

フリクションカットがないニューマチックケーソンの周面摩擦力度に関する報告

川崎 元¹・佐川 幸治²・寺本 英敬³・山口 貴士⁴・久本 洋二⁵

¹正会員 (株)大本組土木本部技術部 (〒700-8550 岡山市北区内山下一丁目1番13号)
E-mail:kawasakimti@gw.ohmoto.co.jp

²(株)大本組東京支店土木部 (〒107-8514 東京都港区南青山五丁目9番15号)
E-mail:sagawa@gw.ohmoto.co.jp

³(株)大本組土木本部技術部技術課 (〒700-8550 岡山市北区内山下一丁目1番13号)
E-mail:teramotoh@gw.ohmoto.co.jp

⁴東京都下水道局建設部土木設計課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号)
E-mail:Takashi_3_Yamaguchi@member.metro.tokyo.jp

⁵東京都下水道局施設管理部管路管理課長 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号)
E-mail:Youji_Hisamoto@member.metro.tokyo.jp

ニューマチックケーソン工法は地下構造物を構築する上でメリットの多い工法であるが、地盤とケーソンの周面摩擦力が想定を大きく上回ると、沈設が困難になる場合がある。また市街地などでは周辺地盤への影響を考慮し、フリクションカットを設けないケースも増えてきており、その危険性はさらに高まってきている。このような理由から、筆者らはそのような場合の周面摩擦力度を推定できるようにするための取組みを行っている。今回、その一環として、ある現場の計測データと、そこで施工前に行った標準貫入試験および原位置せん断試験（以下、SBIFT）の結果を分析したところ、SBIFT結果がその推定に有効に利用できること、さらに経時的に締め付けが増すような地盤では、その推定に掘削沈下の待機時間などを考慮に入れる必要があることもわかった。

Key Words : *pneumatic caisson, peripheral friction force, non-friction cutter, SBIFT*

1. はじめに

東京都下水道局は、これまで普及促進や浸水対策などを目的として、下水道管やポンプ所などの建設を進めてきたが、建設時期が古い施設は老朽化が進行するとともに都市化の進展による下水道への雨水流入量が増加したことにより雨水排除能力が不足している。このため、都下水道局では下水道管やポンプ所などの老朽化対策に併せて能力増強を図る再構築を進めているが、住宅密集地でのポンプ所の再構築や新設においては、工事による周辺への影響の低減を図るため、ニューマチックケーソン工法を多く採用している。

ニューマチックケーソン工法とは、地上での躯体の構築と地下での掘削を繰り返しながら地中に構造物を沈設していく工法である。本工法は、周辺地盤に与える影響が比較的少ない工法であるが、施工箇所の地盤特性が想

定と大きく異なると周面摩擦力が計画値を大きく上回り、水荷重追加や調圧沈下では対応できなくなる恐れがある。特に都下水道局では、周辺地盤環境への影響を最小限に抑えるためフリクションカットを設けないケースも増えてきており、従来から計画に用いられている周面摩擦力度（フリクションカット有）を上回る危険性はさらに高まってきている。したがって、我々はそのようなケースのニューマチックケーソン施工時における周面摩擦力度を推定する取組みを行っている。

今回、その一環として、少ないデータではあるが、フリクションカットがないタイプのニューマチックケーソンの施工時における周面摩擦力度等の計測結果、施工前に実施した標準貫入試験結果、そして新たに導入したSBIFT結果を分析したところ、SBIFTの有効性を確認することができた。また、土層によっては掘削沈下の待機時間等を考慮に入れることで施工時の周面摩擦力度をう

まく再現できるなどのいくつかの知見が得られた。本文ではその詳細を報告する。

2. 計測および試験の対象とした工事

計測はニューマチックケーソン施工中に、SBIFTはニューマチックケーソン施工前に実施した。以下に計測および試験の対象とした工事の概要と、計測工およびSBIFTの概要を示す。

(1) 工事概要

本工事は、雨水流出量の増加および施設の老朽化に対応するため雨水ポンプ所を再構築するもので、躯体の構築にニューマチックケーソン工法を採用した。なお、本工事のニューマチックケーソンには、近傍構造物等への影響を低減するためフリクションカットは設けなかった。

工事名：業平橋ポンプ所施設再構築その2および同その3工事

工事場所：東京都墨田区吾妻橋三丁目13番地先

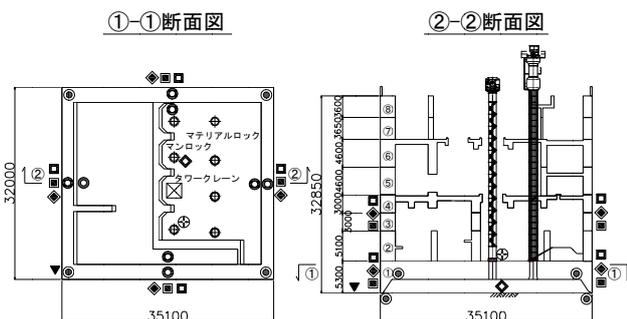
工期：平成22年3月7日～平成27年3月31日

計画最終作業気圧：0.26MPa

コンクリート量：16,871m³

(2) 計測工の概要

ニューマチックケーソン本体に計測器を図-1のとおり取り付け、各種の計測を行った。なお、躯体外壁面に取り付けられた周面摩擦計、土圧計、間隙水圧計の設置高さは下段（1ロット目）が刃先位置から4.85m上方、上段（4ロット目）が刃先位置から15m上方である。また、計測の時間間隔は1分とした。



記号	区分	機器名	設置台数
▼	ケーソン沈下測定	レーザー変位計	1台
⊕	ケーソン傾斜測定	傾斜計	1台
⊙	刃口反力測定	盤圧計（角部）	4台
⊙	刃口反力測定	盤圧計（中間部）	8台
■	周面摩擦測定	周面摩擦計	4台×2段
■	土圧測定	土圧計	4台×2段
◆	間隙水圧測定	間隙水圧計	4台×2段
◆	管内気圧測定	間隙水圧計	1台

図-1 計測器設置位置と数量

(3) SBIFTの概要

SBIFTは、徐ら¹⁾によって開発された原位置せん断摩擦試験で、地盤のせん断強度定数や地盤とプローブとの摩擦力度を現地で直接求めることができるのが特長である。測定を行った土層は、ケーソン沈設前に地盤改良を行う深度範囲（GL±0～GL-10.75）を避け、それ以深の礫混り細砂層（10≤N≤30）、礫混り細砂層（30<N≤35）、貝殻混じりシルト層、凝灰質粘土層である。

SBIFTを実施した深度を、同時に実施した標準貫入試験結果とともに図-2に示す。なお、SBIFTのプローブは図-3に示すように表面に突起を設けた突起型（土のせん断強度調査用）と突起のない平滑型（プローブと地盤の摩擦抵抗測定用）の2種類を用いた。

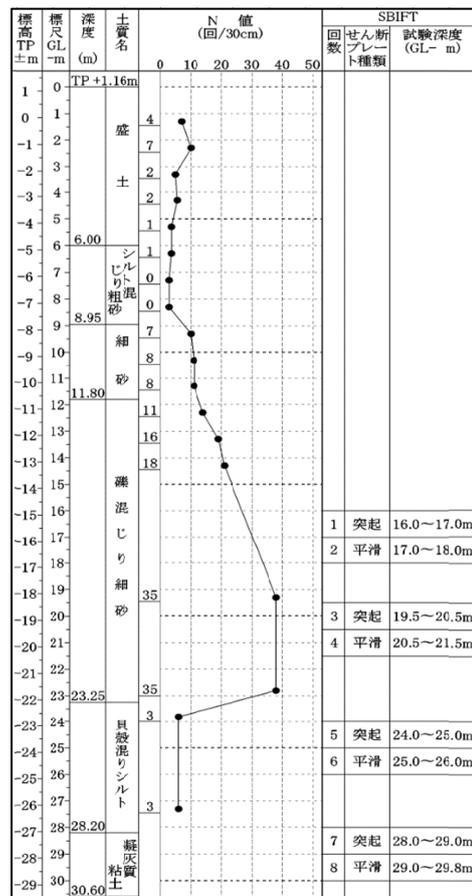


図-2 ボーリング柱状図とSBIFT実施深度

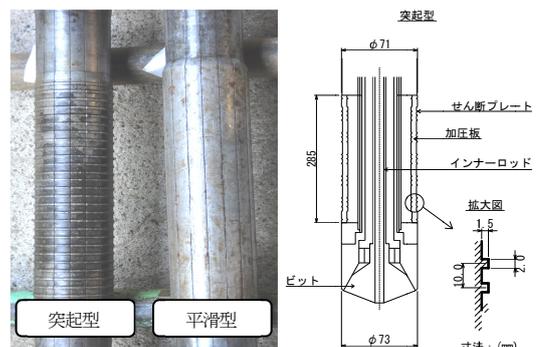


図-3 2種類のSBIFTプローブと突起型の形状詳細

3. 周面摩擦力度に関する試験と計測結果

(1) SBIFT結果

SBIFT結果を表-1に示す。突起型プローブの結果の方が、平滑型よりも大きなせん断強度定数が得られている。すなわち、地盤のせん断抵抗の方がプローブと地盤の摩擦抵抗よりも大きい結果になっている。

(2) 計測結果

ケーソン沈設時に1ロットおよび4ロットで計測した有効土圧（土圧計で計測した値から間隙水圧計の値を差し引いた値）および周面摩擦力度を図-4、表-2、表-3に示す。1ロット、4ロットの結果はともに、有効土圧と周面摩擦力度の間に相関関係があることを示している。なお、これらの値はニューマチックケーソンの東西南北面に設置した計測器で、ある深度において計測した値を平均したものである。

表-1 SBIFT結果

土層	プローブ表面形状	深度 GL(m)	c (kN/m ²)	φ (°)
礫混り細砂 10≦N≦30	突起型	15.34	17.6	35.4
	平滑型	16.34	12.4	20.8
礫混り細砂 30<N≦35	突起型	18.84	17.8	30.2
	平滑型	19.84	17.5	18.1
貝殻混りシルト	突起型	23.34	4.3	30.0
	平滑型	24.34	3.0	24.0
凝灰質粘土	突起型	27.34	19.3	29.1
	平滑型	28.24	6.8	18.2

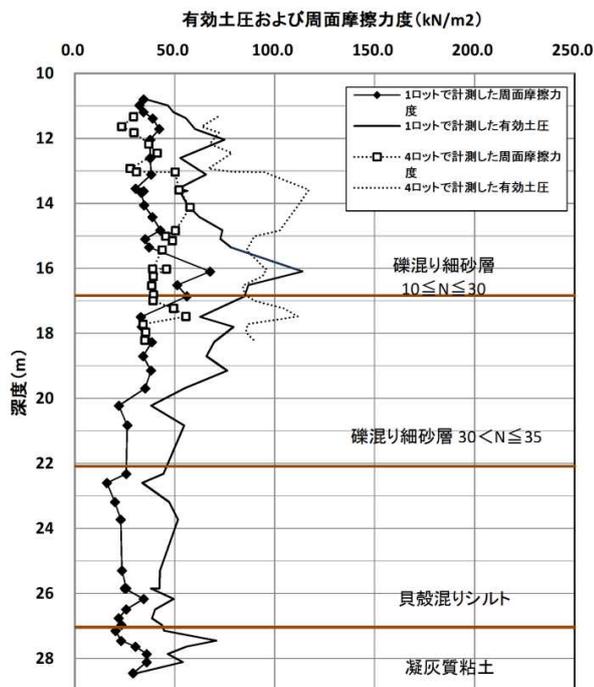


図-4 1ロットおよび4ロットの計測点における計測結果 (有効土圧および周面摩擦力度)

(3) SBIFTの妥当性確認

SBIFTのプローブは2種類のものを用いたが、突起型は土のせん断強度調査用、平滑型はプローブと地盤の摩擦抵抗測定用として試験に供している。今回、現場の計測結果と比較して、その用途の妥当性について確認する。

具体的確認方法は、SBIFT結果を使って推定する周面摩擦力度の式(1)²⁾の p_0 に計測された有効土圧を代入し、 c 、 ϕ には突起型、平滑型それぞれのプローブにより得られた値を代入して周面摩擦力度を求め、計測された周面摩擦力度と比較するという方法である。

$$f = c + p_0 \cdot \tan\phi \quad (1)$$

ここに、 f は周面摩擦力度(kN/m²)、 c はSBIFTの平滑型プローブでの粘着力(kN/m²)、 p_0 は静止土圧(kN/m²)、 ϕ は平滑型プローブでの内部摩擦角(°)を示している。

表-2 計測した有効土圧と周面摩擦力度 (1ロット)

計測深度 (m)	有効土圧 (kN/m ²)	周面摩擦力度 (kN/m ²)	計測深度 (m)	有効土圧 (kN/m ²)	周面摩擦力度 (kN/m ²)
10.797	35.9	34.4	18.697	65.9	34.2
10.980	46.5	32.3	19.413	76.2	38.1
11.188	49.3	34.4	19.686	54.9	35.2
11.377	55.6	39.0	20.223	38.1	22.0
11.707	60.2	42.2	20.833	54.6	26.3
12.040	74.8	37.7	22.319	44.3	25.8
12.601	52.8	37.7	22.597	33.7	16.0
13.108	65.6	38.2	23.189	47.2	20.0
13.543	51.6	30.4	23.730	51.7	23.0
13.616	56.4	34.4	25.298	42.6	23.6
13.660	52.8	33.3	25.846	42.3	25.7
14.054	56.4	34.6	25.848	38.0	24.8
14.418	62.4	38.9	26.170	49.5	34.4
14.823	73.8	42.8	26.495	40.0	25.7
15.093	72.8	35.1	26.795	38.6	21.9
15.347	77.9	37.2	26.967	43.5	23.3
16.093	113.8	67.6	27.149	44.6	20.3
16.507	86.8	51.3	27.454	70.8	23.2
16.860	84.9	56.0	27.631	56.0	30.3
17.492	62.6	33.0	27.862	46.5	36.0
17.794	79.4	33.4	28.113	54.0	35.9
18.262	69.7	38.5	28.451	31.0	29.1

表-3 計測した有効土圧と周面摩擦力度 (4ロット)

計測深度 (m)	有効土圧 (kN/m ²)	周面摩擦力度 (kN/m ²)	計測深度 (m)	有効土圧 (kN/m ²)	周面摩擦力度 (kN/m ²)
11.334	71.4	29.4	14.839	102.4	50.4
11.637	63.4	23.5	15.008	89.8	45.4
11.822	72.1	29.7	15.148	88.5	49.0
12.169	67.5	37.1	15.435	85.9	43.7
12.447	78.5	41.2	16.013	95.2	39.0
12.925	66.9	27.7	16.017	96.0	45.8
13.026	78.2	30.9	16.241	93.9	39.3
13.039	94.7	50.2	16.529	84.0	38.5
13.581	117.0	52.1	16.811	85.1	39.4
14.117	111.0	57.7	-	-	-

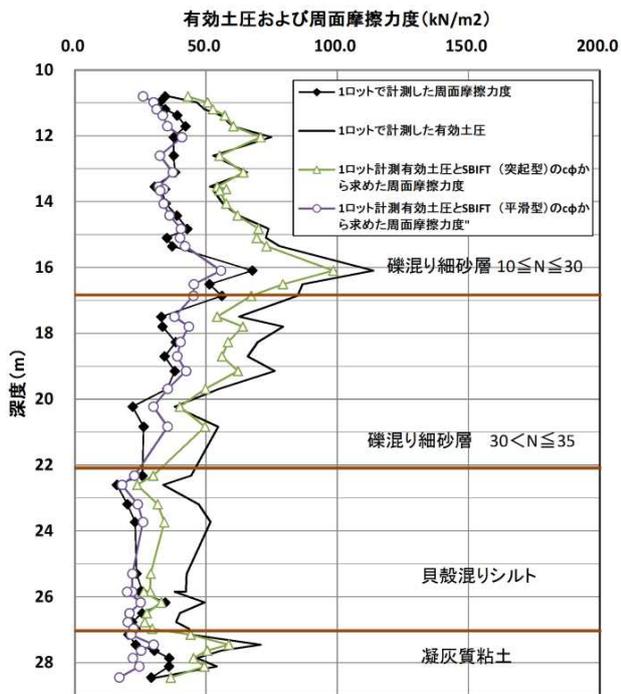


図-5 1ロットの計測結果を使つての妥当性確認

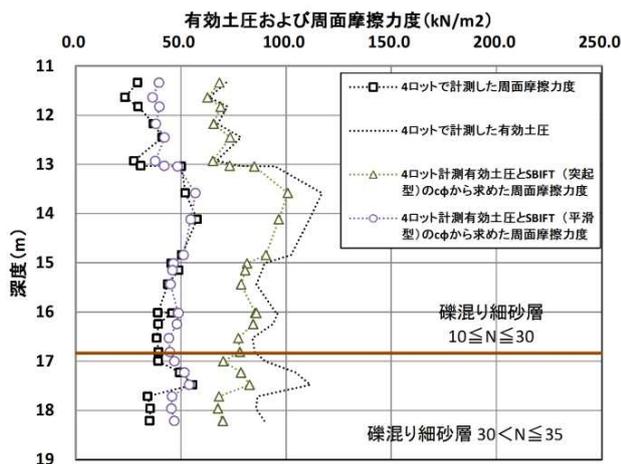


図-6 4ロットの計測結果を使つての妥当性確認

1ロットの比較結果を図-5に、4ロットの比較結果を図-6に示す。これらの結果から、平滑型の結果の方が計測された周面摩擦力度をうまく再現できており、平滑型プローブの用途の妥当性が確認できる。

4. ニューマチックケーソン施工時周面摩擦力度の有効な推定法

ニューマチックケーソン施工時の周面摩擦力度の推定法としての有効性を判断するため、提案するSBIFTによる方法やその他の推定値と、計測された周面摩擦力度とを比較する。

(1) SBIFTの結果から求める方法

SBIFTの結果から求める方法とは、式(1)を利用して周面摩擦力度を推定する方法である。ただし、利用に際しては、 c 、 ϕ には平滑型プローブにより得られた値を、 p_0 には静止土圧ではなく突起型のプローブにより得られた強度定数を式(2)³⁾、式(3)⁴⁾に代入して計算される主働土圧 p_A を用いた(土の単位体積重量は式(2)、式(3)、それぞれの出典元の基準を採用)。この理由は、フリクションカット無しのニューマチックケーソンといえども刃口金物先端の補強鉄板($t=25\text{mm}$)の存在によって、躯体と周囲の地盤との間に若干の隙間ができ、作用する土圧は主働状態なるものと考えられるからである。

$$p_A = K_A \cdot \gamma \cdot x + K_A \cdot q \quad (2)$$

$$\text{ただし、} K_A = \frac{\cos 2\phi}{\cos \delta \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin \phi}{\cos \delta}} \right)^2}$$

ここに、 p_A は主働土圧(kN/m^2)、 K_A はクーロンの主働土圧係数、 γ は土の単位体積重量(kN/m^3)、 x は地表面からの深さ(m)、 q は施工時の地表の載荷重(kN/m^2)、 δ は壁背面と土の壁面摩擦角($\delta = \phi/3$)⁵⁾を示している。

$$\left. \begin{array}{l} \text{砂質土の場合 } p_A = \bar{\gamma}_e \cdot z \cdot K_A \\ \text{粘性土の場合 } p_A = \bar{\gamma}_e \cdot z - 2c \end{array} \right\} \quad (3)$$

ここに、 p_A は主働土圧力度(kN/m^2) (ただし、 $0 \leq p_A \leq p_0$)、 K_A は主働土圧係数($\tan^2(45 - \phi/2)$)、 z は土圧がケーソン側壁に作用する深さ(m)、 $\bar{\gamma}_e$ は深さ z までの土の平均単位体積重量(kN/m^3)、 ϕ は土の内部摩擦角($^\circ$)、 c は土の粘着力度(kN/m^2)を示している。

(2) 比較するその他の方法

比較するその他の方法として、道路橋示方書IV下工編に示されるケーソン基礎施工時の周面摩擦力度⁵⁾ (以下、“道示の周面摩擦力度”と称す) および首都高速道路株式会社仮設構造物設計要領に示される鋼管矢板と地盤との摩擦力度の式⁶⁾ (以下、“首都高仮設設計要領の式”と称す) を選んだ。首都高仮設設計要領の式を式(4)に示す。

$$\left. \begin{array}{l} \text{砂質土の場合 } f = 5N \ (\leq 150) \\ \text{粘性土の場合 } f = c \text{ または } 10N \ (\leq 100) \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここに、 f は周面摩擦力度(kN/m^2)、 c は土の粘着力(kN/m^2)、 N は標準貫入試験のN値を示す。

なお、首都高仮設設計要領の式による摩擦力度の算定において、礫混り細砂層、貝殻混りシルト層のN値は図-2のN値の深度方向の変化グラフから各計測深度に対応するN値を読み取り、推定N値とした。また、凝灰質粘土

表-4 SBIFTの結果から求めた周面摩擦力度の推定値

土層	試験深度 (GL-m)	有効土被り圧 (kNm ²)	K_A	主働土圧 (kNm ²)	周面摩擦力度 (kNm ²)
礫混り細砂 (10≦N≦30)	15.347	134.2	0.247	33.1	25.0
		124.8	0.266	33.2	25.0
礫混り細砂 (30<N≦35)	18.697	165.0	0.306	50.5	34.0
		153.6	0.330	50.7	34.1
		204.5	0.308	63.0	31.1
貝殻混りシルト	23.189	189.6	1.000	180.9≧ 94.8=ρ ₀	45.2
		225.8	0.320	72.3	30.5
凝灰質粘土	27.454	211.0	1.000	172.4≧ 10.5=ρ ₀	41.5

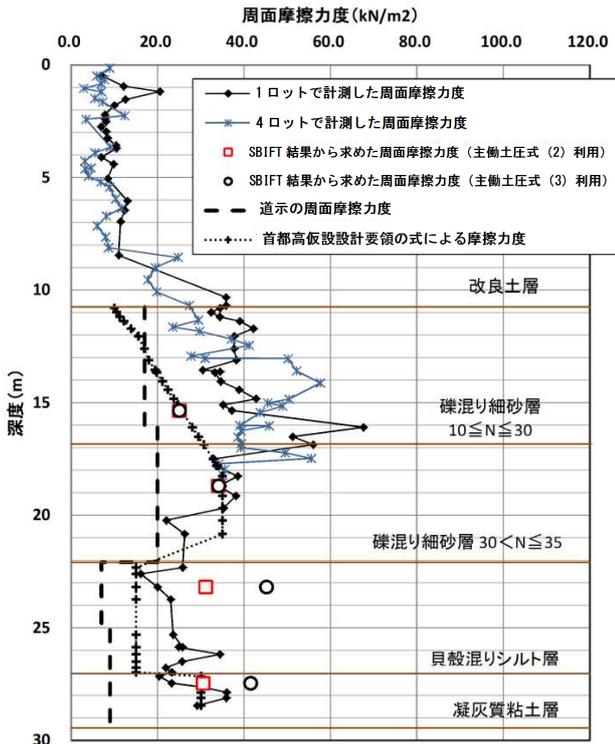


図-7 周面摩擦力度の推定値と計測値の比較グラフ

層は試験位置から7m離れた位置での既往の標準貫入試験データを用い、N=6とした。

(3) 計測値と予測値の比較

表-4にSBIFTの結果から求める方法で算定した周面摩擦力度を示す。なお、各土層の上段の主働土圧が式(2)、下段の主働土圧が式(3)により求めた値である。

図-7に、ケーソン1ロットおよび4ロットで計測した周面摩擦力度と、SBIFTによる方法で推定した周面摩擦力度、道示の周面摩擦力度および首都高仮設設計要領の式による摩擦力度とを比較する。図-7から以下のことがわかる。

①礫混り細砂層 (30<N≦35) , 貝殻混りシルト層, 凝灰質粘土層において、SBIFTの結果から求めた周面摩擦力度 (主働土圧式(2)利用) は、計測した周面摩擦

力度に近い値を示している。

②SBIFTの結果から求めた周面摩擦力度 (主働土圧式(3)利用) は、貝殻混りシルト層, 凝灰質粘土層において、計測した値の約2倍もの大きな値を推定している。

③周面摩擦力度の計測値はフリクションカットが無いので、いずれの土層においても道路橋示方書に示されるフリクションカットがあるケーソン施工時の摩擦力度よりも、大幅に大きな値であった。

④首都高仮設設計要領の式による摩擦力度は礫混り細砂層 (30<N≦35) および凝灰質粘土層において、計測した周面摩擦力度にほぼ等しいが、礫混り細砂層 (10≦N≦30) および貝殻混り細砂層では計測値の約半分程度の値を示している。

⑤礫混り細砂層 (10≦N≦30) において、SBIFTの結果から求めた周面摩擦力度 (主働土圧式(2), (3)とも) は首都高仮設設計要領の式による摩擦力度とほぼ同様の値を示したが、計測値を大きく下回った。

(4) 考察

比較の結果を踏まえて以下のように考察する。

①SBIFTの結果から求める方法 (式(2)利用) は、礫混り細砂層 (10≦N≦30) を除く、礫混り細砂層 (30<N≦35) , 貝殻混りシルト層, 凝灰質粘土層での施工時の周面摩擦力度を概ね再現できた。

②首都高仮設設計要領の式による摩擦力度は礫混り細砂層 (30<N≦35) , 凝灰質粘土層では計測値にほぼ等しい結果となったが、礫混り細砂 (10≦N≦30) および貝殻混りシルト層の周面摩擦力度をうまく再現できなかった。首都高の仮設構造物設計要領の解説よればこの推定式は、N≦2での信頼性が乏しいとされており、貝殻混りシルト層については、地盤が軟弱であることがうまく再現できない原因かもしれない。

③礫混り細砂 (10≦N≦30) において計測値が推定値を大きく上回るのは、比較的細粒分が少なく間隙が大きいため、経時的に間隙が減少して周囲の地盤が密になったためではないかと考える。これに対して、礫混り細砂層 (30≦N<35) においては間隙を粘性土が埋めている部分が確認されており、密になりにくかったとの考えられる。よって、礫混り細砂層 (10≦N≦30) の周面摩擦力度を的確に推定するには時間の影響を考慮する必要があるものと思われる。

④SBIFTの結果から求めた周面摩擦力度 (式(3)利用) が粘性土地盤において大きな値を示すのは、主働土圧を安全のために大きく見積もり過ぎているためと考えられる。今回、計算した土圧は静止土圧よりも大きくなり、実際は上限である静止土圧を採用している。

5. 周面摩擦力度に与える時間の影響について

前章の考察で述べたように、礫混り細砂層（ $10 \leq N \leq 30$ ）の周面摩擦力度を的確に推定するには時間の影響を考慮する必要があると思われる。よって、この章では計測された周面摩擦力度を目的変数に、周面摩擦力度の理論値と着目する時間を説明変数にして重回帰分析を行い、重回帰式で再現した周面摩擦力度と計測値を比較するとともに、標準重回帰係数から実際の周面摩擦力度に与える時間の影響を考察する。

(1) 着目する時間

周面摩擦力度に影響を与える時間としては、以下の2つのものが考えられる。

①掘削沈下待機時間

ケーソンの沈下がストップして、再び沈下を始めるまでの時間（単位：日、 W_p と表記する）

②応力解放時間

ケーソンの刃先がその深度に到達してから、その深度が計測機器設置深度に至るまでの時間（単位：日、 R_p と表記する）

1および4ロットで周面摩擦を計測した深度に対するこれらの時間を表にしたものが表-5である。

(2) 理論周面摩擦力度

各計測深度における理論周面摩擦力度とその算出のために必要な値を表-6に示すが、SBIFTは礫混り細砂層（ $10 \leq N \leq 30$ ）において1深度しか実施してないので、首都高の摩擦力度を求める際に使用した推定N値を式(5)⁷⁾に当てはめて内部摩擦角 ϕ_F を求めた。主働土圧は式(3)を使用して求めた。そして、理論周面摩擦力度は式

表-5 計測深度における W_p , R_p

計測深度 (GL-m)	1ロット		4ロット		
	W_p (日)	R_p (日)	計測深度 (GL-m)	W_p (日)	R_p (日)
10.797	1.766	93.345	11.334	8.813	246.697
10.980	1.056	93.792	11.637	0.020	245.056
11.188	1.023	92.997	11.822	6.995	251.933
11.377	3.196	95.845	12.169	0.140	248.012
11.707	1.770	95.935	12.447	6.806	251.840
12.040	2.016	93.837	12.925	0.023	248.455
12.601	5.119	95.874	13.026	0.017	232.049
13.108	13.872	89.951	13.039	7.228	239.265
13.543	2.040	84.983	13.581	3.975	236.213
13.616	0.056	85.024	14.117	5.985	237.059
13.660	0.082	85.081	14.839	3.821	196.937
14.054	4.772	84.762	15.008	0.085	196.898
14.418	1.990	83.892	15.148	2.129	196.272
14.823	3.210	46.058	15.435	0.998	197.055
15.093	2.010	45.556	16.013	1.018	193.369
15.347	1.862	46.835	16.017	1.660	194.997
16.093	38.958	80.942	16.241	1.299	193.047
16.507	3.199	79.215	16.529	2.024	193.329

(1)に主働土圧とSBIFT（平滑型プローブ）結果の c , ϕ を代入して求めた。

$$\phi_F = 1.85 \left(\frac{N}{\sigma_v' / 100 + 0.7} \right)^{0.6} + 26 \quad (5)$$

$$\sigma_v' = \gamma_t \cdot h_w + (\gamma_t - \gamma_w)(z - h_w)$$

ここに、 ϕ_F は内部摩擦角($^\circ$)、 N は標準貫入試験のN値、 σ_v' は有効上載土圧(kN/m^2)、 γ_t は土の単位体積重量(kN/m^3)、 h_w は地表面から地下水位までの深さ(m)、 γ_w は水の単位体積重量(kN/m^3)、 z は地表面から当該位置までの深さ(m)を示している。

(3) 重回帰分析の概要と結果

時間の影響を実際の周面摩擦力度にうまく反映させるための説明変数を見つけるため、表-7に示すケースの重回帰分析を行い、それぞれのケースの相関係数を求めた。なお、ケース7における説明変数2は W_p と R_p の数値の比率を勘案し、ここでは仮に $(50W_p + R_p)$ とした。

一般に、相関係数 R が0.7よりも大きければそれぞれの変量の間には強い相関があるとされている⁸⁾。このこと

表-6 各計測深度における理論周面摩擦力度

計測 ロット	計測 深度 (GL-m)	有効 土被り圧 (kN/m^2)	推定 N値 (回)	ϕ_F ($^\circ$)	主働土圧 (kN/m^2)	理論周面摩 擦力度 c (kN/m^2)
1	10.797	88.4	10.0	31.6	27.6	22.9
	10.980	89.9	10.5	31.7	27.9	23.0
	11.188	91.5	11.2	31.9	28.2	23.1
	11.377	93.0	12.2	32.2	28.4	23.2
	11.707	95.7	13.8	32.6	28.7	23.3
	12.040	98.3	15.5	33.0	29.0	23.4
	12.601	102.8	16.9	33.3	30.0	23.8
	13.108	106.9	17.9	33.4	31.0	24.2
	13.543	110.4	19.4	33.7	31.6	24.4
	13.616	110.9	19.6	33.7	31.7	24.5
	13.660	111.3	19.8	33.8	31.8	24.5
	14.054	114.5	21.1	34.0	32.4	24.7
	14.418	117.4	22.3	34.2	32.9	24.9
	14.823	120.6	23.7	34.4	33.5	25.1
	15.093	122.8	24.6	34.5	33.9	25.3
	15.347	124.8	25.5	34.7	34.3	25.4
	16.093	131.4	28.0	35.0	35.6	25.9
4	16.507	135.2	29.4	35.1	36.4	26.2
	11.334	92.6	12.0	32.1	28.3	23.1
	11.637	95.0	13.5	32.5	28.6	23.3
	11.822	96.5	14.4	32.8	28.7	23.3
	12.169	99.3	16.1	33.1	29.1	23.5
	12.447	101.5	16.6	33.2	29.6	23.7
	12.925	105.3	17.6	33.4	30.6	24.0
	13.026	106.1	17.8	33.4	30.8	24.1
	13.039	106.2	17.8	33.4	30.8	24.1
	13.581	110.6	19.5	33.7	31.6	24.4
	14.117	114.8	21.3	34.0	32.4	24.7
	14.839	120.6	23.8	34.4	33.5	25.1
	15.008	122.0	24.4	34.5	33.8	25.2
	15.148	123.1	24.8	34.6	34.0	25.3
	15.435	125.4	25.8	34.7	34.4	25.5
	16.013	130.0	27.8	35.0	35.3	25.8
	16.017	130.0	27.8	35.0	35.3	25.8
16.241	131.8	28.5	35.1	35.6	25.9	
16.529	134.1	29.5	35.2	36.1	26.1	

表-7 重回帰分析実施ケース

CASE	目的変数	説明変数1	説明変数2	対象ロット	相関係数R
1	計測周面摩擦力度 f_m	理論周面摩擦力度 f	W_p	1	0.8596
2	同上	同上	W_p	4	0.6606
3	同上	同上	W_p	1および4	0.7059
4	同上	同上	R_p	1	0.6502
5	同上	同上	R_p	4	0.5387
6	同上	同上	R_p	1および4	0.5237
7	同上	同上	$50W_p+R_p$	1および4	0.7135

表-8 係数 α の感度分析結果

係数 α	40	42	44	46	48
相関係数R	0.71280	0.71304	0.71322	0.71334	0.71341
係数 α	50	52	54	56	58
相関係数R	0.71345	0.71347	0.71346	0.71343	0.71339

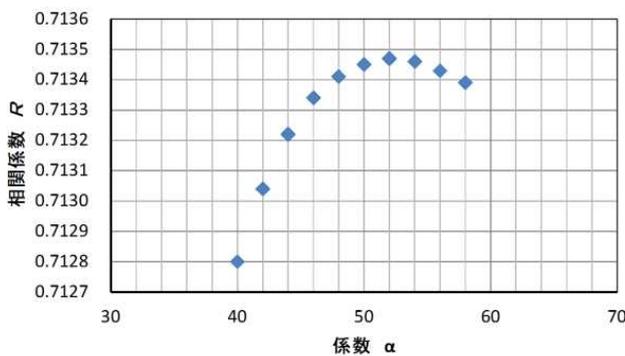


図-8 係数 α の感度分析結果

を踏まえると、時間の説明変数として、待機時間 (W_p) だけを考慮しても周面摩擦力度を推定できる可能性があるが、ケース3よりもケース7のほうが相関係数が大きいので、応力解放時間 (R_p) もうまく組み合わせて時間変数とすれば、より精度よく周面摩擦力度の推定ができる可能性もある。なお、ここでケース3とケース7に着目したのは対象ロッドを「1および4」としたときに0.7以上の相関係数が得られているからである。

(4) 時間の説明変数の最適化

(3)の知見より、時間の説明変数としての適切な組み合わせを決めるために、 α を40~58の間で変化させて再度、重回帰分析を行い、最大の相関係数が得られる α を求める感度分析を行った。感度分析の結果を表-8、図-8に示す。これらより、最も大きな相関係数が得られるのは $\alpha = 52$ であることがわかった。そこで、 $(52W_p+R_p)$ を説明変数2として、重回帰式を求めると式(6)が得られた。式(6)で得られる周面摩擦力度の推定値と計測された周面摩擦力度の深度方向の比較を図-9に示している。この

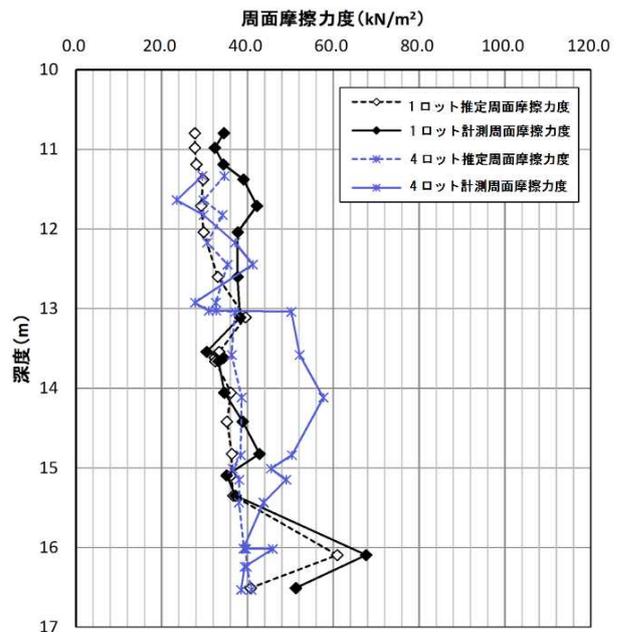


図-9 深度方向の周面摩擦力度の計測値と予測値の対比

図からわかるように、まだ十分に周面摩擦力度の再現ができていない部分もあるが、式(6)を使えば大まかな推定はできそうである。しかし、式(6)の定数項-62.748の絶対値が大きいため、両説明変数がともに小さくなる浅い深度では推定値と実測値が乖離することが考えられるため、本式の適用深度は今回のような範囲に限られるものと思われる。次に、各変数を正規化して得られた重回帰式を式(7)に示している。式(7)から実際の周面摩擦力度に与える時間の影響は、理論周面摩擦力度以上であることがわかった。

$$Y = 3.9956 x_1 + 0.0114 x_2 - 62.748 \quad (6)$$

$$Y_N = 0.4556 x_{1N} + 0.4924 x_{2N} - 3.60 \times 10^{-15} \quad (7)$$

ここに、 Y は推定される周面摩擦力度、 x_1 は理論周面摩擦力度、 x_2 は $(52W_p+R_p)$ 、 Y_N は正規化した推定周面摩擦力度、 x_{1N} は正規化した理論周面摩擦力度、 x_{2N} は正規化した $(52W_p+R_p)$ を示す。なお、正規化とは各データとその平均値との差を標準偏差で除した値に変換することを指す。

6. まとめ

今回の試みの結果から得られた知見を以下にまとめる。

- ① 首都高仮設設計要領の摩擦力度式では、貝殻混りシルト層における施工時の周面摩擦力度をうまく再現できなかった。この理由としては同設計要領には信頼性の問題から軟弱層での式の使用は制限されており、地盤が軟弱であることがその原因である可能性がある。

② SBIFTの結果を以下のように利用すれば礫混り細砂 ($10 \leq N \leq 30$) を除く土層において、フリクションカットがないニューマチックケーソン施工時の周面摩擦力度を概ね再現できたので、これらの土層におけるニューマチックケーソンの施工時の周面摩擦の推定に利用できるものと思われる。

(手順1) 突起型プローブの結果から土の強度定数を求める。

(手順2) 求めた強度定数を使って主働土圧を求め、摩擦力度を求める式(1)に代入する。

(手順3) 平滑型プローブの結果から得られる c , ϕ を周面摩擦力度を求める式(1)に代入する。

③ 経時的に締まり具合が増すような土層については理論周面摩擦力度の影響以上に、掘削待機時間と応力解放時間が実際の周面摩擦力度に影響を及ぼす。したがって、そのような土層についてはそれらの時間を考慮して推定する必要がある。

④ 礫混り細砂層 ($10 \leq N \leq 30$) における周面摩擦力度を推定する式は、式(6)の形で得られたが、定数項が大きいので利用できる深度は今回と同様の範囲に限られるものと思われる。よって、今後、他工事のデ

ータをより多く反映させて適用可能範囲を広げていく必要がある。

参考文献

- 1) 徐光黎, 前田良刀, 落合英俊, 安福規之, 坂田道明: 原位置摩擦試験による地盤の強度・変形定数の推定と実務への適用, 土木学会論文集, 第 617 号, III-46, pp.191-200, 1999.
- 2) 「基礎地盤コンサルタンツ株式会社」 (SBIFT) <http://www.kiso.co.jp/pdfs/catlog/SBIFT_cat.pdf#search='SBIFT'>(2017/ 1/20 アクセス)
- 3) 日本圧気技術協会: 大型地下構造物ケーソン設計マニュアル, p.6, 2015.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計基準・同解説—基礎構造物, pp.210-211, 2012.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, p.327, 2012.
- 6) 土木学会: シールド工食用立坑の設計, pp.4-12, 2016.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—開削トンネル p.60, 2001.
- 8) 小野瀬宏: 統計データ解析, p.74, 2002.

(2017. 8. 11 受付)

REPORT ON THE PERIPHERAL FRICTION FORCE PER UNIT AREA OF A PNEUMATIC CAISSON OF THE TYPE WITHOUT FRICTION CUTTER

Motoi KAWASAKI, Kouji SAGAWA, Hidenori TERAMOTO,
Takashi YAYAMAGUCHI and Youji HISAMOTO

The pneumatic caisson method is a construction method with many merits, but if the frictional force between the ground and the caisson is greatly different from the assumed value, it will be difficult to sink. In urban areas, the number of cases without friction cutter is increasing, and the risk is further increased. So, we are trying to predict the peripheral frictional force per unit area in such the case. This time, we analyzed the local data and the results of the field shear test (SBIFT) etc. carried out before the construction there, we found that the results of the SBIFT test can be effectively used for prediction and it is necessary to consider the waiting time of sinking in the case of soil where earth pressure increases with time.