

特別講演 I

巨大コンクリート浮体構造物の設計開発(主として解析)について

名古屋大学工学部 教授 田辺忠顕

1. はじめに

我国においても、今年1996年7月20日に200海里(約350km)経済水域の国連海洋法条約が発効したが、これによって世界第6位の約451万km<sup>2</sup>広大な水域を有する海洋国家になったのである。まずこの水域の領域を図上で示すと、図1の如くなる。陸上と合せると、海陸合計面積では世界第十位にもなるのである。勿論海が殆どであり、かつその海の部分も水深が100m以上の部分が96.5%なのであるが、これを利用しない手はない。

ほんのわずかに考をめぐらしただけで日本の大きな夢が描ける事はもう当然すぎるほど当然と考えられるのである。きちんとした国家計画を立てて、その方向に進んだならば余程の事が達成されるのは間違いないと思われるのである。現在、この方面で公表されている計画を一応挙げてみると、日本海洋開発建設協会から 1)沖合い人工島、洋上空港都市、海上通勤空港、海中トンネル、マリリゾートランド、海底食料備蓄基地、海

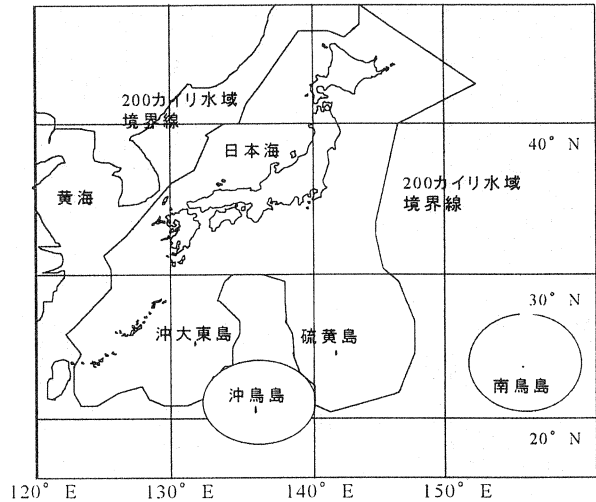


図-1 日本の排他的経済水域

洋エネルギーランド、海中牧場などであるがこれらは全て単発の構想で、451万km<sup>2</sup>を全体的ににらんで国家計画の提案となっているものは今のところ殆ど無い。しかし、今後色々な構想が出てくるのは間違いないであろう。

どういう構想が考え出されるにしろ、水深が30m以内ならばどうにか埋め立ても考えられるが水深が30m以上になれば埋め立てなど考えられなくなる。その場合であっても、浮体構造であるならばどうということ無いのである。しかも、コンクリートの板(勿論板といっても厚さが20m~50mのボックス断面であるか)で10km四方の浮体を造る事はそれ程難しい事ではなさそうなのである。10km四方の土地は1万ヘクタールであり、現在の成田空港の25倍の面積である。ここに巨大な浮体構造を考える意義が出てくる。このような板を10枚とか20枚造って、相互に船あるいは飛行機で交通を確保するならば、日本の土地問題など直ちに解決してしまうような気もする。特に、皆にいやがられている迷惑施設などはこの様なところに持って来て建てても良いのである。

さてコンクリートの分野では、このような海洋コンクリート構造物に関する研究が約20年ぐらい前に大いに燃え上がった。その理由は、関西空港の建設に伴って浮体案も多いに有視されたからであり、かつ当時エコフィスクなど北海の油田開発リグがコンクリートで建造され始めていたからである。しかし、関西空港は埋め立て案が採用となり、石油危機も去るに及んではや、コンクリートによる浮体構造に関する研究が一挙にしぼんでしまったのである。

ところが、最近鋼構造の分野でマリーンフロートとかメガフロート研究組合の活動などが次期の浮体型空港建設を目指して活発化して来ており<sup>2),3)</sup>、実規模に近い実験も行われはじめた。20年前の熱気のリヴァイヴァルである。この様な情勢でコンクリートの分野も安閑としておれなくなって来ているのであり、プ

レストレストコンクリートの分野はその主体的な活動が期待されるのである。

私も、この数年コンクリートの浮体構造に関して研究を進めて来ており、コンクリート屋が浮体構造を研究する場合の隘路が何処にあるか解って来たのでこのあたりを少し述べてみたいと考えている。浮体構造を実用化したい場合に考えなくてはならない幾つかの問題がある。その一つは構造解析、2つは耐久性、3つは環境問題、4つは経済性であるが、この内で最初に解決しておく必要があるにも拘らず一番解らなかつたのがどのような外荷重を考えれば良いのかということであった。例えば、浮体に関する構造物の技術記事は少なくないのであるが、荷重に関しては殆ど書いていないのである。地震のような荷重にたいしては皆が飛び付いてゆくの、これは何故であろうか、この理由は恐らく浮体の荷重が波などの流体力で構造屋には直感的な理解が難しいという事があると思われるのである。確かにコンクリート製の浮体あるいは防波堤の記事はかなり多くても、何故その様な荷重が設定されたかは、殆ど書いていないのである。加えるに、板のようにぺらぺらで、構造体に変形する場合の波の荷重については海岸工学の人達でさえそうはやっていない分野であった。そこでここでは、その取っ付きの悪さを克服する事がコンクリートによる浮体研究の端緒になると考えて始めた理論研究の一部を述べるとともに、従来の剛体としての解析では誤差が大きくなり過ぎる事を示す。

特に、理論解析に関しては従来は不可能と考えられていた数値解析も行えるように成り、振動の連性解析も進んで来た。今回はその進歩の紹介も含めてコンクリートの技術者の関心を再び喚起したいと考える。後の3つの問題点、即ち耐久性、環境問題、経済性については従来までの研究成果の直接的な応用が可能でありここでは取り敢えず触れないで置く。

## 2. 浮体構造が受ける設計波力と波による断面力の推定<sup>4),5),6)</sup>

陸上の構造物でも設置地点が定まるとその地点の活断層の調査など荷重環境を調査するがそれと同様に、海上海中構造物の設置地点がおおよそ定まったら、その海域の風の状況、波の状況を詳細に観測する必要があるようである。気象と海象のうち台風、低気圧というスケールの大きなもの、また気圧、風速、風向など、また、潮汐、波浪、津波、高潮などを調査観測する必要があるようである。例えば、最近この地方で焦点になっている常滑沖における海上空港の設計に当っては次のような観測が為されている。図2に示すように常滑沖海上観測塔、伊勢湾シーバース、伊良子、神島、菅島、に於いて気象観測、常滑沖海上観測塔、四日市港、神島海上パイにおいて、海象観測を行っている。その観測結果の検討から伊勢湾に於いては湾内発生波と湾口侵入波の合成を行う必要があるとされており例えば表-1のような条件で波浪計算などが行われているようである。我々が対象とする浮体構造の設計の場合にも、この様な入力側データの調査を行うと設計荷重データが得られる事になる。

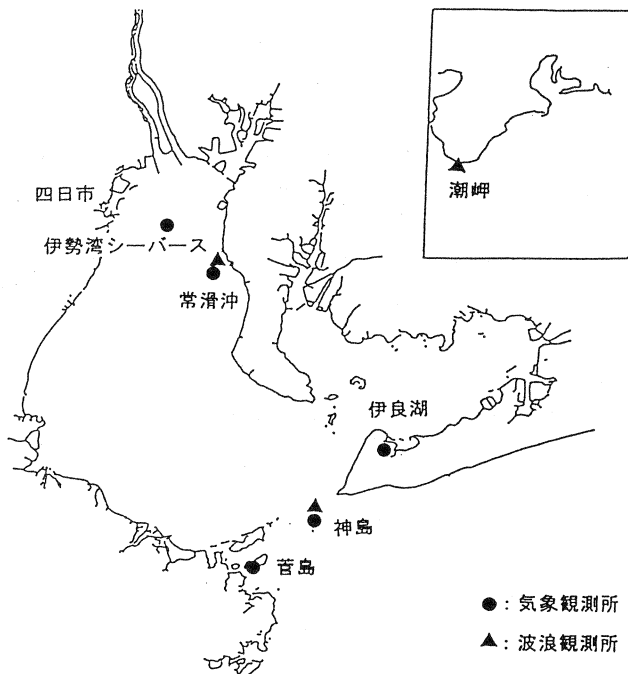


図-2 風・波浪の観測地点位置図

表-1 異常時波浪における波浪変形計算の計算条件

諸元	伊勢湾台風時 (S系)		N系異常時
	湾内発生波	湾口侵入波	湾内発生波
基礎方程式	エネルギー平衡方程式		
計算領域	空港島周辺海域 格子間隔: 200m	〔広領域〕 伊勢湾・三河湾全域 格子間隔: 500m 〔狭領域〕 空港島周辺海域 格子間隔: 200m	空港島周辺海域 格子間隔: 200m
地形条件	バックグラウンド地形: 現港湾計画の完成時の地形, 空港島無し		
水深条件	空港島周辺海域は, 平成5年5月~6月の深浅測量成果 名古屋港・四日市港・衣浦港・三河港・津松阪港は, 港湾計画の水深値 上記以外は最新の世界図		
潮位条件	建設計画地点の設計潮位: D.L.+4.50m		常滑港の朔望平均満潮位 : D.L.+2.20m
入射波条件	建設計画地点の推算値 波向: S S E 波高: 3.58m 周期: 5.6s	伊勢湾港での推算値 波向: S 波高: 13.8m 周期: 15.4s	50年確率波 波向: NNW 波高: 2.24m 周期: 5.2s
不規則波 条件	方向分割数: 32, 周波数分割数: 5		方向集中度: 10
	方向集中度: 10	方向集中度: 10, 25, 75	
護岸反射率	① 空港島護岸(護岸の構造様式ごとに設定) 直立壁: 0.9, 捨石斜面: 0.5, 消波ブロック斜面: 0.4 ② 対岸部の関連開発用地護岸(捨石斜面): 0.5		

このようなデータから、設計波高、周期が定まると、まず一般的に用いられる理論は微小振幅波の理論のようである。微小振幅波の理論は一定水深の領域で、流体に関する質量保存則、表面の2つの境界条件(一つは表面の水粒子の運動に関する力学的な条件、もう一つは水粒子の運動が表面形状の変化と一致している条件である運動学的な条件)と底面で鉛直方向の速度が零の条件から解を求めるもので境界条件や連続条件に関して一次近似を行うと、一定水深の水域で支配方程式の解が存在する条件として  $\omega = 2\pi/T$  と波数  $k = 2\pi/L$ 、水深  $h$  との関係が、 $\omega^2 = gk \tanh kh$  として得られるのである。従って、水深が定まっている地点の

設計波長も求まることになる。また、この場合の速度ポテンシャル  $\phi$  も  $\phi = \frac{Hg \cosh k(h+y)}{2\omega \cosh kh}$  として直ち

に求まる。この速度ポテンシャルを使用すると、先の波浪観測から得られたデータをこの中の  $\omega$ 、 $H$  にまた、先の式から得られた  $L$  を入れると、計算上の入力波浪のポテンシャルも得られるのである。これは耐震計算の入力地震動ができたようなものである。

微小振幅波の理論は、波の一次近似理論であるが、設計に使用されるには大変便利で構造解析の線形理論によく似ている。津波の影響の解析も有る程度までこれで近似できるようなのである。

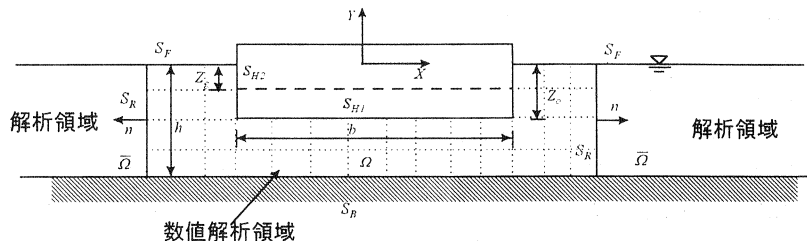


図-3 浮体構造物の座標系

今後コンクリート構造屋も海洋構造物の設計を行うに当ってはこのあたりの理論はきちんと理解しておくべきことのように考えられる。

微小振幅波理論に従えば、理屈っぽくなるのでなるべく簡単にすが、波動に関する散乱波のポテンシャルと浮体の変位を未知数とする連成連立方程式を立てることができる。この場合に、図-3に示すように数値解を求める領域と、無限領域を表す解析解領域を接続して全体を解く事になる。これらの連成方程式を解くと浮体の動揺や断面力が計算される。名古屋大学が開発した計算アルゴリズムは今のところこの分野では最先端を走っており、従来の剛体とみなす計算結果との比較を示すことができる。

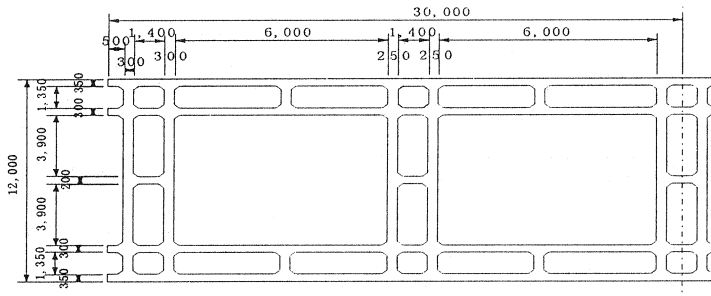


図-4 浮体断面図

まず、関西国際空港の建設の際にコンクリートの浮体構造空港としてプレストレストコンクリート協会が提案した浮体断面を図-4に示す。

この断面2次モーメントはおおよそ  $42\text{m}^4/\text{m}$  であるが、従来の計算では剛体として計算しているから、剛性は無限大を仮定していることになっている。実際PC技術協会の提案はその様な仮定のもとで断面算定されている。そこで、先の波高、周期、水深の関係式を用い関西空港の設計に用いられた有義波高4.6m、周期9.6sec、水深20m、波長115mに対する動揺計算を行ってみる。まず動揺のモードの変化が剛性の違いによってどのように起こるかを示す。浮体の長さはこの場合1000mである。図-5に示したように、提案断面では、曲げ振動の節が5つも出来ているが、その剛性を100倍すると3つに減り、さらに100倍すると殆ど剛体動揺になる事が示される。当然の事ながら、実際の現象は剛体と異なり5つ節が存在するものとなるであろう。このような事から、更に剛性の違いによって最大変位がどの程度剛性によって異なるかを示したのが図-6である。この場合には浮体の長さの関数として最大の動揺量を

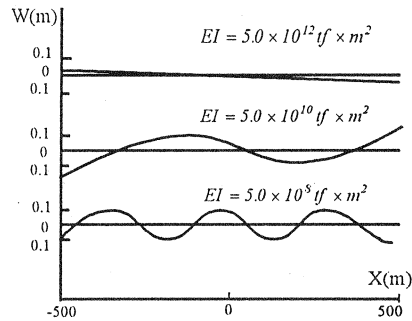


図-5 長さ100mの浮体の振動波形

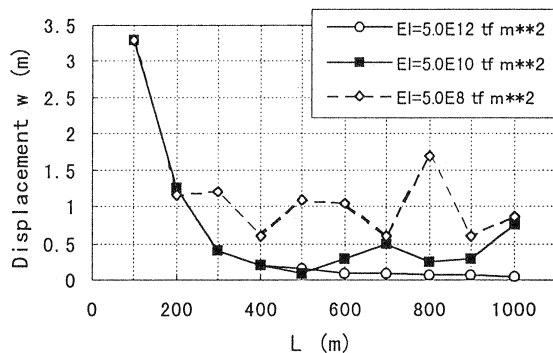


図-6 最大鉛直変位

示してある。浮体の長さが200m以下ならば、剛性の違いによる動揺量は差が無いが1000m程度になると提案断面であれば約1m, その100倍の剛性であれば約80cm程度、更に100倍の剛性であれば5cm程度である事が計算されている。鉛直方向繫留力についても同様に示すと、図-7(a)に示すように長さが200m以下であれば剛性の違いにかかわらず150ton/m~350ton/mで更に長くなると剛性の違いによる繫留力の違いが出てくる。同図(b)にはもう一方の端部の繫留力が示してある。長さが長くなると左右の繫留力の差が無くなる。水平変位についても、計算結果を示すと図-8のようになり1000m程度の浮体になれば10cm程度まで減少する。これらの動揺量は浮体上の施設の使用限界と関連してくるが、構造体として更に重要なのは発生する断面力は許容限界に入っているかどうかのチェックである。最大曲げモーメントとせん断力を各剛性の場合に図-9, 10に示したが剛性が事実上無限大に近い仮定をした場合の曲げモーメントは実際の場合の約10倍以上大きく計算され、せん断力は2倍程度大きく計算されるようである。それでは、PC建協が提案した断面で大丈夫であるかどうかというと、最大圧縮応力が約100kg/cm<sup>2</sup>、最大せん断応力が55kg/cm<sup>2</sup>であって、決して安全な断面設計とはなっていないのである。勿論本当の長さは更に5000mと長いのであるから、これらにたいしての計算を行ってはいじめて答え

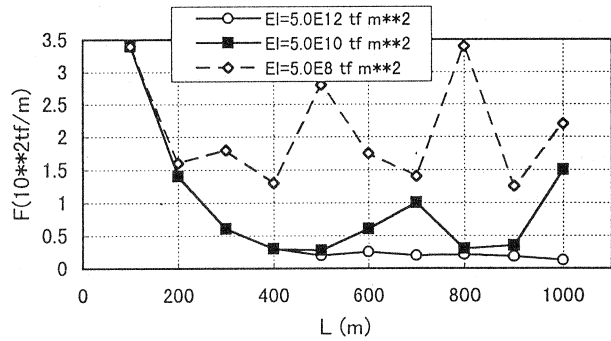


図-7(a) 鉛直係留力 (浮体右側)

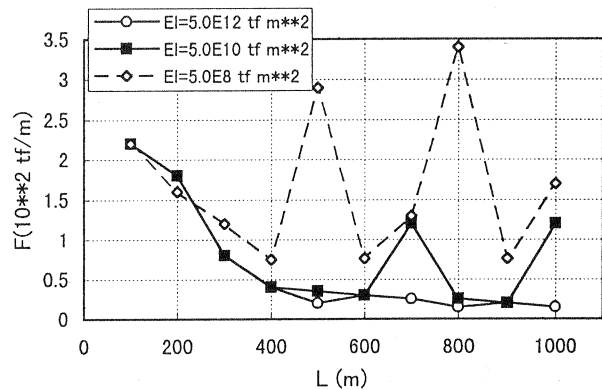


図-7(b) 鉛直係留力 (浮体左側)

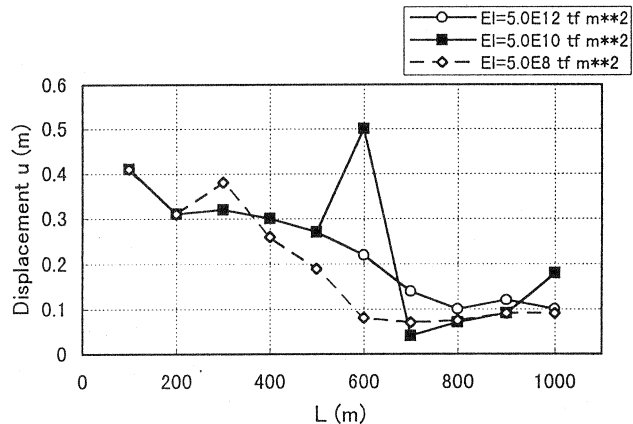


図-8 最大水平変位

の出る問題ではあるのであるが。以上が現在最も進んだ方法による設計断面力の算定方法である。しかしより一般的には、この海域全体を計算領域として海底地形、海陸境界の境界条件、浮体の辺における連性境界条件を設けて、全体の支配方程式を解く事が可能と考えられる。

この方向での研究は今のところ誰も手をつけていないが将来にはその結果に基づいて巨大浮体構造の設計断面設計がなされるようになるのは間違いないとおもわれる。この為に、我々構造エンジニアと海岸工学エンジニアとの協力が不可欠で有り、P C協会の果たす役割は極めておおい。

### 3. おわりに

さてこの様な、外力の計算が終わっても更に、先に述べた耐久性の問題がある。耐久性の問題は電気、化学、構造の3つの分野の量の連成問題である。しかしこの分野における実験量は極めて多大で多くの現場資料も貯えつつあり、コンクリート浮体構造の耐久性設計も費用を厭わなければ、相当程度行えるであろう。しかしマイクロの劣化現象に関しては今後も大いに研究をすすめる必要がありそうである。

この様な色々な検討の結果、実際の構造物が設計され実験が行われかつ実施に移されるであろうが、直ちに大きな構造物が建設されるわけではなく、徐々に規模を大きくして行かなければならない。この意味で早く実験なり、実設計なり始める必要が有りコンクリート分野の企業の早急な認識注意を喚起したい。

### 参考文献

- 1) 日本海洋開発建設協会：21世紀に向けて、これからの海洋開発，山海堂，1987
- 2) (財)沿岸開発センター，マリンフロート推進機構：大規模浮体構造物の研究報告書，1995
- 3) メガフロート技術研究組合：超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)平成7年度研究成果報告書 1996.3
- 4) 西村政博：箱形係留浮体の3次元振動解析，名古屋大学修士論文，1992.3
- 5) 田中小百合：大型浮体構造物の連成振動解析，名古屋大学卒業論文，1993.3
- 6) 天野善勝：非線形バネにより係留されたコンクリート製大型浮体の動揺解析，名古屋大学修士論文，1996.3

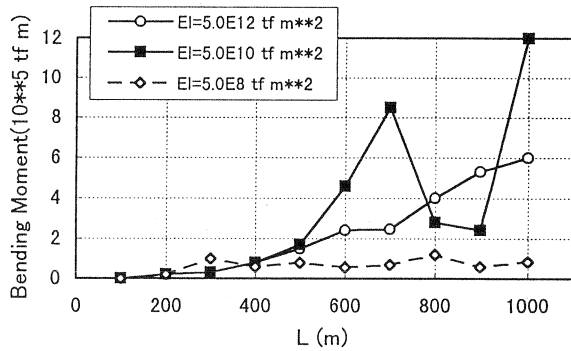


図-9 最大曲げモーメント

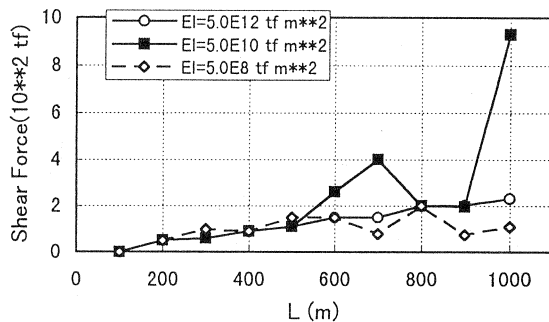


図-10 最大せん断力