

S波反射法による地盤中のセメント混合改良層の連続的な強度分布の評価法

楠見晴重¹・芦田譲²・西田一彦³・河口琢哉⁴・林徹明⁵

¹ 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)

² 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)

³ 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)

⁴ 正会員 修(工) (株)大林組 北品川JV工事事務所 (〒140-0001 東京都品川区北品川)

⁵ 修(工) インドネシア石油(株) 開発部 (〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿)

軟弱地盤を対象として、地上あるいは地中に構造物を施工する場合、セメントミルクと粘性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、機械攪拌工法を用いた地盤改良現場において施工された改良層の改良効果を定量的に評価する手法として、S波反射法を適用して得られたデータを用いて、速度構造解析を行うことにより、改良した地盤のS波速度分布を求めることを試みた。さらに、改良層のボーリングによって採取した試料の一軸圧縮強度と速度構造解析によって得られたS波速度との関係を把握することによって、改良地盤の連続的な一軸圧縮強度分布を求めようとした。

Key Words : reflection method, uniaxial compressive strength, S wave velocity, velocity analysis, ground improvement

1. はじめに

従来、地盤中のセメント改良層の効果確認には、主に、数十 m おきにチェックボーリングを行ってサンプリングしたコアの一軸圧縮試験が行われてきた¹⁾。しかし、この方法では限られた点の情報のみしか得ることができないために、改良層全体の品質評価を行うことは不可能である。建設された改良層を連続的にしかも、それを強度によって評価できる手法の開発が望まれていることはいうまでもない。

筆者らは、先に地盤中の薄いセメント改良層の探査法としてS波反射法を適用することを試み、そのシミュレーション解析によって得られた振源周波数を用いたS波反射法によって、薄いセメント改良層を上下境界面を探査できる可能性について既に発表した²⁾。しかし、この研究では、改良層全体の層厚および強度分布などの定量的評価法の確立までには至っていない。

本研究は、軟弱な粘土層中に薄いセメント改良層の定量的な評価を行うために、S波反射法の

適用を試みた。そして、その探査結果から速度構造解析ならびに複素地震トレース解析³⁾を行って、改良層のS波速度分布と改良層の層厚を連続的に求めることを試みた。さらに、地盤改良層に対して行った、数十本のボーリングからサンプリングしたコアの一軸圧縮強度と速度構造解析によって求められたS波速度との関係について考察し、最終的に、地盤改良層の連続的な一軸圧縮強度分布を求めることを検討した。

2. 現場概要

本研究の対象となった現場は、大阪市内の中央部に位置し、主に沖積粘土が厚く堆積する地盤で、地盤改良区域の全長は約2.5kmである。この現場では、長さ50m、幅13mの試験工区が設けられており、本論文で示す図は、主に試験工区で得られたデータを基にしている。試験工区の地盤改良前の土質は、そのほとんどがN値がほぼ0の沖積粘土層が主体となっている。ただし、深度

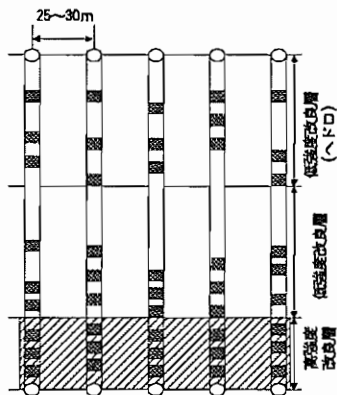


図-1 コアサンプリングの位置の一例

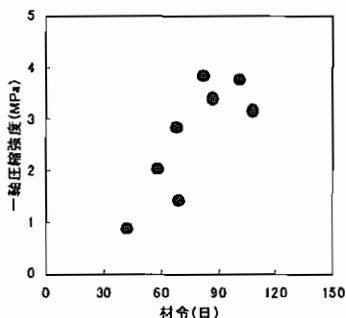


図-2 一軸圧縮強度と材令の関係

3m まではN値が高くなっている。これは車両、重機等が通るために、地表面部分に簡易な地盤改良を行ったためである。深度 10m より深くなると N 値は 0 に近くなり、非常に軟弱な地盤であることが分かる。また、深度 6m 付近に厚さ 2m 程度の、粘土層に比べ N 値の高い砂層が確認できる。他工区の柱状図も、深度に若干の違いはあるが、ほぼ同様の層順となっている。

3. 地盤改良工法

用いた地盤改良工法は、スラリー化したセメント系固化材を軟弱地盤に注入し、軟弱地盤と攪拌混合することで化学的に固化する深層混合処理工法である。

地盤改良は、深度 4~10m 付近では設計一軸圧縮強度 0.1MPa の低強度改良も実施されている。このときのセメント配合量は、高強度改良層の半分である。さらに、この低強度改良層の上部から地表には、上述した工事車両等が通行できるようにしたヘドロ改良層がある。したがって、ここでは深度 12~14m 付近の層厚 2m の改良層を高強度

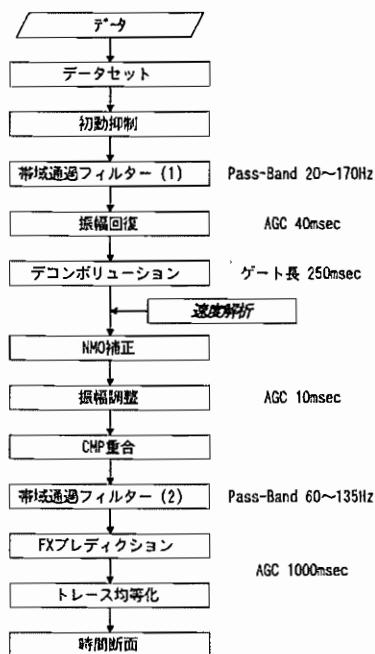


図-3 受振記録の処理の流れ

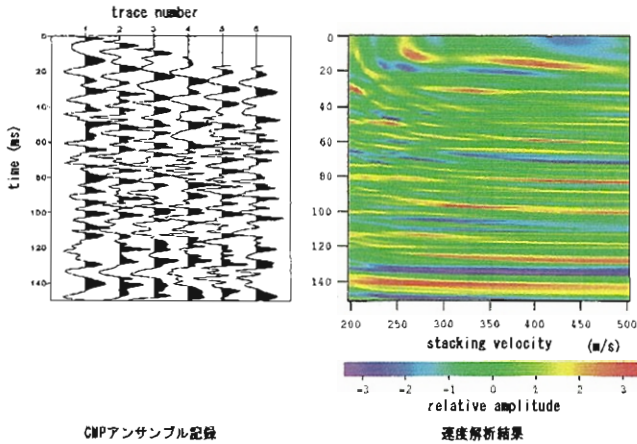
改良層と呼ぶことにする。ここで、高強度改良層の設計一軸圧縮強度は 0.9MPa である。なお、実際の施工にあたっては、60 日養生において、高強度、低強度改良層の必要とする最低の一軸圧縮強度は、それぞれ、0.55MPa, 0.1MPa である。

4. ボーリング

試験工区のボーリングは、幅は中央部で長さ方向 0m, 25m, 50m, の 3ヶ所で実施された。それぞれのボーリング No.を 0m から順に No.1, No.2, No.3 とし、それぞれのボーリング実施時における高強度および低強度改良層の材令は、No.1:82 日, No.2:69 日, No.3:42 日であった。

コアの採取に関しては、1つのボーリング孔において、直径 50mm, 高さ 100mm の試料をヘドロ改良層、低強度改良層、高強度改良層の各層からそれぞれ 3つずつサンプリングを行った。図-1は、コアサンプリングの位置の一例を示している。

図-2は、高強度改良層におけるサンプリングされたコア 3個の平均した一軸圧縮強度と材令との関係を示している。ただし、この中には試験工区と同条件下の他工区のデータも含まれている。これより、改良層の地盤は、材令が大きくなるにしたが



CMPアンサンブル記録

速度解析結果

図-4 5m 地点の CMP アンサンブル記録と速度解析結果

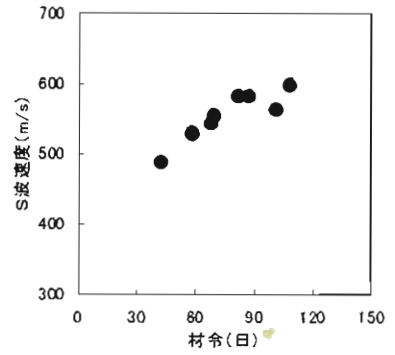


図-5 S波速度と材令の関係

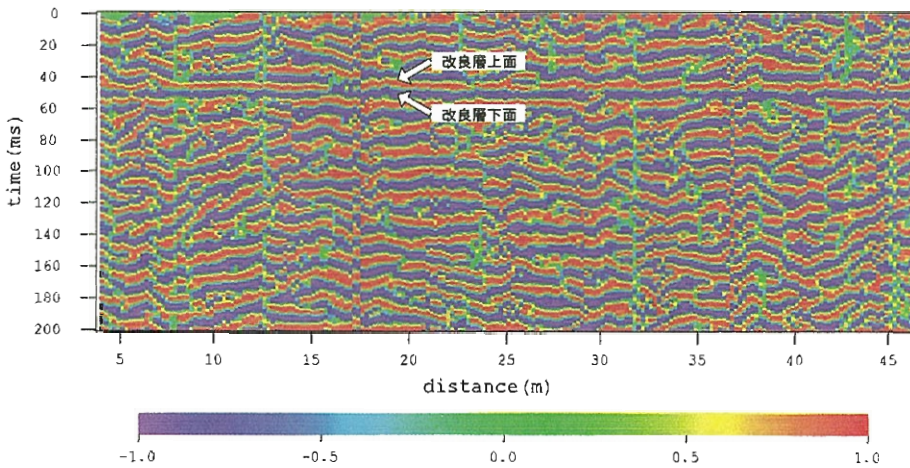


図-6 複素地震トレース解析の位相特性記録

い一軸圧縮強度は増加することがわかる。

5. S波反射法

改良地盤の効果確認に関する新しい試みとして、ボーリングと併せてほぼ同時期にS波反射法が行われた。S波反射法は、起振装置：板たたき法、受振器：動コイル型固有周波数 60Hz を用いて、起振点間隔 1.0m、受振点間隔 0.5m、オフセット 1m のインラインオフセット展開で 1 測線を 50m として計測を行った。

図-3 は、S波反射法を行って得られた受振記録の処理の流れを示している。この図に示すような処理を行って得られた時間断面あるいは深度断面をもとに、改良層の層厚・深度・連続性について評価を行うことを試みた。

(1) 速度解析

速度解析を行うことにより地盤の速度構造を求めた。速度解析の手順は、以下のとおりである。

- (a)速度解析を行う地点の CMP アンサンブル記録を集める。
- (b)ある速度を選び、CMP アンサンブル記録に NMO 補正を施す。
- (c)NMO 補正後の記録をたし合わせる。
- (d)速度を順次変えて(b)，(c)の操作を繰り返す。

図-4 は、試験工区の 5m 地点の CMP アンサンブル記録と速度解析結果を示している。この図より、改良層からの反射面に対応する RMS 速度と走時を読み取り、区間速度を求めた。5m 地点から 45m 地点まで 2.5m 間隔で同様の解析を行い、速度分布を求めた。

図-5 は、速度解析によって求められたS波速

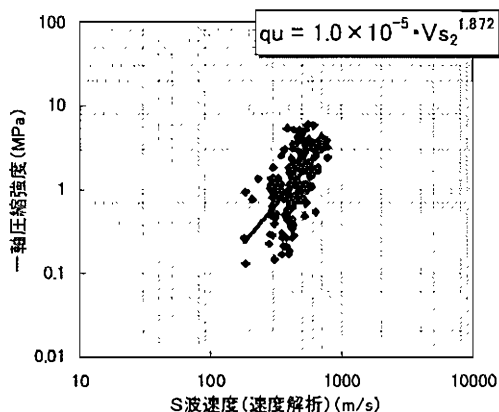


図-7 一軸圧縮強度とS波速度の関係

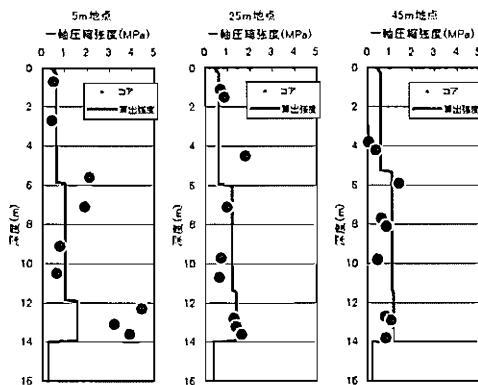


図-8 一軸圧縮強度の深度方向分布

度とその地点における高強度改良層の材令との関係を示したものである。ただし、この中には試験工区と同条件下の他工区のデータも含まれている。これより、このようにして求められたS波速度は、材令が大きくなると増加することが認められた。

今井・吉村⁴⁾は、未固結土の一軸圧縮強度とS波速度の関係について述べている。これによると、一軸圧縮強度が大きくなるとS波速度は増加しており、これらの関係は良い相関性を有していると報告されている。セメントと粘土とを混合させた改良地盤の一軸圧縮強度とそのS波速度との関係に関する研究は全く行われていないが、本論文での図-2と図-5の結果より、速度構造解析によって求められたS波速度と、その地点の一軸圧縮強度とは、今井らが行った研究とほぼ同じ傾向を示すことが十分に類推することができる。

(2) 複素地震トレース解析

改良層の連続性に注目した評価として、複素地震トレース解析³⁾を行った。複素トレース解析は、地下の岩相、物性変化を反射波の微細な振幅、位相、周波数などの変化から検討するために行われる。ここでは、地盤改良、とくに高強度改良層の層厚を連続的に把握するために、本解析法の適用を試みた。

複素トレース $C(t)$ として $C(t)=R(t)+jI(t)$ を定義する。

ここで、 $R(t)$ は観測される地震記録であり、 $I(t)$ は虚数地震記録である。 $I(t)$ は $R(t)$ の位相を 90° ずらせたものであり、 $R(t)$ をヒルベルト変換することにより得られる。

$R(t)$ 、 $I(t)$ が既知であれば、

$$\text{振幅特性} = \sqrt{R^2(t) + I^2(t)}$$

$$\text{位相特性} = \tan^{-1}[I(t)/R(t)] \quad (1)$$

$$\text{瞬間周波数} = d\theta(t)/dt$$

が計算できる。これらはそれぞれ、ある時間区間の平均値ではなく、各サンプルでの瞬間の振幅、位相、周波数の値を示すものである。

図-6は、複素地震トレース解析の位相特性記録を示している。この図において、高強度改良層下面からの負の反射波が50ms付近に連続して存在することが認められ、これによって改良層の層厚が確認することが可能であることが認められた。

6. 改良層の一軸圧縮強度とS波速度との関係

図-7は、全ての改良層を対象として、サンプリングされたコアの一軸圧縮強度と速度解析より求められた同地点のS波速度との関係を示している。これは、セメントと混合している土がすべて粘土ではなく、一部には砂が混在していることに起因していることが考えられるが、このようなコアを選別することは、現時点では不可能である。しかし、全体としては、S波速度の増加に伴い一軸圧縮強度が増加する傾向が認められる。これは、上述した考察と一致する結果が得られた。これら両者の関係を次式に示す。

$$qu = 1.0 \times 10^{-5} \cdot Vs^{1.872} \quad (2)$$

ここで、 qu はコアの一軸圧縮強度、 Vs は速度

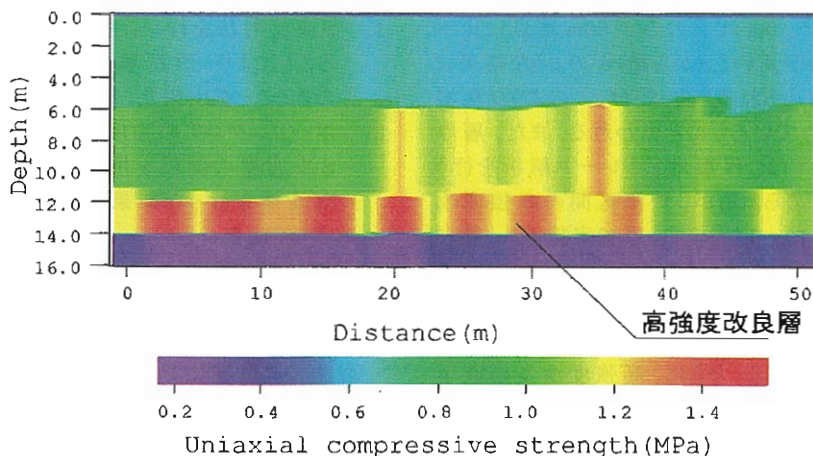


図-9 一軸圧縮試験分布

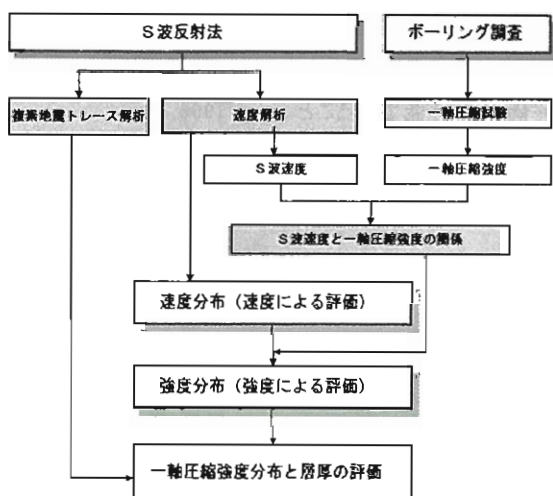


図-10 S波反射法による地盤改良層の評価法

解析から求めたS波速度である。また、式(2)の相関係数は、0.62である。

図-8は、5、25、45m地点において、式(2)によって求めた一軸圧縮強度の深度方向の変化を示している。図中の●は、ボーリングによってサンプリングされたコアの一軸圧縮強度を示している。この図より、式(2)から求めた一軸圧縮強度は、サンプリングされたコアの一軸圧縮強度と比較して、一部コアの強度が大きい個所が認められ、これは、前述した図-7のバラツキによる原因と思われるが、他はよく一致している。これより、式(2)の有効性が認められた。

7. 改良層の連続的な一軸圧縮強度分布と層厚の推定法

図-9は、試験工区における、改良後の地盤中の一軸圧縮強度分布と高強度改良層の層厚変化を示している。これは、速度構造解析によって得られたS波速度の分布から、式(2)を適用して、一軸圧縮強度分布に変換したものである。これより、高強度改良層の一軸圧縮強度分布は、0m地点から50m地点に移行するにしたがって低くなっている。これは、図-8の0、25、45m地点におけるボーリングコアによる一軸圧縮強度の変化とよく一致している。すなわち、地盤改良は0m地点から

行われたために、0m 地点の方が 50m 地点に比べ、改良層の材齢が長いことから図-8 のような結果になったものと考えられる。図-9 は、このような現場状況をよく表しているものと思われる。また、層厚の変化に関しては、複素地震トレース解析を行うことによって求められるが、計測区間の高強度改良層は、深度 12~14m の 2m 厚で実施され、特に改良層下面の位置は、コンピュータ制御によって、改良体建設機械は、精度よく管理されている。図-9 は、これに関して忠実にその施工状況を表しているものと考えられる。さらに、高強度改良層直下の地層は、全く改良されず、軟弱な沖積粘土層であるが、この状態も、図-9 は正確に示している。

以上のことより、S波反射法を用いることによって、地盤中の薄いセメント改良層の一軸圧縮強度および改良層厚を連続的に評価できることが示された。これらのことをまとめると、図-10 に示したフローチャートのとおりである。

この図-10 に示された流れに沿って行うことにより、地盤改良層の定量的評価が不可能であることが示された。

8. 結論

軟弱地盤にセメント混合改良が施工された際の改良効果確認に従来のボーリング調査に加え、S波反射法を用い速度解析、複素地震トレース解析を行うことにより、改良地盤を連続的に評価する手法について検討を行った。本研究の結論を以下にまとめる。

1. S波反射法を行い、複素地震トレース解析することにより、改良層の層厚を連続的に評価できることが出来た。
2. ボーリングコアの強度と速度解析から求めたS波速度の関係を用いて、速度分布から強度変換を行った結果、コアの強度とほぼ同じ値を示した。
3. 本研究で示した手法により、改良地盤を一軸圧縮強度という指標を用いて、断面図として連続的に表すことが可能となった。

以上、本研究によって得られた成果を要約したが、S波反射法によって、深層混合処理工法による改良層を連続的かつ定量的に評価することが可能となり、また他への適用性も十分可能であることが認められた。

参考文献

- 1) 田村昌仁: 消費者危険を考慮した改良地盤の品質管理の考え方, 土と基礎, Vol.44, No.4, pp.37-40, 1996.
- 2) 楠見晴重, 芦田讓, 西田一彦, 江原竜二: 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, 土木学会論文集, No.624/III-47, 245-253, 1999.6.
- 3) Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R.E.: Complex seismic trace analysis, Geophysics, Vol.44, No6, pp.1041-1063, 1979.
- 4) 今井常雄, 吉村正義: 地盤の弾性波速度と力学的性質, 物理探鉱, Vol.25-6, pp.15-24, 1972.

(2000.1.26 受付)

A METHOD TO ESTIMATE CONTINUOUS DISTRIBUTION OF STRENGTH IN IMPROVED LAYER OF GROUND BY S-WAVE REFLECTION METHOD

Harushige KUSUMI, Yuzuru ASHIDA, Kazuhiko NISHIDA,
Takuya KAWAGUCHI and Tetsuaki HAYASHI

Before construction of any structures on surface or subsurface of alluvial clay layer, the cement mixing methods have been used frequently to construct an improved layer at certain depth of ground. However, the confirmation of improved layer is performed by only boring and laboratory testing. The present paper are discussed about the confirmation method using s-wave reflection method, and it is tried that the S-wave distribution of improved layer is obtained by velocity analysis. Furthermore, the relation between the uniaxial compression strength of improved layer specimens by boring and S-wave velocity of improved layer by the velocity analysis are discussed, and the continuous distribution of uniaxial compression strength on improved layer can be accurately obtained.