

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 5：SWS-WL）

スウェーデン式サウンディング試験，
地下水位，土質

報国エンジニアリング
報国エンジニアリング
大阪市立大学大学院
諏訪技術士事務所
基礎地盤コンサルタンツ

○正会員 小川正宏
正会員 金 哲鎬
国際会員 大島昭彦
国際会員 諏訪靖二
正会員 和田昌大

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって，浦安市で大きな液状化被害が生じた。その原因を探るため，浦安市の地盤特性の詳細を研究的に調べることを目的に，各種の地盤調査法の一斉試験が行われた。行った調査は，動的サウンディング試験（標準貫入試験，各種動的コーン貫入試験）と静的サウンディング試験（各種電気式コーン貫入試験，スウェーデン式サウンディング試験とその改良試験，表面波探査）である。一斉試験は液状化した敷地内で地盤性状の異なる地点 1 と地点 3（約 100m 離れ）の 2 箇所で行った。各試験の結果を比較して，その相関性を見いだすことも本調査の目的としている。ここでは，地下水位測定スウェーデン式サウンディング試験（以後，SWS-WL と呼ぶ）を行い，比抵抗水位計を用いて地下水位を測定したので試験概要と結果を報告する。

2. 試験概要

現在，標準貫入試験に比べ簡便で安価なことから，住宅地盤調査は SWS 試験が主流となっている。現状の SWS 試験による宅地地盤の地下水位測定方法は，SWS 試験実施時のロッドを目視観察する方法や，試験後の孔に水位計を挿入する方法などが挙げられる。しかし，前者は信頼性が乏しく，後者は土質によっては水位計の挿入が困難となり，測定不可能な場合がある。上記の現状の測定方法の問題点を踏まえて，有孔管，センサーとメジャーケーブルを開発した¹⁾。それらを写真-1，写真-2，写真-3 に示す。地盤に簡単に孔を設けることが SWS 試験の利点であり，本測定法はこの SWS 試験孔を利用したものである。測定装置および測定方法は，文献 1)，2) に詳しい。

土のサンプリングができないため土質の判別を行うためには，地形図や近隣データ等の資料を用いる必要がある。本調査法では，従来のロッドと同径の外径 19mm の有孔管（写真-2）を使用し，先端に SWS 試験のスクリーポイントを着装するため，調査深度まで容易に有孔管を再貫入することが可能である。ケーブルの全長は，SWS 試験の最大深度 10m に対応するため，ロッド立ち上がり部を考慮して 12m とした。メジャーの読み取りは，地盤工学会基準(JGS 1311-2003)「ボーリング孔を利用した砂質・礫質地盤の地下水位測定方法」³⁾同様 1cm 単位とした。先端のセンサー端子間隔は，有孔管内での泥の影響と水切れに配慮し，シリコン樹脂製，1 芯と 2 芯の離隔を 25mm 程度以上とした。

有孔管は内径が 7mm と狭いため，泡が残りやすく水面を間違えることが考えられる。また，地下水にシルト分を含む場合は，水面より下方の気泡（空洞）が残るケースがあった。そこで，有孔管の水位測定には微妙な違いを観察することが不可欠であった。直流式は電極部電気分解（ガスの発生）や分極があり，見る間に抵抗値が約 25%以上変動した。この時，電極を動かすと再び同じ現象が繰り返され，抵抗値が上下し読みが不安定になる。交流式では，電気分解は起



写真-1 SWS 試験孔を利用した地下水位測定状況



写真-2 有孔管 φ19mm（内径 7mm）



写真-3 センサーとメジャーケーブル (φ5mm)

Comparison of various static sounding tests in Urayasu city
(Part5: Measuring the groundwater level using a hole of Swedish
weight sounding test)

OGAWA, Masahiro Hokoku Engineering
KIM, Cholho Hokoku Engineering
OSHIMA, Akihiko Osaka City University
SUWA, Seiji Geo Office Suwa
WADA, Masao Kiso-jiban Consultants

きないため、メータ指示の振れはほとんどなく安定していることが判った。そこで、有孔管で水位測定をするには読み値が安定した交流式で、微妙な違いが分かりやすいアナログメータが良いことがわかり、専用の「交流式 比抵抗水位計」を開発した。表-1 に直流式と交流式の水位計の違いおよびデジタルとアナログメータの違いを示す⁴⁾。

なお、図-1 は、交流式比抵抗水位計による測定状況である。①は標準的な水面の場合で、センサーが着水した場合に導電率が上昇する。②は水面が泡立っている場合、③は孔内に土が付着している場合で、泡と土によって導電率に変動が見られるが、水面に達した場合に導電率が上昇する。②及び③の場合でも直流式の水圧計では水面を見誤る場合があったが、直流式に比べて地下水の電気分解が起きにくい交流式の電気比抵抗水位計を用い、アナログメータを採用することにした。直流式の水圧計では、地下水の電気分解により電流が漸減し、しばらくすると落ち着くが、電極を動かしたり気泡がある場合はこれが繰返され、正確な地下水位が測定できないためである。本測定法には、主に以下のような特長がある。

- ① SWS 試験の貫入可能な深さまで測定が可能である。
- ② SWS 試験方法に規定された試験装置を用いて地盤中に貫入できる。
- ③ 地下水位測定専用のメジャーケーブルを使用することで、精度の高い測定が可能である。
- ④ 交流式のアナログメータを採用することで、着水時の微妙な変化をとらえることができる。

表-2 は国内 20 地点で実施した現場実証実験結果の一覧を示したものである⁵⁾。No.14 福岡県久留米市城島町ではクリーム状のシルト質の土が管内に入り込み、地下水位が収束するまでに 30 分を要した¹⁾。砂質土地盤においては 5 分以内で収束している地点が 10 地点中 6 地点に対して、粘性土地盤においては、5 分以上収束に要している地点が 10 地点中 7 地点の結果から、土質（砂質土、粘性土）によって収束の傾向に違いが認められた。表-3 に、各調査場所の地下水位付近の粒度試験結果一覧を示す。

図-2 に示す地下水位（基準水位）と測定水位（有孔管の孔内水位）は、砂質土 10 地点、粘性土 10 地点の全 20 地点のデータを示している。20 地点すべてにおいて孔内水位は基準水位ときわめて良く一致しており、本測定法は地下水位の測定に有効であることが確認された⁵⁾。

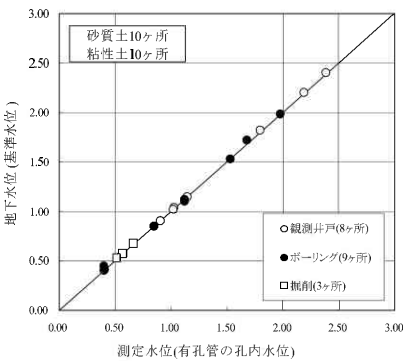


図-2 地下水位（基準水位）と有孔管の孔内水位との関係

表-1 水位計およびメータの違い

水位計	メータ	評価	
交流	アナログ	○	微妙な読みに最適
	デジタル	△	微妙な読みのためアナログ近似
直流	アナログ	×	抵抗値変動のため信頼性なし
	デジタル	×	変動と微妙な読み、両方とも不可

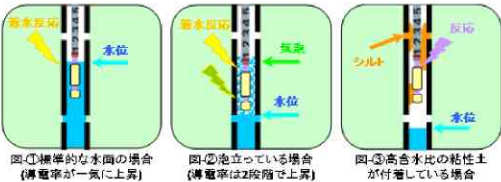


図-1 交流式比抵抗水位計による測定

表-2 実験結果一覧

推定土質 (地下水位付近)	No.	調 査 場 所	調査 深度 G.L.-(m)	地下水位		地下水位 G.L.-(m)	収束 時間	水位 確認方法
				基準水位 m	差 cm			
砂質土	1	宮城県東松島市大曲	3.00	1.53	0	1.53	25 分	ボーリング
	2	浦安市高洲	20.00	0.45	5	0.40	12 分	ボーリング
	3	静岡県浜松市南区白羽町	3.50	1.82	2	1.80	15 分	観測井戸
	4	岡山市北区東花見	10.00	1.04	1	1.03	5 分	観測井戸
	5	大阪府茨木市別院町	4.25	0.40	0	0.40	5 分	観測井戸
	6	習志野市	10.00	1.15	0	1.15	4 分	観測井戸
	7	浦安市富士見	10.00	2.20	1	2.19	7 分	観測井戸
	8	静岡県藤枝市仮宿	5.95	0.90	0	0.90	3 分	観測井戸
	9	山梨県笛吹市石和町窪中島	2.80	2.40	1	2.39	5 分	観測井戸
	10	岡山県倉敷市曾原	10.70	1.12	0	1.12	5 分	ボーリング
粘性土	11	山形県山形市成安	10.00	0.57	0	0.57	20 分	掘削
	12	埼玉県草加市柿木町	10.00	0.67	0	0.67	10 分	掘削
	13	茨城県鉾田市上幡木	10.00	0.53	1	0.52	12 分	掘削
	14	福岡県久留米市城島町	12.75	1.72	4	1.68	30 分	ボーリング
	15	東京都足立区六本	10.00	0.41	0	0.41	15 分	ボーリング
	16	佐賀県唐津市原	5.00	1.98	0	1.98	3 分	ボーリング
	17	愛知県一宮市木曽川町	9.75	1.02	0	1.02	8 分	観測井戸
	18	東京都江戸川区鹿骨	8.95	1.12	0	1.12	5 分	ボーリング
	19	千葉県船橋市芝山	10.00	0.85	0	0.85	3 分	ボーリング
	20	茨城県猿島郡境町	8.40	1.10	2	1.12	9 分	ボーリング

※ボーリング調査による水位確認は、掘進完了後 24 時間静置した水位を確認した。
※観測井戸は、塩化ビニール管（VP13mm、横径 φ4mm）を使用した。
孔内水位と観測井戸の水位が一致することは室内実験で確認している。
※地下水位が浅い位置にあると予想される場合においては、地下水が確認できる深度まで掘削を行い、投げ込み式の水位計を用いて地下水位の測定を行った。

表-3 粒度分布一覧

推定土質 (地下水位付近)	No.	調 査 場 所	地下水位 G.L.-(m)	収束 時間	水位 確認方法	粒度分布(地下水位付近)					
						概分	砂分	シルト分	粘土分	細粒分	細粒分
						(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
砂質土	1	宮城県東松島市大曲	1.53	25 分	ボーリング	0.1	77.2	7.6	15.1	77.3	22.7
	2	浦安市高洲	0.4	12 分	ボーリング	6.5	81	8.4	4.1	87.5	12.5
	3	静岡県浜松市南区白羽町	1.8	15 分	観測井戸	36.5	57.9	0	0	94.4	0
	4	岡山市北区東花見	1.03	5 分	観測井戸	7.3	79.1	8.6	5	86.4	13.6
	5	大阪府茨木市別院町	0.4	5 分	観測井戸	0.1	72.7	17.3	9.9	72.8	27.2
	6	習志野市	1.15	4 分	観測井戸	0	85.8	14.2	0	85.8	14.2
	7	浦安市富士見	2.19	7 分	観測井戸	0.1	77.5	15.9	6.5	77.6	22.4
	8	静岡県藤枝市仮宿	0.9	3 分	観測井戸	68	20	7	5	88	12
	9	山梨県笛吹市石和町窪中島	2.39	5 分	観測井戸	0	52.2	47.8	0	52.2	47.8
	10	岡山県倉敷市曾原	1.12	5 分	ボーリング	0.1	51.6	25.9	22.4	51.7	48.3
粘性土	11	山形県山形市成安	0.57	20 分	掘削	0.2	30.6	30.1	39.1	30.8	69.2
	12	埼玉県草加市柿木町	0.67	10 分	掘削	0	40.9	59.1	0	40.9	59.1
	13	茨城県鉾田市上幡木	0.52	12 分	掘削	1	19	38	42	20	80
	14	福岡県久留米市城島町	1.68	30 分	ボーリング	0	32.5	36.1	31.4	32.5	67.5
	15	東京都足立区六本	0.41	15 分	ボーリング	0	16.2	43.5	40.3	16.2	83.8
	16	佐賀県唐津市原	1.98	3 分	ボーリング	1.6	33	40.5	24.9	34.6	65.4
	17	愛知県一宮市木曽川町	1.02	8 分	観測井戸	0.8	19.2	45.5	34.5	20	80
	18	東京都江戸川区鹿骨	1.12	5 分	ボーリング	0	48.9	37.5	16.6	48.9	54.1
	19	千葉県船橋市芝山	0.85	3 分	ボーリング	1	28	37	34	29	71
	20	茨城県猿島郡境町	1.12	9 分	ボーリング	0	42	37	21	42	58

図-3 に、土質別の測定水位と経過時間の結果を示す。SWS 試験後の孔に有孔管を貫入後、管内に流入する地下水位が下から徐々に上昇し、基準水位に近づいていく結果となった。図-3(a)は砂質土、図-3(b)は粘性土の結果である⁵⁾。地下水位（SWS 試験孔内水位）は 20 地点全てにおいて、30 分程度以内で収束している結果となった。土質別では、砂質土の収束時間が短い傾向にあり、シルト質の比較的透水性の低い土質において収束時間が長くなっていることが認められた。以上の現場実験結果から、SWS 試験の貫入可能な深さまで地下水位の測定が可能であり、SWS 試験時の短期的な孔内水位を確認することが可能であることがわかった。

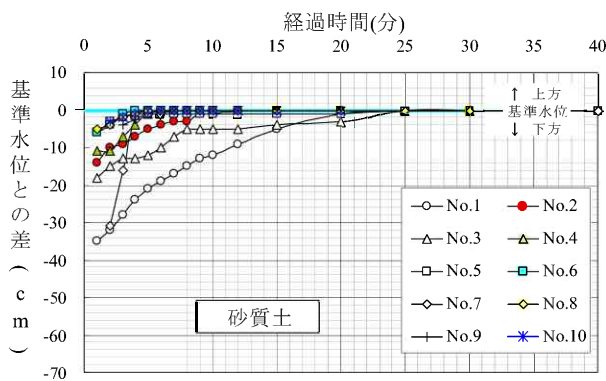


図-3 (a) 測定水位と経過時間(砂質土の結果)

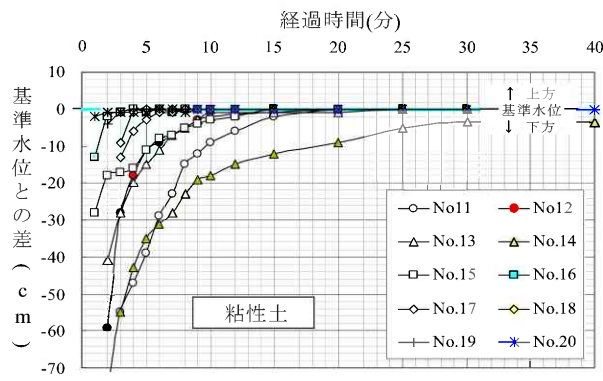


図-3 (b) 測定水位と経過時間(粘性土の結果)

さらに、試料採取を行うため、SWS 試験孔に写真-4 に示すスクリーポイント装着した外径 $\phi 34$ mm のサンプラーを貫入し、土質試料採取を試みた。SWS 試験孔を利用したサンプリング方法としては、スクリーオーガを加工し、SWS 試験ロッドに接続できるようにしたものなどがある。しかしこの方法では、注意深く行わないと対象深度以外の土が混入するおそれがある。このサンプラーにはロックすることができる蓋がついており、蓋を閉じた状態にして試験孔の所定深度まで貫入させ、蓋を閉じているストッパーを外す。その後、正転させることにより SWS 試験孔周辺の土を集め、最後に逆転させて蓋を閉じ、地中から引き上げる⁶⁾。スクリーポイント先端部からサンプラーの蓋までは 25cm、蓋の長さは 25cm であり、SWS 試験データに合わせて試料の採取を行うことができる。最大で 200g 程度の試料を採取することができる。

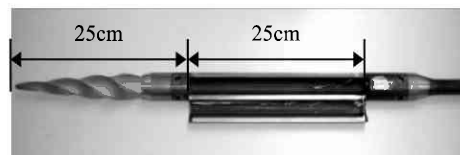


写真-4 土質試料採取器

3. 試験結果

SWS 試験結果を図-4 に示す。試験結果は他の SWS 試験と同様、No.3 の表層部や No.1 の G.L.-9~11m がやや硬くなっている傾向が見られる。

通常の SWS 試験を G.L.-20m まで実施した後、試験孔に有孔管を 5m 挿入し、水位が安定するまでの経過時間と孔内水位の関係を記録した。有孔管の長さは想定地下水位の 1.5 倍程度を目安としているが、本調査地は地下水位が浅く軟弱な埋立地であることから、孔内に土粒子が多く流入してくることを予想し、有孔管の長さを 5m とした。土粒子が有孔管内に多く流入すると、孔内に土粒子が堆積してしまい、水位を正確に測定できない場合がある。

SWS-WL 試験による地下水位測定結果を表-4 に示す。安定時の孔内水位は、地点 1 は G.L.-0.50m、地点 3 は G.L.-0.40m であり、これはボーリング調査の地下水位 G.L.-0.45m とほぼ一致している。

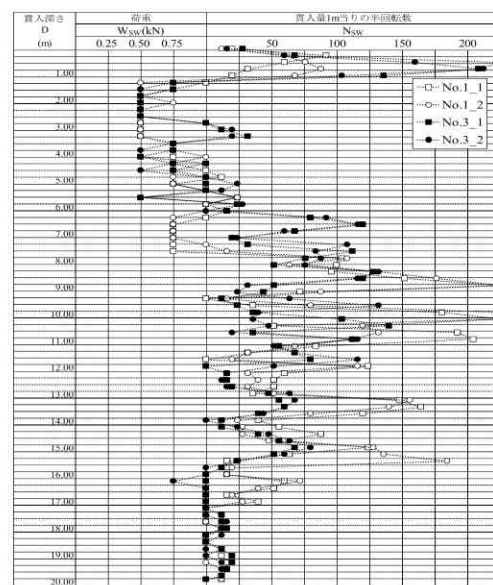


図-4 SWS 試験結果

表-4 地下水位測定結果

地点 No.	孔内水位(G.L.-m)		所要時間 (分)	ボーリング調査の 地下水位(GL-m)
	貫入直後	安定時		
地点 1	1.12	0.50	25	0.45
地点 3	0.56	0.40	15	0.45

図-5 に、SWS-WL 試験における有孔管貫入後の経過時間と、安定時の孔内水位の差を示す。地点 1 では、有孔管貫入直後の水位は G.L.-1.12m であったが、時間経過に伴い孔内水位が徐々に安定水位に近づいていく。安定するまでに要した時間は 25 分である。地点 3 では、有孔管貫入直後の孔内水位は G.L.-0.56m、安定後の水位は G.L.-0.40m、要した時間は 15 分であった。貫入直後の孔内水位に差は見られたが、時間が経過した安定後の孔内水位はボーリング調査とほぼ一致した。この安定するまでの時間の違いは、地下水位および有孔管付近の土質の違いによるものと考えられる。地点 1 の G.L.-0.00~0.50m の試料の細粒分は 38.2%、地点 3 の G.L.-0.00~0.50m の試料の細粒分は 24.4%と若干の差が観察された。このような土質の違いによる透水係数の差が、安定するまでの時間に影響したものと考えられる。

地点 1 および 3 において、調査点 No.1 の G.L.-1.00~1.25m と G.L.-3.00~3.25m の層に対し、SWS 試験孔を利用してサンプリングを行った。土質試料の判別は採取試料の観察により、砂質土か粘性土に分類した。土質の判別結果を表-5 に示す。地点 1 の G.L.-3.00~3.25m の試料は砂質土と判断したが、ボーリング調査ではシルト質粘土となっている。この理由として、採取した試料の含水比が約 100%と非常に高かったため、土質試料採取器を引き上げるまでに細粒分が流れ落ち、採取した細粒分が少なくなったため土質を見誤ったと考えられる。これ以外の試料は、ボーリング調査の土質と一致している。したがって、採取方法に多少の改善は必要であるが、SWS 試験孔を用いた試料採取法により、砂質土または粘性土の判別を行える可能性があることが示された。

4. まとめ

SWS 試験孔を利用した地下水位測定結果は、ボーリング調査の地下水位と概ね一致していることが確認できた。貫入直後の孔内水位と地下水位には差が見られたが、時間経過によりほぼ一致した。孔内水位が安定するまでに要した時間は 30 分以内で、SWS 試験実施中に測定可能な時間と考えられる。SWS 試験において精度良く地下水位を測定できることは、宅地地盤調査以外にも活用することができると考えられる。土質試料採取結果は、1 試料においてボーリング調査結果と異なったが、砂質土または粘性土の判別に必要な量を採取することができた。宅地地盤調査において、SWS-WL 試験と試料採取を併せて行えば、より正確な基礎の設計を行うことができると考えられる。また、地下水位の測定と土質の判別ができれば、「小規模構造物基礎設計指針（日本建築学会）」⁷⁾が推奨している、宅地地盤における簡易液状化判定を行うことも可能であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 金 哲鎬，他：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，日本建築学会学術講演梗概集(東北，構造 I)，pp.635-636，2009.
- 2) 金 哲鎬，他：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（その 2），日本建築学会学術講演梗概集(北陸，構造 I)，pp.701-702，2010.4)
- 3) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.280-288，pp.357-361，2004 年
- 4) Kim, Cholho, et al. : Measuring the Groundwater Level Using a Hole of the Swedish Weight Sounding Test, ISOPE-2010 Beijing, pp.789-792, 2010 年
- 5) 金 哲鎬，他：戸建住宅を対象とした地下水位測定法と土質判別に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 19 巻 第 41 号，2013 年 2 月（発刊予定）
- 6) Kim, Cholho, et al. : Primary Judgment Liquefaction Possibility Based on Groundwater Level for Detached Houses, ISOPE-2011 Maui, pp.633-637, 2011 年
- 7) 日本建築学会：「小規模構造物基礎設計指針」，pp.88-91，2008 年

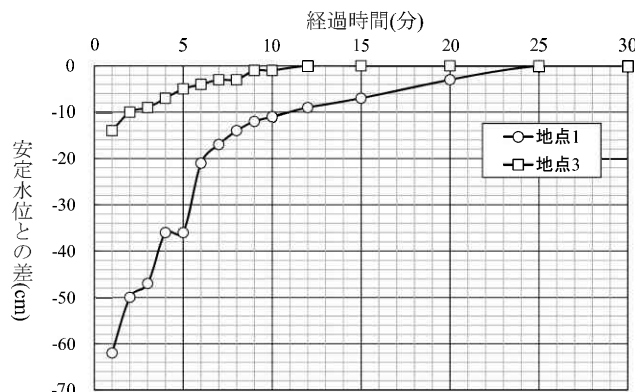


図-5 経過時間と地下水位

表-5 試料採取結果

地点 No.	採取深度 (G.L.-m)	採取土質	ボーリング調査による土質
地点 1	1.00~1.25	(シルト質) 砂質土	シルト質砂
	3.00~3.25	(シルト混じり) 砂質土	シルト質粘土
地点 3	1.00~1.25	砂質土	細砂
	3.00~3.25	(シルト質) 砂質土	シルト質砂