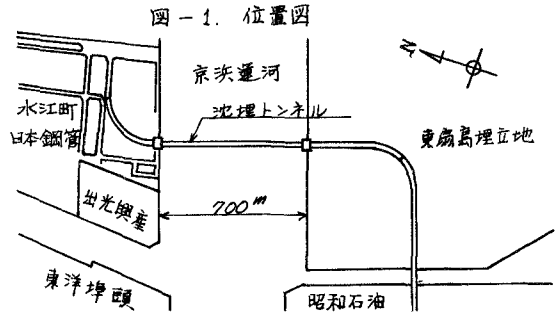


大成建設(株) 正員 ○山本昭生

1 まえがき

本トンネルは日本鋼管京浜製鉄所合理化計画に基づき建設される扇島新工場への連絡海底トンネル(車道専用)として、京浜運河を横断して建設されたもので(昭和46年10月着工~49年11月竣功)、設計から施工まで一貫してゼネコンが担当した最初の沈埋トンネルと言えよう。(図-1参照)

京浜運河は幅700m、内航路幅400mは水深K_P-12mである。こゝを航行する船舶は、1日1000~1500隻であり、これらは7時から17時に集中し、作業船、貨物船及び小型タンカーなどが大部分を占め5000トン以上の大型船舶は数隻に過ぎない。この通行船舶が工事施工計画に大きな問題となった。更に沈埋函の製作、仮置ヤードの敷地面からも制約を受けての施工計画となった。そこでこの沈埋トンネルの工事概要と2、3の問題点について述べたいと思う。



2 工法の選定

一貫道路の内、特に京浜運河の横断が問題となる。こゝを横断する方法として橋梁案、トンネル案、あるいはフェリーポートによる海上輸送案などが考えられ、比較検討した結果、(1)海上輸送は波浪の影響を受け易く、且つ、京浜運河の過密状態を更に増大する。(2)橋梁は桁下空間あるいは羽田空港からの主塔高などの制限があり、建設費が割高になる。(3)シールド・トンネルは土被りの点から取付道路延長が長く、かつ断面的にも4車線を設けるには無理があるなどの理由で、沈埋工法によった。

沈埋函は欧州式を中心とし、エレメントの製作は鋼殻を用いた米因式を採用した。これは(1)地震時に大きな抵抗力を発揮し、沈埋トンネルに靱性を与える。(2)エレメントのコンクリートにクラックなどが発生した場合、漏水防止となる。(3)エレメント製作の際コンクリート打設を海上で行うことができ、且つ外型枠として使用できる。(4)ドライドックのような大規模な設備、敷地が要らない。などの理由によるものである。

3 トンネル交通計画

連絡道路を通過する交通量及び車種の構成は、1時間当りの最大交通量700台、建設期間中は700~1000台、車種は10~20トントラック、50~100トントレーラーなどで、登坂時の最低速度はそれぞれ20km/h、10km/h、又共同溝はガス、電気、工業用水、ベルトコンベヤ(将来)用として幅5mを確保し、縦断勾配及び断面を決定した。

図-2 横断面図

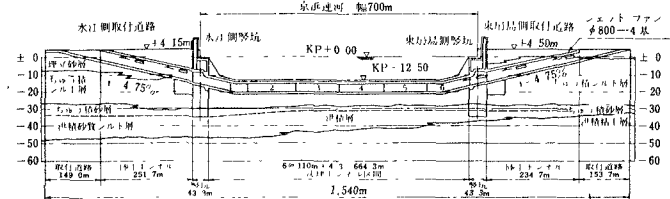
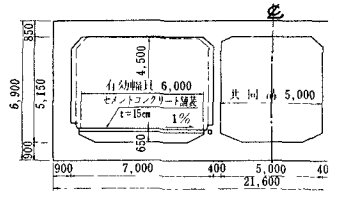


図-3 道路断面図



4 沈埋函の設計

4-1 鋼殻の設計

エレメントの断面形状はヨーロッパ形式の矩形であるが、耐震上並びに種々の理由により鋼殻を用いたアメリカ方式が採用された。常時はRC構造と考える。鋼殻の抵抗力は無視されているが、地震時(動的解析の場合)に発生する函軸方向力(push-pull)に対しては有効に働くという考えである。外殻は9mm鋼板(端部は14mm)で、これに函軸方向のリブを取り付け、この鋼板とリブは横断方向のラーメンフレーム(2mピッチ)で支持され、さらに隔壁部に函軸方向のトラスが入った構造になっている。鋼板に作用する荷重は自重の外に、コンクリート打設時のコンクリート自重、水圧および波浪圧などである。設計に当っては仮想的に使用されるので、波浪の影響を考慮しない場合は35%、考慮する場合は50%の許容応力度の割増しを行なった。函軸方向の計算は鋼殻を箱桁とし、浮力が変位に比例するので、弾性床上の有限長の梁として応力計算を行なった。これはコンクリートも函軸方向に分割して打設し、打設順序によって曲げモーメントが極端に違ってくる。打設順序は、曲げモーメント及びたわみを最小になるように試算して最適順序を決定した。たわみについては全コンクリート打設完了時の函の出来上り精度に関係してくるので、厳密な計算が要求される。それで打設が完了した部分についてはコンクリートの剛性を枚令に応じて評価し、函軸方向に変断面となる梁としての設計を行なった。

4-2 耐震の設計

沈埋トンネルは水底の比較的軟弱な地盤に浅く埋設された数キロメートルに及ぶ長大な構造物であり、一般の地上構造物と異なった動的特質をもっている。従って本トンネルにおいてもその耐震性には充分な配慮をして設計した。ここでは沈埋トンネルの地震時挙動を知るため、模型振動実験を行い、この結果地盤と沈埋トンネルとの挙動がある程度解明された。これに基づいて振動モデルを作成し、動的立場から沈埋トンネルの合理的な設計方法を開発し、計算結果に基づいた設計施工と実施した。沈埋トンネルの断面方向は従来の静的計算によく検討し、縦断方向は動的解析結果によって軸鉄筋を設計し、特に出と入のジョイント部はD29の鉄筋を560本配列した。動的耐震計算のインプットに必要な地質条件及び解析結果の応答値、応力度を示せば次の通り。

表-1 地質と速度測定結果

地質	N値	S波速度	P波速度	ポアソン比	剛性率	ヤング率	密度
埋土細砂	10~50	270 m/s	1300 m/s	0.477	1240 $\frac{kg}{cm^3}$	3660 $\frac{kg}{cm^2}$	1.7 $\frac{g}{cm^3}$
細砂	10~20	110, 140, 170 (150)	1300~1500 (1400)	0.494	383	1140	1.7
粘土質シルト	1~5	140, 170 (150)	1300~1500 (1400)	0.494	360	1080	1.6
シルト混り 粗砂	10~50	256, 270, 300 (270)	1300~1500 (1400)	0.481	1240	3670	1.7
中砂 砂れき	50~	330	1400(?)	0.471	1960	5770	1.8

表-2 トンネル断面の地震時応力度

	鉄筋コンクリートに軸力をかけたとき		鋼材のみを考えたとき	
	コンクリート断面積	コンクリート応力度	鋼材断面積	鋼材応力度
標準断面	コンクリート 469,000 ^{cm²} 鋼材(m ²) 47,000 計 516,000	ILセトリロ $\sigma_c = 17.2$ 青森 $\sigma_c = 30.2$	鋼材 $4 \times 9,135$ ^{cm²} R.R 40D22, 1,538 計 6,683	青森 $\sigma_s = 2340$ ^{kg/cm²}
ジョイント部	コンクリート 266,000 鋼材(m ²) 58,000 計 324,000	ILセトリロ $\sigma_c = 25.0$	鋼材 $4 \times 9,177$ ^{cm²} R.B 50D29, 3597 計 8367	青森 $\sigma_s = 1769$ ^{kg/cm²}
限界応力度		$\sigma_c = 30$ ^{kg/cm²}		$\sigma_s = 2600$ ^{kg/cm²}

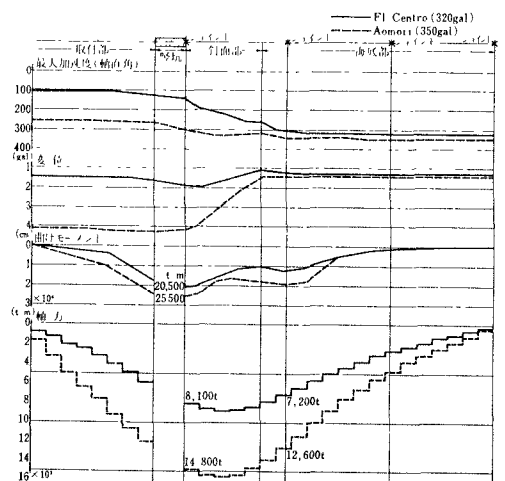
なお、地震計の設置と計測を今後の資料として得るような計画を行なった。

5 沈設方法

5-1 アライメントタワー方式

沈埋工法は我が国においてもすでに10件近い実績をもっている。従来の沈設方式はプレーシングバージ方式が多く採用されてきたが、本トンネルにおいては、改米に数多くの実績を持つデンマークのクリスチャンニールセ

図-4 動的解析による応答値



ン社の技術を導入したいわゆるアライメントタワー方式によった。この方式は沈設作業中に函内に人員を配備して、バラスト調整、引寄せジャッキ及び鉛直ジャッキ操作、函内測量等の施工が容易にできる。航路使用との関係で洋上に突出する2基のシャフトが好ましくないが、当工事で立証された様に、曳航より沈設完了までに要する時間は1日あれば充分である。従って航路の占用時間も短く、航行船舶に対する影響は非常に少ない。また、この方式による特徴の一つとして沈設時の函の安定性が非常に良いことが上げられる。沈埋函を所定の位置に収める場合、沈埋函に結合されているタワー上に操函用ウインチがあり、係留ワイヤーは海中アンカー杭と直接的に操作できるようになっている。従って、タワー上のウインチ操作は即沈埋函の位置制御となり、作業が極めて正確且つ、迅速となる。

5-2 最終ジョイント工法

最終沈埋函と既設構造物（既設沈埋函との場合も有り得る）とのジョイントは、最終ジョイントと称され、特殊な施工となる。現在まで我が国に於ては水中型枠コンクリート、又は、全断面水中コンクリート方式、あるいは最終ジョイント部の仮締切によるドライでの施工が行なわれてきたが、ここではC&N社の提案による「ジョイントパネル方式」を採用した。パネルは下パネル1枚、側パネル2枚、上パネル1枚の計4枚からなり、双方の端面外周を所定強度のゴムガスケットとパネルで閉塞し、ジョイント部の水を排除して、最終的な断面にドライで仕上げる方法である。パネル方式採用の場合、問題となるのは、最終函と既設構造物の出来型精度であり、パネルの製作は現地測量と精度よく行なう、た後になされるが、止水面上から20mm以内に収めることが必要最小条件となる。最終函沈設後の精度が前記条件を満足しない場合は、方向修正等の処置が必要となる。

6. 問題点

6-1 沈埋函の機装

本トンネルのエレメントは仮ドックで鋼殻を製作した後、機装機橋に係留しながら散内にコンクリートを打設する海上製作方式を採用したことから、エレメントの出来上り形状は沈設結合工、ひいてはトンネル全体の線形に多大な影響を及ぼすので、分割したブロックをどのような順序で打設するかが最も重要なポイントとなる。

エレメントは68ブロックに分割し、中心線を軸にして左右対称となるようにコンクリートを打設する計画を行なった。設計方針としては(1)分割数はコンクリートプラントの能力、作業性を充分考慮する。(2)コンクリート打設完了後の出来型は函軸方向のたわみについては、中心線を基準として10mm以内、バルクヘッドの鉛直度は1/1000(±2.5mm)以下とする。(3)打設時に発生する最大曲げモーメントをエレメントの持つ抵抗曲げモーメント以下にする。(4)打設済みコンクリートに許容以上の引張応力が生じないようにするなど考慮して最終的な打設順を決定した。

実際の施工結果は多少計算値と実測値に相違があり、端面精度も許容値以内に収まらないものもあったが、全体としては首尾よく完成できた。今後この方式を採用するに当たって留意すべき事項は、(1)鋼殻の骨組を設計する場合、なるべくベーススラブ内に欠損断面を作らない構造にする。(2)仮設材料の置き方、期間等に関して変位が重複しないような配慮をする。(3)途中の変形は多少あっても、コンクリート打設による曲げモーメントをできるだけ小さくし、クラックの発生と避けることを主目的とした打設順序を優先する、等が考えられるが、他工事の実績と考慮しながら更に検討、研究が必要と思われる。

6-2 基礎工法

沈埋函の基礎工法としては、現在のところ各種モルタル注入、砂利敷均し、モルタル袋、杭基礎などの工法があるが、当現場ではC&N社の特許工法である砂吹き込み工法を採用した。この工法の一層の問題点は、地震時の砂基礎の流動化対策である。ここでは種々の粒土の砂に流動化防止の嵩ばいんダーと混ぜて、室内振動実験と行ない、その混合割合(1~3%)と適当粒度の砂を決定し、現場に施工、成功裡に終わった。

今後この工法の一層の問題点は、沈埋函基礎としての有用性であるが、砂の充填度も函底天端まで密着し、

吹込み後の沈下も予定通りであることから良好と言える。流動化に対してバインダーの添加は必要不可欠であり、添加比を守れば耐震構造となり得ることは実験でも明らかにされ、現場においてもこの混合はさ程困難ではなく目的は達成され得た。経済性は、砂単価、材料費、持許料等と他工法に比してやや割高かと思われるが、今後、当機械は水深25m、函幅35m程度の函底吹込みには非常に有効であり、汎用性は十分見込まれるものと思う。浚渫精度が問題となるが、これは他工法においても同じである。施工性は注入工法に比べて大規模海上作業ということから、安全面が多るかもしれないが、函内の全ての管理が不用であるという大きなメリットを有する。

6-3 沈設精度

沈設精度は種々の条件が関係するが、主たる要素を列挙すると、(1)海象気象条件、(2)沈設方式(ワイヤーリング、吊り具及び仮支持方式)、(3)測量方法、(4)エレメントの出来型、(5)作業員相互の連絡方法などがあり、どの一つが欠けても、沈設精度に大きく影響する。本トンネルにおいては、全6エレメントの沈設において幸いにも殆んどこれらの条件が満足されたといっても過言ではない。途中第4函目に、函軸方向のずれが70mm程度生じたが、ジョイント部にジャッキをセットして方向修正を行ない、正規の軸心を通ることができた。又、最終ジョイント施工のため、最終函の方向修正と同じ方法で20mm行なった。鉛直方向についても設計目標値に対し10mm以内に沈設ができ、砂基礎の圧縮沈下は10~20mm、函内完了及び埋戻しによる基礎の沈下は20~30mmで予想上越し量により、計画高さ通りに収まった。このことは砂吹き込み工法による基礎工法は一応成功であったとも言える。

6-4 最終ジョイント排水時のブロッキング方法

最終ジョイント排水時のブロッキングは既設函の止水プレートとグリッパジョイント鉄筋で行なった。

排水時点では既にNO4エレメントの後端まで函両側の埋戻しも終了していたのでNO3~4及びそれ以前のジョイント部では底面摩擦と埋戻土の側面抵抗で引張力は働かないものとして、NO4・5及びNO5~6の両ジョイントには1部H鋼にて補強し、更に排水時の実応力を測定して、その応力分だけH鋼にて補強した。

当初の計画ではNO6と堅坑の間でブロックする設計であったが、水中作業で数ミリオーダーの移動をブロックすることは非常な困難と危険を伴うものであり、前述のような方法を採用したが、これも問題なく施工できたものと考えている。

7 結び

本トンネル工事でも無事、昭和49年11月に各方面の御支援、御指導により竣工の運びとなった。

しかし今後も、地震時の動的解析の確立、深度25m以深の基礎工法の開発及び浮上コンクリート打設時の端面精度、軸方向変形の施工管理、エレメント製作精度に応じた沈設方法など研究を重ねる必要があると思われる。ここに、本報告がその一助になれば幸いである。

参考文献、日本鋼管技報NO58 斎藤 彰 他等「扇島連絡海底トンネル」