

**地盤を伝播するラブ波の  
より実用的な数値解析手法**  
A MORE PRACTICAL TECHNIQUE OF NUMERICAL ANALYSES  
FOR LOVE WAVES PROPAGATING IN GROUND

年縄 巧\* 蓮見有敏\*\* 大町達夫\*\*\*

by Takumi TOSHINAWA, Aritoshi HASUMI and Tatsuo OHMACHI

With developement of electronic computer, many numerical analyses using FEM have been proposed to simulate earthquake motions on many types of ground. However, it still be difficult to simulate observed seismograms, because such analyses require many degrees of freedom when real ground is idealized as combination of mass and spring. For this reason, we have developed a practical numerical analysis procedure which reduces degrees of freedom by using eigen functions of surface waves as interpolation functions. Here, the numerical results by this procedure were compared with theoretical, experimental or other analytical ones, and it was confirmed that our proposed procedure is much applicable to evaluate earthquake motions on ground.

## 1. はじめに

日本の大都市あるいはメキシコ市のように軟弱な堆積平野上に位置している地域では平野端部で発生した表面波が堆積層内で成長し、しばしば周期の長く振幅の大きい地震動が観測される<sup>1)</sup>。近年大規模な石油タンクや超高層ビルなどの固有周期の長い構造物が数多く建設されるに従ってこのような表面波動は地震工学上さらに重要視されつつある。このような背景に伴って最近FEMやBEMのような数値解析技法を用いてこの種の波動の解析を試みている研究が数多く行なわれている<sup>2), 3)</sup>が電子計算機の記憶容量や実行能力の制約で地震工学上実用的な解析手法が確立されているとは言えないのが現状である。最近では計算機の負担を軽減するためにモデル化する地盤系の自由度を節約するような解析手法も紹介されている<sup>4)</sup>。筆者等も自由度を減らし、精度を落とさず、なおかつ実在する地盤をモデル化しうる数値解析手法を開発することを目的とし、表面波のうちとくにラブ波を対象とする有限要素技法を提案し、長野県西部地震における神奈川県長津田、横浜で観測された地震動をシミュレーションし、ほぼ満足のいく結果を得た<sup>5)</sup>。しかしながらこの手法では質量マトリクスとして consistent matrix を用いており、応答解析にはモーダルアナリシスを採用している等、地震動の数値解析手法としては若干の不满を残していた。そこで本稿では質量マトリクスを consistent matrix から lumped matrix に代え、解析精度がどの程度変化するかを簡単な成層モデル地盤

\* 工修 東京工業大学助手 総合理工学研究科 (〒227 横浜市緑区長津田町4259番地)

\*\* 工学 同 大学院生

\*\*\* 工博 同 教授

の固有値解を求め、理論的に求められる解を基準にして詳細に調べる。また基盤が傾斜しているような地盤に対する適用性をも見るために筆者等が以前に行なった模型傾斜地盤の波動伝播実験<sup>6)</sup>のシミュレーション解析を直接積分を用いて行い、実験結果や従来から用いられているFEMによる解析結果と比較する。固有値解析、シミュレーション解析いずれでも演算時間を計測し、lumped mass matrix を用いた新しい手法の有用性を明示する。

## 2. 解析手法の概要

図2-1(a)のような傾斜した剛基層を持つ2層地盤を考える。座標軸を図のようにとりx方向を伝わるラブ波を扱うものとする。今、考えるべき変位はy方向のせん断変形によるもののみである。この地盤を図のようにx軸に垂直に要素分割すると断面i, jで区切られた一要素は図2-1(b)のようになる(以下この要素を台形要素と呼ぶ)。この台形要素内のy方向変位 $v(x, z)$ は自由表面上での節点変位 $v_i, v_j$ とz軸に沿った変位関数との積で表わされるとすると節点i, jのx座標 $x_i, x_j$ を用いて

$$v(x, z) = \frac{f(x, z)}{x_j - x_i} x$$

$$\begin{bmatrix} x_j - x & x - x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix}$$

と表わされる。ここで $f(x, z)$ は対象とする波動が表面波であるので地表面で1, 基盤面で0となるような関数である。式(1)を次のように書く。

$$v(x, z) = \mathbf{L} \mathbf{v} \quad (1)'$$

ただし、

$$\mathbf{L} = \frac{f(x, z)}{x_j - x_i} \begin{bmatrix} x_j - x & x - x_i \end{bmatrix}, \quad (2-1)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

である。

またこの要素内のy方向変位にともなうせん断ひずみ( $\gamma_{xy}, \gamma_{zy}$ )は次のように表わせる。

$$\begin{bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{zy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial v / \partial x \\ \partial v / \partial z \end{bmatrix} = \frac{1}{x_j - x_i} \begin{bmatrix} -f + (x_j - x)f_x & f + (x - x_i)f_x \\ (x_j - x)f_z & (x - x_i)f_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)を次のように書く。

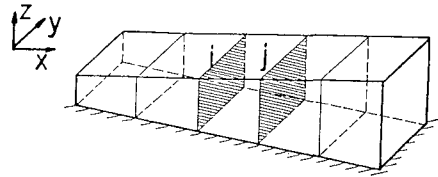


図2-1(a) 剛基礎上の有限要素モデル

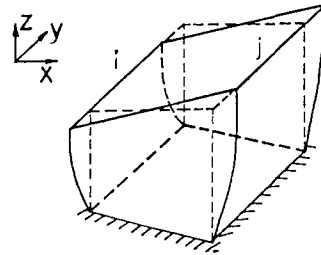


図2-1(b) 断面i, jで区切られた台形要素

$$\gamma = Bv \quad (3)'$$

ここに

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{zy} \end{bmatrix}, \quad (4-1)$$

$$B = \frac{1}{x_j - x_i} \begin{bmatrix} -f + (x_j - x)f_x & f + (x - x_i)f_x \\ (x_j - x)f_z & (x - x_i)f_z \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

であり、 $f_x$ 、 $f_z$ はそれぞれ $x$ 、 $z$ に関する偏微分 $\partial f / \partial x$ 、 $\partial f / \partial z$ を表わす。  
従ってせん断応力 $[\tau_{xy}, \tau_{zy}] = \tau^T$ は

$$\tau = D\gamma = DBv \quad (5)$$

となる。

$$\text{ただし } D = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad (6)$$

であり $G$ は表層地盤のせん断剛性率である。

よって仮想仕事の原理からこの台形要素の剛性マトリクス $k$ 、整合質量マトリクス $m_c$ は次のようになる。

$$k = \int_V B^T DB d(\text{vol}) \quad (7)$$

$$m_c = \int_V \rho L^T L d(\text{vol}) \quad (8)$$

上式の積分演算を施すと $k$ 、 $m_c$ の具体形は次のようになる。

$$k = \frac{G}{(x_j - x_i)^2} \begin{bmatrix} (I_1 + 2I_3 + I_4 + I_7) & & \\ -2x_j(I_2 + I_5 + I_8) & \text{sym.} & \\ +x_j^2(I_6 + I_9) & & \\ -\{ (I_1 + 2I_3 + I_4 + I_7) & (I_1 + 2I_3 + I_4 + I_7) \\ -(x_i + x_j)(I_2 + I_5 + I_8) & -2x_i(I_2 + I_5 + I_8) \\ +x_i x_j(I_6 + I_9) & \} & +x_i^2(I_6 + I_9) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$m_c = \frac{b\rho}{12}(x_j - x_i) \begin{bmatrix} 3z_i + z_j & \text{sym.} \\ z_i + z_j & z_i + 3z_j \end{bmatrix} \int_0^1 F^2 d\xi \quad (10)$$

ここに

$$I_1 = \int_V f^2 d(\text{vol}) = \frac{b}{2}(x_j - x_i)(z_i + z_j) \int_0^1 F^2 d\xi \quad (11-1)$$

$$I_2 = \int_V f f_{,i} d(\text{vol}) = -b(z_j - z_i) \int_0^1 F \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right) \cdot \xi d\xi \quad (11-2)$$

$$I_3 = \int_V x f f_{,i} d(\text{vol}) = -\frac{b}{2}(z_j - z_i)(x_j + x_i) \int_0^1 F \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right) \cdot \xi d\xi \quad (11-3)$$

$$I_4 = \int_V x^2 f_{,i} d(\text{vol}) = \frac{b}{2} \cdot G_1 \cdot \int_0^1 \xi^2 \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi \quad (11-4)$$

$$I_5 = \int_V x f_{,i} d(\text{vol}) = b \cdot \frac{(z_j - z_i)}{(x_j - x_i)} \cdot G_2 \cdot \int_0^1 \xi^2 \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi \quad (11-5)$$

$$I_6 = \int_V f_{,i} d(\text{vol}) = b \cdot \frac{(z_j - z_i)}{(x_j - x_i)} \cdot \ln \frac{z_j}{z_i} \cdot \int_0^1 \xi^2 \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi \quad (11-6)$$

$$I_7 = \int_V x^2 f_{,i} d(\text{vol}) = \begin{cases} \frac{b}{2} \cdot \frac{(x_j - x_i)^2}{(z_j - z_i)^2} \cdot G_1 \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i \neq z_j) \\ \frac{b}{3z_i} (x_j^3 - x_i^3) \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i = z_j) \end{cases} \quad \begin{matrix} (11-7-a) \\ (11-7-b) \end{matrix}$$

$$I_8 = \int_V x f_{,i} d(\text{vol}) = \begin{cases} b \cdot \frac{(x_j - x_i)}{(z_j - z_i)} \cdot G_2 \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i \neq z_j) \\ \frac{b}{2z_i} (x_j^2 - x_i^2) \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i = z_j) \end{cases} \quad \begin{matrix} (11-8-a) \\ (11-8-b) \end{matrix}$$

$$I_9 = \int_V f_{,i} d(\text{vol}) = \begin{cases} b \cdot \frac{(x_j - x_i)}{(z_j - z_i)} \cdot \ln \frac{z_j}{z_i} \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i \neq z_j) \\ \frac{b}{z_i} (x_j - x_i) \cdot \int_0^1 \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)^2 d\xi & (z_i = z_j) \end{cases} \quad \begin{matrix} (11-9-a) \\ (11-9-b) \end{matrix}$$

であり、また

$$G_1 = \begin{cases} (x_j z_j - 3x_j z_i + 3x_i z_j - x_i z_i) + \frac{2(x_i z_j - x_j z_i)^2}{(x_j - x_i)(z_j - z_i)} \ln \frac{z_j}{z_i} & (z_i \neq z_j) \\ 0 & (z_i = z_j) \end{cases} \quad (12-1)$$

$$G_2 = \begin{cases} (x_j - x_i) + \frac{(x_i z_j - x_j z_i)}{(z_j - z_i)} \ln \frac{z_j}{z_i} & (z_i \neq z_j) \\ 0 & (z_i = z_j) \end{cases} \quad (12-2)$$

である。

式中 $b$ は地盤幅、 $F(\xi)$ は $f(x, z)$ を $x$ にかかわらず( $z=0 \rightarrow \xi=0$ ,  $z=-H \rightarrow \xi=1$ ,  $H$ :層厚)となるよう基準化した関数であり $F(0)=1$ ,  $F(1)=0$ である。

ところで有限要素解析において質量マトリクスは consistent mass matrix よりも lumped mass matrix の方が好んで使われる。これは後者の方が前者よりも精度こそ落ちるが、それ以上に計算時間の短縮、記憶領域の節約等のメリットが大きいからである<sup>7)</sup>。本手法の目的もより広い地盤を対象とした数値解析にあるから consistent mass matrix  $m_C$  を参考にして lumped mass matrix  $m_L$  を次のように作製してみた。

$$m_L = \frac{b \cdot \rho}{16} (x_j - x_i) \begin{bmatrix} 3z_i + z_j & 0 \\ 0 & z_i + 3z_j \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで対角項は $m_L$ の対角項を用いており、係数は $z_i = z_j$ の時、節点質量が要素質量の1/4になるように決めた。

求めた要素マトリクスをすべての要素について重畳すれば、この地盤全体のマトリクス $M$ 、 $K$ が得られる。この $M$ 、 $K$ から、直接積分によって地盤の応答解析を行なう。以下、質量マトリクスとして consistent matrixを用いた解析をLovec, lumped matrixを用いた解析をLove1と呼ぶことにする。

### 3. 固有値計算の比較

2. で導いた $M$ 、 $K$ を用いて模型地盤の固有値解析を行いその精度を調べた。対象とした模型地盤は図3-1のように長さ $L=108\text{cm}$ 、厚さ $H=4.4\text{cm}$ 、せん断波速度 $V_s=3.0\text{m/s}$ 、密度 $1.01\text{t/m}^3$ の成層地盤であり、両端及び下端は固定されているものとする。この地盤を三角形要素内でひずみが一定である有限要素法(以下、Cmpと呼ぶ)、及びLovec, Love1によって固有値解析を行い、求められた固有周期 $T^*$ と理論的に求められた固有周期 $T_0$ の比 $T^*/T_0$ をとってその精度を比較した。但し、 $T_0$ は以下の式で表わせる。

$$T_0 = 4H/V_s \cdot \{(2m+1)^2 + (2nH/L)^2\}^{-0.5}$$

( $m$ :鉛直モードの次数, $n$ :水平モードの次数)  
要素分割はCmpにおいては 385 節点 648 要素(水平方向の節点間隔  $\Delta x = 2\text{cm}$ 、鉛直方向の節点隔  $\Delta z = H/6$ )、Lovec, Love1に

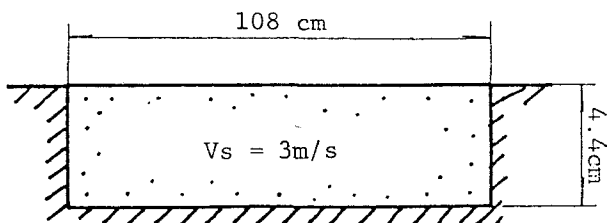


図3-1 固有値解析の対象にした地盤モデル

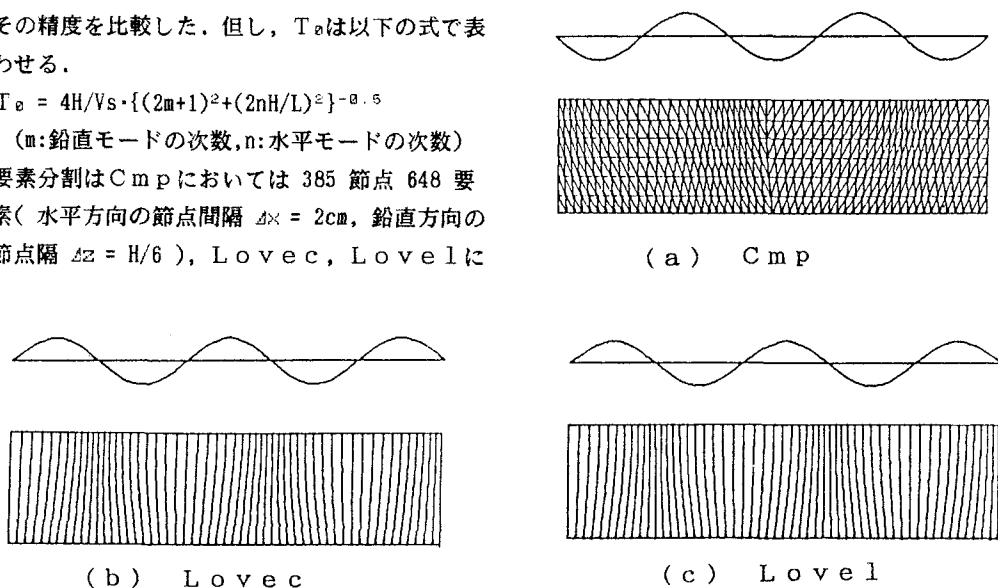


図3-2 各手法によって求められた固有ベクトルの一例

おいては 55節点 54要素( $\Delta x = 2\text{cm}$ )とした。また Lovec, Lovel の変位関数  $F(\xi)$  は下層が剛である場合のラブ波の基本モード( $m=0$ )の固有関数( $=\cos \pi \xi / 2$ )を用いた<sup>9)</sup>。固有値解析はハウスホルダー法によりマトリクスを3重対

表3-1 固有値解析における演算時間、記憶容量、自由度の比較

|                         | Cmp  | Lovec | Lovel |
|-------------------------|------|-------|-------|
| CPU time (sec)          | 5.57 | 1.77  | 0.50  |
| Program length (Kbytes) | 333  | 202   | 145   |
| 自由度                     | 318  | 53    | 53    |

角行列に変換し、バイセクション法、逆反復法によりそれぞれ固有値、固有ベクトルを求めた。図3-2にCmp, Lovec および Lovel によって求められた固有ベクトルの一例を示す。このモデル地盤の固有値及び固有ベクトルをHITAC M-280Hによりモード1~30まで求めた時の CPU time (sec) 及び, program length (bytes) を表3-1に示す。ここで program length の値は配列の取り方に関係しており、この値が大きい程、大きな計算機の記憶領域を必要とする。図3-3はこれら3つの手法による固有値解析結果の比較である。横軸は水平方向の波長 $\lambda_H$ を節点間隔 $\Delta x$ で除した $\lambda_H / \Delta x$ であり、縦軸は $T^* / T_0$ である。またここでいう $\lambda_H$ とは固有ベクトルを定常波とみなした時の波長であり、地盤長さ $L$ とモード次数 $n$ を用いれば、 $\lambda_H = 2L/n$ と表せる。

表3-1, 図3-3から次のようなことがわかる。

- どの解析結果も $\lambda_H / \Delta x$ が10以上であれば $T^* / T_0$ が1に近く理論値にほぼ一致しており、 $\lambda_H / \Delta x$ が小さくなるにつれて理論値から離れていく。
- $T^*$ の値はconsistent mass では $T_0$ より小さめ、lumped massでは $T_0$ より大きめとなる傾向は従来の知見<sup>9)</sup>と一致する。
- 3つの解析手法のうちLovecの解析結果が最も精度が良く、以下Cmp, Lovelの解析結果の順に精度が落ちていく。
- 最も精度の良くないLovelの解析結果でもその誤差は $\lambda_H / \Delta x = 10$ で高々3%程度である。
- Lovelによる解析のCPU timeはLovecによる解析の1/3以下、Cmpによる解析の1/10以下であり、またprogram lengthはLovecによる解析の3/4以下、Cmpによる解析の1/2以下である。

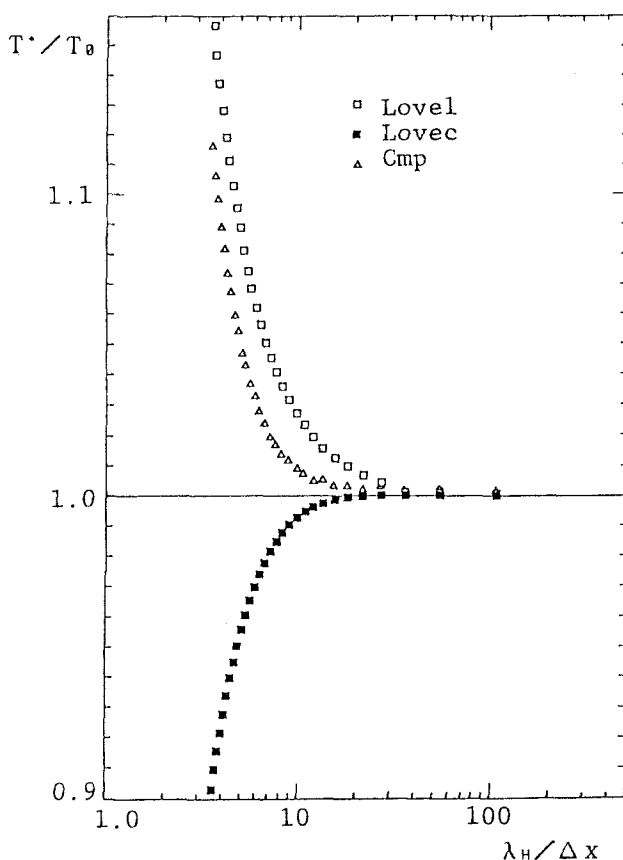


図3-3 各解析手法の精度

以上の解析結果から Love1 による解析は精度こそやや落ちるが、計算時間や計算機の記憶容量の点において他の2つの手法よりも実用的といえることができる。

#### 4. 傾斜模型地盤の波動実験のシミュレーション

3. で下層が剛な平行2層地盤においては Love1 は実用的に機能しうることが示されたが、より現実的な傾斜地盤でもこの手法が適用できるものかどうかはこの結果だけでは判断できない。そこでここでは一様に基盤が傾斜しているような地盤を対象にして更に検証をすすめていくことにした。傾斜地盤の固有値は理論的には求められないので検証には模型傾斜地盤の波動伝播実験<sup>6)</sup>の結果を用いることにした。

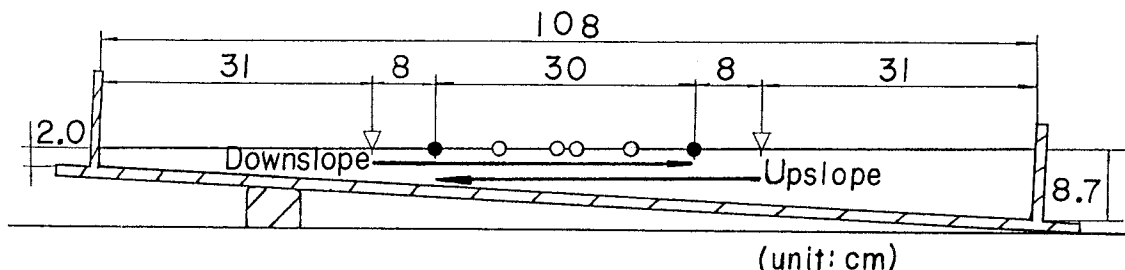


図4-1 実験に用いた傾斜模型地盤

実験に用いた模型地盤は図4-1のようにベニヤ板で囲われた浴槽状の型枠内に流し込んで固められたアクリルアミドゲルであり、型枠を図のように傾けて傾斜地盤を作製した。この地盤の大きさは長さ108cm、幅108cm、層厚が最も浅い左端で2cm、最も深い右端で8.7cmであり、基盤傾斜角は $3.5^\circ$ と、例えば東京西部での基盤の最大傾斜角 $2^\circ$ <sup>10)</sup>よりも大きい。実験は地盤表面上の一点(図中▽)に角材を押し当て、その木口を木鎚で叩いてSH波を発生させて行い、発生した波動の transverse 方向成分を模型地盤上の6点(図中○, ●)において小型の圧電式加速度計を用いて検出した。実験は地盤の左端から31cmの点を加振する場合と右端から31cmの点を加振する場合の2通りについて行い、発生した波動が浅い方から深い方へ、深い方か

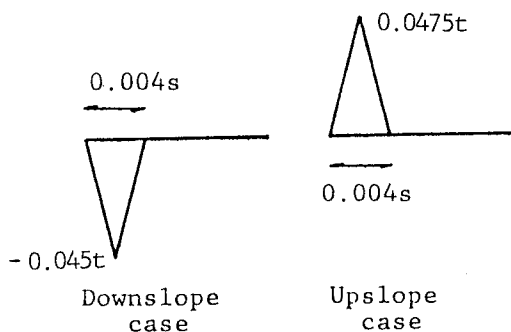


図4-2 シミュレーションの入力波として用いたblast load

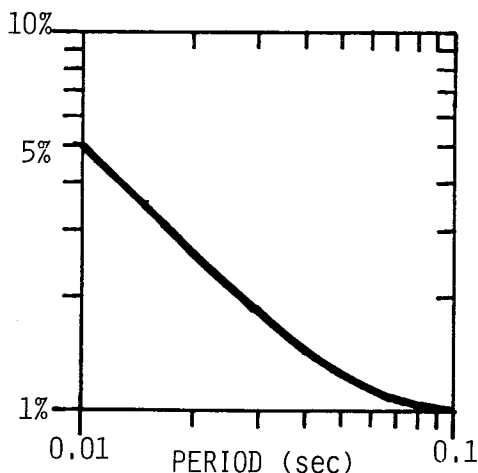


図4-3 シミュレーションに用いた減衰比(%)

ら浅い方へ伝播して行くということから、それぞれDownslope case, Upslope case と呼ぶことにした。尚、実験によって得られた波形の初動の到達時刻から媒質のS波速度を算定すると4.0m/sであった。

一方シミュレーションはCmp, Lovelの2つを用いて行い、要素分割はCmpにおいては $\Delta x=1\text{cm}$ ,  $\Delta z=H/6$ (763節点 1296要素 1175自由度), Lovelにおいては $\Delta x=1\text{cm}$ (109節点 108要素 107自由度)とした。実験時に加振点に作用させた外力は測定されていないのでここでは0.004秒以上の任意の周期成分を一様に含む図4-2のようなblast loadを加振力として与えた。尚、この入力波の振幅は後で述べるように加振点から8cmの点での観測波形とシミュレーション波形の卓越周期のスペクトル振幅が合うように決めた。シミュレーションに用いた減衰定数は、

- i) この媒質の材料減衰は明らかにはされていないもののそれほど大きなものではなく高々数パーセントである。
- ii) 観測波形のフーリエスペクトルを見ると振動数が大きく、その増加の割合は振動数比例よりは小さい。ということが推定されることから周期0.1秒で減衰比を1%とし、これを基準にして周期0.01秒で、振動数比例の量(10%)の半分の5%として図4-3のようなRayleigh dampingを与えた。タイムステップは三角形で要素分割した地盤モデルの最小固有周期0.0026秒を参考にして0.0005秒とし、応答解析は以下のような手順で各時刻、各節点での応答を求めた。
  - i) ある時刻の各節点での加速度の第0次近似を仮定する。
  - ii) 仮定した加速度と一つ前のtime stepの加速度、速度、変位からその時刻の速度、変位を線形加速度法により求める。
  - iii) 求められた速度、変位から各節点での加速度を求め、これを第1次近似の加速度とする。
  - iv) 第1次近似の加速度と第0次近似の加速度の差を各節点について求め、その最大値が0.01gal以下であれば第1次近似の加速度をその時刻での加速度とし、0.01galを越えた場合はi)~iii)を繰り返す。

またLovelによる解析では変位関数 $F(\xi)$ は下層が剛である場合のラブ波の基本モード( $m=0$ )の固有関数( $=\cos \pi \xi/2$ )を用いた場合の応答波形と1次モード( $m=1$ )の固有関数( $=\cos 3\pi \xi/2$ )を用いた場合の応答波形を足し合わせたものを全体の応答波形として計算した。

図4-4(a), (b)はそれぞれDownslope case, Upslope caseの実験結果、および計算結果であり、いずれも加振点から8cm, 38cmの点(図4-1中の●)での変位波形である。図中太い実線が実験結果、細い実線がCmpによる計算結果、細い破線がLovelによる計算結果であり、入力波から斜めに引いた直線は $V_s=4.0\text{m/s}$ から求めた各測定点でのS波の到達時刻を表わす。波形の後半部分は反射波が現れているので考察の対象から除くが、観測波形を見るとDownslope case, Upslope case いずれの場合も短周期成分が長周期成分よりも早く到達しているといういわゆる逆分散の傾向を示しており、2つの解析法によるシミュレーションでもこの傾向は再現できている。また図4-5(a), (b)はそれぞれの波形のフーリエスペクトルであり、縦軸は任意スケールとしている。図中▽, ●はそれぞれ加振点、観測点の層厚から1/4波長則によって求められた周期であり、観測された卓越周期はDownslope caseでは加振点での層厚から求められた周期に近く、またUpslope caseでは観測点層厚から求められた周期に近い。実験結果、シミュレーション結果の卓越周期が層厚から求められた周期よりも短いのは基盤が傾斜しているためと考えられる。加振点から8cmの点での卓越周期のスペクトル振幅は実験結果とシミュレーション結果が同程度となるように入力波の振幅を調整して揃えてあるのでこれを基準にして他のスペクトルを見るとシミュレーション波のスペクトル振幅は卓越周期付近ではやや大きめ、それよりも短い周期ではやや小さめとなる。従って周期0.04秒付近では減衰比はもう少し大きめ、0.03秒付近よりも短い周期では減衰比は小さめであったのかもしれない。しかしながら振幅レベルは全体的によく対応していると思われる。また卓越周期はUpslope caseの加振点から38cmの点を除き実験結果よりも長めとなっている。一般に半無限基盤の上に単一表層地盤がのっている2層地盤では、剛性比(基盤の剛性/表層の剛性)が小さくなると卓越周期は1/4波長則から計算される周期よりも短くな

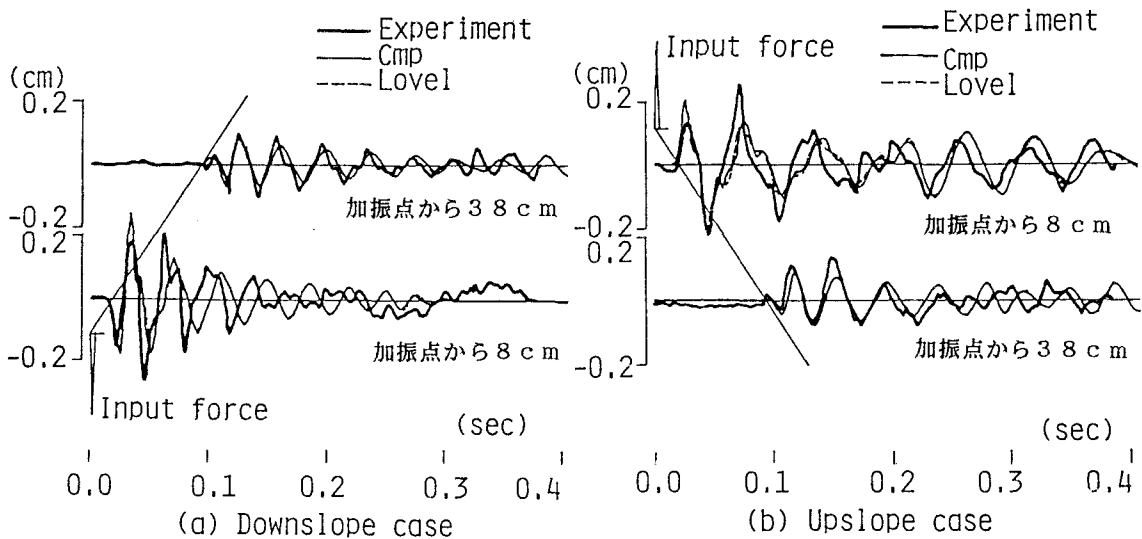


図 4-4 実験結果とシミュレーション結果の比較 (変位波形)

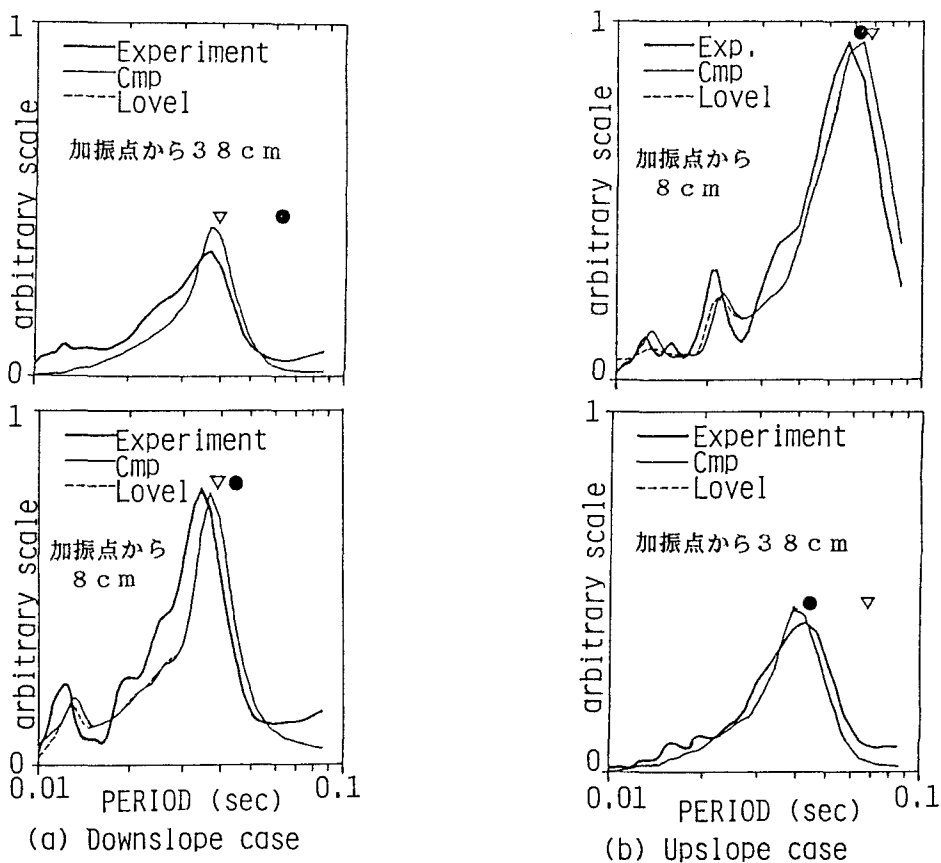


図 4-5 実験結果とシミュレーション結果の比較 (フーリエスペクトル)

る<sup>11)</sup>、シミュレーションでは基盤が剛、即ち剛性比を無限大として計算しているが、実験では剛性比が大きな値ではあるが有限であり従って卓越周期が短めになる傾向があるのであろう。表4-1は応答解析を0.5秒間行なった時のCmp, LovelのCPU time(sec)の比較であり、固有値解析の時と同様Lovelの解析時間はCmpの解析時間の1/10以下となっている。

表4-1 応答解析における演算時間の比較

|                | CPU time (sec) |       |
|----------------|----------------|-------|
|                | Cmp            | Lovel |
| Downslope case | 146            | 9.18  |
| Upslope case   | 130            | 8.76  |

以上の解析結果をまとめると次のようになる。

- i) 解析時間が大幅に短縮されたにも関わらずLovelによるシミュレーション解析はCmpによるものと大差がない。
- ii) 波が深い方から浅い方へ伝播する場合と浅い方から深い方へ伝播する場合で波形の性質が異なるという実験事実や、逆分散の傾向はLovelでもよくシミュレーションできている。
- iii) Lovelで対象とした波動はラブ波であるがCmpと同様に観測波形の初動をシミュレートしているという事実は”ラブ波の群速度は周期が短くなるにつれて表層のS波の速度に漸近する”という性質から説明できる。

これの結果から下層が剛で一般的に想定される勾配を有する傾斜地盤でのラブ波の伝播解析でもLovel本手法は十分適用でき、実用的であることがわかった。

## 5. むすび

ラブ波の固有関数を変位関数として用いて有限要素マトリクスを作成し、自由度を大幅に節約し得る地盤表面波の数値解析手法を考案し、これを更に簡便にした手法を紹介した。この手法を用いて平行層地盤及び傾斜地盤を対象にした固有値解析や応答解析を行い、理論解あるいは実験結果、及び従来の有限要素技法による解析結果と比較した。その結果平行層地盤、傾斜地盤いずれでも本手法が有効かつ実用的であることがわかった。本解析では下層が剛である2層地盤を伝播するラブ波を対象としたが、今後この手法を更に拡張して多層地盤を伝わるラブ波あるいはレイリー波を対象とする解析手法を開発する考えである。

## 参考文献

- 1) 佐間野隆憲, 山中浩明, 瀬尾和大, 地震記象にみられる深い地盤構造の影響 その3, やや長周期帯域における地震波の伝搬性状, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.37-38, 1985.
- 2) 大槻 明, 山原 浩, 春海佳三郎, レーリー波による不整形地盤の挙動, 土木学会論文報告集, 第337号, pp.27-36, 1983.
- 3) 谷實信, 久田嘉章, 山本俊六, 軟弱な堆積盆地における波動性状, 地震学会講演予稿集No.2, pp.109-112, 1987.
- 4) 河野泰直 他, 3次元動的FEMにおけるRitzベクトルを用いた自由度縮合法の適用性, 第42回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.992-993, 1987.
- 5) 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集, pp.331-336, 1986.
- 6) 蓮見有敏, 大町達夫, 年縄巧, 傾斜地盤の波動・振動特性, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.117-120, 1987.
- 7) 河島佑男, 動的応答解析, コンピューターによる構造工学講座Ⅱ-4A, pp.15-23, 1972.
- 8) 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.227-236, 1985.
- 9) 土岐憲三, 構造物の耐震解析, 新体系土木工学第11巻, pp.131-134, 1981.
- 10) 嶋悦三他, 東京の基盤構造その3, Bull. Earthq. Res. Inst. Vol. 53, pp.305-318, 1978.
- 11) 大町達夫, 森地重暉, 年縄巧, 粘弾性地盤を伝播するラブ波と等価せん断減衰振動について, 構造工学論文集Vol.32A, pp.661-668, 1986.

(1987年10月16日)