

(6) 傾斜境界を有する地盤に生ずる波動現象の模型実験的研究

東京理科大学 学生員 君島信夫

東京理科大学 正会員 森地重暉

東京理科大学 学生員 西嶋 望

1. はじめに

メキシコ地震を契機にして、地盤の不整形性が地震動に与える影響についての研究がより重要性を帯びてきた。又、兵庫県南部地震で大災害が発生したが、神戸市等の地盤は六甲山地の傾斜した基盤上にある堆積層であり、このような地層構造が地震動に与える影響について今後検討を要すると思われる。その種の課題の重要性を再認識して、今回の研究を行った。このような研究では、理論解析例、数値解析例に比べ実験解析例は少数であるため、この面での進展が望まれる。

以上のように考えて、本文では、基礎的な課題と思われる基層が傾斜している堆積層での波動の伝播状況について模型実験的研究を試みた。

2. 実験計画・実験方法

傾斜基層をもつ堆積層に入射する波動としてどのようなものを想定するかは議論を要するところである。本文では、水平な剛基層と傾斜した剛基層とが連結しており、しかも水平な自由境界を持つ表層地盤を実験対象とした。そして、水平な基層を持つ表層からのS H波状の波動が傾斜層部分に入射し反射する際に、傾斜層部でどのような波動現象が生ずるか調べてみた。

模型材料として、剛基層部には剛材を、表層部にはアクリルアミドゲル（横波速度 $V_s = 1.64 \text{ m/s}$ ）を用いた。本材料は多くの模型材料に比べて横波速度が低いために、波動現象の速さが低減でき波動現象の把握が容易になる。傾斜部分の傾斜角は 5° とした。模型の奥行き方向の厚さは 24.2 cm である。波動の発生には電磁式加振器を用いた。加振器の加振棒先端にアルミニウム棒を取り付け、模型に圧着する事でS H波状の波動を発生させた。加振振動数は $8.0 \sim 30.0 \text{ Hz}$ の範囲であり、正弦波を連続9波発生させた。波動の伝播に伴い生ずる変位は次のように測定した。測点位置にストローを固定しストロー先端にアルミニウム箔を取り付け、箔の変位を非接触変位計で測定した。変位量に対応する出力電圧は、アナログの並びにデジタル的（ $1/500$ 秒毎）に捉えた。Fig-1に実験模型の概略を示す。▽印は加振点、○印は変位の測点位置、番号は測点番号を表している。なお、模型の水平層部のせん断一次振動数は 8.17 Hz である。

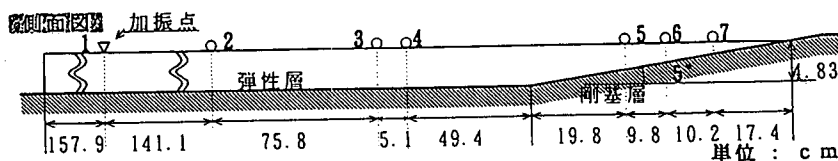


Fig-1. 実験模型の概略図

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果を用いた考察

デジタル的に得られた変位記録から、加振振動数付近の振動数だけ残るようにフィルターをかけて得られた結果をFig-2(a)(b)(c)に示す。図中のCH番号はFig-1の測点番号に対応している。発振位置より波動が表層を伝播し傾斜層部で反射している様子が分かる。これらの入射波及び反射波は剛基層上の弾性層を伝播するLove波により特性づけられることが確認されている。¹⁾ Fig-2(a)に示す 9.0 Hz の加振では傾斜層部にある測点5まで波動が伝播しているのに対し、Fig-2(b)の 12.0 Hz の加振では測点6まで、Fig-2(c)の 22.0 Hz の加振では測点7まで波動が伝播している様子が示されている。このように、高い振動数を有する波動ほど、傾斜層端部で変位を生じやすくなることが分かる。

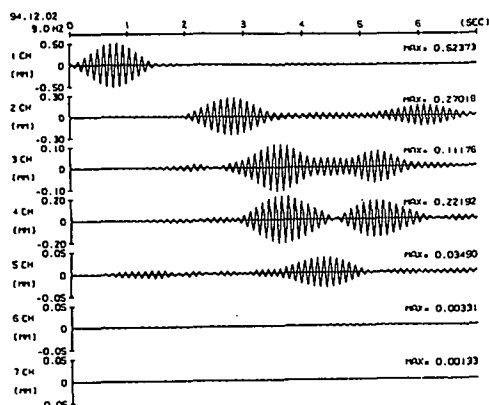


Fig-2(a). 加振振動数 9.0Hz の時刻歴波形

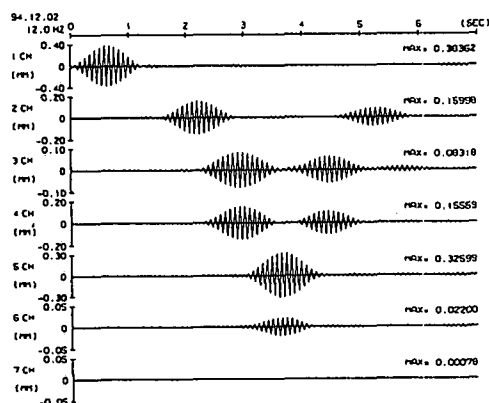


Fig-2(b). 加振振動数 12.0Hz の時刻歴波形

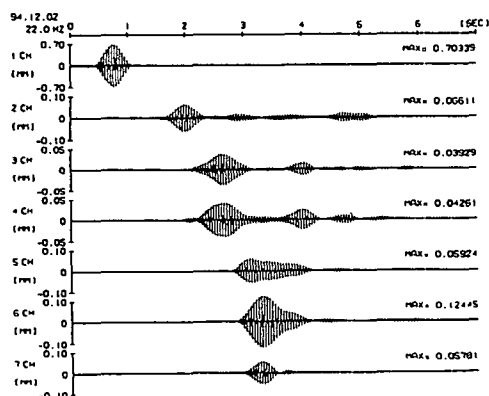


Fig-2(c). 加振振動数 22.0Hz の時刻歴波形

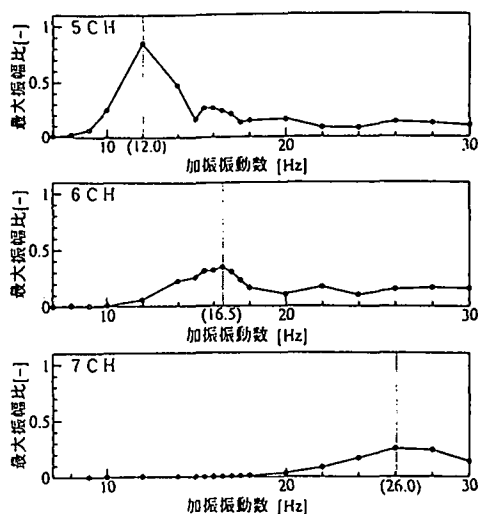


Fig-3. 加振振動数に対する最大振幅比の変動

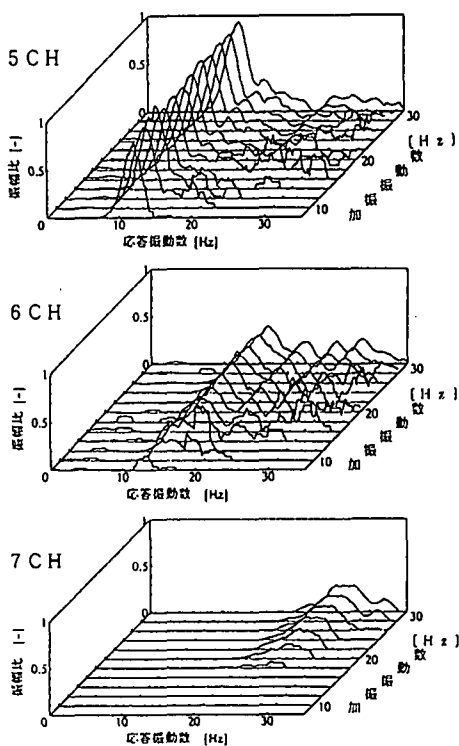


Fig-4. 傾斜層部における各測点の周波数応答倍率

Table-1. 傾斜層上各測点におけるせん断1次振動数

	5CH (層厚 2/3)	6CH (層厚 1/2)	7CH (層厚 1/3)
層厚 (cm)	3. 1 6	2. 3 0	1. 4 5
せん断一次振動数 (Hz)	1 2. 0	1 6. 4	2 6. 0

このようなことを追認するために、傾斜層部での測点に生ずる変位に注目し、加振振動数毎に各測点での最大振幅を各加振振幅で割った値を求め、Fig-3に示す。各測点位置でピークを示す振動数は、模型端部に近づくほど増加することが分かる。

また、各加振振動数毎に得られる測点応答を加振変位で割った周波数応答倍率をFig-4に示す。ピークを示す振動数は傾斜層端部へ近づくほど増加していることが示されている。

振動現象は波動現象の一部である。上述のことを追認するために、水平定常加振実験を行うことにした。波動実験で用いた模型の傾斜層部を若干水平層部を残して切り出し、振動台上に搭載して水平加振実験を行った。模型表面の長手方向に記した指標線によりモードを観察した。その結果はFig-5に示されている。結果を見ると、振動数が高まるにつれて、傾斜層の端部により近いところから振動振幅が発生していることが確認できる。このことは波動実験の結果と類似している。また傾斜層端部から1つめの波形の振幅は他のものより大きな値をとることが特徴的であった。

Fig-3をみると、大まかではあるが、測点5では12.0Hz、測点6では16.5Hz、また、測点7は26.0Hzでピーク値が現れている。また、Fig-4においても加振振動数と係わりなく、応答倍率のピーク値がFig-3におけるものと同様な振動数で現れている。これらの数値については検討を要するが、試みに測点5、6、及び7の測点直下における層厚を用いて、1/4波長則から、せん断一次振動数を算定するとTable-1に示すとおりになり、偶然にもFig-3、Fig-4でピーク値を与える振動数と合致している。さらに、Fig-5に示す水平加振実験結果でも、測点5、測点6の位置に左端の波が差し掛かるときの振動数が12.3Hz、16.8Hzとなり、前出のものと合致しているといえる。

3.2 弾性解析を用いた実験解析についての考察

傾斜した剛基層上の弾性層について弾性論的に固有値解析を行った。傾斜層部に、Fig-6に示す通り円筒座標系を設定する。Z方向のみ変位が生じ、また、Z方向について変動はないものとする。次のように記号を定める。

- w : Z方向の変位
- $\sigma_{zr}, \sigma_{z\theta}$: せん断応力
- r, θ, z : 円筒座標系
- t : 時間
- ρ : 密度
- μ : せん断弾性率
- ω : 円振動数
- i : 虚数単位

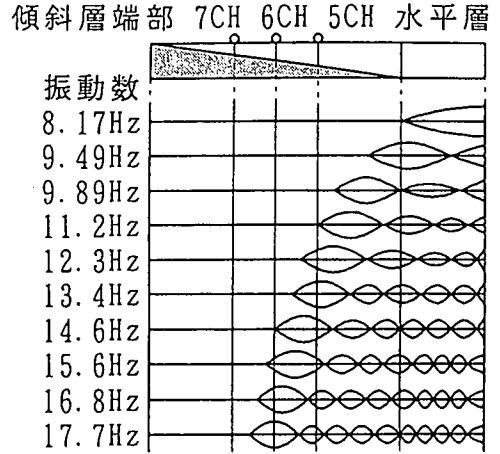


Fig-5. 傾斜層部の振動モード

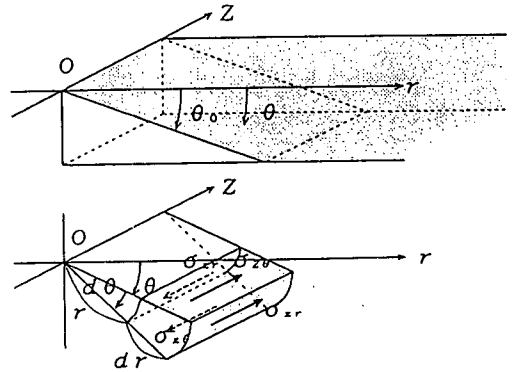


Fig-6. 傾斜地盤模型の円筒座標系

Z方向の運動方程式は(1)式に示すようになる。

$$\frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{r \partial \theta} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (1)$$

Hookeの法則を用いると(1)式は(2)式のようになる。

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \mu \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

wの一般解として、次の変数分離形のもの考える。

$$w = U(r)W(\theta)e^{i\omega t} \quad (3)$$

境界条件は次のようである。

$$\left. \begin{array}{l} \theta = \theta_0 \quad \text{で} \quad w = 0 \\ \theta = 0 \quad \text{で} \quad \frac{\partial w}{r \partial \theta} = 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

(4)の条件を満たすW(θ)は次式のようにである。

$$W(\theta) = \cos \frac{\pi \theta}{2\theta_0} = \cos m\theta \quad (5)$$

$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $r = \frac{V_s}{\omega} X$ と変数変換し、(2)(3)(4)及び(5)を用いると次式を得る。

$$\frac{d^2 U}{dX^2} + \left(1 - \frac{m^2}{X^2}\right) U(r) = 0 \quad (6)$$

この式の解は次のように示される。

$$U(r) = \sqrt{X} J_\nu(X) \quad (7)$$

式中 $\nu^2 = m^2 + \frac{1}{4}$ であり、又 $J_\nu(X)$ はν次のBessel関数を示す。 $k = \frac{\omega}{V_s}$ とおくと(3)式は次のようになる。

$$w = C_0 \sqrt{kr} J_\nu(kr) \cos m\theta e^{i\omega t} \quad (8)$$

本実験模型では、 $\theta_0 = 5^\circ$ である。よって、 $m = 18$ となり $\nu \approx 18$ となる。よって

$$w = C_0 \sqrt{kr} J_{18}(kr) \cos(18\theta) e^{i\omega t} \quad (9)$$

となる。上式でFig-5で得られた実験結果での振動数と実験模型における横波速度を代入し、自由表面におけるモードを求めるとFig-7に示すようになる。本図はFig-5における結果と類似しており、実験結果を裏付けるものと考えられる。

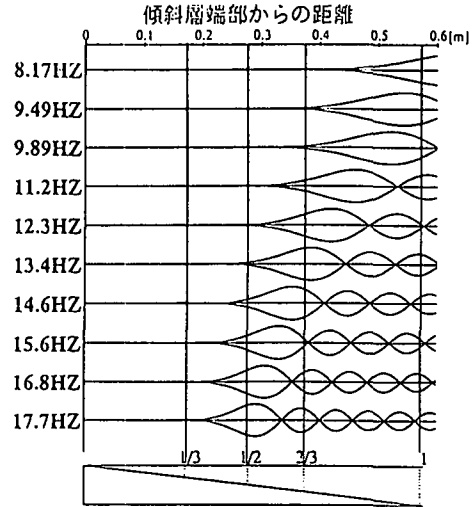


Fig-7. 弾性解析による数値結果

4. 結び

傾斜基盤上の表層に生ずる波動現象について模型実験的に調査した。本研究により以下の結果が得られた。

- 1) 高い振動数をもつ波動ほど、傾斜層端部近くまで伝播することが確認された。
- 2) 加振振動数とは係わりなく、波動伝播にともなう層特有の振動が励起される。水平定常加振実験においても、又弾性解析においてもこの結果は裏付けられる。

参考文献

- 1) 森地 重暉・江口 和人: 地盤内の波動伝播問題に対するゲル材料を用いた一模型実験方法について、土木学会論文集、No.483, I-26, 1994年4月