津波の初期波形による係留船舶の動揺への影響について

榊原 繁樹*・久保 雅義**・小林 英一**・越村 俊一***

Dynamic Behavior of Moored Ship Motions induced by Initial Attack of Large Scaled Tsunami

Shigeki SAKAKIBARA, Masayoshi KUBO, Eiichi KOBAYASHI and Shunichi KOSHIMURA

Abstract

Recently, it has been announced as a warning that the Tokai, Nankai and Tounankai earthquakes will be anticipated to surely occur within next 30 years. These earthquakes involve large scaled tsunami. When the tsunami attacks ships moored inside harbor basin, the motions might attain large movements that exceed the safe mooring conditions due to the surface elevation, the currents and a resonance effect with natural periods of sway or surge of the moored ships. In this paper, we propose a numerical simulation procedure of moored ship motions due to tsunami and investigate the effects on ship motions induced by the initial attack of the large scaled tsunami.

Keywords: *Tsunami, Long-period moored ship motions, Simulation method, Mooring system*

キーワード: 津波, 長周期船体運動, 動揺シミュレーション, 係留システム

1. 緒言

東海地震や東南海地震・南海地震の発生に伴い各地港湾に大きな津波が来襲することが知られるようになってきている⁽¹⁾。一般に津波は地震による海底の隆起で起こることから、緩やかな水位の上昇と下降であると捉えられている。このことから係留船舶も緩やかな上下運動を生じるのみと考えられている。しかし津波には数分から 1 分程度の成分波が含まれていることから、係留船舶の長周期運動と共振する可能性がある。また津波の流速は数 m/s 程度で通常の港内で発生する潮流に比べて大きく、大きな抗力が係留船舶に作用する可能性もある。特に津波来襲初期の水位上昇時において、両者の効果が相乗的に作用して係留船舶に自由振動を誘発させるなど大きな船体動揺を発生させる可能性がある⁽²⁾。

そこで本研究では津波の初期波形による係留船舶の動揺への影響について動揺シミュレーションを用いて検討した。

2. 津波による係留船舶の動揺解析

2.1 津波の水位変動および流速の設定

まず対象港湾および対象船舶の係留バース周辺における津波の水位変動と流速を別途数値計算等により算出する⁽³⁾。そして当該バース位置における水位変動と流速を設定する。Fig.1 は対象バースの船体重心位置近傍における津波の水位変動と流速の時系列計算結果である。

Fig. 1 Time Series of Surface Elevation and Currents of the Tsunami at the Target Berth

* 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 2-1)

** 正会員 神戸大学 海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 非会員 人と防災未来センター (〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通 1-5-2)

2.2 津波水位変動から成分波、速度ポテンシャルおよび流速の設定

一般に津波の数値計算では、長波理論に基づき、任意地点における水位変動と流速が算出される。一方船体に作用する波浪強制力や流れによる流圧力は船体重心位置（座標原点）における速度ポテンシャルが与えられると求められる。震源地から広範囲な計算領域を扱う津波計算と同時に、厳密に、港湾における係留船舶の運動を求めることは計算メッシュの大きさなどの問題から現実的には困難である。そこで両者を実用的に連結させる方法として、津波計算から算出された水位変動を用いて次の手順で速度ポテンシャルおよび流速を与える。

Fig. 2 Coordinate System for Velocity Potentials derived from Surface Elevation of Tsunami

Fig.2 に示すように静止時の船体重心回りの座標系において入射角 ω で津波が進入する場合を考える。このとき津波の水位変動とこれによる速度ポテンシャルは式(1)のように表されるものとする。

$$\begin{aligned}\zeta(x, y, t) &= -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{at } z=0 \\ &= -i\zeta_0 \cdot \exp[ik(x \cos \omega + y \sin \omega) + i\sigma t] \\ \Phi(x, y, z, t) &= \frac{g\zeta_0}{\sigma} \cdot \exp[ik(x \cos \omega + y \sin \omega)] \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cdot \exp(i\sigma t).\end{aligned}\quad (1)$$

ここに g は重力加速度、 ζ_0 、 σ 、 k は津波の振幅、角周波数および波数、 h は水深、 t は時刻である。また設定された速度ポテンシャルから船側方向(x 方向)および船首尾方向(y 方向)の水粒子速度は次式で与えられる。

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

$$\begin{aligned}&= \zeta_0 \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cdot \left\{ \frac{kg}{\sigma} \cos \omega \right\} \cdot \exp\left[ik(x \cos \omega + y \sin \omega) + i\left(\sigma t + \frac{\pi}{2}\right)\right], \\ v &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} \\ &= \zeta_0 \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cdot \left\{ \frac{kg}{\sigma} \sin \omega \right\} \cdot \exp\left[ik(x \cos \omega + y \sin \omega) + i\left(\sigma t + \frac{\pi}{2}\right)\right]\end{aligned}\quad (2)$$

式(2)では $z=0$ として水面上の値を用いる。

さらに津波の水位変動は不規則波として算出されることから、式(3)のように FFT により成分波に分解して成分波ごとに速度ポテンシャルおよび流速を与える。ここに N_e は成分波の個数である。

$$\begin{aligned}\zeta &= \sum_{i=1}^{N_e} \zeta_i(x, y, t), \\ \Phi &= \sum_{i=1}^{N_e} \Phi_i(x, y, z, t), \\ u &= \sum_{i=1}^{N_e} u_i(x, y, 0, t), \\ v &= \sum_{i=1}^{N_e} v_i(x, y, 0, t).\end{aligned}\quad (3)$$

なお津波計算から算出される流速についても FFT を用いて成分波に分解し、成分波ごとにリサージュ図形を作成して波向き(または流向) $\omega = \omega_i (i=1, 2, \dots, N_e)$ を設定する。

以上により、津波計算から求められる水位変動および流速データと船体に作用する波浪強制力や流圧力算定に必要な速度ポテンシャルとが関連付けられたことになる。

2.3 波浪強制力および流圧力の算出

式(3)で設定された速度ポテンシャルと流速を用いて船体に作用する波浪強制力 F_{ex} および流圧力 F_e を求める。波浪強制力は式(3)の成分波ごとに別途定常解析⁽⁴⁾により単位波振幅当りの波浪強制力 f_e を算出して、式(3)の波振幅と合わせて重ね合わせることで式(4)の不規則な波浪強制力を与える。

$$F_{ex} = \sum \zeta_i \cdot f_{ei} \cdot \exp(i\sigma t) \quad (4)$$

また流圧力については式(3)から流速の時系列 $u=u(x, y, t)$ を作成して式(5)のように与える。

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot u^2 \quad (5)$$

ここに ρ は流体密度、 C は抗力係数、 A は受圧面積である。

2.4 係留船舶の時系列解析

津波の初期波形による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(6)の運動方程式を解くことで行うことができる。

$$\sum_{i=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}_i(\tau) \cdot L_{ij}(t-\tau) d\tau + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) \cdot x_i(t) = F_j, (j=1,2,\dots,6) \quad (6)$$

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_{ij} は係留力係数、 F_j は外力項である。津波による波浪強制力および流圧力は式(6)の外力項に付与される。また粘性抵抗は適宜考慮する。

3. 適用事例と船体動揺への影響について

3.1 対象船舶

津波の初期波形による係留船舶の動揺への影響を調べるため、Fig.3 に示すシーバースに係留された 135,000m³ LNG 船を対象に検討した。当該 LNG 船は $\phi 42$ mm ワイヤロープ（ナイロンテイルロープ付き）16 本と防舷材 4 基で係留される状態で、係留索の初期張力は各索 10ton である。このとき当該係留船舶の Sway および Surge 固有周期は 61s と 136s である。座標系は船体重心位置を原点にとり、 x 軸正方向が東方で y 軸正方向が北方である。

Fig. 3 Mooring Arrangement of 135,000m³ LNG-tanker

3.2 成分波の抽出方法と FFT による再現

Fig.1 に示す津波の水位変動と流速の時系列が当該船体重心位置（座標原点）におけるデータとする。まず 2.2 に従い FFT により水位変動の成分波を抽出する。成分波の総数および周波数分解能は、与えられた水位変動データ数 N とサンプリング間隔 Δt （ここでは $N=512$, $\Delta t=10$ s, 水位変動の原波形は約 5000s）により決まる。FFT により抽出した成分波をすべて扱う場合、周波数分解能によっては、実波形にない短周期成分が強調され長周期波側の卓越成分の再現が見づらくなる場合がある。そこで抽出する閾値波振幅を設定して、船体に作用する波浪強制力や流速算出に用いる成分波個数 N_e を限定した。

本研究では閾値波振幅を 5cm, 1cm とした。このとき抽出される成分波の個数はそれぞれ $N_e=21$, 93 となった。閾値波振幅を 5cm とする場合、成分波の周期は $T=5120$ s $\sim$ 160s に分布し、長周期船体運動である Sway, Surge と共振する成分波は含まれなかった。一方閾値波振幅を 1cm とする場合、成分波の周期は $T=5120$ s $\sim$ 45s まで分布することになり、Sway, Surge と共振する成分を含む抽出方法となった。

波向きの設定は本来、成分波ごとにリサージュ図形を作成して、それぞれに与える必要がある。本研究ではまず津波の初期波形がどのように船体動揺へ影響を与えるかを把握したいため、Fig.4 に示すように簡易にすべての流速振幅データをプロットして卓越波向きを設定した ($\omega=30$ deg)。Fig.5 にこのように設定した場合の FFT による津波の水位変動および流速の再現波形を示す。水位変動に関してはよく再現されている。一方流速に関しては流速の絶対値の大きさが過大に評価されている。これは波向き設定の影響と考えられるが、水位変動に対する位相関係はよく再現されている。

Fig. 4 Predominant Wave Direction due to the Current Data of the Tsunami

Fig. 5 Reproduction of Time Series of Surface Elevation and Currents of the Tsunami (Ne=21)

3.3 共振周期波を含まない場合（閾値波振幅が5cmの場合）

長周期船体運動との共振周期波を含む場合と含まない場合それぞれにつき、流圧力の考慮の有無による影響を調べる。なお Fig.5 に示す流速の再現計算結果が Fig.1 に示す値に比べ過大に評価されていたことから、流速の絶対値を合わせるように係数を乗じて修正した。

(1) 流圧力を考慮しない場合

共振周期波を含まない場合で流圧力を考慮しないときの船体動揺量の時系列計算結果を Fig.6(a)に示す。Heave に関しては津波の水位変動に一致した動きとなった。Sway は津波到達前から最大潮位に到るまでは岸壁側に変位して、その後最低潮位になるまでの間では沖側に変位している。引き続き潮位の変動に対応した同様な動揺を生じているが、沖側へ 2.5m に及ぶ大きな動揺となった。Surge についても、津波到達前から顕著に自由振動を生じながら船尾方向へシフトし、その後最低潮位になるまでの間に逆に船首方向にシフトしている。引き続き同様な潮位の変動に対応した動揺を生じているが、船首尾にそれぞれ約 3m に及ぶ大きな移動が発生した。Pitch, Roll, Yaw については微小な動揺を生じているのみであった。

Fig.6(b)に係留索 L1(bow line), L8(bow spring line), L10(stern spring line), L16(stern line)の張力および防舷材 F1(stern side), F4(bow side)の反力時系列結果を示す。Fig.6(a)の動揺量時系列結果に対応して、津波到達前から係留索および防舷材に大きな荷重が発生している。係留索の破断荷重は 127ton である。使用荷重を 42.3ton（安全率3として）とすると、各索において使用荷重を超える張力が生じている。防舷材については最大許容反力が 416ton（65%圧縮時）であることから、大きな圧縮変形が生じているものの、許容範囲内であった。

Fig. 6(a) Calculation Results of Moored Ship Motions due to Tsunami without Currents (Ne=21)

Fig. 6(b) Calculation Results of Mooring Loads due to Tsunami without Currents (Ne=21)

Fig. 7(a) Calculation Results of Moored Ship Motions due to Tsunami with Currents (Ne=21)

Fig. 7(b) Calculation Results of Mooring Loads due to Tsunami with Currents (Ne=21)

(2) 流圧力を考慮する場合

Fig.7(a)に共振周期波を含まない場合における流圧力を考慮するときの船体動揺量の時系列計算結果を示す。動揺特性としては Fig.6(a)の流圧力を考慮しない場合とほぼ同じであるが、流圧力の影響により Sway の沖側への動揺量が 4.5m に及び、Sway との連成に伴い Roll にも大きな変位角が生じている。Fig.7(b)に係留力の計算結果を示すが、係留索には 100ton を超える張力が生じ、係留索破断の危険性が高い。また防舷材についても、許容範囲内ではあるが 300ton に至る反力が生じ、大きな圧縮変形が生じている。当該係留システムの使用限界を超える荷重が作用する結果となり、係留索の破断、本船流出の危険性のある状況であることがわかる。

3.4 共振周期波を含む場合（閾値波振幅が 1cm の場合）

(1) 流圧力を考慮しない場合

共振周期波を含む場合で流圧力を考慮しないときの船体動揺量の時系列計算結果を Fig.8(a)に示す。Fig.6(a)と比較すると、Heave と Pitch に関してはほぼ一致した動きとなるが、Sway, Surge および Yaw においては共振に伴う動揺が水位変動に伴う動揺に相乗して発生し、かなり異なる動揺特性となることがわかる。また Fig.8(b)には係留力の時系列結果を示す。Fig.6(b)の係留力と比較すると、動揺特性の変化に伴い係留特性も変化していることがわかる。水位変動の緩やかな変化に合わせた張力変動だけでなく、共振に伴う急激な張力変化が追加され増加している。また防舷材においても Yaw の効果が追加され、防舷材 F1 では最大反力を超える反力が生じて過圧縮状態となっていることがわかる。

なお共振周期波を含まない場合と同様に、津波到達前から Sway, Surge などに大きな動揺が発生すると共に、これに伴い係留システムに過大な荷重が作用していることがわかる。

(2) 流圧力を考慮する場合

共振周期波を含む場合において流圧力を考慮するときの船体動揺量の時系列計算結果を Fig.9(a)に示す。Fig.7(a)と比較すると、共振に伴う動揺が相乗的に発生してかなり異なる動揺特性となっていることがわかる。Fig.9(b)に係留索張力および防舷材を示すが、津波による水位変動、Sway, Surge, Yaw における共振、さらには流圧力の効果が相乗的に係留システムに作用し、係留索の破断や防舷材の破損さらには本船流出や岸壁施設の損傷の可能性が高い状況であることがわかる。

Fig. 8(a) Calculation Results of Moored Ship Motions due to Tsunami without Currents (Ne=93)

Fig. 9(a) Calculation Results of Moored Ship Motions due to Tsunami with Currents (Ne=93)

Fig. 8(b) Calculation Results of Mooring Loads due to Tsunami without Currents (Ne=93)

Fig. 9(b) Calculation Results of Mooring Loads due to Tsunami with Currents (Ne=93)

なお Fig.8 および, Fig.9 の Sway, Roll などの時系列において、シミュレーション開始と同時に大きな動揺が発生している。これは時系列解析で解が収束せずに発散する現象ではなく（時系列解析における時間ステップは $\Delta t=0.25s$ として、最短波周期に対して十分な時間刻みとしている）、設定した津波水位変動に含まれる短周期波成分による動揺である。

4. 結語

本研究では津波の初期波形による係留船舶の動揺への影響を検討するために、津波による係留船舶の動揺解析手順を示した。そして津波成分波の抽出方法や流圧力考慮の有無による係留船舶の動揺量、係留索張力および防舷材変形量などへの影響について様々なケースを設定して動揺シミュレーションを用いて検討した。得られた結論を要約すると次のようになる。

- ①津波到達前から Sway, Surge などに大きな動揺が発生し、これに伴い係留システムにも過大な荷重が作用し始めることがわかった。
- ②津波の水位変動による波力だけでなく、津波による流圧力を合わせて考慮することで Sway, Surge などにさらに大きな動揺が発生することがわかった。
- ③津波到達時に Heave に最大値を生じるが、その前後で Sway, Surge に大きな動揺が生じることがわかった。
- ④波の最下点で Heave に最小値を生じるが、その直後から Sway, Surge に大きな動揺が生じることがわかった。
- ⑤津波のピークおよびボトム水位前後における大きな Sway, Surge により係留索の破断や防舷材の過圧縮の危険性のあることがわかった。
- ⑥津波の成分波分解においては Sway, Surge, Yaw といった長周期船体運動の固有周期を考慮して設定する必要がある。津波の緩やかな水位変動だけでなく、津波に含まれる長周期波成分との共振や流れによる自由振動により、当該運動モードではさらに大きな動揺が誘発される。

今回は 135,000m³LNG 船を例に検討したが、同じ船種・船型においても津波に対するバース向きの影響、載貨状態の影響、係留索の初期張力や防舷材種類など係留システムの影響などによっても船体動揺特性は変化する。そこでさらに、船種・船型の違いの影響や港内におけるバース配置の影響など、様々な観点から津波の初期波形による係留船舶の動

揺への影響について今後研究を進めたいと考えている。また従来の津波計算と船体回りの速度ポテンシャルを関連付けることで実用的な津波による係留船舶の動揺解析手法を提案したが、この理論的な根拠や有効性などについて検討を加えたいと考えている。

近年、地震津波による被害や津波の特性に関する研究がさかんに行われている⁷⁾。本研究が津波作用下、特に津波の来襲初期段階における係留船舶の動揺特性評価や安全な係留システムの検討、さらには港湾およびバースの防災に関する検討への一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 内閣府編：防災白書, 2004.
- (2) 久保雅義・榊原繁樹・小林英一・越村俊一：津波が船舶及び港湾へ及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 第 112 号, 2004 (投稿中)。
- (3) 越村俊一：津波の数値解析技術とその応用, 非破壊検査, Vol.52, pp.344-348, 2003.
- (4) 榊木亨・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 内係留船舶の運動特性, 海岸工学論文集, 第 27 巻, pp.307-311, 1980.
- (5) 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.
- (6) 久保雅義・榊原繁樹：湾水振動を考慮した港内係留船舶の時系列解析, 日本航海学会論文集, 第 100 号, pp.121-130, 1999.
- (7) 富田孝史・河合弘泰・柿沼太郎：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震津波による被害と津波の特性, 港湾空港技術研究資料, No.1082, 2004.

質疑応答

井関俊夫（東京海洋大学）：

FFT による成分波抽出における陸岸からの反射波はどのように考慮されているのでしょうか。

榊原繁樹：

今回の適用事例では洋上のシーバースに係留された LNG 船を対象に検討したことから、Fig.4 から波の主方向が比較的明確に与えられる条件であったことから反射波は考慮していません。対象船舶が港内の岸壁前面に係留される場合や成分波ごとにリサージュ図形を作成して反射波の影響が顕著にみられる場合は反射波を考慮する必要がある

と考えます。

寺田大介（株式会社エム・オー・マリンコンサルティング）：

前後方向の減衰係数がシミュレーション結果に大きく影響すると思いますがどのように与えられていますか。

榊原繁樹：

深江丸を使った自由振動実験や長周期波作用下における係留船舶の動揺に関する現地実験結果との再現計算検討を参考にして、時系列解析内に考慮しています。