

実験模型弾性層内の波動現象に対する波線論的考察

東京理科大学 学生員 新井延幸

東京理科大学 正会員 森地重暉

1. はじめに

地震時に地盤内に生じる波動現象についての研究は、地震工学上、基礎的な課題である。波動現象についての究明方法として模型実験解析法があるが、著者等はその改良を継続してきた。

実験の実施例として、剛基層上の弾性層内を伝播する波動についての究明を行ってきた。この課題は層状地盤内の波動現象の解明に基礎的である。直方体の弾性層模型を用い、模型の長手方向に伝播する波動を扱った。有限回の正弦振動を加える事によって発生させた波動の応答量は加振振動数に依存する。Love 波状の波動に関してはこの事を波線論的に説明する事が出来た。本研究では、Rayleigh 波状の波動に関してこの説明の可能性を探る。

2. 実験方法と実験結果

本実験で用いた模型弾性層は、高さ 50mm、長さ 5000mm、奥行き 250mm 程度の直方体である。模型材料として、剛基層には鋼材を、弾性層にはアクリルアミドゲルを用いた。アクリルアミドゲルは、横波速度が $1 \sim 3\text{m/s}$ と他の模型材料に比べて著しく低いので波動現象の把握や波動の生成等が容易であり、実験実施面で有利である。本研究での模型弾性層の横波速度は 1.61m/s であった。また、ポアソン比が 0.5 であるため、縦波は検出されず横波のみが模型内に発生する。加振装置として、電磁式加振器を用いた。加振方法として、模型の一点を上下方向、あるいは水平方向に加振すれば、模型鉛直面内に粒子が振動する Rayleigh 波状のものが検出される。本研究では模型の奥行き方向に伸縮を生じさせないように、平面ひずみ状態に近い状態を目指し、円筒加振を行った。円筒加振とは、模型内に円筒状の棒を挿入し、振り運動を起こす事により横波を発生させる方法である。図-1 に円筒加振による実験の様相を示す。模型内に連続 5 波の正弦波を入力し、加振振動数を $5.0\text{Hz} \sim 40.0\text{Hz}$ の範囲で 1Hz ごとに変化させ、模型表面での各測点の上下方向、水平方向の変位を測定した。各実験により得られた時刻歴波形より位相速度と群速度を算出し、波の分散性状を調べた所、Rayleigh 波の分散性状をほぼ示した。図-2 に、上下動より求めた波の分散性状を示す。ここで、 C_g は群速度、 C_p は位相速度、 V_s は横波速度である。さらに、各測点での応答倍率を調べたところ、上下動では f/f_0 が 2 付近で、水平動では f/f_0 が $1 \sim 2$ で最初のピーク値を示した。図-3、図-4 に各チャンネルでの上下動と水平動の応答倍率を示す。このグラフは縦軸に最大変位振幅と加振振幅の比をとり、横軸に加振振動数と弾性層のせん断一次振動数との比 (f/f_0) を示した。

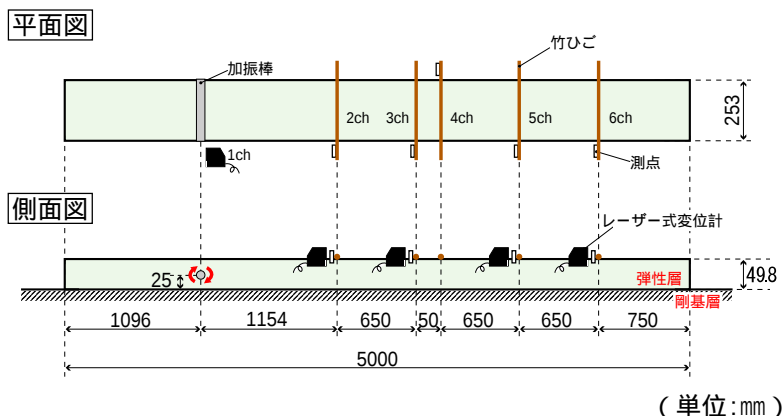


図-1 実験模型の全体図

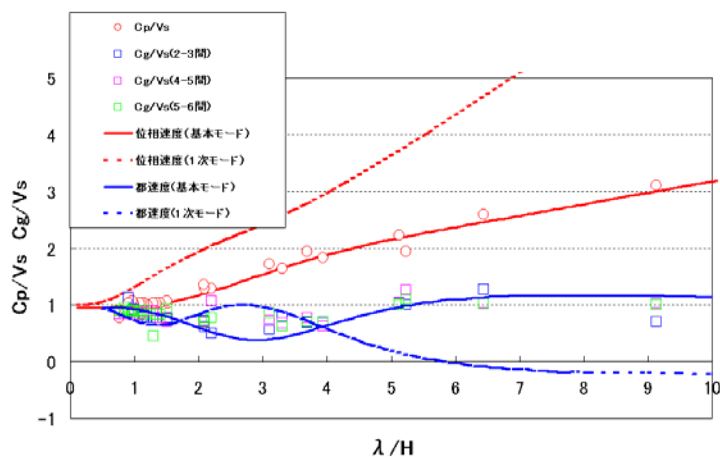


図-2 上下動から求めた波の分散性

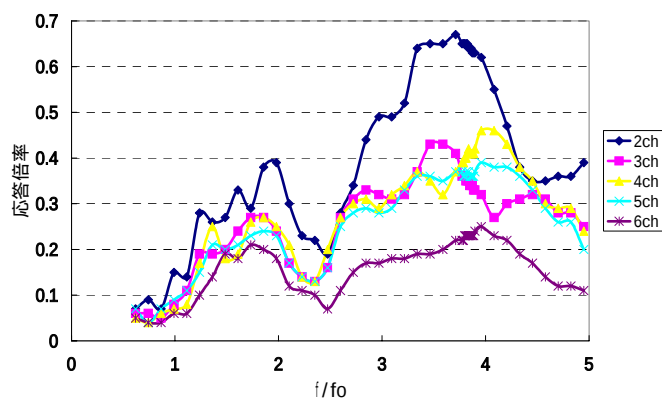


図-3 各チャンネルの上下動の応答倍率

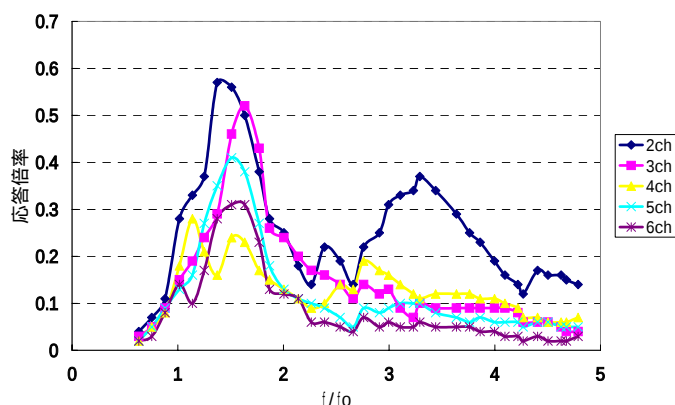


図-4 各チャンネルの水平動の応答倍率

3. 波線理論による考察

以上の実験結果から, Rayleigh 波に対してある特定の加振振動数帯域において応答が大きくなることが確認された. ここで, 自由境界と固定境界の間を伝播する実体波の干渉により生成する表面波について考察する.

上下動の応答について

本研究では, 模型弾性層のポアソン比が 0.5 であるため縦波速度が無限大となり, SV 波の入射角は臨界角を超える. そのため, 入射 SV 波と反射 SV 波とで位相差が生じる. 入射角 45° の場合, 自由境界では反射波の位相差が生じず, 固定境界では 90° の位相差が生じる. これらの条件を踏まえ, 図-5 のような SV 波の干渉による表面波の生成について考える. SV 波の波長を λ' , 表面波の波長を λ , 層厚を H とすると, $\lambda' = 4\sqrt{2}H/3$, $\lambda = 8H/3$ となり, 加算的干渉のために表面波の上下動振幅が大きくなるが, 水平動は生じていない. この事は弾性論的にも説明できる. また, 表面波の位相速度 C_p と弾性層の横波速度 V_s には $C_p = \sqrt{2} V_s$ という関係が成り立ち, $V_s = 4Hf_0$, $C_p = f \lambda$ (f : 加振振動数, f_0 : せん断一次振動数) の関係を用いると, $f = 3\sqrt{2} f_0/2$ となる. つまり, $f_0/f = 2.12$ の時, 上下動の応答倍率が大きな値を示す. この値は実験値と近いものとなっている.

水平動の応答について

水平動の応答については, 水平動成分が卓越するような波線論の説明には至っていない. しかし, 実験的には水平動の応答が大きい振動数は上記のものより低くなっている. 一例として図-6 のように入射角度 22.5° で層内を SV 波が伝播すると考える. 上下動成分に比べ, 水平動成分が卓越する模型内の領域が大きくなる. この時, $f/f_0 = 1.08$ となり, 入射角度 45° の場合より明らかに小さくなっている.

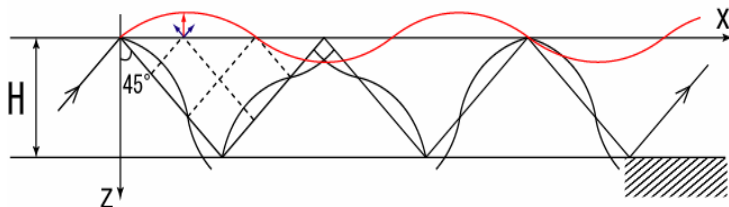


図-5 SV 波による表面波（上下動成分）の生成

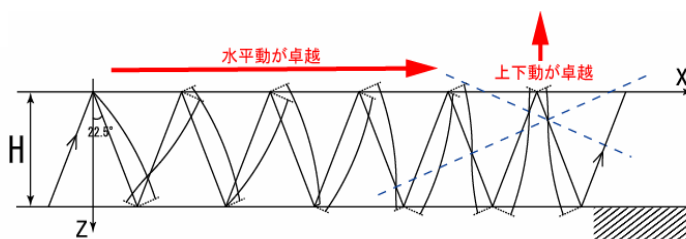


図-6 SV 波による表面波（水平動成分）の生成

4. 結び

水平な剛基層上の一様な高さの弾性層模型を作成し, その実験模型弾性層に生じる波動に対し, 波線論的考察を行った. Rayleigh 波の上下動成分の応答に対しては, SV 波の自由境界と固定境界の反射波の位相ずれを考慮することで実験結果を説明できた. また, 水平動成分に対しては, 十分な説明には至っていない. しかし, 入射角度の減少により, 水平動成分が卓越する模型内の領域が広がることがわかり, 実験結果を一部説明している.