

## 電力地中線土木工事で実施した無人化システムによるニューマチックケーソン工法

UNMANNED EXCAVATION SYSTEM OF PNEUMATIC CAISSON  
APPLIED FOR THE TUNNEL SHAFT FOR THE UNDERGROUND  
HI-VOLTAGE ELECTRIC CABLE

前田 弘\*・川村幸延\*\*・斎藤良太郎\*\*\*

By Hiroshi MAEDA, Yukinobu KAWAMURA and Ryotaro SAITO

### まえがき

安全、アメニティなどを求める社会的風潮の高まりに対応して、電力施設の建設面では安全性確保、品質向上、建設コストの低減が大きな課題となっており、この課題達成のための各種技術開発が活発に進められている。

このような状況のなかで、都市における地中送電線設備の建設についてみると、地下空間の過密化に伴い、建物・地下埋設施設との近接施工、建設位置の深層化、軟弱地盤での工事の不可避等、高度な建設技術が要求される条件は多い。

東京電力(株)では、これらの都市土木技術の課題に対し、トンネルおよび立坑をはじめとする技術開発に、積極的に取り組み成果<sup>1)~8)</sup>をあげている。

都市の地中送電線土木工事における、立坑建設工法のひとつであるニューマチックケーソン工法は、高気圧下施工等による苛酷な作業環境、施工能率面ならびに安全性や、熟練作業員の確保難等の問題から、周辺環境等に比較的恵まれた条件下において採用されてきたが、その数は土留開削工法に比べきわめて少ない。

本報告は、これらの諸問題を解決すべく、掘削の無人化システムを開発し、川崎市川崎区扇島において電力

地中送電線シールドトンネル用立坑工事に採用したので、その概要について述べるものである。この工事においてニューマチックケーソン工法を採用したのは、立坑深さが 40 m に達し、地下水位が高いため、土留開削工法によれば、土留壁の深度が 40 m より深くなること、これに伴い施工設備が大型化すること、さらにかんりの補助工法を要すること、等から無人ケーソン工法が有利と判断されたためである。

### 1. 無人化システムによるニューマチックケーソン工法の開発

ニューマチックケーソン工法はわが国に導入されて以来、橋梁下部工をはじめとする重量構造物の基礎、ビルの地下室、地下鉄、水底トンネル、シールドトンネル用立坑等、さまざまな用途に利用されてきた。本工法はその作業方式から、あらゆる地盤に適應する工法で、支持地盤を直接確認できるため、基礎工法としては信頼度の高いものとして評価されている。しかしながら本工法は、高気圧下にある作業室での人力掘削を伴うという、作業環境上の問題が、大きな欠点の1つとして残されてきた。このうち、人力掘削については、作業性のよいケーソンショベル等の掘削機械の開発により、大型ケーソンから順次機械掘削にとって替わられてきた。しかし依然として、高気圧下にオペレーターと、補助作業員が常時入ることが必要であった。高気圧下の作業室で作業を行うことは、減圧症ばかりでなく、有害ガス、酸欠空気の発生、ならびにケーソンの急激沈下、バケットの落下等の危険を伴うこととなる。

\* 正会員 工博 東京電力(株)理事 送変電建設本部副本部長

(〒100/東京都千代田区内幸町 1-1-3)

\*\* 正会員 東京電力(株)地中線建設所神奈川地中線建設所土木課長

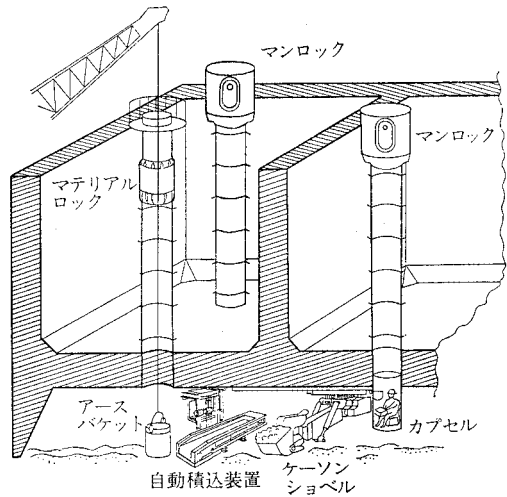
\*\*\* 正会員 (株)白石 常務取締役 東京支店長

したがって、ニューマチックケーソン工法の利点を生かしながら、最大の欠点である高気圧下の作業をなくすることが永年の夢であった。これに対して、無人化の試みは今までに建設省をはじめ、ゼネラルコントラクターを中心にそのシステムの研究が進められ、実証実験等も行われてきたが、実用化には至っていない。主なものを挙げると表一のとおりである。

今回開発された無人掘削システムは、図一に示すよ

表一 無人ケーソン工法の技術開発の現状

開発者名称	システムの概要	備考 (出典)
建設省	Zブームによるバックホウ式掘削機とクラムセルによる排土システムのモニターテレビによる遠隔操作。	昭和47年 木曾川実証試験
フジタ工業(株)	ウォータージェットおよび回転翼掘削機とリバースによる排土システム。	フジタ技報 昭和46年 No. 9
(株)奥村組	バケットコンベア式掘削機とベルトコンベアとトレーリフターによる掘削排土システム。	特許公告番号 昭 59-48253 公告年月日 昭和59年11月26日
飛島建設(株)	函内掘削機に耐圧カプセルを搭載し、大気圧下のカプセル内で運転を行う。オペレーターの入出はシャフト孔にカプセルハッチを接続して行う。	特許公開番号 昭 60-258324 公開年月日 昭和60年12月20日 特許公開番号 昭 60-258325 公開年月日 昭和60年12月20日
(株)熊谷組	刃ロスラブ部に耐圧運転室を設け、ニューマチックケーソンの掘削作業を遠隔操作により行う。	特許公告番号 昭 55-49214 公告年月日 昭和55年12月10日 特許公告番号 昭 55-49215 公告年月日 昭和55年12月10日
大成建設(株)	スラブに設けた耐圧カプセルにより遠隔操作により掘削を行う。	特許公告番号 昭 54-26808 公告年月日 昭和54年9月6日 特許公告番号 昭 54-26809 公告年月日 昭和54年9月6日 実用新案公告番号 昭 56-13411 公告年月日 昭和56年3月28日
鹿島建設(株)	電動ブローダーや電動バックホウショベルをオペレーターは函外操作室において ITV モニターを見ながら遠隔操作する。	特許公告番号 昭 60-2455 公告年月日 昭和60年1月22日
(株)白石	ニューマチックケーソン作業室内に固定した大気圧室を設け、掘削機を遠隔操作する。	実用新案公告番号 昭 55-36597 公告年月日 昭和55年8月28日
(株)白石	函内の圧縮空気により昇降し、かつ旋回機能を有する掘削機運転用カプセル。	特許公告番号 昭 60-499 公告年月日 昭和60年9月3日
(株)白石	作業室内に設置し、アースバケットの上部まで前後進し、端部に昇降可能なホッパーを有するベルトコンベア。	特許公開番号 昭 59-109620 公開年月日 昭和59年6月25日



図一 ニューマチックケーソン無人掘削システム



写真一 無人掘削システムによる作業状況  
(左から自動積込装置、ケーソンショベル、カプセル)

うに、作業室天井スラブから吊り降ろされた気密な円筒形カプセル（この中は大気圧に開放されていて、遠隔操作室となる）の中から、耐圧のガラス窓を通して作業室内を直視しながら、天井走行式ケーソンショベルを遠隔操作し、掘削土をバケットの中へ直接、あるいは自動積込装置を介して投入し、排土するシステムである。写真一に作業状況を示す。

主な内容は次のとおりである。

(1) カプセル

マンシャフトの下部に設置され、ケーソン作業室内の気圧により作動するシリンダーによって昇降し、電動モーターにより、左右 270 度の範囲で旋回する。また、ケーソンの異常沈下が起こった場合には、安全弁が作動して自動的に上昇し、カプセルの損傷を防ぐ安全装置が設けられている。カプセル内には、ケーソンショベルと自動積込装置の遠隔操作設備と、監視窓から直視する際に死角となる場所を、ケーソンショベルに取り付けたテレビカメラによって映し出すモニターなどが設置されて

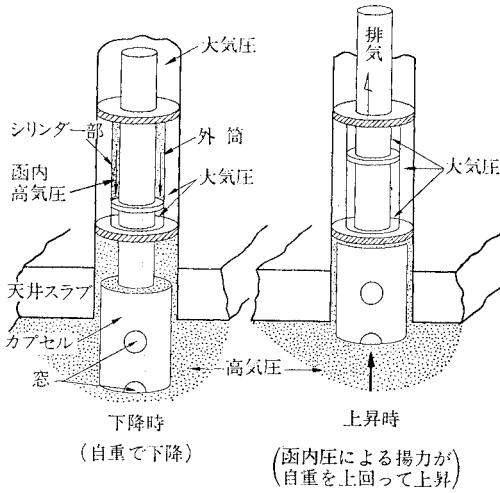
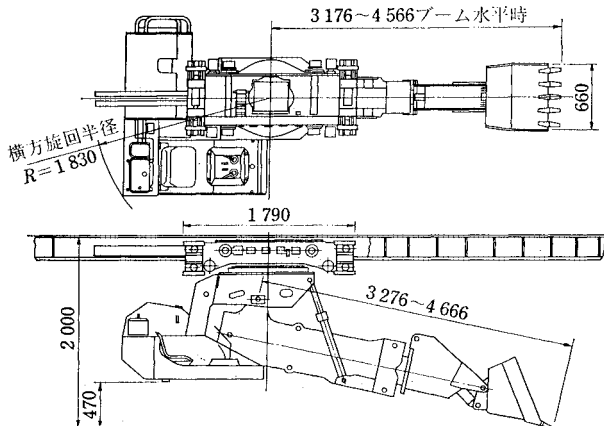


図-2 カプセル昇降機構図

いる。図-2 にカプセル昇降機構図を示す。

(2) ケーソンショベル

天井走行式のショベルで、昭和 45 年に開発以来、種類の改良を重ねて今日に至っている。この機械は、掘削時の反力を天井スラブで受ける機構になっているため、履帯式掘削機に比較して、優れた走行性および掘削性能を発揮できる。駆動は電動油圧方式で、ブームの伸縮、上下動および 360 度の旋回が可能であり、ケーソンの全面積にわたって均一な掘削ができる。図-3 にケーソンショベル構造図を示す。



(単位：mm)

項目	仕様
バケット容量	V-0.15m <sup>3</sup>
旋回速度	5/6 r.p.m 50/60Hz
走行速度	25/30m/min 50/60Hz
帯用圧力	175kg/cm <sup>2</sup>
電動機	15kW×4P 200V 安全防爆型

図-3 ケーソンショベル構造概要図

(3) 掘削土自動積込装置

上下動および水平移動を行う。ベルト式電動フィーダーを主体とするもので、掘削した土砂を一時的にフィーダー(ホッパー付き)上に貯え、その一定量を一気にバケットに投入する装置である。これによって、バケットが上昇してケーソン外で排土している時間内にも、掘削作業が可能で、掘削・排土作業の効率をいっそう高めることができる。図-1 に掘削土自動積込装置の使用状況概念図を示す。

2. 無人化システムによるニューマチックケーソン工法の実施例

東京電力(株)は、川崎市の東扇島発電所と、南川崎変電所を連係する 275 kV 地中送電線建設工事を実施中であるが、このうち京浜運河横断部のシールド到達立坑(仮 4 号マンホール)掘削工事にニューマチックケーソン工法を採用した。

ケーソン施工地点は、京浜運河沿いの、日本鋼管(株)京浜製鉄所敷地内であり、運河の護岸および、石油タンク等の工場施設に近接しての施工となった。図-4 に到達立坑付近詳細平面図を示す。

(1) 地質概要

本工事地点の地質は、洪積世前期に堆積した三浦層群を基盤として、その上部を不整合に覆う内湾性堆積物からなる屏風ヶ浦層に広く覆われ、さらに、多摩ローム層の堆積により形成されている。

地表面から -40.0m までの地質柱状図を図-5 に示す。GL -12.7m 以浅の砂層は、貝殻片、腐植物、シルトを含む不均質な地層である。その下部は、GL -30.8m まで粘性土で構成され、GL -24.0m 付近で上部沖積粘性土と、下部洪積粘性土とに分かれている。GL -30.8m 以深は、N 値 50 以上の密な砂層で、立坑の支持地盤である。

(2) ケーソンの設計

a) 形状寸法

電力ケーブルの敷設、配置、保守面を考慮すると、立坑の必要内寸法は、矩形の場合で 5.5m × 4.65m、円形の場合で、φ6.6m となる。円形は矩形に比べ、掘削面積がやや大きくなり、一般的には不経済となることが多いが、本立坑は沈設深度が深く、側圧が大きいので、円形の方が構造的、経済的に有利となった。図-5 に構造一般図

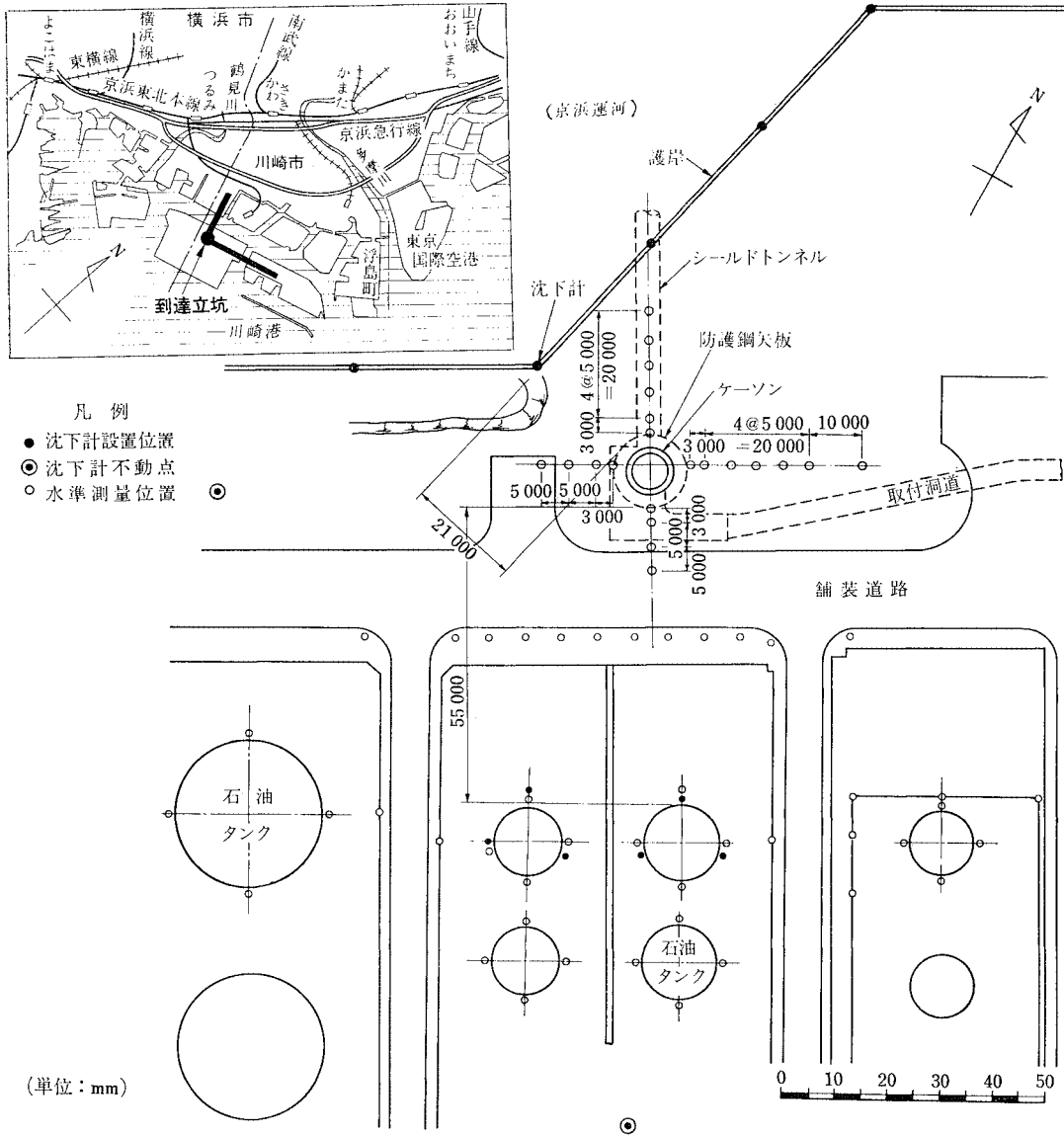


図-4 到達立坑付近詳細平面図(沈下計測点位置図)

を示す。

**b) 補助工法(ヒービング防止対策)**

ケーソンを厚い粘性土層中に沈設させる場合、圧気圧とケーソン外側の土被り圧とのバランスにより、土が作業室内へ膨れ上がる現象、いわゆるヒービングが発生することがある。当ケーソンの場合、GL -12.7m~-30.8m に粘性土層があるので、この層に対してヒービングの検討を行った。

ヒービングの検討は、図-6 に示すように GL -26.0m を境に、粘着力が変化するものとして、GL -26.0m と、それより上方 2.0m、GL -24.0m に刃口先端があるときの 2 ケースについて実施することとし、それぞれ、建築基礎構造計算規準および Bjerrum & Eide の

方法により実施した。その結果安全率を 1.2 とすると、ケーソン刃口先端が、GL -26.0m 以浅にあるときに、作業室の気圧が 1/3 に減少した場合、ヒービングの危険性がある。そのため、ヒービング防止対策として、鋼矢板(Ⅲ型、 $l=26.0m$ )をケーソン周辺に打設した。図-7 にその概要を示す。

**(3) 施工実績**

**a) 工事工程と施工手順**

図-8 に実施工程を示す。各ロットの平均沈下量は約 90cm/日程度で、ほぼ当初の計画どおりの工程で完了した。施工手順は、図-9 に示すとおりである。

**b) 沈下掘削**

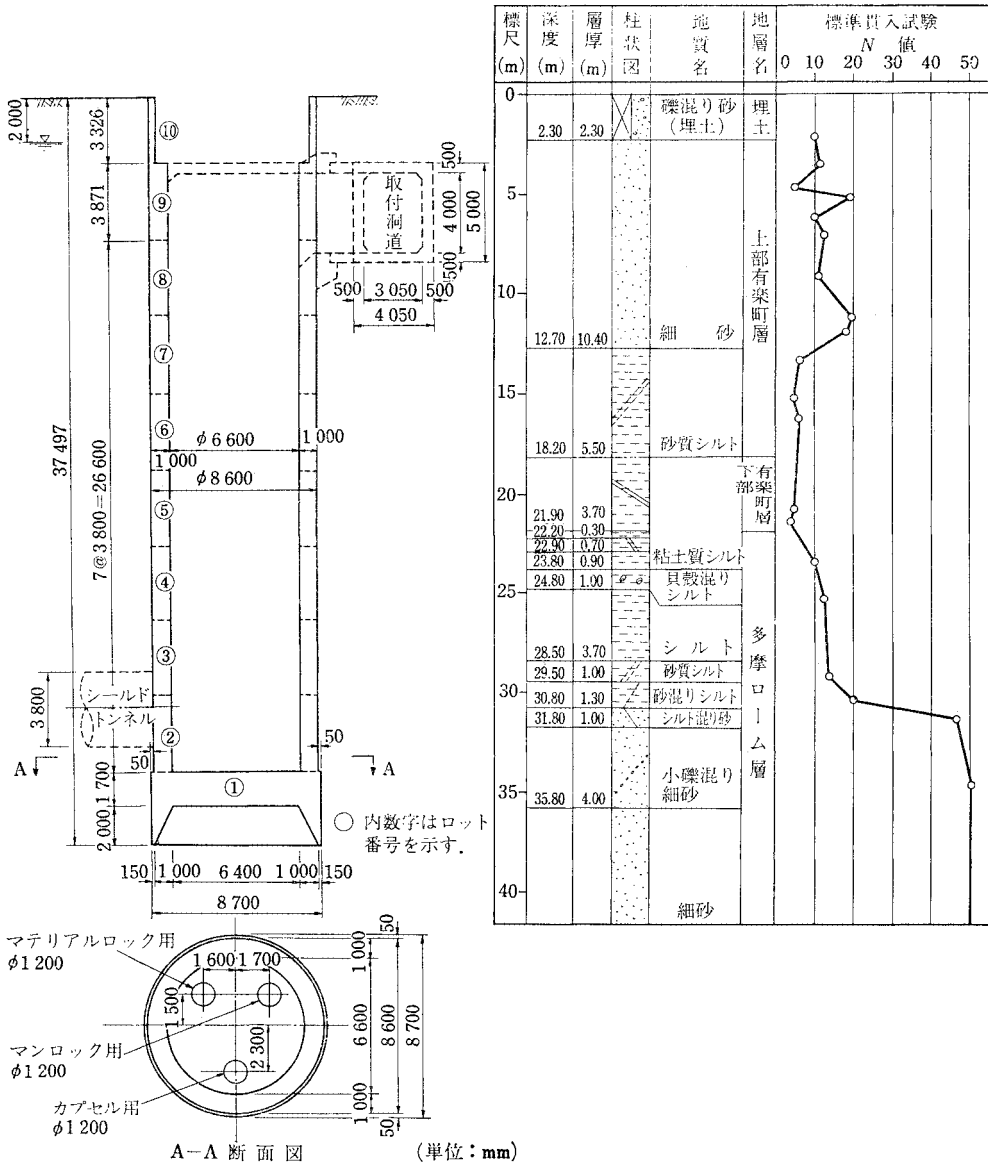


図-5 地質柱状図，構造一般図

作業室部分（第1ロット）の沈下掘削は，地下水位以下 1.0m の深さに至るまでは人力による無圧気掘削とし，第2ロットから，最終の第10ロットまでを圧気掘削とした。沈下促進工としては，通常用いられるフリクションカット部へのベントナイト溶液注入によるほか，土とケーソン躯体との間に，摩擦軽減用のシート（NFシート）を介在させた。図-7 にベントナイト溶液注入管および NF シートの使用図，図-10 に沈下関係実績図，表-2 に沈設精度を示す。

c) 施工管理

ケーソンの施工管理としては，沈下掘削に伴う傾斜，

偏倚を防止するための沈下管理が，最も基本的で重要である。特に，初期沈下時においては，不安定な状態であるため，慎重な管理を必要とする。

沈下管理のポイントは，沈下力と抵抗力のバランスおよび，フリクションカット部の地山の崩壊防止である。

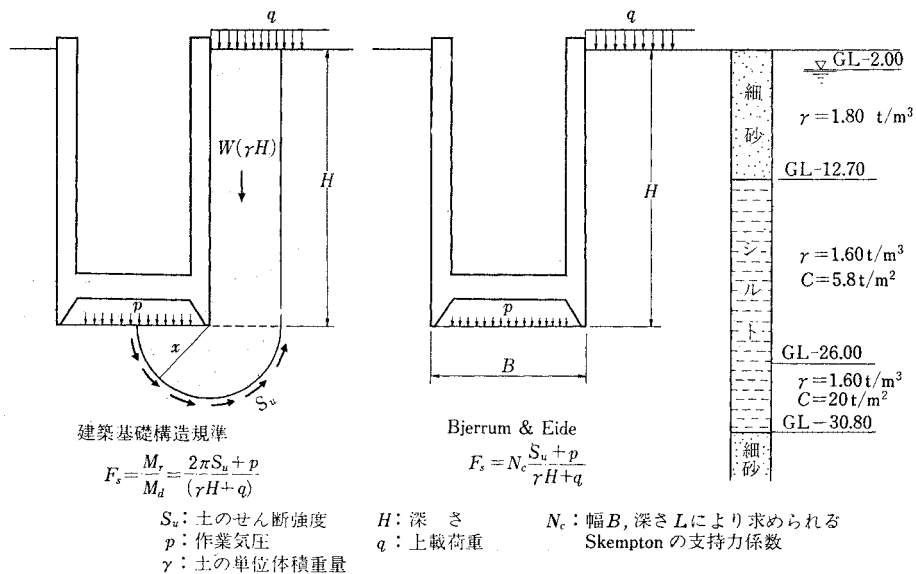


図-6 ヒービング検討モデル図

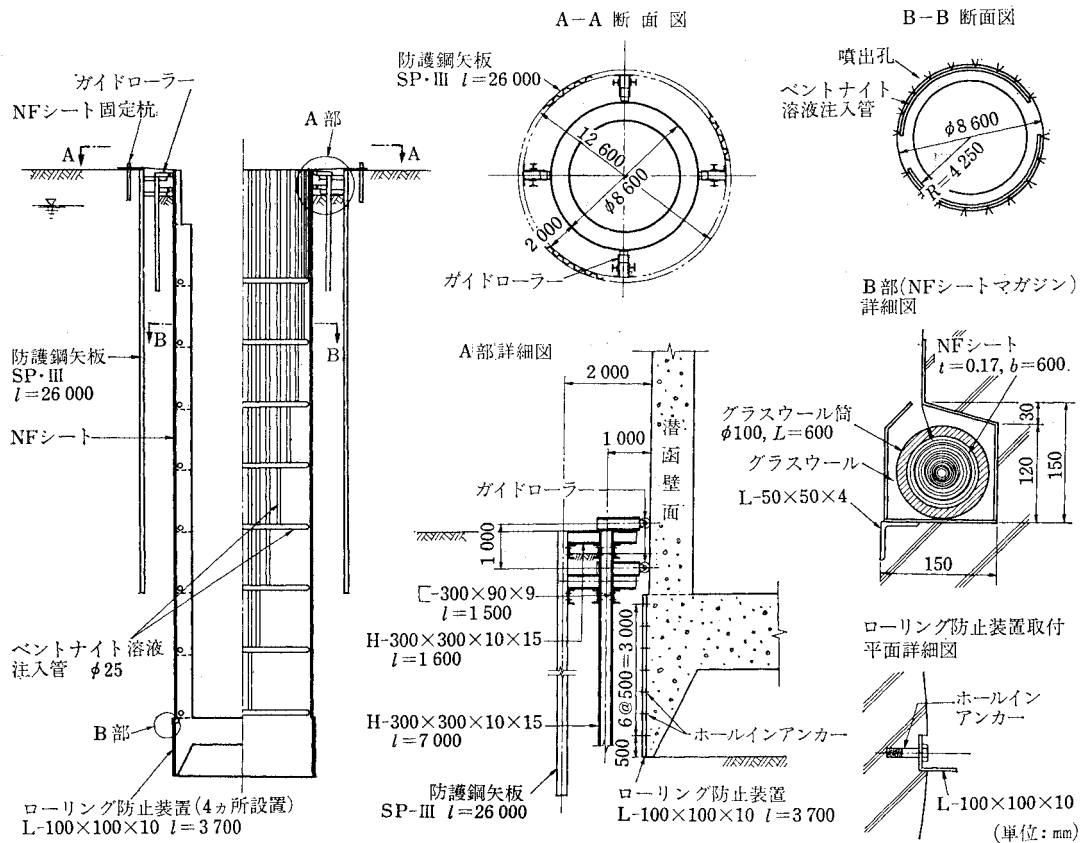
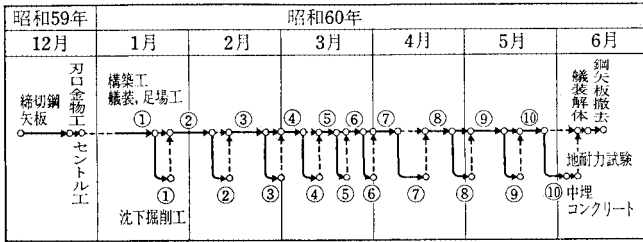


図-7 防護鋼矢板、ガイドローラー、ローリング防止装置、NFシートマガジン、ベントナイト溶液注入管設置図

ケーソンの一般的な性質として、初期段階では沈下力が過剰気味となり、沈下が進むにつれて抵抗力の方が大きくなる。したがってこれらの管理状態によって、傾斜が

発生したり、それに伴う移動(偏倚)、周辺地盤への影響などが現われたりする。

本工事での施工管理の実施内容は、



注：○内の数字はロット番号を示す。

図-8 実施工程表

- ① 沈下力と沈下抵抗力とのバランスを図るため、刃口付近の地山の掘り残し量を調節しながら掘削した。
- ② 差動トランス型計器による傾斜測定を行い、常時ケーソンの姿勢を把握しながら沈下掘削を行った(図-11 参照)。
- ③ 沈下精度確保を目的として、側壁ガイドローラーを設置した(図-7 参照)。
- ④ 刃口部にローリング防止用山形鋼を取り付けた(図-7 参照)。

等である。以上のように、一般のケーソンと同様な施工管理を行い特に無人化システムということで特別な手法は用いていない。

d) 計測

先に述べたように、施工地点が製鉄所内にあること、運河に近接していることから、施工による重要構造物への影響の把握を目的として、沈下計測を実施した。

測定点は、運河の護岸天端、工場内石油タンクの基礎天端および、工場内の道路面である。また、ケーソン近

傍の地盤については、測点を設置して水準測量を行った。測定の結果は±3mm以内で、測定の誤差を考えると、影響は全くなかったといえる(図-4 参照)。

3. 今後の課題

大気圧カプセルとケーソンジョベルの遠隔操作を組み合わせることにより、高気圧下の作業からの解放にほぼ成功し、ここに無人ケーソン工法は、実用化の域に達したといえる。しかしながら、本無人ケーソン工法をさらに適用拡大するためには、今後改良を重ねながら、より完全な方法へと近づける努力が必要である。当面の問題として次のような事項が挙げられる。

- ① 小型ケーソン(約60m<sup>2</sup>以下)の場合には、カプセルを設置するスペースが確保できないため、別途テレビカメラ、あるいは潜望鏡形式による遠隔操作方法を考案することが必要である。
- ② 掘削機械の組立て、解体、点検、修理のほかに、岩盤掘削の際の発破作業、最終支持地盤の地耐力テスト等、まだ高気圧下の作業に依存するものがあり、可能な作業から順次遠隔操作方式に切り換えることが必要である。
- ③ 残土搬出は、1個のバケットにより行っているが、設備の点では簡単で経済的であるという利点はあるが、やや非能率で、さらにより方法を考案する余地があろう。特に大型ケーソンの場合には、たとえば連続排土方式が可能になれば、より経済的になるこ

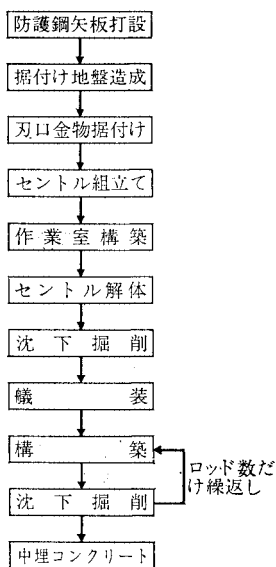


図-9 施工手順

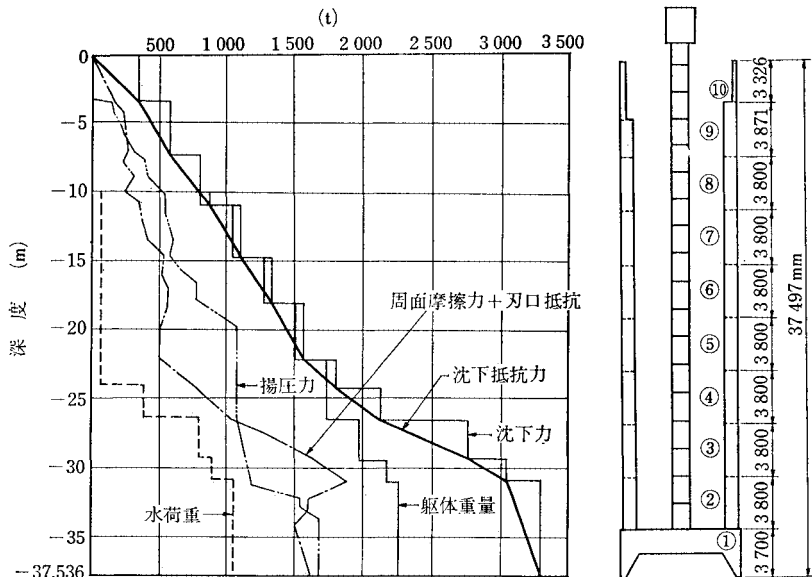


図-10 沈下関係実績図