

不整形地盤に於ける地震動増幅に関する研究

豊橋技術科学大学 学生員 ○西岡省三
 同済大学構造理論研究所 蔣 通
 豊橋技術科学大学 正員 栗林栄一

1. まえがき

地下構造及び地形が地震動に及ぼす影響の問題は地震工学上の重要な課題であり、これまでの数多くの震災例がその重要性を示している。従来行われていた地盤や地形が地震動に及ぼす影響についての理論的な研究は、水平成層地盤を仮定した単純なケースが多かったが、理論の充実やそれに追随する計算機の進歩により不整形な地盤の地震時応答が計算可能となっている。

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を紹介する。

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によって提案された 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も式(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), $\vec{\varphi}$ (vector)で表すと、

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \text{grad } \phi + \text{curl } \vec{\varphi} \\ &= \text{grad}_i \chi + \text{curl}({}_2 \chi, {}_3 \chi, 0) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)の適用により S波の垂直入射が可能になり、 ${}_1 \chi, {}_2 \chi, {}_3 \chi$ がそれぞれ P波,SH波及び 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、 $\phi, \vec{\varphi}$ は 3次元 Helmholtz 方程式を満たさなければならない。そこで、 ${}_1 \chi, {}_2 \chi, {}_3 \chi$ 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。

$$\begin{aligned} {}_1 \chi_i &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [{}_1 A_i(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{p_i} Z) \\ &\quad + {}_1 B_i(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{p_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x dK_y \\ {}_2 \chi_i &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [{}_2 A_i(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{s_i} Z) \\ &\quad + {}_2 B_i(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{s_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x dK_y \\ {}_3 \chi_i &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [{}_3 A_i(K_x, K_y) \exp(+j \nu_{s_i} Z) \\ &\quad + {}_3 B_i(K_x, K_y) \exp(-j \nu_{s_i} Z)] \exp(j(K_x X + K_y Y)) dK_x dK_y \end{aligned} \quad (2)$$

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表し、 A 及び B は散乱係数、 ν は Z 方向の波数を表す。尚、 $j = \sqrt{-1}$ 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 Sanchez-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。解析モデル、物理定数は参考文献を参照されたい。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次元軸対称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次元モデルが放物線状、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。モデルはすべて、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。

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

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。図からわかるように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、鉛直方向については層数が増えることの影響はみられず、2次元及び3次元解析も同様の傾向がみられた。

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次元軸対称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表層による増加のみ確認された。

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) Sanchez-Sesma, F. J. et al., 1984, Scattering of Elastic Waves by Three-Dimensional Topographies, Proc. 8th WCEE 2, pp. 639-646

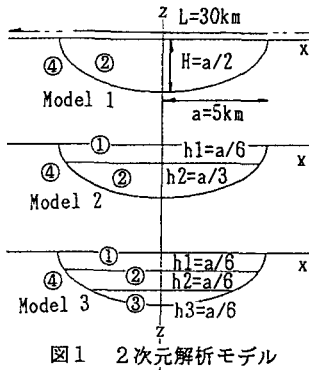


図1 2次元解析モデル

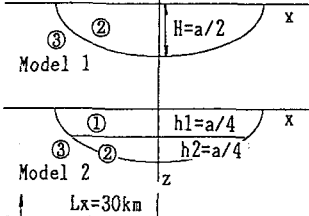


図3 3次元解析モデル

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

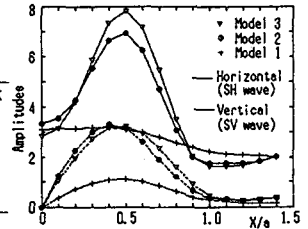


図2 2次元解析結果

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

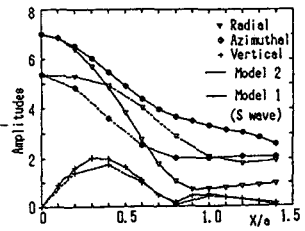


図4 3次元解析結果