

ニューマチックケーソンの機械化施工

MECHANIZED EXCAVATION BY PNEUMATIC CAISSON

* ** **

鯨井 裕嗣 嶋村 彰 鈴木 正道

By Hiroshi Kujirai, Akira Shimamura and Masamichi Suzuki

The essential point of Pneumatic Caisson Method is that the caisson body is automatically sunk down by excavating and removing earth and sand in the working chamber having cutting edge with about 2 meters in height, and the works always remain in dry conditions by sending the compressed air with same hydraulic pressure as of the underground water. Recently to meet the demand of large bridge construction and utilization plan of the underground with a great depth, it is generally known that high efficiency and reliability of construction machineries as well as automataed systems of the construction equipments have been moved ahead with a plan in order to fill up labor shortage and to improve labor envirnment. For this method, the underground excavation under low atomospheric pressure and removal of earth and sand have been performed remotely maneuvered byoperator and automatic operation, namely unmanned excavation system. Followings are described concerning main foundation of Tokyo Cross Harbor Bridge which was performed by Pneumatic Caisson Method and the mechanized excavation of anchorage caisson for the off-shore anchorage foundation.

1. まえがき

首都高速12号線は、首都高速1号線の浜崎橋ICと高速湾岸線の有明付近を結ぶ延長約5kmの路線であり、建設が進められる東京臨海部の交通を確保すると共に、千葉、神奈川方向から都心へ向う交通の混雑緩和の目的で計画された。(図-1参照)

東京港連絡橋(仮称)は、首都高速12号線の東京港第一航路を横断する吊橋で、台場側アンカレッジケーソンは世界最大級の規模である。施工に当っては、種々の施工機械の検討、開発を行ない高精度で沈設する事ができた。

2. 本橋の構造及び地質

上部構造は図-2に示す通り二層構造となっており、下層の中央に新交通システム、その両側に臨港道路、歩道が設けられ、上層は往復4車線の首都高速道路となっている。

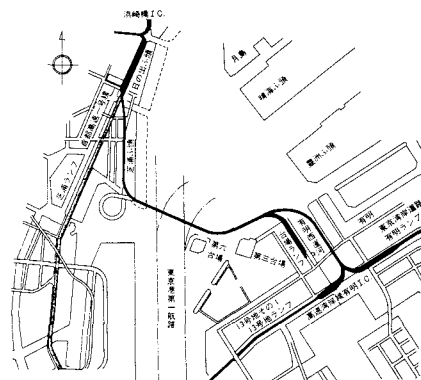


図-1. 位置図

- * 首都高速道路公団第三建設部東京港連絡道路工事事務所 (〒105 東京都港区芝浦2-3-31)
- ** (株) 白石 東京支店 工事部工事長 (〒101 東京都千代田区神田岩本町1番地14)
- *** (株) 白石 東京支店 工事部工事主任 (〒101 東京都千代田区神田岩本町1番地14)

下部構造は、主塔およびアンカレイジの4基全てがニューマチックケーソンとなっており、芝浦側のアンカレイジが陸上施工の他は、海上施工となる。台場側

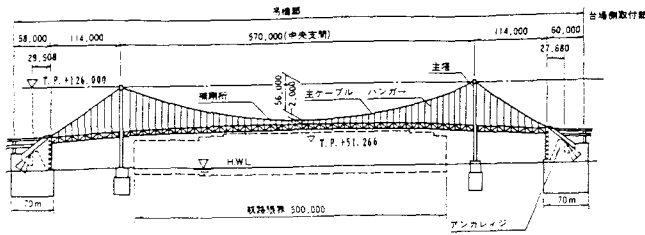


図-2. 吊橋全体図

アンカレイジの構造図を図-3に示す。

地質は、図-4に示す通りT.P.-12.0～-35.1mの間は軟弱な沖積粘性土層、T.P.-35.1～-37.6m間は砂層と礫層の互層、それ以深は、一部に砂が介在する土丹層である。

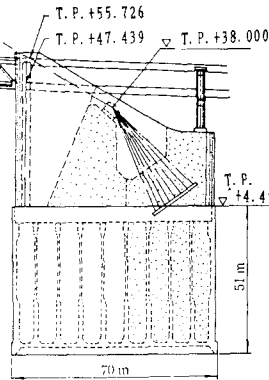


図-3. アンカレイジ構造図

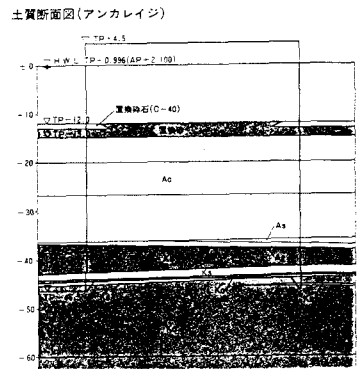


図-4. 土質断面図

3. 施工順序

アンカレイジケーソン（以下「ケーソン」という）の沈設位置は、図-1に示す通り港区台場（建材埠頭）から約1km離れた第六台場に近接した海上となる。したがって、施工順序は、まずケーソン沈設位置の地盤改良、施工ヤードとなる栈台、およびそれに連絡する工事用栈橋から開始した。図-5に施工順序図、および図-6に施工フロー図を示す。

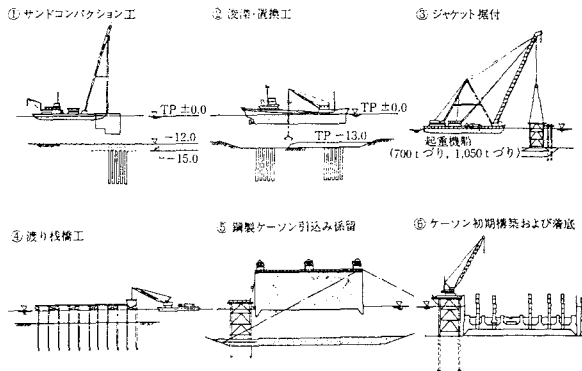


図-5. 施工順序図

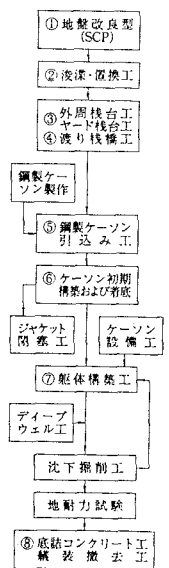


図-6. 施工フロー図

4. 施工上の問題点

ケーソンの構造は、図-3に示す通り平面寸法70m×45m、躯体長51mで、沈設深度はT.P.-46.5mとなる。この平面寸法が大きく、沈設深度の深いケーソンを能率よく限られた工期内に沈設するには、以下の問題点を解決する必要があった。

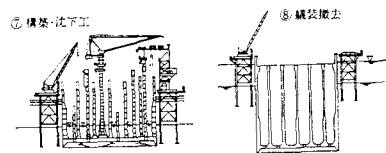


図-5. 施工順序図

図-6. 施工フロー図

1). 面積の広い作業室内（3157㎡）の土砂をマテリアルシャフトへ効率的に掘削、積込みを行う掘削機械の配置計画。

り付けるか、またはバケットに取り付けられているツメの本数を減らし、土丹への貫入力を高めている。しかし、これらの方法は、ケーソン最終深度の僅かな数量を掘削した実績であり、当工事のように主塔ケーソンを含めた2基のケーソンの約30,000m³に及ぶ土丹層を掘削するためには、さらに合理的かつ経済的な方法を開発する必要があった。

首都高速道路公団は、この開発業務を(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所へ委託した。開発に当っては土丹を能率良く切削でき、作業室内無人化のため遠隔操作可能な機械である事を目標とし、作業室中央部を切削する機械については、図-10に示すツインヘッドが提案され、本機のベースマシンとして、図-8に示すショベルを対象機種とした。また、ケーソンを沈下させるためには刃口下部を切削しなければならないが、現有機械にはないので、炭鉱で採炭に使用している薄層掘削機にヒントを得て、図-11に示す新機種のジブカッタを開発した。ツインヘッドおよびジブカッタの特徴は、以下のとおりである。

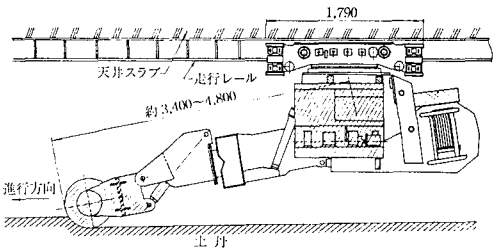


図-10. ツインヘッド

(ツインヘッドの特徴)

- 1). 掘削時の反力や衝撃が小さいので、ショベルを痛めない。
- 2). 遊星歯車の使用でコンパクトで取扱いが容易である。
- 3). ピックを取付けたドラムで土丹を切削するので切削面が平坦で、後の積込作業が効率良く行える。
- 4). ドラム回転により連続切削で大きな掘削能力が得られる。
- 5). 先端部をバケットと交換して使用できるので、軟弱な地盤から軟岩まで効率良く使用できる。

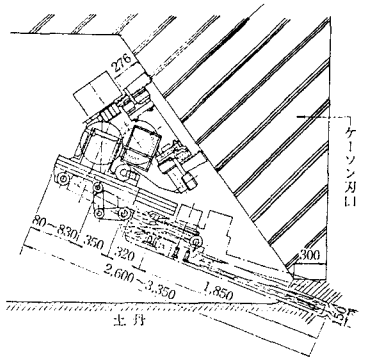


図-11. ジブカッタ

(ジブカッタの特徴)

- 1). ケーソン刃口部へ取付たガイドレール(ラック付き)を走行するので、ショベルの掘削作業に支障を来さない。
- 2). 刃口下を連続、または断続的に掘削すると共に、切削深さも自由に制御できる。
- 3). 駆動は、全て油圧になっているので、過負荷に対しても安全で機械の故障が防止できる。

試作機は、本工事で掘削する土丹と類似した土丹塊を発泡モルタルで固めた模擬地盤で運転制御の方法、機能、能力の照査を行った。その結果、ショベル、ツインヘッド、ジブカッタにより、ケーソンの沈下速度は、18cm/日程度(1日当り21時間稼働)

表-1 ジブカッタの仕様

主 要 仕 様	
油圧電動機	22kw×4p
圧力×周波数	200v×50Hz
油圧	170kg/cm ² (瞬間).140kg/cm ²
操 作	電磁弁
切削方式	ジブカッタ
駆動方式	油圧駆動
チェーンスピード	約60m/min
チェーンストローク	750mm
旋 回 角 度	100°(±50°)
俯 仰 角	+5°(固定式)
走行駆動	ラック
走行速度	1~2m/min
走行力	3900kg
駆動方式	油圧駆動
総 重 量	約4500kg

確保できる事がわかり、本工事では4辺の刃口へ各々1台づつ合計4台取付け適用した。本工事では土丹が水を含んでいた場合、切削した土砂が掘削機のカッタ部へ付着する事が懸念されたが、実施工では効率良く稼働し所期の目的は達せられた。なお、主要な仕様は表-1のとおりである。

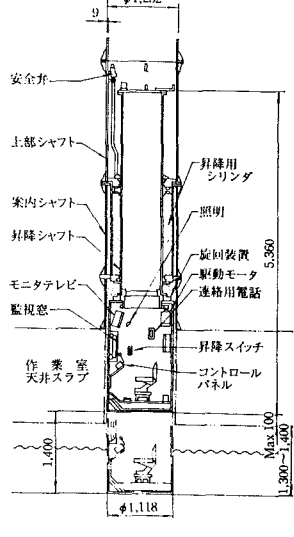


図-12. 遠隔操作室

5. 1. 3 無人掘削システム

従来の掘削方法はオペレーターがショベルを直接操作して地盤の掘削を行い、クレーンにより吊り下げられたアースバケットへ土砂を積み込み、排土をしている。この土砂を地上の土砂ホッパーへ投入している間に作業室内のショベルはもう1台のアースバケットへ土砂の積み込みを行う。したがって、作業室内にはショベルのオペレーターと、アースバケットを交互に交換する潜函工が従事している。

無人掘削システムは、これら一連の作業について作業室内を無人化するもので、システムとしてショベルを操作する遠隔操作室（図-12）と、掘削した土砂を仮置きし、アースバケットへ一気に積み込む自動積込装置（図-13）により構成されている。遠隔操作室は、作業室天井より吊下げられ、ショベルの操作レバー、窓が取り付けられた直径 1.1m の操作室本体、電動モーターを使用した旋回装置と昇降部より構成されている。

無人掘削システムの特徴としては、以下のとおりである。

- 1). 昇降は作業室の圧気を利用する空気シリンダー方式を採用しているので特別な設備を必要としない。
- 2). ショベルの移動に追従できるよう 270° の旋回ができる。
- 3). カプセル内部には、地山を掘削するバケットの状況を映すモニターテレビが設置されている。
- 4). 自動積込装置を操作する制御スイッチが備えられている。
- 5). ケーソンが急激沈下し、カプセル底部に異常荷重が作用した時には、シリンダー部のリリーフ弁により自動的に上昇する機構を備えている。

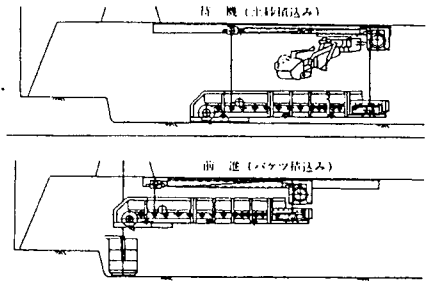


図-13. 自動積込装置

自動積込装置は、掘削土砂 1 m³ の積載部となる幅 0.65m、長さ 4.0m のベルト式フィーダーとこれを支持する 4 本の昇降ワイヤーとモーター、および走行装置から構成されている。ショベルによる当装置への土砂の積み込みは、容易に積み込みができるよう掘削底部まで吊り降しておく。積み込みが完了し、アースバケットへ土砂を積み込む時は、遠隔操作室内のオペレーターがスタート釦を押すと、以下の順に作動する。

- ①フィーダーの巻揚げ ②装置の前進 ③フィーダー駆動 ④装置の後退 ⑤フィーダーの下降

5. 2 排土設備

作業室内で土砂の積み込まれたアースバケットは、巻揚げクレーンによりマテリアルロックを介し土砂ホッパーへ投入される。従来ケーソンの用途は橋梁の基礎、立坑等が多く底面積も 300m² 迄のものが多かったが、近年基礎構造物の大型化にともない、排土用アースバケットの容量は 0.5m³ から 1m³ のものが使用されるようになってきた。したがって、マテリアルロックも 1m³ アースバケットに対応した構造のものを採用し、図-9 に示す配置とした。

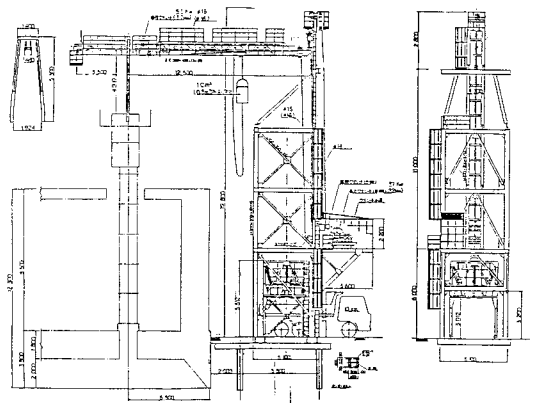


図-14. キャリアー構造図

マテリアルロックの設置数は、長辺方向に配置された 14 台のショベルで全て積込可能とする事、またショベルの走行距離を短縮するために 12 基とした。自動積込装置は、直接操作によってショベルの積込を行う 4 基のマテリアルシャフトを除く 8 基について設置を行った。

12 基のマテリアルロックから土砂の搬出を行うクレーン設備は、ケーソン周囲の栈台上に設置されるの

で専用面積の小さい構造が要求された。したがって、図-14に示す土砂ホッパー（ 30m^3 ）と一体に組立事が可能なキャリアを採用した。このキャリアは、アースバケットを巻揚げる電動ウィンチ（ 37kW ）が配置された運転室と、アースバケットをマテリアルロックから土砂ホッパーまで走行させるウィンチ（ 5.5kW ）が取り付けられたガーター部、およびガーターを支持するフレームから構成されている。ガーターは、マテリアルロックと土砂ホッパーのフレームで支持されているので、各々の支点をピン構造にすると、ケーソン沈下時の傾斜に対応する事が出来ない。したがって、この傾斜に対応できるように、マテリアルロック上の支点は、ローラー支承とした。また、ケーソンの沈下量に比例してガーターを降下しなければならないので、土砂ホッパー側の支点は、ガイドレールに沿ってワイヤーで吊り下げる構造とした。

5. 3 送気設備

ケーソン作業室への送気設備容量は、「平川式」によって算定した結果、主塔ケーソンと合わせて $370\text{m}^3/\text{min}$ の空気量が必要となり、レシプロ型コンプレッサー（ 150kW , $4\text{kgf}/\text{cm}^2$, $34\text{m}^3/\text{min}$ ）11 台を栈台上下へ据付けた。

5. 3. 1 自動圧力調整装置

当ケーソンは海上施工なので、特に初期沈下時には潮位が6時間で最大 2.1m 変化する事となる。この潮位差に追従して正確に気圧管理が行えない時には、作業室内の圧縮空気が刃口からブローをしたり、逆に作業室内へ海水が流入することとなる。従来の気圧管理は、自動圧力調整装置の調整ツマミを手動によりコントロールするため、設定気圧の誤差は、 $0.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度である。当ケーソンを同様の方法で行った場合には、8台の自動圧力調整装置ヘゲージマンを配置し、潮位差に追従して気圧調節を行う事となり、気圧調節の正確性の確保と設定気圧の誤差を少なくする必要がある。新たに装置の開発を行った。

この圧力制御装置の特徴は以下のとおりである。

- 1). 作業室内に圧力伝送器を設置し、電気信号により作業気圧を制御盤内のディストリビュータに送ることで時間遅れを生じない。
- 2). 作業気圧の設定は、制御盤にある $0.01\text{kgf}/\text{cm}^2$ までデジタル表示する指示計を見ながら調整ができる。
また、8台の圧力調整装置の送気調節弁を電気信号によりコントロールできるため、一人の操作員が正確に調整できる。
- 3). 作業気圧の制御誤差は、計器のフルスケール（ $4.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）の $\pm 1\%$ であり、 $\pm 0.04\text{kgf}/\text{cm}^2$ となる

5. 3. 2 送気管

コンプレッサーからケーソン外周の栈台へ設置された8台の圧力調整装置へは、送気管（ $\phi 200$ ）によって送気を行う。この送気管の設置に当たっては以下の点に配慮した。

- 1). 海上工事のため送気管内部の錆により圧力調整装置の弁が損傷しないよう、亜鉛メッキ加工とした。
- 2). ケーソン外周栈台に沿って送気管をループ状に3系統配置し、何らかの事故により何れの系統が破損しても、その他の系統で送気できるようにバイパス配管、バルブを取り付けた。
- 3). 波浪等の影響により栈台が動揺した時に、送気管の継手が損傷しないようエキスパンションホースを取り付け対応した。

5. 4 その他の設備

5. 4. 1 昇降用エレベーター

作業室内で作業を行う潜函工や、地質、地下水の状況把握、掘削指示等の施工管理を行う職員の作業室内の出入りは、シャフト（φ1200）内の螺旋階段を昇降しており、当ケーソンのように深度の深い時の昇降には十数分を要する。また過去の実績から、潜函病にかかる確率が高くなる体の部位は、圧気内で最も活動する膝、肩等の関節である事から、この昇降も軽減されなければならない作業の一つである。以上の事から当ケーソンの8基のマンシャフトの内、1基へエレベーターを設置した。（図-15参照）

開発に当っては以下の点に留意した。

- 1). エレベーター設備は既存のその他の設備が使用できるφ1200のシャフト内に収める。
- 2). 非常停止した時の退避用設備を確保する。
- 3). ケーソン沈設にともなう行う艤装作業が、容易に行う事ができる構造とする。

エレベーターの昇降はラックギア式とし、直径1200mm、長さ2mのシャフト内へ2本のラックギアのついたレールを取り付けた。またこの2本のレールを利用し避難用梯子とした。エレベーター本体はシャフト径の制約から定員は3名とし、上下部を出入り口とした。給電方法は、シャフト頂部へケーブルリールを配置し、艤装時にはエレベーターを上昇させる事により、通常の作業を確保した。安全装置は、ガバナ式落下防止装置、過昇停止バ

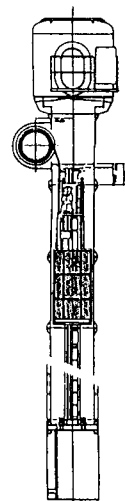


図-15.
エレベーター

エレベーターの昇降速度は、17.2m/min なので最終深度で昇降に要する時間は約3分となる。

5. 4. 2 自動減圧装置

作業室内の圧気下の作業が終了すると潜函工は、高気圧作業安全衛生規則によって定められている減圧をマンロックにおいて行う。3.5 kgf/cm²の作業気圧で160分の作業を行った時の減圧時間は168分となり、潜函工は、長時間にわたり定められた気圧調節を行わなければならない。

自動減圧装置は、潜函工の手動による気圧調節を自動的に行うもので、排気弁、送気弁、操作盤、自記圧力記録計により構成されている。使用方法は、作業時間と気圧を入力するだけで、「高気圧作業安全衛生規則」の減圧速度および減圧停止時間に沿って減圧を行う。

6. 沈設管理の検討

6. 1 沈下関係

ケーソンの沈下関係図を図-16に示す。作業気圧はディープウエル工の採用により最大3.5kgf/cm²とした。ディープウエルは、外径300mmの鋼管をケーソン側壁から6mの位置へ長辺に沿って各々3本ずつ配置した（図-9）。設置深さは、T.P.-48.5mとし、各々のディープウエルから毎分300%の揚水を行った。

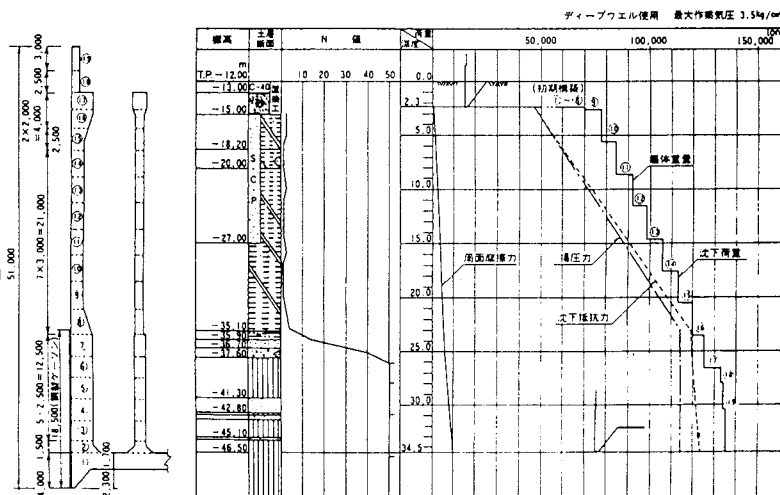


図-16. ケーソン沈下関係図

6. 2 地盤改良工

図-16の沈下関係図に示すように、初期沈下時にはかなりの過沈下状態となる。

また、事前の土質試験結果によると、原地盤粘性土は、強度のバラツキが大きく、沈設管理上、問題となる。したがって、支持力不足と支持力のバラツキをなくし、安定した沈設管理を行うため、サンドコンパクションパイル（以下SCPという）による地盤改良と

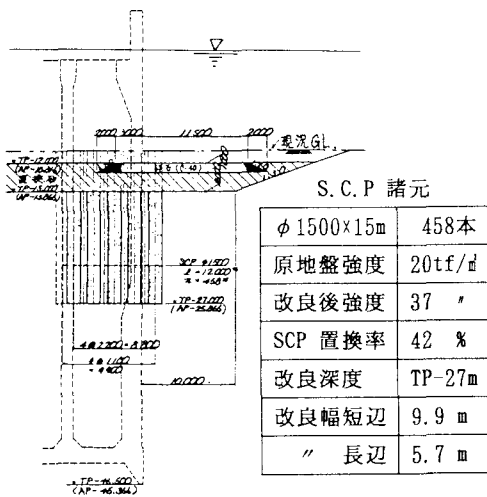


図-17. 地盤改良工

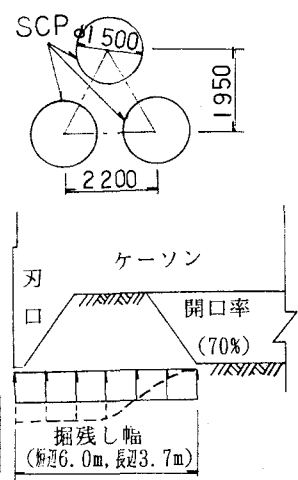


図-18. ケーソン支持状態

上層3mの砂と碎石による置換工を実施した。（図-17参照）ここで、ケーソン沈下時の支持状態は、開口率70%で掘残し幅が、短辺6.0m、長辺3.7mとなる。（図-18参照）このような大きな掘残しをした場合、沈下時の円弧すべりによる影響範囲も大きくなるため、SCPの設計に当っては、SCPの置換率を算定した後、複合地盤の円弧すべりに対する検討を行い、改良幅を広げることとした。（沈下時の安全率=1.0）

6. 3 計測管理工

本工事における計測システム概念を図-19に、また沈下制御計測項目を表-2に示す。

本計測システムの特徴は、以下のとおりである。

- 1). 計測データの取込みを10秒に1回のリアルタイム計測とした点
- 2). リアルタイム計測データを経時的に表示し、ケーソンの変化の状況、スピードを明確にした点。
- 3). 個々の計測データの詳細については、別画面で適宜表示、確認できるようにした点。
- 4). 作業室内にも計測ディスプレイを設置し、作業室内の職員、世話役も一目でケーソンの状況を把握できるようにした点。

これらの採用によりケーソンの姿勢、沈下状況、刃口反力、作業気圧等がリアルタイムでわかるので、状況に応じたすばやい対応が可能となり、またケーソン沈下時期の予測を可能とした。

6. 4 水荷重工

水荷重設備は、ケーソン全体（54樹）を、6プロッ

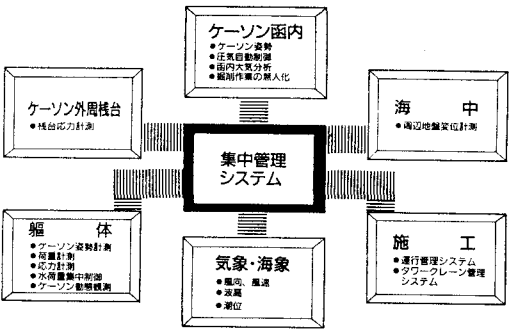


図-19. 計測システム概念図

表-2 ケーソン沈下制御計測項目

傾斜計	ケーソン4隅の相対的な傾斜量を表示。
鉛直変位計	ケーソン4隅の刃口深度を表示。
刃口反力計	沈下時の刃口反力の分布、増減を確認し、沈下時期を予測する。20箇所×3個1箇所につき3個(刃口、刃口裏、刃口裏裏)設置。
作業気圧計	作業気圧を正確に把握、圧力制御を行う。
水荷重計	ケーソン樹内の水荷重の量、バランスを制御し、傾斜修正、沈下作業を行う。
周面摩擦計	ケーソン周面摩擦の大きさ、挙動を確認。

クに分割，ブロック内（9 桝）は，連通パイプにより通水可能とし，各ブロックに注水，排水ポンプ各 1 台を設置した。（図-20参照）また，これら注排水の操作は，計測結果をみながら，計測室ですべて集中管理できるようにした。

ここで，水荷重管理工の主な目的は，以下のとおりである。

- 1). ケーソン沈下作業において，230mに及ぶ刃口回りの掘残し状況の変化に掘削だけで常に対応することは，困難であり，特にケーソンが不安定な初期沈下ではなおさらそうである。したがって，大量の水荷重を短期間に注排水し，偏荷重をかけることにより沈下，傾斜修正を補助する。（図-21参照）
- 2). ケーソン沈下作業中に，次のロットのコンクリート重量にみあう水荷重を各ロット沈下作業終了までに徐々に注水し，コンクリート打設前に排水するプレロードにより，コンクリート打設中のケーソン不等沈下を防止する。

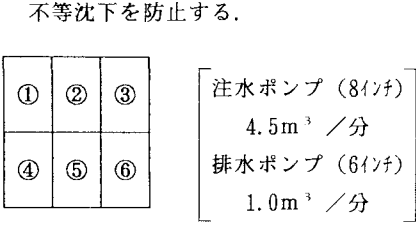


図-20. ブロック割り図

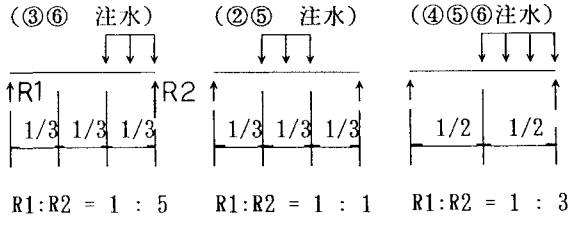


図-21. 水荷重による偏荷重の効果

6. 5 周面摩擦低減工

ケーソン沈下関係における周面摩擦力の中で，粘性土は 1.0tf/m^2 ，土丹は 2.0tf/m^2 と評価しているが，この値は，沈下中の値である。特に沈設地盤の粘性土は，事前の地質調査により N 値0～3にもかわらず粘着力 C は， $3 \sim 16\text{tf/m}^2$ と非常に大きな値を示している。超大型ケーソンは，一般のケーソンのように毎日沈下することではなく，コンクリート打設，養生，艀装等で長期間沈設が停止する場合がある。この時，ケーソン壁面の粘着力が回復すると非常に大きな沈下抵抗となる。この増大した沈下抵抗に対し，ケーソンを沈下させるためには，それにみあった沈下力として，大量の水荷重を必要とするが，一旦ケーソンが沈下を開始すると沈下中の摩擦力は小さいため，結果とし過荷重となり危険となる。したがって，不確定要素である周面摩擦力が粘着力の回復により大きな値とならないよう以下に示す周面摩擦低減工法を採用した。

- 1). ベントナイトによる滑材注入工
- 2). ケーソン壁面への滑材塗布工

7. 沈設工

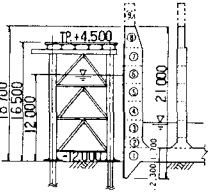


図-22. 初期構築完了時

ケーソンの掘削開始は，第8ロットまでの初期構築完了後であり，構築高21mに対し，刃口 2.3mが貫入した非常に不安定な状態となる。（図-22参照）また，施工場所は，水深12mの海上部で干満差 2.1m（圧力差 0.21kgf/cm^2 ）の影響を受ける。

7. 1 沈下方法

7. 1. 1 作業気圧管理

初期沈下時において干満差によるエアブローを防止するための

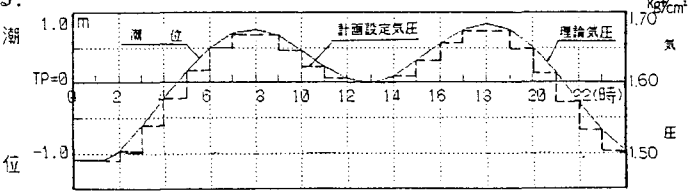
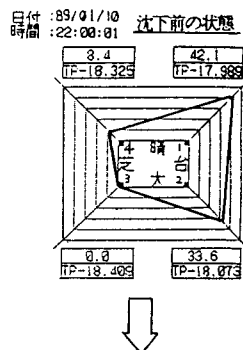


図-23. 潮位と理論気圧，設定気圧の関係（刃口深さTP，-16.0m）

作業気圧管理の基本的な考え方は、以下のとおりである。

- 1). 潮位にともなう理論気圧に対して、オーバープレッシャーにならないよう管理する。
- 2). 設定は、安全側を考慮して、刃口の最も高い位置での理論気圧に対して、刃口下端～上30cm（0～0.03 kgf/cm²）を目標とする。
- 3). 設定は、初期段階では、1時間ごと、後に刃口の貫入量に応じて数時間ごとに調整する。
- 4). ケーソン沈下時は、常に理論気圧を計算し、状況に応じて調整する。

以上、このような気圧管理を可能としたのは、5. 3. 1で説明した電気信号による自動圧力調整装置の採用によるところが大きい。



7. 1. 2 初期の沈下方法

初期沈下作業は、気圧管理によりケーソン沈下力が最大となる最干潮前後（冬は、深夜となる）に行う。図-24は、刃口深さTP-18.0m 付近の初期沈下（傾斜修正）状況を示した計測画面である。

凡 例

芝一台	： 反手方向の傾斜を示す
晴一大	： 短手方向の傾斜を示す
芝・合・晴・大	： 各辺の刃口反力の平均値を示す
平均M	： 全体の刃口反力の平均値を示す

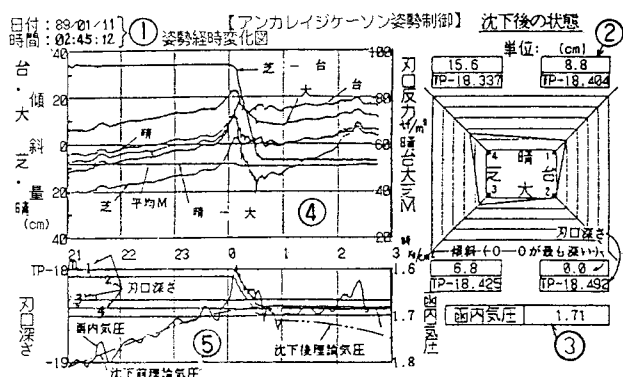


図-24. ケーソン初期沈下状況（刃口深さTP-18.0 m付近）

ここで、この画面の見方を簡単に説明する。

- ①： 計測している現在の日付、時刻を示している。
- ②： ①の時刻のケーソン4隅の傾斜量と刃口深さを示している。上段が傾斜量で0.0cmの場所が最も深く、それに対し他の3隅が何cm高いのかを表示している。下段は、刃口深さをTP表示している。
- ③： ①の時刻のケーソン作業気圧を示している。
- ④： 各辺の刃口反力の平均値（晴・芝・大・台の4辺と全体の平均値M）と傾斜量（芝一台、晴一大方向）の経時変化を表示している。横軸が時刻、縦軸左が傾斜量、右が刃口反力を示している。傾斜の線は、縦軸中心（0）に対して、上側にあれば、台場側（大井側）が高く、芝浦側（晴海側）が低いことを意味する。下側にあればその逆となる。また、ケーソンが沈下しても傾斜量が変らなければ直線のままととなる。なお表示は、10秒に1回のデータをグラフ上に随時プロットしているので、グラフ先端が①の時刻の状態となる。
- ⑤： ケーソン4隅の刃口深さ、および作業気圧の経時変化を示している。傾斜量が0.0cmであれば4本の線は1本に重なることとなる。このグラフによりどの辺の沈下量が少ないか、また沈下のスピードを知ることができる。

次に、具体的な沈下（傾斜修正）方法について説明する。ケーソン沈下前の状態は、3番の角が最も深く、対角で42.1cmの傾斜量であった。0時過ぎの最干潮に向け、理論気圧にあわせた作業気圧調整を行いそれにとまって、刃口反力全体の上昇がみられる。0時過ぎ刃口反力はピークを迎え、沈下開始と同時に減少し、作業気圧の上昇がみられる。沈下は、台場側のみ沈下しているため「芝一台」の傾斜の線が0に向って下降し、傾斜修正が行われている事がわかる。「晴一大」の傾斜はほとんど変化していないため直線のままである。沈下時は、傾斜線の勾配、沈下スピード、刃口反力の増減に注意しながら、水荷重に

初期沈下の特徴は、以下のとおりである。

- ### 7. 1. 3 粘性土層の沈下方法

安定期における沈下の特徴は、以下のとおりである。

- 日付: 89/ 8/01
時間: 16:21:56
- 【アンカレイジケーソン姿勢制御】
姿勢経時変化図
- スケール: 10 [cm]
単位: [cm]
- 傾斜量 (cm)
- TP-32m
- 12時 13時 14時 15時 16時 17時 18時
- 掘削面圧
- 掘削台大芝
- 0.0 cm TP-33.153
3.7 cm TP-33.117
2.3 cm TP-33.133
6.0 cm TP-33.093
掘内気圧 3.18kg/cm²

図-25. 粘性土の沈下状況 (TP.-32.5m 付近)

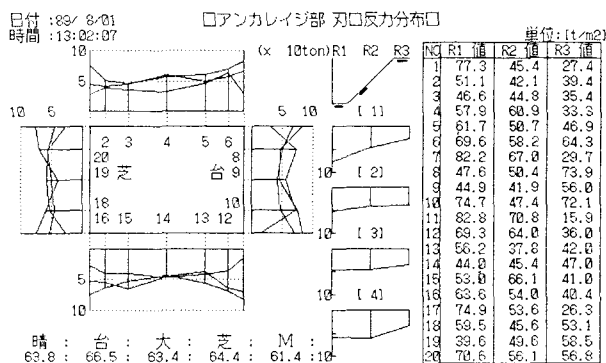


图-26. 刃口反力分布图 (粘性土)

図-28は、T.P-40.5m付近の土丹層における沈下時の経時グラフである。

土丹の地盤支持力は、ほぼ均一で、非常に大きい ($q_d = 600 \text{ tf/m}^2$ 程度) ため、刃口部の掘削状態が均等、左右対象) になるよう注意する必要がある。

土丹における沈下の特徴は、以下のとおりである。

- 日付 : 89/ 8/01
時間 : 13:02:07

□ アンカレージ部 □

水荷重

10m 10 10

4 5 6 (+200 m3)

水平変位

point	h(m)	v(m3)	W(ton)
1	2.52	654	673
2	1.96	634	550
3	3.48	820	845
4	2.71	618	637
5	1.84	493	508
6	2.91	769	792
		3888	4005

point	変位 (cm)
1	7.9
2	3.0
3	7.6
4	-5.0

图-27. 水 荷 重 分 布 图

図-29のように刃口部の掘削を行う必要がある。したがって、沈下作業は、先に中央部をツインヘッドとケーソンショベルにより所定の深さまで掘削し、終了後、ジブカッターにより刃口部の掘削を行う。

- 2). 刃口反力の状況は、掘削した刃口部分の反力が一担増加し、破壊（塑性域）とともに減少する。この時、荷重は、他の掘削していない刃口部分に分担されるため、その反力が増加する。これ

が繰り返えされて全体として躯体自重をささえられなくなった時、ケーソンは沈下する。したがって、沈下直前は、一部分の刃口反力が急激に増加傾向を示す。

- 3). 一回の沈下量は、支持力が大きいので20～30cmを一気に沈下する。したがって、沈下の衝撃をやわらげるため、滑材注入等により、周面摩擦を極力小さくしておくことが必要となる。

7. 1. 5 沈設精度管理

沈設精度管理は、沈設過程における管理と最終沈設精度の管理に分けられる。当ケーソンの様に超大型ケーソンの場合は、躯体の沈設と構築を並行作業とするので、沈設過程の管理も重要となるので管理値としてケーソン4隅の刃口高さの相対的高低差を15cmとした。また、最終沈設精度は、その管理値が偏心量 ± 30 cm、鉛直変位量 ± 10 cmに対し、沈設誤差は偏心量47mm、鉛直変位量-5mmであった。

8. 中埋めコンクリート工

中埋めコンクリートの数量は、約6700m³あり、打設面積も広く従来の中埋めコンクリート打設管理では対応できないので、安全確実な中埋め管理を行う 図-29. 刃口部の掘削ため、以下の対策を実施した。

8. 1 打設管理の問題点

従来の中埋めコンクリートの打設管理は、ブローパイプの詰り確認、およびマンシャフト、マテリアルシャフトに潜函工が入り、充填確認を行っている。しかし、当ケーソンの場合、従来の方法では、下記に示す問題が生じるため、その対策が必要となった。

- 1). ケーソンが大きいため、面積当りの中埋め充填確認箇所（シャフト、ブローパイプ）数が、一般のそれと比較して少ない。
- 2). ケーソンが深いためマテリアルシャフトから充填確認を行う場合、昇降時に転落災害の危険を伴う。
- 3). 作業気圧が、3.5kgf/cm²と高気圧なため、充填確認に必要な圧気内作業時間の確保が困難である。
- 4). シャフトの基数が、マテリアルシャフト12基、マンシャフト8基、カプセルシャフト10基、計30基あり、シャフト内の過打設防止確認に多くの労力を必要とする。

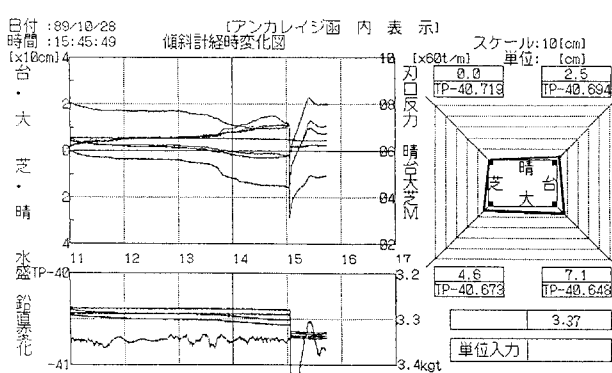


図-28. 土丹の沈下状況 (T.P-40.5m 付近)

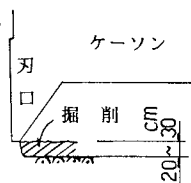


図-29. 刃口部の掘削ため、以下の対策を実施した。

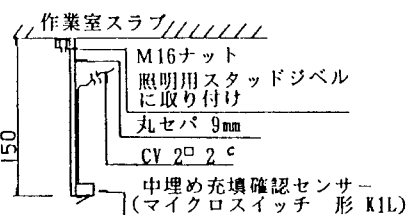


図-30. 中埋め充填確認センサー

8. 2 打設管理対策

上記問題を解決する方法として、以下の対策を実施した。

1). 中埋め充填確認センサーの設置

中埋め充填状況の確認を電氣的に行う中埋め充填確認センサー（以下、中埋めセンサーという）を作業室天井スラブに20箇所設置した。（図-30、31参照）これを設置することにより、単位面積当りの中埋め充填確認箇所数を増やすとともに、マテリアルシャフト周辺の充填確認は、付近に設置した中埋めセンサーで行い、危険をともなうマテリアルシャフトからの確認は、行わないこととした。

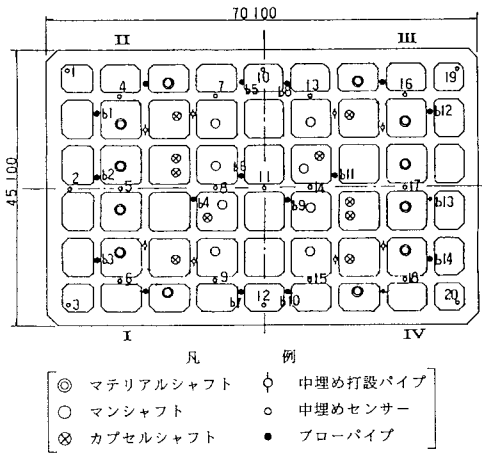


図-31. 中埋めセンサー、ブローパイプ他配置図

2). シャフト部過打設防止対策

シャフト内への過打設防止対策は、原則として、図-32に示すシャフト部盲蓋を取付け、対処した。ただし、安全を考慮して、マテリアルシャフトとマンシャフトには、中埋めセンサーと同様の構造のシャフト内過打設防止センサー（以下、過打設防止センサーという）を設置した。

8. 3 打設管理

中埋めコンクリートの打設は、送気パイプ（φ150-8本）を使用し、作業室内送気をロック送気に切替えた。中埋めコンクリート打設中の管理は、ケーソン上に、打設管理室を設置

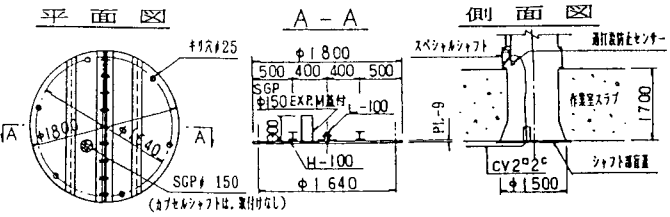


図-32. シャフト部盲蓋、過打設防止センサー

し、センサー表示板を利用して、各項目を集中管理した。主な管理項目は、下記の通りである。

- 1). 中埋めセンサー、過打設防止センサーの点灯状況の確認。
- 2). 1).の充填確認に従い、周辺のブローパイプの操作指示。
- 3). マンロックからの充填確認指示。
- 4). 気圧調整、ケーソンのレベル確認指示。
- 5). ポンプ車別の打設状況、数量の確認。

表-3. 中埋め充填の最終確認

種 別	数 量
中埋めセンサーの点灯確認	20 箇所
ブローパイプの詰り確認	14 "
中埋めパイプの詰り確認	8 "
マンロックからの確認	8 "
計	50 箇所

なお、打設途中の充填状況の確認は、中埋めセンサー、ブローパイプおよび4箇所（最終確認は、8箇所）のマンロックから行った。また、マンロック下部には、打設管理室との連絡用電話を設置した。

$$a = 3157\text{m}^2 \div 50\text{箇所}$$
$$= 63\text{m}^2 / \text{箇所}$$

8. 4 コンクリートの充填確認

中埋めセンサー、過打設防止センサーおよびシャフト部盲蓋の設置により、省力化をふまえた安全で確実な中埋め管理ができ、最終確認は表-3に示す50カ所、63㎡／箇所の確認となった。

9. おわりに

当ケーソンの施工設備計画および沈設管理計画は、海上施工の問題点、土質条件を整理し、超大型ニューマチックケーソンの沈下挙動を予測した上で、工期限内に完了するよう検討を行った。

使用機械の選定に当っては、

- ・現存機械をそのまま使用できるもの。
- ・現存機械を改良して使用できるもの。
- ・新たに機械を開発するもの。

に分類し、事前に試作機、改良機の性能確認試験を繰り返し実施し、現有機械については、点検整備を行い実施工に使用した。これらの施工機械は、実施工において期待されたとおりの実績を上げた。

主なものについて整理すると以下のとおりとなる。

- 1). 特に、干満差の影響を受ける初期沈下時において、電気信号による自動圧力制御装置は、ケーソンが大きな傾斜を引き起こさぬよう沈設していく上で有効に稼働した。
- 2). 超大型で、大深度のニューマチックケーソン施工に当って採用した無人掘削システムは、作業時間の確保による工程短縮、および潜函工の高気圧障害防止に大いに貢献した。しかし、一方では、遠隔操作によるショベルの故障率が直接操作のそれを上回った。これは土砂を掘削する時には、バケットを5tfの押込み力で地盤へ貫入させるが、バケットの貫入角度が適当でない場合には、押込み力の反力により走行、旋回部へ悪影響を及ぼすためである。直接操作の場合、オペレーターは、このような状況を直ちに判断し、バケット貫入角度を変化させることができるが、遠隔操作の場合、特に平面寸法が大きくショベルの位置が遠い時には、この判断が遅くなってしまう。このような原因による故障に対しては、軽微なものを除いては作業室内での修理は行わず、故障部材（ショベルは、組立しが容易なように6部材から構成されている。）の交換により対処した。今後は、作用荷重に対しリミットスイッチ等による稼働制御装置を設置し、改良していく必要がある。
- 3). 土丹層の掘削においては、特に刃口下を掘削する場合、従来の方法（ブレーカー、ショベルバケット）では、均一な深さで掘削することは困難であり、今回、開発採用したジブカッタの切削深さの正確性と切削速度は、土丹層の沈下精度に大きく寄与した。

また、情報化施工による沈設管理は、超大型ケーソンを安全にかつ高精度に施工する上において、非常に有効であったと言える。特に、リアルタイム計測は、ケーソンの沈下の挙動を適確に把握することができ、沈下時期の予測を可能とした。さらに、計測データの解析を進め、超大型ニューマチックケーソン躯体に作用する荷重の設計値と実績値の比較検討を行い、今後の設計に反映していきたいと考えている。

当ケーソンの機械化施工、情報化施工の実績を基に、今後予想される超大型ニューマチックケーソンの施工能率、施工精度を高め、省力化を図っていくためには、「作業室内の自動掘削」、「掘削土砂の自動排土」、「計測による情報化施工」の研究を進めていかなければならないと考える。

参考文献

- 1). 首都高速道路公団、社団法人日本建設機械化協会建設機械化研究所：
（高速及び負担金等受入）東京港連絡橋の大規模基礎掘削機械に関する調査研究報告書（昭和63年3月）
- 2). 石井 紘史・上田敏雄・嶋村 彰：
「首都高速12号線の大規模ニューマチックケーソンの施工」 建設の機械化（89. 12） P. 3 ～ 8

（1991年 9月30日受付）