

(48) 傾斜層を有する地盤で発生する波動の特性

佐藤工業(株) 秋山伸一
早稲田大学 宮原 玄

1. はじめに

不整形地盤では、様々な波動が地盤内を伝播することによって複雑な地震応答を示す。したがって、地震応答を構成するこれらの波動を識別して定量的に評価することは複雑な地震動特性を明らかにしてゆく上で重要である。このような観点から、著者のひとは周波数領域の波動解析から得られる地表面応答と波数スペクトルを用いて卓越する波動成分を求めるモード展開手法¹⁾²⁾を提案している。ここでは、モード展開手法を用いて、傾斜層の側方に水平層が広がる地盤の波動伝播の解析を行い、傾斜層から水平層に向かって伝播する波動の特性について考察する。

2. 解析の概要

図1に示すように、水平層の側方に傾斜角 θ_d が 30° 、 20° および 10° の傾斜層を有する3種類の地盤モデルに平面SH波が鉛直下方から入射する時の地盤の挙動を解析の対象とする。

解析では、まずBEMによる波動解析から周波数領域の地表面変位応答を求める。波動解析によって得られる地表面応答は、水平な基盤面から入射する波動成分と傾斜層から伝播してくる波動成分によって構成され则认为られる。ここでは傾斜層で発生した波動が水平層をどのように伝播するのかを調べるのが目的なので、地表面応答から水平基盤入射による波動成分を除いて傾斜層から伝播してくる波動成分を求めておく。モード展開手法では、この波動成分に対して水平層($x \geq 0$)でモード展開を行い、各モード毎の波数、減衰定数および振幅を算出する。

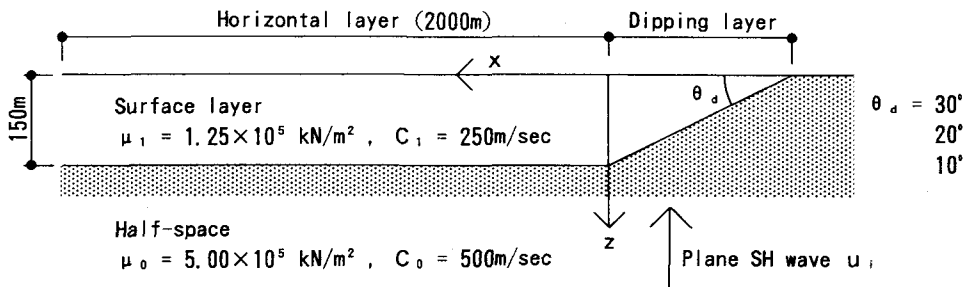
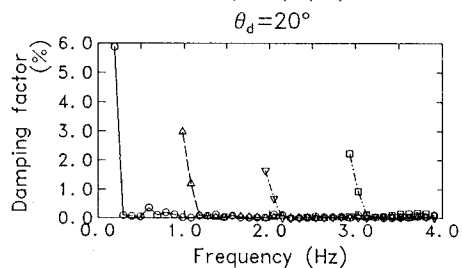
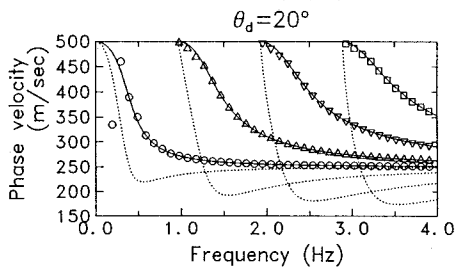
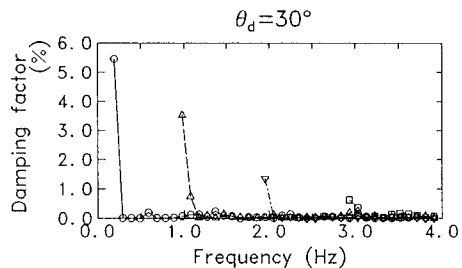
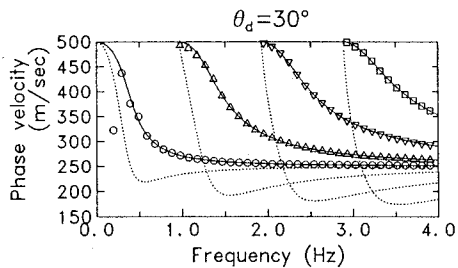
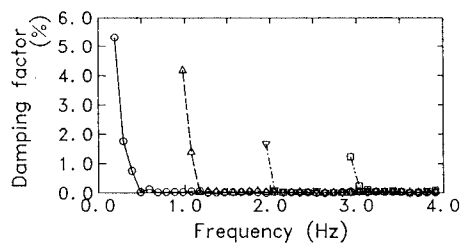
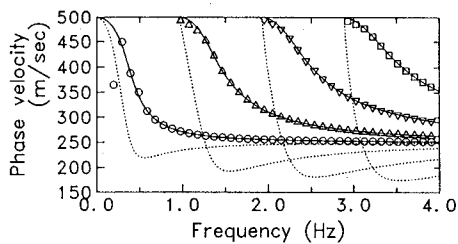


図1 解析モデル

3. モード展開手法による解析結果

まず、解析で得られる各モードの波数を水平方向の位相速度に直し、Love波の位相速度および群速度とともに図2に示す。図2より、傾斜層から伝播してくる波動の位相速度は傾斜角によらず、どのモードも殆どがLove波の位相速度に一致している。次に、図3に示す減衰定数を見ると、Love波のモードが出現するcut-off frequency付近では減衰定数が大きい、周波数の増加に伴い急速にゼロに近づく。これらの結果は傾斜層で発生する波動が水平層では主にLove波として伝播することを示している。傾斜層で発生する波動は様々な波数成分によって構成され则认为るので、水平層でもこれらの波数成分を保持しながら伝播し続けることも予想される。しかし、上記の結果から、傾斜層で発生する波動はLove波の波数に一致する成分のみが水平層を伝播して、それ以外の成分は干渉により急速に減衰するものと考えられる。

さらに、各モード毎の振幅を図4に示す。図中の A_j はモード振幅を表す。ここには比較のために、水平

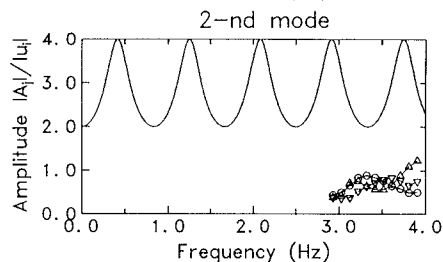
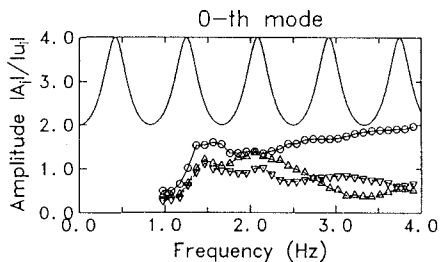
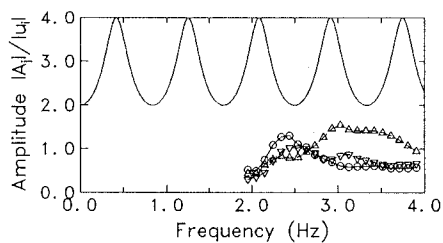
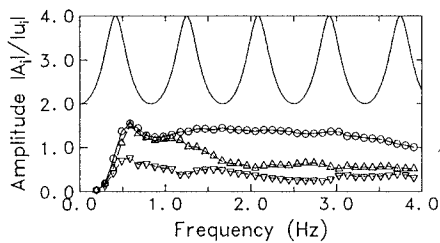


— Phase velocity of Love wave
 --- Group velocity of Love wave
 ○ 0-th mode ▽ 2-nd mode
 △ 1-st mode □ 3-rd mode

○ 0-th mode
 △ 1-st mode
 ▽ 2-nd mode
 □ 3-rd mode

图2 位相速度

图3 減衰定数



○ $\theta_d = 30^\circ$ — Response of wave from horiz. bound.
 △ $\theta_d = 20^\circ$
 ▽ $\theta_d = 10^\circ$

图4 振幅

基盤から入射してくる波動の地表面変位応答倍率も示しておく。図4を見ると、各モードの振幅は傾斜角によって大きさに差があるものの、cut-off frequencyで出現した後に急速に増加してピークを迎えるといった共通点も見られる。この時の周波数は傾斜角による違いは見られず一致している。また、この周波数は図2に示した群速度が停留するAiry相付近の周波数と対応している。Love波のモード振幅はAiry相で大きくなることが知られている。したがって、図4に示すこれらのピークもLove波としての性質を表しているものと考えられる。ところが、周波数がAiry相を過ぎると、各モードの振幅は傾斜角によって異なる変化を示すようになる。 $\theta_d=30^\circ$ の場合、1次モードは周波数が高くなるに従い振幅も大きくなる。また、 $\theta_d=20^\circ$ では各モードがAiry相を過ぎて再びピークを迎える。さらに、 $\theta_d=10^\circ$ では他の場合に比べてモードの振幅が全体的に小さい。なお、これらのモード振幅は最大で入射波振幅 u_i の1~2倍程度であるのに対して、水平基盤から入射する波動の応答倍率は2~4倍である。傾斜層から伝播してくる波動は、水平方向の位相速度が各々異なるモードによって構成されているので、地表面応答はモード間相互の干渉によって場所により大きく変化する。したがって、解析結果から見て、各モード毎の振幅が水平基盤入射の応答と比べて小さくても、これらのモードによって構成される地表面応答は無視できない値であると考えられる。

4. Love波モードの励起に与える回折波の影響

上記の解析結果では、Love波モードの振幅は傾斜角によって変化することを示した。これは、傾斜角が異なると、傾斜層で発生する波動も異なることに起因しているためと考えられる。ところで、傾斜層では平面波の多重反射に伴って回折波が発生することが知られている。回折波には、傾斜層の端部（不連続面の始点）から円筒状に広がりながら伝播する、振幅は不連続面付近で大きく不連続面から離れるにつれて小さくなるといった特徴がある。ここで、波面が円筒状に広がりながら伝播する性質に着目すると、回折波にはLove波モードに一致する波数成分が連続的にすべて含まれることになる。すなわち、回折波が水平層に伝播することでLove波が形成される可能性がある。このような視点に立てば、Love波モードの励起には回折波の伝播特性の影響が関わっていることも考えられる。そこで、Love波モードの励起を傾斜層で発生する回折波の伝播特性と関連づけて考えてみる。

まず、傾斜層で発生する多重反射波の波線と不連続面を図5に示す。図中()内の数値は不連続面における変位の不連続量を入射波振幅 u_i の比で表している。回折波の振幅は不連続面付近で大きいことから、回折波のうち不連続面に沿って伝播する成分の波数がLove波モードの波数と一致すれば、水平層でLove波モードは大きく励起されることも予想される。

そこで、不連続面に沿った回折波の伝播方向とLove波モードの励起の関係を調べてみる。Love波は水平層内を多重反射する平面波と捉えることができるから、Love波の波数は水平基盤面に対する入射角に置き換えて示すこともできる。そこで図6には、不連続面に沿った回折波成分の伝播方向、すなわち不連続面の方向および多重反射する平面波とみた時のLove波モードの伝播方向を水平基盤面に対する角度で示すとともに、Love波モードに対応する振幅も示す。ここで、不連続面の角度はLove波が存在する範囲内($30^\circ \sim 90^\circ$)にあるもののみを対象に示す。まず、 $\theta_d=30^\circ$ の場合、周波数が増加すると基本モードの入射角は不

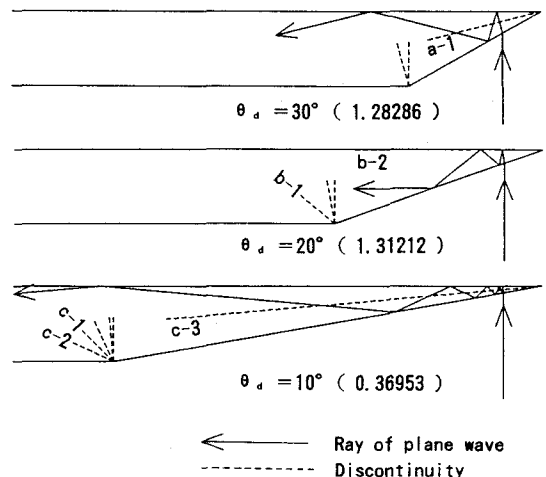


図5 傾斜層で発生する多重反射波の波線と不連続面

連続面(a-1)から次第に離れるのに対して、1次モードはこの不連続面に近づく。これに伴い、基本モードの振幅は次第に減少するのに対し、1次モードは次第に増加する。次に、 $\theta_d=20^\circ$ の場合では、各モードとも振幅がAiry相付近でピークを示した後に再びピークを迎えるが、この時のモードの入射角は不連続面(b-1)の角度に対応している。一方、周波数が高くなると基本モードが不連続面(b-2)に接近するにも関わらず、基本モードの大きな励起は見られない。さらに、 $\theta_d=10^\circ$ ではLove波が存在する範囲内で3つの不連続面(c-1, c-2, c-3)が含まれるが、Love波の励起はどのモードも小さい。これは、図5に示した不連続面における変位の不連続量が他の場合に比べて小さいために、ここで発生する回折波の振幅も小さく、その結果、水平層におけるLove波モードの励起も小さくなったものと解釈できる。

以上のように、ここでは傾斜層内で発生する回折波のうちの不連続面に沿った成分に着目して、Love波モードの励起について考察を行った。その結果、不連続面近傍の振幅の大きな回折波成分がLove波モードと一致した波数を有する時にLove波モードが大きく励起される場合のあることがわかった。ただし、このような関係が成り立たない場合も存在する。その理由として、傾斜層内における他の回折波との相互の干渉、さらには、基盤面から回り込んで入射してくる屈折波の影響などが原因として考えられる。

5. まとめ

モード展開手法を用いて傾斜層を有する地盤の波動伝播を解析した。その結果、傾斜層で発生する波動は水平層で主にLove波を形成すること、傾斜角によってLove波モードの励起が異なることなどがわかった。さらに、傾斜層で発生する回折波に着目してLove波モードの励起について考察を進めた。Love波の生成メカニズムを探るには様々なアプローチが考えられようが、ここで行った考察もこうしたアプローチのひとつとして捉えることができる。

参考文献

- 1) 秋山・東平: 不整形地盤における周波数応答のモード展開手法, 47回土木年次講演会, 1, pp. 824~825, 1992
- 2) 秋山: 傾斜層で発生する波動とLove波の関連, 土木学会論文集, 459/I-22, pp. 129~138, 1993.

連絡先: 〒243-02 厚木市三田47-3 佐藤工業(株)中央技術研究所, TEL 0462 (41) 2171

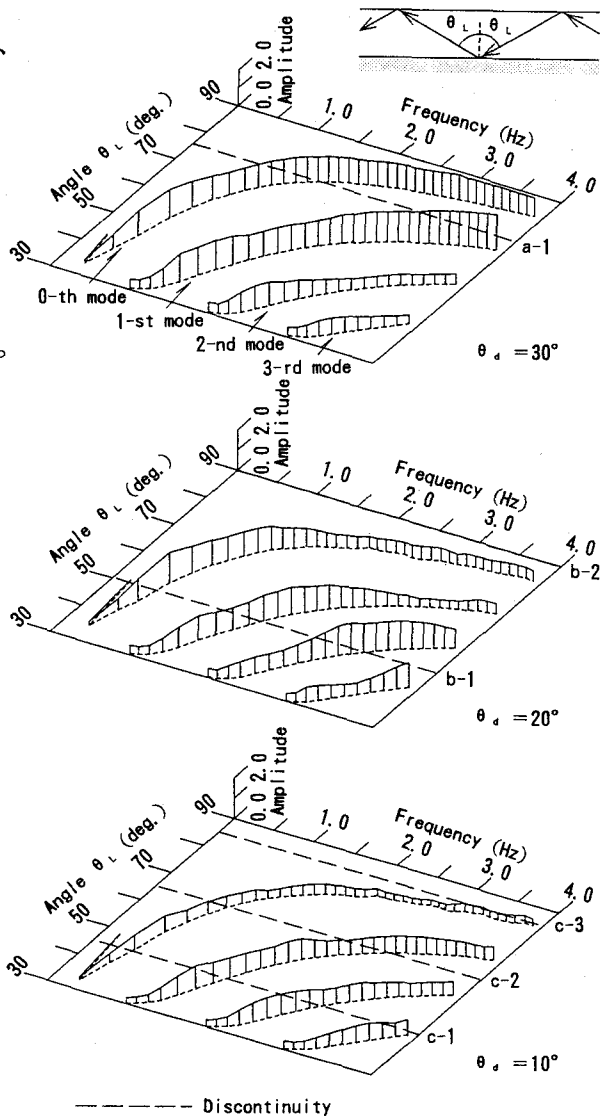


図6 Love波モードと不連続面付近の回折波の関係