

原子力配管系の多入力振動実験報告書（その1）

著者	小川 信行, 箕輪 親宏, 勝山 ヨシ子, 小柳 良一, 千葉 敏郎, 相田 重一
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	75
ページ	1-126
発行年	1987-08-15
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002812/

原子力配管系の多入力振動実験 報告書 (その1)

小川信行* ・ 箕輪親宏* ・ 勝山ヨシ子**

国立防災科学技術センター

小柳良一*** ・ 千葉敏郎*** ・ 相田重一***

石川島播磨重工業株式会社

Multi-Support Excitation Test of Nuclear Piping Model (Report-1)

By

Nobuyuki Ogawa, Chikahiro Minowa, Yoshiko Katsuyama
National Reserch Center for Disaster Prevention, Japan
Ryoichi Koyanagi, Toshio Chiba, Shigekazu Aida
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

Abstract

In order to assess the piping design methodologies and stability of a piping system during multi-support excitation, we have planned the seismic tests of a large piping model in which two test phases were considered.

The first phase test have been performed in 1985. In this phase, the piping system has been tested in several conditions to asses design methodologies. In the second phase which was performed in 1986, the piping system including cracked pipe was tested in order to qualify the piping stability.

This report is the summary on following subjects of the first phase test.

- 1) An outline of testing apparatus.
- 2) The whole survey of phase I test.
- 3) The result and analysis of 2-support excitation test of the more flexible piping system than one designed by mobern seismic criteria.

*第2研究部, **第4研究部, ***原子力事業部技術開発部

目 次

はじめに	2
1. 配管系多入力応答試験装置の製作	3
1.1 概要	3
1.2 全体仕様と機器構成	4
1.3 各部機器の構造、機能	8
1.4 装置性能計算	26
1.5 無負荷加振試験（3入力）とその結果	30
2. 配管系モデルの多入力振動実験—全体の概要—	39
2.1 目的	39
2.2 試験体	39
2.3 実験シリーズおよび実験条件	45
2.4 入力波と入力方法	46
2.5 計測	53
2.6 実験結果の概要	57
3. 2入力モデルの実験結果と解析	106
3.1 概要	106
3.2 試験体の振動特性と実験結果	106
3.3 多入力地震波加振による応答および解析との比較	107
3.4 応答スペクトルによる評価	107
(付) 多入力応答計算式	116
4. まとめ	125

はじめに

原子力施設の耐震安全性を確保することは高地震帯にある我が国において極めて重要なことであり、このための研究開発が数多く行われてきている。当センターにおいても昭和57年度より原子力施設等安全研究の一環として機器配管系の耐震安全裕度の評価確認に関する研究を進めている。

原子力施設の耐震研究は地震動、地盤、建屋、機器系等の各対象について行われるが、特に機器配管系はそのレイアウト、支持方法および地震動の入力機構が建屋等に依存するところが多く、耐震設計に関係する問題点は多岐にわたっている。今後耐震信頼性のより一層の向上を図る上で、これらの問題点を究明し、より合理的な設計・解析手法を確立していくことが重要とされている。

本研究はこのような検討課題の一つである多入力地震動を受ける配管系の応答挙動の実験的評価を対象としたものである。実験は多入力応答に関する実験（昭和60年度）および安全裕度の評価を目的とした破損実験（昭和61年度）にわけて行った。

本報告はこのうち前者について実験全体の概要等をとりまとめたものである。

なお、本研究は国立機関原子力試験研究費（科学技術庁）により実施しているものである。

1. 配管系多入力応答試験装置の製作

1.1 概要

配管系は一般に建屋各層の床面や多数の機器、支持構造物にまたがって設置されるため、地震時にはこれら多くの場所からそれぞれ異なった地震動を受ける可能性が大きい。このような多入力を受ける配管の振動および変形を調べることは、配管系の耐震安全裕度を評価する上で重要な課題の一つである。

本装置はこのような機器配管モデルの多入力振動実験を行うために製作したものである。製作にあたっては、次のような考え方を基本においた。

- (1) 上下面内での多入力を主とし、水平面内でも2入力が可能とする。
- (2) 試験体配管を加振機で直接つかむ方式とはらず、振動板を介して配管またはサポート構造物に接続する多層振動台方式とする。
- (3) 4B～8Bクラスの配管（中小口径配管、縮尺モデル配管）を主な対象とする。
- (4) 大型振動台を反力フロアとして利用する。もし、必要があれば大型振動台による加振も行う。

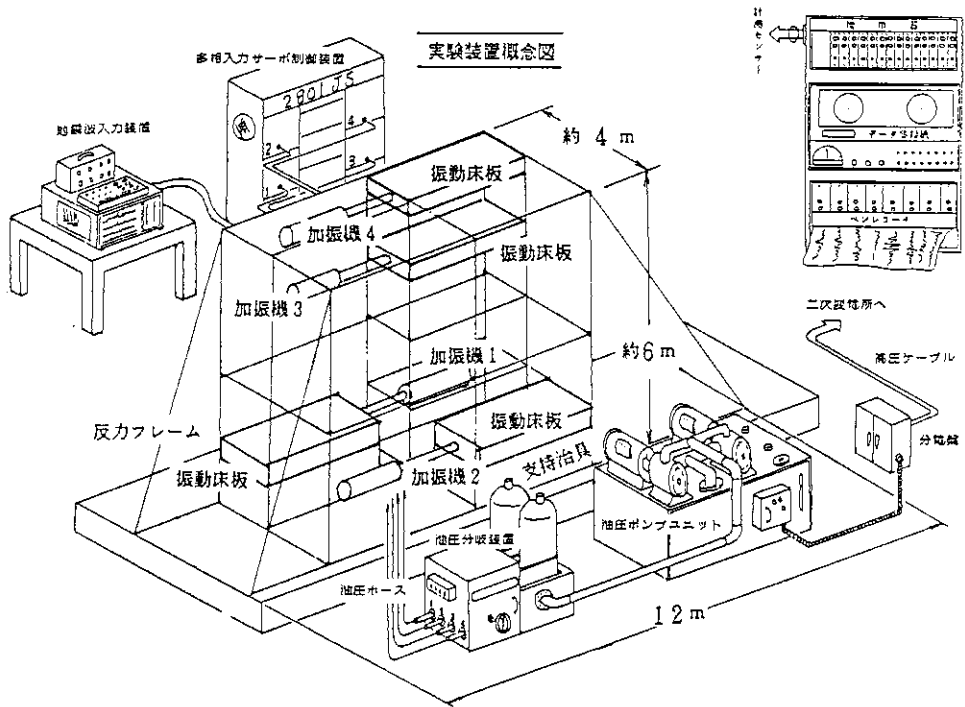


図 1.1 実験装置の概要

Fig. 1.1 General idea of experiment

1.2 全体仕様と機器構成

1.2.1 全体仕様および機能

本装置の全体構成は次表の通りである。

表 1.1 全体構成

Tab. 1.1 Composition of the system

加振機	4台
反力架構および振動板	1式
油圧装置	1式
制御装置	
サーボ制御装置	1式
地震波入力装置	1式

装置の基本仕様は次表の通りである。

表 1.2 基本仕様

Tab. 1.2 Basic specifications

加振方式	多層・多入力加振
加振方向	水平1方向
加振機数	4台(4相)
加振機取付可能位置	水平 $2 \times 2 \times$ 上下 $4 = 16$
制御	電気油圧サーボ制御
制御モード	変位または荷重サーボ
加振力	各10ton
変位	± 15 cm定格 (± 16.5 cm最大)
速度	同期運転時 ± 20 cm/s 以上
使用振動数	0-50Hz
加振波形	正弦波、地震波、ランダム波

反力架構上の任意の位置に設置され、しゅう動治具により支持された振動板4台は、これに接続する加振機および制御装置により水平方向に振動させられる。この振動板の位置は $2 \times 2 \times 4 = 16$ 個所のうち、試験体に応じて任意の4位置を選定して設置する。制御装置により、これら4台の振動板には異なった振動が加えられる。

振動板上に直接または架構、スナッパ等の支持具を介して設置された配管系モデルは4台の振動板から異なった地震入力を受ける。すなわち、地震動による慣性力と多入力による強制変形を同時に受ける。

以上が本装置の基本的な機能である。

1.2.2 機器構成

本装置の機器の構成および主な仕様は次表の通りである。

表 1.3 機器構成と主な仕様

Tab. 1.3 Components of the apparatus and functions

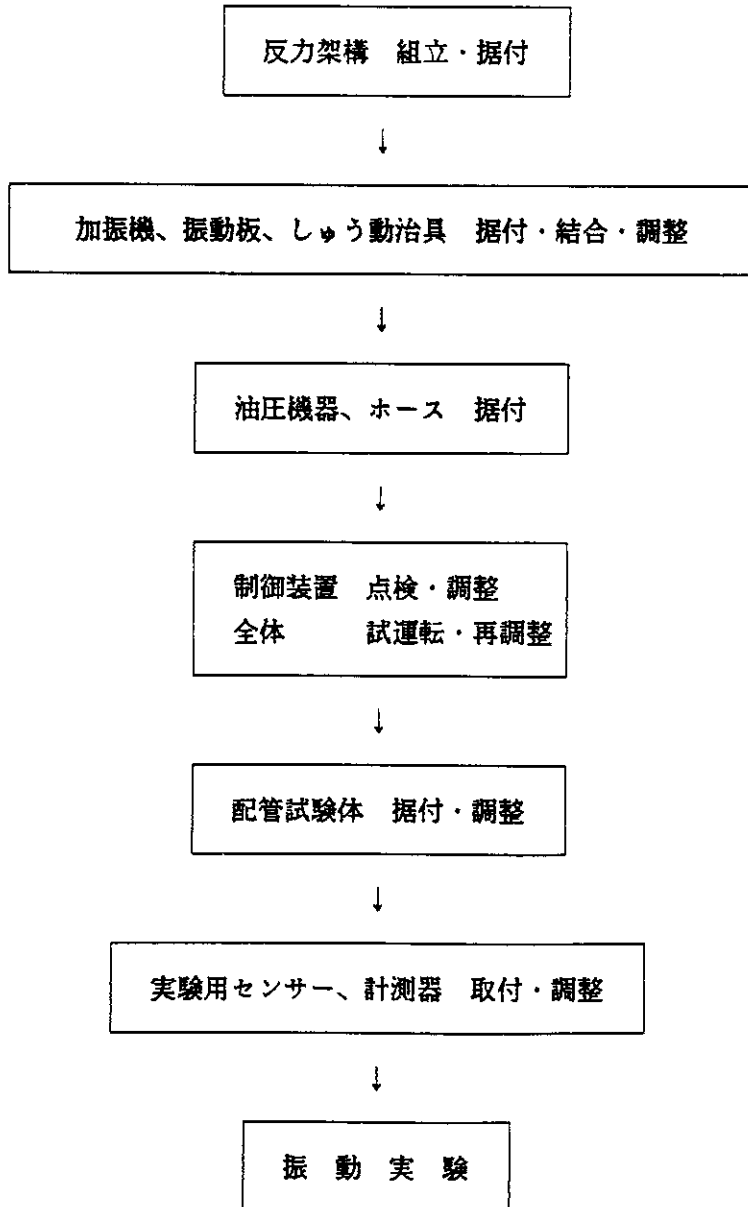
全体構成	細 目	数 量	仕 様
加 振 機	本 体	4 台	±10ton、±15cm (±16.5cm最大)
	サ ー ボ 弁	4 個	113ℓ/min at 210kg/cm ²
	変 位 計	4 個	±15cm、内蔵
	ロ ー ド セ ル	4 個	±10ton
	ス イ ベ ル 継 手	8 個	±10ton、±45度、±3度 (揺動角)
	受 け 架 台	4 台	
反力架構 と振動板	反 力 架 構	1 式	(1)4 m×長12m×高6 m、重量約40ton
	振 動 板	4 台	(1)0.8 m×長2.5 m×厚30cm、重量約1.8ton
	し ゅ う 動 治 具	16 式	ローラ支持荷重 水平5 t、上下3.75 t/個
油 圧 装 置	油 圧 ユ ニ ッ ト	1 式	280ℓ/min、55kw×2、タンク1000ℓ
	油 圧 分 岐 装 置	1 式	210kg/cm ² 、4分岐
	ア キ ュ ム レ ー タ	4 台	210kg/cm ² 、通過流量110ℓ/min
	油 圧 ホ ー ス	1 式	
	冷 却 装 置	1 式	冷却塔0.5kw、送水ポンプ2.2kw、配管配線1式
制 御 装 置	サ ー ボ 制 御 盤	4 台	制御モード4 (変位、荷重他)、制御レンジ4
	4 CH正弦波発生器	1 台	0.01-99.99Hz、可変位相制御
	入 力 信 号 切 換 盤	1 台	PHASE, CPU, EXT
	計 測 盤	4 台	入力±10V、分解能5mV、デジタル4桁
	リ ミ ッ タ ー 盤	4 台	STATIC (high, low), DYNAMIC : load/disp 切換方式
	振 動 回 数 記 録 盤	1 台	デジタル6桁×1, 10, 100:INT/EXT 切換可
	シ ス テ ム 監 視 盤	1 台	異常表示、加振機油圧の選択および停止機能
	油 圧 回 路 開 閉 盤	1 台	油圧ユニットの起動、停止、異常処理
	計 測 制 御 ケ ー ブ ル	1 式	
	地 震 波 入 力 装 置	1 式	C P U (8 bit, 48KB), D/A 7 ch, A/D 16ch

なお、構成機器の製作メーカーは、反力架構、振動板およびしゅうどう治具は石川島播磨重工業(株)、加振機、油圧装置および制御装置は(株)鷺宮製作所、地震波入力装置は(株)TEACである。

1.2.3 実験装置の据付および撤去

本装置は実験時、既設大型振動台上にレイアウトし、2F制御室において運転制御および計測を行う。また、実験後には大型振動台引き出しピット内スペースに分解保全する。なお、加振機、油圧部品等は専用格納箱に格納する。

据付時および撤去時のレイアウト概要を図1、2に示す。
据付の手順の概要はつぎの通りである。



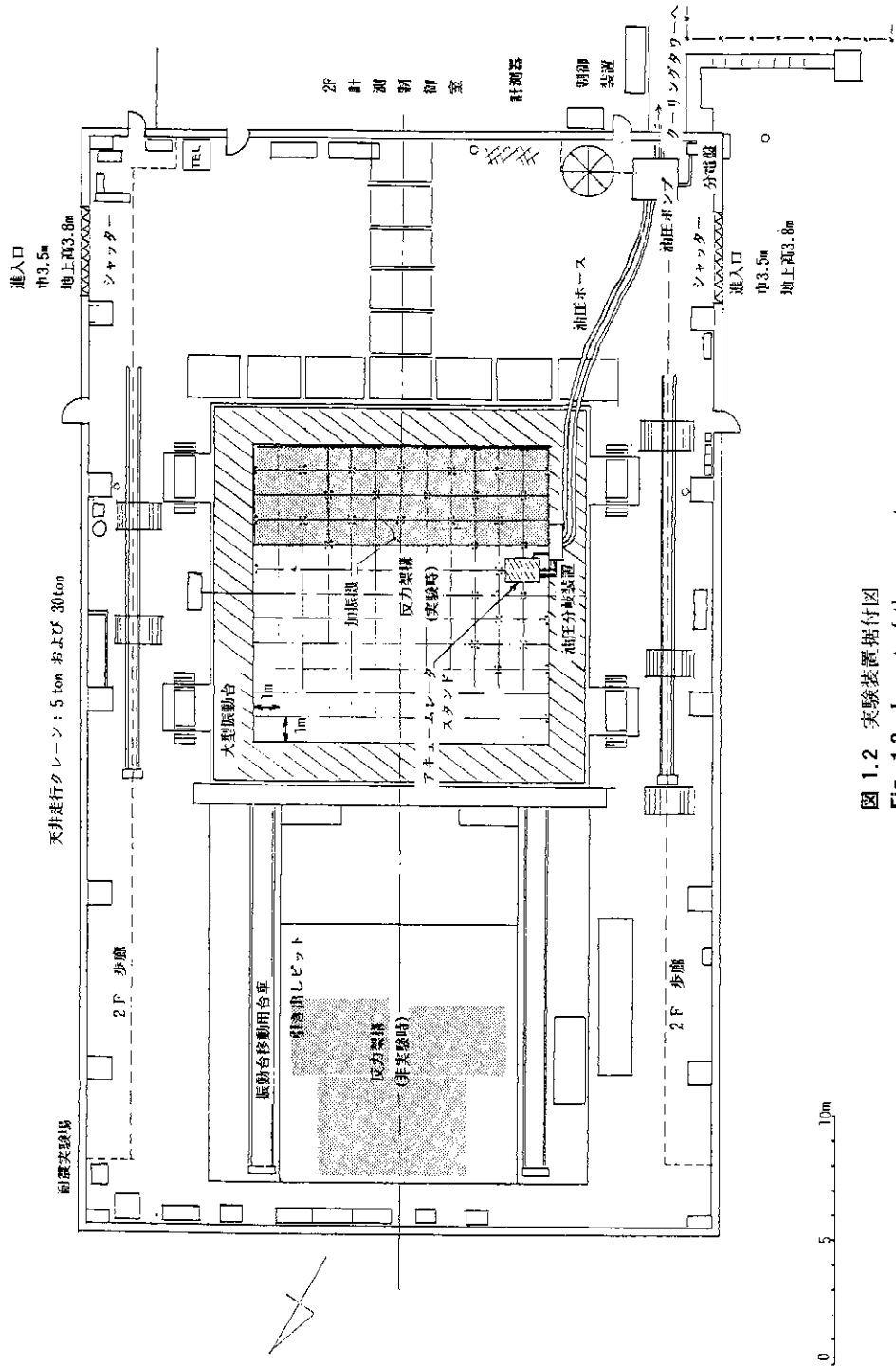


図 1.2 実験装置据付図
Fig. 1.2 Layout of the apparatus

1.3 各部機器の構造と機能

1.3.1 加振機

加振機本体は複動ピストン型油圧シリンダであり、主な仕様は次の通りである。

加振力	動的最大	$\pm 10 \text{ ton}$
	静的最大	$\pm 11.6 \text{ ton}$
変位	動的最大	$\pm 15 \text{ cm}$
	機械的	$\pm 16.5 \text{ cm}$
速度	最大	約 40 cm/s (単体)
重量		約 650 kg

装備品は以下の通りである。

サーボ弁	形式	MOOG J 072-006
	最大流量	113 l/min at 210 kg/cm^2
	定格サーボ電流	100 mA
	定格圧力	210 kg/cm^2
変位計	形式	AC-150D
	直線範囲	$\pm 150 \text{ mm}$ MAX
	非直線性	$\pm 1.0\% \text{ F.S.}$
ロードセル	形式	FLC-10
	容量	$\pm 10 \text{ ton}$
スイベル (継手)	伝達力	$\pm 10 \text{ ton}$
	揺動角	$\pm 45 \text{ 度}$ および $\pm 3 \text{ 度}$

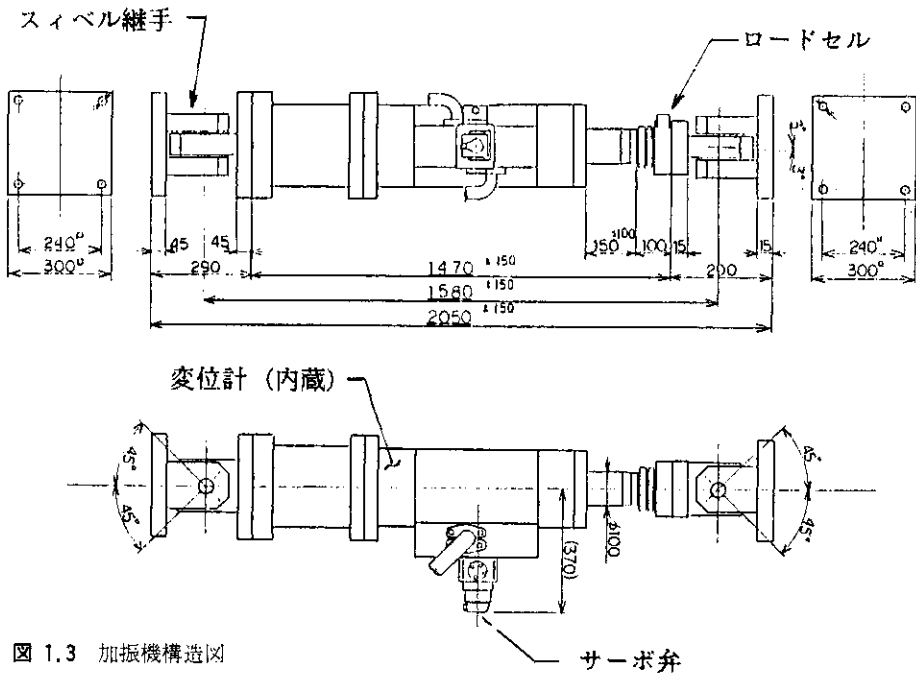
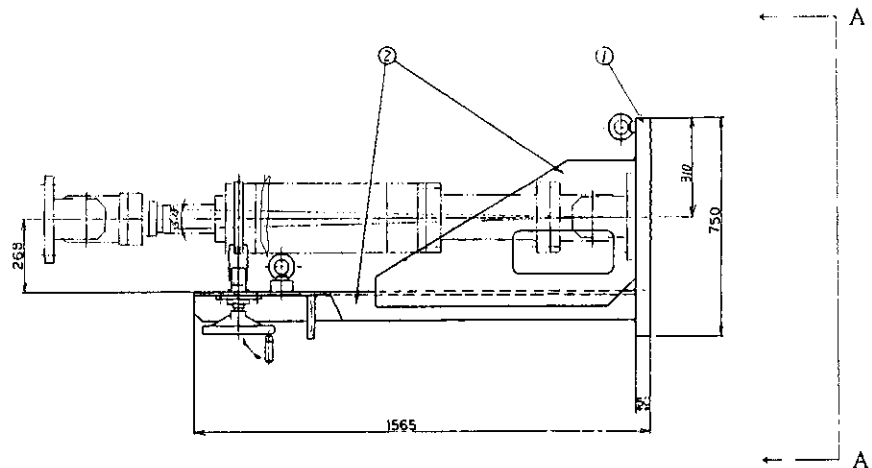


図 1.3 加振機構造図
Fig. 1.3 Hydraulic actuator



許容負荷 (スベーサ板) 10 ton
 上下調整角度 ± 1.3 度
 重量 450 kg

A - A 矢視

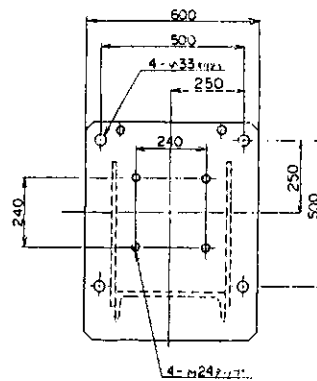


図 1.4 加振機受架台構造図
 (加振機の自重を支持するとともに加振機軸線の調整を行う)
 Fig. 1.4 Support base of the hydraulic actuator

1.3.2 反力架構と振動板

(1) 反力架構の機能

この架構は、加振機4台を搭載してその加振反力を受けるとともに、振動する振動板をしゅう動治具を介して支持するという2つの機能をもたせる必要がある。

また、配管系モデルの多入力試験を行うという目的に適した規模および構造を持つ必要がある。このため、次のような機能的仕様を設定した。

機能上の仕様

全体寸法	巾4 m×長12 m×高約6 m
加振機据付可能位置	水平面内 2×2=4箇所
	上下面内 4レベル、1.5 m間隔

反力架構の平面的なブロック分割と大型振動台との取り合い状況を図1.5に示す。

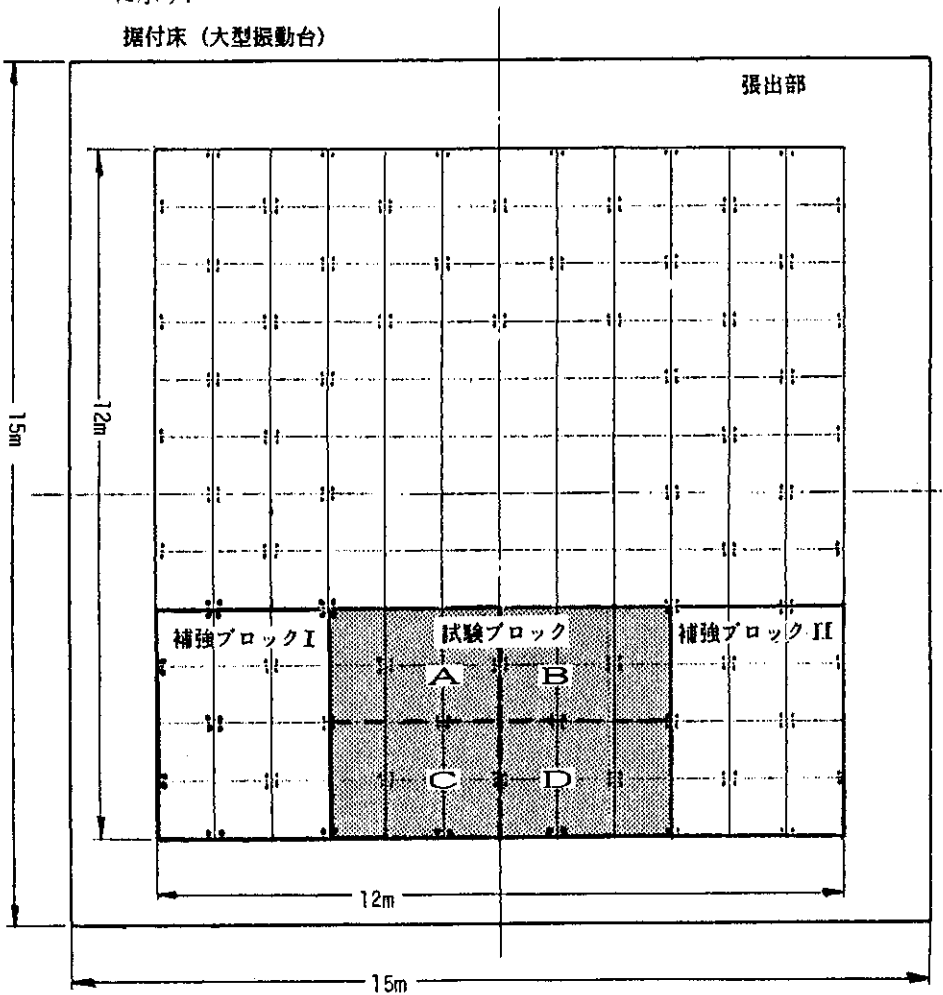


図 1.5 反力架構の平面ブロック分割図
Fig. 1.5 Block layout of reaction frame

加振機、振動板を同一平面内に対向型にレイアウトした例を図1. 6に示す. このような場合、上下方向の配管モデルのレイアウトには多少の工夫が必要である.

上下方向のブロック分割は図1. 7のように4段階とした.

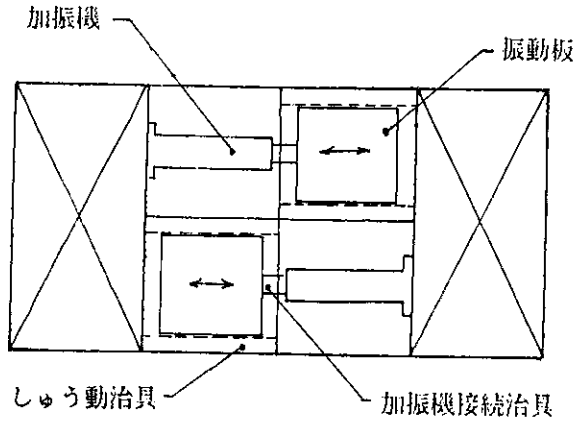


図 1.6 加振機－振動板のクロスレイアウト図

Fig. 1.6 Cross layout of actuator/shaking table

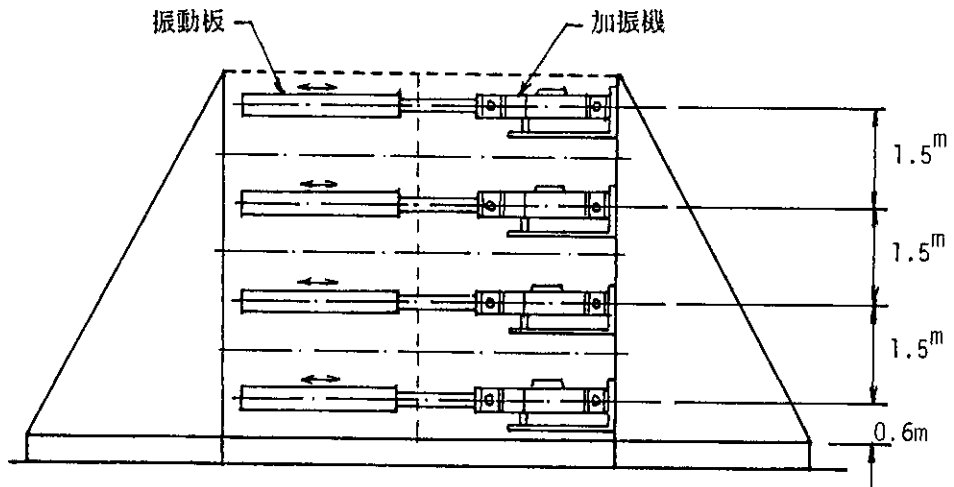


図 1.7 反力架構立面ブロック分割図

Fig. 1.7 Vertical block layout of reaction frame

(2) 反力架構の構造

前述のように架構全体は試験ブロックおよび補強ブロックにわけられるが試験ブロックは柱材および梁を、補強ブロックは斜材を主とした鉄骨軸組溶接構造とした。主部材にはH300×300を用いている。

構造上の仕様

- 設計荷重 加振機取付点（4個所）において静的荷重10ton。
荷重点は強度上最も厳しいと思われる数ケースを考えた。
なお、しゅう動治具取付位置では側面および上下方向にも荷重が作用するので、この点についても配慮した。
- 動的特性 実験時に架構自体が振動すると、試験体の応答を解析するのが大変複雑になる。架構の固有振動数を試験に用いる振動数範囲外にする必要がある。本装置では試験の振動数範囲を一応30Hz程度とし、架構の加振方向一次固有振動数40Hz以上を設計値とした。

全体構造の概要を次頁の図1. 8に示す。

この図にもとづく構造解析では以下の方針でモデル化した。

- 1) 部材は等剛性を有する線形部材とし、三次元にモデル化する。
- 2) 境界条件は部材接合部、部材脚部ともに剛接合とする。

これらにもとづく静解析の結果、上記仕様を満たすことが示された。なお鋼材はS S 4 1とし、許容応力度は1400kg/cm²とした。

動的解析では加振機、振動板の重量を1-4層で等価質量としてモデル化し、固有値解析を行った。この結果、反力架構の加振方向一次固有振動数は約44.94Hzとなり、ほぼ満足しうる設計値が得られた。一方、側方向（加振直角方向）については最低次の固有振動数は約25Hzとなった。これについては加振方向に比べ重要度は低いので、完成時に問題があれば若干の補強を行うことで十分対処できるものと判断した。

図1. 9に加振方向一次固有振動のモードを示した。

なお、加振機取付点やしゅう動治具取付部には局部的に大きな荷重が作用するので、応力の分散および取付時の微調整などが可能なように配慮した。

また、反力架構には、加振機、振動板に加えて試験体配管およびその支持構造物が据付けられ、さらに実験終了の際は架構を分解して保全する。このため、据付・解体方法に考慮し設計を行った。

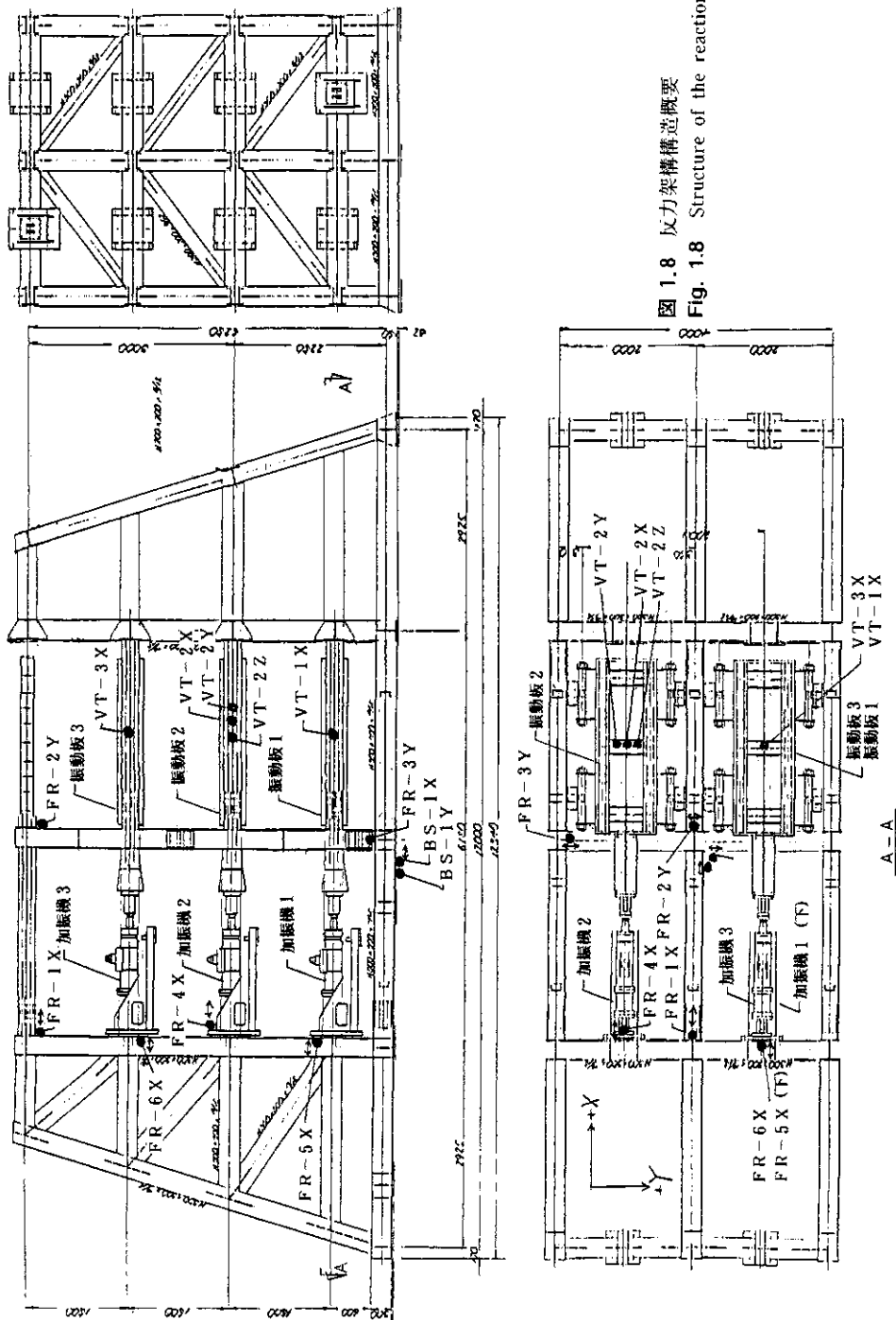


図 1.8 反力架構造概要
Fig. 1.8 Structure of the reaction frame

注) 計算では、図の左側1層から4層の加振機取付位置に
加振機と振動板の重量に相当する節点質量を考慮した。
このため図の振動モードは加振方向が卓越するモード
であるが、実際には図のように左側が大きく動くねじれ
型のモードになる。

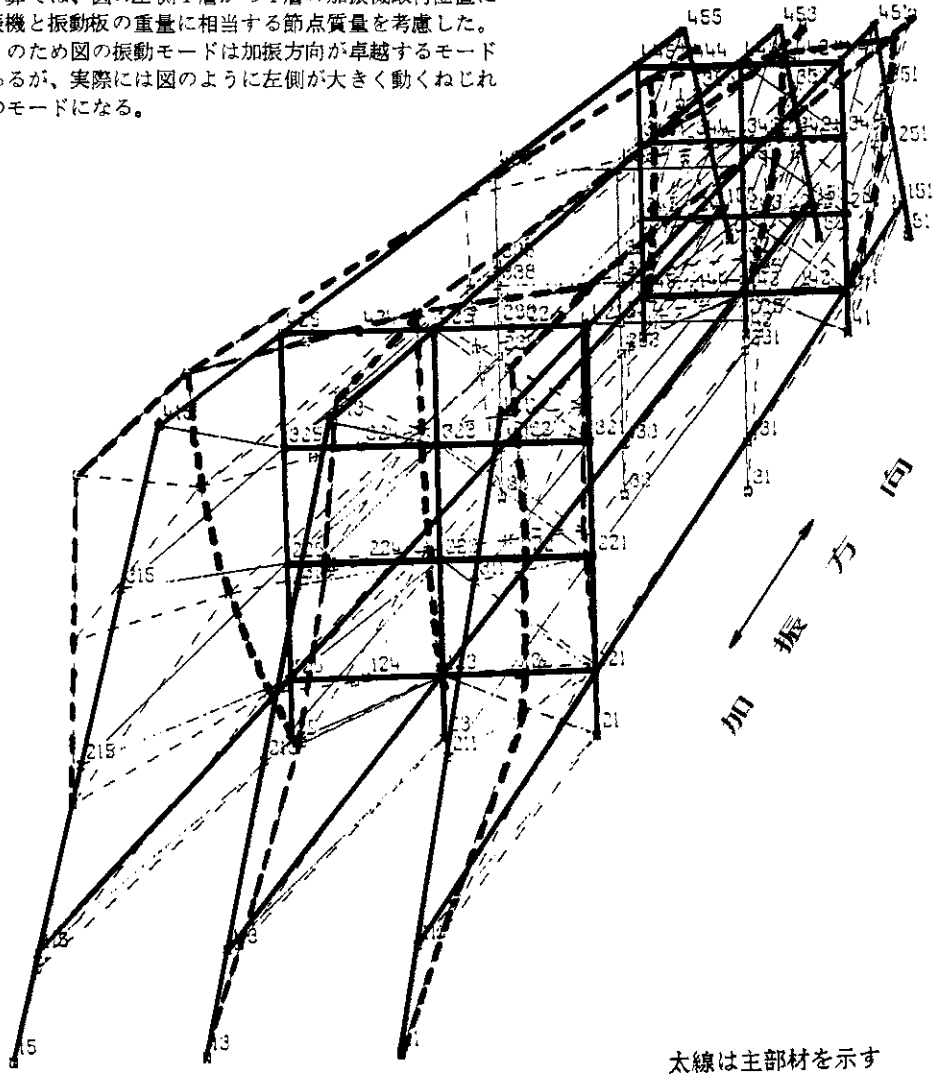


図 1.9 加振方向一次固有振動モード (計算 4.4, 9 Hz)

Fig. 1.9 1st vibration mode of the reaction frame in shaking direction

(3) 振動板

振動板は試験体配管のアンカーまたはサポート等を搭載して振動する床板であり、加振機の加振力を試験体に伝えるとともに、試験体配管の変形抵抗力および抵抗モーメント、慣性力などを受けるものである。

構造上の仕様

寸法	巾0.8 m×長2.5 m、厚さ30 cm
自重	約2 ton
自重以外の垂直荷重	1 ton
面外曲げモーメント荷重	1.5 ton・m
面内捻じりモーメント	2.0 ton・m

振動板には加振方向への移動をスムーズに行い、他方向への振動を拘束するためのしゅう動治具が取付けられる。構造上の特徴としては、一枚板構造とせず、Hビームを用いた格子構造とし、上下に貫通する部分を強度上可能な限り広くした点である。これは、配管モデルの上下方向レイアウトをし易くするためである。

図1.10に構造の概要を示す。これにもとづいて算定した固有振動数は約7.6 Hzであった。

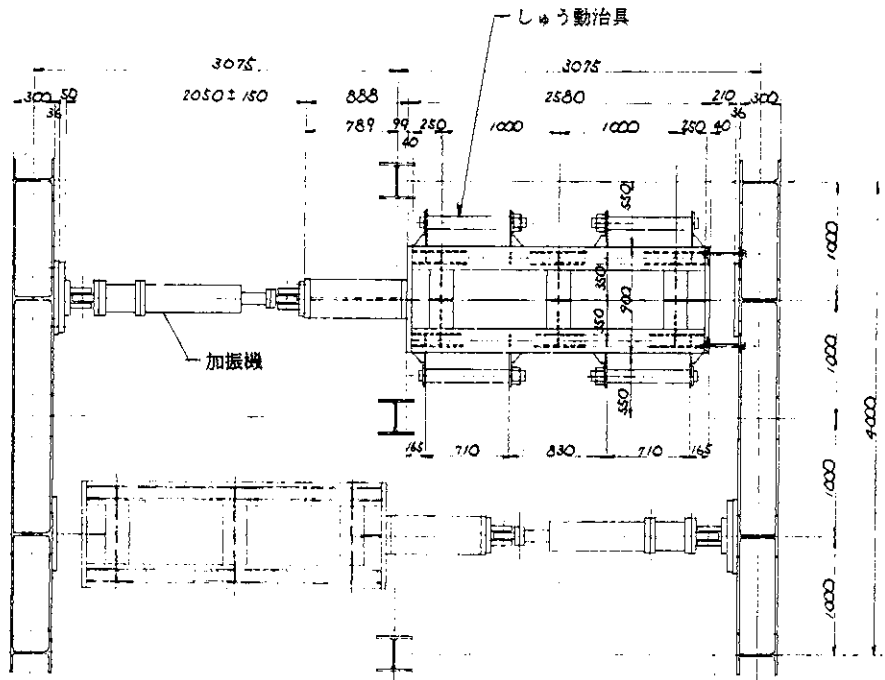


図 1.10 振動板構造概要

Fig. 1.10 Structure of the shaking table

(4) しゅう動治具

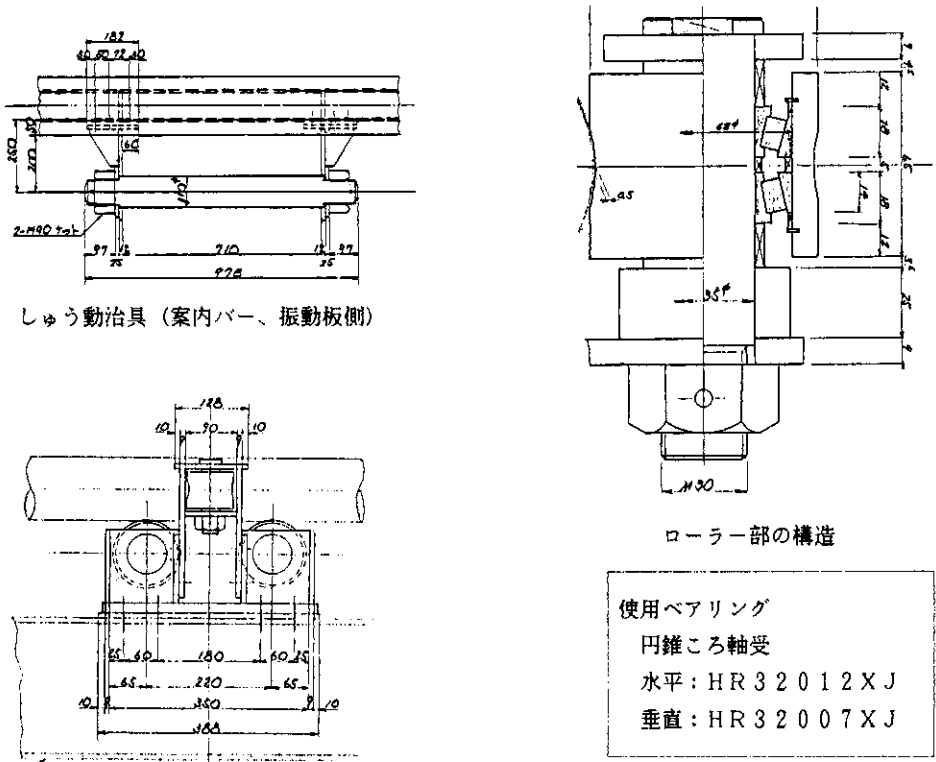
振動板の振動を、その両側面でスムーズに案内するための機構である。

最近の振動台では、静圧軸受によるガイドが普通であるが、本装置では、振動板の数が多いこと、振動板のレイアウトを試験体に応じて変更すること、試作機として計画したこと等の理由で機械的な方式（ローラーガイド）を用いることにした。

構造仕様

ユニット数	振動板1台あたり4個所
ローラー数	1ユニットあたり水平用2、垂直用2
許容荷重	ローラー1個あたり水平5ton 垂直3.75ton
寿命時間	1000時間以上（ただし、振動板は20cm/s定速度運転として評価する）

このローラーは反力架構側に取り付けられ、振動板にはローラーの転動を案内するバーが取り付けられる。なお、必要に応じて振動板を固定できるようロック機構を設けた。



しゅう動治具（ローラーユニット、反力架構側）

図 1.11 しゅう動部の構造
Fig. 1.11 Sliding devices

1.3.3 油圧装置

機能と構成

加振機4台への油圧供給装置は、油圧ポンプユニット、油圧分岐装置、アキュムレータスタンド、冷却装置および電源装置から成る。

基本仕様は加振機最大速度で決まるが、本計画では加振機4台の同時最大速度を20 cm/s とすることとし、油圧ポンプユニットの流量仕様を設定した。一方、各加振機のサーボ弁については速度40 cm/s 程度が可能な定格流量のものを装備し、加振機単体ごとの運転ではかなり高い速度で加振できるようにした。各部の構造の概要を図1.12-1.15に示す。

仕様

油圧ポンプユニット (1式)

定格圧力	210 kg/cm ²
吐出量	140 ℓ/min × 2
電動機	AC 200 V、5.5 kW × 2
タンク容量	1000 ℓ
作動油	ダイヤモンドルブ056
冷却	水冷式オイルクーラー装備

油圧分岐装置 (1式)

各加振機へ油圧を分岐して送り出す。電磁制御弁により任意の加振機を選定することが可能。

付属品	マニホールド 1台 高圧側ストップ弁4台 低圧側チェック弁4台 接続ホース類1式
-----	---------------------------------------------------

アキュムレータスタンド (4台)

定格圧力	210 kg/cm ²
通過流量	110 ℓ/min

冷却装置 (1式)

冷却塔	0.5 kW
送水ポンプ	2.2 kW
制御盤	1台
配管・配線	1式

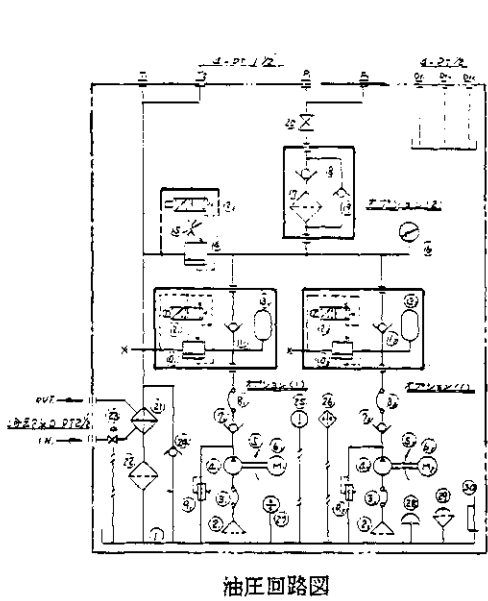


図 1.12 油圧ポンプユニット
Fig. 1.12 Hydraulic pump unit

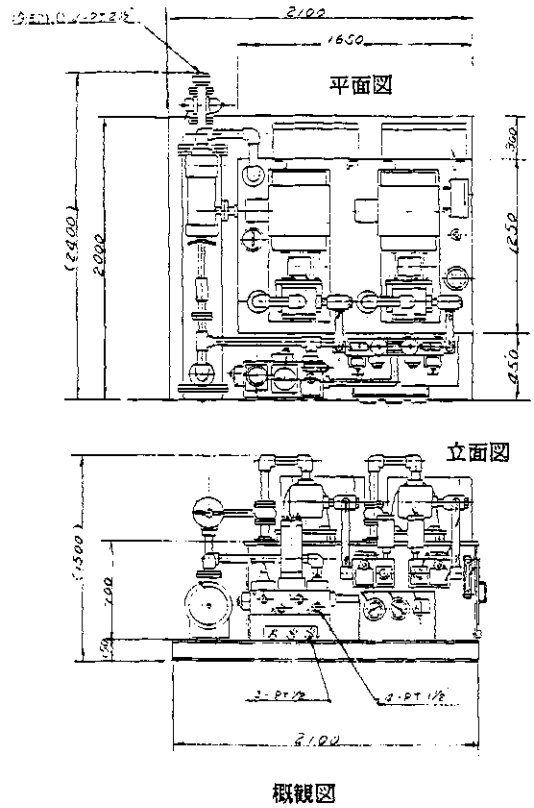
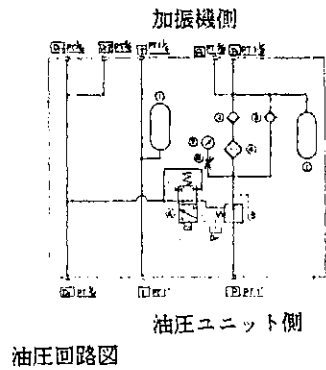
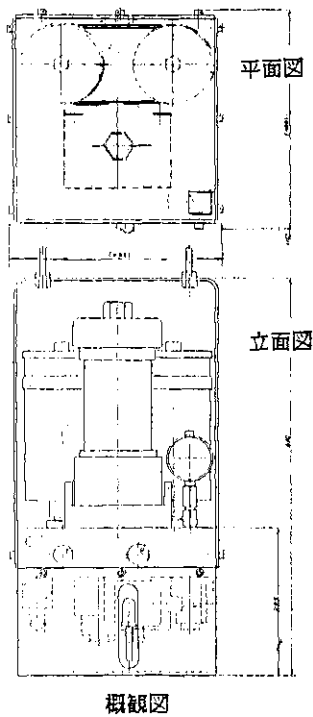


図 1.13 アキュレータスタンド
Fig. 1.13 Accumulator stand



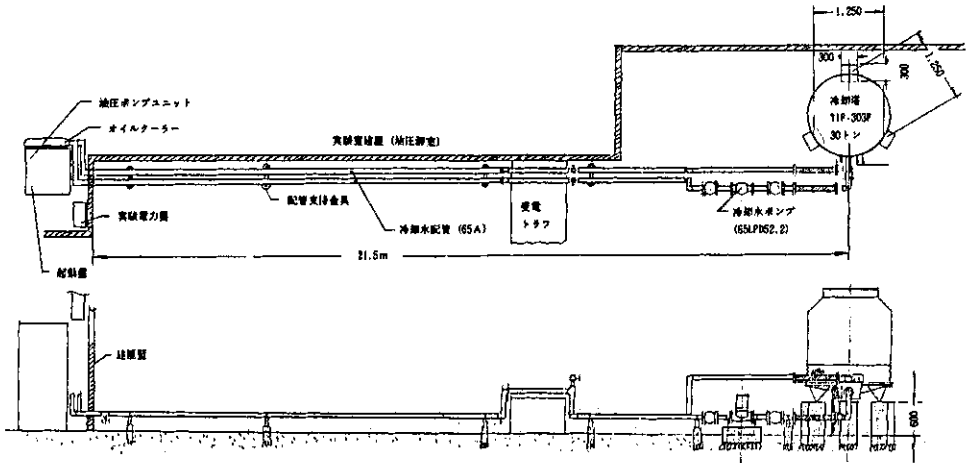


図 1.14 冷却系統 (屋外)
Fig. 1.14 Cooling system (outdoor)

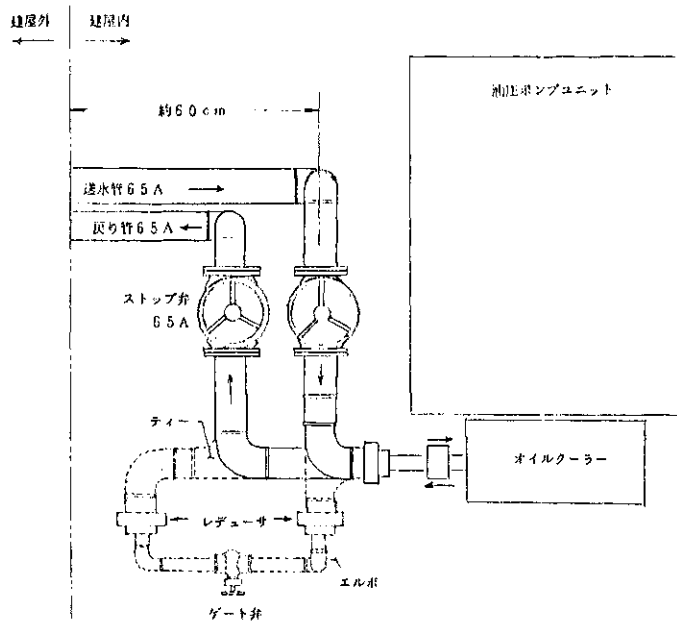


図 1.15 冷却系統 (屋内)
Fig. 1.15 Cooling system (indoor)

1.3.4 制御装置

制御装置は、サーボ制御盤を主とした多相入力制御装置、入力地震波の発生、処理を行う地震波入力装置の2つの装置から構成される。

(1) 多相入力制御装置

基本的な考え方

制御は各加振機ごとに独立したアナログサーボ制御を基本とした。この制御は変位フィードバック制御の他、荷重フィードバック制御も可能であり、変位入力による地震応答試験以外にも試験体初期荷重(応力)の調整が行え、また静的な荷重試験も行えるよう構成した。

一方、加振時には4台の加振機と負荷(振動板や配管モデル)が力学的に連成しあうので、動的な領域では各加振機の実際の動きと入力波の間には差異が生じる。このような差異を生じた場合は最近の振動台などで用いられている入力補償の手法が利用しうると思われる。このため全体構成においては入力補償法の適用が行えるよう考慮した。

しかし、本装置の場合、多入力であること、本格的な振動台に比べるとガイド機構等が簡単な方式であること等のため入力補償により実際に効果を上げることはかなり困難である。この点は現在検討課題として残っている。

制御系全体のフローチャートを図1.16に示す。

構成および特徴

4台の主サーボ制御盤、4ch可変位相正弦波発生器、計測モニター盤、油圧回路制御盤の他、リミッター、入力切り換え、異常監視等の機能を装備している。

サーボ制御盤はマイクロプロセッサを内蔵しており、制御モード、制御レンジの切り換えが容易に行えるほか、外部コンピュータによってもコントロールできる。

- ・ASCIIコードによりサーボアンプのリモートコントロールが行える。
- ・油圧を落とすことなく制御モード(フィードバックモード)の自動切り換えを行うことができる。(変位、荷重等)
- ・制御レンジの切り換えが自動的に行える。
変位 30、50、150mm
荷重 2、5、10ton
- ・異常信号レベルの設定が可能。
- ・オートレスポンス機能を有し、試験前に調整しておくことによりフィードバックモード切替時に再調整の必要がない。
- ・複数のサーボ制御盤の同期をとることが可能である。
- ・停止モードを指定することができる。
- ・電源投入時、サーボアンプエラー信号を自動的に0とし、アクチュエータの異常動作を防止するよう電磁弁制御を行っている。

多相入力制御装置の外観、構成を図1.17に示す。

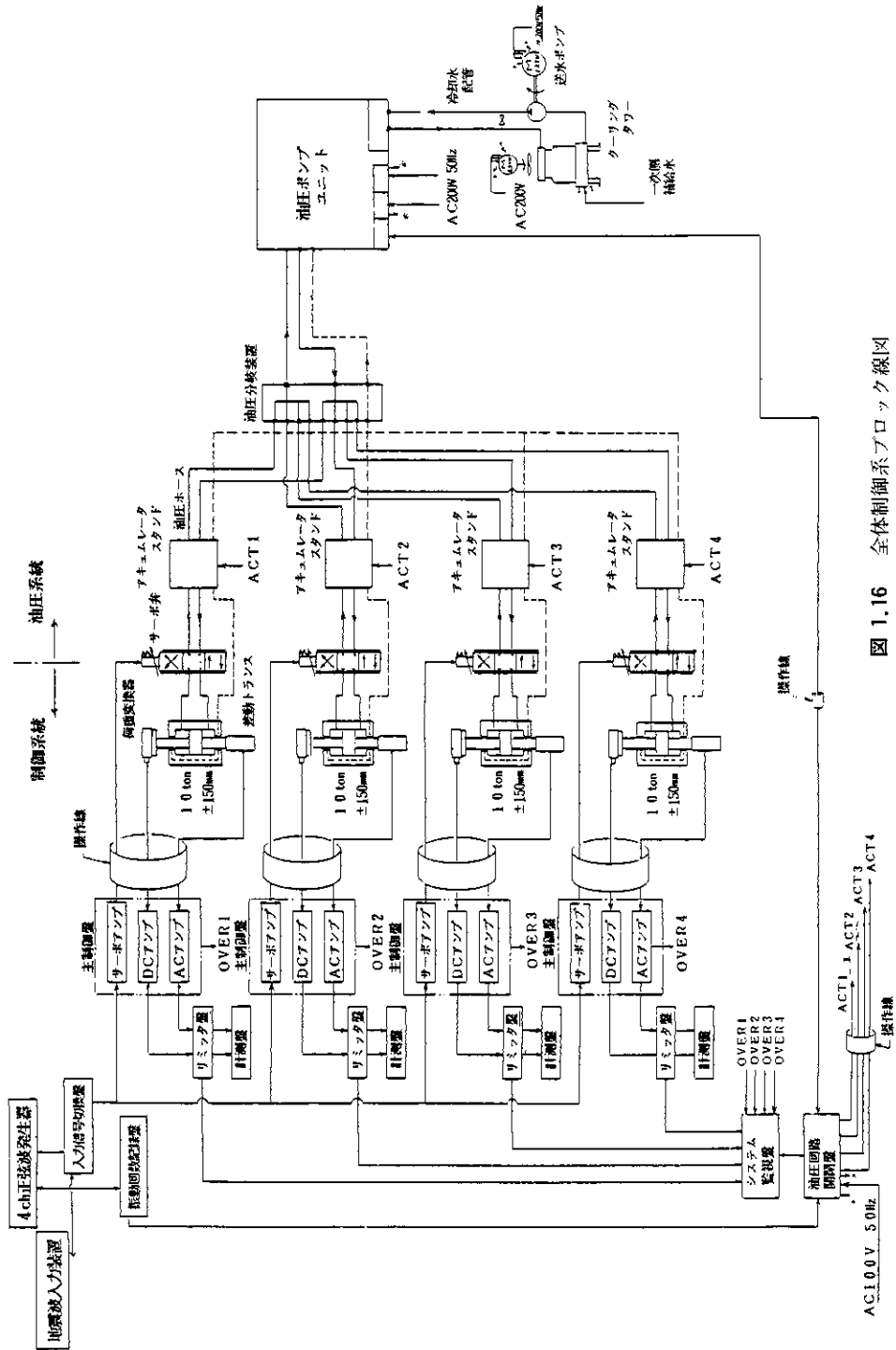


図 1.16 全体制御系ブロック線図
Fig. 1.16 Block diagram of control system

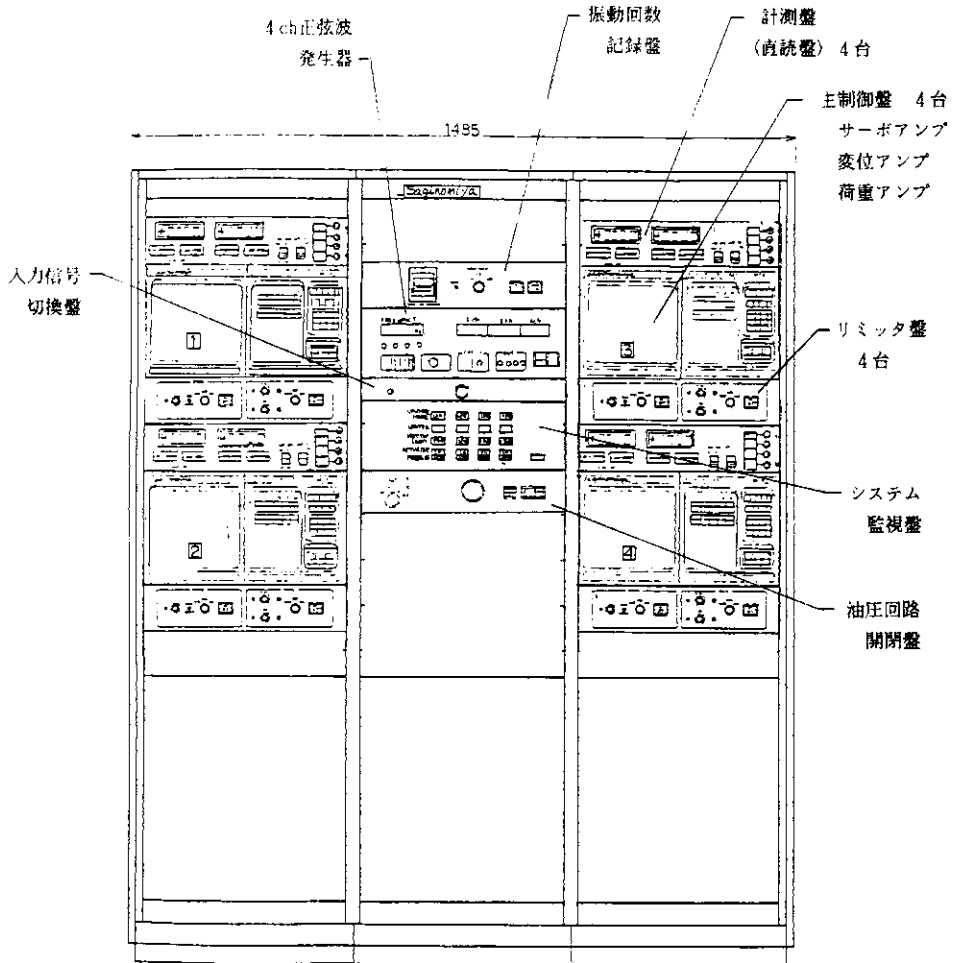


図 1.17 多相入力制御装置 (構成および外観)

Fig. 1.17 General view of multi-phase servo control unit

(2) 地震波入力装置

概要

種々の多入力波を用いて配管モデルの応答および損傷を実験的に調べることが本装置の目的であるが、このためには多入力波をどのように作成し、また印加するかという問題が重要である。入力波の設計自体は試験体との関連で行うわけであるが、装置としては計画された入力波を加振機用のアナログ入力波として作り、またそれらに一次処理を加えたり、レベルを設定したりする機能が必要となる。多入力ではこれらの事情が単入力の場合より複雑となる。

構成

それぞれ異なった振幅レベル、位相差等を持つ4つの入力波を同時に印加するといった多入力試験ではアナログデータレコーダ等による入力方法は困難である。このためマイクロコンピュータによる入力発生、印加が行える構成とした。図1. 18にその内容を示す。

図のように実際の加振操作の中心となるのは8ビットプロセッサを用いた地震波入力装置である。付帯機器としては、入力波の送出および応答波収録のためのAD、DA変換器、タイマーボード、信号中継器、入力波および応答波を一時格納するための拡張メモリー、モニター記録のためのビデオプリンタ等がある。

また、大型振動台用コンピュータ(ソードM685システム)とはRS232Cによる通信が可能とした。

一方、RS232Cおよび簡易データ交換装置を介して多相入力制御装置に接続し、各種操作が地震波入力装置のキーボードで一括して行えるようにすることも可能である。

機能

入力波の生成から加振までのプロセスを要約すると、大型振動台用コンピュータ等を用いた入力波生成と保存(媒体はフロッピーなど)、地震波入力装置による波形データの補正、設定、送出、そして多相入力制御装置で行われるリアルタイムサーボコントロールである。

地震波入力装置自体で行うのが困難な入力処理等を行う場合は大型振動台用コンピュータ(ソードM685システム)で波形の発生、変形等の計算を行い、結果として得られた波をデータ伝送を介して地震波入力装置に送り返すことができる。原波を地震波入力装置に取り込む時も同様である。

主たる入力操作は地震波入力装置のキーボードから与えられるコマンドによつて進められる。

このソフトウェアの構成は図1. 19に示す通りである。

手順の概要は以下の通りである。

イ. 一次入力波の生成

実験対象に対応した入力波作成モデルを考え、これとあらかじめ用意している原地震波ライブラリーや設定スペクトルを組みあわせて、必要とする入力波形データを作っておくものである。この過程は加振実験とは全くオフラインで大型コンピュータ等によって行われる。

入力波モデルは、地震波の場合は建屋とか大型機器の振動モデルである。もっと基礎的な試験の場合は、多入力波作成モデルとしては、波形のスペクトル、位相、振幅包絡曲線などの代表的なパターンが数多く作れるものを利用する必要がある。

ロ. 入力印加(加振)までの手順

多相入力制御装置をリモートコントロールする場合、制御コマンドは多相入力制御装置の制御パラメータをASCIIコードで指定する。制御モードでは荷重制御、変位制御の選択を、制御レンジ、レベルでは計測器のレンジ切り換え、入力範囲の設定を行う。

この手法はコンピュータを用いた自動プログラム試験（疲労試験等）で用いられているが、今回の実験では用いなかった。

入力波補正コマンドは入力波にフィルタリングや応答補正などの簡単な処理を加えるものであり、M685システムで行う。この処理は実験結果を見て必要がある場合に行うものである。

入力波転送コマンドは一次入力波または補正したものを地震波入力装置へ転送するものであり、加振に直接用いる波形データファイルとして利用される。地震波入力装置では転送された原波の変位波への変換（積分）のほか必要な場合は波形の時間軸のずらしなどの処理を行った後、フロッピーへの格納を行う。

入力波設定コマンドは正弦波等も含めた直接入力波の選定、内部メモリーへのセット、入出力波のモニター等を行うものである。入出力チャンネル数、サンプルタイム、入力レベル等の設定もここで行われる。図1.20は入力波設定コマンド例であり、コマンド1により生成した地震波入力波をモニターした例である。このコマンドに引き続いて、スタート・ストップコードにより加振が開始、停止される。停止後、応答波はコマンドによりフロッピー等に格納される。なお、サンプルタイムは1ms（DA）、10ms（AD）が標準である。

ハ. 応答波のモニターと解析

波形処理コマンドでは、収録された入力波および加振機応答波形の表示、FFT処理などを行い、加振の適否、特性などをモニターする。図1.21はその例である。一方、もし必要があれば、応答波転送コマンドにより入力波および応答波をコンピュータM685に送り、加振特性の解析を行い、一次入力波の補正に用いることができる。

なお、コンピュータM685の4CH AD/DAを利用し、これによる加振制御を行うことも可能である。現在プログラム整備中であるが、この方式の場合入力補償等が行いやすくなる。

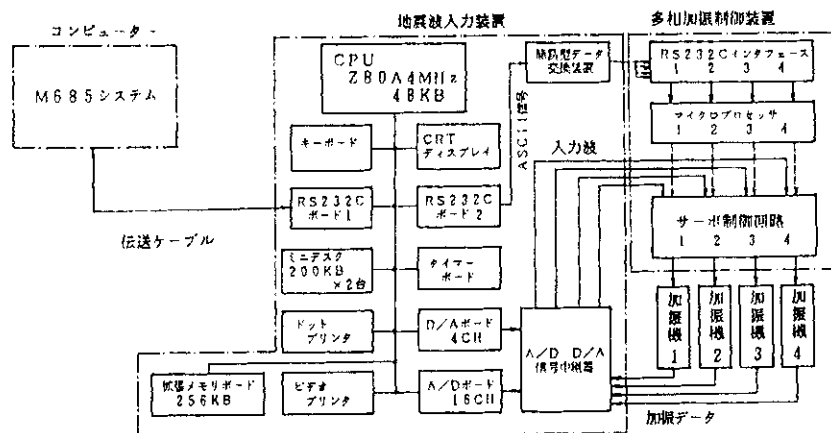


図 1.18 地震波加振入力システム（ハードウェア）
Fig. 1.18 Earthquake signal generating system (hardware)

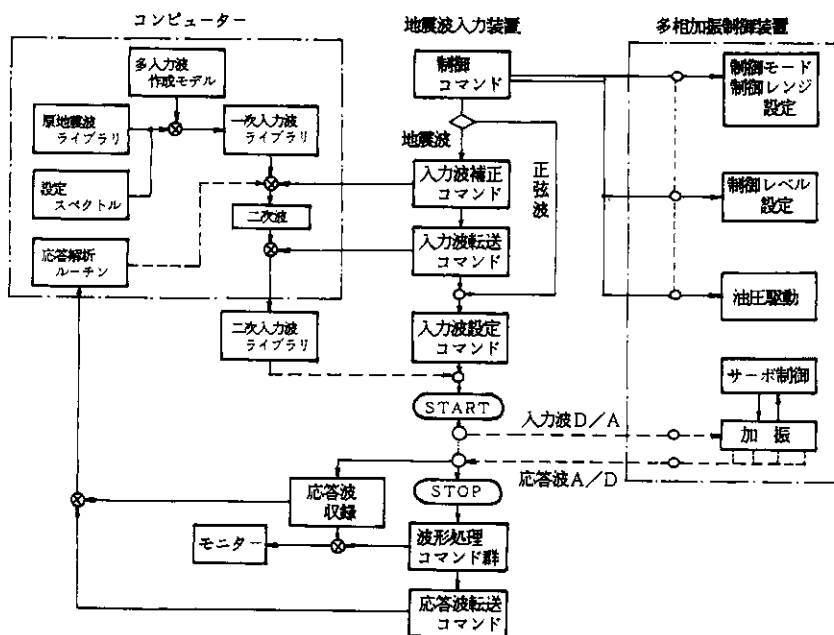
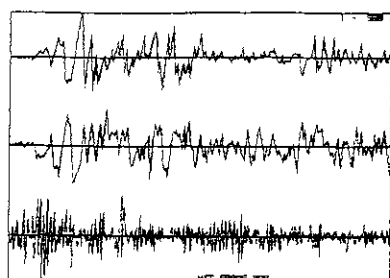


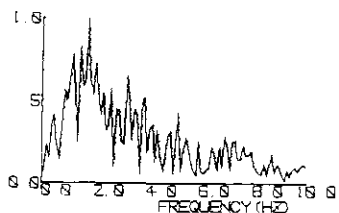
図 1.19 地震波加振入力システム (ソフトウェア)
Fig. 1.19 Earthquake signal generating system (software)



```

COMMAND#0 : STOP
=1 : GENERATE DA DATA
=2 : GRAPH DA DATA
=3 : EXECUTE DA
=4 : SAVE DA DATA
=5 : GRAPH AB DATA
=6 : GRAPH SIMULATE DISP.
=7 : GENERATE SIN WAVE
=8 : SIN SWEEP
=> 1
    
```

図 1.20 入力波設定コマンドと例
(コマンド1により地震波入力を生成)
Fig. 1.20 Input generation by command selection



```

COMMAND#0 : STOP
=0 : RECALL DISPLAY
=1 : SET INPUT/OUTPUT AD DATA CHANNEL
=2 : DISPLAY INPUT WAVE
=3 : DISPLAY OUTPUT WAVE
=4 : DISPLAY INPUT FFT
=5 : DISPLAY OUTPUT FFT
=6 : DISPLAY RESPONSE FUNCTION
=7 : SAVE/READ TO/FROM DISK (DATA OR RESULT)
=> 5
    
```

図 1.21 波形処理コマンドと例
(コマンド5により出力波のフーリエスペクトルをモニター)
Fig. 1.21 Data processing by command selection

1.4 装置性能計算

1.4.1 限界性能について

加振機—振動板を1台だけ動かし、他は静止させている場合（単機運転）、および4台の加振機—振動板を全数同位相で運転する場合（同時運転）の限界性能は以下のようになる。

(1) 計算に必要な定数等

$$\begin{aligned} \text{受圧面積 } A &= \text{静的最大荷重} / 210 \text{ kg/cm}^2 = 11600 \text{ kg} / 210 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 55.6 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{変位ストローク } L = 33 \text{ cm} / 2 = 16.5 \text{ cm}$$

$$\text{圧縮油量 } V = (2AL) = 1834 \text{ cm}^3$$

$$\text{動的加振力 } F = 10000 \text{ kg}$$

$$\text{サーボ弁最大流量 } Q_v = 113 \text{ l/min} \quad (\text{MOOG J072-006})$$

$$\text{油圧ポンプ最大流量 } Q_p = 280 \text{ l/min} \quad (140 \text{ l/min} \times 2 \text{台})$$

$$\text{作動油体積弾性率 } \beta = 7000 \text{ kg/cm}^3$$

(安全側としてやや低く仮定)

負荷重量 W (加振機1台あたり、慣性負荷のみを考える。)

$$W = \text{ピストン} + \text{継手} + \text{振動板} + (\text{試験体} / 4)$$

$$\text{ピストン} = 200 \text{ kg}$$

$$\text{継手} = \text{若干}$$

$$\text{振動板} = 1800 \text{ kg}$$

$$\text{試験体} = 2.4 \text{ ton} / 4 = 600 \text{ kg}$$

$$\therefore W = 2600 \text{ kg} \rightarrow 2.6 \text{ ton} \text{ とする.}$$

(2) 限界性能値 ($g = 980 \text{ cm/s}^2$)

$$\text{変位限界 } L_{max} = 16.5 \text{ cm}$$

速度限界

$$\text{単機運転時 } v_{max} = Q_v / A = 34 \text{ cm/s}$$

$$\text{同時運転時 } v_{max} = Q_p / A / 4 = 20 \text{ cm/s}$$

$$\text{加速度限界 } \alpha_{max} = F / (W/g) = 2800 \text{ Gal}$$

$$\text{加振系固有振動数 } f_n = (1/2\pi) \sqrt{4A^2 g \beta / VW} = 21.2 \text{ Hz}$$

高域応答限界 ($f > f_n$)

$$\alpha_{max} = \left| \frac{2\pi f \cdot Q_{max}}{A(1 - f^2 / f_n^2)} \right|$$

ただし、 $Q_{max} = Q_v$ (単機運転時)

$Q_{max} = Q_p$ (同時運転時)

以上の算定値を図示したものが図1. 2.6の限界性能曲線である。

1.4.2 試験能力 (静的加力の場合)

試験体をバネ負荷とした場合の静的試験能力を、最も簡単な配管モデルで検討すると以下のようなものである。

下図のような平面Z型配管が4層 (点1、5、7、10) で支持されているものとする。

- 1、10 アンカー支持
- 5、7 その他の支持 (xまわり回転および上下変位は自由とした)

この4層のうち1つの層に静的変位を加え、他の層は加振方向に動かないように制御する。このような条件で実験を行った場合、変位入力を加える層の加振機および拘束する層の加振機に生ずる変位又は拘束力が、加振機の持つ限界値 (定格15cm、10ton) に達した時の配管の変形あるいは応力が、この装置の静的試験能力の限界を表すことになる。

上記の算定を次の2種の配管に対して行った。

- (1) 4B-Sch60 外径 $D=11.43$ cm、肉厚 $t=7.1$ mm
- (2) 4B-Sch20 外径 $D=11.43$ cm、肉厚 $t=4.9$ mm

結果は図1.23-1.24に示す通りである。

なお、計算は最後まで弾性応答として行っている。従って過大な応力値となっている。実際は塑性域に入るので、応力、曲げモーメントおよび加振機反力は図示の数値よりかなり小さくなり、逆に入力変位はもっと大きくなる。

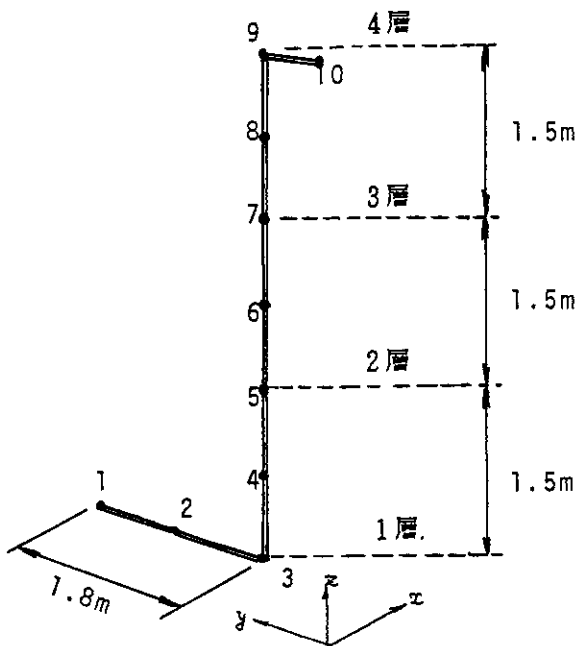


図 1.22 静的試験能力算定モデル

Fig. 1.22 A model for estimation of the system performance

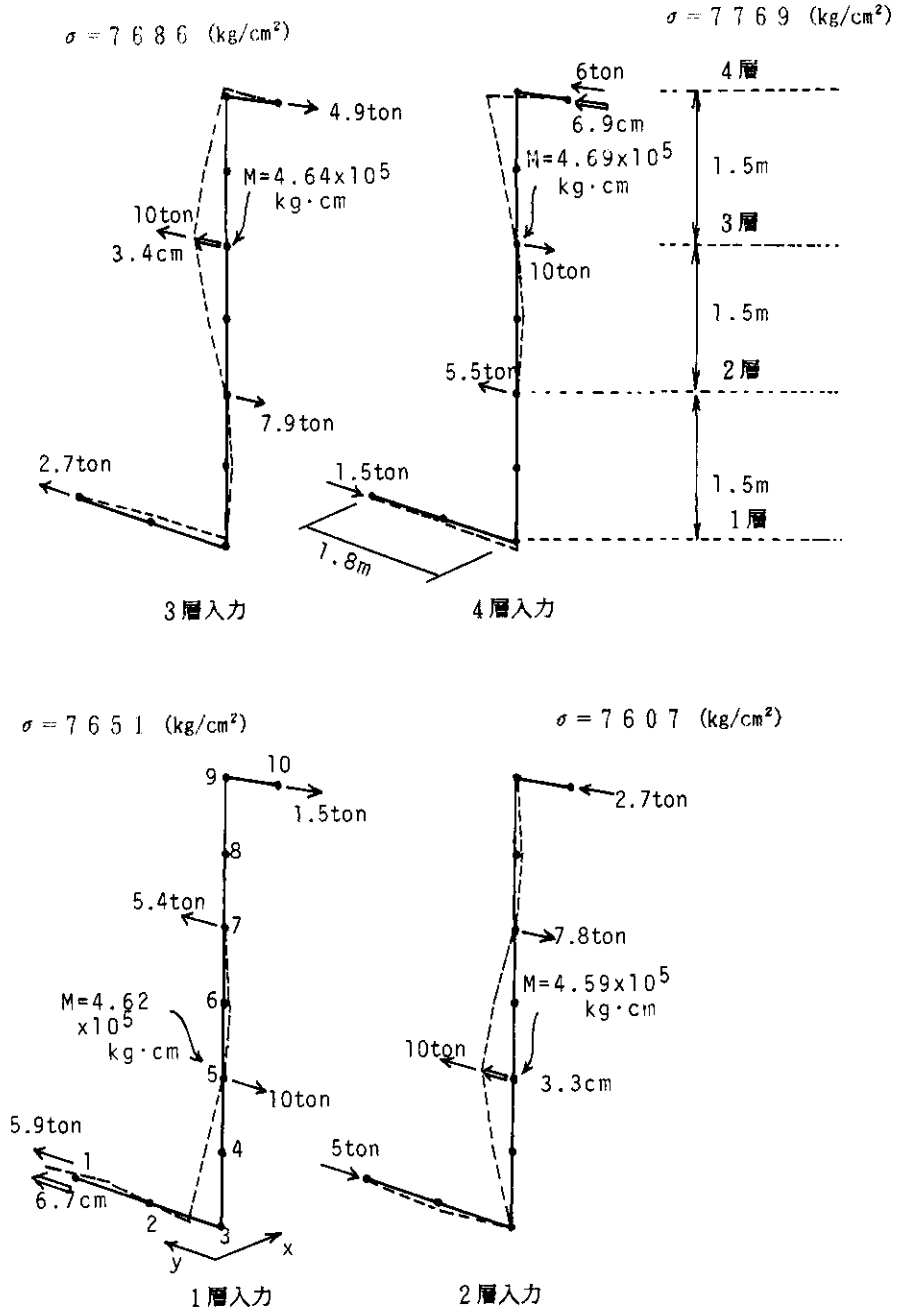


図 1.23 加振機の限界能力 (10 ton、±15 cm) における配管の静変形と応力 (4B-Sch60)

Fig. 1.23 Pipe deformation and stress at limit performance of the actuators

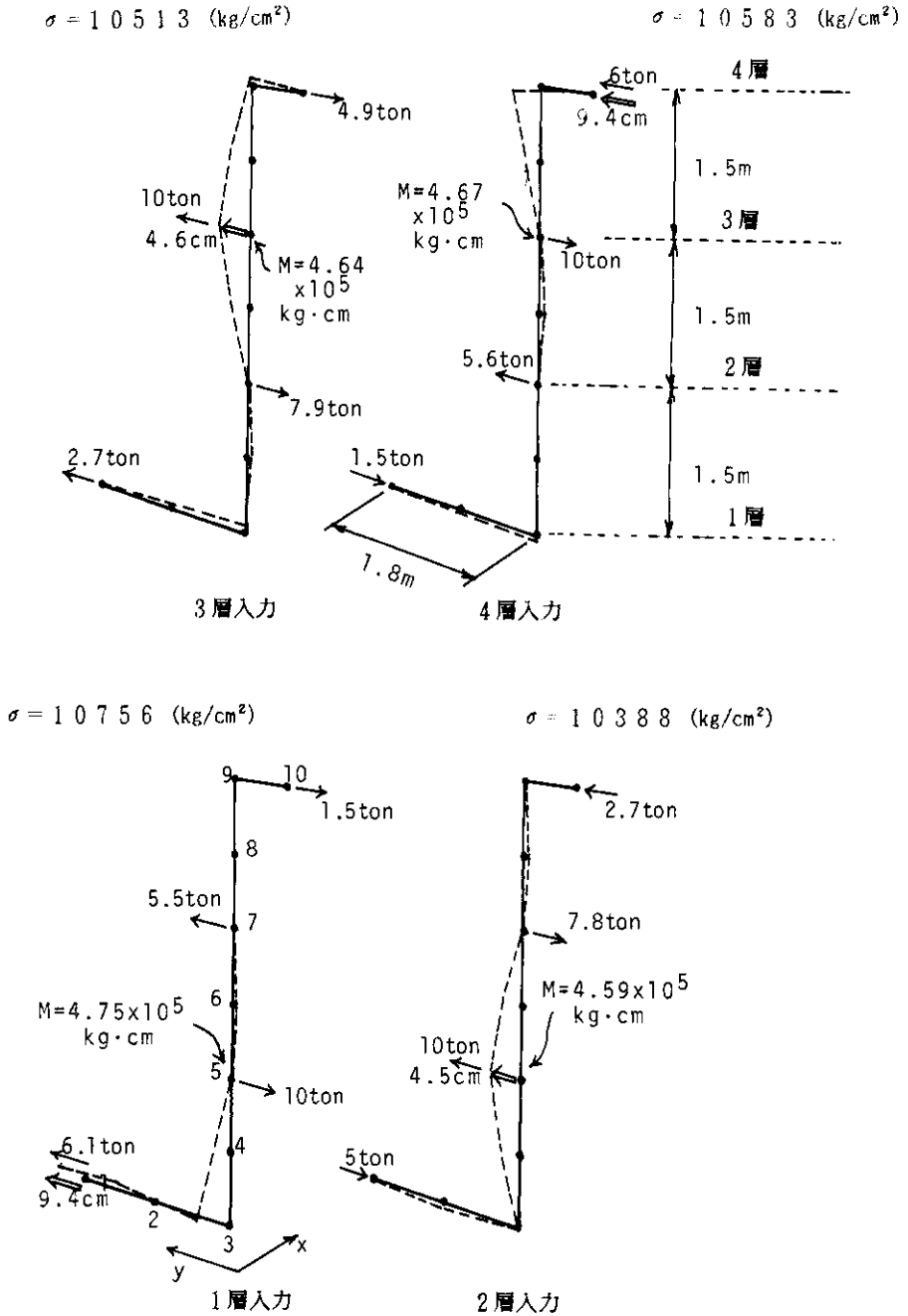


図 1.24 加振機の限界能力 (10 ton、±15 cm) における配管の静変形と応力 (4B-Sch 20)
 Fig. 1.24 Pipe deformation and stress at limit performance of the actuators

1.5 無負荷加振試験（3入力）とその結果

加振機-振動板系の動特性、限界性能および反力架構の振動特性を調べるために、3台の加振機-振動板を反力架構に設置して試験体配管を搭載しない状態で振動試験を行った。

1.5.1 試験条件

- 1) 加振機-振動板3台（下からNo. 1、2、3）、無負荷（試験体なし）
- 2) レイアウト 加振機3台とも同じ側に据付、高さ方向1、2、3層で、千鳥配置
- 3) 油圧 供給圧力 210 kg/cm²、全流量 140 l/min（ポンプ1台）

（注）この段階では制御系のゲイン等は必ずしも最適ではなく試行的な設定で行った。

1.5.2 試験方法

A. 単機運転性能

A-1. 周波数応答試験

加振機-振動板No. 1～3の各々について別個に行う。

正弦波 1 Hz～30 Hzを1～2 Hzきざみ 目標振幅0.75～1.5mm

A-2. 限界性能試験

加振機-振動板No. 1～3の各々について別個に行う。

正弦波 1 Hz～15 Hzを1 Hzきざみ

目標振幅は油圧流量制限内（制限を越えると波形が極端に歪む）でできるだけ大きくする。

B. 複数運転

B-1. 2台同時正弦波位相差加振（No. 2、3）

加振機-振動板No. 2、3を同時に運転する。

・入力レベル 変位入力 最大×0.5%（各加振機とも）

・No. 2の入力位相=0度（固定）

・振動数 5 Hz、16 Hz

No. 3入力位相（度）=0～180°（10°きざみ）

・振動数 10 Hz、20 Hz

No. 3入力位相（度）=0～180°（20°きざみ）

B-2. 3台同時正弦波位相差加振（No. 1、2、3）

振動数 5、10、16 Hz

入力位相設定 各振動数について次表の設定順序で加振

加振機-振動板	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. 1	0°	0	0	0	0	0	0	0	0
No. 2	0°	0	0	90	90	90	180	180	180
No. 3	0°	90	180	0	90	180	0	90	180

1.5.3 測定項目

振動板・・・・・・加速度（振動板No. 2は加振直角および上下も測定）

加振機・・・・・・変位

反力架構・・・・・・各部加速度（加振方向および加振直角方向）

測定点の名称については表1. 4、それらの位置については図1. 8に示した。

1.5.4 試験結果

試験A-1

試験結果から明らかになった点は以下の通りである。

1) 1台の加振機―振動板を動かした場合、他の加振機―振動板も振動数によってはかなり動く。特に1.6 Hz付近および2.6 Hz付近で顕著である。これは次の2)、3)が原因と思われる。2) 反力架構の振動は1.6 Hz付近でかなり顕著である。これは床である大型振動台を含む全体系の振動として現れるもので、架構自体の加振方向固有振動と思われる振動は4.0 Hz以上で生じている。油柱バネ（加振機シリンダ内の圧油のバネ効果）の影響も考えられる。

3) 2.6 Hz付近の振動は架構の特性も関連している（横方向振動など）と思われるが、主として加振機油柱バネと振動板からなる振動系の固有振動による影響である。

4) 加振波形には、低振動数の加振でも2.6 Hz付近の波が重畳して波形が歪む。特にNo. 3加振時の5 Hz付近で顕著である。これも油柱共振の影響が大きいのではないかとと思われる。

5) 架構の振動に伴い、振動板には加振方向以外の振動も生じた。（主に1.6および2.6 Hz付近）。しかし、振動板の上下動はかなり小さい。

以上、1.6 Hz付近の振動（架構）、2.6 Hz付近（加振系）が問題である。これらは基本的には加振機の油柱バネ、反力架構、床（大型振動台）の剛性が連成して生じているものと思われる。実験範囲を1～1.5 Hzとする場合は影響は比較的小さいが、試験体を搭載した場合、加振系の固有振動数が下がり、2.6 Hzより低いところで油柱共振の影響を生ずることが考えられる。このため試験体については固有振動数を低くする考慮が必要である。また、これらの影響は主に高振動数（高次モード）の加速度応答に現れるが配管の変形、歪は低次モードが主である。従って解析において変位および歪の応答に重点をおく必要がある。

加振機―振動板No 1～3の周波数応答測定結果の1例を図1. 25に示す。

試験A-2

試験結果から明らかになった点は以下の通りである。

1) 図1. 26は、加振機変位応答波形から読み取った限界性能実測値であり、単機運転ではサーボ弁性能で限界が決まるので、油圧ポンプは1台であるが、計算値とほぼ同じ値を示している。なお、入力を上げるとさらに大きくなるが、速度限界を越え加速度波形が異常になる。

2) 表1. 4は、この限界加振レベルでの（加振している振動板に対する）各部加速度応答倍率の最大値とその時の振動数を示したものである。ほとんど1.5 Hzで最大になっている。1.6 Hzではさらに大きくなるがここでは、1～1.5 Hzに限定して加振した。

3) 1台の加振機―振動板を動かした場合、他の振動板に与える影響は1.5 Hz付近で加速度20%程度である。1.2 Hz以下ではこの影響は非常に小さい。反力架構上部の振動についてもほぼ同様の状況であった。

4) 振動板の加速度波形には、特に4-8 Hzでかなりの歪を生ずる。この範囲では、架構の振動は小さいので、波形歪は主に油柱共振の影響および油流量の限界により生じたものであると思われる。変位波形には特に目立った歪やノイズは見られない。

5) 架構の振動に伴い、振動板には加振方向以外の振動も生じている。N.O. 1および3を加振している時のN.O. 2振動板の横振動は加振振動板加速度の4%程度、上下動は同じく1%以下であり、これは架構の振動により生じている。一方、N.O. 2加振時のN.O. 2の横振動は加振方向の9%、同じく上下は2%程度になっている。これは振動数にかかわらず同程度であり、振動板のガイド機構に起因しているものと思われる。

以上、1-15 Hzの範囲で限界性能はほぼ予定通りの値が得られた。架構の振動、振動板の横振動、波形歪については試験体と関連して検討すべき点がある。

試験B

各加振機が完全に独立していれば入力位相にかかわらず各加振機-振動板は同じ応答のはずであるが、本装置では架構の振動により無負荷の場合でも干渉が生じる。

各加振機-振動板の応答量は

- 1) 加振機自体の特性（油柱共振、振動数応答、ゲイン等）
- 2) 反力架構の振動による加振機間干渉

によって決まる。2)はこれまでの試験で、1台の加振機だけに入力を加えている場合に他の加振機も動く（16、26 Hzなど）という結果が出ている。

本試験では複数台の加振機-振動板を駆動した時の相互干渉を確認するため、加振機入力のレベルを固定し、位相を種々変えて応答を記録した。このデータから加振機変位および振動板加速度の基本波応答を抽出し、その振幅を位相に対して求めた。

(2台加振)

1) 5 Hzでは加振していない加振機-振動板への影響、加振している加振機の相互干渉は十分小さい。

2) 10 Hzでもほぼ同様であるが、多少干渉がみられる。このため例えば加振機変位から算定した加速度と振動板測定加速度値の間に20%程度の差異が生じる。

3) 16 Hzでは加振していない加振機の変位（ピストンとシリンダ=架構の相対変位）への影響は小さい。しかし、架構が動くため、振動板加速度への影響は大きい。

加振している加振機-振動板どうしの動的干渉は位相差により大きく変動する。特に、位相によっては入力を加えている振動板の加速度が0近くになる。この点は逆に、加振レベルと位相を調整することにより振動板の加速度を補正しうることを示している。

4) 20 Hzでもパターンは異なるが、基本的な事情は同様であった。

(3台加振)

1) 0°、90°、180°の組みあわせを測定したが、5 Hz、10 Hzでは特に問題はない。

2) 16 Hzでは、2台加振と同様大きな位相依存性をもつ。加振している3台の加振機のうち1台の位相を90°変えると全加振機の変位および全振動板の加速度がかなり変動する。

以上、無負荷でも10 Hzを越える領域では、架構を介しての動的干渉がみられたが、15 Hz以下では各加振機をほぼ独立したものと考えてよいと思われる。試験体を搭載した場合は、これによる静的および動的干渉が加わる。これは架構による干渉よりもさらに複雑であると

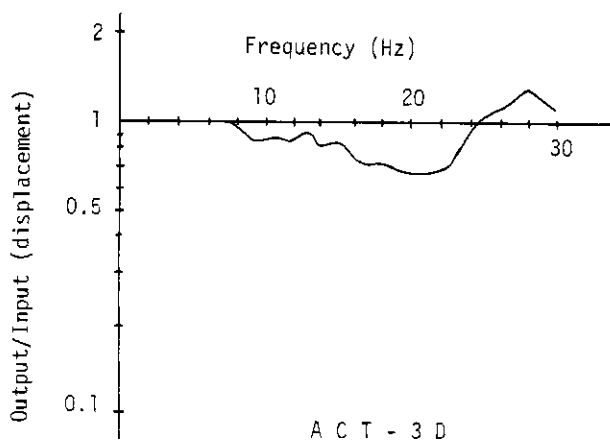
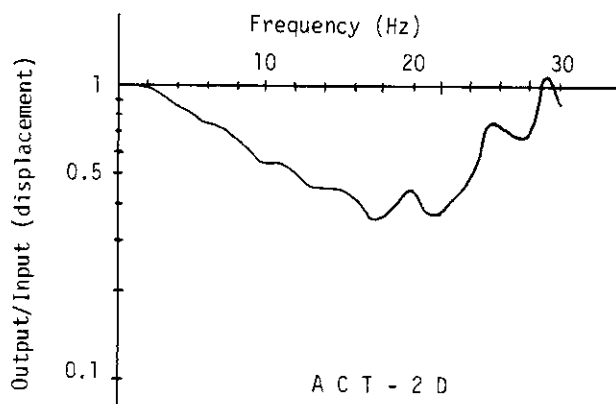
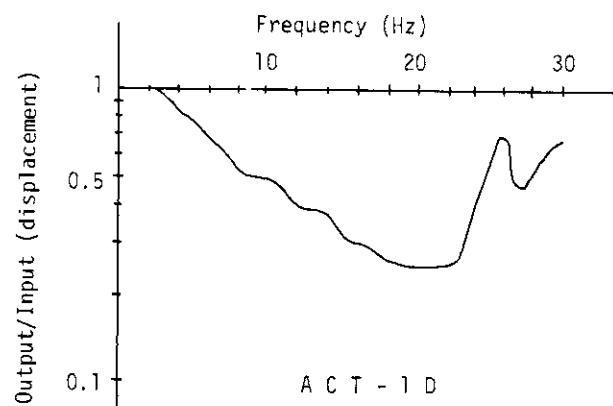


図 1.25 加振機周波数応答実測例 (負荷: 振動板のみ)

Fig. 1.25 Frequency response of actuators with the load of shaking table weight

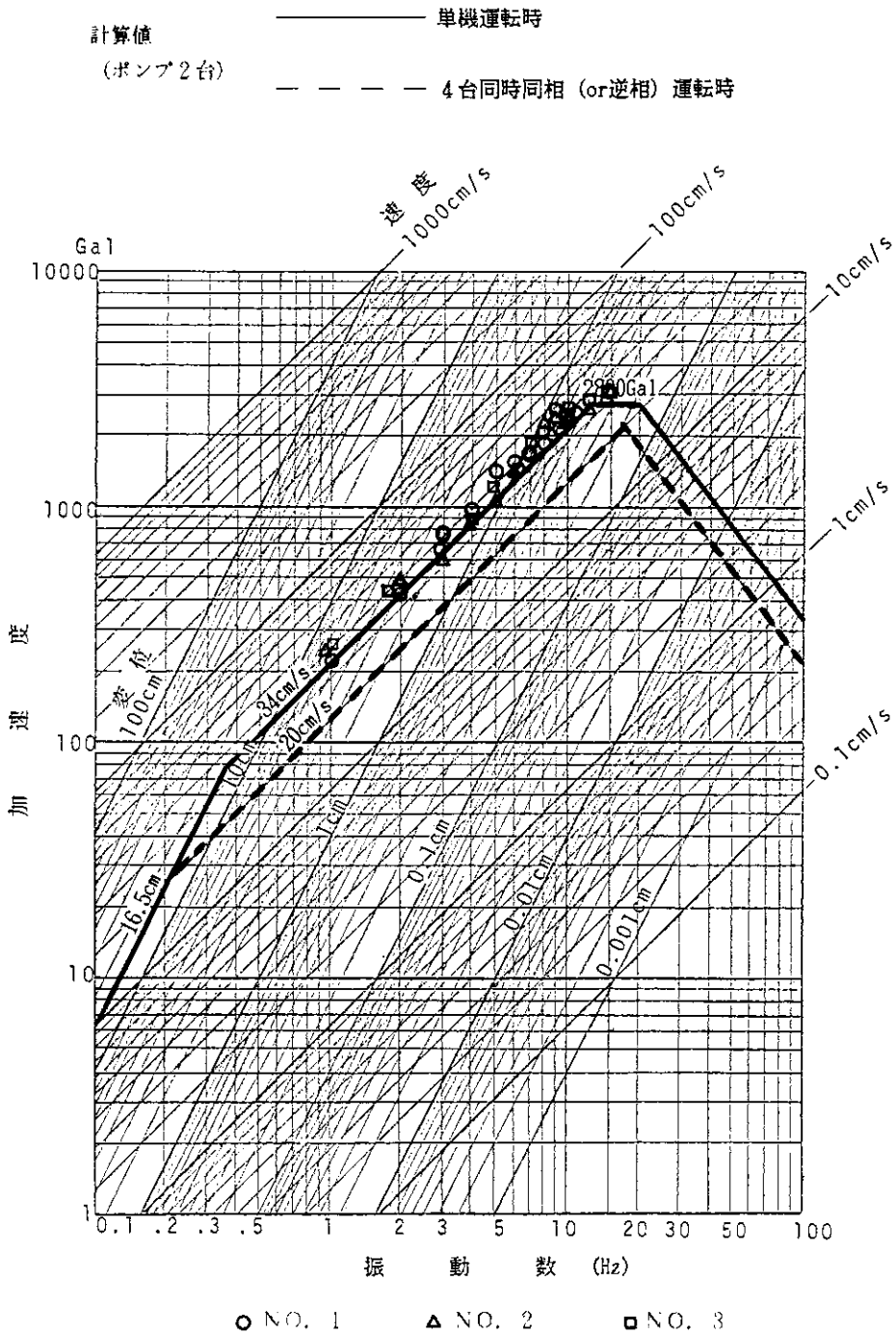


図 1.26 限界性能実測値 (単機運転、ポンプ1台)
注：単機運転ではポンプ台数によらずサーボ弁で限界性能が決まる。
Fig. 1.26 Limit performance of the system (single operation, 1 hydraulic pump)

思われる。試験体から加振機への反力について余裕をもたせる必要がある。16 Hzについては床である大型振動台の挙動が関係しているので除去するのは困難である。

表 1.4 応答倍率表

Tab. 1.4 Multiplication factor of measuring points to shaking table
(GAL/GAL)

	NO. 1加振	NO. 2加振	NO. 3加振	備 考
VT-1X	—	0.089 (15Hz)	0.08 (15Hz)	振動板No.1
VT-2X	<u>0.16</u> (15Hz)	—	<u>0.144</u> (15Hz)	振動板No.2
VT-3X	<u>0.231</u> (15Hz)	<u>0.227</u> (15Hz)	—	振動板No.3
BS-1X	0.028 (15Hz)	0.029 (15Hz)	0.037 (15Hz)	床 (大型振動台)
BS-1Y	0.001 (15Hz)	0.001 (15Hz)	0.001 (14Hz)	床 (大型振動台)
FR-3Y	0.001 (13Hz)	0.001 (13Hz)	0.004 (14Hz)	床ビーム
FR-5X	0.069 (15Hz)	0.067 (15Hz)	0.06 (15Hz)	加振機No.1取付部
FR-4X	0.091 (15Hz)	<u>0.104</u> (15Hz)	0.082 (15Hz)	加振機No.2取付部
FR-6X	<u>0.153</u> (15Hz)	<u>0.151</u> (15Hz)	<u>0.145</u> (15Hz)	加振機No.3取付部
FR-1X	<u>0.165</u> (15Hz)	<u>0.166</u> (15Hz)	<u>0.154</u> (15Hz)	架構最上部
FR-2Y	0.022 (14Hz)	0.031 (15Hz)	0.079 (14Hz)	架構最上部
VT-2Y	0.034 (15Hz)	0.085 (13Hz)	0.039 (15Hz)	振動板No.2
VT-2Z	0.006 (15Hz)	0.024 (15Hz)	0.009 (15Hz)	振動板No.2

(X:加振方向 Y:加振直角方向 Z:上下方向)

注) 加振している振動板(表中一印)の加速度振幅に対する各部加速度振巾の倍率で最大の値。

()内はその最大の値を示す振動数、下線は0.1以上の応答倍率である。

なお、加振は正弦波1~15 Hzで行い、最大の応答値を各点別に選定した。

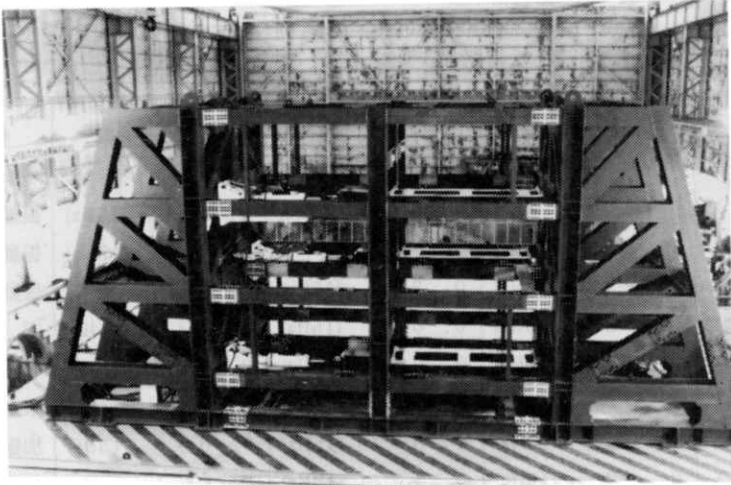


写真1.1 実験装置の外観
Photo 1.1 General view of test system

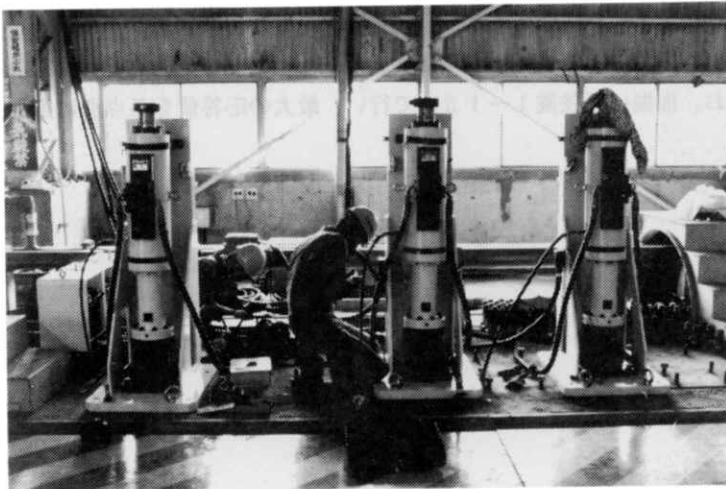


写真1.2 加振機 (±10 ton、±16.5 cm)
Photo 1.2 Hydraulic actuators

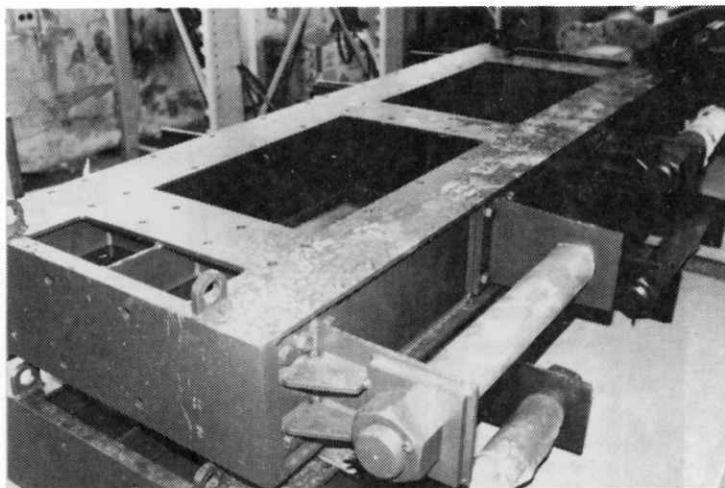


写真1.3 振動板
Photo 1.3 Shaking table

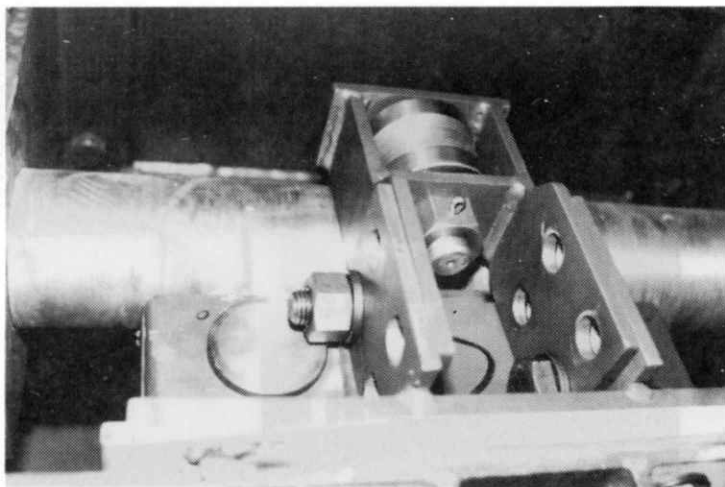


写真1.4 振動板ガイド(しゅう動部)
Photo 1.4 Slide bearing of shaking table

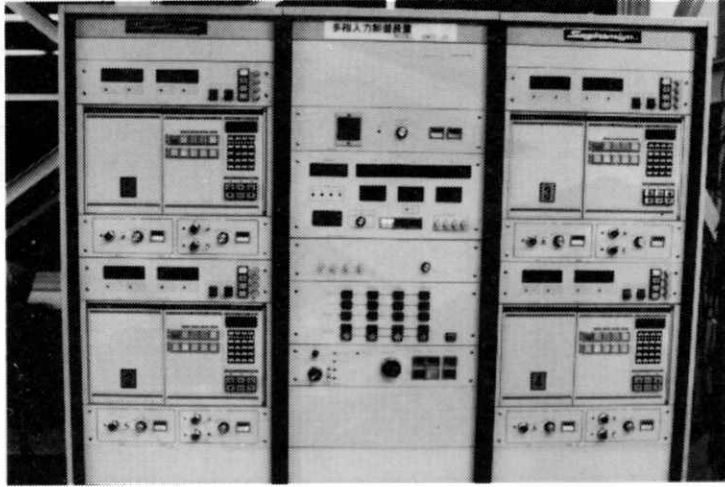


写真1.5 制御装置外観
Photo 1.5 General view of control unit



写真1.6 油圧ポンプユニット
Photo 1.6 Hydraulic pump unit

2. 配管系モデルの多入力振動実験 ー全体の概要ー

2.1 目的

原子力発電所等の実機配管系は複数の構築物より支持された3次元立体配管であり、地震時には、機器、サポート架構、建屋床等よりそれぞれ異なる地震力又は強制変位を受ける可能性が大きい。特に、原子力プラントの圧力容器と建屋より支持されるような配管系では地震時には多入力問題となり、その影響を評価する必要がある。また原子力発電プラントの信頼性の向上に対する要求から従来の設計手法をより合理化することが必要となっている。

このような事情から近年、各支持点より異なる地震入力を受ける配管系の挙動を明確にすることが重要な課題の一つとなつてきている。これまで、このような問題に対処するため多入力解析手法がいろいろ研究されているが、まだ十分ではなく、特に実験的に評価確認した事例は非常に少ない。多入力問題を設計面で考慮する場合の基本的な方法は「床応答スペクトル法、周波数応答法」であるが、応力評価を含む確立された手法はなく、実験との比較を含めて研究途上にある。

本研究では、配管系多入力応答試験装置を用いて立体配管系の振動試験を行い、実測データをもとに多入力応答挙動を把握するとともに設計的に用いることのできる解析手法の適用、検証を行う。

なお、本報告では実験全体の概要（本章）および2入力系構造モデルの実験結果（3章）について述べる。

2.2 試験体

多入力による地震応答が問題となるような配管系は複数の構築物より支持された立体配管である。このような配管系のうち当センター大型振動台上に設置された配管系多入力応答試験装置で実験が可能であり、また、実プラント配管の特徴を有するという点をモデル製作の基本においた。

2.2.1 供試体モデルの設定

実機配管系の特徴を十分考慮し、以下のモデルを設定した。

① 形状

実機配管系には複数の構築物、機器により支持された立体配管が多いことから供試体モデルは配管系多入力応答試験装置の4台の振動板にまたがって設置可能な立体配管とした。全体レイアウト状況を図2.1に、供試体の形状を図2.2に示す。全長は約20mである。

② 配管口径、材質

実機プラントにおける耐震クラスA、A₁の配管系の代表的口径は4～10"であることから、試験体モデルは

4B (Sch 40) 外径D=11.43cm、肉厚t=0.60cm

8B (Sch 40) 外径D=21.63cm、肉厚t=0.82cm

から成る配管系とした。また、材質は実機でよく用いられるものとし、STS42を用いた。

③ 配管サポート配置

実機配管系において多く用いられる架構式レストレイントやメカニカルスナッパを組合せた配置とし、また、実機プラントの平均支持点間距離は約3.4"であるので、本実験の

供試体は3" 前後とした。

④ 配管固有周期

実機配管系の1次固有周期は0.05~0.2秒の範囲であり、本実験の供試体の1次固有周期は0.1~0.2秒の間に設定した。

⑤ 集中質量

実機配管系で用いられる弁の集中質量としての効果を考慮して、

8" の電動弁 (1個)

4" の電動弁 (2個)

の模擬弁を取付けた。

⑥ その他

保温材：考慮しない

温度：常温

圧力：常圧（満水）および加圧（50 kg/cm²）のケースを考えた。

2.2.2 供試体の振動特性

設定した供試体モデルに対し、固有値解析を行った。解析モデルは図2.3に示す通りであり、支持条件は全レストレイント支持、ギャップは0で計算した。

得られた固有周期と刺激係数を表2.1に、振動モードを図2.4に示す。

表 2.1 固有値解析結果

Tab. 2.1 Result of eigen value analysis

次数	周 期	振動数Hz	刺激係数	備 考
1	0.1772	5.64	0.013	4 B 管
2	0.1361	7.35	0.443	8 B 管
3	0.1070	9.35	0.538	4 B 管、8 B 管
4	0.0774	12.92	0.705	4 B 管
5	0.0608	16.46	0.158	8 B 管、8 B 弁
6	0.0570	17.55	0.045	8 B 管
7	0.0410	24.4	0.007	

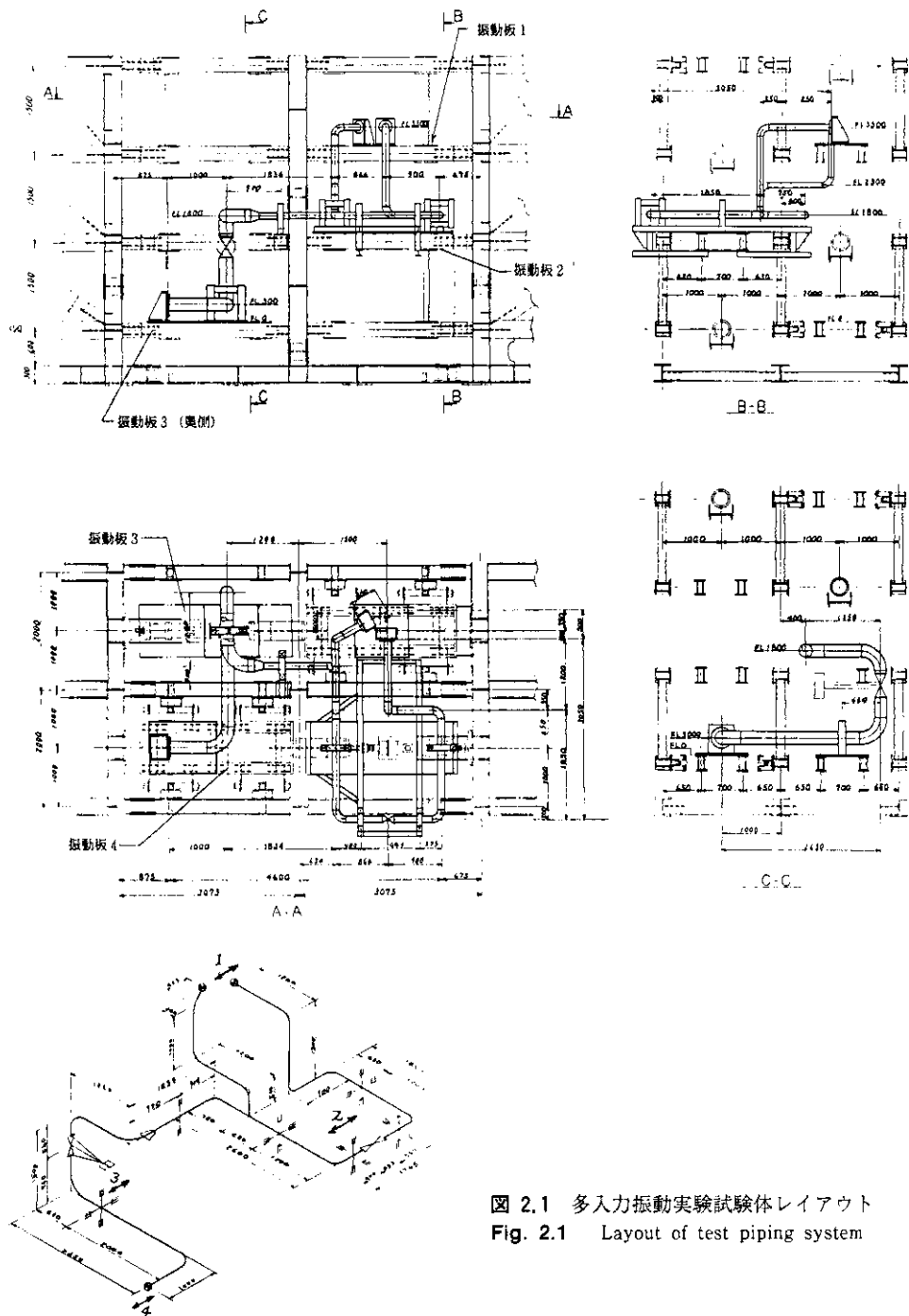


図 2.1 多入力振動実験試験体レイアウト
Fig. 2.1 Layout of test piping system

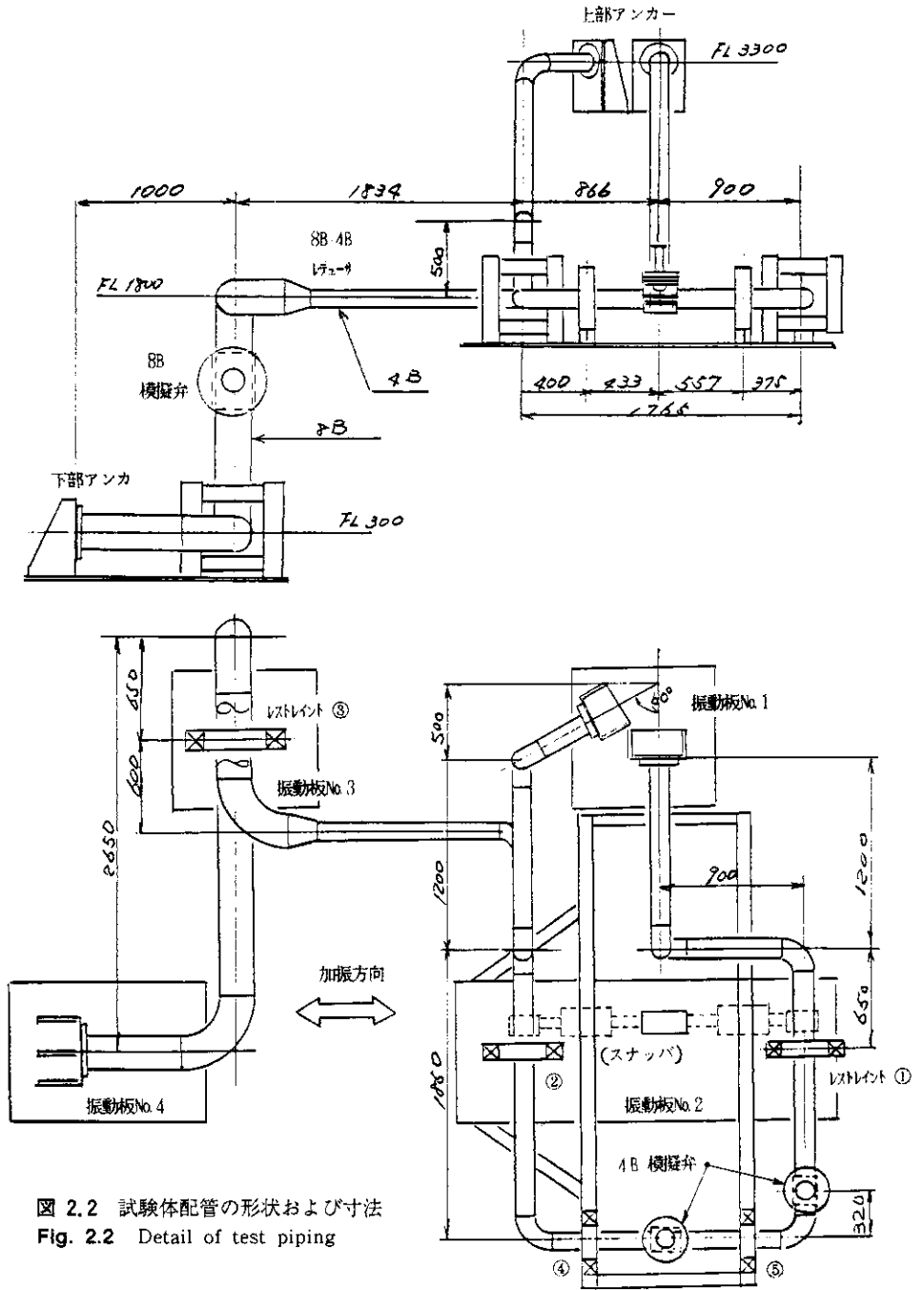


図 2.2 試験体配管の形状および寸法
Fig. 2.2 Detail of test piping

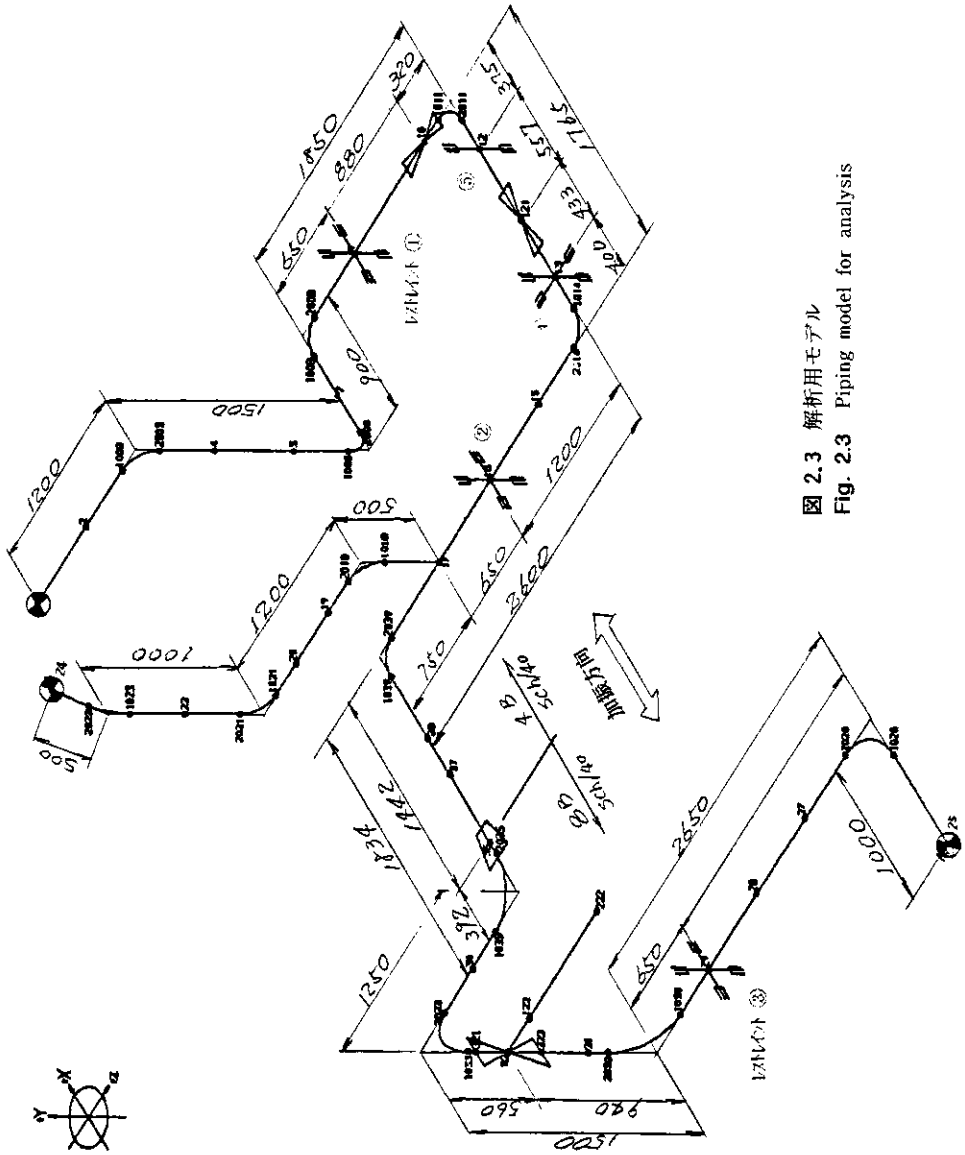


図 2.3 解析用モデル
Fig. 2.3 Piping model for analysis

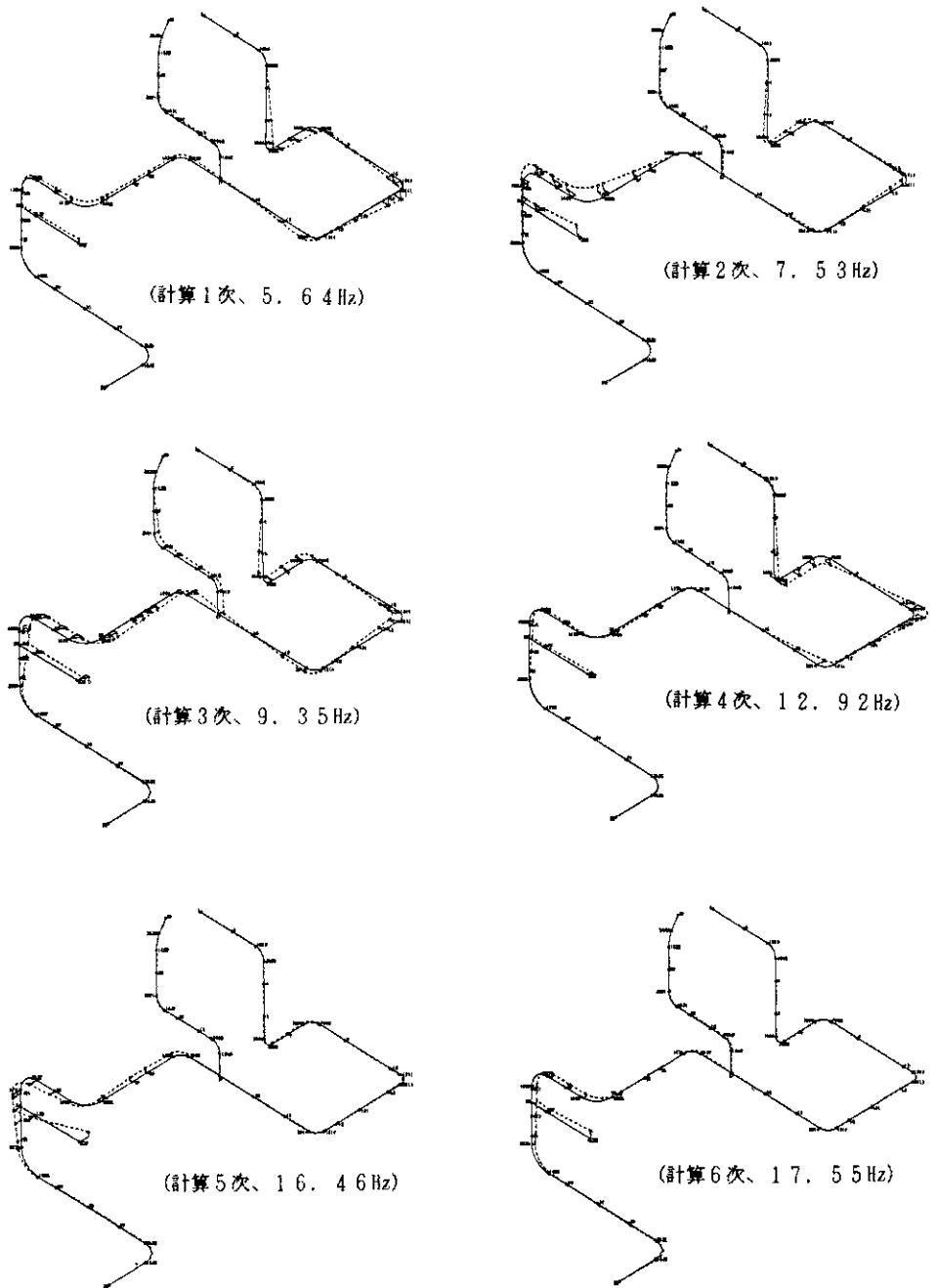


図 2.4 振動モード
Fig. 2.4 Vibration mode

2.3 実験シリーズおよび実験条件

2.3.1 実験パラメータ

本実験では試験体の応答挙動に影響を与える（入力波以外の）主要な実験パラメータの組み合わせを考慮し、一連のシリーズとして実験を行った。

実験パラメータは以下の通りである。

① 支持方法

A：全て架構式レストレイント（以下、「全レストレイント」と記す）

B：一部をメカニカルスナッパ（図2.2）とし、他は架構式レストレイント

C：自重支持部を除き、レストレイントをつけない

注）Cは固有振動数2～3Hzとなるケースで、柔構造とする場合である。

② 架構式レストレイントのギャップ量

A：ゼロ

B：各片側1.5～2mmとする。

③ 内圧

A：満水非圧

B：加圧（50 kg/cm²）

2.3.2 実験シリーズ

① Aシリーズ

条件：全レストレイント、Gap≒0、満水

レストレイントにおける衝突を伴わない基礎的なモデルの多入力応答把握を目的とした。

② APシリーズ

条件：支持条件はAシリーズと同じで加圧50 kg/cm²

Aシリーズと同様の加振内容により動的および準静的応答（配管歪、反力）に対する内圧の影響をみるために行った。

③ Bシリーズ

条件：全レストレイント、Gap≒1.5～2mm、満水

Aシリーズと比較しGapによる応答挙動を確認する他、同一入力波を4台の振動板に種々の時間差をもたせて入力した場合の応答挙動の差異を調べるために行った。

④ BPシリーズ

条件：支持条件はBシリーズと同じで加圧50 kg/cm²

⑤ Cシリーズ

条件：レストレイントおよび一部スナッパ、Gap≒0、満水

Aシリーズとほぼ同様の加振を行い、代表ケースについてスナッパ支持とレストレイント支持による応答の相違を調べるために行った。

⑥ Dシリーズ

条件：レストレイント＋一部スナッパ、Gap≒1.5～2mm、満水

実際の支持条件での応答挙動を調べ、A、Cシリーズとの差異およびGapによる非線形応答挙動を検討するために行った。

⑦ DPシリーズ

条件：支持条件はDシリーズと同じで加圧50 kg/cm²

地震波応答についてDシリーズとの比較を行うために行った。

⑧ Xシリーズ (柔構造系)

条件：上部アンカー (振動板No.1上)、下部アンカー (同No.4上)、自重支持 (テフロンスライド、8 B管1ヶ所、4 B管1ヶ所) 以外のレストレイント、自重支持をすべて解除、満水

振動板No.1、4のみ加振し、2入力による柔構造モデルの応答挙動を調べた。

⑨ LVTシリーズ (大型台加振)

条件：Bシリーズと同一、満水

実験装置の床 (大型振動台) を正弦波 (低レベル)、地震波等で加振し、全体加振と振動板による多入力加振との差異を調べるために行った。この実験では各振動板はボルトで反力架構に固定した。

2.4 入力波と入力方法

多入力による配管系の地震応答特性を明らかにするため各実験シリーズにおいて次の3種類の加振を行った。なお、入力レベルは0.5～3Gくらいの範囲で考え、応答レベル2～20G程度を目標とした。

2.4.1 多入力供試体特性実験

多入力時の供試体配管の変形挙動を知るため、各振動板に準静的な正弦波加振を加えるものである。

入力には正弦波0.2Hzを用い各振動板単独での加振、また複数振動板の同時加振 (同位相および異位相) をいくつかの入力レベルで行った。

2.4.2 多入力振動特性実験

多入力動的加振時の供試体配管の基本的挙動を明らかにするため、各振動板を正弦波加振し、供試体の応答曲線、位相による応答差等を求めるものである。

- ・一点加振による基本的な応答曲線を求めるために正弦波2～30Hz (50～100ガル) を用いた。
- ・位相差加振には正弦波2Hz、5Hz、8Hz、12Hz、18Hz、等を用いた。
- ・振動数応答を概観するための正弦波スイープ加振も一部行った。

2.4.3 多入力応答実験

各振動板に地震床応答波又はランダム波を入力し、多入力時の供試体配管の応答挙動を調べるために行ったものである。

作成した4種類の地震波 (1波はランダム波) から選定したいくつかの波を用いて加振し供試体の応答モード、応力、加速度及び反力等を求めるものである。

2.4.4 入力波

入力地震波は下記の波を用いた。なお、実験装置が変位入力制御であるため、変位波に変換して用いたが、その際、試験体への影響が小さい5 Hz以下の振動数成分はフィルターにより減衰させた。

イ. エルセントロ (1940)

N S 原波 (最大 3.41 Gal) を用いて求めた床応答波

ロ. 通産改標波 S 2 床応答波 (遠地型)

$M=8.5$, $\Delta=68\text{km}$, $V_s=1000 \text{ m/s}$

位相 十勝沖 (八戸)

ハ. 同 S 2 床応答波 (近地型)

$M=6.5$, $\Delta=7.2 \text{ km}$, $V_s=1500 \text{ m/s}$

位相 Cholame Shandon

なお、床応答波は原子力発電所建屋―機器系モデルの4位置での計算波を求め、これをモデル配管系を支持する4台の振動板への入力としたが、実機との直接の対応は考えず、多入力応答挙動を把握するための一般的なモデルと考えている。

この他、ランダム波として帯域0-20Hzの波を作成して用いた。このランダム波は初期乱数を変えた4つの波を作成し、これを床応答変位波そのものと考えて入力した。

上記イ、ロ、ハの波形を図2.5に、これらの応答スペクトルを図2.6.1~2.6.3に示す。地震波番号のNo.1は振動板No.1(最上点)への入力波であり、他も同様である。

2.4.5 加振方法

多入力応答実験では目的に応じて以下のようないくつかの加振方法を用いた。

なお、入力レベルは0.5~3Gくらいの範囲で考え、応答レベル2~20Gを目標とした。

イ. 動的多入力加振

4つの床応答波を4台の振動板にそれぞれ入力する場合で、主な実験での各振動板への入力レベル比は最大変位の比で下から

$$1 : 1 : 2 : 3$$

とし、2~3レベルで加振した。

なお、この比率は図2.5の入力波の比率がほぼこの値になっていることから定めた。加振時の入力加速度の値そのものは必ずしも同図の値によらず適宜設定した。

この加振では、各入力点で波形、応答スペクトルおよび加速度のレベルがすべて異なる。

ロ. 動的均一入力加振

多入力加振と比較するために、全加振機に同一の入力を加えるものである。この場合、モデル配管において高さ方向ほぼ中間位置にあるNo.2振動板用の入力波を共通入力波として用いた。レベルはイと同様2~3レベルとした。

この加振では、各入力点での波形、位相、加速度レベルおよび応答スペクトルはすべて同一である。ただし、1章で述べた理由により、各振動板の加速度は実際には若干の差異を生じている。

ハ. 動的時間差加振

一部のケースでは、同一入力波を下部から上部へ時間遅れをもたせて加振した。この場合、各入力点での波形、応答スペクトルは同一であるが、伝播型の位相差をもつ。

二、準静的地震波加振

多入力地震波による準静的応答を求めるため、イで行った代表的な多入力加振の直後に、その時、収録した加振機変位（ADされた信号）を10倍の時間スケールで再入力したものである。

多入力応答解析は通常、動的応答項と準静的応答項（強制変位）に分割して別個に行われる。イの実験ではこの両者の和が求まる。本加振はこの後者に対応する実測値を求めるものである。イとの差をとれば原理的には動的応答項に対応する実測値を抽出できることになる。但し、加速度応答については、理論上の準静的加速度（強制変位が実時間で作用した場合の加速度）は静的加振では生じないので差をとって慣性応答による部分だけを分離することはできない。

なお、この準静加振と動的加振時の加振機変位の実測値は、レベルに若干の差があるが波形はほとんど同一であった。

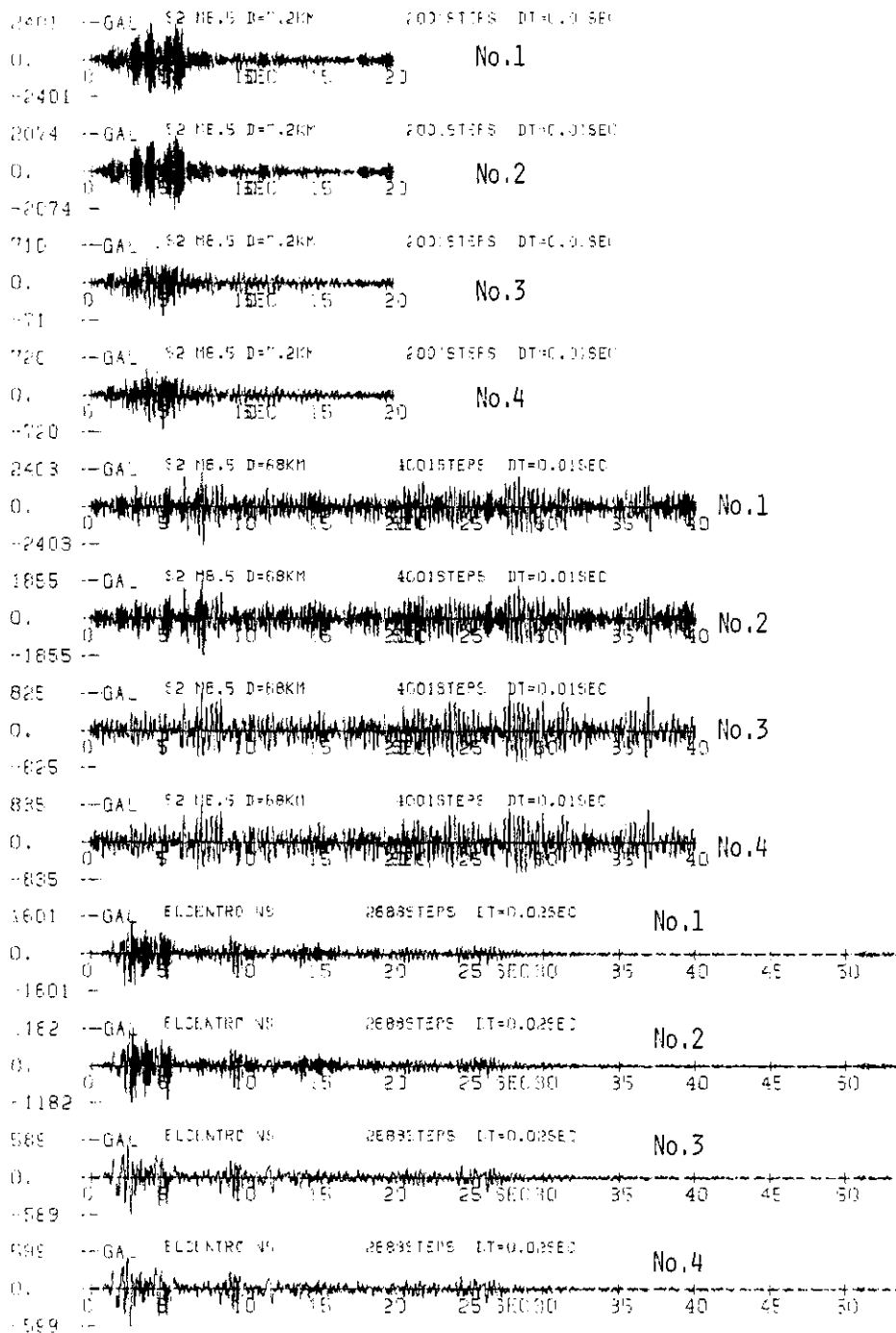


図 2.5 実験に用いた原入力波
 Fig. 2.5 Earthquake waves for input (floor response waves)

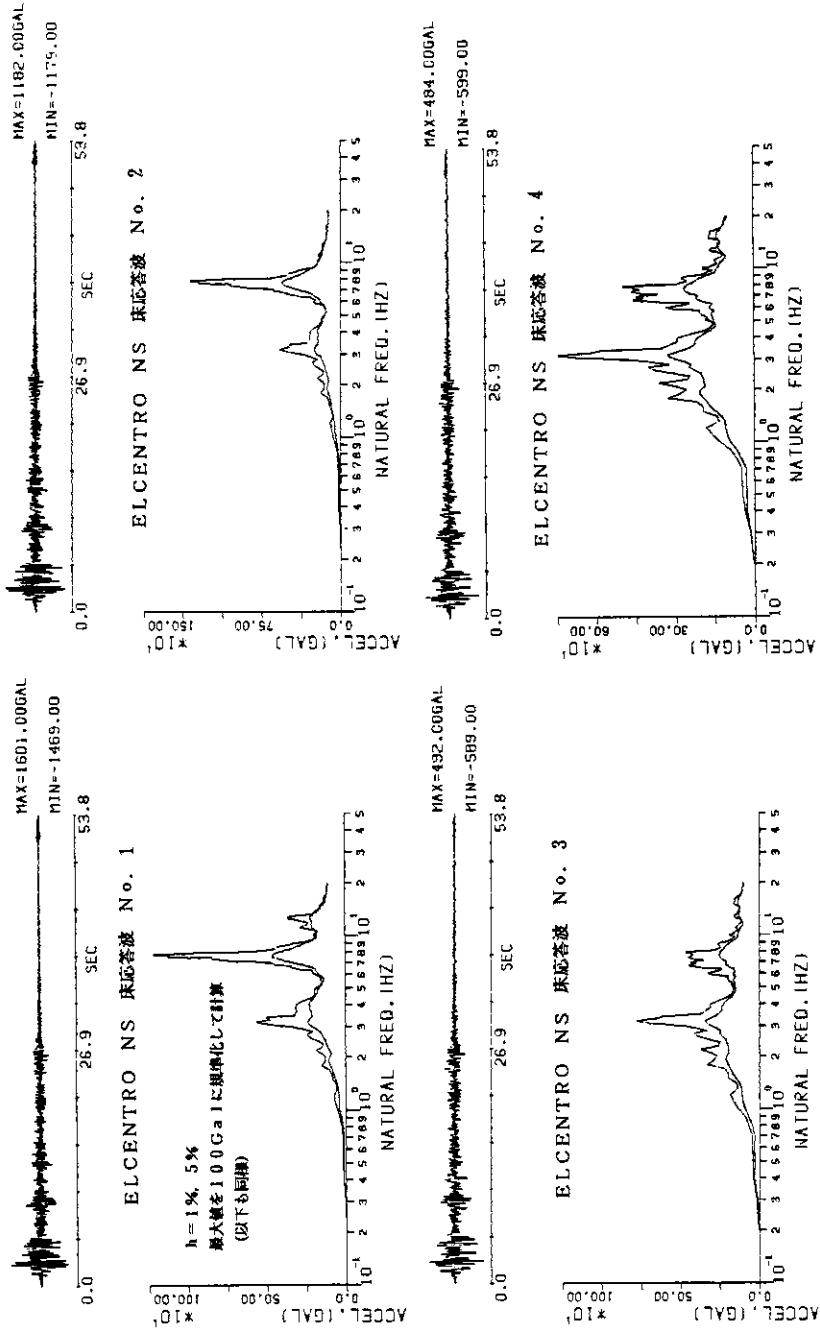


図 2.6.1 入力原波の応答スペクトル (ELCENTRO NS)

No.1は最上点、No.4は最下点への入力波

Fig. 2.6.1 Response spectra of input waves (ELCENTRO NS)

(No.1-4 wave is used for No.1-4 shaking table, respectively)

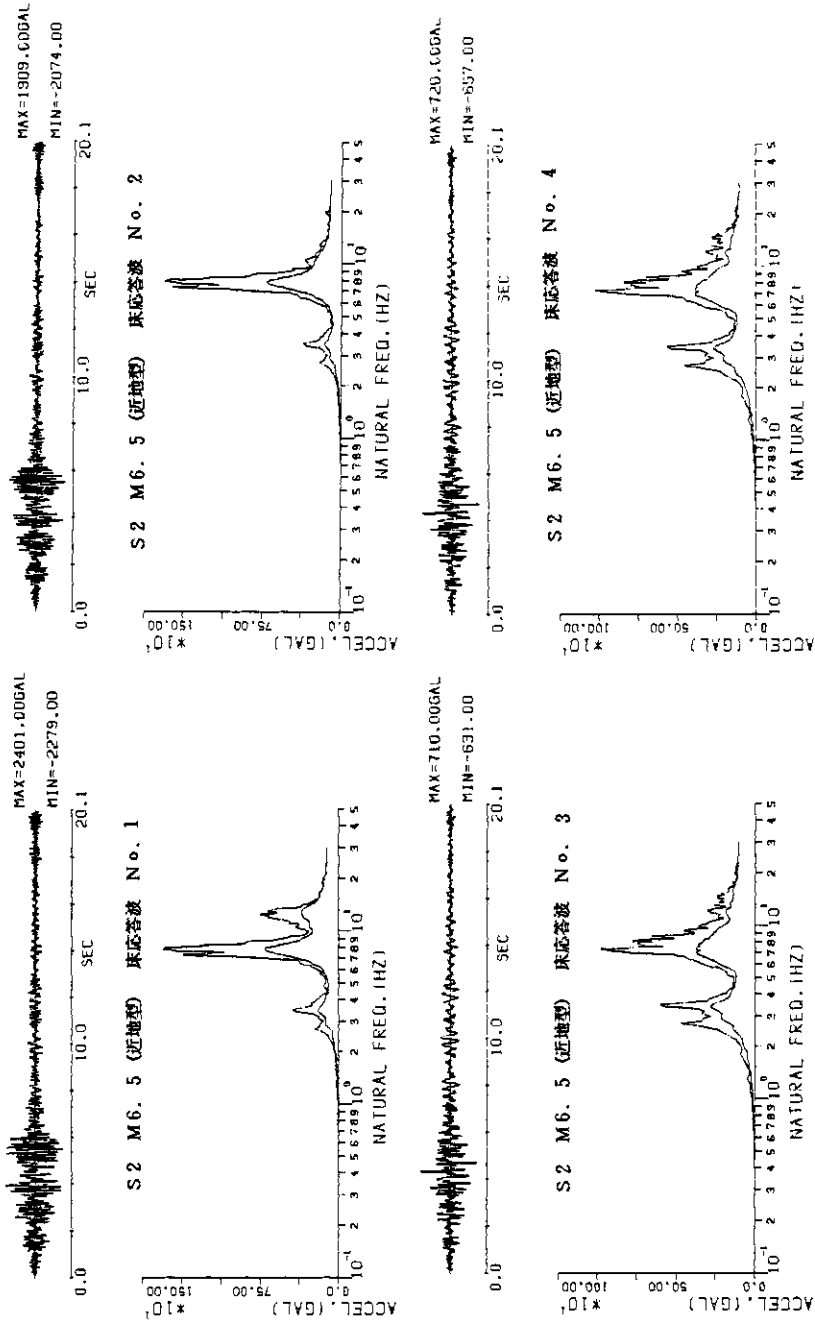


図 2.6.2 入力原波の応答スペクトル (S2 M6.5)
No.1 は最上点, No.4 は最下点への入力波

Fig. 2.6.2 Response spectra of input waves (S2M6.5)
(No.1-4 wave is used for No.1-4 shaking table, respectively)

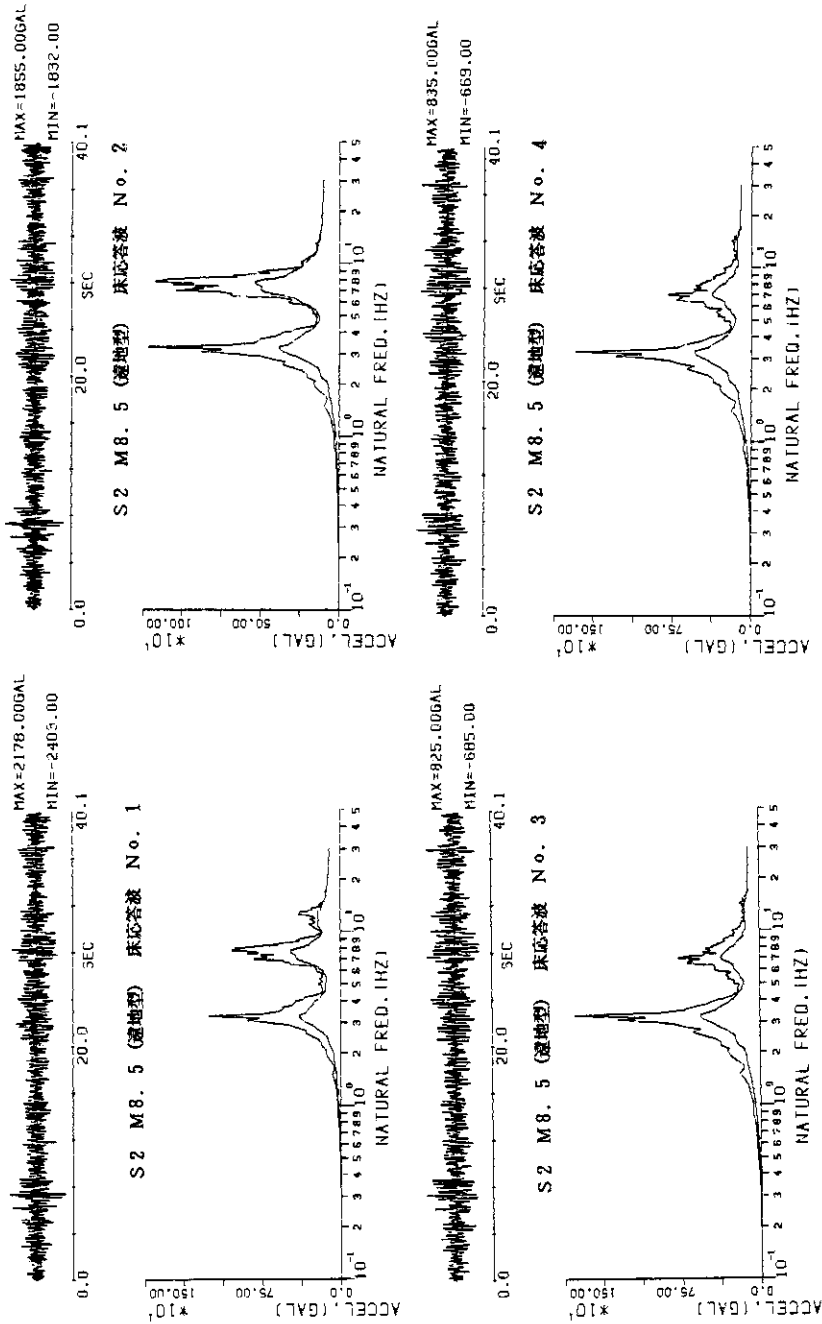


図 2.6.3 入力原波の応答スペクトル (S2M8.5)
No.1 は最上点、No.4 は最下点への入力波

Fig. 2.6.3 Response spectra of input waves (S2M8.5)
(No.1-4 wave is used for No.1-4 shaking table, respectively)

2.5 計測

多入力加振時の配管系供試体の挙動を把握するため、供試体の各種応答量を測定した。計測はデジタル収録とし、主に200Hzのサンプリングで記録した。

また、配管系の主要な点での3次元変位計測を試みるために、ビデオカメラによる画像収録を行った。

計測ブロックダイヤグラムを図2.7に示す。

計測項目はほぼ次の通りである。但し実験条件により一部変更した。なお、計測チャンネル数はデジタルレコーダの能力を考え、同時記録64チャンネル最大とした。

- 1) 加速度計 30 CH

大型振動台	1	
反力架構	4	(1 F ~ 4 F、加振機取付部)
振動板	8	(加振方向4、加振直角方向4)
配管系	21	
- 2) 変位計 6 CH

振動板	4	(加振機変位計)
配管系	2	(対架構)
- 3) 応力、歪 24 CH

配管系	24	曲げ応力 直管部 単歪 エルボ部 (側面円周方向) 振じり 8 B 弁部
-----	----	--------------------------------------------
- 4) 反力 10 CH

振動板	4	(加振機ロードセル)
配管支持部	6	(架構式レストレイント部)
- 5) 圧力 2 CH

配管内圧	2	(4 B、8 B エルボ部)
------	---	----------------
- 6) 映像

ビデオカメラ	4台	
--------	----	--

計測センサーの全体配置を図2.8、配管に取付けたセンサーの個別位置を図2.9に示す。

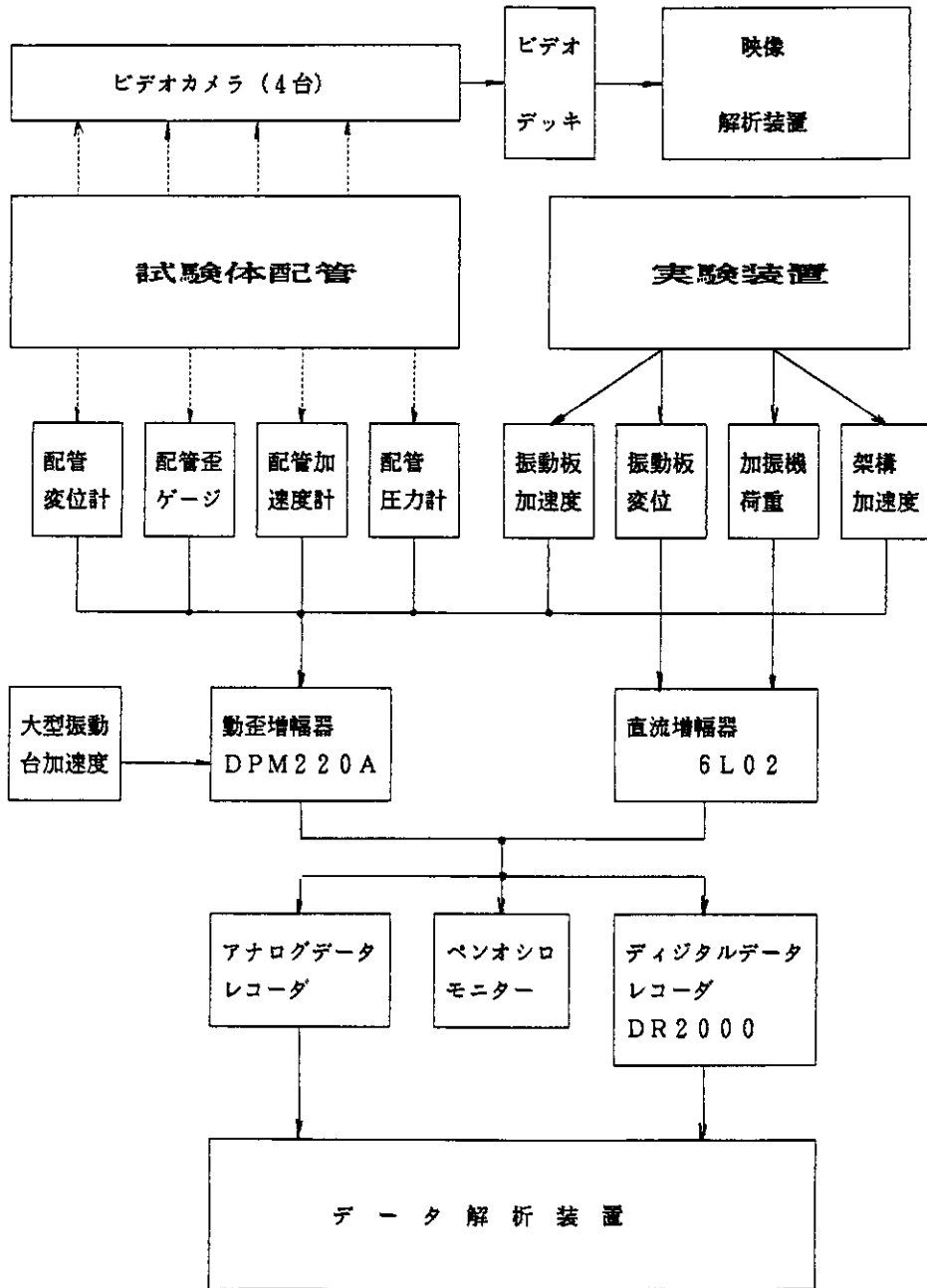
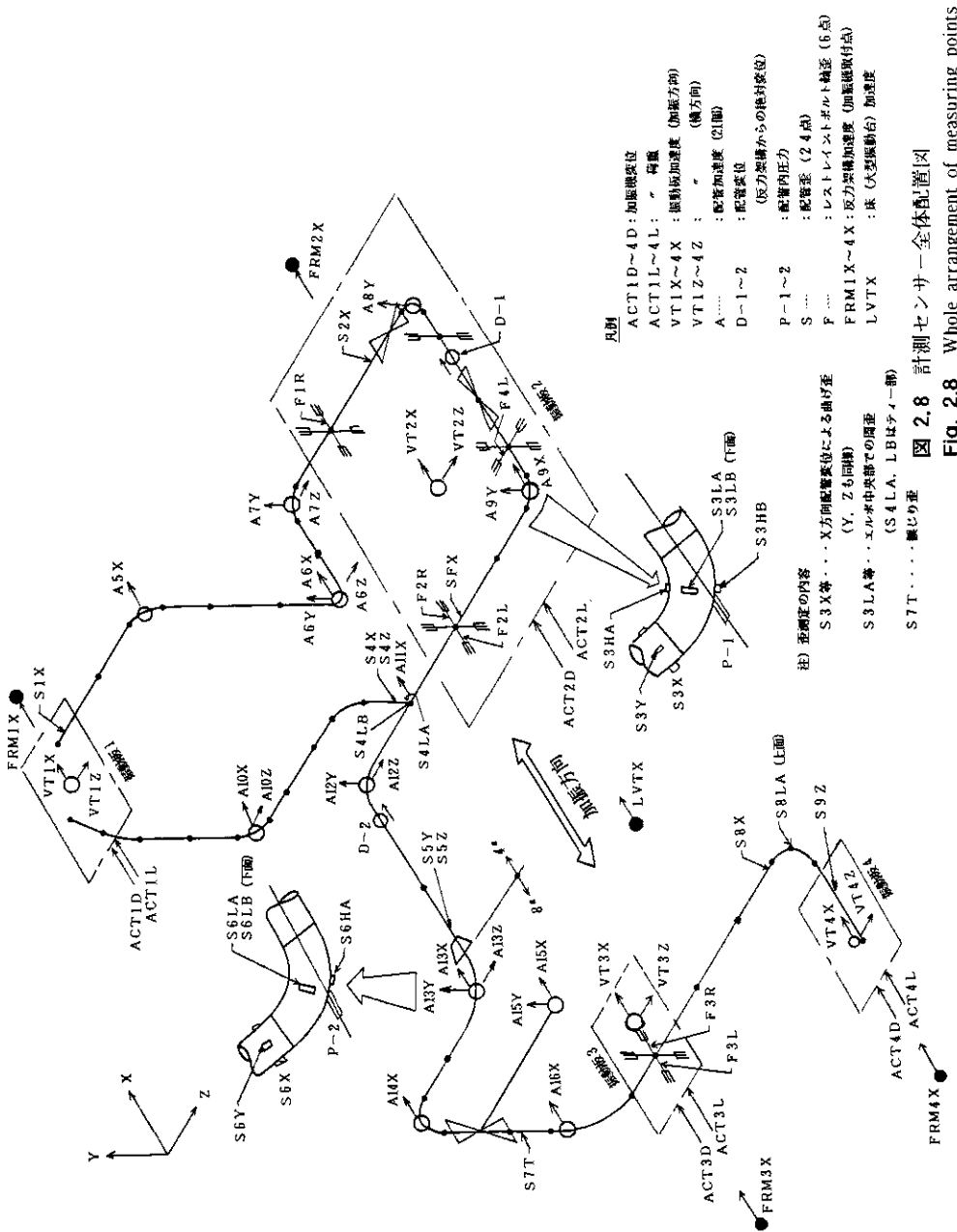


図 2.7 計測ブロック線図

Fig. 2.7 Block diagram of measurement system



注) 垂座の内容
 S3X等... X方向配管姿勢による曲げ歪 (Y, Zも同様)
 S3LA等... エルボ中央部での原歪 (S4LA, LBはテーパー)
 S7T... 異じり歪

図 2.8 計測センサ一全体配置図
 Fig. 2.8 Whole arrangement of measuring points

(注) 寸法数字は概略値 (mm) である。

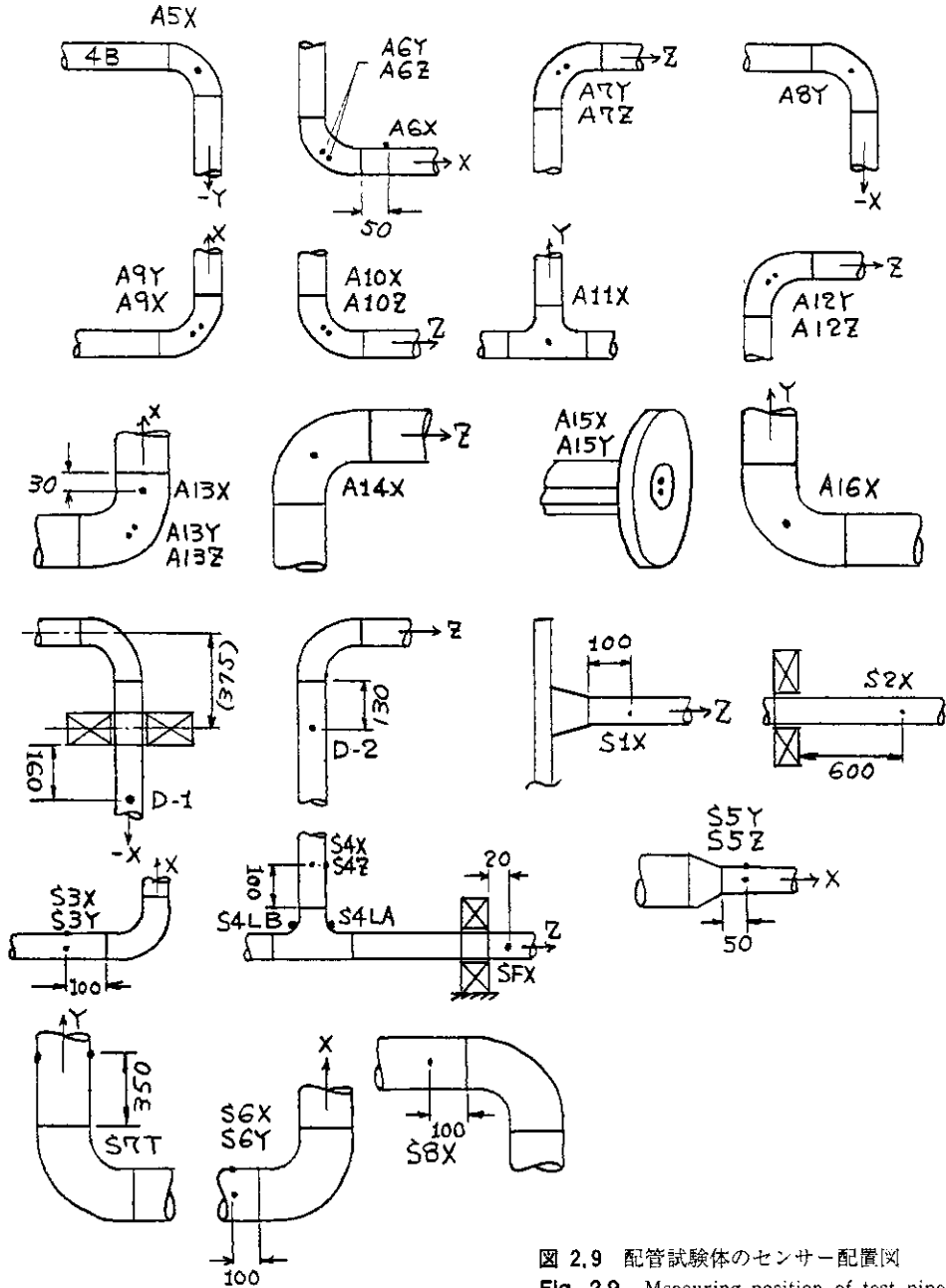


図 2.9 配管試験体のセンサー配置図
Fig. 2.9 Measuring position of test pipe

2.6 実験結果の概要

実験は前述のように以下のシリーズについて行い、これらの計測記録から波形、最大値等の基礎データおよび応答特性などの解析を行った。ここでは実験結果の全体的な傾向、問題点等について概括的に記す。

なお、データの解析、図化、作表には主として耐震実験用コンピュータM685システム(ソード(株)製)を、大量データの同時処理(ビデオカメラによる動的変位の解析、スイープ応答の解析等)にはACOSシステムを用いた。

- ①Aシリーズ 条件：全レストレイント、ギャップ≒0、満水
- ②APシリーズ 条件：全レストレイント、ギャップ≒0、加圧50kg/cm²
- ③Bシリーズ 条件：全レストレイント、ギャップ≒2mm、満水
- ④BPシリーズ 条件：全レストレイント、ギャップ≒2mm、加圧50kg/cm²
- ⑤Cシリーズ 条件：レストレイント+スナップ、ギャップ≒0、満水
- ⑥Dシリーズ 条件：レストレイント+スナップ、ギャップ≒2mm、満水
- ⑦DPシリーズ 条件：レストレイント+スナップ、ギャップ≒2mm、加圧50kg/cm²
- ⑧Xシリーズ 条件：柔構造系、満水
- ⑨LVTシリーズ 条件：全レストレイント、満水 (大型台加振)

2.6.1 全体結果

実験を行った各シリーズについて、入力波別に加振機変位、振動板加速度、配管変位、配管加速度、配管歪、配管内圧変動、支持部反力(レストレイント部のボルト歪)の最大応答値を求め、各最大値を示した位置とともに表2.2(章末)にまとめて記載した。この表は今回の実験で行った加振の総括表であるが、振動特性を求めるための細かい振動数ステップ加振については省略した。最大応答の位置はもちろん計測を行った点の範囲で求めたものであるが、ほぼ全体の傾向を代表しているものと思われる。

応答値を求める場合、各量について加振直前値を0としており、従って内圧、歪等は動的な変動分を考えている。またフィルター処理等は特に行っておらず、表の値は全般的な傾向をつかむ数値である。なお、本節の説明用図表は表2.2からの抜粋であるので、図A.1、表A.1等の仮番号を付した。

2.6.2 試験体の振動特性

静的変形と剛性

4台の振動板の各々を単独に変位させると各加振点からみた系の静的剛性を概略把握できる。Aシリーズの場合、以下のようであった。

表 A.1 加振点からみた静剛性

Tab. A.1 Pipe stiffness at shaking points

加振点	加振機変位cm	加振機反力kgf	加振点からみた静剛性kgf/cm
1	0.352	157	447
2	0.415	59	141
3	0.512	394	769
4	0.269	93	347

4台の加振機に位相差をつけて変位させた場合（強制変位）の配管歪の代表例を次図に示す。荷重と変位のLinearity はほぼ成立している。

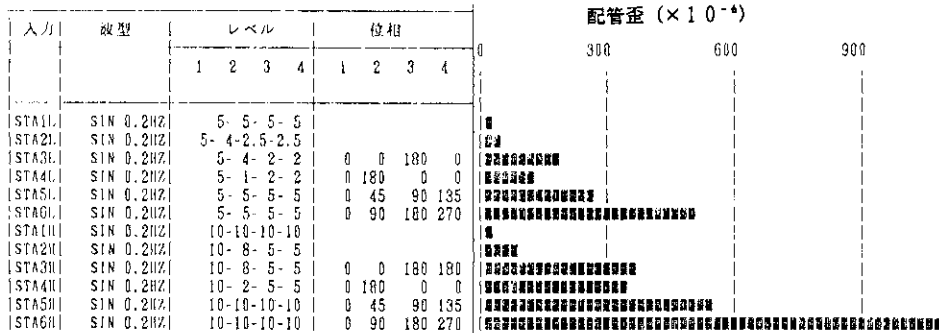


図 A.1 静的強制変位による配管歪 (Aシリーズ)
Fig. A.1 Pipe strain by static deformation

振動特性

Aシリーズは基本的なケースであるので、各支持部（振動板）を単独に加振した場合の応答（1点加振の伝達関数）を求めた。振動数のきざみは0.25Hzとし2~3.0Hzの範囲で加振した。図2.10.1-2.10.4は代表的な応答例である。加振レベルは振動板加速度の基本波成分が100Gal（または50Gal）になるよう調整した。応答倍率は加振振動板と応答点の加速度の基本波成分の比で求めたものであるが、1点加振であるので倍率自体はあまり大きくない。

このような1点加振の他に、全振動板同期加振（通常の振動台加振と同じ）も行ったが、これらの結果から共振点として下記の値が得られた。

4.9, 7.9, 10.6, 11.7, 13.2, 16.5, 17.5, 21.2 Hz

この他にも応答の山を生じているが他のモードの影響と思われる。前述の固有振動数計算値とは多少差異を生じている。原因としてはこのAシリーズでもレストレイント部でわずかにギャップを伴うこと、さらに側面および自重支持部で摩擦を伴うためと思われる。実配管系ではこのような非線形性は一般的とされており線形解析による値にある巾をもたせて考える必要がある。支持部の非線形性などを考慮にいった伝達関数の評価法は今後の問題点と思われる。

なお、入力レベルを変えた場合の比較として図2.10.4、2.10.5を示した。共にNo.4振動板の加振によるものであり、加速度レベルは50Galおよび100Galである。図のように伝達関数の形状はほぼ同じであるが応答倍率は50Gal入力の場合がほぼ倍近い値である。位相の変化も50Gal入力の場合はやや乱れている。この差異はレストレイント③ギャップ部の挙動によるものと考えられる。ちなみに、この場合、生データから読み取った最大値は以下の通りである。

(振動数 7.8Hz の場合)

	No. 4 加振機変位	振動板No. 4 加速度	配管加速度A14X
基本波 50G a l 加振	0.6mm p-p	9 3 G a l	3 1 3 G a l
基本波 100G a l 加振	1.2mm p-p	1 6 9 G a l	3 5 8 G a l

(加速度波形には乱れがあるので上記数値の比率はそのまま応答倍率にはならないが、図 2. 1 0. 4、2. 1 0. 5 とオーダー的にはあっている。)

前記の主な振動数の正弦波加振で計測した試験体の振動モードの概形を図 2. 1 1 に示した。実験値の 4. 9 Hz は計算値 5. 6 4 Hz に対応しうることが伝達関数 (図 2. 1 0) から推定しうるが、モードを描くには応答量が小さすぎたので省略した。表 2. 1 にもあるように刺激係数も小さい。

2.6.3 多入力応答挙動

多入力応答挙動については正弦波位相差加振、地震波時間差加振および地震波多入力加振により検討した。

①正弦波位相差加振では 4 入力の場合は代表的位相差、2 入力の場合は細かく位相差を与えた。この結果、計測点にもよるが、0 ~ 1 0 0 % の応答変動を示した。また、この結果は線形解析による多入力伝達関数を用い、強制変位成分を考慮した位相差応答関数によりほぼ説明しうるということがわかった。

すなわち、2 入力では実際的にも重要な位相差 0 または 1 8 0 ° で応答は最大または最小になる。しかし、3 入力以上ではもっと複雑な算定結果になる。(詳しくは 3 章に述べる)。配管系を支持する機器等が独立な共振点を有する場合、振動数によって配管系に作用する位相が異なるので、その応答はかなりの変動巾を生じるものと思われる。

位相差正弦波による応答例として、4 入力の場合の代表的なケースを図 A. 2 に示す。8 Hz は低次モードのうち最も卓越しているものである。図のレベル、位相の 1、2、3、4 は振動板の (上から) 1、2、3、4 を示す。

加速度の応答では振動板 4 台が同位相で最大となっており、また入力レベルに対して応答量は比例していない。(支持部の非線形性その他によると思われる)。一方、歪の応答では今の場合、位相の異なるケース (S A 7 H) が最大を示している。また入力レベルの変化に対してほぼ比例した応答を示している。

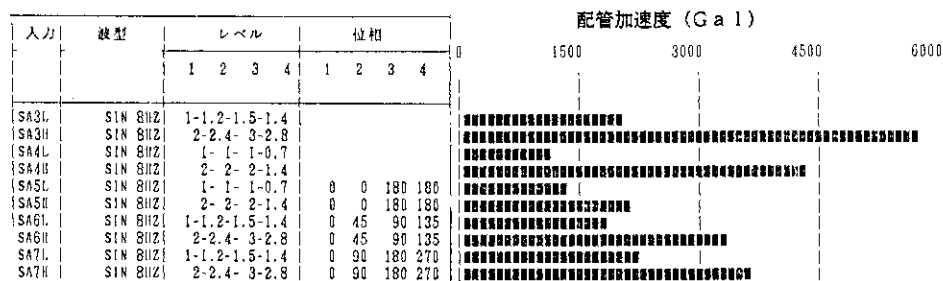


図 A.2 正弦波位相差加振による加速度応答 (A シリーズ、8 Hz)

Fig. A.2 Pipe acceleration by multi-phase excitation (A series, 8 Hz)

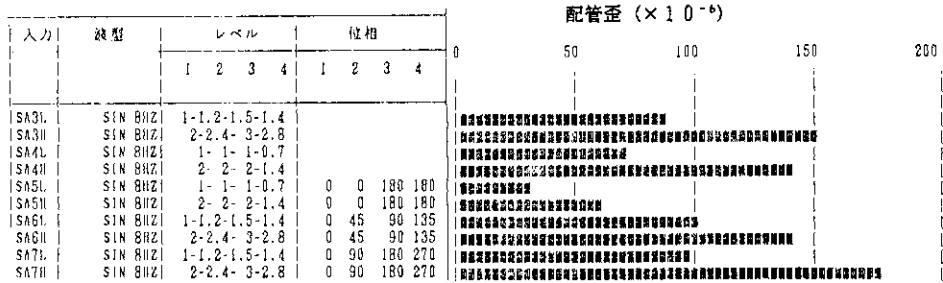


図 A.3 正弦波位相差加振による歪応答 (A シリーズ、8 Hz)
 Fig. A.3 Pipe strain by multi-phase excitation (A series, 8Hz)

次の 1 2 Hz でも同様の傾向を示している。

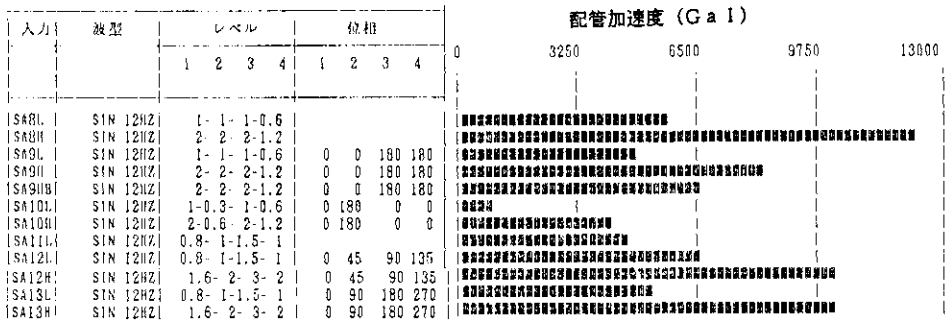


図 A.4 正弦波位相差加振による加速度応答 (A シリーズ、1 2 Hz)
 Fig. A.4 Pipe acceleration by multi-phase excitation (A series, 12Hz)

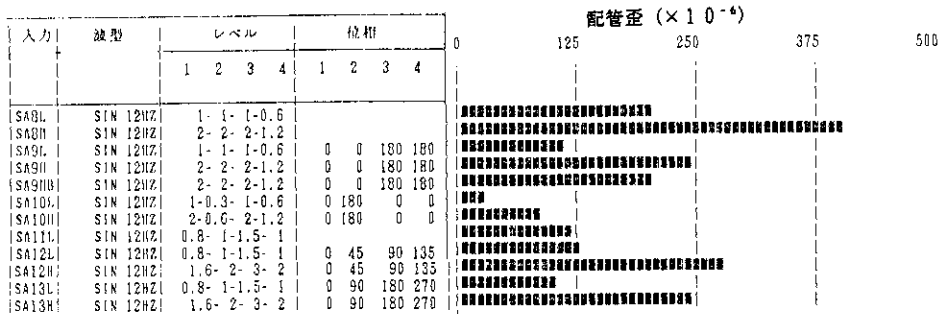


図 A.5 正弦波位相差加振による歪応答 (A シリーズ、1 2 Hz)
 Fig. A.5 Pipe strain by multi-phase excitation (A series, 12Hz)

②地震波時間差加振は同一地震波が伝播する状況を模擬するもので地中管路などに関係がある。ここでは多入力の1形態として用いた。次図に最大応答量の比較例を示す。時間差の与えかたによりほぼ1.5倍程度の応答変動を示している。この場合各入力点のスペクトルは同じであるので結果はもっぱら地震波に含まれる各成分の位相差による応答変動を示すものである。(図A.6, 7で位相の欄は時間差、秒を表わす)。

加速度、歪とも時間差無しの場合が最大かそれに近い応答を示している。時間差がある場合、応答の時間差に対する傾向は不規則のようであり、波形に依存すると思われる。

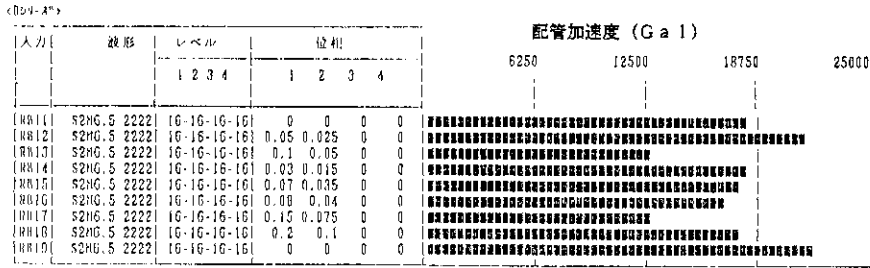


図 A.6 地震波時間差加振による配管最大応答値の比較 (加速度)

Fig. A.6 Comparison of maximum acceleration by earthquake excitations with various time lag

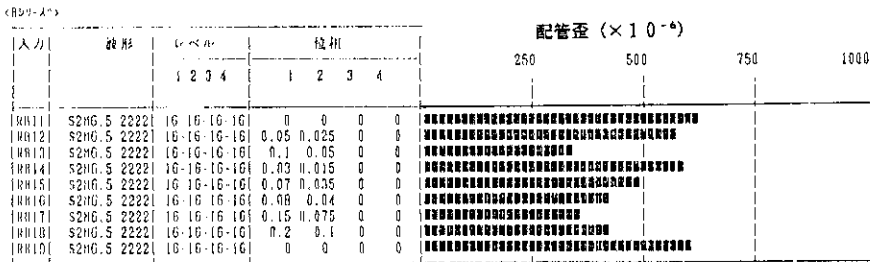


図 A.7 地震波時間差加振による配管最大応答値の比較 (歪)

Fig. A.7 Comparison of maximum strain by earthquake excitations with various time lag

なお、応答波形(歪)は以下のように同時加振では加速度による(慣性)応答が卓越し、また時間差があると強制変位成分が大きくなっていく様子が明瞭である。

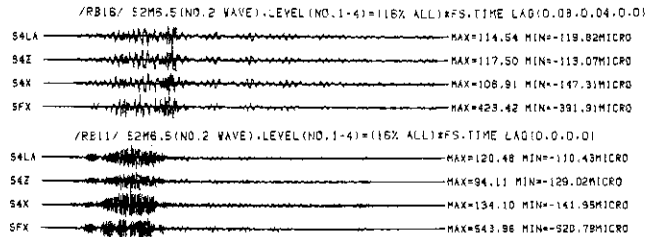


図 A.8 時間差加振と同時加振の配管応答歪

Fig. A.8 Comparison of uniform and time-lag earthquake excitation

③地震波多入力加振は前記加振方法のイによるが、これを口の均一入力加振と比較した。このような比較実験のための入力を厳密に設定することは難しく解析による評価と組み合わせ検討することになるが、ここでは前記イ、口に述べた加振方法による実測値の比較例を表A. 2に示す。

同じ波でもケースにより加振レベルが異なっているものもある。加振は多入力の場合上から第1～4波で、レベルは例えば30、20、10、10%で与え、これに対応する均一加振では全加振点に同一波（第2波）を20%で入力している。

この表にみる限りでは多入力による応答低下を示す場合もあるが顕著ではなく、全体的にみるとあまり差がないように思われる。しかし、今の場合、入力レベルの設定は多少便宜的なもので、この比較は一応の目安といったところである。特に多入力による配管の軸応力がこの表に含まれていないことも考慮する必要がある。本実験では準静的加振を同時に行っており、多入力（強制変位成分）による軸力などが応力の応答に与える効果を抽出しようが、定量的解析は現在進めているところである。

表 A.2 多入力と同一入力による配管応答の実験条件別比較

Tab. A.2 Comparison of pipe responses by uniform and multi-input excitation

シリーズ	入力波	レベル	最大応答加速度(Gal)		最大応答歪(μ)		実験名
			多入力	同一入力	多入力	同一入力	
A	ELNS	30-20-10-10	3065(A5X)	3784(A5X)	243(SFX)	248(SFX)	RA2H/1L
	S2M6.5	12- 8- 4- 4	5916(A7Y)	6083(A10X)	190(SFX)	325(SFX)	RA5L/4L
	S2M8.5	30-20-10-10	5347(A7Y)	5545(A10X)	224(S5Y)	252(SFX)	RA8H/7H
B	S2M6.5	36-24-12-12	21618(A10X)	19244(A6X)	587(SFX)	592(SFX)	RB3/RB4
B P	ELNS	30-20-10-10	7481(A6X)	6686(A6X)	202(S5Y)	272(SFX)	RBP2H/1L
	ELNS	60-40-20-20	11690(A6X)	12483(A6X)	422(S5Y)	436(SFX)	RBP2S/1H
	S2M6.5	12- 8- 4- 4	9492(A5X)	9637(A10X)	225(SFX)	377(SFX)	RBP5L/7L
	S2M6.5	24-16- 8- 8	14646(A7Y)	21961(A10X)	373(SFX)	692(SFX)	RBP5H/7H
	S2M6.5	36-24-12-12	19303(A7Y)	over(A10X)	610(SFX)	895(SFX)	RBP5S/7S
C	ELNS	30-20-10-10	2468(A5X)	3345(A10X)	225(S3LA)*	227(SFX)	RC2H/1L
	S2M6.5	12- 8- 4- 4	3504(A5X)	5007(A10X)	196(S3LA)*	267(SFX)	RC5L/4L
	S2M8.5	15-10- 5- 5	1764(A7Y)	2408(A5X)	101(SFX)	147(SFX)	RC8L/7L
	S2M8.5	30-20-10-10	4724(A7Y)	3304(A10Z)	237(S5Y)	233(SFX)	RC8H/7H
D	ELNS	30-20-10-10	3380(A5X)	3367(A16X)	239(S5Y)	169(S8LA)*	RD2H/1L
	ELNS	30-20-10-10	5261(A7Y)	4397(A10X)	200(S5Y)	192(SFX)	2HB/1L
	S2M6.5	12- 8- 4- 4	3746(A7Y)	6118(A10X)	169(SFX)	205(SFX)	RD4L/3L
	S2M6.5	24-16- 8- 8	8105(A10X)	17767(A10X)	317(SFX)	390(SFX)	RD4HA/3H
	D P	ELNS	30-20-10-10	5185(A16X)	4375(A16X)	249(S5Y)	183(SFX)
D P	ELNS	60-40-20-20	9813(A7Y)	9718(A10X)	350(S5Y)	352(SFX)	RDP2S/1H
	S2M6.5	12- 8- 4- 4	4502(A10X)	5365(A16X)	173(S3LA)*	211(S3LA)*	RD5L/4L
	S2M6.5	24-16- 8- 8	14899(A10X)	20983(A10X)	313(SFX)	523(S8X)	RD5H/4H
	S2M6.5	36-24-16-16	20615(A10X)	21667(A10X)	470(SFX)	1592(S8X)	RD5S/4S

表A. 2の歪で*印の点は、エルボ側面の歪で最大値を生じた場合である。同じ入力波入力レベルにもかかわらず加速度応答などでかなり差異を生じる場合がある。これはギャップおよび支持部の摩擦などの条件がかわるためと思われる。

代表的なケースであるB Pシリーズ（加圧50 kg/cm²、レストレイントギャップ有り）の場合の地震波加振応答波形（全チャンネル）を図2. 12に示す。

④実験条件別比較

前述のように各実験シリーズは支持条件、内圧条件を変えて行っているが、これらの応答を同一入力波の場合について比較した。図A. 9は加速度応答の場合である。入力レベルには一部差があるが、支持部にギャップのあるB、Dシリーズで加圧条件の場合が高い応答を示している。

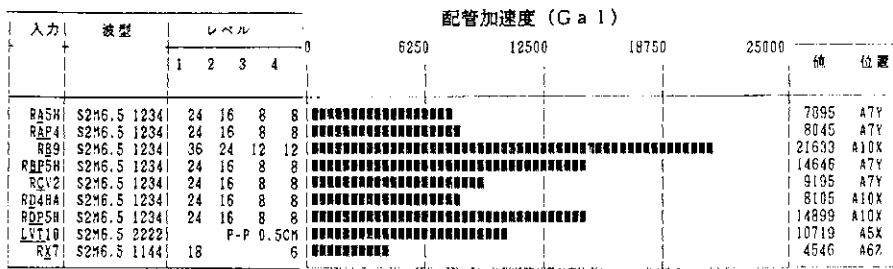


図 A.9 条件別多入力応答の比較（最大加速度）

Fig. A.9 Comparison of maximum acceleration response in each test conditions

同様に図A. 10は配管の最大応答歪を比較したものである。A～Dシリーズでは、Bシリーズがやや大きい、大差はないといえる。一方、ほぼすべてのレストレイントをとり除いた柔構造モデル（Xシリーズ、2入力）ではかなり大きい、固有振動数が低く加速度は小さいが、配管系の変形はかなり大きくなるといえる。

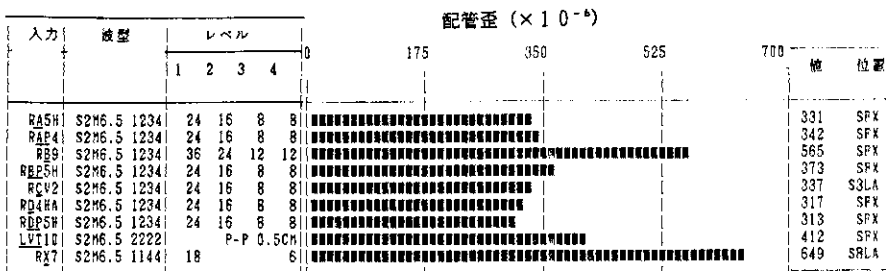


図 A.10 条件別多入力応答の比較（最大応答歪）

Fig. A.10 Comparison of maximum strain response in each test conditions

なお、上記加振時の加振機変位、振動板加速度等は表A. 3の通りである。

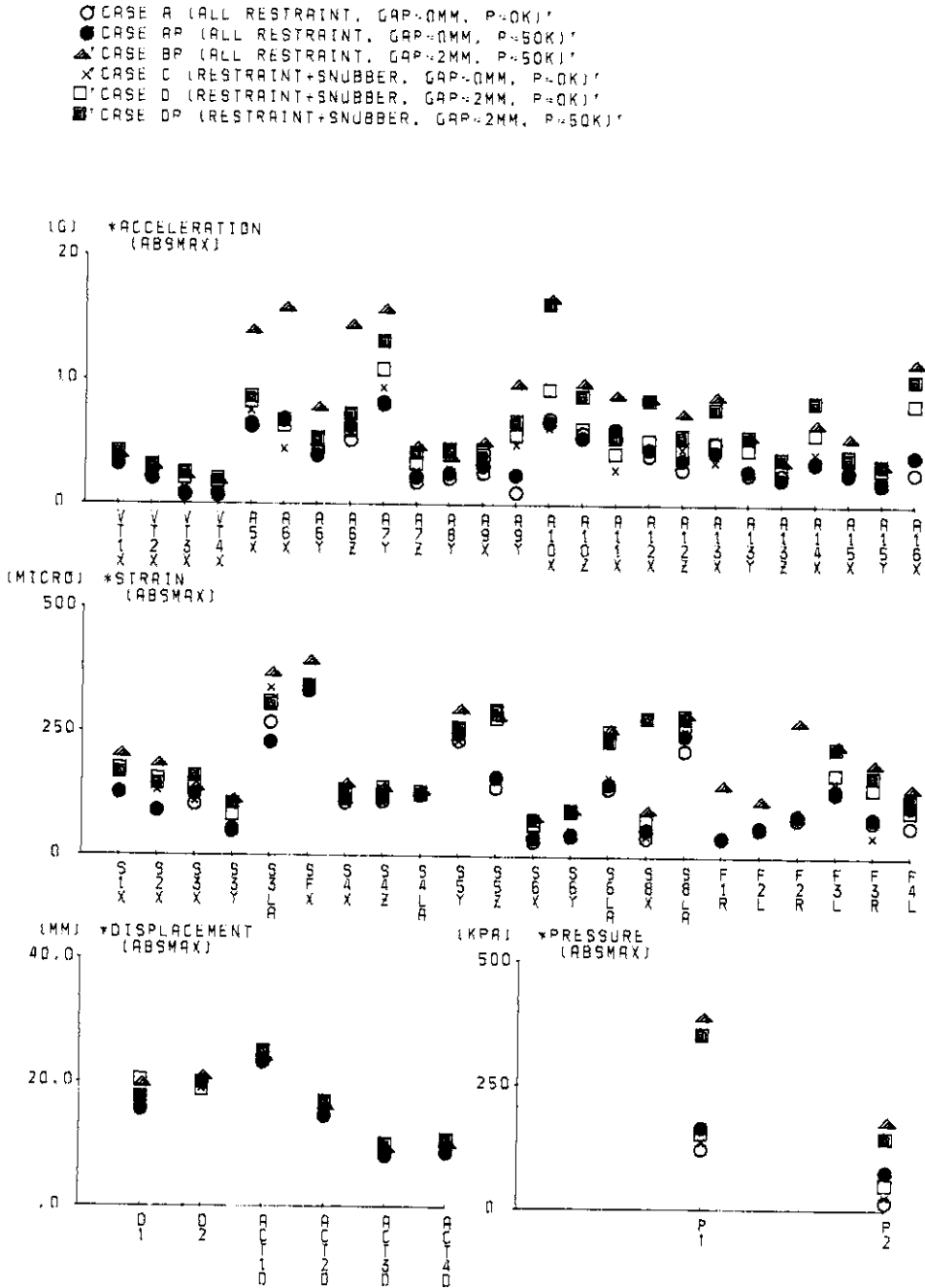


図 A.11 実験条件別多入力応答の比較 (全計測点)
 Fig. A.11 Comparison of the responses at the same measuring points in each test condition

表 A.3 条件別多入力応答の比較 (入力変位、加速度等)

Tab. A.3 Comparison of input levels in each test conditions

入力	機型	レベル				加振機変位		駆動機加速度		配管絶対変位		配管内圧変動		
		1	2	3	4	値 mm	位置	値 Gal	位置	値 mm	位置 KPA	値 mm	位置	
RA5B	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT1D	3094	VT1X	20	02	122	P1	
RA14	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT1D	3122	VT1X	20	02	165	P1	
RA9	S2M6.5 1234	36	24	12	12	26	ACT1D	4196	VT1X	2R	01	234	P1	
RRP5H	S2M6.5 1234	24	16	8	8	22	ACT1D	3095	VT1X	19	02	368	P1	
RCV2	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT1D	3165	VT1X	19	02	136	P1	
RD40A	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT1D	3142	VT1X	1R	01	129	P1	
RD50	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT1D	3082	VT1X	1R	02	32R	P1	
LV10	S2M6.5 2222			P-P	0.5CM	0	ACT3B	1621	VT2X	7	01	207	P1	
VA7	S2M6.5 1144	18				6	17	ACT1B	1918	VT1X	41	01	75	P1

ここに述べた各応答は今回の実験で支持部条件等を比較できる代表的なケースであるがこれを含めた全ケースの応答最大値の比較は表 2. 2 に示す通りである。この表にもとづいて各計測点別に応答を比較したものが図 A. 11 である。この図から、各計測点別にみても B P シリーズの場合が全般に高い応答を示していることがわかる。

なお、各ケース同一入力波の場合、加振機変位はほぼ同じであるが、振動機加速度は試験体および架構の影響を多少受けるため、ケースによって変動がある。

表 A.4 動的加振と準静的加振による配管の最大歪 (多入力の場合)

Tab. A.4 Comparison of maximum strain by dynamic and static excitation

シリーズ	入力波	レベル	最大応答歪 (μ)	
			動的加振	準静的加振
A	ELNS	30-20-10-10	243(SFX)	202(S5Y)
	S2M6.5	24-16- 8- 8	331(SFX)	144(S1X)
	S2M8.5	30-20-10-10	224(S5Y)	171(S5Y)
A P	ELNS	30-20-10-10	277(SFX)	206(S5Y)
	S2M6.5	24-16- 8- 8	342(SFX)	151(S1X)
	S2M8.5	30-20-10-10	237(S5Y)	172(S5Y)
B	S2M6.5	6- 4- 2- 2	89(S3LA)*	35(S8LA)*
	S2M6.5	36-24-12-12	565(SFX)	135(S1X)
B P	S2M6.5	24-16- 8- 8	373(SFX)	116(S1X)
C	ELNS	30-20-10-10	225(S3LA)*	161(S3LA)*
	S2M6.5	24-16- 8- 8	337(S3LA)*	130(S3LA)*
	S2M8.5	30-20-10-10	237(S5Y)	153(S3LA)*
	RAN20	4- 4- 4- 4	319(S3LA)*	167(S8LA)*
D	S2M6.5	24-16- 8- 8	299(S3LA)*	116(S3LA)*
D P	S2M6.5	36-24-16-16	470(SFX)	139(S3LA)*
X	ELNS	30- 0- 0-10	537(S8LA)*	231(S8LA)*
	S2M6.5	18- 0- 0- 6	649(S8LA)*	144(S8LA)*

注) *はエルボ側面の周歪、その他は直管部の曲げ歪

⑤準静的応答と動的応答

前述のように地震波による多入力加振の直後に、収録した加振機変位データを10倍の時間スケールで再入力した。この時の応答は、加速度は小さい雑振動を除けばほぼ0で、配管は静的な強制変位による応答のみを示す。この静的加振では、動的加振時の加振機の変位波形およびレベル比はほぼそのまま静的に再現されるが、絶対レベルは入力設定の関係で多少異なってくる。

そこで静的応答については（絶対レベルについてリニアリティーを仮定して）動的応答と同じ入力レベルに対する応答を比例的に算出し、動的加振の結果（歪応答など）と比較することになる。表A. 4はそのようにして求めた最大応答値の比較である。ギャップのある場合の静的応答値はギャップ内での配管の位置により少なからず違いが出るものと思われるので、この表は概略の傾向を表すものである。

ギャップのないAシリーズについて、上記方法で算定した差応答（変位および歪については、原理的には動的慣性応答のみからなる部分）の波形を元の動的加振応答波、準静的加振応答波とともに図2. 13（Aシリーズ、E L N S波入力）に示した。

2.6.4 支持部の挙動

①ギャップ条件による応答の差異

レストレイント支持部にギャップがある場合、ギャップ内での配管の位置はかなり任意的である。特に下部（自重支持部）で摩擦が作用する場合、加振終了時の位置は応答状況に依存するので、各加振の初期条件は厳密には異なってくる。

このギャップの初期状態による応答の変動は応答レベルが低い場合はかなり大きいが応答レベルの高い場合その影響は相対的に低くなる。例として8B管レストレイント（図2.2の③）のギャップ初期値（左右）を変えた場合の応答の比較を図A.12～図A.13に示す。図で

- A： ギャップ 左=2.3mm、右=1.7mm
- B： ギャップ 左=0、右=4.0mm
- C： ギャップ 左=4.0mm、右=0
- D： ギャップ 左=2.0mm、右=2.0mm

である。この図の場合、加速度応答ではギャップ中立付近のA、Dではほぼ同じ値を示したギャップが右または左に偏ったB、Cの応答にかなり差がある。しかし、加速度応答ではギャップにおける衝突の影響が大きく必ずしも配管全体としての応答を代表するとはいえない。歪では図A.13のように差異は小さい。

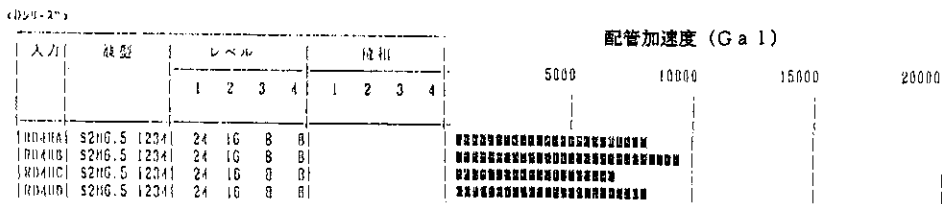


図 A. 12 ギャップ条件による応答の差異（応答最大加速度）

Fig. A. 12 Maximum acceleration response in some conditions of 8B restraint gap clearance(D series)

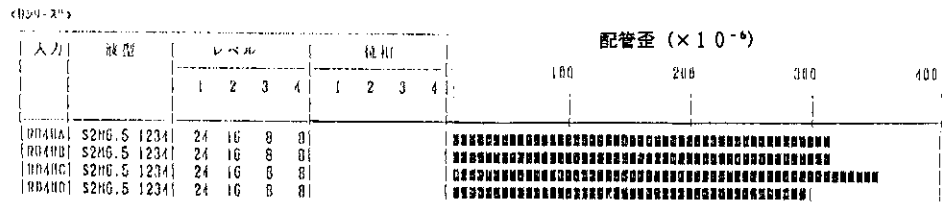


図 A. 13 ギャップ条件による応答の差異（応答最大歪）

Fig. A. 13 Maximum strain response in some conditions of 8B restraint gap clearance(D series)

②ギャップによる不安定応答

ギャップ支持部の非線形性により配管系に不安定応答を生ずることはよく知られている。本実験でもギャップのあるB、Dシリーズの正弦波加振で同様の挙動を生じた。振動数掃引時および振幅掃引時の不安定応答の例を図A.14に示す。振動板は4台同位相、

同レベルの加振である。なお、振動数および振幅の下降掃引でも同様である。

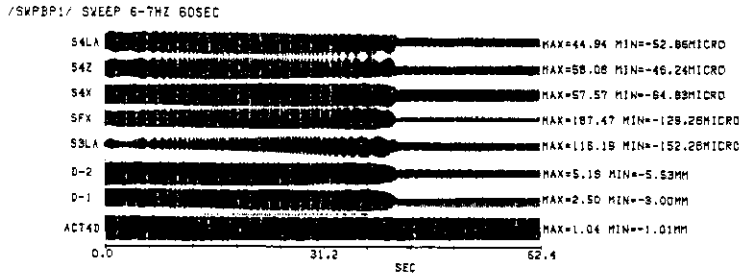


図 A.14 振動数掃引 (上昇) 時の不安定応答 (BP シリーズ)
 Fig. A.14 Unstable response at increasing frequency (BP series)

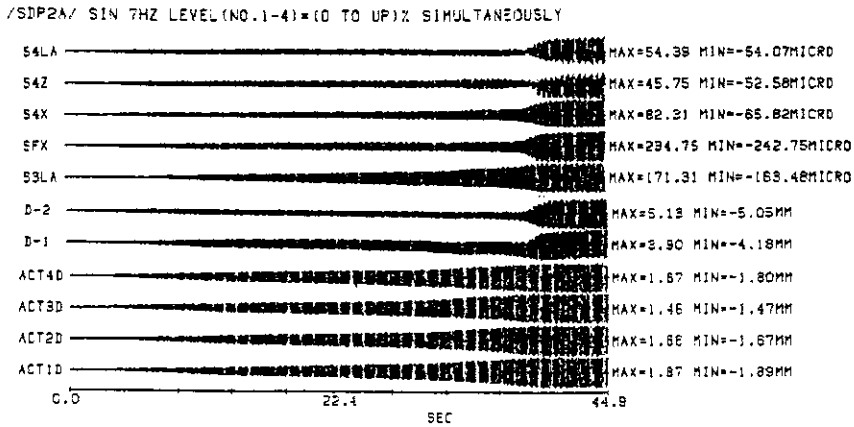


図 A.15 振幅掃引 (上昇) 時の不安定応答 (DP シリーズ)
 Fig. A.15 Unstable response at decreasing frequency (BP series)

③スナップ支持とレストレイント支持

スナップの動特性等については既にかんがりの研究が行われている。本実験はスナップの挙動を詳しく把握することを目的としたものではないが、多入力加振時の応答に対しレストレイントとの差異をみる事ができるような位置に配置した。図2. 2でレストレイント①、②の位置である。容量500kgfのメカニカルスナップで2台用いた。配管系モデルのこの部分(振動板No2上)は4B模擬弁2個を取付けたこともあって動的加振時に最も「振られる」部位である。レストレイント②付近の配管曲げ歪SFXは多くのケースで最大の計測値を生じている。

対応する実験シリーズは、Aシリーズ(全レストレイント、ギャップ0)とCシリーズ(一部スナップ、ギャップ0)、およびB、BPシリーズ(全レストレイント、ギャップ有)とD、DPシリーズ(一部スナップ、ギャップ有)である。

実験結果をみると、スナップ付近の配管があまり動かないモード(レストレイントとして解析した場合のモード)である8HzではA、Cシリーズの配管応答最大歪はほとんど差がない。

一方、この部位がよく振動するモードに近い 12 Hz では 図 A. 16 のように歪の応答にやや差が見られ、スナッチ支持の方が応答曲げ歪は小さくなっている。

入力	波型	レベル				位相				配管歪 ($\times 10^{-6}$)		
		1	2	3	4	1	2	3	4	375	750	1125
SA8H	SIN 12HZ	1	1	1	0.6							
SA8L	SIN 12HZ	2	2	2	1.2							
SA9L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6	0	0	180	180			
SA10L	SIN 12HZ	1	0.3	1	0.6	0	180	0	0			
SA10H	SIN 12HZ	2	0.6	2	1.2	0	180	0	0			
SA11L	SIN 12HZ	0.8	1	1.5	1							
SA12L	SIN 12HZ	0.8	1	1.5	1	0	45	90	135			
SC8L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6							
SC8H	SIN 12HZ	2	2	2	1.2							
SC9L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6	0	0	180	180			
SC10L	SIN 12HZ	1	0.3	1	0.6	0	180	0	0			
SC10H	SIN 12HZ	2	0.6	2	1.2	0	180	0	0			
SC11L	SIN 12HZ	0.8	1	1.5	1							
SC12L	SIN 12HZ	0.8	1	1.5	1	0	45	90	135			

図 A.16 レストレイントとスナッチ支持の比較 (最大応答歪)
 Fig. A.16 Comparison of maximum strain in case A(all restraint supports) and case C(restraint and snubber supports)

加速度応答についても同様に 8 Hz ではスナッチ支持とレストレイント支持はほぼ同程度の応答であるが、12 Hz ではスナッチ支持の方が小さくなっている。但し、両ケースで最大応答を生ずる点は必ずしも同じではない。両ケースで振動板の加速度にも若干の差はあるが、応答にはそれ以上の明瞭な差異を生じているようである。

<Aケース>										配管加速度 (Gal)			
入力	波型	レベル				位相				3750	7500	11250	15000
		1	2	3	4	1	2	3	4				
SA8L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6								
SA8H	SIN 12HZ	2	2	2	1.2								
SA9H	SIN 12HZ	1	1	1	0.6	0	0	180	180				
SA9L	SIN 12HZ	2	2	2	1.2	0	0	180	180				
SA10L	SIN 12HZ	1	0.3	1	0.6	0	180	0	0				
SA10H	SIN 12HZ	2	0.6	2	1.2	0	180	0	0				
<Cケース>										配管加速度 (Gal)			
入力	波型	レベル				位相				1875	3750	5625	7500
		1	2	3	4	1	2	3	4				
SC8L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6								
SC8H	SIN 12HZ	2	2	2	1.2								
SC9L	SIN 12HZ	1	1	1	0.6	0	0	180	180				
SC9H	SIN 12HZ	2	2	2	1.2	0	0	180	180				
SC10L	SIN 12HZ	1	0.3	1	0.6	0	180	0	0				
SC10H	SIN 12HZ	2	0.6	2	1.2	0	180	0	0				

図 A.17 レストレイントとスナッチ支持の比較 (最大応答加速度)
 Fig. A.17 Comparison of maximum acceleration in case A and case C

なお、地震波加振では若干の差はあるが、今回用いた入力波では顕著な差はみられない。図 A. 18 に例を示す。(図示のスケールが異なっている)。

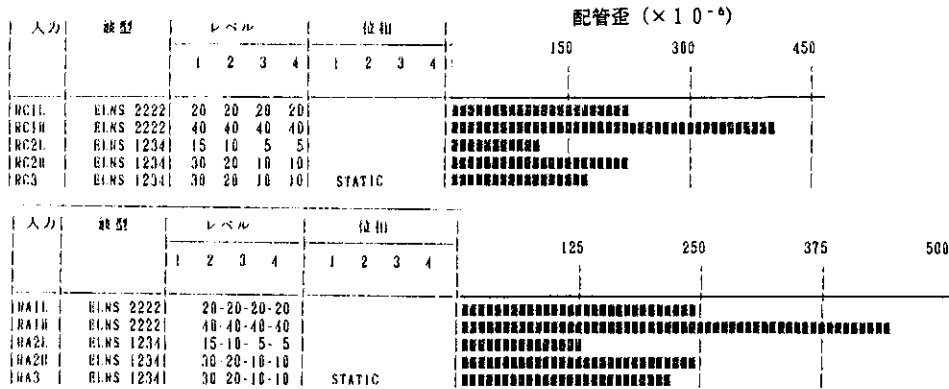


図 A.18 支持条件の比較 (地震波加振の場合、ギャップ無、最大応答歪)

Fig. A.18 Comparison of maximum strain in case A and case C (Earthquake excitation, without gap clearance)

レストレイント支持部にギャップがある場合の全レストレイント支持、一部スナッパ支持の比較についてもほぼ同様の傾向がみられるが、加速度応答の方が明瞭な違いを見せている。加圧条件で行ったBPとDPシリーズの比較を図A.19に示す。

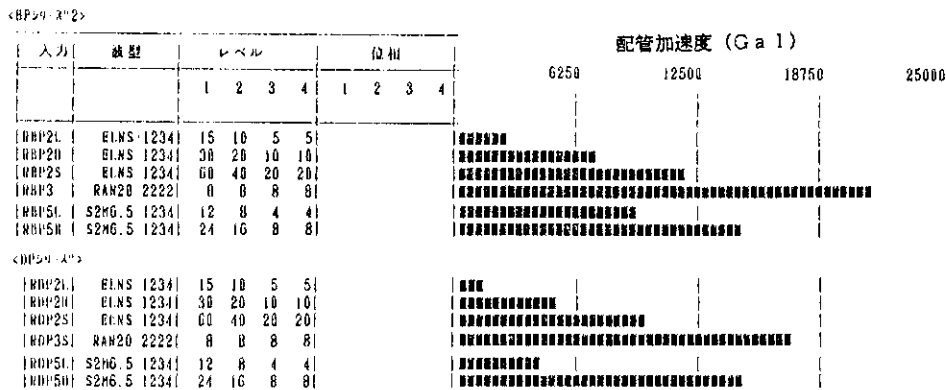


図 A.19 支持条件の比較 (地震波加振の場合、ギャップ有、最大応答歪)

Fig. A.19 Comparison of maximum strain in case BP (all restraint supports) and case DP (restraint and snubber supports) (Earthquake excitation, with gap clearance)

2.6.5 内圧による挙動

①内圧による静的変形

加圧 5.0 kg/cm²時の配管の歪 (直管部の曲げ歪、エルボ側面円周歪) は図A.20の通りで

あった。加圧により増加する方向を+としている。曲げ歪の符号については2. 5計測の項に記した。BPシリーズ(全レストレイント、ギャップ有)とDPシリーズ(一部スナップ、ギャップ有)で加圧による配管の歪にはほとんど差は見られない。

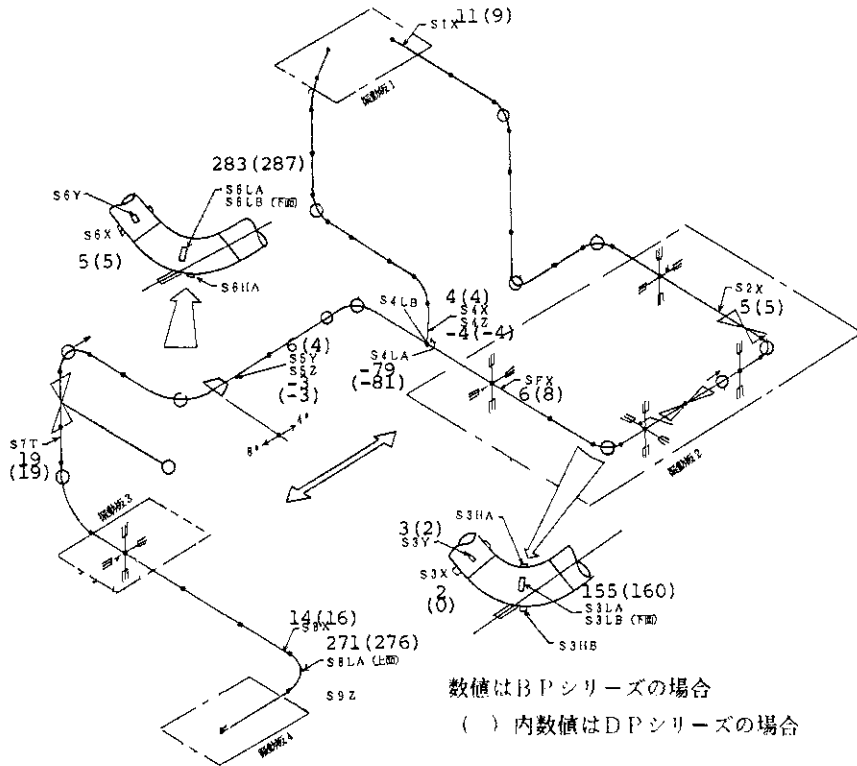


図 A.20 加圧時の配管の歪 ($\times 10^{-6}$)

Fig. A.20 Static strain by internal pressure (50 kg/cm²)

②動的加振時の内圧変動

本試験体のような形状、長さ、振動数範囲では液柱の共振的応答は生じえないが、若干の内圧変動が観測された。圧力測定は4 B管エルボ部 (P-1)、8 B管エルボ部 (P-2、図2. 8参照)で行った。加圧しない満水の場合 (A、B、C、Dシリーズ)、最大圧力変動値として200~300 kPa (2~3 kg/cm²)程度を生じており、また加圧していないため負圧側の応答が押さえられている。但し、実験ケースRB19 (表2. 2. 3)ではP-1、P-2とも600 kPa (6 kg/cm²)ほどの値を生じており、波形も特に異常が見られない。同じ入力 of RB11とくらべても倍以上であるが、原因は明らかでない。

加圧実験のAPシリーズ(全レストレイント、ギャップ0)の地震波加振では図A. 21の程度である。なお、数値は全て設定圧力5 MPa (50 kg/cm²)からの変動分である。

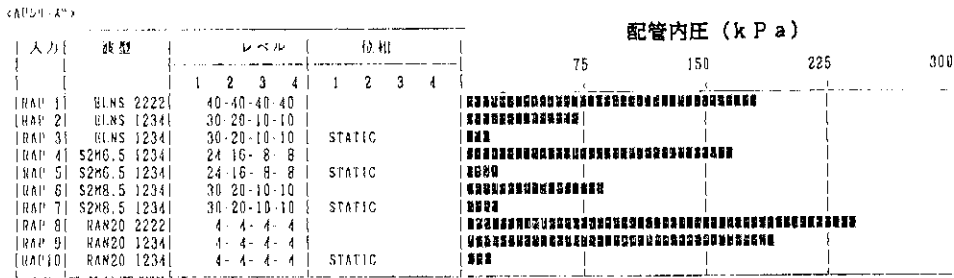


図 A.21 地震波加振時の最大圧力変動 (A Pシリーズ)
 Fig. A.21 Pressure variation by earthquake excitation (AP series)

一方、レストレイントギャップのあるB Pシリーズ、一部スナップを用いたD Pシリーズではそれぞれ図A. 22の通りである。

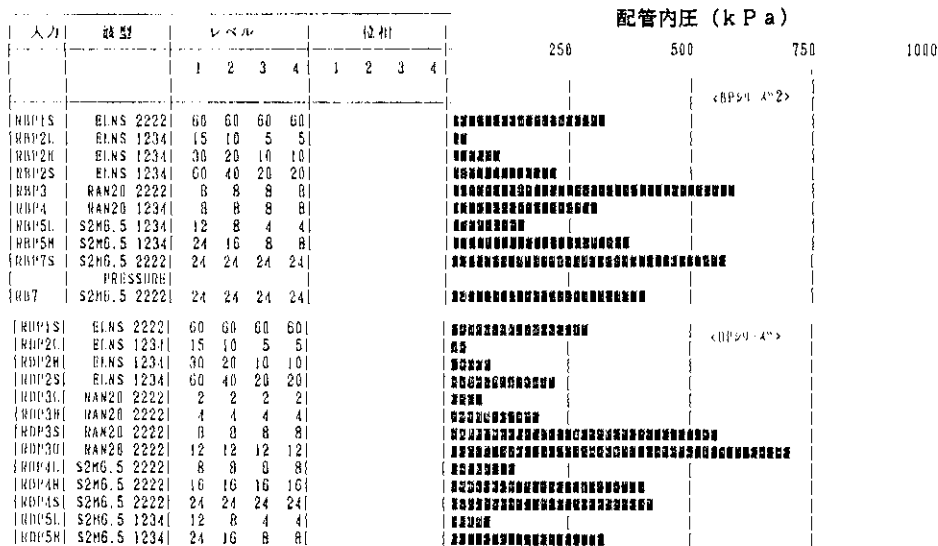


図 A.22 地震波加振時の最大圧力変動 (上: B Pシリーズ、下: D Pシリーズ)
 Fig. A.22 Pressure variation by earthquake excitation (BP and DP series)

これらの図から、波形にもよるが、大まかな傾向としてギャップのない場合 (A P) が有る場合に比べて圧力応答は小さく、またスナップ支持を含むケース (D P) が全レストレイント (B P) よりやや小さい。前述のように本試験体では液柱自体の応答はほとんど励起されないの、管の加速度応答に追従して圧力変動が決まっているように思われる。

例えば前図のR A P 4とR B P 5 Hは同じ入力であるが、圧力応答は2倍程度の差を生じている。前記④実験条件別比較の図A. 9にあるようにR A P 4とR B P 5 Hの配管加速度応答最大値は (同じ計測点A 7 Yで) ちょうど2倍程度異なっているのに対応している。

なお、図A. 22でRB7はRB7S加振後、圧力解除を行い、RBP7Sと同じ加振を行ったもので、加圧条件と滴水条件の比較を直接示したものである。

全体を通じてP-2(8B管)よりP-1(4B管)が圧力応答が大きく、その最大は700kPa(7kg/cm²)程度になっている。これにより配管に作用する力は0.6ton程度である。測定を行っていなかったが、アンカー部ではもっと大きい値になっていると思われる。

2.6.6 ビデオカメラによる応答変位の計測

ビデオカメラによる動的変位の計測は、これまで当センターで行ったいくつかの耐震実験に応用してきたが、今回の実験においても主要部の3次元変位をみるために適用した。この手法自体については文献(国立防災科学技術センター研究速報第68号、昭和60年6月)にあるのでここでは適用結果についてのみ記す。

ターゲット(紙製)は計35個取付けたが、配管には7点、配管支持部など可動部に3点、他は反力架構など動かない点である。カメラは2台しか使えなかったため、配管の計測は8B管バルブ付近から4B管にかけての部分を中心に主対象とした。このうち1点は変位計D-2と直接比較できる(但し、変位計は加振方向のみ)位置に取付けた。また振動板のターゲットも実測と比較できるようにした。

図2.14.1はこれらターゲットの位置を示す。

図2.14.2はビデオ画像から解析した変位波形と変位計による実測波形を比較したものである。応答値および時間軸のスケールが少し違うのでやや見づらいが波形はほとんど一致しているといえよう。また最大値については変位計による値との差は1~1.5mm程度である。変位計による実測値にも多少の誤差があり得ることを考えると、この手法の誤差は1mm程度と思われる。これはもちろん画像解析に用いた機器の性能による制限を受けているが、耐震実験の誤差としては実用的な範囲にあるものと思われる。この誤差は測定値が大きくなってもあまり変わらないと思われるので、大変形を伴う破損実験などにはより有効と考えられる。

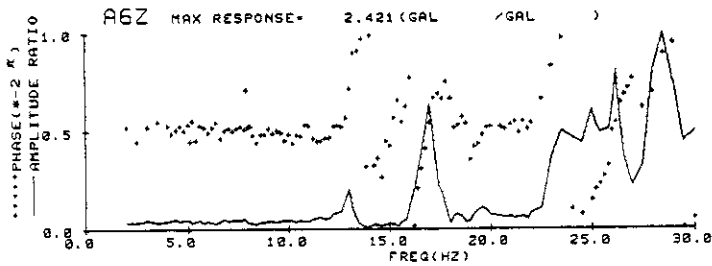
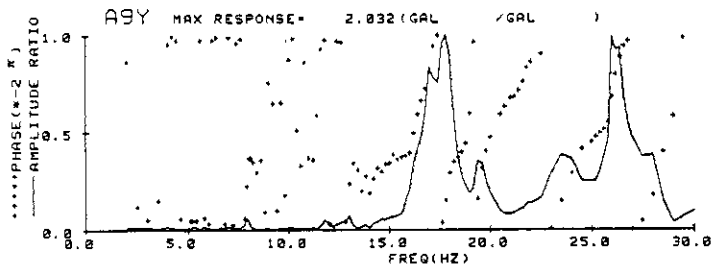
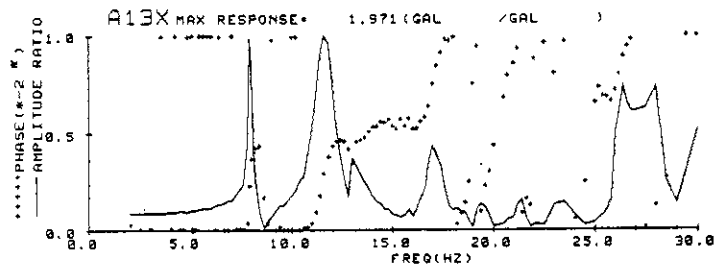
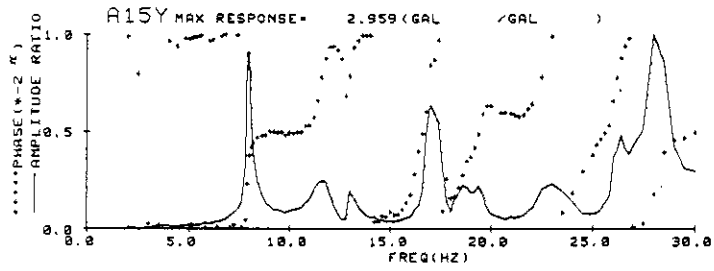
図2.15.1~2.15.3は今回の実験のうちCシリーズ、Xシリーズで行った計測例を示すものである。この図は各ターゲットの計測値から基準ターゲット(T31、原則として動かない点である)の計測値を引いたもので床面(不動点)に対する変位を出したものである。従って配管変位は必ずしも変形量を表すものではない。加振方向以外のY(上下)、Z(加振直角方向)には振動板等も変位しないのでこの図の計測値は配管の変形を示すものである。3次元変位を求められるターゲットは2台のカメラに同時に記録されたターゲットのみであり、今の場合、T19(8Bバルブ先端部)、T20(同取付部)、T21(8Bバルブ上のエルボ部)およびT30(変位計D-2取付部)である。本図からCシリーズについて計測された絶対変位の最大値を要約すると以下のようなものである。(+側と-側のピーク値を示した。)

表 A.5 ビデオカメラから解析した動的応答変位 (Cシリーズ、単位mm)
 Tab. A.5 Maximum pipe displacement at various position measured by
 video camera analyzing method (C series)

	方向	R C V 1		R C V 4	
		ELNS 30-20-10-10		S2M8.5 48-32-16-16	
T 2 3 振動板No 3	X	1 3. 5		1 9. 3	
		- 1 2. 7		- 1 4. 2	
T 2 4 振動板No 3	X	1 4. 5		2 0. 0	
		- 1 2. 9		- 1 5. 5	
T 2 0 8 Bバルブ 取付部	X	1 7. 7		2 6. 2	
		- 1 6. 0		- 1 8. 0	
	Y	1. 3		1. 3	
		- 1. 0		- 1. 6	
	Z	2. 3		3. 5	
		- 3. 3		- 3. 3	
T 1 9 8 Bバルブ 先端部	X	2 1. 1		2 9. 3	
		- 1 7. 6		- 2 1. 3	
	Y	1. 4		2. 1	
		- 1. 7		- 1. 8	
	Z	2. 7		3. 0	
		- 2. 6		- 3. 5	
T 2 1 8 B管 エルボ部	X	2 0. 8		3 0. 0	
		- 1 8. 7		- 2 0. 8	
	Y	0. 8		1. 3	
		- 0. 9		- 1. 3	
	Z	3. 1		3. 2	
		- 3. 6		- 3. 7	
T 2 2 8 B管	X	2 3. 5		3 2. 8	
		- 2 0. 8		- 2 3. 3	
T 3 0 4 B管 変位計測 定部	X	2 4. 1		3 3. 1	
		- 2 1. 0		- 2 4. 4	
	Y	2. 0		2. 8	
		- 2. 3		- 2. 0	
	Z	2. 7		2. 8	
		- 2. 6		- 3. 7	

振動板No 3上のレストレイント支持部(T 2 3、T 2 4)からみた配管計測点(T 1 9～3 0)の変位量はほぼ、RCV 1で7～8 mm、RCV 4では9～1 0 mm程度である。また加振方向以外では、上下が1～3 mm、加振直角方向(Z)がそれより大きく2～4 mm程度変形している。

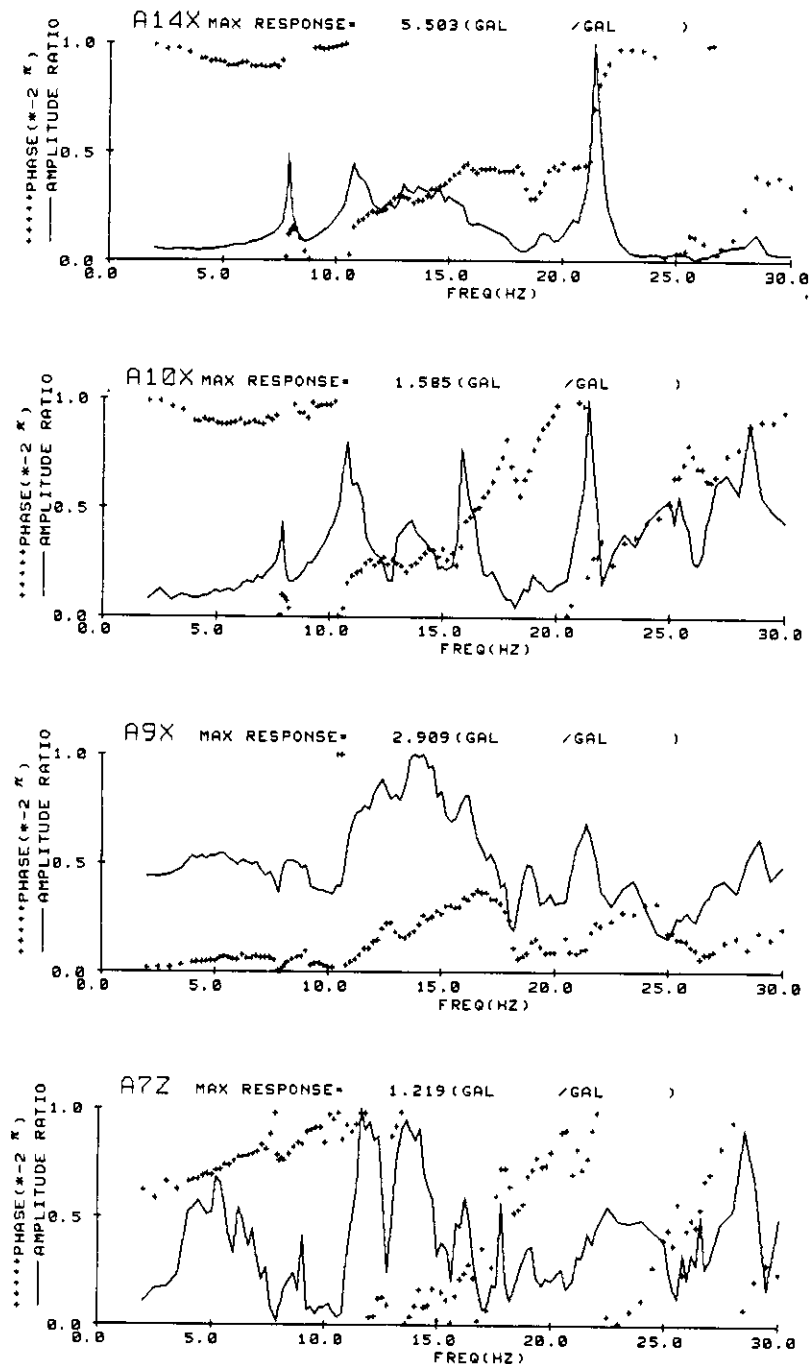
なお、Xシリーズの例(図2. 1 5. 3)では2入力であるが、柔構造のため入力レベルに比べ配管の応答変位が大きくなっているのがわかる。特に、加振直角方向には最大7 mm程度、上下方向には最大4 mm程度の変位を生じている。



(a) No.1 振動板加振、100Gal

図 2.10.1 一点加振による伝達関数 (Aシリーズ)
No.1振動板加振、100Gal

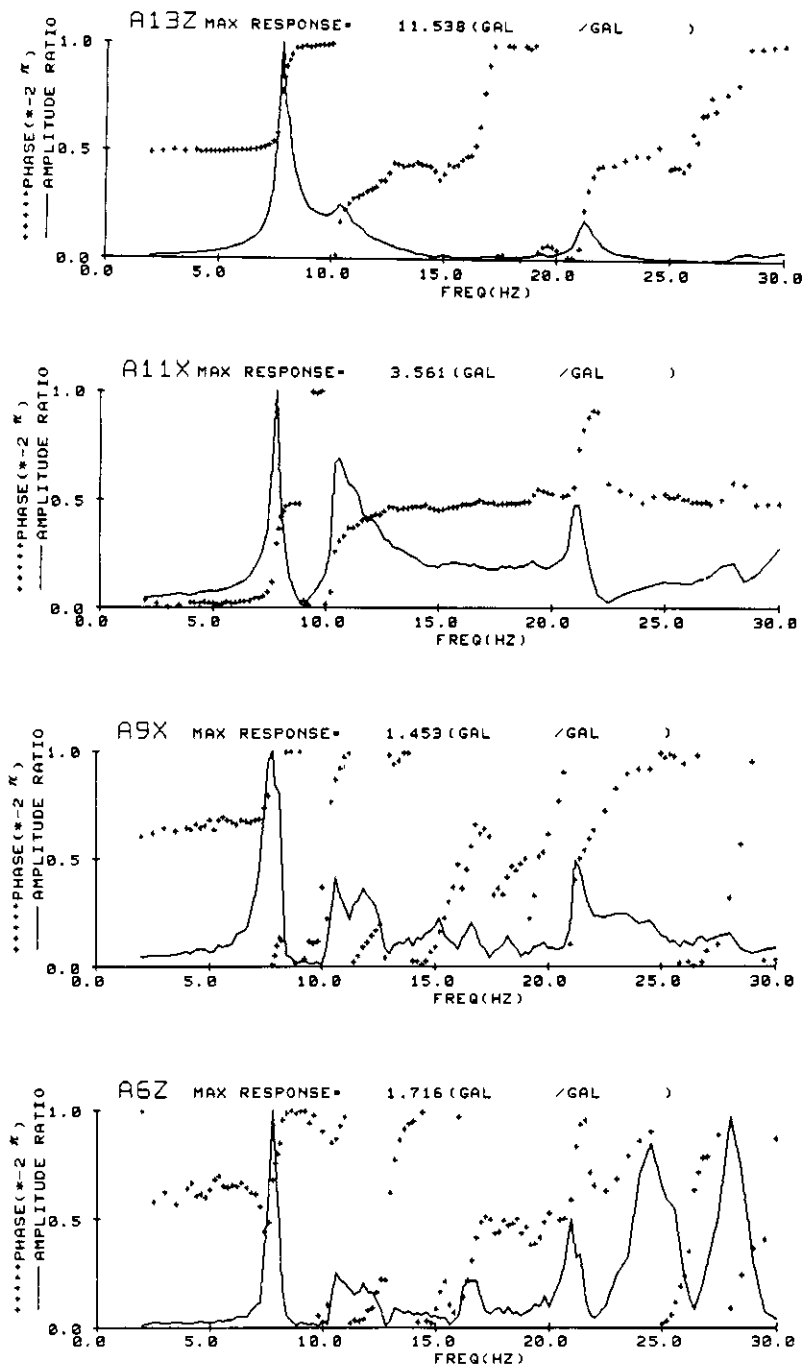
Fig. 2.10.1 Transfer functions of piping response by single point excitation
(A series, only No.1 table shaking, 100Gal)



(b) No. 2 振動板加振、100Gal

☒ 2.10.2 一点加振による伝達関数 (Aシリーズ)
No. 2振動板加振、100Gal

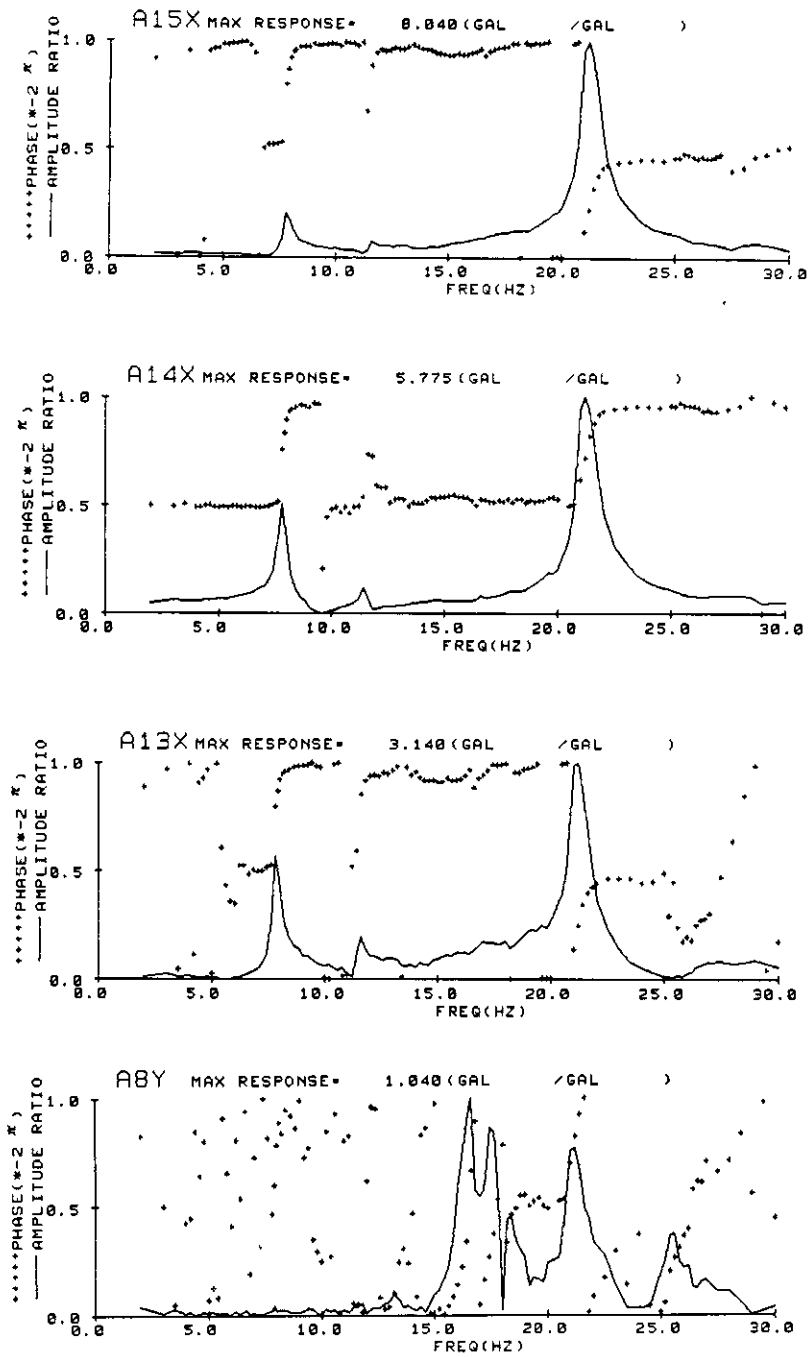
Fig. 2.10.2 Transfer functions of piping response by single point excitation (A series, only No.2 table shaking, 100Gal)



(c) No.3 振動板加振、100Gal

図 2.10.3 一点加振による伝達関数 (A シリーズ)
No.3 振動板加振、100Gal

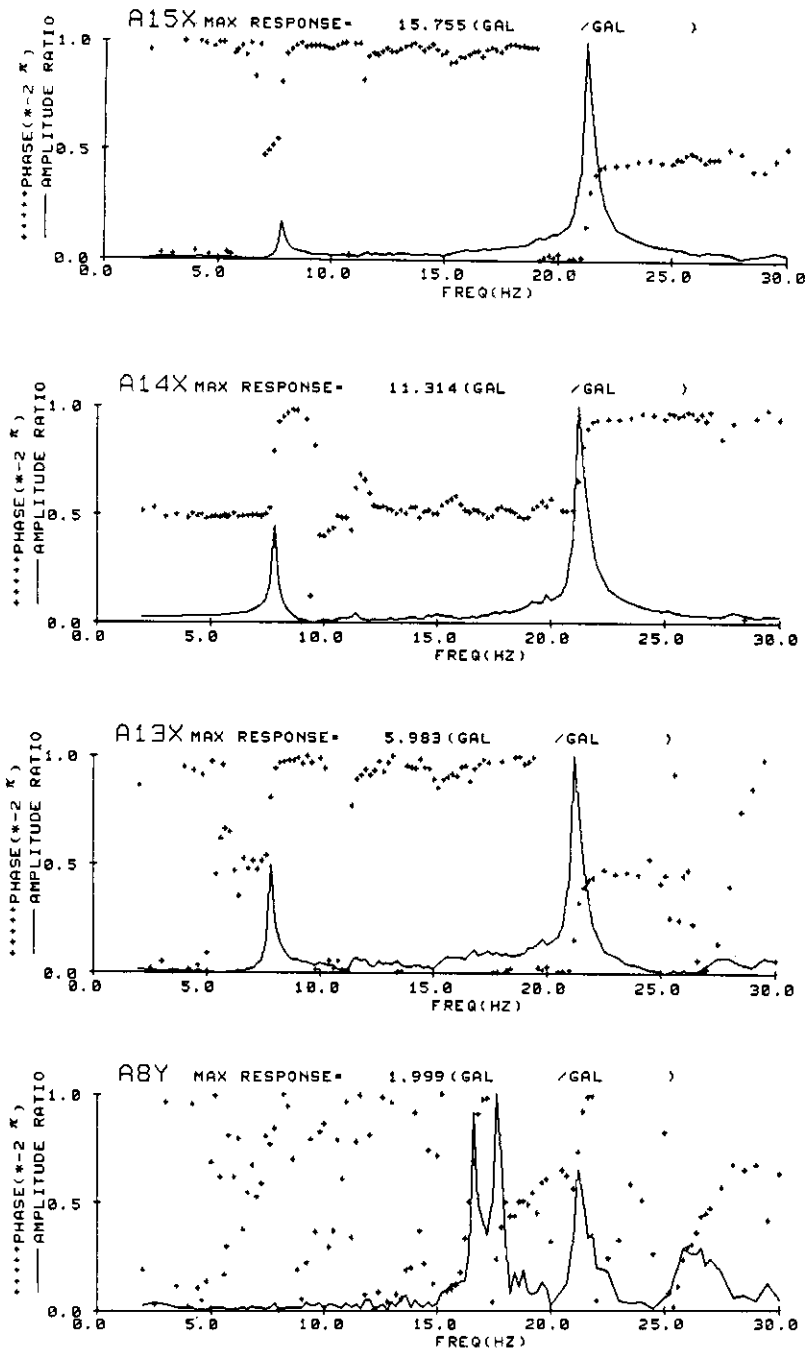
Fig. 2.10.3 Transfer functions of piping response by single point excitation (A series, only No.3 table shaking, 100Gal)



(d) No.4 振動板加振、100Gal

図 2.10.4 一点加振による伝達関数 (Aシリーズ)
No.4振動板加振、100Gal

Fig. 2.10.4 Transfer functions of piping response by single point excitation
(A series, only No.4 table shaking, 100Gal)



(e) No.4 振動板加振、5.0Gal

図 2.10.5 一点加振による伝達関数 (Aシリーズ)

No.4振動板加振、5.0Gal

Fig. 2.10.5 Transfer functions of piping response by single point excitation (A series, only No.4 table shaking, 50Gal)

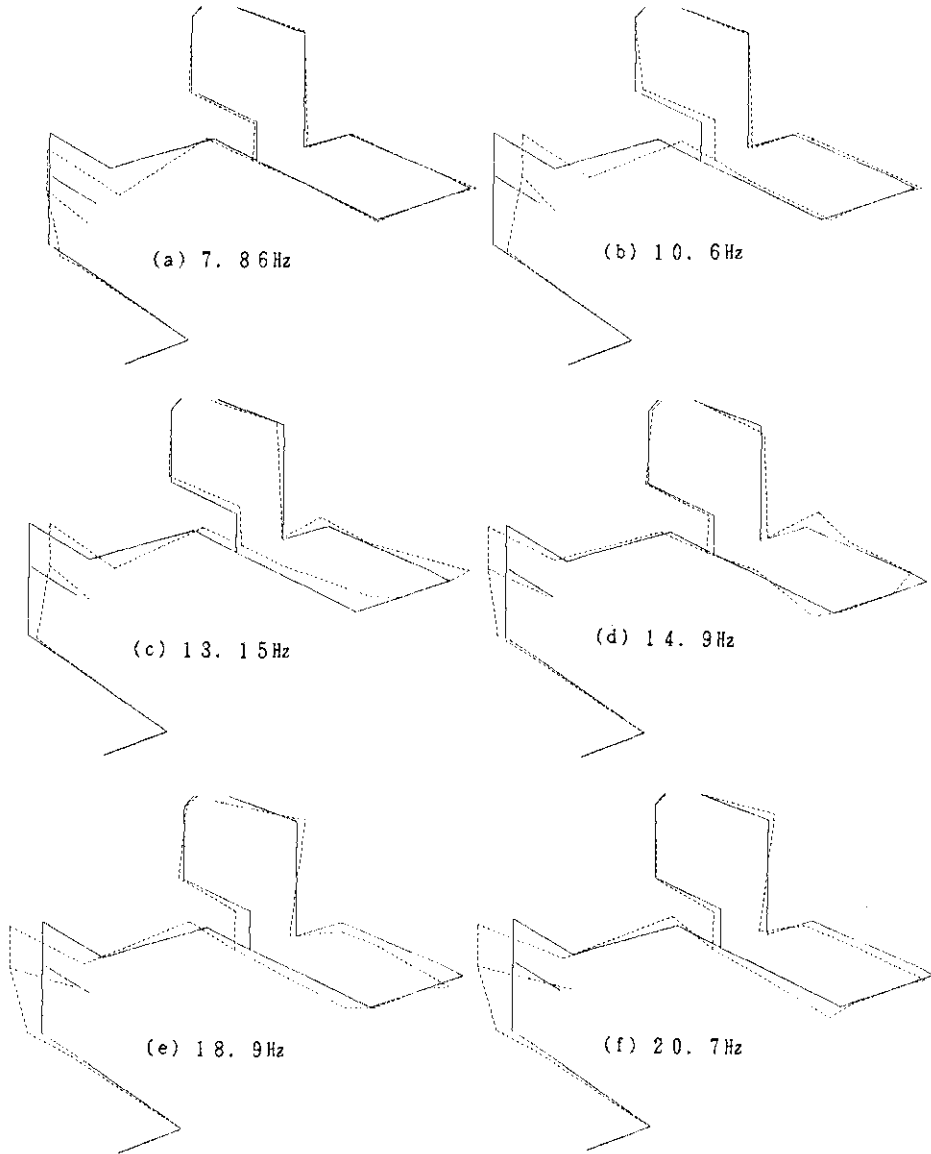


図 2.11 実測振動モード
Fig. 2.11 Measured vibration modes

BPシリーズ、レベル24-16-8-8% (1-32CH)

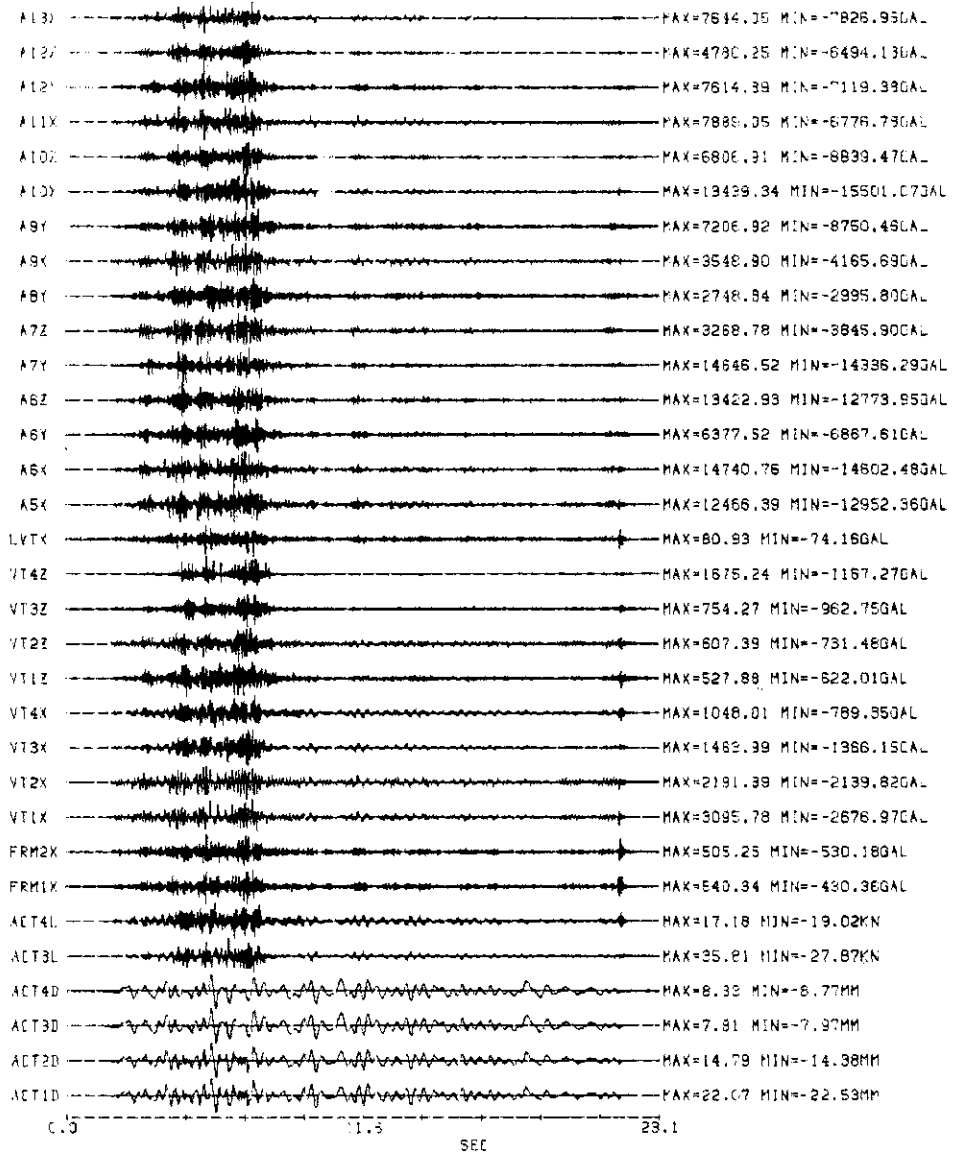


図 2.12.1 多入力地震波加振による応答波形例 (BPシリーズ)

S2M6.5波、レベル24-16-8-8% (1-32CH)

Fig. 2.12.1 Response time histories by multi-input excitation (BP series)
input : S2M6.5 wave, level(No.1-4)=24-16-8-8 % (1-32CH)

BPシリーズ(続き)、レベル24-16-8-8% (32-64CH)

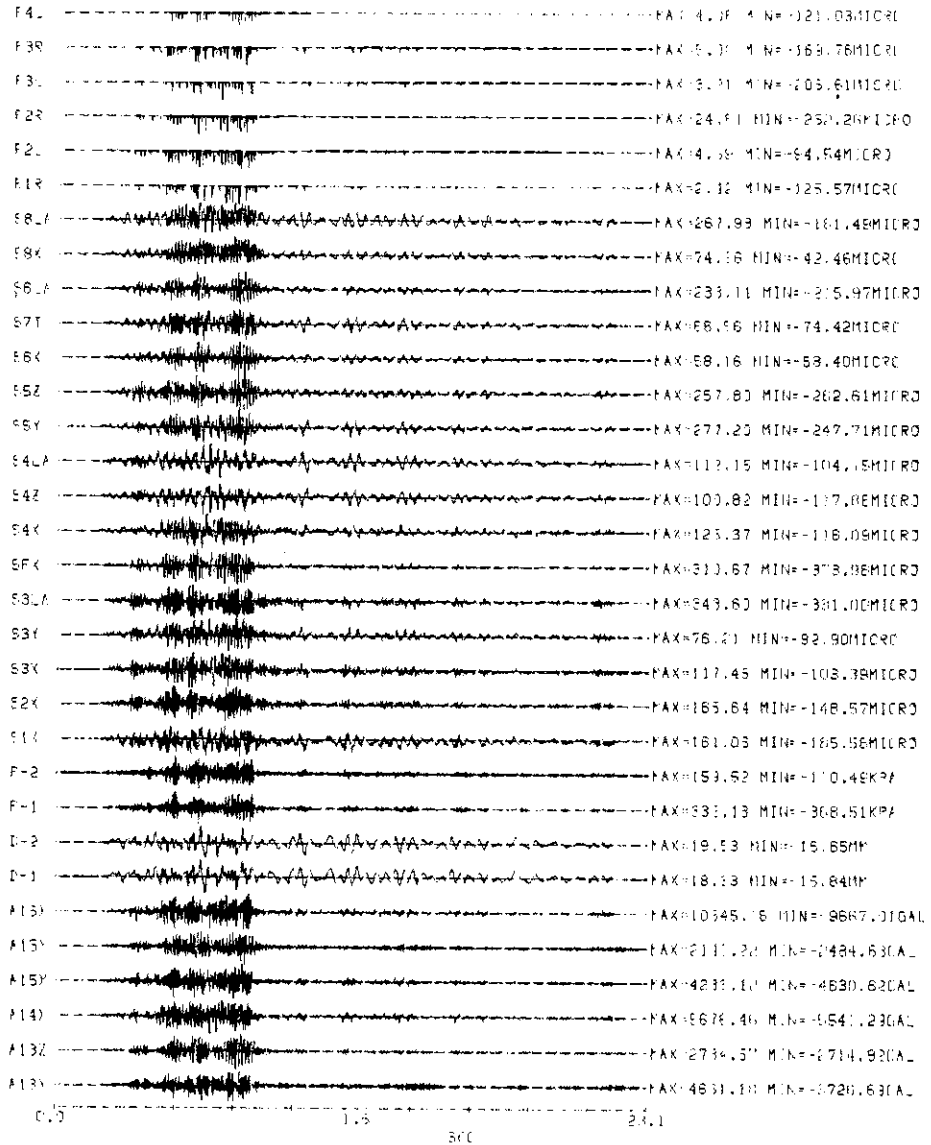


図 2.12.2 多入力地震波加振による応答波形例 (BPシリーズ、続き)

S2M6.5波、レベル24-16-8-8% (33-64CH)

Fig. 2.12.2 Response time histories by multi-input excitation (BP series)

input : S2M6.5 wave, level(No.1-4)=24-16-8-8 % (33-364H)

(a) E L N S 波 (動的多入力応答)

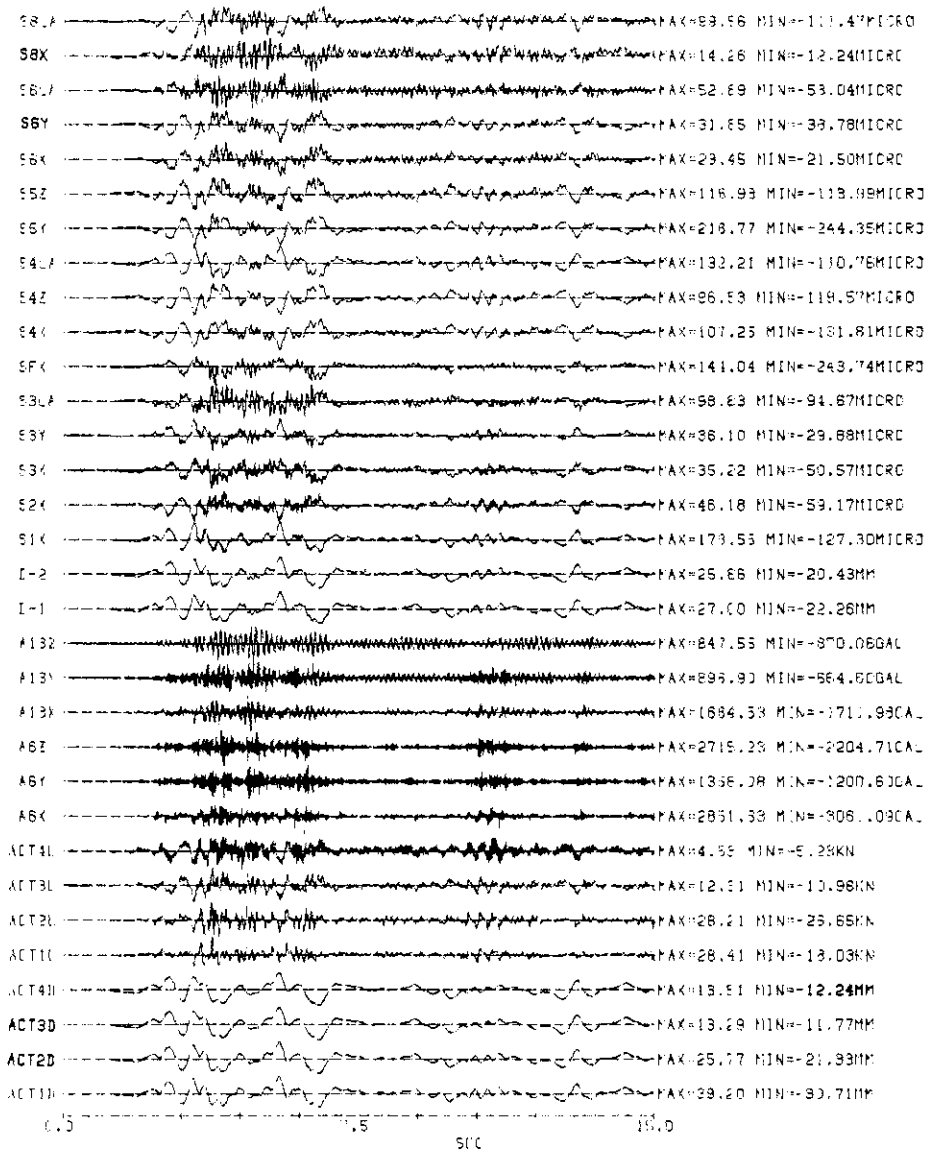


図 2.13 純動的応答量の評価例 (A シリーズ、E L N S 波 30-20-10-10%人力)
(a) 動的多入力応答 (実測)

Fig. 2.13 Estimation of dynamic response by only inertia of piping (A series)
(a) measured dynamic response (total)

(b) ELNS波 (準静的多入力応答)

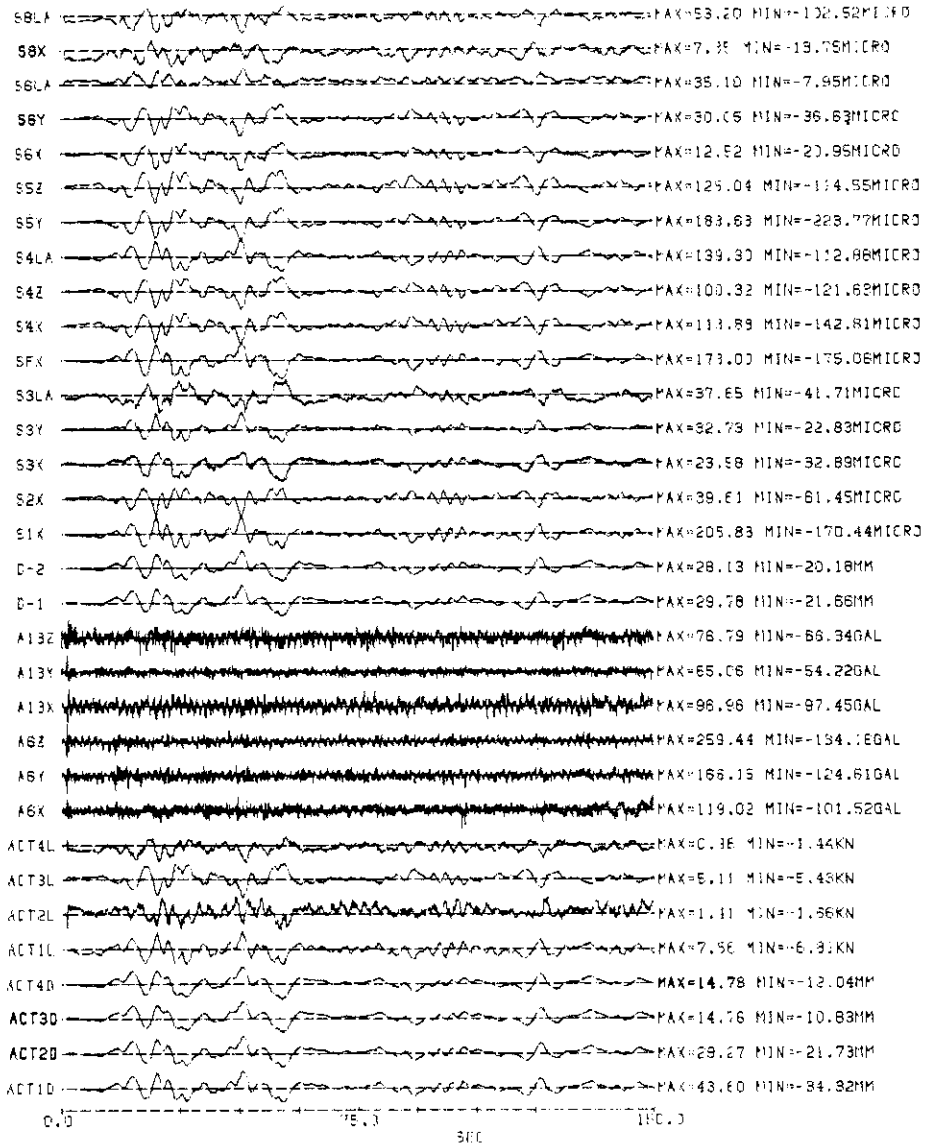


図 2.13 純動的応答量の評価例 (Aシリーズ、ELNS波 30-20-10-10%入力)
 (b) 準静的多入力応答 (実測)

Fig. 2.13 Estimation of dynamic response by only inertia of piping (A series)
 (b) measured static response

(c) E L N S波 (差応答=動的応答-準静的応答)

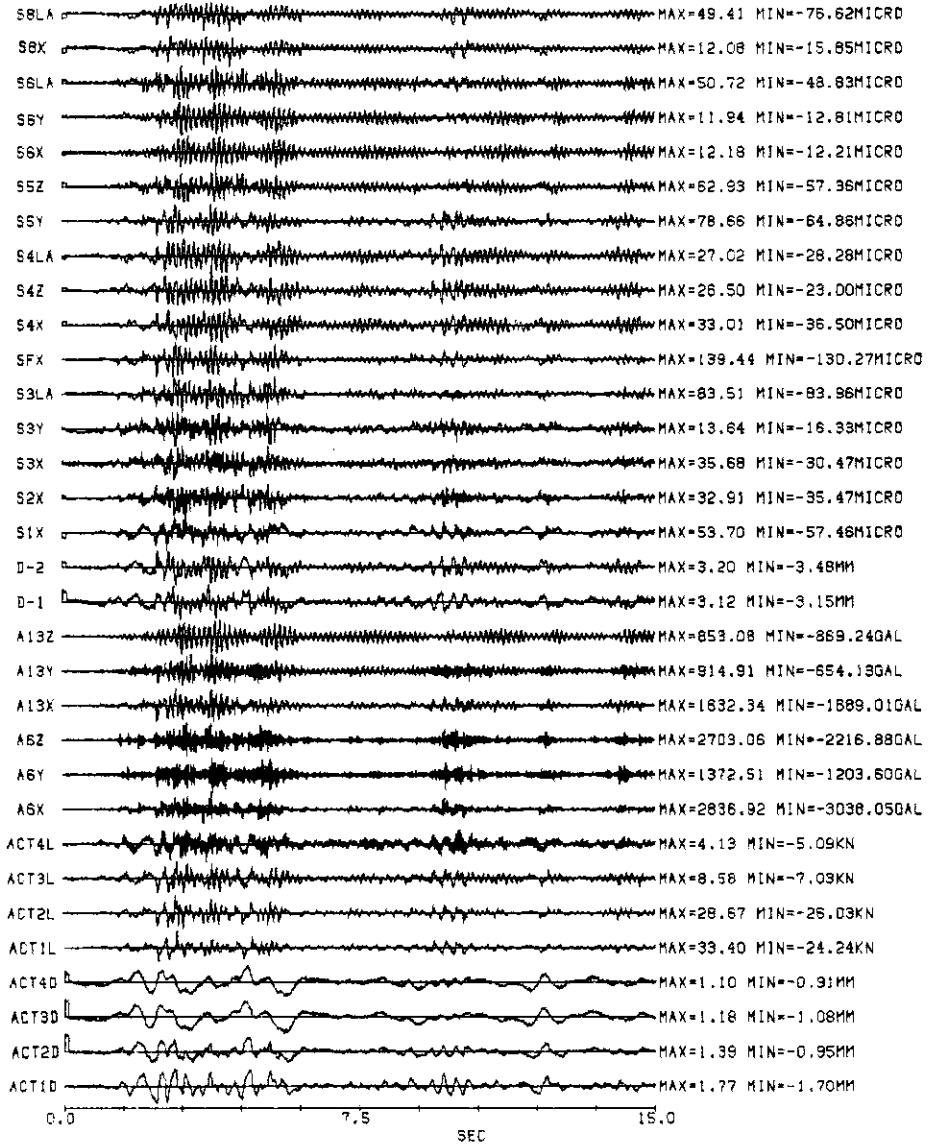


図 2.13 純動的応答量の評価例 (Aシリーズ、E L N S波 30-20-10-10%入力)
(c) 純動的応答 (=動的応答 a - 準静的応答 b)

Fig. 2.13 Estimation of dynamic response by only inertia of piping (A series)
(c) dynamic response by inertia (a-b)

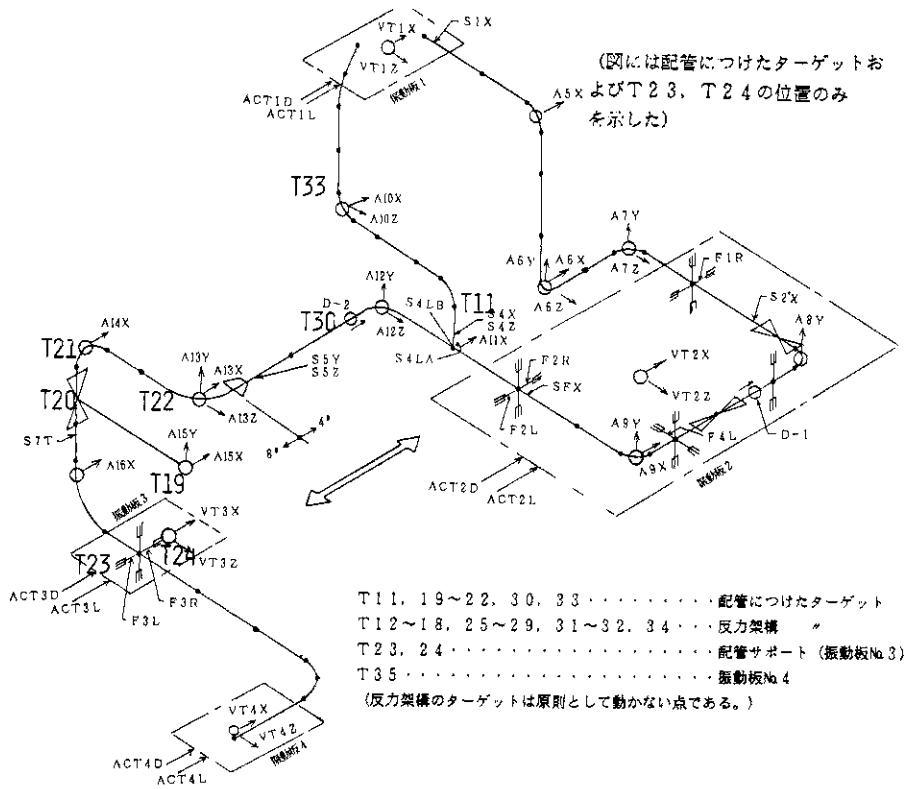


図 2.14.1 ビデオカメラによる応答変位計測を行ったターゲット位置
 Fig. 2.14.1 Arrangement of video camera targets

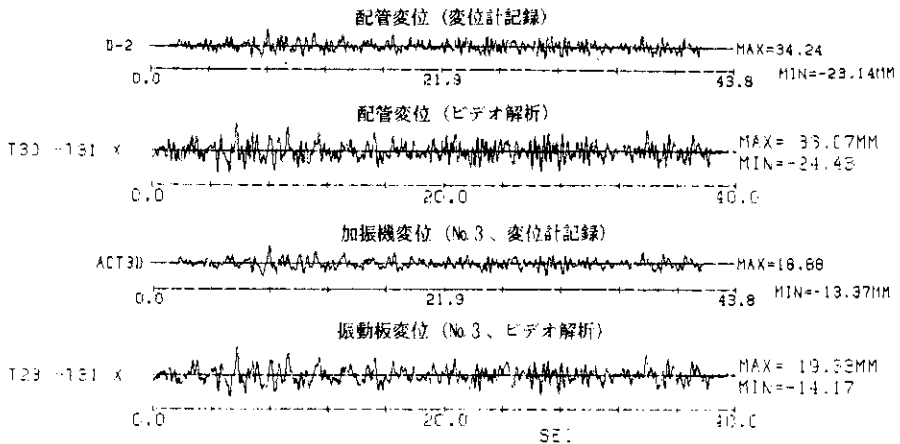
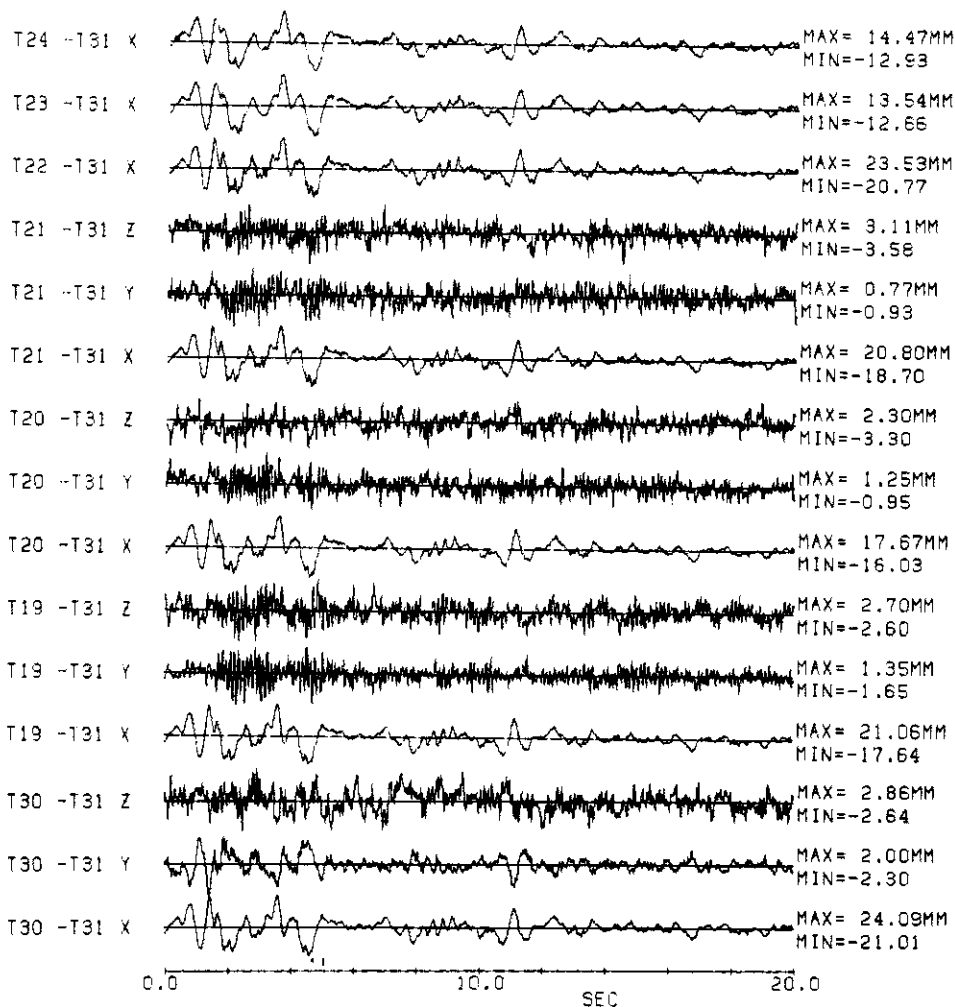
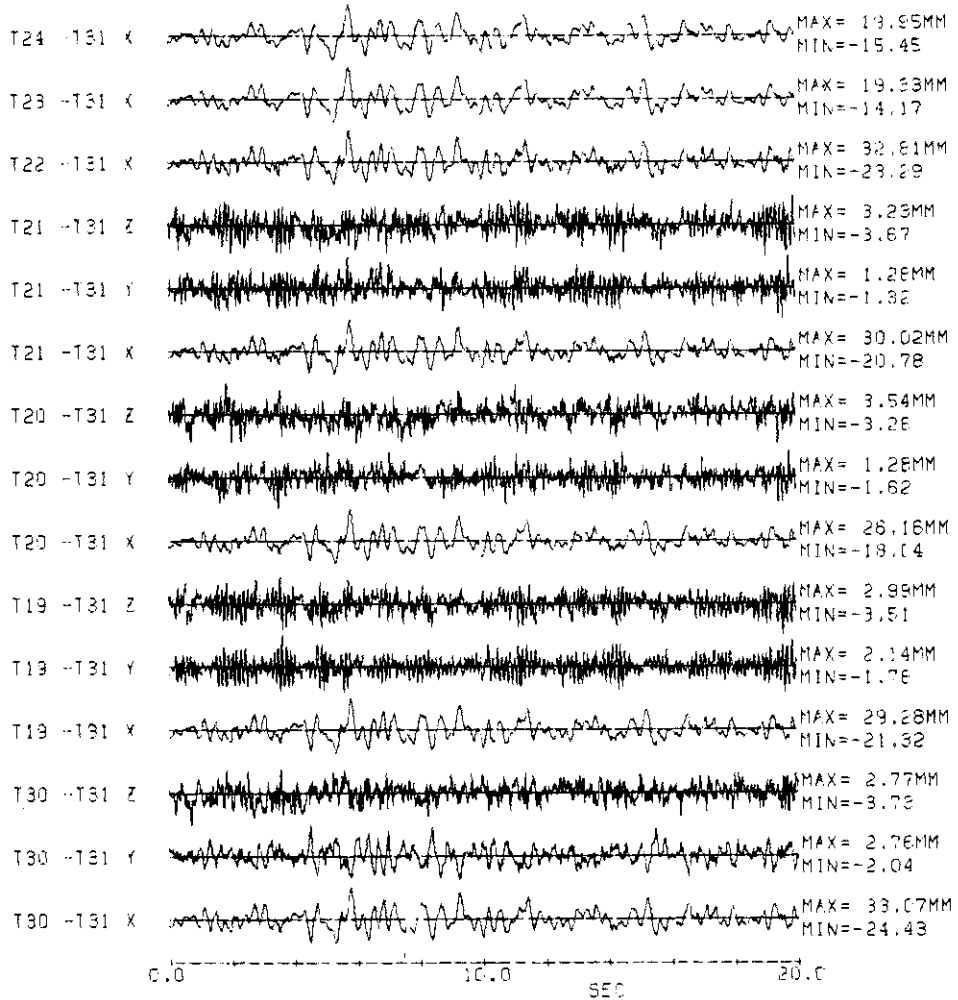


図 2.14.2 変位計実測点における実測値とビデオカメラ解析値との比較
 (T30~T31等はターゲット30と31の相対変位等を表す)
 Fig. 2.14.2 Comparison of displacements measured by electric transducer
 and video camera analysis



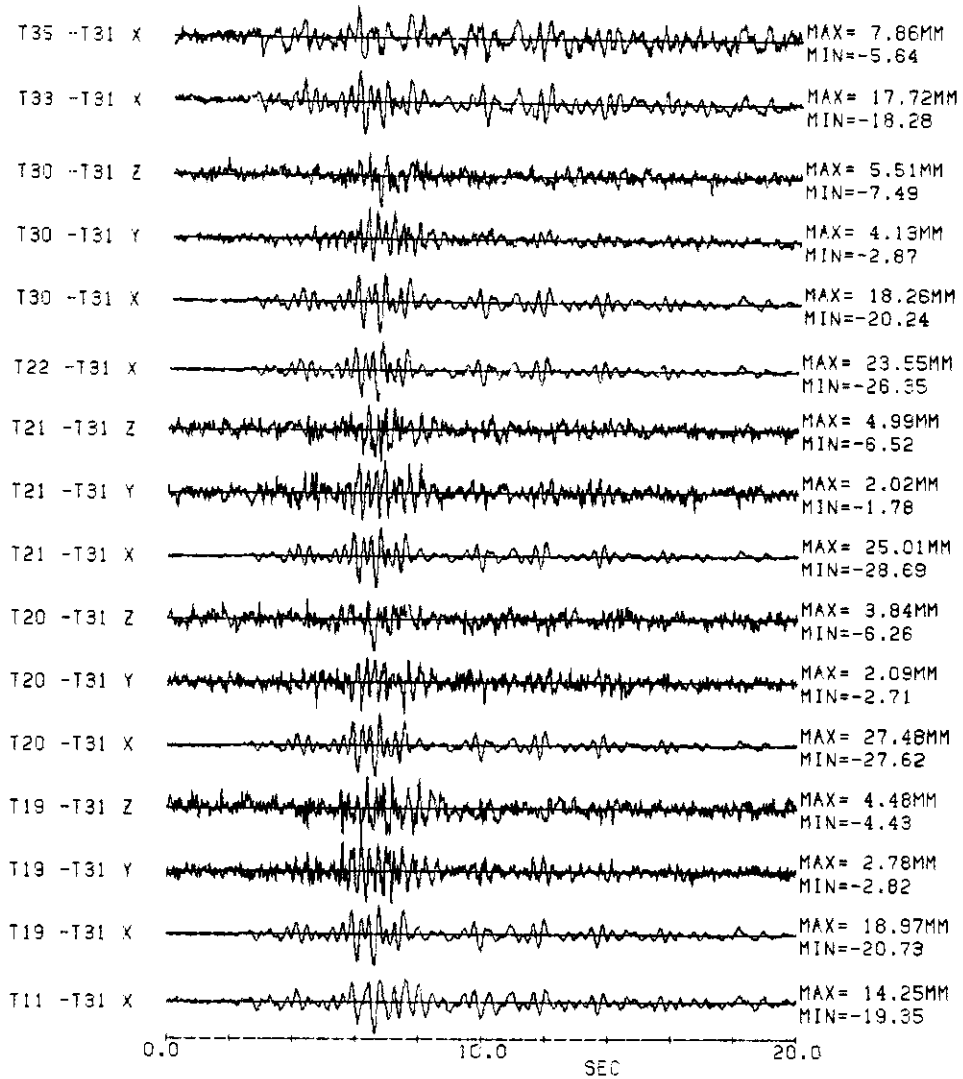
(a) Cシリーズ (入力波ELNS、30-20-10-10%)

図 2.15.1 ビデオカメラより求めた配管変位 (Cシリーズ)
 入力波ELNS、レベルNo.1-4=30-20-10-10%
 Fig. 2.15.1 Pipe displacements measured by video camera method (C series)
 input: ELNS wave, level=30-20-10-10 %



(b) Cシリーズ (入力波 S2M8.5、48-32-16-16%)

図 2.15.2 ビデオカメラより求めた配管変位 (Cシリーズ)
 入力波 S 2 M 8.5、レベル No. 1-4=48-32-16-16%
 Fig. 2.15.2 Pipe displacements measured by video camera method (C series)
 input : S2M8.5 wave, level=48-32-16-16%



(c) Xシリーズ (2入力、S2M6. 5、18-0-0-6%)

図 2.15.3 ビデオカメラより求めた配管変位 (Xシリーズ)
 入力波 S 2 M 6. 5、レベルNo.1-4=18-0-0-6%

Fig. 2.15.3 Pipe displacements measured by video camera method
 (X series, 2input) input : S2M6.5 wave, level=18-0-0-6 %

表 2.2.1 入力波および最大応答値の総括表 (A シリーズ)
 Tab. 2.2.1 List of excitation wave and maximum value of response (A series, 1)

入力	波型	レベル				位相				加振振変位		振動板加速度		配管加速度		配管絶対変位/配管内圧変動		配管曲げ歪		ポルト歪			
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
{STA1L}	SIN 0.2HZ	5-5-5-5								9	ACT3D	46	VT4X	63	A15X	10	D1	16	P2	21	S8LA	7	F4L
{STA2L}	SIN 0.2HZ	5-4-2.5-2.5								12	ACT1D	28	VT1X	55	A13X	11	D1	19	P1	54	S5Y	35	F3L
{STA3L}	SIN 0.2HZ	5-4-2-2				0	0	180	0	11	ACT1D	24	VT2X	55	A13X	10	D1	22	P1	185	S5Y	37	F3L
{STA4L}	SIN 0.2HZ	5-1-2-2				0	180	0	0	7	ACT1D	28	VT2X	157	A5X	5	D1	18	P1	124	S1X	12	F2R
{STA5L}	SIN 0.2HZ	5-5-5-5				0	45	90	135	13	ACT3D	26	VT1X	79	A5X	16	D1	18	P1	274	S8LA	40	F3L
{STA6L}	SIN 0.2HZ	5-5-5-5				0	90	180	270	13	ACT2D	32	VT4X	119	A6X	21	D1	25	P1	508	S8LA	72	F3L
{STA7L}	SIN 0.2HZ	10-10-10-10								23	ACT3D	63	VT4X	76	A6X	25	D1	15	P1	34	S8LA	18	F4L
{STA8L}	SIN 0.2HZ	10-8-5-5								21	ACT1D	39	VT4X	82	A5X	17	D1	17	P1	95	S5Y	30	F3L
{STA9L}	SIN 0.2HZ	10-8-5-5				0	0	180	180	20	ACT1D	57	VT3X	144	A6X	19	D1	23	P1	369	S5Y	54	F3L
{STA10L}	SIN 0.2HZ	10-2-5-5				0	180	0	0	21	ACT1D	43	VT4X	166	A7Y	14	D1	24	P1	346	S1X	46	F4L
{STA11L}	SIN 0.2HZ	10-10-10-10				0	45	90	135	28	ACT4D	36	VT4X	184	A6X	22	D1	18	P2	557	S8LA	44	F3L
{STA12L}	SIN 0.2HZ	10-10-10-10				0	90	180	270	27	ACT1D	44	VT4X	147	A7Y	34	D1	29	P1	11099	S8LA	133	F3L
{SA1L}	SIN 5HZ	2-2-2-2								1	ACT1D	411	VT2X	1240	A10X	2	D2	16	P1	37	S5Y	26	F3L
{SA2L}	SIN 5HZ	5-5-5-5								4	ACT1D	865	VT2X	2749	A10X	6	D2	31	P1	146	SFX	45	F3L
{SA3L}	SIN 5HZ	2-1.6-1-1								1	ACT1D	319	VT2X	485	A10X	1	D2	17	P1	29	S5Y	19	F3L
{SA4L}	SIN 5HZ	5-4-2.5-2.5								4	ACT1D	779	VT2X	2361	A11X	4	D2	36	P1	101	SFX	37	F3L
{SA5L}	SIN 8HZ	1-1.2-1.5-1.4								0	ACT4D	438	VT2X	2014	A6Z	1	D1	24	P1	89	S8X	37	F3L
{SA6L}	SIN 8HZ	2-2.4-3-2.8								1	ACT4D	834	VT1X	5768	A7Y	3	D2	46	P1	153	SFX	47	F3L
{SA7L}	SIN 8HZ	1-1-1-0.7								0	ACT1D	326	VT2X	1178	A10X	1	D1	28	P1	71	SFX	32	F3L
{SA8L}	SIN 8HZ	2-2-2-1.4								1	ACT1D	662	VT2X	4349	A10X	2	D1	51	P1	143	SFX	46	F3L
{SA9L}	SIN 8HZ	1-1-1-0.7				0	0	180	180	0	ACT1D	367	VT2X	1339	A10X	1	D2	17	P1	32	S5Y	25	F3L
{SA10L}	SIN 8HZ	2-2-2-1.4				0	0	180	180	1	ACT1D	638	VT2X	2198	A6Z	2	D2	28	P1	62	S3LA	33	F3L
{SA11L}	SIN 8HZ	1-1.2-1.5-1.4				0	45	90	135	0	ACT4D	380	VT2X	1825	A7Y	1	D1	33	P1	103	SFX	36	F3L
{SA12L}	SIN 8HZ	2-2.4-3-2.8				0	45	90	135	1	ACT4D	857	VT2X	3340	A5X	2	D2	42	P1	142	S5Z	46	F3L
{SA13L}	SIN 8HZ	1-1.2-1.5-1.4				0	90	180	270	0	ACT4D	356	VT2X	2249	A7Y	1	D2	24	P1	97	SFX	30	F3L
{SA14L}	SIN 8HZ	2-2.4-3-2.8				0	90	180	270	1	ACT4D	718	VT3X	3637	A6Z	1	D1	37	P1	177	SFX	37	F4L
{SA15L}	SIN 12HZ	1-1-1-0.6								0	ACT1D	739	VT2X	5782	A5X	2	D1	106	P1	207	S3LA	39	F2L
{SA16L}	SIN 12HZ	2-2-2-1.2								1	ACT1D	1300	VT2X	42352	A7Y	5	D1	143	P1	400	S3LA	74	F2R
{SA17L}	SIN 12HZ	1-1-1-0.6				0	0	180	180	0	ACT1D	599	VT1X	4862	A10X	1	D1	58	P1	113	S3LA	18	F2R
{SA18L}	SIN 12HZ	2-2-2-1.2				0	0	180	180	1	ACT1D	1064	VT2X	8242	A7Y	3	D1	156	P1	242	S3LA	40	F2R
{SA19L}	SIN 12HZ	2-2-2-1.2				0	0	180	180	1	ACT1D	1011	VT2X	6552	A10X	3	D1	132	P1	203	S3LA	30	F2R
{SA20L}	SIN 12HZ	1-0.3-1-0.6				0	180	0	0	0	ACT1D	524	VT1X	890	A5X	0	D2	16	P2	30	S5Y	18	F3L
{SA21L}	SIN 12HZ	2-0.6-2-1.2				0	180	0	0	1	ACT1D	981	VT1X	4238	A5X	1	D2	40	P1	91	S3LA	30	F3L
{SA22L}	SIN 12HZ	0.8-1-1.5-1								0	ACT3D	598	VT2X	4648	A10X	1	D1	77	P1	122	SFX	32	F3L
{SA23L}	SIN 12HZ	0.8-1-1.5-1				0	45	90	135	0	ACT4D	506	VT2X	6517	A7Y	2	D1	62	P1	126	SFX	34	F3L

表 2.2.2 入力波および最大応答値の総括表 (Aシリーズ、続き)
 Tab. 2.2.2 List of excitation wave and maximum value of response (A series.2)

入力	波型	レベル				位相				加振鋼管位		振動板加速度		配管加速度		配管絶対変位		配管内圧変動		配管曲げ歪		ポルト歪	
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
ISA12H	SIN 12HZ	1.6	2	3	2	0	45	90	135	1	ACT3D	1242	VT3X	10246	A10X	4	D1	246	P1	281	SFX	59	F3L
ISA13L	SIN 12HZ	0.8	1	1.5	1	0	90	180	270	0	ACT1D	505	VT2X	5248	A7Y	2	D1	49	P1	103	S31A	27	F3L
ISA13H	SIN 12HZ	1.6	2	3	2	0	90	180	270	1	ACT3D	1089	VT3X	10373	A10X	4	D1	138	P1	246	S31A	47	F2R
ISA14L	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3	0	0	0	0	0	ACT1D	190	VT1X	311	A5X	0	D2	13	P2	6	S5Z	3	F3L
ISA14H	SIN 18HZ	1.2	0.5	0.8	0.5	0	180	0	0	0	ACT1D	532	VT1X	993	A5X	0	D1	19	P1	14	S5Z	8	F3L
ISA15L	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3	0	180	0	0	0	ACT1D	209	VT2X	766	A5X	0	D1	19	P1	10	S3X	3	F3L
ISA15H	SIN 18HZ	1.2	0.5	0.8	0.5	0	180	0	0	0	ACT1D	1263	VT2X	3784	A5X	1	D1	69	P1	113	S31A	30	F2R
RA1L	ELNS 2222	20	20	20	20	26	ACT1D	1007	VT2X	6286	A7Y	56	D1	92	P1	444	SFX	134	F3L				
RA1H	ELNS 2222	40	40	40	40	53	ACT1D	1959	VT2X	6286	A7Y	56	D1	92	P1	444	SFX	134	F3L				
RA2L	ELNS 1234	15	10	5	5	19	ACT1D	631	VT1X	2684	A7Y	14	D1	25	P1	133	SSY	63	F3L				
RA2H	ELNS 1234	30	20	10	10	39	ACT1D	1631	VT1X	3065	A5X	27	D1	35	P1	243	SFX	97	F3L				
RA3	ELNS 1234	30	20	10	10	43	ACT1D	1251	VT2X	6083	A10X	11	D2	84	P1	325	SFX	106	F3L				
RA4L	S2M6.5 2222	8	8	8	8	12	ACT1D	1353	VT1X	5916	A7Y	10	D2	74	P1	190	SFX	76	F3L				
RA5L	S2M6.5 1234	12	8	4	4	23	ACT1D	3094	VT1X	7895	A7Y	20	D2	122	P1	331	SFX	135	F3L				
RA5H	S2M6.5 1234	24	16	8	8	34	ACT1D	1180	VT1X	7895	A7Y	20	D2	122	P1	331	SFX	135	F3L				
RA6	S2M6.5 1234	24	16	8	8	11	ACT1D	732	VT2X	2807	A10X	14	D2	37	P1	153	SFX	38	F2R				
RA7L	S2M8.5 2222	10	10	10	10	23	ACT1D	976	VT2X	5545	A10X	28	D2	61	P1	252	SFX	91	F3L				
RA7H	S2M8.5 2222	20	20	20	20	17	ACT1D	694	VT2X	2546	A5X	13	D2	28	P1	130	SSY	51	F3L				
RA8L	S2M8.5 1234	15	10	5	5	33	ACT1D	2180	VT1X	5347	A7Y	25	D2	46	P1	224	SSY	78	F3L				
RA8H	S2M8.5 1234	30	20	10	10	43	ACT1D	1180	VT1X	5347	A7Y	25	D2	46	P1	224	SSY	78	F3L				
RA9	S2M8.5 1234	30	20	10	10	1	ACT1D	952	VT2X	4961	A7Y	3	D2	57	P1	163	SFX	41	F2R				
RA10L	RAN20 2222	2	2	2	2	2	ACT1D	1717	VT2X	10108	A7Y	6	D2	142	P1	348	SFX	91	F2R				
RA10H	RAN20 2222	4	4	4	4	1	ACT1D	1388	VT2X	5776	A7Y	2	D2	71	P1	160	SFX	40	F2L				
RA11L	RAN20 1234	2	2	2	2	3	ACT1D	2334	VT2X	5776	A7Y	2	D2	71	P1	160	SFX	40	F2L				
RA11H	RAN20 1234	4	4	4	4	5	ACT1D	2334	VT2X	5776	A7Y	2	D2	71	P1	160	SFX	40	F2L				
RA12	RAN20 1234	4	4	4	4	8	ACT1D	2334	VT2X	5776	A7Y	2	D2	71	P1	160	SFX	40	F2L				
RA12	RAN20 1234	4	4	4	4	8	ACT1D	2334	VT2X	5776	A7Y	2	D2	71	P1	160	SFX	40	F2L				

表 2.2.3 入力波および最大応答値の総括表 (A P シリーズ)
 Tab. 2.2.3 List of excitation wave and maximum value of response (AP series)

入力	波型	レベル				位相				加振機変位			振動板加速度			配管加速度			配管総変位			配管内圧変動			配管曲げ歪			ボルト歪													
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	MM	値	位置	MM	値	位置	KPA	値	位置	MM	値	位置	KPA	値	位置	MM	値	位置	MICRO	値	位置	MICRO	値	位置	MICRO					
STAP1	SIN 0.2HZ	10-10-10-10							23	ACT1D	64	VT4X	97	A12Z	24	D1	19	D1	19	P1	22	S8LA	16	F3L																	
STAP2	SIN 0.2HZ	10-8-5-5						24	ACT1D	29	VT4X	49	A15Y	20	D1	14	D1	14	P1	108	SSY	32	F3L																		
STAP3	SIN 0.2HZ	10-8-5-5			0	180	180	23	ACT1D	36	VT4X	85	A6Z	23	D1	21	D1	21	P1	412	SSY	60	F3L																		
STAP4	SIN 0.2HZ	10-2-5-5			0	180	0	17	ACT1D	34	VT4X	152	A7Y	12	D1	19	D1	19	P1	279	S1X	23	F2R																		
STAP5	SIN 0.2HZ	10-10-10-10			0	45	90	135	28	ACT2D	37	VT4X	146	A5Y	34	D1	21	D1	21	P2	654	S8LA	55	F3L																	
STAP6	SIN 0.2HZ	10-10-10-10			0	90	180	270	25	ACT1D	51	VT4X	118	A6Z	34	D1	31	D1	31	P1	607	S8LA	79	F3L																	
SAP 1	SIN 5HZ	5-5-5-5						4	ACT1D	910	VT2X	3820	A10X	7	D2	43	D2	43	P1	132	SFX	26	F2R																		
SAP 2	SIN 8HZ	2-2-4-3-2-8						1	ACT4D	926	VT2X	5768	A7Y	4	D2	166	D2	166	P1	257	SFX	49	F2R																		
SAP 3	SIN 12HZ	2-2-2-1-2						1	ACT1D	1059	VT1X	8990	A7Y	2	D1	202	D1	202	P1	232	SFX	44	F3L																		
SAP 4	SIN 18HZ	1-2-0-5-0-8-0-5						0	ACT1D	611	VT1X	1090	A5X	0	D1	31	D1	31	P1	12	S1X	7	F3L																		
SAP 5	SIN 18HZ	1-2-0-5-0-8-0-5			0	180	0	0	ACT1D	1203	VT2X	7561	A7Y	1	D1	56	D1	56	P1	135	S3LA	30	F2L																		
RAP 1	ELNS 2222	40-40-40-40						53	ACT1D	1951	VT2X	5924	A6Z	57	D2	181	D2	181	P1	453	SFX	131	F3L																		
RAP 2	ELNS 1234	30-20-10-10						39	ACT1D	1675	VT1X	3728	A5X	26	D1	70	D1	70	P1	277	SFX	94	F3L																		
RAP 3	ELNS 1234	30-20-10-10						43	ACT1D					29	D1	15	D1	15	P1	227	SSY	67	F3L																		
RAP 4	S2M6.5 1234	24-16-8-8						23	ACT1D	3122	VT1X	8045	A7Y	20	D2	165	D2	165	P1	342	SFX	130	F3L																		
RAP 5	S2M6.5 1234	24-16-8-8						34	ACT1D					23	D1	21	D1	21	P1	223	S1X	42	F2R																		
RAP 6	S2M8.5 1234	30-20-10-10						33	ACT1D	2169	VT1X	5203	A7Y	25	D2	86	D2	86	P1	237	SSY	85	F3L																		
RAP 7	S2M8.5 1234	30-20-10-10						43	ACT1D					29	D1	224	D1	224	P1	224	SSY	74	F3L																		
RAP 8	RAN20 2222	4-4-4-4						2	ACT1D	1636	VT2X	10746	A7Y	7	D2	242	D2	242	P1	414	SFX	108	F2R																		
RAP 9	RAN20 1234	4-4-4-4						3	ACT4D	2187	VT2X	8881	A10X	6	D1	191	D1	191	P1	387	SFX	105	F2R																		
RAP10	RAN20 1234	4-4-4-4						5	ACT4D					9	D1	18	D1	18	P1	266	S8LA	19	F2R																		

表 2.2.4 入力波および最大応答値の総括表 (Bシリーズ)
 Tab. 2.2.4 List of excitation wave and maximum value of response (B series)

入力	波形状	レベル	位相				加振機変位		振動板加速度		配管加速度		配管絶対変位		配管内圧変動		配管曲げ歪		ポルト歪	
			1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
RB1N	ELNS 1234	30-20-10-10					38	ACT1D	1598	VT1X	6085	A6X	27	D1	57	P2	195	SFX	65	F3L
RB1S	ELNS 1234	60-40-20-20					173	ACT1D	3707	VT1X	10418	A10X	55	D1	153	P1	416	SSY	249	F2R
RB2	ELNS 2222	60-60-60-60					76	ACT1D	2374	VT2X	17158	A10X	86	D1	230	P1	471	SFX	307	F2R
RB3	S2M6.5 1234	36-24-12-12					26	ACT1D	4216	VT1X	121618	A10X	27	D1	317	P1	587	SFX	305	F2R
RB4	S2M6.5 2222	24-24-24-24					25	ACT4D	3026	VT1X	19244	A6X	32	D2	301	P1	592	SFX	425	F2R
SB1A	SIN 2HZ	5-0-0-0					6	ACT1D	165	VT1X	1389	A5X	2	D1	18	P1	82	S1X	7	F2L
SB1B	SIN 2HZ	0-5-0-0					6	ACT2D	146	VT2X	919	A7Y	11	D1	20	P1	87	S1X	12	F2L
SB1C	SIN 2HZ	0-0-5-0					5	ACT3D	227	VT3X	1586	A16X	4	D2	24	P2	139	S8LA	30	F3L
SB1D	SIN 2HZ	0-0-0-5					6	ACT4D	193	VT4X	1303	A16X	2	D2	19	P2	166	S8LA	31	F3L
RB5	S2M8.5 1234	30-20-10-10					32	ACT1D	2236	VT1X	9578	A6X	26	D2	100	P1	262	SSY	97	F3L
RB6	S2M6.5 1234	6-4-2-2					6	ACT1D	709	VT1X	3025	A6X	6	D1	29	P1	89	S3LA	15	F3R
RB8	S2M6.5 1234	6-4-2-2					8	ACT1D					6	D1	17	P2	47	S8LA	8	F3L
RB9	S2M6.5 1234	36-24-12-12					26	ACT1D	4196	VT1X	121633	A10X	28	D1	234	P1	565	SFX	338	F2R
RB10	S2M6.5 2222	16-16-16-16					51	ACT1D					37	D1	21	P1	265	S1X	106	F2R
RB11	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0	0	0	0	15	ACT1D	2184	VT2X	18212	A7Y	22	D1	244	P1	620	SFX	315	F2R
RB12	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.05	0.025	0	0	15	ACT1D	2614	VT3X	121545	A7Y	25	D1	291	P1	583	SFX	254	F2R
RB13	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.1	0.05	0	0	15	ACT1D	1911	VT2X	12850	A6Z	23	D1	167	P1	343	S3LA	141	F2R
RB14	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.03	0.015	0	0	15	ACT1D	2553	VT2X	18175	A5X	23	D1	218	P1	591	SFX	370	F2R
RB15	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.07	0.035	0	0	15	ACT1D	2528	VT1X	117898	A7Y	23	D1	247	P1	484	SFX	186	F3L
RB16	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.08	0.04	0	0	15	ACT1D	2549	VT1X	116897	A7Y	22	D1	181	P1	423	SFX	213	F3L
RB17	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.15	0.075	0	0	15	ACT1D	2098	VT2X	112852	A6Z	28	D1	178	P1	353	S3LA	157	F2R
RB18	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0.2	0.1	0	0	15	ACT1D	1947	VT2X	11714	A10X	30	D1	211	P1	430	S3LA	198	F2R
RB19	S2M6.5 2222	16-16-16-16	0	0	0	0	15	ACT1D	2110	VT2X	121950	A10X	21	D2	577	P1	600	SFX	304	F2R

RB11-19の位相の項は時間差(sec)を表す。

表 2.2.5 入力波および最大応答値の総括表 (B P シリーズ)
 Tab. 2.2.5 List of excitation wave and maximum value of response (BP series, 1)

入力	波型	レベル				位相				加振機変位		振動板加速度		配管加速度		配管絶対変位		配管内変動		配管曲げ歪		ボルト歪	
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
1STBP1A	SIN 2HZ	0-5							7	ACT1D	24	VT2X	162	ASX	2	D2	15	P1	87	S1X	17	F4L	
1STBP1B	SIN 0.2HZ	0-5						7	ACT2D	24	VT4X	273	ASX	11	D1	17	P1	91	S1X	19	F2R		
1STBP1C	SIN 0.2HZ	0-5						7	ACT3D	24	VT2X	176	A16X	4	D2	18	P2	152	S8LA	43	F3L		
1STBP1D	SIN 0.2HZ	0-5						7	ACT4D	23	VT4X	121	A16X	2	D2	17	P1	172	S8LA	23	F3L		
1SBP1A	SIN 2HZ	0-5						6	ACT1D	161	VT1X	1379	A7Y	2	D2	21	P1	83	S1X	6	F4L		
1SBP1B	SIN 2HZ	0-5						6	ACT2D	165	VT2X	1480	ASX	9	D1	25	P1	90	S1X	9	F2L		
1SBP1C	SIN 2HZ	0-5						5	ACT3D	173	VT3X	1075	A16X	4	D2	25	P1	151	S8LA	43	F3L		
1SBP1D	SIN 2HZ	0-5						6	ACT4D	160	VT4X	1021	A16X	2	D2	24	P1	149	S8LA	28	F3L		
1SBP2A	SIN 7HZ	0-4						2	ACT1D	158	VT3X	1680	A16X	1	D2	48	P1	53	S8LA	36	F3L		
1SBP2B	SIN 7HZ	0-4						2	ACT2D	1161	VT2X	5953	A7Y	4	D1	92	P1	208	S3LA	47	F3L		
1SBP2C	SIN 7HZ	0-4						2	ACT3D	1029	VT3X	7964	A7Y	8	D2	226	P1	335	SFX	212	F3L		
1SBP2D	SIN 7HZ	0-4						2	ACT4D	549	VT4X	454	A14X	0	D2	17	P1	98	S8LA	7	F4L		
1SBP3	SIN 13.5HZ	0-3	0-3	0-3	0-3			1	ACT1D	2074	VT2X	12574	A7Y	4	D1	332	P1	229	SFX	110	F2R		
1SBP4	SIN 18.5HZ	0-2	0-2	0-2	0-2			1	ACT2D	1862	VT2X	3888	A6X	3	D1	141	P1	171	S1X	80	F1R		
1SBP5L	SIN 5HZ	2	2	2	2			1	ACT1D	499	VT2X	3888	A16X	6	D2	58	P1	103	S5Y	66	F3L		
1SBP5H	SIN 5HZ	5	5	5	5			4	ACT1D	1013	VT2X	6344	A10X	11	D2	87	P1	179	S5Y	102	F3L		
1SBP6L	SIN 5HZ	2	1.6	1	1			1	ACT1D	308	VT2X	1817	A16X	3	D2	42	P1	52	S8LA	22	F3L		
1SBP6H	SIN 5HZ	5	4	2.5	2.5			4	ACT1D	894	VT2X	5768	A16X	8	D2	125	P1	162	S5Y	98	F3L		
1SBP7L	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4			0	ACT4D	397	VT2X	1668	A10X	0	D2	31	P1	42	S8LA	20	F3L		
1SBP7H	SIN 8HZ	2	2.4	3	2.8			1	ACT3D	1720	VT3X	11622	A10X	7	D2	248	P1	378	SFX	156	F3L		
1SBP8L	SIN 8HZ	1	1	1	0.7			0	ACT1D	357	VT2X	1258	A10X	0	D2	29	P1	28	S8LA	15	F3L		
1SBP8H	SIN 8HZ	2	2	2	1.4			1	ACT1D	650	VT1X	3179	A6X	2	D2	107	P1	95	SFX	50	F3L		
1SBP9L	SIN 8HZ	1	1	1	0.7			0	ACT1D	324	VT2X	785	A12Y	0	D1	22	P1	36	S8LA	4	F3L		
1SBP9H	SIN 8HZ	2	2	2	1.4			0	ACT1D	730	VT1X	2339	A6X	0	D1	39	P1	80	S3LA	12	F2L		
1SBP10L	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4			0	ACT4D	417	VT2X	1251	A10X	1	D2	40	P1	41	S8LA	23	F3L		
1SBP10H	SIN 8HZ	2	2.4	3	2.8			1	ACT4D	1340	VT3X	12969	A10X	4	D1	201	P1	295	SFX	98	F2L		
1SBP11L	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4			0	ACT4D	385	VT2X	1317	A12Y	0	D2	30	P1	49	S5Z	18	F3L		
1SBP11H	SIN 8HZ	2	2.4	3	2.8			1	ACT4D	1006	VT3X	5459	A5X	1	D2	91	P1	98	S5Z	35	F2R		
1SWBP1	SIN 6-7HZ							1	ACT2D	680	VT2X	6037	A12Y	5	D2	138	P1	187	SFX	105	F3L		
1SWBP2	SIN 7-6HZ							1	ACT2D	655	VT2X	5991	A7Y	5	D2	123	P1	155	SFX	98	F3L		
1RBP1L	ELMS 2222	20	20	20	20			26	ACT1D	838	VT2X	6686	A6X	31	D1	133	P1	272	SFX	101	F3L		
1RBP1H	ELMS 2222	40	40	40	40			52	ACT1D	2019	VT1X	12483	A10X	60	D2	282	P1	436	SFX	297	F2R		

表 2.2.6 入力波および最大応答値の総括表 (BP シリールズ続き)
 Tab. 2.2.6 List of excitation wave and maximum value of response (BP series. 2)

入力	波型	レベル				位相				加振機変位 値 MM	振動板加速度 値 GAL	配管加速度 値 GAL	配管絶対変位 位置 MM	配管内圧変動 値 KPA	配管曲げ歪 値 MICRO	ボルト歪 値 MICRO	位置						
		1	2	3	4	1	2	3	4									位置	位置	位置	位置	位置	位置
IRBP1S	ELNS 2222	60	60	60	60					76	ACT1D	2239	VT1X	18615	A10X	84	O2	332	P1	506	SFX	372	F2R
IRBP2L	ELNS 1234	15	10	5	51					19	ACT1D	704	VT2X	2775	A5X	15	O1	48	P1	134	S3LA	28	F3L
IRBP2H	ELNS 1234	30	20	10	10					38	ACT1D	1518	VT1X	7481	A6X	27	O1	106	P1	202	SSY	777	F2R
IRBP2S	ELNS 1234	60	40	20	20					72	ACT1D	3749	VT1X	111690	A6X	55	O1	222	P1	422	SSY	273	F2R
IRBP3	RAW20 2222	8	8	8	8					5	ACT3D	2876	VT2X	21284	A10X	9	O2	590	P1	481	SFX	295	F2R
IRBP4	RAW20 1234	8	8	8	8					6	ACT4D	3857	VT2X	18201	A7Y	11	O1	304	P1	512	S3LA	249	F2R
IRBP5L	S2M6.5 1234	12	8	4	4					12	ACT1D	1320	VT1X	9492	A5X	11	O1	155	P1	225	SFX	146	F2R
IRBP5H	S2M6.5 1234	24	16	8	8					22	ACT1D	3095	VT1X	114646	A7Y	19	O2	368	P1	373	SFX	252	F2R
IRBP5S	S2M6.5 1234	36	24	12	12			STATIC		34	ACT1D					24	O1	18	P1	180	S1X	35	F3L
IRBP7L	S2M6.5 2222	8	8	8	8					26	ACT1D	4345	VT1X	19303	A7Y	27	O1	404	P1	610	SFX	377	F2R
IRBP7H	S2M6.5 2222	16	16	16	16					7	ACT1D	1409	VT3X	9637	A10X	13	O1	284	P1	377	SFX	269	F2R
IRBP7B	S2M6.5 2222	16	16	16	16					15	ACT1D	2321	VT2X	21961	A10X	24	O1	560	P1	692	SFX	265	F3L
IRBP7HC	S2M6.5 2222	16	16	16	16					15	ACT1D	2290	VT2X	17663	A7Y	25	O1	526	P1	637	SFX	263	F3L
IRBP7HD	S2M6.5 2222	16	16	16	16					15	ACT1D	2452	VT2X	21260	A10X	23	O1	516	P1	644	SFX	390	F2R
IRBP7HE	S2M6.5 2222	16	16	16	16					15	ACT1D	2315	VT2X	17866	A10X	24	O1	459	P1	657	SFX	439	F2R
IRBP7HF	S2M6.5 2222	16	16	16	16					15	ACT1D	2169	VT2X	117845	A10X	23	O1	463	P1	675	SFX	436	F2R
IRBP7S	S2M6.5 2222	24	24	24	24					21	ACT4D	3262	VT2X			32	O2	570	P1	895	SFX	592	F2R
IRB7	PRESSURE	24	24	24	24					0	ACT1D					0	O1	4883	P2	281	S6LA	11	F4L
	S2M6.5 2222	24	24	24	24					22	ACT1D	2965	VT2X	21962	A10X	27	O2	409	P1	878	SFX	519	F2R

PRESSUREは内圧の解放を表す。

表 2.2.7 入力波および最大応答値の総括表 (Cシリーズ)
 Tab. 2.2.7 List of excitation wave and maximum value of response (C series, 1)

入力	波型	レベル				位相				加振振動単位 値 PH	加振振動速度 値 GAL	加振振動速度 位置 GAL	加振加速度 値 GAL	加振加速度 位置 GAL	配管絶対応答位		配管内正交運動		配管横び歪		ボルト歪 値 MICRO
		1	2	3	4	1	2	3	4						値	位置	値	位置	値	位置	
ISC11	SIN 0.2HZ	5	5	5	5	11	ACT10	30	VT2X	50	A10X	12	01	18	PI	16	S81A	7	F3L		
ISC12	SIN 0.2HZ	10	10	10	10	19	ACT30	30	VT1X	54	A12Y	20	02	18	PI	30	S81A				
ISC21	SIN 0.2HZ	5	4	2.5	2.5	13	ACT10	25	VT2X	159	A7V	11	01	15	PI	58	S5V				
ISC22	SIN 0.2HZ	10	8	5	5	25	ACT10	25	VT4X	292	A7V	21	01	24	PI	110	S31A				
ISC31	SIN 0.2HZ	5	4	2	2	9	ACT10	25	VT4X	48	A12Z	9	01	23	PI	163	S31A				
ISC32	SIN 0.2HZ	10	8	5	5	2	ACT10	25	VT2X	394	A7V	2	02	35	PI	273	S5V				
ISC41	SIN 0.2HZ	5	1	2	2	0	ACT10	21	VT1X	139	A7V	7	02	15	PI	112	S1X				
ISC42	SIN 0.2HZ	10	2	5	5	0	ACT10	24	VT2X	507	A10X	17	02	21	PI	216	S1X				
ISC51	SIN 0.2HZ	5	5	5	5	0	ACT10	22	VT2X	64	A6X	10	01	30	PI	319	S81A				
ISC52	SIN 0.2HZ	10	10	10	10	0	ACT10	22	VT2X	234	A6X	20	01	35	PI	637	S81A				
ISC61	SIN 0.2HZ	5	5	5	5	0	ACT10	23	VT2X	234	A6X	10	01	36	PI	370	S81A				
ISC62	SIN 0.2HZ	10	10	10	10	0	ACT10	32	VT3X	816	A7V	13	01	53	PI	1174	S81A				
ISC71	SIN 5HZ	2	2	2	2	1	ACT10	447	VT2X	1065	A6X	2	02	19	PI	51	SFX	18	F3L		
ISC72	SIN 5HZ	3	3	3	3	4	ACT10	769	VT2X	2376	A6X	6	02	34	PI	116	SFX	38	F3L		
ISC21	SIN 5HZ	2	1.6	1	1	1	ACT10	358	VT2X	971	A6X	1	01	19	PI	31	S31A				
ISC22	SIN 5HZ	5	4	2.5	2.5	4	ACT10	786	VT1X	1632	A7V	4	02	27	PI	77	SFX				
ISC31	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4	0	ACT40	503	VT2X	1984	A10X	3	01	35	PI	113	SFX				
ISC32	SIN 8HZ	2	2.4	3.2	3.1	0	ACT40	1090	VT1X	5827	A10X	4	01	75	PI	195	SFX				
ISC41	SIN 8HZ	1	1	1	1	0	ACT20	359	VT1X	1755	A10X	3	01	27	PI	94	SFX				
ISC42	SIN 8HZ	2	2	2	2	1	ACT10	876	VT1X	3906	A10X	4	01	77	PI	147	SFX	34	F3L		
ISC51	SIN 8HZ	1	1	1	1	0	ACT10	381	VT2X	1394	A6X	1	01	17	PI	52	S3X	14	F3L		
ISC52	SIN 8HZ	2	2	2	2	1	ACT10	718	VT1X	1691	A5V	2	01	26	PI	88	S31A	23	F3L		
ISC61	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4	0	ACT40	525	VT2X	2040	A10X	3	01	34	PI	103	SFX	25	F3L		
ISC62	SIN 8HZ	2	2.4	3.2	3.1	0	ACT40	1065	VT2X	5737	A9V	4	01	83	PI	154	SFX	33	F3L		
ISC71	SIN 8HZ	1	1.2	1.5	1.4	0	ACT40	421	VT2X	1513	A7V	2	01	30	PI	93	S31A	9	F3L		
ISC72	SIN 8HZ	2	2.4	3.2	3.1	0	ACT40	861	VT3X	4494	A6Z	4	01	76	PI	139	S5Z	62	F4L		
ISC81	SIN 12HZ	1	1	1	1	0	ACT10	589	VT2X	2324	A10X	1	01	30	PI	106	SFX	21	F3L		
ISC82	SIN 12HZ	2	2	2	2	1	ACT10	1022	VT1X	6051	A10X	2	01	100	PI	196	SFX	49	F3L		
ISC91	SIN 12HZ	1	1	1	1	0	ACT10	629	VT2X	1450	A10X	1	01	30	PI	56	SFX	6	F3L		
ISC92	SIN 12HZ	2	2	2	2	1	ACT10	1065	VT1X	3058	A5V	1	01	51	PI	9	F3L	9	F3L		
ISC101	SIN 12HZ	1	0.3	1.0	1.0	0	ACT10	469	VT1X	280	A5X	0	02	15	PI	30	S5Y	14	F3L		
ISC102	SIN 12HZ	2	0.6	2.1	2.1	0	ACT10	883	VT1X	2350	A5X	1	02	19	PI	73	S31A	23	F3L		
ISC111	SIN 12HZ	0.8	1.5	1.3	2.1	0	ACT40	603	VT2X	1689	A7V	1	01	37	PI	112	SFX	23	F3L		
ISC112	SIN 12HZ	1.6	2.3	2.1	2.1	0	ACT40	976	VT2X	7124	A10X	2	01	172	PI	216	SFX	47	F3L		
ISC121	SIN 12HZ	0.8	1.5	1.1	2.1	0	ACT30	595	VT2X	2370	A7V	1	02	33	PI	112	SFX	26	F3L		
ISC122	SIN 12HZ	1.6	2.3	2.1	2.1	0	ACT30	1095	VT3X	5330	A7V	1	01	116	PI	219	SFX	42	F3L		
ISC131	SIN 12HZ	0.8	1.5	1.1	2.1	0	ACT20	549	VT2X	2367	A7V	1	01	28	PI	95	SFX	23	F3L		
ISC132	SIN 12HZ	1.6	2.3	2.1	2.1	0	ACT20	965	VT3X	3814	A10X	2	01	52	PI	186	SFX	37	F3L		

表 2.2.8 入力波および最大応答値の総括表 (Cシリーズ、続き)
 Tab. 2.2.8 List of excitation wave and maximum value of response (C series, 2)

入力	波型	レベル				位相				加振機変位		振動加速度		配管加速度		配管絶対変位		配管内圧変動		ボルト歪			
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
SC14LB	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3					0	ACT10	218	VT1X	339	A6Z	0	D1	18	P1	9	S5Z	4	F3L
SC14L	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3					0	ACT10	221	VT4X	315	A9Y	0	D2	17	P1	11	S5Z	4	F3L
SC14H	SIN 18HZ	1.2	0.5	0.8	0.5					0	ACT10	555	VT1X	802	A9Y	0	D2	22	P1	15	S5Z	9	F3L
SC15LB	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3	0	180	0	0	0	ACT40	836	VT2X	1475	A5X	0	D1	19	P1	42	S3LA	9	F3L
SC15L	SIN 18HZ	0.6	0.3	0.4	0.3	0	180	0	0	0	ACT40	873	VT2X	4639	A7Y	1	D2	22	P1	52	S3LA	9	F3L
SC15H	SIN 18HZ	1.2	0.5	0.8	0.5	0	180	0	0														
RC1L	ELMS 2222	20	20	20	20					26	ACT10	955	VT2X	3345	A10X	29	D1	58	P1	227	SFX	101	F3L
RC1H	ELMS 2222	40	40	40	40					53	ACT10	1949	VT2X	7732	A7Y	57	D1	102	P1	404	SFX	118	F3L
RC2L	ELMS 1234	15	10	5	5					19	ACT10	671	VT2X	1532	A6X	13	D1	26	P1	119	S5Y	57	F3L
RC2H	ELMS 1234	30	20	10	10					39	ACT10	1638	VT1X	2468	A5X	25	D1	40	P1	225	S3LA	100	F3L
RC3	ELMS 1234	30	20	10	10	STATIC				43	ACT10	147	VT4X	341	A7Y	29	D1	29	P1	177	S3LA	44	F3L
RC4L	S2M6.5 2222	8	8	8	8					8	ACT10	1121	VT2X	5007	A10X	10	D2	102	P1	267	SFX	103	F3L
RC4H	S2M6.5 2222	16	16	16	16					16	ACT10	2012	VT1X	7808	A7Y	20	D2	130	P1	495	SFX	206	F3L
RC5L	S2M6.5 1234	12	8	4	4					12	ACT10	1298	VT1X	3504	A5X	10	D2	63	P1	196	S3LA	73	F3L
RC6	S2M8.5 2222	10	10	10	10					11	ACT10	692	VT2X	2407	A5X	14	D2	31	P1	147	SFX	56	F3L
RC7L	S2M8.5 2222	20	20	20	20					23	ACT10	1036	VT2X	3304	A10Z	27	D2	55	P1	233	SFX	88	F3L
RC7H	S2M8.5 2222	15	10	5	5					17	ACT10	698	VT1X	1764	A7Y	13	D2	26	P1	101	SFX	57	F3L
RC8L	S2M8.5 1234	30	20	10	10					33	ACT10	2233	VT1X	4724	A7Y	25	D2	40	P1	237	S5Y	89	F3L
RC8H	S2M8.5 1234	30	20	10	10	STATIC				43	ACT10	1046	VT2X	3344	A10Z	30	D1	25	P1	199	S3LA	62	F3L
RC9	S2M8.5 2222	2	2	2	2					1	ACT40	1294	VT2X	4187	A7Y	2	D1	60	P1	140	S3LA	37	F3L
RC10L	RAN20 1234	4	4	4	4					3	ACT40	2301	VT2X	11241	A7Y	7	D1	184	P1	319	S3LA	64	F3L
RC11L	RAN20 1234	4	4	4	4	STATIC				5	ACT40	77	VT4X	167	A10X	83	D2	27	P1	100	S8LA	28	F3L
RC12	RAN20 1234	4	4	4	4					38	ACT10	1618	VT1X	3451	A5X	25	D1	50	P1	235	S5Y	127	F3L
SCV1	SIN 0.2HZ	40	40	40	40					23	ACT10	3165	VT1X	9195	A7Y	19	D2	136	P1	337	S3LA	149	F3L
RCV1	ELMS 1234	30	20	10	10	STATIC				34	ACT10	3796	VT1X	9955	A5X	22	D1	24	P1	192	S3LA	97	F3L
RCV2	S2M6.5 1234	24	16	8	8					6	ACT40	3603	VT1X	14206	A7Y	13	D1	229	P1	554	S3LA	203	F3L
RCV3	S2M6.5 1234	24	16	8	8					1	ACT10	810	VT1X	3440	A7Y	4	D1	69	P1	137	S3LA	26	F3L
RCV4	S2M8.5 1234	48	32	16	16					2	ACT10	1435	VT1X	6880	A7Y	6	D1	127	P1	234	SFX	60	F3L
RCV5	RAN20 1234	8	8	8	8																		
SCV1	SIN 8HZ	2	2	2	2																		
SCV2	SIN 8HZ	4	4	4	4																		

表 2.2.9 入力波および最大応答値の総括表 (Dシリーズ)
 Tab. 2.2.9 List of excitation wave and maximum value of response (D series)

入力	波型	レベル				位相				加振振幅	加振波加減速度				配管内圧変動配管補正圧				ポート名	
		1	2	3	4	1	2	3	4		幅	位置	値	単位	幅	位置	値	単位		
RD1LH		20	20	20	20	26	ACT10	1028	VTX	4307	A10X	0.2	99	02	63	P1	182	SFX	05	F3L
RD1LH	EIMS 22221	40	40	40	40	53	ACT10	1042	VTX	8636	A10X	0.2	93	02	93	P1	363	SFX	164	F3L
RD1LH	EIMS 12341	15	10	5	5	19	ACT10	633	VTX	2577	A10X	1.3	01	02	24	P1	154	SMA	55	F3L
RD1LH	EIMS 12341	30	20	10	10	39	ACT10	1007	VTX	5261	A10X	2.3	02	02	85	P1	290	SFX	98	F3L
RD10L	RAK20 22221	2	2	2	2	1	ACT40	1807	VTX	2940	A10X	2	02	32	03	P1	108	SFX	4	F4L
RD10L	RAK20 22221	4	4	4	4	2	ACT40	1589	VTX	8109	A10X	4	02	02	03	P1	201	SFX	103	F3L
RD11L	RAK20 12341	2	2	2	2	1	ACT40	1197	VTX	3644	A10X	3	01	02	62	P1	159	SMA	2	F4L
RD11L	RAK20 12341	4	4	4	4	3	ACT40	2043	VTX	10189	A10X	5	01	02	96	P1	273	SMA	1	F3L
RD11L	STA 0.2Hz1	0.10	0	0	0	14	ACT40	100	VTX	185	A10X	13	01	17	11	P1	21	SMA	3	F3E
RD11L	STA 0.2Hz1	10	10	10	10	21	ACT40	45	VTX	68	A6X	22	01	16	16	P1	24	SMA	1	F3E
SD12A	STA 0.2Hz1	0.5				7	ACT20	22	VTX	100	A6X	8	01	16	02	P1	31	SMA	0	F4L
SD12B	STA 0.2Hz1	5.0				10	ACT20	22	VTX	71	A7X	13	01	20	P1	129	SMA	2	F3E	
SD18	STA 2Hz1	0.5				6	ACT20	169	VTX	1311	A7X	11	01	22	P1	111	SFX	2	F3E	
SD18	STA 2Hz1	5.0				6	ACT20	152	VTX	1040	A7X	9	01	18	P1	112	SFX	1	F3E	
SD2B	STA 5Hz1	0.5				4	ACT20	867	VTX	6025	A7X	8	01	43	P1	209	SMA	2	F4L	
SD2B	STA 5Hz1	5.0				4	ACT20	914	VTX	6126	A7X	9	01	50	P1	212	SMA	9	F4L	
SD3A	STA 8Hz1	0.3				4	ACT20	1027	VTX	4106	A7X	4	01	63	P1	280	SMA	15	F4L	
SD3A	STA 8Hz1	3.0				1	ACT20	964	VTX	2175	A6X	3	01	29	P1	127	SMA	2	F4L	
SD4A	STA 12Hz1	0.25				1	ACT20	1037	VTX	5351	A10X	3	01	80	P1	183	SFX	1	F3E	
SD4A	STA 12Hz1	2.5				1	ACT20	1088	VTX	4281	A7X	2	01	78	P1	183	SFX	2	F4L	
SD33A	STA 0.2Hz1	0.6				8	ACT30	108	VTX	982	A16X	3	02	24	P1	311	SMA	56	F3L	
SD33B	STA 0.2Hz1	6.0				14	ACT30	104	VTX	914	A16X	4	02	26	P1	391	SMA	51	F3L	
SD5A	STA 2Hz1	0.5				6	ACT30	260	VTX	1800	A16X	2	02	19	P2	158	SMA	60	F3L	
SD5A	STA 2Hz1	6.0				7	ACT30	188	VTX	366	A12X	2	02	21	P1	179	SMA	2	F3E	
SD6A	STA 5Hz1	0.5				3	ACT30	490	VTX	662	A16X	2	02	16	P1	163	SMA	2	F3L	
SD6A	STA 5Hz1	7.0				4	ACT30	625	VTX	1046	A10X	3	02	22	P2	219	SMA	2	F4L	
SD7A	STA 8Hz1	0.3				1	ACT30	565	VTX	3147	A10X	1	02	25	P2	101	S5Z	2	F3E	
SD7A	STA 8Hz1	3.0				1	ACT30	558	VTX	3331	A10X	1	02	21	P1	105	S5Z	2	F3E	
SD8A	STA 2Hz1	0.5				1	ACT30	1754	VTX	7328	A10X	4	02	64	P1	163	SFX	72	F3L	
SD8B	STA 2Hz1	0.5				1	ACT30	1481	VTX	4085	A10X	4	02	49	P1	126	SFX	2	F3L	
SD9C	STA 12Hz1	5.0				1	ACT30	1486	VTX	4870	A10X	3	02	45	P1	144	SFX	24	F3L	
RD1C	EIMS 22221	20	20	20	20	26	ACT10	955	VTX	3767	A16X	57	02	48	P1	168	SMA	125	F3L	
RD1C	EIMS 22221	40	40	40	40	52	ACT10	1933	VTX	7174	A16X	26	02	86	P1	364	SFX	127	F3L	
RD2L	EIMS 12341	15	10	5	5	19	ACT10	609	VTX	2097	A7X	14	01	25	P2	119	SMA	27	F3E	
RD2L	EIMS 12341	30	20	10	10	39	ACT10	1587	VTX	3180	A5X	21	01	37	P1	239	S5Y	115	F3L	
RD3L	S206.5 22221	8	8	8	8	18	ACT10	1118	VTX	6118	A10X	11	01	58	P1	205	SFX	92	F3E	
RD3H	S206.5 22221	16	16	16	16	36	ACT10	2005	VTX	17167	A10X	18	01	124	P1	308	SFX	238	F3L	
RD4L	S206.5 22341	12	8	4	4	16	ACT10	1444	VTX	3765	A7X	9	03	44	P1	169	SFX	72	F3E	
RD4H	S206.5 22341	24	16	8	8	32	ACT10	3102	VTX	8105	A10X	17	02	129	P1	317	SFX	145	F3L	
RD4H	S206.5 22341	24	16	8	8	23	ACT10	3101	VTX	6968	A10X	17	02	113	P1	317	SMA	132	F3E	
RD4HC	S206.5 22341	24	16	8	8	23	ACT10	3139	VTX	6965	A10X	19	01	92	P1	358	SMA	132	F3E	
RD4HD	S206.5 22341	24	16	8	8	23	ACT10	3127	VTX	8222	A7X	20	01	104	P1	298	SMA	158	F3L	
RD5	S206.5 22341	24	16	8	8	34	ACT10	3127	VTX	8222	A7X	24	01	26	P1	171	SMA	26	F3L	

表 2.2.10 入力波および最大応答値の総括表 (D.P.シリーズ)
 Tab. 2.2.10 List of excitation wave and maximum value of response (DP series)

入力	波型	レベル				位相				加振機変位		振動板加速度		配管絶対変位		配管曲げ歪		ボルト歪			
		1	2	3	4	1	2	3	4	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置
RDP1L	ELNS 2222	20	20	20	20					28	D2	71	P1	183	SFX	123	F3L				
RDP1H	ELNS 2222	40	40	40	40	53	ACT10	1952	VT2X	4375	A16X	231	P1	352	SFX	183	F3L				
RDP1S	ELNS 2222	60	60	60	60	76	ACT10	2260	VT1X	11651	A10X	292	P1	424	SFX	234	F3L				
RDP2L	ELNS 1234	15	10	5	5	19	ACT10	620	VT1X	1551	A16X	14	D1	139	S8LA	62	F3L				
RDP2H	ELNS 1234	30	20	10	10	39	ACT10	1531	VT1X	5185	A16X	26	D2	86	P1	249	S5Y	111	F3L		
RDP2S	ELNS 1234	60	40	20	20	73	ACT10	3528	VT1X	9813	A7Y	52	D1	222	P1	350	S5Y	468	F3L		
RDP3L	RAN20 2222	2	2	2	2	1	ACT40	904	VT2X	3398	AGX	2	D2	75	P1	118	SFX	4	F4L		
RDP3H	RAN20 2222	4	4	4	4	2	ACT30	1628	VT2X	6522	A12Y	4	D2	192	P1	204	SFX	102	F3L		
RDP3S	RAN20 2222	8	8	8	8	5	ACT10	2732	VT1X	17114	A10X	8	D1	563	P1	430	SFX	269	F3L		
RDP3U	RAN20 2222	12	12	12	12	7	ACT10	3660	VT1X	21531	A10X	12	D1	707	P1	680	SFX	356	F3L		
RDP4L	S2M6.5 2222	8	8	8	8	8	ACT10	1094	VT2X	5365	A16X	11	D1	143	P1	211	S3LA	109	F3L		
RDP4H	S2M6.5 2222	16	16	16	16	16	ACT10	2023	VT2X	20983	A10X	21	D1	411	P1	523	S8X	235	F3L		
RDP4S	S2M6.5 2222	24	24	24	24	23	ACT10	3063	VT1X	21667	A10X	28	D2	421	P1	1592	S8X	361	F3L		
RDP5L	S2M6.5 1234	12	8	4	4	12	ACT10	1291	VT1X	4502	A10X	10	D2	91	P1	173	S3LA	65	F3L		
RDP5H	S2M6.5 1234	24	16	8	8	23	ACT10	3082	VT1X	14899	A10X	18	D2	328	P1	313	SFX	195	F3L		
RDP5S	S2M6.5 1234	36	24	12	12	27	ACT10	4227	VT1X	20615	A10X	27	D1	362	P1	470	SFX	237	F3L		
RDP6	S2M6.5 1234	36	24	12	12	51	ACT10	904	VT2X	6896	A16X	37	D1	26	P1	263	S3LA	55	F3L		
SDP2A	SIN 7HZ	0	0	0	0	1	ACT10	1046	VT3X	6935	A10X	5	D2	115	P1	249	S8LA	175	F3L		
SDP2B	SIN 7HZ	0	0	0	0	1	ACT10	915	VT2X	9657	A10X	4	D2	132	P1	237	SFX	147	F3L		
SDP2C	SIN 6-7.3HZ	5	5	5	5	6	ACT10	141	VT1X	667	A7Y	3	D1	12	P1	102	S1X	3	F4L		
SDP1A	SIN 2HZ					6	ACT20	145	VT2X	254	A6Z	13	D1	16	P2	97	S1X	4	F4L		
SDP1B	SIN 2HZ					6	ACT30	156	VT4X	1432	A16X	2	D2	23	P1	162	S8LA	34	F3R		
SDP1C	SIN 2HZ					6	ACT40	23	VT1X	50	A16X	0	D1	4948	P2	284	S6LA	5	F4L		
SDP1D	PRESSURE					0	ACT20														

表 2.2.11 入力波および最大応答値の総括表 (LVTシリーズ)
 Tab. 2.2.11 List of excitation wave and maximum value of response (LVT series)

入力	波型	レベル		加振機変位		振動板加速度		配管加速度		配管絶対変位		配管内圧変動		配管曲げ歪		ボルト歪	
		目標変位	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値	位置	値
		MM	GAL	MM	GAL	MM	GAL	KPA	MICRO	MICRO	MICRO	KPA	MICRO	MICRO	MICRO	MICRO	MICRO
LVT1	ステップ P-P 1MM	0	1696	ACT1D	VT1X	5619	A7Y	70	P1	108	P1	70	P1	108	SFX	19	F2L
LVT2	ステップ P-P 1MM	0	1733	ACT1D	VT1X	4696	A7Y	61	P1	108	P1	61	P1	108	SFX	24	F1R
LVT3	SIN 8HZ 100GAL	0	178	ACT3B	VT2X	380	A6X	21	P1	25	P1	21	P1	25	S8LA	2	F2R
LVT4	SIN 7HZ 100GAL	0	252	ACT4D	VT1X	507	A10X	21	P2	45	P2	21	P2	45	S8LA	2	F4L
LVT5	SIN 6HZ 100GAL	0	238	ACT3D	VT2X	428	A7Y	26	P2	51	P2	26	P2	51	S8LA	2	F2L
LVT6	SIN 5HZ 100GAL	0	254	ACT2D	VT2X	844	A6X	21	P1	36	P1	21	P1	36	S3X	2	F2L
LVT7	SIN 4HZ 100GAL	0	150	ACT3D	VT2X	394	A10X	20	P2	35	P2	20	P2	35	S3X	3	F2L
LVT8	ELNS 2222	0	778	ACT4D	VT1X	5035	A5X	76	P1	220	P1	76	P1	220	S31A	49	F3L
LVT9	ELNS 2222	0	2084	ACT2D	VT1X	16625	A10X	284	P1	638	P1	284	P1	638	SFX	183	F3L
LVT10	S2M6.5 2222	0	1621	ACT3D	VT2X	110719	A5X	207	P1	412	P1	207	P1	412	SFX	168	F3L
LVT11	S2M6.5 2222	1	4075	ACT4D	VT1X	120749	A10X	450	P1	750	P1	450	P1	750	SFX	375	F2R
LVT12	RAN20 2222	0	2457	ACT2D	VT2X	113621	A10X	146	P1	238	P1	146	P1	238	S31A	84	F2L
LVT13	RAN20 2222	7	10313	ACT1D	VT1X	22348	A6X	25	D1	1023	D1	25	D1	1023	S31A	1046	F2R
LVT14	SWEEP 5-15HZ 100GAL	1	669	ACT1D	VT1X	1936	A5X	29	D2	455	D2	29	D2	455	S8X	7	F1R
LVT15	SWEEP 5-15HZ 200GAL	2	3816	ACT1D	VT1X	115029	A5X	89	D2	938	D2	89	D2	938	S8X	107	F3L

表 2.2.12 入力波および最大応答値の総括表 (X シリーズ)
 Tab. 2.2.12 List of excitation wave and maximum value of response (X series)

入力	波型	レベル				静的	加振周波数				加振加速度				加振対位変位				加振内圧変動				配置測点												
		1	2	3	4		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					
STX1	S18 0.2RZ	5					10	ACT10	25	VTX	49	A15X	2	02	22	P1	60	S1X																	
STX2	S18 0.20Z	5	51				13	ACT10	27	VTX	55	A12Z	5	02	17	P1	232	S1A																	
SXA1	S18 20Z	5					6	ACT10	150	VTX	200	A5X	2	02	21	P1	59	S1A																	
SXA1B	S18 20Z	5					6	ACT10	139	VFX	207	A12V	3	02	20	P1	125	S1A																	
SXC1	S18 28Z	5	0			0	6	ACT10	140	VTX	384	A8X	17	01	20	P2	127	S1A																	
SXD1	S18 28Z	5	0			0	6	ACT10	146	VTX	263	A8X	5	01	18	P2	62	S1X																	
SXE1	S18 28Z	5	0			0	1801	6	ACT10	151	VTX	387	A5X	1	02	22	P1	194	S1A																
SXZ4	S18 48Z	3	31	0			01	3	ACT10	250	VFX	850	A6Z	4	02	30	P1	187	S1A																
SXZ1	S18 48Z	3	31	0			901	3	ACT10	239	VFX	595	A16Z	2	02	22	P1	123	S1A																
SXZ2	S18 48Z	3	31	0			1801	3	ACT10	228	VFX	275	A5X	1	02	22	P1	123	S1A																
SXZ4	S18 7.40Z	2	21	0			01	1	ACT10	516	VTX	2670	A9V	1	01	30	P2	121	S31B																
SXZ1	S18 7.40Z	2	21	0			101	1	ACT10	509	VTX	3802	A9V	2	02	21	P2	133	S31B																
SXZ2	S18 7.40Z	2	21	0			201	1	ACT10	510	VTX	2970	A9V	2	01	26	P2	131	S31B																
SXZ3	S18 7.40Z	2	21	0			301	1	ACT10	530	VTX	3360	A9V	2	01	36	P2	155	S31B																
SXZ4	S18 7.40Z	2	21	0			401	1	ACT10	515	VTX	3515	A9V	2	01	36	P2	162	S31B																
SXZ5	S18 7.40Z	2	21	0			501	1	ACT10	518	VTX	3481	A9V	2	01	35	P2	164	S31B																
SXZ6	S18 7.40Z	2	21	0			601	1	ACT10	515	VTX	3313	A9V	2	01	36	P2	160	S31B																
SXZ1	S18 7.40Z	2	21	0			781	1	ACT10	507	VTX	3318	A9V	2	01	31	P2	154	S31B																
SXZ2	S18 7.40Z	2	21	0			861	1	ACT10	510	VTX	3189	A9V	2	01	31	P2	152	S31B																
SXZ3	S18 7.40Z	2	21	0			941	1	ACT10	509	VTX	3121	A9V	2	01	31	P2	148	S31B																
SXZ4	S18 7.40Z	2	21	0			1041	1	ACT10	524	VTX	2998	A9V	2	01	31	P2	141	S31B																
SXZ5	S18 7.40Z	2	21	0			1141	1	ACT10	490	VTX	2937	A9V	2	01	27	P2	137	S31B																
SXZ6	S18 7.40Z	2	21	0			1201	1	ACT10	565	VTX	2724	A9V	2	01	26	P2	125	S31B																
SXZ1	S18 7.40Z	2	21	0			1351	1	ACT10	498	VTX	2576	A9V	1	01	38	P2	118	S31B																
SXZ6	S18 7.40Z	2	21	0			1441	1	ACT10	495	VTX	2398	A9V	1	01	26	P2	109	S31B																
SXZ9	S18 7.40Z	2	21	0			1561	1	ACT10	577	VTX	2126	A9V	1	01	26	P2	105	S31B																
SXZ1	S18 7.40Z	2	21	0			1641	1	ACT10	524	VTX	1936	A9V	1	01	28	P1	93	S31B																
SXZ1	S18 7.40Z	2	21	0			1701	1	ACT10	498	VTX	1787	A9V	1	01	23	P1	79	S31B																
SXZ5	S18 7.40Z	2	21	0			1801	1	ACT10	512	VTX	1557	A9V	1	01	23	P1	71	S31B																
SXZ4	S18 10RZ	3	31	0			01	1	ACT10	1140	VTX	3072	A5X	1	01	37	P1	72	S1X																
SXZ1	S18 10RZ	3	31	0			901	1	ACT10	1126	VTX	2451	A5X	1	01	43	P1	70	S5Z																
SXZ4	S18 10RZ	3	31	0			1801	1	ACT10	1086	VTX	2806	A5X	0	01	28	P1	51	S5Z																
SXZ6	S18 14RZ	4	41	0			901	2	ACT10	1417	VTX	2984	A5X	1	01	42	P2	91	S5Z																
SXZ6	S18 14RZ	4	41	0			1801	2	ACT10	1408	VTX	3284	A5X	1	01	32	P2	59	S31B																
RT1	ELMS 1111	20	20	0			05	ACT10	969	VTX	4394	A11	71	01	91	P2	655	S81X																	
WZ2	ELMS 4444	20	20	0			20	ACT10	414	VTX	4394	A12V	59	01	51	P2	336	S81X																	
RT3	ELMS 1144	30	30	0			06	ACT10	1065	VTX	4609	A11	65	01	66	P2	549	S81X																	
RT3B	ELMS 1144	20	20	0			06	ACT10	1625	VTX	6620	A5X	70	01	75	P1	537	S81X																	
RT4	S206.5 1144	20	20	0		STATIC	43	ACT10	1301	VTX	6133	A9V	30	02	09	P4	261	S81X																	
RT5	S206.5 1144	12	12	0			42	ACT10	700	VTX	3461	A7V	54	01	02	P2	688	S81X																	
RT6	S206.5 1144	12	12	0			14	ACT10	1461	VTX	7461	A7V	51	01	102	P2	293	S81X																	
RT7	S206.5 1144	18	18	0			14	ACT10	1916	VTX	4546	A6Z	41	02	25	F1	243	S81X																	
RT8	S206.5 1144	18	18	0			25	ACT10	250	VTX	1084	A6Z	62	01	50	F1	463	S31B																	
SWP1	SWEEP 1-3RZ						6	ACT10																											

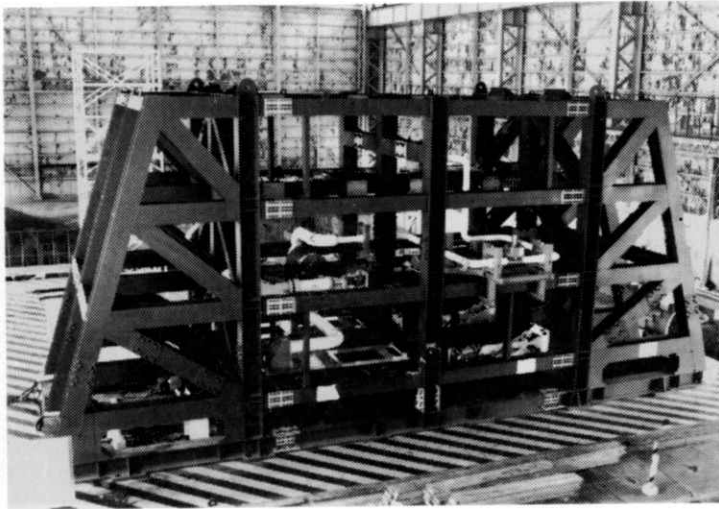


写真2.1 試験体配管全景 (左右が加振方向)

Photo 2.1 General view of test piping (right-left: shaking direction)

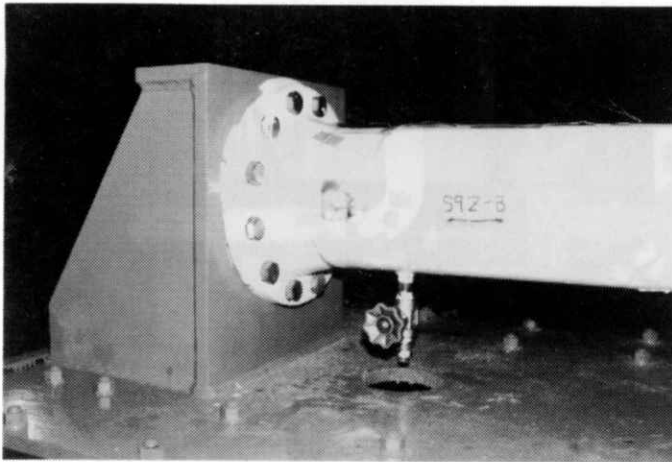


写真2.2 下部アンカー (振動板No.4上、8 B管)

Photo 2.2 Anchor at the lowest part (No.4 shaking table)

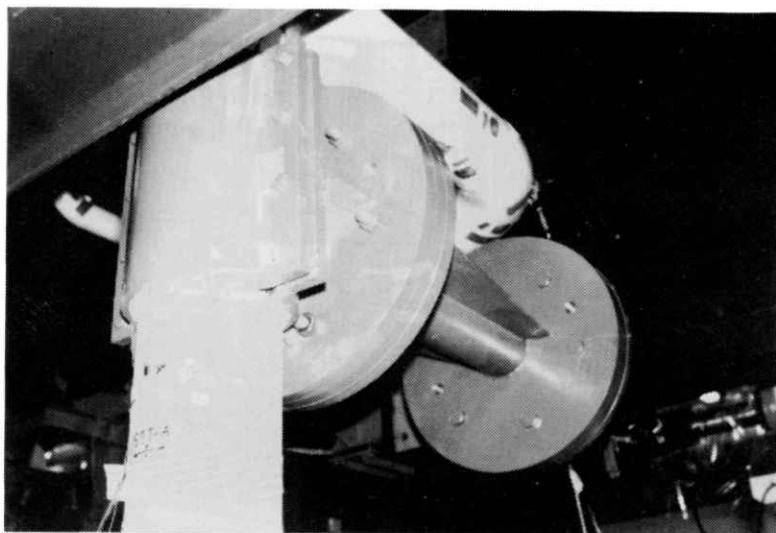


写真2.3 模擬バルブ (振動板No.3上、8 B管)
Photo 2.3 Dummy valve (No.3 shaking table)

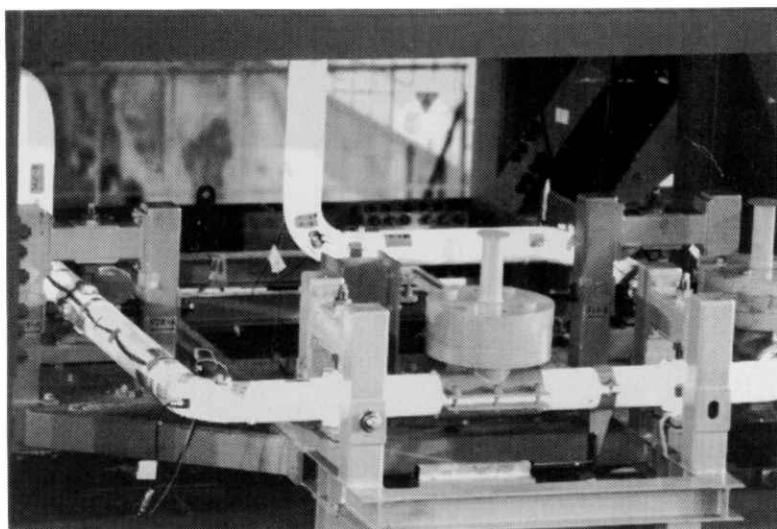


写真2.4 4 B管レストレイントおよび模擬バルブ (振動板No.2上)
Photo 2.4 4B restraint and dummy valve (No.2 shaking table)

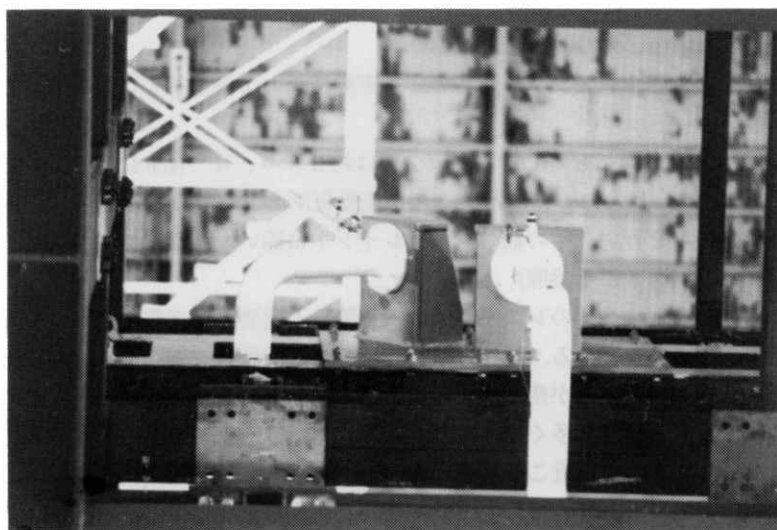


写真2.5 上部アンカー (振動板No 1上、4 B管)
Photo 2.5 Anchor at the highest part (No.1 shaking table)

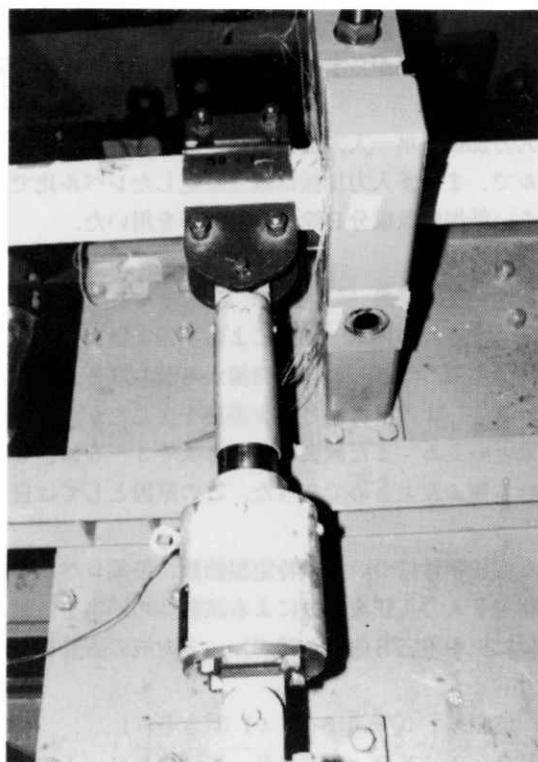


写真2.6 メカニカルスナッパ (振動板No 2上、4 B管)
架構式レストレイントを解除した場合に使用
Photo 2.6 Mechanical snubber

3. 2入力モデルの応答実験結果と解析

3.1 概要

本章では2入力モデル(Xシリーズ)の応答実験結果および解析との比較等について述べる。

試験体配管は前章と同じものであるが(全長は約20m、4^B(sch40)、8^B(sch40)からなる配管系(STS42))、2入力モデルとするため振動板No2、3では各1個所でテフロンを介して自重の支持のみを行い、その他のレストレイントは除いた。従って加振入力点は振動板No1、4である。(図3.1参照)。

このようにほとんどすべてのレストレイントを除くと配管系は実際のプラント配管と比べると極めて柔らかい構造となる。既往の耐震設計では、配管系を剛に支持することを基本とし、そのため多数の支持装置が使われている。しかし、支持装置が多いことはそれだけ振動挙動に関連する不確定要素が多くなることであり、信頼性向上の面からみて必ずしも望ましいことではない。このため最近このようなサポートの数を減らした柔構造配管系の挙動にも関心がもたれるようになってきている。本モデルの設定にあたってはこの点も考慮したものである。なお、管内は満水非圧とした。この場合の固有振動数と刺激係数の計算値を表3.1に示した。また、低次の主要モードを図3.2に示す。

入力波は前と同様試験体の振動特性を求めするための正弦波および多入力による応答特性を調べるための地震波を用いた。地震波はエルセントロ(1940、NS成分)および模擬地震波(S2、近地型、通産改良標準波)から求めた床応答波(各2波)を振動板No1、4用の加振波として用いた。

加振方法も同様に多入力加振、単一入力加振、準静的地震波加振等を用い、単一入力加振では同一波を同一レベルで、また多入力加振は適宜設定したレベル比で加振した。また地震波は試験体に影響の小さい低振動数成分を除去したものをを用いた。

3.2 試験体の振動特性と実験結果

配管系の振動特性を確認するために単一入力による加振実験を行った。図3.3は地震波加振時の代表的な応答例である。これらの応答曲線から読み取った共振点および減衰値を表3.2に示す。共振点は表3.1の計算値と多少差異を生じたが、差異は10%以内の範囲にあり、ほぼ妥当な結果といえる。また減衰は1~2次で3~6%、3次以上で1~3%であり、通常考えられている値より大きめであった。この原因としては自重支持部での摩擦等が考えられる。

2入力の位相差による応答特性については特定振動数、振幅レベルの正弦波位相差加振を行った。図3.4は位相差2入力正弦波加振による試験体の応答を位相差と関連させて表示したものである(ここでは位相差応答曲線と呼ぶ)。入力波の振動数、位相の設定は下記の通りである。

SIN 7.4Hz 位相差 0°-180°(10°きざみ)

なお、加振振動板はNO.1、NO.4であり、振動板NO.1の入力位相を0°固定とし、振動板NO.4の位相を上記のように変えた。応答値は既知の振動数を用いたフーリエ分析(最小自乗法)により加振振動数成分の振幅値を求めた。図示は、横軸に入力位相差、縦軸に応答振幅値を最大1にノーマライズして示し、最大の応答値は数値で図中に記入した。

この結果を見ると、計測点の応答振幅値（加振振動数成分）は2入力の位相差によりかなりの変動を示すことがわかる。このような応答の変動は各入力点における刺激係数を介して2入力の位相が影響を与えるためである。この点の解析的な取り扱いについては（付、多入力応答計算式）に示した。位相差応答曲線の解析による計算例を図3. 5に示す。

3.3 多入力地震波加振による応答および解析との比較

地震波を用いて多入力加振を行い、解析による結果と比較検討を行った。解析には（付）に示した式を用いた。なお、以下ではエルセントロ床応答波による応答について述べる。

時刻歴応答の計算には13次（28.5Hz）まで考慮したモーダル法を用いた。また減衰比は実測値を参考にした値（1、2次で6%、3、5次で3%、その他は1~2%）を使用した。

図3. 6は振動板No1、4の加速度（VT1X,4X、加振方向）、変位（ACT1D,4D）である。入力にはほぼ1:3の比率で入れている。解析にはこれらの加速度および変位（（ACT1D）等）を用いたが、振動板には加振直角方向の加速度も生じたので実際の計算ではこれらも入力として考慮した。なお、これらの実測および解析波形には2.9HzのLow Pass Filterを用い、不要成分をカットした。

図3. 7は準静的応答成分を比較したものである。括弧付きの(D-2)等が解析による波形で以下の図についても同様である。実験波形は動的多入力加振後、記録した加振機波形を準静的に再入力した時の応答変位である。図3. 8は配管の絶対変位を比較したものである。図3. 7、3. 8とも若干の差があるが波形および振幅の解析値はほぼ妥当な範囲に入っている。両図の応答変位を比較すると、D-1では準静的成分に比し動的応答が卓越し、他方D-2では応答がほぼ準静的成分で占められている。これは励起されている主モード形（約2.4Hz）と対応している。図3. 8のACT4Lは加振点での反力であるが、実測（加振機荷重）は振動板等の慣性反力のため大きくなっている。

図3. 9は加速度応答を比較したものである。A9Xでやや差があるが他の点では良好と思われる。波形の差異は主に高振動数成分で生じており、高次モードの減衰の設定の他、自重支持部の摩擦などが関与していると思われる。同様に図3. 10は配管応力（曲げ）の比較である。

以上、多入力時刻歴応答の解析と実験は波形および応答値でみてほぼ良好な一致を示している。理論解析で用いられる応答計算式は実規模の配管系についても、非線形性があまり強くない場合はほぼ妥当な結果を与えるといえる。

3.4 応答スペクトルによる評価

前項で述べた地震波応答について床応答スペクトル法による評価を行い、実験と比較した。このような評価法については種々提案されているが、ここでは一般に使われているものから選定して用いた。多入力応答スペクトルは振動板No1、4の波形（前項と対応させるため主要部のみを使用）から求めたものを用い、他に比較のためこれらを包絡した単一スペクトル（1入力法）も用いた。参考にエルセントロ床応答波で加振した時の振動板No1、4の加速度波形の応答スペクトルを図3. 11に示した。

応答の合成法は入力点間の合成は絶対値和法（ABS）、自乗和平均法（RMS）を用いた。またモード間合成は単一スペクトル法ではRMS、多入力スペクトル法ではRMSの他、

N R C、Regulatory Guide 1.92 にある10%法を用いた。なお、使用モードは時刻歴の場合と同様13次までとし、減衰も同じ値を用いた。

評価結果を図3.12に示した。図には実験および時刻歴応答解析による評価値も併記した。モード間合成では加算法からRMS<10%法であるが、本試験体の場合10%にかかわるのはかなり高次の成分なので加速度応答に顕著に現れている。多入力応答スペクトル法の評価値は時刻歴応答値に比し全般に大きくなっているが、入力点間およびモード間合成をいずれもRMSで行った場合が比較的近い値を示している。また本試験体の場合包絡スペクトルを用いた評価はかなり妥当な結果を与えている。なお、以上のシミュレーションおよびスペクトル法による評価では33Hzまでのモードを考慮したが、20Hzまでのモードに限定しても大差ない結果が得られている。

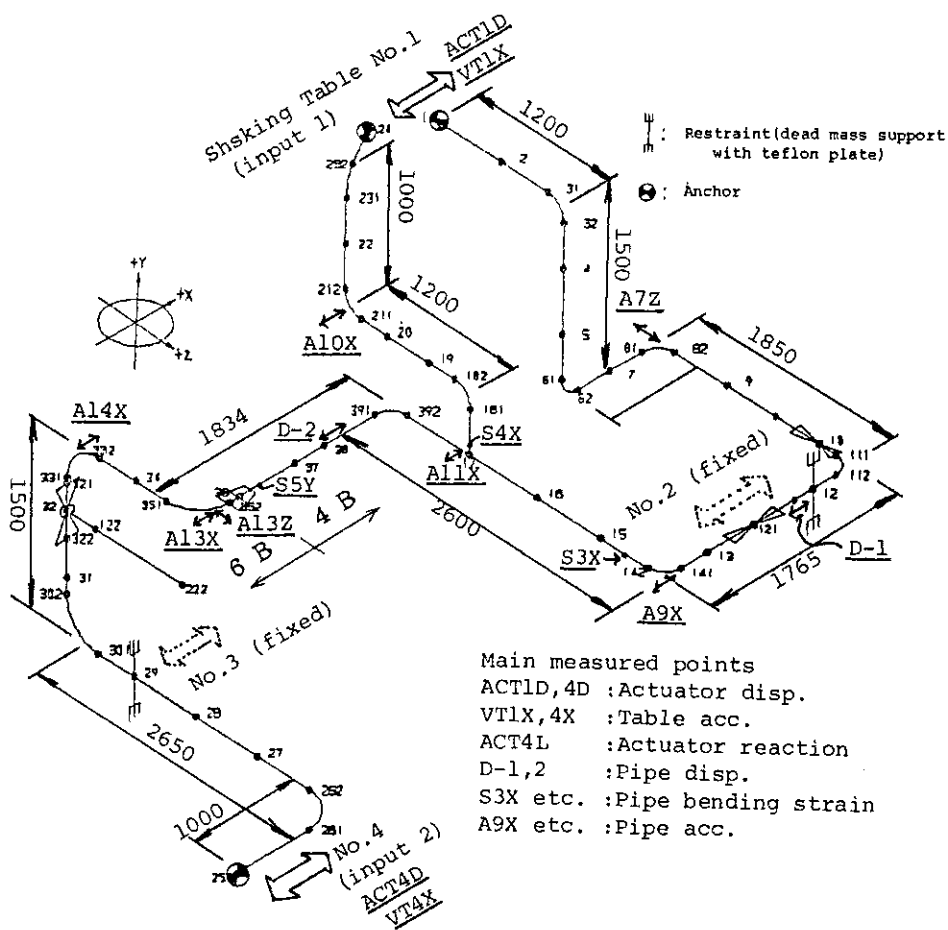


図 3.1 2入力応答実験モデル

Fig. 3.1 Test model for 2 inputs excitation

表 3.1 2入力モデルの固有値解析結果
(*は均一加振に対する値)

Tab. 3.1 Eigen values of the model

次数	振動数Hz	刺激係数*	主要振動部位
1	2.26	-0.803	4 B管 (X)
2	3.89	-0.810	8 B管 (X)
3	6.08	0.095	4 B管 (Z)
4	6.93	-0.075	4 B管 (Y)
5	7.93	-0.040	8 B管 (Z)
6	11.68	0.108	8 B管 (X)
7	13.49	0.160	4 B管 (X)
8	15.24	-0.006	4 B管 (Y)
9	17.33	0.032	4 B管 (Y)
10	18.10	-0.063	8 B管 (Z)
11	19.45	-0.066	8 B管 (X)
12	21.79	-0.025	4 B管 (X)
13	28.53	0.014	4 B管 (Y)

表 3.2 2入力モデルの実験結果
(固有振動数)

Tab. 3.2 Measured resonance frequencies

次数	共振点Hz	減衰係数
1	2.39	0.075
2	3.86	0.047
3	6.20	0.012
4	7.23	0.022
5	8.39	0.009
6	10.74	0.011
7	13.67	0.0095
8	14.65	0.006
9	17.68	0.003
10	18.26	0.0013
11	19.68	0.0028
12	20.54	0.0027
13	28.86	0.0008

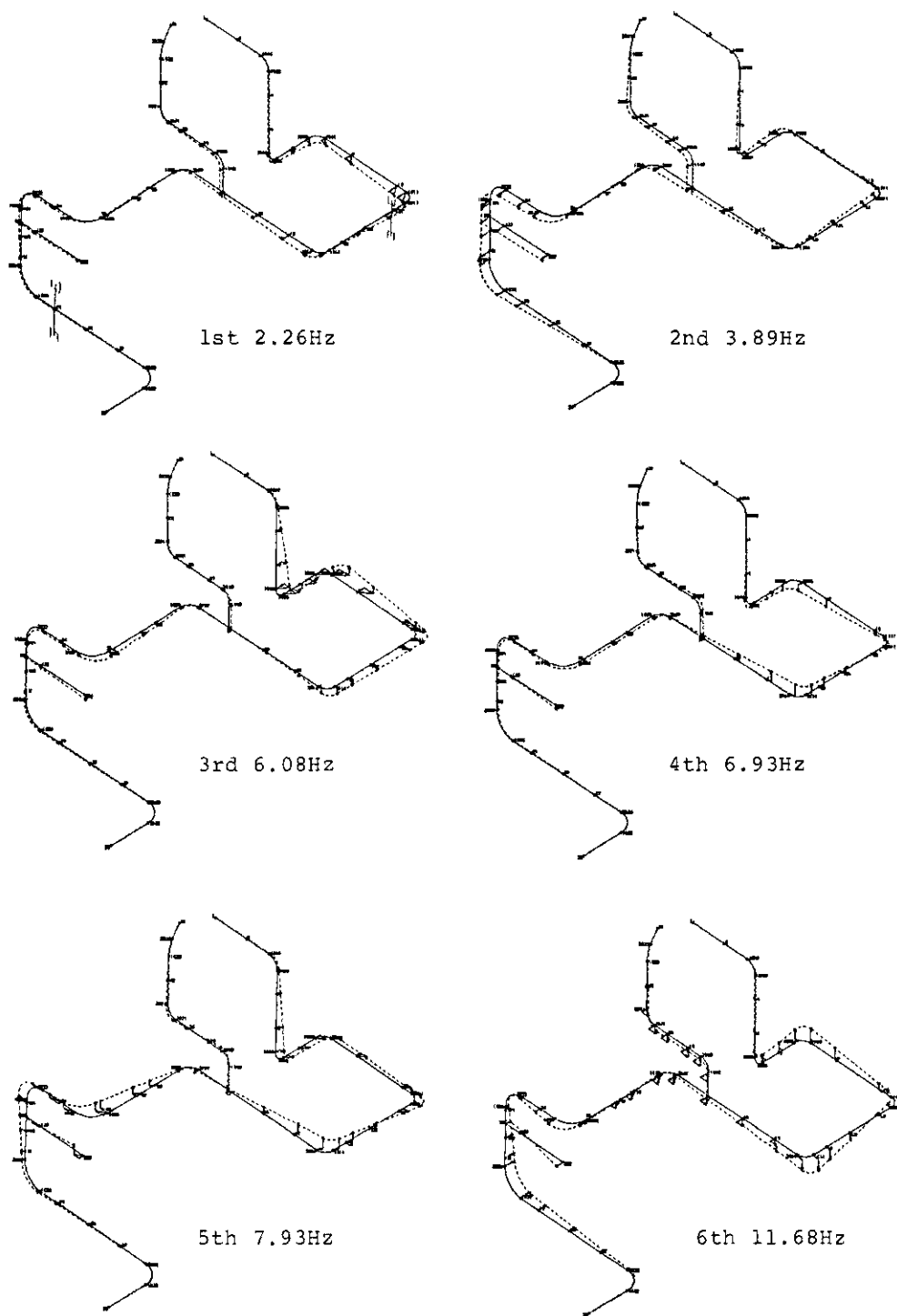


図 3.2 主な固有モード (計算)
Fig. 3.2 Main vibration modes (analysis)

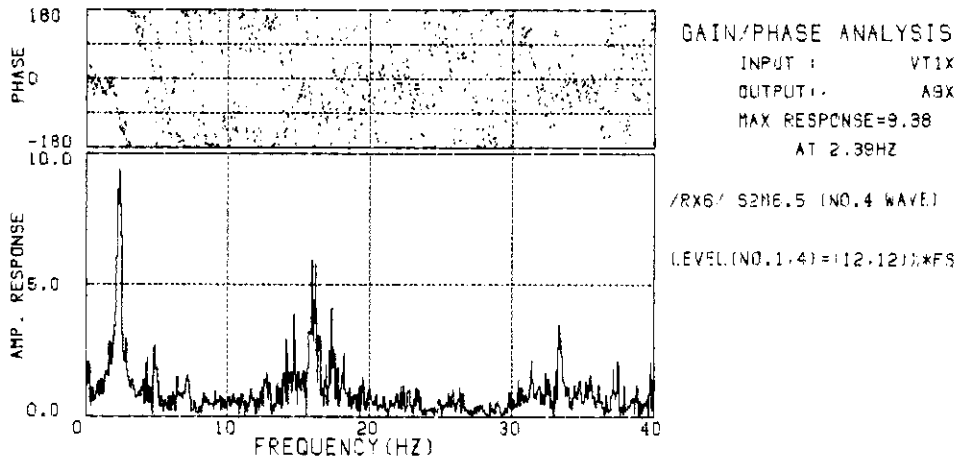
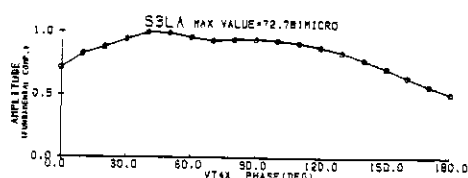
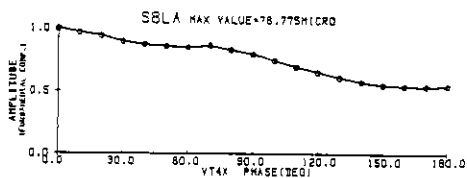


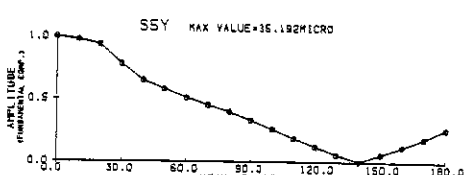
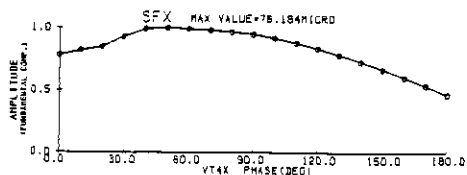
図 3.3 地震波加振による応答曲線例
(測定点については図3.1または図2.8を参照)

Fig. 3.3 Typical transfer function by uniform earthquake excitation

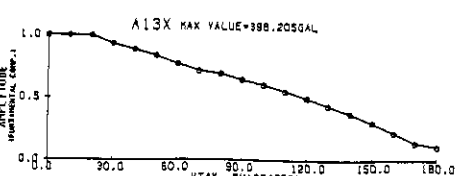
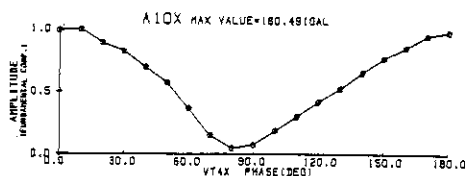
配管歪 (エルボ部分)



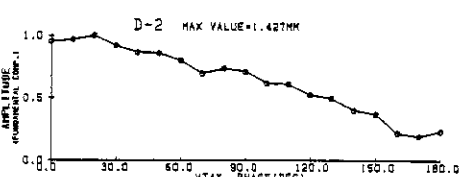
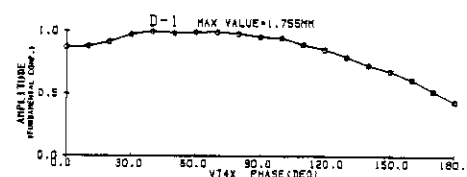
配管歪 (直管部分)



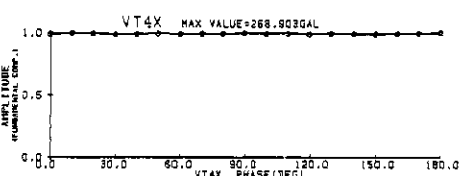
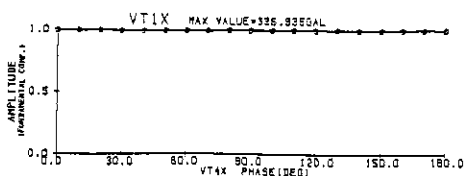
配管加速度



配管変位 (絶対)



加振点加速度 (振動板)



VT1X : 位相固定、VT4X : 位相変化

図 3.4 位相差 2 入力正弦波加振による応答振幅値の変動
 Fig. 3.4 Variation of response amplitude in multi-phase sinusoidal excitation (7.4Hz)

VT1X (No.1 shaking table) : fixed phase
 VT4X (No.4 shaking table) : variable phase (0-180 °)

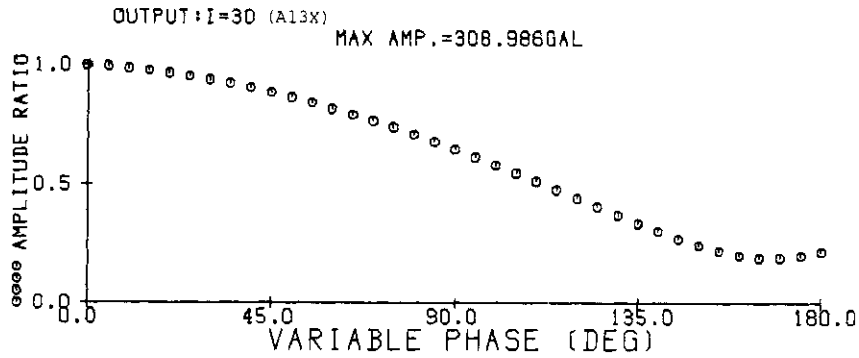


図 3.5 位相差応答曲線の計算例

Fig. 3.5 A example of multi-phase response curve by analysis

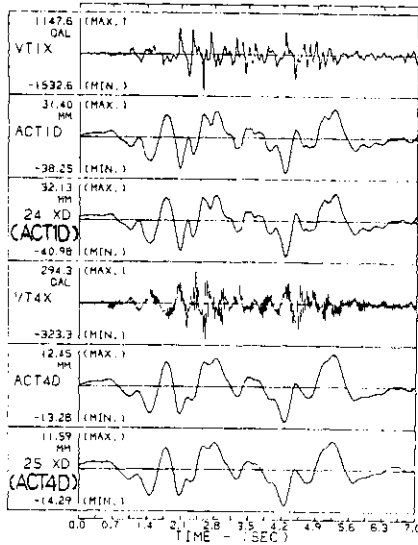


図 3.6 応答シミュレーションに用いた振動板波形(加速度とそれを積分した変位)および加振機変位(ACT1D等)との比較
(入力波: ELCENTRO NS 床応答波)

Fig. 3.6 Shaking table accelerations, integrated displacements and the comparison with actuator displacements input: ELCENTRO NS floor response waves

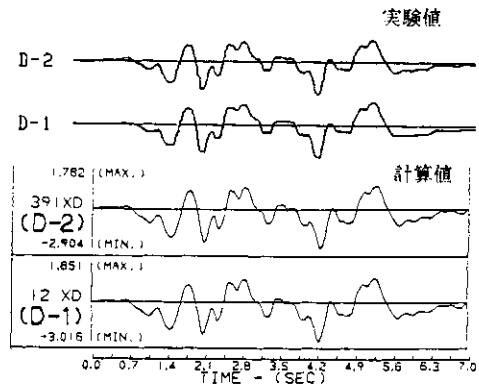


図 3.7 準静的応答成分の比較
(配管変位応答)

Fig. 3.7 Comparison of quasi-static responses by analysis and measurement

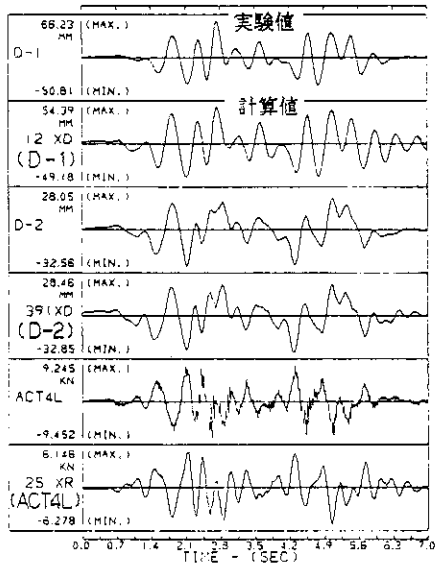


図 3.8 実験とシミュレーションの比較 (配管変位)

Fig. 3.8 Comparison of analysis and measurement (pipe displacement)

(配管変位)

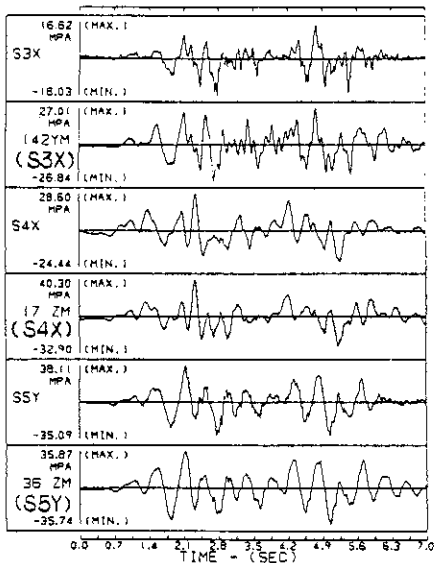


図 3.10 実験とシミュレーションの比較 (配管応力)

Fig. 3.10 Comparison of analysis and measurement (pipe stress)

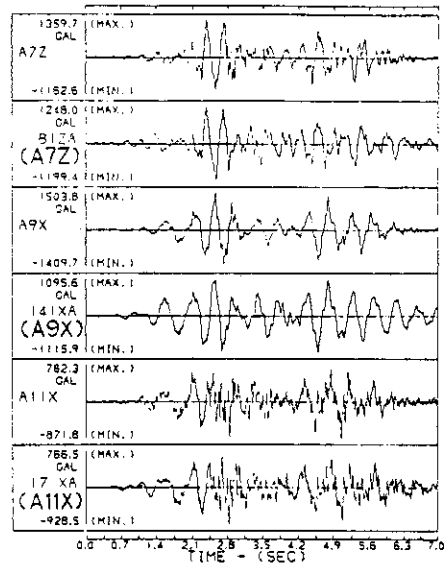


図 3.9 実験とシミュレーションの比較 (配管加速度)

Fig. 3.9 Comparison of analysis and measurement (pipe acceleration)

(配管加速度)

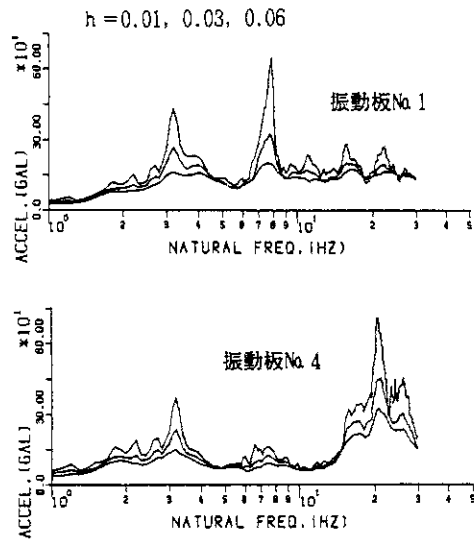


図 3.11 振動板波形の加速度応答スペクトル (入力波: ELCENTRO床応答波)

Fig. 3.11 Response spectra of shaking table accelerations

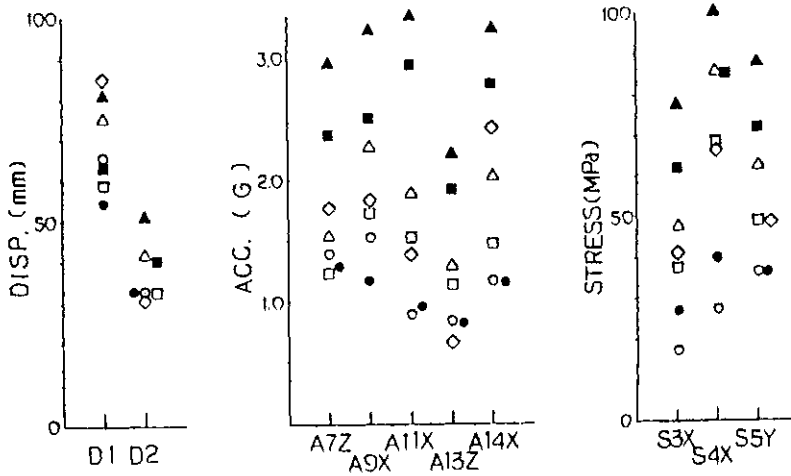
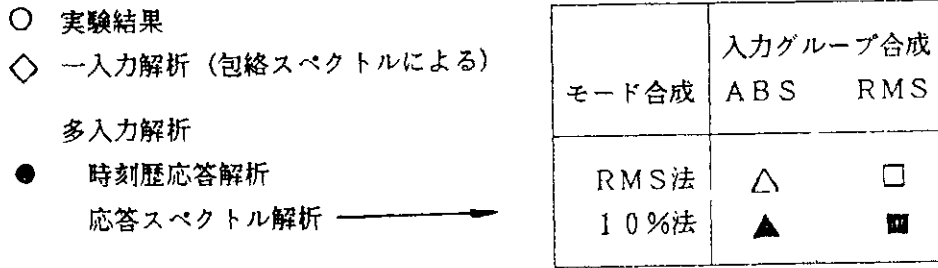


図 3.12 応答スペクトル法による評価 (横軸: 計測点)

Fig. 3.12 Response estimation by some spectrum methods

(付) 多入力応答計算式

線形系の多入力応答計算手法の基本は既に確立されている。ここではその要点をとりまとめるとともに本文に記した位相応答線図の算定式を導く。なお、以下ではベクトルに { } 記号、マトリクスに [] 記号を用いる。

運動方程式

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに {X} : 全体変位ベクトル
 {F} : 慣性力以外の外力ベクトル
 [M]、[C]、[K] : 質量、減衰および剛性マトリクス

上式は全自由度無拘束の一般式であるが、通常は支持点、拘束点が存在するので、運動方程式は次のように表現される。

$$\begin{bmatrix} M_a & M_{ab} \\ M_{ba} & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_a \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a & C_{ab} \\ C_{ba} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_a \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a & K_{ab} \\ K_{ba} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_a \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに {X_a} : 拘束されていない自由度の変位ベクトル ({X} の一部)
 {X_b} : 拘束されている自由度の変位 (同)
 {F_a} : 自由点での外力 ({F} の一部)
 {F_b} : 拘束点での反力 (同)
 [M_a] [K_a] 等は [M]、[K] 等の部分マトリクスであり、各自由度と外力に対応するものである。

上式で {X_b} の一部は入力点として強制変位が与えられ、他は本来の意味での拘束となる。

また {F_a} は系に対する力加振源がある場合や、非線形系を疑似外力法によって取り扱う場合に必要となるが、通常の慣性加振 (支持点加振) では

$$\{F_a\} = \{0\} \quad (3)$$

とおくことができる。

準静的応答

自由変位 {X_a} (絶対変位) は

$$\{X_a\} = \{X_d\} + \{X_s\} \quad (4)$$

と表せる.

ここに

$\{X_s\}$: 準静的応答変位 (強制変位応答)

$\{X_d\}$: 動的応答変位 (慣性応答)

$\{X_s\}$ は加振 ($\{X_b\}$ の一部) が静的に作用した場合の系の応答変位 (強制変形+剛体変位) であり、 $\{X_d\}$ はその状態からの相対的な応答 (慣性力による応答) である.

(2) 式から動的応答項を取り去り (3) を用いると

$$\begin{bmatrix} K_a & K_{ab} \\ K_{ba} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b' \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに $\{F_b'\}$: 準静的応答に対する拘束点反力 (含加振点)

(5) から

$$\{X_s\} = [T] \{X_b\} \quad (6)$$

$$\{F_b'\} = \{[K_{ba}][T] + [K_b]\} \{X_b\} \quad (7)$$

ここに

$$[T] = -[K_a]^{-1}[K_{ab}] \quad (8)$$

は変形マトリクスである.

動的応答

運動方程式 (2) から準静的応答を除く部分を求めると動的成分に関する振動方程式を得る. この場合 $\{X_b\}$ を加振入力として扱い、また準静的応答 (6) 式 of 速度、加速度を考慮する.

(2) 式に (3)、(4) を入れ、準静的変位関係式 (5) の部分を除くと

$$\begin{bmatrix} M_a & M_{ab} \\ M_{ba} & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_d + \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a & C_{ab} \\ C_{ba} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_d + \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a & K_{ab} \\ K_{ba} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_d \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b' \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに $\{F_b'\}$: 動的応答 (慣性応答) に対する拘束点反力 (含加振点)

(9) の第1行から動的応答の振動方程式が得られる. 即ち

$$[M_a M_{ab}] \begin{Bmatrix} \ddot{X}_d + \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + [C_a C_{ab}] \begin{Bmatrix} \dot{X}_d + \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + [K_a K_{ab}] \begin{Bmatrix} X_d \\ 0 \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (10)$$

展開して (6) を用いると

$$\begin{aligned}
 & [M_a]\{\ddot{X}_d\} + [C_a]\{\dot{X}_d\} + [K_a]\{X_d\} \\
 & = -\{[M_a][T] + [M_{ab}]\}\{\ddot{X}_b\} - \{[C_a][T] + [C_{ab}]\}\{\dot{X}_b\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

(11)の右辺第2項が第1項に比し小さく無視できる場合は動的応答を求める式は次のようになる。

$$[M_a]\{\ddot{X}_d\} + [C_a]\{\dot{X}_d\} + [K_a]\{X_d\} = -\{[M_a][T] + [M_{ab}]\}\{\ddot{X}_b\} \quad (12)$$

通常の応答解析ではこの式が用いられる。なお、質量マトリクスにLumped Massを用いるときは、上式右辺の $[M_{ab}]$ は不要である。

拘束点反力

動的応答による拘束点反力は(9)の第2行を展開した式から得られる。即ち(6)を用いると

$$\begin{aligned}
 \{F_b^*\} &= [M_{ba}]\{\ddot{X}_d\} + \{[M_{ba}][T] + [M_b]\}\{\ddot{X}_b\} \\
 &+ [C_{ba}]\{\dot{X}_d\} + \{[C_{ba}][T] + [C_b]\}\{\dot{X}_b\} \\
 &+ [K_{ba}]\{X_d\}
 \end{aligned} \quad (13)$$

強制変位(静的応答)による項(7)を含めた全拘束点反力は

$$\{F_b\} = \{F_b'\} + \{F_b^*\} \quad (14)$$

で与えられる。

なお、(13)式で影響の小さい項は適宜省略できる。

直接積分による解

入力 $\{X_b\}$ を与えて(12)式を積分し、変位 $\{X_d\}$ 、加速度 $\{\ddot{X}_d\}$ を求める。

一方、 $\{X_b\}$ から(あるいは直接に)入力変位 $\{X_b\}$ を求めておく。解は

$$\text{全変位応答} \quad \{X_d\} = \{X_d\} + [T]\{X_b\} \quad (15)$$

$$\text{全加速度応答} \quad \{\ddot{X}_d\} = \{\ddot{X}_d\} + [T]\{\ddot{X}_b\} \quad (16)$$

で求まる。

また支持点反力は(7)、(13)で求めるが、このときは速度の応答も用いる。

モーダル法による解

動的応答を求める式 (12) にモーダルアナリシスを適用する.

$$[T_c] = [T] + [M_a]^{-1}[M_{ab}] \quad (17)$$

とおくと (12) 式は (Lumped Mass 系では $[T_c] = [T]$)

$$[M_a]\{\ddot{X}_d\} + [C_a]\{\dot{X}_d\} + [K_a]\{X_d\} = -[M_a][T_c]\{\ddot{X}_b\} \quad (18)$$

となる. 解 $\{X_d\}$ を

$$\{X_d\} = [\phi]\{\xi\} = \sum_{\ell=1}^N \xi_{\ell} \{\phi_{\ell}\} \quad (19)$$

とおく. ここに $[\Phi]$ はモーダルマトリクスで

$$[\phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N] \quad (20)$$

ϕ_{ℓ} : 第 ℓ 次モードベクトル

ξ_{ℓ} : ℓ 次モーダル変位 (規準関数)

N : 拘束されていない自由度数

(19) を (18) に代入して左から $[\Phi]^T$ を乗ずる.

$$\begin{aligned} [\phi]^T [M_a] [\phi] \{\ddot{\xi}\} + [\phi]^T [C_a] [\phi] \{\dot{\xi}\} + [\phi]^T [K_a] [\phi] \{\xi\} \\ = -[\phi]^T [M_a] [T_c] \{\ddot{X}_b\} \end{aligned} \quad (21)$$

ここで $[T_c]$ を分解する.

$$[T_c] = [T_{c1}, T_{c2}, \dots, T_{cj}, \dots, T_{cJ}] \quad (22)$$

ここに $j = 1, 2, \dots, J$ は拘束されている自由度である.

$[T_{cj}]$ は $\{X_b\}$ の第 j 要素 (自由度) に対応するベクトルである. これを (19) と同じ形でモード分解すると

$$\{T_{cj}\} = [\phi]\{\beta_j\} = \sum_{\ell=1}^N \beta_{\ell j} \{\phi_{\ell}\} \quad (23)$$

ここに

$$\{\beta_j\} = (\beta_{1j}, \beta_{2j}, \dots, \beta_{Nj})^T \quad (24)$$

(23) を (22) に代入すると $[T_c]$ のモード分解

$$[T_c] = [\phi][\beta] \quad (25)$$

が得られる. ここに $[\beta]$ は刺激係数マトリクスで

$$[\beta] = [\beta_{\ell j}] \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, J \\ \ell = 1, 2, \dots, N \end{array} \quad (26)$$

$\beta_{\ell j}$ は第 j 入力点 (拘束された自由度) における第 ℓ 次モードの刺激係数である.

(23) およびモード直交性

$$\begin{aligned} [\phi]^T [M_a] [\phi] &= [m] \\ [\phi]^T [K_a] [\phi] &= [k] \\ [\phi]^T [C_a] [\phi] &= [c] \end{aligned} \quad (27)$$

を用いると

$$\beta_{\ell j} = \frac{\{\phi_{\ell}\}^T [M_a] \{T_{c j}\}}{\{\phi_{\ell}\}^T [M_a] \{\phi_{\ell}\}} \quad (28)$$

が得られる。振動方程式は(21)に(25)を代入し、(27)を用いると

$$[m] \{\ddot{\xi}\} + [c] \{\dot{\xi}\} + [k] \{\xi\} = -[m] [\beta] \{\ddot{X}_b\} \quad (29)$$

となる。但し、[m]等は対角マトリクスで、また減衰マトリクスもモード直交性をもつと仮定している。

(29)から第 ℓ 次モードの式は

$$\ddot{\xi}_{\ell} + 2h_{\ell} \omega_{\ell} \dot{\xi}_{\ell} + \omega_{\ell}^2 \xi_{\ell} = -\sum_{j=1}^J \beta_{\ell j} \ddot{X}_{b j} \quad (30)$$

ここに $X_{b j}$ は $\{X_b\}$ の第 j 要素であり、

$$h_{\ell} = \frac{c_{\ell}}{2m_{\ell}\omega_{\ell}}, \quad \omega_{\ell}^2 = \frac{k_{\ell}}{m_{\ell}} \quad (31)$$

但し、 m_{ℓ} 等は[m]の第(ℓ , ℓ)要素等である。

(30)を必要な次数について解き(15)、(16)に入れば多入力による応答を求めることができる。

多入力正弦波加振による応答関数

加振入力変位 $\{X_b\}$ (絶対変位)が各点で同一振動数の正弦波のとき

$$\{X_b\} = \{U\} e^{j\omega t} \quad (j = \sqrt{-1}) \quad (32)$$

ここに $|U|$ は複素数振幅ベクトルで

$$\{U\} = (U_1, U_2, \dots, U_J) \quad (33)$$

なお、 $\{X_b\}$ のうち単純な拘束点(入力点でない)では $U_j = 0$ である。

モーダル応答変位ベクトルを

$$\{\xi\} = \{Y\} e^{j\omega t} \quad (34)$$

ここに $\{Y\} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_\ell, \dots, Y_N)^T$ (3 5)

とする。 Y_ℓ は入力 $\{X_\ell\}$ に対する ℓ 次モードの応答で (3 0) 式から

$$Y_\ell = H_\ell(\omega) \sum_{j=1}^J \beta_{\ell j} U_j$$
 (3 6)

$$(\ell = 1, 2, \dots, N)$$

と得られる。ここに

$$H_\ell(\omega) = \frac{\omega^2}{(\omega_\ell^2 - \omega^2) + j(2h_\ell \omega_\ell \omega)}$$
 (3 7)

(注) (3 6) と (3 7) で j を使い分けている。

(1 9) に (3 4) を用いると動的応答分については

$$\{X_d\} = [\phi]\{\xi\} = [\phi]\{Y\} e^{j\omega t}$$
 (3 8)

また準静的応答 (6) を加えた全応答は

$$\{X_e\} = \{R\} e^{j\omega t}$$
 (3 9)

となる。ここに $\{R\}$ は自由点の応答変位振幅ベクトル (全応答値) であり、

$$\{R\} = [\phi]\{Y\} + [T]\{U\}$$
 (4 0)

ここで $\{Y\}$ を $\{U\}$ を用いて表す。 (3 6) は $\ell = 1, 2, \dots, N$ についてまとめると

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1(\omega) & & 0 \\ & H_2(\omega) & \\ & & \ddots \\ 0 & & & H_N(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1J} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2J} \\ \vdots & & & \\ \beta_{N1} & \dots & \dots & \beta_{NJ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_J \end{pmatrix}$$
 (4 1)

であるから

$$\{Y\} = [H][\beta]\{U\}$$
 (4 2)

とかける。ここに $[H]$ は (4 1) の右辺第 1 項を表す。

これを (4 0) に代入すると

$$\{R\} = [G]\{U\}$$
 (4 3)

ここに

$$[G] = [\phi][H][\beta] + [T]$$
 (4 4)

$[G]$ は加振変位ベクトル $\{U\}$ から強制変位成分を含む応答変位ベクトル $\{R\}$ への伝達

関数である。

一点加振の伝達関数

以下ではLumped Mass 系（または [M] の非対角項が無視できる場合）を考え

① j 点のみ加振した場合の i 点の全応答の伝達関数

② 特定振動数 ω で全入力点を加振し、かつ特定の入力点 j の位相のみを変えた場合の i 点の応答関数（ここでは位相応答とよぶ）

を求める。

この場合、(17)、(25) より [T] = [Φ] [β] であるので (44) は

$$[G] = [\phi][H+I][\beta] \quad (45)$$

となる。ここに I は単位マトリクスである。

j 点を加振した場合の i 点の応答の伝達関数は [G] の要素 G_{ij} そのものであるから (45) の展開から次のように求まる。

$$G_{ij} = \frac{\sum_{\ell=1}^N \phi_{i\ell} \beta_{\ell j}}{(\omega_{\ell}^2 - \omega^2) + \sqrt{-1}(2h_{\ell}\omega_{\ell}\omega)} \quad (46)$$

この式は (Φ_{ij} , β_{ij})、 ω_{ℓ} 、 h_{ℓ} をモーダルパラメータとしており、実験モード解析の基礎式にもなる。

位相応答線図

i 点の応答（複素）振幅は (43) から

$$(47)$$

となる。加振（複素）振幅および i-j 伝達関数を

$$U_j = |U_j| e^{\sqrt{-1}\theta_j}, \quad G_{ij} = |G_{ij}| e^{\sqrt{-1}\tau_{ij}} \quad (48)$$

と表すと

$$R_i = \sum_{j=1}^J a_{ij} e^{\sqrt{-1}(\tau_{ij} + \theta_j)} \quad (49)$$

$$a_{ij} = |U_j| |G_{ij}| \quad (50)$$

ここに a_{ij} は実数である。i 点の応答を絶対振幅で考えると

$$\begin{aligned} |R_i|^2 &= \left| \sum_{j=1}^J a_{ij} e^{\sqrt{-1}(\tau_{ij} + \theta_j)} \right|^2 \\ &= \{C_i + a_{ij} \cos(\tau_{ij} + \theta_j)\}^2 + \{S_i + a_{ij} \sin(\tau_{ij} + \theta_j)\}^2 \quad (51) \end{aligned}$$

ここに

$$C_i = \sum_{j' \neq j}^J a_{ij'} \cos(\tau_{ij'} + \theta_{j'}) \quad (5.2) - 1$$

$$S_i = \sum_{j' \neq j}^J a_{ij'} \sin(\tau_{ij'} + \theta_{j'}) \quad (5.2) - 2$$

(5.1) は位相可変入力点 j とその他の点を分けて示したものである。この式を用いて j 点での位相 (θ_j) に対する i 点の応答変動を求めることができる。

ここで i 点の応答が最大または最小になるような j 点の加振位相を評価してみる。これは (5.1) を位相 θ_j で微分すればよい。

$$\frac{d|R_i|^2}{d\theta_j} = 2a_{ij} \{-C_i \sin(\tau_{ij} + \theta_j) + S_i \cos(\tau_{ij} + \theta_j)\} \quad (5.3)$$

従って

$$\tan(\tau_{ij} + \theta_j) = \frac{S_i}{C_i} \quad (5.4)$$

を満たす θ_j で最大または最小の応答振幅となる。(5.1) から最大か最小かは

$$S_i \sin(\tau_{ij} + \theta_j) + C_i \cos(\tau_{ij} + \theta_j) \leq 0 \quad (5.5)$$

(> 0 で最大)

によって決まる。

共振振動数付近の加振を考えてみる。加振が l 次モード付近 $\omega = \omega_l$ のとき (4.6) 右辺の l 次項が卓越する。

2入力の場合 (j と j' 、 j で位相変化) を考えると (5.4) は

$$\tan(\tau_{ij} + \theta_j) = \frac{a_{ij'} \sin(\tau_{ij'} + \theta_{j'})}{a_{ij} \cos(\tau_{ij} + \theta_j)} = \tan(\tau_{ij'} + \theta_{j'}) \quad (5.6)$$

伝達関数の位相 θ_j と $\theta_{j'}$ には (応答点 i を固定している場合は刺激係数のみ) の符号によって 0 または π の差がある。従って固定位相 $\theta_{j'} = 0$ とすると $\theta_j = 0$ または $\theta_j = \pi$ で最大または最小になる (最大または最小は刺激係数の符号に依存する)。

最小の場合 (5.1) を用いると

$$|R_i| = |a_{ij'} - a_{ij}| \quad (5.7)$$

従って加振振幅比が

$$|U_j| / |U_{j'}| = |G_{ij'}| / |G_{ij}| \quad (5.8)$$

のとき i 点の振幅は 0 となる。2 入力の場合のこのような結論は直観的にも明らかであるが、3 入力以上の場合、(5.4) 式は $\omega = \omega_1$ のときでも

$$\tan(\gamma_i + \theta_j) = \frac{\sum_{j'} a_{ij'} \sin(\gamma_i + \theta_{j'})}{\sum_{j'} a_{ij'} \cos(\gamma_i + \theta_{j'})} \quad (5.9)$$

であり、これを満たす θ_j は他の入力点 j' での振幅、位相関係に依存し単純ではない。

但し、j 点以外の入力点がすべて同一振幅、同一位相である場合は当然であるが 2 入力と同じ扱いとなる。

4. まとめ

昭和57年度より進めてきた実験装置の製作および昭和60年度に行った弾性応答実験について概要を取りまとめた。これらの結果を要約すると以下の通りである。

(1)実験手法としていくつかの新しい手法を適用した。

- ・多層振動台型の多入力加振装置を採用し、その有用性を確認できた。この手法は原子力配管のように立体的に立ち上がる配管の多入力応答実験に適しているが、一方、装置全体の剛性確保と加振機の干渉防止については十分注意を払う必要がある。特に、床及び反力フレームの剛性、加振機の出力は試験体の固有振動数を考慮して余裕を持たせる必要がある。

- ・入力装置として、パーソナルコンピュータを核とした地震波入力装置を製作し、地震波の変換、積分、モニタ、多入力地震波の印加、地震波の時間差入力、加振機変位の準静的再入力等に利用し、その有用性を確認できた。

- ・変位計測の1手法として開発されたビデオカメラによる解析手法を配管変位の測定に適用した。その結果、誤差1.5mm以内で検出でき、大変位については十分有効であることがわかった。

(2)原子炉給水系を参考とした配管系モデルの4入力振動実験を行い、その応答挙動について調べた。

- ・振動特性の非線形性はギャップ0でもかなり大きく、摩擦の影響が(低レベルの加振で特に)顕著である。

- ・正弦波位相差加振では計測点にもよるが、0~100%の応答変動を示した。また、このような特性は線形解析による多入力伝達関数を用い、強制変位成分を考慮した位相差応答関数によりほぼ説明しうることがわかった。

- ・地震波時間差加振では時間差の与えかたによりほぼ1.5倍程度の応答変動を示している。これは各床の応答スペクトルが同じでも波形の到達時間により、応答がかなり変わることを示している。

- ・実験条件別の応答では支持部にギャップがあり、かつ加圧条件の場合が全般的に高い応答を示している。ギャップがある場合、その偏在の影響はあまり大きくないが、ギャップによる不安定応答は顕著に現れる。

- ・動的加振時の内圧変動はエルボ部では最大700kPa(7kg/cm²)程度になっている。

(3)同じ配管系の支持条件を変更し(柔構造モデル)、2入力振動実験を行いその応答挙動を調べ解析と比較した。

- ・原子力配管系として通常の支持方法を用いた4入力モデル(前項)に比べると、配管の応答加速度は小さいが、応答歪はかなり大きくなる。支持装置を減らす場合、この点を十分検討する必要があると思われる。

- ・多入力時刻歴応答の解析と実験は波形および応答値でみてほぼ良好な一致を示し、理論解析で用いられる応答計算式は実規模の配管系についても、非線形性があまり強くない場合はほぼ妥当な結果を与えることがわかった。

- ・応答スペクトルによる評価はいずれもかなり安全側の評価となったが、入力点間およびモード間合成をいずれもRMSで行った場合が実験と比較的に近い値を示している。また本試験体の場合包絡スペクトルを用いた評価(いわゆる1入力法の一つ)はかなり妥当な結果を与えている。

おわりに、本研究全般について東京大学生産技術研究所教授柴田碧博士の御指導をいただいている。また当センター高橋博所長には研究当初より御指導をいただいている。研究の計画、実施にあたっては科学技術庁原子力局技術振興課の関係各位、当センターの広部良輔第2研究部長、大谷圭一耐震実験室長、管理部施設課各位他多くの方々の御助力をいただいた。試験体の製作、入力波の作成および実験計測等では多くの方々の御協力をいただいた。以上の方々に深甚の謝意を表す次第である。なお、データ整理については国府田正義氏の御尽力をいただいた。

(1986年12月23日 原稿受理)