

大深度ケーソン立坑と高水圧海底シールド工事

CONSTRUCTION OF A DEEP SHAFT AND A SHIELD TUNNEL UNDER
A HIGH WATER PRESSURE AT OSAKA BAY

山下 修*・稲田 澄夫**・和佐野貞利***・小林 育夫****

By Osamu YAMASHITA, Sumio INADA, Sadatoshi WASANO and Ikuo KOBAYASHI

Sakai Koro Tunnel is a shield tunnel constructed under Osaka bay. This tunnel is used for transportation of natural gas. The length of the tunnel is 2 130 m and the deepest level of the tunnel is 45 m below the ground level. The two driving shafts were constructed by the method of pneumatic caisson employing ground freezing. One of the shafts is 52 m in depth and one of the deepest shafts in Japan. Sandy layer with gravel under high water pressure of 4.5 kgf/cm² was excavated from the both shafts by slurry shield method. These tunnels were connected under the sea by employing ground freezing method. Since a part of the tunnel is subjected to consolidation settlement of the ground in future, elastic washers and flexible segments were installed into the tunnel at the appropriate places to release the influence.

Keywords: deep shaft, pneumatic caisson, shield tunnel under the sea, high water pressure, docking of the tunnel, docking by the ground freezing method

1. はじめに

関西電力(株)が、大阪市南港南埠頭に建設する南港火力発電所(出力180万kW)の発電用燃料には、天然ガス(LNG)が使用される。この天然ガスは、図-1に示すように、大阪ガス(株)泉北製造所から南港火力発電所まで、高圧ガス導管によって輸送される。

堺航路シールドは、このラインのうち、堺市第7-3区埋立地から大阪市住之江区南港に至る延長2130mのガス管敷設用の海底シールド工事である。

本工事は、関西電力(株)より大阪ガス(株)が委託を受け、計画から設計・施工までを行ったもので、平成元年5月に、導管工事も含めて、工事は無事完了した。

この堺航路シールドのルート上には深い護岸構造物があること、2130mの長距離ルートのほとんどが海底であること、さらに、このルートの一部にトンネル完成後埋立てが予定されているなどの特徴があった。

これらの要因により、本工事には、次のような計画上

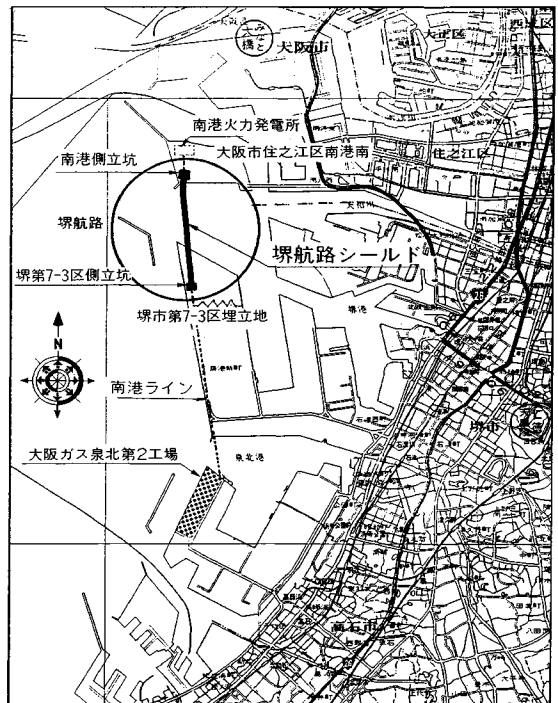


図-1 堺航路シールド建設位置図

* 正会員 大阪ガス(株) 幹線部特殊工事チーム
(〒541 大阪市中央区平野町 4-1-2)

** 正会員 大阪ガス(株) 幹線部特殊工事チーム (同上)

*** 正会員 技術士 (株) 鴻池組大阪本店
(〒541 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

**** 正会員 技術士 (株) 鴻池組土木本部第2技術部 (同上)

表-1 工事主要諸元

工事名称	堺航路シールド工事																																																		
工事場所	大阪市住之江区南港南6-7 堺市東港新町堺第7-3区内																																																		
立坑 (ニューマチックケーソン)	南港側立坑 { 内寸法 8.00 m × 10.00 m 深さ 52.00 m 外寸法 11.60 m × 13.60 m } 堺第7-3区側立坑 { 内寸法 8.00 m × 10.00 m 深さ 37.70 m 外寸法 11.00 m × 13.00 m }																																																		
シールド工	シールド機 掘削外径 セグメント外径 掘進延長 土被り 地中接合 (ドッキング工)	配水加圧式シールド機 2機 φ 3,840 mm φ 3,730 mm φ 3,900 mm 厚さ t = 200 mm 南港側 1,433 m 堺第7-3区側 697 m 合計 2,130 m 29.20 m (堺第7-3区側) 凍結工法 凍結工法																																																	
配管・中詰工	配管	ガス管φ 750 mm × 2本 配管後シールド坑内は粒砕石にて充填																																																	
補助工	立坑補助 発進防護 ドッキング補助	南港側 凍結工 堺第7-3区側 凍結工 南港側 凍結工 堺第7-3区側 凍結工 凍結工																																																	
工期表	<table border="1"> <tr> <th>年月</th> <th>昭和60年</th> <th>昭和61年</th> <th>昭和62年</th> <th>昭和63年</th> <th>昭和64年 (平成元年)</th> <th>平成2年</th> </tr> <tr> <td>立坑</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>南港側準備工</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>立坑工</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>シールド工</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>ドッキング工</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>配管中詰工</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> </table>		年月	昭和60年	昭和61年	昭和62年	昭和63年	昭和64年 (平成元年)	平成2年	立坑	1	2	3	4	5	6	南港側準備工	1	2	3	4	5	6	立坑工	1	2	3	4	5	6	シールド工	1	2	3	4	5	6	ドッキング工					1	2	配管中詰工					1	2
年月	昭和60年	昭和61年	昭和62年	昭和63年	昭和64年 (平成元年)	平成2年																																													
立坑	1	2	3	4	5	6																																													
南港側準備工	1	2	3	4	5	6																																													
立坑工	1	2	3	4	5	6																																													
シールド工	1	2	3	4	5	6																																													
ドッキング工					1	2																																													
配管中詰工					1	2																																													

の検討課題が生じた。

- ① 深さ 52 m のわが国でも最深規模のニューマチックケーソンの沈設方法。
- ② 4.5 kgf/cm² の高水圧の作用する洪積砂礫層掘進のためのシールドマシンの開発。
- ③ 高水圧砂礫層内での海底ドッキングの方法。
- ④ 将来の埋立てに伴うトンネルの不同沈下対策。

本報告は、上記課題を中心としてその設計・施工管理の方法を述べるとともに、ニューマチックケーソンと海底ドッキングの施工に重要な役割を果たした凍結工法の方法について述べるものである。

本工事の主要諸元と概略工程を、表-1 に示す。

2. トンネル全体計画

(1) 路線計画

図-2 に示すように、本工事は、堺市第7-3区内の埋立て予定地から堺航路を横断して南港埋立地に至る、ほぼ直線の平面ルートである。堺市第7-3区内の立坑基地は、シールド工事に先行して海上を埋立てて造成したものである。

トンネルの縦断ルートは、既設護岸の下端からシールド径 (1.0D) 以上の離隔をとること、さらにトンネルの縦断勾配を一定とすることにより決定した。

この既設護岸として、南港側には洪積砂礫層 (天満砂礫層) まで貫入された鋼管矢板護岸、堺市第7-3区側にも洪積砂礫層まで貫入されたセル護岸があり、このため図-2 に示すように、トンネルの深さは、南港側では土被り 43.5 m となる全線洪積砂礫層掘進の大深度シールドとなった。

(2) ドッキング工法の採用

全延長が 2 130 m の洪積砂礫層の長距離掘進に対して、片押し工法案と両押し工法案を比較検討した。その結果、工期・シールドマシンの耐久性・障害物出現に対する確実性などから判断し、両押し工法案を採用し、海底ドッキングすることに決定した。

このドッキング位置は、下記条件を加味して、シールド工期全体を最短とする地点を選定した結果、南港側立坑から 1 433 m、堺市第7-3区側立坑から 697 m の位置とした。

- ① 堺市第7-3区側シールド工事の着工は、先行して行われる立坑基地造成のための埋立てにより、6 か月遅れること。

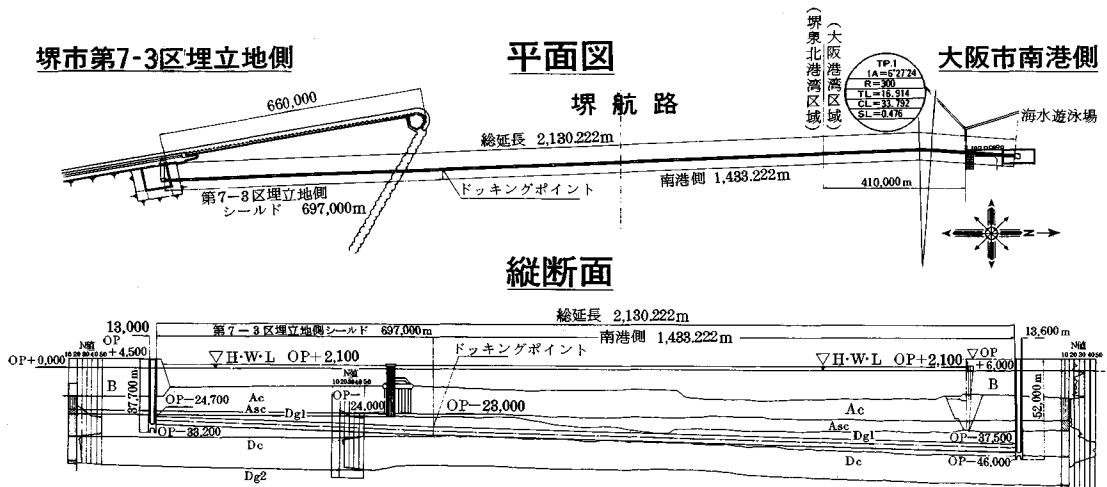


図-2 全体計画図

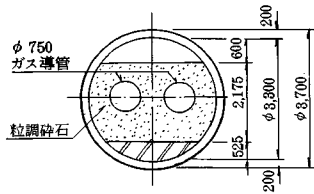


図-3 トンネル完成断面図

② 埋立てが予定されている堺市第7-3区内や護岸直下でのドッキングはできないこと。

(3) トンネル断面

トンネルの内径は、ガス導管(径750mm)が2本敷設されることとその溶接スペースの確保から、3300φに決定した。

ガス導管敷設後のトンネル内は、砂の摩擦力により導管発生応力が減少でき、かつ各種検知管を用いれば管理も容易にできる中詰め方式を採用した(図-3参照)。また、中詰め材料としては、地震時の液状化を生じにくい最大粒径20mmの粒調砕石を使用した。

3. 土質概要

計画地は、大阪湾に流入する大和川河口部にあたり、厚い沖積粘土層をもつ典型的な海底地盤である。

南港側陸地部は、昭和53年に埋立てが完了しており、堺市第7-3区側は、立坑基地を除いてその全ルートが海域部である。

表-2に計画地点の土質概要を示す。

南港側では、最上部に約20mの埋立て層があり、その下部に旧海底地盤である層厚17mの沖積粘土層、シールド掘進地盤である層厚14mの洪積砂礫層(天満砂礫層)、Ma12と呼称される層厚11mの洪積粘土層が続き、さらに下部には洪積砂礫層と洪積粘土層が、交互に堆積している。

堺市第7-3区側でも、南港側とほぼ同じ地層構成をしている。

海上航路部は、船舶の運行上ボーリング等の土質調査が困難なため、船上から音波探査によって地層調査を行い、シールドルートに沿った土質縦断面を作成した。その結果、地層は連続性に富んでおり、堺市第7-3区側から南港側にかけて、若干、下方に傾斜している。

今回のシールド掘進土層である洪積砂礫層は、N値が50以上と非常に密な状態にあり、また最大粒径は150mm、透水係数は $2.0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ と非常に透水性の良い地盤である。

この砂礫層より下部の洪積粘土層は、直下のMa12をはじめとして、埋立てにより、一次圧密沈下を生じるとともに、長期にわたる二次圧密沈下も生じることが報

表-2 土質概要

標高	土質柱状図	N値	記 事
OP+6.00		0 10 20 30 40 50	
	砂礫(盛土)		上部はφ150mm程度の玉石混り砂礫でN=9~15、中部は粗砂でN=9~15、下部は粘土混り砂礫層。
-14.01	シルト Ac1		埋立土による上載荷重により圧密され、N=1~5を示す。貝殻混り海成粘土層。
80.66	砂礫 Dg		上部がφ20~50mm、中部がφ80~50mmの円礫を主体とする砂礫質土、最大では150mmの礫を混入し、N値=50と締っている。
44.11	粘土 Dc		海成粘土で、Ma12と呼ばれる洪積粘土層。OP-53m付近を境にして上部と下部の圧密特性が変わる。潜在クラックの存在が認められる。
-58.11	砂礫		第2天満砂礫層と呼ばれる洪積砂礫層。礫混り砂礫で、N>50を示す。

告されている。

4. 立 坑

立坑工法は、ニューマチックケーソン工法、地下連続壁逆巻き工法の両者について比較検討した結果、南港側と堺市側の両立坑とも工期が短く、埋立地でも確実に施工できるニューマチックケーソン工法を選定した。

南港側では、このケーソンの深さは52mとなり、次に示す検討課題があった。

- ① 4.8 kgf/cm²の理論水圧に対して安全性と工程上より2.0 kgf/cm²程度の函内圧で沈設すること。
- ② 排水先がないために、地下水位低下工法以外の適切な遮水補助工法を必要としたこと。
- ③ 大深度のケーソンを、確実に沈設するための適切な管理システムの開発を必要としたこと。

南港側立坑の施工図を、図-4に示し、この南港側立坑を中心として設計・施工の概要を述べる。

(1) 設 計

a) 立坑の構造

立坑の内空寸法と形状は、シールドマシンの搬入、シールド初期ならびに本掘進、さらにガス管の搬入時の必要スペースをもとに検討し、形状は矩形、内空は10m×8mに決定した。

側壁断面は、静止土圧・静水圧と偏土圧を考慮した構造計算結果、さらに沈下に必要な躯体荷重の両者を加味して検討し、最大壁厚は、1.8mとなった。

b) 凍結遮水壁工

洪積砂礫層の被圧水位；4.8 kgf/cm²を遮水してケーソンの函内圧を、2.0 kgf/cm²で施工するために、遮水壁を用いることにした。

この遮水壁には、凍結壁・泥水固化壁・コラムジェット柱列壁などを比較検討したが、施工性、确实性に優れた凍結壁に決定した。

凍結壁の形状は、高水圧に対して力学的に有利な円筒リング状とした。この凍土リング厚の決定要因となる凍土の特性は、土質、塩分混入度、凍結温度などによって異なる。特に本地点の土中には、海水濃度の65%の塩分が混入しており、強度の推定が困難であった。このため、最大50mの深度より不攪乱試料を採取し、凍土試験によって強度と凍土率、沈下率を求めた。

沖積粘土、洪積砂礫および洪積粘土 (Ma 12) の試験結果を、図-5と図-6に示す。

これらの試験結果より、凍土の平均温度を-13°Cとして洪積砂礫層の設計上の圧縮強度を50 kgf/cm²、曲げ強度を30 kgf/cm²、せん断強度を25 kgf/cm²とした。

これらの設計強度を用い、土圧・水圧の作用する円形リングとして設計した結果、必要凍土厚は3.1mとなった。

また、下端の洪積粘土層への根入れ長は、ヒービングなどに対する安定性を考えて4.0mとした。

c) 地下水の流速低減工

凍土リングには、地下水の流速が一定以上速くなると、造成が困難となる限界流速； $U_{\infty crit}$ が存在する。

洪積砂礫層に対するこの限界流速を、式(1)により求めた結果、0.4 m/dayとなった。

$$U_{\infty crit} = \frac{6\pi \cdot M^2 \cdot \lambda_1}{(n/100) \cdot l_f \cdot \gamma_w \cdot C_w} \cdot \frac{\theta_f - \theta_0}{\theta_{\infty} - \theta_f} \cdot F\left(\frac{2a}{P_i}, b_{crit}\right) \dots \dots \dots (1)$$

- ここに、 $U_{\infty crit}$ ：限界流速 (m/h)
- M ：凍結管の列数
- λ_1 ：凍結後の土の熱伝導率 (kcal/mh°C)
- n ：地盤の間隙率 (%)
- l_f ：凍結域の代表長 (m)
- γ_w ：地下水の単位体積重量 (kgf/m³)
- C_w ：地下水の比熱 (kcal/kgf°C)
- θ_f ：地下水の水点 (°C)
- θ_0 ：ブライン温度 (°C)
- θ_{∞} ：無限遠の地下水温 (°C)
- $F(2a/P_i, b_{crit})$ ：凍結管の管径と間隔によって決まる関数値
- a ：凍結管の外半径 (m)
- P_i ：凍結管の間隔 (m)

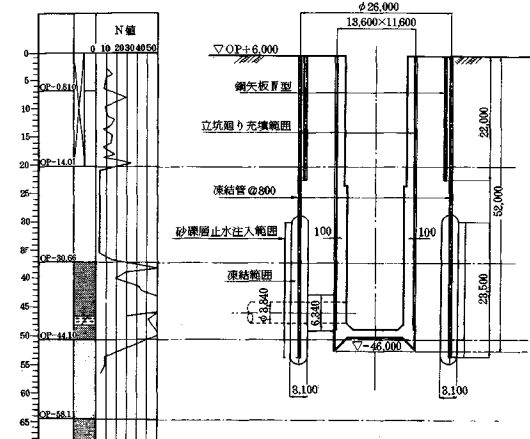
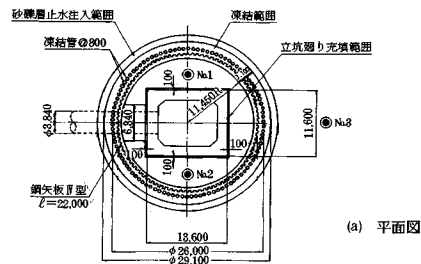


図-4 南港側立坑概要図

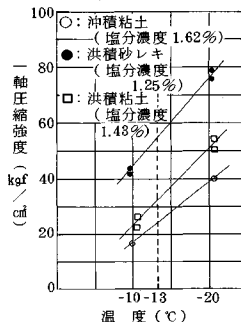


図-5 凍土の強度

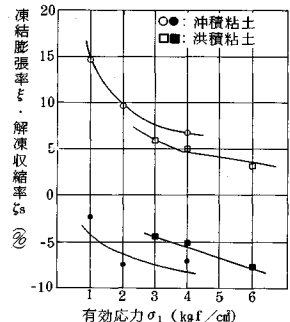
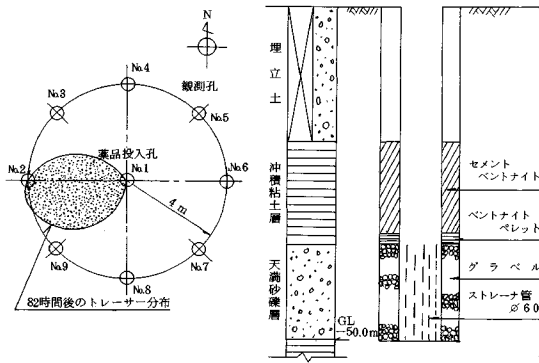


図-6 凍結膨張率と解凍沈下率

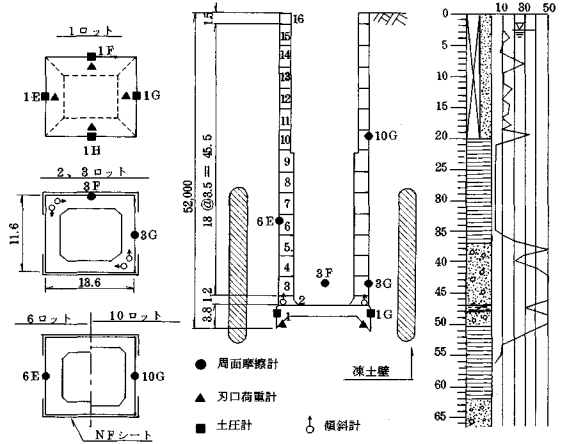
一方、この洪積砂礫層の地下水の流向・流速は、不明であった。そこで図-7で示す配置で、GL-36m~GL-50mの洪積砂礫層で、多孔式地下水流向・流速調査を実施した。

この調査法は、中心にトレーサー (塩化リチウム溶液) の投入孔を、半径4.0mの同心円状に8か所の観測孔を設け、この観測孔からの採水によって、トレーサーを確認する方法である。

調査の結果、14mの全層にわたり東から西へ向かう1.2 m/dayの地下水流 (図-7参照) が測定され、凍土リングの造成に支障を及ぼすと判断した。このため、浸透流解析を行い、1.0m厚の薬注により流速を1/10程



図一七 地下水の流向・流速調査



図一八 計器の配置図

度に低減できる結果を得たので、凍土造成予定域外周に、二重管ダブルバッカー工法を用いてリング状に難透水ゾーンを造成することとした。

(2) 立坑の施工管理

深さ 52 m のケーソンを、凍結リングの中で沈設させた施工管理のうち、ケーソン本体の沈設管理と、凍土の維持管理について述べる。

a) ケーソンの沈設管理

ケーソン躯体内に、図一八に示す配置で計測器を埋設し、自動計測ならびにデータ解析を行い、以後の沈設にフィードバックさせたが、その結果の一部を次に示す。

周面摩擦力の低減対策に、NF (ノンフリクション) シートとベントナイト減摩材を用いたが、表一三に示すように、NF シートにより 70 % に、さらに減摩材が加わると 20 % までに摩擦力が低下することが測定された。

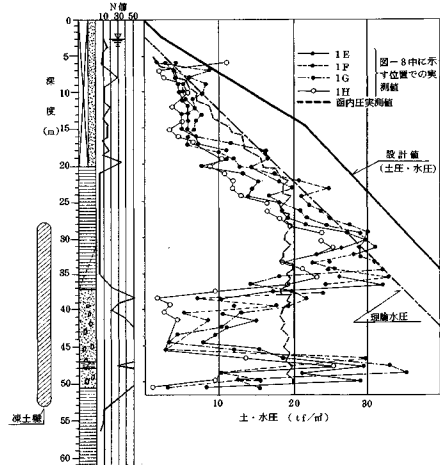
図一九に示すように、土圧計の測定結果は、GL-30 m 付近までは、ほぼ理論水圧に等しい値となっているが、洪積砂礫層の凍土区間では、測定値は急激に減少し、ケーソンの函内圧に近い値となっている。この原因として、上部埋立砂層は矢板 (Ⅳ型; $l=22$ m) リングの閉塞効果のため、水圧のみが作用し、洪積砂礫層では、凍結リングが外部土圧・水圧を負担しているためケーソン壁面には、函内圧気圧のみが作用しているためと考えられる。

また、GL-47 m 付近で急激に土圧の増大が計測されているが、これは、洪積砂礫層内に挟在している粘性土の凍結膨張圧を測定したものと思われる。

さらにケーソンの沈設には、埋設計器から得られた周面摩擦・刃口荷重・傾斜等のデータを即座に、掘削方法や沈下荷重の調整に利用することにより、鉛直精度で 1/2 000、沈設深さの精度で 2 cm 以内の高精度を得た。

b) 凍結壁の施工管理

ケーソン外周にリング状に造成した凍土壁の管理は、



図一九 土圧計測経深変化図

表一三 周面摩擦低減効果 (平均値)

	NFシート有 (8F)	NFシート無 (8G)	NFシートによる低減率
ベントナイト配水注入前	1.0 tf/m ²	1.4 tf/m ²	30%
ベントナイト配水注入後	0.8 tf/m ²	1.1 tf/m ²	70%

注) 8F, 8Gは図一八中に示す。

図一十に示す管理フローで実施した。

凍結壁は、ケーソン外周に 80 cm ピッチに設置した凍結管 (4" 鋼管) 内に、冷媒 (塩化カルシウム溶液) を循環するブライン方式によって造成するが、本工事の凍結管の埋込み長は、 $l=54$ m と長尺であった。このため、凍結柱の閉塞を確実にを行うには、高精度の凍結管の埋設が要求された。この対策として、事前に削孔試験を行うとともに、設置後、全数の凍結管埋設精度の測定を行った。

凍土の閉塞確認は、凍結域内外の地下水位を測定することにより判断した。この地下水位観測孔は、図一四に

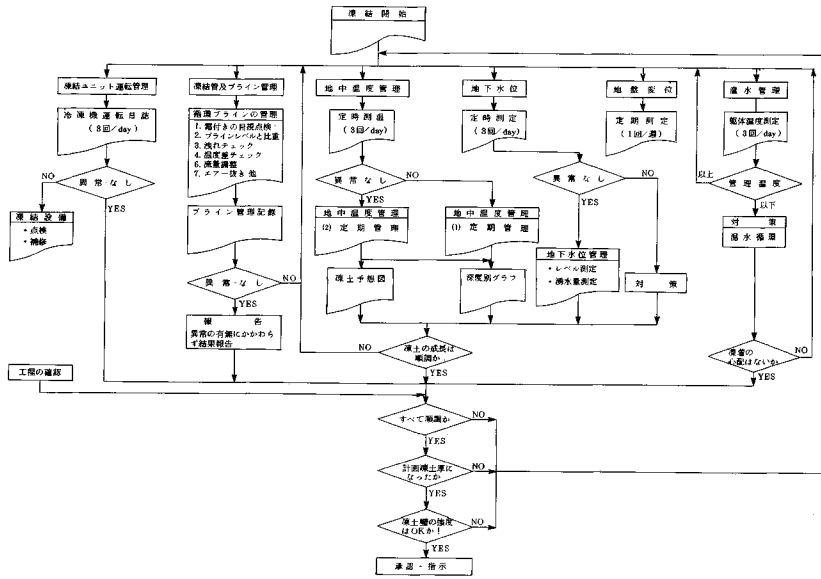


図-10 凍結運転管理フロー図

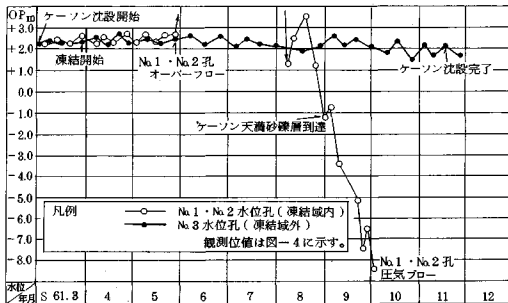


図-11 地下水水位測定図

示すとおりリングの内部に2本、リングの外側に1本設置しGL-37m~GL-50mにストレーナー部を設けた。図-11の測定図のように、凍結開始当初は、リング内外の地下水水位は連動していたが、やがてリング内外で異なる水位変化を示し、リング内の水位が上昇し始め、凍結運転開始後2か月でオーバーフローが始まったが、これにより凍結リングの閉塞を確認した。

一方、閉塞後の凍土が厚くなりすぎると、ケーソン壁面に凍着し、以後のケーソン沈設に支障を及ぼすことが懸念された。この対策として、測温管を使って凍土面を推定しながら凍土の成長抑制を行った。凍土の成長抑制は、ブライン温度を下げる(-25°C→-30°C)とともに、一定の間隔で間引き運転することで行った。なお、万一の凍着を想定して、ケーソン躯体内に配管を行い、温水循環を可能とする設備も施した。

5. シールドトンネル

この海底シールドの特徴は、4.5 kgf/cm²の高水圧の作用する洪積砂礫層内の長距離掘進であったが、本章では、これらを中心とした設計と施工管理の方式を述べる。

(1) 設計

a) セグメント

セグメントは、鉄筋コンクリート(RC)、スチール、ダクタイルならびにコンポジットセグメントを比較した結果、防食性・経済性よりRCセグメントを採用した。

このRCセグメントの継手部には、防錆のため、タクロタイズド処理を施した。

セグメントのシールド部は、4.5 kgf/cm²の高水圧対応のため、事前に耐水圧試験を実施し、シールド溝を2条とし、クロロプレンゴムとブチルゴムの複合タイプのシールド材を採用した。

b) シールド発進補助工

50mにおよぶ大深度・高水圧砂礫層の発進補助工法として、凍結工法、コラムジェットグラウト工法ならびに薬液注入工法などを比較検討した結果、確実な止水ゾーンが造成可能な凍結工法を採用した。

この凍結ブロックには、図-12に示すように、立坑沈設工で用いた凍結リングの一部を有効利用した。

一方、シールド発進部の下方には、凍結対象範囲内に洪積粘土層があり、シールド発進後の解凍沈下に伴って、トンネルに不等沈下を生じることが懸念された。

この解凍沈下量は、式(2)に示す三次元変位計算法に図-6に示す凍土試験のデータをインプットすること

により算定した.

$$G(x, y) = \frac{\eta}{4} \int_{h_2}^{h_1} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{l+x}{ah} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{l-x}{ah} \right) \right\} \cdot \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{w+y}{ah} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{w-y}{ah} \right) \right\} dh \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $G(x, y)$: 点 (x, y) における沈下量
 η : 解冻沈下率
 h_1, h_2 : 凍土の上下面深度
 l : 凍土の幅 (x 方向) の 1/2
 w : " (y 方向) "
 a : 沈下の影響を表す値
 $\operatorname{erf}(x)$: Gauss の誤差曲線

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2} d\lambda$$

計算した結果, 解冻沈下のためトンネル縦断方向に最大 6.5 cm の不同沈下を生じ, セグメント継手部の許容値をオーバーすることが判明した.

この解冻沈下対策として, 洪積粘土層内の凍結対象範囲には, トンネル内から強制解冻を行いながら, 超微粒子セメントを注入することとした.

c) シールドマシン

高水圧砂礫層の掘進のため, 礫対策を施した泥水加圧式シールド工法を採用した.

このシールドマシンは, 事前に模型実験機を製作し, 実働時; 5 kgf/cm², 静止時; 6 kgf/cm² の耐水圧性能を保有するよう改良し, その結果を踏まえて設計を行った.

シールドマシンの主要検討項目を表-4 に示す.

このほか, 砂礫層の長距離掘進対策として, ツールビットの寿命を伸ばすため, 1パス2カッターのディスクカッターを設置した. また, 万一の障外物出現対応として, バルクヘッド内に薬液注入管を, カッターヘッド裏面に凍結管を配置した.

(2) シールドの施工管理

本工事は, 高水圧の海底シールドのため, 長距離掘進にもかかわらず, 測量用の観測孔が設置できないこと, また, 施工後の立坑とトンネルが, 洪積粘土層の圧密のため, 図-22 に示すように, 徐々に沈下を生じているという状況下にあった.

このため, シールドマシンの姿勢と位置はレーザー装置とジャイロコンパスを併用した自動方向計測システムにより測定した.

レーザー装置は, シールドマシンのピッチング, ヨーイング, ローリングの各量とセンターの座標値の測定を行い, 一方, ジャイロコンパスは, 水平方向ずれの測定を行い, それぞれを方向制御にフィードバックさせた.

また, ドッキング時の最終路線決定は, ジャイロトラ

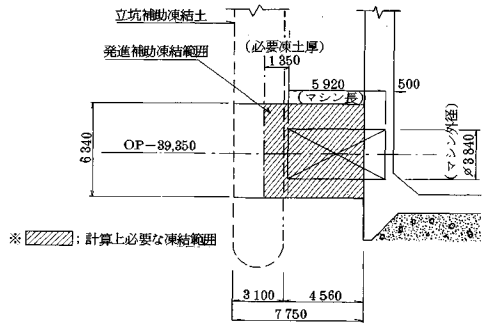


図-12 発進補助凍結工断面図

表-4 シールドマシン検討項目

検討項目	設計・実施項目
1. カッターヘッドベアリング室の耐圧性能	<ul style="list-style-type: none"> シールド段数の増加 (M形シールド2段を4段に) (リップシールド1段を2段に) これからの増加に伴って自動給脂装置を1台から2台に増設
2. ワイヤブラシ形テールシールドの耐久性能	<ul style="list-style-type: none"> テールシールド2段を8段に増加 (兼, 8段にすることで充填スペースが増加)
3. テールシールドの耐水密性能	<ul style="list-style-type: none"> テールシーラーの材質調整 テールシールドへの自動注入装置の新設 (2ポンプによる2系統のブラシ間注入)
4. ディスクカッターの耐圧性能	<ul style="list-style-type: none"> 水圧バランス形のシールドを採用
5. バルクヘッド(隔壁)の耐圧性能	<ul style="list-style-type: none"> 板厚 40 mm を 70 mm に増加

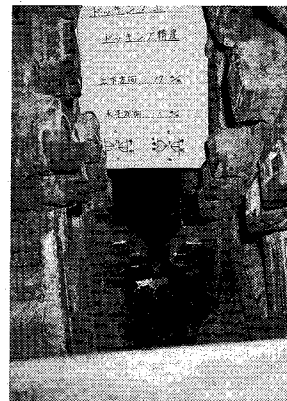


写真-1 シールドドッキング精度

ンシットとセオドライドによる測量を組み合わせることにより行った. このシールドマシンのドッキング誤差は 200 mm の許容値に対し, 写真-1 のとおり, 水平 1 mm, 垂直 17 mm となり, 非常に高精度のドッキングであった.

なお, シールド掘進中における掘削量や泥水の管理には, データを即座に把握し, 以後の管理にリアルタイムに反映させる掘削管理システムを採用した.

6. ドッキング工

地中ドッキングは, 南港側立坑より 1433 m, 堺市第 7-3 区側立坑より 697 m 地点の海底下で行われたが, こ

の地点は、航路に近いため、海上からの作業が行えず、トンネル坑内からの凍結補助工を用いて行った。

本章では、これらの設計・施工の方法を述べる。

(1) 施工手順

ドッキングの施工手順を、図一13に示し、要旨を以下に述べる。

- ① 両シールド機が、ドッキング地点に到着後、バルクヘッド部のみ残し、シールド機材を撤去する。
- ② 砂礫層内の地下水の流速を低減するため、まず薬液注入を行う。次に、坑内からスキムプレートを削孔して、凍結管を設置し、その後、冷凍機を坑内に搬入する。
- ③ 凍土の造成を確認した後、バルクヘッドを撤去しスチールセグメントを組み立てる。
- ④ トンネル下部の粘性土に対して、強制解凍を行いながら、解凍沈下防止のための薬液注入を行う。その後、スチールセグメント組立て部に覆工コンクリートを打設し、ドッキング工が完成する。

(2) 設計

a) ドッキング部の構造

ドッキング部の構造は、観測孔が設置できない測量条件下の長距離掘進のため、相対誤差が20 cmとなっても接続できる構造とした。この構造を、図一14に示す。

また、このドッキング部は、高水圧のため漏水防止対策としてスキムプレート内に覆工コンクリートを打設するので剛構造となるが、両端に可撓セグメントを配置し地震時のひずみを吸収することにした。

b) 凍土の設計

図一15に示すように、凍土に作用する荷重は、土圧と水圧とし、断面計算は、セグメントの設計法に準拠して剛性一様なリングとして行い、計算上の必要凍土厚として、1.1 mが算定された。この必要凍土厚は、バルクヘッド解体による解放区間1.6 mに、両側1.0 mを加えた範囲(合計長=3.6 m)が必要と考えた。

また、マシンテール部の凍結範囲は、マシン最後部より2.0 mとした。

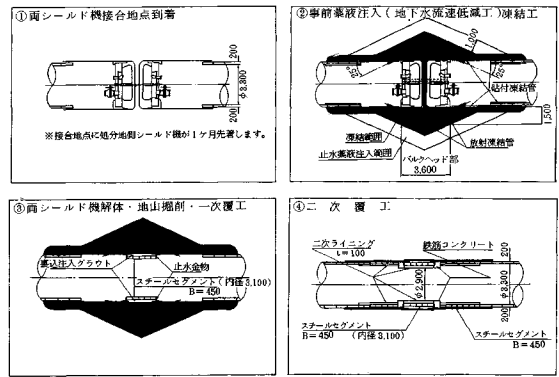
決定した凍結範囲を、図一16に示す。

c) 地下水流の影響と対策

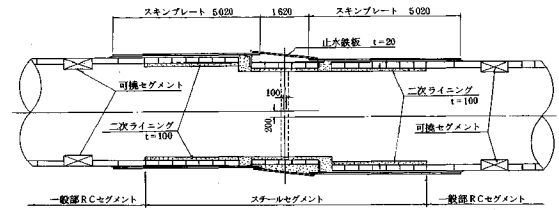
南港側立坑と同様の方法で、ドッキング部の凍土の限界流速を計算した結果、1.5 m/dayが算出された。これに対し、堺市第7-3区側で、地下水の流向・流速調査を行った結果、4.2 m/dayの流速が測定され、立坑部と同様の理由により、凍土外周に、1.0 m厚の薬液注入による難透水性ゾーンを造成した。

d) 解凍沈下対策

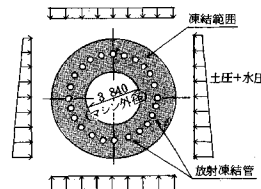
トンネル下部粘土層の解凍沈下量は、最大4 cmとなり、ドッキング部の構造に悪影響を及ぼすことが予想さ



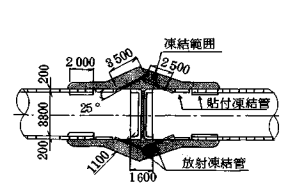
図一13 ドッキング施工手順図



図一14 ドッキング構造図



図一15 強度計算モデル図



図一16 ドッキング部凍結範囲

れたので、強制解凍と超微粒子セメントの注入の両者で対応することとした。

(3) ドッキング工施工中の凍土管理

マシン解体作業は、ガス切断器などの火気を使用するため、トンネル坑内の温度上昇による凍土の融解が懸念された。この対策として、下記に示す管理を行った。

- ① シールドマシンとセグメント内側に断熱材を貼り付け、地盤への熱伝達量を減少させる。
- ② 貼付け凍結を行って、内部からも冷却する。
- ③ 坑内の換気設備を十分に行うことによって、坑内温度の上昇を防止する。
- ④ ブライン温度を下げ、凍土の平均温度の上昇を防止する。
- ⑤ 地中温度の常時測定を行いながら、切断作業を管理する。

7. 不同沈下対策

本シールドトンネルは、 N 値が約 50 の非常に密な洪積砂礫層を掘進するが、トンネル以深の洪積粘土層は、埋立て土の荷重によって、圧密沈下を生じる層である。

南港側の立坑基地付近は、埋立て後約 7 年を経過しているが、洪積粘土層以深になお沈下が続いている。一方堺市第 7-3 区の延長約 600 m の区間は、トンネル完成後に埋立てが計画されており、新たにトンネル以深の粘土層にも圧密沈下が予想される。

本章では、これらの不同沈下に対する対策を、堺市第 7-3 区側を中心に述べる。

(1) 沈下量の推定

堺市第 7-3 区内の埋立て計画と土質を図-17 に示す。このうち、立坑盛土（シールド工事直前に施工）とセル護岸は既設であり、区割堤とポンド部はトンネル完成後に埋立てられる予定である。

区割堤部は礫質土を主体とした建設残土で、ポンド部は海底の盛り粘土や産業廃棄物でそれぞれ埋立てられる計画であり、埋立て土の単位体積重量が異なるため、不同沈下を生じることとなる。

圧密沈下計算を行う対象地盤は、トンネル以深の、深度約 100 m までの洪積粘土層とし、沈下量は図-18 に示すように、一次・二次圧密を合算し算出した。

この沈下計算の結果、埋立て後 30 年における最大沈下量は、区割堤部分で発生し、約 110 cm と推定された。

(2) トンネル構造対策

図-19 に示すように、シールドトンネルは、縦断方向に一次覆工であるセグメント本体部と継手部が交互に連なった、弾性床さへはりにモデル化した。

構造解析は、この弾性床さへはりに、最小多項近似した沈下量を、図-19 に示す地盤ばねを介して強制変位量として与え、発生曲げモーメントと継手部の目開き量を解析した。

トンネルの安全性は、この発生曲げモーメントと目開き量を、継手試験や止水試験により求めた許容値と比較することにより検討した。

構造解析の結果、通常のトンネル構造では、許容値内には収まらず、不同沈下対策を要するとの判断を得た。

不同沈下対策としては、まず今回新規に開発した弾性ワッシャーを、トンネル縦断方向の継手部に設置することにした。この弾性ワッシャーは、図-20 に示すように継手ボルトとともに用い、強度は鋼材に近く、しかも弾性係数は、鋼材の 1/100 程度のエポキシ系材料からできている。これを設置したトンネルは、構造上フレキシブルとなり、不同沈下の応力が緩和されたが、なお大きな応力の残る箇所には、図-21 に示す可撓セグメント

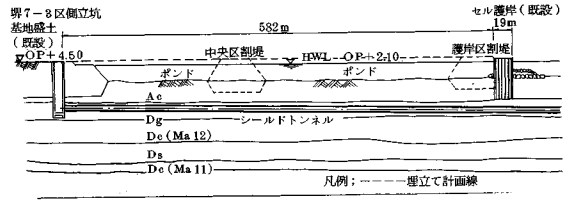


図-17 堺市 7-3 区内埋立て計画図

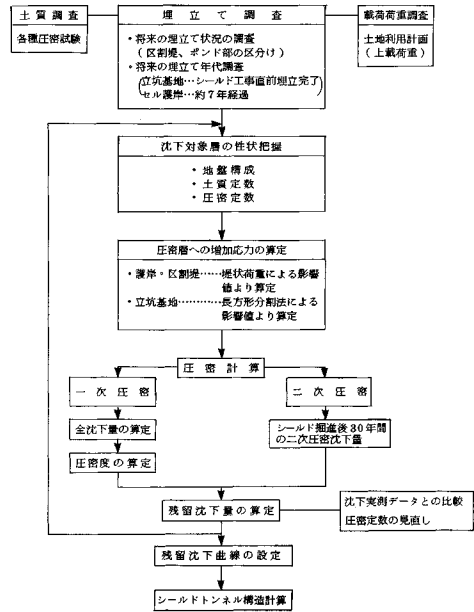


図-18 圧密沈下計算フロー図

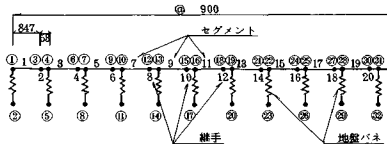


図-19 シールドトンネルはりモデル

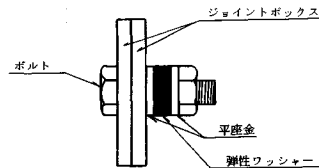


図-20 弾性ワッシャー設置図

を配置することで対応した。

この可撓セグメントは、ゴムと耐力バーで土・水圧に抵抗し、大きなせん断変位、角変位、ねじれ変位などに追従するものであり、今回 10 kgf/cm² の耐水圧を保有

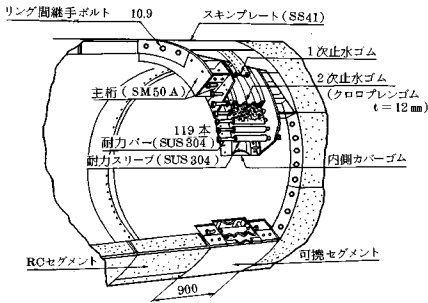
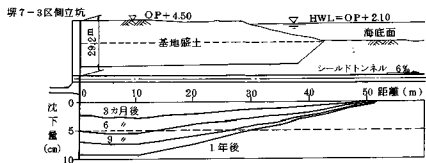
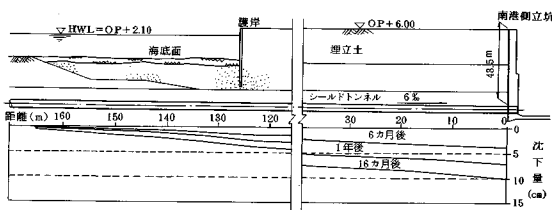


図-21 可撓セグメント構造模式図



(堺市第7-3区側)



(南港側)

図-22 シールド施工中の沈下実測図

するよう開発したものである。

以上の対応により、不同沈下の応力吸収を行ったが、立坑基地造成のための圧密沈下の始まった堺市第7-3区側と残留沈下の継続する南港側では、図-22に示すように、施工中もシールドトンネルの沈下が観測されており、実挙動を調べるための応力・変位計測も合わせて実施した。

この結果、推定した沈下量とそれに伴って発生する予想された応力の両者とも、現時点では実測値にほぼ同一であることが確認されている。また、中詰め後の沈下もフォローするため、トンネル坑内には地上から測定できる沈下検知管を設置しており、今後も沈下観測を行っていく予定である。

8. あとがき

堺航路シールドは、 4.5 kgf/cm^2 とほとんど実績のない高水圧の洪積砂礫層を長距離掘進し、海底下でドッキングする工事であった。

この工事の計画上のポイントは、52 m とわが国でも最深規模のニューマチックケーソンの沈設、高水圧対応のシールドマシンの開発、止水性に優れたトンネル構造の開発、高水圧砂礫層内でのドッキング、シールドトンネル縦断方向の不同沈下対策などであったが、大深度における凍結工法の採用、各種の開発試験の実施などによって、平成元年5月、配管・中詰め工事を含めて無事完了できた。

また、今後のトンネルの沈下に対しては、トンネル坑内に埋設した沈下検知管により、さらに観測を行って、トンネルの安全性確認を行うとともに、埋立地盤における洪積粘土層の圧密沈下に関するデータの収集にも努めていくつもりである。

本工事の報告が、今後の軟弱な埋立地における大深度立坑や高水圧地盤のシールド工事の参考になれば幸いである。

最後に、当工事を進めるにあたって、ご指導を頂いた京都大学教授 足立紀尚先生に対して、厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 高志：凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響について、土木学会論文報告集，1968.9.
- 2) 戸部・秋元：凍土変位計算法（三次元），土木学会第34回年次学術会議・講演会概要集，Ⅲ-124.
- 3) 赤井・佐野：大阪上部洪積粘土の長期圧密特性，土と基礎，1981.3.
- 4) Yamashita, O., Ono, K., Wasano, S. and Kobayashi, I.: Construction of a shield tunnel under the sea Tunnel and Water, Serrano (ed.), 1988.
- 5) 山下・稲田・和佐野： 4.5 kgf/cm^2 の高水圧滞水砂礫層を掘進した海底シールド，トンネル技術協会施工体験発表会，1988.11.
- 6) 山下・稲田・和佐野： 4.5 kgf/cm^2 の高水圧砂礫層の内での海底ドッキングシールド——凍結工法併用のニューマチックケーソン立坑——，土木学会関西支部，土質工学会関西支部，日本建設機械化協会関西支部，昭和63年度施工技術報告会概要集。

(1989.6.9・受付)