

### (30) 傾斜地盤の波動・振動特性

東京工業大学 ○蓮見有敏 大町達夫 年縄 巧

#### 1. はじめに

厚い堆積層を有する平野で観測される地震動には表面波による長周期の波動成分が現れる。表面波は、振幅が地表面付近で集中的に大きい、長周期成分が卓越する、継続時間が長い、といった特徴を持っている。近年土木構造物の大型化に伴い設計の対象とすべき地震動の範囲が長周期側へと広がったことや、地下埋設構造物やライフラインシステムの耐震性と関連して、表面波に対する地震工学上の関心が高まっている。

実在する広大な不整形地盤を対象とする場合には、表面波の伝播特性に及ぼす基盤傾斜の影響を無視するわけにはいかない。従来傾斜層の表面波群の解析には、平行な面を持つ多くの階段状基盤によって傾斜面を置き換え、各々の階段についてはその層厚を持つ平行層の理論を直接適用するという方法が採られてきた。一方、平行層内の表面波の性質はせん断波速度と層厚のみによって決定される。本研究は、実験と解析の両面からこのような理論の適用性を検討し、傾斜地盤の波動・振動特性を解明したものである。

#### 2. 傾斜地盤のせん断振動

この研究では、表面波として剛な基盤を持った2層地盤を伝播するラブ波を取り上げた。両端に剛な境界を設けた有限長地盤のせん断自由振動は、無限長地盤を伝播するラブ波と全く同一の支配方程式を持つ<sup>1)</sup>。したがってこのせん断振動は互いに逆方向に同位相・同振幅で伝播するラブ波によって生じた定常振動とも解釈できる。この事を利用してまず最初に有限長傾斜地盤のせん断振動実験を行った。

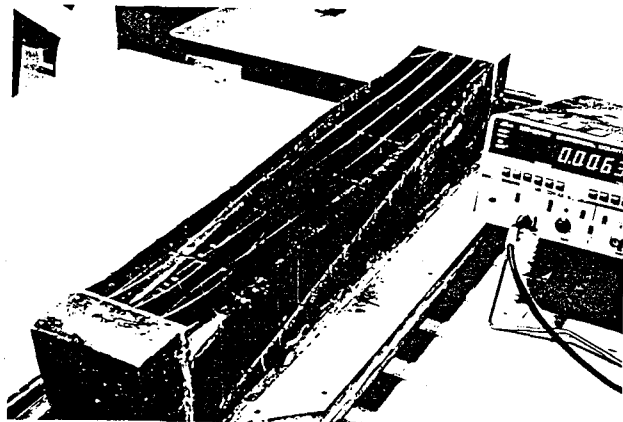


Photo Vibration experiment.

実験は表層にアクリルアミドゲルを用いてPhotoに示すような模型地盤

盤を作製し、これを振動台の上で水平方向に定常加振して発生するモードと周期を測定するという方法を行った。また、これと同時に平面ひずみモデルの有限要素法による固有振動解析も行った。基盤の傾斜の勾配は、0%～18%の5種類を考えた。傾斜地盤でも低次のモードでは平行層のものから類推しやすいが、高次のモードでは鉛直軸に沿う振動形が互いに相似でない複雑なせん断振動を生じる。

節と節の距離から波長を求め、周期から位相速度を計算した。ここでは、層厚として節と節の平均のものをを用いたが、ほぼラブ波の分散曲線上にプロットすることができる。したがって、傾斜層においても各点では特性方程式が成立しており位相速度は平行層の値、すなわちせん断波速度と層厚から求められる値を用いることが可能である。

平行層地盤においては、両端の境界の影響がない場合（両端freeの境界条件）には、モード1では水平方向への波長が無限大のせん断振動を生じる。このモードの固有周期 $T$ は、せん断波速度を $V_s$ 、層厚を $H$ とすれば、 $T = 4H/V_s$ である。これは地盤の固有周期が $1/4$ 波長則から求められることを示している。境界の影響がある場合でも、地盤の長さが層厚に比べて十分長い場合には、このことは近似的に成立する。

しかし、傾斜層の場合には境界の影響がなくともモード1では有限な波長を持つ。つまり傾斜のためにある有限な長さをもった波長しか存在できなくなる。

この結果、固有振動周期は最大振幅となる点の層厚 $H$ から求められる周期 $T^* = 4H/V_s$ よりも必ず短くなる。Fig. 1は真の固有周期 $T$ と層厚から求められる周期 $T^*$ の比 $T/T^*$ の値を傾斜の勾配に対して各モードでプロットしたものである。勾配が小さい時には、両端の境界の影響で高次のモードになるにつれて $T/T^*$ の値は小さくなってゆく。しかし、勾配が大きくなると波長が短くなったために両端の境界の影響がなくなってゆき、10%を越えるとモード5まではほぼ一定の値をとる。また、この固有周期のずれはほぼ傾斜の勾配に比例し、勾配10%で1割、勾配20%で2割であることがわかる。

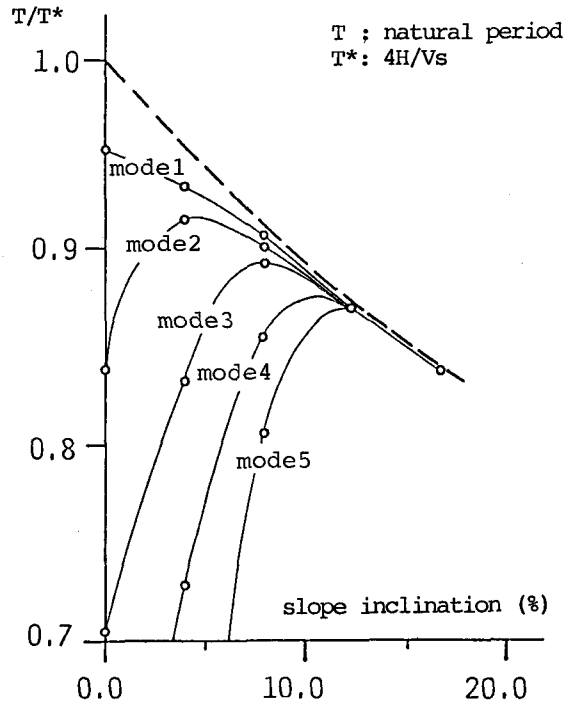


Fig.1

$T/T^*$  plotted against slope inclination.

### 3. 傾斜地盤の波動伝播

次に、傾斜層を持つ模型地盤に実際にラブ波を発生させてその性質を調べた。実験はアクリルアミドゲルによってFig. 2に示す勾配6.2%の傾斜地盤を作製し、板叩き法によって発生させたラブ波を地盤表面に設置した小型のピックアップで観測するという方法を採用した。深い方から伝播させた場合( $D \rightarrow S$ )と浅い方から伝播させた場合( $S \rightarrow D$ )の2種類の実験を行い、それぞれの加振位置は $\Delta$ で示した。観測された変位波形およびそのフーリエスペクトルをFig. 3に示す。ラブ波の分散性により波形は伝播にともない変化する。また、短周期の波が先に到着し長周期成分がそれに続くという逆分散であることがわかる。深い方から伝播させた場合、各点のスペクトルには0.04~0.06 s付近と0.01~0.02 s付近の2つのピークがみられる。これらは、鉛直方向が fundamental mode と first higher mode の卓越周期であると考えられる。基盤が剛な平行層ではこれらの卓越周期は $4H/V_s$ と $4H/3V_s$ にあたるが、実験ではどの点でもこれらの周期よりも小さめになった。この事は前述した傾斜層のせん断振動の結果をよく説明している。また、伝播にともなってスペクトルの長周期側が欠けてゆき、その結果ピークの周期が短くなってゆくという現象がみられる。このように深い方から伝播させた場合には、スペクトルは各点の層厚を反映したものとなっている。

一方、浅い方から伝播させた場合には内部減衰のために絶対値は小さくなっているがスペクトルのピークは0.035 s付近で変化していない。したがって、各点の層厚を反映したものとはなっていない。この卓越

周期は加振点の層厚Hによって決まり、 $4H/V_S$ に傾斜の影響を考慮して1割程度小さめにした値とほぼ一致した。

この実験でreciprocity (相反性) は明らかに成立していないことになるが、弾性体内の波動現象を取り扱った模型実験ではreciprocityが成立するという結論のもの<sup>2)</sup>と成立しないというもの<sup>3)</sup>がある。一般に表層と基盤層のインピーダンス比が小さい程、また傾斜の度合いが大きい程、reciprocityは成りたたなくなるが、本実験では、この場合に当てはまり、基盤が剛であるためにインピーダンス比が0であり $4H/V_S$ がいわゆる遮断周期となり、これ以上の長周期成分は表面波としては存在できないためと考えられる。

次に、各点の波形をフーリエ分解し位相差と距離から位相速度を求めた。ここでも2点間の平均の層厚とせん断波速度で無次元化した。これは広い周期範囲でラブ波の分散曲線上にプロットできる。波形にバンドパスフィルターをかけ、最大振幅の移動する速さから群速度を求めると、やはり両方の点の分散曲線上にほぼプロットすることが可能である。このように傾斜層における位相速度および群速度は各点の層厚を用いた平行層の値と一致すると考えてよい。また、深い方から伝播させた場合の0.01~0.02 sのピークは、鉛直first higher modeの卓越周期であることが確かめられた。

#### 4. 基盤内を伝播する実体波により励起される表面波

3. で示した表面波の伝播の様子は、表層内の浅い地点に震源があるとみなせる場合、あるいは実体波と表面波の減衰性の差により表面波だけが伝播すると考えられる場合に相当する。一方、メキシコ地震では震源からかなり離れたメキシコ市内で大きな被害がでたように、基盤内を伝播する実体波によって表面波が励起される場合もある。このような現象の模擬実験を行うことは難しいので筆者等が以前に提案した有限要素技法<sup>4)</sup>を用いてシミュレーションすることにした。

ここでは3. の波動伝播実験と同一の地盤モデルを考え、基盤内のS波は周期0.004 sの正弦波1波長分とし、簡単のために距離減衰なしで伝播させた。また、深い方から伝播させた場合と浅い方から伝播させ

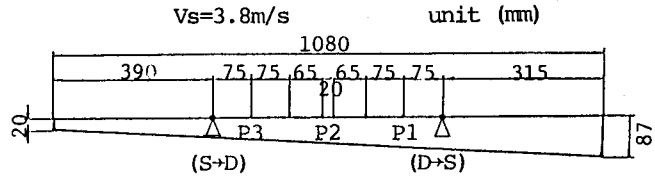


Fig. 2  
Profile of inclined ground model

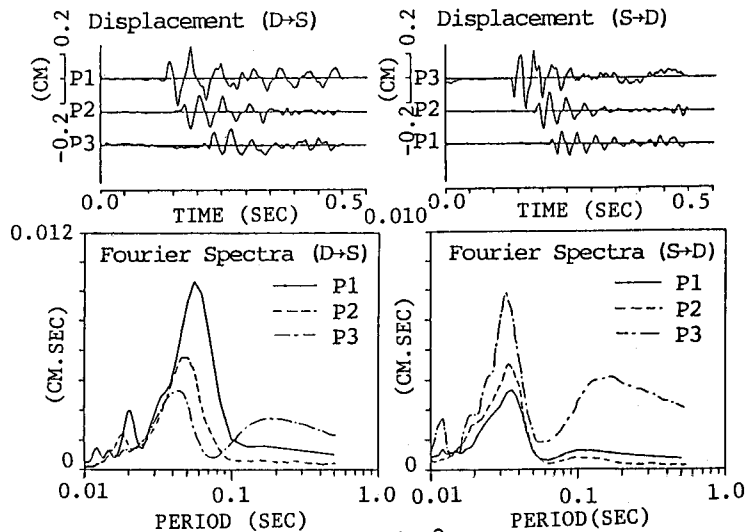


Fig. 3  
Observed wave forms and those Fourier spectra

た場合の2種類を考え、それぞれの計算された変位波形およびそのフーリエスペクトルを Fig.4 に示した。

スペクトルを見ると伝播にともなって形状が変化しており、各点の層厚を反映したものとなっている。しかし、ピークを示す周期は層厚から求められる周期  $T^* = 4H/V_S$  に傾斜の影響を考慮して1割小さくしたものと比べて、深い方から伝播させた場合には長周期側に、浅い方から伝播させた場合は短周期側にややずれている。これは、波が各点の層厚とともに通ってきた経路の影響を受けていると

いうことであろう。しかし、この周期のずれは基盤内のS波の伝播速度を大きくすると小さくなり、速度が表層のせん断波速度に対して十分大きい時にはピークの周期は層厚から求められる周期  $T^*$  を1割小さくしたものとほぼ一致した。

このように卓越周期が基盤の実体波の伝播速度に影響されるという結果は興味深い。

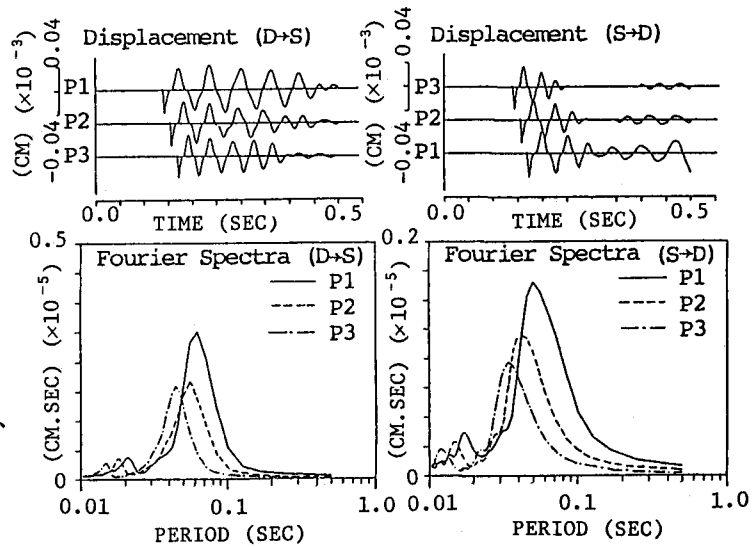


Fig.4

Calculated wave forms and those Fourier spectra.

## 5. 結論

本研究の結論として次の事がわかった。

- 1) 傾斜地盤であっても鉛直軸に沿う変位形状、位相速度、群速度は平行層の値を適用できる。
- 2) 基盤内の実体波の影響がない時、深い方から伝播する場合にはスペクトルは長周期側が徐々に欠けてゆき、ピークの周期は各点の層厚から求められる周期  $T^*$  に傾斜の影響を考慮したものとなる。また浅い方から伝播する場合には、スペクトル形状は一定で、ピークの周期は加振点の層厚から求められる周期  $T^*$  に傾斜の影響を考慮したものとなる。
- 3) 表面波が基盤内の実体波によって励起される時、スペクトルのピークは各点の層厚から求められる周期  $T^*$  に傾斜の影響を考慮したものとは比べて、深い方から伝播する場合はやや大きく、浅い方から伝播させた場合はやや小さくなる。このずれは基盤内の実体波の伝播速度の影響を受ける。

## 5. 参考文献

- 1) Morichi, S., Ohmachi, T. and Toshinawa, T., "Vibration Modes Characterized by Love Waves in an Elastic Layer Overlying a Rigid Basement," Proc. of JSCE, Vol.2, No.1, pp.277-236, 1985.
- 2) 浜田和郎, "傾斜層を伝わる表面波の模型実験" 北大地球物理学研究報告, 15, pp.129-148, 1966.
- 3) Abe, M. and Suzuki, Z., "A Model-seismological Study on the Propagation of Rayleigh Waves in a Medium with a Dipping Boundary between Superficial Layer and Basement," Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, 20, pp.1-25, 1970.
- 4) 大町達夫、年縄 巧, "広大な不整形地盤を伝播するラブ波の数値解析手法" 第7回日本地震工学シンポジウム講演概要, pp.331-336, 1986.