

## PCポンツーンを用いた六角形浮体構造物の開発

横田 弘<sup>\*1</sup>・戀塚 貴<sup>\*2</sup>

### 1. はじめに

近年の余暇時間の増大、快適生活空間確保への要望等を背景に、いわゆるウォーターフロントブームに代表される新たな開発要請が挙がってきている。その結果、港湾施設や海岸施設で親水機能を高めることが求められるとともに、周辺環境に溶け込む美しいものが開発されつつある。ここで、報告するPCポンツーンを用いた六角形浮体構造物(H.M.S. -Hexagonal Marine Structure)は快適環境の創出を目的として考案されたもので、プレストレストコンクリート製のポンツーンを水上で六角形状に接合して小型船等の係留施設、浮防波堤あるいは海洋性レクリエーションのための施設とするものであり、水面利用の多様な要請に応えることができる(図-1)。

本稿では、H.M.S.の開発経緯を報告するとともに、平成元年に横浜港で開催された横浜博覧会で利用された実用化第1号の設計、施工の概要を紹介する。

### 2. H.M.S.の開発

#### 2.1 H.M.S.の構造

H.M.S.は図-2に示すように平面形状が台形で内部が空洞のコンクリート製ポンツーン6個を組み合わせ、PC鋼棒等で接合することにより六角形状の浮体構造物

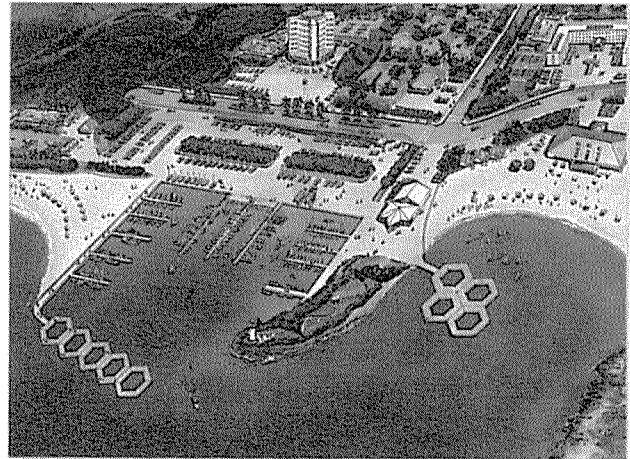
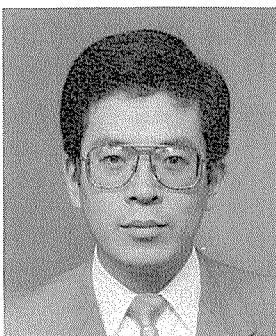


図-1 H.M.S.利用例

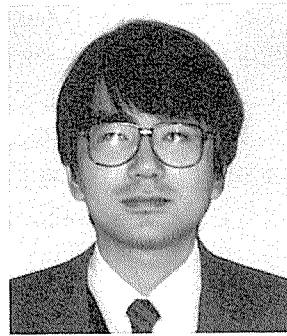
とするものである。ポンツーンは水密性、耐久性を確保するためPC構造を基本としている。プレストレスの導入方法として、個々のポンツーン自身をPC構造とする方法と最終形状に組み立てた後対角線上にPC鋼材等を利用して引張力を掛けることにより各ポンツーン軸方向に圧縮力をかける方法(図-3)とがある。通常、ポンツーン個々が大型であり、床版、側壁等が厚くPC鋼材を中心に配置できる場合は前者の方法をとり、小型で版厚が小さくPC鋼材の配置ができない場合は後者の方法をとることとなる。

なお、H.M.S.の特徴を整理すると以下のとおりとなる。

- ① 陸上で6個のポンツーンを別々に製作した後、水上で六角形状に組み建てるプレハブ方式であることから、全体として大型なものとなっても大型施工機械や設備のないところで簡単に製作できる。
- ② ドーナツタイプであることから、あらゆる方向の波に対してサイドフロート構造と類似の動揺特性となり、安定性が高い。また、重量が大きいため航跡波等の短い波の影響をほとんど受けない。
- ③ 各ポンツーンの軸方向にプレストレスを与えることにより、コンクリートのひびわれ防止効果が高く、その結果耐久性の向上が図れる。
- ④ 中央部に形成される静穏な水面を、洋上プール等



\*<sup>1</sup> Hiroshi YOKOTA  
運輸省第二港湾建設局  
横浜調査設計事務所次長



\*<sup>2</sup> Takashi KOIZUKA  
運輸省第二港湾建設局  
横浜調査設計事務所  
技術開発課長

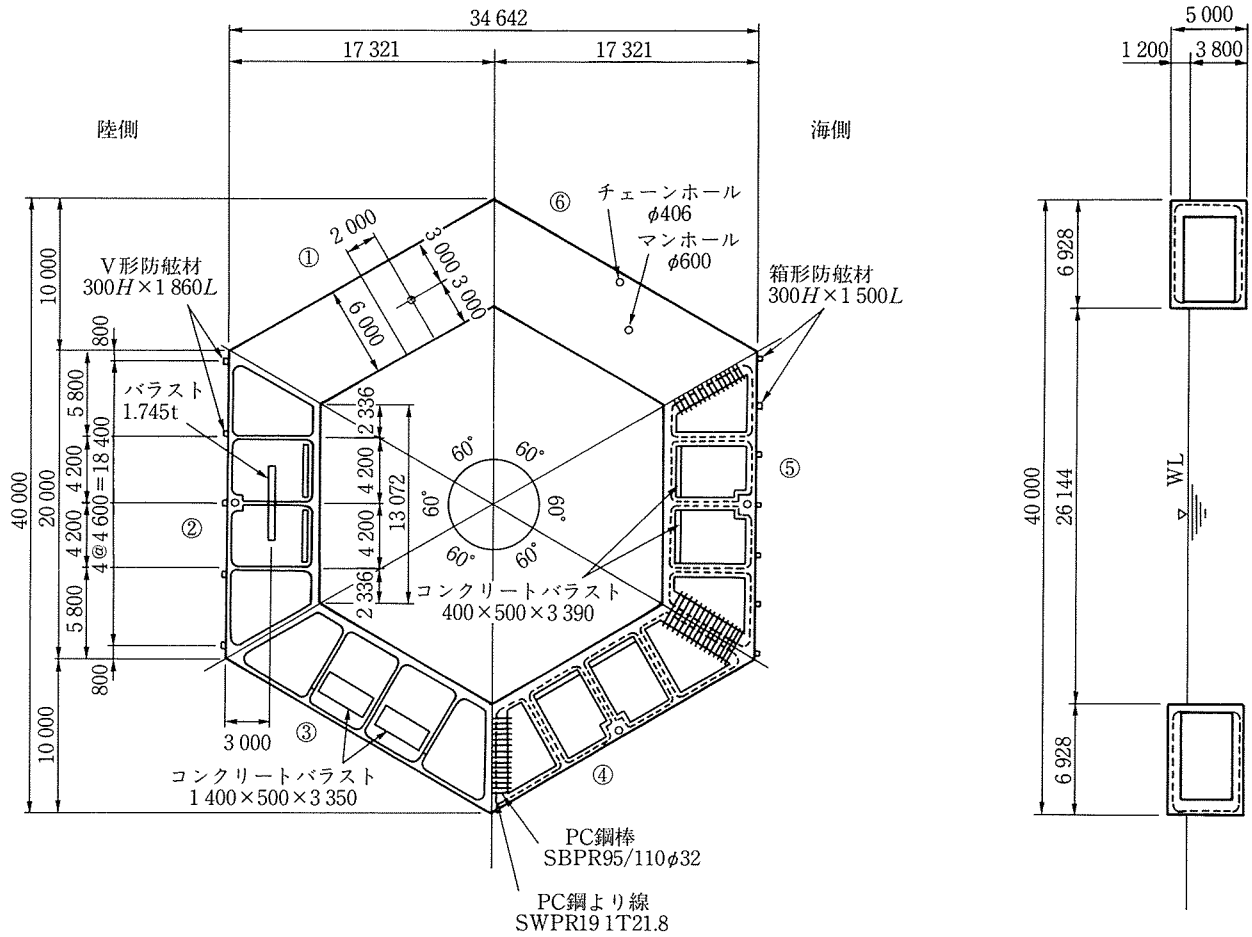


図-2 H.M.S. 構造一般図 (「海のパビリオン」H.M.S.)

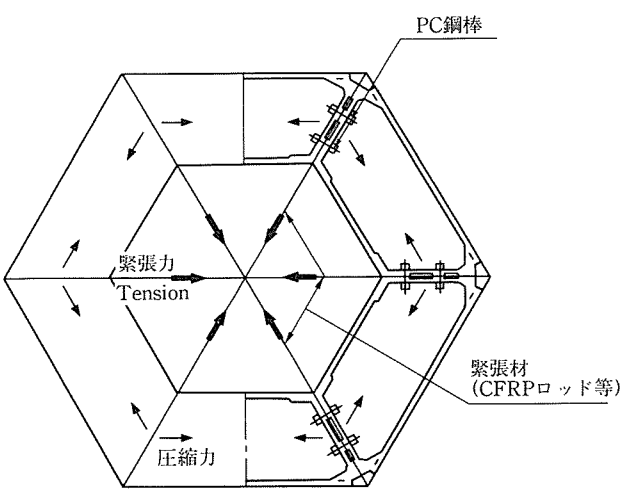


図-3 対角線緊張方式概念図

として利用できる。

⑤ 複数の H.M.S. を連結して様々な平面形状を形成できる。

### 2.2 動揺特性

H.M.S. は、内水面を持つ六角形状の浮体という新しい形状の浮体であることから、新たに動揺特性の把握、最適係留方法および係留力の検討が必要となる。H.M.S. の今後の汎用化を図るうえで、これらの特性を数値解析により把握し評価することが必要である。このため、水理模型実験 (六角形の一辺 60 cm の模型を使用) による動揺特性の把握を行うとともに、有限要素法を用いた動揺解析方法の開発 (図-4) を行い、模型実験結果と数値シミュレーション結果との対比を行うことにより、数値シミュレーションの適用性の検証を行った。

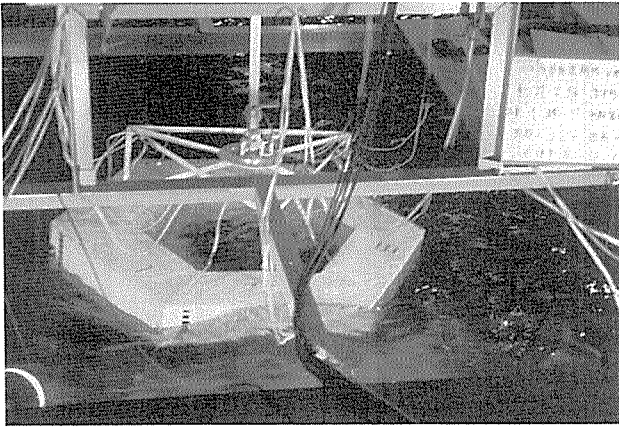


写真-1 水理模型実験状況

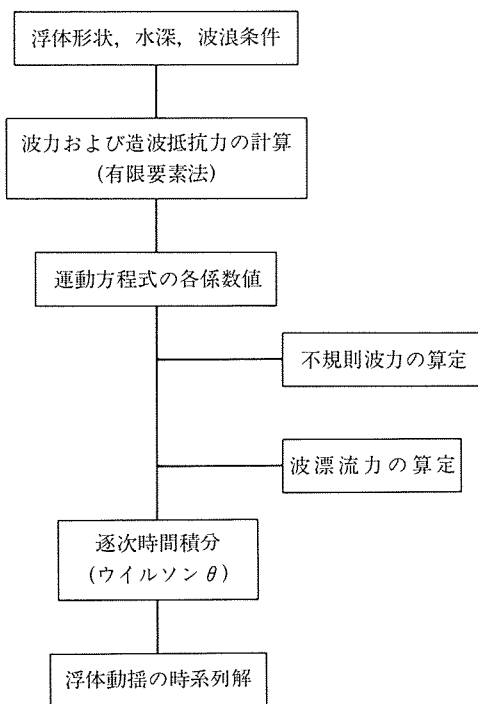


図-4 動揺解析フロー

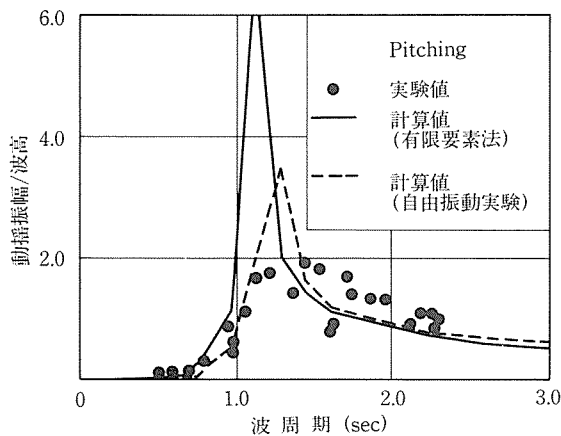


図-5 規則波中の動揺振幅 (Pitching)

対比結果の1例として、Pitchingの模型観測結果と数値シミュレーション結果を図-5に示す。シミュレーション結果と水理模型実験結果とは比較的良く合っており、数値解析方法の適用性が確認された。また、H.M.S.の動揺特性として模型周期0.8 sec以下(一辺20 cmの場合4.6 secに相当)ではH.M.S.の動揺量は波高の1/10以下となり、非常に安定性が良いことがわかった。なお、本検討によって最適係留方法および係留力も同時に解明された。

### 2.3 施工実験および実水域実験の実施

H.M.S.は、6個のポンツーンを個々に陸上で製作し、浮上後水上で接合することにより六角形状にするものであることから、ポンツーンの製作、水上浮遊接合、緊張方法等の一連の施工方法の確認を目的に、一辺6 m、幅2 mのH.M.S.を用いた施工実験を実施した。

H.M.S.の完成時には6つのポンツーンが一体の構造物として挙動しなければいけないことから、接合面の密着性を高める必要がある。このため、ポンツーン製作に当たってはマッチキャスト方式を用いた。マッチキャスト方式とは、図-6に示すように、まず1つおきにポンツーンを製作し、次にこれらの接合面を型枠とし残りのポンツーンのコンクリートを打設することにより、お互いの接合面の密着性を高める方法である。マッチキャスト方式によるポンツーン製作後、浮遊接合実験を実施した。接合作業は、ポンツーン浮上後10~20 cmの浸入波のある状態で行ったが、接合面に設けた接合キーを利用することにより仮結合からPC鋼

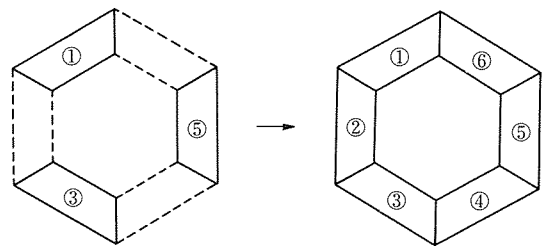


図-6 マッチキャスト方式

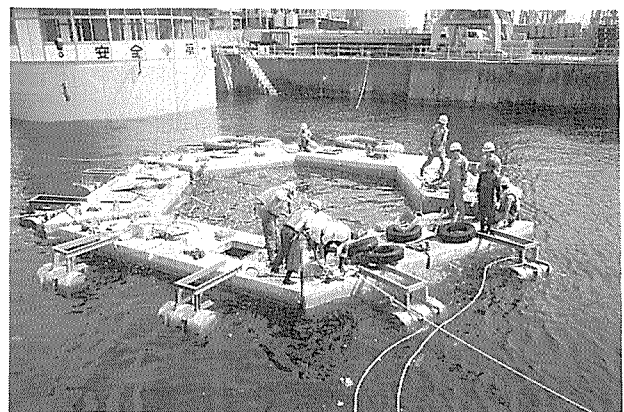


写真-2 水上浮遊接合実験状況

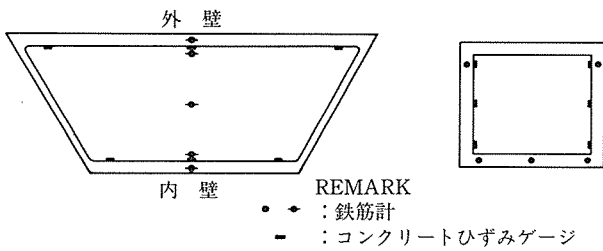


図-7 鉄筋計およびコンクリートひずみゲージの配置

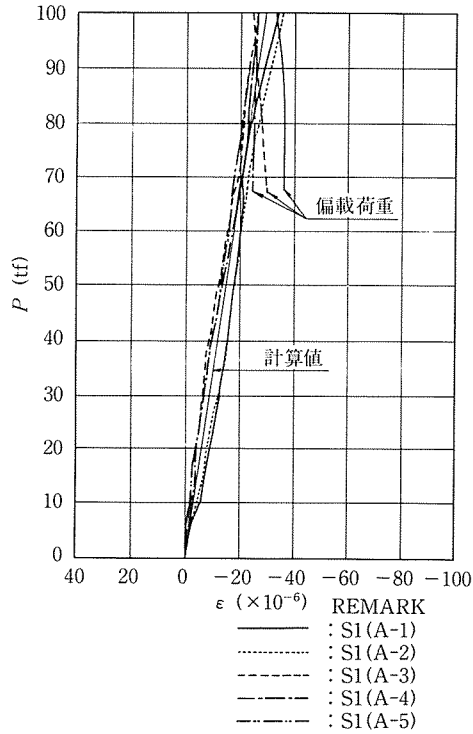


図-8 荷重-鉄筋ひずみ図

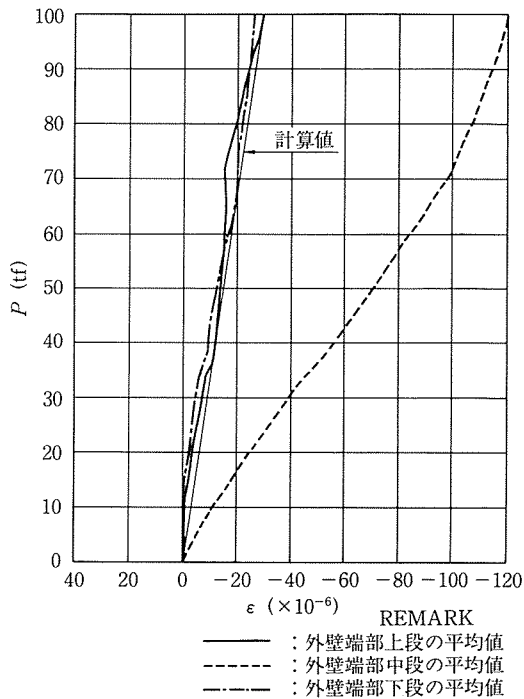


図-9 荷重-コンクリートひずみ図(外壁)

棒の緊張による本接合までを短期間で終了することができた。接合終了後、緊張材を用い H.M.S. の対角線方向に緊張力を与えポンツーン軸方向にプレストレスを導入した。プレストレス導入の確認を行うため鉄筋計、コンクリートひずみゲージを取り付け(図-7)計測を行った結果、図-8~10 に示すとおり外壁中段端部を除き所定のプレストレスが導入されたことが確認された。なお、緊張材には腐食を考慮し CFRP ケーブル(φ8 mm の炭素繊維補強プラスチックロッド 8 本を 1 組としたもの)を用いた。

以上の方法により H.M.S. の製作を行い、一連の施工法に特に問題の無いことを確認した。また、これらの一連の施工実験に引き続き、実水域における施工性およびコンクリート等の耐久性の確認を目的として、昭和 63 年度から平成 2 年度にかけて福島県猪苗代湖において実水域実験を実施している。

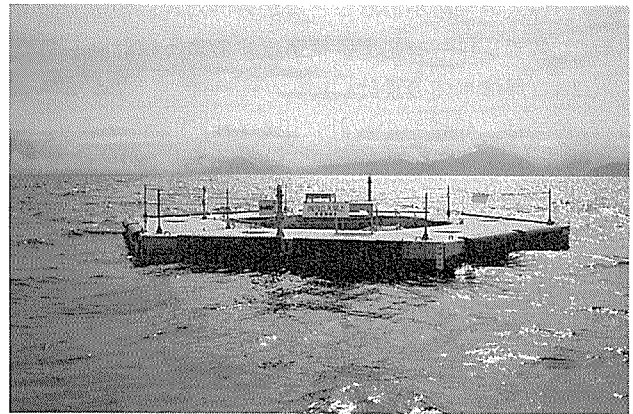


写真-3 実水域試験(福島県猪苗代湖)

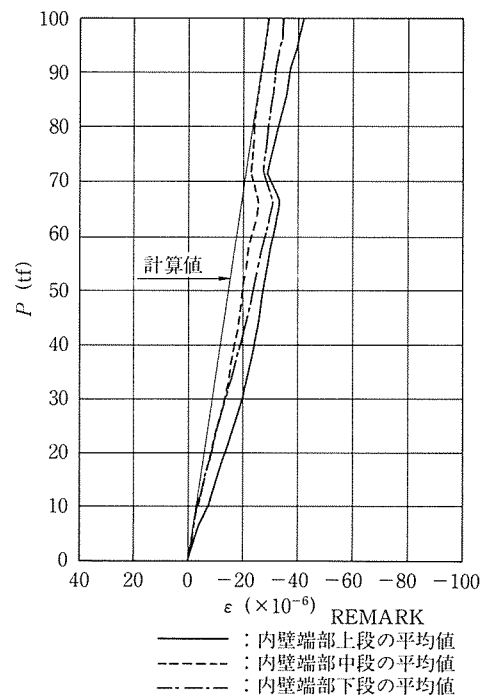


図-10 荷重-コンクリートひずみ図(内壁)

### 3. 横浜博覧会「海のパビリオン」 H.M.S. の製作

横浜市制 100 周年，横浜開港 130 周年の記念事業として，横浜博覧会が平成元年 3 月から 10 月にかけて横浜 MM 21 地区において開催された。運輸省は，本博覧会に「海のパビリオン」を出展したが，その中心となったのが H. M. S. 実用化第 1 号である。

#### 3.1 「海のパビリオン」H.M.S. の設計

##### (1) 設計条件

「海のパビリオン」H.M.S. の形状は，洋上散策道としての利用，内水面での各種アトラクションの実施，周辺部への展示船の係留等を鑑み，図-2 のとおりとした。なお，各ポンツーンの軸方向のプレストレスの導入方法については，内水面を利用すること，H.M.S. 自体が大型となり，部材厚が厚く側壁，床版等内に PC 鋼より線の導入の余裕があること等から，対角線緊張方法ではなく各ポンツーンを PC 構造とするように計画した。

##### (2) 浮体本体の設計

浮体本体，係留系の設計に用いた自然条件を表-1 に示す。浮体本体の設計は，これらの波浪，静水圧等の外力に対し所定の安全性を確保するように行う。特に重要なのは，ポンツーン間の接合部の設計および軸方向へのプレストレスの導入量の設定である。接合部およびポンツーン軸方向のプレストレス量の設計においては，波浪荷重による鉛直，水平方向の断面力を算定し，各ポンツーンに引張応力が生じないようおのおの PC 鋼棒，PC 鋼より線を使用してプレストレスを導入することとしている。また，軸直角方向は，静水圧荷重等による断面力を計算し，RC 構造で対応した。各断面力の算定方法は以下のとおりである。

鉛直方向断面力；浮体の自重と浮力の釣合条件からミューラーの算定式を用い求める（図-11）。

水平方向断面力；係留チェーンによって拘束された状態を平面フレームでモデル化し，波力を荷重として FEM により求める（図-12）。

静水圧等による断面力；床版，側壁，底版については，浮体の上端が水中に 0.5 m 沈んだ状態の静水圧に対して四辺固定版として，受け梁は浮体の床版上に最大荷重が作用し吃水か浮体の高さに等しくなった状態の静水圧に対してボックスラーメンとして求める（図-13）。

設計の結果，図-14～15 に示す PC 鋼材配置としてい

表-1 自然条件

潮位	±0.0 m (LWL) +2.0 m (HWL)
水深	-10.5 m
波浪条件	波高 ( $H_{1/3}$ ) 1.5 m 周期 ( $T_{1/3}$ ) 4.0 sec
風荷重 (10 分間平均風速)	30.0 m/sec
土質 (シルト質粘土層)	C=2 t/m <sup>2</sup> (-11.5 m 以深) -10.5 m ~ -11.5 m の浮泥層は設計上考慮しない

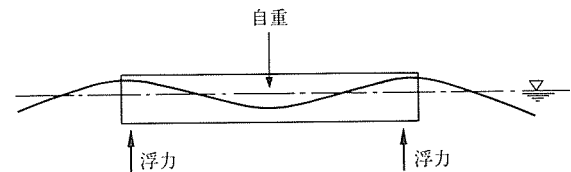


図-11 ミューラーの算定式の考え方

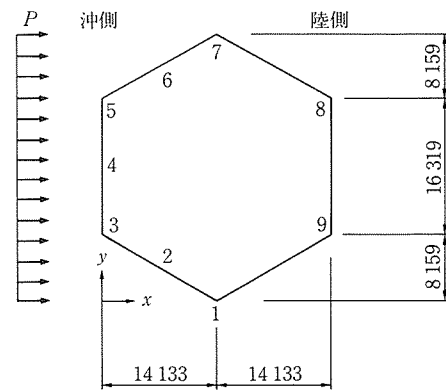


図-12 平面フレーム図

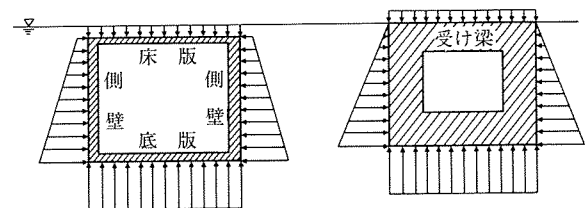
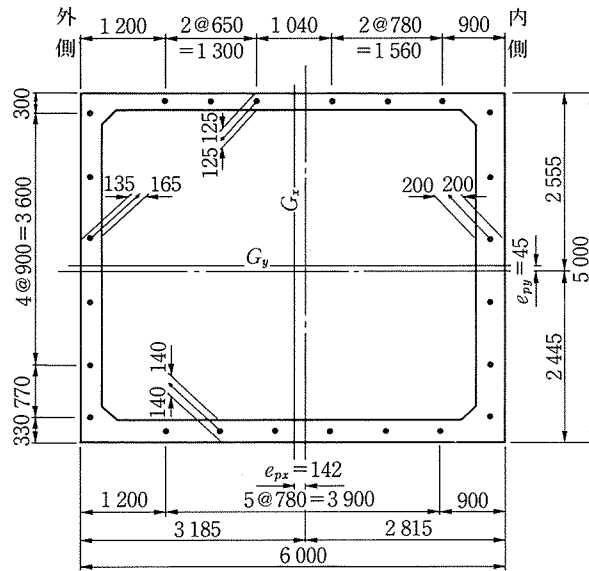


図-13 荷重分布図

る。

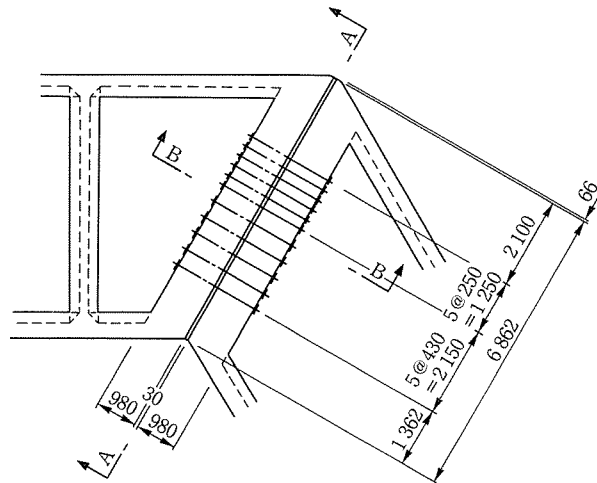
##### (3) 係留系の設計

「海のパビリオン」H.M.S. の係留は，図-16 に示すように沖側にチェーン 3 本，岸側にロープ 4 本を配することとした。係留系の設計は，風荷重，波漂流力，護岸からの反射波等の外力と係留チェーンやロープの係留特性から浮体の動揺量，チェーン等の張力を求めて行うこととなる。この算定は前述した浮体の動揺解析プログラムを用い，動的解析により求めており，この計算より得られた各最大張力に対し安全なチェーンおよびロープを選定した（図-17）。



種類：PC鋼より線 SWPR19 T21.8

図-14 ポンツーン軸方向 PC 鋼材配置図



種類：PC鋼棒 SBPR95/110φ32

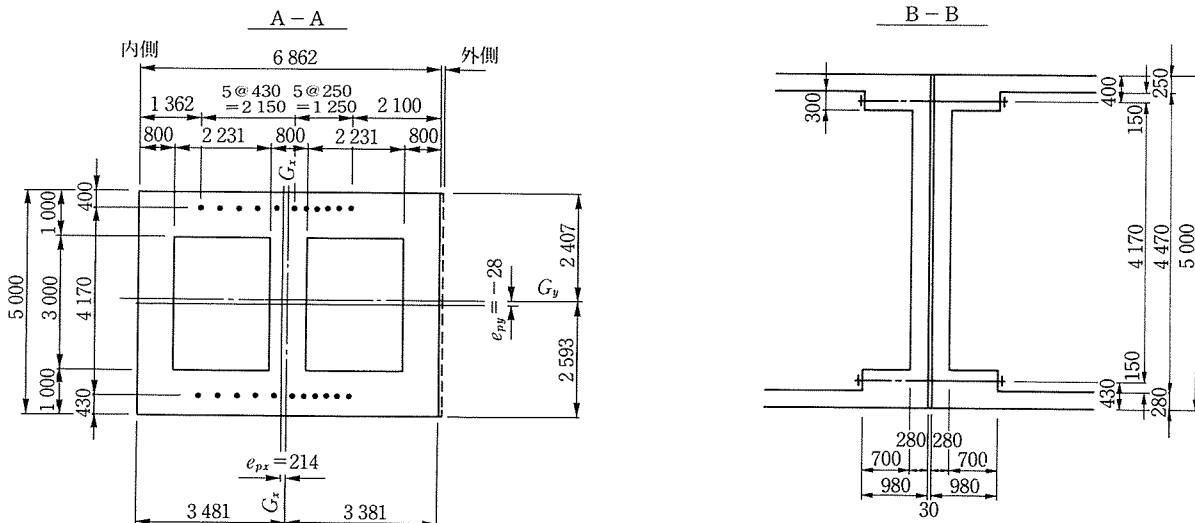


図-15 浮体連結 PC 鋼材配置図

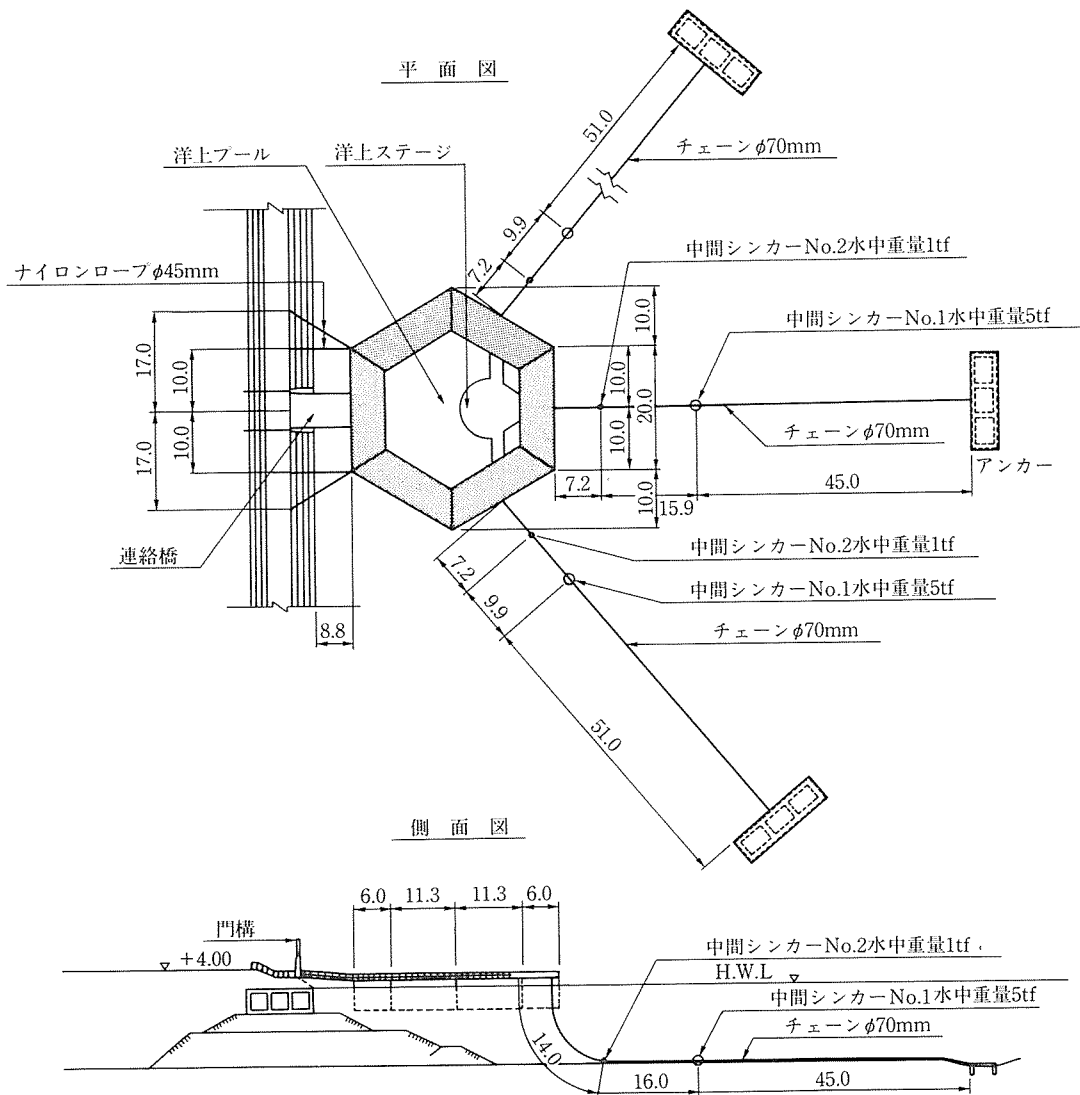


図-16 「海のバビロン」H.M.S. 係留系配置

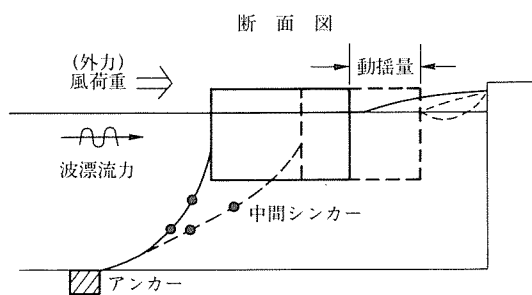


図-17 浮体の動揺モデル図

### 3.2 H.M.S. の施工

本 H.M.S. の施工は、まずドライドック内でポンツーン6個を製作する製作台工から緊張工までを行い、次に海上における浮遊接合、展示場所までの曳航そしてアンカー、チェーン等の設置という順序で進む。各施工の順序は以下のとおりである。

#### ① 製作台工

各ポンツーンへプレストレスを導入する際発生するコ

ンクリートの弾性変形に追随させるため、製作台上にアスファルトルーフィングを二重に敷設した。

#### ② 付属工

係留環、防舷材取付けのためのアンカーボルトおよび埋込み栓を鉄筋組立時に取り付けた。またチェーンホー

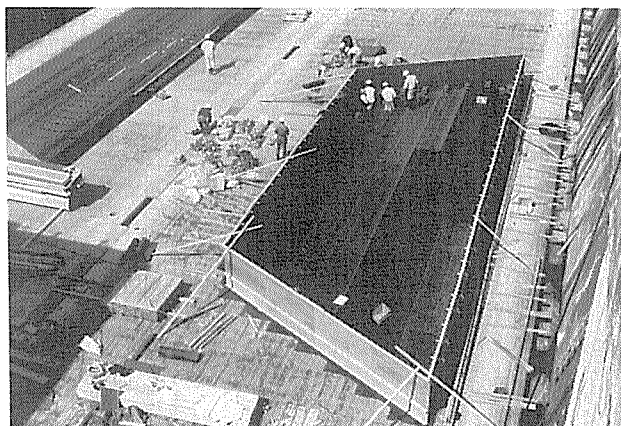


写真-4 アスファルトルーフィング敷設状況

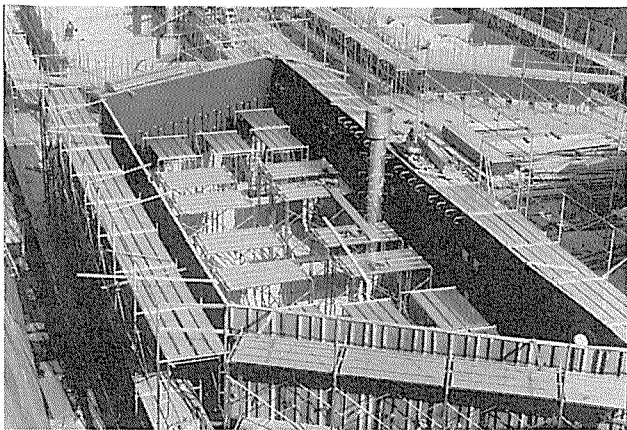


写真-5 鉄筋組立状況

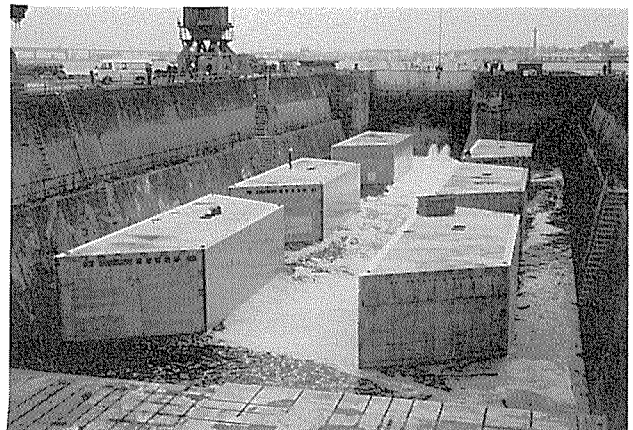


写真-6 ポンツーンの浮上

ルも同時期に取り付けた。

③ コンクリート打設

コンクリート打設は、底版部および側壁下段、側壁上段および上床版の3回に分けて行った。水密性を高めるため、打継ぎ面はレイトンス除去を特に入念に行い、散水により十分吸水させるとともに、セメントミルクで処理した後新コンクリートの打設を行った。

④ 緊張工

PC 鋼より線の緊張は全ケーブル片引きとし、緊張方向は千鳥とした。緊張順序はポンツーンに有害な応力を発生させないように中立軸に対称に行った。

⑤ 浮遊接合

各ポンツーン完成後、ドック内に注水し浮上引出しを行い、接合作業に入った。接合に当たっては、接合面の密着性を高めることが必要であるが、本 H.M.S. の場合は施工実験時にとられたマッチキャスト方式が施工ヤードの制約上採用ができなかったため、図-18 に示す無収縮モルタル注入工法を採用した。この工法は、

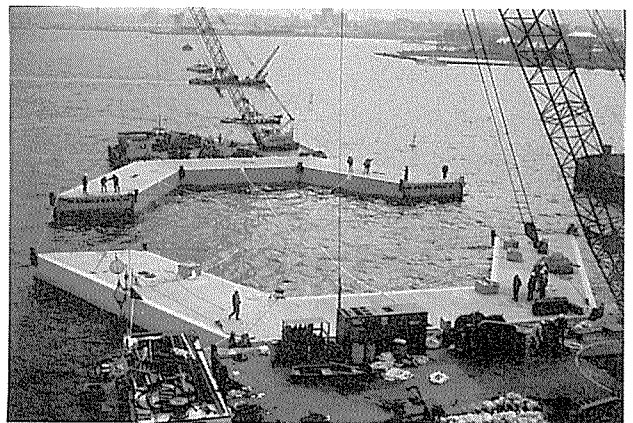


写真-7 ポンツーン接合作業状況

緊張した後ポンツーン間の接合面の隙間(30 mm)に無収縮モルタルを注入し、所定の強度が出現したことを確認したうえで PC 鋼棒に所定の最終緊張力をかけるものである。

⑥ 係留

H.M.S. を所定の位置まで曳航し、まず岸側と4本のロープで係留し、次に沖側の3本のチェーンの設置を行った。チェーンについては1本につき中間シンカー2個を設置して、定常外力に対する動揺の低減を図っている。

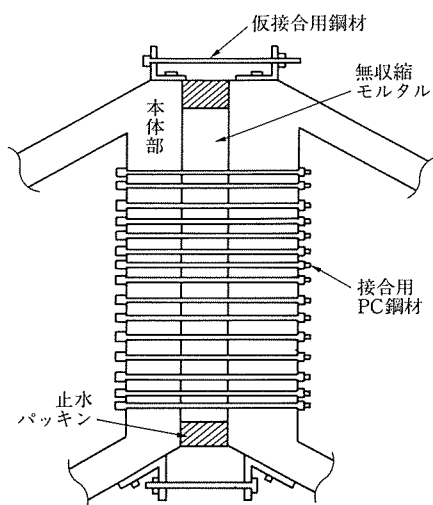


図-18 無収縮モルタル注入工法

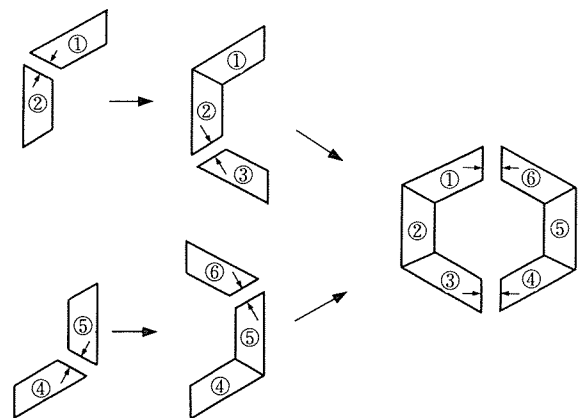


図-19 ポンツーン接合順序



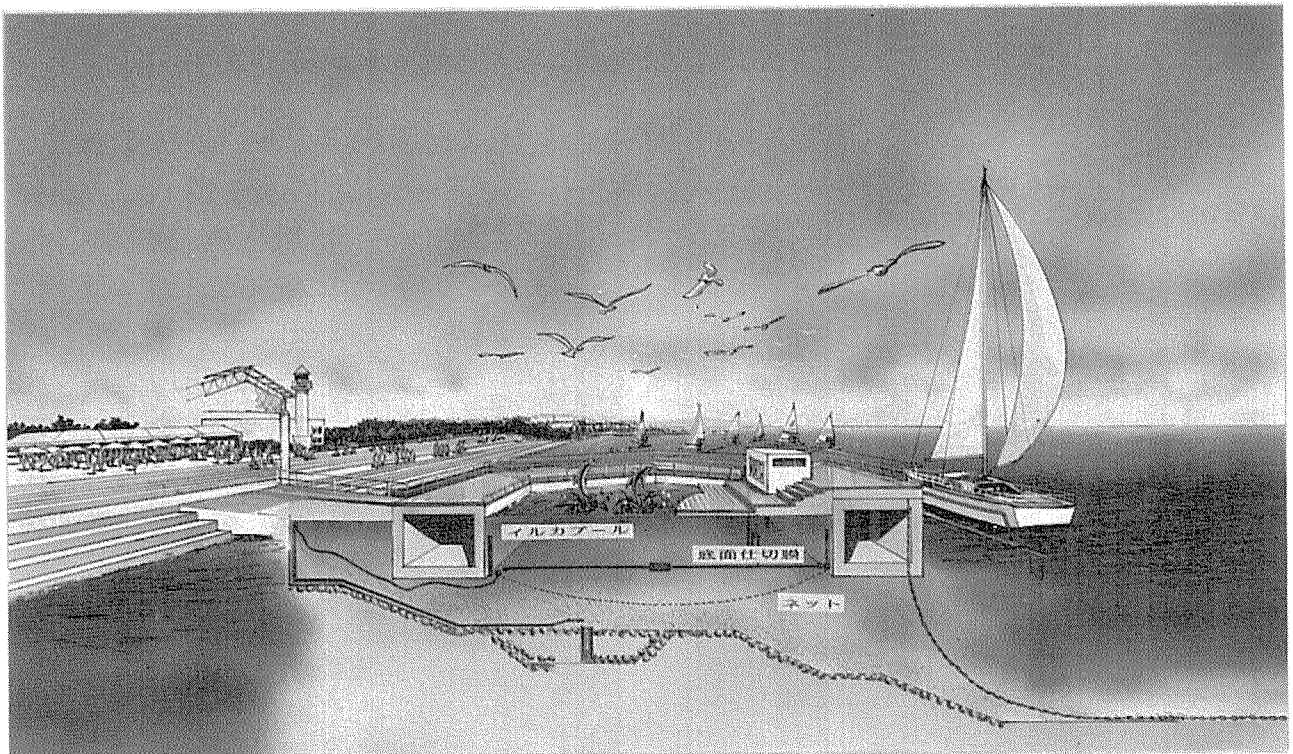


図-20 「海のパビリオン」H.M.S. 断面図

⑦ 連絡橋の設置

本体の施工と並行し、鋼製の電動巻上げ式の連絡橋（歩廊部分：幅6 m、長さ10 m）の設置を行っている。

⑧ 付属施設の設置

係留後「海のパビリオン」として、洋上プール、洋上ステージ、装飾等の施工を実施した。洋上プールは、底部に海中仕切り膜を取り付け、海底砂濾過方式により清浄な海水をプール内に揚水した。洋上ステージは、水面上0.7 mと0.3 mにそれぞれメインステージとイルカステージを設けている。また、装飾として、床面は木甲板とし、その他手摺、各種照明等を取り付けている。

5. おわりに

H.M.S. は関係者の方々の御協力のもと約4年間をかけて開発したものである。これまでに実用化されたものとしては「海のパビリオン」H.M.S. 1基であるが、海洋レクリエーションに係る様々な目的に利用することが

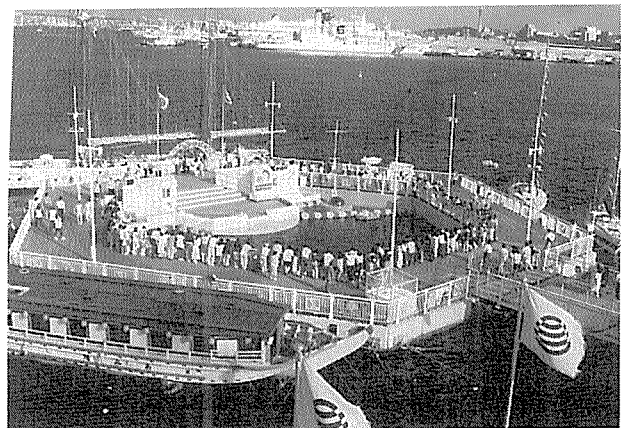


写真-8 「海のパビリオン」

可能であることから、現在青森県十和田湖において建設計画が進行している。今後さらに各海域で建設が推進されていくことを希望するものである。

【1991年2月9日受付】