

多摩川沈埋トンネル工事

—東京外環状鉄道・京葉線羽田トンネル—

田 中 行 男*
 平 岡 治 郎**
 大 平 拓 也***

1. はしがき

日本鉄道建設公団が現在建設中の京葉線は、川崎市の塩浜より東京湾岸の埋立地を通り、千葉県木更津に至る延長約 100 km の鉄道新線で、武蔵野線、小金線とともにいわゆる東京外環状線を形成するものであり、特に塩浜、品川埠頭間については、国鉄が第 3 次長期計画で実施中の東海道本線増工と密接に関連しており、その早期完成が強く要望されているものである（図-1）。

上記塩浜～品川埠頭の線路は、図-2 のごとく塩浜駅の構内よりただちに地下（羽田トンネル、延長 5.980 km）に入り、多摩川河底をくぐり、東京国際空港の西端部、森ヶ崎運河の海底下、京浜 3 区埋立地、京浜運河底をトンネルで通過し、大井埠頭埋立地において、大井操車場および貨物駅に連絡し、同埋立地の北端から再び地下（台場トンネル）に入り、品川運河底を横断し、品川埠

頭内で右折して東京港第一航路の海底下を横断し、船橋方面に至る水底トンネルを主体とする特異な線路構成となっている。

このため公団においては、京葉線水底トンネル技術調査委員会を設置し、部内外の学識経験者を委員に委嘱して慎重に審議、検討を行なった結果、図のごとく多摩川および京浜運河横断は沈埋工法、空港内および京浜 3 区埋立地内は普通シールド工法、森ヶ崎運河横断は特殊な泥水式シールド工法によることに決定した。

工事は現在ほぼ全面的に着工されているが、特に多摩川横断の沈埋トンネル工事は昭和 42 年 12 月に着工、すでに沈埋函 3 基の沈設を完了し、わが国最初の本格的沈埋トンネルとして工事完成に十分なる見通しを得るに至った。

最近、わが国においても沈埋工法がにわかに脚光を浴び、大規模な計画が続々と企画されるに至ったので、まだ工事途上ではあるが、ここに京葉線多摩川横断沈埋ト

図-1 東京外環状線略図

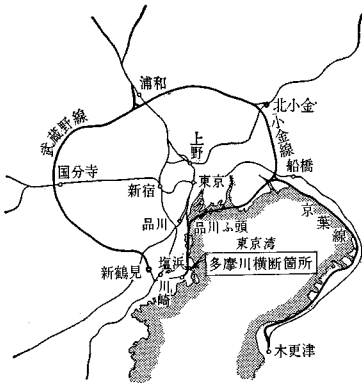
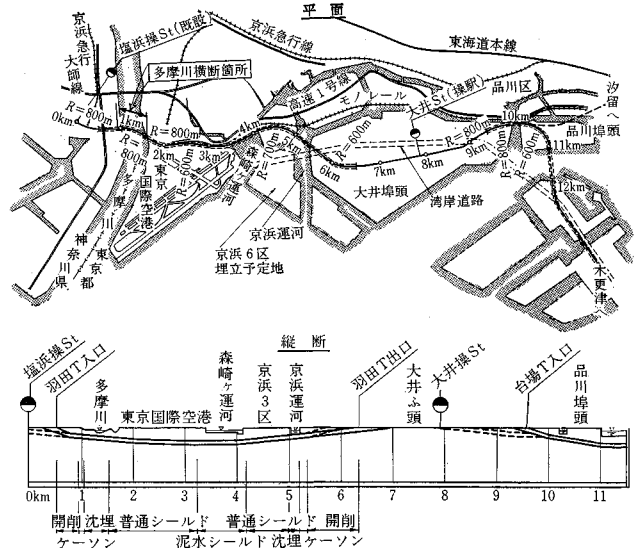


図-2 京葉線塩浜～品川埠頭間線路略図



* 正会員 工博 日本鉄道建設公団理事
 ** 正会員 日本鉄道建設公団計画課長
 *** 正会員 日本鉄道建設公団 環状線第一課長

ンネル工事につき概要を簡単に報告するものである。

図-3 多摩川横断部分トンネル一般図

2. 多摩川横断水底トンネル設計上の諸条件

横断部付近の多摩川は、図-3のごとく横断河幅約 600 m、流水部の幅約 300 m、最大水深約 3.5 m であるが、全幅を水深 4.0 m とする改修計画（計画洪水量 4 200 m³）がある。現場付近は河口に近く感潮区域に入っており、潮の干満による流速が約 1.0 m に達するが、降雨による流速はわずかで、計画洪水量に対する流速も 1.3 m である。

地質は図のごとく洪積層が深く谷状をなし、上から約 20 m は細砂層であるが、左岸側には厚さ約 10 m の砂礫層が介在しており、その下は *N* 値 5~10 程度の粘性土層となっている。トンネルはこの洪積層の谷間の沖積層内を通過することになる。

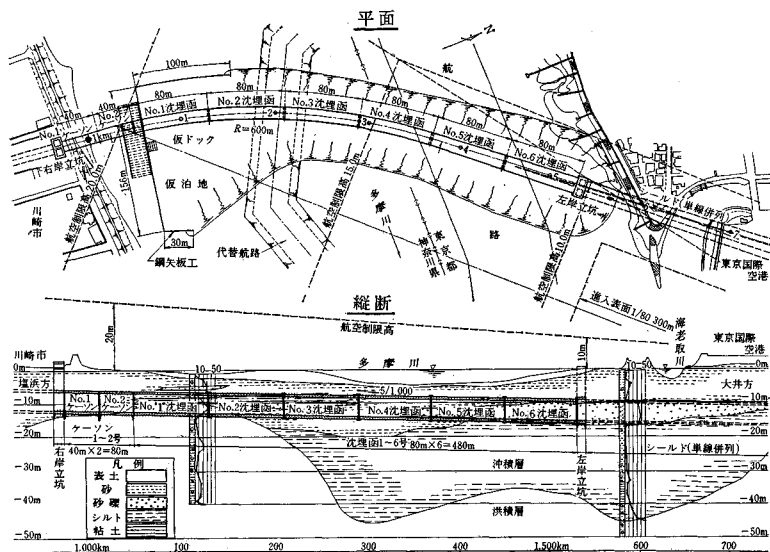
横断部の線路は平面的には、すでに確保されている右岸側の用地、ならびに左岸側の民家密集の支障関係などより、*R*=600 m の曲線をもって、わずかに大田区の一部をかすめて空港敷地下へ接続するようにし、縦断的には塩浜駅の配線関係より多摩川河底を、できるだけ浅く通過する必要があるので、右岸において、河川管理者の要求する計画河床下最小土かぶり を 2.0 m とし て 線路位置を定め 5/1 000 の片勾配をもって左岸側の空港内シールド式トンネルに接続するようにした。

3. 沈埋工法採用と、その方式

この場合、水底トンネルの建設工事としては、大別して、① シールド工法、② ニューマチックケーソン工法、③ 沈埋工法の 3 工法が考えられる。

まずシールド工法については、上述のごとく水底の土かぶりがきわめて少ないので、浮き上がり防止上外径を普通の場合の 7.1 m に対して 8 m 程度としてセグメント巻厚を大とせざるを得ず、また噴発防止のため十分なクレイブランケット、薬液注入などを必要として不経済であるとともに作業の危険性が大きいためと考えざるを得ない。

ニューマチックケーソン工法による場合は、1 基長さ 40 m のブロック 14 基を要するが、河川管理上および舟航のために、同時施工基数の制限を受け工期上不利であ



るとともに、B滑走路の航空制限がきびしくケーソンのすえつけ、沈下に特殊な措置を要し、なお各ケーソンブロック間の結合にはその設計、施工ともに難点がある。

沈埋工法の場合にはトンネルエレメントの製作と沈設作業との分離並行施工が可能で、工期を短縮しようとともに、トンネルエレメントの水中結合は確実で、水底トンネルとして最も重要な防水性がきわめて高く、工事費も前述のような特殊施工条件を伴うので、前二者と比べて安く、全体の作業の安全度も高いと判断され、沈埋工法が最も有利であるとの結論に達した。

沈埋工法にはドライドックその他により、鉄筋コンクリート製のトンネルエレメントを建造して曳航沈設する方式と、鋼殻を船台において製作進水させて、浮遊状態の鋼殻内において鉄筋コンクリートにより函体を製作する方式とに大別される。

多摩川においては、現地付近の状況より函体製作用のドライドックを現地付近に仮設することは、きわめて困難であり、また造船所のドライドックを利用する場合には、完成した函体を沈設現場まで曳航するので途中水路しゅんせつに莫大な工費を要する。したがって、鋼殻を造船所で建造進水させ浅い吃水状態で現地まで曳航し、現地の右岸側に沈設溝の一部も利用して水深を十分に確保した仮設岸壁に繫留して、内部鉄筋コンクリートを打設して函体を完成する方が経済的にも工期的にも有利であり、いわゆる鋼殻式沈埋函方式を採用することとした。

鋼殻方式を採用した主たる理由は、上記のとおりであるが、鋼のもつすぐれたじん性、防水性は地震あるいは地盤の不等沈下に対しても有利と期待される。

4. 設 計

(1) 横断部全体の設計

沈埋式トンネルの施工区間としては、現地付近の状況より沈設溝（トレンチ）の掘削が両岸の堤体に悪影響をおよぼさない範囲に限らざるを得ない。したがって、横断部全体の設計としては、地下へのアプローチとなる右岸側と、空港内地下のシールド式トンネル（単線並列）に接続する左岸側の状況を種々検討して、図-3のごとく右岸側には体堤部を含み長さ40mのケーソン2基を設け、左岸側には河川敷内に立坑（工事完了後は計画河床以下に躯体をおさめて切り捨てる）を設けて、空港側シールド式トンネルと接続させるものとして、沈埋工法施工区間はこの間の河川中央部約480m（80m×6基）とした。

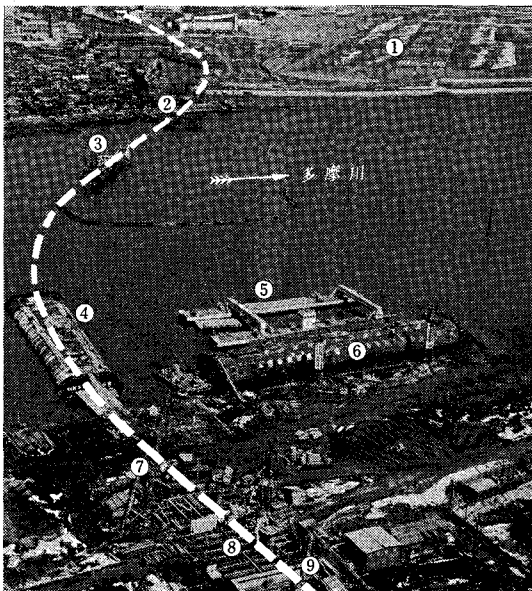
沈埋函1基の長さは、鋼殻の構造設計、継手の数（施工基数）、沈設用バージその他の機械設備、曳航、沈設の難易などを検討して80mとした。

写真-1は塩浜方から見た横断部工事現場の全景である。

(2) 沈埋函の設計

沈埋函の断面形状としては、複線線路（曲線部あり）の建築限界および作業用通路に対して、むだがなく、水圧、土圧の外力に対して断面に生ずる引張り応力が小さくなるよう、図-4に示すように中柱をもった小判形と

写真-1 塩浜方から見た工事現場



注：点線は線路中心の位置を示す
（写真説明）

- ① 東京国際空港B滑走路
- ② 左岸立坑
- ③ サンドポンプ船
- ④ No. 6 沈埋函（構築中）
- ⑤ プレーシングバージ
- ⑥ No. 5 沈埋函の鋼殻
- ⑦ No. 2 ケーソン（沈下ずみ）
- ⑧ No. 1 ケーソン（沈下中）
- ⑨ 右岸立坑

した。

鋼殻は進水時、曳航時の応力、仮ドックにおけるコンクリート打設の各段階における応力と変形等を考慮して図-5のごとく内部に1.5m間隔に横リブを設けた外板厚9mmの薄肉中空殻構造とした。

鋼殻は内部に鉄筋コンクリートのトンネル本体を完成するための浮いた外型わくであり、かつ、防水被膜であって、沈埋函がその最終沈設位置において受ける水圧、土圧、活荷重その他の外力は、すべて鉄筋コンクリートのトンネル本体が負担する。なお、鋼殻には流電式の電気防食を施すこととした。

沈埋工法の施工区間の左岸側においては立坑を介して単線並列式シールド（心々間隔平均15m）と接続するので、上下線の間隔を徐々に拡大する必要があり、そのためNo.1~No.4函は同型であるが、No.5, No.6函は異型となっており、特にNo.6函は途中より二またに分れて円形の断面になるという特殊な形状とした。

沈埋函1基の重量は鋼殻と躯体鉄筋コンクリート合せて約6950tで、これに対して全排水量は約7200m³で

図-4 トンネル断面（標準）

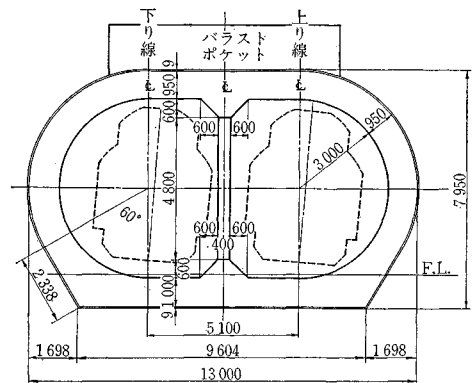
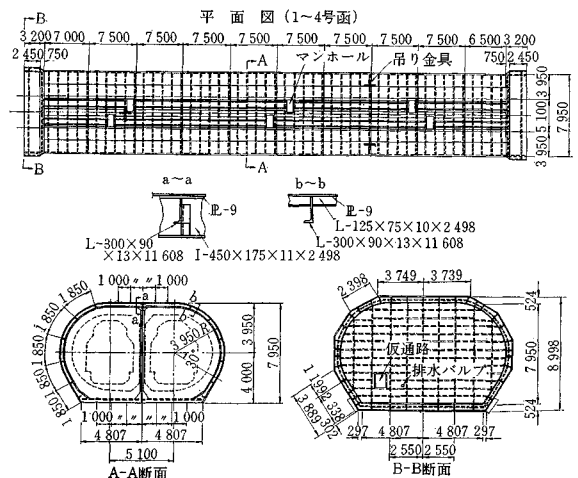


図-5 鋼殻設計図



ある。

沈設にはわずかの乾舷（フリーボード）を残して浮いている沈埋函に荷重を加えて、水より重くする必要があり、そのために沈埋函上部に頂面の防護もかねバラストポケットに碎石を積載する。最終的には沈埋函は軌道、道床コンクリートその他の重量が加えられるので、海水に対して比重 1.1 程度となる。

(3) 基礎

沈埋函はその性質上、水よりわずかに重く水底土よりは軽い程度で、埋め戻しを終った後の沈埋函底面の支圧力は、その面におけるトレンチ掘削前の圧力より小である。沈埋函の基礎は、一般にかなりの軟弱地盤でも支持力を増すなどのための特別な基礎工は必要でなく、むしろ、すえつけ面を整正するための手段であることが多いが、一般にその方法としてはトレンチ底面に仮支承を設け、これにより沈埋函の位置を正確に調整した後に、函底のすき間に砂などを吹き込みてん充する方法と、掘削底面に砂利または碎石の基層を所定の高さに正確に敷きならした上に直接沈埋函を沈設すえつける方法、等が採用されるのが普通である。

多摩川においては種々検討の結果、小判形断面を採用し、函の底面幅を縮小することとしたので、後者の碎石基層を敷きならした（スクリード）上に直接沈埋函をすえつける方法によることとした。基層の厚さは掘削底面の凹凸ならびに後述する結合部ガスケットビームの張り出し量を合わせ考えて 70 cm とした。結合部分は、あらかじめ基層を設けることができないので、函の結合後に沈埋函を上下に貫いて設備しているトレミーパイプによる水中コンクリートでてん充する。

(4) 沈埋函の結合

水底における沈埋函相互の結合方法としては、結合部の両隔壁（バルクヘッド）内の水を抜き、静水圧を利用して端面のゴムガスケットを強圧し、水を締め切った後に内部を結合する方法をとった。

鋼殻の両端面には、図-6 のごとくガスケットビームが外側に張り出しており、一方の端面には図のごときゴムガスケット2条が断面を一周して取付けられている。また端部には自動連結機つきの引張りジャッキ（100 t、ストローク 1.0 m）が左右に1基ずつ取り付けられており、これにより沈埋函を既設沈埋函に引き付けて、ゴムガスケットを相手側のガスケットビーム面に密着させてから、両バルクヘッド間の水を抜き強大な静水圧（断面積×平均水圧）を働かせ、ゴムガスケットを圧縮し完全に水を締め切る。そこで両鋼殻の外板を内部より鋼板を用いて溶接接合し、バルクヘッドを撤去して継手部の鉄筋コ

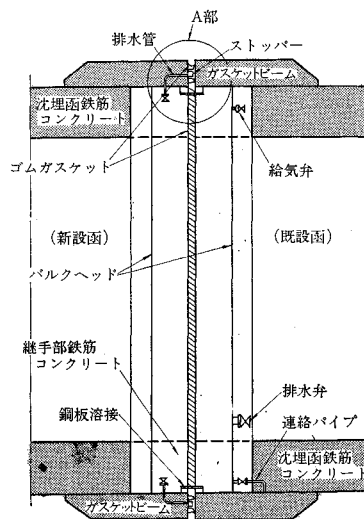
ンクリートを打設して結合を終る。したがって、設計としてはゴムガスケットによる止水は、あくまで仮の一次止水であり、鋼殻相互間の鋼板溶接を本止水と考えている。

結合方法としては、地盤沈下も余りないことが予測されているので、防水、地震、等に対し総合的に判断して、剛結結合方式を採用した。

なお、外側ゴムガスケットの舌状の突起は、ゴムガスケット面およびビーム面の多少の不陸に対しても、容易に密着して水をシャ断し水圧が効果的に効くように考慮したものであり、2条のゴムガスケットの間に設けたストッパーは、なんらかの異状による不等圧密を最小限に防止するためのものである。

(5) 沈埋溝、埋め戻しその他

図-6 沈埋函接合端部



A部詳細

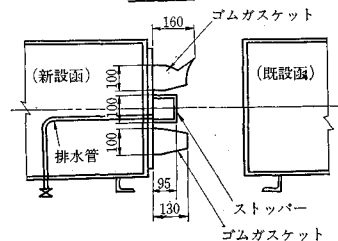
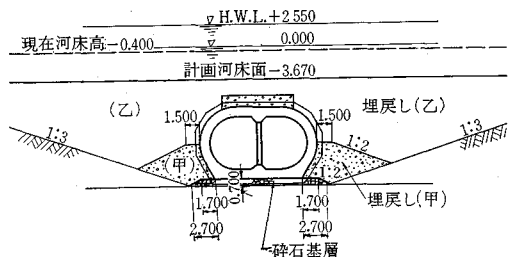


図-7 沈埋函沈設断面図



沈設溝の標準断面は、図-7のごとくである。埋め戻しは函体のほぼ半分の高さまでは横抵抗を増すため碎石をてん充するが、それ以外は良質の土砂で埋め戻す。

水中における掘削り面勾配は、土質試験の結果より種々検討したが、現地の地質状態が複雑であるうえに長期間にわたり、流水下で安定している必要があるので、1:3のややゆるい勾配を標準と定めた。

なお、埋め戻しを終わった最後段階で、函底に対してモルタル注入を施工しうるように、鋼殻にはあらかじめ注尿管が多数取り付けられている。

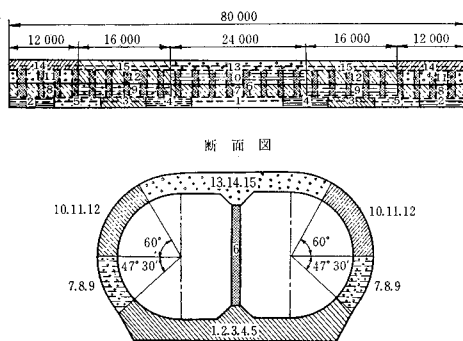
5. 施 工

(1) 沈埋函の製作

鋼殻は造船所に発注し製作した。工場内でブロックを製作し船台上的作業を簡素化したので、1函の製作はほぼ1ヵ月半である。完成進水した鋼殻は曳航されて、現地仮ドック岸壁に繋留して、浮いた状態のまま内部鉄筋コンクリートのトンネル躯体が打設されて函体が完成される。

外型わくとして鋼殻全体が浮いているので、コンクリート打設の各段階ごとに、鋼殻はきっ水を増すとともに各種の変形を生ずる。このためコンクリート打設の各段階における鋼殻ならびにコンクリートの応力、変形量を検討してコンクリートの打設区分、順序を図-8のごとく定めた。

図-8 コンクリート打設順序



施工結果は打設の各段階においては若干の変形を示すが、最終的には、ほとんど変形は残らないことが判明した。トンネル頂部のコンクリート打設は、鋼殻頂部のコンクリート打設孔より直接上から施工するので、鋼殻との間に空けきを残すことは少ないが、打設孔を鋼板で溶接閉そくした後にモルタル注入して完全にてん充を期した。

(2) 沈 設

沈設は特にこの工事のために設計、建造したプレッシングバージと称する図-9のごとき特殊作業船により施工することとした。

このプレッシングバージの特色の一つは、沈埋函を前部2点、後部1点の3点がつることである。3点づりにしたのは、沈埋函を静的につり下げてバージの両ポンプの各種動揺に対して、つり点に無理な力の生ずることなく、つり降ろし沈設の各段階における沈埋函の前後左右の傾斜その他に対するコントロールが容易なるように考慮したためである。3点の荷重が均等になるように沈埋函のつり位置は函の重心に対してそれぞれ1:2の位置に定めてあり、懸垂用桁もそれに合わせてバージに対しては偏心して設置している。またこの桁も両ポンプの各種動揺に対して無理がかからぬように特殊な3点支持建築をとっている。

バージには四隅に各2本ずつ、計8本のアンカーワイヤーおよびそのウインチ(双胴4基)を設備しており、トレンチの両側に、適当に打ち込まれた鋼管杭をアンカーとし、これらウインチを適宜操作して移動するとともに、沈設位置に正確に定着する。バージにはアンカーウインチ、3点の主つり下げ用ウインチのほかに、沈設の最終段階近くで、沈埋函の位置を前後に微動修正しうるように、斜めつりワイヤーの微動用ウインチを設備している。これらのすべてのウインチはコントロールタワーにおいて集中制御しうるようになっており、3点の主づり点に対しては、荷重計と沈降移動距離計を設置した。

沈設の最終位置ぎめについては、沈設する函の前端は既設沈埋函後端に接続されるので、沈埋函後端の中心線上に水面上に達する測量塔をたて、これを視準して後端を所定の位置に誘導してすえる。接続端の誘導に対しては、既設沈埋函後端との間に図-10のように水中超音波距離測定用の端子を取り付け、立体三角形的に端子間の距離を電氣的に測定して、沈埋函端面の相互関係位置間隔をコントロールタワー内において観測できるようにした。既設沈埋函後端の下部両側には、あご状に誘導台が図のごとく、鋼設ガスケットビームに取り付けられているので、相互端面位置がある範囲内に入れば、そのまま沈降すれば誘導されて正しく端面が向き合うようになる(写真-2は沈設直前(碎石積載中)のNo.4沈埋函である)。

(3) 碎石基層の敷きならし(スクリード)

いかにして水底の広い面積に精度よくかつ能率的に碎石を敷きならすかは、本工中、施工上の最大の問題であった。現地多摩川の水は沈濁はなはだしく、潜水夫による人力施工は、精度、能率の点より考えて至難と判断し、特殊機械設備によることとした。

図-9 プレーシングバージ一般図

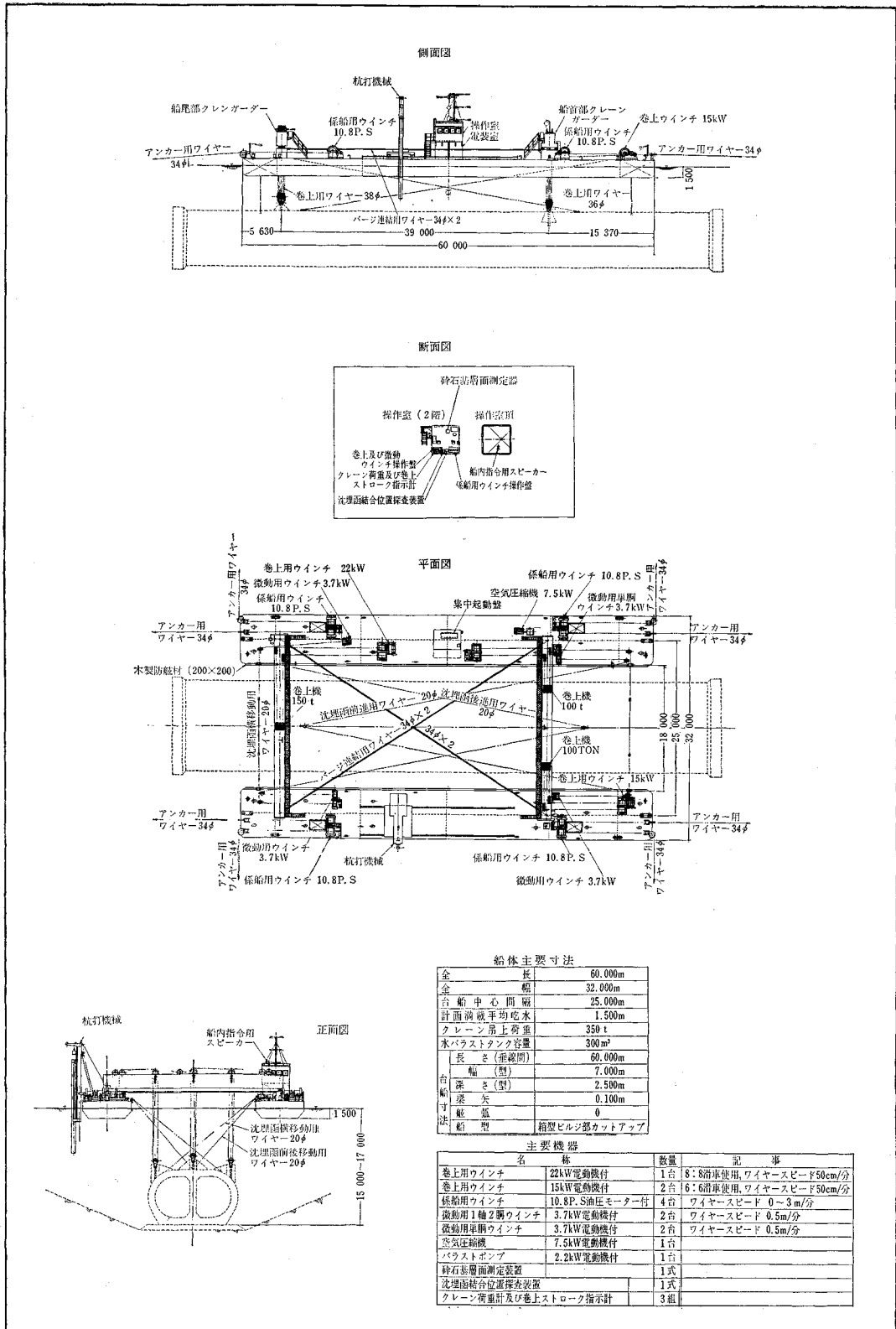
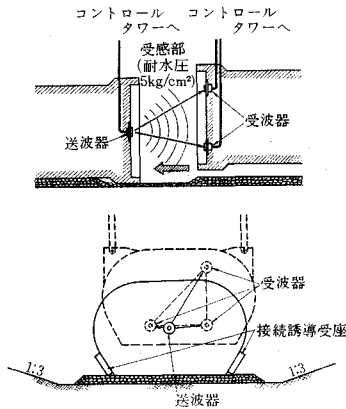


図-10 沈埋函端面探査装置



この機械設備としては種々の結果、図-11のようにトレンチ底面の両側に敷設した走行上を移動する。箱路桁様の敷きならし装置にトレミーパイプによって、碎石を連続供給する方法をとることにした。この装置の移動は、左右にずれを起こさないように、走行桁上のチェーンを巻き取って動く機構とした。水底のスクリード機の移動に従って、トレミーパイプをつり下げたプレッシングバーも追随移動する必要があり、トレミーパイプは上下端がヒンジ構造でかつ上下に伸縮可能な構造となっている。スクリードの移動速度は碎石の供給能力より考えて、きわめて微速とする必要があり 5 cm/min 程度とした。

このような構造の装置で所定どおり碎石が敷きならせるかどうか、図-12のごとき実験用水槽、スクリード装置により、各種のテストを行なった。結果は全体として、きわめて満足すべきものであり、実施について十分の自信と設計に対する資料が得られた。

水底の走行路の設置方法としては、図-11のように鋼管杭の上に高さを修正しうるまくらばりを取り付け、これに縦方向に桁を渡して走行路とした。作業は盲目同然の潜水夫作業となるので、水上より打ち込んだ杭の高さを測定し、高さの調整量をまくらばりに施して潜水夫が手さぐり作業でも簡単に杭頭に取り付けられるようにし、まくらばり上に桁を渡せば、走行路となる桁は所定の高さとなるようにした。走行路桁の通りならびに左右間隔の多少の不同は、スクリード機の走行車輪を一端は両フランジのものとし、他端は幅広いローラーとして移動に支障のないようにした。

スクリードが正常に進行しているか否かを確認するために、超音波水中測深機数個をスクリード機の側面に取り付けて、仕上がり面の凹凸を進行とともにプレシ

図-11 スクリード設備一般図

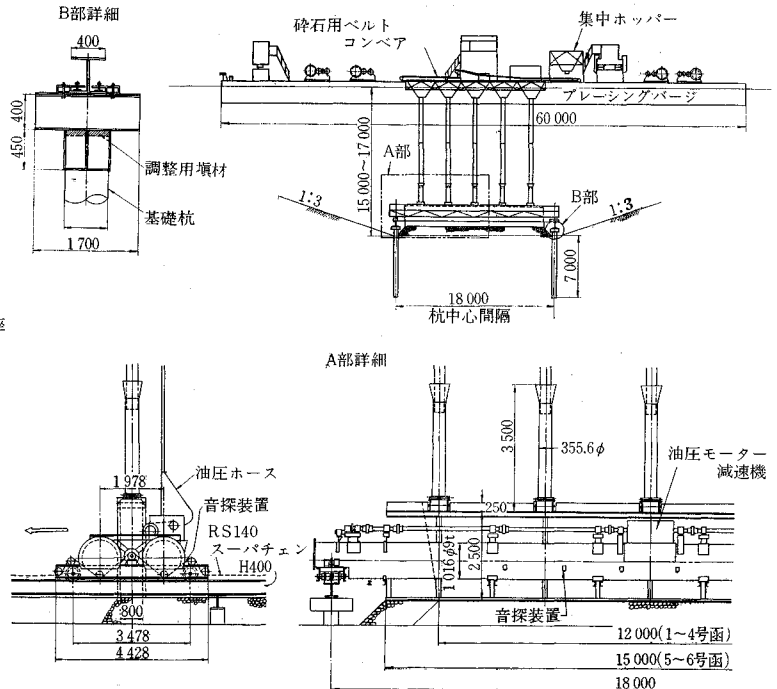


写真-2 沈設直前(碎石積載中)のNo.4沈埋函

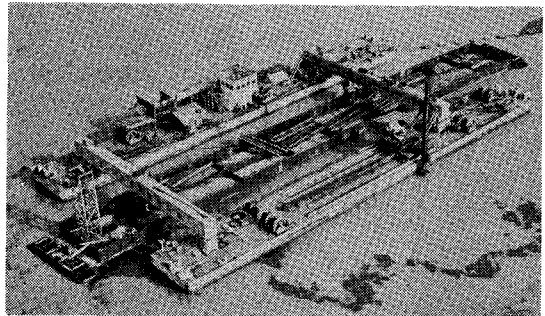
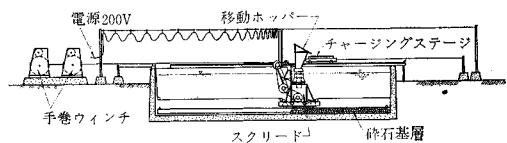


図-12 スクリード実験水槽



グバージのコントロールタワー内に自動記録し、またスクリード面に接近させて水中テレビカメラを装置し、タワー内で観測しうるようにした。

鋼管杭の打込みは、航空制限下の水面上より、すでに掘削の終わった水深の深いトレンチ底面に正確に打ち込む必要があり、種々検討の結果、プレッシングバーに横移動可能な特殊設計の杭打ち機を積載して長いやっこを用いて施工した。

基層表面の仕上がり精度は ± 50 mm と示方しているが施工の結果は、図-13のごとく走行路の高さならび

航空制限により、ポンプ船特有のスパッドは支障するので、クリスマスツリーと称するワイヤー方式のアンカーに改造し、かつ前部カッターのブームも姿勢の低いものに改造せざるを得なかった。

流れに対し、横断方向に深い溝を掘削し相当の期間放置するので、泥土の堆積、出水による埋設が心配されたが、現在の多摩川はほとんど出水の危険はなく、泥土の堆積については、実際にトレンチ底面において測定の結果、最も多い流心部で1cm/日程度であり、液状に近いきわめて、軟かいものであるため、スクリード開始直前において吸い上げポンプにより簡単に除去した。

掘削総量は、トレンチ、仮ドック、仮泊地、代替水路を合わせて約45万m³である。

(6) 立坑ケーソンと沈埋函の結合工

左岸立坑の設計は、沈埋函を正しい位置から正しい方向にスタートさせるため、沈下終了後に測量を行なって沈埋函のガasketビーム面に相当する受け面の鋼板、連結機その他を正確に施工できるように、外側を鋼矢板で囲い、内部を鉛直方向に隔壁で2室に分け、一方はドッキングの作業に、他方には水を入れて、トレンチ掘削による土圧の片荷重に対して立坑全体の前倒を防ぐなどの考慮をした特殊な形態をとった。

沈埋函3基の沈設、結合と埋め戻しの進行した現在は内部隔壁は撤去している。

6基の沈埋函は左岸立坑方へ順次ゴムガasketによる水圧ドッキングを施工して結合されるが、最後に残るNo.1沈埋函とすでに沈下完成されている右岸No.2ケーソンとの結合は、特殊な、結合法によらざるを得ない。

No.2ケーソンの沈埋函側接合面は、トレンチ掘削により水中に露出しているので、向き合った接合端面のまわりを鋼矢板で囲み、断面に相当する内型わくを設けて、上下左右の全周に、水中コンクリートを打って固めてから、沈埋函のバルクヘッドを撤去して結合する方法による予定である。

6. 工程、工事費

本工事は、昭和42年12月末着手、45年9月完成予定で、全体工程は、表-1のごとく工期は33ヵ月である。最初の沈埋函は44年5月に沈設され、6基の沈設に12ヵ月を要する予定としたが、作業の習熟に従ってスクリード、沈設等の各種作業の工程も順調となり、短縮が期待される。最近実施したNo.4沈埋函では鋼管杭打ちより沈設までの作業を35日で完了した。

工事費については、精算を終らなければ正確な値は出し得ないが、純沈埋工法区間について、メートル当り、340万円程度である。なお、本工事に使用されるプレッシングパージ、スクリード機械設備等は引き続き施工される京浜運河横断の沈埋トンネル工事(82m×4基)に転用することとしているので、これを計算に入れると、この工事単価はさらに若干下まわることとなる。

7. むすび

わが国において実施された沈埋工法による水底トンネル工事としては、大阪市安治川の源平渡し、首都高速1号線羽田トンネル、大阪市営地下鉄6号線堂島川、同線道頓堀川等があり、いずれも先覚の技術者によって立派に完成されている。これらの先例に比較すると、この多摩川横断トンネルは、はるかに規模も大きく、そのため多くの技術上の問題にも直面したが、砕石基層のスクリードや沈設作業にも新しい構想の特殊設計の機械設備を用いて精度の高い作業を実施することができた。

また現在までの施工結果から判断して、本工事の場合においては鋼殻式沈埋工法の採用は正に適切であったといえることができる。

沈埋工法によれば、水底下の比較的浅い位置に、能率よく確実にトンネルを築造することができるので、わが国においても今後ますます採用されることになると考えられるが、その場合には現場の施工条件を詳細に分析検討し、その条件に最もよく適合するよう設計の基本事項を決定することが重要であると考えられる。

(1969.10.1・受付)

日本土木史 —大正元年～昭和15年—

- 体 裁：B5判 8ポ横一段組み 本文1770ページ 図410葉 表500点
写真150枚余 上製箱入革製豪華製本 定価12000円(〒300円)
- 内 容：第1章 河川・運河・砂防・治山／第2章 港湾・漁港・航路標識／第3章 農業土木／第4章 都市計画・地方計画／第5章 道路／第6章 軍事土木／第7章 上水道・下水道および工業用水道／第8章 土木行政／第9章 建設機械／第10章 トンネル／第11章 発電水力およびダム／第12章 鉄道／第13章 水理学／第14章 応用力学／第15章 土性および土質力学／第16章 測量／第17章 土木材料／第18章 コンクリート／第19章 土木教育史／第20章 学・協会史／付・日本土木史年表