中水深域空間利用構造体の開発

——半潜水式リング状構造体の検討——

正員 吉 田 宏一郎* 正員 有 馬 俊 朗**
正員 岡 徳 昭*

Development of a New Type Structure for Ocean Space Utilization of Middle Water
—— Investigation of a Semisubmersible Type Ring-like Structure ——

by Koichiro Yoshida, *Member* Toshiro Arima, *Member*
Noriaki Oka, *Member*

Summary

In Japan, space utilization of the ocean has been considered as one of the most important subjects. Therefore we thought out a new type structure for ocean space utilization which can be installed in the ocean of water depth 30~70m. This structure is composed of a semisubmersible type ring-like structure and supporting foundations. For the sake of investigation of structural feasibility of this ring-like structure, the steps of procedure taken in this paper are as follows;

- (1) concept design of a new type structure,
- (2) setting of natural environmental conditions (wind, current, wave, earthquake) and design criteria,
- (3) initial structural design,
- (4) evaluation of external forces using wind tunnel tests and a source distribution method,
- (5) structural response analysis using FEM.

1. はじめに

現在、日本における海洋開発は第2次ブームにある。このブームは昭和30年代後半からの高度成長期におとづれた、主に海洋の資源開発を目的とした第1次ブームと異なり、海洋の空間利用に重きが置かれている点が特徴である¹⁾。海洋の空間利用とは、海域を人間の活動のための新しい空間として捉え、主に海上空間を生産、ビジネス、居住、レジャーなどの目的のために利用していこうとするものである。

現在のブームの中心であるウォーターフロント開発は、外国における先進地域におけるそれとは異なり、大都市におけるビジネス空間や居住空間、地方都市の活性化のためのコアなどの創出のために極浅海を埋め立て、ここに高層建築やレジャーランドを建設しようとするものである。埋立による土地の造成は、それが海岸線に沿う臨海部の場合には勿論のこと、海岸線から少し沖に出た沿岸部の場合であ

ろうとも、水深が20~30m以下でないと経済性が失われ、自然環境に対する影響も大きく、また一旦完成した後の状況の変化に対する適応性が乏しい。

これに対し、必要なのは土地ではなく空間であるとの観点から、海洋構造物による海上空間の創出、特に浮遊式海洋構造物を用いる方法では上述の埋立の場合の短所の裏返しとしての長所を有している。しかしながら、通常の浮遊式海洋構造物は程度の差こそあれ、漂流や動揺が避け難く、一般の利用者を前提とする目的の場合には採用が困難になる可能性がある。

そこで、本論文では水深30~70mの中水深域の海上空間を利用するための新形式の浮遊式海洋構造物即ち海底に埋設された数ヶ所の基礎構造により支持された半潜水式リング状構造体に関して構造工学的な検討を加え、その可能性を確認した。

2. 基本コンセプトおよび構造計画

2.1 基本コンセプト

開発対象とする構造体の使用目的を海洋のアメニティ性を手軽に楽しむための機能を有したビジネス空間の創出と

* 東京大学工学部

** (財)日本海事協会技術研究所(研究当時東京大学大学院工学系研究科)

する。現在および将来の我が国の海岸部大都市のビジネススペースの不足、余暇時間の増大と海洋レジャーへの関心の高まりを考える時、このような目的は海洋空間の有効利用の1つの方向を示していると言えよう。ただし、本論文では、アメニティ性を楽しむための機能については、付属施設によるものとして特には取り挙げない。

本論文で提案する構造体の基本コンセプトは半潜式、リング状構造体、支持方法の3点に要約される。半潜式は浮遊式の1種であり、浮遊式の一般的特徴については、既に1.で言及した。構造及び積載重量をコラムとローハルで構成された浮力体で支持するものとする。これにより、水線部分がスパースとなり、風、潮流、波から受ける荷重が一般に小さくなるとともに、特に波の上下動荷重に関して有利な形状を選択できる可能性が生ずる。また、潮位の変動に対しては、ローハル内のバラスト水を制御することによってこれを相殺するシステムとする可能性も有している。

埋立あるいはケーソン工法等による土地造成の場合、陸上の土地の延長という観念が強いため、造成された土地へ高層建築物を建設して利用するという考えが自然である。しかし、海上の空間は一般に広大であるため、スペースの確保は低層によっても可能であり、この方が耐風性に優れているとともに、周囲の環境と適合して人間の心理面により優れた効果を持つものと想像される。

一方、低層とする場合、例えば海上空港を目的とする場合には、面的に大きく海面を覆うことになる。しかし、ここで目的としているビジネス空間の場合、海洋の自然環境への影響を極力小さくするためには線状の構造体を採用する方が望ましい。これは、また、海洋のアメニティ性を利用する上でもより大きな可能性を与える。線状の構造体としては、橋梁のような直線的で開いた構造とリングのよう

に閉じた構造が典型的と考えられるが、構造工学上の有利さと構造体内部における移動をよりスムーズにすることから、リング状の上部構造を採用することとする。例えば、リング状の上部構造の内部に動く舗道などを設置すれば山手線のような機能を持たせることが出来るであろう。更に、建造に関し、線状構造物は1次元的な接合ですむので、面状構造物に比較して容易である。

半潜式リング状構造体の支持については、多条のチェーン、ワイヤー等を用いて弛緩係留あるいは緊張係留することが考えられるが、風や潮流による漂流や波による動揺が避けられず、一般の使用のためのビジネス空間としての適性が損なわれる可能性が高いとともに、多条係留の強度評価の信頼性にもまだ問題があると考えられるので、ここでは、前述のように、海底に埋設された数カ所の基礎構造（以後支持基礎と称する）によって支持するものとする。支持基礎は長さ160 m×幅80 m×高さ160 m程度のコンクリート構造物を想定する。

以上の基本コンセプトに基づいて考案した構造体の概念図をFig.1に示す。この図では、支持基礎は3カ所としてある。平面図では浮力体の一部のみを示し、また、断面図の上部構造は省略してある。

2.2 可能性検討の手順

リング状構造体の構造工学的可能性を検討するには、まず基本コンセプトに基づいて試設計を行ない、その構造応答を調べ設計基準と照し合わせる必要がある。一般の海洋構造物の構造設計の手順は、(1)設計条件の設定、(2)構造計画、(3)設計荷重の算定、(4)安定計算、(5)構造計算、(6)安全性の検討、(7)建造計画、(8)設計図書の作成等の作業が含まれる²⁾が、ここでは本論文の目的上、構造応答を計算するのに必要な事項を決定するに留めることにした。また、構造応答解析を行なう前には、設置海域を想定

Fig.1 Conceptual configuration of a new type structure

Fig. 2 Flow chart of the feasibility study

して自然環境条件を決めたうえで外力を評価しておく必要がある。

Fig. 2 に本論文で行なった可能性検討の手順を示すが、今回は上部構造・浮力体に関する事項は初期試設計時の値に固定し、支持基礎の個数を主要パラメーターにして構造物の改良を行なっている。

2.3 設計基準

構造重量を軽減するために、降伏応力が 40 kgf/mm^2 程度の高張力鋼を用いることにした。ロング材やガーダー材等 (Fig. 4 参照) の構造寸法を決定する際に用いる許容応力は、安全率を 1.6 として許容応力を 25 kgf/mm^2 と設定した。

リング状構造物をはり要素を用いてモデル化して構造解析を行なう場合の許容応力は、板要素等を用いた詳細解析と異なり計算精度が粗いため更に余裕を見込んだ設定値にす

る必要がある。ばら積み貨物船の直接応力計算を骨組構造モデルを用いて行なった場合の船底外板の船長方向の直応力に対する許容応力が軟鋼材で $100 \text{ N/mm}^2 (10.2 \text{ kgf/mm}^2)$ である³⁾ ので、これを参考にして 15 kgf/mm^2 と設定した。

居住性の目安としては、加速度を基準として採用し ISO の示している不快限界 (comfort boundary) である 0.05 m/s^2 以下⁴⁾ となるように設計する。その他の振動加速度に対する基準値としては、船酔症状発生限界として 0.1 m/s^2 ⁵⁾、搭載機器 (主にコンピューター等) の振動限界として 5.0 m/s^2 を採用することにした。

2.4 自然環境条件^{6), 7), 8), 21), 22)}

設置海域としては水深が $30 \sim 40 \text{ m}$ が広く分布し、比較的大規模な都市の近くであるということから伊勢湾をここでは想定することにした。

2.4.1 風

伊勢湾周辺の津, 名古屋, 伊良湖における昭和 25 年～昭和 60 年までの年間最大風速⁹⁾ から 35 年間の平均年間最大風速を求めると 25 m/s となる。また、異常時の最大風速は再現期間を 100 年と想定し、次式で表される Gumbel の極値分布法¹⁰⁾ を用いて求めた結果、津で 53.4 m/s となった。

$$V_T = U + \frac{1}{a} \ln T$$

ここに、 T は再現期間、 V_T は T 年再現期待値、 U は最頻値、 $1/a \approx 0.1 U$ である。

これらの値は海岸における値であるので、これを海上での値に補正する必要がある。従って、補正係数を $1.17^{11)}$ として補正を行なうとそれぞれ 29.3 m/s , 62.5 m/s となる。従って、通常時の平均年間最大風速は 30.0 m/s 、異常時の年間最大風速として 65.0 m/s を想定することにした。

2.4.2 波

通常時については、次に示すウィルソンの式⁸⁾ に基づいて求めた結果、有義波高 $H_{1/3} = 3.0 \text{ m}$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 6.2 \text{ sec}$ と設定することにした。この時、吹送距離は 60 km とした。

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$$

$$\frac{C}{U} = \frac{gT_{1/3}}{2\pi U} = 1.37 \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right]$$

ここに、 g は重力加速度、 U は風速、 F は吹送距離、 C は波速である。

異常時については、井島が伊勢湾台風のデータをもとに行なった波浪推算の結果¹²⁾ を用いて、最大波高として $H_{\max} = 15.7 \text{ m}$ 、 $T_w = 16.5 \text{ sec}$ と設定することにした。

2.4.3 潮流・潮位

潮流は、伊勢湾口では最大 $1.5 \text{ knots} (0.77 \text{ m/s})$ に達する¹³⁾。異常時の場合の潮流については、台風によって生じる線流量が $70 \text{ m}^2/\text{s}$ である¹⁴⁾ ので、湾口の水深を 30 m とし

た場合、その流速は 2.33 m/s と計算される。従って、通常時の流速を加えて、設計最大流速は 3.10 m/s と設定した。

潮位の異常時のデータとしては、台風による高潮が1959年9月26日に最大気象潮 3.5 m を記録している¹⁴⁾。通常時の潮位としては、1951～1967年の資料¹³⁾によれば朔望平均満潮位が 2.53 m 、朔望平均干潮位 0.02 m となっている。よって、最大潮位は朔望平均満潮位に高潮最大偏差を加えて 6.03 m と設定した。また、最小潮位は低極潮位から潮位基準面を引いて -0.56 m と設定した。

2.4.4 地震

海洋構造物の設置点の地震の大きさは、地震規模、震源距離によって決まる。海洋に於ては、さらに基盤層から海底面までの比較的軟弱な沖積層により、一般に、加速度は1.2倍前後増幅される²⁾。この増幅率は設置地点の地層の特性により決るので、実際の地震記録が必要となる。しかし、破壊的地震動の記録は滅多に見られない為、微小地震動の記録や常時微動が利用される事が多い¹⁵⁾。今回の試設計の段階では伊勢湾の地震動記録が見当らない為、模擬地震波として1940年のEl Centro地震波を用いることにした。最大加速度は 0.326 G (3.19 m/s^2) である¹⁵⁾。

(a) CROSS SECTION OF UPPER STRUCTURE

(b) FLOATING BODY

Fig. 3 Configuration of the upper structure and the floating body

Table 1 Conditions of natural environment

項目		通常時	異常時
風		30.0 m/s	65.0 m/s
波	波高	3.0 m	15.7 m
	波周期	6.2 sec	16.5 sec
潮位	最大潮位	2.53 m	6.03 m
	最小潮位	0.02 m	-0.56 m
潮流		0.77 m/s	3.10 m/s
地震		模擬地震波 (EL CENTRO地震波) 最大加速度 319 gal	

以上の自然環境条件をまとめて、Table 1に示す。

2.5 構造プラン⁶⁾

2.5.1 上部構造

まず、ビジネス都市で働く人々の人口を3万人と設定した。例えば東京の中央官庁では国家公務員約10万人に対して、その使用床面積が 120 万 m^2 となっているが、ここではゆとりのある空間とする為に1人当りの床面積を2.5倍つまり 30 m^2 とすることにした。従って、オフィス空間全体としては 90 万 m^2 の床面積が必要となる。これ以外に飲食店、映画館、劇場等の施設用として 20 万 m^2 を見込んで、合計 110 万 m^2 の床面積を想定する事にした。

この床面積を作りだす為に、リングの外径を 1000 m 、内径を 800 m とし、断面の寸法はFig. 3(a)に示すように決定した。この内、最下層は輸送用とユーティリティ（例えば下水処理施設や発電施設など）の為に空間として用いる事にし、上部5層で必要な床面積を作り出すことにした。

積載重量は最下層 3000 kgf/m^2 、下から第2層は 1300 kgf/m^2 、その他は 400 kgf/m^2 を想定した。Fig. 3(a)で太

Fig. 4 Sketch of inner construction of the upper structure

Table 2 Principal dimensions of a new type structure

上部構造断面の寸法（幅×高さ）	100m×40m
上部構造の外径	1000 m
上部構造の内径	800 m
ローハル寸法（長さ×幅×高さ）	84m×28m×15m
カラム寸法（直径×高さ）	20m×25m
吃水	25 m
エアーギャップ	15 m
排水量	41,185 tonf ^{*)}

*) リング状構造体全体の1/48

線で示されている部分は後の構造応答解析の際に剛性評価に算入する部材であり、全て二重壁としてある。また、上部4層はFig. 4に示すような構造とした。これらの部材寸法は積載重量と鋼材重量に対する各部材の最大応力が許容応力以内に収まるように決定した。上下方向部材については、座屈に対する検討も行なった。

以上の様にして決定した部材寸法から得られる鋼材重量に積載重量を加えると上部構造の全重量は169万トンになる。但し、重量計算に際しては最下層と第2層に対しては積載率1/3と1/2をそれぞれ設定した。

2.5.2 浮力体

浮力体は、Fig. 3(b)に示すようにコラム2本のコラムーローハルタイプとした。対象としているリング状構造体は、100m四方のデッキを持つ通常の石油開発用のセミサブを直線的に25個連結した後にリング状にしたものとイメージする事もできる。従って、浮力体の個数は50個程度になると想像されるが、ここでは浮力体の個数は48個にする事にした。よって、浮力体1個の受け持つべき上部構造重量は3.5万トンとなる。これに浮力体自身の重量も考慮して、必要な浮力が得られるように浮力体全体の寸法を決定した。浮力体の板厚や補強部材の寸法は、波浪による動圧により最大水圧が静圧の2倍になると仮定し、各部材の最大応力が許容応力以下となるよに決定した。

2.5.3 支持基礎

支持基礎は、その単体を見ればまさに固定式海洋構造物であり設計上考慮すべきことは多い。しかし、本論文では構想した構造体のうちリング状構造体の構造応答に注目してその構造工学的フィジビリティの確認を行なうことを現段階での目的としているので、支持基礎設計の詳細には触れず、その個数とリング状構造体を支持するのに必要な反力を決定するにとどめる事とした。

Fig. 5 Verification of the compute code used for evaluation of wave exciting forces

Fig. 6 Mesh subdivision

以上の結果の内、リング状構造体の主要目をまとめてTable 2に示す。

3. 構造体に作用する外荷重の評価

3.1 波浪荷重

波浪荷重の推定には、調和振動流れ場を計算する標準的な手法である三次元特異点分布法に基づいた計算コード¹⁶⁾を用いた。この計算コードにより浮力体の付加質量、減衰係数、波浪強制力を計算した。このコードは、流体は非圧縮性・非粘性、流体の運動は非回転、浮体の運動と入射波の流体運動は微小振幅周期運動をするものと仮定している。また、自由表面はすべての方向に無限に広がっているものとし、有限水深の場合は水深一定と仮定している。このコードの計算精度を確かめる為に、大川らが行なった3コラム+1ローハルに関する実験と計算¹⁷⁾と比較した結果の一例として波浪強制力を無次元化した形でFig. 5に示すが、良い相関を得ている。従って、本計算コードは精度的に問題無いと考えられる。

今回の計算では、Fig. 6に示すように浮力体を402個の要素に分割して計算を行なった。ただし、今回の計算では浮力体間の流体力学的相互干渉は考慮していない。本計算結果の例としては、単位波高当りの付加質量係数の結果をFig. 7、波入射角(ローハルの長手方向と波進行方向とな

Fig. 7 Added mass of floating body

Fig. 8 Wave exciting forces per unit wave height

Fig. 9 Schematic arrangement of wind tunnel test system for upper structure

Fig. 10 Schematic arrangement of wind tunnel test system for floating body

す角)90°の場合の単位波高当りの波強制力の結果を Fig. 8 に示す。

3.2 風荷重と潮流荷重

3.2.1 風洞実験

(1) 風荷重

対象としている構造体の風荷重及び潮流荷重に関する抗力係数等の流体力係数は数値計算等によって得ることが困難なため、風洞実験により求める事にした。全体システムについては Fig. 9 に示すとおり、原点を模型中心にとり風軸を x 軸に、 z 軸を鉛直上方にとった座標系を用いることにする。風荷重に関する諸係数を求めるために用いた供試模型は、リング状構造体の水面上部分の 1250 分の 1 のスケールモデルである。ただし、模型のカラム高さは 8 mm とすべきであるが、風洞壁の影響を考慮して 42 mm のカラム高さにした。構造解析の入力データとしては、構想した構造体が長大であるため、全体としての流体力係数だけでは十分ではなく、遮蔽効果・隣接効果を受けた各ブロック

ごとの係数が必要である。そこで、Fig. 9 に示すように模型をリング状構造体模型の 5/6 部分 (以下 5/6 模型と呼ぶ) と 1/6 の部分 (以下 1/6 模型と呼ぶ) の大小 2 つに分割した模型を製作し、この 2 つの部分模型を組合せて一体として測定部に設置した。2 つの部分模型にはそれぞれ鋼製の剛棒を介して検力計と接続し、風荷重を別々に測定できるようになっている。模型は z 軸周りに 7.5° おきに回転できるようになっており、上部構造の各セクション毎の風荷重が、1/6 模型に対する風入射角を変化させる事によって計測できるシステムとなっている。また、上部構造全体の風荷重は 5/6 模型と 1/6 模型の風荷重の和として求められる。

カラムの様に鈍い物体に作用する風荷重はレイノルズ数の影響を補正する必要があるので、カラム付モデルとカラム無しモデルの 2 ケースの実験を行ない、その差からカラムだけの風荷重を推定することにした。

(2) 潮流荷重

水面下の部分は48個の浮力体を円形に配置したのとなっている。従って、浮体に作用する流体力は隣接効果、遮蔽効果の影響を大きく受けると予想される。そこで、Fig. 10に示すようにダミーモデルを両サイドに配置することによりその影響を考慮に入れることにした。供試模型は浮力体の1/200スケールモデルであり、中央の浮力体模型の風荷重のみを検力計により測定した。模型はz軸（座標系は風荷重用システムと同じ）周りに任意の角度で回転できるようにになっている。また、海底の影響を模擬する為に測定部断面の高さは水深の1/200になっている。

3.2.2 実験結果

(1) 風荷重

実験結果は次に定義するように風による動圧と物体の投影面積を用いて無次元化した形で整理した。

① 抗力係数

$$C_D = D / \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

ここに、 D は抗力、 ρ は空気密度、 V は風速、 A は抗力の作用方向に直角な平面（yz平面）への投影面積である。

② 揚力係数

Fig. 11 Drag coefficient of upper structure

Fig. 12 Side force coefficient of upper structure (1/6 model)

Fig. 13 Lift coefficient of upper structure (1/6 model)

Fig. 14 Decreasing rate of drage of columns

$$C_L = L / \frac{1}{2} \rho V^2 B$$

ここに、 L は揚力、 B は揚力の作用方向に直角な平面（xy平面）への構造物の投影面積である。

③ 横力係数

$$C_s = S / \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

ここに、 S は横力である。

カラム無しのケースの抗力係数の結果を、Fig. 11に示す。無次元化には上部構造全体の投影面積を用いた。Fig. 12にカラム無し1/6模型の横力係数を示した。1/6模型の入射角0°のときのyz平面への投影面積（上部構造モデル全体の投影面積の1/2）を用いて無次元化を行なっている。カラム付1/6模型の揚力係数の結果をFig. 13に示す。これは1/6模型のxy平面への投影面積を用いて無次元化を行なっている。

カラムに作用する風荷重は、隣接効果・遮蔽効果の影響を受けて入射角とその位置によって大きく変化する。そこで、「1/6模型のカラム抗力」の「(カラム単体の抗力を抗力係数1.2として求めた値)×8本分」に対する割合（以下、低減率と呼ぶ）によりその影響を整理した。その結果をFig. 14に示す。

Fig. 15 Drag coefficient of floating body

$$R = D_{\text{COLUMN}} / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \times 1.2 \times A' \times 8 \right)$$

ここに、 R は低減率、 D_{COLUMN} は1/6 模型のカラムの抗力(実験値)、 A' はカラム1本の yz 平面への投影面積である。

(2) 潮流荷重

潮流荷重も、風荷重と同様に無次元して整理した。浮力体の抗力係数を、入射角 0° の場合の yz 平面への投影面積を用いて無次元化し Fig. 15 に示す。

3.3 地震荷重

2.3 で述べたように El Centro 地震の加速度記録を模擬地震波として用いる事にする。

4. 構造応答解析による試設計の検討

4.1 構造解析プログラムと計算モデル

構造応答解析には、東京大学大型計算機センターのライブラリーに登録されている汎用構造解析システム ISAS II (Integrated Structure Analysis System II) を用いた。この ISAS II は NASTRAN を母体としている¹⁸⁾。

構造解析に際してリング状構造体を線状構造とみなしてモデル化を行なった。その線状構造の剛性は上部構造の主構造材 (Fig. 3(a) で太線で示した部分) によるもののみを考慮し、浮力体の剛性は無視した。リング状構造体の浮力体取り付け位置(中心角 7.5° おき)に節点を48個とり、節

Fig. 16 Coordinate system of FEM model

Table 3 Parameters of beam element

ヤング率	$2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
剪断弾性係数	$8.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
ポアソン比	0.3
密度	$2226 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
構造減衰係数	0.01
断面積	27.52 m^2
x 軸に関する断面2次モーメント	4590 m^4
z 軸に関する断面2次モーメント	23770 m^4
ねじり係数(J)	2820 m^4

点間は直線ばりでモデル化を行なっている。はり要素の材料定数等をまとめて Table 3 に示す。ただし、ねじりはサンプナン振りのみを考え、反りの影響は無視した。Fig. 16 にモデルの座標系等を示すが、全体座標は大文字で、節点毎の局所座標は小文字で表示している。浮力体の質量及び慣性モーメント(付加質量も含む)は節点での値に換算して集中質量として取扱った。流体による減衰と変動浮力による復元力も各節点ごとに計算に取り入れた。支持基礎との上部構造の接合部は1節点で代表させるものとし、節点の半径方向 (x 方向 (Fig. 16 参照)) 変位と上下方向 (z 方向) 変位のみを固定とし、接線方向 (y 方向) 変位とすべての回転成分は自由とした。

4.2 計算結果及び考察

4.2.1 固有振動数

固有値解析を行なうことによって、システムの固有振動数と振動モードを調べた。第1次モードとしてかなり長周期(支持基礎6個の場合21分)のモードが現われるが、ここでは波周期帯との関連で第2次モードの結果を Fig. 17 に示す。支持基礎の個数が4, 6, 8と増加するにつれて第2次モードの固有円振動数は、0.285, 0.660, 1.268 rad/sと増加する。波のパワーの大きい円周波数帯はほぼ1.0 rad/s までなので、一般的には支持基礎の個数は8個以上が望ましい。しかし、支持基礎の個数が多すぎるとコスト等の面で不利となる。また、構造体は長大であるので、波浪の様な周期外力は位相差により相殺されることも期待されるので、支持基礎の数は4個, 6個, 8個の場合の3ケースについて以下の解析を行なうことにした。

4.2.2 静荷重・風荷重・潮流荷重に対する応答

自重と浮力のみが作用している静荷重状態における最大の応力は、 1.5 kgf/mm^2 であった。また、風荷重のみが作

Fig. 17 Mode of FEM model

用する場合に発生する応力は 1.9 kgf/mm^2 であり、潮流荷重のみが作用する場合は 0.8 kgf/mm^2 である。従って、静的な外力のみを受ける場合の最大応力は 4.2 kgf/mm^2 となり、静的荷重に対して構造強度上十分な強度を有している^{19),20)}。また、リング状構造体全体に作用する風荷重、潮流荷重はそれぞれ 20,000 tonf, 27,000 tonf である。

また、支持基礎の数が 8 個の場合、支持基礎 1 個が受け持つ最大荷重は風荷重に対して 5,100 tonf, 潮流荷重に対して 4,600 tonf である。

4.2.3 波浪に対する応答

Fig. 18 Maximum bending stress per unit wave height

Fig. 19 Maximum acceleration per unit wave height

Fig. 20 Maximum forces of supporting foundation per unit wave height

対象としている構造物の単位波高の波浪によって生じる最大応力を波円周波数に対して Fig. 18 に示す。支持基礎の数が 8 個の場合は異常時の設計波に対して応力が 16.3 kgf/mm^2 となりほぼ設計基準の 15 kgf/mm^2 に近い値となる。従って、リング構造体の強度を多少強める事により十分な強度を有するようになると考えられる。

Fig. 21 Maximum acceleration vs. spring constant

基礎支持が6個の場合も1.0 rad/sのピーク値のある付近を除けば8個の場合と同様の結果となっている。このピークは、1.0 rad/sの波長が55 mと浮体間隔と同程度になることにより波進行方向にほぼ平行に浮体群が並んでいる部分では各浮体に作用する波力の位相差が0となり、波力の相殺が殆ど期待できないことが原因のひとつであると考えられる。

単位波高当りの加速度の最大値を波円周波数を横軸にとり、Fig. 19に示す。支持基礎の個数が8個の場合の加速度応答は、通常時の設計波高を全ての周波数に対して適用しても不快限界を越えない。異常時の設計波高を全周波数に対して適用すると1.0 rad/sで最大で0.23 m/s²の加速度が生じる事になるが、実際には1.0 rad/sでは最大波高の数分の1の波高しか発生しないので船酔症状発生限界以下となると考えられる。従って、支持基礎の個数が8個の場合ならば、十分な居住性を持っていると言える。

リング状構造体（支持基礎数8）が支持基礎数1個に及ぼす単位波高当りの力の最大値をFig. 20に示す。異常時の波高に対して計算すると、水平力として最大32,000 tonf、上下方向力として26,000 tonfになっている。

4.2.4 地震に対する応答

地震にたいする応答は、まず地震加速度を入力とする過渡応答解析を行なって調べた。その結果、リング状構造体の弾性応答による加速度の増幅は見られず、各節点加速度は入力加速度とほぼ同じ程度であった。

次に、応答スペクトル解析法を用いて支持基礎とリング状構造体の接合を代表させている節点の半径方向と上下方向をバネ支持に変更した場合（他の成分は自由）の最大応答加速度を求めた。結果を横軸にバネ定数を取りFig. 21に示す。計算点の数が十分とはいえないが、バネ定数を非常に大きくすれば前述の過渡応答解析の結果と同じになるであろうし、また、バネ定数が10¹⁰~10¹³ kgf/m附近にピークがあるように思われる。従って、バネ定数が10⁸ kgf/m以下になれば地震応答加速度がかなり軽減されうると言え

るであろう。しかし、結果は省略するがこの場合のリング状構造体の拘束がゆるくなる結果、リング状構造体全体の剛体運動（サージ）が発生するようになって波浪応答が大きくなってしまふ。従って、地震と波浪両方に適したばね定数を決定する事はかなり難しいと思われる。波浪応答と地震応答を同時に抑えるような接合法を探す事も今後の課題の一つであると思われる。

また、今回の解析では、地盤の影響、支持基礎自身の地震応答の影響が考慮されていないが、実際にはこれらの影響でより大きな応答になる事もありうるので、支持基礎とリング状構造体の接合法を含めて今後検討を行なう必要がある。

5. おわりに

本論文で構想、検討した8ヵ所の支持基礎で支持された外径1 kmの半潜式リング状構造体は、想定した海象・気象に対し、照査した強度、居住性に関する設計基準に適合し、その構造工学的可能性が検証された。

地震荷重に関しては、リング状構造体と支持基礎との接合部に緩衝構造を設置することにより、地震加速度がリング状構造体に与える影響を制御することの可能性が検討された。支持基礎本体とこの緩衝構造の具体的な構想と検討は今後の課題である。

支持基礎の数についてここでは一定の剛性を仮定して8個必要としているが、この必要数は半潜式リング状構造体の剛性の関数であり、建設コスト面からの最適化が可能であろう。また、リング状構造体の材料については鉄鋼を想定しているが、上部構造の一部にアルミ合金を採用することなどによる最適化の検討も考えられる。

本論文で提案している、半潜式リング状構造体の規模は、想定した床面積を基礎に、ブロック建造の容易さを考慮して決定しているが、必要床面積或使用目的が異なる場合には、リング状構造体の規模、支持基礎の数を変化させることによって対応ができる。ただし、大規模海上ビジネス都市を構想する場合には、提案した半潜式リング状構造体単体の規模をさらに大きくするのは設計、建造、建設の面から不利であることが予想され、リング状構造体の規模をここで提案した大きさの程度に止め、その数を増して、これらを有機的に結合することによって対応する方が適切であろう。

海の持つアメニティ性を利用するためには、リング状構造体の内部海水面にジャッキアップ式の人工ビーチ、マリナー等を設けることが考えられる。アクセスは離岸距離10 km程度までを想定して、支持基礎のコンクリート構造部分を接続点とする橋梁とホーバークラフトなどの高速艇との併用システムとなろう。電力、通信、上水道、廃棄物処理等のインフラストラクチャーの選択や、緊急時対策など構造体以外の問題の検討が進めば、これらが構造体へ与え

る影響も明らかになるであろう。

謝 辞

本論文をまとめるにあたって、自然環境条件設定用の資料収集及び整理等は東京大学工学部船舶工学科4年生の田中信之氏⁶⁾(現、三井物産)に負う所が多い。また、3次元特異点分布法による計算では東京大学大学院工学系研究科の具滋三氏にご尽力いただいた。ここに、両氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 横内憲久, 横内研究室: “ウォーターフロント開発の手法”, 鹿島出版会, 1988。
- 2) 小林浩: “海洋施設の計画と設計”, 日刊工業新聞社, 1987。
- 3) 日本海事協会: “鋼船規則等の検査要領集”, 1988。
- 4) 沿岸開発技術研究センター: “海洋構造物の安全性に関する研究報告書”, 1988。
- 5) 日本建築学会: “海洋建築計画指針”, 1988。
- 6) 田中信之: “伊勢湾洋上首都計画”, 東京大学工学部船舶工学科卒業論文, 1988。
- 7) 宝田直之助: “超大型海洋構造物のテクノロジー・アセスメントの一例(その1~その10)”, 日本造船学会誌第638号~第652号, 1982~1983。
- 8) 山内保文他: “「海洋工学」特集(海洋構造部と海象)”, 日本造船学会誌第609号, 1980。
- 9) 名古屋地方気象台: “愛知県気象月報”の昭和25年1月号から昭和60年12月号まで, 1950~1985。
- 10) 岡内功 他: “耐風構造”, 丸善, 1977。
- 11) 土木学会: “本州四国連絡橋耐風設計指針”, 1964。
- 12) 井島武士他: “数値計算による台風域内の波の分布について(海洋上における台風の場合)”, 第14回海岸工学講演会講演集, 1967。
- 13) 土木学会: “海洋保全施設設計便覧”, 1969。
- 14) 気象庁海洋気象部: “伊勢湾高潮の総合調査報告”, 気象庁技術報告第4号, 1960。
- 15) 日本土木学会: “本州四国連絡橋技術調査報告書耐震設計指針”, 1967。
- 16) 具滋三 他: “多数の三次元任意形状物体間の相互干渉”, 日本造船学会論文集第165号掲載予定, 1989。
- 17) 大川豊 他: “浮体に働く外力及流体力の推定法に関する研究”, 船舶技術研究所報告別冊第6号, 1985。
- 18) 日立製作所: “HITAC マニュアル総合構造解析システム ISAS II機能編”, 1982。
- 19) ABS: “Rules for Building and Classing Offshore Mobile Drilling Units”, American Bureau of Shipping, New York, 1973。
- 20) DnV: “Rules for Classification of Mobile Offshore Units”, 1982。
- 21) 安藤定雄 他: “浮体工法による海上空港建設に係わる評価のための技術調査研究”, 船舶技術研究所報告別冊第4号, 1983。
- 22) ECOR 日本委員会波浪委員会: “海洋波浪の調査研究に関する現況報告, 観測・資料の集積・利用・計測技術及び理論の現状”, 1975。