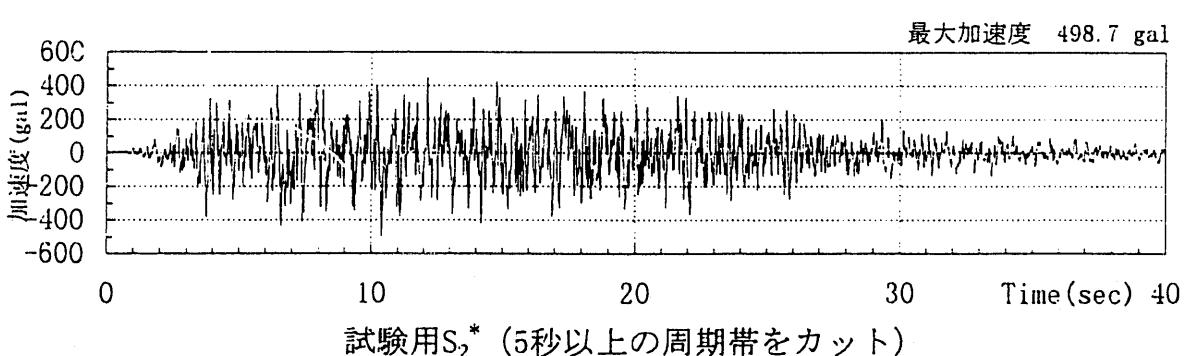
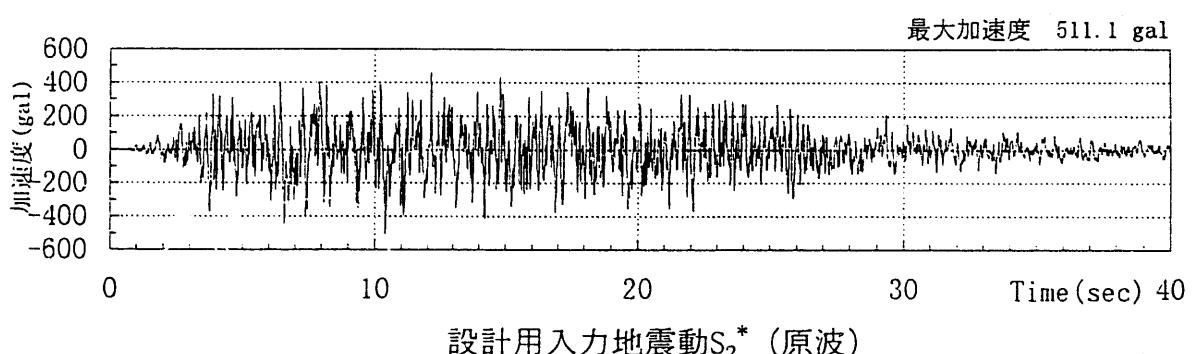
ゴム層厚 $0.9\text{mm} \times 30\text{層} = 27\text{mm}$
鉄板層厚 $0.4\text{mm} \times 29\text{層} = 11.7\text{mm}$

図2-3 積層ゴムの仕様



※ $\phi 22\text{mm}, \phi 24\text{mm}$ も棒径以外は同寸法

図2-4 鋼棒ダンパー

設計用入力地震動と試験用 S_2^* の比較図 2-5 (1) S_2^* 波の加速度及び応答スペクトル

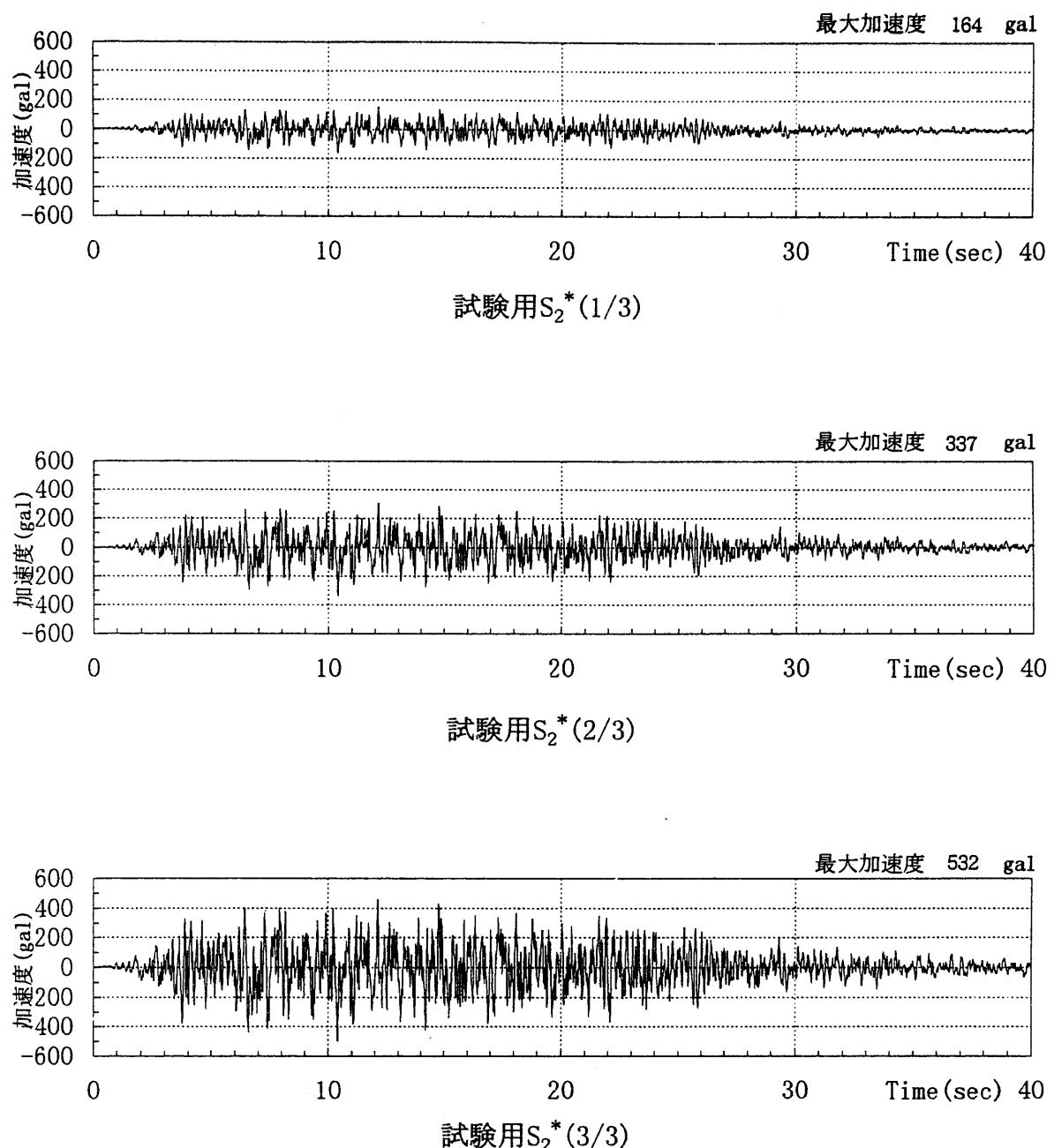
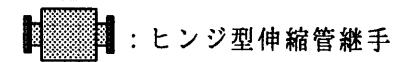
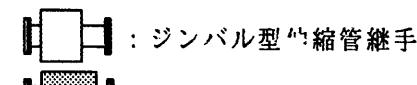


図 2-5 (2) 試験用 S_2^* 波の入力レベル (1/3, 2/3, 3/3 S_2^*)

凡例



配管径 : 150 A

● : 加速度計 (AC0 ~ AC10)

→ : 変位計 (D1 ~ D6)

■ : 歪ゲージ (S1 ~ S15)

△ : 内圧 (P1)

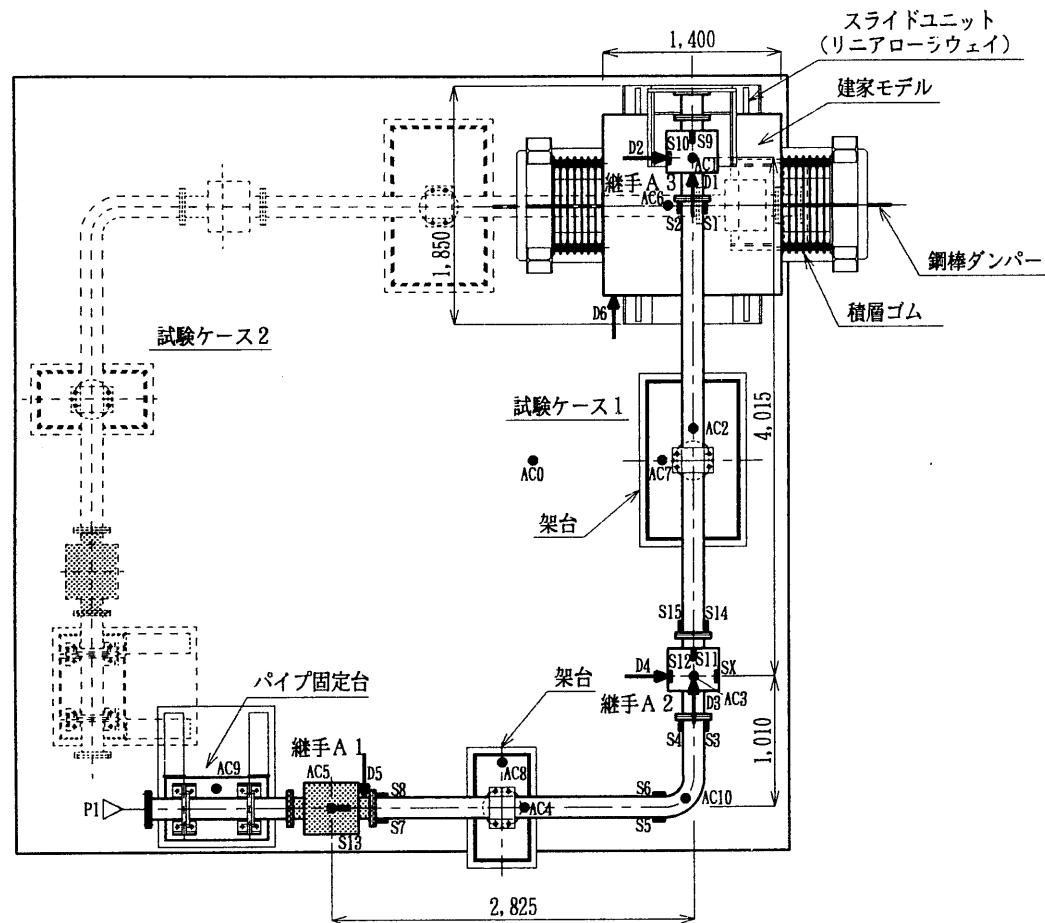
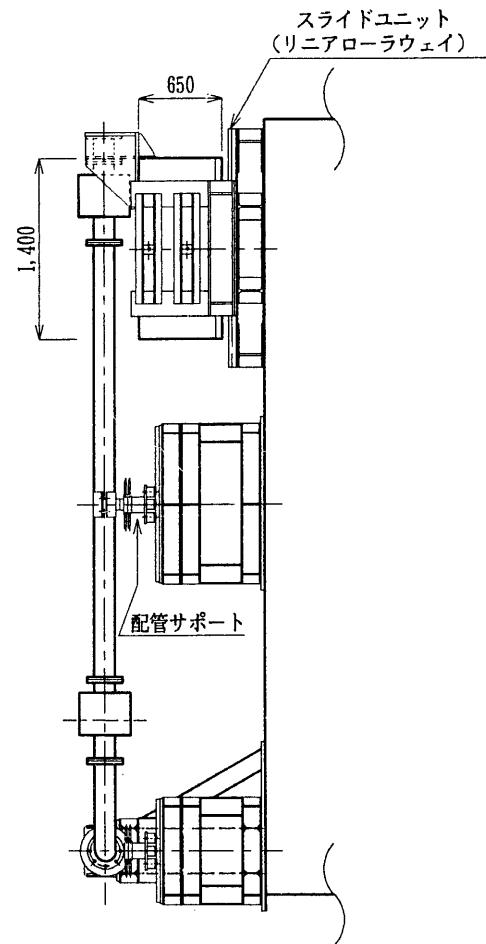
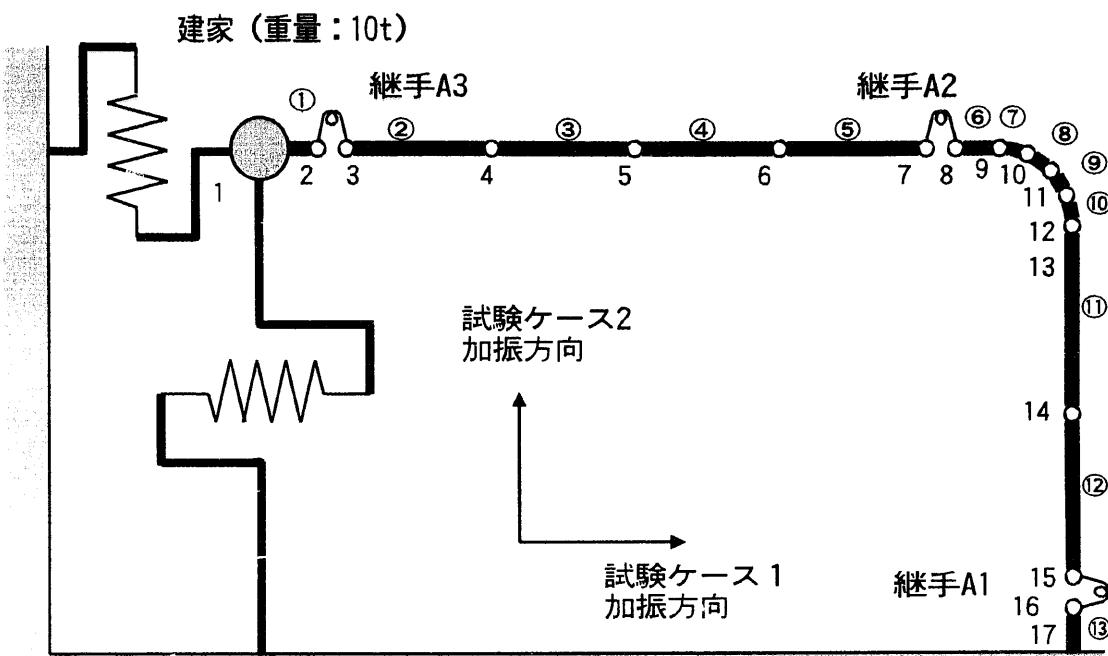
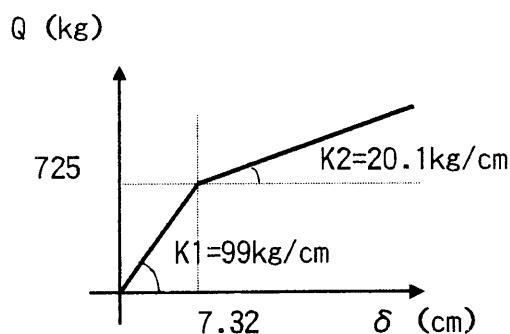


図2-6 計測点一覧



使用材料 : SGP
 配管径、肉厚 : $\Phi 150$ $t=5\text{mm}$
 縦弾性係数 : 21000kg/mm^2
配管重量
 (満水時) : 38.7kg/m
継手重量 A1 : 86kg
 A2 : 112kg
 A3 : 86kg
継手剛性 A1 : $1050\text{kg} \cdot \text{cm/deg}$
 A2 : $880\text{kg} \cdot \text{cm/deg}$
 A3 : $1260\text{kg} \cdot \text{cm/deg}$

地震応答解析モデル



建家の復元力特性

図2-7 シミュレーション解析モデル

参考文献

- (1) Experimental and analytical study on cross-over piping system in seismic isolation FBR PLANT, (I) MAIN STEAM PIPING, 12th SMiRT K19/6, (1993)
- (2) Experimental and analytical study on cross-over piping system in seismic isolation FBR PLANT, (II) CCWS-SEA WATER PIPING, 12th SMiRT K19/7, (1993)
- (3) 免震構法第二期共同研究（その3）最終報告書

3. 試験結果

3.1 振動特性試験

(1) 試験ケース 1

① 建家系（ランダム波加振試験）

図3-1～図3-3に建家モデルの最大応答変位が約100mm, 200mm, 300mm前後の振動台上の加速度と建家モデルの応答変位の時刻歴曲線を示す。また、図3-4に伝達関数及び建家モデルの変位と加速度の履歴曲線を示す。

建家モデルの加速度は、質量を乗じることにより力に変換できるため、建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線は、変位と抵抗力の履歴曲線と等価となる。

図中には建家モデルの静的加力試験の結果から想定した復元力特性（降伏変位 $\delta_y = 7.32\text{cm}$, 初期剛性 $K_1 = 99\text{kgf/cm}$, 2次剛性 $K_2 = 20.1\text{kgf/cm}$ ）を示す。

表3-1に建家モデルの固有振動数及び減衰比を示す。

表3-1 固有振動数及び減衰比

最大応答変位 (mm)	固有振動数 (Hz)	減衰比
83	0.648	0.479
173	0.586	0.747
312	0.488	0.785

これらから、最大応答変位が大きくなるにつれ、等価剛性が下がり、固有振動数が下がる。また、最大応答変位が大きくなるにつれ、鋼棒ダンパーの消散エネルギーが増加するため、減衰比が大きくなることが認められた。

履歴曲線より、建家モデルは、鋼棒ダンパーにより良好にエネルギーが消散されており想定した復元力特性とほぼ一致していることが認められた。

② 配管系（正弦波掃引試験）

図3-5～図3-7にX, Y, Z方向の各々の1次振動モードを示す。

継手部に変位がおきることが確認できる。

図3-8～図3-14にX, Y, Z方向の各々の加振時の伝達関数を示す。

これらから、配管の固有振動数は、10Hz以上にあることが認められた。

地震加振中の試験体の挙動を決定する建家モデルの固有振動数が1Hz以下であることから、加振中の配管は、自らの振動特性により挙動することなく、疑似静的な挙動を示

すことが認められる。

③ 全体系（ランダム波加振試験）

図3-15～図3-17に建家モデルの最大応答変位が約50mm, 100mm, 200mm前後の振動台上の加速度及び建家モデルの応答変位の時刻歴曲線を示す。また、図3-18に伝達関数及び建家モデルの変位と加速度の履歴曲線を示す。

図中には建家モデルの静的加力試験の結果から想定した復元力特性（降伏変位 $\delta_y = 7.32\text{cm}$, 初期剛性 $K_1 = 99\text{kgf/cm}$, 2次剛性 $K_2 = 20.1\text{kgf/cm}$ ）を示す。

履歴曲線より、建家モデルは、鋼棒ダンパーにより良好にエネルギーが消散されており、想定した復元力特性とほぼ一致していることが認められる。

④ 全体系（正弦波掃引試験）

図3-19～図3-20に1次と2次の振動モードを示す。

継手部に変位がおきることが確認できる。

図3-21～図3-23に50gal, 70gal, 100gal加振時の伝達関数を示す。

配管系の固有振動数が20Hz以上あることが確認できる。

図3-24に加振時の建家モデルの伝達関数について、建家モデル固定時及び作動時の相違を示す。図中より、建家モデル固定時では、30Hzをピークとする振動系となっており、建家モデル作動時では、応答倍率が0であることから、絶対変位が0であることを示している。

図3-25に配管の伝達関数について、建家モデルの固定時及び作動時の相違を示す。図中より建家モデル固定時の配管は、建家モデルの応答を強く受けるため、応答が大きくなる。また、建家モデル作動時には建家モデルが空中静止していることとなり、境界条件としては、固定に近づくため、配管の固有振動数も高くなっている。

(2) 試験ケース2

① 配管系（正弦波掃引試験）

図3-26～図3-27にX方向, Y方向、各々の1次モードを示す。

継手部に変位がおきることが認められる。

図3-28～図3-31に伝達関数を示す。図中の1次固有振動数は、約8Hzにあることが認められる。

試験体の挙動は、継手A2から建家モデル方向にかけては、建家モデルが支配する1Hz以下の疑似静的な挙動を示し、継手A2から固定部方向にかけては、配管の1次固有

振動数である約 8 Hz の成分で挙動することが認められる。

② 全体系（ランダム波加振試験）

図 3-32～図 3-34 に建家モデルの最大応答変位が約 100mm, 150mm, 300mm 前後の振動台上の加速度及び建家モデルの応答変位の時刻歴曲線を示す。また、図 3-35 に伝達関数及び建家モデルの変位と加速度の履歴曲線を示す。

図中には建家モデルの静的加力試験の結果から想定した復元力特性（降伏変位 $\delta_c = 7.32\text{cm}$, 初期剛性 $K_1 = 99\text{kgf/cm}$, 2 次剛性 $K_2 = 20.1\text{kgf/cm}$ ）を示す。

履歴曲線より、建家モデルは、鋼棒ダンパーにより良好にエネルギーが消散されており、想定した復元力特性とほぼ一致していることが認められる。

③ 全体系（正弦波掃引試験）

図 3-36 に 1 次モードを示す。

継手部に変位がおきることが認められる。

図 3-37 に加振時の建家モデルの伝達関数について、建家モデル固定時及び作動時の相違を示す。図中より、建家モデル固定時では、30Hz をピークとする振動系となっており、建家モデル作動時では、応答倍率が 0 であることから、絶対変位が 0 であることを示している。

図 3-38 に配管の伝達関数について、建家モデルの固定時及び作動時の相違を示す。図中より建家モデル固定時の配管は、建家モデルの応答を強く受けるため、応答が大きくなる。また、建家モデル作動時には建家モデルが空中静止している状態となり、境界条件としては、固定に近づくため、配管の固有振動数も高くなっている。

今回の試験ケース 2 では、1 次固有振動は 8 Hz であり、試験ケース 1 の固有振動数 10 Hz に対して 2 Hz 程度小さい。これは、試験ケース 2 の建家モデルの可動方向が振動しやすい方向にあり、固定度が弱くなっているためと考えられる。

3.2 地震応答試験

(1) 試験ケース 1

① 最大値リスト（代表測定点）

表 3-2 に代表測定点の最大値リストを示す。

S_2 * 地震下 (1/3, 2/3, 3/3) での配管の応力は、配管の許容応力 (26.6kg/mm^2) に対し、曲管部でも 2.0kg/mm^2 以下であり、十分小さい応力となっている。また、伸縮管

継手アーム部の応力は、 2.0kg/mm^2 以下であり、アームの許容応力 (21.9kg/mm^2) より十分小さい。

② 建家モデルの応答変化と応答加速度の履歴曲線

図 3-39に建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線を示す。

建家モデルの応答加速度は、質量を乗じることにより力に変換できるため、建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線は、変位と抵抗力の履歴曲線と等価となる。

履歴曲線図中には、建家モデルの静的加力試験の結果から想定したバイリニア型の復元力特性（降伏変位 $\delta_y = 7.32\text{cm}$ 、初期剛性 $K_1 = 99\text{kgf/cm}$ 、2次剛性 $K_2 = 20.1\text{kgf/cm}$ ）を示している。

$1/3 S_2^*$ 波では想定している復元力特性より小さいが、 $2/3 S_2^*$ 、 $3/3 S_2^*$ 波では想定している復元力特性とほぼ一致している。

(2) 試験ケース 2

① 最大値リスト（代表測定点）

表 3-3 に代表測定点の最大値リストを示す。

S_2^* 地震下 ($1/3, 2/3, 3/3$)での配管の応力は、配管の許容応力 (26.6kg/mm^2)に対し、曲管部でも 5.5kg/mm^2 以下であり、十分小さい応力となっている。また、伸縮管継手アーム部の応力は、 3.8kg/mm^2 以下であり、アームの許容応力 (21.9kg/mm^2) より十分小さい。

② 建家モデルの応答変化と応答加速度の履歴曲線

図 3-40に建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線を示す。

履歴曲線図中には、建家モデルの静的加力試験の結果から想定したバイリニア型の復元力特性（降伏変位 $\delta_y = 7.32\text{cm}$ 、初期剛性 $K_1 = 99\text{kgf/cm}$ 、2次剛性 $K_2 = 20.1\text{kgf/cm}$ ）を示している。

$1/3 S_2^*$ 波では想定している復元力特性より小さいが、 $2/3 S_2^*$ 、 $3/3 S_2^*$ 波では想定している復元力特性とほぼ一致している。

3.3 シミュレーション解析

(1) 試験ケース 1

図 3-41、図 3-42、図 3-43及び表 3-4 に $3/3 S_2^*$ 波加振試験結果とシミュレーション解析結果の比較を示す。

試験結果とシミュレーション解析結果は、よく一致しているが、AC3YとD4において解析結果のほうが小さい値を示している。これは、建家モデルの境界条件が異なる（解析の場合、加振方向の直角成分は、完全に拘束できるが、試験では、積層ゴムの軸方向の成分が出ているため、差異が生じる）ためである。しかし、両者の差は比較的小さく、配管系全体に与える影響は小さいと考える。

なお、配管系の減衰定数は、シミュレーション解析で4%である。

(2) 試験ケース2

図3-44、図3-45、図3-46及び表3-5に3/3S₂*波加振試験結果とシミュレーション解析結果の比較を示す。

試験結果とシミュレーション解析結果は、よく一致しているが、AC3XとD3において解析結果のほうが小さい値を示している。これは、上記同様建家モデルの境界条件が異なるためである。しかし、両者の差は比較的小さく、配管系全体に与える影響は小さいと考える。

なお、配管系の減衰定数は、シミュレーション解析で1%である。

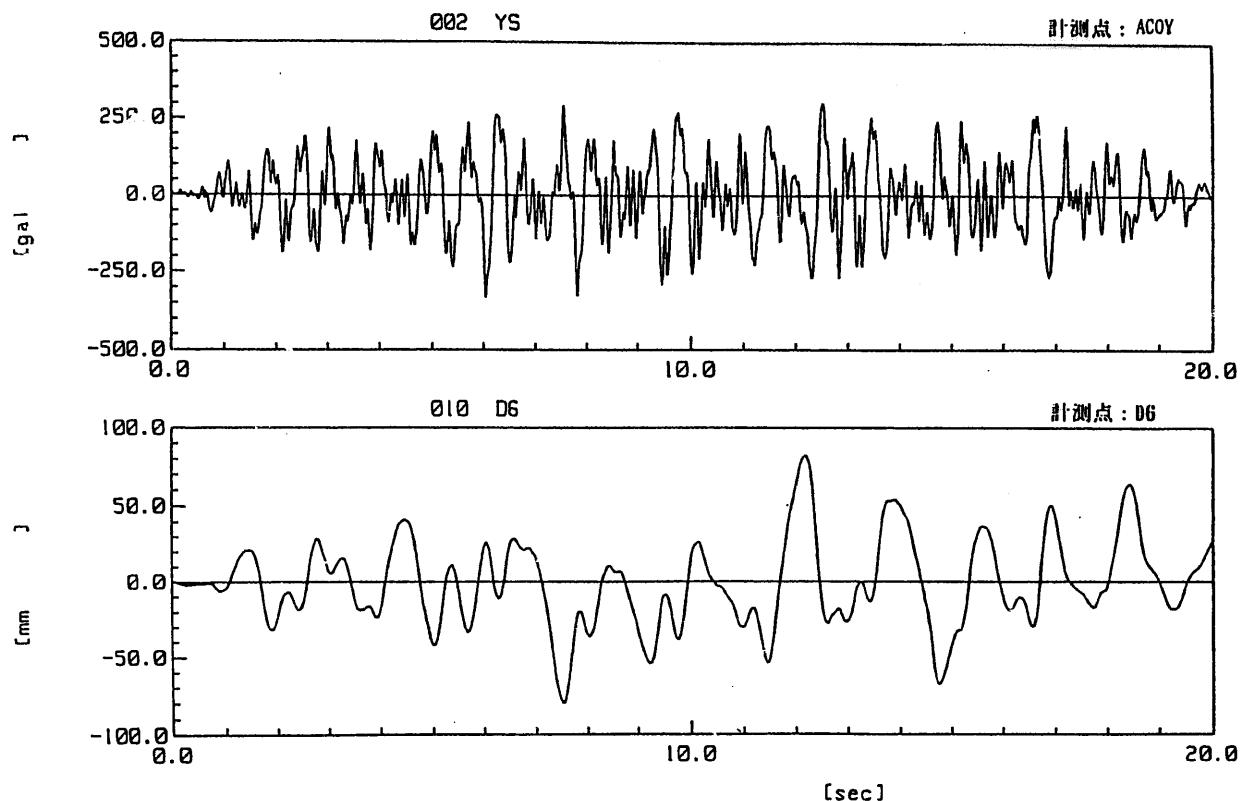


図3-1 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位83mm）
(建家モデル系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

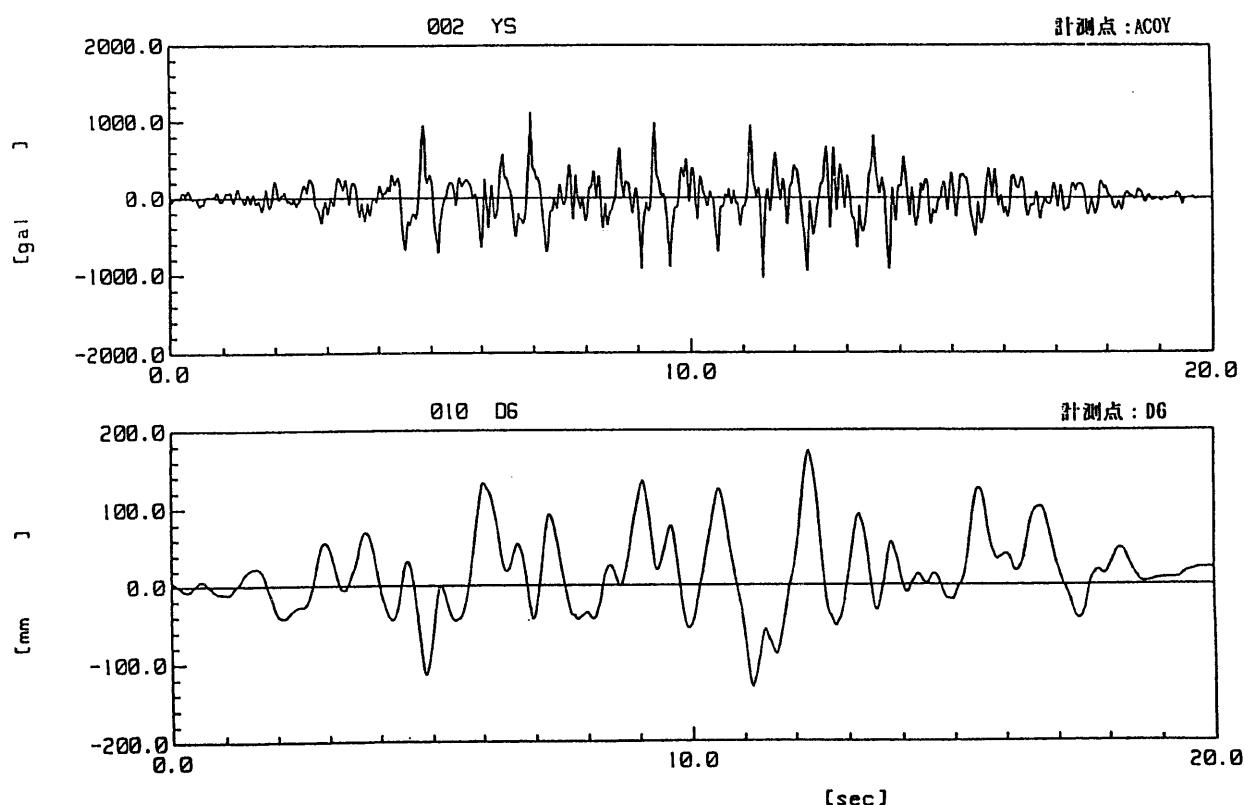


図3-2 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位173mm）
(建家モデル系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

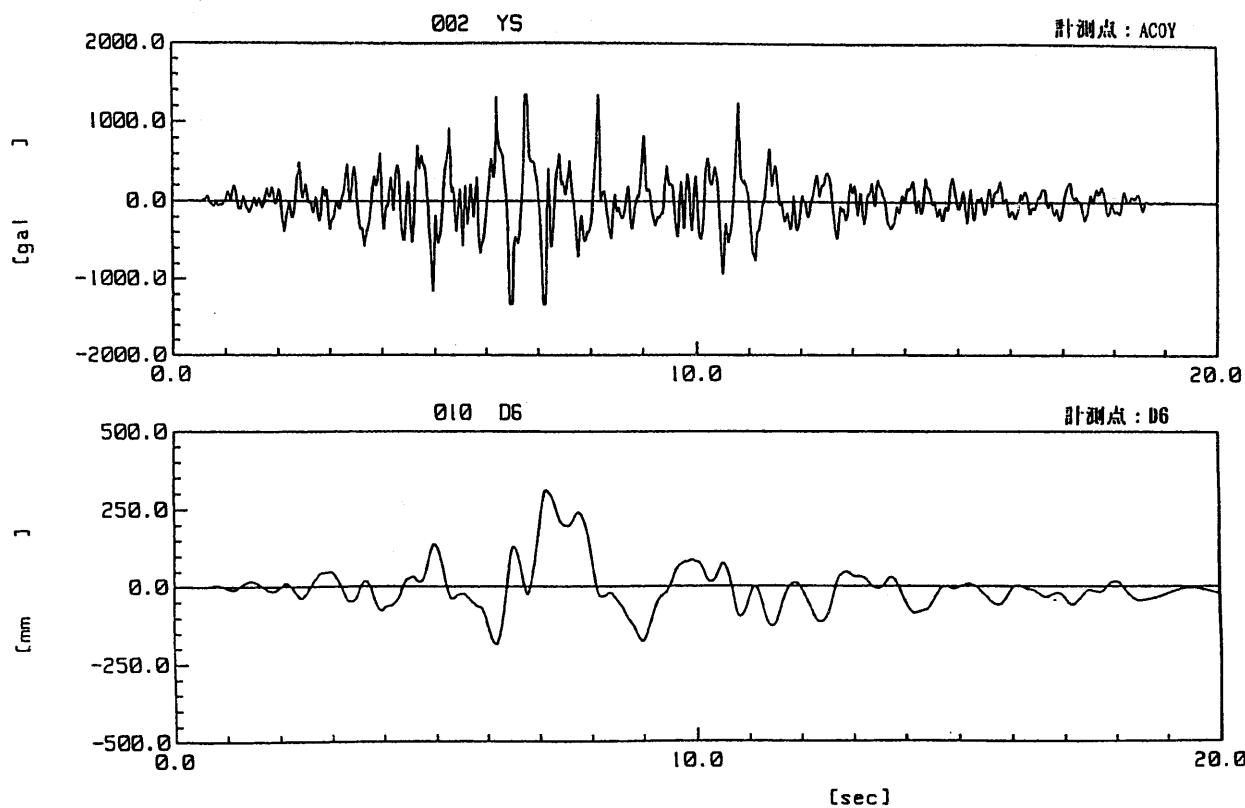


図3-3 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位312mm）
(建家モデル系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

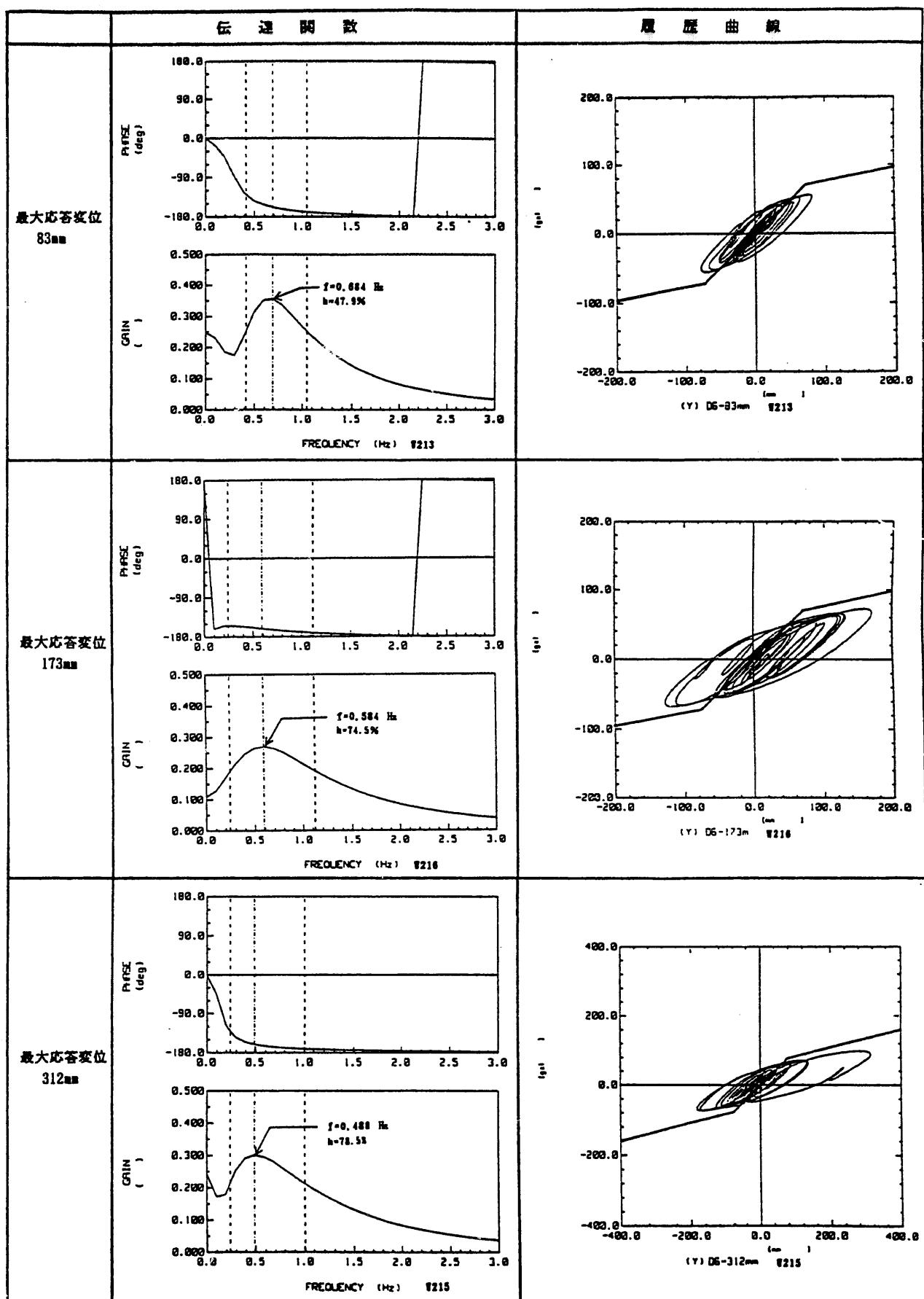


図 3-4 伝達関数と履歴曲線
(建家モデル系, 試験ケース 1, ランダム波加振試験)

建家モデル

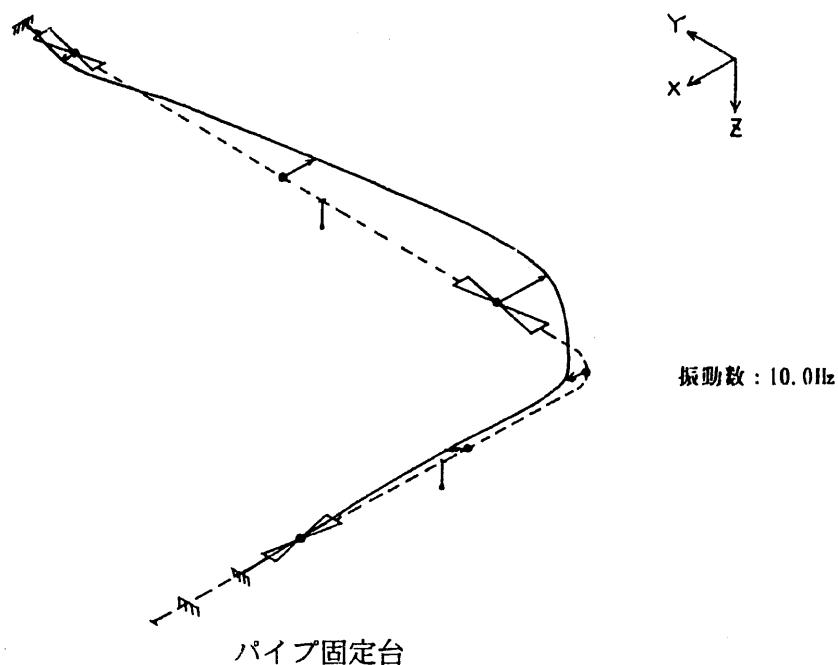


図3-5 振動モード(X方向, 1次モード, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

建家モデル

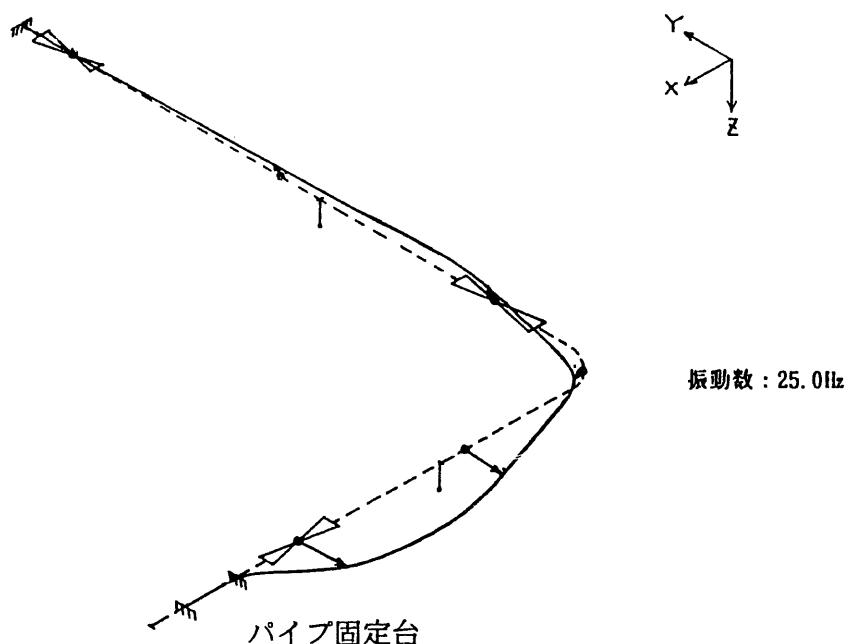


図3-6 振動モード(Y方向, 1次モード, 入力50gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

建家モデル

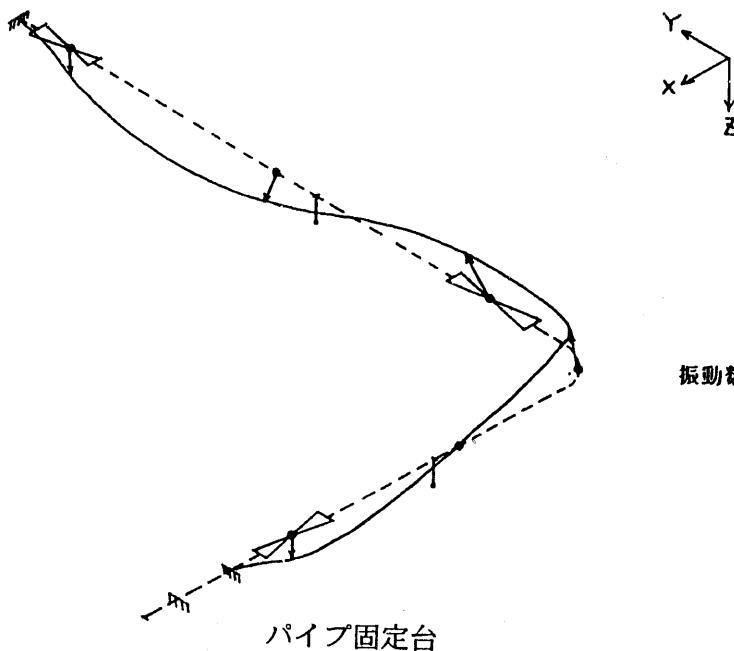


図3-7 振動モード (Z方向, 1次モード, 入力70gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

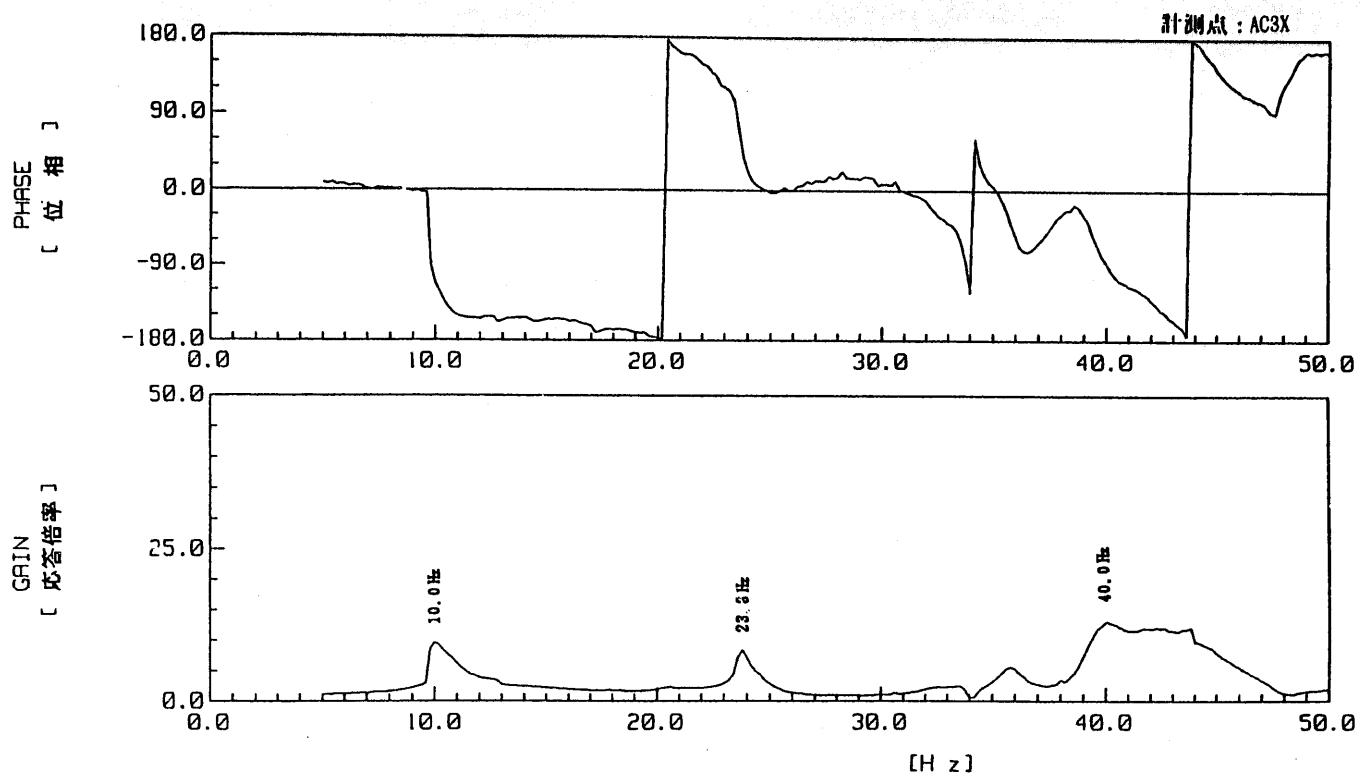


図3-8 伝達関数(X方向, 建家固定, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

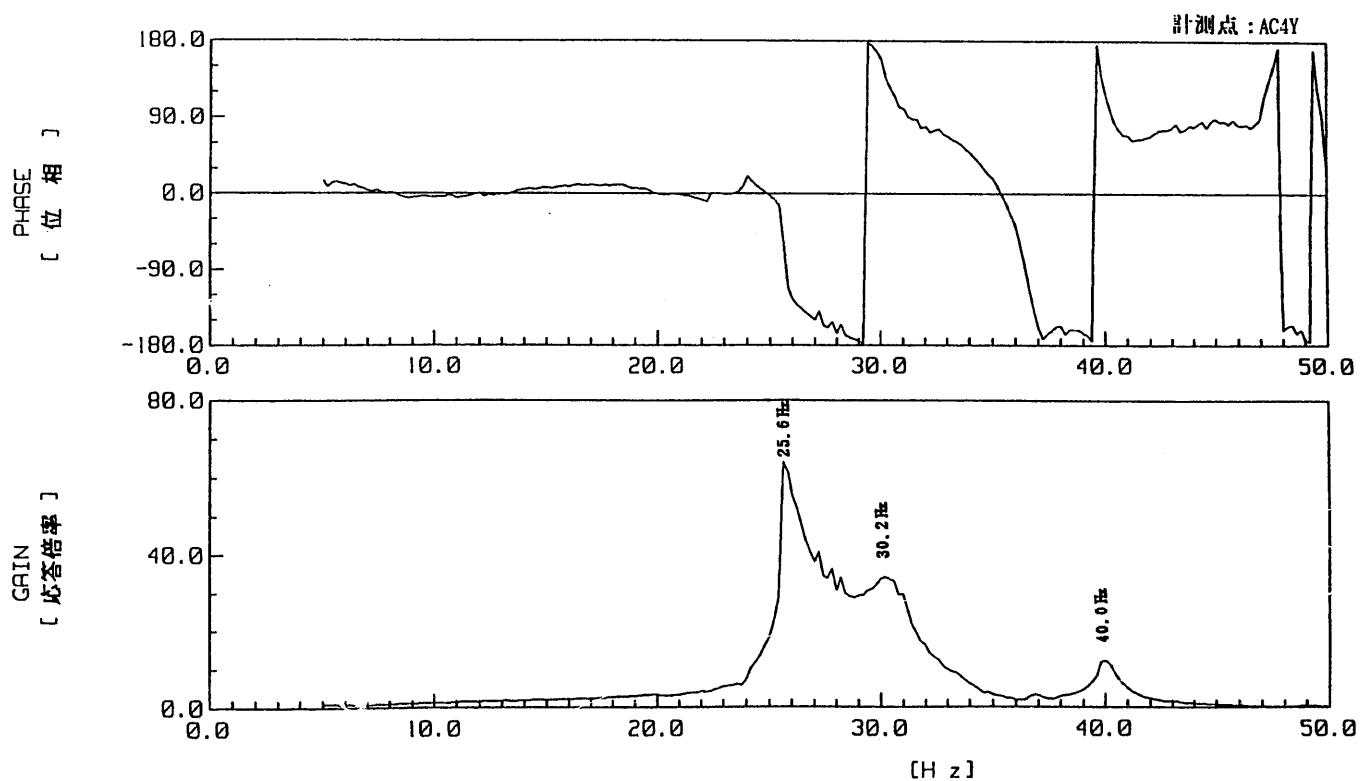


図3-9 伝達関数(Y方向, 建家固定, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

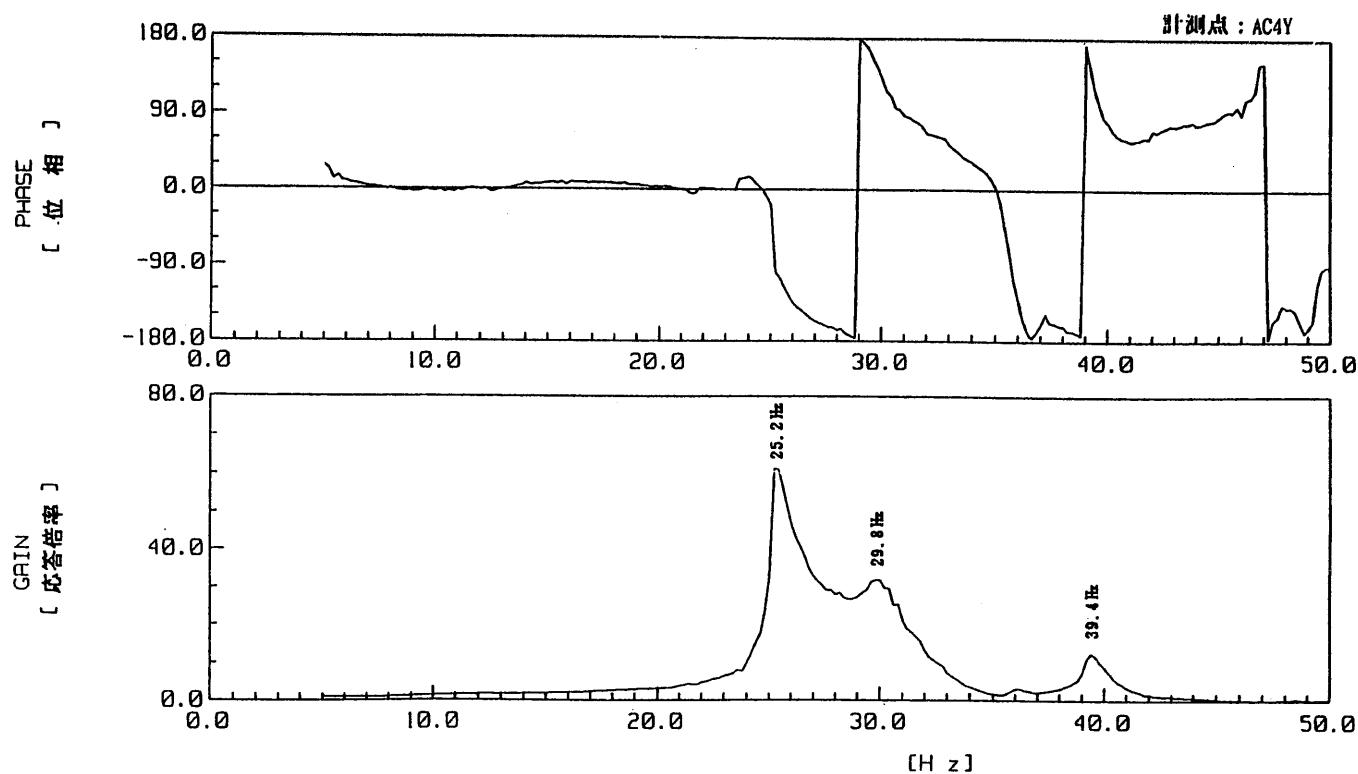


図3-10 伝達関数（Y方向，建家固定，入力40gal）
(配管系，試験ケース1，正弦波掃引試験)

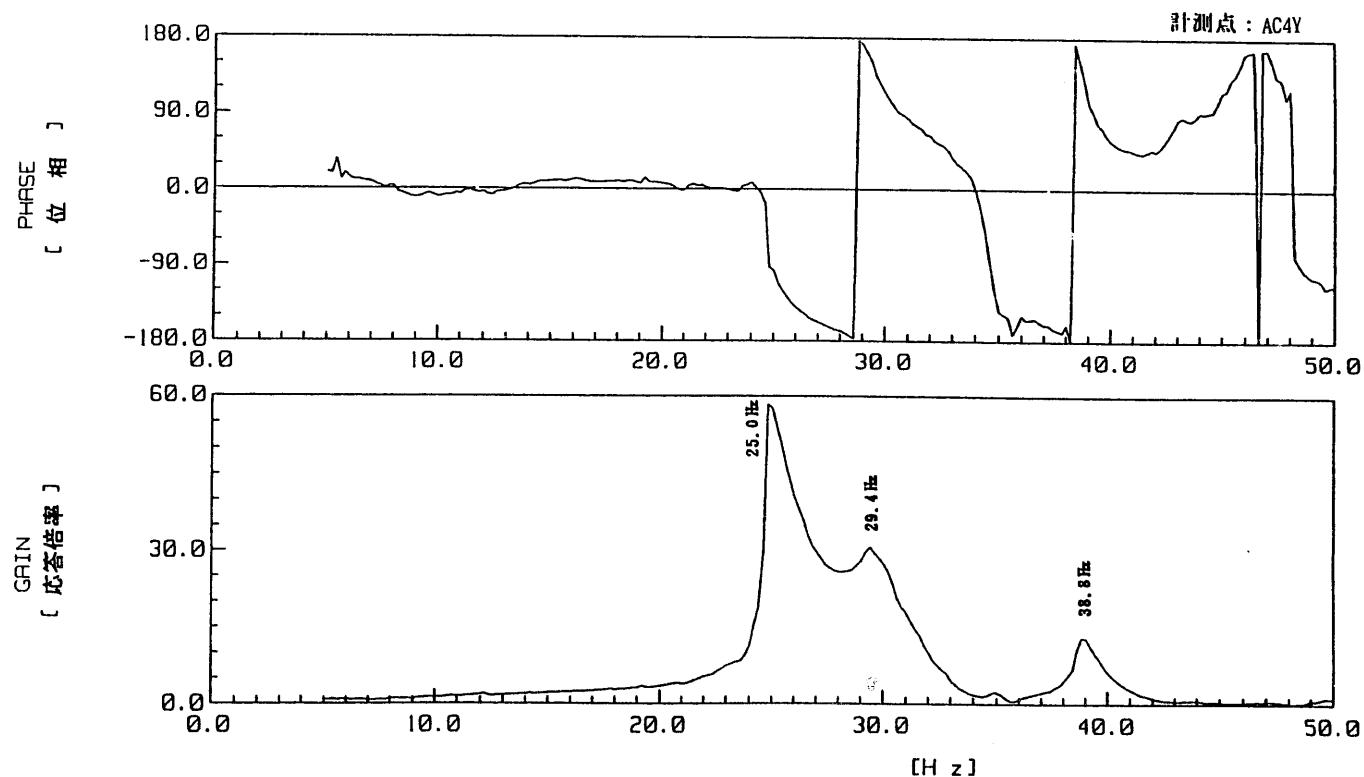


図3-11 伝達関数（Y方向，建家固定，入力50gal）
(配管系，試験ケース1，正弦波掃引試験)

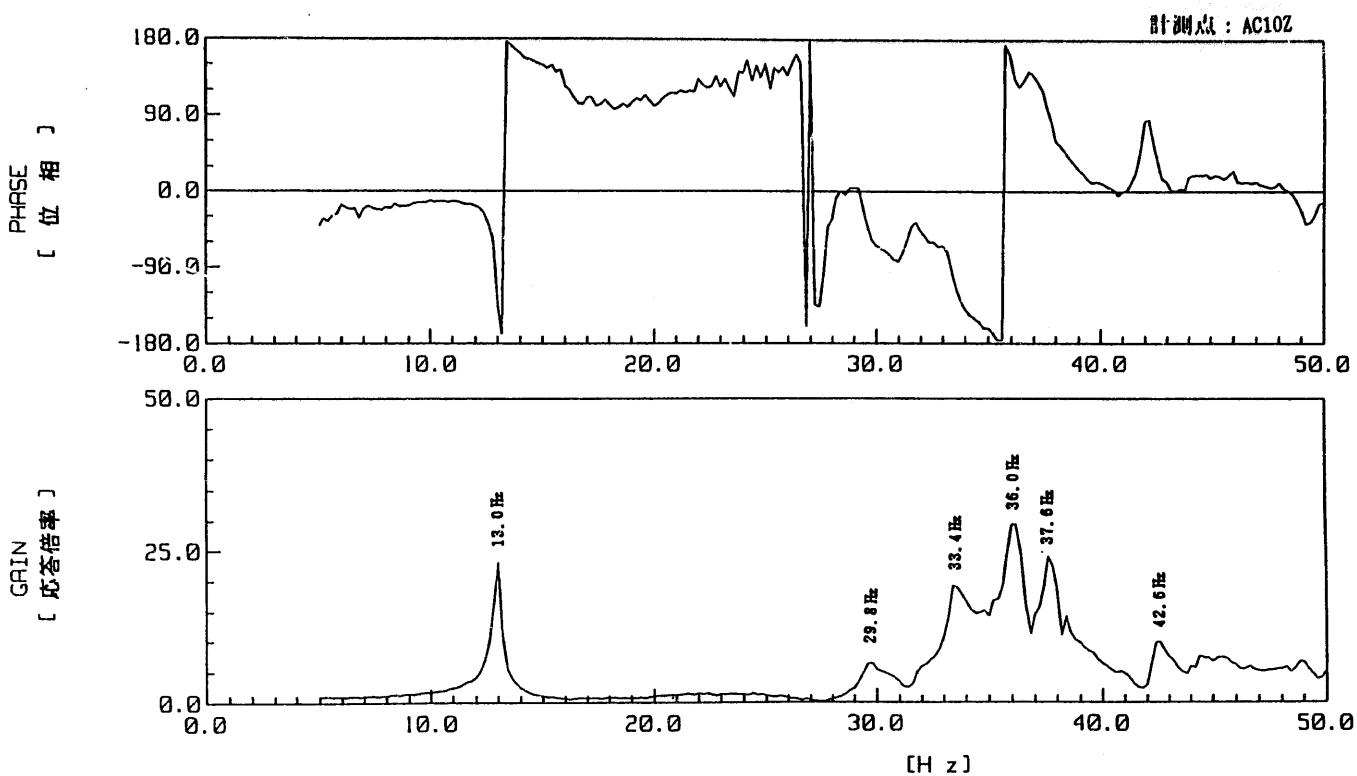


図3-12 伝達関数（Z方向，建家固定，入力10gal）
(配管系，試験ケース1，正弦波掃引試験)

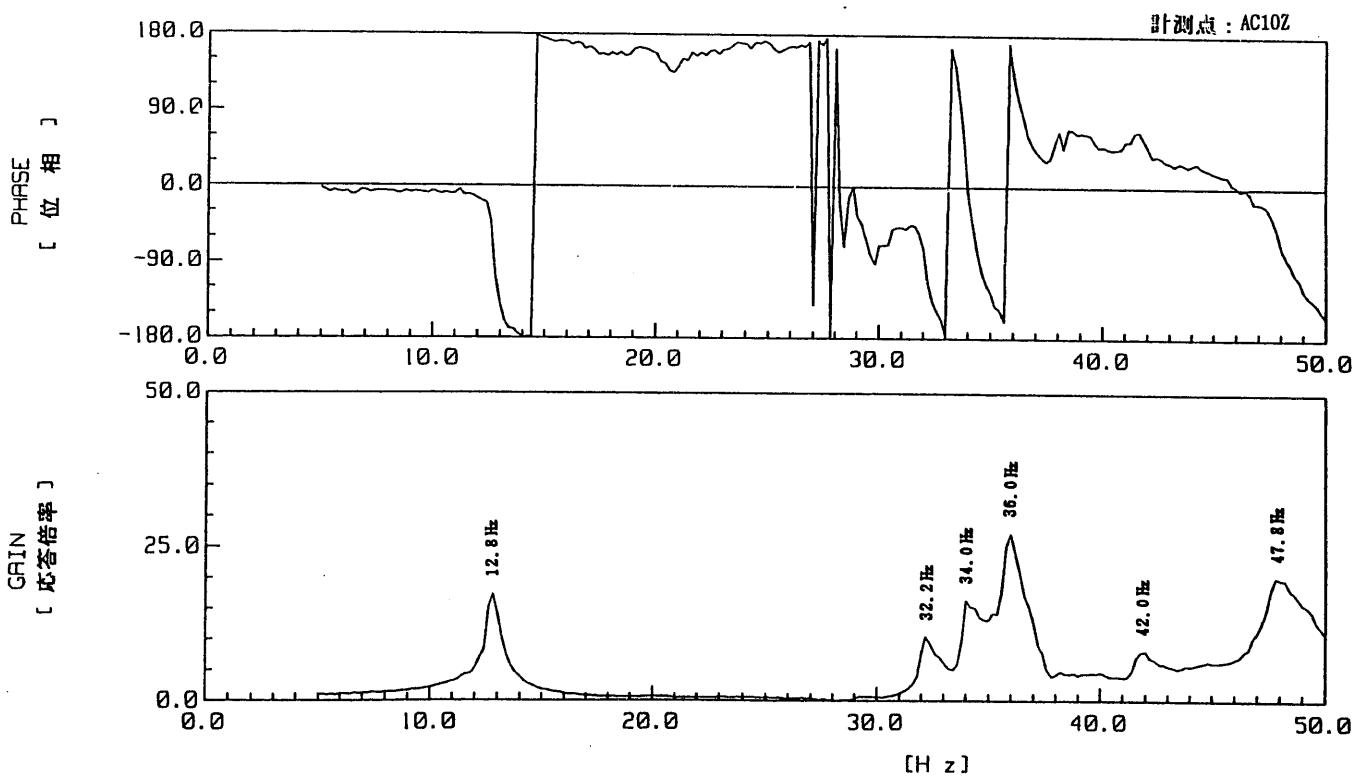


図3-13 伝達関数（Z方向，建家固定，入力20gal）
(配管系，試験ケース1，正弦波掃引試験)

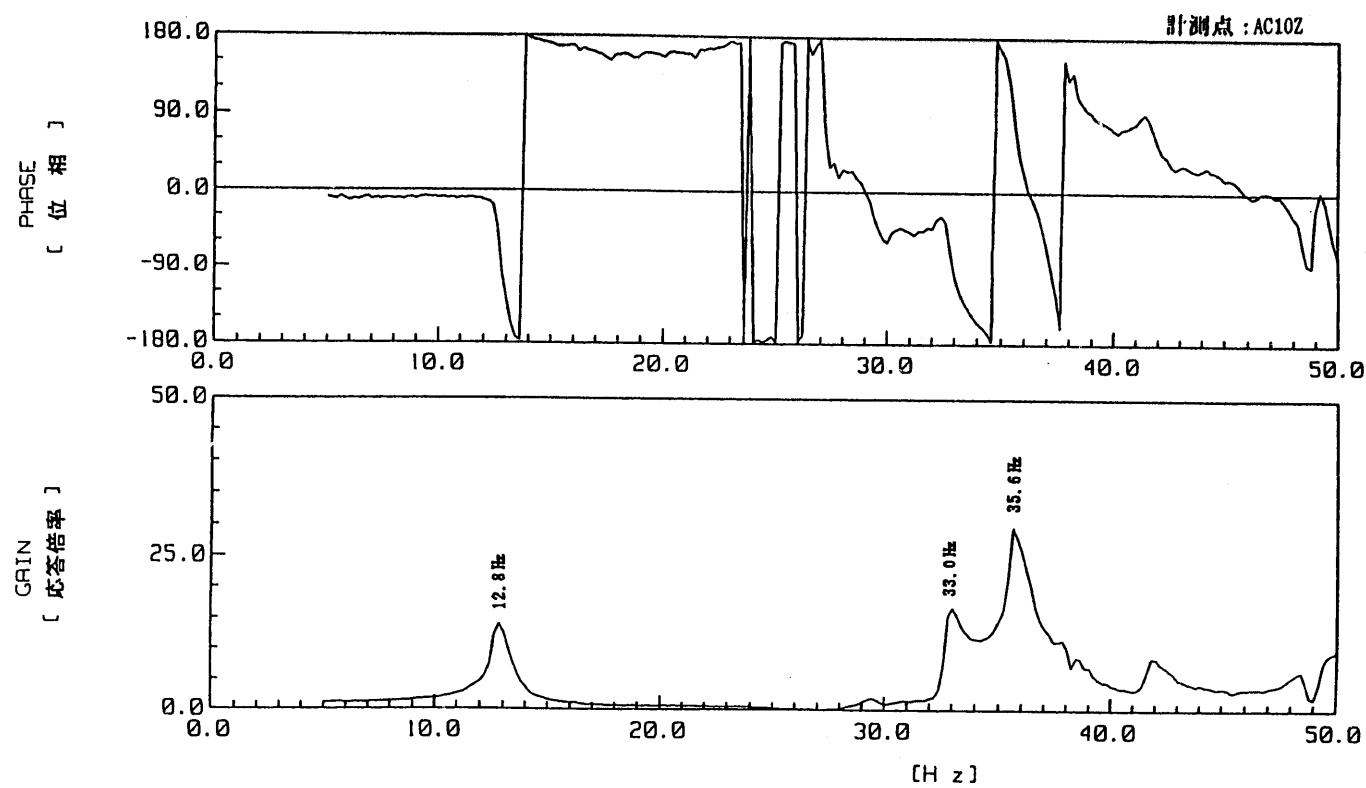


図3-14 伝達関数（Z方向, 建家固定, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

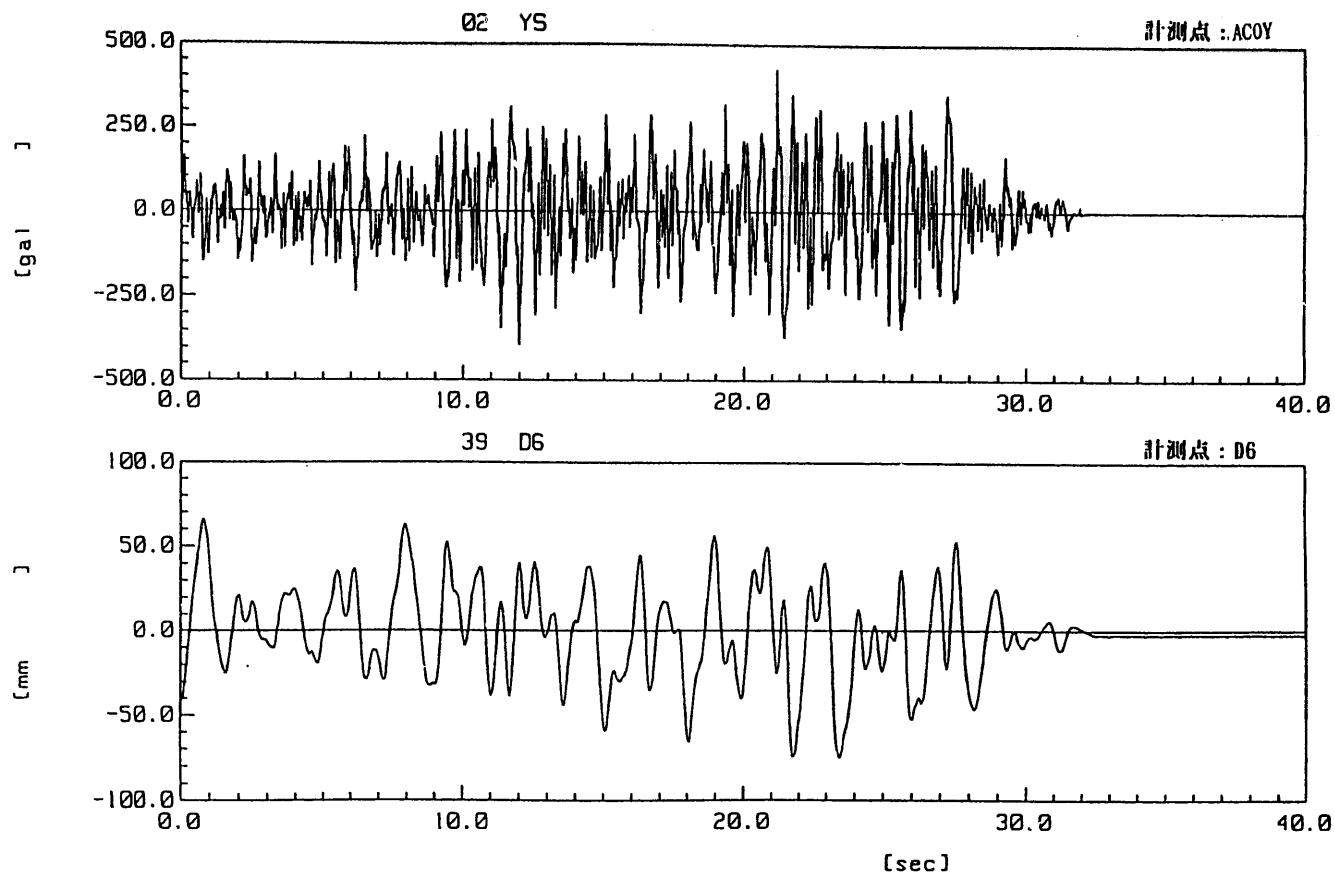


図3-15 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位75mm）
(全体系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

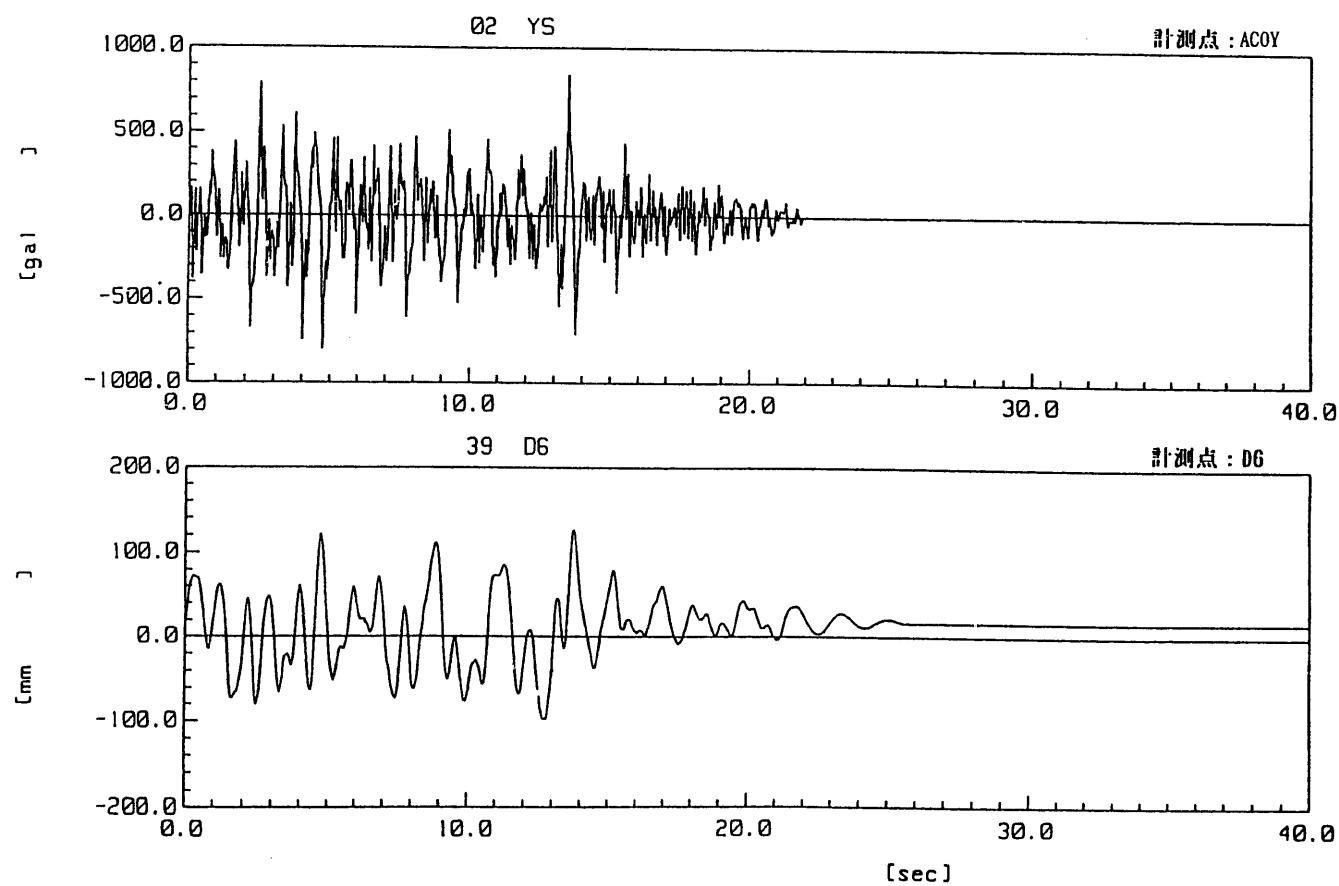


図3-16 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位125mm）
(全体系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

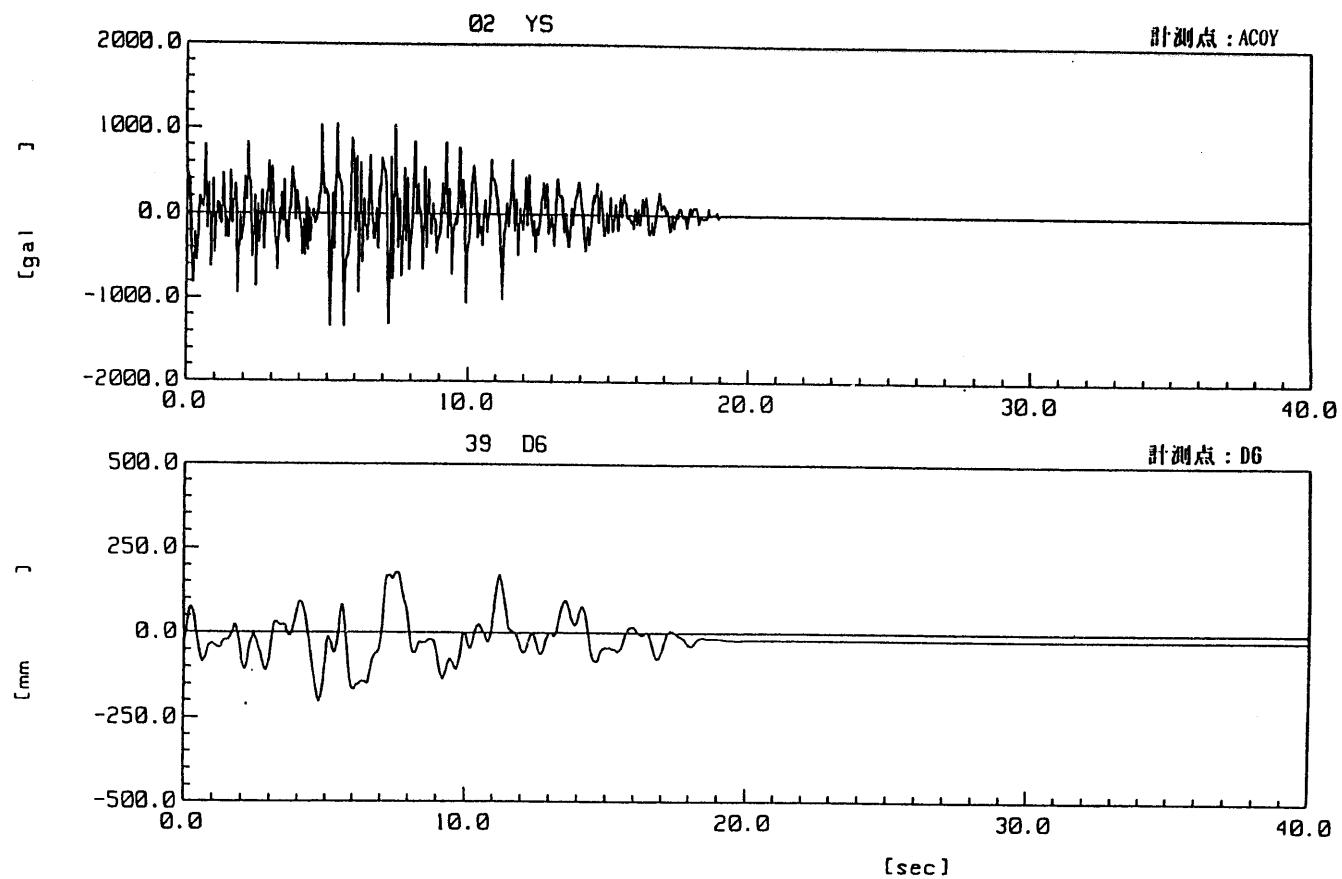


図 3-17 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位204mm）
(全体系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

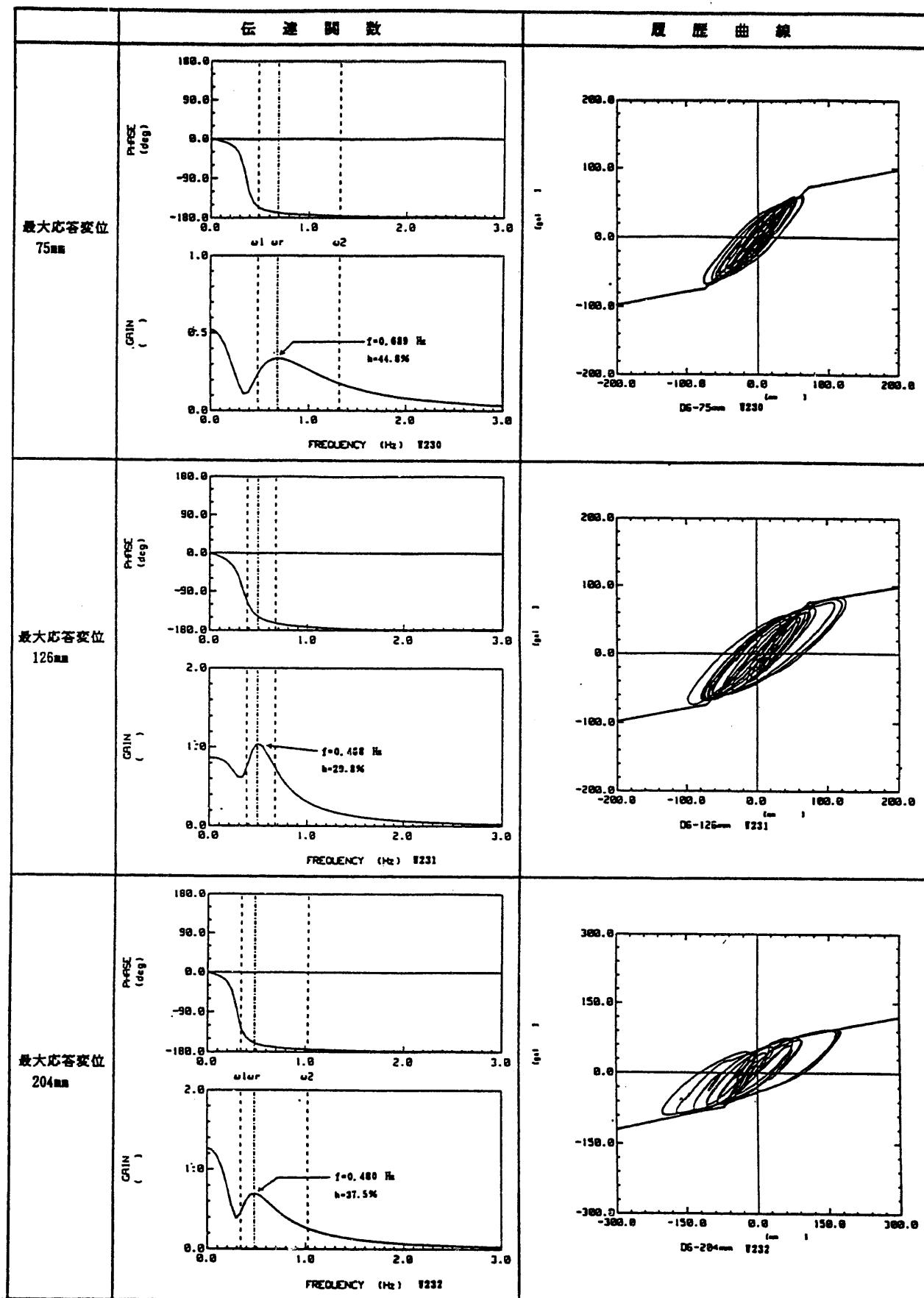
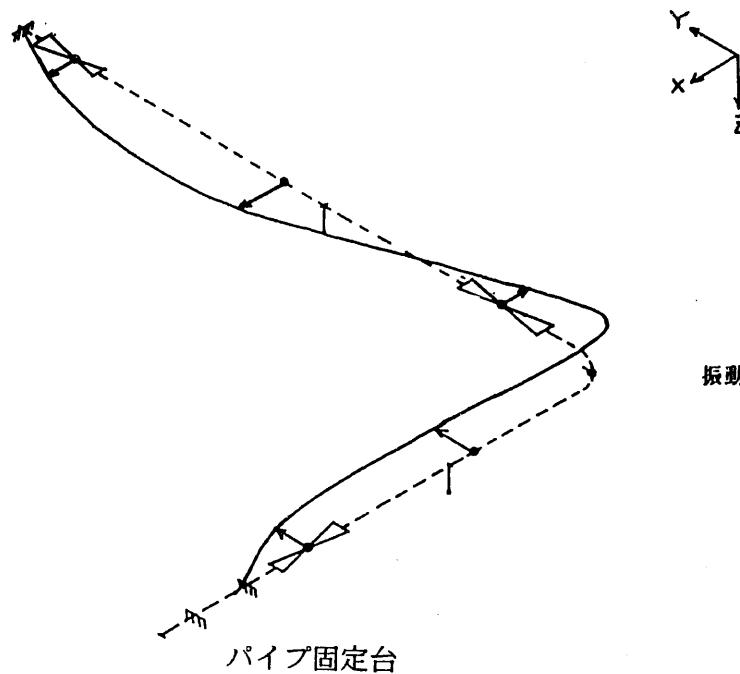


図3-18 伝達関数と履歴曲線
(全体系, 試験ケース1, ランダム波加振試験)

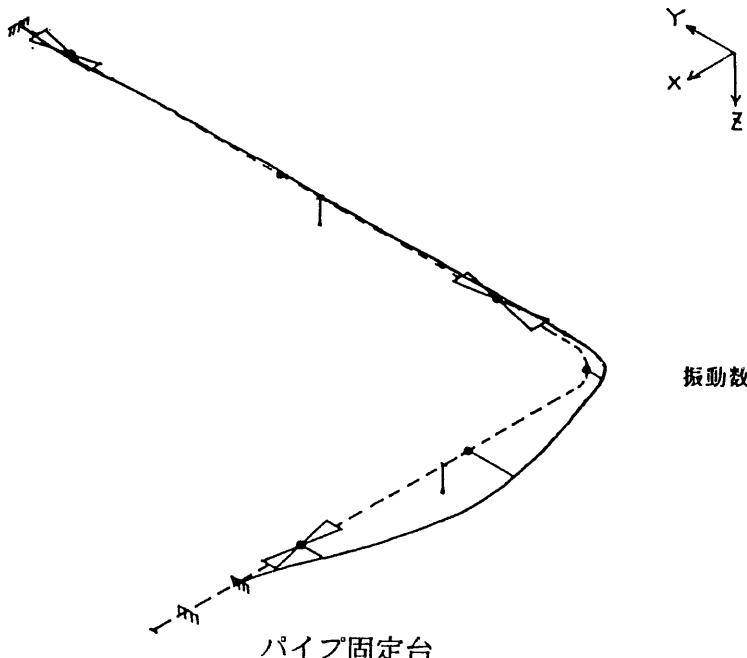
建家モデル



パイプ固定台

図3-19 振動モード(Y方向, 1次モード, 入力100gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

建家モデル



パイプ固定台

図3-20 振動モード(Y方向, 2次モード, 入力100gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

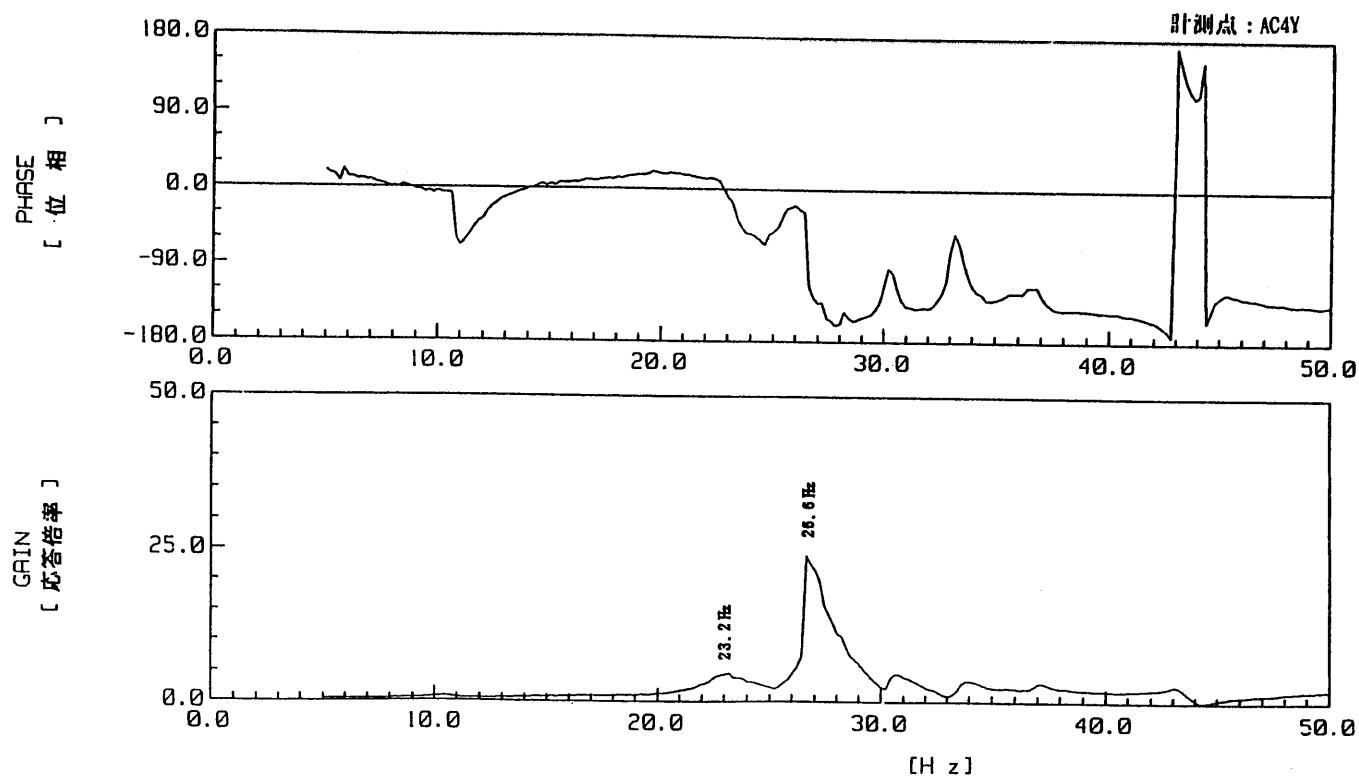


図3-21 伝達関数(Y方向, 入力50gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

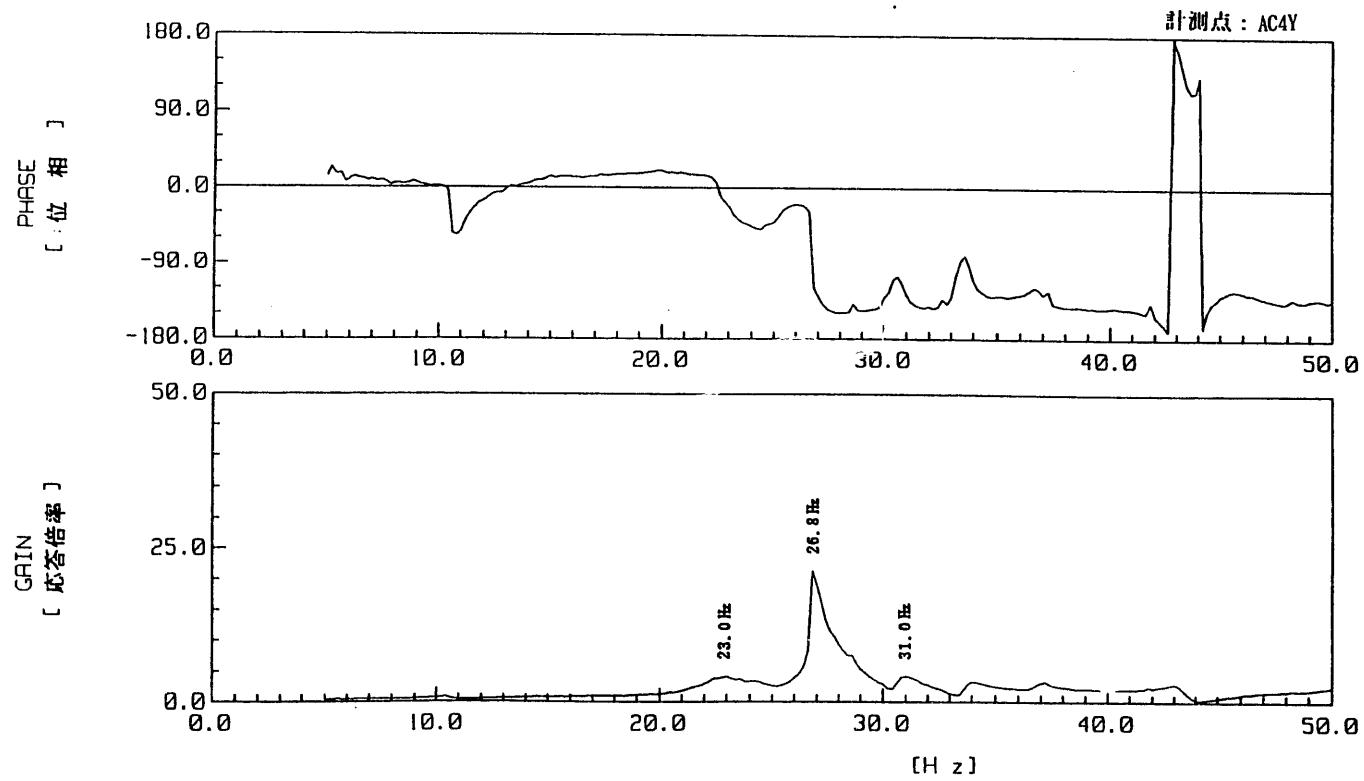


図3-22 伝達関数(Y方向, 入力70gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

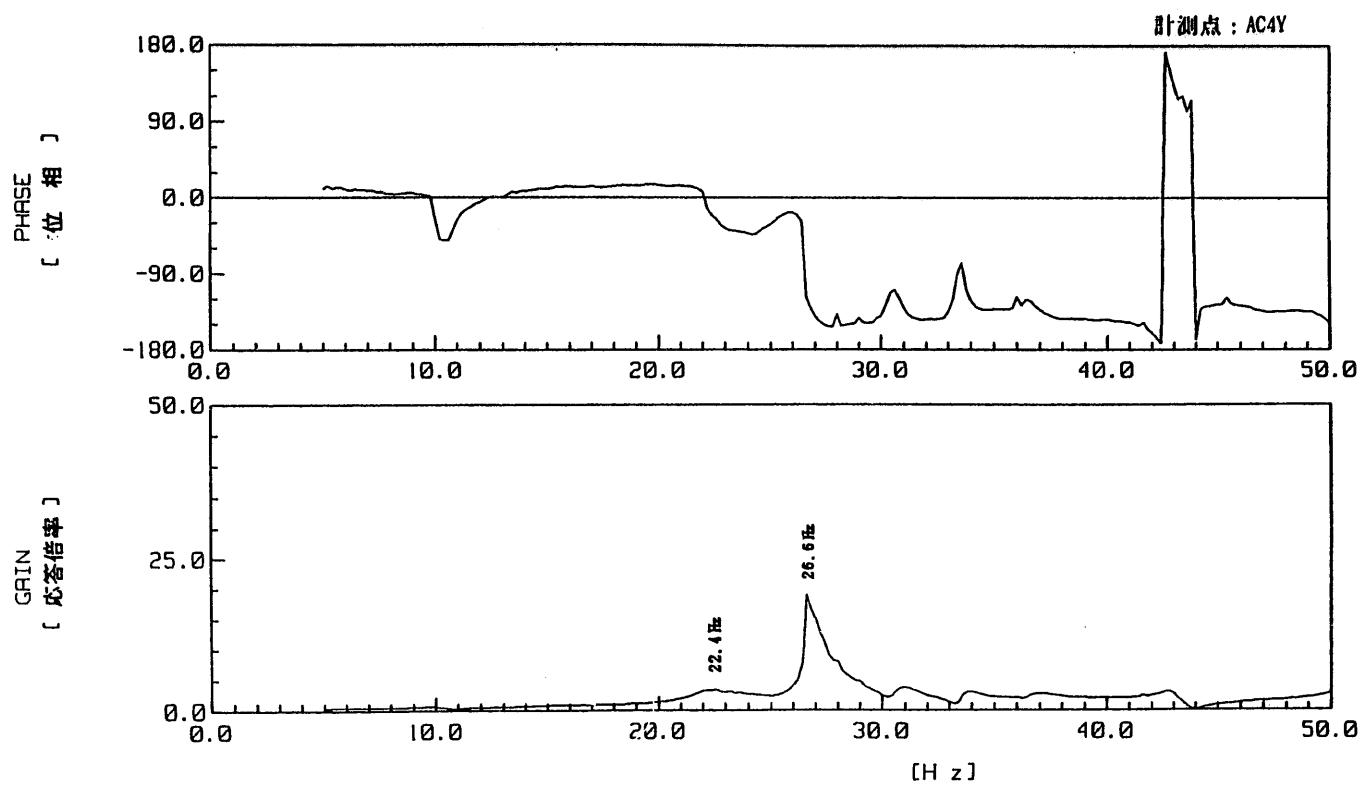


図 3-23 伝達関数 (Y方向, 入力100gal)
 (全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

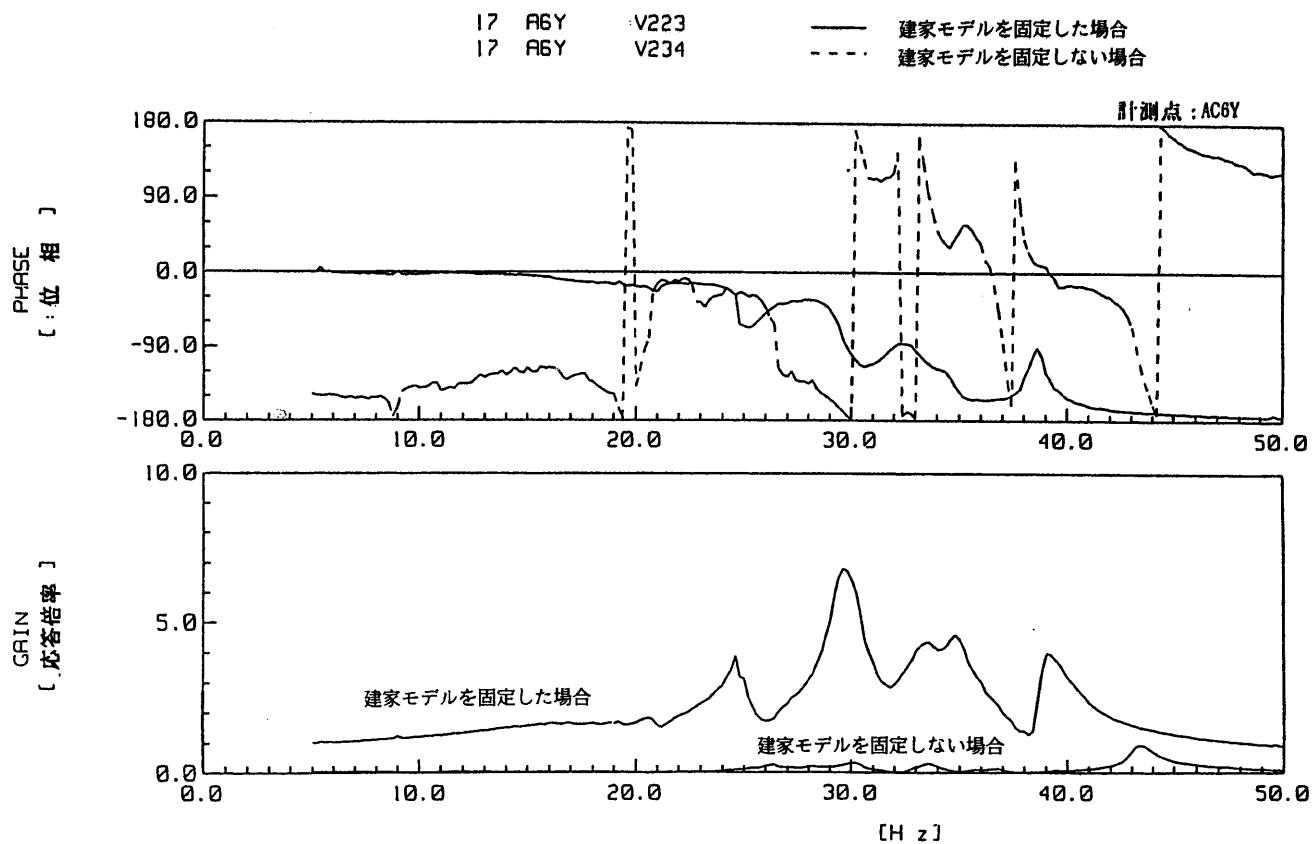


図3-24 建家モデルの伝達関数 (Y方向, 入力50gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

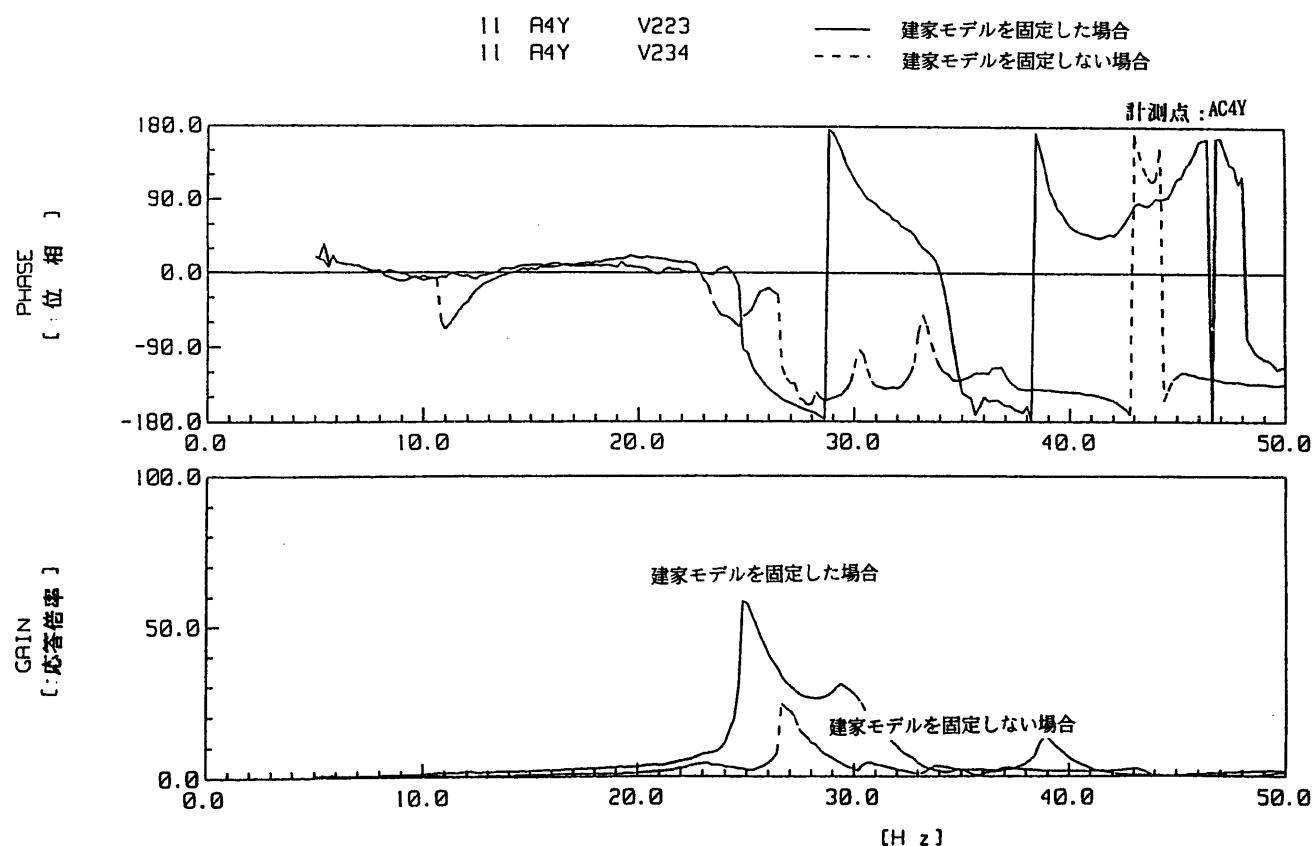


図3-25 配管の伝達関数 (Y方向, 入力50gal)
(全体系, 試験ケース1, 正弦波掃引試験)

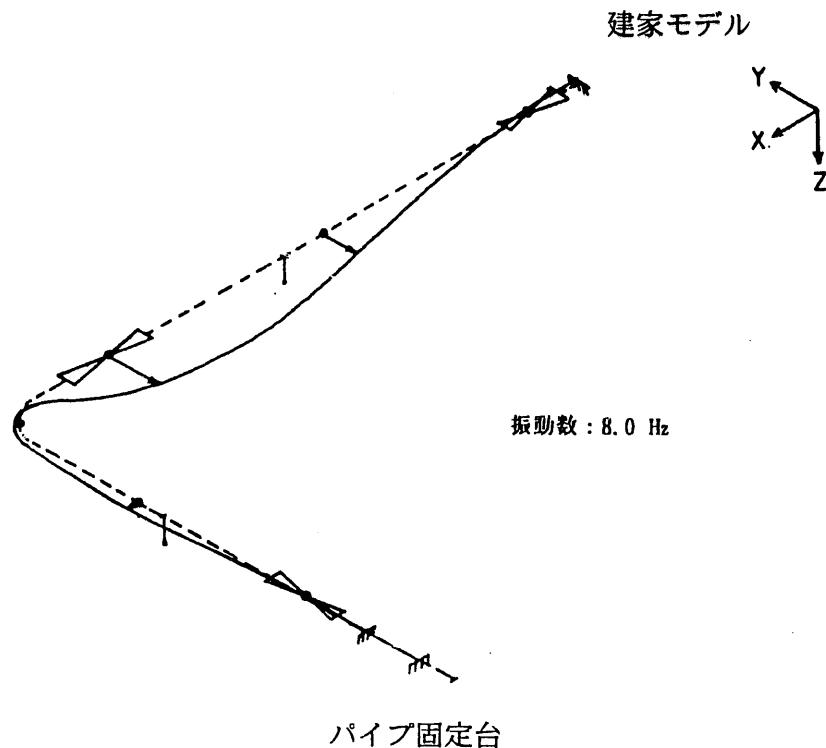


図3-26 振動モード（X方向，建家固定，1次モード，入力50gal）
(配管系，試験ケース2，正弦波掃引試験)

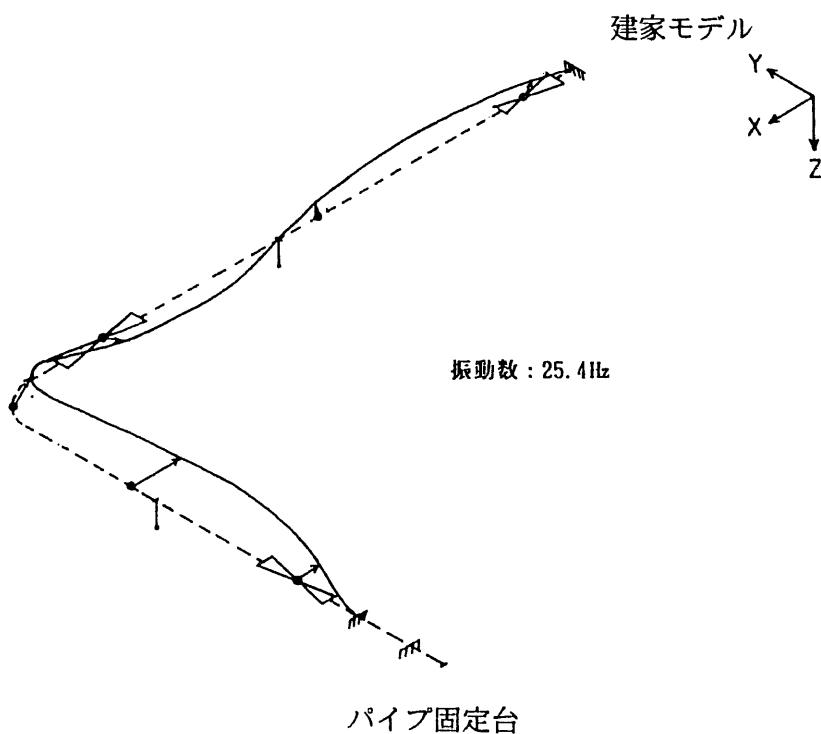


図3-27 振動モード（Y方向，建家固定，1次モード，入力30gal）
(配管系，試験ケース2，正弦波掃引試験)

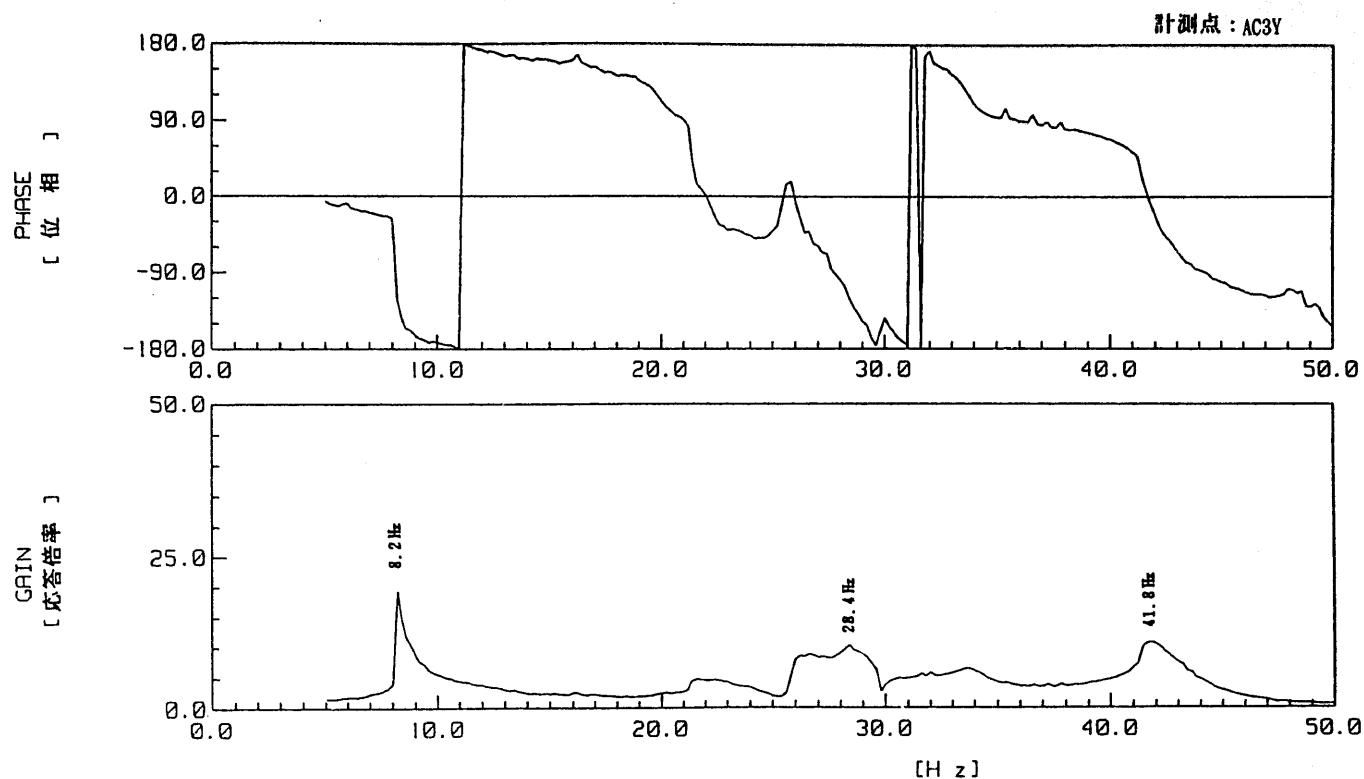


図 3-28 伝達関数 (X 方向, 建家固定, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース 2, 正弦波掃引試験)

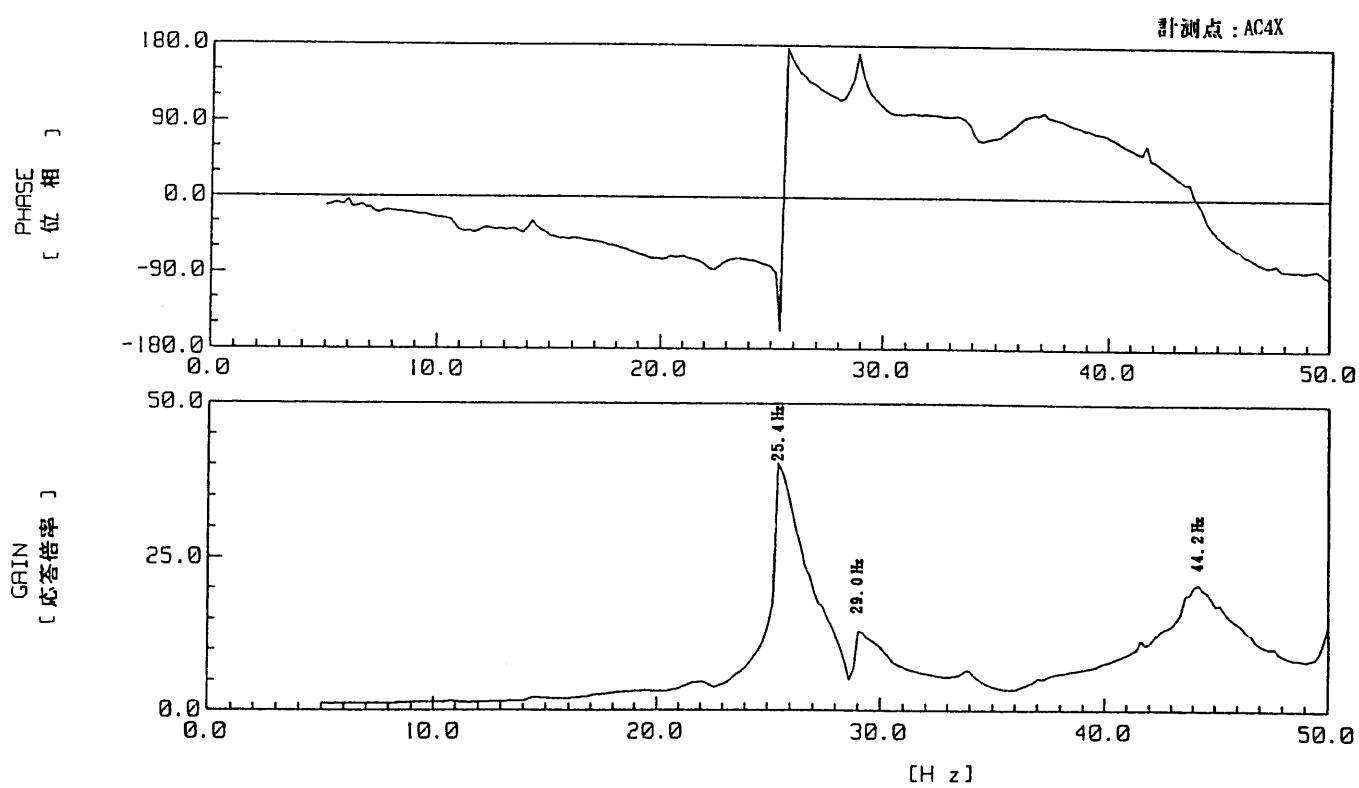


図 3-29 伝達関数 (Y 方向, 建家固定, 入力30gal)
(配管系, 試験ケース 2, 正弦波掃引試験)

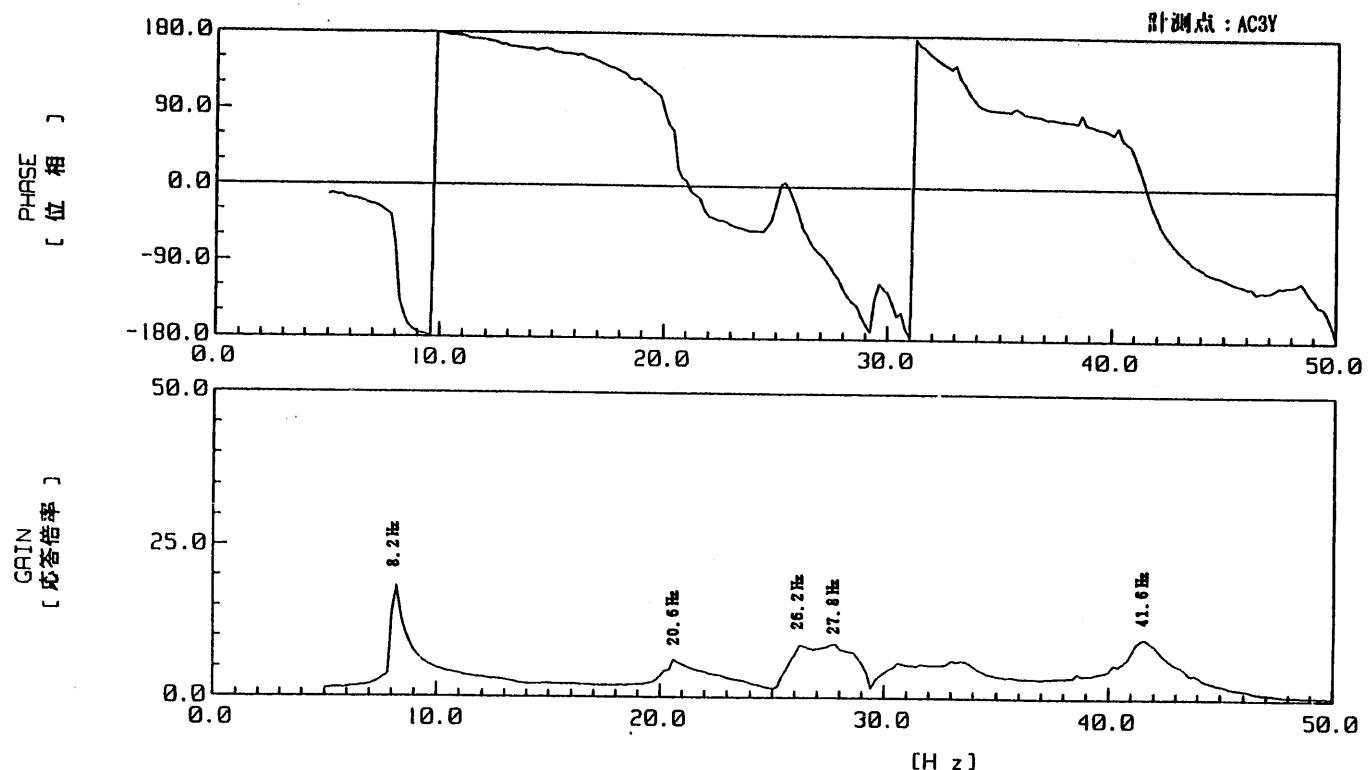


図3-30 伝達関数(X方向, 建家固定, 入力40gal)
(配管系, 試験ケース2, 正弦波掃引試験)

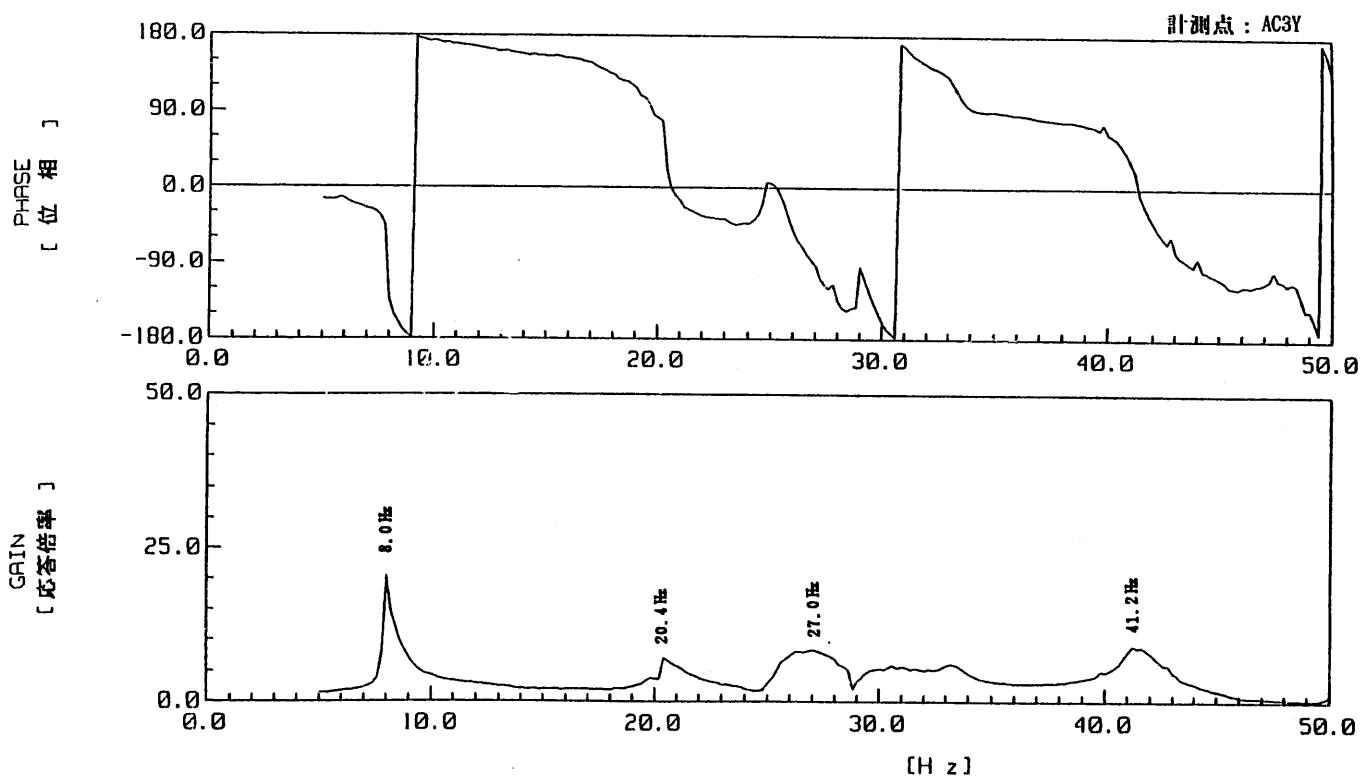


図3-31 伝達関数(X方向, 建家固定, 入力50gal)
(配管系, 試験ケース2, 正弦波掃引試験)

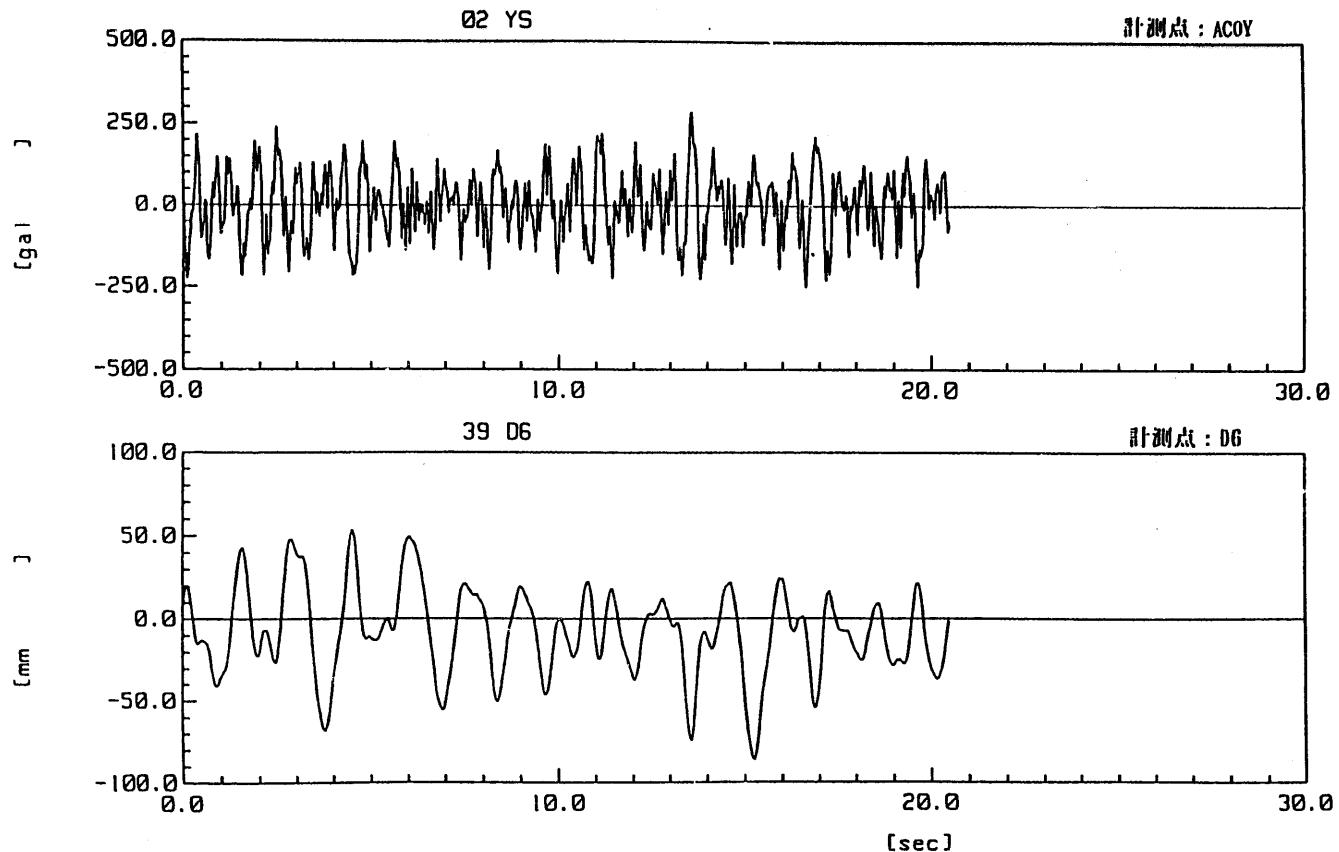


図3-32 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位86mm）
(全体系, 試験ケース2, ランダム波加振試験)

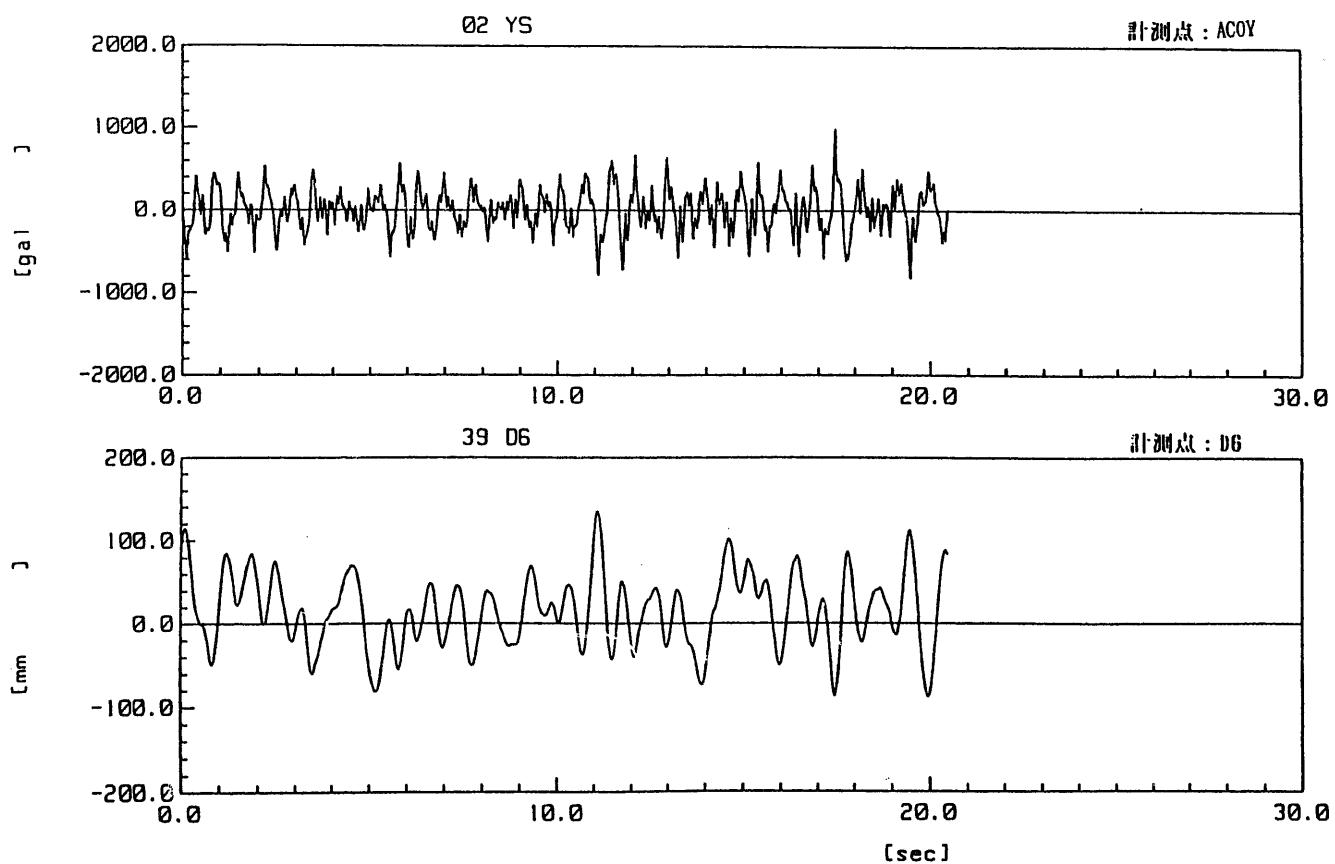


図3-33 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位135mm）
(全体系, 試験ケース2, ランダム波加振試験)

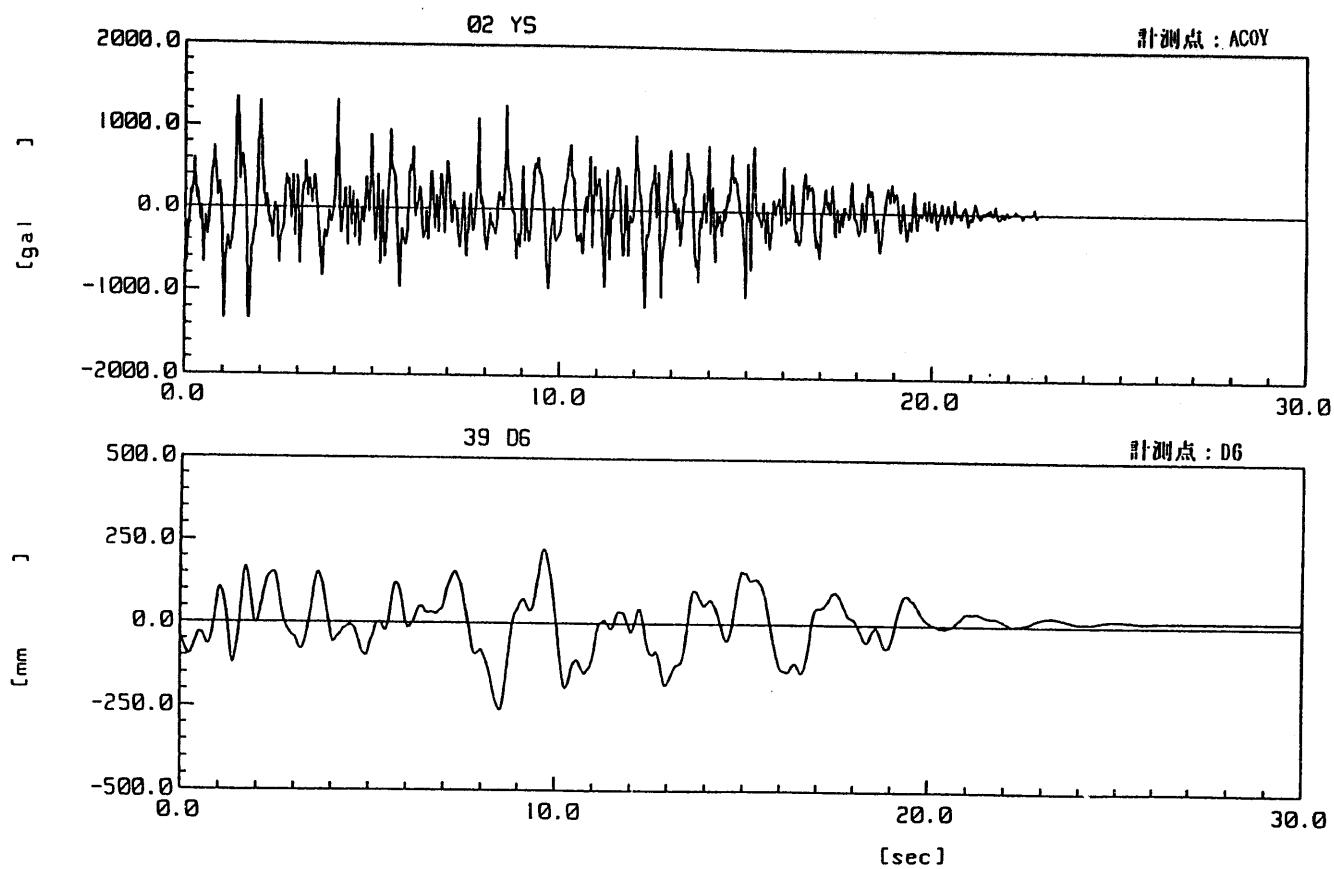


図3-34 振動台上の加速度と応答変位（最大応答変位261mm）
(全体系, 試験ケース2, ランダム波加振試験)

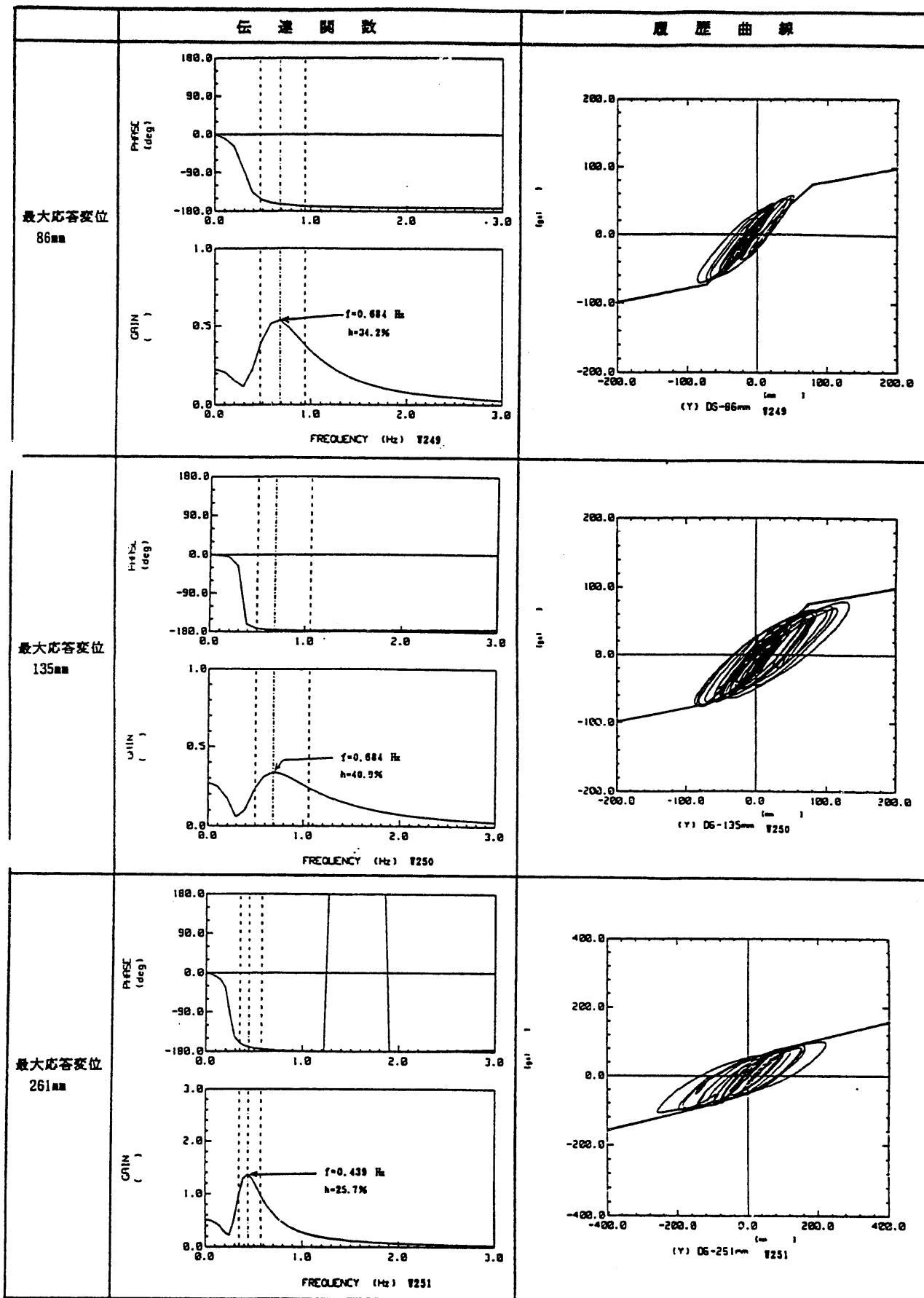


図 3-35 伝達関数と履歴曲線
(全体系, 試験ケース 2, ランダム波加振試験)

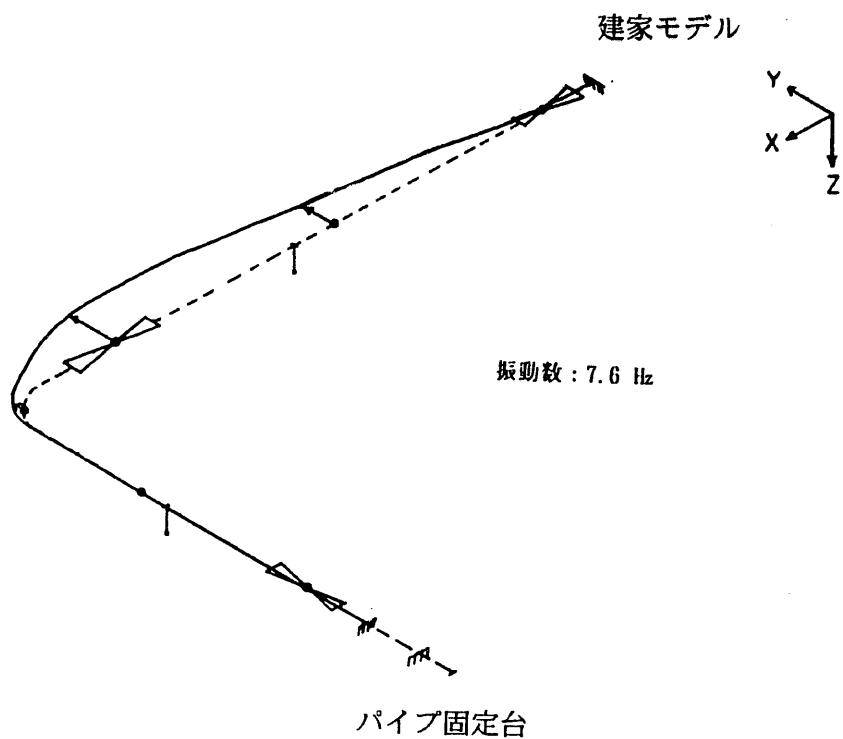


図3-36 振動モード(X方向, 建家固定, 1次モード, 入力100gal)
(全体系, 試験ケース2, 正弦波掃引試験)

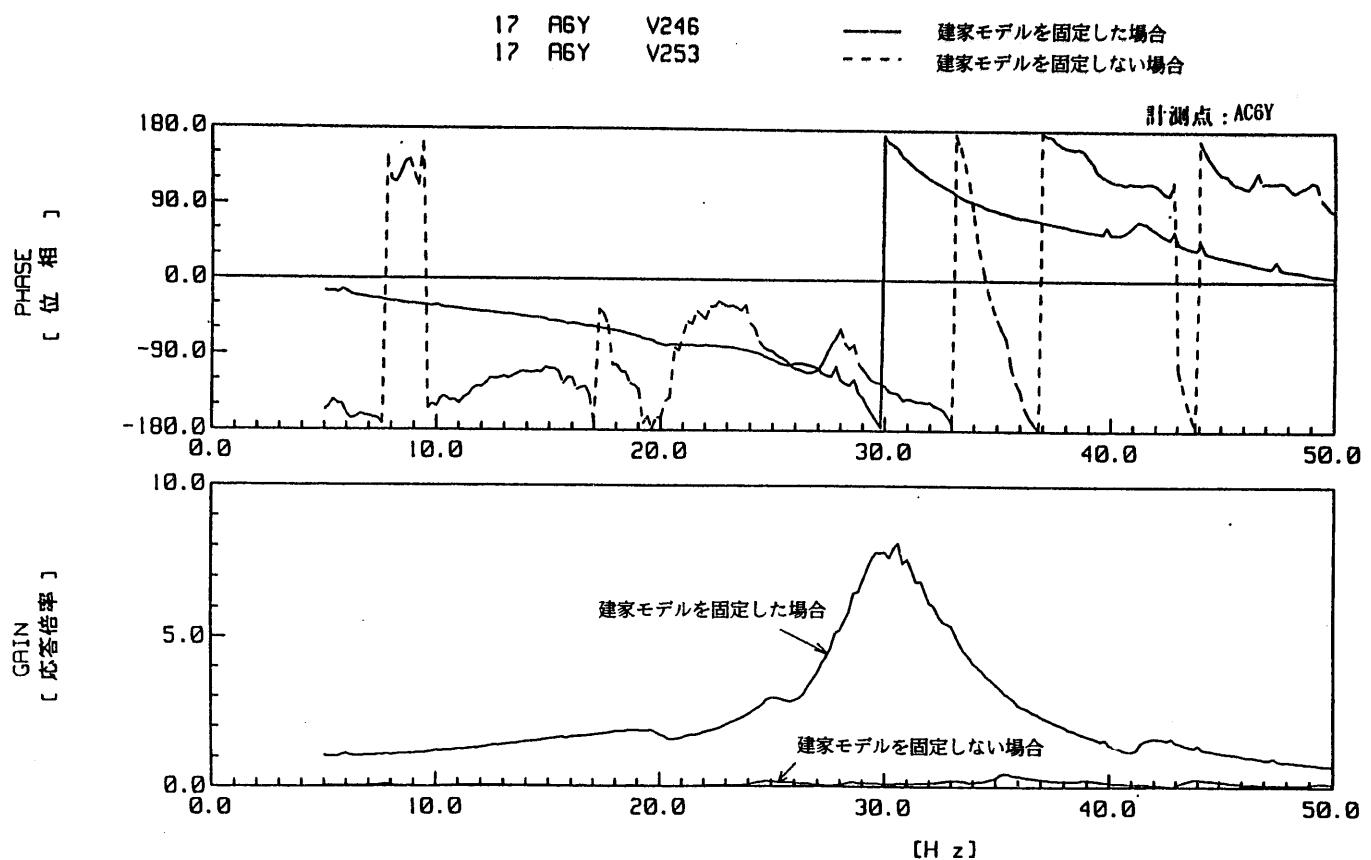


図3-37 建家モデルの伝達関数（X方向、入力50gal）
(全体系、試験ケース2、正弦波掃引試験)

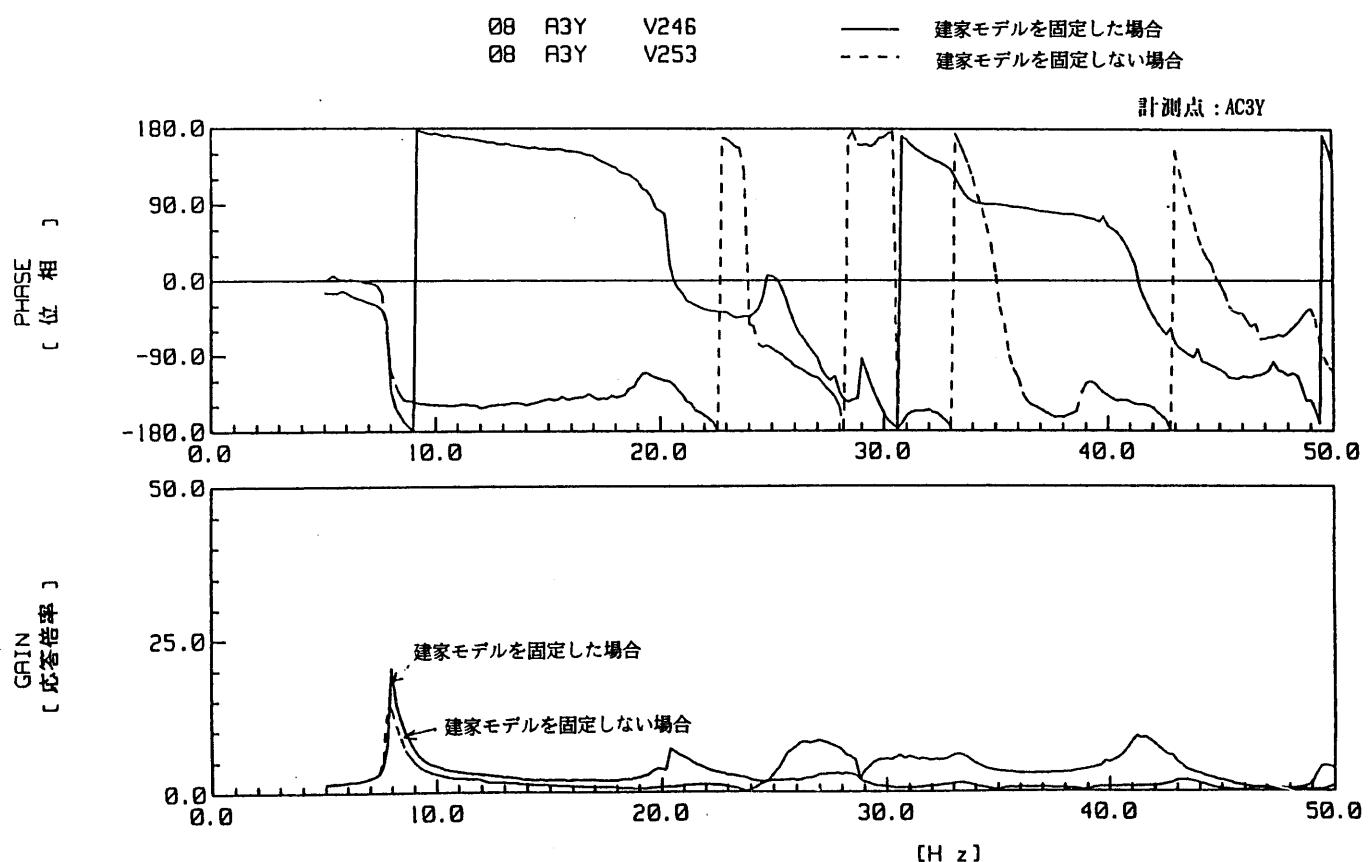


図3-38 配管の伝達関数（X方向、入力50gal）
(全体系、試験ケース2、正弦波掃引試験)

表3-2 試験ケース1最大値リスト(代表測定点)

	計測点	1/3S ₂ *	2/3S ₂ *	3/3S ₂ *	単位	測定箇所
加速度	AC0X	5	15	27	g a l	振動台上
	AC0Y	152	305	468	g a l	
	AC2X	117	238	337	g a l	継手A2～A3 間 配管直管部上
	AC2Y	69	94	119	g a l	
	AC3X	167	320	444	g a l	
	AC3Y	70	103	161	g a l	継手A2 ジンバル上
	AC4X	20	52	69	g a l	
	AC4Y	107	196	274	g a l	継手A1～A2 間 配管直管部上
	AC5X	14	44	56	g a l	
	AC5Y	156	314	487	g a l	
	AC6X	14	23	61	g a l	模擬建家上
	AC6Y	64	88	111	g a l	
変位	AC10X	22	44	59	g a l	配管曲管部上
	AC10Y	74	109	145	g a l	
	D3	71	159	277	mm	継手A2 ジンバル
変位	D4	29	75	156	mm	模擬建家
	D6	72	160	300	mm	
応力	S5	0.7	1.3	2.0	kg/mm ²	配管曲管部
	S6	0.6	1.1	1.7	kg/mm ²	
	S10	0.1	0.3	0.4	kg/mm ²	伸縮管継手 アーム部
	S12	0.5	1.2	2.0	kg/mm ²	
	S13	0.3	0.5	1.0	kg/mm ²	
圧力	P1	4.3	4.5	4.9	kg/cm ²	配管内

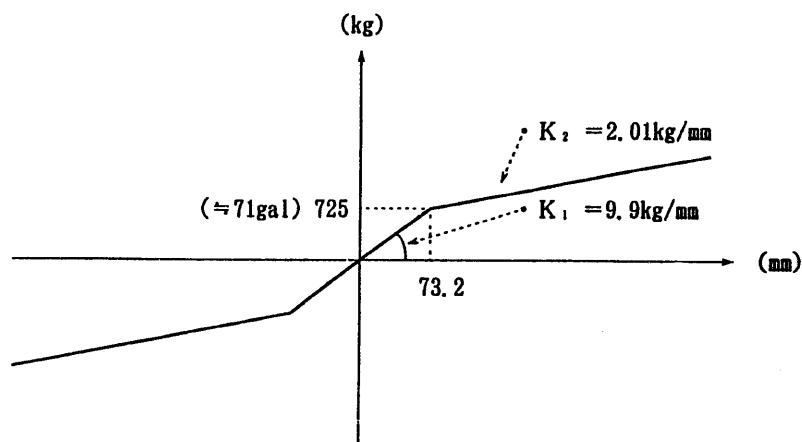
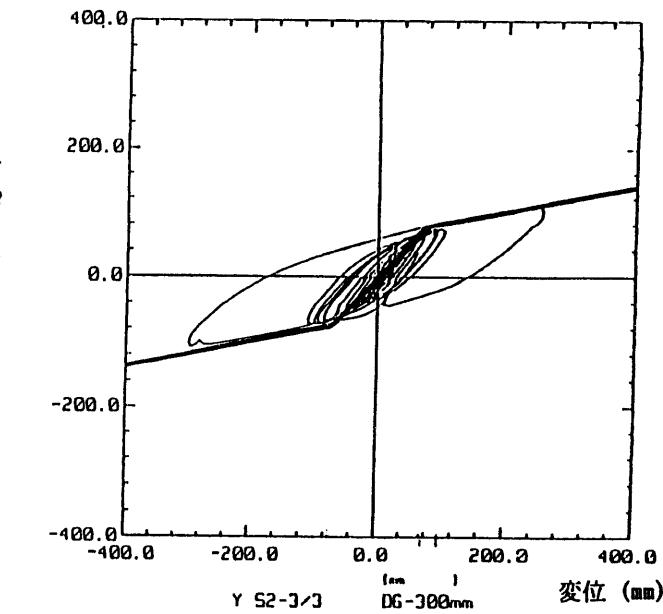
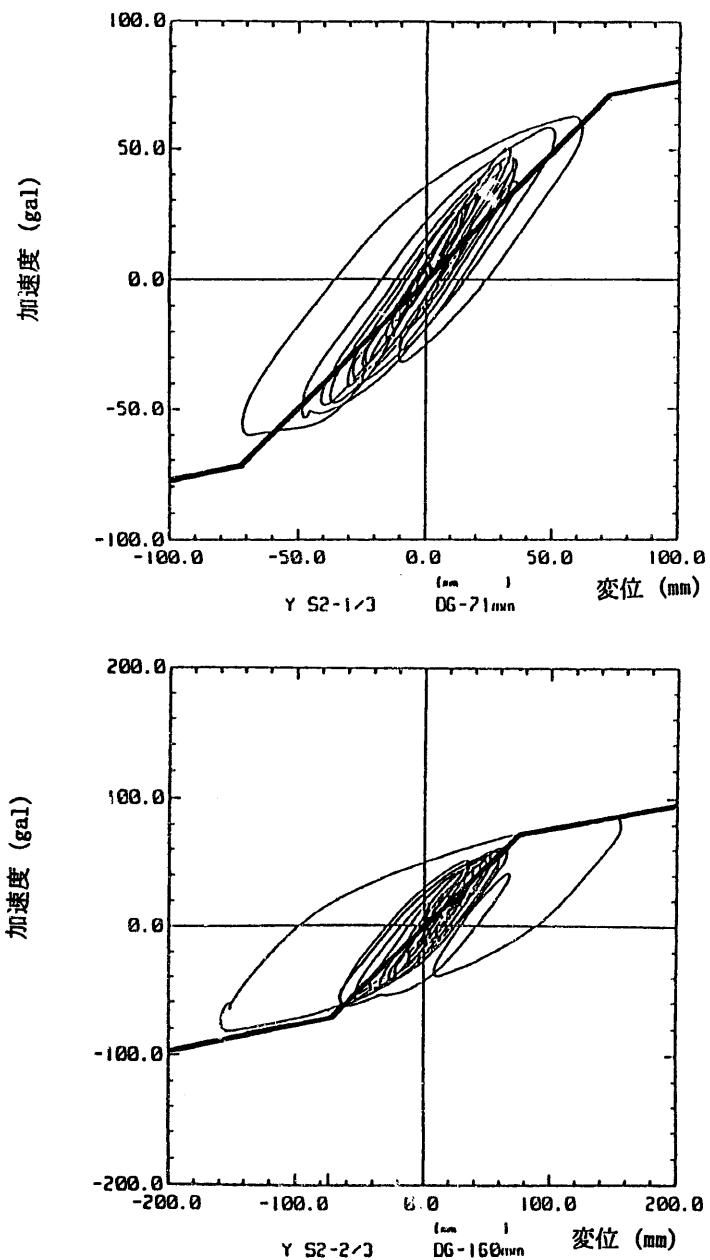


図3-39 建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線（試験ケース1）

表3-3 試験ケース2最大値リスト(代表測定点)

	計測点	1/3S ₂ *	2/3S ₂ *	3/3S ₂ *	単位	測定箇所
加速度	A C 0 X	7	21	30	g a l	振動台上
	A C 0 Y	146	295	466	g a l	
	A C 2 X	16	27	54	g a l	継手A 2～A 3 間 配管直管部上
	A C 2 Y	270	711	1344	g a l	
	A C 3 X	12	41	75	g a l	継手A 2 ジンバル上
	A C 3 Y	412	1091	2028	g a l	
	A C 4 X	67	193	377	g a l	継手A 1～A 2 間 配管直管部上
	A C 4 Y	145	297	274	g a l	
	A C 5 X	29	55	86	g a l	継手A 1 ヒンジ上
	A C 5 Y	149	296	478	g a l	
	A C 6 X	11	17	47	g a l	模擬建家上
	A C 6 Y	68	89	115	g a l	
変位	A C 10 X	29	66	124	g a l	配管曲管部上
	A C 10 Y	149	293	482	g a l	
	D 3	1	5	16	mm	継手A 2 ジンバル
	D 4	2	5	9	mm	模擬建家
	D 6	75	163	312	mm	
応力	S 5	1.2	2.8	5.5	kg/mm ²	配管曲管部
	S 6	1.0	2.3	4.5	kg/mm ²	
	S 10	0.3	0.7	1.1	kg/mm ²	伸縮管継手 アーム部
	S 12	1.1	1.9	3.8	kg/mm ²	
	S 13	0.1	0.1	0.2	kg/mm ²	
圧力	P 1	4.6	4.6	4.6	kg/cm ²	配管内

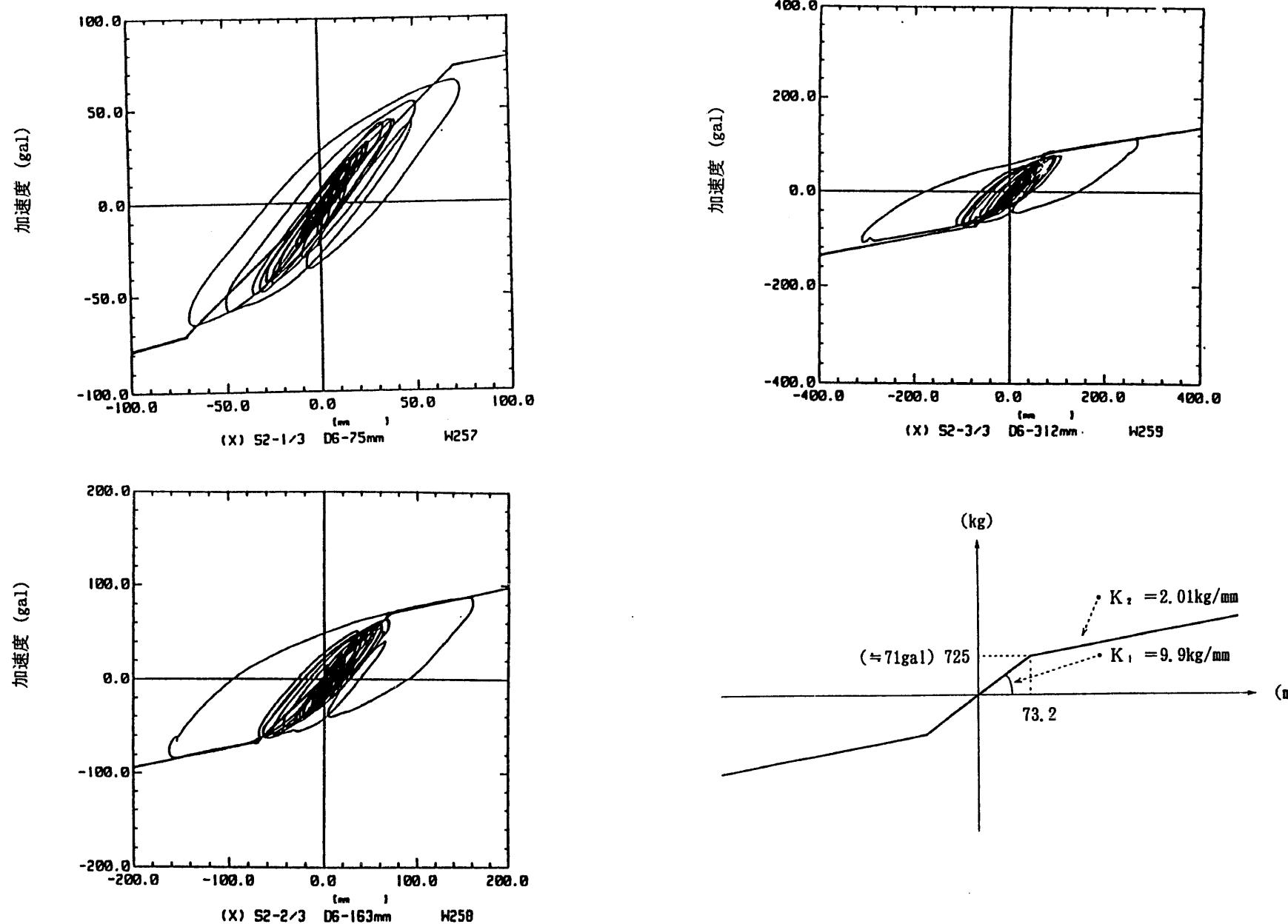


図 3-40 建家モデルの応答変位と応答加速度の履歴曲線（試験ケース 2）

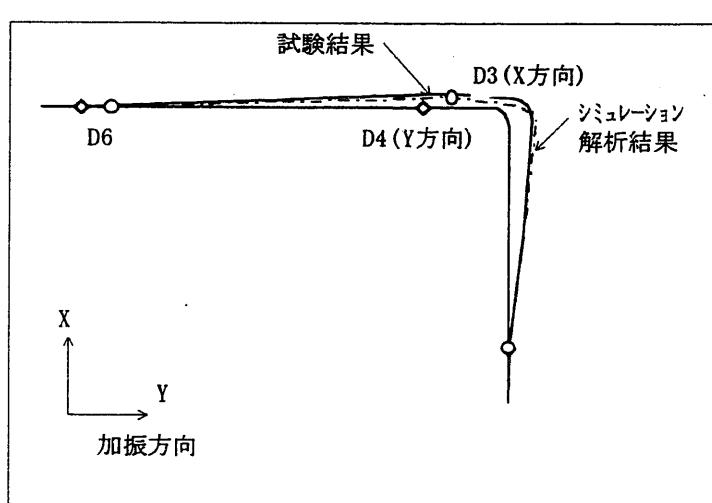
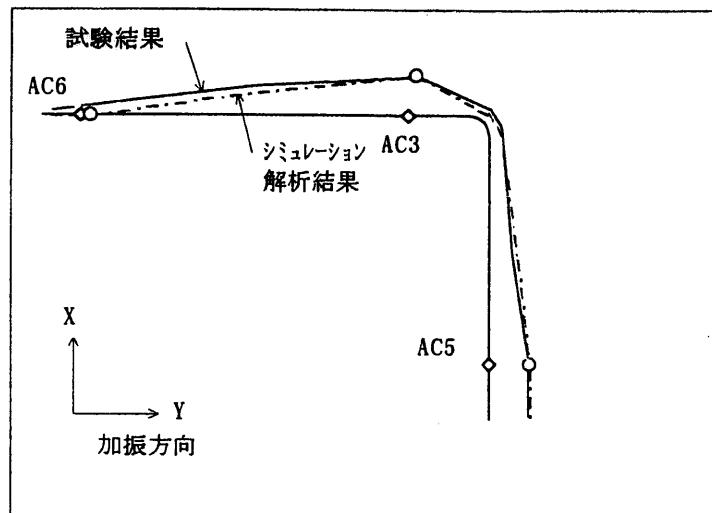


図3-41 最大応答値の比較（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース1, 3/3S₂*)

表3-4 最大応答値の比較（試験ケース1, 3/3S₂* ）

加速度 (gal)			変位 (mm)		
計測点	試験	シミュレーション解析	計測点	試験	シミュレーション解析
AC6Y (建家)	111	115	D6 (建家)	300	319
AC3X (継手 A2)	444	460	D3 (継手 A2)	277	319
AC3Y (継手 A2)	161	119	D4 (継手 A2)	156	111
AC5Y (継手 A1)	487	499	-	-	-

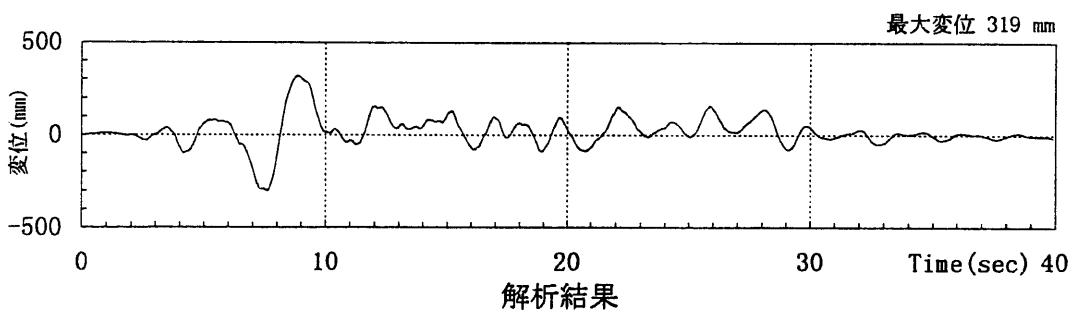
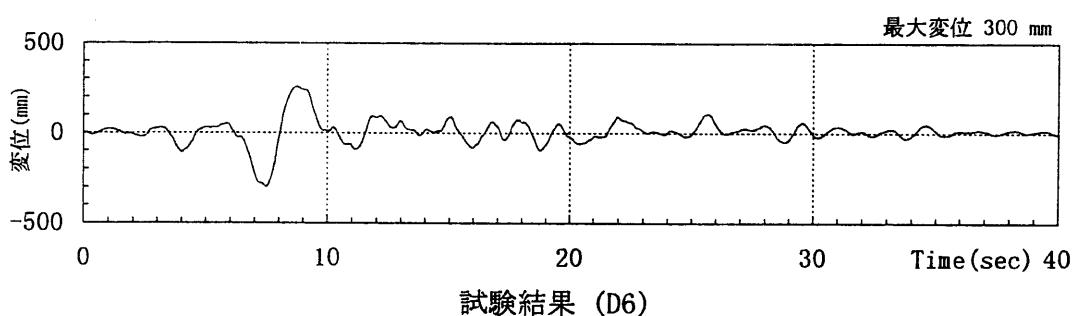
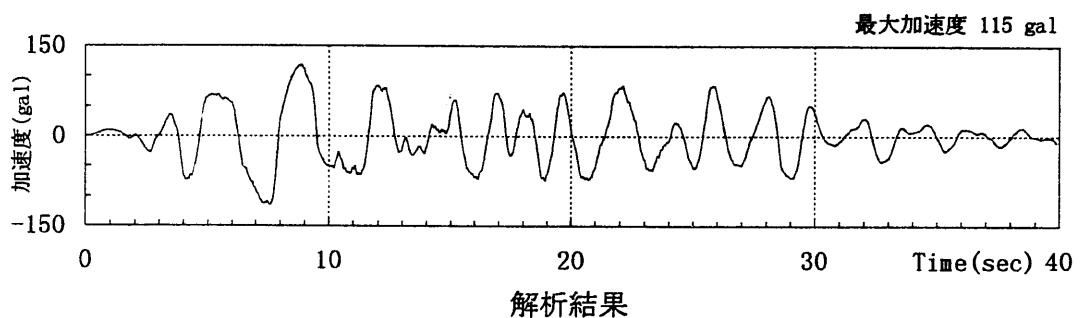
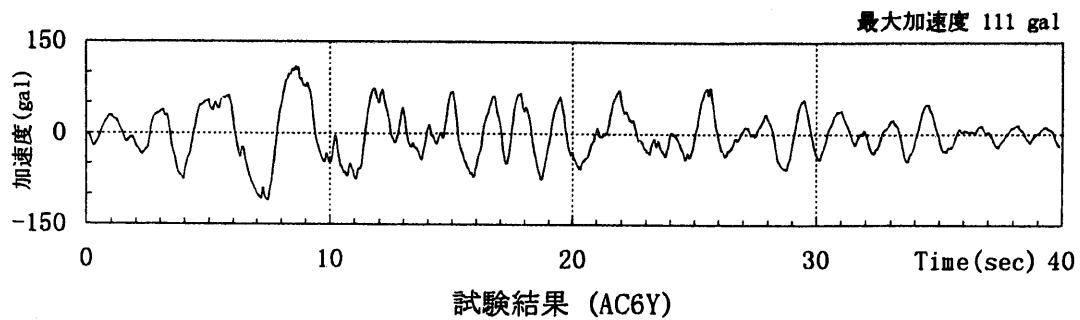


図3-42(1) 建家モデル位置における応答加速度及び変位波形（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース1, 3/3 S₂ *)

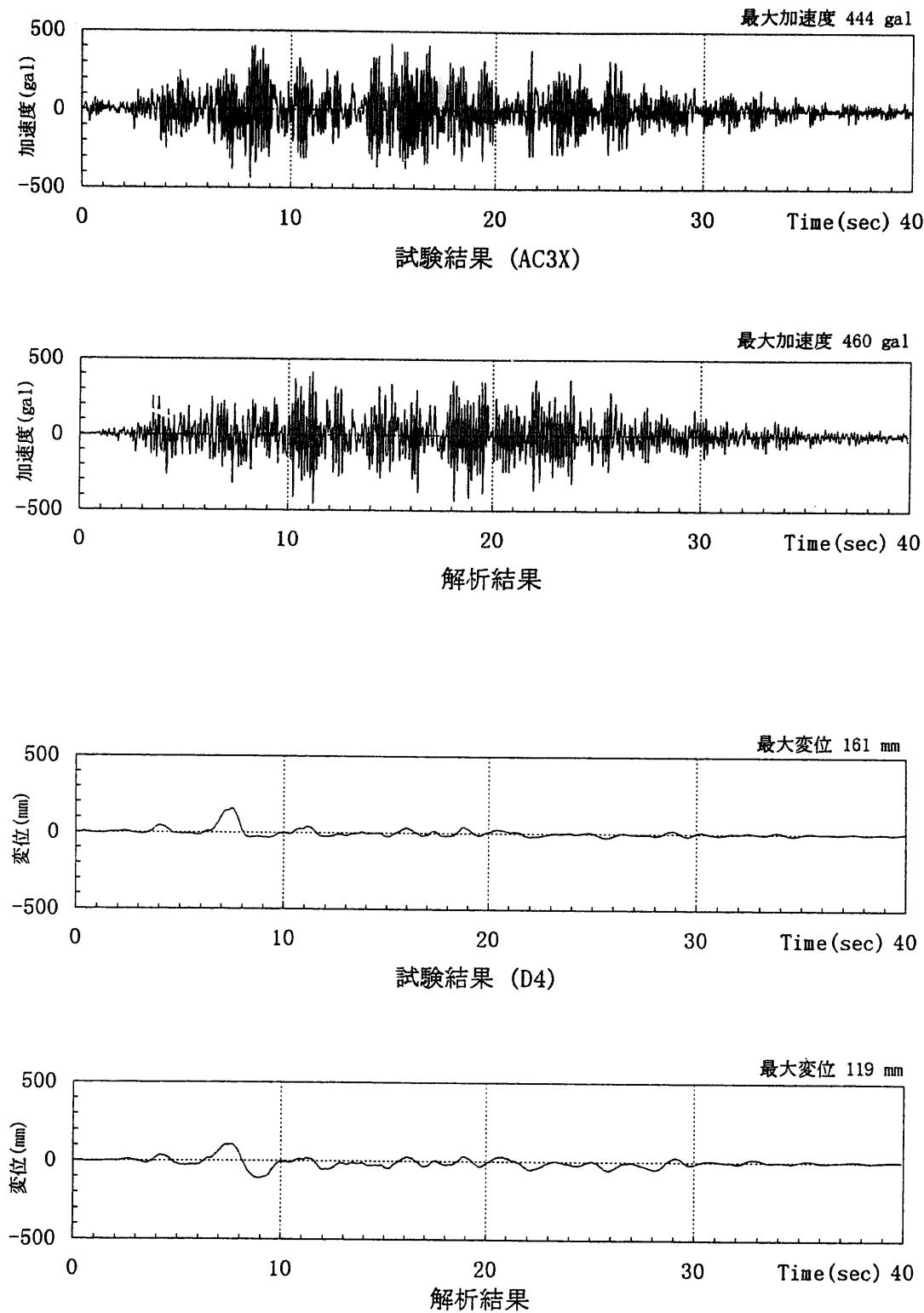


図3-42(2) 継手A2位置における応答加速度及び変位波形（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース1, 3/3S₂*)

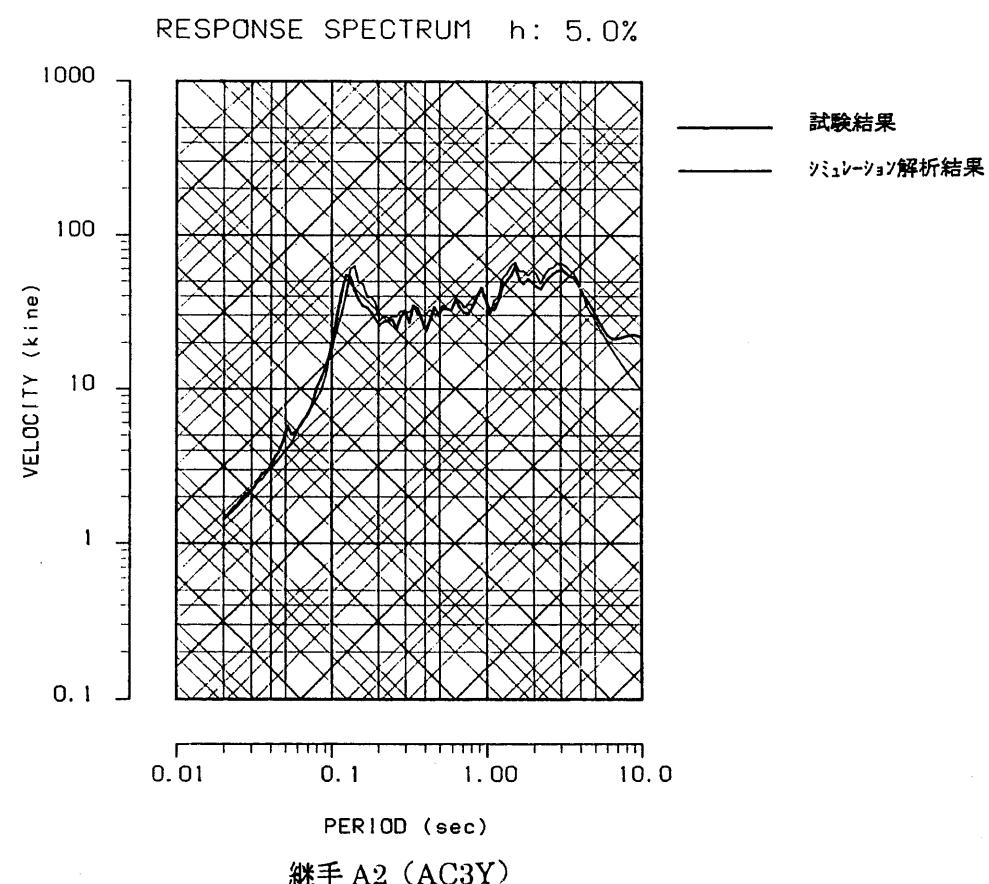
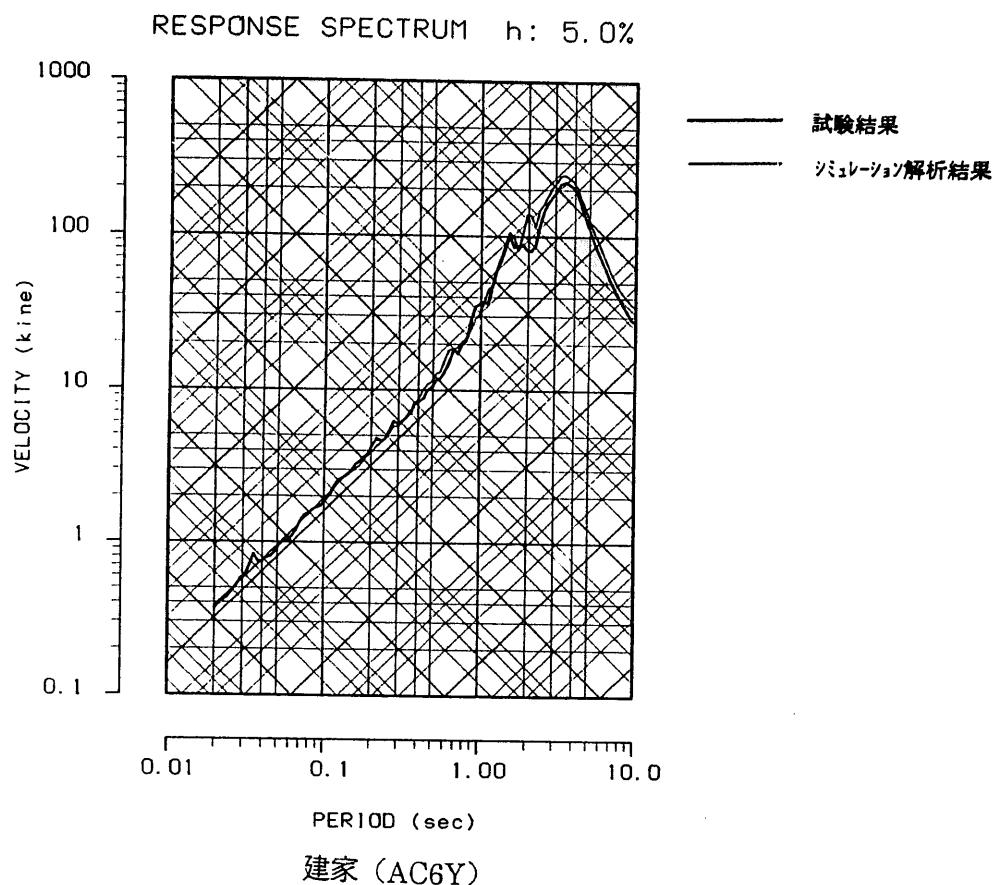
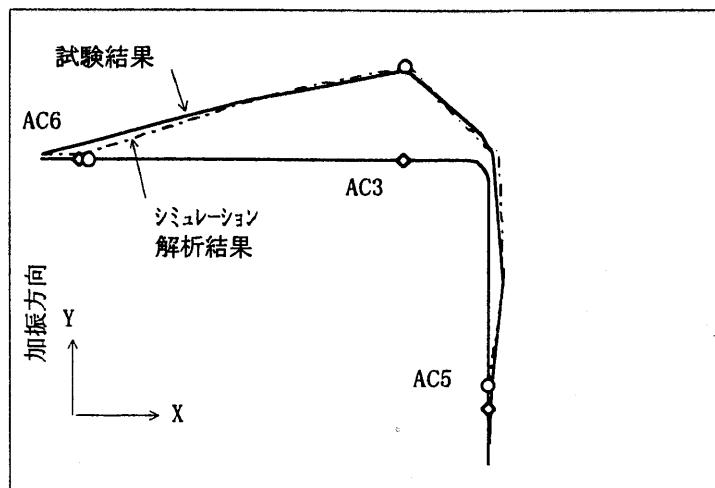
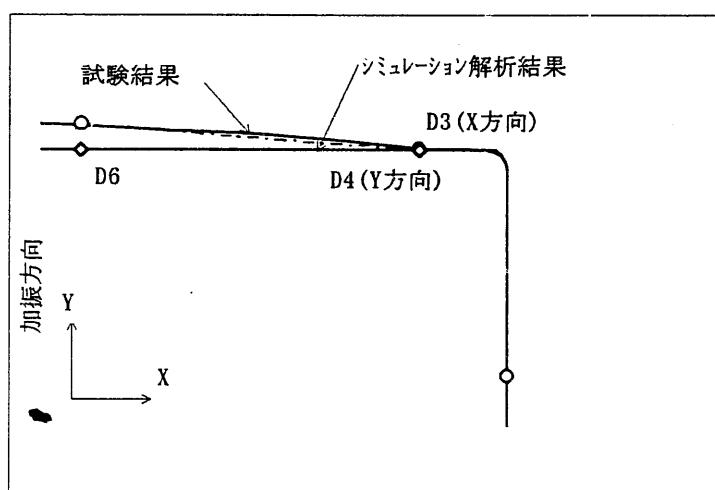


図3-43 応答スペクトルの比較（試験 V_s シミュレーション解析）
(試験ケース1, $3/3S_2^*$)



最大加速度



最大変位

図3-44 最大応答値の比較（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース2, 3/3S₂*)表3-5 最大応答値の比較（試験ケース2, 3/3S₂* ）

加速度 (gal)			変位 (mm)		
計測点	試験	シミュレーション解析	計測点	試験	シミュレーション解析
AC6Y (建家)	115	120	D6 (建家)	312	316
AC3X (継手 A2)	75	13	D3 (継手 A2)	16	0
AC3Y (継手 A2)	2028	2122	D4 (継手 A2)	9	11
AC5Y (継手 A1)	478	499	-	-	-

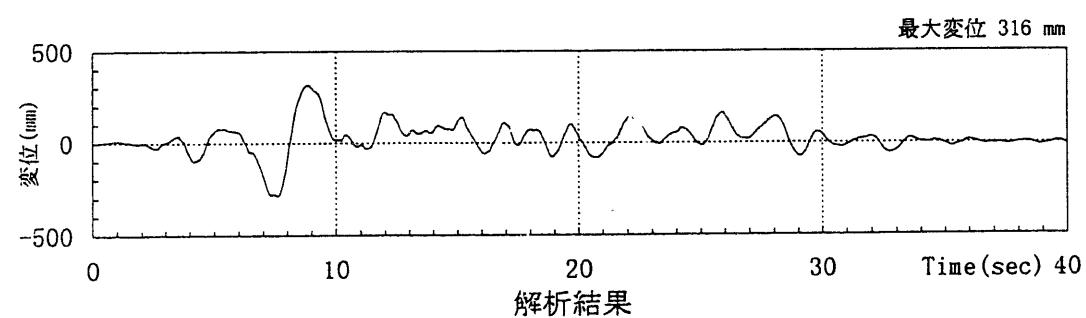
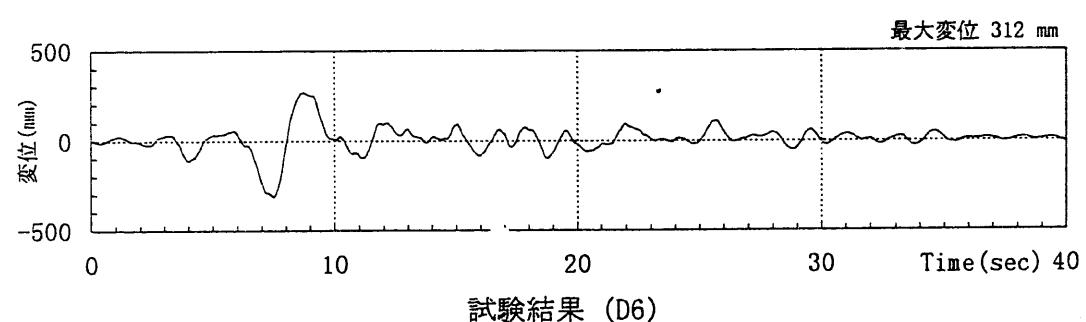
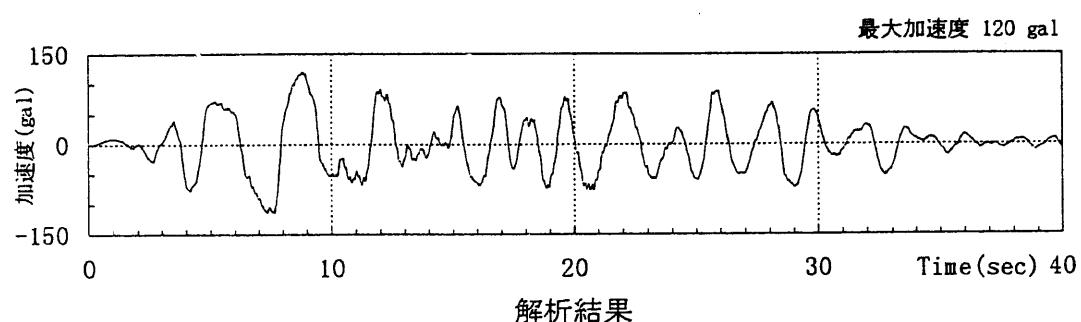
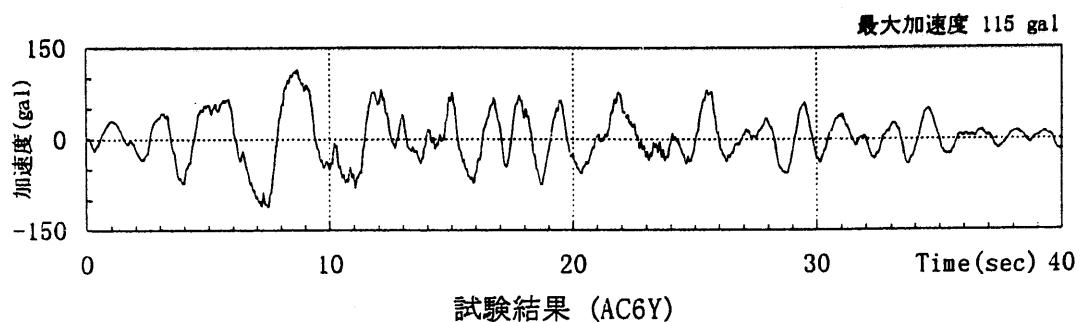


図3-45(1) 建家モデル位置における応答加速度及び変位波形（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース2, 3/3S₂*)

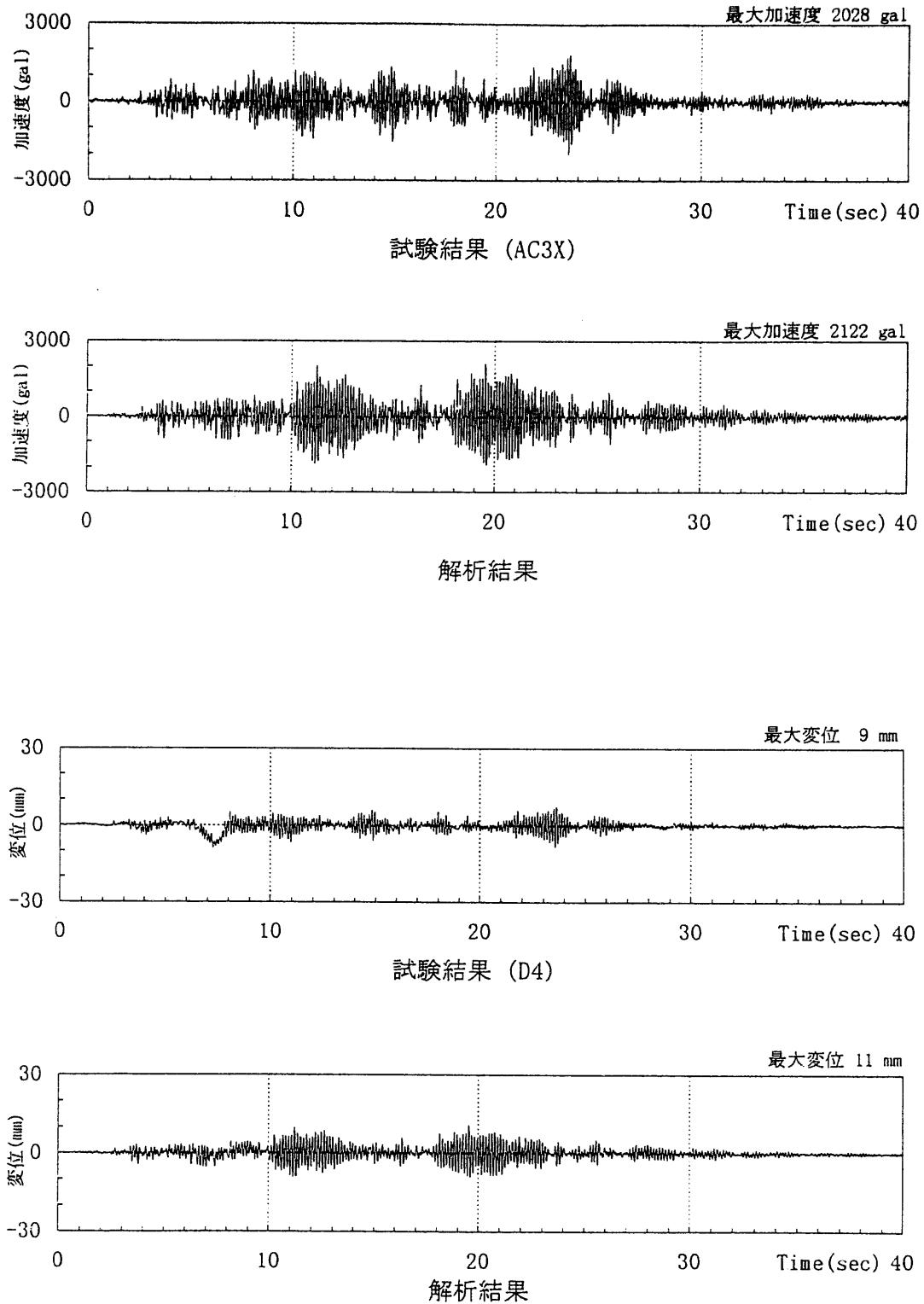


図3-45(2) 繼手A 2位置における応答加速度及び変位波形（試験V_s シミュレーション解析）
(試験ケース2, 3/3S₂*)

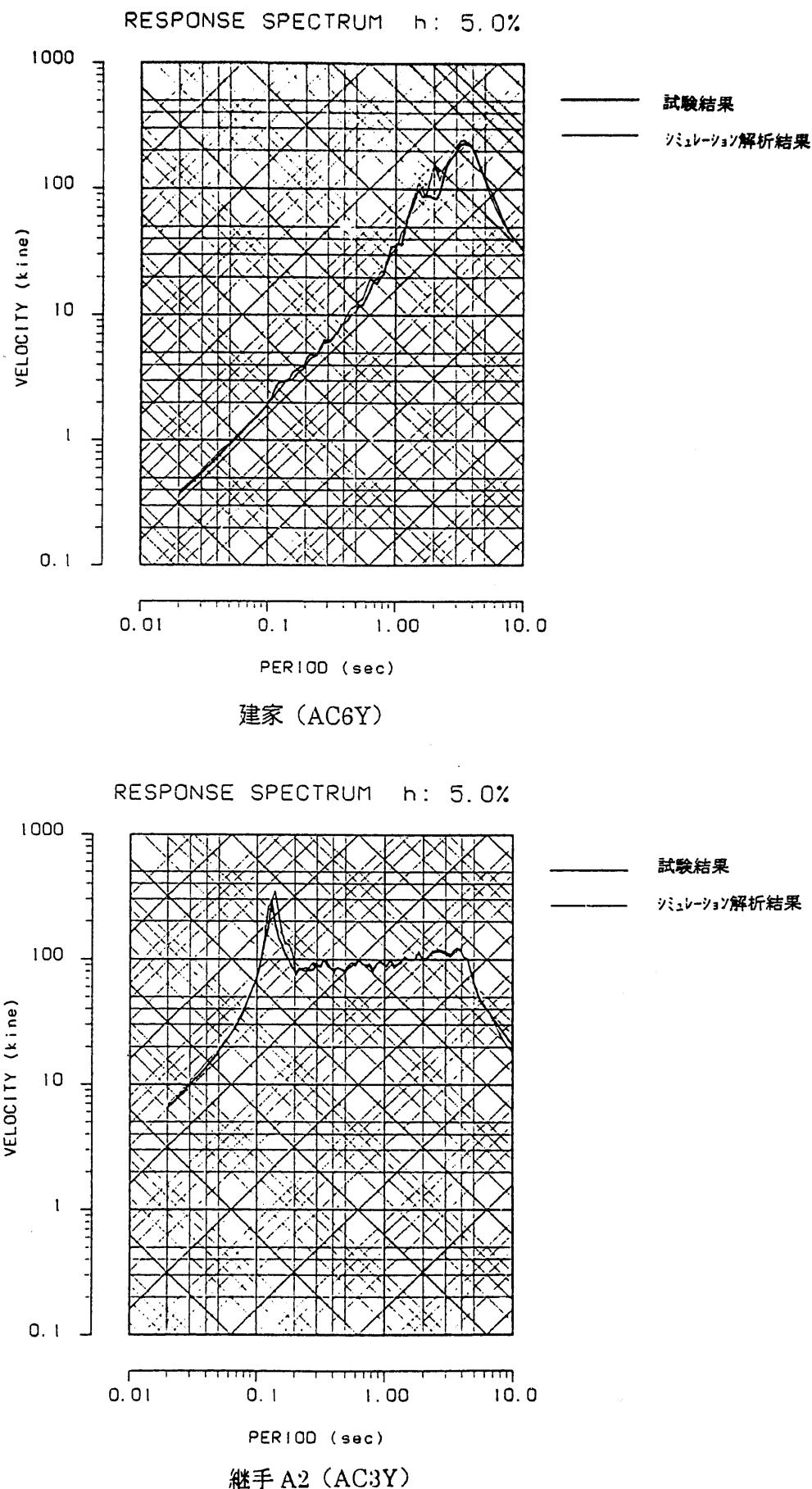


図3-46 応答スペクトルの比較（試験 V_s シミュレーション解析）
(試験ケース2, $3/3S_2$ *)

4. まとめ

4.1 振動特性試験

試験ケース1では、配管の固有振動数は、10Hz以上であることを確認した。

加振中の試験体の挙動を決定する建家モデルの固有振動数が1Hz以下であることから、加振中に配管は、自らの振動特性により挙動することなく、疑似静的な挙動を示すものと推定する。

試験ケース2では、配管の固有振動数は、8Hz以上にあることを確認した。

継手A2から建家モデル側にかけては、建家モデルが支配する1Hz以下の挙動を示し、継手A2から固定部側にかけては、固有振動数の約8Hzの成分で挙動していることを確認した。

4.2 地震応答試験

試験ケース1及び試験ケース2とも配管の応力及び伸縮管継手アーム部の応力は、許容応力に対して十分小さいこと、建家モデルの復元力特性については想定した復元力特性とほぼ一致していることを確認した。

4.3 シミュレーション解析

地震応答試験結果とシミュレーション解析結果を比較した結果、よく一致していることから、シミュレーション解析モデルによる評価手法の妥当性を確認した。

シミュレーション解析結果より配管系の減衰定数は、1～4%となっており、実際の設計には、減衰定数は0.5%を用いることから、安全側の評価が可能となる。

以上より、実物大の渡り配管による振動台試験を実施した結果、免震設計用入力地震動 S_2 * 時においても、配管系が健全であることを確認した。また、地震応答試験結果と本試験体をモデル化したシミュレーション解析結果を比較した結果、よく一致していることから、シミュレーション解析モデルによる評価手法の妥当性を確認することができた。

5. 試験に係る予備解析

5.1 建家モデル重量の検討

建家モデルの重量は、振動台の載荷能力の観点から、配管系の振動特性にあまり影響を与えることなく、かつ、配管系の剛性の影響を受けない範囲で軽くすることが望ましい。

表5-1及び図5-1に建家重量の影響を比較した結果を示す。

解析には、建家を1質点、配管を梁要素で模擬したモデルを用いている。

表5-1 建家部の重量の変化が応答に与える影響検討(X方向加振、水有り)

建家重量 (ton)	1次固有値 (建家一次) (Hz)	2次固有値 (配管一次) (Hz)	建家加速度 (Gal)	建家変位 (cm)	A2継手 モーメント (ton・cm)
20581	1.103	12.82	113.0	32.89	7.277
100	1.100	12.82	113.2	32.92	7.283
20	1.092	12.82	114.0	33.03	7.307
10	1.086	12.83	115.0	33.15	7.335
5	1.067	12.83	117.0	33.38	7.385
1	0.947	12.86	143.1	40.45	8.952

注) 本検討の解析モデルは概略検討用であり、最終的に採用した解析モデルとは若干異なる。

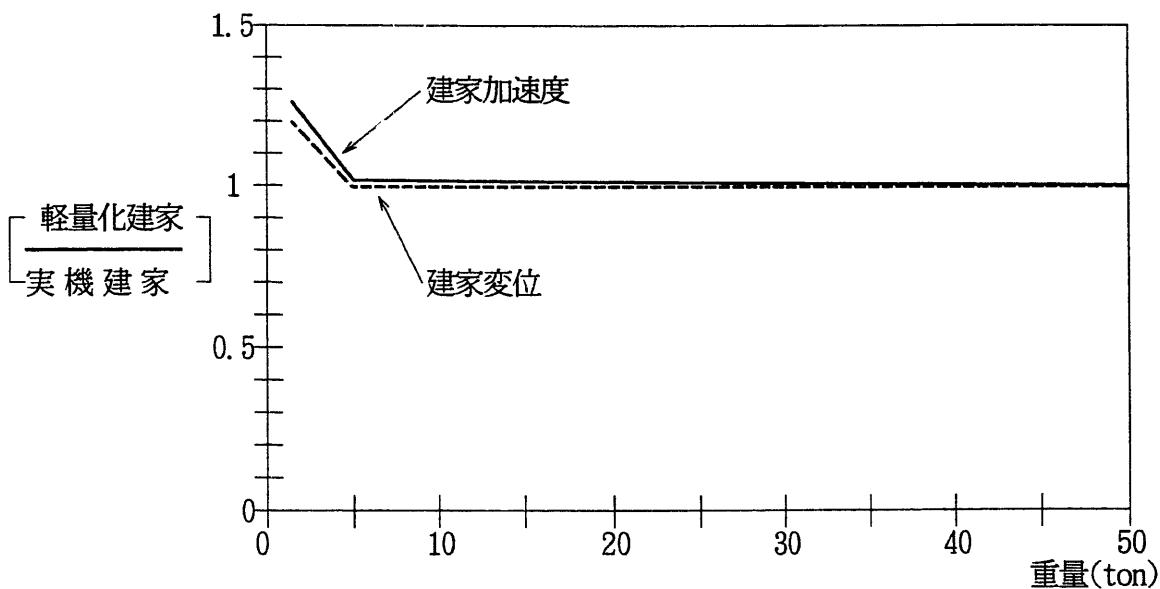


図5-1 建家重量の変化と建家応答の変化率

これより、20,000 tから5 tまでは、配管系への影響が小さいので、配管系全体の重量(約0.6t)に対して、約20倍程度の重量となる10 tを目標に検討を進めることとする。

なお、S₂*波入力時のA3継手での発生応力は、0.1～0.2 t程度と見積られる。

5.2 建家モデルの復元力特性の検討

建家モデルの重量を10 tとして周期4秒程度を実現するための建家モデルを考える。

鍤りは鉄板を積み重ね、リニアローラウェイ上を滑動させ、側面には多段式積層ゴムと鋼棒ダンパー免震装置を設置する。

$$\frac{\text{実建家と模擬建家の重量比}}{20500 \text{ t}} = \frac{1}{2050}$$

目標とする復元力特性
(実建家の1/2050)

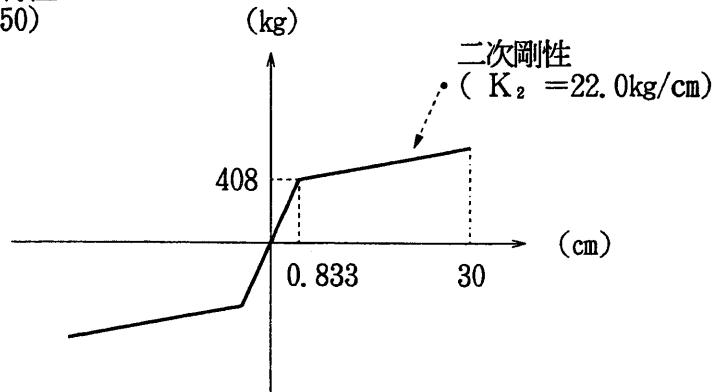


図5-2 目標とする建家モデルの復元力特性

(1) 積層ゴムの設計

床免震用天然ゴム系積層ゴム 0.75ton用MRB（マルチラバーベアリング）を使用する。

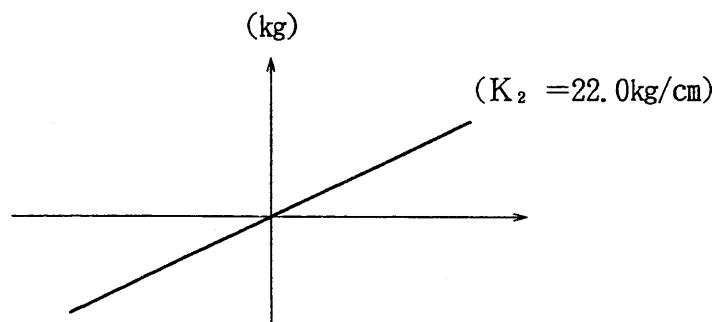


図5-3 積層ゴムの復元力特性

$$\text{水平剛性 } K_H = 40 \text{ kgf/cm}$$

$$4\text{列として } K = 4 K_H = 160 \text{ kgf/cm}$$

$$\text{必要段数 } n = \frac{K}{K_2} = \frac{160}{22} = 7.27 \Rightarrow 7\text{段}$$

$$K = 4 K_H / n = 22.9 \text{ kgf/cm}$$

$$\text{固有周期 } T = 2\pi \frac{10000}{980 \times 22.9} = 4.19 \text{ sec}$$

ゴム層厚 0.09cm×30層 = 2.7 cm

変位量 30 cmの場合 $\gamma = 30 / 7 / 2.7 = 158\%$

注意点) ・固有周期が目標値よりも若干短い。

・メーカー設定の許容変位は150 %で若干小さいが、実際には無荷重のため、180 %程度までは十分变形可能である。

(2) 鋼棒ダンパーの設計

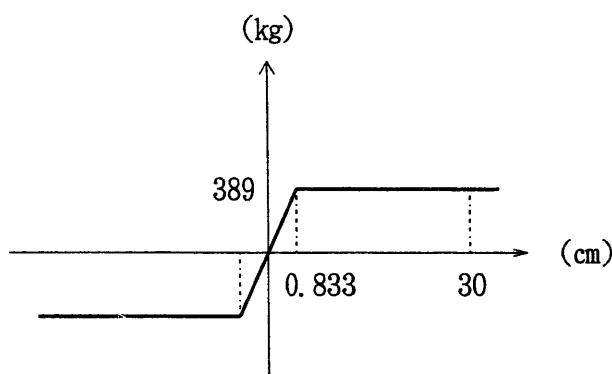


図 5-4 鋼棒ダンパーの復元力特性

鋼棒ダンパー（片持ち曲げ梁形式）

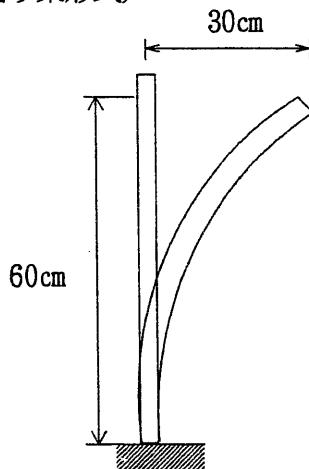


図 5-5 鋼棒ダンパー概要図

4本使用

材質 SS400 又は SR235

降伏応力 $\sigma = 2400000 \text{ kg/cm}^2$

縦弾性係数 $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ を用いる。

$$\text{弹性域 } \delta_y = \frac{Z_p \cdot \sigma_y \cdot \ell^2}{3EI}$$

$$\text{ここで 塑性断面係数 } Z_p = \frac{D^3}{6} \quad \text{断面二次モーメント } I = \frac{\pi D^4}{64}$$

$$\text{弾性剛性 } K_s = \frac{3EI \cdot n}{\ell^3}$$

ここで n は鋼材ダンパーの本数（4本）として

$$\delta_y = \frac{\frac{D^3}{6} \sigma_y \ell^2}{3E \cdot \frac{\pi D^4}{64}}$$

$$\text{直径 } D = \frac{32 \sigma_y \ell^2}{9E \pi \delta_y}$$

$\ell = 60\text{cm}$ のとき $Q_y = K_s \delta_y = 0.389\text{t}$ となるような δ_y を収れんによって求める。

弾性域 $\delta_y = 1.91\text{cm}$, 直径 $D = 2.44\text{cm}$

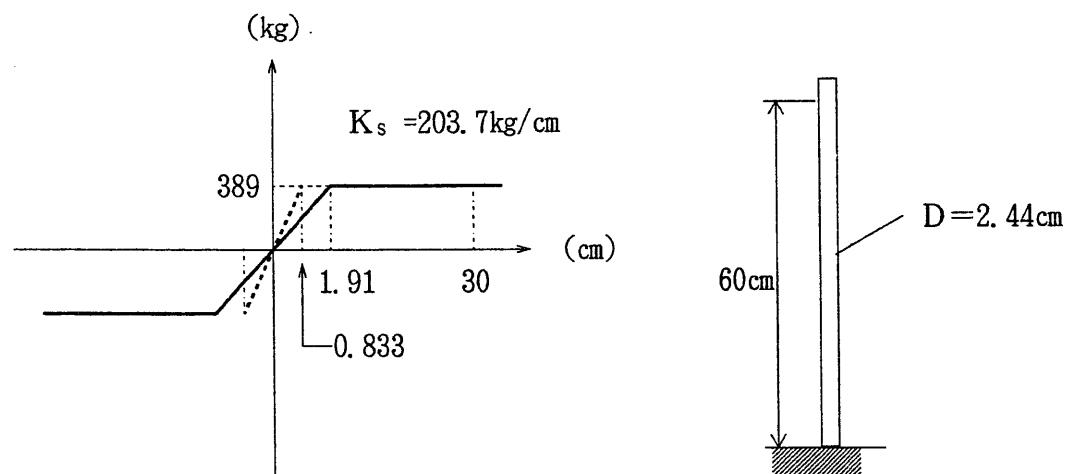


図 5-6 鋼棒ダンパーの設計復元力特性

1次剛性は目標よりも小さくなるが、塑性変形能力30cmを確保するためには、他研究の実験例を見ても、 ℓ は少なくとも60cm以上とする必要がある。

* 鋼棒ダンパーは、 $D = \phi 2.2\text{ cm}$, $\ell = 62\text{cm} \times 2$ 本, $\phi 2.4\text{ cm}$, $\ell = 62\text{cm} \times 2$ 本を組み合わせて使用する。

5.3 振動台用模擬入力波の検討

本試験で使用する振動台試験機の限界性能曲線等の仕様を別添資料-1に示す。

振動台は載荷荷重に応じて、入力地震動の加速度、速度、変位に対して加振限界が、設定されている。本試験のようにやや長周期成分が支配的な入力に対しては変位の制約がクリティカルになるものと思われる。

そこで、 S_2^* 波（原波）にやや長周期成分をカットする矩形フィルターを通し、カットする周期と応答の関係を検討するために、やや長周期成分をカットした入力波を複数作成し、

5.1 項の解析モデルを用いて地震応答解析を実施した。

その結果、周期 5 秒以上の長周期成分をカットしても建家や配管の応答は 3 %程度の変動にとどまり、実用上問題ないと考えられる（表 5-2、図 5-7 参照）。この時、入力波の最大加速度は約 500Gal、最大速度は約 58kine、最大変位約 23cm となり別添資料-1 に示す振動台で加振可能となる。

参考として、フィルターをかけた入力波の加速度波形を図 5-8 に示す。

表 5-2 入力地震動の長周期成分カットが応答に与える影響（X 方向加振、水有り）

カット周期 (sec)	入力地震動 最大加速度 (Gal)	入力地震動 最大速度 (kine)	入力地震動 最大変位 (cm)	建家応答 最大加速度 (Gal)	建家応答 最大変位 (cm)	A 2 継手 モーメント (ton·cm)
なし	511.2	60.5	64.2	113.0	32.89	7.277
10	510.1	63.0	35.1	116.4	34.38	7.613
7.5	503.3	67.2	30.8	115.7	34.11	7.549
5	498.7	58.0	23.3	110.7	31.88	7.053
4	486.7	47.1	16.0	95.24	25.10	5.552
3	465.0	39.9	9.88	73.78	15.68	3.475
2	476.9	38.6	5.55	60.24	9.72	2.168

注) 本検討の解析モデルは概略検討用であり、最終解析モデルと同一ではない。

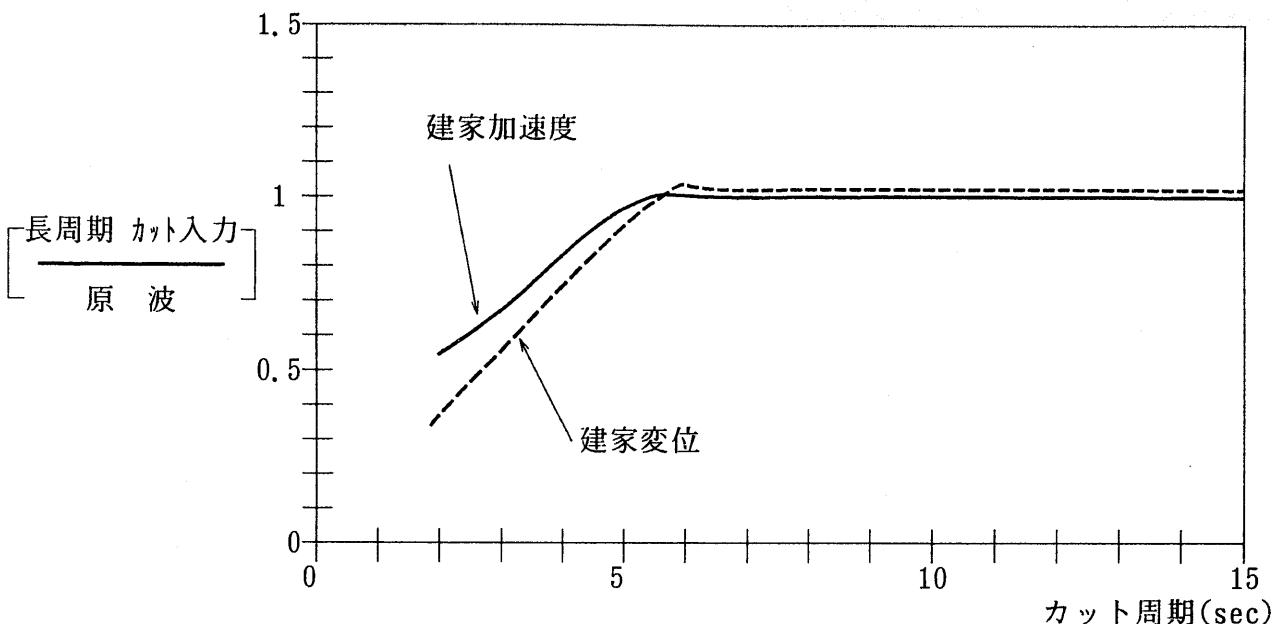


図 5-7 長周期成分のカットと建家応答の変化率

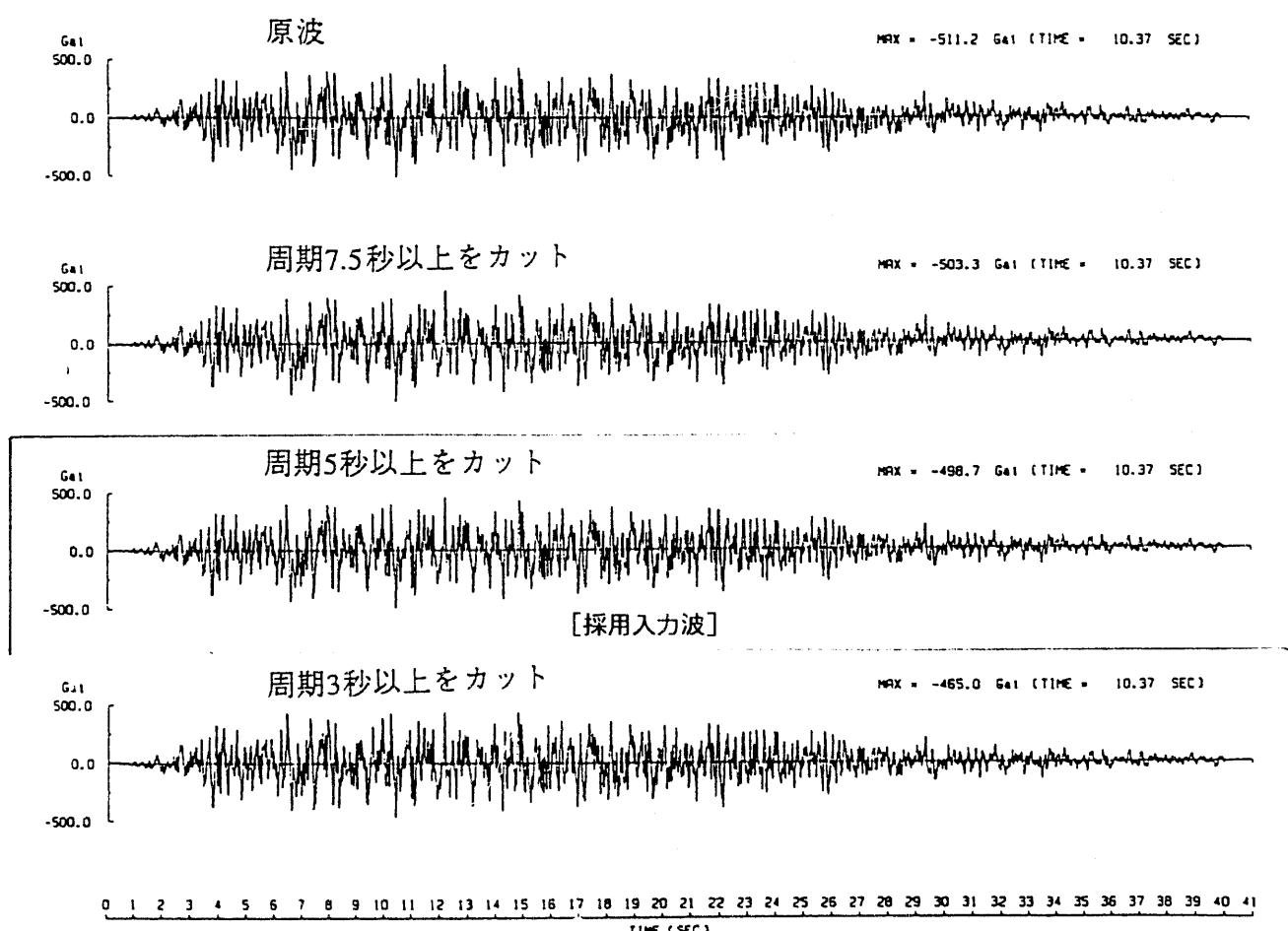
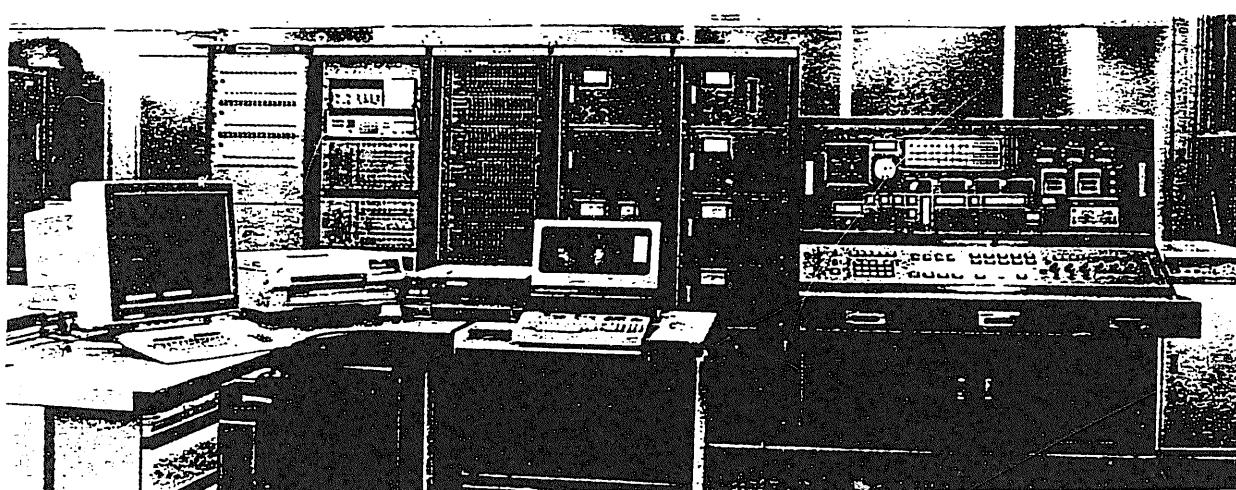
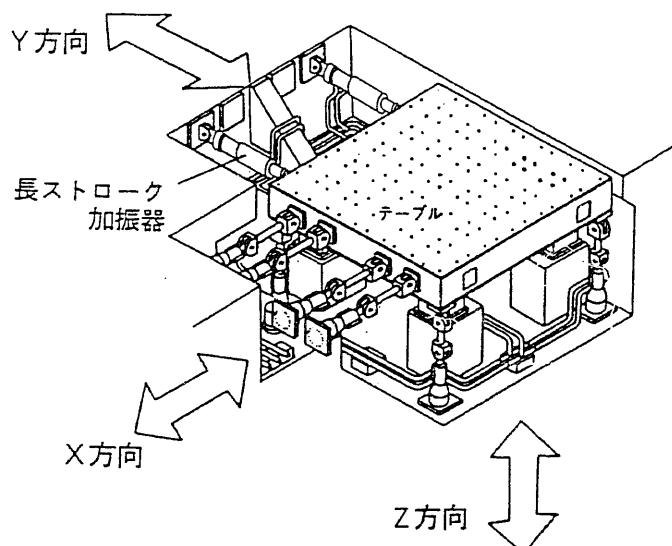
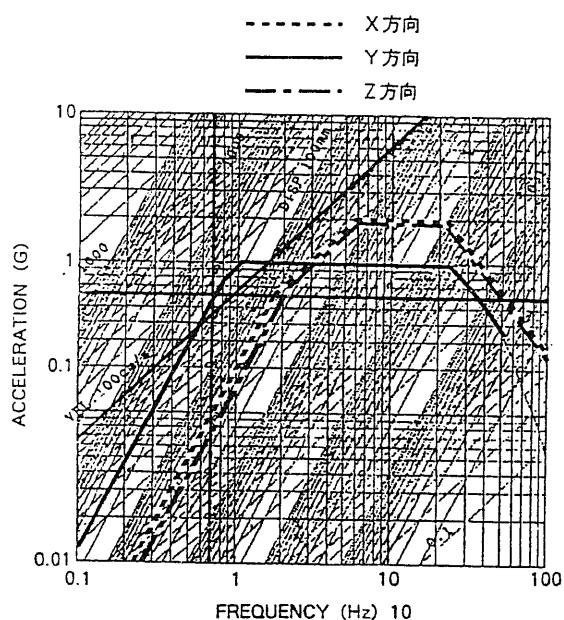


図 5-8 フィルターを掛けた入力波の加速度波形

主な仕様

加振力	振動波形	
a. 水平X方向加振時 120ton・g		正弦波、地震波
b. 水平Y方向加振時 60ton・g		不規則波 etc.
c. 垂直Z方向加振時 120ton・g		
最大振幅	振動台制御方式	
a. 水 平 方 向 ± 50mm (X方向) ± 300mm (Y方向)	a. デジタル反復入力補償 b. 逐次適応型反復入力補償 c. リアルタイム入力補償	
b. 垂 直 方 向 ± 40mm	起振方式	電気・油圧サーボ方式
載荷台の大きさ 6m × 6m × 1m	限界性能	
載荷台の重量 20ton	a. 水 平 方 向 約2G (60ton慣性負荷時) b. 垂 直 方 向 約2G (60ton慣性負荷時)	
搭載重量 100ton (max)		
周波数範囲 0~50Hz		



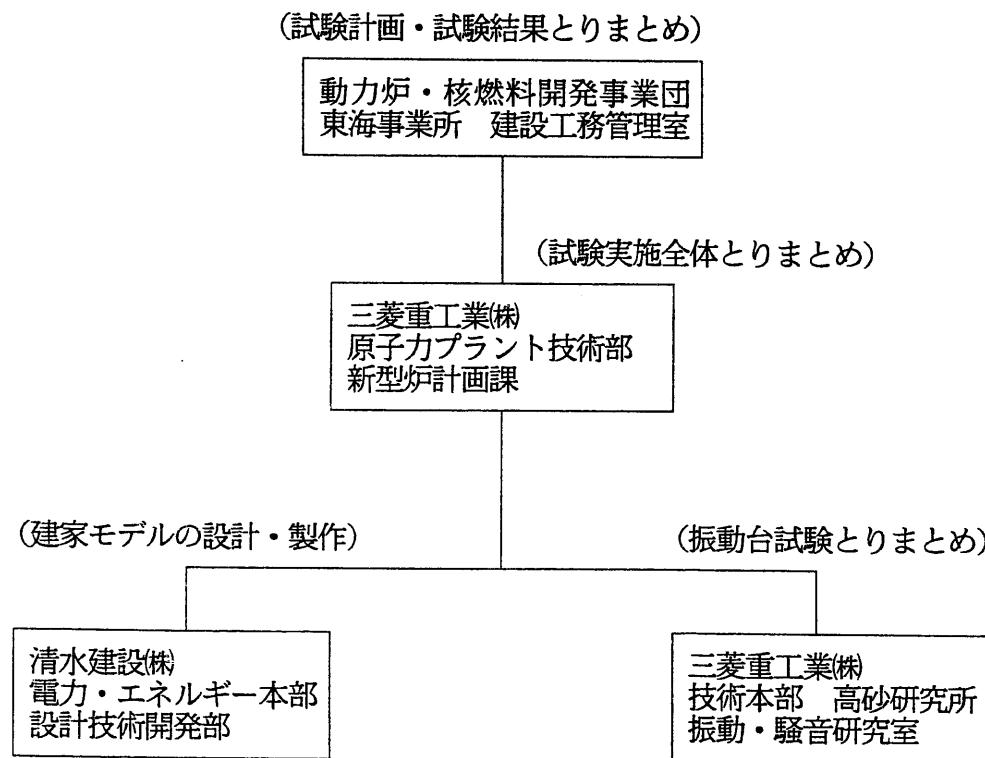
制御装置とデータ処理装置

6. 付 錄

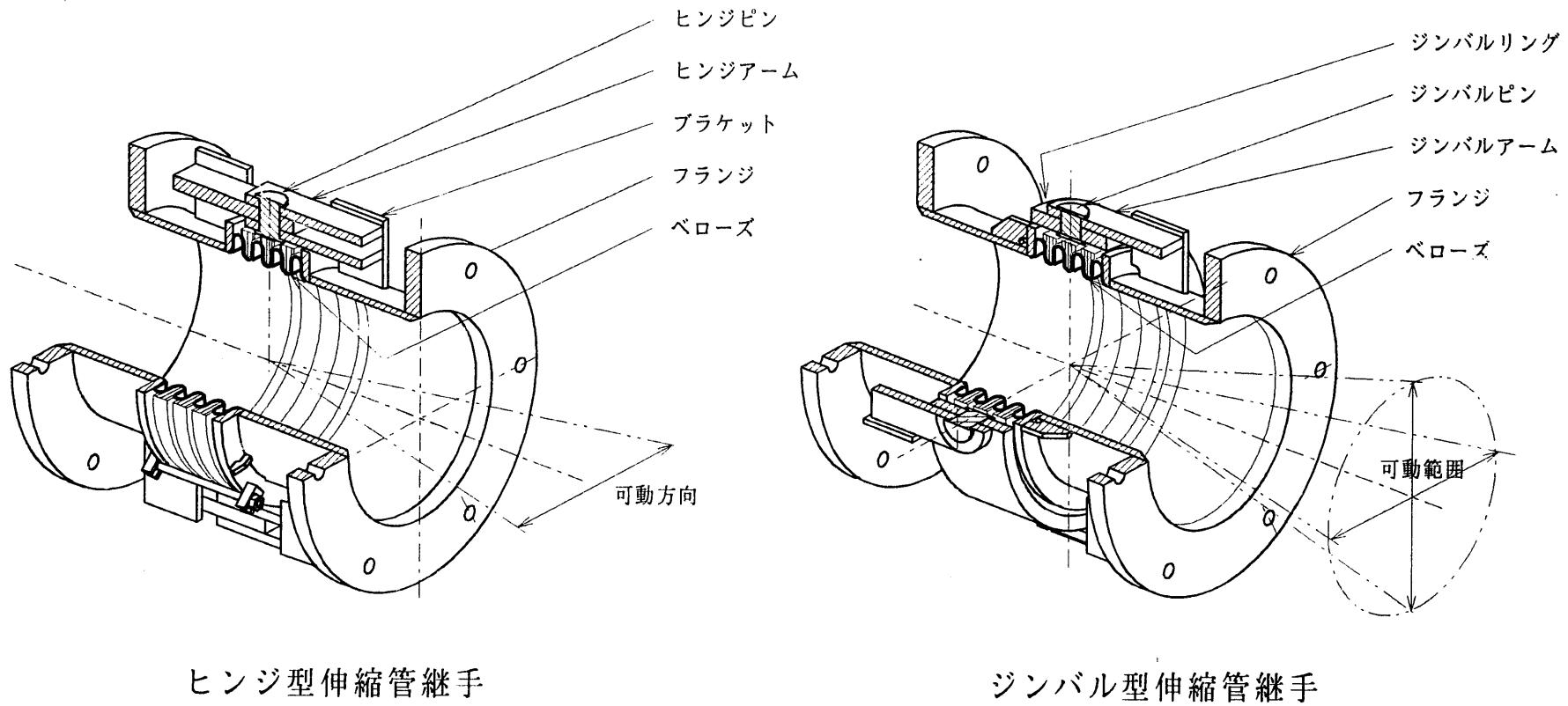
6.1 試験実施体制

本試験に係る実施体制を以下に示す。

本試験は、平成8年11月から同年12月にかけて三菱重工業(株)技術本部高砂研究所にて実施した。



6.2 伸縮管継手（ヒンジ型、ジンバル型）概略図

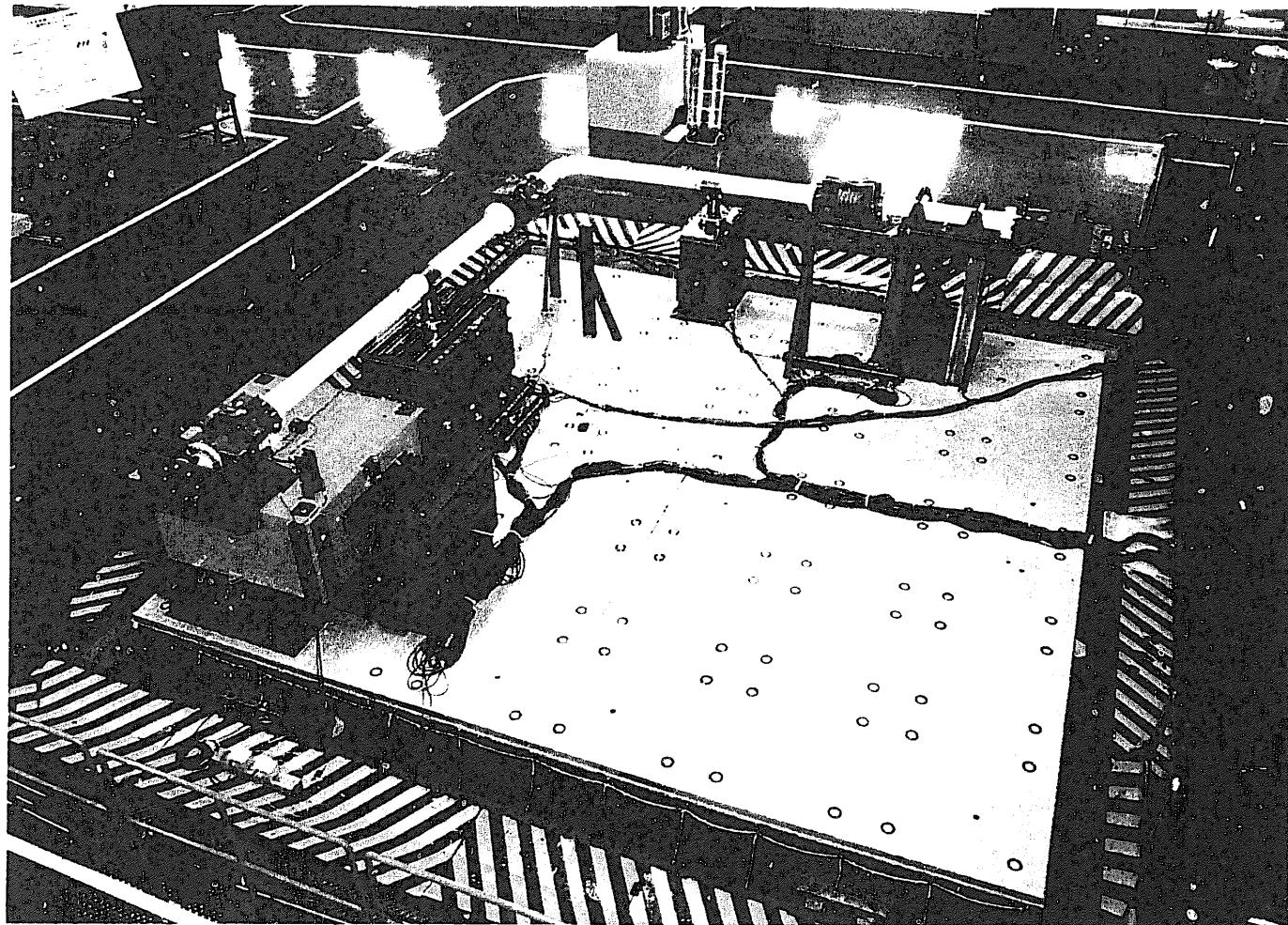


ヒンジ型伸縮管継手

ジンバル型伸縮管継手

伸縮管継手概略図

6.3 試験装置写真



試験装置写真