

(9) コンクリート製大型浮体空港の動揺解析及び設計手法の提案

石川島播磨重工業(株) 工修 正会員○谷川 亮
名古屋大学 工博 正会員 田邊 忠顕

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、近年、鋼構造の分野で数百メートル規模の大規模な建設が進んでいる。しかし建設費用や建設後の補修、メンテナンスを考えれば鋼材よりもコンクリートの方が浮体の材料として優れた要素が多い。

浮体に作用する波浪外力や浮体の動揺量の算定には、通常浮体を剛体として扱う解析法が用いられるが、空港のように厚さに対して広がり大きいものは、大きな弾性変形を生じ、浮体と波浪との連成振動による浮体の曲げ変形を考慮する必要がある。しかもコンクリートは鋼材に比べれば、変形量が大きく慣性力も大きいので、コンクリートでこのような大きな浮体を建設することは、困難であると考えられている。そこで本研究は、中部新国際空港をコンクリート製の浮体式で建造することを想定し、国際空港規模である5000m×840mの構造物をFEMにより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。

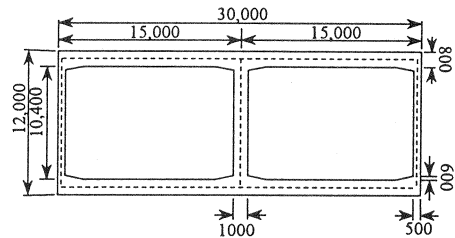


図-1 x方向断面概略図

2 設計の条件設定

2.1 浮体の条件

1unit断面の大きさはx方向断面が30m×12m、y方向が100m×12mとする。各方向断面の断面剛性は、それぞれ概略計算により、図-1、図-2に示す1unitあたりの断面剛性、 $EI_x=3.5 \times 10^{10}(\text{kNm}^2)$ 、 $EI_y=1.1 \times 10^{11}(\text{kNm}^2)$ となった。このユニットをx方向に50unit、y方向に28unit連結すると仮定する。

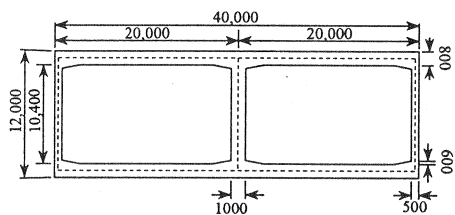


図-2 y方向断面概略図

国際空港の規模は、約4000mの滑走路と着陸帯が一本づつ必要である。ここでは浮体のモデルを図-3に示すような浮体長が5000m(x方向)、浮体幅840m(y方向)、浮体高が12.0m、喫水7.0mのものとする。また、浮体上に施設帯があることを想定し、図-4に示すように1m²当たり1000Nの鉛直下向きの重量を考慮した。

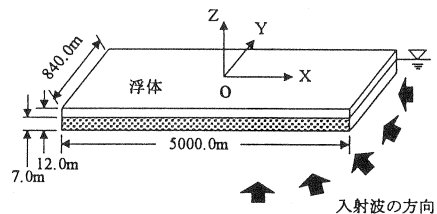


図-3 浮体の全体図

浮体の係留は浮体底面に60箇所均等に配置し、水平方向に25000kN/m、鉛直方向に2450kN/mのばね剛性を与え、過去に実績の多いチェーン係留を想定している。

2.2 波浪場の条件

浮体の建設地点を常滑沖 5km とする。中部新国際空港委員会資料によると、入射波の計算条件は、表-1 に示す伊勢湾台風時の異常時の波浪条件を考えればよい。また、入射方向は図-3 に示すように5種類の場合について角度を変化させて解析を行う。

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-5 に示すように静水面上に x 軸、鉛直上向きに z 軸をとる。また、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。

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弾性のコンクリート平板として近似し、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、図-6 に示すように節点ごとに 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、数値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じ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。故に、実際に設計するときはその死荷重も考慮しなければならない。

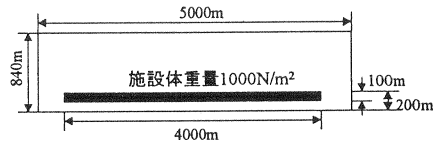


図-4 浮体上の施設帯

表-1 波浪場の条件

波高(m)	周期(s)	波長(m)	水深(m)
3.2	9.9	128.5	25.0

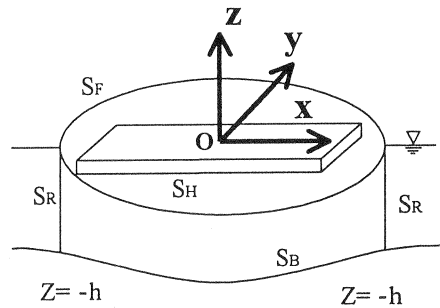


図-5 全体系の座標

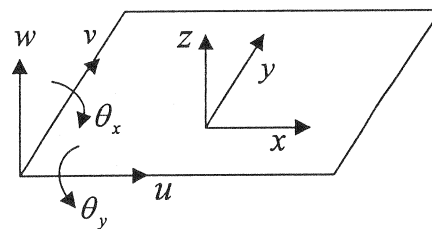


図-6 平板要素の節点自由度

3.3 解析結果

2章で設定した浮体に対し、5方向から独立に波を入射して連成曲げ振動解析を行った結果、浮体断面の最大鉛直方向変位、最大曲げモーメント、最大せん断力が入射角 0° の場合に最も大きな値が計算され、この場合について断面を決定するものとした。

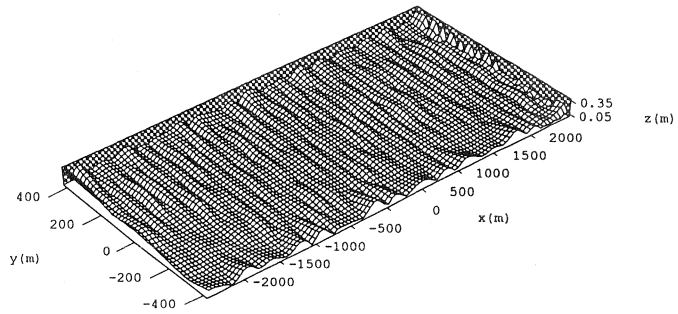


図-7 最大鉛直方向変位

図-7は浮体各節点の最大鉛直方向変位であり、浮体はx方向の節と腹のある曲げ振動が起きており、鉛直方向の最大値は浮体の入射側のコーナーにおいて約0.34mであることが分かる。また、施設帯の重量による大きな挙動の変化はないことが分かるが、施設帯付近で最大変位が0.3mほど見られるので施設帯を設計する場合はこのことを正しく評価しなければならない。

図-8はx方向断面(y軸回り)の曲げモーメントの最大値の分布図であり、 $y=0$ 付近つまりx方向断面の中央部付近では曲げモーメントが比較的小さいという結果が得られた。しかし入射角が 0° 以外の場合、中央部付近では両端とほぼ同じ曲げモーメントが発生することが分かっているため、断面設計をする際、両脇に比べて断面剛性を小さくできるということにはならない。この断面における最大値は、 $(x,y)=(2083,336)$ において、 1799.8kN/m である。また、断面に数箇所曲げモーメント図が不連続になっているように見える場所があるが、要素分割の影響と、図形出力時のスムージングの影響である。

図-9はy方向断面の曲げモーメント(x軸回り)の最大値の分布図であり、非常に複雑な挙動であることが分かる。この断面において最大の場所は、 $(x,y)=(-2083,168)$ であり最大曲げモーメント 1363.5kN/m であり、x方向の最大値の約75%となるので、x方向断面よりも断面剛性を小さく設計してもよいであろう。

図-10はx方向断面のせん断力の各点での最大値の分布図であり、浮体全体での最大の場所は $(x,y)=(-1833,252)$ である。この時の最大値は 145.0kN/m であり、構造物の大きさを考慮すれば、さほど大きなものではない。しかし、この値はあくまでも波浪によって起きる曲げ振動によるものであり、実際の設計の際には施設帯の重量や航空機の離発着によって発生するせん断力も考慮しなければならない。

また、せん断力分布図が曲げモーメント分布図よりも不連続になっているのは、解析上で鉛直変位を3次の関数で表しているからである。

図-11はy方向断面のせん断力の各点での最大値の分布図であり、

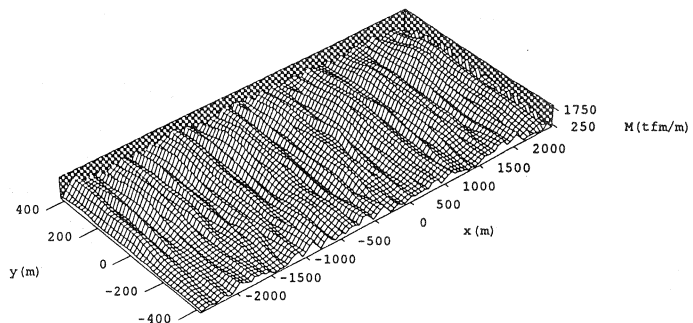


図-8 x方向最大曲げモーメント分布図

最大は $(x,y)=(-2000,0)$ の場所で 99.0kN/m であり、 x 方向の最大値の70%ほどである。

図-3.13は x 方向と y 方向断面に発生する最大ねじりモーメントの分布図であり、その最大値は $103.8\text{kN}\cdot\text{m/m}$ であり、これは単位長さ当たりの値であるので両方向等しくなる。このねじりは、床版断面のせん断力として扱う。その最大値は 103.8tf/m となり、床版にはこのせん断に対する補強筋が必要になる。

以上の解析結果をまとめると、入射方向 0° の場合、発生する断面力が最大になる。また、断面力が最大となる部分は、 x 方向断面と y 方向断面では異なる。つまり、波の入射角が変化することを考えれば、浮体の断面を決定する際には、断面力の最大値に対して各方向に均一の断面剛性を与えるべきである。ヒンジのようなものは別として、場所によって小さな断面力を与えることは危険である。

4 断面設計

4.1 断面設計の概念

前章で述べたように、浮体は曲げ変形を考慮すると、鉛直上下にたわんで変形する。このとき、上下床版には同じ絶対量

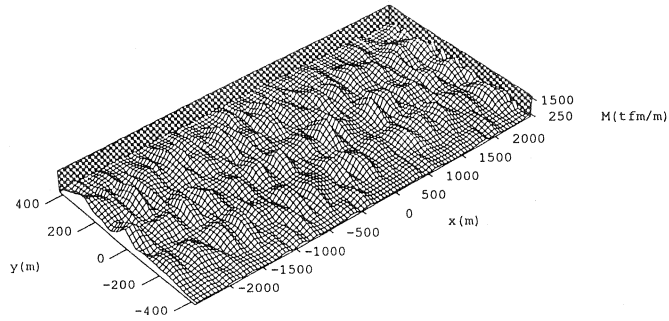


図-9 y方向最大曲げモーメント分布図

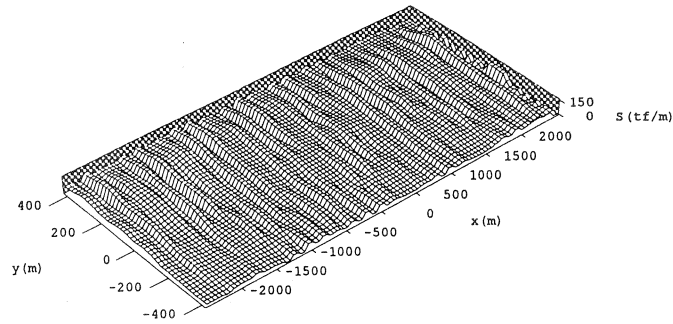


図-10 x方向最大せん断力分布図

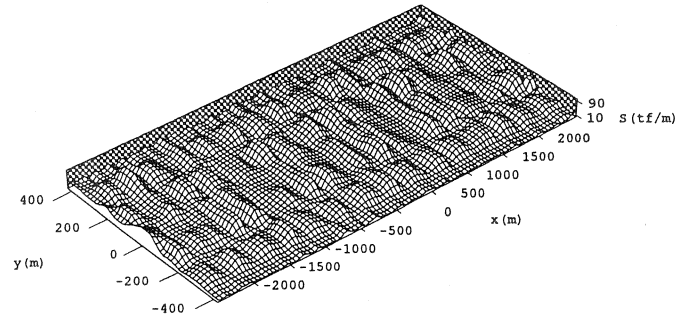


図-11 y方向最大せん断力分布図

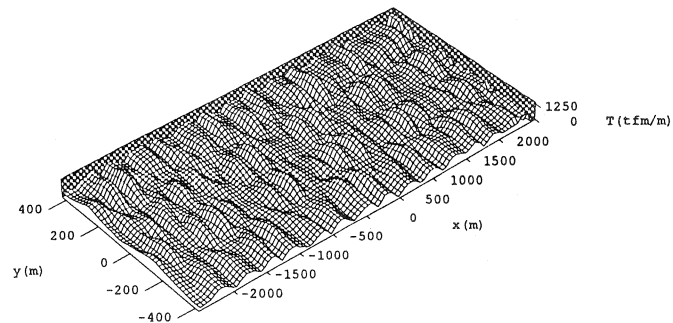


図-12 最大ねじりモーメント分布図

だけ引張、圧縮応力が反対に作用することになる。例えば、図-13のように浮体が曲げ状態にあるとすると、上床版には引張り応力、下床版には圧縮応力が作用することになる。この考え方によって、数値解析から求める断面力から計算した最大の曲げ応力と、静的な荷重によって発生する応力とを足し合わせるにより、断面内の最も危険な状態を計算する。

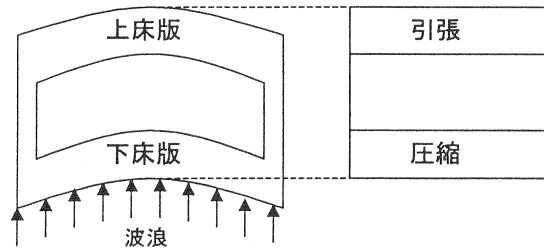


図-13 浮体断面の応力状態

このような状態下にある浮体をプレストレストコンクリートで造るとき、浮体の中に海水が侵入する危険性を考慮し、コンクリートにクラックが発生しないように全断面にプレストレスを与え、断面中に引張り応力が発生しないようにしなければならない。さらに、ここで注意すべきことは、上床版、下床版にプレストレスを与えるとき、浮体全体として偏心しないように、上床版と下床版のプレストレス量を釣り合わせる必要がある。また、洋上に移動する前の施工段階で、プレストレスによって引張り応力が生じないようにしなければならない。ここで、プレストレスによる応力は、式(1)によって計算する。

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

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。

4.2 上床版の曲げ応力

上床版の断面には波浪の曲げ応力、天板の自重、航空機荷重、プレストレスによる応力を考慮し、図-13に示す危険個所に発生する応力を、 x 方向、 y 方向断面について計算する。

ただし、波浪によって生じる曲げ応力は最大の値で考え、航空機の荷重はB-747の車輪の換算した荷重(232kN)が上床版の中央部分に載荷したときときを考える。

4.3 下床版の曲げ応力の計算

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。設計の際は、危険側である貨物の荷重がない場合を考え、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する。

4.4 せん断力の算定

波浪により発生するせん断力は、すべてウェブ(隔壁)が受け持つものとし、接合部分にはプレストレスによってせん断に抵抗するものとする。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ることにする。せん断力は(2)式によって求めることができる。

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

ただし、 A_w : 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、 α : 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り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 としてよい。

また、上床版のせん断力補強筋は自重、航空機の荷重を考慮し、下床版の補強筋は浮力によるせん断力を考える。

5. 結論

表-7 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(kN/本)	偏心量(m)
X 方向	中央部	12T15.2	2	1800.0	0.00
	隔壁部	12T15.2	2	1800.0	0.10

表-8 Y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(kN/本)	偏心量(m)
Y 方向	隔壁部	12T12.7	4	1200.0	0.00
	隔壁部	12T12.7	4	1200.0	0.10

表-9 X,Y方向のスターラップ

	最大せん断力(kN/m)	鉄筋の種類	配置間隔(m)	スターラップの形
X 方向	513.9	D16	0.250	U 型
Y 方向	442.0	D16	0.215	U 型

2章で提案した断面諸量を基に、数値計算を行い、x方向及びy方向断面のプレストレスと、断面中のせん断補強筋を計算すれば、表-2及び表-3、表-4のような計算結果を得ることができる。

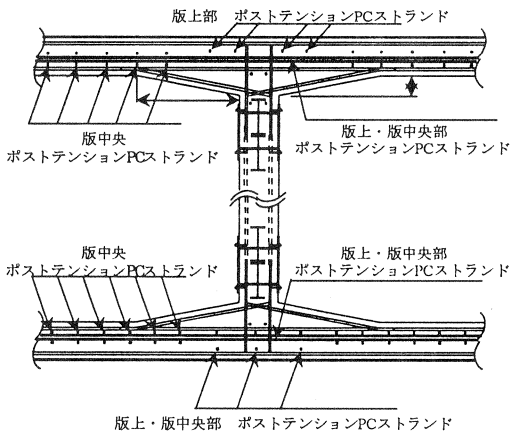


図-14 x方向断面概略図

また、この計算結果を基に、図-14のようなx方向断面の概略図を描くことができる。なお、y方向断面図の掲載は割愛した。

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) 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
- 3) マリンフロート推進機構 : 浮体式海上空港, 鹿島出版会, 1997