

自動スウェーデン式サウンディング試験機の適合性に関する検討

Examination of Adaptability of Automatic Swedish Weight Sounding Test Machine

下平 雄二 (しもだいら ゆうじ)
 株式会社管理総合試験所

村上 幸利 (むらかみ ゆきとし)
 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部

1. はじめに

「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が2000年に施行された。この法律は新築住宅の基本構造部分に関する瑕疵責任を建築請負会社に義務付けるものであり、たとえば請負会社が地盤調査を怠りまたは考慮しないで基礎の設計・施工を行った結果、住宅に不同沈下を生じせしめた場合には基礎の瑕疵責任を請負会社に負わせるものである。国土交通省は、その宅地の地盤調査法としてスウェーデン式サウンディング（以下、SWSと表す）試験を建築基準法体系の中に位置づけている。このため、住宅の地盤調査において、SWS試験による調査法が主流となり、近年は自動化されたSWS試験機の普及が著しい。しかしながら、試験機の機械性能・能力等に関して明確な規格がないため¹⁾、従来の手動式SWS試験機による調査との整合性において問題を残すことになっている。

そこで本論では、SWS試験の自動化に伴う問題点に着目し、手動と自動によるSWS試験および標準貫入試験による調査結果をもとに、同じ調査地点・深度での地盤のN値について比較・検討を行い、統計解析を通して、自動SWS試験の運用で発生している問題点を定量的に明確にしようとするものである。

2. 標準貫入試験と手動式SWS試験によるN値の比較

まず、標準貫入試験と手動式のSWS試験によりそれぞれ評価されるN値を比較してみる。標準貫入試験では打撃回数から直接的にN値を求めることができるが、手動式SWS試験では、下記の換算式を用いてN値を算出する。

$$N = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (\text{礫, 砂, 砂質土})$$

$$N = 0.003W_{sw} + 0.05N_{sw} \quad (\text{粘土, 粘性土})$$

ここに、 W_{sw} は荷重(N)、 N_{sw} は貫入量1m当たりの半回転数(回/m)である。この換算式は、精密調査の補足手段としてSWS試験を活用する目的で、土の工学的特性とSWS試験結果の相関関係に基づき、稲田倍穂によって1960年に提案され、長年にわたって地盤技術者の実務に利用されている²⁾。そこで、この換算式の妥当性を確認するために、同じ調査地点・深度において両試験から得たデータ(61箇所から採取したもので、砂・礫質土についてN値2~10で13個、N値11~30で4個、

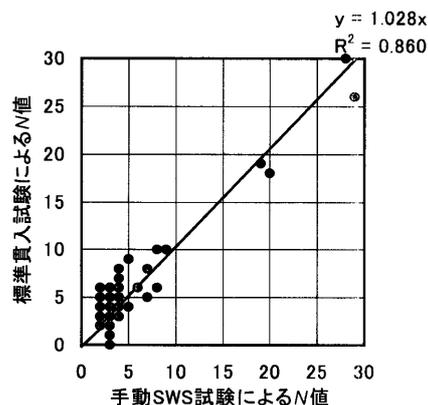


図-1 標準貫入試験と手動SWS試験によるN値の相関性

粘性土についてN値0~9で44個のデータ)の相関関係を図-1に示し、回帰式($y=ax$)を求めた。この結果、 $y=1.028x$ を得た。 a の値は極めて1に近く、上記の換算式の適用性が十分に認められる。また、相関係数 r と決定係数 R^2 を求めたが、 $r=0.928$ 、 $R^2=0.9274^2=0.860$ となった。これより、両者には大きな正の相関が認められ、両試験結果の適合度が良いと言える。

3. 各種の自動SWS試験により評価されるN値の比較

自動SWS試験によって評価されるN値は試験機種によって差異を生じると言われるので、各種の自動SWS試験機を用いて、任意の同じ調査地点・深度における地盤のN値を評価し、それらの評価結果の比較からそれぞれの試験機の相互関係を明らかにすることが必要である。その比較のために、6機種のSWS試験機を用いて調査を行った。すなわち、基準データを取るための手動式のSWS試験機を1台用意し、比較対照を行うための自動SWS試験機を4機種、半自動試験機を1機種それぞれ用意した。この4機種の自動試験機は現在広く使われているものであるが、便宜上、自動A、B、C、Dと表示する。また、これらの試験機の回転トルクなど主な機械仕様を表-4に示しておく。地盤調査場所を9地点選定し、同じ地点・深度(118箇所)で手動および自動と半自動のSWS試験を並行して実施した。それぞれの地点・深度において手動式SWS試験により求めたN値を横軸に、自動SWS試験または半自動SWS試験により求めたN値を縦軸に取り、手動のSWS試験

論文

表一 相関係数および線形近似による a 値

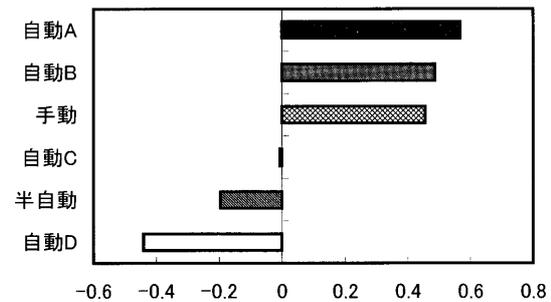
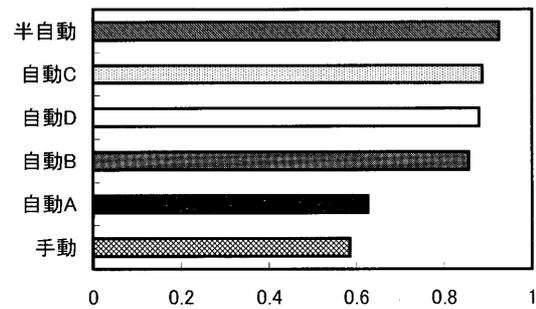
試験機	相関係数 r	$y = ax$
自動 A	0.643	0.985
自動 B	0.663	1.454
自動 C	0.474	1.069
自動 D	0.340	1.129
半自動	0.414	1.196

表二 固有値および寄与率

固有値表	固有値	寄与率	累積寄与率
主成分No. 1	56.971	72.8%	72.8%
主成分No. 2	13.435	17.2%	89.9%
主成分No. 3	3.432	4.4%	94.3%
主成分No. 4	2.125	2.7%	97.0%
主成分No. 5	1.387	1.8%	98.8%
主成分No. 6	0.936	1.2%	100.0%

による N 値と自動または半自動の SWS 試験による N 値の相関関係をグラフ化して、上記と同様な方法により相関係数 r と回帰式 ($y = ax$) の a 値を求めた。その結果を表一に示す。相関係数 r では、5 機種の中では自動 A および B が比較的大きな相関にあり、 a の値では自動 A 以外の 4 機種が 1 より大きくなっているのに対して、自動 A では a の値が 1 より若干小さい 0.985 を示していることから自動 A に注目したい。

次に、上記データの多変量解析を行った³⁾。最初に、主成分分析結果を表二および図一に示す。この結果では、主成分 No. 1, No. 2 の固有値が 10 を越え、寄与率も 10% 以上で累計寄与率が約 9 割に達していることから、ここでは主成分 No. 1, No. 2 が解釈に意義をもつ主成分となる。主成分 No. 1 は、データの総体からみて機械の性能・能力といった機械総合力を表すと考えるが、自動 B, 自動 C, 自動 D, 半自動の 4 機種の主成分負荷量が 0.8 前後であるのに対して、自動 A と手動の主成分負荷量が 0.6 前後を示しているのが特徴である (図一の上図)。また主成分 No. 2 は、主成分負荷量が大い正または負の値を示す自動 A と自動 D の入力データサンプルを比較し推察すると、土質 (特に砂質土・礫質土) による N 値の評価の差異を表すと考えられる (図一の下図)。また、数量化 I 類による分析を行った。ここでは、「調査地点における土質や微地形など」の質的な要因に関する情報に基づいて、量的に測定された外的基準の値である「SWS 試験により評価される N 値」を説明することが目的となる。用いた要因アイテム・カテゴリおよび分析結果のなかから、ここでは自動 A の結果を表三に示す。表中に示される要因アイテム・カテゴリに付与される数量ならびにレンジは、SWS 試験結果に与える重みの評価を数量的に表している。例えば要因アイテム「深度」の数量は最大値 0.340、最小値 -0.668 であり、その差すなわちレンジは $0.340 - (-0.668) = 1.008$ となり、これが要因アイテム「深度」の重みの程度を表すことになる。また統計理論が教える



図一 主成分負荷量 (上図: 主成分 No. 1, 下図: 主成分 No. 2)

表三 数量化 I 類分析結果 (自動 A)

アイテム	カテゴリ	度数	数量	レンジ	偏相関係数
深度	0~2.5m	70	0.340	1.008	0.258
	2.5~5.0m	30	-0.668		
	5.0m 以上	18	-0.211		
土質	粘性土	101	-0.618	8.208	0.735
	砂質土	12	2.037		
	礫質土	5	7.590		
表土	客土	48	0.899	1.516	0.423
	自然土	70	-0.617		
貫入状況	自沈層が存在	29	-0.732	0.970	0.271
	回転貫入のみ	89	0.238		
微地形	後背湿地	88	0.283	1.164	0.264
	扇状地	3	-0.366		
	自然堤防	27	-0.881		

ところから、数量化された外的基準と各要因アイテムとの偏相関係数が、SWS 試験結果に及ぼす各因子の影響の程度を表す数値となる。

その値が 1 に近いほど影響の程度が大きいと評価される。表三に示した分析結果では、「土質」のレンジが 8.208、偏相関係数が 0.735 と他のアイテムのそれよりかなり大きい数値にあることから、SWS 試験では「土質」が強い影響をもち、試験の結果に強く関与することが分かる。なお、これまで自動 A のデータ解析結果について説明を加えてきたが、他の自動 SWS 試験機および半自動の試験機による場合についてもほぼ同じ傾向にあり、「土質」が強く影響することが分かっている。

4. 分析結果の考察

まずは、手動式 SWS 試験の結果に稲田の換算式を適用させて求まる換算 N 値と標準貫入試験から求まる N

値との相関性を調べた。その結果、両者はほぼ完全に一致することを確認できた。次に、この結果を踏まえて、自動 SWS 試験と手動式 SWS 試験からそれぞれ求まる N 値との間にどの程度の一致性が有るのかを明らかにするために、地盤調査を実施し、データを集積し、集めたデータについて統計解析を行った。その結果として、自動 SWS 試験により求められた換算 N 値は、手動の SWS 試験により評価される N 値より相対的に大きくなる傾向にあることが分かった。主成分分析と数量化 I 類の結果に基づき考察すると、その要因としては、自動試験装置の機械性能・能力といった機械総合力、言い換えれば、トルク量や回転速度といった仕様条件が与える影響によるものと考えられる。そこで、各自動試験機（半自動はここでは参考値とする）の仕様である回転トルク・1分間当たりの回転数を大きい順に並び替え、回帰式より求めた a の値と合わせて表-4 に示してみる。

この表をみると、回転トルクが大きく、1分間当たりの回転数が多い自動 SWS 試験機ほど a の値が 1 に近くなっていることが分かる。この理由としては、次のように考察される。すなわち、手動式 SWS 試験機を用いた場合におけるロッド貫入時の状況を観察すると、1 kN の錘を載せ回転貫入を行う際に、鉛直方向にロッドを押し込むように人力を加えながらロッドに回転を与えていく。しかし、自動 SWS 試験機による調査では、モーターの動力でもってロッドに回転・貫入を与えるとき、トルク量と回転数が大きい場合には、先端のスクリーポイントのねじれ効果と 1 kN の錘の影響によって、ロッドはきりもみ状態で押し込まれるように貫入していく。この状態においては、機械力の一部が鉛直方向の力に変換されていると考えられる。このため、ある一定の大きさの回転トルク・回転数等に設定された場合に、手動による回転作業に近い力学的状況が作られると思われる。本研究で用いた 4 機種目の自動 SWS 試験機（現在広く利用されている試験機をできるだけ網羅した）に限れば、その一致する回転トルクと 1 分間の回転数が、それぞれ 0.135 kN・m と 25 rpm であると考えられる。それよりも回転トルクが小さい場合には、ロッド先端で下方向に伝わる力が十分でないため、同じ深度に達するには、手動による回転数よりも、多くの回転数を与えなければ到達しないことになる。したがって、回転トルク量が小さく、回転数が少ない自動 SWS 試験機では a の値が大きくなる傾向、すなわち N 値を過大評価する傾向になると考える。よって、自動 SWS 試験機においては、機械性能・能力の基準化が必要となる。

あえて言えば、現在利用されている試験機のうちでは、回転トルクで 0.135 kN・m、1 分間の回転数で 25 rpm を

表-4 回転トルクおよび回転数と a 値

	自動 A	自動 C	自動 D	自動 B	半自動
回転トルク (kN・m)	0.135	0.127	0.101	0.077	0.072
回転数 (rpm)	25	25	19	18	32
$y = ax$	0.985	1.069	1.129	1.454	1.196

固定化できる自動 SWS 試験機を利用することが望ましい。

5. まとめ

本研究から明らかになった知見の要点を列記する。

- (1) 従来利用されてきた手動による SWS 試験は、稲田が提案する換算式を用いることによって、標準貫入試験から求まるものとほぼ同じ N 値を評価することができる。
- (2) 自動 SWS 試験機を用いて評価される N 値は、機種により異なる。従来利用されてきた手動による SWS 試験に比べて、全体的に地盤の N 値を高く評価する傾向にあり、設計上は危険側の結果を導く。
- (3) 自動 SWS 試験機の性能・能力として、ある一定の回転トルクと回転数を与えることで、標準貫入試験による N 値に極めて近い N 値を評価させることができる。一定の回転トルクと回転数とは、本研究で用いた自動 SWS 試験機の範囲においては、回転トルクが 0.135 kN・m、1 分間での回転数が 25 rpm である。また、回転トルク量が約 0.1 kN・m 以下になると、ロッド先端で下方向に伝わる力が十分でないため、結果として N 値を高く評価してしまう。
- (4) N 値、すなわち地盤の地耐力の評価に最も影響を及ぼす大きな要因は「土質」である。また、土質の種類（砂礫土、粘性土といった区分）によって、その影響の程度も異なる。そのため、SWS 試験時における土質の判定は、用いる換算式の選択とも関連して、極めて重要な条件となる。すなわち、その判断の適否が最終的に地盤の N 値や地耐力の評価に大きく影響を及ぼすことになる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査法，pp. 213~219, 1995.
- 2) 稲田倍穂：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.
- 3) 田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp. 137~140, pp. 230~235, 1980.

(原稿受理 2003.4.25)