波浪変形計算とストリップ法を組み合わせた任意水底形状における係留船舶の動揺解析手法

榊原 繁樹*・大竹祐一郎**・山口将人**・久保 雅義***

A Combined Numerical Simulation Method of Wave Transformation and Strip Method on Ship Motions moored at Arbitrary Bathymetry

Shigeki SAKAKIBARA, Yuichiro OTAKE, Masato YAMAGUCHI

and Masayoshi KUBO

Abstract

In our previous study, we proposed a strip method of motions of ship moored along jetty, which employed a singularity distribution method, $G=\log R$. Applying to an arbitrary bathymetry around the ship, it was difficult to calculate the three-dimensional exciting forces of ship precisely due to wave direction and phase difference in direction of ship's bow and stern. In this paper, a combined numerical simulation method of wave transformation for nonlinear irregular wave and strip method on ship motions moored at arbitrary bathymetry is proposed, and we investigate the effect on ship motions of the uneven water depth(bathymetry), applying to a bulk carrier.

Keywords: Strip method, Wave transformation, Numerical simulation, Moored ship motions, Mooring load

キーワード: ストリップ法, 波浪変形計算, 数値計算, 船体運動, 係留力

1. 緒言

著者の二人は船舶工学で用いられているストリップ法に $G=\log R$ による二次元特異点分布法を適用した岸壁前面の係留船舶の動揺解析手法を提案した⁽¹⁾⁽²⁾。この計算手法では、Fig.1 に示すように船体の各横断面での流体力や波浪強制力を求めてこれらを船長方向へ積分することで船体に作用する三次元外力を算出していた。特に、波浪強制力の算出においては入射波の船首尾方向への位相変化を考慮して三次元波浪強制力を算定していた⁽³⁾。

この解析方法によれば船体形状だけでなく岸壁構造や水底形状も任意に扱える利点を持つが、港湾内に係留された船舶に作用する波外力を算定する場合、港外の任意点で得られた設計波または観測波データから波浪変形計算を行うことにより船体周りの水位

変動や流速を設定する必要があった。また港内の観測波データを用いる場合でも、船体周りの水底形状が変化する場合には水深影響による屈折や振幅変化により入射波の設定が難しく、三次元的に船体の波浪強制力を求めることは現実的には困難であった。

そこで本研究では波浪変形計算とストリップ法を組み合わせた実用的な任意水底形状における係留船舶の動揺シミュレーション手法を提案すると共に、一例として水底形状が変化する場合と水深一定の場合での船体動揺特性の違いについて検討した。

2. 任意水底形状における係留船舶の動揺解析

2.1 水深変化を考慮した波浪変形計算手法

波浪変形計算としては水深変化を考慮できるブシネスク方程式による方法を使用した⁽⁴⁾。これにより

* 正会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 神奈川県平塚市追分 2-1)

** 正会員 株式会社エム・オー・マリンコンサルティング (〒108-0022 東京都港区海岸 3-18-1)

*** 正会員 大島商船高等専門学校 (〒742-2193 山口県大島郡周防大島町大字小松 1091-1)

Fig. 1 Strip method considering arbitrary bathymetry

式(1),(2)に示す方程式を数値的に解くことで任意地点 (x,y) における水位変動 ζ と流速 u, v が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{M^2}{D} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{MN}{D} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \nu \left\{ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right\} \\ + \varepsilon M + \frac{f}{2D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} &= \left\{ B + \frac{1}{3} \right\} h^2 \left\{ \frac{\partial^3 M}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 N}{\partial x \partial y \partial t} \right\} \\ + Bgh^3 \left\{ \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x \partial y^2} \right\} + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial^2 M}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 N}{\partial y \partial t} \right\} \\ + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial t} \right\} + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right\}, \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{N^2}{D} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{MN}{D} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \nu \left\{ \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right\} \\ + \varepsilon N + \frac{f}{2D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} &= \left\{ B + \frac{1}{3} \right\} h^2 \left\{ \frac{\partial^3 N}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 M}{\partial x \partial y \partial t} \right\} \\ + Bgh^3 \left\{ \frac{\partial^3 \zeta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^2 \partial y} \right\} + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial^2 N}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 M}{\partial x \partial t} \right\} \\ + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 M}{\partial y \partial t} \right\} + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial y} \left(2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$M = \int_{-h}^{\zeta} u dz, N = \int_{-h}^{\zeta} v dz, D = h + \zeta \quad (2)$$

ここに g は重力加速度、 ζ, M, N は静水面からの水位変動と x 方向および y 方向の流量フラックス、 f は底面摩擦係数、 ν は砕波による渦動粘性係数、 ε はエネルギー吸収帯の吸収係数、 B は係数 $(=1/15)$ 、 $h=h(x,y)$ は水深、 t は時刻である。

2.2 従来のストリップ法による波浪強制力算出

新たに提案する波浪変形計算から波浪強制力を算出する手法を理解し易くするため、まず従来のストリップ法による船体の波浪強制力の算定方法を概説する⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

Fig.2に示すように船体を Y 軸方向(船首尾方向)にいくつかの断面 D_i ($y=y_i, i=1,2,\dots,ND$)に分割し、それぞれの岸壁および水底形状も含んだ代表断面座標系 $0-XZ(y=y_i)$ において二次元波浪強制力を算定する。ここに入射波および反射波のみが存在する外部領域をRegion(O)とし、当該領域での速度ポテンシャルを式(3)のように設定する。

$$\begin{aligned} \Phi_0(x, y_i, z, t) &= \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[-i e^{-ik(x \cos \omega + y_i \sin \omega)} \right. \\ &\quad \left. + K_{Ri} \cdot e^{-ik\{(-x-2\ell_2)_i \cos \omega + y_i \sin \omega\}} \right] \cdot A(kz) \cdot e^{-i\sigma t}, \\ A(kz) &= \frac{\cosh k(z+h_i)}{\cosh kh_i} \end{aligned} \quad (3)$$

(a) Division of ship toward ship's bow-stern direction

(b) Ship cross section, D_i at $y=y_i$

Fig. 2 Calculation method of hydrodynamic forces in strips at arbitrary bathymetry

ここに σ は角周波数、 ω は波の入射角、 K_{Ri} は反射率、 k は波数、 h_i はRegion (O)での水深、 t は時刻および ζ_0 は入射波振幅(複素数)である。

式(3)の速度ポテンシャルから水位変動は式(4)のように与えられる。

$$\begin{aligned}\zeta &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} \Big|_{z=0} \\ &= \zeta_0 \cdot e^{-iky_i \sin \omega} \cdot \left[e^{-ikx \cos \omega} + K_{Ri} \cdot e^{ik(x+2\ell_2) \cos \omega} \right] \cdot e^{-i\alpha} \quad (4)\end{aligned}$$

次に式(3)(4)のRegion(O)での速度ポテンシャルおよび水位変動から、船体周りの内部領域Region(I)の速度ポテンシャルを式(5)のように設定する。

$$\Phi(x, y_i, z, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} e^{-iky_i \sin \omega} \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha} \quad (5)$$

すると領域Region(I)での水位変動および圧力は次式のように求められる。

$$\begin{aligned}\zeta &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \\ &= i \cdot \zeta_0 \cdot e^{-iky_i \sin \omega} \cdot \phi(x, 0) \cdot e^{-i\alpha} \\ &= \zeta_0 \cdot e^{-iky_i \sin \omega} \cdot (i \phi(x, 0) \cdot e^{-i\alpha}) \quad (6) \\ p &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ &= i\rho g \cdot \zeta_0 \cdot e^{-iky_i \sin \omega} \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha} \\ &= \zeta_0 \cdot e^{-iky_i \sin \omega} \cdot (i\rho g \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha}) \quad (7)\end{aligned}$$

以上より、水位変動および圧力さらには船体各横断面で求められる二次元波浪強制力は、Y軸方向(船首尾方向)には $\zeta_0 \cdot \exp(-iky_i \sin \omega)$ で変動すると仮定していることがわかる。したがって座標原点となる船体中央断面での水位変動および流速から一律に波向き ω を設定し、当該特異点分布法から求められた各断面での二次元波浪強制力 f に中央断面との位相差 $\zeta_0 \cdot \exp(-iky_i \sin \omega)$ を考慮して式(8)のようにシンプソン積分により三次元波浪強制力 F を算出していた。

$$\begin{aligned}F &= \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{i=1}^{ND} \zeta_{0j} \cdot e^{-ik_j y_i \sin \omega} \cdot f(y_i, \sigma_j) \cdot \Delta y_i, \\ f &= f(y_i, \sigma_j)\end{aligned}$$

$$= \int_{SH_i} p(y_i, \sigma_j) \cdot \cos(n, X) ds \quad (8)$$

ここに ρ は流体密度であり、 σ 、 ζ_0 は船体中央横断面での水位変動からFFTにより抽出した成分波周期 $\sigma = \sigma_j$ および振幅 $\zeta_0 = \zeta_{0j} (j=1, 2, \dots, Ne)$ 、 k_j は成分波ごとの波数、 $\cos(n, X)$ は運動モード X に対する方向余弦および Δy_i はY軸方向の断面ごとの分割長さである。

2.3 今回のストリップ法による波浪強制力算出

(1) 波浪変形計算から二次元波浪強制力算出

従来のストリップ法による波浪強制力算出においては、座標原点となる船体中央横断面での水位変動および流速データのみを用いていた。船体周りの水深および岸壁構造を含む水底形状が変化する場合、波向きや入射波振幅は屈折や水深影響などにより船体位置により変化する。そこで新たに提案する手法では、船体中央横断面だけでなく船体の各横断面で水位変動および流速を算定する方法とした。

式(3),(5)に対応する外部領域Region(O)および内部領域Region(I)での速度ポテンシャルは次式のように設定する。

$$\begin{aligned}\Phi_0(x, y_i, z, t) &= \frac{g\zeta(y_i)}{\sigma} \left[-i \left\{ e^{-ikx \cos \omega_i} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + K_{Ri} \cdot e^{ik(x+2\ell_2) \cos \omega_i} \right\} \cdot A(kz) \right] \cdot e^{-i\alpha} \quad (9)\end{aligned}$$

$$\Phi(x, y_i, z, t) = \frac{g\zeta(y_i)}{\sigma} \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha} \quad (10)$$

$$\zeta = \zeta(y_i) \text{ at } x=0, z=0 \quad (11)$$

ここに $\zeta = \zeta(y_i)$ および ω_i は船体の各横断面での水位変動および波の入射角である。

すると領域Region(I)での圧力は次式のように求められる。

$$\begin{aligned}p &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ &= i\rho g \cdot \zeta(y_i) \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha} \\ &= \zeta(y_i) \cdot (i\rho g \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha}) \quad (12a)\end{aligned}$$

次に新たな指数を以下に定義する。

$$\begin{aligned}CR(y_i) &= \frac{\zeta(y_i)}{\zeta_0} \\ &= \frac{\zeta^* \cdot e^{i\theta_i}}{\zeta_0^* \cdot e^{i\theta_0}} = \frac{\zeta^*}{\zeta_0^*} \cdot e^{i(\theta_i - \theta_0)} \quad (13)\end{aligned}$$

ここに ζ_0 は船体中央横断面（座標原点）での入射波振幅、 ζ^*, ζ_0^* は振幅（実数）、 θ_i, θ_0 は位相差であり、指数 $CR=CR(y_i)$ は船体中央横断面の入射波振幅で規格化した船体各横断面での振幅比である。すると式(12)a は次式と書き換えられる。

$$p = \zeta(y_i) \cdot (i\rho g \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha})$$

$$= \zeta_0 \cdot CR(y_i) \cdot (i\rho g \cdot \phi(x, z) \cdot e^{-i\alpha}) \quad (12)b$$

以上より、式(12)b と従来の式(7)を比較すると、任意水深の場合の所量は、Y 軸方向（船首尾方向）に船体中央横断面の所量に対して位相差 $\theta_0 \cdot CR(y_i)$ で変動していると考えることができる。

(2) 三次元波浪強制力の算出

新たに提案する波浪変形計算から船体に作用する三次元波浪強制力の算出方法の流れを Fig.3 にまとめる。

まず波浪変形計算により船体各横断面における水位変動 $\zeta = \zeta(y_i, t)$ および流速 $u = u(y_i, t)$, $v = v(y_i, t)$ の時系列データを算出する。次に水位変動を FFT により成分波に分解し、一方流速の x, y 方向時系列データから Fig.4 のように船体横断面ごとに卓越波向き ω_i を算定する。そして船体中央横断面での水位変動 $\zeta = \zeta(y=0, t) = \zeta_0(t)$ を用いて閾値振幅の設定などにより成分波を抽出の上、成分波周期 $\sigma = \sigma_j (j=1, 2, \dots, Ne)$ を設定する。抽出した当該成分波周期ごとに船体各横断面における振幅比 $CR=CR(y_i, \sigma_j)$ （位相差含む）を求める。そして抽出した成分波ごとに二次元波浪強制力 f を算出し、式(14)のように三次元波浪強制力を算定する。

$$F = \sum_{j=1}^{Ne} \sum_{i=1}^{ND} \zeta_{0j} \cdot CR(y_i, \sigma_j) \cdot f(y_i, \sigma_j) \cdot \Delta y_i \quad (14)$$

2.4 係留船舶の時系列解析

当該波浪変形計算とストリップ法を組み合わせた係留船舶の動揺解析は、従来の岸壁係留船舶の解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾と同様に式(15)の運動方程式を解くことで行うことができる。

$$\sum_{i=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}_i(\tau) \cdot L_{ij}(t-\tau) d\tau$$

$$+ \sum_{i=1}^6 C_{ij} \cdot \dot{x}_i(t) + G_j = F_j, (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (15)$$

ここに $x_i(t)$ は船体動揺の変位または回転角、 M_{ij} は船体の質量または慣性モーメント、 $m_{ij}(\infty)$ は不変付加

Fig. 3 Flowchart on calculation of exciting forces

Fig. 4 Predominant wave directions at ship cross sections

質量または不変付加慣性モーメント、 L_{ij} はメモリー影響関数、 C_{ij} は静的復原力係数、 G_j は係留力ベクトル、 F_j は外力項である。当該手法により求めた三次元波浪強制力は式(15)の外力項に付与される。なお Surge の波浪強制力は船体の横断面での解析では算出することができないため、船体の縦断面に対して同様に二次元波浪強制力を求めて三次元波浪強制力を算定した。また付加質量や減衰係数については従来のストリップ法と同様に算出し、Surge 成分は同様に船体を縦断面に分割して算定した。

3. 適用事例と船体動揺への影響

3.1 対象船舶および水底形状

今回提案する係留船舶の動揺シミュレーション手

Fig.5 Mooring arrangement of the bulk carrier and bathymetry around the berth

法を水深変化のある岸壁前面に係留された 22 万 DWT トン級鉱石船 ($L_{pp}=308\text{m}$, $B=54\text{m}$, $d=12.7\text{m}$, $W=173,896\text{ton}$, $KG=11.9\text{m}$, $GM=13.3\text{m}$) に適用し、合わせて同船型が隣接する一定水深バースに係留された場合の動揺シミュレーションを行うことで水深変化が船体動揺へ与える影響を調べた。

Fig.5 に当該鉱石船の係留配置および船体周りの水深変化の状況を示す。鉱石船は $\phi 65\text{mm}$ ナイロン索 16 本と 1250H $\times$ 2 ソリッド式防舷材 7 基で係留されるものとした。係留索の初期張力は各索 69kN(7ton)とし、Sway, Surge 固有周期は 175s と 183s である。水深は 19m から 14m まで船底近傍で変化しており、船体代表横断面は垂線間長の 1/10 を基準長に 21 断面に分割した($ND=21$)。一例として Fig.5(b)に横断面 D1 (船尾)、D11 (中央) および D16 (船首側)の二次元解析領域 Region(I)を示す。

3.2 波浪変形計算による外力条件の設定

(1) 港外波浪条件

港外波のスペクトルは、Fig.6 に示すように平石らが提案した近似形長周期波スペクトルを用いた⁽⁷⁾。短周期波 (風浪) については有義波高 3m および有義周期 12s とし、長周期波については成分波の波周期を 30~300s とし、成分波の波エネルギーが有義波高 $H_{L1/3}=0.3\text{m}$ に相当するように設定した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

(2) 船体断面における水位変動および流速

Fig.6 の港外波のスペクトルを用いて式(1),(2)の波浪変形計算を実施した。計算格子間隔は成分波波

Fig.6 Wave spectrum of outside harbor

Fig.7 Selection of wave profile at ship cross sections by grids for calculation of wave transformation

(a) Wave spectrum

(b) Time series

Fig.8 Surface elevation at ship cross section of D11

Table 1 Allowable ship motions ⁽⁹⁾

Modes	Allowable ship motions
Sway	+1.0m
Surge	±1.0m
Heave	±0.5m
Pitch	±1.0deg
Roll	±3.0deg
Yaw	±1.0deg

長を考慮して 20m とした。そして Fig.7 に示すように波浪変形計算での格子から船体の各断面での水位変動および流速を抽出した。また波向きは当該水位変動および流速から卓越波向きを設定した。一例として Fig.8 に船体の中央横断面 D11 で得られた水位変動およびそのスペクトルを示す。

3.3 任意水深の場合

Fig.5 に示す船体周りの水底形状が変化するバース前面に係留された当該鉤石船についての船体動揺シミュレーションを実施した。以下に船体動揺量および係留力のシミュレーション結果をまとめるが、船体運動については比較のために荷役限界動揺量を Table 1 に示す⁽⁹⁾。

(1) 船体運動

Fig.9(a) に船体動揺計算結果を示す。卓越する船体運動は Surge で +2.13m ~ -2.61m と大きな長周期動揺が発生し、Sway についても +1.42m ~ -0.11m の荷役限界動揺量を超える大きな動揺が発生する状況となった。その他の Heave, Pitch, Roll および Yaw は比較的抑えられていた。

(2) 係留力

Fig.9(b) に係留索 L1(bow line), L5(bow breast line), L9(stern spring line), L12(stern breast line)の張力および防舷材 F1(bow side), F7(stern side)の反力時系列結果を示す。Fig.9(a)の動揺量時系列結果に対応して係留力は発生しているが、係留索張力は Surge が卓越したことから船首尾のスプリングラインに大きな張力が発生したが、最大約 190kN で全ての係留索で安全使用荷重 420kN (安全率 2.2、破断荷重 920kN) 以下となった。防舷材については船首尾端での防舷材に大きな反力が発生したが、最大 1758kN および圧縮率 17.1% (最大反力 1772kN、規定圧縮率 52.5%) で許容値以内となった。

3.4 一定水深の場合

(1) 船体断面における水位変動および流速

Fig.5 に示す対象船舶が隣接する一定水深バース (水深 19m) に係留された場合の動揺シミュレーション

Fig. 9(a) Calculation results of moored ship motions under the uneven water depth for the bulk carrier

Fig. 9(b) Calculation results of mooring loads under the uneven water depth for the bulk carrier

Fig.10 Surface elevation at ship cross section of D11 under the constant water depth

Fig.11 Wave directions at ship cross sections (D1-D21)

ョンを行うことで水深変化が船体動揺へ与える影響を調べた。

Fig.6 に示す港外波スペクトルに対して波浪変形計算により、同様に船体の各断面での水位変動および流速を算出した。一例として Fig.10 に船体の中央横断面 D11 で得られた水位変動およびそのスペクトルを示す。短周期成分波については水深一定の方がスペクトル値は若干低減しているが、長周期成分波については Fig.8 の任意水深の場合と同様に港外波に比べて複数の波周期で増幅している様子がみられる。

Fig.11 に船体各断面での波向きを示す。Fig.11 には前述の任意水深の場合での波向き変化も添付する

Fig. 12(a) Calculation results of moored ship motions under the constant water depth for the bulk carrier

Fig. 12(b) Calculation results of mooring loads under the constant water depth for the bulk carrier

Fig. 13 Calculation results of exciting forces under the uneven and constant water depths for the bulk carrier

が、いずれの水底形状の場合も船体各断面で波向きがかなり変化している様子がわかる。また当該任意水深の場合、波向きは船尾側断面で横波に近く船首側断面ほど船首尾方向となっている。一方一定水深の場合、波向きは逆に船尾側断面で船首尾方向に近く、船首側断面ほど横波に近くなっている。港内のバース前面水底形状の違いにより船体各断面での波向き特性が変化することがわかった。

(2) 船体運動

Fig.12(a)に船体動揺計算結果を示す。卓越する船体運動は前述の任意水深の場合と同様に Surge で $+1.79\text{m} \sim -1.19\text{m}$ と大きな長周期動揺が発生しているが低減している。一方 Sway では大きくなり $+2.02\text{m} \sim -0.13\text{m}$ と荷役限界動揺量を超える大きな動揺が発生する状況となった。その他の Heave, Pitch, Roll は同様に抑えられているが、Yaw は Sway との連成で $+0.26\text{deg} \sim -0.91\text{deg}$ と比較的

大きな動揺が発生している。

Fig.13 に Sway, Surge, Yaw の波浪強制力の時系列計算結果を示す。船体動揺に対応して、当該任意水深の場合 Surge が卓越しているのに対して、当該一定水深の場合 Sway および Yaw が大きくなっていることがわかる。

(3) 係留力

Fig.12(b)に係留索 L1(bow line), L5(bow breast line), L9(stern spring line), L12(stern breast line)の張力および防舷材 F1(bow side), F7(stern side)の反力時系列結果を示す。Fig.12(a)の動揺量時系列結果に対応して係留力は発生しているが、係留索張力は Surge だけでなく Sway が卓越したことからプレストラインに大きな張力が発生したが、最大約 260kN で全ての係留索で安全使用荷重以下となった。防舷材については船首尾端での防舷材に大きな反力が発生したが、最大 1764kN および圧縮率 32.6% (最大反力 1772kN、規定圧縮率 52.5%) で許容値以内となった。

4. 結語

波浪変形計算とストリップ法を組み合わせた実用的な任意水底形状における係留船舶の動揺シミュレーション手法を提案すると共に、当該シミュレーション手法を 22 万 DWT 級鉱石船に適用して水底形状の変化が船体動揺特性に与える影響について検討した。得られた結論を要約すると次のようになる。

- ① 港外の任意点における設計波データから波浪変形計算とストリップ法を組み合わせて水深変化を考慮した実用的な港内係留船舶の船体動揺時系列解析手法を確立した。
- ② 港内に係留された船舶の船体各断面での波向きは、バース前面が任意水深および一定水深の場合のいずれの水底形状の場合でも、船体の各断面でかなり変化することが波浪変形計算からわかった。またバース前面における水底形状が船体各断面での波向き特性に影響を与えることがわかった。
- ③ 水底形状の違いにより船体各断面での波向きや水位変動の特性が変化することに対応して、船体に作用する波浪強制力さらには船体動揺量や係留力が変化することがわかった。
- ④ 詳細な検討を要する場合など必要に応じて、水底形状の影響を考慮した船体動揺の算定を行う必要性のあることがわかった。

本研究が港内係留船舶の長周期動揺特性をより良く解明するためのツールとなることを希望すると共に、係留問題（特に長周期船体動揺問題）への対策立案の一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹：ストリップ法による岸壁前面係留矩形浮体の動揺解析，日本航海学会論文集，第79号，pp.195-201，1988。
- (2) 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹：岸壁前面係留船の船体運動へのストリップ法の拡張，海岸工学論文集，第35号，pp.682-686，1988。
- (3) 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹：岸壁前面での船体運動におけるストリップ法の改善について，日本航海学会論文集，第82号，pp.173-180，1990。
- (4) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，2002。
- (5) 榎木亨・久保雅義：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究，直線岸壁およびSlip内係留船の運動特性，海岸工学論文集，第27巻，pp.307-311，1980。
- (6) 久保雅義・笹健児・白石悟・榊原繁樹：数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について，海岸工学論文集，第44巻，pp.236-240，1997。
- (7) 平石哲也・河野信二他：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて，海岸工学論文集，第44巻，pp.246-250，1997。
- (8) 榊原繁樹・大竹祐一郎・久保雅義：長周期波の標準スペクトルを用いた係留船舶の長周期動揺特性の評価手法について，日本航海学会論文集，第112号，pp.155-161，2005。
- (9) (財)沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸技術ライブラリー，No.21，2004。

質疑応答

井関俊夫（東京海洋大学）：

Surgeの有限水深における波浪強制力計算方法を詳しく教えてください。

榊原繁樹：

Fig.2およびFig.5に対応したSurge波浪強制力の算出に際して用いた船体縦断面および二次元解析領域をFig.14に示します。Fig.5では船首尾方向へ船体横断面Diを21断面に分割していましたが、

Fig.14では船体の幅方向へ船体縦断面DLiを3断面に分割して、横断面と同様な手順により、二次元（縦断面）波浪強制力を求め、さらには当該縦断面波力を船体幅方向に積分することでSurgeの三次元波浪強制力を算出しています。ここに水底形状も含んだ代表断面座標系 $0-X_L Z_L (Y_L=Y_{Li}, i=1,2,3)$ を設定し、また岸壁からの反射波成分は既に波浪変形計算による水位変動に含まれていることなどから、開水域における二次元解析を適用しています。

(a) Cross sections in longitudinal

(b) 2D-analytical region(I) for DL1,DL2 and DL3

Fig.14 Ship cross sections in longitudinal for calculation of surge hydrodynamic force

小林英一（神戸大学）：

貴重なご講演ありがとうございます。計算精度についての検証方法についてのご見解をお聞かせください。

榊原繁樹：

これまでに提案した従来のストリップ法については、水槽実験レベルで実船および矩形船を用いた検証を行っています⁽¹⁾⁽²⁾。このとき水底形状については一定水深のみを扱いましたが、波向きは様々な場合で行っています。今回提案する方法では船体の各断面での水位変動および流速データが必要となることから、モデル実験または現地実験での検証を行う場合、当該水位変動および流速データの取得に工夫が必要となるかもしれません。他の計算手法による任意水底形状における船体動揺計算事例が少ないことから、今後の課題として、既往の実船を用いた港内係留船舶の現地実験結果との照合により当該計算精度の検証を行いたく考えています。