

二次元振動装置製作に関する報告 (第1報)  
—二次元接手試験装置の試作—

小川信行\*

国立防災科学技術センター大型実験研究部

Report on Construction of a Two-Dimensional  
Earthquake Simulator (First Report)  
— Trial Making of the Two-Dimensional  
Shaking Machine by Universal Coupling —

By

Nobuyuki Ogawa

*Earthquake Engineering Laboratory  
Research Division of Large Experiment (Ibaragi-ken)  
National Research Center for Disaster Prevention*

Abstract

The National Research Center for Disaster Prevention has been studying the feasibility of establishment of a large-scale two-dimensional earthquake simulator. Many technical problems concerning its mechanical and software systems have been found in this study. One of them is how to improve the accuracy of the mechanical coupling system between a shaking table and horizontal or vertical actuators. A small pilot model of a shaking machine has been made to solve the problem as the first stage.

In this report the author describes the availability of a two-dimensional earthquake simulator and technical subjects for its construction, and the outline of the hardware made for this purpose.

1. はじめに

当センターでは大型二次元振動台の建設を計画・推進しているが、今回そのミニチュア版ともいうべき二次元接手試験装置を試作したのでその概要について報告する。

二次元振動台は構造物を搭載して水平および上下方向の同時加振により、構造物の振動性状、振動による破壊性状などを調べる実験装置であり、2方向の同時加振を機械的に実現することは比較的容易であるが、耐震工学からの要求にこたえるためには種々の問題点がある。ハードウェアとしての問題点は、第一に地震波のようにランダムな波形を正確に再現しうる精度であり、第二に供試体を破壊までもっていけるパワーであるといえよう。

\*耐震実験室

このような要求を実現するためには振動台の製作者側における十分な技術的蓄積が必要であるが、他方、実験する側の立場においてもハードウェア、ソフトウェア両面にわたる深い経験と知識が必要となる。この点については従来、耐震実験室および二次元振動実験施設調査委員会において各種の検討が行なわれてきたが、今回その一環として二次元接手試験装置を試作したものである。製作にあたっては、接手を主とする装置の性能および利用技術に関する実機試験を行なうとともに構造物の二次元振動に関する予備的研究に役立てることを念頭においた。

本報告は二次元振動実験の意義および二次元接手試験装置の概要について記したものである。

## 2. 二次元振動実験の意義

地震による振動は、水平・上下の並進および回転を考えると一般に6個の成分をもつ複雑な運動である。このうち回転運動については実測例にも乏しく、あまり大きな値になるとは考えられないのでこれを除いてよいと思われるが、従来、構造物の耐震設計においてはもっぱら水平動のみが対象とされ、また多くの場合、振動台のように剛な地盤が均一に動くものとして扱われてきた。後者の点については最近、地盤との相互作用を考えた連成系についての動的解析が盛んに行なわれるようになり耐震設計にとり入れられるようになってきている。上下動が従来ほとんど考慮されなかったのは、一つにはそれを考慮した場合の解析の困難さという制限があったことにもよるが、他方、実際面では上下動の影響は無視できる、あるいは設計における安全率という考えでカバーできるものとされてきた。構造物の耐震設計に対する考え方が、静的震度法から動的応答解析へ、剛な地盤から地盤との相互作用へと発展してきた背景にはコンピュータなどの解析手段の発展もさることながら、それまでの考え方が実地震によってテストされた結果、必ずしも地震時にみられる現象、被害状況を十分に説明できないという認識があったものと思われる。上下動に関しては、現在のところ、そのような認識が一般的になされているわけではないが、上のような耐震設計に対する考え方の進歩を考えると水平動のみから水平2方向および上下動を含む三次元地震動へという発展もむしろ当然のことと考えられる。

上下動が無視できない問題としてとり上げられるようになり、その影響について各方面で議論されるようになってきたのはごく最近のことであるが、

- ① その一つの契機と考えられるのは、マナグア地震、伊豆半島沖地震、大分県中部地震など国内外で相次いで起こった地震による被害および、歴史時代に東京付近に発生した狭い範囲の強い地震に関する再調査などと関連して都市域直下に起こる地震の危険性が指摘されたことであり、

② またその背景には、近年の都市構造物がますます複雑、過密、大規模になり、二次元的、三次元的に柔な構造物が都市における重要な役割を受けもつようになってきたことがある。また、構造物の耐震設計法の進歩により、水平動に対しては動的応答解析の結果などを取り入れてかなり精度の高い設計が行なわれるようになってきているが、このことは逆にいえば設計における安全率を引き下げることになり、仮定した入力に対しては安全であるが、それ以外の入力条件に対する設計余裕が非常に小さい構造物をつくることにつながるという認識があったものと思われる。

③ さらに近年の強震観測事業の推進等により上下動の観測記録も増え、その規模、特徴などが解析されうようになってきたことも上下動がとりあげられるようになってきた一つの要因であろう。

これまでの被害地震で観測された例を表1に示してあるが、上下

動の大きさは水平動に比べ無視できない程度であり、場合によっては水平動と同程度の上下動を伴うものであることがうかがえる。これらの事情により現在では耐震設計用入力波として上下動を含めた三次元地震動を考慮すべき時期にきているといえる。問題は構造物の側にあるが、たとえば、パイプライン、地下埋設管、スパンの長い建築構造、高架橋梁など比較的上下動の影響を受けやすい構造物、あるいは水平動に対する耐震設計が行

表1 主な被害地震の振幅極値記録

地震	水平(X)	水平(Y)	上下
1940年 Imperial Valley 地震 (EL Centro)	加速度 342 gal 速度 33cm/s 変位 11 cm	210 gal -37 cm/s -20 cm	-206 gal -11 cm/s -5.6 cm
1952年 Kern County 地震 (TAPT)	153 gal -15.7 cm/s -6.7 cm	176 gal -18 cm/s -9 cm	103 gal 6.7 cm/s -5 cm
1964年 新潟地震 (川岸町)	159 gal	155 gal	50 gal
1968年 十勝沖地震 (八戸)	225 gal	183 gal	114 gal
1972年 マナグア地震 (Esso製油所)	340 gal	390 gal	330 gal

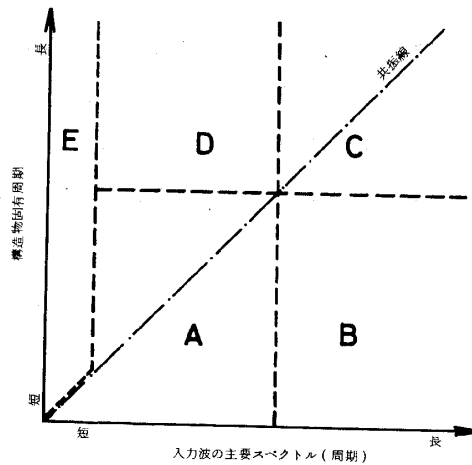


図1 周期特性からみた地震動効果の分類

表2 各タイプ(図1)の地震動の特徴と例

タイプ	特徴	例
A	加速度中心の動的三次元応答	プラント配管等三次元柔構造の振動、小物体の転倒・滑動、砂の液状化、盛土・斜面の安定性
B	水平、上下の静的荷重による安定性	地盤との結合の弱い剛構造・重量物の転倒・滑動
C	変位中心の動的三次元応答	長大規模の三次元柔構造(地下埋設管、長スパン橋梁、軌道等)、原油タンクのスロッシング、斜面の安定性
D	—	—
E	加速度衝撃に対する安定性	土造・石造等ねばりの少ない構造物など

なわれていてもその設計余裕が十分でない構造物などの場合は、いわゆる直下地震などに際して予想外の被害を受けることも考えられる。

また、地震に伴って起こる盛土や斜面の崩壊に上下動がどの程度影響するかという点も重要な問題である。

このような各種の構造物と上下動を含む三次元地震動との関連は個々の場合によりかなり異なったものとなろうが、非常に大ざっぱに周期スペクトルだけからみて分類すると図1および表2のようになる。たとえば、上下動が衝撃として作用すると脆い構造物はそれだけで各部に損傷を受ける可能性があり、また上下動が重量を軽減するように作用すると設備ユニットの転倒、石油タンクなど重量物の滑動を助長することが考えられ、さらに配管系などのように水平動と同質の振動的外力として作用した場合は合成された振動応力が問題になる等等。一般に構造物は上下方向には比較的剛であって、上下動による振動自体は水平動に比べ小さいとされているが、単なる振動の合成だけでは割り切れない面もあり、この点が三次元的な地震応答を考えるときの問題点となろう。

三次元地震応答のうちでも水平2方向のカップリングについては従来の手法、知識を適用できる部分も多く、数値的なシミュレーションも比較的容易と思われるが、水平一上下のカップリングについては前述のように未知の点が多く実験的にはより重要と思われる。上下動の影響についても一般的には三次元地震動という形で考慮すべきと思われるが、取扱いの困難さを考えれば水平1方向一上下の二次元地震動を考えるのが第一段階であろう。

二次元振動実験では、このような構造物の振動および破壊におよぼす水平・上下動同時入力の影響を明らかにし、その結果を各種の耐震対策に役立てることが重要な目的となる。このような研究を進めていくにあたっては、

- ① 本来の入力としての三次元地震動の特性をあらかじめ知っておくこと、
  - ② 三次元地震動を二次元地震動でおきかえる手法とその場合の構造物の耐震性評価における近似性および、これまでの水平一次元振動による諸検討に対する優位性を調べること、
  - ③ これらの結果を耐震設計に反映させるための計画論の裏づけを明らかにしておくこと、
- の3点が問題となる。

二次元振動台の役割は主に②と関連したものであるが、さらに具体的には二つの目的をもっている。一つは構造物のモデル化と関連したものである。すなわち精度の良い正弦波加振により構造物の振動特性を正確に把握し、モデルの開発あるいはその妥当性を確認するために使われる。一般的な建築構造物の場合は一部非線形領域も含めてすでにコンピュータによるシミュレーションが優位に立っており、振動台による実験の意義は比較的小さいとされているが、土質あるいは水の関係する構造物などではモデル化の困難なものも多く、実用的なモデルの開発が今後とも基本的な役割をはたすものと思われる。この場合に使われる振動台

表3 二次元振動台に関する問題

項目	問題点
加振力伝達	リンク接手，静圧接手等があるが，いずれも機械的ガタ式或いは水平—垂直間クlostックに対する対策を必要とする。さらに複数加振機の同期制御を必要とする。
ガイド機構	台のヨーイング，ローリングに対する側面ガイドとしては静圧軸受が一般的であるが，支持剛性及びガイド配置についての検討を要する。
自重支持	垂直加振機自体による場合，バランスシリンダ等の支持機構を使う場合があり，いずれも供試体の自重及び転倒モーメントによる台のピッチングに対する制御を必要とする。
周波数特性	供試体搭載による応答特性の変化を検出し，制御の質を最適に調整できることが望ましい。
波形精度	機械的ガタ，油圧系に起因する加速度波形の歪及び加振方向以外の雑振動の除去を十分に行ない実験の精度を高めることが必要である。
計測	計測すべき情報の増加に応じたピックアップの小型化，精度の向上が必要。さらに台及び供試体の二次元変位の検出などには特別の考慮が必要である。
入力波	正弦波による共振試験は特別の場合を除き極めて能率の悪いものとなる。振動特性把握のための二次元ランダム波，破壊及び地震応答試験のための擬似正弦波，地震波の開発が必要となる。
データ処理	入力波及び振動台に関する各種情報をオンラインで制御系に提供すると共に，供試体の応答特性をオフラインで解析できるコンピュータシステムの開発が必要。さらに二次元的な情報の処理，表現法などについての検討を要する。

は精度と波形の良さが大切な要素となる。第二の目的は，このようにして特性のわかった構造物が激震時にどのような挙動を示すかという点である。破壊がどのようなステップを経ていつどこで発生し，終局状態はどうかという点は重要構造物の耐震設計および各種の地震対策にとって最も重要な点の一つであろう。振動台による破壊実験は実地震に比べ限定されたものにならざるを得ないが，振動による動的破壊の特徴を調べることができ，静的な実験結果などと組み合わせて一定の役割をはたすことができよう。特に破壊の終局段階については理論的な手法もなく，実験によるか，過去の被害例などから推測するしかない現状と思われる。この場合の振動台には終局破壊までもっていけるパワーとある程度の実物が載せられるスケールが必要である。

以上のような役割を目的として，これまでもかなり多くの振動台が作られ，また計画されているが，いずれも入力地震動という点からみても，搭載する構造物からみても，できるだけ実際の状況に近づけようということが一つの目標になっている。当センターの計画する二次元振動台も，入力地震動を一步現実に近づけるための一つの試みといえるが，上にあげたような使い方の違いがあるだけでなく，二次元の場合は，機構的にも，またデータ処理などソフトウェアの面でも解決しなければならない問題が多い。表3にそのような問題点のいくつかを整理して示した。

### 3. 二次元接手試験装置の概要

前節で述べたような二次元振動実験の意義と問題点についてより幅広く検討することを目的として二次元振動実験施設調査委員会が設置され、実験する立場から必要な性能仕様についての討議が行われてきたことは冒頭に記した通りである。委員会での討議において、特に二次元振動台のハードウェアに関する各種の方式のうち、いわゆる二軸接手が重要なポイントになることが明らかにされたが、二軸接手の実施例はまだ非常に少なく、その方式・性能については一般的な調査だけでなく実機あるいは模型による試作試験が特に必要と思われた。このため、当センターにおいて二軸接手の試作が二次元振動台建設計画の一つのステップとしてとりあげられ、昭和50年度予算により製作することになったものである。二軸接手による二次元化の方式のうち代表的なものとしては図2のようなものがあり、それぞれ一長一短あるといえるが、今回の試作では機構的に簡単で実現しやすいものとしてリンク接手方式を採用した。試作にあたっては、実大の接手そのものの試作では接手による動的な問題点を明らかにできないので、小型ながら実際に供試体を載せて水平・上下の二次元加振が行なえるものを考え次のような基本仕様を定めた。

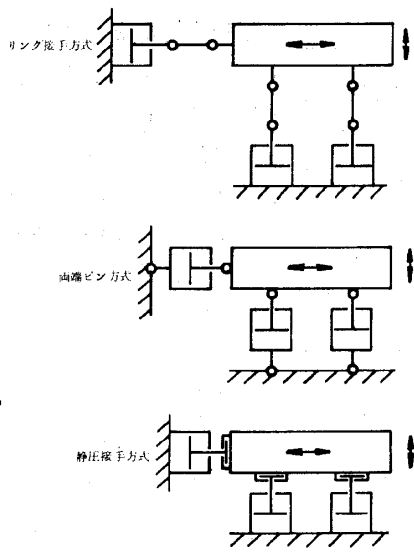


図2 二次元化の方式

振動台大きさ	1 m × 1 m
最大搭載重量	1 ton
最大変位	水平、鉛直共± 5 cm
最大速度	水平 6.2 cm/s, 鉛直 1.4 cm/s
最大加速度	水平、鉛直共± 1 G
静的最大グロストーク	全ストロークの 5% 以内

さらに二軸接手などの機構および駆動方式については以下の方針に基づいて製作した。

- (1) 駆動方式は電気-油圧サーボ方式による。
- (2) 加振機から振動台への加振力伝達はリンク接手および球面軸受を介して行なう。
- (3) 振動台および供試体の自重は鉛直加振機により支持する。
- (4) 水平面内のヨーイングおよび鉛直面内のローリング防止のための側面ガイドにもリンク接手を用いる。

(5) 鉛直面内ピッチング(転倒モーメント)

の防止は2台の鉛直加振機による。

装置の主要構成機器は表4, 全体レイアウトは図3の通りである。振動台は箱型の鋼板溶接構造で上面には供試体がボルトで取付けられるようになっている。加振機は復動型油圧シリンダにサーボ弁およびIDS型変位計を装備したもので水平用は1台, 鉛直用は1

表4 主要機器構成

機器名	諸元	数量
振動台	1m×1m×40cm, 0.7ton	1台
水平加振機	出力2ton, 最大ストローク±60mm	1台
垂直加振機	出力4ton, 最大ストローク±60mm	2台
リンク接手	リンク長60cm, 揺動角±8°	3台
ガイドリンク	リンク長60cm, 揺動角±8°	3台
アキュムレータスタンド	供給, 戻り側各3ℓ	1台
油圧パワーユニット	210kg/cm <sup>2</sup> , 40ℓ/min	1台
制御装置		1台
支持フレーム	重量3ton	1台
基礎	重量50ton	1基

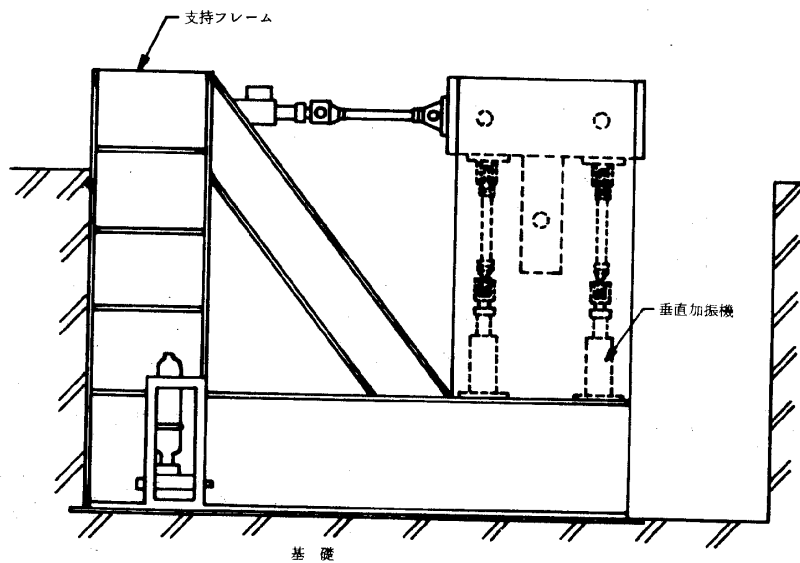
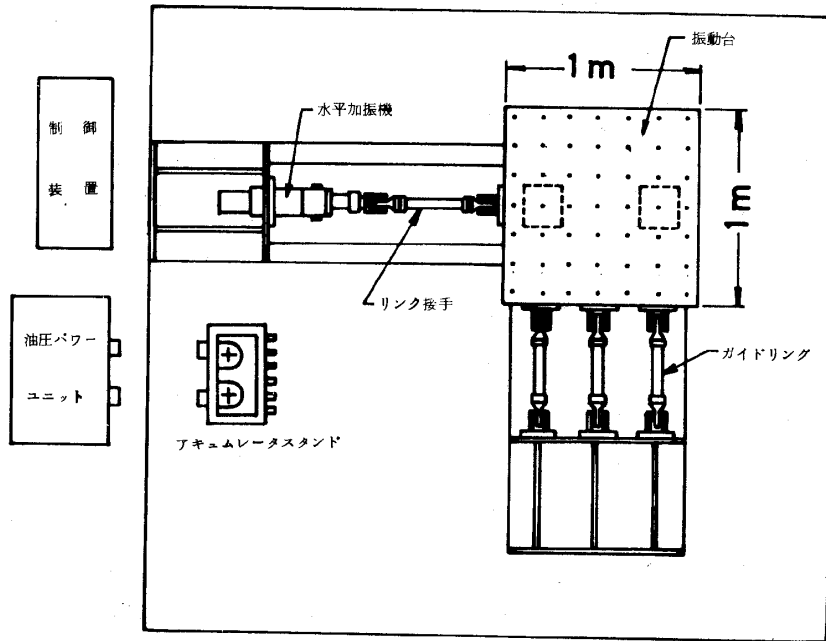


図3 二次元接手試験装置レイアウト

台でも可能であるが多点加振を行なわせる目的で2台とした。リンク接手はロッド部および両端の球面軸受から成るもので、加振機および振動台へはそれぞれ球面軸受を介して結合される。軸受の精度は機械的ガタに関連し、波形精度(特に加速度波形)に影響する主要因の一つである。リンク接手を採用した場合、クロストークの発生が一つの問題となる。すなわち水平加振機だけが動作している場合でも鉛直加振機の接手のために振動台には上下方向の変位を伴い、またその逆も生ずる。この量はリンクの長さを長くすることにより実用的には無視できる程度にしうる。また静的なクロストークについては電気回路で入力側に補正として加えることも可能である。

振動台の剛体としての運動は図4のように一般にX, Y, Z軸方向の並進とこれらの軸まわりの回転で6自由度になっているが、二次元振動台による地震シミュレーションで必要とするのはX(水平)およびZ(上下)方向の運動であり、他はすべて外乱運動として供試体に作用するものであって、精度のよい実験を行なうためにはこれらを防止することが必要となる。ここではY軸まわりの回転は

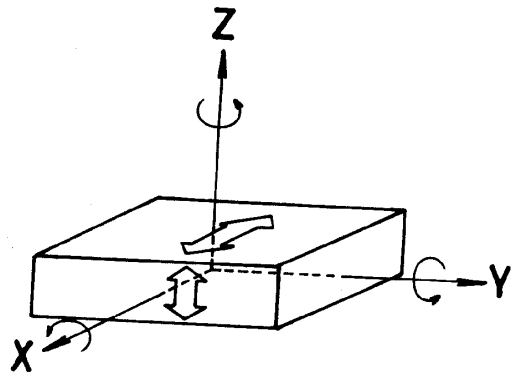


図4 台の運動成分

鉛直加振機2台のもつ剛性によって防止し、X軸、Z軸まわりの回転およびY軸方向の並進運動は側面ガイド機構により防止することとした。側面ガイドは大型振動台などの場合、静圧軸受方式が普通であるがここではリンクを側面の3点に配置し振動台の運動を拘束できるようにした。ボールガイドなどに比べ構造が簡単で寿命も長いのが特徴といえるが、欠点としては前のクロストークと同様にY軸方向の変位を発生する。この量は水平または上下加振

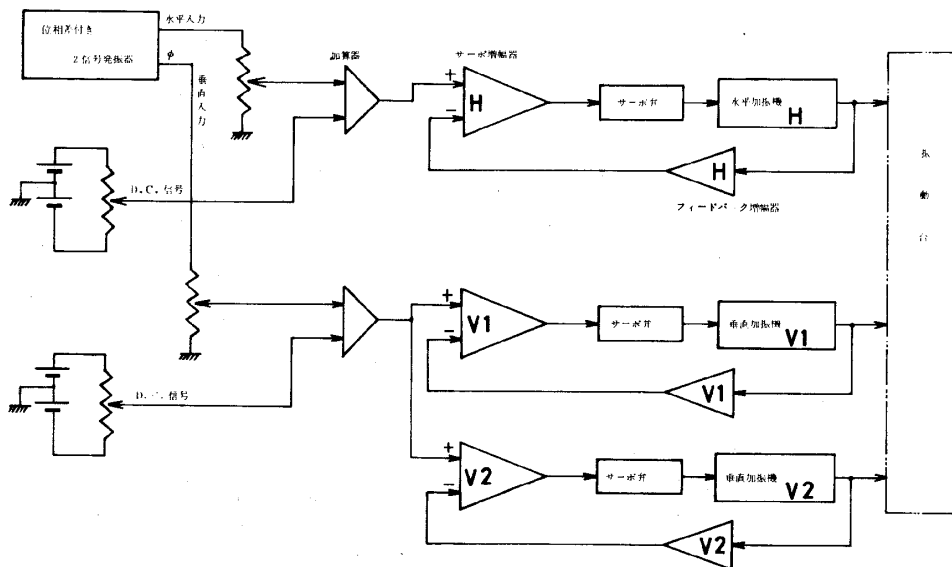


図5 制御装置構成



のフルストロークに対し2%程度であり通常は無視できる。加振機および側面ガイドの反力は一体構造の支持フレームで受け、このフレームは約50トンのコンクリート基礎にアンカーされている。

図5に制御装置の構成を示す。制御は変位により行っており、試作的なものであるため、既存の増幅器などにより最も簡単なサーボ系を構成した。サーボ増幅器には三菱測器製の6L5、フィードバック増幅器には新興通信製の動歪増幅器6001Fを使用している。二次元加振では制御装置のはたす役割は大きく、サーボ補償制御をはじめ、加振機の同期制御、クロストーク補償、さらに加速度制御などの機構が必要となり、これらはまた搭載する供試体に応じて最適に調整されることが望ましい。本装置のような小型のものはこのような制御方式を実機で試験する場合にも適当な模型となりうるものである。この他、油圧配管には高圧および低圧ラインに各1個のアクムレータが装備されており、内部の窒素ガスの圧縮性により加振時の脈動・衝撃を吸収するとともに加振ピーク時の流量補充が行なえるようになっている。

なお、本装置のうち、振動台、加振機などの機械装置本体は(株)三菱重工により製作されたものである。

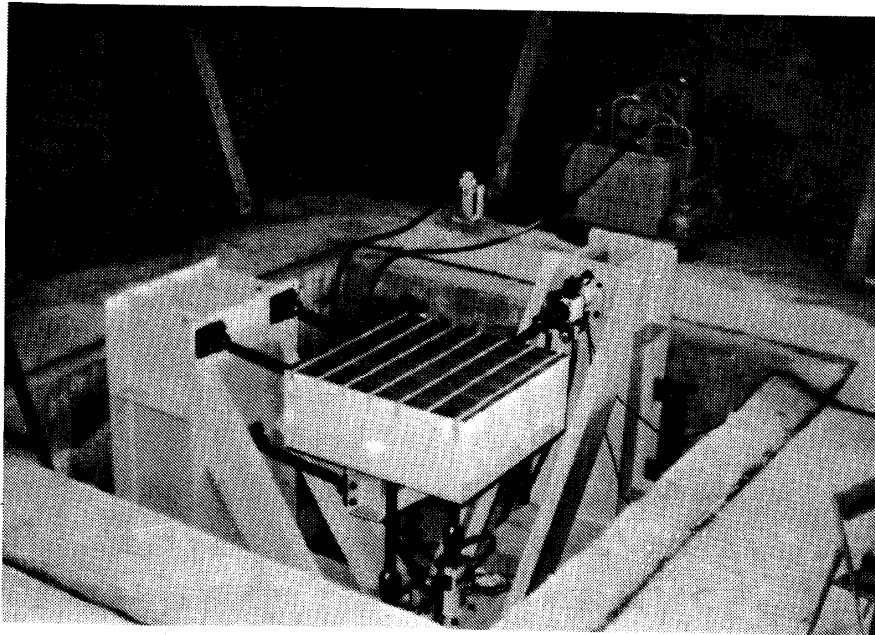


写真 2次元接手試験装置

#### 4. 二次元接手試験装置の性能

振動台の性能評価については従来主に周波数特性だけが取り上げられているが、実験上の要求が厳しくなり、また二次元加振ということになると振動台上の一点で測定した周波数特性だけではその性能の良否を評価できなくなる。たとえば、供試体が平面的な広がりをもつ

ている場合、台の各部で振幅なり位相なりに顕著な差異があれば実験結果はあまり信用できないものとなる。実験である以上、正確な均一加振が望ましい。また変位で測定された周波数特性からは加速度波形の良否は推定できず、正確な正弦波加振が行なわれているかどうかはわからない。これらの点を考慮すると二次元加振などの場合、供試体の振動性状から破壊に至る一連の実験を有効に行なうためには、振動台の即応性、波形精度、運動精度および限界性能という4点からみた性能評価が必要となってくる。これらは金物的には以下のような意味をもっている。

即応性は、いわゆる周波数特性と等価なもので加振機フィードバック制御の応答性を表わし、加振機シリンダ内の作動油剛性と負荷から成る振動系の共振点の一つの指標である。実験上は供試体に衝撃を加えるステップ状入力に対する立ち上がり特性や正弦波加振の場合の高振動数域での精度に関連してくる。

波形精度では正弦波加振時の振動台上における加速度波形の歪率が問題となる。これは地震波のようなランダム波の再現に特に必要である。供試体の振動特性が単純な狭帯域特性の場合は共振点付近で十分な選択共振が行なわれ、波形の歪、雑振動は一応無視できるが、供試体が広帯域あるいは非線形性をもった場合には振動台加速度波形の歪が実験結果に影響する。現在の耐震設計用入力波が主に加速度波形で観測され、また使われるという事情もあって、歪のない加速度波形の実現が望ましいが、大型振動台での成効例はなく今後の目標といえよう。波形歪の発生要因としては、電気-油圧サーボ弁の非線形特性および零点付近の不感帯、接手などにある機械的ガタ、配管および作動油を伝わってくる雑振動などが主なものとされており、これらが振動数によっては加振機-負荷振動系により増幅される場合がある。記録波形では低振動数域で特にショックノイズ、三次高調波などが目立つという現象が生じる。低振動数域で基本波に対する歪率が20%以下であれば実用的には十分といえよう。

振動台の運動精度は加振方向の運動が目標入力に精度よく一致するとともに、前節で述べたように加振方向以外の並進あるいは回転といった外乱運動を防止することによって得られる。これには加振機自体の特性がそろっていることの他にガイド機構による振動台の拘束、支持機構による安定化、および供試体の振動による転倒モーメントの防止が十分に行なわれることが重要である。制御についても各加振機単独のサーボ制御に加えて加振機相互の同期制御などが必要となる。最後の限界性能は各振動数で実現できる変位、速度、加速度の限界値を示すもので、破壊実験を行なう対象および実現したい地震波の規模などから決められるものである。この限界値は低振動数においては加振機の機械的ストローク、受圧面積および油圧ポンプ流量によって制限され、また高振動数域では加振機の応答速度によって制限される。破壊実験に必要とするのは一般に低中振動数域での大変位といえるが、そのためにはストロークの大きい加振機と大規模の油圧源を必要とし、また大出力であるがために前述のような即応性、精度の維持も容易でないといえる。

以上、われわれの必要とする性能指標について要点を述べたが一般にこれらすべてを満足させることは非常に困難であり、実験目的に応じた性能仕様の選定が必要といえる。以下では、本装置の性能について簡単に述べ、主に試作試験として行なった限界性能および周波数特性について記し、精度とその改善等については別の機会にゆずることにしたい。

さて、本装置のような電気-油圧サーボ方式の振動試験装置の動特性あるいは限界性能を推定する基本式は次のようなものである。すなわち、

加振機の運動方程式

$$M \ddot{y} = A P_L \quad (1)$$

加振機内作動油の連続の式

$$Q = A \dot{y} + \frac{V}{\beta} \dot{P}_L \quad (2)$$

サーボ弁の流量特性

$$Q = K i \frac{P_s - P_L}{2} \quad (3)$$

記号は次の通りである。

- |  |                    |
|--|--------------------|
| M : 負荷質量 ( 振動台および供試体 )                 | Q : サーボ弁流量         |
| y : 負荷変位                               | V : 加振機シリンダ容積      |
| A : 加振機ピストン受圧面積                        | $\beta$ : 作動油体積弾性率 |
| $P_L$ : 負荷圧力 ( $0 \leq P_L \leq P_s$ ) | K : サーボ弁流量係数       |
| $P_s$ : 供給圧力                           | i : サーボ弁への入力電流     |

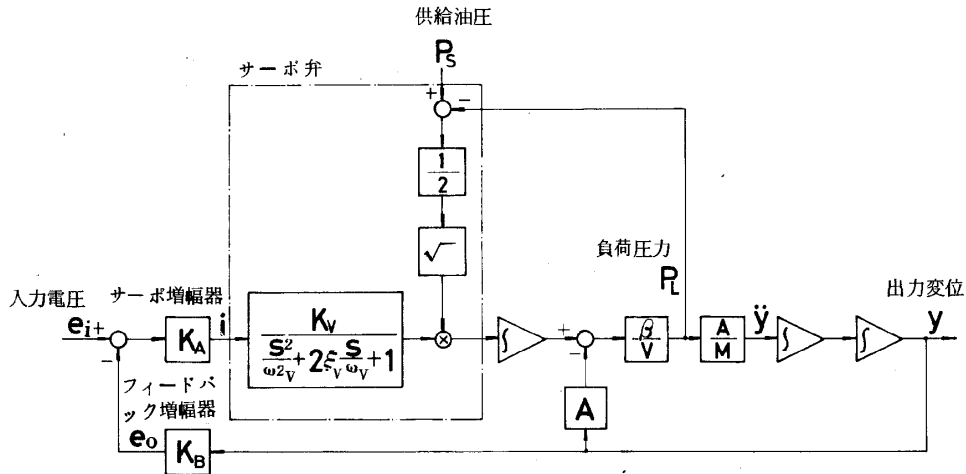


図6 フローチャート

なお、この場合の物理的な信号の流れは図6のようになる。サーボ弁流量係数 $K$ は周波数特性をもち図6のような二次系で近似的に表わされる。ここで $\omega_v$ はサーボ弁固有振動数、 $\xi_v$ はダンピング係数、 $K_v$ は定数である。サーボ弁特性が(3)式のように表わされるため系全体は非線形性をもち正弦波入力 $e_i$ に対する出力は正確な正弦波にならない。この点は、図6のように閉ループにすることによって解決することはできず、油圧方式を採用する場合の基本的な問題点といえよう。近似的な限界性能および系の特徴をみるために開ループとしてサーボ弁入力電流 $i = I \sin \omega t$ に対する近似解を求めると次のようになる。すなわち(1)~(3)で $P_L/P_s = x$ とおき $\sqrt{\quad}$ の項を展開すると ( $0 \leq x \leq 1$ )

$$\ddot{x} + \frac{A^2 \beta}{MV} \dot{x} = \frac{K \beta}{V} \frac{1}{2 P_s} \left\{ \dot{i} \left( 1 - \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} - \dots \right) + i \dot{x} \left( -\frac{1}{2} - \frac{x}{4} - \dots \right) \right\} \quad (4)$$

ここで

$$\frac{A^2 \beta}{MV} = \omega_n^2, \quad \frac{K \beta}{V} \sqrt{\frac{1}{2 P_s}} = c \quad (5)$$

とおき(4)の右辺で2次以上の項を省略すると

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = c \left\{ \left( 1 - \frac{x}{2} \right) \dot{i} - \frac{1}{2} i \dot{x} \right\} \quad (6)$$

このような近似は $x$ が十分小さいとき、すなわち負荷の慣性力に比べ出力が十分大きい場合にのみ正確に適合するものであるが、ここでは限界値付近でもほぼ成立つと仮定する。(6)式で $i = I \sin \omega t$ とおき周期解の存在を仮定して

$$x = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega t + b_n \sin n \omega t)$$

を(6)に代入し4次以上の項を省略すると

$$x = \frac{1}{8 N_1 N_2 N_3 + 3 \alpha^2 N_1 + \alpha^2 N_3} \left\{ \alpha ( 8 N_2 N_3 + 3 \alpha^2 ) \cos \omega t - 4 \alpha^2 N_3 \cos 2 \omega t + 3 \alpha^3 \cos 3 \omega t \right\} \quad (7)$$

$$\text{ただし, } \alpha = c I \omega, \quad N_k = \omega_n^2 - (k \omega)^2$$

したがって基本波のみの加速度振幅を考えると(1)から、

$$y = \frac{A P_s}{M} \frac{\alpha ( 8 N_2 N_3 + 3 \alpha^2 )}{8 N_1 N_2 N_3 + 3 \alpha^2 N_1 + \alpha^2 N_3} \quad (8)$$

となる。限界性能は入力電流の振幅 $I$ を大きくして油圧源またはサーボ弁によって決まる最大流量が得られる点で決まる。すなわち、最大流量を $Q_{\max}$ として

$$K I \sqrt{\frac{P_s}{2}} = Q_{\max} \quad (9)$$

を(8)に代入すれば基本波の限界性能を得るが、この他にシリンダの機械的ストローク制限、 $P_L \leq P_s$ による加速度出力の制限を考慮する必要がある、また振動数が高くサーボ弁の固有

振動数を越えた場合(9)のKが小さくなり限界値が下がる。以上の結果に設計値を入れると近似的な限界性能は図7のようになる。なお推定値の場合、 $Q_{max}$ としては油圧源容量にアキュムレータの効果を見込んだ値を使用した。

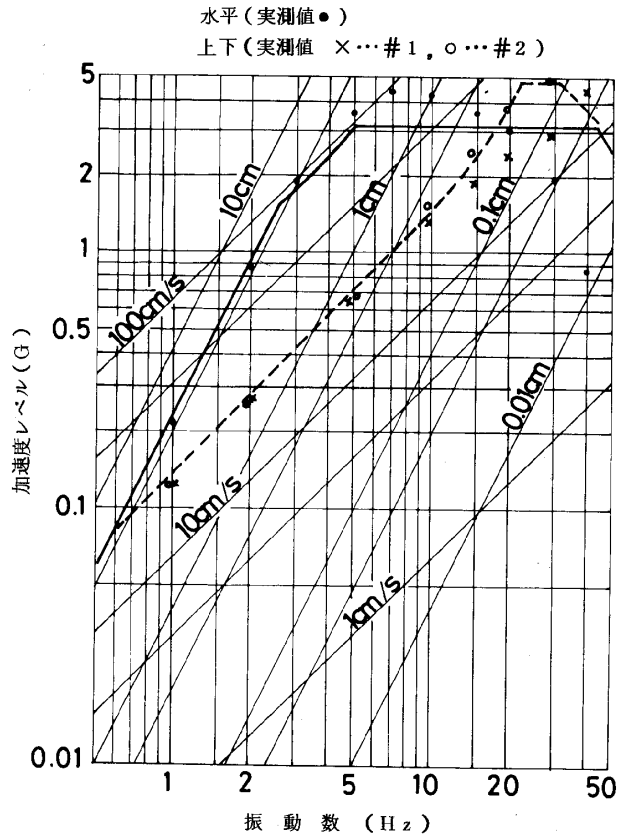


図7 限界性能

微小振幅に対する周波数特性を求める場合はサーボ弁特性(3)を動作点付近で直線近似すれば

$$Q = K_1 i - K_2 P_L \quad (10)$$

となり、 $K_1$ が図6のような伝達特性をもつとすると系全体の閉ループ伝達関数は

$$G(\omega) = \frac{1}{\frac{A}{K_2 K_A K_B} s \left( \frac{s^2}{\omega_n^2} + 2 \xi_n \omega_n \frac{s}{\omega_n} + 1 \right) \left( \frac{s^2}{\omega_v^2} + 2 \xi_v \frac{s}{\omega_v} + 1 \right) + 1} \quad (11)$$

となる。ここで  $s$  はラプラス演算子、また  $\omega_n$  は(5)式で、 $\xi_n$  は次式で与えられる。

$$\xi_n = \frac{M K_2}{2 A^2} \omega_n \quad (12)$$

(11)式の分母は加振機シリンダの積分特性、シリンダー-負荷系の周波数特性およびサーボ弁の周波数特性によるもので  $\omega_n$  はシリンダー-負荷系の共振振動数を表わし(5)式)、 $\xi_n$  は

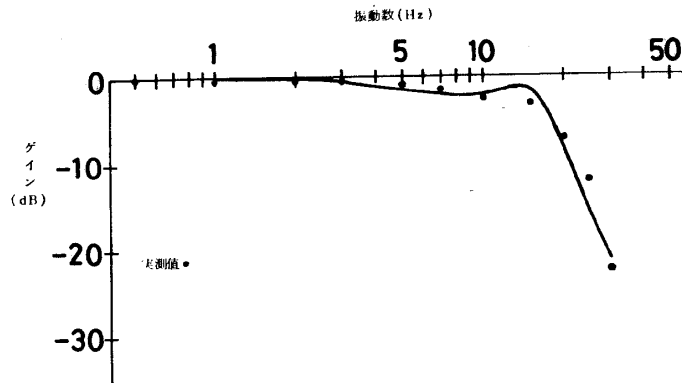


図8 周波数特性(水平)

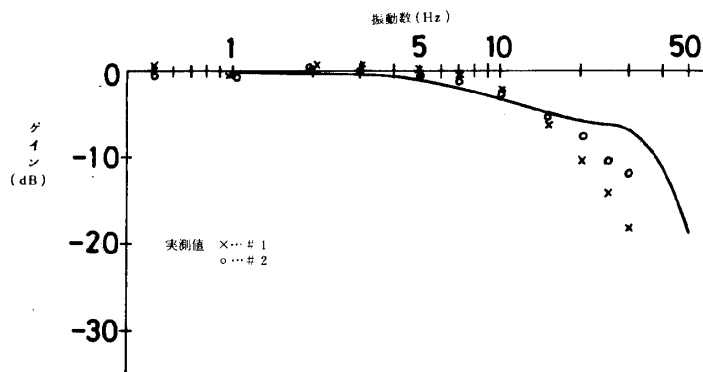


図9 周波数特性(上下)

流量 $Q$ が負荷圧力 $PL$ に依存することから生ずるダンピング効果を表わしている。(1)式に水平および上下の設計値を入れて求めた周波数特性が図8, 図9である。負荷は振動台のみである。なお推定値の計算では(2)式によるダンピングの他に各部の等価的な減衰を考慮して $\xi_n = 0.4$ とした。図10にランダム波による加振を行なった時の加振機変位および振動台加速度の波形を示す。入力スペクトルは1Hz ~ 20Hzでほぼ平坦なものであるが加振機変位では前述の周波数特性により高振動数成分がかなり減衰している。2台の鉛直加振機は変位でみる限りよくそろっているといえる。

## 5. おわりに

本装置は基礎工事を含め昭和51年3月に完成したものであるが、前節で述べたようにリンク接手による二次元加振の実現、加振機の同期性能などについては一応所期の目的に沿ったものが得られ、小型ながら二次元加振装置として実用に供しうるものと考えている。試作的なものであるため精度的にはいくつかの問題が残っており、今後の改善試験が必要である。また二次元地震応答に関する予備的研究として構造物のロッキング、液面揺動などの模型試

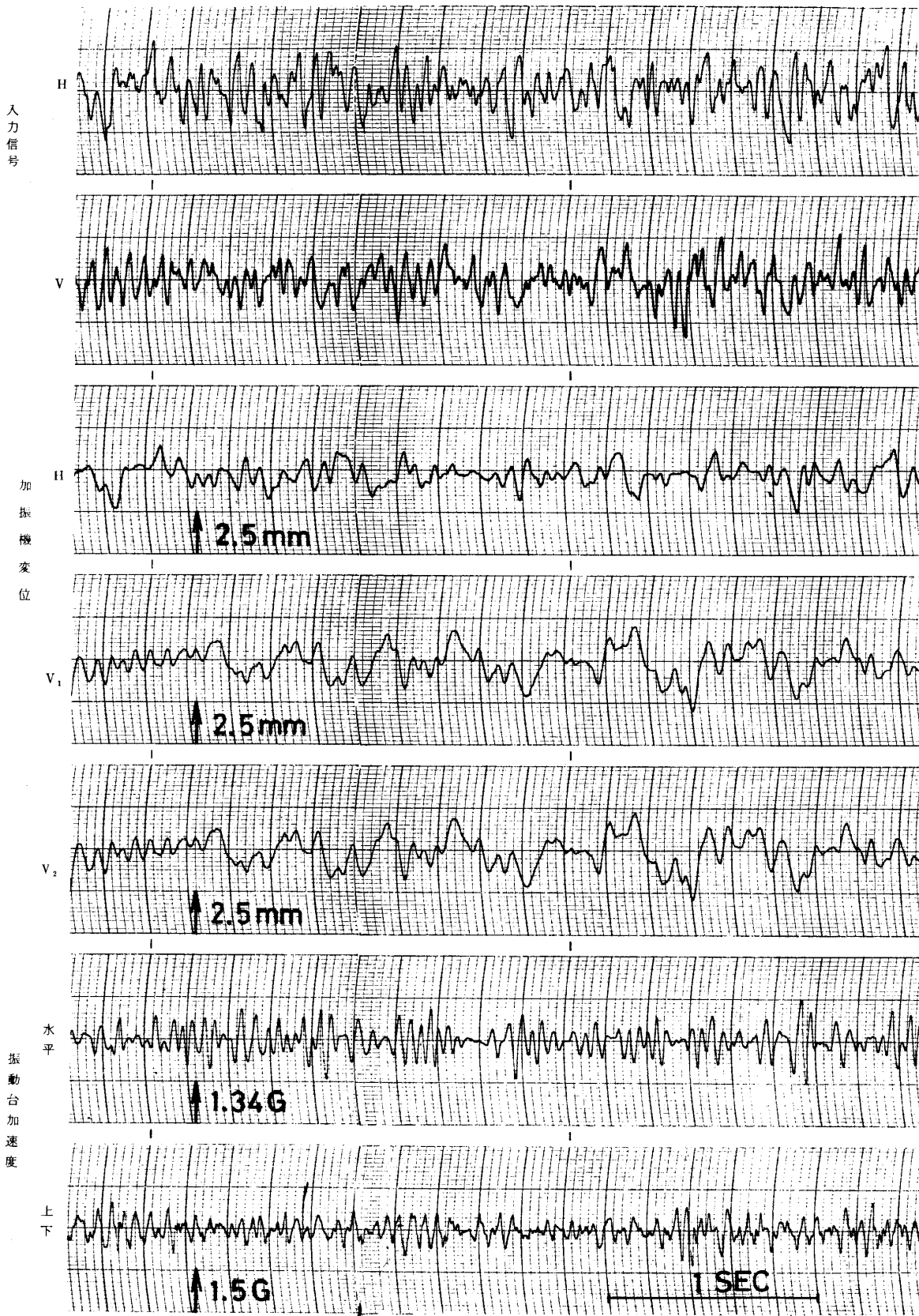


図10 ランダム波による加振波形

験を計画している。制御装置の製作には久保田技官並びに飯田技官の御協力を得た。記して謝意を表します。

(1976年10月12日 原稿受理)