

尼崎港閘門改良の計画と設計

運輸省第三港湾建設局 正 会 員 柳 生 忠 彦
同 上 藤 原 辰 彦

1. はじめに

尼崎市は、大阪湾の奥部にあるため、台風時の気圧低下による海面上昇に加えて、風波の「吹き寄せ」による高潮を過去に多く経験している。また、同市の南部臨海部は「ゼロメートル地帯」であるなどの悪条件が重なって、高潮被害を受けやすい地区である。中でも昭和25年に阪神地方を襲ったジェーン台風は、当地域に大きな被害をもたらした。この惨禍を契機に高潮に対する恒久的な対策として当地域を囲む輪中式防潮堤が提案された。しかし、輪中式防潮堤では当地域で河川、運河を利用して行われている港湾荷役に支障をきたすこと、また、道路や橋梁の嵩上げを必要とするなどの問題点のあることが指摘された。このため、沿岸部前面に防潮・治水システムを備えた一本の防潮堤を建設する案がこれに替わって採用された。この案は輪中式に比べ防潮堤の延長が短く経済的であり、堤内の諸施設は現状のままで利用できるという利点がある。

この案に従って、尼崎市南部臨海地帯の工業生産活動と市民生活を守るために第1線の防潮ラインとして閘門式防潮堤が築堤された。第1線の防潮ラインの中でも最重要施設である尼崎閘門(図-1参照)については、第一閘門(東側)が昭和29年、第二閘門(西側)が昭和39年に完成している。この施設も完成後すでに長年月を経過しているため施設の老朽化が著しく、また一連の海岸保全施設について所要の耐震強度を確保する上からも早急に改良することが必要となってきた。

本稿は、尼崎閘門改良における改良計画及び設計について述べるものである。

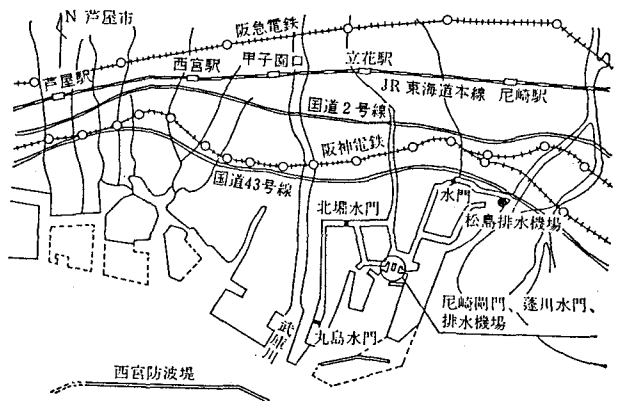


図-1 位置図

2. 改良計画

1) 尼崎閘門の現況

現閘門の施設は、図-2に示すように前後の扉室(鉄筋コンクリート構造)、セクタゲート(鋼製)及びその他の護岸(鋼矢板式構造)からできている。セクタゲートの開閉部の基礎となる扉室は、尼崎市の激しい地盤沈下の影響を受け、構造物全体が傾斜した状態になっている。また、護岸についても鋼矢板が腐食し、構造上必要な断面を確保できていない箇所もある。このため、現閘門に地震力等の大きな外力が作用した場合は施設全体の安定性が損なわれる恐れのある状態にある。

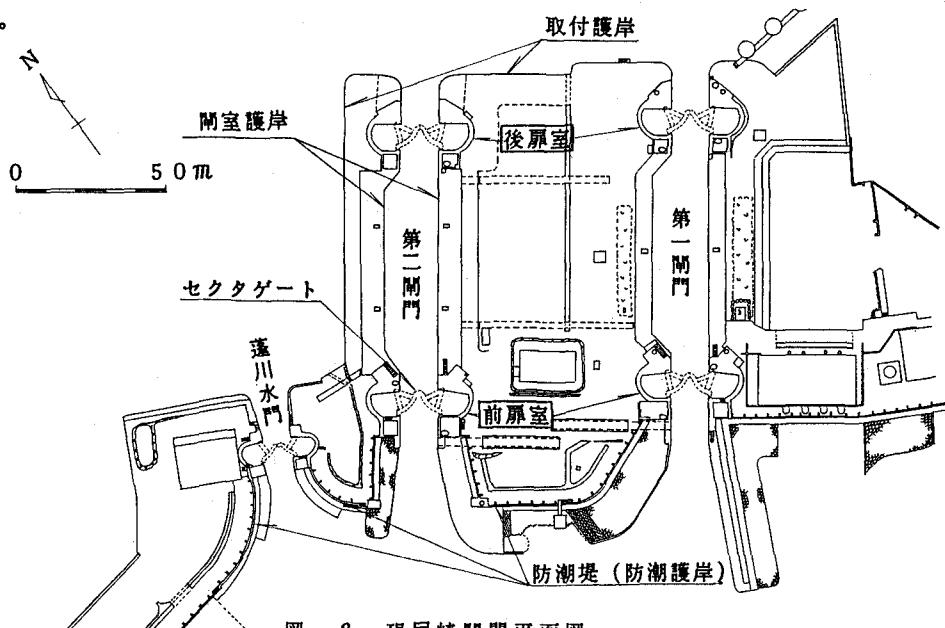


図-2 現尼崎閘門平面図

2) 改良方針

尼崎閘門改良にあたっての基本方針は以下のとおりである。

- ① 改良工事中も既設閘門の安定及び船舶の通行を確保すること。
- ② 改良工事中も第1線防潮ラインを確保すること。
- ③ 堤内水域での船舶航行を確保するため、工事用水域を一定の領域におさえること。

3) 改良規模及び位置

閘門改良の規模は、閘門を利用する対象船舶の諸元及び堤内の河川管理上から必要とされる通水能力により決定された。現在、閘門を利用している最大級の船舶は499t型(G.T)であり、将来も堤内にこれ以上の船型を対象とした接岸施設の計画がないことから、対象船舶は新測度法を適用した499t型(G.T)とした。従って、閘門改良の規模は、対象船舶及び通水能力から表-1に示すとおりとした。なお、門扉の形式については、セクタゲート、スライドゲート、マイタゲート、ラジアルゲート等があるが、動力の大きさ、操作性、船舶通行等に対する安全性等を検討し、既設と同じ形式であるセクタゲートとした。

新しい閘門の位置として、現位置案、前出案、背後案の3案を検討したが、前出案、背後案は堤内又は堤外において船舶の回頭水域が確保できない等の問題があるため、現位置において閘門を使用しながら改良する案を採用することとなった。

表-1 新設閘門の諸元

閘門諸元	決 定 値	概 略 参 考 図
閘門有効長	90m ----- 船長+余裕	
閘門幅員	17m ----- 船幅+余裕	
敷 居 高	O.P.-5.5m ----- 有効水深	

4) 改良の施工法

前述した改良方針、改良規模及び位置を踏まえ、改良の施工法としては、仮締切工法(ドライワーク工法)、水中施工法、築島工法が検討の対象となった。検討の結果、扉室の構造は遮水性の高いゲートを取付けるため高い施工精度を確保する必要があること、現閘門付近の水域が狭いため工事中の占有水域も最小限に抑える必要があること等により、仮締切によるドライワーク工法で行うこととした。

仮締切工法の種類としては、土堰堤式、二重矢板式、セル式等がある。仮締切堤の選定にあたっては、施工性、遮水性、安全性などのほか扉室構造物の大きさや隣接構造物への影響等を考慮した検討を行った。その結果、限られた場所で施工できること、施工が比較的容易であること等により二重矢板式仮締切堤を採用することとした。

閘門改良工事の施工図は図-3に示すとおりである。まず、第1期工事として、仮締切堤を施工し堤内をドライにした後に新設の第二閘門を築造する。第1期工事中の船舶の通行は現第一、第二閘門を使用して行われることになる。第1期工事が完了し新設の第二閘門が使用可能になったときは、現第一閘門と新設の第二閘門を使用し、第1期工事で使用した仮締切堤の矢板を第2期工事の仮締切堤に転用して新設の第一閘門を施工する。全工事が完成後は新設閘

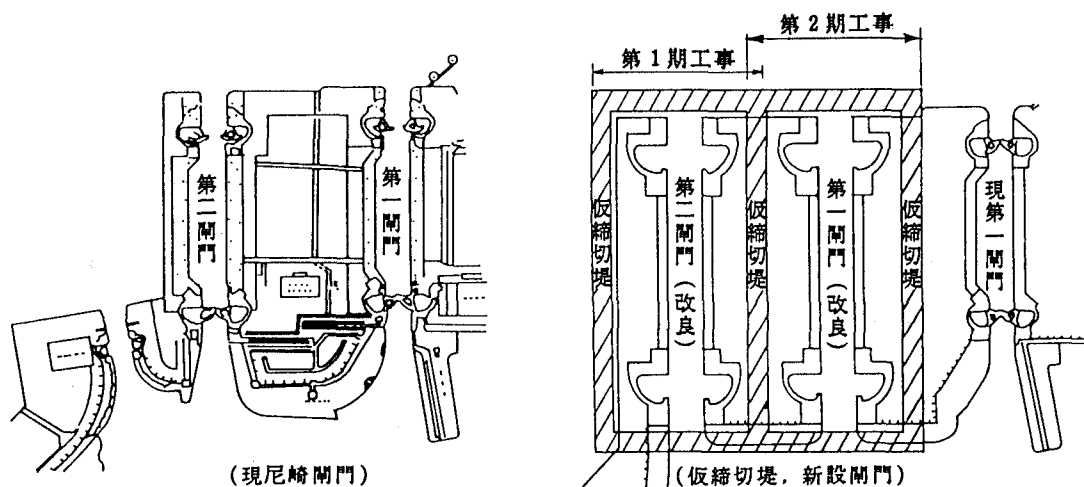


図-3 閘門改良施工図

門の2門を使用し現第一閘門は埋殺しすることになる。

3. 仮締切堤の設計

1) 地盤改良工法

閘門改良付近の現地盤には図-4に示すとおり、海底面より0.P-22.5m~-24.5mまで軟弱な沖積粘土が堆積している。仮締切堤の安定上この粘土層の強度が不足するため地盤改良を行う必要がある。地盤改良工法としては、床掘置換工法、サンドコンパクションパイル工法(SCP工法)、深層混合処理工法(DM工法)等がある。これらのうち床掘置換工法は、床掘深度が大きくなるため隣接する構造物の安定が確保できなくなるので不採用とした。DM工法は、通常、改良体を一体構造物として設計するが、本構造のような場合は二重矢板壁により改良体が仕切られることになるので設計法上に課題がある。従って、地盤改良工法として盛上り土が発生すること等の欠点があるが、DM工法のような問題点のないSCP工法(置換率70%)を採用することとした。

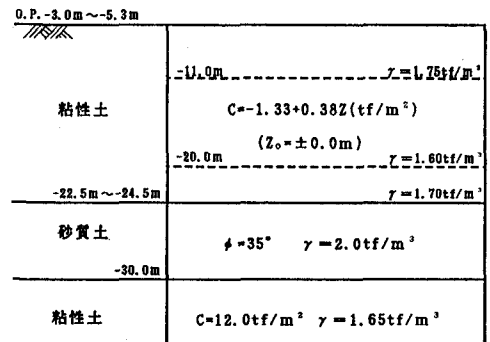


図-4 土質条件図

2) 水平載荷試験

二重矢板式構造物の設計については、従来、矢板式構造物とセル式構造物の設計法を援用する「慣用法」が用いられてきた。ただしこの方法は、二重矢板壁頭部の拘束条件が自由の場合にのみ適用できるものである。海上での締切工事においては、堤外側から大きな静水圧が作用することになり、頭部自由の二重矢板では十分な強度が得られないことがある。このため、本締切堤では二重矢板壁頭部を剛結(頭部拘束条件を固定)した構造物とすることによって強度を増す案を採用することとした。頭部剛結二重矢板の設計法としては、「沢口の方法」¹⁾と「大堀らによる方法」²⁾が提案されている。両設計法とも、二重矢板式構造物を矢板壁と中詰砂の複合構造物として扱っており、また、頭部拘束条件も自由と固定の両方に適用できるものである。しかしながら、これら設計法を適用して締切堤を設計するにあたっては以下のような問題点がある。

- ① 設計法は、実験室レベルではその妥当性が確認されているが、現地に適用された事例がないこと。
- ② 原地盤の軟弱地盤をSCP工法により改良した複合地盤における横方向地盤反力係数の評価については確立された手法がないこと。

これらの問題点を解決するため現地の二重矢板式仮締切堤の一部を利用して水平載荷試験を行った。

3) 試験解析及び設計法

水平載荷試験による矢板の変位、曲げモーメントから横方向地盤反力係数(k_0)を逆算すると、 $k_0 = 0.045 \cdot N$ (N はSCP改良地盤の砂杭中心のN値)と推定できることが明らかとなった。なお、 k_0 値は地表面変位(y_0)が1cmに対応するものである。また地表面変位が大きい場合には k_0 値はひずみ依存性を示し、横方向地盤反力係数は $k_h = k_0 \cdot y_0^{-0.5}$ となることが明らかとなった。更に大堀らによる方法では、地表面から $1/\beta$ 以深の地盤について所謂二層系地盤として扱うと地中部での変位、曲げモーメントの載荷試験による分布状況をよく説明することができた。図-5と図-6は試験計測値と大堀らによる方法の変位、曲げモーメント分布を示したものであり、横方向地盤反力係数については二層系として評価し解析したものである。

今回の試験解析より両設計法は、解析法として実用の範囲の値を与えるものであることが明らかとなったが、地中部の変位、曲げモーメント分布については大堀らによる方法の方が計測値とよく一致している。両設計法の特徴を表-2に示しているが、適用に当たってはその特徴に応じて使

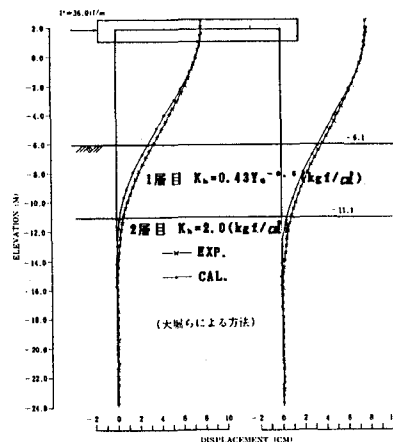


図-5 変位分布図

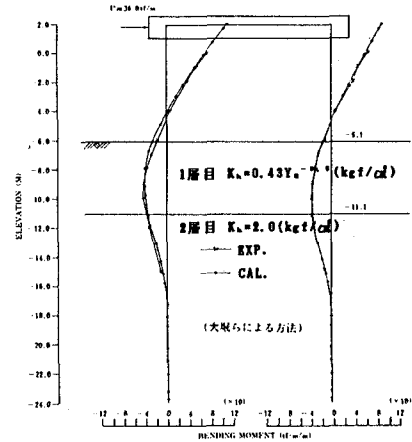


図-6 曲げモーメント分布図

表－2 二重矢板壁の解析方法

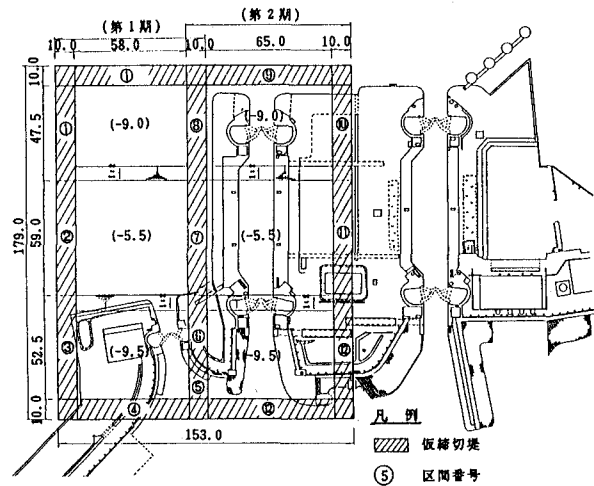
	沢口の方法	大堀らによる方法
モデルの基本的考え方	二重矢板壁の地盤上部を矢板と中詰砂の複合構造物とみなし、中詰砂を一様な弾性体と仮定して構造物の微小なスライスの力のつり合い条件及び変形特性から力学的挙動を解析している。	「沢口の方法」を基本としているが、中詰砂の圧縮特性を考慮し、さらに中詰砂及び地盤の弾塑性の性質を取り入れた力学的挙動解析モデルである。表層部胃心の地盤評価が可能であり、地層に応じた多層系評価も可能。
地盤の評価	海底面下1/βのところを仮想固定点としているため、それより深い地盤は評価されない。	表層部以深の地盤評価が可能であり、地層に応じた多層系評価も可能である。
中詰時の計算	中詰後を初期状態としているため「大堀らによる方法」や既存の矢板壁の設計法により別途計算する必要がある。	中詰時の部材の挙動を計算しており、水平載荷時と総合して実際の挙動を把握するモデルとなっている。
矢板の挙動及び応力	両矢板は同一挙動するものとしており、応力状態も同一である。	それぞれの矢板の挙動、応力状態を算定する。
実測値との整合性	海底面上の変位・曲げモーメント分布については、ほぼ、十分な精度を有しているが、モデルの性格上地中部には大きな固定端モーメントが計算される。	変位・曲げモーメント分布とも十分な精度を有している。
計算手段	パソコンで可能。	大型コンピューターが必要。
利用手段	手軽に計算できるので断面寸法を決定する迄の概略設計に有用である。	詳細設計の段階で使用にたえる。

い分けることが必要である。実際の仮締切堤では頭部水平載荷試験の場合と違って、水圧、土圧等の荷重の中心位置が下り、かつ現地の地盤は深度に応じて強度が増加性状を示している。本仮締切堤の設計にあたっては、現地地盤の強度が深さと共に増大するために地盤を2層系として評価する必要があること、地中部における変位、曲げモーメントの推定が可能であること等により、大堀らによる方法を用いることとした。

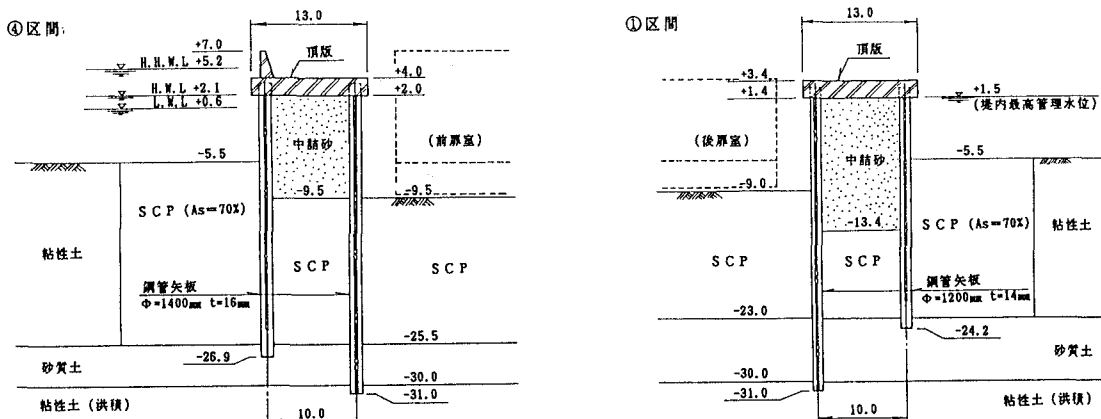
4) 仮締切堤の設計

仮締切堤の設計法は、前述したとおり水平載荷試験の解析結果より大堀らによる方法とした。仮締切堤の堤内は閘門の扉室躯体及び閘室護岸を築造するため図－7に示すように前扉室は-9.5m、後扉室は-9.0m、更に扉室間の閘室については-5.5mに床掘し、堤内水位についても床掘深度以上に下げることとしている。このような堤内条件、当該地盤の土質条件等の設計条件及び施工条件を踏まえ図－7に示す区間設定を行い、各区間の仮締切堤断面を設定した。各区間で設定した断面は、それぞれ断面剛性が異なっており各区間の境界で変位等の急激な変化を緩和するため、境界の剛性が小さいほうの断面に隔壁を設けることとした。

図－8は、前扉室側、後扉室側の仮締切堤断面を示す。仮締切堤の鋼管矢板の根入長は砂質土層の上層に打ち込めば支持力上は十分である。ただし、堤内をドライにした場合については有限要素法(FEM)による浸透流解析を行った結果によるとSCP砂杭を介して多量の浸透水が発生することが判明した。この浸透水が長期間続くとパイピング等の危険な状態になることが予想される。このため鋼管矢板は砂質土層下の不透水層である洪積粘土層まで打ち込むこととした。なお、堤外からの水圧荷重を堤内側矢板に作用させた方が仮締切堤の断面上有利となるため堤内側の鋼管矢板を洪積粘土層まで打ち込むこととした。



図－7 仮締切堤区間設定図



図－8 仮締切堤断面図

4. 扉室の設計

1) 基礎形式

原地盤は軟弱地盤であるため、前述の3.1)地盤改良工法と同様にSCP工法により地盤改良を行うこととした。

従来、閘門あるいは水門等の建設において地盤が軟弱で支持力が不足する場合は、杭基礎、オープンケーソン基礎、ニューマチックケーソン基礎等が状況に応じて使用されてきた。今回の閘門改良で最も重要な構造物である扉室躯体には、ゲート、機械設備が設置されることになっており、大きな重量がSCP改良地盤上に載ることになる。このため、扉室全体重量に対しSCP改良地盤だけでは不等沈下に対処できないこと、地震時の水平力に対し滑動の安定を計れないことにより基礎形式は杭基礎工法によることとした。

2) 扉室の基本設計

扉室躯体は、図-9に示す底板、前柱、親柱、レセス側壁からできている。扉室躯体の形状寸法は、ゲート及び機械類の配置より水路方向の長さを前扉室は35m、後扉室は31mとした。また水路直角方向の幅はレセス寸法より前、後扉室ともに48m強とした。

扉室躯体に作用する外力状態の組合せとして水位(外水位、内水位)、波浪、風速、水平震度(左右、内外方向)等の条件から26ケースを想定して基本設計を行った。

①設計の基本的な考え方

扉室躯体の底板は杭で支持されている。底板の配筋設計するにあたっては底板を杭列中心から一定の有効幅を持ち、杭をバネと仮定した弾性支承上の梁として構造解析を行った(図-10 構造解析モデル参照)。ここで、バネ定数は、杭の鉛直方向のバネ定数の値を用いるものとした。側壁、親柱等に作用する水平力については、底板中立軸上に作用するモーメントと水平力に転換して作用させた。

扉室躯体に作用する外力は三次元的であり、応力の伝達方向や変形状態が従来の設計法では厳密な予測はできない。特に構造が曲面形状をしていたり、開口部を持っている場合は、これらを適切に把握することが難しい。最近では、このような問題の解析にFEMが用いられており、その精度も信頼できるものとなっている。ここでは、FEMを用いて扉室躯体の全体構造を解析することにより、従来の設計法を補完し、より安全な設計を行うこととした。杭基礎は、上部荷重を完全に支持し、不等沈下を起こさないよう地盤に伝達する構造とした。杭の断面力は、上部荷重が最も支配的になる状態での応力度、支持力及び変位置を検討して決定した。なお、杭の挙動解析は、港研方式で検討し、チャンの方法は参考とした。

②底板厚及び基礎杭

底板厚は、版厚が薄いほど経済的になるが、扉室躯体には前柱、親柱、レセス側壁ゲートが載る構造となっているため底板の弾性沈下によるたわみを小さくする必要があること及び他の事例などを考慮して3.5m(後扉室3.0m)とした。

基礎杭は鋼管杭とし、杭径は経済性を考慮して900mm($t=12\text{mm}$)とした。本数については122本(後扉室82本)が必要となった。また、杭の配置については正方形配置を基本に扉室両側の柱部を重点的に図-11のように配置した。

3) 扉室の構造解析

①底板

底板は、杭を支点とした弾性支承上の梁(図-10参照)としてモデル化した。ただし、水路直角方向のレセス部と親

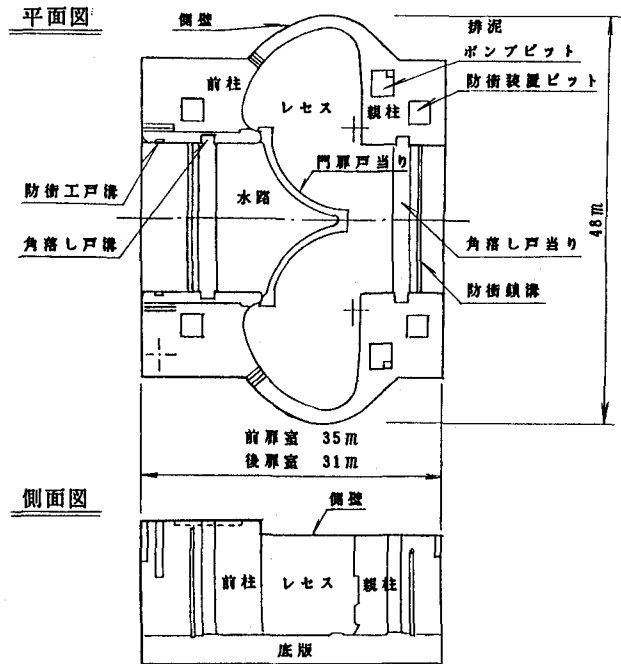


図-9 扉室躯体構造図

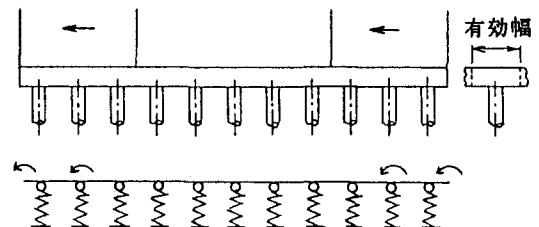


図-10 構造解析モデル

柱部ではFEM解析結果のほうが大きい曲げモーメントとなっており、この部分についてはFEM解析値を採用することとした。

②前柱、親柱

前柱及び親柱の構造は図-12に示すように2層の箱型形状をしており、構造解析をする場合のモデルとしては、各壁を四辺固定版、2層のラーメン構造、三次元立体構造の3方法が考えられる。この中で2層のラーメン構造の場合は、開口部のモデル化が難しいことと端部の固定条件が無視されることにより大きな部材力が発生する結果を与えるという問題がある。従って、基本的には四辺固定版として設計し、全体系FEM解析で版の固定端モーメントと逆方向の曲げモーメントが発生している場合はその曲げモーメントも考慮することとした。

③レセス処理

レセス側壁は、図-13に示すように鉛直方向に変断面形状をしており、かつ曲面を持つシエル構造である。従って、部材計算モデルとしては、三次元シエル構造として解析(部分系FEM解析 図-13参照)し、全体系FEM解析(図-14参照)と比較検討して断面を決定した。その結果、鉛直方向の力に対しては全体系FEM解析、水平方向の力に対しては部分系FEM解析が大きな応力を与えており、各々の値で断面設計を行った。

④全体構造解析

対象とする扉室は、複雑な構造形状をしており、また作用する外力の種類も多く外力の相互作用も複雑である。扉室構造は水路中心線に対して対称形であるが、作用外力は対称でないため、図-14に示すように扉室全体をモデル化した。モデルを構成する要素は、部材力を求めるため後処理が容易なシエル要素を主体とした。また親柱のセクタゲート取付部は、マス・コンクリートに近い状態であることからソリッド要素を用いた。更に杭基礎の支持条件については、杭頭固定とし鉛直・水平方向ともバネ支持とすることでモデル化した。なお、FEM全体解析は前扉室を対象として行った。

全体構造解析の結果、構造物に作用する荷重が各構造部材に分散され、扉室構造物全体として外力の作用に抵抗することが明らかとなった。また局部的に極端な応力の発生している部材はなく、構造物として力学的に無理のない構造をしていることが確認された。

5. おわりに

仮締切堤は扉室躯体を安全に気中施工するために非常に重要な構造物である。その設計をするに当たっては実構造での載荷試験を行って安全性の確認を行った。しかし、工事区域の地盤は必ずしも一様でなく、SCP地盤改良もその品質にばらつきがあることが想定される。従って仮締切堤の数ヶ所において工事中の堤体の挙動を連続的に観測し全工事期間にわたる安全確認を慎重に行うことにしている。これら観測結果は第2期工事の安全性向上のために活用されることは勿論のこと、二重矢板式仮締切堤の設計法の検証にも有効に活用されるものと期待される。

〔参考文献〕

- 1) Sawaguti M: Lateral Behavior of a Double Sheet Pile Wall Structure, Journal of the Japanese Society of Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 14, No.1, 1974
- 2) 大堀晃一・莊司喜博・高橋邦夫・上田寛・原道彦・川井豊・塩田啓介: 二重矢板式構造物の力学特性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 1984

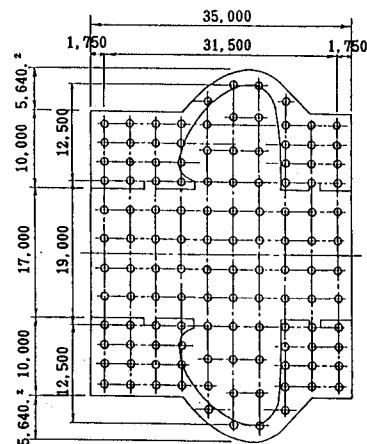


図-11 基礎杭配置図(前扉室)

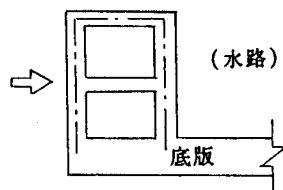


図-12 前柱及び親柱構造図

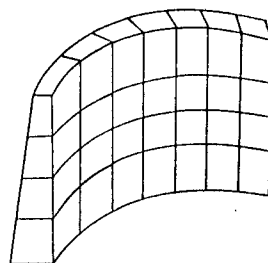


図-13 レセス側壁構造モデル

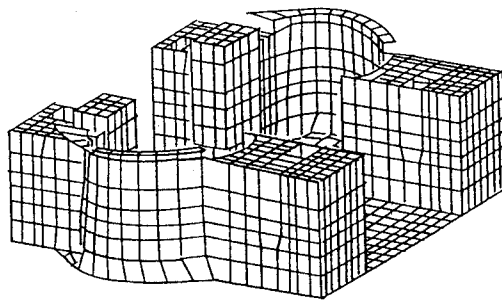


図-14 FEM全体解析モデル図