

## スウェーデン式サウンディング試験と土質力学試験との関連性†

森友宏\*, 土倉泰\*, 関崇夫\*\*

## Relevance of Swedish Weight Sounding test and soil mechanics test†

Tomohiro Mori\*, Toru Tsuchikura\* and Takao Seki\*\*

The purpose of this study is to evolve the Swedish Weight Sounding test (Hereinafter referred to as SWS test) results from the conventional "relative index indicating the hardness of the ground" to "values with clear physical meaning". For this purpose, we analyzed the results of the edge penetration box shear test simulating a SWS test, the tri-axial compression test, and the SWS test using a full-scale embankment. The results indicated that the  $N_{sw}$  value and the torque value in the SWS test were not indicators of soil shear strength but indicators of soil volume compression characteristics. In addition, the shape of the screw point in the SWS test was simulated as "screw", and the acting force was considered from a mechanical engineering point of view. The results showed that the SWS test did not "screw in" the screw point, but penetrated by "compressing" the ground by rotating the screw point.

**Key words** : Swedish Weight Sounding test, Full-scale embankment, Soil volume compression characteristics, Soil shear strength

## 1 はじめに

国内の住宅建築時に必須の地盤調査試験であるスウェーデン式サウンディング試験(以降SWS試験と表記)は、「地盤の硬軟を現す相対的指標」として広く用いられている。また、国内において住宅の新規建築や建て替え時の地盤調査には、SWS試験を実施する定めがあることから、その試験の実施数は莫大である。

近年、学協会内で、そのSWS試験を地盤の沈下量や液状化危険度評価に利用する動きがあるが、本来SWS試験は地盤の沈下量や液状化を評価する試験方法ではない。既往の研究において、SWS試験結果の土質による差異<sup>1)</sup>や、SWS試験結果を標準貫入試験の $N$ 値と関連付ける手法<sup>2)</sup>、地盤の液状化強度と関係つけるための努力<sup>3)</sup>などが行われてはいるものの、SWS試験結果が表現する地盤の物理的意味を裏付ける研究事例は極めて少ない。そこで、本研究ではSWS試験結果を従来の「地盤の硬軟を現す相対的指標」から「物理的意味を明確にした値」へと進化させるために、SWS試験を模擬した室内要素試験結果と、実大盛土を用いたSWS試験結果との関係性の詳細な分析を行う。実際のSWS試験結果と室内要素試験結果を精度良く比較するためには、使用材料の物性・条件の制御が必須であることから、自然地盤ではなく人工の実大盛土を用いる。

本稿では、前橋工科大学 2019 年度重点課題対応研究

における 2 ヶ年計画のうち、1 年目の研究成果に関する報告を行う。

## 2 実大盛土を用いた SWS 試験

## 2・1 密度を管理した実大盛土の築造および試験条件

本研究で用いた砂(群馬県吉岡町産)および砂質土(群馬県伊勢崎市産)の粒径加積曲線を図1に示す。砂は50%粒径が0.65mm程度の中砂、砂質土は0.075mm以下の細粒分が33%含まれる土で、街路樹の植栽等に用いられるものである。また、用いた材料の締固め曲線(E-a法)を図2に示す。

盛土は、前橋工科大学の敷地内において、所定の締固め度となるよう密度を管理して築造した。盛土の概形を図3に、盛土の全景写真を写真1に示す。砂(Dc=85%)、砂質土(Dc=78%)では、バックホウにて材料を40~45cm程度の厚さにまき出し、振動ローラー(重量約700kgf)で締固め、約30cmの厚さとした。盛土の締固め度は、RI(ラジオアイソトープ)式密度測定器でその都度計測を行い、締固め度が所定の値となるまで、均一・入念な締固めを行った。2mの高さを築造するのに、計7層の締固めを行った。砂(Dc=92%)、砂質土(Dc=86%)においては、振動ローラーでは所定の締固め度を達成できなかったため、ランマーで入念に締固めを行った。これらの実大盛土の天端から、表1に示す条件でSWS試験

† 原稿受理 令和2年2月28日 Received February 28, 2020

\* 社会環境工学科 (Department of Civil and Environmental Engineering)

\*\* 建築学科 (Department of Architecture)

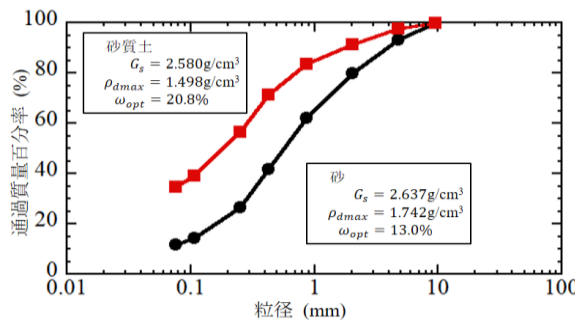


図1 使用した土材料の粒径加積曲線

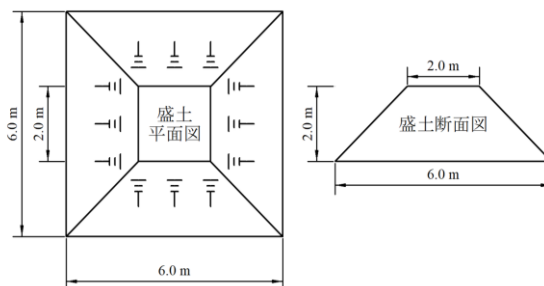


図3 実大盛土の概形図

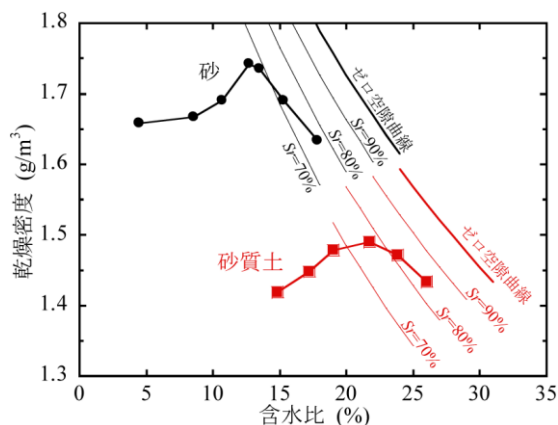


図2 使用した土材料の締固め曲線 (E-a 法)



写真1 築造した盛土 (奥：砂質土，手前：砂)

を行い、 $N_{sw}$ 、トルクを計測した。トルクの計測には KTC 社製のハンディトルク計 (製品名：トルクル 80 N・m) を用いた。

### 2・2 SWS 試験結果

盛土の築造時、RI 式密度測定器により求めた乾燥密度の結果を図 4 に示す。図中の破線は、築造時の目標密度である。均質材料を用いて、厳密な密度管理を行いながら施工したにもかかわらず、盛土の密度は  $0.3 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$  ほどはバラつきが出てしまう。また、締固め度の小さい盛土の方が密度のバラつきの程度が大きい。この事は、締固め度の不十分な盛土ほど、盛土内の不均質性が高まり、地震時や豪雨時の不同沈下や崩壊の危険性を特定するが難しくなる事を示唆している。

次に、盛土の飽和度を変化させた時の  $N_{sw}$  とトルクの例を図 5 に示す。飽和度は盛土への散水・排水によって調整した。図より、 $N_{sw}$  とトルクの値は飽和度にほとんど影響を受けないことがわかる。これより、SWS 試験は、地下水位が浅もしくはは以深であっても、結果に大きな違いは無いといえる。

次に、SWS 試験の先端スクリーポイントの磨耗度の違いによる影響について図 6 に示す。磨耗無は新品 (最大径 33mm)、磨耗大は磨耗限界 (最大径 30mm) の場合を示す。図より、 $N_{sw}$  はスクリーポイントの磨耗度

表 1 SWS 試験の実施条件

| 土質  | 締固め度 (%) | 飽和度 (%) | スクリーポイント |
|-----|----------|---------|----------|
| 砂   | 85       | 小       | 磨耗無      |
|     | 92       | 中       | 磨耗中      |
| 砂質土 | 78       | 大       | 磨耗大      |
|     | 86       | 小       | 磨耗無      |

による変化は小さい一方で、トルクは、摩耗度が大きくなると値が小さくなるのがわかる。スクリーポイントの磨耗限界以内であれば  $N_{sw}$  値に影響は少ないが、磨耗度によって得られるトルク値には差が生じるため注意が必要である。

最後に、締固め度を変化させた時の影響を図 7 に示す。砂質土の  $N_{sw}$  は締固め度に比例して大きくなるが、深度方向には変化が無い。一方、砂の  $N_{sw}$  は締固め度に比例して大きくなることに加えて、深度方向にも大きくなる。この傾向はトルクにも同様のことが言える。土質によってこのような差が生じる要因として、材料の粒度分布が考えられる (図 1 参照)。砂質土は細粒分が 33% 含まれることにより  $N_{sw}$  とトルクは粘着力  $c$  に影響を受けていると考えられる。一方、砂の  $N_{sw}$  とトルクには、締固め度と深度 (拘束圧) に正の相関があることから、せん断抵抗角  $\phi$  に影響を受けていると考えられる。

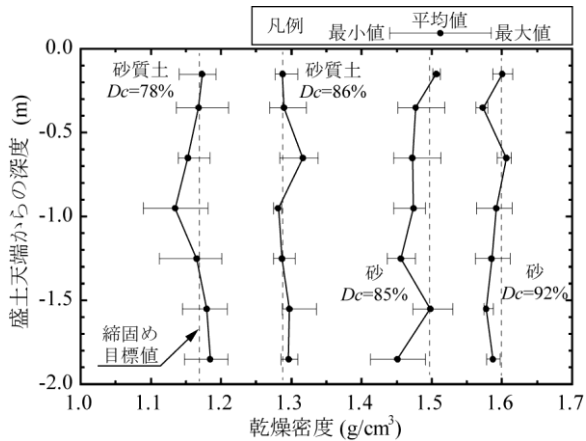


図4 実大盛土の深度-乾燥密度

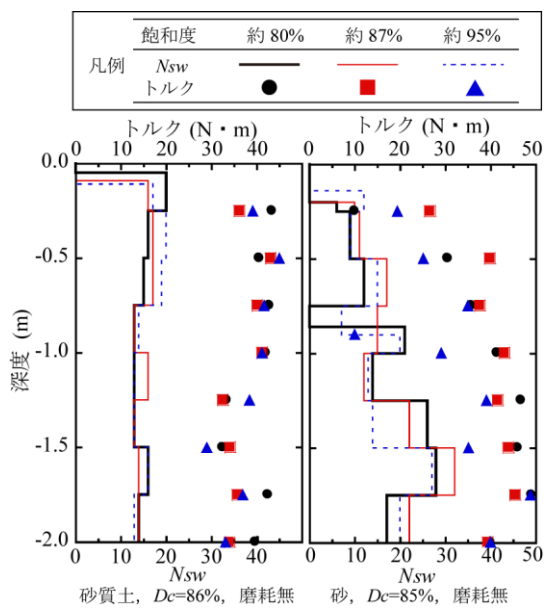


図5 飽和度変化時の  $N_{sw}$ , トルクの深度分布

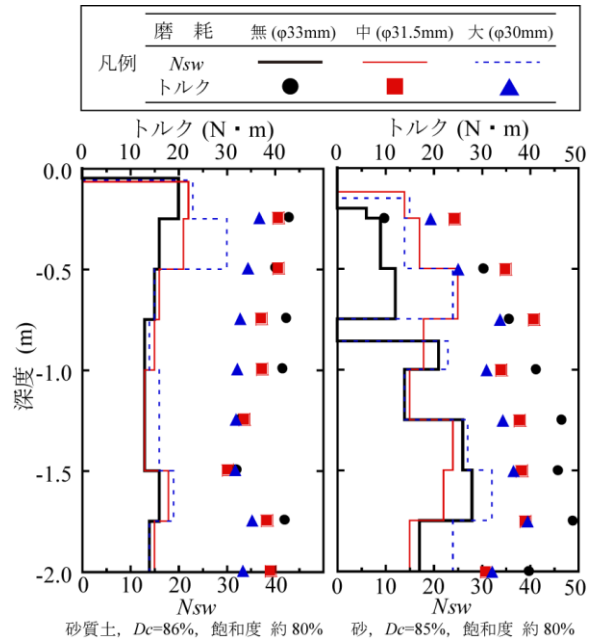


図6 磨耗度変化時の  $N_{sw}$ , トルクの深度分布

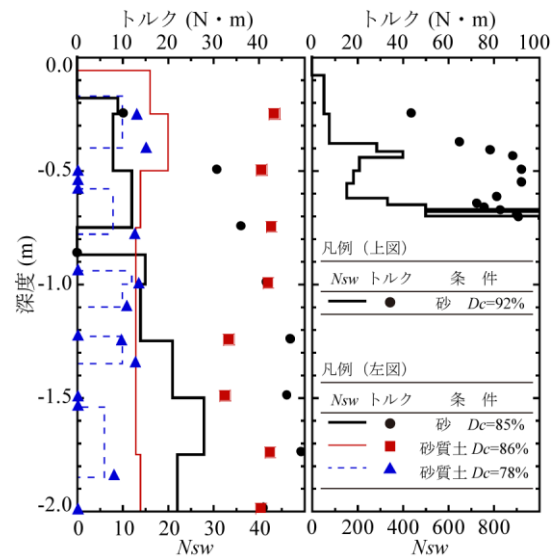


図7 締固め度変化時の  $N_{sw}$ , トルクの深度分布

2・3 実大盛土を用いた SWS 試験結果に関する知見  
密度を管理した実大盛土を用いた SWS 試験結果から、  
次のような知見が得られた。

- (1) 盛土の築造時、細心の注意を払っても乾燥密度には  $0.3 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$  の差が生じる。締固め度の小さい盛土の方が密度のバラツキの程度が大きい。
- (2) 飽和度の違いは、 $N_{sw}$ , トルクに大きな影響を与えない。したがって、地下水位以浅, 以深であっても、 $N_{sw}$ , トルクに影響は小さい。
- (3) スクリューポイントのエッジの磨耗の程度は、使用限界までの範囲であれば、 $N_{sw}$  には影響はそれほど表れないが、トルクには影響が表れる。
- (4) 土の締固め度の違いは、砂質土よりも砂の方が影響は大きい。砂では深さ方向に拘束圧が大きくなるに従って  $N_{sw}$ , トルクも大きくなり、その増加割合は

締固め度が大きくなると急増する。一方、砂質土では深さ方向に拘束圧が大きくなっても、 $N_{sw}$ , トルクともに大きな変化は無い。

### 3 室内土質試験と SWS 試験結果との関連性

#### 3・1 SWS 試験における回転・貫入機構

SWS 試験の過程を考えると、(1)「おもり载荷による先端スクリューポイントのエッジ部分の地盤への貫入」と、(2)「貫入したエッジの回転による地盤のかき取り」の2段階に分けることができる(図8参照)。半回転あたりのスクリューポイントによる地盤の掘進長は、1kNの貫入用おもりを载荷した時にスクリューポイントのエ

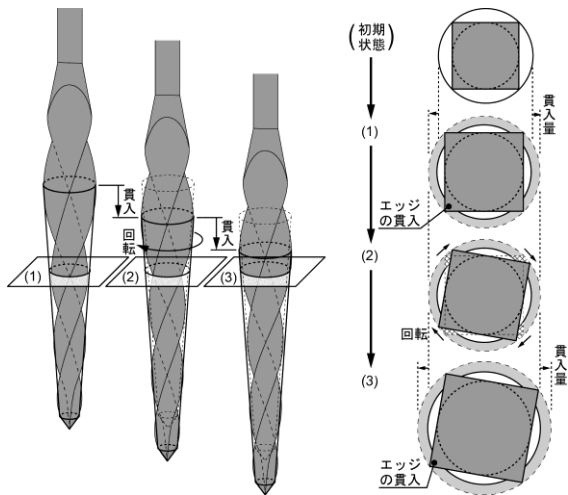


図8 SWS試験の回転・貫入機構の考え方

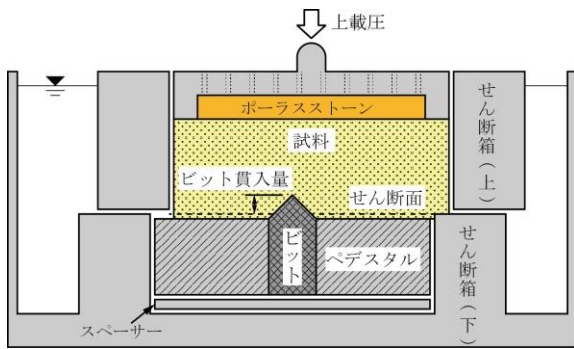


図9 エッジ貫入状態での一面せん断試験模式図

ッジ部分がどれだけ地盤に貫入しているかに左右される事から、上記(1)はSWS試験における $N_{sw}$ 値に関する要素であると考えられる。また、上記(2)における地盤のかき取り抵抗は、SWS試験における回転トルクに関係する要素と考えられる。

本章では、SWS試験における、地盤に貫入したエッジの地盤のかき取りを直接的に模擬した(a)「エッジ貫入一面せん断試験」、エッジの回転によりかき取られる土のせん断強度を求める(b)「静的三軸試験」を行って、土の力学特性を求め、これら室内試験結果と実大盛土におけるSWS試験結果との比較を行うことで、SWS試験の力学的意味を明らかにしようとする。

なお、スクリーポイントのエッジ部分の地盤への貫入を模擬した(c)「エッジ貫入量計測試験」に関する検討結果は既報<sup>4)</sup>を参照されたい。

### 3・2 エッジ貫入一面せん断試験結果とSWS試験結果との比較

SWS試験でスクリーポイントを回転させたとき、地盤に貫入したエッジが地盤をかき取る現象を模擬したのが、図9に示すエッジ貫入一面せん断試験装置である。スクリーポイントのエッジ部分が地盤に回転・貫入することを模擬しているため、せん断箱の下半分には試料

表2 一面せん断試験の実験条件

| 土質  | 拘束圧<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 締固め度<br>(%) | 飽和度<br>(%) |
|-----|-----------------------------|-------------|------------|
| 砂   | 5.91                        | 85          | 100        |
| 砂質土 | 17.76                       | 98          |            |

表3 上載圧と残留鉛直変位の関係

| 上載圧<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 土質   | 砂質土         |       | 砂    |       |
|-----------------------------|------|-------------|-------|------|-------|
|                             | 締固め度 | 85%         | 85%   | 98%  |       |
|                             | 貫入量  | 4.5mm       | 4.5mm | 2mm  | 4.5mm |
| 5.91                        |      | 0.03mm(膨張)  | 0.17  | 1.25 | 1.17  |
| 17.76                       |      | -0.14mm(収縮) | 0.16  | 1.05 | 0.91  |

表4 上載圧と残留せん断強度・ピークせん断強度

| 種別       | 上載圧<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 土質   | 砂質土   |       | 砂    |       |
|----------|-----------------------------|------|-------|-------|------|-------|
|          |                             | 締固め度 | 85%   | 85%   | 98%  |       |
|          |                             | 貫入量  | 4.5mm | 4.5mm | 2mm  | 4.5mm |
| 残留せん断強度  | 5.91                        |      | 7.5   | 13    | 10.5 | 19.5  |
| ピークせん断強度 | 17.76                       |      | 19    | 30    | 30.5 | 33    |
| ピークせん断強度 | 5.91                        |      | 8     | 13    | 40   | 38.5  |
| ピークせん断強度 | 17.76                       |      | 19    | 30    | 58   | 59    |

(単位: kN/m<sup>2</sup>)

を入れず、ステンレス製のペDESTアルと、スクリーポイントのエッジに相当するステンレス製ビットを取り付ける。ビットの先端角は90度、高さはビットを換装することにより0~4.5mmに変化させることができる。試料部分は直径60mm、高さ20mmである。また、地下水水面以下を想定し、飽和状態で試験を行った。せん断速度は0.2mm/分とした。試験条件を表2に示す。

表3, 4にエッジ貫入一面せん断試験結果の一覧を示す。結果より、上載圧と残留せん断強度は比例すること、上載圧が大きくなるとせん断時の体積膨張量が小さくなる事が分かる。また、締固め度が大きくなるとせん断時の膨張量は小さくなる。これは、通常的一面せん断試験と同様の特徴を有しているといえる。

エッジ貫入一面せん断試験の結果を踏まえながら、図10(図7の再掲)で、SWS試験の深度における $N_{sw}$ 、トルクの分布を再び考えてみる。全体の傾向として、 $N_{sw}$ とトルクの傾向は一致しており、 $N_{sw}$ が大きくなるとトルクも大きくなる。しかし、深さ方向に $N_{sw}$ 、トルクが増加しているのは、砂(Dc=85%, 92%)の方だけであり、砂質土(Dc=78%, 86%)では深さ方向の変化は認められない。SWS試験におけるスクリーポイントの回転・貫入時の、トルクの増減は、貫入したスクリーポイントのエッジ部分の回転により生じる地盤のせん断による地盤の体積変化に左右される。せん断時の体積変化は、せん断強度にも影響を及ぼす。再度、表3を見直してみると、砂質土(Dc=85%)はせん断時に体積収縮傾向を示していることから、スクリーポイントの貫入によるトルクの増加がない、もしくは小さかったものと考えられる。

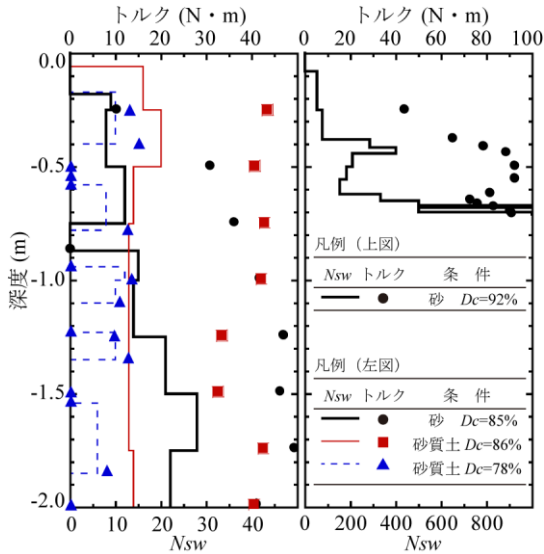


図 10 深さ方向の  $N_{sw}$ , トルクの関係 (再掲)

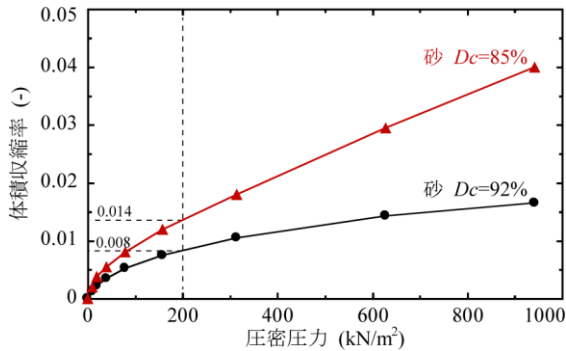


図 11 圧密圧力と体積圧縮量の関係

一方、砂 ( $D_c=85\%$ ,  $98\%$ ) ではせん断時に体積膨張傾向を示していることから、トルクの増加が生じたものと考えられる。一方、 $N_{sw}$  はスクリーポイントが 1m 貫入するのに要する半回転数であり、回転に伴う貫入量 (掘進長) は 1kN の重錘を載せた時の、地盤へのスクリーポイントのエッジの食い込み量に関連する値であると考えられる。このことを示すために、圧密による体積圧縮率 (密度変化) の一例を図 11 に示す。1kN の重錘を載せた時のスクリーポイント表面の法線方向に加わる圧力は約  $200\text{kN/m}^2$  前後と算出される (詳細割愛) が、圧密圧力  $200\text{kN/m}^2$  における体積収縮量は、砂 ( $D_c=85\%$ ) の 1.4% に対し、砂 ( $D_c=92\%$ ) では 0.8% である。同じ圧力に対して、エッジの食い込み量に差が出ることから、 $N_{sw}$  にも違いが生じるものと考えられる。

### 3・3 静的三軸試験結果と SWS 試験結果との比較

SWS 試験で先端スクリーポイントを回転させる時、地盤に貫入しているスクリーポイントのエッジ周辺では、せん断破壊が生じているものと考えられる。そこで、SWS 試験を実施する状況に対応した条件を用いて、静的三軸圧縮試験を行った。試験条件を表 5 に示す。供試体

表 5 静的三軸圧縮試験の条件

| 土質            | 拘束圧 [kPa]     | 締固め度 $D_c$ [%] | 飽和度 [%] |    |
|---------------|---------------|----------------|---------|----|
| 砂             | 8(G.L-0.47m)  | 85             | 60      |    |
|               | 16(G.L-0.95m) |                |         |    |
|               | 32(G.L-1.90m) |                |         |    |
|               | 8(G.L-0.51m)  | 92             |         | 80 |
|               | 16(G.L-1.02m) |                |         |    |
| 32(G.L-2.03m) | 砂質土           | 78             | 60      |    |
| 8(G.L-0.44m)  |               |                |         |    |
| 16(G.L-0.89m) |               |                |         |    |
| 32(G.L-1.78m) |               | 86             |         | 80 |
| 8(G.L-0.43m)  |               |                |         |    |
| 16(G.L-0.91m) |               |                |         |    |
| 32(G.L-1.81m) |               |                |         |    |

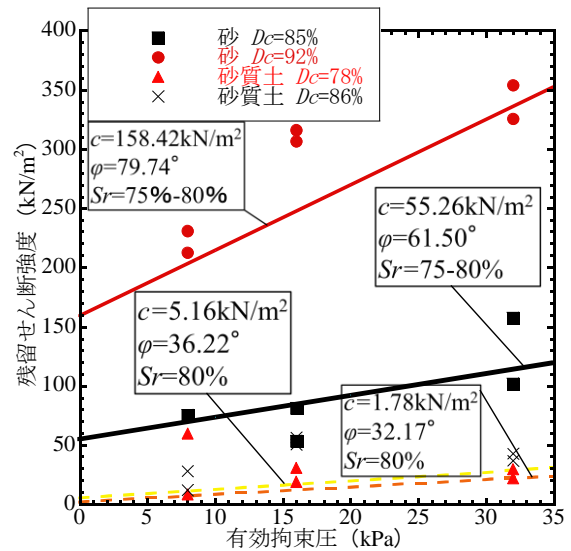


図 12 三軸圧縮試験から求めた、砂の残留せん断強度-有効拘束圧の関係

寸法は直径 5cm、高さ 10cm で作成し、試験は不飽和で行い、拘束圧、密度 (締固め度)、飽和度を制御した。せん断は非排水で行い、軸変位制御 (1%/min) の単調圧縮とした。

SWS 試験は、先端スクリーポイントのエッジ部分で土をかき取りながら回転・貫入するため、回転の初期段階でピーク強度は過ぎてしまい、その後は残留せん断強度となると推測している。よってここでは、SWS 試験から得られる  $N_{sw}$ 、トルクと、三軸圧縮試験から得られる残留せん断強度との関係性について論ずる。SWS 試験は深さ方向に連続した値が得られる一方で、三軸圧縮試験では、離散的にしか値が得られない。三軸圧縮試験結果を深さ方向に連続性を持たせるため、三軸圧縮試験で得られた残留せん断強度のプロットから、拘束圧に応じた推定残留せん断強度を求めた。結果を図 12 に示す。この図から、 $D_c=85\%$ 、 $D_c=92\%$  では、供試体作成時にタンピング締固めを行っていること、また不飽和であることから粘着力  $c$ 、せん断抵抗角  $\phi$  が大きいことがわかる。

また、拘束圧 (深さ) を基準とした SWS 試験と三軸圧縮試験との比較を行った。推定残留せん断強度と  $N_{sw}$ 、

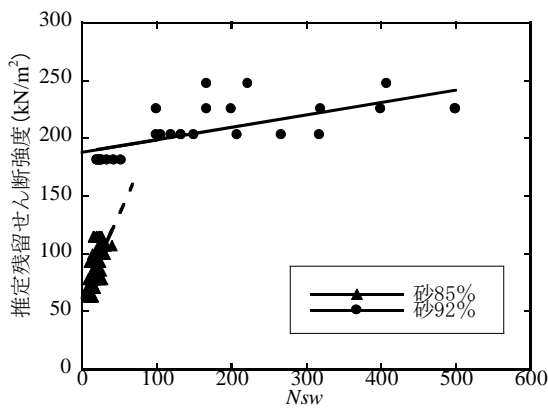


図 13 砂の  $N_{sw}$ —推定残留せん断強度の関係

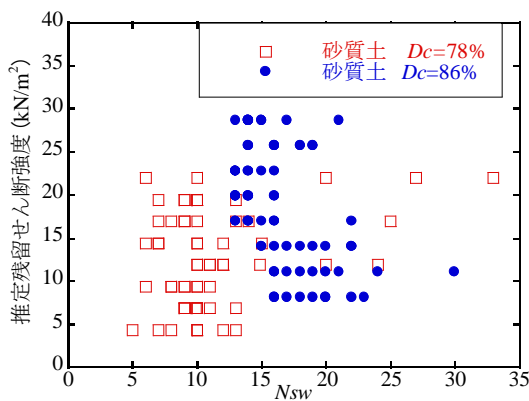


図 14 砂質土の  $N_{sw}$ —推定残留せん断強度の関係

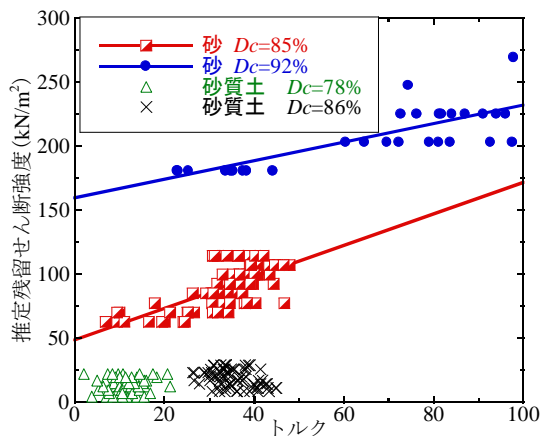


図 15 トルク—推定残留せん断強度の関係

トルク値との関係を図 13, 図 14, 図 15 に示す。図 13 を見ると,  $D_c=85\%$  と  $D_c=92\%$  はどちらも  $N_{sw}$  が大きくなるにつれて, 推定残留せん断強度も大きくなっていることがわかる。  $D_c=92\%$  で推定残留せん断強度に対して  $N_{sw}$  が急に大きくなるのは, 締固め度が大きいことにより, SWS 試験のスクリーポイント貫入時に, 土が体積膨張しようとするからだと考えられる。図 14 を見ると,

$N_{sw}$  と残留せん断強度との関係性は見られない。  $D_c=78\%$ ,  $D_c=86\%$  の砂質土では強い締固めを行っていないため, 図 12 中の  $c$ ,  $\varphi$  もそれほど大きくないと考えられる。図 15 を見ると, トルクも,  $N_{sw}$  と同様に, 残留せん断強度との関係性が見られるのは  $D_c=85\%$  と  $D_c=92\%$  のみであるが, 締固めの程度に応じたトルクの増加の傾向は砂, 砂質土ともに見られる。

### 3・4 現時点におけるまとめ

SWS 試験と各種室内力学試験結果を比較したところ, SWS 試験結果は地盤の密度, 粘着力, せん断抵抗角と関連を示すものの, SWS 試験の回転・貫入メカニズムを考慮すると, 最も関連の深い特性は, 地盤の体積変化量であると示された。これより, SWS 試験におけるトルクはせん断時の体積変化特性を,  $N_{sw}$  は圧密による体積変化特性を強く反映していると推察された。

また, SWS 試験における回転・貫入機構も, 当初に想像していた機構とは異なり, (1)「おもり载荷による先端スクリーポイントのエッジ部分の地盤への貫入」と, (2)「貫入したエッジの回転による地盤の拡幅(押し広げ)」の 2 段階によるものであると推察された。

## 4 ネジの力学から見た SWS 試験の回転・貫入特性

### 4・1 ネジの力学と先端スクリーポイントの形状

著者らが大学構内に築造した密実な実大盛土(砂, 締固め度  $D_c=92\%$ )において, 汗だくになりつつ手動でスウェーデン式サウンディング試験(SWS 試験)を行っている最中, ずっと疑問に思っていたことがある。

#### 【疑問 1】

ネジのような先端スクリーポイントを回転・貫入させているが, 果たして, この貫入機構はどのようなものだろうか? 回転によるねじ込み? 孔壁の押し広げ?

#### 【疑問 2】

密な砂において, 回転トルク 60 N・m を超えると手応えが変わり, 微振動とともに「クッククック」「ポクポク」という回転の感触になる。材料の砂は均質であるにもかかわらず, この感触の変化は何だろうか?

通常の SWS 試験では  $W_{sw}$ ,  $N_{sw}$ , トルクのデータを機械的に処理し, 地盤の硬軟を把握することに注力してきたが, 本章では, 上記 2 点の疑問を解決するべく, SWS 試験の先端スクリーポイントの形状を「ネジ」に見立て, 機械工学的見地から先端スクリーポイントに働く力の見直しを行った結果を示す。先端スクリーポイントの形状から導かれる貫入特性を明らかにすることで, SWS 試験とは地盤の「なに」を求めているのかを, いま一度考えるための材料を提供したい。

SWS 試験の先端スクリーポイントは, 四角錐の槍の穂先を捻ったような独特の形状をしている(図 16 参照)。このスクリーポイントを地盤に回転・貫入させる様子は, ネジ(特にタッピングビスだろうか)をねじ込む様子を彷彿とさせる。そこで, スクリューポイントをネジに見立て, ネジの力学体系を用いて SWS 試験中のスクリーポイントに働く力を推察してみることにする。

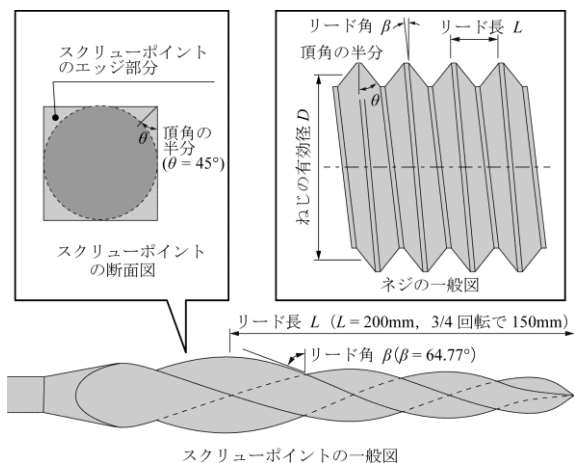


図 16 ネジとしてのスクリーポイントの諸量

表 6 本検討における各種条件

| 項目    | 記号                       | 値           |
|-------|--------------------------|-------------|
| リード角  | $\beta$                  | 64.77°      |
| リード長  | $L$                      | 200 mm      |
| 頂角の半分 | $\theta$                 | 45°         |
| 有効径   | $D$                      | 30 mm       |
| 摩擦係数  | $\mu (\mu_1 = \mu_2)$    | 0.364~0.700 |
| 摩擦角   | $\rho (\rho_1 = \rho_2)$ | 20°~35°     |

台形ネジを回転させた時に働く力を求めるには、図 16 に示すリード角  $\beta$ 、リード長  $L$ 、ネジ山の頂角の半分  $\theta$  の値が必要になる。これらの諸量をスクリーポイントにあてはめた時、 $\beta = 64.77^\circ$ 、 $L = 200\text{mm}$ 、 $\theta = 45^\circ$  となる。ネジの軸を回転させた時に、トルクが推力に変換される割合を正効率  $\eta_p$  といい、一方でネジ軸を押した時にトルクに変換される割合を逆効率  $\eta_n$  という。正効率  $\eta_p$  および逆効率  $\eta_n$  を求める式を以下に示す。

$$\eta_p = \frac{1 - \tan \beta \cdot \tan \rho_1}{1 + (\tan \rho_1 / \tan \beta)} \quad \text{式(1)}$$

$$\eta_n = \frac{1 - (\tan \rho_2 / \tan \beta)}{1 + \tan \rho_2 \cdot \tan \beta} \quad \text{式(2)}$$

$$\tan \rho_1 = \mu_1 / \cos \theta, \tan \rho_2 = \mu_2 / \cos \theta, \tan \beta = L / \pi D$$

ここで、 $\rho_1$  は正摩擦角、 $\rho_2$  は逆摩擦角、 $\mu_1$  は正摩擦係数、 $\mu_2$  は逆摩擦係数、 $D$  はネジの有効径である。

島ら<sup>5)</sup>による鋼板と粗砂の摩擦係数は  $\mu = 0.6$  程度であることから、 $\mu_1 = \mu_2$  とし、摩擦角は  $\theta = \tan^{-1} \mu$  より  $\theta = 20^\circ \sim 35^\circ$  ( $\mu = 0.364 \sim 0.700$  に相当) の範囲について検討を行う。また、スクリーポイントは錐形ではあるが、先端に向けての絞りの角度が  $5^\circ$  程度のため、有効径  $D = 30\text{mm}$  の円筒形ネジとして計算を行う。本検討における各種条件を表 6 にまとめる。

式(1)、式(2)を用いて、SWS 試験で 1.0kN の重錘を載せた時に先端スクリーポイントに生じるトルク（逆作動トルク値） $T_n$ 、および、SWS 試験でトルクを与えて回転させた時に先端スクリーポイントに生じる軸力（正作動抵抗値） $F_p$  を求める。 $T_n$  と  $F_p$  を求める式を以下に示す。

$$T_n = \frac{F_n \cdot L \cdot \eta_n}{2\pi} \quad \text{式(3)}$$

$$F_p = \frac{2\pi \cdot \eta_p \cdot T_p}{L} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $F_n$  は重錘の重さ（軸力）、 $T_p$  は回転トルクである。

#### 4・2 先端スクリーポイントに生じる力の算出

前述のネジの力学（式(1)および式(2)）を用いて、リード角  $\beta$  と摩擦角  $\rho$  を変化させた時の、正効率  $\eta_p$  と逆効率  $\eta_n$  との関係を図 17 に示す。スクリーポイントのリード角  $\beta = 64.77^\circ$  を見てみると、摩擦角  $\rho$  が  $20^\circ \sim 35^\circ$  における正効率  $\eta_p$  は負の値を示す。これは、SWS 試験では回転を加えようとしてトルクをかけると、スクリーポイントには「浮き上がろうとする力」が働くことを意味する。一般的なネジのリード角は数度であるので、回転トルクは「ねじ込む」方向の推力に変換される。一方、摩擦角  $\rho = 20^\circ \sim 35^\circ$  における逆効率  $\eta_n$  は正の値をとり、なおかつ、摩擦角  $\rho = 30^\circ$  においては逆効率の最大値を示している。これは、SWS 試験で重錘を載せると時計回りのトルクが発生し、土の摩擦角として最も一般的に用いられる摩擦角  $\rho = 30^\circ$  において、重錘の力が最も効率良く回転トルクに変換される事を意味する。これらの事を勘案すると、SWS 試験の先端スクリーポイントの形状は、機械工学的に計算され尽くした形状なのではないかと感じられる。

次に、式(1)および式(4)を用いて、SWS 試験でトルクを与えて回転させた時に、先端スクリーポイントに生じる軸力（正作動抵抗値） $F_p$  を土の摩擦角に応じて求めたものを図 18 に示す（計算条件は表 6 を参照）。トルク値と回転に要する力加減のイメージとしては、40 N・m であれば容易にハンドルを回せるが、60 N・m になると一般男性が腕の力で回せる限界である。80 N・m ともなると、SWS 試験のロッドを垂直に維持しながら回転させるためには、鋼管パイプなどを用いたハンドル長の延長が必要であった。摩擦角  $\rho = 30^\circ$  においては、与えるトルクが 60 N・m になると  $F_p$  が 1.0kN（浮き上がろうとする力）となり、重錘の重さ 1.0kN を相殺することから、スクリーポイントの貫入が困難になるものと考えられる。冒頭で提示した「回転トルク 60 N・m を超えた時の手応え・微振動の変化」は、スクリーポイントの浮き上がりに起因している可能性がある。また、図 18 の結果は、摩擦角  $\rho = 35^\circ$  のような礫混じり土や、かなり固い土では、礫当たりが無くとも試験開始後に早々に貫入できなくな

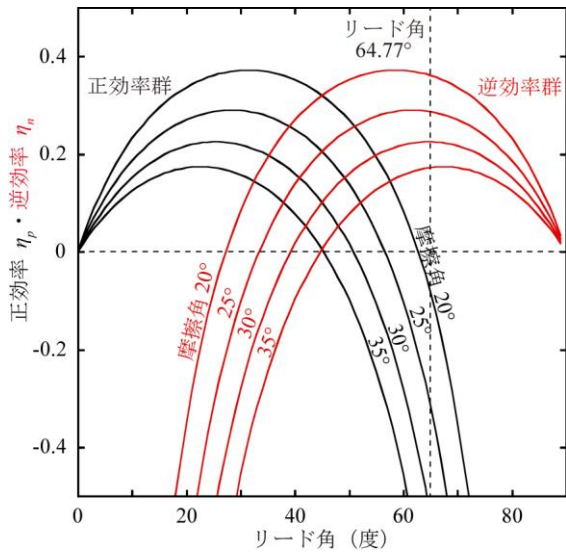


図 17 リード角と摩擦角を変化させた時の効率

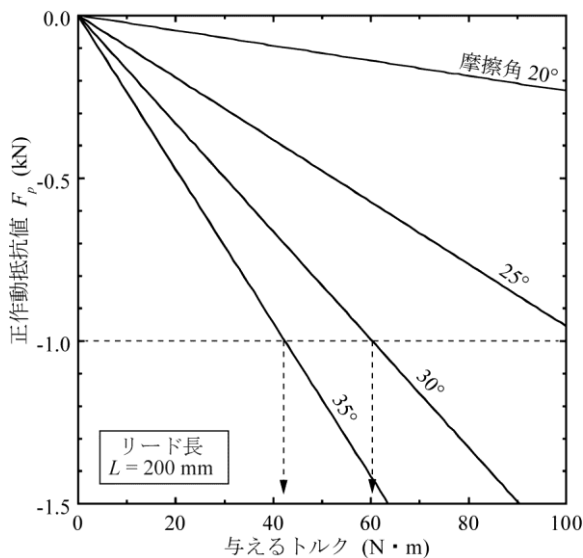


図 18 エッジ貫入量計測試験結果

る経験と符合する。一方、摩擦角  $\rho = 20^\circ$  や  $25^\circ$  のような緩い土、柔らかい土では、与えられるトルク値はせいぜい  $40 \text{ N}\cdot\text{m}$  程度であることから、重錘の重さ  $1.0 \text{ kN}$  の相殺は生じず、貫入が容易に行えることを示唆している。

#### 4・3 SWS 試験の回転・貫入特性に関するまとめ

機械工学的見地から「ネジ」の力学を用いて、SWS 試験の先端スクリーポイントの形状から導出される、試験中に先端スクリーポイントに加わる力の分析を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) SWS 試験の先端スクリーポイントの形状の場合、回転トルクを加えると「浮き上がろうとする力」が生じる。
- (2) 回転トルクを加えたときの「浮き上がろうとする力」は、摩擦角の大きさに影響を受け、摩擦角の大きい固い土ほど「浮き上がろうとする力」が大きくなり、

重錘の重さを相殺するため、貫入が困難になる。

- (3) 先端スクリーポイントは、摩擦角  $30^\circ$  において重錘の力が最も効率良くトルクに変換されるよう設計されている。

以上の知見をまとめると、SWS 試験は、いわゆる「ネジ」のように、回転トルクを推力に変換して地盤に「ねじ込む」ものではないといえる。与える回転トルクは主に「回転」のために用いられることから、SWS 試験とは、先端スクリーポイントの回転によって孔壁を押し広げ、その結果として下方に貫入していく試験であることが示唆された。

## 5 結論

本研究では、均質の土質材料を用いて密度を厳密に管理した実大盛土における SWS 試験を実施し、この結果と室内土質試験結果との比較・分析を行い、SWS 試験結果が表現する地盤の物理的意味を明らかにする試みを行った。その結果、SWS 試験におけるトルクはせん断時の体積変化特性を、 $N_{sw}$  は圧密による体積変化特性を強く反映する値であると推察された。

また、SWS 試験の先端スクリーポイントの形状を機械工学の見地から見直して、SWS 試験の回転・貫入メカニズムを考察した。その結果、SWS 試験における回転・貫入メカニズムは、地盤への先端スクリーポイントの「ねじ込み」では無く、先端スクリーポイントの回転による孔壁拡張の結果として下方に貫入することが示された。この事は、前述の SWS 試験結果の  $N_{sw}$  とトルクは地盤の体積変化特性を強く反映するという結果を補強するものである。

## 謝辞

本研究は、前橋工大学 2019 年度重点課題対応研究費の助成をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 田村昌仁, 藤井衛, 新納秀樹, 奥田悟, 安川郁夫, 杉浦弘忠, 安枝政昭, スウェーデン式サウンディング試験結果に及ぼす影響要因の評価(その 3:トルクの測定から見た土層の評価), 第 37 回地盤工学研究発表会(大阪) (2002).
- 2) 藤井衛, 田村昌仁, 伊集院博, 小規模建築物の地盤を対象としたスウェーデン式サウンディング試験方法の評価と問題点, 日本建築学会構造系論文集 第 557 号, pp.121-128 (2002).
- 3) K. Kumada, N. Sako, S. Shimomura, T. Adachi & T. Hirade, Correlation between Liquefaction Resistance and Penetration Resistance of Swedish Weight Sounding Tests, Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.773-776 (2017).
- 4) 森友宏, スウェーデン式サウンディング試験結果の力学的意味, 第 54 回地盤工学研究発表会(大宮) (2019).
- 5) 島 昭治郎, 室 達朗, 鋼板の砂質土に対する摩擦および摩擦特性, 土木学会論文集, Vol.157, pp.42-53 (1968).