

(51) 広大な3次元地盤における表面波伝播の解析手法

東京工業大学 正員 ○ 年縄 巧
同 正員 大町達夫

1. はじめに

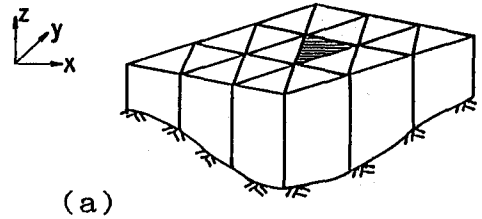
近年の電子計算機の進歩に伴い、有限要素法や境界要素法、差分法などの数値解析手法を用いた地震応答解析が盛んに行なわれるようになった。すでに2次元地盤においては、SH波場、P-SV波場において鉛直方向あるいは水平方向に不均質な媒質を有する地盤の応答性状が、多くの研究者によって解析されている。本来現実の地震動は、3次元的な広がりをもった媒質を伝播するものであり、観測される地震動も、3次元的な地下構造の影響を受けている。適切かつ現実的な地震動予測を行なうためには、3次元的な地形の変化が地震動に与える影響も考慮することが望ましい。

ところで広範囲の地域を対象とした地震動予測を行なうことの必要性は近年、マイクロゾーニング、都市の地震防災、ライフラインやウォーターフロントの耐震性などの観点から、ますます重要視されてきている。

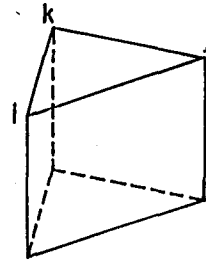
このような背景から、著者らは広大な3次元地盤を対象とした、地震動予測を簡便に行なう数値解析手法を開発している。ここではこの手法の概念を述べ、簡単な3次元地盤の固有値解析や衝撃応答解析の結果を紹介する。

2. 解析手法の概要

この方法では3次元地盤を図1(a)のように三角柱の有限要素で要素分割を行なう。節点*i*, *j*, *k*で区切られた一要素は図1(b)のようになる。自由度を節約するために要素内の*x*, *y*, *z*方向の変位u(*x*, *y*, *z*), *v*(*x*, *y*, *z*), *w*(*x*, *y*, *z*)は自由表面上の節点変位*U*, *V*, *W*と鉛直軸に沿った補間関数*f*(*z*), *g*(*z*), *h*(*z*)を用いて次のように表わす。



(a)



(b)

図1 3次元有限要素モデル

$$\begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(z) & 0 & 0 & xf(z) & 0 & 0 & yf(z) & 0 & 0 \\ 0 & g(z) & 0 & 0 & xg(z) & 0 & 0 & yg(z) & 0 \\ 0 & 0 & h(z) & 0 & 0 & xh(z) & 0 & 0 & yh(z) \end{bmatrix}$$

$$\times \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_j y_k - x_k y_j)I & (x_k y_i - x_i y_k)I & (x_i y_j - x_j y_i)I \\ (y_j - y_k)I & (y_k - y_i)I & (y_i - y_j)I \\ (x_k - x_j)I & (x_i - x_k)I & (x_j - x_i)I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ U_j \\ V_j \\ W_j \\ U_k \\ V_k \\ W_k \end{bmatrix}$$

ここに x, y は節点 i, j, k の絶対座標、 A は i, j, k で囲まれる三角形の面積、 I は 3×3 の単位行列である。要素内の変位が節点変位で表わされれば、後は通常の手順で剛性マトリクスを作成すればよい。質量マトリクスは解析を簡単に行なうために、要素の質量を $1/6$ にして各節点に分散させたランブトマスマトリクスを用いる。

ここで問題となるのは補間関数として、どのような形状の関数を選ぶべきかということである。表層と基盤とで構成される2層地盤を考えたとき、基盤が剛な場合、表層を伝わるラブ波の基本モードの固有関数は、表層厚さを H とすれば、 $\cos \pi z/2H$ で表わされる¹⁾。またこの表層のポアソン比が 0.25 の場合、この地盤を伝播するレイリー波の M_0 波のうち、波長が長い領域(層厚の 4.6 倍程度より長い波長領域)の固有関数は、水平動成分は $\cos \pi z/2H$ 、上下動成分は $\cos 3\pi z/2H$ とほぼ同じ形状をしている²⁾。そこで、補間関数 $f(z)$ 、 $g(z)$ 、 $h(z)$ として図2のような形状のものを選べば、任意の方向に伝わる基本モードのラブ波とレイリー波の伝播解析が行えると考えた。

3. 従来の有限要素法との固有値解析の比較

2.で述べた補間関数を用いて、図3のような簡単な3次元地盤の固有値解析を行なった。この地盤は厚さが 1km であり、四方および下端が固定されている。物性値は密度 1.9t/m^3 、せん断波速度 700m/s 、ポアソン比 0.25 である。比較のために、従来の3次元有限要素法を用いて同様の解析を行なった。固有値解析はモード1～20までの固有周期、固有ベクトルを求め、演算時間を計測した。図4(a)、(b)はそれぞれ従来の手法、本手法による固有値解析結果である。従来の手法では四面体要素を、本手法では三角柱要素を用いて有限要素分割を行なったが、解析結果の理解を容易にするため、直方体として図化してある。個々の節点変位に若干の相違はあるものの、地盤全体の動きをみれば、両手法による結果はよく対応しており、 y 方向、 x 方向の並進のモードの次に、ねじれのモードがあらわれ、続いて対角線方向の伸縮モードが出ている。固有周期は本手法の解析結果の方が3%～8%程度長い。

表1は、この解析における自由度と演算時間の比較である。従来の手法では、深さ方向に6分割して有限要素モデル化しているため、本手法のモデルの方が $1/6$ の自由度で済んでいる。また演算時間は約 $1/170$ までに短縮された。

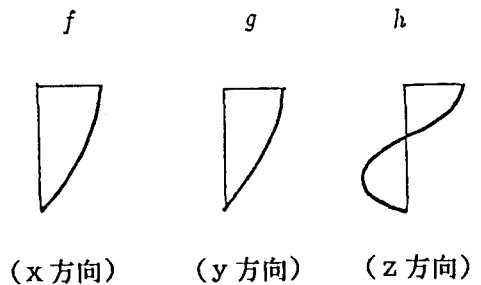


図2 補間関数の形状

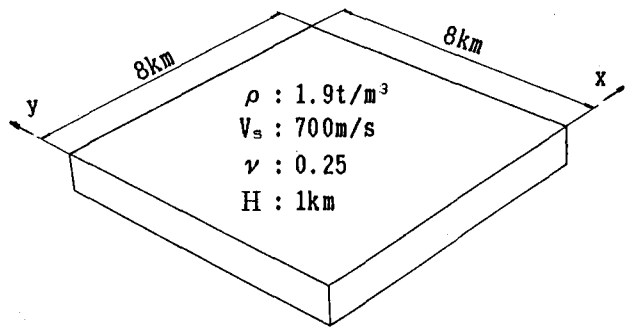
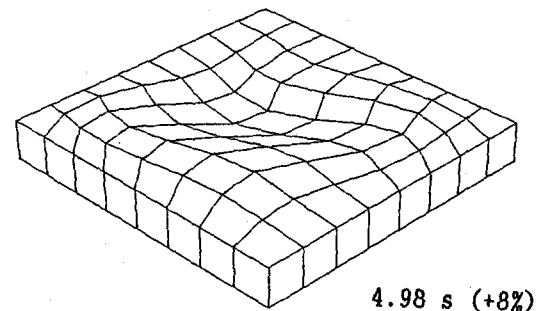
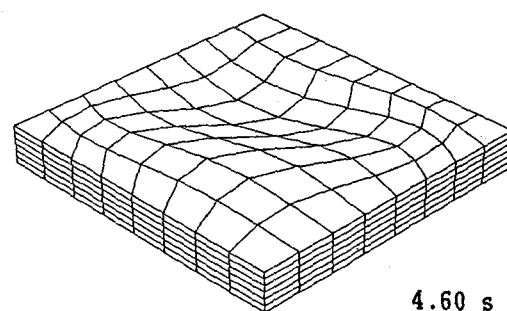
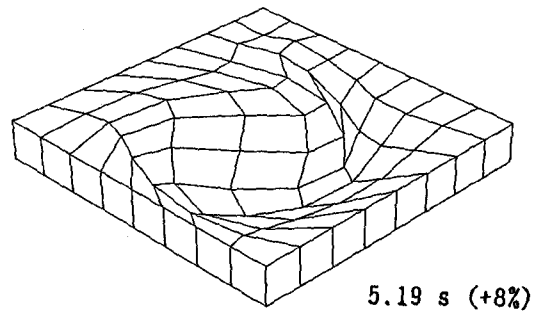
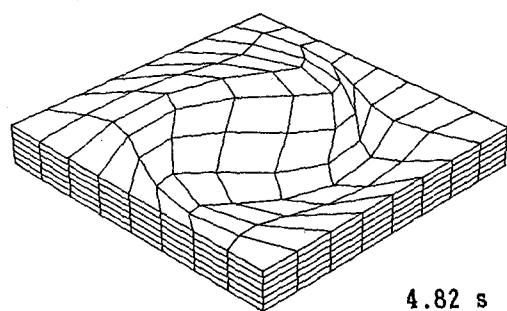
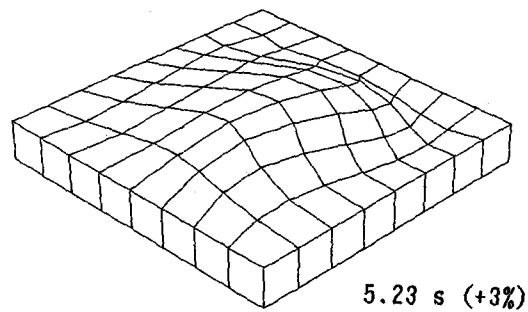
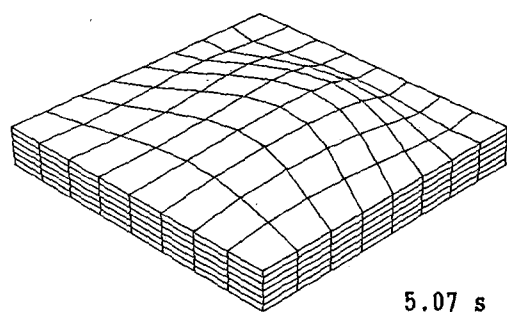
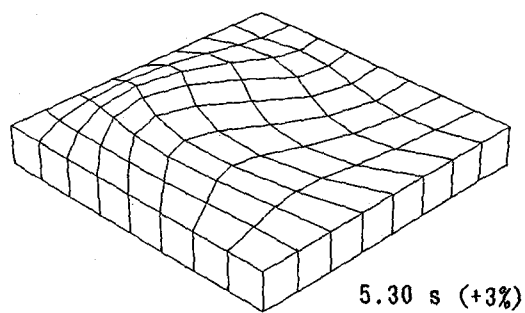
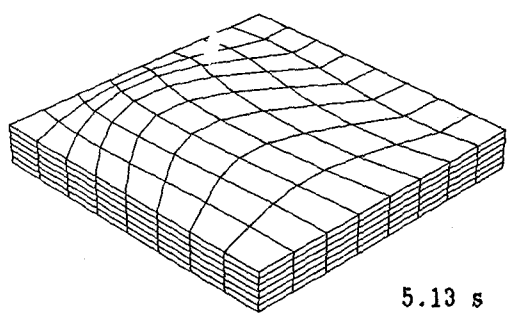


図3 3次元モデル地盤

表1 自由度と演算時間(HITAC M-280H)の比較

	従来の手法 a	本手法 b	b/a
自由度	882	147	1/6
演算時間	1000 sec	6 sec	1/167



(a) 従来の有限要素法

(b) 本手法

図4 固有値解析結果の比較

4. 1/4円盤の単位衝撃応答解析

次に、この手法を用いて図5のような円盤を1/4にした地盤の○点に、x方向に衝撃力を与えて、この地盤の応答を計算した。解析は無減衰で行い、タイムステップ0.1秒で200ステップ計算した。このモデル地盤の物性値、および厚さは3. の地盤のものと同じであり、自由度は約5000である。図5は加振後14秒における、この地盤の水平動の応答である。振幅の大きな加振点に近い部分は図化する際、除いてある。衝撃力を与えた方向がx方向であるため、x方向には疎密波、y方向にはせん断波が伝播していく様子がよくわかる。紙面の都合上ここでは割愛したが、y軸上に位置している点でのx方向(Transverse方向)の変位波形は、ラブ波のエアリー相に相当する5秒付近の成分が卓越していた。また、x軸上に位置している点でのx方向(Radial方向)の変位波形は、鉛直方向の変位波形に対して位相が $\pi/2$ 遅れており、波長が長い領域におけるM₂波の特質と符合した¹⁾。尚、この解析に要した演算時間はETA¹⁾で30分以下であった。

5. 結論

地盤内の変位を内挿する補間関数を用いることによって、自由度を削減した有限要素法を提案した。この手法を用いて簡単な3次元地盤の固有値解析を従来の有限要素法と比較して行なった。従来の手法とほとんど変わらない解析結果にもかかわらず、cpu timeで約1/170もの演算時間の節約ができた。また円盤の1/4の形状をしたモデル地盤の衝撃応答解析をしたところ、ラブ波やレイリー波の伝播していく様子がシミュレーションできた。ここでは、媒質のポアソン比が0.25のもののみ取り扱ったが、0.25より大きなポアソン比についても同様の解析を行なう予定である。

参考文献

- 1) Morichi, S., T. Ohmachi and T. Toshinawa :Vibration modes characterized by Love waves in an elastic layer overlying a rigid basement, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.2, No.1, pp.227-235, 1985.
- 2) 大田裕: 2層構造における分散性Rayleigh波(II), 地震, 第17巻, pp.89-100, 1964.
- 3) 年縄巧, 大町達夫: 3次元地盤を伝わる表面波の実用的数値解析手法, 土質工学会・地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp.213-218, 1989.

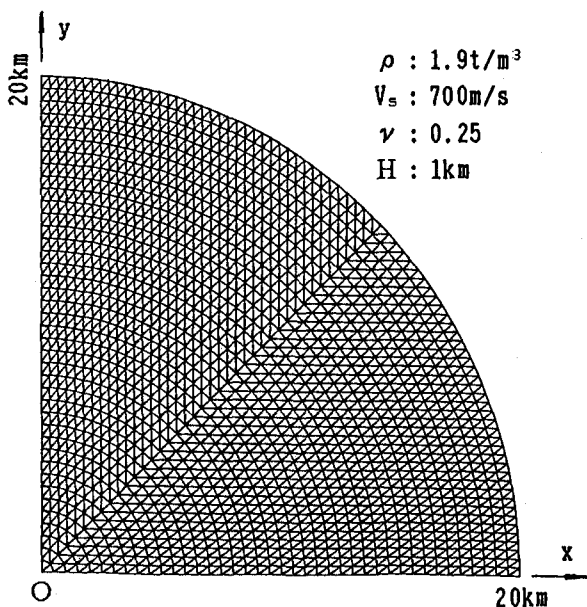


図5 3次元有限要素モデル(衝撃応答解析)

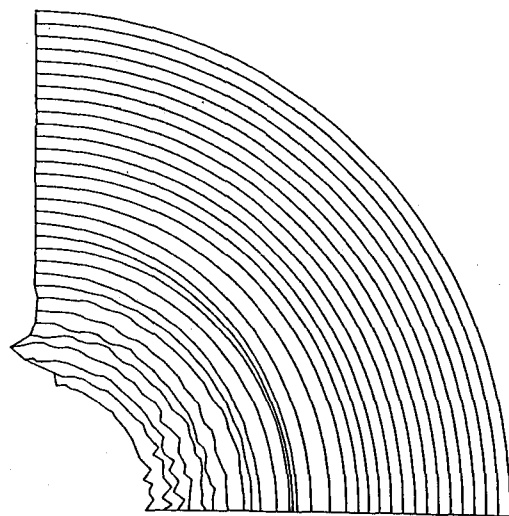


図6 水平動変位(加振から14秒後)