

I-20

白鳥大橋下部工の設計について

北海道開発局室蘭開発建設部 本田 幸一
 北海道開発局室蘭開発建設部 正員 和田 忠幸
 北海道開発局室蘭開発建設部 高橋 守人

1. はじめに

白鳥大橋は、室蘭港湾口部の海上に架設される中央径間720m・橋長 1380mの東京以北最大の長大吊橋である。橋梁一般図を図-1に示す。昭和56年度の事業化後、気象・地質等の現地調査及び設計を経て、昭和60年に海上部栈橋工事に着手し、平成元年度には陣屋・祝津アンカレイジ(1A・6A)下部工事及び陣屋側・祝津側の海上部主塔(3P・4P)の地中連続壁工事を実施しており、平成10年頃の完成が予定されている。

本稿では、主塔基礎・アンカレイジ基礎・側塔基礎の設計概要について報告する。

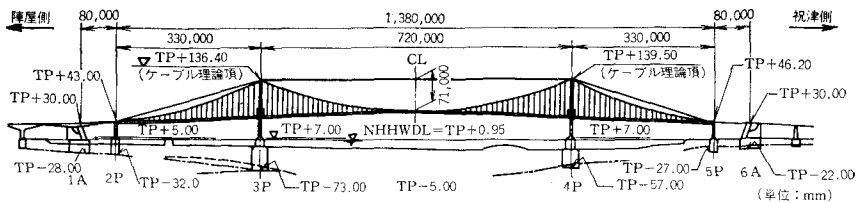


図-1 橋梁一般図

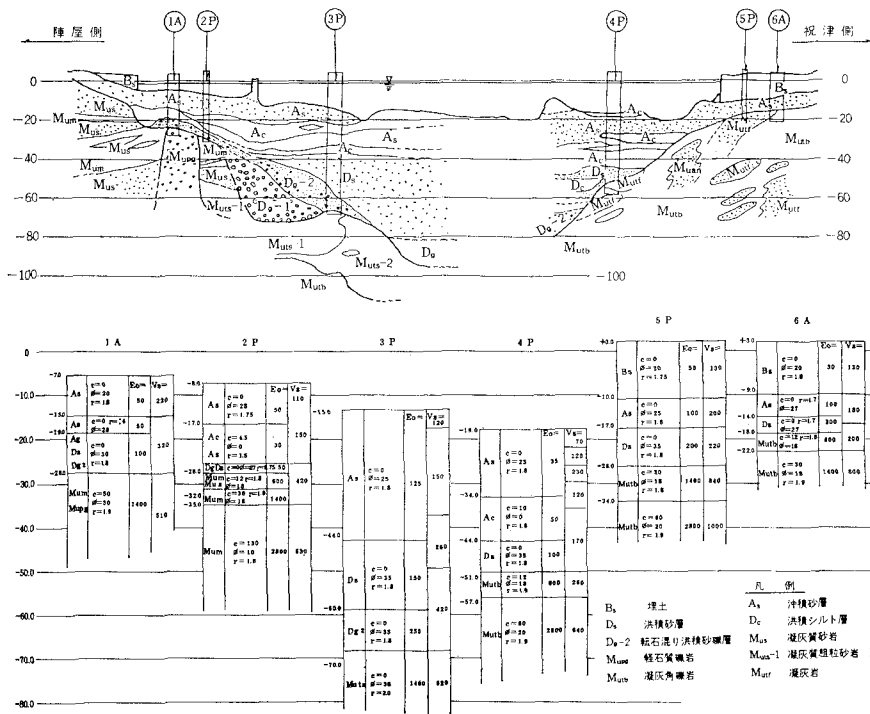


図-2 地質図・地盤モデル図

Design of Foundation of Hakuchō Bay Bridge
 by Kohichi HONDA, Tadayuki WADA and Morito TAKAHASHI

2. 設計条件

白鳥大橋架橋地点の地質は、第4紀洪積層・沖積層の下に新第3紀凝灰質岩盤が分布し、航路中央に向かって岩盤線が傾斜している。基礎は新第3紀層の岩盤に支持させることとし図-3に示す支持力の検討を行った。地質図及び地盤モデル図は、図-2に示すとおりである。

耐震設計は静的設計であるが、安定計算に先立ち上部工をタワー及びアンカレイジ躯体までモデル化した応答スペクトル法による動的解析を行った。その結果、各基礎ごとに静的設計計算に用いる地震時の荷重条件を定めた。

動的解析に用いる設計加速度は、室蘭港の強震計（SMAC）データを用いて応答解析及び震源距離とマグニチュードから室蘭港基盤入射加速度予測式を作成し、白鳥大橋設計基盤加速度として 100 年再現期待値相当の 120 gal を設定した。設計基盤加速度検討のフローは、図-4 に示すとおりである。

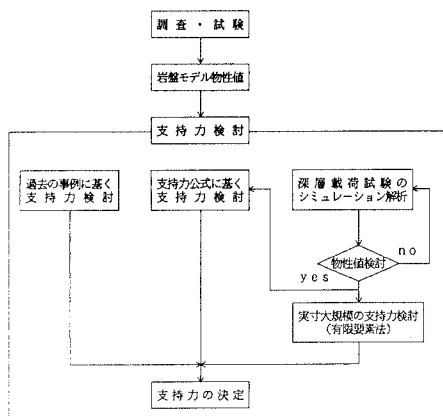


図-3 支持力検討のフロー

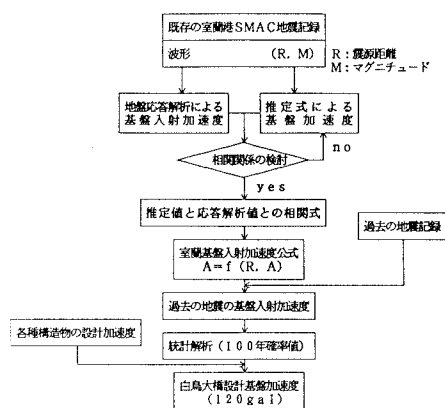


図-4 設計基盤加速度検討のフロー

3. 主塔基礎

白鳥大橋主塔基礎の支持層となる岩盤の位置は非常に深く、3PでTP-73m、4PでTP-57mである。

主塔基礎の施工方法は、築島後、地中連続壁を土留め止水壁として外径 37m の円筒状に構築しその内部をドライ掘削して、剛体基礎を建上げる、「地中連続壁併用逆巻剛体基礎工法」を採用した。主塔基礎の構造は、図-5 に示すとおりである。

地中連続壁工法は、専用の掘削機を用いベントナイトを主体とした特殊な安定液で掘削溝を満たし溝壁面の崩壊を防止しながら各ガットを掘削し、掘削完了後に予め組み立てた籠状の鉄筋を溝内に建込み、トレミー工法で各エレメントに水中コンクリート打設を行う作業を繰り返して連続した構造体を構築する工法である。ここに、ガットとは一回当たりの掘削単位で主塔基礎では2.4m×1.5mの矩形断面であり、エレメントとは地中連続壁の一施工単位となるコンクリート1打設当たりの単位である。

地中連続壁構造は図-6に示すとおりである。エレメント間の継手は3Pと4Pで異なるが、地中連続壁は1エレメントが3ガットで構成される先行エレメントと1エレメントが1ガットで構成される後行エレメントの組合せで施工されている。

主塔基礎の地中連続壁は仮設構造物として位置づけたが、閉合後のドライ掘削時に長期にわたり大深度まで作業員が内部に入ることから、施工中の安全性を充分確保できる設計とした。

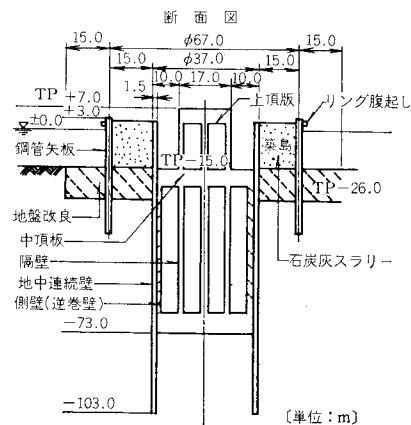


圖-5 主塔基礎構造圖(3P)

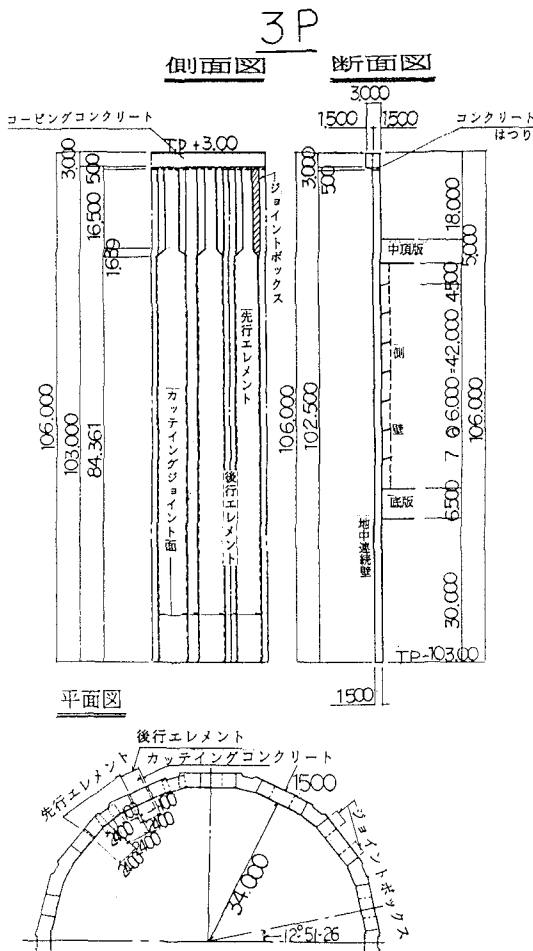


図-6 地中連続壁構造図

地中連続壁の解析モデルは図-7に示す円筒シェルFEMモデルを用いた。地中連続壁内部土の各掘削段階に応じ支保工兼用の本体側壁が逆巻で構築されるので、次の点を考慮した。

- ①地中連続壁の平面形状が多角形状であること。
- ②各掘削段階に応じたモデルであること。
- ③常時応力は各掘削段階で逐次累加すること。
- ④地中連続壁と逆巻壁の結合条件を重ね梁と合成梁の場合について考慮すること。

設計で考慮した荷重及び荷重の組合せは、表-1・2、図-8に示すとおりである。

地中連続壁の厚さは、過去の施工実績から1.5mとした。側壁厚と掘削ステップを変化させて比較検討を行った結果、側壁厚2.0m、掘削ステップ6.0mとした。地中連続壁の厚さは1.5mであるが、設計上の有効断面は施工誤差によるエレメント間のズレを考慮して厚さ1.4mとした。

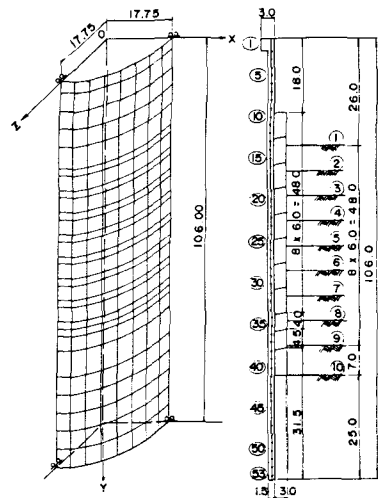


図-7 円筒シェルとした
FEMモデル (3P)

解析結果と構造の特徴は、次のとおりである。

- ①3Pの円周方向コンクリート圧縮応力度が、常時に173kgf/cm²発生することから、設計基準強度370kgf/cm²（水中強度470kgf/cm²）の高強度コンクリートとした。
- ②エレメント間の継手は、地質条件・経済性を検討した結果、3Pでカッティング継手、4Pで止水板継手を採用した。
- ③地中連続壁上部には、地震時偏土圧により円周方向曲げ引っ張り応力が働くため、水平方向の重ね継手を設計した。
- ④地中連続壁最上部には、各エレメントを連結し水平方向の合成を高めるため、3.0m×3.0mの矩形断面のコーピングコンクリートを設けることとした。
- ⑤地中連続壁の本体基礎底面以深の根入長は、ボーリングやヒービングを生じないこと、地中連続壁全体の安定を損なわないこと等を考慮し、3Pで30m、4Pで10mとなった。

主塔基礎本体の設計フローを、図-9に示す。設計条件の特徴は次のとおりである。

- ①水平震度は設計地盤面より上で0.3とし、設計地盤面より下では地盤応答解析結果から求めた変位の相対差を地盤バネを介して静的に載荷した。
- ②水平力に対する主塔基礎側面の抵抗幅は、仮設用の地中連続壁の全幅を友好と考えた。
- ③基礎躯体が円柱であることから、水平方向地盤反力係数は側面のせん断バネの分担率を考慮して40%割増した。
- ④側壁は逆巻で施工する時に生じる残留応力を考慮した。
- ⑤側壁と隔壁には施工時期に差が有るため乾燥収縮を考慮した。

基礎本体の解析結果は、次のとおりである。

- ①動的解析で主塔基礎と上部工に共振現象が見られたため、主塔をトラス形式からラーメン形式にして上部工の周期を長くするとともに、主塔基礎の海底面から上の形状を円形から小判状にすることで基礎上部の質量を低減して基礎の周期を短くし、地震力による応答値を低減した。
- ②側壁は、施工時地震荷重で決定される。
- ④底版は、底版打設後にディープウェルの効果が低下した時の揚圧力で決定された。

表-1 荷 重

荷重の種類	載 荷 方 法
常 時 土 圧	静止土圧を等圧で作用させる。
常時偏土圧	常時土圧の20%を両押しで作用させる。
水 圧	掘削面を頂点とする三角形分布荷重を作用させる。
地 震 時 偏 土 圧 ①	地震時と常時の主動土圧の差を両押しで作用させる。(図8の1/2のkh=0.15を記載する。)
地 震 時 偏 土 圧 ②	地盤応答解析から得られた地盤変位を地盤バネを介して片押しで作用させる。(図8のkgilを記載する。)
地 震 時 築 島 土 圧	築島中詰め材の質量を慣性力として作用させる。(図8の1/2のkh=0.15を記載する。)

表-2 荷重の組合せ

目的	状態	荷重	常時土圧	常時偏土圧	地震時偏土圧①	地震時偏土圧②	水圧	常時築島土圧	地震時築島土圧	その他荷重	許容応力度の係数
部材計算	常 時	○	○	○			○	○		○	1.50
	地震時①	○	○	○	○				○	○	1.65
	地震時②	○	○	○		○			○	○	1.65

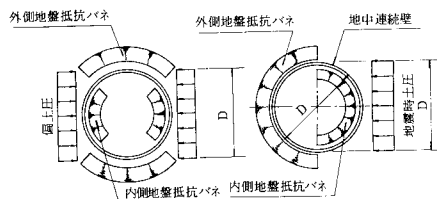


図-8 作用荷重と地盤バネ

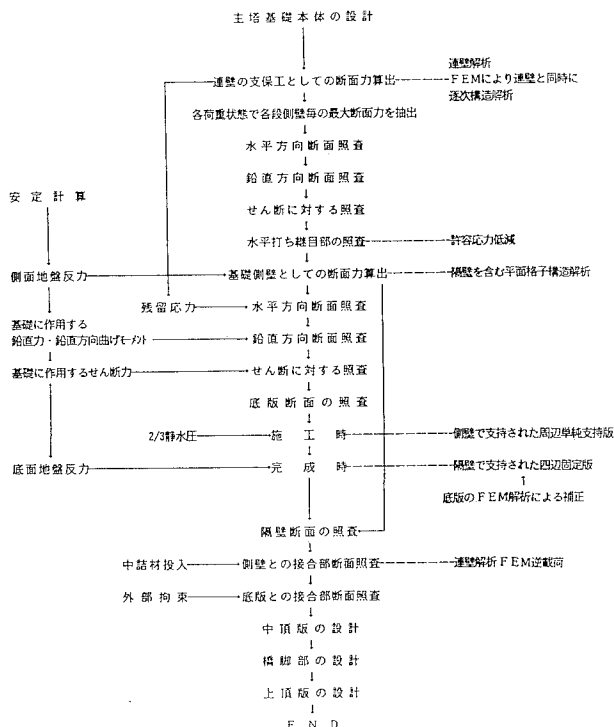


図-9 主塔基礎設計のフロー

4. アンカレイジ基礎

アンカレイジの基礎形式は、ニューマチックケーソン工法・地中連続壁工法・鋼管矢板土留工法の3種類から施工法・経済性・工期等を条件として検討した結果、図-10に示すようにニューマチックケーソン工法による剛体基礎を採用した。

白鳥大橋のアンカレイジ基礎は、構造物～地盤系モデルによる応答計算結果から次の理由により直接基礎として設計した。

- ①回転中心が底面より下にあり天端と底面が同一方向に振動する。
- ②橋軸直角方向の根入れ比が1Aで0.43、6Aで0.53となり直接基礎とケーソン基礎の間である。
- ③周辺地盤と基礎が別々の挙動を示す。

直接基礎の設計では基礎周辺の地盤が良好の場合、周辺地盤にも水平力を分担させて良いことが道路橋示方書（下部構造編）に示されている。本橋では、表-3に示すように動的解析の結果、水平力の分担率を橋軸方向で底面：側面＝85：15、橋軸直角方向で底面：側面＝75：25とした。

地震地荷重は、水平震度を設計地盤より上で0.24、設計地盤より下で0.12とした。さらに、吊橋のケーブル荷重をアンカレイジの自重で支えることを配慮し、鉛直震度0.09を設定した。

ニューマチックケーソン工法の場合施工時の荷重が本体構造に影響を及ぼすため、施工時の作業室内圧力低下や、初期構築時の支持状態が均等支持・単純支持・片持支持・対角支持の場合についても設計時に考慮した。

海上で作業を行う1Aでは、鋼矢板二重締切を行い施工する。1A及び6Aともにケーソン沈下後、現場発生材による中詰めを行うこととした。

5. 側塔基礎

側塔基礎形式は、ニューマチックケーソン基礎・地中連続壁基礎・鋼管矢板井筒基礎の3種類から、施工性・経済性等を条件として検討した結果図-11に示す地中連続壁基礎を採用した。

白鳥大橋側塔基礎に用いる地中連続壁の設計法は、「地中連続壁基礎設計施工指針（案）」（日本道路協会）に準拠した。

- 図-12に示す8種類の地盤バネは、次のとおりとした。
- K₁：多層地盤を考慮して道路橋示方書のケーソン基礎の方法による。
 - K₂：鉛直断面のFEM解析から地盤反力係数比（ α_2 ）を求め、 $K_2 = \alpha_2 \cdot K_1$ より決定した。
 - K₃、K₄、K₆：内部土の剛性と質量の影響を時刻歴応答解析で評価した結果、内部土は地震時に基礎躯体と一体と

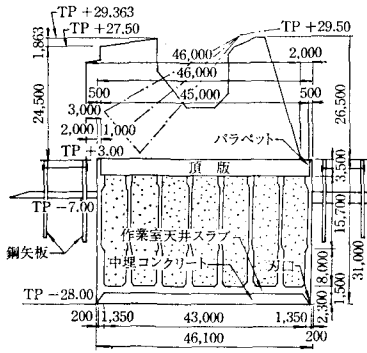


図-10 アンカレイジ基礎構造図（1A）

表-3 水平力分担率

	1 A	6 A
橋軸方向	底面剪断力	18,962 tf
	全水平力	22,529 tf
	底面分担率	84%
	側面分担率	16%
橋軸直角方向	底面剪断力	16,444 tf
	全水平力	22,030 tf
	底面分担率	75%
	側面分担率	25%

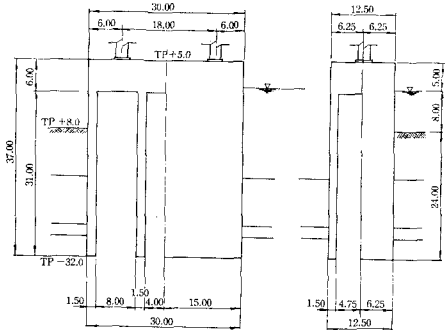


図-11 側塔構造図（2P）

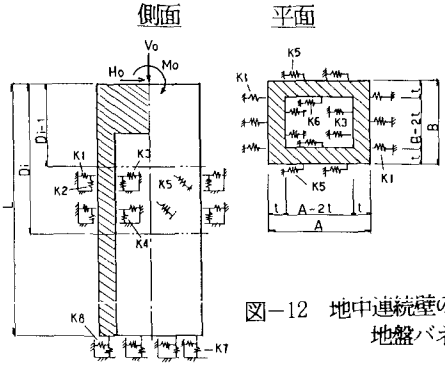


図-12 地中連続壁の地盤バネ

して挙動するため内部土と連壁間の地盤バネは考慮しない。

K_5 ：水平断面の2次元FEM解析結果から地盤反力係数比(α_5)を求め、 $K_5 = \alpha_5 \cdot K_1$ より決定した。

K_7 、 K_8 ：地中連続壁基礎設計施工指針(案)によった。

地震時荷重は、水平震度を設計地盤から上で0.30、設計地盤より下で0.15とした。安定計算で、基礎底面の地盤反力分布については底面の浮き上がりを考慮した。

地中連続壁の厚さは1.5mで、平面形状は2Pを目の字型、5Pを日の字型で閉合させ、各エレメント間の継手を止水板方式とした。海上に施工される2Pは、鋼管矢板による一重締切を行い、自硬性の材料で中詰めをして築島を構築し、作業を行う。

6. 設計部材厚

以上、白鳥大橋の各基礎の設計概要を紹介したが、各基礎の設計部材厚等を表-4に示す。

表-4 各基礎の設計部材厚と数量

基 礎	部 材	コンクリート 設計基準強度 (kgf/cm ²)	部 材 厚 (m)	数 量 等
アンカレイジ 基 礎	天井スラブ	2 4 0	1. 5 0	・コンクリート体積 1A:23,180(m³) , 6A:19,627(m³) ・鉄筋重量 1A: 2,998(ton), 6A: 2,518(ton)
	側 壁		1.00(1.50)	
	隔 壁		0.70(1.20)	
	頂 版	2 1 0	3. 5 0	・() : スラブから 8.0m の高さまで
側 塔 基 礎	側 壁	* 2 4 0	1. 5 0	・コンクリート体積 2P: 6,853(m³) , 5P: 5,741(m³) ・鉄筋重量 2P: 571(ton), 5P: 464(ton) ・鋼材重量 2P: 422(ton), 5P: 229(ton) ・* : 水中コンクリート
	隔 壁		1. 5 0	
	頂 版	2 1 0	6. 0 0	
主 塔 基 礎	地中連続壁	* 370(* 250)	1. 5 0	・コンクリート体積 3P: 57,783(m³) , 4P: 43,056(m³) ・鉄筋重量 3P: 5,161(ton), 4P: 4,167(ton) ・鋼材重量 3P: 558(ton), 4P: 607(ton) ・* : 水中コンクリート ・() : 4Pの値
	側 壁	2 1 0	2. 0 0	
	底 版		6.00(5.00)	
	隔 壁		1. 5 0	
	中 頂 版		5. 0 0	
	上 頂 版	3 0 0	7. 0 0	

7. おわりに

白鳥大橋は、主塔基礎の支持層が非常に深いため、橋梁基礎としては前例のない地中連続壁併用逆巻剛体基礎を採用している。現在、主塔及びアンカレイジ基礎を施工中であり、平成2年度には支持地盤まで達する予定であり、支持岩盤の載荷試験が予定されている。

<参考文献>

土木学会北海道支部：白鳥大橋技術検討委員会報告書（昭和56年度から昭和58年度）

土木学会北海道支部：白鳥大橋上部構造に関する技術検討委員会報告書（昭和59年度から昭和62年度）

土木学会北海道支部：白鳥大橋下部構造に関する技術検討委員会報告書（昭和59年度から昭和62年度）

土木学会北海道支部：白鳥大橋施工法検討委員会とりまとめ（昭和63年度）