

SWS 試験の測定値が示す地盤工学上の意味†

森友宏*, 土倉泰*, 関崇夫**

Geotechnical Meaning of Test Measurements of the Screw Weight Sounding 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 the 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 consolidation test, the edge penetration box shear test simulating the SWS test, and the SWS tests using the full-scale embankment. As a result, it was shown that N_{sw} values of the SWS test are related to the volume compression characteristics of the soil, and that torque values of the SWS test can be estimated by shear force of the edge penetration box shear test. Since these laboratory tests are conducted by controlling the degree of soil compaction, N_{sw} values and torque values of the SWS test can be associated with the degree of soil compaction. Based on these findings, it was shown that the SWS test results could be used for liquefaction risk assessment and ground subsidence prediction using the degree of soil compaction as an index.

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は、SWS 試験結果の土質による差異¹⁾や、SWS 試験結果を標準貫入試験の N 値と関連付ける手法²⁾に関する研究が行われている。また、スクリーポイントの回転トルクと粘性土の非排水せん断強さ³⁾とを関連付ける研究⁴⁾や、地盤の液状化強度と関係つけるための努力⁵⁾などが行われてはいるものの、SWS 試験結果が表現する物理的意味を裏付ける研究事例は極めて少ない。

地盤の沈下量推定や液状化危険度判定を行うためには、原位置地盤調査によって地盤の締固めの程度を把握することが必須となる。SWS 試験からは、重錘荷

る貫入に関する値 W_{sw} 、スクリーポイントの回転貫入量に関する値 N_{sw} 、スクリーポイントの回転抵抗に関する値であるトルクの値が得られるが、これらの値は

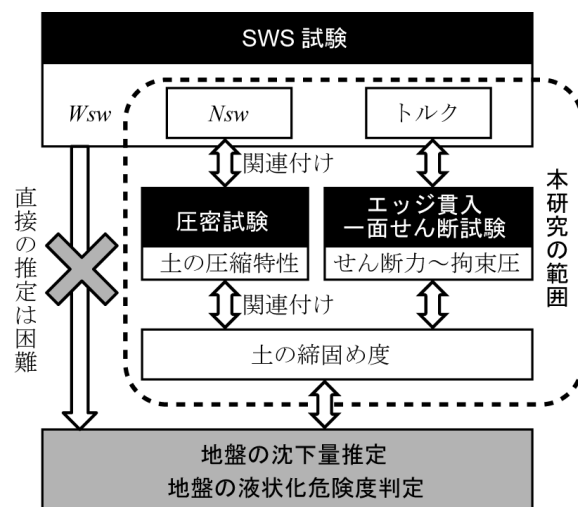


図 1 本研究の位置付け

† 原稿受理 令和3年2月26日 Received February 26, 2021

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

** 建築学科 (Department of Architecture)

SWS 試験の中で閉じてしまっている独立した値として取り扱われ、土質力学や地盤工学の力学体系と関連付けられていない。そのため、SWS 試験結果は、地盤の硬軟を表す相対指標程度としての値しか与えられず、ゆえに SWS 試験結果が積極的に設計に反映されることもなかった。

そこで、本研究ではこれらの反省点を踏まえ、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 試験結果がもたらされるまでの力学的過程を明らかにすることで、SWS 試験結果と土の締固め度を関連付けることを目的として研究を進める。これにより、SWS 試験結果を用いて地盤の沈下量推定や液状化危険度判定を行うための基礎が構築される。

N_{sw} 値～土の圧縮特性～土の締固め度の関係を把握するために、SWS 試験結果と圧密試験結果とを比較・分析する。また、トルク値～せん断力～土の締固め度の関係を把握するために、SWS 試験結果とエッジ貫入定体積一面せん断試験の結果とを比較・分析する(図 1 参照)。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。

2 地盤材料と実大盛土

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 2 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 3 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 4 に、盛土の全景写真を写真 1 に示す。砂(Dc=80%, 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=82%, 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 試験を行い、 N_{sw} 値、トルク値を計測した。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 実大盛土の乾燥密度の分布

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 5 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

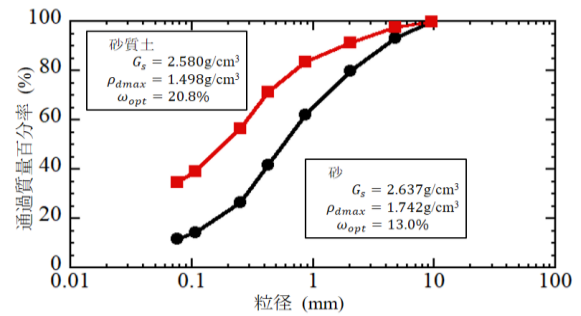


図 2 使用した土材料の粒径加積曲線

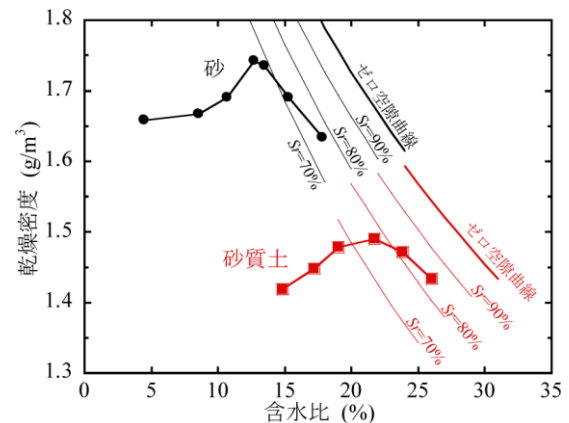


図 3 使用した土材料の締固め曲線 (E-a 法)

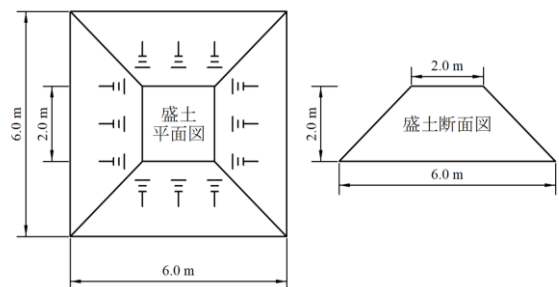


図 4 実大盛土の概形図



写真 1 築造した盛土(奥: 砂質土, 手前: 砂)

表 1 SWS 試験の実施条件

土質	締固め度 (%)	スクリーポイントの摩耗	重錘の重さ (kN)
砂	80	摩耗(無)	0.25
	85		
	92		
砂質土	78	摩耗(中)	0.50
	82		
	86		

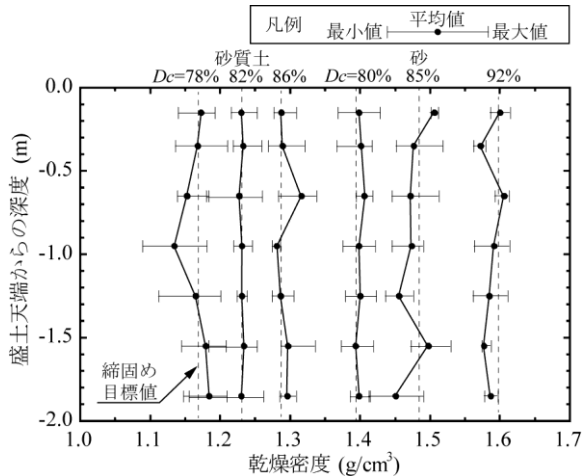


図 5 実大盛土の深度～乾燥密度

ら施工したにもかかわらず、盛土の乾燥密度は最大で $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 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、締め固め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ことが難しくなる事を示唆している。

3 土の圧縮特性と N_{sw} 値との関係

3・1 実大盛土における SWS 試験の N_{sw} 値

実大盛土を用いて実施した SWS 試験のうち、砂質土 ($D_c=86\%$) と砂 ($D_c=85\%$) の結果を図 5 に示す。実大盛土の締固め度の実測平均値は、砂では目標値 $D_c=85\%$ に対して実測平均値 $D_c=84.8\%$ 、砂質土では目標値 $D_c=86\%$ に対して実測平均値 $D_c=86.4\%$ である。

重錘は 1.0kN 载荷、スクリーポイントは新品で摩耗は無い。砂質土 ($D_c=86\%$) における N_{sw} 値は盛土全域にわたって 15 程度、砂 ($D_c=85\%$) は深さが深くなるにつれて N_{sw} 値が少しずつ大きくなっているものの、平均すれば 20 程度である。

3・2 圧密試験による土の体積圧縮特性の把握

SWS 試験のスクリーポイントのエッジがどのくらい地盤に貫入するか、すなわち地盤がどれだけ体積圧縮するかが N_{sw} 値に大きく影響を及ぼす。そのため、地盤の初期締固め度～体積圧縮率～圧密応力の関係を把握する必要がある。ここでいう圧密応力とは、スクリーポ

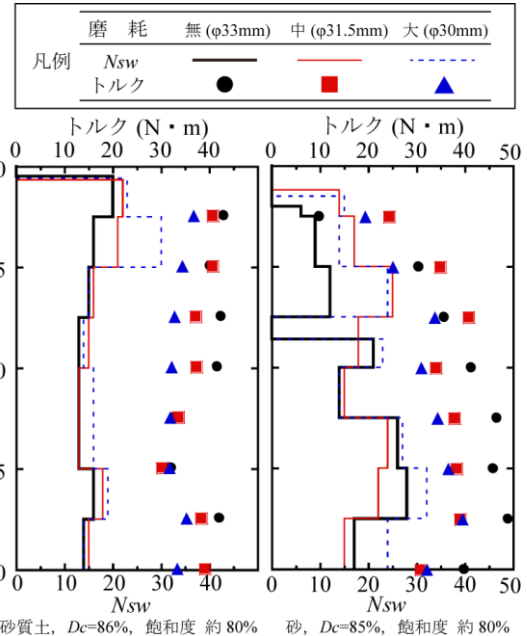


図 6 磨耗度変化時の N_{sw} , トルクの深度分布

イントのエッジが地盤に食い込んで、地盤に対して载荷する圧力のことで、エッジの地盤への食い込み量によって圧力は変化する (付録 II を参照)。

圧密供試体は最適含水比で作成した。所定の締固め度 (実大盛土と同じ締固め度) にするために圧密リングの体積 56.55cm^3 を用いて土と水の配合を計算し混合させて試料を作った。圧密リングとガイドリングをつけた状態の圧密試験機に試料を少しずつ入れて締め固め、全体に一樣に締め固めた。供試体は、砂と砂質土の 2 種類、初期締固度は、砂が 75, 80, 85, 92% の 4 種類、砂質土が 75, 80, 86, 92% の 4 種類、計 8 ケース作製した。使用する砂、砂質土の最大乾燥密度はそれぞれ $1.742\text{g}/\text{cm}^3$, $1.498\text{g}/\text{cm}^3$ で最適含水比はそれぞれ 13.00%, 20.80% である。圧密試験により得られた圧密応力に応じた締固め度と体積圧縮率との関係を図 7 に示す。

3・3 土の体積圧縮量と N_{sw} 値との関係

スクリーポイントが貫入して周辺の土を押しつけた時、周辺地盤への体積変化の影響範囲を実大盛土を用いて計測したところ、孔壁外縁からの影響範囲は砂 ($D_c=85\%$) で約 $9\sim 11r$ (r : スクリューポイントの半径)、砂質土 ($D_c=86\%$) で $8\sim 10r$ であった。

スクリーポイントの貫入によって押しつけられた土が弾性的に周辺地盤に影響を及ぼすとした時、その影響範囲を式(1)で求める (導出の詳細は付録 IV 参照、式は付録 IV 式(A21)と同じ)。

$$a = \frac{\pi}{3V} \cdot (b^3 - 3bc^2 + 2c^3) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 c は孔壁の半径、 b はスクリーポイントの孔中心からの影響範囲、 V はスクリーポイントが 1cm 貫入

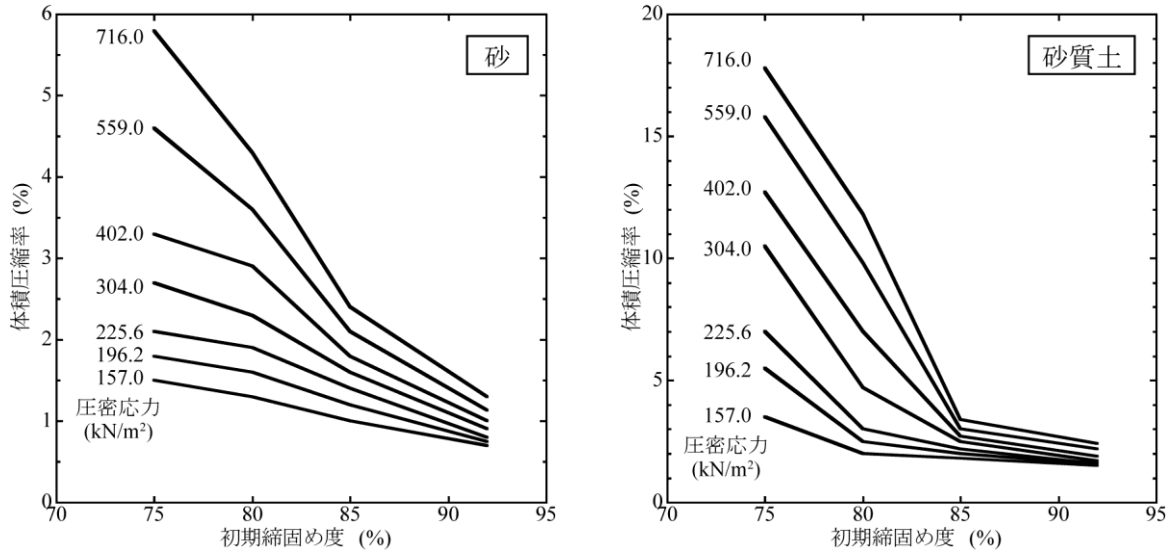


図7 圧密応力に応じた体積圧縮率と初期締固め度との関係

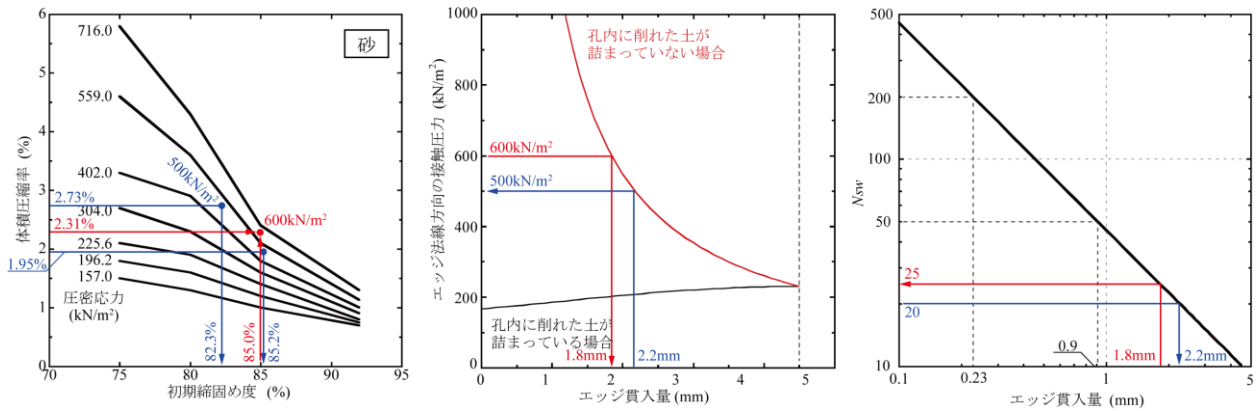


図8 土の体積圧縮特性とSWS試験における N_{sw} 値との関連

- (左) : 圧密圧力に応じた体積圧縮率～初期締固め度関係
- (中) : スクリューポイントのエッジ法線方向の接触圧力～エッジ貫入量関係
- (右) : SWS試験の N_{sw} 値とエッジ貫入量関係

する時に押しのけられる土の体積 8.553cm^3 である。式 (1)を用い、砂 $D_c=85\%$ の影響範囲を $10r$ として、 $b=18.15\text{cm}$ 、 $c=1.65\text{cm}$ 、 $V=8.553\text{cm}^3$ とした時の a の値を求めると 715.0 となる。これより、スクリューポイントのエッジに接触する部分の土の圧縮量 $(b - c) / a$ は 0.0231cm と求められ、この部分の体積圧縮率は $(0.0231\text{cm} / 1.0\text{cm}) \times 100 = 2.31\%$ となる。圧密試験結果より得られた、体積圧縮率と初期締固め度との関係を示した図7から、砂 $D_c=85\%$ で体積圧縮率 2.31% の時、圧密応力は約 600kN/m^2 となる (図8 (左) 赤矢印参照)。

次に、約 600kN/m^2 の圧力がスクリューポイントから地盤に加わるような状態を考える。スクリューポイントと地盤との接触面積は、スクリューポイントのエッジの地盤への食い込み量によって大きく異なることから、地盤へ加わる圧力もまた大きく変化する。地盤に加わる圧力を計算する過程は複雑であるので詳細は付録IIに記す

が、スクリューポイントのエッジ法線方向の接触圧力とエッジの貫入量との関係を示したグラフが図8 (中) である。この図より、約 600kN/m^2 の圧力がスクリューポイントから地盤に加わる時のエッジ貫入量は 1.8mm (孔内に削れた土が詰まっていない場合) となる (図8 (中) 赤矢印参照)。

最後に、地盤に食い込んだスクリューポイントのエッジが、回転により地盤を押し広げていく過程を考える。回転貫入時の地盤の擾乱による土の体積膨張などにより、スクリューポイントのエッジが押し戻されたりせず、地盤に食い込んだエッジ部分の土を回転によって全て押し広げられると仮定した場合、得られる N_{sw} 値とエッジ貫入量との関係を示したグラフが図8 (右) である (導出の詳細は付録IIIを参照)。図より、エッジの貫入量が 1.8mm の時の N_{sw} は 25 と推定される (図8 (右) 赤矢印参照)。

3・4 実測の N_{sw} 値による盛土の締固め度の推定

ここでは逆に、 N_{sw} 値から地盤の締固め度を推定する。砂の実大盛土 $D_c=85\%$ の SWS 試験の $N_{sw}=20$ を使って実際に計算してみる。図 8 (右) の青矢印のように $N_{sw}=20$ の時、エッジ貫入量は約 2.2mm となる。さらに図 8 (中) の青矢印のように、エッジ貫入量が約 2.2mm の時のエッジ法線方向の接触応力は約 500kN/m^2 となる。SWS 試験の砂 ($D_c=85\%$) 影響範囲を $9r\sim 11r$ とした時、式(1)より $a=545.4\sim 931.7$ となる。スクリーポイントのエッジに接触する部分の土の圧縮量 $(b \cdot d) / a$ は $0.0273\text{cm}\sim 0.0195\text{cm}$ となる。これより、体積圧縮率は $2.73\%\sim 1.95\%$ と求められる。さらに、図 8 (左) 青矢印のように、エッジ法線方向の接触応力約 500kN/m^2 と体積圧縮率 $2.73\%\sim 1.95\%$ から締固め度を探索すると、土の締固め度 $82.3\%\sim 85.2\%$ の推定値が得られる。これは、実大盛土の砂の締固め度である目標値 $D_c=85\%$ (実測平均値 $D_c=84.8\%$) とほぼ同等の値を示しており、推定値としては良い結果を示したといえる。

4 エッジ貫入一面せん断試験によるせん断力とトルク値との関係

4・1 エッジ貫入定体積一面せん断試験

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押し広げ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を入れず、ステンレス製のペDESTAL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 $0\sim 4.5\text{mm}$ 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。地下水面以下を想定し、供試体は飽和状態で試験を行った。せん断速度は 0.2mm/分 とした。また、せん断時の供試体の体積

収縮・体積膨張によるせん断力への影響を小さくして、供試体の初期締固め度に対する純粋なせん断力を求めたかったため、定体積条件で試験を行った。しかし、本試験装置はもともと定圧一面せん断試験装置であったため、せん断を行いながら鉛直変位を監視し、鉛直変位が生じ始めたらおもりを載せて上載圧を増加させ、鉛直変位をゼロに保つことで定体積状態を維持した。試験条件を表 2 に示す。

試験結果の一例として、図 10 に砂質土 ($D_c=86\%$) におけるせん断力～水平ひずみ関係と、せん断力～拘束圧関係を示す。本試験は定圧一面せん断試験装置において手で拘束圧を制御して定体積状態を維持したため、拘束圧が不連続になり、データプロットは離散的になる。

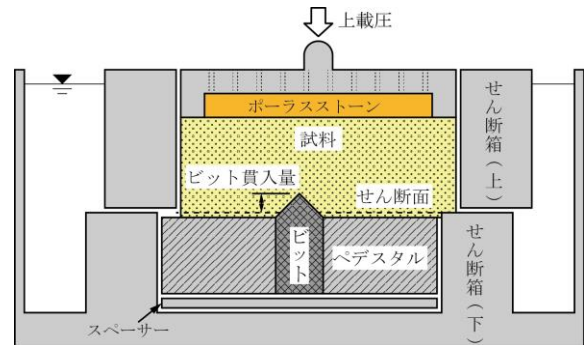


図 9 エッジ貫入状態での一面せん断試験模式図

表 2 エッジ貫入定体積一面せん断試験の試験条件

土質	締固め度 (%)	ビット貫入量
砂	92	4.5mm
	85	1.0mm
	80	0.0mm
砂質土	86	4.5mm
	82	1.0mm
	78	0.0mm

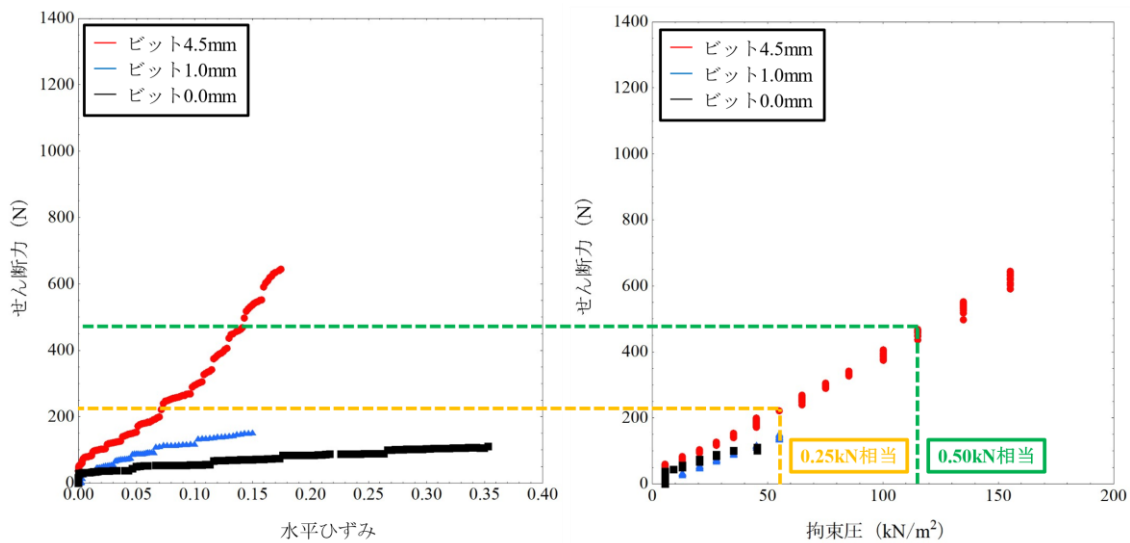


図 10 砂質土 ($D_c=86\%$) におけるせん断力～水平ひずみ関係(左)、せん断力～拘束圧関係(右)

SWS 試験において重錘 0.25kN, 0.50kN を載せた時の、スクリーポイントのエッジ法線方向の圧力、すなわち拘束圧は、それぞれ 57.45kN/m², 114.90kN/m² となる (付録Ⅲ参照)。図 10 (右) をみると、ビット貫入量 4.5mm のプロットは拘束圧 114.90kN/m² (重錘 0.50kN 相当) のラインまで到達しているが、ビット貫入量 1.0mm のプロットは拘束圧 57.45kN/m² (重錘 0.25kN 相当) 付近で途絶えてしまっている。これは、ビット貫入量 1.0mm におけるせん断においては、拘束圧 57.45kN/m² 程度までしか定体積状態を維持できず、それ以上の拘束圧の場合は体積収縮してしまうことを意味している。定体積状態でせん断ができないということは、SWS 試験の上ではスクリーポイントのエッジ部分がせん断力を受け持たない、トルクを生じさせないということと同義である。これより、図 10 の砂質土 (Dc=86%) においては、スクリーポイントのエッジ部分全体がせん断力を受け持って仕事をするのは拘束圧 57.45kN/m² (重錘 0.25kN 相当) までであり、拘束圧 114.90kN/m² (重錘 0.50kN 相当) では、ビット貫入量 4.5mm の部分ではせん断力を受け持っているが、ビット貫入量 1.0mm の部分はほぼ空回りしているということがわかる。

4・2 エッジ貫入一面せん断試験のせん断力から SWS 試験の推定トルク値を算出する方法

エッジ貫入一面せん断試験のせん断力から、SWS 試験のトルク値を算出する手順を以下に示す。

- (1) エッジ貫入定体積一面せん断試験結果から、ある拘束圧におけるビット貫入量 4.5mm と 1.0mm のせん断力を求める (図 10 参照)。
- (2) 求めたビット貫入量 4.5mm と 1.0mm のせん断力を、ビットの単位長さ当たりの力に直す (本研究におけるビット長は 40mm)。
- (3) 求めたビットの単位長さ当たりのせん断力に、スク

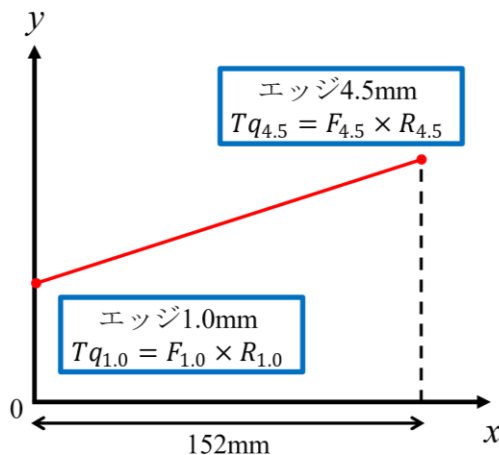


図 12 トルクの算出手順の模式図

- リューポイントの半径 (付録Ⅱ 図 A2'参照) を乗算することで、ビット 4.5mm (半径 12mm), 1.0mm (半径 5mm) それぞれの部分のトルク値を求める。
- (4) 上記(3)で求めたトルク値をもとに、ビット高さ とトルク値の関係が線形関係であると仮定しながら、スクリーポイントのエッジの長さ (長さ 152mm, 図 11 参照) の分を積分して、スクリーポイントのエッジ 1 条分に作用するトルク値を求める (図 12 参照)。
- (5) スクリーポイントにはエッジが 4 条あるため、上記(4)で求めたエッジ 1 条分のトルク値を 4 倍して、スクリーポイントに生じるトルク値を求める。

上記の手順で、砂質土 $D_c=86\%$ 、重錘 0.25kN の時の推定トルク値を算出してみる。図 10 より、重錘 0.25kN の時のせん断力は、ビット 4.5mm の場合で 220.58N、ビット 1.0mm の場合で 152.83N である。これらの値を用いて図 12 の計算式に従って計算を進めると、この条件における推定トルク値は 23.6N・m となる。

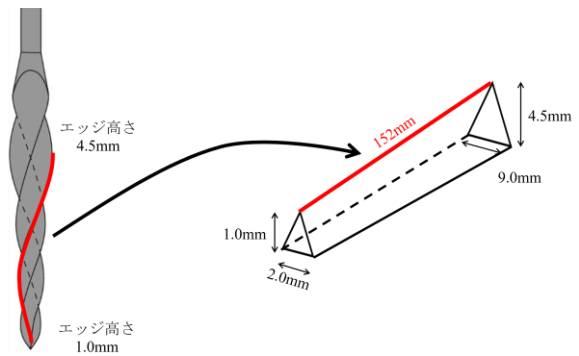


図 11 スクリーポイントのエッジ 1 条の長さ

x : エッジ長さ (mm)
 y : トルク (N・mm)
 Tq : トルク
 F : 単位長さ当たりのせん断力
 R : スクリーポイントの半径

$$\text{傾き} : a = \frac{(Tq_{4.5} - Tq_{1.0})}{152} \text{ (N/mm)}$$

$$\text{切片} : b = Tq_{1.0} \text{ (N・mm)}$$

$$y = ax + b$$

$$Tq_{1\text{条}} = \int_0^{152} ax + b \, dx$$

$$= \left[\frac{a}{2} x^2 + bx \right]_0^{152}$$

= エッジ 1 本分のトルク (N・mm)

$$Tq_{4\text{条}} = 4 \times Tq_{1\text{条}}$$

= スクリーポイント全体に働くトルク (N・m)

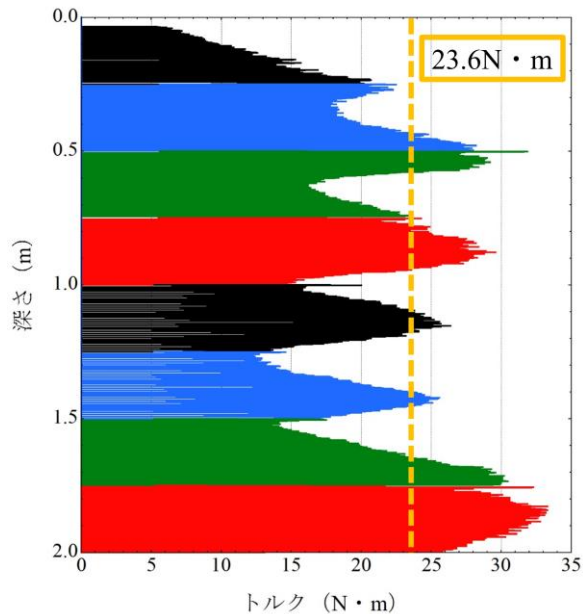


図 13 実大盛土を用いたトルク値とエッジ貫入一面せん断試験からの推定トルク値の比較 (砂質土 $D_c=86\%$, 重錘 0.25kN 相当)

4・3 実大盛土における SWS 試験の実測トルク値とエッジ貫入一面せん断試験からの推定トルク値との比較

実大盛土の砂 ($D_c=86\%$, 重錘 0.25kN) における SWS 試験の実測トルク値と、エッジ貫入一面せん断試験の砂質土 ($D_c=86\%$, 重錘 0.25kN 相当, 拘束圧 57.45kN/m^2) における結果から推定したトルク値との比較を、図 13 に示す。図中の山あり谷ありの線が実測トルク値である。実大盛土は約 0.3m ごとに丁寧な撒き出し、締固めを行ったが、それでも層内に締固め度のばらつきがあり、SWS 試験の実測トルク値にも凹凸が生じている。一方、図中の破線がエッジ貫入一面せん断試験結果からの推定トルク値である。推定トルク値が $23.6\text{kN}\cdot\text{m}$ 、実大盛土の各締固め層ごとの実測トルクのピーク値が $22.5\sim 33.3\text{kN}\cdot\text{m}$ となっており、ほぼ一致している。

5 結論

本研究では、以下の手順で「SWS 試験値の物理・力学的意味」の解明に努めてきた。

- (1) 締固め度を制御して築造した実大盛土における SWS 試験から N_{sw} 値、トルク値を求める。
- (2) SWS 試験のスクリーポイントの幾何的形狀を精査し、スクリーポイントのエッジの貫入量と地盤との接触面積との関係を求めることで、土の体積圧縮特性と N_{sw} 値を関連付ける。
- (3) スクリーポイントのエッジを模擬したエッジ貫入定体積一面せん断試験結果からトルク値を推定し、SWS 試験の実測トルク値と室内試験からの推定トルク値を比較・分析する。

その結果、SWS 試験の N_{sw} 値は土の体積圧縮特性に関係つけられること、SWS 試験のトルク値はエッジ貫入定体積一面せん断試験により推定可能であることが示された。これらの室内試験は土の締固め度を制御して行われるものであるため、最終的に、SWS 試験の N_{sw} 値、トルク値は、土の締固め度と関連付けることが可能となった (図 1 参照)。これにより、SWS 試験結果を、土の締固め度などを指標とする液状化危険度判定や地盤の沈下量予測などに用いることができる可能性が生じた。

従来、SWS 試験値は地盤の硬軟を示す相対指標としてのみ扱われ、物理・力学的意味は与えられてこなかったため、SWS 試験の結果が地盤の設計に積極的に用いられたことはなかった。しかし、本研究により SWS 試験のスクリーポイント周辺の力学体系が整理されたことから、今後、SWS 試験に関する力学的視点からの様々な知見が蓄積されていくことが期待される。

謝辞

本研究は、前橋工大学 2020 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) 藤井衛, 二木幹夫, 伊集院博, 風間了, 田村昌仁, 阿部秋男: スウェーデン式サウンディングによる N_{sw} と標準貫入試験による N 値との相関性, 日本建築学会技術報告集 第 3 号, pp.64-68 (1996)。
- 4) 品川恭一, 藤井衛: スウェーデン式サウンディング試験機のスクリーポイントによる粘性土の非排水せん断強さの推定, 地盤工学ジャーナル Vol.8, No.1, pp.155-164 (2013)。
- 5) 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)。
- 6) 森友宏, 土倉泰, 関崇夫: 先端スクリーポイントの形状から導くスウェーデン式サウンディング試験の特性, 第 55 回地盤工学研究発表会(京都市)(2020)。

付録 I SWS 試験における重錘载荷時のスクリーポイントの貫入力

SWS 試験時で重錘を載せた時に、スクリーポイント周辺に働く力を考える。スクリーポイントは角錐を 1 回転捻った形状をしており、スクリーポイントのエッジとエッジの間はやや窪んだ形に見える。SWS 試験を実施していると、この窪み状の部分に削れた土が詰まっていき、スクリーポイントの本体と詰まった土を包括した形状は、円錐形に近い形になることから、ここではスクリーポイントの形状を円錐と見なして議論を進める。

重錘を載せてスクリーポイントを貫入させる時の、スクリーポイント周辺の力のベクトルを図 A1 に示す。なお、図 A1 ではスクリーポイントの半分だけを示す。スクリーポイントの先端角の半分を θ 、重錘による力を W 、スクリーポイントのエッジの法線方向の力を F 、摩擦角を μ とすると次式が成り立つ。

$$W = F \sin \theta + \mu F \cos \theta \quad \text{式(A1)}$$

$$F = \frac{W}{(\mu \cos \theta + \sin \theta)} \quad \text{式(A2)}$$

重錘による力 W を 1kN、スクリーポイントの先端角の半分 θ を 5.2° (実測値)、摩擦角 μ を 0.577 (せん断抵抗角 30° 相当) とすると、式(A2)を用いてスクリーポイントのエッジの法線方向の力 F は 1.50kN と求められる。すなわち、SWS 試験においてスクリーポイントのエッジの法線方向の力 F は、載せた重錘の重さの約 1.5 倍であるといえる。

式(A2)の記号のうち、 W と θ は SWS 試験装置による固定値であるから、 F の値を左右するのは摩擦角 μ である。摩擦角 μ の小さい土はスクリーポイントのエッジの法線方向の力 F が大きくなり、同じ重錘の重さ (1kN) でも貫入しやすくなる。

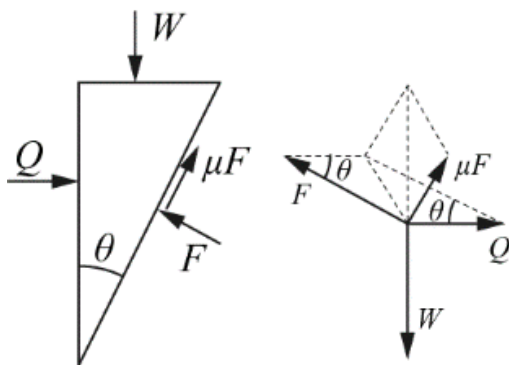


図 A1 スクリューポイント周辺に働く力に関するベクトル図

付録 II SWS 試験におけるスクリーポイントのエッジの貫入量と重錘荷重を伝達する表面積

付録 II・1 孔内に削れた土が詰まっている場合

ここでは、SWS 試験において回転・貫入を行う際のスクリーポイント周辺の状況を整理する。

スクリーポイントの横断面は正方形で、四角錐のような形のものをつねった形状をしている (図 A2 参照)。スクリーポイントの寸法は、スクリー最大の径部分 (以降、根元部と記述) が 33mm (エッジ高さ 4.5mm)、スクリーのうちエッジを有する部分の最先端部分 (以降、先端部と記述) の径が 7mm (エッジ高さ 1mm)、スクリーポイントのエッジは最大径部分から先端部に向けて 4 分の 3 回転捻れている。図 A2' に示すとおり、スクリーポイントにおいて回転・貫入に寄与するエッジ部分の高さ (以降、実効高さ) と記述) は 143mm で、エッジの高さは根元部から先端部へ向けて 4.5mm から 1.0mm へと徐々に小さくなっている。

スクリーポイントが回転すると円錐形に近い孔を削孔する。スクリーポイントは基本的に回転による「地盤の押し広げ」によって貫入していくが、回転により生じた土の削りクズが孔内に詰まるかどうか (図 A3 参照) によって、スクリーポイントから地盤に伝達される応力が異なる。孔内に土の削りクズが詰まっていない場合には、スクリーポイントのエッジは地盤に対して「線状」に接触する。接触面積が小さいため、地盤に対するエッジの貫入圧力は大きい。一方、孔内に土の削りクズが詰まっている場合または変形性に富む土の場合、孔内は土で満たされてしまうので、詰まった土による応力の分散によりスクリーポイントのエッジにかかる貫入圧力は小さくなる。

次に、エッジの貫入量に応じた重錘荷重を伝達する接触面積について考える (図 A2' の縦断面の模式図を参照)。捻れたスクリーポイントの形状をそのまま考えることは難しいため、以降は、スクリーポイントは捻れを延ばした四角錐 (図 A2 参照) と仮定して計算を行う。また、エッジの貫入量を根元部 (スクリーポイント最大

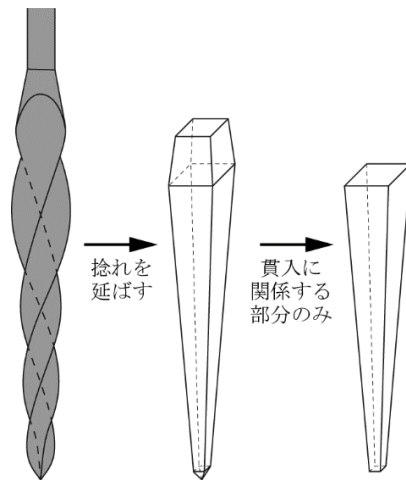


図 A2 スクリューポイントの形状

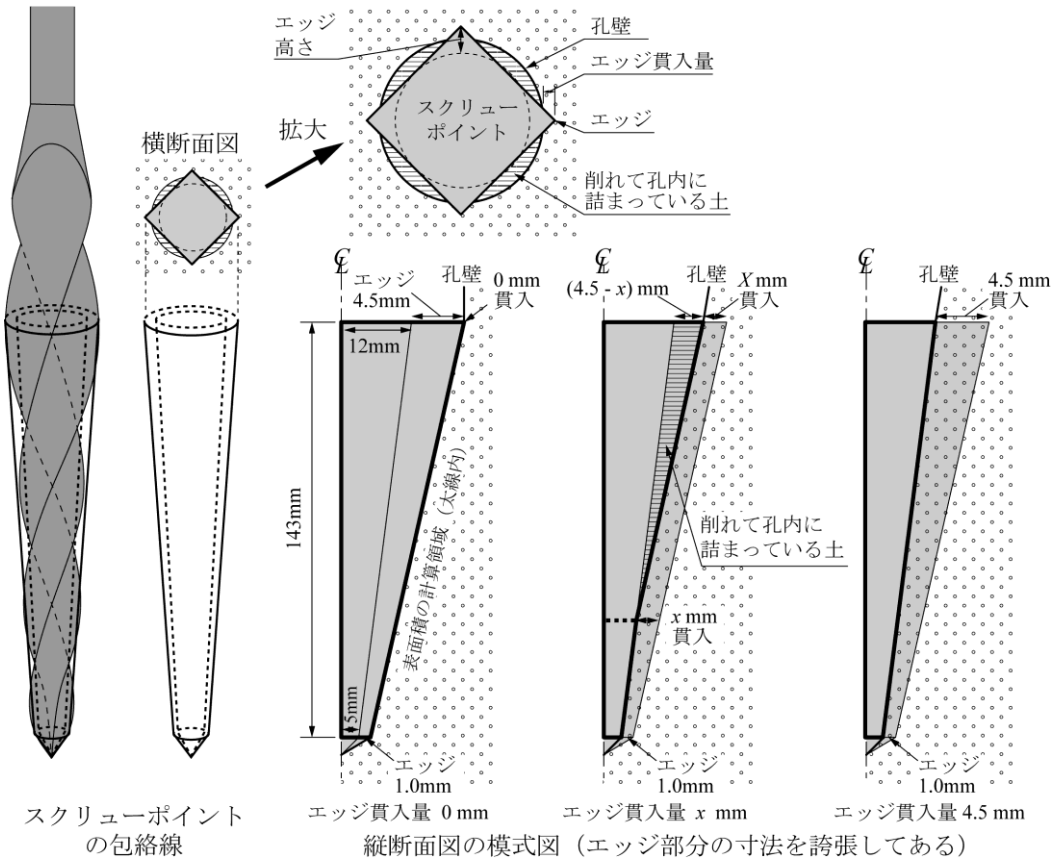


図 A2' 貫入時のスクリーポイント周辺の状況



図 A3 孔壁法線方向の応力の受け持ち部

径部分)におけるエッジの貫入量と定義する。エッジ貫入量 0mm の時、スクリーポイントのエッジは孔壁に接している状態である。エッジ貫入量 x mm の時、スクリーポイントのエッジは地盤に食い込んでいるが、貫入量が 1mm を超える場合は先端部のエッジ (エッジ高さ 1mm) は完全に地盤に食い込んでしまうことから、スクリーポイントのエッジは全体で一様に x mm 貫入しているわけではないことに注意する必要がある。図 A4 において、エッジ貫入量 $0 \leq x \leq 1$ の時には中間面は形成されない。中間面が形成されるのはエッジ貫入量 $1 < x \leq 4.5$ の時である。また、エッジ貫入量 x mm の時は、上部にスクリーポイントと孔壁との間に空間が存在するが、前述のとおり削れた土が詰まっていることが多いであろう。エッジ貫入量 4.5 mm の時は、スクリーポイントのエッジは全て地盤に食い込んでいる。以上のことから、重錘荷重を伝達する接触面積については、図 A2'

の縦断面図の黒太線部分を用いて考える。

図 A2' のエッジ貫入量 x mm の時の黒太線部分を一回転させた時の模式図が図 A4 である。根元径 φ_1 は、エッジ貫入量 x に応じて小さくなる。 φ_1 と x の関係を式(3)に示す。

$$\varphi_1 = 33 - 2x \quad \text{式(A3)}$$

ここでの値 33 とは、スクリーポイントの最大径 33mm である。

一方、先端径 φ_3 も、エッジ貫入量 x に応じて小さくなる。 φ_3 と x の関係を式(A4)に示す。

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= 7 - 2x && (\text{ただし } 0 \leq x \leq 1 \text{ の時}) \quad \text{式(A4)} \\ \varphi_3 &= 5 && (\text{ただし } 1 < x \leq 4.5 \text{ の時}) \quad \text{式(A4)'} \end{aligned}$$

中間径 φ_2 は、 $1 < x \leq 4.5$ の範囲において φ_1 と φ_3 から次式で与えられる。

$$\varphi_2 = \varphi_3 + \frac{(24 - \varphi_3) \cdot (x - 1)}{3.5} \quad \text{式(A5)}$$

ここで、分母の 3.5 とは根元部におけるエッジ (高さ 4.5mm) が 1mm 貫入した時の値である。分子の 24 と

は根元部におけるエッジ高さを除いた径 (33mm - 2 × 4.5mm = 24mm) である。

根元面～中間面の高さ h_{12} は、 $1 < x \leq 4.5$ の範囲において、スクリーポイントの実効高さ H (=143mm) とエッジ貫入量 x から、次式で与えられる。

$$h_{12} = H - \frac{(x-1)}{3.5} \cdot H \quad \text{式(A6)}$$

また、中間面～先端面の高さ h_{23} は、 $1 < x \leq 4.5$ の範囲において、次式で与えられる。

$$h_{23} = H - h_{12} \quad \text{式(A7)}$$

(1) エッジ貫入量 $1 < x \leq 4.5\text{mm}$ の時

これらの諸量を用いて、根元面～中間面の部分円錐形の表面積を求めていく。エッジの貫入量 x に応じて、 φ_1 、 φ_2 、 h_{12} が変化することに注意されたい。根元面～中間面の部分円錐形が、そのまま延長された時の仮想円錐を考える (図 A5 参照)。この仮想円錐の高さを H^* とすると、 H^* は次式で与えられる。

$$H^* = h_{12} \cdot \frac{\varphi_1}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad \text{式(A8)}$$

これより、仮想円錐の先端角の半分 θ^* は次式で表される。

$$\theta^* = \tan^{-1} \left(\frac{\varphi_1}{2} \cdot \frac{1}{H^*} \right) \quad \text{式(A9)}$$

また、仮想円錐の母線の長さ l^* は次式で表される。

$$l^* = \sqrt{\left(\frac{\varphi_1}{2} \right)^2 + (H^*)^2} \quad \text{式(A10)}$$

仮想円錐を展開したときの側面 (図 A6 参照) が成す先端角 θ_n^* は次式で表される。

$$\theta_n^* = \frac{2\pi \cdot \varphi_1}{2l^*} \quad \text{式(A11)}$$

これより、仮想円錐の側面の表面積 A^* は次式で表される。

$$A^* = \pi \cdot (l^*)^2 \cdot \frac{\theta_n^*}{2\pi} \quad \text{式(A12)}$$

根元面～中間面の部分円錐形の表面積 A は次式で表される。

$$A = A^* - \left\{ \pi \cdot \left(l^* - l^* \cdot \frac{h_{12}}{H^*} \right)^2 \cdot \frac{\theta_n^*}{2\pi} \right\} \quad \text{式(13)}$$

中間面～先端面の部分円錐形の表面積も同様にして求める。

式(A8)から式(A13)の φ_1 、 φ_2 、 h_{12} を、それぞれ φ_2 、 φ_3 、 h_{23} に置き換えればよい。

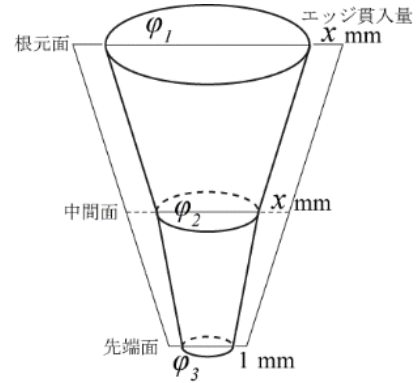


図 A4 スクリューポイント周辺の重錘荷重を伝達する面に関する説明図

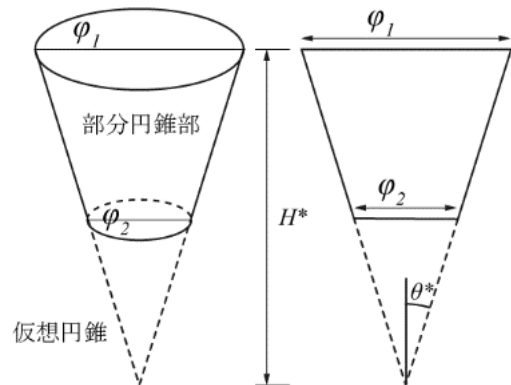


図 A5 根元面～中間面の部分円錐形

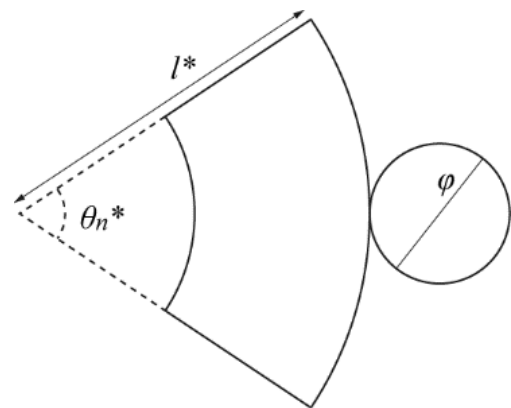


図 A6 仮想円錐の展開図

(2) エッジ貫入量 $0 \leq x \leq 1\text{mm}$ の時

中間面は形成されないため、図 A4 の φ_2 , h_{12} を、それぞれ φ_3 , H に置き換えて、式(A8)から式(A13)を用いて計算を行い、根元面～先端面の部分円錐形の表面積を求める。

スクリーポイントのエッジの貫入量に応じた重錘荷重を伝達する表面積 A_{total} は、(1)エッジ貫入量 $1 < x \leq 4.5\text{mm}$ の時、根元面～中間面の部分円錐形の表面積と中間面～先端面の部分円錐形の表面積の和で求められる。また(2) エッジ貫入量 $0 \leq x \leq 1\text{mm}$ の時は根元面～先端面の部分円錐形の表面積をそのまま用いる。

式(A2)より、スクリーポイントのエッジの法線方向の力の合計 F は 1.50kN であることから、エッジ法線方向の貫入圧力 P は、接触面積 A_{total} を用いて次式で求められる。

$$P = \frac{F}{A_{total}} \quad \text{式(A14)}$$

付録Ⅱ・2 孔内に削れた土が詰まっていない場合

ここでは、試験対象の地盤が堅固で、重錘の荷重によってスクリーポイントのエッジが地盤に全て食い込まず、かつ、孔内に削れた土が無い場合におけるスクリーポイントのエッジの貫入量と重錘荷重を伝達する表面積との関係を求める。

スクリーポイントの横断面は正方形であることから、

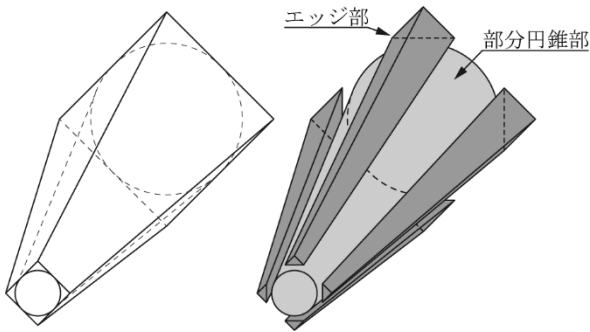


図 A6 捻りが無い場合のスクリーポイントの模式図

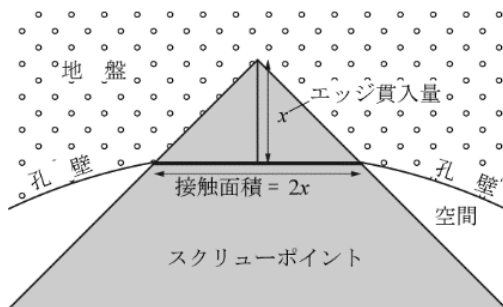


図 A7 地盤に食い込んだエッジ部分の模式図

ら、エッジは 4 条となる。図 A6 に、スクリーポイントの捻りが無いものと仮定したときの模式図を示す。また、前述のとおり、スクリーポイントにおいて回転・貫入に寄与する実効高さは 143mm で、この 143mm の部分でエッジは 4 分の 3 回転している。この部分のエッジの長さ l_e は 152mm である。

スクリーポイントのエッジが地盤に食い込んでいいる部分を拡大すると図 A7 のようになる。また、スクリーポイントのエッジの 1 条部分のみを 3-D で模式的に示すと図 A8 のようになる。エッジは先端部と根元部ではエッジを成す直角三角形の大きさが異なる。また、エッジ貫入量に応じてエッジと地盤が接触する面積(図 A8 中の灰色部の面積)が変化する。

(1) エッジ貫入量が $0 \leq x \leq 1$ の時

スクリーポイントの根元面から先端面に至るまで、地盤に接触する部分はエッジ部分に限定されるため、重錘の荷重を地盤に伝達する領域は長方形となる。エッジ 4 条分の地盤との接触面積 S は、エッジの貫入量を x 、エッジ長を l_e とした時、次式で表される。

$$S = 4 \cdot 2 \cdot x \cdot l_e \quad \text{式(A15)}$$

(2) エッジ貫入量が $1 < x \leq 4.5$ の時

エッジ貫入量が $1 < x \leq 4.5$ の時は、スクリーポイントの先端の方のエッジは、エッジ貫入量が大きくなって、既にエッジの全てが貫入してしまっているため、接触面積は増加しない。例えば、エッジ貫入量が 1mm から 2mm になった時には、前述の図 4 で示すところの根元面、中間面、先端面が形成され、接触面積は図 A8 のように変化する。求めるべき面積は、中間面～先端面部分では部分円錐形の表面積、根元面～中間面では 4 枚の長方形の面積となる。求める領域の形状は、あたかもバドミントン競技のシャトルのような形となる(図 A9 参照)。求めるべき表面積は次式から得られる。

$$S = \left\{ \left(\pi \cdot (l^*)^2 \cdot \frac{\theta_n^*}{2\pi} \right) - \left(\pi \cdot \left(l^* - l^* \cdot \frac{h_{12}}{H^*} \right)^2 \cdot \frac{\theta_n^*}{2\pi} \right) \right\} + 4 \cdot \left\{ 2 \cdot x \cdot l_e \cdot \frac{4.5 - x}{3.5} \right\} \quad \text{式(A16)}$$

ここで、中括弧で囲まれた第 1 項は φ_2 , φ_3 , h_{23} を用いた式(A13)である。中括弧で囲まれた第 2 項は根元面～中間面の長方形の面積である。

式(A2)より、スクリーポイントのエッジの法線方向の力の合計 P は 1.50kN であることから、エッジ法線方向の貫入圧力 P_e は、式(15)または式(16)から求めた接触面積 S を用いて次式で求められる。

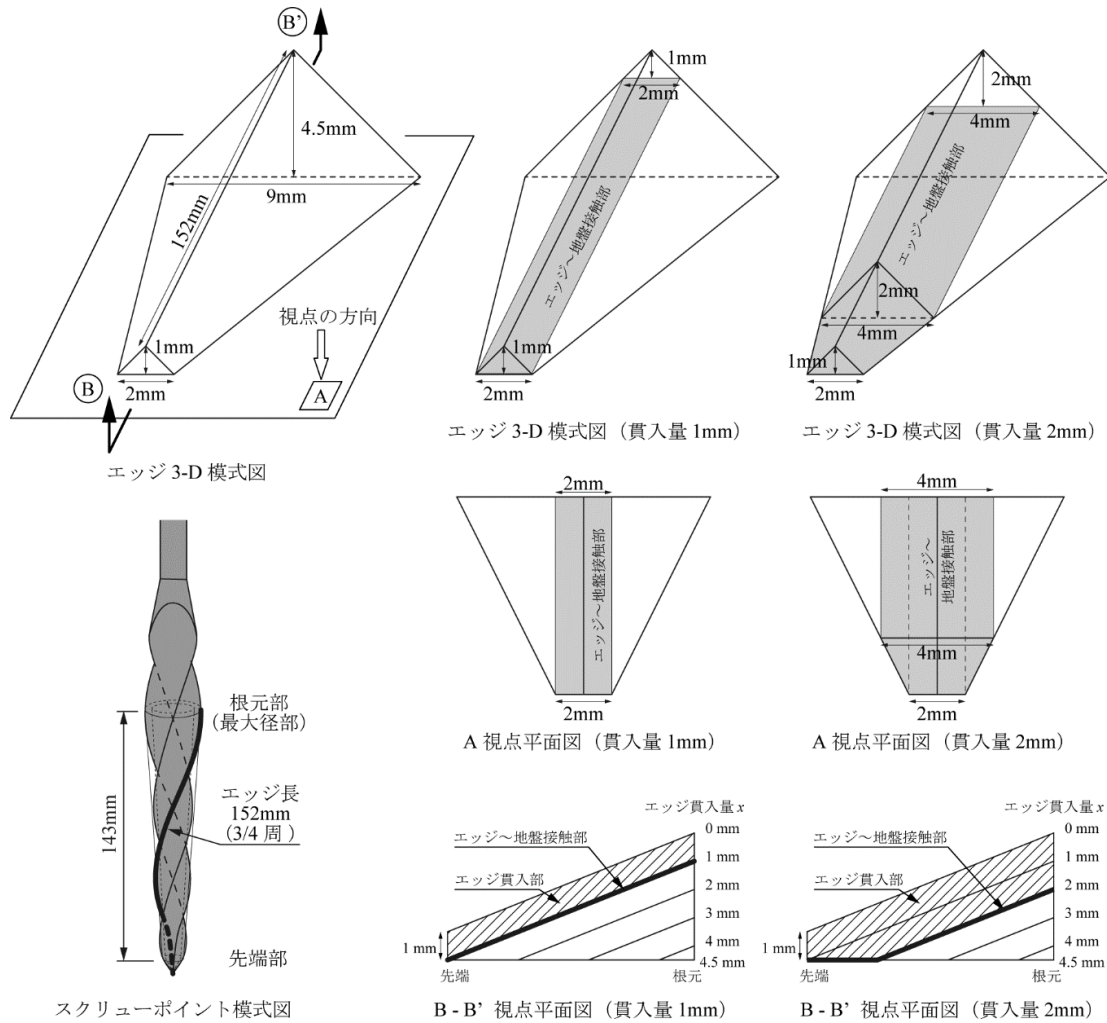


図 A8 エッジ貫入量に応じたエッジ～地盤接触部の変化

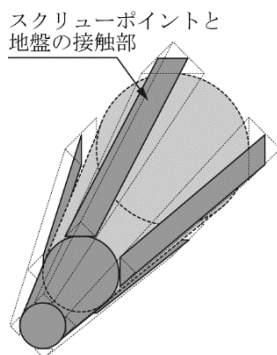


図 A9 エッジ貫入量が $1 < x \leq 4.5$ の時の求めるべき表面積の形状

$$P_e = \frac{P}{S} \quad \text{式(A17)}$$

孔内の削れた土の詰まりの有無に応じたエッジ法線方向の接触圧力を図 A10 に示す。また、概略値の一覧を表 A1 に示す。

これより、孔内に削れた土が詰まっている場合、スクリーポイントのエッジ法線方向の圧力は約 200kN/m^2 であることがわかる。また、エッジ貫入量が 4.5mm の時のエッジ法線方向の圧力は 229.8kN/m^2 であることから、SWS 試験において 1kN の重錘载荷により自沈する地盤の層は、 229.8kN/m^2 の圧力によって 16.5mm (スクリーポイントの最大径 33mm の半分) 以上、土が押しつけられ、圧縮変形するというを意味する。また、エッジの貫入量が小さいほどエッジ法線方向の圧力が小さくなることから、スクリーポイントのエッジは、柔らかい地盤ではより食い込みやすく、固い地盤ではより食い込みにくくなる事がわかる。

稲田式では、重錘 1kN で自沈する粘土・粘性土の一軸圧縮強度 q_u は 45kN/m^2 と推定されているが、ここでの「エッジ法線方向の圧力」は、せん断強度というよりも圧密応力に近い。

一方の、孔内に削れた土が詰まっていない場合は、SWS 試験における回転貫入が進行してエッジが積極的に地盤に食い込んでいっている状態、もしくは地盤が固

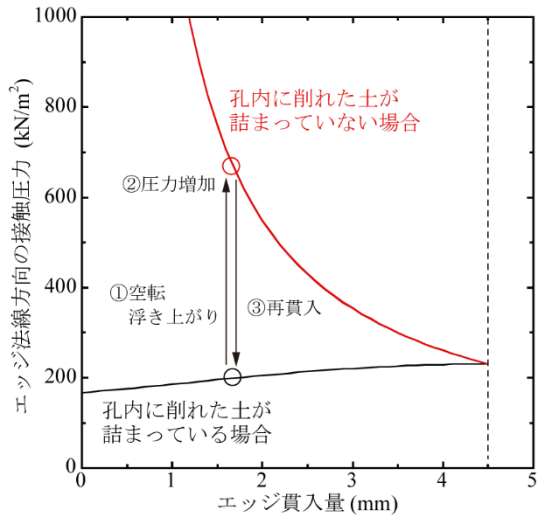


図 A10 エッジ貫入量とエッジ法線方向の接触圧力

表 A1 エッジ貫入量とエッジ法線方向の接触圧力の概略値

エッジ貫入量 (mm)	エッジ法線方向の接触圧力	
	孔内の削れた土の詰まりの有無 有 (kN/m ²)	無 (kN/m ²)
0.0	166.3	∞
0.5	175.0	2467.1
1.0	184.7	1233.6
1.5	194.8	760.5
2.0	204.2	549.6
2.5	212.7	430.1
3.0	219.8	353.2
3.5	225.1	299.6
4.0	228.5	260.1
4.5	229.8	229.8

くエッジが全て地盤に食い込みきらずに空転に近い状態と考えられる。地盤がかなり固い場合、スクリーポイントに回転トルクを加えても地盤を押し広げることができず、反対に回転トルクがスクリーポイントを押し上げる力に変換され、スクリーポイントが空転気味になる時がある。この時、SWSのロッドからは「クッククック」や「ポクポクポク」といったような微細な振動を伴った音が聞かれることも多い。この時、スクリーポイントのエッジは、微細な浮き上がりや再貫入を繰り返しているものと考えられ⁹⁾、この現象は図A10および表A1から説明可能である。例えば、固い地盤にエッジが1mm貫入した状態で釣り合っている時、孔内には削れた土も詰まっていて接触面積は大きいため、エッジ法線方向の圧力は184.7kN/m²である。これが、回転によってスクリーポイントがわずかでも浮くと、スクリーポイントと地盤との接触面積が減少して、エッジと地盤のみが接触するようになるため、エッジ法線方向の圧力は計算上1233.6kN/m²以上に急増する。そのため、一度浮き上がったスクリーポイントであっても、固い地盤に再貫入できるものと考えられる。

付録Ⅲ SWS 試験におけるスクリーポイントのエッジ貫入量と N_{sw} 値

スクリーポイントのエッジのリード長は200mm (200mmで1回転していることを示す) である。エッジは4条あるので、回転によって貫入したエッジ部分の土を全て押しのけられるとすれば、4分の1回転で360°全周の土を押しのけられる。スクリーポイントが下方に貫入するためには、スクリーポイントの径が最も太い部分(エッジ高さ4.5mm)の土が完全に押しのけられる必要がある。4分の1回転あたりの貫入量 d (mm)は、エッジの貫入量 x (mm)とエッジの角度 θ_e を用いて、次式で表される(図11参照)。

$$d = \frac{x}{\tan \theta_e} \quad \text{式(A18)}$$

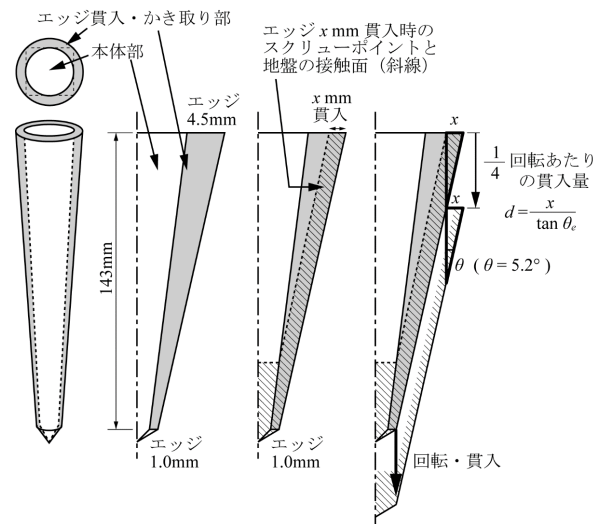


図 A11 エッジ貫入量と N_{sw} 値の模式図

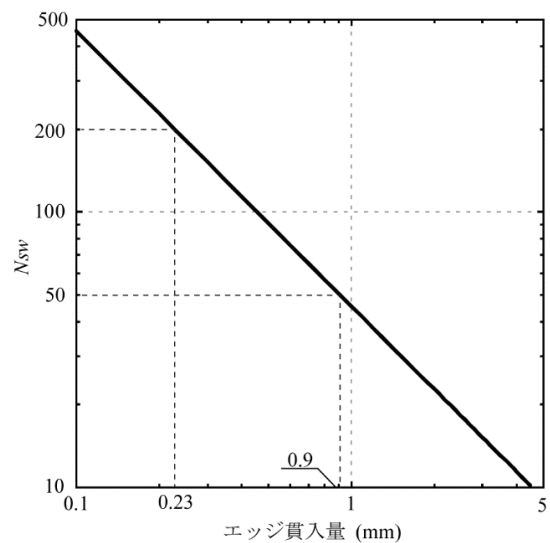


図 A12 エッジ貫入量と N_{sw} 値との関係

N_{sw} 値は、1000mm 貫入させるための半回転数（2分の1回転数）であるから、次式で表される。

$$N_{sw} = \frac{1000}{2d} \quad \text{式(A19)}$$

エッジの貫入量 x (mm)と、 N_{sw} 値との理論上の関係を、図 A12 に示す。グラフは両対数軸グラフにおいて直線を示す。回転貫入時の地盤の擾乱による土の体積膨張などにより、スクリーポイントのエッジが押し戻されたりせず、地盤に食い込んだエッジ部分の土を回転によってすべて押し広げられると仮定した場合、 N_{sw} 値が 10, 50, 200 の時のエッジの貫入量はそれぞれ 4.5mm, 0.9mm, 0.23mm である。

付録IV スクリューポイントを貫入させた時の孔壁周辺地盤への影響範囲

スクリーポイントを回転・貫入させると、スクリーポイントの横断面積分の土が、孔壁周辺に押し出される。この際、押し出される土が孔壁周辺地盤の密度をどのように変化させるか、また密度変化の影響範囲はどのくらいになるのかを推定する。

まず、押し出される土による孔壁周辺地盤の密度変化の様子について考える材料を得るため、高反発スポンジを用いた圧縮実験を行った（図 A13 参照）。高反発スポンジは弾性体と仮定している。スポンジには正方形の格子を描き上下方向に 16 個の要素を作成した。また、スポンジの上下面には平面を保つためにアクリル板を接着した。このスポンジを座屈しないように上下方向に圧縮した時の、格子の変形状況を観察することで、強制変位が与えられた時の変位の分布の仕方を確認した。

スポンジを圧縮した時の、各要素の圧縮後の要素高さ と初期要素高さの比を図 A14 に示す。また、図 A14 のグラフ形状の特徴を模式図として図 A15 に示す。本実験から得られた知見を以下に示す（項目(a)～(e)の内容は図 A15 に対応する）。

- (a) 要素サイズの変化は高さの中央で対象となる。
- (b) 荷重を増していくと (①→②→③)、端面から変形が進行していくが、中央部はほとんど変形しない。
- (c) 端部の変形が進行し、グラフの傾きがある値になると端部の変形が止まり、中央部の変形が進行する。③と④のグラフの傾きはほぼ同じ。
- (d) 前述の(c)の挙動が中央部まで進行し、要素の圧縮量の比がほぼ一様となる。
- (e) さらに荷重を加えていくと、全体が一様に変形していく。

この高反発スポンジの圧縮実験が、地盤の圧縮変形にどのように利用できるかを考える。本研究で用いている砂の体積圧縮量は、スポンジとは異なり、多く見積もっても 15%程度である。以下に事例を示す。

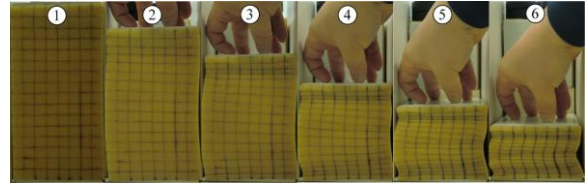


図 A13 高反発スポンジの圧縮実験

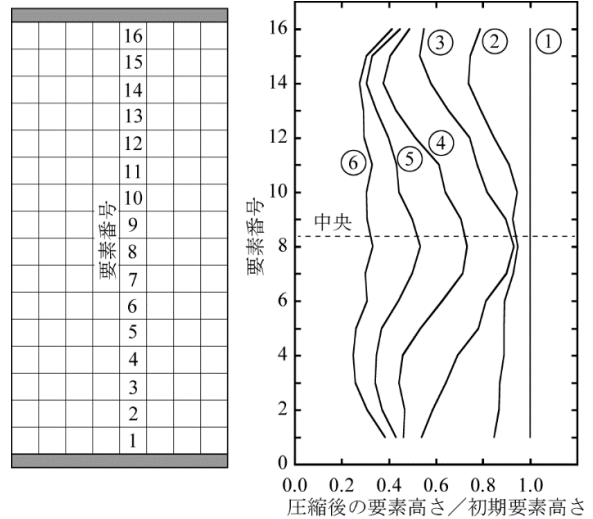


図 A14 スポンジの圧縮による要素高さの変化

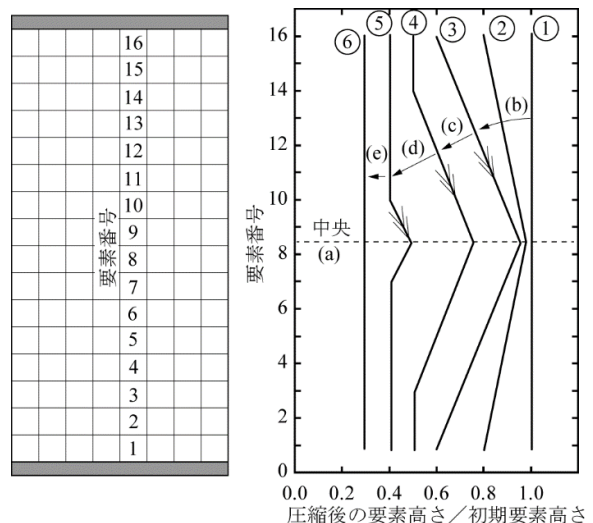


図 A15 スポンジの圧縮による要素高さの変化に関するグラフ形状の模式図

【例】本研究で使用している砂、 $\rho_{d,max} = 1.742\text{g/cm}^3$ 、圧密試験による体積圧縮量
 締固め度 $D_c = 80\%$ → (圧縮) → 88%, $\Delta V = +9.07\%$
 締固め度 $D_c = 80\%$ → (圧縮) → 92%, $\Delta V = +13.04\%$

これより、強制変位が与えられることによる地盤の圧縮の様子は、高反発スポンジによる実験の①→②の様子に近いと考えられる。すなわち孔壁周辺地盤の変形量は線形分布を示し、その変形量は孔壁に近いほど大きく、

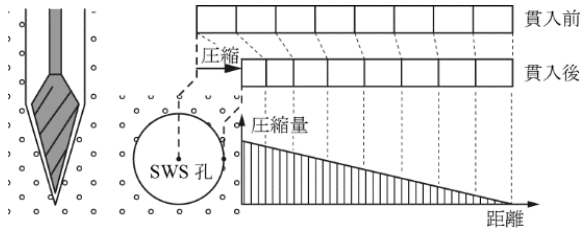


図 A16 孔壁周辺の地盤の変形の分布

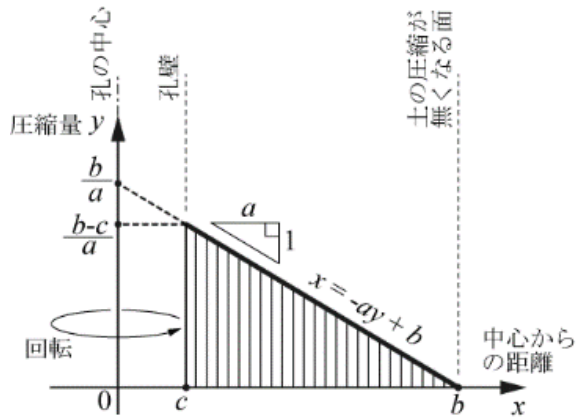


図 A17 孔壁周辺の影響範囲を求めるためのグラフ

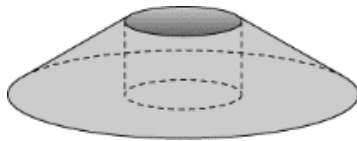


図 A18 図 A17 ハッチ部を y 軸周りに回転させてできる立体の模式図

孔壁から離れるほど小さくなると考えられる。この事を模式的に示したのが図 A16 である。スクリーポイントの貫入により押しつけられた土が孔壁周辺の地盤を圧縮し、その影響範囲は押しつけられた土の体積分が、孔壁周辺地盤の圧縮量で相殺される範囲までとなる。この影響範囲を図 A17 から求める。図中の c は孔壁の半径、 b は押しつけられた土の体積分が孔壁周辺地盤の圧縮量で相殺されるまでの孔壁中心からの距離、三角形のハッチ部を y 軸周りに回転させてできる立体（回転体、図 A18 参照）の体積が孔壁周辺地盤の圧縮量を示す。図 A18 の立体の体積 V は次式で与えられる。

$$V = \pi \int_0^{\frac{b-c}{a}} (-ay + b)^2 dy - \pi c^2 \cdot \frac{b-c}{a}$$

$$= \frac{\pi}{3a} \cdot (b^3 - 3bc^2 + 2c^3) \quad \text{式(A20)}$$

ここで、 c はスクリーポイントの最大半径 1.65cm、また V はスクリーポイントが 1cm 貫入する時に押しつけられる土の体積 8.553cm³ である。式(A20)を変形した式(A21)を用いて、 $c=1.65\text{cm}$ と $V=8.553\text{cm}^3$ とした時の

a の値を求める。

$$a = \frac{\pi}{3V} \cdot (b^3 - 3bc^2 + 2c^3) \quad \text{式(A21)}$$

ここで b は押しつけられた土の体積分が孔壁周辺地盤の圧縮量で相殺されるまでの孔壁中心からの距離であり、使用者自らが自由に設定する（表計算ソフトなどを用いると便利である）、もしくは模型地盤などを作成して実測する。 a が求まると、孔壁直近の半径方向の圧縮量を示す図 A17 中の y 軸の切片の値 $(b-c)/a$ が得られる。

上記の関係式を用いて、本研究で用いている砂にスクリーポイントを貫入させた時の、孔壁周辺の体積変化の影響範囲を推察する。砂の圧密試験結果より、締め度 $D_c=80\%$ の試料に、圧密圧力 200kN/m² を载荷した時の体積圧縮量は 1.6% (0.016) であったので、 $(b-c)/a$ が 1.6% (孔壁半径方向 1cm あたり 0.016cm の変形) となるような b の値を探索すると約 22cm となる。よって、影響範囲は孔の中心から約 22cm と推察される。影響範囲は密な地盤ほど広く、緩い地盤ほど小さくなる。密な地盤における影響範囲が広いということは、スクリーポイントの貫入のために、より広い範囲の地盤を変形させる必要があるということであり、密な地盤ほどスクリーポイントの貫入が困難になるという実現象と符合する。

ただし、上記の記述は、土粒子間に摩擦が無い場合の理論値であるので、実際の地盤における影響範囲はより小さくなる。