(21) 模型地盤に生ずる振動モードについての波動論的考察

東京理大　○正員　森地　重暉
東京理大　　正員　田村　浩一

1. はじめに

構造物の耐震性を検討するに当っては、地盤の地震時挙動の詳細な把握が切望され、特に長大構造物・地中構造物に対しては地盤振動の波動論的な究明も必要とされてくる。　多くの観測結果の検討に基づいて強震記録の中に表面波の成分の存在することも指摘されており、地震動に関する波動論的な解明の進展は著るしい。

地盤の振動特性や、構造物と地盤との動的相互作用等に関する波動論的検討に対しては地震観測・理論的究明と並び模型実験解析も有効であると考えられる。　模型実験による地盤内の波動伝播状況の解明に際しては実験の実施のために特殊な機器類や実験技術を要するのが通例である。　一方、振動実験の実施に当っては、特殊な装置や実験技術を必要とせず模型地盤内に生ずる波動は定常波として検出されるが、実験の実施上設定される模型地盤の境界による影響を考慮すると実験結果と同様な現象が実地盤に生ずるか否かは問題となるところであろう。　しかし、模型地盤に生ずる振動モードがどのような波動により生ずるか知れれば、振動実験が地盤振動や構造物と地盤との動的相互作用に関する波動論的な究明に資するところが少くないと考えられる。

以上のような観点にたち模型地盤に生ずる振動モードについて波動論的な検討を加えてみた。　この種の研究の初期のものとして寺田・坪井(1)の論文があり、二層地盤の基層内の点振動源より生ずる表面波の崖における反射、溝における通過状況に関し検討されている。　本文では、具体的な工学上の問題にはふれず、基礎的な究明を目的とした。

2. 実験計画及び方法

硬い基層上にある軟弱地盤を対象として実験を行った。　調査対象とした振動モードとして表層地盤の自由表面に発生する上下動並びに水平動のそれぞれに着目し、それ等が明瞭に把握しうる形状をもつ模型として表－1. に示す寸法をもつ角壔形の供試体を用いた。

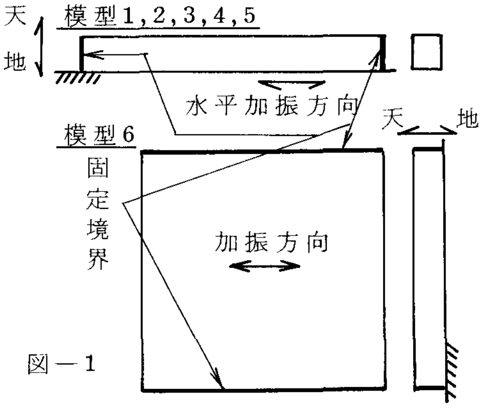
振動モードを明瞭に検出する目的で模型には固定境界が設けられている。（図－1）

使用した模型材料はアクリルアミドゲルであり、配合を調節することにより横波伝播速度を2～3 m/sec 程度にできるのでこの種の実験には都合がよい。　ポアソン比は0.5と考えることができる。　このような材料を用いて表層地盤模型を作り、アルミニューム板を基層として地盤模型を作成した。

模型を加振する方法としては上下動に着目した実験に対しては基層を水平加振する手法と模型の中心線に関して左右逆位相で上下加振する手法とを用いた。
実験実施の上では前者については模型を振動台上に搭載しこれを水平加振することとし、又、後者に対しては2ケの電磁式加振器を30 cm間隔で中心線に関し対

	横巾		厚		高さ（cm）
模型－1	120	×	8	×	6
2	120	×	8	×	4
3	60	×	8	×	8
4	60	×	8	×	6
5	60	×	4	×	6
6	60	×	60	×	6

表－1



図－1

称に設置して模型の自由表面上を点加振することにした。 水平動に着目した実験に対しては模型を振動台上にのせ基層を水平加振する手法を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 上下動に着目して実施した実験結果について

模型－5についてのみ左右逆位相で上下加振したが、得られた振動モードが明瞭に傾向を示しているので、それ等に関し略述する。 表－2、図－2及び写真－1に得られた結果の一部が示されているが、①9.8 Hz、②1 3.4 Hz では表層地盤の自由表面で上下動が僅かに認められただけで模型横断面上で水平動が卓越した。 水平動振巾は自由表面において最大でレベルが低くなるに伴い減少する。 ①9.8 Hz では水平動は同相であり、僅かに発生している上下動は中心線で逆位相となっており1波長分の定常波が自由表面附近で発生しているようである。

	f (Hz)	λ (cm)	v (m/sec)	v/v_s	λ/H
①	9.8 0	6 0	5.9	2.8	1 0
②	1 3.4	3 0	4.0	1.9	5.0
③	1 7.0	2 2.5	3.8	1.8	3.8
④	1 8.5	1 5	2.8	1.3	2.5
⑤	2 1.0	1 2	2.5	1.2	2.0
⑥	2 2.7	1 0	2.3	1.1	1.7
⑦	2 2.5	8.5	2.2	1.0	1.4
⑧	2 7.9	7.5	2.1	1.0	1.3

f：加振振動数、λ：波長　v：位相速度

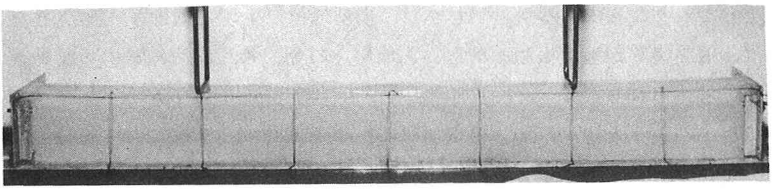
v_s：横波速度（2.1 1 m／sec）H：地盤高さ（6 cm）

表 － 2

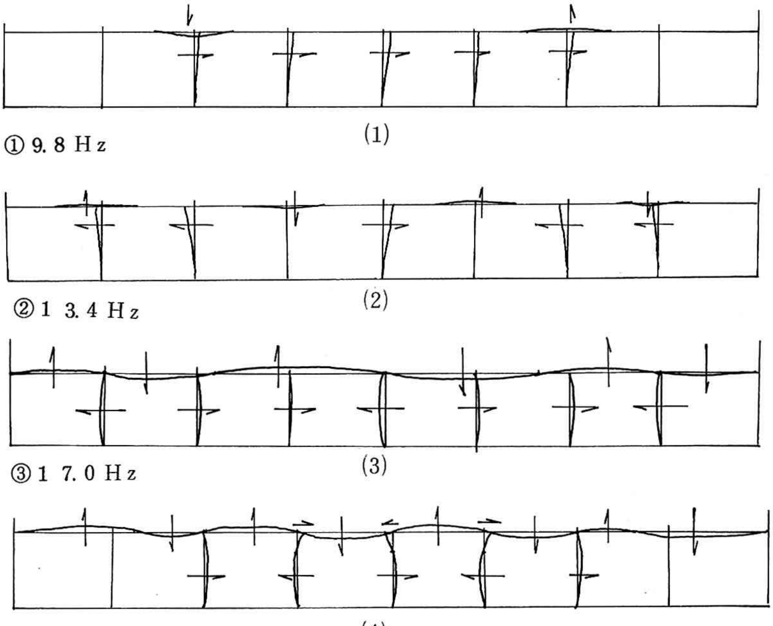
②1 3.4 Hz では水平動は図－2に示されるような位相の状況を呈していて、あたかも水平方向に2波長の定常波が発生しているようである。

③1 7.0 Hz になると表層地盤表面における上下動が顕著になり水平方向に3波長分の定常波が発生するようになる。 又、水平動振巾は表層地盤表面のものよりも中位レベルのものの方が大きくなる。 以下、加振振動数を増加するに伴い上下動の節の数が増加してゆく。

④1 8.5 Hz では水平動振巾に節が生じて、表層地盤表面と中位レベルとでは互に逆位相となる。 この振動モードは①9.8 Hz ②1 3.4 Hzにおけるものとは異質のものである。 更に加振振動数を増加してゆくと水平動振巾は認めにくくなる。



③1 7.0 Hz　　写真－1



①9.8 Hz (1)

②1 3.4 Hz (2)

③1 7.0 Hz (3)

④1 8.5 Hz (4)

図－2

なお、振動台上で水平加振した場合にも、振動モードについてほぼ同様な傾向が把握できるが、模型横断面上に生ずる水平動振巾は前述の上下加振の場合に比べ明瞭な把握がしにくくなる。

表－2．に示される通り、上下加振した場合の実験結果について定常波と認められるものの波長λを測定して求め、加振振動数 f との積より定常数の位相速度 v を得て位相速度と横波伝播速度 v_s との比（v/v_s）を定めていった。 λと地盤高さHとの比（λ/H）が増加するに伴い（v/v_s）が増加することが分り、分散性を呈していることが理解できる。

図－3.には表－2 に示された結果が表わされており図中の番号は表－2 のものと対応している。

他の模型についての実験結果も同様な整理をした後図－3.に併記されている。本結果の検討のために 2 層地盤を進行するRayleigh波の基本モードの分散曲線を図－3.中に描いた。 本実験の場合、基層の横波伝播速度を無限大とし、又、ポアソン比の関係から表層地盤の縦波伝播速度を無限大として分散曲線が求められている。

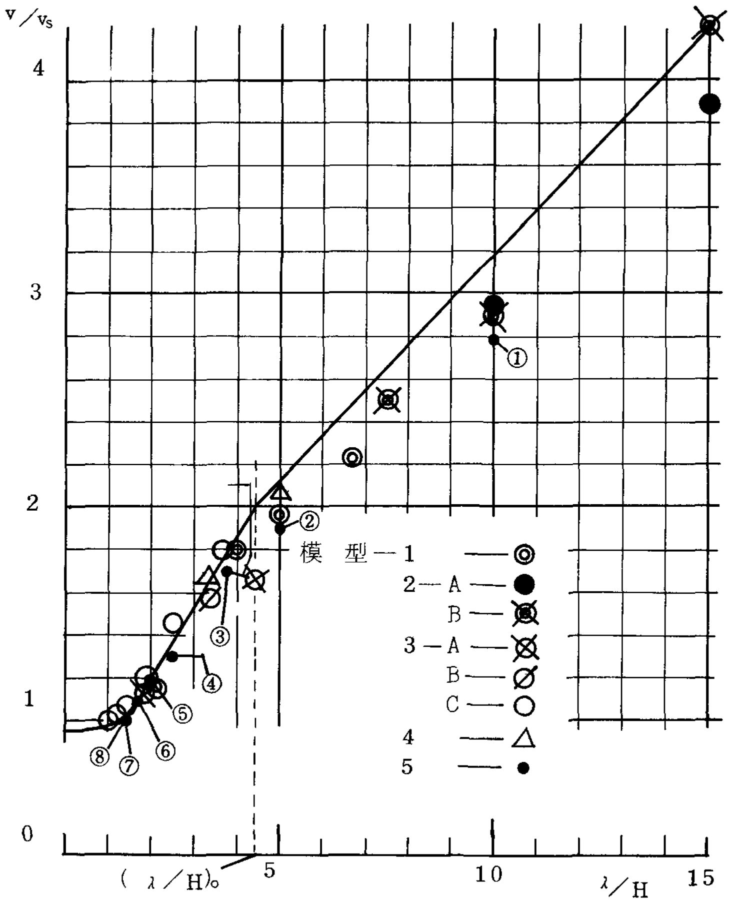


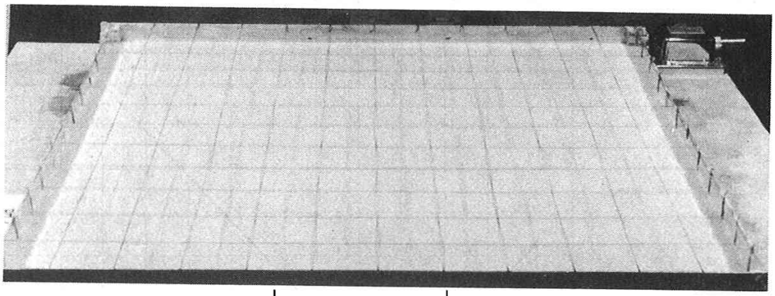
図 － 3

妹沢・金井(2)は 2 層地盤内を進行するRayleigh 波の変位状況について検討を加えている。 それによると基本モードとその次の次数のモードとの分散曲線を接する（λ/H）の値〔以下（$\lambda/H)_0$ とする〕を境目にして、（$\lambda/H)_0$より大きい（λ/H）では図－2－1 に示されるように水平動が横断面上にわたり同位相であるが、（$\lambda/H)_0$より小さい（λ/H）では図－2－4 に示されるように水平動振巾に節が生じている。 本実験結果は全くその状況と合致しており分散曲線が実験結果をほぼ説明していることを併せ考えると、本実験で得られた振動モードはRayleigh波に基づくものであろうと推定される。

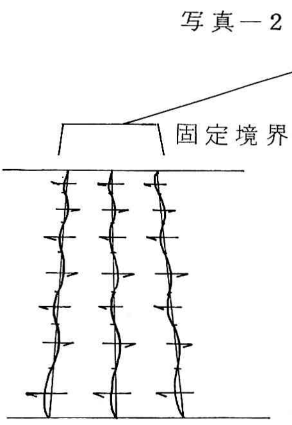
3.2　水平動に着目して実施した実験結果について

写真－2 の例は水平動に着目して実施した実験の結果の一例で、同写真の説明図にても示される通り、3.5 波長の定常波と解される振動モードが模型中央部に発生している。 加振振動数を増加してゆくと 3.1 の場合と同様に波の数が増加してゆく。 ただし、振動モードは模型全体にわたり一様でない場合が多く、加振振動数によっては模型端部で写真－2に示すと同様な振動モードが生じて模型中央部では振動モードの発生していない場合もある。 又、本実験例では、水平動のみが検出されている場合は少なく、多くの振動モードでは 3.1 に述べたと同様Rayleigh波に基づくと思われる上下動の発生を伴っている場合が多い。

詳細な検討は今後に行うとして、3.1において行ったと同様に水平動について波長λを求め、加振振動数fとの相乗積より位相速度vを算定し、λと地盤高さHとの比(λ/H)に対するvと横波伝播速度v_sとの比(v/v_s)の値を求めると図－4に示す通りとなる。 検討のためにLove波の分散曲線を併記する。 分散曲線は実験結果をほぼ説明していると考えられ、本実験例で定常波として検出される水平動はLove波によるものと推定される。



写真－2



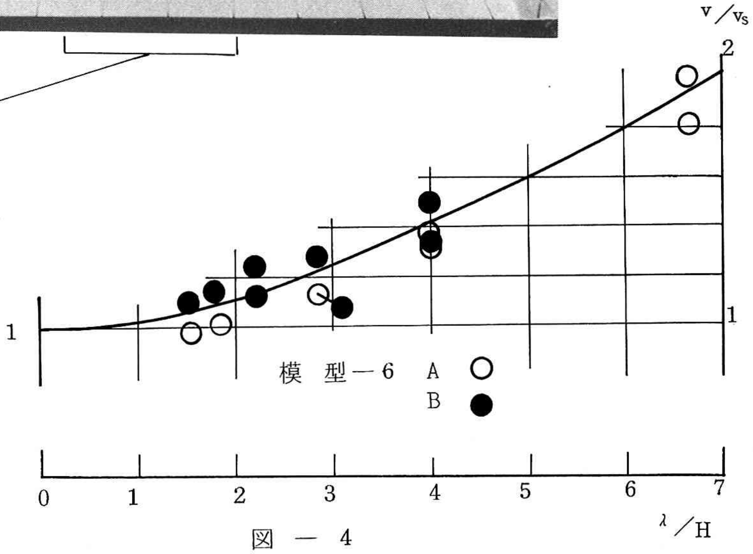


図 － 4

4. 結び

本研究に用いた模型地盤に発生する振動モードのうち、表層地盤の自由表面に発生する上下動は基本モードのRayleigh波に、又、水平動はLove波に基づくものであると考えられる。 なお、高次モードのRayleigh波に関しては、本文執筆時ではその痕跡を認めることができなかった。 終りに、共に実験を行った学生諸君に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

(1) T.Terada, C.Tsuboi :Experimenfal Studies on Elastic Waves (part 1)
Bull.Earthq.Res.Inst.3. 55-66,1927

C.Tsuboi :Experimental Studies on Elastic Waves (part 2)
Bull.Earthq.Res.Inst。4. 9—2υ.1928

(2) K.Sesawa, K.Kanai :Discontinuity in the Dispersion Curves of Rayleigh Waves.
Bull.Earthq.Res.Inst. 13.237-244,1935