

超音波反射強度を用いた 岩盤物性評価に向けた基礎的研究

大塚 康範^{1*}・安富 宏和²・八野 祐二³・田島 克洋⁴・藍壇 オメル⁵・渡嘉敷 直彦⁵

¹応用地質株式会社 エンジニアリング本部技師長室（〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5）

²日本物理探査株式会社 関東支店技術第一部（〒143-0027 東京都大田区中馬込2-2-12）

³基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術本部物理探査部（〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7）

⁴アース・スキャニング研究会 事務局（〒245-0067 神奈川県横浜市戸塚区深谷町1412-10）

⁵琉球大学 工学部環境建設工学科（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地）

*E-mail: ootsuka-yasunori@oyonet.oyo.co.jp

超音波式ボアホールスキャナーは孔内水の影響を受けずに孔壁画像が得られる等の利点はあるが、十分に地質調査に活用されていない。この背景には計測データを活用した岩盤物性評価技術が確立していないことが挙げられる。そこで、超音波反射強度を使った岩盤物性評価技術を確認するため、(1)水セメント比を変えたセメント供試体並びに岩石物性値が既知の岩石試料の超音波反射強度を同一条件で測定し、(2)機械式攪拌工法で造成された改良杭のボーリング孔を使った孔壁沿いの超音波反射強度測定と同一カ所のコアサンプルでの針貫入試験を実施した。その結果、超音波反射強度は岩石の力学特性並びに針貫入勾配と良い相関があり、超音波式ボアホールスキャナーによる原位置での岩盤物性評価の可能性が示された。

Key Words : borehole image scanner, ultrasonic wave reflection intensity, uniaxial compression strength, ground improvement pile, needle penetration tests

1. はじめに

超音波式ボアホールスキャナー（USS：Ultra Sonic Scanner）は、濁った孔内水でも孔壁画像が得られるボアホールスキャナーとして登場したが、光学式に比べて未だ十分に地質調査に活用されていない。今回、超音波式ボアホールスキャナーを用いて、均質材料として、セメントテストピースと代表的な岩石試料による室内実験を行い、次に、不均質材料として地盤改良杭を対象とした現場実験を行った。その結果、超音波反射強度を用いた岩盤物性評価の可能性が示されたので、ここに報告する。

用いて、図-2 の様に超音波反射強度の測定を行った。

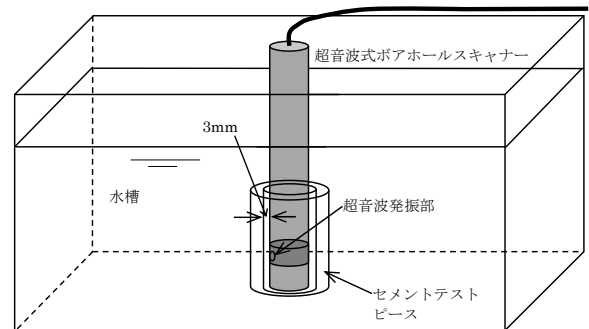


図-1 各セメントテストピースでの測定状況

2. 室内での基礎実験

(1) 実験方法

図-1 の様に、水：セメント比を変えて硬さの異なるテストピースを作成し、φ66mm でコアリングした孔の中で超音波反射強度を測定した。次に、コアリングで採取したコアを用いて、一軸圧縮試験や超音波速度試験等の室内試験を行った。また、物性値が既知の岩石試料を

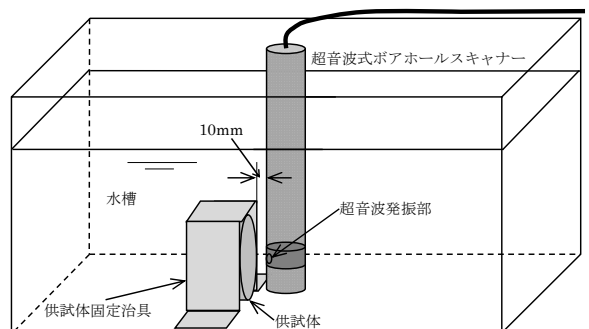


図-2 各岩石試料での測定状況

各テストピースと各岩石試料の物性値を表-1 に示す。

表-1 試料物性値一覧表

試料名	密度 (g/cm^3)	一軸圧縮強さ (MN/m^2)	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)
テストピース	1	1.740	4.1	2.655
	2	1.760	6.2	2.827
	3	1.827	16.9	3.134
	4	1.945	37.9	3.536
	5	2.132	85.4	4.174
溶結凝灰岩	1.990	26.8	2.530	1.400
砂岩	2.090	38.3	2.640	1.390
大理石	2.700	84.7	5.670	3.030
大谷石	1.740	8.3	2.090	0.990
凝灰岩	1.770	22.6	2.320	1.380
花崗岩	2.680	173.8	4.800	2.620
プラスチック	1.410	—	2.300	0.950
ゴム	1.120	—	1.570	0.250

超音波反射強度の測定については、深度を変えながら孔内の全周方向を測定する通常の方法ではなく、深度と方向を一定とした静止状態で測定（フルウェーブ）を実施した。図-3 のように、このフルウェーブ（＝1 回の発振（周波数：1MHz）に対する反射波を 20ns 間隔でサンプリングした値を繋いで連続波形として表したもの）の超音波反射波形には、第 1 波及び多重反射（第 2 波～第 4 波）の反射波が見られるが、第 1 波の最大振幅を反射強度として読み取った。

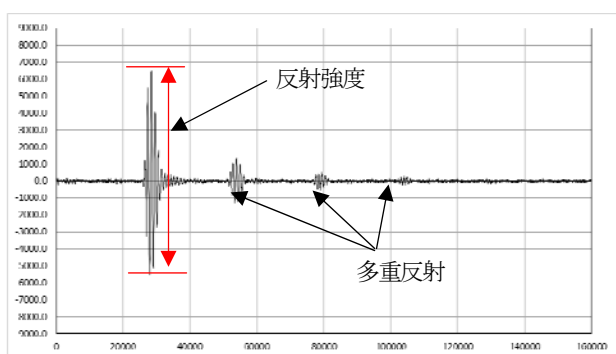


図-3 フルウェーブの反射強度の読み取り方法

超音波反射強度は、各テストピースの 4 方向で各 10 回、各岩石試料で各 5 回の測定を実施し、読み取った。

(2) 実験結果

超音波反射強度は、テストピースでは孔内で、岩石試料関係では端面の平坦部で測定している。また、測定時のプローブからの距離は、テストピースで 3mm、岩石等試料で 10mm の離れで測定を行っている。従って、テストピースの反射強度と岩石試料関係の反射強度を比較するために、距離や反射面の形状の補正を行う必要があるが、今回は別々の回帰直線として示した。結果として得られた反射強度と各物性値の関係を図-4～図-7 に示す。これらの図では、反射強度と各物性値(密度、一軸

圧縮強さ、P 波速度、S 波速度)の間に相関が認められる。

今後はセメントテストピースでも平面での測定を行い、孔内の超音波反射強度算出のための補正方法を確立する予定である。

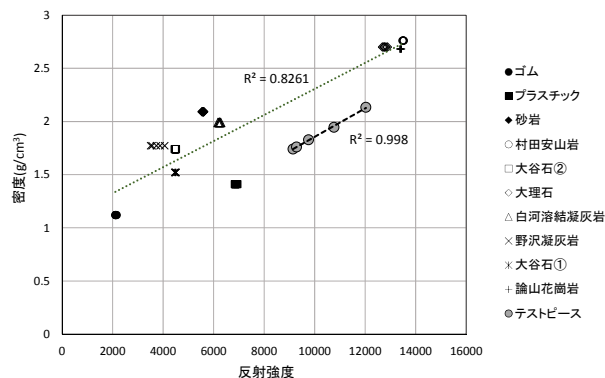


図-4 反射強度と密度の関係

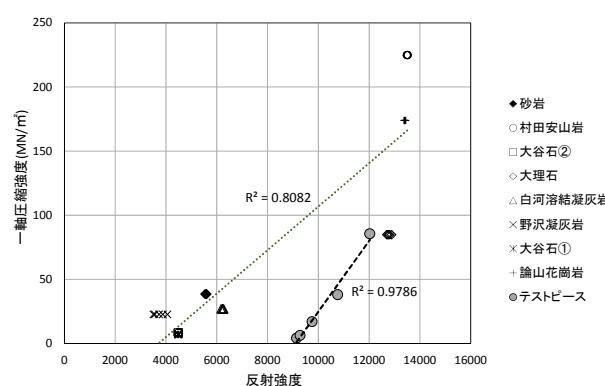


図-5 反射強度と一軸圧縮強さの関係

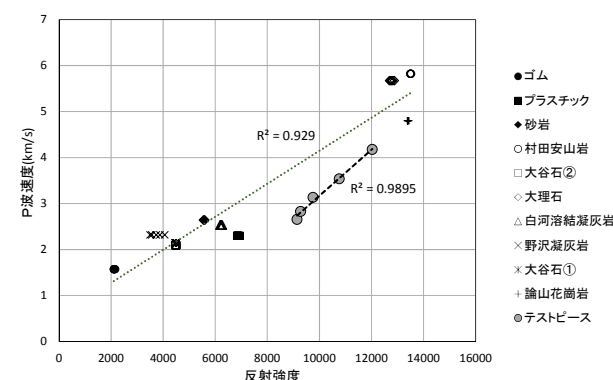


図-6 反射強度と P 波速度の関係

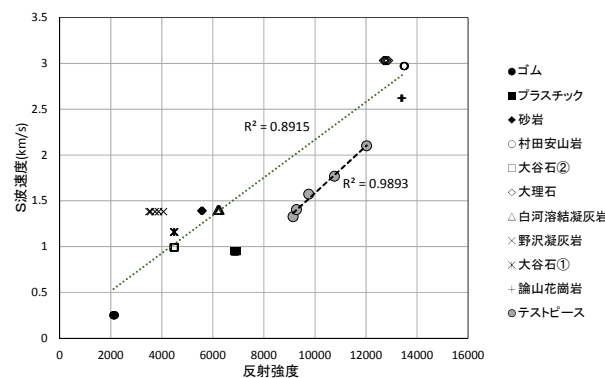


図-7 反射強度と S 波速度の関係

3. 改良杭での現場実験

(1) 実験方法

地盤改良では、均質な改良体を作るために施工方法に様々な工夫がされている。その一方、改良体の品質管理は、造成した杭の硬化後にボーリングコアを採取し、室内土質試験で求めた一軸圧縮強さにより確認しているのが実状である。このため、改良体の品質管理として、造成された改良体の物理特性ならびに力学特性を迅速かつ連続的に把握する手法が求められている。

今回、均質な岩盤や完全に地盤改良されて均質化された地盤では画一的なデータしか得られないため、実験対象とした地盤は、硬軟のばらつきのある人工地盤が望ましいと考えた。そのため、異なる攪拌混合仕様で造成され、あらかじめ一軸圧縮強さにばらつきのある事が分っている試験施工杭4体を利用することにした。

今回、USS試験を実施した地盤改良杭は、表-2に示すように粘性の高い火山灰質土を対象に機械性能や施工条件の違いによる効果を見るために試験的に造成されたものであり、施工条件が改良杭ごとに異なる。改良杭の造

成時期は、今回の現場計測の約半年前である。各々の改良杭の中心から0.4m（半径の1/2）の位置で、ボーリングコアを採取し、その孔壁に対して光学式ボアホールスキャナー（ODS：Optical Digital Scanner）と超音波式ボアホールスキャナー（USS）を用いて孔壁画像を取得した。また、採取したボーリングコアを用いて、物理試験、力学試験及び針貫入試験を行った。

超音波反射強度については、通常のUSSとは別に全周ではなくEとWの2方向で、深度方向に2cm間隔でフルウェーブの測定を行った。針貫入試験は上部（GL-0.4～-0.9m）、中間部（GL-3.0～-3.5m）、下部（GL-4.4～-4.9m）の3箇所、超音波反射強度を測定した箇所に対して実施した。

(2) 実験結果

a) ODS と USS の測定結果例

図-8には、同じ場所のODSとUSSの孔壁展開画像の測定例を示す。右側に示す波形は、左側のUSSの孔壁展開画像中に示す丸印の箇所のフルウェーブの超音波反射波形である。左側のUSSの画像は反射波形中の最大反射強度を256階調の濃淡で表したものである。反射強度が大きいところは薄い色調で表され、反射強度が小さいところは濃い色調で表される。ODSの画像を見ると、改良材で固結した中に攪拌され残した土塊(未固結土塊)が多数残っているのが見られる。これらの土塊は改良され固結した部分に比べて軟質なためUSSの画像では黒く表されている。また、ボーリングのコアチューブを上下する際に付いたと思われる縦方向のきず跡がODSでは不明瞭なのに対し、USSでは明瞭に捉えられている。これは、ODSでは照明を当てているために陰影ができてにくいのに対し、USSではきず跡の部分で超音波が乱反射するためと考えられる。

表-2 地盤改良杭の施工条件と実験結果

項 目	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
施工条件	対象土質 火山灰質粘性土			
	セメント添加量 250kg/m ³			
	改良深度 7.0m			
	ワーカビリティ 考慮なし		考慮あり	
	引抜速度	低 高	低 高	
造成直後のコア状況	固化程度	○ △(未固化やや多)	○ △(未固化やや多)	
	一軸圧縮強さ	固化部は目標強度 500kN/m ² を満足 ばらつきやや大	ばらつき小さい	ばらつきやや大

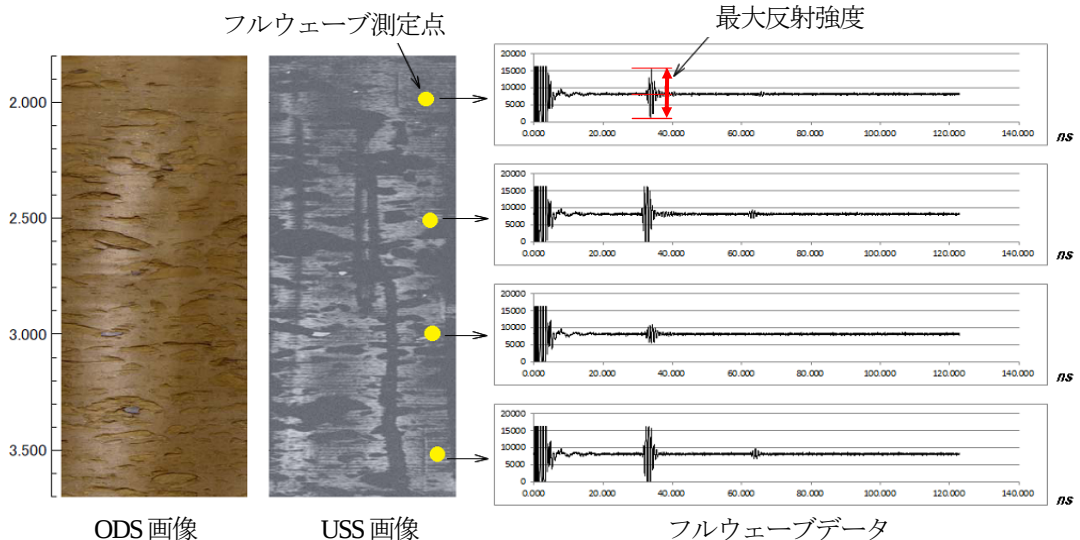


図-8 ODSとUSSの展開画像の比較と超音波反射波形の例

b) 針貫入試験結果と超音波反射強度結果

針貫入試験とは、土・岩に針を貫入し、その貫入長さと貫入荷重を測定して、その関係から針貫入強度を求める方法であり、主に針の貫入が可能な固化処理土を含む土及び軟岩に適用可能である。図-9に針貫入試験結果の例を示す。強度が大きい場合には、針貫入勾配 (NPI) が大きくなる。

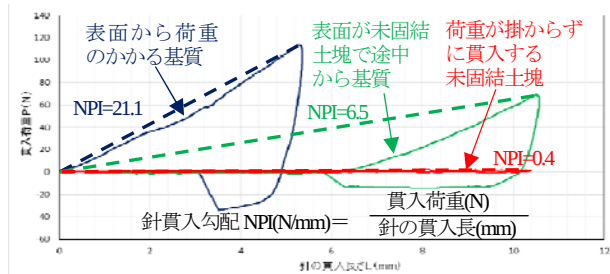


図-9 針貫入試験結果例

図-10に2方向の2cm間隔の超音波反射強度と針貫入勾配 (NPI) の深度分布図を示す。図-10では超音波反射強度が細かく振れているが、低い値の箇所が未固結土塊に反射した箇所、高い値の箇所が基質 (固結土塊) に反射した箇所である。深度が深くなるに従い、反射強度と針貫入勾配が大きくなっており、改良地盤の性状と一致している。

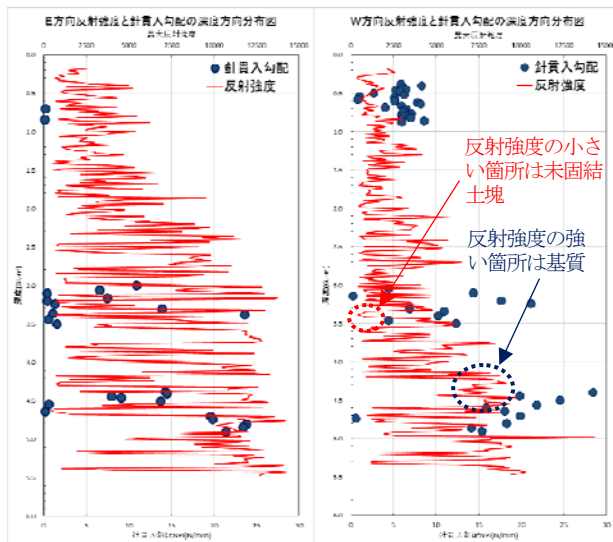


図-10 超音波反射強度と針貫入勾配の深度分布図

c) 物理試験結果と力学試験結果

2cm 間隔の超音波反射強度と針貫入試験結果では大きな変動が見られるため、ここでは供試体 (長さ 10cm) レベルでの物性値を対比することとする。

図-11 に一軸圧縮強さと湿潤密度の関係を示すとともに、図-12 に一軸圧縮強さと間隙率の関係を示す。図-11 及び図-12 から、湿潤密度が大きくなると一軸圧

縮強さが大きくなり、間隙率が小さくなると一軸圧縮強さが大きくなるという一般的な関係が見られる。

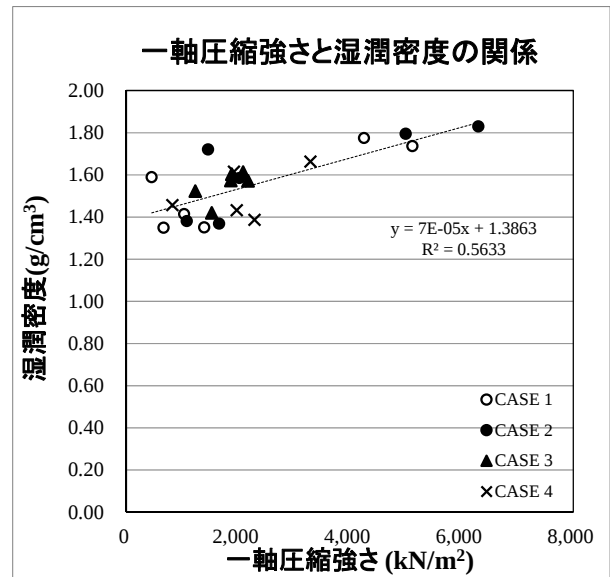


図-11 一軸圧縮強さと湿潤密度の関係

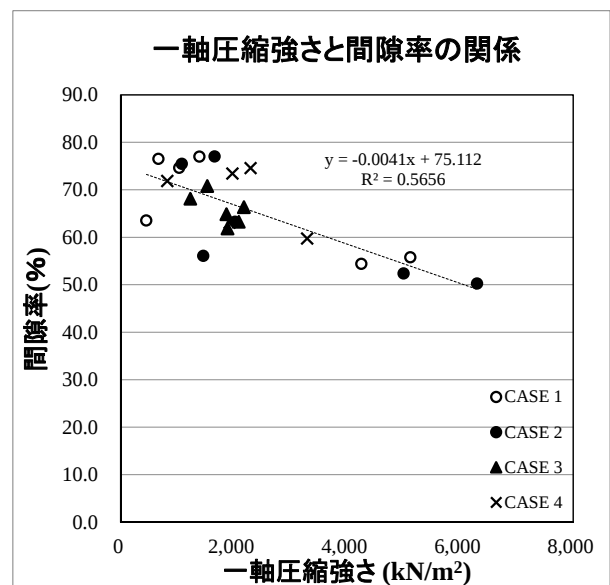


図-12 一軸圧縮強さと間隙率の関係

d) 一軸圧縮強さ結果と超音波反射強度結果

図-13に今回実施したボーリング孔内における超音波式ボアホールスキャナー（USS）の超音波反射強度の深度10cm区間での平均化の方法を示す。測定区間を10cmとしたのは、一軸圧縮強さを求めた試験片のコア長と同じにするためである。

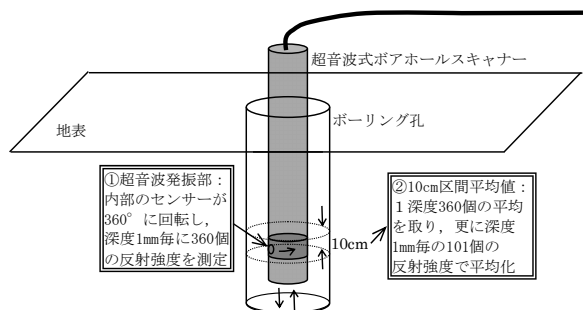


図-13 超音波反射強度の全周10cm区間平均化の概要

一軸圧縮強さと超音波反射強度の変化を深度方向に示したものが図-14である。超音波反射強度（全周平均超音波反射強度）は、図-13に示すように、孔壁全周（360°）の10cm間の平均値で表している。図-14を見ると、CASE1、CASE2及びCASE4は孔底に行くに従い超音波反射強度及び一軸圧縮強さは大きくなる傾向が見られる。孔の下部で超音波反射強度及び一軸圧縮強さが大きくなっているのは、他の杭体の試験結果から見ても、施工方法の違いによるものと考えられる。その証拠として、CASE3では地表から孔底までほぼ一定の超音波反射強度及び一軸圧縮強さを示し、均質な改良体が造成されている。

これらの杭体毎の超音波反射強度の違いは、「表-2 地盤改良杭の施工条件と試験結果」に示した施工条件の違いによるものであり、施工時の仕様の違いを反映しているものと考えられる。

図-15に超音波反射強度と一軸圧縮強さの関係を示す。超音波反射強度は室内試験用供試体を採取した区間の全周方向平均反射強度を用いて、一軸圧縮強さとの関係を示している。図-15によれば、データのばらつきはあるものの、超音波反射強度が大きくなると一軸圧縮強さも大きくなる傾向が見られる。これらのデータのばらつきは、改良体中に不規則に混入する攪拌され残した未固結土塊が原因と考えられる。改良体中の未固結土塊は不規則に混入するため、孔壁表面の反射強度が小さくても背面に堅い固結部分があれば、コアとしての一軸圧縮強さは大きくなる。また、その反対もあることで上下にバラツクものと考えられる。この傾向は、超音波反射強度の大きい箇所でも顕著である。

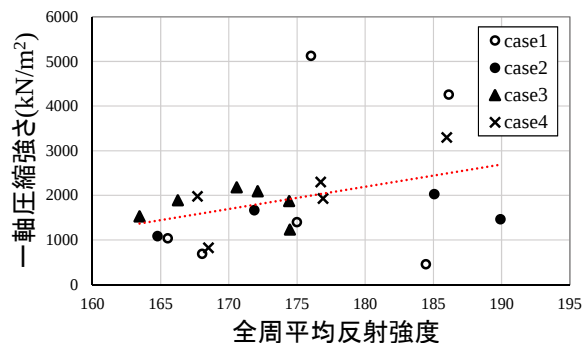


図-15 全周平均超音波反射強度と一軸圧縮強さの関係

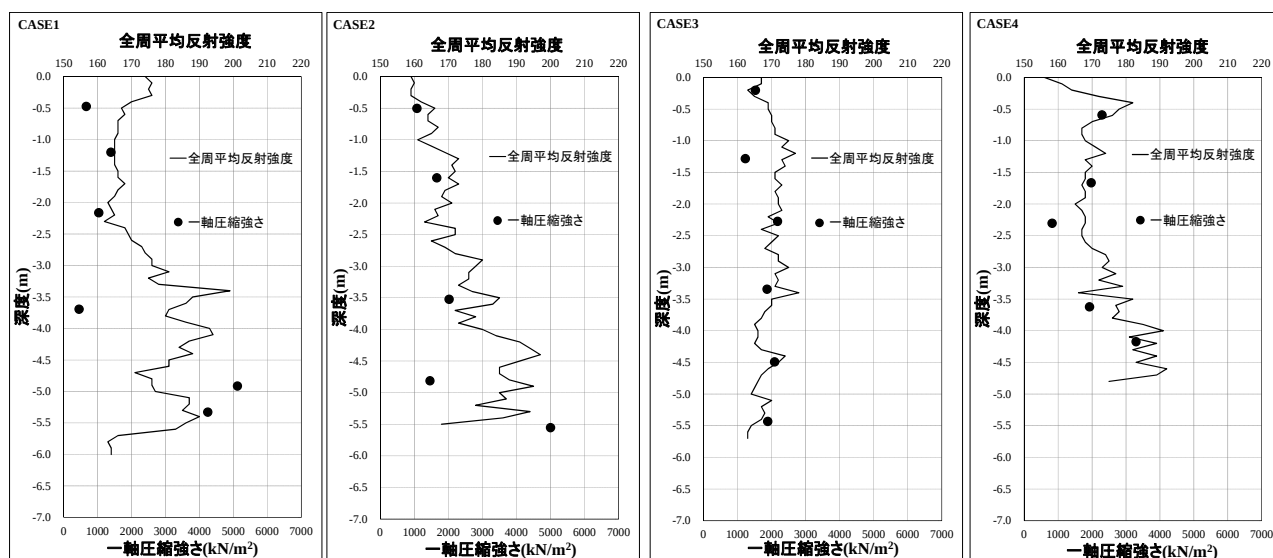


図-14 超音波反射強度と一軸圧縮強さの深度分布図

e) 超音波反射強度結果での1点と全周10cm区間の比較

図-10に示した改良体CASE2での深度2cm毎のW方向の超音波反射強度を、図-14のCASE2の結果に重ねた図を図-16に示す。図-16の超音波反射強度で、全周の深度10cm平均値（全周平均反射強度）は、傾向として、深度2cm毎の超音波反射強度の中間的な値を示している。

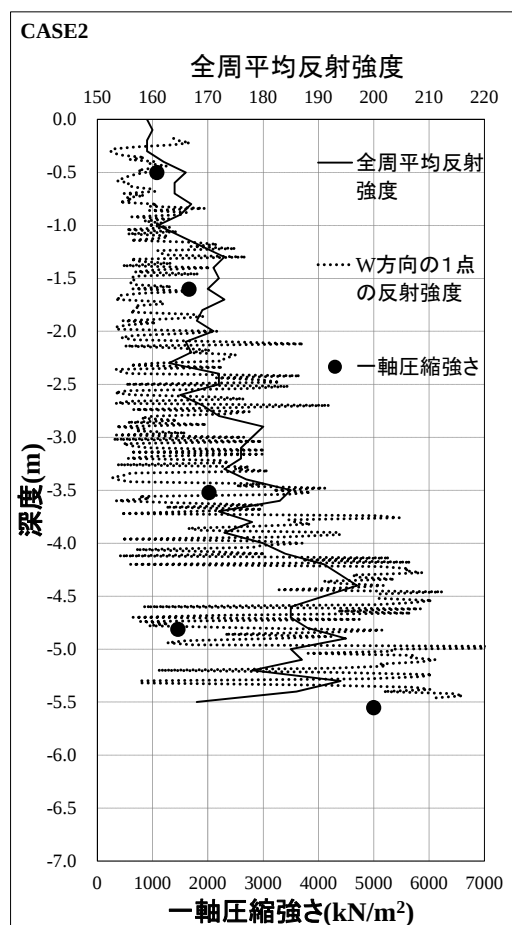


図-16 No.2孔の超音波反射強度と一軸圧縮強さの深度分布図

4. まとめ

今回、基礎実験として水セメント比を変えたセメントテストピース並びに物性値が既知の岩石試料の超音波反射強度を測定した。その上で、現場実験として様々な施工条件で実施した機械攪拌混合処理による地盤改良杭において、ボーリングコアによる一軸圧縮試験に加えて、ボーリング孔を利用して光学式（ODS）と超音波式（USS）のボアホールスキャナーによる計測、ボーリングコアによる針貫入試験を行った。その結果、改良体の間隙率（未固結土塊の体積比）と一軸圧縮強さに良い相関があることが示されたと共に、超音波式のボアホールスキャナーによる孔壁の超音波反射強度も間隙率と同様に一軸圧縮強さと良い相関が認められ、従来のコアサンプルの一軸圧縮試験による品質管理手法を補完して、連続的かつ簡便に品質を評価する手法の可能性が示された。今後は、ボアホールスキャナーの孔壁画像から推定した間隙率並びに超音波反射強度を用いて、改良体の一軸圧縮強さを連続的かつ迅速に推定する定量的評価手法の確立に向けて、更に研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 安富宏和, 森口安宏, 藍壇オメル, 渡嘉敷直彦, 八野祐二, 石川貴規, 中原毅, 平木伸明, 山田直之, 川上哲, 村田明, 戸谷成寿, 宮澤忠明, 田島克洋: 超音波反射強度を用いたボーリング孔壁強度の推定, 日本応用地質学会研究発表会, 論文番号 65, 2015.
- 2) Kawakami, A., Yasutomi, H., Murata, A., Nakahara, T., Hiraki, H., Moriguchi, Y., Ootsuka, Y. and Tajima, K. : Comparison of borehole scanning systems, Optical digital scanner (ODS) and ultrasonic scanner (USS), *Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium, ISRM*, pp. 2224-2232, 2014.
- 3) Ootsuka, Y., Yasutomi, H., Tajima, K. and Aydan, O. : Fundamental research on the property assessment of ground improvement utilizing the borehole wall imaging, *Proceedings of 10th anniversary Asian Regional Conference of IAEG, IAEG*, Tp4-P09, 2015.

BASIC RESEARCH FOR THE EVALUATION OF ROCK PHYSICAL PROPERTIES USING THE ULTRASONIC REFLECTION INTENSITY

Yasunori OOTSUKA, Hirokazu YASUTOMI, Yuji HACHINO, Katsuhiro TAJIMA, Omer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

In order to establish the rock evaluation technique of physical properties using ultrasonic reflection intensity, we made the following two measurements, (1)ultrasonic reflection intensity under the same testing condition to concrete specimens and rock specimens, (2)ultrasonic reflection intensity by a borehole televiewer along the improved pile, compared with laboratory tests and needle penetration tests of the core samples. As the result, a ultrasonic reflection intensity was a good correlation for mechanical characteristic of rocks and needle penetration slopes, and it was indicated that there was a possibility of the evaluation of physical and mechanical properties in the field by the ultrasonic borehole scanner.