

不整形部をもつ模型地盤内の波動現象に対する一考察

An examination on wave phenomena resulting from ground irregularity

川名太*, 森地重暉**, 白戸義孝***

Futoshi Kawana, Shigeaki Morichi, Yoshitaka Shirotō

*東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

**工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

***東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

Concerning wave propagation phenomena produced in irregular ground, model experimental results were examined by use of numerical analyses and ray theory. Displacement time histories due to wave propagation were found to be predominant in certain frequency band. This characteristic seems to have essential effects on wave phenomena due to irregular ground part such as discontinuity of layers.

Key Words : Model Experiment, Ray Theory, irregular ground

1. はじめに

不整形地盤内に生ずる波動現象についての究明は地震工学や環境工学上で基礎的な課題である。実際の地盤の複雑な力学的性質を加味する以前に、単純な模型での基礎的な究明結果が解析の手がかりを与える。本文ではこのような基礎的な究明に資するべく、単純な形状をもつ地盤についての波動現象の解明を試みた。

地盤の不連続性が波動現象に及ぼす問題の扱いについては、例えば Malischewsky の著書¹⁾に総括がなされている。このような課題の解明手段としては、弾性論的、波線論的あるいは数値解析的アプローチがあり、それらの普及は著しい。一方、模型実験解析は数値模型の構築に効果があるだけでなく、波動現象の直感的把握に有効である。そのため、理論解析の急速な普及に呼応して一層の進展が望まれる。限られた寸法の模型内に生ずる波動現象を把握するためには、模型材料に低弾性材料を用いると波動現象の速度を低減することが可能であり、過去の文献では、ポリウレタンフォーム²⁾、シリコンゴム³⁾などが用いられている。本文では、それらの模型材料に比べてより一層弾性率の低いアクリルアミドゲルを用いて、そのような課題に対して実験解析を行った。

本文では、層状地盤の解明に対して基礎的と思われる剛基層上の弾性層を伝播する波動を扱った。弾性層の層厚が不連続な所に波動が伝播するとき生ずる現象を模型実験的に調べ、実験結果を数値計算及び波線理論的に検討した。著者自身も類似した実験研究⁴⁾を行なったが、実験的究明の可能性に対して示すに止まっている。

2. 実験計画と実験方法

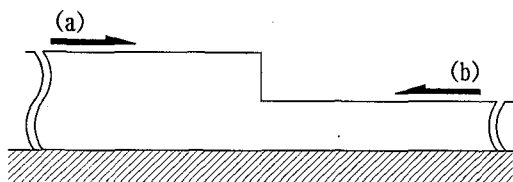
2.1 実験計画

本研究の目的は、剛基層上に段差部左右で層厚の異なる弾性層があり、弾性層内を伝播する波動が段差によって反射や透過に受ける影響について調査することにある。その方法として模型実験方法を用い、得られた結果について数値解析的に、また波線論的に究明した。用いた模型の形状が図-1に示されている。2次元模型とし、剛基層上の弾性層が左右で層厚が異なるとした。極端に層厚が異なるものとし、1:2の比率にした。剛基層上に層厚の異なる弾性層が連結している場合と、自由表面が同レベルで剛基層に段差のある場合について行なった。表-1に実験の概要が示されている。

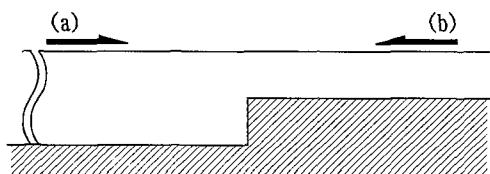
2.2 実験模型

地盤模型材料として、アクリルアミドゲル^{5), 6)}を用いた。この材料は二液混合型の高分子材料であり、材料の配合によって横波速度を1~3m/s程度に調節することができる。ポアソン比は0.5であり、単位体積重量は、1.0g/cm³である。

図-2には実験模型が示されている。図-2(a)のものは、表-1中の実験-1(a), (b)に対応する。弾性層の横波速度は1.63m/sであった。模型中央部に段差があり、これを不整形部と考えた。左側の層厚は7.9cm、右側の層厚は4.2cmであるとした。また、図-2(b)には実験



実験—1



実験—2

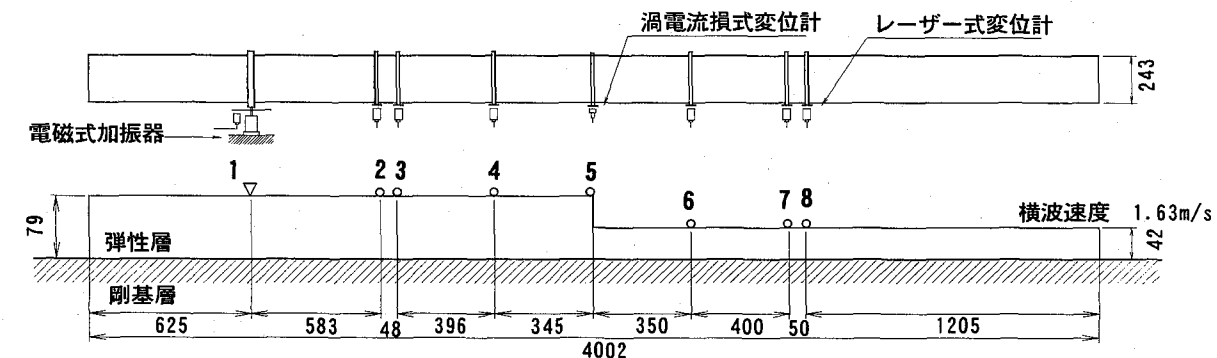
図—1 模型形状

表—1 実験概要

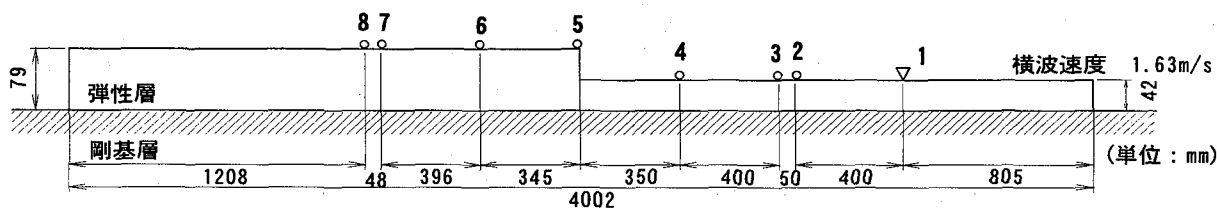
実験—1	(a)厚い層から波動を伝播 (b)薄い層から波動を伝播	基層は共通, 層厚が異なる
実験—2	(a)厚い層から波動を伝播 (b)薄い層から波動を伝播	基層に段差あり, 自由表面は同じ

表—2 各模型のせん断一次振動数

実験	厚い層	薄い層
実験—1 (a), (b)	5.16Hz	9.70Hz
実験—2 (a), (b)	4.78Hz	9.11Hz

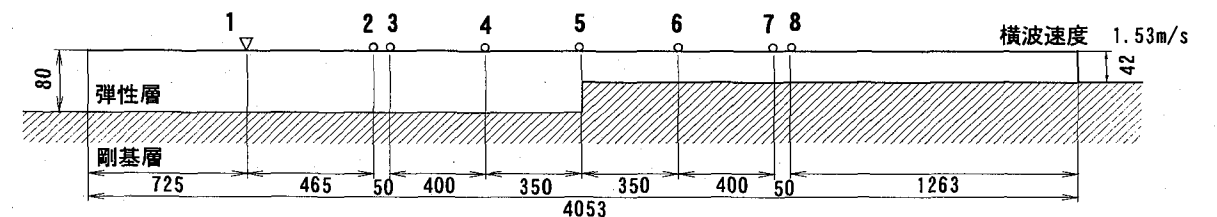


実験—1 (a)

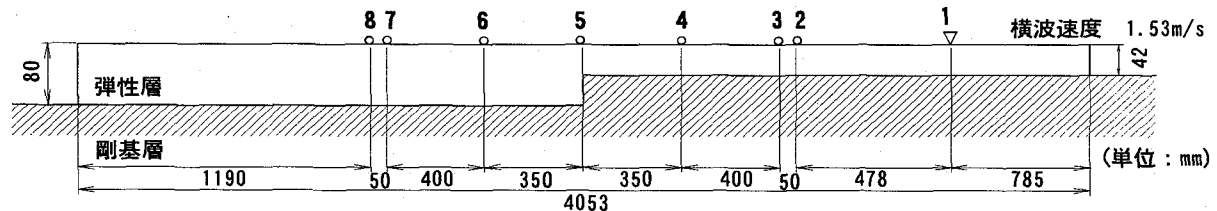


実験—1 (b)

(a) 実験—1 (層厚の異なる弾性層が連結している地盤模型)



実験—2 (a)



実験—2 (b)

(b) 実験—2 (剛基層に段差のある地盤模型)

図—2 実験模型詳細図

－2(a), (b)に対応する模型が示されている。弾性層の横波速度は、1.53m/s、模型中央より左側の層厚は8.0cm、右側のものは4.2cmとした。表－2には、各模型部分のせん断一次振動数が示されている。

2.3 波動の発生方法と変位測定方法

波動の発生には電磁式加振器を用いた。模型奥行き方向にアルミニウム角棒(10×10×300mm)を圧着した。この角棒の先端部に電磁式加振器の加振棒を取り付け、模型表面の線上を奥行き方向に加振することでSH波を発生させた。加振振動数を4.0～18.0Hzとし、1Hz刻みで実験を行なった。

波動の伝播に伴い生ずる模型表面の奥行き方向の変位を測定した。変位の測定にはレーザー式変位計(LB-1000/LB-040：(株)キーエンス)及び渦電流損式変位計(AEC-2525-20：電子応用(株))を用いた。測点数の関係上、二種類の変位計を用いている。測定に際して、対象物として前者には白紙を、後者にはアルミニウム箔を必要とする。変位測定位置にストローを置き、ストロー先端に25mm角の白紙またはアルミニウム箔を取り付け、これらの変位を測定し模型の変位とした。実験結果を比較しやすくするために、測定点の不整形部からの距離を同様にしてある。図－2中に示される太字の番号は測点番号を意味しており、後に示される波形のチャンネル番号(ch番号)と一致している。サンプリング間隔は1/1000秒とし、8秒間の記録を得ている。

3. 実験結果

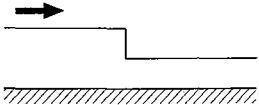
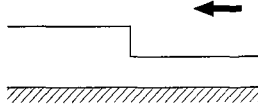
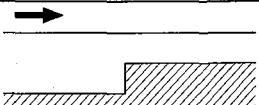
各測定点で記録された変位時刻歴の原波形をフーリエ変換し、加振振動数を中心にして前後2.0Hzの帯域フィ

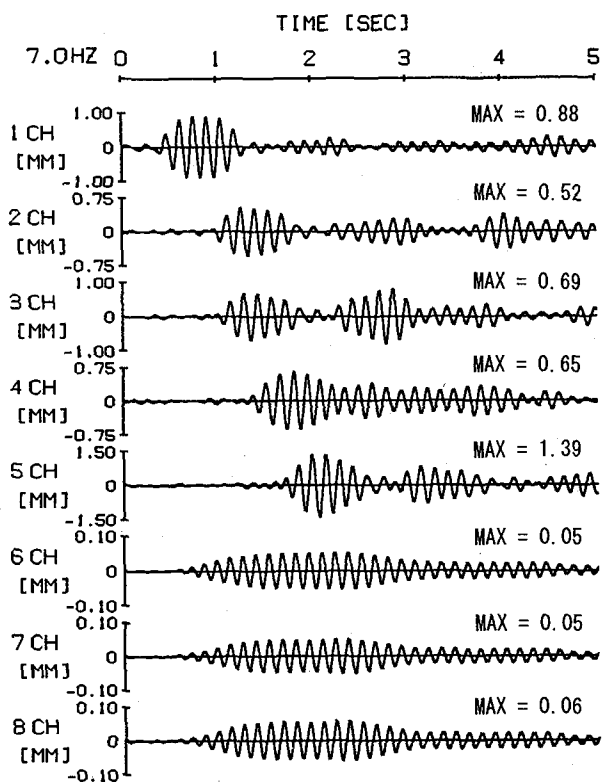
ルターをかけ、逆変換している。図－3には、実験－1(a), (b)の結果の代表例が、また、図－4には実験－2(a), (b)のものが示されている。図中に示されているmaxは変位記録の最大値を意味している。図－3、図－4で共通して次のことがいえる。低い加振振動数の場合、薄い層で加振すると波動伝播が生じていない。厚い層で加振すると薄い層には波動が透過しないで段差部で反射している。また、高い振動数で加振すると波動の伝播が生じており、隣の層への透過と段差部での反射が生じている。実験－1、2の結果を用いて波動の発生位置での最大振幅と各測定点での最大変位振幅の比率を求めた。加振振動数に対する変化状況が図－5に示されている。図－5中の黒系統の印は入射側のもの、白系統のものは透過側のもので、×印のものは段差部の自由表面でのものを示す。

図－5は特徴的な結果を示している。厚い層で加振すると厚い層での応答は6～7Hz近辺でピークを示すのに対し、薄い層への透過波の振幅が大きな場合には、薄い層での応答は11～13Hz近辺でピークを示している。また、薄い層で加振すると波動の振幅が大きな場合、11～13Hz近辺でピークを示している。表－3に結果の概要をまとめている。

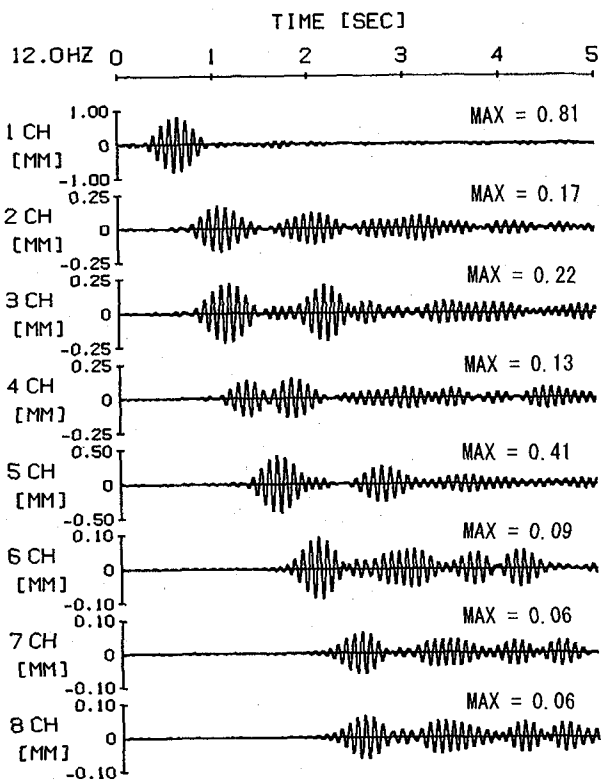
上記に付け加えると、実験1－(a)では段差部に大きな変位が発生していることが分かる。自由表面が形成されているので、波動の反射により大きな変位が生じたものと考えられる。そこでの振幅は入射波の約2倍になっている。本実験で得られた時刻歴をみると、波群の進行していく様子が明瞭である。この波動の性状を調べるために、位相速度(C_p)と群速度(C_g)を図－6に示されるように求めた。位相速度の算定には、相互に近い測定点での変位時刻歴を用い、対応する位相のずれを Δt 、測点間距離を ΔL として求めた。また、群速度の算定には、相互に離れた測定点の変位時刻歴を用い、波群のピーク

表－3 実験結果の概要

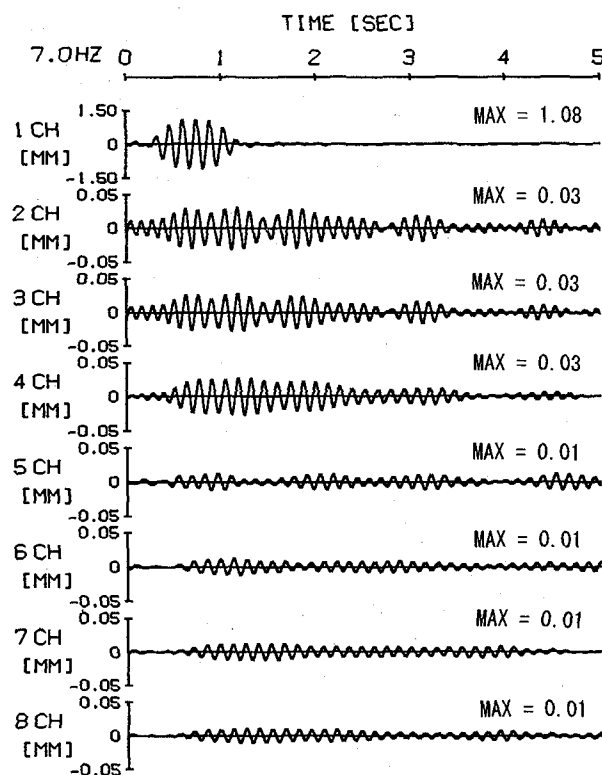
実験－1 (a)		実験－1 (b)	
7.0Hz	厚い層にのみ波動伝播が発生。 段差部で反射が生じている。	7.0Hz	何れの層にも波動伝播は発生せず。
12.0Hz	波動伝播が発生。反射、透過が生じている。	13.0Hz	波動伝播が発生。反射、透過が生じている。
実験－2 (a)		実験－2 (b)	
7.0Hz	厚い層にのみ波動伝播が発生。 段差部で反射が生じている。	7.0Hz	何れの層にも波動伝播は発生せず。
12.0Hz	波動伝播が発生。反射、透過が生じている。	13.0Hz	波動伝播が発生。透過のみ。反射は確認できない。



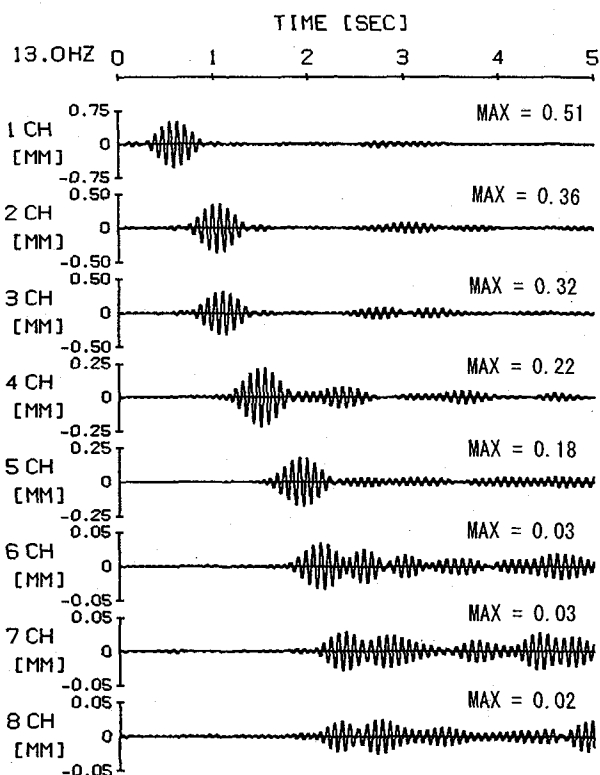
(厚い層から入射)
(a) 実験-1(a) (7.0Hz)



(厚い層から入射)
(b) 実験-1(a) (12.0Hz)

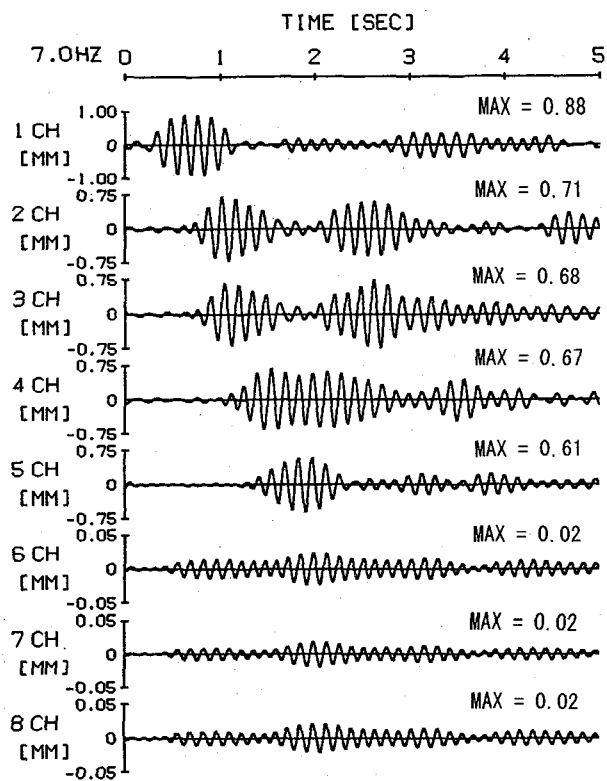


(薄い層から入射)
(c) 実験-1(b) (7.0Hz)

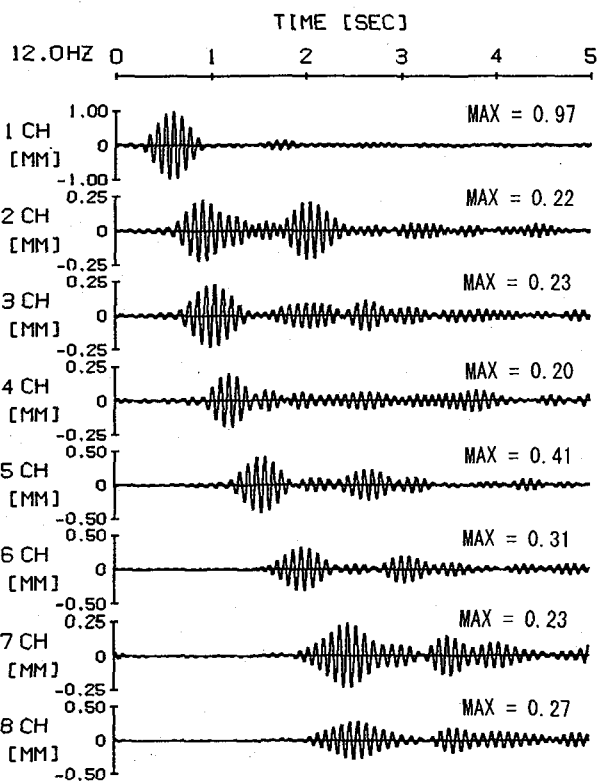


(薄い層から入射)
(d) 実験-1(b) (13.0Hz)

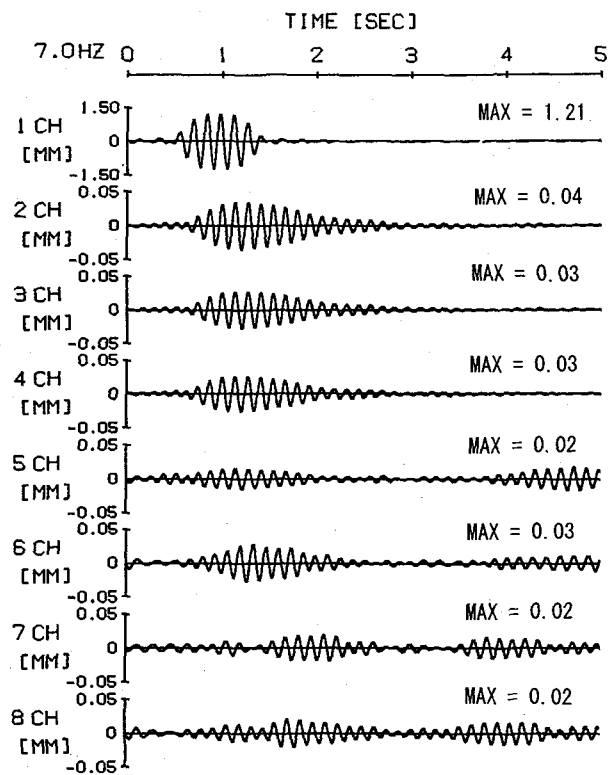
図-3 変位時刻歴 (表面に段差のある場合)



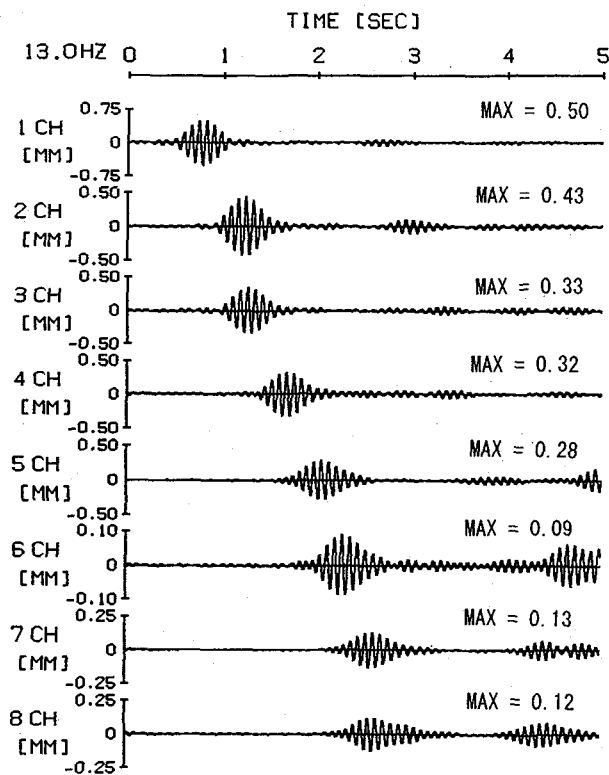
(厚い層から入射)
(a) 実験-2(a) (7.0Hz)



(厚い層から入射)
(b) 実験-2(a) (12.0Hz)

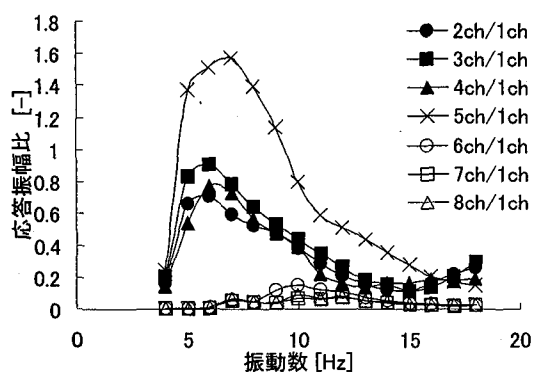


(薄い層から入射)
(c) 実験-2(b) (7.0Hz)

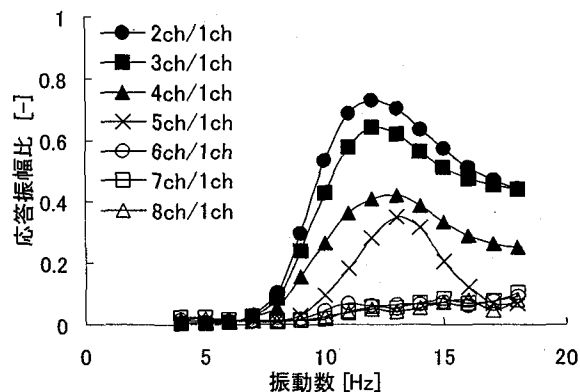


(薄い層から入射)
(d) 実験-2(b) (13.0Hz)

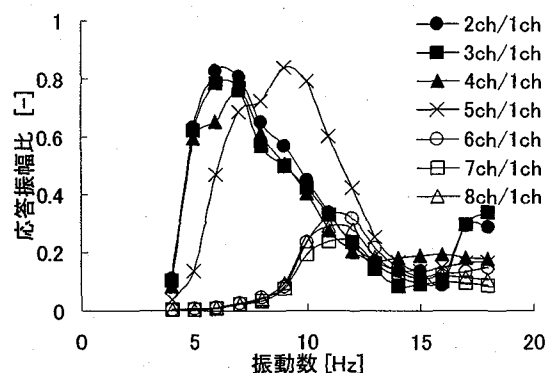
図-4 変位時刻歴 (基層に段差のある場合)



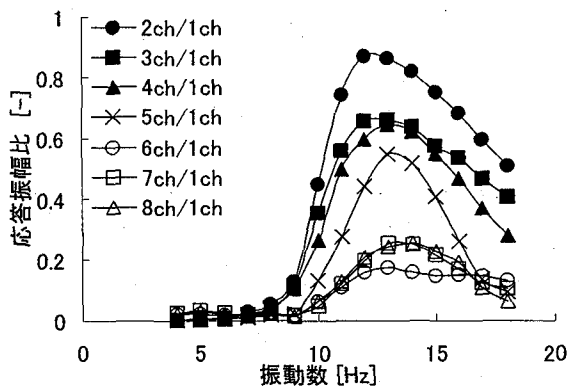
(a) 実験 - 1 (a)



(b) 実験 - 1 (b)



(c) 実験 - 2 (a)



(d) 実験 - 2 (b)

図 - 5 応答倍率

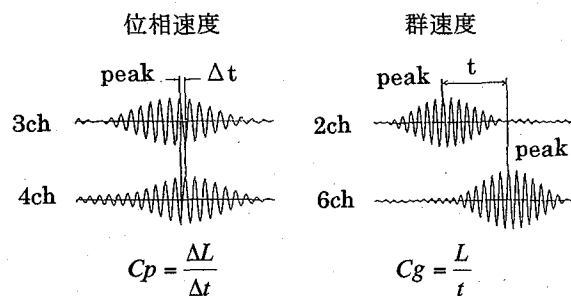
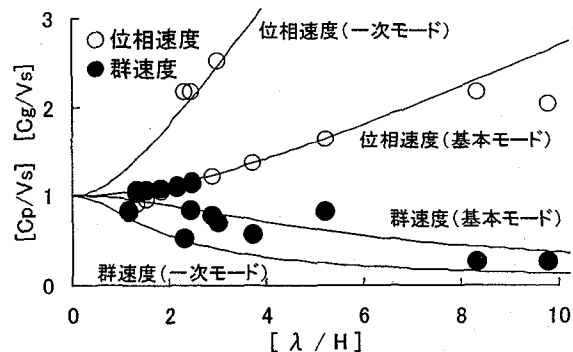
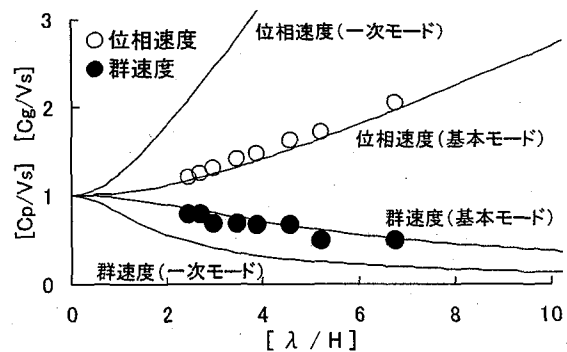


図 - 6 位相速度, 群速度の算出法

を示す時間差 t と測点間距離 L を用いた。測点間距離 L は ΔL に比べて比較的長い距離を表している。図 - 7 には、実験 - 2 (a) についての結果が示されている。横軸には、波長の波長 (λ) を層厚 (H) で除したものが、縦軸には、位相速度、群速度をそれぞれ横波速度 (V_s) で除したものが示されている。図 - 7 (a) には段差に入射する前の波の分散状況が、また図 - 7 (b) に透過後の波のものが示されている。透過波については、薄い層のせん断一次振動数以上の振動数で加振した際に波動伝播が確認されたので、9.0Hz 以降のものが示されている。図中には剛基層上の弾性層内を伝播する Love 波の理論分散曲線が併記されている。両者の合致より、実験結果が Love 波のものであると考えられる。他の実験結果についても同様ながいえる。



(a) 入射波の分散性状



(b) 透過波の分散性状

図 - 7 実験 - 2 (a) についての位相速度と群速度

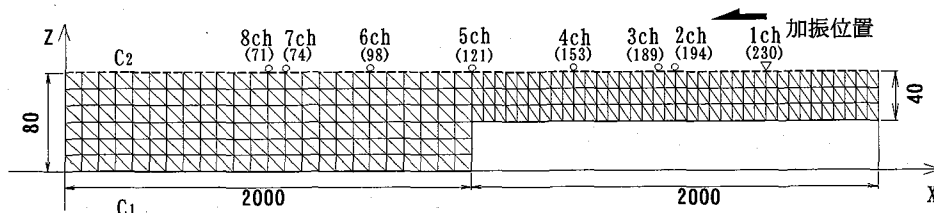


図-8 数値計算モデル (計算-2 (b): 実験-2 (b)に対応)

4. 実験結果の検討

4.1 数値解析結果との比較

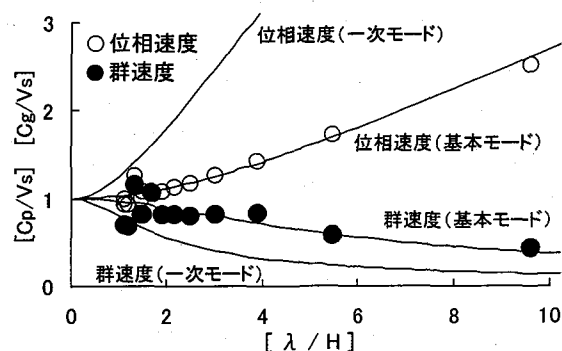
実験結果の検討のために、有限要素解析を利用した。変位は奥行き方向のみに生ずるとした。解析モデルは実験で使ったものと同様になるようにした。実験-1 (a), (b), 実験-2 (a), (b)に対応して、数値解析では計算-1 (a), (b), 計算-2 (a), (b)と類別した。図-8に、計算-2 (b)における模型の概要が示されている。三角形要素数 $M=2520$ 、節点数 $N=1576$ 、領域内部の節点数 $L=1266$ である。厚い層では水平方向に120分割、深さ方向に6分割とし、薄い層ではそれぞれ180分割、3分割としている。他の計算模型についても実験と同様な形状となるようにした。実験での加振点と同じ位置で5波の正弦加振をした。Newmarkの β 法を用いて変位の時刻歴を求めた。サンプリング間隔は0.001秒とし、8秒間の記録を得た。図中の C_1 上では変位が0、 C_2 上ではひずみが0とした。波動伝播距離が短いので伝播に伴う減衰は著しくないものと考え、構造減衰のみを考慮し、加振振幅に対する測定点での応答倍率が実験結果とほぼ同様になるように定めた。減衰定数は 2.0×10^{-4} とした。

計算で得られた変位時刻歴に実験結果と同様な処理を施した。図-9、図-10に実験結果と対応して計算結果が示されている。計算の波動の性質を調べるために実験結果と同様に分散状況を調べた。図-11に計算-2 (a)についての結果が示されている。結果をみると実験結果と同様、Love波により特性づけられると考えられる。計算-1, 2で共通していることは、低い加振振動数の場合、薄い層で加振しても波動伝播は生じない。厚い層で加振すると薄い層には波動が透過しないで段差部で反射する。また、高い振動数で加振すると、波動の伝播が生じており、隣の層への透過と段差部での反射が生じている。計算-1, 2の結果を用いて波動の発生位置での最大振幅と各変位測定位置での最大振幅の比率を求めた。加振振動数に対する変化状況が図-12に示されている。この状況は図-5のものと類似している。しかし、実験-1の結果と異なり厚い層から薄い層に透過している波動が計算の場合には大きになっている。表-3と同様に、概況が表-4に示されている。計算-2 (a)では、反射が認められない。この点は実験の場合と異なっている。実験結果と計算結果の共通している点は、反射波、

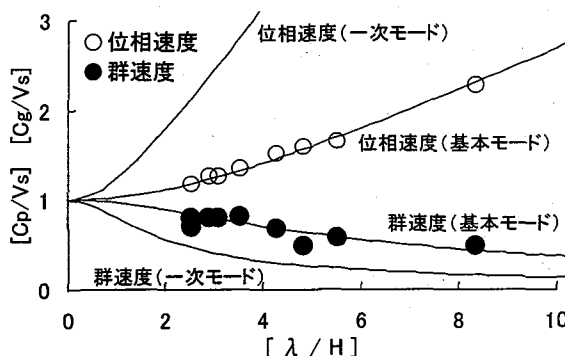
透過波の伝播が確認された層には波動を発生させやすい特有の振動数があることで、この点について究明することが不整形部をもつ地盤の動的挙動の解明に重要と思われる。

4.2 剛基層上の弾性層内の波動伝播について

上述のように考えて、剛基層上の弾性層を伝播する波動振幅の振動数に対する影響について調べた。伝播する波動がSH波状のものであるとき、Love波であることは既に述べられている。ここで問題なのは加振振動数の相違が発生する波動の振幅にどのように影響を与えるかで、その調査のために図-13に示すように実験を行った。入射した波動振幅の最大値と各測定点での最大変位の比率を求めた。加振振動数ごとの結果が図-14に示されている。入射した波の個数の影響を調べるために10波と15波で加振した場合についても実験を行ったが、ほぼ同様な結果が得られた。この弾性層のせん断一次振動

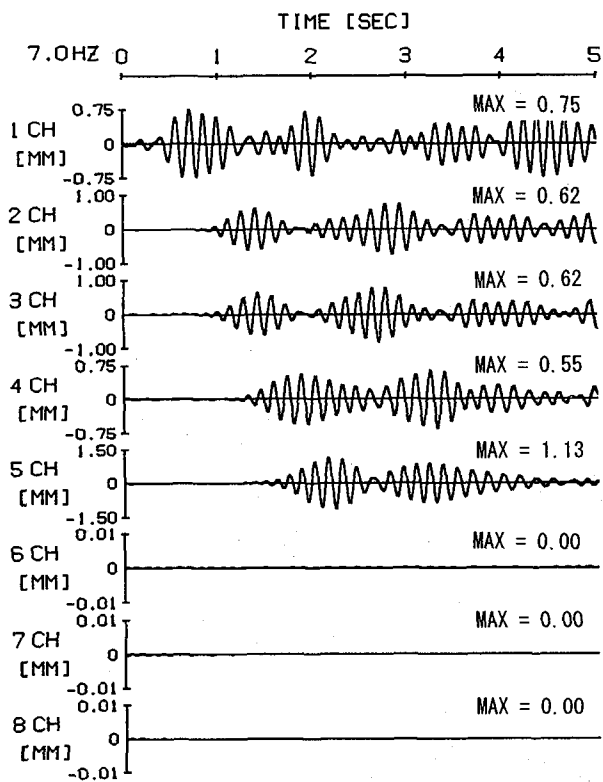


(a) 入射波の分散性状

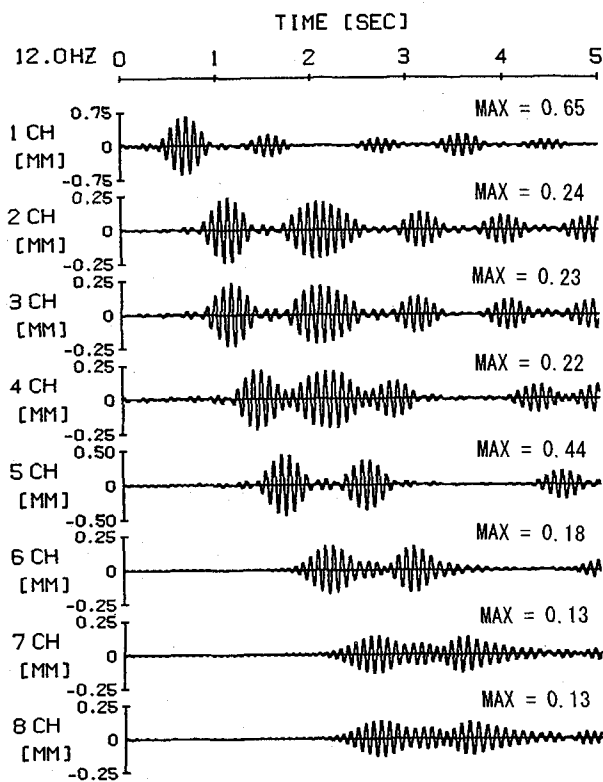


(b) 透過波の分散性状

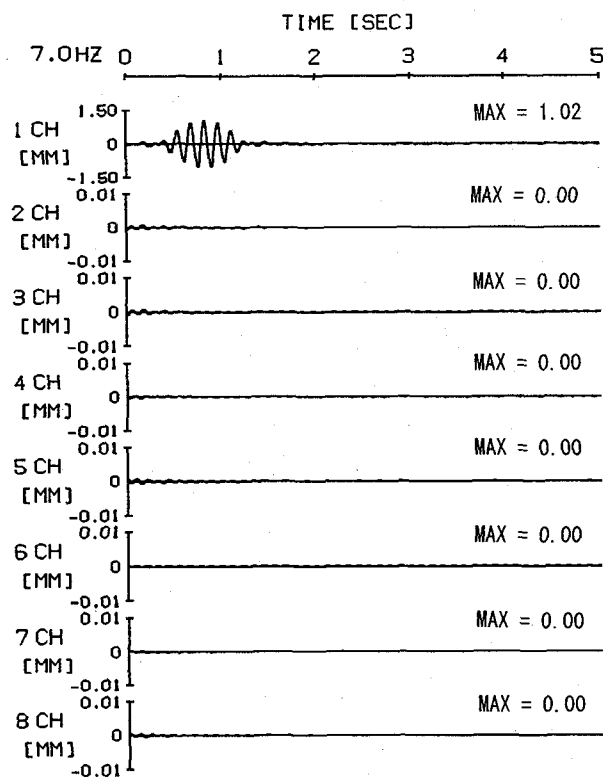
図-11 計算-2 (a)についての位相速度と群速度



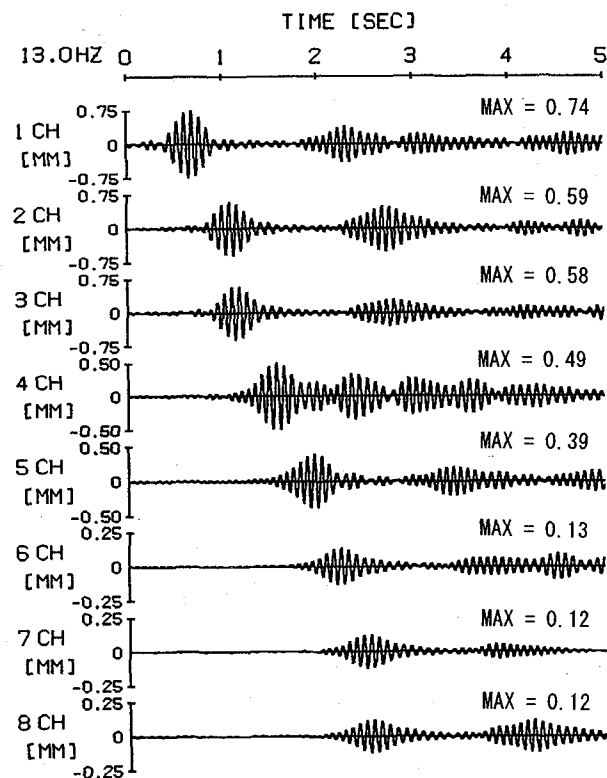
(厚い層から入射)
(a) 計算-1(a) (7.0Hz)



(厚い層から入射)
(b) 計算-1(a) (12.0Hz)

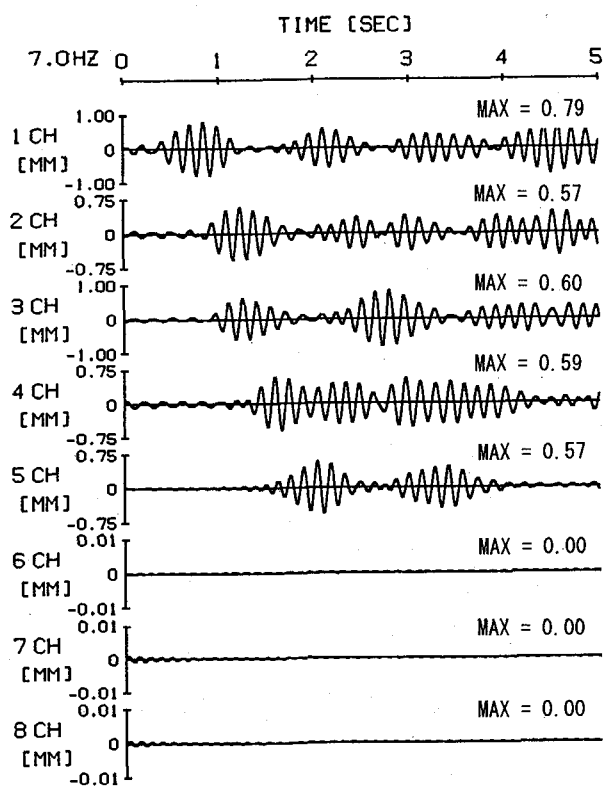


(薄い層から入射)
(c) 計算-1(b) (7.0Hz)

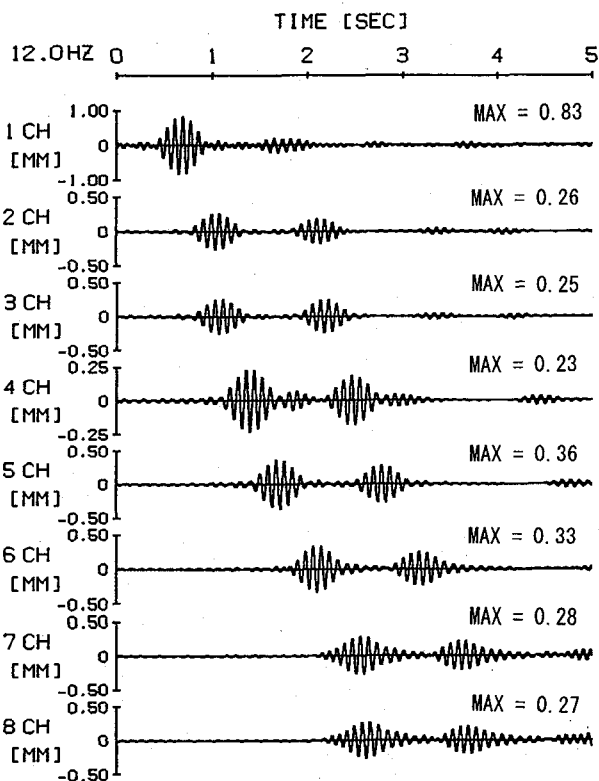


(薄い層から入射)
(d) 計算-1(b) (13.0Hz)

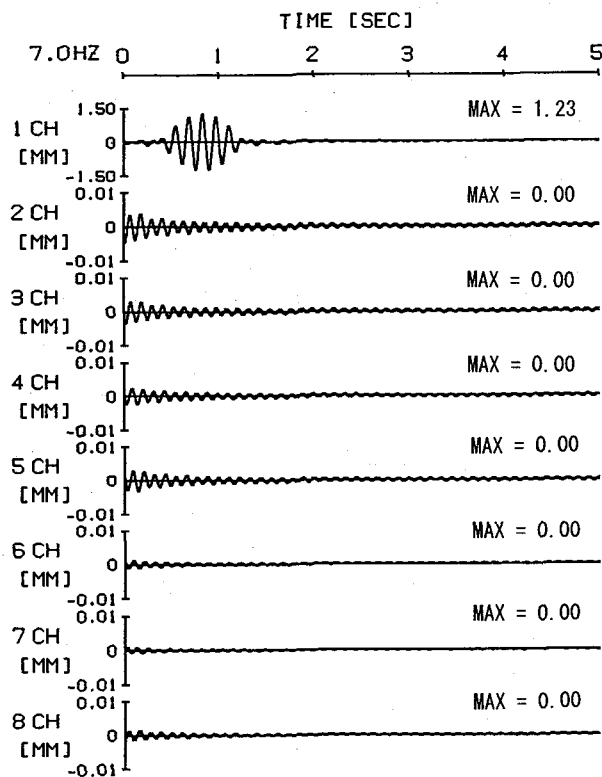
図-9 変位時刻歴 (表面に段差のある場合)



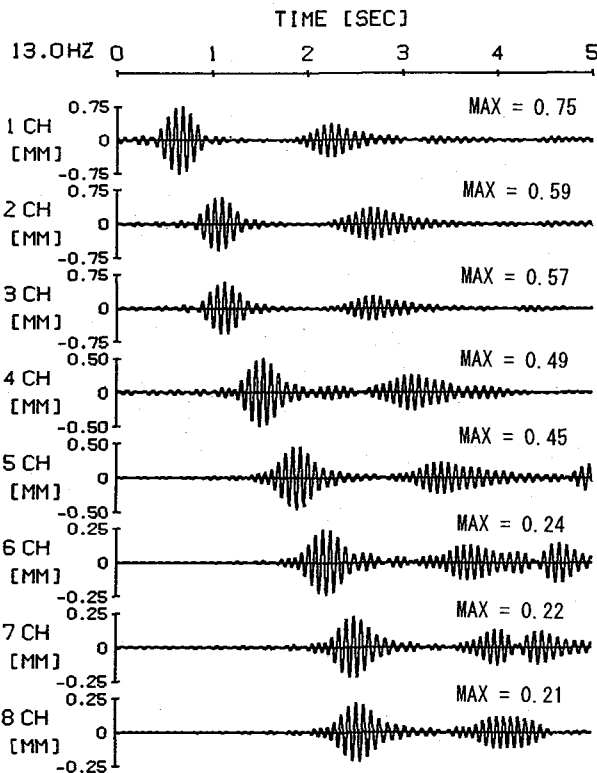
(a) 計算 - 2(a) (7.0Hz)



(b) 計算 - 2(a) (12.0Hz)



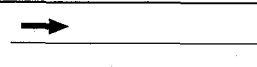
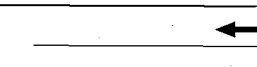
(c) 計算 - 2(b) (7.0Hz)

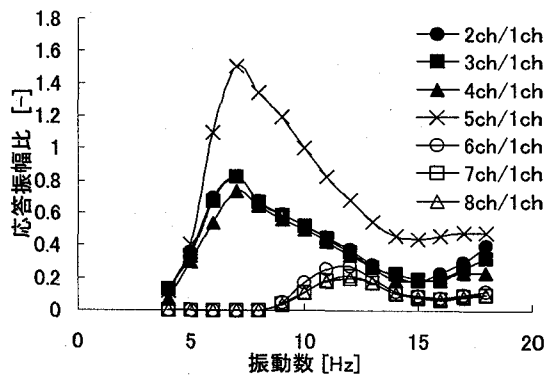


(d) 計算 - 2(b) (13.0Hz)

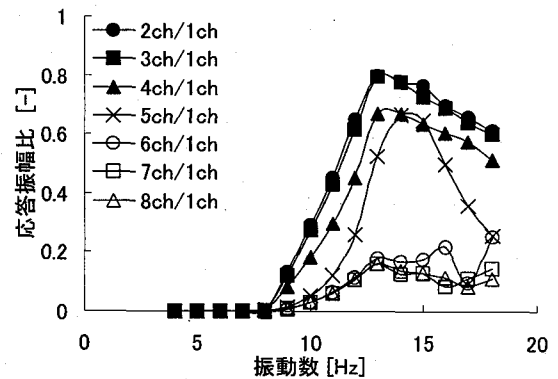
図 - 10 変位時刻歴 (基層に段差のある場合)

表-4 計算結果の概要

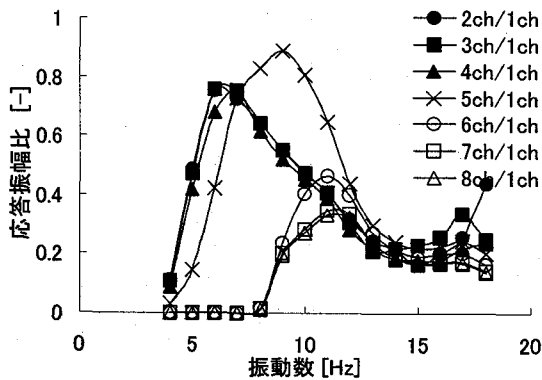
計算-1 (a)		計算-1 (b)	
7.0Hz	厚い層にのみ波動伝播が発生。 段差部で反射が生じている。	7.0Hz	何れの層にも波動伝播は発生せず。
12.0Hz	波動伝播が発生。 反射、透過が認められる。	13.0Hz	波動伝播が発生。 反射、透過が生じている。
計算-2 (a)		計算-2 (b)	
7.0Hz	厚い層にのみ波動伝播が発生。 段差部で反射が生じている。	7.0Hz	何れの層にも波動伝播は発生せず。
12.0Hz	波動伝播が発生。透過のみ。	13.0Hz	波動伝播が発生。透過のみ。



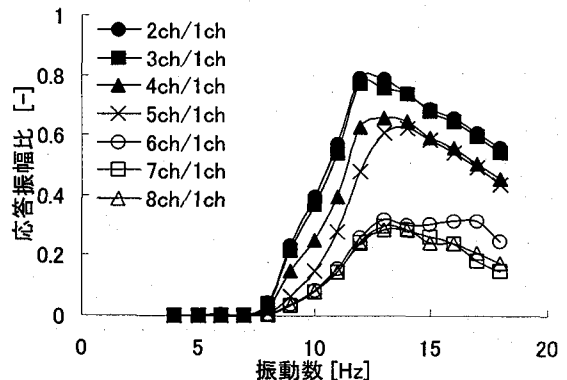
(a) 計算-1 (a)



(b) 計算-1 (b)



(c) 計算-2 (a)



(d) 計算-2 (b)

図-1 2 応答倍率

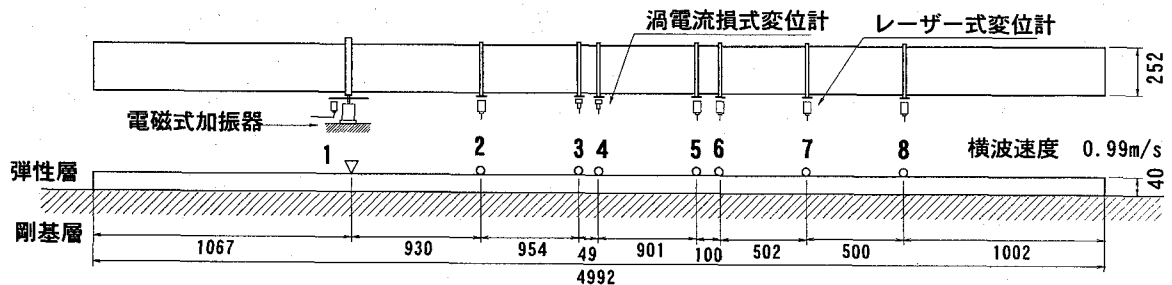


図-1 3 実験模型詳細図 (成層地盤)

数は 6.2Hz であるが、図-14 に示されている結果では 6~8Hz で振幅比が大きくなっていることが分かる。

実験結果や数値解析結果に注目する。表-2 に示されているように、せん断一次振動数は厚い層では 5Hz、薄い層では 9~10Hz である。それに対して実験結果等では 6~7Hz、11~13Hz で振幅比がピークになっている。つまり、何れの場合もせん断一次振動数の 1.3 とか 1.4 倍程度の加振振動数で振幅比がピークになっている。このことに関して調査した。

4.3 波線論的な考察

層状地盤に生ずる Love 波は、SH 平面波が弾性層内で反射を繰り返す際の干渉で説明づけられることが成書でも示されている^{7,8)}。このようなことを基に上記のことを調査した。以下に述べることにする。

剛基層上に層厚 H の弾性層があり、図-15 中の波線方向に平面 SH 波が伝播すると考える。自由表面と剛基層と弾性層の境界面で反射を繰り返しながら進行していく。符号の変動状況を調べる。図中、a 点は自由表面であるためにひずみが 0 であるという条件から a 点で反射する波の符号は変化しない。その波が b 点に到達し反射する。b 点では変位が 0 であるため符号が逆転する。c、d、e、f 点でも同様な議論ができる。以上のことより、ab 間にあった波動の変位が+であるとき、各区間でいずれの符号をとるか定めることができる。結果が図-16 に示されている。

図-17 には平面波の入射角度 θ が 30 度、45 度及び 60 度の場合での Love 波の発生状況が示されている。図-17 (b) の入射角度が 45 度の場合、12 間と同じ長さの半波長の波が 23、34、45 間等に発生する。剛基層や自由表面で反射を繰り返して SH 波が伝播していく。例えば一波長の波を考えた場合、図中の 12 の区間で + の符号を持つ波は、23 間では - の符号を持つことになるが、変位の符号の変化を図-16 を基に定めると、符号が逆転して + の符号を持つ波となる。この場合、12、23 間の平面波は自由表面上では、同符号なので加算され 13 間の表面波になる。この場合、弾性層全域で平面波が加算されることになる。図-17 (a) の場合、 $\Delta 2'33'$ の部分では、23、34 間のものが加算されているが $\Delta 3'4'5'$ では、45 間の平面波の影響だけとなる。よって、入射角度が 45 度より大きい場合には、45 度の場合に比べて、表面波振幅が小さくなると考える。図-17 (c) の場合には、多くの反射波が重なって表面波が形成されることは明らかである。しかし、加振は 5 波程度なのでこのような長い波動が顕著に生成されることは考えにくい。以上の考察から、入射角が 45 度近辺の加振振動数で大きな変位振幅の表面波が生成され易いものと考えられる。この場合の表面波の波長 λ は $4 \times$ 弾性層厚、横波速度を V_s とすれば、位相速度

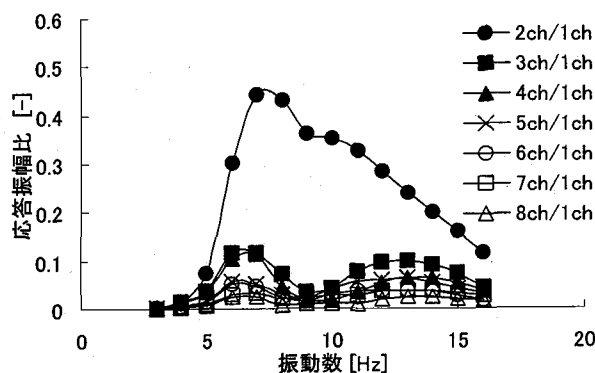


図-14 応答倍率 (5 波入射)

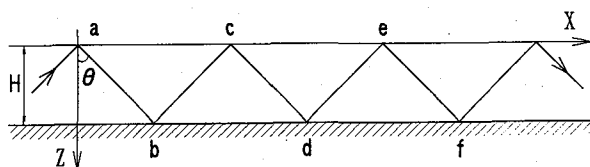


図-15 SH 波の伝播経路

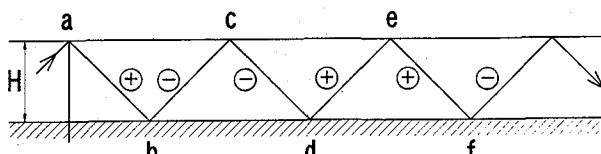
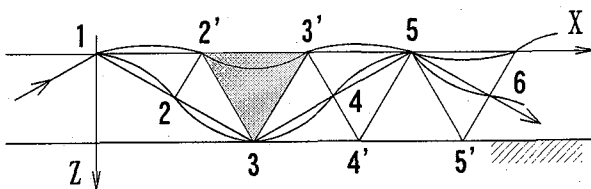
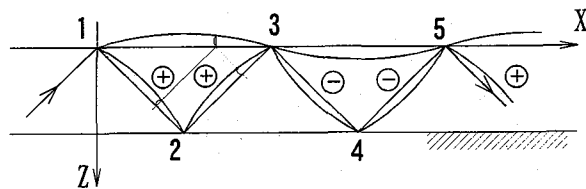


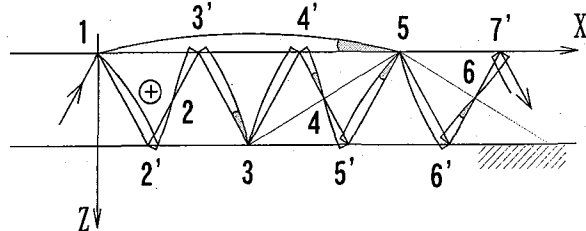
図-16 各区間における SH 波の符号



(a) 入射角度が 60° の場合



(b) 入射角度が 45° の場合



(c) 入射角度が 30° の場合

図-17 表面波生成の様子

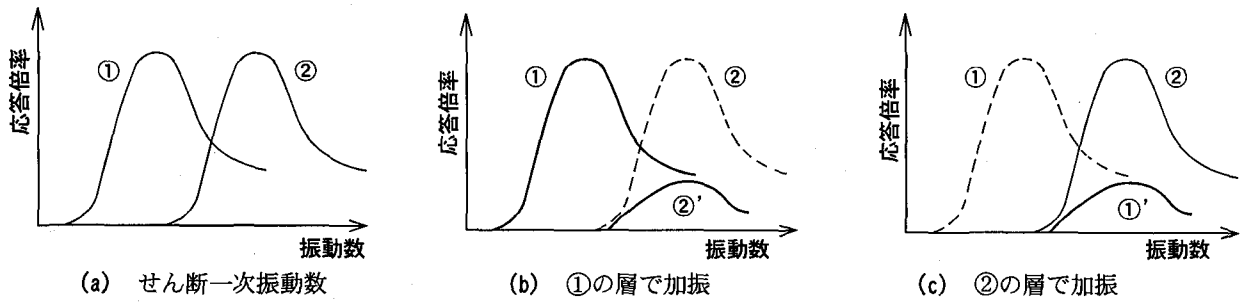


図-19 それぞれの層で加振した場合の各層の応答倍率

C_p は $\sqrt{2} \times V_s$ となる。この層のせん断一次振動数を f_0 とすれば、 $V_s = 4 \times \text{弾性層厚} \times f_0$ の関係より、このときの表面波の振動数は、せん断一次振動数の $\sqrt{2}$ 倍となる。このことは実験結果、計算結果を説明すると考えられる。

4.4 不整形部での波動の入射・透過に対する考察

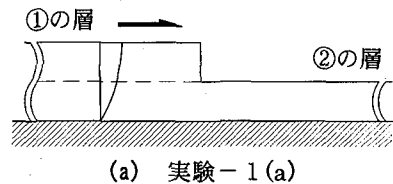
本実験の例のように接合の状態が異なれば、接合部で反射や透過の状況が異なるのは当然である。図-18に示されているのは、実験-1(a)、実験-2(a)の例であるが、明らかに図-18(a)では、反射が大きく、図-18(b)では透過が顕著になる。

接合状況が透過等に大きな影響を与えない場合、弾性層の性状が問題になる。図-19は、上記の考察から振動数に応じて波動の発生状況の異なることを考えたもので、①は②に比べてせん断一次振動数の低い場合に相当する。①より入射する場合、図-19(b)に示されている太線が各層の応答に近いものであろう。②の層の応答は入射する波動以上に大きくならないものとし、②'で示されている。②より入射する場合、図-19(c)に示されている太線が各層の応答に近いものと思われる。②の層で加振した際には、②の層のせん断一次振動数以上の振動数で加振した際にのみ波動伝播が確認できるので、①の層での応答は①'のようになる。また、図(b)、(c)中の①'と②'は応答倍率が同様となるとは限らないが、①'の場合、不整形部に到達する波動が大きくなると厚い層への透過波もそれに伴って大きくなるので、②に近いものになると考えられる。定性的には実験結果、解析結果を説明すると考えられる。

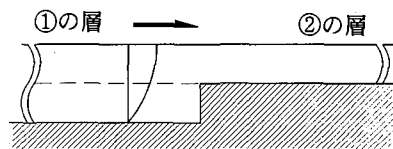
5. 結び

弾性層内を伝播する波動が段差などの不整形部によって反射や透過にどのような影響を受けるか模型実験結果をもとに数値解析、波線論的に考察した。反射波や透過波の発生状況や加振振幅の最大変位に対する各測定点での応答比を調べることで、それぞれの層には波動が伝播し易い特有の振動数があることが明らかになった。本模型実験においては、波長が弾性層厚の4倍であり、振動数がせん断一次振動数のおおよそ $\sqrt{2}$ 倍の表面波が

伝播しやすいことが確かめられた。このようなことをもとに、段差等の不整形部で生ずる波動現象を調査する可能性が示された。



(a) 実験-1(a)



(b) 実験-2(b)

図-18 反射、透過の状況

参考文献

- 1) P. Malischewsky: Surface Waves and Discontinuities, Akademie-Verlag Berlin, 1987. ISBN 0 444 98959 5. (Vol.16)
- 2) J.L.King and J.N.Brune: Modeling the Seismic Response of Sedimentary Basins, Bull. Seism. Soc. Am. 71, pp. 1469-1487, 1981.
- 3) 河西良幸, 丹波正徳: 不規則地盤模型の動的性状に関する振動台実験と解析, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp. 337-341. 1986.
- 4) 森地重暉, 江口和人: 連続した2つの異質の弾性層内の波動伝播状況についての模型実験的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 1327-1332, 1994.
- 5) 森地重暉, 江口和人: 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, 土木学会論文集, No. 489/I-27, pp. 197-206, 1994.
- 6) 森地重暉, 君島信夫: 傾斜層内の波動現象に対する模型実験結果についての一考察, 土木学会論文集, No. 626/I-48, 245-250, 1999.
- 7) 佐藤泰夫: 弾性波動論, 岩波書店, 1978.
- 8) Agustín Udías: Principles of Seismology, Cambridge, 1999. ISBN 0 521 62434 7.

(2000年9月14日 受付)