

動的コーン貫入試験の高精度化に関する研究

～ N_d 値の利用方法と土質判定の試み～

A study on improvement of precision of dynamic cone penetration test ~utilization of N_d value and trial of soilclassification

地盤工学分野 三田 大貴

本研究では、7地点の地盤において種々の動的コーン貫入試験を実施し、それらの結果をまとめ、試験結果 N_d 値の利用方法と大型動的コーン貫入試験 (SRS) による土質判定方法について検討を行った。まず SRS 試験による N_d 値と標準貫入試験 (SPT) の N 値の関係を明らかにし、次いで SRS 試験と他の動的コーン貫入試験の結果の相関について、ロッド周面摩擦と打撃エネルギーの補正方法に着目し検討した。また、SRS 試験中に土中で発生する音を利用した土質判定を試みた。

Swedish ram sounding (SRS) and the other several kinds of dynamic cone penetration tests (DCPTs) were performed at 7 sites in Japan with an aim to establish an appropriate utilization of N_d value that is outcome of SRS. A lot of DCPTs results were summarized and compared with N_d value and then follows were concluded; (1) An assured correlation was verified between N_d value and SPT-N especially on sandy ground and (2) More accurate corrections on the surface friction and the potential energy than conventional one were applied into results of DCPTs. Moreover, a new idea of evaluation of soil classification with SRS based on the acoustic properties of underground soil was introduced.

1. まえがき

2011年の東北地方太平洋沖地震により、千葉県浦安市を始め、多くの住宅地が液状化被害を受け、宅地における液状化判定と対策のニーズが高まっている。今後想定される大地震に備え、宅地を対象とした低コスト・高精度な液状化判定技術を開発することは喫緊の課題である。土木・建築分野で標準的に用いられる地盤調査方法は、標準貫入試験 (Standard Penetration Test、SPT) であるが、宅地に対しては調査費用が高すぎる。また、SPTは地盤の強さを N 値として判定するサウンディングと土試料のサンプリングができるが、動的貫入による N 値は土質によって異なり、特に沖積粘土層では N 値は 0~3 程度であり、地盤情報としては非常に粗い。また、採取試料は乱れが大きく、力学試験に用いることはできない。近年では SPT に変わる様々な調査方法が研究、開発されている。

そこで、本研究で対象としたのは大型動的コーン貫入試験 (Swedish Ram Sounding、SRS) である。SRS は質量 63.5kg のハンマーを高さ 50cm から自由落下させ、ロッド先端のコーンが 20cm 貫入するのに要する打撃回数、 N_d 値を測定するものである。SPT と単位貫

入量当たりのエネルギーが同じとなるので、 N_d 値 $\approx N$ 値とされている。ただし、単管のロッドの周面には常に地盤との摩擦力が作用するため、ロッドの回転トルクを測定して N_d 値を補正する方法が取られている。本研究では、土質ごとの N 値と N_d 値の対応関係を再検討し、室内力学試験より得られる一軸圧縮強さ q_u 、圧密降伏応力 p_c との相関性も検証した。

また、コーン単位面積当たりの打撃エネルギーが SRS の 1/2 となる中型動的コーン貫入試験 (Mini Ram Sounding、MRS)、1/4 となる簡易動的コーン貫入試験 (Portable Dynamic Cone Penetration Test、PDCPT) についても検証した。これらの試験は SRS と同様に周面摩擦補正を行い、打撃エネルギーの違いを補正することで SRS と同等の N_d 値が得られるとされている。これらの補正方法の妥当性を検証する。

また、これらの動的コーン貫入試験では土試料のサンプリングができないため、液状化判定に必要な土質判定ができない。そこで、SRS の先端コーン内部にマイクを設置し、土中で発生する音を録音し、別途行った室内実験結果との比較することによって音による土質判定を試みた。

2. 各試験の打撃仕様と補正方法

表-1 に各試験の打撃仕様をまとめる。

表-1 各種動的貫入試験の打撃仕様

試験名	SRS	MRS	PDCPT	SPT	
ハンマー質量 m (kg)	63.5	30.0	5.0	63.5	
落下高 H (m)	0.50	0.35	0.50	0.75	
コーン先端角 (°)	90	90	60	非閉塞	閉塞
コーン直径 D_c (mm)	45.0	36.6	25.0	外径51- 内径35	外径51
コーン断面積 A ($\times 10^{-4} \text{m}^2$)	15.9	10.5	4.9	10.8	20.4
ロッド直径 D_r (mm)	32.0	28.0	16.0	40.5	
コーン直径/ロッド直径 D_c/D_r	1.41	1.31	1.56	-	
トルクによる周面摩擦補正係数 β	0.04	0.139	0.510	-	
単位面積当たりのエネルギー $E=mgH/A$ (kJ/m^2)	195.8	97.9	50.0	432.6	229.0
SRS基準のエネルギー比	1	0.500	0.255	1.500	
打撃回数測定時の貫入量 P (m)	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3
単位貫入量当たりのエネルギー $E=mgH/A/P$ ($\text{kJ/m}^2/\text{m}$)	979.2	489.5	499.6	1442.0	763.4
SRS基準のエネルギー補正係数 α	1	0.500	0.510	1.470	0.780

2.1 測定トルクによる周面摩擦の補正方法

図-1 に動的コーン貫入試験の概要を示す。土とロッドの周面摩擦によるエネルギー E_{skin} を式(1)で定義する。ここで f_s はロッドと土の周面摩擦応力 (N/m^2)、 L は地中のロッド長さ (m)、 D_r はロッド直径、 P は N_d 値測定時の貫入量 (m) である。

$$E_{\text{skin}} = f_s (\pi D_r L) P \quad (1)$$

E_{skin} を測定トルク M_v ($\text{N} \cdot \text{m}$) から求める。この周面摩擦によるエネルギーを1打撃当たりのエネルギーで除すことで打撃回数 N_{skin} に換算する。次に式(2)のように N_{skin} を測定打撃回数 N_{dm} から引くことで、補正打撃回数 N_d が求められる。

$$N_d = N_{\text{dm}} - N_{\text{skin}} = N_{\text{dm}} - \beta M_v \quad (2)$$

ここで β は周面摩擦補正係数である (表-1 参照)。

2.2 エネルギー補正方法

表-1 に示したように、各種動的コーン貫入試験では打撃エネルギー mgH 、コーン断面積 A 、打撃回数測定時の貫入量 P がそれぞれ異なるが、式(3)に示す単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー $mgH/A/P$ で換算した貫入抵抗 R_d を用いれば結果を相互に比較できると言われており、SRS 試験の単位面積・単位貫入量当たりのエネルギーを基準とすれば、各試験の N_d 値から式

(3)でエネルギー補正した打撃回数 N_d' 値を求めることができる。

$$N_d' = \left(\frac{mgH}{AP} \right) \left(\frac{mgH}{AP} \right)_{\text{SRS}} \times N_d = \alpha N_d \quad (3)$$

ここで α は SRS を基準としたエネルギー補正係数である (表-1 参照)。式(2)、式(3)より、周面摩擦とエネルギー補正は式(4)にまとめられる¹⁾。以下では式(4)で補正した N_d' を用いて各試験の比較を行う。

$$N_d' = \alpha (N_{\text{dm}} - \beta M_v) \quad (4)$$

3. SRS と SPT の比較

本研究で実調査を行ったのは、岡山市南区浦安南町 (以下、岡山浦安)、大阪市城東区東中浜 (以下、東中浜)、千葉県浦安市鉄鋼通り (以下、鉄鋼通り)、茨城県神栖市掘割 (以下、神栖)、浦安市運動公園 (以下、運動公園)、滋賀県守山市今浜町 (以下、今浜)、滋賀県守山市水保町 (以下、水保) の7地点である。図-2 に代表例として岡山浦安、東中浜、神栖、水保における SRS の N_d 値と SPT の N 値の深度分布を示す。これらの図から SRS の N_d 値と SPT の N 値は比較的整合性が高いことがわかる。

ところで、SRS の先端はコーンで、中実であるのに対し、SPT の先端は中空のサンプラーである。この先端形状の違いにより、土質ごとに SPT の N 値の出方は変化すると考えられる。表-1 では SPT のコーン直径 D_c 、コーン断面積 A について閉塞時 (SPT サンプラーの先端シューが閉塞せずに土が内部に入る状態)、非閉塞時 (SPT サンプラーの先端シューが完全に閉塞した状態) の2つに場合に分けた値を示した。これらは完全に非閉塞状態、閉塞状態の時の値であり、貫入する土質によってサンプラーの閉塞程度はこれらの値の間で変化すると考えられる。すなわち、柔らかい粘土層では非閉塞状態で貫入するため (エネルギー補正係数 $\alpha=1.47$) N 値 $< N_d$ 値に、密な砂礫層では閉塞状態となり ($\alpha=0.78$)、貫入しにくく N 値 $> N_d$ 値に、砂質土では中間の状態となり ($\alpha \approx 1$)、 N 値 $\approx N_d$ 値になると考えられる。そこで、図-3 に土質別に分けて N_d 値と N 値の相関図を作成した。SPT と SRS では N 値、 N_d 値の測定深度が異なるため、 N 値の測定深度における N_d 値を比例配分して読み取った。相関図から、粘性土地盤では N_d 値は N 値の約 1.6 倍、砂質土ではほぼ一致する結果となった。

以上の結果より、粘性土で N_d 値は N 値に比べて小さくなることがわかった。これは貫入メカニズムの違いによるものだと考えられ、SRS の N_d 値と SPT の N 値の対応関係は土質によって変わると考えられる。

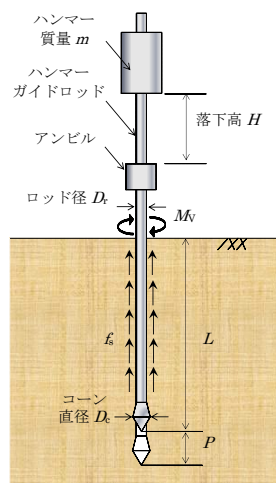


図-1 動的コーン貫入試験の概要

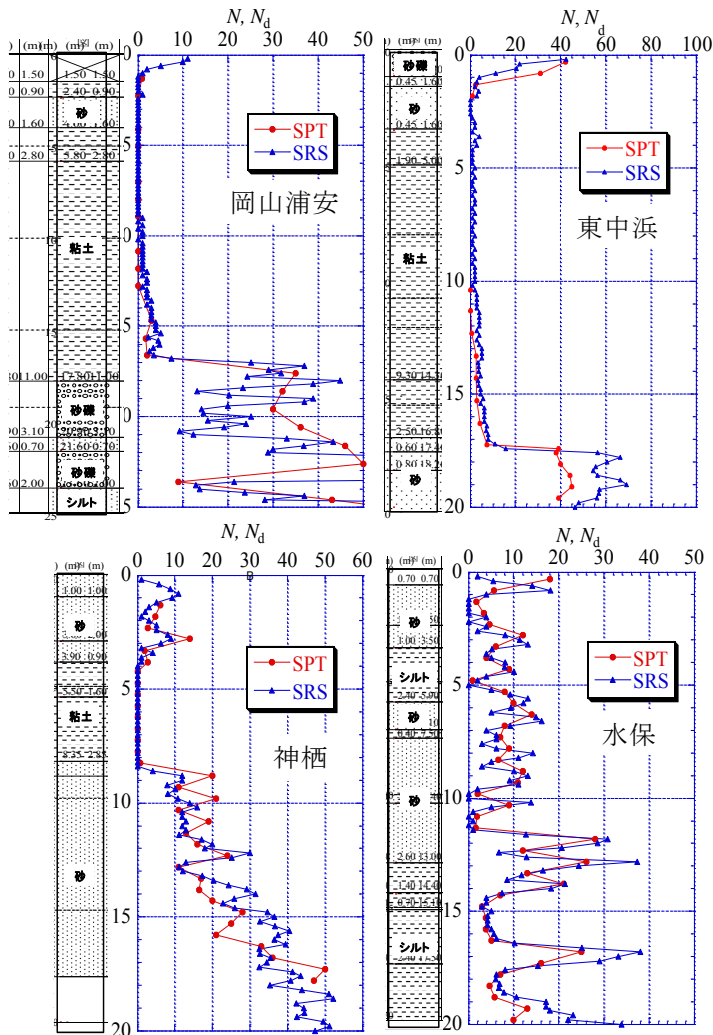


図-2 各地点での N_d 値と N 値の深度分布

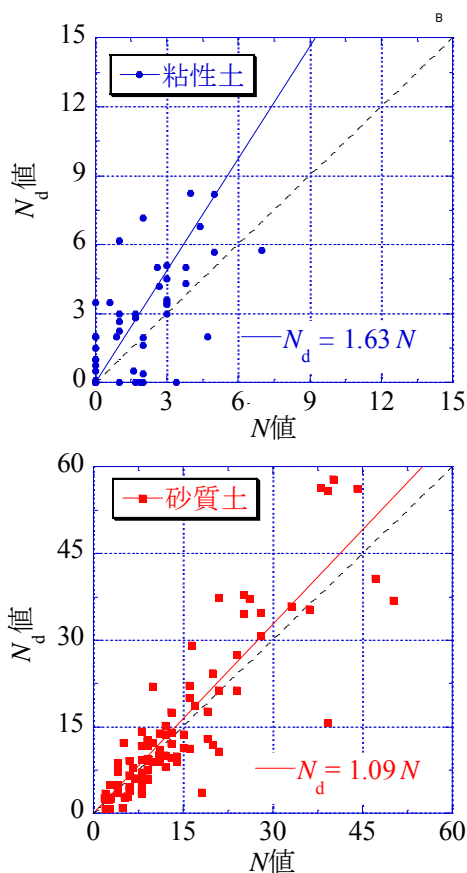


図-3 土質別の N 値と N_d 値の相関

4. SRS と MRS の比較

表-1 で示したように MRS におけるエネルギー補正係数 α 、周面摩擦補正係数 β はそれぞれ 0.50、0.139 である。しかし、一般に MRS は菅原ら²⁾による式(5)の方法でエネルギーと周面摩擦の補正が行われる。

(従来補正 $E \rightarrow f_s$)

$$N_d'' = 0.5 N_{dm} - 0.16 M_v \quad (5)$$

ここでトルク摩擦補正係数 $\beta=0.16$ は SRS の N_d 値と合うように、これまでの試験結果から経験的に求められた値である。さらに、先にエネルギー補正するのは順序が逆と考えられる。よって式(4)で示した補正式に $\alpha=0.50$ 、 $\beta=0.139$ を代入して得た式(6)のように、先に周面摩擦補正をし、その後でエネルギー補正をするのが正しいと考えられる。

(新補正 $f_s \rightarrow E$)

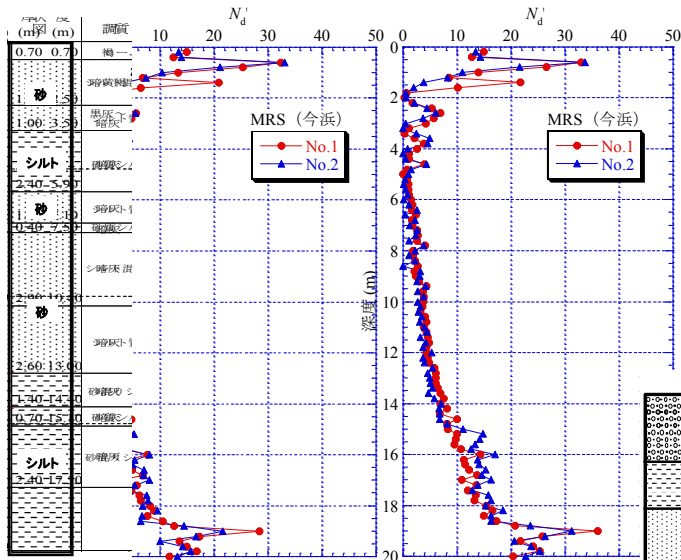
$$N_d' = 0.5 (N_{dm} - 0.139 M_v) \quad (6)$$

式(5)は周面摩擦補正量が式(6)の 2.3 倍になり、従来の補正方法は過大な周面摩擦補正をしていると考えられる。ここでは、補正方法の違いによる影響を検討した。

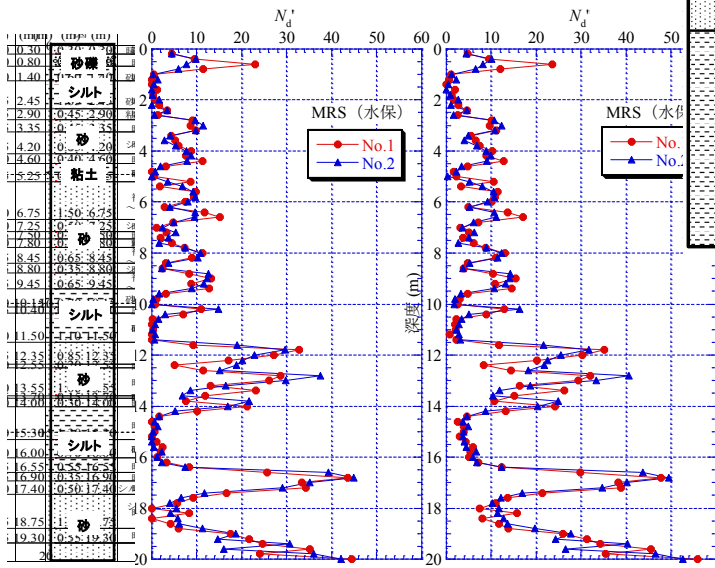
図-4 に代表例として、今浜、水保での 2 つの補正方法による結果を示す。今浜での (従来補正 $E \rightarrow f_s$) の結果では、深度 8m から 13m 付近で測定打撃回数 N_{dm} は 0 ではないが、周面摩擦補正により N_d' 値が 0 以下になっているところが見られる。(新補正 $f_s \rightarrow E$) の結果では N_d' 値が 0 になることはなく、軟弱な粘性土に対して、より詳細な結果を示すことができたと考えられる。水保では補正方法の違いによる補正結果の差はあまり見られないが、当地では、測定トルク値自体があまり大きな値を示さなかったため、トルク補正方法の違いによる補正結果への影響が大きくならなかったと考えられる。

図-5 に本研究で調査した 7 地点での 2 種類の補正方法による補正結果を土質別にまとめた相関図を示す。ここで、SRS と MRS の N_d 値、 N_d' 値をそれぞれ N_{dR} 、 N_{dM} としている。(新補正 $f_s \rightarrow E$) の結果に注目すると、粘性土で N_{dM} は N_{dR} に比べて少し小さくなり、砂質土ではほぼ一致する結果となった。(従来補正 $E \rightarrow f_s$) による結果は、砂質土ではほぼ一致するが、粘性土において相関図の勾配が 0.57 となり、SRS の N_d 値に相当する結果とは言い難いものであった。粘性土において補正方法の違いで結果の差が大きくなったのは、粘性土で SRS に比べて周面摩擦補正が過大となるためだと考えられる。

以上の結果から、(従来補正 $E \rightarrow f_s$) より (新補正 $f_s \rightarrow E$) の方が適切であり、SRS の N_d 値に良く対応すると言える。

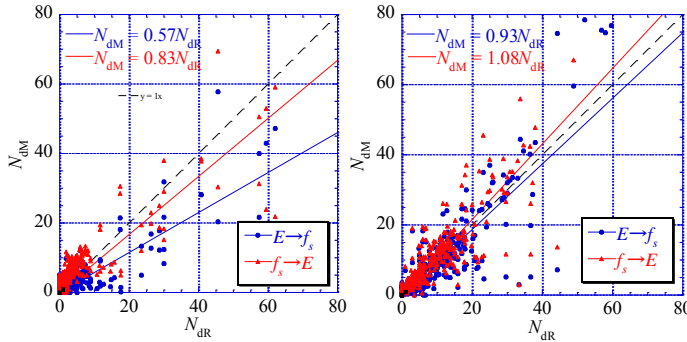


(1) 今浜の(従来補正) (2) 今浜の(新補正)



(3) 水保の(従来補正) (4) 水保の(新補正)

図-4 MRS の補正結果 (今浜、水保)



(1) 粘性土 (2) 砂質土

図-5 N_{DR} と N_{DM} の相関図

5. SRS と PDCPT の比較

PDCPT は宅地調査などに有効な試験であると考えられている。そこで PDCPT の試験結果と SRS の N_d 値との対応関係を明らかにすることが求められている。本研究では今浜、水保の2地点で PDCPT 試験を実施

した。表-1 に示した $\alpha=0.51$ 、 $\beta=0.51$ を用いて補正した N_d' 値と SRS の N_d 値との対応関係を図-6 に示す。今浜では SRS との整合性はあまりよくないが、水保では良く整合している。この2地点の結果から粘性土では PDCPT の N_d' 値は SRS の N_d 値より大きくなり、砂質土ではほぼ一致すると言える。粘性土における PDCPT の N_d' 値が大きいのは、周面摩擦の影響がトルク補正だけでは除去できないためと考えられる。

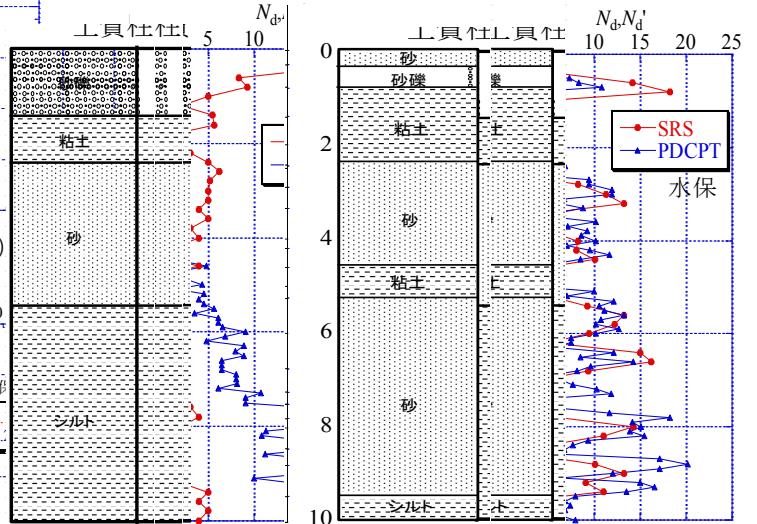


図-6 PDCPT の補正結果 (今浜、水保)

6. SRS と力学試験結果との対応関係

6.1 整理方法と代表例

昨年度までの研究より SRS の N_d 値と力学試験結果（一軸圧縮強さ q_u 、圧密降伏応力 p_c ）を比較すると、両者にはある一定の対応関係がみられることがわかった。このことから N_d 値から地盤の非排水せん断強度 s_u を直接的に推定できる可能性が示唆された。そこで、 N_d 値が測定された同深度の q_u 、 p_c を比例配分して読み取り、前者は $s_u = q_u/2$ から、後者は $s_u = p_c/3$ （強度増加率 $s_u/p=1/3$ を仮定）から N_d 値との相関図を作成した。また、これらの相関図によって得られた回帰式を用いて N_d 値から直接推定される s_u と土質試験で実測した s_u の深度分布を比較した。

図-7~9 に代表例として東中浜での整理結果をまとめる。図-7 は N_d 値と p_c 、 q_u の深度分布である。両者とも深度方向に増加しており、相関性があることが見受けられる。これらの比較により、図-8 の N_d 値と s_u の相関図を作成し、回帰式を得た。図-9 に回帰式により SRS の N_d 値から推定した推定 s_u と、土質試験結果により得た実測 s_u の深度分布を示す。参考のため、同様の整理を行った岡山浦安での推定 s_u と実測 s_u の深度分布も示す。両地点で実測 s_u 値と推定 s_u 値が良く整合しており、SRS の N_d 値から非排水せん断強度を推定できることが分かる。

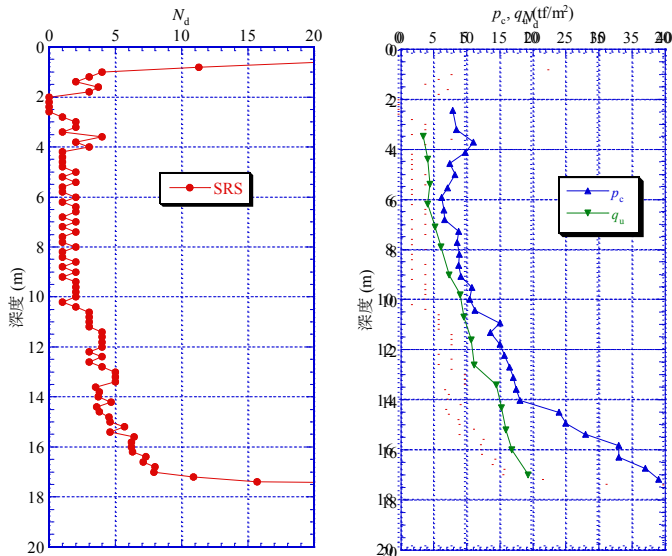


図-7 SRS の N_d 値と力学試験結果の比較 (東中浜)

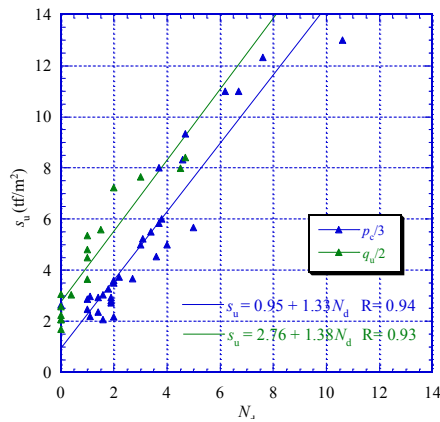


図-8 N_d 値と s_u の相関図 (東中浜)

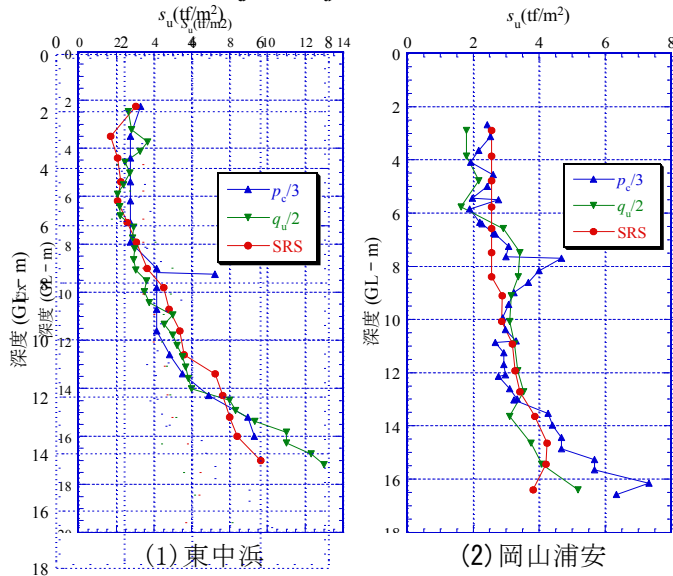
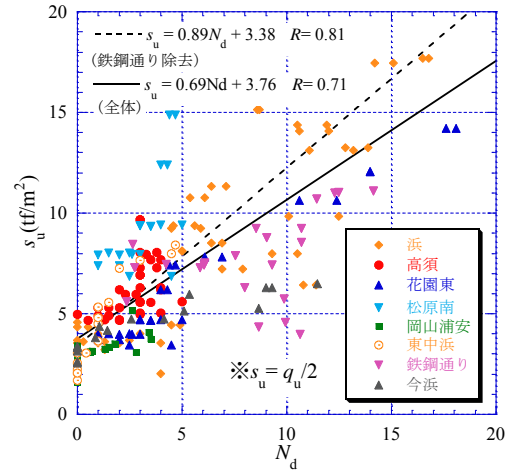


図-9 推定 s_u と実測 s_u の比較

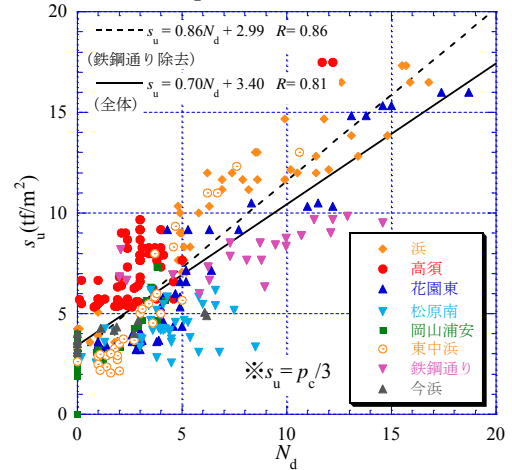
6.2 全地点のまとめ

図-10 に今年度の研究結果と、昨年度の研究³⁾でまとめられた4地点(浜、高須、花園東、松原南)の N_d 値と s_u の関係をあわせた相関図を示す。図(1)は $s_u = q_u/2$ 、 $s_u = p_c/3$ の相関図である。鉄鋼通りは深度17mから40mの結果を比較したものであり、SRSの適用深度を超えているのでSRSの N_d 値が正しく測定できていな

い可能性が高い。そこで、鉄鋼通りを除去した場合と、除去しない場合の回帰線を引いた。 N_d 値と s_u の関係には地点によるばらつきはあるが、鉄鋼通りを除去した場合、 $s_u = p_c/3$ 、 $s_u = q_u/2$ の両方で相関係数 R が0.8を超えており、この回帰式を用いて N_d 値から非排水せん断強度 s_u を推定することは妥当であると考えられる。



(1) $q_u/2$ による相関図



(2) $p_c/3$ による相関図

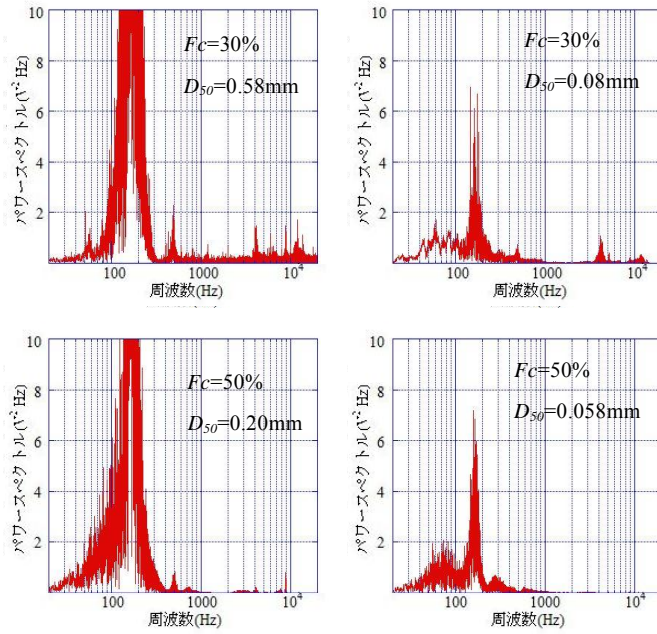
図-10 SRS の N_d 値と s_u の相関図

7. 音による土質判定

本研究では室内、現場実験ともSRS試験のトルク測定時に土中で生じる音を測定し、それを高速フーリエ変換することで音響特性(パワースペクトル)を求め、それらから土質判定を試みた。

7.1 室内実験

珪砂5号、7号に細粒分含有率 F_c がほぼ100%である珪砂特粉を混合することで F_c を調整し、模型土槽で異なる F_c での音響特性を調べた。図-11に例として珪砂5号、7号の $F_c = 30$ 、50%のパワースペクトルを示す。平均粒径 D_{50} による音響特性の違いも現われると考えられるので、 D_{50} の値も示した。100Hz付近でピーク値を取り、 F_c を上げると1000Hz以上の高周波域で変化が見られた。また、 D_{50} が大きい珪砂5号では全体的に大きなパワースペクトル値が出ていることがわかる。



(a) 珪砂 5号 (b) 珪砂 7号

図-11 室内実験（細粒分含有率 F_c の比較）

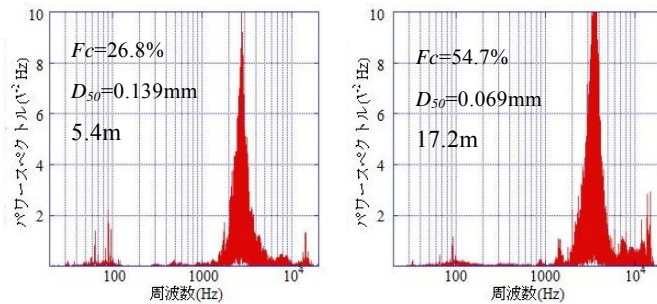


図-12 現場実験（室内実験の F_c と対応）

7.2 現場実験

音測定現場実験は今浜、水保の2地点で実施した。代表として水保での試験結果を示す。現場実験は室内実験結果の細粒分含有率 F_c が近い値である深度のデータを対応させ、比較検討した。図-12に $F_c=30, 50\%$ に対応するものとしてそれぞれ深度 5.4m 深度 17.2m を代表として示す。以上の結果から現場実験では 2500Hz 付近でピーク値をとることが分かり、室内実験との対応関係は見られなかった。

7.3 現場実験で測定した音と土質の対応関係

7.1、7.2より細粒分含有率による室内実験と現場実験の対応関係の比較から、共通点は見出せなかった。そこで、測定した音と現場実験の土質（粒度による分類）との関係から共通点を探すこととした。今浜、水保の結果から、砂質土、砂礫において音が出やすく、粘性土では音が出にくいという傾向が見られたが、全てに当てはまる訳ではなかった。図-13に水保における(a)深度 0.6m 砂礫、(b)深度 1.0m 砂質シルト、(c)深度 2.0m 砂混り粘土、(d)深度 2.6m 粘土混り砂における測定結果のパワースペクトルを示す。(a)の砂礫で測定値は大きくなく、それより少し深い (b) では

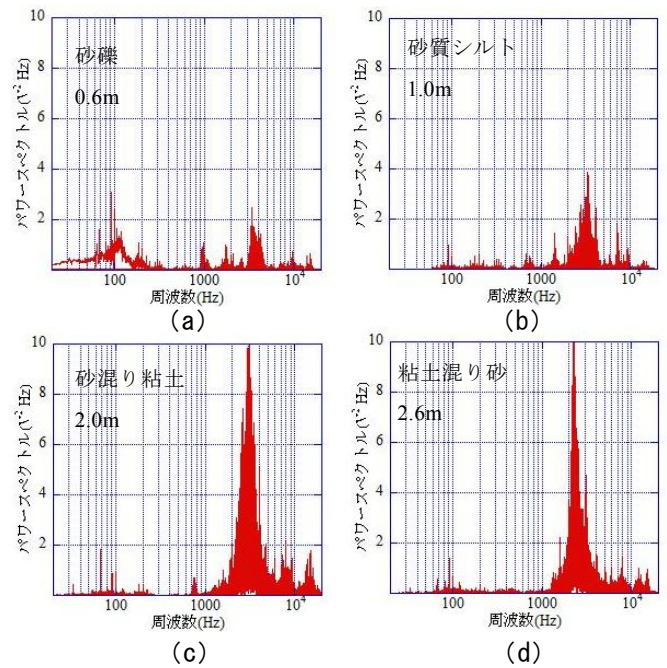


図-13 水保での測定結果

2500Hz 付近で値が出始めた。更に深い (c) でその値は大きくなり、(d) でも計測された。この結果はコーンの直径がロッドよりも大きいため、コーン直上のロッドは土と触れ合っておらず、徐々に孔壁が崩れ、ロッドと接触し始めたと考えられると説明できる。

また、コーンが砂礫層内にある (a) でのパワースペクトル値はロッドからのノイズよりも小さいことから、コーン部の摩擦音よりも、ロッドからのノイズの方が大きく影響したと考えられる。土質判定のためにはコーン部での摩擦音を分析する必要があり、ロッドからのノイズを遮断するしくみを開発することが必要であるとされる。

8. 結論

- (1) SRS の N_d 値と SPT の N 値の比較から、粘性土では N_d 値 $>$ N 値、砂質土では N_d 値 \approx N 値となることがわかった。これは両者の貫入メカニズムの違いによると思われる。
- (2) 力学試験結果と SRS の N_d 値の比較から、 N_d 値から非排水せん断強度 s_u を求めることが可能であることが示された。
- (3) MRS の新しい補正方法の妥当性が確認できた。
- (4) SRS 試験の音から土質判定につなげることはできなかったが、次年度以降に解決すべき、現在の問題点を挙げる事ができた。

[参考文献] 1)大島昭彦:浦安一斉試験における各種サウンディング試験の比較、浦安地盤調査一斉試験報告会論文集、2012 2)菅原ら:小型動的貫入試験の開発とその利用、全地連「技術フォーラム'97」講演集 3)平田拓也:地盤調査における動的コーン貫入試験の適用性に関する研究、大阪市立大学卒業論文、2012

質疑

重松先生

Q. 音測定に関して、粒度を対象として検討したのはなぜか？ 鉱物組成の影響の方が大きいのではないか？

A. 道路橋示方書によれば、液状化判定の P_L 法のためには地盤の強さである N 値の他に、細粒分含有率 F_c が必要となるため、粒度及び細粒分含有率に着目した検討を行いました。また、鉱物組成による影響も考えられますが、細粒分含有率の違いによって、高周波域で共通の傾向が見られたので細粒分含有率のみに着目することで比較が可能であると考えました。

松村先生

Q. 音の変化はロッドの通過層の違いによる影響と考えていますが、前半のトルク補正に関して、通過層の違いによる影響は考慮していますか？

A. トルク補正のためのトルク測定については通過層の違いによる影響はないと考えられます。先端コーンの存在する深度までロッドは連続しており、トルク測定では全深度における周面摩擦の合計を測定することができます。それらを周面積、打撃エネルギーで打撃回数に換算することで周面摩擦補正ができます。

角掛先生

Q. MRS の新・従来補正について、MRS の新補正結果は SRS に対して 0.83 倍となり、整合したとしているがその根拠は？

A. 0.83 倍で 17% の誤差を大きい小さいかを判断することはできません。ただ、従来補正では 43% の誤差が出ておりそれに比べて新補正では整合性が上がったと判断しました。

山口先生

Q. MRS の新・従来補正について、菅原ら²⁾が調査を実施した地盤で調査を行った場合どちらの方が整合するのか？

A. 菅原らが調査を実施した地盤では従来補正の方が整合します。ただ、菅原らによって提案された式は理論に基づくものではなく、本研究で調査を実施した全 7 地点の地盤を対象とする場合、整合しないことが分かりました。今後データを増やして新補正の妥当性をさらに明らかにする必要があると考えます。

重松先生

Q. SRS と MRS の土質ごとの相関図について、データ数はどれぐらいあるのか？

A. 300~400 程度です。全 7 地点で調査を行いました。基本的に 1 地点当たり、20cm ピッチで 20m 測定するので 100 個のデータを取ります。それが 7 地点分あり、それらを土質ごとに分けるので、このようなデータ数になりました。