

地中振動源による波動伝播特性

後藤 尚男・高田 至郎・吉田 明

WAVE PROPAGATION AND ITS CHARACTERISTICS DUE TO UNDERGROUND LOADING

By *Hisao GOTO, Shiro TAKADA and Akira YOSHIDA*

Synopsis

This paper treats the wave propagation and its characteristics due to a shock load buried in a surface ground layer.

Analytical and experimental studies are performed. By finite element method, linear and non-linear vibrational characteristics of surface ground are analyzed and the effect of a length of structures, a buried depth of structures and a height of surface layer are investigated. Also, the effect of trenches to prevent the vibration of a ground are discussed.

On the other hand, vibrational experiments are performed in a model ground and also in a real ground. Their results show good agreement to the theoretical results.

1. ま え が き

最近、鉄道、道路などの陸上交通機関における交通輸送量の増大や交通車両の速度向上などに伴って、それらが沿道に及ぼす振動障害は社会的な問題となっている。地下鉄道あるいは地下高速道路においても、このような振動障害は容易に予想され、その振動の伝播特性を十分に把握し、振動を軽減するための対策を講じることが必要とされている。

本研究においては、まず2次元有限要素法を用いて、任意波形入力に対する地盤の過渡応答解析を行ない、波動伝播に伴う地盤の運動軌跡を明らかにするとともに、その入力、応答波形をそれぞれフーリエ変換することにより、波動の伝播特性を周波数領域でも検討し、周波数伝達関数の考え方についても言及した。また等価せん断弾性係数、等価減衰定数を導入することにより、地盤のもつ非線形性を考慮した解析を行ない線形解との比較を行なうとともに、このように地中構造物内に加振源をもつ場合、その構造物の大きさ、その埋設深さ、基盤層の存在などが波動の伝播特性にどのような影響をもたらすかを明らかにすることに努めた。また同様の観点から室内模型実験、野外実験を実施し、そこで得られた結果を種々の側面から評価することにより、このような模型地盤、実地盤においても、有限要素法による解析結果と同様の傾向を示す現象がみられることを明らかにした。

さて、地盤中を伝播する波動を遮蔽するという問題に関しては、従来加振点が地表にある場合を取り扱うことが多かったため、地表でトレンチ、コンクリートブロック等の剛性変化部を設定するという方法が考えられてきた¹⁾。これは地表加振源によって地表面を伝播する波動が主にレーレイ波であり、そのレーレイ波は地表面下1波長の深さ以内でそのエネルギーの大部分が伝わるという性質を利用したものである。本研究においては、地中に加振源がある場合でも、その伝播波動が地表に設けたトレンチでよく遮蔽されることを示した。

2. 有限要素法による波動伝播の解析

2.1 パルス入力による地盤の過渡応答解析

Fig. 1 には、解析にあたって用いた埋設構造物—地盤系の振動モデルを示し、Table 1 にはその水平、上下、ロッキング振動の各固有円振動数を示した。境界条件としては、地盤層下端部は上下、水平方向とも固定

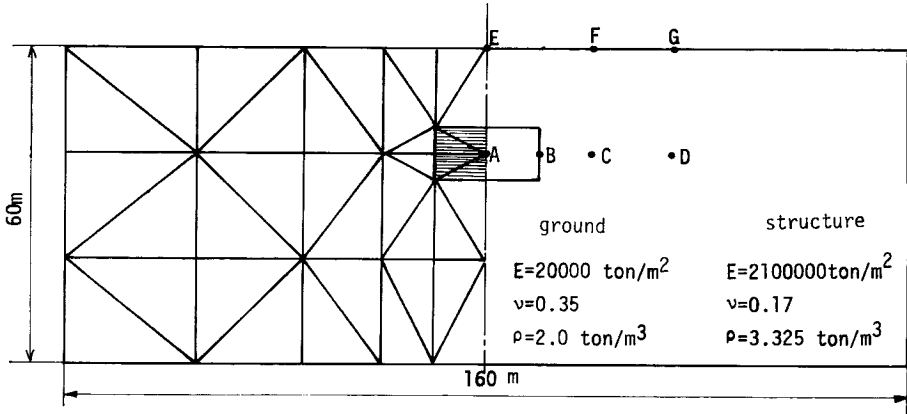


Fig. 1 Analytical model.

とし、側方は上下方向は自由、水平方向は固定とした。弾性波動論によれば、地盤層の厚さをHとして、その地盤のみの上下振動の固有円振動数 ω_0' は次式で書き表わされる。

$$\omega_0' = \pi \cdot v_l / 2H \dots\dots\dots(2-1)$$

なお、 v_l は縦波の伝播速度である。

本解析で用いた地盤モデルの上下方向の固有円振動数は Table 1 に示すように 10.18 rad/sec であり、式(2-1) で与えられる連続体解析値 $\omega_0' = 10.38$ rad/sec とよく近似している。また同表中に示すように埋設構造物の有無が固有円振動数に与える影響は少ないと考えられる。

Table 1 Resonant frequency (rad/sec).

Mode	ground-structure	ground
Horizontal	14.23	14.20
Vertical	10.04	10.18
Rocking	18.85	18.57

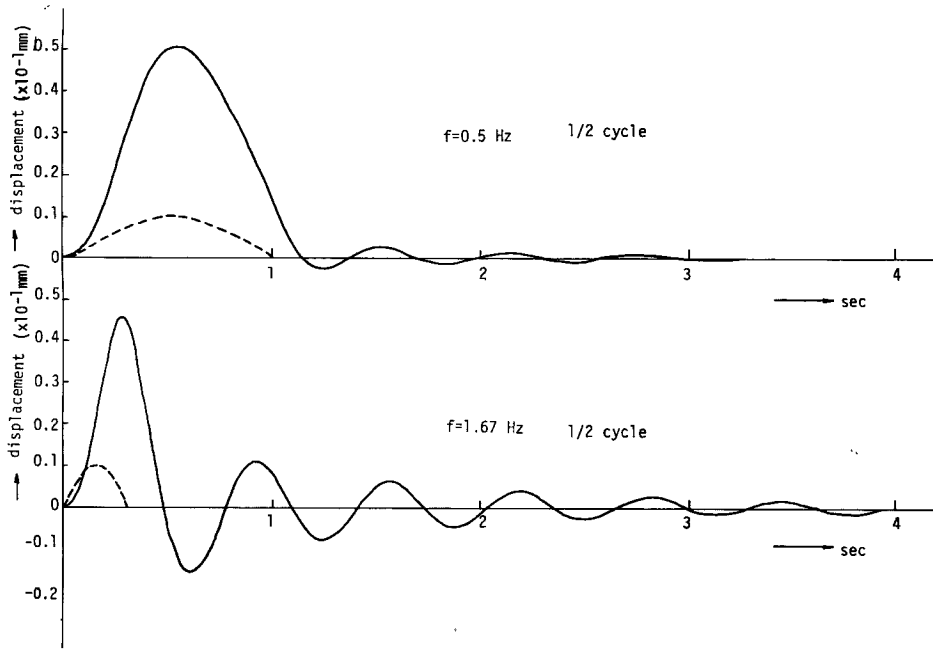
次に有限要素法による過渡応答解析の方法に

ついて述べる。このような多自由度の振動系はマトリックスを用いて周知の次式で書き表わされる。

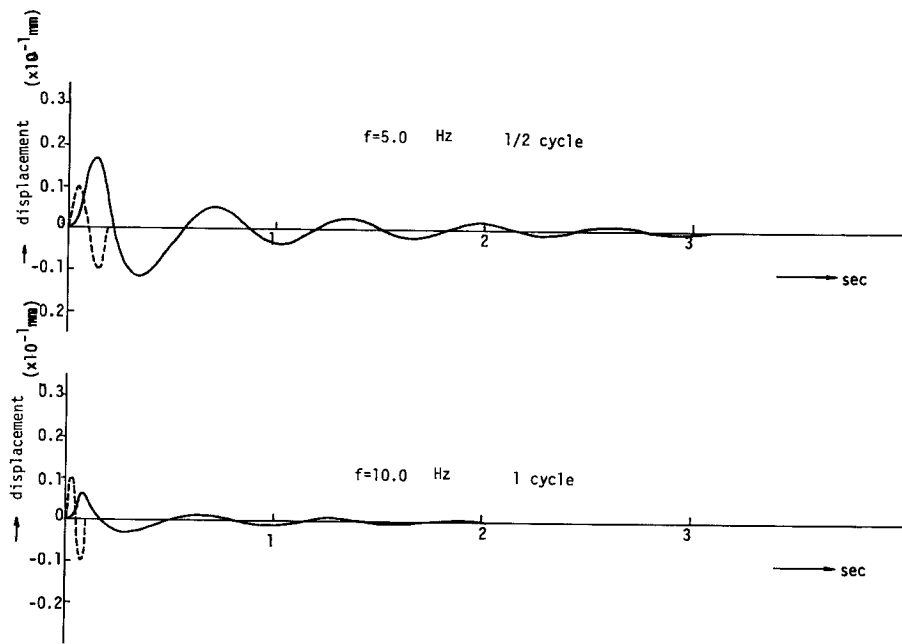
$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P(t)\} \dots\dots\dots(2-2)$$

ここに、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスである。質量マトリックス $[M]$ は、本研究では、各三角形要素の質量を重心と頂点の距離に反比例させて分配させる集中質量系を用いた。減衰マトリックス $[C]$ をどのように評価するかについてはいろいろ議論のあるところであるが、ここでは各分割要素に C^* なる減衰係数を与え、それを各三角形要素の頂点に1/3ずつ分配させて求めた。式(2-2)において $\{P(t)\}$ が非周期性の過渡入力ベクトルである場合、構造系の応答はいろいろな方法で求めることができる。ここでは式(2-2)を直接に時間の進む向きに積分していく方法をとった²⁾。このような方法は直接漸化法と呼ばれるもので、この代表的な解法は、加速度の直線的な変化を仮定する方法である。時間間隔 $(n-1) \cdot \Delta t \dots n \cdot \Delta t$ の間で加速度が直線的に変化するものとする次式が成立する。

$$\{\ddot{\delta}\}_n = \{\ddot{\delta}\}_{n-1} + \{\ddot{\delta}\}_{n-1} \cdot \Delta t \dots\dots\dots(2-3)$$



(a)



(b)

Fig. 2 Transient response of the ground.

式(2-3)を用いれば速度，変位は次式で与えられる。

$$\{\dot{\delta}\}_n = \{\dot{\delta}\}_{n-1} + \{\ddot{\delta}\}_{n-1} \cdot \Delta t / 2 \dots\dots\dots (2-4a)$$

$$\{\delta\}_n = \{\delta\}_{n-1} + \{\dot{\delta}\}_{n-1} \cdot \Delta t + \{\ddot{\delta}\}_{n-1} \cdot (\Delta t)^2 / 3 + \{\ddot{\delta}\}_n \cdot (\Delta t)^3 / 6 \dots\dots\dots (2-4b)$$

式(2-2)が区間の終りの時刻 ($t = n \cdot \Delta t$) について書かれているものとする

$$[M]\{\ddot{\delta}\}_n + [C]\{\dot{\delta}\}_n + [K]\{\delta\}_n = \{P\}_n \dots\dots\dots (2-5)$$

式(2-5)に式(2-4a), (2-4b)を代入することにより, $\{\delta\}_n$ および $\{\dot{\delta}\}_n$ を消去すると, $\{\ddot{\delta}\}_n$ を次のように一つ前の時刻 $(n-1) \cdot \Delta t$ における値で表示することができる。すなわち

$$\{\ddot{\delta}\}_n = [Q] (\{P\}_n - [C]\{A\}_n + [K]\{B\}_n) \dots\dots\dots (2-6)$$

ここに, マトリックス $[Q]$, $\{A\}_n$ および $\{B\}_n$ は, 次のように表示される。

$$[Q] = \left[[M] + \frac{\Delta t}{2} \cdot [C] + \frac{(\Delta t)^2}{6} [K] \right]^{-1} \dots\dots\dots (2-7a)$$

$$\{A\}_n = \{\dot{\delta}\}_{n-1} + \{\ddot{\delta}\}_{n-1} \cdot \Delta t / 2 \dots\dots\dots (2-7b)$$

$$\{B\}_n = \{\delta\}_{n-1} + \{\dot{\delta}\}_{n-1} \cdot \Delta t + \{\ddot{\delta}\}_{n-1} \cdot (\Delta t)^2 / 3 \dots\dots\dots (2-7c)$$

それゆえ, $\{\delta\}$, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\ddot{\delta}\}$ の三つの値が, 区間のはじめで既知であれば式(2-4a), (2-4b) および式(2-6)により区間の終りにおけるこれらの値を求めることができる。 $n=0$ の場合すなわち積分の開始時には, 通常は初期条件として変位と速度しか与えられないが, 式(2-5)により出発点の加速度を次式で求めることができる。

$$\{\ddot{\delta}_0\} = [M]^{-1} (\{P_0\} - [C]\{\dot{\delta}_0\} - [K]\{\delta_0\})$$

ここでは, パルス入力に埋設構造物の中央部すなわち **Fig. 1** に示すA点に上下方向に作用するものとしたが, そのパルス入力には, 半サイクルまたは1サイクルの正弦波で近似した。正弦波は力として与え, 入力の継続時間は, その振動数が $f=0.2, 1.67$ (共振振動数付近), 5.0 Hz の場合には半サイクル, $f=10.0 \text{ Hz}$ の場合には1サイクルで終わるようにした。

Fig. 2(a), 2(b) は, 同図中に破線でパルスを作用させて, パルス入力の振動数の変化が地盤E点の応答波形にどのような影響をもたらすかを検討したものである。 $f=0.5 \text{ Hz}$ の場合には, 他の場合に比べて最初の立ち上がり部分は入力波形に対してほとんど位相遅れを生ぜず, パルスが作用なくなった後の自由振動の応答変位も極端に小さくなっていることが知られる。このように地盤層の共振振動数より小さい振動数領域ではパルス入力が波動として伝播せず, いわゆる cut-off-frequency 以下の振動数であるためと考えられる。また波形はいずれもなめらかな連続性を保ち, この図で見る限り, 反射波の影響はみられなかった。またこの自由振動部分の周期は, この系の上下方向の固有周期と一致することが知られた。

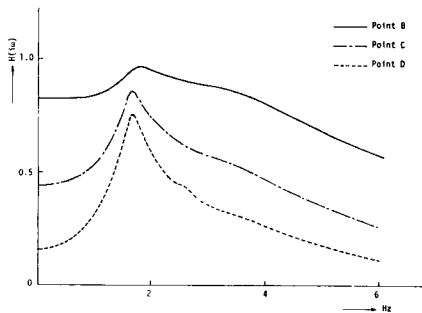


Fig. 3 Frequency response function from transient solution.

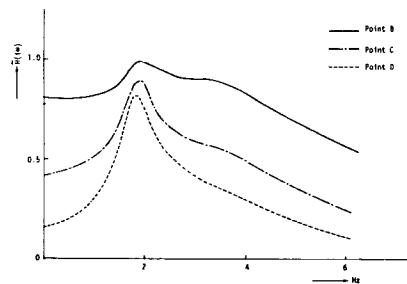


Fig. 4 Frequency response function from periodical solution.

さて、周波数領域での波動の伝播特性を明らかにするために、地盤各点の応答のフーリエスペクトルの絶対値を載荷点のそれで除したものを周波数伝達関数 $H(i\omega)$ と呼ぶことにし、B, C, D 各地点の載荷点A点に対する周波数伝達関数 $H(i\omega)$ を示したものが Fig. 3 である。また一方、定常応答解析においても、ある外力の振動数に対して求められる地盤各点の定常応答変位を加振点のそれで除したものを、同じ意味で周波数伝達関数 $\hat{H}(i\omega)$ と呼ぶことにし、同じく B, C, D 各地点での載荷点A点に対する周波数伝達関数 $\hat{H}(i\omega)$ を示したのが Fig. 4 である。両図ともほぼ同様の傾向を示し、 $H(i\omega)$ と $\hat{H}(i\omega)$ との差異も小さいことが知られる。各地点ともこの地盤層の上下方向の固有振動数 $f=1.62$ Hz 近傍の振動数においてピークを有し、各地点間の伝達率の差異も他の振動数に比べて最も小さいことが知られる。このことは、このような振動系においては外力の振動数が上下振動の固有振動数近傍では、系全体として振動しているため、この近傍の周波数成分をもつ波動が最もよく伝播されるということを示している。また各地点とも振動数が高くなるにつれて、伝達率は小さくなっており、加振点から離れるにつれて高周波成分が低下していくことが特徴的である。このことは波動のもつ高周波成分ほど伝播距離に応じて比較的是やく減衰し、遠方まで伝播されにくいことを示しているものと思われる。

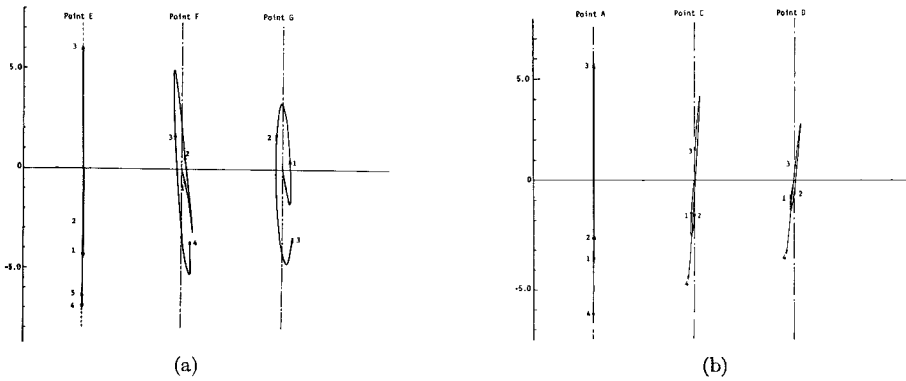


Fig. 5 Time locus of the ground.

Fig. 5(a), 5(b) は、振動数 $f=1.67$ Hz の正弦波が連続的に作用した場合に、その水平、上下方向の過渡応答変位から求められる地表および地盤内各点の運動軌跡を示したものである。Fig. 5(a) は、Fig. 1 に示した地表の E, F, G 各地点の運動軌跡を示したものである。図より明らかなように地盤は波の進行方向と逆方向に回転するような逆行運動をしており、横方向の運動成分は、振動源から離れるにつれて大きくなっている。このような性質をもつ波動は一般にレーレイ波として知られるところであり、ここでもこのような波動の存在が予想される。また Fig. 5(b) は、Fig. 1 に示した振動源A点とそこから水平方向にある C, D 各点の運動軌跡を示したものである。各地点の横方向の運動成分は地表面に比して小さく、またそれぞれ地表面とは逆の回転運動を行なっていることが知られる。これは地盤層が横方向には必ずしも一次モードで運動していないためと思われる。

2.2 土の非線形性を考慮した地盤の定常応答解析

地中に振動源がある場合、そこから伝播していく波動は、その間の地盤がいわゆるフィルターとして作用する

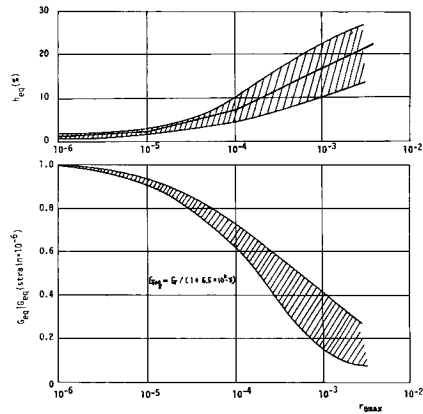
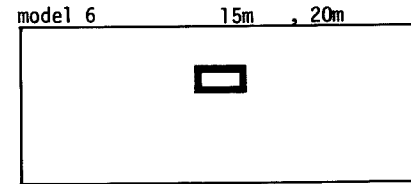
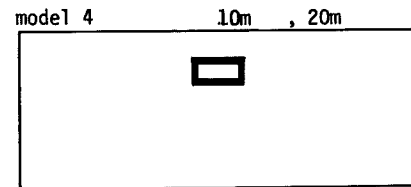
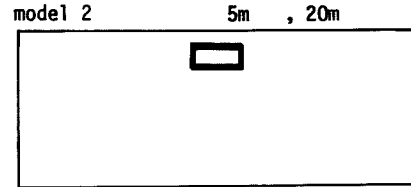
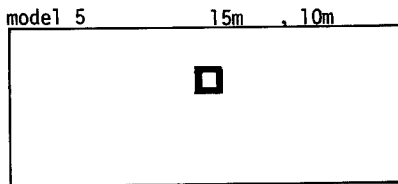
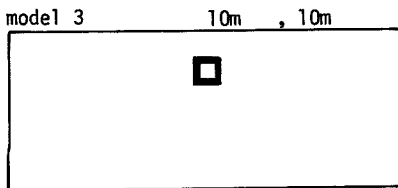
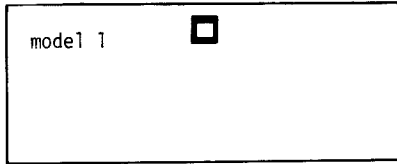


Fig. 6 Relation between γ_{max} and G_{eq} , h_{eq} .

ために、地盤の動特性の影響を強く受けるものと考えられる。したがって、定量的な解析にあたっては、土の力学的性質、とくにその動的性質を十分に把握するとともに、それを解析に反映させていく必要がある。土の動的変形を考えると、その応力とひずみの関係は一般に非線形であり、繰り返し荷重の作用によって大きな履歴を描くことが知られている。解析にあたっては、このような土の複雑な特性を簡単に処理できるように土

Depth of ground- 60m, width of ground-200m
depth of structure-5m, width of structure-10m



Depth of ground-40m, width of ground-200m

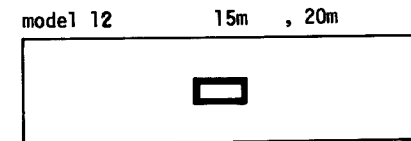
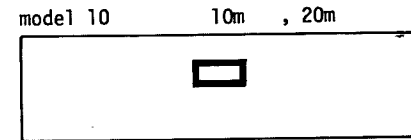
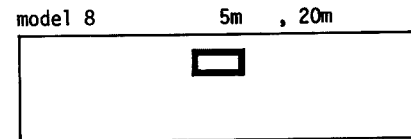
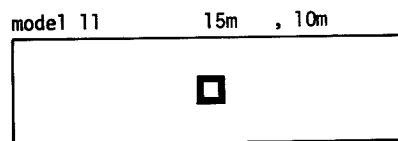
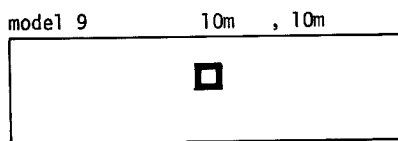
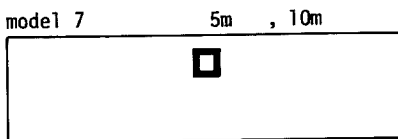


Fig. 7 Analytical model.

をある程度理想化して取り扱うことが必要とされてくる。ところがよく使われるバイリニアールのモデルでは応力とひずみの関係は2本の直線で表わされ、本研究で取り扱うような多自由度の振動モデルでは解析は複雑かつ困難となってくる。ここでは等価せん断弾性係数 G_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} を用いて、バイリニアールモデルを等価線形モデルに置き換えた。Seed³⁾ は、比較的多くの種類の土に対する実験から、Fig. 6 に示すように G_{eq} , h_{eq} と最大せん断ひずみ γ_{max} との関係を求めている。本解析においては、Fig. 6 における G_{eq} は双曲線で、また h_{eq} はあるひずみレベルでは片対数目盛上で直線近似できるものとして模式化した。Fig. 6 にこの近似式を合わせて示した。さて実地盤においてはこの h_{eq} の他に、地盤における地下逸散減衰を考慮する必要がある。ところが本解析においては地盤を有限な領域に限定しているため波動の地下逸散性を考慮できない。そこで、ここではこれを等価な減衰定数 h として取り入れた。したがって全体の減衰定数 h_{eq}^* は次式となる

$$h_{eq}^* = h_{eq} + h \dots \dots \dots (2-8)$$

すなわち、非線形解析においては、ある振動数をもつ正弦波入力に対して、まず初期のせん断弾性係数 G_0 , 減衰定数 (= h) により線形計算を行ない、その結果求められる解析モデルの各三角形要素のひずみを計算して新たに G_{eq} , h_{eq}^* を求める。この G_{eq} , h_{eq}^* の値を用いて再び線形計算を行ない、各要素のひずみがある一定値に収束するまで繰り返し計算を行なった。

さて本解析においては、埋設構造物の埋設深さ(土かぶり厚)、横幅の大きさ、表層地盤の厚さを異にする Fig. 7 に示すような12個の解析モデルを用いた。埋設構造物や地盤の諸定数、また地盤の境界条件は前節と同様である。モデル1~12は、埋設構造物の壁の厚さは一律に2mとし、同図中に示すようにその埋設深さを5, 10, 15mの3種類、横幅の大きさを10, 20mの2種類、また表層地盤の層厚を40, 60mの2種類にそれぞれ変化させたものである。

地盤層の横幅は一律に200mとした。またメッシュの分割数、分割方法の違いによる計算誤差をできるだけ小さくするために、それらが各モデルにおいてそれぞれ同じになるように留意した。次に種々の解析計算結果を示しつつ考察を進めていく。なお外力は埋設構造物内の下端の中央部に上下方向に $P = P_0 \sin \omega t$ なる形で与え、 P_0 はここでは10tonとした。

Fig. 8(a), 8(b), 8(c) は、モデル1の図中に示すA, B, C各地点での上下方向変位の共振曲線を求めたものである。非線形解析で得られたものを破線で示した。式(2-8)における h の値はここでは10%とした。線形解析で得られた結果をみると、たとえばモデル1についていえば、各地点の共振曲線とも $f = 1.55, 2.70$ Hz 付近に共振点をもち、これは同モデルの上下、ロッキング振動の固有振動数 $f = 1.64, 2.77$ Hz に比較よく一致している。非線形解析で得られた共振曲線は、いずれの場合にも各ピークが線形解析のそれより低い

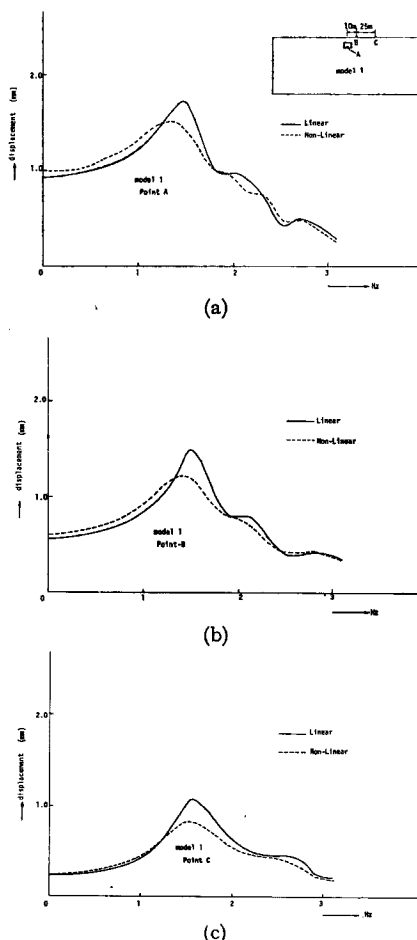


Fig. 8 Response curve of displacement.

振動数で現われ、ピーク部分のふくらみも線形解析のそれに比べて大きくなっている。また、たとえば1次の共振点についてみれば、加振点から離れるにつれて、その共振振動数が高くなる傾向がみられる。これは遠方の地点ほどひずみレベルが小さくなって見掛け上は剛性が増加することとなり、共振振動数が高くなっているものである。

これらのことは地盤のもつ非線形性の特徴をよく表わしていると思われる。

次に、構造物の埋設深さ、横幅の大きさ、あるいは表層地盤の層厚の違いによって、波動の伝播特性がどのような影響を受けるかについて解析結果を示し、考察を加える。以後述べる数値計算結果はすべて非線形解析によった。

さて1つのモデルにおいてある地点の上下方向の応答変位 u_g を載荷点のそれで除したものを u_g^* と定義する。すなわち

$$u_g^* = u_g / u_{11} \dots \dots \dots (2-9)$$

この u_g^* は載荷点と地盤各点との間のいわゆる変位伝達率を表わしていると考えてよい。前に述べたように、この u_g^* は、外力の振動数と密接な関係を持ち、このような振動系においては上下振動の共振振動数付近で最大値をとるといった性質を有するものである。以下外力の振動数がそれぞれのモデルの上下方向の固有振動数の場合の計算結果を示す。

Fig. 9 は、表層地盤の層厚が 60 m の場合について、埋設構造物の大きさの違い(横幅 10 m, 20 m) が、地表各点の変位伝達率にどのような影響をもたらすかを検討したものである。各埋設深さの場合とも構造物の横幅が 10 m の場合を基準にとった。同図より明らかなように、構造物の大きさが大きい方がその変位伝達率は大きくなり、その差は載荷点から離れるにつれて広がっていくことが知られる。このように地中の構造物内の1点を加振した場合、地盤中を伝わる波動は載荷点からというより、むしろ構造物全体の動きによって引き起こされることが知られているが⁴⁾、Fig. 9 の結果をみれば、埋設構造物が大きい場合には小さい場合に比べて、波動がより広範囲に伝播されるため、振動がより遠方まで伝わりやすいことが知られる。

このため応答変位は、載荷点近傍では構造物が小さい方がより大きな変位を与えるが、遠方に行くほど伝達率が異なるためその差異は小さくなるものと思われる。

次に Fig. 10 は、同じく表層地盤の層厚が 60 m の場合について構造物の埋設深さの違いが地表各点の変位伝達率にどのような影響をもたらすかを検討したものである。同図は構造物の大きさが 10 m の場合と 20 m の場合に分けて示したものである。またそれぞれ埋設深さが 5 m の場合を基準にとった。同図をみれば埋設構造物の埋設深さが 10 m の場合には、その値は各地点とも 1.0 近傍の値であり、この程度の埋設深さの差は変位伝達率に差異をもたらさないものと考えられる。しかし埋設深さが 15 m の場合には、その変位伝達率は埋設深さが 5 m の場合よりもかなり大きくなっており、その差は載荷点から離れるにつれて広がっていくことが知られる。

Fig. 11 は、表層地盤の厚さの違いによる変位伝達率の比を示したものである。構造物の埋設深さ、大きさが同じで、表層地盤の層厚のみが異なるモデルの対応する

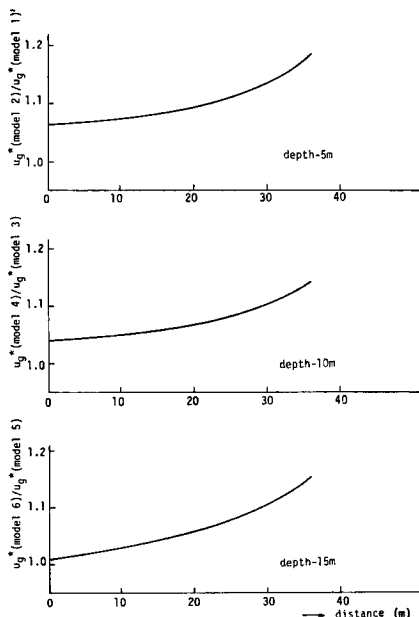


Fig. 9 Transmission rate of displacements considering the length of structures.

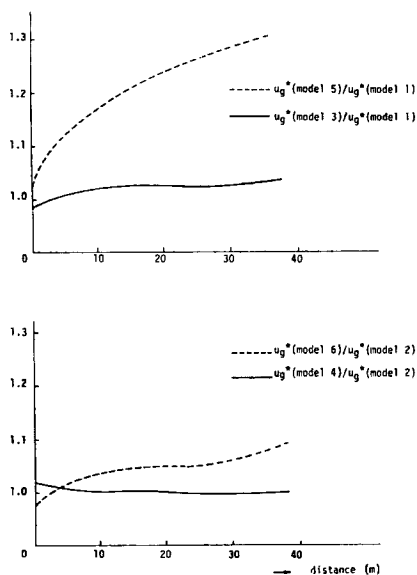


Fig. 10 Transmission rate of displacements considering the buried depth of structures.

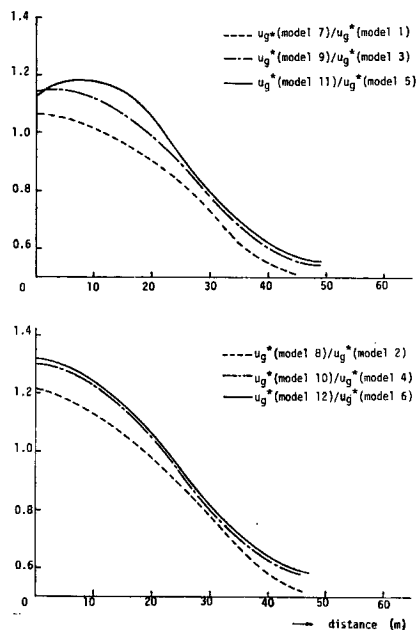


Fig. 11 Transmission rate of displacements considering the depth of surface layer.

地表各点の変位伝達率を示したものである。いずれも層厚が 60 m の場合を基準にとった。同図より明らかなように、いずれの場合も層厚 40 m の場合には、その変位伝達率が急速に減少していくことが知られる。このことは層厚が小さい場合、系の固有振動数は高くなり、伝播波動の周波数成分に高周波成分が卓越するため、距離による減衰も大きくなるものと考えられる。

2.3 波動伝播特性と振動遮蔽効果に関する考察

これまでの解析で明らかになったように、地中の構造物の 1 点に加振源がある場合、そこから地盤中に伝播していく波動は、構造物の埋設深さ、大きさ、あるいは表層地盤の大きさ等の変化によってある程度の影響を受けるものと思われる。地表面についていえば、その運動は波の進行方向と逆方向に回転するような逆行運動をしており、レーレイ波的存在が予想される。一般にレーレイ波のエネルギーの大部分は地表面下 1 波長までの深さで伝播されることが知られており、振動を軽減するにあたっては、このような波動のもつ特性を考慮に入れていく必要があるのは当然のことである。

このような観点より、ここでは、このような伝播特性をもつ波動を遮蔽するために、地表面にトレンチを設け、トレンチの位置、深さ、あるいは外力の載荷位置を変化させることにより、それらと遮蔽効果との関連性を定性的に明らかにするとともに、その遮蔽効果に関して得られた結果を分析把握することにより、逆に伝わる波動の伝播特性を検討することに努めた。まずここで用いた解析モデルについて述べる。Fig. 12 には、ここで用いた種々の解析モデルを一まとめにして表わした。地盤層の横幅は 200 m、層厚は 40 m とし、地盤の諸定数、境界条件はそれぞれ Fig. 1 に示したものと同様とした。Table 2 には、ここで用いた 10 通りのモデルについて CASE 番号とそのトレンチ位置、深さ、載荷点位置との対応を一括して示した。Table 2 より明らかなように、たとえば Case 1 は、そのトレンチ位置が載荷点より 10 m、その深さが 5 m、また載荷点が GL-5 m (すなわち L1 の位置) なるモデルであることを示すものである。またモデル化にあたっては、メ

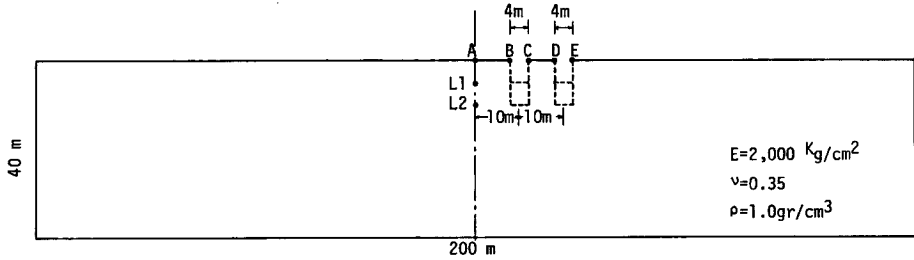


Fig. 12 Analytical model.

ッシュの分割数, 分割方法が各モデル間でできるだけ等しくなるよう留意した。なお外力は GL-5 m の L1 点, GL-10 m の L2 点の上下方向にそれぞれ $P=P_0e^{i\omega t}$ なる形で与えた。

さて, その遮蔽効果を評価する指標として, どのようなものを導入すればよいかについては種々の議論があるところと思われるが, ここではトレンチの両端の地点の応答変位の比をその指標として用いた。すなわち, たとえば Fig. 12 に示す手前のトレンチについて, 変位伝達率 $R_{BC}(f)$ を次のように定義する。

$$R_{BC}(f) = u_B(f) / u_C(f) \dots\dots\dots (2-10)$$

ここに, $u_B(f)$: B 地点での上下方向の応答変位
 $u_C(f)$: C 地点での上下方向の応答変位

Table 2 Kinds of model.

location	depth	GL-5 m(L1)	GL-10 m(L2)
10 m	5 m	CASE 1	CASE 1'
10 m	10 m	CASE 2	CASE 2'
20 m	5 m	CASE 3	CASE 3'
20 m	10 m	CASE 4	CASE 4'
no-trench		CASE 5	CASE 5'

Fig. 13 は载荷位置が GL-5 m, トレンチ位置が 10 m とそれぞれともに等しく, トレンチ深さが 5, 10 m と異なる Case 1 と Case 2 の変位伝達率をそれぞれ 1 点鎖線, 破線で示したものである。またトレンチがない CASE 5 の変位伝達率 $R_{BC}(f)$ を実線で示した。CASE 5 についていえば, その $R_{BC}(f)$ は $f=2.6 \text{ Hz}$ 付近にピークをもつが, この振動数はこの地盤の上下振動の共振振動数とも一致しており, 前に述べたように共振振動数付近では波動の距離に対する減衰が最も小さいことを表わしている。また共振振動数より大きい振動数では, 変位伝達率は振動数の増加とともに減少する傾向を示し, 振動数の高い波動ほど距離に対して早く減衰することが知られる。またこれらの傾向は CASE 1, CASE 2 についても同様であることがわかる。破線で示した CASE 1 についてみれば, CASE 5 に比較してその変位伝達率は小さくなっており, とくに高い振

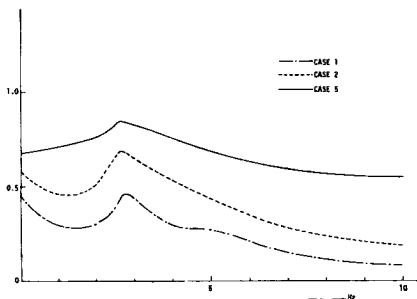


Fig. 13 Transmission rate R_{BC} .

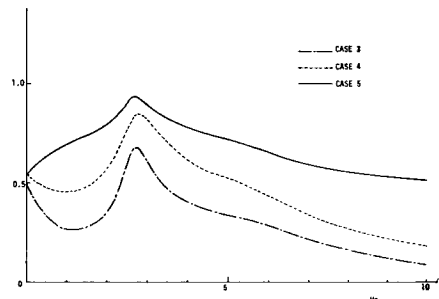


Fig. 14 Transmission rate R_{DE} .

動数になるほど CASE 5 との差は広がっていく傾向を示している。このことは波長の短い波ほどこのようなトレンチによってよく遮蔽されるためと思われる。この傾向は一点鎖線で示した CASE 2 の場合についても同様であるが、その変位伝達率はさらに小さくなっていることが知られる。

Fig. 14 は、CASE 3, CASE 4, CASE 5 の場合について D-E 間の変位伝達率を示したものである。CASE 3, 4 は Fig. 13 の CASE 1, 2 とトレンチの深さが対応しているモデルであるが、その変位伝達率はいく分 CASE 1, 2 のそれより大きくなっていることが知られる。また CASE 5 についても B-C 間よりも D-E 間の方がその変位伝達率は若干大きくなっている。このことは、地表面を伝わっている波動は、加振点から離れるにつれてトレンチの有無にかかわらず、その距離に対する減衰割合が小さくなる性質をもつてくるためと思われる。したがって、この結果から見れば、トレンチの設置位置は加振点に近い方がより効果的であると思われる。

次に、このトレンチによる遮蔽効果に対して、載荷位置の違いが及ぼす影響について検討してみる。

Fig. 15 は載荷点の位置が GL-5 m, GL-10 m の場合について、トレンチ深さがそれぞれ 5, 10 m である CASE 1, 1', CASE 2, 2' の変位伝達比を求めたものである。これは変位伝達率からトレンチによる変位減衰効果のみを取り出して比較するために、各振動数におけるそれぞれのトレンチなしの場合の変位伝達率を 1 とし、それに対する各 CASE の変位伝達率の比率を求めたものである。同図によれば、トレンチの深さが 5 m の場合も 10 m の場合も、その変位伝達率比は載荷点の位置が GL-10 m と深い場合の方が上回る傾向にあることが知られる。これは載荷点の位置が深いほど、波動は深く潜行するかたちで地盤中を伝播するため、このように地表面に設けたトレンチではその波動が遮蔽されにくいからと思われる。したがってトレンチによる振動遮蔽効果は、振動源の位置が地表に近いほどより大きいことが予想される。

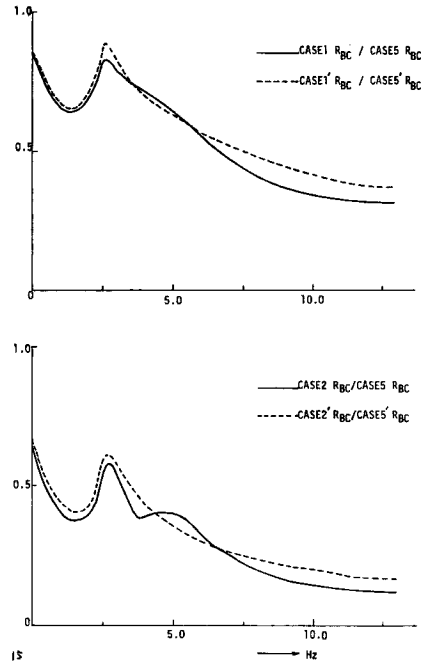


Fig. 15 Transmission rate R_{BC} .

3. 振動実験による波動伝播特性の解析

3.1 模型地盤振動実験と結果の考察

ここでは、地盤内部の 1 点に振動衝撃荷重が作用した場合、その表層地盤中を伝播する波動の特性を、おもにその伝播速度や距離による波動の減衰といった観点から検討する目的で、室内においてアクリル-アマイド系のグラウト剤によって模型地盤を作製し、地盤振動の測定を実施した。まず最初に本実験における相似律、模型地盤材料の性質、計測装置、実験方法等を説明する。

本実験における相似律については以下のような検討を行なった。Fig. 16 に示す実験モデルにおいて、この振動現象に関与する物理定数、変数には次のようなものが考えられる。

$h[L]$: 地表面より荷重の作用する点までの距離

$H[L]$: 地盤層の厚さ

$\rho[ML^{-3}]$: 地盤の密度

$E[ML^{-2}T^{-2}]$: 地盤の弾性定数

ω [T⁻¹]: 荷重の円振動数

u [L]: 地盤の応答変位

ここに, [L], [M], [T] は絶対単位系で表示した3つの基本単位である。

以上の物理定数, 変数で構成される振動現象は次式で書き表わされる。

$$f(h, H, \rho, E, \omega, u) = 0 \dots\dots\dots(3-1)$$

この振動現象に関与する前述した6個の次元量のうち, [L], [M], [T] の代表量として H, ρ, E を選ぶと Buckingham の π 定理によって式(3-1)は, 次のような無次元量によって表示される。

$$g(h/H, u/H, H^2\rho\omega^2/E) = 0 \dots\dots\dots(3-2)$$

したがって地盤の応答変位に関しては次の関係式が成立する。

$$H = \psi(h/H, H^2\rho\omega^2/E) \dots\dots\dots(3-3)$$

式(3-3)は右辺の無次元量を原型と模型においてそれぞれ等しくなるように選べば, 応答変位の地盤層の厚さに対する比は原型と模型において等しくなることを示している。本実験においては, 長さ比 $L_p/L_m \doteq 100$ とし, また地盤材料として用いたアクリル-アマイド系のグラウト剤の性質から, 密度比 $\rho_p/\rho_m \doteq 2.0$, 弾性定数比 $\doteq 5000$ と定めた。なお上式中の添字 p, m はそれぞれ原型 (prototype), 模型 (model) を表わしていることはいままでもない。この時, 外力の周波数についての相似律を考えれば, $H_p^2\rho_p\omega_p^2/E_p = H_m^2\rho_m\omega_m^2/E_m$ の関係より次式が成立する。

$$\frac{\omega_p}{\omega_m} = \frac{H_m}{H_p} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \frac{E_p}{E_m}} \dots\dots\dots(3-4)$$

前述した諸数値を代入すれば, $\omega_p/\omega_m = 0.5$ と求まる。この時, 時間についての相似律を考えれば, 時間比 $T_p/T_m = 2$ となる。すなわち実験モデルにおいては時間領域においては, 半分に短縮して取り扱うことが必要とされる。

Table 3 には, 本実験で用いた模型実験の寸法とその物理定数およびそれに対応する実地盤のそれらを一括して示した。

本実験で模型地盤材料として使用したアクリル-アマイド系のグラウト剤 (商品名: 日東 SS 30 R) は, ほぼ弾性的な挙動を示し, 弾性定数は本実験で用いた15%濃度の場合で, $E = 466 \text{ gr/cm}^2$, また $\rho = 1.0 \text{ gr/cm}^3$, $\nu = 0.495$ なる物理的性質をもつものである。

実験方法としては, **Fig. 16** に示すように,

A1, A2, A3, A4 の位置に直径約 10 mm の載荷用の円形板を埋め込んで, それに上下方向に衝撃を加えて波動を発生させ, それによって生ずる地盤各点の加速度を測定するという方法をとった。その際に衝撃を加える棒と, 周辺地盤とが接触しないようにするために, 載荷用円形板と地表面との間に直径約 5 mm の空洞を設けた。また模型地盤の境界についていえば, 模型地盤層下端部の境界は実地盤における基盤とみなし, 側方の境界は測定時には取り去って反射動の影響を少なくするとともに, 振動源より直接に伝播していく波動と一たん境界面で反射した後, 伝播していく波動との分離が可能であるように, 模型地盤の側方の大きさと測点距離を決定した。

次に加速度波形とそのスペクトル, 伝播速度, 波動の距離による振幅減衰特性, 周波数伝達関数の考え方について, 実験結果を示しつつ考察を進めていくことにする。

Table 3 Prototype and model.

	prototype	model
depth of ground (m)	52	0.52
shock location (m)	GL-10, 20, 30	GL-0.1, 0.2, 0.3
elastic constant (kg/cm ²)	2330	0.466
unit weight (t/m ³)	2.0	1.0
poisson ratio	0.495	0.495

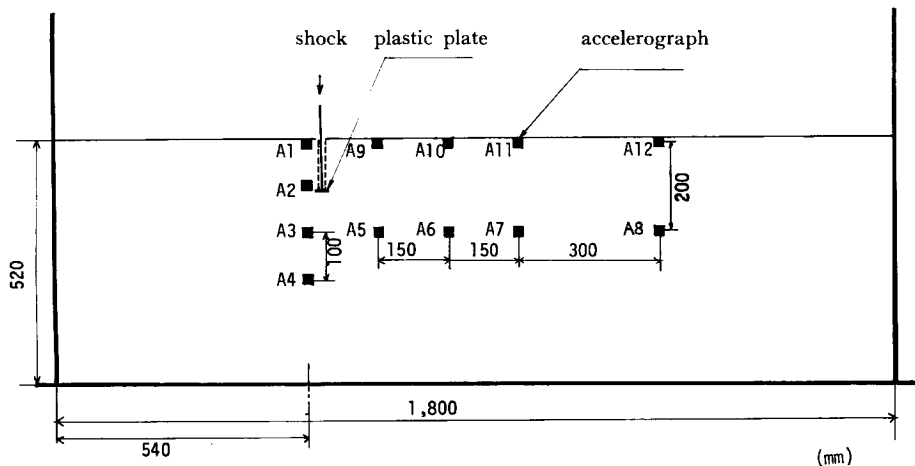


Fig. 16 Experimental model.

Fig. 17(a), 17(b) は、一例として地表面より 20 cm の位置 (A3 近傍) に上下方向の衝撃を加えた場合の A5~A8 の鉛直方向成分の加速度波形、および A3, A4 の鉛直方向加速度波形を示したものである。波形の最初の立ち上がり時間から求めた位相速度は A5~A8 方向へは 3.91 m/sec, A3~A4 方向へは 11.91 m/sec と求められ、加振点から水平方向と鉛直方向には異なった種類の波動が伝播していることが知られる。一方、地盤材料の弾性定数、密度から計算される縦波、横波実体波の速度はポアソン比を 0.490, 0.480 としてそれぞれ 2.76, 2.78 m/sec, 19.74, 11.71 m/sec と求められる。この結果より打撃方向には縦波が、それと直交する方向には横波的性質をもつ波動が伝播しているとみなしてよさそうである。

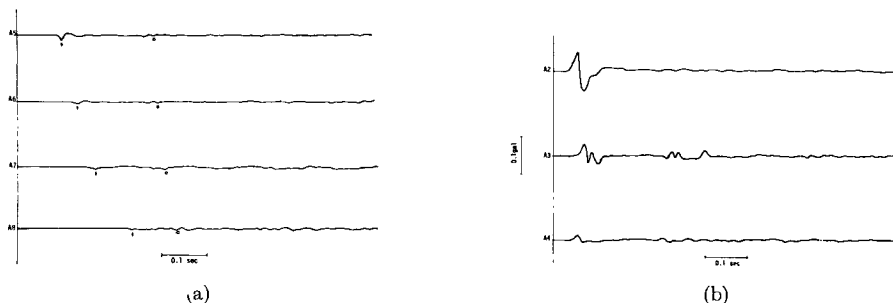


Fig. 17 Acceleration (vertical component)

次に Fig. 18(a), 18(b) には、A4 の位置に打撃を加えた際の、A3, A12 の位置での加速度 3 成分の同時時間記録を示した。この図からわかるように A3, A12 の位置ともに、地盤層の長手直角方向の運動成分は小さく、とくに A12 点ではその運動は鉛直-水平長手平面内のみとなっていることが知られる。このような平面内において運動成分をもつような波動はレーレイ波として一般に知られており、また嶋⁵⁾らによっても振動源から離れた地表面付近ではレーレイ波が伝播することが指摘されており、本実験においても表層地盤表面においてはレーレイ波の存在が予想される。

次に、2 測点で得られた同時記録から、フーリエ変換の助けを得て、波動のもつ位相速度、群速度を求める手法について説明する。今、 $x-y$ 平面内で x 方向に伝播する波動を考え、 $x=x_1, x_2$ で測定される波動の時

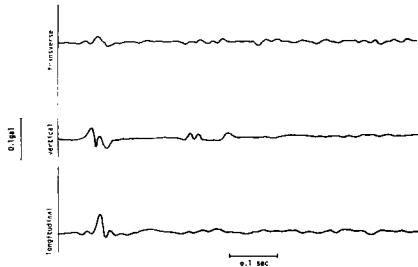


Fig. 18(a) Acceleration (A3).

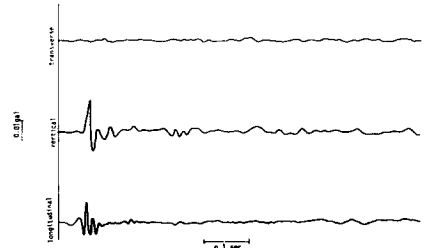


Fig. 18(b) Acceleration (A12).

間記録をそれぞれ $f(t, x_1), f(t, x_2)$ とする。またそれぞれのフーリエ変換を $g(\omega, x_1), g(\omega, x_2)$ とする。ここで、たとえば、 $g(\omega, x_1)$ を考えると、これは複素数値であり、絶対振幅 $|g(\omega, x_1)|$ と位相特性 $\varphi(\omega, x_1)$ を用いると、次のように書き表わされる。

$$g(\omega, x_1) = |g(\omega, x_1)| e^{-i\varphi(\omega, x_1)} \dots\dots\dots(3-5)$$

ところで、測点 x_1 より Δx 隔たった測点 x_2 での時間記録 $f(t, x_2)$ が次のように書き表わされるものと仮定する。

$$f(t, x_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(x_1, x_2) g(\omega, x_1) e^{-i\omega \left\{ t - \frac{x_1 - x_2}{v(\omega)} \right\}} d\omega \dots\dots\dots(3-6)$$

上式の持つ意味は次のとおりである。波動は平面的な拡がりをもつ媒体中を伝播するのでエネルギーが拡散し、 $x=x_1$ より Δx 隔たった $x=x_2$ 地点においては power が減少している。しかし波動のもつスペクトル特性には変化がなく、その絶対値は伝播距離のみの関数 $a(x_1, x_2)$ として表わされるものとする。一方、位相特性について考えれば、波動が2点間のある周波数における伝播速度 $v(\omega)$ で伝播することによって、2点間の距離を $v(\omega)$ で除した位相遅れが生じることになると考える。この $v(\omega)$ が実は波動のもつ位相速度ということになってくる。これらのことより $x=x_2$ 地点での位相特性 $\varphi(\omega, x_2)$ は次のように書き表わされる。

$$\varphi(\omega, x_2) = \varphi(\omega, x_1) + \omega \cdot \Delta x / v(\omega) \dots\dots\dots(3-7)$$

したがって、位相速度 $v(\omega)$ は次式で書き表わされる。

$$v(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\varphi(\omega, x_2) - \varphi(\omega, x_1)} \dots\dots\dots(3-8)$$

次に、位相速度 $v(\omega)$ より群速度 $V(\omega)$ を求める手法について説明する。

群速度 $V(\omega)$ と位相速度 $v(\omega)$ には次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{V(\omega)}{v(\omega)} &= \frac{1}{v(\omega)} \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{v(\omega)} \frac{d\omega}{dv(\omega)} \bigg/ \frac{d \left\{ \frac{\omega}{v(\omega)} \right\}}{dv(\omega)} \\ &= \frac{1}{v(\omega)} \frac{d\omega}{dv(\omega)} \bigg/ \left\{ \frac{1}{dv(\omega)} \frac{d\omega}{dv(\omega)} - \frac{\omega}{v(\omega)^2} \right\} \\ &= v(\omega) \frac{d\omega}{dv(\omega)} \bigg/ \left\{ v(\omega) \frac{d\omega}{dv(\omega)} - \omega \right\} \dots\dots\dots(3-9) \end{aligned}$$

ところで本実験より求めた位相速度 $v(\omega)$ は後述するように横軸に周波数、縦軸に位相速度をとって両対数目盛上に図示すると、両者の関係はほぼ直線関係であることが知られ、次式のように表示される。

$$\log v(\omega) = a \log \omega + b \dots\dots\dots(3-10)$$

両辺を $v(\omega)$ で微分すると、

$$\frac{1}{v(\omega)} = \frac{a}{\omega} \frac{d\omega}{dv(\omega)}$$

よって、

$$v(\omega) \frac{d\omega}{dv(\omega)} = \frac{\omega}{a} \dots\dots\dots(3-11)$$

式(3-11)を式(3-10)に代入すると

$$V(\omega)/v(\omega) = 1/(1-a) \dots\dots\dots(3-12)$$

Fig. 19 の●印は、A3 の位置に打撃を加えた時に、A5, A6 間を地盤層の長手方向に伝播する波動の位相速度を求めたものである。一方、この $v(\omega)$ を両対数目盛上に図示すれば位相速度と振動数の関係はほぼ直線関係にあることが知られ、その傾きは $a=0.46$ と求まる。

この値を用いて式(3-12)より計算される $V(\omega)$ を Fig. 19 に○印で示した。

また、A5, A6 の 2 測点でのそれぞれの加速度記録より、目視によって近似的に群速度を求めたものが×印であり、両者は比較的よく一致している。このことは、この手法による位相速度、群速度の算定の妥当性を示すものであると思われる。また伝播速度はいずれも振動数とともに増加するような分散性をもつ波動であることが知られた。

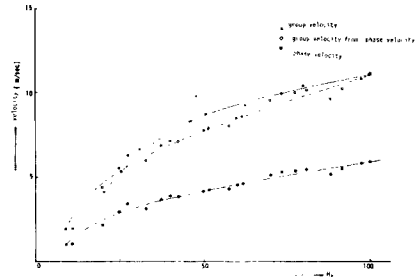


Fig. 19 Wave velocity.

次に、加振点からの距離と波動減衰との関連性について検討する。これまでの研究ではもっぱらその振動減衰効果を伝播距離の関数として評価することに重点がおかれてきたと思われる。ここでは、3つの方法によって評価する。1つは得られた波形からフーリエスペクトルを計算して、その絶対値の2乗を振動数に関して積分し、加振点近傍の測点で同様にして得られた値で除すことによってこの波動減衰率を求める方法である。この方法は波動のもつエネルギーの減衰の仕方と伝播距離

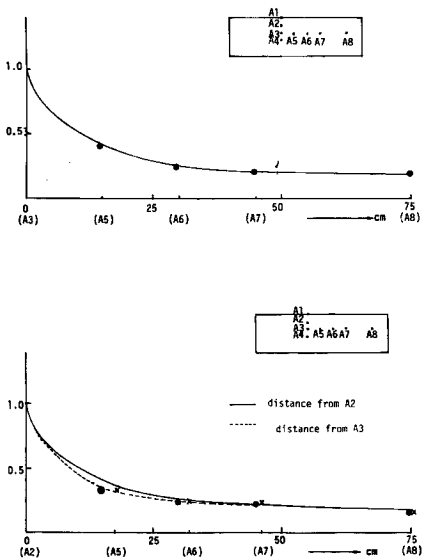


Fig. 20 Decrease of acceleration.

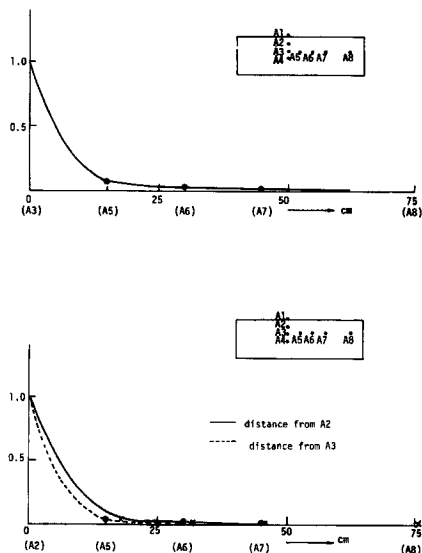


Fig. 21 Decrease of acceleration.

との関係を求めていくものであり、以下エネルギー法と呼ぶことにする。第2の方法は、波の最初の立ち上がり波の振幅の大きさを求めて、これを加振点近傍での値で除して、それと距離との関連について検討するもので、この方法を振幅法と名付けておく。Fig. 20 には、A2, A3 点の近傍の載荷板上上下方向の衝撃を加えた時に、測点 A5~A8 方向での波動減衰の様子を上述したエネルギー法で、また Fig. 21 は同様の実験を振幅法でそれぞれ整理した結果を示した。図より明らかなように、エネルギー法、振幅法の違いによる減衰曲線は大きく異なる。これは振幅法が最大振幅のみを問題にしたのに対して、エネルギー法においては、伝播とともに、反射、屈折、散乱等によって、種々の周波数成分を含んでくる波のトータルなエネルギー量を問題にしたためと思われる。しかし波形全体を積分して用いることに多少の問題があるとしても、本研究のように表層地盤を伝播する波を取り扱う場合には、このようなエネルギー法を用いるのも一方法であり、最大振幅のみでは、ある地点の振動の影響を過少に評価する危険があると思われる。第3の方法は、この減衰効果を周波数伝

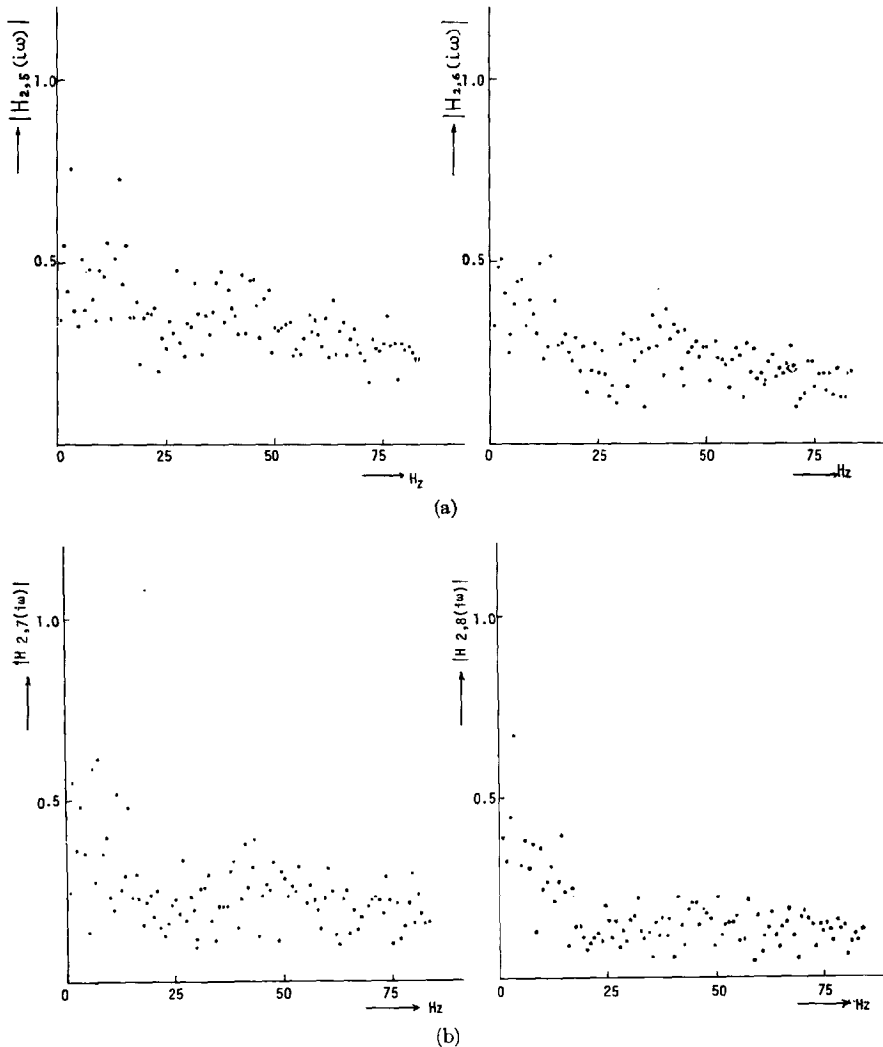


Fig. 22 Frequency response function.

達関数の考え方をういて評価するものであり、周波数伝達関数法と名付けた。今、測点 j, k での波形が得られており、そのフーリエ変換をそれぞれ、 $H_j(i\omega), H_k(i\omega)$ とすれば、測点 j から測点 k へと波動が伝達されてその間で振動数特性が変形されたわけであるから、もしこの振動系が線形であるならば、そのフィルター効果を表わす $H_{jk}(i\omega)$ は次のように書き表わされる。

$$H_{jk}(i\omega) = H_k(i\omega) / H_j(i\omega) \dots\dots\dots(3-13)$$

Fig. 22(a), 22(b) には A2 近傍に衝撃を加えた時の $H_{2k}(k=5,6,7,8)$ を示した。周波数伝達関数はともに似かよった形状を示しており、2~3 Hz にピークを有し、それ以上の振動数の増加に対しては、一様に減少していく傾向にある。2~3 Hz のピークについては、この振動系に固有なものであり、有限要素法による解析結果から考えると、この模型地盤層の上下方向振動の固有振動数に対応してくるものであると思われる。さらにこの周波数伝達関数の特性を明らかにするために、次式で定義される α_{kl} を考えることにする。

$$\alpha_{kl} = H_{jl}(i\omega) / H_{jk}(i\omega) \dots\dots\dots(3-14)$$

ここで j は、衝撃を加えたごく近傍の測点を表わす suffix であり、 k, l はともに各測点の位置を表わす suffix である。Fig. 23 は $j=2$ の場合の、 $\alpha_{5,l}(l=6,7,8)$ を求めたものである。 $\alpha_{k,l}$ は振動数に関係なくほぼ一定値をとっていることが知られる。このことは、衝撃点より出た波動は、衝撃点近傍では、衝撃入力そのものの影響を強く受けるのに対し、衝撃点から離れるにつれて系そのものの振動特性の影響を受けるため、同様のスペクトル特性をもってくるためと思われる。したがってその間の地盤内は、周波数成分に対して同様のフィルター効果を示し、その振幅に対する減衰効果だけが異なっていると言える。さらにこの $\alpha_{k,l}$ が振動数に対して一定値をとってくるということは、ここで定義した周波数伝達関数が、周波数に関する要素と加振点からの距離に関する要素に分離できる可能性があることを示している。前述したように各周波数伝達関数はほぼ同じ振動数でピークをもつような、この振動系に固有と思われる形状を示すことがわかった。そこで伝播距離との関係を見るために、 α_{kl} と衝撃点から α_{kl} が求められている各測点までの距離との関係を Fig. 24 に示した。

本実験においては計測器等の不備のためもあって十分な資料を得られなかったため、周波数伝達関数が周波数に関する要素と、加振点からの距離に関する要素とで表わしうることを定性的に述べるにとどまったが、さらに多くの実験データを得ることによって、伝達関数そのものを各要素(伝播距離、振動源の深さ、系の固有周期、など)の関数として数式表示することが望まれる。

3.2 実地盤振動実験と結果の考察

実地盤において地表および地中に振動源がある場合の、波動の伝播特性を解析する目的で、振動源として起振機を地表面上と井筒ケーソン内の GL-2 m の地

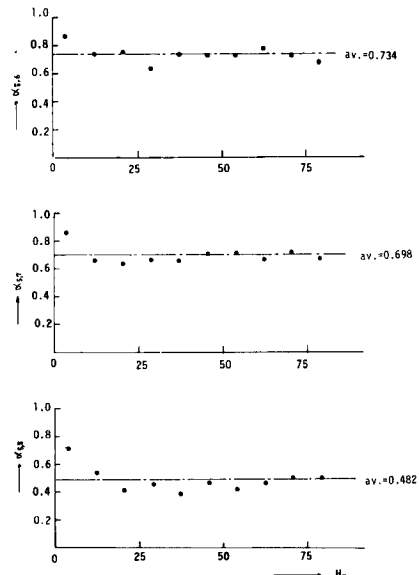


Fig. 23 Relation between α_{kl} and frequency.

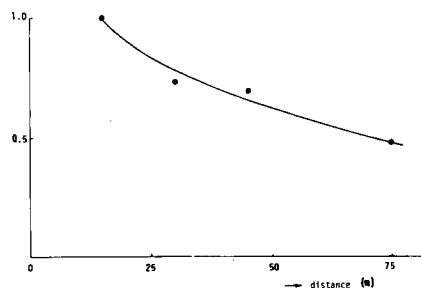


Fig. 24 Relation between α_{5l} and distance.

点に設置し、地表での振動測定を行なった。また雷管による振動実験も合わせて実施した。本実験を実施した地点は京都大学防災研究所宇治川水理実験所構内である。この地点では標準貫入試験、プレシオメーターによる横方向K値の測定などによる土質試験がすでに実施されており⁶⁾、その結果を Fig. 25 に示す。また板たたき法によるSH波、あるいはP法によるP波の伝播速度はそれぞれ、185 m/sec, 490 m/sec である。

起振機による振動実験では、地表面上および GL-2 m の位置に起振機を設置して、上下方向に定常加振し、地表面上の測線に沿って 5 m 間隔に 5 箇所にした速度型換振器によって、地盤の上下方向の運動成分を計測した。起振機はいずれの場合にも 60×60×25 cm の鉄筋コンクリート製の矩形型載荷板に固定して加振し、振動が一樣に地盤中に伝達されるように工夫した。また GL-2 m の位置に起振機を設置するに際しては、直径約 110 cm の井筒ケーソンを沈下させ、中の土を取り除くようにした。

また GL-3.5 m の位置に 6 号雷管を埋め込んでおき、それを炸裂させて、その時の地表面上に設けた測線上の 5 地点での上下方向の振動速度を計測した。

Fig. 26 は、地表面上および GL-2 m の位置に起振機を設置して、上下方向にある一定の振動数で加振し、その時同図中に示した地表面上の測点 V1~V5 で得られた地盤の上下方向の運動成分の定常波記録より位相差 ΔT を読みとって、次式で位相速度 $v(\omega)$ を求めて、各振動数について図示したものである。 Δx は測点間の距離である。

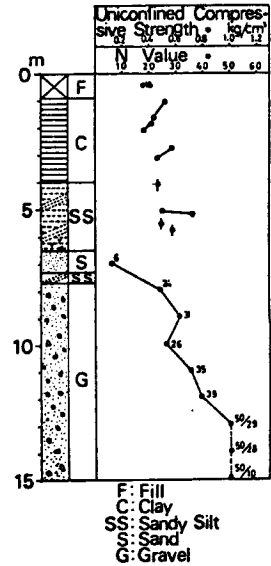


Fig. 25 Soil characteristics of surface ground.

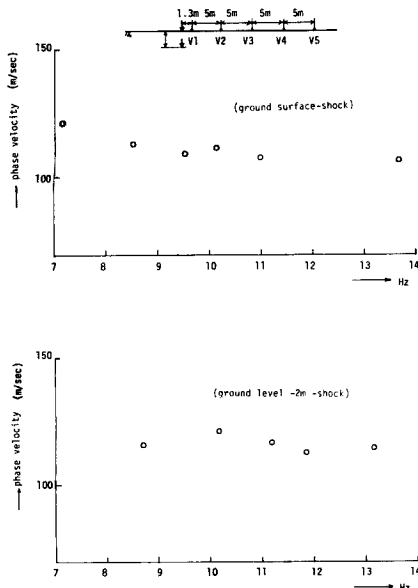


Fig. 26 Phase velocity.

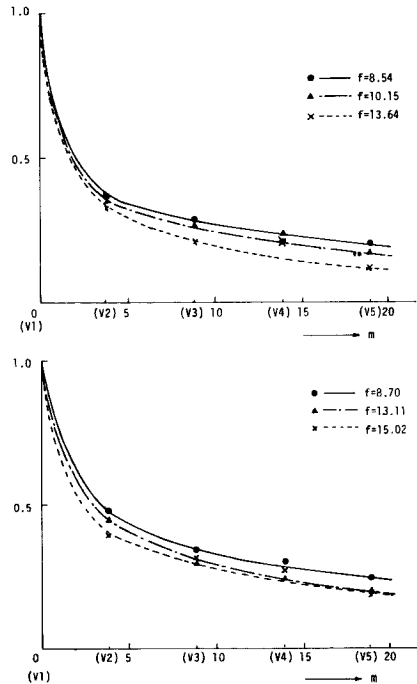


Fig. 27 Decrease of velocity.

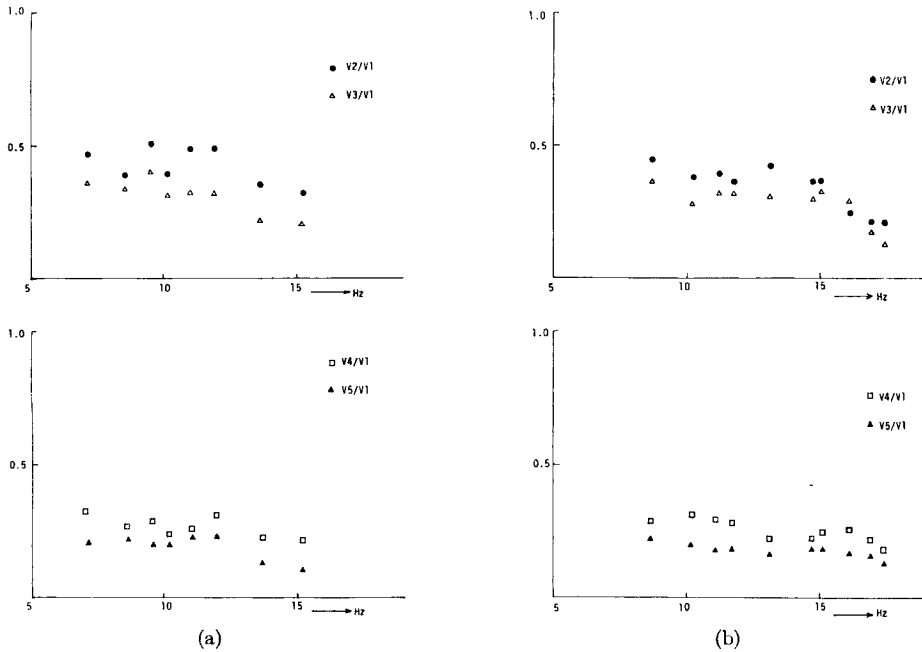


Fig. 28 Frequency response function.

$$v(\omega) = \Delta x / \Delta T \dots\dots\dots(3-15)$$

7~14 Hz の加振振動数の範囲では、位相速度は振動数のいかにかわらずほとんど一定値 (105~120 m/sec) を示す。この値から考えると、この方向には S 波速度に近い伝播速度をもつ波動が伝播しているものと思われる。

次に、地表面、および GL-2 m の位置で加振した時の地表面各測点の速度振幅を、V1 を基準として示したものが Fig. 27 である。測点 V1 は起振機より約 1.3 m 離れた地点にあるが、特に地表面加振においては加振点での地表の動きをほぼ近似しているものと思われる。同図をみると GL-2 m で加振した場合には、地表面で加振した場合に比べて距離による減衰率は小さくなっており、波動がより遠方まで伝播する傾向にあることを示している。また加振振動数が増加するにつれて、すなわち伝播する波の波長が短くなるにつれて、その伝達率は減少しており、これらの結果は 2 次元有限要素法あるいは室内模型実験の結果とよく対応している。

次に、周波数伝達関数の考え方を用いて、周波数領域における波動の伝播特性を明らかにする。起振機実験においては、ある加振振動数 ω に対して、各測点

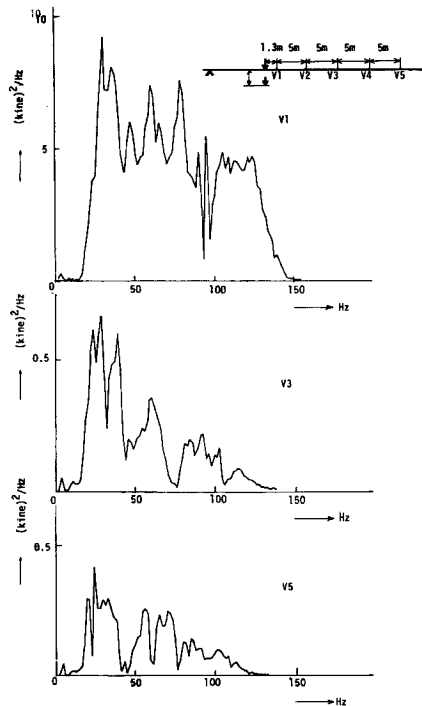


Fig. 29 Power spectrum of velocity.

での速度振幅 $\tilde{U}(\omega)$ が求められており、測点 j と測点 k の間の地盤のフィルター効果を表す周波数伝達関数を式(3-13)に対応して次式で定義する。

$$\tilde{H}_{jk}(\omega) = \tilde{U}_k(\omega) / \tilde{U}_j(\omega) \dots\dots\dots(3-16)$$

ここに、

$\tilde{U}_k(\omega), \tilde{U}_j(\omega); k, j$ 地点での速度振幅

今、基準点 j 点を起振機のごく近傍の測点 V1 にとり、V2~V5 各測点の周波数伝達関数を求めたものが Fig. 28(a), 28(b) である。同図 (a) は地表面で加振した場合、同図 (b) は GL-2 m で加振した場合であるが、いずれもこの振動数範囲の約 7~18 Hz では、 $H_{jk}(\omega)$ は顕著なピークを示さず、各地点とも振動数の増加に伴って、その値は減少していく傾向を示す。これは高い振動数成分の波ほど距離に対して減衰しやすいためと思われる。

次に雷管による振動実験の結果を示す。Fig. 29 には GL-3.5 m の位置で雷管を炸裂させた時の、図中に示す V1, V3, V5 地点における応答速度のパワースペクトルを示したものである。いずれも約 25~30 Hz 付近にピークをもつことが知られる。V3 と V5 におけるパワースペクトルは、パワーそのものの大きさは異なるが、そのスペクトル特性はほぼ似たような形状を示すことが知られるが、V1 におけるスペクトル特性は V3, V5 のそれとは大きくその様相を異にしている。これは測点 V1 が、振動源のほぼ直上付近にあるために、振動源そのものの振動特性に大きく影響されるのに対して、V3, V5 地点では振動系としての地盤の動特性に大きく左右されるため同様のスペクトル特性を有してくるものと思われる。今、このことより V1 での応答が振動源での地盤の挙動を多少の差異はあるにせよ、ほぼ近似しているものとみなし、式(3-16)を用いて、V1 を基準として地表各地点での周波数伝達関数を求めたものが Fig. 30(a), 30(b) である。求められた周波数伝

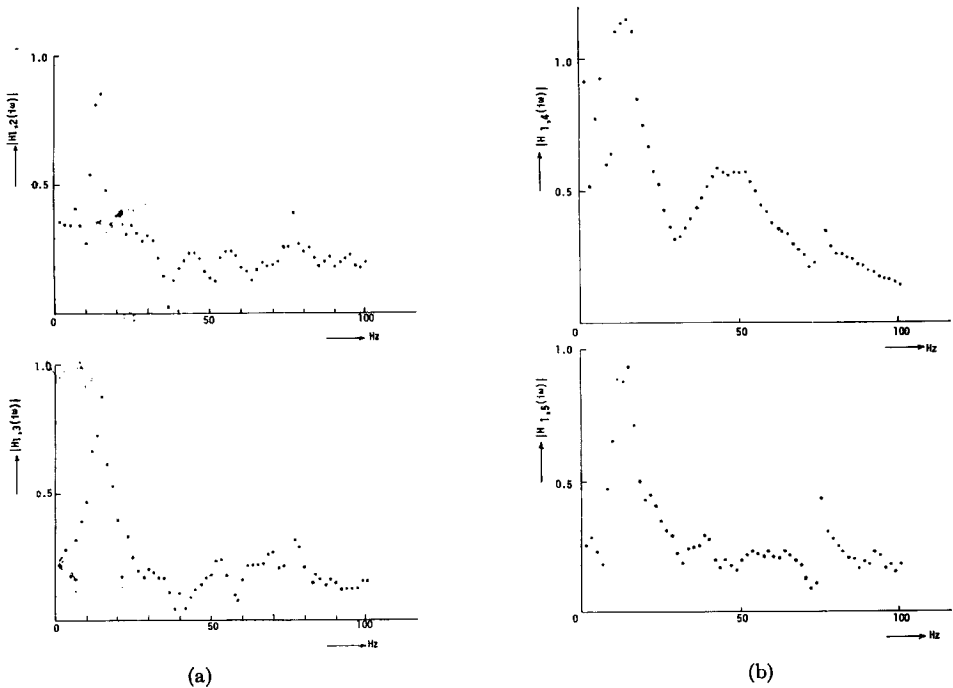


Fig. 30 Frequency response function.

達関数はいずれも 15 Hz 付近にピークを有し、それより高い振動数に対しては減衰する傾向にある。さてこのように地盤中の 1 点に加振点がある場合、各地点の周波数伝達関数は先に述べたように、上下振動の固有振動数付近でピークをもつことが知られたが、弾性波動論では、その固有振動数 f'_g は v_l を縦波の伝播速度、 H を層厚として周知の次式で与えられる。

$$f'_g = v_l / 4H \dots\dots\dots (3-17)$$

P 法での結果より $v_l = 490$ m/sec, また Fig. 25 に示したこの地盤の柱状図より $H = 8$ m とすれば $f'_g = 15.3$ Hz となり、Fig. 30(a), 30(b) における周波数伝達関数のピークを示す振動数約 15 Hz とよく一致している。起振機加振によって求められた周波数伝達関数 $\tilde{H}(\omega)$ においては、この 15 Hz 付近のピークは認められなかったが、これは起振機程度のエネルギーでは、GL-8 m の基盤層まで波動が十分に到達し得ず、地盤層全体として振動していないためと思われる。

4. 結 論

本研究において得られた成果を列挙すれば次のとおりである。

- 1) 地盤各点の振動変位伝達率は、表層地盤の上下振動の固有振動数付近でピークをもつ。このことは、この付近の周波数成分の波動が最も伝わりやすいことを示している。また高い振動数成分の波動ほど伝播距離の増加に対して早く減衰する傾向にある。
- 2) 有限要素法の結果によれば、埋設構造物内に加振源がある場合、その波動は、その埋設構造物が大きいほど、また埋設深さが深いほど、さらに表層地盤の層厚が大きいほど、それぞれ遠方まで伝わりやすい性質をもつ。
- 3) 室内模型実験においては、伝播距離と波動の減衰の関係を、振幅法、エネルギー法、および周波数伝達関数法という 3 つの方法で評価したが、振動伝播特性をより詳細に検討するための評価法としては、周波数伝達関数法が適していると思われる。
- 4) トレンチによる振動遮蔽は、トレンチが深いほど、またその位置が地表に近いほど効果的である。また振動源が地表に近い方が、トレンチは効果的に作用する。
- 5) 有限要素法による解析結果をみると、土の非線形性はこのような波動伝播問題ではさほど問題にする必要はないが、線形解と比べると共振振動数の低下、あるいは共振振動数付近での応答変位の低下がみられ、この点は十分考慮に入れておく必要がある。

謝 辞

本実験を行なうにあたり、多大の御便宜を与えて下さった京都大学防災研究所柴田研究室の各位に深く感謝の意を表します。なお数値計算は、京都大学大型計算機センター FACOM 230-60, 230-75 によった。なおこの研究は文部省科学研究費（特定研究、代表者：山本剛夫教授）の援助を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 柳沢栄司：地盤振動の遮蔽効果に関する基礎的研究，第 8 回土質工学研究発表会講演集，昭 48. pp. 613-616.
- 2) O. C. Zienkiewicz and Y. K. Cheung: The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, pp. 181-182, 1967.
- 3) H. B. Seed: The Influence of Local Soil Conditions on Earthquake Damping, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, August, 1969.
- 4) 後藤尚男・高田至郎・吉田明：地中構造物および周辺地盤の振動特性について，土木学会第 27 回年次学術講演集，I，pp. 413-414, 昭 47. 10.

- 5) 嶋悦三：強震地動にみられる表面波成分，第3回日本地震工学シンポジウム（1970）講演集，pp. 277-284.
- 6) 防災研究協会：基礎体—地盤系の振動，地震応答，耐震設計に関する研究，本州四国連絡橋公団委託研究昭和46年度報告書（代表者後藤尚男），昭47.3.