

大型振動台加振時の周辺地盤振動 に関する調査報告

小川信行* 箕輪親宏*
飯田晴男** 久保田武**

国立防災科学技術センター

The Measurement of the Ground Vibration Propagated from the Foundation of the Large Scale Shaking Table

By

N. Ogawa, C. Minowa, H. Iida and T. Kubota

National Research Center for Disaster Prevention,

Abstract

The ground vibration propagated from the foundation of the large scale shaking table was measured. The main measurement was done in the range of 600 m distance from the foundation to the shaking direction and 200m distance to the direction perpendicular to it.

Using shock wave or sinusoidal wave as the input to the shaking table, the frequency response, the relation of the amplitude and the distance dependant on frequency, and the propagation of shock wave were obtained. It was found from this measurement that the ground vibration was extremely sensitive for frequency and distance, the growth of vibration near the foundation was remarkable, and the propagation velocity of the ground vibration was much faster than the S-wave velocity of the surface layer.

1. はじめに

近年の都市過密化に伴い交通機関, 土木建設機械などから発生する地盤振動による障害は無視できない社会問題になりつつある。振動台のような研究目的の機械装置であっても, その大型化に伴い, 周辺への波動伝播による影響を考えなければならないようになってきている。この点は設計時にも一定の考慮が払われているが実測との対比はきわめて少ないのが現

* 第2研究部耐震実験室 ** 施設課

状であり、詳細な実測データの積み上げが特に必要と思われる。

他方、耐震工学で構造物への地震入力を考える場合、表層地盤の波動伝播特性の影響が大きなファクターであることが多くの研究によって指摘されている。このため表層地盤の振動性状について理論的な研究だけでなく、実際に地盤を加振してその波動伝播特性を調べることも少なからず行われている。それらのうちで、爆破、板たたきによる弾性波探査が多く行われているが、地盤振動の伝播を詳しく調べるには正弦波定常加振などが行えることが望ましい。その一つの手段として起振機による地盤加振があるが、低周波数域での出力不足のため耐震工学などで問題とすべき周波数範囲での実測が困難といえる。この意味で大型振動台による加振は、それが設置されている特定の地点における測定に限られるが、加振力が大きく任意入力が可能という点からみて地盤振動を調べる一つの手段にもなりうるものと思われる。

本報告は、従来、振動台周辺でのこの種の実測がほとんど行われていなかった点にかんがみ、筑波施設構内の大型振動台を用いて周辺地盤振動の測定を行い、上に述べた振動障害あるいは耐震工学の立場から地盤振動を研究する際の資料として供する目的で主要な測定結果をとりまとめたものである。

なお、本測定は旧大型実験研究部耐震実験室で行ったものであり、実施計画は小川、箕輪が、振動台運転は飯田、久保田が主として担当し、計測、読み取り等の作業は表記4名が共同して行ったものである。

2. 測定概要

Fig. 1に測定範囲と測点の位置を示す。観測線は振動台基礎(以下「台基礎」とする)の中心より加振直角方向にX測線、加振方向にY測線とした。Fig. 1の・点は測定点、●点は既往ボーリング地点である。建設時の地盤調査および野外実験の際に行った地盤調査などによりこの範囲の地盤構造はかなり明らかになっている。Fig. 2-1は各ボーリング地点のN値分布およびNo.9点で行った速度検層の結果であり、これからX測線およびY測線方向の推定断面図を求めたものがFig. 2-2~3である。この付近の地質構造については建設時に行われた地盤調査報告(1968)に詳しく述べられているので割愛するが、大別すると地表から深度6~7m付近までの洪積Ⅲ層(N=1~7)、深度25m付近までの洪積Ⅱ層(N=10~50)、それ以下の洪積Ⅰ層(N>50)にわけられ、各層はそれぞれ不整合面で接しており、ゆるやかな起伏を示している。台基礎底面は洪積Ⅱ、Ⅲ層の境界面よりやや下部に位置している。

地表には両測線とも雑木や若干の構造物があり、振動の伝播にある種の影響を与えていると考えられるが、各測点ではかなり良好な振動波形記録が得られた。なお、以下の説明、図

等で「距離」は台基礎中心から測定点までの水平距離であるが、厳密な測量によっているのではなく、また地表が完全に平にならされているわけではないので若干の誤差を含むものである。

測定方法は、各測点にピックアップベース（大きさ $30\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 、厚さ 10 cm 程度のコンクリート製トラフを使用した）を設置し、測線方向（水平はX方向およびY方向）に合わせてピックアップをセットした。地表測定用のピックアップには動コイル型換振器（㈱保坂振動製）、地中測定用にはサーボ型換振器（㈱東京測振製）を使用した。これらの型式、使用台数は以下の通りである。

地表測定用ピックアップ

水平用	MTKH-1C	固有周期1秒	9	台
	MTDH-1C	同上	1	台
上下用	MTKV-1C	同上	9	台
	MTDV-1C	同上	1	台

地中測定用ピックアップ

3成分用	SA-355	固有周期0.2秒	2	台
------	--------	----------	---	---

増幅器と組み合わせた場合の周波数特性は、地表用ピックアップでは $1\text{ Hz} - 70\text{ Hz}$ 、地中用ピックアップでは、 $0.7\text{ Hz} - 20\text{ Hz}$ 以上で平坦であり、また位相特性は地表用ピックアップの場合、 2 Hz で約 20° の位相遅れがあるが、 5 Hz 以上で 0° となっており、地中用ピックアップの場合は $0.7\text{ Hz} - 20\text{ Hz}$ で 0° である。これらピックアップの特性を比較するために測定に先立って、同一地点にピックアップを集め、常時微動あるいは振動台加振時の振動を測定し波形が等しいことを確認した。

測定時のピックアップの感振方向は、各測線に対し、測線方向の振動成分をL-comp.、測線直角方向の振動成分をT-comp.、上下動成分をV-comp.と示し、加振方向との関係で表示する場合は、加振方向の振動成分をY-comp.、加振直角方向の振動成分をX-comp.と表示している。また、ピックアップ数の制限のため、以下に述べる各測定項目を実施するに当たっては、いくつかの測定ケースにわけ、各ケースに共通の測点を設けて各々の測定結果をつなぎ合わせるという方法で測定を行った。

主要な測定項目は以下の通りである。

(1) 台基礎および台基礎近傍地盤の振動挙動

Y測線上 50 m 地点に埋設した地中地震計を利用し、地表、地下 -10 m 、 -40 m 地点で同時測定を行い、各点3成分につき周波数特性を求めた。さらに台基礎および埋戻土付近の振動挙動について若干の測定を行った。

(2) 地表3方向での地盤振動

地盤振動伝播の概況をみるためにX測線、Y測線および両測線の中間の方向で距離

100 mの地点を選び各点の振動オービット、周波数特性などを調べた。

(3) 加振直角方向測線(X測線)での地盤振動

X測線上50 m~200 mの範囲につき、地表の各点での周波数特性、距離による振幅の減衰およびステップ加振による波動伝播の測定を行った。この測線ではSH波またはラブ波が卓越すると思われるT-comp.の観測に重点をおいた。

(4) 加振方向測線(Y測線)での地盤振動

Y測線上50 m~600 mの範囲につき(3)と同様の測定を行った。50 m~100 m間の比較的振動源に近いところではやや密に測定を行い、また50 m~600 mでは測点間隔を長くし、可能な限り遠方の地点を含めて測定を行った。この測線ではL-comp., V-comp.の観測に重点をおいた。

末尾の写真1~4に各測線の概観および測定状況を示す。

振動台への入力には正弦波およびステップ波(矩形波)を主とし、一部で定加速度掃引正弦波を使用した。振動台(170トン)上には負荷として砂層(約370トン)を塔載した。したがって可動重量は全体で約540トンになり十分な起振力が得られるので、正弦波入力は振動台加速度100 galを目標として加え、一部比較のため300 galの加振も行った。なお、100 gal加振時の基礎への加振力は約54トンとなる。

測定は振動変位について行い(ピックアップにより検出した速度を増幅器で積分している)データレコーダに記録すると共にペンレコーダでモニターした。読み取りに際しては入力周波数を考慮し、正弦波加振の場合は基本波成分以上をほとんどカットするようなローパスフィルターを通し、ステップ加振などでは30 Hz以上をカットした。これは主として振動台-基礎系あるいは基礎-地盤系の非線形性などに起因する高調波歪を除去するためである。

得られた振幅記録を正規化する場合、通常は起振力で除した値を用いるが、ここでは振動台(側面)の加速度で除した1G当りの振幅を求め、これを応答倍率(μ/G)または振幅比とした。負荷重量が一定であるので、これは起振力による正規化と同じである。振動台加速度としては台両側についている加速度計記録の平均値を用いた。

Fig. 3にいくつかの測定ケースにおける振動台加速度記録を示す。目標加速度は加速度計TA1で100 galであったが、TA2においては10~14 Hzの間でかなりのばらつきを生じており、台に回転が生じていると思われる。300 galの加振ではこの傾向は小さくTA1, TA2ともほぼ等しくなる。なお台の回転の影響は基礎にはほとんど現われていない(Fig. 8参照)。

Fig. 4およびFig. 5は測定ケースによる条件の差異をチェックするため、基礎および地盤の代表点につき、異なった測定ケースから得られた周波数特性を比較したものである。Fig. 4で記号×, ・等はそれぞれ異なったケースから得られたものでFig. 5も同様である。測定ケースによる加振条件の差異は多少みられるが、今回の測定目的からみれば良

好に一致しているといえる。

3. 測定結果

3・1 振動台基礎および基礎近傍地盤の振動挙動

振動台基礎は重量約1万トンの直接基礎である。Fig. 6にその形状・寸法等を示す。

Fig. 7は基礎近傍の地盤でY測線に沿って配置した地表および地中におけるピックアップの配置を示す。

Fig. 8は台基礎の各点で測定した周波数特性で、水平動および上下動について求めたものである。振動台の加振は水平方向のみについて行われているが、台基礎への加振点は台基礎重心よりかなり上にあり、また地盤からの反力も下部に作用するため、台基礎の運動は回転と水平運動の連成したものとなる。これらの事情のため地盤への加振機構は半無限地盤上の点加振など理論上のモデルで扱われている場合に比べかなり複雑となる。

Fig. 8にみられるように加振方向振動成分のピークは約3 Hz, 6 Hz, 12 Hzとなっている。このうち3 Hz および6 Hz 付近のピークは常に生ずるが、12 Hz 付近のピークは不安定で加振振幅を上げると消滅することがある。上下動のピークは6 Hz と9 Hz にあり加振振幅にかかわらず現われる。6 Hz 以外のピークは台基礎の設計においては考慮されていなかったものである。地盤調査から知られた表層(Fig. 2-1の第1, 2層)の平均S波速度(114 m/sec)と層厚8 mから表層の一次固有振動数を求めると約3.5 Hzとなる。したがって台基礎水平動にみられる3 Hz 付近のピークは台基礎が表層地盤中に埋設されているために生じたものと思われる。6 Hz と9 Hz のピークは上下動に明瞭に現われていることから台基礎のロッキング振動により生じたピークといえる。加振直角方向の振動はほとんど生じていない。

なお、この台基礎の振動性状については別途詳細な報告にまとめられている。(田治見・箕輪・小川, 1975)。台基礎の振動は周辺地盤の振動と直接関連しているので、本報告ではその代表的な点として台基礎底部(Fig. 8のHL)での振動記録を地盤振動の記録と合わせて図示した。

Fig. 9に埋戻土の加振方向振動成分の測定結果を示す。加振は300 galで行ったものであり、測点はFig. 7に示す通りである。この図で位相差は台基礎の振動を基準としている。低周波数では各測点とも振幅、位相に大きな差異はみられないが、周波数が高くなるにつれ振幅および位相の差が顕著になってくる。位相差が顕著になっていることは伝播波の波長が短くなっていることに相当し、この位相差から伝播速度を推定すると3 Hz で約400 m/sec, 10 Hz で約100 m/secとなる。周波数の増加と共に伝播速度は遅くなっており分散性の傾向がみられる。振幅は地盤と台基礎で形成される振動系の固有振動と

推定される6 Hzで全般的に大きくなっている。また台基礎から離れるほど振幅が大きくなる傾向があり、埋戻土付近の振幅は台基礎の約3倍程度の値となっている。

Fig. 10-1~2はY測線上50 m地点のボーリング孔で測定した正弦波加振による周波数特性である。Fig. 10-1は100 gal加振、Fig. 10-2は300 gal加振の場合である。地中の測点においても測線方向成分をL-comp.、測線直角方向をT-comp.と表わしている。地表での振幅値は、加振方向成分が全般的にみて大きく出ており振動数によっては上下成分の数倍になっている。ただ、常に加振方向の振動が最大とは限らず、振動数によっては上下成分の方が大きい場合もある。(たとえば10 Hz近傍など)。また加振直角方向の振動(T-comp.)はほとんど生じないだろうと思われたが、5 Hz~10 Hzの範囲で加振方向成分と同程度の値になっている。台基礎-地盤系の固有振動数と考えられる6 Hzでは、加振直角方向成分にピークが現われ、振幅値も加振方向成分とほとんど同じである。

地中での記録をみると、深さによる減衰は高振動数になる程大きい。しかし上下方向成分の場合はやや異なり、台基礎-地盤系の固有振動数付近では地表より地中GL-10 mの方が大きい振幅値を示している。加振直角方向成分は地中ではほとんど現われていない。

100 gal加振と300 gal加振の周波数特性は地表、地中ともほぼ同じ傾向になっている。

3.2 地表3方向での地盤振動

台基礎中央から距離100 mの地点でX測線($\theta = 90^\circ$)、Y測線($\theta = 0^\circ$)およびその中間 $\theta = 45^\circ$ の方向での地盤振動各3成分を比較するために同時測定を行った。ピックアップの配置をFig. 11に示す。

Fig. 12は振動台をステップ加振した場合の地表面での振動波形である。このステップ加振は振動台を周期の長い矩形波で加振したものであり、振動台が+側に動く場合と-側に動く場合で台基礎に作用する加振力は対称になっている。以下の図では+側加振をA、-側加振をBとして区別している。

各測点とも加振方向成分がやや卓越し、台基礎と同程度の変位になっているが、Y測線および $\theta = 45^\circ$ の測線上では加振直角方向の振動も加振方向成分と同程度の値になっているのが注目される。上下変位は3測点ともほぼ同程度で水平動の1/2以下といえる。初動到達時刻は3測点3成分ともほぼ同じであるが加振方向成分がやや早くなっている。これに対しピーク変位の生ずる時刻は振動成分によりかなりの差があり、また測点により異なっている。この測定結果からみると振動台加振時に周辺地盤に伝わる振動は、振幅レベルでみる限り特定の指向性をもたないと思われる。なお、+側加振と-側加振では各測点、各振動成分とも波形および振幅がほぼ完全に対称となっている。

Fig. 13は正弦波加振を行ったときの地表面で観測された変位振幅と位相(基本波成分)

から水平面内 (X - Y) および垂直面内 (Y - Z) でのオービットを計算して示したものである。一般的に加振方向成分が卓越していることがわかるが、振動数によっては加振直角方向成分および上下成分も加振方向成分と同程度の値になっている。また図の楕円の形状、すなわち各振動成分間の位相差と振動数の関係はかなり不規則である。

Fig. 14-1 ~ 2 は正弦波加振時の周波数特性を各測点、各成分別に示したものである。100 gal 加振と300 gal 加振の結果には顕著な差異はみられない。この図から、正弦波加振の場合も $\theta = 45^\circ$ の測線上で加振直角方向の振動が大きく現われ、振動数によっては $\theta = 0^\circ$ または $\theta = 90^\circ$ の測線上より大きくなっていることがわかる。なお、Fig. 14-1 の X-comp. , $\theta = 45^\circ$ の結果で2~7 Hz が欠落しているのは、この範囲で波形の歪が大きくなりデータの読みとりを行わなかったためである。

3.3 加振直角方向測線での地盤振動

Fig. 15 に測点の配置を示す。この測線では250 m地点でも若干の測定を行ったがここでは割愛した。

Fig. 16 ~ 17 はステップ加振を行ったときの伝播波形であり加振方向成分を示している。この測線では T-comp. が卓越し、+側加振と-側加振で地盤の振動波形は対称となっている。この測線では、測定器の都合により Fig. 16 (50 m ~ 115 m) と Fig. 17 (100 m ~ 200 m) で測定時期がかなり異なることになった。そのためと加振入力レベルの違いのため、Fig. 16 と Fig. 17 の波形に若干の相異がみられる。なお、Fig. 17 の台基礎の波形は上面で測定したもので HL とは異なる位置での記録である。台基礎は約9 Hz の減衰振動をしており、伝播する波もこの成分が卓越しているが、遠方に行くにしたがって長周期の成分が大きくなり、表層地盤固有の振動が顕著になるようである。

Fig. 18 は50 m, 75 m および100 m地点での L および V-comp. の伝播波形で、加振力レベルを Fig. 16 の場合の約2倍にして測定したものである。振動源に近い50 m地点の L および V-comp. には初動より後に台基礎のロッキングに伴うと思われる倍調波の振動が目立っているが、振動源から離れた100 m地点ではそれらは減衰し、台基礎と同じ周期ないしそれ以上の長周期成分が卓越してくる。すなわち振動源に近いところの L および V-comp. は台基礎の水平動および回転動から発生した波動の合成されたものと思われる。このため+側加振と-側加振での波形の対称性も100 m地点では明瞭に認められるが、振動源に近い50 m地点では対称になっていない。

Fig. 19-1 は T-comp. について初動およびその後のいくつかのピークについての走時を示す。この際、測定時期の異なる Fig. 16 と Fig. 17 では100 m地点の走時を合わせた。図には、これから求めた地表面におけるみかけの伝播速度を記したが、初動部のみかけの伝播速度は表層の SH波速度 (Fig 2) に比べ非常に大きくなっている。台基礎は GL-8.2 m の第3層に支持されているベタ基礎であり、X方向の側面は切り開かれて地

盤に直接接している部分が少ない。このためX方向へ伝播する主要な波動源は地盤第3層への底面加振であり、この層を伝わる屈折波が考えられるが、その速度を考慮しても表層におけるみかけの伝播速度はかなり高くなっている。Fig. 19-2はL, V-comp. について初動のピークから求めた走時である。

Fig. 20以下は正弦波で加振した場合の結果である。Fig. 20は台加速度をほぼ一定にして周波数を連続的に変えた場合の応答である。これは正規化していない波形であり、各測点における振幅変化のパターンだけを示すものであるが、地盤の応答は距離と周波数に関して非常に敏感であり、ほぼ同程度の起振力に対して周波数による応答の差は数十倍にも達することがわかる。この図をみると、7 Hz程度までは距離にかかわらずほぼ同一の傾向を示し、7 Hz以上では距離によって複雑な挙動を示し、数 m の差で応答に極端な差異を生じているところもある。図示していないが、位相にも同様に距離による波うち現象が強く現われる。これは地表で観測される波動の伝播が垂直な波面をもつ単一の波動でなく、位相速度の異なるいくつかの波の合成過程であることを示していると思われる。

Fig. 21は周波数特性が距離と共に推移する状況を正弦波定常加振の結果から求めたもので測定成分はT-comp.である。以下このような周波数特性の推移を示す図では、縦軸に応答倍率(μ/G)、横軸に周波数を取り、測点ごとにその地点での最大応答倍率で規準化している。振動台による加振力は台基礎-地盤系に作用し、ここから地盤へ伝播していくため、地盤で測定した周波数特性には地盤自体の特性と合わせ台基礎の応答の影響も入っている。この図ではFig. 20の結果から求まる3.5 Hz付近のピークを追加している。このピークは遠方になる程成長し、表層(Fig. 2の第1, 2層)の一次固有振動にほぼ対応している。100 m付近までは5~6 Hzに大きなピークがみられる。これは台基礎-地盤系の固有振動が6 Hz付近にあると推定されること、および台基礎からの加振が地盤第3層に強く作用するため、台基礎付近ではこの層を含む固有振動の影響が大きいためと考えられる。

Fig. 22は距離による振幅の変化を周波数をパラメータとして示したものである。この図では台基礎での測定値(HL)を含めて最大の応答値(μ/G)で規準化してある。台基礎の応答倍率はFig. 8から読みとることができる。5 Hz以上では近傍地盤の振幅が台基礎より大きくなっており、この傾向は周波数が高くなるほど著しい。低周波数(2~3 Hz以下)では台基礎近傍で急速に減衰し、その後は波うち現象を示すが減衰はゆるやかである。周波数がやや高くなると台基礎近傍地盤での振幅分布の波うちが著しくなり、この傾向は周波数が高くなるほど台基礎近傍に移動し、それより遠いところで急速に減衰している。波うちの周期(Fig. 22でピークと次のピークの間の距離)も周波数が高くなると共に短くなっている。これらの点はFig. 20について述べたのと同様に、周波数が高いほど伝播波の波長が短くなり、また台基礎に近いところで波動の合成が行われているためと考えられる。この振幅分布の波うちは単純な波動の合成から予想されるものに比べかなりの乱れを生

じている。これには地表面での凹凸および地中での地盤構造の不均一性などが影響していると考えられる。なお、75m～100m間では農道を横切っているため測定を行わなかったが、図からみてこの間に少なくとも一つの振幅のピークを与える地点があると思われる。

Fig. 23はFig. 22と同じ結果を地盤50m地点を1として両対数グラフで表わしたもので2～8Hzについて示した。

3・4 加振方向測線での地盤振動

Fig. 24にY測線上でのピックアップの配置を示す。測定は100mまでの近距離の場合と600mまでの遠距離の場合について行い、測定器数の制限で各振動成分別に測定した。

Fig. 25～29にステップ加振を行ったときの伝播波形を示す。3成分のうちではL-comp.が最も大きい振幅を示している。振動台の十側加振と一側加振ではX測線のときと同様に各測点、各成分の波形がほぼ対称になっており、600m地点においてもこの対称性がみられる。50m地点のL-comp.は台基礎とほぼ同程度の振幅になっている。各成分とも距離と共に減衰しており、遠距離の場合の測定結果から最大変位と距離の関係を片対数グラフに示すと各成分ともFig. 30のように一定の帯状領域の中に入っている。このことは、この範囲での波動の減衰が粘性減衰の形で大略近似できることを示している。帯状領域になっているのは幾何学的な広がりによる減衰および地表面の不均一性の影響とみられる。波形中の最大変位を示す部分の周期は各測点とも6Hz前後であるが遠距離の地点ではやや低くなっている。Fig. 25～26の初動付近のピークから50m～90m間について走時を求めたものがFig. 31である。L-comp.とV-comp.は60～65m付近を除いてほぼ同じ速度335m/sec程度で伝播している。100m～600m間ではFig. 26～28にみられるように波形の変形が著しく、その伝播を読みとることが難しいが、初動以後最初に大きな振幅を与える波群のみかけの伝播速度は各成分とも400～500m/sec程度の値になっている。波形中の最大変位を与える波の到達時刻はかなり不規則であり、分散性および地表面の不均一性の影響が著しい。

Fig. 32以下は正弦波加振を行った場合の記録である。Fig. 32-1～2に台基礎から90m地点までの周波数特性の推移を示す。加振方向振動成分はX測線と同様に台基礎から離れるにつれて3.5Hz付近の成分が卓越してくるが、上下成分では遠方で5Hz付近の成分が顕著に現われている。いずれの成分とも台基礎に近いところでは12Hz付近のかなり顕著なピークをもっている。これは台基礎にも若干現われており、台基礎一近傍地盤系の振動によると思われるが、加振力のレベルが異なる場合や測定時期の異なるケースではこのピークがあまり顕著に現われない場合もあった。100m～600mについても同様に周波数特性を測定し、上に述べた傾向の他に、上下動においても3.5Hz付近の成分が相対的に大きくなるなどの傾向がみられたが、全般的に不規則性が強くなり、特定の傾向が認められないのでここでは割愛した。

Fig. 33-1~2は台基礎近傍地盤(50m~90m)の振幅値(応答倍率)の減衰を周波数別に示したもので各周波数別に台基礎を含めた最大振幅で規準化してある。なお台基礎の応答倍率はFig. 8から読みとることができる。4Hz以上では地盤が台基礎より大きい振幅となり、また8Hz以上では50m以遠に振幅の最大値が現われ減衰状況も単純ではない。

Fig. 34-1~13はY測線全体についての振幅減衰を50m地点の振幅を1として両対数グラフに表わしたものである。50m地点の応答倍率はFig. 10から読みとることができる。500m地点では50m地点に対し0.008~0.1倍の振幅値を示し周波数によって大きなばらつきを示す。このように相当離れた二つの地点で比較すると振動源に近い地点の振幅が常に大きい。比較する二つの測点が近くなると、必ずしも振動源に近い方が大きい振幅値を示すとは限らないことが読みとれる。

Fig. 34のような減衰傾向は、距離による減衰、粘性減衰および地盤の層構造を含めた地盤の振動モードを周波数別に表わしているものとみることができる。低周波数では距離により一様に減衰するモードであるが、周波数がやや高くなると乱れの大きい波うちを示しながら全体として減衰するモードとなる。低周波数では伝播波の波長が長く地盤構造の小さな不均一性は地盤振動のモードに影響を与えないが、周波数が高くなり波長が短くなると地盤条件のわずかな乱れ(地盤層構造の不均一性、地表の起伏、地中埋設物、溝など)が地盤振動に大きな影響を与えることが考えられる。周波数が高い場合でも地盤が均一な状態であればほぼ規則的な減衰モードを示すと思われ、この意味で本測定の場合は地盤の不均一性の影響を強く受けているものと思われる。

なお、振動台建設時に実施された爆破による弾性波探査においても地盤の減衰特性が測定されている。それによると、地盤の減衰特性を表面波で考えて $A = A_0 X^{-\frac{1}{2}} e^{-kx}$ (A_0 および A : 距離 X だけ離れた二地点での振幅, k : 減衰係数) で表わしたときの k の値として $k = 0.01 \sim 0.03$ となっている。本測定で得た Y 測線での結果にこの式をあてはめると高い周波数では $k = 0.01$ でほぼ近似できるが、全般的にみて $k < 0.01$ となり、弾性波探査の場合より減衰はかなり小さくなっている。このときの弾性波探査では周波数約 20 Hz の表面波について減衰を調べていること、また同探査の結果にもとづいて指摘されているように、測線の方向によって減衰特性に相違がある(これは地盤構造が平面的に一様でないためと思われる)ためにこの差異を生じたものと考えられる。

一方、SH大砲による地盤振動の減衰に関する実測も多い。その一つとして高橋末雄(1969)が実測例を述べているが、河川敷の軟弱地盤上での測定により、T-comp. について $k = 0.016$ 程度の値が得られている。この値が強度の軟弱地盤上での測定値であることを考えると、われわれの測定から得られる $k < 0.01$ という評価はほぼ妥当と思われる。すなわち細部については地盤の不均一性、地表構造物などの影響が大きい

いと考えられるが全体的な減衰傾向についていえば通常よく使われる表面波を仮定した粘性減衰による評価が本測定の場合にも適用しうることを示している。

以上の測定結果にみられるように、本振動台の場合は台基礎および地盤の振動は設計時点の予想より上まわっており、また近傍地盤での振動の増幅もかなり著しい。これらの点は今後の大型振動台建設に際しても留意すべき点と考えられる。

謝 辞

本測定を実施するにあたり、日本大学理工学部教授田治見宏博士の御助言をいただいた。不足した測定器は東急建設技術研究所、日本大学金井研究室および同田治見研究室からお借りした。東急建設の小島英治氏、林田敏雄氏、元日大大学院生中平守氏には測定作業を手伝っていただいた。また本測定の計画、実施にあたって当センター第3研究部木下武雄部長（当時大型実験研究部長）ならびに稲葉誠一氏（当時耐震実験室長）より御助言をいただいた。ここに記して関係諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 応用地質調査事務所（1968）：大型耐震実験装置建設予定地地盤地質調査報告書。
高橋末雄（1969）：SH波発生装置による地盤振動の観測，防災科学技術総合研究報告，第19号。
田治見，箕輪，小川（1975）：Dynamic behaviors of a large scale shaking table foundation，第4回日本地震工学シンポジウム論文集。

（1977年 7月18日 原稿受理）



Photo.1 View of the experimental site to the direction of the X-line

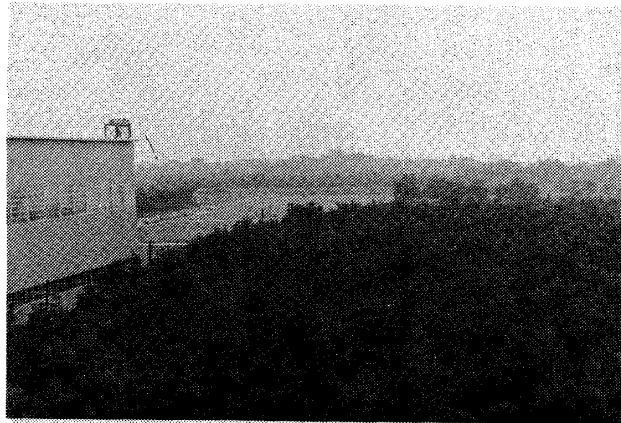


Photo.2 View of experimental site to the direction of the Y-line

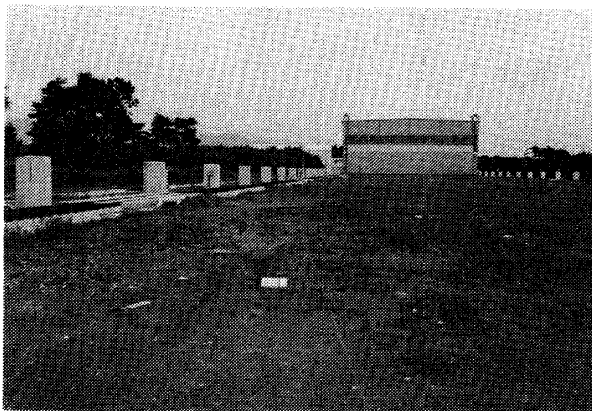


Photo.3 Distant view of test room building from 300m-point on the Y-line



Photo.4 View of pick-ups and their base

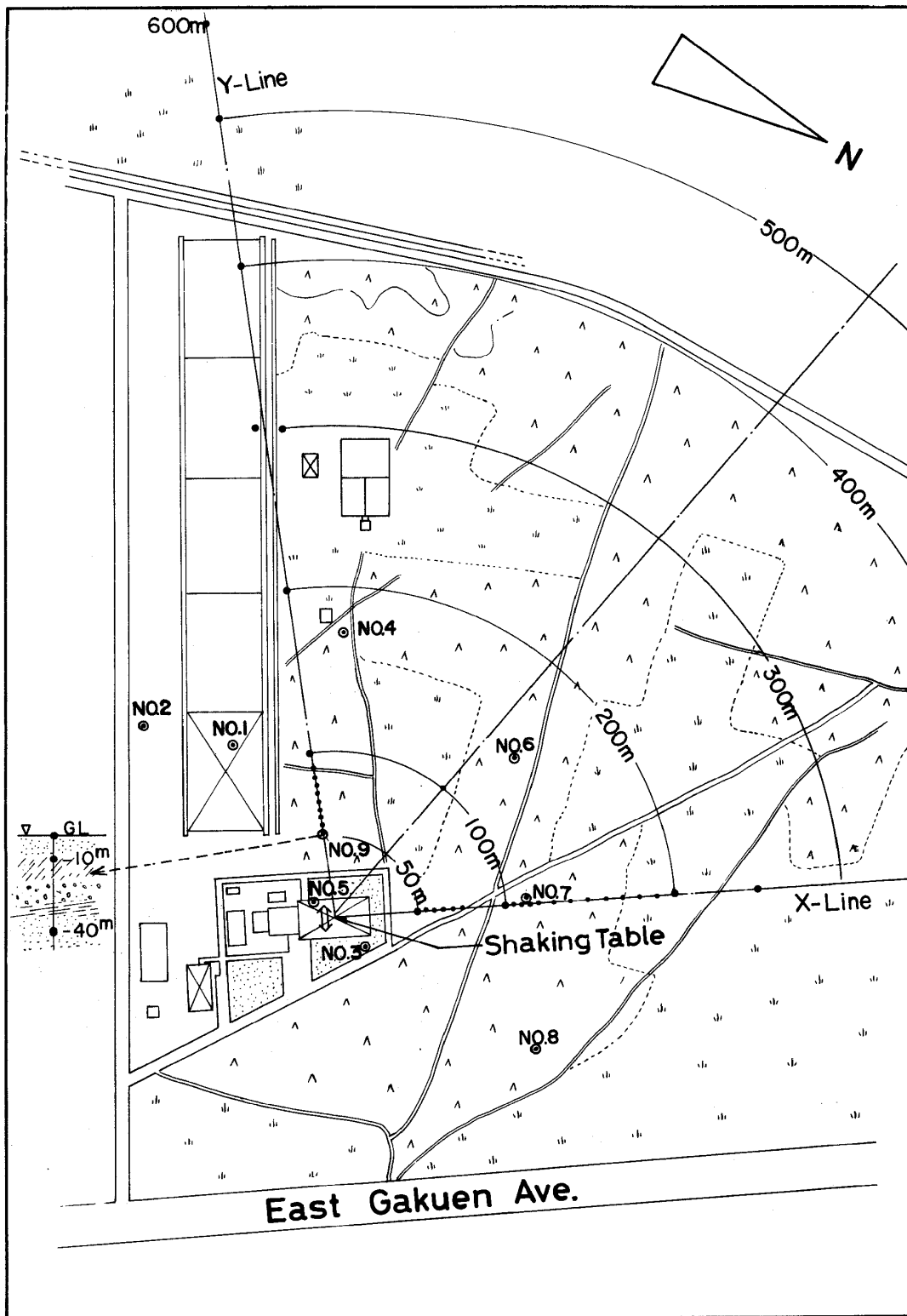


Fig.1 Experimental site

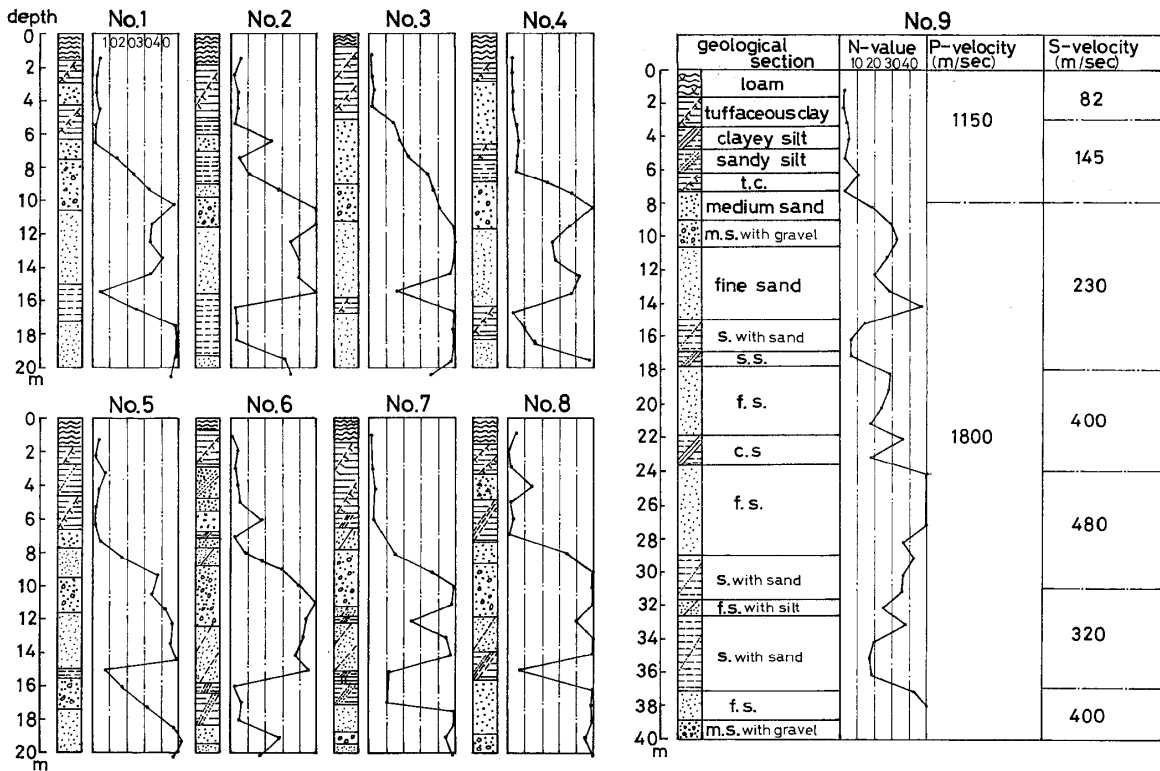


Fig.2.1 Ground survey at experimental site

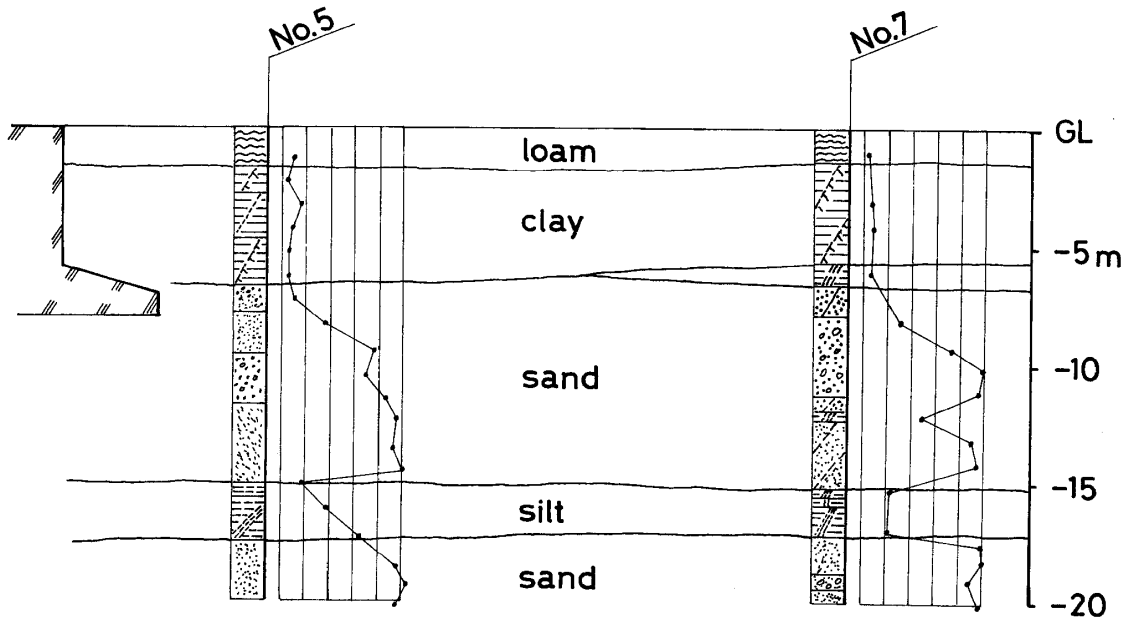


Fig.2.2 Geological view of X-measurement line

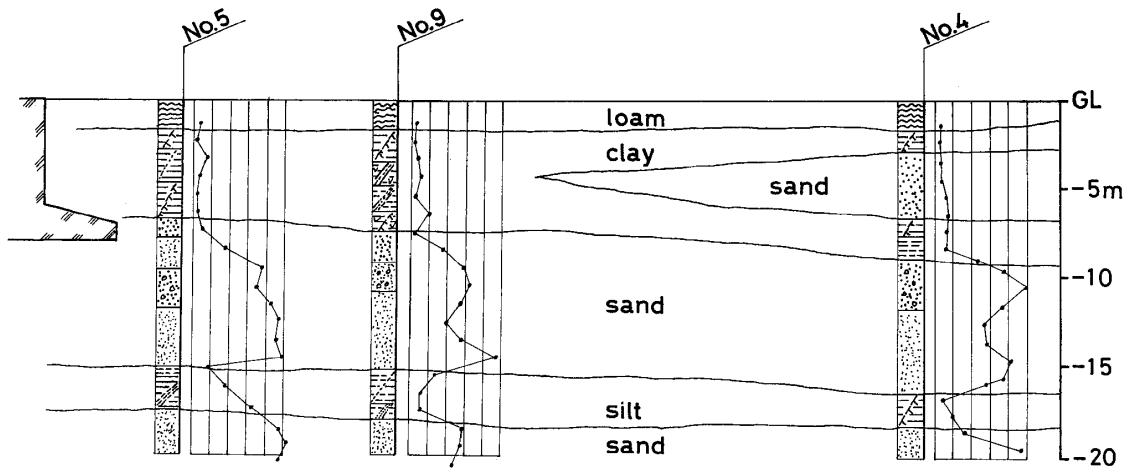


Fig.2•3 Geological view of Y-measurement line

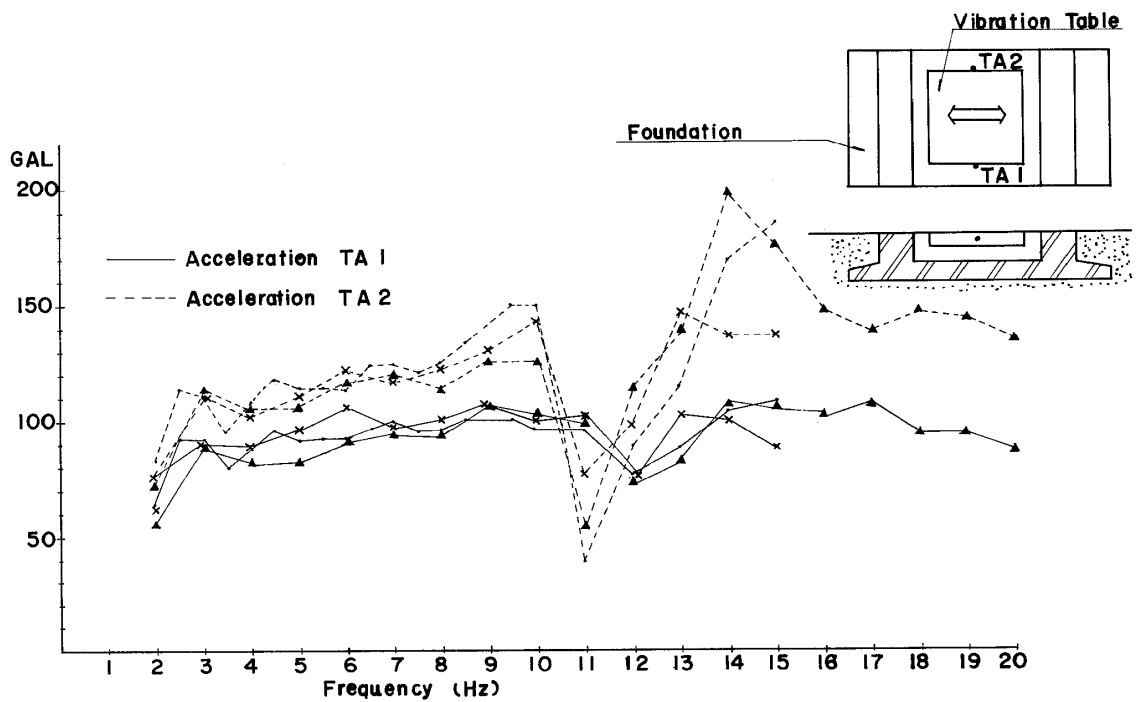


Fig.3 Accelerations on both sides of the shaking table for some measurement cases

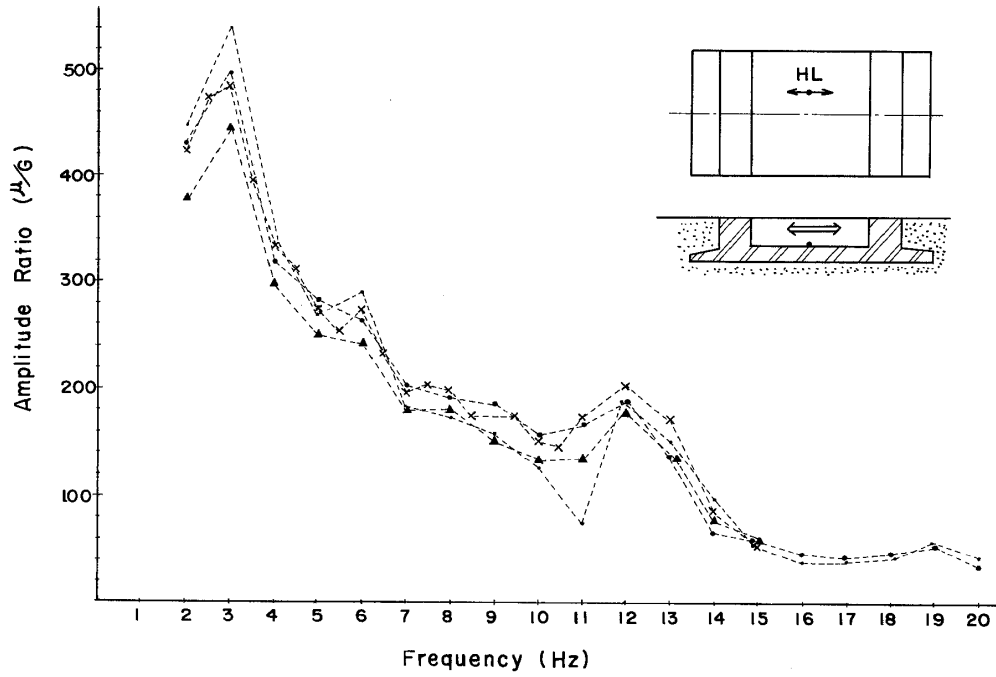


Fig.4 Comparison of frequency responses of the foundation for some measurement cases

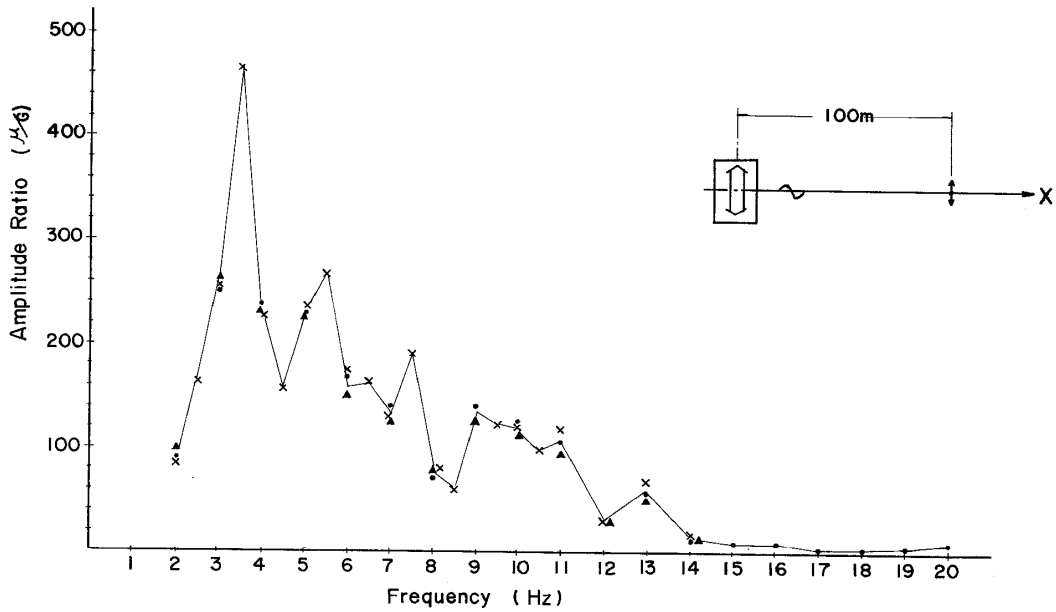


Fig.5 Comparison of frequency responses of the ground for some measurement cases

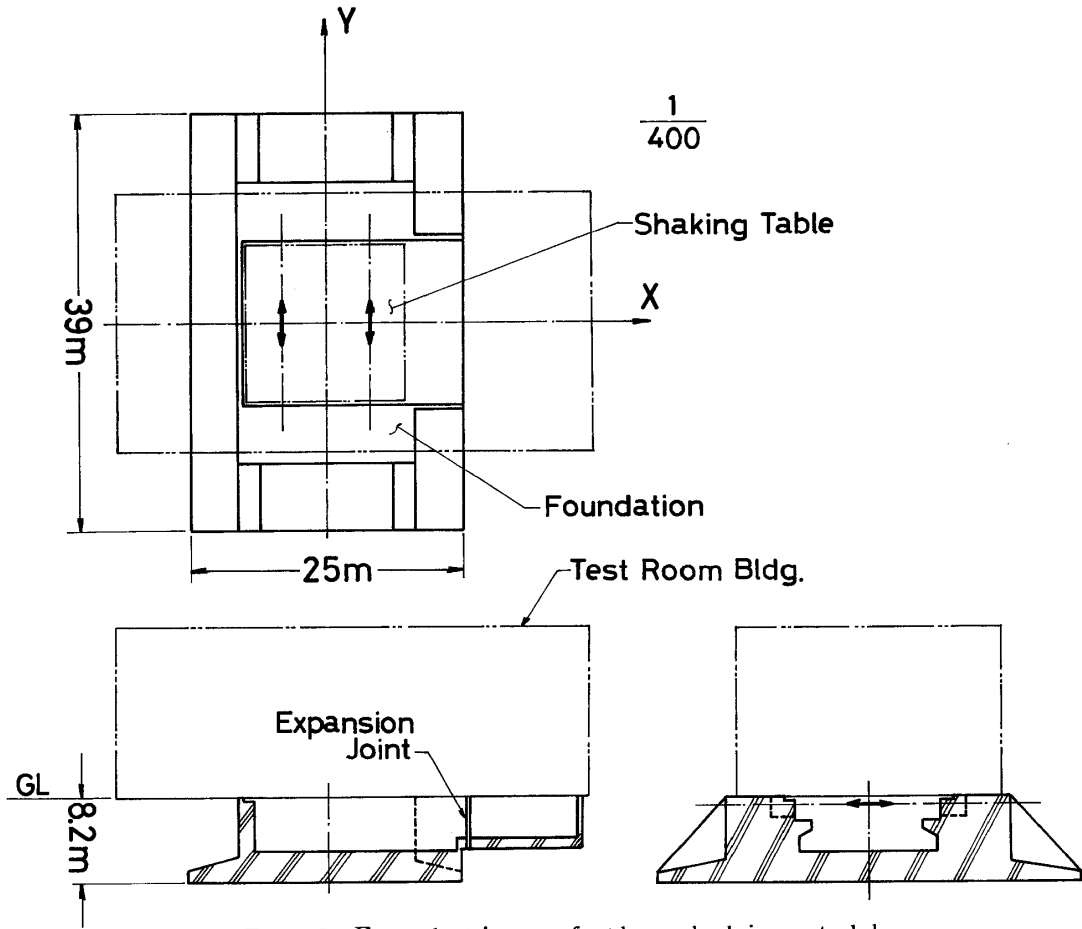


Fig. 6 Foundation of the shaking table

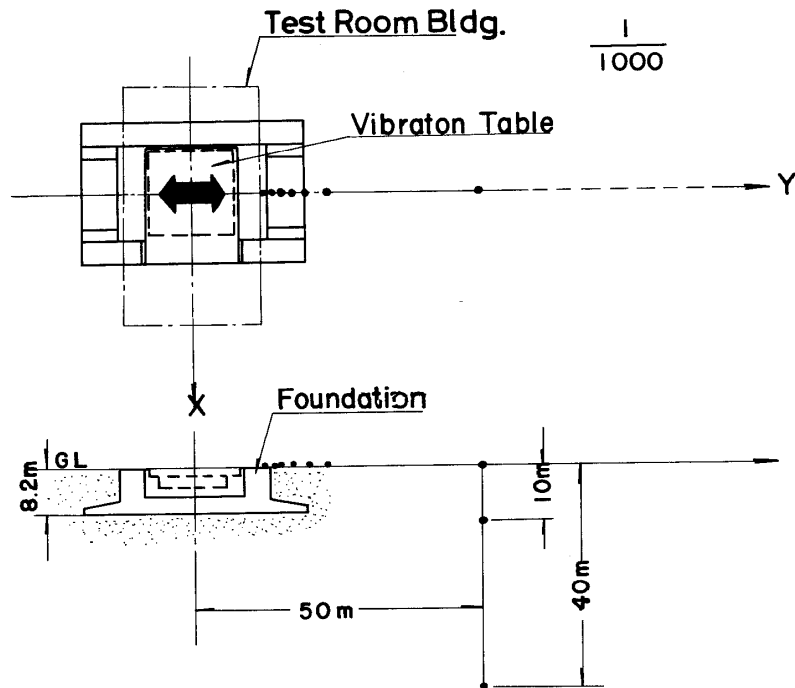


Fig. 7 Measurement points of the ground near the foundation

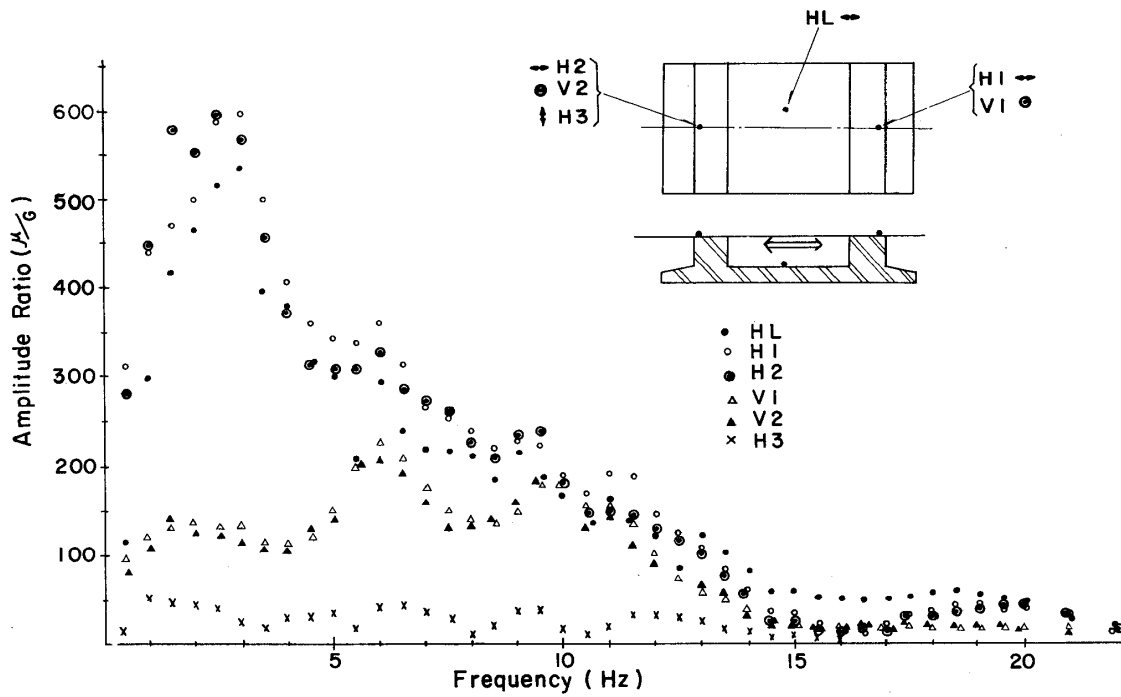


Fig.8 Frequency response of the foundation

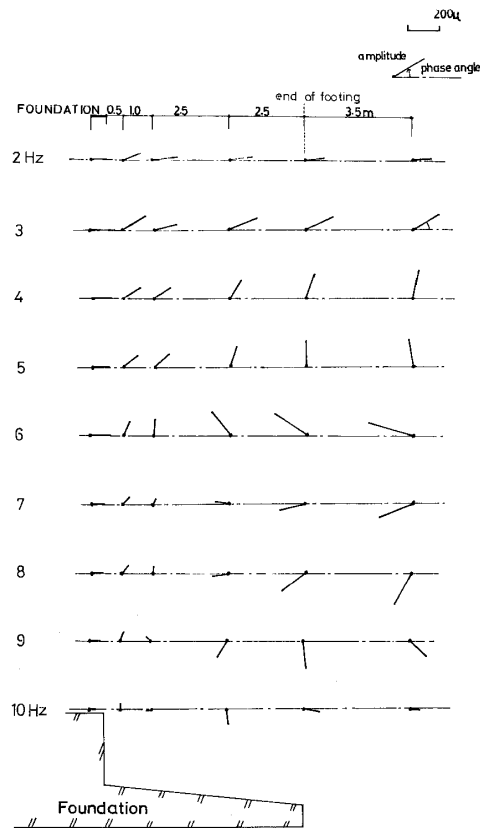


Fig.9 Ground vibrations (L-comp.) on the back-fill soil

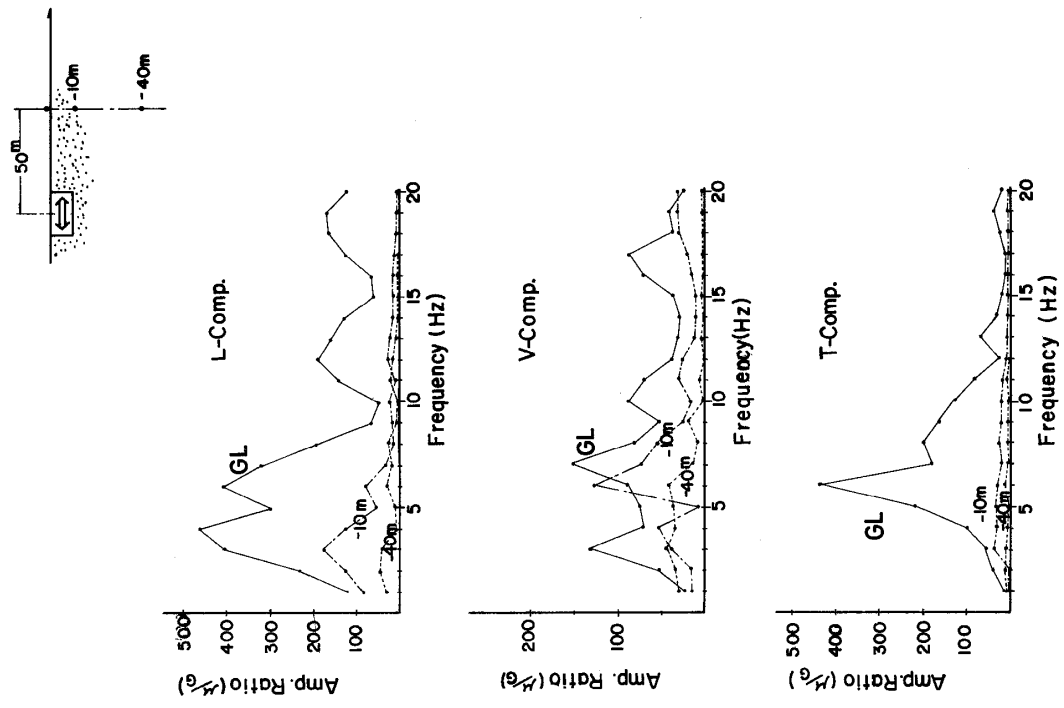


Fig. 10.2 Ground vibrations of GL-0m, -10m and -40m near the foundation (table acceleration: 300gal)

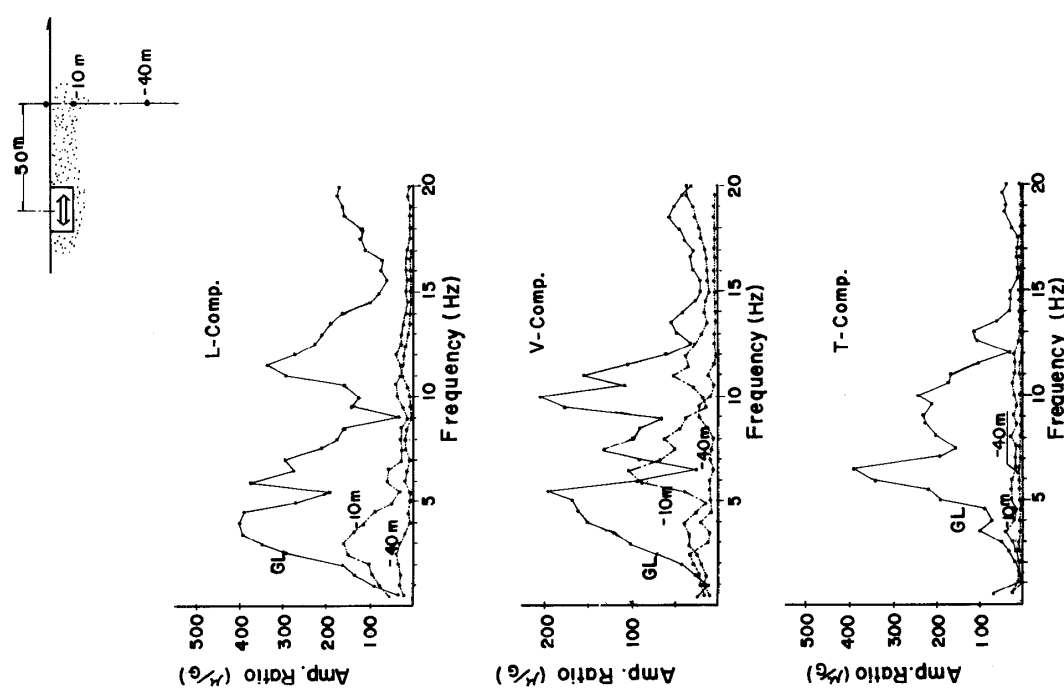


Fig. 10.1 Ground vibrations of GL-0m, -10m and -40m near the foundation (table acceleration: 100gal)

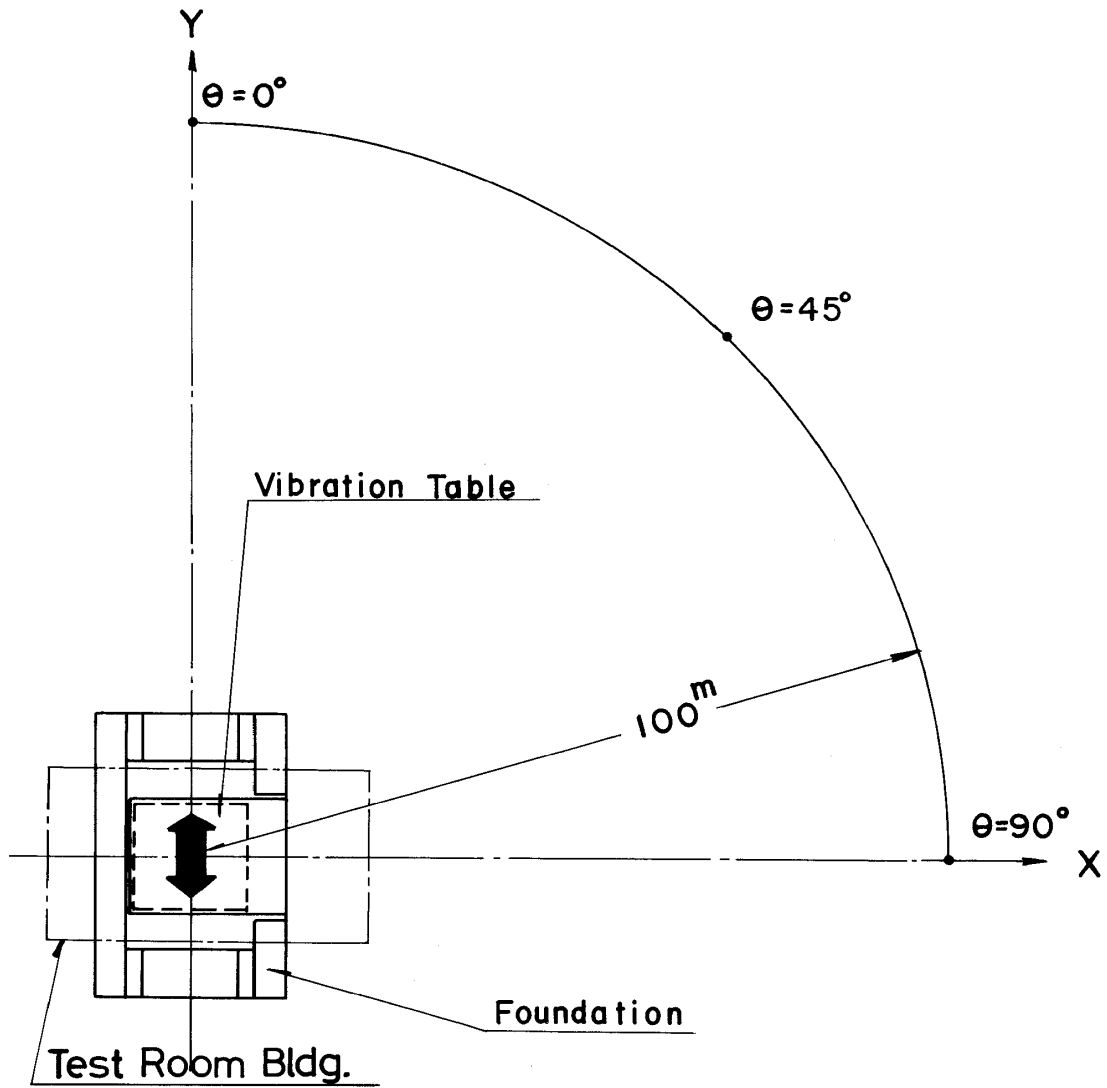
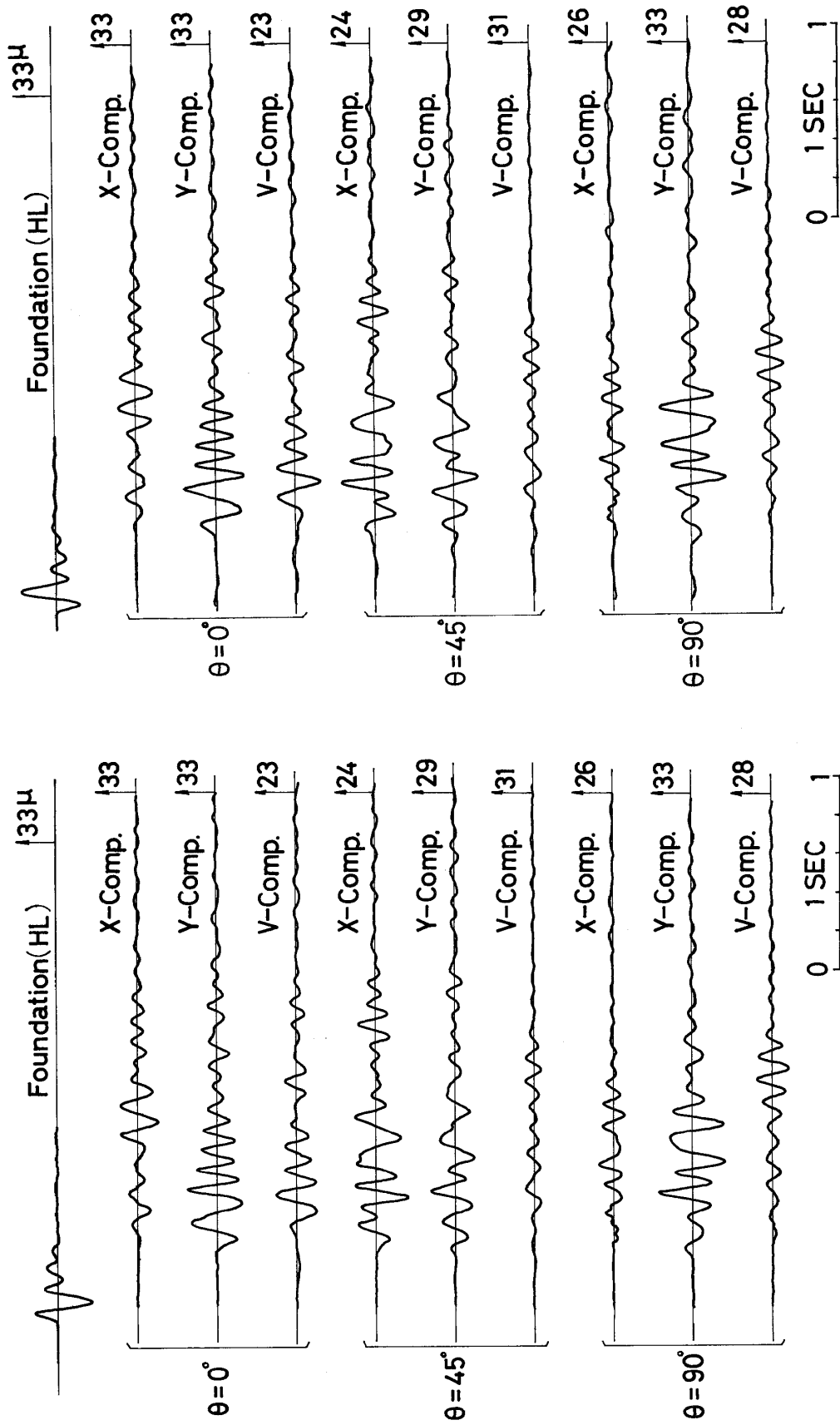


Fig.11 Measurement points on the three different directions



(B)

(A)

Fig.12 Ground vibrations on the three directions for shock wave excitation

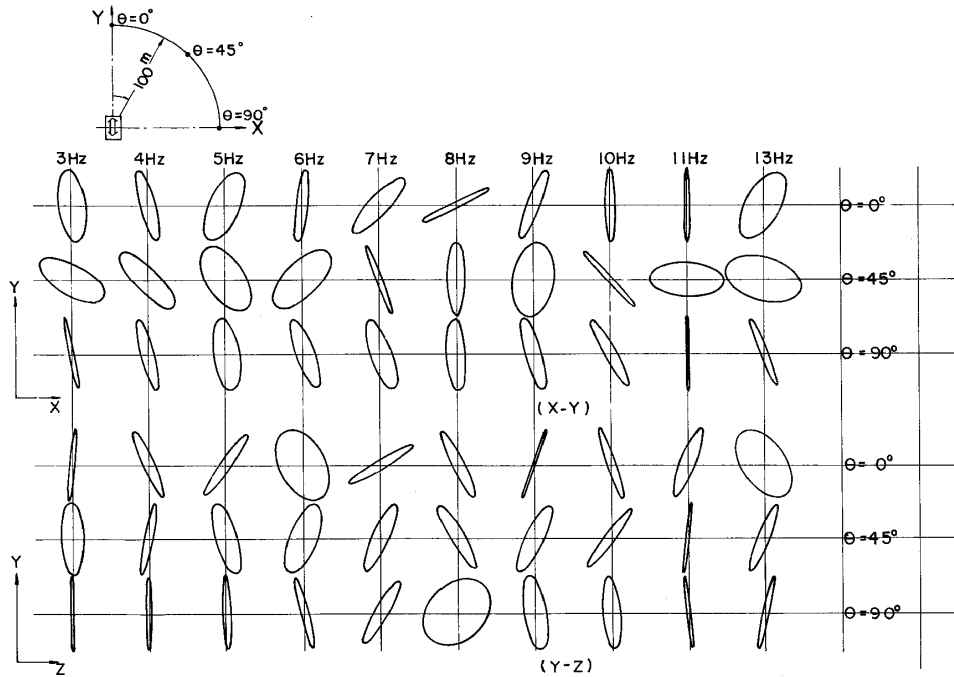


Fig.13 Ground orbits on the three directions for sinusoidal excitation

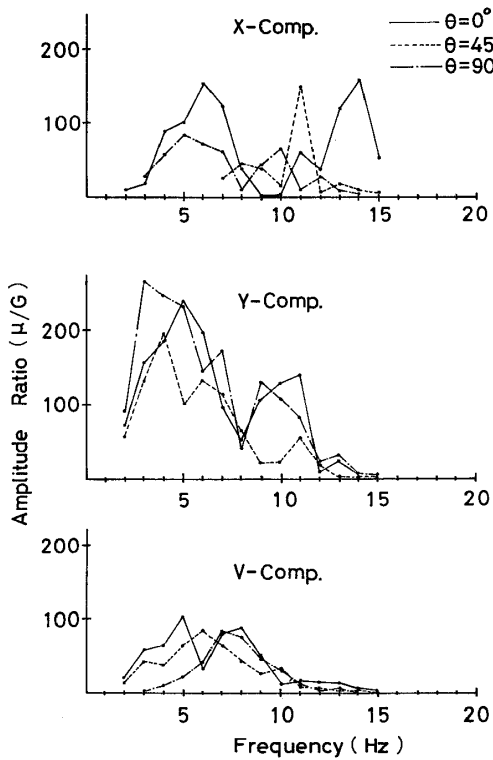


Fig.14-1 Frequency responses on the three directions for sinusoidal excitation (table acceleration:100gal)

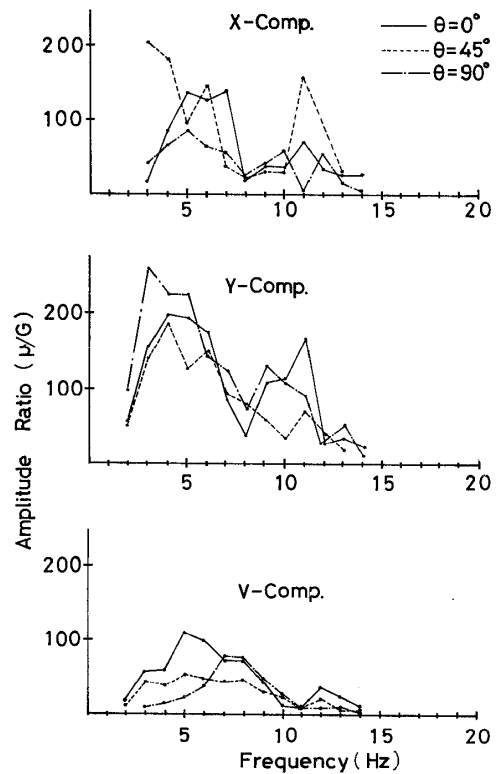


Fig.14-2 Frequency responses on the three directions for sinusoidal excitation (table acceleration:300gal)

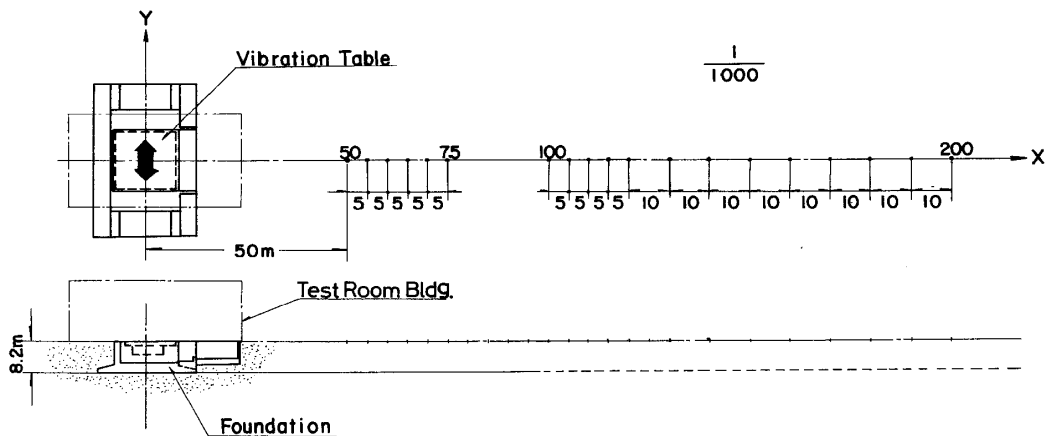


Fig.15 Measurement points on the X-line

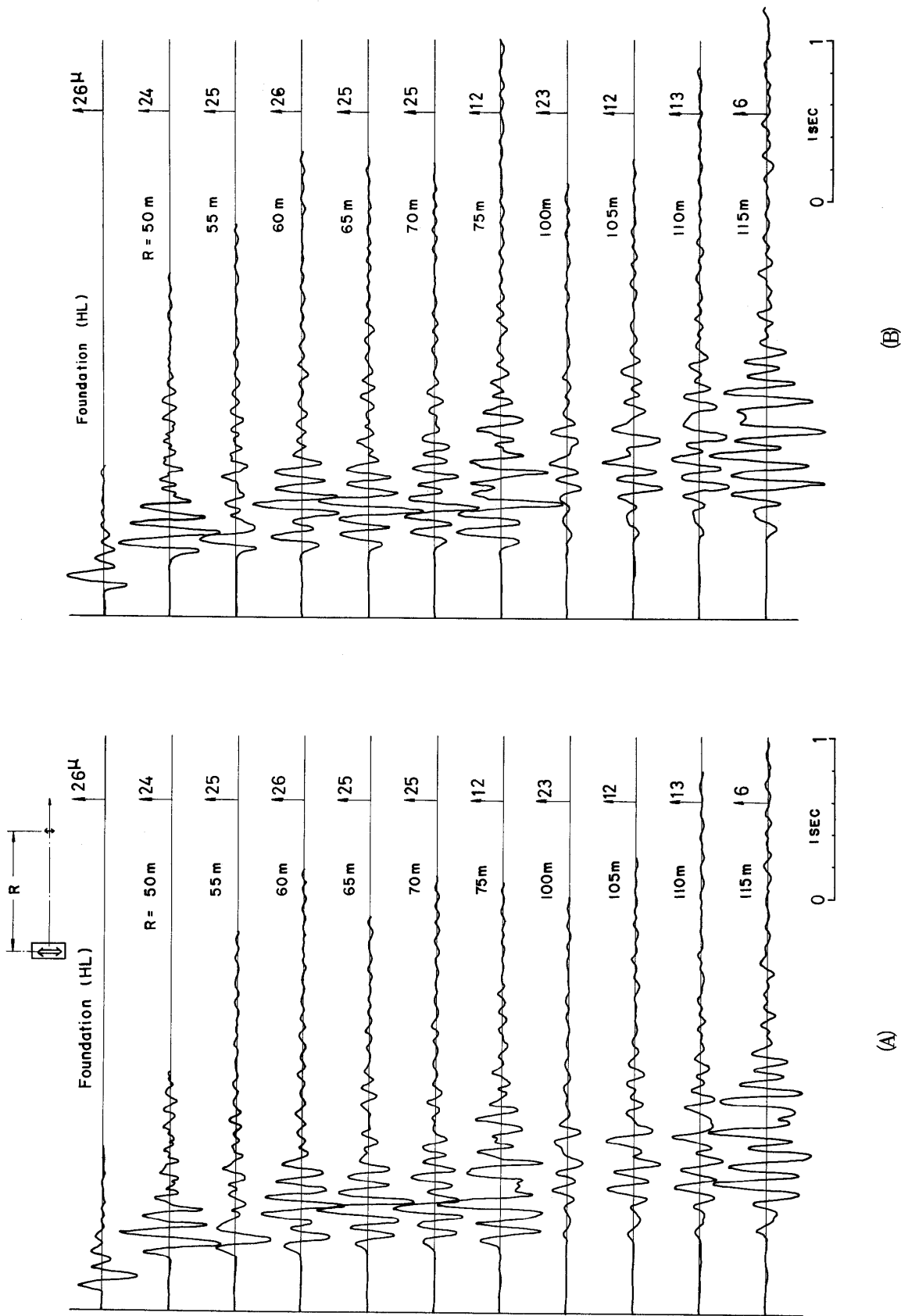


Fig. 16 Ground vibrations (T-comp.) on the X-line for shock wave excitation (50m-115m)

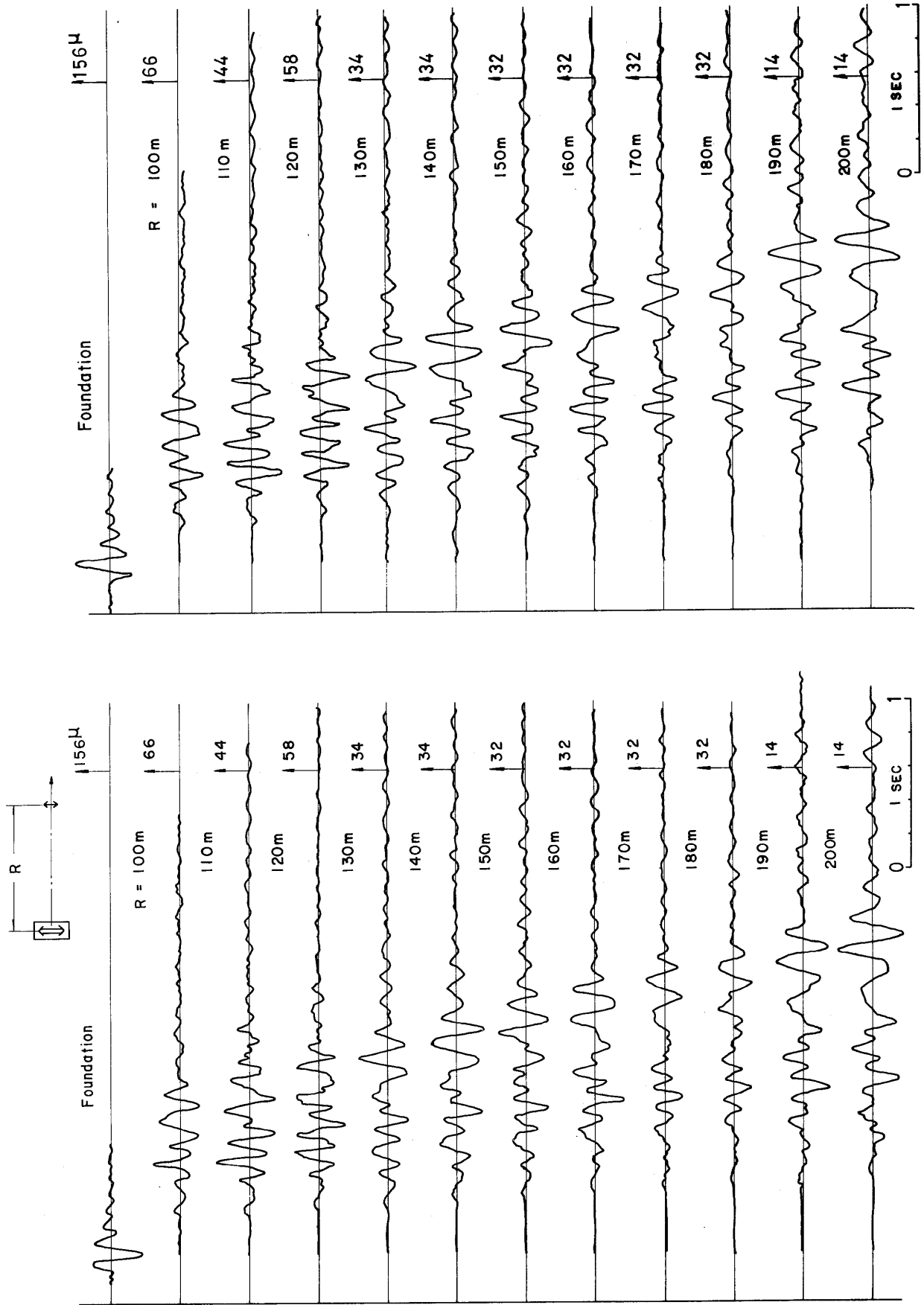
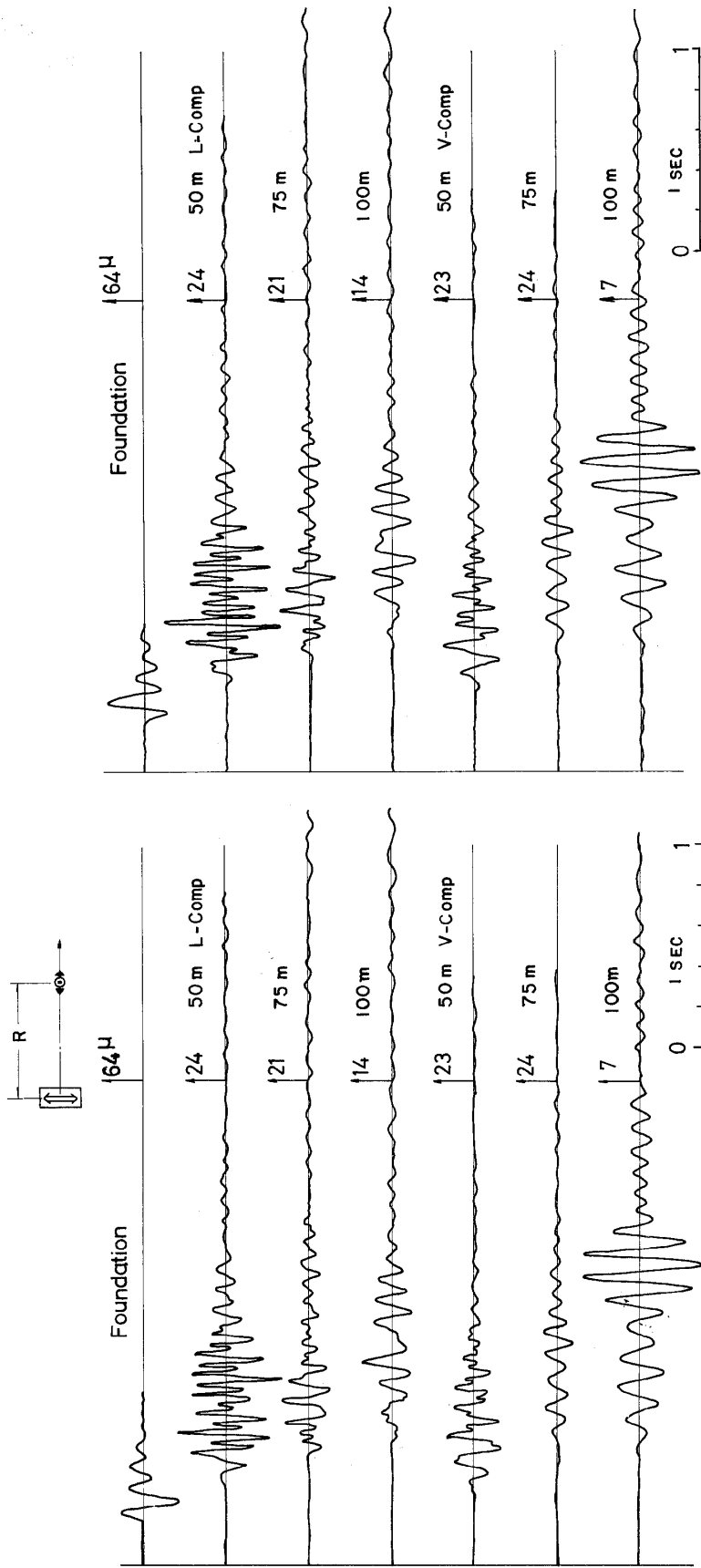


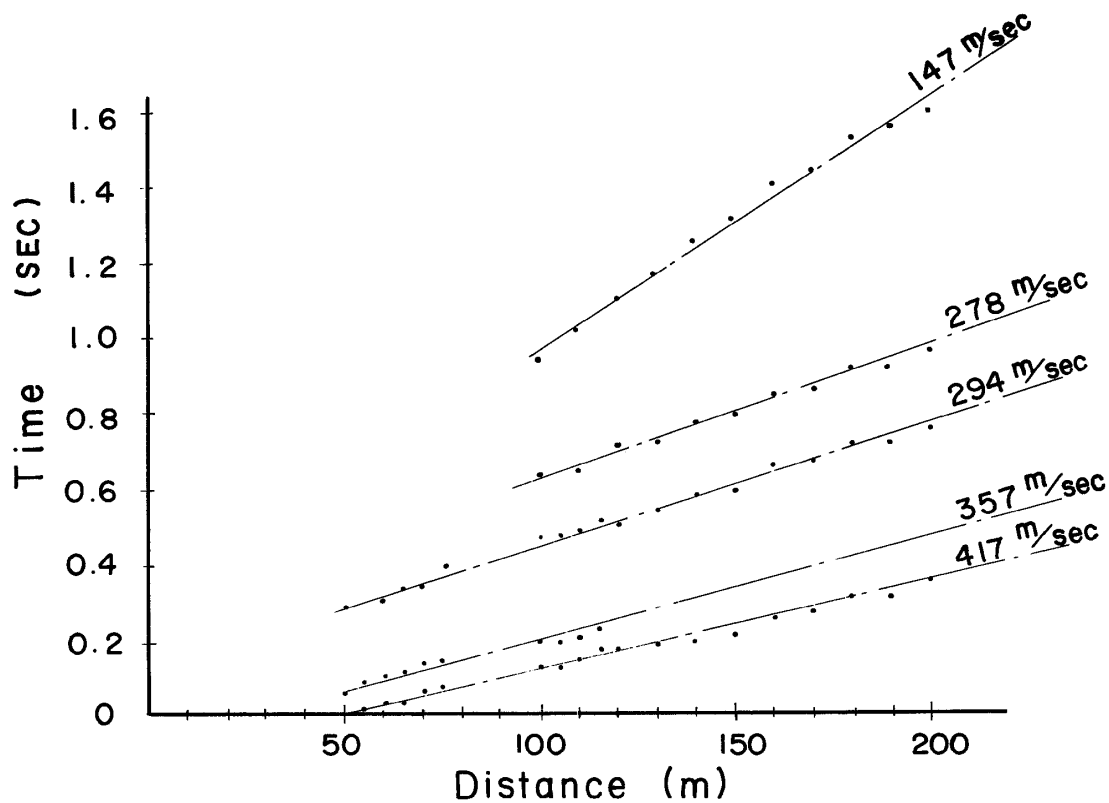
Fig.17 Ground vibrations (T-comp.) on the X-line for shock wave excitation (100m-200m)



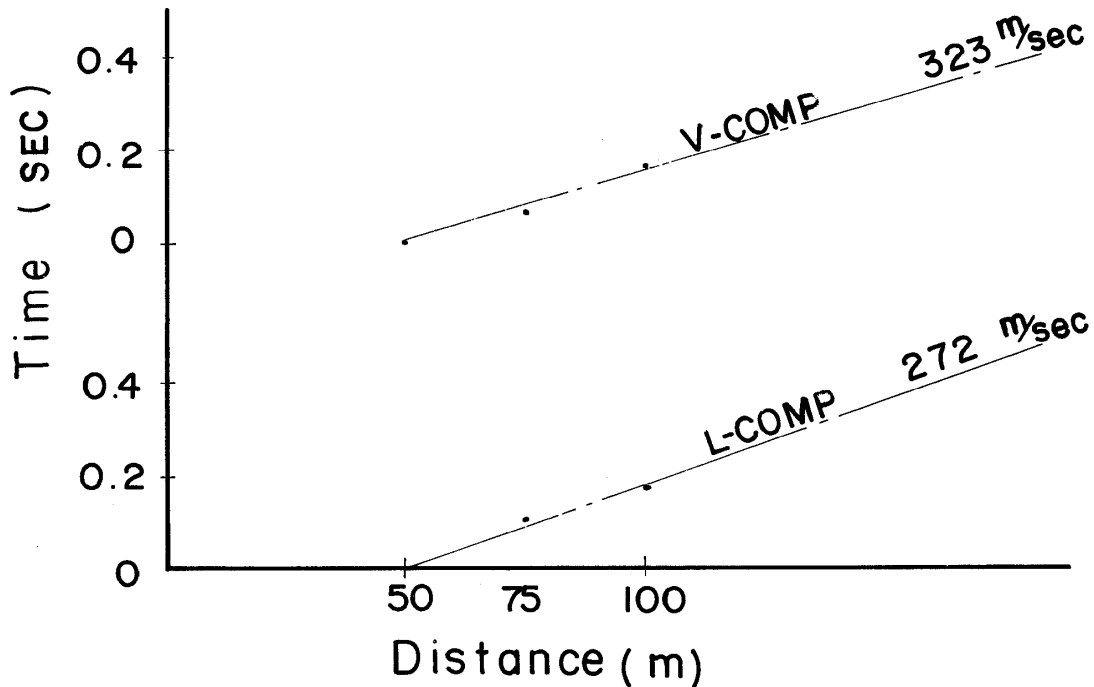
(B)

(A)

Fig.18 Ground vibrations (L and V-comp.) on the X-line for shock wave excitation



(1) L-comp.



(2) L and V-comp.

Fig.19.1~2 Travel time on the X-line

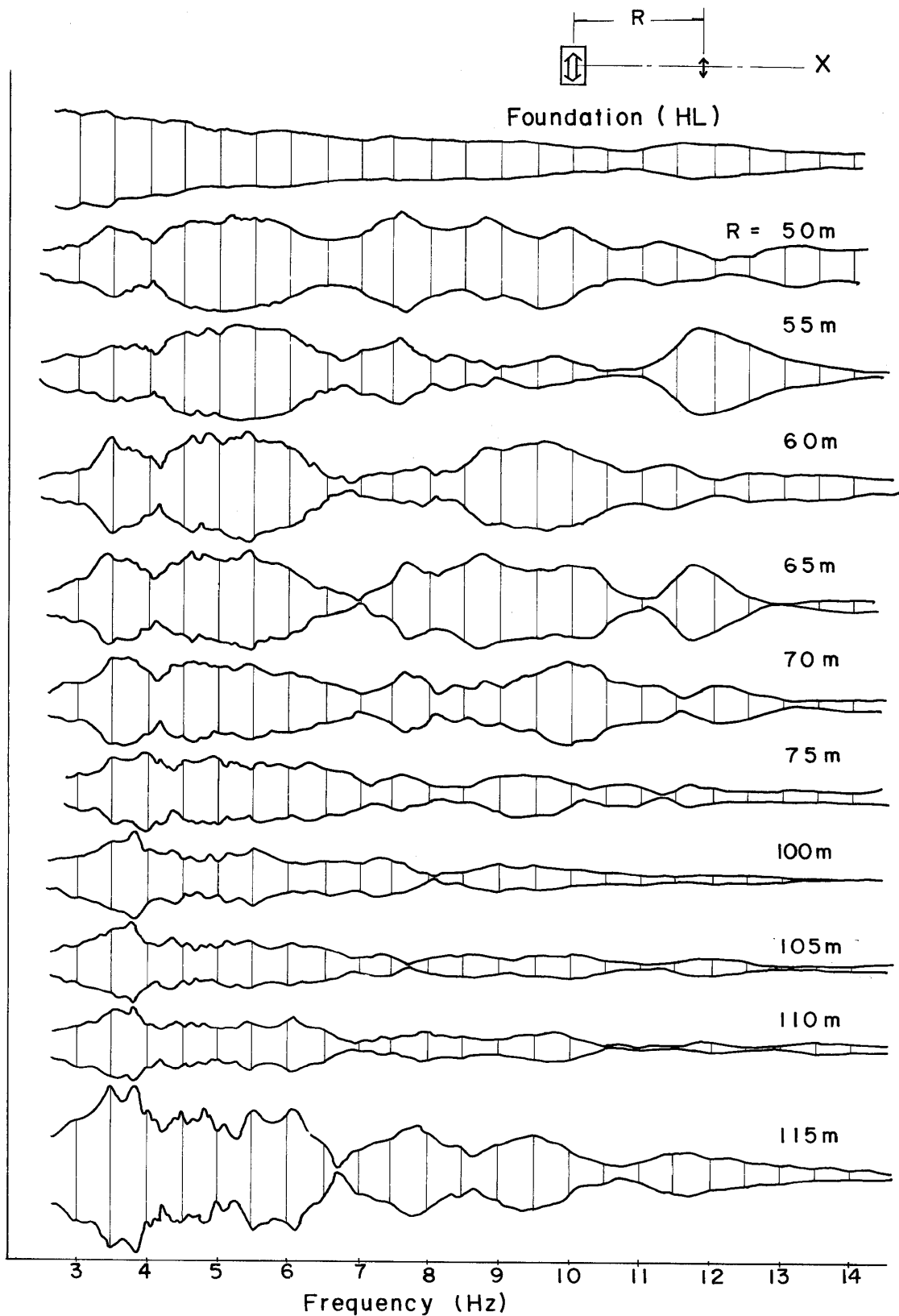


Fig.20 Ground vibrations (T-comp.) on the X-line for sinusoidal excitation with continuously varied frequency

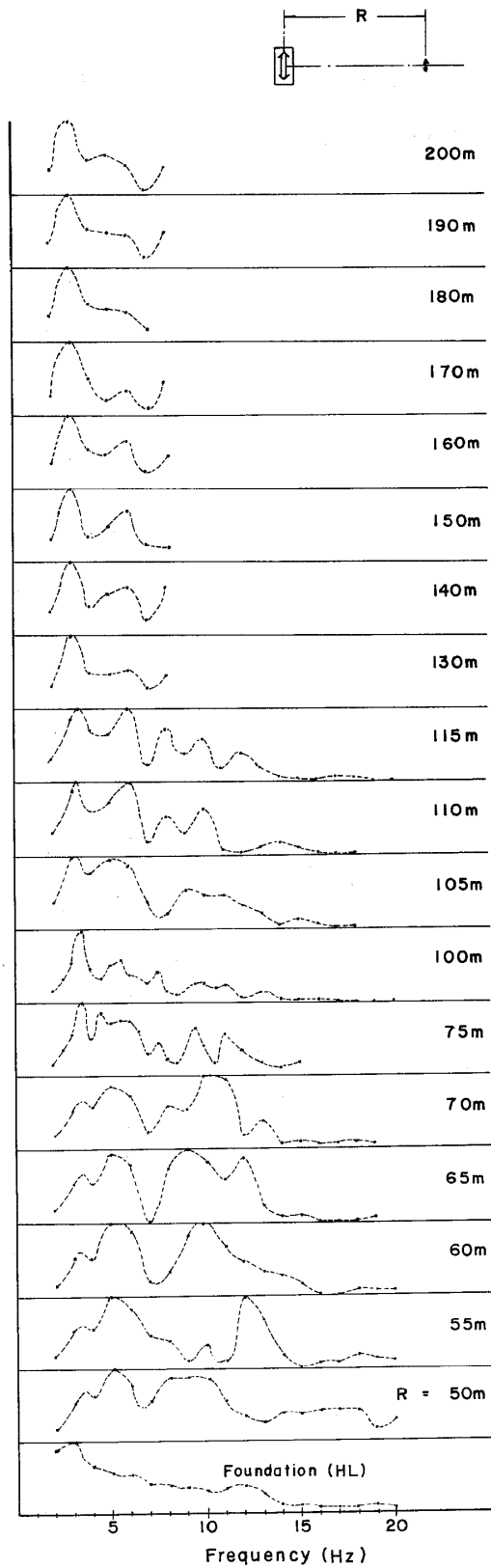


Fig.21 Frequency responses of T-comp. on the X-line dependent on distance

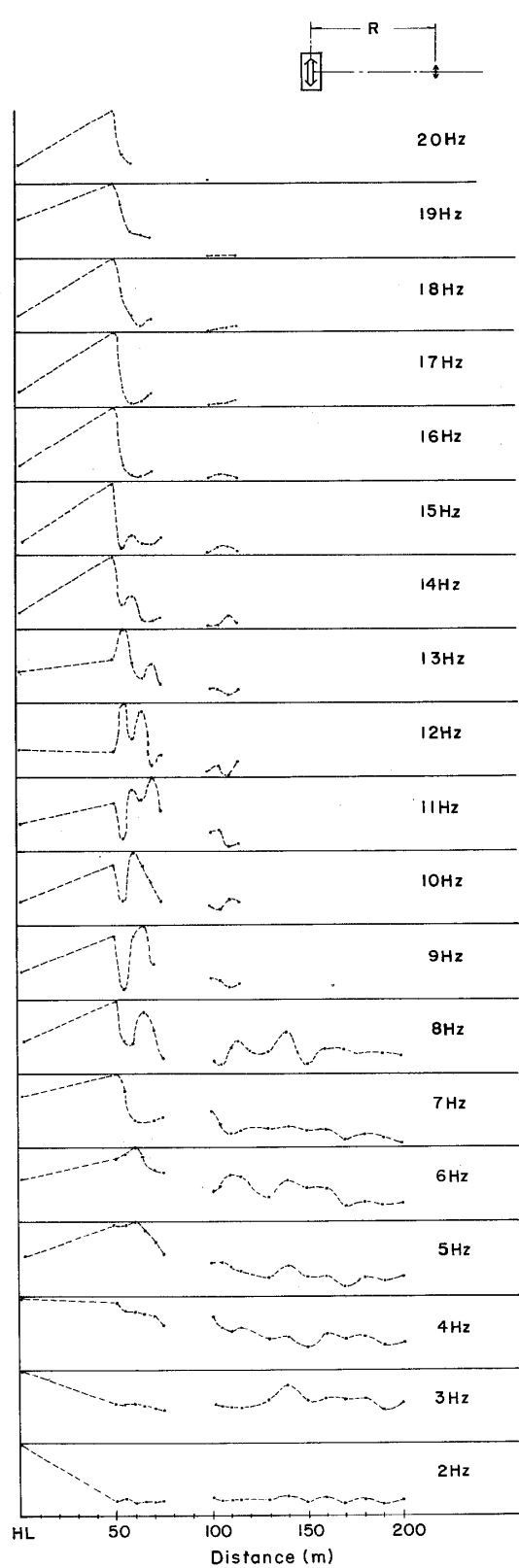


Fig.22 Relations of amplitude of T-comp. on the X-line and distance dependent on frequency

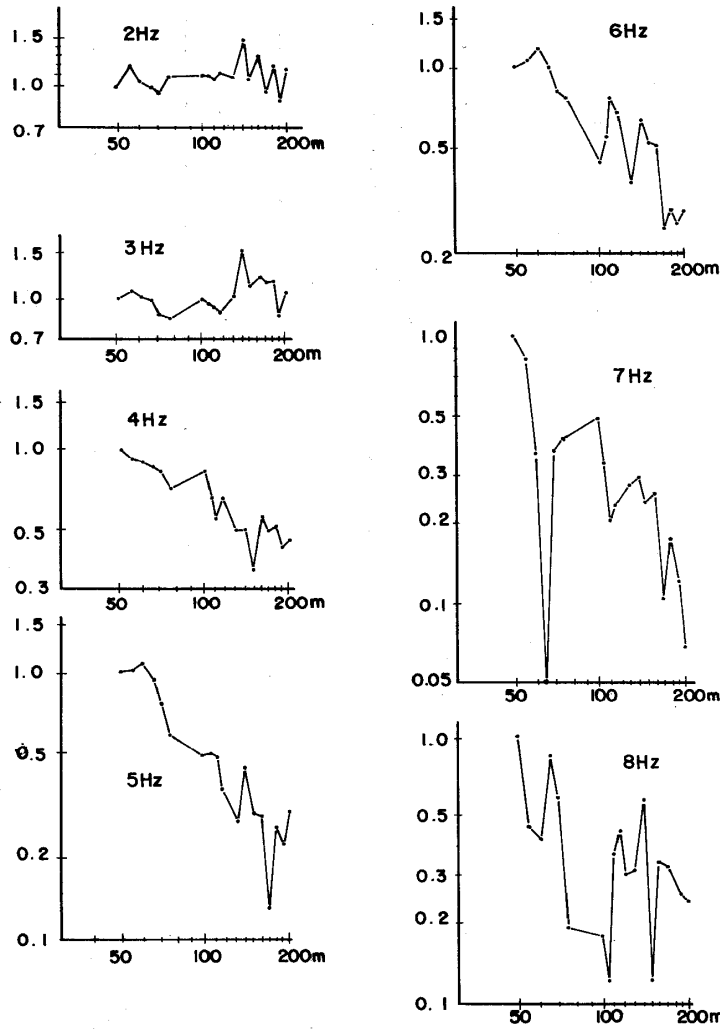


Fig. 23 Relations of amplitude of T-comp. on the X-line and distance on a log scale

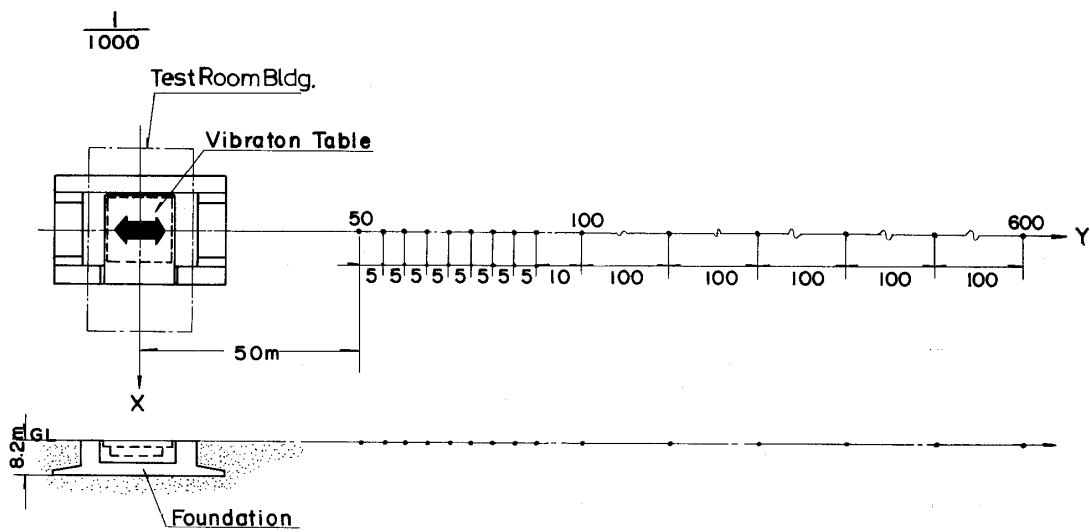


Fig. 24 Measurement points on the Y-line

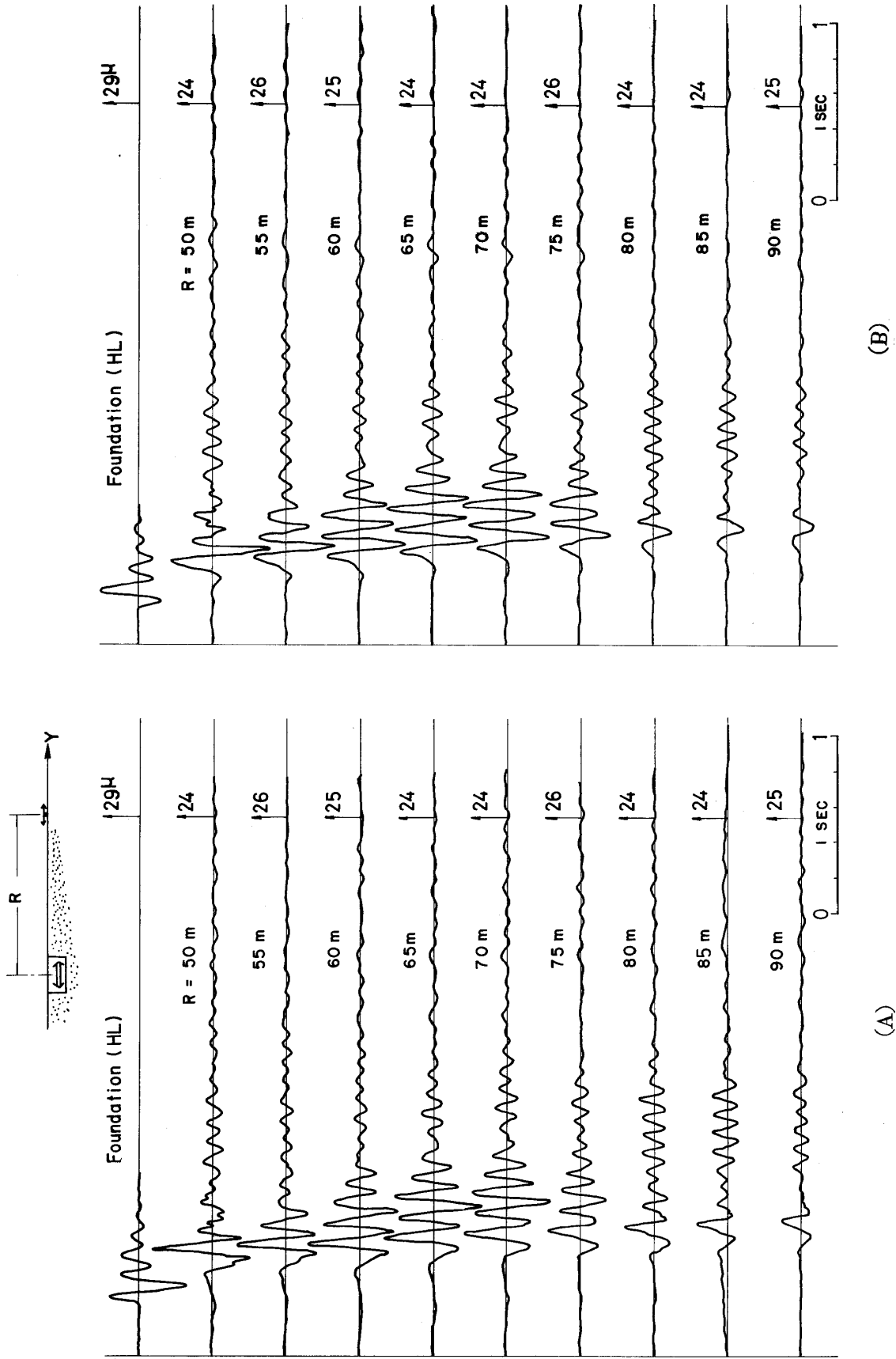


Fig. 25 Ground vibrations on the Y-line near the foundation for shock wave excitation (L-comp.)

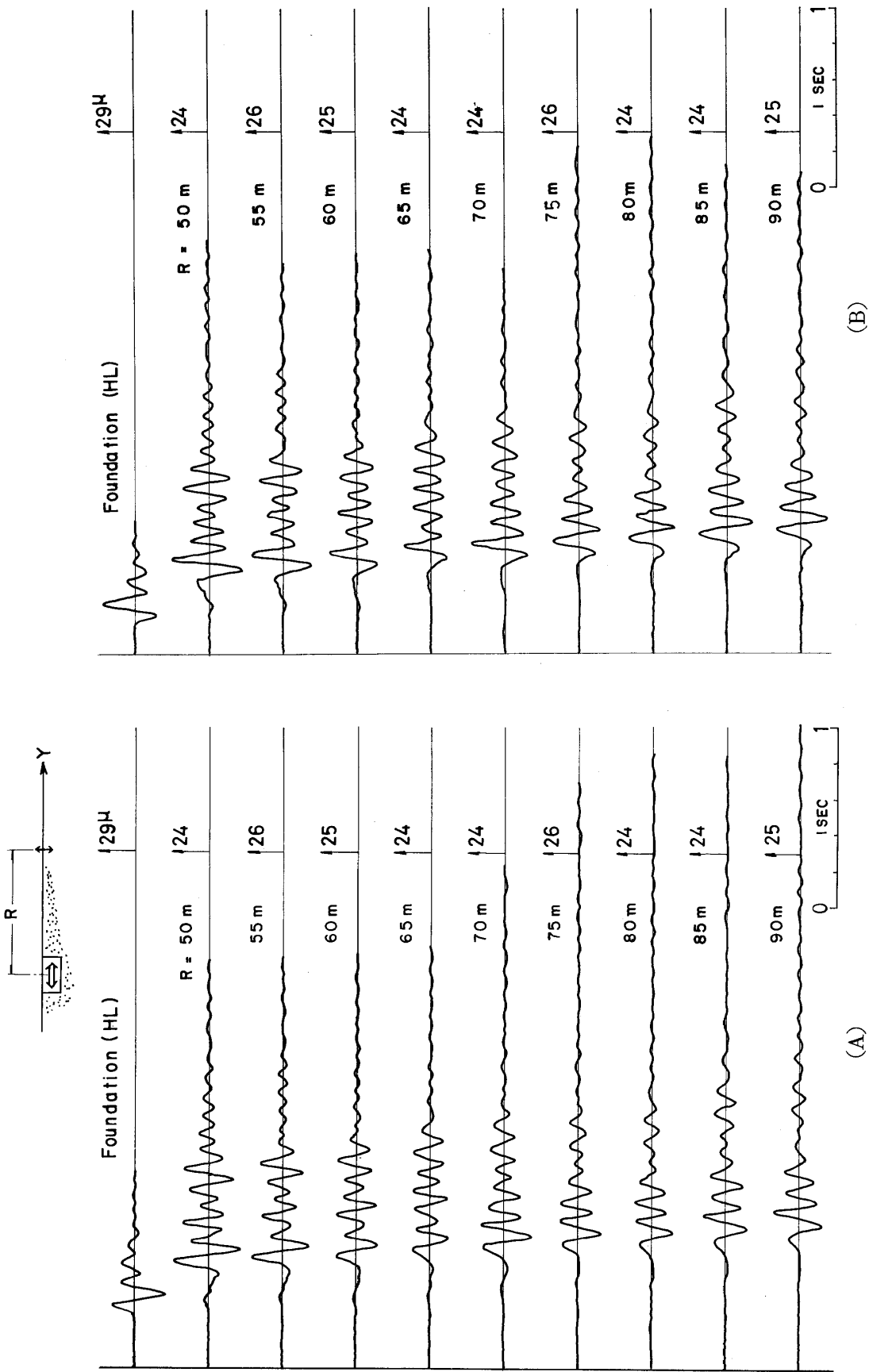
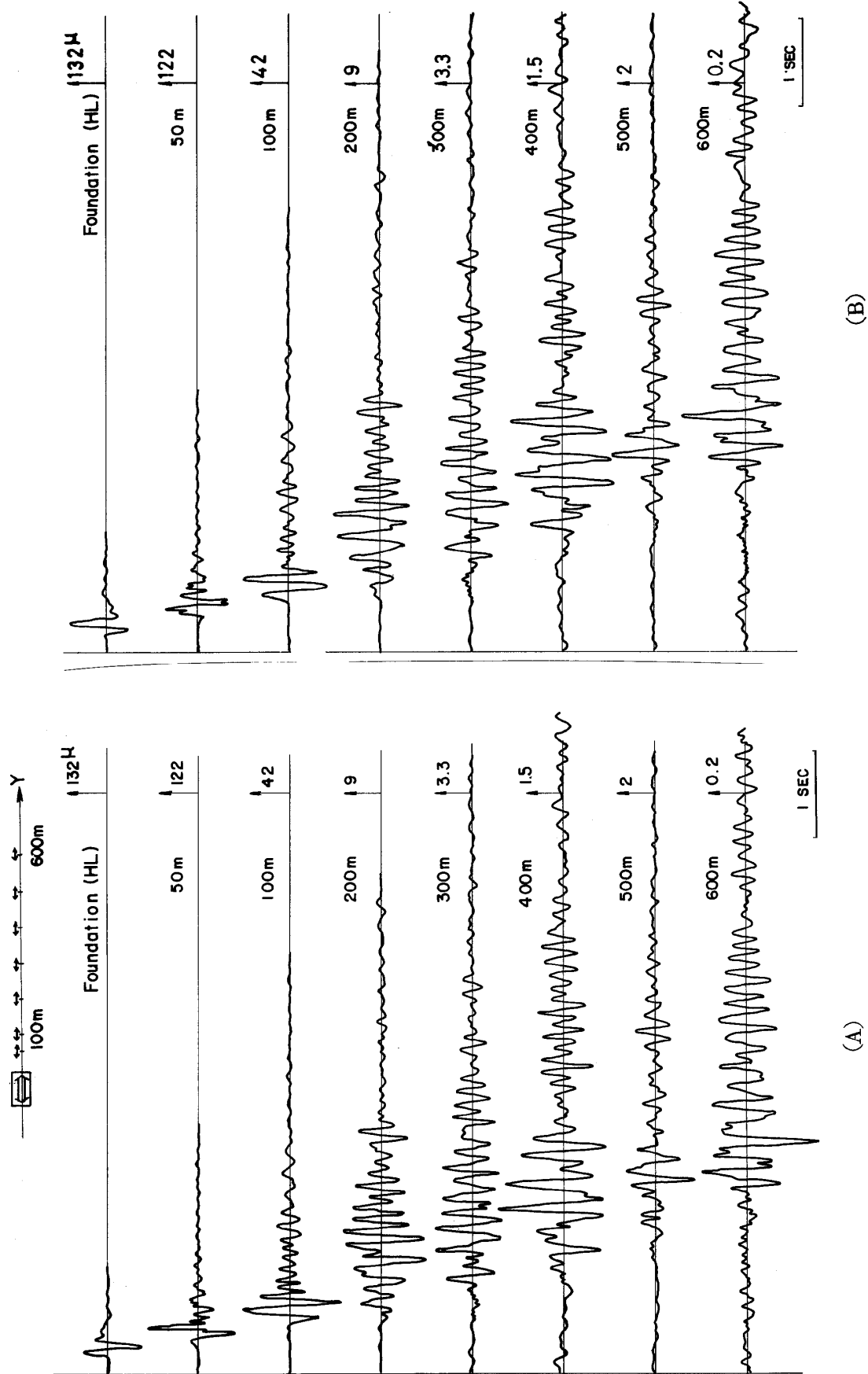


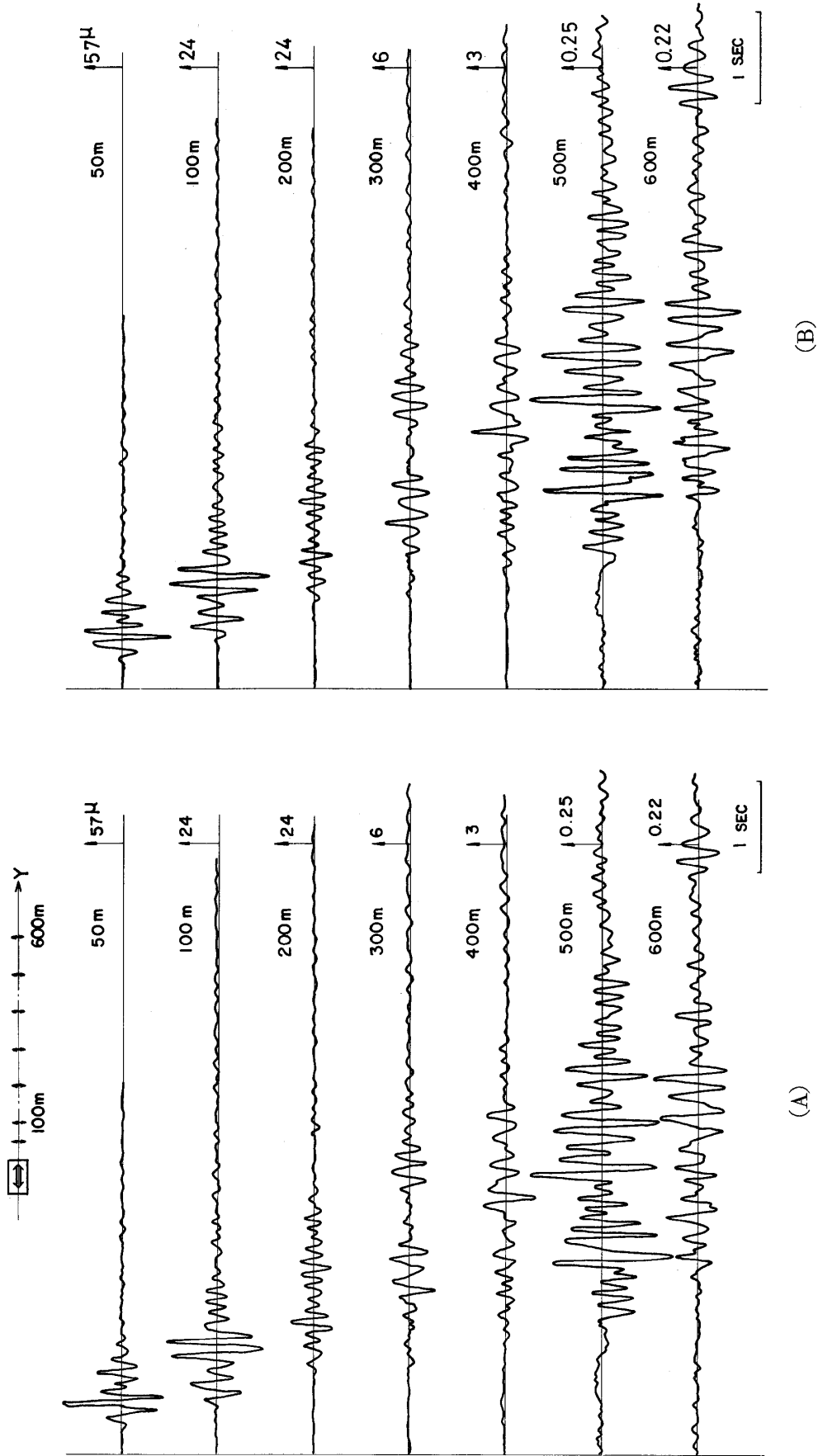
Fig.26 Ground vibrations on the Y-line near the foundation for shock wave excitation (V-comp.)



(A)

(B)

Fig. 27 Ground vibrations on the Y-line distant from the foundation for shock wave excitation (L-comp.)



(A)

(B)

Fig. 28 Ground vibrations on the Y-line distant from the foundation for shock wave excitation (T-comp.)

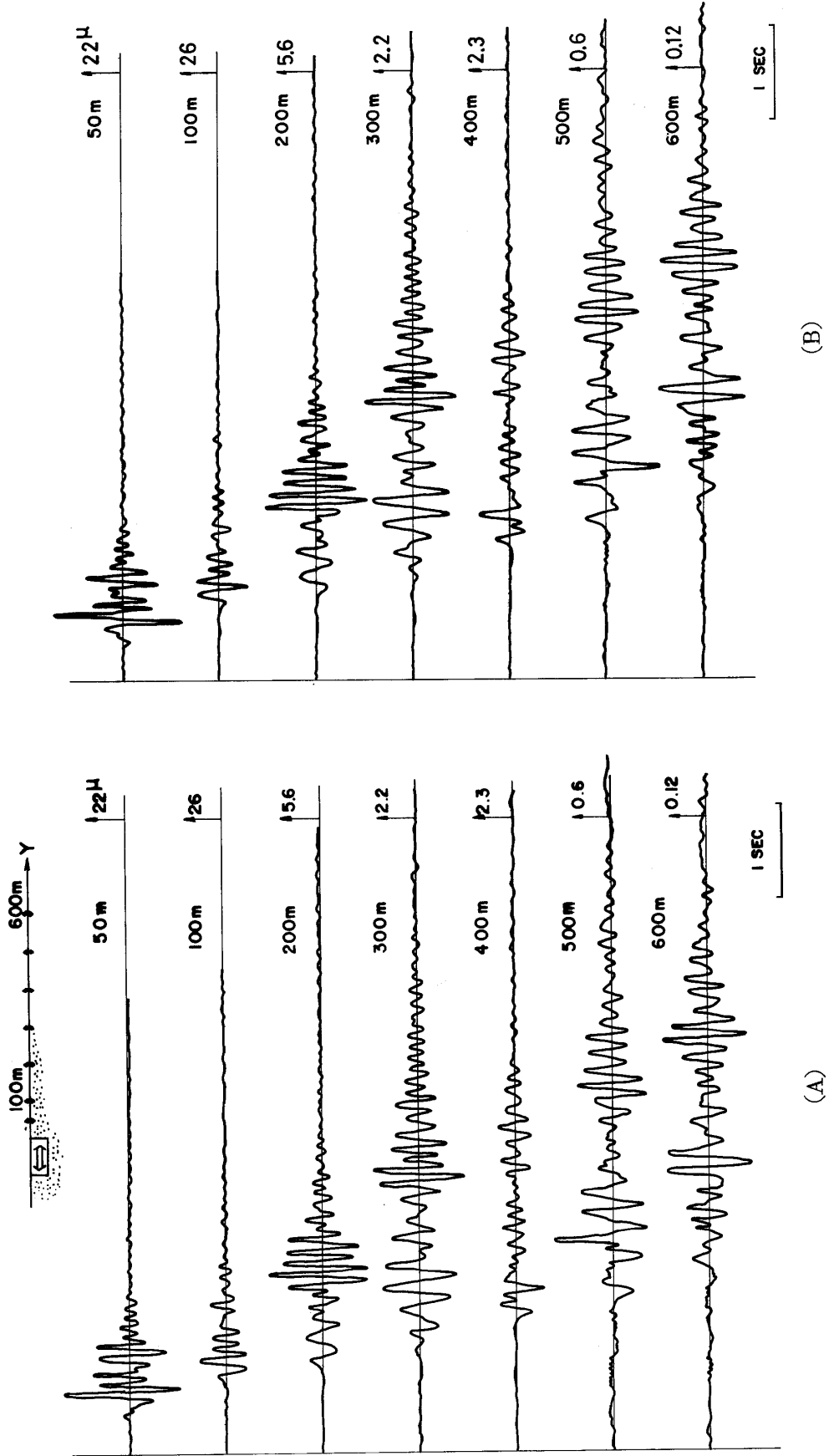


Fig.29 Ground vibrations on the Y-line distant from the foundation for shock wave excitation (V-comp.)

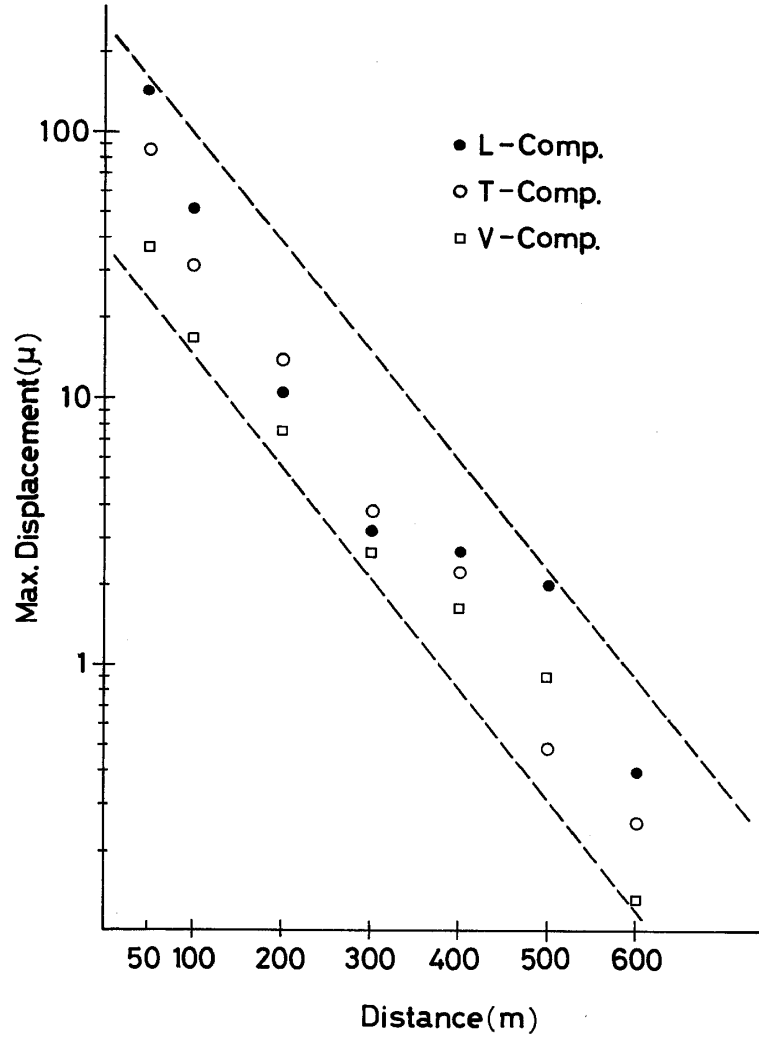


Fig. 30 Relation of maximum displacement on the Y-line and distance for shock wave excitation

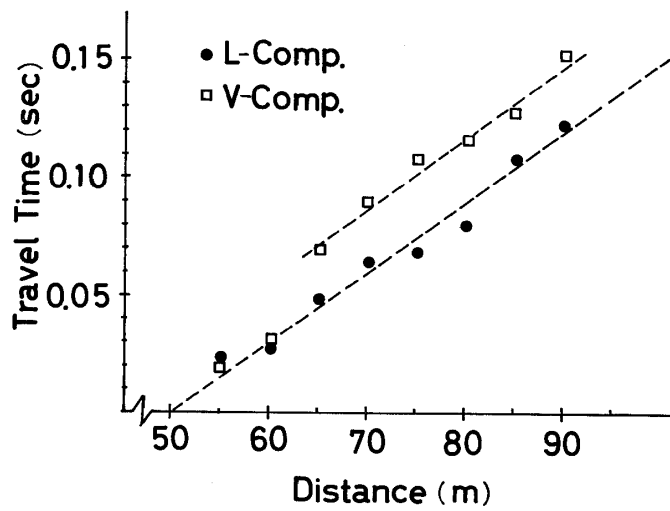
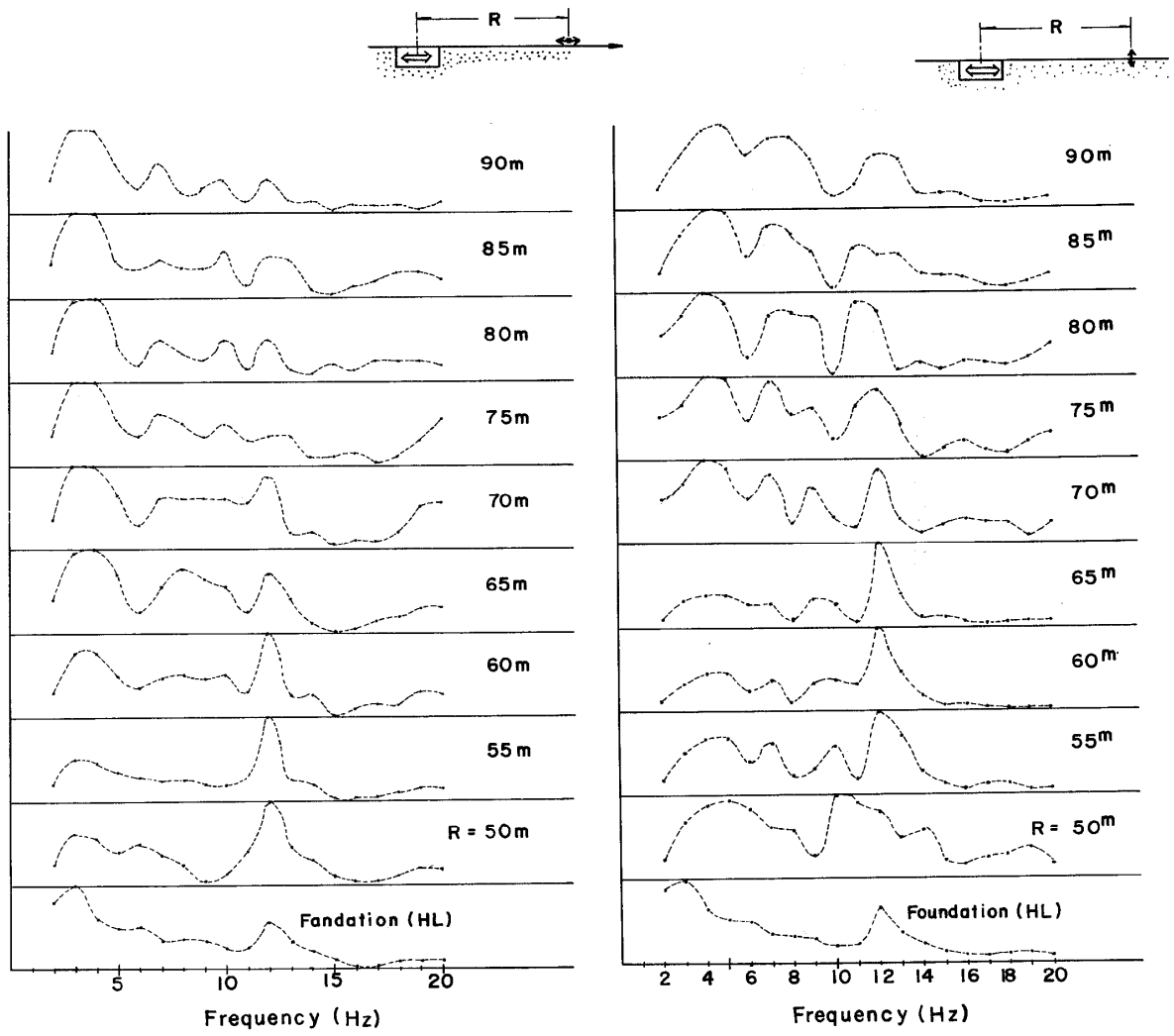


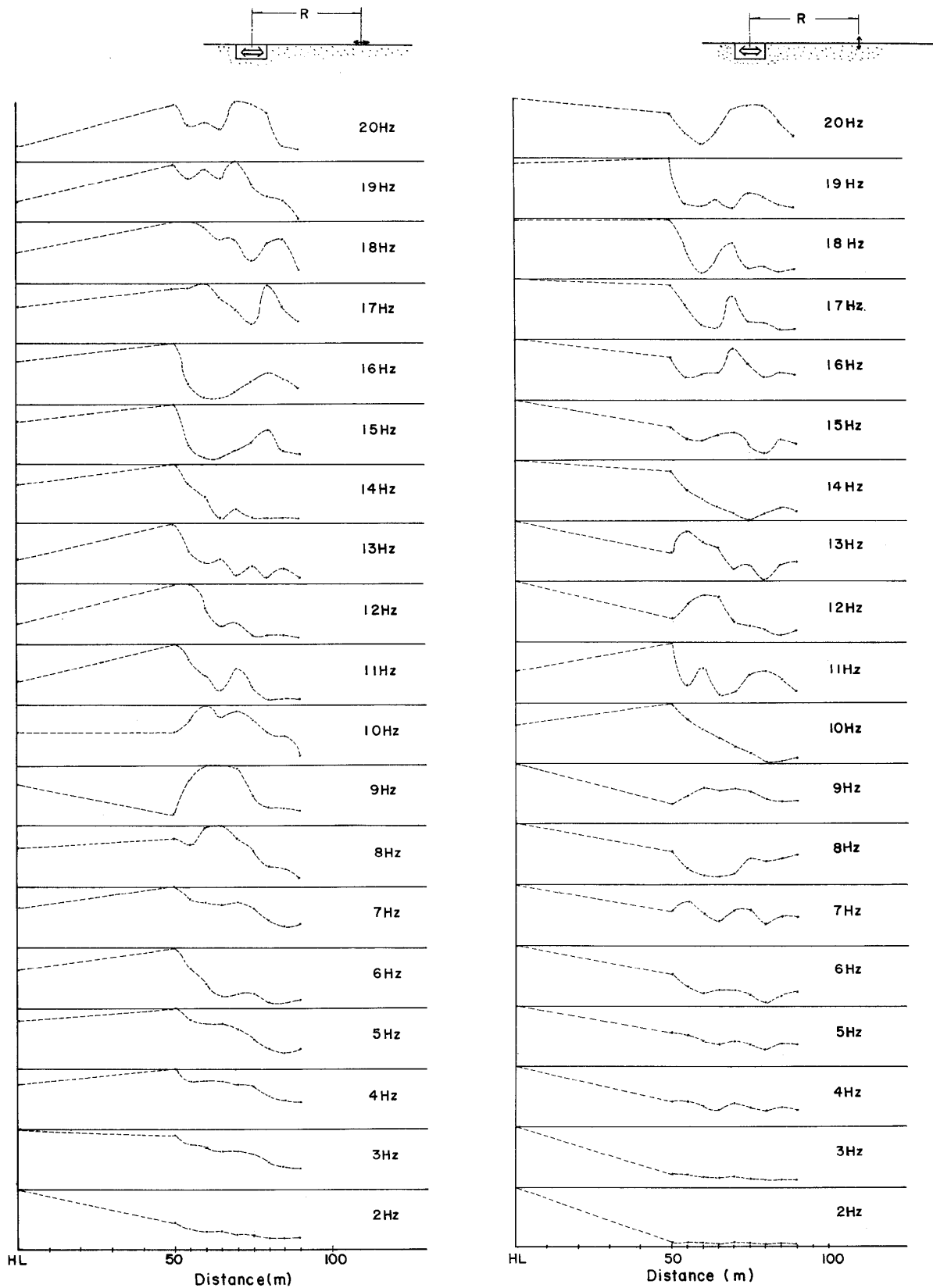
Fig. 31 Travel time of L and V-comp. on the Y-line near the foundation



(1) L-comp.

(2) V-comp.

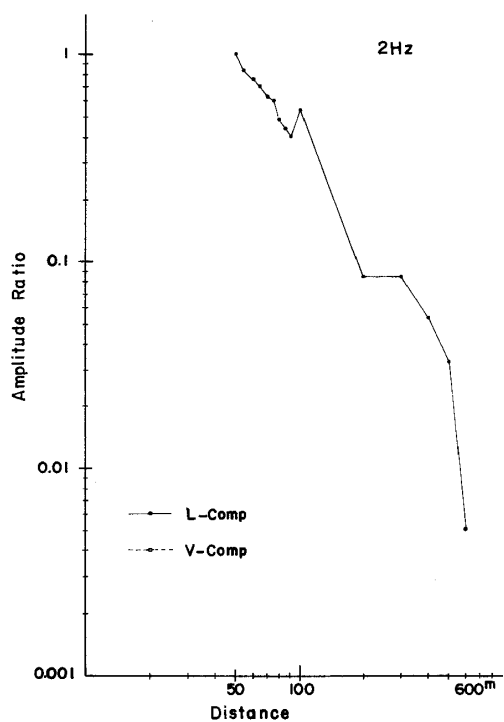
Fig.32.1~2 Frequency responses on the Y-line near the foundation dependent on distance



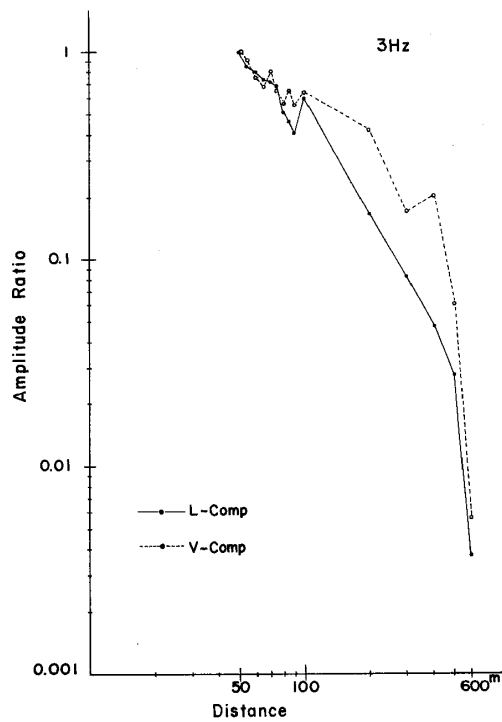
(1) L-comp.

(2) V-comp.

Fig.33.1~2 Relations of amplitude on the Y-line near the foundation and distance dependent on frequency

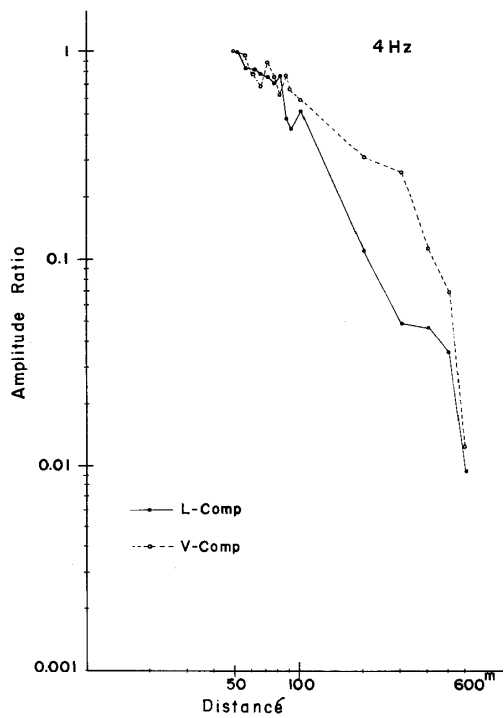


(1) 2Hz

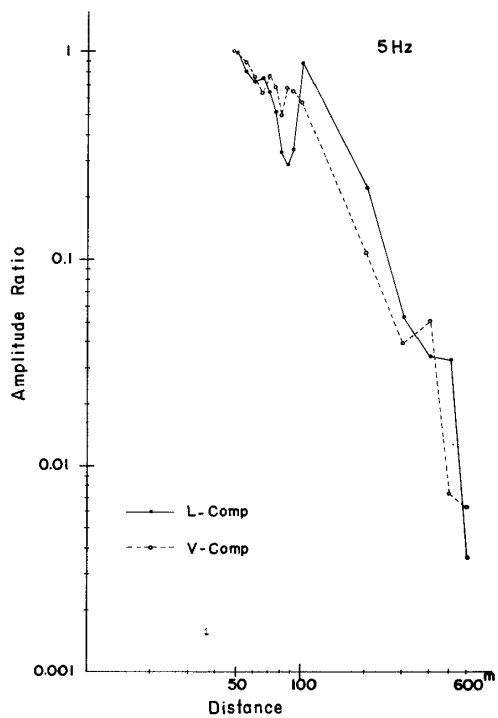


(2) 3Hz

Fig.34.1~13 Relations of amplitude on the Y-line and distance on a log scale

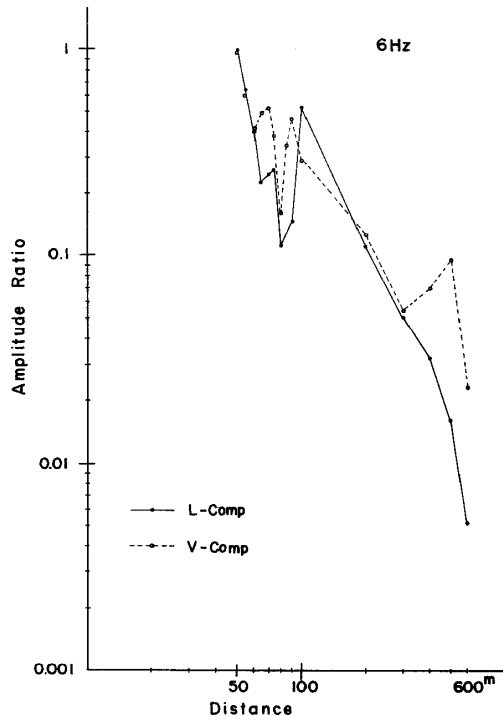


(3) 4Hz

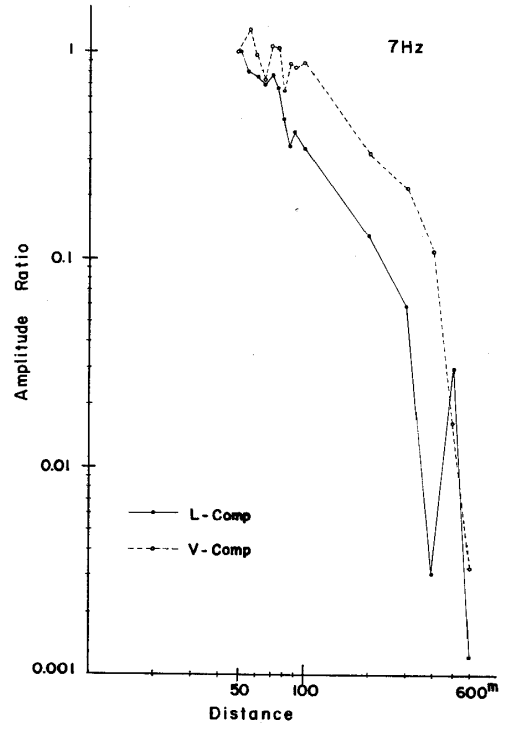


(4) 5Hz

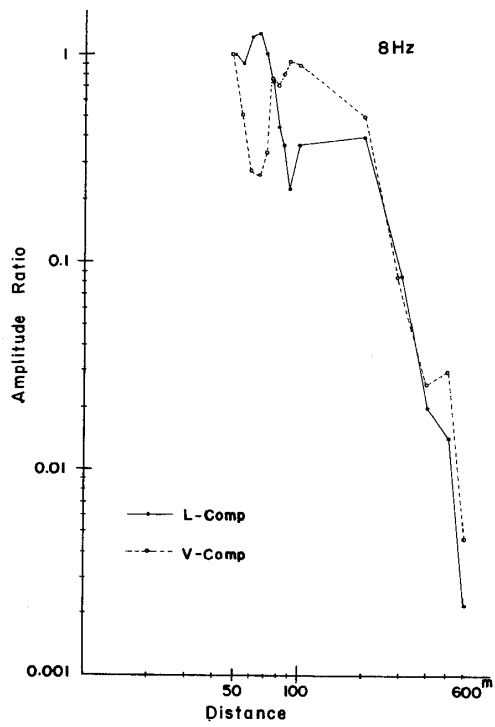
大型振動台加振時の周辺地盤振動に関する調査報告—小川ほか



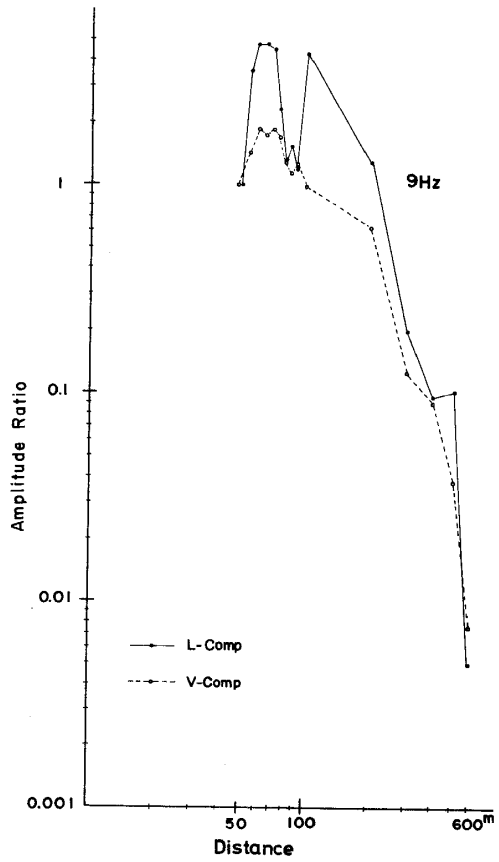
(5) 6Hz



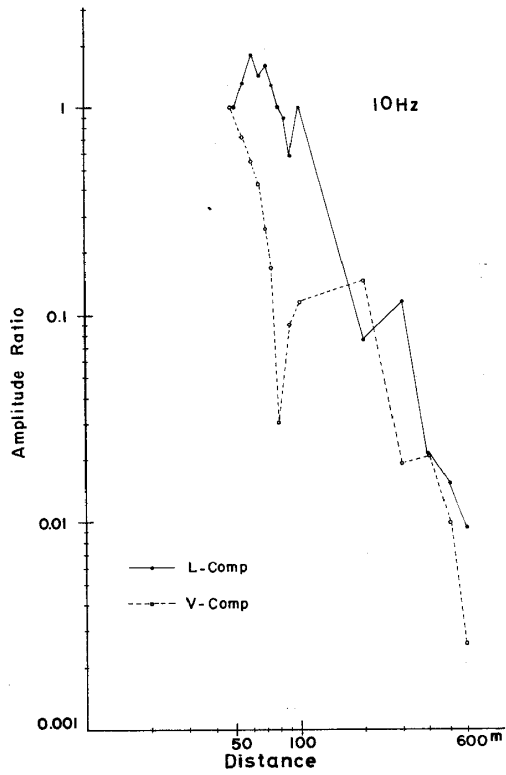
(6) 7Hz



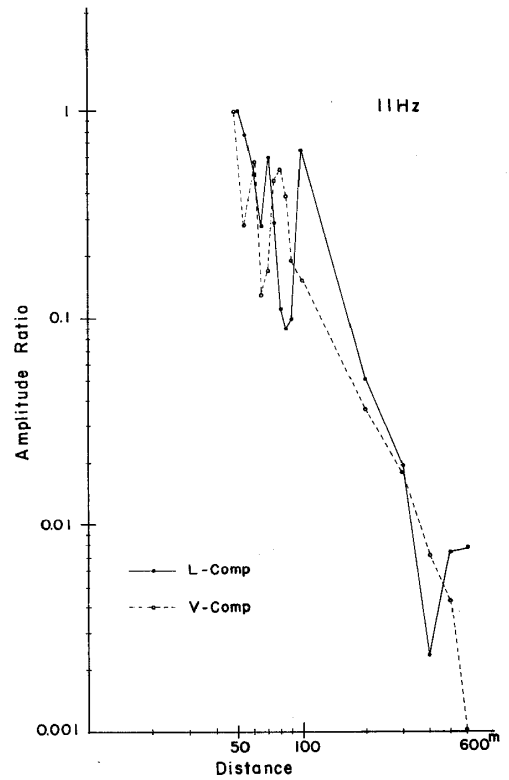
(7) 8Hz



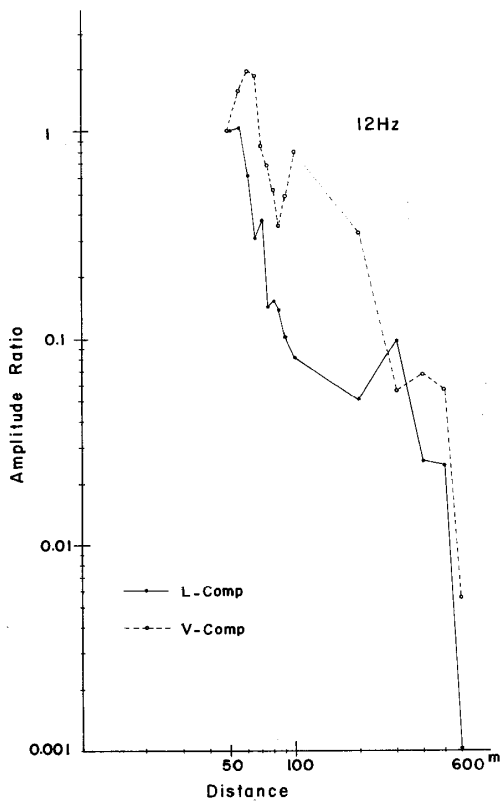
(8) 9Hz



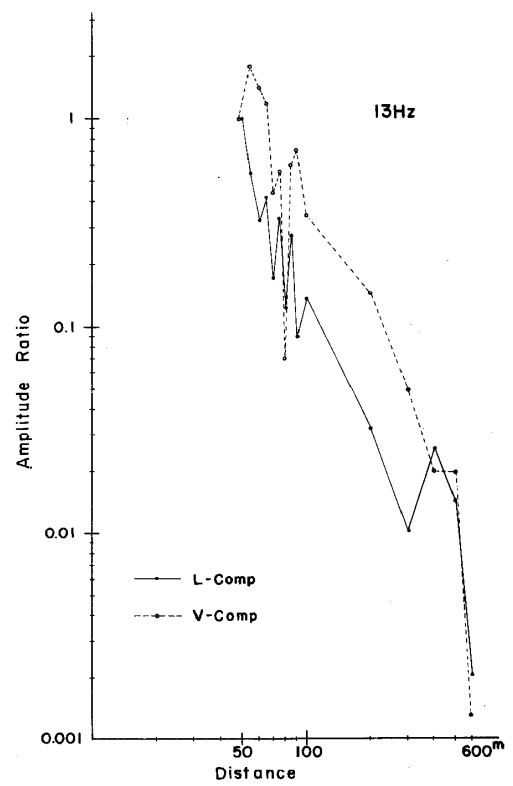
(9) 10Hz



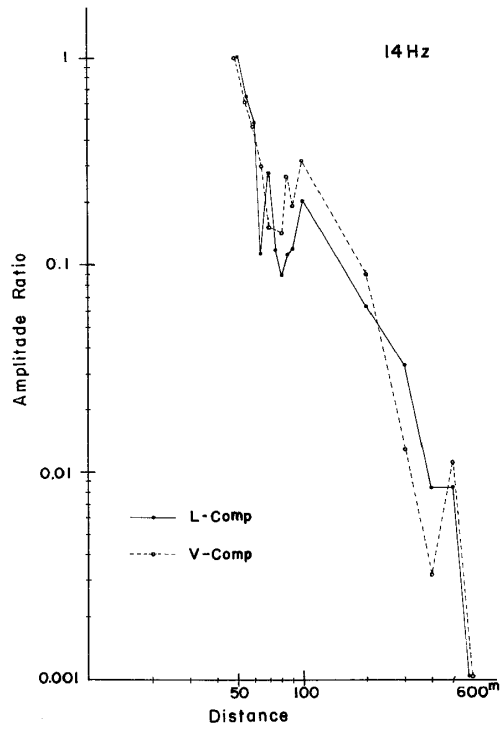
(10) 11Hz



(11) 12Hz



(12) 13Hz



(13) 14Hz