

土 木 研 究 所 資 料

第1151号

軟弱地盤における道路交通振動調査 (第 1 報)

昭和51年7月

建 設 省 土 木 研 究 所
動土質研究室

目 次

まえがき	1
1. 現場振動実験	3
1-1 実験目的	3
1-2 現場の状況	3
1-3 実験方法	11
1-3-1 振動源	11
1-3-2 地震計による地盤振動測定	13
1-3-3 公害用振動計による地盤振動測定	19
1-4 実験結果	20
1-4-1 軟弱層の厚さによる地盤振動特性の相違	20
1-4-2 地盤の土質条件と振動の大きさの関係	27
1-4-3 振動源の違いによる地盤振動特性の相違	36
1-4-4 距離減衰係数 α の推定法	41
1-4-5 トラックの走行速度および積載重量の違いによる地盤振動特性の相違	42
1-4-6 振動速度と振動レベルの関係	43
1-4-7 地表面の状態の差による地盤振動特性の相違	43
2. 模型振動実験	47
2-1 実験目的	47
2-2 模型材料および寸法	47
2-3 相似律	47
2-4 実験方法	48
2-4-1 振動源	48
2-4-2 実験条件, 振動測定位置および測定方法	48
2-5 実験結果	51
2-5-1 模型地盤の振動特性	51
2-5-2 Q値による振動の距離減衰の推定	57
2-5-3 盛土による振動軽減効果	57
2-5-4 溝による振動遮断効果	58
2-5-5 地中壁による振動遮断効果	61
3. 結 論	64

ま え が き

最近の自動車交通の増大に伴って道路交通振動が生活環境問題として大きく取り上げられるようになり、国会においても振動規制法が制定され、道路交通振動に関する規制規準が定められた。しかしこれで問題が全て解決したわけではなく、振動規制法第22条に謳ってあるように、振動を発生する施設の改良のための研究、振動の生活環境に及ぼす影響の研究、その他振動の防止に関する研究を今後推進してゆかなければならない。

道路交通振動の大きさを決定する主な要因としては

交通量

走行速度

道路からの距離

地盤条件

道路構造条件

地形条件

路面条件などが考えられる。

これらの8種類の要因のうち、本報告においては主に道路からの距離による減衰の問題および地盤条件と振動の大きさの関係について取り上げた。

本報告は3章より成り、第1章においては埼玉県川口市安行領家地先の国道298号線予定地において実施した現場振動実験について述べる。現場は軟弱地盤上に施工されており、軟弱地盤の土質条件と振動の大きさの関係および振動の距離減衰の予測法について検討を行なった。なお実験に用いた振動源は振動ローラー、重錘落下、トラック走行の3種類であり、振動源の違いによる地盤振動の相違についても考察を加える。

第2章においては模型振動実験について述べる。模型は現場地盤をシミュレートしたものであり、模型振動実験結果を現場実験の結果と比較し考察を加える。また振動の距離減衰の予測法について、計算値と実験値の比較検討を行なう。さらに盛土等による振動軽減効果の実験結果についても述べる。

第3章においては実験結果をまとめた結論を述べる。

なお現場実験は建設省関東地方建設局北首都国道工事事務所と共同で行なわれたものであり、ここに関係各位に対し深く感謝の意を表する。

昭和51年7月

動土質研究室

沢田 健吉

谷口 栄一

小笠原 久

館山 悟

1. 現場振動実験

1-1 実験目的

本実験の目的を次に示す。

- ①軟弱地盤の土質条件と振動レベルおよび距離減衰の関係を調べること。
- ②振動の距離減衰の予測法について検討すること。
- ③振動ローラー、重錘落下、トラック走行等の振動源の違いによる地盤振動特性の相違を調査すること。

1-2 現場の状況

現場振動実験を行なった場所は埼玉県川口市安行領家地先の国道298号線（外郭環状道路）予定地の試験盛土区間である。現場の平面図を図1-1に、道路中央における縦断面図を図1-2に示す。現場はA～Fの6種の盛土区間に分けられており、各区間の長さは約70mである。地質についてはA、B区間とC、D、E、F区間で大きく異っており、A、B区間においては深さ約14～15mの軟弱な沖積粘土より成る溺れ谷が存在するのに対し、C～Fの区間の軟弱層の深さは約2～3mである。この軟弱地盤を改良するために現地盤表層の10～20cmを良質材料に置換し、さらにプレロードが施工されている。プレロードは厚さ1mの路床の上に施工されており、各区間でその高さが異っている。表1-1に振動実験を行なった各区間のプレロードの諸元を示す。プレ

表1-1 各測線における地盤改良工法の種類およびプレロードの諸元

区 間	軟弱地盤の厚さ (m)	地 盤 改 良 工 法		プレロードの盛 土高さ (m)	プレロード 荷重 (t/m ²)
		プレロード	置 換 ※		
A	約 14	○	○	2.0	2.67
C	約 2	なし	○	0	0
E	約 2	○	なし	3.0	2.97
F	約 2	なし	なし	0	0

※ 現地盤の表層の10～20cmを良質材料に置換した。

ロードは昭和50年1月～3月に施工され、昭和50年10月～11月に撤去された。なお現場振動実験の時期は昭和50年12月9日～14日であり、この時はプレロード撤去後で、厚さ1mの路床のみが残されていた。

現場振動実験はA、C、E、Fの4区間において行なった。A、C、E、Fの各区間における道路中央付近でプレロード施工前およびプレロード撤去後に測定した土質諸定数を図1-3に示す。A区間とE区間のプレロード施工前後の土質定数を比較してみると、A区間においては、含水比・コンシステンシー限界・比重・単位体積重量の顕著な変化は見られない。一軸圧縮強度 q_u についてはばらつきが大きく比較することは困難であるが、特に大きな強度増加は見られない。これに対しE区間の軟弱層の一軸圧縮強度はプレロードによって約2～3倍に増加しており、軟弱層の改良効果が見られる。

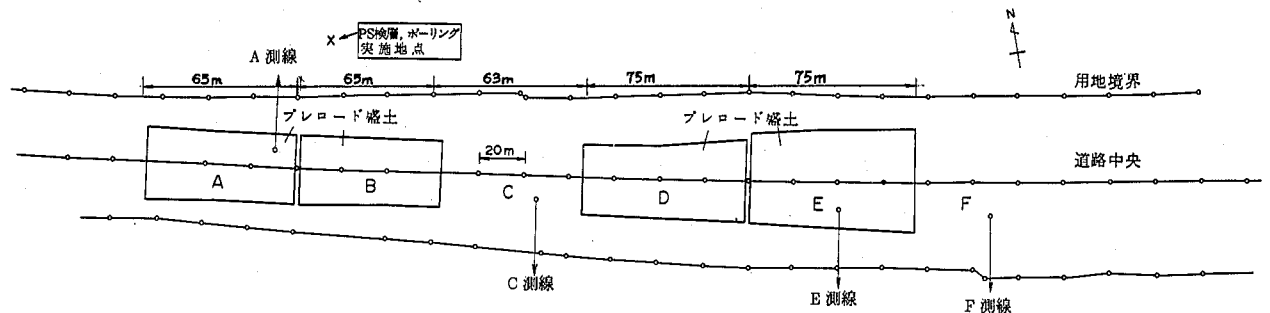


図 1-1 現場平面図

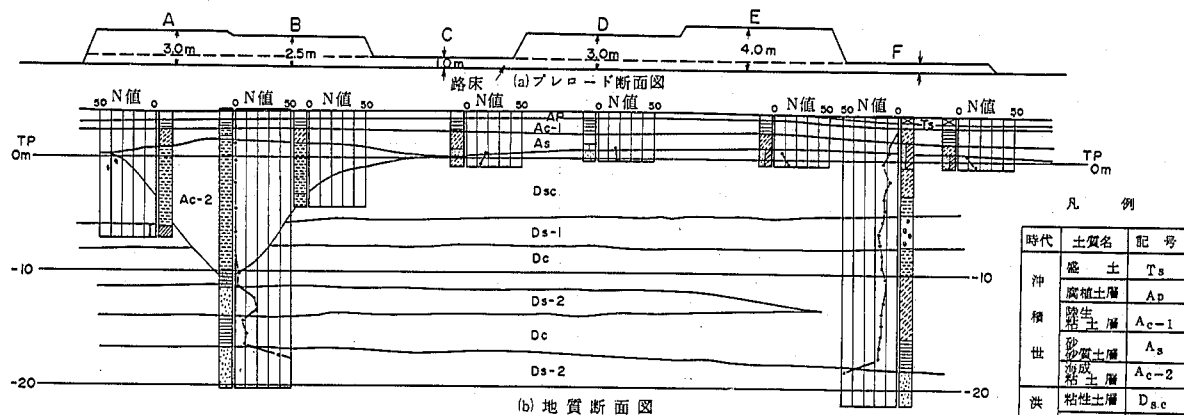


図 1-2 現場縦断面図

凡 例

時代	土質名	記 号
沖積世	盛 土	Ts
	腐植土層	Ap
	陸生粘土層	Ac-1
	砂質土層	As
	海成粘土層	Ac-2
洪積世	粘性土層	Dsc
	第1砂層	Ds-1
	粘土層	Dc
洪積世	第2砂層	Ds-2

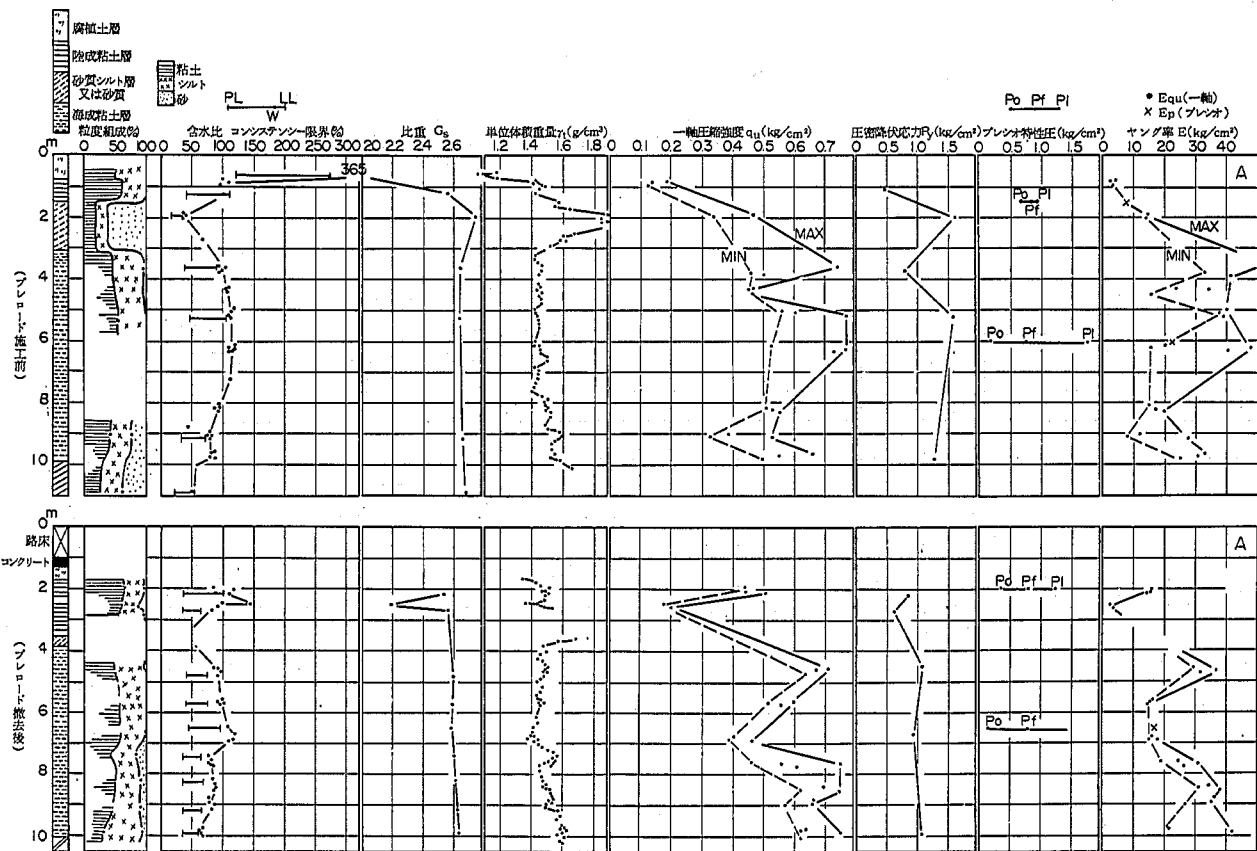


図 1-3 (a) プレロード施工前後の地盤土性図 (A 区間)

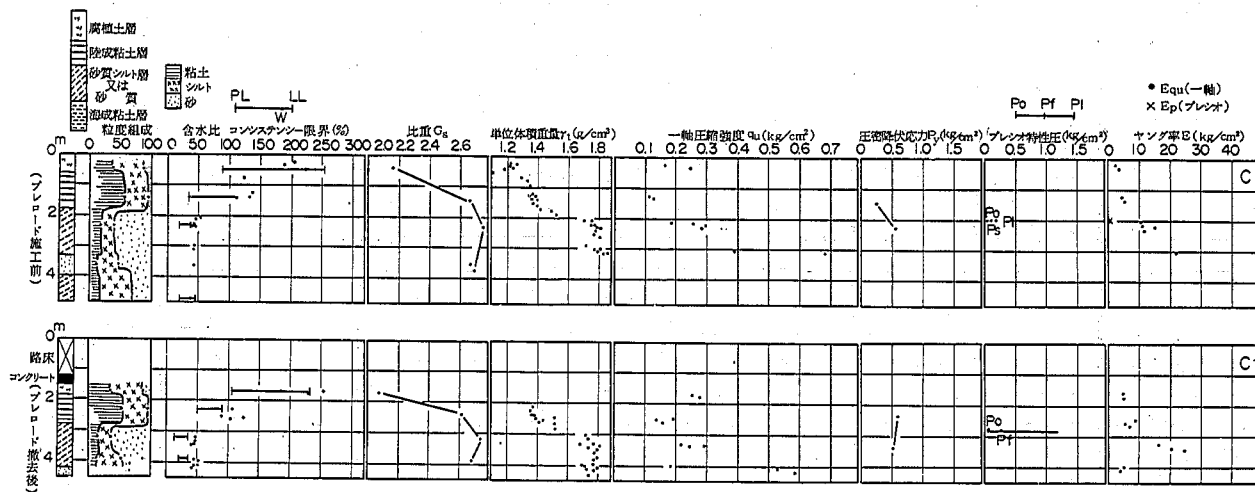


図 1-3 (b) プレロード施工前後の地盤土性図 (C 区間)

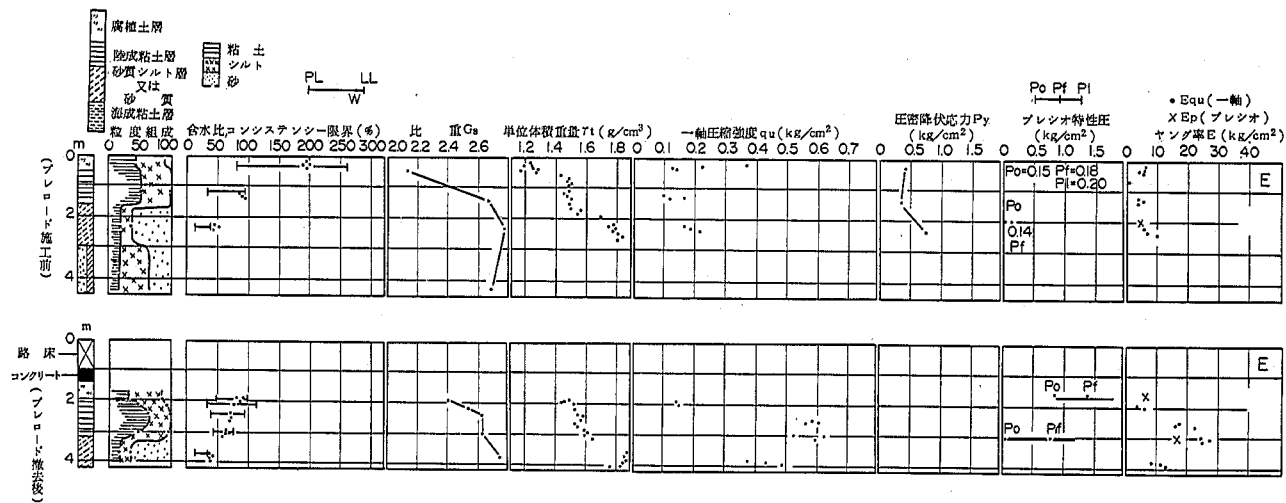


図 1-3 (c) プレロード施工前後の地盤土性図 (E 区間)

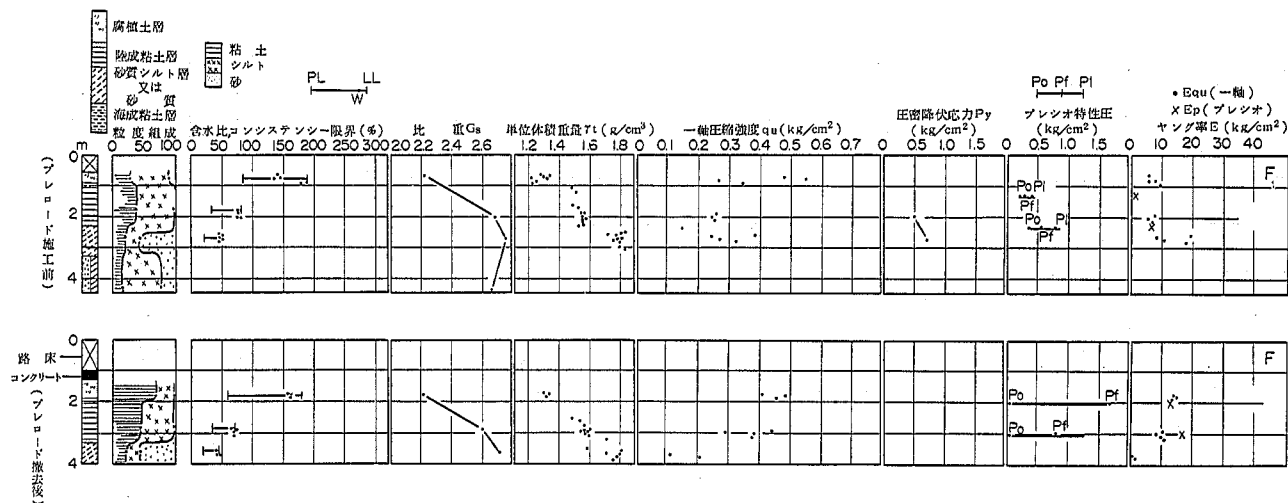


図 1-3(d) プレロード施工前後の地盤土性図 (F 区間)

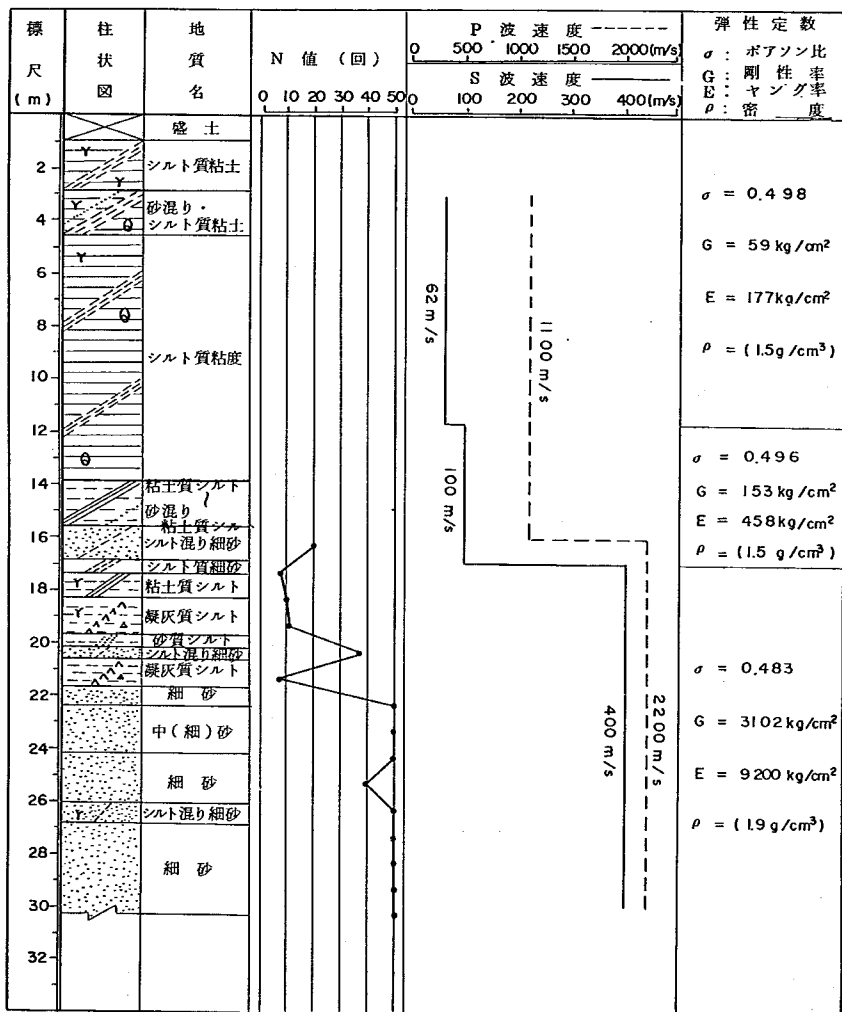


図 1-4 地質柱状図 (A 区間)

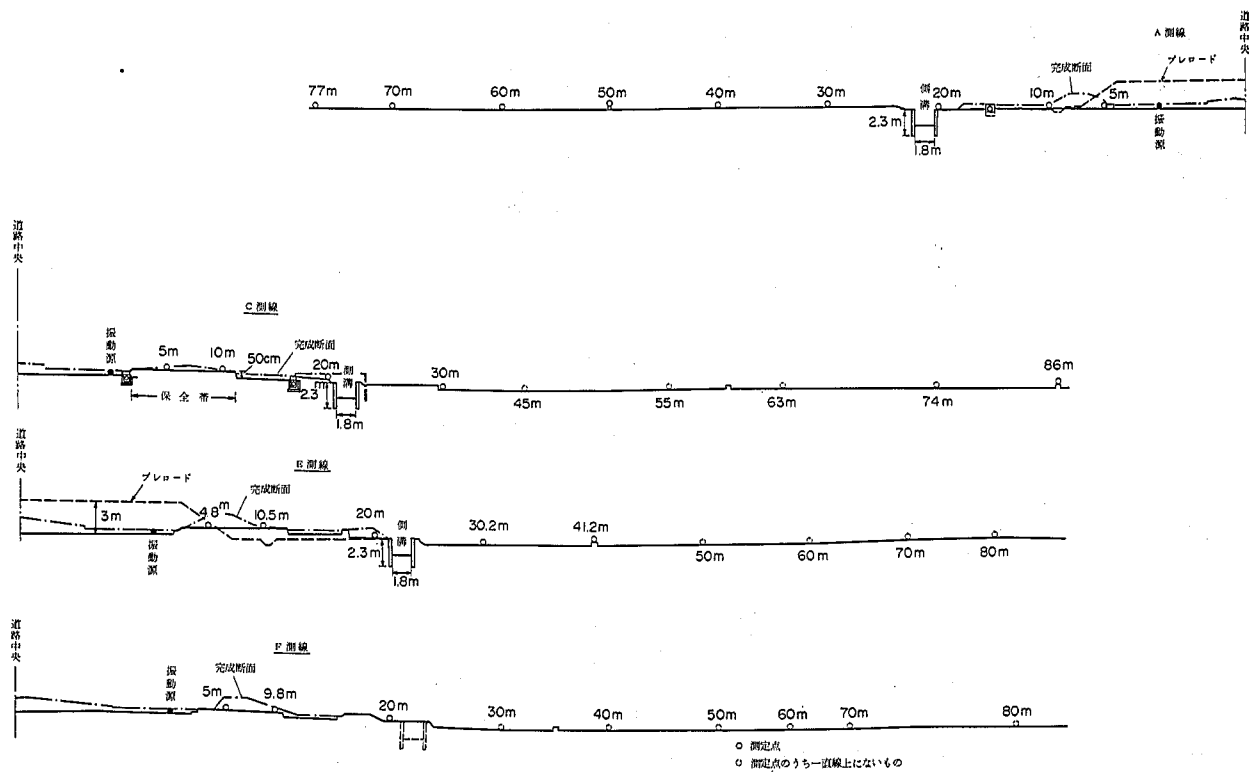


図1-5 現場横断面図

また図1-4は、昭和50年10月25日から30日にわたってA区間の道路端より25mの地点において実施したボーリングおよびPS検層より得られた土質柱状図、N値（深さ16m以上）、P波、S波速度を示している。これによると、深さ約12mまでの沖積粘土のS波速度は62m/sで非常に小さい値となっており、この粘土層がかなり軟弱な層であることを示している。

振動の測定はA、C、E、Fの4つの区間において図1-1に示されるように道路直角方向に測線を設けて実施した。各測線における横断面図を図1-5に示す。地表面の状態はA測線が盛土（厚さ約1m）の上、C測線が田圃の畔道、E測線が田圃の中および畔道、F測線が田圃の畔道である。現場には深さ2.3mのコンクリートの側溝が設けられており、振動伝播に影響があるのではないかと考えられたが、実際に実験を行なってみると、ほとんど影響はなかった。その理由として、今回の実験で発生した表面波の波長が20~30mと非常に長いために、波長の約1/10の深さの溝による遮断効果はほとんどないことが考えられる。

1-3 実験方法

現場振動実験は図1-1に示したA、C、E、Fの4つの測線において、プレロードを徹去した後実施した。

1-3-1 振動源

実験に用いた振動源は、振動ローラー、重錘落下、トラック走行の3種類であり、それぞれの規格及び実験時の使用状態を次に示す。

(a) 振動ローラー（サカイSV25）

呼称重量2.5tの振動ローラーで、自重は2.75tである。実験時には停止状態で振動させて振動源とした。（写真1）起振機の回転数は2,600rpm、1,800rpm、1,050rpmの3種類に変化させた。起振力は回転数が2,600rpmの時に2.8t、1,800rpmの時に1.5t、1,050rpm

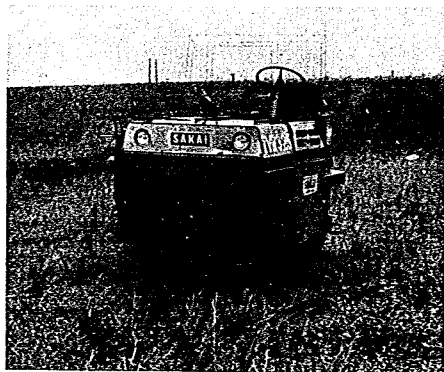


写真1 振動ローラー (2.5ton)

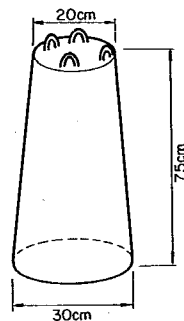


図1-6 使用した重錘 (150kg)

の時に0.25tである。

(b) 重錘落下

実験に用いた重錘は150kgの鉄塊であり、2mの高さから自由落下させた。(図1-6、写真2)



写真2 重錘落下 (150kg, 2mの高さより自由落下)

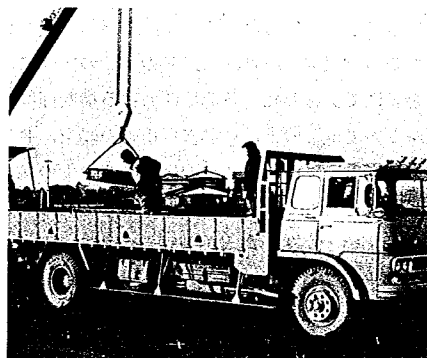


写真3 トラック (自重6.55ton, 7.5ton
の積荷を積んでいるところ)

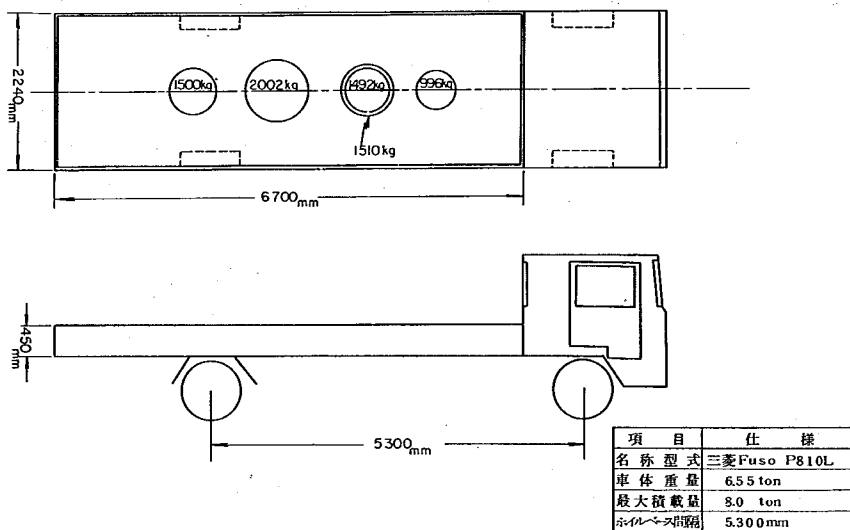


図1-7 実験に用いたトラックおよびウエイト積載位置

(c) トラック走行 (三菱FUSO P810L)

実験に用いたトラックは、自重6.55t、最大積載量8t、ホイールベース5.3mのものである。
(写真3) 走行速度は30km/h、50km/hの2種類とし、空荷の場合 (すなわち重量6.55t)
と7.5tの荷重を積載した場合 (すなわち重量14.05t) について実験を行なった。測定時には測線

の位置から前後に20mずつ計40mの定常走行区間を設け、この区間内では定められた一定速度で走行するようにした。路面の状態は原地盤の上に厚さ1mの路床を施工し、トラック走行直前にブルドーザーで成形したものである。

路床材料はいわゆる“山ズリ”で礫が多く、粒度試験の結果では礫分が60%以上の礫質土であり、日本統一土質分類ではGW-GMに区分される。また次式により定義される路床の締め固め度を計算すると、

$$\text{締め固め度(\%)} = \frac{\text{現場における乾燥密度}}{\text{最大乾燥密度}} \times 100 \quad \text{式(1-1)}$$

A測線が92.0%, C測線が96.0%, E測線が101.6%, F測線が89.3%となり、現場の路床は非常によく締め固められていると言える。

図1-7にトラックに積載したウェイトの位置を示す。

輪荷重は測定していないが過去の例から積荷の場合には後輪に70% (約9.8t) 前輪30% (約4.2t)、空荷の場合には50%ずつであろうと推定される。

各測線において用いた振動源の種類を表1-2に示す。

表1-2 各測線において用いた振動源の種類

振動源 \ 測線	A	C	E	F
振動ローラー	○	○	○	×
重錘落下	○	○	○	○
トラック走行	○ 30km/h空荷のみ	○	×	×

○…… 実験を実施した。

×…… 実験を実施しなかった。

1-3-2 地震計による地盤振動測定

測定は前述のように、A, C, E, Fの4測線において行なった。測定には地震計を用い、出力は速度出力とした。(㊦:振動規制法では振動レベルを測定するように定められているが今回の実験において速度出力とした理由は、埼玉県振動規制が振動速度によって行なわれていたためである。また実験時期は、振動規制法公布前である。)記録はオシログラフに記録すると共にデータレコーダーを用いて磁気テープに記録した。図1-8に測定ブロック図を示す。また使用した計器を表1-3に記す。

表1-3 測定計器

計器名	地震計	増幅器	データレコーダー	電磁オシログラフ
特性	固有振動数 1Hz 電圧感度 2.0V/kine	チャンネル数 9 アネテッター 内蔵	チャンネル数 14 周波数特性 0~10KHz 記録再生方式 FM	チャンネル数 12 使用ガルバノ メーター G-300
会社名 製品名	勝島製作所 PMK110	勝島製作所 MA101S	TEAC R280	三栄測器 FR101A

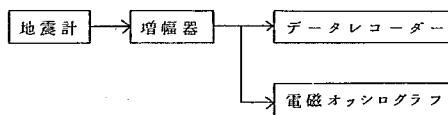


図1-8 振動測定ブロック図

測定器の周波数特性を図1-9に示す。

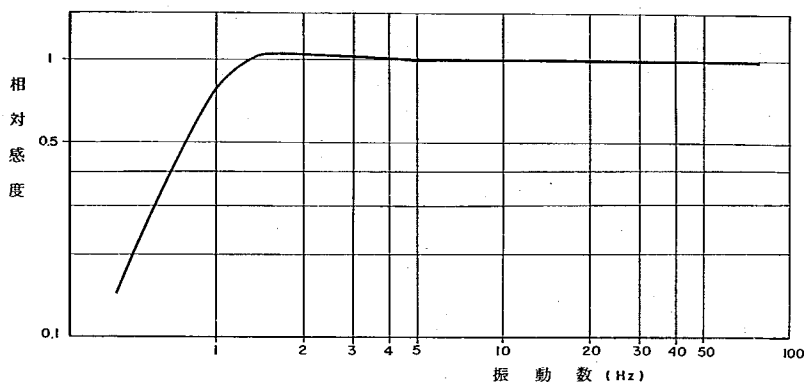


図1-9 振動測定器の周波数特性

振動測定は1測線につき9点で行ない、ほぼ10m間隔にピックアップを設置した。(図1-10) 9点のうち、振動源より20mと50mの地点(C測線は55m)においては水平方向2成分と鉛直方向1成分の計3成分を同時に記録した。残りの地点では1成分ずつ3回に分けて測定を行なった。(水平・道路直角方向をX, 水平・道路走行方向をY, 鉛直方向をZ成分とする。)

ピックアップは、道路の路床の上あるいは畔道の比較的堅い所では直接設置し、(写真4)畔道



写真4 田圃の畔道に地震計を直接設置したところ(E測線)



写真5 盛土上にコンクリート板を置いて地震計を設置したところ(E測線)

や盛土上の軟弱なところでは長さ60cm, 幅25cm, 厚さ4cmのコンクリート板の上に設置した。

(写真5) 軟弱な地表面におけるピックアップの置き方については現在のところまだ一定の方法が確立されていないので上記のような方法を用いた。測線はA測線については測定点が1直線上に並んでいるが、残りの測線では地表面の制約のために測定点を1直線上に並べることができなかったが、できるだけ1直線に近くなるように田圃の畔道の上に測点を設けた。

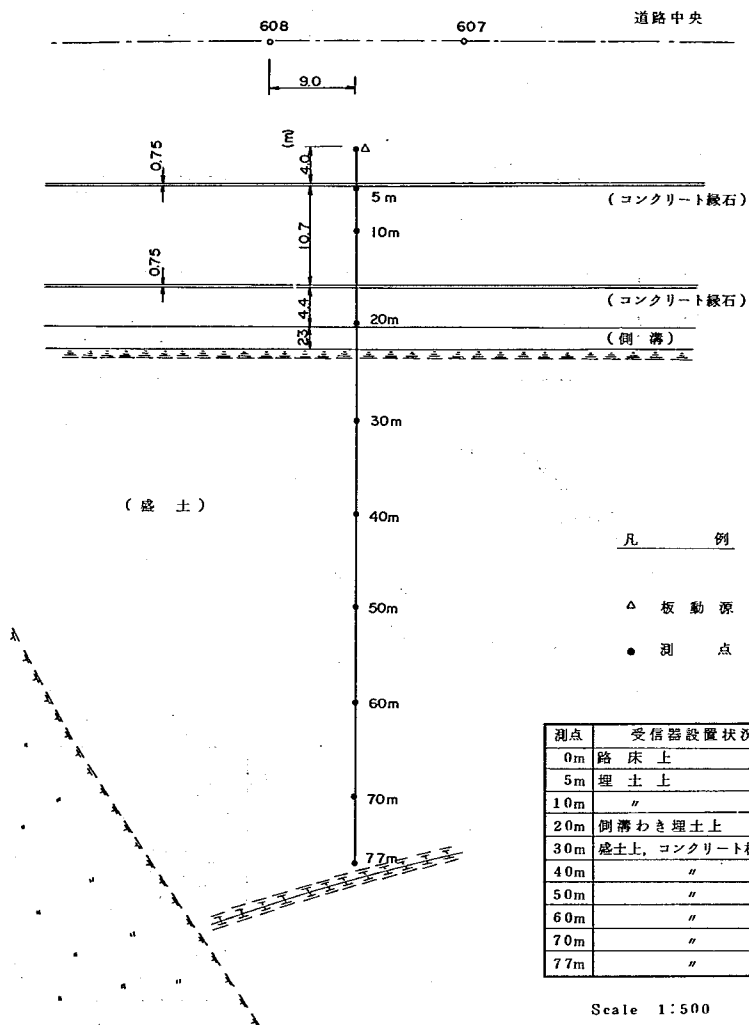


図1-10(a) A測線測点配置図

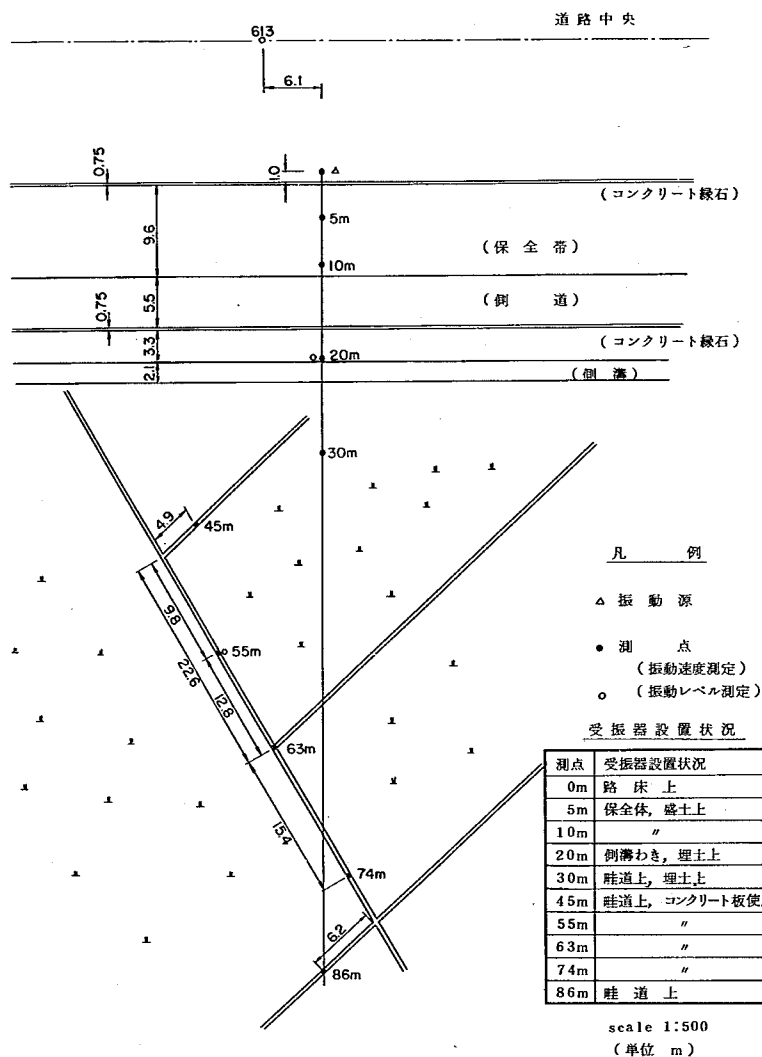


図1-10(b) C測線 測点配置図

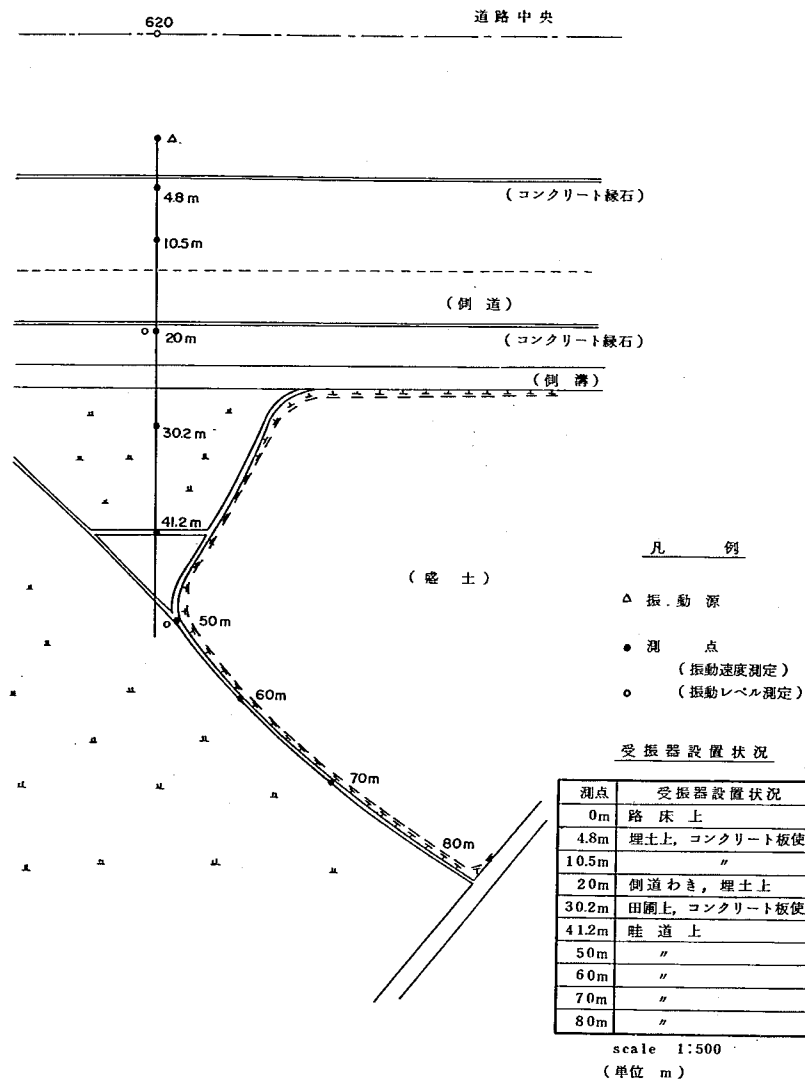


図1-10(c) E測線 測点配置図

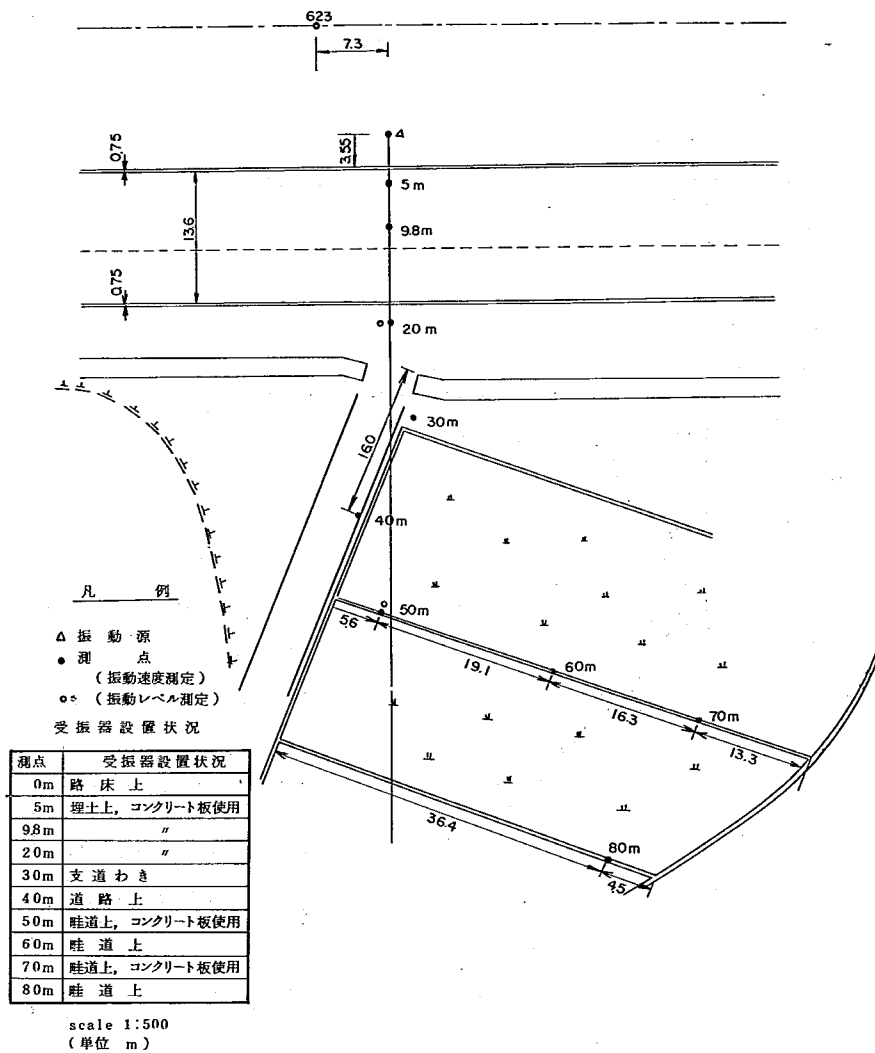


図1-10(d) F測線 測点配置図

1-3-3 公害用振動計による地盤振動測定

E 測線の道路と平行方向に公害用振動計を設置して田圃の中、田圃の畔道、盛土の上等の地表面の状態の違いによる地盤振動の変化を調べた。(図 1-27) 測定に用いた計器を次に示す。

○ 公害用振動計

ノード製 LP 2

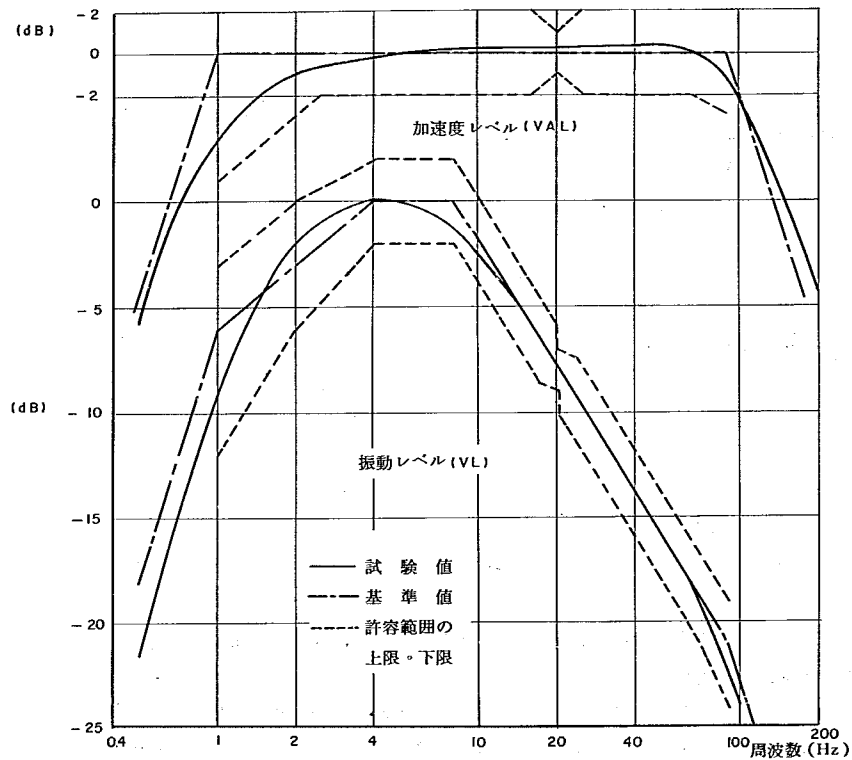


図 1-11 公害用振動計周波数レスポンス

測定範囲	加速度レベル	} 45~120 dB
	振動レベル	
	振動速度	0.01~10 cm/sec

○ピックアップ

ノード製 A-50

図1-11に上記の公害用振動計の周波数特性を示す。ピックアップは地表面に直接設置し、測定は動特性FASTを用いて加速度レベル、振動レベル、振動速度をメーターの指示値より読み取った。

また各測線の20mおよび50m地点（G測線は55m）において公害用振動計を用いて振動レベルを測定した。動特性はFASTを用いた。測定に使用した計器を次に示す。

○公害用振動計

リオン製 VM-12A

測定範囲	加速度レベル	} 50~120 dB
	振動レベル	
	振動速度	0.01~10 cm/sec

○ピックアップ

リオン製 PV-10B

○レベルレコーダー

リオン製 LR-03

1-4 実験結果

1-4-1 軟弱層の厚さの違いによる地盤振動特性の相違

軟弱層の厚さの違いによる地盤振動特性の変化を見るために、重錘落下による各測線の振動を取り上げる。重錘落下試験を選んだ理由として、重錘の重さ、落下高、落下地点の地盤の堅さが一定であれば地盤に対する入力エネルギーが一定であるので、各測線の地盤振動特性を比較するのが容易であることがあげられる。

また一般に人体は水平振動よりも鉛直振動に対して敏感であると言われており、振動規制法においても鉛直振動を測定するように定められているため、以下においては主に鉛直振動について考察を加える。図1-12に各測線における重錘落下による振動速度の鉛直成分の波形記録を示す。どの測線においてもまず最初に位相速度が1,000~1,200 m/secのP波と思われる波が現われている。P波に続いてかなり振幅の大きな波が見られるが、この波について運動軌跡を描いたものが図1-13である。この図によるとどの測線においても振動速度のX成分（水平・道路直角方向）が最も大きく、ついでZ（鉛直方向）、Y成分（水平・道路走行方向）の順となっている。運動軌跡から波の種類を決定することは非常に困難であるが、理論的に求められるRayleigh波の地表面における運動軌跡はX-Z面内で図1-14のようになり、これと実測記録を比較してみると、実測記録においても波の進行方向と逆向きの楕円運動がみられるのでRayleigh波的な要素を持っているものと考えられる。

表1-4は各測線の波形記録より求まる走時曲線より位相速度を計算した結果を表わしている。

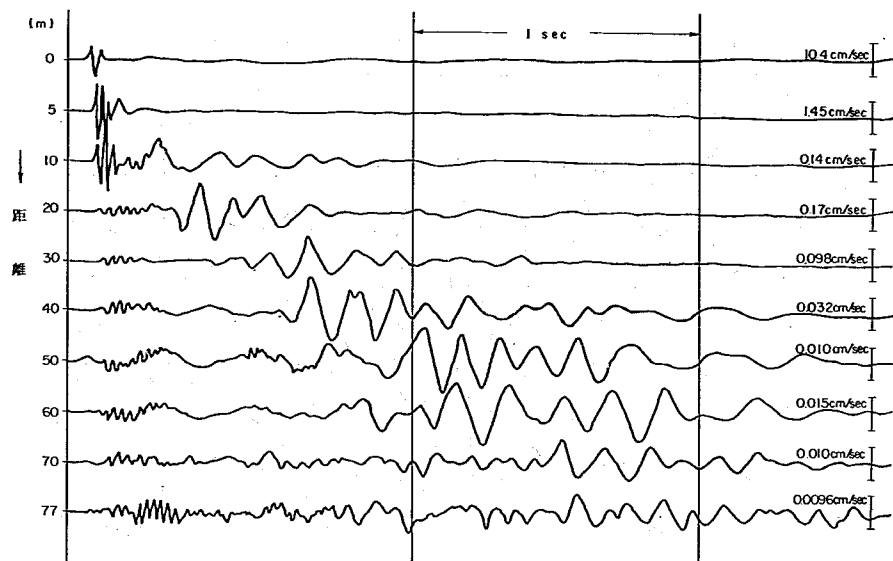


圖 1-12(a) 振動波形記錄 (重錘落下, A 測線, Z 成分)

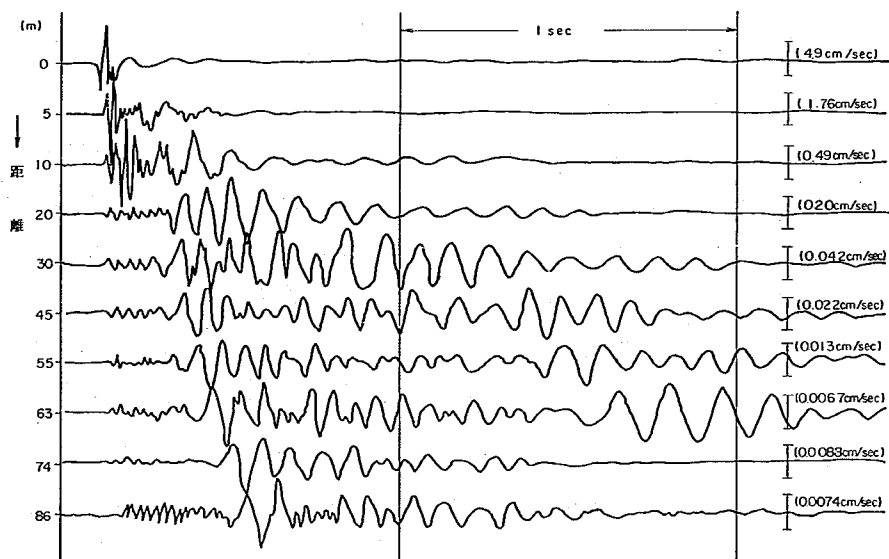


圖 1-12(b) 振動波形記錄 (重錘落下, C 測線, Z 成分)

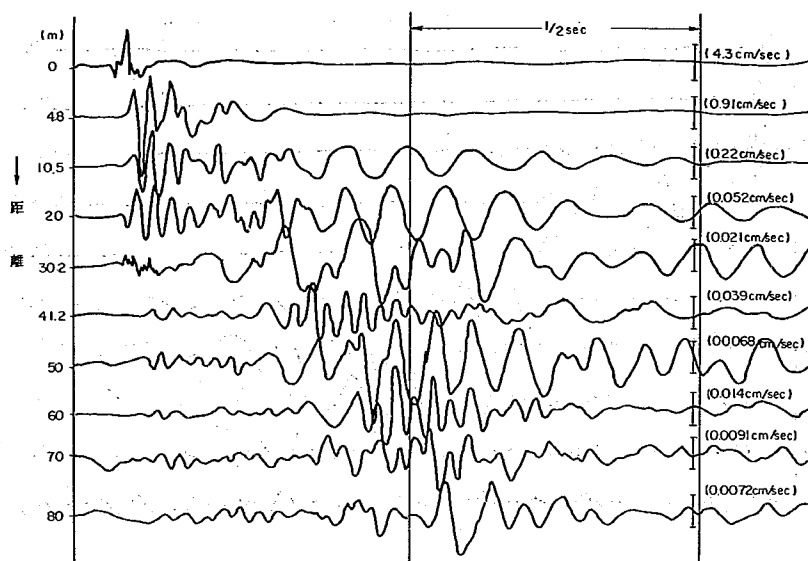


圖 1-12(c) 振動波形記錄 (重錘落下, E 測線, Z 成分)

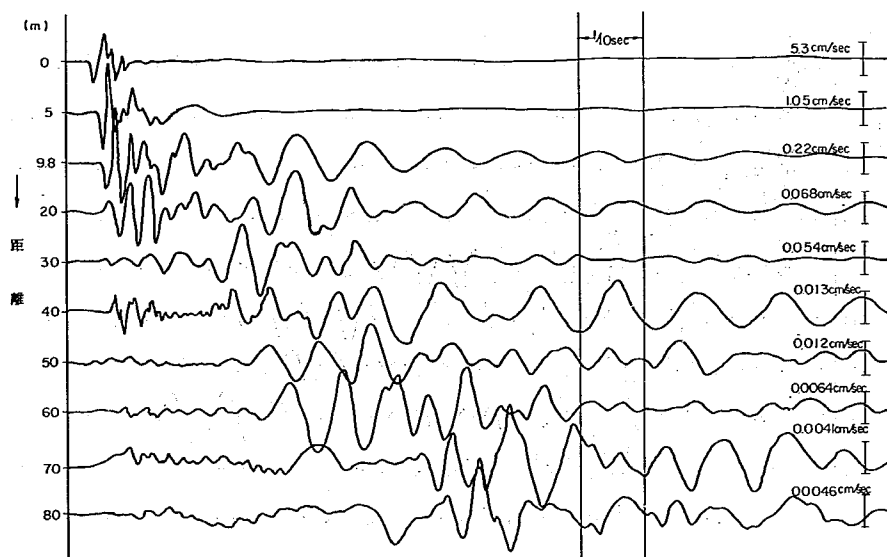


圖 1-12(d) 振動波形記錄 (重錘落下, F 測線, Z 成分)

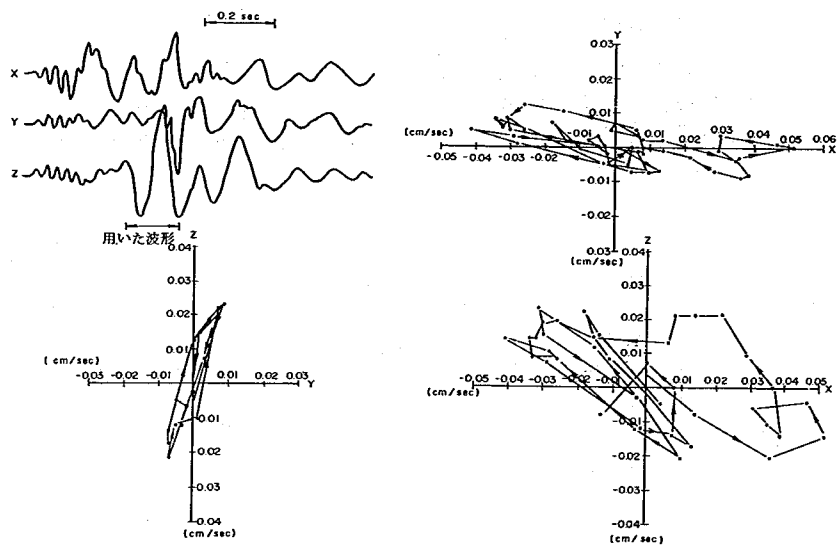


図 1-13(a) 運動軌跡 (重錘落下, A 測線, 振動源からの距離 20 m)

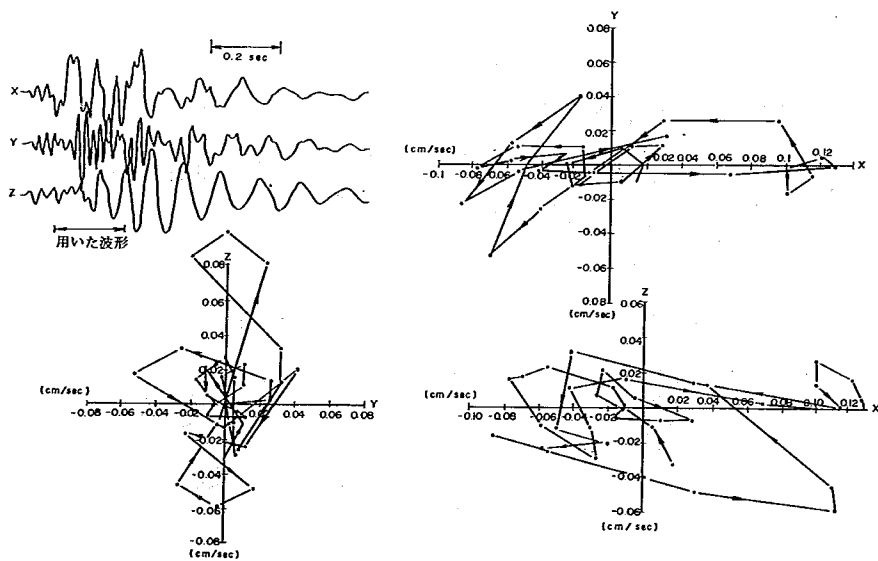


図-1-13(b) 運動軌跡 (重錘落下, C 測線, 振動源からの距離 20 m)

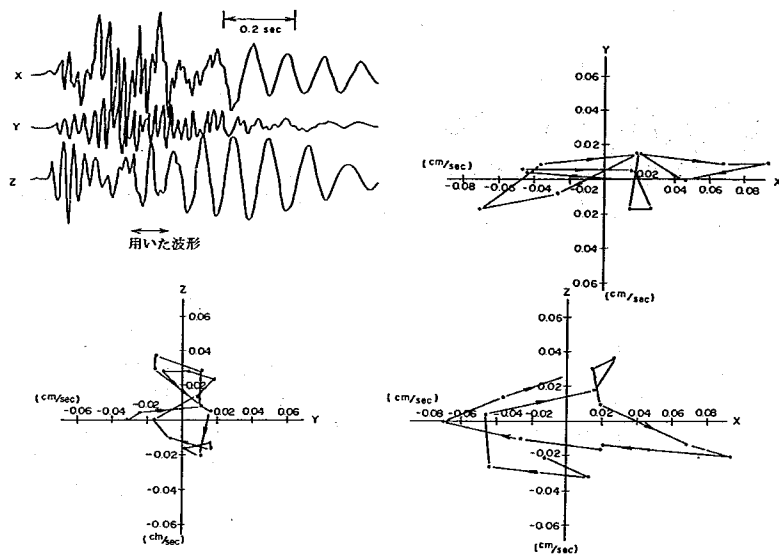


図 1 - 1 3 (c) 運動軌跡 (重錘落下, E 測線, 振動源からの距離 2 0 m)

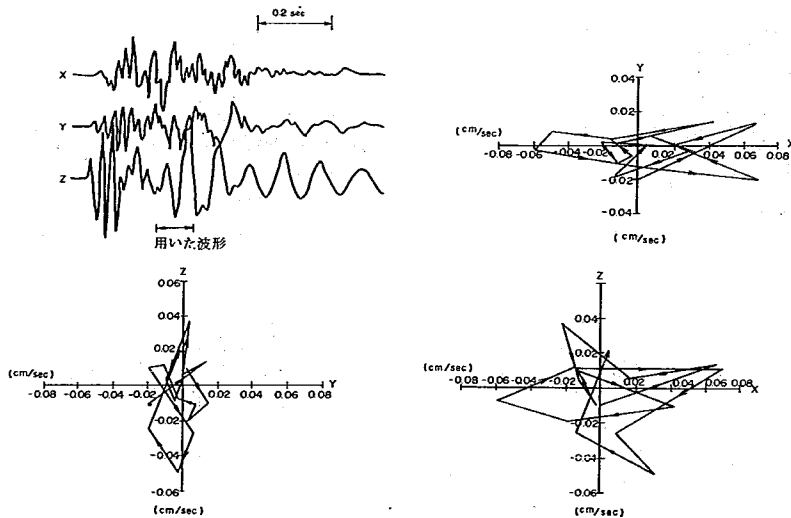


図 - 1 3 (d) 運動軌跡 (重錘落下, F 測線, 振動源からの距離 2 0 m)

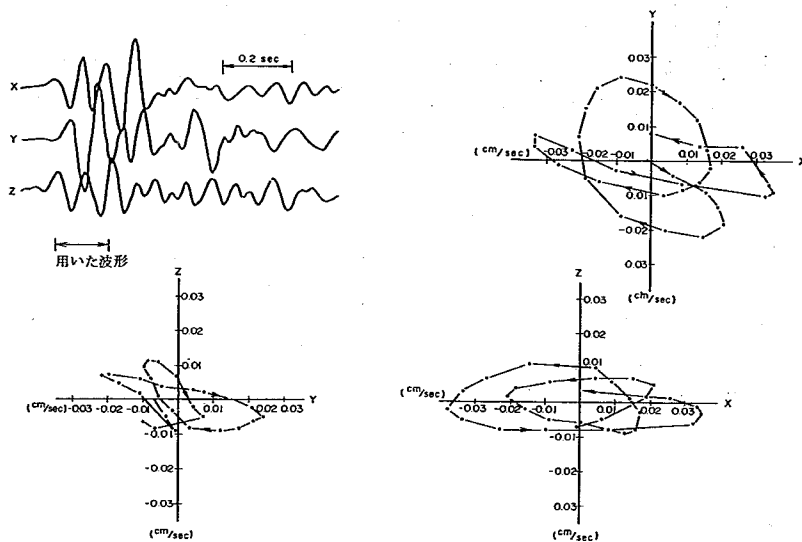


図 1-13 (e) 運動軌跡 (重錘落下, F 測線, 振動源からの距離 50 m)

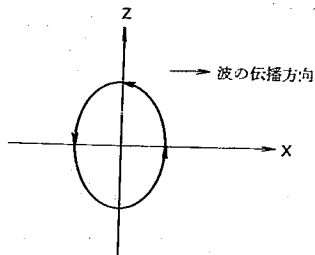


図 1-14 Rayleigh 波の運動軌跡

表 1-4 各測線の表面波の
位相速度 (m/sec)

測線 \ 成分	X	Y	Z
A	132	93	112
C	212	261	241
E	351	268	200
F	208	211	212

これによると C, E, F 測線における位相速度はほぼ同程度の大きさであるが, A 測線における位相速度は C, E, F 測線に比べて約半分となっている。また各測線の振源より 20 m, 50 m 地点におけるフーリエ振幅スペクトルを図 1-15 に示す。ただしフーリエ振幅スペクトル $|F(\omega)|$ は次式により定義される。

$$|F(\omega)| = \left\{ \left[\int_0^s v(t) \cos \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^s v(t) \sin \omega t dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 (1-2)}$$

ここに $v(t)$: 振動速度 s : 振動継続時間
 ω : 振動数 t : 時間

図においてたとえば 20 m 地点についてみると, C, E, F 測線においては 8 Hz, 12 Hz 付近にピークがあるのに対して A 測線では 5 Hz, 8 Hz 付近にピークがあり, 振動数が A 測線の方が低い

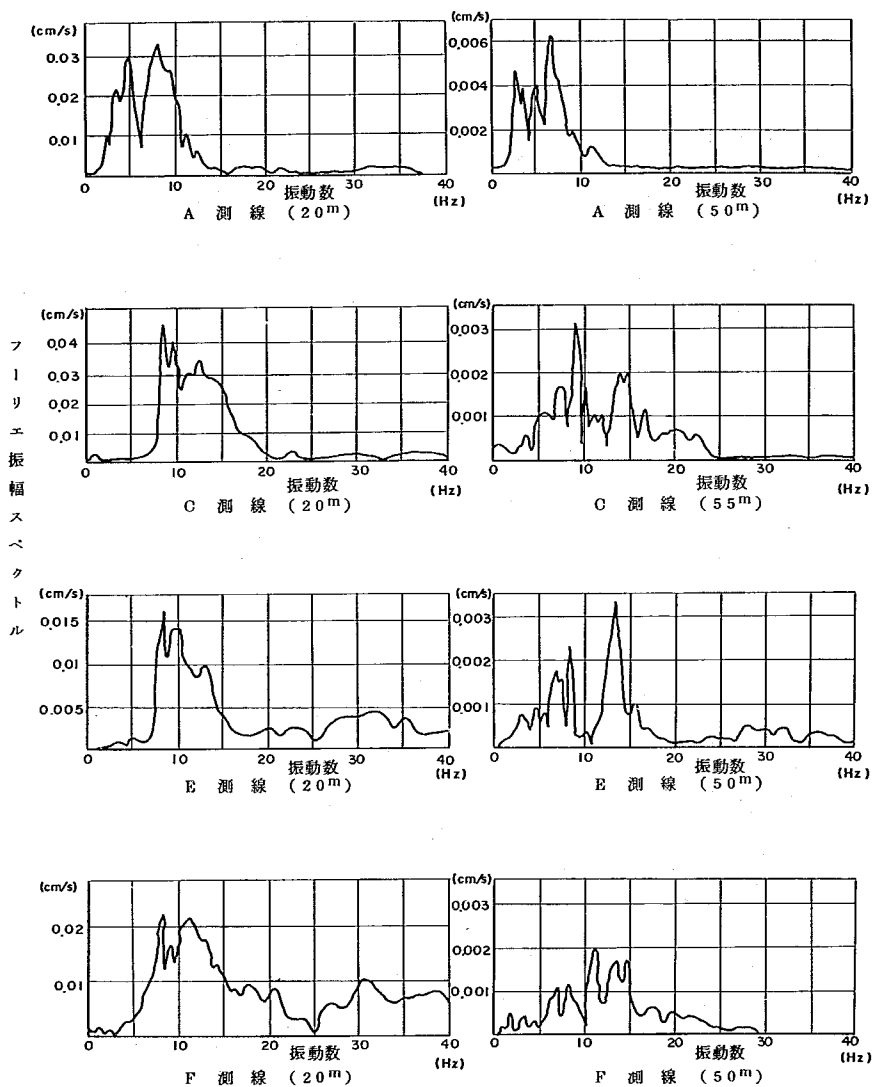


図1-15 各測線におけるフーリエ振幅スペクトル

ことを示している。このことは軟弱層の厚さと関係があるものと思われる。また表面波の波長はA測線で15~20m, C, E, F測線で20~30mとなる。

次に各測線における振動の距離減衰について述べる。表面波について、振動源より距離 r の点の振動振幅を G 、Bornitz⁽¹⁾は次式のように表わした。

$$A = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r}} \exp \{-\alpha (r - r_1)\} \quad \text{式 (1-3)}$$

ただし A : 振源から距離 r の地点における振動振幅 (あるいは振動速度あるいは振動加速度)

A_1 : 振源からの距離 r_1 の地点における振動振幅 (既知) (あるいは振動速度あるいは振動加速度)

α : 距離減衰係数

上式中、 $\sqrt{r_1/r}$ の項は幾何減衰 (geometrical damping) を表わし、 $\exp \{-\alpha (r - r_1)\}$ の項は土の内部減衰 (material damping) を表わしている⁽²⁾。図1-16にC測線における各振動源による最大速度振幅 (各測点における振動速度の最大値) の距離減衰を示す。また図1-17には各測線における重錘落下の距離減衰を示す。図中二点鎖線は式(1-3)のうち幾何減衰のみの場合を表わし、実線は内部減衰も含めた場合を表わしているが、実測値はほぼ式(1-3)によって近似することができるものと考えられる。図1-16, 図1-17に見られるように実測値を幾何減衰のみで表現することは困難であり、内部減衰も考慮することが必要である。図1-17の各測線における距離減衰を比較すると軟弱層の厚いA測線と他の測線の間に顕著な差は認められない。また各測線におけるX, Y, Zの3成分についての距離減衰係数 α の値を表1-5に示す。

表1-5 各測線における α の変化 (重錘落下)

成分 \ 測線	A	C	E	F
X	0.08	0.05	0.06	0.01
Y	0.06	0.04	0.04	0.01
Z	0.07	0.10	0.08	0.09

(1/m)

1-4-2. 地盤の土質条件と振動の大きさの関係
各測線における地盤の土質諸定数は先に図1-3に示した。交通振動に関してどの程度の深さまでの地盤が影響を持つのかという点についてはまだ解明されていないが、ここでは地表より深さ2~3mの地点の沖積陸成粘土の土質定数を代表として取り上げてみる。図1-18に各測線における沖積陸成粘土の単位体積重量 γ_d 、一軸圧縮強度 q_u 、ヤング率 E (④応力, 歪曲線における q_u の50%の点における勾配) 並びに路床の締め固め度および振動源より1m, 5m, 10m, 20m, 50m地点における振動速度を示す。ただし路床の締め固め度は式(1-1)により計算した。

表1-6 表層の一軸圧縮強度と振動速度の相関係数

成分 \ 振動源からの距離	1m	5m	10m	20m	50m
X	—	-0.41	-0.86	-0.75	-0.13
Y	—	-0.007	-0.48	-0.63	+0.067
Z	-0.44	-0.92	-0.85	-0.87	+0.52

図1-18において各測線の振動速度の大きさと表層付近の軟弱な沖積陸成粘土の一軸圧縮強度 q_u あるいはヤング率 E を比較してみると、定性的には q_u あるいは E が大きくなると振動速度が小さくなるという関係がみられる。表1-6は q_u と振動速度の相関係数を表わしているが、振動源より

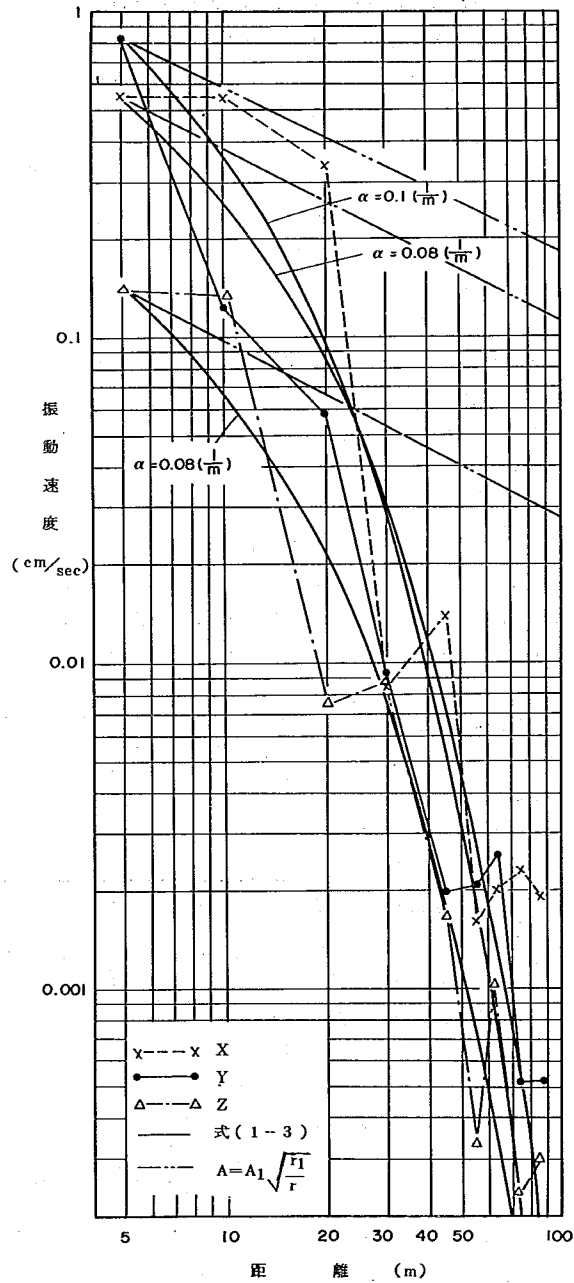


図1-16(a) 距離減衰 (振動ローラー, 2600 rpm, O測線)

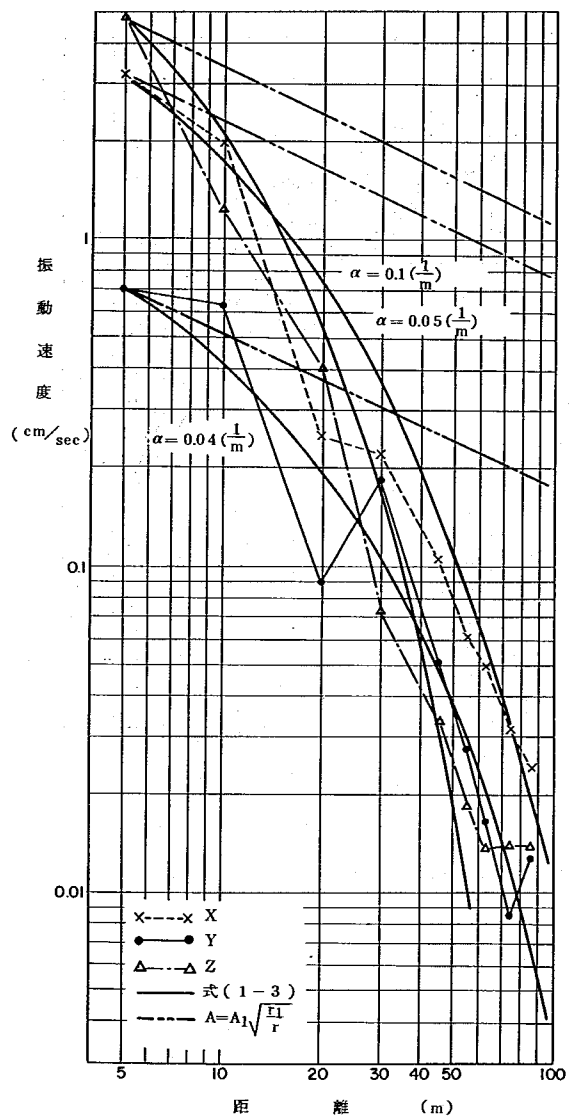


圖 1-16(b) 距離減衰 (重錘落下, C 測線)

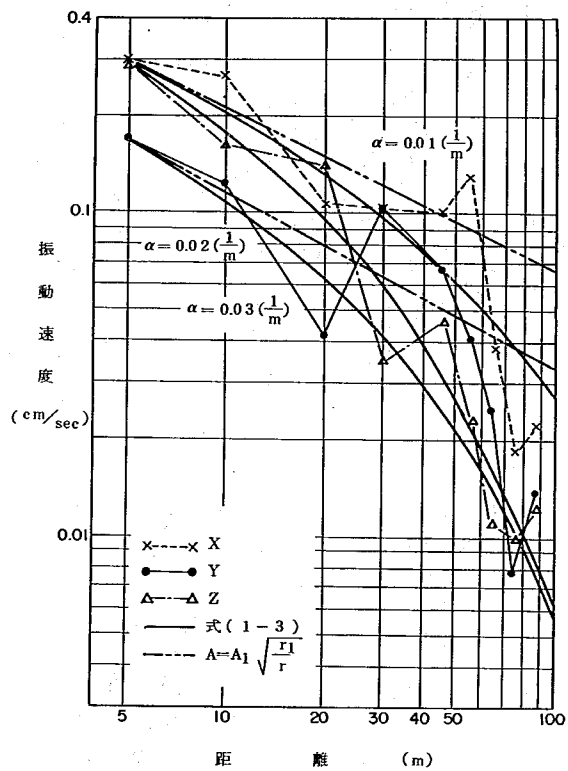


図 1-16(c) 距離減衰 (トラック走行, 50 km/h, 積荷, G測線)

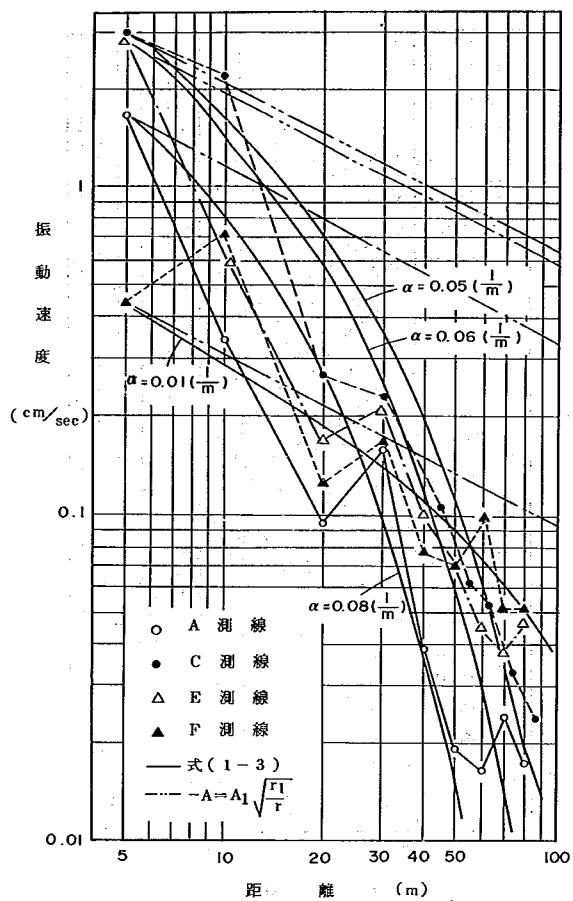


圖 1-17(a) 距離減衰 (重錘落下, X成分)

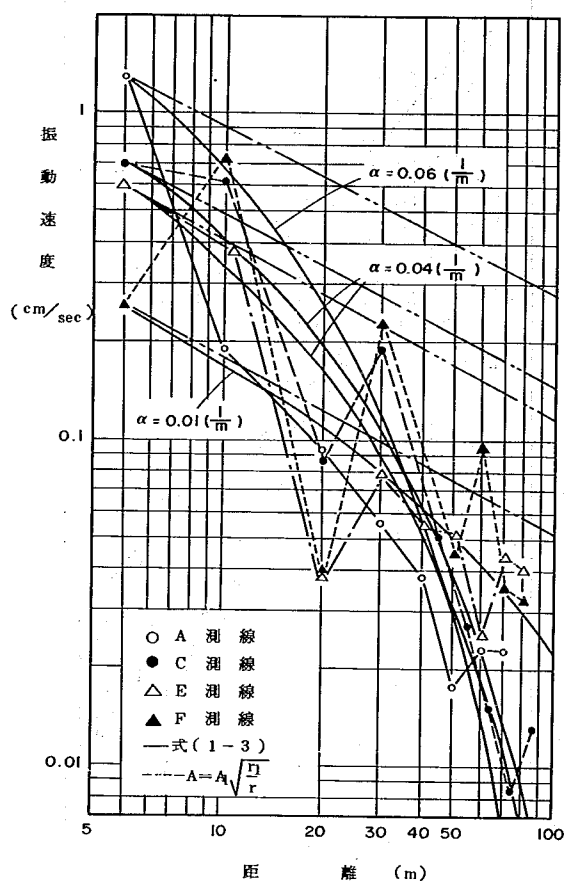


圖 1-17(b) 距離減衰 (重錘落下, Y 成分)

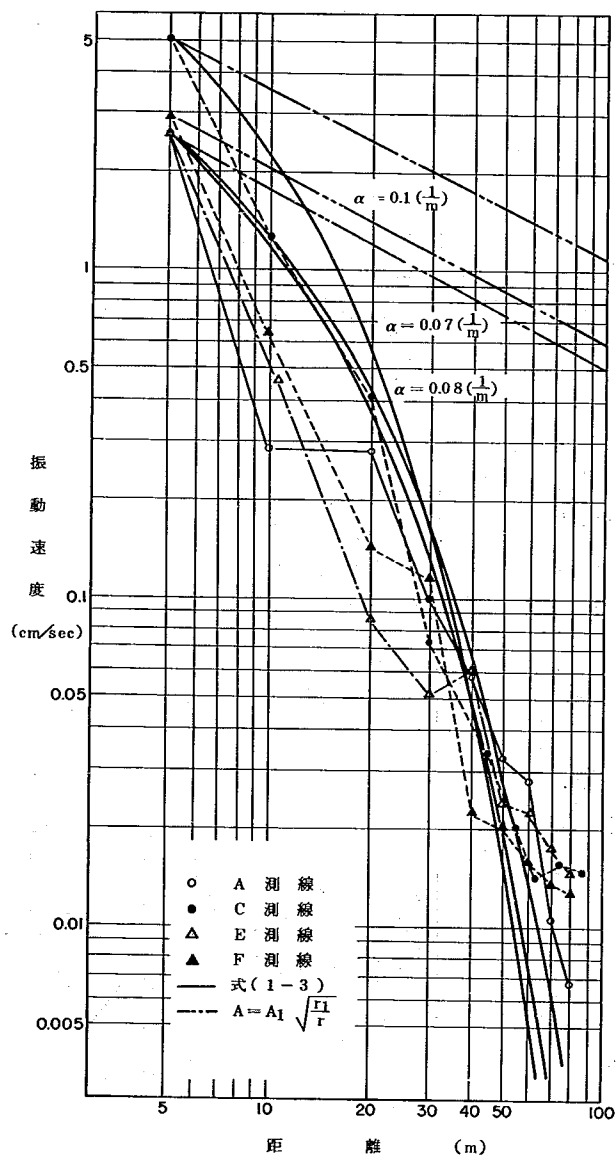


圖 1 - 1 7 (c) 距離減衰 (重錘落下, Z 成分)

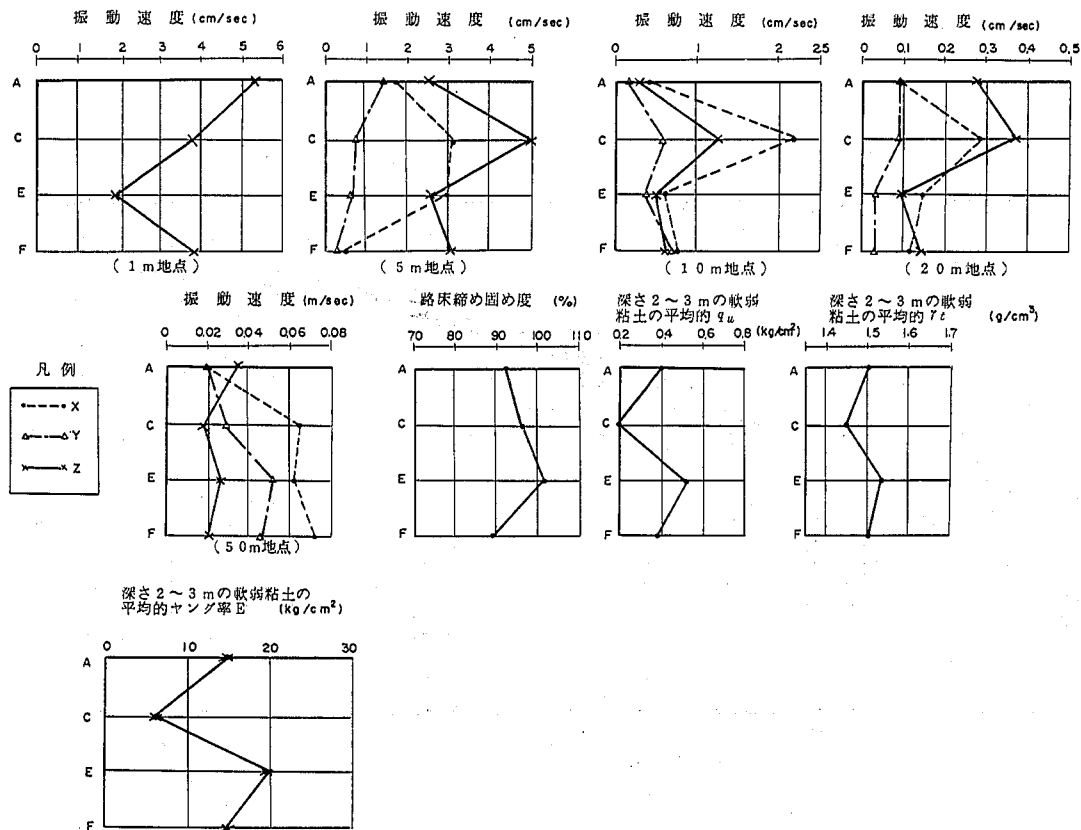


図1-18 深さ2~3mの軟弱粘土の土質定数および振動速度の大きさ (重錘落下)

20 mまでの範囲においてはかなり高い負の相関を示している。

次にC測線とE測線の振動の大きさを比較する。プレロード施工前においては、図1-19に見

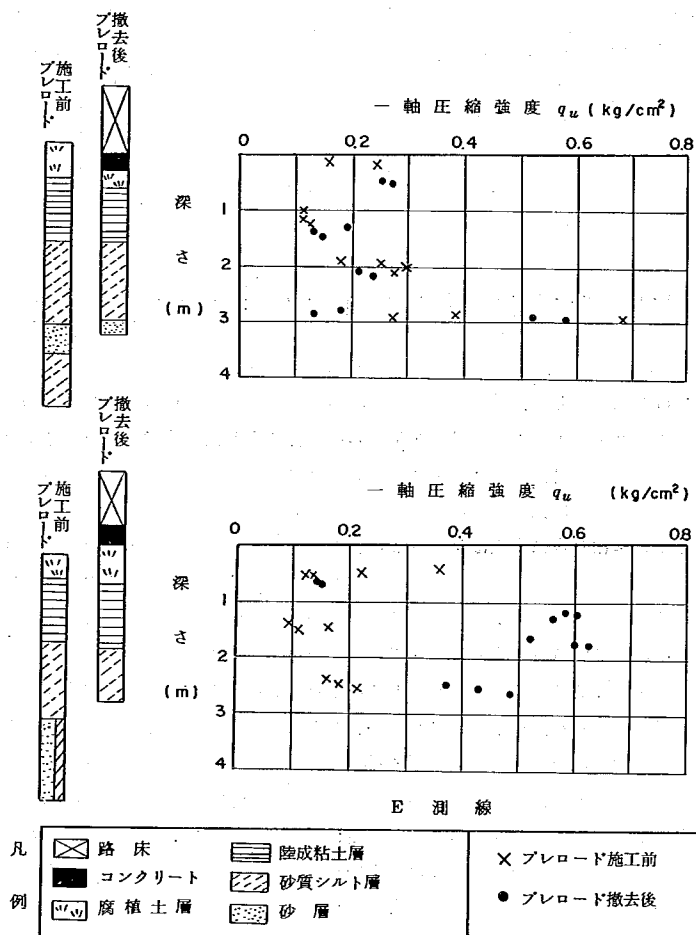


図1-19 プレロードによる軟弱粘土層の強度増加

られるようにC、E測線の軟弱粘土層の q_u は共に $0.1 \sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$ であるが、プレロード施工後においては、E測線の軟弱粘土の q_u は $0.5 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^2$ に上昇しており、かなり圧密効果が出ている。(C測線はプレロードがない)そこで重錘落下による振動の大きさを比較してみると、(表1-7)振動源より20 m以内において振動速度はX、Y、Zの3成分共にE測線の方がC測線より約5~75%小さくなっている。この結果よりプレロードによる軟弱地盤改良工法は振動軽減にかなり効果があるのではないかと考えられる。

表 1-7 C測線とE測線の振動速度の比較 (重錘落下)

成分 距離	X			Y			Z		
	振動速度 (cm/sec)		比	振動速度 (cm/sec)		比	振動速度 (cm/sec)		比
	① C測線	② E測線		③ C測線	④ E測線		⑤ C測線	⑥ E測線	
1 m	—	—	—	—	—	—	3.83	1.87	0.49
5	3.07	2.96	0.96	0.704	0.605	0.86	4.99	2.59	0.52
10	2.21	0.595	0.27	0.608	0.382	0.63	1.24	0.462	0.37
20	0.289	0.150	0.52	0.091	0.035	0.38	0.371	0.089	0.24
30	0.231	0.210	0.91	0.194	0.080	0.41	0.073	0.051	0.70
40	0.14	0.102	0.73	0.075	0.056	0.75	0.043	0.061	1.42
50	0.080	0.063	0.79	0.036	0.052	1.44	0.026	0.025	0.96

1-4-3 振動源の違いによる地盤振動特性の相違

実験においては振動源として振動ローラー、重錘落下、トラック走行の3種類のものを用いた。図1-20、図1-21にA測線における3種類の振動源による振動波形、(重錘落下は図1-12を参照) 距離減衰および振動源より20m地点におけるフーリエ振幅スペクトルを示す。振動ローラーによる地盤振動の波形は振動源に近いところではほぼ正弦波であり、振動源から遠ざかると若干波形が乱れるが卓越振動数に変化は見られない。トラック走行による振動波形は2~3種類の振動数の正弦波が重なった形をしており、卓越振動数は振動源からの距離が遠くなってもほとんど変化しない。重錘落下による波(図1-12)は振動源の近くでは衝撃的な波動であるが50m離れた地点においては約1秒間持続する波となっている。重錘落下による波にも1~2個の卓越周波数が認められる。図1-22にC測線の50~55m地点における振動ローラーおよびトラック走行による波の運動軌跡が示されている。いずれの場合もX成分がY、Z成分に比べて振幅が大きく、前述したようにこの傾向は重錘落下においても見られた。またトラック走行の場合にはX-Z面内において橢円運動が見られるが理論的なRayleigh波における橢円運動の運動方向とは逆になっている点が注目される。次に図1-20(c)のトラック走行と重錘落下の場合の距離減衰係数 α を比較してみるとトラック走行の場合の方が小さくなっている。この理由として重錘落下とトラック走行では地盤振動の卓越振動数が異なっていることが考えられる。図1-21のスペクトルにおいて重錘落下では約3, 5, 7Hzのところにピークがあるのに対し、トラック走行では3Hzに卓越したピークが見られる。そこで同一振動数についてのフーリエ振幅スペクトルより距離減衰を求めたグラフの一例が図1-23である。また表1-8に最大速度振幅より求められた α とフーリエ振幅スペクトルより求められた α の値を示す。これによるとフーリエ振幅スペクトルより求められた α の値は重錘落下においてもトラック走行においてもほぼ同程度の値となっている。表1-9に振動ローラーにおける振動数の違いによる α の変化が示されている。これを見ると α は振動数の減少と共に減少する傾向が見られる。次に α の推定法について考察を加える。

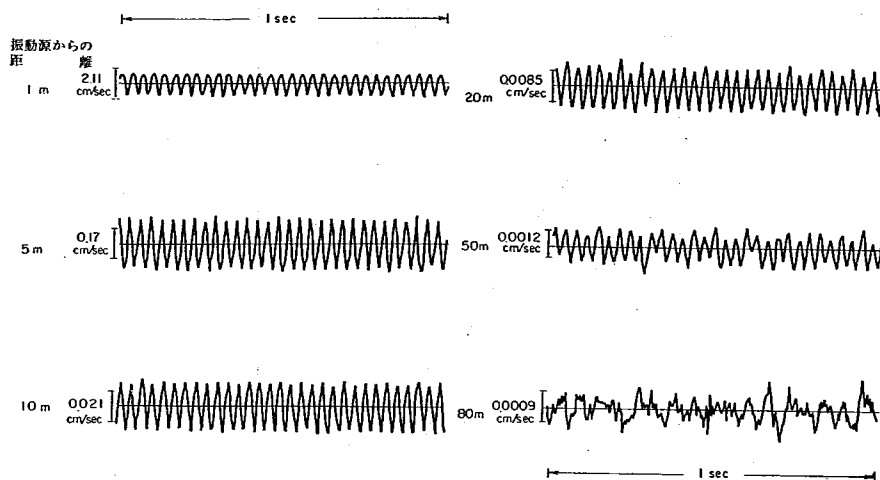


図 1-20(a) 振動波形記録 (振動ローラー, 2600rpm, A 測線, Z 成分)

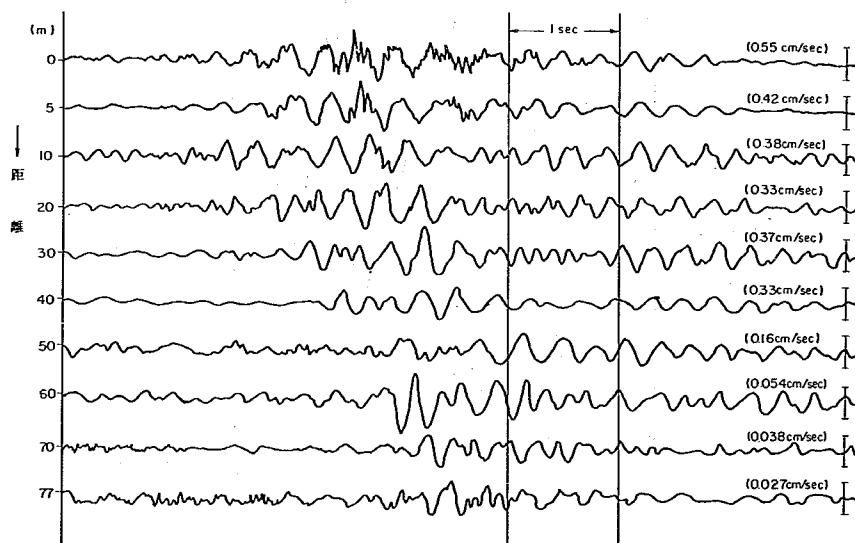


図 1-20(b) 振動波形記録 (トラック走行, A 測線, Z 成分, 走行速度 30km/h)

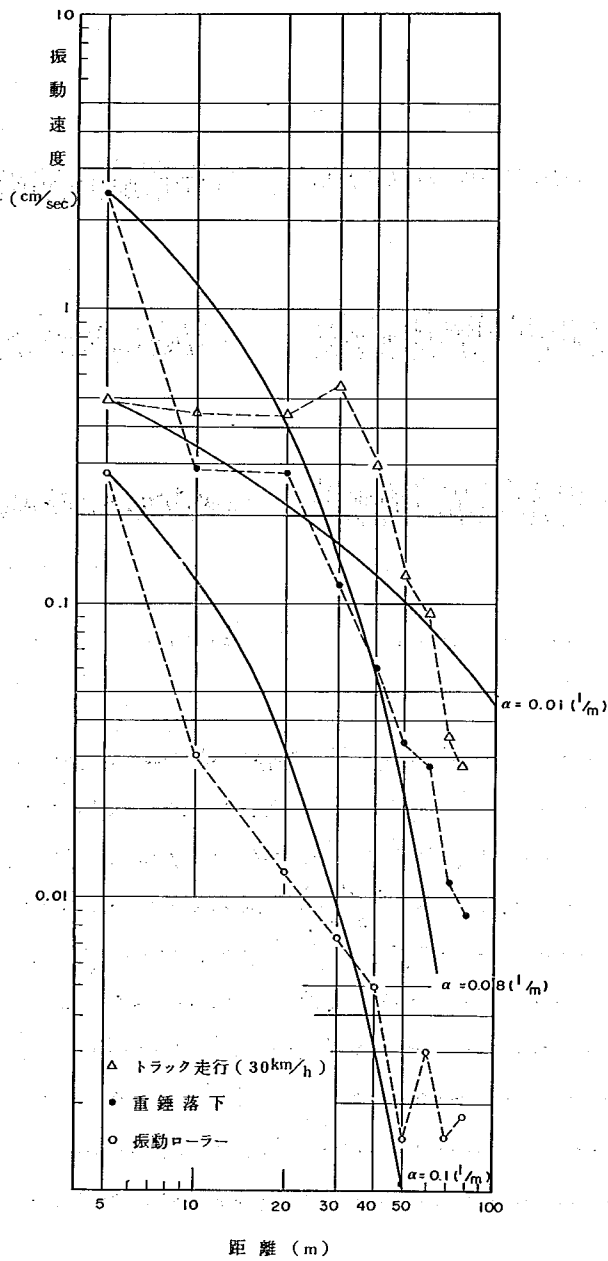


図1-20(c) 距離減衰 (A測線, Z成分)

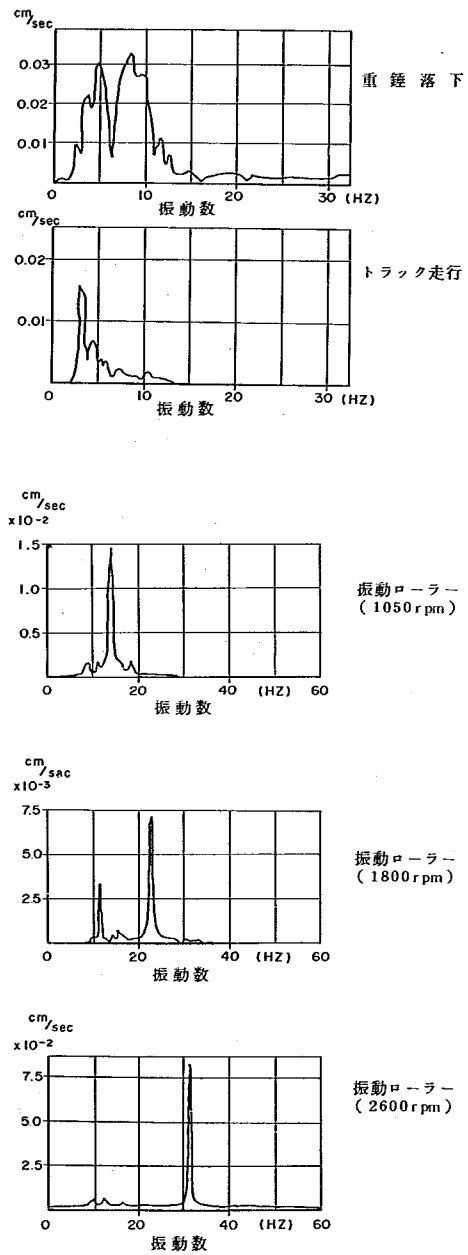


図1-21 各振動源によるフーリエ振幅スペクトル (A 測線, 20m)

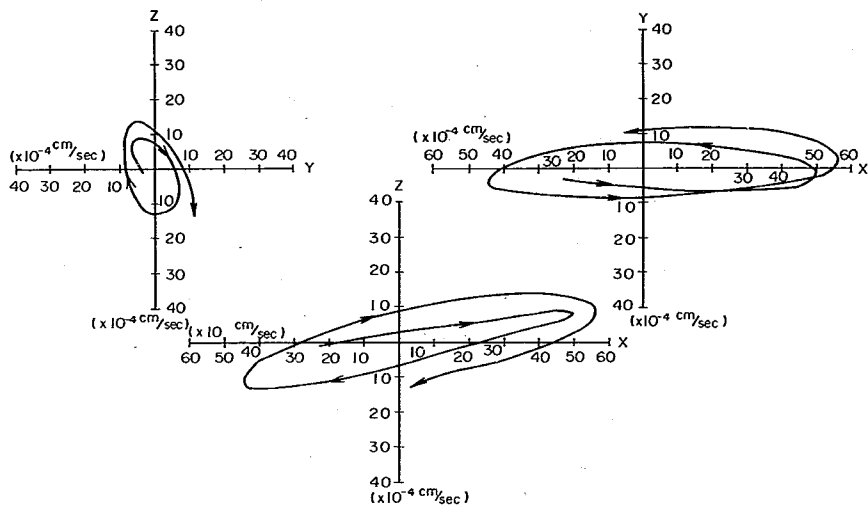


図 1-22(a) 運動軌跡 (振動ローラー, C 測線, 50 m, 1050 rpm)

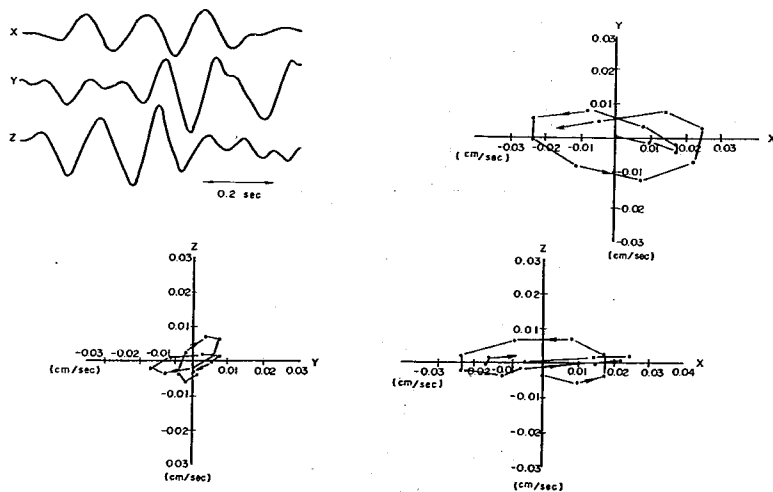


図 1-22(b) 運動軌跡 (トラック走行, C 測線 55 m, $V = 50 \text{ km/h}$, 空荷)

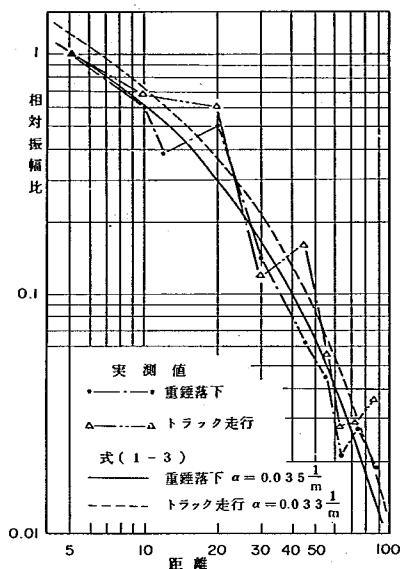


図1-23 フーリエ振幅スペクトルの距離減衰 (C測線, Z成分) (相対振幅比は5m地点の振動速度を基準にとった)

1-4-4 距離減衰係数 α の推定法

一般に α は次式のように表わすことができる。(付録1)

$$\alpha = \frac{\omega}{2QU}$$

式(1-4)

ただし Q : Quality Factor (波動の減衰の程度を示す量)

ω : 振動数

U : 伝播速度

上式において Q は地盤に固有の値であり, Q の値を決定することが α を推定する際に非常に重要な要素となる。

B・O・Hardin⁽³⁾によると Q と地盤の対数減衰率 δx の間には

$$\delta t \approx \delta x = \frac{2\pi\alpha U}{\omega} = \frac{\pi}{Q}$$

式(1-5)

の関係がある。(付録2) ただし上式における δx は距離に関する対数減衰率であるが, 減衰が小さい範囲においては δx は時間に関する対数減衰率 δt に等しいと考えてよいとされている。ここでは式(1-4)を用いて α の値を推定することを考える。

まずA測線におけるボーリングより得られた不攪乱粘土試料を用いて共振ねじり試験機により δt

表1-8 重錘落下とトラック走行の α の相違

測線	成分	最大速度振幅より求めた α ($1/m$)		フーリエ振幅スペクトルより求めた α ($1/m$)		
		重錘落下	トラック走行	振動数	重錘落下	トラック走行
A	X	0.08	0.03	5Hz	0.04	0.03
	Z	0.08	0.01		0.03	0.03
C	X	0.05	0.02	9Hz	0.03	0.02
	Z	0.10	0.03		0.035	0.03

表1-9 振動数による α の変化 (振動ローラー, C測線)

成分	振動数	3.1Hz	2.2Hz	1.4Hz
X		0.08	0.04	0.04
Y		0.1	0.05	0.02
Z		0.08	0.07	0.07

($1/m$)

を求めた。その方法は、中空円柱に成形した試料を3軸室内に設置し、下端固定、上端自由の状態において試料上端に取り付けた加振装置により試料に強制ねじり振動を与え共振状態において加振力を取り除き、自由振動をさせるものである。この自由振動記録の減衰に加振装置の減衰を補正して試料の対数減衰率 δt を定めた。図1-24にひずみレベルが約 10^{-5} における粘土の対数減衰率 δt および減衰比 h の値が示されている。(㊦交通振動におけるひずみレベルは $10^{-6} \sim 10^{-5}$ と言われている。)結果はかなりばらついているが、これは試料の乱れ、あるいは加振装置の減衰の補正法によるものと思われる。 δt の平均的な値を求めると0.3である(この場合のQ値は10.4となる) δt を0.3とし、 U をPS検層より求められた値62m/secを用いると、式(1-4)、式(1-5)より α を推定することができる。その α の推定値と実測値の比較を表1-10に示す。

表1-10 α の実測値と式(1-4)による推定値の比較(A測線、振動ローラー)

	振動数	3 1 Hz	2 2.5 Hz	1 4 Hz
	成分			
現場試験による実測値	X	0.1	0.1 5	0.1
	Y	0.1	0.0 6	0.0 2
	Z	0.1	0.1	0.0 6
式（1－4）による推定値		0.1 5	0.1 1	0.0 6 8

(1/m)

推定値と実測値はオーダーとして一致しているが、その差はX成分について30~50%、Y成分について30~70%、Z成分について10~30%である。この原因として地盤の土質の不均一性、層構造が水平でないことおよび対数減衰率 δt の測定値のばらつき等が考えられる。 δt の測定の精度を上げることは重要な課題であり、そのためには加振装置の減衰をできるだけ小さくすることが必要である。

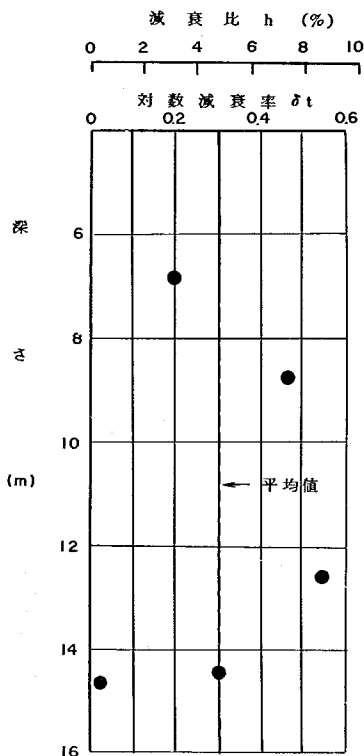


図1-24 対数減衰率 δt -深さ(せん断歪= 10^{-5})

1-4-5 トラックの走行速度および積載重量の違いによる地盤振動特性の相違

図1-25にC測線におけるトラック走行実験の距離減衰を示す。実験条件は走行速度が30 km/h、50 km/hの2種類、荷重は空荷の場合と7.5 tの積荷の場合の2種類である。走行速度と地盤の振動速度の関係についてみると、走行速度が50 km/hの場合の方が30 km/hの場合より振動速度が1.6~2倍程度大きくなっている。また同一速度においては積荷の無い場合の方が有る場合に

比べて振動速度は大きくなっている。この積荷に関する結果は普通予想されることと逆の結果であるが、この原因としてはトラックを走行させた道路がまだ未舗装の段階で、路面にかなりの凹凸があったために空荷走行時に積載時に比べ車体が大きくバウンドし大きな振動が生じたことが考えられる。

1-4-6 振動速度と振動レベルの関係

今回の実験においては振動速度を測定したが、振動規制法の制定により、これからは振動レベル (VL) で規制を行なうことに統一された。従って今回測定したデータを生かすために、振動速度と振動レベルの関係を把握する必要がある。

振動速度が振動数 f (Hz) の正弦波であると仮定すると、振動速度の最大値 V_{max} (cm/sec) と振動加速度の最大値 A_{max} (cm/sec²) の間には

$$A_{max} = 2\pi f V_{max} \quad \text{式 (1-6)}$$

の関係がある。また振動加速度の実効値 A_e は

$$A_e = A_{max}/\sqrt{2} = 2\pi f V_{max}/\sqrt{2} \quad \text{式 (1-7)}$$

である。振動数が 8 ~ 90 Hz の範囲においては振動レベル VL は

$$\begin{aligned} VL (\text{dB}) &= 20 \log_{10} \frac{A_e (\text{cm/sec}^2)}{0.125 f \times 10^{-3} (\text{cm/sec}^2)} \\ &= 20 \log_{10} \frac{2\pi f V_{max}/\sqrt{2}}{0.125 f \times 10^{-3}} \\ &= 20 \log_{10} V_{max} (\text{cm/sec}) + 91 \end{aligned}$$

式 (1-8)

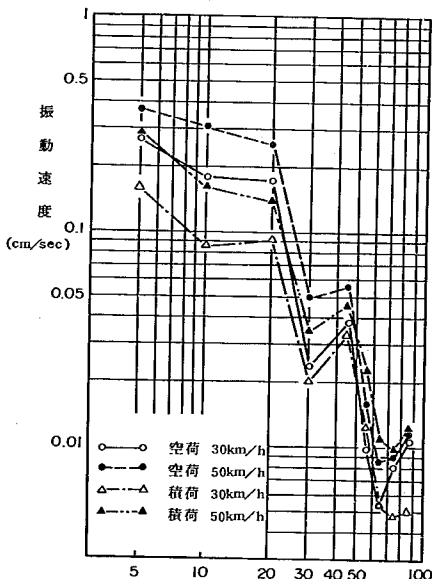


図 1-25 トラック走行における距離減衰 (G 測線, Z 成分)

となり、 V_{max} と 1 対 1 に対応する。

今回の測定においては各測線の 20 m と 50 m (G 測線は 55 m) 地点において振動速度と振動レベルの両方を測定したのでトラック走行と重錘落下試験における両者の関係を図 1-26 に示す。図中には式 (1-8) およびその値より $\pm 2\text{dB}$ の範囲が示されている。これによると実測値はばらつきがあるが、式 (1-8) によって大体近似することができる。式 (1-8) からのずれは振動数が 8 Hz 以下の成分によるものと思われる。

1-4-7 地表面の状態の差による地盤振動特性の相違

図 1-27 に示すように、E 測線において振動源よりほぼ等距離において田圃の中、田圃の畔道、盛土の上等の地表面の状態の違いによる地盤振動の変化を調べた。図 1-28、図 1-29 に測定結果の一例を示す。これを見ると地表面の状態によって地盤振動の大きさにかなりの変化が認めら

れる。たとえば振動ローラーの回転数が1,800回転の場合のZ成分についてみると田圃の中と畔道とで加速度レベルが約5dB違っている。また盛土上と畔道とでは10dB以上違っている場合も見られる。このように地盤振動の大きさは地表面の状態によって大きく影響を受けるものであるから、振動測定に当っては測定場所の地表面の状態に十分注意を払わなければならない。

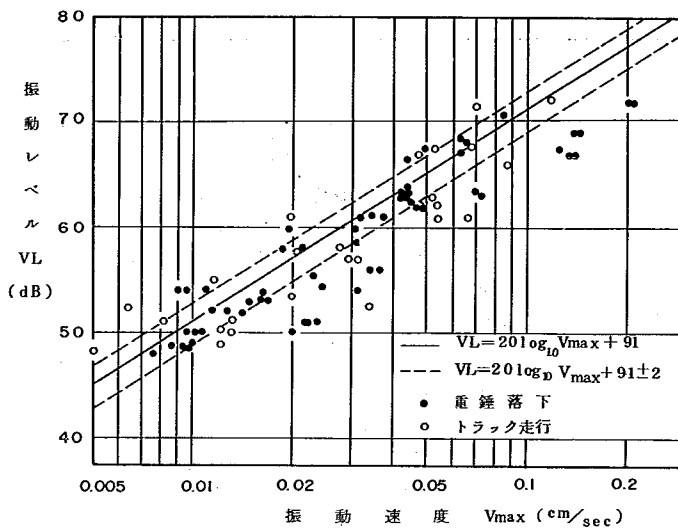


図 1-26 振動レベルと振動速度の関係

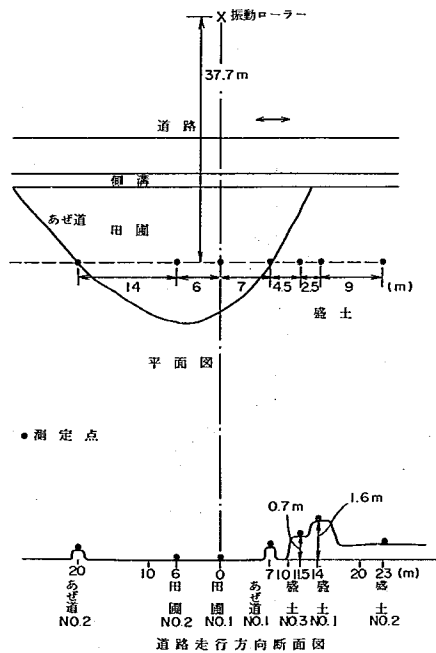


図 1-27 測定点位置
(E測線, 公食用振動計による)

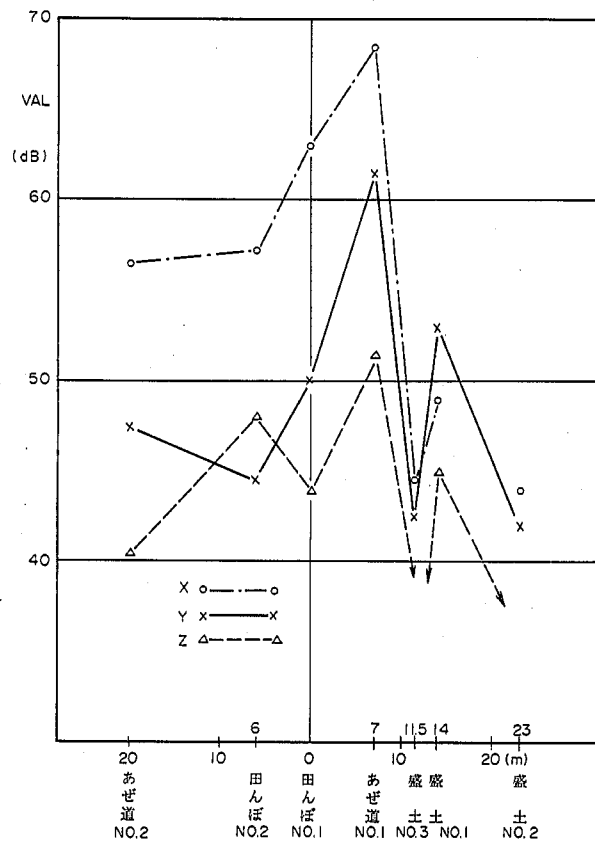


図 1-28 加速度レベル (振動ローラー 1,800 rpm, E測線)

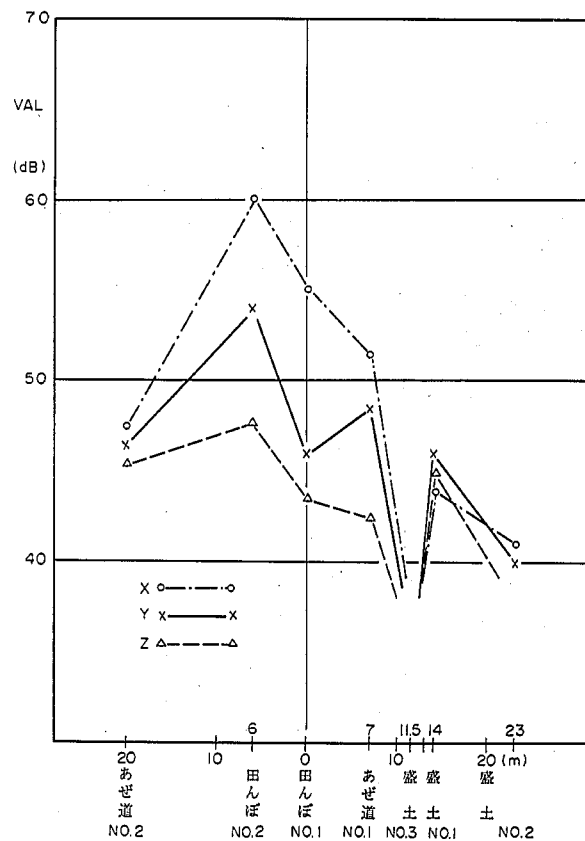


図 1-29 加速度レベル (振動ローラー 1,050 rpm, E測線)

2. 模型振動実験

2-1 実験目的

実験目的は以下の2項目である。

- (1) 現場地盤（現場実験のA測線）をシミュレートした模型地盤を作成し、模型実験による交通振動解析の可能性を検討し、また地盤振動の距離減衰の予測法について検討を加えること。
- (2) 溝、地中壁、盛土等による地盤振動の遮断効果について調べること。

2-2 模型材料および寸法

模型材料としてはグラウト材（品名日東SS-30R）、ベントナイト、けいそう土、砂、水を混合したものを用了。模型地盤は3層より成るが、各層の材料配合を表2-1に示す。図1-4に示されているようにA測線においてはS波速度が深さ方向に3段階に変化しており、これに対応して模型地盤においても3層とした。また模型土槽の概略を図2-1に示す。実際の模型地盤作成に際しては土槽壁より10cm内側に木製の取りはずし出来る内壁を設けてこの中に地盤を作成し、施工終了後内壁をはずして模型地盤と土槽壁間に砂を詰め込んだ。この砂層は土槽壁からの反射波の影響を少なくするために設けた。

表2-1 模型地盤材料配合表

層	配合材料	グラウト材	水	けいそう土	ベントナイト	砂
上層		16	64	10	10	—
中層		20	60	10	10	—
下層		11.9	19.4	6.3	6.3	56.3

（重量比 %）

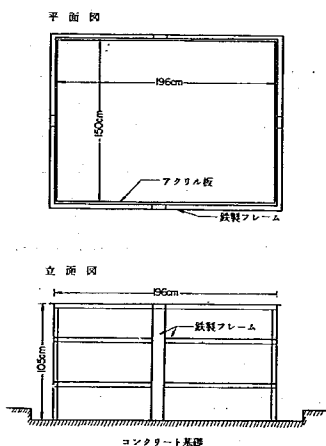


図2-1 模型実験用土槽

2-3 相似律

今回の模型実験においては模型土槽の大きさや使用できる受振器の大きさの制限等から長さの縮尺率を1/150とした。また弾性波速度については現場のA測線において実施したPS検層より得られたP波速度、S波速度の1/10となるように模型地盤を作製した。なお密度の縮尺は約1/13となった。表2-2、表2-3に模型の縮尺率およびでき上った模型の諸定数の値を示す。弾性波速度についてみると模型の目標値との差は約±10%となっている。

なお実地盤は溺れ谷になっていて、水平な層構造ではないが、模型では簡単のために水平な層構造とした。

表 2-2 模型地盤の縮尺率

物 理 量	長 さ	時 間	周 波 数	速 度	密 度	弾 性 数	ポアッソン比
記 号	l	t	f	v	ρ	E	σ
次 元	L	T	T^{-1}	LT^{-1}	ML^{-3}	$ML^{-1}T^{-2}$	—
縮 尺 率 (模型/実物)	$\frac{1}{150}$	$\frac{1}{15}$	15	$\frac{1}{10}$	1.3	$\frac{1}{130}$	1

表 2-3 実地盤と模型地盤の諸定数比較

(a) 実地盤 (A 測線)

諸定数 層	層 厚 (m)	P 波速度 (m/sec)	S 波速度 (m/sec)	ヤング率 (kg/cm^2)	ポアッソン 比	密 度 (g/cm^3)
上 層	12	1100	62	177	0.498	1.5
中 層	5	1100	100	458	0.496	1.5
下 層	—	2200	400	9200	0.483	1.9

(b) 模 型 地 盤

諸定数 層	層 厚 (cm)	P 波速度 (m/sec)	S 波速度 (m/sec)	ヤング率 (kg/cm^2)	ポアッソン 比	密 度 (g/cm^3)
上 層	8	103 (-6.4%)	6.7 (8.1%)	1.56	0.498	1.14
中 層	3.3	110 (0%)	11.4 (14%)	4.52	0.495	1.14
下 層	50	196 (-10.9%)	37 (-7.5%)	71.6	0.482	1.73

() 内の数字は目標値との誤差

2-4 実験方法

2-4-1 振動源

加振方法としては図 2-2 に示されるような装置を用いて常に一定の高さ (模型地盤表面から 11 cm) から重さ 4 g の鉄球を落下させ、地盤からはね上がったところを手ですくい上げる方法を用いた。

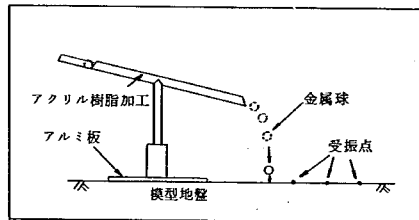


図 2-2 模型加振装置

2-4-2 実験条件、振動測定位置および測定方法

今回行なった実験は次の 5 つである。(図 2-3)

(1) 無対策振動実験

模型の振動特性を把握するため振動源より 1 cm の地点から 3.3 5 cm の間隔で 17 点の測点を設け先に述べた加振装置で加振し、各測点での 3 成分の振動を測定した。なお測定は 9 地点ずつ行なった。そのうち振動源より 1 cm の地点は振源の大きさをモニターするため常時固定した。また振動源から 1 4.4 cm, 3 4.5 cm の地点では地中における測定も行なった。



写真6 模型地盤

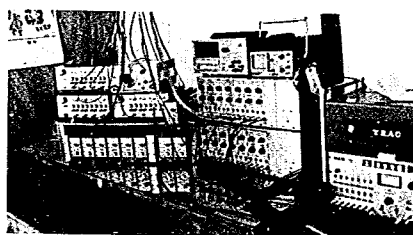


写真7 模型実験測定装置

(2) 盛土による振動軽減実験 1

模型地盤上に高さ 1 cm および 3 cm, 幅 6 cm, 長さ 40 cm (実地盤に換算すると高さ 1.5 m および 4.5 m, 幅 9 m, 長さ 60 m) の 2 種類の盛土を作製し, この盛土による振動遮断効果について実験を行なった。振動源の位置は盛土法尻より 7.7 cm の地点である。なお盛土材料としては模型地盤の中層と同じ材料を用いた。

(3) 盛土による振動軽減実験 2

盛土の寸法, 材質は(2)と全く同じであり, 振動源が盛土上にある場合の盛土による振動軽減効果を調べた。

(4) 溝による振動遮断効果

溝の幅は 7 mm, 長さ 50 cm で深さを 1 cm, 3 cm, 5 cm の 3 通りに変えて実験を行なった。(実地盤に換算すると幅 1.05 m, 長さ 7.5 m, 深さ 1.5 m, 4.5 m, 7.5 m に相当する。) まず初めに深さ 1 cm の溝について溝と振動源の位置を 2, 4, 6, 8 cm の 4 種類に変化させて実験を行ない, 溝の効果の最も大きな位置を求める実験を行なった。次に溝と振動源の位置を固定し, 溝の深さを変えて遮断効果を調べた。

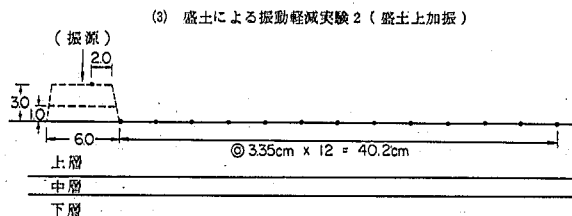
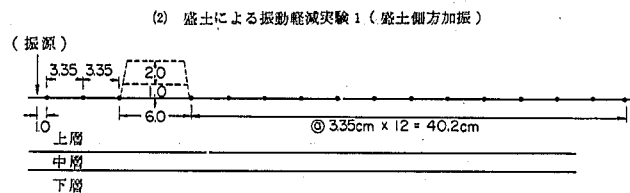
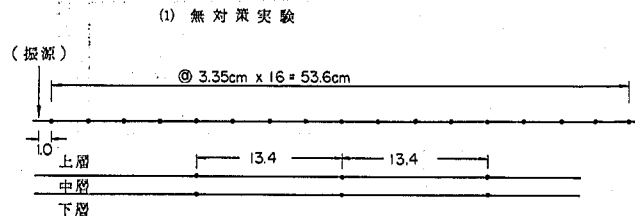
(5) 地中壁による振動遮断実験

リン青銅, セルロイド, ゴムの 3 種類の材料による地中壁を地盤表面付近に作り, 地中壁による振動遮断効果を調べた。地中壁は振動源より 4 cm の地点に設け深さはリン青銅の場合のみ 1 cm, 3 cm, 5 cm と変化させ, セルロイド, ゴムについては 5 cm とした。地中壁材料の寸法および諸定数は後に表 2-8 に示す。

表 2-4 測定計器

計器名	加 速 度 計	増 幅 器	フ ィ ル タ ー	データレコーダー	オッシログラフ
特 性	圧電型 重量 0.5 g 応答周波数 6~8000 Hz	周波数特性 2~20 KHz	周波数範囲 DC~100 KHz 入力電圧 ±10 V	14 チャンネル	12 チャンネル
会 社 名	ENDEVCO	ENDEVCO	電 子 測 器	T E A C	三 栄 測 器
製 品 名	MODEL 2222B	MODEL 2735		R-280	FR102A

測定は圧電型の加速度計を用い, 記録はデータレコーダーにとると共に電磁オッシログラフに書かせた。測定に用いた計器を表 2-4 に示し, そのブロック図を図 2-4 に示す。



・測定点
(単位 cm)

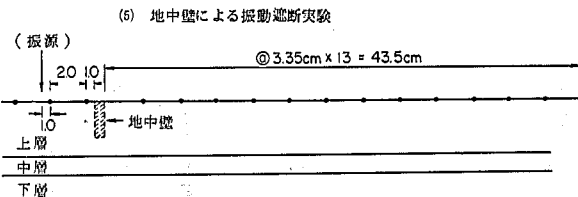
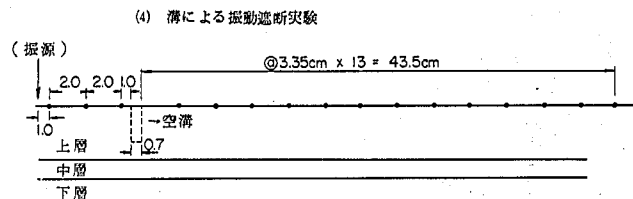


図 2 - 3 模型実験測点配置図

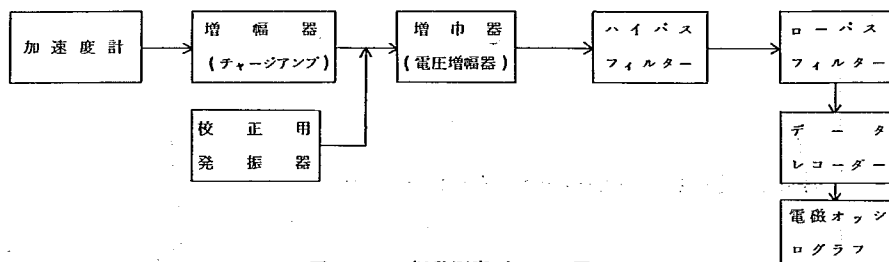


図2-4 振動測定ブロック図

測定成分は水平2成分、鉛直1成分の計3成分であり、測定は1成分ずつ行なった。以下においては現場実験の場合と同様に水平測線方向をX、水平測線直角方向をY、鉛直方向をZと呼ぶ。また地盤の運動軌跡を見るために振動源から14.4 cm、34.5 cmの2測点では3個の加速度計を設置し、3成分同時測定を行なった。

2-5 実験結果

2-5-1 模型地盤の振動特性

図2-5(a)に無対策の場合の振動波形記録(Z成分)を示す。また図2-5(b)にはその時のフーリエ振幅スペクトルを示す。これをみると卓越振動数は100~150 Hz 付近にある。実地盤のA測線における重錘落下による卓越振動数は4~8 Hzであったから、この模型地盤は振動数の縮尺率(15倍)をほぼ満足している。

図2-6は振動源より14.4 cmの地点における運動軌跡であるが、X、Y成分に比べてZ成分が4~5倍大きくなっている。現場実験においてはZ成分が卓越していたので、この点に関しては模型地盤は実地盤をうまくシミュレートできていない。Z成分について走時曲線を描き、波の伝播速度を求めると6.1 m/secであり、いわゆる板叩き法によって求められたS波速度6.7 m/secより若干小さくなっている。また図2-7に表面と地盤内の振幅比が示されているが、地盤内では表面に比べてかなり振動が小さくなっているため観測された波動は表面波が主成分をなしているものと思われる。また模型表盤の諸定数を用いてRayleigh波の分散曲線を求めたのが図2-8である。図中の・印は実測値であるが、理論値と非常によく一致しており、実測された波は1次モードのRayleigh波であると考えられる。

また、模型地盤を伝播する波の波長は、卓越振動数が100~150 Hzであるので6.1~4.1 cmと計算される。

次に減衰について検討を加える。図2-9は無対策の場合のZ成分の距離減衰であり、4回の実験値を同時にプロットしてある。図中の実線は前述の式

$$A = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r}} \exp[-\alpha(r-r_1)] \quad \text{式(1-3)}$$

において $\alpha = 0.034$ (1/cm)とした場合の曲線であるが、実験値はほぼ式(1-3)によって

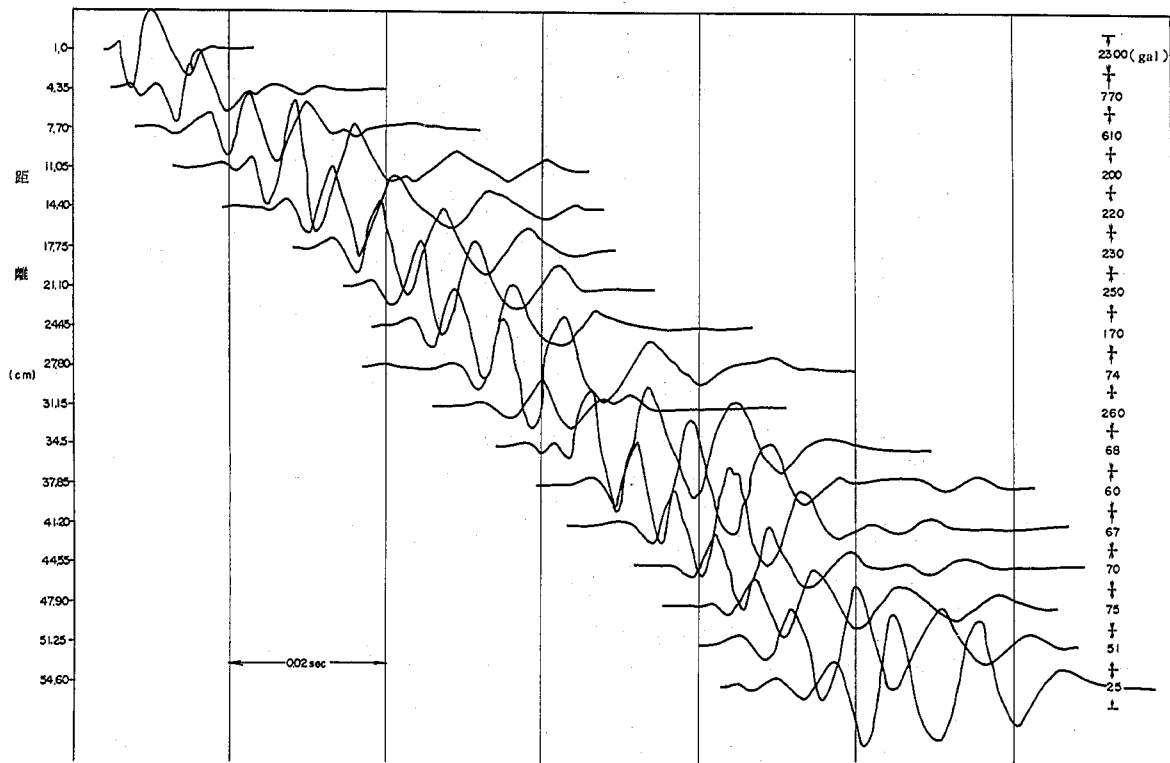


图 2 - 5 (a) 模型地盤振動波形記錄 (無对策, Z 成分)

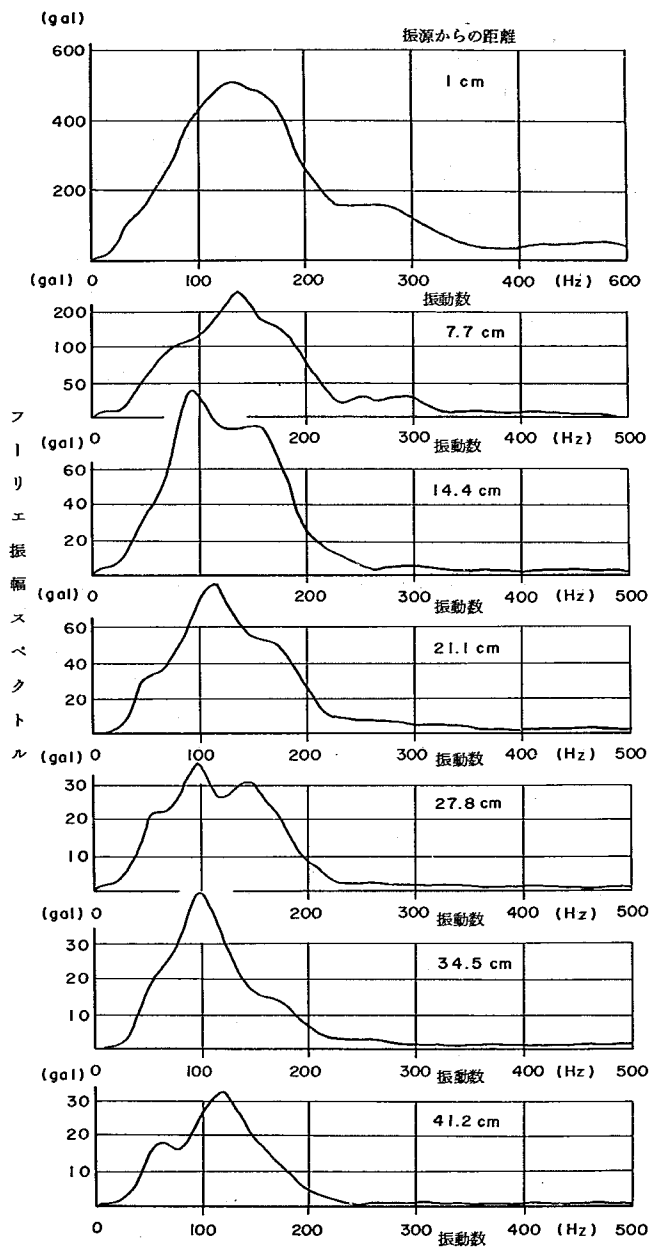


図 2-5 (b) フーリエ振幅スペクトル (Z成分)

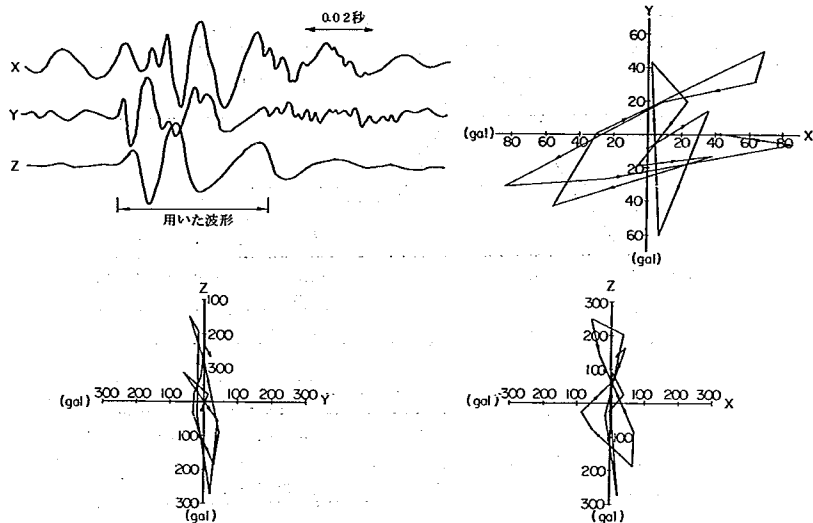


図 2-6 運動軌跡（無対策，振動源からの距離 14.4 cm）

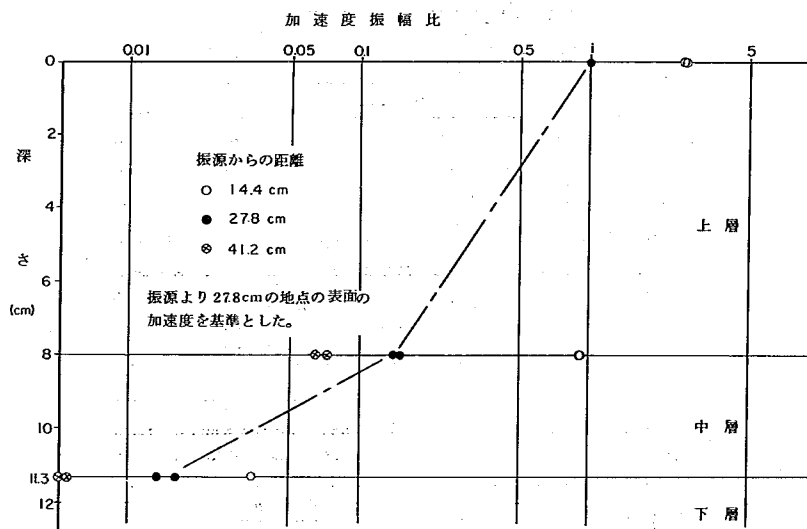


図 2-7 模型地盤内部の振動測定結果（無対策，Z 区分）

表わすことができる。X成分の α は $0.047 (1/cm)$ ，Y成分は $0.049 (1/cm)$ であり，いずれもZ成分より大きくなっている。また図2-10は各振動数毎のフーリエ振幅スペクトルの減衰を示しているが，振動数が高くなる程距離減衰係数 α の値は大きくなっている。表2-5には各

表 2-5 模型地盤の各振動数における Q 値

(Z成分)							
振動数 (Hz)	50	75	100	125	150	175	200
α (1/cm)	0.012	0.016	0.025	0.036	0.045	0.052	0.060
U (m/sec)	4.3	5.8	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
Q	30.4	25.4	20.6	17.9	17.2	17.3	17.2

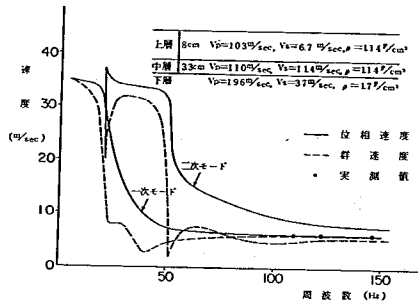


図 2-8 模型地盤の Rayleigh 波の分散曲線

オーダーは一致している。従って模型地盤の Q 値はコントロールできなかったが、偶然実地盤の Q 値とオーダーとして一致していたことになる。

振動数における α の実測値、伝播速度の計算値および Q 値が示されている。なお Q 値は式 (1-4) を変形した次式を用いて計算した。

$$Q = \frac{\omega}{2 \alpha U} \quad \text{式 (2-1)}$$

ボーリング試料を用いた共振ねじり試験より求められた実地盤の平均的 Q 値は 10.4 であり、また表 2-6 に振動ローラー実験より求めた実地盤の Q 値が示されているが Q 値は振動数によってかなり変化している。従って実地盤と模型の Q 値を比較することは困難であるが、少なくとも両者のオ

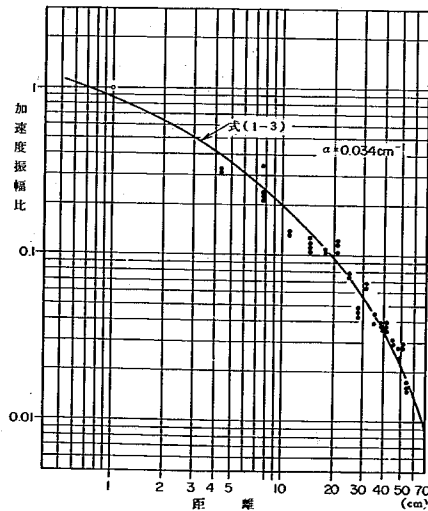


図 2-9 模型地盤の距離減衰 (Z成分)

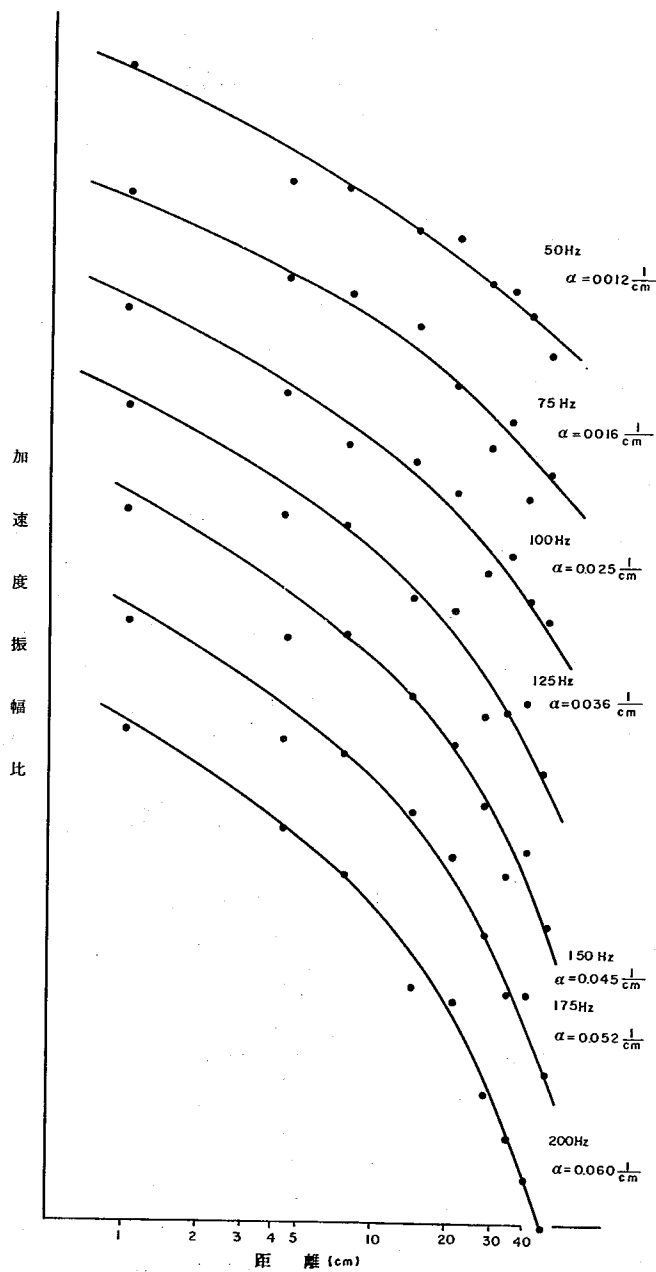


図 2-10 振動数毎のフーリエ振幅スペクトルの距離減衰

表 2-6 実地盤の Q 値 (A 測線)*

成分 \ 振動数	3.1 Hz	2.25 Hz	1.4 Hz
X	1.6	8	7
Y	1.6	1.9	3.6
Z	1.6	1.1	1.0

となる。 $Q=2.2.6$ として図 2-8 の群速度を用いて式 (1-4) より α を求めたのが図 2-11 の曲線である。図中の・印は実測値の α であるが、計算値とかなりよく一致している。従って式 (1-4)、式 (1-5) による α の推定は均一水平地盤に対してはかなり信頼性の高いものと考えられる。

2-5-3 盛土による振動軽減効果

振動源より 10.7 cm の地点に盛土の中心がある場合の盛土による振動軽減効果を表わしたのが図 2-12 である。これを見ると、盛土によって振動は軽減され、その効果は盛土高が高くなる程大きい。盛土背後の平均振動軽減度を次式

$$\Delta = 20 \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (\text{式 2-2})$$

ただし A : 対策工がある場合の加速度

A_0 : 無対策時の加速度

により計算すると

盛土高 1 cm の時 $\Delta = -1.4 \text{ dB}$

盛土高 3 cm の時 $\Delta = -6.4 \text{ dB}$

となる。盛土高さが 3 cm の場合には振動加速度は約半分に軽減される。図 2-13 は盛土高さ 3 cm の場合のフーリエ振幅スペクトルであるが、波が盛土を通過することによって卓越振動数が少し低くなり、盛土直後においては高周波振動がカットされている。図 2-14 は、振動数が 100 Hz と 175 Hz のフーリエ振幅スペクトルの距離減衰であるが、175 Hz の方は盛土直後で急激に振幅

2-5-2 Q 値による振動の距離減衰の推定
模型地盤の Q を求めるために直径 7 cm、高さ 20 cm の円柱試料 (上層と同じ配合) を作製し、ねじり振動を与えてその自由振動記録より対数減衰率 δt を求めると 0.14 であった。この値より式 (1-5) を用いて Q を計算すると $Q=2.2.6$

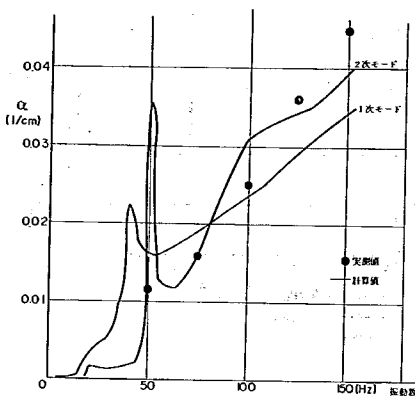


図 2-11 α の計算値と実測値の比較

※注：完全弾性体では Q 値は無限大になり、 Q 値が大きい程その物質は完全弾性体に近いことになる。たとえば水晶の Q が約 10 万、スチールの Q が約 1,000、岩石では数 100 程度の値を持っている。

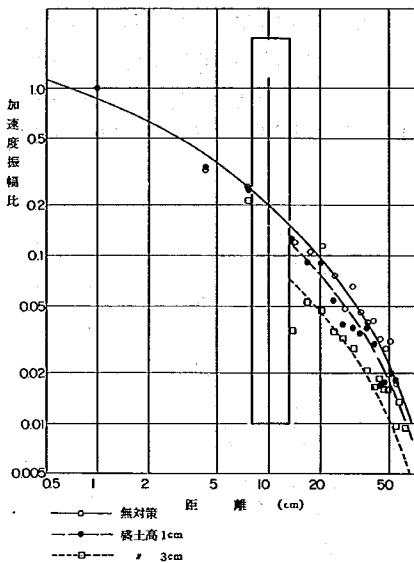


図 2-1 2 盛土による振動軽減効果 (Z成分) 図 2-1 6 に示す。この場合の溝の深さは 1 cm で

が小さくなり、遠去かると無対策の値に近づいている。盛土によってカットされる振動数はおそらく盛土の幅あるいは材質等に影響されるものと思われるが、この点については今後の課題である。

次に盛土上を加振した場合の結果について述べる。図 2-1 5 に距離減衰が示されているが、無対策の場合と比べると盛土があることによりかなり振動加速度が小さくなっている。式 (2-2) で定義される振動軽減量 Δ を求めてみると

盛土高さ 1 cm の場合 $\Delta = -3.4 \text{ dB}$

盛土高さ 3 cm の場合 $\Delta = -11.2 \text{ dB}$

ようになる。従って盛土高さが 3 cm の場合には無対策の場合と比べて振動加速度が約 $1/3.6$ に軽減されることになる。

2-5-4 溝による振動遮断効果

溝と振動源の距離の違いによる振動遮断効果を調べるために溝と振動源との距離を 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm と変えて実験を行なった。その結果を

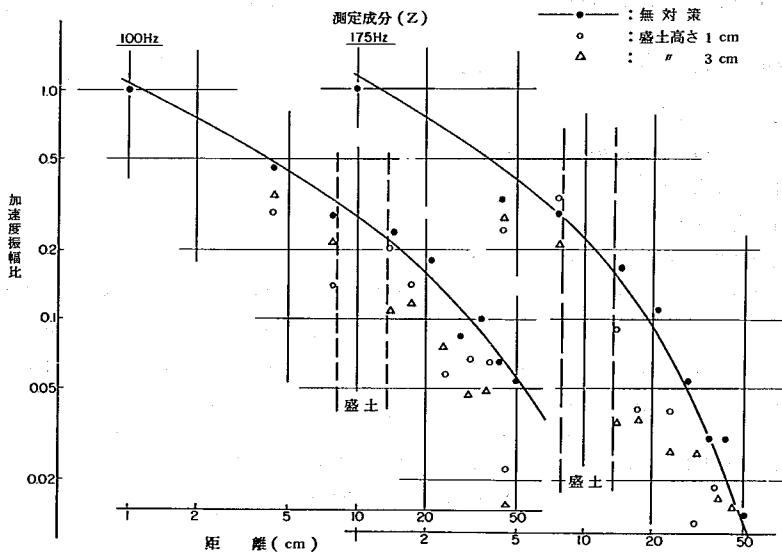


図 2-1 4 盛土による振動軽減効果 (振動数 100 Hz, 175 Hz)

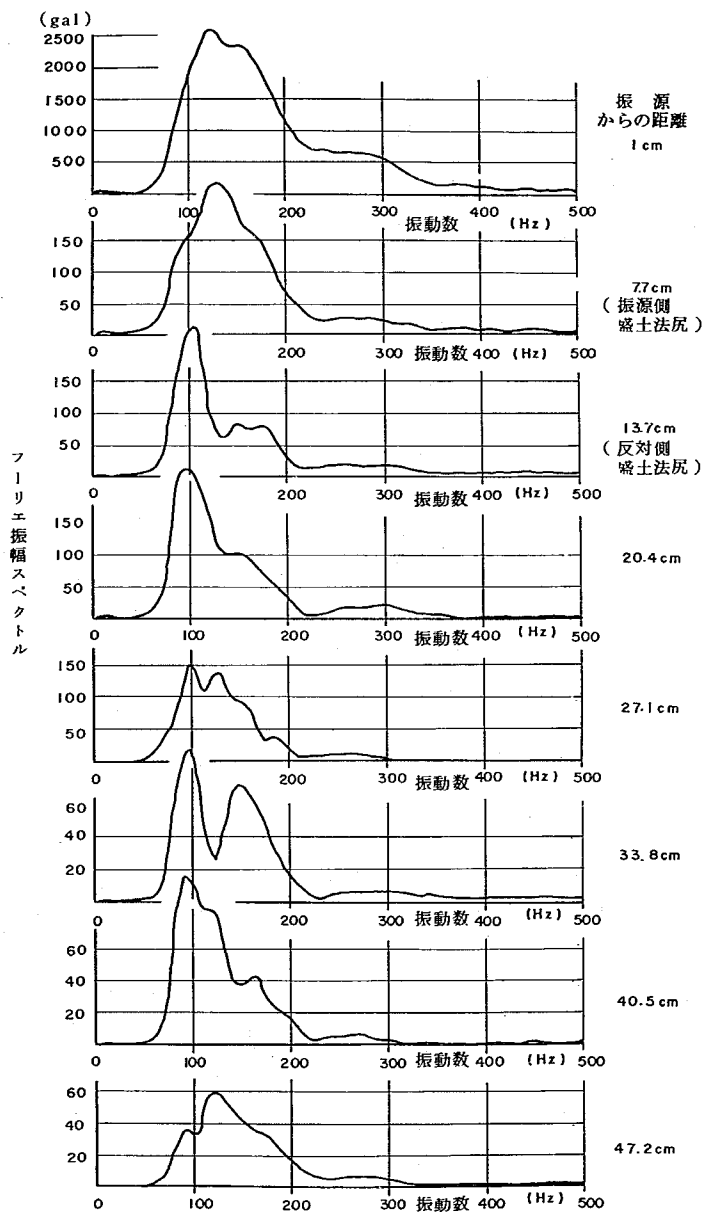


図 2-13 フーリエ振幅スペクトルの変化
(盛土高 3 cm, Z 成分)

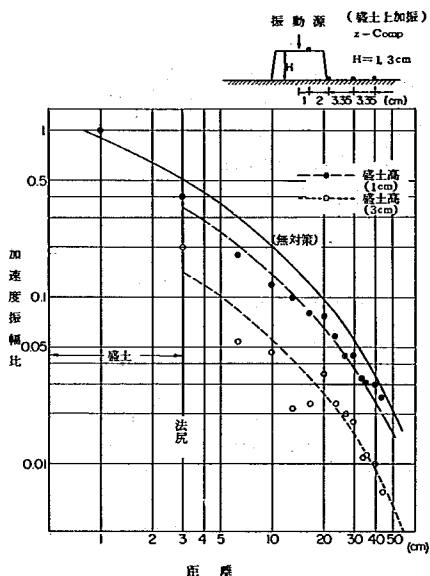


図 2-15 盛土による振動軽減効果
(盛土上加振, Z成分)

ある。この図によれば溝と振動源との距離が遠くなる程、振動遮断効果は少なくなる傾向が見られる。

次に溝と振動源の距離を 4 cm に固定し、溝の深さの違いによる振動遮断効果を調べた。溝の深さを 1, 3, 5 cm と変化させた場合の実験結果を図 2-17 に示す。溝によってかなり振動が軽減されており、その度合は溝が深くなる程大きくなっている。溝の深さによる振動加速度の軽減量 $\frac{A}{A_0}$ の変化を表 2-7 および図 2-18 に示す。ここでは溝から 4.15 cm の点の加速度を比較しているが、溝の深さが波長の $\frac{1}{4}$ の時に $\frac{A}{A_0}$ が約 50 % ($\Delta = -6$ dB), 溝の深さが波長の $\frac{1}{2}$ の時に $\frac{A}{A_0}$ が約 35 % ($\Delta = -9$ dB), 溝の深さが波長に等しい時には $\frac{A}{A_0}$ は約 20 % ($\Delta = -14$ dB) となる。この結果は鈴木、石垣⁽⁴⁾の超音波による実験結果とほぼ同じものとなっている。このように表面波の波長と同程度に深い溝は表面波の遮断

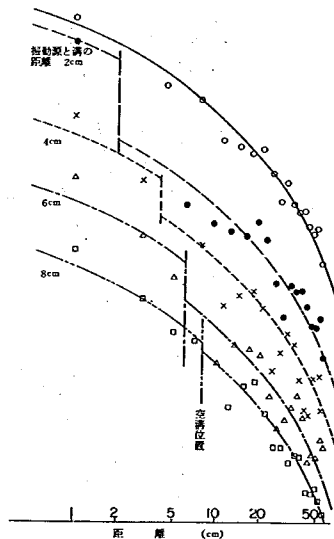


図 2-16 溝による振動遮断効果
(溝深度 1 cm, Z成分)

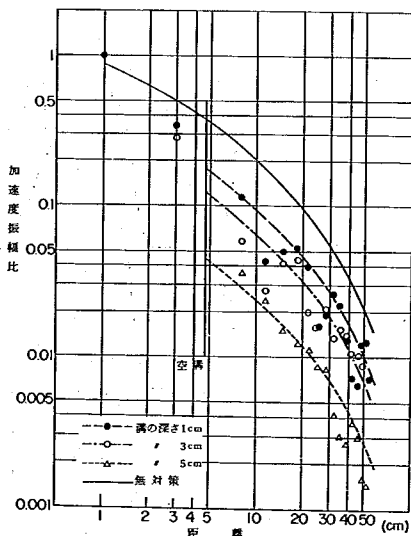


図 2-17 溝による振動遮断効果
(Z成分)

表 2-7 溝の深さと振動遮断効果

溝の深さ (cm)	溝の深さ 波 長	点Rにおける振動 加速度A (gal)	$\frac{A}{A_0}$	$20 \log_{10} \frac{A}{A_0}$
1	0.20	666	0.55	-5.1 dB
3	0.59	390	0.32	-9.8 dB
5	0.98	219	0.18	-14.8 dB

A_0 : 無対策の場合の点Rにおける振動加速度

($A_0 = 1.204 \text{ gal}$)

波長は5.1cmとした。

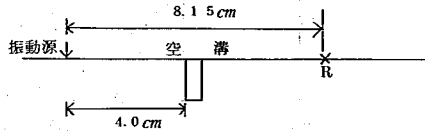


表 2-8 地中壁材料の寸法および諸定数

諸定数 材料	幅 (mm)	長さ (cm)	深さ (cm)	密度 ρ_2 (g/cm^3)	S波速度 v_2 (m/sec)	$\frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1}$
リン青銅	0.31	40	13.5	8.8	2,230	2,550
セルロイド	0.20	40	5	1.38	430	84
ゴム	2.0	40	5	1.80	24	55

ρ_1, v_1 は模型地盤の密度とS波速度

A (溝のある場合の点Rの加速度)

A_0 (無対策における点Rの加速度)

点R : 溝から4.15cm離れた点

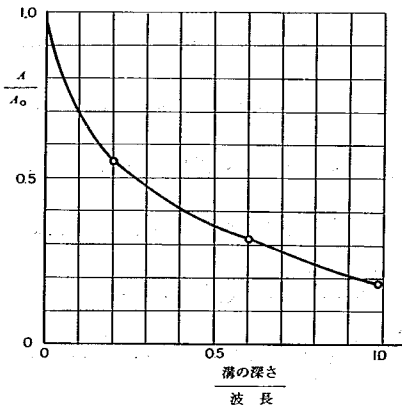


図 2-18 溝の深さと振動遮断効果

a の値が非常に重要な量である。一般に無限に続く地盤の中に無限に長い地中壁がある場合に、

効果が大きいのであるが、実際にそのような深い溝を空のまま永久施設として維持することは困難であると考えられる。

2-5-5 地中壁による振動遮断効果

地中壁として用いた材料はリン青銅、セルロイド、ゴムの3種類である。表2-8の右端の欄に地盤と地中壁の音響インピーダンス ρv の比 a が示されている。

$$a = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \quad \text{式 (2-4)}$$

ただし ρ_1 : 地盤の密度

v_1 : 地盤の伝播速度

ρ_2 : 地中壁の密度

v_2 : 地中壁の伝播速度

地中壁による振動遮断の問題を考える時にはこの

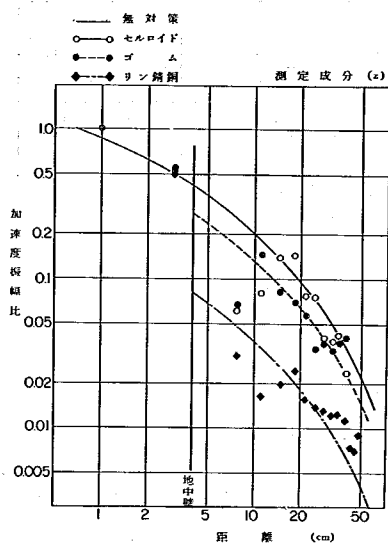


図 2-19 地中壁による振動遮断効果
(地中壁深度 5 cm, Z 成分)

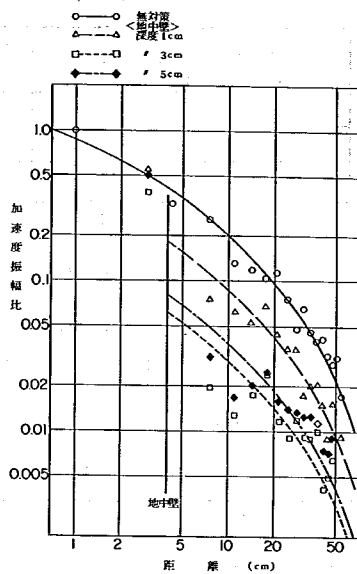


図 2-20 地中壁の深度による振動
遮断効果の変化 (リン青銅, Z 成分)

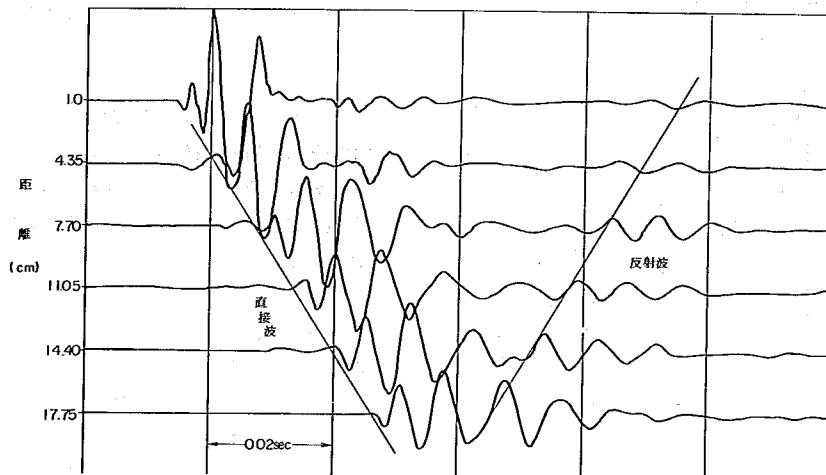


図 2-21 直接波および地中壁による反射波の波形記録

壁に直角に入射する波に対しては α の値が非常に小さい場合（たとえば溝のような場合）には振動遮断効果が大きく、また α が非常に大きい場合（たとえば剛体のような場合）にもまた遮断効果が大きいと言われている。実際には地中壁は有限であるので波の回折現象が生じ、地盤は層をなしているため波の反射が生じるために問題は複雑となるが、 α の値が重要なファクターであることは間違いないと思われる。図2-19は3種類の地中壁による振動遮断効果を表わしているが、音響インピーダンスの比 α が非常に大きいリン青銅の場合はかなりの遮断効果がみられる。それに比べて α の値が比較的小さいゴムとセルロイドの場合は顕著な遮断効果は見られない。ただ地中壁の直後においては振動加速度が無対策の場合の約1/3に減少しているのが注目される。この実験における地中壁の深さは5cmで、ほぼ1波長に当たるが、この結果を溝の場合と比較してみると、リン青銅は溝とほぼ同じ程度の振動遮断効果があることになる。

図2-20にリン青銅の深さの違いによる振動遮断効果を示す。深さが深くなる程遮断効果は大きくなっているが、ただ3cmと5cmの場合にはかえって3cmの方が遮断効果が少し大きくなっている。

ところで地中壁による振動遮断の方式にはエネルギーを吸収する方式あるいは波を反射させる方式等いろいろ考えられるが、音響インピーダンス比の高いリン青銅の場合には反射によって振動を遮断しているものと考えられる。それを示すのが図2-21、図2-22であり、地中壁を振動源より21cmの地点に設置した場合の入射波と反射波の波形および距離減衰を表わしている。図2-22によると反射波の振幅は無対策の場合とほぼ同程度となっており反射効率が非常によいことを表わしている。

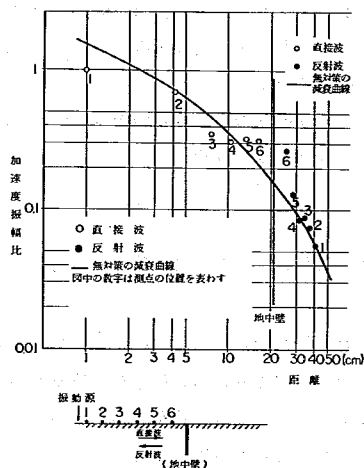


図2-22 地中壁による反射波の減衰（地中壁深度3cm、Z成分）

3. 結 論

今回の実験において得られた結論を以下に述べる。

〔現場振動実験〕

① 今回の実験においては重錘落下、トラック走行、振動ローラーの3種類の振動源を用いたが、いずれの場合にも発生した表面波はX成分（水平、波動伝播方向）が卓越していた。表面波のどの成分が卓越するかは、地盤の層構造あるいは土質条件によって変化すると考えられるので一般的に述べることは困難である。

② 軟弱層の厚さの違いによる振動伝播特性の変化を調べた結果、軟弱層の厚い方が振動伝播速度は遅く、振動数は低いが、距離減衰係数 α の値については軟弱層の厚さによる変化はあまり見られなかった。

③ 地盤の土質定数と地盤振動の大きさについては、表層付近の軟弱粘土の一軸圧縮強度あるいはヤング率と振動の大きさの間に比較的強い相関関係が見られた。またプレロードによる圧密効果によって軟弱粘土の強度あるいはヤング率が大きくなり、これによって振動がかなり軽減されるという結果を得た。

④ 地盤振動の距離減衰の予測については、振動源より距離 r の点の振動振幅（あるいは振動速度、振動加速度） A を

$$A = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r}} \exp \left[-\alpha (r - r_1) \right] \quad \text{式 (1-2)}$$

のようにおき、距離減衰係数 α を次式

$$\alpha = \frac{\omega}{2QU} \quad \text{式 (1-4)}$$

より計算する方法について検討を加えた。ボーリング試料から共振ねじり試験により求められた Q と、 PS 検層より求められた U の値を用いて α を推定した。その結果推定値と現場の実測値の間には10～70%程度の差が見られたが、地盤の土質の不均一性、層構造が水平でないことおよび Q 値のばらつき等を考慮するとやむを得ないものと考えられる。

⑤ 重錘落下試験とトラック走行試験を比較すると、重錘落下試験により発生する波動は衝撃的な波であり波の位相速度を求めるためには便利であり、また地盤への入力エネルギーが一定であるので2地点の振動レベルを比較するためにも好都合である。重錘落下とトラック走行の振動の距離減衰係数 α は異っていたが、これは両者の卓越振動数が違うことから説明できる。すなわちフーリエ振幅スペクトルを求めて同一振動数についての両者の α の値を比較するとほぼ同じ値となった。

⑥ トラック走行試験において走行速度が高い方が振動速度は大きい。積荷については今回の実験では積荷がない場合の方が振動速度が大きいという結果を得たが、このことは路面の凹凸と車両のバネの両方に関係すると考えられるので今後さらに詳しいデータを集める必要がある。

⑦ 地表面の状態による地盤振動の変化を調べた結果、振動源よりほぼ等距離においても、田圃の中、畔道、盛土の上等、地表面の状態によってかなり振動の大きさが変化することが認められた。

〔模型振動実験〕

① グラウト材、けいそう土、ベントナイト、水、砂を混合した材料を用いることによって弾性波速度については約10%の誤差の範囲内で実地盤をシミュレートした模型を作製することができた。減衰については現在のところコントロールできないが、距離減衰の傾向については実地盤と似たものが得られた。

② 鉄球を落下させて加振する方法をとったが、その際発生した表面波は鉛直成分(Z)が卓越しており、この点については水平成分(X)が卓越していた実地盤と異っている。

③ 地盤振動の距離減衰係数 α を式(1-4)

$$\alpha = \frac{\omega}{2QU} \quad \text{式(1-4)}$$

より推定した値と模型地盤における実測値を比較するとかなりよく一致していた。このことは、均一水平な地盤に対しては式(1-4)による α の推定がかなり精度がよいことを示している。

④ 盛土による振動軽減効果を調べた結果、盛土材料として地盤よりかたい材料を用いた場合、かなり効果があることが認められた。たとえば高さ3cm(実地盤に換算すると4.5m)の盛土上に振源がある場合、盛土のない場合に比べて振動加速度は約1/3.6に軽減されるという結果を得た。

⑤ 溝による振動遮断効果については、溝の位置が振動源より遠去かるにつれて遮断効果は少なくなるという結果を得た。また溝の深さと遮断効果の関係については従来の実験結果とはほぼ同様の結果となった。すなわち溝の深さが波長の1/4の時に振動加速度は約 $\frac{1}{2}$ となり、波長の $\frac{1}{2}$ の時には振動加速度は約35%となった。

⑥ 地中壁による振動遮断効果をみるために地中壁として音響インピーダンスの比の異なる3種類の材料を用いて実験を行なった。音響インピーダンスの比が2550ときわめて大きいリン青銅の場合には、空溝と同程度の遮断効果がみられた。音響インピーダンスの比が比較的小さいゴムとセルロイドの場合は地中壁の直後においては遮断効果がみられたが、地中壁から少し遠去かると遮断効果がほとんどないという現象が観測された。

付録 1 式 (1-4) の誘導

(1) 変位 u を $u = A e^{i\omega t}$ とおくと減衰を伴う一次元の運動方程式は次のように書ける。

$$\left(1 + \frac{i}{Q}\right) \frac{d^2 A}{dx^2} + \frac{\omega^2}{U^2} A = 0 \quad \text{式 (A-1)}$$

ただし $i = \sqrt{-1}$, Q : Quality factor

U : 伝播速度, ω : 振動数

u : 変位

式 (A-1) を解くと

$$u = \exp[i\omega t - i\frac{\omega}{U}(1 + \frac{i}{Q})^{-\frac{1}{2}} x] \quad \text{式 (A-2)}$$

となる。

$Q \gg 1$ であると仮定すると,

$$u = \exp[i\omega t - i\frac{\omega x}{U} \{1 - \frac{3}{8Q^2} + O(\frac{1}{Q^4})\} - \frac{\omega x}{2UQ} \{1 + O(\frac{1}{Q^2})\}] \quad \text{式 (A-3)}$$

となり, 微小項を無視すると,

$$u = \exp[i\omega(t - \frac{x}{U})] \exp[-\frac{\omega}{2UQ} x] \quad \text{式 (A-4)}$$

となる。従って減衰を表わす項を $\exp[-\alpha x]$ とおくと,

$$\alpha = \frac{\omega}{2Q U} \quad \text{式 (1-4)}$$

が求まる。

(2) エネルギー法より式 (1-4) を求めると次のようになる。

減衰を伴う一次元の進行波の変位を

$$u = A \sin \omega(t - \frac{x}{U}) \exp(-\alpha x) \quad \text{式 (A-5)}$$

とおく。ただし A : 振幅 , t : 時間 , ω : 振動数

x : 距離 , U : 伝播速度 , α : 距離減衰係数

速度は上式を微分して次式のようになる。

$$\frac{du}{dt} = A \omega \cos \omega(t - \frac{x}{U}) \exp(-\alpha x) \quad \text{式 (A-6)}$$

任意の時刻 t において $x = x_0$ の点におけるエネルギー $T x_0$ は

$T x_0$ = トータルエネルギー

= (運動エネルギー) + (位置エネルギー)

$$= \frac{1}{2} m \left(\frac{du}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2} k u^2 \quad \text{ただし } m : \text{質量} , \quad k : \text{バネ定数}$$

$$= \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2 \omega(t - \frac{x_0}{U}) \exp(-2\alpha x_0) + \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega(t - \frac{x_0}{U}) \exp(-2\alpha x_0)$$

$$= B \exp(-2\alpha x_0) \quad \text{式 (A-7)}$$

ただし

$$B = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \cos^2 \omega(t - \frac{x_0}{U}) + \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega(t - \frac{x_0}{U}) \quad \text{式 (A-8)}$$

また $x = x_0$ から一波長進んだ点 $x = x_0 + \frac{2\pi U}{\omega}$ におけるエネルギー $T(x_0 + \frac{2\pi U}{\omega})$ は次式より表わされる。

$$T(x_0 + \frac{2\pi U}{\omega}) = B \exp[-2\alpha(x_0 + \frac{2\pi U}{\omega})] \quad \text{式 (A-9)}$$

従って一波長中に失われるエネルギー ΔT は

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{x_0} - T(x_0 + \frac{2\pi U}{\omega}) \\ &= B \exp[-2\alpha x_0] \{ 1 - \exp(-2\alpha \frac{2\pi U}{\omega}) \} \quad \text{式 (A-10)} \end{aligned}$$

となる。 Q は次式のように定義されるから、

$$Q = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{1波長中の消費エネルギー}}{\text{そのときのエネルギー}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta T}{T_{x_0}} \quad \text{式 (A-11)}$$

式 (A-11) に式 (A-7), 式 (A-10) を代入すると、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2\pi} \frac{B \exp(-2\alpha x_0) \{ 1 - \exp(-\frac{4\pi\alpha U}{\omega}) \}}{B \exp(-2\alpha x_0)} \\ &= \frac{1}{2\pi} \{ 1 - \exp(-\frac{4\pi\alpha U}{\omega}) \} \end{aligned}$$

ここで α が小さいと仮定すると

$$\begin{aligned} Q &\doteq \frac{1}{2\pi} \{ 1 - (1 - \frac{4\pi\alpha U}{\omega}) \} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{4\pi\alpha U}{\omega} \\ &= \frac{2\alpha U}{\omega} \quad \text{式 (A-12)} \end{aligned}$$

これを書きかえると

$$\alpha = \frac{\omega}{2QU} \quad \text{式 (1-4)}$$

が得られる。

付録 2

B.O.Hardin (参考文献 2) は波動方程式を解くことにより δt , δx を次のように求めた。

Kelvin-Voigt モデルのねじり振動の基礎方程式は次式により表わされる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^3 \theta}{\partial t \partial x^2} - \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad \text{式 (A-13)}$$

ただし θ : ねじり変位 t : 時間
 μ : 粘性係数 x : 距離
 ρ : 密度 G : せん断弾性係数

式 (A-13) の解を

$$\theta(x, t) = C e^{-\lambda t} \sin px \sin \omega t \quad \text{式 (A-14)}$$

ただし C : 定数 λ : 減衰係数
 p : 波数 ω : 振動数

と仮定し式 (A-13) に代入すると

$$\lambda = \frac{G}{\mu} \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\mu \omega}{G} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{式 (A-15)}$$

が得られる。従って時間に関する対数減衰率 δt は

$$\delta t = \frac{2\pi\lambda}{\omega} = \frac{2\pi \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\mu \omega}{G} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right]}{\left(\frac{\mu \omega}{G} \right)} \quad \text{式 (A-16)}$$

と表わされる。また同様に距離に関する対数減衰率 δx は、

$$\delta x = 2\pi \left\{ \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu \omega}{G} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1}{\left[1 + \left(\frac{\mu \omega}{G} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{式 (A-17)}$$

と表わされる。

図 A-1 に δt , δx が示されており, δt , δx が小さい範囲においては

$$\delta t \approx \delta x \quad \text{式 (1-18)}$$

が成立する。今の場合 $\delta t \approx 0.3$ であるから式

(1-18) は成立している。

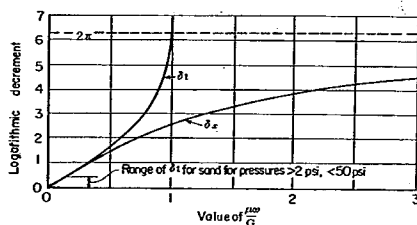


図 A-1 COMPARISON OF THE LOGARITHMIC DECREMENTS WITH RESPECT TO TIME AND WITH RESPECT TO DISTANCE(AFTER B.O.HARDIN)

参考文献

- (1) G.Bornitz; Über die Ausbreitung der von Groszkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J. Springer,, 1931
- (2) F.E.Richert, Jr., T.R.Hall, Jr., R.D.Woods; Vibrations of Soils and Foundations, Rrentice-Hall, 1970
- (3) B.O.Hardin; The nature of Damping in Sands, Proc, of ASCE, SM1, 1965
- (4) 鈴木次郎, 石垣昂; 衝撃波の最大振幅が色々な溝によって減少する度合について,
「地震」Vol.12, No.3, 1960