

## (43) 最も簡単な堆積盆地の2次の表面波の計算方法

大林組技術研究所 大堀道広

大林組技術研究所 野畑有秀

大林組技術研究所 若松邦夫

大林組技術研究所 安井 譲

### 1. はじめに

薄い堆積盆地の地震動特性は、実体波の多重反射と盆地端部で発生する2次の表面波で特徴づけられることが知られている（例えば[1]）。さらに、平野規模の広大で薄い堆積盆地では、震源位置が浅い場合に、実体波よりも表面波の方が卓越しやすいことが指摘されている。この特徴を利用して、最近では効率的な2次の表面波の計算方法が相次いで提案されている（例えば[2],[3],[4]）。しかし、これらの方法ですら、実用的な観点から見て筆者らには依然として難解に思える。少なくとも実務レベルでの設計入力評価を行うためには、ある程度の精度を犠牲にしてもより簡便な方法が望まれる。そこで、本論文では工学的にも設計入力地震動の評価の際によく用いられるHaskell法を水平方向に応用して、最も簡便でかつ実用的な方法の提案を試みた。そして、精算解との比較により手法の妥当性を示し、さらにその物理的な意味の考察を行っている。

### 2. 解析方法

薄い堆積盆地に実体波が入射した場合、盆地端部で2次の表面波が生成されるが、その伝播特性（伝播速度ならびに鉛直方向の振幅分布）は平行成層構造のそれで特徴づけられる。従って、堆積盆地内を伝播する2次の表面波を計算するには、入射側の端部における入射波から表面波への変換（あるいは透過）とこれが盆地内を伝播した後に端部に到達した時の反射・透過を効率的に評価する必要があるのだが、一般にこれらの問題はGreen関数を用いて境界積分方程式を解くことに帰着する。ここでは、数学的な厳密性を捨てて、表面波の変位・応力における深さ依存性を無視し、水平方向に1次元的に境界条件を満足するような2次の表面波の近似解を求める。

薄い堆積盆地において端部への入射波を基準化すれば2次の表面波の振幅・位相はともに入射波の種類によらないことが示されている<sup>[5]</sup>。また、地震観測記録より2次の表面波が大きく卓越するのはマグニチュードが大きく震源が浅い場合であることが指摘されている<sup>[6]</sup>。従って2次の表面波の生成問題は、入射波を平面波とし入射方向は真横方向として取り扱えば工学的に十分であると考えられる。そこで、問題を絞り込み、Fig. 1 (a)に示すように2次元堆積盆地に平面波が真横入射する場合を考える。まず平行成層部分の地下構造に対して表面波（Love波）の基本モードの理論分散曲線を計算する。次に得られた位相速度を用いて、Fig. 1 (a)の2次元堆積盆地をあたかもFig. 1 (b)のような1次元鉛直成層構造に見立て、これに平面波が真横から入射するものとしてHaskell法により地震応答計算を行う。この時、Fig. 1 (a)の地表点はFig. 1 (b)の地中点として計算される。ただし、通常のHaskell法と異なり、盆地部分の物性値を $\rho_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\mu_2$ （ $=\rho_2\beta_2$ ）ではなく $\rho_2$ 、 $C_0(\omega)$ 、 $\mu_2$ （ $=\rho_2\beta_2$ ）として計算を行う。

### 3. 解析結果

本手法の妥当性を検討するために、境界積分方程式法<sup>[7]</sup>による精算解との比較を行った。解析の対象として、Fig. 2の閉じた盆地とFig. 3の開いた盆地を設定する。これらの盆地において盆地端部の基盤の傾斜角は63.4°であるが、本手法では90°とみなす。そして、これらの盆地に真横から平面波が入射する場合について、時刻歴応答波形の計算を行う。入射波形としては中心周期3秒のRicker Waveletを用いる。

#### (a) 閉じた盆地

Fig. 4はFig. 2に示す閉じた盆地モデルについての精算解と本手法による結果の比較を示している。これ

より、波形の初動部分において、精算解には、本手法で考慮していない盆地端部で発生する実体波と堆積層下方から入射する実体波の多重反射が含まれるので、両者の結果にはやや違いが見られることがわかる。しかし、盆地左端で生成された2次的表面波が盆地内を伝播し、右端で反射した後に左端へ伝播する位相とさらに左端で反射し再び右端へ伝播する位相について、本手法の結果が振幅レベル、波形の形状とも精算解のそれによく一致していることがわかる。

#### (b)開いた盆地

Fig. 5はFig. 3に示す開いた盆地についての計算例である。これより、盆地端部から離れるにつれて精算解と良い対応を示している様子がわかる。これは、盆地端部より遠方の地点ほど本手法で考慮していない盆地端部で発生する実体波の影響が小さくなり、減衰のない2次的表面波が相対的に卓越してくるためである。

#### (c)端部境界の傾斜角の影響

(a), (b)を通して本手法は特にFig. 3のように開いた形状の盆地において有効なことがわかった。ここではさらに盆地形状を矩形とみなす本手法のモデル化の妥当性を検証するために、Fig. 3の盆地端部の基盤の傾斜角を変えた場合(21.8°, 12.5°, 7.6°)の精算解を計算し、傾斜角63.4°の場合の応答との比較により、傾斜角によって盆地内の応答がどの程度影響されるか検討を行った。盆地端部から離れた遠方地点の応答波形をFig. 6に示す。これより、傾斜角が小さくなるに従い、2次的表面波の振幅レベルが小さくなる傾向が見られる。またこの傾向は伝播速度の遅い短周期成分ほど顕著である。境界の傾斜角の変化は、傾斜層近傍の応答ばかりでなく2次的表面波の生成機構に対しても大きな影響を与えている。そして、今回の検討のみから判断すれば、本手法において盆地形状を矩形とすることは2次的表面波の予測において工学的に安全側の評価をしていると考えられる。

#### 4. 本手法の物理的な意味

ここでは久田らの解<sup>[4]</sup>から出発して、本手法の物理的な意味を検討してみる。久田らによれば、堆積盆地内の観測点( $\xi_1, \xi_3$ )における変位は2次的表面波のみに着目すれば次式で表される。

$$V_2(\xi_1, \xi_3) = 2 \sum_{m=0}^M \sum_{j=1}^N \mu_{2j} T_j^m \Delta A_{Lj}^m(\xi_3) V_{1j}^1 \exp\{-ik_2^m(\xi_1 - X')\} \quad (1)$$

ここで、 $\mu_{2j}$ 、 $T_j^m$ 、 $\Delta A_{Lj}^m(\xi_3)$ 、 $V_{1j}^1$ は、堆積層部分のj番目の層に関連するものでそれぞれせん断弾性定数、m次モードに関する基盤からの透過係数、m次モードに関する深さ $\xi_3$ への寄与、入射振幅を意味する。また、M、Nはそれぞれ最大のモード次数、基盤を含めた層数を意味する。

次に本手法では基本モードのみ( $m=0$ )、表層のみ( $j=1$ )、地表のみ( $\xi_3=0$ )を取り扱っており、さらに入射振幅1( $V_{1j}^1=1$ )とすれば、(1)式は次式のように簡略化される。

$$V_2(\xi_1, 0) = 2 \mu_{2,1} T_1^0 \Delta A_{L1}^0(0) \exp\{-ik_2^0(\xi_1 - X')\} \quad (2)$$

ところで、 $\Delta A_{L1}^0(0)$ はmedium responseをもとに算出される実数値であり、Fig. 7に $\mu_{2,1} \Delta A_{L1}^0(0)$ として示す。本手法ではこれを考慮していないので、言い換えれば $\mu_{2,1} \Delta A_{L1}^0(0)$ を1として近似していることになる。従って、(2)式はさらに次式のように簡略化される。

$$V_2(\xi_1, 0) = 2 T_1^0 \exp\{-ik_2^0(\xi_1 - X')\} \quad (3)$$

上式中の係数2は自由地表面での反射に伴うものであり、 $T_1^0$ は上述のように鉛直境界面での透過係数を表し周波数に依存する。これらは本手法においてはHaskell法による計算において考慮されている。従って、本手法は(3)式で示される近似解をHaskell法を用いて計算していることに相当する。

Fig. 8にはFig. 3の堆積盆地モデルについての本手法の計算結果を久田らの方法による結果と比較して示す。これより、本手法は久田らの方法による結果に非常によく一致していることがわかる。また、久田らの方法では盆地内における地震応答を鉛直境界における表層部分と基盤層部分のそれぞれの寄与に分離できるが、Fig. 7、Fig. 8より前者(①)が短周期成分、後者(②)が長周期成分を多く含んでいることがわかる。

## 5. まとめ

以上より、本論文では堆積盆地の2次の表面波の簡便法を提案し、精算解との比較により手法の妥当性を示し、さらに本手法の物理的な意味を示した。今後は本手法の改良とその適用範囲ならびに本手法の概念をベースとする応用方法を提案する予定である。また、精算解による検討がやはり重要であると考え、現在効率的な解析手法の開発を進めている。これらについても機会を変えて報告して行きたい。

## 【謝 辞】

最後に、正規モード解のプログラムを使用させて頂きました東京大学地震研究所工藤一嘉氏と、本稿をまとめるに当たり有益な議論と研究ならびに投稿する上での暖かい励ましを頂きました京都大学防災研究所岩田知孝氏、東京電力植竹富一氏、九州大学理学部竹中博士氏に紙面を借りて深謝致します。

## 【文 献】

- [1] BARD, P.-Y. and M. BOUCHON (1980), Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1263-1286.
- [2] HISADA, Y., S. YAMAMOTO and S. TANI (1992), Proc. of the International Symposium on ESG, Odawara, Japan, 185-189.
- [3] 藤原広行, 竹中博士 (1992), 地震学会講演予稿集春期大会, 25.
- [4] 久田嘉章, 山本俊六, 谷資信 (1991), 日本建築学会構造系論文報告集, 419, 135-143.
- [5] 大堀道広, 野畑有秀, 若松邦夫, 安井譲 (1993), 地震, (再審査中) .
- [6] 田中貞二, 吉沢静代, 大沢胖 (1979), 東京大学地震研究所集報, 54, 629-655.
- [7] SANCHEZ-SESMA, F. J. and J. ESQUIVEL (1979), Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1107-1120.

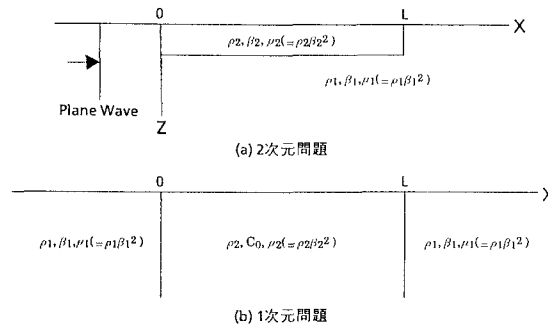


Fig. 1 手法の概略

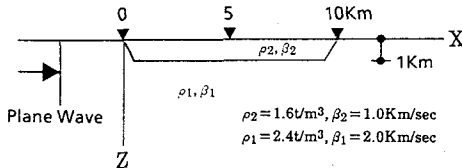


Fig. 2 閉じた堆積盆地モデル

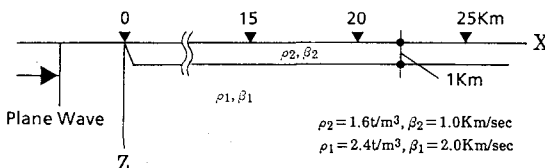


Fig. 3 開いた堆積盆地モデル

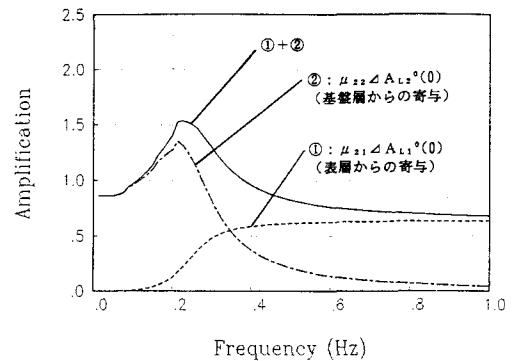


Fig. 7 実関数  $\mu_{2j} \Delta A_{L,j}^0(0)$

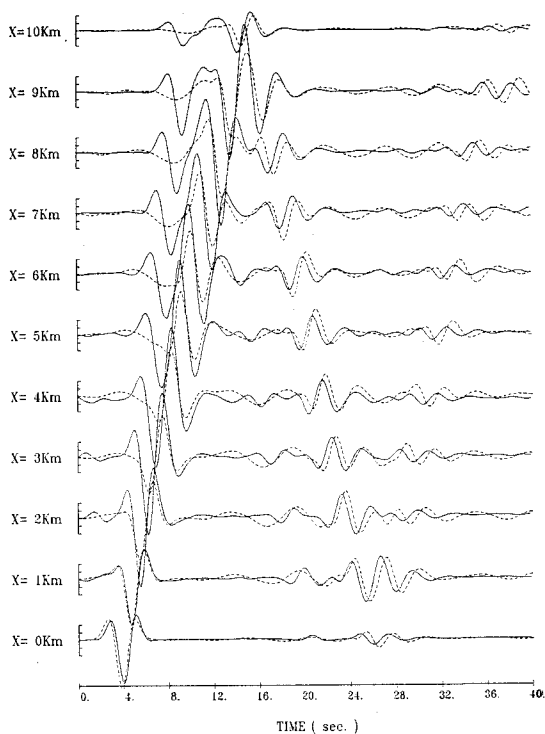


Fig. 4 Fig. 2 に対する計算結果  
(実線が精算解<sup>[7]</sup>, 点線が本手法)

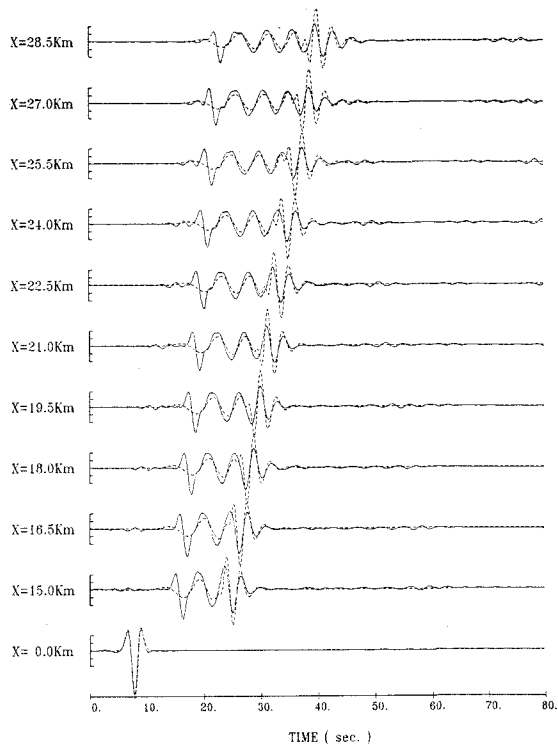


Fig. 5 Fig. 3 に対する計算結果  
(実線が精算解<sup>[7]</sup>, 点線が本手法)

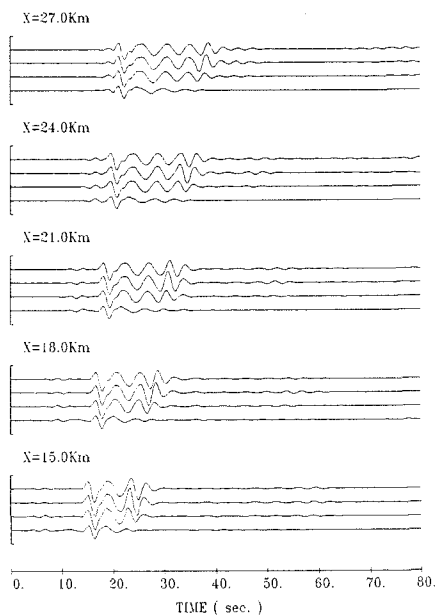


Fig. 6 Fig. 3 において傾斜角を変化させた場合  
の計算結果<sup>[7]</sup> (上から63.4°, 21.8°, 12.5°, 7.6°)

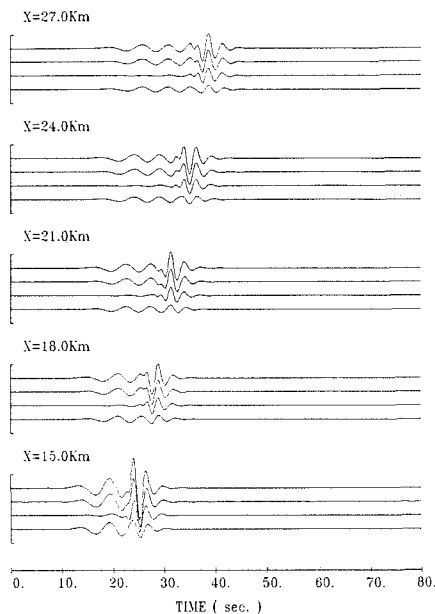


Fig. 8 Fig. 3 に対する計算結果 [上段が本手法,  
以下全て精算解<sup>[4]</sup> (上から, ①+②, ①, ②)]