

# S波反射法による地盤中の薄いセメント改良層の探査 に関するシミュレーション解析とその適用性

楠見晴重<sup>1</sup>・芦田讓<sup>2</sup>・西田一彦<sup>3</sup>・江原竜二<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町)

<sup>2</sup> 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup> 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町)

<sup>4</sup> 大阪府 土木部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前2丁目)

沖積粘土層上もしくはその地中に構造物を建設する場合、セメントミルクと粘土を機械的に攪拌させて地盤改良を行う工法がよく用いられている。しかし、この工法の改良効果の判定は、ボーリングによるサンプリングによってのみ行われている。本研究は、この工法によって改良された薄層状の改良部分の改良効果と連続性を評価する手法として、S波反射法による手法を確立するためにシミュレーション解析、特に低速地盤中にある高速度を有する薄層の探査手法について検討した。更に実際の機械攪拌工法による地盤改良現場において、シミュレーション解析結果で得られた検討結果を用いてS波反射法を実施した結果について検討した。

*Key Words: reflection method, simulation analysis, S wave, ground improvement, thin layer*

## 1. はじめに

近年、地盤改良工法の中で、軟弱地盤を対象として10m前後の深さに、高い強度を有する土層を人工的に建設するために、セメントミルクと軟弱粘土を攪拌機械によって混合させて約2~3m厚さ程度の軟弱地盤を固化させる工法がよく利用されている<sup>1)</sup>。この工法の特徴は、地表面から機械によって迅速に対象深度を地盤改良することにある。しかし改良土層の管理に関しては、地盤中の改良工事のため、直接的な方法によって改良層全体を精度良く把握することはかなりの困難を伴うものと思われる。このために、現時点では数十mに1本のボーリングを行い、改良層厚の確認と不攪乱試料をサンプリングして、一軸圧縮強度を求めて改良効果の確認を行っているのが現状である。この方法では、地盤改良が所定の厚さで、連続して精度良く施工されているかどうかを改良区域全体について管理するのが困難なことから、少なからず問題となっている。更に、地中構造物に対して約2~3mの薄い改良層が地中梁として、または被圧地下水圧の耐圧層として働くことを期待する場合には、なおさら改良層全体の連続性と厚さを精度良く把握することが必要である<sup>2)</sup>。

これらの問題に関して、何らかの物理探査手法の利用が考えられるが、この問題に関連した論文または報告は皆無であるために、早急にこの分野の研究が必要

であると思われる。

本研究は、沖積粘土層中に上述した地盤改良法によって施工された約2m程度の薄い改良土層を探査するために、S波反射法を適用する方法に着目し、シミュレーション解析<sup>3)</sup>を行い、その解析結果に基づいて実際の改良地盤へ適用することを試みたものである。

弾性波を利用した反射法は、近年では活断層調査によく利用されており、かなりの実績を挙げている探査法である<sup>4)</sup>。またS波はP波と異なり、地下水の影響を受けにくく、浅い地層に対してはP波よりも速度の遅いS波を用いることによって分解能を向上させることができ、更にS波の中でもSH波はそれ自身のみ反射させるので<sup>5)</sup>、本改良層の検出にはSH波による探査法の適用を試みた。

シミュレーション解析は、地下構造のモデルを設定して反射記録を作成する順解析問題とした。解析は、地盤改良された薄い土層を想定してモデル化し、振源周波数、改良層厚、改良層の弾性波伝播速度をそれぞれ変化させ、これらの反射波特性について考察するとともに、改良層を定量的に検出するために必要な最適振源周波数について検討を行った。そして、実際に沖積粘土中に、深さ約12m、厚さが約2mの地盤改良層を施工した現場において、このシミュレーションに基づいた検討結果によるS波浅層反射法を適用し、改良層の抽出を行った結果についても検討した。

## 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。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<sup>6)</sup>。地震波動のシミュレーションを行う方法としては、波線理論に基づく方法、グリーン関数による積分法などがあるが、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。

実際の現場における取得データは、三次元的な広がりを持つ空間から入ってくる情報である。しかしながら、本研究のシミュレーション解析においては、二次元のモデルを中心に解析を行っていく。その理由として、

①三次元のシミュレーション解析は膨大な情報量を扱うので、それに比例して大型計算機における計算時間の増大が見込まれる。

②本研究の解析は、現場の状態を想定したシミュレーション解析なので、受振器間隔などの既知パラメータが存在し、三次元になると解の安定条件がより困難となる。

③SH波は反射の際にSH波のみを発生させるので、測線方向と測線に垂直な方向のベクトルの波に関しては性質の違う広がりをみせるものと思われる。

以上に挙げた理由により、本研究では三次元のシミュレーション解析は行わない。

### (1) 差分近似

差分法では不均質な弾性媒質を多くの微少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<sup>6)</sup>。

二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。

二次の中央差分式により式(1)は、

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

と差分近似される。

次に、地下の領域について地表に沿う水平成分を  $X$  軸、鉛直方向を深度方向を正とする  $Z$  軸、時間ステップを  $k$  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。図-1 は、これらの

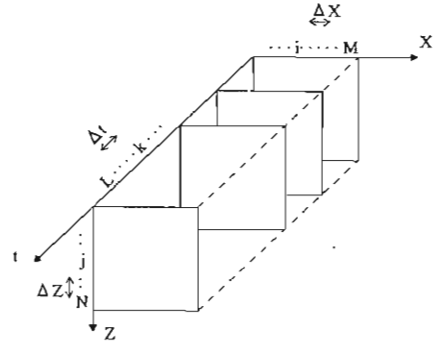


図-1 座標軸の設定

軸の定義について示したものである。いま、 $(i=1, 2, 3, \dots, M; j=1, 2, 3, \dots, N; k=1, 2, 3, \dots, L)$ として、

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

と表すと、式(2)は、

$$U_{i,j}^{k+1} = 2[1 - (V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta X)^2 - (V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta Z)^2] U_{i,j}^k + (V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta X)^2 (U_{i+1,j}^k + U_{i-1,j}^k) + (V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta Z)^2 (U_{i,j+1}^k + U_{i,j-1}^k) - U_{i,j}^{k-1} \quad (4)$$

さらに、 $\alpha = V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta X$ ,  $\beta = V(X, Z) \cdot \Delta t / \Delta Z$  とすると式(4)は、

$$U_{i,j}^{k+1} = \lambda(1 - \alpha^2 - \beta^2) U_{i,j}^k + \alpha^2 (U_{i+1,j}^k + U_{i-1,j}^k) + \beta^2 (U_{i,j+1}^k + U_{i,j-1}^k) - U_{i,j}^{k-1} \quad (5)$$

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。式(5)は、原位置  $(i, j)$  における時間ステップ  $k+1$  の状態は、時間ステップ  $k$  における原位置を中心とする5つのグリッドの状態、および時間ステップ  $k-1$  における原位置の状態によって求まることを意味する。

### (2) 振源関数

一般的にシミュレーション解析は、振源を初期条件として与える方法と、振源関数として与える方法がある。本研究では振源を、振源関数として与える。振源関数はショックウェーブを想定して、リッカーウェーブレット<sup>7)</sup>を用いる。リッカーウェーブレットは正規分布のグラフを2階微分した形で次のように表される。

$$y = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) \exp(-\pi^2 f^2 t^2) \quad (6)$$

振源関数としてリッカーウェーブレットを用いる際注意しなければならないことは、関数  $y$  は  $t$  が無限大の値をとっても限りなく零に近づくだけで完全には零にならない。

### (3) 境界条件

差分近似によるシミュレーション解析においては式(5)で述べたように、 $k-1$ ,  $k$  の時間ステップの状態により、 $k+1$  の時間ステップの状態が求まるという時間的な連鎖

と同時に、空間的な連鎖の広がりも行われている。前者は、時間ステップを途中で打ち切れば大きな問題は生じない。しかしながら後者の空間的な連鎖に関しては、大型計算機においては、メモリの制限から空間的な広がりに対して無限の計算領域を取ることができないという点から、何らかの条件が必要となってくる。その計算領域の設定に用いられるのが境界条件である。

本研究では境界条件として、透過境界条件を用いてシミュレーション解析を行う。

#### a) 透過境界条件

透過境界条件とは、境界面に入射してきた波に対して、反射係数が零になるように条件を与えるものである。たとえば、 $X=a$ における透過境界条件は、次のように表される。

$$\frac{1}{V(X,Z)} \frac{\partial U(a,Z,t)}{\partial t} + \frac{\partial U(a,Z,t)}{\partial X} = \frac{1}{V(X,Z)} \frac{\partial U(a-\Delta X,Z,t-\Delta t)}{\partial t} + \frac{\partial U(a-\Delta X,Z,t-\Delta t)}{\partial X} \quad (7)$$

式(7)を、式(3)を用いて差分化すると、

$$U_{M,j}^{k+1} = U_{M,j}^k + U_{M-1,j}^k - U_{M-1,j}^{k-1} + \alpha(U_{M-1,j}^k - U_{M,j}^k - U_{M-2,j}^{k-1} + U_{M-1,j}^{k-1}) \quad (8)$$

となる。

同様に  $X=0$ ,  $Z=b$  における透過境界条件は、

$$U_{1,j}^{k+1} = U_{1,j}^k + U_{2,j}^k - U_{2,j}^{k-1} + \alpha(U_{2,j}^k - U_{1,j}^k - U_{3,j}^{k-1} + U_{2,j}^{k-1}) \quad (9)$$

$$U_{i,N}^{k+1} = U_{i,N}^k + U_{i,N-1}^k - U_{i,N-1}^{k-1} + \beta(U_{i,N-1}^k - U_{i,N}^k - U_{i,N-2}^{k-1} + U_{i,N-1}^{k-1}) \quad (10)$$

シミュレーション上ではこの式を用いて条件を与えるが、近似的に導いた式であることから、モデルの境界での反射係数は、完全には零とはならない。

#### (4) 収束と安定条件

差分近似によって導かれた式(5)は、微分で表されている波動方程式を差分で近似したもので、時間的な連鎖を繰り返すうちに解の誤差が増大してしまうことがある<sup>8)</sup>。解の安定とは、差分方程式の解の誤差が時間の増加と共に発散しないことである。また、解の収束とは空間や時間の刻みを零に近づけたとき、差分方程式の解が微分方程式の解に収束する事を意味する。Rを差分方程式の解の誤差、Pを微分方程式の解、Sを差分方程式の解、Cを定数として、解の安定と収束の意味を式で表すと、

$$\lim_{k \rightarrow \infty} R < C \quad (11)$$

$$\lim_{\substack{\Delta X \rightarrow 0 \\ \Delta Z \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0}} S = P \quad (12)$$

を意味する。

式(11)は安定条件、式(12)は収束条件に対するものである。ここで  $t=k\Delta t$  であるから、時間の刻みを零に

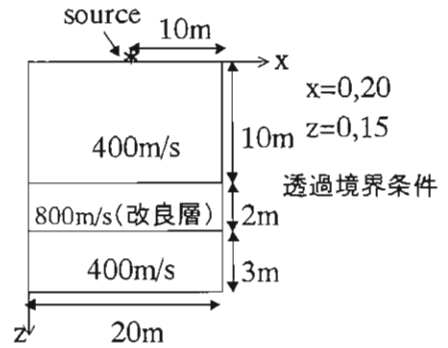


図-2 解析に用いた地層モデル

近づけるということはある時間までに無限の時間ステップを繰り返すということである。つまり式(11)で表した安定条件が言えたならば、それは同時に式(12)の収束条件も満たしていることになる。

いま、波の伝播速度をVとして、 $\alpha = V \cdot \Delta t / \Delta X$  とすると、解の安定条件は次の式で表される。

$$\text{一次元の場合} \quad \alpha \leq 1/\sqrt{2} \quad (13)$$

$$\text{二次元の場合} \quad \alpha \leq 1/\sqrt{2} \quad (14)$$

$$\text{三次元の場合} \quad \alpha \leq 1/\sqrt{3} \quad (15)$$

シミュレーション解析では、パラメータをどのように変化させても、 $\alpha$ の値が安定条件の範囲内にある場合、差分計算の解の意味においては影響がない。

### 3. 改良層の反射波特性

予想されるモデルを与えてその応答のシミュレーションを実行することは、一般に順問題あるいは順解析といわれ、地下情報計測上重要な位置を占める方法である。一方、未知の地下構造を計測して得られたデータからその構造を推論することを逆問題あるいは逆解析(あるいはインバージョン)と呼んでいる<sup>9)</sup>。

本研究は、現場における地盤改良後の調査がまだ十分に実施されていないという理由もあり、順問題のシミュレーション解析を行う。しかしながらこの順問題も、繰り返し構造修正を行うシミュレーション逆解析過程を形成する要素である。

逆問題には唯一解が存在しないため、観測データから予想される地下構造は多岐にわたる。しかしながら本事業においては、PS検層の結果により、各層の弾性波伝播速度をある程度既知パラメータとして解析することができる。そのため解析においては、層の存在、層の弾性波伝播速度を未知とする真の意味での逆問題に対して、比較的順問題の要素を含んだ解釈法が求められ

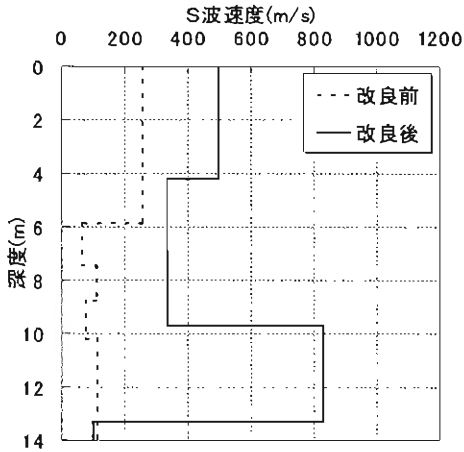


図-3 地盤改良前後のPS 検層結果

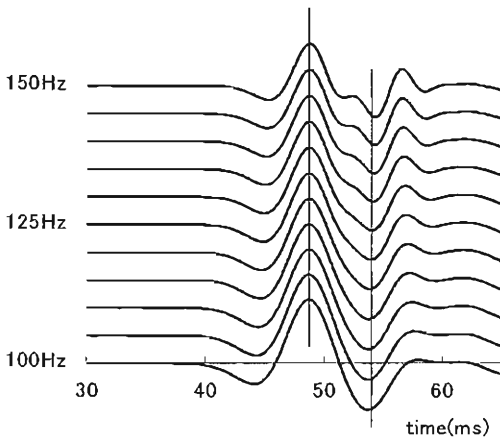


図-4 振源周波数の変化に伴う反射波変化

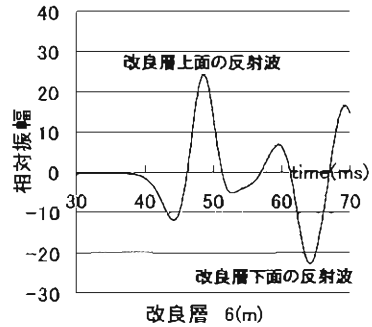
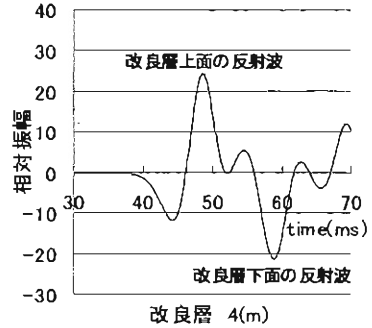
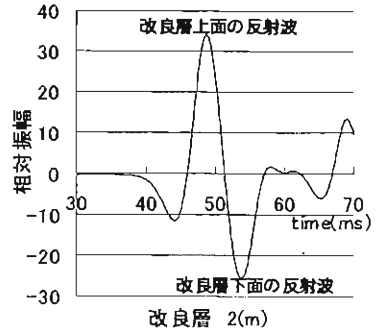


図-5 改良層厚の変化に伴う時間断面

る。

### (1) モデリング

本研究に用いた解析は、図-2 に示すように、深さ15mの地層の水平多層構造で幅20mの断面を想定し、地表の中心にS波振源を位置させた平面2次元モデルを用いた。

対象とする実際の地盤改良は幅約12m、長さ約110m、改良層の深度は約10m、厚さは2mでCDM工法(Cement Deep Mixing)によって施工される。ここで試験的にS波反射法を行う。図-2は測線方向の地層モデルである。二次元的なモデルを測線方向の平面で想定した場合、水平方向の境界には透過境界条件を用いる。また、地中の速度分布は、改良後

の地盤層を想定してS波伝播速度400m/sの速度層中に、厚さ2m、S波伝播速度800m/sの改良層を設定して行う。図-3は、地盤改良前後におけるPS検層によって得られたS波速度の深度方向分布を示したものである。この図より、改良層上部には、後述するように低強度の改良層が存在していることから、改良後のS波速度はすべての深度で高くなっている。これらのことより、図-2で示した地層モデルのS波速度を決定した。

解析においてグリッドの離散化、周波数、速度などのパラメータは、前述した安定収束条件、グリッド分散などの諸条件を考慮して設定しなければならない。本研究におけるこれらの基本となるパラメータは、 $\Delta X = \Delta Z = 0.05\text{m}$ 、 $\Delta t = 0.04\text{ms}$ とする。この場合安

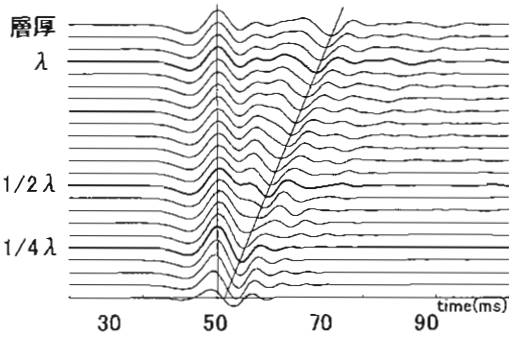


図-6 改良層の変化に伴う反射波変化

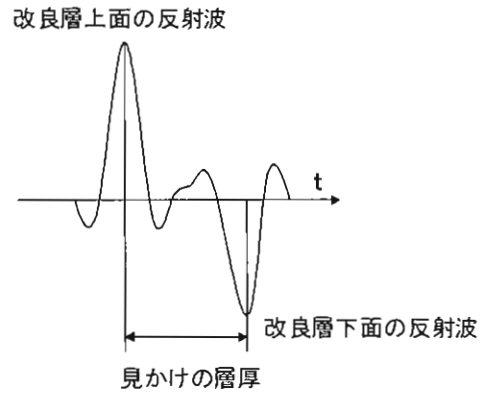


図-7 見かけの層厚の定義

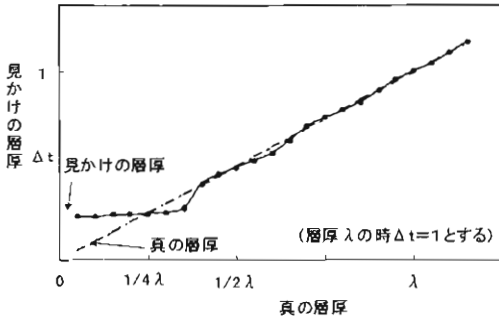


図-8 真の層厚と見かけの層厚との関係

定化条件は式(14)より,

$$\alpha = V \cdot \Delta t / \Delta X = 800 \times 0.00004 / 0.05 = 0.64 \leq 1/\sqrt{2} \quad (16)$$

となり, 安定収束条件を満たす。

### (2) 振源の周波数の変化による反射波特性

層の分解能は波長によって決定される。波長は弾性波伝播速度と周波数によって定まるが, 地中におけるS波伝播速度は人為的に変化させることはできないので, 分解能の向上は振源周波数を上げることが最適な手段といえる。図-4 は, 分解能を考察するために周波数を変えて 2m の薄層の上下面から反射波形を表したものである。これによると, 130Hz あたりで反射波が分離していることが見てとれる。

### (3) 波長と反射波形上の改良層厚の検出能力

改良体のS波速度と周波数ともに一定とし, 改良体の層厚を変化させて, 反射波形の上での改良体層厚の検出能力について数値シミュレーションを行った。

図-5 は, 図-2 のモデルにおける時間断面である。これは, 振源の位置における時間断面を一次元的に取り出したもので, 振源周波数 100Hz, 発振ピーク値は相

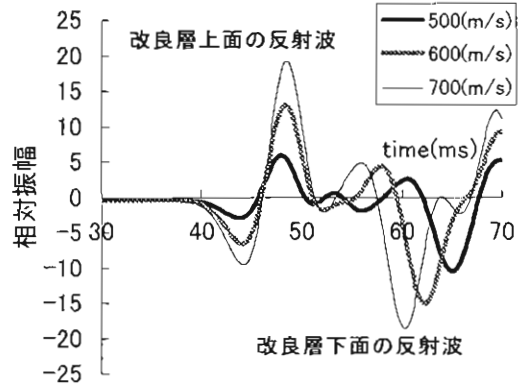


図-9 改良層の速度変化に伴う時間断面

対振幅 100 の振源を用い, 改良層を 2m, 4m, 6m にしたものである。図-6 は, 同様に層厚を変えて反射波形を表したものである。いま, このグラフについて図-7 に示すように見かけの層厚を定義する。真の層厚とは, 改良層の層厚の二倍をその層の弾性波伝播速度で割った走時で表した層厚のことである。見かけの層厚とは, 改良層の上面と下面からの, 二つの反射波による到達時間の差である<sup>10)</sup>。図-8 は, これら二つの層厚の関係をグラフにしたものである。理論上は振源周波数の  $1/4\lambda$  が分解能の限界とされているが, このグラフから  $1/4\lambda$  より少し厚い層で見かけの層厚が一定値に収束していることがわかる。このことは, 分解能の限界以下では, 見かけの層厚から真の層厚の推定が不可能であることを意味している。

### (4) 改良層の弾性波伝播速度変化による反射波特性

いままで述べてきた振源の周波数の変化と層厚の変化は, 相関関係を持っており, 一般化されやすいパラメータ変化である。つまり, シミュレーション解析において

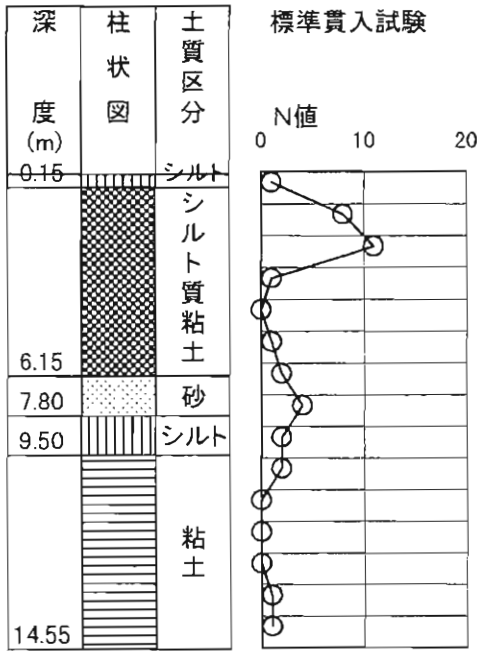


図-10 試験現場の土質柱状図

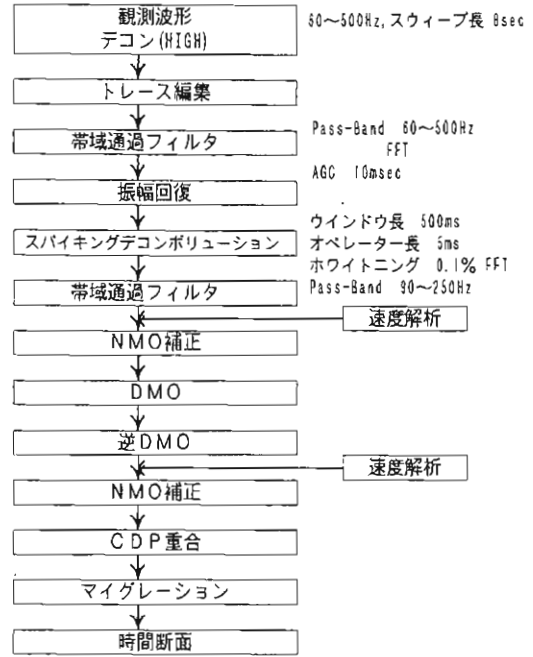


図-11 波形解析のフローチャート

振源の周波数 100Hz で層厚 4m の層を検出するという事は、振源の周波数 200Hz で層厚 2m の層を検出することと何ら変わりはない。しかし速度が変化すると反射係数が変化する。反射係数とは、

$$K = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (17)$$

と表される。ここで、 $\gamma$ : 反射係数、 $\rho_1$ : 媒質 1 の密度、 $V_1$ : 媒質 1 の弾性波伝播速度、 $\rho_2$ : 媒質 2 の密度、 $V_2$ : 媒質 2 の弾性波伝播速度とする。解析では媒質の密度は一定として扱うので  $\rho_1 = \rho_2 = 1$  である。式(17)より、対象としている改良層上面の反射係数  $K_1$  は、

$$K_1 = \frac{800 - 400}{800 + 400} = 0.3$$

また、改良層下面の反射係数は、

$$K_2 = \frac{800 - 400}{800 + 400} = -0.3$$

となり、改良層下面からの反射波は負の値となって返ってくる。すなわち、これは改良層上面および下面の反射波が、逆位相となることを意味している。

図-9 は、図-2 に示す地盤モデルについて層厚を 4m にした状態で、改良層の S 波伝播速度を 500m/s から 700m/s とした場合の図である。また、振源の周波数 100Hz、発振ピーク値は相対振幅 100 の振源を用いた。

この図は振源の位置における一次元的時間断面である。この図より、改良層上面の反射波と、改良層下面の反射波による干渉の度合いが判断される。

層の検出とは、その層の上面の反射係数が大きければよい。それに対して層の分離は、層の上面と下面における往復走時と反射係数のかねあひが必要となってくる。つまり、層の上面の反射係数が大きいと、その透過する弾性波のエネルギーが少なくなり、また下面からの反射波振幅が小さくなり、分解が困難になることを意味する。往復走時が短いと、改良層下面の反射波が、改良層上面の反射波と干渉するという現象が生じることから、上下層の分離が困難になることを意味する。

#### 4. 現場への適用

##### (1) 施工概要および S 波浅層反射法の仕様

実験対象とした現場は大阪府の中部に位置し、沖積粘土が厚く堆積している。本現場の土質柱状図を図-10 に示す。この図から明らかなように、地表面から 3m までは N 値が高くなっているが、これは重機等が通るために、地表面部分を地盤改良したためである。その後 4m 以深では、軟弱な粘土層が連続しているが、深さ 10m までには厚さ 1m 程度の沖積砂層が存在する。また

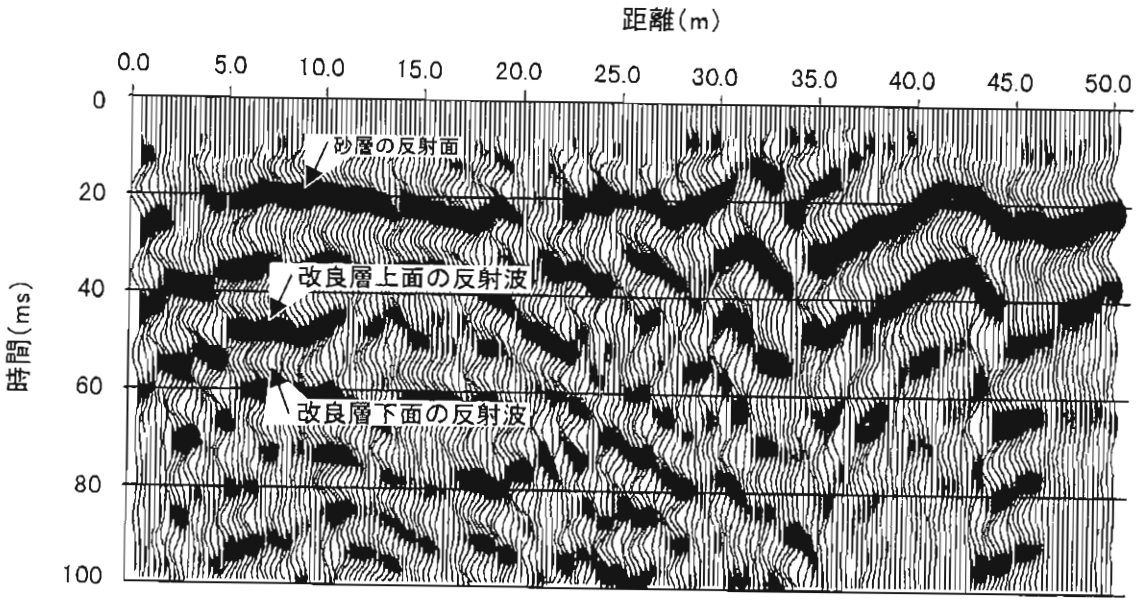


図-12 探査対象層の時間断面

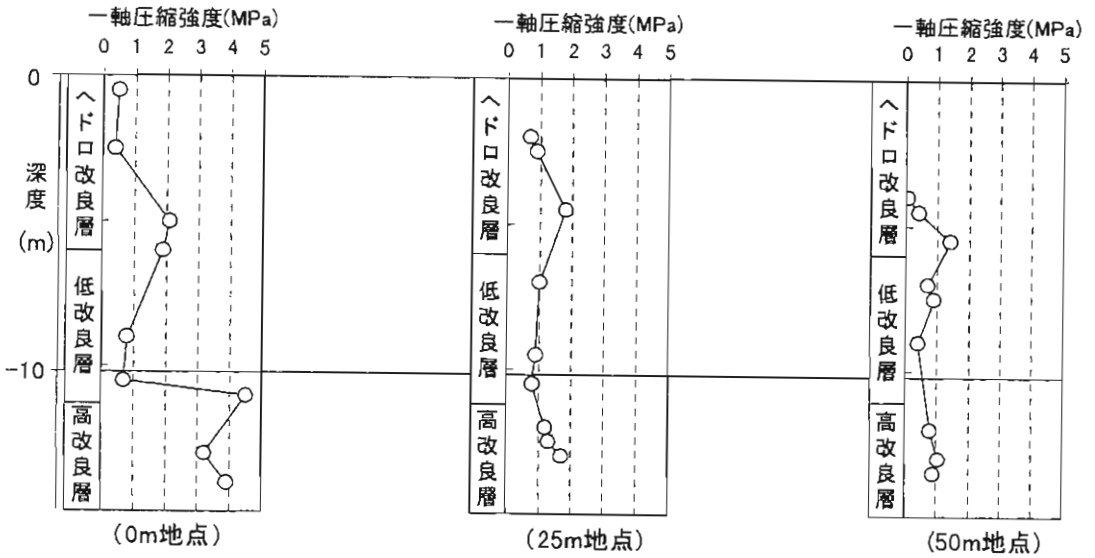


図-13 地盤改良後のボーリング結果と一軸圧縮試験結果

地下水位は、ほぼ $-0\text{m}$ である。改良層の施工は深度 $12\text{m}$ の地点に、直径 $1.5\text{m}$ 、高さ $2\text{m}$ の円柱状の固化体を一部重ねながら連続して施工していくものである。なお室内実験の結果、現位置との同一条件下で作成した固化体の $90$ 日養生における一軸圧縮強度は約 $3.4\text{MPa}$ である。またこの改良層の上には、 $-7.5\text{m}$ 付近からセメントミルクの配合量を高強度改良層に比べて、半分の量としている低強度改良層がある。この層の室内

試験で得られた $90$ 日養生における一軸圧縮強度は、約 $0.23\text{MPa}$ である。

S波浅層反射法は、地盤改良後この現場内において実施した。地盤改良を行った後、改良層の強度が所定の値に達するまでには少なくとも約 $60$ 日以上養生期間を必要とすることから、本探査を実施する測線は、地盤改良後できるだけ長い日数が経過している地点を対象として、 $50\text{m}$ の測線を選定した。この測線上に $0.5\text{m}$ 間

隔で 48 個の速度型受振計を設置した。用いた受振計の固有周波数は 14Hz である。振源としては 500N のエネルギーを有するポータブルパイブレータを用いた。振源は 1m のオフセットで移動させ、1 回の測定に際しては、スイープ長 8 秒、スイープ周波数 60~500Hz の SH 波を地盤内に与えた。なおこのときの重合数は 4 回であり、サンプリング間隔 0.5ms、記録長 0.5sec である。このとき受振された波の卓越周波数は 100~120Hz であった。これより、3. で本計測現場を対象として検討した解析結果より求めた最適周波数とほぼ一致した値が得られている。

## (2) 探査結果

これら記録された波形は、図-11 のフローチャートに示す流れに沿って解析処理を行った。またこの図中には解析処理に用いたパラメータを示している。速度解析に関しては、参考文献 9) を参考にして行った。なお解析に際して、各地盤の S 波速度は、本計測線にあるボーリング孔を利用して行った PS 検層結果を用いた。

図-12 は解析処理を行った時間断面を示している。なお測線は本断面の左端を 0 とする。反射波は、反射係数が正となる部分を黒く塗りつぶしている。この図より、20msec 付近に極めて連続性の良い反射面が認められ、その下位にも数条の連続した反射面が認められる。これらの反射面はヘドロ層と低強度改良層との境界、粘土層と砂層との境界等を示していると思われる。またその下位の 60msec 付近には、負の明瞭な連続した反射面が認められる(測線 0~25m 付近)。PS 検層で得られた S 波速度を用いて深度変換すると G.L.-14.5m となり、これは高強度改良層下面(高強度改良層とその下の沖積粘土層との境界)とほぼ一致している。また約 50msec 付近には正の反射面が認められる。これは高強度改良層の上面と考えられるが、その連続性は下面の反射面に比べて低い。この原因としては、低強度改良層と高強度改良層との速度の差が、高強度改良層とその下の沖積粘土層との速度差より少ないためと考えられる。更にこれら反射面は右へ行くほど深度方向に傾斜している。これは、0~25m 付近までの養生日数は約 90 日を経過しているが、25~50m までのそれは約 60 日程度となっている。したがって各層の S 波速度は養生日数の短い地点では遅くなっていることが推測されることから、時間断面ではこのような結果になったものと考えられる。

図-13 は、計測線上の 0m、25m、50m 地点における地盤改良後のボーリング結果、ならびにサンプリングしたコアの一軸圧縮強度を示している。これより、60 日養生における各地点の高強度改良層および低強度改良層の一軸圧縮強度に関しては、必要とする最低の一軸圧縮強度(低強度改良層: 0.1MPa、高強度改良層:

0.55 MPa) を十分満たしている。しかし、低強度改良層の顕著な差異は養生期間が 60 日前後では現れず、本現場では、90 日程度必要とされる。これに関しては、種々の要因があると考えられるが、現時点では十分わかっていない。各ボーリングの実施日は、S 波反射法を行った時期とほぼ同様である。これによると 0m 地点の一軸圧縮強度の深さ方向の分布は、低強度改良層と高強度改良層とは、明確な相違がみられ、高強度改良層の一軸圧縮強度は、急激に高くなっているのが認められる。これに対して、25m 地点ではその違いが 0m 地点に比べて小さく、50m 地点ではその違いが明確ではない。これは、上述したように高強度改良層の養生期間の差異によるものと思われ、図-12 の探査結果ともよく一致したものとなっていることから、本探査は真の結果を与えていることが認められた。

以上より、S 波浅層反射法によって改良された層を探査する手法は、本解析結果とそれに基づいて行った実際の現場での測定結果とはよく一致した。これにより、このような広範囲の地盤改良法の新しい管理手法として、本探査法が十分適用可能であることが示された。

## 6. 結論

本研究は、薄層の地盤改良面を抽出するために、S 波浅層反射法の適用に関して、主としてシミュレーション解析を用い、その有効性および、適用条件について研究を行ったものである。本研究によって得られた研究成果を、以下に述べる。

(1) 振源の周波数変化の結果より、100Hz より周波数を上げていくと、120Hz から 130Hz で反射波が分離することが認められた。しかしながら、周波数が高いほど、地盤による吸収が大きい。そこで、改良層の存在が既知であると考え、振源のエネルギーを考慮すると最低 100Hz の振源周波数を用いることが必要である。

(2) 改良層の層厚を変化させたシミュレーション解析の結果より、真の層厚と見かけの層厚が一致するのは、層厚が振源周波数の  $1/4\lambda$  より厚い層厚の時であることが認められた。

(3) 改良層の弾性波伝播速度を変化させた時、弾性波伝播速度が大きくなるほど、改良層下面からの反射波振幅が小さくなり、また上下面からの反射波の到達時間間隔が短くなることから、分解能が低下することが認められた。このことから、薄い改良層の抽出には、改良層厚と改良土層の弾性波伝播速度とが深くかかわっていることが認められた。

(4) 現場での適用に関しては、厚さ 2m の改良層を S 波反射法によって探査することが可能であることが認められた。しかし、更に薄い改良層の探査に関しては、改良、



未改良層の弾性波伝播速度、深度等に注目して解析すべきであることが明らかとなった。

謝辞:本研究を遂行するにあたり、多大なご協力を頂いた関西大学大学院生河川琢哉君、ならびに元関西大学卒研生の城本大作君(現(株)森組)に対して感謝申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) DJM工法研究会技術委員会:粉体噴射攪拌工法・技術マニュアル, DJM工法研究会, pp.1-11, 1993.
- 2) 西田 一彦:地盤改良と計測, 地盤改良便覧, 日本材料学会 土質安定材料委員会, pp.32-38, 1991.
- 3) 芦田 譲, 村山 典久, 佐々 宏一:反射法探査データのAVOインバージョン, 物理探査, vol.44, No.5, pp311-317, 1991.
- 4) 金山清一, 長谷川修一, 鶴田聖子, 川上祐史:物理探査と活断層トレンチ調査, 物理探査, vol.50, No.6, pp.589-599, 1997.
- 5) 田治米 鏡二:土木技術者のための弾性波による地盤調査法, 槇書店, pp.142-149, 1977.
- 6) 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.
- 7) Ricker, N.: Wavelet contraction, wavelet expansion and the control of seismic resolution, Geophysics, vol.18, pp.769-792, 1953.
- 8) 橋本 修: FDTD時間領域差分法入門, 森北出版, pp.17-19, 1996.
- 9) 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, pp.79-85, pp.108-109, p.143, 1993.
- 10) Widess, M. B.: How thin is a thin bed?, Geophysics, vol.38, pp.1176-1180, 1973.

(1998.9.18 受付)

## SIMULATION ANALYSIS ON GEOPHYSICAL PROSPECTING OF IMPROVED THIN LAYER BY S-WAVE REFLECTION METHOD AND ITS APPLICATION

Harushige KUSUMI, Yuzuru ASHIDA, Kazuhiko NISHIDA and Ryuji EHARA

Before construction of any structures on surface or subsurface of alluvial clay layer, the cement mixing method is used frequently to construct a thin improved layer at certain depth of ground. However, the confirmation of improved layer is performed by only boring and laboratory testing. In the present paper, the confirmation method using s-wave reflection method, and the simulation analysis which as certain continuity of an improved thin layer is proposed. Especially in this analysis, the proposed method for the model at a thin layer of high velocity which lies between two layers of low velocity is examined, and the results of this simulation analysis are found to be applicable construction site.