土木学会論文集 No. 626／I-48, 245-250, 1999.7

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

森地重暉[1]・君島信夫[2]・西嶌望[3]・土居誠[4]・川名太[5]

[1]正会員　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）
[2]正会員　工修　株式会社宮地鐵工所（〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町15-18）
[3]正会員　工修　大成建設株式会社（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）
[4]正会員　工修　福岡県庁（〒812-8577 福岡県福岡市博多区東公園7-7）
[5]学生員　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）

傾斜基盤上の表層地盤では，震害の著しいことが指摘されている．この種の問題に対する基礎的な究明に資するために，傾斜地盤における波動現象の模型実験的解明を行った．傾斜した剛基層上に水平自由境界をもつ傾斜弾性層があるとし，層厚の厚い所から薄い方にSH波状の波動が伝播するように実験を行った．弾性層の模型材料には，低弾性材料を活用し，実験の実施を容易にした．次のことが明らかになった．(1) 波動は振動数が高くなるほど，層厚の薄くなる上方まで伝播する．(2) 傾斜弾性層での波動現象は局部的に一様な層厚をもつ弾性層内を伝播するLove波のものと類似するが，傾斜角が15°になるとそのような類似性は呈しにくくなる．

Key Words : model experiment , Love wave , sloping layer

1. はじめに

丘陵地に近い軟弱地盤での地震被害が甚大であることが指摘されている．兵庫県南部地震(1995)では，六甲山系に平行な帯状地帯で震害が大きかったことは周知の通りである．この例だけでなく，チリ地震(1960)，フルウリ地震(1976)，メキシコ地震(1985)，ノースリッジ地震(1993)でも同様な地盤での震害が大きかったことが伯野[1]により示されている．

傾斜基盤上の表層地盤での地震動の増幅が震害を大きくする原因であると考えられる．この種の成層地盤と異なるいわゆる不整形地盤における地震動の増幅現象や複雑な波動現象の解明には，解析的手法として差分法，有限要素法，境界要素法，波線理論等が活用され，種々の地下構造に対する解明がなされている．纐纈[2]，竹中[3]の論文にそれらの研究の総括がなされている．

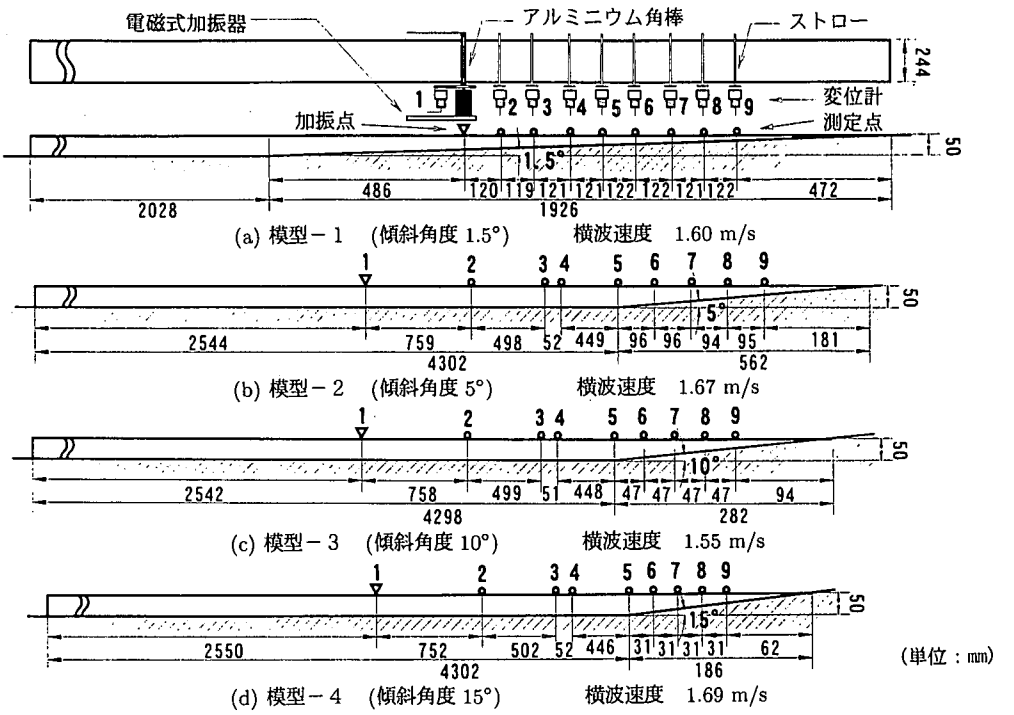
また，傾斜地盤についての実測的研究としては，大槻[4]，木下[5),6)]等のものがあるが，後者の論文は傾斜層でのSH波状の波動の全反射現象として地震動を捕捉している．田村[7]は傾斜層内に付設されたシールドトンネル内で地震時に生ずるひずみを測定し，そこでのひずみの増幅を確認している．

傾斜層内における波動現象を調べる手法として，数値解析・強震観測以外に模型実験的方法があり，これらの成果を活用することで，より一層，解明が深まると考える．傾斜層内の波動現象についての模型実験例として，Kuo[8]，浜田[9]，本山[10]等のものがある．Kuoは，基層上に表層があり，異なる表層厚の地盤の間を厚さが一次的に変動する表層で連結した模型を作り，波動を伝播させて傾斜層内での波動の位相速度を測定している．また，浜田，本山は基層上に傾斜した表層を作り，種々の傾斜角度をもつ傾斜層内の伝播状況を調べ，位相速度が層厚に依存することを調べている．何れの場合もプラスチックを模型材料としており，又，波動はRayleigh波状のものを研究対象にしている．

本研究では，SH波状の波動について究明した．基層は表層よりも著しく硬いとし，波動は表層内にこもると考えた．このような場合について波動現象を模型実験的に調査することにした．

2. 実験計画と実験方法

剛基層上に傾斜弾性層があり，弾性層内に波動が伝播する場合について究明した．本山の論文にも指摘されている通り，傾斜層の傾斜角度が波動の伝播状況に



図－1 地盤模型図

及ぼす影響が課題になる．傾斜層の傾斜角度$\theta_0 = 1.5°$，5°，10°，15°の場合を究明し，傾斜角度の変化が波動現象に与える影響を調査した．実験模型は，傾斜層と水平層を連結したものとし，水平層より波動を発生させた．SH波状の波動が伝播する場合を考えた．図－1にそれらの形状，寸法が示されている．模型－1以外は平面図を省略した．

実験方法について述べる．地盤模型材料としてアクリルアミドゲルを用いた．この材料の横波速度は1～2 m/s程度に調節することが出来るため，ゴムやプラスチックなどの他の模型材料に比べて波動現象の速さの低減が可能になる．そのために実験の実施が容易になる．基層の模型材料には鋼材を用いた．

SH波状の波動の発生を計画した．弾性層模型上表面にアルミニウム角棒（10×10mm）を圧着し，模型の奥行き方向に角棒を動かすようにした．角棒の先端に電磁式加振器の加振棒を取り付けた．加振器で角棒を正弦状に9回振動させて波動を発生するようにした．加振振動数は，5.0～30.0Hzとした．波動伝播により模型に生ずる変位の測定は次のように行った．模型上表面に生ずる奥行き方向の変位を測定した．変位の測定位置に奥行き方向にストローを挿入固着し，ストロー先端にアルミニウム箔（厚さ0.06mm）を付け，箔の変位を非接触式変位計（ギャップセンサー（型番：AEC-2525-20）：電子応用（株））で測定し，これを測定位置の変位とした．変位波形はデジタル的に記録した．サンプリング間隔は1/500秒とした．実験概要は図－1に示されている．太字で著した数字はチャンネル番号を意味する．

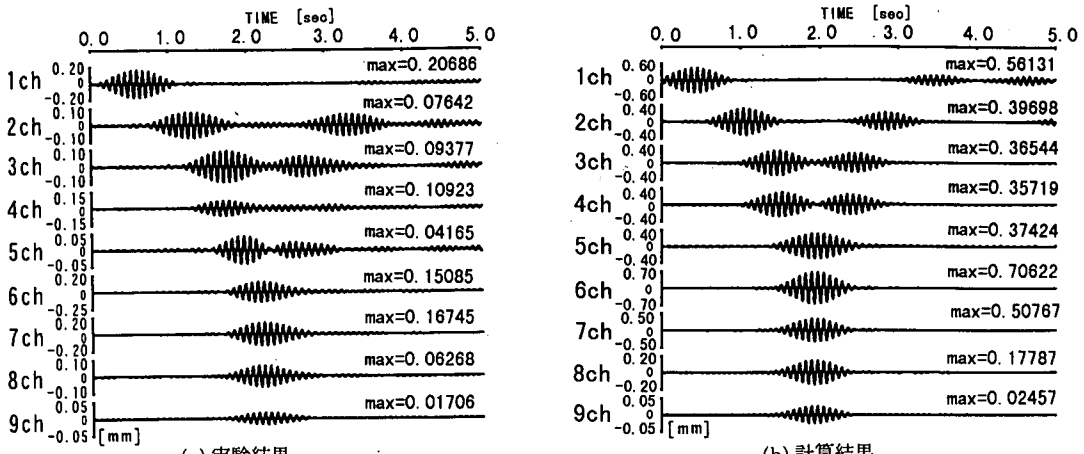
3. 実験結果と考察

(1) 実験結果の概況

波動伝播により生ずる変位波形は次の様に処理した．原波形をフーリエ変換し，得られたスペクトルより加振振動数を中央とした2.0Hzの範囲以外の振動数成分を除去した後，逆変換して得られたものを実験結果とした．

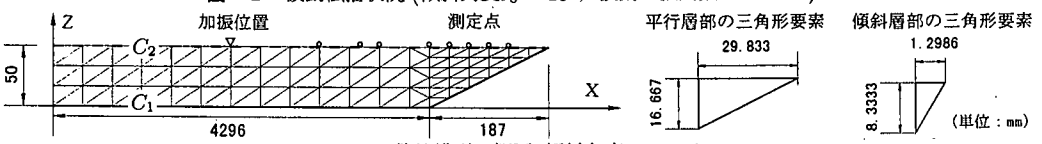
図－1に示す実験模型2，3，4においては，水平層部分でSH波を発生させ傾斜層へと伝播させた．図－2 (a)には，模型－4の傾斜角15°の場合についての実験結果の一例が示されている．水平層より傾斜層へ波群が伝播していく状況が示されている．傾斜層に入りかかると変位振幅が増加して次いで反射波が水平層へと伝播していく．

模型－2，3のような傾斜角度の小さい場合について



(a) 実験結果　　(b) 計算結果

図－2　波動伝播状況 (傾斜角度$\theta_0 = 15°$，波動の振動数：13.0Hz)



図－3　数値模型の概要(傾斜角度$\theta_0 = 15°$)

も類似した結果が得られている．傾斜角1.5°の模型－1の場合には，模型形状の関係から傾斜層の途中から波動の発生が可能であり，本来の目的である傾斜層内の波動現象の究明に沿った実験が行える．この場合の実験においても，傾斜層の層厚の薄い方向に波動が伝播していくと波群が停滞し反射波状のものが伝播していく様子が分かる．

(2)　実験結果に対する考察

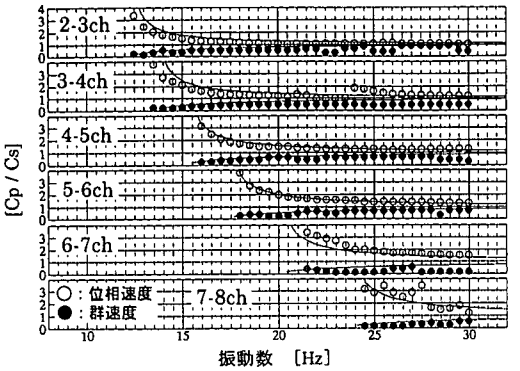
a）数値解析結果との対比

地盤内を伝播する波動について数値解析を行う方法の一つに有限要素法がある．本文でも，その手法を利用した．模型地盤と同様な形状とし，波動源の位置で9波の正弦波動の入力を行った．**図－3**に$\theta_0 = 15°$の数値模型の概形を示す．変位は奥行き方向のみとし，Newmarkのβ法 ($\beta = 1/4$) を用い変位の時刻歴を求めている．時間間隔は1/500秒，又，継続時間は7秒とした．三角形要素数M=1869～2610，節点数N=1220～1568で，又，図中のC_1上では変位が0，C_2上ではひずみが0であるとした．又，波長と要素数の関係は1波長に10要素以上になるようにした．**図－3**では，水平方向の要素分割のみ略図として示されている．図中では，傾斜層上，水平層上の自由表面の要素数は6，12となっているが，解析ではそれぞれ144要素となるようにしている．模型材料の力学的性質のため，また，波動の伝播距離が短いため，波動振幅の伝播に伴う減少は著しくない．解析では構造減衰のみを考慮し，その係数を2.0×10^{-4}として，伝播に伴う波動振幅の減少が実験結果と解析結果とで似かよったものとなるようにした．

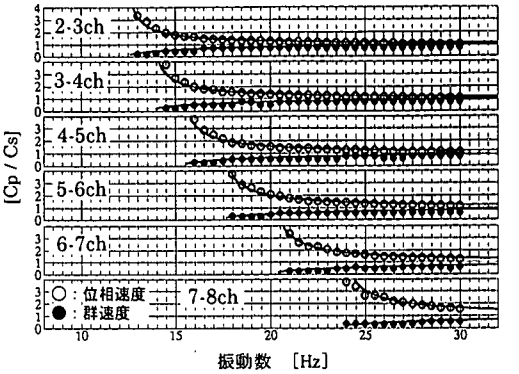
波形については，実験記録の場合と同様にスペクトルについての処理をし，フーリエ逆変換を施した結果を用いた．**図－2** (a)(b) に実験結果と計算結果の一例を対比している．両者の結果は似通っているといってよい．

次に波動の位相速度と群速度について検討してみた．著者の文献[11]と同様に波群の最大値を示す時間差と測点の離隔距離から群速度を求め，また，隣り合った測点の位相の時間差を利用して位相速度を求めた．

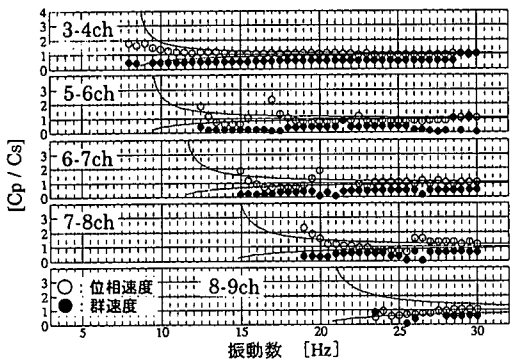
佐藤の論文[12]にも記されているが，表面波の位相速度は観測点の地下構造に反映されるか否かの問題がある．**図－4**に実験結果と計算結果から各々得られたものが示されている．図中には，2つの測点間の平均層厚を持つ水平層が剛基層上にある場合のLove波の分散曲線が併記されている．縦軸は位相速度（Cp）と横波速度（Cs）の比，又，横軸には振動数が示されている．Love波の分散性状に起因するが，2測点間の平均層厚の水平層のせん断1次振動数のところで速度比が無限大になる．得られた結果の分散状況を見ると，傾斜角1.5°の場合には，Love波の性状を示しているが，傾斜角15°になると傾斜層の中腹位でLove波の性状とはや



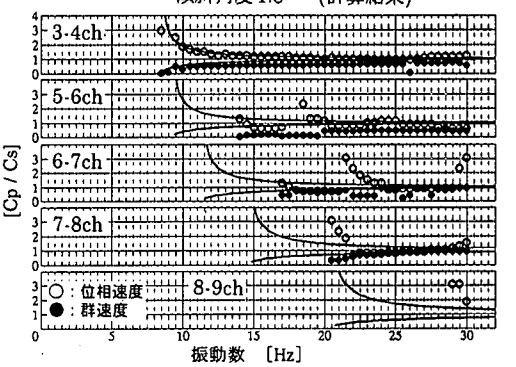
(a) 傾斜角度1.5° (実験結果)



傾斜角度1.5° (計算結果)

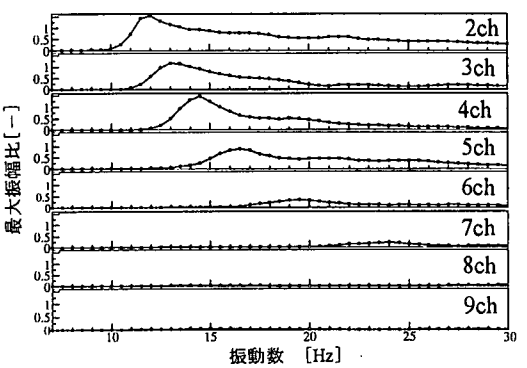


(b) 傾斜角度15° (実験結果)

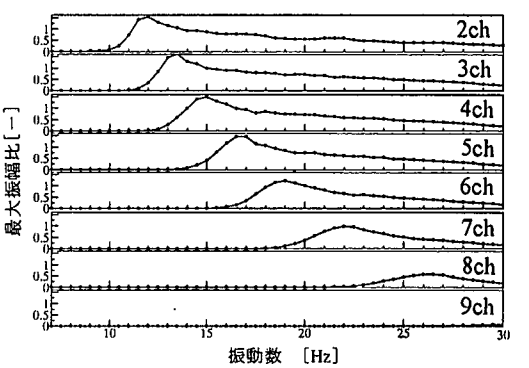


傾斜角度15° (計算結果)

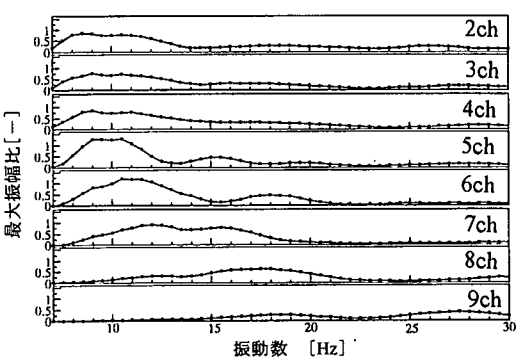
図－4 各測点間の位相速度及び群速度



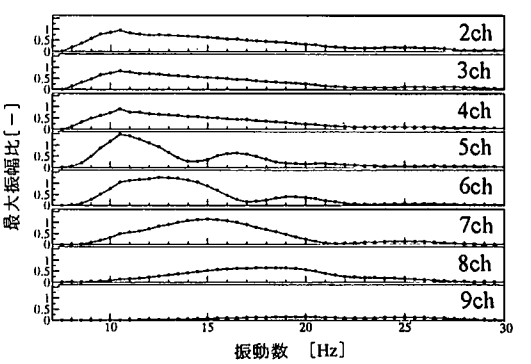
(a) 傾斜角度1.5° (実験結果)



傾斜角度1.5° (計算結果)

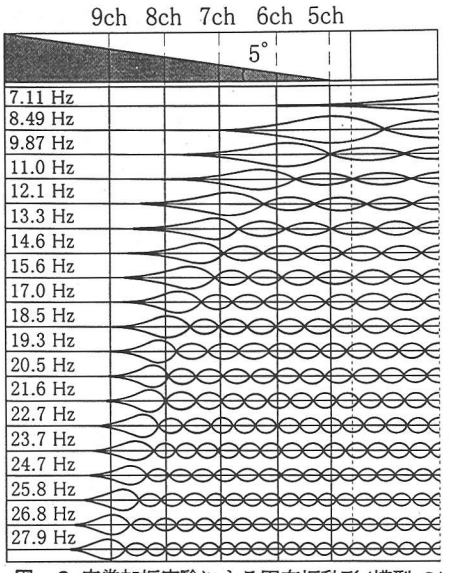


(b) 傾斜角度15° (実験結果)

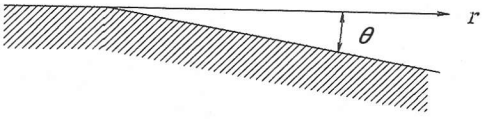


傾斜角度15° (計算結果)

図－5 各実験における最大振幅比



図－6 定常加振実験による固有振動形 (模型-2)



図－7 極座標系

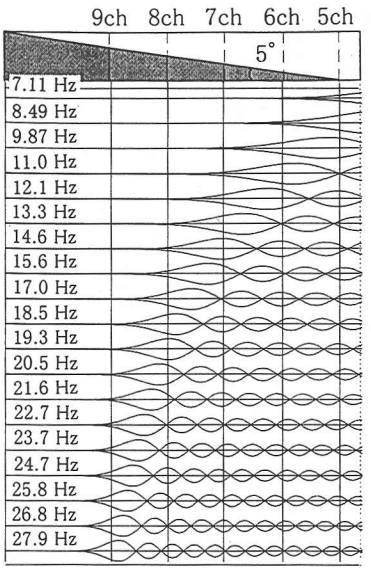
や異なる様相を示し，二測点間の平均層厚を伝播するLove波よりも位相速度は低めになっている．紙面の関係で傾斜角5°，10°についての結果を省略したが，それらは傾斜角1.5°の場合と似通ったものであった．

図－5には，加振点の振幅と測定点の振幅の比を各振動数について求めた結果を示している．高い振動数の波動ほど傾斜層の層厚の薄い方へ進むことがわかる．実験結果と計算結果とは定性的に同様であると考える．

b）振動実験による考察

前出(2)において述べたとおり，高い振動数の波動ほど傾斜層の層厚の薄い方へ進んでいく．この現象は定常加振実験でも現れる．模型－2で傾斜層部分とそれに連結している水平層部分を若干残して切り離し振動台上に登載する．模型奥行き方向に水平定常加振することで固有振動形を求めた．**図－6**に示す実験結果は，節の位置のみを測定することで得られた振動形の概形である．加振振動数を増加していくと傾斜層の奥まで振動が現れていくことが分かる．このことは，弾性論的にも裏付けることが出来る．本間の論文[13]に示される通り剛基層上に弾性層がありその弾性層の傾斜角度をθ_0として，極座標系を用いて解析を行った(**図－7**)．

極座標を用い奥行き方向にのみ変位Wがあるとし自



図－8 弾性論より導かれた固有振動形 (模型-2)

由表面でせん断ひずみが0，また，剛基層と弾性層の境界で変位が0であるとする．

固有振動形は次のようである．

$$W = C_0 J_m(kr)\cos m\theta e^{i\omega t} \tag{1}$$

式中，$r, \omega, m, k, V_s, J_m$は次のようである．

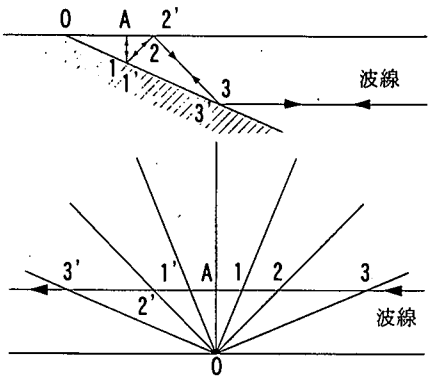
$$\begin{cases} i：\text{虚数単位} \\ r, \theta：\text{極座標} \\ \omega：\text{円振動数} \\ m = \pi/2\theta_0 \\ k = \omega/V_s \\ V_s：\text{横波速度} \\ J_m：\text{m次Bessel関数} \\ C_0：\text{係数} \end{cases}$$

模型－2の$\theta_0 = 5°$では$m = 18$となるのでその場合を計算すると，**図－8**に示される結果になる．実験結果は理論のように無限に続く傾斜層のものではなく，また解析では円振動数として実験値を用いているので当然この比較は厳密なものではない．しかし，振動数が高くなる程傾斜層の層厚の薄い所まで振動する点では共通している．

c）波線理論による考察

水平層から傾斜層の波動が進行する場合，複雑な波動現象の生成が予想される．任意の方向から波動が進行するものとして，波線理論的に調べる．

SH波は模型の表面でも底部でも入射角と等しい反射角のSH波のみが反射するので，一例として，**図－9**に示される様に傾斜層内の波の伝播状況が得られること



図－9　波線理論

になる．図中，傾斜層の頂点O点を通る波線以外は必ずO点に近づいて遠のくことになる．図中のOAの寸法は波長に比例する．即ち，位相速度が同様で振動数が高ければ，波長は短くなるので波動は傾斜層の層厚の薄い方へ進行することになる．

4.　結び

傾斜剛基層上に水平な自由境界をもつ弾性層があり，その中にSH波状の波動が伝播していく状況を模型実験的に究明した．結果の考察のために数値計算，振動実験，波線理論での検討を併せ行い，次の結論を得た．

1. 波動は振動数が高くなるほど，層厚の薄くなる上方まで伝播する．

2. 剛基層上の水平層内(層厚：H)を伝播するLove波と傾斜層内を伝播する波動は類似した性質を示す．但し，傾斜層における測定点の層厚をHとする．傾斜角度15°になると，このような類似性を呈しにくくなる．つまり，表層厚に対して斜面長が短くなるほど傾斜層を伝播する波動はLove波の性状と類似しなくなる．

参考文献

1) 伯野元彦：被害から学ぶ地震工学，鹿島出版会，ISBN - 306 - 02291 C1044，1992.
2) 纐纈一紀：不整形地盤における地震動，土木学会論文集，No.437/I，pp.1～18，1991.
3) 竹中博士：不整形地盤における波動伝播の数値計算法，地震，第二輯，Vol.46，No.2，pp.191～207，1993.
4) 大槻明，田蔵隆，清水勝美：傾斜地盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ，土木学会論文集，No.350/I-2，pp.291～300，1984.
5) 木下繁夫：傾斜層内におけるSH波の全反射伝播，地震，第二輯，Vol.38，pp.597～608，1985.
6) Phillips,W.S., S.Kinosita and H.Fujiwara : Basin-induced Love Waves Observed Using the Strong-Motion Array at Fuchu, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am*, 83, No.1, pp.64～84, February, 1993.
7) 田村重四郎，岡本舜三，小長井一男：トンネルの地震時の変形(ひずみ)について，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.625～630，1990.
8) Kuo, J.T.and G.A.Thompson : Model Studies on the Effect of a Sloping Interface on Rayleigh Waves , *J. Geophys. Res.* , 68, pp.6187～6197, 1963.
9) 浜田和雄：傾斜層を伝わる表面波の模型実験，北海道大学理学部地球物理学報告，No.10 , pp.129～148, 1966.
10) 本山満雄：有限長正弦波による傾斜層を伝わる表面波の模型実験，地震，第二輯，Vol.22，pp.94～103，1969.
11) 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年.
12) 佐藤良輔：傾斜層構造を伝わる表面波の群速度，地震，第二輯，Vol.19，pp.147～148，1966.
13) Honma, S. : Love Waves in a Surface Layer of Varying Thickness, *Geophy. Mag., Tokyo*, Vol.24, No.9, pp.9～14, 1952.

(1998.8.17 受付)

AN EXAMINATION FOR MODEL EXPERIMENTAL RESULTS ON WAVE PROPAGATION PHENOMENA INDUCED IN SLOPE LAYERS

Sigeaki MORICHI, Nobuo KIMIZIMA, Nozomu NISHIZIMA, Makoto DOI and Futoshi KAWANA

Surface layer that overlays a sloped base layer often suffers severely in earthquake disasters. To research this problem, a model experimental analysis on elastic wave propagation phenomena in slope layers was conducted . A model made of a material of low elasticity was used to facilitate the experiment. An elastic layer on a sloped rigid base has varying thickness. SH waves are thought to propagate from the deep to shallow part of the surface layer. The following conclusions were drawn : (1)Higher frequency waves propagate in shallow parts of the slope layer. (2)Wave behavior in the slope layer is similar to a Love wave propagaton through a layer of uniform thickness. However, this similarity does not hold for a slope layer inclined at more than 15°.