

動電型振動試験装置について

大 島 久* 井 藤 昭 夫**

1 概 要

構造研究室では昭和44年、45年度において水平振動台を含むランダム波振動再現制御装置を設置した。

本機は正弦波、三角波、矩形波などの定常波動と、地震波などのランダム波動の再現制御が可能である。

装置の主な性能としては最大加振力 500 kg (peak)、加振振動数範囲 0.2~1,000 Hz、最大変位 60 mm (p-p) である。

また水平振動台の支持方式は変位量の大きな加振の場合にも安定性があり、精確な波形再現に適するハイドロスタティックベアリング方式（自動静圧型）である。

2 試験装置の使用目的

近年橋梁など構造物の耐震設計に関する研究が盛んであるが、その設計資料となるものが少ない。すなわち、ある地盤上に構造物を建設する場合、設計上の主たる水平力である地震力をいかにとればよいか、またその構造物の耐震安定性を検討する上の未解決な問題が多く存在する。

特に北海道には広大に分布する泥炭性軟弱地盤が存在し、このような軟弱地盤の振動性状および軟弱地盤上に架設される橋梁の耐震安定性については今後研究されるべき多くの問題がある。

このような問題を解決する方法としては、実在構造物に対する試験、地震観測、および模型による振動試験がある。当研究室では各地の主たる橋梁の現場振動試験を行ない設計資料を蒐集しているが、これとは別に昭和41年度を初年度として各地の橋梁および架設付近の地盤上にSMAC型強震計を設置し、強震観測を行なっている。

これら強震記録を有効に設計資料とするためには記録された地震波動を振動分析して地盤および構造物の震動特性を求めなければならない。

このような強震記録の分析結果は、将来構造物が類似した地盤上に建設されるとき、模型に対して、強震記録の波動を再現して作用させ地震応答を求めることができる。また強震記録があり、その地盤のインピーダンスが既知であれば地震基盤での波動を逆に推定することもできるので本試験装置とA-D変換器、電子計算機を併用することにより模型振動試験を行なうことができる。

特に橋梁などのように多質点系の地震応答を求めるのには相似律を考慮した模型で振動試験を行なうことは非常に有効なことである。

また本装置には掃引発振器を付属させたので一般にランダム波のパワースペクトラムおよび伝達関数としての応答スペクトラムを自動的に求めることが可能である。

今後本装置を使用して高橋脚を持つ橋梁や泥炭性軟弱地盤上に架設される橋梁の耐震性などについて試験研究を行なう予定である。

3 試験装置

試験装置を構成している各計器は次のとおりであり、その性能と仕様を簡単に述べる。

3-1 試験装置の構成と仕様

1) 動電形加振機 (1台)

最大加振力 500 kg、使用周波数範囲 0~1,000 Hz、最大変位 60 mm (p-p) の性能を持ち、振動板の弾性支持には空気バネ支持機構を有する。

2) 駆動電源装置 (1台)

増幅方式は全トランジスタ式、使用周波数範囲 0.1~1,000 Hz、最大出力 5 kVA、周波数特性 0.1~1,000 Hz で ± 3 dB、SN 比 -40 dB 以上である。

また、過大入力電圧、過大出力電力、冷却水断水、誤操作などには保護装置が差動する。

3) 低周波発振器 (1台)

発振周波数として 0.0001~10,000 Hz (8段切換)、出力波形として正弦波、三角波、矩形波、鋸歯状波、波形ヒズミ (正弦波) は 0.0001~1,000 Hz で 1% 以下、1,000~10,000 Hz で 2.5% 以下である。また出力電圧 15 Vp-p (600 Ω 負荷時)、出力インピーダンス約 10 Ω である。

4) 振動計 (3成分用 1台)

加振機内蔵の速度形ピックアップおよび圧電形ピックアップの出力を測定し、加振機の変位、速度、加速度を直続する。

測定範囲は変位 0.02~30 mm、速度 0.02~100 cm/s、加速度 0.02~30 g である。

また測定精度は3成分とも $\pm 5\%$ である。

5) プリセットカウンター (1台)

本機は低周波発振器よりの信号波形を 1~9 波ま

*構造研究室長 **同副室長

で任意に選択し継続して孤立波形を作るものである。

仕様

動作周波数 0~100 Hz
設定数 1~9
トリガースロープ 正, 負切換
トリガーレベル +1~0~-1 V
信号接点動作時間 1 ms 以下

6) 帯域濾波器 (1 台)

ランダム信号は実際の振動の記録や雑音発生器から得られるが, その中には不必要な周波数成分がある。本装置はこの不必要な周波数成分を取り除く装置である。

仕様

ハイパスフィルター特性
遮断周波数 2~16 Hz を 10 段切換
($\times 1, 10, 100, 1,000$)
特性 18 dB/oct
ローパスフィルター特性
遮断周波数 2.5~16 Hz を 10 段切換
($\times 1, 10, 100, 1,000$)
特性 18 dB/oct

共通仕様

入力インピーダンス 50 k Ω 以上 (不平衡)
出力レベル ± 4.3 V (5 k Ω Load 不平衡)
 ± 15 mA (10 k Ω Load $\times$)
SN比 70 dB (8 Hz 以上の Noise)

7) 低域等化器 (1 台)

加振機の出力加速度の周波数特性は約 600 Hz 以下の低域周波数領域において, 200 Hz 付近に折点をもつ曲線である。本器はこの周波数特性が平坦になるように補正する装置である。

仕様

周波数範囲 0.5~3,000 Hz
等化周波数範囲 1~600 Hz
等化である成分 変位, 速度, 加速度
等化方式 高, 低域フィルターの組合わせ
等化性能 無負荷時 1~600 Hz において
 ± 3 dB 以内に調整可能

8) ピーク・ノッチ等化器 (1 台)

加振機に振動板および水平振動台に共振性の負荷を加えると, 負荷の共振質量の慣性力によって振動特性にピークとノッチ (後述) を生じる。本器はこれを補正する装置である。

仕様

周波数範囲 1~1,000 Hz

周波数調整 連続可変

選択度 $Q=2\sim 30$ (50~1,000 Hz)
 $Q=2\sim 20$ (1~50 Hz)

9) クリッパー増幅器 (1 台)

ランダム信号の中にはきわめて大きな振幅が含まれており, 時には加振機の定格を越えることがある。本器はこのような場合に信号の振幅で加振装置の定格以下に制限する装置である。

仕様

周波数範囲 1~5,000 Hz
クリップレベル 連続可変
利得 (出力/入力) 約 1

10) 自動同調形バンドパスフィルター (1 台)

周波数追跡形固定バンド幅のバンドパスフィルターでその選択周波数を与えられた同調信号によって任意に可変できる。

被測定体より検出された大量のノイズを含む波形から任意の周波数成分をレベルと位相を保った正弦波として取り出すことができる。

仕様

チャンネル数 2
周波数範囲 2.5~5,000 Hz
周波数特性 ± 0.5 dB 以下
直線性 ± 0.25 dB 以内
入力インピーダンス 50 k Ω
入力電圧 3 mV~100 Vp-p
入力同調電圧 最小 1 Vp-p
フィルターバンド幅 $\pm 2.5, 5, 10$ Hz
フィルター出力 AC 5 Vp-p フルスケール
DC 1 V フルスケール
出力インピーダンス 1 k Ω 以下

11) 掃引発振器 (1 台)

本器は振動分析用の発振器で, 広い周波数帯域の信号を連続的に発振する。

仕様

周波数範囲 0.5 Hz~5 kHz (3 デカート可変)
周波数表示と精度 メーター表示, 読取り精度
1.5 % 以下

出力

波 形 矩形波, 三角波, 正弦波
ヒズミ率 矩形波は立上がり時間 2 μ sec 以下,
三角波, 正弦波は各 1 % 以下
振 幅 各波 0 V~10 Vp-p
抵 抗 1 k Ω 以下
掃引様式 外部信号, 手動, 対数単一, 対数繰
り返し, 直線単一, 直線繰り返し

- 掃引率 3 dec/10 V, 0~12 dec/min
0~200 Hz/sec 連続可変
- 12) 対数変換器 (2 台)
本品は自動同調形バンドパスフィルターの出力を
対数変換する装置である。
- 仕様
測定範囲と精度 60 dB $\pm$ 0.4 dB
周波数範囲 DC および AC (5~5,000 Hz)
入力電圧 AC 1 mV~100 Vrms
DC 3.16 mV~316 mV
入力抵抗 100 k Ω
出力電圧 DC 1 V/60 dB
出力抵抗 1 k Ω 以下
応答速度 最大 60 dB/sec
- 13) 水平振動台
本機は構造物模型などの供試体を水平加振する時
に使用する振動台で加振機に連結棒で接続して使用
する。
- 仕様
周波数範囲 0~100 Hz
台面積 1,000 $\times$ 1,500 mm
台重量 約 400 kg
台支持方式 ハイドロスタティックベアリング
方式
可載重量 約 800 kg
- 14) 製作メーカー
株式会社 明石製作所
- 3-2 試験装置の総合性能
- | | |
|-----------------|--|
| 加 振 力 | 500 kg (peak) |
| 振動数範囲 | 0.2~1,000 Hz |
| 最大変位 | 60 mm (p-p) |
| 最大加速度 | { 無負荷時 29 g
100 kg 負荷時 4.2 g |
| 振 動 方 向 | 加振機に垂直 $\pm 90^\circ$ 間任意方向 |
| 振 動 波 形 | 正弦波およびランダム波 |
| 振 動 波 形
ヒズミ率 | { 変 位 5%以下 (0.2~200 Hz)
加速度 10%以下 (1.0~1,000 Hz)
速 度 7%以下 (1.0~200 Hz) |
| 許容搭載重
量 | { 加振機 { 垂直方向 200 kg
水平方向 200 kg-cm
水平振動台 800 kg |
| 振動検出器 | 圧電形ピックアップ (速度形) |
| 発振振動数 | 0.0001~10,000 Hz 8 段切換
振動数確度 $\pm 1.5\%$ |
| 振 動 測 定 | 電子管式指示形振動計による。
変位, 速度, 加速度同時指示式測定 |

可能範囲	変 位 $\pm 0.02 \sim 30$ mm $\pm 5\%$ 速 度 $0.02 \sim 100$ cm/s $\pm 5\%$ 加速度 $0.02 \sim 30$ g $\pm 5\%$
駆動電源	全トランジスタ式 振動数範囲 0.1~1,000 Hz 出 力 5 kVA
励磁電源	出 力 2.5 kW 出力調整 零~最大連続可変
冷却方式	{ 加振機 強制空冷 駆動電源 水冷 (15 l/min)
保護装置	{ 加振機過大振幅 冷却水断水 誤操作 増幅器過大入力電圧 電力
所要電源	{ 単相 100 V 50/60 cps 約 3 kVA 3 相 200 V 50/60 cps 約 15 kVA 加 振 機 約 1,300 W $\times$ 1,060 D $\times$ 1,350 Hmm, 3,000 kg 水平振動台 1,000 $\times$ 1,500 mm, 400 kg 駆動電源 約 1,550 W $\times$ 750 D $\times$ 2,000 Hmm, 1,000 kg 制 御 盤 約 1,200 W $\times$ 600 D 1,800 Hmm, 300 kg

警報装置によ
る指示

4 加振機の振動特性と等化

正弦波試験あるいはランダム波試験を行なう場合, 加振機の加速度, 速度, 変位特性が問題となる。

加振機の各特性を示すと図-1 のようになる。

図-1 に示すような特性曲線をどの周波数においても出力レベル (加速度, 速度, 変位) を一定にする操作を“等化”という。等化するためには特性と逆の特性を加える。例えば加速度特性を等化するために図-2 に示す点線の逆特性を加える。その結果レベル一定の特性が得られることになる。この等化する装置を等化器といい, 等化する周波数, 形状によって低域等化器, ピークノッチ等化器 (3 の 7), 8) の項を参照) などと呼ばれている。

同様なことが速度, 変位について行なわれるが検出する成分が例えば加速度だけであれば他の成分についての特性を等化する必要はない。

5 正弦波振動の再現と制限

正弦波試験の場合, 加振機の特性の等化はサーボ機構を有する「定振動装置」で行なう。

正弦波発振器の出力はレベル設定器で設定された基準電圧と振動計出力電圧との差電圧で駆動するサーボモ-

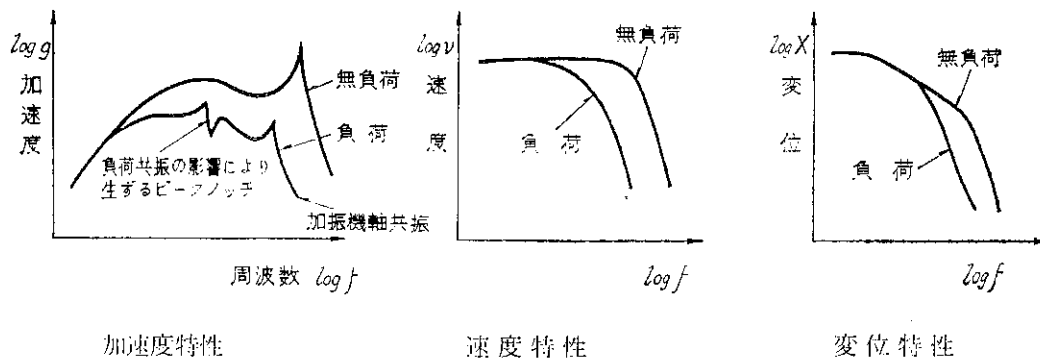


図-1

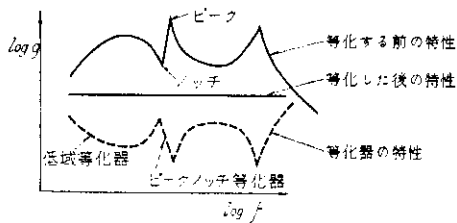


図-2

ターで制御される。

サーボモーターはこの差電圧を0にするように回転する。したがって、基準電圧を設定調節することにより加振機の振動レベルが調節できる。この設定を行なった後は振動レベルは周波数を換えても一定に保たれる。

以下図-3に、正弦波模型試験を行なう場合のブロック図を示す。

6 ランダム波振動の再現と制御

一般に任意波形による振動試験には波形再現方式とスペクトラム再現方式とがあり、本装置は前者の波形再現方式をとっている。

任意波形源としては White noise generator または実際の振動の記録で与えられるが、飛行中の航空機や走行中の車輛の振動のように、Stationary random process

と仮定できる場合はその振動に含まれる周波数成分が再現されればよく、この場合はスペクトラム再現方式が採用される。

一方、記録された地震波によって構造物の模型震動試験を行なうような場合、地震波は Stationary random process と仮定できないため、波形自体の再現が要求される。

この場合、波形に含まれる周波数成分が再現されるだけでは十分でなく、さらに波形中のかく周波数成分間の位相も偏差を生じないことが必要となる。

このように地震波を再現する場合、波形再現方式を採用しなければならない。

したがって、上記の両方式とも加振装置の周波数一振幅特性は平坦であることが必要であり、特に波形再現方式では周波数一位相特性も平坦でなければならない。

ところが加振機の周波数特性は平坦ではないため、任意波形再現のためには補助装置が必要となる。

したがって、ランダム波の振動の再現には、4.で述べたように加振機の特性を周波数特性一定になるように等化しなければならない。

等化器を内蔵した波形再現方式のランダム波振動加振

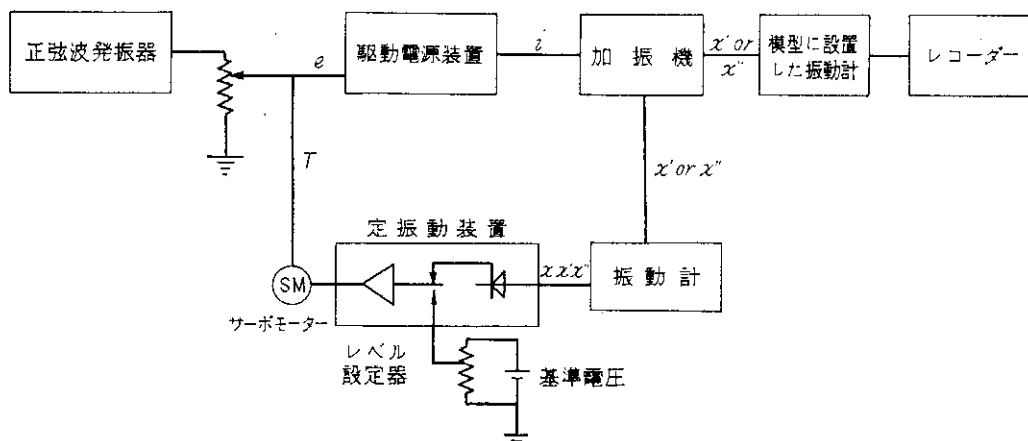


図-3 正弦波模型試験のブロック図

装置は図-4のようなブロック図で表わされる。

なお本装置の入力信号の形状はアナログ量であり、したがって各等化器はアナログ等化器を採用している。

また孤立波振動再現制御方式のブロック図は図-5のようになる。

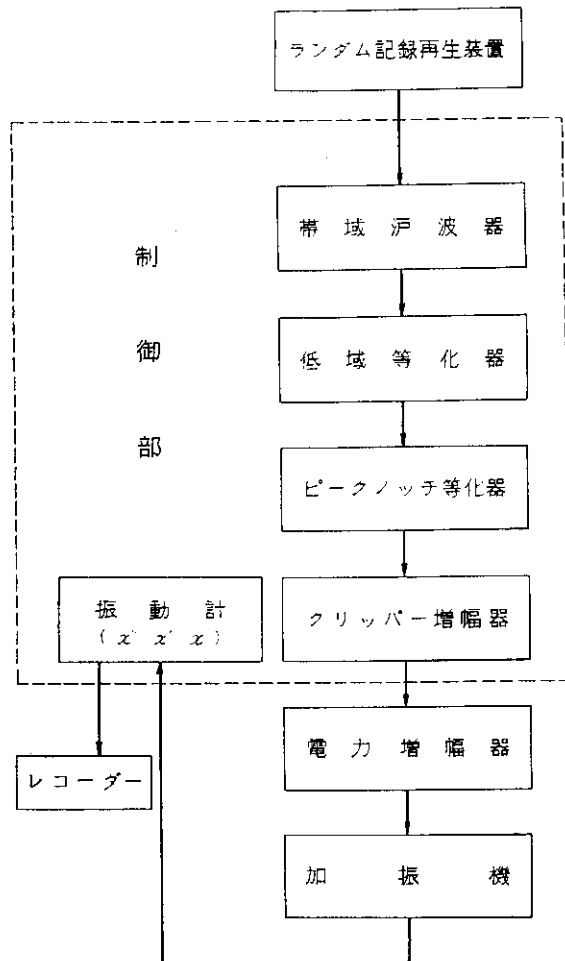


図-4 ランダム波振動再現，制御方式

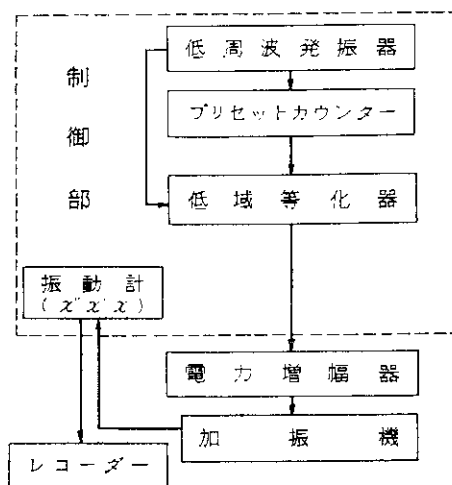


図-5 プリセットカウンタによる
孤立波振動再現，制御方式

7 ランダム波動再現制御装置による振動分析および波動再現

7-1 地震波のパワースペクトラム

地震波などのように統計時にのみ確定されている不規則波の統計量は，アンサンブル平均で波形の性質を示すことができる。しかし一度に地震波の記録を数多く用意できないような場合にはエルゴード性（不規則波に関するアンサンブル平均と時間平均が一致する場合，この現象をエルゴード的であるという）を仮定し，任意の一つの地震波についてその性質を調べればほかの地震波の性質を知ることができる。

地震波をエルゴード波形とすれば，あるきざまれた時間間隔 $2T$ の外側ではゼロになると仮定される（図-6参照）。

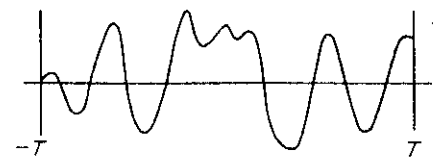


図-6

この仮定のために，この波形はその Fourier 変換が有限となる。

Fourier 変換論によれば，関数 $x(t)$ が変域 $(-\infty, \infty)$ で Dirichlet の条件 ($x(t)$ が (a, b) で有界変動をなすときは二つの有界な単調増加関数の差で表わすことができる) を満足し，かつ

$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt$ が絶対収束であれば，次の定積分で表わしうる。

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega,$$

$$\text{ただし } F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{i\omega s} ds \quad (1)$$

一方 Parseval の公式は

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau)dt = 2 \int_0^{\infty} F(\omega)^2 \cos \omega \tau d\omega \quad (2)$$

$F(\omega)$ は実関数 $x(t)$ の Fourier 変換を表わす。

今図 () の自乗平均値を σ^2 とすると

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{x(t)\}^2 dt \quad (3)$$

(2) 式で $\tau=0$ とすれば

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^{\infty} F(\omega)^2 d\omega \quad (4)$$

(4) 式で $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} F(\omega)^2 = G(\omega)$ と書けば，結局 σ^2 は次式となる

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega \quad (5)$$

この $G(\omega)$ をパワースペクトラムという。

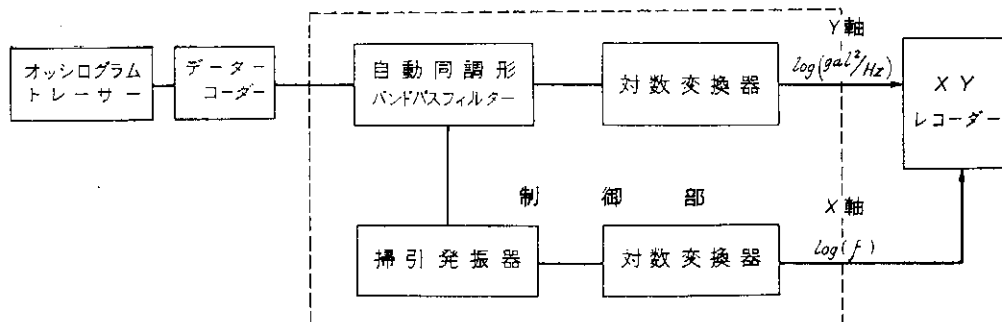


図-7 パワースペクトラムの自動記録のブロック図

例えば地震の加速度成分を $x(t)$ にとれば、 $G(\omega)$ のディメンジョンは $(\text{gal})^2/\text{Hz}$ ($=\text{cm}^2, \text{sec}^{-3}, \text{Rad}^{-1}$) となる。

したがって、ある振動数での $(\text{gal})^2/\text{Hz}$ がわかれば、平均の $\text{gal}(\text{cm}, \text{sec}^{-2})$ を求めることができる。

$G(\omega)$ を本装置を使用して求めるために次のような操作を行なう。

まず地震波をデーターレコーダーに記録させる。(オシログラムトレーサーなどを用いる)

この地震波(アナログ信号)を自動同調形バンドパスフィルターに加えると、同時に別に加えられた同調信号周波数(掃引発振器より発振した周波数信号)を中心周波数(本装置の場合約 $6.3 \text{ Hz} \pm 3.15 \text{ Hz}$)とする狭周波数帯域に含まれ周波数成分のみが選択、検出される。

この自動同調形バンドパスフィルターの出力を対数増幅器で対数変換した後、演算操作すれば $\log(\text{gal}^2/\text{Hz})$ に比例した出力を得る。

また掃引発振器より発振した周波数を対数変換すれば

$\log(f)$ に比例した出力を得る。

$\log(\text{gal}^2/\text{Hz})$ を Y 軸に、 $\log(f)$ を X 軸に XY レコーダーに記録させる。

次にこの自動記録のブロック図を示すと図-7のようになる。

図-8, 9 はそれぞれ 1968 年 5 月 16 日の十勝沖地震による一般国道 236 号、幌満橋(地表面)の左右動および前後動のパワースペクトラムを表わす。ここで横軸は振動数、縦軸はパワー (gal^2/Hz) である(以下図-10, 11 も同様)。

図-8, 9 より幌満橋付近の地盤では約 3.5 Hz にピークがあることがわかる。

図-10, 11 はそれぞれ 1970 年 1 月 21 日の日高山脈南部の地震による一般国道 275 号、新石狩大橋(地表面)の左右動および前後動のパワースペクトラムを表わす。

図-10, 11 より新石狩大橋付近の地盤では約 1.5 Hz にピークがあることがわかる。

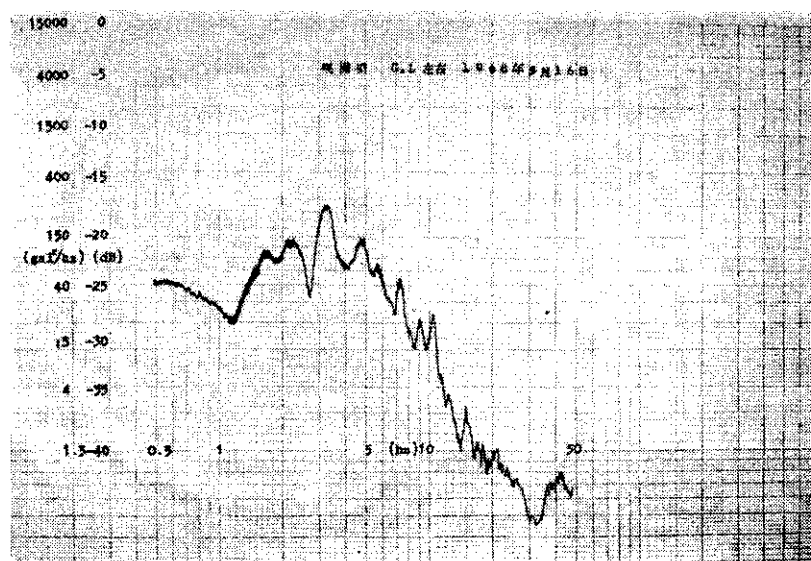


図-8

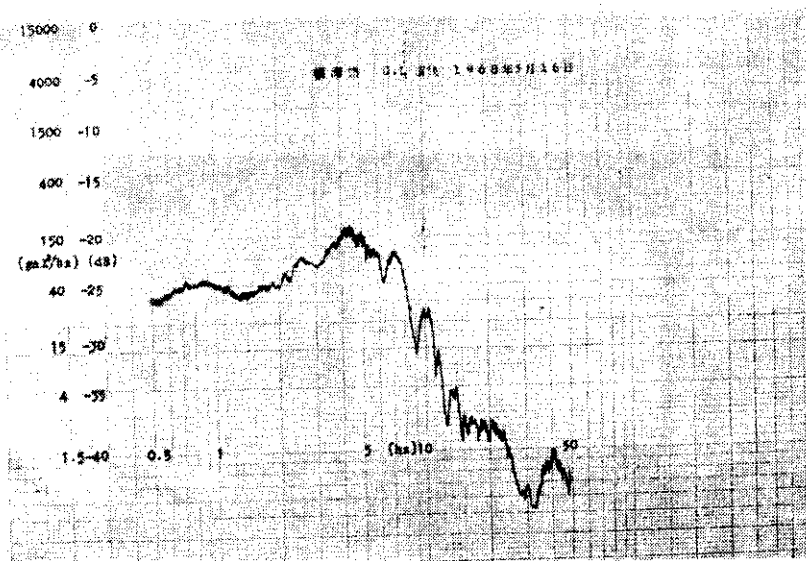


图-9

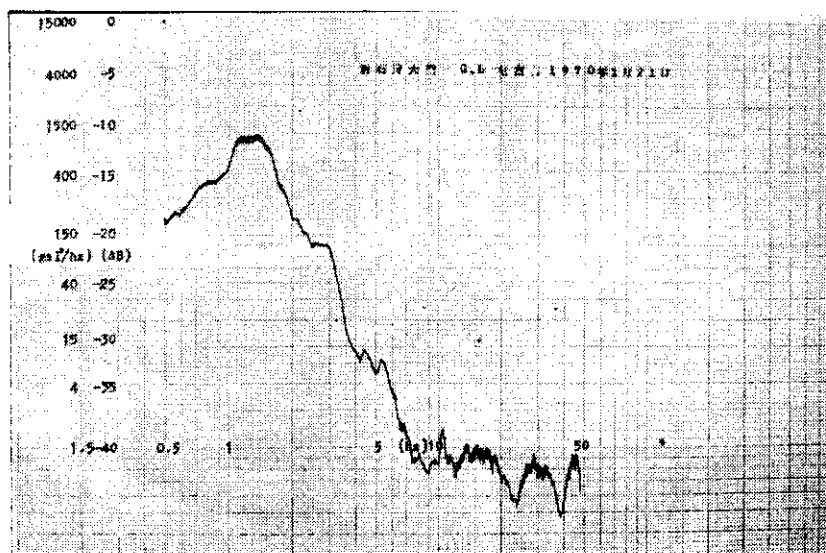


图-10

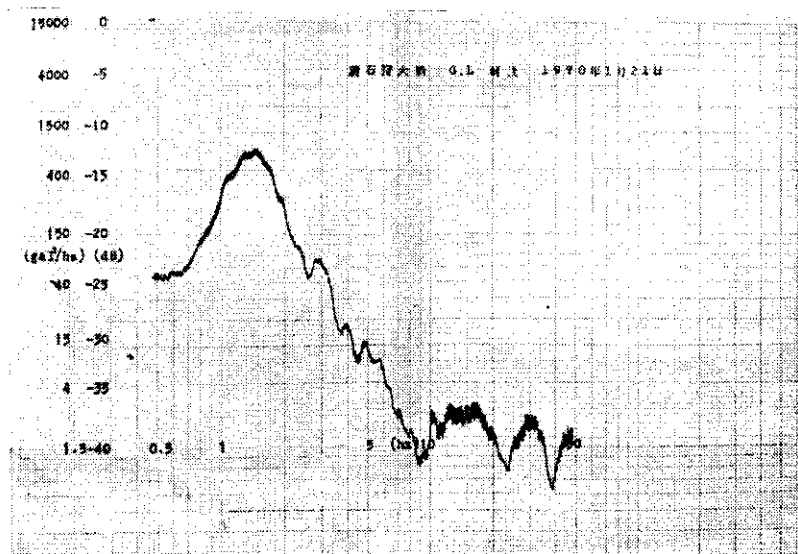


图-11

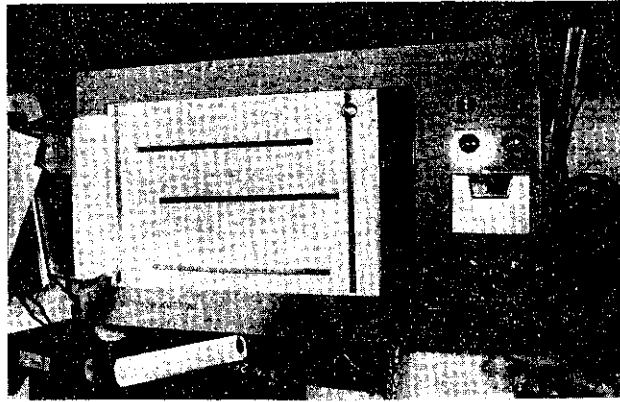


写真-1 オッシログラムトレーサー

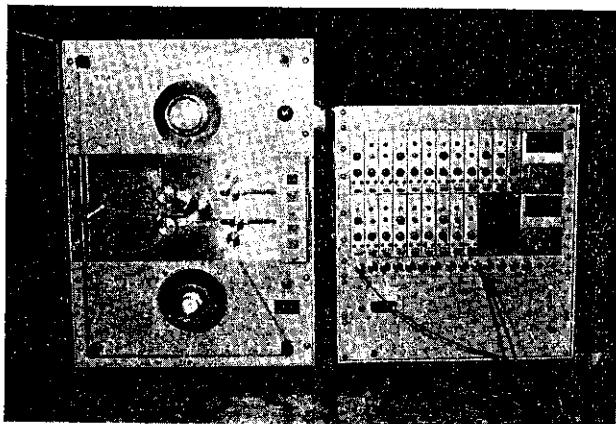


写真-2 データーレコーダー

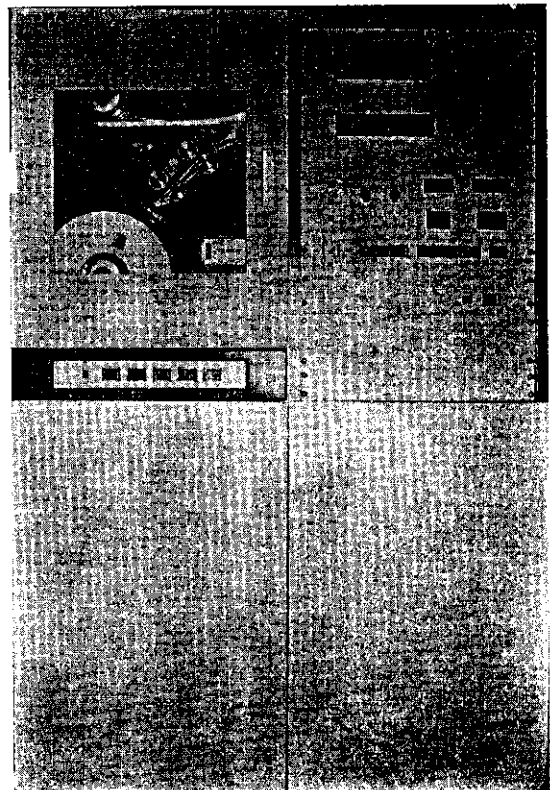


写真-3 データー処理器

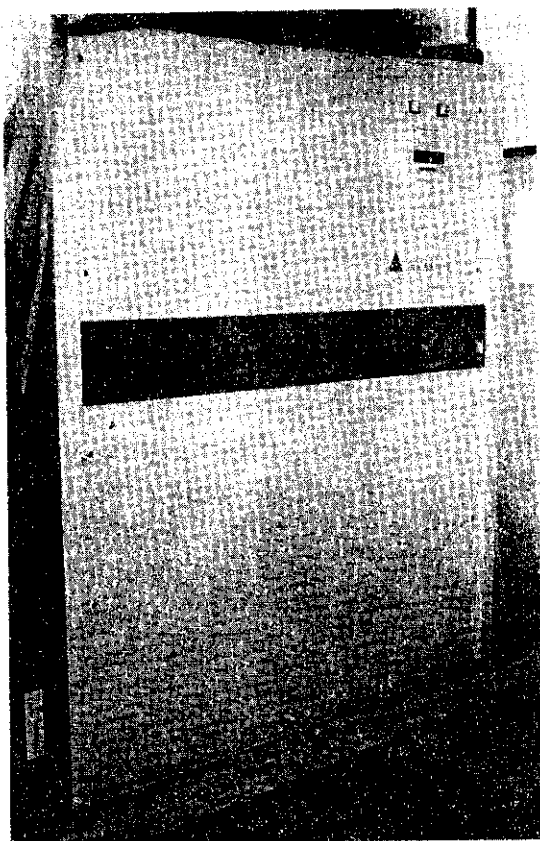


写真-4 加振機駆動電源部

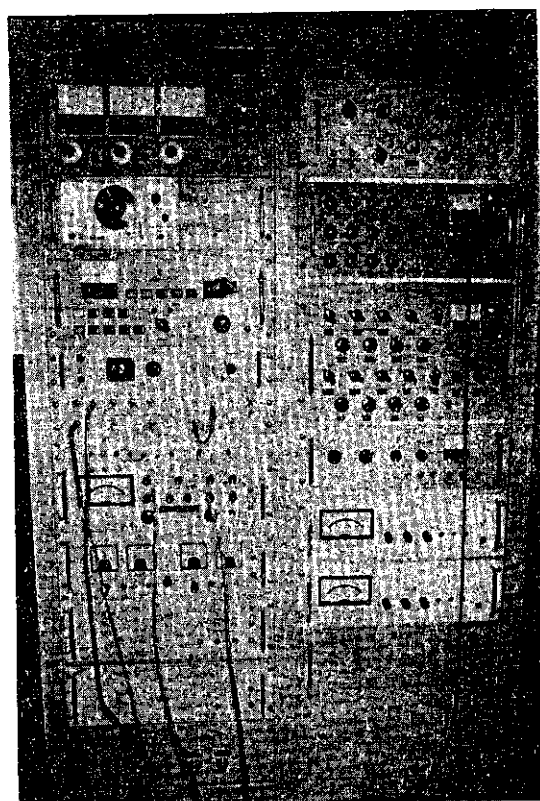


写真-5 加振機制御部

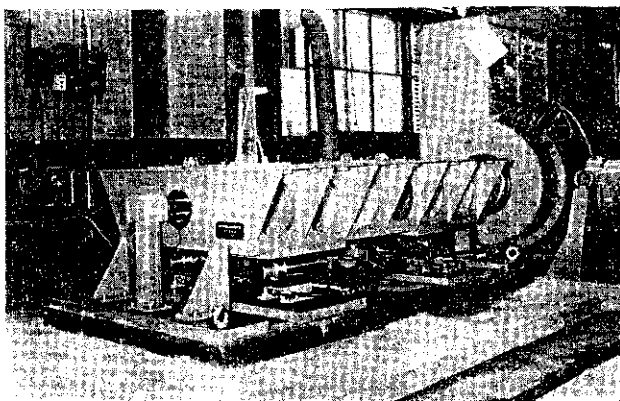


写真-6 加振機および水平振動台



写真-7 振動試験装置全景

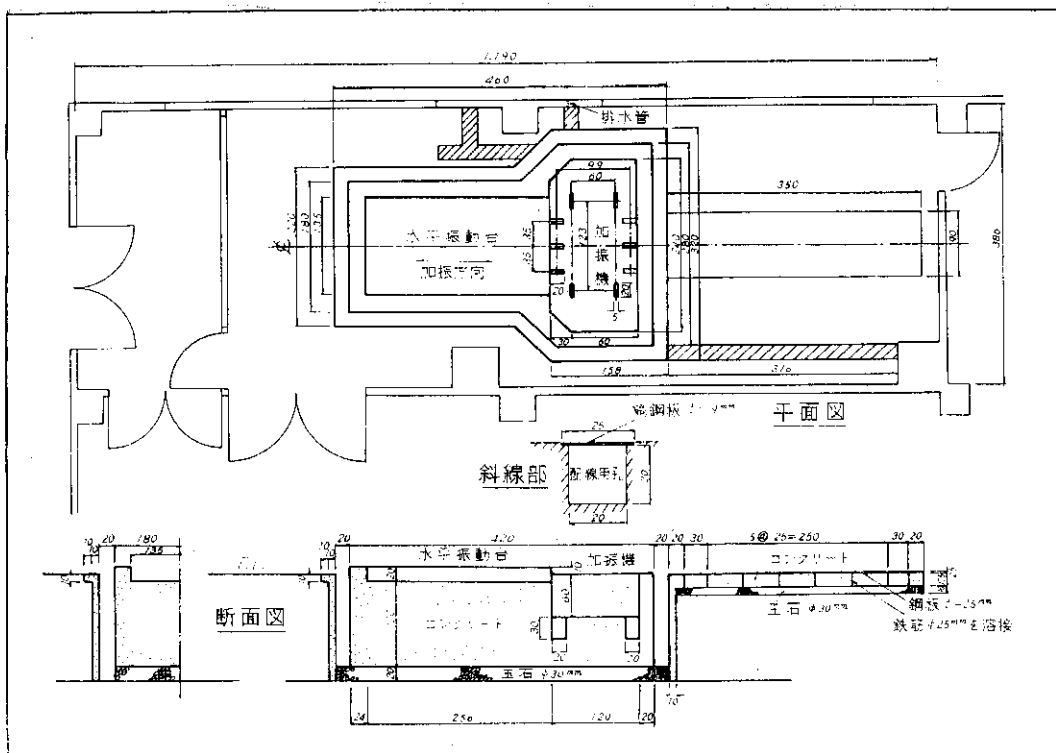


図-12 振動試験装置基礎図 (単位 cm)

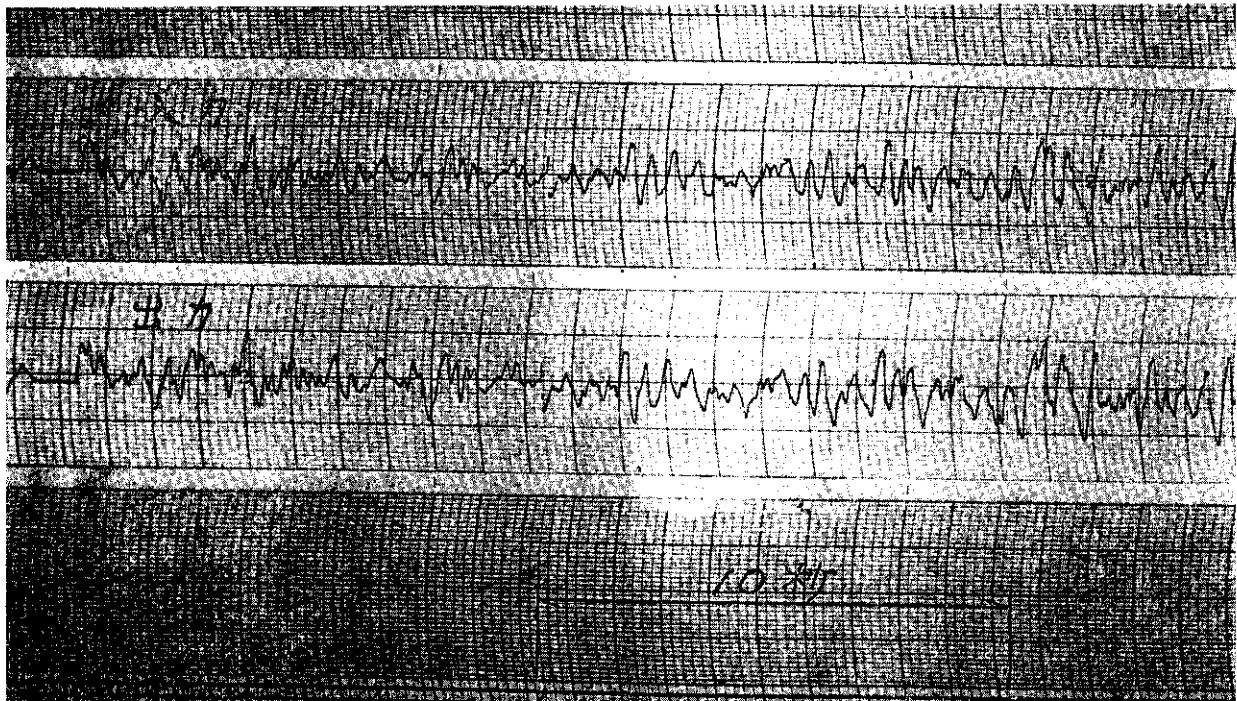


写真-8 地震波形の再現

7-2 地震波形の再現

写真-8は入力として1970年1月21日の日高山脈南部の地震による一般国道242号、千代田大橋の地表面の加速度記録を水平振動台に稼動させて再現したときの出力波形である。入力電圧を等化器を通した場合、震動台の出力電圧は入力電圧に比例したものになり、写真-8に見られるようにほぼ相似になっていることがわかる。

8 あとがき

以上述べたように本試験装置は正弦波をはじめ、地震波など不規則波の再現および振動分析を行なうことができるものである。今後各種振動試験を行なう際有力な装置であるということがいえ、現場振動試験のデータ処理や模型による耐震設計などに関する試験調査に使用するものである。