沿岸海域に弛緩係留された浮遊式建築物の運動及び係留索張力
の予測法に関する研究 (第2報)

—避難場所を有する浮遊式建築物の応答評価—

STUDY ON PREDICTION METHOD FOR MOTIONS AND THE TENSIONS
OF MOORING LINES ON RELAXATION MOORED FLOATING
TYPE OCEANIC ARCHITECTURAL BUILDING
IN COASTAL ZONE (2ND REPORT)Estimation of responses of a moored floating type oceanic architectural building
with place of floating type refuge

増田 光一*, 大澤 弘敬**

Koichi MASUDA and Hiroyuki OSAWA

The present paper is concerned with the wave response on relaxation moored two floating type architectures in coastal zone. On evaluation of wave response of floating bodies, the effects of hydrodynamic interaction and reflection wave due to quay were discussed by using the numerical results. Furthermore, the responses on motion and tension of mooring line were calculated by numerical simulation considering the nonlinearity of wave exciting forces and mooring system, and the nonlinear effects on motion and tension of mooring line were made clear.

Keywords : two bodies response, hydrodynamic interaction effects, quay effect, floating type oceanic architectural building, tensions of mooring lines, response of nonlinear numerical simulation

2 浮体応答、流体力学的相互干渉影響、岸壁影響、浮遊式建築物、係留索張力、非線形応答シミュレーション

1. 緒言

浮遊式建築物の建設・建造に際しては、陸上の建築物と同様に建築基準法等の法令の適用を受けなければならない。特に、浮遊式建築物の場合、陸上の建築物と違い敷地が水域に設定されていることにより、災害時の避難等の防災上の措置が、利用者の安全を図るという意味から設計・計画段階において十分に考慮される必要があると考えられる。この防災上の措置としては、陸上建築物のように接道条件が満たされない場合が多いことより、日本建築センターの海洋建築物安全性評価指針¹⁾において、海洋建築物から陸上の道路等への避難路として、消防隊や緊急車両の接近及び避難経路としての避難場所等の確保が義務づけられている。通常この避難路及び避難場所は、波浪等の環境外力の遮蔽効果を期待して浮遊式建築物背後の岸壁近傍に浮体式で設置される場合が多く、その応答の評価法も単体構造物として波浪の遮蔽効果を考慮し、波高を減じて応答を評価している場合がほとんどである。しかし、災害時の避難場所として浮遊式建築

物背後の浮体を考える場合、波浪の遮蔽効果だけを考慮した応答の評価で良いかはその安全性の面からも疑問が残る。また実際は、浮遊式建築物との流体力学的相互干渉影響や、岸壁からの反射波による影響等により浮遊式建築物のみならず、その背後の避難場所の応答にもそれぞれ単体の浮体として解析する場合に比べ、多大な影響を与えるものと考えられる。さらにそれに加え、係留系の非線形性や非線形波浪外力がそれぞれの浮体に与える影響に関しても明確にする必要がある。現在まで浮体間の流体力学的相互干渉影響を調べた研究として Oortmerssen²⁾³⁾は、2 浮体間の流体力学的相互干渉影響を考慮してそれぞれの浮体の応答を評価しており、水槽実験との比較により浮体の応答に及ぼす相互干渉影響を調べている。具ら⁴⁾は、Kagemoto and Yue⁵⁾の相互干渉理論を3次元特異点分布法に適用することにより、50 個程度までの浮体間相互干渉影響の数値計算結果を多行多列の箱型浮体を用いて示した。また、岸壁近傍に係留された浮体の応答に関する研究として清川ら⁶⁾は、岸

* 日本大学理工学部海洋建築工学科 教授・工博

** 日本大学大学院理工学研究科 大学院生・工修

Prof, Dept. of Oceanic. Archit. & Eng., College of Science & Tech., Nihon Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Science & Tech., Nihon Univ., M. Eng.

壁に対する鏡像を利用した3次元境界積分法によって流体力、運動応答に及ぼす離岸距離の影響を2次元的手法との比較により明らかにしており、岸壁との離岸距離が増すに従い3次元影響が現れることを指摘している。さらに、井上⁷⁾は、岸壁の反射率が浮体の運動応答に与える影響について周波数領域及び時間領域の両者について比較計算をしており、任意反射率を有する岸壁前面に係留された浮体の応答を評価する場合、周波数領域での線形解析だけでなく係留系や波浪外力の非線形性を考慮した時間領域での数値シミュレーションを行う必要性のあることを指摘した。しかしながら、今までの研究成果は、浮体間の流体力学的相互干渉影響と岸壁よりの反射波の影響を独立して取り扱っており、浮体の応答について両者を同時に考慮し、さらに、それに加え、係留系の非線形性や非線形波浪外力を含めて応答を検討した研究は、著者らの知る限りではほとんど見あたらないのが現状である。そこで本論では、岸壁近傍に非線形係留された避難場所と浮遊式建築物の波浪外力、運動応答、係留索張力等の応答について、著者らが前報⁸⁾で示した非線形応答シミュレーション法及び岸壁近傍の係留浮体の解析法⁹⁾、大型構造物近傍の係留浮体の非線形応答解析法¹⁰⁾¹¹⁾を拡張して浮体間の流体力学的相互干渉影響、岸壁よりの反射波の影響、係留系の非線形性、波浪外力の非線形性を考慮した応答評価法により数値的検討を行い、各影響因子が応答に及ぼす基本的な特性を明確にすることを目的とする。

2. 岸壁近傍に係留された2浮体の応答評価法

本解析に用いる座標系を、Fig.1に示す。

Fig.1 Coordinate systems

座標系は右手直交座標系とし静止水面上Oに原点を持つ空間座標系O-XYZと、それぞれの浮体重心Gに原点

を持ち浮体の運動と共に移動する物体固定座標系G-X'Y'Z'を用い、入射波はX軸負方向より θ の角度で入射するものとする。また、浮体はBODY Iを浮体1、BODY IIを浮体2として取り扱い、添字I、IIは、それぞれの浮体を表し、 n は物体より流体中への外向法線ベクトルを表す。さらに、岸壁は直立岸壁とし各境界は、 Ω :流体領域、 S_F :自由表面、 S_H :浮体表面、 S_B :水底表面、 S_R :無限遠方の仮想表面のそれぞれの各境界を表すとともに運動振動 ξ_i 、速度ポテンシャル Φ_i 等の添字 i は $i=1$: surge、 $i=2$: sway、 $i=3$: heave、 $i=4$: roll、 $i=5$: pitch、 $i=6$: yawの各運動モード及び対応する発散波ポテンシャル、 $i=7$: 散乱波ポテンシャルを表す。また、 Y_q は岸壁と原点OとのY方向距離を表すもの定義とする。

2. 1 流体力学的相互干渉影響

岸壁近傍に係留された2浮体に及ぼす流体力学的相互干渉は、岸壁からの反射波及び浮体間での流体の相互干渉により、それぞれの浮体の付加質量及び造波減衰力、波強制力、運動応答に影響を与える。今、ラディエーション流体力、波強制力の解析は、ポテンシャル流れの仮定の下に行うとすれば、流場における境界値問題は以下のように定義できる。

$$\nabla^2 \Phi^{(i)} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial Z} - K \Phi^{(i)} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial Z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^{(I)I}}{\partial n} = n_i \quad \text{on } S_H^I \quad (i=1 \sim 6) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^{(I)II}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_H^{II} \quad (i=1 \sim 6) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^{(I)I}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_H^{II} \quad (i=1 \sim 6) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^{(I)II}}{\partial n} = n_i \quad \text{on } S_H^{II} \quad (i=1 \sim 6) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_0^{(I)}}{\partial n} + \frac{\partial \Phi_7^{(I)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_H^I, S_H^{II} \quad (6)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \Phi^{(i)}}{\partial r} - ik \Phi^{(i)} \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (7)$$

ここで、 $K: \omega^2/g$ 、 ω : 円周波数、 g : 重力加速度、 $r: \sqrt{x^2+y^2}$ 、 k : 波数、 n_i : 各運動モードの物体表面上の法線ベクトル、 $\Phi_i^{(I)I}$ 、 $\Phi_i^{(I)II}$: それぞれBODY I, BODY IIが運動した時の各運動モードの1次発散波の速度ポテンシャル、 $\Phi_0^{(I)}$: 1次の入射波の速度ポテンシャル、 $\Phi_7^{(I)}$: 1次の散乱波の速度ポテンシャルを表す。また、(4)、(5)式は、片方の物体を止めて、他方の物体を動かしたときのそれぞれの物体表面上の境界条件である。さらに、流場の1次の全速度ポテンシャル $\Phi^{(I)}$ は以下のように定義できる。

$$\Phi^{(i)} = -i\omega \left[\bar{\zeta}(\Phi_0^{(i)} + \Phi_7^{(i)}) + \sum_{i=1}^6 (\bar{\xi}_i^I \Phi_i^{(i)I} + \bar{\xi}_i^{II} \Phi_i^{(i)II}) \right] \quad (8)$$

ここで、 $\bar{\zeta}$ 、 $\bar{\xi}^I$ 、 $\bar{\xi}^{II}$ は時間項 $e^{-i\omega t}$ を除いた入射波振幅及びそれぞれの浮体の運動振幅を表す。さらに、それぞれの物体表面上の境界条件(4)、(5)、(6)式を考慮し、Oortmerssen¹²⁾が示したように(2)、(3)、(7)式を満たすグリーン関数 $G(P, Q)$ に鏡像の原理を用いて岸壁からの影響を考慮すると、各速度ポテンシャルは以下のように表示できる。

$$\Phi_i^{(i)I}(P) = \iint_{S_H^I + S_H^{II}} \sigma_i^I(Q) [G(P, Q) + G(P, Q')] ds \quad (9)$$

$$(i=1 \sim 6)$$

$$\Phi_i^{(i)II}(P) = \iint_{S_H^I + S_H^{II}} \sigma_i^{II}(Q) [G(P, Q) + G(P, Q')] ds \quad (10)$$

$$(i=1 \sim 6)$$

$$\Phi_7^{(i)}(P) = \iint_{S_H^I + S_H^{II}} \sigma_7(Q) [G(P, Q) + G(P, Q')] ds \quad (11)$$

$$\Phi_0^{(i)}(P) = \frac{1}{K} \frac{\cosh k(h+z_p)}{\cosh kh} \left[e^{ik(x_p \cos \theta + y_p \sin \theta)} + e^{ik(x_p \cos \theta + (2Y_q - y_p) \sin \theta)} \right] \quad (12)$$

ここで、 $P=(x_p, y_p, z_p)$ ：流体中の観測点座標、 $Q=(x_q, y_q, z_q)$ ：それぞれの浮体表面上の積分点座標、 $Q'=(x_q, 2Y_q - y_q, z_q)$ ： Q の鏡像点、 σ ：それぞれの物体表面上の吹き出し強さ、 h ：水深である。速度ポテンシャルが求まれば、それぞれの浮体に作用する単位運動振幅に対する流体力 f は流体圧力のそれぞれの浮体表面上での積分により以下のように与えられる。

$$f_{ij}^I = -\rho \omega^2 \iint_{S_H^I} (\Phi_j^{(i)I} + \Phi_j^{(i)II}) n_i ds \quad (13)$$

$$(i, j=1 \sim 6)$$

$$f_{ij}^{II} = -\rho \omega^2 \iint_{S_H^{II}} (\Phi_j^{(i)I} + \Phi_j^{(i)II}) n_i ds \quad (14)$$

$$(i, j=1 \sim 6)$$

ここで、 ρ ：流体密度である。

また、(13)、(14)式の流体力を付加質量及び造波減衰力係数に分離すると下式のように表現できる。

$$am_{ij}^{L,M}(\omega) = -\rho \operatorname{Re} \left[\iint_{S_H^M} \Phi_j^{(i)L} n_i ds \right] \quad (15)$$

$$N_{ij}^{L,M}(\omega) = -\rho \omega \operatorname{Im} \left[\iint_{S_H^M} \Phi_j^{(i)L} n_i ds \right] \quad (16)$$

$$(i, j=1 \sim 6)$$

$am^{L,M}$ 、 $N^{L,M}$ ($L, M=I, II$)は、BODY Lの運動の発散波によりBODY Mに作用する付加質量及び造波減衰力係数を表す。また、それぞれの浮体に作用する1次波強制力 $E^{(i)}$ は下式のように与えられる。

$$E_i^{(i)L}(\omega) = -\rho \bar{\zeta} \omega^2 \iint_{S_H^I} (\Phi_0^{(i)} + \Phi_7^{(i)}) n_i ds \quad (i=1 \sim 6) \quad (17)$$

そして、付加質量、造波減衰力係数、波強制力を用いて流体力学的相互干渉影響を考慮した周波数領域における運動方程式は下式のように表現できる。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left\{ -\omega^2 (m_{ij}^I + am_{ij}^{I,I}(\omega)) - i\omega N_{ij}^{I,I}(\omega) + C_{ij}^I \right\} \bar{\xi}_j^I \right. \\ \left. + \left\{ -\omega^2 am_{ij}^{I,II}(\omega) - i\omega N_{ij}^{I,II}(\omega) \right\} \bar{\xi}_j^{II} \right] = E_i^{(i)I}(\omega) \quad (i=1 \sim 6) \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left\{ -\omega^2 (m_{ij}^{II} + am_{ij}^{II,II}(\omega)) - i\omega N_{ij}^{II,II}(\omega) + C_{ij}^{II} \right\} \bar{\xi}_j^{II} \right. \\ \left. + \left\{ -\omega^2 am_{ij}^{I,II}(\omega) - i\omega N_{ij}^{I,II}(\omega) \right\} \bar{\xi}_j^I \right] = E_i^{(i)II}(\omega) \quad (i=1 \sim 6) \quad (19)$$

ここで、 m_{ij}^I ：浮体Lの広義の付加質量、 C_{ij}^I ：浮体Lの静的復元力係数である。さらに、不規則波が円周波数 ω_k ($k=1, 2, \dots, N$)の規則波からなる規則波群によって近似できるものとする、非線形外力である長周期変動波漂流力 $E^{(2)}$ は、それぞれの浮体の1次運動応答をその平均位置まわりで摂動展開し、瞬時の沈水面に作用する流体圧を積分することにより以下のように与えられる。¹³⁾¹⁴⁾

$$E_i^{(2)L}(\omega_k, \omega_l) = -\frac{\rho g}{4} \int_{W_L} \eta_{R_k}^{(i)L} \eta_{R_l}^{(i)L*} n_i dl \\ + \frac{\rho}{4} \iint_{S_H^L} \nabla \Phi^{(i)}(\omega_k) \nabla \Phi^{(i)*}(\omega_l) n_i ds \\ + \frac{i\rho \omega_l}{2} \iint_{S_H^L} \bar{X}_k^{(i)L} \nabla \Phi^{(i)*}(\omega_l) n_i ds \\ + \frac{m_{ij}^I \omega_k}{2} \iint_{S_H^L} \bar{X}_{Gk}^{(i)L} \times \bar{R}_l^{(i)L*} \\ - i\rho(\omega_k - \omega_l) \iint_{S_H^L} \Phi_0^{(2)}(\omega_k - \omega_l) n_i ds \quad (20)$$

ここで、 $\eta_R^{(i)}$ ：それぞれの浮体の1次波面上昇量、 $\bar{X}^{(i)}$ ：それぞれ浮体上点の1次変位ベクトル、 W_L ：それぞれの浮体水線、 $\bar{X}_G^{(i)}$ ：それぞれの浮体重心の1次変位ベクトル、 $\bar{R}^{(i)}$ ：それぞれの浮体の1次角変位ベクトル、 $\Phi_0^{(2)}$ ：2次入射波ポテンシャル、 $*$ ：複素共役である。(20)式は、厳密には2次散乱波ポテンシャルの影響を考慮しなければならないが、本論の長周期変動波漂流力の評価に際しては、2次散乱波ポテンシャルよりもむしろ2次入射波ポテンシャルの影響が大きいたした松井¹⁵⁾の長周期変動波漂流力の厳密解の計算結果に基づき、2次入射波ポテンシャルの影響だけを考慮した近似式を採用する。また、2次入射波ポテンシャルは、1次入射波ポテンシャルと同様に岸壁よりの反射波の影響を考慮すると下式のように定義できる。

$$\Phi_0^{(2)}(\omega_k - \omega_l) = \gamma_{kl} \frac{\cosh k^-(z+h)}{\cosh k^-h} \left[e^{ik^-(x \cos \theta + y \sin \theta)} + e^{ik^-(x \cos \theta + (2Y_q - y) \sin \theta)} \right] \quad (21)$$

ここで、

$$\gamma_{kl} = -\frac{ig \bar{\zeta} \bar{\zeta}^*}{4} \left[\frac{k_k^2}{\omega_k \cosh^2 k_k h} - \frac{k_l^2}{\omega_l \cosh^2 k_l h} \right. \\ \left. + \frac{2\omega^- k_k k_l}{\omega_k \omega_l} (1 + \tanh k_k h \cdot \tanh k_l h) \right] \\ / (\omega^{-2} / g - k^- \tanh k^- h) \quad (22)$$

$$k^- = k_k - k_l, \quad \omega^- = \omega_k - \omega_l \quad (23)$$

k_k, k_l は、それぞれ ω_k, ω_l に対応する波数を示す。

2. 2 相互浮体の非線形応答シミュレーション⁸⁾

浮体の相互間の流体力学的な相互干渉影響を考慮した時間領域の運動方程式は、固有周期に対応した同調現象も含め、時々刻々の流体力係数を自動的に選択できる遅延関数を用いた以下の連立方程式により定義できる。

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left\{ m_{ij}^I + am_{ij}^{I,I}(\infty) \right\} \ddot{\xi}_j^I(t) + \int_0^t K_{ij}^{I,I}(t-\tau) \dot{\xi}_j^I(\tau) d\tau \right. \\ \left. + N_{vij}^I \dot{\xi}_j^I(t) \left| \dot{\xi}_j^I(t) \right| + C_{ij}^I \dot{\xi}_j^I(t) + R_i^I \left\{ \xi_1^I(t), \xi_2^I(t), \dots, \xi_6^I(t) \right\} \right. \\ \left. + am_{ij}^{II,I}(\infty) \ddot{\xi}_j^{II}(t) + \int_0^t K_{ij}^{II,I}(t-\tau) \dot{\xi}_j^{II}(\tau) d\tau \right] = F_i^{(1)I}(t) + F_i^{(2)I}(t) \quad (i=1 \sim 6) \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left\{ m_{ij}^{II} + am_{ij}^{II,II}(\infty) \right\} \ddot{\xi}_j^{II}(t) + \int_0^t K_{ij}^{II,II}(t-\tau) \dot{\xi}_j^{II}(\tau) d\tau \right. \\ \left. + N_{vij}^{II} \dot{\xi}_j^{II}(t) \left| \dot{\xi}_j^{II}(t) \right| + C_{ij}^{II} \dot{\xi}_j^{II}(t) + R_i^{II} \left\{ \xi_1^{II}(t), \xi_2^{II}(t), \dots, \xi_6^{II}(t) \right\} \right. \\ \left. + am_{ij}^{I,II}(\infty) \ddot{\xi}_j^I(t) + \int_0^t K_{ij}^{I,II}(t-\tau) \dot{\xi}_j^I(\tau) d\tau \right] = F_i^{(1)II}(t) + F_i^{(2)II}(t) \quad (i=1 \sim 6) \quad (25)$$

ここで、 $am_{ij}(\infty)$ ：周波数無限大での広義の付加質量、 K_{ij} ：遅延関数、 ξ_j ：浮体重心での時刻歴運動変位、 N_{vij} ：粘性減衰力係数、 R_i ：係留力、 $F^{(1)}$ ：1次波強制力、 $F^{(2)}$ ：2次波強制力であり、添字 I、II はそれぞれの浮体を表す。また、それぞれの浮体に対する係留力は、それぞれの浮体重心から係留索の浮体取り付け点 (x_p, y_p, z_p) までの位置ベクトルを用いて次式のように与えられる。

$$R_1^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N -T_{Hi}^L \cos \alpha_i^L \quad (26)$$

$$R_2^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N -T_{Hi}^L \sin \alpha_i^L \quad (27)$$

$$R_3^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N -T_{Vi}^L \quad (28)$$

$$R_4^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N T_{Hi}^L z_{pi}^L \sin \alpha_i^L - T_{Vi}^L y_{pi}^L \quad (29)$$

$$R_5^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N T_{Vi}^L x_{pi}^L - T_{Hi}^L z_{pi}^L \cos \alpha_i^L \quad (30)$$

$$R_6^L \left\{ \xi_1^L, \xi_2^L, \dots, \xi_6^L \right\} = \sum_{i=1}^N T_{Hi}^L y_{pi}^L \cos \alpha_i^L - T_{Hi}^L x_{pi}^L \sin \alpha_i^L \quad (31)$$

ここで、 N ：それぞれの浮体の係留索本数、 T_H ：水平張力、 T_V ：鉛直張力、 α_i ： x - y 平面での X 軸と係留索とのなす角度を表す。そして、水平張力及び鉛直張力は係留索が常にカタナリー状態にあるものと仮定し修正カタナリー理論¹⁶⁾を用い、浮体の時々刻々の運動に伴い、それぞれの張力も同様に变化するものとして解析を行う。⁸⁾ また、外力である波強制力は、1次、2次のインパルス応答関数と波振幅とのたたみこみ積分により定義できる。今、それぞれの浮体($L=I, II$)の1次、2次のインパルス応答関数 $g^{(1)L}$ 、 $g^{(2)L}$ は、周波数領域の1次、2次の伝達関数 $E^{(1)L}$ 、 $E^{(2)L}$ を用いて下式のように与えられる。

$$g_i^{(1)L}(\tau) = \text{Re} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_i^{(1)L}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \right] \quad (32)$$

$$g_i^{(2)L}(\tau_k, \tau_l) = \text{Re} \left[\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_i^{(2)L}(\omega_k, \omega_l) e^{i(\omega_k\tau_k - \omega_l\tau_l)} d\omega_k d\omega_l \right] \quad (33)$$

さらに、それぞれの浮体に作用する1次、2次波強制力は、下式のように定義できる。

$$F_i^{(1)L}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_i^{(1)L}(\tau) \zeta(t-\tau) d\tau \quad (34)$$

$$F_i^{(2)L}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_i^{(2)L}(\tau_k, \tau_l) \zeta(t-\tau_k) \zeta(t-\tau_l) d\tau_k d\tau_l \quad (35)$$

3. 数値計算モデル

Table 1 Principal particulars of calculation model

	Body I	Body II
Length(m)	63.9 (L_1)	30.0 (L_2)
Breadth(m)	18.0 (B_1)	12.0 (B_2)
Draft(m)	1.45 (D_1)	1.00 (D_2)
Displacement(m^3)	1667.8 (V_1)	360.0 (V_2)
KG (m)	4.73	1.125
Radius of gyration(m)	I_{xx}	8.665
	I_{yy}	3.476
	I_{zz}	9.327
Viscous damping coefficient	($kg \text{ sec}^2/m^2$)	9.27×10^4 (Sway)
	($kg \text{ sec}^2/rad^2$)	6.41×10^5 (Roll) 1.03×10^5 (Pitch)
Chain length(m)	88.26 (No.1~No.12)	57.43 (No.1~No.4)
Diameter of chain	$\phi 152$	$\phi 114$
Weight in water of chain(kg/m)	439.5	247.2
Initial tension(kg)	4.9×10^3	3.0×10^3
Distance of quay(m)	100.0 (Y_q)	
Spaces of structures(m)	10.0 (C)	
Water depth(m)	6.05

Fig.2 Layout of calculation model

避難場所を有する浮遊式建築物の数値計算モデルを Fig.2、その諸元を Table 1 に示す。数値計算モデルは BODY I を浮遊式建築物、BODY II を避難場所と想定した。避難場所は入射波方向に対し、浮遊式建築物背後に完全に隠れる形で設置するものとし、波浪の遮蔽効果を期待する。また、避難場所背後の岸壁は完全反射の直立壁として計算を行う。計算に用いる粘性減衰力係数に関しては、山下の実験式¹⁷⁾及び係留システム設計指針¹⁸⁾に基づき算定する。また、波漂流減衰係数に関しては、考慮されていない。計算条件は、周波数応答について周期 4.0sec から 13.0sec、また、時系列応答については、有義周期 6.5sec、有義波高 1.5m の Bretschneider-光易型スペクトルを用いて計算を行った。係留索については、浮遊式建築物が 12 本、避難場所が 4 本のチェーンでカタナリー係留されているものとする。

4. 浮遊式建築物及び避難場所の応答に関する数値的検討

Fig.3 Calculation mesh

避難場所を有する浮遊式建築物の流体力、波強制力、定常波漂流力、運動及び係留索張力の各応答に及ぼす浮体間の流体力学的な相互干渉影響、岸壁からの反射波の影響を検討するため、係留索張力に最も影響を及ぼすSwayモードについて数値計算結果を示す。なお、数値計算は各影響を明確にするため、それぞれ浮体単体で解析した場合（以降 Singleと呼ぶ）浮体間の流体力学的相互干渉影響を考慮した場合（Interaction only, 以降 I.Oと呼ぶ）及び浮体間の流体力学的相互干渉影響と岸壁からの反射波の影響を同時に考慮した場合（Interaction + quay, 以降 I.Qと呼ぶ）の3つの条件について比較を行った。また、運動応答、係留索張力の時系列解析に際しては、さらに係留系の非線形性を考慮すると共に、非線形波浪外力である長周期変動波漂流力を考慮して数値計算を行い、相互干渉影響、岸壁の影響とあわせて長周期変動波漂流力が各応答に及ぼす影響についても検討を行った。数値計算に用いたメッシュをFig.3に示す。また、没水面の要素は平面四角形の一定要素に分割し、要素数はBODY Iの浮遊式建築物が180要素、BODY IIの避難場所が92要素である。

4. 1 流体力・波強制力の特性

Fig.4～Fig.6に浮遊式建築物の付加質量係数、造波減衰力係数、波強制力の計算結果を示す。

付加質量係数、造波減衰力係数、波強制力の計算結果

Fig.4 Added mass coefficient of sway (Body I: Floating type oceanic architectural building)

Fig.5 Wave make damping coefficient of sway (Body I: Floating type oceanic architectural building)

Fig.6 Wave exciting forces of sway (Body I: Floating type oceanic architectural building)

は、避難場所との浮体間の流体力学的相互干渉影響を考慮したI.Oと浮体単体での計算結果Singleとを比較した場合、相対的な変化は小さく流体力学的な相互干渉影響は少ないと考えられる。この理由として、浮遊式建築物が波上側にあることや、背後にある避難場所の大きさが浮遊式建築物に比べ質量で約1/5と小さいためと考えられる。しかし、相互干渉影響に岸壁の反射波の影響を考慮したI.Qの計算結果は、Single、I.Oの結果に比べ、明らかに周期的に変動しており、岸壁からの反射波の影響が顕著に現れていることがわかる。また、その変動の周期は離岸距離と波長との比を考えた場合、ほぼ入射波長の半分の波長の重複波の周期で大きく変動しており、岸壁による影響が大きいことが伺える。この結果は、清川ら⁶⁾の数値計算結果及び実験結果と同じ傾向となっている。次に、Fig.7～Fig.9に避難場所の付加質量係数、造波減衰力係数、波強制力の計算結果を示す。

避難場所の各特性は、SingleとI.Oを比較した場合、浮遊式建築物の計算結果と違い、浮体間の流体力学的な相互干渉影響が顕著に現れている。I.Oの付加質量係数、造波減衰力係数は、Singleに比べ変動しており、また、波強制力に関しては前面の浮遊式建築物の遮蔽効果により、その値が小さくなっていることがわかる。この理由としてはFig.4～Fig.6の計算結果とは逆に浮遊式建築物が避難場所

に比べ大きいことにより、避難場所に及ぼす発散波、回折波の影響もそれに伴い大きくなったものと考えられる。

Fig. 7 Added mass coefficient of sway (Body II : A floating type refuge)

Fig. 8 Wave make damping coefficient of sway (Body II : A floating type refuge)

Fig. 9 Wave exciting forces of sway (Body II : A floating type refuge)

また、相互干渉影響及び岸壁の影響を考慮したI. Qの計算結果は、浮遊式建築物の結果同様、大きく変動しており、相互干渉影響と共に岸壁と浮体間の重複波の影響が大きいことがわかる。特に波強制力に関しては、前面の浮遊式建築物に遮蔽されているにも関わらず周波数によってはSingleの計算結果よりもI. Qの計算結果が大きくなる場合がある。このことは、避難場所が浮遊式建築物の背後に設置される場合でも流体力、波強制力の特性は、浮体間の流体力学的相互干渉影響、岸壁間の重複波の影響に

より、それぞれ単独の浮体として解析する場合に比べ、大きく変動することがわかる。

4. 2 定常波漂流力の特性

浮遊式建築物及び避難場所の定常波漂流力の計算結果をFig. 10、Fig. 11に示す。Fig. 10の浮遊式建築物の定常波漂流力の計算結果に関しては、Single、I. O共、応答値はほぼ同じであり、流体力、波強制力の特性と同様に相互干渉影響は少ないと考えられる。しかし、I. Qの結果は、岸壁間の重複波の影響により周波数による変動が激しく、負の定常波漂流力の存在が確認できる。また、Fig. 11の避難場所の結果に関しては、相互干渉影響、岸壁影響が、顕著に現れており、相互干渉影響については、Singleに比べI. Oは、前面浮体の遮蔽効果により定常波漂流力が減少傾向にある。この理由として避難場所の喫水比は、浮遊式建築物の約0.7倍であり、前面の浮遊式建築物に完全に遮蔽されるためと考えられる。しかし、I. Qの計算結果に関しては、Singleの計算結果よりも大きくなる場合や、さらにSingleの正の最大値と同オーダーの負の定常波漂流力の周波数帯が存在し、岸壁と浮体間の重複波の影響が大きいことがわかる。このことは、岸壁よりの反射波によって浮体を岸壁より引きはなす定常波漂流力が作用することを示しており、浮体の応答の評価に際しては重要な影響因子となるものと考えられる。これらの傾向は、著者ら^{9) 10) 11)} が先に示した実験結果及び計算結果とも一致する。

Fig. 10 Steady wave drift forces of sway (Body I : Floating type oceanic architectural building)

Fig. 11 Steady wave drift forces of sway (Body II : floating type refuge)

4. 3 運動と係留索張力特性

浮遊式建築物及び避難場所の周波数領域における運動応答の計算結果をFig. 12、Fig. 13に示す。

それぞれの浮体の応答は、Singleと相互干渉影響を考慮したI.Q.とでは、その応答は、ほぼ同オーダーの結果を示している。特に、避難場所の運動応答に関しては、前面浮体の遮蔽効果はほとんど期待できず、遮蔽効果を期待して単独浮体として、波高を減じて応答を評価することは、応答を過小評価する恐れがあり、安全性を考える上で問題があるものと考えられる。この現象は、大型構造物背後に係留された浮体の応答評価を行った、著者ら¹⁰⁾の今までの実験結果及び計算結果とも一致する。また、さらに相互干渉影響を加え、岸壁の影響を考慮したI.Qの結果に関しては、流体力、波強制力の特性と同様に周波数により応答の変動が著しく、Single、I.Qの結果に比べ応答が大きくなる周波数が存在する。このように岸壁前面に係留された2浮体間のI.Qの結果は、井上⁶⁾が単体の浮体の評価で指摘しているように、周波数による応答の変動が激しいことより、周波数領域の線形解析だけではなく、時系列解析の必要性を示唆した結果であると考えられる。

Fig. 12 Response function of sway motion (Body I: Floating type oceanic architectural building)

Fig. 13 Response function of sway motion (Body II: A floating type refuge)

さらに、周波数領域の応答計算に加え、相互干渉、岸壁

の影響に係留系の非線形性及び非線形波浪外力を考慮した非線形応答シミュレーションにより計算を行い、それぞれの浮体の運動応答、係留索張力の特性について検討した。Fig. 14、Fig. 15、Fig. 16に入射波振幅及び浮遊式建築物の運動応答の時系列計算結果、入射波、運動応答のスペクトル解析結果を示す。

Fig. 14の運動応答の計算結果は、波の時系列に比べどの条件で計算した場合でも長周期の大振幅動揺の現象が

Fig. 14 Time histories of sway motion of mooring chain in irregular waves ($T_{1/3}=6.5$ sec, $H_{1/3}=1.5$ m, Body I: Floating type oceanic architectural building)

Fig. 15 Spectra of irregular waves ($T_{1/3}=6.5$ sec, $H_{1/3}=1.5$ m)

Fig. 16 Spectra of sway motion (Body I: Floating type oceanic architectural building)

顕著に現れている。また、応答の振幅の大きさに関しては周波数応答同様、SingleとI.Oとではほぼ同じ応答であるのに対して、I.Qの応答はSingle、I.Oに比べ大きな応答値となっている。この長周期の大振幅現象は、Fig. 16の運動応答のスペクトル結果からも分かるようにFig. 15の入射波のスペクトルに対し、係留索の初期張力より計算した固有周期、約25.0sec(0.25rad./sec)近傍で応答のピークを持っており、非線形外力との同調現象であることが推察できる。また、応答の大きさもI.Qが最も大きくなっている。さらに、Fig. 17、Fig. 18に波上側No. 3、波下側No. 12のチェーンの張力の時系列計算結果及び、Fig. 19、Fig. 20にそれぞれのチェーン張力のスペクトル解析結果を示す。波上側、波下側共、運動応答同様に1次応答に比べ、固有周期に対応した長周期の張力応答が時系列、スペクトル結果より確認でき、相互干渉影響に岸壁の反射波の影響を考慮したI.Qの結果が最も張力が大きいことがわかる。このことより、本計算モデルのように大きさが違う2浮体が岸壁前面に係留された場合、波上側の浮体に関しては浮体間の相互干渉影響よりも岸壁からの重複波の影響が大きくなることが理解できる。

Fig.17 Time histories of tension of mooring chain in irregular waves (Body I: Floating type oceanic architectural building, Weather side: No.3)

Fig.18 Time histories of tension of mooring chain in irregular waves (Body I: Floating type oceanic architectural building, Lee side: No.12)

Fig.19 Spectra of tension (Weather side: No.3)

Fig.20 Spectra of tension (Lee side: No.12)

次に、入射波振幅及び避難場所の運動応答の時系列計算結果をFig. 21に、また、運動のスペクトル解析結果をFig. 22に示す。

Fig.21 Time histories of sway motion of mooring chain in irregular waves ($T_{1/3}=6.5\text{sec}$, $H_{1/3}=1.5\text{m}$, Body I: Floating type oceanic architectural building)

Fig. 22 Spectra of sway motion (Body II : A floating type refuge)

運動のスペクトル結果は、どの計算条件においても固有周期約20.0sec (0.3rad./sec) で、非線形外力と同調した長周期運動が見られるが、1次応答と比較するとその値は小さく運動の時系列結果からもその傾向が伺える。また、スペクトルの応答値で比較するとSingleとI.O.とは、ほぼ同じオーダーであるのに比べI.Qの結果は、Singleに比べ1次応答のピークで約1.7倍の応答値となっている。これらの現象の解明は、安全性の面から考えると線形的な周波数応答の評価だけでは不十分であり、特に岸壁近傍の長周期運動を伴った浮体の応答に関しては、直接係留索に影響を与えるため、その評価に際して十分注意を要するものと考えられる。さらに、Fig. 23、Fig. 24にNO.1チェーン、NO.2チェーンの張力の時系列計算結果、及びFig. 25、Fig. 26にそれぞれのチェーン張力のスペクトル解析結果を示す。張力の時系列応答に関しては、No.1、No.2チェーン共、初期張力3.0tを境にして変動していることがわかる。また、その周期については運動応答同様に、1次成分が主である。この傾向は、Fig. 25、Fig. 26のスペクトル結果に顕著に現われ、全ての条件でそれぞれの張力は、係留系を含めた浮体の固有周期に対応した周波数に比較して、Fig. 15の波浪による1次周波数に張力のピークを持つことよりも理解できる。

Fig. 23 Time histories of tension of mooring chain in irregular waves (Body II : A floating type refuge, Weather side : No.1)

Fig. 24 Time histories of tension of mooring chain in irregular waves (Body II : A floating type refuge, Lee side : No.2)

Fig. 25 Spectra of tension (Weather side : No.1)

Fig. 26 Spectra of tension (Lee side : No.2)

また、張力応答の値に関しては、I.Qの結果が最も大きく、岸壁からの重複波の影響がSingle、I.O.に比べ強く現れていることがわかる。このことは、浮遊式建築物背後に避難場所を計画した場合、避難場所の応答評価として、前面浮体による遮蔽効果により単独浮体として、波高を減じて応答を評価するよりも、相互干渉影響、岸壁の影響、係留索及び波浪外力の非線形性を考慮して応答を評価する必要があるものと考えられる。

5. 結言

岸壁近傍の避難場所を有する浮遊式建築物の波浪中応答特性に関して、流体力学的相互干渉影響及び岸壁からの反射波の影響が、浮遊式建築物、避難場所それぞれの浮体に及ぼす影響について検討を行った。また、運動応答、係留索張力に関しては、さらに係留系の非線形性、波浪外力の非線形性を考慮した非線形応答シミュレーションによる評価、検討を行った。

以上、本論で検討、考察した結論は以下の通りである。

1) 浮遊式建築物に比較してその大きさが小さな避難場所を入射波に対し、その背後に完全に遮蔽して係留するような一般的な場合、浮遊式建築物の流体力、波強制力の特性に関しては、浮体間の流体力学的な相互干渉影響は少ないが、避難場所に関しては、その影響が大きい。また、岸壁からの反射波の影響については、どちらの浮体に関してもその影響が大きく、周期により流体力、波強制力の特性が大きく変動する。この変動の周期は離岸距離と波長との比を考えた場合、入射波長のほぼ半分の波長の重複波の周期で変動するものと考えられる。

2) 定常波漂流力の特性に関しては、浮遊式建築物よりもその背後の避難場所の方が相互干渉影響、岸壁の影響が大きく、特に岸壁からの反射波により岸壁側からも波を受ける形で負の定常波漂流力が作用する周波数帯が存在し、応答評価を行う上で重要な影響因子になるものと考えられる。

3) 運動応答、係留索張力の特性に関しては、浮遊式建築物、避難場所共、浮体間の流体力学的相互干渉影響に比べ岸壁からの反射波の影響が大きく、非線形応答シミュレーションの結果より、その応答は単独の浮体として解析した場合や、相互干渉影響を考慮して解析した場合に比較して大きくなる傾向にある。特に避難場所は、浮遊式建築物に比べ岸壁近くに係留されるため、単独浮体として、浮遊式建築物の遮蔽効果により波高を減じて応答を評価する簡易的な方法や、線形的な周波数応答だけの評価では、応答を過小評価する危険がある。よって、浮遊式建築物、避難場所共、係留索の安全性の面からも応答の評価に際しては、係留系、波浪外力の非線形性、相互干渉影響に加え、岸壁の影響を考慮した評価法により検討する必要があると考えられる。

謝辞

本論文作成に際し、増田研究室諸氏には多大なる御協力を頂いた。また、本研究は、平成六年度・日本大学学術研究助成金(共同研究)の一部として行われたことをここに付記する。

参考文献

1) 財団法人日本建築センター編：海洋建築物安全性評

価指針，1990.4

- 2) Oortmerssen G Van: Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves, BOSS conference, pp. 339~356, 1979
- 3) Oortmerssen G Van: Some hydrodynamic aspects of multi-body system, Proc. International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering, pp. 725~744, 1981
- 4) 具滋三, 吉田宏一郎: 多数の三次元任意形状浮体間の相互干渉, 日本造船学会論文集, 第165号, pp. 193~202, 1989. 6
- 5) Kagemoto, H. and Yue, D. K. P.: Hydrodynamic interaction among multiple three dimensional bodies: an exact algebraic method. J. Fluid Mech., Vol. 166, pp. 189~209, 1986
- 6) 清川哲志, 平山彰彦: 岸壁前面の浮体動揺解析における3次元性の影響, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 546~550, 1986
- 7) 井上義行, 杉山裕樹: 任意反射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, 海岸工学講演会論文集, 第36巻, pp. 739~743, 1989. 11
- 8) 増田光一, 大澤弘敬: 沿岸海域に弛緩係留された浮遊式建築物の運動及び係留索張力の予測法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第464号, pp. 128~139, 1994. 10
- 9) 大澤弘敬, 増田光一: 岸壁近傍の浮遊式建築物に作用する定常波漂流力に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 10038, pp. 1501~1502, 1993. 9
- 10) 片山昌大郎, 増田光一, 大澤弘敬, 小林昭男: 大型構造物近傍に係留された浮遊式構造物の運動応答と係留力に関する実験的研究(その1運動応答), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 10019, pp. 1579~1580, 1994. 9
- 11) 大澤弘敬, 増田光一, 片山昌大郎, 小林昭男: 大型構造物近傍に係留された浮遊式構造物の運動応答と係留力に関する実験的研究(その2係留索張力), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 10020, pp. 1581~1582, 1994. 9
- 12) Oortmerssen G Van: The motions of a ship in shallow water, Ocean Engineering, Pergamon Press, vol. 3, pp. 221~pp. 225, 1976
- 13) Pinkster, J. A.: Low-frequency second order wave exciting force on floating structures. Neth. ship Model Bain Pub., No650, 1980
- 14) Bowers, E. C.: Long Period oscillations of moored ships subject to short wave seas, Trans. Royal. Inst. Nav. Arch, Vol. 118, 1976
- 15) 松井徹哉: 不規則波中の係留構造物に働く長周期変動波漂流力ー2次厳正理論の定式化および応用ー, 日本建築学会構造系論文報告集, 第382号, pp. 65~76, 1987. 12
- 16) 庄司邦昭: 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, 第138号, pp. 233~246, 1975. 11
- 17) 山下誠也, 片桐徳二: 浅喫水箱形浮体の横揺れに関する系統的实验結果, 西部造船会会報, 第60号, pp. 77~86, 1980
- 18) 日本海事協会編集: 係留システム設計指針, 1983

(1994年10月7日原稿受理, 1995年2月22日採用決定)