

任意反射率岸壁付近に係留された浮体の運動と 係留力の3次元解析

井 上 義 行*・杉 山 祐 樹**

1. 緒 言

近年、浮体を利用した海岸構造物への関心が高まっているが、それらの中には、浮体式係船岸や浮き防波堤等の計画がある。このような構造物は一旦海域に設置されると、一般船舶のように荒天時に避泊などの措置を取ることが不可能なため、その基本設計においては荒天時でも浮体や係留系の安全が保てるよう考慮しなければならない。

ところで、このような比較的陸地に近接した浮体の運動、あるいは係留系に対しては、岸壁等による反射波の影響を無視することはできないが、これらの問題に関する研究は少ない。岸壁の反射率と浮体運動の問題に対しては清川ら (1984, 1985) が2次元問題として行った基礎的な研究がある。しかし、2次元では斜波中の問題等は解けないため、より実際に即した問題を検討するためには、やはり3次元問題として取り扱う必要がある。

したがって、本研究では Oortmerssen (1976) が示したような3次元特異点分布法による岸壁前面における浮体動揺の解析方法を任意反射率を有する岸壁の場合に拡張し、その前面における浮体の流体力や運動応答に関する理論展開を行い、得られた数値計算結果を模型実験結果と比較して、その有効性を確認した。そして、反射波の存在による流体力、運動応答及び波浪漂流力などへの影響について考察した。

さらに、不規則波中において変動風を受ける係留浮体の長周期運動のシミュレーション計算を行った。ここでは、変動波浪漂流力等を含む運動方程式の時間領域での解法に、Cummins (1962) が示したインパルス応答を用いた。その適用例として、実機計画・検討されている浮体式係船岸を選び、シミュレーション計算によって、反射波による浮体運動あるいは係留系への影響について検討を加えた。以下にその概要を示す。

2. 定 式 化

3次元特異点分布法は、非回転調和振動流れ場を決定する汎用性の高い手法である。まず、図-1に示すように、一定水深 h にある浮体に対して、空間固定右手系デカルト座標 $O-X_1, X_2, X_3$ をとる。また、静止状態で浮体の重心と一致する原点を有し、この座標系に平行な $O-\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$ を考え、各軸方向の並進運動、及び各軸回りの回転運動を図-2のように定義する。

自由表面を有する流体中における物体の定常動揺問題を考えるとき、流れ場は速度ポテンシャル $\phi \exp(-i\omega t)$ によって決定される。この速度ポテンシャルはグリーン関数 G を用いて、Oortmerssen (1976) が示した方法を拡張し、任意の反射率を有する岸壁前面の速度ポテンシャルとして、次式で示す。

$$\phi(P) = \int_S \sigma(Q) G(P, Q) dS_Q + K_R \int_S \sigma(Q') G(P, Q') dS_{Q'} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、

$P=(X_1', X_2', X_3')$: 流体中の任意点

$Q=(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$: 浮体表面 S 上の任意点

σ : 浮体表面 S 上の吹き出し分布密度

$Q'=(\xi_1, 2c-\xi_2, \xi_3)$: 鏡像の浮体表面上の点

K_R : 岸壁の反射率 (実数、位相及び周期の変化を無視)

c : 浮体中心と岸壁との距離

ところで、式 (1) 中のグリーン関数は F. John (1950) によって与えられているので、Hess & Smith (1964) の方法によって浮体表面の境界条件を用いて σ を求め、 ϕ を決定する。

得られた j 方向 ($j=1, 2, \dots, 6$) の運動の単位速度ポテンシャルによって、付加質量、減衰力は、

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} &= -\rho R_e \int_S \phi_j n_i dS \\ b_{ij} &= -\omega \rho I_m \int_S \phi_j n_i dS \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

($i, j=1, 2, \dots, 6$) (R_e : 実部, I_m : 虚部)

* 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科 (船舶海洋工学)

** (財)日本海事協会

(研究当時 横浜国立大学大学院在学)

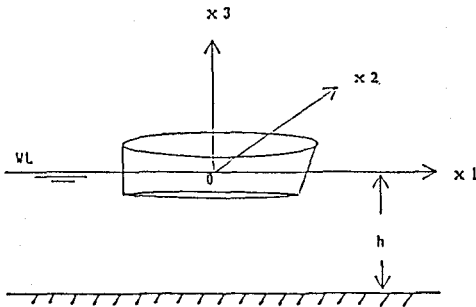


図-1 座標系

で求められる。

また、 j 方向の波浪強制力は、入射波の速度ポテンシャル ϕ_0 とディフラクション速度ポテンシャル ϕ_1 によって

$$f_j = i\omega\rho \int_S (\phi_0 + \phi_1) n_j dS \quad \dots\dots\dots (3)$$

で得られる。

一方、任意の反射率を有する岸壁の前面における入射波の速度ポテンシャルは、微小振幅の進行波に反射波を重ねて、次式で表わす。

$$\begin{aligned} \phi_0 \exp(-i\omega t) = & \frac{g\zeta_a \cos hk(X_3 + h)}{i\omega \cosh kh} \\ & \times \{ \exp(ik(X_1 \cos \beta + X_2 \sin \beta)) \\ & + K_R \exp(ik(X_1 \cos \beta + (2c - X_2) \sin \beta)) \} \\ & \times \exp(-i\omega t) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 ζ_a : 波振幅 β : 波の入射角

以上により、浮体の運動方程式の各係数を定め、周波数領域で運動方程式を解くことによって、浮体動揺の周波数応答を求める。さらに、その結果を用いて、波浪漂流力を Faltinsen ら (1974) の表示式により計算する。

このようにして求めた、ラディエーション流体力、波浪強制力及び波浪漂流力を用いて、複合外力の下で非線形係留された浮体の運動及び係留力を求める時間領域の運動方程式を、Cummins (1962) に従って次のように表す。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 \{ (M_{kj} + m_{kj}(\infty)) \ddot{X}_j(t) + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau \\ + C_{kj} \dot{X}_j(t) \} = X_k(t) + \sum_{i=1}^{n_L} L_{ik}(t) \\ + \sum_{i=1}^{n_F} N_{ik}(t) \quad (K=1, 2, \dots, 6) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし、

$X_j(t)$: 時刻 t における船体の運動変位

M_{kj} : 船体質量マトリクスの k, j 要素

$m_{kj}(\infty)$: 周波数 $\omega \rightarrow \infty$ における付加質量マトリクスの k, j 要素 (定付加質量)

K_{kj} : 遅延関数マトリクスの k, j 要素

C_{kj} : 静水圧による復原力マトリクスの k, j 要素

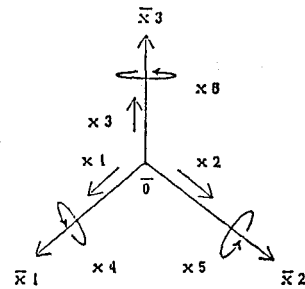


図-2 浮体動揺の定義

L_{ik} : 係留ラインによる復原力マトリクスの i, k 要素 ($i=1, 2, \dots, n_L$)

n_L : ラインの本数

N_{ik} : フェンダーによる復原力マトリクスの i, k 要素 ($i=1, 2, \dots, n_F$)

n_F : フェンダーの総数

X_k : 複合外力ベクトルの k 要素

(5) 式における遅延関数及び定付加質量は周波数領域での解析結果から計算する。

複合外力としては、不規則波のスペクトラム分布の素成波振幅に対応する波浪強制力の振幅にランダムな位相を用いて作成した不規則波浪強制力、及び Hsu (1970) の方法により求めた2次の流体力である変動波浪漂流力、さらに、変動風のスペクトル分布から作成した変動風荷重及び潮流力を考慮する。なお、潮流力は浮体の運動速度を重ねて相対潮流速度に対する抗力として計算する。

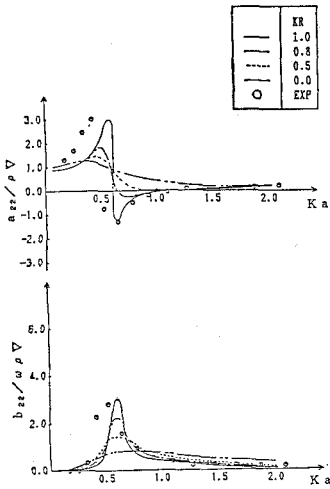
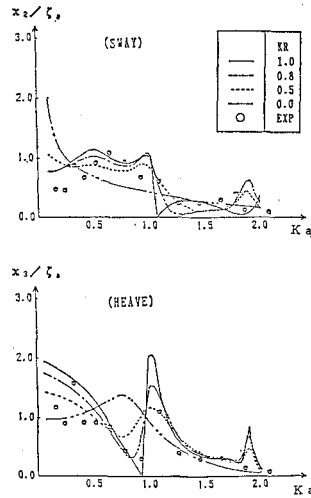
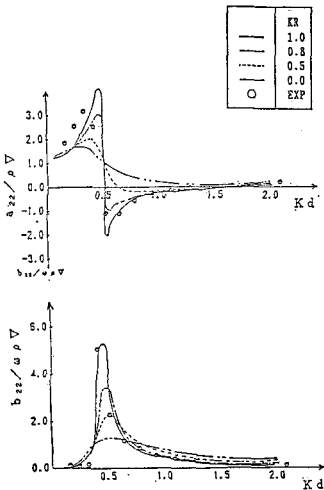
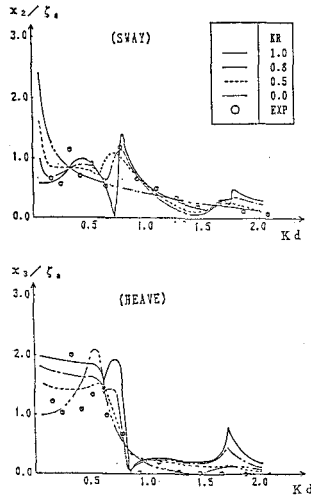
3. 模型実験と数値計算との比較

3次元特異点分布法を用いた数値計算結果の有効性を確認するため、模型実験結果との比較を行った。実験は本学船舶海洋工学設計研究室水中振動台において 表-1

表-1 供試模型の主要要目

	CIRCULAR CYLINDER	RECTANGULAR BOX
L (m)	0.973	0.973
B (m)	0.300	0.300
D (m)	0.250	0.250
d (m)	0.150	0.150
Δ (kg)	34.39	43.79
KG (m)	0.132	0.119
r (m)	0.070	0.128

* r : transverse radius of gyration

図-3 付加質量, 減衰係数
(半円柱模型)図-4 動揺応答 (Sway, Heave)
(半円柱模型)図-5 付加質量, 減衰係数
(矩形断面模型)図-6 動揺応答 (Sway, Heave)
(矩形断面模型)

に示す半円柱及び矩形断面浮体の2種類の模型に対して直立岸壁前面の強制左右揺れ試験及び横波中浮体運動の応答試験を実施したものである。比較した条件は、水深が1.0mで、岸壁と浮体中心間の距離が0.3mである。図3~6に比較結果を示す。図中の各記号は、 ρ : 流体密度、 a : 浮体模型の半幅、 d : 浮体模型の喫水、 V : 浮体模型の排水量、 K : 波数 ($=\omega^2/g$) である。

数値計算は岸壁の反射率 (K_R) を1.0, 0.8, 0.5及び0.0 (岸壁なし) として行った。いずれの浮体模型に対してもSwayの付加質量と減衰力、及びSway, Heaveの動揺応答に関する $K_R=1.0$ と0.8の計算結果に対して実験結果がよく一致しており数値計算が有効であることがわかる。また計算結果から、岸壁の反射率が低くな

ると、流体力の岸壁による干渉が緩和されて、岸壁なしの値へと近づいてゆくことがわかる。

4. シミュレーション計算の適用例

シミュレーション計算の適用例として、現在計画・検討されている浮体式係船岸を取り上げた。その主要目を表-2に示す。また、この浮体は図-7に示すように、ほぼ岸壁線上に設置されたドルフィンにロッドを介して係留されており、また長手方向はドルフィンフェンダー方式が採用されている。

シミュレーション計算に先立ち、横波中における浮体動揺及び波浪漂流力の周波数応答特性を調べた。図-8~11にそれらの結果を示す。Sway, Heaveの動揺応答は、岸壁の反射率が低いほど応答が大きくなる場合があり、特に、Heaveは $\omega=0.4\sim0.7$ 付近でこの傾向が顕著である。このような現象は樫木ら(1983)、清川ら(1984)によっても指摘されており、低反射率岸壁の採用は、浮体の設計条件によっては、むしろ動揺を助長する場合があることが、本浮体に対する解析においても明らかとなった。これに対して、Rollの動揺応答は反射率の低下に伴って小さくなってはいるものの、反射率の変化による運動応答の変化は小さい。一方、波浪漂流力の特性も岸壁の反射

率によって大きく変化し、特に $K_R=1.0$ においては負の漂流力、すなわち岸壁から遠ざかる方向に漂流力が作用する場合があることがわかる。

これらの結果を用いて、この浮体が図-7のように非線形係留された場合のシミュレーション計算を行った。

表-2 浮体式係船岸の主要要目

L	(m)	210.0
B	(m)	70.0
D	(m)	5.0
d	(m)	1.5
Δ	(ton)	22,601
KG	(m)	1.1
TRANSVERSE RADIUS OF GYRATION (m)		24.5

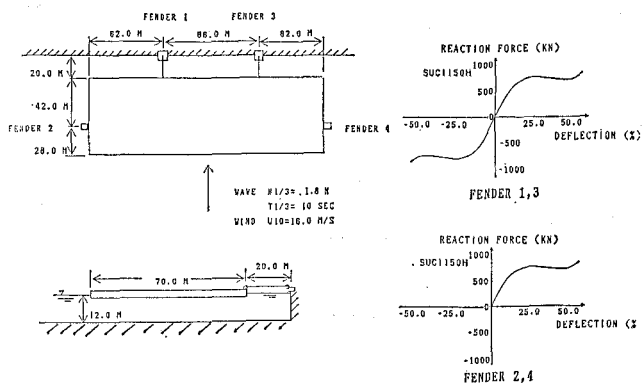


図-7 係留装置の配置及びフェンダーの反力特性

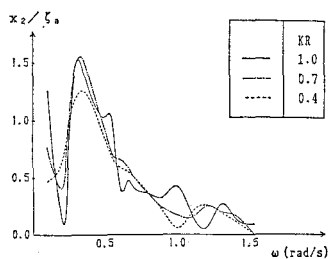


図-8 Sway の応答特性

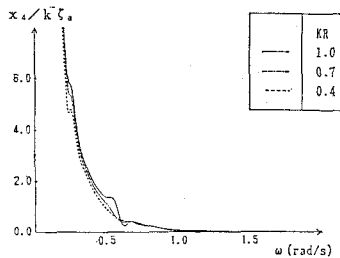


図-10 Roll の応答特性

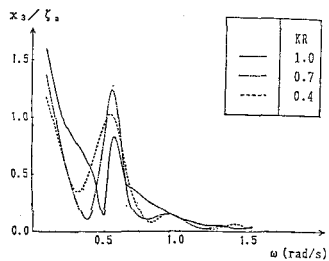


図-9 Heave の応答特性

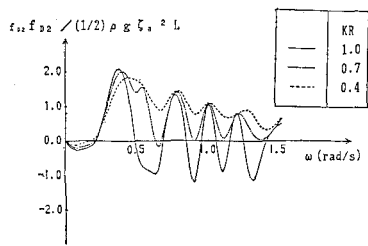


図-11 波浪漂流力の周波数特性

計算を行う際の時間刻みは実機時間で 0.25 s とした。係船限界を想定した海象条件として、有義波高 $H_{1/3} = 1.8$ m, 有義波周期 $T_{1/3} = 10$ s で、Bretschneider-光易型スペクトル分布を有する 2 次元不規則波及び 10 分間平均風速 $U_{10} = 16.0$ m/s で、Davenport のスペクトル分布を有する変動風が浮体に真横から当たるものとし、潮流はなしとした。

図-12 はシミュレーション計算で過渡影響の恐れのある部分を除いた時間 $t = 300 \sim 600$ s の Sway の時系列である。 $K_R = 1.0$ の Sway の結果が他と異なる波形であり、また振幅も大きい。一方、いずれの K_R においても十側、すなわち岸壁側に定常変位した位置を中心にして動揺している様子がわかる。この特性は反射率が大きくなるに従って緩和されており、負の漂流力の影響が現われているものと考えられる。

これらのシミュレーション計算の結果を総括して表-3 に示す。同表より反射率が高くなると浮体運動及びフェンダーの反力は大きくなる傾向があり、 $K_R = 1.0$ と $K_R = 0.4$ の場合を比較すると、Sway の動揺量の最大値は 2 倍近くも異なる。また、フェンダーの反力も十側、すなわち圧縮側で 30%、引っ張り側で 60% 増となり、浮体運動及び係留系に対する岸壁の反射率の影響は非常に大きいことがわかる。しかしながら、 $K_R = 0.7$ と 0.4 の場合を比較すると大きな差は認められず、岸壁の反射率の低減化を行っても期待したほどの動揺の低減化あるいは係留系の負担減にはつながらない場合もあることがわかる。

5. 結 言

任意反射率を有する岸壁前面における浮体のラディエ

表-3 シミュレーション計算結果の総括表

		KR= 1.0	KR= 0.7	KR= 0.4
SWAY	MAX (m)	0.121	0.067	0.063
	MIN (m)	-0.080	-0.047	-0.035
HEAVE	MAX (m)	0.124	0.093	0.077
	MIN (m)	-0.113	-0.091	-0.084
ROLL	MAX (deg)	0.371	0.232	0.226
	MIN (deg)	-0.312	-0.232	-0.210
FENDER	MAX (KN)	666	562	518
	MIN (KN)	-653	-458	-398

付記する。

参 考 文 献

- 清川哲志・平山彰彦 (1984): 任意反射率岸壁前面の船体動揺特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 476~480.
- 清川哲志・平山彰彦 (1985): 任意反射率岸壁に非線形係留された船体の不規則動揺解析, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 657~661.
- 樫木 亨・久保雅義 (1983): 係留船体運動からみた港内静穏度の算定について (3), 港湾, pp. 73~77.
- Cummins, W. E. (1962): The Impulse Response Function and Ship Motions, Schiffstechnik Bd. 9, Heft 47, pp. 101~109.
- Faltinsen, O. M. and F. C. Michelsen (1974): Motions of Large Structure in Waves at Zero Froude Number, Intl. Symp. on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 91~106.
- Hess, J. L. and A. M. Smith (1964): Calculation of Non-lifting Potential Flow About Arbitrary 3-dimensional Bodies, J. Ship Research 9, pp. 22~44.
- Hsu, F. H. et al. (1970): Analysis of Peak Mooring Forces Caused by Slow Vessel Drift Oscillations in Random Seas, OTC 1159, pp. 135~146.
- John, F. (1950): On the Motion of Floating Bodies II, Comm. Pure & Appl. Math. 3, pp. 45~101.
- Oortmerssen, G. Van (1976): The Motions of a Moored Ship in Waves, N.S.M.B. Publication No. 510, 141 p.

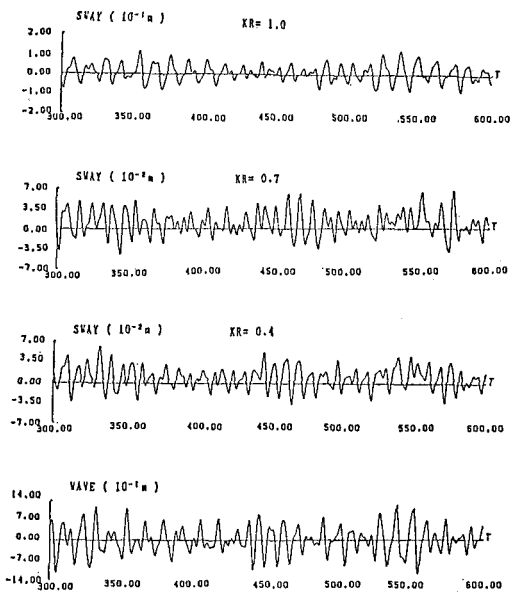


図-12 シミュレーション計算結果

イシオン流体力、動揺応答等を3次元特異点分布法に鏡像法を適用して数値計算し、模型実験結果との比較によりその有効性を確認した。また、実機計画・検討されている浮体に対するシミュレーション計算を行った結果から、浮体の運動、係留力に対する反射波の影響は非常に大きいことがわかった。したがって、岸壁などによる反射波の影響を受ける海域に設置される浮体の設計、あるいは係留計画を行う際には、岸壁などの反射率を考慮した検討が必要であることが明らかとなった。

終わりに、本研究における数値計算は横浜国立大学計算機センター HITAC-M280H を用いて行ったことを