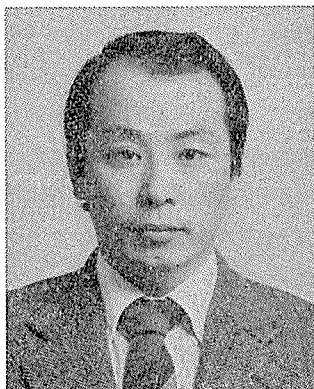


海洋港湾構造物の動向

長 崎 作 治
古 賀 尚 宏



Sakuji NAGASAKI
東海大学海洋学部海洋土木工学科教授



Hisahiro KOGA
ピー・エス・コンクリート(株)技術部

1. ま え が き

我が国のプレストレストコンクリート（以下 PC と略す）港湾構造物は、今までに利用できなかった海域、例えば、大水深（20～50 m）海域とか、軟弱地盤海域のごとく、新しい海洋スペースの有効利用の場で、研究、実用化が日に日に増している動向にある。

PC は、鉄筋コンクリート（以下 RC と略す）や鋼材と並び優れた港湾構造物の建設材料である。なかんずく、PCは、RCと鋼材との中間に位置し、両者の長所を保有しているばかりでなく、両者以上に高強度材料を有効に利用していることは現社会状況から見ても、将来性の高い材料である。

PC は、鋼材と比べると、海水による腐食に対して耐久性が優れ、そして、ひびわれ発生前は、非常に弾性的挙動を示すが、一たんひびわれが発生すると非常に大きい塑性変形を示す能力があり、全体的過載荷重状態の警告を明瞭にするとともに、集中的過載荷重作用力の再分配を可能とする望ましい性質を持っている。軟鋼と異なる点は、この弾塑性範囲における大きい回復能力であって、相当大きい変形を生ずる範囲で載荷しても、除荷後の残留変形は小さく、荷重除去後はほとんど完全に原形に復することである。

以下、海洋エネルギー発電（潮位差・波浪・海流・温度差・バイオマス農場・塩濃度差）のための各国の浮遊構造物の展望と、日本における PC 港湾構造物の動向をのべる。

2. 海洋エネルギー

海洋からエネルギーが変換できる。海洋のエネルギーを利用した例としては海上保安庁（日本）の波力発電灯浮標（ブイ）、アメリカ合衆国コーストガードの波の上下運動を利用したホイッスル（音響浮標）ブイ、そしてフランスの 240 MW 潮力（潮位差）エネルギー発電所などがある。1970 年の石油値上げ以来、ソビエト、南朝鮮、イギリスも潮力発電を計画している。

また海岸流（5 マイル/時）を利用する海流発電の計画がフロリダにある。

1970 年アメリカ合衆国海軍は太平洋 San Clemente 島沖の海面下 12 m に世界最初の海洋エネルギー農場を設置し、深海から栄養に富んだ冷海水を汲み上げ、ジャイアントケルプの栽培実験に成功した。ケルプをメタンガスに変換することが目的で 20×20 km² の海洋ケルプ農場から 5 万人のエネルギーが期待できるという。日本でも 500×250 m のユニット 156 個からなる 4×8 km² の農場を沖合 10 km 以上、水深 100 m 以上におき年間

100万tの海藻を栽培し、メタンガスに変換するスタディが行われている。

また海洋温度差発電は、1881年論文が発表され、1920年 Claude (フランス) がキューバの海岸沖で22kWの発電に成功した。その後地中海に75MW発電が計画されたが、巨額な投資と海水によるボイラーの腐食問題から中止され、長年スタディが行われなかった。オイルショック以降ハワイ島(ハワイ州政府、アメリカエネルギー省)、ナウル島(東京電力)、徳の島(九州電力)で発電実験を行っており、実用化の時代を迎えている。

夏至線と冬至線間の海域の場合、海面の平均温度は27°C、水深600mの水温は2~3.5°Cである。この温度差を利用して作動液体を海面水で蒸発させタービンを回し、発電し、冷水で蒸気を元の液体に戻す考え方が海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion)である。

なお塩濃度差発電の考え方の一つである塩水/真水バッテリー発電も研究されている。

将来、海洋エネルギーをメタンガス、水素、電気に変換し、船でケーブルを運搬、送電することが期待できる。

3. 海洋浮遊構造物

北海における石油とガスの発見は、海洋工学に新しい寸法をもつ構造物を提示した。海洋油田に対する探査が一層大水深に移り、そしてきびしい環境に向かうにつれ、固定した掘削/生産プラットフォームに鋼ジャケット構造物を利用する一方、理想的な構造物として重力型のコンクリート構造物が選ばれるようになった。

1972年以降、重力型構造物に関するいろいろのアプローチが行われ、コンクリートによるC.G. DORIS型、CONDEEPそしてSEA TANK型などの海洋構造物が設置されている。

固定した海洋構造物を技術的に建設することができない時代、それに代わるものとして船形構造物をカテナリチェーンで係留することは250年前にイギリス、ドイツ、フランスで実施され、今日に至るまでこの方法が採られている。しかし長い歴史をもつ浮遊構造物の設計には不確定要素がかなり多く、浮体に作用する波漂流力と運動、確実な係留など問題点がかなりある。

しかし最近、破断力1000tをもつ係留ラインの開発、さまざまな海底地盤に適応したいろいろのアンカーの開発などによって、上下、水平、ピッチングなどの運動を限定した準固定的な浮遊海洋構造物の設計・施工に関する究明が行われるようになった。

本文は、コンクリート・プレストレストコンクリート

による水深600~1300mにおけるフレキシブルな、あるいは剛な冷水取水パイプをとりつけたユニークな海洋温度差発電(OTEC)浮遊構造物について、海洋エネルギー会議の論文等からその設計展望をご紹介します。

4. 冷水取水パイプ(CWP)をつけた海洋温度差発電(OTEC)複合コンクリート浮体の設計考案

海洋に設置されるOTECプラントは発電システム、浮遊構造物、冷水を汲み上げるCWP、位置保持(ダイナミックポジショニング)または係留装置、電力輸送用ケーブルなどのコンポネンツからなる。

OTECは高低熱源間の温度差が20°C前後であるから、出力に対する処理熱量すなわち取水量は100MW(10万kW)プラントで表面高温水、深層冷却水のおののについて、1時間あたり100万tにも達し、水深600m以深に及ぶ直径10m以上のパイプラインがまず問題となる。さらにOTECを日本近海で実用化しようとする場合、台風時の海象、気象条件に抵抗できるCWPを取付けた浮体、そして送電ケーブルの取付けから運動のすくない複合浮体の係留が必要条件となる。

4.1 ダイナミックポジショニングによるTRW社のコンクリート複合浮体

100MW(10万kW)発電を目的としたアンモニアによるClosed-Rankinサイクルのプラントで、その基本設計は、図-1に示される海面に浮かんだ直径102m円盤形のコンクリート浮体中央に直径12m強化プラスチック(FRP)CWPを水深1200mまで付けた複合浮体を熱交換から排水される海水のジェット流を利用しダイナミックポジショニングによって位置を保持する設計で、耐用年数は40年である。

(1) 浮体とCWPの考え方

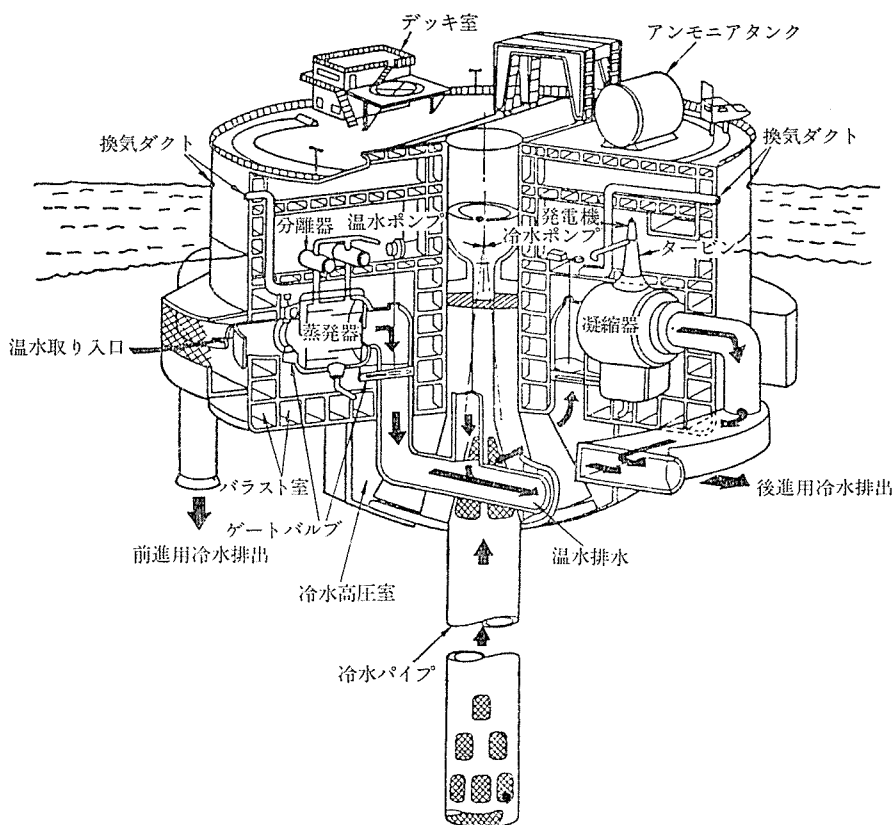
① 浮体

浮体形状をスパー(棒状)、セミサブマジブル(半没水)、そしてベッセル(台船)と3形状、14体について評価した結果、円形と方形のベッセルが必要条件を満足するので、この4体について特性を検討し、波浪に対する運動の優れた円盤ベッセルが最適構造物として選ばれた。なおスパーとセミサブマジブルは高いリスクと建造価格が高いため除外された。

② 冷水取水管(CWP)

CWPに関する問題点は、使用材料、展開、回収(撤去)の方法である。FRPパイプとナイロンファイバー強化ネオプレンパイプが候補となった。

鉄筋コンクリートパイプは、周期的応力によるポテン



図一1 ダイナミックポジショニングによる TRW 社のコンクリート複合浮体

シャルクラックの発生，クリープと収縮による寸法上の不安定さ，クラックによる剛度の減小，クラック後の鉄筋の腐食，浮体との取付け，重量など問題が多く除外した。また堅くない鋼（必要壁厚より高額）パイプ，堅い鋼（腐食対策などにより高額），堅くない FRP（必要壁厚より高額）パイプも除外した。

第一候補の FRP パイプは腐食しない，ぼろぼろにならない，寸法的にも安定し，強く，フレキシブル性をもち，重量 2.976 t/m，1 万ドル/m のものである。現在技術で直径 12 m までの FRP パイプの製作は容易にできる。

(2) 係留とダイナミックポジショニング

係留としてはワイヤとチェーン係留が考えられる。ワイヤ係留システムは信頼できる深海係留であるが，水深 900 m 以上では未だ使用されていない。またチェーンも OTEC に適用できるようなチェーンはいまのところ製作されていない。

ダイナミックポジショニングシステムとしては，排水パイプからの水射射によるものと，プロペラ推進の 2 タイプが考えられる。後者は据付け価格，オペレーション価格が高く，パワー消費も高つく。前者は革新的のようと思われるが，リスクも少なく，運動エネルギーを排水

射から得ることは合理的な方法といえる。水射による位置保持システムの問題点は海底面にハードラインをもたないで，プラントが風下，風上に向かってどのように漂流するかである。一例であるが，風速 50 ノット，流れ 0.5 ノットの場合，プラントは温水排水ジェット 4 本で風上に 10 マイル向かうことになる。しかし流れが 2 ノットになるとプラントは風下方向に漂流する。風速 50 ノット，流れ 1 ノットではそのままの位置が保持できる。

4.2 HCL (孔あき円筒鋼リンク) による一点係留 (ロッキード社のコンクリート複合浮体)

直径 12 m，長さ 450 m のテレスコピックタイプコンクリート CWP と 4 基のパワーモジュールから構成された円筒タイプの浮体を，図-2 に示されるように孔あき円筒鋼 (HY 80) リンク (リンク直径 178~36 cm) による 1 点係留ラインで，直径 28 m，高さ 4.8 m，海中重量 800 t の重量アンカーによって位置づける設計である。プラントは厳しい環境でオペレートでき，発電出力 160 MW (16 万 kW)，海岸までケーブルで送電する。

パワーモジュールは海水ポンプ，熱交換機，タービン，ゼネレータ (発電機)，アンモニア液，ポンプ，浮力調整システム，その他付属機器をもち，ドライドックで建

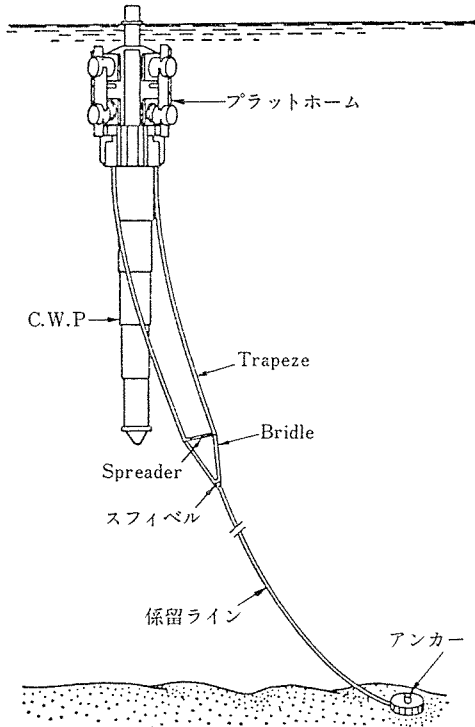


図-2 ロッキード社のテレスコピックコンクリート CWP 複合浮体

造（コンクリート）できるように設計した。モジュールにすることによって建設，展開，オペレーション，維持そして修理が容易にできる。

(1) プラットホーム

図-3 に示されるように、プラットフォームのコア構造体と浮円筒はパワーモジュールと CWP を支持し、船員室、調整室、付属機械室となる。プラットフォームの各構成部材はスリップフォームによるコンクリート打設で十分建造できる。直径 18 m の円筒は海面上に伸び、船員室、オペレーティング室となる。この円筒とアンモニアタンクは厚さ 10 cm のコンクリートで被覆した鋼製で、鋼の腐食を防護する一方、船舶衝突時のエネルギーを吸収し、破損を最小とするように考えた。図-4 の中央コアは、海面下 46 m 位置が冷水入口で高圧室となっており、直径 6.4 m のポートを通してパワーモジュールのコンデンサ（凝縮器）に冷水が流れ込む。中央コアの上部セクションは 4 個の直径 6.4 m のポートから各パワーモジュールのエバポレータ（蒸発機）に温水が流入する。4 個の 60 MW（6 万 kW）のパワーモジュールはバラストなしで排水量 1 万 1 300 t の浮体となる。4 個のモジュールで発生した 240 MW のパワーのうち 80 MW が海水ポンプなどの電源として消費され、陸へは 160 MW が送電される。

(2) テレスコピック・コンクリートの CWP

水深 450 m あるいはそれ以上から海面近くのコンデ

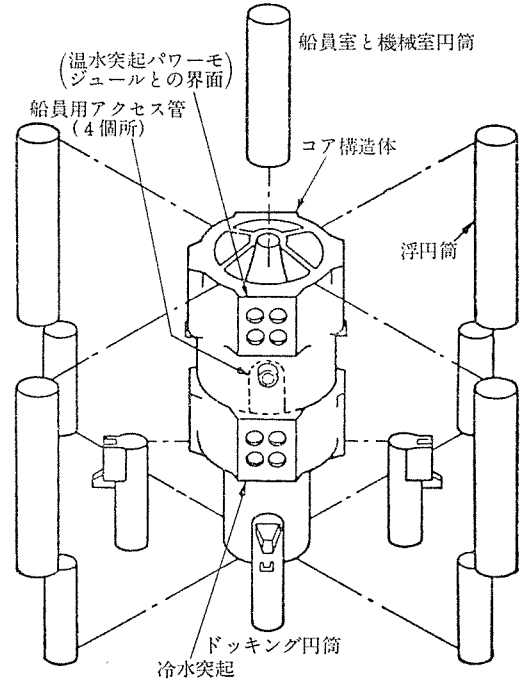


図-3 プラットホームの構成部材

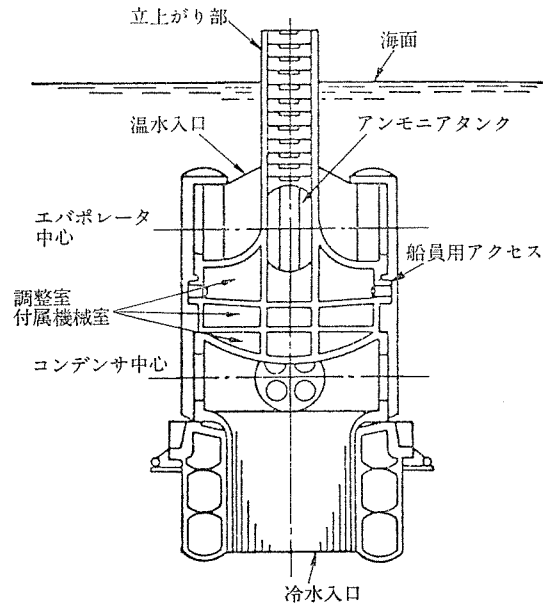


図-4 中央コア

ンサまで冷水を取水する場合、運搬水の温度が上昇しないようにすることがまず必要条件となる。また台風条件下の海洋環境における運動にも抵抗でき、最小の維持で耐用年数が長く、しかも急速建造，展開ができなければならない。ポストテンションによる図-5 に示されるコンクリートの環状断面ユニットをテレスコピック状につないだ全長 300 m の CWP が設計された。長さはもちろん限定されず、冷水，温水量と設置水深によって変え

ることができる。1ユニットパイプの長さは60mで、連続したユニットパイプは頂部から底部まで順次断面直径を小さくしている。パイプの壁厚は45.7cmで、重量を軽くするため15cmのボイドを組込んだ。作業荷重を分散し、パイプ内の水もれを防止するため、ユニットパイプ間各接手に金属被覆とエラストマ(ゴムのような弾力性のある物質)ガスケットを設けた。最深部のユニットパイプ下端に冷水入口の流水のロスを減少させるため鐘形の口(bell mouth)を取付けた。またパイプ外周、水平方向に棚状のリンクを組み込み、建造時、全パイプセグメントの全重量を十分支持できるように強化した。

プラットホームの乾舷を一定にするには、CWPの重量が水深によって変化するのでバラストで補正しなければならない。

4.3 コンクリート・ゴム複合 CWP

をつけた空気クッション、コンクリート浮体

ウエスチングハウス電気会社はドイツのコンクリート会社 Dywidag とコンクリート・ゴム複合 CWP をつけた運動のすくない空気クッション (Air Bag Type) ・コンクリート浮体を設計した。

コンクリートの浮体は、表-1 に示されるように発電プラントに応じ、1~5のモジュールからなり、中央のコアに長さ900mのCWPをつけたものである。長さ900mのCWPはコンクリート浮体の吃水深に大きく影響を与えることとなる。

コンクリート、鋼などのCWPを剛結した複合浮体の場合、浮体の曲げモーメントは直径に比例するが300~400万t-m、CWPの曲げモーメントは100MWで100万t-mとなり、構造的にむずかしい。

位置保持に関しては、表-2の階級6をオペレーション時、階級9を極限時として運動を計算すると表-3のようになる。

CWPの接合が剛の場合、横ゆれ(rolling)は小さく、上下ゆれ(heaving)は波高程度、前後ゆれ(surging)も小さい。

フレキシブルなゴムのCWPをヒンジで接合した浮体では、パイプの曲げモーメントはほとんどなくなるが、横ゆれは大きくなる。

これらの問題を解決するため、空気クッションをもつ

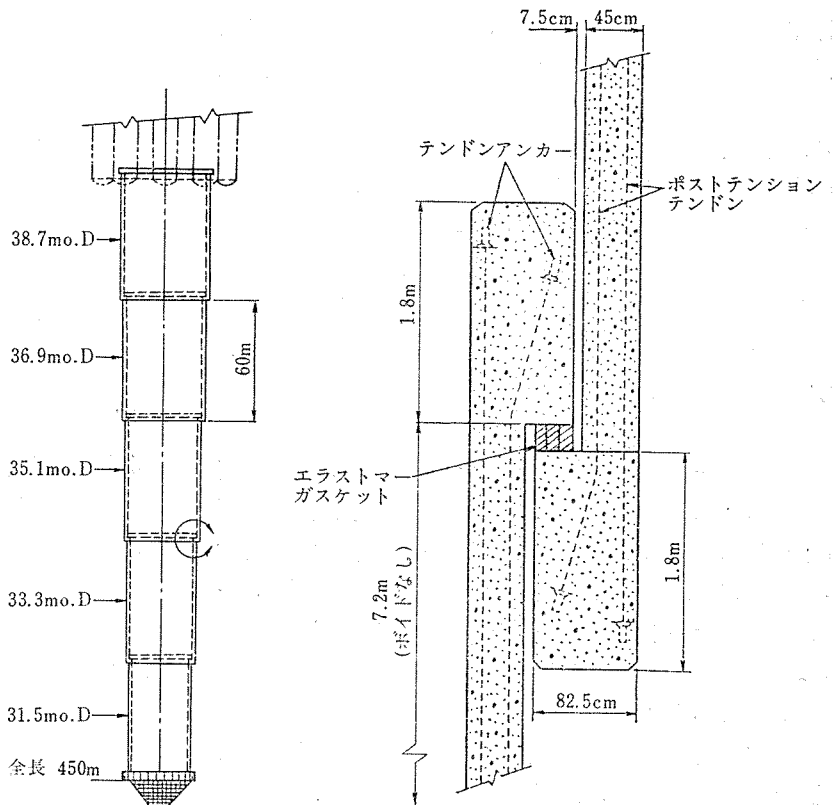


図-5 テレスコピック CWP とパイプ接合 (右)

表-1 発電出力とモジュール

モジュール(個)	コア(個)	パワー (MW)
1	1	10, 25, 33.3, 50, 100
3		30, 75, 100, 150, 300
5		50, 125, 166.7, 250, 500

表-2 保留設計条件

階級	6	9
風速 (m/sec)	12.6	22.3
波高 (m)	4.8	12.6
周期 (sec)	8	12

表-3 形姿と運動

CWPと浮体と結合状態	たわみ性をもつ堅いCWPを剛結した浮体	フレキシブルなCWPをヒンジした浮体	空気クッション浮体にたわみ性をもつ堅いCWPを剛結
形姿			
階級6 横揺れ	0.1°	1.3°	0.1°
階級6 上下揺れ	0.3m	0.3m	0.3m
階級6 前後揺れ	0.4m	0.4m	0.4m
階級9 横揺れ	1.7°	8.3°	1.4°
階級9 上下揺れ	15.0m	15.0m	14.5m
階級9 前後揺れ	9.2m	9.6m	9.2m

論 説

浮体にたわみ性をもつ堅い CWP をつけた 図-6 の設計が採り上げられた。浮体の重量はモジュールの輪室 (annulus) に閉じ込められた空気クッションで保持される。浮体下面は空気室であるから受圧面積が少なく曲げ応力は少なくなる。また海面の面積も小さいので浮体の運動はセミサブ浮体のようになる。

空気クッション浮体の場合、ウエイトによって安定性を保つこと、つまり重心を下げる必要がある条件となる。それにはたわみ性をもつ重量のある CWP をヒンジすればさらによい。

(1) 浮 体

コンクリートの圧縮強度 450 kg/cm^2 、鋼材の引張強度 $42\sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 、プレストレスト鋼材の引張強度 $85\sim 105 \text{ kg/cm}^2$ のプレストレストコンクリートで浮体は設計する。なお空気クッション室のコンクリート (壁厚 $0.4\sim 0.6 \text{ m}$) はコートし、不浸透とすることが必要条件となる。

(2) C W P

CWP はウエイトとして浮体を安定させ、取水の役目ももつ。したがって、海面から $120\sim 170 \text{ m}$ までをプレストレストコンクリートとし、それ以深はフレキシブルなゴムとする。必要直径はプラントの出力によって異なるが 9 m 以上、必要長さも 900 m 前後となる。

(3) 運動と係留

CWP をつけた空気クッション浮体の横ゆれはセミサ

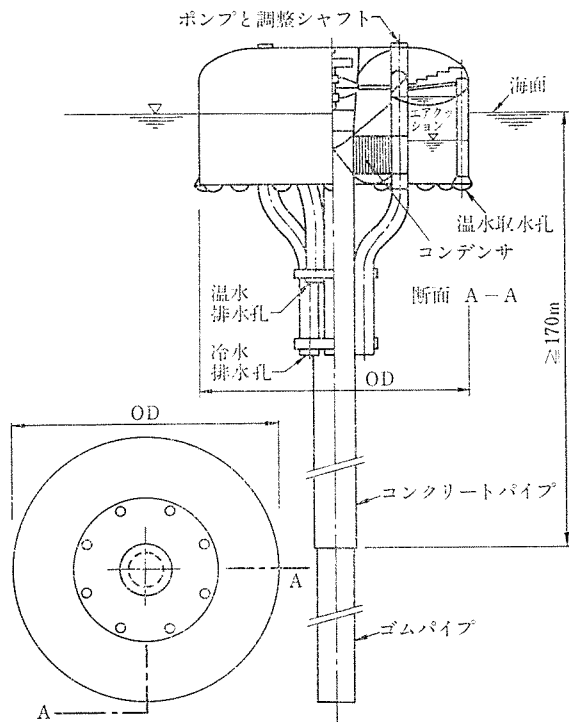


図-6 たわみ性をもつ堅い CWP をつけた空気クッション浮体

ブ浮体のように、上下ゆれは台船のように運動する。前後ゆれ、横ゆれとも共振しないが、上下ゆれ運動は現場波浪周期 18 sec で共振する。

なおロープ、チェーンのカテナリ係留、あるいはダイナミックポジショニングで十分位置保持ができる。

(注) イギリス建設省の Floating Aerodromes (1969)、すなわち海洋における可能性のある空港の建造報文でも、空気圧 $0.21\sim 0.35 \text{ kg/cm}^2$ の空気クッションガスホルダタイプの設計があり、ボックスタイプの構造体より複雑でなく、作用波力も少ないと述べている。

5. 我が国の港湾構造物

5.1 着底式防波堤

(1) 曲面スリット式防波堤

写真-1 は、昭和 54 年 10 月より 55 年度に、秋田湾実験工事としての実物大実験堤である。曲面スリット式防波堤は、運輸省港湾技術研究所の特許製品として、すでに大水深用 PC 防波堤が開発されている。

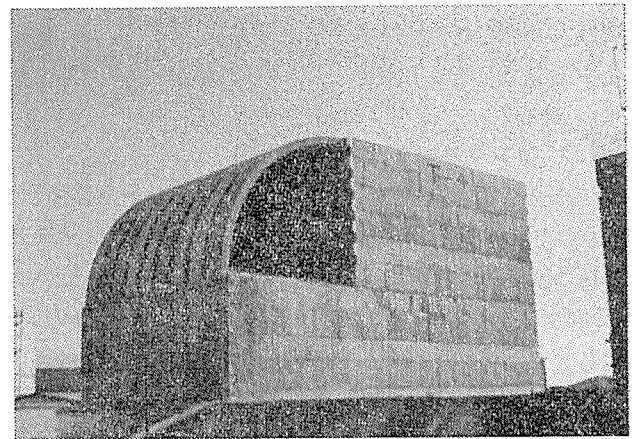


写真-1 秋田湾の曲面スリット式ケーソン

曲線スリット防波堤は、ケーソン本体の前面に曲面縦スリット壁を設け、断面においてほぼ $1/4$ 円形状の遊水室を形成する防波堤および護岸の消波構造である。

反射波、越波、波力を軽減するために、ケーソン前面に消波ブロックを投入したいわゆる消波ブロック被覆構造が、比較的浅い海域における防波堤および護岸の主流の消波構造として従来から用いられているが、大水深、大波浪の条件下では、ブロックの大量化、安定性などに問題がある。曲面スリット防波堤は、消波部のスリットに曲面 PC プレキャスト部材を使用し、プレストレス連結でケーソン本体にスムーズな連続構造とし、水平方向の流入、流出ばかりでなく、上下方向の流入、流出によっても波のエネルギーの消費が期待でき、部材に生ずる大きな純引張力をプレストレスで打ち消し耐久性を高め、経済的にも合理的な消波構造を有するところこの特徴がある。

現在、運輸省、通商産業省合同の海上石炭火力発電所を対象とする沖合人工島委員会のFSでも、当曲面スリット防波堤が外海用防波堤として用いられている。

(2) マルチセルラー式防波堤

図-7、図-8は、マルチセルラー式防波堤の概念図である。外海に面した大水深海域では、砕波による波高の減衰がないために設計波高が非常に大きくなり、通常のケーソン堤形式では堤体幅が著しく増大することが多くなる。このため、比較的狭い堤体幅で安定を保ち得る構造形式を開発し、大水深防波堤の建設費の低減を図る点にマルチセルラー式防波堤の特徴がある。曲り斜面壁は一体製作が困難であるので、PCプレハブ部材を使用し、PC結合で本体のケーソンに取り付け、波力により生ずる純引張力をプレストレスで打ち消すようになっている。

現在、運輸省第三港湾建設局でこの研究と実用化の検討が進められている。

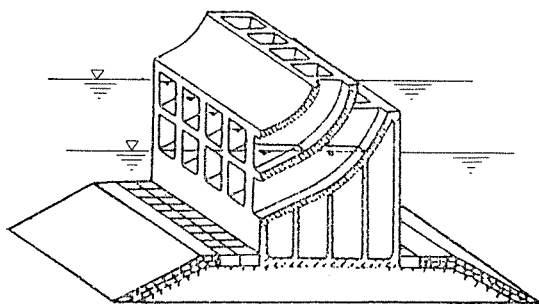


図-7 マルチセルラーケーソン基本型スケッチ

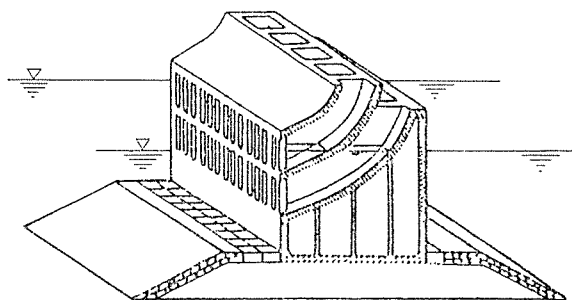


図-8 マルチセルラーケーソン消波型のスケッチ

5.2 浮防波堤

写真-2は、運輸省第四港湾建設局が開発したPC浮防波堤である。当PC浮防波堤は、幅10m、長さ10m、高さ4mのRC製浮体ユニット4函をPC鋼線で接合して一体の浮体とするPC構造物である。そして、堤体中央部に遊水部を設けて波のエネルギーを消しやすくしている。

今回の工事の特色は、PC構造物として、PC接合工

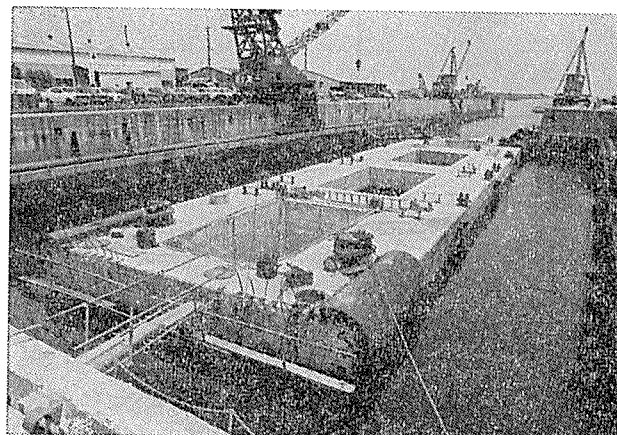


写真-2 PC浮防波堤

事を海上で行ったところにある。このことにより、力浮を利用して、従来の地上での工事よりも容易に大型の構造物がPCの技術を使用することによって製作ができるようになったことである。この技術は、今回のような浮防波堤に限らず、広く大型海洋構造物の建設工事に生かされていく動向にある。

5.3 その他の構造物

そのほかに、新聞、雑誌等に公開されているもののようなものがある。

東海地震時の物資、人員の海上補給路の確保を目的に、清水港をモデル港としてPC製耐震係船岸が委員会を設けて検討されている。その規模は、長さ150m、幅40m、高さ6mのPC浮函体である。浮函体であるため耐震性には最も合理的である。そのうえ、大水深、干満差の大きい所、または軟弱地盤海域でもこの形式の係船岸が経済的となる場合も多くなると思われる。

大規模なものとしては、先述の沖合人工島委員会で、40万DWTの石灰貯蔵ビージが、長さ400m、幅80m、高さ35mの規模で、コンクリート容積が約10万m³のPCバージとして検討されている。

6. あとがき

海洋エネルギー発電のための各国の浮遊構造物の展望と、日本におけるPC港湾構造物の動向を述べた。北海において、設計波高30m、水深70~170mの海域で、PC製石油掘削用プラットフォームがこの11年間にすでに15基も建造されている実績は、PC港湾構造物の研究価値と実用度が高いことを実証している。今後は我が国においてもますますこの種の構造物がふえていくであろう。