

有限長の防波堤と3次元係留浮体の波による干渉

—計算値と実験値の比較—

永田 修一*・藤田 孝**・三宅成司郎***

巻幡敏秋*・小田一紀****

1. 緒 言

洋上石油備蓄基地などのように沿岸部に浮体構造物を建設する場合の浮体運動予測には、防波堤や島などの地形の影響を含めた解析が必要である。前論文(永田ら, 1990)では、井島ら(1975)によって提案された3次元領域分割法を用いて、有限長の防波堤が存在する海域での自由浮体の波浪中の運動計算を行った。そして、その計算結果より、浮体運動に及ぼす防波堤の影響について理論的な考察を示した。また、計算を効率よく行うために、大きな連立方程式を解くかわりに元数の小さな逆行列を多数個扱う方法を示した。

しかしながら、前論文は自由浮体に関するものであり、また計算例を示したのみで、計算法の具体的な検証を行っていなかった。そこで、本研究では、係留浮体に関する水理模型実験を行い、浮体の運動や係留力に関する計算値と実験値を比較することによって解析手法の有効性を示すことにする。

2. 解 析 法

解析法に関して、本論文では、おもに係留力を理論的に扱う方法について述べる。その他の解析手法の詳細については、自由浮体の運動について記述した前論文(永田ら, 1990)を参照されたい。

2.1 基本仮定

対象とする解析領域は、図-1に示すように、有限長の防波堤と係留浮体が存在する一定水深の海域である。入射波は、角周波数 σ 、振幅 ζ_0 の平面規則波でかつ微小振幅波とする。簡単のために、浮体は矩形で単一、係留索は線形バネ、防波堤の幅は零とする。静水面上に原点 O および x, y 軸、鉛直上方に z 軸をとり、静止時の浮体重心を $(0, 0, z_0)$ 、係留時の喫水を qh とする。また、入射波の進行方向と x 軸のなす角度を ω とする。

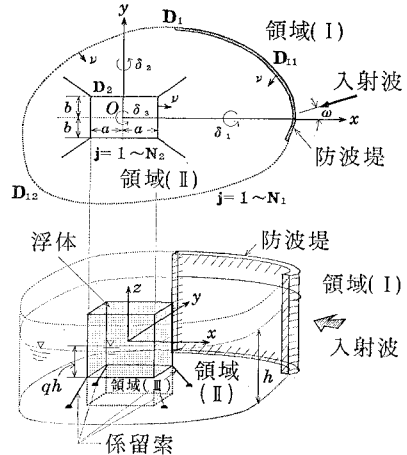


図-1 解析領域

時刻 t で浮体重心が (x_0, y_0, z_0) に移り、かつ x, y, z の各軸に関して $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ の回転を行うものとする。と次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \xi^* e^{-i\sigma t}, & y_0 &= \eta^* e^{-i\sigma t}, & z - z_0 &= \zeta^* e^{-i\sigma t} \\ \delta_1 &= \omega_1^* e^{-i\sigma t}, & \delta_2 &= \omega_2^* e^{-i\sigma t}, & \delta_3 &= \omega_3^* e^{-i\sigma t} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\xi^*, \eta^*, \zeta^*, \omega_1^*, \omega_2^*, \omega_3^*$ は、それぞれ x, y, z 方向の変位と x, y, z 軸まわりの回転角の複素振幅であり、 i は虚数単位である。

2.2 運動方程式

浮体の質量を M 、重心に関する各軸まわりの慣性モーメントを I_x, I_y, I_z とし、浮体に作用する流体圧力の各軸方向の合力および重心まわりのモーメントをそれぞれ $P_x, P_y, P_z, T_x, T_y, T_z$ とおくと、浮体の運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M \frac{d^2 x_0}{dt^2} &= P_x + F_x, & M \frac{d^2 y_0}{dt^2} &= P_y + F_y \\ M \frac{d^2 z_0}{dt^2} &= P_z + F_z, & I_x \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= T_x + M_x \\ I_y \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= T_y + M_y, & I_z \frac{d^2 \delta_3}{dt^2} &= T_z + M_z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

* 正会員 工博 日立造船(株) 技術研究所

** 正会員 工修 日立造船(株) 技術研究所

*** 工修 日立造船(株) 技術研究所

**** 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

ここで, F_X , F_Y , F_Z は係留力であり, M_X , M_Y , M_Z は係留力によるモーメントである.

これらの係留力および係留力によるモーメントは, 幾何学的な釣り合いから求められ, 係留索の初期張力や初期長さなどから決定されるもので, たとえば F_X と M_X について, その形を示すと次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} F_X &= \sum_{j=1}^{n^*} [F_{xx}^{(j)} \cdot \eta^* + F_{xy}^{(j)} \cdot \eta^* + F_{xz}^{(j)} \cdot \zeta^* \\ &\quad + F_{x1}^{(j)} \cdot \omega_1^* + F_{x2}^{(j)} \cdot \omega_2^* + F_{x3}^{(j)} \cdot \omega_3^*] \cdot e^{-i\omega t} \\ M_X &= \sum_{j=1}^{n^*} [M_{xx}^{(j)} \cdot \xi^* + M_{xy}^{(j)} \cdot \eta^* + M_{xz}^{(j)} \cdot \zeta^* \\ &\quad + M_{x1}^{(j)} \cdot \omega_1^* + M_{x2}^{(j)} \cdot \omega_2^* + M_{x3}^{(j)} \cdot \omega_3^*] e^{-i\omega t} \\ &\quad (j=1, 2, \dots, n^*) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, n^* は係留索の本数を表し, F_{xx} , F_{xy} , M_{xx} などは係数で F_{xx} , M_{xx} についてのみ示すと以下になる.

$$\left. \begin{aligned} F_{xx} &= F_1 \cdot m_x + F_2 \cdot \varepsilon_{1x} + F_3 \cdot \varepsilon_{2x} \\ M_{xx} &= M_1 \cdot m_x + M_2 \cdot \varepsilon_{1x} + M_3 \cdot \varepsilon_{2x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= -k_f \cdot \cos \varepsilon_1^* \cdot \cos \varepsilon_2^* \\ F_2 &= F_0 \cdot \sin \varepsilon_1^* \cdot \cos \varepsilon_2^* \\ F_3 &= F_0 \cdot \cos \varepsilon_1^* \cdot \sin \varepsilon_2^* \\ M_1 &= -k_f (y_f \cdot \sin \varepsilon_3^* + c \cdot \sin \varepsilon_1^* \cdot \cos \varepsilon_2^*) \\ M_2 &= -F_0 \cdot c \cdot \cos \varepsilon_1^* \cdot \cos \varepsilon_2^* \\ M_3 &= -F_0 (y_f \cdot \cos \varepsilon_2^* - c \cdot \sin \varepsilon_1^* \cdot \sin \varepsilon_2^*) \\ m_x &= \cos \varepsilon_1^* \cdot \cos \varepsilon_2^* \\ \varepsilon_{1x} &= \frac{-\sin \varepsilon_1^*}{m_0 \cdot \cos \varepsilon_2^*}, \quad \varepsilon_{2x} = \frac{-\cos \varepsilon_1^* \cdot \sin \varepsilon_2^*}{m_0} \\ c &= qh + \bar{z}_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

なお, k_f は係留索のバネ定数, F_0 は静止時に係留索に作用している初期張力, m_0 は係留索の初期の長さ (初期張力が作用している状態) であり, y_f は浮体側の係留位置の y 軸座標値である. また, ε_1^* は 図-2 に示すように, 係留索の x - y 平面への正写影と x 軸のなす角であり, ε_2^* は係留索の x - y 平面からの仰角である.

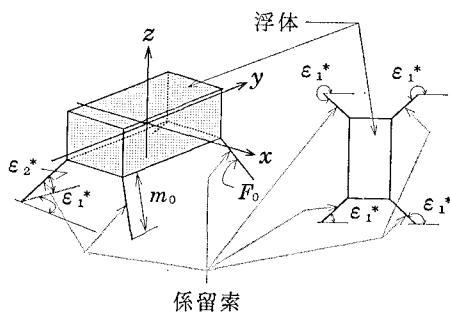


図-2 浮体と係留索

3. 実験

3.1 供試模型

実験に用いた模型は, 浮体, 係留バネおよび防波堤によって構成されている. 浮体は 表-1 に示す諸元を有する矩形の木製模型である. 浮体の係留は, 線形バネ (バネ定数: 0.01 kgf/mm) を用いて行った. また, 防波堤は, 表-2 に示すように有限長の直線型と 3 方向を囲ん

表-1 浮体の諸元

全長 (m)	L	1.00
幅 (m)	B	0.30
深さ (m)	D	0.25
喫水 (m)	d	0.12
排水量 (kgf)	Δ	34.80
固有周期 (sec)	roll	1.56
	pitch	1.12
慣動半径 (m)	roll	0.10
	pitch	0.45
慣性能率 (kgf·m ²)	roll	0.04
	pitch	0.70
	yaw	3.24

表-2 実験の種類

モデルの種類	形状
防波堤なし	
直線型防波堤	
コの字型防波堤	

だコの字型の 2 種類を作成し実験に用いた. なお, 実験は, この 2 種類の防波堤および open sea 中に浮体を係留した場合の 3 種類について行った.

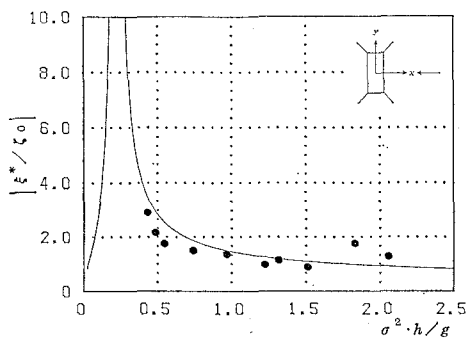


図-4 sway 運動の比較 (防波堤がない場合)

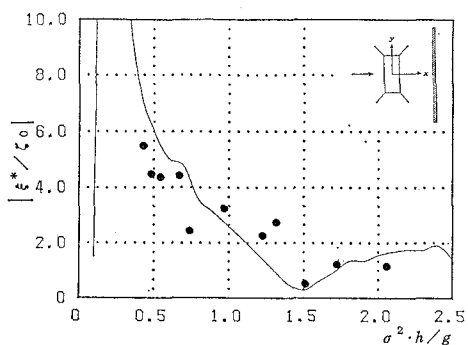


図-5 sway 運動の比較 (直線型防波堤)

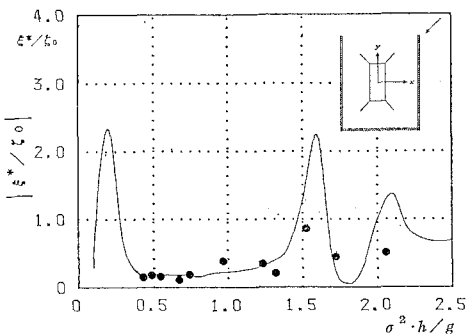


図-6 sway 運動の比較 (コの字型防波堤)

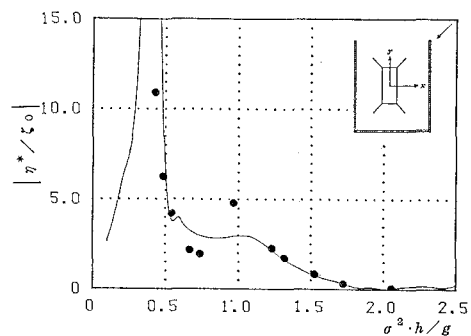


図-7 surge 運動の比較 (コの字型防波堤)

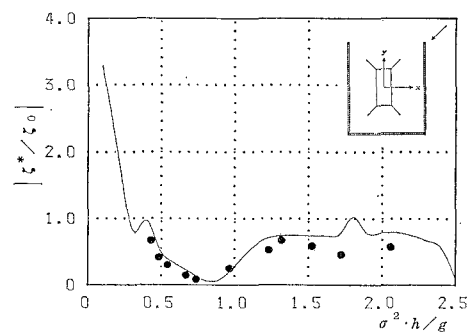


図-8 heave 運動の比較 (コの字型防波堤)

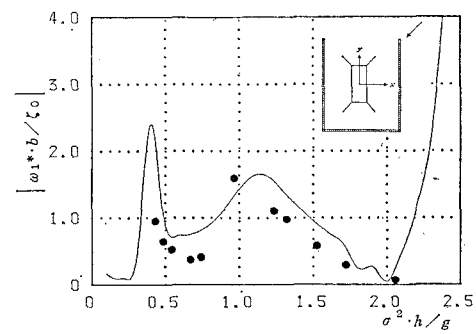


図-9 pitch 運動の比較 (コの字型防波堤)

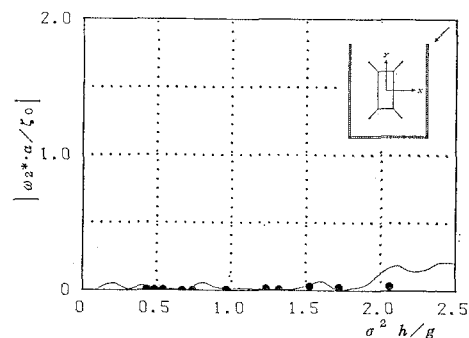


図-10 roll 運動の比較 (コの字型防波堤)

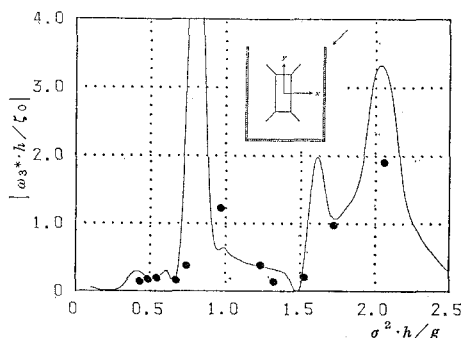


図-11 yaw 運動の比較 (コの字型防波堤)

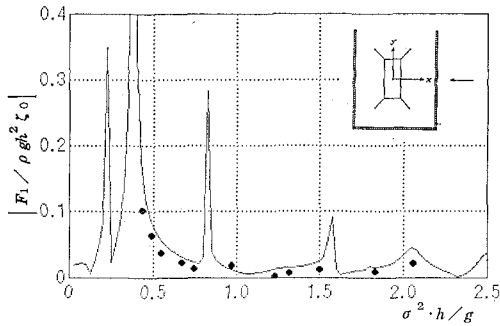


図-12 係留力の比較(入射角 0°)

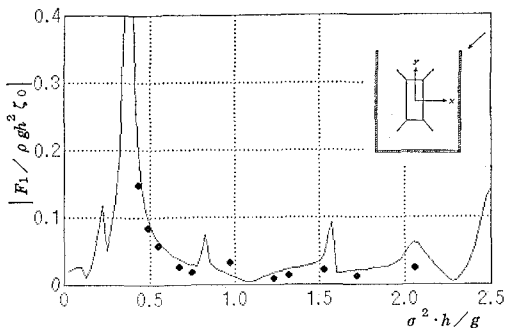


図-13 係留力の比較(入射角 45°)

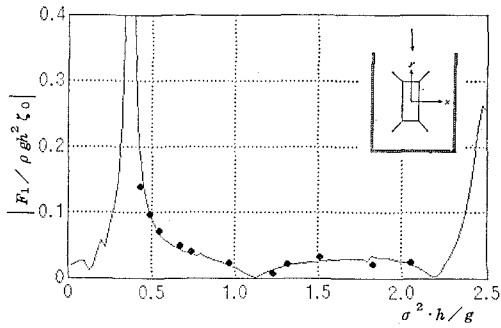


図-14 係留力の比較(入射角 90°)

留索)に作用する係留力を流体密度(ρ),重力加速度(g),水深(h)および入射波の振幅(ζ_0)で無次元化し,絶対値をとったものであり,横軸は無次元周波数である。なお,係留力は初期張力を差し引いたものをプロットしている。

これらの図によると,係留力に関する実験結果と解析結果はよく一致していることがわかる。また,解析値には幾つものピークが現れている。これらは,各運動の同調周期や係留浮体と防波堤の干渉によるピークにそれぞれ対応して生じている。

5. 結 言

本研究では,前論文で提案した理論を拡張し,防波堤の存在する海域での係留浮体に関する波浪中の3次元浮体運動の計算法を示すとともに,その計算法の検証を目的とした水理模型実験を行った。実験は表-2に示すように, i) open sea 中の係留浮体, ii) 有限長の直線防波堤と係留浮体, iii) コの字型防波堤内の係留浮体, の3種類の場合について行い, それに対応した解析結果と比較した。その結果, いずれの場合も解析値と実験値はよく一致していることがわかり, 解析法の妥当性が検証できた。

今後は, 複数個浮体と防波堤の干渉問題など, より現実に近い状態の浮体運動計算を行う予定である。

本研究を進めるにあたり, 実験にご尽力頂いた中井正人君(大阪市立大学大学院)および土井淳君(当時大阪市立大学)に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 井島武士・吉田明德・湯村やす (1975): 有限水深域の波による楕円および矩形浮体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第244号, pp. 91-105.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 3-24.
- 永田修一・中川有紀・巻幡敏秋 (1990): 3次元領域分割法による浮体運動の計算—任意平面形状をもつ有限長さの防波堤と単一浮体の波による干渉—, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 699-703.