

宅地地盤評価に関わる技術的問題：SWS 試験による宅地地盤の評価技術

大島 昭彦

Citation	地盤工学会誌. Vol.68, No.2, p.6-9.
Issue Date	2020-02
Type	Journal article
Textversion	Author
Rights	<p>© 2020 大島昭彦, 地盤工学会出版. この記事は原稿版です。この原稿は、「私的使用」にかぎり使用できます。引用は出版社版の確認、そのほかの使用は地盤工学会(https://www.jiban.or.jp/)の事前の許可が必要です。</p> <p>© 2020 Author, Published by the Japanese Geotechnical Society. The following article is the accepted manuscript of a Published Work. For personal use only. Any other use requires prior permission of the Japanese Geotechnical Society. https://www.jiban.or.jp/.</p>

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University

宅地地盤評価に関わる技術的問題（SWS 試験による宅地地盤の評価技術）

Technical Problems for Evaluation of Residential Ground

~ Evaluation Technology of Residential Ground due to Swedish Weight Sounding Test ~

大 島 昭 彦 (おおしま あきひこ)
大阪市立大学大学院 教授

1. はじめに

土木構造物や中規模以上の建築物の地盤調査方法は、標準貫入試験 (SPT) を併用するボーリング調査が基本であるが、宅地地盤ではコストの問題から安価なスウェーデン式サウンディング (SWS) 試験を用いることが標準となっており、宅地調査の件数が多いことから、現在日本で最も多く行われている地盤調査方法である。

本稿では、宅地地盤評価の標準となっている SWS 試験に関わる技術的問題として、SWS 試験結果から SPT の N 値および粘性土の非排水せん断強さ s_u 値への換算方法、SWS 試験による液状化判定方法、沈下量予測方法について述べる。

2. SWS 試験の換算 N 値, 換算 s_u 値

2.1 従来の換算式 (稲田式)

SWS 試験で得られる荷重 W_{sw} (kN) と半回転数 N_{sw} (回) は、稲田¹⁾による次式によって N 値、一軸圧縮強さ q_u 値に換算することが実務では一般に行われている。

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

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

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

しかし、上記の稲田式は 50 年以上前に名神高速道路予定路線の軟弱沖積地盤での地域限定の測定値に基づいて提案されたものであること、また、当時の SWS 試験は手動式の試験装置であり、SPT はコーンブーリー法であることから、その適用精度は疑問視される。

さらに、静的な試験である SWS 試験と動的な試験である SPT では、貫入時の地盤の排水条件が異なる。特に、礫・砂・砂質土に対する SWS 試験は排水せん断であるのに対し、SPT は非排水せん断となるので、そもそも両試験に相関性を求めること自体に無理があるともいえるが、ここではあくまで地盤強さの相関として捉える。

2.2 N 値, s_u 値の新たな相関式

筆者がここ 10 年間に日本各地で実施した SWS 試験結果と N 値および粘性土の非排水せん断強さ s_u 値との比較結果から、新たな相関式を以下に示す。ただし、試験結果は日東精工社製全自動式の SWS 試験装置で実施した

ものみを対象とし、対象深度を 20m までとした。なお、新相関式誘導の詳細は文献 2), 3) を参照されたい。

< $W_{sw} \cdot N_{sw}$ と N 値の関係 >

$$\text{砂質土: } N = 4 W_{sw} + 0.040 N_{sw} \quad [N_{sw} \leq 300] \quad (4)$$

$$N = 16 + 0.022 (N_{sw} - 300) \quad [300 < N_{sw} \leq 600] \quad (5)$$

$$\text{粘性土: } N = 1 W_{sw} + 0.044 N_{sw} \quad [N_{sw} \leq 300] \quad (6)$$

< $W_{sw} \cdot N_{sw}$ と s_u 値の関係 >

$$\text{粘性土: } s_u = q_u / 2 = 38 W_{sw} + 0.36 N_{sw} \quad (7)$$

なお、粘性土の強度としては q_u 値よりも s_u 値の方が直接的なので、ここでは q_u 値から求めた s_u 値 ($= q_u / 2$) を採用した (一面せん断定体積試験による s_u 値の相関式は文献 3) 参照)。

以下に上記の新相関式の根拠となった試験データを示す。表-1 に 29 の調査地点と図-1~3 の凡例を示す。

図-1 に 29 地点の砂質土における $W_{sw} \cdot N_{sw}$ と N 値の関係を示す。図は 0~10m を白抜きで、10~20m を黒塗りでプロットしている。全体にばらついているが、正の相関はあり、0~10m と 10~20m での傾向の違いは見られない。図内に稲田式を破線で、新相関式を実線で示す。新相関式は $N_{sw} = 300$ (換算 N 値=16) で折線とし、 $N_{sw} \leq 300$ と $300 < N_{sw} \leq 600$ ごとの一次回帰から、式(4), (5)のように示した。 $N_{sw} = 300$ で折線としたのは、 N_{sw} が 300 程度を超えると、硬い地盤ではスクリーポイントが空転し易く、地盤に貫入しにくくなり、 N_{sw} が大きくなるためである。稲田式(1)に比べて新相関式は $N_{sw} \leq 74$ で大きめに、 $N_{sw} > 74$ で小さめに N 値を換算することになる。なお、 $N_{sw} > 300$ の領域への稲田式の適用は明らかに過大となる (元々適用範囲外ではあるが)。

表-1 調査地点と図-1~3 の凡例

◇ 東大阪市松原南	□ 浦安市高洲6
▽ 浦安市高洲8-1	◇ 浦安市運動公園2
△ 浦安市高洲8-3	◇ 大阪市北区梅北
▲ 東大阪市花園東	○ 諏訪市上川
□ 大阪市城東区東中浜	○ 諏訪市四賀
□ 茨城県神栖市	□ 熊本県益城町
◇ 浦安市運動公園1	△ 尼崎市築地
◇ 浦安市鉄鋼通り	△ 浦安市高洲8_2017
○ 滋賀県守山市今浜	▽ 諏訪市豊田
○ 滋賀県守山市水保	△ 諏訪市湖南2
▽ 浦安市港	△ 大阪市港区弁天町
▽ 茨城県香取市2	□ 埼玉県越谷市
△ 大阪市住之江区泉	□ 茨城県稲敷市
▲ 浦安市千鳥	□ 大阪市此花区舞洲
□ 諏訪市湖南1	

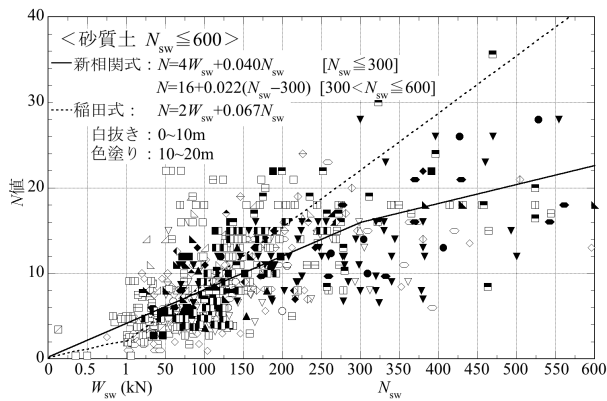


図-1 29地点の砂質土の W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係

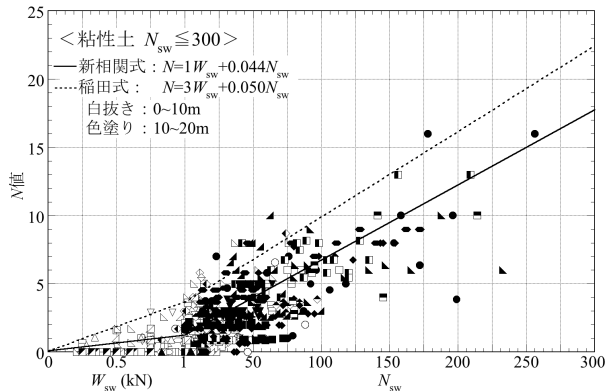


図-2 28地点の粘性土の W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係

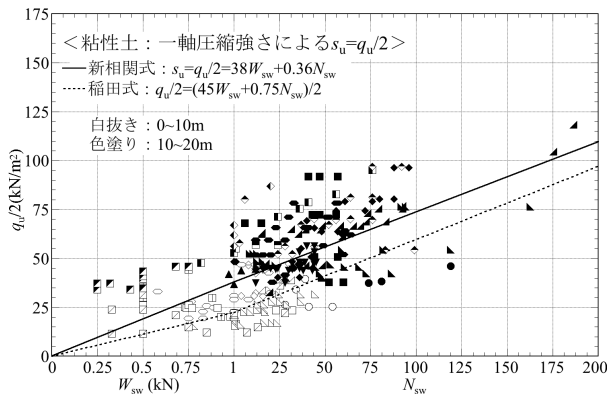


図-3 20地点の粘性土の W_{sw} , N_{sw} と s_u 値の関係

実務での支持力判定では $N_{sw}=150$ までを対象とすることが多いが、3. で示す液状化判定では $N_{sw}=300$ (0.25m 貫入の $N_a=75$) 以上も対象とするので、その場合には式(5)の適用が妥当と考えている。なお、式(4), (5)の新相関式は筆者による調査結果を基に独自にとりまとめたものであるが、偶然にも平成 25 年建築基準整備促進事業で小規模建築物に適用する簡易な液状化判定手法の検討で提案された式⁴⁾と近いものとなった。

図-2 に 28 地点の粘性土における $W_{sw} \cdot N_{sw}$ と N 値の関係を示す。やはり図は 0~10m を白抜きで、10~20m を黒塗りでプロットしているが、両者による傾向の違いは見られない。全体にばらつきはあるが、図-1 の砂質土よりもばらつきは小さく、相関性は高い。図内に稲田式を破線で、新相関式を実線で示す。新相関式は $W_{sw} \leq 1$ (自沈層) と $N_{sw} \leq 300$ (回転層) ごとの一次回帰から、式(6)

のように示した。稲田式(2)に比べて新相関式は全体に小さめに N 値を換算することになる。稲田式は測定データに対して上限値に近く、 N 値を過大評価している。なお、新相関式では自沈 ($W_{sw} \leq 1$) する N 値は 1 以下となる。

図-3 に 20 地点の粘性土における W_{sw} , N_{sw} と q_u 値から求めた s_u 値の関係を示す。やはり図は 0~10m を白抜きで、10~20m を黒塗りでプロットしているが、両者による正の相関の傾向の違いはあまり見られない。図内に稲田式を破線で、新相関式を実線で示す。新相関式は一次回帰から、式(7)のように示した。新相関式は 10m 以浅ではやや過大であるが、10m 以深を含めると平均的な関係を表している。稲田式は下限値となっている。

以上の新相関式は、従来の稲田式よりも N 値および q_u 値の換算精度が高いものとなっている。実際の N 値と比較した新相関式の適用事例は文献 2), 3) を参照されたい。

3. SWS 試験による液状化判定

3.1 宅地地盤の液状化判定の必要性

東日本大震災では、東北・関東地方で砂地盤の液状化によって数多くの戸建住宅が被災した。その液状化被害の大きさから、宅地地盤の液状化検討深度は 10m 程度まで拡張し、FL 法で判定することが必要と考えられる。しかし、SWS 試験結果のみでは液状化判定はできない。

SWS 試験で液状化判定するためには、地盤強度の指標 (2.2 で示した換算 N 値) に加えて、地下水位測定と土質判定 (細粒分含有率 F_c , 塑性指数 I_p など) が必要である。土質は原位置の試料をサンプリング (乱れた試料でもかまわない) して、判定するのが直接的な方法である。

3.2 地下水位の測定方法

地下水位は、試験後に引き抜いたロッド、あるいは試験孔に挿入・引き抜いた測定棒の周面部に付着した水的位置をスケールで計測する簡易な方法でも測定可能であるが、試験孔に通電型水位計を挿入して測定する方法が実用化されており、実用上問題ない精度で水位測定が可能である。ただし、孔内崩壊によって測定不能となる場合もある。その場合には、中空ロッドを試験孔に挿入して、ロッド内水位をアナログメータ式の交流式比抵抗水位計で正確に測定する装置⁵⁾を用いるのが有効である。

3.3 簡易サンプリング方法

SWS 試験に利用する簡易サンプラーの例として、図-4 (1), (2) にそれぞれ従来型開閉回転式 (通称: 土壌すくい)、開閉貫入式を示す⁶⁾。

図-4 (1) の開閉回転式 (内管高さ約 15cm) による採取方法は、①試験孔に所定深度まで正転で貫入し、逆転で内側のポケットが開き、採取刃が周囲の土を掻き取り採取する。②採取後、正転して蓋を閉じ、引き上げる。試験孔を利用するので、作業者の労力が比較的少ないが、挿入・引上げ時に別深度の土が入り込む可能性がある。そこで、最近になって、外管の中にシャフトを入れて採取深度以外の土が入り込みにくいようにし、所定の深度

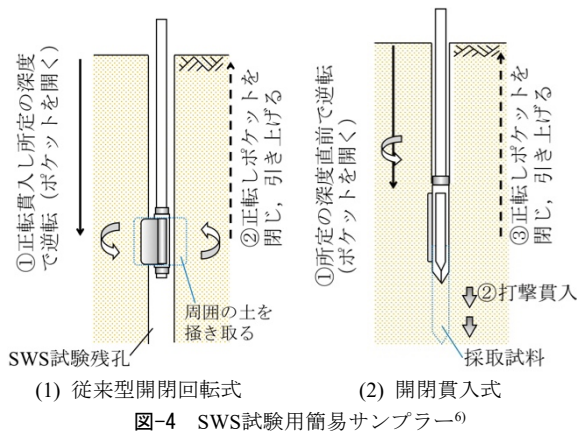


図-4 SWS試験用簡易サンプラー⁶⁾

でシャフトを抜いてから先と同様な手法で土を採取する新型開閉回転式も開発されている。

図-4 (2)の開閉貫入式(内管高さ約20cm)は、先端をより鋭角にして打撃貫入によって土を採取できるように改良したものである。採取方法は、①別孔で所定の深度直前まで正転で貫入し、逆転により内側ポケットを開き、②20cm打撃貫入させ試料採取を行う。③採取後、正転して蓋を閉じ、引き上げる。別孔にて試料採取を行うため、採取深度以外の土が入り込みにくい特徴をもつ。

また、所定の深度までSWS試験にて孔を開け、ロッド先端に50cm程度のらせん状のドリル刃を取り付け、回転貫入によって所定の土を採取するドリルサンプラーがある⁷⁾。さらに、別孔で土試料を連続サンプリングする手動式、自動式パイロサンプラーがある⁸⁾。両者ともSWS試験に限らず、他のサウンディング試験と併用でき、先端にコアキャッチャーを取付け、引抜き時に採取試料が脱落しない構造となっている。

3.4 液状化判定結果

以上の方法で、地下水位を測定し、簡易サンプラーで採取した試料で粒度試験を行い、SPTと比較した結果、地下水位や細粒分含有率 F_c にはそれほど大きな差はなかった⁹⁾。また、SWSによる換算 N 値と簡易サンプラー試料による F_c を併用して行った液状化判定は、SPTと同等な結果が得られた。いくつかの地点での比較例は文献9)を参照されたい。SWS試験でも液状化判定は十分可能と考えられた。

ただし、SWS試験の簡易サンプラーの機構にはまだ改良の余地がある(ロッド径が19mmなので試料採取がやや困難)。液状化判定のためには深度10mまで少なくとも1m間隔で採取することが必要と考えられる。

4. SWS試験による沈下量予測

4.1 宅地地盤の沈下量予測の必要性

実は戸建住宅で最も問題となるのは、不同沈下である。宅地地盤では、不同沈下が起こらない安全な基礎を設計することが必須となる。不同沈下は、盛土部の締固め不足によって起きる場合も多いが、やはり軟弱な粘性土地盤の圧密沈下が原因となることが多い。

周知のように、圧密沈下量の予測は、圧縮曲線($e \sim \log p$ または $f \sim \log p$ 曲線)、圧縮指数 C_c 、体積圧縮係数 m_v 、圧密降伏応力 p_c などの圧密定数を圧密試験によって求めるのが本来のやり方である。しかし、圧密試験を行うためには、ボーリング・サンプリングによって乱れの少ない粘性土試料を採取しなければならず、費用および工期の面から宅地地盤に対して実施されることはまずない。不同沈下の検討が最も重要といいながら、その情報がないまま十数cmオーダーの高い精度の沈下量予測が要求されるという矛盾をかかえている。

4.2 従来の沈下量予測方法

これまでは文献10)、11)による体積圧縮係数 m_v と粘着力 c (先の s_u 値と同義で、SWS試験結果から稲田式(3)によって $c=q_u/2$ として算定)との関係

$$m_v = 1/(80c) \quad (8)$$

$$m_v = 1/(52c) \quad (9)$$

あるいは、文献12)による自然含水比 w_n と平均有効応力(初期応力 $\sigma'_i + \text{増加応力} \Delta\sigma/2$)から推定する m_v の関係

$$m_v = 1.0 \times 10^{-5} \cdot w_n^4 \quad (10)$$

$$\text{ここに、} A = 1.2 - 0.0015(\sigma'_i + \Delta\sigma/2)$$

から、 m_v 法と呼ばれる沈下算定式を用いる方法が提案されている。しかし、本来、土の圧縮性 m_v と強度 c および自然含水比 w_n との間に相関性があるとは言い難く、この手法はあくまで便宜的なものと言わざるを得ない。

4.3 推定圧縮曲線による沈下量予測方法

やはり圧密沈下量を求めるためには、圧縮曲線を求めることが必須と考えられる。圧密試験を行わずに圧縮曲線を推定するためには、宅地地盤であっても少なくとも以下の調査を行うことが必要と考えられる。

- ① 圧密沈下が想定される深度(5~10m)までSWS試験を実施し、粘性土の深度(層厚)を特定する。
- ② 3.2で示した手法によって地下水位を測定する。
- ③ 3.3で示した簡易サンプラーによって所定の深度まで1mピッチで土試料を採取する。
- ④ 採取した試料の自然含水比 w_n を測定する。
- ⑤ 粘性土の中央部の試料で液性限界 w_L を測定する。

①~⑤の調査結果から、以下の手順で、圧密沈下量を算定する粘性土の中央部での圧縮曲線(図-5参照)が推定できる。

- 1) ②、③、④の結果から、1mピッチの地盤の密度を推定し(無機質地盤で、地下水位以下であれば $\rho_s = 2.67 \text{g/cm}^3$ 、 $S_r = 100\%$ と仮定して w_n から算定)、粘性土中央部での有効土被り圧 p_0 を推定する。
- 2) ④の結果から、粘性土中央部での間隙比 e_0 (または体積比 f_0)を算定する。
- 3) ①の結果と式(7)から、粘性土中央部での粘性土の非排水せん断強さ s_u 値を求め、式(11)から圧密降伏応力 p_c を推定する。これは粘性土の強度増加率 $s_u/p = 0.3$ と仮定したものである。

$$p_c = s_u / 0.3 \quad (11)$$

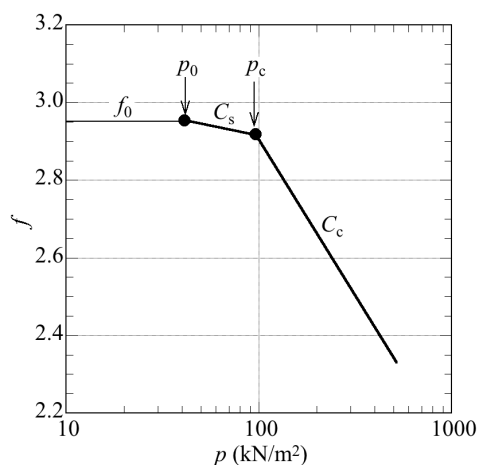


図-5 推定圧縮曲線 (f - $\log p$ 曲線) の例

- 4) ⑤の結果から、正規圧密域の圧縮指数 C_c を式(12)¹³⁾ で推定する。これは日本の沖積粘土の平均的な C_c - w_L 関係を表したものである(地域ごとの相関式があれば、それを用いてよい)。

$$C_c = 0.015(w_L - 19) \quad (12)$$

- 5) 過圧密域での膨張指数 C_s を式(13)で求める。

$$C_s = C_c / 10 \quad (13)$$

- 6) (f_0 , p_0)点から C_s の勾配で過圧密域の圧縮曲線を引き、3)で求められた p_c との交点から C_c の勾配で正規圧密域の圧縮曲線を引く。

沈下量は、初期値(f_0 , p_0)から増加応力に応じて C_s または C_c 線上における最終値(f_i , p_i)の間でひずみを計算し、それを粘性土の層厚に乗じて求めることができる。

ただし、この方法は3)のSWS試験結果から s_u 値を推定する方法、すなわち式(7)の精度にかかっている。

5. おわりに

現在、SWS試験のJISA 1221の改正作業が行われている。まず第1に現行JISの誤りを解消することにあるが、ちょうど2017年に対応国際規格「ISO 22476-10: 2017 Weight sounding test」が制定されたため、ISOとの整合を図る改正も必要となった。ただし、我が国の宅地地盤調査の標準となっているSWS試験を今さらISOに合わせることはできないので、今回の改正で現行のJISの試験装置及び試験方法を大きく変える予定はない。

しかし、規格名称は「スクリューウエイト貫入試験方法」(英語名はScrew weight sounding testで、略称はSWS試験のまま)に変更される予定である。これは、対応国際規格ではスウェーデンという国名が付けられていないこと、我が国では試験装置及び試験方法が独自に発展し、対応国際規格とは異なるものとなっていること、およびそもそも試験名称は、試験装置や試験方法がわかるような名称が相応しいので、回転と荷重による試験という意味でスクリューとウエイトが試験名称として適切と判断されたものである。

この改称にしたがって、国土交通省告示1113号の改正が必要となること、各学会、協会(公・民)などの指針、

マニュアルの改定も必要となるため、しばらくは旧名称を併記されることになるかもしれないが、時間をかけて普及していくものと考えられる。

SWS試験は、本来は地盤の硬軟、締まり具合及び土層構成を判定するための簡易な地盤調査方法であるが、既に世の中に普及している全自動式の試験装置は短時間で精度よく試験が実施できるため、非常に有効な地盤調査方法といえる。新しいJISを契機に、SWS試験が宅地地盤の評価技術として正しく普及することが期待される。

参考文献

- 1) 稲田倍徳：スウェーデン式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, pp.13~18, 1960.
- 2) 大島昭彦・安田賢吾・深井公・松谷裕治：スウェーデン式サウンディング試験結果と N 値との新相関式の提案、第54回地盤工学研究発表会、No.0783, pp.1565-1566, 2019.
- 3) 深井公・松谷裕治・大島昭彦・安田賢吾：スウェーデン式サウンディング試験結果と N 値、 s_u 値との新相関式の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、No.20335, 2019.
- 4) 国土交通省：平成25年度建築基準整備促進事業、小規模建築物に適用する簡易な液状化判定手法の検討、検討結果報告(S12), 2014, <http://www.mlit.go.jp/common/001037170.pdf> (参照 2019.4.16).
- 5) 金哲鎬・藤井衛・小川正宏：戸建住宅を対象とした地下水位測定法と土質判別法に関する研究、日本建築学会、日本建築学会技術報告集、Vol.19, No.41, pp.89-94, 2013.
- 6) 岡田勝彦・深井公・大島昭彦・下平祐司・坂本新：スウェーデン式サウンディング試験用の簡易サンプラーの適用性、第49回地盤工学研究発表会、No.45, pp.89-90, 2014.
- 7) 渋谷朋樹・矢野さおり・平田茂良・深井公・小川正宏・大島昭彦：うめきた2期地区での地盤調査結果(その4：簡易サンプラーの適用性)、第52回地盤工学研究発表会、No.0060, pp.119-120, 2014.
- 8) 小川正宏・金哲鎬・大島昭彦・深井公・佐藤将：宅地調査用パイロサンプラーの適用性、第49回地盤工学研究発表会、No.46, pp.91-92, 2017.
- 9) 大島昭彦・平田拓也・山田卓・平田茂良・深井公・下平祐司・金哲鎬：宅地の各種地盤調査法を用いた液状化判定の比較、日本材料学会、第11回地盤改良シンポジウム論文集、pp.195-202, 2014.
- 10) 竹中準之介：粘土のサンプリングとその信頼度、日本材料試験協会、pp.1-22, 1962.
- 11) 安達俊夫・佐藤浩介：軟弱地盤における戸建住宅の沈下計算、基礎工、Vol.31, No.11, pp.29-31, 2003.
- 12) 田村昌仁、枝宏茂樹・人見茂・秦樹一郎：スウェーデン式サウンディングで自沈層が認められた地盤の許容応力度と沈下の検討、建築技術、3月号、pp.106-111, 2002.
- 13) 田中洋行・榊原基生：港湾地形における土の一次的性質の統計解析、港湾技研資料、No.719, p.36, 1991.

(原稿受理 2019.10.30)