

世界最大の平面積を有する ニューマチックケーソンの設計施工

片岡 正造¹・金井 伸二¹・永田 有利雄²・五ノ井 滋徳²
金子 勝幸³・齋木 正³・大野 裕嗣⁴・遠藤 和雄⁵

¹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2-8-1)

²東京都下水道局 第一基幹施設再構築事務所 工事第二課 (〒111-0051 東京都台東区蔵前2-1-8)

³正会員 清水建設(株) 土木東京支店土木第三部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館)

⁴清水建設(株) 土木東京支店土木第三部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館)

⁵正会員 清水建設(株) 土木技術本部設計第一部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3シーバンスS館)

テニスコート8面分に相当する4,837m²の平面積を有する大型構造物を、ニューマチックケーソン工法で地下43.9mまで沈設させた。この平面積は、これまで世界最大であったレインボーブリッジのアンカレイジ基礎3,157m²の約1.5倍であり、世界最大である。これまでに類を見ない超大型のニューマチックケーソンの施工にあたり、沈設過程の傾斜や変形によるねじれによって構造物に大きな応力が発生することが懸念され、設計や施工において特段の配慮を要した。対角延長99.6mに対し沈設完了時の高低差わずか4mmという高精度を実現した。ここでは、平面積の大きなケーソン特有の設計・施工面の各特徴について、沈設完了までに実施した施工方法とともに紹介する。

キーワード: ニューマチックケーソン, 平面積, 世界最大, 構造物, 情報化施工, 無人化施工

1. はじめに

東京都荒川区に位置する「東尾久浄化センター」は、隅田川の水質浄化及び東京湾の富栄養化防止対策の一環として、三河島処理区の一部汚水の処理及び三河島処理区の一部雨水を吸揚するため計画された施設である。また、既設の尾久ポンプ所の更新と能力増強を図るための代替機能を併せ持った施設である(図-1)。

本施設が完成すれば、排水面積約610ha、晴天時時間最大汚水量3.29m³/s、雨天時時間最大汚水量

8.7m³/s、雨水量60m³/sの処理が可能となる。本稿は当施設の中核となる2つの主ポンプ棟(尾久系、西日暮里系)のうち、世界最大のニューマチックケーソン工法(62.1m×77.9m)で建設した東尾久浄化センター西日暮里系主ポンプ棟工事について紹介する(図-2)。

これまでの世界最大規模はレインボーブリッジのお台場側アンカレイジ基礎(45m×70m)であったが、長辺の施工長がおおよそ70mでありこの施工実績に近い(姿勢制御の限界範囲内である)こと、正方形に近いことでむしろ安定性が得られること、分割施工し



図-1 東尾久浄化センター全体平面図

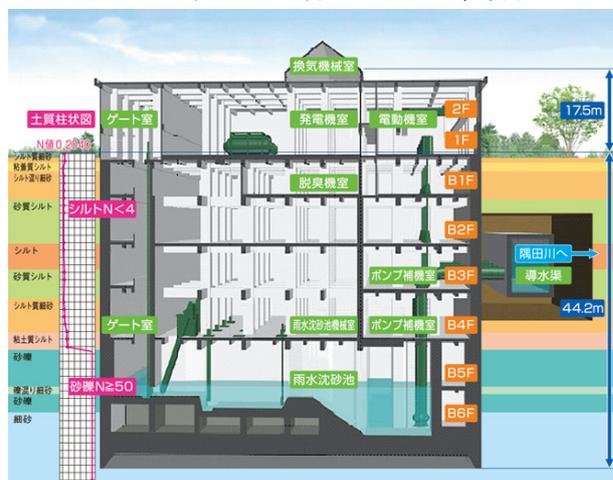


図-2 西日暮里系ポンプ室透視図

た場合には接続工や全体排土量の増加により不経済になる等の方針から大型1函での施工に至った。

また、連続地中壁による大規模山留案との比較においても、工期工費ともニューマチックケーソン工法のほうが優位となっている。

2. 工事概要

工事概要を表-1に、ニューマチックケーソンの設備数量を表-2に、沈設施工中の施工状況を写真-1にそれぞれ示す。

3. 地質概要

主ポンプ棟位置での土質調査(躯体付近の6箇所)結果の一例を示す(図-3, 4)。TP-26.0m以浅ではN値1~4の軟弱なシルト層(有楽町層)が続き、それ以深ではN値50以上の堅固な砂礫層(埋没段丘礫層)と粒子が均一で非常に密にしまった細砂(江戸川層)からなる。

表-1 工事概要

工事名称	東尾久浄化センター主ポンプ棟建設工事(その2・3・4)
工事場所	東京都荒川区東尾久七丁目2番地
事業主体	東京都下水道局
設計・監理	日本上下水道設計(株)
施工者	清水建設(株)
工期	平成18年9月12日～ 平成23年2月28日(その2・3・4)
躯体平面積	4,837m ² (62.1m×77.9m)
最終深度	TP-41.2m(最大気圧0.38MPa)
施工方法	ニューマチックケーソン工法

表-2 ニューマチックケーソン設備数量

設備名称	機械	仕様	単位	数量(その4)	備考
掘削沈下	ケーソンジョベル	0.15m ³	台	30	天井走行式
	遠隔操作設備		台	30	
	溜材注入プラント	0.5m ³	式	1	2槽式
送気設備	コンプレッサー	26.4m ³ /min	台	21	電気式・スクリュー型145kW
	空気清浄機	1.10m ³ /min	台	6	
	クーリングタワー	40t/h	台	12	
排土設備	自動圧力調整装置		台	6	マースコントロール
	土砂ホッパー	30m ³	基	14	
	排土キャリア	ブーム長16.0m	基	12	テルハ式
搬送設備	クローラクレーン	50t吊	台	2	
	マテリアルロック	耐圧0.7MPa	基	14	
	マンロック		基	10	
減圧設備	ケーソン用エレベータ		基	2	
	酸素減圧設備		式	1	
救急・安全設備	非常用コンプレッサー	18.5m ³ /min	台	11	エンジン式
	非常用発動発電機	100kVA	台	2	エンジン式
	ホスピタルロック	0.49MPa	台	6	



写真-1 施工状況(沈設中)

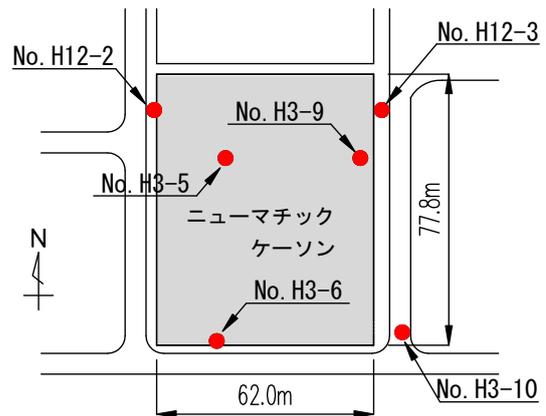


図-3 土質調査位置図

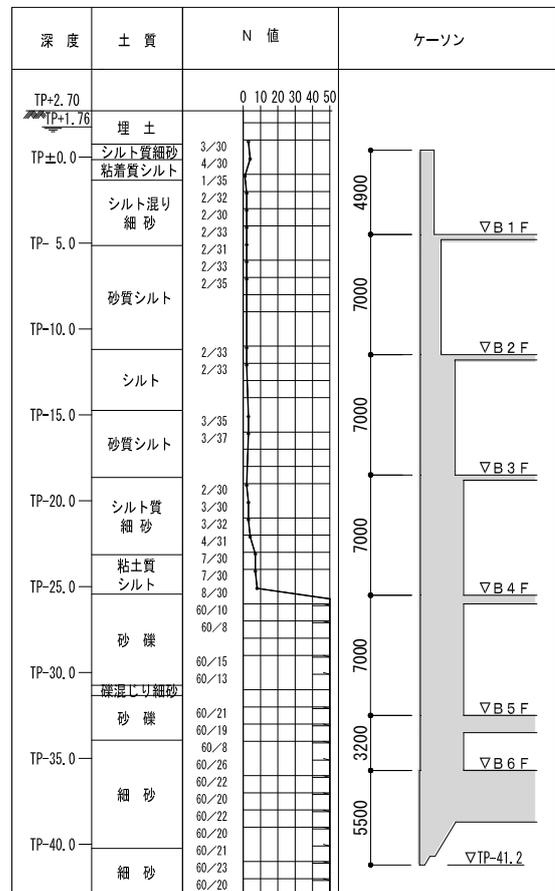


図-4 土質柱状図(No. H12-2)

ケーソンの沈下管理において、土層境の勾配は躯体の姿勢を不安定にさせる要因となる。TP-26.0m付近から現れる砂礫層の深度は、6箇所の土質調査結果から最大で2.4m程度の差があったため、刃口先端がこの深度を通過する時にはケーソンの傾斜とそれに伴う漏気が懸念されていた。

4. 技術的特徴

(1) 設計的特徴

現在、大型ケーソンの設計方法は日本圧気技術協会の「大型地下構造物ケーソン設計マニュアル」に従って行われている。この設計方法は、これまで世界最大規模であった「レインボーブリッジのアンカレイジ基礎および主塔基礎(計4基)」の施工時の計測データを分析し、従来の一般的な設計方法「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」に大型ケーソン独特の施工状態を考慮した手法となっている。

しかし、今回のケーソン面積はこれまでに類を見ない超大型であり、設計にも以下に示すように特段の配慮がなされている。したがって施工にあたってはこの設計条件を十分に理解したうえで、ケーソンの状態を常に確認しながら慎重に行った。

a) 大規模吊桁構造の採用

ケーソンの底版は完成すれば直接基礎となるが、沈設施工中は広い圧気作業室を柱なしで支える天井としての機能を有する。ケーソンの平面積が大きくなるに従い、この天井もより大きなスパンに耐えられる剛性を有している必要がある。

平面積の小さなケーソンは沈設中に発生するねじれや曲げに対して底版スラブ1枚の剛性で抵抗するが、本ケーソンのように面積が大きな場合には底版を格子状に補強したボックス構造としてその剛性を確保することが一般的に行われている。本ケーソンにおいてもこのボックス構造が採用され、底版からの高さ15.9m(刃口先端から地下4階の床までの高さに相当)分をボックス構造として、この内部に格子状に補強仮壁を配置、この補強仮壁と底版が一体化した逆T形状を有する吊桁が連続した構造とされている(図-5)。

この構造は2次元の平面格子解析では設計上のメリットは現れないが、実構造や3次元シェル解析においてはボックス上面(B4Fスラブ)の効果は大きなものとなる。

また構造設計を行う上での条件として、ケーソン

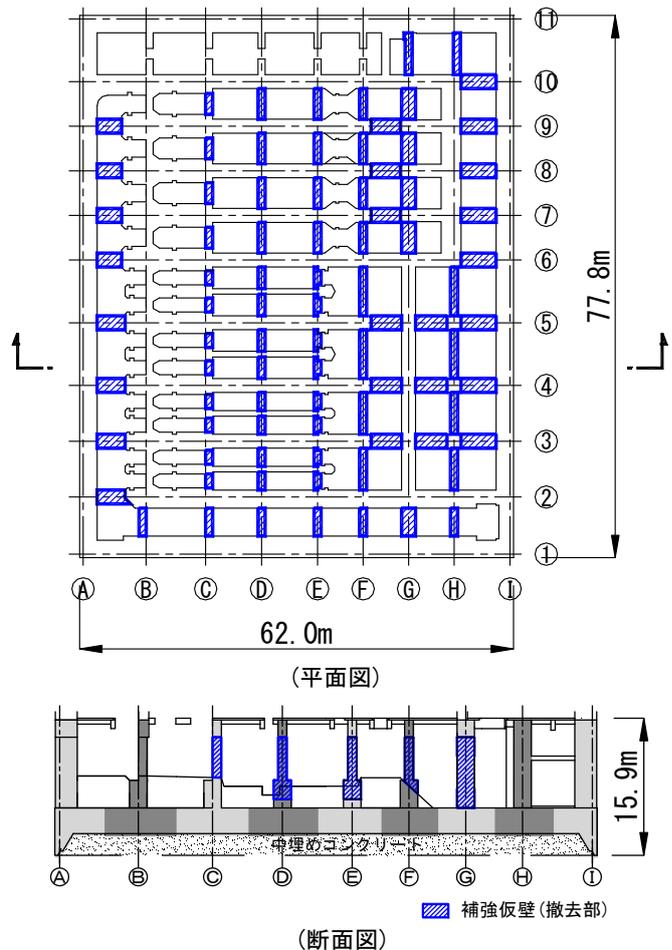


図-5 吊桁配置図

刃口が地盤から受ける支持反力を設定する必要があるが、この支持反力は外周4辺で必ずしも一定ではなく、過去の沈下実績からケーソンの短辺・長辺の反力バランスは1:3~3:1の範囲で変化することが分かっている。本ケーソンにおいてもこの比率で構造設計がなされたことで吊桁は全通り芯(B~H, ②~⑩)に格子状に配置された。

実施工においても沈設開始前の初期構築の段階で補強仮壁部(地下6階~地下4階)を全て完了させてから開始し、ケーソンが設計深度に着底するまで躯体の剛性を確保することができた。

なお、この補強仮壁は中埋めコンクリートの打込み後に切断・撤去した。

b) 刃口鋼板・スラブ鋼板の採用

ケーソンの刃口部および底版スラブ部は沈設中に発生する大きな変形に抵抗するだけの剛性が必要となり、一般に高密度配筋となる部位である。特に刃口部は内空が小さいためこの傾向が著しい。本ケーソンではこの部位の表面に鋼板を用い、この鋼板にスタッド(φ19mm, L=150, 500mm間隔)を溶接し一体



写真-2 刃口金物設置状況



写真-3 スラブ鋼板設置状況

化した合成構造として鉄筋量を低減、さらに2段刃口として刃口内空を大きくすることでコンクリートの充てん不良等に対するリスクを緩和した(写真-2, 3)。

さらに、鋼板の厚みは「6~9mm」が一般的だが、本ケーソンでは刃口部に「16mm」底版スラブ部に「12mm」をそれぞれ採用することで鉄筋量の低減効果を高めた。

また、底版スラブの厚さは3mあり、マスコンクリートとしてのひび割れを避けることは困難である一方で、万一ひび割れが発生すると沈設中の漏気の原因となるばかりでなく、完成後にも地下水の浸透経路となって構造物としての耐久性を低下させる要因となる。底版スラブ下面および刃口部の全面を鋼板で覆った本構造はこれらの対策にも非常に有効なものとなった。

c) 刃口高2.5mの採用

掘削中の作業室の気圧は、万一、ケーソンが急な傾斜を起こした場合の漏気(エアブロー)に対する安全性を確保するため、刃口先端よりも20cm程度高く水位を設定し、さらにブロー回収装置を設けるなど二重の安全対策を設けることが一般的に行われて

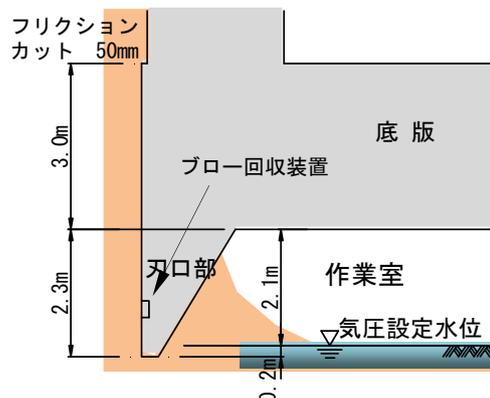


図-6 一般的なケーソンの刃口形状

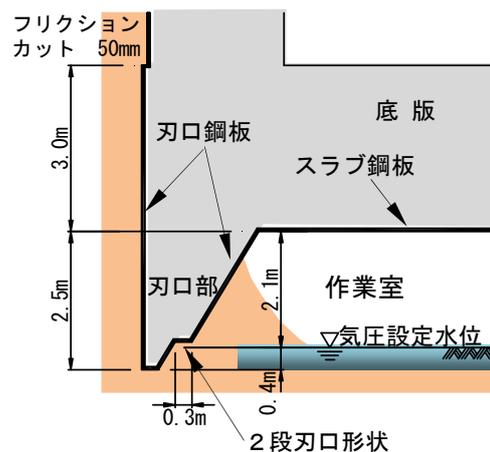


図-7 2段刃口形状

いる(図-6)。すなわち、ケーソンが傾斜しても高い側の刃先が水位以下(20cm以下)であれば漏気を防止することができるうえ、万一漏気してもブロー回収装置によって土中での拡散を防止できる効果がある。

しかしながら本ケーソンの場合には刃口部の鋼板が鉄筋の一部としての役目を果たしているため連続している必要がありブロー回収装置のような開口部を設置することができない。この制約のなかで確実なブロー防止対策を行うため、刃口高を一般的なケーソンの2.3mよりも20cm大きい2.5mとした(図-7)。

刃口高さを2.5mとしたことで刃口先端よりも40cm程度高く水位を設定することができ、エアブローの対策に有効となった。これは、東京都下水道局では初めての採用であった。

d) 初期掘削時から作業気圧を作用させることによる応力低減

沈下掘削の過程でケーソンの底版はその下の作業室から上向きの気圧を受けるため自重によって発生する下向きの荷重が低減される特徴がある。しかしながら沈下掘削開始時では、圧気前であるためにこ

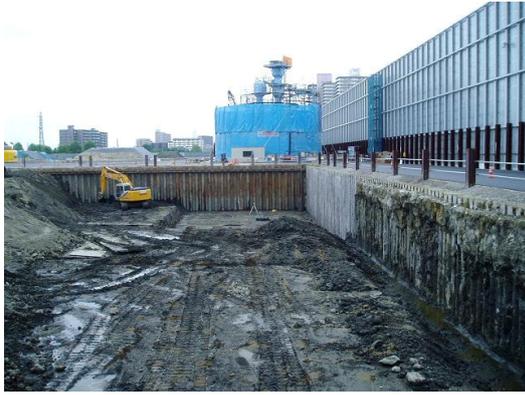


写真-4 刃口据付け高の盤下げ状況



写真-6 躯体内に溜められた荷重水



写真-5 電気式自動圧力調整装置

の効果が得られない。

本ケーソンでは大面積を有する底版の自重を沈下掘削開始時から低減するため、沈下開始時の刃口高さをあえて地表面よりも4.7m低いレベル(TP-2.0m)として地下水位をわざと回復させた(写真-4)。掘削開始の段階で既に作業気圧0.03Mpa(水頭3m相当)を上向きに作用させることで底版の自重により発生する応力を低減している。

(2) 施工的特徴

施工は、前述の設計的特徴に十分配慮し、その効果を施工面で活かせるように慎重に実施した。また過去に類をみない大型のケーソンの施工にあたり、その気圧管理、姿勢制御、躯体構築精度などには特段の配慮を要した¹⁾。

a) 作業気圧の管理

ニューマチックケーソンは刃口先端から漏気が発生した場合、地中の酸素欠乏物質と結合して近隣範囲に酸欠ガスを発生させる危険性がある。

設計段階から「刃口高2.5m」が配慮されていたが、より確実に漏気を防止するためには施工面からも作業気圧の管理を特に慎重に行う必要があった。

そこで、作業気圧の管理には「電気式自動圧力調

整装置」(マースコントローラ)を用いた(写真-5)。これは、地下水位(間隙水圧)から計算した設定圧力を自動で保持するもので、0.001MPa(10cmの水頭差)単位での微妙な調整も可能である。従来この装置は、海上工事で干満差などの影響を受け常に気圧調整を行う必要がある場合などに採用されていたものであるが、今回は陸上施工のニューマチックケーソンに取り入れた。

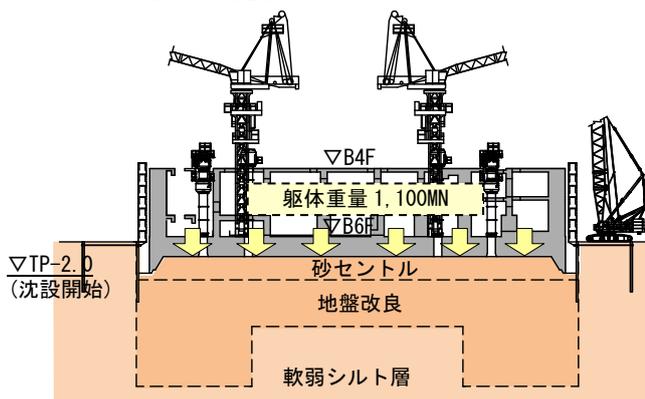
b) 初期沈設時の姿勢制御

図-8にケーソンの沈下ステップを示す。沈設開始前のケーソンは躯体の全重量を砂セントルが直接基礎として支持している(STEP1)が、この状態から掘削が始まると重量を支持する面積が徐々に減少し、刃口付近の地盤はそれまで以上の荷重がかかるとともに(STEP2)、底版には大きな剛性が必要となる。その後沈設が進むと地下水の浮力の影響を受け見かけ上躯体は軽くなり軟弱な地盤でも支持できるようになり(STEP3)、最終的には荷重水を加えて強制的に重量を増さないと浮力以上の沈下力が発生しない(STEP4)(写真-6)。

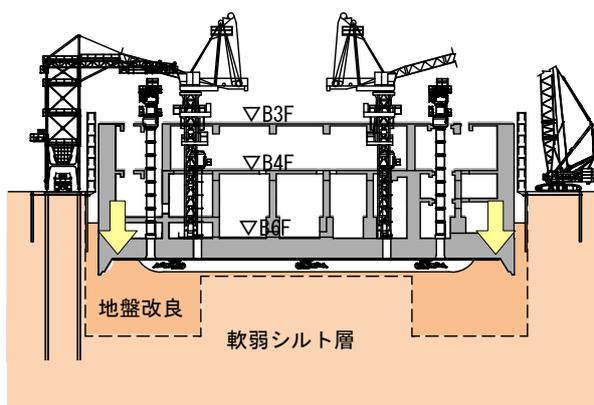
本ケーソンは剛性確保のために大規模吊桁構造が採用されたことで、地下6階～地下4階の構築を全て完了してから沈下掘削を開始した。そのため、沈下開始前までに既にコンクリート打込み量は43,000m³(沈設完了時の58%に相当)を超え、これに刃口鋼板・スラブ鋼板・艀装設備を含めると躯体の全体荷重は1,100MN程度にもなっていた。これは一般的なケーソンの沈下開始時の重量に比べて非常に大きなものとなり、N値1～4程度の軟弱地盤では、沈下掘削の初期の段階(STEP1)で地盤の支持力が不足していた。

そこで、このような軟弱地盤上に設置された重量構造物の安定を図るため、ケーソンの躯体構築に先立ち地盤改良を施工してその支持力を確保した。地盤改良は、静的締固め砂杭工法(セーブコンポーザ

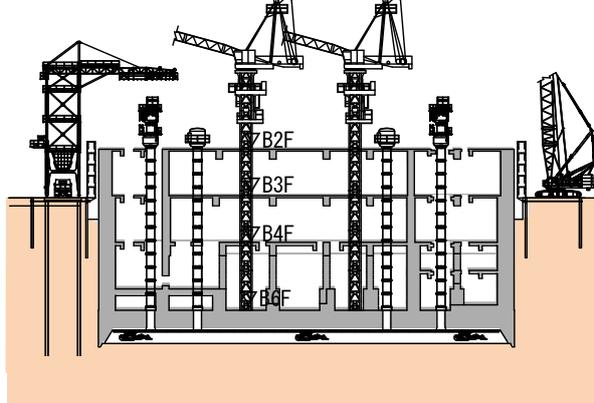
<STEP1：初期構築完了>



<STEP2：底版下の地盤改良部の掘削を完了>



<STEP3：荷重水注水前>



<STEP4：沈下完了，中埋めコンクリート打設>

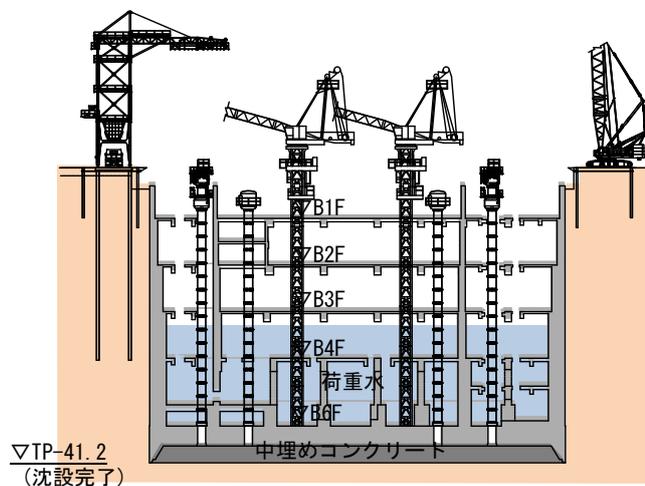


図-8 沈下ステップ図

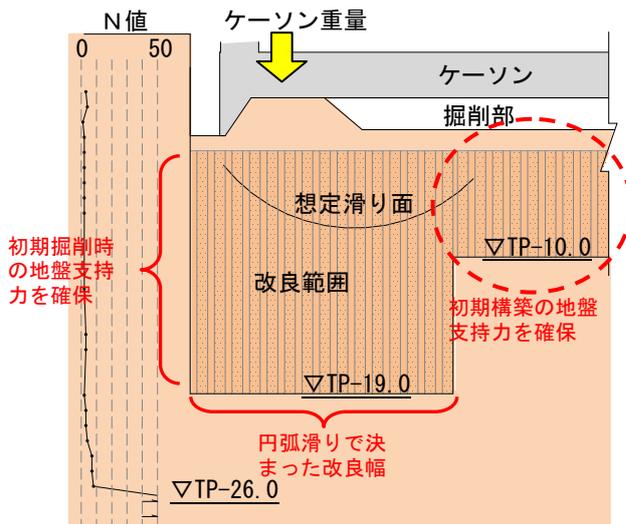


図-9 地盤改良概念図

一)による置換率29%でN値 ≥ 8 相当である。

改良の範囲は、図-9に示すように「初期構築時(STEP1)に直接基礎として支持するために必要な範囲」と沈下掘削が進み「刃口部で荷重を受ける段階(STEP2)に必要な範囲」を合わせたものとし、改良の幅は刃口荷重から想定される円弧滑りの安全率が確保できる範囲とした。

このとき、図-7で示した2段刃口形状が地盤との接地面積を増加させる効果もあり過沈下対策にもなったと考えている。

なお、ケーソンはSTEP1に示す初期構築が完了した段階で、その大きな自重の影響によって既に20cm程度の沈下が認められていた。

c) 沈下掘削中の姿勢制御

一般に、地盤が軟弱な場合には、沈下掘削中の過沈下を防止するために刃口周辺の土を残し、躯体重量を支持する地盤の面積を増やすことで対応する。掘削面積が大きなケーソンでは、この開口率が同じであっても通常のケーソンに比べて掘削できる絶対面積は大きく作業しやすいため、この方法は面積が大きなケーソンの姿勢制御に特に有効であった。

開口率は、リアルタイムに計測される刃口反力計(28台)とスラブ反力計(28台)の値を監視しながらその掘残し位置と範囲を定め、ケーソンが傾斜および過沈下しないよう毎日管理した。

図-10に本工事における地盤種類と開口率の関係、図-11に刃口深度と開口率の関係を示す。すなわち、TP-26.0m以浅の軟弱シルト地盤掘削時には開口率を30~80%程度とすることで躯体の過沈下および傾斜を防止し、それ以深の堅固な砂礫層の掘削時には開

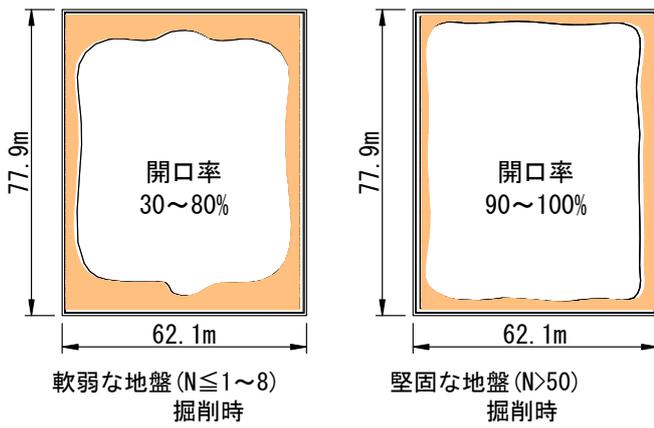


図-10 地盤種類と開口率の関係

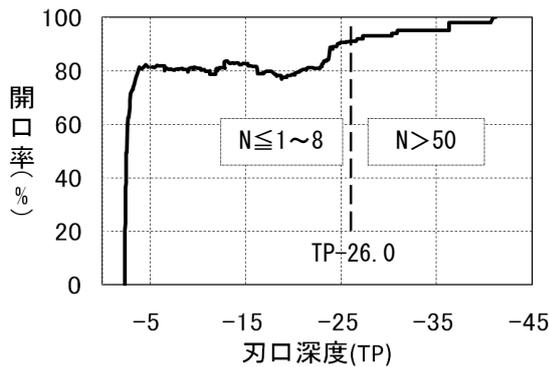


図-11 刃口深度と開口率

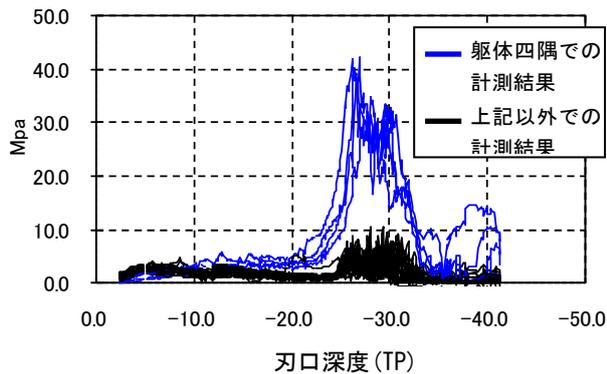


図-12 刃口反力計の計測値

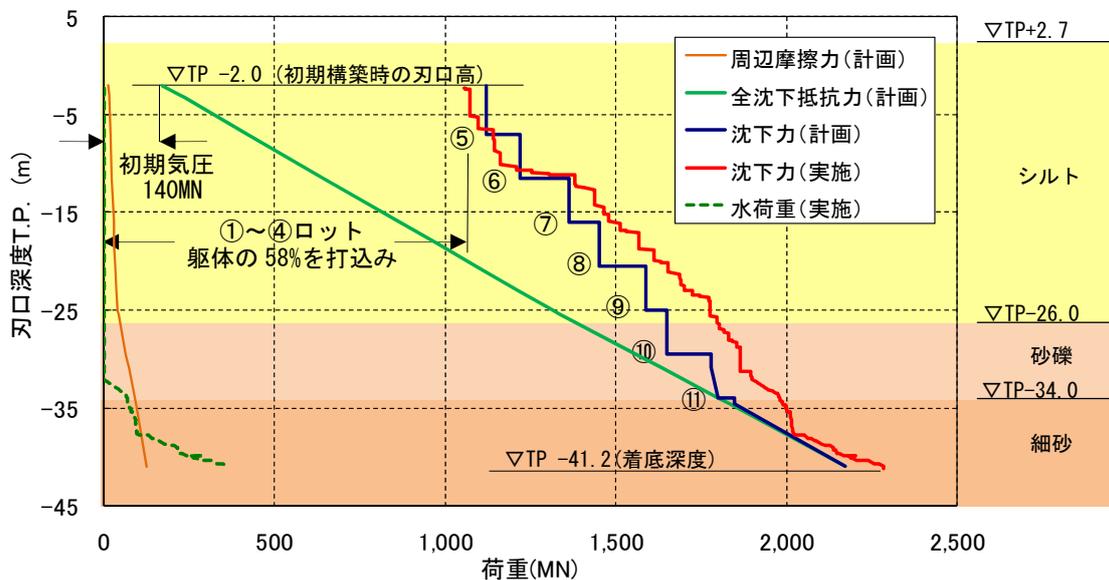


図-13 沈下関係図

口率を90%以上とし掘削の作業性を高めることができた。なお、ケーソンは沈設完了まで大きな姿勢不良はなかった。

一方、刃口反力は予想されたとおり地盤性状が変化するTP-26.0mで計測値が大幅に変化した。特に、躯体四隅においてその傾向は顕著であった(図-12)。

また、前述のとおり、初期沈下時のケーソンは短辺、長辺の支持力の分担比が1:3~3:1の範囲で設計されているが、本工事ではTP-20.0mで浅まで最大でも1:1.9の分担比となり、設計で考慮された比率よりも十分安定して施工ができた。TP-30.0mで反力が低減しているのは、地下水による浮力の影響がケーソンに働いたためである。

d) 沈下力の管理

本ケーソンでの沈下関係図について、図-13に計画と実績を比較したものを示す。本ケーソンは大規模吊桁構造が採用されたことで沈下掘削の開始前までに沈設完了時の58%相当(1,100MN程度)のコンクリート打込みを完了していたため、その後の沈設過程でのコンクリート打込みによる重量の増分は全重量の割合の3~4%程度にとどまるものとなった。計画時の沈下力はコンクリートのロット割りに重量を加算しているため、グラフでは階段形状を示すが、実際にはロットごとに数回に分けて打ち込んでいるため、1回の打込みあたりの荷重増分はさらに小さなものとなった。これにより、沈設途中での急激な沈下力増加がなくなり徐々に増加させることで安定した沈設を図ることができた。

e) 計測管理

表-3にケーソンの沈下掘削に使用した計測項目とその機器数量，図-14に計測機器の配置図，図-15にその管理画面を示す。計測はケーソン躯体の鉛直変位，傾斜，刃口反力，スラブ(底版)反力，周面摩擦力，土圧，間隙水圧，函内気圧，水荷重，鉄筋応力，鋼板応力，底版変形量の12項目である。これらの計測器から得られたデータは20秒間隔でリアルタイムにモニターに表示し，関係者全員が情報を即座に確認できるようにした。掘削作業は，ケーソンの急激な沈下や傾斜が生じないようにこのモニターに表示される躯体傾斜と刃口荷重のバランスを監視し，開口率や掘削位置を調整しながらおこなった²⁾。

最終的には高低差4mmで着底でき，躯体の平均沈下速度は，1日に約10cmであった。

5. おわりに

世界最大のニューマチックケーソンの沈設にあたり，設計施工の両面から綿密な技術的検討を実施したことで無地に沈設を終えることができた。今後，同種の工事を行うに当たり，本工事で得られた知見を積極的に活かして品質向上に貢献していきたいと考える。

最後に，本工事の遂行にあたり多大なご指導・ご支援をいただいた関係各位の皆様に深く御礼申し上げます。

げる次第である。

参考文献

- 1) 「世界最大級の面積を有するニューマチックケーソンの施工」トンネルと地下483号Vol. 41 No. 11 2010 (株)土木工学社
- 2) 「大型ニューマチックケーソンの情報化施工」土木施工2011. 8 (株)オフィス・スペース

表-3 計測項目と機器数量一覧

記号	計測項目	計測器	数量	備考
▼	ケーソン鉛直変位	レーザー距離計	1台	
+	ケーソン傾斜	傾斜計	4台	(X, Y) 2軸型
●	刃口反力(15MPa)	盤圧計	4台	
○	刃口反力(10MPa)	盤圧計	24台	
●	スラブ反力(15MPa)	盤圧計	4台	
○	スラブ反力(10MPa)	盤圧計	24台	
□	周面摩擦力	周面摩擦力計	8台	
■	土圧	土圧計	8台	
◇	間隙水圧	間隙水圧計	8台	水頭 42.7m
◇	函内気圧	圧力計	2台	
◇	水荷重	間隙水圧計	4台	
■	鉄筋応力(直角方向)	鉄筋計 測温機能付	40台	側壁(長手方向)
■	鉄筋応力(軸方向)		40台	側壁(短手方向)
■	鋼板応力計	ひずみ計	15台	隔壁(長手方向)
■	鋼板応力計	ひずみ計	15台	隔壁(短手方向)
★	鋼板応力計	ひずみ計	20台	
■	床版変形	基準水槽	2台	
■	床版変形	水盛式沈下計	26台	盛替え用1台含む

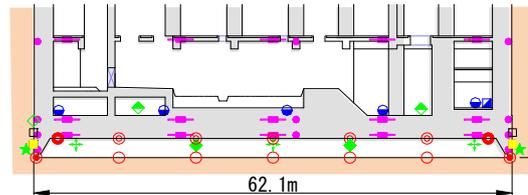


図-14 計測機器取付配置図

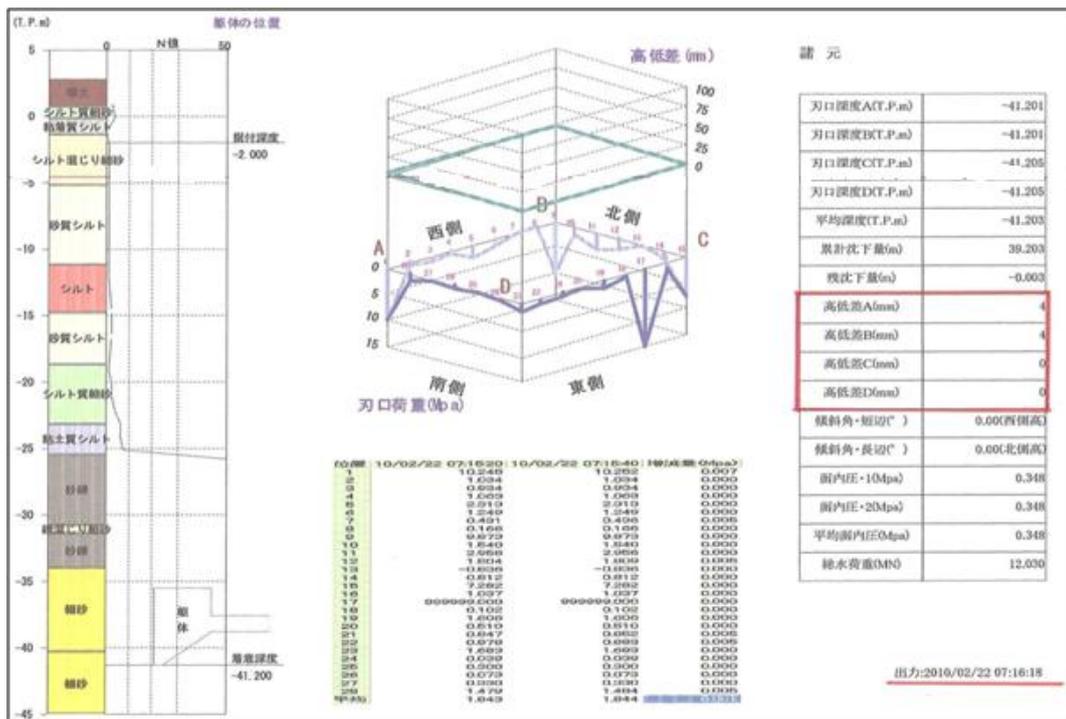


図-15 計測管理画面