

京都大学大学院	正会員	芦田	譲
関西大学工学部	正会員	楠見	晴重
関西大学工学部	正会員	西田	一彦
(株)森組	正会員	○城本	大作

1. はじめに

反射法地震探査は、音響インピーダンスが異なる境界面で反射して地表へ戻ってくる波を利用して、地層境界面の位置と形状を探査する手法である¹⁾。近年とくに、地下の開発が著しい都市部においては、地表面から非破壊で地下の情報が得られる物理探査に注目が集まっている。本研究は、都市部で行われる地盤中の、数mの薄層における地盤改良工事に関して、その改良層の効果判定にS波浅層反射法の適用についてシミュレーション解析を行い、改良層の検出手法を検討したものである。

2. シミュレーション解析

物理探査では、観測データから地下の構造や物性を求める際、その解が一義的に定まらないことが多い²⁾。そこで地質や地球物理的な条件を加味して、地下構造の数学的モデルを作成し、解析を進めることがしばしば行われる。本研究では差分法による数値解析法を用いてシミュレーション解析を行う。

差分法では不均質な弾性媒質を多くの微小なグリッドで分割し、それぞれの格子内では弾性的性質は均質であると仮定して、波動方程式を有限差分式で表す。

2次元の波動方程式は、Uをある時刻tにおける圧力、V(X, Z)を伝播速度として

$$\frac{1}{V^2(X, Z)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \quad (1)$$

である。関数 $U(X + \Delta X)$ と $U(X - \Delta X)$ を $U(X)$ の近傍でテイラー展開すると(1)の差分近似は、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{V^2(X, Z)} \frac{U(X, Z, t + \Delta t) - 2U(X, Z, t) + U(X, Z, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \\ &= \frac{U(X + \Delta X, Z, t) - 2U(X, Z, t) + U(X - \Delta X, Z, t)}{(\Delta X)^2} + \frac{U(X, Z + \Delta Z, t) - 2U(X, Z, t) + U(X, Z - \Delta Z, t)}{(\Delta Z)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

水平方向をX軸、鉛直下方向をZ軸として $0 \leq X \leq a$, $0 \leq Z \leq b$ 内を、 $\Delta X = a/M$, $\Delta Z = b/N$ のグリッドに区切り離散化を行う。今、 $(i = 1, 2, 3, \dots, M; j = 1, 2, 3, \dots, N; k = 1, 2, 3, \dots, L)$ として、

$$U(i\Delta X, j\Delta Z, k\Delta t) = U_{i,j}^k \quad (3)$$

と表し、さらに $\alpha = V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta X$, $\beta = V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta Z$ とすると(2)式は、

$$U_{i,j}^{k+1} = 2(1 - \alpha^2 - \beta^2)U_{i,j}^k + \alpha^2(U_{i+1,j}^k + U_{i-1,j}^k) + \beta^2(U_{i,j+1}^k + U_{i,j-1}^k) - U_{i,j}^{k-1} \quad (4)$$

となる。この差分近似式を用いて本研究のシミュレーション解析を行う。

3. 反射係数

シミュレーション解析で得られる結果は、地表面における時間の経過に伴う応力または変位である。それらは設定された層による反射を表し、反射波振幅は反射係数によって決定される。

Yuzuru ASIDA, Harusige KUSUMI, Kazuhiko NISIDA, Daisaku SIROMOTO

いま、媒質 1 および媒質 2 の密度と速度をそれぞれ、 ρ_1, V_1, ρ_2, V_2 とし、媒質 1 の方向から垂直に波が入射したとすると、反射係数 r は、

$$r = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (5)$$

と表される。本シミュレーションでは媒質の密度は、一定として扱う。(5) 式より、改良層の弾性波伝播速度を上下の層に対して大きく設定した場合、改良層上面の反射係数は正の値をとり、改良層下面の反射係数は負の値をとる。すなわち、改良層上面および下面の反射波は逆位相となる。

4. 改良層の反射波特性

図-1 は、1 次元シミュレーション解析を行ったモデルである。図に示すように、弾性波伝播速度 200m/s の均一な層に、改良層の弾性波伝播速度を V_{pe} として解析を行った。改良層の厚さ L_2 は、周波数 f 、波長 λ と k とで一般化している。すなわち、 V_{pe} と f を決定することによって λ が決まり、そして改良層厚 L_2 が決定される。図-2 は図-1 に示すモデルの、 $V_{pe}=600\text{m/s}$ のときの解析結果である。ここで、 k は $1/20$ から $23/20$ としている。この図より層の厚さ $1/3\lambda$ のあたりで反射波が分離していることが見てとれる。つまり $1/3\lambda=2\text{m}$ として、 $\lambda=6\text{m}$ このとき $f=100\text{Hz}$ で層が分離できると考えられる。またこの図より k が小さくなる、つまり薄層になるにしたがって、上下改良面の反射波の分解能が低下している。これより層の分離は、発振周波数の波長によって左右されることがわかる。

図-3 は、改良層厚 L_2 を 4m にした状態で、改良層の弾性波伝播速度 V_{pe} を 400m/s と 700m/s とした場合の結果である。震源として周波数 150Hz、発振最大応力値 100MPa とした。この図より、 V_{pe} が大きくなるほど分解能が低下することが認められる。

5. まとめ

10m 前後の極浅層部において、薄層の改良層（高速度帯）が存在するときの改良層の検出方法に関して、シミュレーション解析を行った。この結果次の成果が得られた。

- 1) 球面発散、地盤状況による減衰を考慮すると、最低 100Hz 以上の発振周波数が必要である。
- 2) 強度の硬軟を表す伝播速度パラメータの変化により、反射係数、波長が変化し、より速い弾性波速度とした場合の結果は薄層分離の分解能の低下につながる。

今後は、実際の地盤に対して S 波浅層反射法を行い、本シミュレーション結果の適用性について検討するとともに、その有効性についてより具体的に検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐々 宏一・芦田 譲・菅野 強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版，1993。
- 2) 常 旭・芦田 譲・佐々 宏一：差分法による弾性波探査における波動現象のシミュレーション，水曜会誌，Vol. 21, No. 3, pp. 201-210, 1990。

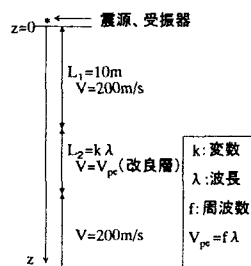


図-1 地盤改良後想定モデル

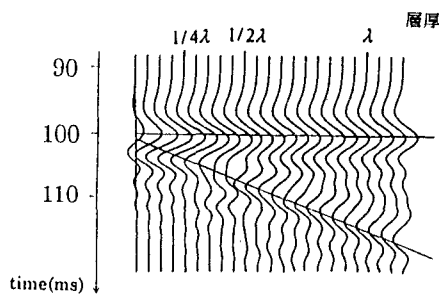


図-2 解析結果

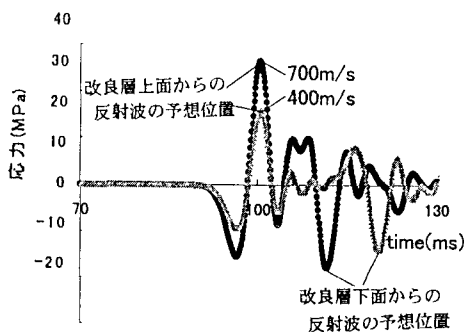


図-3 層の速度変化に伴う反射波形変化