

神戸市 正員 吉井 真
 大阪大学工学部 正員 前田 幸雄
 大阪大学工学部 正員 大倉 一郎

1. まえがき 既報¹⁾では、実構造物に基づいたジャケットの固有振動解析を行ない、その振動特性を明らかにした。本報告では、ジャケットの波浪応答解析を行なうために、ノーマルモード法を用いた不規則振動解析を適用し、海象を与える波高スペクトルとジャケットの応答スペクトルの関係を定式化した。これに基づいて、ジャケットの波浪応答解析プログラムを作成し、波力の離散化方法の照査及び既報で示したジャケットの実構造モデルに対する応答計算結果を報告する。

2. 波高スペクトルと応答スペクトルの関係 ジャケットの円管部材に作用する波力は、モリソン公式の抗力項を線型化したBorgmanの第1近似式²⁾を用いた。波力の離散化においては、各節点で連結される部材の部材長の半分に、節点における水平方向の水粒子速度及び水粒子加速度で算定される波力を等分布荷重として作用させ、その総計を節点外力とした。したがって、節点*i*における離散化した波力 f_i は、節点*i*における水粒子速度及び水粒子加速度を u_i , $\dot{u}_i$ とすると次式のように表わせる。

$$f_i = C_{Di} u_i + C_{Mi} \dot{u}_i \quad \text{ただし, } C_{Di} = \frac{1}{2} \rho_w C_D \sqrt{\frac{g}{\pi}} \Omega u_i D_m l_m, \quad C_{Mi} = \frac{1}{2} \rho_w C_M \frac{\pi D_m^2}{4} l_m \quad (1)$$

ここに、 D_m , l_m は、節点*i*で連結される部材*m*の外径及び鉛直面への投影長の半分、 ρ_w は、流体の単位質量、 C_D , C_M は、抗力係数及び質量力係数、 Ωu_i は、節点*i*における水粒子速度の標準偏差である。ジャケットの離散化には有限要素法を用いた。したがって、ジャケットの運動方程式は、水粒子運動との相対速度及び相対加速度を考慮すると、次式のように表わせる。

$$[M + C_d] \ddot{x} + [C + C_b] \dot{x} + [K] x = [C_b] \dot{u} + [C_M] \ddot{u} \quad (2)$$

ここに、 M , C , K は、構造物の質量、減衰、剛性マトリックス、 C_d は、付加質量マトリックス、 C_b , C_M は、対角項に、式(1)の C_{Di} , C_{Mi} を有するマトリックス、 x は、構造物の変位ベクトル、 u , $\dot{u}$ は、水粒子速度及び加速度ベクトルである。式(2)において、非減衰自由振動方程式の固有値解析より得られるモーダルマトリックスを用いてノーマルモード法を適用し、流体減衰を含めた全減衰がモーダルダンピングの形で与えられるものと仮定する。水粒子運動に微小振幅波理論を適用すると、任意節点*P*の変位スペクトル $S_P^{x,y}(w)$ は、次式のように導かれる。

$$S_P^{x,y}(w) = \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i,j} \phi_{k,i} \phi_{k,j} H_k^*(w) H_k(w)}_{[1]} \underbrace{\{ C_{Di} C_{Dj} + i w (C_{Di} C_{Dj} - C_{Mi} C_{Mj}) + w^2 C_{Mi} C_{Mj} \}}_{[2]} \underbrace{w^2 \frac{\cosh k z_i \cosh k z_j}{\sinh^2 k h}}_{[3]} \underbrace{\cos k(x_i - x_j)}_{[4]} \underbrace{S^y(w)}_{[5]} \quad (3)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$, $w^2 = g k \tanh k h$; k , g , h は、それぞれ角波数、重力加速度、水深を表わす。式(3)において、項[1]は、構造物の振動特性を表わし、 $\phi_{k,i}$, $H_k(w)$ は、第*k*次振動の振動モード及び周波数応答関数を表わし、記号*y*は、共役成分を表わす。項[2]は、離散化した波力の作用断面を表わす。項[3]は、波力の水深方向の相互相関を表わす。項[4]は、波力の空間的位相差を表わし、 $\cos k(x_i - x_j) = -1$ のとき、2点*i*, *j*間で波力が逆位相で作用する。2点間距離をジャケットのレブ間隔*L*とすると、次式で与えられる周波数において、ジャケット全体に作用する波力は、干渉効果により減少する。

$$f_s = (2\pi)^{-1} \sqrt{g(2m-1)\pi L^{-1} \tanh(2m-1)\pi h L^{-1}} \quad (4)$$

ただし、 $m = 1, 2, \dots$

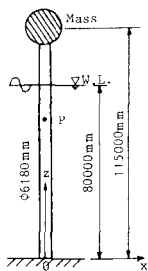


図-1 円柱モデル

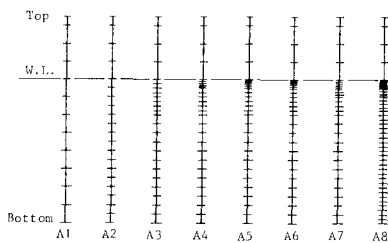
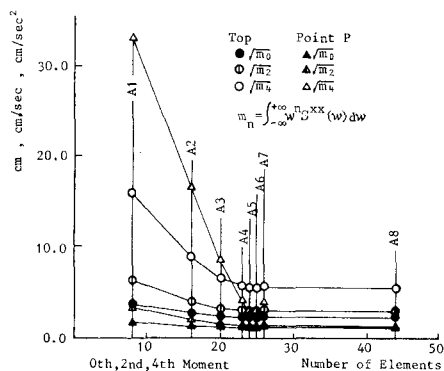


図-2 要素分割状態

項[5]は、海象を与える波高スペクトルであり、本解析においては、Pierson-Markowitzのスペクトル³⁾を用いた。

3. 波力離散化の照査 式(3)の項[1]は、作用波力が静水面で最大となり、水深が増すに従い急速に減少する分布をもつことを示す。したがって、要素分割の粗密が波力算定に影響を及ぼすものと考えられる。これを調べるために、図-1に示す単一円柱モデルに対し、図-2に示すように要素分割を変化させて、応答計算を行った。モデルの固有振動数は、第1次が0.3268 Hz、第2次が2.896 Hzである。設定海象は、有義波高7.5 m、減衰率は各モードとも0.05とした。図-3は、頂部及び点Pの水平変位の0, 2, 4次のモーメントと水中部要素数の関係を示したもので、図-3 変位の応答と水中部要素数の関係である。これより、水面近傍の要素分割を密にすれば、解は一定値に近づくことがわかる。



4. ジャケットの応答計算 解析モデルは、図-4に示す頂部に上載重量2000 tをもつ水深約76.5 mのジャケット¹²⁾であり、平面モデルに置換したもので考察する。投影面に対して垂直な方向に在る部材については、各格点部に、 λ の部材の半分に等しい質量とそれと等価な波力の作用断面を付加している。モデルの固有振動数及び固有振動モードを図-5に示す。第1次振動モードは、頂部で最大振幅となり、ジャケット部は比較的小さい。第2次振動モードは、wave zoneで最大振幅となり、頂部の振幅は小さい。設定海象は、表-1に示す有義波高 $H_{1/3}$ が、2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0 mの5海象である。減衰率は各モードとも0.05とした。表-2は、頂部変位及び静水面にある斜めブレース下端の応答を示したものである。有義波高が大きくなるに従い、応答量は増加している。平均周波数は有義波高が大きくなるに従い、波高の平均周波数に近づき、これを下回っている。いずれの場合も応力のスペクトル幅パラメータ ϵ は、1.0に近く、広域帯の応答である。また、式(4)で示した波力が部材間の干渉効果で打ち消し合う周波数(数値計算上0.3675 Hz)に第1次固有振動数がきわめて近接しているため、このモデルの動的応答成分は、少ないと考えられる。

表-1 設定海象

$H_{1/3}$ (m)	f_p (1/sec)	f_0 (1/sec)
2.5	0.126	0.177
5.0	0.0891	0.125
7.5	0.0727	0.102
10.0	0.0629	0.113
15.0	0.0514	0.0724

f_p : ピーク周波数
 f_0 : zero-up-cross 平均周波数

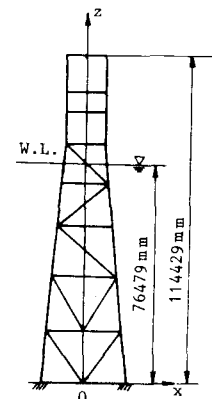


図-4 解析モデル

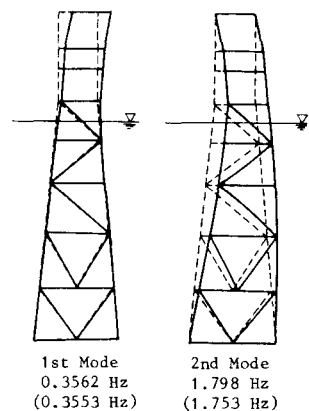


図-5 固有振動数及び固有振動モード

表-2 応答計算結果

頂部変位				静水面にある斜めブレース下端の応力						
$H_{1/3}$ (m)	$\sqrt{m_0}$ (cm)	ϵ	f_0 (1/sec)	Axial Stress			Bending Stress			
$H_{1/3}$ (m)	$\sqrt{m_0}$ (cm)	ϵ	f_0 (1/sec)	$H_{1/3}$ (m)	$\sqrt{m_0}$ (kg/cm ²)	ϵ	f_0 (1/sec)	$\sqrt{m_0}$ (kg/cm ²)	ϵ	f_0 (1/sec)
2.5	0.0946	0.634	0.240	2.5	2.05	0.951	0.207	1.32	0.984	0.256
5.0	0.200	0.809	0.150	5.0	5.12	0.959	0.127	3.81	0.992	0.130
7.5	0.361	0.841	0.111	7.5	9.73	0.948	0.0994	7.56	0.990	0.0973
10.0	0.588	0.841	0.0917	10.0	16.2	0.930	0.0845	13.0	0.985	0.0818
15.0	1.24	0.821	0.0718	15.0	35.5	0.885	0.0681	29.3	0.969	0.0659

ϵ : スペクトル幅パラメータ
 $\epsilon = \sqrt{1 - m_2^2 / m_0 m_4}$

参考文献 1) 年譜撰要集: I-214, 1982 2) Borgman L.E.: ASCE vol. 93, WW2, May, 1967
3) Pierson W.J., L. Markowitz: J. of Geographic Res. vol. 69, 5181, 1964