

I-301

不整形地盤に於ける地震動増幅効果に関する研究
- 3次元AL法による解析 -

鹿島建設(株) 正員 西岡省三
同済大学 蔣 通

豊橋技術科学大学 正員 栗林栄一
豊橋技術科学大学 園田一博
佐賀大学 正員 新納 格

1. はじめに

不整形地盤構造が地震動に及ぼす影響の問題は、地震工学上重要な問題となっている。これらの影響を解明するために、豊橋技術科学大学及びその周辺に地震観測システムが設置され、現在までに数回の地震が観測されている。本論では、不整形地盤において地震動を理論的に計算するための手法として、Aki-Larner法の拡張によって行った3次元堆積盆地の解析例について紹介する。

2. 解析手法

本研究において適用されている手法は、1970年に Aki and Larnerにより提案されたAki-Larner法¹⁾(以下AL法と記す)であり、彼らは地表面が水平で沖積層と基盤層との境界が不整形性を有する2層地盤の平面SH波入射問題について、散乱変位場を様々な波数に関する平面実体波の重ね合わせで表現し、地盤の不整形性が水平方向にある周期長さで繰り返されるという仮定を導入し、境界条件式に水平方向へのフーリエ変換を施し数値解を求めている。その後、AL法は地表面の不整形性、2次元多層地盤、P, SV波問題を解くためにも拡張され、研究例は少ないが3次元問題にも拡張され、大堀ら²⁾は平面S波の垂直入射が取り扱い難いとされていた3次元問題をベクトルポテンシャルによる変位ベクトルの表現式を工夫することによってその問題を解決している。本論で使用した定義式もこれと同様のもので式(1)に示し、さらに成層不整形地盤と同一地質Unitにおける水平成層地盤問題に拡張した。3次元変位場の変位ベクトルをポテンシャル ϕ (scalar), $\vec{\psi}$ (vector) で表すと、

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \text{grad } \phi + \text{curl } \vec{\psi} \\ &= \text{grad } \mathcal{X} + \text{curl}(\mathcal{X}, \mathcal{Y}, 0) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)の適用によりS波の垂直入射が可能になり、 \mathcal{X} , \mathcal{Y} , \mathcal{Z} がそれぞれP波, SH波, SV波入射に対するポテンシャルに対応することになる。また、SH波とSV波の分離問題であるが、波動の進行方向がY-ZあるいはX-Z面に平行であれば分離は可能となる。また ϕ , $\vec{\psi}$ は3次元Helmholts方程式を満たさなければならぬ。そこで \mathcal{X} , \mathcal{Y} , \mathcal{Z} は次式のように水平方向波数 K_x, K_y についての2重無限積分の形で表現する。

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_i &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [{}_1A_1(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{p_i} Z) \\ &\quad + {}_1B_1(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{p_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x K_y \\ \mathcal{Y}_i &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [{}_2A_1(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{p_i} Z) \\ &\quad + {}_2B_1(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{p_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x K_y \\ \mathcal{Z}_i &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [{}_3A_1(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{p_i} Z) \\ &\quad + {}_3B_1(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{p_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x K_y \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、添字*i*は媒質*i*に、添字*p, s*はP, S波に関連することを示し、*A, B*は散乱係数、 ν はZ方向の波数を表す。なお、 $j = \sqrt{-1}$ である。式(2)は有限個の水平方向波数で打ち切り、2重有限級数で近似する。その際の打ち切り波数の個数*N*は、次式を満たすべきである。

$$N \geq 1.1 * f * L / V S_{min} \quad (3)$$

f: 解析周波数, L: 不整形性の周期長さである。

3. 解析例

拡張された解析プログラムの検証のため、2次元モデルについてはBravo, M.A. et al. (1988)³⁾、3次元モデルについてはSánchez-Sesma et al. (1984)⁴⁾の解析した沖積谷の周波数応答の結果と比較を行い良好な結果を得た。また、盆地形状の半無限弾性体上に異なる層数の水平堆積層が存在する2次元及び3次元軸対象モデルについて平面S波垂直入射問題を解いた。解析モデルは、2次元モデルが放射線状、3次元モデルは式(3)に示す曲面状の沖積谷に異なるパラメータの水平層が堆積したモデルである。モデルは全て、盆地半幅 $a=5.0\text{km}$ 、最大深さ $H=2.5\text{km}$ 、不整形性の周期長さ $L=30\text{km}$ 、解析周波数 $f=0.3\text{Hz}$ (無次元周波数 $\eta=1.0$ に相当)である。

$$h=2.5*(1-3a^2+2a^3) \quad (4)$$

2次元モデル解析結果及び3次元解析結果を図2, 4に示す。解析に用いたパラメータは表1, 2に示す。図から分かるように2次元モデル、3次元モデルとも水平方向変位は層が増えるとともに大きくなる傾向があり、特に表層の比較的軟弱な層の影響が大きいとみられる。また、鉛直方向についても、2次元及び3次元解析も同様の傾向がみられた。

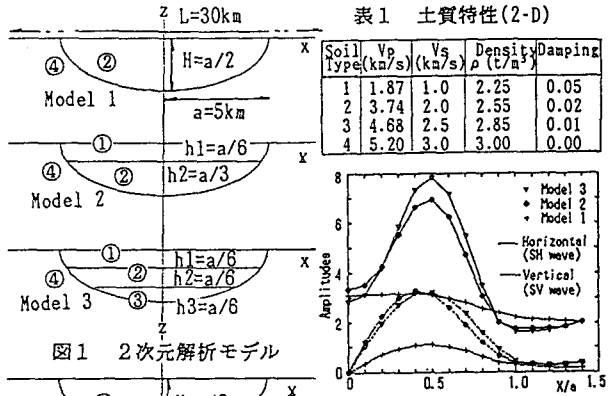


図1 2次元解析モデル

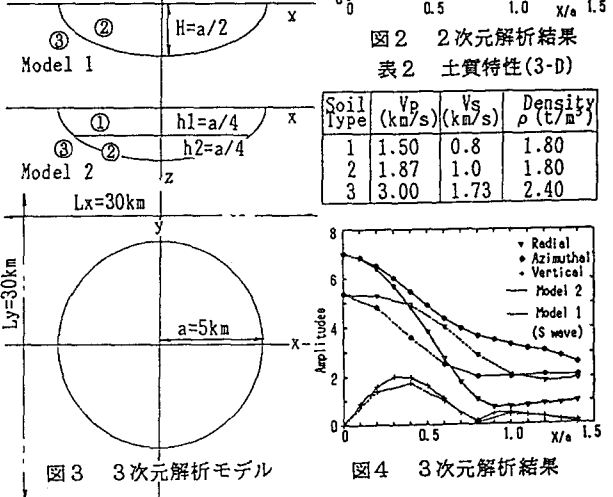


図2 2次元解析結果

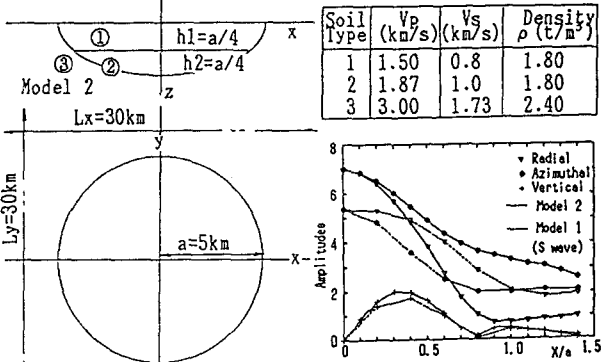


図3 3次元解析モデル

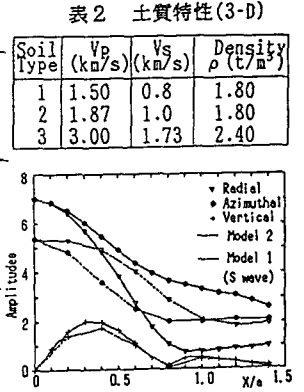


図4 3次元解析結果

表1 土質特性(2-D)

Soil type	V_p (km/s)	V_s (km/s)	Density ρ (t/m^3)	Damping
1	1.87	1.0	2.25	0.05
2	3.74	2.0	2.55	0.02
3	4.68	2.5	2.85	0.01
4	5.20	3.0	3.00	0.00

表2 土質特性(3-D)

Soil type	V_p (km/s)	V_s (km/s)	Density ρ (t/m^3)
1	1.50	0.8	1.80
2	1.87	1.0	1.80
3	3.00	1.73	2.40

4. 結論

大堀らによって提案されたベクトルポテンシャルによる変位の表現式及び伝達マトリクスの工夫によりAL法を任意形状の3次元問題を周波数領域で解析を行えるよう拡張した。またプログラム検証のため他の研究者により発表されている2次元及び3次元解析結果と本研究により得られた解析結果を比較したところ良好な一致が得られた。

続いて、拡張されたプログラムにより盆地形状の半無限弾性体上に複数の水平成層地盤が存在する2次元及び3次元軸対象モデルについて平面S波入射問題を解いたところ、解析結果より水平方向変位は比較的軟弱な表層により大きく増幅され、層数の増加による影響も見られた。また、鉛直方向の変位には同様な傾向が確認された。

参考文献

- 1) Aki, K and K.L.Larner, 1970, Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface due to Incident Plane SH waves, J. Geophys. Res., vol. 75, pp. 933-954
- 2) 大堀道広, 額額一起, 南忠夫, 1990 3次元AL法による堆積盆地の地震動解析, 地震研究所彙報, vol. 65, pp. 433-461.
- 3) Bravo, M.A. et al., 1988, Ground Motion Stratified Alluvial Deposits for Incident SH waves, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 78, No. 2, pp. 436-450
- 4) Sánchez-Sesma, F.J. et al., 1984, Scattering of Elastic Waves by Three-Dimensional Topographies, Proc. 8th WCEE 2, pp. 639-646