

係留された円筒状浮体の波浪応答解析

鳥 取 大 学 正 員 神 部 俊 一
 日 本 電 炉 株 正 員 鈴 木 慎 一
 鳥 取 大 学 大 学 院 学 生 員 ○ 宮 脇 健 一
 鳥 取 大 学 大 学 院 学 生 員 秋 本 孝

1. まえがき

日本は周囲を海で囲まれているために工業製品の輸出や資源の輸入に際して、海上輸送に頼らざるを得ない。海洋構造物を資源備蓄用倉庫として利用すれば、陸上スペースを他の用途に使用できる利点がある。ここでは、ロッドで係留される浮遊式海洋構造物にポテンシャル理論を適用して、ロッドに導入された初期張力が浮体の動揺制御に及ぼす効果と入射波の波周波数が浮体の動揺特性に及ぼす影響を数値計算により明らかにする。

2. 波力の算出¹⁾

非圧縮性、非粘性、非回転の流体場に対する速度ポテンシャル Φ を次のように表わす。

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_S + \Phi_R$$

ここに、 Φ_I :入射波の速度ポテンシャル、 Φ_S :散乱波の速度ポテンシャル、 Φ_R :浮体の動揺に起因する発散波による速度ポテンシャルを意味する。速度ポテンシャル Φ はラプラスの方程式と自由表面条件、海底面条件、物体表面における不透過条件、およびゾンマフェルトの放射条件を満たす必要がある。しかし、この境界値問題を解析的に解くのは困難であるのでグリーン関数法を用いて数値的に解く。

上記の境界値問題は、グリーン関数とグリーン関数の第2定理を利用して式を変形すると、浮体の没水表面で定式化された境界積分方程式を解く問題に帰着する。没水表面を N 個の境界要素に分割して離散化すると、速度ポテンシャルを未知量とする複素係数の連立一次方程式が得られるが、入射波の速度ポテンシャル Φ_I が既知であるから、散乱波の速度ポテンシャル Φ_S と発散波の速度ポテンシャル Φ_R とが求められる。

入射波および散乱波の速度ポテンシャルを用いると、波浪強制力 E_m は次のように表わされる。

$$E_m = i \rho \omega \exp(-i \omega t) \sum_j \{ \Phi_I(P_j) + \Phi_S(P_j) \} \cdot n_m(P_j) \Delta S_j \quad (m=1 \sim 6)$$

ここに、 E_m ($m=1 \sim 6$): 波浪強制力の各座標軸方向成分、 $i = \sqrt{-1}$ 、 ρ : 海水の密度、 ω : 波角周波数、 n_m ($m=1 \sim 6$): 微小要素 P_j における単位速度の法線方向成分 ($m=1 \sim 3$)、単位角速度に対応する速度の法線方向成分 ($m=4 \sim 6$)、 ΔS_j : 微小境界要素の面積である。

また、付加質量 M_{km} および造波減衰抵抗 N_{km} は次のように表わされる。

$$M_{km} + i \frac{N_{km}}{\omega} = \rho \sum_j \Phi_R(P_j) n_m(P_j) \Delta S_j \quad (k, m=1 \sim 6)$$

3. ロッドの係留力²⁾

ロッドと海底および浮体との結合部に自在継手を用いることにし、浮体が動揺してもロッドは湾曲しないものと仮定する。さらに、ロッドに作用する流体力は無視できるものとする。次に、上記の仮定をもとに係留点 j におけるロッドの係留力の各座標軸方向成分を行列表示すると次のようになる。

$$\{ \mathbf{p}_j \} = [\mathbf{K}_j] \{ \mathbf{u}_j \}$$

ここに、 $\{ \mathbf{p}_j \}$: 係留点 j の作用力ベクトル、 $\{ \mathbf{u}_j \}$: 係留点 j の変位ベクトル、 $[\mathbf{K}_j]$: 剛性マトリックス

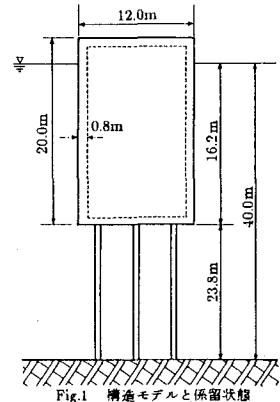


Fig.1 構造モデルと係留状態

である。

浮体の重心に原点を設けて浮体の動揺を解析するので、変換行列 $[T_j]$ を用いると係留力により重心Gに生じる復元力ベクトル $\{F_a\}$ は、座標原点における変位ベクトル $\{u_a\}$ と次式により関連付けられる。

$$\{F_a\} = \left[\sum_j [T_j]^T [K_j] [T_j] \right] \{u_a\}$$

4. 浮体の運動方程式¹⁾

浮体の重心Gの変位ベクトル $\{u_a\}$ を支配する運動方程式は粘性減衰を考慮しないと次のようになる。

$$([m] + [M]) \frac{d^2}{dt^2} \{u_a\} + [N] \frac{d}{dt} \{u_a\} + ([C] + [K_a]) \{u_a\} = \{E\}$$

ここに、 $[m]$:質量マトリックス、 $[M]$:付加質量マトリックス、 $[N]$:造波減衰係数マトリックス、 $\{E\}$:波浪強制力ベクトル $[C]$:静水圧による復元力マトリックス、 $[K_a]$:係留力による剛性マトリックスである。剛体運動による浮体重心の変位ベクトル $\{u_a\}$ は定常運動をしていると考えられるので、 $\{u_a\} = \{\bar{u}_a\} \exp(-i\omega t)$ 、波浪強制力も時間項を分離して $\{E\} = \{\bar{E}\} \exp(-i\omega t)$ とおいて上式に用いると、

$$([C] + [K_a] - i\omega[N] - \omega^2([m] + [M])) \{\bar{u}_a\} = \{\bar{E}\}$$

上記の方程式を解いて $\{\bar{u}_a\}$ が求まれば、入射波の各円振動数に対する浮体の動揺を知ることができる。

5. 数値計算例

浮体は没水表面円筒側面部を長方形要素を用いて60分割、底面部を三角形要素を用いて30分割することによって離散化されている。解析に用いた物理定数はヤング係数 $E=2.6 \times 10^6$ kgf/cm²、コンクリートの単位体積重量 $\rho_c=2500$ kgf/m³、海水密度 $\rho_w=1025$ kgf/m³、重力加速度 $g=9.8$ m/sec² とする。構造モデルはFig. 1 に示すように高さ20m、円筒の外形が12m、内径が10.6m 厚さ80cmである。ロッドはFig. 1 に示すように水深16.2m の位置で浮体と結合している。浮体を1m 沈めることにより、初期張力を与えていく。

係留に用いる3種類のロッドを表-1に示す。解析に用いた入射波を表-2に示す。ロッドAで係留した浮体の前後揺(surge) u_a と縦揺(pitch) ψ との関係をFig. 2に示す。

さらにロッドBとロッドCについても計算により得られた同様の結果をそれぞれFig. 3とFig. 4に示す。

表-1 ロッドの寸法

	(A)	(B)	(C)
直径	60cm	60cm	60cm
内径	0cm	10cm	20cm
長さ	23.8m	23.8m	23.8m

表-2 入射波の波長と周期

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
周期(sec)	5.0	5.3	5.6	5.9	6.2
波長(m)	39.0	43.8	48.9	54.3	60.0
波高(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
入射角(°)	30	30	30	30	30

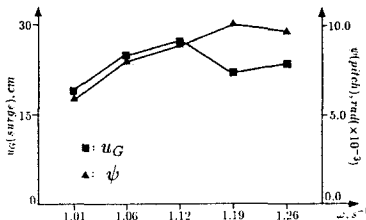


Fig.3 波周波数と浮体の動揺解析(ロッドB)

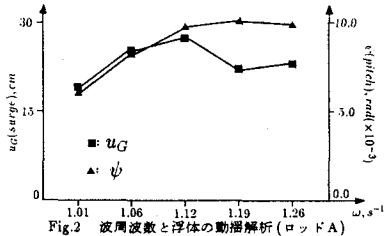


Fig.2 波周波数と浮体の動揺解析(ロッドA)

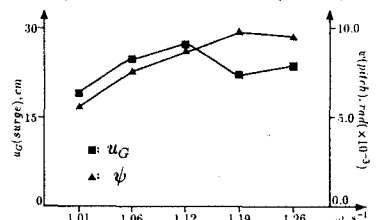


Fig.4 波周波数と浮体の動揺解析(ロッドC)

6. 結論

数値計算により得られた結果に対する考察を箇条書きにして以下に示す。

- 1) 波周波数 ω が一定の場合、ロッドに導入された初期張力が大きくなるほど、浮体の並進変位は減少し回転変位は増加する。
- 2) 初期張力が一定の場合、波周波数 ω が小さくなるほど大旨浮体の並進変位が減少し回転変位も減少する。

【参考文献】

- 1) 清川哲志・大山巧・小林浩: グリーン関数法による任意形状浮体の動揺解析、土木学会論文報告集、第322号、1983年4月pp.55 ~65、
- 2) M.H.Patel and E.J.Lynch: Coupled dynamics of tensioned buoyant platforms and mooring tethers, Eng. Struct., Vol. 5, October