

2.2 中型二次元振動台の概要と試験データ

On Two-axdal 7 ton Shaking Table and its Performance

柴 田 碧*

Heki SHIBATA

1. 本設備による研究

この二次元振動台は、本研究計画で設置された試験体をはじめ、機械、建築、土木の分野に関連する各種構造物モデルの振動特性の把握のため、および破壊実験を行うことを目的として計画、設計された。その基本的要目は表1に示すとおりであるが、他の振動台にないいくつかの特徴を有している。水平一次元、垂直一次元であるが、垂直方向加速度は最大搭載時でも1Gを超え、重力加速度による非線形性の実験ができることをはじめ、操作性の良さを目標におき、運転中に加振条件を任意に変更できるよう、全アナログ制御方式を採用した。

2. 本設備の構成

この振動台の機械部は、振動台本体、水平加振機1体、垂直加振機4体、継手5個からなり、いわゆる静圧軸受方式を採用している。全体は耐力壁部分と共通な基礎コンクリート上に設置されている。全体の配置は本誌9ページに示すとおりであり、これにより基礎重量に十分な値を確保するようにした。制御部は通常のアナログ方式による電気油圧サーボ制御系を使用しており、加速度入力制御方式によっている。本装置としては、2軸の入力の協調に重点を置き、正弦波の任意位相差から、不規則信号の任意加振角度（水平から垂直まで）入力など各種の操

表1 振動台主要諸元

No.	項 目	仕 様	
1	振 動 台 寸 法	3 m×3 m	
2	最 大 積 載 重 量	7 ton	
3	加 振 方 向	水平(X) 上下(Z)	
4	最 大 振 幅	水平方向	±150mm
		上下方向	±60mm
5	最 大 速 度	水平方向	±75cm/sec
		上下方向	±35cm/sec
6	最 大 加 速 度	水平方向	±3G(無載荷時)、±2G(7ton載荷時)
		上下方向	±1.5G(無載荷時)、±1.1G(7ton載荷時)
7	加 振 振 動 数	DC~50Hz	
8	駆 動 方 式	電気油圧サーボ方式	
9	制 御 方 式	加速度制御、速度制御、変位制御入力切換式	
10	側 面 案 内	油 圧 式	
11	加 振 波 形	規 則 波(正弦波等) 不規則波(地震波等)	
12	転 倒 モ ー メ ン ト	10ton-m	
13	ヨ ー イ ン グ モ ー メ ン ト	7 ton-m	
14	限 界 性 能	水平方向	図2(a)
		上下方向	図2(b)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

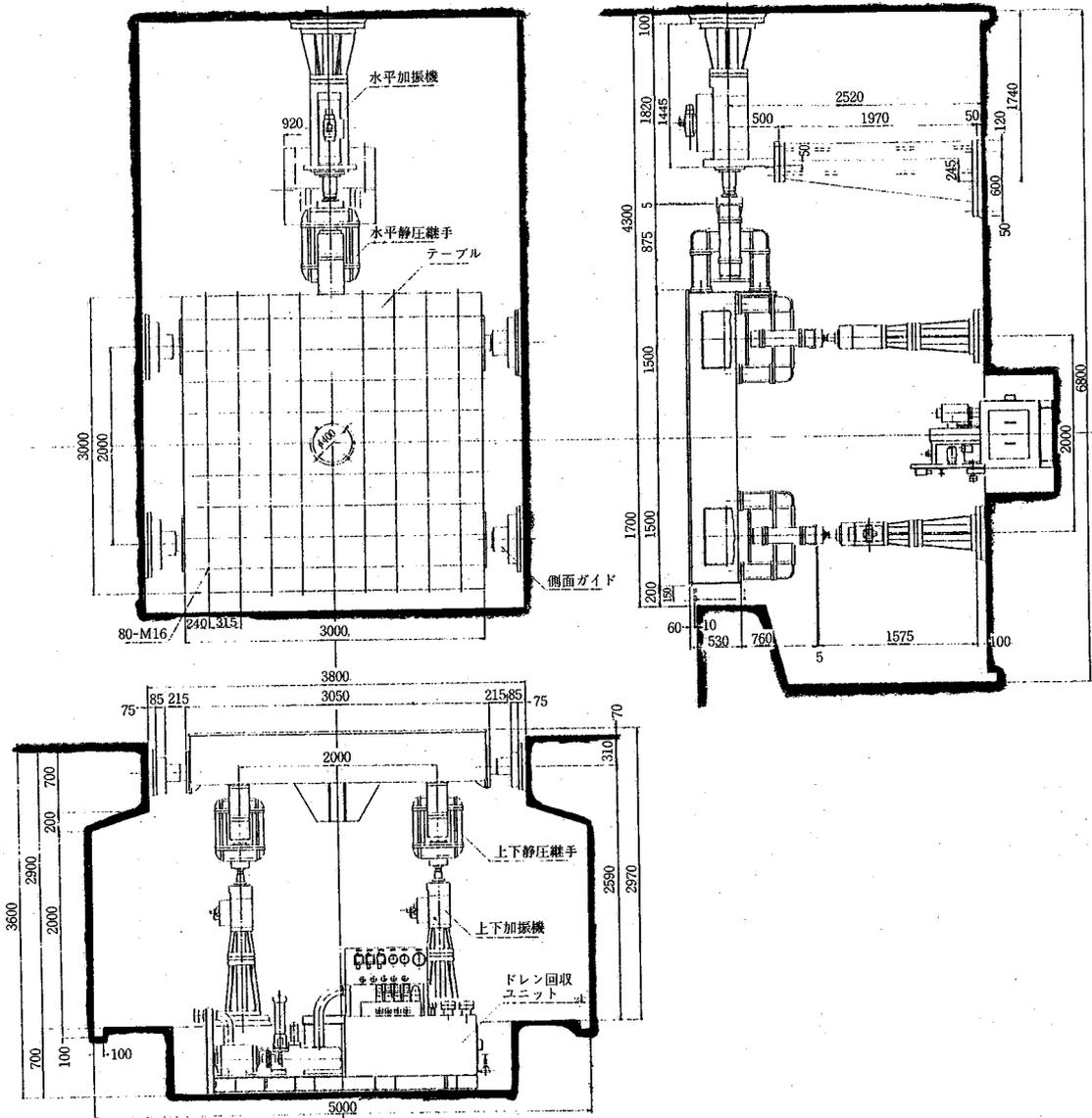


図 1(a) 振動台全体図



図 1(b) 全景写真

作および運転中の変更が可能なものとした。このため、入力回路の一部にアナログ演算部を設置した。油圧部は本振動台に油圧を供給するほか、動的破壊試験装置に同時に油圧を供給できるように設計されている。油圧装置の運転を制御パネルに集中、自動化して操作性をよくすると同時に、主ポンプを2台設置し必要に応じ、1/2流量で運転も簡単に選択できるようにして、常時の電力の節減を計った。

3. 設計・計画上の特徴

前項で簡単に、各部構成に付記した特徴のほかやや細部にわたっての特徴を述べると次のとおりである。

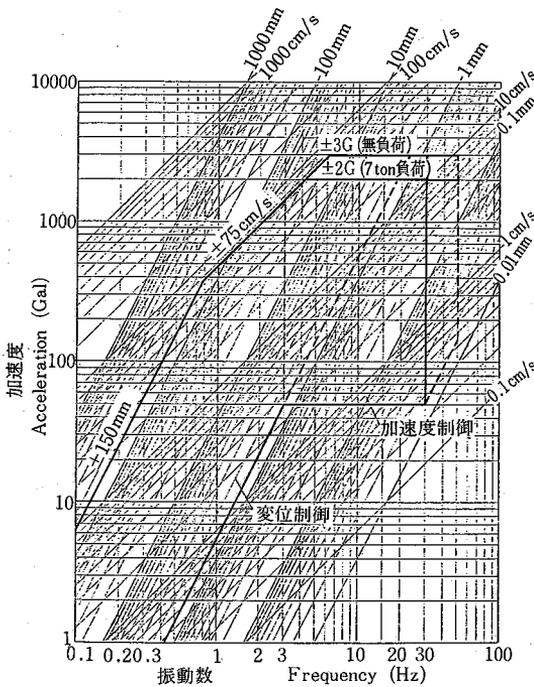


図 2(a) 水平加振限界線図

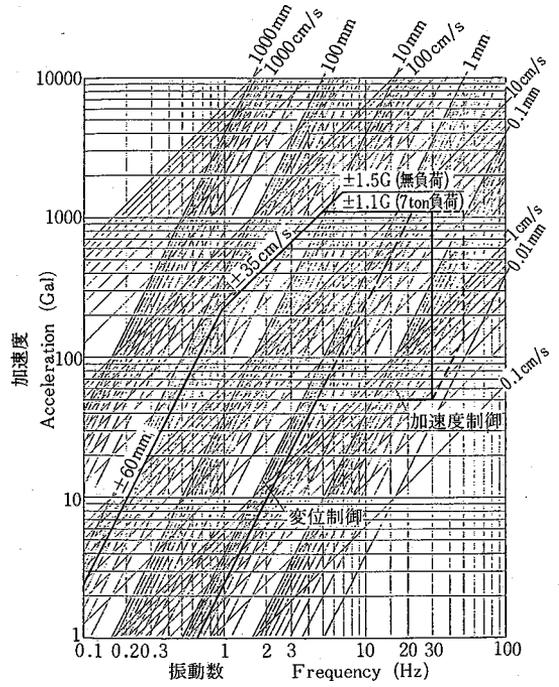


図 2(b) 上下加振限界線図

振幅については、従来のものに比べ大振幅となるように目指した。しかし、速度振幅を大にとることは、そのまま油圧源の大きさに、また電力負荷に関連するので、当初の 2 ton 計画のときのように 100 cm/sec を超すことはできず 75 cm/sec となった。変位は片振幅で 150 mm であり、現存のものとしては大きい方ではあるが、300 mm 以上という夢は実現できなかった。特性図にまとめると図 2(a), (b) のようになり、全搭載荷重でも上下方向で 5 Hz 以上で 1G を超した 1.1G 加振が可能なこと以外は、とくに大きな特徴はない。

台については、従来の小型振動台と試験体取付ねじ配置寸法を同一とし、使用の便をはかった。中央にセンタホールを設け、台下面にも取付ねじ孔若干を設けた。表面は上下動関係の実験の条件を明確にするため、当面無塗装として、状況の変化を見ることとした。振動台寸法は 3 m × 3 m、重量 4.0 ton あり、鋼板溶接一体構造である。両側面に設けた静圧案内で支持されている。パッドは球面座で支持され片側は調節可能である。

水平加振機は 1 台で動的な最大出力 22 ton G であり、ピストンは静圧軸受方式で支持されている。サーボ弁は 800 l/min で 2 段方式を採用した。

垂直加振機は 4 台で動的な最大出力 5.5 ton G × 4、静的 8.4 ton × 4 で、静荷重も垂直加振機で支持しているが、油圧系は分けて、副室で荷重に応じ調整している。サーボ弁は 90 l/min のものが各 1 台、取り付けられている。

静圧継手は球面座付きで、半密閉型のカバーを付してある。最大回転角は ±5° である。

加振用制御入力アナログ量とし、加速度、速度、変位の 3 信号のいずれかを使用することができるようにした。フィードバックの調整を通常の使用時に行うのは、取扱いに熟練することが必要となるので、そのようなことはないよう、1~2 ページの使用手順書によれば、だれでもが運転できるようにした。

アナログ入出力処理装置を設け、独立な二つの信号を適当な比率で混合し、それぞれの信号による加振軸が任意の角度（水平・上下軸で構成する加振面内で）に傾けることができるようにしたほか、出力信号の積分、相対値などの算出が実時間で可能なようにした。これはこの振動台の特徴の一つである。

油圧源は 200 kW 主油圧ポンプ 2 台および 90 kW 副油圧ポンプ 1 台から成り、主油圧ポンプは 1 台でも使用可能である。主油圧ポンプは 3000 V 駆動であるが、冷却水系を含めて主操作盤から一括して制御できるようになっている。油圧の立ち上げも自動的に行えるようになっているが、アクチュエータ（動的破壊試験装置）を使用のときは、手で任意圧力に設定することも可能になっている。

基礎は耐力壁と一体であり、とくに振動台部分は抗で支持されている。全体の重量は約 2,000 ton であり、建屋の一部も兼ねている。総経費の節減も考えてこのような設計を試みた。また耐力壁の一部は振動台水平加振機側

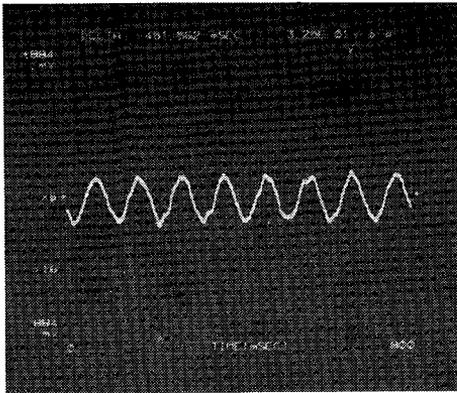


図3 水平加速度波形 無負荷 50 Gal 10 Hz 歪率 3%

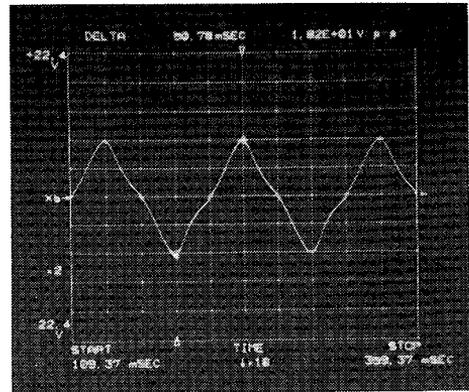


図4 水平加速度波形 無負荷 3 G 10 Hz 歪率 17%

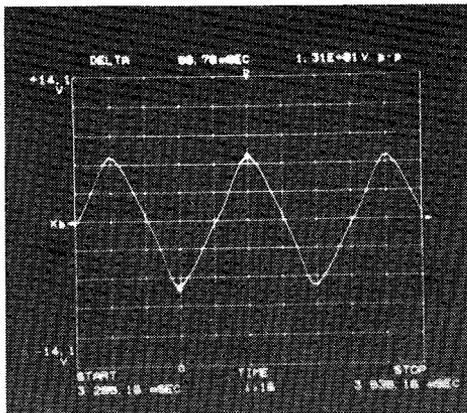


図5 水平加速度波形 7 ton 負荷 2 G 10 Hz 歪率 10%

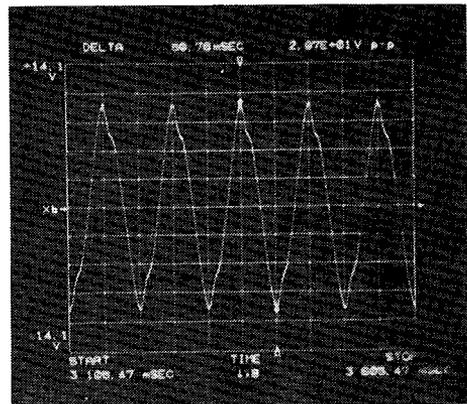


図6 上下加振 無負荷 1.5 G 10 Hz 歪率 9%

に延長され、多入力実験および試験体の損傷時転倒防止のための支持構造物の設置に便利ように計画された。

4. 試験成績の概要

工場での試験ののち納入され、組立後調整試験に入った。無負荷、7 ton の慣性試験体、2 ton の共振試験体をそれぞれ搭載した場合についての特性試験および周辺の振動、騒音試験を実施した。

主要な特性としては、50 Gal の加速度入力で 3~30 Hz における加速度波形の歪率 15% 以下、同最大加振条件で 10% 以下、また、1~3 Hz では変位入力により変位波形の歪率を 5% 以下とした。また上下、水平のクロストークは一方向加振、他方向停止で 1% 以下を目標とし、7 ton 荷重の搭載時に有害なロッキング運動を生じないものとした。

当初の測定では、サーボ弁の切換え時の加速度衝撃がかなり大きかったが、弁のラップ量を調整した結果、おおむね上記値内に入るようになった。低振幅加振時のほうが歪率から見た特性は良好であるが、高次のノイズ的な成分があり、波形としては汚くみえる(図3)。加振限

界沿いの特性は 10~20 Hz では、おおむね良好であるが、低い側の高調波成分が含まれ、波形としては図4、5に示すような、やや三角波的などところもみられる。これらの波形は悪いものを示した。なお Z 軸(上下)方向の加速度は、各加振機の値を平均したものをういて検定した。個別の加速度はかなりの乱れがあるが、平均値についてはよい結果が得られている。波形の1例を図6に示す。変位波形領域については、非常によい結果である。

各項のクロストークについては、加振直角方向 Y 軸については問題なかった。両加振軸間の連成したロッキング(Y 軸方向まわりの回転、試験体からみたときのよび方、台からみてピッチングともよばれている。)については期待したよりは大きかった。静圧軸受方式は球面軸受方式よりもこの点良好で、そのための制御を行わないのが通常である。本例では慣性負荷でも 30 Hz 近くなるとかなりのロッキング振動を生じている。原子力工学試験センタの 1000 ton 振動台でこのことが問題となった際の測定方式に準じて、各上下加振機位置における上下方向加速度と水平方向加速度の比率を測定することとした。その結果、無負荷で 100 Gal 程度では全く連成を生じ

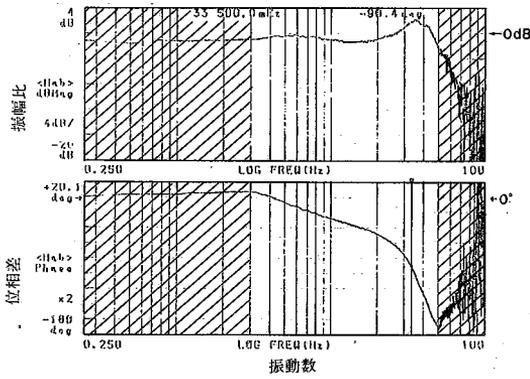


図 7(a) 水平加振振動数特性 無負荷 600 Gal

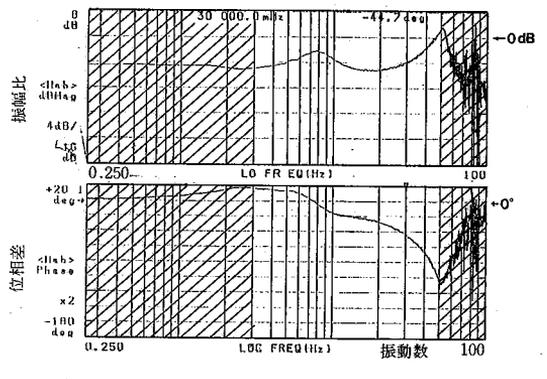


図 8(a) 上下加振振動数特性 無負荷 300 Gal

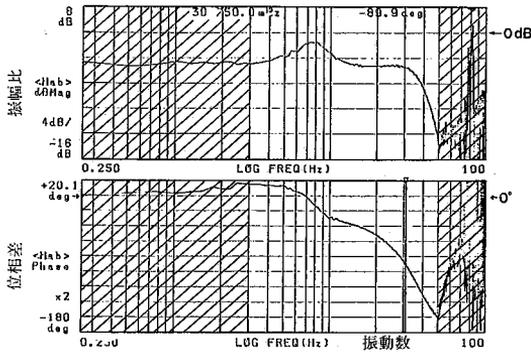


図 7(b) 水平加振振動数特性 7 ton 負荷 400 Gal

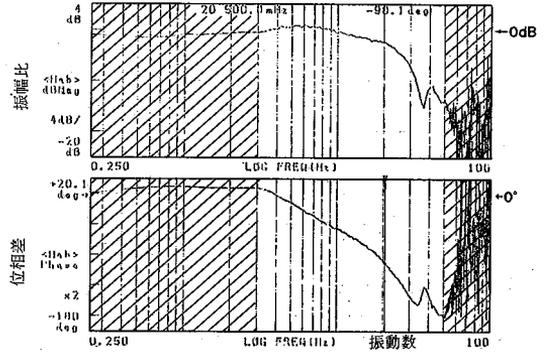


図 8(b) 上下加振振動数特性 7 ton 負荷 200 Gal

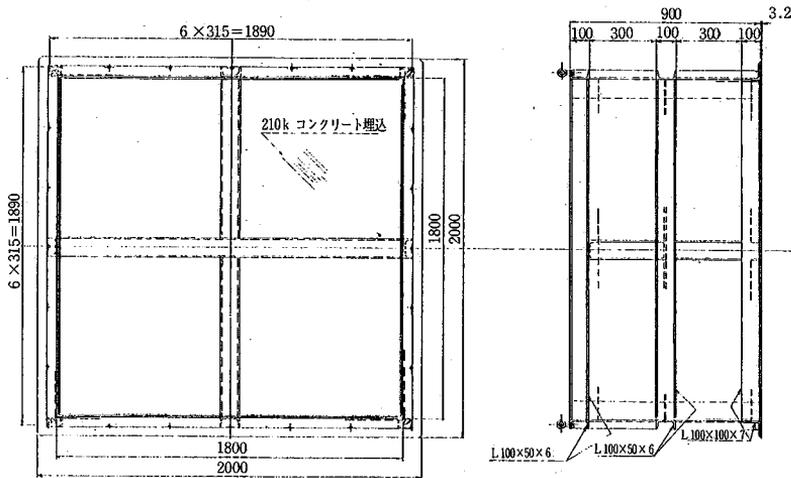


図 9 7 ton 慣性試験体

ないが、慣性負荷では 20 Hz を越すと急激に増加し、30 Hz 付近では 100% 近くと大きく連成していることが判った。この問題は、事前に波形を逆応答関数を乗じて修正することによりかなり修正可能であり、そのためにも、アナログ計算部を有していることが役立つと考えられる。共振試験体 (図 10) はさらにロッキングの影響を見ようとするものであった。図 11 のように、15.6 Hz で共

振を生じ、浮上した状態ではかなり幅が広く、着座した状態では鋭いピークが連成として現れた。上述の水平、上下比率はこの状態では 100% 程度となり、やはりかなり大きいことが判った。

このほか、フィードバック系のゲイン特性に 800 Hz 付近にピークがあり、このため低振動域加振の際にその振動数で発振することがあったが、これは V ノッチフィ

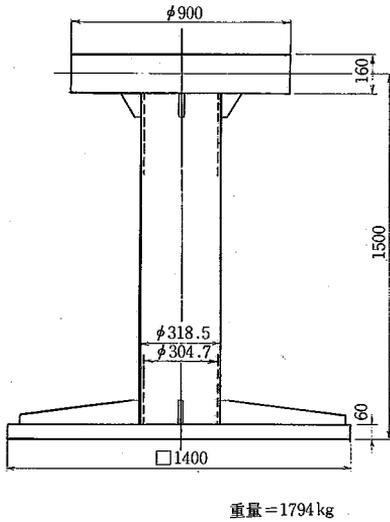


図10 2 ton 共振試験体

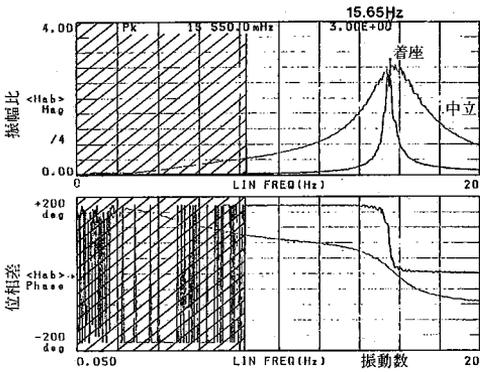


図11 共振試験体搭載時振動数特性 150 Gal

ルタを挿入することにより安定化することができた。

つぎに周辺の振動伝播状況を調べた。本振動台の基礎は隣接する加力装置の耐力壁と一体となっている。この耐力壁は振動台側に延長されてきて、また建屋の壁面の一部をも形成している。したがって、基礎重量としては十分な値が得られているが、その反面建屋に振動が入りやすいということがある。このA地区は公務員宿舎に隣接しているので、この境界線上の地点の振動を70 dBに抑えることを目標とした。その結果、慣性試験体水平2G加振で62, 71, 70 dB(加振方向, 直角方向, 上下方向), 上下変位9 μ , また垂直1.1G加振で64, 64, 47 dB, 0.2 μ であり、ほぼ目標の範囲に抑えることができた。上下の変位9 μ は敏感な人が辛じて識別でき、また木造家屋などがあると戸、窓ガラスなどがガタガタ音を出す程度の

ものである。垂直加振での振動のレベルが水平方向より、著しく小さいのは、むしろこの点の特異性であるかも知れず、他の点は、振動方向と加振方向の間に強い相関はないといってよい。宿舎の一室での測定結果は、40 dBもしくはそれ以下で、振動の伝播があるとはいえない。しかし所内事務棟では最大加振時には明瞭に感じた。また、実験棟のガラスは大きく振動するのが認められた。

騒音については、Cスケールで70 dB以下を目標とした。境界で70~73 dBである。宿舎室内で窓を開けると60 dBぐらいで、音として認識できる状態である。Aスケールにすると64 dBぐらいまで低下するが、これは音の成分中120 Hzぐらいのものが卓越し、ポンプから建屋壁面を経て輻射しているためと考えられる。これは油ポンプの回転数約900 rpmの7倍によるものであると判断される。実験棟はポンプ騒音のほか、制御系から油圧系へ来るディザーのためのものなど合さり、Cスケールで84 dB程度となり、かなり高いレベルにある。これらのデータについては、橋研究室のご助力によって得られた部分が多い。

5. ま と め

前節で述べたように、振動台特性のうち20 Hzを超えた部分のロッキング(Y軸廻り)については、現時点では機構および原因が不明確であることをはじめ、いくつかの問題点が残っている。とくに共振特性の鋭い試験体の場合どのように扱うかは、振動試験法の問題としてさらに検討することが必要である。振動特性試験の場合は、試験体に過度の振動エネルギーが入るのを避けなければならないし、損傷試験の場合は実物に即した条件でエネルギーを入れることができなければならない。この両者では補正方法も異なってくる。

環境振動および騒音の点についても、今回の仕様は別として、さらに改善を要する点があると思われる。とくに実験室内の台周辺の騒音レベルはかなり低減する必要があると思われる。

以上のような諸点があるにせよ、本振動台は操作性もよく、本所規模の研究で破壊実験を含めた諸研究に全く適合したもので、今後の成果が期待される。

この振動台施設、設置にご尽力いただいた前所長、田中名誉教授、所長、石原教授、前経理課長、梶原氏ほか担当事務官、日製産業、羽毛田氏、日立製作所土浦工場の担当者の方、それに細部の設計に至るまでご協力いただいたERSメンバーをはじめとする教官および研究室の諸氏に厚く感謝の意を表する。(1983年7月20日受理)