

東京湾に沈埋トンネルをつくる

木村康宏*・岡田郁生**

に発展が期待されるものであろう。

1. 沈埋工法の沿革

沈埋工法による水底トンネルの歴史は、意外に古い。1893～1894年にボストン港内のシャーリガットサイフォンと呼ばれる下水管が敷設されたのが現在の沈埋工法の最初とされている。以来、上下水道、鉄道、道路などの渡海（河）工法の一つとして、世界的に多方面に採用されてきた。

今日までに完成したものは50例を越し、施工中・計画中のものを含めると約60例に及ぶ。

沈埋工法の発展の過程において、いわゆるアメリカ方式と呼ばれる鋼殻を用いた比較的小さな断面（2車線程度）形式のものと、ヨーロッパ方式と呼ばれるコンクリートを主体とした大断面（4～6車線）形式のものがそれぞれのお国柄・立地条件のもとに併行して発展してきている。

わが国では、戦前（昭和10～19年）大阪の安治川の源平の渡しともいわれる河底トンネルが施工されたのが沈埋工法としての最初のものである。

昭和39年の東京オリンピック時に完成した、首都高速道路1号羽田線の羽田海底トンネルは、鋼殻を用いた4車線の沈埋工法として、当時注目をあびた。以来、わが国においても大阪の堂島川および道頓堀川トンネル（1967～1969年）、国鉄の多摩川海底トンネル（1968～1970年）、同じく国鉄の京浜運河、衣浦港海底トンネル、洞海湾の海底トンネル（コンベア用）など、最近になって続々と完成してきている。

また、現在施工中のものとして、本稿において紹介する東京港海底トンネル、川崎航路横断海底トンネル、扇島海底トンネル、計画中のものとして東京港内横断の鉄道用海底トンネル、東京港第二航路横断トンネル、さらには川崎木更津を結ぶ東京湾横断道路のうち主航路部を横断する大規模トンネルなど、東京湾内はまさに沈埋工法の競演である。

新しい国土開発・海洋開発に欠くべからざる道路、その渡海（河）部分の有力な工法の一つとして、今後大い

2. 沈埋工法の特徴

先にも述べたとおり、沈埋工法にはヨーロッパ方式、アメリカ方式があり、前者はドライドックでコンクリート断面を完成させたのち浮上させ曳航沈設するもので大断面に適し、後者は船台その他で鋼材によりトンネル外殻をつくり、進水後、浮上状態で鋼殻内に鉄筋コンクリートを打設することによりエレメントを完成させる方法で、両方式ともそれぞれ特徴があり、トンネルの大きさや規模に応じて、その長所を生かしうるもので、たまたま東京湾内において施工された国鉄京葉線の多摩川の沈埋トンネルは典型的なアメリカ方式で、また現在、筆者らが担当している東京港海底トンネルはヨーロッパ方式の代表的なものであり、湾内の近接地域で同時に別型の二方式が採用され施工していることは非常に興味ぶかい事実である。沈埋工法の最も特長とするところは、

① トンネル本体を造船台とかドライドックなどの大気中の好条件下でつくれるので、均一な品質のよい水密なトンネルをつくりうる、

② トンネルの敷設深さは、船舶航行に支障のない程度でよいので最小限の深さですみ、したがって、トンネルの全体長が短縮される、

③ 沈設されるトンネルエレメントの比重は小さく、むしろ浮き上がらないようにする必要があるくらいなので、浚渫されたトレンチの先行荷重よりも、はるかに軽い荷重のトンネルで置き換えられるので、地盤支持力はほとんど問題とならず、軟弱地盤にも適していること、

④ プレハブ方式であるから沈設に要する現場作業はきわめて短時間ですみ、航路障害も比較的少なく、また圧気などの必要がまったくないこと、

⑤ 曳航沈設設備を大型化することによって、安全に大断面ものトンネルが施工でき工期が短くてすみ、などの利点がある。したがって、これらの条件を満たしうる場所においては、十分にその経済効果を発揮する工法として期待してよいであろう。

しかし、道路・鉄道という公共の重要交通施設をつくる場合、とくに水底下につくられるという条件下では、

* 首都高速道路公団湾岸線建設部長

** 正会員 首都高速道路公団湾岸線建設部設計課長

永久に水密性を確保するという絶体的な必須条件を満たし得ないで、それから生ずる被害の大きさを思うとき、これらにまつわる技術的諸問題については、十分に検討されなければならない。

3. 東京港海底トンネルの工事概要

われわれの現在取り組んでいる首都高速道路湾岸線一

期工事は、この東京港海底トンネル1035mを含む2.8kmで、大井埠頭その1と13号埋立地を結ぶものである。路線そのものは東京湾環状道路の一部に属し、当面は首都高速1号羽田線と9号線とを連絡することにより1号線のバイパス神奈川―千葉の短絡路として、また着々進む埋立地の港湾施設等からの発生交通を処理し、さらには新たに今年度から着手する首都高速湾岸線二期、すなわち夢の島から荒川と旧江戸川を渡り千葉県浦安に

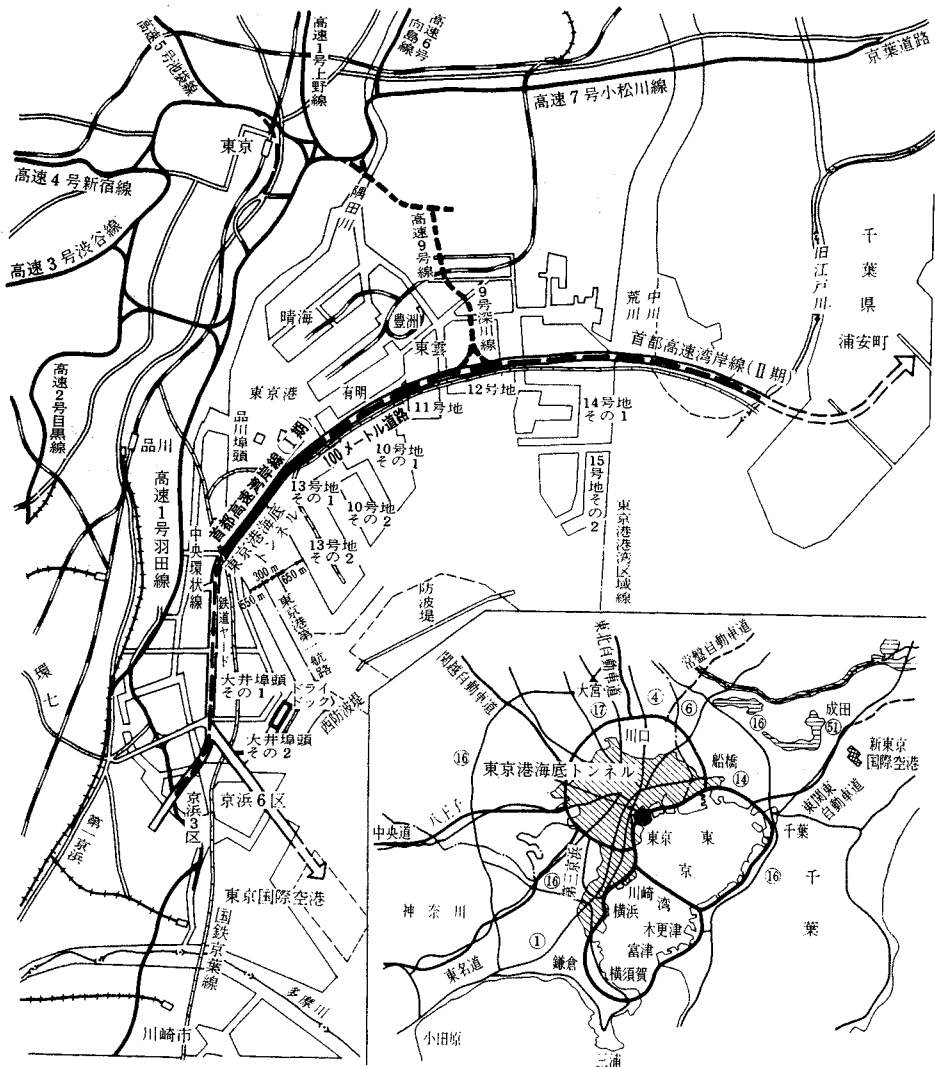


図-1 東京港海底トンネル位置図

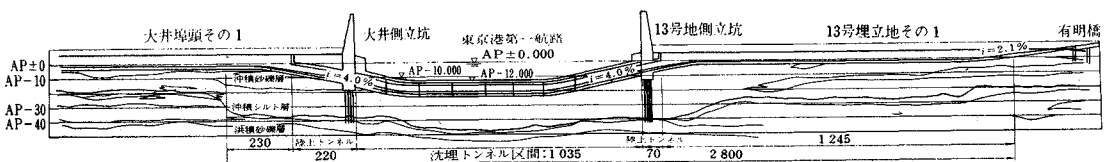


図-2 沈埋トンネル縦断面図

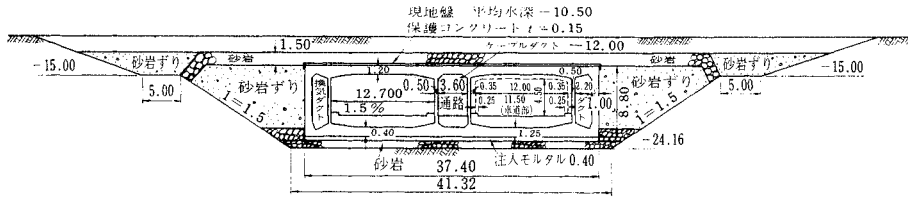


図-3 沈埋トンネル横断面

至る 6 km があり、神奈川一東京一千葉を直結し都内交通緩和と、地域発展に寄与しようとするもので早期完成が望まれているのである。目下のところ一期工事については昭和 49 年度完成、二期工事を昭和 50 年度完成を目標にしている。

一期工事 2.8 km の工費は約 250 億円で、トンネル断面は幅 37.4 m・高さ 8.8 m で一方 3 車線、中央部分は管理用通路ならびに電力・電話等との共同溝を兼用し、両側には換気用のダクトをそれぞれ 12 m² ずつ確保した。1 エLEMENT 長 1 035 m を 9 個に分割し 115 m とした。

4. 技術上の諸問題と将来の展望

発展途上の沈埋工法において、とくに大断面の沈埋トンネルの建設に際し、われわれが直面した技術的問題のうち二、三をあげると

- ① エLEMENTの製作
- ② トンネルの耐震性と継手
- ③ トンネルの基礎処理
- ④ 沈設その他

などがあげられ、われわれとしてもその規模において世界最大級の沈埋トンネルに取り組むに際し、これらの基本的問題に対して慎重に検討を重ね、湾岸道路の第一の拠点の早期完成に全力をあげている。

(1) エLEMENT製作

トンネルの建設方法が、大きなプレハブ方式である沈埋トンネルのエLEMENTの製作の巧拙は、そのトンネルの工費・工期に大きな影響を与えるものである。

したがって、前述のような二大方式があるが、そのトンネルがいずれの方式において有利であるかの検討はもちろんのこと、そのトンネルの立地条件に照らして、構造および製作方法は十分に検討されなければならない。

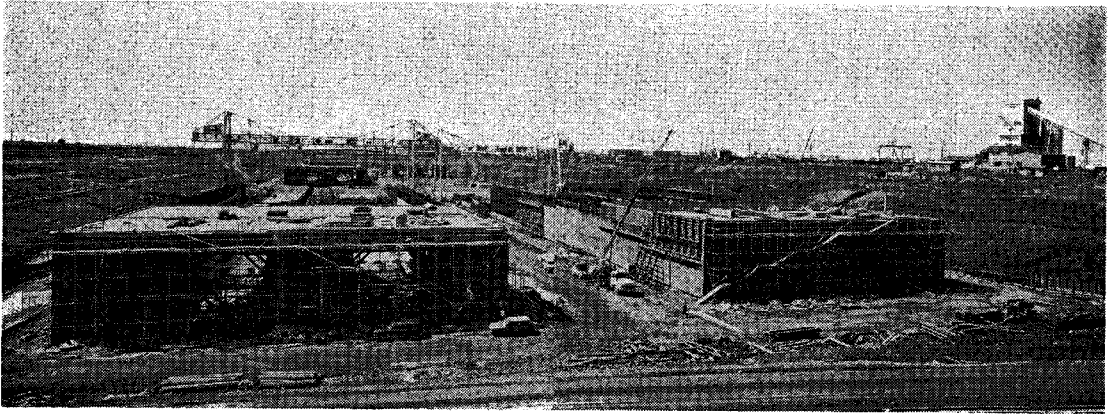
東京港の場合、断面が大きいこと、トンネル延長も 1 000 m を越え、全量 13 万 2 000 m³ の鉄筋コンクリートの打設をいかに行なうべきかは、大いに検討の余地があった。

小ドック方式（転用を考慮）、大ドック方式（一度に全ELEMENTを製作する）、鋼殻方式（船台使用）等

を検討の対象としたが、工費工期の点で全ELEMENTを同時に製作できるドック候補地の得られたことにより、決定的に現在われわれのとった方式（ドライドック方式による鉄筋コンクリート構造）が有利となった。とくにこのドックは、東京都港湾局の好意で将来の水路予定地を、しかもあらかじめ所定深さ AP-10 m まで浚渫していただいた。われわれとしては単に仮締切（二重鋼矢板締切）を施すことによってドライアップさせ、若干地盤の悪いために基礎杭の必要性、およびり面の崩壊があったが、わずか 8 億円程度ででき上がったことは、最も恵まれた条件下にあったものといえる。ドック底面積 8 万 1 000 m² に 9 個のエLEMENTを 2 列に配し、同時に 4 函を製作可能な仮設備を必要とした。すなわち、① 品質管理と 1 日に 800~1 200 m³ もの均一なコンクリートを供給するために、時間最大 150 m³ の能力をもつパッチャープラントを設置し、② コンクリートの打設および鉄筋の組立て、③ 防水鋼板（6 mm 厚を底版・側壁部に施工）の施工等のために 10 t 吊りの巻上装置を 2 台を有する門型クレーン 4 基を設置、④ さらにコンクリート打設用の移動式型枠（トラベラフォーム）を 4 セット用意することなどにより、コンクリートの打設に万全を期した。昭和 46 年 6 月に開始したELEMENT製作もこれらの仮設備を駆使して約 1 年間で全部の製作を終えることができた。

また完成したELEMENTも、ことコンクリートに関しては比重・材質などにおいて、ある程度満足すべきものが得られたと考えている。

とくに乾燥収縮や打継目のひび割れに対しては万全を期した。すなわち、115 m ものエLEMENTを縦方向に 8 分割、さらに 1 ブロックを底版、側壁、上床版と 3 段階に分け、片方から連続的に打設・一体として施工した、① 使用セメントは中庸熱セメント、② 配筋は、鉄筋間隔保持のため太径鉄筋の使用、③ 打継目のていねいな目荒しの処理など、細心の注意をもってすれば、かなりの成果を収めうるとの確信を得た。ただ、われわれも当初において考えたことであったが、この施工経験に照らして、将来もっと大断面かつ、さらに長いELEMENTを製作するにあたっては、継方向のみだけでなく若干のプレストレスを導入することによって、これらひび割れの問題をおさえられること、さらに、地震時の軸力等について



(昭和 46 年 9 月 27 日・撮影)

写真-1 製作中のエレメント

もエレメントの負担を少なくすることなどから十分考慮の余地のある問題であると思う。

(2) 耐震性と継手処理

a) 耐震性とエレメント間継手の問題

大断面でかつ延長の長い沈埋トンネルにおいて、地震地帯での設置例は少ない。しかも、軟弱地盤中の浅い位置に埋められるトンネルの耐震性は十分に検討されなければならない。

いままでの外国の例では、サンフランシスコ湾の BART TUBE (複線鉄道 5.6 km)、カナダの DEAS ISLAND TUNNEL (4 車線 630 m) などがあり、それぞれ耐震性の検討がなされている。

また、わが国でも延長の長い京葉線多摩川トンネル (480 m)、衣浦港海底トンネル (480 m) などでも耐震性について、かなり検討が加えられている。

しかし、いずれの場合も沈埋トンネル端部を除きエレメント間の中間継手は剛結合で処理されており、これは注目すべき問題であろう。

エレメントの継手については、温度変化、地盤の変位、地震時の軸力、曲げ、せん断力などをやわらげるために、伸縮可能な柔構造とすることは理論的にも構造的にもトンネルに対して負荷をへらす一つの方法である。しかし、地震の方向性、地盤の均一性等を考えると必ずしも实际的に、土とトンネルの挙動を的確につかむことはむづかしい問題である。巨大な海中構造物において土の大きな変位や塑性的な移動が継手構造に悪影響をもたらすとすると、むしろ非常に危険な構造物となってしまうおそれがある。地震のない国でのトンネルにおいては温度変化・地盤変位に対して比較的簡単なゴム材や Ω 型鋼板で可撓性継手を多用している例が多いが、地震国であるわが国のトンネルへの適用は慎重に検討されなければならない。1000 m にも及ぶトンネルを等断面力で

連続させたとしても、土の変形によるトンネル断面の変形は、コンクリートのひび割れ限界まで許容しうるので——かなりの可撓性構造物ともいえる——われわれのトンネルの試算においても決定的な欠陥となることはなかった。しかし、現段階においてわれわれもよりトンネルの安全性を高める継手構造についての比較検討を実施した。その結果、ある制限内の変形を可能にし、その限度を越えた場合は剛結合に近い性格をもつので、その場合の強度は、本体とほぼ同じ程度の強度を保持しうるのであることとした。すなわち、ある範囲とは継手の変形後も止水材であるゴムガスケットの止水機能を失うことのない程度の変形を一つの目安とする。また、この継手材は所定のばね能力をもっていて、温度変化、地盤の変形もある程度吸収し、地震時の変形にも余裕をもった条件を備えるということで、現在のところ 25 mm 程度の鋼板を Ω 形に整形した継手材によって接続することを検討している。

エレメント間の継手問題とは別に、陸上部との継手処理については地形の相違、トンネルと立坑との支持条件の相違によりこれらを剛結合することは好ましくなく、したがって、回転・移動が可能な継手が必要となる。よって、東京港の場合、軸方向に 10 cm 程度、軸直角方向 3 cm 程度移動可能な継手を用意し、軸方向の stopper は PC 鋼線、直角方向はコンクリートのせん断 key を使用している。

トンネルの耐震性については、岡本舜三博士を委員長とする沈埋トンネル研究委員会耐震分科会(首都高速道路協会委託)により検討を進めてきたが、とくに ① 地震規模の設定、② 埋設地盤の土の動的性状の究明、③ 地盤の動特性の検討、④ 動的応答計算法の検討、などの点について検討されてきた。

地震の規模については、トンネルを含む半径 50 km 以内に発生するであろう $M=7.0$ 程度の中規模地震を

対象として耐震性の検討を行なった。動的解析を行なう場合には、基盤への入力地震波形として、地震の規模、震央距離、表層地盤の厚さなどの諸条件により EL Centro の加速度記録を採用した。また、解析結果については、地表での最大加速度が EL Centro の記録の最大加速度 $0.32g$ となるようにした。

また、 $M=8$ 程度の大規模地震に対しても被害の規模を検討する必要性が認められた。この規模の地震では、震央距離 100 km 前後で最大加速度は $0.3\sim 0.35g$ と推定されている。そこで、基盤への入力地震動としては十勝沖地震（1968 年）時の青森港の記録を採用、最大加速度を $0.35g$ とした。

これに基づくトンネルの応答計算結果については、参考文献³⁾に書かれているので詳細は省略するが、この結果をみても、トンネル断面の曲げ剛性の $1/400$ の曲げ剛性をもつばねと考えてエレメント間をつないだ場合、断面力が剛結合の場合のほぼ $1/2$ に低下し、しかも、分布は平均化される傾向にあり、構造物に十分な余力をもたせることとなることがわかった。

動的計算法については現在各方面において活発に研究が進められており、実験結果との照合などもされて開発途上とはいえ、理論的には高く評価されている。

現在、土木学会の沈埋トンネル耐震設計研究委員会（委員長 岡本舜三博士）においても着々耐震設計指針の作成も急がれており、さらに東京湾横断道路のようなきたるべき大規模沈埋トンネルに対しても万全を期していることは、われわれ施工技術者にとっては心強いことである。加えて、軟弱地盤の動特性や地震の規模、耐震上好ましい構造のあり方など耐震的技術指針を得て、沈埋トンネルの可能性を拡大して活用されていくことを期待している。

（3）エレメントの基礎

沈埋工法のうちで施工的に最も重要な位置を占めるのが基礎工法である。本来この形式のトンネルでは、トレンチ掘削により除去された土の先行荷重よりも小さい荷重のトンネルエレメントによって構造物が置換されるわけで、基本的には特別な基礎を要しない。しかし、浚渫という手段において現状土を即基礎とすることは精度的にむづかしい問題である。

従来行なわれてきている工法には、大断面トンネルには砂の吹込み方式、小断面トンネルにはスクリード方式、特別な場合には杭方式などがそれぞれ採用されている。東京港の場合もこれらの工法の検討はもちろんのこと、その他の工法についても検討を加えた。砂の吹込み工法の出現によって基礎工法が非常に楽になり、大断面トンネルを可能ならしめたわけであるが、この工法はデンマ

ークの C & N 社の特許工法でもあり、技術導入の問題、砂の充てん度などの確認方法が、かなりの経験を要する。よって、われわれとしては、将来の大水深・大断面トンネルへの適用をもあわせ考慮し、別途工法の選択・開発を試みた。その中で採用に踏みきったモルタルの注入工法は、函内にあらかじめ $4\sim 9$ m 間隔に設けた注入バルブをとおして、沈設後、仮支承によって支えられたエレメントと浚渫面との間に、流動性のよいモルタルを注入することによって基礎を造成しようとするものである。使用するモルタルについては種々のものが考えられた。これには、気泡モルタル、ベントナイトモルタルなどのように流動性のよいこと、また、揚圧力の大きく発生しないもの、少なくとも現地盤以上の強度の得られるものをめどに選択する必要がある。今回はこれらについて各種小型大型の実験を繰り返し、とりあえずベントナイトモルタル（セメント使用量・ 150 kg/m^3 程度）を使用して、充てん度（目標 90% 以上）や、材料分離が少なく、かつブリージングなどが小さいことの確信を十分得て目下本番のための準備を進めている。本工法は、すべて沈設後函内から施工ができること、また、確認も 1 函あたり約 100 個ほど用意する注入バルブをとおして直接検査・確認も可能であること、水深の大小は水圧分の注入圧を調整することのみで、大水深の場合も問題がないことなどの利点を得ている。本工法は、これからの沈埋函の有力な一つの基礎工法として考えられる。

ただ、本トンネルにおいても問題となっているところであるが、新しい埋立地はその軟弱層が厚ければ厚いほど圧密沈下は避けられない。この圧密沈下が海中にも影響を及ぼすとなると、その部分の基礎については一考を要する。とくに陸上部と海中部との接点近くは、陸上部が杭などで支えられた構造物であれば、なおさらである。

この場合には、数十 cm 以上の大きい圧密沈下が予想される区間に限って、杭などを用いた特別な基礎が必要となる。東京港の場合においても、13 号地側についてはこの問題にぶつかっている。本トンネルの場合には一応杭基礎を実施し、杭頭には特殊なキャップをつけ接地面積を大きくし、キャップとエレメントの間を先述の注入モルタルによって充てんすることによって比較的容易に均等支持させようと考えられる。

東京湾内にこれから建設されるであろう沈埋函についても、同様な問題に悩まされることになるだろうが、この場合、継手問題を含めて構造物の地盤への追従しうる範囲の判断と基礎の選択は重要な要素となるものと思う。

（4）沈設、その他

沈設そのものについては、エレメントの大きさ、水深

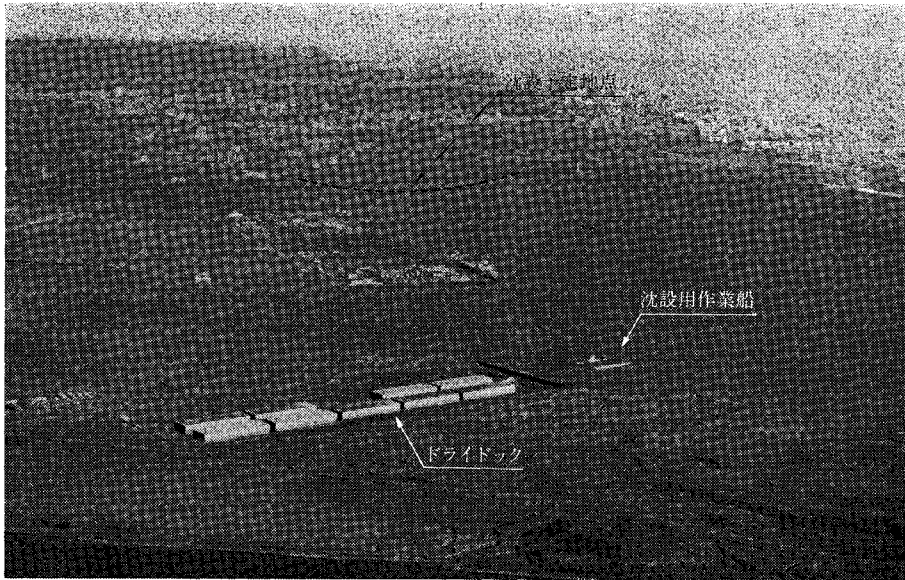


写真-2 完成したエレメントと沈設予定地点

の大小等によってそれぞれ各種の工法が考えられ、創意くふうの余地の大きいものである。われわれが採用した双胴船タイプの沈設バージによる方法は、京葉多摩川の実績をふまえ、適用に踏みきったもので、特別目新しい方法ではない。しかし、沈設作業中にはできるだけ潜水夫およびエレメント内の作業をなくし、無人化をはかって遠隔操作による工事の安全性を確保するべく努力している。

今後、大水深、軟弱地盤にも適した作業台等の開発はさらにその沈設精度をたかめ、作業を容易にすることは可能であり、規模に応じた開発がなされていくものと思う。

沈設に先きだって行なわれる現地盤の浚渫は、大水深になるほど作業船の能力等の問題とあいまって機械の選択は慎重に行なう必要がある。通常の大形浚渫船での精度はかなり荒っぽいものであり、このために基礎の処理が悩みのたねとなる。むしろ、最終仕上げ面には低揚程のポンプにて回転数を落とし、ゆっくりと浚渫させることによって現地盤を乱すことなく、不陸も ± 30 cm 程度には十分収めうることも確認されてきた。われわれとしても試行錯誤を繰り返しつつも、なんとか最善のもの

を見いだすべく努力していきたいと考えている。

5. おわりに

東京港の沈埋トンネルも、本年5月末ころに第1函の沈設を予定している。わが国初の大型沈埋トンネルの成功は、今後東京湾を中心に各方面での採用の可能性を大きくするものとして責任の重大さを痛感している。

紙面の関係で雑感にとどめたが、発展途上にあるこの工法は、これからの海洋開発、列島改造に大いに役立つものとして、いっそう諸兄のご指導を得て、本工法の広範囲の活用を期待するとともに、当面のプロジェクトの早期完成を期したいと思う。

参考文献

- 1) 土木学会：沈埋トンネル要覧，昭和46年7月。
- 2) 首都高速道路協会：東京港海底トンネル耐震分科会報告，昭和47年3月。
- 3) 田村重四郎：沈埋トンネルの耐震性，橋梁と基礎，昭和48年1月。
- 4) 上前行孝：東京港横断トンネル設計に対する考慮，土木建設，昭和46年8月。
- 5) 有江・木村・岡田：沈埋工法による東京港海底トンネル工事の現況，土木学会誌，昭和47年1月。

土木学会トンネル工学委員会編

沈埋トンネル要覧

B5・188 ページ
2000円(¥140)

土木研究所より受託した研究成果を便覧の形にとりまとめたユニークな報告書。総論，計画と調査，設計，施工の4編よりなる。