

二重管スウェーデン式サウンディングの開発と貫入抵抗値の考察

Development of double tube Swedish weight sounding and a consideration of the penetration resistance

下平 祐司*1、廣瀬 竜也*2、大島 昭彦*3

1. はじめに

スウェーデン式サウンディング試験（以下“SWS”と称す）は、JIS規格（JIS A 1221）にも定められている地盤調査法である。この試験は、ボーリング調査+標準貫入試験に較べて安価に実施可能であること、および、試験機の自動化が進んだことで延べ80m／日程度の調査が可能であり、同一宅地内で1日に複数箇所の調査が可能であることから、戸建て住宅などの地盤調査法として広く普及している。

一方、SWSの短所として、以下が指摘されている。

- ①地盤種類の判別が試験時の音や感触に頼るものであり、土質判別の信頼性が低いこと
- ②孔内水位が確認できないこと
- ③調査深度が深くなると、ロッドの傾斜、曲がりや試験孔の崩壊によってロッドと地盤との摩擦が大きくなり、貫入抵抗値が過大評価されること
- ④硬い地盤での貫入性が悪いこと

このうち、①の地盤種類の判別については、SWS実施後の試験孔を使ったサンプリング方法¹⁾が実用化されている。また、②の孔内水位については、SWS実施後の試験孔内に比抵抗電極を挿入して測定する方法²⁾などが実用化されている。③のロッドの周面摩擦については、積極的にこれを軽減しようとする試みは見あたらず、④の硬い地盤での貫入性については、調査方法の能力の問題であり簡単に解決できるものではない。

以上のうち、③の問題に関連して、文献³⁾においてSWSの解説に、調査の適用範囲として“10m程度の軟

弱地盤層を対象”とすることが明記されている。このロッドの周面摩擦については、調査深度が深い場合だけでなく、表層や中間層に硬質層が存在する場合も貫入抵抗に影響すると考えられる。ロッドの周面摩擦の影響が貫入抵抗に現れている一例を図-1に示す（SWS、DT-SWSの測定方法については、後述2.参照）。なお、SWSの貫入抵抗は W_{sw} とこれに追加される N_{sw} の2指標であるため、以降に示す図での貫入抵抗を示す軸では、0~1は W_{sw} (kN) の目盛を、1~数百は N_{sw} の目盛を示していることに注意されたい。

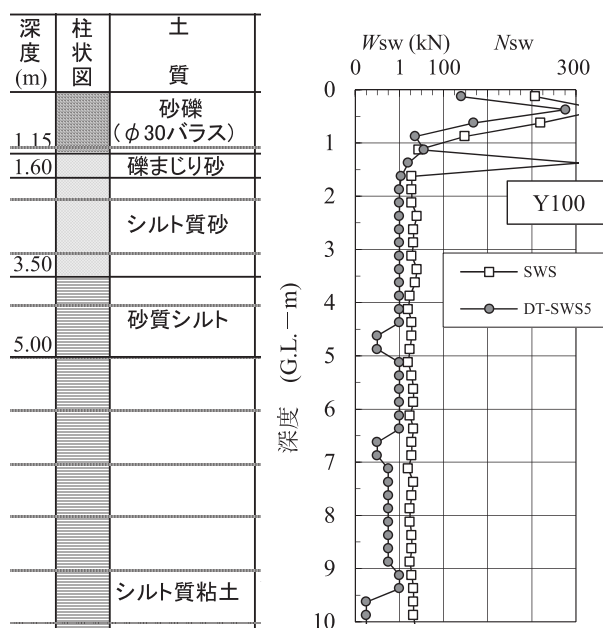


図-1 ロッドの周面摩擦の影響例(大阪市東中浜)

*1 SHIMOHIRA Yuji：(一財)日本建築総合試験所 建築確認評定センター 建築確認評定部 部長 博士(工学)

*2 HIROSE Tatsuya：(一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 土質基礎試験室 主査 博士(工学)

*3 OSHIMA Akihiko：大阪市立大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学)

図-1は、深度10mまでの2本のSWS（1本は外管挿入ピッチ5mの二重管を用いたDT-SWSとして実施）の結果を示したものであるが、DT-SWSの表層5m間は外管を挿入せずに通常のSWSとして実施している。ただし、当現場は表層1.5m程度までが非常に締まった（ N 値>30）粒径の大きな碎石層で、DT-SWSにおける外管の挿入が困難となることが予想されたため、表層2mの区間のSWSを実施した後に、再度拡張したスクリーポイントを入らせて表層部のロッドの周面摩擦を低減している。深度2m以深の区間では、SWSでは N_{sw} が現れているのに対し、表層2mの貫入孔を拡張したSWS（DT-SWS5）では全て自沈層となっており、表層部分のロッドの周面摩擦がSWSの貫入抵抗に影響を与えていることがわかる。

一方、厚い軟弱地盤が堆積している場合の戸建て住宅等の基礎工法として、小口径の鋼管や既製コンクリート柱状体の先端を深度10m以深の支持層に到達させて杭状地盤補強材として利用する工法が多数あり、当法人の基礎工法に関する建築技術性能証明取得工法においても、杭状地盤補強材の支持力をSWSの結果から求める設計法が採用されている⁴⁾。このような状況で、SWSの深度10mを越える領域での調査結果の信頼性を向上させるべく開発したのが、二重管スウェーデン式サウンディング（Double Tube Swedish Weight Sounding、以下“DT-SWS”と称す）である。

本稿では、DT-SWSの再現性、試験機による差異を確認し、DT-SWSとSWSとを比較することでロッドと地盤との周面摩擦の影響を検討するとともに、標準貫入試験の N 値、不攪乱試料による一軸圧縮強さ q_u との関係を検討した結果を報告する。

なお、本報告は既発表の報文5)~11)を取り纏めたものであり、本報に示している現地調査は、「低コスト・高精度な地盤調査法に基づく宅地の液化被害予測手法研究委員会、研究代表者：大島昭彦」が実施した地盤調査一斉試験の一環として実施したもの¹¹⁾であることをお断りしておく。

2. DT-SWSの概要と調査結果

DT-SWSは、SWSのロッド（ $\phi 19\text{mm}$ ）の外側に両端部にネジ継手を設けた外管（ガス管20A、外径27.2mm、内径21.6mm）を所定の深度増分毎に挿入することで、ロッドと地盤との直接接点部を最小限にするとともに、ロッドに生じた傾斜や曲がりを解消することが可能となる。また、これらの結果として、硬質な地盤

への貫入性も向上することが期待できる。

試験の手順は以下のとおりである（図-2参照）。

- ①所定の深度増分（例えば1m、2m、5m）まで貫入抵抗の測定をSWSと同様に行う。貫入抵抗の測定は、貫入量を測定しながら荷重を1kNまで0.25kNピッチで載荷し、貫入量が25cmに達した場合は、その時点での荷重を W_{sw} とする。荷重を1kNまで載荷しても貫入量が25cmに満たない場合は、ロッドを回転させて貫入量が25cmに達するまでの半回転数を計測する。貫入抵抗は、この半回転数を貫入量1m当たりの半回転数 N_{sw} に換算する。この手順を貫入量25cm毎に繰り返し、深度25cm毎の貫入抵抗（ W_{sw} , N_{sw} ）を得る。
- ②外管とロッドを継ぎ足す。
- ③外管を①で貫入させた深度増分だけ貫入させる。この際、外管の貫入には、SWS試験装置による回転トルクと荷重を利用する。この時点で、ロッドと地盤とが接触する部分はなくなる。
- ④さらに、①と同じ所定の深度増分だけSWSを実施し、②に戻る。

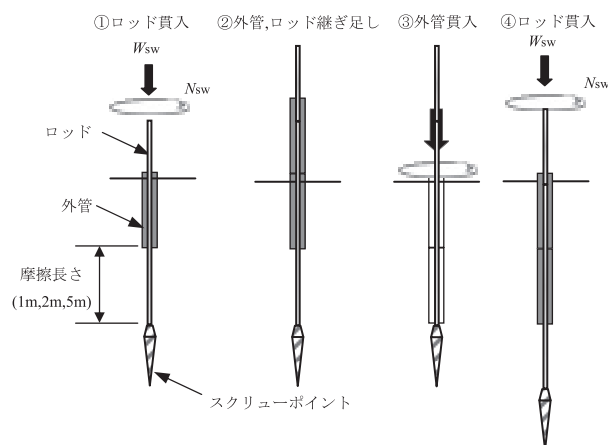


図-2 DT-SWSの実施手順

本調査ではY社あるいはN社の全自動SWS試験機を用いたが、Y社の試験機は機械的に荷重を載荷するのに対し、N社の試験機は予め載せている荷重1kNを制御して所定の荷重を載荷する機構となっている。また、ロッド1本の長さはY社の試験機が75cmあるいは100cm、N社の試験機が75cmである。

調査は表-1に示す9現場で実施した。同表中の記号N75、Y100およびY75は、使用した試験機の種類を示しており、先頭のアルファベットは試験機メーカーを、その後の数字はロッド1本の長さ（cm）を示している。

調査結果の一例として守山市今浜（粘性土）および浦安市港（砂質土）で実施したSWS及びDT-SWSの貫入抵抗の深度分布を図-3に示す。なお、DT-SWS試験における外管の挿入ピッチは、ロッド1本の長さである。

表-1 調査現場一覧

No.	現場名	主体土質	調査深度	使用試験機
1	大阪市東中浜	粘性土	17m	N75,Y75,Y100
2	神栖市堀割	砂質土	13m	Y100
3	浦安市運動公園	砂質土	25m	Y100
4	浦安市鉄鋼通り	砂質土	25m	Y100
5	守山市今浜	粘性土	20m	N75,Y100
6	守山市水保	砂質土	12m	N75,Y100
7	浦安市港	砂質土	20m	Y75,Y100
8	唐津市岸山	粘性土	8m	Y75,Y100
9	唐津市原	砂質土	15m	Y75,Y100

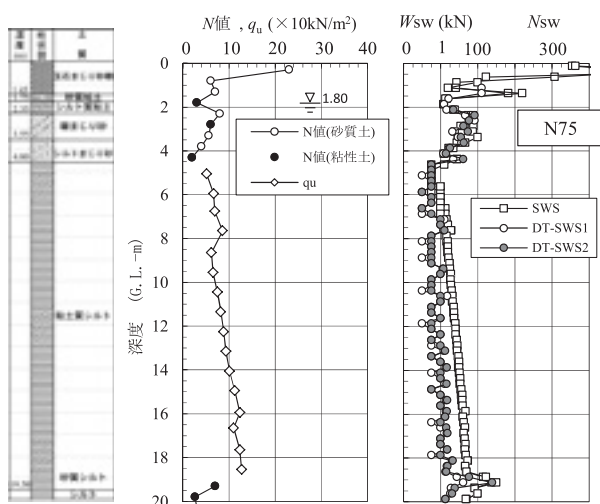


図-3(a) 貫入抵抗の深度分布(粘性土、守山市今浜)

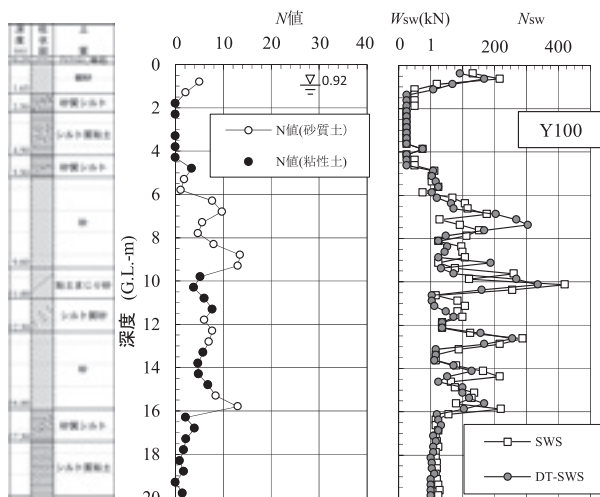


図-3(b) 貫入抵抗の深度分布(砂質土、浦安市港)

3. DT-SWSの有効性検討

3.1 DT-SWSの再現性

DT-SWSの再現性を確認するために、同一条件で2本のDT-SWSを実施した3現場(大阪市東中浜、守山市今浜、守山市水保)について、1本目と2本目のDT-SWSの結果を比較して図-4に示す。バラツキはあるが、概ね1:1の関係にありDT-SWSの再現性は問題ないと判断される。

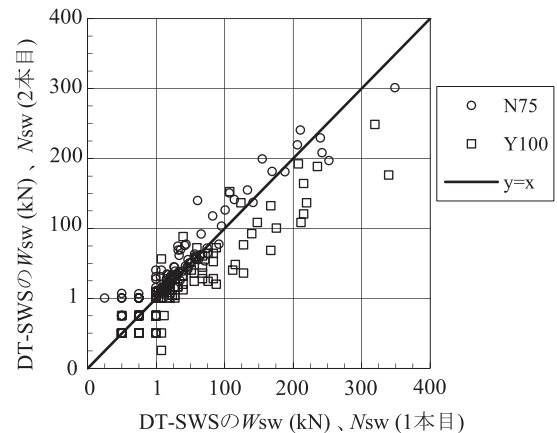
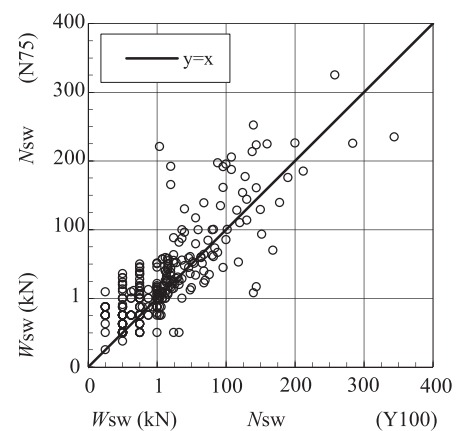
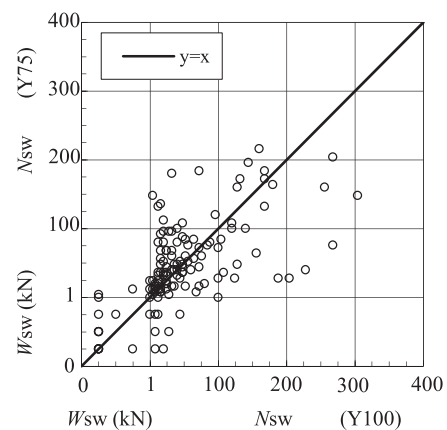


図-4 DT-SWSの再現性の確認



(a) N75とY100との比較



(b) Y75とY100との比較

図-5 DT-SWS貫入抵抗の試験機による比較

3.2 試験機別のDT-SWSの比較

試験機の種類がDT-SWSの結果におよぼす影響を確認するため、2種類の試験機でDT-SWSを実施した6現場（大阪市東中浜、守山市今浜、守山市水保、浦安市港、唐津市岸山、唐津市原）について、貫入抵抗の比較を図-5に示した。N75とY100の比較（図-5（a））では、Y100の自沈層においてN75試験機が大きい貫入抵抗を示しているが、これが試験機の荷重制御方法に起因するものか否かは判断できない。また、Y75とY100の比較（図-5（b））では、N75の場合に比べてバラツキは大きい、明瞭な試験機による大小関係は認められない。

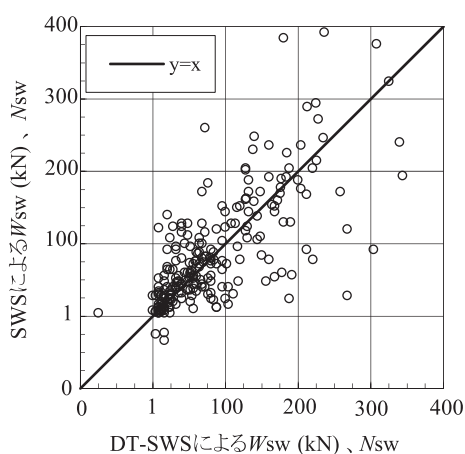
3.3 DT-SWSとSWSの貫入抵抗の比較

図-6および図-7には、SWSの貫入抵抗とDT-SWSの貫入抵抗との関係を土質別に示した。土質の判別は、標準貫入試験のペネ試料の粒度分析と柱状図を参考に行っている。なお、図-1に示したように、東中浜の結果は、表層の堅い碎石層（ $N > 30$ ）でのロッドの周面摩擦の影響

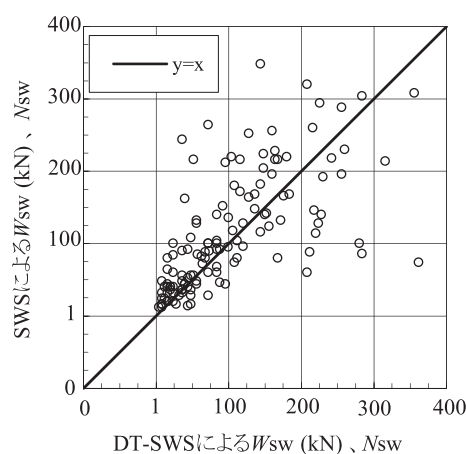
響が大きいと考えられるので、ここでは除外している。

図-6（a）および図-7（a）の砂質土の場合は、バラツキは大きい、概ね1：1の関係にあることがわかる。粘性土の場合は、図-6（b）の深度10m以浅ではSWSの貫入抵抗がやや大きめの傾向にあるが、図-7（b）の深度10m以深の場合では、明らかにSWSの貫入抵抗がDT-SWSの貫入抵抗より大きくなっており、この傾向は特にDT-SWSの貫入抵抗が自沈の場合に顕著である。このことは、前述図-3（a）の守山市今浜の厚い粘性土層において、深くなるほどSWSの貫入抵抗とDT-SWSの貫入抵抗の差が大きくなっていることから確認できる。以上のことから、粘性土層の貫入抵抗にはロッドの周面摩擦の影響が現れていることがわかる。

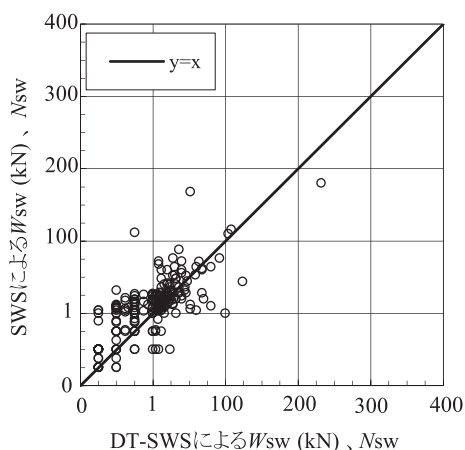
図-8（a）は、粘性土の場合でDT-SWSの貫入抵抗が自沈の場合だけを抽出して描いたSWSの貫入抵抗とDT-SWSの貫入抵抗との関係を示したものである。ここで、SWSのスクリュポイントが20cmで1回転捻ったネジとなっているため、ネジのとおり貫入した



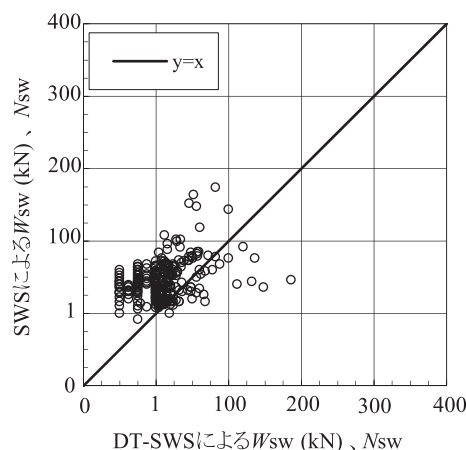
(a) 砂質土



(a) 砂質土



(b) 粘性土



(b) 粘性土

図-6 SWSとDT-SWSの貫入抵抗の比較（深度10m以浅）

図-7 SWSとDT-SWSの貫入抵抗の比較（深度10m以深）

$N_{sw}=10$ までを自沈層 ($W_{sw}=1\text{kN}$) として扱っている。このデータについて、二重管を導入したことでロッドと地盤との周面摩擦がすべてキャンセルされ、スクリュポイントにロッドの自重がすべて働くとして式 (1) で求めた W_{sw}' を横軸にとって図-8 (b) に描いた。 W_{sw} が 0.25kN 刻みの離散値であるため図-8 (b) のバラツキは大きい、正の相関が認められ、二重管を導入した場合はロッドの自重も考慮する必要があると考えられる。

$$W_{sw}' = W_{sw} + l_g \cdot z \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

W_{sw}' : ロッドの自重を考慮した荷重 (kN)

W_{sw} : 荷重 (kN)

l_g : 1m あたりのロッドの重量 ($=0.022\text{kN/m}$)

z : 深度 (m)

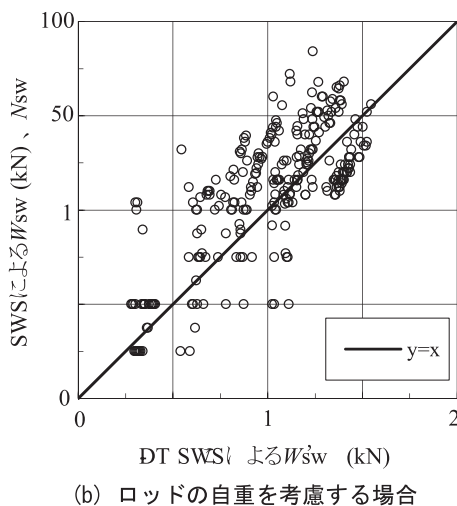
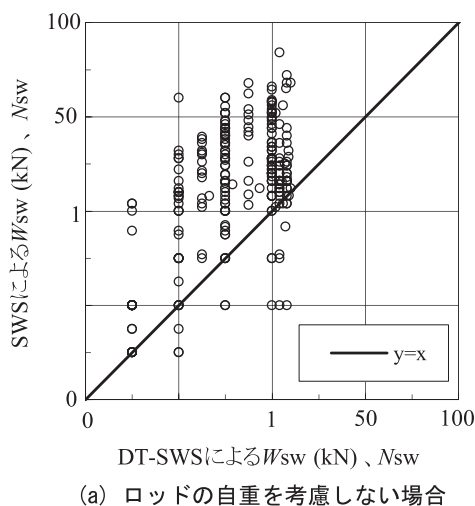


図-8 SWSとDT-SWSの貫入抵抗の比較(粘性土、自沈層)

3.4 N 値とDT-SWSの貫入抵抗との関係

図-9には、 N 値とDT-SWSの貫入抵抗との関係を土質別に示した。砂質土(図-9 (a))の場合、自沈層となるデータは3点のみで、砂質土で自沈層が現れることはまずないと判断できる。 N 値と N_{sw} との関係のバラツキは大きい、平均的な関係式としては式 (2) となり、これは粘性土の場合の稲田式¹²⁾の第1項を4とした式となる。

$$N = 4 + 0.05N_{sw} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

N : 標準貫入試験の N 値

N_{sw} : DT-SWSによる 1m あたりの半回転数

粘性土(図-9 (b))の場合、 N 値とDT-SWSの貫入抵抗の間には相関は認められない。なお、 N 値とSWSの貫入抵抗との関係を図-10に示すが、DT-SWS

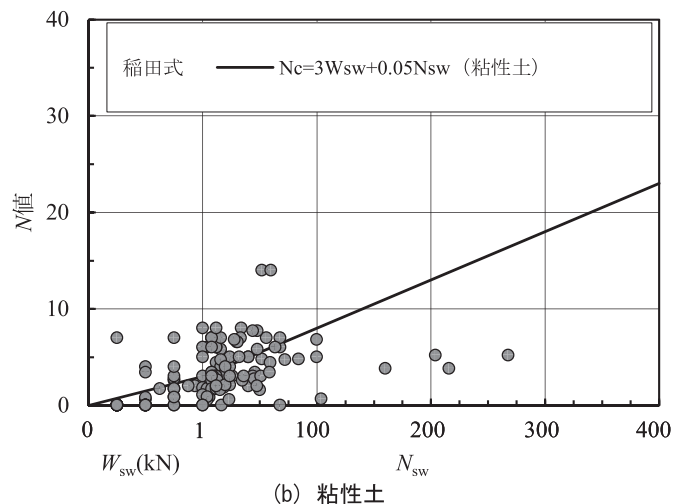
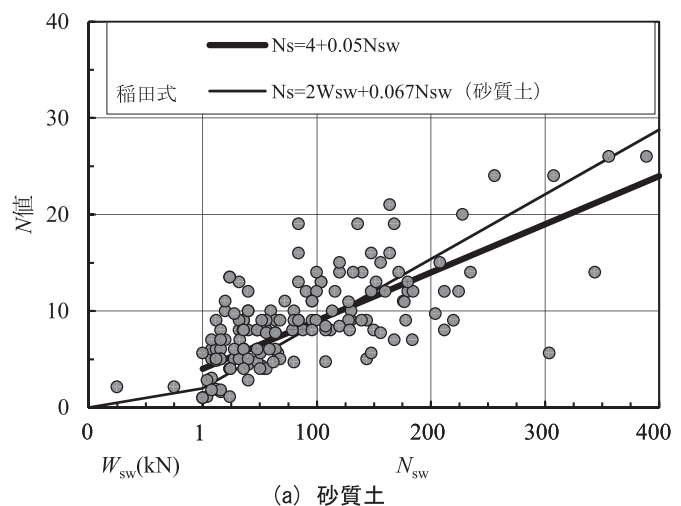


図-9 N 値とDT-SWSの貫入抵抗との関係

の場合と同様に、砂質土ではある程度の相関性は認められるが、粘性土における自沈層では、稲田式が上限値となっていることがわかる。

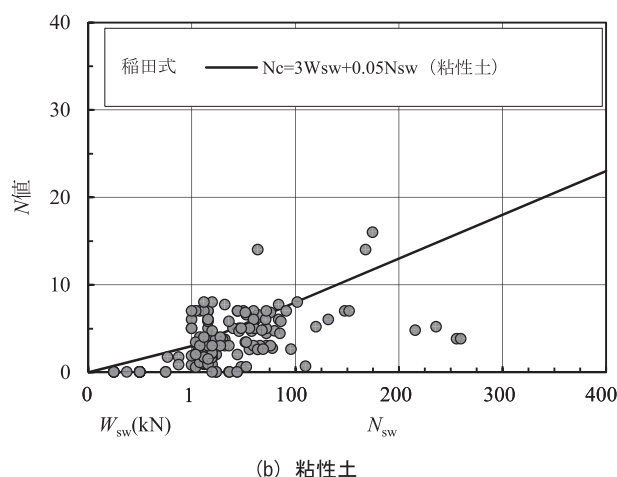
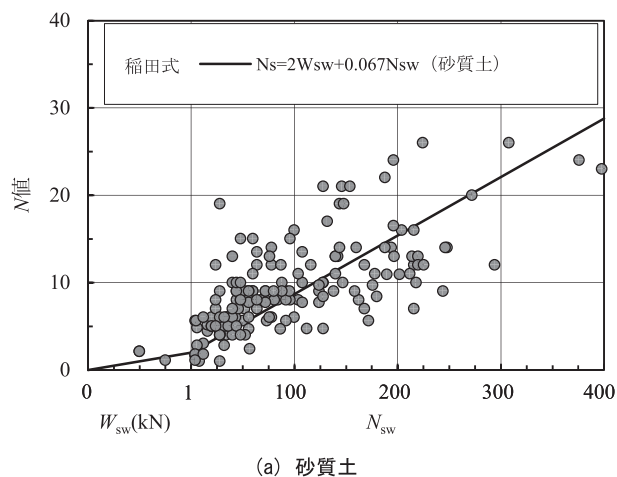


図-10 N値とSWSの貫入抵抗との関係

3.5 q_u とDT-SWSの貫入抵抗との関係

図-11には、一軸圧縮強さ q_u とDT-SWSの貫入抵抗との関係を示したが、自沈層でのバラツキは大きい。そこで、3.3と同様に、自沈層($N_{sw} \leq 10$)のデータについて、前掲の式(1)によってロッドの自重を考慮した荷重 W_{sw}' を求め、これと q_u との関係を図-12にまとめた。 q_u と W_{sw}' との関係には、 W_{sw} の場合よりもバラツキが小さくなっている。 q_u とSWSの貫入抵抗との関係を図-13に示すが、DT-SWSの場合に較べて相関性が高く、稲田式が下限値となっていることがわかる。DT-SWSの場合に較べて q_u との相関性が高くなっているのは、本来自沈層である部分がロッドと地盤との周面摩擦の影響で回転層となっており、 W_{sw} に較べて分解能が高い N_{sw} による測定結果となっていることが主因と考えられる。

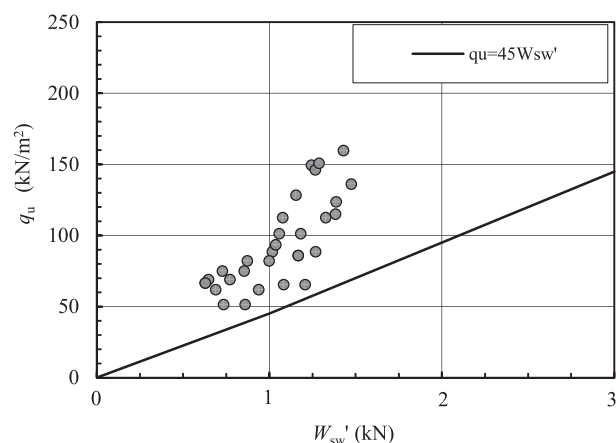


図-12 q_u と W_{sw}' との関係

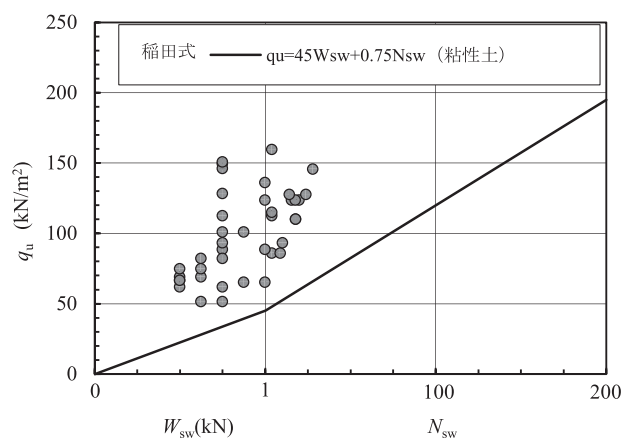


図-11 q_u とDT-SWSの貫入抵抗との関係

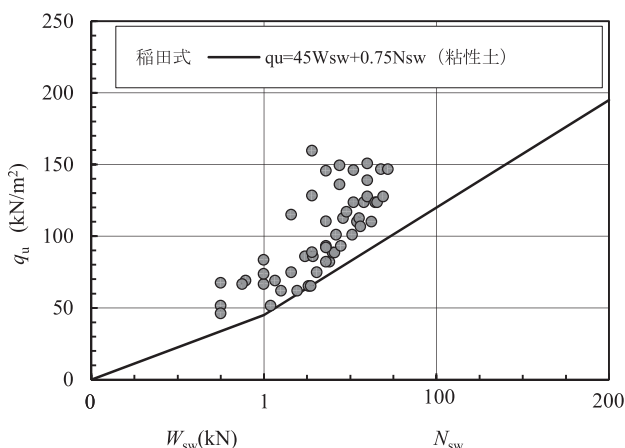


図-13 q_u とSWSの貫入抵抗との関係

4. まとめ

SWSにおいて貫入抵抗に影響すると考えられるロッドと地盤との周面摩擦の影響を低減するために二重管を用いたSWS (DT-SWS)を開発し、多数の現場で比較試験を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) DT-SWSの再現性は確保できていたが、試験機の種類による貫入抵抗の差異が自沈層において認められた。
- 2) DT-SWSの貫入抵抗とSWSの貫入抵抗を比較した結果、砂質土ではバラツキは大きいが両者の関係は概ね1:1の関係であった。粘性土でのDT-SWSの結果は、自沈層($N_{sw} \leq 10$ と定義)の範囲では明らかにSWSの貫入抵抗が大きかった。この範囲の荷重として載荷荷重にロッドの自重を考慮すると、SWSの貫入抵抗との関係に相関性が認められ、外管を挿入することでロッドと地盤との周面摩擦が低減されていることが確認できた。
- 3) N 値とDT-SWSの貫入抵抗を比較した結果、砂質土の N 値とDT-SWSの貫入抵抗の関係は、既往の粘性土に関する稲田式に近かった。粘性土については、 N 値とDT-SWSの貫入抵抗に相関性は認められなかった。
- 4) 粘性土の q_u とDT-SWSの貫入抵抗を比較した結果、自沈層でのバラツキが大きかった。自沈層($N_{sw} \leq 10$)のデータについて、載荷荷重にロッドの自重を考慮すると、 q_u とDT-SWSの貫入抵抗の関係において相関性の向上が認められた。

以上のことから、砂質土地盤におけるSWSの貫入抵抗値(N_{sw})は、深度10m超であってもロッドの周面摩擦の影響を受けていないと判断できる。一方、粘性土地盤の場合は、貫入抵抗値が小さいこともあって、ロッドの周面摩擦の影響は無視できない。ただし、このロッドの周面摩擦の影響で、本来自沈層である地盤においても N_{sw} が計測されることとなり、より分解能の高い抵抗値が得られることとなって q_u とSWSの貫入抵抗との相関性が高い結果となっている。

本報でご紹介したDT-SWSの実用性を確保するためには、①例えば、文献13)の装置を使うことで荷重の分解能を向上させる(現状は0.25kNピッチ)、②専用の自動試験機を製作して、試験に要する時間を短縮する(現状は、SWSの2~3倍の時間がかかる)などの取り組みが必要である。

【参考文献】

- 1) 例えば、柴崎実, 樺澤 初, 千葉和生 他: 土壌すくい-SS試験後の残孔を利用した土のサンプリング装置について-, 建設機械, vol.44, No.5, pp.68-73, 2008.5
- 2) 金 哲鎬, 松下克也, 岡野泰三, 安達俊夫, 藤井 衛: スウェーデン式サウンディング試験孔を利用した有孔パイプによる地下水位の測定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造I, pp.635-636, 2009.8
- 3) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第6編第4章スウェーデン式サウンディング試験, pp.325-336, 2013.3
- 4) 下平祐司, 富永晃司: 日本建築総合試験所の建築技術性能証明の概要と評価内容, 基礎工 vol.38, No.10, pp.11-14, 2010.10
- 5) 下平祐司, 大島昭彦, 平田茂良, 深井公, 金哲鎬: 浦安市における各種静的サウンディング試験の比較(その6: DT-SWS), 第47回地盤工学研究発表会, No.81, pp.159-160, 2012.7
- 6) 廣瀬竜也, 下平祐司, 大島昭彦, 平田茂良, 深井公, 平田拓也: 二重管スウェーデン式サウンディングの開発と測定例, 第47回地盤工学研究発表会, No.96, pp.189-190, 2012.7
- 7) 廣瀬竜也, 下平祐司: 二重管スウェーデン式サウンディングの開発と測定例(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 構造I, pp.653-654, 2012.9
- 8) 下平祐司, 大島昭彦, 平田茂良, 深井公, 金哲鎬: 浦安市における各種静的サウンディング試験の比較(その6: DT-SWS), 浦安地盤調査一斉試験報告会論文集, 平成24年度京都大学防災研究所共同研究<一般研究集会>・地盤工学会, pp.45-48, 2012.10
- 9) 下平祐司, 廣瀬竜也, 大島昭彦, 規矩大義, 柳浦良行, 平田茂良, 深井公: 滋賀県守山市における地盤調査一斉試験(その10: DT-SWS), 第48回地盤工学研究発表会, No.95, pp.189-190, 2013.7
- 10) 下平祐司, 廣瀬竜也, 大島昭彦: スウェーデン式サウンディング試験における回転トルク測定の試み, 第49回地盤工学研究発表会, No.40, pp.79-80, 2014.7
- 11) 建設技術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化被害予測手法の開発」((公社)地盤工学会, 平成26年5月)
- 12) 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
- 13) 相沢彰彦, 渡辺佳勝, 原田貴司, 大野真幸, 藤井 衛: 自沈時の荷重 W_{sw} を連続計測するスウェーデン式サウンディング試験機の開発 その1: 試験機の概要と特徴と測定例, 第49回地盤工学研究発表会, No.92, pp.183-184, 2014.7

【執筆者】



*1 下平 祐司
(SHIMOHIRA Yuji)



*2 廣瀬 竜也
(HIROSE Tatsuya)



*3 大島 昭彦
(OSHIMA Akihiko)