

三次元精密振動台による小型模型実験 (三次元振動台による実験その1)

小川信行*・箕輪親宏*

国立防災科学技術センター

Three Dimensional Shaking Table Test of Small Scale Model Structures

By

N. Ogawa and C. Minowa

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

Dynamic behaviour of structures submitted to three dimensional earthquake motion is one of the principal subjects to be studied in earthquake engineering, but at present, there are very few investigations in this field. The authors intended to make a progress of experimental studies and, as the first step, tried a three dimensional shaking table test of small scale model structures.

The test models used are simple piping systems made of steel wire, a rectangular liquid tank made of chloride vinyl, a mini-scale banking of soil and piled wooden blocks. The small scale three dimensional shaking table manufactured for trial by HITACHI, Ltd. was used for these experiments.

These experiments gave some results as follows:

1. Natural vibrations of model piping systems measured by each one dimensional excitation well agreed with calculated values, and in multi-dimensional excitation, they appeared together corresponding to shaking directions. And the different effects of two types of support conditions (fixed or elastic movable) were clearly observed.
2. In the test of rectangular water tank, the nonlinear sloshing behaviours and the increases of sloshing periods caused by side wall flexibilities were observed. These phenomena were compared with theories. The multi-dimensional responses of seismic wave excitations would be almost explained by the superpositions of one dimensional response.
3. Three banking models were tested and collapsed by some excitations, but these tests were not satisfactory to compare one or multi-dimensional responses because of the difficulty of model production and design of input signal.
4. Piled wooden blocks was tested by 14 cases of excitation, and fell down with torsion of block columns by the excitations including two horizontal directions. This phenomenon was not observed in one dimensional shaking test.

* 第二研究部

1. はじめに

地表の各点で観測される地震動が三次元的な立体振動であることはよく知られている。このような三次元振動に対する構造物の動的挙動についてはまだあまり詳しく調べられていない。現今の耐震設計では各方向の地震動に対する構造物の応答量を個別に算出して、それらに工学的評価を加えるとともに、被害の事例などを参考して構造計画上たとえばねじれを生じにくい配置とするなどの配慮をなすべきものとされている。

しかし、耐震工学の研究面では設計の現状とは別に二次元あるいは三次元振動に対する構造物の挙動を評価する試みも進められており、またこの研究の基礎となる三次元強震動の観測研究も活発に行われている。構造物に対する三次元振動の効果を調べるには基礎的な実験を積み重ねていくことが必要であり、当センターでもその手段となる高精度三次元振動台の開発を鋭意進めてきている。一方当センターにおける開発に先行して(株)日立製作所において将来の三次元振動台のヒナ型というべき静圧継手方式によるパイロットモデルが開発試作された。(写真1-1)これは1m×1mと小型ではあるが、小さな供試体の実験には十分実用的といえるものである。

筆者らは、三次元振動台の開発にあわせて、小型の模型実験により実験の手法なども含めて予備的な検討を行っていく必要を感じていたのであるが、幸い(株)日立製作所の御好意により上記小型振動台を使わせていただけたことになった。本報告は、この振動台を用いて行った最初の小型模型実験についてとりまとめたものである。供試体としては、比較的単純な構造物であってしかも多次元加振で興味あるものとして配管模型、液体貯槽模型、盛土模型、ブロック積模型をとりあげた。

配管系は立体的な多モード特性をもち三方向加振がほぼ均等に作用する構造物の一つであるが、今回は鋼線で配管を模擬して簡単な立体モデルを作った。(写真1-2)

液体貯槽は水平一次元加振においても液面の回転が生じたり、また一方、上下動により不安定振動が生じることが知られており、三次元で加振された場合いかなる現象が現われるか興味ある対象である。このため塩化ビニール製長方形液体貯槽の供試体を作成した。(写真1-3)

一方、崩壊挙動が主となる対象として積荷等を想定した木製ブロックを積み上げた柱体、砂質土でつくったミニ盛土をとりあげた。(写真1-4, 5)

各供試体別実験結果の整理にあたっては、長方形液体貯槽を箕輪が、その他を小川が主に担当した。

2. 実験装置

実験に用いた小型三次元振動台の性能を表2-1に、外観を写真1-1に、静圧継手部分を写真2-1に示す。台は、水平X、Y方向にそれぞれ2本、上下Z方向に4本の油圧加振機によって駆動され、台と加振機は静圧継手によって結合されている。従って各方向が独立に加振できる構造となっており、各方向の性能は最大加速度1000gal、最大速度25cm/s及び最大変位±2.5cmである。制御は各方向別の追従サーボ制御（加速度制御方式）の他、同方向の複数加振機の同期制御が行われている。

3. 計測方法と加振入力

供試体には加速度センサー、歪ゲージ、圧力センサー等を適宜に取付け動的な応答を測定した。計測データはデジタル方式のデータレコーダによりすべて磁気テープに記録した。デジタル方式の記録であるためサンプリングが問題になるが、チャンネルあたり100Hzでサンプルしたため50Hz以下の振動に対し、この計測は有効である。ローパスフィルターは合計35チャンネルあり、ローパスフィルターを通さないで磁気テープに記録されたデータは歪データの一部である。加速度データは最大2G、歪データは最大 1000×10^{-6} 程度を目標にゲインを設定した。

一般的な計測の他に写真機のモータードライブによる連続撮影（約5枚/秒）も適宜実施した。また実験全般をカラービデオでも記録した。（図3-1参照）

磁気テープに記録された加速度、歪、圧力等のデータは当センターのコンピューター（ACOSシリーズ、TOSBAC77、システム700）で処理し、以後に示す各図を描いた。なお、原記録の再生にあたっては、データにドリフトおよびノイズ成分が含まれていたため、移動平均法（中央値をもとに平均したため位相遅れはない）によるローパスおよびハイパスフィルターを必要に応じて使用した。

振動台入力は、三次元のランダム波（各方向の相関なし）と正弦波および地震波を用いた。

正弦波入力の場合、各方向間の位相は制御されていない。振動数の設定は周波数カウンターを用いて行った。

地震波入力に使用した波形は、1978年6月12日宮城県沖地震で仙台住友生命ビル（地上18階、地下2階）の地下に於いて記録された加速度記録波形を用いた。方向の対応は次のように定めた。

振動台X方向	地震波N-S方向
振動台Y方向	地震波E-W方向
振動台Z方向	地震波U-D方向

地震波記録の最大値はN-S方向、E-W方向で約250gal、U-D方向で約100galであるので、この比率を保つように振動台各方向の入力振幅を定めた。タイムスケールは1とした。

なお振動台入力波には適宜に定めたカットオフ振動数のハイパスフィルターをかけた。

4. 配管モデル振動実験

4-1. モデルの概要

径2mmの鋼線(GA46SR)を用いて、以下のような簡単な立体配管モデルを作成した。

イ. 平面Z型(Pipe 1及びPipe 2)

1は分岐角60°、2は分岐角90°である。

ロ. 立体Z型(Pipe 3及びPipe 4)

3は両端共剛支持、4は一端が剛支持、他端支柱が弾性支持されたものである。

ハ. 平面門型(Pipe 5及びPipe 6)

5と6の相違点は上記立体Z型と同様。

各モデル共両端はベースプレート上に溶接した支柱(34mmφ鉄パイプ)にろう付け固定した。Pipe 4及び5の片側支柱はゴム足を介してベースプレートに接着した。従って可動支柱となっており、配管が構造物等に接続されている状況を模擬したものである。ベースプレート上のレイアウトを図4-1に、各モデルの詳細を図4-2~4に示した。振動台への設置状況は写真3-2のようである。

計測は歪及び加速度について行った。図4-2~4において矢線でStrainと示した位置に歪ゲージを貼り、2方向の曲げ歪を測定した。測定点はPipe 1, 2, 5, 6は1点(4ゲージ)、Pipe 3, 4は3点(各4ゲージ)、全体で40ゲージとした。径2mmの鋼線の周囲に4枚のゲージを貼ることは容易でないので異なる方向の曲げ歪に対応するゲージの位置を若干ずらしている。精度の高い測定ではないが、振動性状の概略を定量的に把握するために取りつけたものである。

Pipe 1, 2はいずれも全長90cmで中間の分岐角の違いによる効果をみるためのモデルであり、X方向が面外加振、Y, Z方向が面内加振である。Pipe 3, 4も全長90cmで支持部の差異による効果をみるためのモデルである。この場合、可動支柱の振動特性が問題となる。このため、可動支柱の上端に加速度計(J-X及びJ-Y)を取りつけX, Y方向の水平加速度を測定できるようにした。図4-5はPipe 4の可動支柱単体のX及びY方向の自由振動記録である。支柱は4個のゴム足を介して床板に接着されているが、X方向、Y方向の固有振動はいずれもほぼ25.8Hzとなっている。Pipe 5, 6は全長50cmの門型モデルで、Pipe 3, 4と同様可動支柱の有無を比較の対象としている。可動支柱の上端に加速

度計（L-X及びL-Y）を取りつけている。図4-6はこの可動支柱単体の自由振動記録で、X方向は27.8Hz, Y方向は25.8Hzとなっている。

両端固定支柱の場合の振動性状を推定するため、Pipe 1, 2, 3は9要素に、Pipe 6は10要素に分割して固有値計算を行った。その結果を図4-7～10に示した。

これによるとPipe 1では1次(10.2Hz, 面外), 2次(21.9Hz, 面内)および5次(45.2Hz, 面外)が卓越している。Pipe 2もほぼ同じで1次(9.4Hz, 面外), 2次(24.1Hz, 面内), 5次(41.4Hz, 面外)が大きい。Pipe 3では1次(9.4Hz)が大きく、2次(23.9Hz), 4次(41.2Hz), 5次(46.1Hz)の順で3次(31.5Hz)はやや小さい。Pipe 6は1次(33.8Hz, 面外)がかなり高く、実験モデルとしては剛になりすぎたようである。

4-2. 正弦波試験

最初にX, Y, Z各方向の正弦波スイープ加振を行った。配管系のような立体的な多モード系の場合、供試体の方向を転換しないで任意方向の入力が加えられる点も三次元振動台の大きなメリットの一つである。例えば、面外振動をゼロにするように振動台の振動方向を種々変えてみる（制御する）といった試みも可能と思われる。（模型が正確に作られていることが前提であるが）、今回はそこまで行わず単純にX, Y, Z方向を決めて加振した。

図4-11はX方向スイープ加振時の時刻歴応答である。この図を含めて以下のすべての図では、例えばPipe 1の測定点のZ方向曲げ歪は1-BEND-Z, Pipe 3の点1のY方向曲げ歪（Y方向に凹となる曲げを正としている。X, Zも同様）は3-1-BEND-Yというように表わしている。

図4-11は7Hz～35Hzを掃引加振したもので振動台の加速度振幅は50gal一定を目標としたが、振動数が高くなると加振のレベルは徐々に落ちている。このため一定の時間間隔ごとの波形を取り出し、振動台の加速度に対する歪量の比を応答値として処理したものが図4-12の応答曲線である。この処理に際しては各時刻点ごとに基本波を抽出するとともに振動台加速度に対する位相差も検出した。

Pipe 1では8.4Hz, Pipe 2では9.5Hzが最大のピークを示しており、これは前の計算結果の1次モードとほぼ対応しているがPipe 1でやや差がある。面外モードであることは、X方向歪が卓越することからもわかる。Pipe 1の19.5Hz附近のピークは2次の面内モードがX方向面外加振でも多少現れていることを示している。27Hz附近のピークは計算結果と対応していない。また応答倍率は、X方向曲げでPipe 2がPipe 1の2倍程度になっており、また応答曲線の1次モード附近の拡がりがPipe 1とPipe 2でやや異なっている。なお、ピーク直後の応答曲線の波うちは共振通過に伴うビート現象である。また位相は最低次の共振を通過したあとは非常にランダムな変動をしており、これは各加振記録に共通

している。

Pipe 3 および 4 では、それぞれ 9.06 Hz, 9.28 Hz が卓越しており 1 次モードに対応している。また 2 次モードの計算値 23.9 Hz に対応する位置に第 2 のピークを生じているが Pipe 3 と 4 ではその現れ方が異なっている。Pipe 3 では幅が狭く鋭いピークの形で応答倍率も 1 次に比しかなり低くなっているが、Pipe 4 では幅の広いピークであり中央部にノッチをもっている。応答量も可動支柱側の点 1-BEND-Z では 1 次と同程度の値となっている。一方、Pipe 4 の可動支柱の加速度振幅応答では X 方向加速度 (J-X), Y 方向加速度 (J-Y) ともにピーク附近に鋭いノッチをもっている。Pipe 4 の場合、配管自体の 2 次固有振動と可動支柱の共振振動が 24 Hz 附近に近接しており、その影響が上記の現象として現れたものであろう。X 方向加振であるが可動支柱の Y 方向加速度の応答倍率は X 方向の 1/2 程度あり、これはほとんど配管の立体振動の影響を受けたものと思われる。(X 方向加振でも振動台に Y 方向加速度が幾分か生ずるのでその影響も考えられる)。

Pipe 5, 6 は X 方向加振が面内加振であるため応答が小さく波形処理は行わなかった。Pipe 5 の可動支柱は X 方向 (L-X), Y 方向 (L-Y) 共に Pipe 4 の可動支柱と同程度の応答倍率を示しているが前のような特異な形状を示していない。

図 4-13 および図 4-14 は Y 方向スイープ加振の波形および応答曲線である。このスイープは 15 Hz ~ 50 Hz で行ったので 1 次モードは除外されている。

Pipe 1 では Z, X 方向曲げ共に 38 Hz 附近に小ピーク、46 Hz 附近に卓越ピークをもち、前者では Z 方向曲げ、後者では X 方向曲げの応答倍率が大きい。従って、加振は一応面内であるが、この二つのピークは計算上の 4 次 (38 Hz, 面内) および 5 次 (45.2 Hz, 面外) と対応している。図 4-7 にある通り 5 次モードの刺激関数が非常に大きいためと思われる。いずれにしても Pipe 1 の卓越ピークは 5 次モードに起因している。(Z 方向曲げは X 方向有限変形に伴って生じたものと思われる)。

これに反し、Pipe 2 では Z 方向曲げ (2-BEND-Z) には 2 次、4 次 (面内 24.1 Hz および 39.1 Hz 計算値) が、X 方向曲げには 3 次、5 次 (面外 34.6 Hz および 41.4 Hz) が明確に分離されて現れており、卓越ピークは 4 次および 5 次モードに起因している。

なお応答倍率は Pipe 2 の方がかなり大きいが、これは面内加振で Pipe 2 の方が分岐角 90° と大きいことからうなづける。

Pipe 3 では各測点とも 5 次モード (計算値 46.1 Hz) が卓越しており 2 ~ 4 次も部分的に現れている。図 4-9 のモード図からみて Y 加振で卓越するのは 3 次および 5 次とみられるのと対応している。

Pipe 4 では、X 加振の時に 2 次モード附近にみられた可動支柱との連成効果が、可動支柱に近い点での歪応答にいく分か現われている。この場合、可動支柱の応答には X 加振の時のようなノッチは生じておらず、逆に Pipe の方に (4-1-BEND-Z) 錐いノッチを生

じている。しかしX加振の場合の方が支柱と配管モデルの相互作用は大きい。可動支柱は前述のようにゴム足付きの鉄パイプであり、その振動はロッキングが主となる。従って、配管から支柱に伝わる振動がロッキングを誘発しやすいX加振（および次のZ加振）では相互作用が大きく、Y加振の場合は配管から伝わる力は主として可動支柱を水平面内でねじる方向に作用し相互作用は小さくなるものというように考えられる。この点を定量的に議論するためには、支柱+ゴム足（=支持構造物）を含めた三次元的な振動モデルを検討する必要があるが、支持部のねじり振動や減衰の評価も関連してくるので簡単ではない。

しかし一般の配管システムではこのような配管-支持構造物系が随所にあり、その連成効果が問題になる場合も少なくないと思われる。防振支持された機械装置や小型のタンクに接続された配管などがその一例である。

Pipe 4の応答のもう一つの特徴はPipe 3ではほとんど現われていない4次モード（計算41.2Hz）が大きく現われていることである。測点1と2（両端）では最大ピークは4次モードで決まっており、特に最大応答倍率を示すのが4-2-BEND-X（高い方の支柱取付部のX方向曲げ）であることは図4-9のモード図とも対応している。Pipe 3でも測点2-BEND-Xなどに少し現われているが、Pipe 4でこのように4次モードが著しく強調されたのは可動支柱の影響があったのかも知れない。

Pipe 5, 6の場合、Y加振は面外加振となり、応答曲線には面外1次モード（計算値33.8Hz）と思われる卓越ピークが明瞭に出ている。しかし細かくみるとPipe 5のピークは35Hz、Pipe 6は35.7Hzとわずかながら異なっている。可動支性をもつPipe 5では更に、支柱の共振である23Hz附近（支柱単体時に比して2~3Hzずれている）で小さな山があり、可動支柱に引きずられて振動していることがわかる。位相もPipe 6では20~30Hzでランダムな変化をしているがPipe 5は支柱の位相変化（L-X, L-Yの点線）と対応した規則的変化を示している。一方、支柱の加速度L-Yをみると35Hz附近にピークがあり、この附近では支柱が配管から加振されていることがわかる。応答の最大値では可動支柱をもつPipe 5の方が両端固定のPipe 6よりかなり小さくなっている。このような結果は簡単な門型配管でも支持構造物との連成如何でその振動挙動に大きな差異を生ずることを示しているといえよう。

図4-15および図4-16はZ（上下）方向加振の結果である。

Pipe 1, 2ではX, Y加振の場合と違い、2次モード（面内）が最大ピークを示すがあまり鋭くない。記録範囲が20~32Hzであったので他のモードはみられない。

Pipe 3, 4も全般的にX, Y加振に比し応答が小さい。最大ピークは2次モードであり、同じ面内加振であるY加振の場合、ほぼ3次>2次であったのと対照的である。Pipe 4で可動支柱との連成の影響がみられるのは前と同様である。

Pipe 5, 6はこの場合も面内加振であるため有意な応答を生じていない。可動支柱の加

速度L-X, L-Yは24.5Hz附近にピークをもち単体の場合に比し若干低くなっている。

4-3. 正弦波重ね合わせ試験

以上はX, Y, Z各一次元加振による振動性状であるが、正弦波による多次元加振の例として、各一次元加振で卓越する主要なピークを一つづつとりあげ、それらの組み合わせによる多次元加振を行ってみた。このテストの結果については定量的な処理を行っていないので、Pipe 3および4の加振波形と代表点での重ね合わせの状況のみを記載した。

Pipe 3の場合は、X, Y, Z各一次元加振で卓越するピークが現れた9.06Hz(1次モード), 30Hz(3次附近), 23Hz(2次附近)をそれぞれX, Y, Z方向の入力とした。一～三次元で7つのケースがあるが図4-17がその時の加振波形である。測定チャンネル数の関係でデータのサンプリングがやや粗くなつたため波形としてはあまり良好とはいえない。この波形を用いて二、三次元の場合に、成分となる各一次元入力に対応する応答波形を重ねて描いたのが図中の点線である。但し、各波形は最大値=1に規準化してあるので、各一次元応答波形の相対的レベルは考慮していない。しかし定性的には、各一次元応答の重ね合わせと多次元応答波は類似しているといえそうである。

もともと線形理論の適用される対象では、入力に対する重ね合わせが成立するので、本模型の場合はそのような目的にはあまり適してはいない。しかし実際の多くの構造物では重ね合わせがどの程度まで成立つか必ずしも明らかでなく、三次元振動台によるこの種のテストが今後の大きな課題であると思われる。なお、このような「重ね合わせ試験」を正弦波で行う場合、X, Y, Z各方向の振幅、振動数を独立に設定しうるだけでなく、各方向入力間の位相関係も規定する必要がある。今回の試験では3台の発振器を単に並列に使用しただけであるので、相互の位相関係は(電源ONの時点で)勝手に決まってしまうというものであった。正弦波による試験ではこのような実験手法を検討していく必要がある。一方、地震波を用いれば、そのような繁雑さを避けて比較的容易に「重ね合わせ試験」が行える。しかし有意な結果を得るためにには数多くの入力地震波を用意しなければならないと思われる。

図4-18は同様にPipe 4の場合でX 9.28Hz(1次), Y 4.05Hz(4次附近), Z 22.5Hz(2次附近)を入力とした。定性的な傾向は前と同様である。

4-4. ランダム波試験

X, Y, Z各方向の一次元、XZ, YZ, XY同時の二次元およびXYZ三次元、計7ケースのランダム波加振を行った。入力の周波数帯域はX方向5~30Hz, Y, Z方向15~50Hzとしたが台上加速度には振動台自体の伝達特性が加わっているためフラットな周波数分布にはなっていない。

一次元および三次元加振時の波形を図4-19~22に示した。この波形は原波形のドリ

ト、雑音を除去するためにMOVING AVERAGEによるLOW PASSおよびHIGH PASSフィルターを通したものである。入力レベルは振動台上で約100galを目指とした。

図の波形をみるとX加振およびX、Y、Z同時加振ではX方向入力による1次モードによる応答が卓越している。また応答の時間的経過をみるとあまり定常的ではないようである。これは入力波の特性が関連していることも考えられる。

この波形（いずれも27秒間）を定常的とみて相関およびスペクトルを出してみたものが図4-23～26である。Pipe 1～4では波形から察せられる如く、極めて単純な線状スペクトルとなり、これは1次モードを示している。同図のスペクトルは各チャンネル独立に最大値で規準化しているので相対的な比較はしていない。従って振動台加速度のうち加振方向以外のものは見かけ上大きく出ているだけである。しかし例えばX加振の時のY方向加速度のスペクトルは振動台のクロストーク的な特性のようなものを示している。このクロストークは今回実験に使用した三次元振動台が試作後まもない為専用の基礎に設置されておらず比較的簡単なフレームにより反力をとっていたために生じたものである。

Pipe 1と2および3と4の相違などはX加振のスペクトルでは現われていない。入力スペクトル分布の影響と思われる。しかし可動支柱の加速度J-Xには正弦波加振のときと同様のノッチが検出されている。Y、Z加振では高次モードがよく現われている。三次元加振ではやはりX加振によるといえる1次モードが卓越するが高次モードも部分的に現われている。本模型の場合は多次元加振を行っても、各入力のスペクトルと系の刺激関数に応じたスペクトルが並列に現われているように見える。可動支柱の加速度J-Y、L-X、L-Yなどには三次元加振で8Hz附近にピークのようなものを生じている。これは正弦波（単軸）加振で現われなかったものである。このピークはZ加振のスペクトルにも少し現れており三次元加振ではより明確になっている。従って上下加振に関連したものと思われるが、可動支柱単体の特性を詳しく調べていないのではっきりはわからない。

図4-27は一次元を含め7ケースの加振に対する前記のようなスペクトルを並列したものでPipe 1およびPipe 3の例を示した。本模型は各モードが明確に分離しており、加振レベルも低いということもあってモードの干渉といった現象もほとんどないと考えられる。

図4-28は7ケースのランダム加振を行った際の振動台のX、Y、Z各方向加速度の自己および相互相関係数($C_{xy}(\tau) / \sqrt{C_x(0) \cdot C_y(0)}$)を算定したものである。一次元加振の場合の相互相関をみると、加振方向に対しやや（時間にして0.05～0.1秒）遅れて、この方向に対する他方向の相関のピークを生じている。なお、例えばY加振のときのX-Y相関は、Xの方が遅れるので、 $\tau < 0$ のところにピークがくる。多次元加振の場合に相互相関が小さくなっているのは、各加振方向の信号レベルが高くなり干渉成分が相対的に小さくなっている

ためである。

図4-29～32は同様な計算でPipe 3の点1、点2、Pipe 4の点1、2の歪（の各方向成分）と振動台のX、Y、Z方向成分の相関を図示したものである。ある点、ある方向の応答（歪）が入力のどの成分と主に関連し、その場合のモード（振動数）はどれかといったことについて概略の判断を行う際には、正弦波のように細かくはいかないが、このような相関処理も有効と思われる。図4-29の3-1-BEAD-Zでみると、X加振、Z加振ではそれぞれ1次モード、2次モードが加振方向加速度との相間に強く現われている。一方、Y加振の場合は、Z方向に生ずる振動台の動きにかなり影響されている。これはYZ2次元加振のときにも明確に現われていて、Y加振の影響は小さい。正弦波試験の結果にあるように3-1-BEND-ZがY加振で刺激されるのは5次モード（46.1Hz）と高いため、その影響が小さくなつたものと思われる。X方向を含む多次元加振では、Y、Z方向加振の影響は非常に小さい。

5. 長方形液体貯槽実験

5-1 目的

液体貯槽の耐震設計は、近年、工業施設（石油、LPG、排液、その他各種の貯槽）および水道施設（ビルの受水槽など）の地震安全性確保に関連して注目を集めようになつた。液体貯槽は形態から分類しても、長方形、円筒形、球形、横置円筒形など多種にわたる。材質は鉄、FRP、ステンレス、木などがある。最近は地下タンクも現われている。

耐震設計を行うには対象構造物の地震挙動を適確に把握しておかねばならない。このために振動解析、強震観測、震度3～4を対象とした地震観測、振動台実験が行われている。液体貯槽の地震挙動に限らずほとんどすべての構造物において、振動解析は一次元でしか行われていない。しかし実際の地震動は一次元以上であり、構造物の応答も単に一次元解析の重ね合せで表現できるのか、それとも各方向間の連成効果があり重ね合せが無効であるのか問題になっている。

液体貯槽の振動で問題になっているのは現在のところ次のようなことであろう。

- 構造物と液体の連成振動
- 液面揺動（スロッシング）の非線形挙動
- 液面の回転

これらは水平あるいは上下一次元、水平二次元、水平上下二次元および三次元の各ケースで問題になることであり、従来はほとんど一次元でしか議論されていない。今回の実験でも一次元での現象を把握するのが主であり、二次元、三次元は一次元の重ね合せで表現できるか否かを見るのが目的である。

5-2 実験

供試体は $60\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ の平面断面を有し、高さ 50 cm の屋根付長方形タンクである。側板は厚さ 2 mm の透明塩化ビニール板である。底板は $70\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 、厚さ 5 mm の不透明塩化ビニール板であり、側板は底板に溶接されている。

この底板は厚さ 1 cm のベニヤ板に接着され、振動台にボルトで接合されている鉄箱に接着剤により取付けた。設置状況を図5-1に示す。

計測は振動台の3方向の加速度と変位、図5-2に示す供試体の加速度、図5-3に示す水位、図5-4と図5-5に示す歪について行った。計測データ成分は63チャンネルであり、デジタルデータレコーダーに記録した。図5-2から図5-5に記してある番号7～63は通し番号であり、1, 2, 3は振動台のX, Y, Z方向の加速度に、4, 5, 6はX, Y, Z方向の変位に対応する。

なおビデオ、写真による撮影も行った。

振動台の加振は次のように行った。

- 水位 0 % X 一次元ランダム波加振
Y "
Z "
X Z 二次元ランダム波加振
Y Z "
X Y Z 三次元ランダム波加振
X 方向 22Hz 一次元正弦波加振
Y 方向 17Hz 二次元正弦波加振
- 水位 50 % X 一次元ランダム波加振
Y "
Z "
X Z 二次元ランダム波加振
Y Z "
X Y "
X Y Z 三次元ランダム波加振
X 方向 9.95Hz 一次元正弦波加振
Y 方向 9.80Hz "
X 方向 9.95Hz Y 方向 9.8Hz 二次元正弦波加振
X 方向 1.06Hz 一次元正弦波加振
Y 方向 1.37Hz 一次元正弦波加振
X 方向 1.06Hz Y 方向 1.37Hz 二次元正弦波加振

○水位 75 % X 一次元ランダム波加振
Y "
Z "
X Z 二次元ランダム波加振
Y Z "
X Y "
X Y Z 三次元ランダム波加振
X 方向 9.37 Hz 一次元正弦波加振
Y 方向 8.33 Hz "
X 方向 9.37 Hz Y 方向 8.33 Hz 二次元正弦波加振
X 方向 1.12 Hz 一次元正弦波加振
Y 方向 1.34 Hz "
X 方向 1.12 Hz Y 方向 1.34 Hz 二次元正弦波加振
X 方向一次元地震波 (仙台住友B2 FN-S) 加振
Y 方向 " (" E-W) "
Z 方向 " (" V-D) "
X Z 二次元地震波 (" N-S, V-D) 加振
X Y 二次元地震波 (" N-S, E-W) 加振
X Y Z 三次元地震波 (" N-S, E-W, V-D) 加振

5-3 データ掃出し

a)

ディジタルデータレコーダーに記録したデータにはノイズが含まれているため、移動平均法によるローパス、ハイパスフィルターを通してプロッターに記録波形を描いた。

b)

ランダム波加振のときの記録データ（主に加速度記録）のフーリエスペクトルはFFTにより求め0.25, 0.5, 0.25のウィンドウを掛け描いてある。解析時間10.24秒、振動数0～30 Hz, 1/10.24 Hz きざみである。

c)

正弦波加振は主に振動モードを求めるために行った。この場合、必要とする振動数成分をフーリエ解析（最小2乗法）により求めた。

d)

ランニングスペクトルはフーリエ解析により求めた。数値は解析波形の最大値で割り、その値に10を掛けたものである。フレームタイムは3秒、シフトタイムは0.2秒とし

た。

e)

地震波加震のときの振動台加速度波形の特性はレスポンス・スペクトルにより表わした。レスポンスの計算には4次のルンゲクッタ法を用いた。

5-4 実験結果

- 静水圧による側板の歪について

図5-6に水を注入して行ったときの側板の歪の状況を示す。底板と側板の接合部、および側板の接合部（コーナー）に応力が集中しているのが判る。また水位の増加による歪分布形状が、縦方向で変化するのが判る。これらの歪分布から判断すると側板と屋根の接合部を除き、他の接合部は剛接合とみなせる。

- 側壁と水の連成振動系の卓越振動について

ここに水位0%、50%、75%での連成系の卓越振動とみなせる振動数を示すと次のようになる。

水位	X方向	Y方向	Z方向
0%	約22Hz	約17Hz	約20Hz
50%	約10Hz	約10Hz	約9.5Hz
75%	約9.37Hz	約8.33Hz	約9Hz, 11Hz

図5-12に水位75%のときのランダム波加振の測点12のスペクトルを各方向加振について示す。この図から一応の卓越振動数が読み取れる。しかし多方向加振のときの特性と一方向加振の特性についての関連について言及するのは困難と考える。

図5-17、18に水位75%の連成系の卓越振動での歪分布および加速度分布を示す。加速度分布から、X1方向ならびにY1方向加振において、逆対称のモードで振動していることがわかる。歪分布においては接合点での歪が、となりあった2枚の側板でかなりの位相差がみられる。

またX1方向加振の水平歪分布で受圧板中央の歪がほとんど現われていない。これは75%のスロッシングのときにも言えることであるが、50%のスロッシングのときには言えない。したがって水位に関連したことと考えられる。

- 液面揺動（スロッシング）について

スロッシングの卓越振動数（1次固有振動数）は次に示す値であった。

水位	X方向	Y方向
50%	1.06Hz	1.37Hz
75%	1.12Hz	1.34Hz

図5-7、8、9は50%水位のときの各方向の1次スロッシング振動数で加振したとき

の波形である。図5-9は水平2方向で加振したときのものである。これらの波形を見て気付くことであるが、加振振動数（1次スロッシング振動数）の2倍の振動数で振動している波形があり、かつほとんどの波形にその成分が含まれているとみられる。

図5-10, 11はX, Y, 一次元スロッシング加振のときの、加振振動数成分の歪および加速度分布と、加振振動数の2倍の振動数成分の歪および加速度分布である。加振振動数は逆対称モードを示しているのに対し、2倍の振動数成分は対称モードを示している。なお加速度分布の値は振動台加振加速度と測点加速度の振幅比である。2倍の振動数モードの場合には振動台加速度は加振振動数成分、測点加速度は2倍の振動数成分である。

図5-13, 14, 15は75%水位のときの各方向の1次スロッシング振動数で加振したときの波形であり、図5-16, 17は50%のときと同様の歪および加速度分布である。50%水位のときと同じく2倍の振動数成分がかなり大きく現われている。逆対称性、対称性は50%水位のときと同じだが、歪分布形状にはいくらかの差異がみられる。

○地震波加振について

図5-20がX一次元加振のときの波形であり、図5-21が測点1（振動台X方向加速度）と測点19（水圧）のランニングスペクトルである。歪応答波形からみてスロッシングによる挙動が卓越しているので、ランニングスペクトルの振動数は0.5Hz～4.0Hzとした。このときも1次スロッシング振動数のところと、その2倍の振動数のところに山がみられる。写真5-7はこのときの連続写真である。この写真から最大波高を推定すると6cm程度と考えられる。

図5-22, 23、写真5-8は同様のY一次元加振のものである。写真から推定される波高はX一次元加振のときよりも若干小さい。

図5-24, 25、写真5-8はZ（上下）一次元加振のときのものである。スロッシングはほとんど現われておらず、水圧のランニングスペクトルは振動台のZ方向加速度のそれとほぼ一致している。写真には、ほとんど動きが見られない。

図5-26, 27、写真5-9はXY二次元加振のときのものである。X方向、Y方向の加振レベルはおののの一次元加振のときとほぼ同じである。写真をみると主要動付近で回転しているような感じを受ける。波高は10cmを越えていると見られる。

図5-28, 29はXZ二次元加振のときのものであり、X一次元加振のときと、波形、振幅とも類似しており、Z（上下）方向の効果はとても小さいと考えられる。Z方向の加振レベルはX方向の半分である。

図5-30, 31、写真5-10はXYZ三次元加振のときのものであり、各方向の加振レベルはおののの一次元加振のときとほぼ同じである。波形、ランニングスペクトルおよび連続写真ともほぼXY二次元加振のときと同じであり、写真をみると（ビデオをみても同じである）やはり液面が回転しているように感じられる。図5-32はこのときの振動台の

各方向の加速度の応答スペクトルである。X, Y方向は3 Hz附近, Z方向は1 Hz附近に最大のピークが見られる。

○方向の重ね合せについて

各方向の一次元地震波加振の波形を重ねて、三次元および二次元地震波加振の波形を表現できるか、試みてみた。重ね合せの方法は、一次元地震波加振における振動台加速度波形の最大値の時刻が、多次元加振のときの各方向の最大値が現われた相対的時刻と一致するようになる方法である。このようにして一次元地震波加振を重ね合せると、多次元地震波加振のときの応答波形と全波形にわたりほぼ一致する。図5-33が一次元を重ね合せた波形であり、X, Y, Zを重ね合せたものと図5-30を比較すれば、その整合性がわかる。X, Yを重ね合せたものは図5-26と比較できる。図5-34はその差を描いたものである。最大値だけの差を取ってみれば20%程度であるが、波形を全時間にわたりひき算をし、差を取って行くと、位相の関係で差が大きくなり、タンク側板の振動が卓越している加速度波形では60%程度の差が現われているが、歪波形では20%程度の差になっている。このように波形のひき算をすると振動数の高い成分で、微小な入力波形の差により応答波形に位相差が生じているため、このような差が生じると考えられるが、全体の波形を見れば明らかなように、液面の非線形性があるにもかかわらず（多分、非線形性が弱かったと考えられよう）重ね合せが成立しているとみられる。この結果からすれば多次元加振でみられた回転は見かけものであったのがわかる。

5-5 側壁剛性が1次スロッシング振動数に与える影響

加振方向に直角な側壁（受圧板と呼ぶ）を周辺回転支持板とみなし、また加振方向に平行な側壁を剪断壁とみなしたときの1次スロッシング振動数が剛体タンクの1次スロッシング振動数からいかなる程度変化するか計算してみた。（表5-1参照）

側壁剛性を考慮した計算方法については別紙（箕輪、1979）を参照されたい。

実験においてY方向加振50%水位(1.37Hz)と75%水位(1.34Hz)では75%水位の方が1次スロッシング振動数で低くなっている。表5-1の計算結果はこの結果を定性的にではあるが説明していると思う。

一方バルジング振動数は計算方法が周辺回転支持板にしか適応できないため、この供試体のように明らかに周辺固定支持板である場合は、実験値と計算値の差が大きくなる。周辺固定の場合を単に板剛性を上げるだけではモードが異なるため水の効果を含めて説明することは困難である。

5-6 液面揺動に於て現われた基本振動の倍の振動成分について（2次元非線形スロッシングのランダム波応答について）

液体貯槽の非線形スロッシング挙動については、円筒タンクに於いては Hutton(1963) が、長方形タンクに於いては、Faltinsen(1974) がすでに振動安定性、回転までも含んで解析している。ここでは1次スロッシング（液面揺動）のとき現われる基本振動の2倍の振動数に焦点を合せ、水平方向地震波形に対しその応答を求める目的とした。解法は perturbation method を用いた。(Wind Wave, 1965)

$\dot{\phi} = \dot{\phi}(x, z, t)$: 速度 potential

$$z = h \quad \text{で} \quad \dot{w} = \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} = 0 \quad \dots \quad \text{式 1}$$

η を波高、 g を重力加速度とする、 $z = h + \eta$ で

$$g\eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0 \quad \dots \quad \text{式 2}$$

$\eta = \eta(x, t)$ と考え、 $\dot{\phi}$ と η の関係は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \quad \dots \quad \text{式 3}$$

ここで $\dot{\phi}(x, z, t)$ を $z = h$ の近傍で Taylor 展開することを考える。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}(x, z, t) &= \dot{\phi}(x, z, t) \Big|_{z=h} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \Big|_{z=h} (z - h) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \Big|_{z=h} (z - h)^2 \dots \quad \text{式 4} \end{aligned}$$

右辺の第2項まで取り、 $z - h = \eta$ とし、式 2、式 3 に代入する。

式 2 は

$$\begin{aligned} g\eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} \eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial x \partial z} \eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0 \dots \quad \text{式 5} \end{aligned}$$

3乗以上の項を無視すると

$$g\eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z \partial t} \eta + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right) = 0 \quad \dots \quad \text{式 6}$$

式 3 は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial x \partial z} \frac{\partial \eta}{\partial x} \eta + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \eta \quad \dots \quad \text{式 7}$$

3乗以上の項を無視すると

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \eta \quad \dots \dots \dots \text{式 8}$$

式 6 の左辺第 3 項の η を $\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t}$ とする。すると式 6 から

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} - \frac{1}{g} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right) \right) \dots \dots \text{式 9}$$

式 9 を式 8 に代入し、3 乗以上の項を無視する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t^2} - \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t^2} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial x} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \\ - \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} - \frac{1}{g} \frac{\partial^3 \dot{\phi}}{\partial t^2 \partial z} = 0 \end{aligned}$$

整理して

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} = \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial z^2} \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} - 2 \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial x} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial x} - \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial z} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t^2} \frac{\partial^2 \dot{\phi}}{\partial t \partial z} \right. \\ \left. + \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial t} \frac{\partial^3 \dot{\phi}}{\partial t^2 \partial z} \right) \quad \text{式 10} \end{aligned}$$

この式 10 を解くことになる。

$\dot{\phi} = \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2$ と仮定し、 $\dot{\phi}_1$ を剛体長方形タンクの線形スロッシングに対する速度 potential とする。 $\dot{\phi}_1$ は次のようなものである。

$$\dot{\phi}_1 = \sum_{m=0,1,2} \dot{\beta}_m \cos \frac{m \pi x}{a} \cosh \frac{m \pi}{a} z - \left(x - \frac{a}{2} \right) \dot{u}_g \quad \dots \dots \dots \text{式 11}$$

\dot{u}_g は地動あるいは振動台速度である。

perturbation method を用い、式 10 の左辺の $\dot{\phi}$ を $\dot{\phi}_2$ 、右辺の $\dot{\phi}$ を $\dot{\phi}_1$ として $\dot{\phi}_2$ を求める。すなわち $\dot{\phi}_1$ を入力とした次の線形方程式を解くことである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{\phi}_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \dot{\phi}_2}{\partial z} = \frac{\partial \dot{\phi}_1}{\partial t} \frac{\partial^2 \dot{\phi}_1}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial \dot{\phi}_1}{\partial x} \frac{\partial^2 \dot{\phi}_1}{\partial x \partial t} - \frac{\partial \dot{\phi}_1}{\partial z} \frac{\partial^2 \dot{\phi}_1}{\partial z \partial t} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial^2 \dot{\phi}_1}{\partial z \partial t} \frac{\partial^2 \dot{\phi}_1}{\partial t^2} \right. \\ \left. + \frac{\partial \dot{\phi}_1}{\partial t} \frac{\partial^3 \dot{\phi}_1}{\partial z \partial t^2} \right) \quad \text{式 12} \end{aligned}$$

$\dot{\phi}_2$ は剛タンクのスロッシングの条件 $\frac{\partial^2 \dot{\phi}_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{\phi}_2}{\partial z^2} = 0$ $\left. \frac{\partial \dot{\phi}_2}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$ を満すと

すると、 $\dot{\phi}_2$ に対し $\dot{\phi}_1$ と同様に次のような解を仮定する。

$$\dot{\phi}_2 = \sum_{n=0,1,2} \alpha_n \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi}{a} z \quad \dots \dots \dots \quad \text{式 13}$$

式 12 に式 11, 式 13 を代入する.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=0,1,2} \left(\ddot{\alpha}_n \cosh \frac{n\pi h}{a} + \dot{\alpha}_n \frac{n\pi}{a} g \sinh \frac{n\pi h}{a} \right) \cos \frac{n\pi x}{a} = \sum_{m_1=0,1,2} \sum_{m_2=0,1,2} \left| \ddot{\beta}_{m_1} \dot{\beta}_{m_2} \right. \\
 & \cdot \frac{\pi^2}{a^2} m_2 \left\{ \left(\frac{m_2}{2} \cosh \frac{m_1\pi h}{a} \cosh \frac{m_2\pi h}{a} - \frac{m_1}{2} \sinh \frac{m_1\pi h}{a} \sinh \frac{m_2\pi h}{a} \right) \left(\cos \frac{\pi}{a} (m_1 + \right. \right. \\
 & \cdot (m_1 + m_2)x + \cos \frac{\pi}{a} (m_1 - m_2)x) + m_1 \cos h \frac{m_1\pi h}{a} \cosh \frac{m_2\pi h}{a} \left(\cos \frac{\pi}{a} (m_1 + \right. \\
 & \left. \left. m_2)x - \cos \frac{\pi}{a} (m_1 - m_2)x \right) \right\} + \ddot{\beta}_{m_1} \dot{\beta}_{m_2} \frac{\pi}{2ga} \left(m_1 \sinh \frac{m_1\pi h}{a} \cosh \frac{m_2\pi h}{a} + m_2 \right. \\
 & \left. \left. \cosh \frac{m_1\pi h}{a} \sinh \frac{m_2\pi h}{a} \right) \left(\cos \frac{\pi}{a} (m_1 + m_2)x + \cos \frac{\pi}{a} (m_1 - m_2)x \right) \right| - \sum_{m=0,1,2} \\
 & \left\{ \dot{\beta}_m \ddot{u}_g \frac{m\pi}{a} \cosh \frac{m\pi h}{a} \left(\frac{\pi}{a} (x - \frac{a}{2}) \cos \frac{m\pi x}{a} - 2 \sin \frac{m\pi x}{a} \right) - 2 \ddot{\beta}_m \dot{u}_g \frac{m\pi}{a} \right. \\
 & \left. \cosh \frac{m\pi h}{a} \sin \frac{m\pi}{a} x + (\ddot{\beta}_m \ddot{u}_g + \dot{\beta}_m \dot{u}_g) \frac{m\pi}{ga} \sinh \frac{m\pi h}{a} \cdot (x - \frac{a}{2}) \cdot \cos \frac{m\pi x}{a} \right\} \\
 & - 2 \ddot{u}_g \dot{u}_g \quad \dots \quad \text{式 14}
 \end{aligned}$$

式 14 の両辺に $\cos \frac{n\pi x}{a}$ を掛け, x について 0 から a まで, すなわちエネルギー積分をほどこす。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \ddot{\alpha}_n + \frac{n\pi g}{a} \tanh \frac{n\pi h}{a} \dot{\alpha}_n \right\} \frac{a}{2} \cosh \frac{n\pi h}{a} = \sum_{m_1=0,1,2} \sum_{m_2=0,1,2} \left| \ddot{\beta}_{m_1} \dot{\beta}_{m_2} \frac{m_2\pi^2}{a^2} \right. \\
 & \left(\frac{m_2}{a} \cosh \frac{m_1\pi^2}{a} \cosh \frac{m_2\pi^2}{a} - \frac{m_1}{2} \sinh \frac{m_1\pi h}{a} \sinh \frac{m_2\pi h}{a} \right) \frac{a}{2} (\delta(n - m_1 + m_2) + \\
 & \delta(n - m_1 + m_2)) + m_1 \cosh \frac{m_1\pi h}{a} \cosh \frac{m_2\pi h}{a} \frac{a}{2} (\delta(n - m_1 - m_2) - \delta(n - m_1 + m_2)) \\
 & + \ddot{\beta}_{m_1} \dot{\beta}_{m_2} \frac{\pi}{2} \left(m_1 \sinh \frac{m_1\pi h}{a} \cosh \frac{m_1\pi h}{2} + m_2 \cosh \frac{m_2\pi h}{a} \sinh \frac{m_2\pi h}{a} \right) \frac{a}{2} (\delta(n - m_1 -
 \end{aligned}$$

$$\left. m_2) + \delta(n - m_1 + m_2)) \right| = \sum_{m=0,1,2} \left\{ \dot{\beta}_m \ddot{u}_g \frac{m\pi}{a} \cosh \frac{m\pi h}{a} \frac{a}{2\pi} \varepsilon(m_1 n) + (\ddot{\beta}_m \ddot{u}_g \right. \\ \left. + \ddot{\beta}_m \ddot{u}_g) \frac{m\pi}{g a} \sinh \frac{m\pi h}{a} \frac{a^2}{2\pi^2} \varepsilon(m_1 n) \right\} \quad \cdots \text{式 15}$$

ただし $n \neq 0$ であり、 $\varepsilon(m, n)$ は次式を意味する

$$\varepsilon(m, n) = \frac{1}{(m+n)^2} (\cos \pi(m+n) - 1) + \frac{1}{(m-n)^2} (\cos \pi(m-n) - 1)$$

$\delta(l)$ は $l = 0$ で 1, $l \neq 0$ で 0 (クロネッカーノルムの δ 関数) β_m は水平 1 方向入力なので次式で与えられる。

$$\ddot{\beta}_m + \frac{m\pi}{a} g \tanh \frac{m\pi}{a} h \beta_m = - \frac{4a \ddot{u}_g}{m^2 \pi^2 \cosh \frac{m\pi h}{a}} \quad m = 1, 3, 5 \quad \cdots \cdots \cdots \text{式 16}$$

$n = 0$ だと

$$\ddot{\alpha}_0 a = \sum_{m_1=0,1,2} \sum_{m_2=0,1,2} \dot{\beta}_{m_1} \dot{\beta}_{m_2} \frac{m_2 \pi^2}{a^2} \left(\frac{m_2}{2} \cosh \frac{m_1 \pi h}{a} \cosh \frac{m_2 \pi h}{a} - \frac{m_1}{2} \sinh \frac{m_1 \pi h}{a} \right. \\ \left. \cdot \sinh \frac{m_2 \pi h}{a} \right) a \delta(m_2 - m_1) - m_1 \cosh \frac{m_1 \pi h}{a} \cosh \frac{m_2 \pi h}{a} a \delta(m_2 - m_1) + \ddot{\beta}_{m_1} \\ \cdot \ddot{\beta}_{m_2} \frac{\pi}{2ga} \left(m_1 \sinh \frac{m_1 \pi h}{a} \cosh \frac{m_2 \pi h}{a} + m_2 \cosh \frac{m_2 \pi h}{a} \sinh \frac{m_1 \pi h}{a} \right) a \delta(m_2 - m_1) - \\ \sum_{m=0,1,2} \left\{ \dot{\beta}_m \ddot{\eta}_g \frac{m\pi}{a} \cosh \frac{m\pi h}{a} \frac{a}{2\pi} \varepsilon(m, 0) + (\ddot{\beta}_m \ddot{u}_g + \ddot{\beta}_m \ddot{u}_g) \frac{m\pi}{g a} \sinh \frac{m\pi h}{a} \right. \\ \left. \cdot \frac{a^2}{2\pi^2} \varepsilon(m, 0) \right\} - 2 \ddot{u}_g \dot{u}_g a \quad \cdots \text{式 17}$$

$\varphi_1 \varphi_2$ で仮定し液面モードは $n = 0$ を除いて各次モード自身で体積不変の条件をみたしており、 $n = 0$ の項を考えると、この条件がみたされなくなるので、 $\ddot{\alpha}_0$ の成分は無視する。ここで $m = 1$ とした場合、 $n = 2$ の場合のみ式 15 の右辺は値を有する。この場合について、式 16 を時間で 1 回積分して表すと次のようになる。

$$\ddot{\alpha}_2 + \frac{2\pi g}{a} \tanh \frac{2\pi h}{a} \alpha_2 = \frac{2}{a \cosh \frac{2\pi h}{a}} \left[\frac{\pi^2}{4a} \left(\frac{1}{2} + \left(\cosh \frac{\pi h}{a} \right)^2 \right) \dot{\beta}_1^2 + \frac{\pi}{4g} \left(\sin \right. \right.$$

$$\cdot \frac{2\pi h}{a}) \ddot{\beta}_1^2 - \frac{1}{2} \cosh \frac{\pi h}{a} \varepsilon(1, 2) \int \dot{\beta}_1 \ddot{u}_g dt - \frac{a}{2\pi g} (\sinh \frac{\pi h}{a}) \varepsilon(1, 2) \dot{\beta}_1 \ddot{u}_g \right] \dots$$

式 19

式 17, 19 で求めた α_2 , β_1 を $\dot{\phi}_2$, $\dot{\phi}_1$ の式に代入すれば速度ポテンシャルが求まり、動水圧 p はベルヌーイの定理により

$$g\rho_w \eta + \rho_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right) - p = 0 \quad \dots \text{式 20}$$

free surface 上の流線では $p = 0$ であり、式 2 が得られる。座標を固定し、 $z = h$ 付近で η について展開したのが式 5 以下の式である。水中での圧力は式 5 以下の解析で free surface の条件が ϕ の中に含まれており、式 20 の第 1 項がないベルヌーイの式から求めても良いであろう。よって次式から求めた。

$$p = \rho_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right) \right) \quad \dots \text{式 21}$$

波高 η は式 9 に ϕ を代入すれば求められることになる。計算例として、図 5-38 に式 9 から求めた波高の波形を示す。式 9 から求めた最大波高は写真およびビデオから観察した波高 5 ~ 7 cm に比べ 10 cm となっており大きすぎる。むしろ、表面水圧（現実にはマイナス値は出ない）から $p = g\rho_w \eta$ で逆算した値の方が観察に近い。なお図 5-35, 36 は X, Y 各一次元加振のときの水圧を非線形と線形について比較したものであり、非線形であると 1 次スロッシングの 2 倍の振動数成分を表現できるのがわかる。

また、この効果が液面近くで大きいのもわかる。図 5-38 は平面でタンクをみたときの中央での水圧であり、ほとんど 1 次スロッシングの 2 倍の振動数成分しか現れていない。

6. 盛土模型の振動実験

6-1 模型の概要

この実験及び次項のブロック積模型実験は、配管、タンクなどに比し、より壊れやすいものを三次元で加振してみようということを目的として行ったものである。

しかし、この種の特に小型模型による破壊実験は振動応答を主とする実験に比べ模型の作成、実験手法とも非常に難しいものであった。実験模型は前の写真 3-3 あるいは図 6-1 に示したような極めて簡単な“ミニ盛土”である。実際の盛土を単に相似縮尺しただけの模型では、この程度小さくなると、とうてい壊れ得ないと思われる所以のように四周を垂直に近い斜度をもつ斜面とした。模型の製作は鉄枠の中に砂質土を入れ、締め固めた後枠をはずして所定の形状に成形した。模型は 3 体作成したが、それぞれの乾燥密度、含水比は図 6

— 1 の通りである。締め固めは、模型 1, 2 は底部より 5 ~ 10 cm 深さごとに突き固めを行い、模型 3 では最上面だけで突き固めた。このため模型 2, 3 は密度、含水比は同じであるが、下部では模型 3 の方が多少ゆるづめだったと思われる。結果的には模型 3 では下部の方から崩れており、その影響があったようである。一方、模型 2 のようにある深さごとに突き固めると全体としては強固になるものの突き固めた面に境界層のようなものができる可能性がある。模型 2 の実験ではその影響と思われる亀裂が生じた。加振時の模型の挙動は、3 台のカメラ A, B, C (図 6-1) により毎秒 3 ~ 4 コマで撮影した。入力波はランダム波を用い、それで崩壊しない場合は正弦波も使った。土中には底面より深さ 6 ~ 7 cm のところに加速度計 3 個 (X, Y, Z 方向) を埋め込んだ。振動台の加速度は主として、盛土全体のスリップを防止するための木枠 (高さ 5 cm) を経て盛土の下部に伝達される。土中の加速度はこの伝達がうまく行われているかどうかをチェックするためにつけたものである。従って応答加速度の測定などは本実験では行っていない。

実験の本来の目的は、ほぼ同一条件の模型を 4 ~ 5 体作成し、あらかじめ決めた入力波を用いて一~三次元加振の破壊力を比較することであったが、今回は模型作成に時間を要し、また破壊に必要な入力を算定するための事前の予備実験を十分に行う余裕がなかったため、初期の目的を達することはできなかった。このため、以下では模型 1, 2, 3 個々についての実験結果について簡単に記す。

6-2 実験結果

① 模型 1

含水量が多く締め固めも十分に行ったもので予定した以上に強固な模型となり、以下のようないくつかの加振を行ったが最終的に天端の一部が落下するとどまった。加振は主に X 方向であった。

第 1 回加振 ランダム波 8 秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 977, \ddot{y} = 263, \ddot{z} = 138$

土中 " $X = 780, \ddot{Y} = 219, \ddot{Z} = 162$

(加速度値は (最大 - 最小) / 2, 単位 gal, 以下同様)

第 2 回加振 ランダム波 8 秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 1051, \ddot{y} = 291, \ddot{z} = 140$

土中 " $X = 885, \ddot{Y} = 215, \ddot{Z} = 182$

第 3 回加振 正弦波 10Hz 7 秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 695, \ddot{y} = 193, \ddot{z} = 105$

土中 " $X = 535, \ddot{Y} = 148, \ddot{Z} = 118$

第 4 回加振 正弦波 20Hz 8.5 秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 834, \ddot{y} = 220, \ddot{z} = 102$
 土中 " $\ddot{X} = 717, \ddot{Y} = 172, \ddot{Z} = 113$

第5回加振 正弦波 25Hz 15秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 926, \ddot{y} = 188, \ddot{z} = 152$
 土中 " $\ddot{X} = 784, \ddot{Y} = 146, \ddot{Z} = 166$

第6回加振 正弦波 18Hz 35秒

振動台加速度 $\ddot{x} = 812, \ddot{y} = 201, \ddot{z} = 110$
 土中 " $\ddot{X} = 729, \ddot{Y} = 176, \ddot{Z} = 124$

第1回加振より第5回加振までは模型に顕著な外的変化は見られなかったが天端附近に弱い亀裂が生じはじめた。第6回加振でこの亀裂が発達し、天端の一部が崩れ落ちた。図6-2は第1回加振の時の振動台加速度及び土中加速度の波形である。振動台加速度の土中への伝達は問題ないようである。また、図6-3は第1回～6回各加振の初めの部分の波形を示す。最終加振にいたるまで振動台加速度 \ddot{z} ～土中(底部)加速度となっており、加速度計より下の木枠の高さ附近でスリップなどの異常がなく加振力が伝達されていることがわかる。

写真6-1、6-2は第6回加振の際の模型頂部の崩落状況である。写真6-1はカメラA、6-2はカメラBで撮影したものである。写真6-3は最終加振終了後の状況である。

② 模型2

模型1が強固にできすぎたので砂質土を多少乾燥させた後、締め固めの方法・回数を模型1とほぼ同様にして作成したのが模型2である。計5回の加振(一～二次元)を行ったが、第1回加振の際に底面から $\frac{1}{3}$ 位の高さでほぼ全周にわたる亀裂を生じた。これが内部にも拡がっていたためか第2回以後の加振ではほとんど変化が見られず、亀裂がやや明確になった程度であった。すなわち、亀裂面を境に加振力の伝達が十分に行われなかつたようである。この原因としては模型製作の際に締め固めを行った面で境界層が残り、これが亀裂面になってしまったことが考えられる。5回の加振入力は以下の通りであるが土中加振度 \ddot{X} は動作不良により欠落している。

第1回加振 ランダム波(10～25Hz)8秒(**X Z**が主)

振動台加速度 $\ddot{x} = 737, \ddot{y} = 222, \ddot{z} = 495$
 土中 " $\ddot{Y} = 159, \ddot{Z} = 408$

第2回加振 ランダム波(10～25Hz)8秒(**X Z**が主)

振動台加速度 $\ddot{x} = 745, \ddot{y} = 238, \ddot{z} = 498$
 土中 " $\ddot{Y} = 159, \ddot{Z} = 402$

第3回加振 ランダム波(10～25Hz)8秒(**X Z**が主)

振動台加速度 $\ddot{x} = 711, \ddot{y} = 223, \ddot{z} = 630$
 土中 " $\ddot{Y} = 152, \ddot{Z} = 398$

(土中加速度の上下方向 \ddot{Z} が振動台に比べ異常に小さい原因は不明)

第4回加振 ランダム波(10~25Hz)8秒(X Yが主)

振動台加速度 $\ddot{x} = 740, \ddot{y} = 685, \ddot{z} = 130$

土中 " $\ddot{Y} = 599, \ddot{Z} = 147$

第5回加振 正弦波 20Hz 17.5秒(Xが主)

振動台加速度 $\ddot{x} = 809, \ddot{y} = 212, \ddot{z} = 86$

土中 " $\ddot{Y} = 136, \ddot{Z} = 74$

図6-4は第1回加振の際の振動台および土中加速度の波形である。また図6-5に、図6-3と同様第1回~5回加振の初めの部分の波形を示した。前述のような亀裂面が生じていたとしても、加速度計の高さまでは振動台加速度がほぼ伝達されていたといえる。しかし加速度のレベルは振動台と多少の差異がある。振動台加速度は振動台にとりつけられている制御用のセンサーによるものであり、計器の違いによる誤差とわれわれの加速度計の土中への設置方向が多少ずれていたために生じたものと思われる。

但し第3回加振の上下加速度は異常と思われる差異を示した。写真6-4は少々分りにくいかが第1回加振による亀裂面の発生を示したものである。

③ 模型3

模型2の実験終了後直ちに作成したものである。含水量は模型2と同じであるが締め固めは最上面での突き固めだけにした。このため、上部での密度は模型2と同じであるが下部は多少ゆるく、全体として模型2よりゆるづめであったと思われる。模型1、2では主加振が一~二次元であったが、模型3では以下のようなX、Y、Z各方向ほぼ同一レベルの三次元加振を1回行ったところで完全に崩壊した。

加振 ランダム波(10~25Hz)8秒(XYZ三次元)

振動台加速度 $\ddot{x} = 886, \ddot{y} = 789, \ddot{z} = 735$

土中 " $\ddot{X} = 830, \ddot{Y} = 821, \ddot{Z} = 794$

加振波形及び土中加速度波形の一部を拡大して図6-6に示した。レベルの多少の差異を除けば振動台加速度と土中加速度のX、Y、Z各成分の波形はそれぞれ同じである。参考に図6-7に加振時間7秒間の波形スペクトルを示した。当然のことながら土中加速度のスペクトル分布は振動台のそれに一致している。この加振で模型3は崩壊したが、その過程は連続写真6-5(カメラA)、6-6(カメラB)、6-7(カメラC)に示されている。写真6-7はC面で最初に下部が崩れ、その影響で上部が滑り落ちたことを示している。(模型のA-D面の位置については図6-1を参照)。この模型3では、加振の総エネルギーは模型1、2に比しかなり大きいものであったといえる。しかし崩壊の形態は前記のように模型の中間~下部のゆるづめに大きく影響されていたのではないかと考えられる。写真6-8は加振終了後の状況である。

7. ブロック積み模型振動実験

7-1 模 型

写真3-4に示したように5cm×5cmの木製ブロック（立方体）を積み上げ、20cm×20cm×高さ40cmの柱体を作成した。振動台上には柱体の各辺がX, Y方向に平行になるようにセットした。また底板は木板とし振動台にボルトで固定した。このような模形は重力と摩擦により安定し、振動中も衝突と摩擦による減衰が作用するなど全体としての挙動は非常に複雑であるが、簡単に崩壊が生じるという点で多次元振動の効果を観察するのに適している。

7-2 入 力 波

地震波（宮城沖）の3成分を用いたが、400gal程度の加速度を振動台上で生じさせる必要があるので変位の大きい低周波成分（2Hz以下）を入力アンプのフィルターで減衰させて使用した。3成分の比率は前述のように5:5:2を目標とし、それらの組合せで一～三次元入力波、計14ケースの加振を行った。各ケースで振動台加速度の波形は同じであり、三次元の場合を図7-1に示した。また各ケースの振動台最大加速度（p-pの1/2）は表7-1のようであった。各方向の加速度を決めた上で一～三次元の組み合せ7ケースを行い、更に全体のレベルを変えるのが目標であったが、実際に加振してみると予定通りの値が得られなかつたわけである。このため各ケースの比較はややあいまいになってしまった。なお、加振方向と異なる方向に生じた振動台の加速度は表7-1でカッコ付きの数値で示してある。

7-3 ブロックの振動及び転落の状況

この模形は8個のブロックを上下方向に積み上げた5cm×5cm×高さ40cmの柱体が16本密に並んでいるものである。従って、加振による伝達力が小さいうちは上下のブロック間の摩擦力の拘束を受けるためブロック間の滑りはほとんどなく、各柱体が下部で浮上を生じ单独でまた各柱体相互では衝突を生じながら振動する。写真7-1はこの状況を示している。加振の最大加速度附近に至って、外側の柱体から順次浮上り→転倒の形で崩壊した。別の振動台で行った加振実験（2Hz以下の成分が残っており、従ってより変位の大きい地震波を用いた）では全柱体が同時に同じ方向に剛体のように崩落する状況がみられたが、今回は振動数がやや高いこともあるて各柱体単独の動きが目立った。図7-2は各ケース別入力加速度と転落したブロックの個数を図化したものである。最大加速度の総和が大きい順に並べてあるが、これと転落の程度は無関係のようである。NS, EW成分ともあるレベル以上になると転落数が急増し、それ以下では転落しないという状況がみられた。しかしこの場合も写真7-2（ケース8）のように柱体相互のズレや全体的な回転などが見られた。転落を生じたのは全体のうち7ケースあり、このうち2ケースは転落数が少なかった。写真7-3～9

は転落したケースについてその状況を示したものである、一次元加振の場合、X方向（NS）加振では加振方向両側への転落がみられ、Y（EW）方向加振では片側のみへの転落を生じた。これは波形の特性によるものであろう。二次元以上の加振では（水平-上下の二次元はケース9のみであったが転落はなかった）いずれもX及びY方向への転落を生じている。また転落に至る経過については写真では判断できないが、ビデオの記録をみると柱体が浮上り後ねじれの回転を起こしながら転倒していく様子が明らかであった。また転落前の柱体の浮き上がりは、いずれのケースもおおむね最下段のブロックとその上のブロックの間で主要な浮き上りを生じていた。時間的制約のため実験はわずかなケースにとどまり統計的なデータとするに至らなかったが、多次元振動の効果を見るにはこのような簡単な模型も一つの手段であるといえよう。

8. まとめ

とりまとめとして、各供試体についての実験結果の要約および今回の経験からみて今後の三次元振動実験で考慮すべきと思われる点について簡単にまとめておきたい。

8-1 各供試体についての実験結果の要約

① 配管模型

平面Z型2種（分岐角の異なるもの）、立体Z型2種（両側支柱とも床板に剛結合のもの及び片側の支柱が床板と弾性結合をするもの）、門型2種（同前）の6模型を用いた。配管材は径2mmの鋼線を用いた。X、Y、Z各方向の一次元加振に対する応答曲線及び固有振動を求めた。多次元加振は、各方向加振によって刺激される主な共振振動数を組み合わせた正弦波加振及びランダム波加振（一次元X、Y、Z、二次元XZ、XY、YZ、三次元XYZの7ケース）を行った。

多次元加振ではそれぞれの加振に最も刺激されやすいモードが同時に現われた。各方向加振に対する固有振動がかなり離れており、モード間干渉は小さかったようである。また配管を支持する構造物と配管の連成の影響が自由振動の減衰及び応答曲線に顕著に現われた。

② 長方形液体貯槽模型

厚さ2mmの透明塩化ビニールの高さ50cm、長さ60cm、幅40cmの屋根付長方形液体貯槽模型を供試体として用いた。

加振は水位0%、50%，75%の三つのケースについて行った。

側壁と液体の連成振動系の卓越振動数はX、Y方向ではほとんど違いは見られなかった。空の状態では、X、Y方向の卓越振動数の違いがあった。振動モードを見ると立体的な、すなわち各方向が連成したモードで振動しているのが判った。

液面揺動現象においては、1次スロッシング振動で2倍の振動数成分が現われると言う液面の非線形効果が顕著に測定された。またY方向の加振において、1次スロッシング振動数が水位50%と75%では、75%の方が、50%の1.37Hzに対し1.34Hz（地震波加振のときの自由振動から読み取っても1.36Hz）と小さくなっている。これは剛な貯槽では説明できないことであり、側壁の変形効果によるものと解釈でき、側壁を弾性体とした解析でも説明できる。

多次元振動の効果については明確なことは言えないが、X、Y、Z方向の一次元地震波加振の測定波形を重ね合せると、X、Y、Zの三次元地震波加振の測定波形とほぼ全測点についてその形が近似することから、この程度の振幅のスロッシングについては方向についての重ね合せがほぼ有効と考えられる。ただし、重ね合せ波形と三次元加振波形のひき算波形で10Hz程度の振動が現われているため（振動台の動きが必ずしも同じとは言えない点があると思われるが）、バルジング（側壁と液体の連成振動）については重ね合せが有効であるかどうかは不明である。

③ 盛土模型

高さ30cm、底面40cm×40cm、上面約20cm×20cmの角錐体状のミニ盛土を作成した。全体的な移動を防止するため底面より5cmの高さまで木枠で拘束した。斜度を非常に大きくしたのは単に崩壊挙動を見ることだけを目的としたためである。

模型は1（乾燥密度2.54、含水比10.6%）、2（2.44、5.6%）、3（2.44、5.6%）の3体を作成した。模型1は強度が高く、主にX方向一次元加振で800gal前後の入力を数回（ランダム波、正弦波等）加えても天端の一部が落下するにとどまった。

このため模型2では乾燥後ゆるづめにしたのであるが、初回加振（X方向一次元ランダム700gal 約8秒、振動数範囲10～25Hz）で底部から1/3位のところで全周にわたって亀裂を生じ、以後の加振では力の伝達が不十分となったようである。

模型3は、模型2と異なり最上面でのみ締め固めを行ったもので、上部の密度は模型2と同じであるが下部は模型2より多少ゆるづめであったと思われる。この場合1回だけの加振（XYZ三次元ランダム波800gal、振動数10～25Hz、約8秒）で完全に崩壊した。しかし崩壊そのものは下部のゆるづめが主因であったと思われる。

④ ブロック積模型

5cm角の木製ブロックを積み上げて20cm×20cm×高さ80cmの柱体を作成して加振した。この作業は容易であるが入力を種々変えて行う場合かなりの時間を要する。このため今回は統計的に整理できるほどのデータを得ることができなかった。

実験は地震波（宮城沖）のNS、EW、UD成分を組み合せて一～三次元加振とし、計14ケースについて転落ブロック数のチェック及びビデオ撮影を行った。転落の様子はNS加振では両側へ、EW加振ではもっぱら片側へというように入力波の特性に依存していた。

上下動の効果はこの程度の実験回数では何ともいえないが、水平二次元加振の場合はプロック柱がねじれの回転を伴いながら転落する状況が明らかであった。

8-2 三次元振動実験において考慮すべき問題点など

三次元振動実験はわれわれにとって初めてであり、また小型振動台によるものであったが、今後の三次元振動実験において考慮すべきと思われた問題点も少なくない。それらを列記すると以下のようである。

① 国立防災センターの大型振動台での実験など大規模な実験では、実験者が全体を把握するのが困難である。たとえば実験者が実験中の供試体の状況を監視し、かつ計測の状況を把握しながら実験を行うには、最低数名の人間が必要となろう。これに対し小型の振動台の実験であると実験者が振動台の運転、供試体、計測等の状況を一人で把握できるので、実験を行い易い。このため三次元振動の問題点を把握するのに小型模型実験は役立つと思う。

② 供試体によっては、三方向の正弦波で振動数、振幅がいずれも異なる加振を行いたい場合がある。今回の実験では三台の発振器を並べたわけであるが、厳密に言うと、三方向の位相関係の制御を無視していたことになる。従って独立した三台の発振器ではなく、一体化された三次元正弦波発振器でしかも入力の設定がプログラマブルに行える装置の開発が必要である。

③ 一次元の加振実験では、当センターの大型振動台でも 50 チャンネルを越えることは少ない。（これは計測システムの制限も一因であるが）しかし三次元の実験では、今回のように簡単な模型でも必要最少限のデータチャンネルはたちまち 50 チャンネルを越える。将来の本格的な三次元振動実験では 300 チャンネル程度に達することも考えられる。このような大量のデータの迅速な処理、特に波形および解析結果の図化表示を効率的に行えるシステムを考えておく必要がある。われわれの場合、当センターのコンピュータ及びオフラインのプロッタを用いたのであるが、それでも一通りの処理をし、出力を得るにはかなりの手間と時間を要した。

④ 上記 ③ 項と関連して、小型センサーの開発も今後の課題の一つである。特に加速度計、変位計のような基本的なセンサーは現在程度の性能を落さずにどこまで小型軽量化できるか、接続ケーブルの軽量化を含めて今後の進展に期待するところが大きい。

⑤ 従来の一次元加振実験においても、部分的に供試体の条件を変えて破壊実験を行うことが少なくなかったが、この場合他の条件は勿論同じでなければならない。一ないし三次元を含む実験では加振入力の選び方も多く、これらの各種加振条件に対応する供試体の特性をそろえるために（特に破壊実験では）多大の労力を要することになる。そのための補助手段として、例えば常時微動による固有振動及び減衰性のチェック機能を実験システムに加えるなどの工夫が必要である。

⑥ 振動台上にセットされた供試体と加振機の加振方向は必ずしも想定通り一致するとは限らない。厳密な試験ではこれが問題になる場合もある。基礎的な一方向加振実験の場合には特に気になるところである。このような場合、三次元加振の利点を生かして、任意方向直線加振（例えば斜め方向スイープ加振など）の機能をもたせれば、供試体の特性把握においても、また供試体セットの状況をチェックする点でも大変便利であろう。この直線加振は勿論、実験者が頭の中でリサジュー分解して入力するのではなく、方位角とその他の情報（振動数など）を与えて機械的に設定できるものでなければならない。

⑦ センサーのうち基本的な加速度計等については前述したが、耐震実験で従来あまり使われていないもの、例えば回転またはねじれ検出センサー、非接触の位置検出器などは三次元振動実験では重要なものとなる。本実験でもとり上げた配管模型や一般的な骨組構造物の応答を立体的に考える場合、部材に作用するトルク或いはねじり応力は全体的な応答を考える場合に重要な要素となる。このような場合、対象とする部材附近での回転加速度などの測定も必要となる。また、位置検出では、本実験の場合、液体貯槽の液面や、ブロック積の単体の移動を調べるために必要であったが、これといった方法がないのが現状である。前述したような映像からの読みとりが可能になれば最も理想的であるが、過渡的な手法として、簡単なターゲットによる光学的検出が現在より安価にかつ多チャンネルで実用化されることが期待される。

⑧ 映像記録については、実験状況のモニター記録のみを主眼として考えても三次元振動実験の場合は少なくとも三方向からの撮影が必要であるし、欲をいえば、供試体の1側面を複数の方向から撮影したい。また実験者の一人一人は供試体の背面を見ることができない。従って少なくとも三方向からの同期撮影が必要である。本実験ではビデオシステムと二方向同期モータードライブカメラシステムを用いた。ビデオシステムは一般の市販品を用いたため残像が現われ像の境界が不鮮明になり、映像から変形（たとえば波高）を定量的に読み取ることができなかった。今後、映像を利用して立体視を行い、変形測定を行うことも考えられるので、残像が無視でき、かつ高速（1秒200コマ）、三方向同期撮影が出来るビデオシステムを本格的な三次元振動実験では用いる必要がある。

謝 辞

今回の実験には多くの方々の並々ならぬ御協力を得た。特に、試作後間もない小型三次元振動台の使用を快諾され、種々の便宜を図っていただいた（株）日立製作所機械研究所並びに同社土浦工場の御好意に対し深く感謝いたします。

また国立防災科学技術センター第一研究部 八木鶴平室長並びに 岸井徳雄主任研究官には、モータードライブカメラの御貸与およびその使用法に関する御助言を得た。

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

同第三研究部降雨実験室 福園輝旗、森脇 寛、井口 隆の各氏には主に盛土模型の製作について御協力をいただいた。

同施設課 飯田晴男氏には実験期間中、主に計測作業を担当していただいた。

以上の方々に厚くお礼申し上げます。

最後に、本実験全般にわたって国立防災科学技術センター 高橋 博 第二研究部長の熱心な御指導をいただいた。末筆ではありますが深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hutton, R.H., (1963): An Investigation of Resonant Nonlinear, Nonplanar for Surface Oscillations of a Fluid. NASA, TND - 1870.
- 2) Kinsman, Blair (1965): Wind Waves. Pionce Hall, 588-597.
- 3) Faltinsen, Odd M., (1974): A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks. *Journal of Ship Research*, Vol. 18, No. 4, 225-241.
- 4) 箕輪親宏 (1979) : 長方形水槽の振動解析. 日本建築学会論文集, 289号, 21-29.
- 5) 日本機械学会 (1962, 1963, 1967) : 原子炉配管系の耐震設計法に関する研究成果報告書

(1981年8月21日 原稿受理)

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

表 2-1 小型三次元振動台の主な仕様

Table. 2-1 Main Spec. of Small Scale 3-Dimensional Shaking Table

加 振 方 向	水平2方向(X, Y) 上下方向(Z)
振動台	寸 法 1 m × 1 m
	重 量 約 500 kg
	構 造 鋼板溶接構造
加 振 機 容 量	X : 1000 kgf × 2台
	Y : 1000 kgf × 2台
	Z : 1000 kgf × 4台
振動台変位	X, Y, Z方向とも±25 mm
加振機 振動台間結合方式	静圧継手
振動台および試験体の自重補償	上下方向加振機内蔵バランスピストン
加振制御方式	電気-油圧サーボ(アナログ制御)

MEASURE SYSTEM

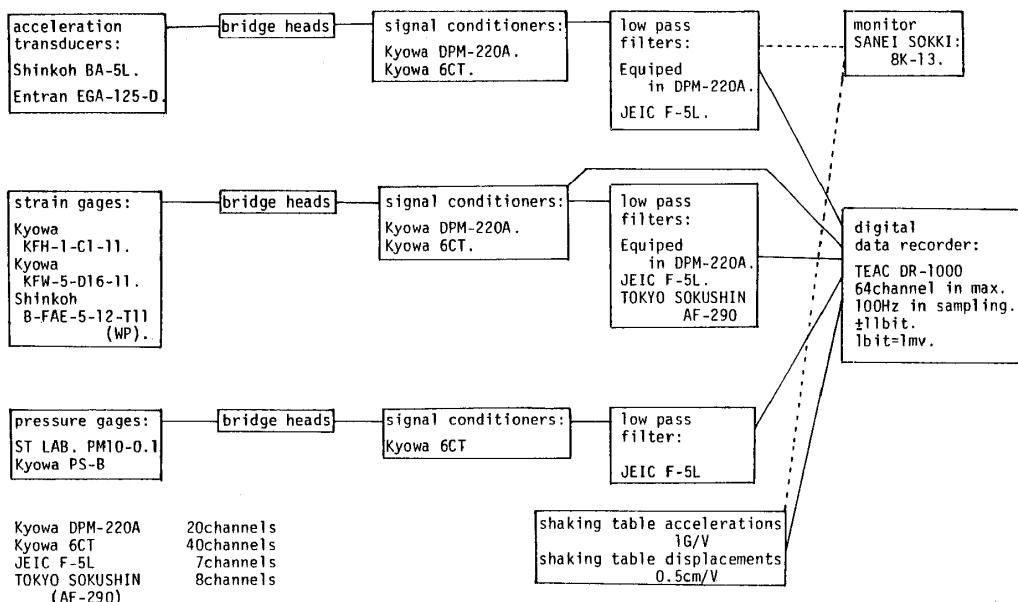


図 3-1 計測システム

Fig. 3-1 Measurement System

図 4-1 配管モデルのレイアウト
Fig. 4-1 Layout of Pipe Models

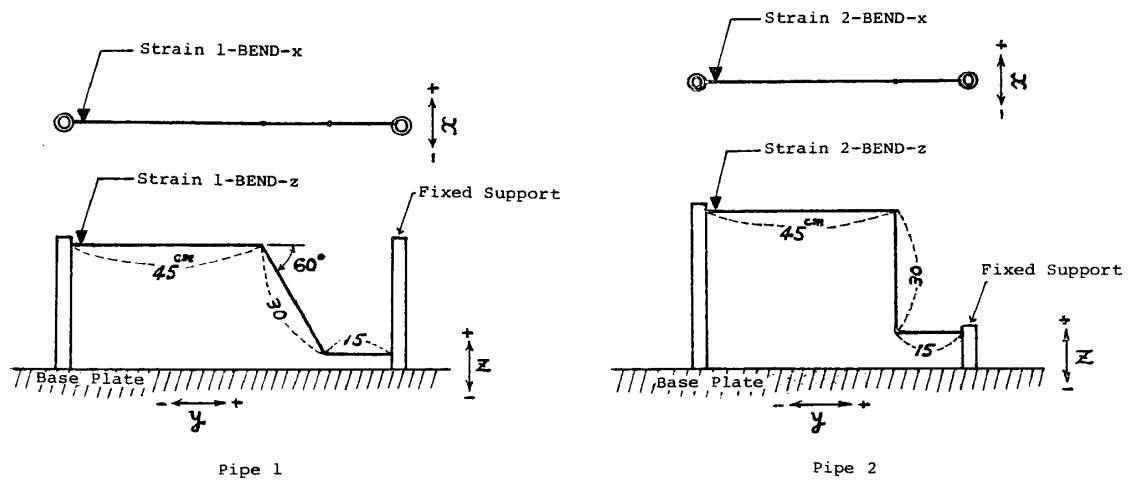
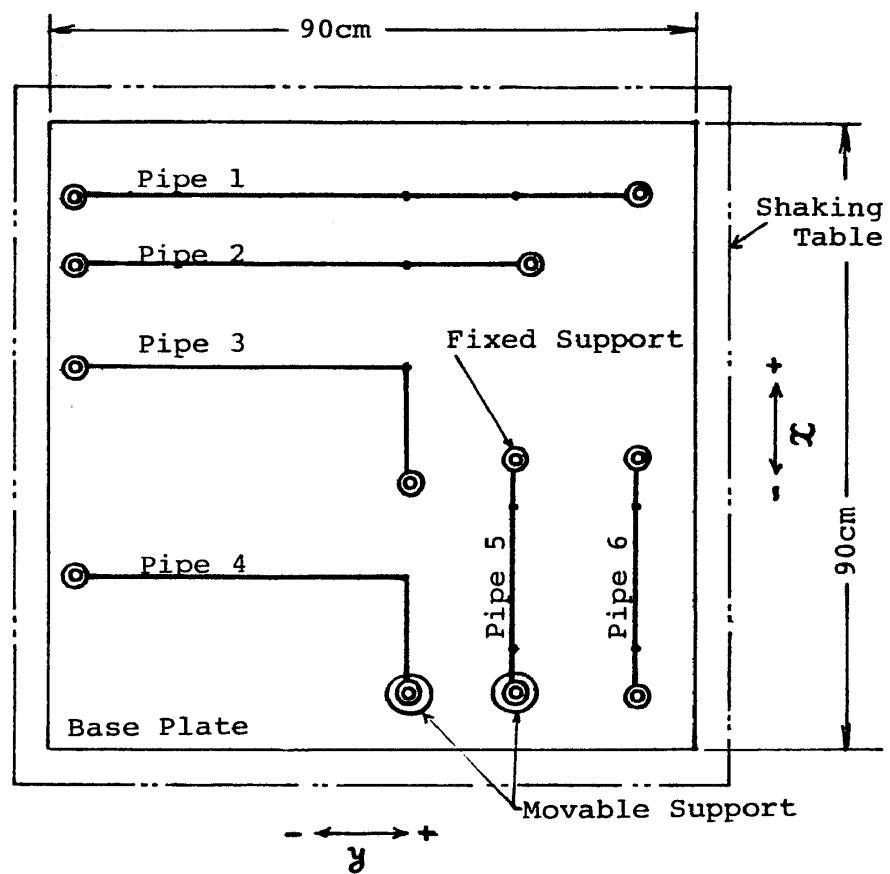


図 4-2 二次元Z型配管モデル(2種)
Fig. 4-2 Two-Dimensional Z-Type Models (Pipe 1 and Pipe 2)

三次元精密振動台による小型模型実験一小川・箕輪

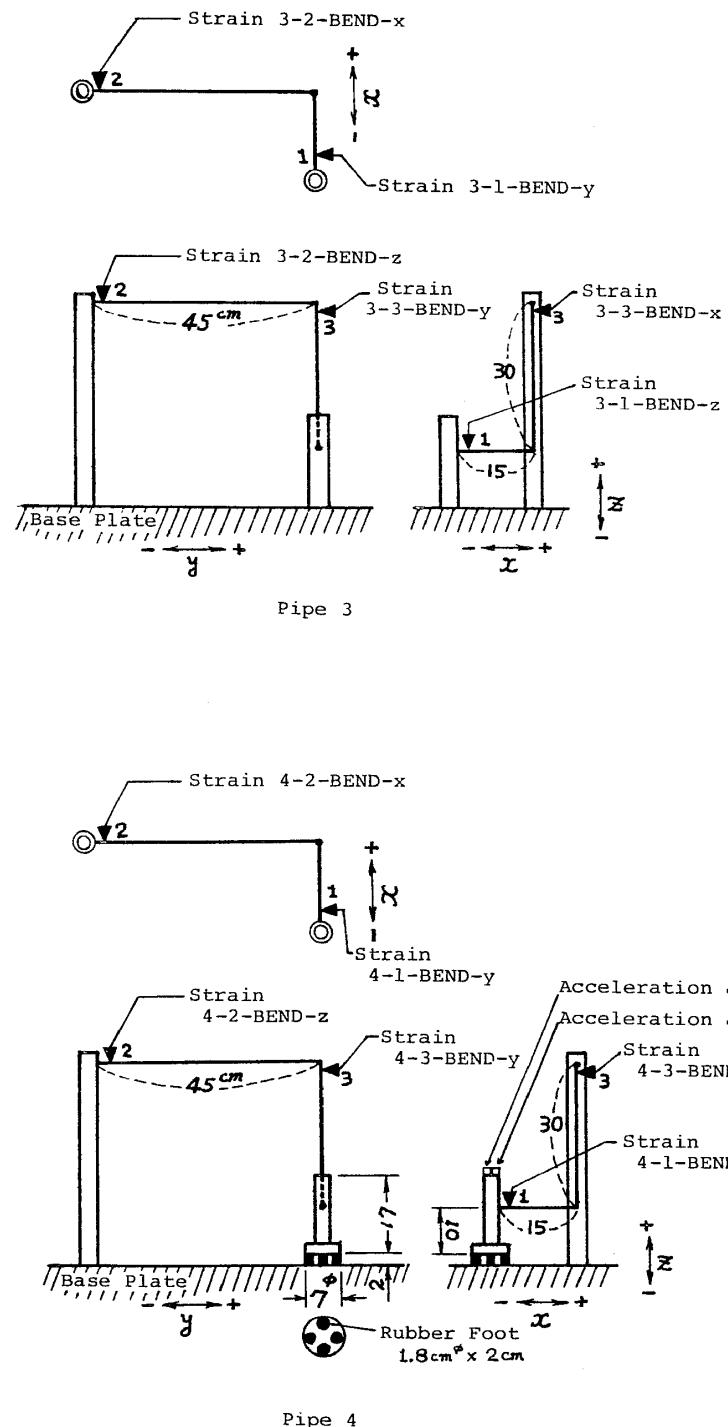


図 4-3 三次元Z型配管モデル(2種)

Fig. 4-3 Three-Dimensional Z-Type Models (Pipe 3 and Pipe 4)

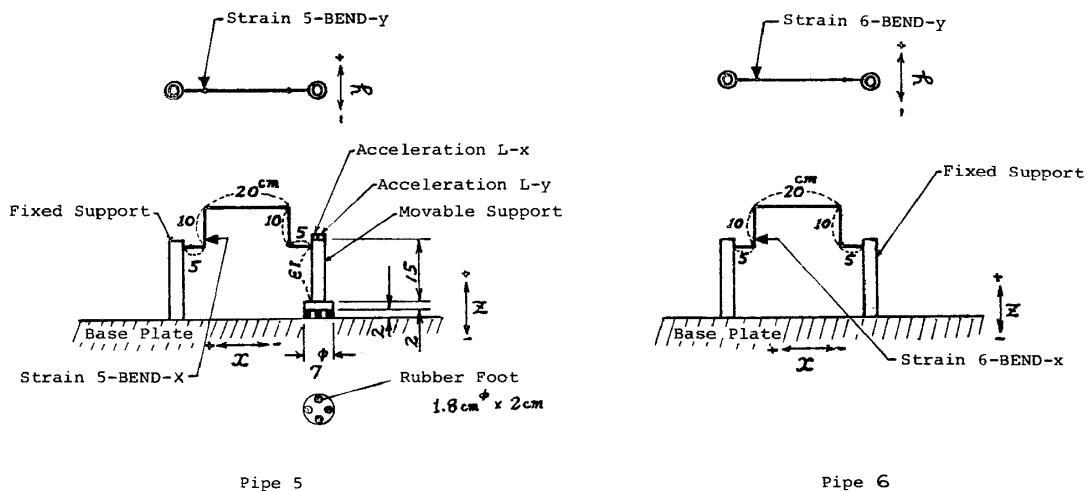


図 4-4 二次元門型配管モデル(2種)

Fig. 4-4 Two-Dimensional L-Type Models (Pipe 5 and Pipe 6)

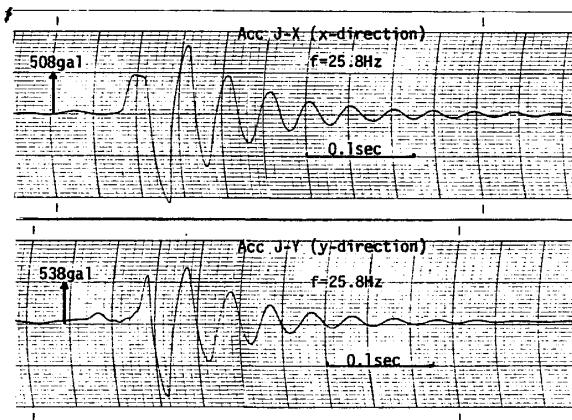


図 4-5 Pipe 4 の可動支柱の自由振動(単体)

Fig. 4-5 Free Vibrations of The Movable Support of Pipe 4
(without pipe)

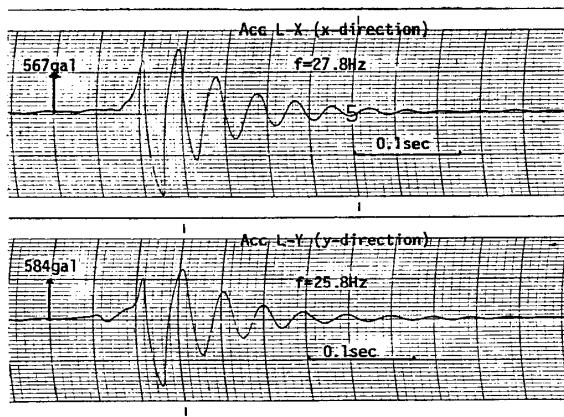


図 4-6 Pipe 5 の可動支柱の自由振動(単体)

Fig. 4-6 Free Vibrations of The Movable Support of Pipe 4
(without pipe)

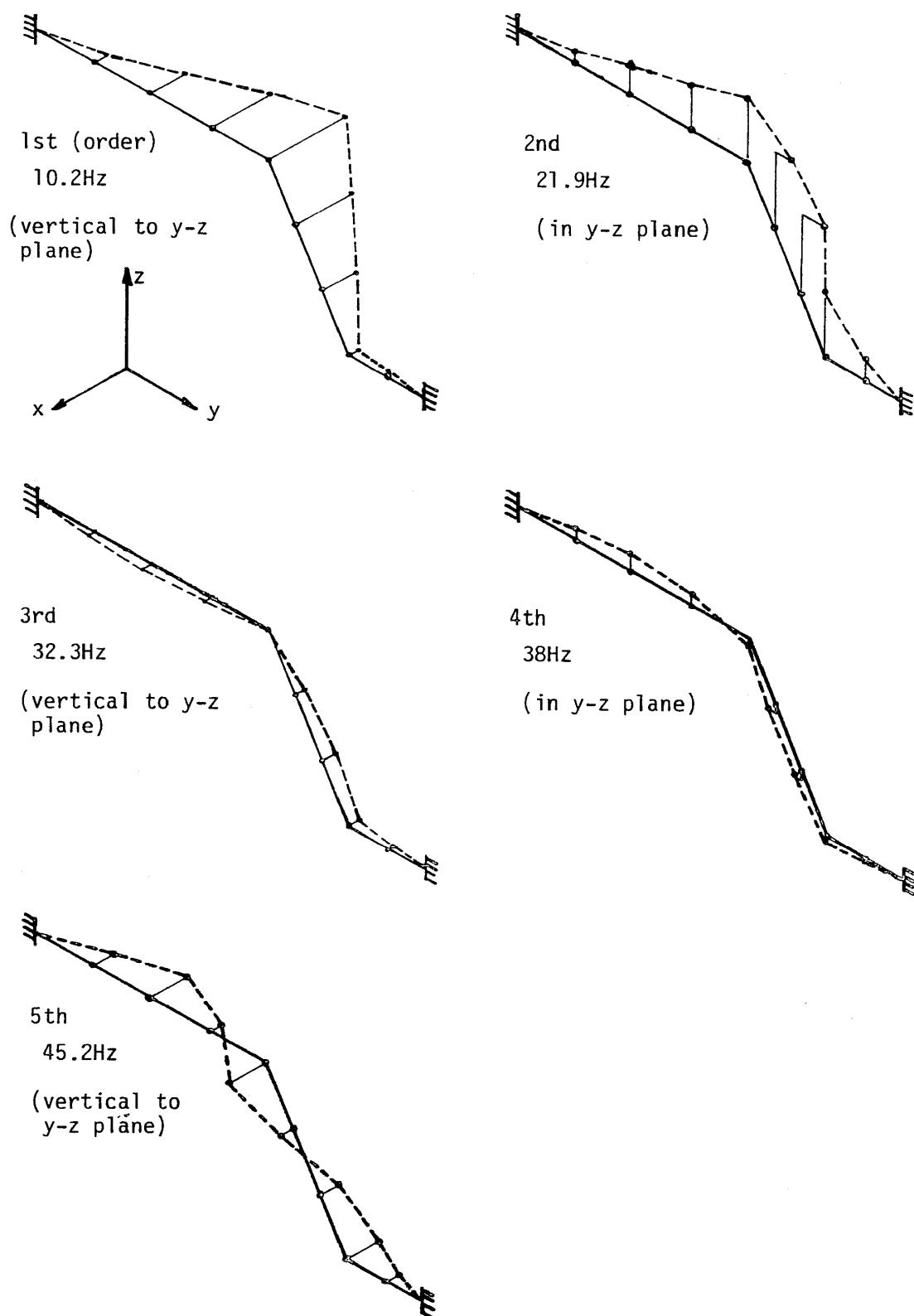


図 4-7 固有振動と刺激関数 (Pipe 1)

Fig. 4-7 Natural Frequencies and Participation Functions (Pipe 1)

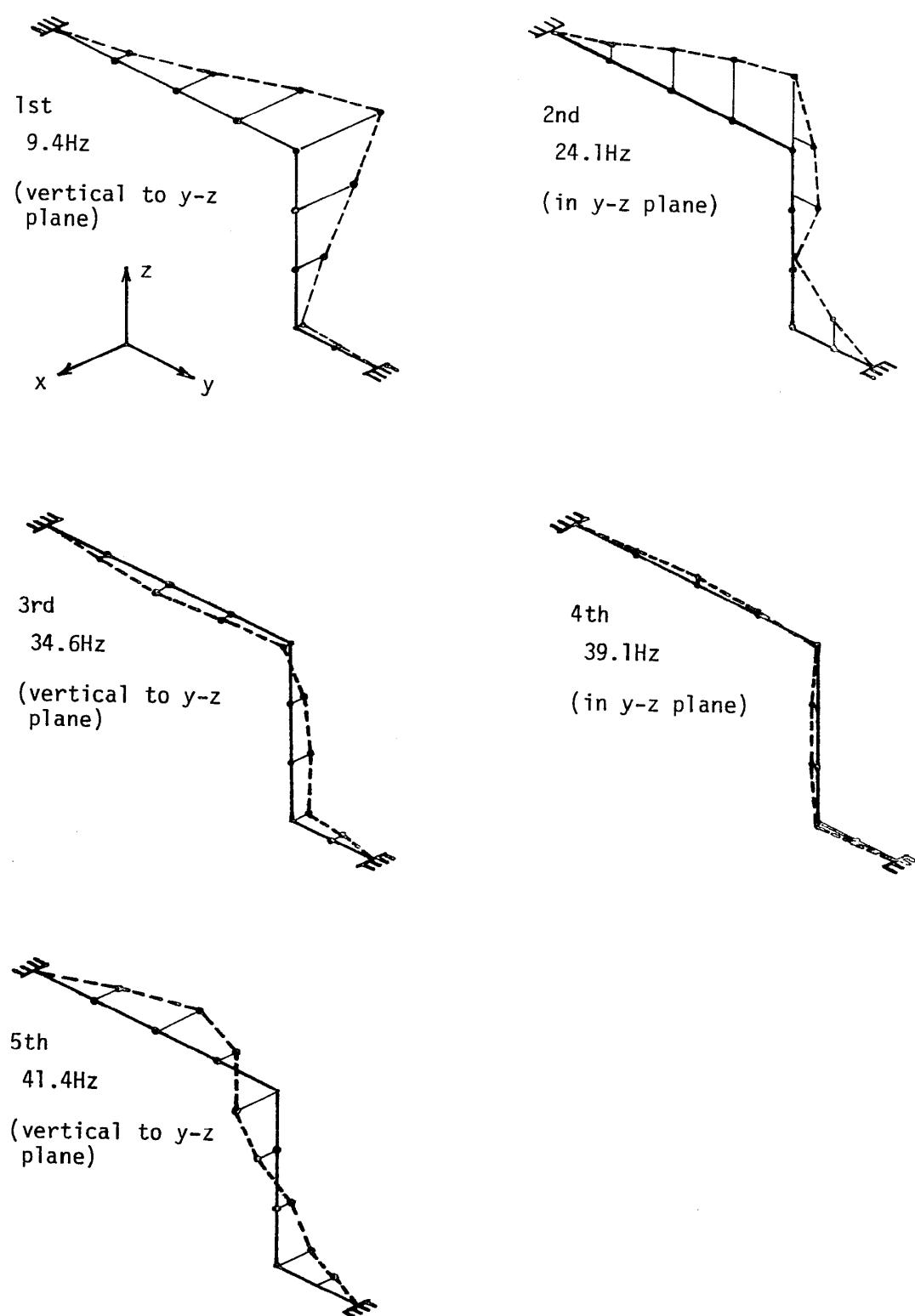


図 4-8 固有振動と刺激関数 (Pipe 2)

Fig. 4-8 Natural Frequencies and Participation Functions (Pipe 2)

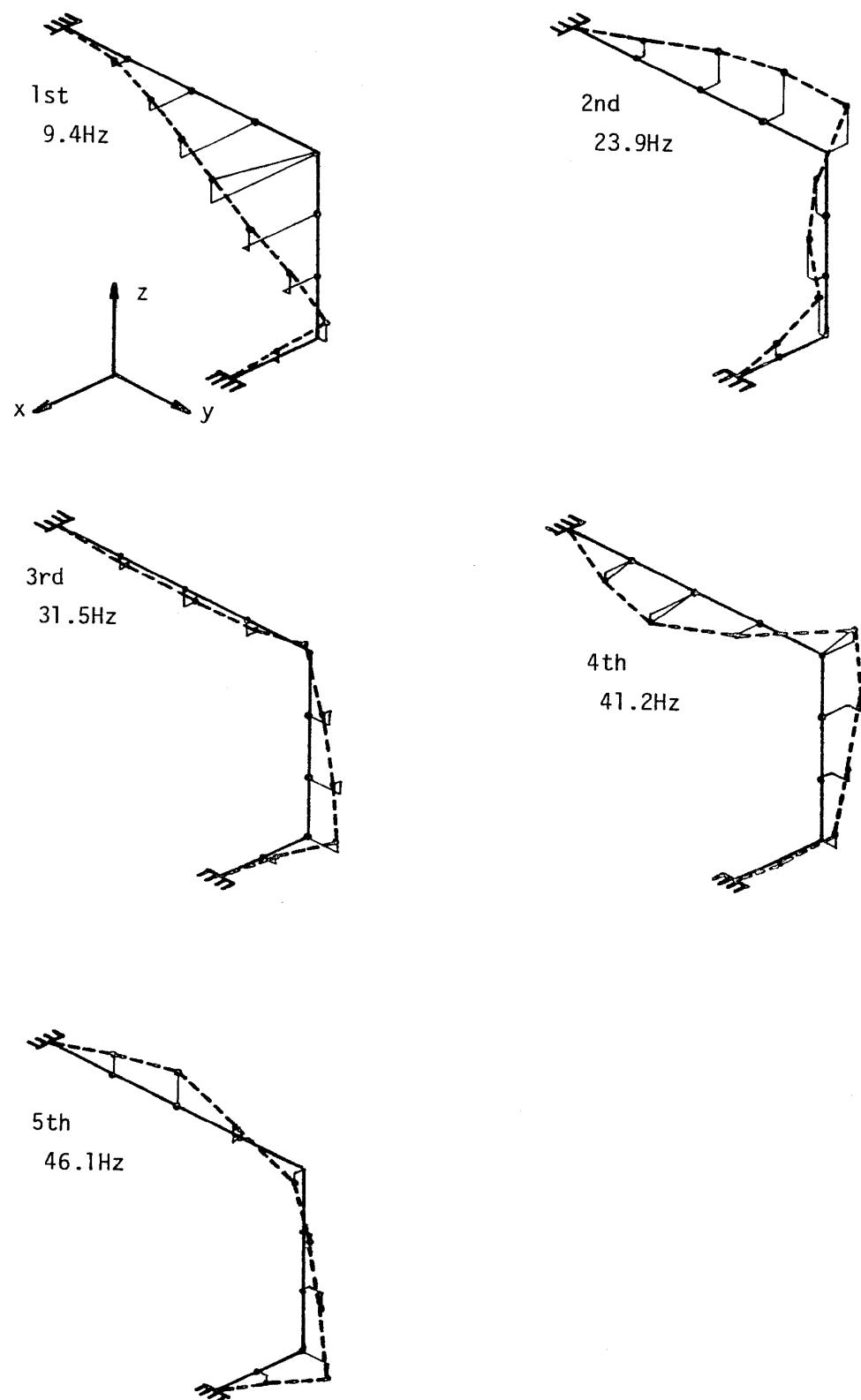


図 4-9 固有振動と刺激関数 (Pipe 3)

Fig. 4-9 Natural Frequencies and Participation Functions (Pipe 3)

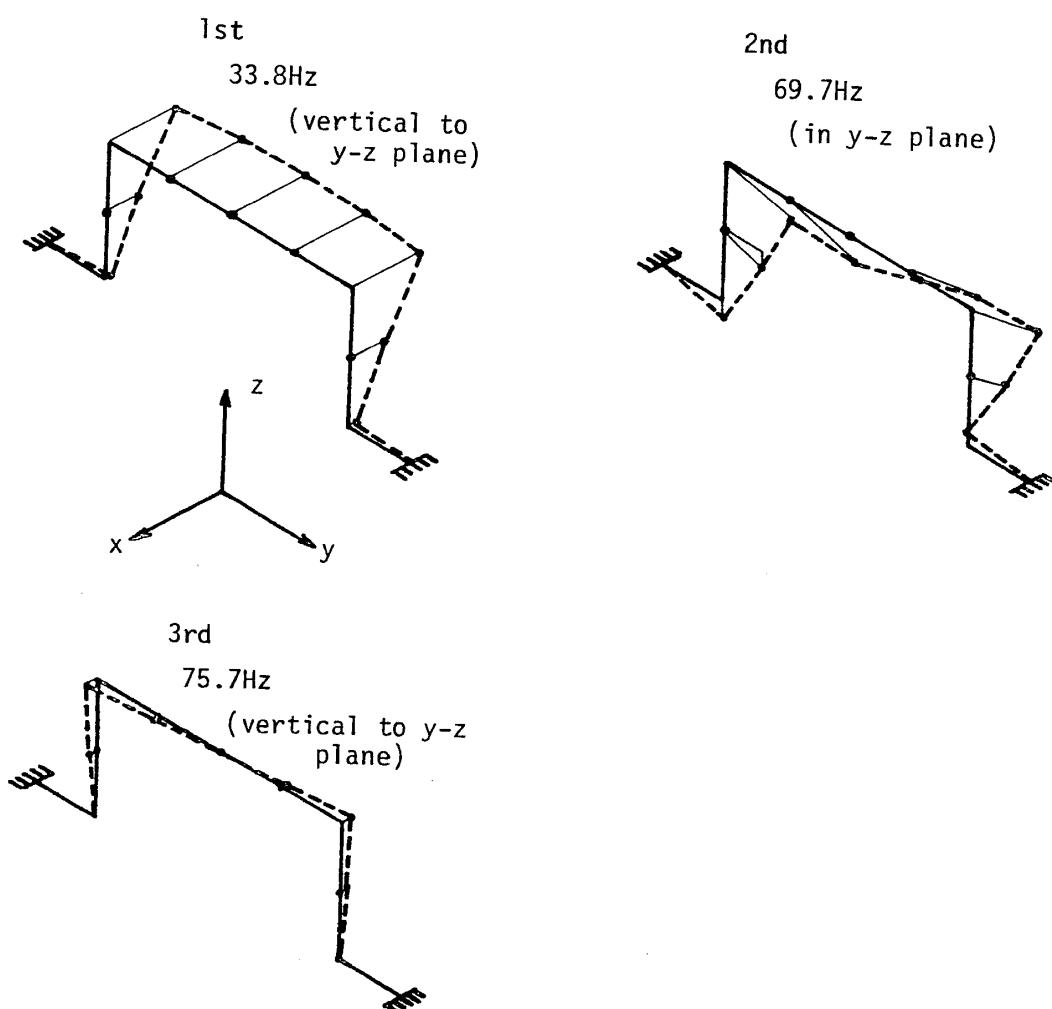


図 4-10 固有振動と刺激関数 (Pipe 6)

Fig. 4-10 Natural Frequencies and Participation Functions (Pipe 6)

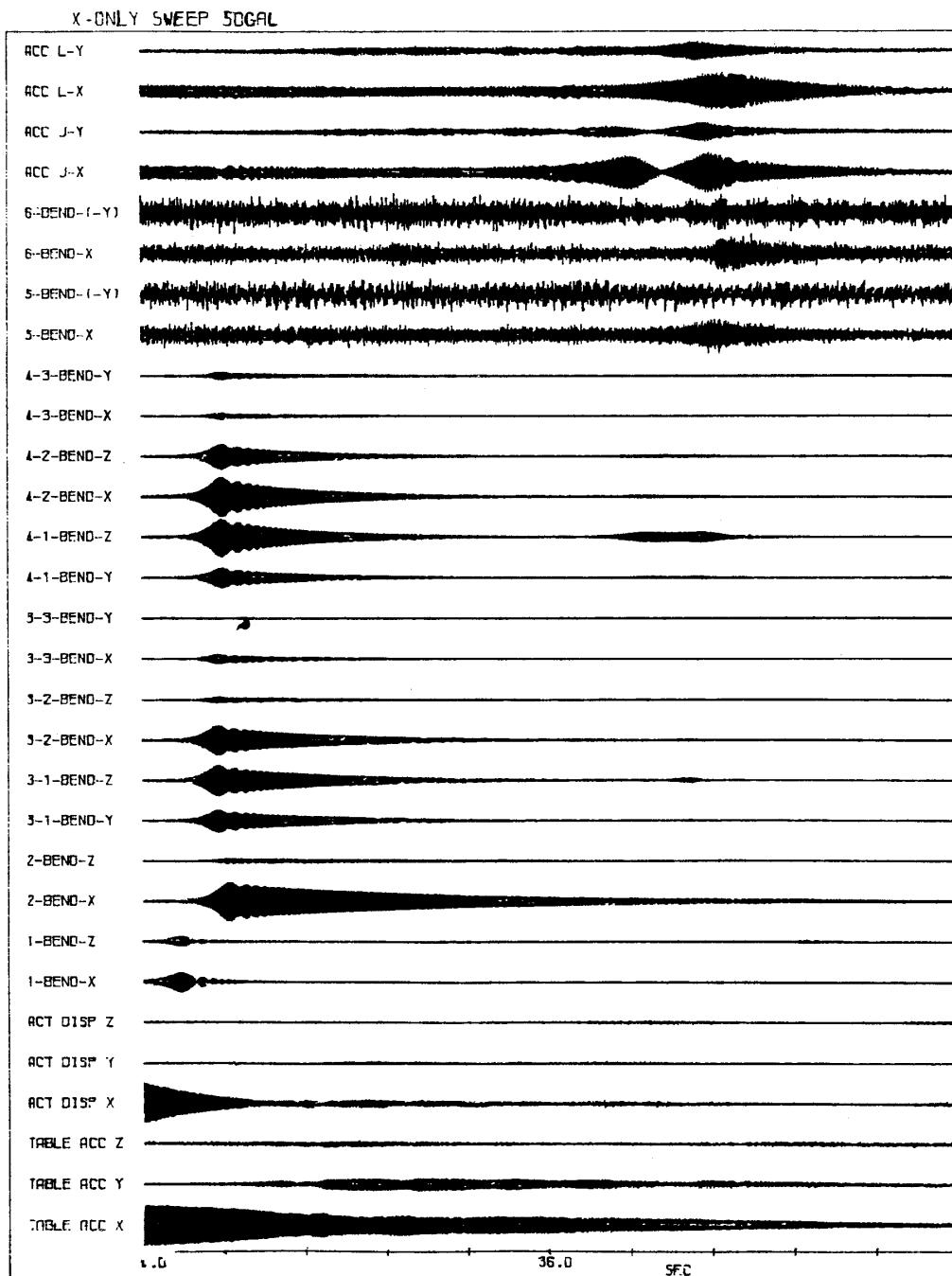


図 4-11 スイープ加振(X 方向)

Fig. 4-11 Sweep Sinusoidal Excitation (X-Direction)

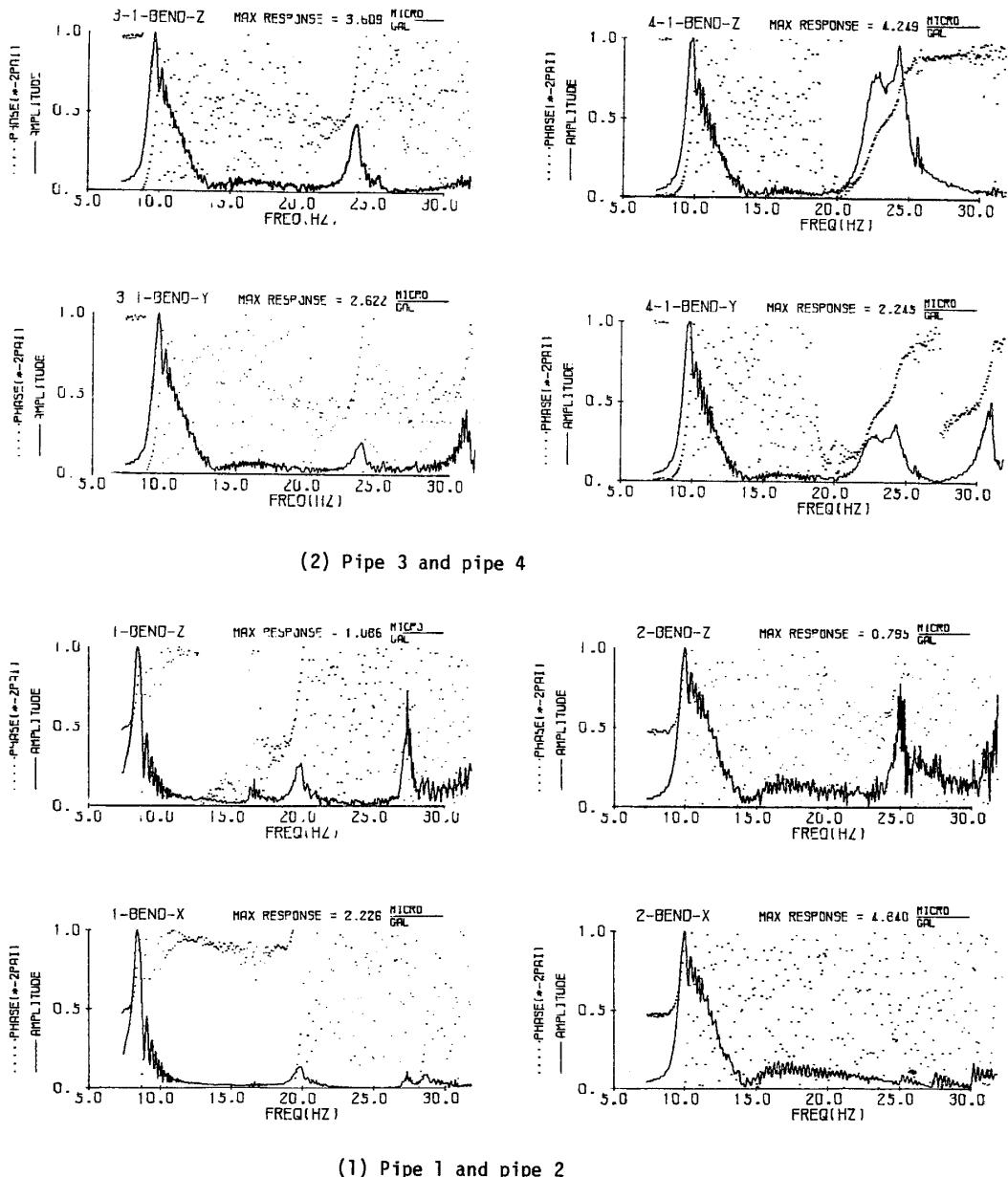


図 4-12 応答曲線(X方向スイープ加振)

Fig. 4-12 Frequency Responses of Model Pipes and Supports
(X-Sinoidal Excitation)

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

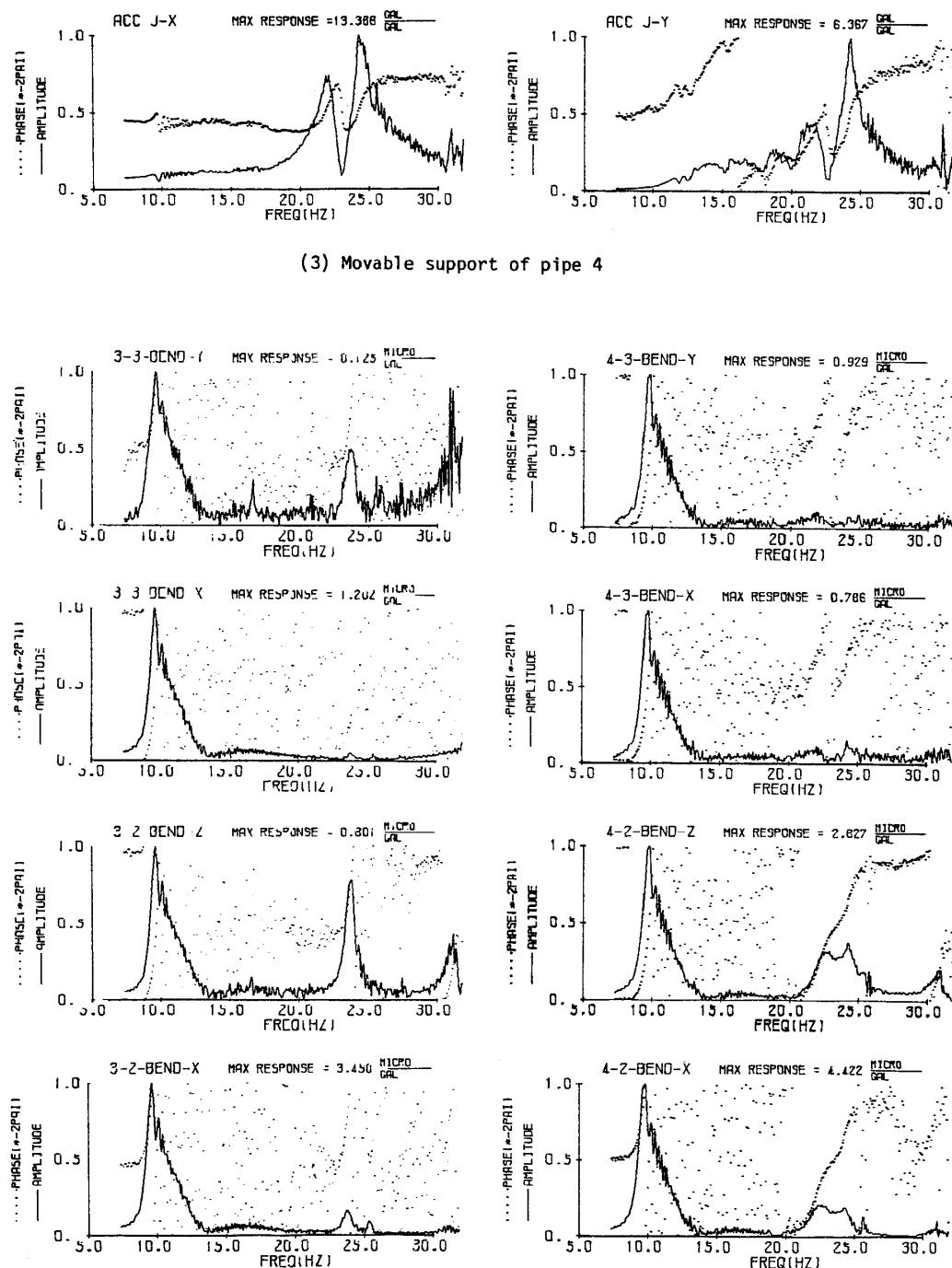
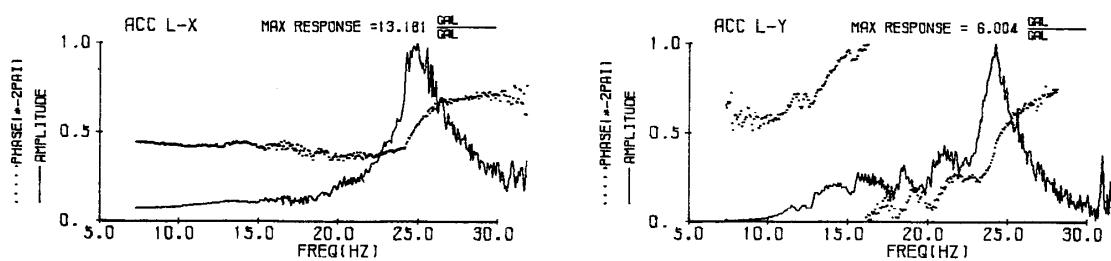


図 4-12(2)
Fig. 4-12(2)



(5) Movable support of pipe 5

図 4-12 (3)

Fig. 4-12 (3)

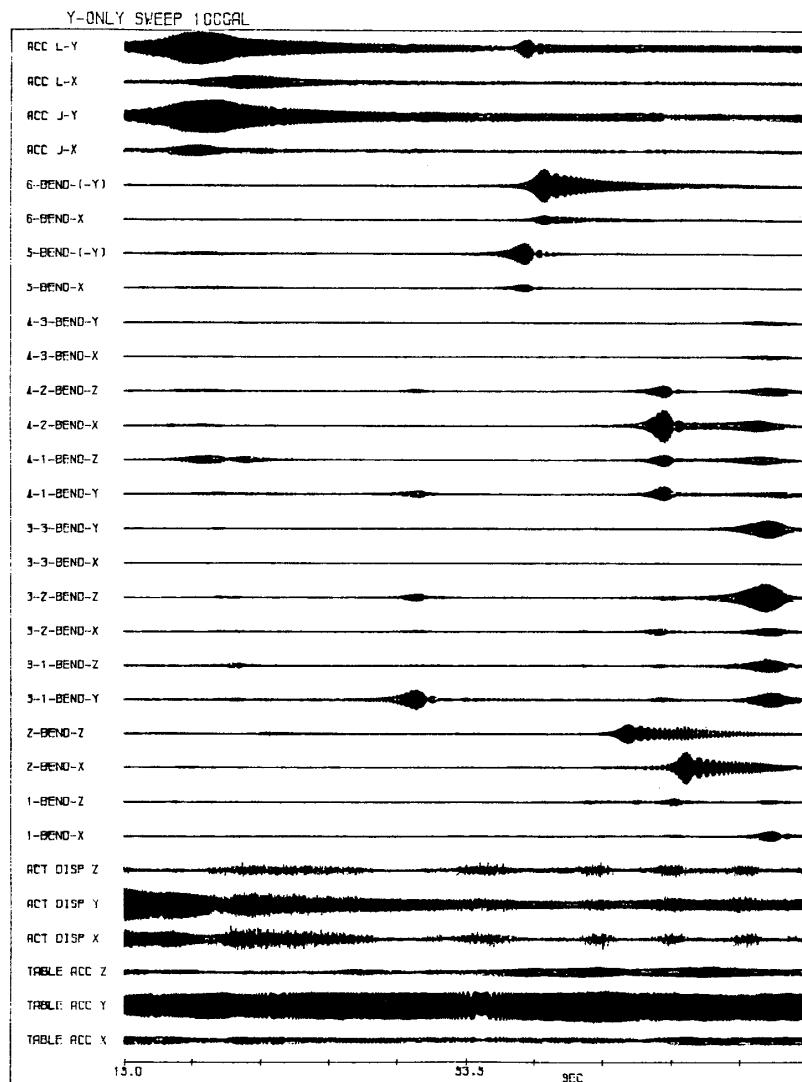
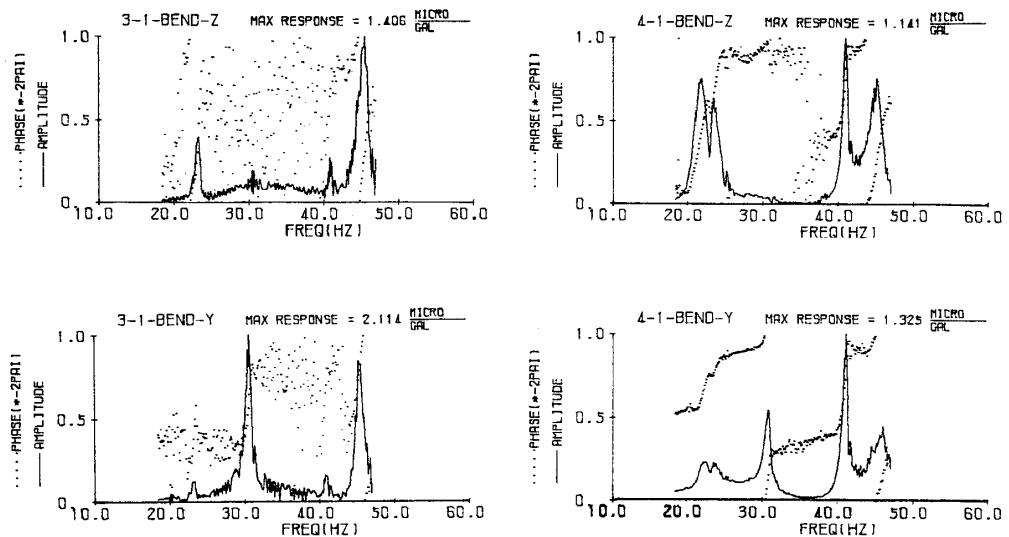


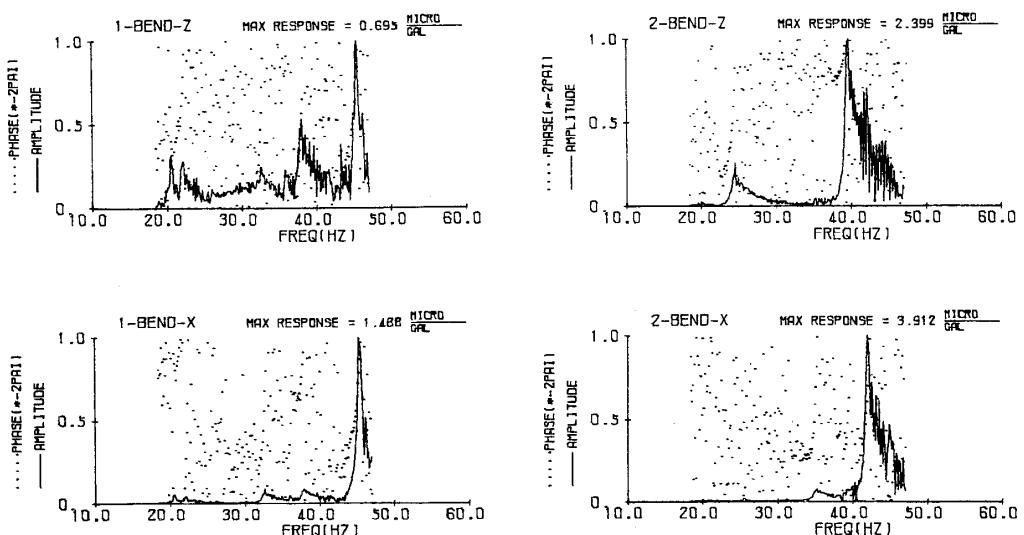
図 4-13 スイープ加振(Y方向)

Fig. 4-13 Sweep Sinusoidal Excitation (Y-Direction)

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪



(2) Pipe 3 and pipe 4



(1) Pipe 1 and pipe 2

図 4-14 応答曲線 (Y方向スイープ加振)

Fig. 4-14 Frequency Responses of Model Pipes and Supports
(Y-Sinusoidal Excitation)

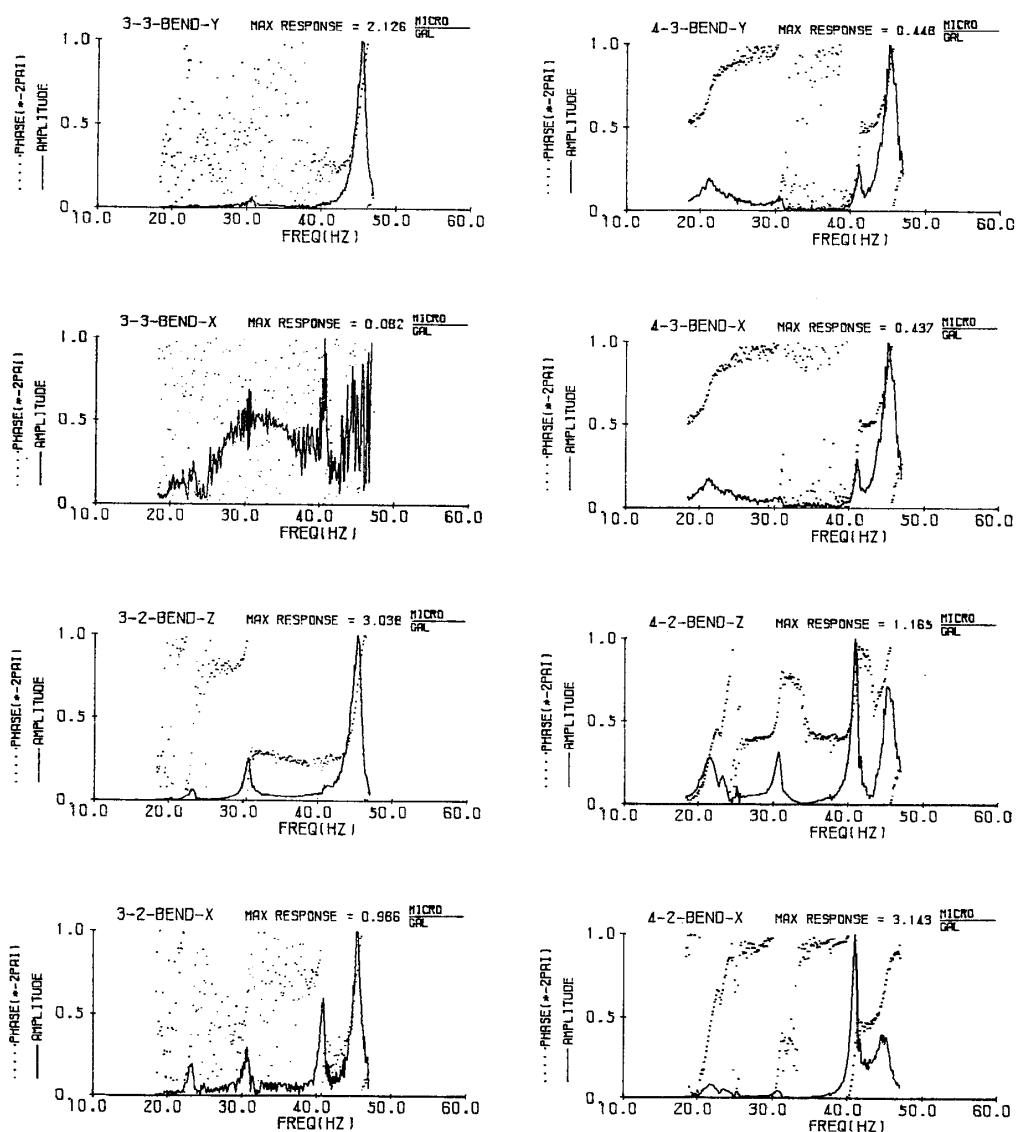
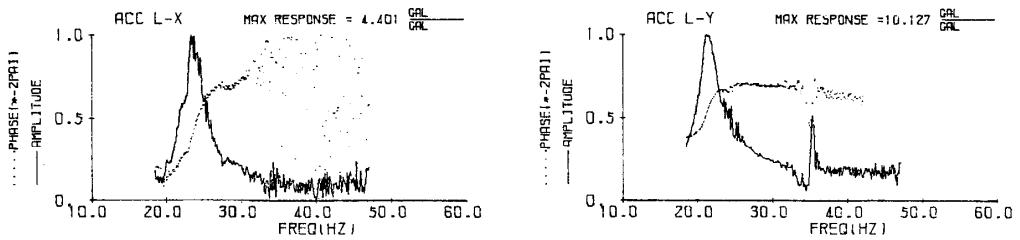
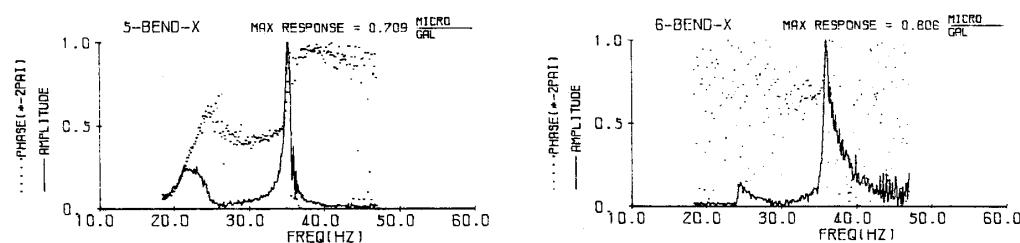
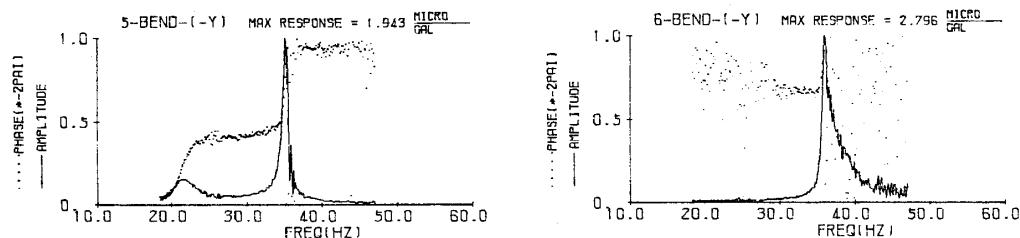


図 4-14(2)
Fig. 4-14(2)

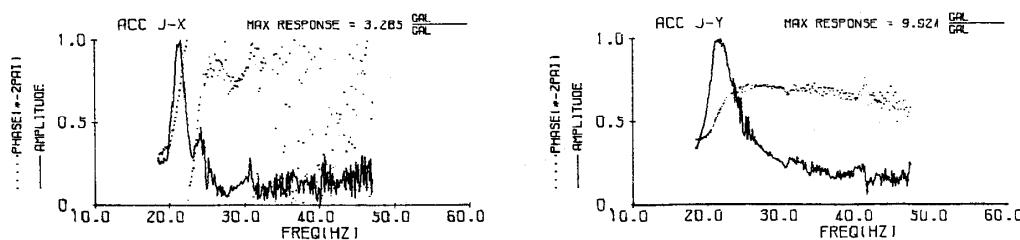
三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪



(5) Movable support of pipe 5



(4) Pipe 5 and pipe 6



(3) Movable support of pipe 4

図 4-14(3)

Fig. 4-14(3)

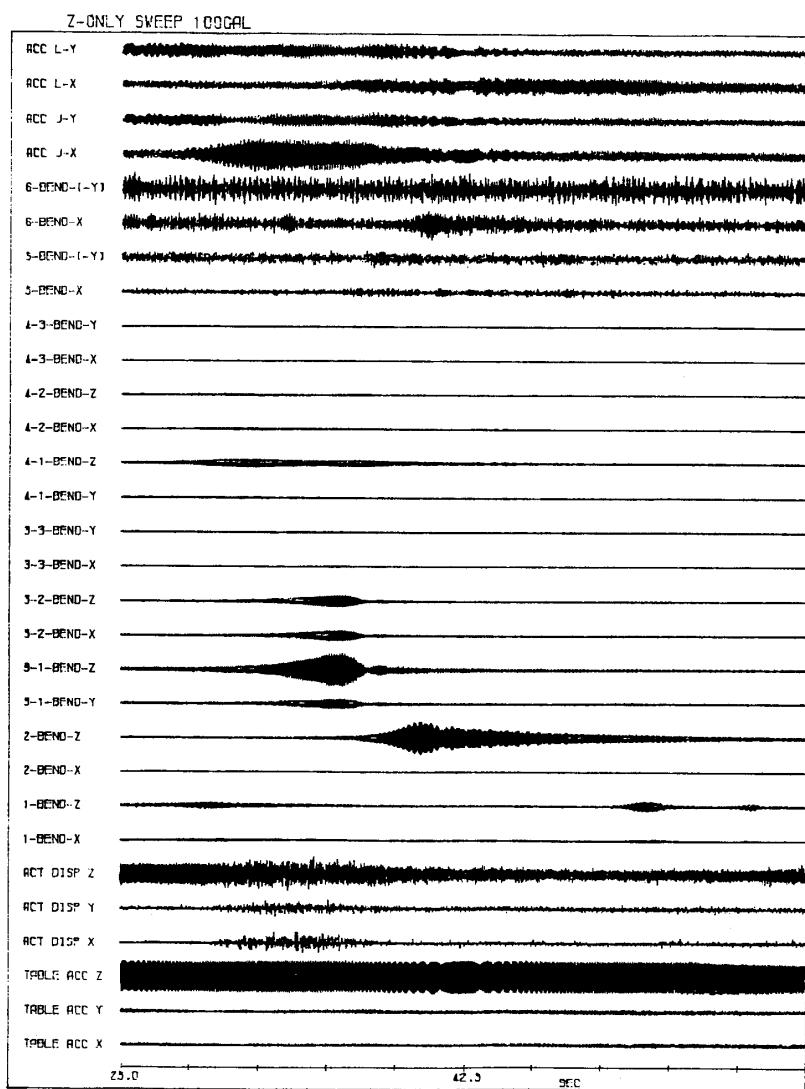
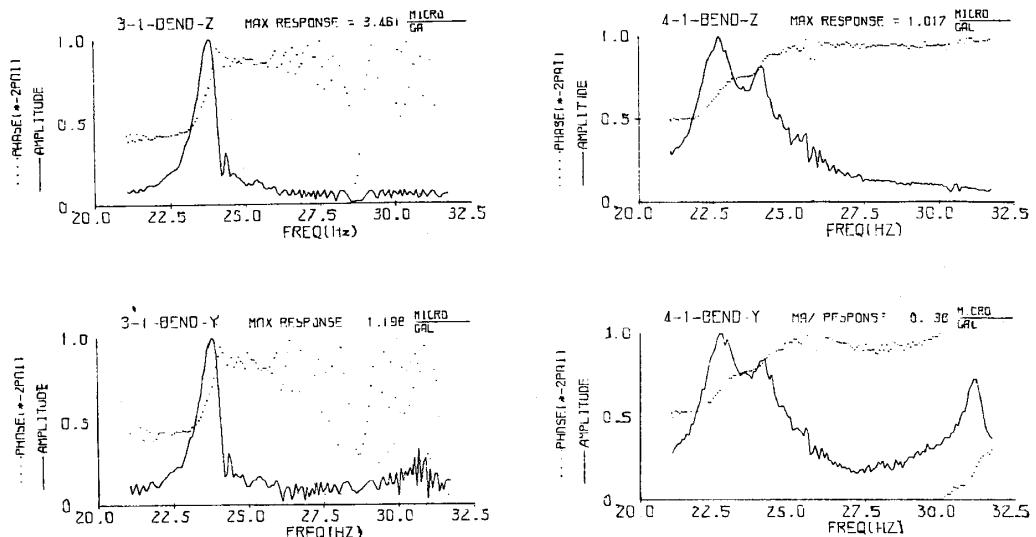


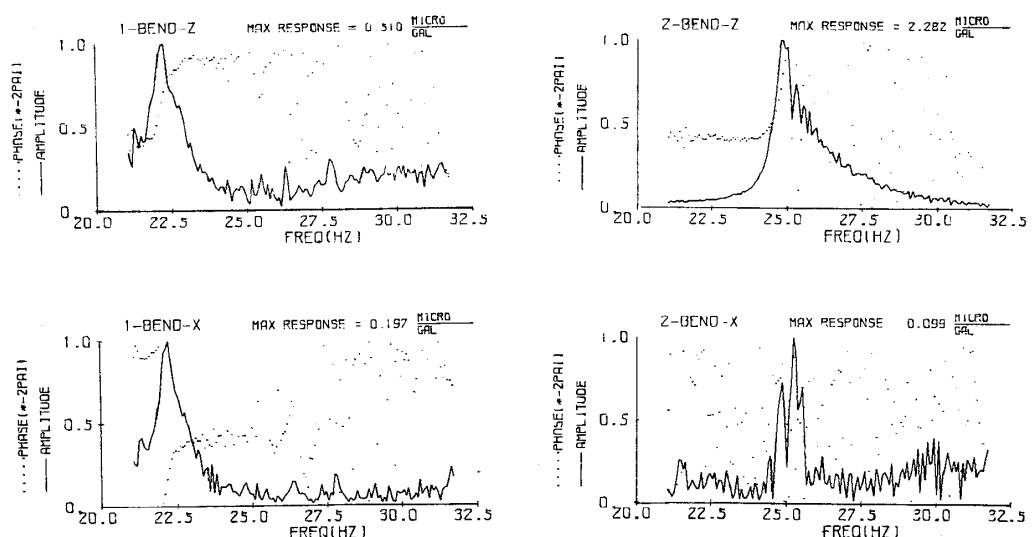
図 4-15 スイープ加振(Z 方向)

Fig. 4-15 Sweep Sinusoidal Excitation (Z-Direction)

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪



(2) Pipe 3 and pipe 4



(1) Pipe 1 and pipe 2

図 4-16 応答曲線 (Z方向スイープ加振)

Fig. 4-16 Frequency Responses of Model Pipes and Supports
(Z-Sinusoidal Excitation)

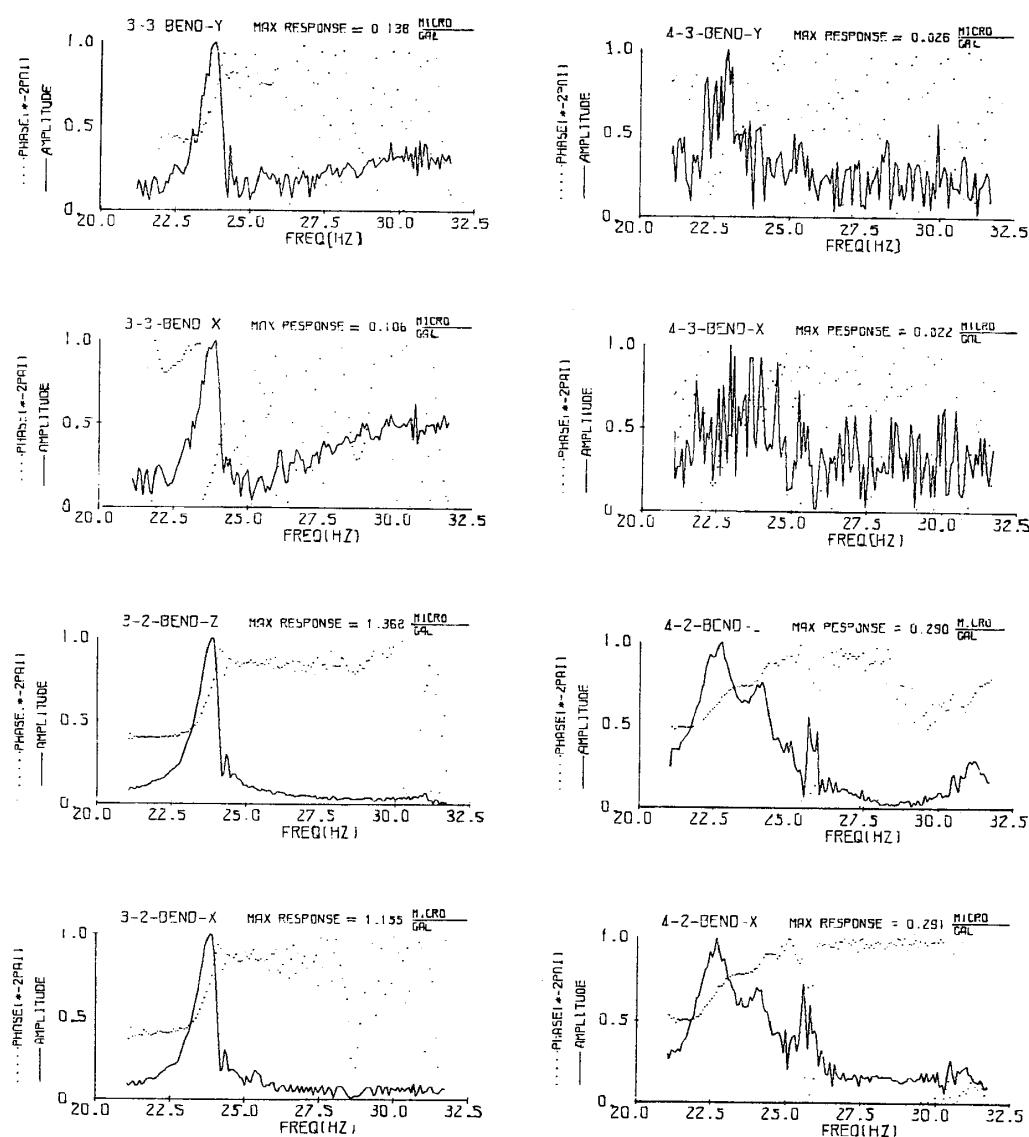
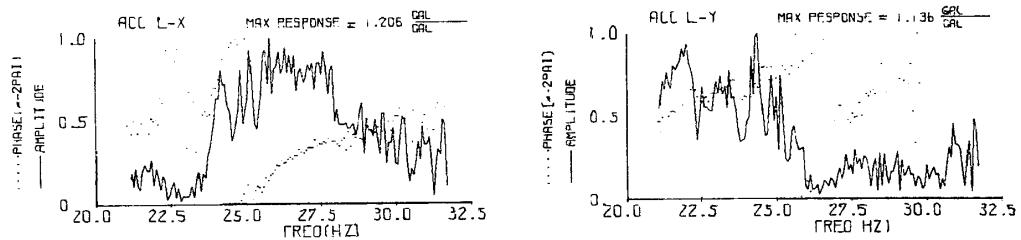
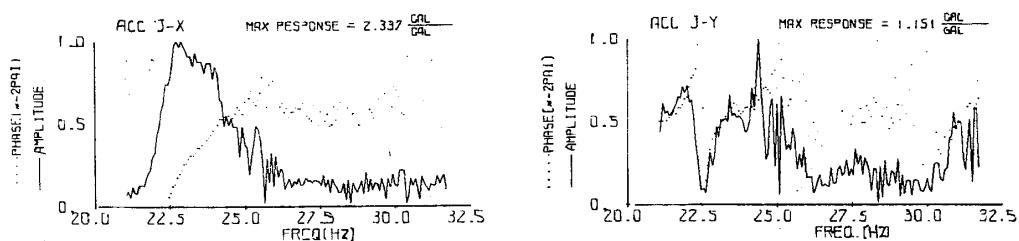


図 4-16(2)
Fig. 4-16(2)



(4) Movable support of pipe 5



(3) Movable support of pipe 4

図 4-16 (3)
Fig. 4-16 (3)

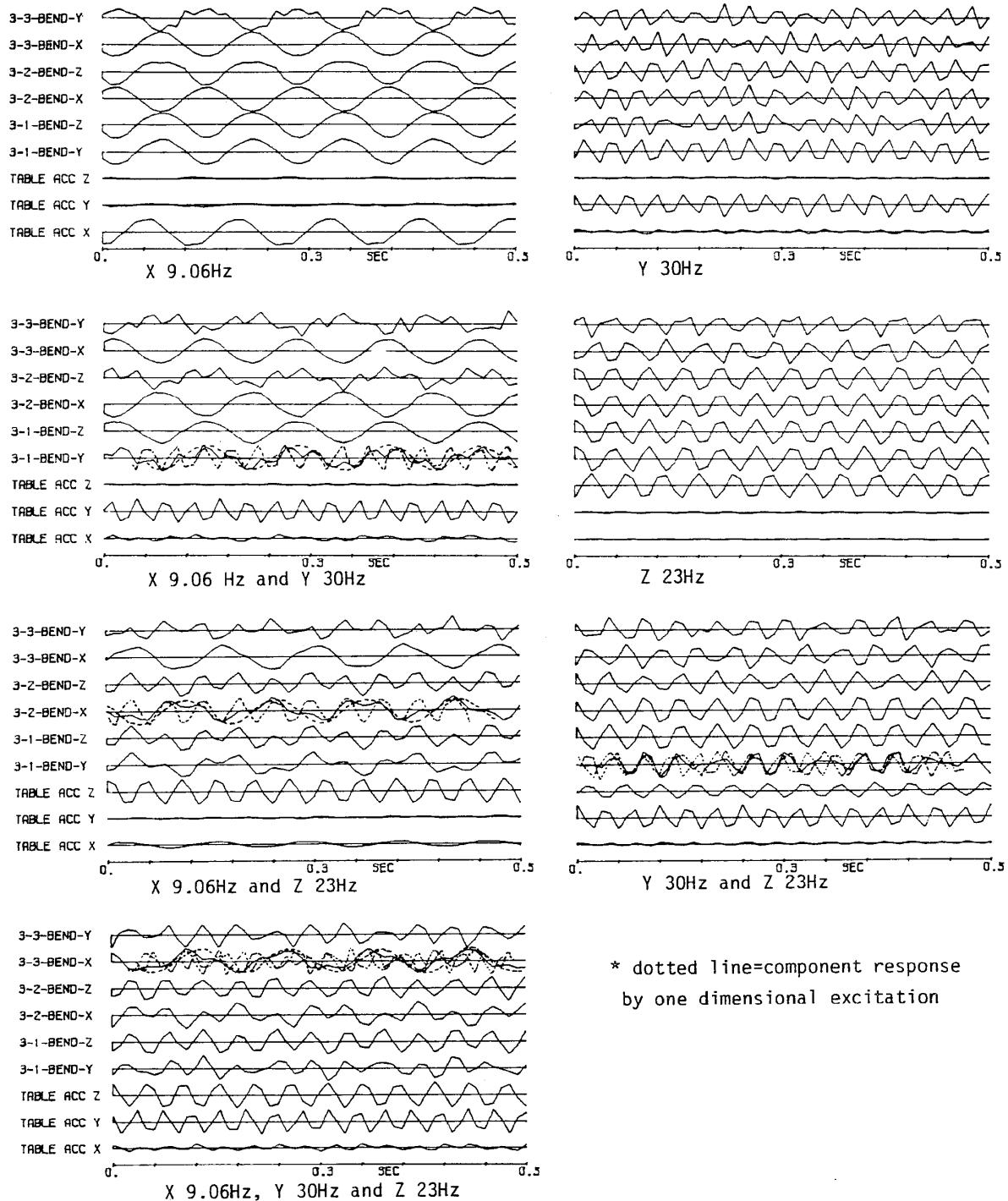


図 4-17 多次元正弦波加振と重ね合わせの例 (Pipe 3)

Fig. 4-17 Multi-Dimensional Sinusoidal Excitations and Examples of Superposition (Model Pipe 3)

* dotted line=component response
by one dimensional excitation

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

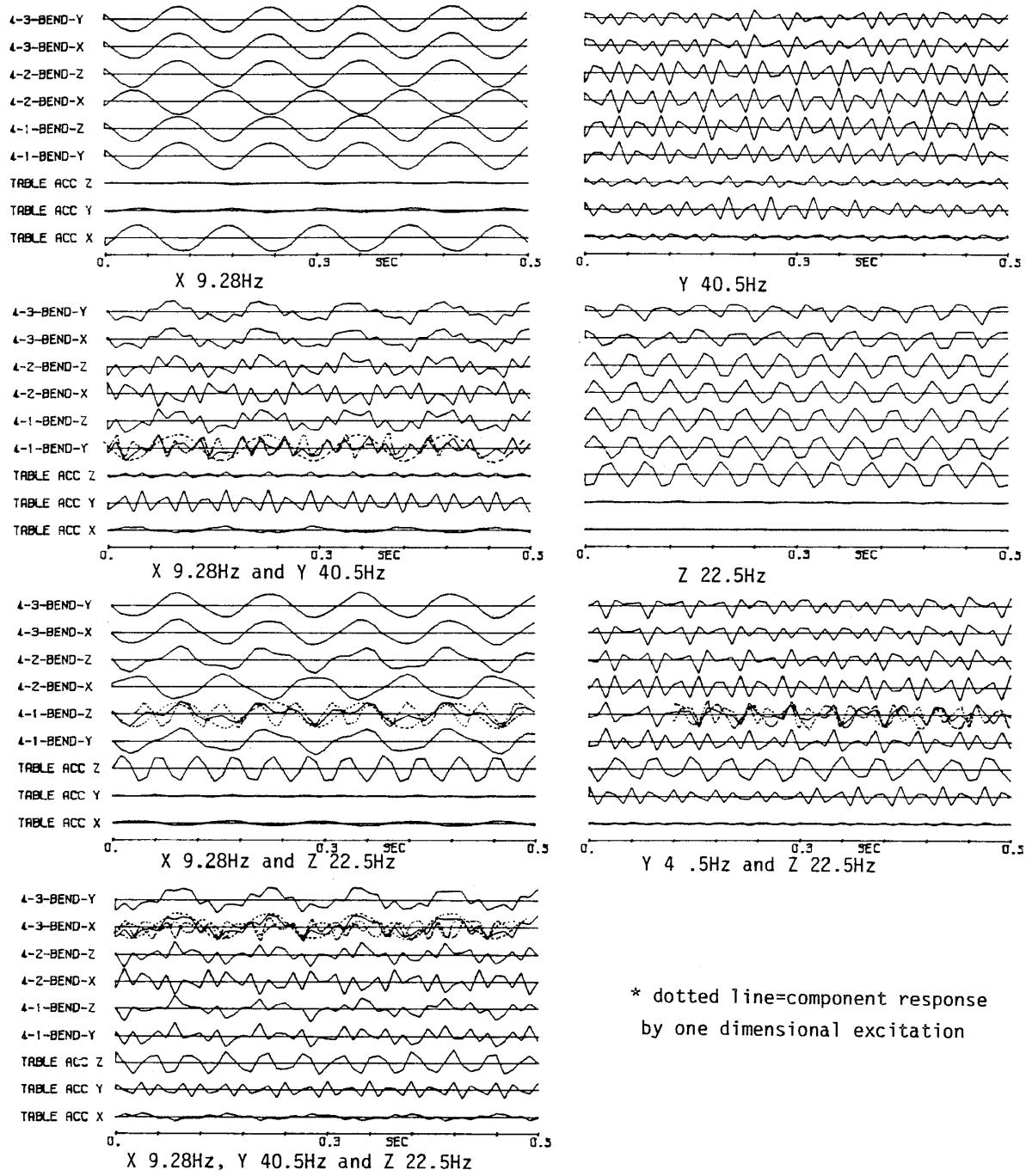


図 4-18 多次元正弦波加振と重ね合せの例 (Pipe 4)

Fig. 4-18 Multi-Dimensional Sinusoidal Excitations and Examples of Superposition (Model Pipe 4)

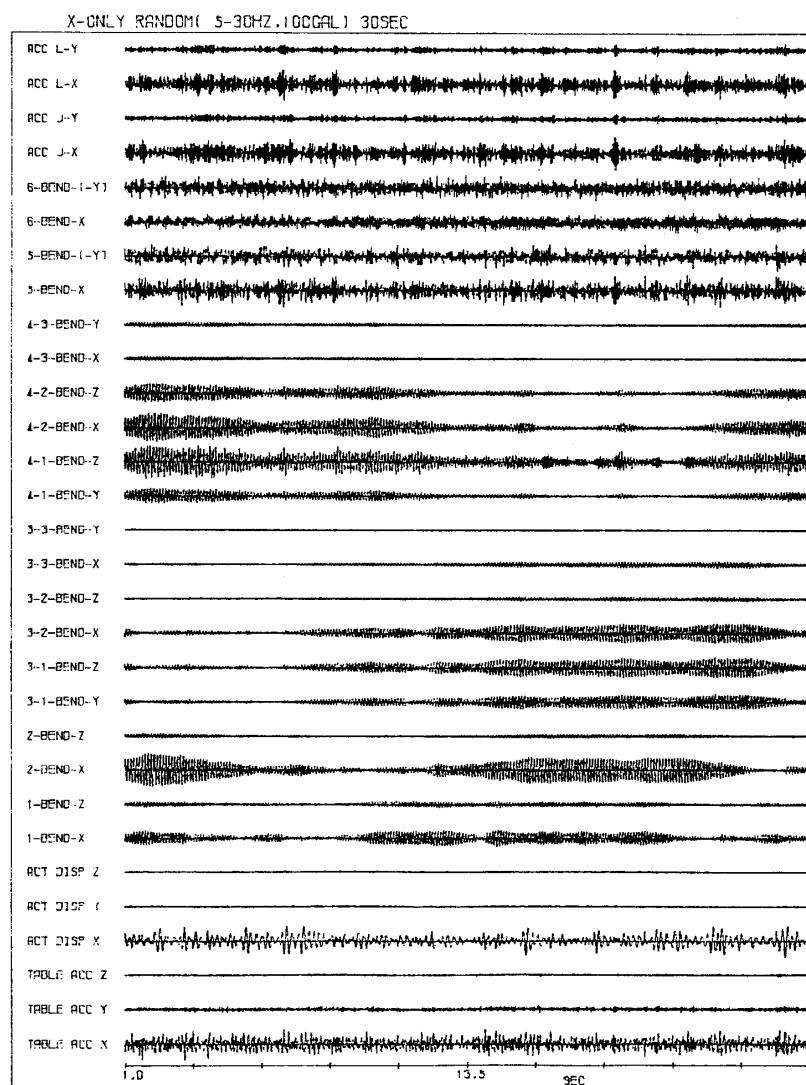


図 4-19 ランダム加振(X 方向)

Fig. 4-19 Random Excitation (X -Direction)

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

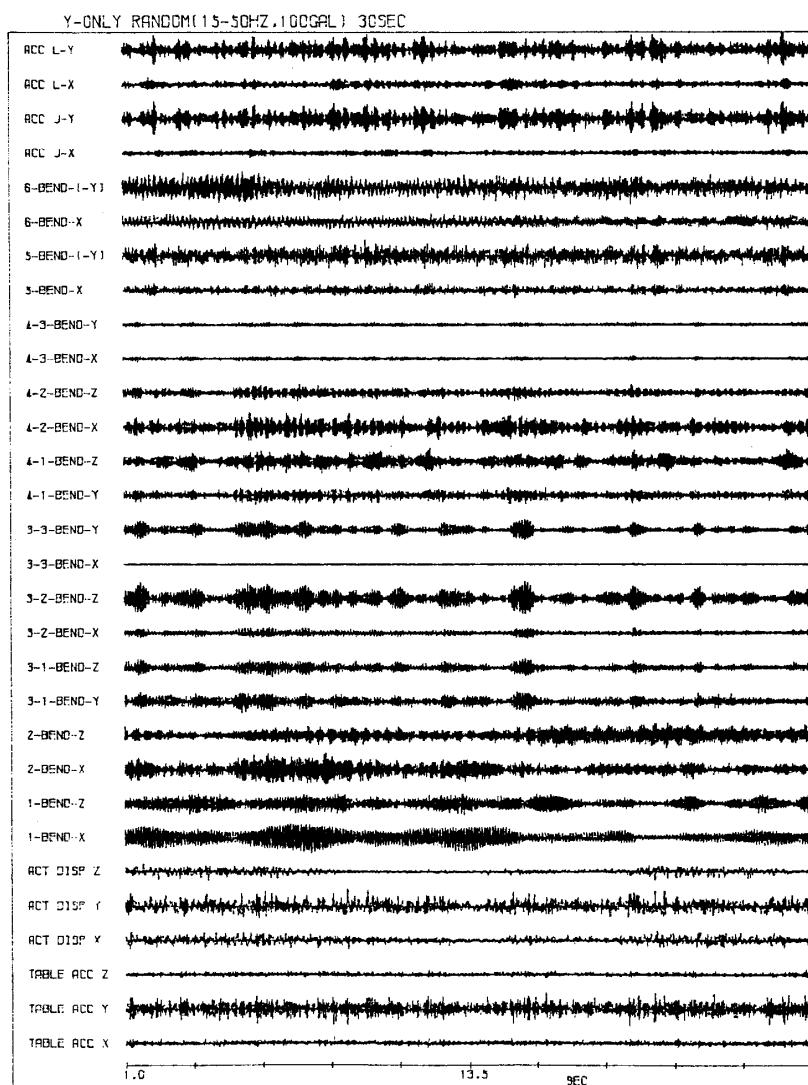


図 4-20 ランダム加振 (Y方向)
Fig. 4-20 Random Excitation (Y-Direction)

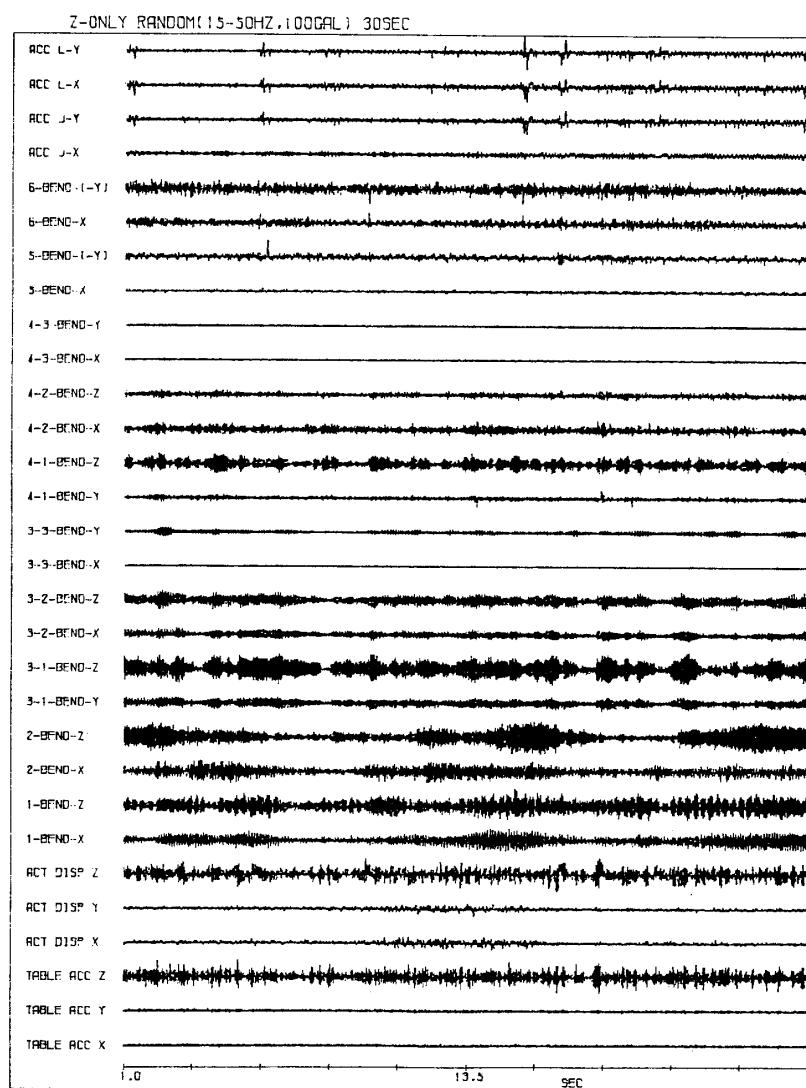


図 4-21 ランダム加振 (Z方向)
Fig. 4-21 Random Excitation (Z-Direction)

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

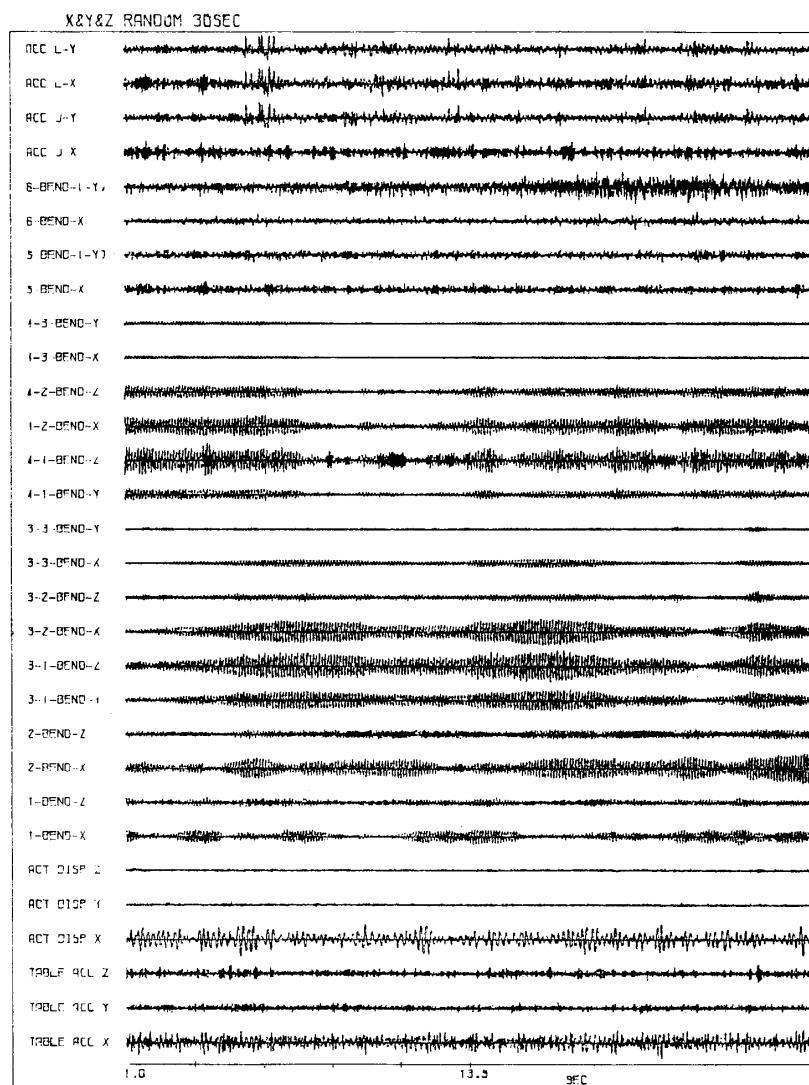


図 4-22 ランダム加振 (X, Y, Z三次元)

Fig. 4-22 Random Excitation (X Y, Z -Direction)

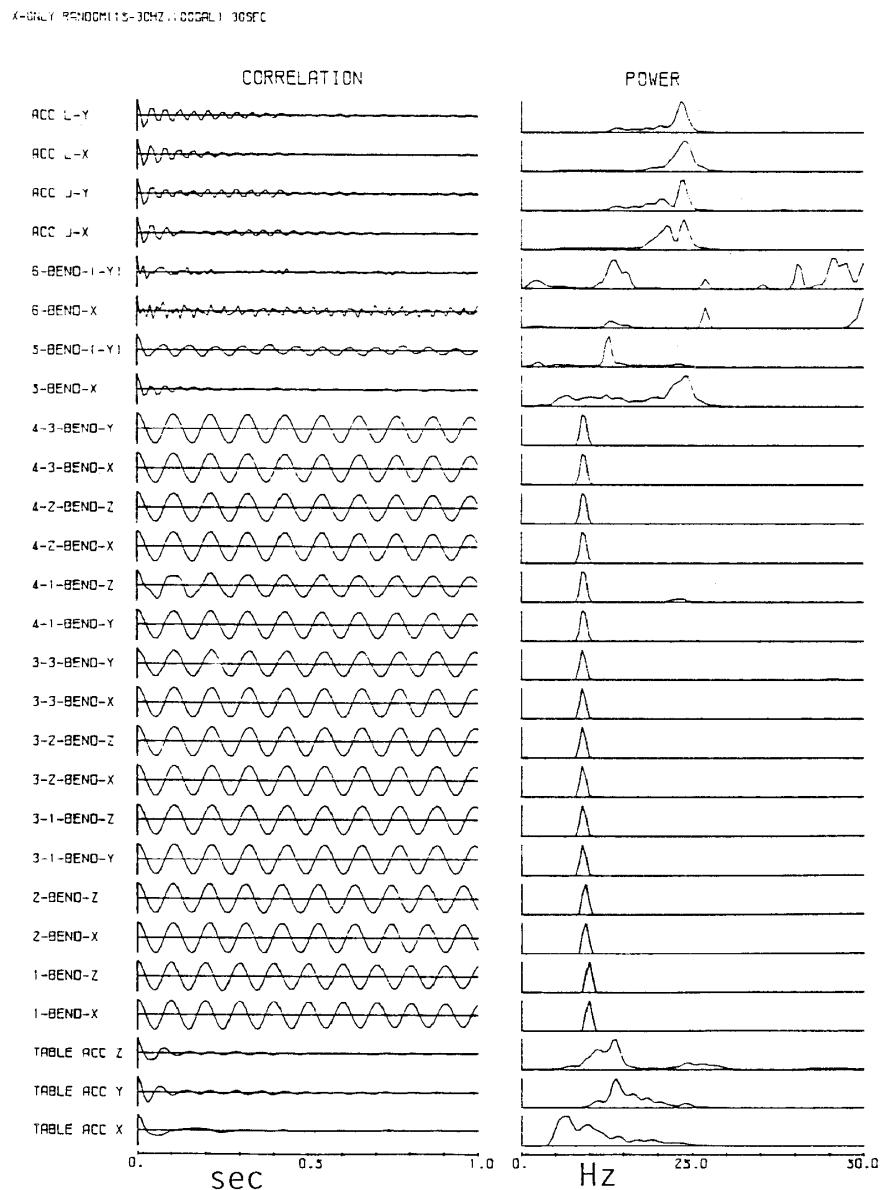


図 4-23 歪波形の自己相関とスペクトル(X 方向ランダム加振)

Fig. 4-23 Auto-Correlations and Power Spectra (X-Random Excitation)

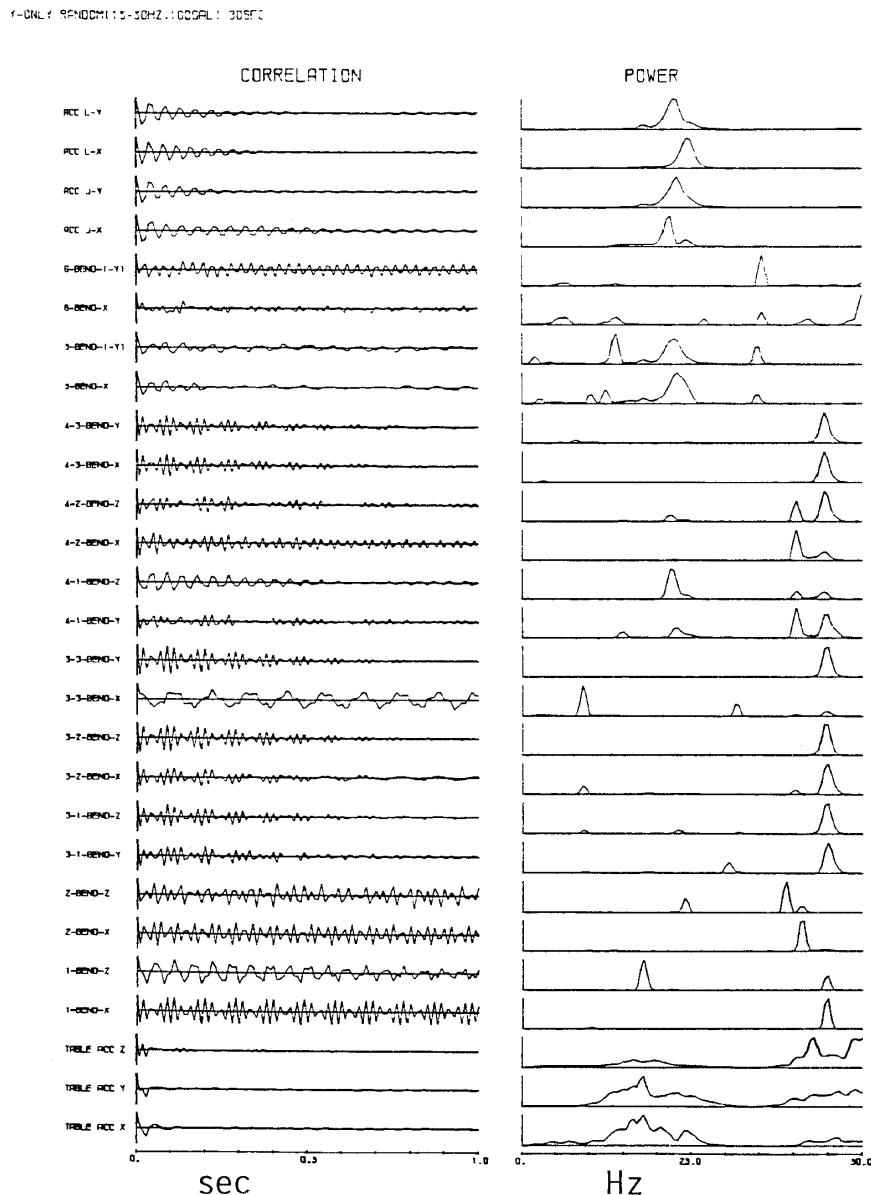


図 4-24 歪波形の自己相関とスペクトル (Y方向ランダム加振)

Fig. 4-24 Auto-Correlations and Power Spectra (Y-Random Excitation)

Z-ONLY PENDULUM: 5-50HZ, 100GAL: 20SEC

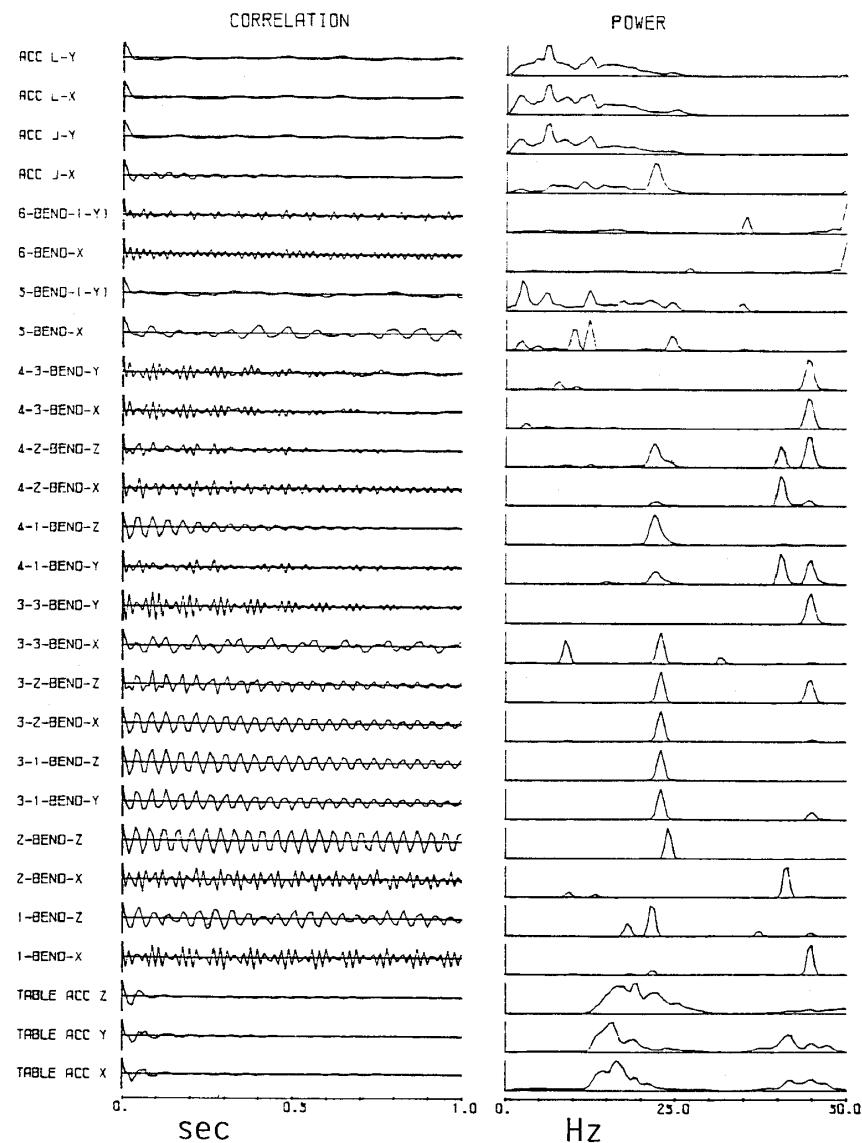


図 4-25 歪波形の自己相関とスペクトル(Z 方向ランダム加振)

Fig. 4-25 Auto-Correlations and Power Spectra
(Z -Random Excitation)

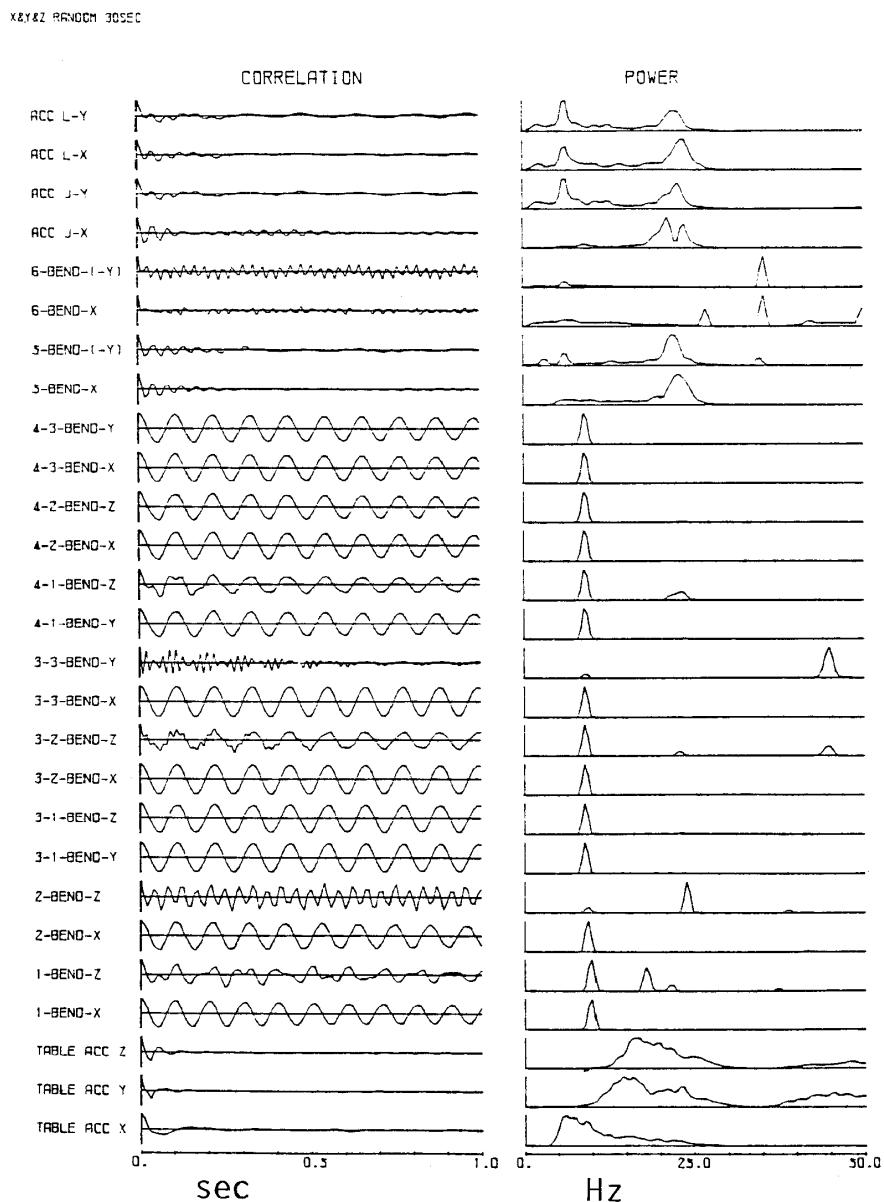


図 4-26 歪波形の自弓相関とスペクトル(X, Y, Z 三次元加振)

Fig. 4-26 Auto-Correlations and Power Spectra
(X, Y, Z 3-Dimensional Excitation)

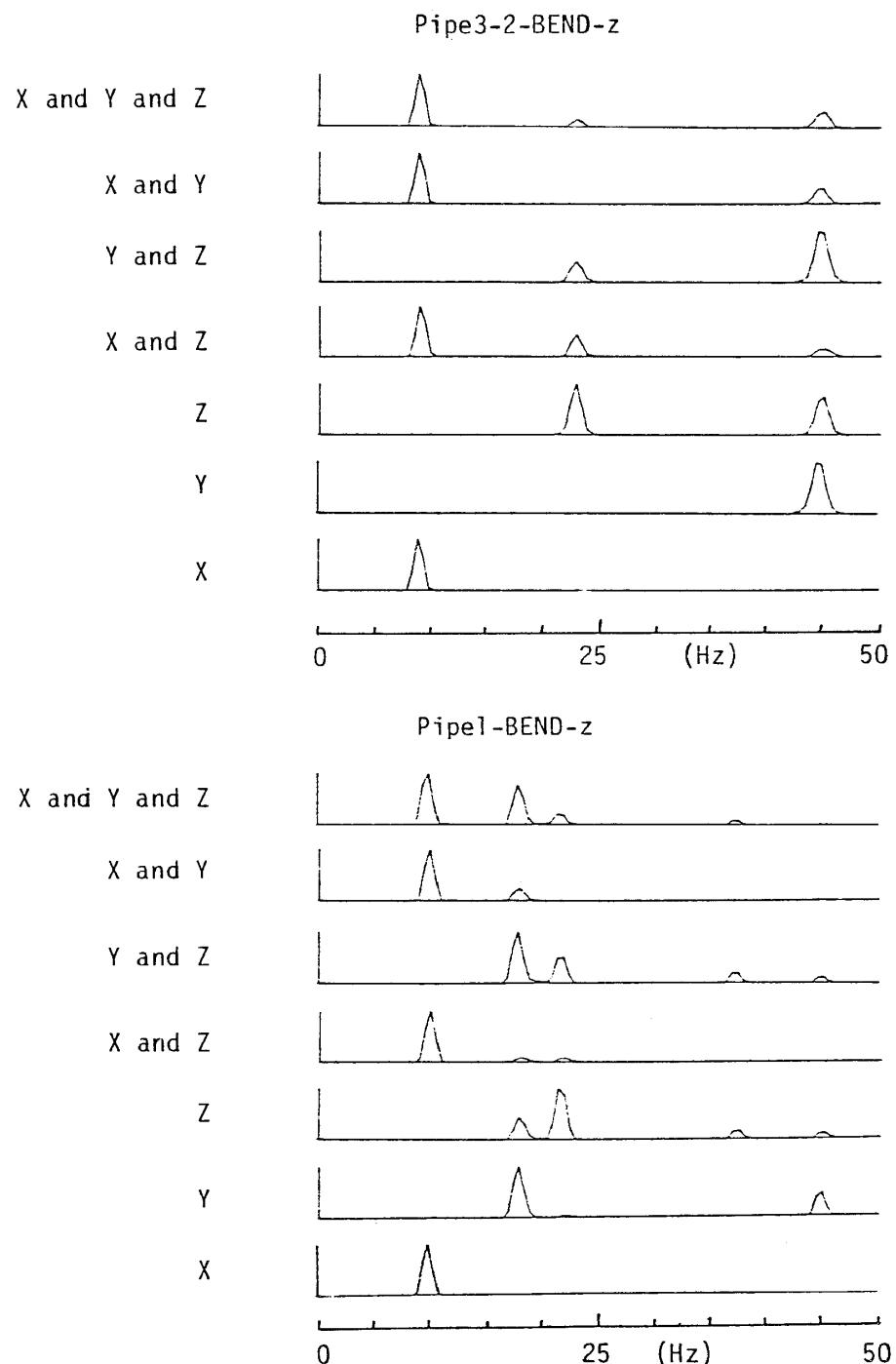
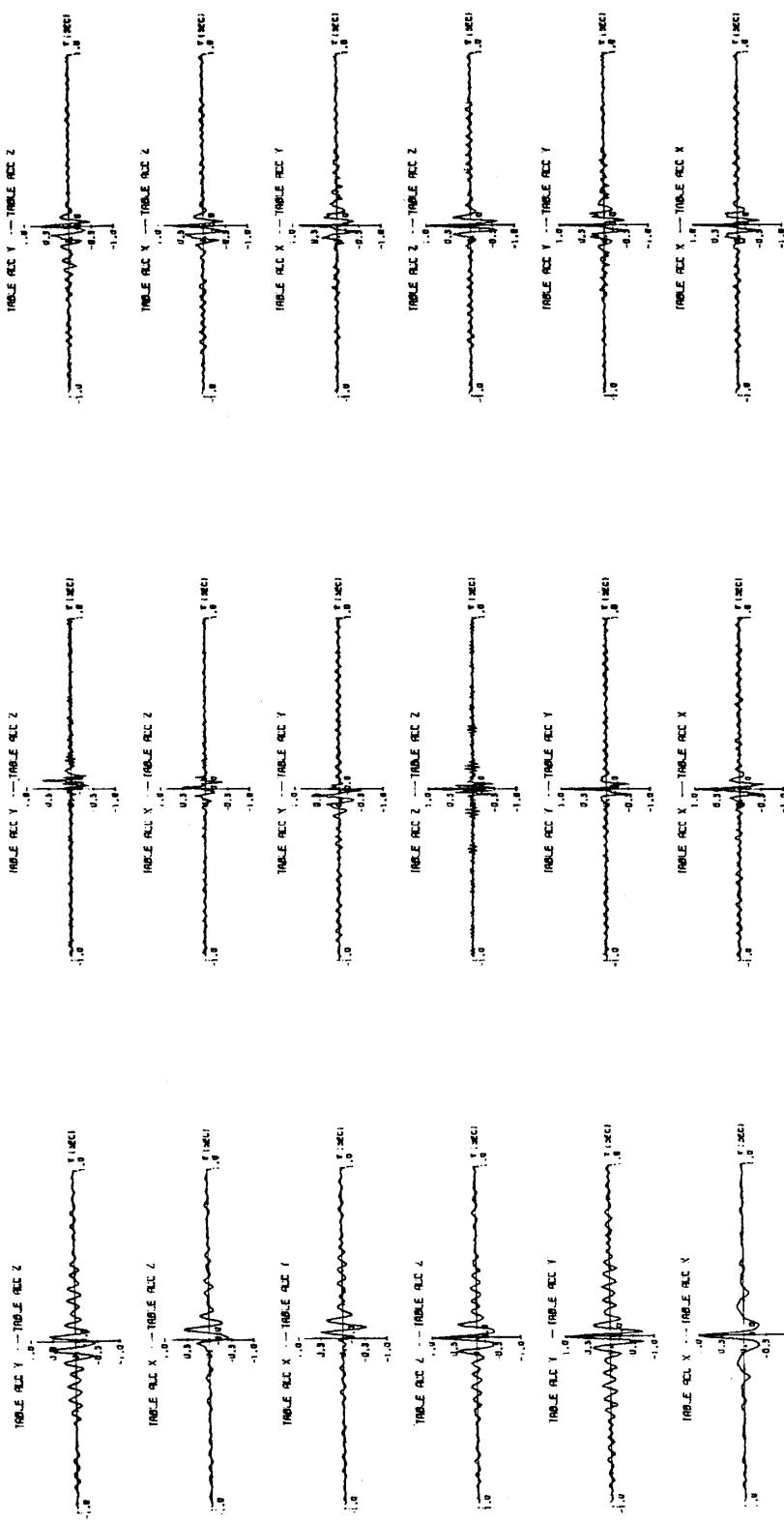


図 4-27 7ケースのランダム加振の際の歪波形のスペクトル

Fig. 4-27 Power Spectra of Pipe Strains by 7 Types of Excitation

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

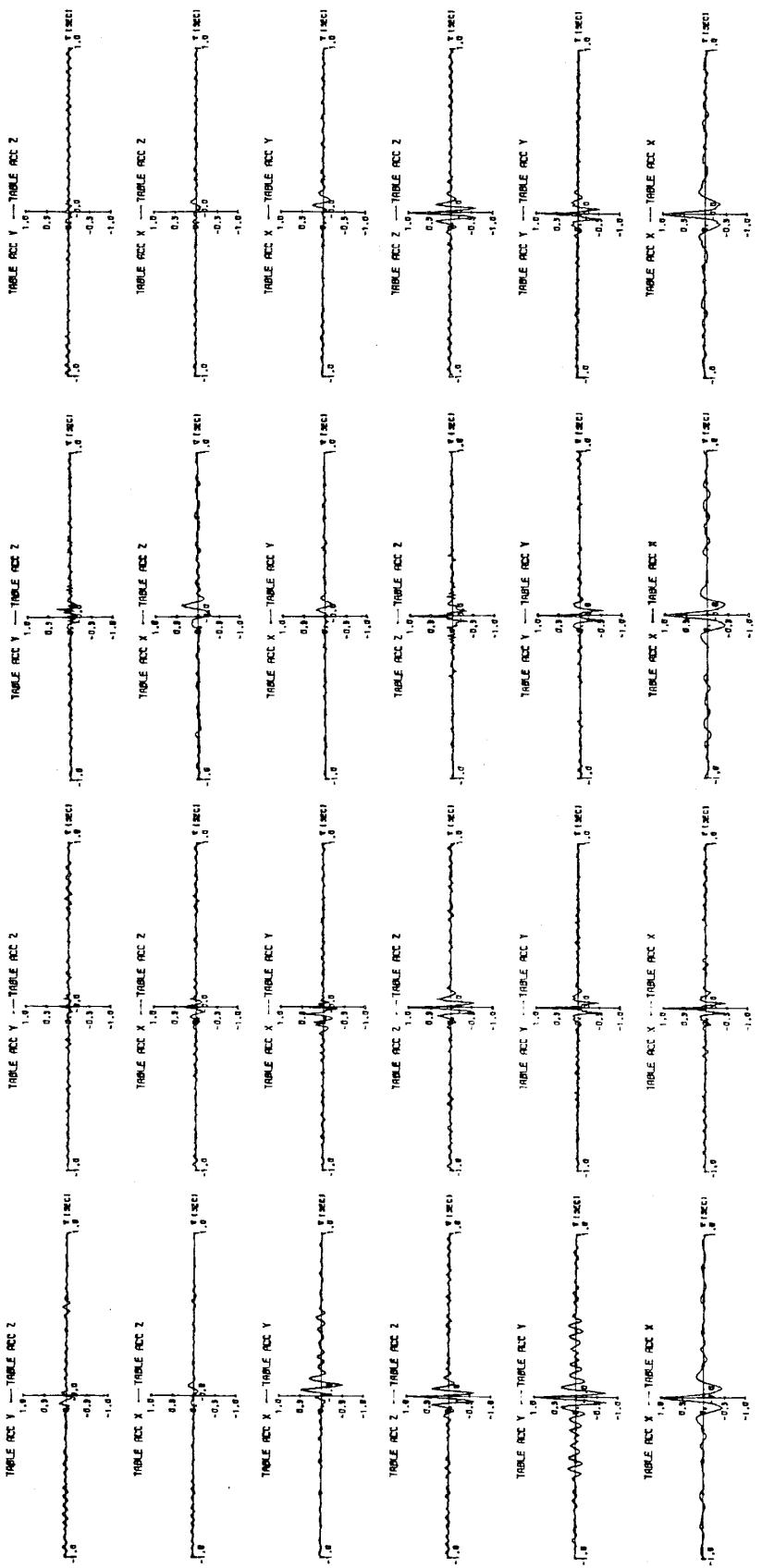


(1) X-Random

(2) Y-Random

(3) Z-Random

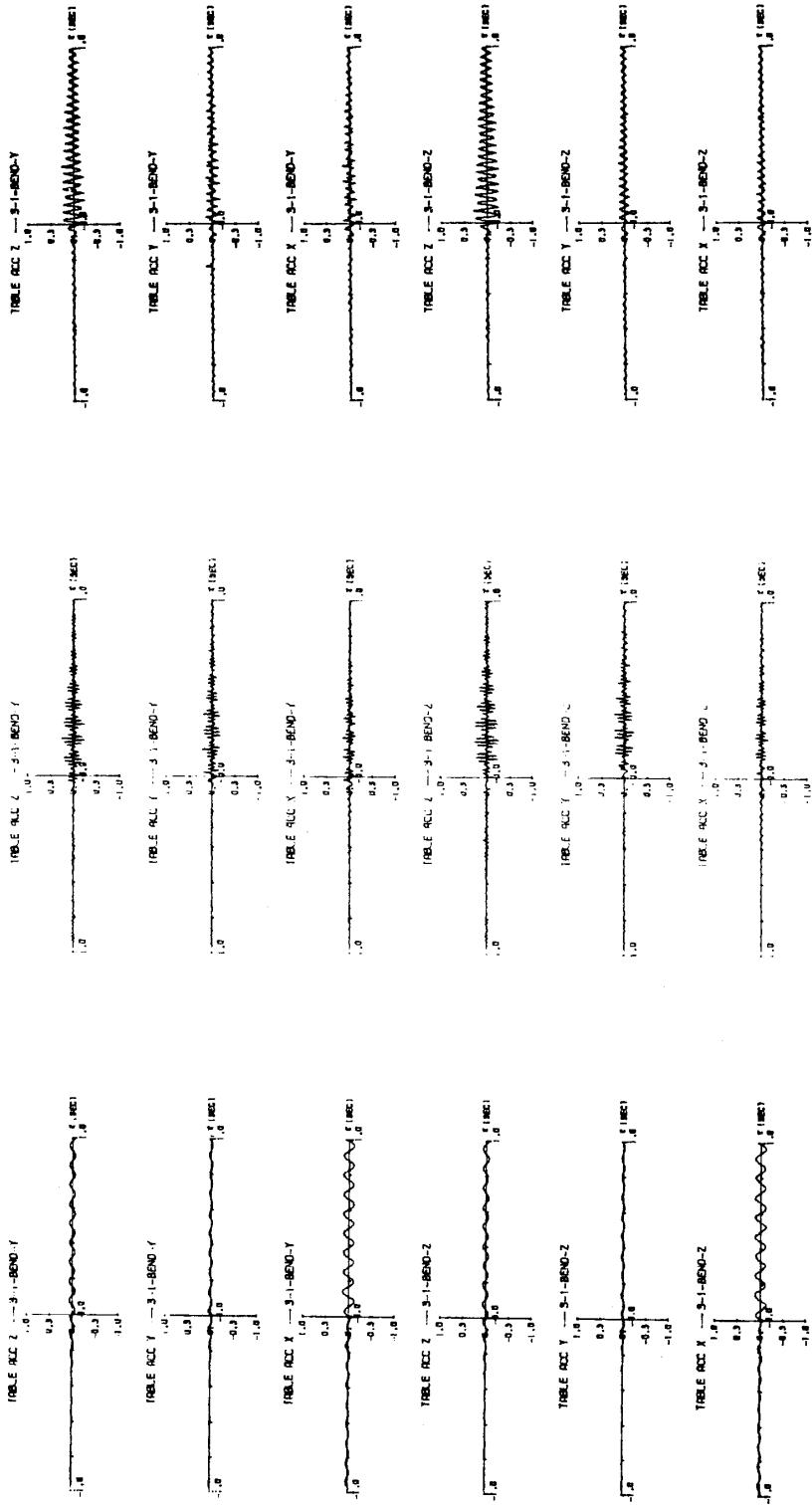
図 4-28 振動台のX, Y, Z方向加速度波形の自己および相互相関
Fig. 4-28 Auto- and Cross-Correlations of X, Y and Z Acceleration of
Shaking Table



(4) XZ-Random (5) YZ-Random (6) XY-Random

(7) XYZ-Random (6) XY-Random (7) XYZ-Random

Fig. 4-28 (2)

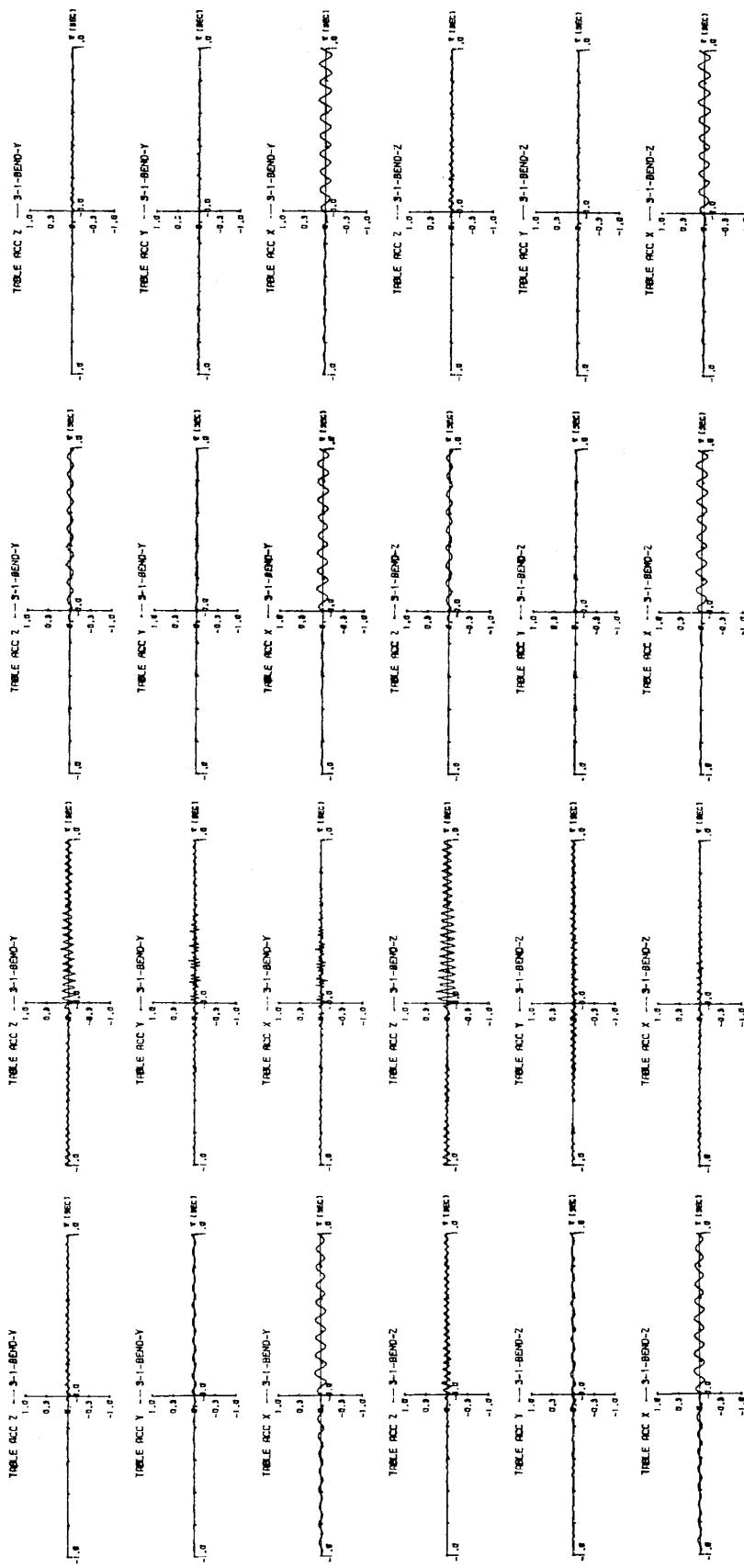


(1) X-Random

(2) Y-Random

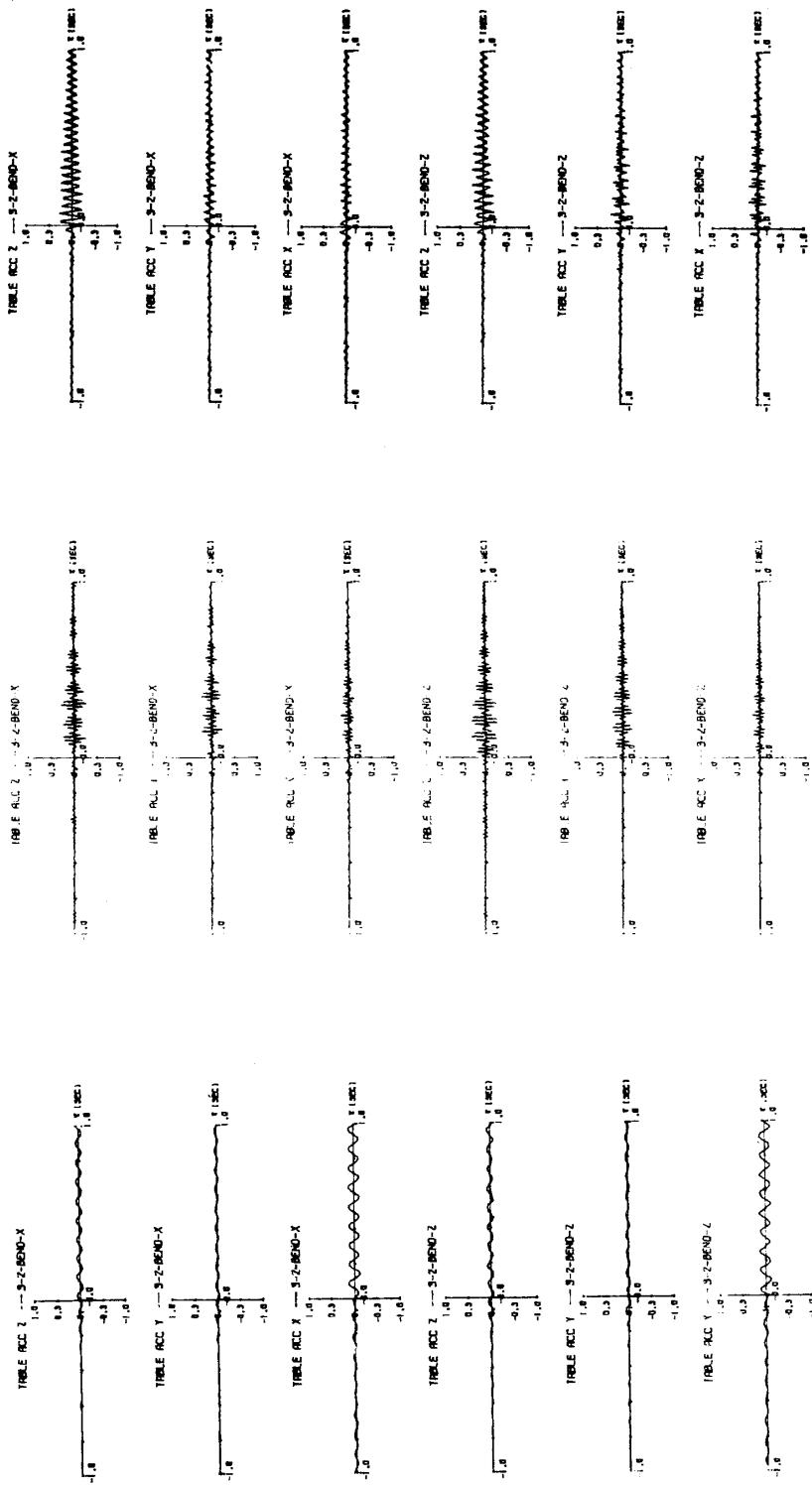
(3) Z-Random

図 4-29 振動合加速度と配管モデル歪波形の相互相関 (Pipe 3 の点 1)
Fig. 4-29 Cross-Correlations between Table Accelerations (X, Y and Z)
and Pipe Strains (at a point 1 of pipe 3)



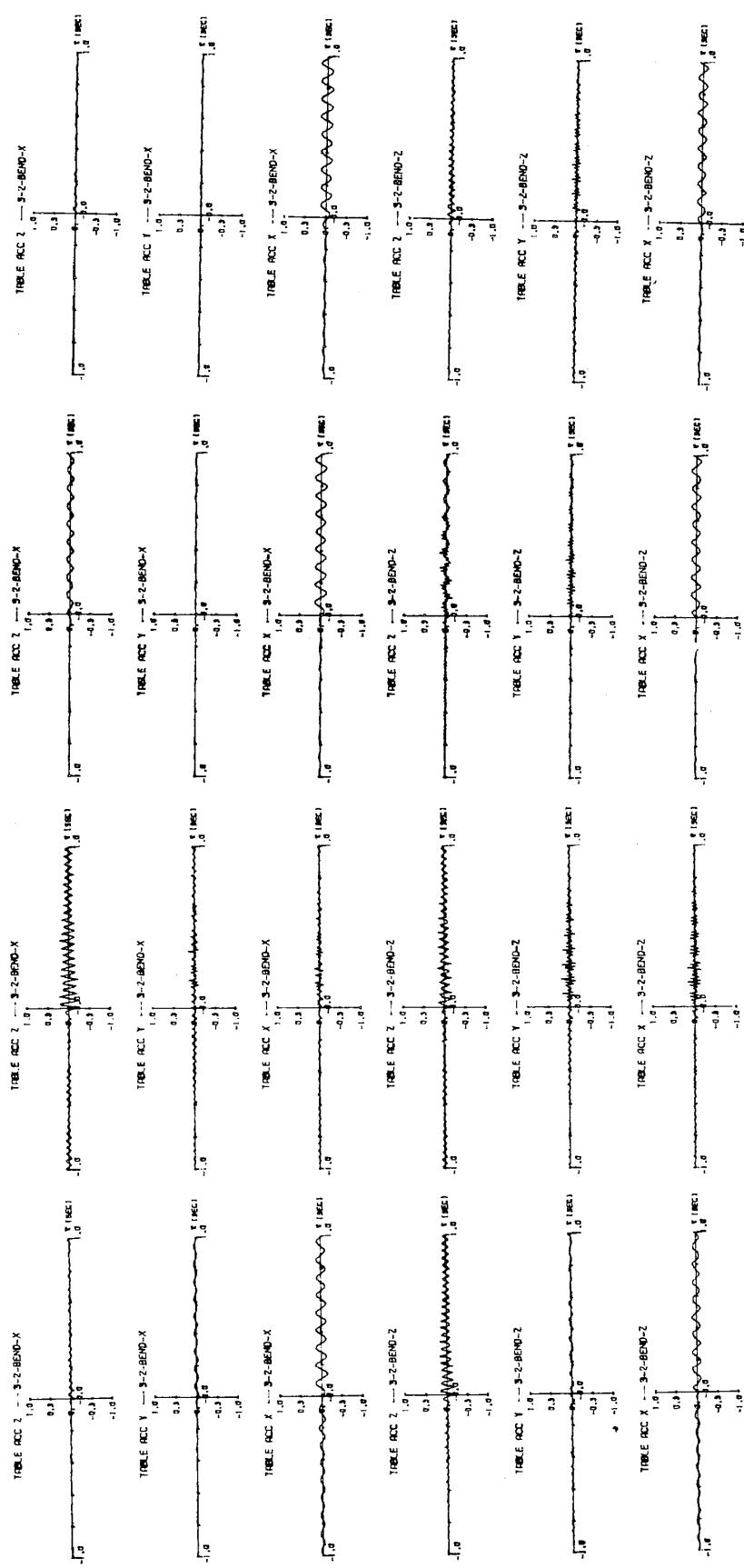
(4) XZ-Random (5) YZ-Random (6) XY-Random (7) XYZ-Random

Fig. 4-29 (2)



(1) X-Random (2) Y-Random (3) Z-Random

図 4-30 振動台加速度と配管モデル歪波形の相互相關 (Pipe 3 の点 2)
Fig. 4-30 Cross-Correlations between Table Accelerations (X, Y and Z)
and Pipe Strains (at a point 2 of pipe 3)



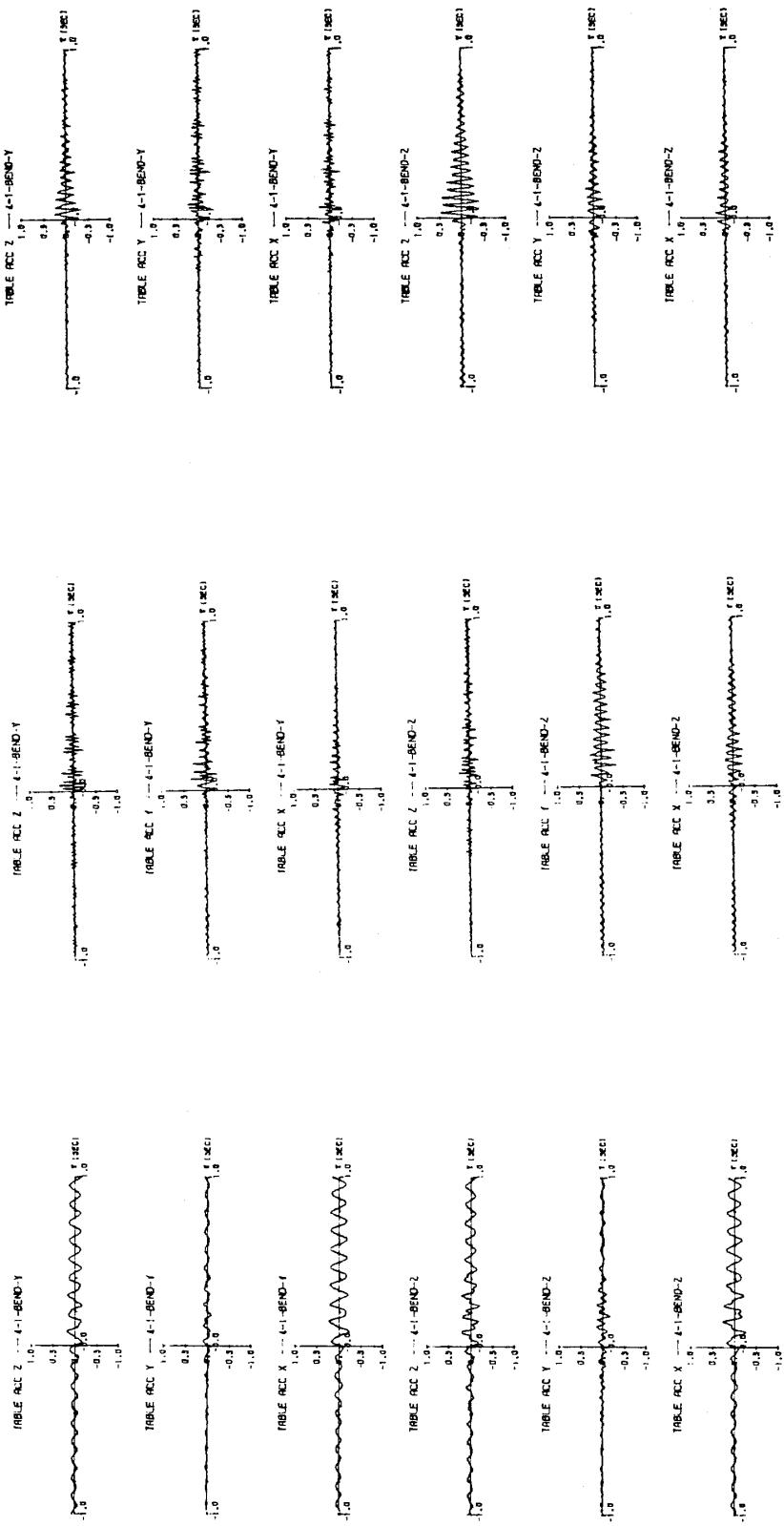
(4) XZ-Random

(5) YZ-Random

(6) XY-Random

(7) XYZ-Random

図 4-30(2)
Fig. 4-30(2)



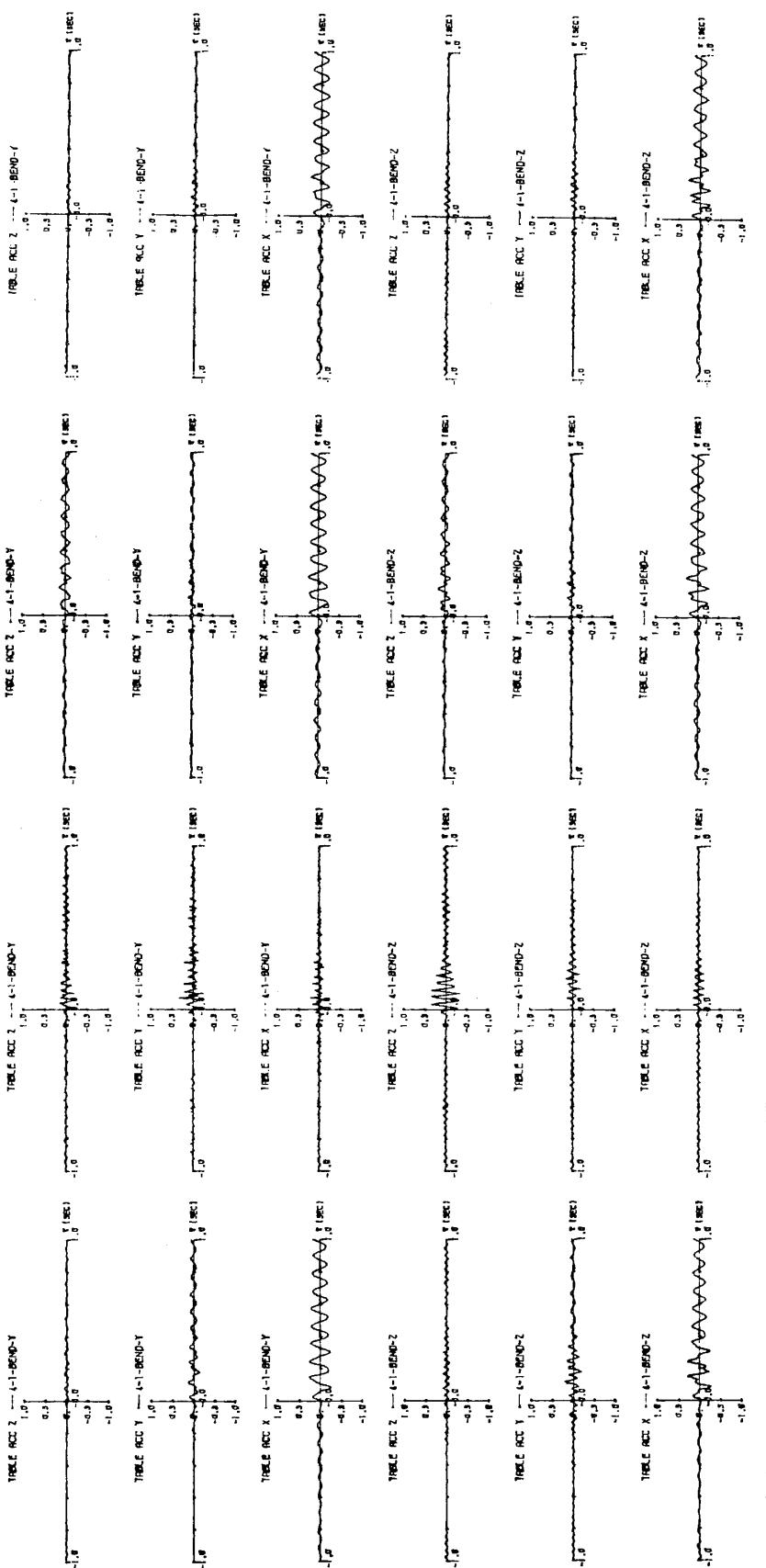
(3) Z- Random

(2) Y- Random

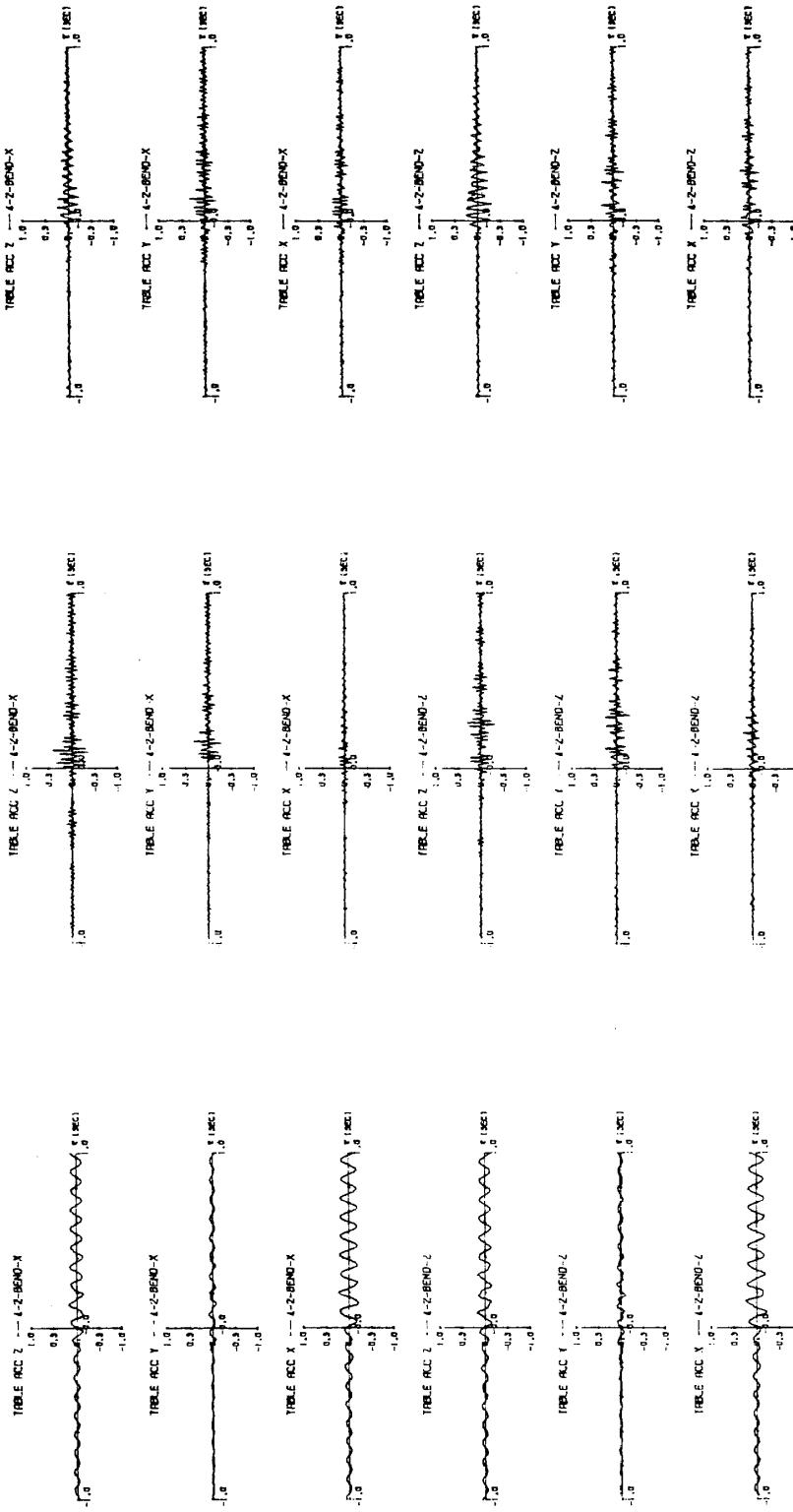
(1) X- Random

Fig. 4-31 Cross-Correlations between Table Accelerations (X, Y and Z) and Pipe Strains (at a point 1 of pipe 4)

図 4-31 振動台加速度と配管モデル歪波形の相互相関(Pipe 4 の点 1)



三次元精密振動台による小型模型実験一小川・箕輪

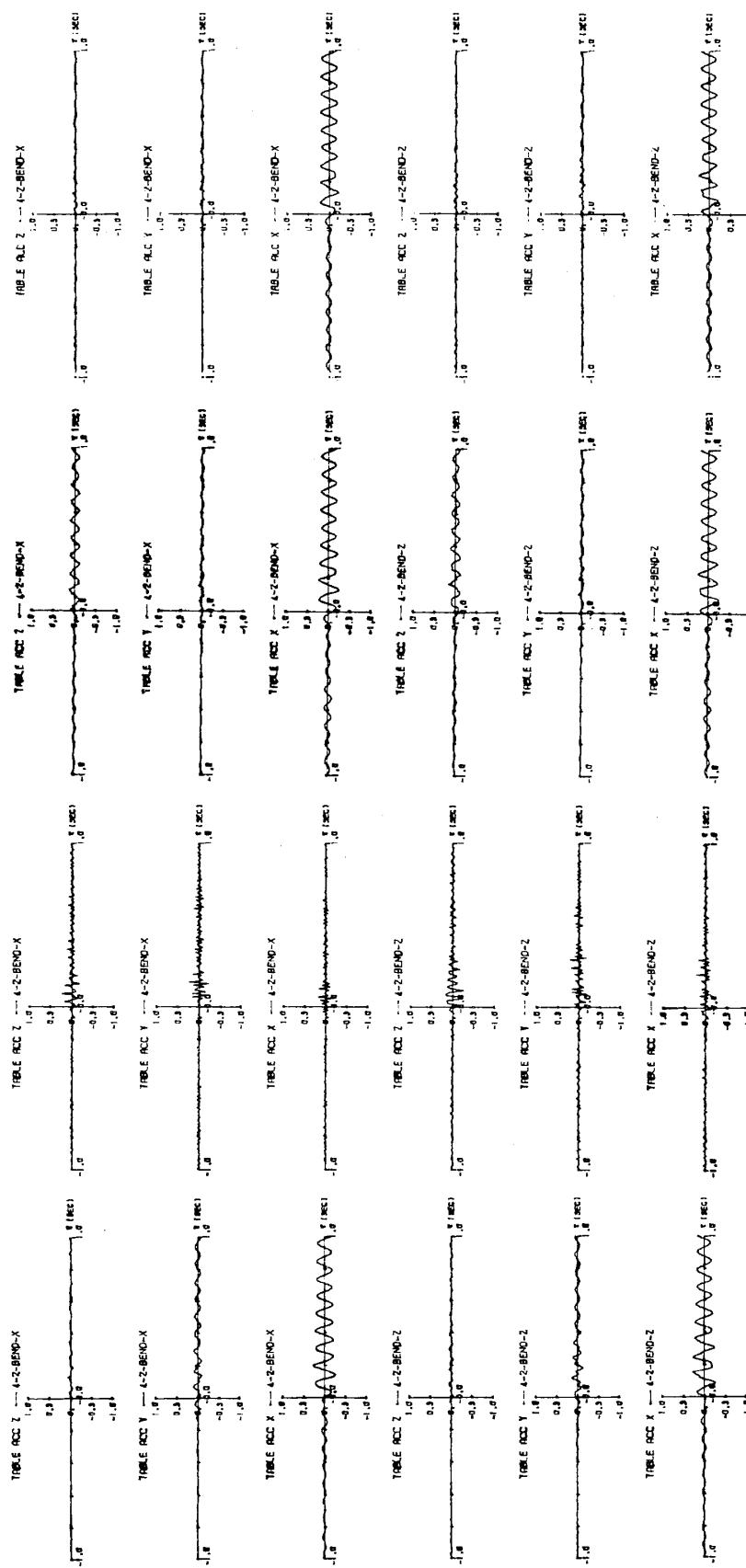


(1) X-Random

(2) Y-Random

(3) Z-Random

図 4-32 振動台加速度と配管モデル歪波形の相互相関 (Pipe 4 の点 2)
Fig. 4-32 Cross-Correlations between Table Accelerations (X, Y and Z)
and Pipe Strains (at a Point 2 of Pipe 4)



(7) XYZ- Random

(6) XY- Random

(5) YZ- Random

図 4-32(2)
Fig. 4-32(2)

THE TEST TANK ON THE THREE DIMENSIONAL SHAKING TABLE

THE MATERIAL OF TEST TANK;

CLEAR VINYL CHLORIDE PLATES
THICKNESS OF THE PLATES : 0.2cm

YOUNG MODULUS : 32000kg/cm²

UNIT VOLUME WEIGHT :
1.47gram/cm³

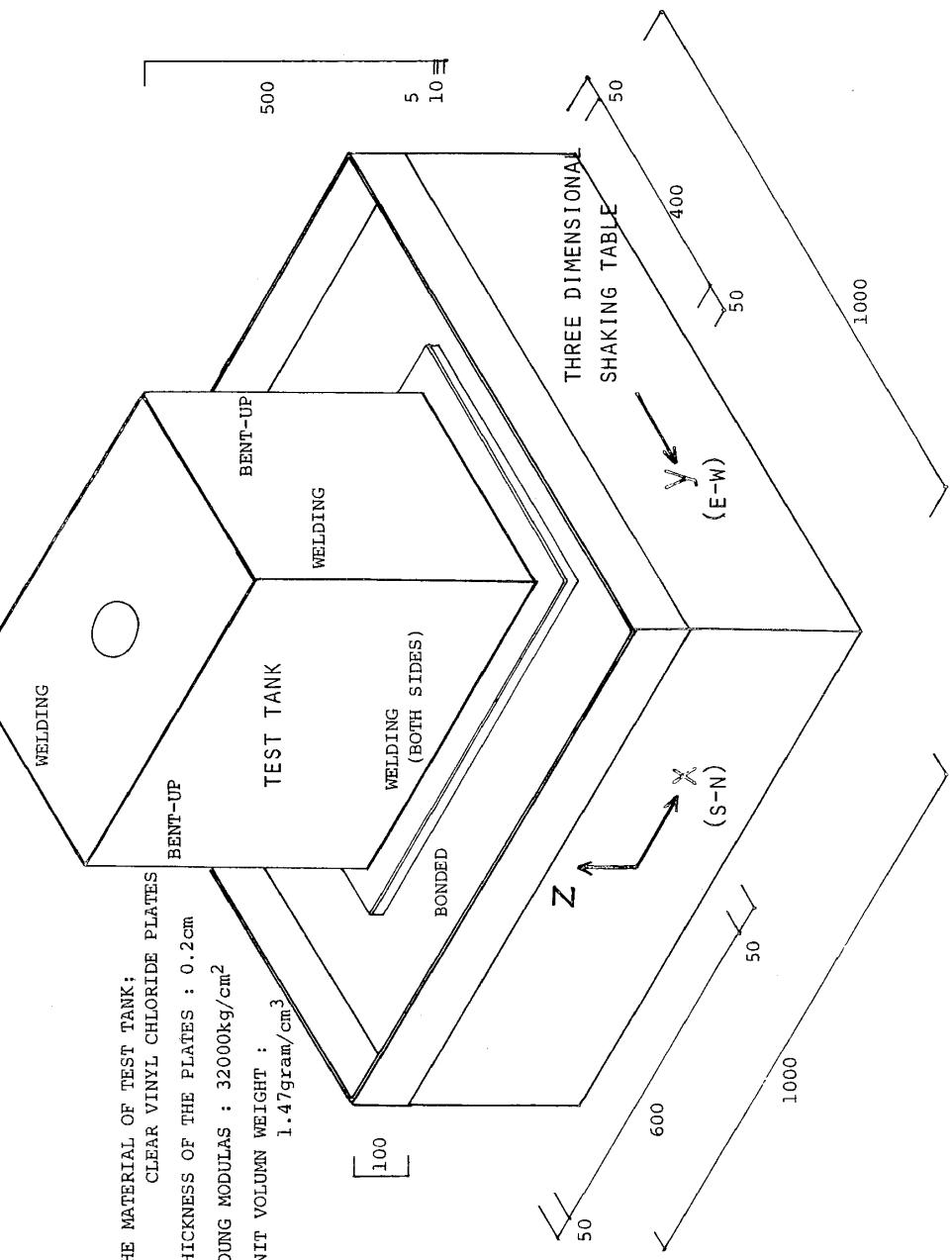


図 5-1 模型タンク概要
Fig. 5-1 Outline of Test Tank

MEASURE POINTS OF ACCELERATIONS.

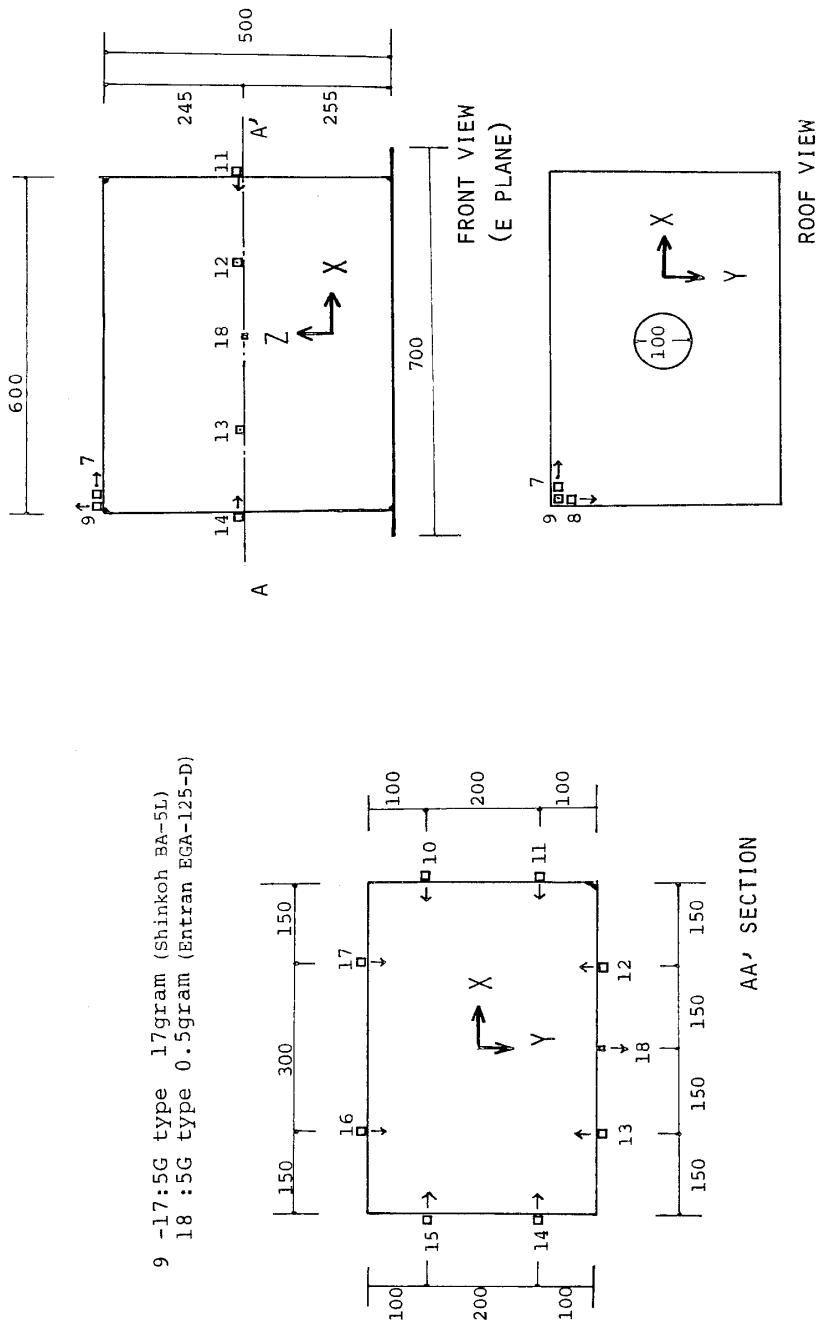


図 5-2 加速度測定点および測定方向
Fig. 5-2 Measure Points of Accelerations

MEASURE POINTS OF WATER PRESSURES.

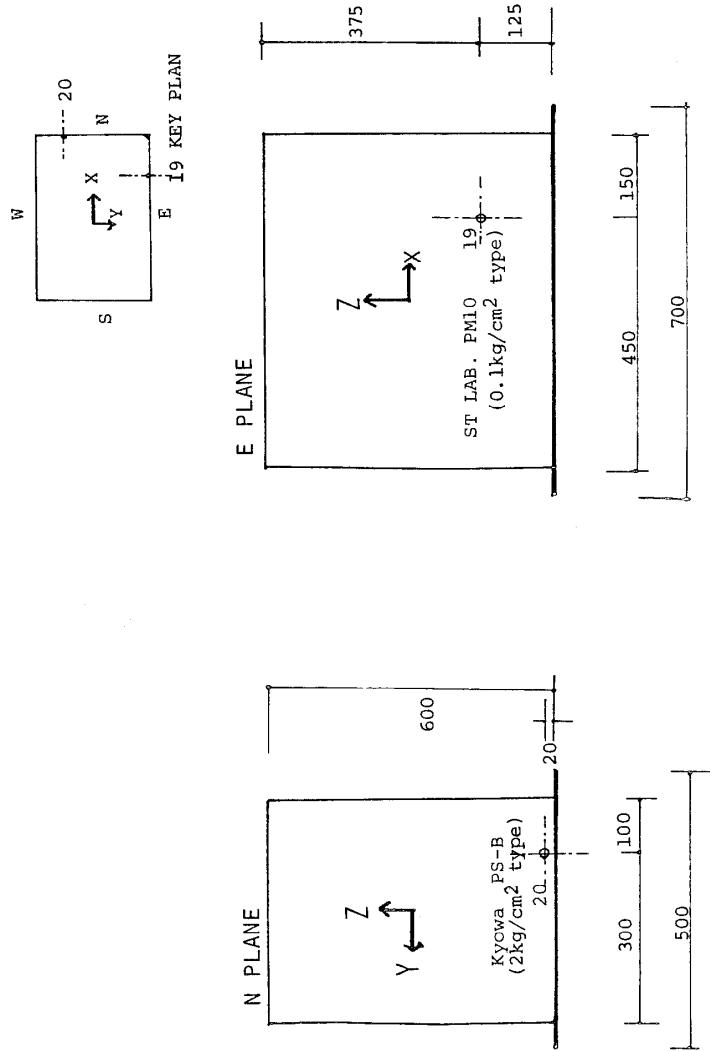
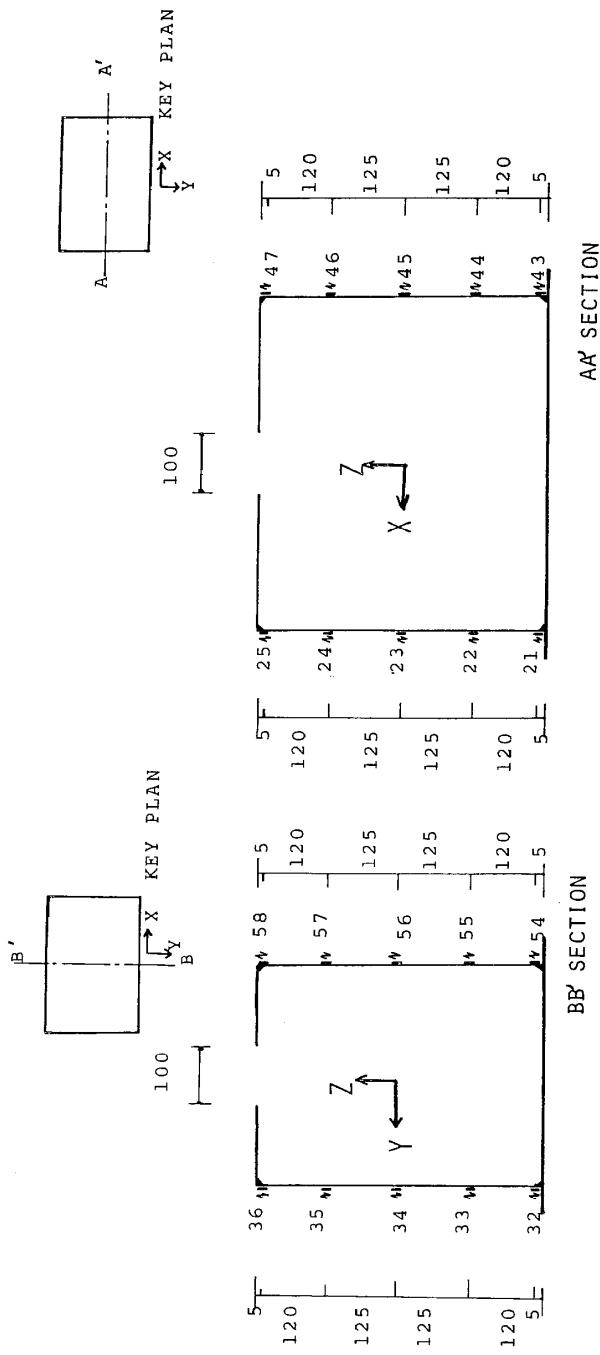


図 5-3 水圧測定点
Fig. 5-3 Measure Points of Water pressures

THE MEASURE POINTS OF VERTICAL STRAINS.



21, 23, 25, 32, 34, 36
43, 45, 47, 54, 56, 58 Kyowa KFW-5-D16-11-L500
22, 24, 33, 35,
44, 46, 55, 57, Shinkoh B-TAE-5-12-T11 WP

図 5-4 縱方向歪測定点
Fig. 5-4 Measure Points of Vertical Strains

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

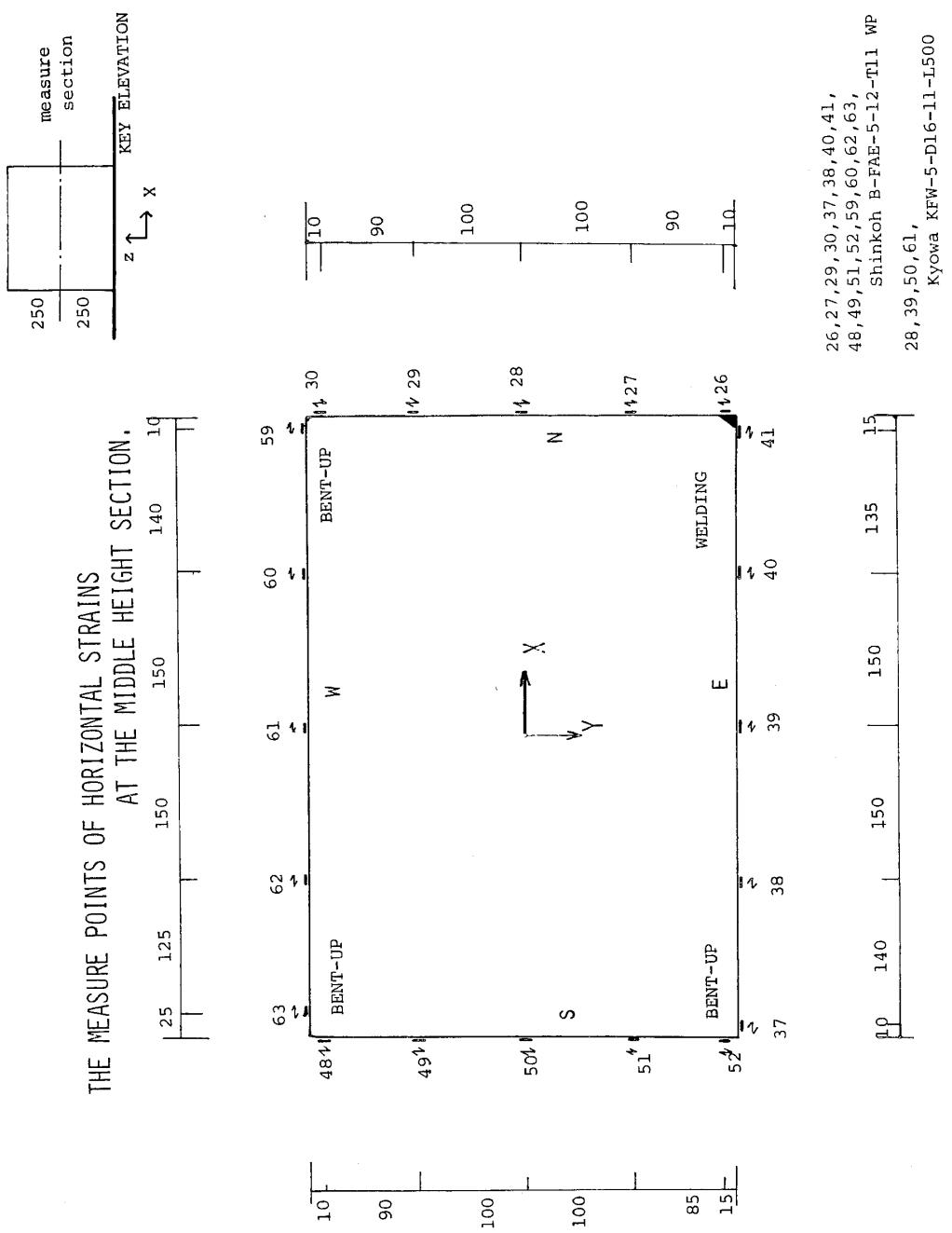
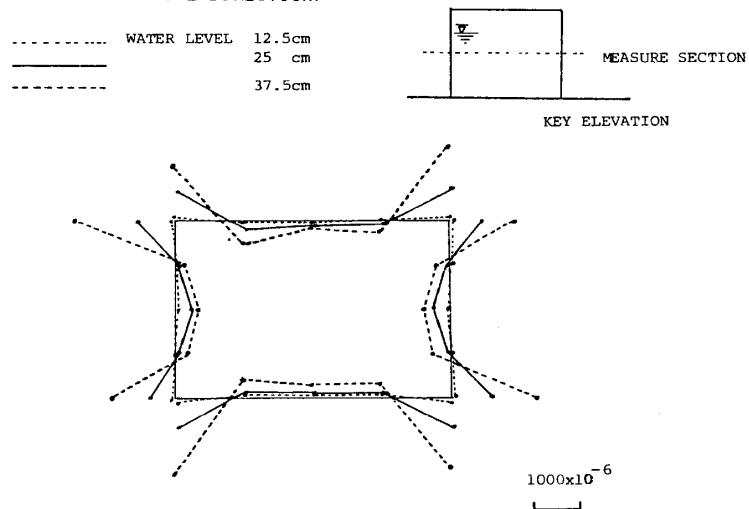


图 5-5 横方向歪测定点
Fig. 5-5 Measure Points of Horizontal Strains

MEASURED STATIC STRAIN AT THE MIDDLE HEIGHT
(HORIZONTAL DIRECTION)



MEASURED STATIC STRAIN(VERTICAL DIRECTION)

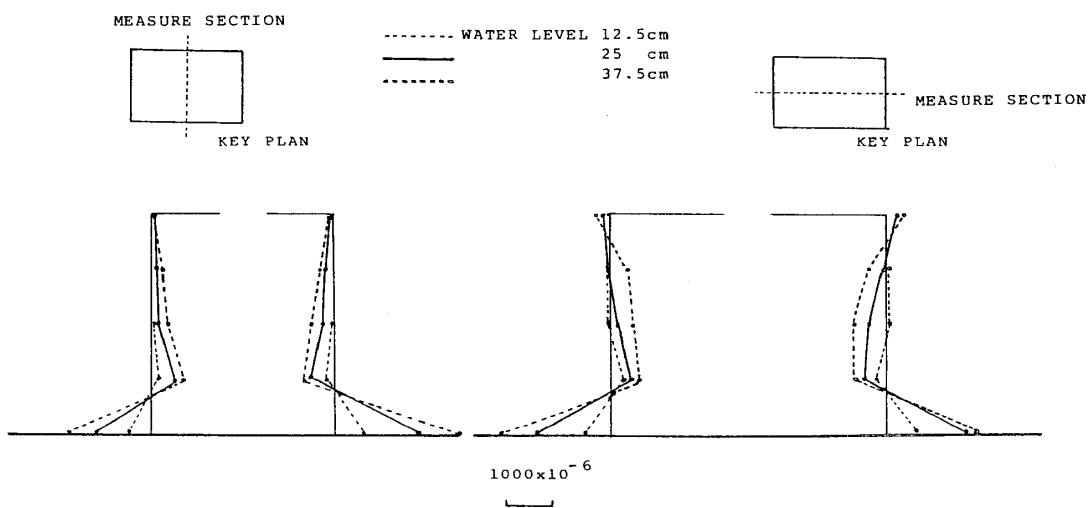
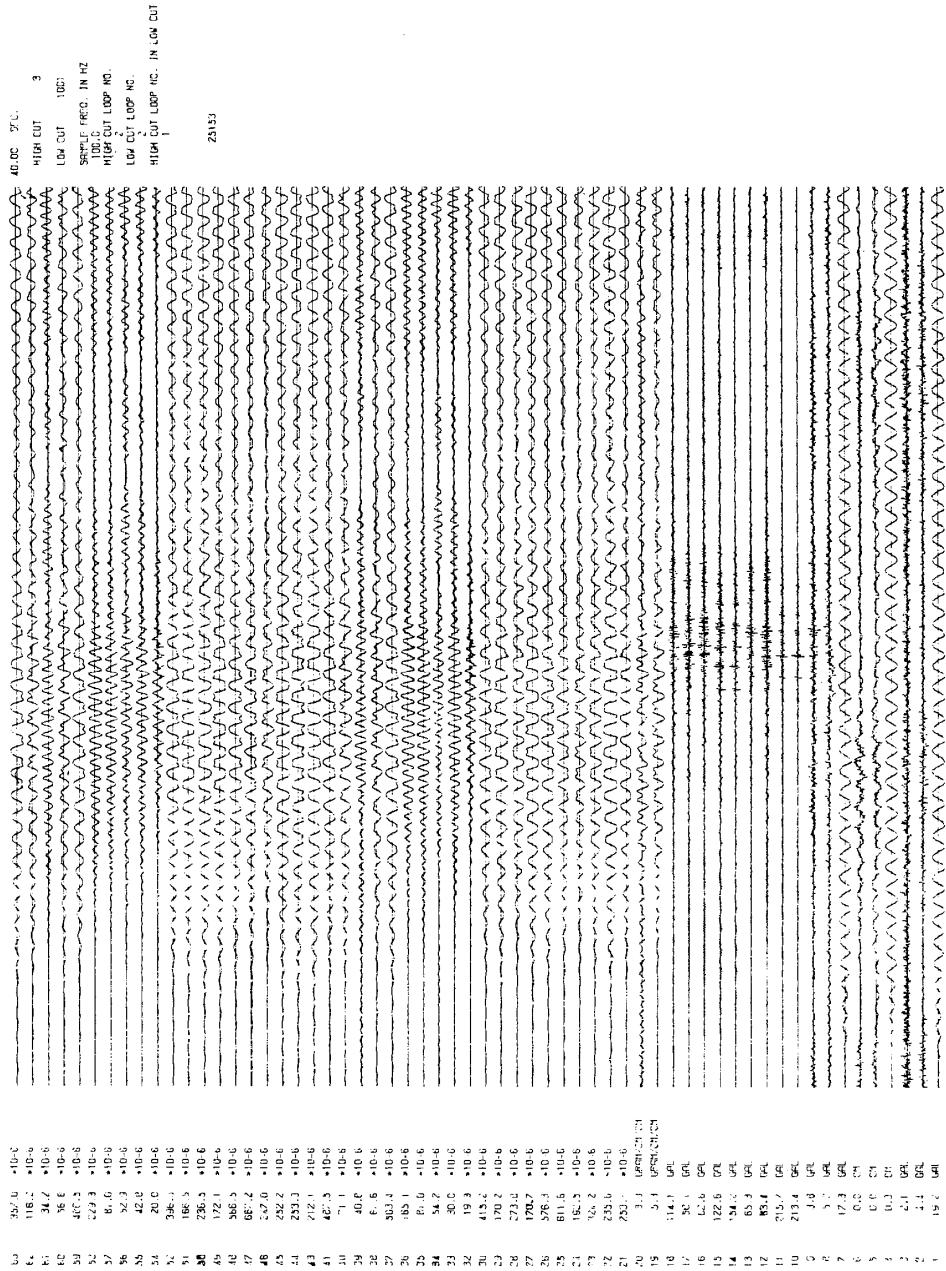


図 5-6 各水位に於ける静歪
Fig. 5-6 Measured Static Strain Distributions

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪



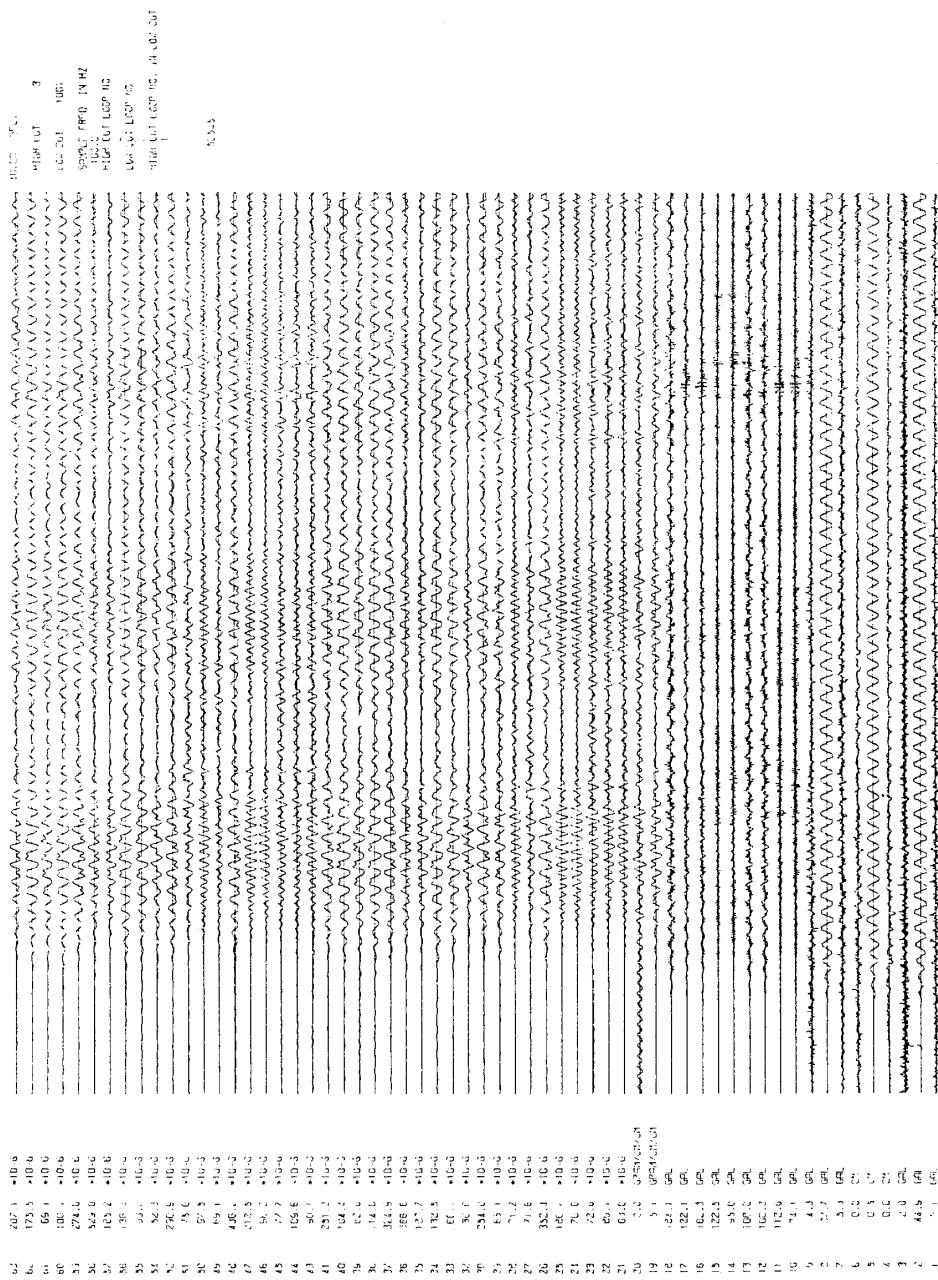


図 5-8 水位 50%Y 方向スロッシング振動数(1.37Hz)加振記録波形
Fig. 5-8 Records of 1.37Hz Y Sinusoidal Excitation with 50% Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

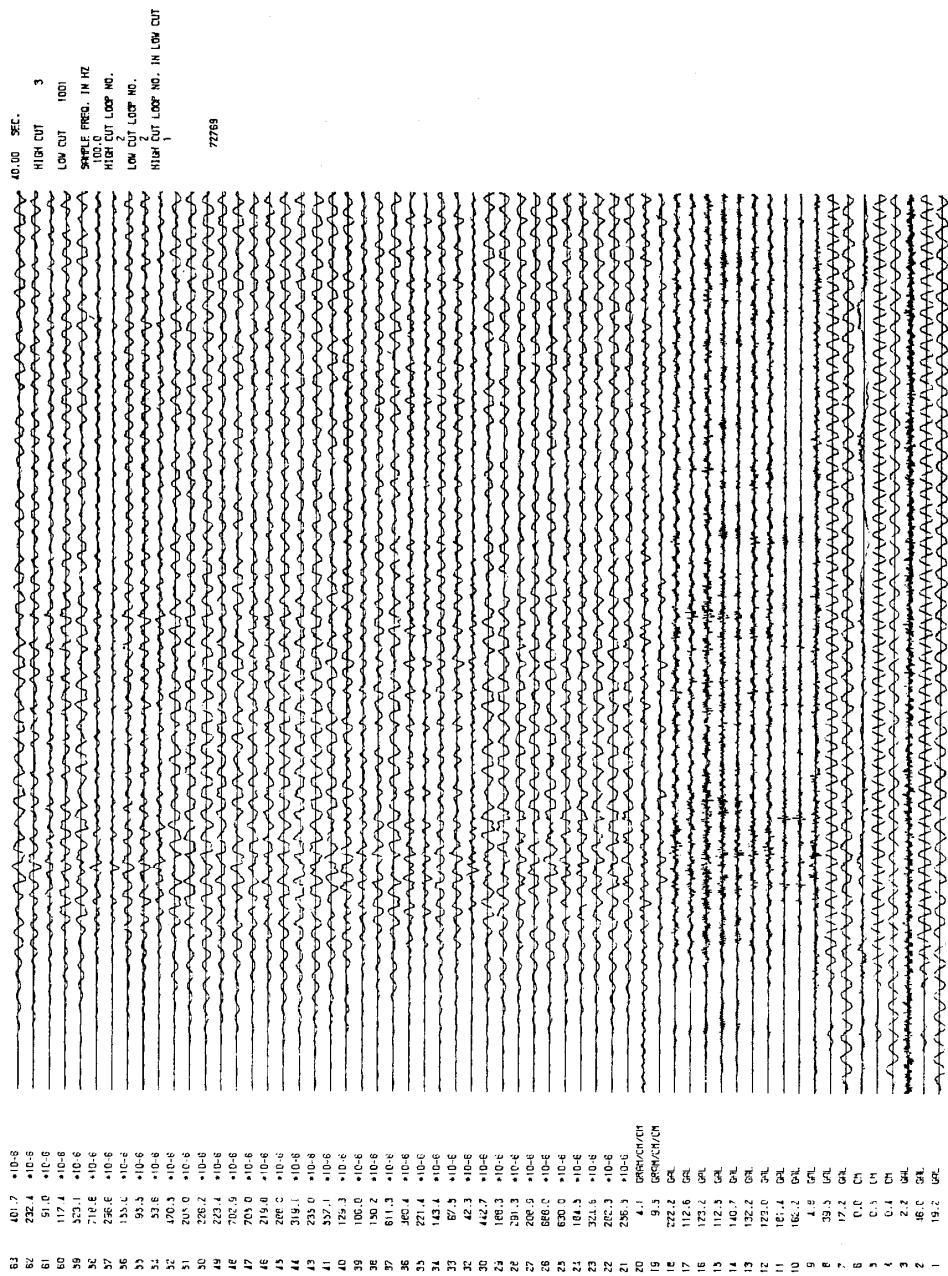
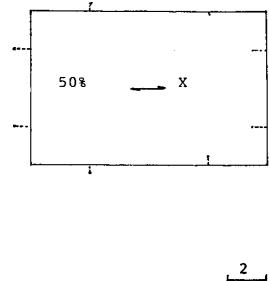
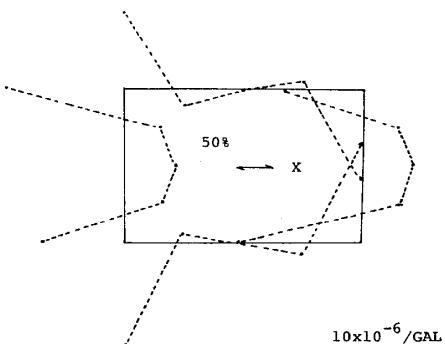


図 5-9 水位 50 % XY 方向スロッシング振動数 (X 方向 1.06 Hz, Y 方向 1.37 Hz) 加振記録波形
Fig. 5-9 Records of 1.06Hz in X, 1.37Hz in Y, XY Sinusoidal Excitation with
50 % Water Level

THE 1.06Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION

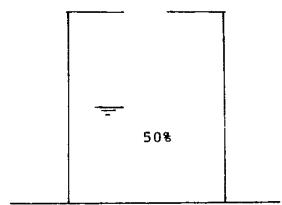


ACCELERATION MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION

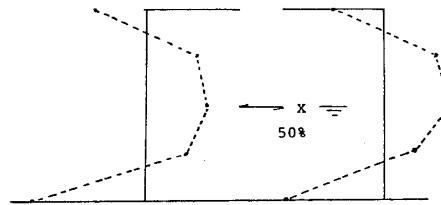


HORIZONTAL STRAIN MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION

THE 1.06Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.06Hz

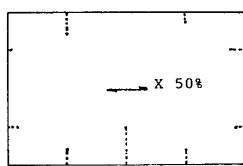


VERTICAL STRAIN MODE OF BB' SECTION

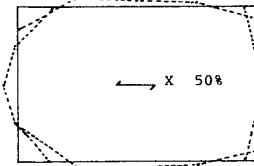


VERTICAL STRAIN MODE OF AA' SECTION

THE 2.12Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.06Hz

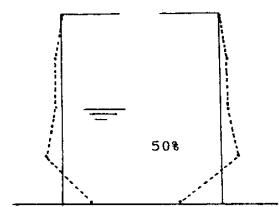


ACCELERATION MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION

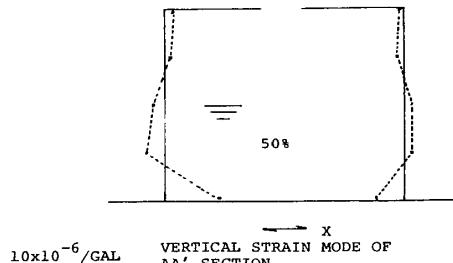


HORIZONTAL STRAIN MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION

THE 2.12Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.06Hz



VERTICAL STRAIN MODE OF BB' SECTION



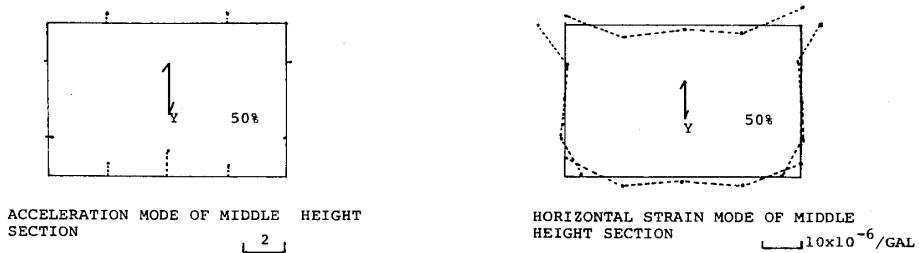
VERTICAL STRAIN MODE OF AA' SECTION

図 5-10 水位 50% X方向スロッシング加振時加振振動数成分および倍加振振動数成分歪分布

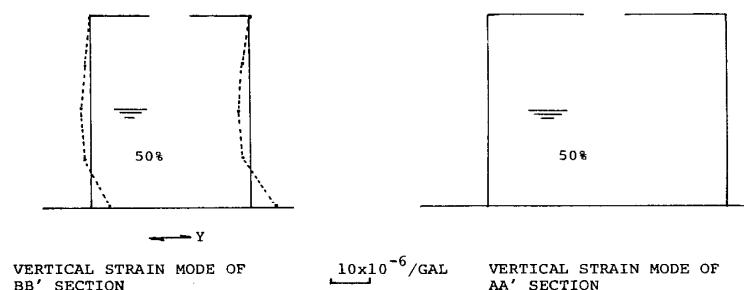
Fig. 5-10 Strain Distributions of 1.06Hz X Sinusoidal Excitation with 50% Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

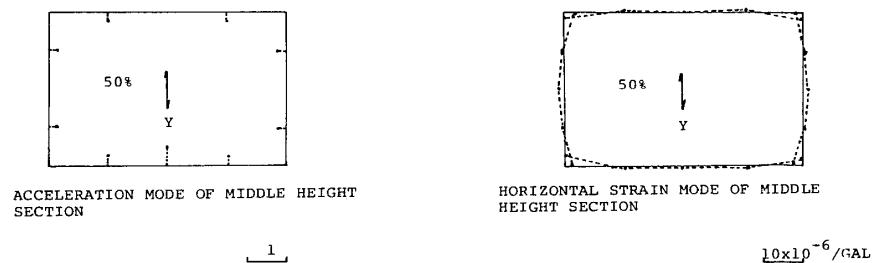
THE 1.37Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.37Hz



THE 1.37Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.37Hz



THE 2.74Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.37Hz



THE 2.74Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.37Hz

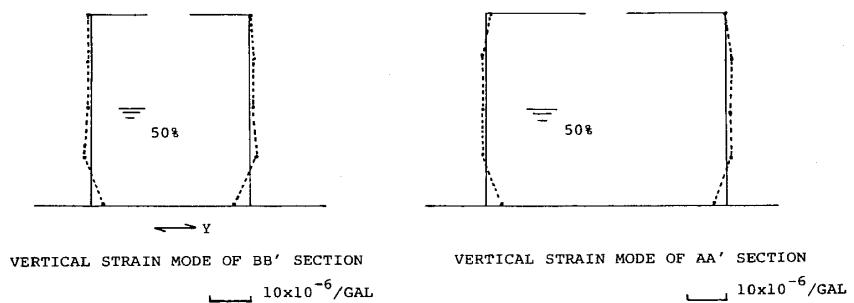


図 5-11 水位 50% Y方向スロッシング加振時加振振動数成分および倍加振振動数成分歪分布

Fig. 5-11 Strain Distributions of 1.37Hz Y Sinusoidal Excitation with 50% Water Level

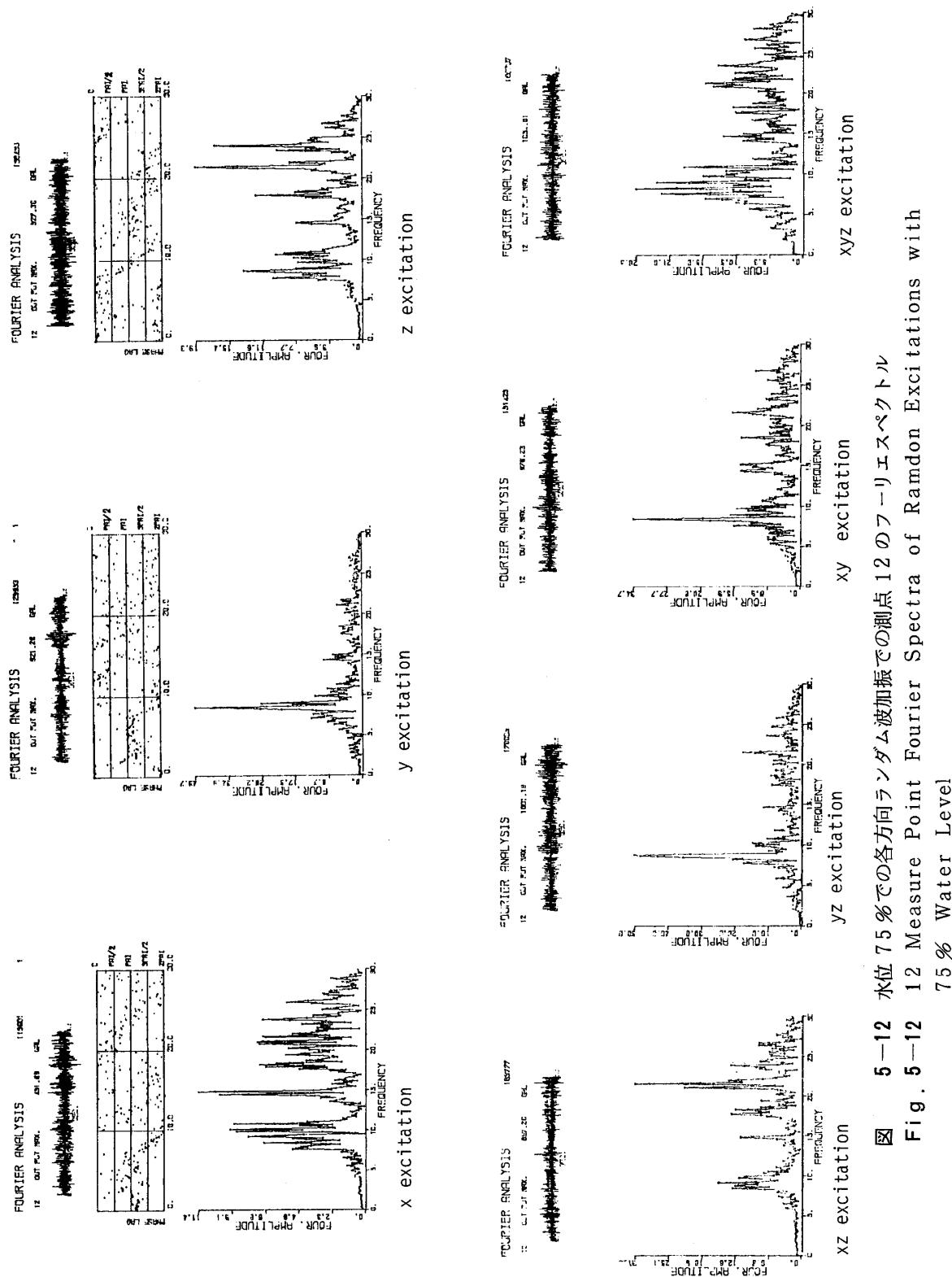


図 5-12 水位 75 % の各方向ランダム波加振での測点 12 の Fourier スペクトル
Fig. 5-12 12 Measure Point Fourier Spectra of Random Excitations with
75 % Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

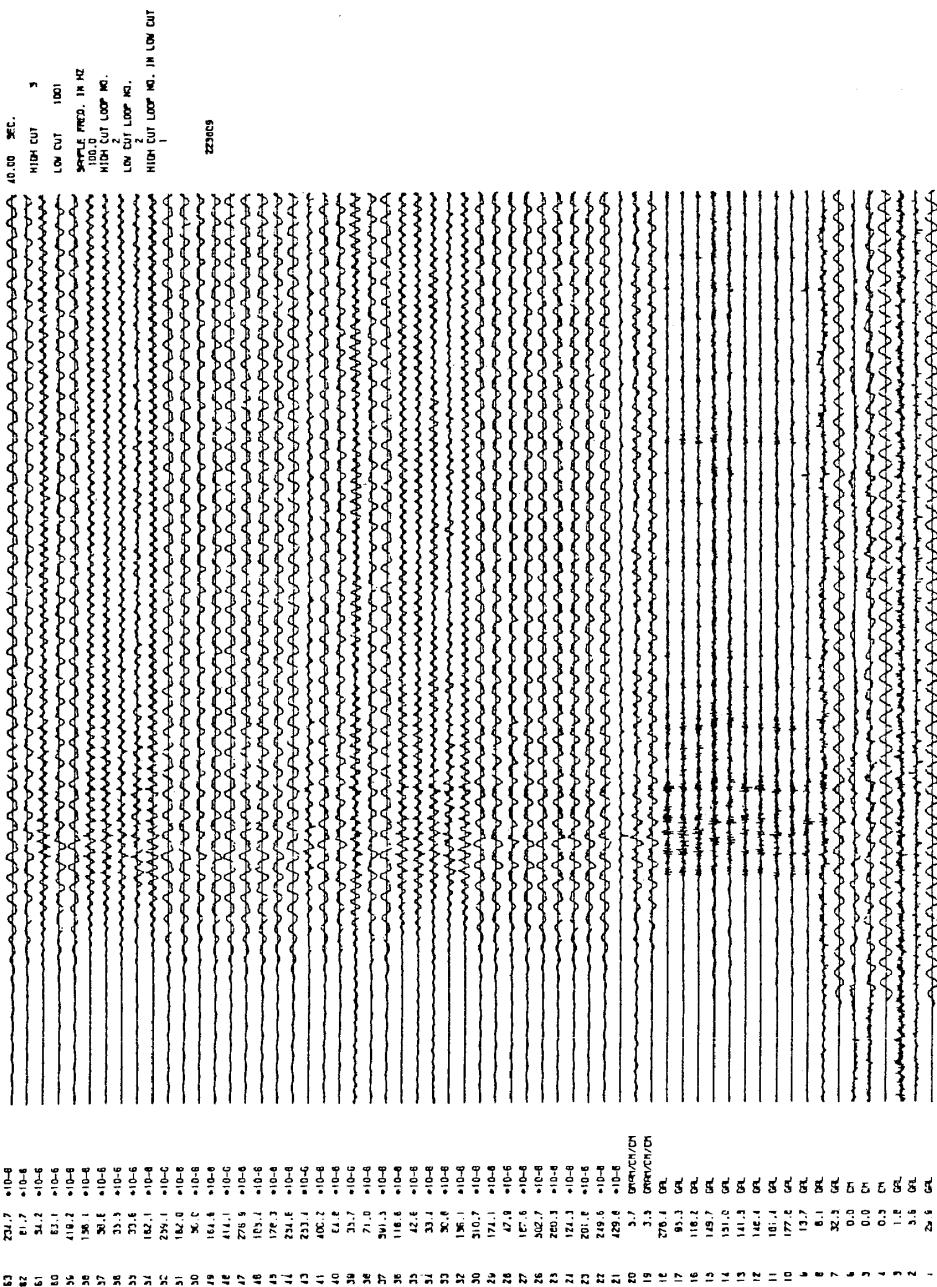


図 5-13 水位 75 %X 方向スロッシング振動数 (1.12Hz) 加振記録波形
Fig. 5-13 Records of 1.12Hz X Sinusoidal Excitation with 75% Water Level

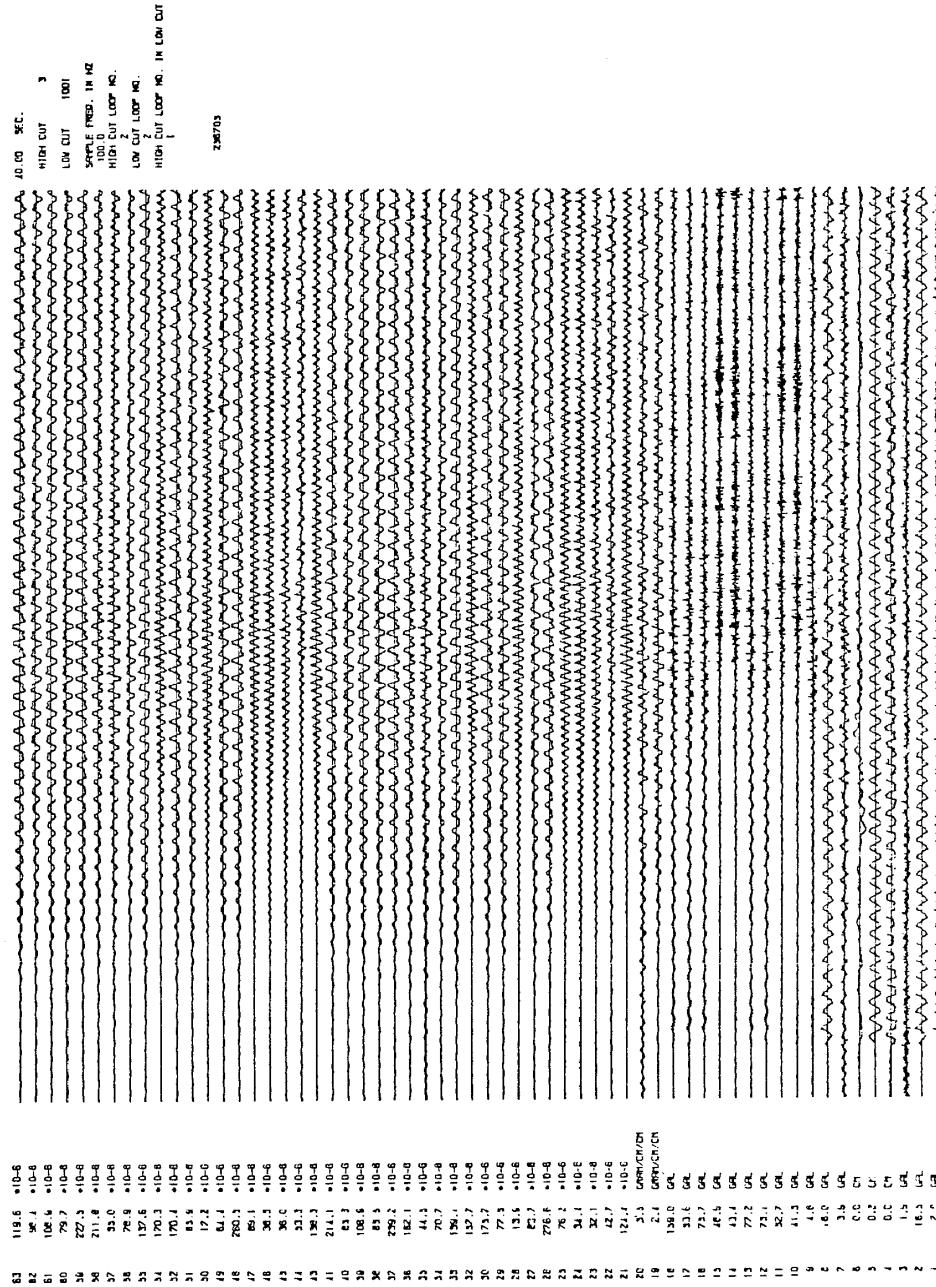


図 5-14 水位 75%Y 方向スロッシング振動数 (1.34 Hz) 加振記録波形
 Fig. 5-14 Records of 1.34Hz Y Sinusoidal Excitation with 75% Water Level

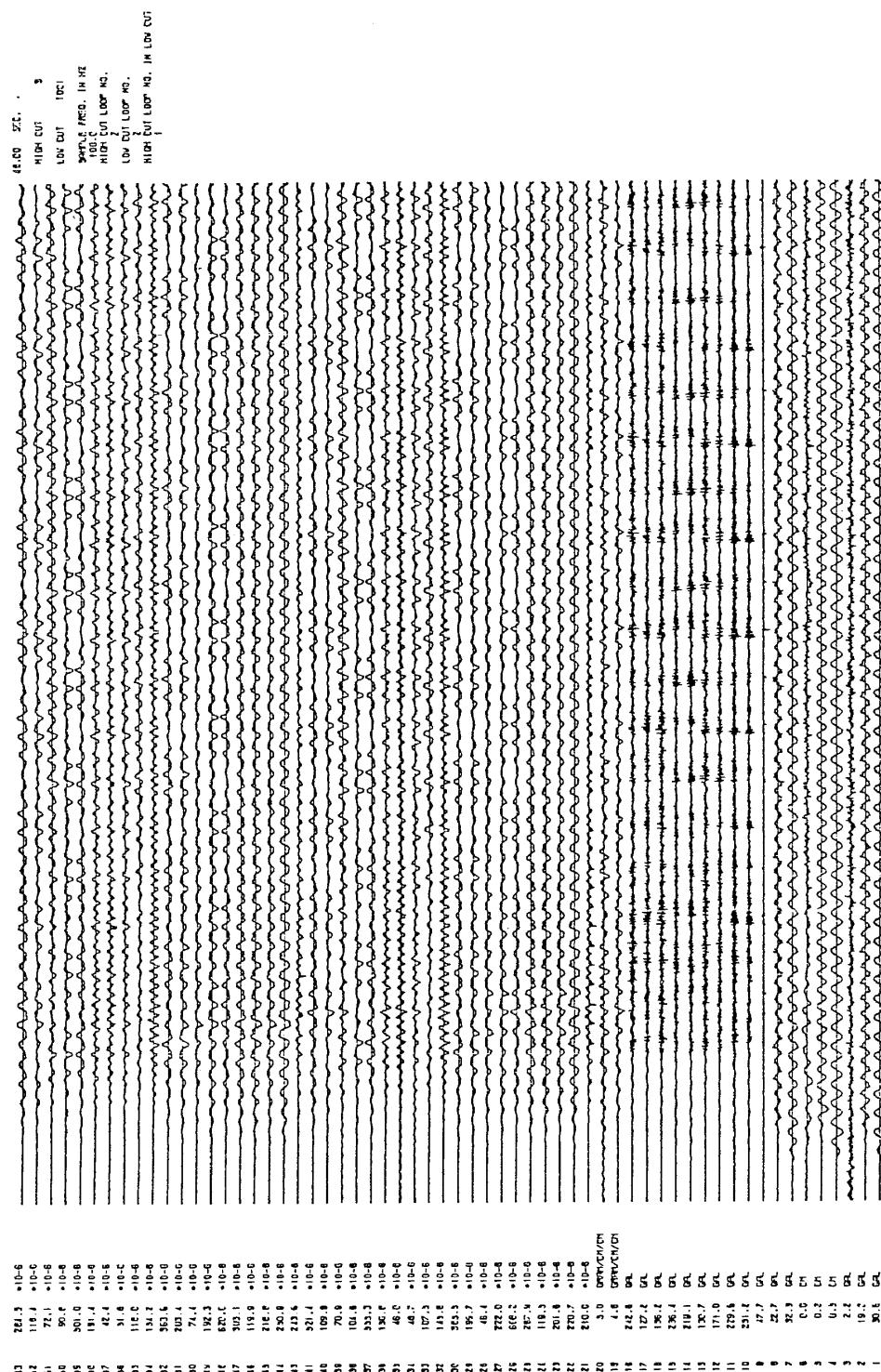
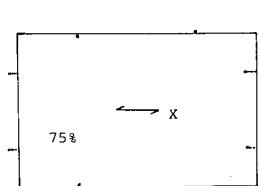
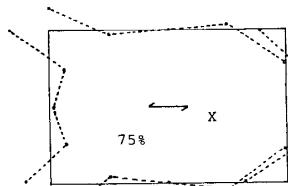


図 5-15 水位 75 %X Y 方向スロッシング振動数 (X 方向 1.12 Hz, Y 方向 1.34 Hz) 加振記録波形
Fig. 5-15 Records of 1.12Hz in X, 1.34Hz in Y, XY Sinusoidal Excitation with 75% Water Level

THE 1.12Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.12Hz

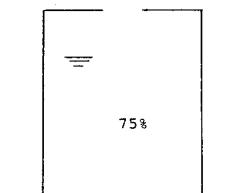


ACCELERATION MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION



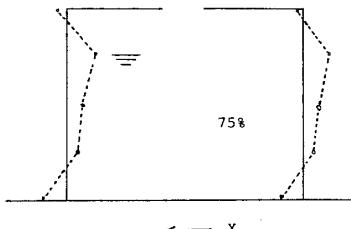
HORIZONTAL STRAIN MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION 10×10^{-6} /GAL

THE 1.12Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.12Hz



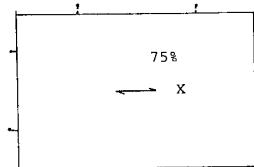
VERTICAL STRAIN MODE OF BB' SECTION

10×10^{-6} /GAL

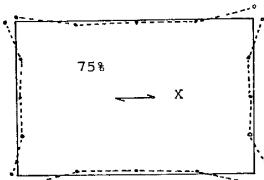


VERTICAL STRAIN MODE AA' SECTION

THE 2.24Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.12Hz



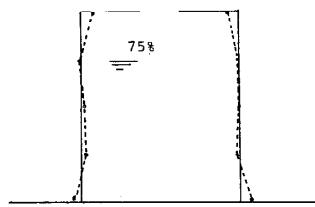
ACCELERATION MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION.



HORIZONTAL STRAIN MODE OF MIDDLE HEIGHT SECTION.

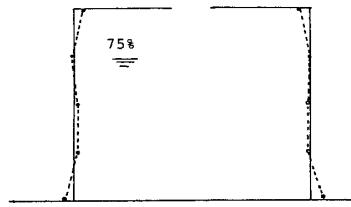
10×10^{-6} /GAL

THE 2.24Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.12Hz.



VERTICAL STRAIN MODE OF BB' SECTION

10×10^{-6} /GAL



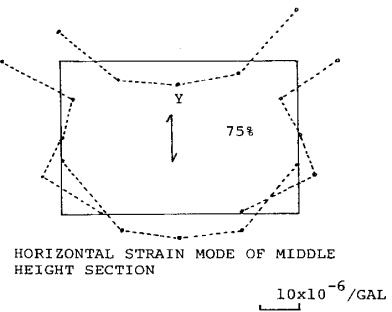
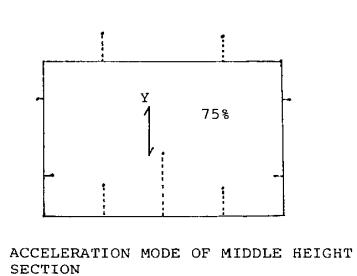
VERTICAL STRAIN MODE AA' SECTION.

図 5-16 水位 75 % X方向スロッシング加振時加振振動数成分および倍加振振動数成分歪分布

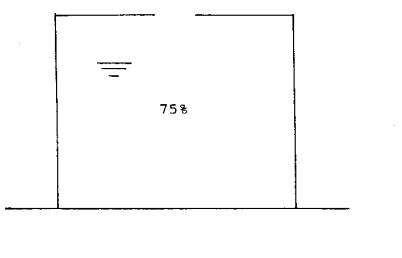
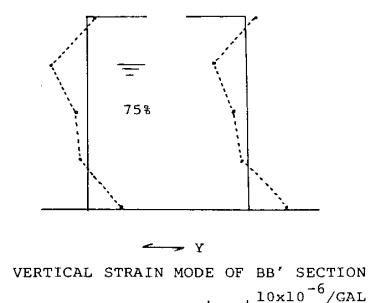
Fig. 5-16 Strain Distributions of 1.12Hz X Sinusoidal Excitation with 75% Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

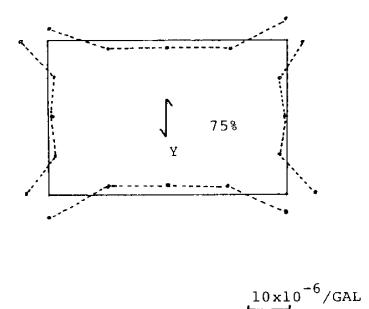
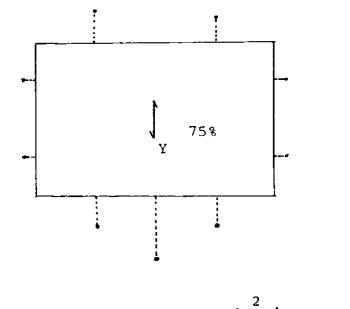
THE 1.34Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.34Hz



THE 1.34Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.34Hz



THE 2.67Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.34Hz



THE 2.67Hz COMPONENT AT THE SINUSOIDAL EXCITATION OF 1.34Hz

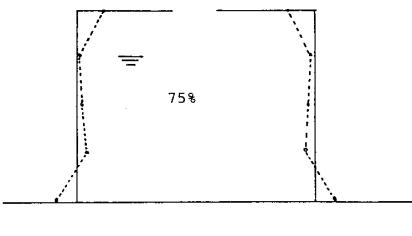
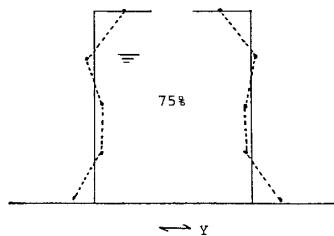


図 5-17 水位 75 % Y方向スロッシング加振時加振振動数成分および倍加振振動数成分歪分布

Fig. 5-17 Strain Distributions of 1.34Hz Y Sinusoidal Excitation with 75% Water Level

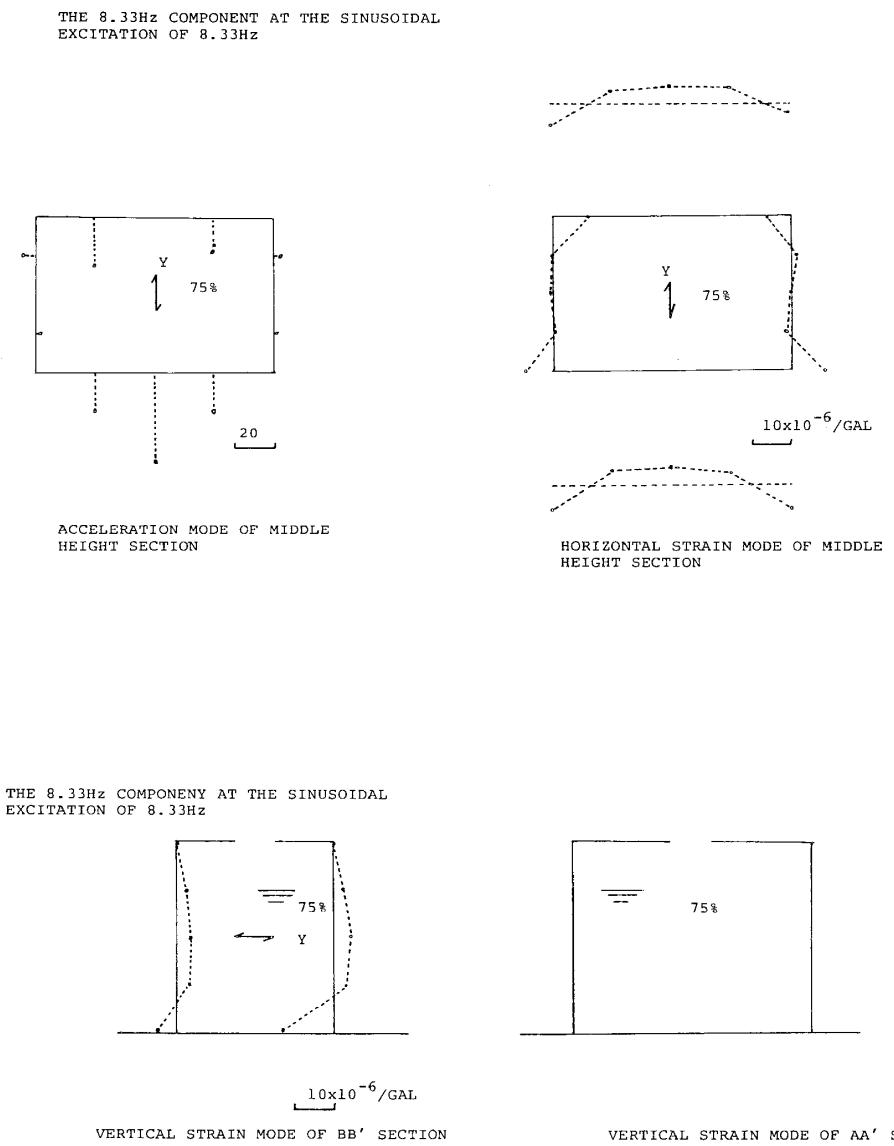


図 5-18 水位 75 %Y方向バルジング(8.33Hz) 加振時歪分布
Fig. 5-18 Strain Distributions of 8.33Hz Y Sinusoidal Excitation with 75 % Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

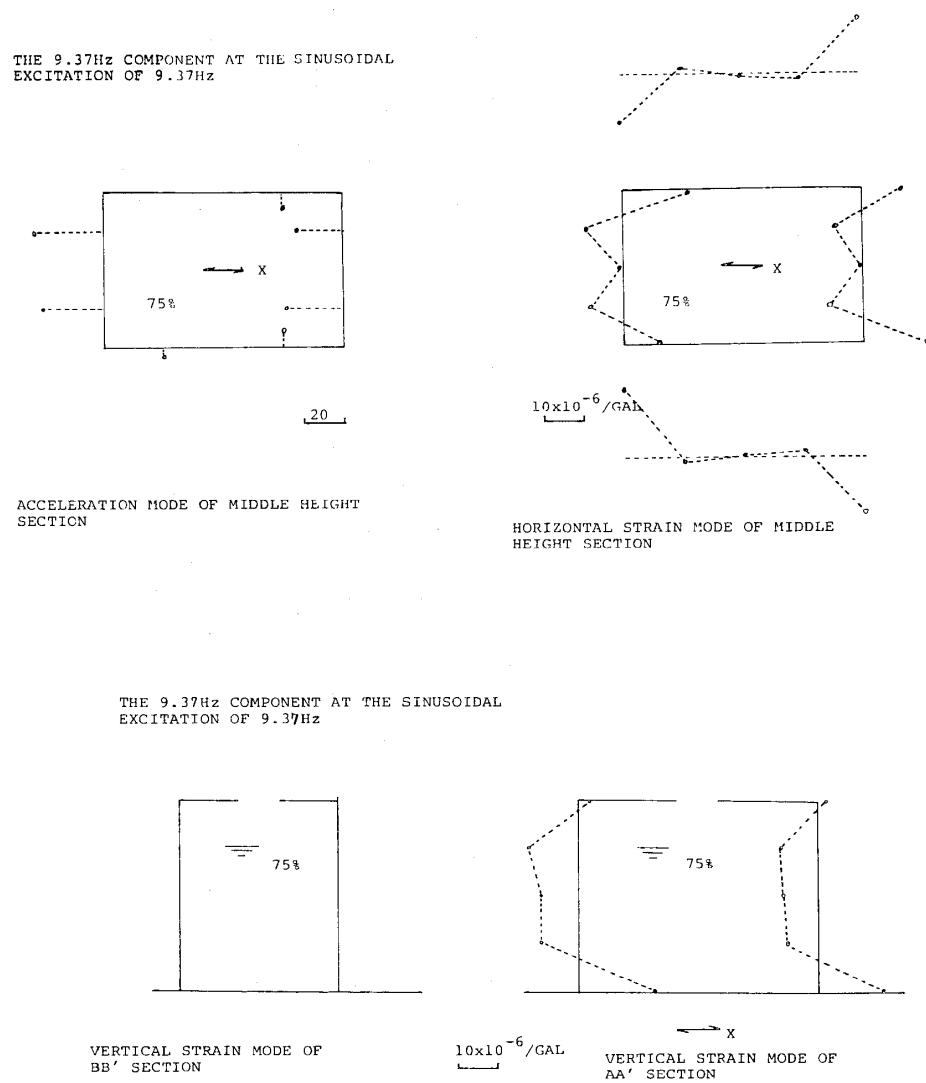


図 5-19 水位 75 % X方向パルジング (9.37Hz) 加振時歪分布

Fig. 5-19 Strain Distributions of 9.37Hz X Sinusoidal Excitation with 75 % Water Level

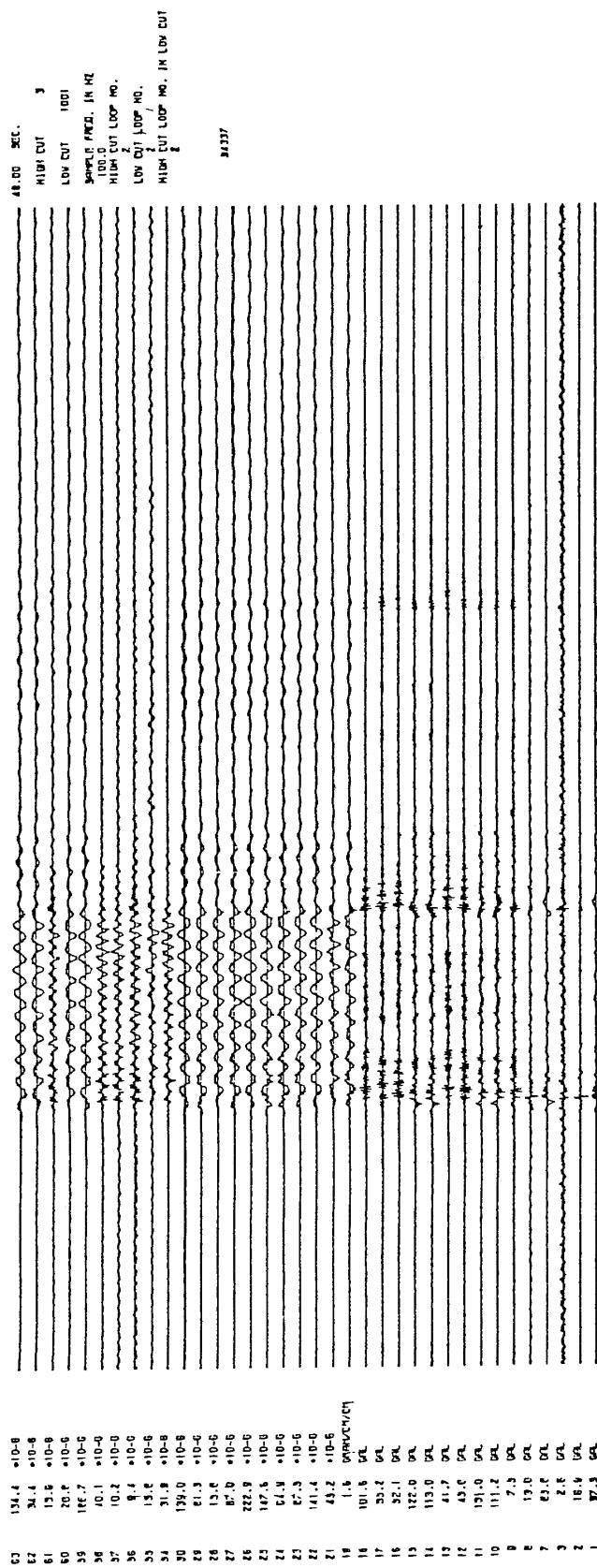


図 5-20 水位 75 % X 方向地震波加振記録波形
Fig. 5-20 Records of X Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

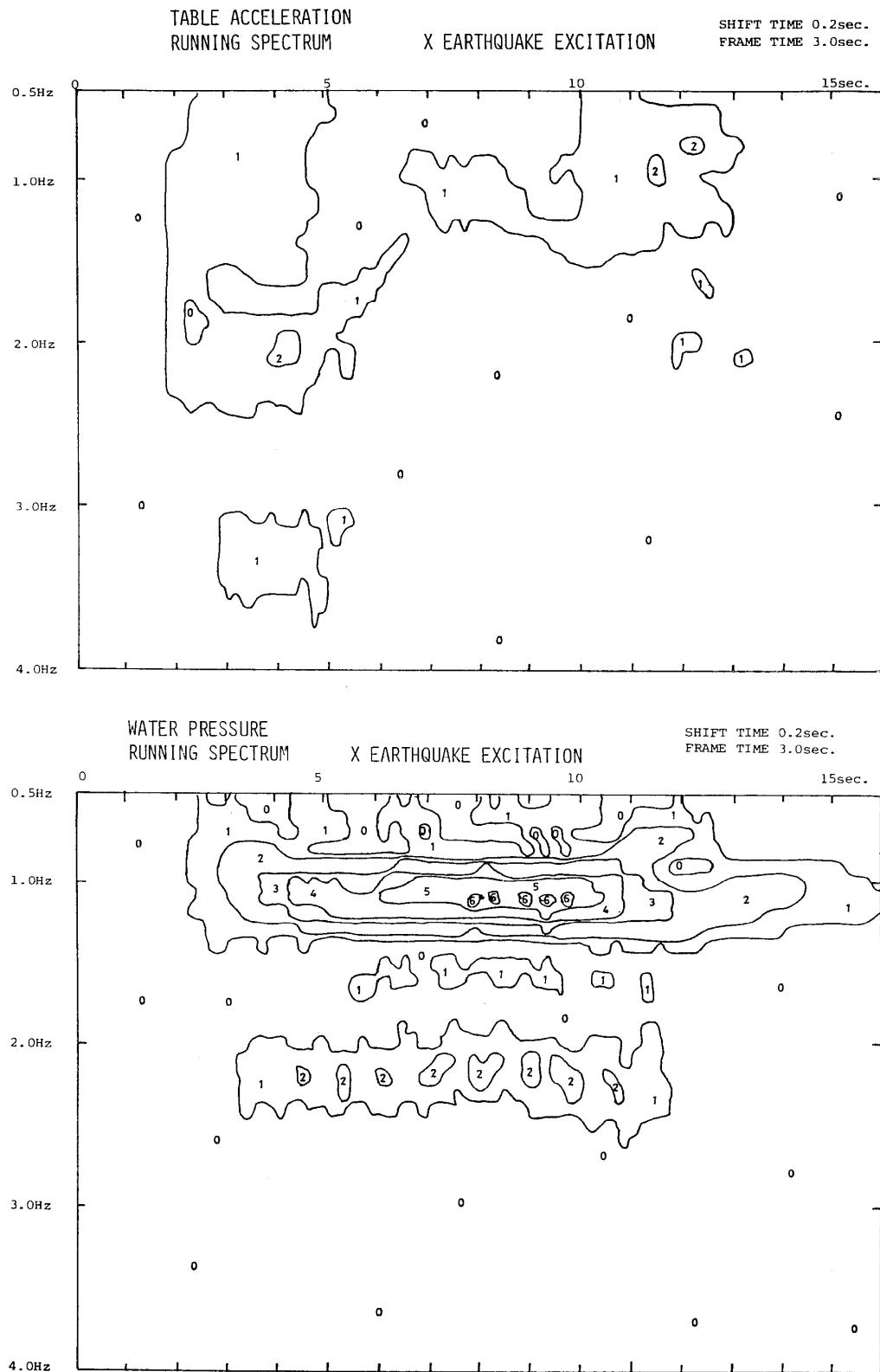


図 5-21 水位 75 % X方向地震波加振振動台および水圧波形ランニングスペクトル

Fig. 5-21 Running Spectra of X Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

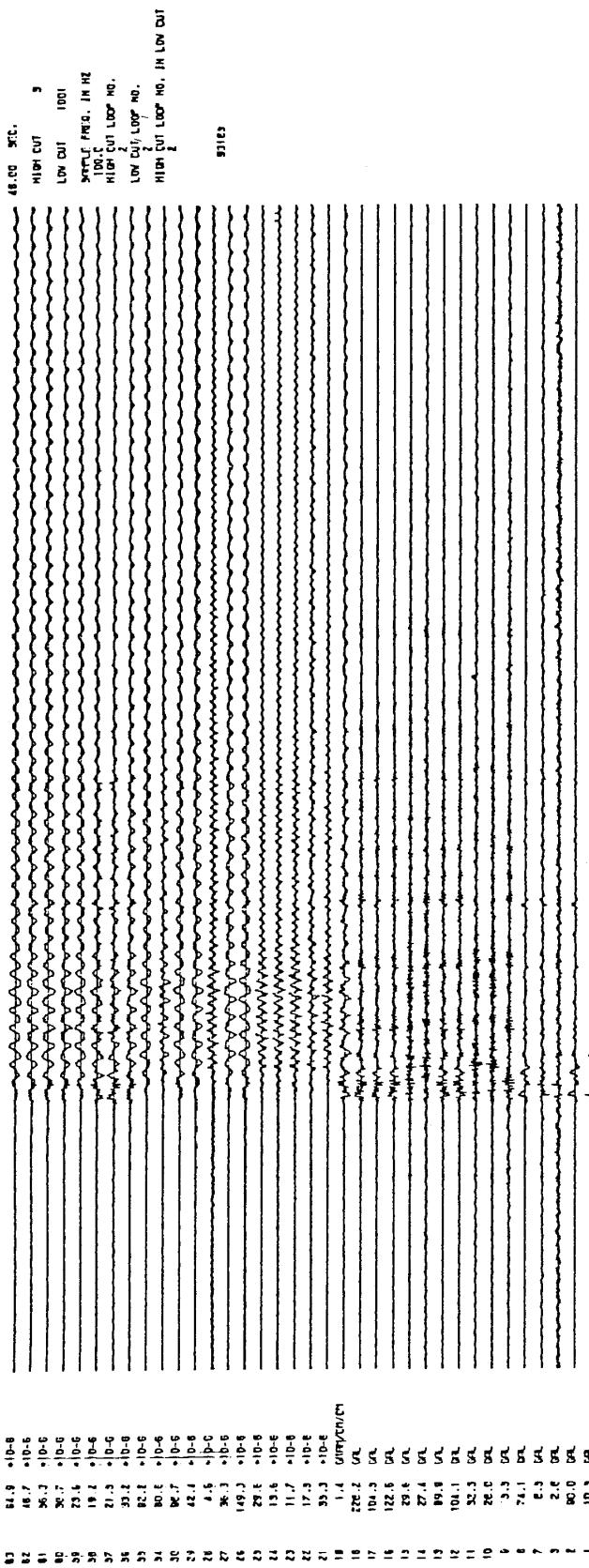


圖 5-22 水位 75%Y 方向地震波加振記錄波形
Fig. 5-22 Records of Y Earthquake Wave Excitation with 75% Water Level

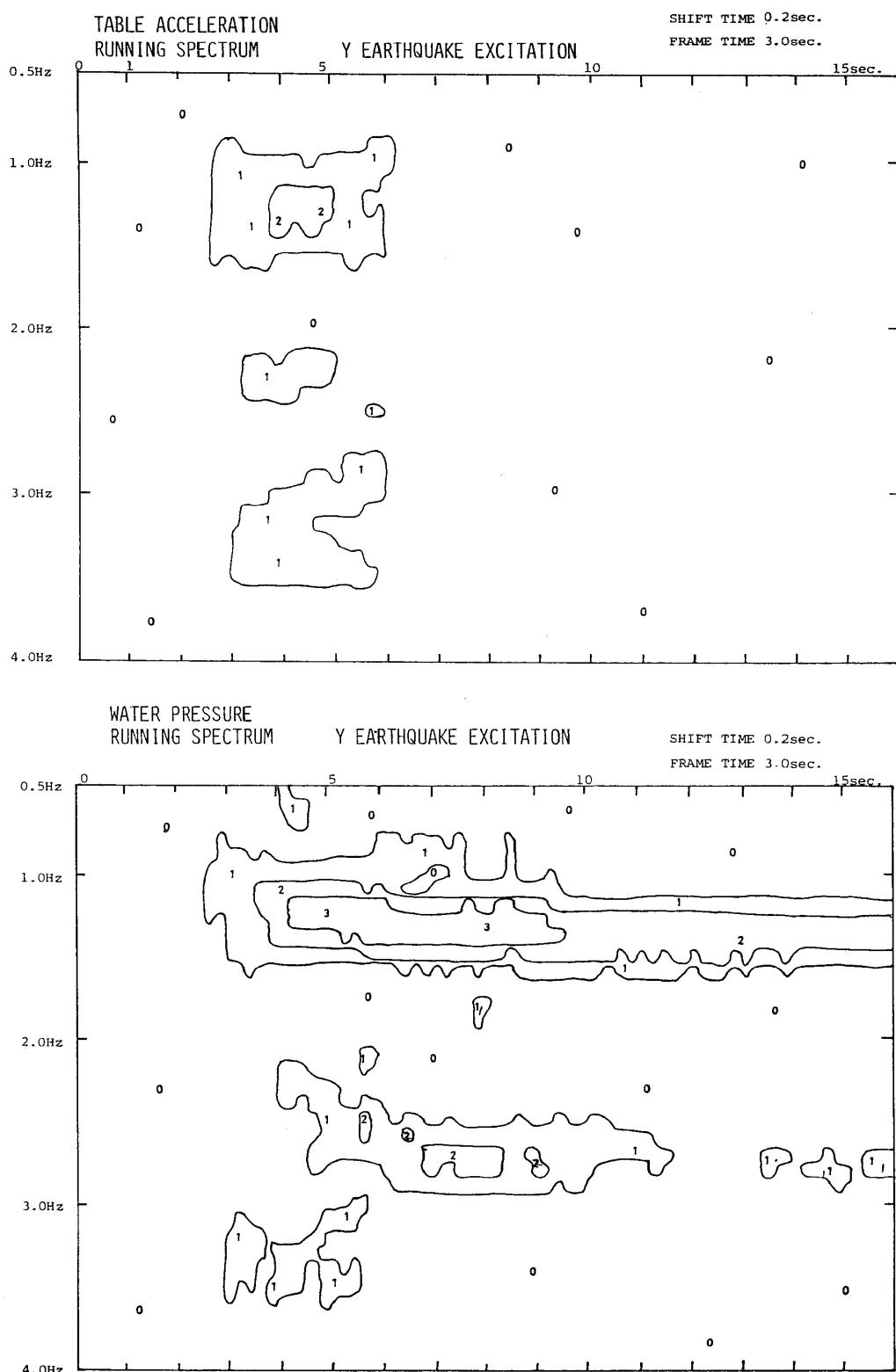


図 5-23 水位 75 % Y方向地震波加振振動台および水圧波形ランニングスペクトル

Fig. 5-23 Running Spectra of Y Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

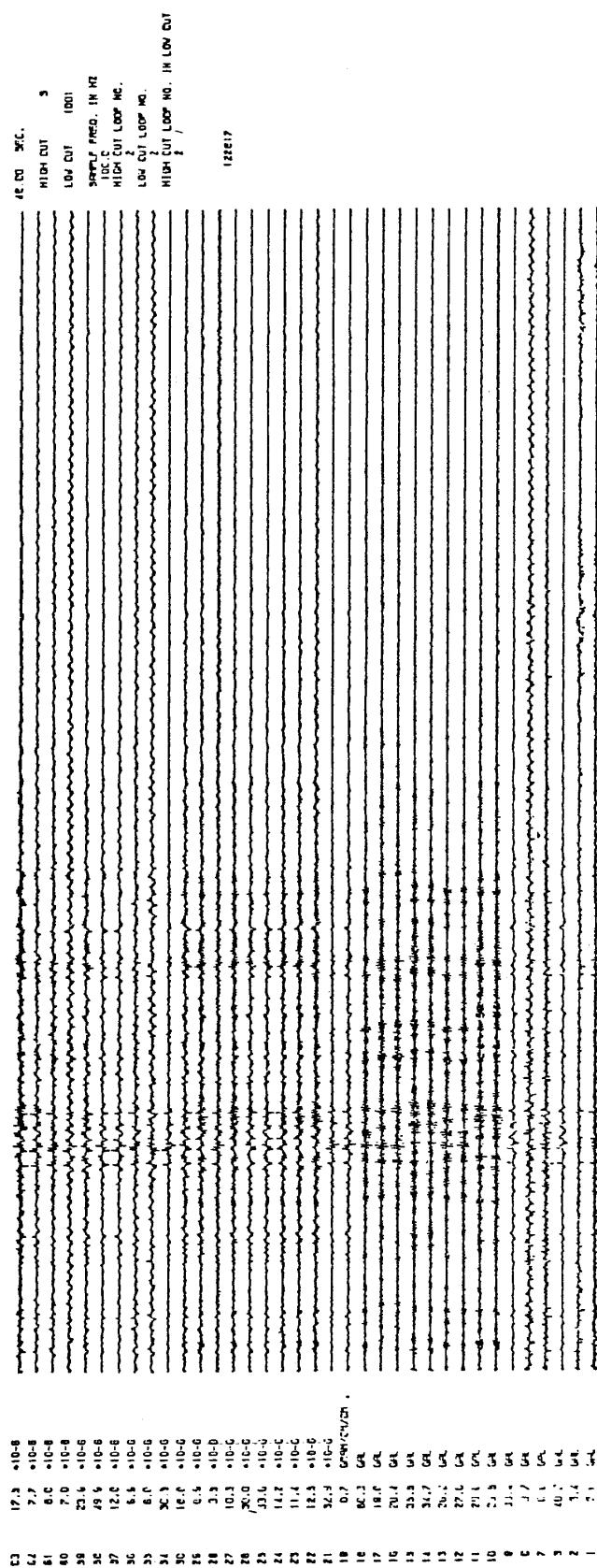


図 5-24 水位 75% Z 方向地震波加振記録波形
Fig. 5-24 Records of Z Earthquake Wave Excitation with 75% Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

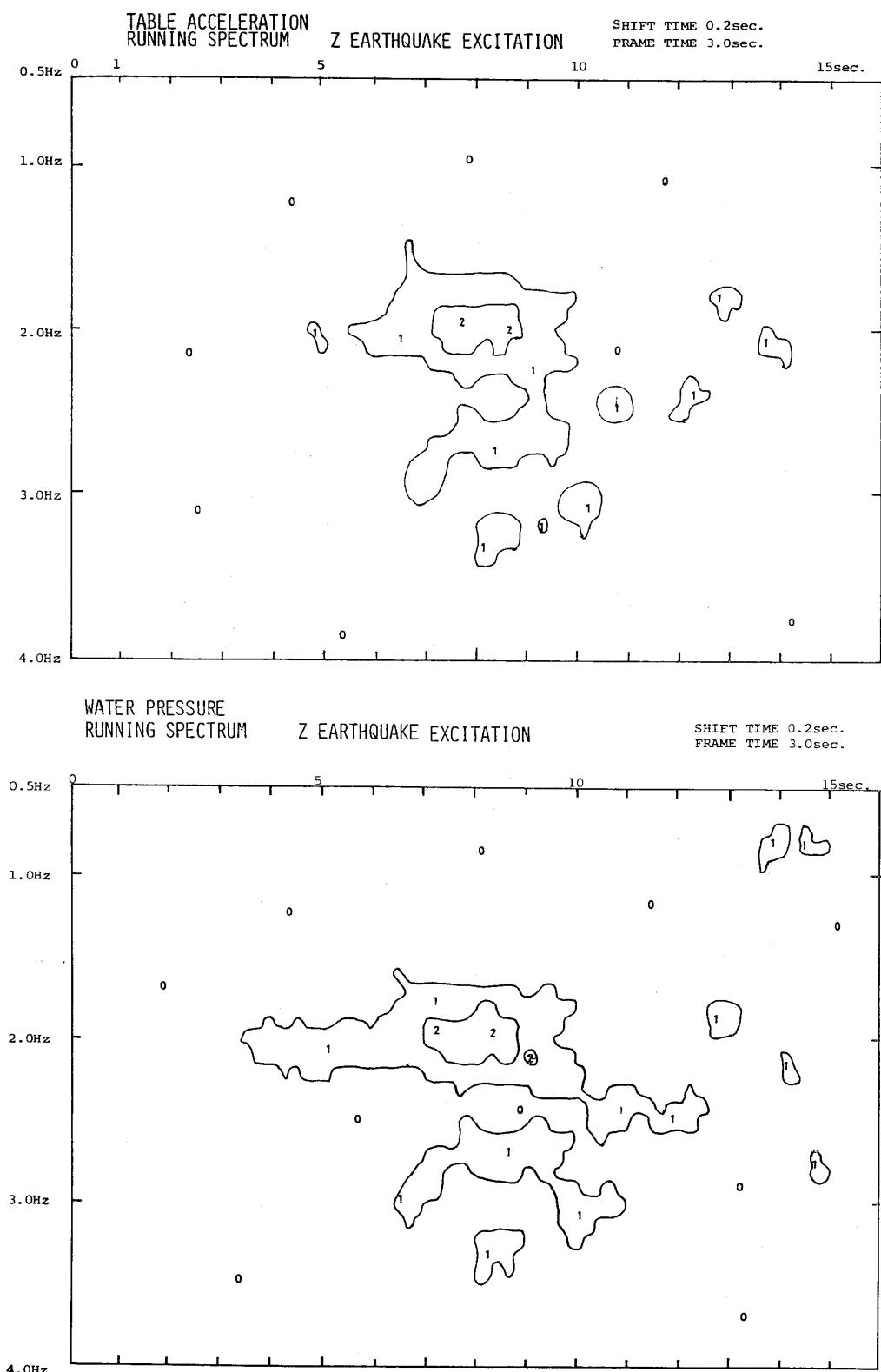


図 5-25 水位 75 % Z 方向地震波加振振動台および水圧波形ランニングスペクトル
Fig. 5-25 Running Spectra of Z Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

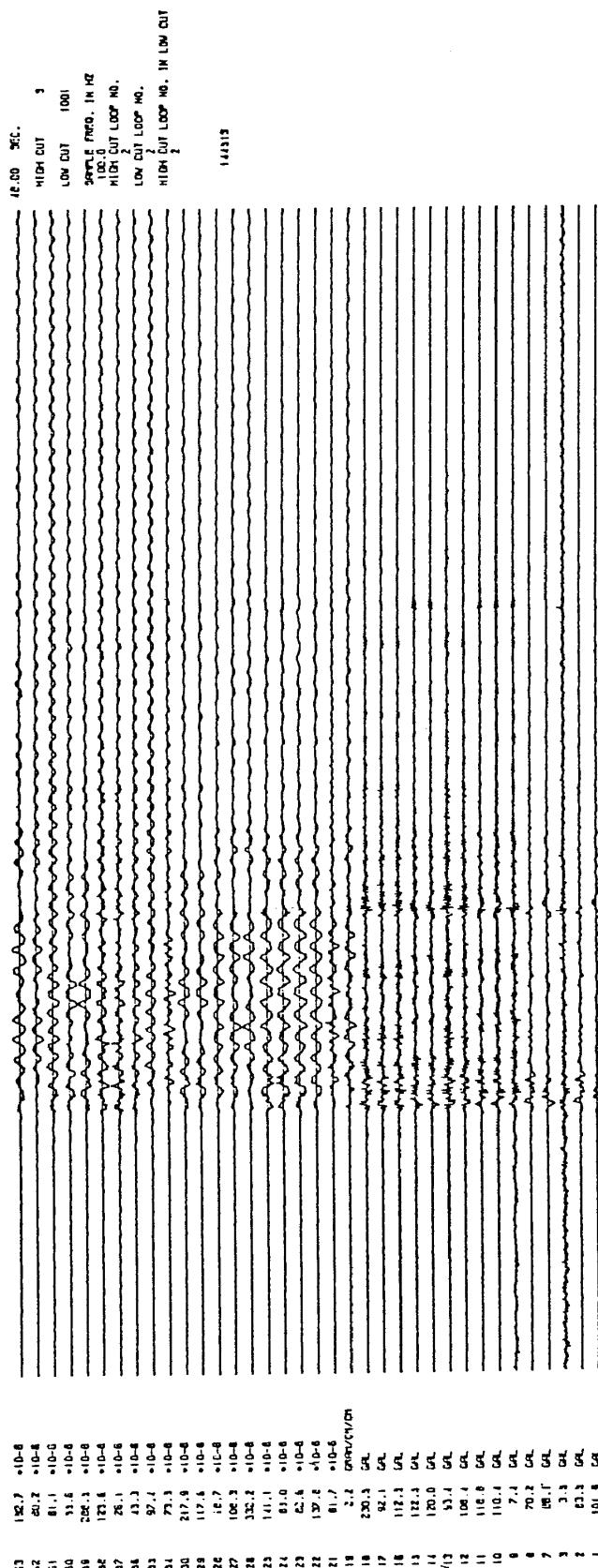


図 5-26 水位 75 % XY 方向地震波加振記録波形
Fig. 5-26 Records of XY Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

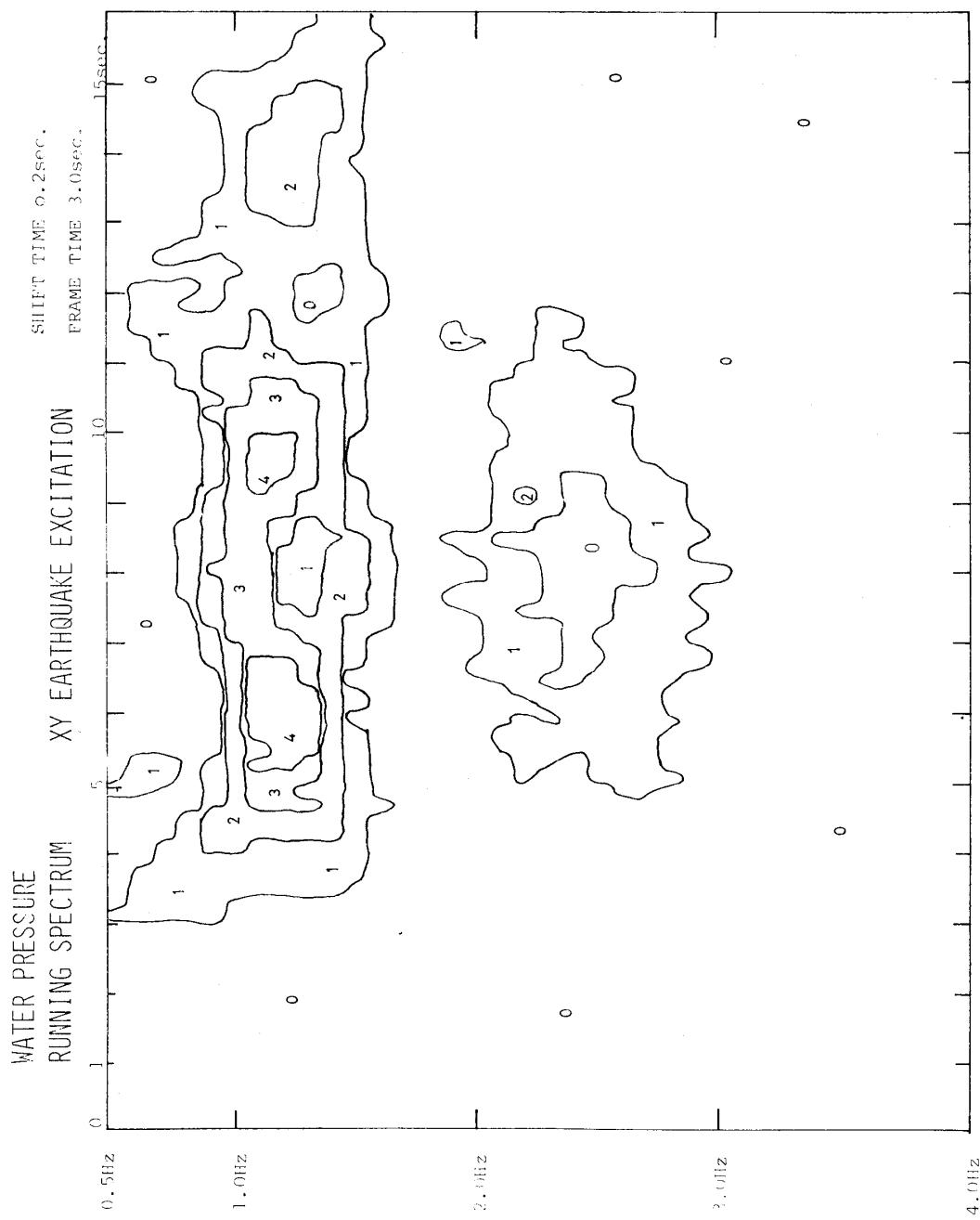


図 5-27 水位 75 % XY 方向地震波加振水圧波形ランニングスペクトル
Fig. 5-27 Water Pressure Running Spectra of XY Earthquake Wave Excitation
with 75 % Water Level

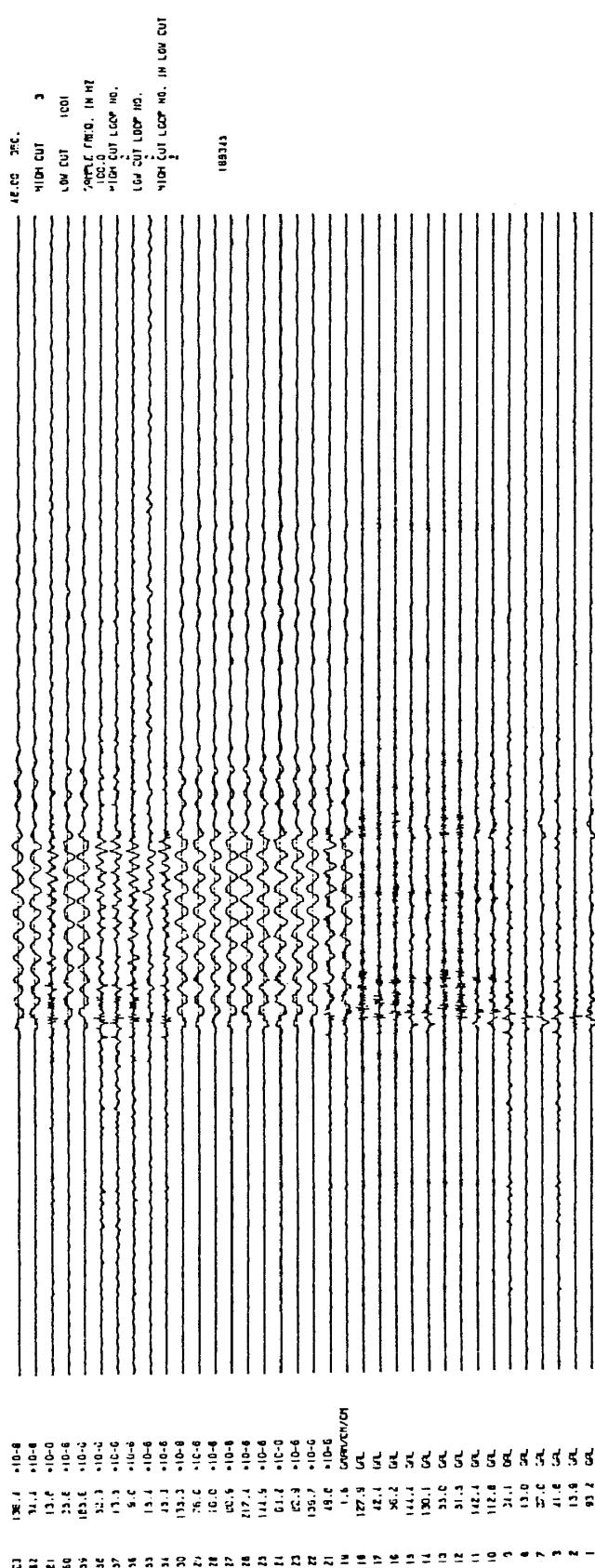


圖 5-28 水位 75% XZ 方向地震波加振記錄波形
 Fig. 5-28 Records of XZ Earthquake Wave Excitation with 75% Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

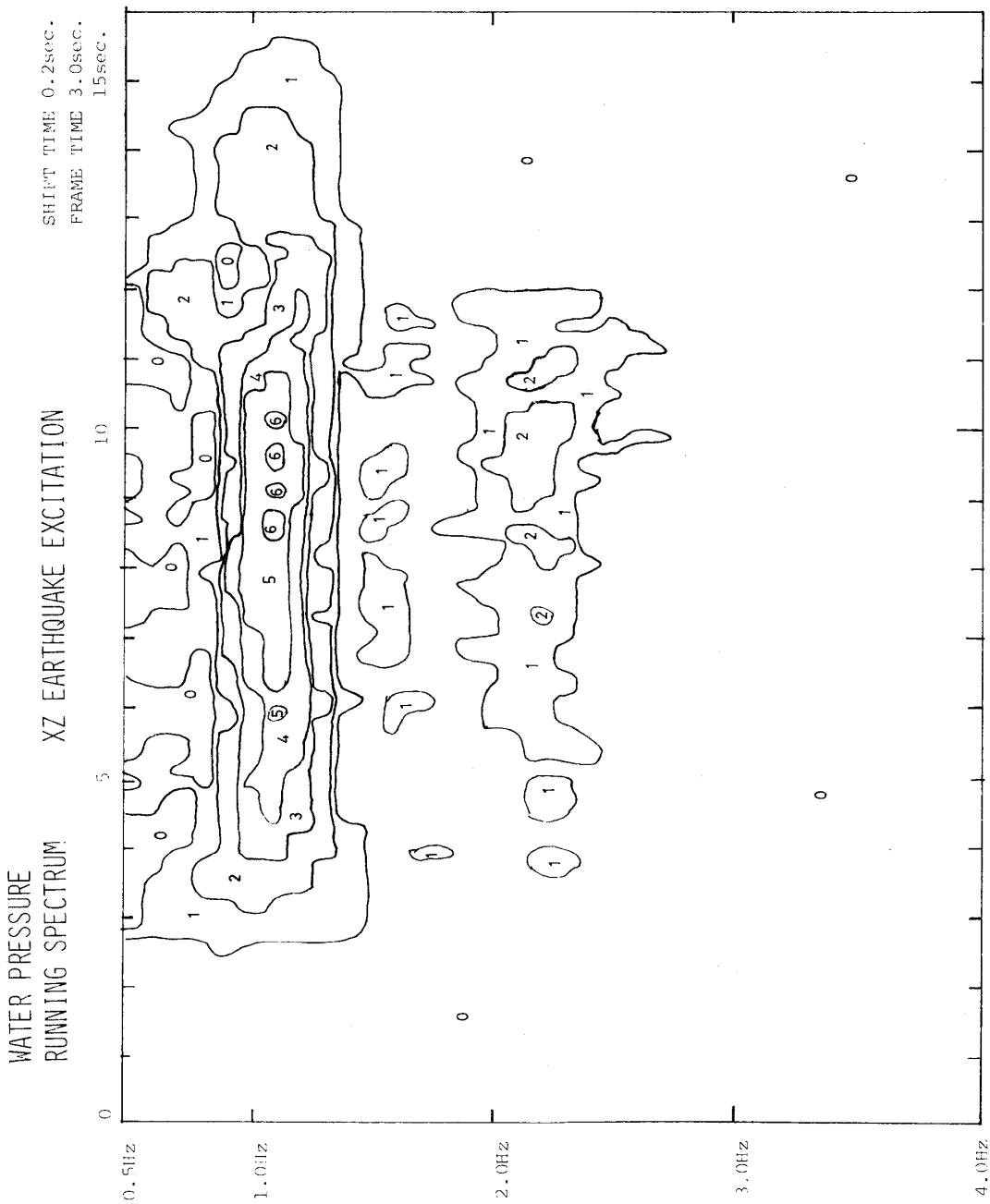
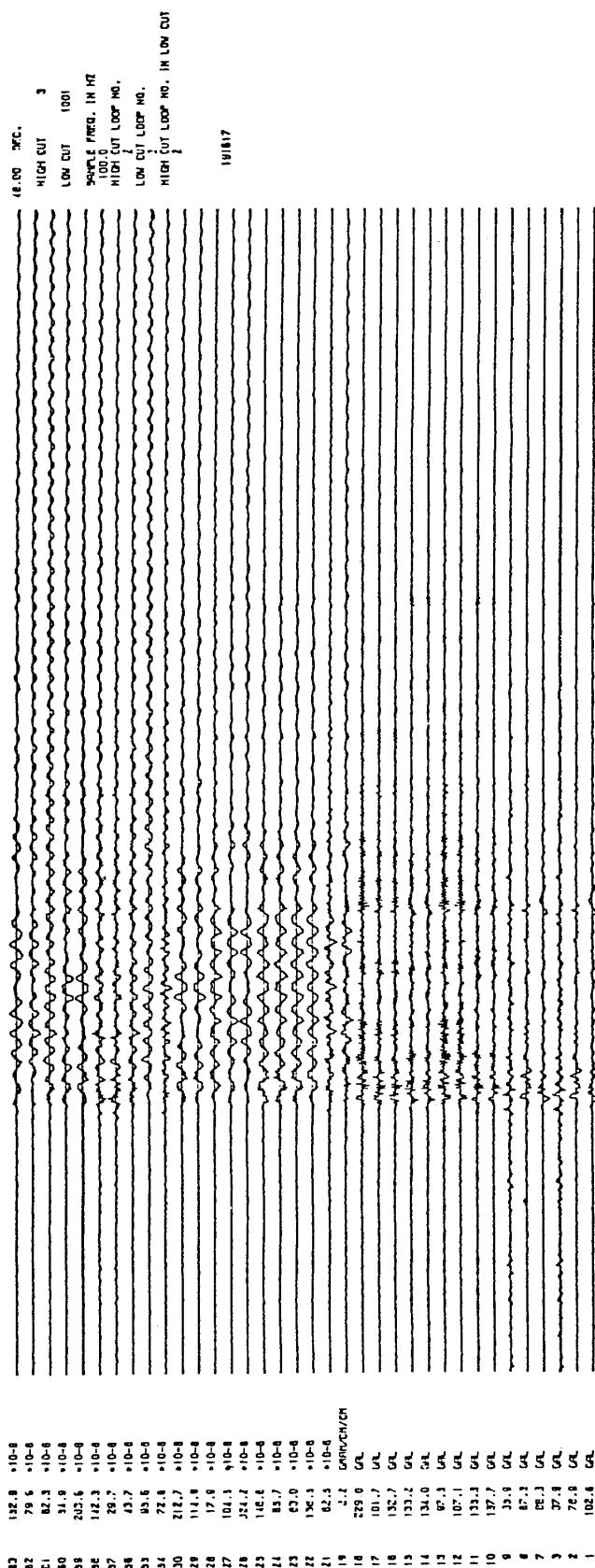


図 5-29 水位 75 % XZ 方向地震加振水圧波形ランニングスペクトル
 Fig. 5-29 Water Pressure Running Spectra of XZ Earthquake Wave Excitation
 with 75 % Water Level



RECORDS OF XYZ EARTHQUAKE EXCITATIONS IN 75% WATER LEVEL,
SENDAI SUMITOMO B2F N-S IN X DIRECTION,
SENDAI SUMITOMO B2F E-W IN Y DIRECTION,
SENDAI SUMITOMO B2F U-D IN Z DIRECTION.

圖 5-30 水位 75 % XYZ 方向地震波加振記錄波形
 Fig. 5-30 Records of XYZ Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

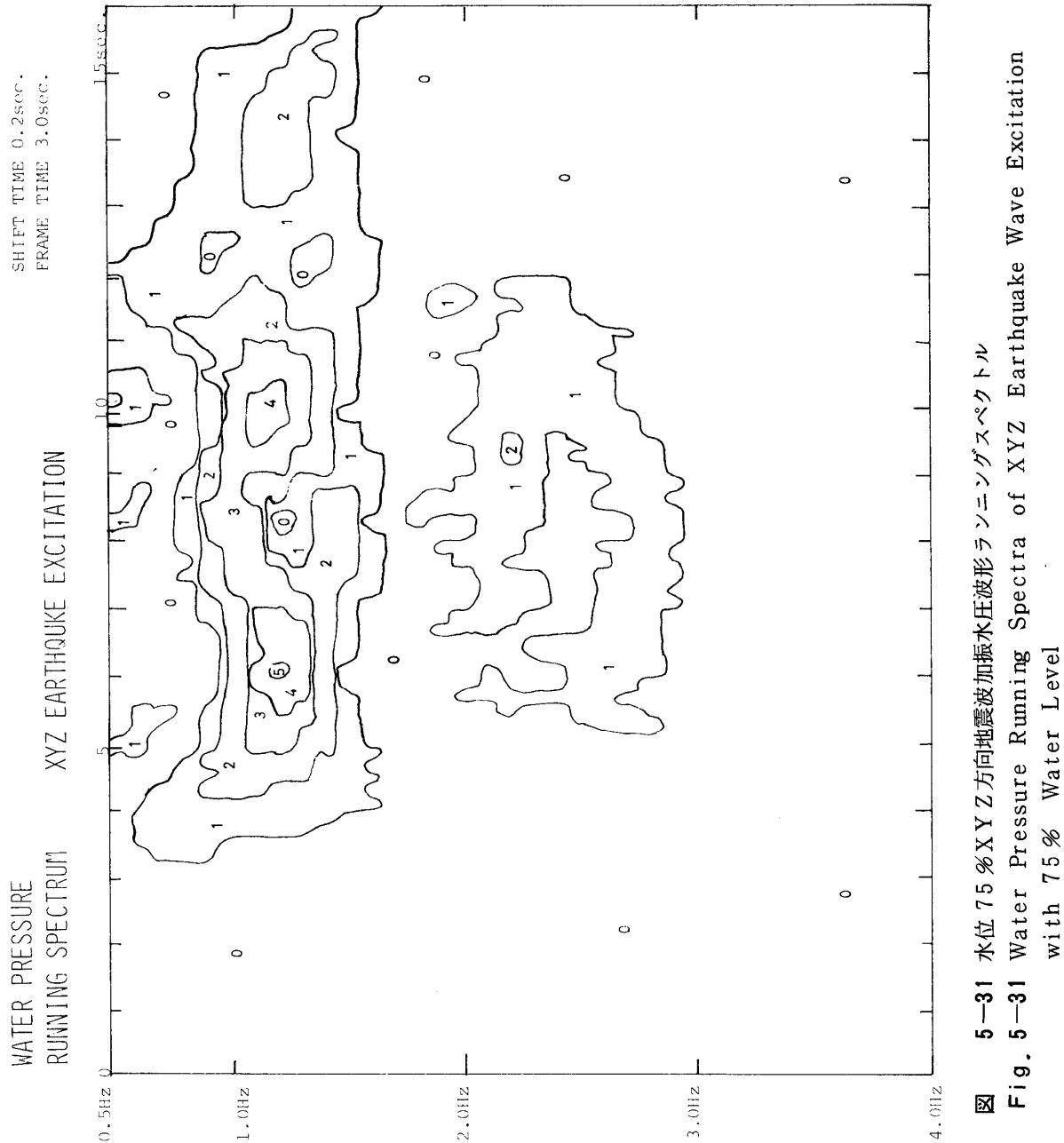


図 5-31 水位 75 % XYZ 方向地震波加振水圧波形ランニングスペクトル
 Fig. 5-31 Water Pressure Running Spectra of XYZ Earthquake Wave Excitation
 with 75 % Water Level

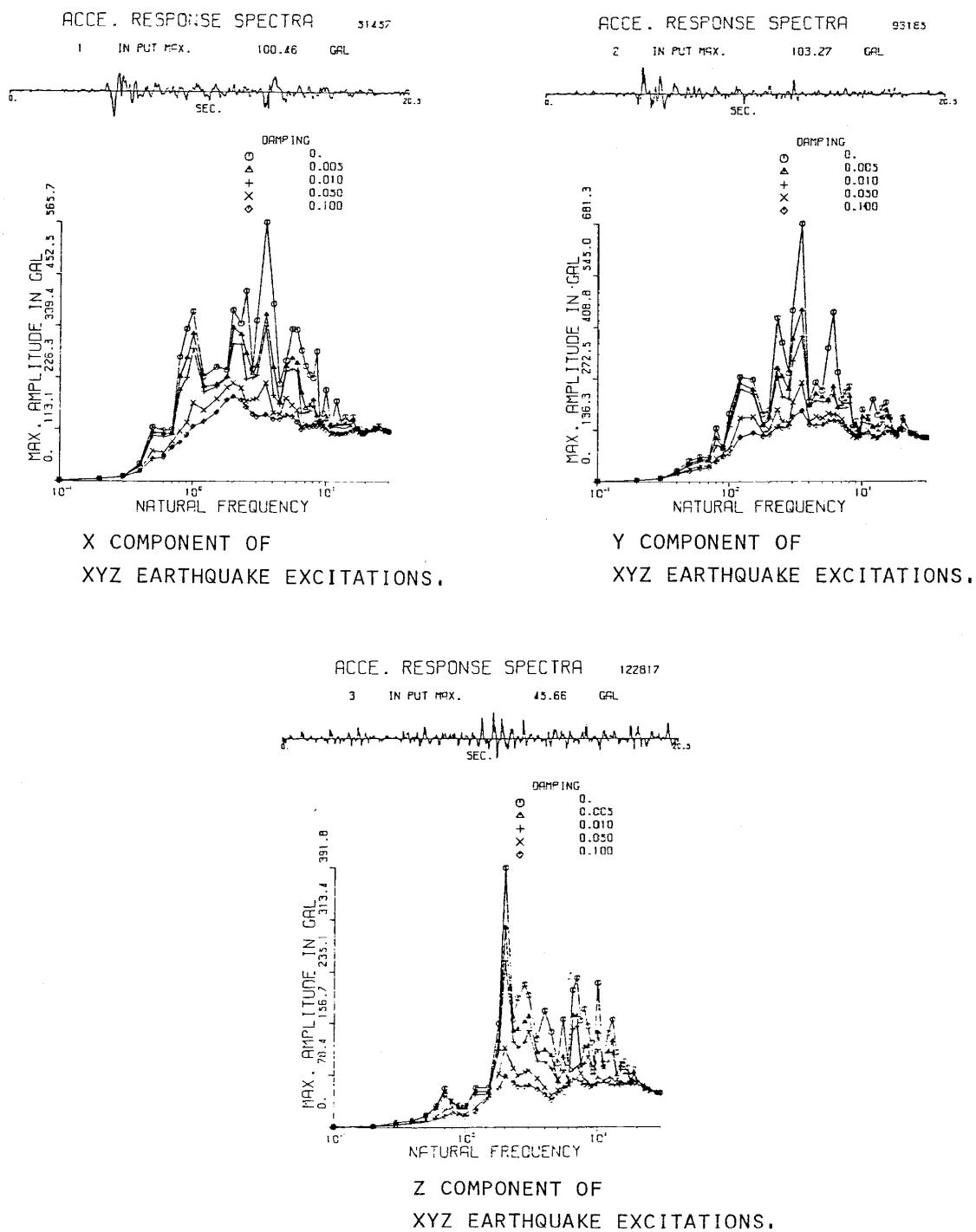
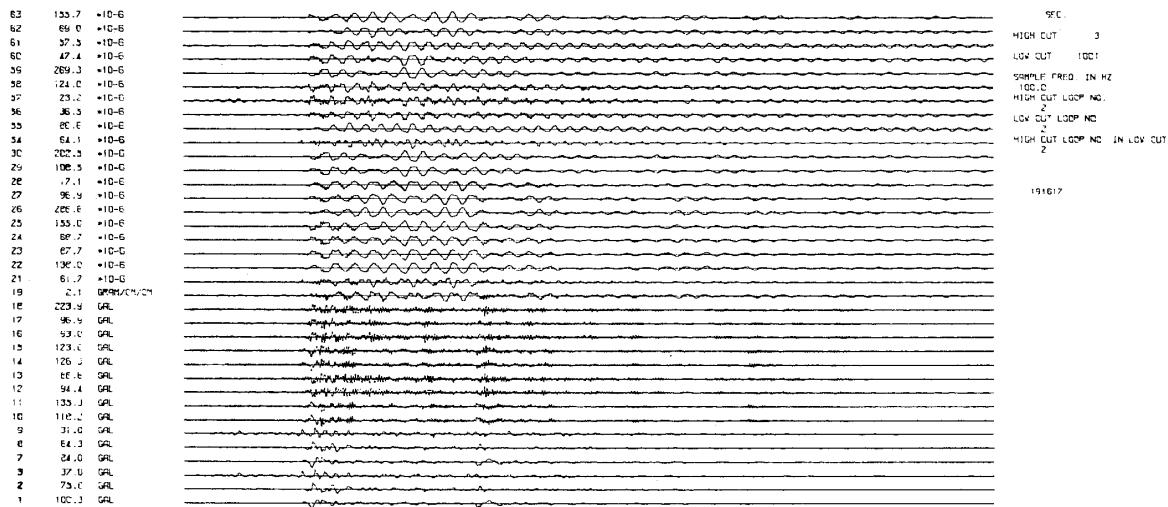


図 5-32 水位 75 % X Y Z 方向地震波加振振動台波形レスポンススペクトル

Fig. 5-32 Response Spectra of Table Records at XYZ Earthquake Wave Excitation with 75 % Water Level

三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪

SUPERPOSITION OF X, Y, AND Z EARTHQUAKE EXCITATIONS.



SUPERPOSITION OF X AND Y EARTHQUAKE EXCITATIONS.

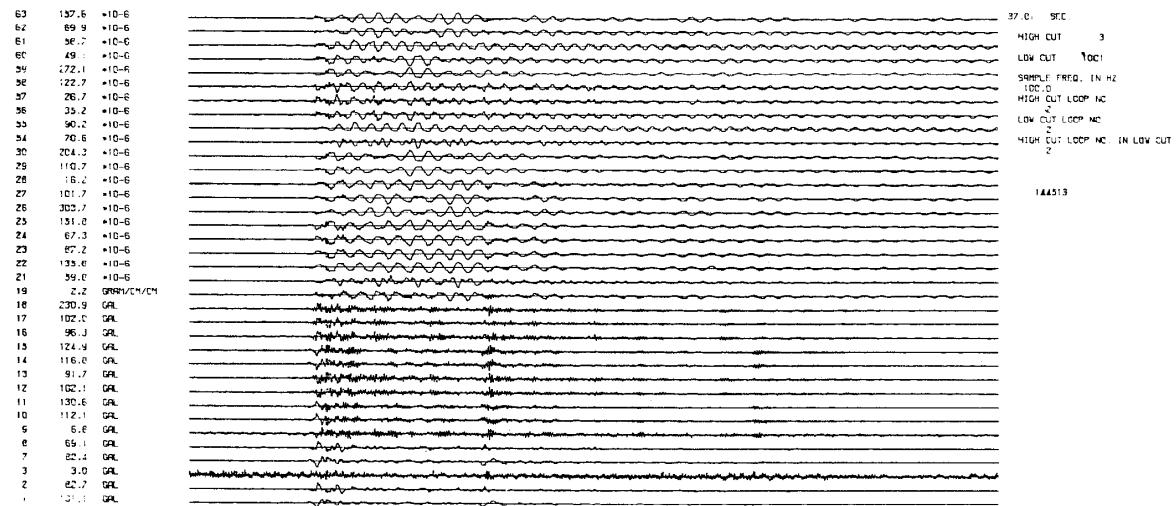
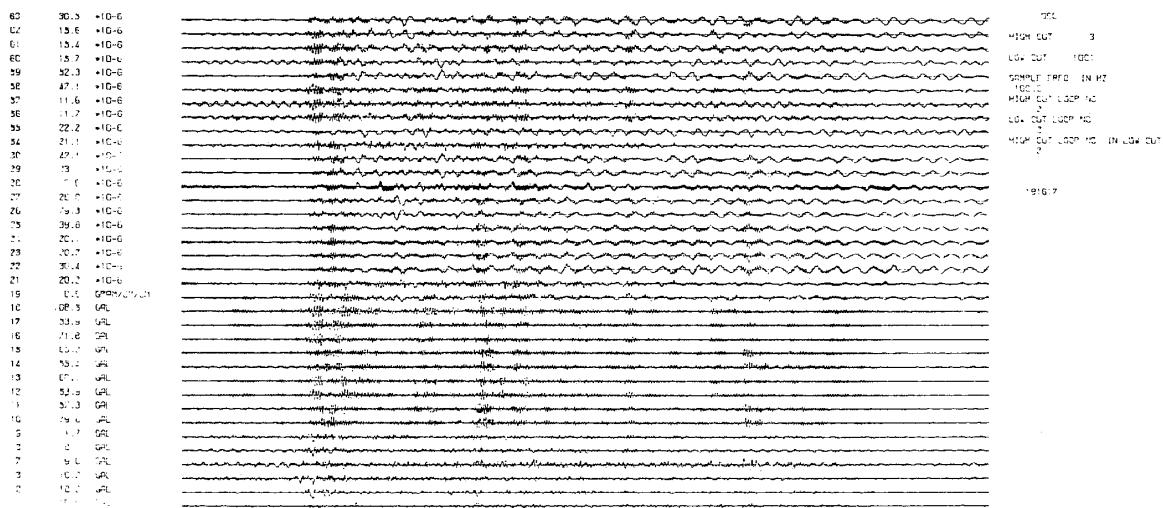


図 5-33 重ね合せ波形（水位 75 % 地震波加振）

Fig. 5-33 Superposition Waves

DIFFERENCES BETWEEN XYZ EARTHQUAKE EXCITATION AND THE SUPERPOSITION X, Y, AND Z.



DIFFERENCES BETWEEN THE XY EARTHQUAKE EXCITATION AND THE SUPERPOSITION X AND Y.

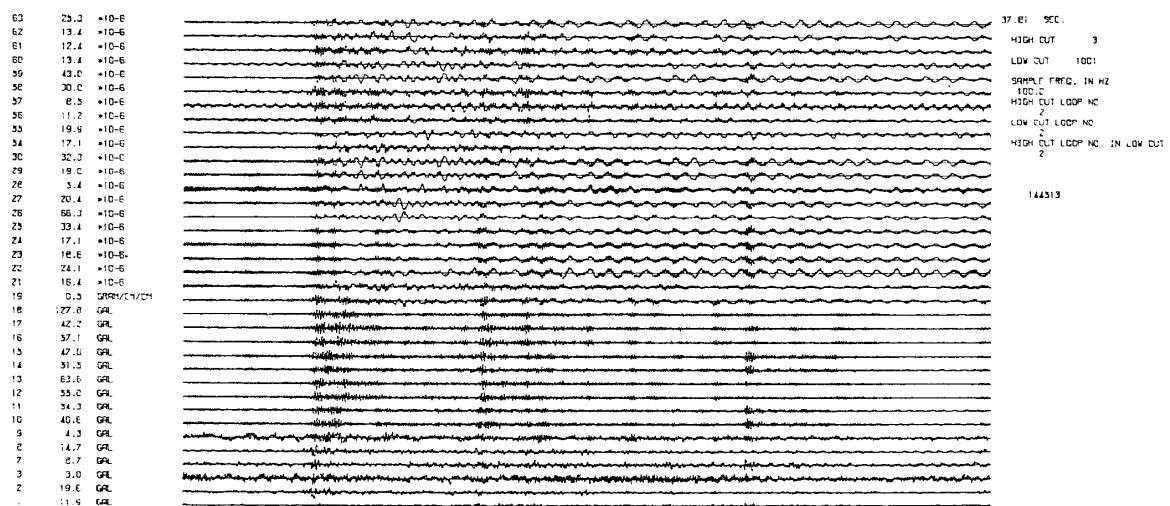


図 5-34 多方向加振波形と重ね合せ波形の差（水位 75 %地震波加振）

Fig. 5-34 Difference Waves between Multi-Directional Earthquake Wave Excitation Records and Superposition Waves.

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

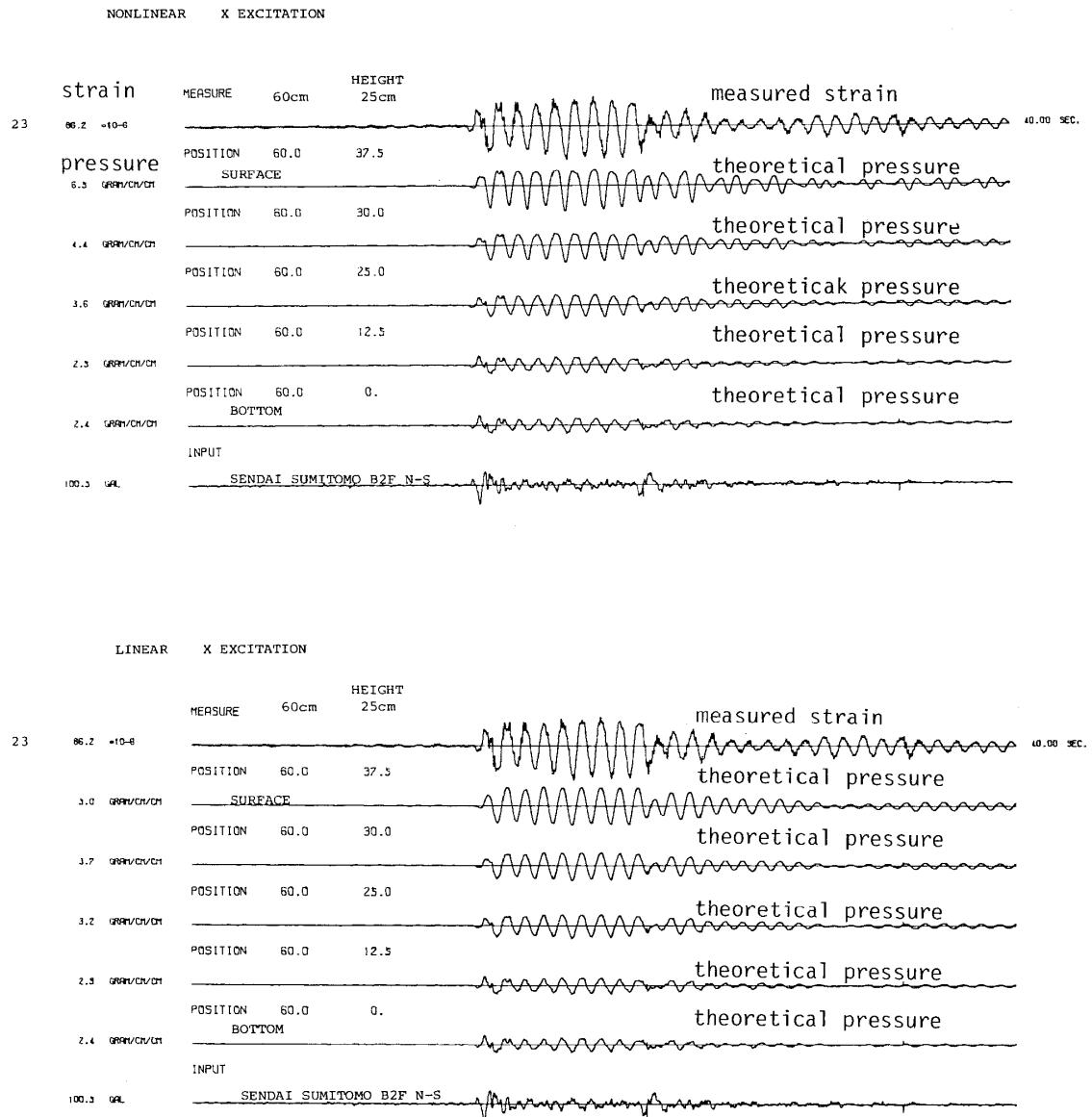


図 5-35 スロッシングの非線形計算と線形計算の比較（水位 75 % X 方向地震波加振振動台波形を入力として）

Fig. 5-35 Comparison of Nonlinear Sloshing and Linear Sloshing Calculations

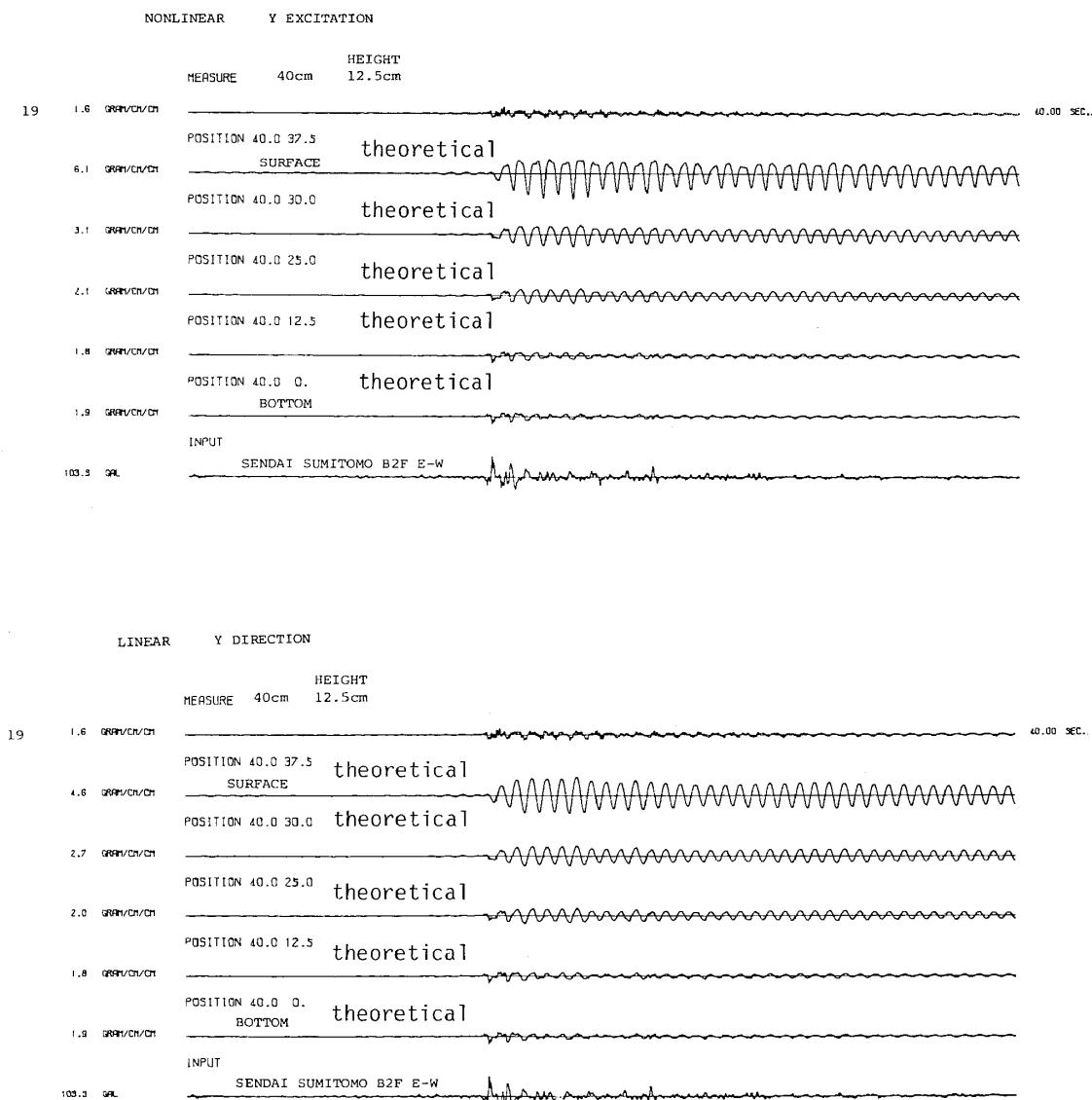


図 5-36 スロッシングの非線形計算と線形計算の比較（水位 75% Y方向地震波加振振動台波形を入力として）

Fig. 5-36 Comparison of Nonlinear Sloshing and Linear Sloshing Calculations

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

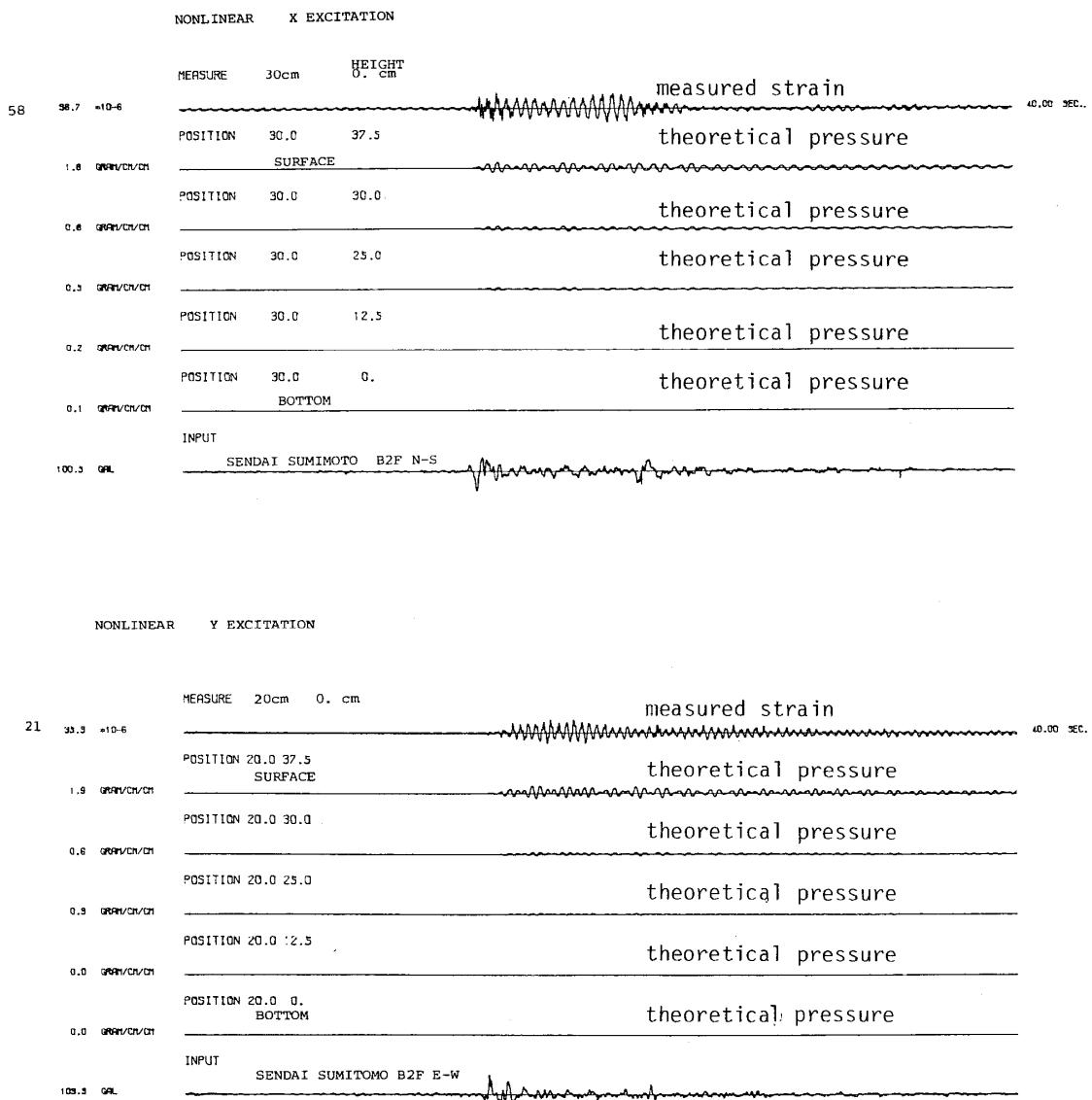


図 5-37 スロッシング非線形計算で側壁中央部に現われる波形
 Fig. 5-37 Nonlinear Sloshing Calculations at the Center Line of Side Wall

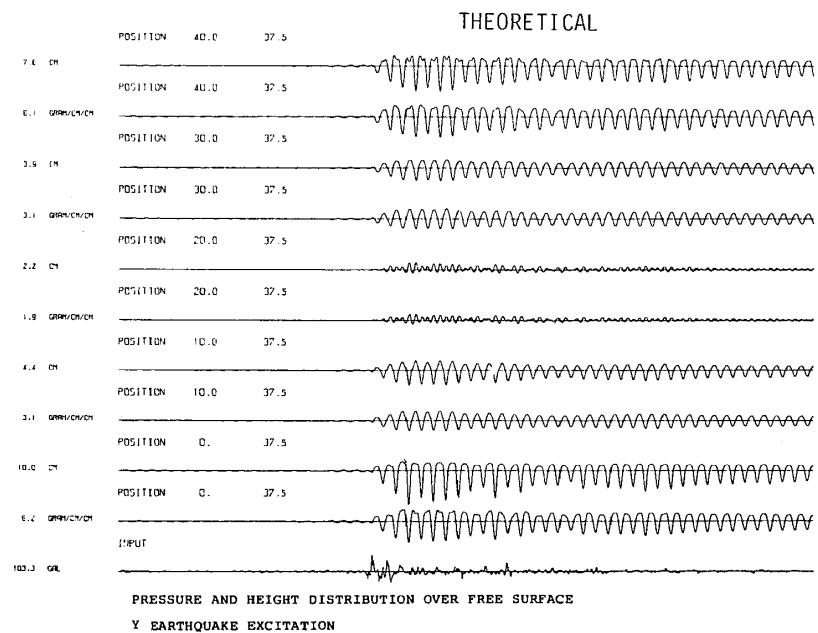
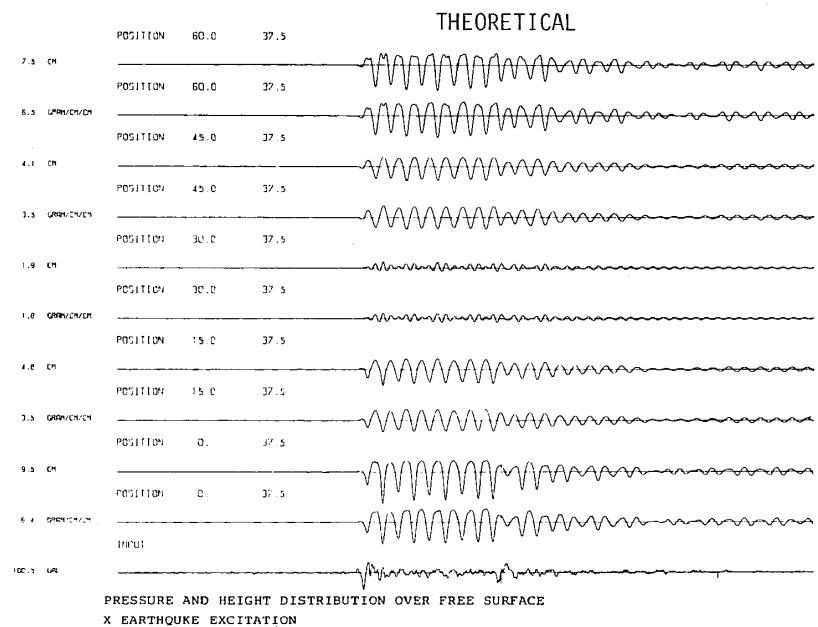
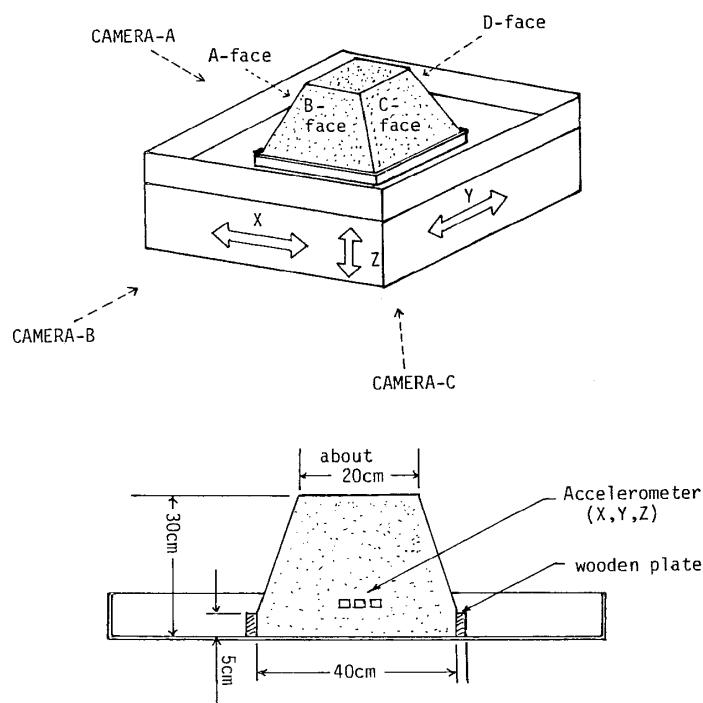


図 5-38 スロッシング非線形計算での液面波高および水圧分布
Fig. 5-38 Nonlinear Sloshing Calculations over Free Surface

water level	X DIRECTION			Y DIRECTION		
	flexible tank D=100000	tank D=23000	rigid tank	flexible tank D=100000	tank D=23000	rigid tank
10%	0.5713Hz	0.5712Hz	0.5713Hz	0.8458Hz	0.8457Hz	0.8458Hz
20%	0.7835Hz	0.7831Hz	0.7836Hz	1.1226Hz	1.1215Hz	1.1229Hz
30%	0.9164Hz	0.9151Hz	0.9169Hz	1.2626Hz	1.2588Hz	1.2638Hz
40%	1.0011Hz	0.9983Hz	1.0020Hz	1.3312Hz	1.3236Hz	1.3335Hz
50%	1.0542Hz	1.0499Hz	1.0556Hz	1.3638Hz	1.3517Hz	1.3668Hz
60%	1.0871Hz	1.0814Hz	1.0888Hz	1.3790Hz	1.3616Hz	1.3826Hz
70%	1.1073Hz	1.1006Hz	1.1091Hz	1.3861Hz	1.3617Hz	1.3899Hz
80%	1.1196Hz	1.1125Hz	1.1214Hz	1.3898Hz	1.3559Hz	1.3933Hz
90%	1.1273Hz	1.1204Hz	1.1289Hz	1.3920Hz	1.3457Hz	1.3949Hz
100%	1.1321Hz	1.1264Hz	1.1334Hz	1.3937Hz	1.3351Hz	1.3957Hz

表 5—1 タンク側板剛性減少によるスロッシング振動数の減少

Table. 5—1 Decrease of First Slosing Frequencies Due To Plate Flexibilities



Test model 1 : dry bulk density 2.54 water content 10.6%

Test model 2 : 2.44 5.6%

Test model 3 : 2.44 5.6%

図 6-1 盛土模型
Fig. 6-1 Mini-Scale Banking Model

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪

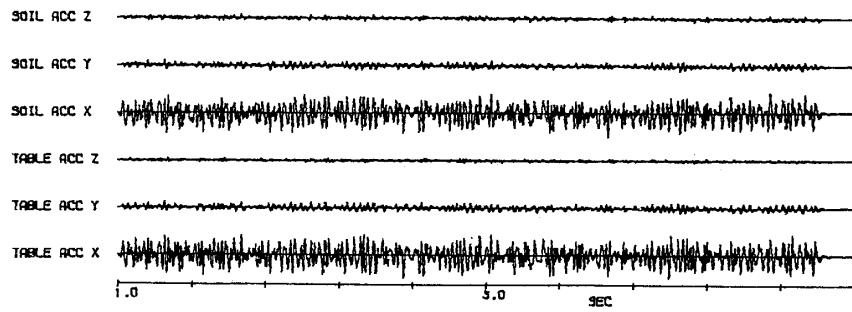


図 6-2 モデル 1 の第一回加振時の振動台および土中加速度波形

Fig. 6-2 Table and Soil Accelerations of 1st Excitation for Test Model 1

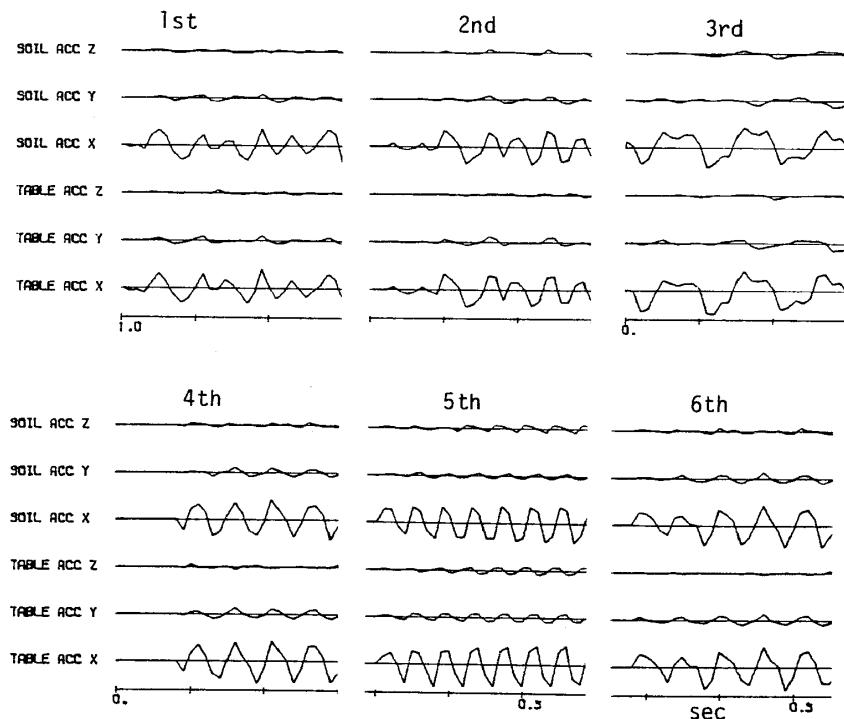


図 6-3 モデル 1 の第一回～六回加振の振動台および土中加速度波形(初めの部分)

Fig. 6-3 Table and Soil Accelerations at the Beginning of 1st-6th Excitation for Test Model 1

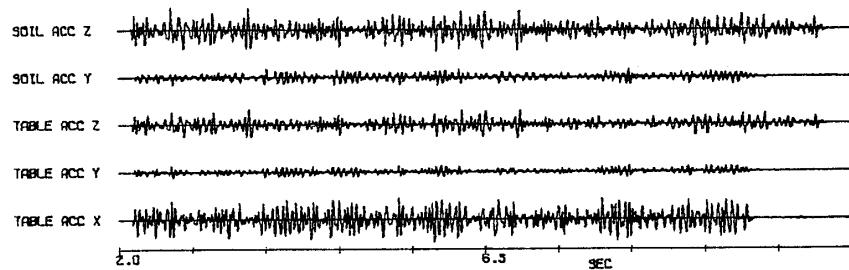


図 6-4 モデル2の第一回加振時の振動台および土中加速度波形

Fig. 6-4 Table and Soil Accelerations of 1st Excitation for Test Model 2

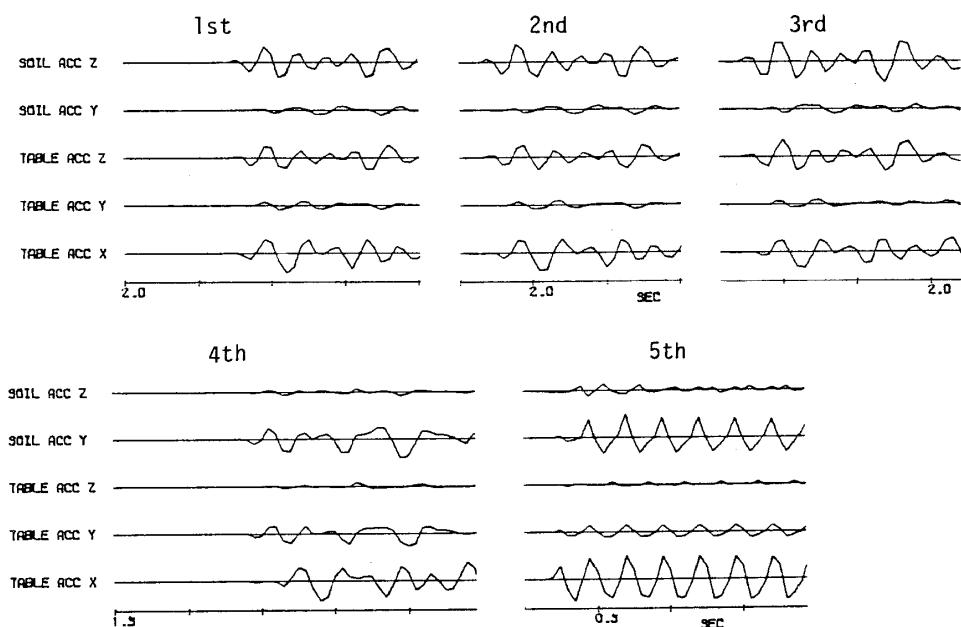


図 6-5 モデル2の第一回～五回加振の振動台および土中加速度波形（初めの部分）

Fig. 6-5 Table and Soil Accelerations at the Beginning of 1st-5th Excitation for Test Model 2

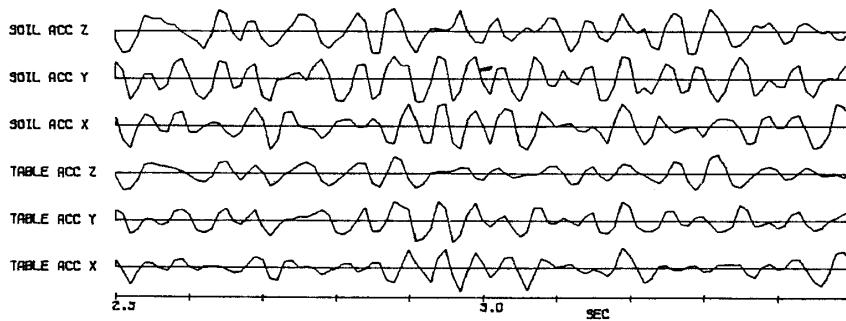


図 6-6 モデル 3 加振時の振動台および土中加速度波形(一部)

Fig. 6-6 Accelerations of Table and Soil (Test Model 3)

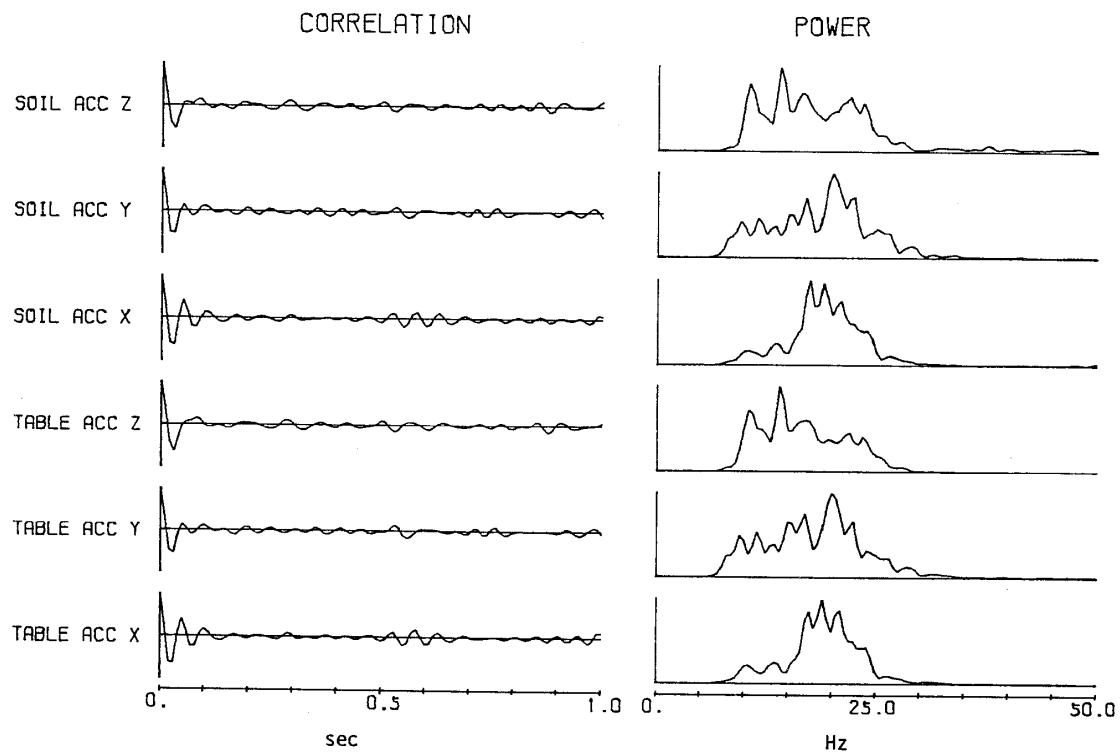


図 6-7 モデル 3 加振時の振動台および土中加速度波形のスペクトル

Fig. 6-7 Power Spectra of Table and Soil Accelerations (Test Model 3)

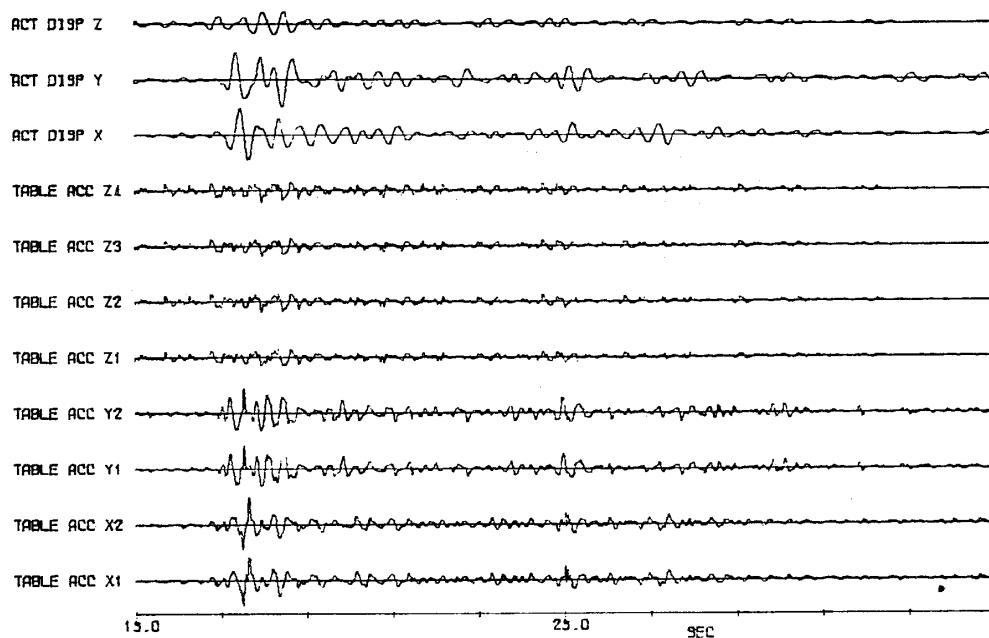


図 7-1 ブロック積実験時の振動台加速度（X 1,X 2 は水平X方向，Y 1,Y 2 は水平Y方向，Z 1～Z 4 は上下方向）

Fig. 7-1 Table Accelerations for Test of Wooden Blocks (Input:Modified 1978 Miyagiken-Oki Earthquake Record at Sendai Sumitomo Bldg. B 2F)

表 7-1 ブロック積実験時の振動台各方向加速度の最大値

Table. 7-1 Maximum Recorded Accelerations of Shaking Table for Each Excitation Case of Wooden Block Test

case	X (NS) (gal)	Y (EW) (gal)	Z (UD) (gal)	Excitation direction of input signal
1	(37)	219	(16)	Y
2	(45)	260	(25)	Y
3	(50)	286	(28)	Y
4	317	(48)	(25)	X
5	(57)	330	(31)	Y
6	364	(55)	(31)	X
7	389	(53)	(32)	X
8	242	214	(26)	X & Y
9	320	(50)	139	X & Z
10	448	(62)	(42)	X
11	262	217	96	X & Y & Z
12	377	214	(36)	X & Y
13	381	275	(36)	X & Y
14	332	285	126	X & Y & Z

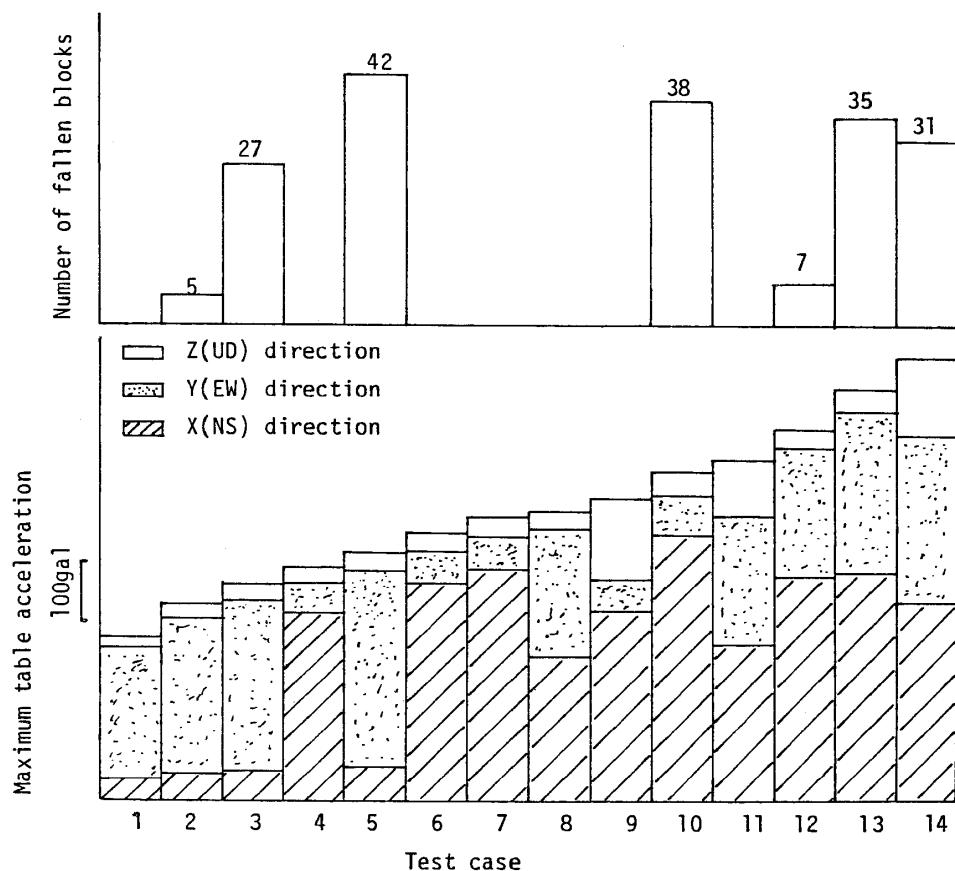
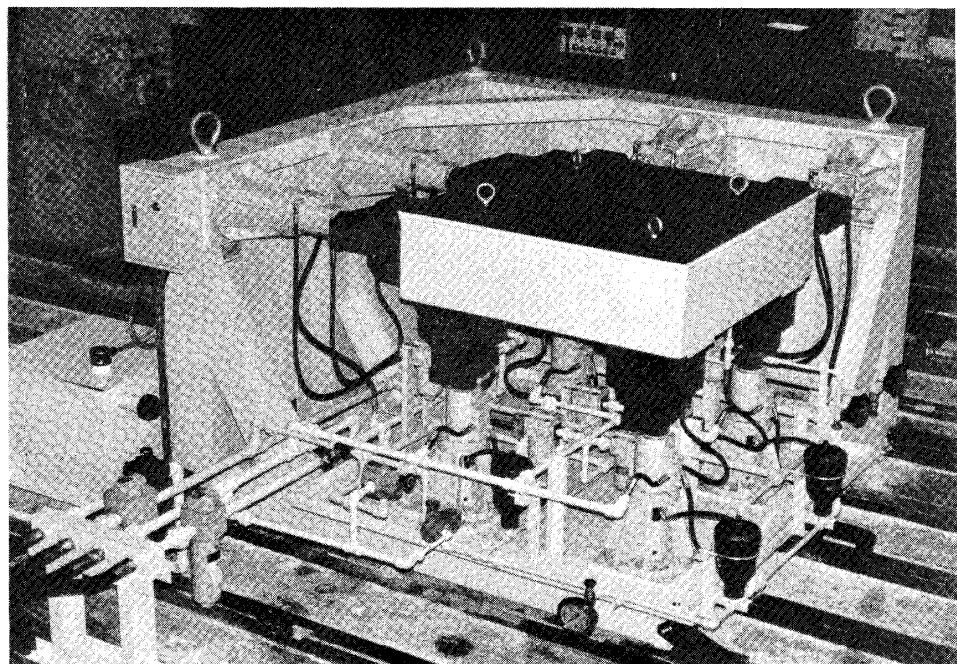


図 7-2 ブロックのケース別落下数

Fig. 7-2 Table Accelerations and Number of Fallen Blocks for Each Test Case

三次元精密振動台による小型模型実験—小川・箕輪



写 真 1-1 小型三次元精密振動台(株 日立製作所御提供)
Photo. 1-1 Small Scale 3-Dimensional Shaking Table
(by HITACHI, Ltd.)



写 真 1-2 配管モデル
Photo. 1-2 Model Piping Systems



写真 1-3 長方形液体貯槽
Photo. 1-3 Rectangular Tank

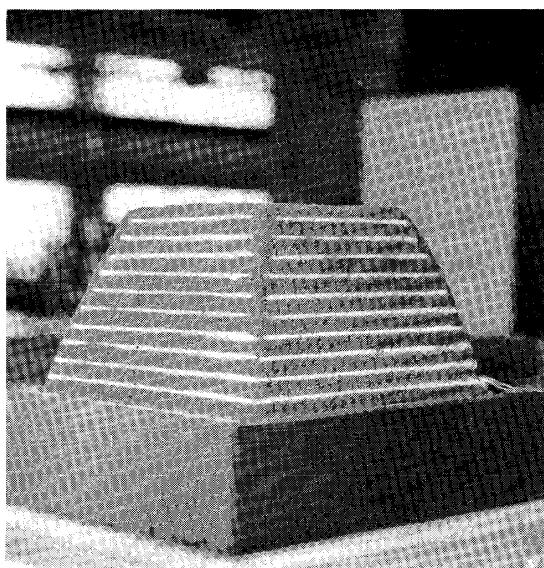


写真 1-4 ミニ盛土模型
Photo. 1-4 Mini-Scale Banking Model

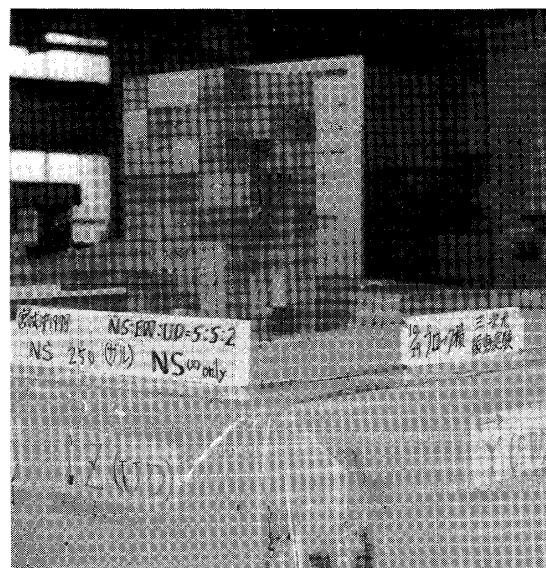


写真 1-5 木製ブロック積模型
Photo. 1-5 Piled Wooden Blocks

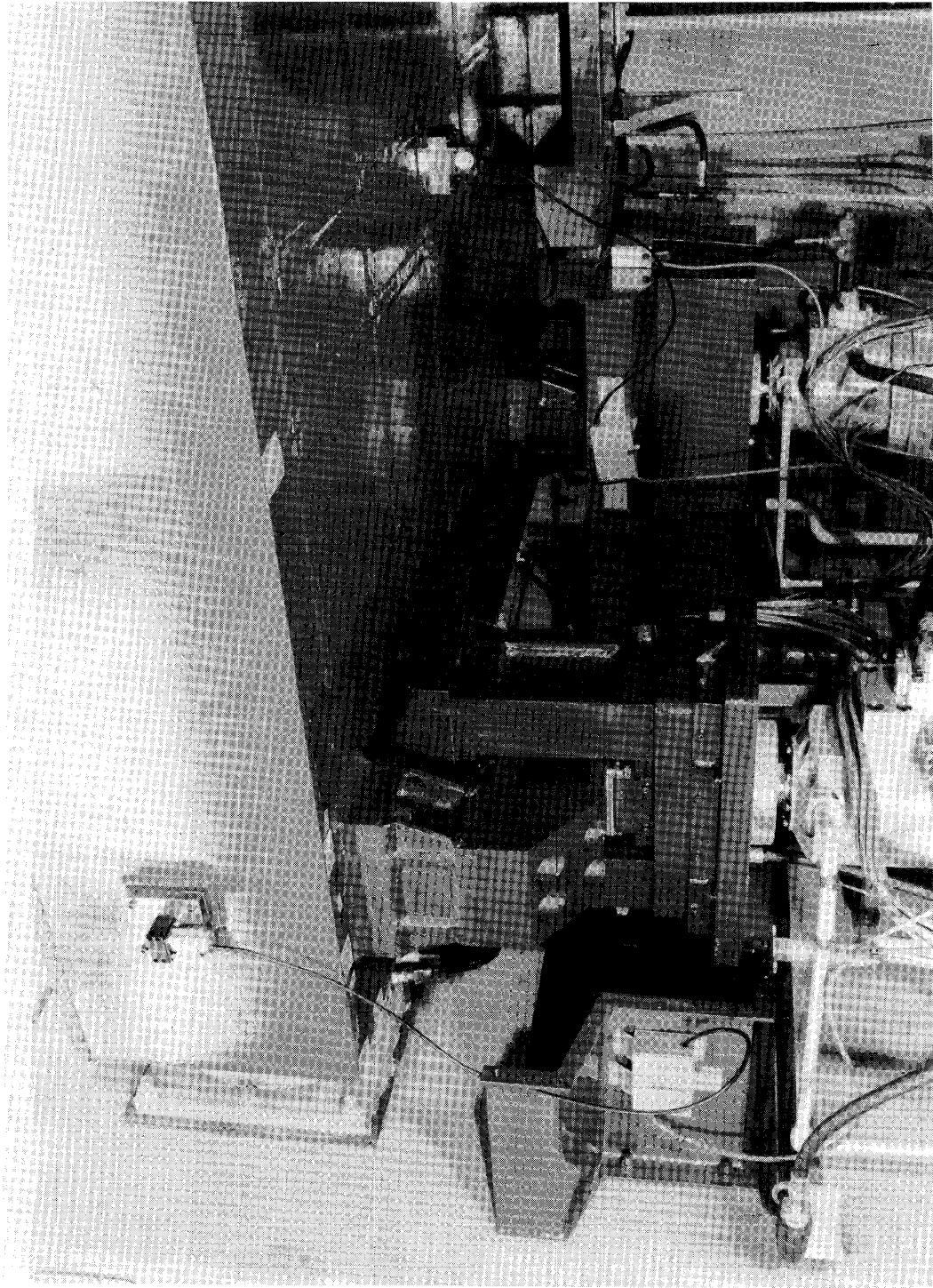


写真 2-1 三次元振動台に用いられているものと同型の静圧継手
Photo. 2-1 Hydro-Static-Bearing (by HITACHI , L.t.d.)

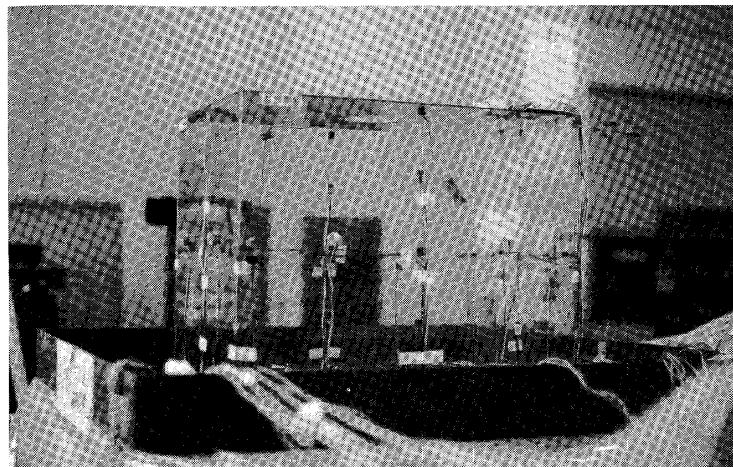


写真 5-1 空状態の模型タンク
Photo. 5-1 Empty Test Tank



写真 5-2 YZ 2方向ランダム波加振時の模型タンク(水位 50%)
Photo. 5-2 YZ Random Excitation with 50% Water Level

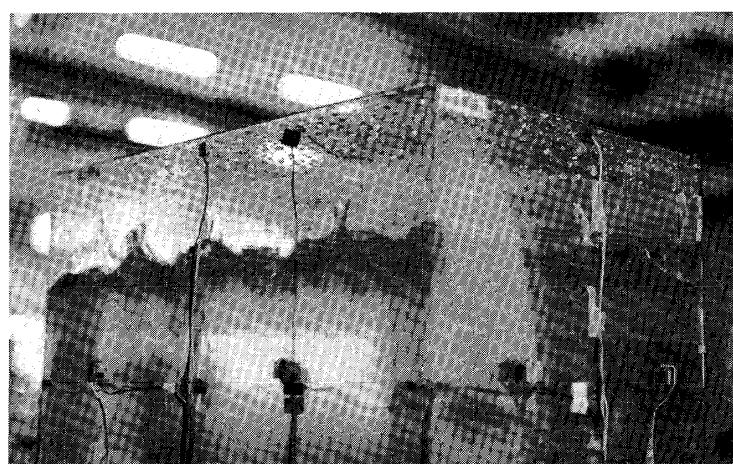
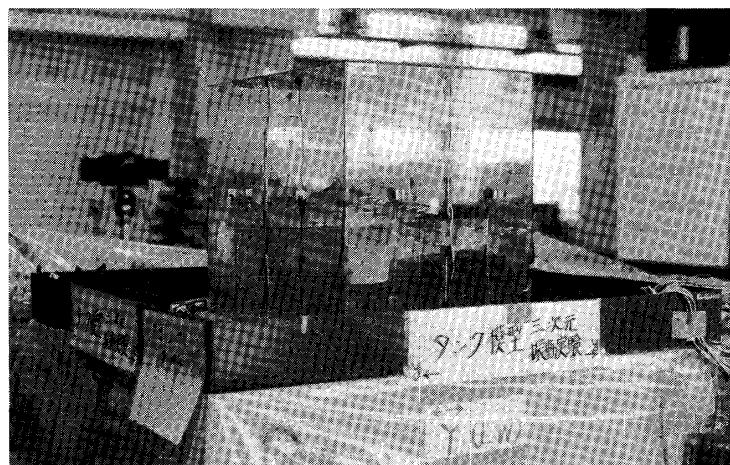


写真 5-3 ランダム波加振時の液面(水位 75%)
Photo. 5-3 The Water Surface at The Random Excitation
with 75% Water Level

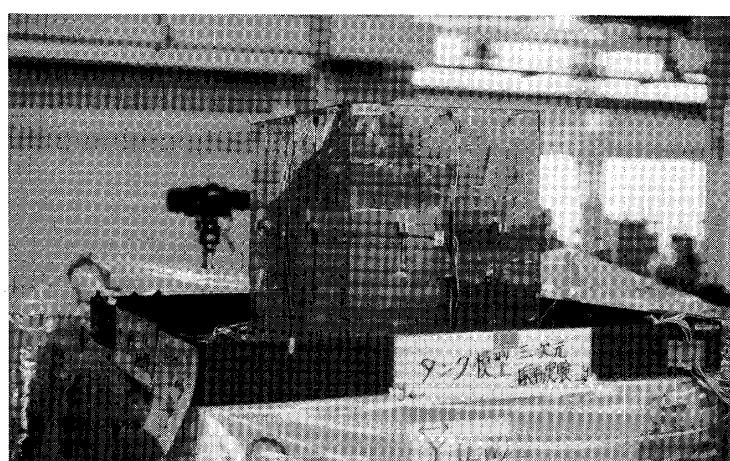
三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪



写 真 5-4 水位 50 %でのY方向スロッシング振動数での加振 (1.37 Hz)
Photo. 5-4 1.37 Y Excitation , Water Level 50 %



写 真 5-5 水位 50 %でのXY2方向スロッシング振動数での加振 (X方向 1.06 Hz , Y方向 1.37 Hz)
Photo. 5-5 1.06Hz in X , 1.37Hz in Y , XY Excitation , Water Level 50 %



写 真 5-6 水位 75 %でのX方向スロッシング振動数加振 (1.12 Hz)
Photo. 5-6 1.12Hz X Excitation



写真 5-7 水位 75% X 方向地震波加振連続写真
Photo. 5-7 Continual Photographs of X Earthquake Wave Excitation with 75%
Water Level



写真 5—8 水位 75% Y 方向地震波加振連続写真
Photo. 5—8 Continual Photographs of Y Earthquake Wave Excitation with 75%
Water Level



写真 5—9 水位 75% Z 方向地震波加振連続写真
Photo. 5—9 Continual Photographs of Z Earthquake Wave Excitation with 75%
Water Level



写真 5-10 水位 75 % XY 方向地震波加振連続写真
Photo. 5-10 Continual Photographs of XY Earthquake Wave Excitation with 75 %
Water Level



写真 5-11 水位 75 % XYZ 方向地震波加振連続写真
Photo. 5-11 Continual Photographs of XYZ Earthquake Wave Excitation with
75 % Water Level



写真 6-1 モデル 1 の A 面（第六回加振時）
Photo. 6-1 A-face of Test Model 1 at the 6th Excitation (continual photo graphs)

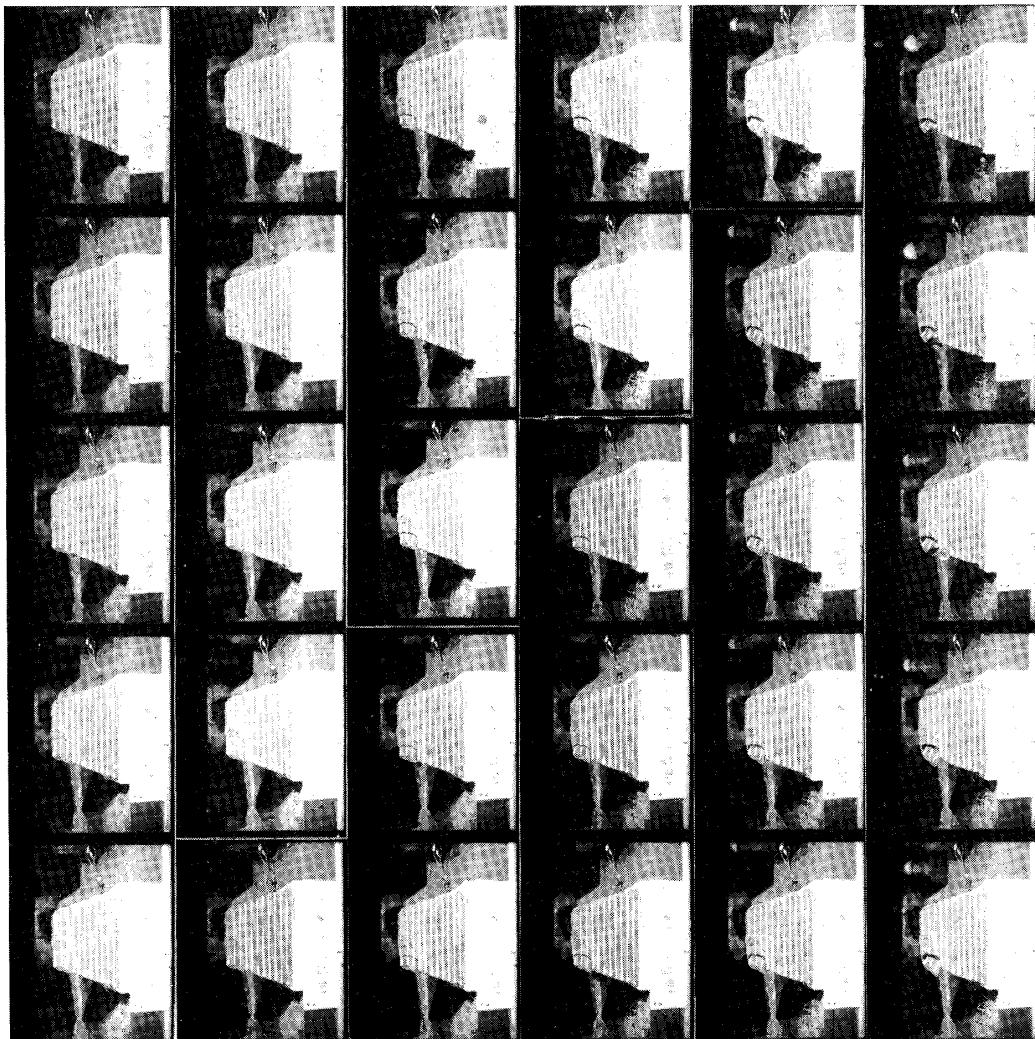
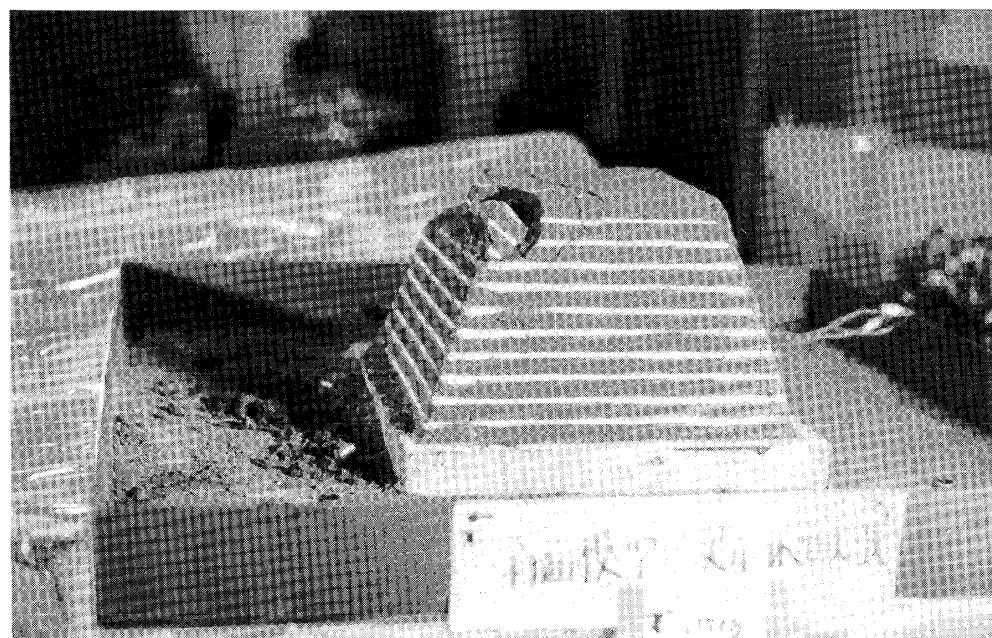


写真 6-2 モデル1のB面(第六回加振時)
Photo. 6-2 B-face of Test Model 1 after 6th Excitation (continual photo-
graphs)



(1) A面
(1) A - face



(2) A, B面 (左右が加振方向)
(2) A - face(left) and B - face(right-left is shaking direction)

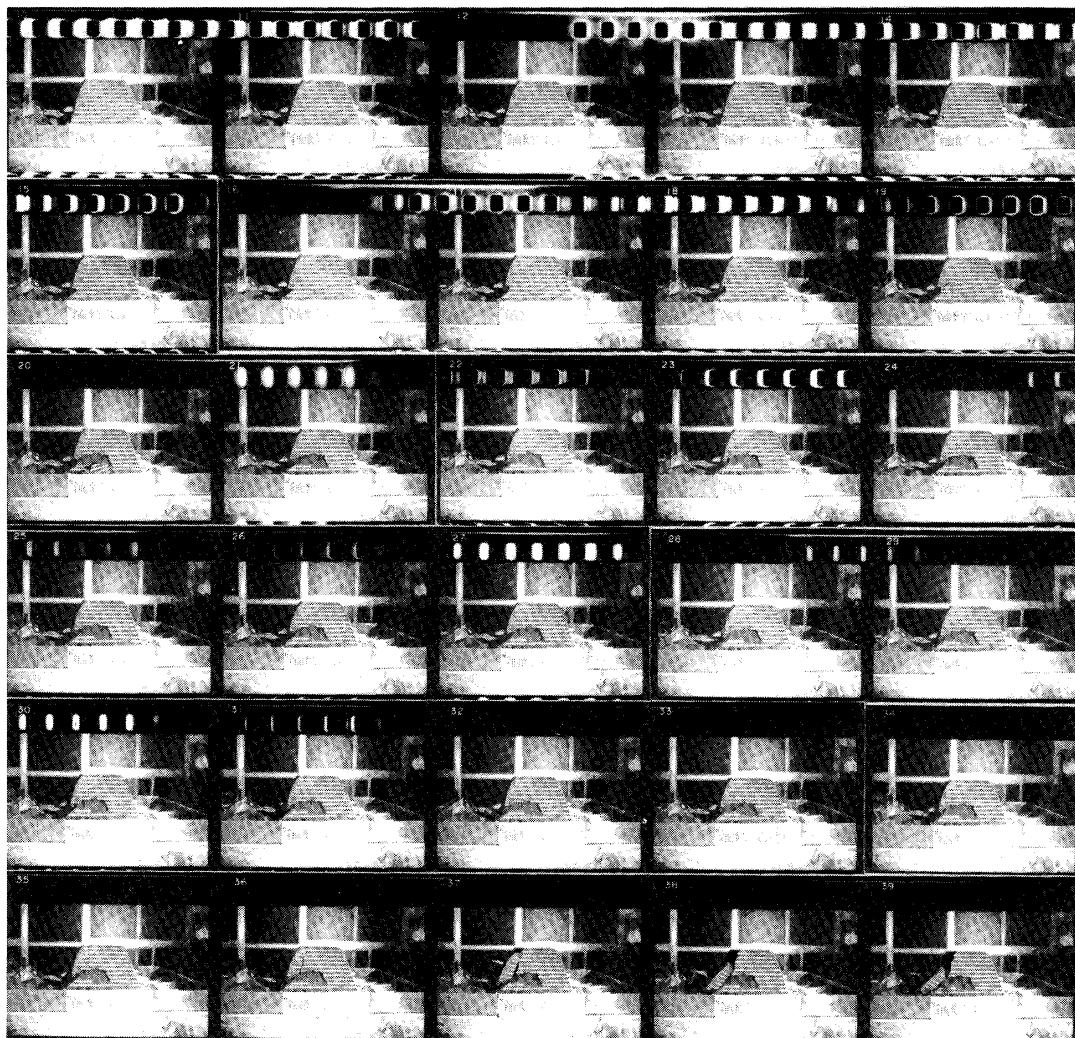
写 真 6-3 モデル1崩壊状況(全加振終了後)

Photo. 6-3 Test Model 1 after All Excitations



写 真 6-4 モデル2のB面およびC面(右)(第一回加振時)

Photo. 6-4 B-and C-face of Test Model 2 at the 1st Excitation (continual photographs)



写 真 6-5 モデル3の崩壊状況（A面）

Photo. 6-5 A-face of Test Model 3 (continual photographs)



写 真 6-6 モデル3の崩壊状況(B面)

Photo. 6-6 B-face of Test Model 3 (continual photographs)

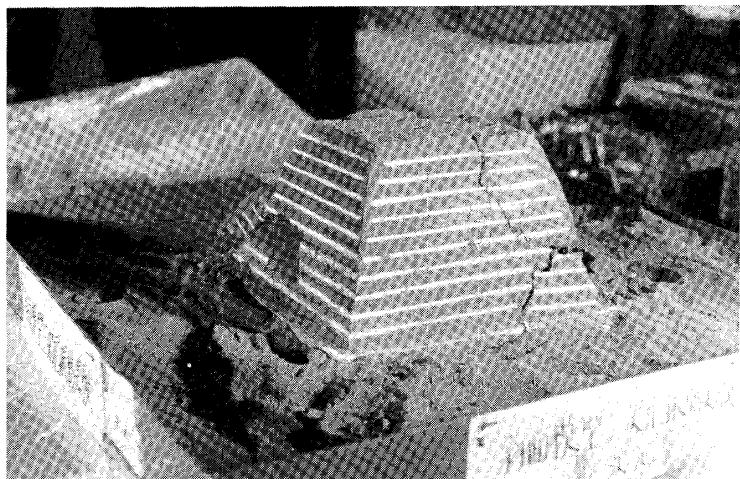
三次元精密振動台による小型模型実験－小川・箕輪



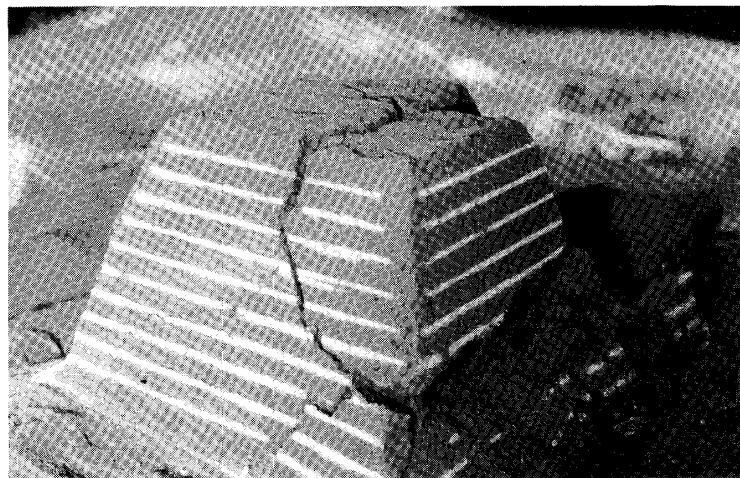
写 真 6—7 モデル3の崩壊状況 (B面(左)およびC面)

Photo. 6-7 B-(left) and C-face of Test Model 3 (continual photographs)

(1) A面(左), B面(右)
(1) A-face(left)
B-face(right)



(2) B面(左), C面(右)
(2) B-face(left)
C-face(right)



(3) D面(右)
(3) D-face(right)

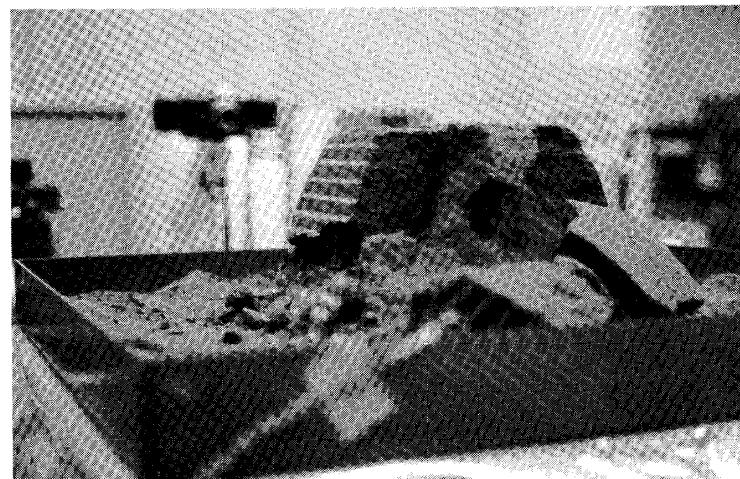
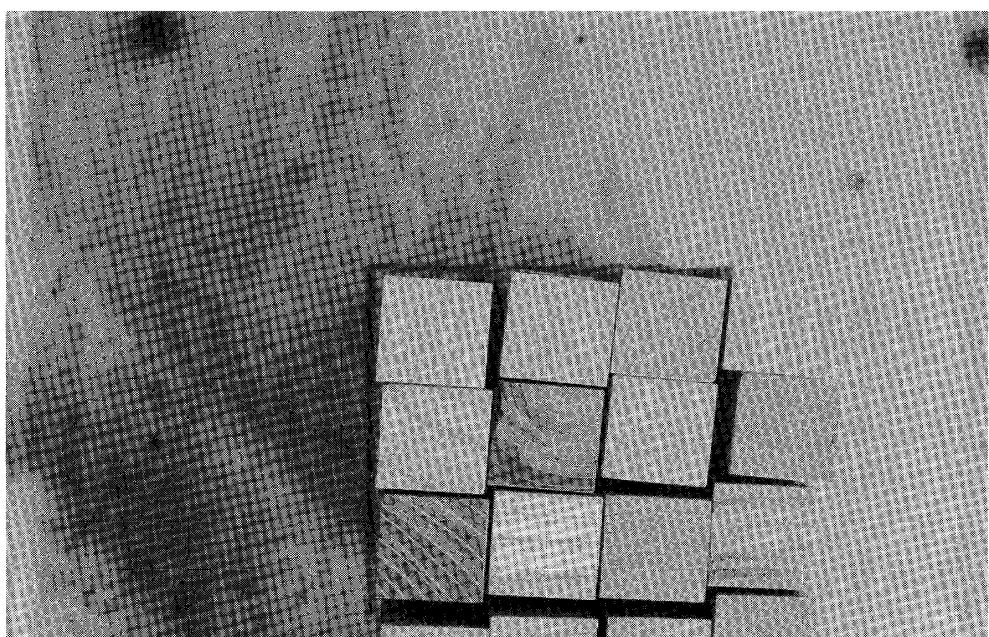


写真 6-8 モデル3(加振終了後)
Photo. 6-8 Test Model 3 after Excitation



写 真 7-1 木製ブロック柱の振動状況（ケース 13，XY二次元加振）

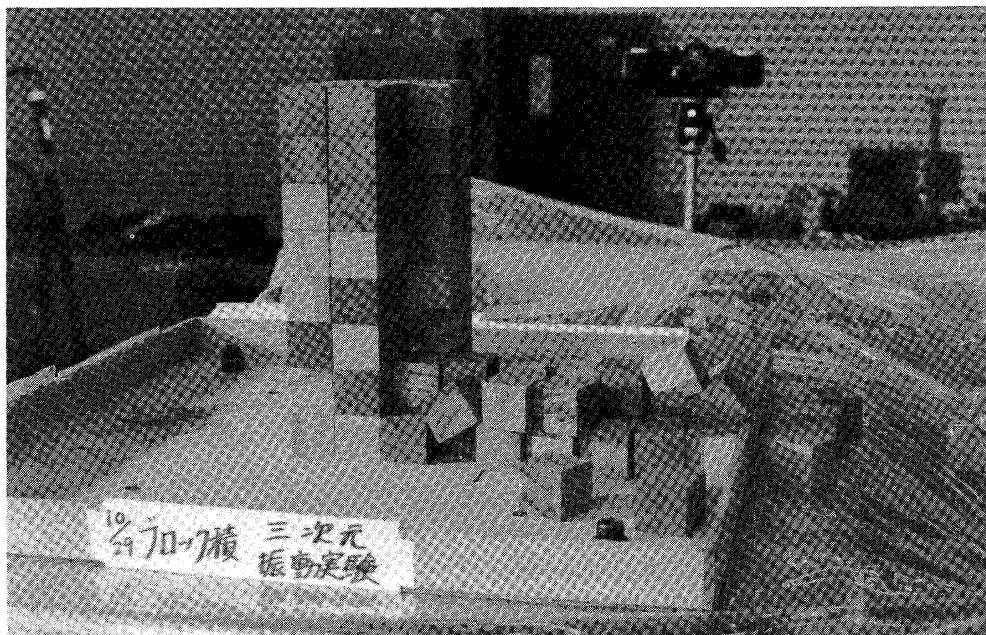
Photo. 7-1 Rocking of Column of Wooden Blocks (Case 13, X and Y Excitation, before Collapse)



写 真 7-2 ブロック柱の回転（上面）ケース 8 X : 242 ガル, Y : 214 ガル, 転落なし

Photo. 7-2 Turning of Wooden Blocks (upper view)

Case 8: X 242 gal (max), Y 214 gal (max) (Collapse did not occur)



写 真 7-3 ブロック柱の崩壊(ケース5, Y: 330ガル, 左右がY方向)

Photo. 7-3 Collapse of Wooden Blocks

Case 5: Y 330gal(max) (right-left is Y direction)



写 真 7-4 ブロック柱の崩壊(ケース10, X: 448ガル)

Photo. 7-4 Collapse of Wooden Blocks

Case 10: X 448 gal(max)



写真 7-5 ブロック柱の崩壊（ケース 12, X : 377 ガル, Y : 214 ガル）
Photo. 7-5 Collapse of Wooden Blocks
Case 12: X 377 gal (max), Y 214 gal (max)

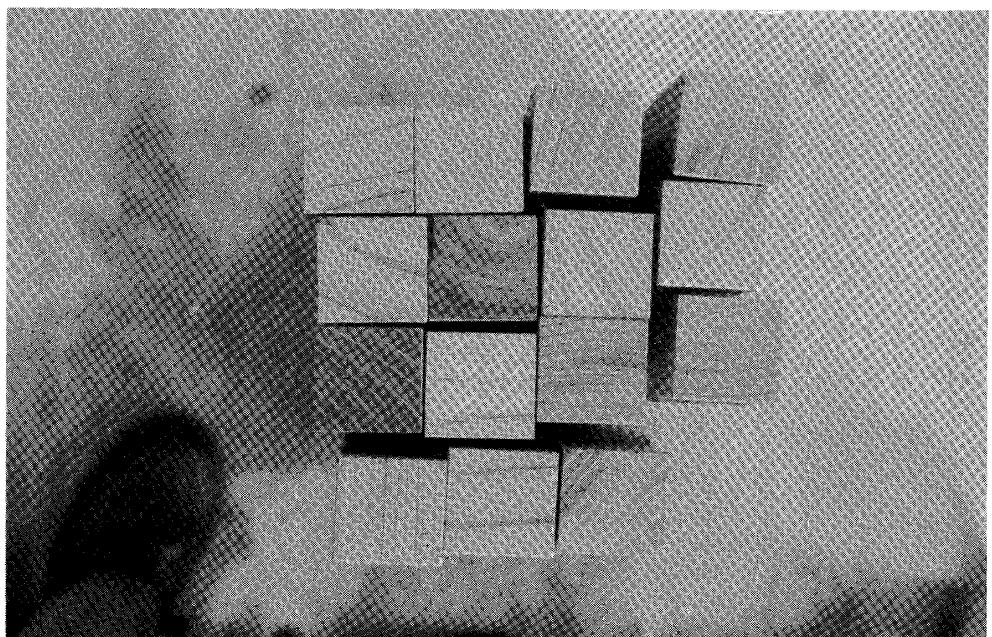
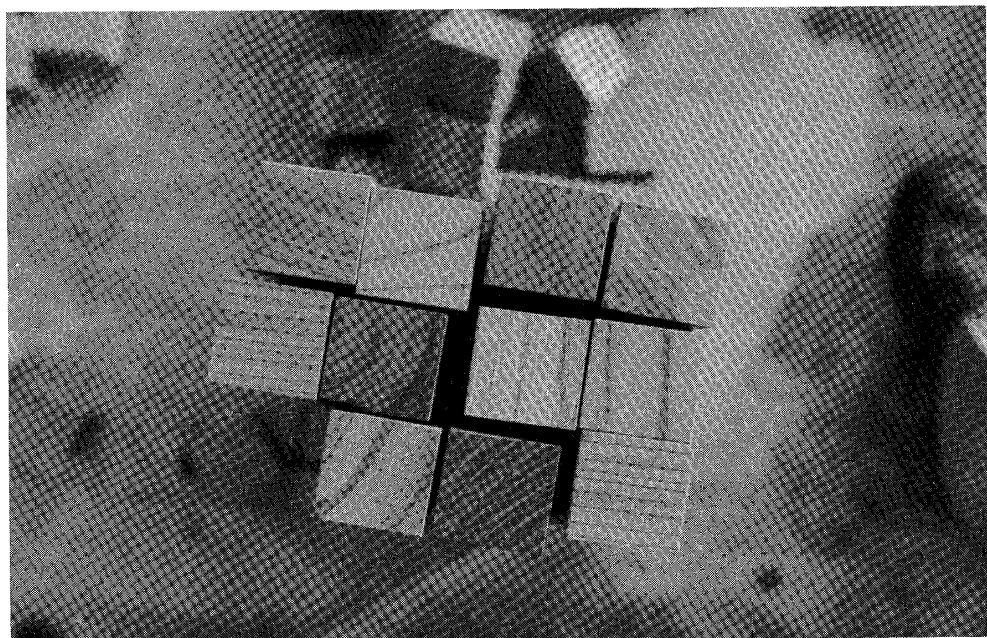


写真 7-6 ケース 12（写真 7-5）を上面から見たもの（左右がX方向）
Photo. 7-6 Upper View of Case 12 (right-left is X direction)



写 真 7-7 ブロック柱の崩壊(上面)(ケース13, X: 381ガル, Y: 275ガル, 左右がY方向)

Photo. 7-7 Collapse of Wooden Blocks (upper view)

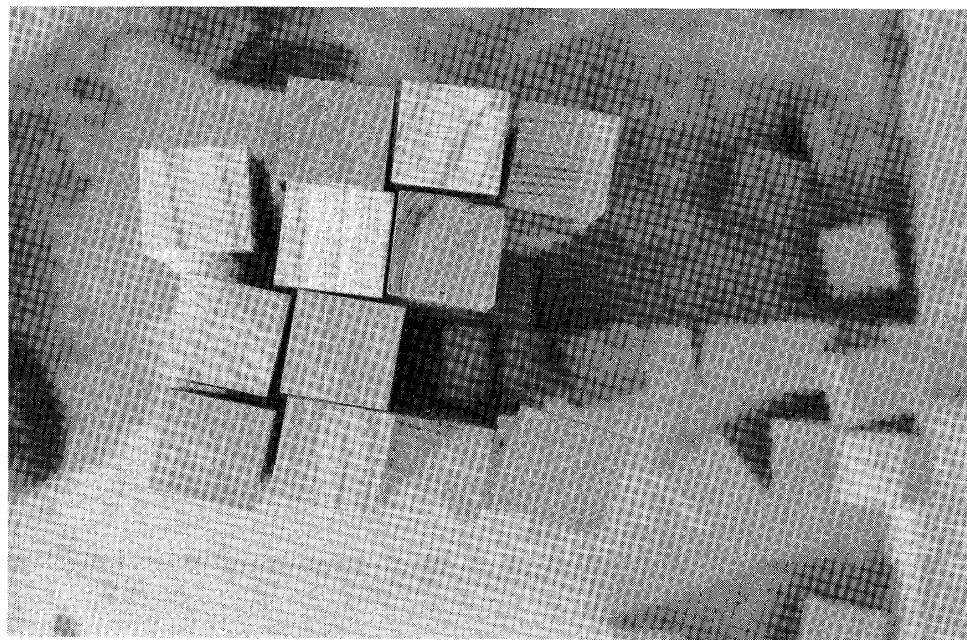
Case 13: X 381gal(max), Y 275gal(max) (right-left is Y direction, and up-down is X)



写 真 7-8 ブロック柱の崩壊(ケース14, X: 332ガル, Y: 285ガル, Z: 126ガル)

Photo. 7-8 Collapse of Wooden Blocks

Case 14: X 332 gal(max), Y 285 gal(max), Z 126 gal(max)



写 真 7-9 写真 7-8を上面から見たもの（左右がY方向）
Photo. 7-9 Upper View of Case 14