

大深度オールケーシング工法の課題と対策 Challenges and Solutions of Deep All-Casing Method

鈴木 俊吾* 中野 文彦*
Shungo Suzuki Fumihiko Nakano
市川 督人**
Masato Ichikawa

要 約

本工事は、羽田空港から川崎市浮島までを首都高湾岸線と並走する国道357号多摩川シールドトンネル工事の到達立坑をニューマチックケーソン工法により施工する工事である。本文では、ケーソン沈設範囲の地中障害物撤去と首都高構造物の変位抑制を目的とした大深度オールケーシング工法の課題と対策について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 大深度オールケーシング工法施工時の課題
- § 3. 置換杭工（大深度オールケーシング工法）の概要
- § 4. 二重管施工における工夫
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、羽田空港から川崎市浮島までを首都高湾岸線と並走する国道357号多摩川シールドトンネル工事の到達立坑をニューマチックケーソン工法により施工する工事である。本工事の主な特徴は下記2点である。

- ・埋立地である羽田地区に位置し、支障物探査の結果、ケーソン沈設範囲内に地中障害物が確認されたため、ケーソン沈設前に障害物撤去が必要である。
- ・首都高速のU型擁壁とケーソン躯体との離隔が6.4mと近接しており、首都高の許容変位は水平3mm、鉛直5mmと極めて小さいため、首都高の変位抑制が重要課題である。

本文では、ケーソン沈設範囲の地中障害物撤去と首都高構造物の変位抑制を目的とした大深度オールケーシング工法の施工上の課題と対策について報告する。

1-1 工事概要

工 事 名：R2 国道357号多摩川トンネル羽田立坑工事
発 注 者：国土交通省関東地方整備局川崎国道事務所
施 工 者：西松・奥村特定建設工事共同企業体
工事場所：東京都大田区羽田空港地先

工 期：自) 2021年3月23日～至) 2025年3月31日

工事内容：ニューマチックケーソン工

46m×28.1m, H=31m (次工事にて施工)

付帯工事 (埋設管路工)

地盤改良工

置換杭工 (大深度オールケーシング工法)

φ2500～φ2000 L=21.5m～79.0m

N=182本

支障物探査

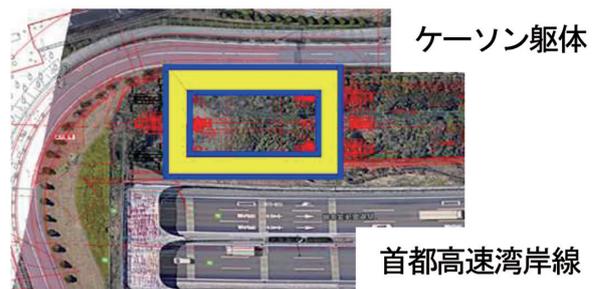
地中埋設物撤去工

土砂ピット工

防護施設工



図一 工事場所位置図



図二 工事場所位置図

* 関東土木 (支) 羽田立坑 (出)

** 土木設計部設計3課

1-2 大深度オールケーシング工法選定の経緯

ケーソン沈設範囲内を支障物探査した結果、Bsg層に最大径1m以上のコンクリート殻や鋼矢板などの地中障害物が確認された。この地中障害物により、ケーソン沈設が不可能になるリスクがあるため、事前にオールケーシング工法による地中障害物撤去を行うこととなった。

また、当初設計では図-3に示すように地中連続壁による変位抑制対策が計画されていたが、ケーソン着底地盤が軟弱層であるため、着底時のケーソン荷重によって側方変位を生じ、首都高擁壁の許容変位を上回ることが予想された。そのため、ケーソン荷重を支持杭で受けることで側方変位抑止を図る対策方法に変更した。変更後の首都高変位抑制対策を図-4に示す。変更設計では、ケーソンの施工時荷重を支持層まで伝達する支持杭L=79mが必要となった。

以上より、オールケーシング工法による地中障害物撤去と首都高変位抑制対策（支持杭L=79m）を実施可能な大深度オールケーシング工法を選定した。

§2. 大深度オールケーシング工法施工時の課題

オールケーシング工法において、当社の施工実績はφ1500、杭長65mであった。本杭の仕様杭径φ2000、杭長79mは当社初の施工となり、前例のない杭施工によるリスクとして、ケーシング引抜時の回転トルク値の不足が懸念されたため、周面摩擦への対応が課題となった。

2-1 ケーシング引抜可否について

掘削径φ2000単独で施工した場合を想定して、ケーシングの引抜可否について計算を行った。

表-1にケーシング引抜判定で使用される計算条件を示す。掘削径はφ2000であり、機種はφ2000が施工可能なRT-200Hとした（引抜力、トルク、機械重量はRT-200Hの諸元）。

続いて、表-2に周面摩擦抵抗力を示す。地質情報は、事前に行った土質調査結果を採用している。各地質の層厚から算出される層間の表面積と単位摩擦力度を乗じることで、各層の摩擦力が算出され、その集計が周面摩擦抵抗力となる。単位摩擦力度については、地質とN値から従来の計算方法で算出した数値である。また、機械能力については故障のリスクを考慮し、一般的な80%とした。

以上の諸元等を用いて計算した結果を表-3に示す。引抜可否については周面摩擦抵抗力(①)と回転引抜余力(⑨)の比較により判定される。判定方法を下記に示す。

- ・回転引抜余力(⑨) > 周面摩擦抵抗力(①)かつ引抜余力(⑥) > 0 の場合、引抜可能
 - ・回転引抜余力(⑨) < 周面摩擦抵抗力(①)または引抜余力(⑥) < 0 の場合、引抜不可能
- 今回は回転引抜余力(⑨)と周面摩擦抵抗力(①)の

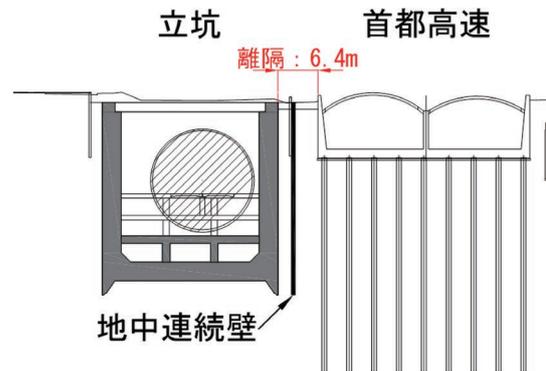


図-3 到達立坑近接構造物断面図

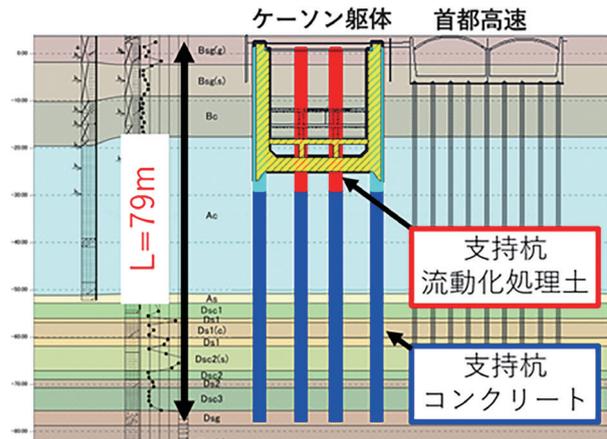


図-4 首都高変位抑制対策仕様

表-1 ケーシング引抜判定 計算条件

項目	諸元
機種	RT-200H
掘削径	φ2000 mm
引抜力	352.0 tf
トルク	301.0 tf・m
ケーシング径	2.0 m
機械重量	26.0 t
ケーシング重量	144.0 t
周面摩擦抵抗力	265.4 tf
機械能力	80%

表-2 周面摩擦抵抗力 (φ2000単独)¹⁾

地質	層厚 (m)	単位摩擦力度 (tf/m ²)	層間の表面積 (m ²)	摩擦力 (tf)
Bsg (g)	2.15	0.60	13.51	8.1
Bsg (C)	9.90	0.50	62.20	31.1
Bsg (s)	1.10	0.60	6.91	4.1
Bc	6.20	0.50	38.96	19.5
Ac	33.80	0.50	212.37	106.2
As	1.95	0.50	12.25	6.1
Dsc1	2.55	0.50	16.02	8.0
Ds1	3.05	0.50	19.16	9.6
Ds1 (C)	4.80	0.60	30.16	18.1
Dsc2 (s)	2.95	0.50	18.54	9.3
Dsc2	2.50	0.60	15.71	9.4
Ds2	1.05	0.60	6.60	4.0
Dsc3	5.35	0.60	33.62	20.2
Dsg	2.65	0.70	16.65	11.7
周面摩擦抵抗力総計				265.4

表-3 ケーシング引抜判定 (回転併用)¹⁾

No	項目	数値	備考
①	周面摩擦抵抗力	265.4 tf	
②	ケーシング重量	144.0 tf	
③	機械重量	26.0 tf	
④	最大引抜力	352.0 tf	
⑤	有効引抜力	281.6 tf	= ④×80%
⑥	引抜余力	111.6 tf	= ⑤-②-③
⑦	接線力	301.0 tf	= トルク÷ケーシング半径
⑧	有効接線力	240.8 tf	= ⑦×80%
⑨	回転引抜余力	265.4 tf	= $\sqrt{\{⑥^2+⑧^2\}}$

表-4 周面摩擦抵抗力 (二重管)¹⁾

地質	層厚 (m)	単位摩擦力度 (tf/m ²)	層間の表面積 (m ²)	摩擦力 (tf)
Ac	21.59	0.50	135.65	67.8
As	1.95	0.50	12.25	6.1
Dsc1	2.55	0.50	16.02	8.0
Ds1	3.05	0.50	19.16	9.6
Ds1 (C)	4.80	0.60	30.16	18.1
Dsc2 (s)	2.95	0.50	18.54	9.3
Dsc2	2.50	0.60	15.71	9.4
Ds2	1.05	0.60	6.60	4.0
Dsc3	5.35	0.60	33.62	20.2
Dsg	2.65	0.70	16.65	11.7
周面摩擦抵抗力総計				164.2

数値が同値であったため、掘削径φ2000 単独で施工した場合は引抜不可能という結果であった。

2-2 周面摩擦低減の対策

2-1 の結果を踏まえ、φ2000 の周面摩擦低減対策として、φ2500 で先行施工する二重管工法を選定した。全周回転掘削機はφ2500 が施工可能な機種 (RT-260H) に変更し、ケーソン着底深度から2 m 下方までをφ2500 で施工、以深をφ2000 で施工とすることで、表-4 の通り周面摩擦抵抗力は掘削径φ2000 単独で施工した場合の265.4 tf から164.2 tf (38%減) まで減少した。

§3. 置換杭工 (大深度オールケーシング工法) の概要

前述1章で述べた大深度オールケーシング工法 (置換杭工) の平面図を図-5、断面図を図-6 に示した。各杭の様、目的、置換材は下記の通りである。

- ・赤色の「置換杭(1)」はφ2500 を碎石、φ2000 をコンクリートで置換する杭長79 m の杭である。当杭の目的はケーソン全施工ステップにおける首都高変位抑制対策、刃口部の置換、地中障害物撤去であり、ケーソン刃口部に配置している。
- ・緑色の「置換杭(2)」はケーソン着底深度-2 m までをφ2000 で碎石に置換する杭長31.5 m の杭である。目的はケーソン全施工ステップにおける首都高変位抑制対策、刃口部の置換、地中障害物撤去であり置換杭(1)と同様に刃口部に配置している。

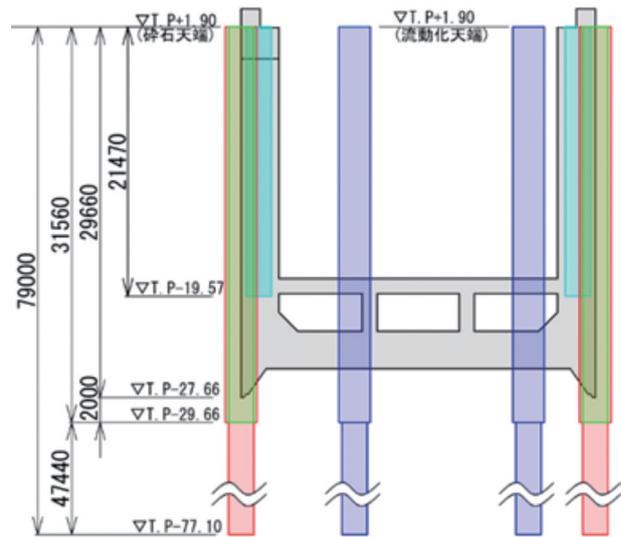


図-5 置換杭工概要 平面図 (大深度オールケーシング工法)

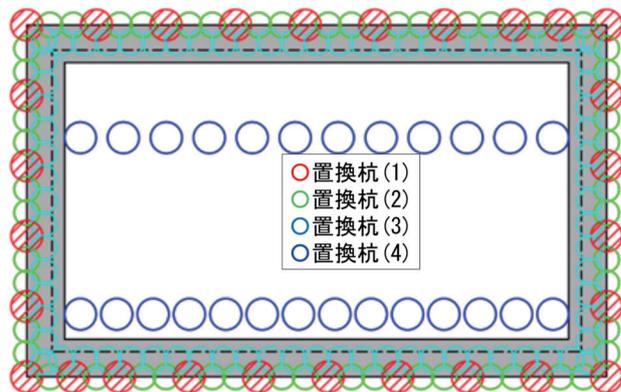


図-6 置換杭工概要 断面図 (大深度オールケーシング工法)

- ・水色の「置換杭(3)」は埋立層の深度までをφ2000 で碎石に置換する杭長21.4 m の杭である。地中障害物撤去を目的としており、置換杭(1)より内側に配置している。
- ・青色の「置換杭(4)」はφ2500 を流動化処理土、φ2000 をコンクリートで置換する杭長79 m の杭である。当杭はケーソン初期構築時の支持杭である。首都高変位抑制対策の目的もあるため、首都高側に寄せた配置とした。

杭種は合計で4種あり、そのうち2種 (置換杭(1)、置換杭(3)) が二重管施工の杭である。

3-1 大深度オールケーシング工法の施工フロー

大深度オールケーシング工法の施工手順を以下に示す (図-7、図-8)。

① 敷鉄板、H 鋼架台、定規鉄板の敷設

定規鉄板の沈下抑制のために敷鉄板を敷設し、φ2500 ケーシング仮受け時の作業空間確保を目的として、山留材 (400 H) を2段に組み立てた H 鋼架台を設置する (後述の4章にて詳述)。上記 H 鋼架台の上に、杭芯に合わせて全周回転掘削機を据え付ける際の定規となる鉄板を設置する。

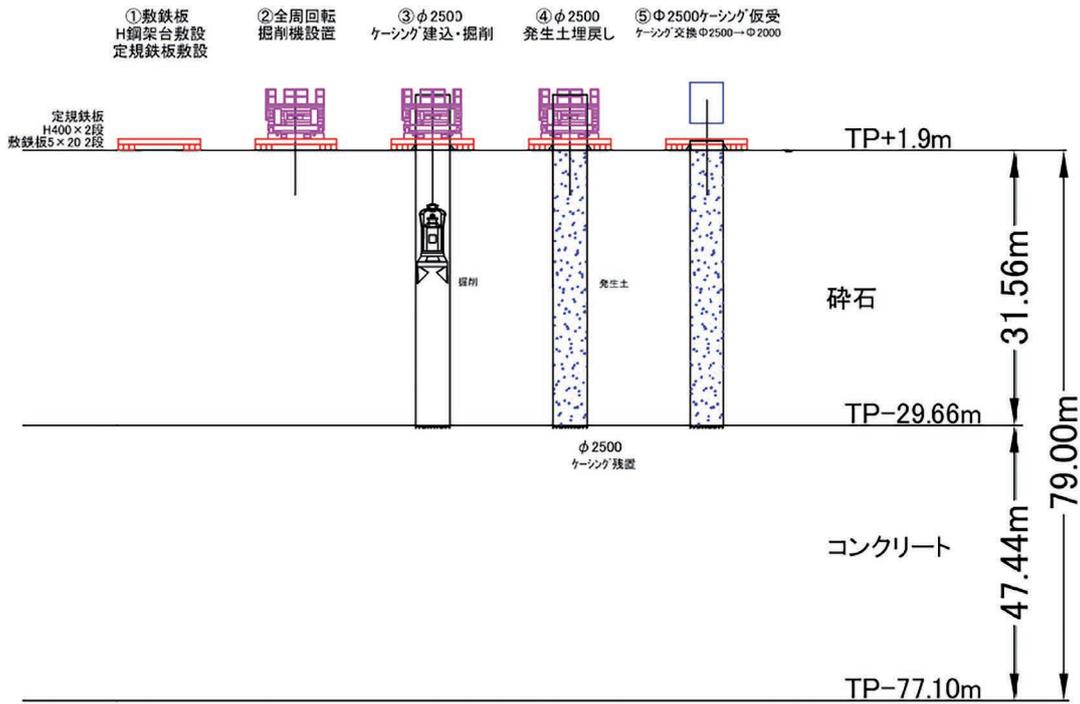


図-7 大深度オールケーシング工法の施工フロー

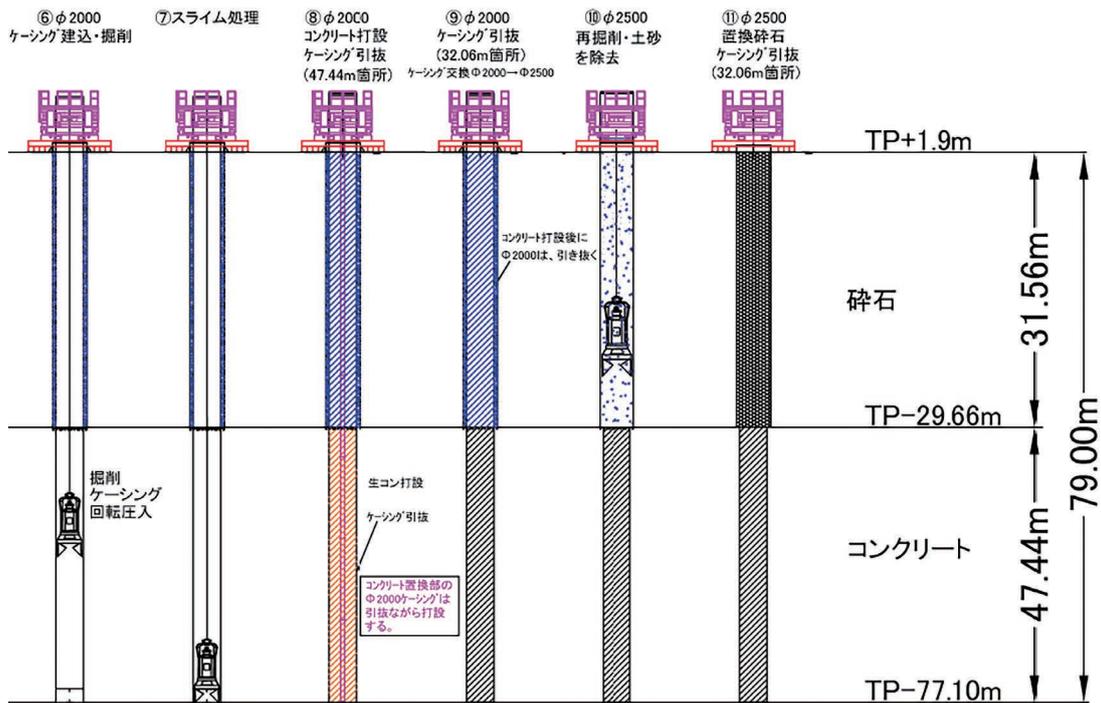


図-8 大深度オールケーシング工法の施工フロー

② 全周回転掘削機設置

定規鉄板上に全周回転掘削機を設置する。

③ φ2500 ケーシング建込・掘削

全周回転掘削機にケーシングを挿入する。ケーシングを回転圧入しハンマークラブにて土砂掘削を行う。

④ φ2500 発生土埋戻し

所定の深度まで掘削が完了した後、φ2500 ケーシング内において施工基面の高さまでふるい分けした発生土の埋戻しを行う。目的はφ2000の施工において、鉛直精度

を確保するためである。

⑤ φ2500 仮受、ケーシングφ2500→φ2000の交換

φ2500 ケーシングを回転し、ブラケットの孔面を所定の位置に合わせる。φ2500 ケーシングを1本切り離してケーシングを仮受けする(後述の4章にて詳述)。その後、全周回転掘削機を撤去し、チャックをφ2500用からφ2000用に交換する。

⑥ φ2000 ケーシング建込・掘削

φ2500と同様にケーシングを回転圧入しハンマーク



写真一 1 ブラケット、特注ケーシング

ラブにて土砂掘削を行う。

⑦ 孔底処理

コンクリート打設前に、ハンマグラブとスライムバケットにて孔底処理を行う。

⑧ φ2000 コンクリート打設

ケーシング内にトレミー管を建込み、トレミー工法でコンクリートの打設を行う。

⑨ ケーシングの交換φ2000→φ2500

コンクリート打設後、残りのφ2000ケーシング全て引抜き、チャックをφ2000からφ2500へ交換する。

⑩ φ2500再掘削（レイタンス・土砂を除去）

④の残土及びレイタンスをハンマグラブにて除去する。

⑪ φ2500 碎石 or 流動化処理土置換

ケーシング内に碎石を投入し、施工基面まで置換を行う。置換完了後に全周回転掘削機を撤去する。

流動化処理土に置換する場合は、⑧と同様にトレミー工法にて施工基面まで打設を行う。打設後日、流動化処理土表層部に発生したレイタンスを除去する。

§4. 二重管施工における工夫

二重管施工における工夫は以下の2点である。

4-1 φ2500 ケーシングの仮受

二重管で施工する場合、先行して施工するφ2500ケーシングの仮受が必要であった。また、羽田地区はシルトを多く含む軟弱地盤であるため、φ2500ケーシングの自沈対策が課題となった。

そこで、φ2500ケーシングの荷重の受台となるブラケットとブラケットを取付用に加工した特注のケーシングを製作した（写真一1参照）。ブラケットは高力ボルト（F10TM30）6本で固定し、特注ケーシングの対面に設置することで仮受が可能となる。

4-2 φ2500 ケーシング仮受後の施工を可能にするための対策

仮受したφ2500ケーシングが全周回転機を設置する上で支障になる。また、仮受作業は狭隘空間において人力作業が発生するため、全周回転機の嵩上げが必要であ



写真一 2 H鋼架台



写真一 3 φ2500 ケーシング仮受後状況

った。そのため、全周回転機の下に山留材 H400 を二段に重ねた H 鋼架台を設置した（写真一2 参照）。

§5. まとめ

5-1 二重管工法で施工した結果

二重管工法で施工した結果、回転トルク値 350 tf・m で引抜くことができた。ただし、従来の計算方法による予測値は表一4の通り 164.2 tfであったのに対し、約 2.13 倍の周面摩擦抵抗力が発生したことになり、想定値よりもはるかに大きくなった。そのため、想定よりも大きくなった原因を現場独自に考察した。

5-2 現場独自の考察

当該地質で最も支配的な層は、層厚約 34 m の粘性土 Ac 層である。従来の計算方法は、土質分類と N 値から経験的に周面摩擦抵抗力を算出しており、粘性土も N 値から周面摩擦抵抗力を設定しているため、Ac 層（N=2）を過小評価した可能性がある。表一5の通り Ac 層の粘着力は $-1.6h + 42$ （h：標高）と深くなるにつれ、強度が増加する特性があるため、実際の Ac 層の周面摩擦抵抗は N 値から想定した値よりも大きい可能性がある。

表一五 羽田地区の土質定数値

土質記号	設計用 N 値	単位体積重量 ρ_1 (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	変形係数 E_0 (MN/m ²)
Bsg (粘)	3	17.2	38	0	16
Bsg (礫)	7	17.8	0	34	19
Bsg (砂)	8	18.1	0	34	24
Ac	2	15.6	-1.6h + 42	0	25
As	14	15.9	0	39	39
Dsc1	7	18.0	60	0	20
Ds1 (砂)	35	18.3	0	32	98
Ds (粘)	10	16.9	97.5	0	28
Dsc2(粘)	11	18.0	68.5	0	31
Dsc2(砂)	32	18.2	0	31	90
Ds2	22	18.0	0	31	62
Dsc3	11	17.8	68.5	0	31
Dsg	50	21.0	0	35	140

表一六 周面摩擦抵抗力 (Ac 層の粘着力反映)¹⁾

地質	掘削層厚 (m)	単位摩擦力度 (tf/m ²)	層間の表面積 (m ²)	摩擦力 (tf)
Ac 層	21.59	9.70	135.65	1315.8
As	0.95	0.60	5.97	3.6
Dsc1	2.55	0.50	16.02	8
Ds1	3.05	0.50	19.16	9.6
Ds1 (C)	4.80	0.50	30.16	15.1
Dsc2 (s)	2.95	0.60	18.54	11.1
Dsc2	2.50	0.50	15.71	7.9
Ds2	1.05	0.60	6.6	4
Dsc3	5.35	0.60	33.62	20.2
Dsg	3.65	0.70	22.93	16.1
周面摩擦抵抗力総計				1411

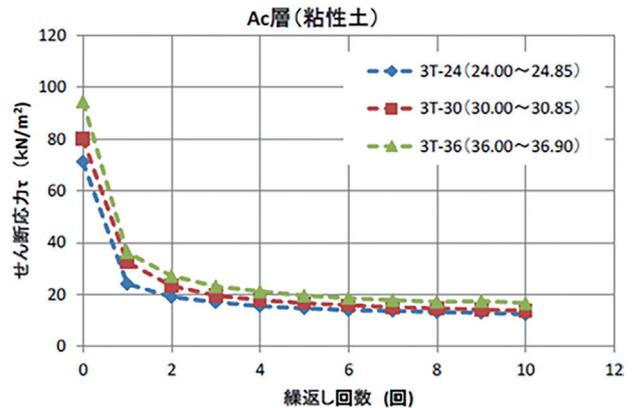
そこで、次の二つの条件を仮定し、周面摩擦抵抗を再計算した。

- ・従来の計算方法の周面摩擦抵抗力と実測値を比較し、周面摩擦抵抗の差分より Ac 層の粘着力を逆算する。
- ・現地で実測した回転トルク値 (350 tf) を周面摩擦抵抗とする。

続いて、Ac 層の粘着力を計算する。Ac 層の標高中央値である TP-34.235 m を前述の Ac 層の粘着力の計算式に反映し、計算した結果は下記の通りである。

$$\begin{aligned}
 \text{Ac 層粘着力} &= -1.6 \times h + 42 \\
 &= -1.6 \times (-34.235) + 42 \\
 &= 96 \text{ kN/m}^2 \approx 9.7 \text{ tf/m}^2
 \end{aligned}$$

表一六の通り、算出した Ac 層の粘着力 9.7 tf/m² を従来の計算の単位摩擦力度に反映した結果、周面摩擦抵抗力は 1411 tf となり、実測値の周面摩擦抵抗力である 350 tf と比べて約 4 倍と非常に大きくなった。なお、表一六中の Ac 層の掘削層厚 21.59 m は全層厚から ϕ 2500 ケーシング区間を除いた層厚である。



図一九 繰返し一面せん断試験結果

表一七 周面摩擦抵抗力 (Ac 層の粘着力 1/5 反映)¹⁾

地質	掘削層厚 (m)	単位摩擦力度 (tf/m ²)	層間の表面積 (m ²)	摩擦力 (tf)
Ac 層	21.59	1.88	135.65	255.0
As	0.95	0.60	5.97	3.6
Dsc1	2.55	0.50	16.02	8.0
Ds1	3.05	0.50	19.16	9.6
Ds1 (C)	4.80	0.50	30.16	15.1
Dsc2 (s)	2.95	0.60	18.54	11.1
Dsc2	2.50	0.50	15.71	7.9
Ds2	1.05	0.60	6.6	4.0
Dsc3	5.35	0.60	33.62	20.2
Dsg	3.65	0.70	22.93	16.1
周面摩擦抵抗力総計				350

粘着力から推定した周面摩擦抵抗力が実測値を大きく上回ったことを踏まえ、事前に行った繰返し一面せん断試験結果に着目した。図一九のとおり、Ac 層は施工時に乱されると強度が 1/5 程度まで低下する特性がある。その特性を反映し粘着力の 1/5 相当である 1.88 tf/m² を入力した結果、表一七のとおり、周面摩擦抵抗力の総計と概ね一致した。

以上より、Ac 層のように N 値に比べ粘着力が大きい粘性土が支配的な場合は、N 値から周面摩擦抵抗を算出する従来の計算方法では危険側の評価となるリスクがあることがわかった。

今後の同種工事においては、粘性土の粘着力に着目し、乱されることで強度低下する粘性土の特性も踏まえて、周面摩擦抵抗力を算出することが重要である。

また、最適な機械選定ができるようデータの積み上げと水平展開を続けることが必要であり、また効率的なデータ活用のため、DX 技術の利活用も進める必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本車輛製造株式会社、技術資料「スーパートップ工法のすべて」。