

# 地盤内の波動伝播問題に対するゲル状材料を用いた一模型実験方法

森地重暉\*・江口和人\*\*

地盤内の波動問題の解明は、地震工学等の面で重要であり、波動現象の解明に有効な模型実験方法の一層の進展が望まれる。過去に、地盤の模型材料に低弾性材料を用いることで波動現象の速さを低減し、実験の実施を容易にした。本文では、過去に用いたアナログ的な記録方法に加えて、デジタル的な記録方法を導入して、模型地盤内の波動現象の解析を迅速かつ正確にした。例題として、剛基層上の弾性層に溝がある場合の波動現象を調査することで、本実験方法の有効性を示した。

**Key Words:** model experiment, Love wave, Rayleigh wave, Wave propagation

## 1. はじめに

地盤内を伝播する波動問題の解明は、地中構造物に対する耐震性の検討など地震工学上の問題に限らず、交通振動などの環境問題に関連しても基本的であるといえる。地中を伝播する地震波動の把握に対しては、アレイ強震観測等による実測が盛んに行われている。一方、理論解析、数値解析及び実験解析も波動問題の究明に対し有効である。前二者の進展に呼応して実験解析のより一層の発展が期待されている。

伝播する波動についての模型実験の実施に際しては、模型材料の選定が一つの課題になる。過去の研究では、ウレタンフォーム<sup>1)</sup>、アクリライト<sup>2)</sup>、アルミニウム<sup>3)</sup>、ジュラルミン<sup>4)</sup>、プレキシグラス<sup>5)</sup>等が用いられている。弾性率の高い模型材料を用いると模型内に生ずる波動の伝播速度が速くなるために、波動現象の発生や記録等を通常の機器で行うのは容易でない場合が多い。一方、弾性率の低い模型材料を用いると波動の伝播速度が遅くなるために波動現象の速さが低減できるので実験の実施面で有利になる。著者の一人はこのような性質をもつ模型材料を活用して波動実験方法の開発を行ってきた。本文では、過去に発表したもの<sup>6)</sup>に比べ記録方法での改善を企てた。その結果、実験方法の有効性を高めたと考えたので報告する。

## 2. 実験計画・実験方法

### (1) 実験計画

著者の一人はアクリルアミドゲルを模型材料として用い、地盤内を伝播する波動についての模型実験を行ってきた。この模型材料は、原材料の配合を変えることにより横波速度を1~3m/s程度に調節することができる。そ

れゆえ、通常の模型材料に比べて波動の横波伝播速度が低くなる。例えば、ウレタンゴムに比べると1/10~1/50、また、プラスチックに比べると1/300程度になる。波動の波長は、波速と周期の積であるので、同じ波長の波動を発生したり把握したりするには、波速の低い材料では高い材料に比べて、周期が大きくなる。そのために、模型における波動現象の発生や把握が容易になるので、波動伝播速度の低い模型材料を用いると実験の実施面で有利になる。

過去に、この模型材料を活用して、剛基層上にある弾性層内を伝播する波動に対して実験的究明を行った<sup>6)</sup>。その結果、波動の進行方向と直交した方向に、粒子が水平面内で振動するようなSH波状の波動はLove波として特性づけられ、また、波動の進行方向を含む鉛直面内で粒子が振動する波動はRayleigh波として特性づけられることを示した。ここでいうLove波、あるいはRayleigh波とは、基層と表層よりなる二層地盤内を伝播するものを意味するが、本文の場合、横波速度の高い方の基層は剛体であるとし、また、横波速度の低い方の表層は弾性層と表記されている。このような場合、表層のみに波動が伝播するので、本文では、剛基層上の弾性層内を伝播するLove波、あるいはRayleigh波という単純な表現を用いている。

過去の研究で、弾性層内の波動伝播に伴い生ずる変位の測定は、非接触変位計を用いて行い、変位記録には電磁式オシログラフを用いた。このように、変位計からの出力をアナログ的に記録する方法は即座に波動現象が把握できるので、実験計画の手直しや実験結果についての考察が実験中に可能であるという利便性がある。しかし、実験結果の数的処理がそのままでは容易でなく、解析に手間がかかり、解析結果への個人差の混入が避け難いなどの難点がある。このような点を考慮して本研究では、変位計からの出力電圧をデジタル的にも記録するこ

\* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 野田市山崎2641)

\*\* 学生員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻

表-1 実験内容

実験	加振方向	変位測定方向	溝の深さ
1	水平	水平	0.0 cm
2	水平	水平	1.5 cm
3	水平	水平	3.0 cm
4	上下	上下	0.0 cm
5	上下	上下	1.5 cm
6	上下	上下	3.0 cm

とで実験結果の数的処理を可能にして、得られた波形の解析を正確かつ迅速に行い得るように工夫した。

本方法は、模型での波動の発生やアナログ的な記録面が有利である。また、発生する波動の振動数が低くなるので、デジタル的な記録に際し、通常のAD変換器でも使用に耐えうるため、この意味でも実験が行いやすい。本方法のこれらの有効性を例証するために、次のように実験計画を立てた。過去における研究と同様に剛基層上の弾性層内を波動が伝播する問題を取り上げ、更に、例題として弾性層に溝がある場合の波動の挙動について調査した。用いた地盤模型の寸法は図-1に示す通りである。溝の位置・寸法等は点線で示す。▽印は加振の位置を示し、また、○印は変位の測定点を意味している。溝の波動伝播に及ぼす影響を調べるために表-1に示す通り6種類の場合について実験を行った。各実験での弾性層の寸法は同一である。

(2) 実験方法

模型材料として剛基層に対しては鋼材を、また、弾性層に対してはアクリルアミドゲルを用いた。アクリルアミドゲルの横波速度は、次のように測定した。地盤模型と同一の配合の原材料でできた直方体供試体(5.0×60.0×12.0cm)を振動台上で長手方向に水平加振することで得られるせん断一次振動数を求めて横波速度を算出した。また、実験後、地盤模型より直方体供試体を切り出して同様な測定を行って横波速度の値を追認した。また、アクリルアミドゲルのポアソン比は0.5で、単位体積重量は1.0t/m<sup>3</sup>である。なお、ポアソン比の測定は、塊状の材料に水圧をかけて体積ひずみを求めることで行った。材料のポアソン比が0.5であるので、縦波速度は理論上、無限大になる。

波動の発生方法は次のようである。電磁式加振器の加振棒の先端にアルミニウム角棒(断面:10.0×10.0mm)を取り付け、角棒を模型に若干、圧接するようにした。図-1に示す加振位置で角棒を上下加振、あるいは水平加振することで線状の加振源とした。そして、正弦波状の変位を連続9波発振し、模型内に波動を発生させた。

以下に波動の伝播に伴い生ずる変位の測定方法を述べる。変位量の測定には、非接触変位計(ギャップセンサー:電子応用(株))を用いた。非接触変位計は渦電流損を利

用したもので、変位計に内蔵された高周波コイルへの金属の近接量を検出するものである。模型の上表面における上下方向の変位の検出は次のようにした。模型の上表面の奥行き方向の中央位置に、一辺25.0mmの正方形のアルミニウム箔(厚さ0.06mm)を密着させて、その箔の変位を非接触変位計で測定し、それを測定箇所の変位とした。また、模型の奥行き方向の上表面近くの水平変位は次のように測定した。測定位置の奥行き方向にストローを挿入して、ストロー先端にそれに直交して、アルミニウム箔を取り付ける。その箔の変位を非接触変位計で測定した。SH波状の波動の進行方向と直交した水平変位は箔の変位に相当すると思われる。

非接触変位計からの出力電圧はアナログ的ならびにデジタル的に記録した。記録方法の状況は図-2に示されている。デジタル処理に際しては、AD変換器(AD12-16TA(98):(株)CONTEC)を用いた。

実験は次のように行った。電磁式加振器の加振振動数は7.0~34.0Hz程度とした。ある振動数で加振して波動を発生させる。オシログラフにより描かれるアナログ波形を観察すると波動の伝播状況の概要を把握することができる。結果次第では、加振器の出力等の調節も可能である。実験が確実に行われていることを確認したら図-2に示す切り換えスイッチでデジタル記録が行えるようにして、再度、同一の実験を行う。データ数は1秒間に500ヶとし、また、データ収集の継続時間は4~6秒とした。

3. 波形処理の方法

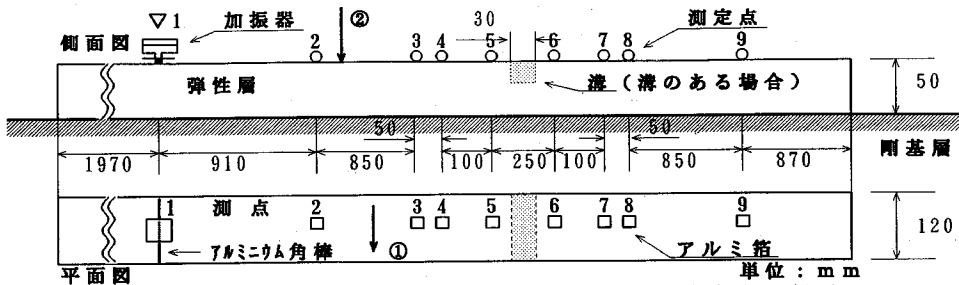
波動伝播に伴い弾性層内に発生する変位の記録から群速度、位相速度を求めるに際し、デジタル記録は有効である。

実験的に得られる波形は加振振動数以外の振動数も含んでいるので、群速度などを求めやすい波形を得るには加振振動数以外の振動数成分を取り除く等の工夫が必要である。もちろん、原波形でも群速度等を求めることは可能である。しかし、加振振動数によっては、波群の時刻歴が明瞭でなくなる場合もある。そこで、以下に示すような方法で原波形にフィルターをかけると、その加振振動数近くの振動数成分をもつ波群が明瞭に現れて群速度の算定が容易になる。本文では次のような方法で行った。

式(1)に示すように原波形 $f(t)$ をFourier変換し、スペクトル $g(\omega)$ を求める。 $t$ は時間、 $\omega$ は円振動数、また、 $i$ は虚数単位である。

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \dots \dots (1)$$

スペクトル $g(\omega)$ のピーク値に対応する円振動数は加振振動数 $\omega_0$ に略対応する。 $g(\omega)$ を円振動数 $(\omega_0 + 2\pi)$



※ 水平加振の場合は側面図の加振点を紙面に垂直方向に加振し、紙面に垂直方向の変位を記録する。(図中の点線は溝を掘る位置を示してある)

図-1 実験模型図

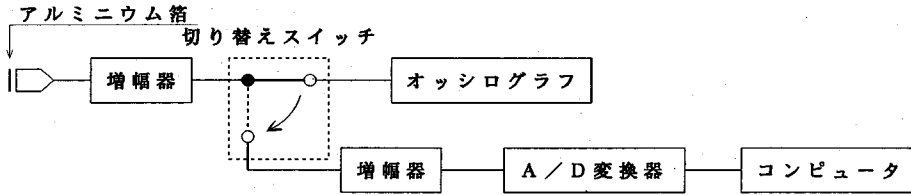


図-2 システム概略図

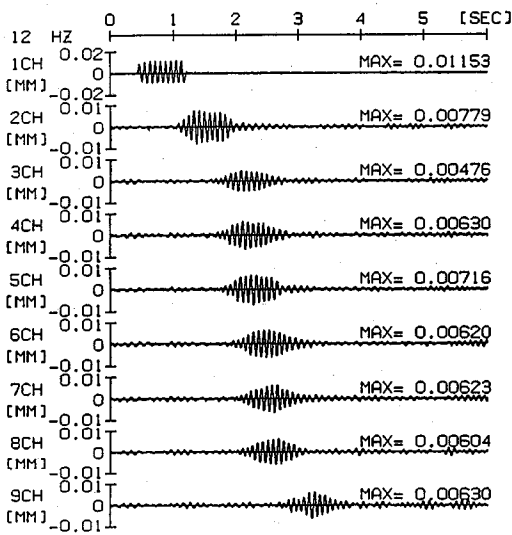


図-3 (a) 原波形 :  $f(t)$

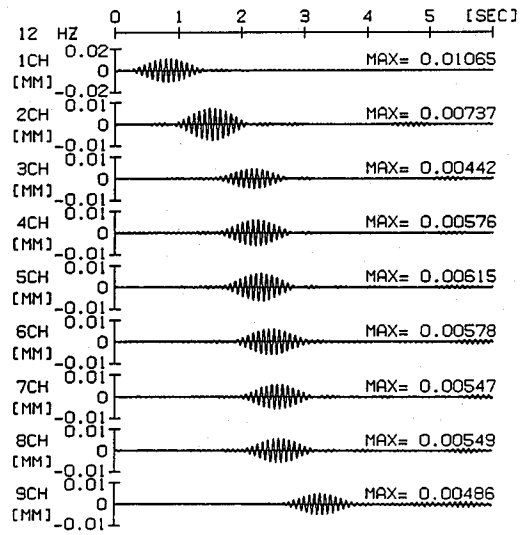


図-3 (b) 変換後の波形 :  $f'(t)$

図-3 実験結果 (水平加振、12.0 Hz、溝なし)

と  $(\omega_0 - 2\pi)$  の間を残して除去し逆変換する。すなわち、式(2)のようにして、波形  $f'(t)$  を得ることができる。

$$f'(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 - 2\pi}^{\omega_0 + 2\pi} g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \dots (2)$$

当然ながら、本実験での記録は有限個の離散データであるので、上式は離散形に変換し、計算される。スペクトルを求めるにも高速フーリエ変換を用い、また、データ数は1秒間に500ヶなので、解析時間が4秒の場合は全データ数は2000ヶ、6秒の場合は3000ヶとなる。

図-3にデジタル記録の原波形  $f(t)$  ならびに  $f'(t)$  の一

例を示す。なお、図-3の時刻歴での変位の正(+)の方向は、図-1における測定点の矢印方向の動き①を示し、図-3のチャンネル番号は各測定点を表す。

なお、表-1に示す6種類の実験について、種々の加振振動数に対して、デジタルの原波形が得られたが、ほとんどの結果に対して、式(2)に示すとおりスペクトルを処理した。その結果、明瞭な波群が得られて群速度を求めることができた。式(2)に示す方法で波群が明瞭に得られない場合には、積分範囲を調節することで、 $f'(t)$  の波群を明瞭にするように工夫した。

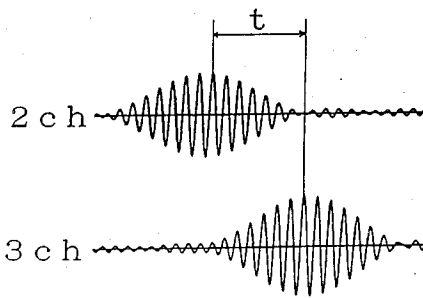


図-4 (a) 群速度の求め方

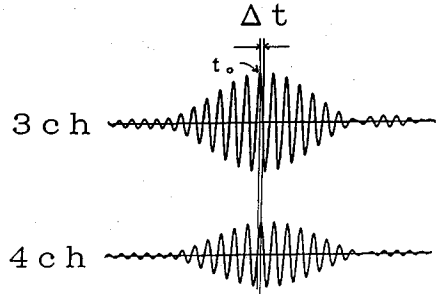


図-4 (b) 位相速度の求め方

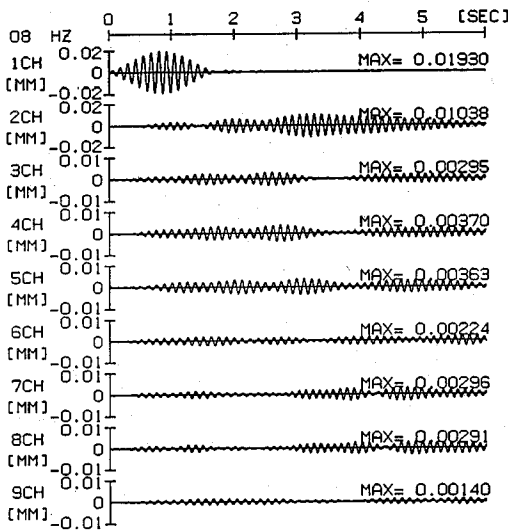


図-5 (a) 8.0 Hz

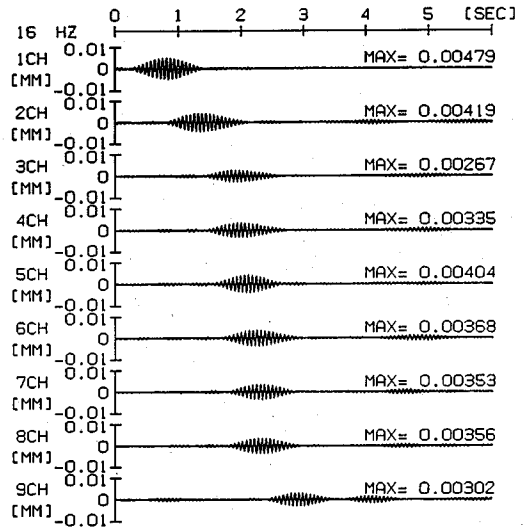


図-5 (b) 16.0 Hz

図-5 実験結果 (水平加振, 溝なし)

群速度 $C_g$ を求める。図-3(b)において測点(2)と(3)の波形を見比べると明らかに波群の進行している様子が分かる。図-4(a)に示すように2つの波形の最大値を示す時間差を $t$ とし、両者の測点間の距離を $L$ とすると式(3)に示すようにして群速度 $C_g$ を得ることができる。

$$C_g = L / t \dots\dots\dots (3)$$

位相速度は次のようにして求める。図-4(b)に示す測点(3)と(4)の間の距離 $l$ は5.0cmである。図-4(b)に示すように、測点(3)におけるある位相の山に着目する。本文では測点(3)での最大値を示す時刻 $t$ に着目した。測点(4)での $t$ より後の最初の位相の山が $\Delta t$ 秒後にあるとする。測点(3)を通る長さ $l$ 以上の波長をもつ波動の位相速度 $C$ は $l$ を用いて式(4)で与えられる。

$$C = l / \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

なお、図-3(b)に示される測点(5)は測点(3)からみて $l$ の3倍の距離があるため、測点(5)の時刻歴は位相速度を求めるにあたり参考資料に用いることができる。また、波長を求めるには、位相速度が波長と振動数との積であることを利用した。

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) SH波状の波動が弾性層内を伝播する場合

###### a) 溝を入れない様な弾性層に対する結果

表-1に示す実験1の結果がこれに相当する。弾性層の横波速度は1.8m/sで、そのせん断一次振動数は9.3Hzである。このせん断一次振動数より低い振動数で地盤模型を加振すると、波群らしいもの以外に固有振動状の動きが現れる(図-5(a))。9.3Hzよりも高い振動数で地盤模型を加振すると、明瞭な波群が現れてそれが伝播していく

表-2 実験結果 (水平加振, 溝なし)

せん断一次振動数 = 9.3 Hz 層厚 H = 4.9 cm		横波伝播速度 Vs = 1.8 m/s 溝の深さ = 0.0 cm				
H/z	C(m/s)	λ(m)	C/Vs	λ/H	Cg(m/s)	Cg/Vs
10	2.5	0.25	1.3	4.9	0.99	0.54
12	2.0	0.17	1.1	3.4	1.3	0.69
14	2.0	0.15	1.1	2.9	1.4	0.79
16	1.9	0.12	1.0	2.4	1.4	0.79
17	1.9	0.11	1.0	2.2	1.4	0.79
18	1.8	0.097	0.95	1.9	1.6	0.87
19	1.9	0.099	1.0	2.0	1.5	0.79
20	1.9	0.094	1.0	1.9	1.6	0.87
22	1.9	0.086	1.0	1.7	1.6	0.87
24	1.9	0.079	1.0	1.6	1.9	1.0
26	1.8	0.067	0.95	1.4	2.0	1.1
28	1.9	0.067	1.0	1.4	2.0	1.1
30	2.0	0.068	1.1	1.4	1.9	1.0
32	1.9	0.059	1.0	1.2	2.0	1.1
34	2.7	0.080	1.5	1.6	0.95	0.52

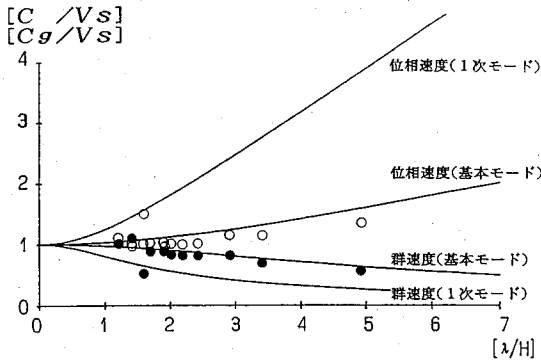


図-6 実験結果 (水平加振, 溝なし)

様子が分かる(図-5(b)). なお, 加振源のアルミニウム角棒の動きにも本方法に示す処理を行っている. それ故, 図-5(a)(b)の1Chは9波以上の波形が見えるが, 実験時では原波形の通り9波になっている. 本文における一連の実験では全て9波の発振である.

3章で述べた波形処理方法を用いて, 実験結果に対して波動の群速度, 位相速度及び波長を求めると表-2に示す通りになる. 図-6には, これらの結果が図示されている. 横軸は波長/層高(λ/H), また, 縦軸は位相速度(または群速度)/横波速度(C or Cg/Vs)の値を示している. 図中には, 剛基層上の弾性層内を伝播するLove波の理論分散曲線を併記する<sup>7)</sup>.

図-6に示される通り, 実験的に得られた群速度並びに位相速度は, Love波の基本モードや一次モードのものに対応していると考えられる. 基本モードの波動の結果が多いのは, 他の高次モードのものより, 実験的に把握されやすいためと思われる.

波動がLove波により特性づけられることを示すには,

群速度や位相速度の他に, 弾性層の振動モードの鉛直方向に見た形状についての検討も必要になる. この検討に関しては, 著者の論文<sup>7)</sup>にも一部述べられており, 図-6に示す分散曲線の基本モードに対応する振動モードは, 剛基層上の弾性層のせん断一次振動形に, また, 一次モードの分散曲線に対応するものは同じ弾性層のせん断二次振動形になることが確認されている. よって, 本実験での波動はLove波により特性づけられると考えられる.

なお, 弾性層のせん断一次振動数より低い振動数で加振すると波群の他に固有振動状のものが生ずる理由は次のように説明することができる. 次のように記号を定める.

u: y方向の変位, i: 虚数単位, A: 振幅, C: 位相速度, λ: 波長, ω: 円振動数, t: 時間, Vs: 横波速度, H: 弾性層高, f: 加振振動数, f<sub>0</sub>: 弾性層のせん断一次振動数, n: (0, 1, 2, ...)

z軸は上向きを正とし, 座標系の原点は弾性層底部にあるとする. 剛基層上の弾性層内を伝播するLove波の速度は, 式(5)で示される<sup>7)</sup>.

$$C = V_s \sqrt{1 + \left\{ \frac{(2n+1)\lambda}{4H} \right\}^2} \dots \dots \dots (5)$$

また, C=f×λ, Vs=4Hf<sub>0</sub>であることを考慮すると, 剛基層上の弾性層内をx方向に伝播するLove波の変位は, 式(6)(7)にて示される.

$$u = A \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2H} \cdot \exp(i\omega \left( \frac{x}{C} - t \right)) \dots (6)$$

$$C = \frac{4Hf_0}{\sqrt{1 - (2n+1)^2 \cdot \left( \frac{f_0}{f} \right)^2}} \dots \dots \dots (7)$$

f < f<sub>0</sub> のとき, 式(7)の根号の中は負になり, Cは虚数になる. それ故, 式(6)は振動状の動きを示すことになり, 図-5(a)の振動状態がこれに相当する.

b) 弾性層における溝の有無の影響

一例として, 波動源の加振振動数が18.0Hzの場合の溝の深さの変更に応じた波動の伝播状況の変化を図-7に示す. 表-1に示した実験1, 2, 3の資料を用いている.

b. 1) 弾性層に溝がない場合(図-7(a))

波群の伝播していく状況が明瞭に分かる. 図-7(a)において, 測点(9)の2番目に大きい振幅をもつ波群②は図-1に示す模型地盤右端の境界からの反射波のものである. そして, 測点(2)から(8)の時刻歴には, その反射波に対応した波群が現れている. また, 測点(2)において波群①は, 模型地盤左端からの反射波である. このことは, 図-1に示す加振源と測点(2)と模型左右端部との位置関係から裏付けることができる.

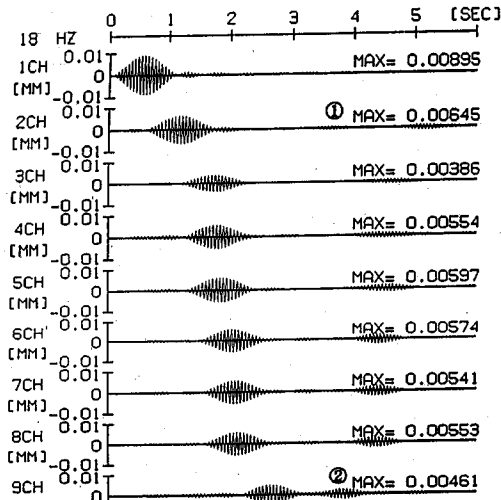


図-7(a) 18.0 Hz, 溝の深さ0 cm

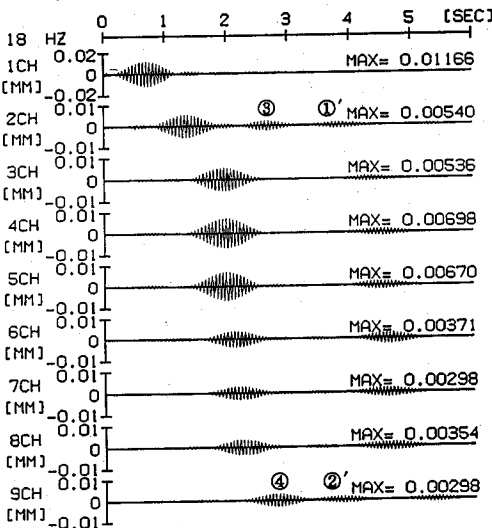


図-7(b) 18.0 Hz, 溝の深さ1.5 cm

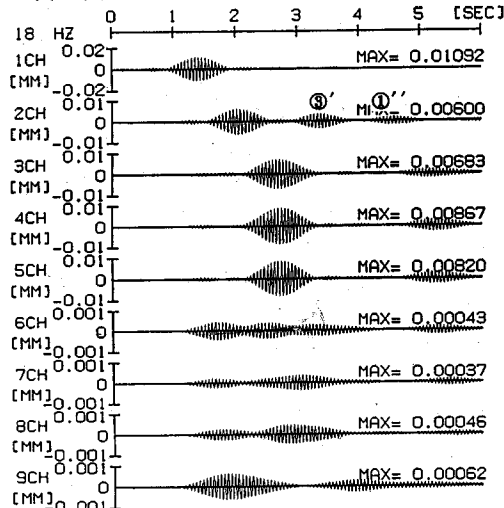


図-7(c) 18.0 Hz, 溝の深さ3.0 cm

表-3 実験結果 (水平加振, 溝の深さ1.5 cm)

せん断一次振動数 = 9.3 Hz      横波伝播速度  $V_s = 1.8$  m/s  
 層厚  $H = 4.9$  cm      溝の深さ = 1.5 cm

Hz	$C$ (m/s)	$\lambda$ (m)	$C/V_s$	$\lambda/H$	$Cg$ (m/s)	$Cg/V_s$
10	2.5	0.25	1.4	5.1	1.0	0.55
12	2.3	0.19	1.3	3.9	1.3	0.71
14	2.1	0.15	1.2	3.0	1.5	0.81
16	2.0	0.12	1.1	2.4	1.5	0.90
17	2.0	0.12	1.1	2.3	1.7	0.90
18	2.0	0.11	1.1	2.2	1.5	0.89
19	2.0	0.10	1.1	2.1	1.7	0.83
20	1.8	0.091	0.99	1.8	1.7	1.3
22	2.3	0.11	1.3	2.1	1.6	0.58
24	2.1	0.088	1.2	1.8	1.5	0.49
26	1.7	0.065	0.92	1.3	2.4	0.60
28	2.0	0.070	1.1	1.4	1.1	0.34
30	8.5	0.028	4.6	5.6	0.90	0.34
32	2.1	0.066	1.2	1.3	1.1	0.33
34	2.5	0.075	1.4	1.5	0.62	0.32

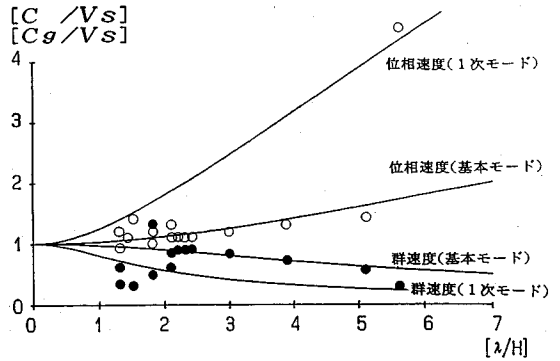


図-8 実験結果 (溝を通過後の分散状況)

b.2) 弾性層に深さ1.5cmの溝がある場合(図-7(b))

測点(2)と(9)の位置は溝から等距離にあるので、溝からの反射波である測点(2)における波群③と透過波である測点(9)の波群④とは同時刻で生ずるとみてよく、図-7(b)にその状況が示されている。また、測点(2)における波群①'は、前出の波群①と同様な意味をもつ。

b.3) 弾性層に深さ3.0cmの溝がある場合(図-7(c))

測点(2)に溝からの反射波に対応する波群③'が、また、模型地盤左端からの反射波に対応する波群①''が現れている。本実験では、溝による波動の遮断効果が大きいためか波動の透過はほとんどなく、図-7(b)の④に対応するものは現れていない。溝の遮断効果が大きいため溝より遠方では波動伝播がほとんどなくなり、振動状態が目立ったものと考えられる。また、この振動状態は、数値処理のため出現したものではなく、デジタル波形とアナログ波形の原波形においても存在していた。また、溝の通過後に現れている振動振幅が目立つのは時刻歴における変位のスケールが溝の通過以前より格段に小さいためである。

溝を通過した後の波動の性質を調べるために深さ1.5

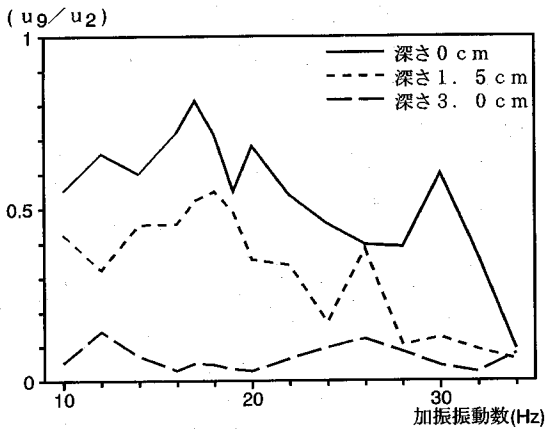


図-9 溝の深さに伴う最大振幅比の変動状況

cmの溝をもつ弾性層の測点(8)と(9)の時刻歴を用いて群速度を、また、測点(7)と(8)の時刻歴を用いて位相速度及び波長を求めた。その結果は、表-3、図-8に示される通りである。図中に併記された理論分散曲線は実験値を説明すると考えられる。従って、溝を通過した後の波動もLove波により特性づけられると言える。深さ3.0cmの溝をもつ弾性層については、溝を通過した後の波動の性質には明瞭な傾向が見いだせなかった。

溝が波動を遮断する効果の程度を示すために、表-1の実験-1,2の場合には、図-7(a)(b)の測点(2)と(9)における波群の最大振幅の比率( $u_9/u_2$ )を求め、各振動数毎に示したのが図-9である。深さ3.0cmの溝についての実験-3の場合には、図-7(c)に示す通りで、測点(6),(9)での時刻歴は波動の伝播状況を呈してはいない。そこで、 $u_2$ としては測点(2)の時刻歴における波群の最大振幅を用いたが、 $u_9$ としては測点(9)の時刻歴における最大振幅を用いた。その結果を図-9に併記する。

図-9を見ると明らかに溝が深くなるに伴い振幅比が減少していく様子が分かる。また、加振振動数毎に( $u_9/u_2$ )が変化する理由については、媒質の減衰性等も関係すると思われるが、その他の要因についても究明する必要があると考えられる。

(2) 上下方向に地盤模型を加振する場合

表-1に示した実験4, 5及び6の結果を以下に示す。弾性層の横波速度は1.9m/sである。装置上の制約から、上下加振により生じた波動の伝播に伴い生ずる変位のうち上下動のみに着目した。

図-10には、加振振動数が18.0Hzの場合が示されている。時刻歴における変位の正(+)の方向は、変位計よりアルミニウム箔が遠のく方向、つまり、図-1に示す矢印②の方向を表す。

4.(1)の場合と同様な方法で溝のない様な弾性層に対して伝播する波動の群速度、位相速度を求めると表-4

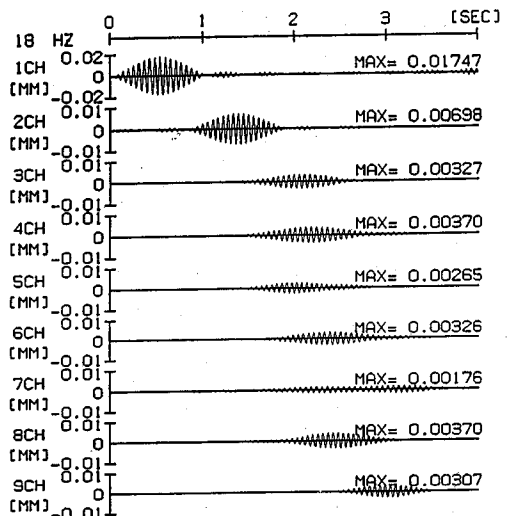


図-10(a) 18.0 Hz, 溝の深さ0 cm

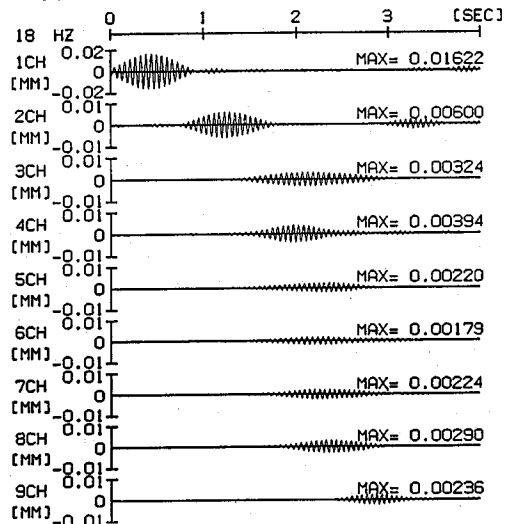


図-10(b) 18.0 Hz, 溝の深さ1.5 cm

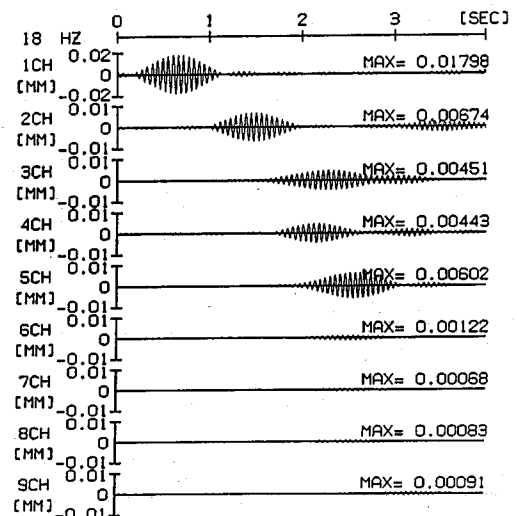


図-10(c) 18.0 Hz, 溝の深さ3.0 cm

表-4 実験結果 (上下加振, 溝なし)

せん断一次振動数 = 9.3 Hz      横波伝播速度  $V_s = 1.9$  m/s  
 層厚  $H = 5.0$  cm      溝の深さ = 0.0 cm

Hz	$C(m/s)$	$\lambda(m)$	$C/V_s$	$\lambda/H$	$C_g(m/s)$	$C_g/V_s$
12	4.3	0.35	2.2	7.3	1.7	0.89
14	3.6	0.26	1.9	5.4	0.86	0.46
16	3.2	0.20	1.7	4.1	0.76	0.40
17	3.2	0.19	1.7	3.9	0.97	0.51
18	3.2	0.18	1.7	3.6	1.1	0.59
19	3.2	0.17	1.7	3.5	0.97	0.51
20	2.6	0.13	1.3	2.6	1.1	0.56
22	2.6	0.12	1.3	2.4	1.1	0.56
24	2.3	0.097	1.2	2.0	1.3	0.67
26	2.1	0.082	1.1	1.7	1.5	0.77
28	2.1	0.076	1.1	1.6	1.7	0.89
30	2.1	0.071	1.1	1.5	1.7	0.88
32	2.6	0.080	1.3	1.6	1.6	0.82
34	3.2	0.094	1.7	1.9	1.2	0.63

表-5 実験結果 (上下加振, 溝の深さ 1.5 cm)

せん断一次振動数 = 9.3 Hz      横波伝播速度  $V_s = 1.9$  m/s  
 層厚  $H = 5.0$  cm      溝の深さ = 1.5 cm

Hz	$C(m/s)$	$\lambda(m)$	$C/V_s$	$\lambda/H$	$C_g(m/s)$	$C_g/V_s$
12	8.7	0.72	4.6	14.9	1.6	0.86
14	8.7	0.62	4.6	12.7	1.2	0.65
16	8.7	0.54	4.6	11.2	6.3	3.3
17	5.2	0.31	2.7	6.3	1.2	0.63
18	4.3	0.24	2.3	5.0	1.8	0.94
19	3.7	0.20	2.0	4.0	1.2	0.63
20	4.3	0.22	2.3	4.5	1.0	0.55
22	2.4	0.11	1.2	2.2	0.62	0.33
24	2.9	0.12	1.5	2.5	1.1	0.58
26	2.4	0.091	1.2	1.9	1.4	0.75
28	2.2	0.077	1.1	1.6	1.3	0.67
30	2.4	0.079	1.2	1.6	1.8	0.94
32	2.2	0.068	1.1	1.4	1.5	0.81
34	2.0	0.059	1.1	1.2	2.2	1.2

[C/Vs] [Cg/Vs] 理論分散曲線 (Rayleigh波)

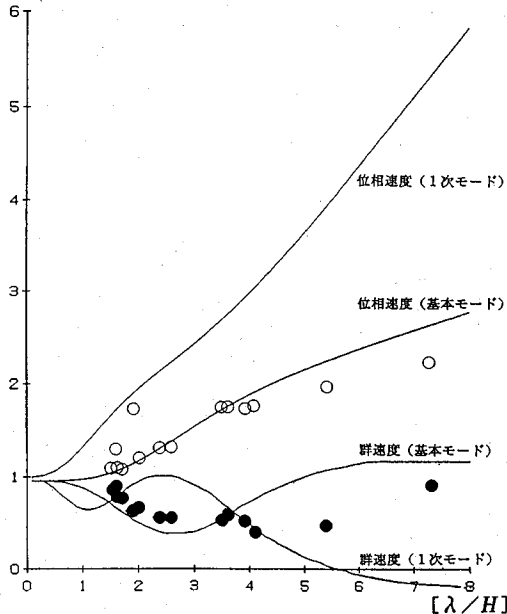


図-11 実験結果 (上下加振, 溝なし)

[C/Vs] [Cg/Vs] 理論分散曲線 (Rayleigh波)

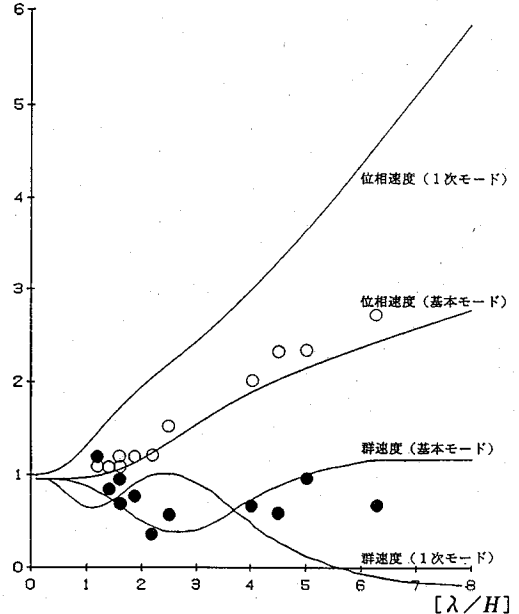


図-12 実験結果 (溝を通過した波動の分散状況)

に示す通りとなる。これらの結果を4.(1)の場合と同様に図示すると図-11の通りとなる。図-11には、剛基層上の弾性層内を伝播するRayleigh波の理論分散曲線を併記している<sup>2)</sup>。図-11に示される通り、実験的に得られた群速度ならびに位相速度は、剛基層上の弾性層内を伝播するRayleigh波のものに、ほぼ対応すると考えられる。ただし、波動がRayleigh波により特性づけられることを示すには、本実験で得られた上下動の他に、水平動についての検討も必要であるが、この件についても、一部、著者の論文<sup>2)</sup>に述べられている。

また、剛基層上の弾性層内を伝播するRayleigh波の分散曲線を求めるにあたっては弾性層のポアソン比を0.5とし、また、平面ひずみ状態で解析している。模型の厚

さ方向の変形が問題になると思われるが、著者は次のように考えて平面ひずみ状態とした。

著者の論文<sup>2)</sup>で、厚さ8.0cm、高さ8.0cm、長手方向の長さ60.0cmの直方体供試体が剛基層上にある場合、水平方向の加振により生ずる振動状態の結果から、ここでいうRayleigh波の分散性を調査した。その結果、実験結果と平面ひずみ状態であるとした理論とは合致していると判断した。本文の場合には、模型の高さ(5.0cm)、厚さ(12.0cm)を考慮すると、文献<sup>8)</sup>における模型より平面ひずみの状態に、より近いと考える。実験模型においては、アクリルアミドゲルと基層の鋼材との密着のため、厚さ方向の変形が拘束されていると思われる。

溝の深さが1.5cmである弾性層内を伝播する波動が溝



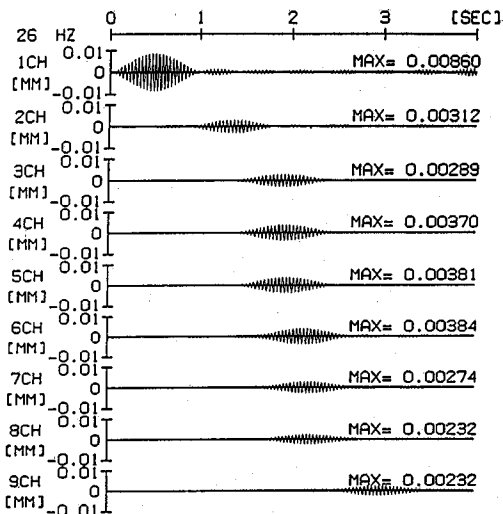


図-13(a) 26.0 Hz, 溝の深さ0 cm

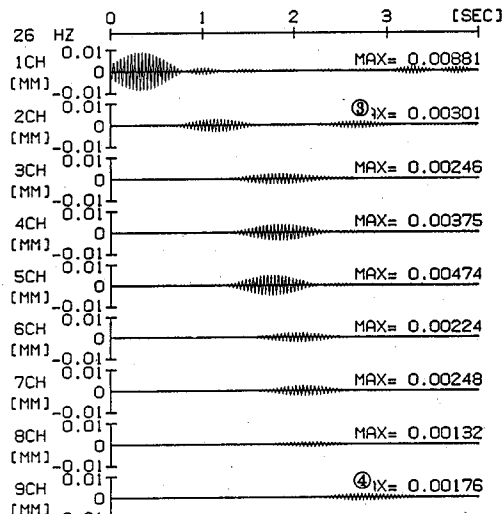


図-13(b) 26.0 Hz, 溝の深さ1.5 cm

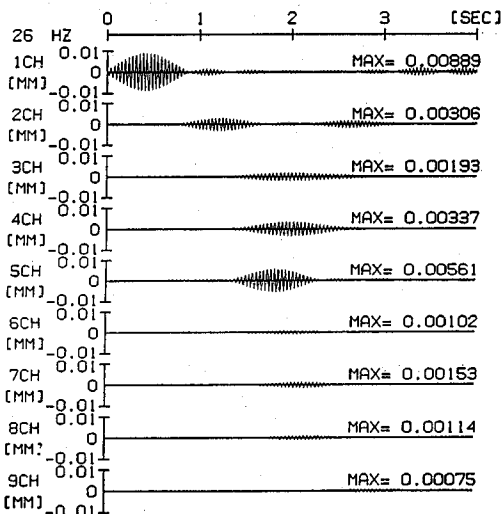


図-13(c) 26.0 Hz, 溝の深さ3.0 cm

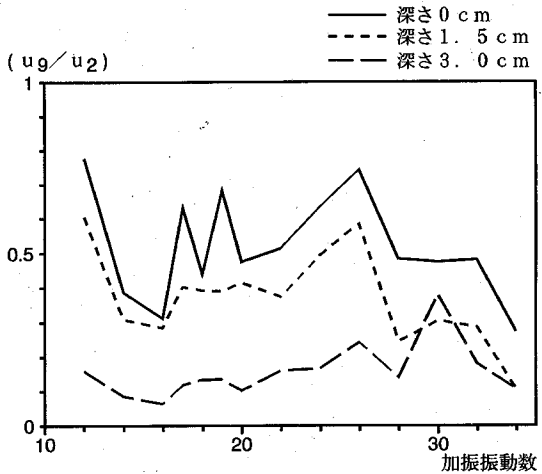


図-14 溝の深さに伴う最大振幅比の変動状況

を通過した後に示す性状を調べるために前出4.(1)と同様な方法でその分散性を調査した。その結果は、表-5、図-12に示す通りで、波動は剛基層上の弾性層内を伝播するRayleigh波の性質をもつと考えられる。

4.(1)に示したSH波状の波動による実験結果は明瞭に波群が現れているが、上下加振での実験結果にはやや明瞭性を欠くことが多い。例えば図-10(b)(c)では溝における反射の痕跡等が明瞭でないが、他の加振振動数では明瞭になることがある。図-13(b)には、図-7(b)における波群③、④と同様のものが現れていて、それらの波群を図-7(b)と同一の記号で指し示している。

図-14には溝の深さが変動した場合の図-9におけると同じ意味の比率( $u_g/u_2$ )の変化状況が示されている。図-9の場合と同様に、明らかに溝が深くなるに伴い振幅比が減少していく様子が分かる。

## 5. 結 び

地盤内を伝播する波動現象の解明は、地中構造物等に関連しての地震工学上の問題や交通振動等の環境問題に対して重要である。地盤内での波動現象を解明する一方法として、模型実験的手法は有効と思われ発展が期待されている。著者らは低弾性材料を用いることで模型内に生ずる波動現象の速さを低減し、実験の実施を容易にした。本論文では、過去に用いたアナログ的手法に加えて、デジタル的手法を記録に導入し、それらを併用して実験を行い、実験後の記録の解析を迅速かつ正確にすることで波動現象の解明手法をより一層進展させることができた。

剛基層上の弾性層における波動伝播の問題を取りあげた。応用例として、弾性層内にある溝が波動に及ぼす影響を調べることで本実験方法の有効性を例示した。

参考文献

- 1) King, J.L. and Brune J.N. : Modeling the Seismic Response of Sedimentary Basins, B. S. S. A. Vol. 71, No. 5, pp. 1469~1487, 1981
- 2) 藤井和成 他3名:溝を通過するレイリー波について(I) (II) 地震, 第2, 第33巻, pp.1~10, 11~22, 1980
- 3) Rogers, A.M. et al : Topographic Effects on Ground Motion for Incident P Waves, B. S. S. A. Vol. 64, No. 2, pp. 437~456, 1974
- 4) Martel, L. et al : Transmission and Reflection of Rayleigh Wave Through a Step, B. S. S. A. Vol. 67, No. 5, pp. 1277~1290, 1977
- 5) Kuo, J. t. and Thompson, G. A. : Model Studies on the Effect of a Sloping Interface on Rayleigh Waves, Jour. Geophys. Res. Vol. 68, No. 22, pp. 6187~6197, 1963
- 6) 森地・大西:弾性層内を伝播する表面波に対する一模型実験方法について, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 625~638, 1992
- 7) Morichi, S., Ohmachi, T. and Toshinawa, T. : Vibration Modes Characterized by Love Waves in an Elastic Layer Overlying a Rigid Basement, Proc. of J. S. C. E. No. 356/1-3, pp. 203~211, Apr. 1985.
- 8) Morichi, S., Ohmachi, T., Toshinawa, T. and Miyai A. : Vibration Modes Characterized by Rayleigh Waves Propagating in an Elastic Layer on a Rigid Base, Proc. of J. S. C. E. No. 380/1-7, pp. 165~173, Apr. 1987

(1993. 4. 26 受付)

A MODEL EXPERIMENTAL METHOD BY USING GELLED MATERIAL TO ADDRESS THE ISSUE OF WAVES PROPAGATING THROUGH THE GROUND

Shigeaki MORICHI and Kazuhito EGUCHI

The elucidation of the issue of waves propagating through the ground is very important in the area of seismic engineering. This requires the further development of a model experimental method effective for the clarification of a phenomenon of wave propagation. In the past, the use of low-elastic material to make a ground model made it possible to reduce the velocity of propagating waves, resulting in an easier execution of experiments. This paper discusses that in addition to an analogic method of recording used in the past, we introduced a digital method of recording to analyze quickly and accurately the phenomenon of waves propagating through a model ground. An example is given to prove the validity of the proposed method through investigation of the phenomenon of waves propagating through the ground in case there is a trench in an elastic layer lying over a rigid substratum.