

(78) コンクリート製大型浮体構造物の設計に関する研究

名古屋大学大学院 学正会員 谷川 亮
 名古屋大学教授 正会員 田邊 忠頭

1. はじめに

超大型施設を浮体式により海上へ立地させることが提案され、十数年が過ぎた。近年、鋼構造の分野ではスチール製による数百メートル規模の浮体構造物を実験的に建造している。しかし、今後さらに浮体の大型化が進めば、鋼材では材料費や定期的な塗装費を含めたメンテナンスの費用が相当大きくなるということもあり、コンクリートで建造するという提案が浮上している。

ところで、浮体構造物は、数百メートルもの長さになると大きな弾性変形を生じるため、浮体を設計する上で、この現象を正確に捕らえることが大きな問題である。

そこで本研究は、海洋構造物の材料として優れたコンクリートにより浮体構造物を建造することを考え、800m級の構造物の3次元数値解析シミュレーションを行い、部材の断面寸法を決定する断面力を求め、試設計を行った結果を報告する。

2 設計の条件設定

2.1 浮体の条件

浮体のモデルは浮体長が800m(x方向)、浮体幅160m(y方向)、浮体高が12.0mのものとし、各方向の断面剛性はそれぞれ概略計算により、図-1、図-2に示す1ユニット分の断面剛性 $EI_x=1.0 \times 10^9(\text{kNm}^2)$ 、 $EI_y=9.3 \times 10^8(\text{kNm}^2)$ となった。また、図-3に示すように8点で線形バネによる拘束をした。バネ定数は鉛直方向が $2.0 \times 10^2 \text{tf/m}$ 、水平方向は $1.0 \times 10^3 \text{tf/m}$ である。

この断面に対して補強鉄筋量、プレストレス量などを決定する。

2.2 流体場の条件

本研究では、中部新国際空港の建設予定地である常滑沖5kmの水深25mの位置を考えるこ

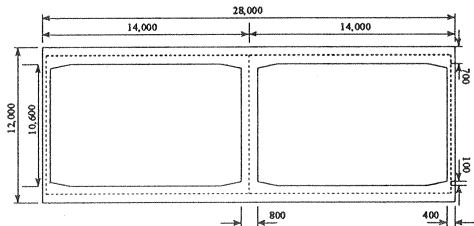


図-1 x方向断面

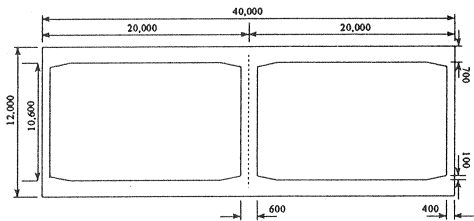


図-2 y方向断面

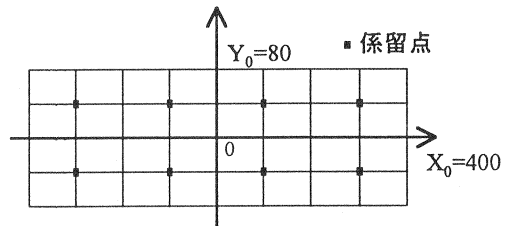


図-3 係留点および浮体の要素分割図

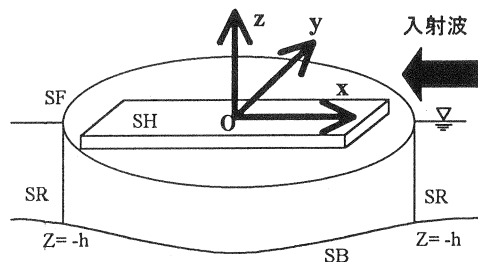


図-4 座標系の定義

とにする。中部新国際空港委員会資料によると、常滑沖における異常時の波浪場の計算条件は、表-1に示す伊勢湾台風時のものである。

次に、浮体に対する波の入射角は、図-4に示すように、浮体のx方向(長手方向)に対して平行に入射するものとした。

表-1 波浪場の条件(x方向)

水深	波高	周期	波長	喫水
25.0m	3.2m	6.3s	61.2m	7.0m

3. 構造解析

3.1 流体場の解析

本研究では、西村らが提案した解析理論¹⁾により、有限要素法を用いた3次元流体浮連成曲げ振動解析を行う。なお解析理論の詳細については参考文献¹⁾を参照していただきたい。

一定水深hの海域に浮遊式構造物があり、これに角振動数 ω の微小振幅波が入射しているものとする。この時、浮体は波力を受け、水平方向の振動及び曲げ震動を伴った微小な定常周期運動状態にあるとする。

座標軸は、図-4に示すように静水面上にx軸、鉛直上向きにz軸をとる。流体は、非圧縮、非粘性で微小な非回転定常運動状態にあるとして、速度ポテンシャルを用いて線形理論解析を行う。

また、流体場における要素の分割方法は図-5に示すように、浮体と流体の節点が、互いに独立していることを利用し、自由度を削減する方法²⁾を採用した。

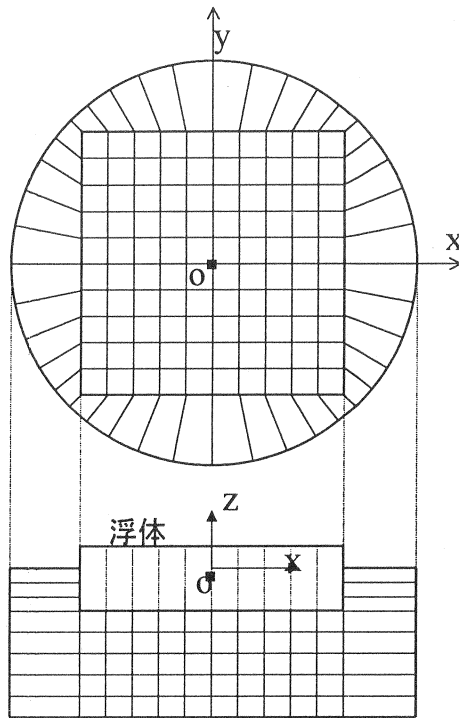


図-5 3次元流体要素分割図

3.2 浮体の振動解析

浮体は水平振動及び鉛直方向の曲げ振動を伴う平板で近似し、水平方向及び鉛直方向それぞれに線形バネによる係留を考えている。浮体を四角形要素に分割し、節点ごとにx軸方向変位u、y軸方向変位v、z軸方向変位w、y軸回りの回転角 θ_x 、x軸回りの回転角 θ_y の5自由度を与え、1要素につき合計20自由度を考える。

また、解析において考慮した外力は、以下のものである。

- 1) 入射波による外力
- 2) 浮体動揺により生ずる散乱波による外力
- 3) 浮体の鉛直方向動揺による静水圧の変化
- 4) 線形バネによる係留力

ここで、3)には、自重およびそれに伴う浮力の死荷重は含まれず、鉛直方向の動揺により生ずる自重と浮力の不釣り合いによる荷重のみを考えている。

4 解析結果

4.1 鉛直方向変位

図-5は浮体の各節点における鉛直方向の最大値を示したものである。浮体全体を通しての最大値は、31.2cmほどであり、変位が20cm程度となる場所が数箇所あり、浮体上に構造物を建設する際には曲げ変形挙動をきちんと把握して設計していかなければならないということが分かる。

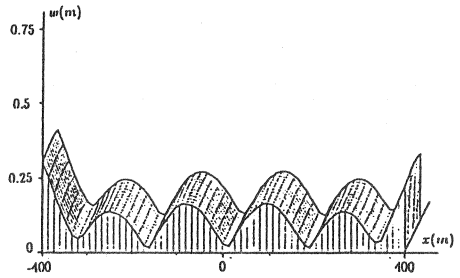


図-5 鉛直方向変位

4.2 波浪による曲げモーメントの計算

図-6は浮体各点における各方向の曲げモーメントの最大値の分布図である。計算結果によると、浮体全体を通しての最大値は5613tfm/mであり、大変大きな値であることが分かる。特に大きな値を示す係留点付近では、設計の際にはもっとも注意が必要である。

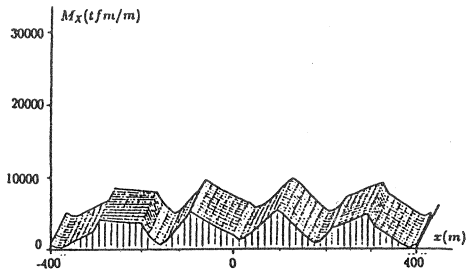


図-6 曲げモーメント図

4.3 波浪によるせん断力の計算

図-7に浮体各節点におけるせん断力の最大値の分布図を示した。浮体全体を通してのせん断力の最大値は、78.4tf/mであり、浮体の中心付近と浮体の前面付近で大きな値をとっていることが分かる。

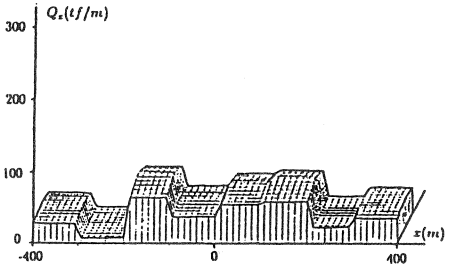


図-7 せん断力図

5 断面設計

5.1 断面中の曲げ応力

前章で述べたように、浮体は曲げ変形を考慮すると、鉛直上下に変形する。この浮体をプレストレストコンクリートで造る事を考えるならば、海水が進入すると危険であるので、コンクリートにひび割れを発生させてはならない。つまり、浮体断面に引張応力を発生させないように、全断面にプレストレスを与えなければならない。

ここで、浮体の断面設計をするとき考慮しなければならない荷重は、波浪、航空機、自重(浮力と釣り合っている)、プレストレスによる荷重がある。これらの荷重によって断面の中に曲げ応力が集中する部分は図-8に示した。

5.2 上床版の曲げ応力の計算

前節で述べたように、浮体断面に引張応力を発生させないためにプレストレスを与えなければならないが、床版中でストランドを偏心させているため、その反対側になるべく引張応力が発生しないように注意しなければならない。

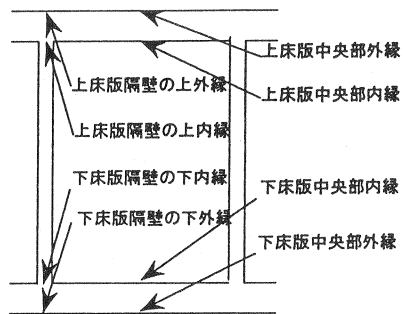


図-8 断面中の危険箇所

断面の各危険個所に存在する波浪による曲げ応力及び航空機荷重によって発生する曲げ応力、上床版の自重によって発生する曲げ応力及びプレストレスによる曲げ応力のそれぞれの計算結果を、表-2に示した。これらの表の波浪による応力の(+),(-)という表現は、浮体が上下に振動した時、断面が圧縮された状態を(+)とし、引っ張られたときを(-)としており、航空機の荷重は B-747 の車輪の荷重(928kN)が上床版の中央部分にかかったときを考えた。また、プレストレスによる応力は、式(1)によって計算した。

$$\sigma_p = P/A + P \cdot e/Z \quad (1)$$

ただし、 σ_p :プレストレストによる曲げ応力、 A :床版の断面積、 e :偏心量、 Z :断面1次モーメントとする。

計算結果によれば、表-2によると x 方向断面については、上床版では航空機および自重より発生する曲げ応力よりも波浪によるものの方が大きくなっているものの、自重および航空機より発生する応力は無視できないものである。波浪によって上床版が引張作用を受けるとき、断面の応力は引張り領域に近づくので、プレストレスの導入には注意が必要である。

表-2 上床版の応力 (kgf/cm²)

		波浪		航空機	自重	プレストレス	合計
中央部	外縁	+	57.3	10.3	6.6	45.0	119.2
		-	-57.3				4.6
	内側	+	50.6	-10.3	-6.6	70.0	103.7
		-	-50.6				2.5
端部	外縁	+	57.3	-4.6	-5.2	70.0	117.5
		-	-57.3				2.9
	内側	+	50.6	4.6	5.2	45.0	105.4
		-	-50.6				4.2

5.3 下床版の曲げ応力の計算

表-3 に示すように下床版には通常、波浪、浮力、貨物の荷重による曲げ応力が作用している。ここでは、浮体内の貨物の荷重がない危険側を考え、浮力は下床版に一樣に作用しているものとする。また、プレストレスと偏心量は x 方向と同じ計算式を使用した。

表-3 下床版の応力(x 方向) (kgf/cm²)

		波浪		浮力	プレストレス	合計
中央部	外縁	+	57.3	17.6	50.1	125.0
		-	-57.3			10.4
	内側	+	50.6	-17.6	75.5	108.5
		-	-50.6			7.3
端部	外縁	+	57.3	-13.2	75.5	119.6
		-	-57.3			5.0
	内側	+	50.6	13.2	50.1	113.9
		-	-50.6			12.7

表-3 は、x 方向断面の曲げ応力の計算結果を集計したものであり、計算結果によるとこの断面に

は相当大きな圧縮応力が発生するところが見られる。特に、波浪によって断面が圧縮されるとき、これらの場所にはそれぞれ 100kgf/cm² 以上の圧縮応力が発生しており、この断面の設計を行う際には最も注意が必要である。また、相当大きな引張力をプレストレスにより圧縮することになるため、設計時はもちろんのこと施工時においてもプレストレスの導入は正確に行わなければならない。

5.4 PC ストランドと偏心量

前節で明らかになったプレストレス量から、x 方向の断面に使用した PC ストランド及び偏心量を表-4 に示した。

表-4 X 方向断面のプレストレス

		使用 PC ストランド	ストランド本数(/m)	使用状態でのストランド緊張力(tf/本)	偏心量(cm)
上床版	中央部	1T21.8	5	30.7	4.0
	隔壁の上	1T21.8	5	30.7	4.0
下床版	中央部	1T21.8	6	29.0	4.0
	隔壁の下	1T21.8	6	29.0	4.0

5.5 セン断力の算定

波浪により発生するせん断力は、すべてウェブ(隔壁)が受け持つものとする。また、隔壁の上の直線上に航空機の脚のうち 2 本が乗っている状態で、せん断力の最大値が得られるものとする。ここでは、波浪、航空機、浮力によるそれぞれの最大せん断力が同時に作用した最も危険な状態を考えた。せん断力は(2)式によって求めることができる。

$$Aw = r_b \cdot V_{sd} \cdot s / f_{wyd} \cdot z \quad (2)$$

ただし、 Aw : 区間 s におけるせん断補強鉄筋の総断面積、 f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計降伏強度、 s : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角、 z : コンクリート圧縮応力の合力作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に $z = d / 1.15$ としてよい。 r_b : 部材計数 と呼び一般に 1.15 としよ。

この計算によって x 方向のせん断補強鉄筋量を計算し、表-5 が得られた。

表-5 X,Y 方向のスターラップ

最大せん断力(tf/m)	鉄筋の種類	配置間隔(m)	スターラップの形
78.4tfm/m	D16	0.75	U 型

5.6 設計断面

前節で決定した断面諸量をもとに、図-9 のような x 方向断面を描くことができる。床版はすべて工場でプレキャスト化し、ドライドック内で隔壁を図中の鋼材方枠によって立ちあげていくことで組み立てる。また、洋上での結合作業が困難になることが予想されるため、なるべく大きな

ユニットを組み立てるべきである。

洋上でプレストレスを与えるとき、浮体底面の結合作業が困難であるが、この断面を一度に緊張できる重機が必要であると思われる。

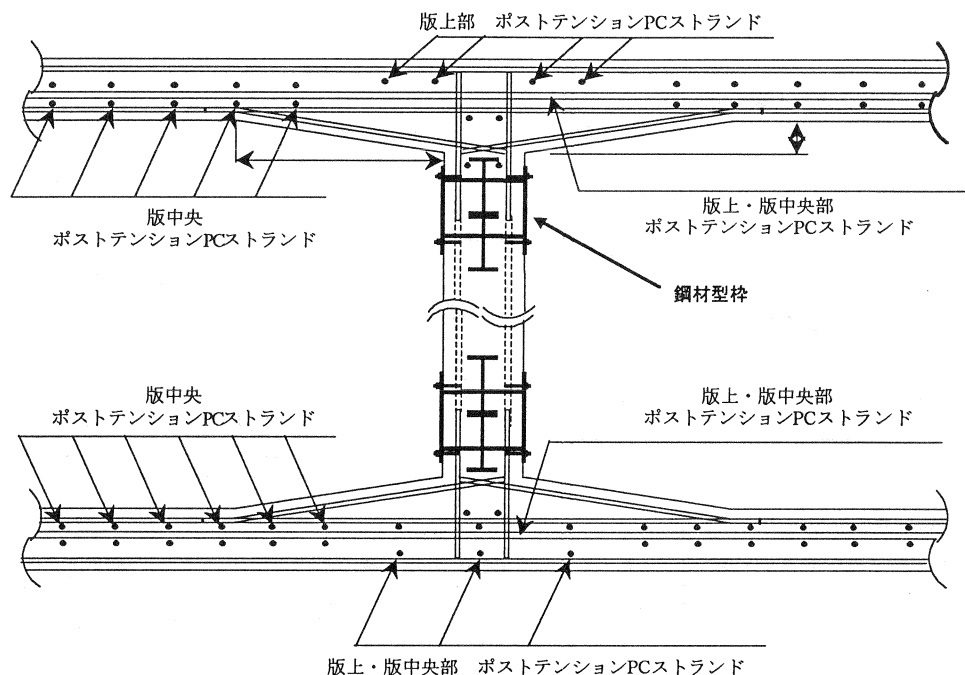


図-9 断面の概略図

6 結論

線形パネに係留された、800(m)×160(m)のコンクリート製大型浮体構造物の3次元数値解析をし、断面設計を試みた。その結果、今回提案した箱形断面のコンクリート製大型浮体空港の断面設計が可能であると思われる。また、箱形断面浮体の断面設計を行うとき、航空機の荷重や浮力、自重によって発生する曲げを、波浪による曲げとともに正確に把握する必要がある。

ドック内や洋上での施工の際、大規模な作業になることが予想されるため、効率のよい建設作業と、建設重機の開発が不可欠である。

参考文献

- 1) 西村 政洋：箱形係留浮体の3次元振動解析，名古屋大学修士論文，1993
- 2) 天野 喜勝：非線形パネにより係留されたコンクリート大型製浮体の動揺解析，名古屋大学修士論文，1996
- 3) 海洋構造委員会：浮上式プレストレストコンクリート製海上空港に対する構想，プレストレストコンクリート Vol21, No6, pp23-43, 1979
- 4) マリンフロート推進機構：浮体式海上空港，鹿島出版会，1997