

(30) 傾斜基盤を有する堆積地盤の地表面応答の簡便な計算手法

(株)大林組 関 崇夫
東京都立大学 西川 孝夫

1. はじめに 不整形地盤に関する研究が近年盛んに行われ、地震動の継続時間の延び、表面波の発生などさまざまな特徴が指摘されている。これらの研究の多くは、差分法・境界要素法・AL法・有限要素法などの領域法・境界法と呼ばれる解析手法を利用している。しかし、これらの解析手法は、解析領域全体またはその境界を離散化して解くため、高振動数域まで計算する場合や、モデルの規模が大きい場合、また基盤と堆積地盤の地盤物性のコントラストが強い場合には、要素数も増加し演算時間も膨大となる。

そこで本研究は、傾斜層および傾斜部を有する堆積地盤の地表面応答を、簡便でしかも経済的に高振動数域を計算する手法を提案し、境界要素法による結果と比較することによりその有効性を検討したものである。

2. 解析手法 図-1に示す左端の傾斜角が $\pi/2N$ ($N=1, 3, 5, \dots$)で傾斜部分の幅が H 、最深部の深さ D の側方の開いた傾斜部分を有する堆積地盤が弾性基盤に支持されている場合を考える。このような堆積地盤にSH波が斜め入射する場合の地表面応答を簡便に計算する手法を、下記の仮定に基づいて定式化を行う。

- (1) 傾斜部分の応答は、くさび形状の堆積盆地の地表面応答計算手法を示した文献1), 2)に従う。
- (2) 平坦部分の応答は、傾斜部分からの応答と堆積地盤と基盤を2層地盤とした重複反射理論より求めた応答の和として表されるとする。

(1) 傾斜部分 ($X < 0$ の範囲)

Sanchez-Sesma等¹⁾は、図-2に示すような両端の傾斜角度が $\pi/2N$ ($N=1, 3, 5, \dots$)のくさび形状をした堆積盆地の地表面応答を求めるために“折り紙手法”を提案している。この手法は、同じ長さを持つ波線をまとめてバンドとし、個々のバンドを地表面と基盤面で折り返し、重ね合わせることで応答を求める簡便な手法である。そこで、図-1の傾斜部分の応答は、図-2の左側傾斜基盤から入射する波動により表せると考えると、傾斜部分の地表面応答は(1)式で表すことができる。

$$\frac{U}{U_0} = \sum_{j=0}^M \sum_{n=0}^j \varepsilon_{M-n} \exp \{-i \cdot (\omega \cdot H / V_s) \cos \theta_j\} \cdot a_{jn} \cdot \prod_{jn}^{(1)} \exp \{-i \cdot \omega \cdot S_{jn} / V_s\} \quad \dots (1)$$

ここで、

$$M: (N-1)/2$$

a_{jn} : 傾斜面から堆積地盤内に透過した波動の振幅

ε_N : Neumann factor ($N=0: \varepsilon_N=1, N \geq 1: \varepsilon_N=2$)

θ_j は(2)式で表され、傾斜基盤から入射した波動が地表面と基盤面で反射を繰り返す時の、地表面での反射角を示している。

$$\theta_j = (N-2j-1) \pi / 2N, \quad (j=0, 2, \dots, M) \quad \dots (2)$$

$$\prod_{jn}^{(1)} = \prod_{k=0}^n (A_k) \quad : \quad S_{jn} < 0$$

A_k : 傾斜部で堆積地盤内から基盤に向かって入射する波動が傾斜面で反射されときの反射係数

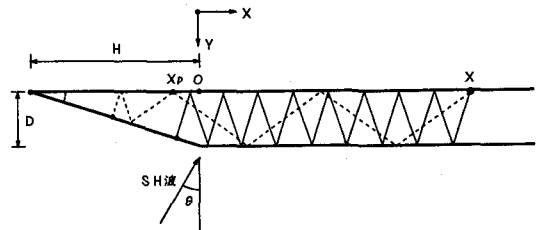


図-1 傾斜層の側方が水平成層となる地盤モデル

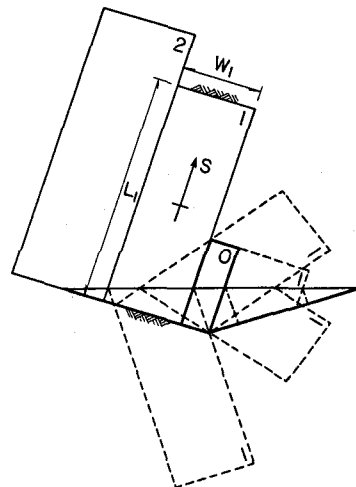


図-2 くさび形状をした地盤モデル ($N=5$ の場合)

また、 S_{jn} は(3)式で表され、図-2の個々のバンドが地表面となす角度が θ_n のとき、バンド座標 S と地表面上の点 X との関係を表している。

$$S_{jn} = H \cdot \cos \theta_j - (H - |X|) \cos \theta_n \quad \dots (3)$$

(2) 平坦部分 ($X > 0$ の範囲)

i) 傾斜層部分からの応答

図-1の点 X には、傾斜部分から伝播する M 本の波線が存在する。従って、点 X における傾斜部からの応答は、これらの波線による応答の和として求められる。すなわち、図-2の個々のバンドをバンド座標 S の正方向に無限に延びたバンドと考え、このバンドを地表面と基盤面との間で折り返し、重ね合わせることより(4)式で表すことができる。

$$\frac{U}{U_0} = \sum_{j=0}^M \varepsilon_{M-j} \cdot \exp \{-i \cdot (\omega \cdot H / V_s) \cos \theta_j\} \cdot a_{j1} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \exp(-i \cdot \omega \cdot S_{j1} / V_s) \quad \dots (4)$$

ここで、

a_{j1} : 傾斜面から堆積地盤内に透過した波線の振幅

$$\sum_{j=1}^{\infty} (B_j)^m \cdot \prod_{k=0}^j (A_k) \quad : \quad S_{j1} > 0$$

B_j : 平坦部で堆積地盤内から基盤に向かって入射する波線が境界面で反射されるとき反射係数

m : j バンドに属する波線が点 X までに平坦部の基盤面で反射する回数

このとき、バンド座標 S と地表面上の点 X との関係は(5)式で与えられる。

$$S_{j1} = X_0 + m \cdot 2H \cdot \tan \{ \pi / (2N) \} / \sin \theta_j \quad \dots (5)$$

ii) 重複反射理論による応答

点 X では、傾斜部分からの応答のほかに、下方から入射する波線が存在する。ここで、図-3のようにSH波が鉛直下方と角度 θ をなす方向から入射する場合では、地表面での応答は(6)式で表される。

$$\frac{U}{U_0} = \frac{2 \cdot \exp \{-i \cdot K_s \cdot (X - X_a)\} \cdot \exp \{-i \cdot K_{sr} \cdot X_a\}}{\cos(K_s \cdot t^L \cdot D) + i \cdot \eta \cdot \sin(K_s \cdot t^L \cdot D)} \quad (6)$$

ここで

D : 平坦部の深さ ($= H \cdot \tan \{ \pi / (2N) \}$)

η : インピーダンス比 ($= \rho_s \cdot V_s / \rho_{sr} \cdot V_{sr}$)

K_s : 堆積層での波数 ($= \omega / (V_s \cdot \sin \theta)$)

K_{sr} : 基盤層での波数 ($= \omega / (V_{sr} \cdot \sin \theta)$)

$t^L = -i \sqrt{1 - 1 / \{ (V_s / v_{sr}) \sin \theta \}^2}$

従って、平坦部における全体の応答は、(4)、(6)式の和として表される。

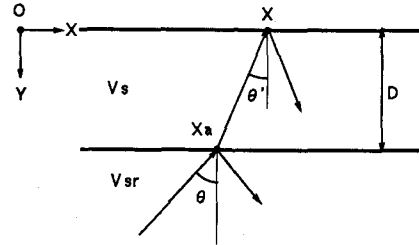


図-3 2層地盤モデル

3. 解析結果

i) 伝達関数

本手法の有効性を検討するために境界要素法による計算結果と比較した。堆積地盤の左端の傾斜角度が 18° ($N=5$ の場合)、弾性基盤と堆積地盤のせん断速度比: $V_s/V_{sr}=0.25$ 、密度比: $\rho_s/\rho_{sr}=0.8$ 、 $Q_s=25$ である地盤モデル(インピーダンス比: $\eta=5$ の場合)に、SH波が鉛直入射、 30° 入射したときの地表上の点 $X/H=-0.5, -0.2, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の9地点の伝達関数を図-4, 5に示した。縦軸は伝達関数を、横軸は平坦部の1次固有振動数(f_0)で無次元化した振動数(f/f_0)を表している。傾斜部分では全振動数範囲にわたって、また平坦部分では、ほぼ $f/f_0=1.0$ 以上の振動数範囲で境界要素法による結果とよく一致している。

また、 f_0 以下の振動数範囲は境界要素法などの手法で計算し、それ以上の振動数範囲を本解析手法で計算し結合させるHybrid手法により、高振動数域をも考慮した解析が可能である。

ii) 傾斜層端部から生ずる回折波

本手法では、傾斜部分の応答の計算に関し波線理論を適用している。一般に波線理論は、傾斜端部から生ずる回折波は考慮できないことから、その影響を考慮するために、丹羽・廣瀬⁴⁾等は積分方程式法を用いた解析を行っている。しかしながら、図-4, 5の本解析手法における傾斜部分の伝達関数に注目すると、解析振動数範囲で境界要素法による結果とよく一致しており、本手法の結果に回折波的な波動の効果が含まれているものと考えられる。

そこで、図-6に示す傾斜角 30° の傾斜層と弾性基盤により構成される地盤モデル⁵⁾を設定し、この地盤にSH波が入射角 45° の方向から入射したときの、境界要素法と本手法による地表面の変位応答を求め、その効果を検討する。なお、地盤の物性値は、傾斜層

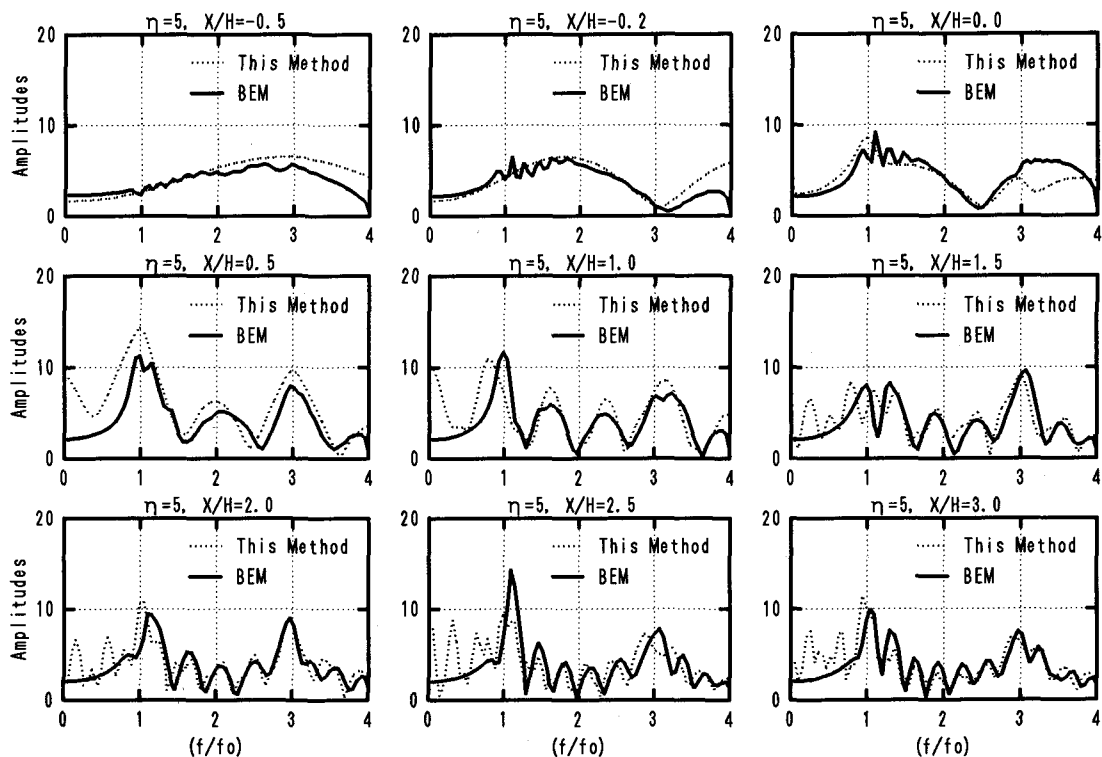


図-4 伝達関数 ($N=5$, $\eta=5$, 鉛直入射)

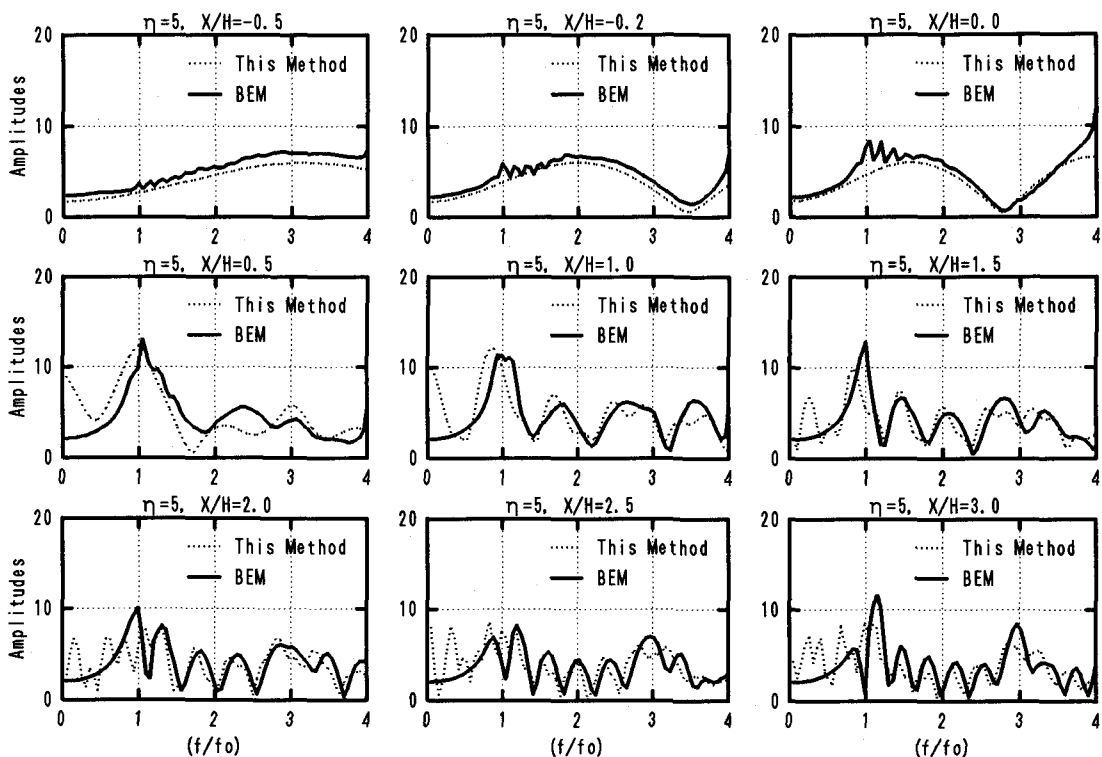
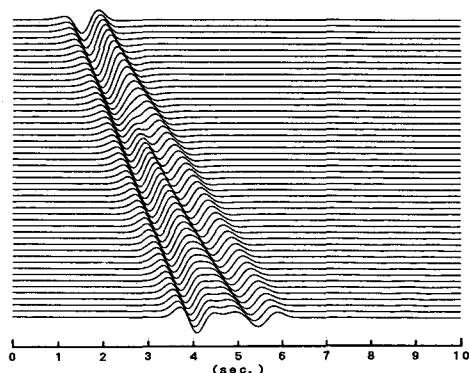
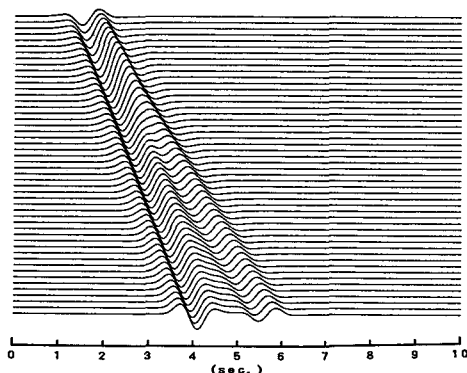


図-5 伝達関数 ($N=5$, $\eta=5$, 30° 入射)



(a) 境界要素法



(b) 本手法

図-7 傾斜層の波動伝播解析結果

と基盤の単位体積重量 2.0 t/m^3 、せん断速度が傾斜層で 250 m/s 、基盤で 500 m/s である。また入射波は、(7)式で示すRicker-Waveletを用いた。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (b^2 - 0.5) \cdot \exp(-b^2) \quad \dots (7)$$

ここで、 $b = \pi(t - t_0)/t_p$ 、 t_0 は $f(t)$ のFourier振幅の卓越周期、 t_p は $f(t)$ の絶対値が最大となる時刻である。

図-7に、卓越周期 $t_p = 1.0$ 秒の入射波が入射した際の地表面応答を示す。境界要素法・本手法による解析結果ともに直達波と回折波の2本の走時が現れ、応答波形もよく対応した結果が得られた。そこで、本解析結果に回折波的な波動が生じた要因を(1)式より考察する。

(1)式の $j=n=M$ の場合の応答成分は、(8)式で与えられる。(8)式の下線部分に注目すると、これは地表面

$$\frac{U}{U_0} = a_{MM} \cdot \exp\{-i \cdot (\omega \cdot H/V_s)\} \cdot \exp\{-i \cdot \omega \cdot |X|/V_s\} \quad (8)$$

に沿って伝播する波動成分を表し、この成分の影響により地表面応答に回折波的な波動が発生したものと考えられる。また、この地盤モデルの場合、変位の不連続面が比較的地表面に近く、本来この不連続面に沿って伝播する回折波と(8)式の波動が同等の効果を及ぼしたためと考えられる。この点については今後詳細な検討が必要である。

4. まとめ 傾斜層および傾斜部を有する堆積地盤の地表面応答を計算するための簡便な手法を提案した。またこの手法を適用した解析を行い、境界要素法による結果と比較検討し、以下の結果が得られた。

(1) 本手法は、境界要素法と比較して計算時間短く、パソコン程度で高振動数域での伝達関数の計算が十

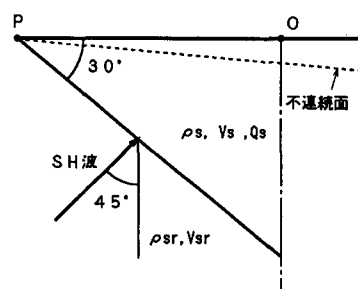


図-8 傾斜層モデル

分可能である。

(2) 傾斜層の側方が閉じていないため、境界要素法のように側方境界の打ち切りの影響を考慮する必要がない。

(3) 低振動数域は境界要素法で、また高振動数域を本手法で計算し結合させるHybrid手法により、高振動数域をも考慮した解析が可能である。

(4) 傾斜層において、従来波線理論では考慮できない回折波の発生を、波線理論を応用した本解析手法で考慮できる可能性のあることを示した。

参考文献

- 1) Sanchez-Sesma, F. J. Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH wave, Bull. Seism. Soc. Am. 78, pp. 83-95
- 2) 関、西川：弾性基盤に支持された不整形堆積盆地の地表面応答に関する研究(Sanchez-Sesma法を適用した解析)、第8回日本地震工学シンポジウム、1990、pp. 355-360
- 3) Ishii, h. and R. M. Ellis, Multiple reflection of plane SH waves by a dipping layer, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 60, 15-28, 1970.
- 4) 丹羽、廣瀬：傾斜層を有する地盤における理論的地震動解析、土木学会論文報告集、第337号、57-66, 1983
- 5) 秋山、吉田：不整形地盤の地震動に与える回折波の影響、第20回地震工学研究発表会講演概要集、161-164, 1989