

多角形浮体構造物（H.M.S.）施工実験

前運輸省第二港湾建設局 正会員 稲垣紘史
（現日本国有鉄道清算事業団）

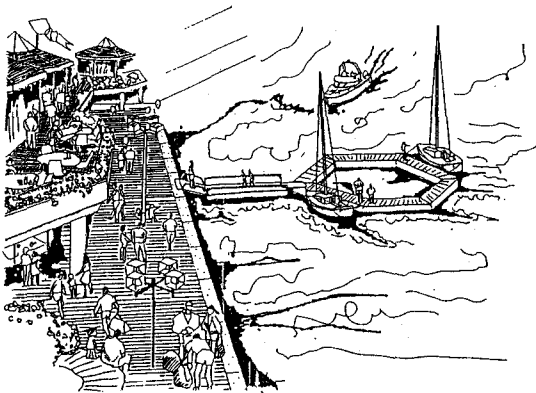
運輸省第二港湾建設局	同上	豊田奉節
同上	同上	石井一郎
同上		野上富治
同上		小熊康文

1. はじめに

近年、ウォーターフロントへの社会的関心が高まりを見せている。今後余暇時間の増大、生活様式の多様ななどを背景として、海、湖などの水面、水辺でのプレジャーボート、ボートセーリングなど海洋性レクリエーション需要の飛躍的な進展が予想される。こうした需要に応えるとともに、水面と一体感のある親水空間を創成するため、レイアウトの自由度の大きい多機能浮体施設などを実用化する必要がある。また、整備要請の強い全国各地の港湾においては、施工機械や作業ヤード等の制約から施工性に優れた構造物の開発が望まれる。

このような背景から、運輸省第二港湾建設局では、図-1のように、使用目的に応じて六角形状の浮体を複数個連結することにより浮防波堤や浮桟橋等のマリーナ施設などへの多目的な利用を図る新しい多角形浮体構造物「H.M.S. (Hexagonal Marine Structure)」の開発を行っている。一連の開発実験の第一段階として、今回、H.M.S. の基礎的な施工実験を行い、施工方法、部材応力状態などについて検討した。

係留施設としての利用



浮消波効果を中心とした多目的な利用



図-1 H.M.S. 利用例

2. H.M.S.の特徴

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6個の鉄筋コンクリート部材を組み合わせ、PC鋼棒で接合し、さらに対角線方向に緊張材で緊張力を与えて六角形の浮体構造物とするものである。

このH.M.S. には、

- ① 陸上で6個のコンクリート部材を製作したあと水上で組み立てるプレハブ方式であることから、大型の施工機械や設備のないところでも簡単に製作できること
 - ② 緊張材でH.M.S. の対角線方向に緊張力を与えることによりコンクリート部材に圧縮力を与え、コンクリートのひび割れを防止し、品質の向上が図れること
 - ③ 複数個のH.M.S. を自由に連結して浮防波堤や海上ステージなど様々な施設として利用できること
- などの特徴がある。

3. 実験概要

H.M.S. の製作、水上における接合、緊張方法など一連の施工方法の確立を図るため、運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所ケーソンドックにおいて、H.M.S. （一辺の長さ 6.0m、幅 2.0m、高さ 2.0m）一基の

製作を、①部材（RC構造）の製作、②進水、③水上での部材接合、④PC鋼棒による緊張、⑤緊張材によるプレストレスの導入の順で行い、これと合せて緊張材のひずみ、部材応力の測定などを実施して、プレストレス導入量などの検証を行った。

4. H.M.S. 施工実験

(1) 部材（RC構造）の製作

H.M.S. の中心となるコンクリート部材は、内部が空洞のRC構造である。部材製作は、工場施工および現場施工いずれでも可能であるが、今回の実験では、現場施工で行うこととした。

部材製作にあたっては、各部材の接合面の施工精度を上げ、密着性を高めることが最も重要である。工場などで製作を行う場合は、鋼製型枠の使用、出来形管理を厳重に行うことで施工精度を確保できるものと思われるが、今回の実験のように現地製作を行う場合には問題が生ずるものと思われる。このため、マッチキャスト方式により製作を行なった。この方法は、図-3のように、まず、一つおきに奇数番号の部材を製作し、次にこれらの部材の接合面を型枠として利用してコンクリート打設を行い、残りの偶数番号の部材を製作するもので、接合面の密着性を高めることができる。

(2) 部材の接合

部材の接合は、部材製作の場所であるケーソンドック内に注水し、各部材を浮上させた後、水上で組み立てるプレハブ方式で行った（実験期間等の制約から、本実験では水上での接合は片側3部材のみ実施した）。部材の接合を容易にするため、各部材接合面に凹凸を組み合わせた接合キーを計4ヶ所部材製作時に埋設しておき、部材の接合の際これがかみ合うことにより接合面にずれが生じないようにした。

部材の接合は図-4に示すように、以下の順序で行った。

- ブロック①とブロック②を接合したあとブロック③を接合して3部材1組とする。
- ブロック④とブロック⑤を接合したあとブロック⑥を接合して3部材1組とする。
- それぞれ3部材1組となった2つのユニットを接合して六角形とする。

なお、各部材の平面形状は台形であり、水上に浮いた状態では不安定であるため長辺側にフローターを取り付けて安定を図った。

(3) PC鋼棒の緊張

6本のコンクリート部材接合後、PC鋼棒に緊張力を加えて、各接合面を密着させる。PC鋼棒は、各接合面に上下2本ずつ、合計4本配置し、1本当たりの緊張力は40tfとした。また、PC鋼棒の緊張は、写真-1に示すように油圧ジャッキを用い、荷重とPC鋼棒の伸び量を管理しながら行った。

(4) CFRPケーブルの緊張

H.M.S. 製作の最終ステップとして、CFRPケーブルを用いて対角線方向に緊張力を与える。与えた緊張力によって部材軸方向に圧縮力が加わり、その結果コンクリート部材にプレストレス力が与えられる。

緊張材には、新素材として注目されているCFRPケーブルを用いた。このCFRPケーブルは、CFRPロッド（φ8mmの炭素繊維補強プラスチックロッド）を8本1組としたものである。このロッドは炭素繊維をエポ

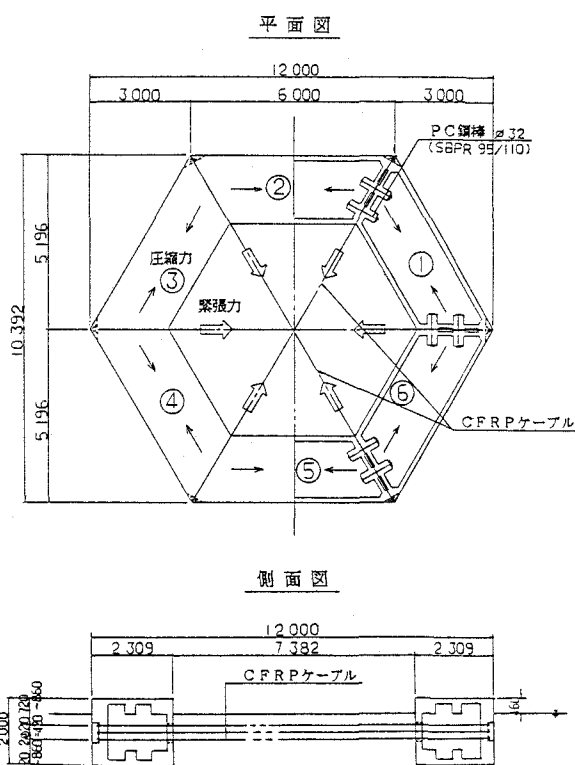


図-2 H.M.S. 構造図

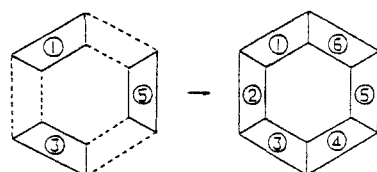


図-3 マッチキャスト方式

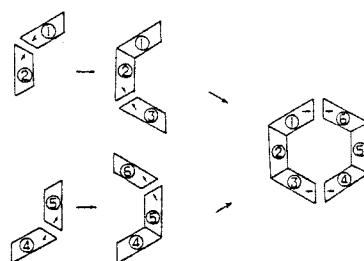


図-4 部材の接合順序

キシ樹脂で固めたもので、塩害などに強く耐腐食性に優れていること、引張強度（ 180kgf/mm^2 、 $8,800\text{kgf/本}$ ）が極めて大きいこと、軽量（比重 1.6）であることなどの特徴がある。

CFRPケーブルの緊張は、写真-2に示すように油圧ジャッキを用い、PC鋼棒と同様に荷重とケーブルの伸び量を管理しながら行った。コンクリート部材に 8kgf/cm^2 程度の圧縮力を与えることとして、1ケーブルの緊張力は 33tf 、1対角線当り3本のケーブルで緊張し、計 99tf の緊張力を与えた。

以上の方法により、H.M.S.の製作（写真-3）を行い、一連の施工方法に特に問題のないことを確認した。

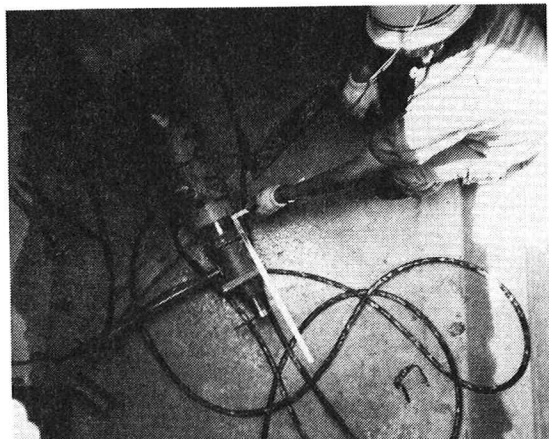


写真-1 PC鋼棒緊張状況

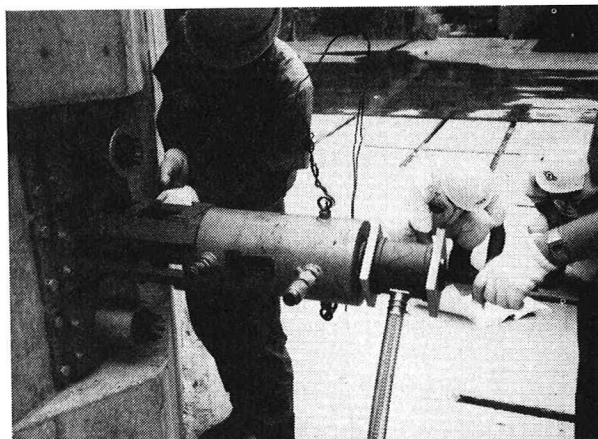


写真-2 CFRPケーブル緊張状況（陸上）

5. 緊張材ひずみ量と部材応力

CFRPケーブルの緊張時に、ケーブルのひずみ量およびコンクリート部材軸方向に導入されるプレストレス量を測定した。各ケーブルの緊張力を $0\text{tf} \rightarrow 5\text{tf} \rightarrow 10\text{tf} \rightarrow 15\text{tf} \rightarrow 20\text{tf} \rightarrow 25\text{tf} \rightarrow 30\text{tf} \rightarrow 33\text{tf}$ と徐々に増加させ、各段階での緊張材のひずみ量および部材に生ずる応力、ひずみを測定した。緊張力は、油圧ジャッキにセットしたロードセルにより、CFRPケーブルのひずみは、各ロッドに貼付したひずみゲージにより計測した。プレストレス量については、部材のひずみ量で確認することとし、部材軸方向に埋込んだ鉄筋計（計15個）による鉄筋応力およびコンクリート表面に貼付したひずみゲージ（計42枚）からひずみ量を求めた。なお、鉄筋計は、図-5のようにブロック①～③の中央部の側壁および底版に配置し、コンクリートひずみゲージは、鉄筋計と同じくブロック①～③の側壁の中央部および端部に配置した。

また、CFRPケーブルおよび全体構造の安定性について検討するため、3方向に緊張しているCFRPケーブルの一部が破断した場合を想定し、緊張力の一部を解放したときの部材応力などを測定した（偏載荷実験）。実験は、計9本のケーブルのうち1本の緊張力を $33\text{tf} \rightarrow 30\text{tf} \rightarrow 25\text{tf} \rightarrow 20\text{tf} \rightarrow 15\text{tf} \rightarrow 10\text{tf} \rightarrow 5\text{tf} \rightarrow 0\text{tf}$ と除荷しながら行った。

図-6は、CFRPケーブル緊張時の1本のケーブル（計8本のロッド）について、各ロッドのひずみと緊張力の関係を示したものである。なお、図中の計算値は、次式で求めた。

$$\begin{aligned} P &= A_{CF} \cdot E_{CF} \cdot \varepsilon \\ &= 3.92 \times 10^{-4} \times 1.47 \times 10^7 \times \varepsilon \\ &= 5.762 \times 10^3 \times \varepsilon \end{aligned}$$

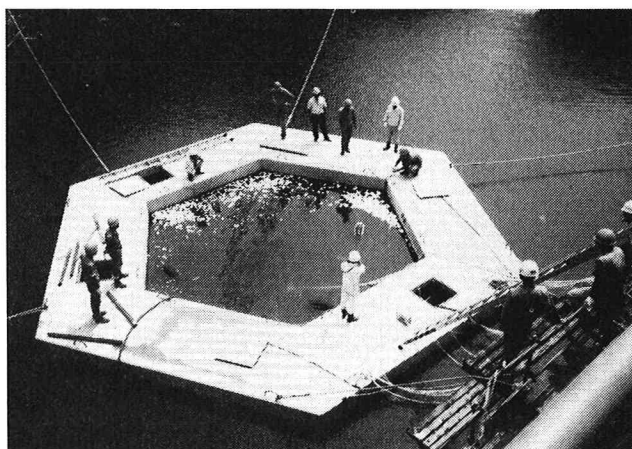


写真-3 H.M.S.の製作

ここに、

P : 緊張力(tf)
 A_{CF} : CFRPケーブル断面積(cm^2)
 E_{CF} : CFRPケーブル弾性係数(tf/cm^2)
 ε : CFRPケーブルひずみ

図-6から、CFRPケーブルの緊張力Pとひずみ ε の関係は、各々のロッドの間に差はあるものの、ひずみの平均値は計算値と大体一致していることがわかる。

図-7~9は、CFRPケーブル緊張の緊張力Pとコンクリート部材軸方向に発生する部材のひずみ ε （鉄筋のひずみ、コンクリートひずみ）との関係を示したものである。鉄筋のひずみ量は、鉄筋計で計測した鉄筋応力よりひずみを計算し、コンクリートひずみは、3ブロック同じ場所に貼付したひずみゲージで計測し、その平均値から求めた。

なお、部材に導入される量および部材のひずみ量は、プレストレス対角線方向に与える99tfの緊張力の軸方向成分が力のつり合いから99tfになることから、次式によって計算できる。

$$\begin{aligned}\delta_c &= P / A_c \\ &= 99 \times 10^3 / 1.155 \times 10^4 \\ &\approx 8.57\end{aligned}$$

このときのひずみ量は

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \delta_c / E_c \\ &= 8.57 / 3.0 \times 10^5 \\ &= 28.6 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

ここに、

δ_c : コンクリート応力度 (kgf/cm^2)
P : 緊張力 (kgf)
 A_c : コンクリート断面積 (cm^2)
 ε : " ひずみ
 E_c : " 弾性係数 (kgf/cm^2)

図-7~9より、計測したひずみ量は計算値 28.6×10^{-6} に対し、鉄筋計ひずみおよびコンクリートひずみは外壁端部の中段を除いて $25 \sim 35 \times 10^{-6}$ 程度となり概ね一致していることがわかる。図-8の外壁端部中段については、CFRPケーブルの固定箇所付近であるため、応力集中による大きなひずみ ($\varepsilon = 120 \times 10^{-6}$) が発生したものと考えられる。しかし、その絶対量は小さく、特に問題はないものと思われる。また、偏載荷実験の結果は、図-7に示すとおり、ひずみ量の顕著な変化はみられず、安全性については問題はない。これらの結果から、CFRPケーブルの緊張により、部材軸方向には、所定のプレストレスが導入されたものと考えられる。

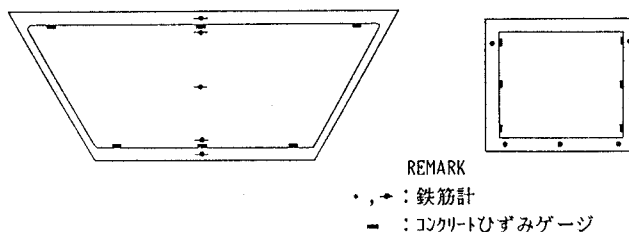


図-5 鉄筋計およびコンクリートひずみゲージの配置

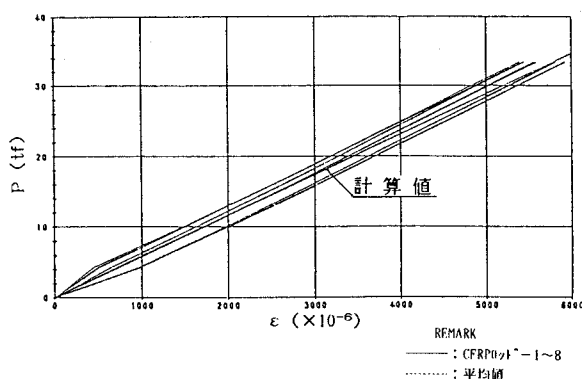


図-6 荷重-CFRPひずみ図

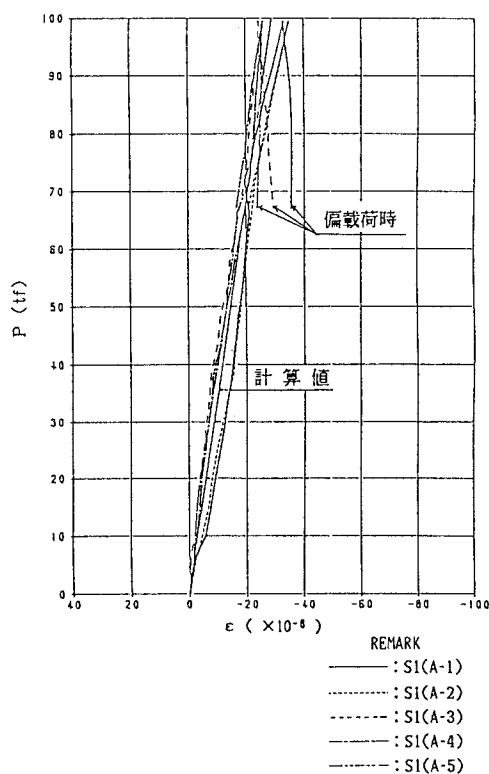


図-7 荷重-鉄筋ひずみ図(ブロック①)

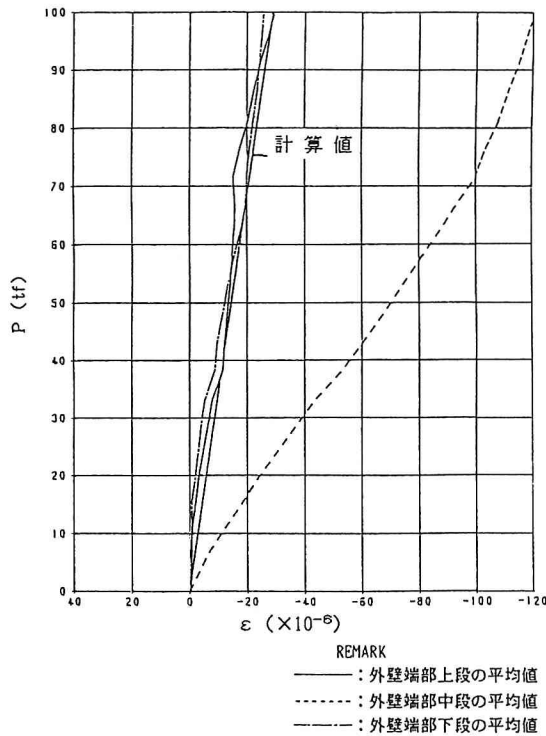


図-8 荷重-コンクリートひずみ図 (外壁)

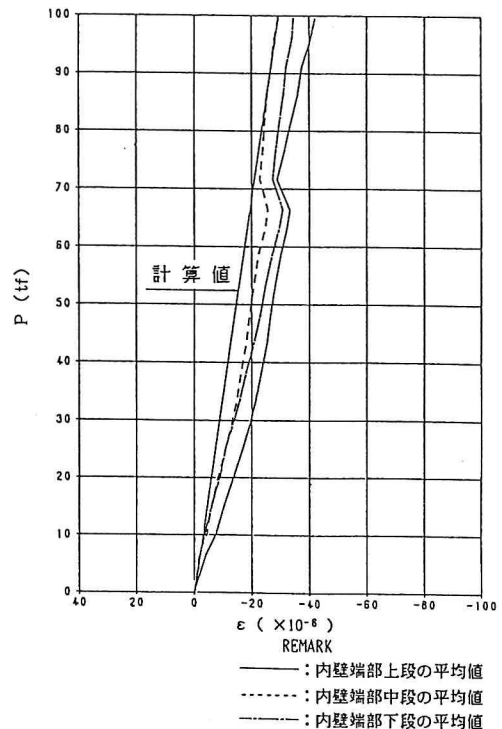


図-9 荷重-コンクリートひずみ図 (内壁)

6. まとめ

本実験によりH.M.S. 工法に関する基礎的な事項、特に、水上における接合・組立方法およびプレストレス導入の効果などに関して以下の事項を確認した。

- 1) 水上において、各コンクリート部材を接合し緊張材で緊結するプレハブ方式により、浮体構造物 (H.M.S.) を製作することができる。
- 2) コンクリート部材の接合面の密着度を高めるため、部材をマッチキャスティング方式により製作することにより、緊張材による緊張力をプレストレスとして均等にコンクリート部材に加えることができる。
- 3) 緊張材の緊張力とプレストレスによる各部材のひずみは比例関係にあり、ひずみの計算値と鉄筋計ひずみ、コンクリートひずみは、概ね一致した。なお、緊張材の固定部周辺については応力集中によりひずみ量も増大するが、その量は小さく特に問題とはならないと考えられる。
- 4) ブロックは平面形状が台形をしており、単体としては浮遊時の安定性が問題となる。今回の実験では、フローターを取り付け安定させるようにしたが、吃水が十分にとれる場合には、ブロック各部材の部材厚を変化させるなどして重心位置を調整する方法が適当と考えられる。

7. おわりに

今回の施工実験は、H.M.S. 工法の基礎的な施工方法の検討のため、ケーソンドックにて一連の実験を行ったものである。運輸省第二港湾建設局では、福島県猪苗代湖において、昭和63年 7月より今回の実験と同規模のH.M.S.を設置し (写真-4) 長期安定性の確認のため現地実証実験を行っている。また、昭和64年 3月から開催される横浜博覧会にも、図-10に示すような一辺の長さ20mの大型H.M.S. を海のバビリオンとして出展する予定である。



写真-4 猪苗代湖における現地実験

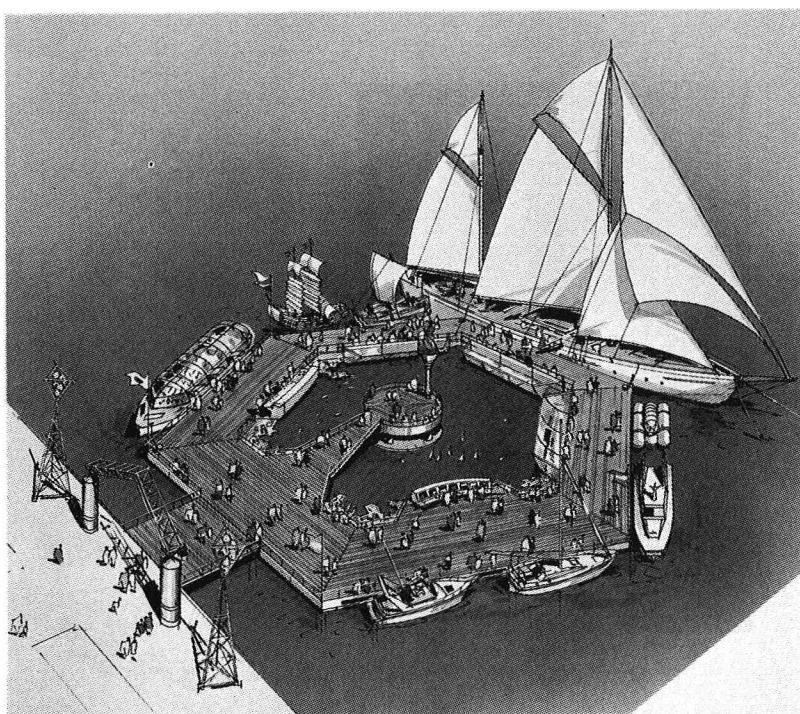


図-10 横浜博覧会 海のバビロン