新しいスウェーデン式サウンディング試験(NSWS)による 地盤評価に関する基礎的研究

NSWS N值 換算式

大北耕商事 正会員 大北耕三 ジオ・フロント 特別会員 高清水祐之 篠塚潤 アスカソイルコーナー 正会員 ○奥野日出

1. はじめに

JIS-1221 規格にある SWS は、荷重 250N 毎の段階載荷で、最大 1000N までで貫入時にトルクを要さない自沈層と 1000N よりトルクを要する回転層によって地盤評価を行う。一方、自動および半自動式 SWS も JIS 規格と同様な段階載荷で自沈層と回転層による地盤評価を行うものであるが、これらの性能評価は必ずしも明確でない。本報は、0 から最大 2500N まで任意の載荷重 Wsw(N)で、自沈層と回転層 Nsw(1m 当たりの半回転数)で表わす地盤強度を求め、標準貫入試験、室内力学試験などの結果と比較検討した。この結果より、既成の自動式 SWS および新自動式 NSWS の性能評価を見出し、地盤の許容応力度を求める国土交通省の告示式10との対応関係や 10 値に換算する稲田の式10と一致する結果と著者らの提案式が土質性状の違いから得られた。

2. NSWS の構造および特徴

2.1 基本構造 2)

NSWS の基本構造は、図-1 に示す空気圧を載荷源とする空油圧式シリンダと動滑車チェーンを任意に設定することができ、載荷重は 50N ピッチで計測する.

2.2 特徵 2),3)

NSWS は、従来の手動式 SWS に対して、1 ストロークが完全な自律運転の自動化機である。第一の特徴は、載荷方式が空気圧であること、第二は計測値が 25~38mm ピッチに取得できること、第三は従来の固定された段階荷重と未定義の試験条件(最大荷重、回転速度、自沈の定義)を任意に設定できるところにある。また、NSWS 機は傾斜方向の試験が可能であり、連続的な荷重調整と計測の細分化による高い分解能を有する。

表-1 には既成の SWS(手動, 自動・半自動)と NSWS の機構上の特徴,各々の長所,短所をまとめた.

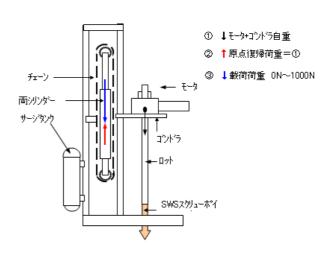


図-1 NSWS の基本構造

表-1 既成 SWS(手動,自動・半自動)と NSWS の特徴

方 法	特 徴	長所	短所
SWS(手動)	全て人力で操作	装置が簡便, 小型	作業負担大
	最大荷重 1000N(固定)	操作が簡単	測定誤差(個人差)あり
SWS(自動・半自動)	自動操作	作業負担小	装置がやや複雑、大型
	自動計測		測定誤差(機種差)あり
	最大荷重 1000N(固定)		
NSWS(自動)	完全自律運転	作業負担小	装備がやや複雑、大型
	空気圧載荷	傾斜貫入	操作に熟練を要する
	計測ピッチ 25~38mm	高分解能	
	測定条件任意変更可	条件変更による結果の高度利用	

※自動式・半自動式 SWS の自動操作・自動計測の機構は、メーカーと機種によって異なる.

3. 調査概要

今回の調査は、大阪、関東、青森の3箇所で行い、調査の目的、項目、内容および成果などの概要を表-2の一覧表に示す。

試験結果は、土質、堆積位置、年代の異なる地層において、載荷方式の異なる各 SWS 試験機での測定値が、標準貫入試験値と同じような相関を得るかどうかを稲田の換算式や国土交通省の告示式に示される宅盤評価の許容応力度 qa について検討した。特に関東ローム層については、最大載荷重を能力最大値の 2500N とし、この荷重に達するまで回転させない場合の結果を鉛直方向と傾斜方向について求めた。これによって、N 値や力学試験値とどのような関係にあるのか、さらに半回転数 Nsw を得るときの軸荷重と回転数なしの最大軸荷重の軸差力から回転による仕事量 $(N\cdot m)$ を求めた。以上より、NSWS が地盤評価に有効な試験法として用いることができるかどうかを検討した。

調査場所	対象地質	調査目的	調査項目と実施内容	調査成果
大阪府 住之江区 大阪湾沿岸	沖積粘土・砂 (貝殻片含)	NSWS 試験値と N 値との相 関関係 軟弱粘土層の強度分布把握	NSWS 試験(鉛直 GL-20m, 最大荷重 1600N) 標準貫入試験	沖積粘土・砂のN値とNSWS測定値との相関式 軟弱粘土の詳細強度分布把握
千葉県柏市 洪積台地	関東ローム 洪積粘土・砂	NSWS, 自動 SWS 試験値, N 値等と室内力学試験値との 関係 NSWS の鉛直・傾斜測定値の 解釈	NSWS 試験(鉛直・傾斜 60°, 最大荷重 2500N) 自動 SWS 試験(最大荷重 1000N) 標準貫入試験 ローム層の物理試験・三軸圧 縮試験(UU 条件)	洪積各層の N 値と自動 SWS,NSWS 測 定値との相関式 N 値,換算 N 値と力学試験値との関係 試験機の違いによる許容応力度評価 1000N 載荷,回転数と 2500N 載荷比較 から半回転数による仕事量 Wt 算定
青森県 つがる市 沖積平野	沖積粘土・砂	NSWS の載荷重を変えたと きの半回転数 Nsw の違い	NSWS 試験(載荷重 700N と 1200N)	土質別半回転数 Nsw の増加,その仕事 量 Wt に関する考察

表-2 調査概要一覧

4. 試験結果および考察

4.1 大阪地盤の調査結果

図-2 の土質柱状図に、標準貫入試験と NSWS 試験の結果を示す. 土質の観察により、約 GL-19m 以浅に上位より埋土、砂、シルト、砂質土および貝殻片混じり粘土の沖積層、その下位には砂薄層、腐植土、砂の洪積層が分布する. 実測 N 値と共に NSWS 試験値は,以下に示す稲田の換算式(1), (2) を用いて示した.

N=0.002Wsw+0.067Nsw (砂地盤) (1) N=0.003Wsw+0.05Nsw (粘土地盤) (2)

ここで、GL-6m 以浅においては、標準貫入試験後に工事の影響を受けて地盤に攪乱が生じている。NSWS 試験は工事後に実施したので実測 N値と換算 N値の差が顕著に出ている。したがって、以下には攪乱の影響がない下位の沖積砂層 As と粘土層 Ac について実測 N値と換算 N値の相関関係について検討した。

検討結果については、 $\mathbf{表}$ -3の一覧に示し、また各層の試験値は \mathbf{Z} -3 (a)、(b)に示し、試験値の相関性は各右図に表すとおりである.

図-3(a)の沖積砂層 Asでは、やや角ばった細砂で貝殻片を所々含んでいて NSWS 試験結果の 25mm ピッチ記録をみると、Nsw に局部的に急増がみられ、実測 N 値の計測では把握できない貝殻片の当たりを捉えていると思われる。また NSWS の換算 N 値は、砂で稲田の式を用いた場合、実測 N 値との傾向がほぼ一致していることが分かる。

なお、Wsw は、載荷重の正確な値として 1200N から 1500N の範囲でロッド自重(20N/m)を加えて補正した.

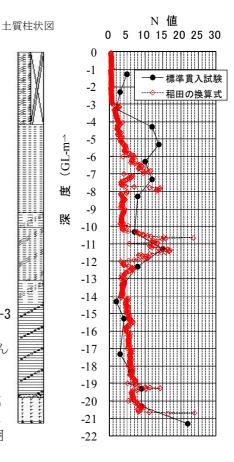


図-2 調査地の土質柱状図(大阪湾下)

表-3 大阪湾下各層における実測 N 値と換算 N 値との関係一覧

U. 55 5 71.	NTI HA LIK ALA	Life bother was land bother when I'v	実測N値と	両試験値の差	
地質名称 測定機能		換算N値算定式	換算 N値との 相関係数	平均値	標準偏差
砂		N=0.002Wsw+0.067Nsw	0.631	2.14	3.11
粘土	Wsw(N), Nsw	N=0.002Wsw+0.05Nsw	0.496	-0.3	0.67
711 -1-		N=0.003Wsw+0.05Nsw	0.344	-1.84	0.66

注) N=0.002Wsw+0.05Nsw 〈著者の提案式〉

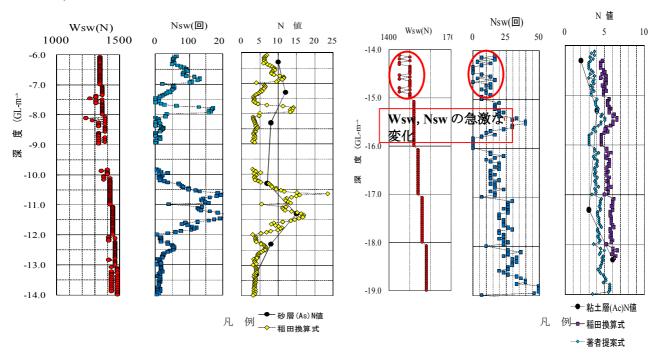


図-3(a) 大阪湾下の沖積砂層 As の実測 N 値と 換算 N 値

図-3(b) 大阪湾下の沖積粘土層 Ac の実測 N 値と 換算 N 値

相関係数を算定するにあたっては、換算 N 値に対して実測 N 値の試験数が少ないので、実測 N 値間を直線補間して値を補足した. これより、実測 N 値と換算 N 値の差をとり、この平均値と標準偏差を求めて両試験値のバラツキを表-3 に示した.

次に、沖積粘土層 Ac では図-3(b)のような結果が得られた。Ac 層でも貝殻片を含み、局部的に Wsw と Nsw の変化が見られる。つまり、 $GL-14\sim-15m$ 間においては、Wsw の上昇下降と Nsw が 0 から 16 の範囲で変化しているように、貝殻片の影響か、脆弱な粘土が挟まるかが考えられ、細密な強度変化が捉えられた。

NSWS の換算 N 値は, 表-3 の稲田の式 Wsw に掛る係数を 0.002 とすれば, 相関係数は係数 0.003 の場合よりも勝り, また図-3 (b) に示す換算 N 値の分布傾向を直視して分かるように実測 N 値とのバラツキが小さい.

4.2 関東地盤の調査結果

調査地は関東平野の台地に相当し、図-4の土質柱状図に標準貫入試験とNSWS 試験(鉛直、傾斜方向)の結果などを示す. 土質の観察により、約 GL-10m 以浅には、上位より表土、関東ロームおよび凝灰質粘土・砂の洪積層が分布する.

ローム層 Lm について,実測 N 値と換算 N 値の相関関係について検討した結果を表-4 Lm に,また許容応力度 Lm については表-5 Lm に示した.本節では同一地盤での Lm NSWS 試験方向の違いによって地盤強度を求める上で 異方性があるかどうか,また載荷方式の違いで載荷重 Lm WSW のみの試験値と Lm に半回転数 Lm NSW が加わる一般値との比較に着目した.ただし,各図の傾斜測定は鉛直方向の深度に測定値をプロットし直したものである.

またローム層での換算 N 値は、前述の(2)式を前提として、自動 SWS 試験については Wsw に掛る係数を 0.002 と稲田の式の係数 0.003 と比較した.一方、NSWS 試験は、実測 N 値と換算 N 値のバラツキが Wsw の みで直視できるので Wsw の係数を 0.002 とした.さらに、実測 N 値、各種 SWS 試験値から推定するせん断強度(粘着力 c)と一軸および三軸圧縮試験からの c との関係について、図-6 に示した.

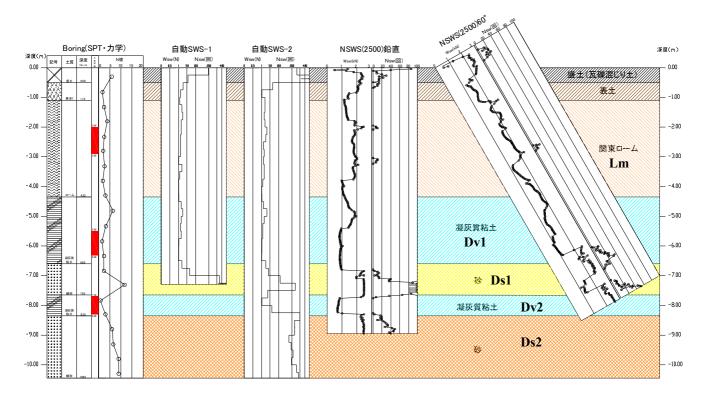


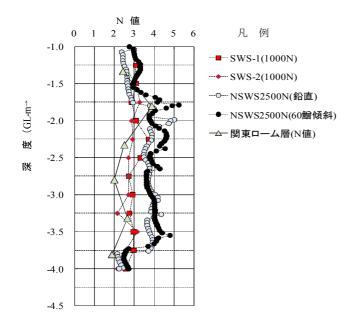
図-4 調査地の土質及び各試験結果(関東地盤)

表-4 関東ローム層における実測 N値と換算 N値との関係一覧

	測定機能	換算N値算定式	実測N値と	両試験値の差	
試験機名			換算 N値と の相関係数	平均値	標準偏差
NSWS2500N (鉛直)	Wsw (N)	N=0.002Wsw	0.34	-0.9	0.8
NSWS2500N (60°傾斜)	Wsw (N)	N=0.002Wsw	0.50	-1.2	0.6
自動 SWS1000N (鉛直 SWS-1)	Wsw(N), Nsw	N=0.002Wsw+0.05Nsw	0.34	-0.5	0.6
		N=0.003Wsw+0.05Nsw	0.31	-1.6	0.6
自動 SWS1000N (鉛直 SWS-2)	Wsw(N), Nsw	N=0.002Wsw+0.05Nsw	0.69	-0.2	0.5
		N=0.003Wsw+0.05Nsw	0.60	-1.2	0.5

表-5 関東ローム層における実測 N 値と各種 SWS 試験値による許容応力度 qa 一覧

= NEV NV P	Nto the late Ale	許容応力度 qa(kN)	各 SWS 試験値,実測	両試験値の差	
試験機名	測定機能 算定式		N値から求まる qa の 相関係数	平均値	標準偏差
NSWS2500N (鉛直)	Wsw(kN)	qa=38Wsw	0.24	10.8	18.4
NSWS2500N (60°傾斜)	Wsw(kN)	qa=38Wsw	0.41	5.2	15.8
自動 SWS1000N (鉛直 SWS-1)	Wsw(kN), Nsw	qa=38Wsw+0.64Nsw	0.09	24.9	16.3
自動 SWS1000N (鉛直 SWS-2)	Wsw(kN), Nsw	qa=38Wsw+0.64Nsw	0.54	28.3	14.3



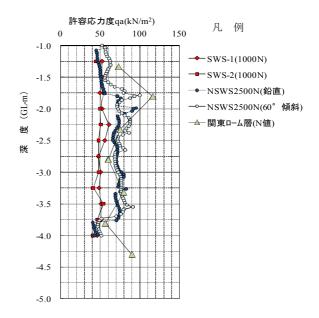


図-5(a) 実測 N 値と各試験機に換算 N 値との関係

図-5(b) 各 SWS 試験値,実測 N 値から求まる 許容応力度 qa の関係

表-6 関東ローム層の主な土質試験結果一覧

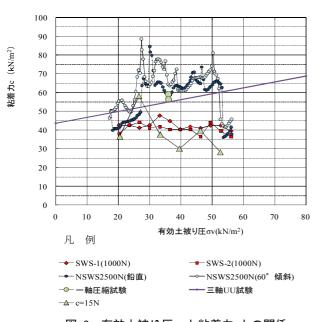


図-6 有効土被り圧ovと粘着力cとの関係

不撹乱試料の試験深度 GL-(m)		2.00~2.90
湿潤密度	pt(g/cm ³)	1.268
細粒分含有率	Fc(%)	95.6
自然含水比	Wn(%)	158.8
飽和度	Sr(%)	95.25
液性限界	WL(%)	204.7
塑性限界	Wp(%)	76.8
塑性指数	Ip	127.9
コンシステンシー指数	Ic	0.36
液性指数	IL	0.64
一軸圧縮強度	qu(kN/m²)	112~118
変形係数	$E_{50}(MN/m^2)$	3.5
三軸圧縮強度	c(kN/m ²)	43.6
(UU 条件)	φ(°)	17.4

なお,表-5、図-5(b) および図-6 に示す強度換算式の式(3)は国土交通省告示 1113 号の準用 11 ,式(4)は旧住宅公団の提示式 41 ,式(5)は旧日本住宅公団が提示した式(4)の qa を一軸強度と見なした著者の提案である. また,粘土の一軸圧縮強度に関して,式(6)は稲田の式を示し 11 ,式(7)は式(6)を参考にして,ロームについて著者の実験式を提案する.

qa=38Wsw+0.64Nsw	(kN/m^2)	(3)
qa=30N	(kN/m^2)	(4)
c=15N	(kN/m^2)	(5)
qu=45Wsw+0.75Nsw	(kN/m^2)	(6)
qu=67.5Wsw+0.75Nsw	(kN/m^2)	(7)

表-4 より、ロームの換算 N 値を求める際、粘土の換算式を適用すると、自動 SWS 試験においては大阪地盤の粘土 Ac と同様に Wsw の係数を 0.002 とした方が 係数 0.003 よりも相関係数が良好で、実測 N 値との差も小さい、また半回転数 Nsw を考慮しない NSWS の換算 N 値も比較的実測 N 値との差が小さく、自動 SWS 試験との大差はなかった。したがって、Nsw を伴わない載荷重 Wsw のみの貫入によって、N 値 $2\sim5$ (最大 2500N) の範囲で詳細な試験結果が得られると判断される。また、図-5(a)をみれば、実測 N 値と各 SWS 試験機の換算 N 値の分布傾向がわかるように、多少のバラツキがでるのは、若干試験位置を変えることによって、ローム層に含まれる微細な軽石の影響を考慮しなければならいと考える。

次に換算 N 値を用いず、直接 SWS 試験の結果から許容応力度 qa を求める換算式について検討する.

表-5 および図-5 (b) より、Wsw と Nsw から qa が求まる式(3)と実測 N 値に基づく式(4)との結果を比較すると NSWS2500N 機の鉛直、傾斜方向における結果の相関が比較的良好で、式(4)とのバラツキが自動 SWS の結果と比較して小さいことが分かる。つまり、これは自動式 SWS の性能評価の見直しと、また最近になって式(4)の公表がなくなったこと 5)については、今後議論の対象となろう。何故なら、SWS からの強度設定に関しては、いくつかの課題があり、特に回転数から強度を求める上で CPT や SDS などとの関係を明らかにすることも必要と考える 6 , 7) 一方、著者らは、NSWS2500N 試験による関東ローム層を事例とする宅盤評価として、換算 N 値 5 までは回転層による強度換算を用いず qa が求まることと、異方性を配慮して傾斜測定を行って、鉛直測定と比較した上で安全側の試験値を採用することが望ましいと考えている。

関東ローム層で不攪乱試料を採取して、室内土質試験を行った結果を表-6の一覧に示した。

本層の主な物理特性は、今回の試験結果だけに限らずロームの特性として一般値の範囲にあり、異常値ではないと判断される⁸⁾. また調査地は台地にあり、GL-10m以浅には地下水位はなかった.

図-6 にはロームの力学試験値と式(5)、(7)を用いた実測 N 値と自動 SWS、NSWS から得た試験値による粘着力 c をプロットした. 同図より、力学試験値は、NSWS 試験による換算式(ただし、今回は Wsw の試験値のみ)を用いた値と一致する傾向がみられる. この結果からも SWS 試験結果において半回転数を含めて強度を求める上で課題があると思われる.

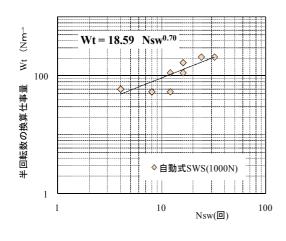
4.3 半回転数 Nsw に関する考察

(1) 関東洪積地盤の半回転数 Nsw による仕事量 Wt 算定

半回転数を得るときの軸荷重(SWS1000N機または1200N機)と半回転数なしの最大軸荷重(2500N機)の軸差力から半回転数の仕事量 Wt (Nm)を求めた.

軸差力による仕事量 Wt(Nm) とは、試験機別の荷重差 $\Delta P(N)$ に貫入量 $\Delta D(m)$ を乗じたものである. 地層別の Wt の増加傾向は、図-7(a),(b) に示すとおりである.

その傾向は地層別に異なるが、Wt の絶対量を比較するため、半回転数の Nsw=30 に注目すると、洪積粘土層 Dv1 で Wt=200(Nm)、洪積細砂層 Ds1 では Wt=300(Nm)となり、砂層では粘土層よりも回転による仕事量が大きくなることが分かる。すなわち、摩擦力として砂層の ϕ 成分が定性的ではあるが、粘土層よりも大きいと考えることができ、今後はこの Wt を定量的な ϕ 成分の評価につなげて行きたいと考える。



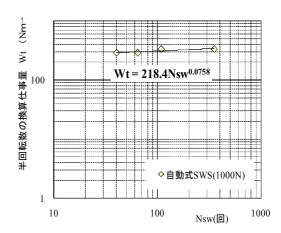


図-7(a) 洪積粘土層 Dv1 の半回転数の仕事量 Wt 図-7(b) 洪積細砂層 Ds1 の半回転数の仕事量 Wt

(2) 津軽平野沖積層における軸荷重を変えたときの半回転数 Nsw の増加に関する考察

調査地は、青森県津軽平野の南部で軟弱な沖積地盤が厚く分布するところであり、**図-8** にボーリング柱状図を示す. 地層は上位より埋土、砂を挟むシルト、砂質シルトおよびシルト質砂、砂の順に分布する.

ここに、中間部 GL-3m 前後のシルト層では、半回転数を伴わない自沈層である.

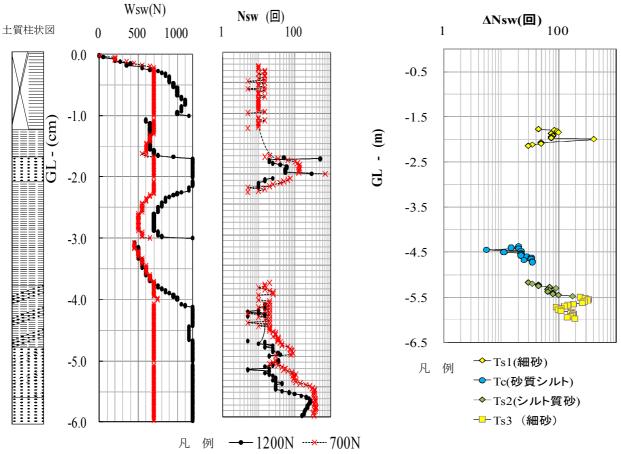


図-8 同一地盤での載荷重を変えた試験結果

図-9 軸力差 500 (N) に対する 増加半回転数 Δ Nsw

図-8 には、NSWS1200N 機の載荷重を 1200N と 700N の場合に、その軸力差に対する半回転数 Nsw の変化 を調べた結果を示す. これより、回転領域(Nsw>0)で軸力の違いから、Nsw の差が明瞭に出ていることが分かる.

図-9 には、上記の軸力差 500N に対して、地層別に低載荷側の半回転数がどれだけ増加するかを半回転数の差 Δ Nsw を示した。なお、表層の不均質な盛土のデータは省いた。また GL-2.2~-3.8m 付近に分布する軟弱な自沈層のシルトでは半回転数が得られなかった。

図-9 より、軸力差 500N での Δ Nsw は、肉眼観察によるが細粒分質の Tc 層が少なく、細粒分が少なくなるに従い、Ts2 層<Ts3 層の順に多くなっている。これは、粗粒分が多い土ほど軸力差の応力分に対して半回転数が多いと摩擦力が大きいと考えることができ、このことは先に述べた関東地盤での粘土と砂の仕事量 Wt の違いと定性的には同様と考えることができる。したがって、半回転数の仕事量 Wt は、地層の物理的性質として、粒度組成、細粒分含有率、コンシステンシー特性などとの相関性を調べる必要があると考える。

今後は、この相関を求め、力学試験値と比較してせん断定数 c, φについて検討して行きたいと考える.

5. 結論

本報では NSWS 試験機による地盤評価を行い、主な知見を以下に示す.

- ・粘土,砂など土質別に N 値や力学試験値の換算式を示すと,砂地盤において,稲田の式と同様な結果が得られた.
- ・粘土地盤では稲田の式の内、Wsw に掛る係数が 0.002 となる実験式を得た.
- ・JIS 規格の SWS では 1000N までの載荷重と半回転数による地盤評価にあるが、本 NSWS と標準貫入試験、室内力学試験と比較した結果、2500N までの載荷重によっても地盤評価が可能と考える.
- ・大阪地盤の沖積粘土では、貫入中の載荷重変化によって、細密な強度が把握できたため、地盤内のすべり面などの弱線を捉えることが可能と考える。
- ・半回転数に関わる仕事量 Wt や同一地盤で軸力差による Δ Nsw を求めることによって、土質別に特徴が得られた.この結果を利用して、今後は物理特性との相関を求め、せん断定数 c, ϕ を検討する.

参考文献

- 1) 地盤工学会: 地盤調査の方法とその解説, pp285-287, 2004.
- 2) 近藤巧,大北耕三:地盤内空洞自沈領域の詳細調査方法およびその調査機,地盤工学会誌, Vol.56, No.9, pp30-31, 2008.
- 3) 風嵐健志,近藤巧,大北耕三: NSWS による地盤陥没領域の調査, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム, 地盤工学会関西支部主催, pp. 101~106, 2009.
- 4) 日本建築学会:小規模建築物基礎設計の手引き,pp15,1988.
- 5) 都市再生機構:宅地地盤性能評価基準(案),2008.
- 6) 高田徹,他5名:三成分コーン貫入試験による宅盤の評価手法に関する考察,地盤工学ジャーナル,Vol.4, No.2, pp157-170, 2008.
- 7) 関口和富,他3名:塑性論アナロジーモデルを適用した新しいスウェーデン式サウンディング試験方法,第6回地盤工学会関東支部発表会,2009.
- 8) 地盤工学会(旧土質工学会): 日本の特殊土, 土質基礎工学ライブラリー 10, pp22-59, 1992.