

S波浅層反射法による地盤中の薄いセメント改良層の モニタリング

楠見 晴重*・芦田 讓**・西田 一彦*
江原 竜二*³・河口 琢哉*⁴

Monitoring of Improved Thin Layer by S-Wave Reflection Method

rushige KUSUMI*, Yuzuru ASHIDA**, Kazuhiko NISHIDA*, Ryuji EHARA*³ and Takuya KAWAGUCHI*⁴

ABSTRACT

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 effective confirmation of improved thin layer is performed by only boring and laboratory testing. In the present paper, the confirmation method of an improved thin layer by using S-wave reflection method are discussed. Especially, prospecting before and after ground improvement by S-wave reflection method, it is tried to develop the monitoring system of improved thin layer. This monitoring system is found to be applicable to construction sites.

Key words: reflection method, monitoring, S wave, ground improvement, thin improved 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10 m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2~3 m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(DJM工法研究会技術委員会, 1993)。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。現時点では数十mに1

1998年10月29日原稿受付；1998年12月18日受理

* 関西大学工学部土木工学科

〒564-8680 吹田市山手町

** 京都大学大学院工学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

*³ 大阪府 土木部

〒540-0008 大阪市中央区大手前2丁目

*⁴ 関西大学大学院工学研究科

〒564-8680 吹田市山手町

Manuscript received October 29, 1998; Accepted December 18, 1998.

* Department of Civil Engineering, Kansai University
Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan

** Department of Earth Resources Engineering, Kyoto University

Yoshida-honcho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

*³ Department of Civil Engineering, Osaka Prefectural Office

Otemae 2-chome, Cyuo-ku, Osaka-shi, Osaka 540-0008, Japan

*⁴ Department of Civil Engineering, Kansai University
Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan

本のボーリングを行い、改良層厚を確認し、また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ことが困難であり、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(西田, 1991)。

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。

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波浅層反射法を適用する方法に着目し、2カ所の地盤改良現場を対象として、地盤改良前後について本探査法を実施して、改良層のモニタリングを行ったものである。

一般にセメントミルクによる地盤改良を行う対象層は、地下水位が高く、沖積粘土層がほとんどである。したがって、このような地層に対して、何らかの物理探査法を用いて、改良層のモニタリングを試みる場合には、地下水の影響を受けないS波を利用した手法が適当であると考えられる。また高密度電気探査法の活用も考えられるが、海岸部に近い場合は海水の影響を受けることから、S波浅層反射法が最適であると判断し、この手法を用いて、薄いセメント改良層のモニタリングの可能性について検討を行った。

2. 工事手順

図1は、工事概要を示したものである。まず、地盤改良を行う区間全てをSMW(Soil Mixing Wall)工法によって、図1(a)に示すように両側に深さ約30mの連続した壁を地中に作る。この時点で地盤改良前にS波浅層反射法によって探査を行う。次に図1(b)に示すように深さ12mの地点に厚さ2mの改良層を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る工法を用いて施工する。施工後約60~90日経過したときに、再びS波浅層反射法を実施して、改良後の地盤状況を探査する。これより、改良前後の探査結果を比較することによって改良層のモニタリングを行う。

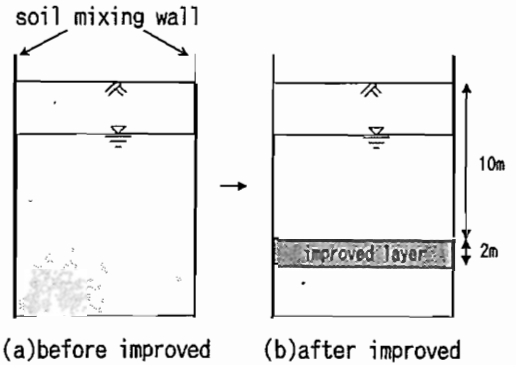


Fig. 1 Schematic diagram of engineering work

3. 地盤改良工法

本研究で用いられる地盤改良工法、すなわち粉体噴射攪拌工法(Dry Jet Mixing method: DJM工法)は建設省総合技術開発プロジェクトの「新地盤改良技術の開発」の一環として建設省土木研究所(施工研究室)と日本建設機械化協会(建設機械化研究所)が中心となって、昭和52年度から54年度にかけて開発された技術を基礎として実用化が進められた工法である。

工法の内容としては、軟弱地盤中に粉粒体の改良材を供給し強制的に原位置土と攪拌混合することにより、土と改良材を化学的に反応させて土質性状を安定なものにするとともに強度を高めるものである。改良材は、空気流により搬送され攪拌翼の付け根部から翼の回転によって生じる空隙部に吐出され、吐出された改良材は攪拌翼の回転に伴って回転軌跡の全面に均等散布された後、さらに原位置土と攪拌混合される。改良材と分離した空気は攪拌軸に沿って軸と土の間隙から地表に放出される。

改良材は主として石灰、セメントが使用され近年さらに高炉水砕スラグ、フライアッシュ等のボラゾン物質、硫酸カルシウム、塩化カルシウム等の無機化合物等が混合されたセメント系固材が使用されている。

4. 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2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

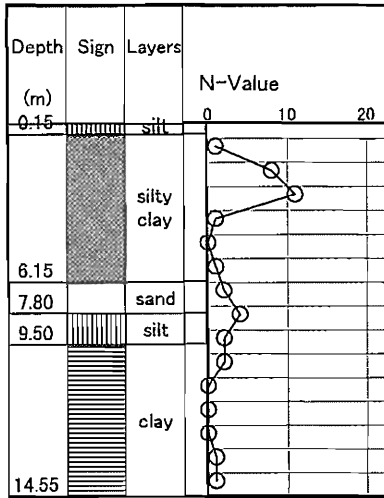


Fig. 2 Geological profile of testing site

た地下水位は、ほぼ -0 mである。改良層の施工は深度 12 mの地点に、直径 1.5 m、高さ 2 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 MPaである。またこの改良層の上には、 -7.5 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 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 日以上での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 mの測線を選定した。この測線上に 0.5 m間隔で 48 個の受振器を設置した。用いた受振器の固有周波数は 14 Hzである。震源としては 500 Nのエネルギーを有するポータブルバイブレータもしくは板たたき法を用いた。ポータブルバイブレータは 1 m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 $60\sim 500$ HzのSH波を地盤内に与えた。なおこのときの重ね数は 4 回であり、サンプリング間隔 0.5 ms、記録長 0.5 secである。計測の展開はインラインオフセットで行った。このとき受振された波の卓越周波数は $100\sim 120$ Hzであった。板たたき法はやはり 1 mのオフセットで移動させ、1回の測定に対しては数回打撃している。

5. 探査結果

図3, 4は、現場Aの同一測線において地盤改良前後に行った板たたき法によるS波浅層反射法の解析処理を行った時間断面を示している。各地盤のS波速度は本計測線上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5は、現場AのPS検層結果のS波速度分布を示している。図3, 4の時間断面におけ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。このときの卓越周波数は約 $60\sim 70$ Hzである。両図を比較すると、地盤改良後の時間断面の 60 msec付近に改良層下面の反射面がみられる。しかし、改良層上面の反射面はあまり明瞭ではない。図6は、図4と同一測線上において、ほぼ同じ時期にポータブルバイブレ

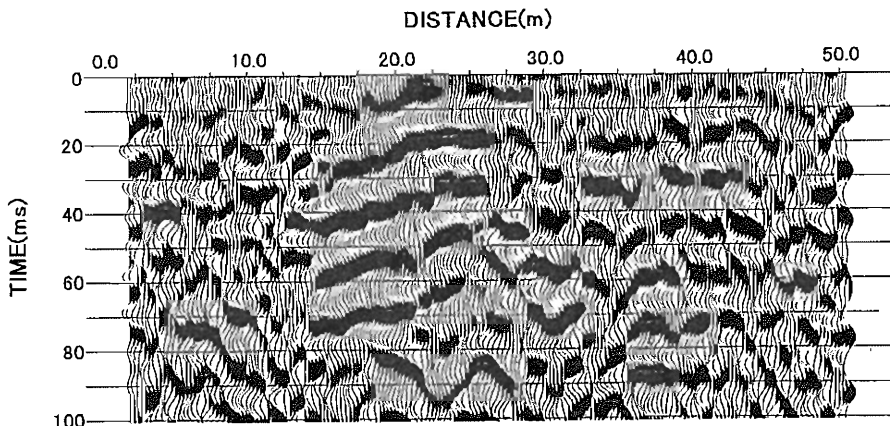


Fig. 3 Time section before improved work in site A (plate stacking method)

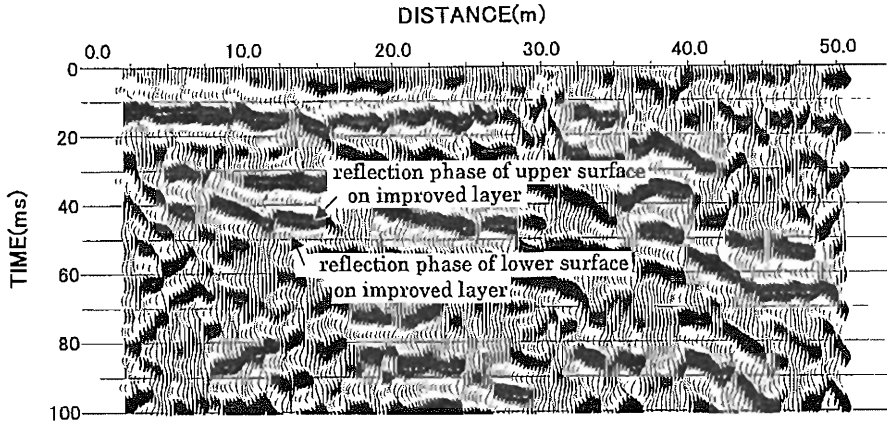


Fig. 4 Time section after improved work in site A (plate stacking method)

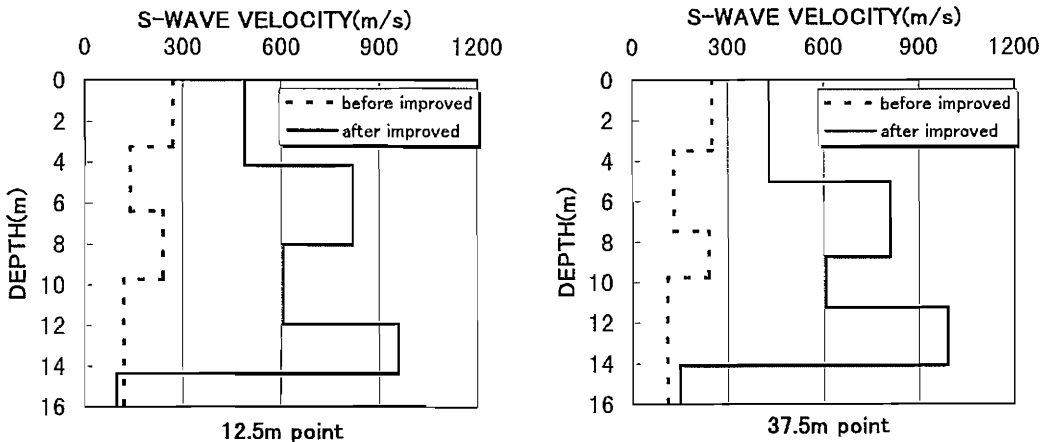


Fig. 5 Vertical distribution of S-wave velocity

ータを震源として、S波浅層反射法を行った時の時間断面である。この図より、20 msec 付近に極めて連続性の良い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 60 msec 付近には、負の明瞭な連続した反射面が認められる（測線 0~25 m 付近）。これら反射波の卓越周波数は 100~120 Hz である。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. -14.5 m 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 50 msec 付近には正の反射面が認められる。これは高強度改良層付近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、図 5 から明らかなように低強度改良層

と高強度改良層との S 波速度の差が、高強度改良層とその下の沖積粘土層との S 波速度差より少ないためと考えられる。更にこれらの反射面は右に行くほど深度方向に傾斜している。これは、0~25 m 付近までの養生日数は 90 日を経過しているが、25~50 m までのそれは約 60 日程度となっている。したがって図 5 より、上部のヘドロ改良層の S 波速度は 12.5 m 地点では 490 m/sec、養生日数の短い 37.5 m 地点では 430 m/sec と遅くなっていることから、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 7 は、図 4, 6 の計測線上の 0 m, 25 m, 50 m 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。各ボーリングの実施日は、S 波浅層反射法を行った時期とほぼ同

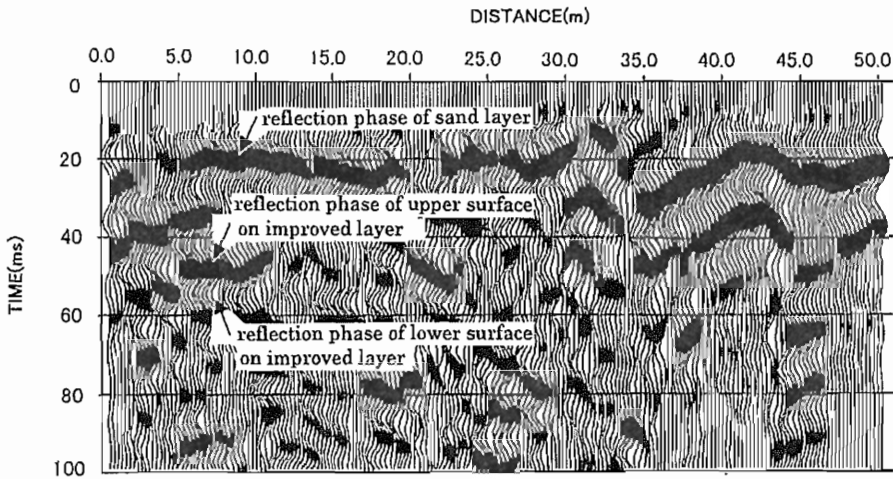


Fig. 6 Time section after improved work in site A (potable vibrator)

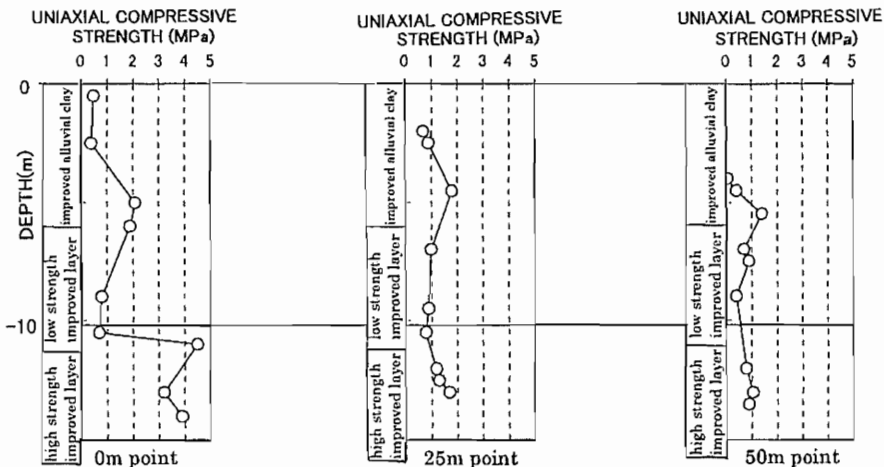


Fig. 7 Vertical distribution of uniaxial compressive strength after improved work by boring core

様である。これによると 0 m 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ことが認められる。これに対して、25 m 地点ではその違いが 0 m 地点に比べて小さく、50 m 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る、図 6 の探査結果ともよく一致したものとなっている。

図 8, 9 は、図 4, 6 とは少し離れた現場 B で、S 波ポータブルバイブレータを震源として S 波浅層反射法を

適用した時の地盤改良前後の時間断面である。ただし、この地層構成は、図 2 とはほぼ同じである。また地盤改良層の厚さおよび深度も図 4, 6 の場合と同様である。これらの図より地盤改良前の時間断面では、50~60 msec 付近には反射面が認められなかったのが、地盤改良後は、その付近で地盤改良上面と下面の反射面が確認される。特に図 4 の地盤改良後の時間断面に比べて、地盤改良上面の反射面が連続的に、しかも明瞭に確認できる。この原因としては、低強度改良層の改良工法の違いにあると思われる。すなわち、現場 A の地盤改良工法は DJM 工法と呼ばれており、図 10(a) に示すように

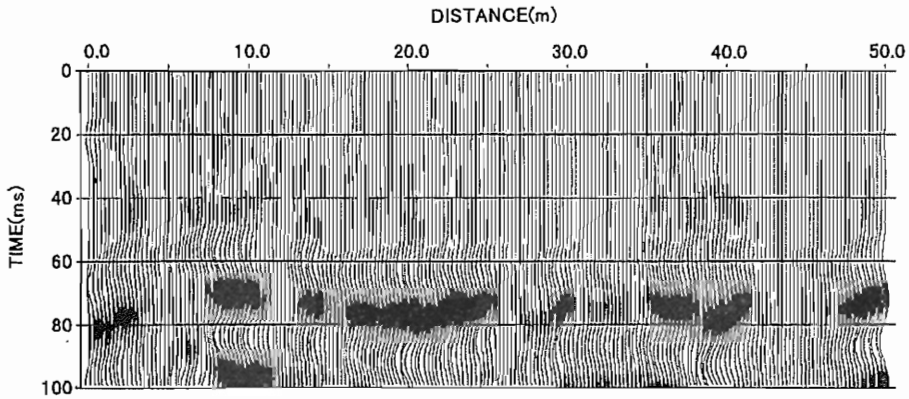


Fig. 8 Time section before improved work in site B (portable vibrator)

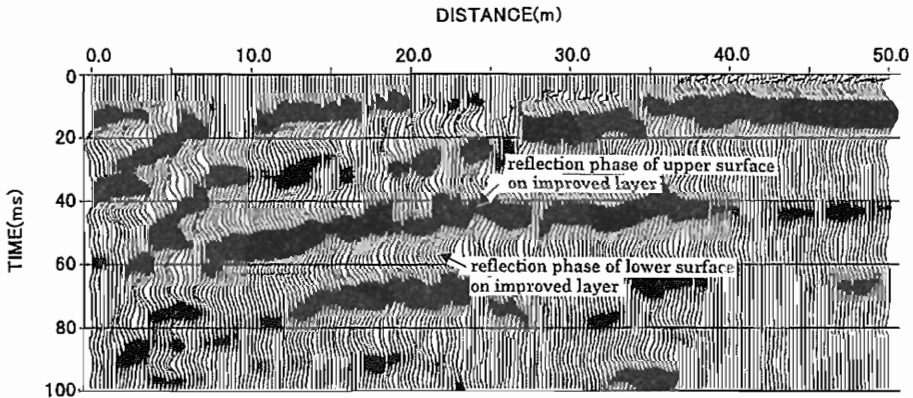


Fig. 9 Time section after improved work in site B (portable vibrator)

シャフト先端の攪拌翼を地中に回転貫入させながら改良材（セメント粉体）を吐出し、原地盤と改良材を強制混合する。所定の深度まで吐出した後、引上げ攪拌し、円柱状の改良体を造成する。低強度改良層と高強度改良層は、改良材の吐出量を変えることより、1サイクルの作業の中で施工できる。

これに対して、現場Bの地盤改良工法はSMM工法と呼ばれており、図10(b)に示すようにボーリングマシンによって単管ロッドを改良深度まで貫入後、ロッド先端から改良材（セメントスラリー）を高圧噴射しながら回転引き上げて、原地盤の切削と攪拌混合を同時に行い、円柱状の改良体を造成する。改良材の吐出量およびボーリングマシンの回転数を施工中で変えることができないため、低強度改良層と高強度改良層はロッドの引き上げ速度を変えることにより、1サイクルの作業の中で施工できる。ここでは、

(1) 高強度改良層は、1ステップ毎に改良材を吐出して上下に連続した改良層を造成する。ここで1ステップは2.5 cmである。

(2) 低強度改良層は、2ステップおきに3ステップ改良材を吐出して、サンドイッチ状の改良層を造成する。すなわち、現場Aの低強度改良層は高強度改良層に比べ、改良材の吐出し量が少なくなるが、深度方向に連続的に改良されている。一方現場Bの低強度改良層は、5 cmの未改良層、15 cmの改良層と深度方向には連続的に改良材を攪拌されていない。図11は、現場A, Bにおける地盤改良後にサンプリングしたボーリングコアによるS波速度の深さ方向分布を表している。この図より、図6の高強度改良層と低強度改良層のボーリングコアのS波速度の差と図9のその差は、図9の方が大きいことが明らかであることから、図9の高強度改良層上面の反射係数は図6の反射係数より大きくなる

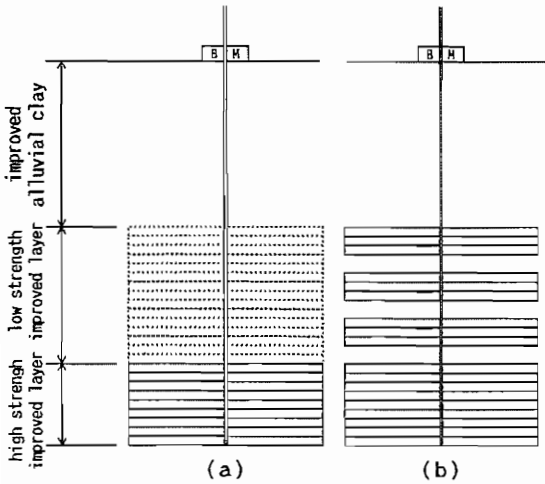


Fig. 10 Schematic diagram of DJM method and SMM method

ため、図9の高強度改良層上面の反射面が連続的にしかも明瞭に表れているものと考えられる。

以上、セメントミルクと軟弱粘土を機械攪拌によって混合させて、10~20 m 程度の深さに薄い改良地盤を造成し、そのモニタリング手法として、S波浅層反射法の適用を試みた。その結果、本手法を使用して地盤改良層をモニタリングすることは十分可能であることが認められた。また、極浅い所に薄い層の高速度帯を探索する手法についても多くの知見を得ることができ、今後更に定量的な手法として検討していくことが必要と考えられる。

6. 結 論

本研究は、沖積粘土層中の深さ約 10 m のところに約 2 m の改良層を施工した現場において、改良層の効果判定に S波浅層反射法を用い、モニタリング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) 同一測線における地盤改良前後の板たたき法およびポータブルバイブレータを震源とする S波浅層反射

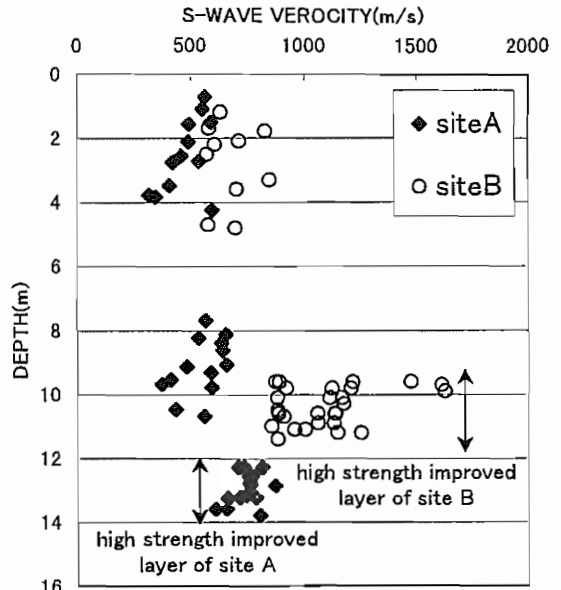


Fig. 11 Vertical distribution of S-wave velocity in site A and B by boring core

法の解析処理を行った時間断面から、ポータブルバイブレータを震源とする方法によって改良層上面、下面の反射面が認められた。

(2) ポータブルバイブレータを震源として S波浅層反射法を行うことにより、改良層の施工方法の違いによる地盤の改良程度を反射面から読み取ることが可能であることがわかった。

(3) 反射波が分離している状態では、改良層の速度差が大きいかほど反射係数が大きくなるため、反射波は連続的かつ明瞭に表れることがわかった。

参 考 文 献

DJM 工法研究会技術委員会 (1993) : 粉体噴射攪拌工法・技術マニュアル, DJM 工法研究会, 1-11.
 西田 一彦 (1991) : 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, 32-38.