

# 大形振動台

## Large-sized Shaking Table

熊谷 弘巳\*  
Hiromi Kumagai

松崎 淳\*\*  
Atsushi Matsuzaki

橋本 時夫\*\*\*  
Tokio Hashimoto

### 要 旨

近年の各種構造物の大形化に伴い、地震時の潜在危険度は非常に高くなっており、なかでも原子力発電用機器の耐震性の研究は特に重要な問題である。

これらの耐震実験を行なうため、各種大形振動台の設置が要望されているが、本文はこのほど完成した電力中央研究所納め振動台の構造、機能、性能などについて述べたものである。

### 1. 緒 言

日本は環太平洋地震帯に位置し、これまでしばしば大地震に襲われ、土木建築諸設備、石油タンク、大形電力機器などの倒壊、破損が発生しているが、近年の各種施設の大形化、潜在危険度の増大に伴い耐震性の研究は重要度がますます高まっている。

しかるに、これら諸施設の耐震研究を行なう場合には、構築物をささえる基礎地盤と構築物との相互作用を考慮した振動特性を解明する必要があり、岩盤や土壌の振動性状、破壊機構が重要な因子となる。

これらの解明を行なうには相似律の満足される規模の模型実験による研究が不可欠であり、各種地震動をシミュレートすることのできる大形の振動台が必要である。

このほど電力中央研究所に納入された振動台は、コンピュータ連動の油圧式振動台であり、過去の地震の再現や多層系基礎地盤の地震動伝播(でんぱ)のシミュレーションを行なうことができるものである。本振動台は下記の諸研究を目的としたものである。

- (1) 原子力発電所用機器の耐震研究
  - (2) ダム、岸壁、堤防などの耐震研究
  - (3) 地中埋設管および地下構造物の耐震研究
  - (4) 軟弱地盤の震動特性
- など。

以下、本振動台の概要を述べる。

### 2. 試験装置の概要

前述の背景のもとに計画された本機は、おもに原子力発電用機器をはじめとする電力機器の耐震研究を目的としたものであり、入出力指令装置には、ハイブリッド計算システムを備え、システムからの指令に従い、油圧サーボ式加振機で、全面油圧支持された振動台を加振し、各種地震動を再現するコンピュータ連動の油圧加振振動台である。正弦波などの基本波による加振をはじめ、実際の地震記録の再現のほか、多層地盤の地震動伝播をシミュレートして加振したり、あるいは振幅、時間軸を変更して加振するなど各種の地震動を再現することができる。

模型からの各種のデータはただちに計算機にて処理され、試験の迅速化が図られている。

本機はコンピュータの連動により実験項目の拡大と、試験の迅速化が図られるとともに、加振装置をはじめ、振動台の支持、ガイド、加振器との連結部などに油圧が採用され、性能の向上が図られている。

\* 日立製作所亀有工場

\*\* 日立製作所機械研究所

\*\*\* 日立電子株式会社営業本部

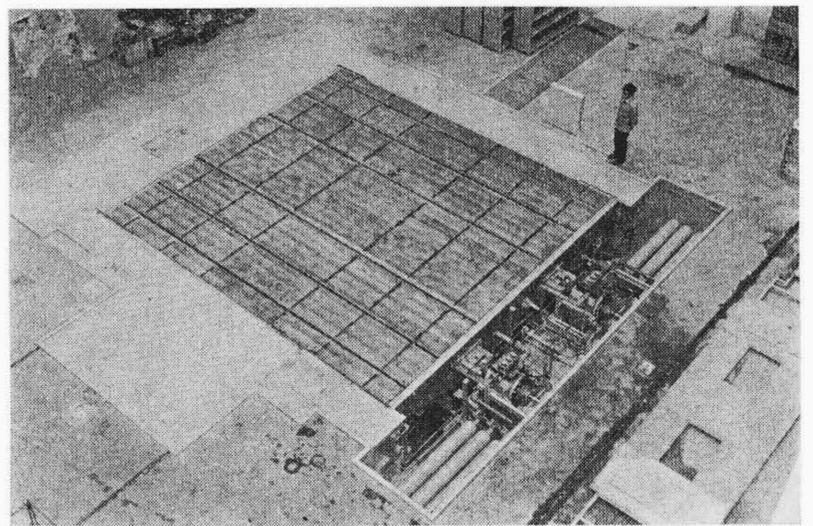


図1 振動台

本機のおもなる仕様は下記のとおりである。

振動台寸法	6 m × 6.5 m
最大積載重量	120 t
最大振幅	±50 mm
振動数範囲	0.1~20 Hz
最大加速度	400 gal
加振力	30 t × 2
加振方式	電気-油圧サーボ式
制御方式	ハイブリッド計算機連動制御
支持方式	油圧式(浮上, 側面, 転倒防止)

### 3. 機器の構成

本機は、図2系統図に示す各要素を、有機的に結合したシステムとして構成されているが、以下各構成要素につき、特徴的な点を説明する。

#### 3.1 ハイブリッド計算システム

システムは、アナログ部(ALS-2000A)、デジタル部(CLOAP-2000E)および周辺機器として、光電式カーブトレーサ(1台)、万能入出力装置(オンライン用1台、オフライン用1台)、高速紙テープ穿(せん)孔機(1台)、光電式紙テープ読取機(1台)、ペン書き記録計(8チャンネル)(1台)とより構成されている。

光電式カーブトレーサ、万能入出力装置は、それぞれアナログ、デジタルの地震記録の読み込みに使用される。

アナログ部は、

加算器/直流増幅器	56台(176台)
加算積分器素子	20台(60台)
ポテンショメータ	56台(248台)
サーボ乗算器	1台(5台)
乗算器素子	4台(10台)

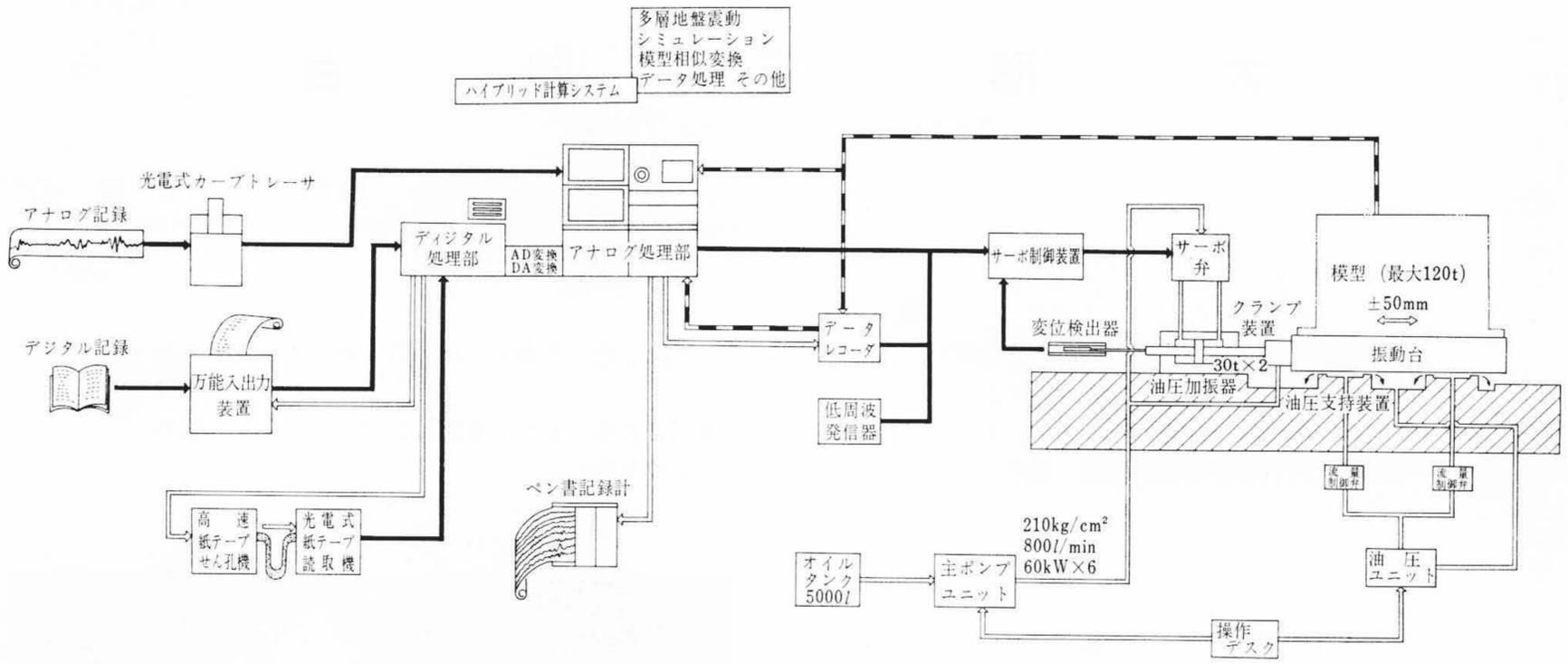


図2 系統図

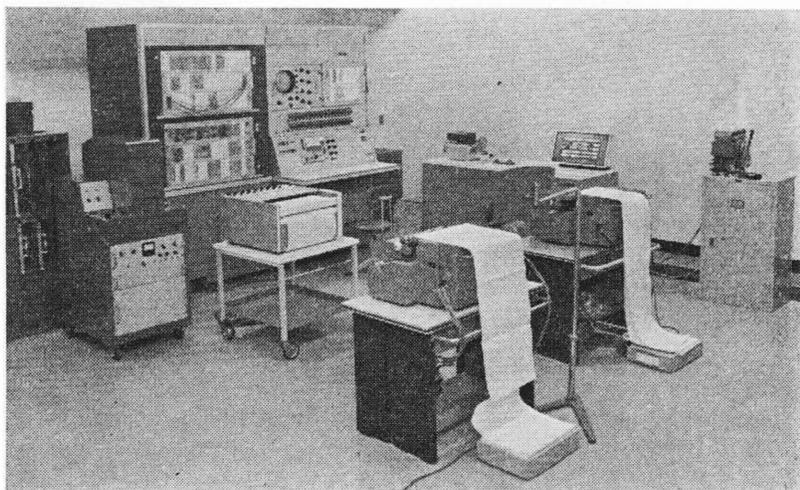


図3 ハイブリッド計算システム

関数発生器素子	4台 ( 6台)
むだ時間素子	1台 ( 2台)
雑音発生器	1台 ( 1台)
電圧比較器	1台 ( 2台)
サンプル・ホールド素子	1台 ( 1台)
論理演算要素	1式 ( 1式)

上記( )内は増設後の台数である。

デジタルおよびリンケージ部は、

CPU(中央処理装置)	18ビット, メモリ16K語
高速A-D変換	60 μs 8CH
高速D-A変換	40 μs 8CH
デジタル入力チャンネル	8
デジタル出力チャンネル	8
ハイブリッド選択チャンネル	308
ハイブリッド制御チャンネル	6

となっている。

ソフトウェアは、使用言語としてハイブリッド・フォートランが使用できる。さらに各種データ処理アプリケーション・ウェアとして、

- (1) フーリエ解析
- (2) パワースペクトラム
- (3) 波形変換
- (4) 頻(ひん)度分布
- (5) 多質点系シミュレーション
- (6) 応答スペクトル

などが用意されているほか、

- (1) IBM-360 データ変換ルーチン
- (2) 各種関数ルーチン
- (3) むだ時間ルーチン

などのサブルーチンを備えている。

### 3.2 振動台本体

振動台本体は、所定の積載荷重に対してじゅうぶんな強度と剛性とを有し、かつできるかぎり軽量なものが要求される。このため、鋼板溶接箱形構造とし、残留応力による寸法変化を防ぐため大形炉による焼なましを行なっている。振動台において特に問題となるのは、台自身の固有振動数で、加振振動数の上限に対しじゅうぶん高い固有振動数をもつよう設計する必要がある。一般に周辺自由支持された長方形平板の第1次固有振動は、2本の中心線を節とする振動モードをもっている。本機の場合、1次固有振動数は51 Hzとなり、上限加振振動数20 Hzに対しじゅうぶん高い値となっている。今回のように鋼板溶接構造で各部の板厚、デプスが異なる複雑な構造物の固有振動数を設計段階において求めることは、かなりむずかしい問題であるが、(1) 剪(せん)断流理論によるねじり剛性の計算、(2) 等価曲げ剛性モデルに対する有限要素法による剛性の計算を行ない、Rayleigh法により固有振動数を求めた。計算結果は剪断流理論による値が49 Hz、有限要素法による値が71 Hzとなり、実測値51 Hzに対し、後者はやや大きい値となった。後者は、使用した等価剛性モデルにおいて要素の数を増すことにより、さらに計算精度を向上させることができる。構造の複雑な箱形構造物の固有振動数の設計手法として剪断流理論による計算法および有限要素法による計算法を用いることが有効であることが確かめられた。

### 3.2 振動台の支持、案内装置

波形ひずみを極小にするため、振動台の支持および案内装置は、しゅう動抵抗の小さい機構を採用せねばならない。このため本機においては全面的に静圧軸受による油圧支持方式を採用した。静圧軸受はすり合わせ加工した平面の間に作られた薄い油膜により支持する構造のもので、本機の場合、振動台自重25 tに対するしゅう動抵抗は、2 kgにすぎない。静圧軸受装置全体に対する油圧原動力は15 kWである。

### 3.3 加振機

振動台を加振する加振機は、動的出力30 t×2台(増設後)は4台で、サーボ弁は、加振機1台につき3台を並列使用している。加振機の仕様は、耐震実験に必要な出力、ストローク、加振振動数範囲より決定されるが、振動数範囲は模型実験における相似則により、

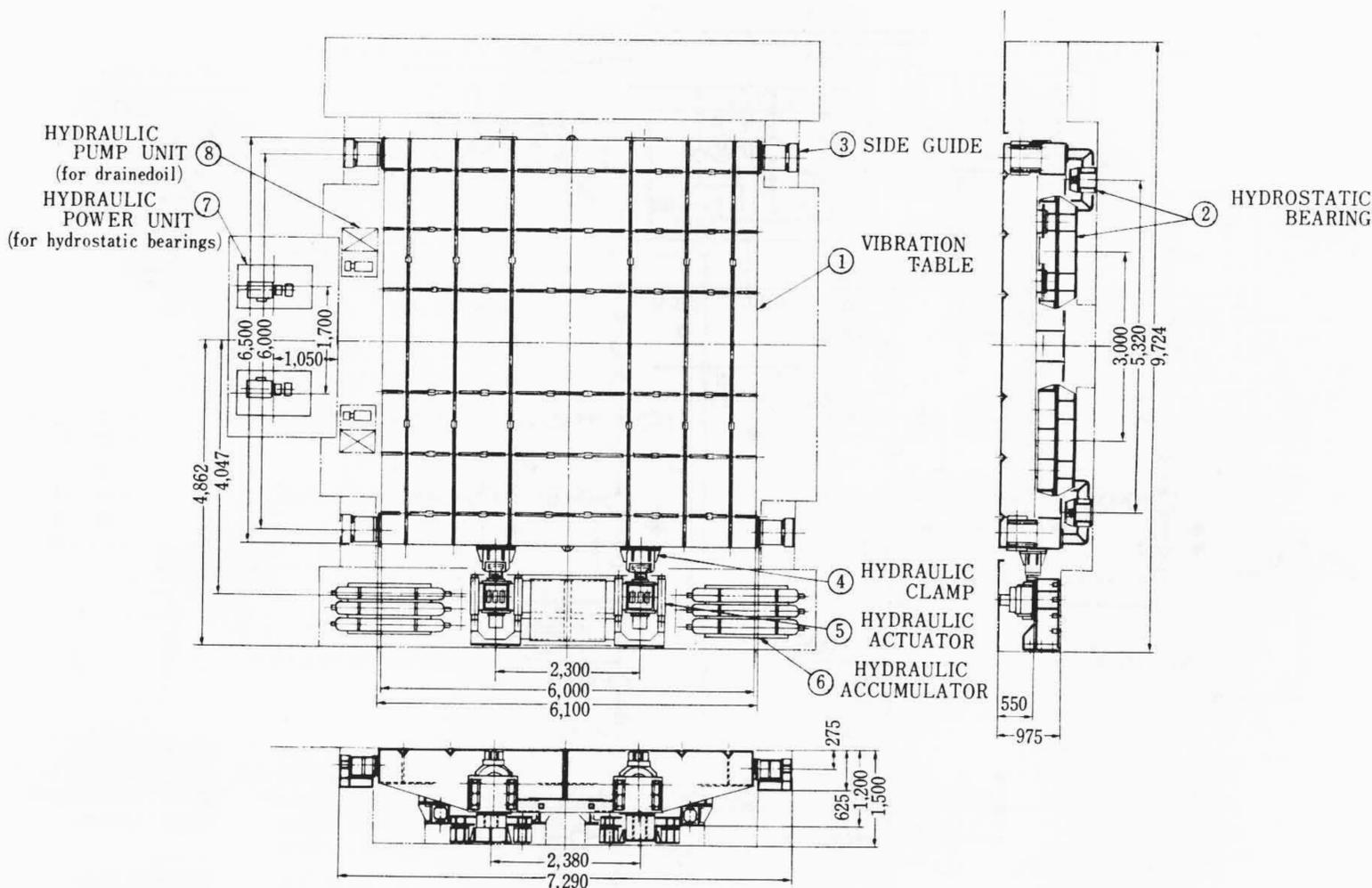


図4 振動台寸法図

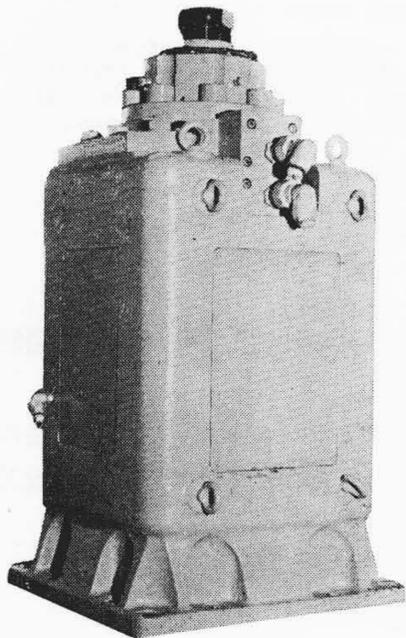


図5 副加振機

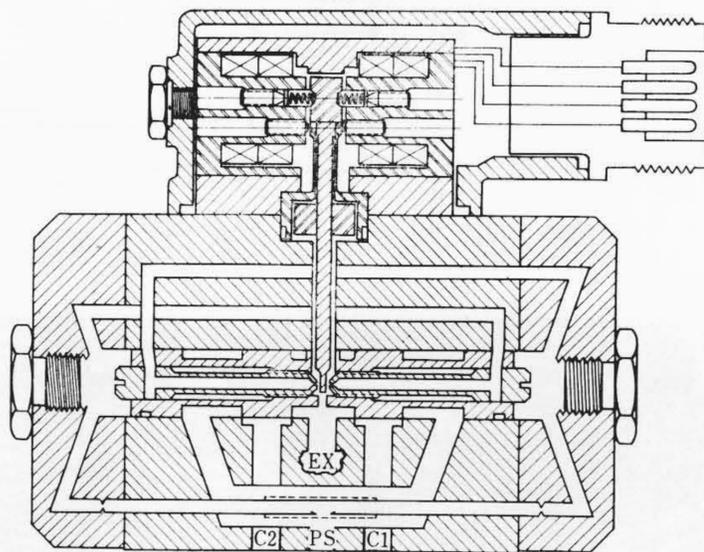


図6 サーボ弁 (ペガサス社)

実際の地震波より高い振動数範囲まで必要となる。さらに以上3条件より決まる。油圧源装置の容量より経済性を考慮して、本機の仕様が決定された。

加振機は、両端ロッド形の油圧シリンダで、高圧シール部は、フラインギャップ・シールレス構造である。

加振機と振動台との連結には、特殊な油圧式クランプ装置を採用し、静圧軸受による振動台の浮上量を吸収している。

サーボ弁(6台)の仕様は、次のとおりである。

形式	1160G (ペガサス)
供給圧力	210 kg/cm <sup>2</sup>
定格流量 (圧力降下 70 kg/cm <sup>2</sup> 時)	150 l/min

応答周波数 (位相遅れ 90°時) 40 Hz

サーボ弁の内部構造は図6に、サーボ弁の周波数特性は図7に示すとおりである。

### 3.4 油圧源装置

加振機に供給する高圧油の油圧源装置の仕様は次のとおりである。

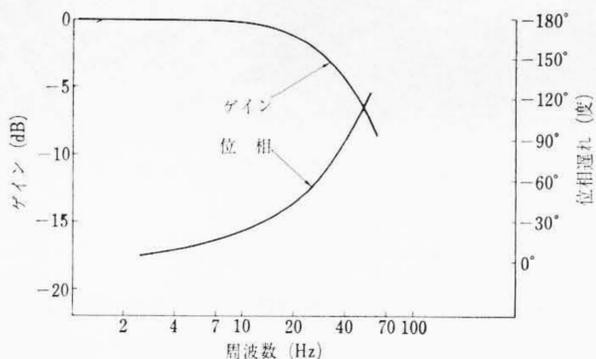


図7 サーボ弁の周波数特性 (ペガサス #1160G)

吐出圧力	210 kg/cm <sup>2</sup>
吐出流量	800 l/min
電動機容量	60 kW × 6台
オイルタンク	5,000 l

図8は油圧回路を示したものである。

油圧源装置の操作は、すべて操作室のデスクにおいて遠隔操作される。各機器の運転は自動化され、操作は起動・停止押しボタンと圧力設定のみで行なわれる。

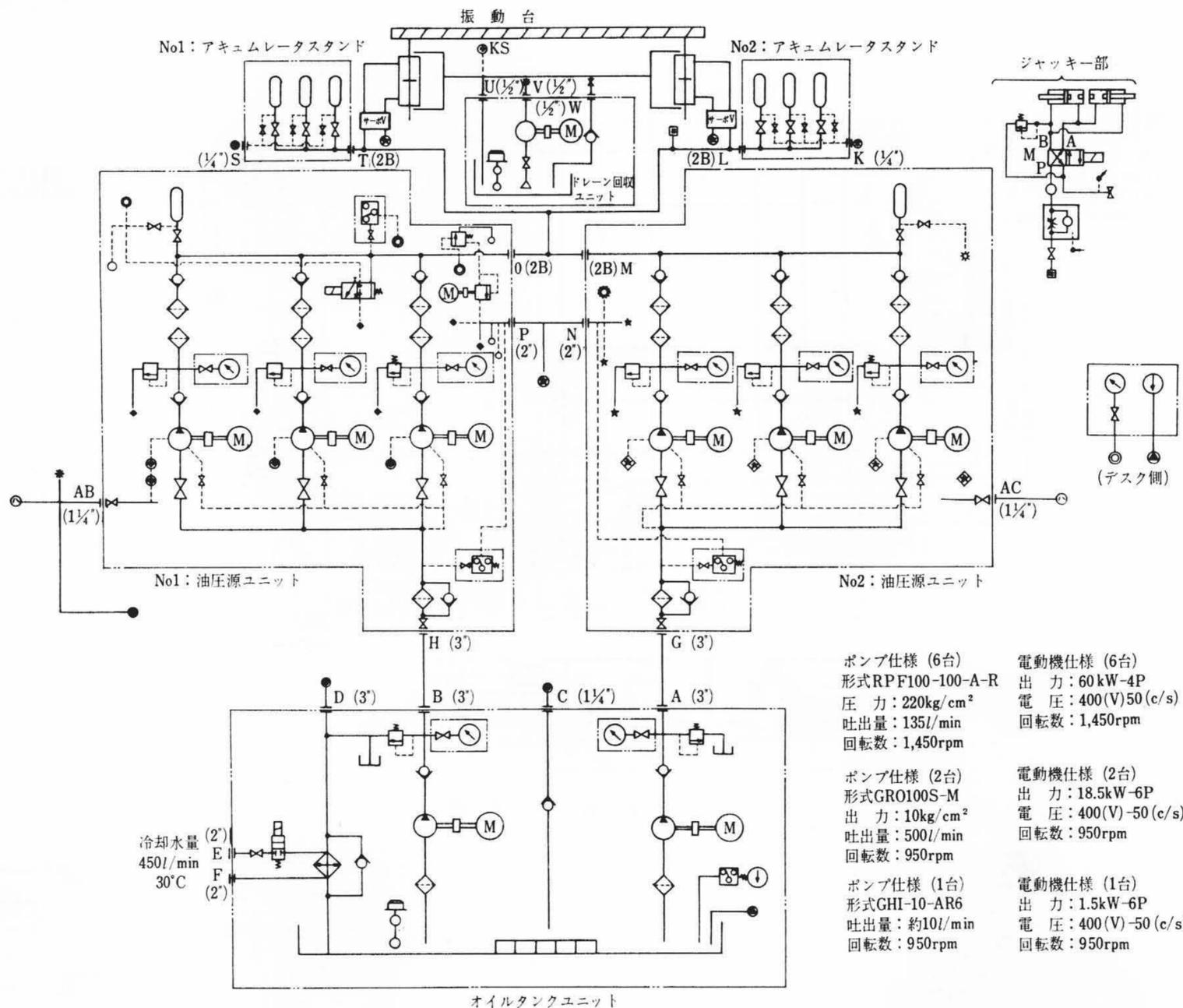


図8 油圧回路図

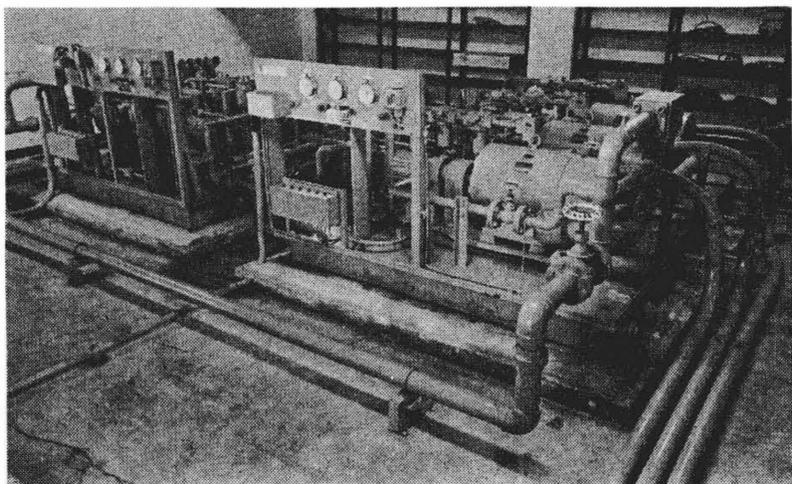


図9 油圧ポンプユニット

3.5 制御装置

サーボ制御系のブロック図は図10に示すとおりである。制御装置は図中の鎖線内の要素と、保安装置、電源装置より構成される。本装置の特徴は、

- (1) 入力信号としてアナログ計算機出力、データレコーダ制御装置出力、超低周波発振器出力の3種を切替え使用したこと。
- (2) 1台の加振機に使用する3台のサーボ弁の零点、ゲインをそれぞれ調整するため、弁ごとにブーストアンプを設けたこと。
- (3) 2台の加振機の並列運転の同期をとるための、同期修正回路を設けたこと。
- (4) 帰還信号には、変位、速度、加速度を使用し、それぞれの

帰還量としては負荷の特性、大小により最適値を設定する方法をとったこと。

- (5) 変位計には、差動トランスを用い、検出回路に平衡整流形を採用し、直線性ならびにドリフト特性の改善を図ったこと。

などである。

<帰還信号の最適値>

本制御装置においては、台の周波数特性をできるだけ高くし、かつ加速度波形のひずみを最小にするため、変位・速度・加速度の帰還量を調整しステップ応答が最適になるようにした。

応答性の評価は、入力と出力との差を積分した誤差面積、すなわち、

$$\int |r-y| dt$$

ここに、 $r$ : 目標値、 $y$ : 変位  
が、最小になる点を最適とした。最適値は、負荷の特性、大小により変わるのだからじめアナログ計算機による系のシミュレーションを行ない、各負荷条件に対する最適値を求め実機に適用した。負荷が一定の場合、それぞれの帰還量を変えて得られる周波数特性、ステップ応答の変化を定性的に述べると次のようになる。(1) 変位帰還を小さくすると、時定数が大きくなり立上りは悪くなるが、安定性は向上する。(2) 速度帰還量を小さくすると行き過ぎを生じ、大きくすると応答性が悪くなる。(3) 加速度帰還量を小さくすると、比較的周波数の高い振動が現われ、ある値以下に小さくすると、自励振動を生ずる。一方大きくすると、行き過ぎを生ずる。最適帰還量は、負荷重量の増加とともに増加する。一例として速度

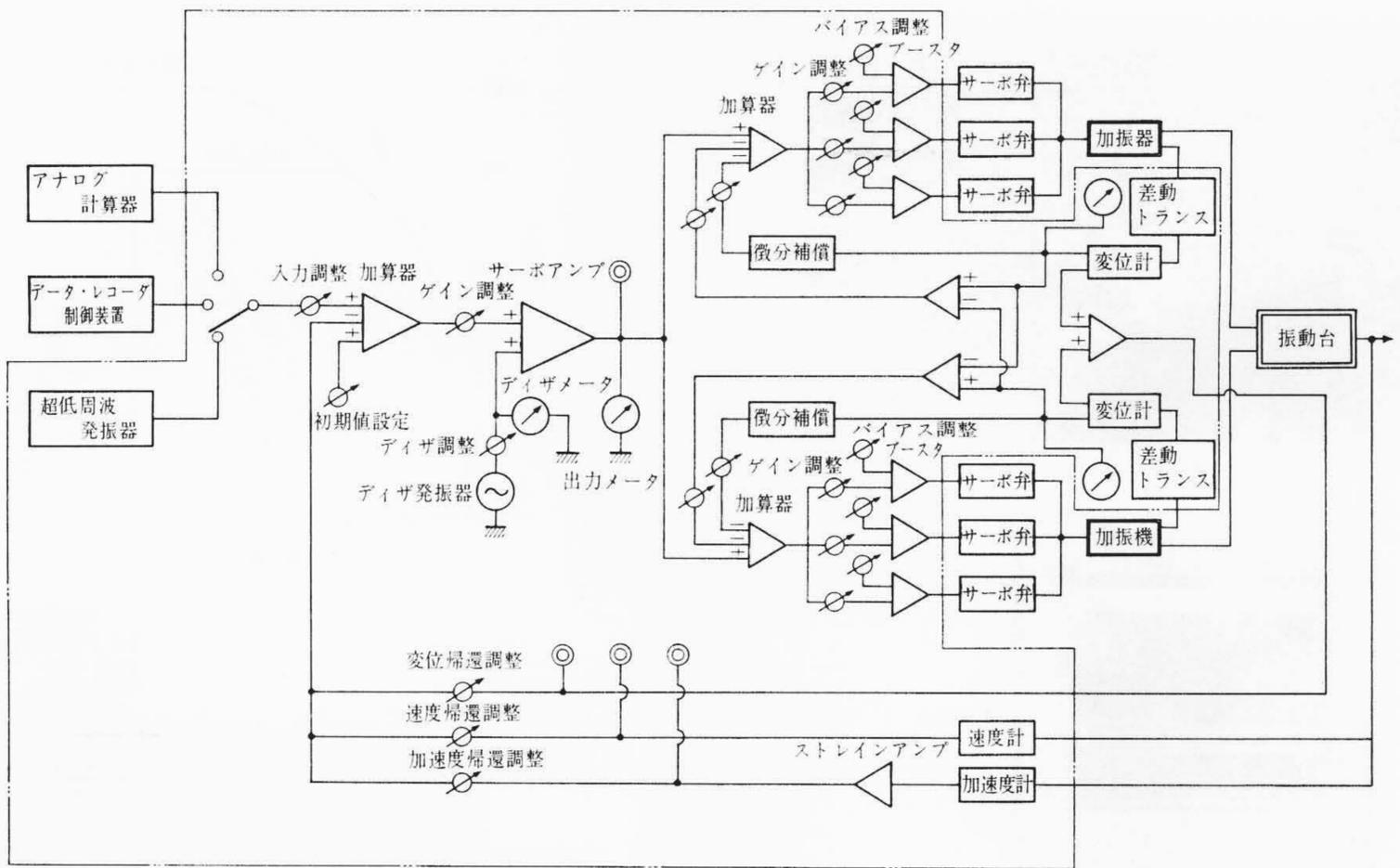


図10 ブロック図

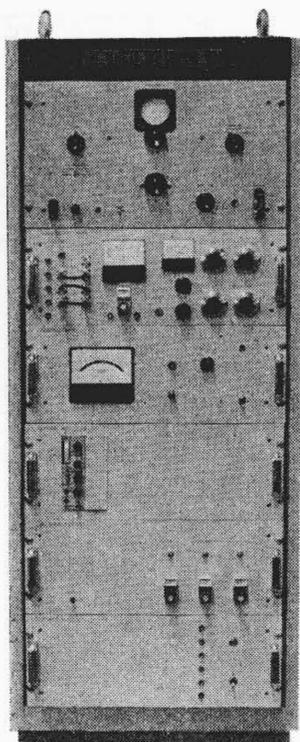


図11 制御装置

帰還量を変えた場合の周波数特性の変化を図12に示した。図は実験値とアナログ計算機によるシミュレーションを行なった結果とを示したものである。

#### 4. 振動台による試験方法

振動台を使用した耐震性に関する試験および研究の分野は、多岐にわたっている。大別すると、(1) 建築物(原子力発電所建家, ダム), 配管系, 構造物(鉄塔, 煙突, 貯油タンクなど)の耐震試験, (2) 軽弱地盤, 基礎構造物(くい, ケーソンなど), 山腹斜面, 擁(よう)壁の耐震試験, (3) 電力機器(しゃ断器, 変圧器など)の耐震試験となる。(1), (3)の場合には, 振動台上へ模型または, 実物を取り付ける。取付は振動台上面に設けたみぞによりボルト締めする。(2)の場合には, 砂箱を台上にボルト締めする。

試験に使用する振動波形は, 正弦波, 合成波, 地震波のほかに, 相似律に従って振幅, 時間軸を変えた変換波, 多層系基礎地盤の地震動伝播シミュレーションによる出力波など, ハイブリッド計算システム, データレコーダ制御装置, 超低周波発振器を多角的に応用

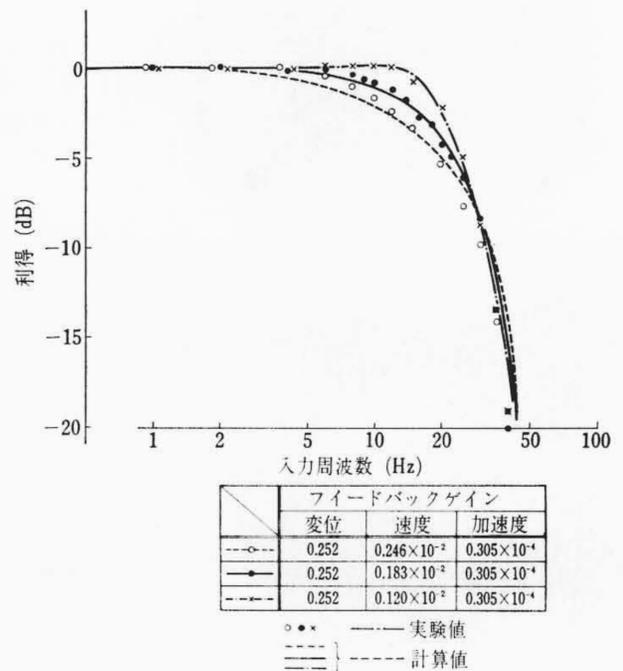


図12 速度フィードバックゲインを変えたときの周波数特性

し種々の波形を使用することができる。

振動台加振による, 試験結果はハイブリッド計算システムによりオンラインまたはオフラインで, ただちにデータ処理される。

データレコーダ制御装置(図14)は, データレコーダに記録された地震波形を任意の加速度レベルに設定し, 振動台を加振させるための装置で, 記録波形は最大振幅で正規化され記録されている。加速度の設定は, 正規化されたデータの基準加速度と設定加速度とで, デジタルスイッチにより行なう。またデータレコーダ制御装置は, データと同時に記録された制御信号により, 起動, 停止および記録計などの周辺機器の起動, 停止を自動的に行なう。

多層系基礎地盤の振動伝播シミュレーションは, ハイブリッド計算システムの多質点系シミュレーションの応用で, 図15は3層の場合の計算例を示したものである。

#### 5. 性能

試験結果に基づいて, 振動台の性能について述べる。試験は振動台上に試験用荷重を取り付けて行なわれた。振動台の自重が25tで

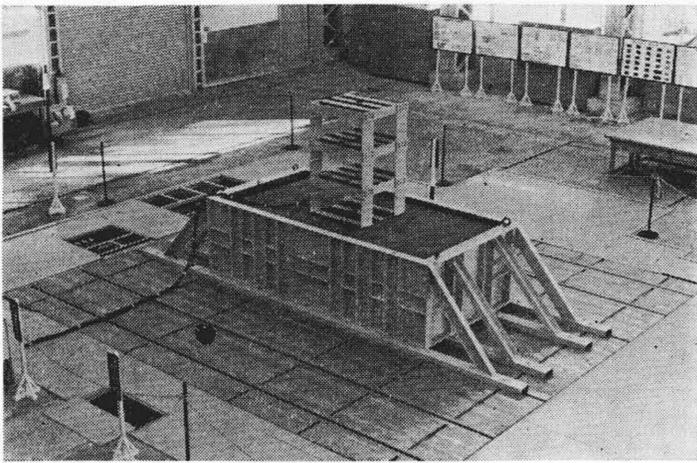


図13 砂箱をとりつけた状態

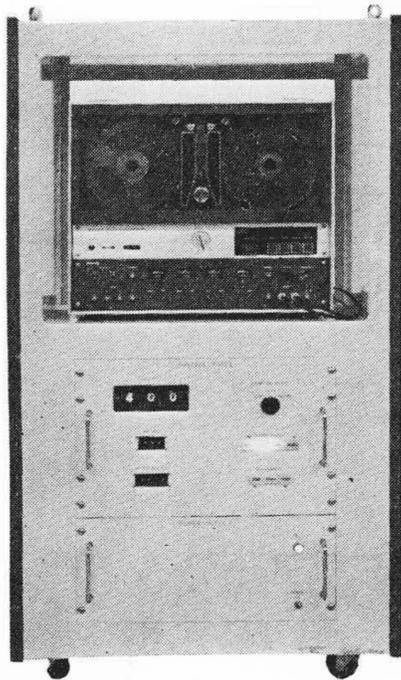
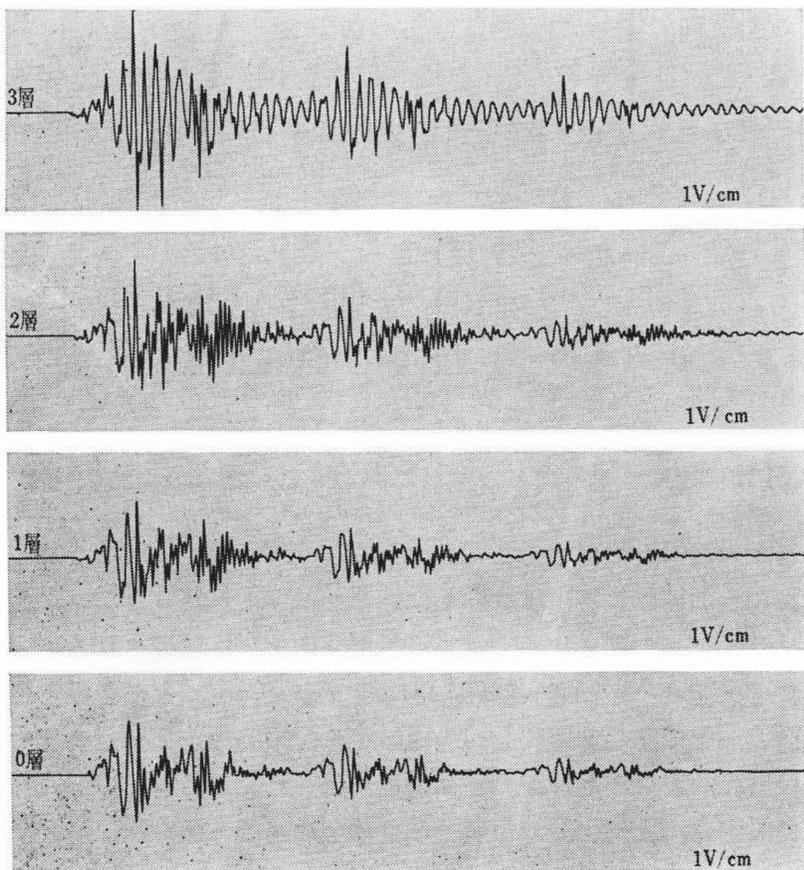


図14 データレコーダ制御装置



(0層にはいった加速度波より計算した層の加速度)

図15 多層系基礎地盤の模擬

あるから、荷重0t, 15t, 30t, 60tにおいて、慣性負荷は、25t, 40t, 55t, 85tとなる。

図16は本機の加振限界特性を示したものである。加振限界は、加振機のストロークによる限界(図中a-b)、油圧源吐出流量による速度の限界(b-c)、加振機の出力と負荷による限界(c-d, e-f)の3種の限界線で決まる。

図17は慣性負荷40tのときのステップ応答と、三角波加振の結果

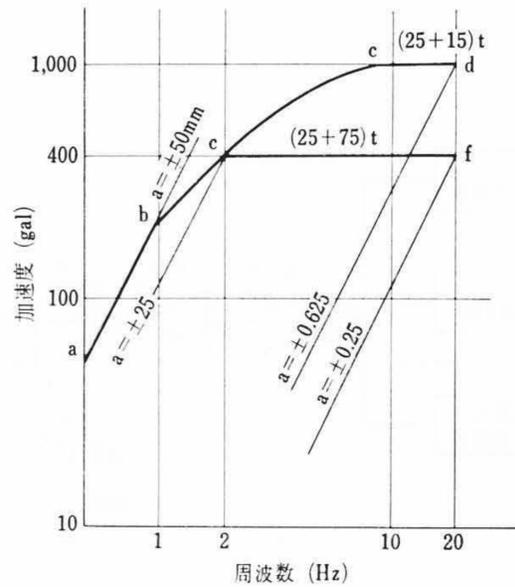


図16 加振限界特性

(慣性負荷40t)  
油圧 205kg/cm<sup>2</sup> S.Amp  
DISP 0.155  
VELO 0.010 10db  
ACC 0.020

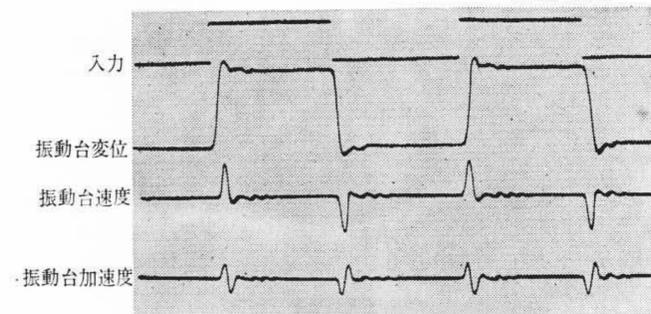


図17(1) ステップ応答(1Hz) (慣性負荷40t)

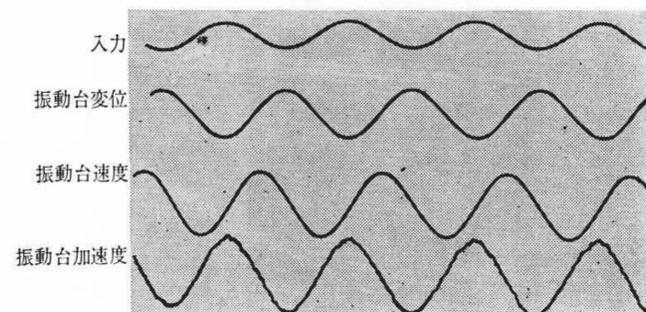


図17(2) 三角波加振(1Hz) (慣性負荷40tのとき)

果とを示したもので、入力信号には、超低周波発振器の出力を使用した。

図18は慣性負荷40tの場合の正弦波加振の結果を示したもので、入力信号には超低周波発振器の出力を使用した。

図19は周波数特性を示したもので、帰還量は負荷によりその最適値を調整することができるが、実用上の不便を伴うのでアナログ計算機によるシミュレーションの全負荷に対して一定に設定してある。

試験負荷の全範囲において最適値に最も近い一定値に設定して行なわれた。

図20は本装置による地震波の再現例を示す。(1)はエルセントロ地震波形(1940, NS)。(2)はタフト地震波形(1952, EW)について行なったものである。サーボ系への入力信号には、ハイブリッド計算機による原加速度波形の2回積分を行なって作成した変位信号を使用した。(1),(2)とも上段より振動台加速度波形(台上の加速度検出器で測定)、第2段が加速度の原波形、第3段、第4段が積分波形で、それぞれ速度波形、変位波形に相当する。

### 6. 納入実績

振動台の納入実績を示すと表1のようになる。加振機には、すべて電気油圧式を使用している。負荷と加振機との連結は、バネを介して連結する方式と直結方式とがある。前者の利点はバネ質量系の

表1 納入実績

納入先	東京大学生産技術研究所	東京大学工学部	標準形 HST-03-50-D	電力中央研究所	鉄道技術研究所	東京大学工学部
加振方式	電気油圧サーボ方式	電気油圧サーボ方式	電気油圧サーボ方式	電気油圧サーボ方式	電気油圧サーボ方式	電気油圧サーボ方式
連結方式	共振バネ式	共振バネ式	油圧直結式	油圧直結式	油圧直結式	油圧直結式
寸法	砂箱 長10×幅2×高4 (m)	台幅36×長1.5 ×高0.65 (m)	台長1.5×幅1.5 ×高0.48 (m)	台長6.5×幅6 ×高1.05 (m)	砂箱 長10×幅2×高3.2(m)	台長2×幅1.5×高1.07(m)
慣性負荷	170 t	40 t	6.6 t	145 t	100 t	7 t
振幅	±100 mm	±100 mm	±50 mm	±50 mm	±30 mm	±75 mm
加振周波数	0.1~10 Hz	0.1~10 Hz	D.C.~20 Hz	D.C.~20 Hz	D.C.~20 Hz	D.C.~30 Hz
加振機出力	±20 t×1台	±5 t×3台	±3 t×1台	±30 t×2台	±40 t×1台	±4.7 t
支持方式	油圧支持	油圧支持	油圧支持	油圧支持	油圧支持	油圧支持
案内方式	ボールベアリング	ボールベアリング	油圧支持	油圧支持	ボールベアリング	油圧支持
油圧源	吐出圧力	210 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>	210 kg/cm <sup>2</sup>
	吐出流量	332 l/min	126 l/min	42 l/min	800 l/min	220 l/min
	電動機容量	75 kW×2台	22 kW×3台	22 kW	60 kW×6台	100 kW×1台
形状概図略						

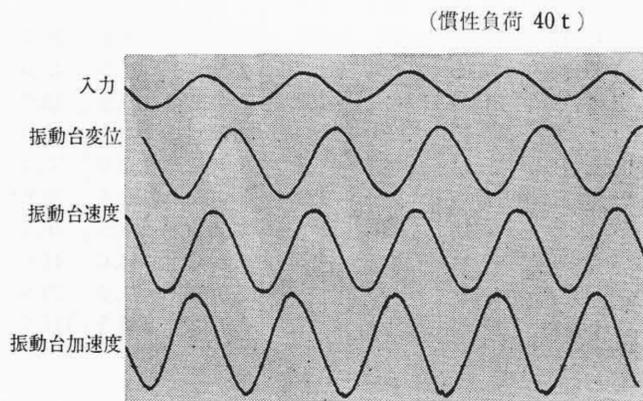


図18(1) 正弦波加振 (10 Hz)

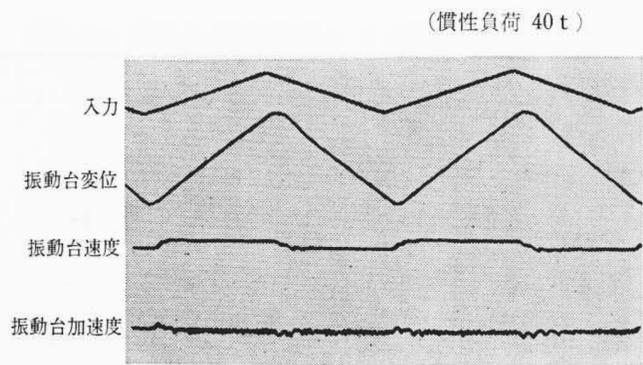


図18(2) 正弦波加振 (20 Hz)

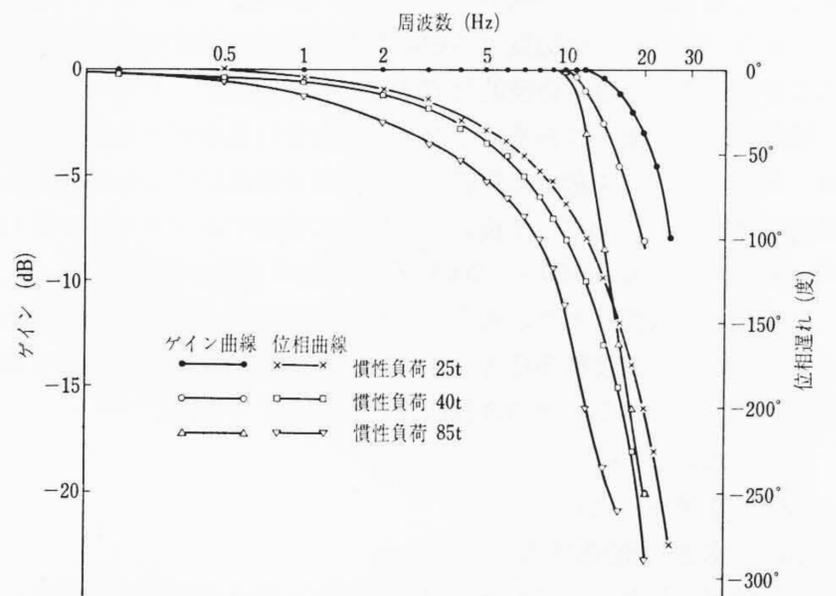


図19 振動台周波数特性

共振を利用することにより、大負荷、大振幅の加振が容易な点にある。一方、この方式では正弦波加振しか行なえない不利がある。直結方式は正弦波のみならず、ランダム波まで可能であるが、油圧源装置などの設備が大規模になる。

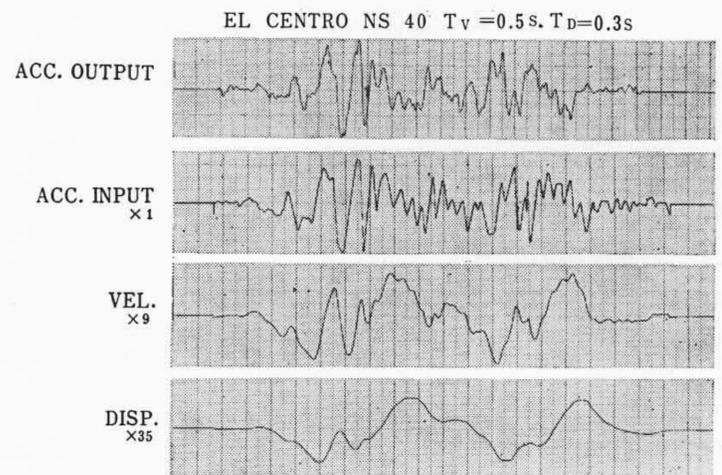
### 7. 結 言

大形構造物、原子力プラントなどの耐震性に関する研究は、地震国日本において、きわめて重要な課題であることは言うまでもないが、日立油圧式振動台がこれらの研究、試験の発展のために寄与できれば幸甚である。

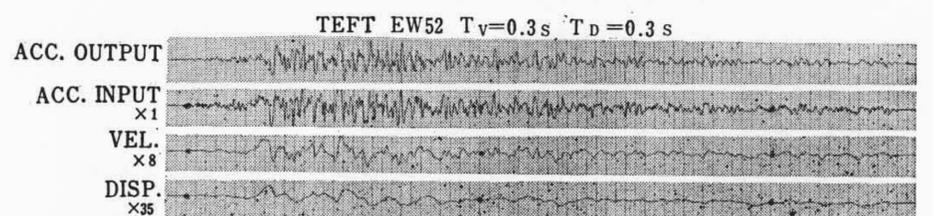
本機の製作にあたり、終始有益なるご指導を賜った電力中央研究所の関係各位に厚くお礼申し上げます。

### 参 考 文 献

電力中央研究所技術研究所「地震加速度波形の積分」技術研究所研究報告 No.68077 (1969年6月)



(1) エルセントロ 1940, NS



(2) タフト 1952, EW

図20 振動台による地震波の再現