

大阪港海底トンネルの計画及び設計

運輸省 第三港湾建設局 神戸調査設計事務所
同 上

正会員 柳生 忠彦
正会員 高橋 浩二

1. はじめに

大阪港海底トンネルは、沈埋工法により建設する我が国初の道路・鉄道併用トンネルである。本海底トンネルは、大阪港南港地区埋立地の開発に伴い発生する南港地区・大阪都心部間の自動車交通及び旅客輸送需要に対応するため、南港地区と大阪都心部とを直結する臨港道路として、橋梁案、シールドトンネル案と利害得失を比較検討のうえ採用したものである。

2. 計画の背景

大阪港南港地区埋立地は、大阪港最大の埋立地であり、現在、大規模な総合的港湾空間として整備されているところである。計画では、コンテナ埠頭、ライナー埠頭、フェリー埠頭等の港湾機能のほか、人口4万人のポータウン、国際見本市会場（インテックス大阪）、大学、公園等が建設されることとなっており、すでに一部は機能している。

また、大阪市では、大阪市制100周年事業の一環として、南港地区埋立地を含めた「テクノポート大阪」計画を推進している。この計画は、南港地区の北側への拡張（約67ha）、並びに北港北地区（約224ha）及び北港南地区（約391ha）を埋め立てることにより、これらの地区を中心とした情報通信機能、先端技術開発機能及び国際交易機能を備えるとともに、文化・レクリエーション・居住機能を合わせ持った総合的な地域開発を行おうとするものである。

南港地区および北港地区の埋立地は、埋立地間、埋立地と都市部間とは航路等で仕切られており、既成市街地も含めこれらの埋立地が一体として機能するためには、連絡をする交通路の整備が不可欠である。現在、南港地区と都市部とを結ぶ連絡交通路は、主に港大橋経由の道路及び住之江経由の新交通システム（ニュートラム）しかなく、大阪港南港地区埋立地の開発に伴い発生する南港地区・大阪都心部間の自動車交通および旅客輸送需要に対応するためには、新たなルートを開くことが必要である。このため、大阪港湾計画の一環として、南港地区と大阪都心部とを直結する「大阪港・港区～南港地区連絡交通路」の整備が計画されたものである。

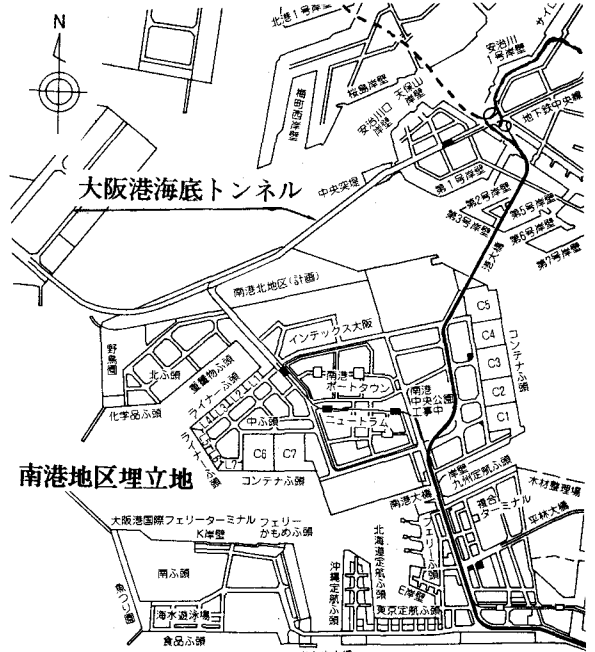


図-1 大阪港 全図

表-1 基本計画

3. 「大阪港・港区～南港地区連絡交通路」基本計画

大阪港港湾計画として決定された「大阪港・港区～南港地区連絡交通路」の基本計画を表-1に示す。

道路及び鉄道は、ともに「港湾法」の臨港道路及び臨港交通施設（鉄道・軌道）である。このうち、鉄道については、大阪市の第三セクターが第一種鉄道事業者としてすでに免許・特許を取得しており、現在南港地区の中埠頭まで大阪市交通局が営業している新交通システム（ニュートラム）を延伸し、その経営をすることとなる。

また、線形等の技術的基準として、道路については「道路構造令」、鉄道については、鉄道営業法に根拠を置く「案内軌条式鉄道構造規則（運輸

種 別	細 目	仕 様
道 路	道路規格	道路構造令第4種第1級に準拠
	設計速度 車線構成	60 km/h r 往復分離4車線
鉄 道 ニュートラム	軌道構成 案内方式	複 線 案内軌条方式
	軌 間 車両編成	1, 600 mm 6両
航 路	航路限界	D L + 51.1 m (OP+51.5m)
	主航路水深	D L - 13.0 m
	主航路幅	300 m

省令)」及び「大阪市中量軌道南港ポートタウン線建設規程（大阪市）」を適用することとした。

4. 施工法の検討

大阪港南港地区と大阪都心部との連絡交通路は、水深13mの大阪港中央航路及び泊地を斜めに延長1kmにわたって横断することとなる。このため、連絡方法として、沈埋トンネル、橋梁、およびシールド・トンネルの3案について比較検討を行った。

この結果、橋梁案（中央径間650m）については、桁下高51mを確保し、しかも、新交通システムを既存の駅・軌道施設に取りつけるためには、縦断勾配が新交通システムの縦断勾配の許容値を越えることになる、道路は、既存道路にループにより取りつける必要がある等という問題がある。また、橋梁のタイプは構造上吊橋以外には考えにくいため、経済的にも沈埋トンネルより不利になる。また、シールド・トンネルについては、工法上海底面から少なくとも10m程度の深度を確保する必要があるため、縦断勾配の制約から新交通システムを既存の駅・軌道施設と取りつけるのが困難である。また、道路・新交通システムのふたつを通さなければならないことから、トンネル断面として、道路トンネル2断面新交通システム1断面を確保する必要がある、経済的には3案のうち最も不利になる。沈埋トンネルについては建設予定地の立地条件から、本工法の特徴を生かした施工をすることが可能である。以上により、上記3案のうち本計画の臨港道路の施工法として沈埋トンネルを採用することとなった。

5. 沈埋工法

沈埋工法とは、トンネルを設置する海底にあらかじめ溝（トレンチ）を掘削しておき、陸上部で製作されたトンネル躯体（沈埋函）を製作場所から現場へ海上曳航、沈埋函を沈設したうえ沈埋函端部に作用する水圧を利用し、ゴムガasketにより沈埋函を順次接続することによって、トンネルを建設する工法である。このため、沈埋トンネルは、主に以下のような特徴を持つ。

- ①設置深さを、船舶の航行に影響がない程度に浅くでき、トンネル全長を短縮できること。
- ②沈埋函を、ドライ・ドック等陸上部で施工するため、経済的かつ確実に大断面のトンネルが製作可能であること。
- ③沈埋函は、比重が小さいため、沈下等の問題のある軟弱地盤等での建設にも適していること。

6. 設計概要

本トンネルの平面計画図、縦断計画図及び沈埋部の断面図（標準部）を図-2、3、4に示す。
沈埋工法による道路・鉄道（新交通システム）併用トンネルは、我が国には例がなく、世界的にはベルギーの

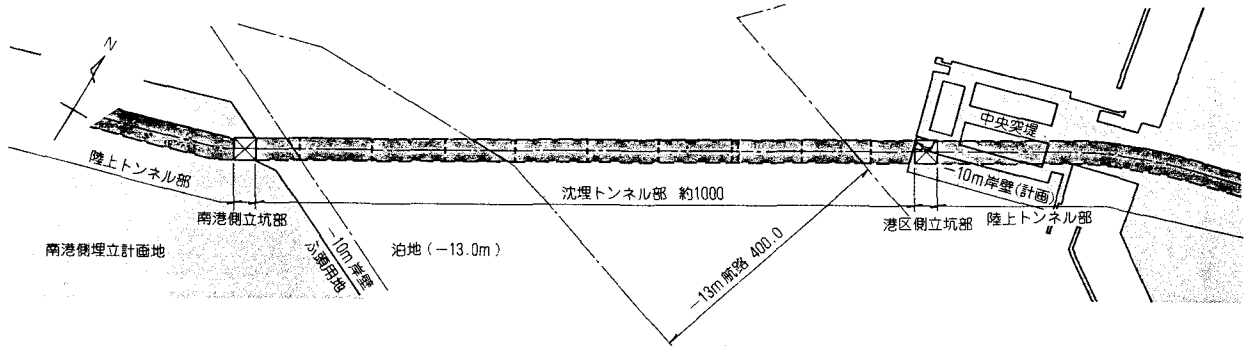


図-2 大阪港海底トンネル平面計画図

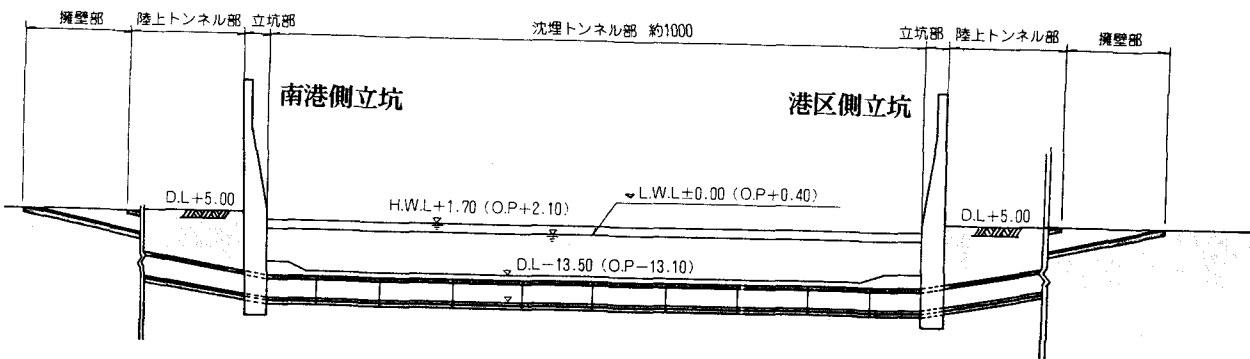


図-3 大阪港海底トンネル縦断計画図 単位：m

“E3 シェルデトンネル (1969 年完成)”、
香港の“第 2 クロスハーバートンネル (工
事中)”の例があるのみである。また、ト
ンネルの断面規模で比較してみると、沈埋
トンネルとしては世界最大級のものである。

大阪港海底トンネルは、下記の 3 種の工
区から成り立っている (図-3 参照)。

- ①海底トンネル部
- ②換気塔立坑部
- ③陸上トンネル部

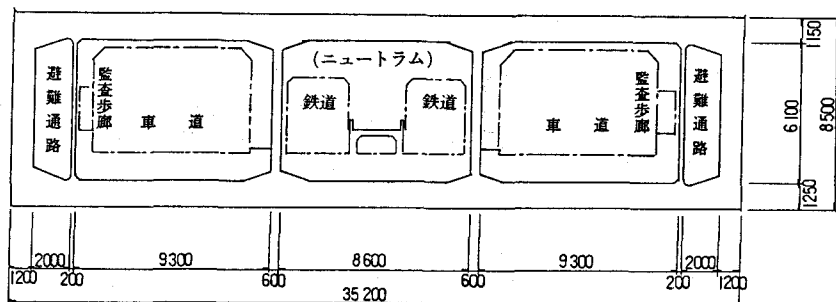


図-4 沈埋函断面図 (標準部)

このうち、①海底トンネル部および②換気塔立坑部については、運輸省第三港湾建設局が、③陸上トンネル部については、大阪市港湾局が設計・施工を行うこととしている。本文では、①海底トンネル部、②換気塔立坑部を対象として以下に設計の概要を述べることにする。

1) 沈下に対する検討

本トンネルの建設予定地が大阪湾臨海部に位置することから、設計上の大きな課題の一つとして沈下対策があげられる。トンネル法線縦断方向の土質成層図を図-5に示す。

図-5によれば、沖積層と洪積層の境界はD.L.-3.0m付近にあり、西方に穏やかに傾斜して分布しているのが読み取れる。本トンネルの建設により、沈下が問題になるのは、港区側・南港側の各々立坑を中心とした場所である。沈埋部は、沈埋函自体の海水に対する比重が完成時で 1.2 前後であり周辺の土の比重 (1.5~2.0) より軽いため、沈下は発生しないものと考えられる。このため、換気塔立坑を中心とした地区の沈下予測及び沈下対策について以下に述べることにする。

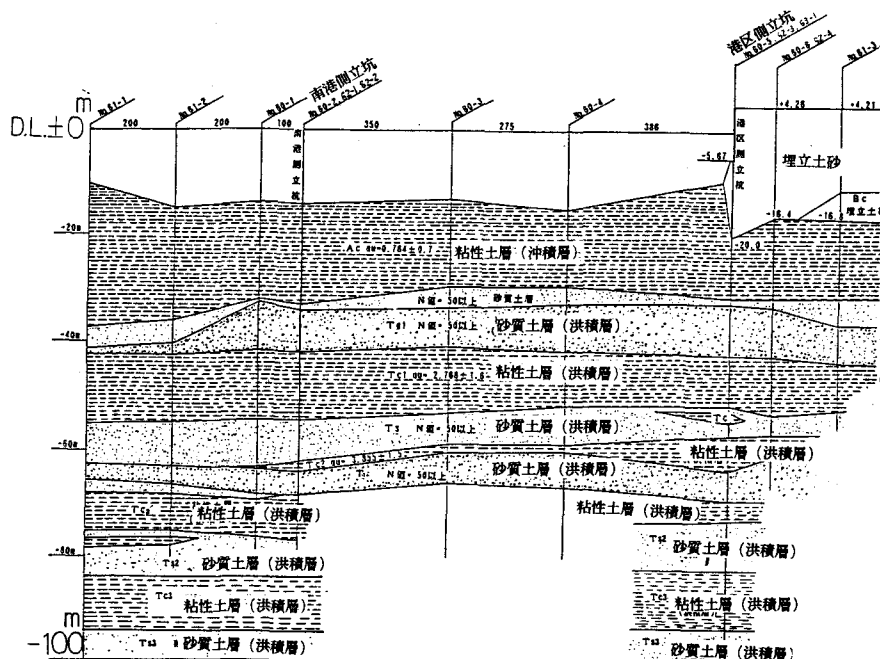


図-5 土質成層断面図

(1) 沈下予測

大阪湾臨海部の埋立では、埋立盛土や構造物の荷重による洪積粘性土層の圧密沈下がしばしば問題になっているが、この沈下のメカニズムについては未だに十分解明されていない。このため、南港側立坑及び港区側立坑周辺の洪積粘性土層の沈下対策については、長期圧密試験結果を用いて一次圧密に加え、二次圧密による沈下についても考慮した。また、洪積粘土層の圧密沈下については未解明な点が多いことから、大阪港海底トンネル建設位置周辺の沈下観測実績をもとに二次圧密による沈下量の実態について検討し、両立坑の沈下予測量の検証を行った。

[室内試験結果による沈下量の推定]

沈下圧密量の推定式は下記に示す式を用いて行った。

$$\begin{aligned}
 \text{①一次圧密沈下量} \quad S_1 &= m_v \times \Delta P \times H & P_c > P \text{ の場合} & \dots\dots\dots \text{①} \\
 & C_c \cdot H \\
 S_1 &= \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot \log P / P_c & P_c < P \text{ の場合} & \dots\dots\dots \text{②} \\
 \text{ただし、} P_c &= \text{圧密降伏荷重}
 \end{aligned}$$

②二次圧密沈下量

$$S_z = \epsilon_s \times H \times \log t / t_0 \dots\dots\dots ③$$
 但し、 t = 経過年
 t_0 = 経過年の起点（立坑完成時を1年とする）
 $\epsilon_s = 0.8 + 2.33 \log P / P_c \dots\dots\dots ④$

上記二次圧密係数(ϵ_s)の設定は一連の長期圧密試験のうち、4サイクル目の値を平均化して求めた。また、埋立荷重、原設計荷重による P / P_c はいずれも1以下である。

なお、港区側立坑付近については、中央突堤が昭和25年（1950年）までに完成しており、埋め立て荷重によるプレローディング効果があると考えられる。このため、プレローディング効果を考慮し、 t_0 の補正をした上で沈下計算を行った。

〔沈下観測結果による沈下量の検証〕

大阪湾臨海部の洪積粘性土層の二次圧密については、未解明部分も多いことから、大阪湾内の埋立地の層別沈下実績をもとに洪積粘土層の沈下量の実態について検討し、両立坑の沈下予測量の検証を行った。

この結果、第1洪積粘性土層の沈下量の占める割合は、全沈下量のうち14～16％程度であり、深度100m以浅の洪積粘性土層でも26～54％程度と小さく、逆に深度100m以深で46～74％もの沈下が発生していることが判明した。これは、深度方向の沈下範囲が－100mを大幅に越える大深度に達していることが推測できる。

そこで、南港埋立地の層別沈下計から得られた ϵ_s および P / P_c の実測値により式④を式⑤に補正し、沈下実測値に近くなるよう修正した。

$$\epsilon_s = 0.56 + 2.33 \log P / P_c \dots\dots\dots ⑤$$

南港側立坑周辺について、式⑤により沈下観測の実績値から推定した沈下量と、室内試験（長期圧密試験）により得られた沈下予測量とを比較すると、陸上トンネル部ではやや大きな沈下量となっているが、逆に立坑部では小さな沈下量となった。これらの沈下予測量の差は、沈下予測の精度を考慮すると問題のない数値であると考えられる。したがって、室内試験結果を使用して予測した沈下量は妥当な数値であると言える。沈下の予測量がほぼ一致した理由のひとつとして、長期圧密試験から得られた式④により求めた ϵ_s は安全側に大きい値を採用したことが上げられる。

また、港区側立坑の予測沈下量については、南港側と同じ手法を採用していることを考慮すると、室内試験結果による予測沈下量は妥当な数値であると言える。

(2) 沈下対策

沈下対策を検討する場合次の事項について注意を要する。

- ・地盤改良、杭基礎等の沈下防止対策は、沈下が大深度にわたることから、経済性に不利になる。
- ・沈下予測には不確実性が伴う。

したがって、沈下対策としては、沈下防止対策に加え、沈下を一定の範囲で許容した場合の対処方法も含めて検討することとした。表－4に沈下対策を示す。

表－2 立坑周辺の沈下対策

南港側立坑周辺の沈下対策	港区側立坑周辺の沈下対策
①ケーソン設置及び背後埋立完了後4～5年間の放置期間を設け、洪積粘土層の早期沈下を図った後にトンネル部を接続する。 ②放置期間後の残留沈下に対しては、沈下を考慮した沈埋函の耐力、継手の配置及び性能を設定する。 ③ケーソン内の立坑構築は放置期間の後とし、この場合、ケーソンの沈下及び傾きは内部躯体の調整により修正する。 ④立坑周辺の沈下予測の精度を向上するため、沈下管理を十分に行う。	①沈下を考慮した沈埋函の耐力、継手の配置及び性能を設定する。

2) 耐震設計

本トンネルで使用した想定地震を表-5に示す。これらは、文献1)に基づき設定したものであり、南海地震については、「地震防災計画(大阪府)」、「港湾における大規模地震対策施設の整備構想(運輸省)」等で想定している地震である。また、動的解析モデルを図-5に示す。このモデルは、基盤上の表面地盤をせん断一次振動に等価な質点・バネ系に置換し、この質点に沈埋トンネル構造物をバネを介して結合した質点系モデルである。基盤に与える振動については、地震波が進行していくことによる位相差 1 km/sec を考慮した。

沈埋トンネルの耐震設計の基本条件となるのは、可撓性継手・剛継手の配置及び性能並びに沈埋函の耐力である。このため耐震性については、沈埋函接続部に可撓性継手を設けて対応することとしており、図-6に示すような継手の配置の構造系を設定し、現在、経済性・施工性等を考慮して最も合理的な継手の配置、性能について検討を実施中である。

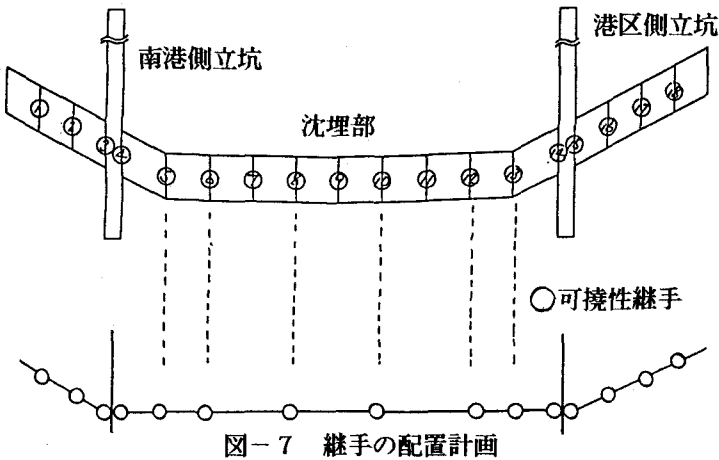
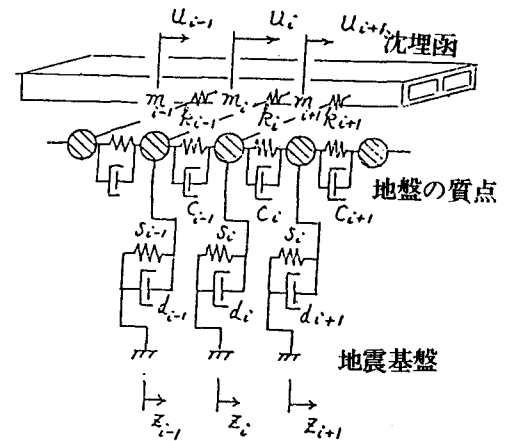


表-3 想定地震

	海洋型	内陸型
想定地震	南海地震 (仮想)	京都文禄地震 (1596年)
マグニチュード	8.4	7.25
震源深さ	30 km	(-)
地震波形	八戸 N-S	エルセントロ N-S
地中基礎沈下	120 gal	180 gal



3) 換気等諸施設

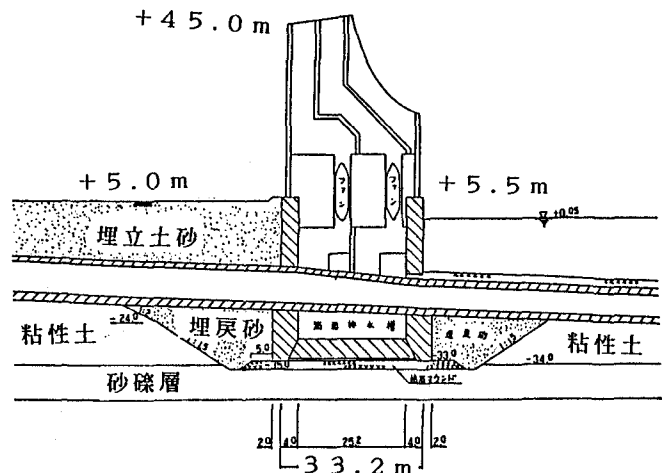
本トンネルは、延長が約2.2kmあるため、計画交通量等を考慮すると、道路部及び鉄道部については強制換気が必要となる。このため、換気方式について、トンネルの延長、換気所立坑の設置位置等を考慮し、技術的、経済的に検討した結果、立坑集中排気型縦流換気方式(ジェットファン付き)を採用することとした。また、トンネル内の施設については、道路部は「道路トンネル非常用施設設置基準(建設省)」のAAランク相当とし、鉄道部は「地下鉄道の火災対策の基準(運輸省)」を利用した。

7. 立坑の設計

1) 南港側立坑施工方式

立坑下部は、大規模・大深度構造物の施工となることから、種々の工法について検討をし、最終的には、①ニューマティックケーソン工法、②オープンケーソン工法、③設置ケーソン工法の3工法について比較検討を行った。この結果、いずれの工法でも施工は可能であるが、現在建設予定地が海上であること、施工の難易性、経済性、工程等を総合的に考慮し、二重鋼殻設置ケーソン工法を採用した。

この工法は、造船所のドック等であらかじめ二重鋼殻ケーソンを製作し、海上曳航、沈設の後、コンクリート打設を経てケーソンを建設する工法である。ケーソン建設後は、図-9の施工段階を経て内部を構築することとなる。図-8に完成時の断面を示す。



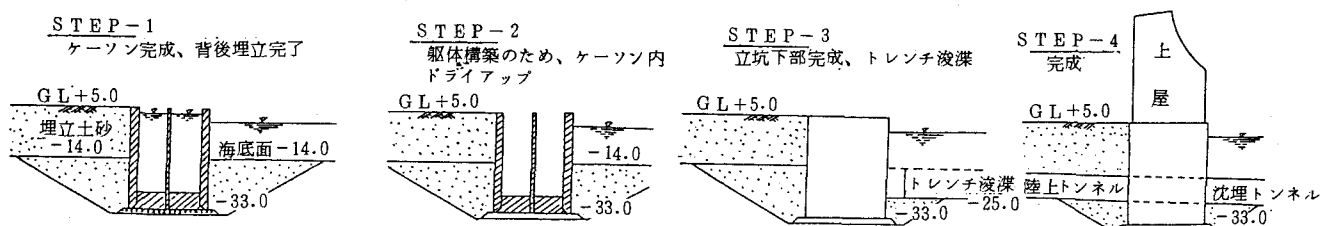


図-9 南港側立坑施工段階

2) 港区側立坑施工方式

立坑建設予定位置の大半が、既設埋立地にかかることから、①ニューマティックケーソン工法、②オープンケーソン工法、③既設構造物の撤去を前提とした設置ケーソン工法の3工法について比較検討を行った。この結果、既設構造物の撤去が可能となったため、南港側と同じ二重鋼殻設置ケーソン工法を採用することとした。

3) 南港側立坑二重鋼殻ケーソン

平成元年度から製作に着手することとしている南港立坑二重鋼殻ケーソンの形状および諸元を図-10、表-4に示す。この鋼殻ケーソンは、立坑下部のケーソンを構成するものであり、製作に当たっては、あらかじめ必要な鉄筋等は組み込んでおくこととしている。

表-4 南港側立坑二重鋼殻ケーソンの諸元

平面寸法	幅53m × 奥行33.2m (幅53m × 奥行37.2m)
高さ寸法	36m
鋼重	(本体) 約 6,700トン (鉄筋) 約 1,700トン

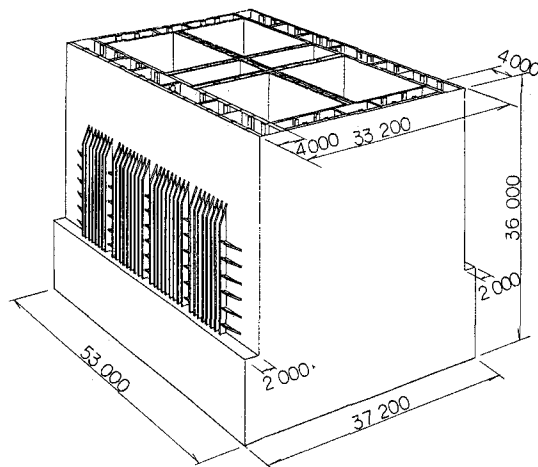


図-10 南港側立坑二重鋼殻ケーソン

8. 沈埋函の設計

沈埋函の製作方式としては、従来からRC方式、鋼殻方式の2種類がある。本トンネルでは、これらの2方式に加え、防水用鋼板とコンクリート部材とを合成化する合成構造方式について、技術的、経済的検討を実施し、比較検討の上製作方式を決定することとしている。

9. 今後のスケジュール

本事業は、平成元年度に南港側立坑下部二重鋼殻ケーソンの製作に着手するとともに、ケーソンの沈下管理及び施工時の挙動管理に必要な沈下管理システムの開発することとしている。

また、沈埋函の製作方式を決定するための模型実験等を実施する予定である。

参考文献 1) 大阪湾沿岸地域の大地震時における地盤加速度；港研資料 No. 253, 1977