

火力発電所循環水ポンプ室における ニューマチックケーソンの近接施工

Neighboring construction of Pneumatic Caisson at the Circulating Water Pump Room of Thermal Power Plant

三井 功如* 山本 享司*
Noriyuki Mitsui Koji Yamamoto
村上 孝夫* 佐々木 智文**
Takao Murakami Chifumi Sasaki

要 約

苫東厚真発電所4号機増設工事において、循環水ポンプ室本体の施工にニューマチックケーソン工法を採用した。本ケーソンは、掘削面積805m²、掘削深さ17.25mの大規模構造物ケーソンである。基礎地盤は、軟弱なシルト層（N値1～3）のため、基礎杭（PHC杭φ800）を併用した脚付きケーソンとして設計された。また、運転稼働中の3号機灰処理架台が離隔5.4mに近接しているため、ケーソン沈設時の地盤変状により影響を与える危険性があった。このため、FEM解析による予測解析をもとに、管理基準値を設定し、異常事態の早期把握およびリアルタイムな沈設管理を目的とし、情報化施工を行った。この結果、沈設深さh=9.6m（55%）において、地中変位が第1次管理基準値近傍まで増大したが、逆解析による現況の把握および対策工の検討等綿密な施工を行うことにより、周辺構造物に影響を与えることなく無事沈設を完了した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 計測管理
- § 4. 対策工
- § 5. おわりに

- ③ 沈設地盤は支持層が深く非常に軟弱なシルト層（N値1～3）であり、かつ地下水位が高いことから脚付ケーソンを採用している。このため、正確な沈設が要求される。
- ④ 沈設初期（h=2.25m迄）においては、取水路側に偏土圧が作用するため、傾斜・水平移動管理に慎重を要する。

§ 1. はじめに

本工事は、近接する3号機灰処理架台への影響および施工性・経済性について比較検討を行った結果、本体部の施工方法としてニューマチックケーソン工法（基礎杭併用）を採用した。また、施工時は、異常事態の早期把握および沈設管理を目的に、リアルタイム計測システムを採用し、情報化施工を実施した。本施工に当たり特に考慮した点を以下に示す。

- ① 3号機灰処理架台が近接するため、ケーソン沈設の影響により灰処理架台基礎に変状が生じる危険性がある。離隔は約5.4m。
- ② 底面積約805m²の大型ニューマチックケーソンであり、沈設後構造物として使用される。

本報告は、FEM解析による地盤変状の予測とその対策および計測管理について述べるものである。

§ 2. 工事概要

2-1 工事概要

(1)全体工事概要

工事件名：苫東厚真発電所4号機増設工事のうち土木本工事 第1工区

発注者：北海道電力株式会社

施工場所：北海道苫小牧市

工 期：自 平成11年2月10日

至 平成13年6月20日

工事内容：取水路（内空4.0m×4.0m、延長52.0m）

循環水ポンプ室（短辺15.1～20.2m、長辺40.2m、高さ20.2m）

循環水管路（送水管）（φ2200～3300鋼管、

* 札幌支店 苫東出張所

**土木設計部設計課

延長134m)

(2)ケーソン施工概要

本ケーソンは、沈下深さ17.25m、掘削土量15,895^m3、最終沈設時の理論気圧0.152MPa (1.55kgf/cm²) である。ケーソン概要図を図-1、主要機械設備を表-1に示す。

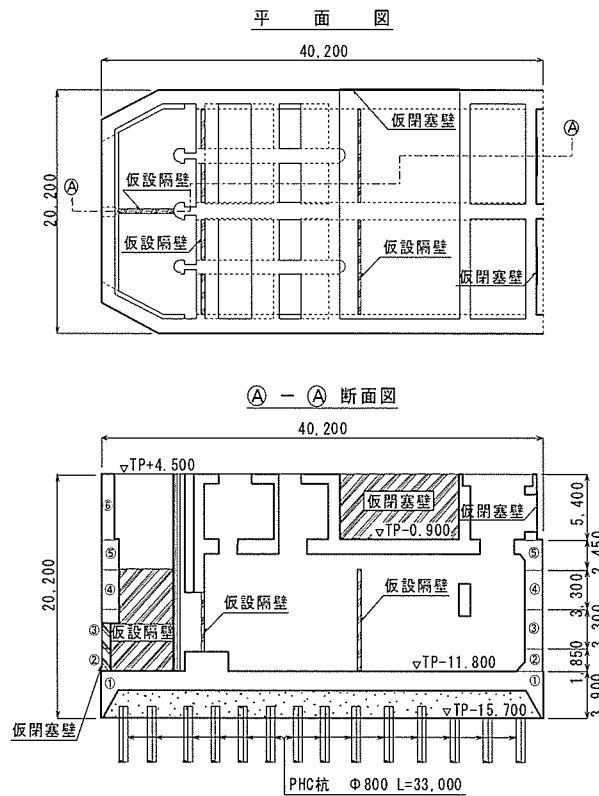


図-1 ケーソン概要図

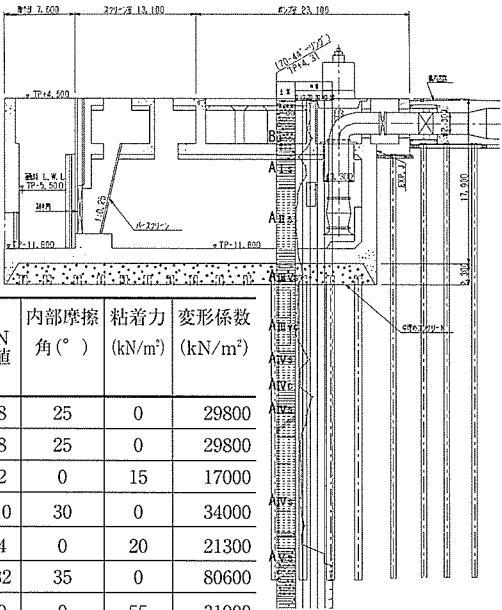
表-1 ケーソン主要機械設備

掘削設備
天井走行ショベル0.15 ^m 3×4(6)台、函内バックホウ0.2 ^m 3×2台 函内バックホウ0.02 ^m 3×2台(口開け掘削時)、アースバケット1.0 ^m 3×6台 排土キャリア3基(土砂ホッパ30 ^m 3×3基)
簀装設備
マテリアルロック1.0 ^m 3用×3基、マンロック10～12人用×2基 ボットムドアφ1.4 ^m ×3基
送気設備
コンプレッサー200ps(150kw)×2基、クーリングタワー 40～50t/h×1基 アフタークーラー・セパレーター×1基、マースコントローラ×1基
通信連絡設備
函内テレビ×2基、電話機×14台、信号設備×1式
救急設備
ホスピタルロック横型 0.5Mpa 4～6人用×1基
予備設備予備設備
可搬式エンジンコンプレッサー80ps 7.5 ^m 3/min×1台 発動発電機 270KVA×1台

2-2 地質概要

施工地点は埋立地で、GL-50m以浅の地質は、第四紀沖積層の氾濫源堆積物と海成堆積物からなる。土層構成は礫、砂および粘性土が錯綜した状態にある。それ以深は、第四紀洪積層のN値50以上の砂礫層が分布する。

沈下掘削部の地質はGL-6mまでが浚渫土砂による埋立層Bu (N値6～23)、GL-10mまでが細砂層A_{Is} (N値5～15)、GL-16mまでがシルト層A_{Ic} (N値1～3)、最終沈設高までが細砂層A_{Ivs} (N値3～10) である。図-2に土質概要を示す。



土質	層下端 標高 (m)	N 値	内部摩擦 角(°)	粘着力 (kN/m ²)	変形係数 (kN/m ²)
Bu	TP-1.19	8	25	0	29800
A _{Is}	-5.29	8	25	0	29800
A _{Ic}	-11.79	2	0	15	17000
A _{Ivs}	-15.69	10	30	0	34000
A _{Ivs}	-22.94	4	0	20	21300
A _{Ivs}	-24.34	32	35	0	80600
A _{Ivs}	-27.19	9	0	55	31900
A _{Ivs}	-32.19	32	35	0	80600
A _{Ivs}	-44.29	9	0	55	31900
A _{Ivs}	-45.79	39	40	0	95500

図-2 土質概要

§ 3 計測管理

3-1 計測概要

本計測の目的は、ケーソン本体の沈設精度管理および周辺地盤・構造物の挙動を迅速に把握し、事前解析と相違する挙動が認められた場合は、逆解析による現況把握を実施し、次段階施工の安全性を確認するものである。

ニューマチックケーソン工法は、周辺地盤・構造物に対し比較的影響度の小さい工法であるが、軟弱地盤における施工においては、以下に示す要因により影響を与える危険性がある。

- フリクションカット (t=50mm) 部分による地盤の側方変位・引込み
- ケーソン沈設時の傾斜による地盤の水平変位の発生
- ケーソン壁面に発生する周面摩擦力による地盤の引込み
- 函内掘削に伴い生じるヒービング現象による地盤の側方変位

これらの要因により3号機灰処理架台への影響が懸念されたため、ケーソン周辺に変位の遮断を目的とした縁切鋼矢板（SPⅢ，L=18m）を設置した。また、事前予測解析を行い構造物の安全性を確認した上で、沈下掘削に伴う挙動を常時監視しながら情報化施工を実施した。

表-2 計測項目・計器・頻度

計測項目	設置位置	計測機器	計測頻度
ケーソンの位置・姿勢			
傾斜	ケーソン側壁	傾斜計 (設置型)	沈設時：常時 (1回／分) 構築時：常時 (1回／時間)
沈下			
移動			
変形		水平・鉛直変位 (手動)	沈設時：2回／日
躯体に作用する外力			
函内気圧	作業室内	函内気圧計	沈設時：常時 (1回／分) 構築時：常時 (1回／時間)
刃口反力	刃口下部	刃口反力計	
周面摩擦	側壁外部	周面摩擦計	
土圧	側壁外部	壁面土圧計	
躯体に発生する応力			
鉄筋応力	側壁	鉄筋計	沈設時：常時 (1回／分) 構築時：常時 (1回／時間)
コンクリート ひずみ	底版中央 側壁中央	ひずみ計 温度計 無応力計	
コンクリート 温度		温度計	
外気温	百葉箱	温度計	
周辺地盤， 3号機灰処理架台			
沈下	周辺地盤 3号機灰処理 架台	沈下測定 (手動)	沈設時：1回／週 構築時：1回／月
間隙水圧		間隙水圧計	沈設時：常時 (1回／分) 構築時：常時 (1回／時間)
傾斜		傾斜計 (設置型)	
水平変位		地中傾斜計	

計測項目・計器および頻度を表-2に、管理基準値を表-3に、計測機器配置図を図-3に、管理モニター画面を写真-1に示す。

表-3 管理基準値

管理項目	第1次管理値	第2次管理値	対応策
ケーソン沈下 (施工時)	150mm/急激 沈下	300mm/急激 沈下	1次 掘削パターン変更 2次 サンドルの設置
ケーソン傾斜 (施工時)	1/200 (長辺20cm 短辺10cm)	1/100 (長辺40cm 短辺20cm)	1次 掘削パターン変更 2次 偏荷重の载荷 サンドルの設置
函内気圧	設定値により ± 0.1 気圧		原因の究明・対策 非常用コンプレッサーの作動
3号機灰処理 架台の挙動	総沈下量2.5cm 変形角 0.5×10^{-3} rad	総沈下量4.0cm 変形角 1.0×10^{-3} rad	1次 掘削土量の低減 2次 地盤改良
地盤の 側方変位	15mm	18mm	1次 掘削土量の低減 2次 地盤改良

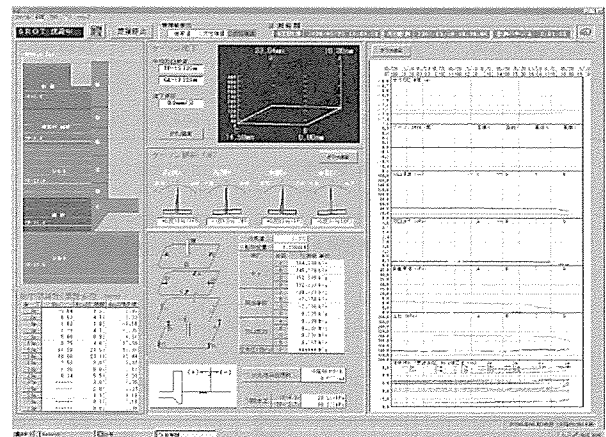


写真-1 計測モニター

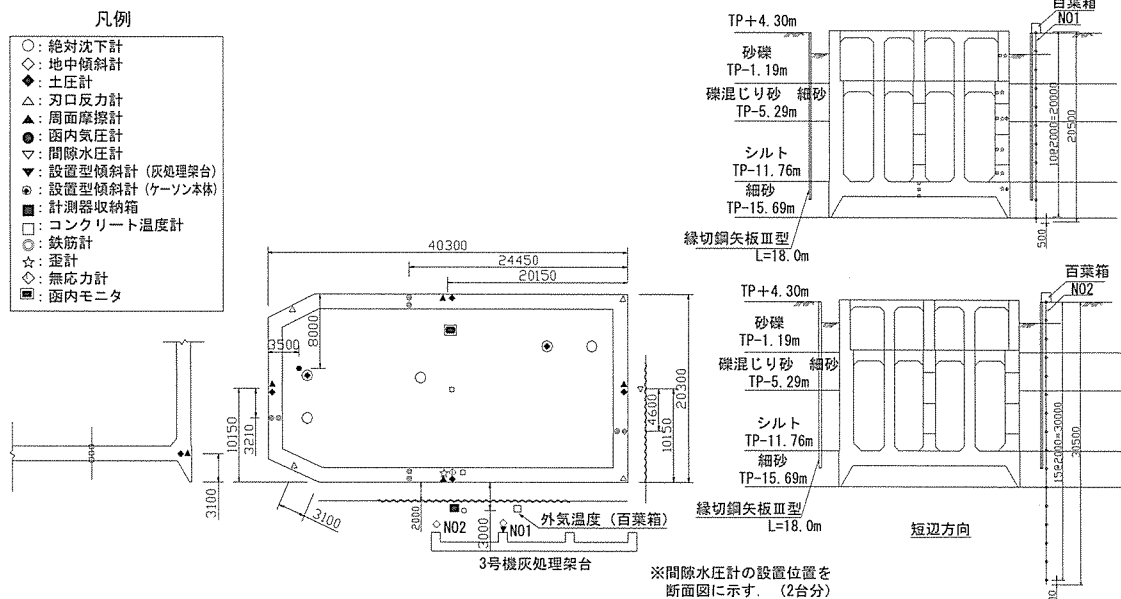


図-3 計測機器配置図

3-2 影響検討

ケーソン沈設に伴う地盤変状を2次元弾性FEM解析により予測した。フリクションカット部の地盤の変位(5cm)は、主働崩壊線に沿って地盤が落ち込むことを評価し、強制変位を主働崩壊角の方向に与えた。強制変位量は、フリクションカットによる緩み幅の1/3(17mm)とした。フリクションカット部以深の刃口部の境界条件は、水平方向拘束、鉛直方向自由とした。また、縁切鋼矢板の変位遮断の効果により、ケーソン側地盤と矢板背面地盤に不連続な段差が生じるため、鋼矢板の内側に摩擦型ジョイントを介在させ評価した。解析ステップを表-4に、解析モデルを図-4に示す。

表-4 解析ステップ

STEP	ケーソン刃口位置	圧気圧 (kN/m ²)	解析 モード
1	TP+1.55 (刃口掘付高)	—	初期応力 解析
2	TP-5.50 (h=7.05m)	60.0	強制変位
3	TP-10.50 (h=12.05m)	97.5	強制変位
4	TP-15.70 (h=17.25m)	154.7	強制変位

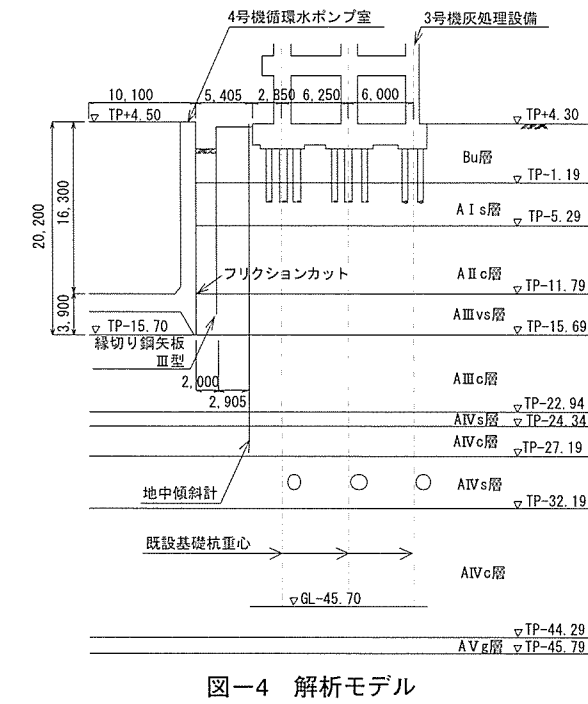


図-4 解析モデル

解析の結果、地中傾斜計設置位置での最大水平変位は、12mmと予測され、許容水平変位量(18mm)以下であることを確認した。

3-3 計測結果

(1)ケーソン沈設時の位置・姿勢

本ケーソンは、地層の傾斜、軟弱地盤、躯体重心の偏心かつ各ロットのコンクリート打設量が大い等の理由から、急激沈下および傾斜等の発生が懸念された。この

ため、掘削作業室内に大型土のうやパイプ支保工を設置し、沈下掘削を実施した。また、一部躯体コンクリートの打設にあたっては、事前に水荷重による掘削地盤のプレロードを実施し、打設に伴うケーソンの急激沈下を防止した。取水路側(D-C面)の縁切鋼矢板については、取水路工事の施工基盤の盤下げ5.0mに伴う土留め(土留高2.25m)を兼用しており長辺方向の土圧が不均等に作用するため、押え盛土により補強を行った。初期沈設時において最大傾斜が長辺方向1/80、短辺方向1/73、長辺方向の最大傾斜発生時には最大10cm分(60cm時)の急激沈下が発生した。沈下過程における最大偏心は長辺方向が82mm、短辺方向が83mmであった。最終沈設時は、基礎杭上にサンドルを設置し慎重な沈下管理を実施した。この結果、最終沈設精度は、ポンプ室の機能上の要求精度を満足することができた。沈設完了後の傾斜、偏心、沈設高さを図-5および表-5に、ケーソン沈設過程における偏心・傾斜を図-6に示す。

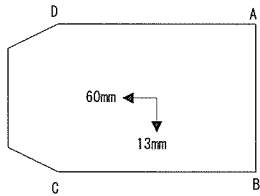


図-5 最終沈設時偏心

表-5 最終沈設時傾斜・沈設高

傾斜量	沈設高 (TP)
1/1010 (短辺) 1/4370 (長辺)	-15.693 (基準高-15.700)

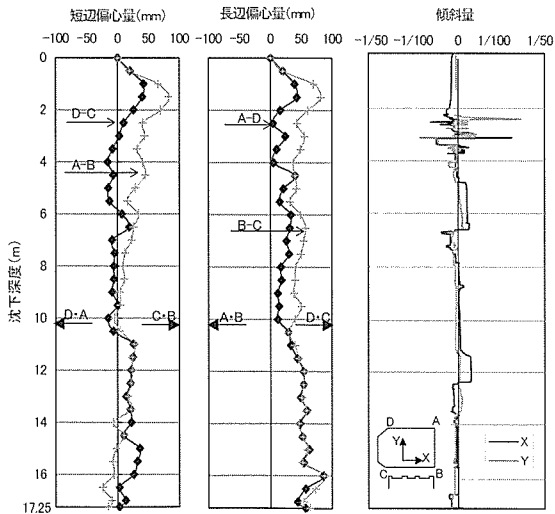


図-6 ケーソンの偏心・傾斜

(2) 周辺地盤の地中変位

掘削深度9.6m (TP-8.05m) において、地中傾斜計の変位がケーソン側へ累計10mm発生し、解析値より大きな値を示した。このため、沈下掘削を一時中断し、計測値を用いた逆解析を行い、地盤定数、解析ステップおよび強制変位量の再評価を行った。地中水平変位および周辺構造物変位を図-7に示す。

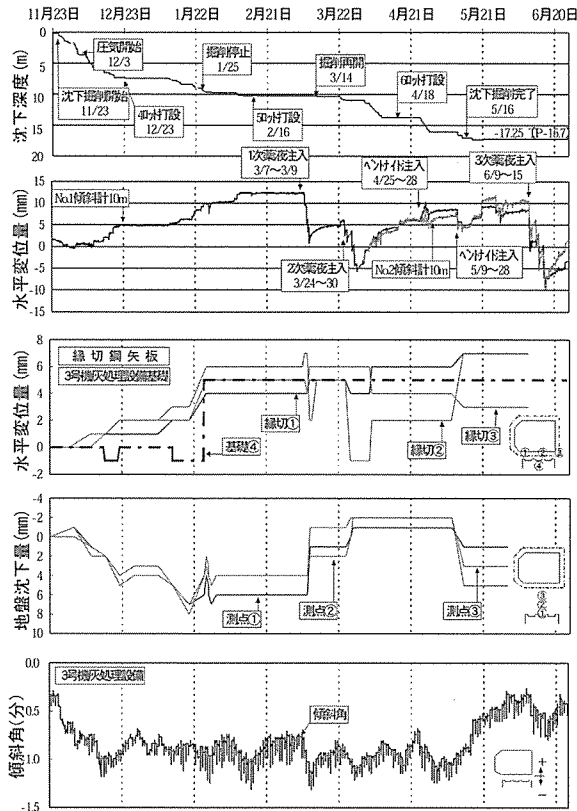


図-7 地盤・周辺構造物変位

検討の結果、沈設完了時に深度10m付近のシルト層(A_{IIc})において最大26mm累計変位が予測され、3号機灰処理架台基礎杭に影響を及ぼすことが懸念された。地盤変位の解析値、計測値を図-8に示す。

周辺地盤を変位させた主要因は、フリクションカット部の緩み幅の増加(当初解析17mm、逆解析50mm)、シルト層のヒービングによる函内方向への側方流動およびケーソンの偏心が要因であると判断した。

(3) 周辺地盤・3号機灰処理架台の変状

緑切鋼矢板頭部の最大水平変位は7mm、鋼矢板背面で最大8mmの地盤沈下が発生した。また、3号機灰処理架台の傾斜は、ケーソン躯体の反対側に最大約1分、基礎コンクリートは、ケーソン側に1~5mmの水平変位を生じた。

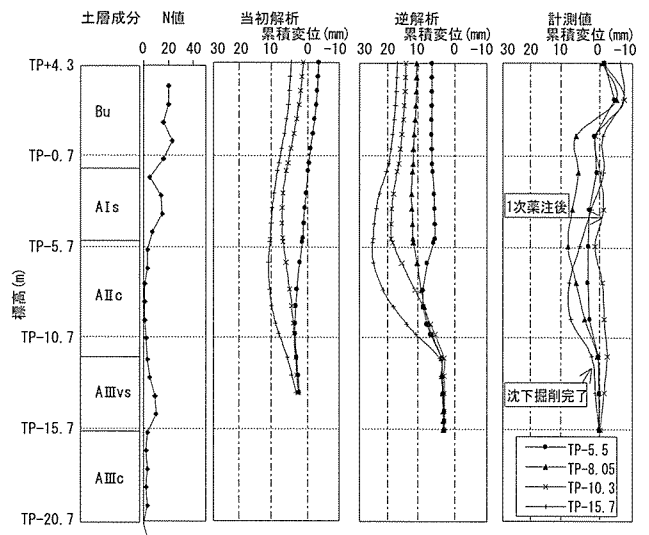


図-8 地盤変位 解析値・計測値

※凡例に示す標高 (TP) は、解析ステップ位置

(4) 躯体に作用する外力

周面摩擦、壁面土圧および刃口反力の計測結果と設計値との比較を図-9に示す。

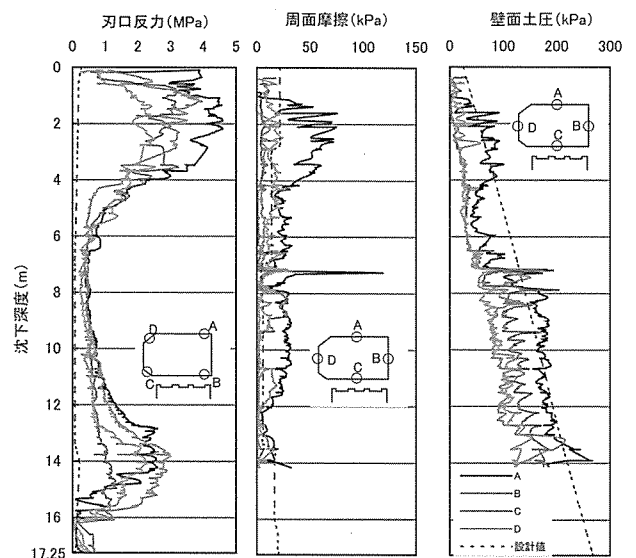


図-9 刃口反力・周面摩擦・壁面土圧

周面摩擦は、各地質においてA壁が他の3壁より大きめとなったが、平均値は設計値とほぼ一致した。

壁面土圧は、A壁が設計値とほぼ一致したが、他の3壁は設計値の1/2程度であった。A壁の壁面土圧が設計値と比較的一致したのは、他の3壁(C壁:3号機灰処理架台近傍、D壁:取水路立坑部近傍、B壁:送水管近傍)ほど近接構造物の影響を受けない半無限地盤となっているためと考えられる。

刃口反力は、設計値よりも大きい値を示した。ケーソン全周に設置された緑切鋼矢板による側方変位の拘束と刃口荷重による締固め効果により、刃口底面地盤の極限支持力が増加したと考えられる。特に、砂礫~礫混砂・

細砂層においてこの傾向が見られた。このため、実績開口率（75～97%）は、掘り残し面積分の極限支持力によって設定される設計開口率（49.9～92.6%）に比べ、大きい値で掘削を進行した。

§ 4. 対策工

対策工の検討は、逆解析モデルを用い、遮断保護工法（縁切鋼矢板追加+薬液注入）、地盤強化工法（①高圧噴射攪拌工法、②薬液注入工法）、間隙充填工法（薬液注入工法）の4案について比較検討した。

検討の結果、ケーソンと縁切鋼矢板間の緩んだ地盤を充填・補強することが変形の伝播を抑制する有効な手段であると判断し、間隙充填工法（薬液注入工法）を採用した。

薬液注入工法は、二重管ストレーナー工法（溶液型水ガラス系、瞬結+緩結注入）を採用し、周辺地盤の性状を均等化するため注入位置はケーソン躯体長辺方向の両側、深さは深度5m～17m（TP-0.7～TP-12.7）とした。対策工施工図を図-10に示す。

対策工を実施した結果、地中水平変位は、薬液注入による地盤の間隙充填効果により減少したが、沈下掘削再開後、再び増加する傾向が見られた。変位が再び管理基準値に近づいた場合は、さらに対策工として追加薬液注入や周面グラウト孔を利用したベントナイト注入を実施した。これらの対策工の実施により、最終沈設時の地中傾斜計深度10mの最大累計変位は11mmとなり、管理基準値を満足して沈下掘削を完了することができた。

§ 5. おわりに

工事は、大規模構造物、軟弱シルト層における沈下掘削、脚付きケーソン、運転稼働中の発電設備の近接施工等の厳しい施工条件があったが、リアルタイム計測システムを用いた情報化施工を行った結果、既設構造物に影響を及ぼすことなく、ポンプ室の機能上の要求精度を満足し施工を完了した。

本施工を踏まえ、今後ニューマチックケーソン工法による近接施工を行う場合の検討課題を以下に示す。

- ①施工計画時において、フリクションカットの縮小またはフリクションカット無しでの沈下関係の検討を行い、周辺地盤に与える影響を最小限にする。沈下関係において沈下力が不足すると判断される場合は、滑材（摩擦低減材）の注入および強制圧入装置の採用を考慮する。
- ②防護工として多用される縁切鋼矢板は、地盤変位の伝播を遮断する目的で計画するが、地質によっては十分な効果が期待できない場合がある。特に構造物が近接する場合は、剛性の高い遮断壁を採用するなど、詳細な検討が必要である。
- ③FEM解析による影響検討においては、強制変位の設定をケーソンの偏心移動等を考慮して、安全側に設定する。また、解析ステップの設定は、地層変化点に着目するなど慎重に設定する。
- ④掘削開口率の計画は、刃口部地盤の極限支持力が見かけ上補強されることを考慮し検討する。

最後に、本設計・施工にあたって、ご指導、ご尽力を頂いた北海道電力㈱、土木設計部はじめ関係者各位に深く感謝の意を申し上げます次第である。

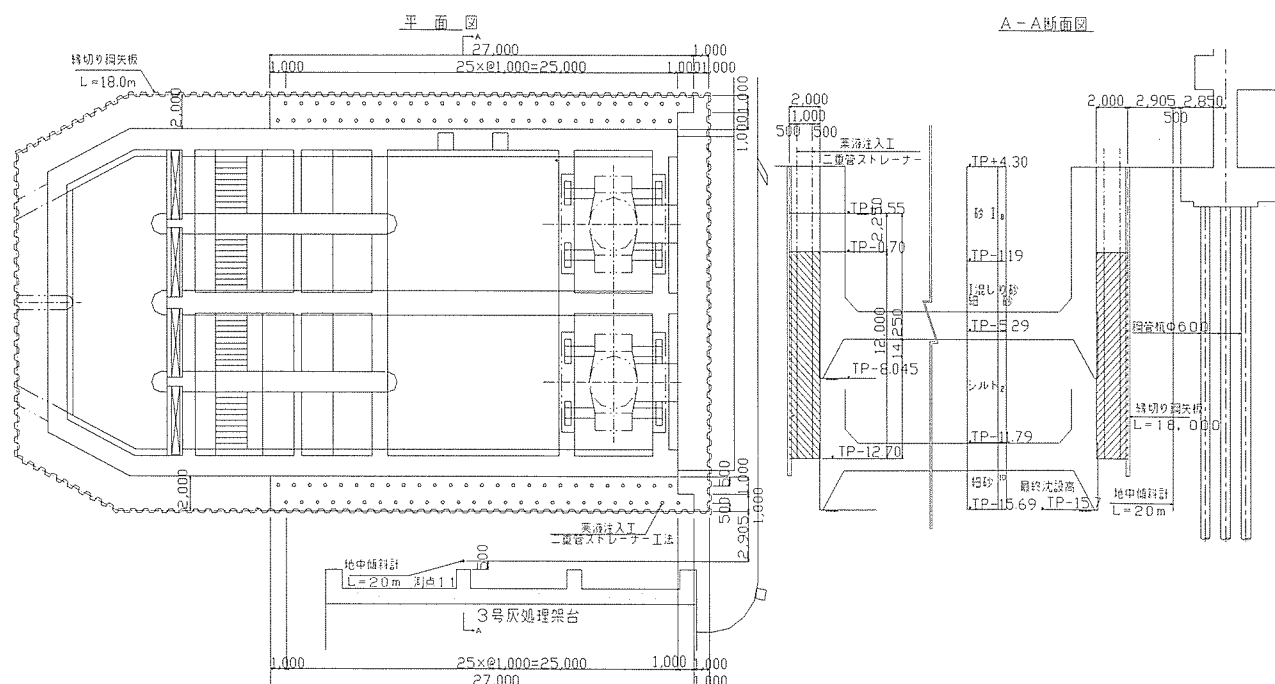


図-10 対策工施工図