

盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング 試験結果の相関性

A Correlation of Soil Strength between Different Sounding Tests on Embankment Surface

岡田 勝也 (おかだ かつや)

（財）鉄道総合技術研究所浮上式鉄道開発本部 土木部長

野口 達雄 (のぐち たつお)

（財）鉄道総合技術研究所 JR部JR課長

杉山 友康 (すぎやま ともやす)

（財）鉄道総合技術研究所地質・防災研究室 研究員

村石 尚 (むらいし ひさし)

（財）鉄道総合技術研究所地質・防災研究室 主任研究員

1. まえがき

鉄道沿線の斜面では梅雨期や台風時等の豪雨によってのり面災害が発生する。これらの災害の原因究明や災害防止対策の施工にあたり、沿線斜面の地形・地質等の調査のほかに、表層土の厚さや土質強度などの斜面の性状調査のためのサウンディング試験が行われることが多い。

このサウンディング試験として、標準貫入試験やスウェーデン式サウンディング試験等が広く用いられてきたが、これらの試験は比較的手間のかかる作業を伴うものである。したがって、広くかつ細長い斜面で数多くのサウンディング試験を実施することは困難であるので、現実には数少ないサウンディング試験結果をその斜面の性状として代表させ、設計や保守のデータとして用いている。

こうした斜面において小型軽量で作業も比較的容易な簡易貫入試験機を用いることができれば、のり面におけるサウンディング試験が短期間、少ない労力で数多く実施できることになる。しかしながら、簡易貫入試験機とスウェーデン式サウンディング試験のサウンディング結果を同じ土質について比較した例は少なく、両者の相関式は提案されていない。そこで、簡易貫入試験機とスウェーデン式サウンディング試験との関係を定量的に求めることを目的に鉄道盛土ののり面を対象にサウンディングを実施し、新しく両者の相関式を提案する。さらにこの簡易貫入試験機による結果から標準貫入試験による N 値と一軸圧縮強度 q_u を推定する式を提案する。

2. 異なるサウンディングの相関に関する過去の研究事例

各種のサウンディングによる土質強度の相関に関する過去の研究事例として、例えば、標準貫入試験の N 値とスウェーデン式サウンディング試験の W_{sw} と N_{sw} との関係については、稲田¹⁾が名神高速道路における調査結果をまとめて、次のような関係式を提案している。

礫、砂、砂質土について

$$N=0.02 W_{sw}+0.067 N_{sw} \dots\dots\dots(1)$$

粘土、粘性土、礫まじり粘性土について

$$N=0.03 W_{sw}+0.050 N_{sw} \dots\dots\dots(2)$$

また、一軸圧縮試験結果との関係については粘性土に対して、

$$q_u=0.0045 W_{sw}+0.0075 N_{sw} \dots\dots\dots(3)$$

を与えている。

同じころ三木²⁾は赤土台地（ローム層）において各種のサウンディング試験を実施し、赤土ならびに砂礫についてそれぞれ

$$N=(1/9)N_{sw} \text{ ただし } (N_{sw}<90)$$

$$N=(1/12)N_{sw} \dots\dots\dots(4)$$

を提案している。以上の提案式は線型式であるが、上田^{3),4)}は粘土、砂、礫に対して次の非線型式、

$$N=0.318 N_{sw}^{0.755} \dots\dots\dots(5)$$

を提案している。

一方、スウェーデン式サウンディング試験とオランダ式コーン貫入試験との関係についての直接的な比較はあまりなされていないが、三木²⁾が赤土台地で実施した結果から次式を与えている。

報文—2192

$$q_c = (1/3)N_{sw} \dots\dots\dots(6)$$

また室町^{5),6)} は東京圏の鉄道沿線の実測データから

$$q_c = 6.7 + 0.49 N_{sw} \dots\dots\dots(7)$$

を提案している。

また、簡易貫入試験と標準貫入試験との関係については、簡易貫入試験機取扱要領⁷⁾ に

$$N_{c,30} = 3 \sim 10 N \dots\dots\dots(8)$$

と示されている。ただし、 $N_{c,30}$ は貫入量 30 cm の打撃回数である。

しかし、簡易貫入試験の N_c とスウェーデン式サウンディング試験の結果との関係については、簡易貫入試験機取扱要領に

表層土	$W_{sw} < 100 \text{ kg}$	$N_c < 5$	} \dots(9)
砂質ローム	$N_{sw} < 80$	$5 < N_c < 15$	
砂層	$100 < N_{sw}$	$15 < N_c$	

を与えているが、この値はオーダーを与えたものであり、同じ土質において両者の関係を求めたものではない。

したがって、鉄道盛土のサウンディング試験として従来多く用いられてきたスウェーデン式サウンディング試験と比較的軽量で簡単な操作でできる簡易貫入試験のサウンディング結果を関係づける式は提案されていない。

3. 鉄道盛土におけるサウンディングの概要

3.1 使用したサウンディング試験機の概要

スウェーデン式サウンディング試験は JIS に示されているとおりであるので、ここでは斜面調査用簡易貫入試験機⁷⁾ (以下、簡易貫入試験機という) の概要を示す。簡易貫入試験機は建設省土木研究所で考案され、(財)砂防地すべりセンターで検定を受けた動的貫入試験であり、その概形は図-1 のとおりである。

この簡易貫入試験機は総重量が約 10 kgf と小型軽量なため、急斜面上や狭あいな箇所での作業が比較的容易であり、従来数点しか調査ができなかったような斜面においても面的な調査が可能である。この簡易貫入試験機のコーンの先端角度は60度、径は 16 mm であり、5 kg のウェイトを 50 cm の高さから自由落下させ、先端コーンを 10 cm 貫入させる時の打撃回数 N_c を測定するものである。4~5 m 程度

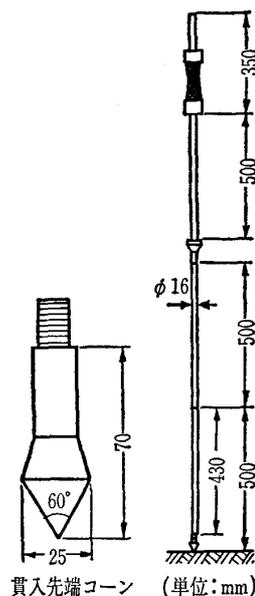


図-1 斜面調査用簡易貫入試験機

の深度まで調査が可能とされている。

3.2 土質特性

調査の対象とした盛土は全国は鉄道盛土68箇所である。これらの盛土は過去10年間に JR 北海道から JR 九州に及ぶ全国において降雨によって崩壊した盛土を対象としたものであり、それぞれの盛土のり面の中腹部に1, 2点の代表点を設定してサウンディングを実施した。なお、このうちの1箇所については盛土のり面に格子点を設けて複数本のサウンディングを実施したものである。

降雨によって崩壊した鉄道盛土68箇所の盛土表層から 3 m間の簡易貫入試験機によるサウンディング結果の頻度分布は図-2 のようである。これによれば、のり面表層部の盛土強度の平均値は $N_c = 5.4$,

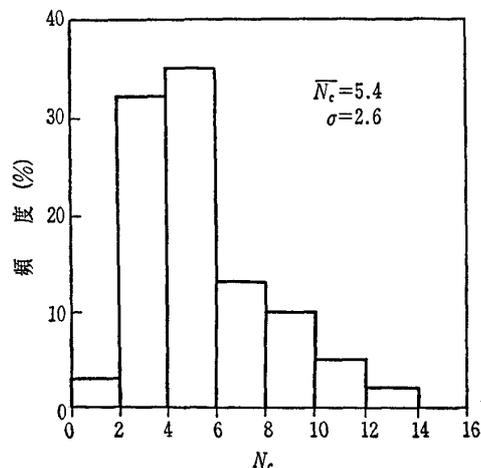


図-2 崩壊盛土の盛土強度 N_c の頻度分布

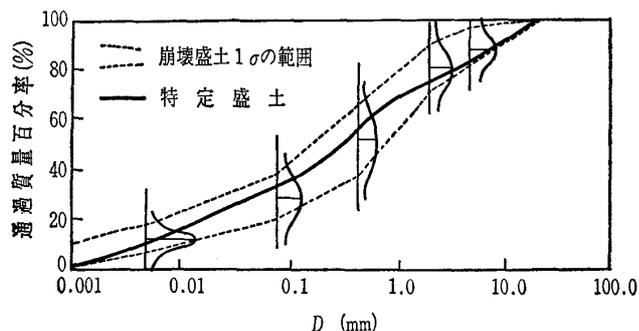


図-3 崩壊盛土試料の粒径加積曲線

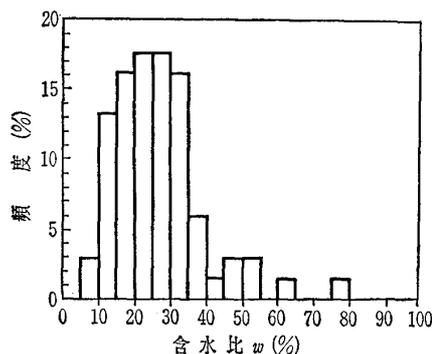


図-4 含水比の頻度分布

その標準偏差は $\sigma=2.6$ である。

これらのサウンディング箇所に対応する盛土試料の粒径加積曲線を描くと図-3のようになる。図には $\pm 1\sigma$ (標準偏差) の範囲を点線で示した。またサウンディングを実施したときの含水比の頻度分布を示すと図-4のようであり、盛土表層部の含水比は15~55%に広く分布している。

一方格子点を設けてサウンディングを実施した盛土(特定盛土と言う)は、明治37年に開業し昭和55年別線付け替えがされるまで営業線として使用された経年約84年、高さ約14mの単線の盛土である。サウンディングを実施するにあたり、盛土のり面に線路方向に3mピッチの8測線、高さ方向には3mピッチ6測線の格子点を設けた。そしてこれらの格子点について簡易貫入試験とスウェーデン式貫入試験によるサウンディングを実施した。

表層30cmについては均等係数 $U_c=69.2$ 、曲率係数 $U_c'=6.31$ 、50cmについては $U_c=63.3$ 、 $U_c'=0.53$ であって、蒸気機関車時代の石炭殻が土羽に混入しているものと考えられ、それぞれG-O(石炭まじり礫)、SO(石炭まじり砂)である。しかし、のり面から80cmの深さになると $U_c=111.3$ 、 $U_c'=0.89$ のSM(シルト質砂)で、粒度組成、粒度配

合ともによい材料である。表層のG-O、SOを除く盛土試料の粒径加積曲線は図-2に示すように、全国の既往崩壊盛土の粒度分布の範囲に入っている。またサウンディング試験を実施した時の含水比は約30~60%であったが、これは全国のデータである図-4の分布幅にほぼ入っている。

4. 簡易貫入試験とスウェーデン式サウンディング試験との相関

4.1 特定の盛土における相関

ここでは、特定の盛土において同一位置で実施した簡易貫入試験とスウェーデン式サウンディング試験による土質強度の相関性について検討する。

今、簡易貫入試験による強度 N_c の深さ方向の分布の一例として、特定盛土の格子点の全測点の平均値を示すと図-5(a)のようになる。なお、図には深さごとの標準偏差 σ も同時に示している。簡易貫入試験機のウェイトの質量は5kgと比較的軽いので、大きな礫に当たった場合には N_c は非常に大きくなりかつ標準偏差 σ も大きな値を示す。これは、貫入によって与えられる動的な圧縮力と土のせん断力の比にも影響されるが、土の粒度特性にも関係するものである⁹⁾。このような特異なデータを棄却して整理しなおすと図-5(b)のようになる。

一方、スウェーデン式サウンディング試験の自沈の W_{sw} に対する N_c については、スウェーデン式サウンディング試験の重りを載せた際の沈下の慣性によって本来停止するべき深さよりも深い位置まで達してしまうことが考えられる。したがって、自沈し始めた位置での W_{sw} と N_c を対応させた。また、 N_{sw} と N_c については、標準的には25cmごとに N_{sw} のデータが一つ得られるため、この間の平均の N_c を対応させた。

以上の条件のもとに整理した簡易貫入試験による

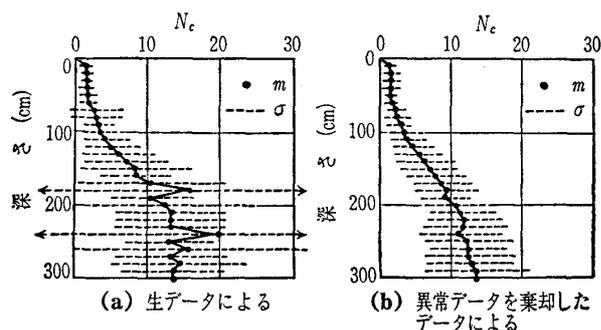


図-5 鉛直方向の強度分布

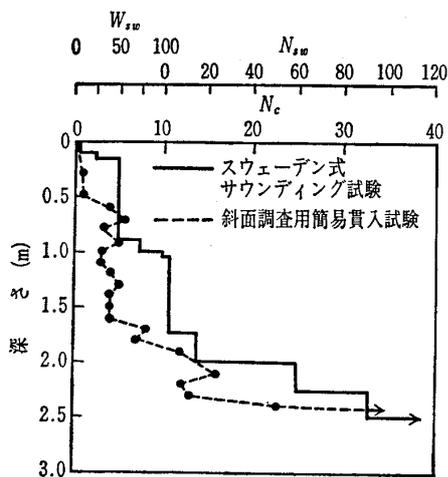


図-6 N_c と W_{sw} , N_{sw} の比較 (測点H-2)

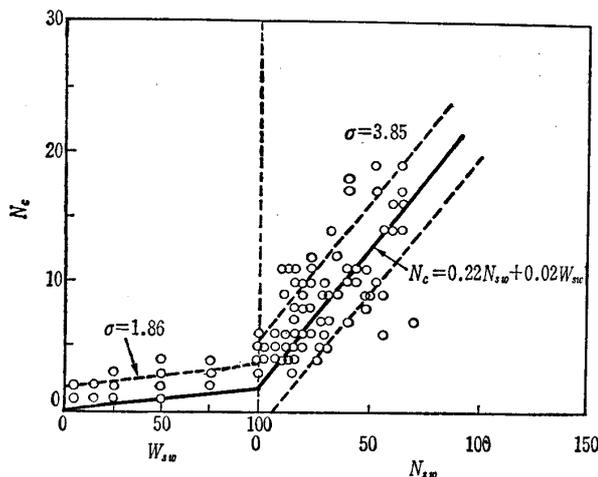


図-7 N_c と W_{sw} , N_{sw} との関係

N_c とスウェーデン式サウンディング試験による W_{sw} , N_{sw} を比較した一例は図-6 のようである。

さて当該盛土の格子点のサウンディングに対して W_{sw} , N_{sw} と N_c との関係を求めることにするが、それぞれは、

$$\left. \begin{aligned} N_c &= \alpha W_{sw} \\ N_c &= \beta N_{sw} + \gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

で与えられるものとする。ここに α , β と γ は未定定数であるが、 $W_{sw}=100 \text{ kgf}$ と $N_{sw}=0$ 回のときの N_c は一致しなければならないから、式(10)の定数 γ は $\gamma=100\alpha$ となる。したがって式(10)は、

$$N_c = \beta N_{sw} + 100\alpha \dots\dots\dots(11)$$

となる。式(11)において、自沈の際の W_{sw} と N_c のデータを (x_{1i}, y_{1i}) 、回転の際の N_{sw} と N_c のデータを (x_{2i}, y_{2i}) とし、両者の残差の平方和が最小になるように α , β を求める。両者の残差の平方和は、

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^{\lambda} (y_{1i} - Y_1)^2 + \sum_{i=1}^{\mu} (y_{2i} - Y_2)^2 \\ &= \sum_{i=1}^{\lambda} (y_{1i} - \alpha x_{1i})^2 + \sum_{i=1}^{\mu} (y_{2i} - \beta x_{2i} - 100\alpha)^2 \dots\dots(12) \end{aligned}$$

となる。なお、 λ , μ はそれぞれ自沈、回転のときのデータ数、 Y_1 , Y_2 は W_{sw} , N_{sw} に対するそれぞれの N_c の平均値である。これを α , β で偏微分して 0 とおけば、 α , β に関する連立方程式が得られ、結局、

$$\alpha = (1/\Delta) \left\{ \left(\sum_{i=1}^{\lambda} x_{1i} y_{1i} + 100 \sum_{i=1}^{\mu} y_{2i} \right) \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i}^2 \right.$$

$$\left. - 100 \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i} y_{2i} \cdot \sum_{i=1}^{\lambda} x_{1i}^2 \right\}$$

$$\beta = (1/\Delta) \left\{ \left(\sum_{i=1}^{\lambda} x_{1i}^2 + \mu \cdot 100^2 \right) \cdot \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i} y_{2i} \right.$$

$$\left. - 100 \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i} \left(\sum_{i=1}^{\lambda} x_{1i} y_{1i} + 100 \sum_{i=1}^{\mu} y_{2i} \right) \right\} \dots\dots\dots(13)$$

ただし、

$$\Delta = \left(\sum_{i=1}^{\lambda} x_{1i}^2 + \mu \cdot 100^2 \right) \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i}^2 - \left(100 \sum_{i=1}^{\mu} x_{2i} \right)^2 \dots\dots\dots(14)$$

が得られる。

当該盛土の実測値、182点について式(13)により定数 α , β を求め、これを式(11)に代入すれば、

$$N_c = 0.22 N_{sw} + 0.02 W_{sw} \dots\dots\dots(15)$$

を得る。式(15)による両者の関係は図-7 のようであり、このときの相関関数は 0.83 である。なお図の点線は、 W_{sw} , N_{sw} のそれぞれの回帰式による予測値と実測値の差の標準偏差をシフトさせて示したものである。

4.2 土質別の相関

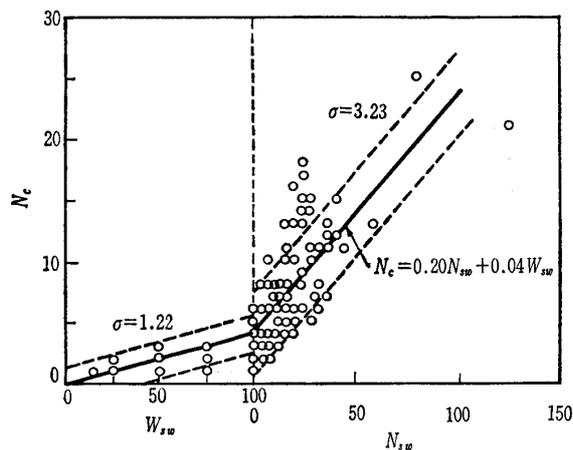
上述の式(15)で与えられる N_c と W_{sw} , N_{sw} との関係は、特定の盛土斜面の調査結果をもとにして得られたものであり、すべての土質に対して適用できるものではない。そこで、降雨による既往災害箇所の盛土67箇所についてスウェーデン式サウンディング試験と簡易貫入試験を同一の場所で行った。

解析は、日本統一分類による礫粒土、砂粒土、細粒土にデータを分類して行った。礫粒土は14箇所、砂粒土、細粒土はそれぞれ35箇所、5箇所の計54箇所の調査結果をもとに計算した。なお、データについては4.1で示した条件のもとで整理したものをを使用した。土質別の計算結果は以下のとおりである。

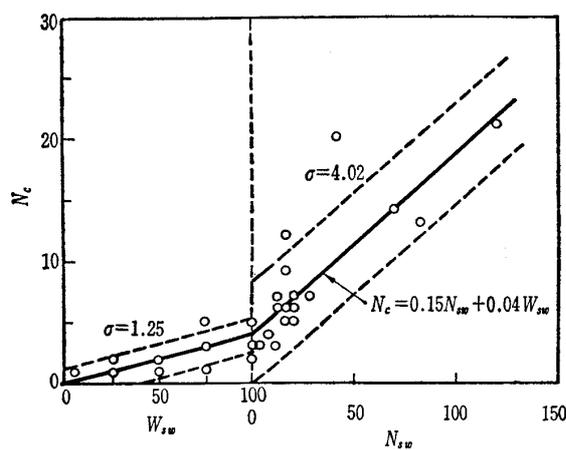
礫粒土について

$$N_c = 0.20 N_{sw} + 0.04 W_{sw} \dots\dots\dots(16)$$

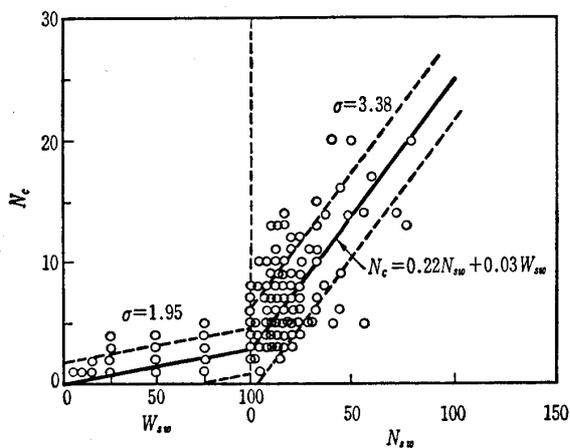
砂粒土について



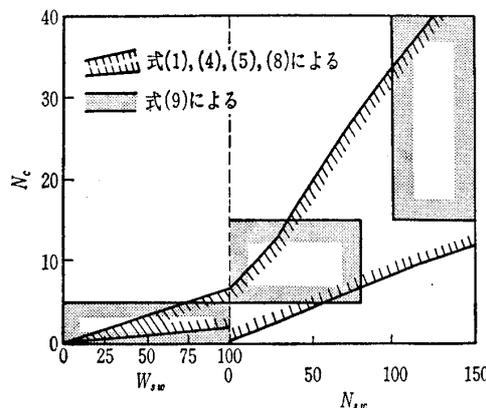
図—8 N_c と W_{sw} , N_{sw} との関係 (粗粒土)



図—10 N_c と W_{sw} , N_{sw} との関係 (細粒土)



図—9 N_c と W_{sw} , N_{sw} との関係 (砂粒土)



図—11 過去の研究によるスウェーデン式サウンディング試験と簡易貫入試験との関係

$$N_c = 0.22 N_{sw} + 0.03 W_{sw} \dots\dots\dots(17)$$

細粒土についてはデータ数が少ないが、

$$N_c = 0.15 N_{sw} + 0.04 W_{sw} \dots\dots\dots(18)$$

が得られた。式(16)~(18)の関係を図—8, 図—9, 図—10に示すが、それぞれの相関係数は、0.79, 0.76, 0.87である。4.1で示した特定盛土の土質は砂粒土に分類されるが、式(17)で示される異なった調査箇所データのよると N_c と W_{sw} , N_{sw} の関係は、式(18)で示される両者の関係とほぼ一致した結果となった。

2.1の過去の研究経過で示した既往の提案式による両試験の関係が図—11に示すようになりかなり幅広いばらつきを示すものであったが、式(16)~(18)の新しい提案式は従来よりはより定量的な評価を与えることになるものと考えられる。

5. 簡易貫入試験による N_c から標準貫入試験の N 値と一軸圧縮強度 q_u の推定式

5.1 N_c から N 値の推定式

標準貫入試験の N 値とスウェーデン式サウンディ

ング試験の W_{sw} , N_{sw} との関係については、2.に示したように稲田¹⁾, 三木²⁾, 上田^{3), 4)}らが求めているが、ここでは幅広い土質について提案する稲田の式を介在させて、 N_c から N 値を推定することにする。

すなわち、 N_c と W_{sw} , N_{sw} の関係は4.によって式(16)~(18)によって与えられたから、これと稲田による W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係を示す式(1), (2)から求めることにする。

$W_{sw} \geq 100$ の場合は、礫粒土については式(16)で $W_{sw} = 100$ とおけば、

$$N_{sw} = -20 + 5 N_c \dots\dots\dots(19)$$

が得られる。一方、式(1)でも同様にして、

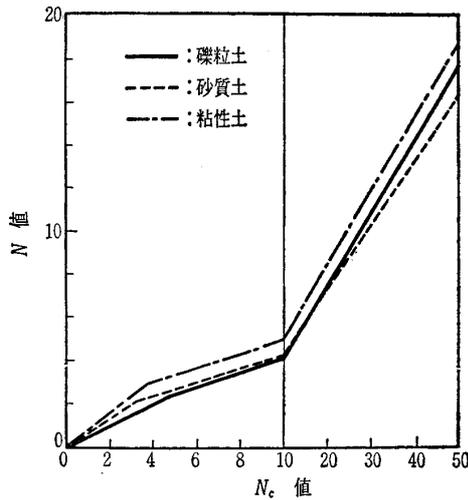
$$N = 2 + 0.067 N_{sw} \dots\dots\dots(20)$$

となるので、これらの両式から礫粒土については、

$$N = 0.7 + 0.3 N_c \text{ (礫粒土)} \dots\dots\dots(21)$$

が得られる。同様に砂質土と粘性土についてはそれぞれ、

$$N = 1.1 + 0.30 N_c \text{ (砂質土)} \dots\dots\dots(22)$$



図—12 N_c 値と N 値の関係

$$N = 1.7 + 0.34 N_c \quad (\text{粘性土}) \dots\dots\dots (23)$$

となる。

$W_{sw} < 100$ の場合についても同様にして求められる。その結果は、

$$N = 0.50 N_c \quad (\text{礫粒土}) \dots\dots\dots (24)$$

$$N = 0.66 N_c \quad (\text{砂質土}) \dots\dots\dots (25)$$

$$N = 0.75 N_c \quad (\text{粘性土}) \dots\dots\dots (26)$$

となる。

式(21)~(26)を図示すると図—12のようになる。これによれば、 N_c がほぼ4以下の場合には式(24)~(26)を用い、4以上の場合には式(21)~(23)を用いれば良いことになる。

5.2 N_c から q_u の推定式

N_c から q_u を推定する場合も稲田による q_u と W_{sw} , N_{sw} の関係式である式(3)と4. で提案した式(18)を用いる。計算の結果は、 $W_{sw} \geq 100$ の場合は

$$q_u = 0.25 + 0.05 N_c \dots\dots\dots (27)$$

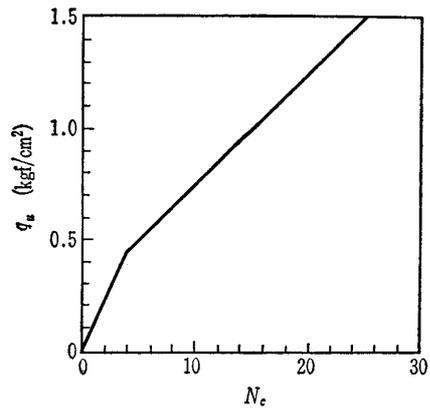
となり、 $W_{sw} < 100$ の場合は

$$q_u = 0.11 N_c \dots\dots\dots (28)$$

が得られるので、これら両者を図示すれば図—13のようになる。これによれば $N_c < 4$ の場合には式(28)を用いることになる。

6. ま と め

降雨による既往崩壊盛土を対象とした鉄道盛土ののり面表層部に着目して、簡易貫入試験とスウェーデン式サウンディング試験を実施し、この両者の関係式を土質別に式(16)~(18)のように提案した。この結



図—13 N_c と q_u の関係

果、簡易貫入試験機によるサウンディング結果は、従来から実施されてきたスウェーデン式サウンディング試験とある程度定量的に関係づけることが可能となった。

また簡易貫入試験による N_c から標準貫入試験の N 値と一軸圧縮強度 q_u の推定式を求めるために上述の成果を稲田の式¹⁾を介在させて、式(21)~(26)を求め、図—12と図—13を提案した。

これらの成果は、作業が比較的容易な簡易貫入試験機を使用して調査を実施する際、従来から行ってきたスウェーデン式サウンディング試験や標準貫入試験の結果と関連づける有益な資料を提供するものである。さらにデータを蓄積してより精度の高い合理的な関係式を提案していきたいと考えている。

文 献

- 1) 稲田：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, 1960.
- 2) 三木：赤土台地における各種サウンディング方法の比較実験とその実用性の検討，土と基礎，特集号，No. 1, 1959.
- 3) 上田：スウェーデン式サウンディングロッドについて，土と基礎，Vol. 5, No. 5, 1957.
- 4) 土質工学会：土質調査法，1982.
- 5) 室町：静的コーンペネトロメーターの軟弱地盤調査への適用に関する実験的研究，鉄道技術研究報告，No. 757, 1971.
- 6) Muromachi: Comparative study of static and dynamic penetration tests currently in use in Japan, Proceeding of the 2nd European Symposium on Penetration Testing/Amsterdam, pp. 297~302, 1982.
- 7) 助砂防・地すべりセンター：斜面調査用簡易貫入試験機取扱い要領，1982.

(原稿受理 1991.7.26)