

静的サウンディング（SPS, SWS）試験の適用性と他試験との相関に関する研究

A STUDY ON APPLICABILITY OF STATIC SAMPLING SOUNDING AND SWEDISH WEIGHT SOUNDING TESTS AND CORRELATION WITH OTHER SOUNDING AND LABORATORY TESTS

地盤工学分野 安田 賢吾

Lab. of Geotechnical Engineering Kengo YASUDA

本研究では静的サウンディング試験としてサンプリング・サウンディング（SPS）試験とスウェーデン式サウンディング（SWS）試験を対象として現場調査を行い、各種サウンディング試験との相関及び粘性土地盤を対象に室内力学試験との相関を求めた。その結果、SPS, SWS 試験の地盤調査としての適用性が確認でき、室内力学試験との相関性も確認できた。また、SWS 試験では稲田式の精度の確認を行い、稲田式に代わる新相関式を提案し、さらに、SWS 試験の適用深度の検討を行った。

This paper shows site investigation results of sampling sounding test (SPS), and Swedish weight sounding test (SWS). And this study examines the correlation between SPS and SWS, precision of each sounding tests, and examined the correlation between SPS and SWS and laboratory mechanical tests for the clay ground. Consequently, this study was able to identify the applicability of SPS and SWS as soil investigation, and was able to identify correlation as laboratory mechanical tests. Also, this study on SWS identified the precision of the formula by Inada, and suggested the new correlation formulas to replace the formula by Inada, and considered the applied depth to perform the tests.

1. まえがき

土木・建築構造物の計画・設計・施工を行うためには、地盤情報を得るために地盤調査を行うことが必須である。この地盤調査は原位置でのボーリング調査を基本として行われ、その中で地盤の強さを直接測定する方法（サウンディング）と原位置の性質を保持した乱れの少ない土を採取（サンプリング）し、それを用いて各種室内土質試験で調べる方法を併用するのが一般的である。標準貫入試験（SPT）は、このサウンディングとサンプリングを同時に行うことができるため、地盤調査の標準的なものである。しかし、調査費用が高く、調査時間も長いため、宅地の沈下や液状化判定などに対する地盤調査には適さない。

本研究は、SPT に頼らない、低コストな地盤調査法として、静的サウンディングであるスウェーデン式サウンディング（SWS）試験を取り上げその適用性を検討する。そのために、まず、過去に実施した SWS のデータを見直し、次に SWS と SPT の対応関係を検討し、粘性土地盤に対しては室内力学試験結果との相関性を調べる。また、SWS 試験では稲田式により N 値、 q_u 値に換算する方法があるが稲田式は 50 年以上前に提案されたものであり、現

在の試験結果に適用できる保証がない。そこで、本研究では稲田式に代わる新相関式を提案する。

一方、粘性土地盤に対する SPT は、 N 値は 0~3 程度であり、地盤情報として粗く、採取試料は乱れが大きく力学試験に供することができない。そのため、力学試験用には別途サンプリングを行っているが、このサンプリング方法として最も普及しているのが水圧式サンプラーによるサンプリングである。この乱れの少ない粘性土試料のサンプリングとして使われる水圧式サンプラーのシウォールチューブは、地盤に挿入する抵抗体と見なすこともできる。そこで、地盤工学研究室では、この水圧式サンプラーに定流量ポンプを導入して、サンプリングチューブを一定の速度で貫入させる際の流量速度（貫入量に換算）と反力としての水圧（静的貫入抵抗に換算）を測定することで、サウンディングも同時に行う新しいサンプリング・サウンディング（SPS）試験を開発し、現在までに全 30 地点で行っている。本研究では静的サウンディングの一つとしてこの SPS を取り上げ、室内力学試験結果との相関性を調べる。

以上から、2 つの静的サウンディング試験の適用性と他試験との相関性を調べるのが本研究の目的である。

2. 試験方法及び調査地点

2.1 サンプリング・サウンディング (SPS) 試験

上記の通り、SPS 試験はサンプリングとサウンディングを同時に行う試験である。図-1 に SPS 試験装置の概要を示す。水圧式サンプラーの固定ピストンは、ピストンロッド、ボーリングロッドを介して地上のボーリングマシンに固定される。予めサンプラーヘッド内と取り付け治具を水で飽和し、取り付け治具に耐圧ホースを直結し、地上の定流量ポンプ (吐出量 6.3L/min, 最大圧 7.0MPa) から清水を送り、サンプリングチューブを地盤に静的に圧入する。圧入が終了すると、圧力水はアウターチューブ下部の解放孔より排水される構造になっている。計測した水圧から静的貫入抵抗を、流量速度から貫入量を求める。ただし、水圧式サンプラーの貫入抵抗にはサンプリングチューブヘッドと固定ピストンのシール摩擦による抵抗が含まれているので、事前に空状態でサンプラーを圧入した時の水圧 (空作動時水圧) を測定し、それを用いて計測値を補正する。

本研究では、室内力学試験との対応関係を検討し、非排水せん断強さを推定する相関式を提案する。

2.2 スウェーデン式サウンディング (SWS) 試験

SWS 試験は荷重 W_{sw} ($=0.05 \sim 1\text{kN}$) による貫入と回転 (半回転数 N_{sw}) による貫入を併用した原位置試験であり、静的サウンディングに位置づけられる。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、宅地調査の標準となっており、深度 10m 以浅の軟弱層を対象に用いられている。一般に SWS の結果と N 値、 q_u 値の関係は稲田¹⁾による式(1)~(3)の相関式が用いられる。

$$N=2W_{sw}+0.067N_{sw} \quad [\text{礫} \cdot \text{砂} \cdot \text{砂質土}] \quad (1)$$

$$N=3W_{sw}+0.050N_{sw} \quad [\text{粘土} \cdot \text{粘性土}] \quad (2)$$

$$q_u=45W_{sw}+0.75N_{sw} \quad [\text{粘土} \cdot \text{粘性土}] \quad (3)$$

これらは 50 年以上前に提案されたものであり、相関式を求めたデータが地域限定であること、さらに当時と現在では試験方法も大きく異なることから、現在の試験結果に適用できる保証がない。また、式(1)と(2)を比較しても自沈が起きる W_{sw} の係数が砂質土より粘性土の方が大

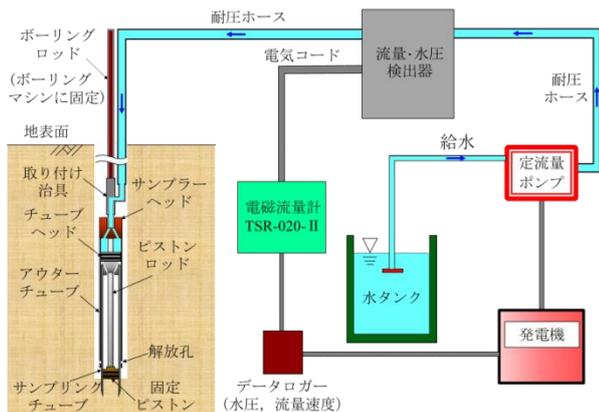


図-1 SPS 試験装置の概要

きいことも疑問である。

そこで、本研究では SWS と SPT の N 値及び力学試験の関係を検討し、稲田式に代わる新相関式を提案する。

2.3 調査地点

2017, 2018 年度に現場調査を行ったのは、尼崎、浦安市高洲 8, 諏訪市豊田, 同湖南 2, 弁天町, うめきた 2 期地区 (SWS 試験のみ), 埼玉県越谷市, 茨城県稲敷市, 舞洲の 9 地点であり、SWS 試験は全ての地点で行った。一方、SPS 試験を行ったのは、うめきた (2016 年度に実施), 稲敷以外の 6 地点である。

3. 試験結果

3.1 SPS 試験結果

図-2 に SPS 試験で計測した流量速度と水圧の代表例として尼崎沖積粘土 (Ma13) の結果を示す。流量速度 q は 10 秒ほどで一定値となり、一定速度でサンプリングチューブを貫入させていることがわかる。また、水圧 p は基本的には単調増加するが、土質の変化によって増減する場合もある。約 38 秒を過ぎると水圧が下がり、貫入が終了していることがわかる。T-13 の約 33 秒から水圧が急激に大きくなっているのは砂質土が混入したためである。

次に、補正した水圧にチューブヘッド断面積を乗じて貫入力を求め、それをサンプリングチューブ周面積で除して貫入抵抗 q_p を求めた。図-3 に尼崎の貫入抵抗 q_p を示す。均質な粘土層であれば q_p の増減は小さいが、シルト分や砂分が多くなるにつれて増減が大きくなる。このように q_p は土質の変化や異物などによって増減が激しい場合があるので、各貫入量 ($\approx 0.90\text{m}$) の q_p を台形積分したものを貫入量で除して平均化した代表貫入抵抗 q_p^* を算定し、各深度の代表値とした。図-4 に尼崎の q_p と q_p^* の深度分布を示す。 q_p はやはり増減が激しいが、 q_p^* は基本的に深度方向に増加している。17m 付近で q_p^* が減少しているのはアカホヤ火山灰 (K-Ah) の影響と考えられる。

3.2 SWS 試験結果

図-5 に、9 地点のうち代表として 4 地点 (尼崎, 弁天町, 越谷, 稲敷) で実施した複数試験機関による SWS 試験結果を示す。SWS-T はトラバース社製であり、それ以外は日東精工社製の試験機である。

各地点とも、試験機関による違いはほとんど見られない (越谷では SWS-T がやや大きい)。図-5(1)~(3)の粘性土層ではばらつきはほとんどなく、特に再現性が高いことがわかる。図-5(3)越谷の粘性土では GL-7.0~20m 付近まで自沈層が確認できた。また、深度方向に W_{sw} はほとんど増加していないことが分かるが、これは越谷の粘性土は超鋭敏性を示すため、先端のスクリーポイント貫入による練返し効果によって貫入抵抗が過小になっていると考えられる。一方、砂質土においては粘性土よりもばらつきは多い結果となったが、傾向は同様と考えられる。

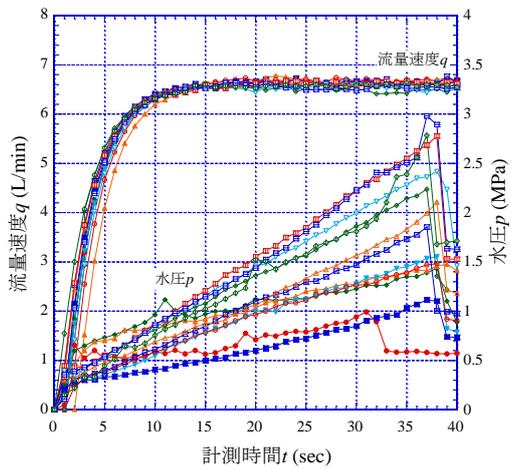


図-2 SPS 試験の測定結果 (尼崎)

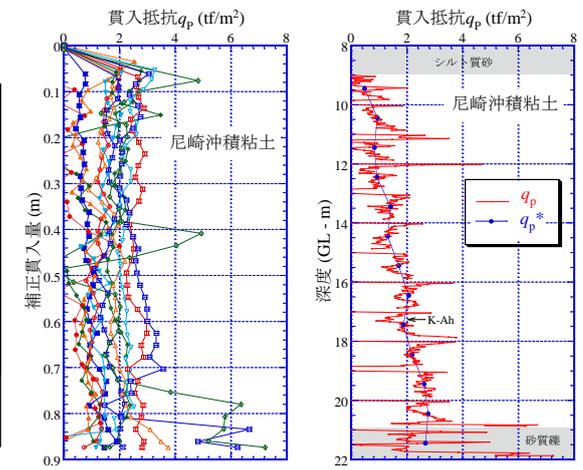


図-3 尼崎 Ma13 の q_p 図-4 q_p と q_p^* の深度分布

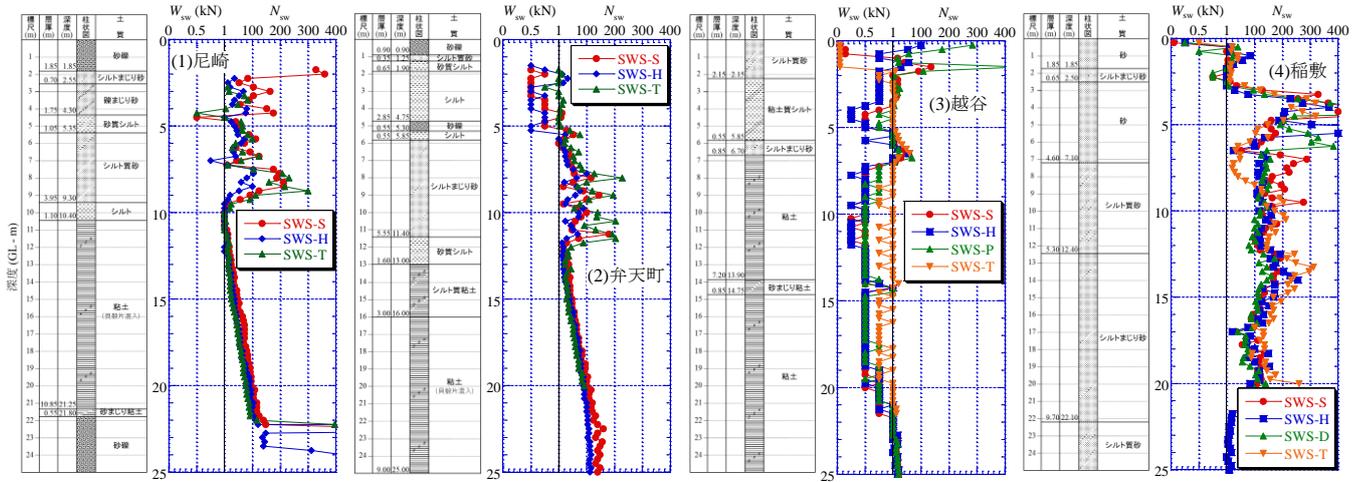


図-5 SWS 試験結果と柱状図

4. 静的サウンディング試験と他試験との関係

4.1 SPS 試験と非排水せん断強さ s_u 値との関係

図-6 に全 28 地点での代表貫入抵抗 q_p^* と採取した粘性土の室内力学試験による非排水せん断強さとの関係を示す (凡例は図-7 参照, 以下同様)。非排水せん断強さは、一面定体積せん断試験による s_u 、一軸圧縮強さによる $q_u/2$ 、圧密降伏応力による $p_c/3$ (強度増加率 $s_u/p_c = 1/3$ を仮定, ただし諏訪市の腐植土などの特殊土は s_u/p_c を一面定体積せん断試験によって直接求めた値とし, それらの値を q_p^* を求めた深度に比例配分して求めた。また, 既往の研究より, 鋭敏性の高い粘性土では貫入時の練返し効果によって q_p^* が過小に得られると考えられるため, 粘土の鋭敏性を液性指数 I_L で判断し, 非鋭敏粘性土を $I_L < 1$, 鋭敏粘性土を $I_L \geq 1$ として分けて検討した。さらに本研究では, 鋭敏性の区分に加え, 腐植物を多く含む高有機質土が主体となる諏訪 5 地点を分けて検討した。図-6(1)の全地点ではばらつきがあるように見えるが, 図-6(2)の非鋭敏粘性土ではばらつきは小さくなり, 図-6(3)の鋭敏粘性土では q_p^* が小さくなるため, 回帰式の傾きが大きくなった。図-6(4)の諏訪 5 地点では, 腐植物が多く強度が弱いと考えられるため, 回帰式の傾きは小さくなった。また, 全地点と非鋭敏粘性土の回帰式ではほぼ同様に

なっているが, これは鋭敏粘性土と諏訪 5 地点で相殺していると考えられる。したがって, 次式によって代表貫入抵抗 q_p^* から粘性土の非排水せん断強さ s_u を推定することができるといえる。

$$\text{非鋭敏粘性土: } s_u = 3.76q_p^* \quad (4)$$

$$\text{鋭敏粘性土: } s_u = 5.99q_p^* \quad (5)$$

$$\text{諏訪 5 地点: } s_u = 2.51q_p^* \quad (6)$$

代表例として, 図-8(1)~(3)にそれぞれ尼崎, 高洲 8 (2017 年度), 諏訪湖南 1 の q_p^* から式(4)~(6)で推定した非排水せん断強さ s_u と室内力学試験による実測 s_u , $q_u/2$, $p_c/3$ の深度分布の比較を示す。図-8(1)の非鋭敏粘土では, q_p^* による推定 s_u は実測 s_u と比較的よく一致している。一方, 図-8(2)の鋭敏粘土では, 練返し効果によって q_p^* が過小に得られるが, 式(5)を採用することによって推定 s_u は実測 s_u に近づいた。しかし, 24m 以深では推定 s_u は小さくなっており, これは鋭敏性の違いのためと考えられる。図-8(3)の諏訪粘性土では, 式(6)を採用することによって推定 s_u は実測 s_u に近づいた。

以上から, 代表貫入抵抗 q_p^* によって粘性土の非排水せん断強さ s_u を推定することができると考えられる。ただし, 砂分やシルト分を多く含む場合には q_p^* 値が過小となるため, 推定 s_u の精度が低い地点も見られた。

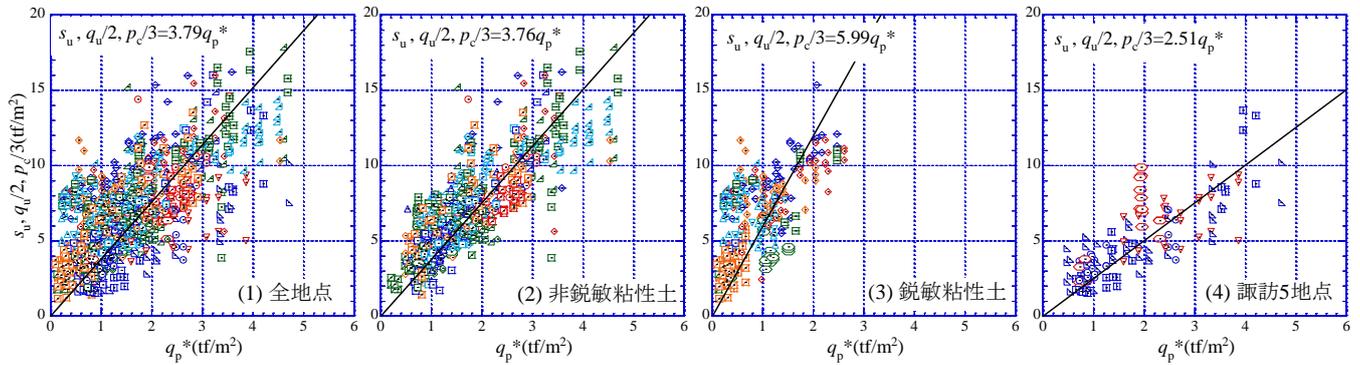


図-6 q_p^* と全力学試験結果との相関図



図-7 地盤調査地点の凡例

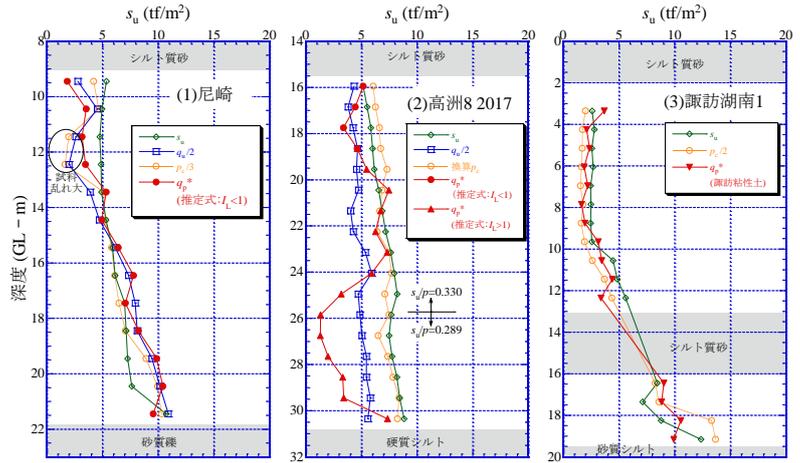


図-8 q_p^* から推定した s_u と実測した s_u との比較

4.2 SWS 試験と N 値との関係

(1) W_{sw} , N_{sw} と N 値との関係

図-9 に全 29 地点の砂質土における N_{sw} と N 値の関係、図-10 に全 28 地点の粘性土における W_{sw} と N 値の関係、 N_{sw} と N 値の関係を示す。それぞれの図において黒線で稲田式、赤線で回帰式を示し、データは 10m 以浅を白抜き、10m 以深を色塗り（以下も同様）で表している。

図-9 より、全体にばらつきは大きく、10m 以浅と 10m 以深による傾向の違いは見られない。そこで、本研究では 10m 以浅と 10m 以深を区別しないこととした。また、砂質土では $N_{sw} \leq 300$, $N_{sw} > 300$ で回帰式を分けているが、これは SWS 試験において N_{sw} が 300 程度を超えると、硬い地盤に対してスクリーポイントが空転して、地盤に食い込むような貫入が起きにくくなるためである。図-9 より、 $N_{sw} \leq 300$ では稲田式、回帰式ともに平均的な関係を表しているように見えるが、 $300 < N_{sw} \leq 600$ では稲田式は明らかに N 値を過大に評価しているのに対し、回帰式は平均的な関係を表している。

図-10 より、粘性土でもややばらつきは大きい。やはり、粘性土においても 10m 以浅と 10m 以深による傾向の違いは見られない。また、諏訪 5 地点を区別して検討したが、違いは見られなかった。そのため、本研究では、10m 以浅と 10m 以深を区別せず、さらに諏訪 5 地点を分けず全地点で検討を

行った。図-10 より、稲田式は上限値を越えているのに対し、回帰式では平均的な関係を表している。

(2) 新相関式

以上をふまえて、稲田式に代わる新相関式を提案する。砂質土の新相関式は上記の通り、 $N_{sw} \leq 300$, $300 < N_{sw} \leq 600$ で分け、図-9 から得られた回帰式を基に、式(7)、(8)として提案する。ただし、 $N_{sw} \leq 300$ における W_{sw} の係数は整数で表し、 $300 < N_{sw} \leq 600$ における回帰式を平行移動をさせている。

$$N = 4W_{sw} + 0.040N_{sw} \quad (N_{sw} \leq 300) \quad (7)$$

$$N = 16W_{sw} + 0.022(N_{sw} - 300) \quad (300 < N_{sw} \leq 600) \quad (8)$$

図-11 に全 29 地点の砂質土の N_{sw} , W_{sw} と N 値の関係を示す。上記のように、 $N_{sw} \leq 300$ および $N_{sw} \leq 600$ において、新相関式は稲田式よりも平均的な関係を表していると考えられる。以上のことから、一般的に SWS 試験では 10m 以浅が適用深度とされているが、 $N_{sw} \leq 300$, $0 < N_{sw} \leq 600$ に分け、新相関式を用いることで 20m 程度まで適用できると考えられる。

次に、粘性土の新相関式は、図-10 から得られた自沈層と回転層の回帰式を基にして、式(9)として提案する。ただし、 W_{sw} の係数は整数で表す。

$$N = 1W_{sw} + 0.044N_{sw} \quad (9)$$

図-12 に全 28 地点の粘性土の N_{sw} , W_{sw} と N 値の関係を示す。上記のように、稲田式は上限値を越えているの

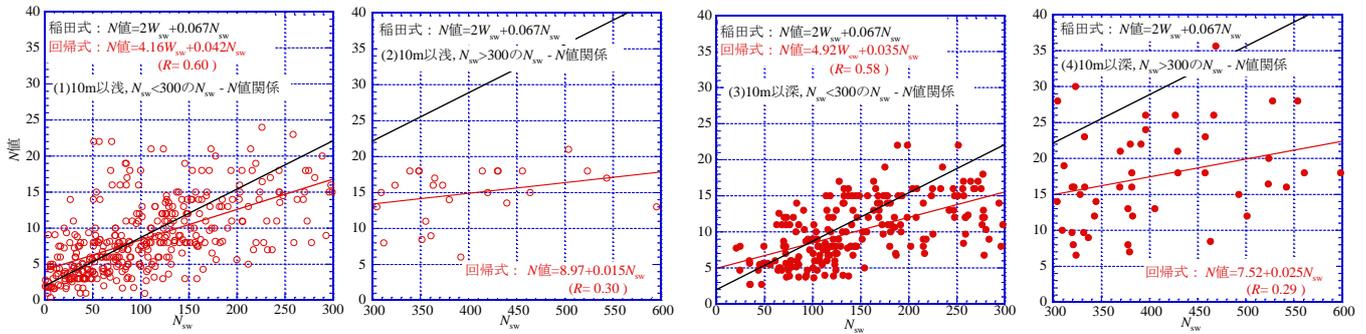


図-9 砂質土における N_{sw} - N 値関係 (続く)

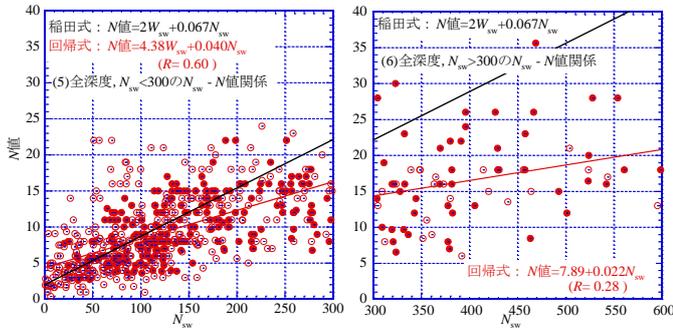


図-9 砂質土における N_{sw} - N 値関係 (続き)

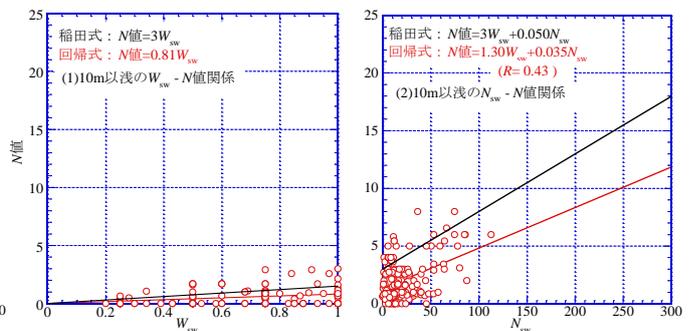


図-10 粘性土における W_{sw} , N_{sw} - N 値関係 (続く)

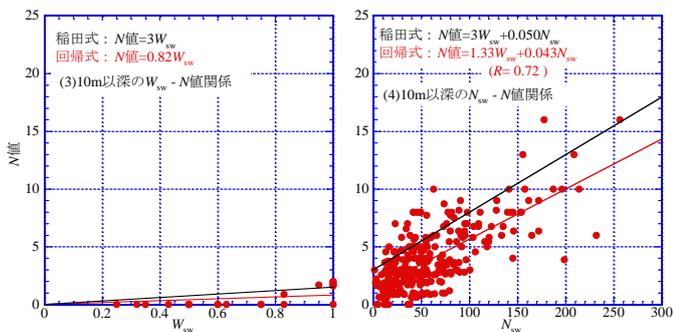


図-10 粘性土における W_{sw} , N_{sw} - N 値関係 (続き)

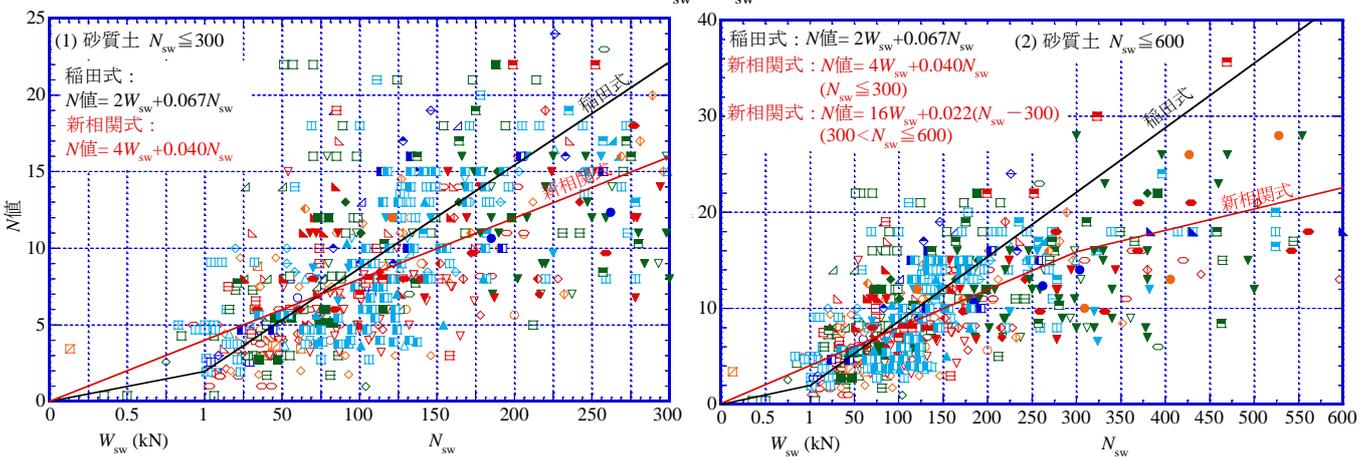
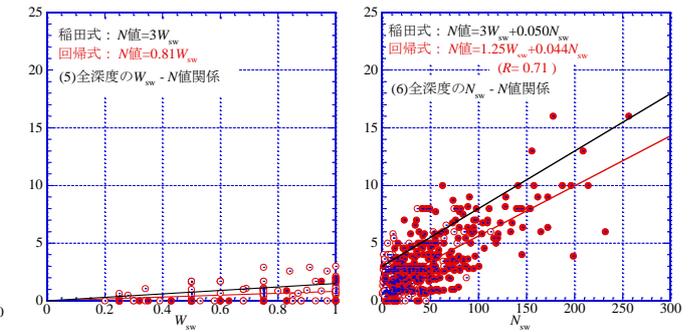


図-11 全 29 地点 (砂質土) における W_{sw} , N_{sw} - N 値関係 (左図: $N_{sw} \leq 300$ 右図: $N_{sw} \leq 600$)

に対し、新相関式では平均的な関係を表している。また、稲田式では N 値が 3 以下であれば SWS 試験では自沈を表しているが、粘性土の N 値が 3 で自沈するとは考えにくい。一方、新相関式では N 値が 1 以下で SWS 試験は自沈を表し、稲田式と比較すると、適切と考えられる。

次に、得られた新相関式を用いて、SWS 試験の W_{sw} , N_{sw} から換算 N 値を求める。図-13 に代表として(1)高洲 8 1, (2)浦安千鳥の N 値, 換算 N 値の深度分布を示す。ま

た、稲田式によって、求めた換算 N 値も参考のため図内に示す。両地点とも、砂質土では換算 N 値は N 値とばらつきはあるが、同様な傾向を示している。また、 N 値 ≥ 16 の砂質土では稲田式による換算 N 値よりも新相関式による換算 N 値の方が N 値に近い値を示している。一方、粘性土における稲田式による換算 N 値は N 値よりも大きい地点が多いが、新相関式による換算 N 値では N 値に近い値を示している。

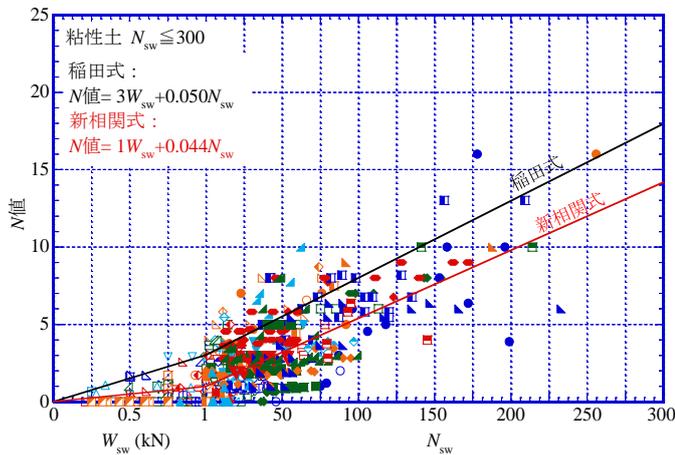


図-12 全 28 地点 (粘性土) における W_{sw} , N_{sw} - N 値関係

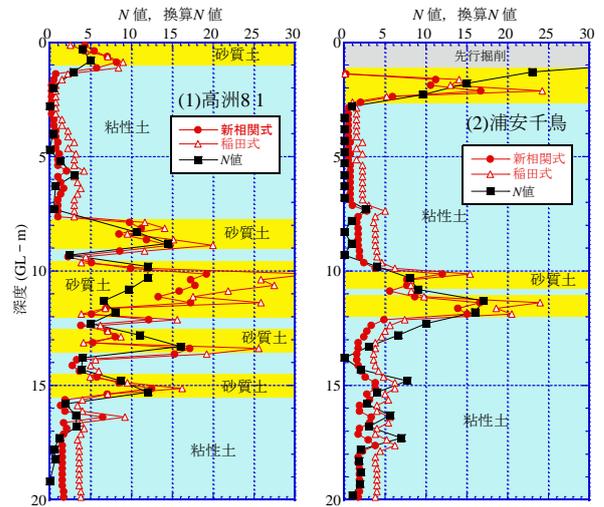


図-13 N 値, 換算 N 値の深度分布

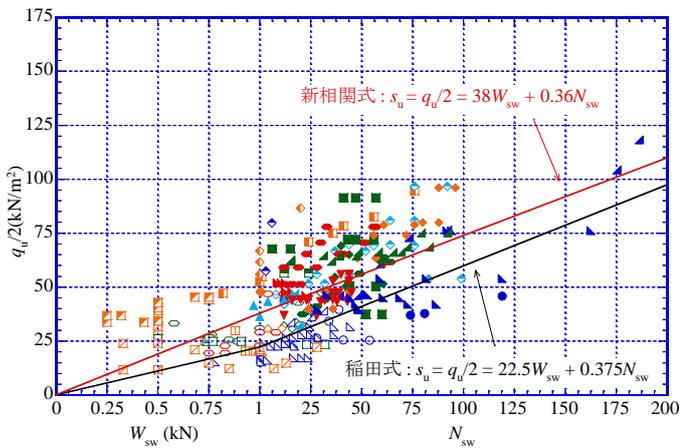


図-14 全 20 地点における W_{sw} , N_{sw} と $q_u/2$ の関係

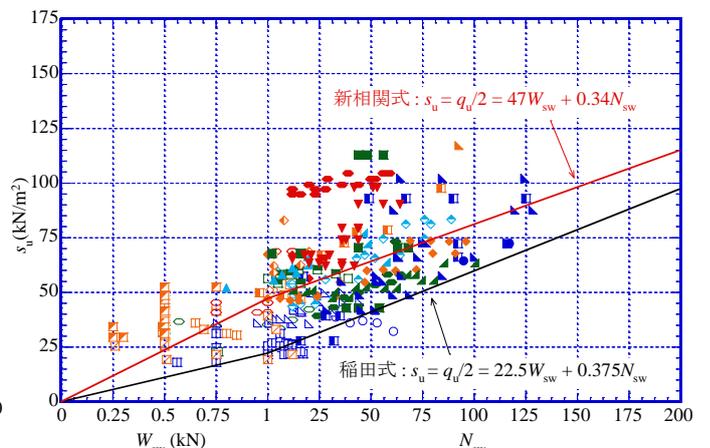


図-15 全 18 地点における W_{sw} , N_{sw} と s_u の関係

4.3 SWS 試験と $q_u/2$, s_u 値との関係

SWS と $q_u/2$, s_u の関係においても、粘性土における SWS と N 値の関係と同様に、新相関式を求めた。図-14 に全 20 地点における N_{sw} , W_{sw} と $q_u/2$ の関係、図-15 に全 18 地点における N_{sw} , W_{sw} と s_u の関係を示す。

図-14 より、稲田式は 10m 以浅では平均的な関係を表しているように見えるが、10m 以深では下限値を通過している。一方、新相関式は 10m 以浅の一部を除き、20m まで平均的な関係を表している。図-15 より、稲田式は全体的に下限値を通過しているが、新相関式は 10m 以浅の一部を除き、平均的な関係を表している。諏訪市の粘性土は高有機質土であり、一軸圧縮強さ q_u が小さく、SWS 試験においては腐植物がロッドに絡みつき N_{sw} が過大になるため、新相関式の下側に位置していると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) SPS 試験では鋭敏部分と非鋭敏部分の相関式をそれぞれに適用し、さらに、諏訪粘性土を別途検討し、諏訪 5 地点における相関式を適用した。
- 2) 1)の結果、非鋭敏部分と諏訪 5 地点では推定 s_u と実測 s_u は近い値を示した。鋭敏部分でも多くの地点で推定 s_u は実測 s_u に近づいたが、鋭敏性の違いにより推定 s_u

と実測 s_u が異なる部分も見られた。

- 3) W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係において、SWS 試験の適用深度を 10m と考え、10m 以浅と 10m 以深を区別して調べた。その結果、砂質土ではばらつきが大きく、粘性土ではばらつきは見られたが砂質土よりは少なく、10m 以浅と 10m 以深による傾向の違いは見られなかった。
- 4) W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係において新相関式を提案した結果、新相関式は全体的に平均的な関係を表し、新相関式を用いると 20m 程度まで適用することができる。
- 5) W_{sw} , N_{sw} と $q_u/2$, s_u 値の関係においても新相関式を提案した結果、新相関式による換算 $q_u/2$, s_u 値は平均的な関係を表した。しかし、諏訪粘性土は新相関式の下側に多く見られた。

SWS 試験結果と N 値との砂質土と粘性土別の新相関式を提案したが、この適用のためには、土質判定が必要となる。SWS 試験での土質判定は簡易サンプラーによることが多いが、その精度を高めることが今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 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。