

宅地のサウンディング試験の高精度化と室内力学試験の相関性に関する研究

A study on improvement of precision of sounding tests for residential land an correlation with laboratory mechanical tests

地盤工学分野 張林松

Lab. of Geotechnical engineering Zhang Linsong

本研究では動的サウンディング試験（SRS、MRS、PDCPT）、スウェーデン式サウンディング試験（SWS）を対象とし、低コストのまま高精度に地盤強度を測定し、土質判定できる試験方法を開発するために現場調査を行い、各種サウンディング試験の相関性及び粘性土地盤を対象に室内力学試験との相関性を求めた。その結果、各種サウンディング試験の精度を高めることができ、室内力学試験と一定の相関性を確認できた。また、各種簡易サンプラーの妥当性も検討した。

This paper shows site investigation results of dynamic cone penetration tests (SRS, MRS and PDCPT) and Swedish weight sounding test (SWS) for residential land. This study examines the correlation between dynamic and SWS and improvement of precision of each sounding test, and examined the correlation between SRS and SWS and laboratory mechanical tests for the clay ground for sounding test's low cost and high accuracy. Consequently, this study was able to raise precision of sounding test for residential land, and was able to identify constant correlation as laboratory mechanical tests. Moreover, this study examined the validity of various simple samplers.

1. まえがき

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北・関東地方で砂地盤の液状化現象によって約2万7千棟の戸建住宅が被災した。液状化判定を行うためには地盤強度と粒度の情報が必要である。通常、液状化判定は標準貫入試験（SPT）による N 値と採取試料の粒度から行われるが、宅地に対してはコスト的に無理がある。一方、宅地の標準的な地盤調査法であるスウェーデン式サウンディング（SWS）試験の結果のみでは液状化判定ができない。したがって、これまで宅地に対して液状化判定と対策を行っていないのが実情であった。しかし、東日本大震災を経て、現在、宅地の液状化判定と対策のための地盤調査法の開発が喫緊の課題となっている。

本研究では宅地のサウンディング試験として動的コーン貫入試験（SRS、MRS、PDCPT）及びSWS試験を対象とし、低コストのまま高精度に地盤強度を測定し、土質判定できる試験方法を開発するために大阪市西淀川区中島、長野県諏訪市湖南、千葉県浦安市高洲6、同運動公園の4地点で実証試験を行う。まず、過去の地点を含めて動的コーン貫入試験（SRS、MRS、PDCPT）の結果を集約し、各試験間の相互関係（ N_d 値と N 値の相関性など）の検討、及び室内力学試験結果の対応関

係（ N_d 値と圧密降伏応力 p_c 、一軸圧縮強さ q_u 、一面非排水強さ s_u との相関性）の検討を行い、試験方法としての高精度化を図る。次に、SWS試験の結果を集約し、 N 値との相関性の検討（稲田式の見直し）、及び q_u 、 s_u 値との相関性の検討を行い、試験方法としての高精度化を図る。同時に、両試験で試験孔を利用して土試料を採取するいくつかの簡易サンプラーを適用してサンプリングした試料の粒度をSPT試料と比較して、簡易サンプラーの妥当性を検討し、それらを用いて液状化判定の精度も検討する。

以上から、宅地のサウンディング試験を高精度化し、室内力学試験との相関性を求めることが本研究の目的である。

2. 各種サウンディング試験の仕様と補正方法

2.1 各種サウンディング試験の仕様

表-1に本研究で対象とした各種サウンディング試験の仕様をまとめた。¹⁾

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。SPTと単位貫入量当たりのエネルギーが同じなので、 N_d 値 $\approx N$ 値とされている。また、単管のロッドの周面には常に地盤との

表-1 各種サウンディング試験の仕様¹⁾

試験名	SRS	MRS	PDCPT	SPT	SWS
メーカー	YBM	OYO	JGS仕様	JIS仕様	JIS仕様
ハンマーガイドロッド径 (mm)	101.6	20	16	40.5	-
ハンマー直径 D_h (mm)	246	160	60	180	-
アンビル直径 D_a (mm)	120	90	50	71	-
アンビル直径/ハンマー直径 D_a/D_h	0.49	0.22	0.32	-	-
打撃装置総質量	80.5	62	5	63.5	-
ハンマー質量 m (kg)	63.5	30	5	63.5	100
落下高 H (mm)	500	350	500	750	-
コーン先端角 (°)	90	90	60	非閉塞 ^{*1} 閉塞 ^{*2}	S.P.
コーンマントル長 (mm)	90	69	0	外径51 外径51	200
コーン直径 D_c (mm)	45	36.6	25	内径35	33
コーン断面積 A ($\times 10^{-4}$ m ²)	15.9	10.5	4.9	10.8	20.4
ロッド直径 D_r (mm)	32	28	16	40.5	19
コーン直径/ロッド直径 D_c/D_r	1.41	1.31	1.56	-	1.74
トルクによる周面摩擦補正係数 β	0.040	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に基づくエネルギー比	1.00	0.500	0.255	2.21	1.17
打撃回数測定貫入量 L (m)	0.20	0.20	0.10	0.30	0.30
単位貫入量当たりのエネルギー $E=mgH/AL$ (kJ/m ² /m)	979.2	489.5	499.6	1442.0	763.4
SRSに基づくエネルギー補正係数 α	1.00	0.500	0.510	1.47	0.780

*1: 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
*2: SPTサンプラーの先端シューが完全に閉塞した状態

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る。

さらに、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 MRS では、SRS と同様に周面摩擦補正を行い、エネルギーの補正を行うことで SRS と同等の N_d 値が得られるとされている。しかし、その補正方法には現在 2 種類あるので、その補正方法の妥当性を SRS との比較から検証する。

2.2 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費やされるエネルギー 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/m²)、 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。

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

E_{skin} は測定トルク M_v (N・m) ($=f_s (\pi D_r L) \cdot D_r / 2$) から求められる。この E_{skin} を 1 打撃当たりのエネルギー mgH で除すことで周面摩擦による打撃回数の補正值 N_{skin} が求められる。よって式(2)のように測定打撃回数 N_{dm} から N_{skin} を差し引くことで、補正打撃回数 N_d が求められる。

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

ここに、 β は周面摩擦補正係数である (表-1 参照)。

2.3 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

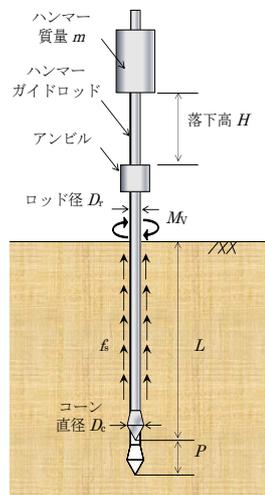


図-1 動的コーン貫入試験の概要

の貫入量 P がそれぞれ異なるが、式(3)に示す単位面積・単位貫入量あたりのエネルギー $mgH/A/P$ で換算すれば結果を相互に比較できると言われている。そこで、SRS 試験の $mgH/A/P$ 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。

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

ここに、 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⁾。

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

2.4 SWS 試験

SWS 試験は荷重 W_{sw} ($=0.05 \sim 1$ kN) による貫入と回転による貫入 (半回転数 N_{sw}) を併用した静的サウンディング試験である。簡易なサウンディングのうちでは比較的貫入能力に優れており、深度 10m 以内の軟弱層を対象に用いられている。一般に SWS の結果から式(5)~(7)の稲田³⁾ による相関式によって N 値、 q_u 値に換算される。

$$N = 2W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad [\text{礫} \cdot \text{砂} \cdot \text{砂質土}] \quad (5)$$

$$N = 3W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad [\text{粘土} \cdot \text{粘性土}] \quad (6)$$

$$q_u = 45W_{sw} + 0.75N_{sw} \quad [\text{粘土} \cdot \text{粘性土}] \quad (7)$$

3. 各種サウンディング試験結果と室内力学試験比較

3.1 SRS と SPT の比較

本研究の現場調査は、大阪市淀川区中島、諏訪市湖南、浦安市高洲 6 丁目、同運動公園の 4 地点である。

図-2 の(1)~(4)にそれぞれ中島、諏訪、高洲 6 丁目、運動公園の SRS 試験機 (全自動 SRS-Y、半自動 SRS-T) の N_d 値と SPT の N 値の深度分布を示す。図(1)の中島ではこれまでの研究得られた砂質土では $N_d \approx N$ 値、粘性土では $N_d > N$ 値という結果とは異なり、砂質土でも N 値より大きくなった。これは浅層のセメント改良土がロッド上部の摩擦を大きくしたためと考えられる (ロッドの傾斜も考えられる)。図(2)諏訪では、5m 以深の泥炭層から SRS-Y 試験機の N_d 値は N 値よりも大きくなっている。これは通常の粘性土とは異なる泥炭の特殊な性質 (過大な周面摩擦を示す) によると考えられる。一方、図(3)、(4)の高洲 6、運動公園では N_d 値と N 値が良く整合している。ただし、SPT はそれぞれ 15m、13m までしか実施していない (それ以深の粘性土ではサンプリングを行った) ので直接比較できないが、過去の浦安調査の沖積粘土層は N 値 2~3 と深度方向に一定だった。図(2)、(3)、(4)では、SRS-Y と SRS-T の試験機の違いは見られなかった。

図-3 に過去を含む全 13 地点における SRS 試験 (SRS-Y) の N_d 値と N 値の関係を示す。なお、先の理由

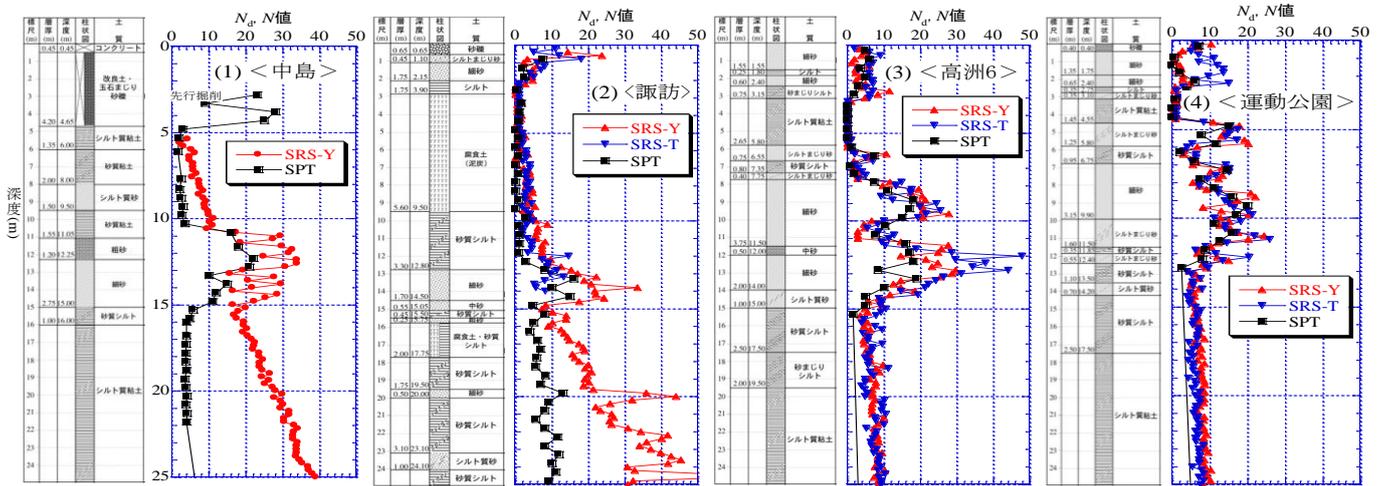


図-2 各地点での SRS の N_d 値と SPT の N 値の深度分布

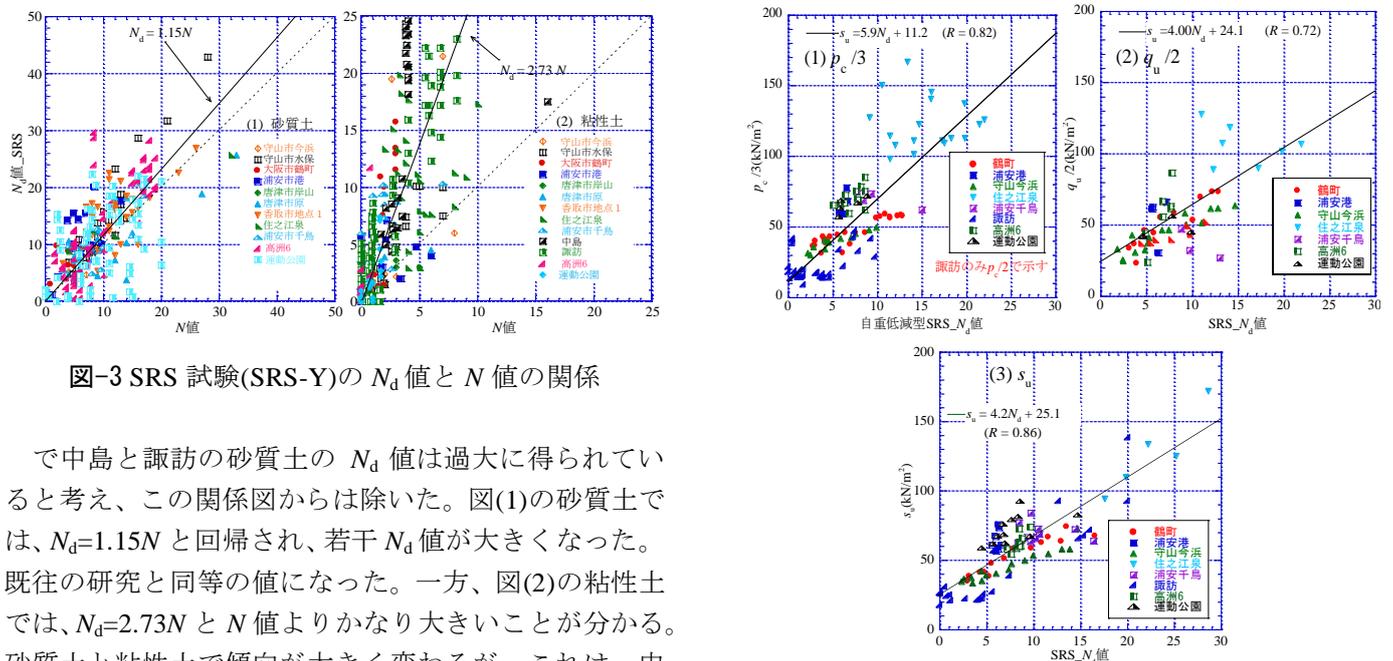


図-3 SRS 試験(SRS-Y)の N_d 値と N 値の関係

で中島と諏訪の砂質土の N_d 値は過大に得られていると考え、この関係図からは除いた。図(1)の砂質土では、 $N_d=1.15N$ と回帰され、若干 N_d 値が大きくなった。既往の研究と同等の値になった。一方、図(2)の粘性土では、 $N_d=2.73N$ と N 値よりかなり大きいことが分かる。砂質土と粘性土で傾向が大きく変わるが、これは、中実コーンである SRS 試験と中空サンプラーである SPT の貫入メカニズムの相違から説明できる。

3.2 SRS と室内力学試験の相関

図-4 に過去を含む 8 地点における SRS の N_d 値と $p_c/3$ 、 $q_u/2$ 、 s_u の関係を示す (ただし、諏訪の $p_c/2$)。図(1)の $p_c/3$ では、ばらつきが生じている。特に昨年実施した住之江の $p_c/3$ が大きいのは洪積粘土 (Ma12 層) によるためと考えられる。図(2)の $q_u/2$ では、 $p_c/3$ よりばらつきは小さくなっている。図(3)の s_u では、相関係数が 0.86 と最も高く、ばらつきが小さい。よって、 N_d 値から非排水せん断強さを推定できると考えられる。

3.3 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(8)の方法でエネルギーと周面摩擦の補正が行われる。

$$\text{従来補正: } N_d = N_{dm}/2 - 0.16M_v \quad (8)$$

図-4 SRS の N_d 値 s_u 値の関係

ここに、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(9)のように、先に周面摩擦補正し、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。

$$\text{理論補正: } N_d' = (N_{dm} - 0.138M_v)/2 \quad (9)$$

式(8)は周面摩擦補正量が式(9)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を検討した。また、試験機として O 社製 (MRS-O) と T 社製 (MRS-T) を比較した。

図-5、図-6 に諏訪、高洲 6 における MRS の N_d' 値と SRS の N_d 値の比較を示す。MRS-O と MRS-T を比較す

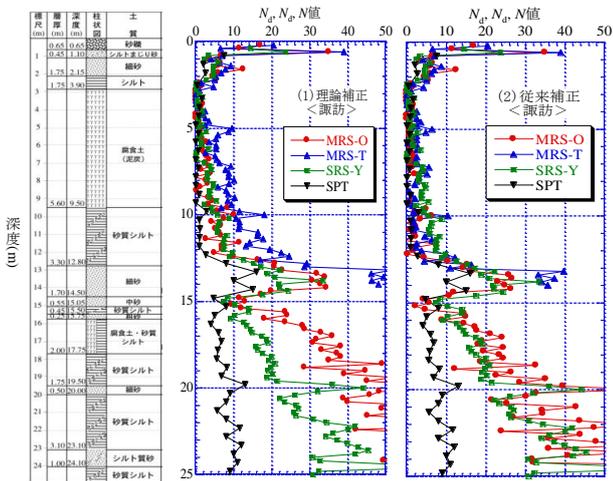


図-5 諷訪の MRS の N_d' 値と SRS の N_d 値の比較

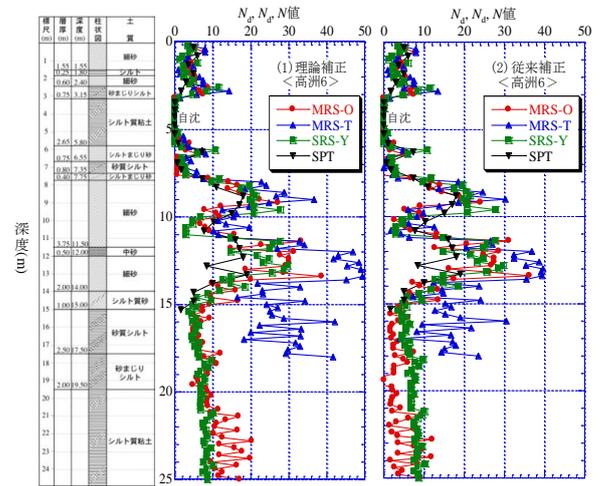


図-6 高洲6の MRS の N_d' 値と SRS の N_d 値の比較

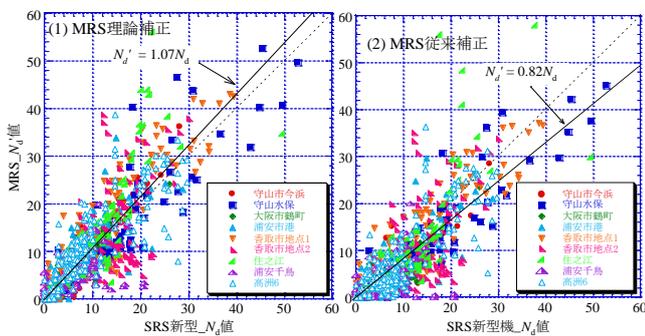


図-7 全9地点の MRS の N_d' 値と SRS の N_d 値の相関

ると、両地点ともに MRS-T の N_d' 値が深度方向に過大になっていることが分かる。測定トルク M_v は、MRS-T は MRS-O よりかなり大きくなっており、試験機の機構上に問題があると考えられる。次に、両地点における理論補正と従来補正を比較すると、図-5 の諷訪では、理論補正 N_d' と SRS の N_d 値が整合しているに対し、従来補正 N_d 値が深度 13m までは SRS の N_d 値よりも小さく、過小評価となってしまふ。図-6 の高洲6 では、図(1) の理論補正では MRS-O と SRS-Y の N_d 値、SPT の N 値は 15m までほぼ一致しているのに対し、図(2) の従来補正は 10m 前後で MRS-O の N_d' 値が SRS の N_d 値と N 値より小さくなっている。

図-7 に過去を含む9地点(諷訪は上記の理由で除く)における MRS の N_d と SRS の N_d 値の相関を示す。図(1)の理論補正 MRS の N_d' 値は SRS の N_d 値にほぼ一致していることが分かる。図(2)の従来補正 N_d' 値はトルクによる周面摩擦の補正量が過大となるため、SRS の N_d 値より小さくなる。

以上から MRS は理論補正が正しいと考えられる。

3.4 SWS と SPT の比較

図-8 に、今年度3地点(諷訪、高洲6、運動公園)で実施した複数試験機関による SWS 試験結果を示す。各地点とも、試験機関による違いは見られず、試験精

度が高いことが確認できた。図(1)では、5m 以深の腐植土は高含水比で超軟弱であるが、自沈層ではなく回転層($N_{sw} > 1$)となっている。これはスクリーポイントやロードに腐植土が絡み付いて、結果が過大になったと考えられる。図(2)の高洲6 丁目では、14m 以深の粘土層で深度方向にやや増加している。一方、砂層においてばらつきが確認できる。図(3)の運動公園では、高洲6 丁目と同様な結果が得られた。

図-9 の(1)、(2)に過去を含む全20地点の W_{sw} 、 N_{sw} と N 値の関係をそれぞれ粘性土、砂質土に分けて示す。両図とも 10m 以浅を色抜きで、10m 以深を色塗りで区別して示したが、両者による傾向の違いは特に見られない。図(1)の砂質土ではかなり大きくばらついているが、図中に示した稲田式(5)による線は平均的な関係を表しているようにも見える。図(2)の粘性土もばらついているが、砂質土よりは相関性が高い。稲田式(6)による線はやはり平均的な関係を表している。砂質土でばらつきく原因は、静的貫入と回転貫入を併用する SWS 試験は排水せん断条件、動的貫入である SPT は非排水せん断条件で、両試験の排水条件が異なるためと考えられる。

3.5 SWS と室内力学試験の相関

図-10(1)、(2)にそれぞれ全13地点、7地点(鋭敏粘土地点を除く)の SWS 試験の W_{sw} 、 N_{sw} と q_u 値の関係を示す。鋭敏な粘土の地点では、SWS の回転貫入によって粘土が練返されるため、 N_{sw} が過小に得られることが分かっているため別整理を行った。稲田式(7)は明らかに下限値を示し、過小評価となるので、新たな相関式を提案した。

図-11(1)、(2)にそれぞれ全13地点、7地点(鋭敏な地点を除く)の SWS 試験の W_{sw} 、 N_{sw} と s_u 値の関係を示す。 s_u の方が q_u よりばらつきが小さく、相関性が高い。やはり稲田式($s_u = q_u/2$ に換算)は下限値を示すので、新たな相関式を提案した。全体を確認すると相関

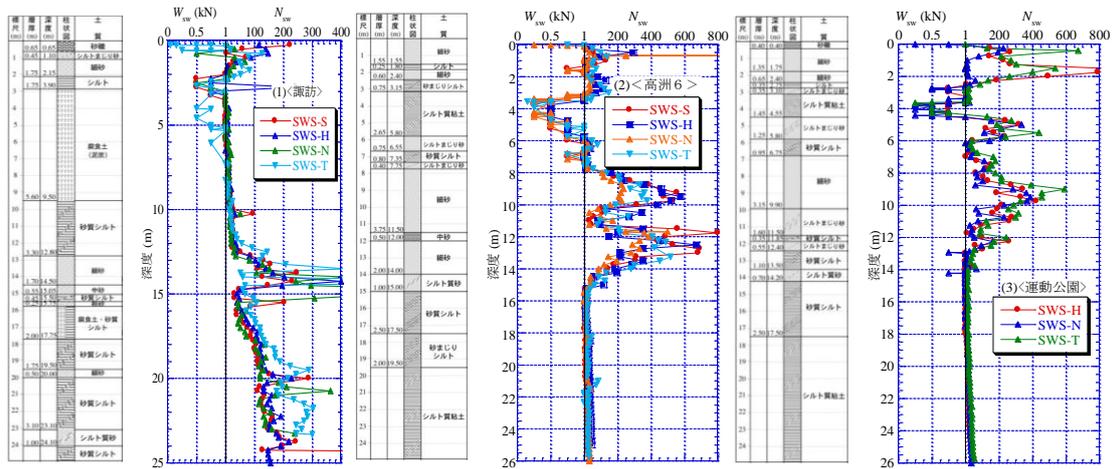


図-8 今年度各地点における SWS 試験の比較

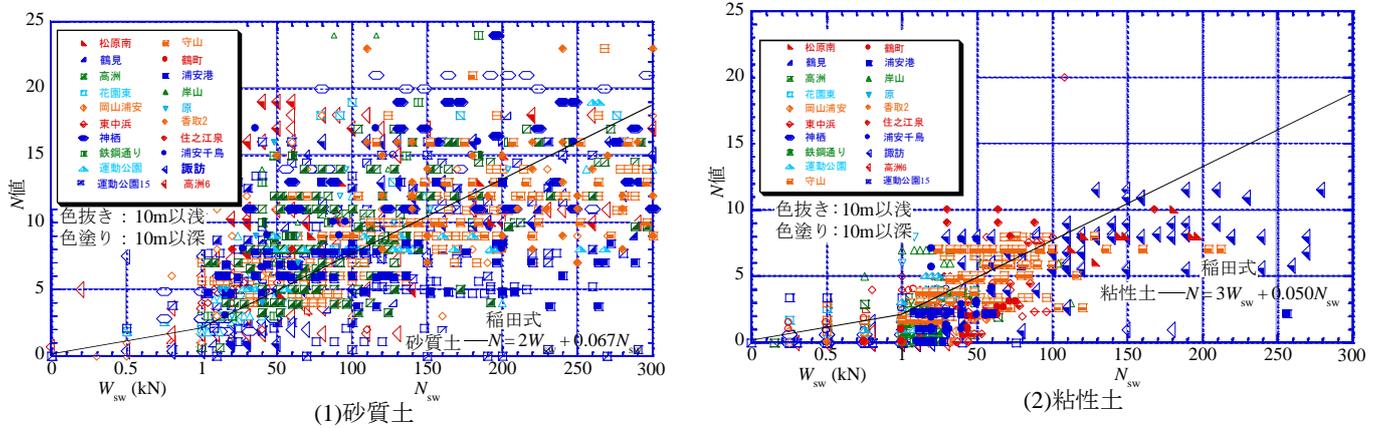


図-9 全 20 地点における W_{sw} 、 N_{sw} と N 値の相関性

式と稲田式 (式 7、 $s_u=q_u/2$) を書き込んでいる。

4. 簡易サンプラーによる液状化判定

ここでは、調査地点で実施した SRS、MRS、SWS 試験において簡易サンプラーによって採取した試料による粒度試験によって得られた細粒分含有率 F_c を SPT 試料と比較し、深度 10m までの液状化判定を行った結果を示す。今回は統一的な比較をするため、各地点の地下水位は SPT による値を用いた。液状化判定は建築基礎構造設計指針⁴⁾により以下の 2 通りで行った。

- ① 中地震 (損傷限界) : $\alpha_{max}=200gal$ 、 $M=7.5$
- ② 大地震 (終局限界) : $\alpha_{max}=350gal$ 、 $M=7.5$

図-12 に代表例として高洲 6 丁目における簡易サンプラーによる液状化判定結果を示す。図(1)の各換算 N 値はほぼ N 値と一致している。図(2)の F_c は SRS、MRS の結果が SPT とほぼ一致しているが、SWS は過小となった。図(3)、(4)の液状化安全率 F_L は SRS は SPT とほぼ一致しているが、MRS はやや過小に、SWS は過大となっている。SWS は 3 深度のみの試料採取だったが、深度が深い側の 2 点は細粒土で、液状化判定の対象外となったため、 F_L が求められなかった。

今回の液状化判定では試料採取ピッチに問題があった。今後簡易サンプラーを用いて精度の高い液状化判定を行うためには、少なくとも 1m 毎に土試料を採取する必要があると考えられる。

5. 結論

本研究から以下の結論が得られた。

- 1) 大型動的コーン貫入試験 (SRS) の N_d 値と SPT の N 値の比較から、砂質土で $N_d \approx N$ 値となり、粘性土では $N_d > N$ 値となった。これは貫入メカニズムの相違によると考えられる。
- 2) 中型動的コーン貫入試験 (MRS) の補正方法については、理論補正は妥当であり、従来補正は過小評価する。
- 3) SWS 試験結果の稲田式による換算 N 値は SPT の N 値に比べて、砂質土、粘性土で大きな違いが見られなかった。砂質土ではばらつきがかなり大きい、稲田式が平均的な関係を表している。粘性土ではばらつきが砂質土に比べて小さく、やはり稲田式が平均的な関係を表している。
- 4) SWS 試験結果と一軸圧縮強さ q_u 、一面非排水せん断強さ s_u と一定の相関関係を求めることができた。 s_u と

の相関がよりばらつきが小さく精度が高かった。

5) 各種簡易サンプラーを用いた液状化判定では、土試料採取ピッチに問題を残した。今後は、1m 毎に試料を採取すれば、精度が高まると考えられる。

[参考文献]

1)地盤工学会「低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液状化被害予想手法研究委員会」：建設技術研究開発費

補助金総合研究報告書：低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液状化被害予想手法の開発，2014.

2) 菅原紀明・鈴木勝久・菅原章治：小型動的貫入試験機の開発とその利用，全治連「技術フォーラム '97」講演集，pp.461-464，1997.

3) 稲田倍穂：スウェーデンサウンディング試験結果の使用について，土と基礎，vol.8，No.1，pp13～18，1960.

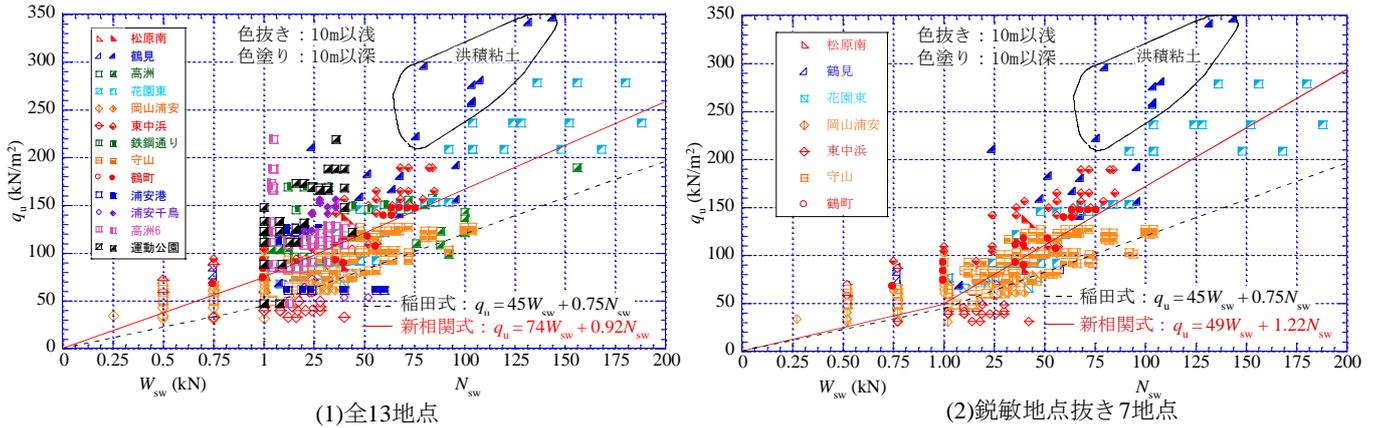


図-10 SWS の W_{sw} 、 N_{sw} と q_u 値の相関性

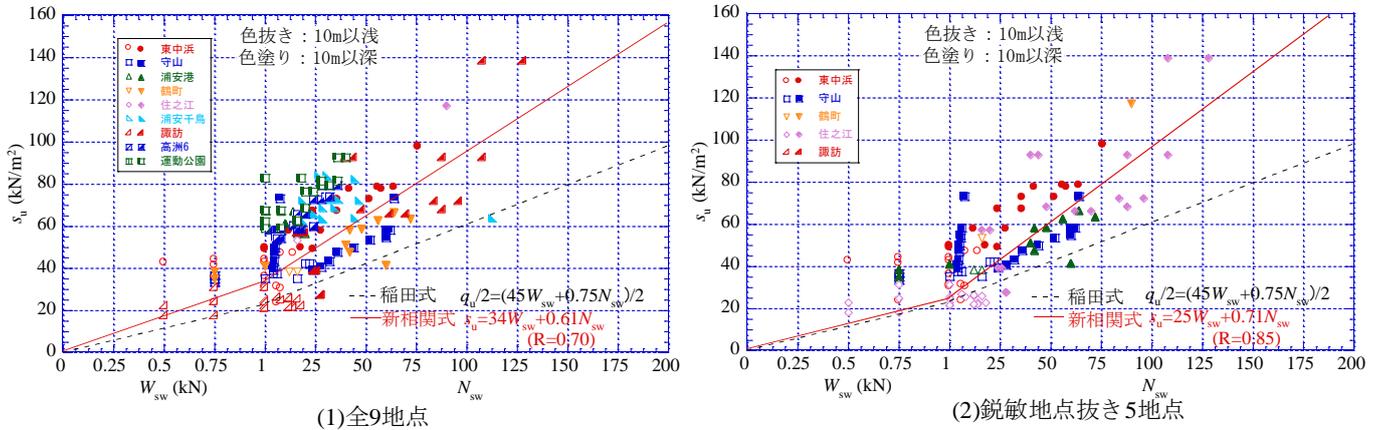


図-11 SWS の W_{sw} 、 N_{sw} と s_u の相関性

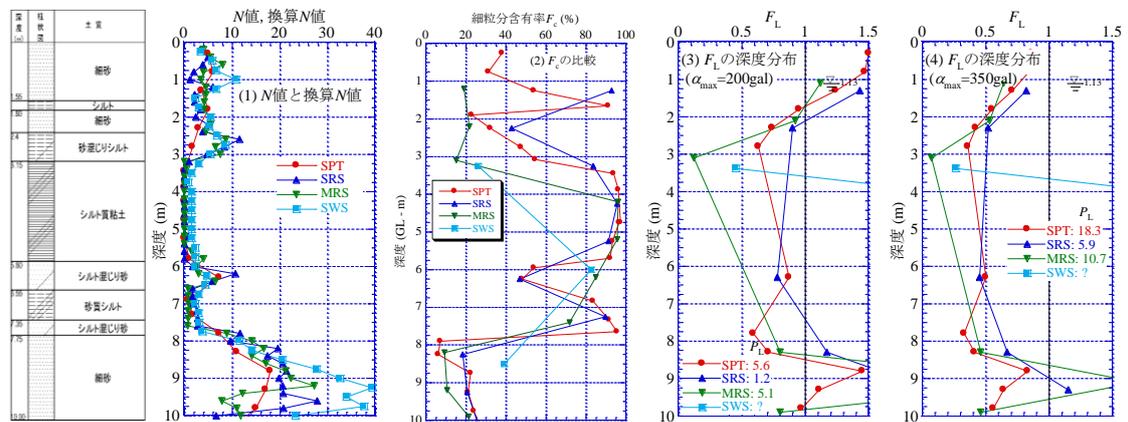


図-12 高洲6丁目における簡易サンプラーに夜液状化判定結果

討議

討議 [重松先生]

・各相関図において、ばらつきはどう評価するのか？
・追加して調査し続けると、相関式が収束しないのではないか？

回答

本研究で取り上げる各相関図におけるばらつきは大きく分けて2種類があるといえます。まず1つ目は、SWS試験の W_{sw} 、 N_{sw} と N 値の相関のように貫入メカニズムの違い、せん断条件の違いから生じる大きいなばらつきです。これに関しては、本文でも述べたように、相関を取るのに無理があると考えられます。もう1つは SRS 試験と各力学試験の相関のように明らかな傾向を示すものです。このような相関に関しては回帰式により換算を行えると思いますが、そのばらつきの評価、許容幅に関しては、まだ明らかにしていません。今後の課題ともいえると考えています。

また、調査地点が増えることによって相関式が多少変動するのは事実です。しかし、その変動は調査地点が増えることによって収束していると思っています。実際、地点増えることで相関式の振れ幅はだんだん小さくなっています。本研究で取り上げられる過去を含む全地点とはいっても多いもので20地点となりますので、相関を確立させるにはまだ不十分だと考えております。

討議 [山口先生]

・稲田式は下限値、中央値どちらを設定したものなのか？
・設計においては下限値、中央値どちらから行うべきであるか？

回答

稲田式を確立させる際には中央値（回帰線）を用いています。その際にも、ばらつきを確認しており、砂層では N 値 ± 4 の幅を確認したと書かれています。本研究ではそれよりもかなり大きなばらつきが見られています。先ほども申し上げたように、SWS試験の W_{sw} 、 N_{sw} と N 値の相関を取るには無理があると考えられます。しかし、SWS試験の W_{sw} 、 N_{sw} と q_u 、 s_u は一定の相関性を確認しているが、稲田式は下限値を示しています。実際の設計においては安全側設計となりますが、コストの浪費につながると考えています。本研究では、回帰から相関式を立てていますが、稲田式の問題点を取り上げ、提案していることに過ぎないと考えています。

討議 [山田先生]

・SRS と室内力学試験の相関は粘性土のみなのか？
・今後、その結果をどのように利用してほしいか？
・1m 毎のサンプリングが必要とする理由は？

回答

本研究で取り上げられた SRS 試験と室内力学試験の相関は粘性土のみとなります。

SRS の N_d 値と N 値の相関から明らかになっているように N_d 値 = N 値ではなく砂質土で N_d 値 \approx N 値、粘性土で N_d 値 $>$ N 値と、大変異なる結果を示しています。今後の地盤調査において、このような結果を含めて考慮し、より高精度な地盤調査結果が得られることを望んでおります。そして、SRS 試験と力学試験の相関性に関してですが、より低コストで、多くの地盤情報が得られ、設計においてより豊富な情報が参考になれるのではないかと考えています。

また、簡易サンプラーにより液状化判定において、1m 毎のサンプリングを必要とする理由としては、 P_L 値が設計において大変重要なパラメータです。図-1 の P_L 値の求め方から分かるようにサンプリングの頻度が P_L 値に非常に大きい影響を与えます。そのため、 P_L 値の計算において、最低でも 1m 毎にサンプリングを行う必要があると考えられます。ただし、ある深度における地層が液状化の危険性があるかを確認するためであれば、その深度におけるサンプリングのみでも行えます (F_L 値を求める)。

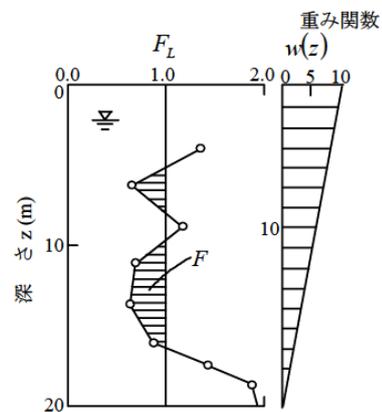


図-1 液状化指数 P_L の求め方