

パルス状入力による応答を用いた 模型実験弾性層に対する波動解析法

森地重暉¹・川名太²・油井道彦³

¹正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²正会員 博士(工学) 東京理科大学助手 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

³学生員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

波動模型実験を試行するにあたり、任意波形を模型に入力することが困難な場合がある。このような場合、パルス状の波形に対する模型の応答が得られれば、実験結果を算定で重ね合わせることにより任意波形に対する波動現象の解明が可能になると考えられる。

本文では、このような方法の可能性を以下のように例証した。剛基層上の弾性層にSH波状の半波長の正弦波を入力し、模型各部での変位時刻歴を得た。結果は実体波の伝播で説明することができる。この記録を用いて複数回の正弦加振による各部での変位時刻歴を算定した。得られた結果は別途行った実験結果に酷似しており、模型各部に生じた波群はLove波の性状を示した。

Key Words : model experiment, Love wave, superposition of wave phenomena

1. はじめに

地盤内に生ずる波動現象の解明は、地震工学上だけでなく交通振動等の環境問題や微動を用いた地盤構造の調査に基本的課題である。解明の方法として、数値解析をはじめとする理論解析や実測等があり、それらの普及は著しい。その他の方法として模型実験法がある。前二者の普及を考慮すると、一層の進展が期待される。このような背景を考慮して、著者等は波動模型実験法の開発を行ってきた^{1), 2), 3)}。

実験の目的にもよるが、任意の入力に対する波動現象の生成を実験的に行うには、装置の面で困難なことがある。しかし、特別な装置を用いることなく実験を行って、波動現象の把握が可能になれば実験法の使用性が高まることになる。そのように考えて本文では、一例として剛基層上の弾性層にSH波状のパルスに似た入力をし、得られる実験結果を重ね合わせた算定結果を用いて波動現象を把握する一方法を試行した。

2. 実験計画及び実験方法

剛基層上の弾性層にSH波状のパルス波形を入力したとき、模型地盤表面に生じる変位の時刻歴を求めた。パルス状の変位は図-1(a)に示されているように、

半波の正弦波に似ており、継続時間は0.12秒とした。同図(b)には、この入力波形のフーリエスペクトルが示されている。このスペクトルは、バンド幅2.0HzのParzenウィンドウを用いて平滑化してある。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¹⁾。このゲルは他の模型材料に比べて横波速度が極端に小さいので、波動現象の速度の低減が可能になり現象の発生や記録などが容易になる。本実験に用いたものの横波速度は1.1m/sであった。

実験模型、波動発生装置、変位測定位置は図-2に示される通りである。加振は模型奥行き方向に行った。波動の発生には電磁式加振器を用いた。半波の正弦波の発生には通常の関数発振器を用いた。模型表面にアルミニウム角棒を圧着し、棒が模型奥行き方向に動くようにした。変位の測定は次のように行った。測定位置にストローを貼り付け、ストローの先端に白紙を付けて紙の変位をレーザー式変位計で測定した。サンプリング周波数は2000Hzとし、模型奥行き方向の変位を測定していった。

3. 実験結果と考察

図-3には、波動の発生点にパルスを加えた場合の各測定点に生ずる変位時刻歴の一例が示されている。こ

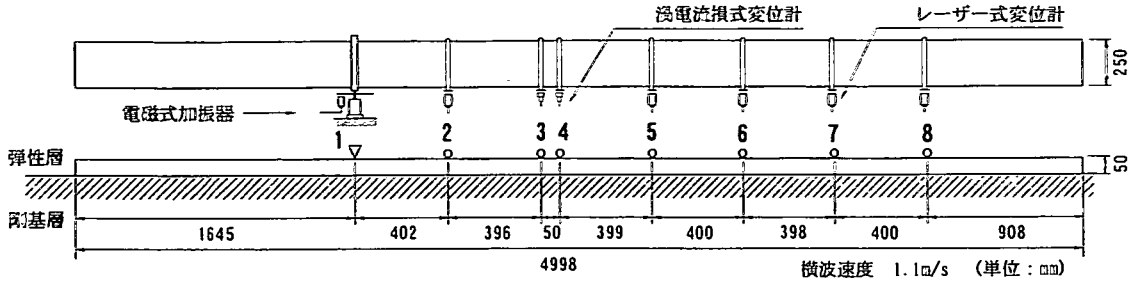


図-2 地盤模型図

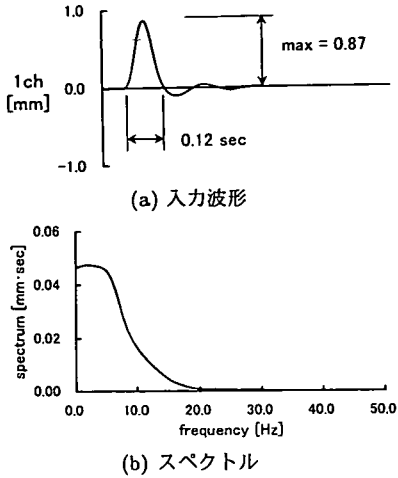


図-1 入力波形及び入力波のスペクトル

の時刻歴波形は、実験で得られた原波形からノイズと思われる高振動数成分をフーリエ逆変換を用いて除去したものである。各点の変位時刻歴をみると、ある瞬間に変位が発生し、次いで最大の振幅を示し、その後、変位振幅が減少していく状態を示すことがわかる。

図-3より、次のようなことがいえる。

- (a) 発生点において変位時刻歴が立ち上がる瞬間から横波が伝播し、各点に到達する時刻を波線理論より求め、図中に点線a-a'で示す。この比較より、各測定点の初動の変位は加振点から直接到達した横波により生じたものとする。
- (b) 各測定点で振幅が小さくなった後も一定の振動数で振動が持続している。
- (c) 各測定点で変位振幅の減少していく状況は、波動発生点に近い測点ほど早くなっている。

これらのことについて調査するために理論上の考察を行った。図-4に示されているように、半無限弾性体の表面の1点（ここでは座標原点）に力Pのパルスがyz面に生ずる+のせん断応力の方向に作用する場合、弾

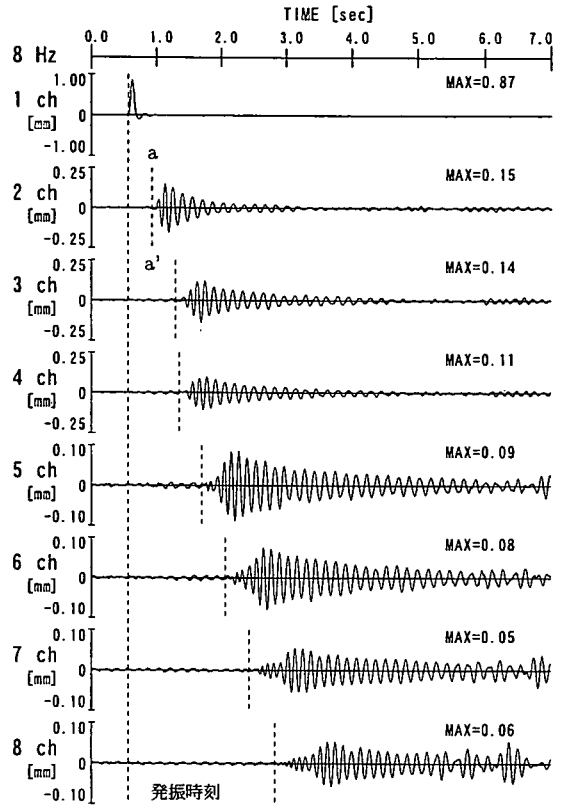


図-3 変位時刻歴

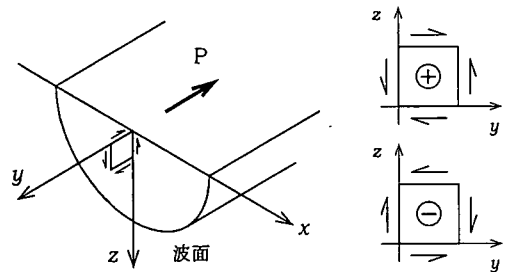


図-4 座標系

性体内に伝播する波動の y 方向の変位 v は以下の通りである^{4),5)}。次のように記号を定める。

$$\begin{cases} x, y, z, t & : \text{座標系, 時間} \\ v & : y \text{ 方向の変位} \\ c & : \text{横波速度} \\ \mu & : \text{せん断弾性係数} \\ H(\dots) & : \text{階段関数} \end{cases}$$

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}$$

v は次のようになる。

$$v(r, t) = -\frac{P}{\pi\mu\sqrt{c^2t^2 - r^2}} H(ct - r) \quad (1)$$

式(1)の意味するところは、次のようである。波動はパルスの作用点から円筒状に波面が広がってゆき、しかも波面上では同一の変位である。また、変位振幅は距離に逆比例する。

本実験例では、剛基層上の弾性層表面が波動の発生源になっている。式(1)は、半無限体のものであるが、本実験例では、上式の波動が剛基層や弾性層自由表面で反射すると考えればよい。図-5に示されているように、波動発生点を S 、変位測定点を R とすると、直達波は SR の経路をたどる。自由表面及び剛基層で入射波と等しい角度で反射波が生じるので、剛基層及び自由表面で弾性層を折り返した図をもとに波動の伝播経路を調べることができる。図-5では、 $a-a'$ 線が弾性層と剛基層の境界を表しており、この線で弾性層を折り返した場合の自由表面が $b-b'$ となる。さらにこの線で弾性層を折り返した場合の剛基層が $c-c'$ となっている。例えば、剛基層で1度反射し、 R に達する波動は $S1$ の経路になる。実際の経路は点線にて示されている。以下、 N を整数とすると剛基層で N 回反射し、自由表面で $(N-1)$ 回反射して R に達する波動の伝播経路は SN にて示されることになる。また、 $(+)$ 方向に入力したパルスは、 N が偶数のとき R での変位は $(+)$ に、 N が奇数のとき $(-)$ になる。振幅は距離に逆比例することを意味する式(1)と考え併せると、 R 点での変位の発生状況を調べることができる。例えば、波動発生点より継続時間0.12秒の半波の正弦波が進行して行く場合の変位時刻歴は図-6のようになる。測定点の位置は実験の場合と同様とし、2chに到達する直達波の振幅が1.00mmとなるようにしている。結果では、初動の部分が大きくなっているが、殆ど実験結果と類似している。なお、この解析では1chの振幅は与えることができない。そ

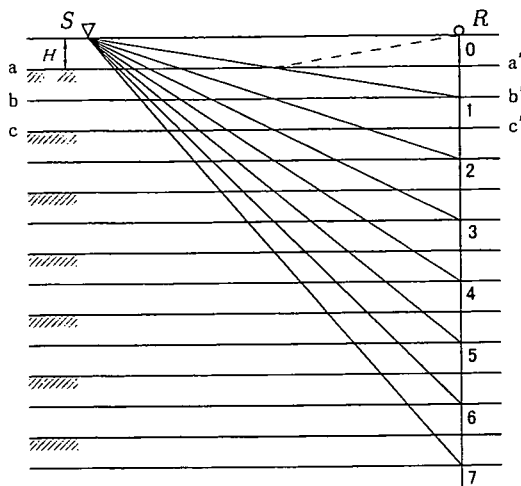


図-5 伝播経路

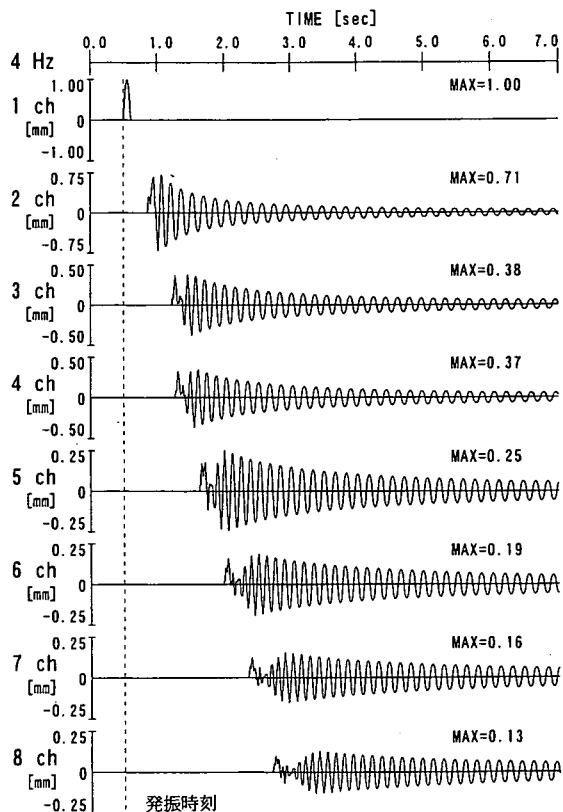


図-6 各測点での変位の発生状況

こで、波形を実験結果と同様にして、発振時に振幅を仮に1.00mmで示している。

図-5に示される整数番号を N とすると伝播経路 \overline{SN} は式(2)にて示される。 $\overline{SR} = L$ 、層厚を H とする。

$$\overline{SN} = L \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2NH}{L}\right)^2} \quad (2)$$

$\frac{2NH}{L} \gg 1$ と考える。すなわち、 N の値が大きい場合に相当する。 \overline{SN} は、 N に対するもので、 $\overline{SN} + \Delta\overline{SN}$ は $N+1$ に対するものとする。この場合には、 $\overline{SN} = 2NH$ と近似できる。また、 $\Delta\overline{SN} = 2H$ で、これは伝播経路

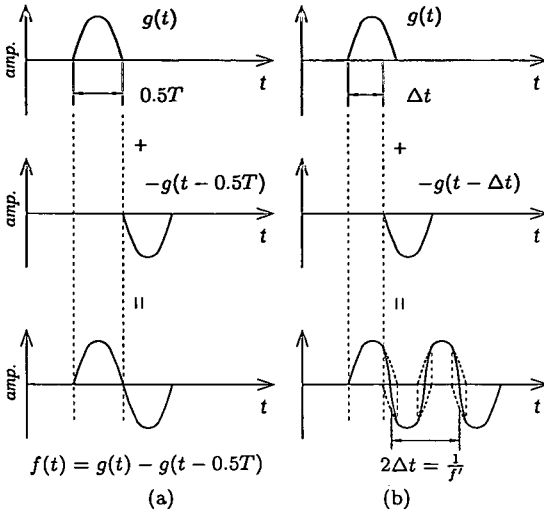


図-7 重ね合わせの手法

差で等差になっている。従って、このとき N 波と $N+1$ 波が逆位相で重なり合う振動数は $\frac{c}{4H}$ であり、これは表層のせん断一次振動数を示している。実験結果及び図-6の時刻歴の各測定点に生じている後揺れの振動数は、それぞれ 5.8Hz 並びに 5.5Hz となっている。実験模型の弾性層のせん断一次振動数は 5.5Hz であるので、前出 (b) を説明するものといえる。

変位振幅の減少率は式 (3) に示すようである。

$$\frac{\overline{SN}}{\overline{SN} + \Delta\overline{SN}} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2NH}{L}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2(N+1)H}{L}\right)^2}} \quad (3)$$

上式で、 N を固定して $\frac{H}{L}$ の大小が振幅の減少率に及ぼす影響を調べる。 $\frac{H}{L}$ が 0 に近づくとき、即ち波動の発生点と測定点が遠くになると振幅比は 1 に近づく。よって、波動発生点に近い測定点ほど振幅の減少が早くなる。このことは前出 (c) を説明している。以上より、前出の (a) と考え併せると、図-3 の結果は、剛基層と自由表面で反射を繰り返して弾性層内を伝播する実体波に起因すると考えられる。

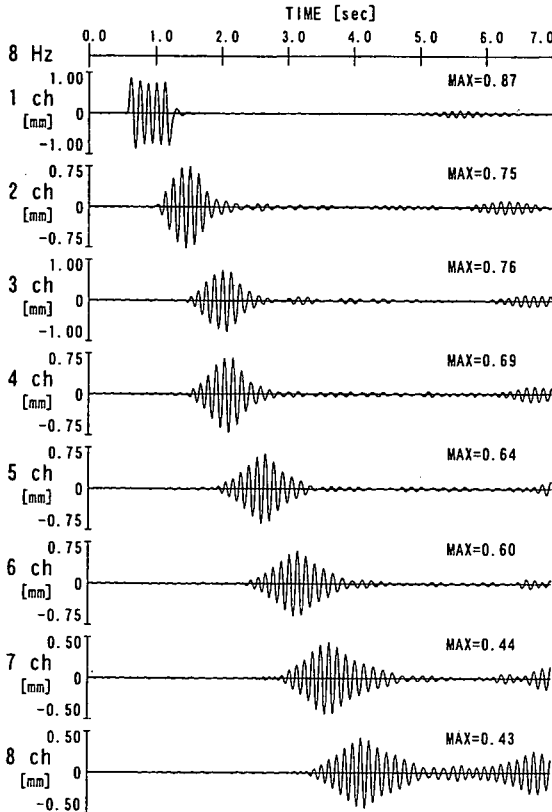


図-8 変位時刻歴 (重ね合わせ結果)

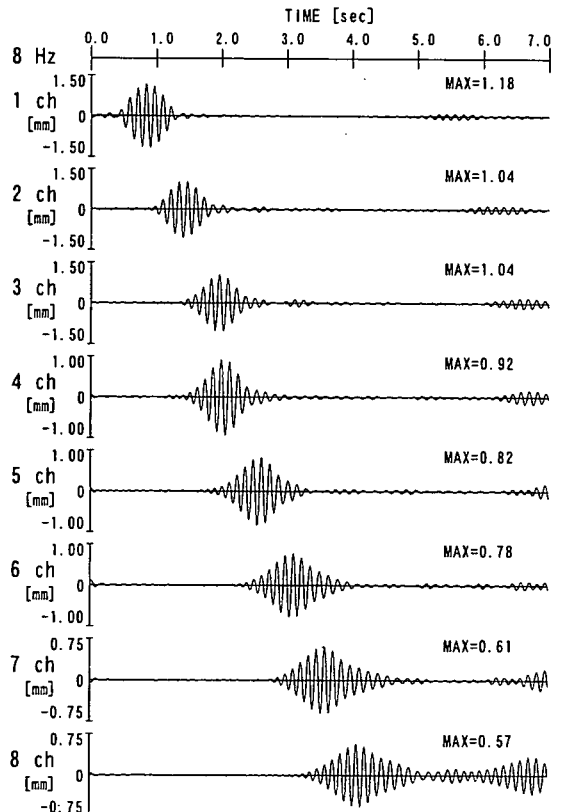


図-9 変位時刻歴 (実験結果)

4. 重ね合わせの方法と算定結果についての考察

前述の通り、地盤模型内にパルス波形に似た変位波形を入力すると、測定点で得られる変位時刻歴は実体波に起因すると考えられる。本章では、複数回の正弦加振により生ずる波動現象を前出の実験結果の重ね合わせで説明することを試みた。

図-7(a)に示される方法で実験結果を重ね合わせた。加振の周期を T とする。0.5 波で加振した場合の変位時

刻歴を $g(t)$ とすると、1 波のときの時刻歴を求めるには、 $g(t)$ の時刻を $0.5T$ だけ正の方向にずらし、マイナスをかけた波形をもとの $g(t)$ と足し合わせればよい。すなわち、1 波の場合の時刻歴 $f(t)$ は $f(t) = g(t) - g(t - 0.5T)$ であらわすことができる。同様な計算操作を繰り返すことで加振が 5 波の場合の時刻歴を求めた。また、図-7(b)に示されているように、加振の振動数を変更した場合の変位時刻歴を求めるためには、目的とする振動数を f' とすると、時刻 $\Delta t = \frac{1}{2f'}$ だけずらして前出と同様な操作を行えばよい。

上述の方法を用いて、加振振動数が 4.0~18.0Hz の場合の変位時刻歴を 1.0Hz 刻みで振動数を変更して算出した。得られた時刻歴の一例が図-8に示されている。図-3に示される半波で加振した場合の実験結果の重ね合わせであり、振動数は 8.0Hz である。明らかに図-3のものとは様子が異なっている。発振点での入力に伴い、各測定点に順次、波群が伝播していく様子がわかる。また、7ch, 8ch には反射波も確認できる。

図-9には、図-2の地盤模型を用いて実際に 5 波の正弦加振を行った場合の実験結果が示されている。加振振動数は 8.0Hz とし、他の実験条件は同様である。この時刻歴波形は、解析上妥当と思われる振動数領域を考慮して、加振振動数を中心とする前後 2.0Hz の帯域フィルターを用いて逆変換したものである。図-8の算定結果と酷似していることが分かる。このような酷似は、他の振動数についても同様であった。

重ね合わせで得られた波群の伝播性状を調べるために位相速度と群速度を算出した。図-10に示されているように、位相速度は隣り合った測定点の結果より、対応する位相の時間差 Δt と測点間距離 ΔL を用いて算出している。群速度の算出には比較的離れた測定点で

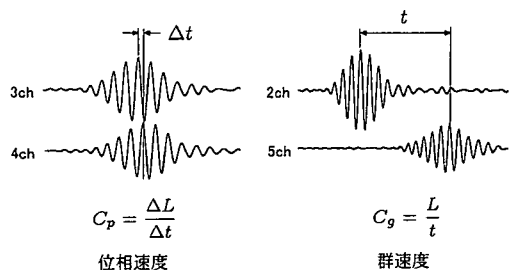


図-10 位相速度と群速度の算定方法

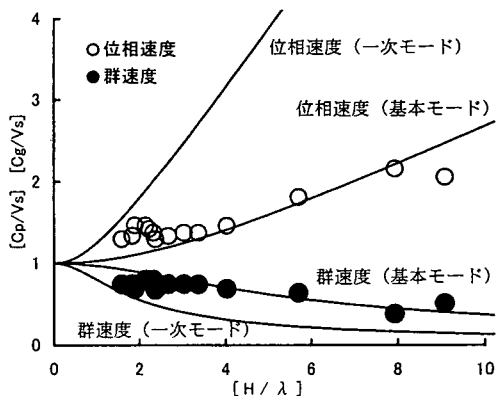
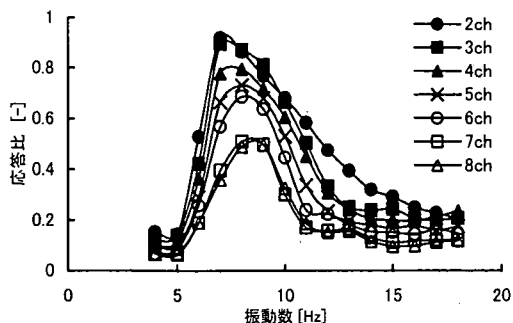
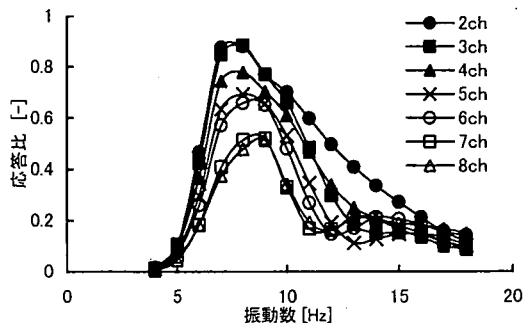


図-11 位相速度と群速度の算定結果



(a) 重ね合わせの結果



(b) 実験結果

図-12 応答倍率

の波群のピークの時間差 t と測点間距離 L を用いている。得られた振動数毎の結果が図-11に示されている。横軸には、波長(λ)を層厚(H)で除したものが、縦軸には、位相速度(C_p)、群速度(C_g)をそれぞれ表層の横波速度(V_s)で除したものが示されている。また、図中には、剛基層上の弾性層内を伝播するLove波の理論分散曲線が併記されている。このような計算操作で得られた結果はLove波の性状を呈しているといえる。なお、実験的に得られた結果についても同様な性状を示すことが既報^{6),7)}に示されている。

また、加振の最大振幅で各測定点の最大振幅を除いた応答倍率を加振振動数毎に求めていった。重ね合わせによる結果が図-12(a)に示されている。図-12(b)には、実験的に複数回加振した場合の結果が示されている。倍率が卓越するときの振動数並びに応答倍率は、互いによい一致を示している。以上より、重ね合わせで得られた算定結果は、実験結果と酷似しているといえる。

5. 結び

模型にパルス状の変位波形を入力して得られた実験結果を用いて、それらを重ね合わせることで波動現象を解明する方法の有用性について例題を用いて調査した。

剛基層上の弾性層にSH波状の半波長の正弦波を入力して、模型各部の変位時刻歴を求めると、それらが実

体波の伝播状況から説明できることが確認された。この結果を用いて、重ね合わせを行い、種々の振動数で複数回の正弦加振をした場合の模型各部の変位時刻歴を算出した。算定結果には、パルス状の入力によるものとまるで異なり、明瞭な波群が確認された。また、それらはLove波の性状を呈しており、複数回の加振による実験結果と酷似していた。以上の例題の結果より、本方法の有用性が部分的には示されたと考える。

参考文献

- 1) 森地重暉, 田村重四郎:ゲル状材料を用いた動力学模型実験解析の一方法について, 土木学会論文報告集, No.310, pp.33~44, 1981.
- 2) 森地重暉, 江口和人:地盤内の波動伝播問題に対するゲル状材料を用いた一模型実験方法, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.197~206, 1994.
- 3) 森地重暉, 川名太:地盤の不整形性に起因する波動現象に対する一模型実験法, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.71~80, 2001.
- 4) Achenbach, J. D. *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland Publishing Company, 1975. ISBN 0 7204 0325 1
- 5) Keiiti Aki, Paul G. Richards: *QUANTITATIVE SEISMOLOGY Theory and Methods* Vol.1, W. H. Freeman and Company, 1980. ISBN 0 7167 1058 7(v.1)
- 6) 森地重暉, 川名太:剛基層上の弾性層内を伝播するLove波に対する波線理論的の一考察, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.421~426, 2001.
- 7) 川名太, 森地重暉:不整形部を持つ模型地盤内の波動現象に対する一考察, 構造工学論文集, No.74A, pp.517~528, 2001.

(2002. 7. 30 受付)

AN ANALYTICAL METHOD FOR WAVE PHENOMENA INDUCED IN AN ELASTIC LAYER BY CALCULATING TIME-SHIFTED SUPERPOSITION OF RESPONSE DUE TO IMPULSE-LIKE INPUT TO AN EXPERIMENTAL MODEL

Shigeaki MORICHI, Futoshi KAWANA and Michihiko YUI

In conducting model wave experiments, there are occasionally technical problems of exciting apparatus when a model is subjected to arbitrary-type input. In such a case, wave phenomena of a model can be obtained simply by calculating the superposition of responses caused by an impulse. In this study, the accuracy of such a method was estimated as follows. Displacement time histories of an elastic layer model were measured when a half-wavelength impulse type input was applied. Time histories for several sinusoidal inputs were then calculated by the proposed method, and were compared with those obtained experimentally. The good agreement between the results indicated the validity of this method.