増しもやいによる岸壁係留船舶の津波防災対策に関する研究(その2)

正会員 増 田 光 弘^{*}
正会員 増 田 光 一^{**}

正会員 南 清 和^{*}
正会員 居 駒 知 樹^{**}

A Study on Tsunami Protection Measures of Mooring Vessels to a Wharf by Install More Mooring Tethers (Part 2)

by Mitsuhiro Masuda, *Member* Kiyokazu Minami, *Member*
Koichi Masuda, *Member* Tomoki Ikoma, *Member*

Summary

When tsunami attacks a harbor, the vessels moored at the wharf are exposed to a risk. For example, the following damages are assumed; breaking the mooring tether, grounding on a wharf, drifting to land areas and destroying buildings. In the previous report, the motion analysis of mooring vessels in tsunamis and the usefulness of tsunami protection measures by the install more mooring tethers (IMMT) was described using the MPS method. The incident wave angles of tsunami were used the 0 degrees (longitudinal wave) and 90 degrees (Transverse wave). For any incident angles, IMMT was effective. However, in the case of transverse wave of wave height 6.0m or more, it is possible to prevent the break of the mooring tethers, but it was confirmed that the vessels damaged by the grounding on a wharf. In the case of longitudinal wave, IMMT confirmed that it did not affect in some cases. It is influenced by the direction the mooring tether pulls. When the vessel moves, there are mooring tethers that are pulled or slacked. As a result, the mooring force does not act equally on the mooring tethers. Also, as an issue of existing papers, studies on oblique waves were not done. It is important to solve these issues.

In this present paper, the influence of the oblique wave is studied. The extent of damage of longitudinal waves, transverse waves and oblique waves are compared through a numerical simulation method, the 3D MPS method. The 3D MPS method is used for numerical simulation. In this paper, quaternion is applied to the algorithm of rotational motion of the floating model. Furthermore, a more effective mooring method for longitudinal wave is proposed, and its effectiveness is demonstrated.

1. 結 言

津波警報発令から津波来襲まで時間が短い場合や荷役作業中の船舶、船員不在の船舶、津波に対する知識の乏しい外国船、出航にタグボートを必要とする大型の貨物船などは、岸壁に係留されたまま津波の被害に備えなければならない。岸壁係留船舶に津波が来襲した場合、係留索の破断に伴い海域への漂流や座礁、岸壁への乗り揚げ、建築物との衝突といった被害が発生することが想定される。これらのことから、津波来襲時の岸壁係留船舶の被害を予測するとともに、防災・減災対策を検討することは非常に重要であるといえる。

そこで著者らは、岸壁係留船舶の津波防災・減災対策として、増しもやいによる津波防災対策¹⁾に着目した。増しもや

いは、係留索の本数を増やすことによって係留索の破断を防ぐ対策である。著者らは、前報¹⁾において粒子法の一つである MPS 法を用いた数値シミュレーションによって、津波高および津波の入射角度、船舶の大きさ、喫水の違いが係留索の破断と船舶の挙動に与える影響を明らかにするとともに、増しもやいによる岸壁係留船舶の津波防災・減災効果について検討を行った。それにより、増しもやいを行うことによって、係留索の破断および岸壁の乗り揚げ被害を防ぐことができることを明らかにした。しかしながら、津波が船首尾方向に対して 90 度方向から入射する場合（以下、横波）、小型の船舶では津波高が 5.0m を超えると増しもやいによって係留索の破断や岸壁への乗り揚げを防ぐことは難しく、中型の船舶では津波高 6.0m を超えると喫水によっては係留索が一部破断せず残ったとしても船体が岸壁に乗り揚げってしまうといった被害が発生することが確認された。船首尾方向に対して 0 度方向から入射する場合（以下、縦波）は津波が入射した際、船体の移動とともに引つ張られる係留索と弛む係留索があるため、すべての係留索が同様に船舶の移動を拘束するわけではない。そのため、増しもやいを行っても十分に効果が発揮されず、係留索が破断してしまう可能性があることが確認された。ただし、斜めから津波が入射する場合（以

* 東京海洋大学学術研究院海洋工学系海事システム工学部門 1

** 日本大学理工学部海洋建築工学科 2

下, 斜波)などの, 津波の入射角度の違いについての検討が十分ではなかった. そこで, これらの課題について更なる検討を行う必要がある. しかしながら, 乗り揚げが発生するほどの津波高の横波に対しては, 陸側斜め下向きに張力を発生させる増しもやいのみで防災・減災することは難しい可能性も考えられる. そのため, 著者らは横波に対しては浮体橋に着目し, 浮体式津波対策用岸壁を提案²⁾しているが, 本報では増しもやいによる防災・減災対策の可能性を明らかにすることを目的に, 以下の問題について検討を行う.

(1) 斜波を考慮した津波の入射角度が及ぼす影響

(2) 縦波に対するより効果的な増しもやいの方法

(1)では, 前報で検討を行った横波, 縦波に加えて, 45度方向から入射する斜波について検討を行い, 岸壁係留船舶において被害が大きくなると想定される津波の入射角度を明らかにする. (2)では, 増しもやいによって増やすことができる係留索の本数には限りがあり, 現実的な増しもやいの本数では津波高が高くなると係留索の破断を防ぐことが難しくなるという課題がある. また, 長い係留索に比べて短い係留索は破断しやすく, そのため短い係留索が先に破断してしまい, 長い係留索のみで係留状態を保たなければならなくなり, 最終的にすべての係留索が破断してしまう. そのため, 増しもやい対策をより効果的なものとするためには係留索をより長くするとともに, 係留索全体のばね定数をできるだけ等しくかつ, 大きくすることが重要だと考えられる. そこで, 前報での増しもやい方法では効果が発揮されにくかった縦波に対してより効果的な増しもやいの方法を提案するとともに, その有効性を明らかにする. そして, これらの検討結果と前報の結果から, 増しもやいによる津波防災・減災対策の有効性を示すことを本報の目的とする. なお, 本研究では前報と同様に数値シミュレーションによる数値実験によって検討を行っていく. 数値シミュレーションには著者ら²⁾⁻⁶⁾が作成した3次元MPS法プログラムを用いる.

2. 数値シミュレーション法

本研究では, 数値シミュレーション法として越塚ら⁷⁾によって開発された粒子法の一つであるMPS法(Moving Particle Semi-implicit method)を用いる. 本研究で用いるMPS法プログラムは著者らが独自に作成したものであり, 水槽実験や理論解との比較によって計算精度の検証を行い, その適用性を確認している.²⁾⁻⁵⁾具体的な離散化および各モデル化については越塚らの論文⁷⁾および著者らの論文²⁾⁻⁵⁾に詳細が記載されているため本報では割愛する. ただし, 岸壁係留船舶の斜波中の挙動においては, 縦波・横波中に比べてYaw, Rollの回転運動が顕著になることが予想される. そこで, 本研究では剛体の回転運動のアルゴリズム²⁾に既存の回転行列ではなく, クォータニオン⁸⁾を用いる.

浮体モデルは粒子の連続体として流体と相互作用させ

つ, 剛体として運動させる. まず, N 個の粒子で表された重心座標 r_g , 初期状態における慣性テンソル I_0 を式(1), 式(2)のように求める. このとき, 粒子 i の座標を r_i とする.

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (1)$$

$$I_0 = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に, 剛体粒子間の相対位置関係をもとの形状に戻す. ただし, 剛体の重心の座標変化量 r'_g と, 回転角変化量(時計回りを正とする) θ' は保たれるようにする.

$$\hat{r}'_i = \hat{r}_i^{k+1} - r_i^k \quad (3)$$

$$\hat{r}'_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{r}_i^{k+1} \quad (4)$$

$$\hat{r}'_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{r}_i' \quad (5)$$

$$\hat{\theta}' = I(t)^{-1} \sum_{i=1}^N m \hat{r}_i' \times (\hat{r}_i^k - \hat{r}_g^{k+1}) \quad (6)$$

ここで k はMPS法の半陰的解法における仮の時刻, $k+1$ は新しい時刻を表わしている. 式(6)の m は剛体の質量, $I(t)^{-1}$ は任意の時刻 t における慣性テンソル $I(t)$ の逆行列であり, I_0 および回転行列 R_1 を用いて式(7)のように表わされる.

$$I(t)^{-1} = R_1(\vec{q}) I_0^{-1} R_1(\vec{q})^T \quad (7)$$

ここで, R_1 はクォータニオン $q=(s; v_x, v_y, v_z)$ を用いて式(8)のように変換される. なお, v は剛体の並進速度である.

$$R_1(\vec{q}) = \begin{pmatrix} 1-2v_y^2-2v_z^2 & 2v_x v_y - 2sv_z & 2v_x v_z + 2sv_y \\ 2v_x v_y + 2sv_z & 1-2v_x^2-2v_z^2 & 2v_y v_z - 2sv_x \\ 2v_x v_z - 2sv_y & 2v_y v_z + 2sv_x & 1-2v_x^2-2v_y^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(7)で得られた $I(t)^{-1}$ を式(6)に代入することで角変化量ベクトル $\hat{\theta}'$ が得られる.

以上により, 剛体の回転角絶対値 $\theta=|\hat{\theta}'|$ および回転軸 $\vec{a}=\hat{\theta}'/\theta$ が求められ, 剛体粒子の速度および位置修正は式(9)を用いて行われる. ここで, $R_2(\vec{a}, \theta)$ は任意の単位ベクトル $\vec{a}$ まわりに θ 回転する回転行列である.

$$\vec{r}'_i = \vec{r}'_g + R_2(\vec{a}, \theta) [\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^k] \quad (9)$$

3. 入射角度の違いが岸壁係留船舶に及ぼす影響

3.1 数値シミュレーション概要

3次元 MPS 法プログラムを用いて、津波の入射角度が異なる場合の津波来襲時の係留索の破断の性状について検討を行う。津波の入射角度は45度の斜波を対象とするが、前報¹⁾と異なり浮体運動モデルにクォータニオンを用いていることから横波、縦波についても再度検討を行うこととする。

船舶の諸元を Fig. 1, Fig. 2, Table 1 に示す。本報では、中型の船舶として 3,000DWT のコンテナ船を対象とする。計算領域の諸元を Fig. 3～Fig. 6 に示す。横波時の計算領域は Fig. 3, Fig. 4 のように海域を長さ 300m、奥行き 100m、陸域を長さ 100m、奥行き 100m とする。縦波時の計算領域は Fig. 5 のように岸壁端部から沖側を長さ 60m、造波境界から船尾までの距離を 300m、船首から境界端部までを 300m とする。斜波時の計算領域は Fig. 6 のように造波境界から 300m 後方に造波境界に対して 45 度の角度で設置した岸壁の奥行き方向先端部が位置している。計算領域の奥行きは 100m、陸域を長さ 100m とする。なお、すべての計算領域において、水深は 10m、岸壁高さは 12m とする。船舶と岸壁の間の防舷材部分は、Fig. 1, Table 1 に示すように直径 1.0m の剛体粒子で表現し、10m 間隔で岸壁上面から 1.0m の位置に配置する。ただし、本報では完全剛体粒子として計算しており、実際の防舷材が持つゴム弾性や摩擦は考慮していない。

係留索の諸元を Fig. 2, Table 2 に示す。係留索には、線形ばねによる拘束条件³⁾を用いる。Fig. 2 のように、船舶はヘッドライン Line 1 およびスターンライン Line 4、フォアスプリング Line 2 およびアフトスプリング Line 3、フォアブレストライン Line 5、アフトブレストライン Line 6 を用いて係留されている。係留索の材質は、海上安全技術研究所の報告書⁹⁾を参考にポリアミド系（ナイロン）エイトローブを模擬し、索径は 60mm とする。係留索の本数は、Line 1, Line 4 を 4 本ずつ、それ以外を 2 本ずつとする。係留索の本数は、各係留点間のばね定数をそれぞれ係留索の本数倍することによって表現する。なお、係留索 Table 2 に示す係留索長さ以下の場合、拘束条件は作用しない。1 本あたりの係留索の破断荷重は 603kN とする。係留索の破断は、張力が破断荷重を超えた時点で、それ以降張力が作用しなくなるとする。

模擬津波には前報でも用いた孤立波に加えて、より高い水位の継続時間が長く、より津波に近い性質を持つ段波を用いる。Fig. 7 に孤立波の水面変位を、Fig. 8 に段波の水面変位および水平流速を示す。水面変位および水平流速は、船舶と岸壁を設置しない矩形水槽内における造波境界から 200m 前方の位置で計測されている。孤立波の波高については、前報より波高 5.0m を超えると一部の係留索の破断が発生し、波高 6.0m 以上となると係留索の破断とともに岸壁へ乗り揚がることを確認されている。このことから、孤立波の波高を 5.0m, 6.0m とする。孤立波の最大流速は波高 5.0m の場合が

5.3m/s、波高 6.0m の場合が 6.2m/s となっている。段波は 6.0m の孤立波を 3 波連続して造波することによって表現する。段波の津波高は、第 1 波が 5.7m、第 2 波が 6.3m、第 3 波が 7.3m となっている。この時の水平流速は約 6.0m/s である。

Fig. 1 Calculation arrangement of vessel from elevation view.

Fig. 2 Calculation arrangement of vessel from plan view.

Table 1 Calculation conditions of vessel.

DWT	3,000
Displacement [t]	2,937.2
Particle numbers of vessel [number]	10,429
Density of structure's particles [kg/m ³]	474.5
Particle distance [m]	1.0
Length overall (L) [m]	88.0
Molded breadth (B) [m]	13.0
Molded depth (D) [m]	10.0
Molded draft (d) [m]	5.0
Water depth (h) [m]	10.0
Crown height (H) [m]	2.0
Clearance (b) [m]	1.0
Fender diameter (f) [m]	1.0

Fig. 3 Calculation setup system in transverse wave from plan view.

Fig. 4 Calculation setup system in transverse wave from elevation view.

Fig. 5 Calculation setup system in longitudinal wave.

Fig. 6 Calculation setup system in oblique wave.

Table 2 Calculation conditions of mooring tethers.

Tether type	Polyamide
Tether diameter [mm]	60
Mass per unit length [kg/m]	2.24
Allowable tensile stress [kN/m ²]	75.4
Stretch rate [%]	13
Breaking force [kN]	603
Spring constant of Line 1, 4 [kN/m]	30.9
Spring constant of Line 2, 3 [kN/m]	99.4
Spring constant of Line 5, 6 [kN/m]	102.5
Length of Line 1, 4 [m]	18.6
Length of Line 2, 3 [m]	5.2
Length of Line 5, 6 [m]	4.2
Number of Line 1, 4	4
Number of Line 2, 3, 5, 6	2

Fig. 7 Water elevations (Solitary wave).

Fig. 8 Water elevation and flow velocity (Bore).

3.2 結果および考察

Table 3 は入射波角度ごとの各係留索の破断の有無をまとめたものである。○印は係留索の破断がなかった場合、×印は破断があった場合を示している。Table 4 は横波および斜波入射時の船舶の岸壁への乗り揚げの有無についてまとめたものである。○印は乗り揚げが発生しなかった場合、×印は乗り揚げが発生した場合、△印は一部岸壁端部に乗り揚げものの海域に落下し、陸域への漂流には至らなかったケースを表わしている。Fig. 9 は段波が横波で入射した場合のシミュレーション結果のスナップショットである。Fig. 10 は段波が縦波で入射した場合のシミュレーション結果のスナップショットである。Fig. 11 は段波が斜波で入射した場合のシミュレーション結果のスナップショットである。

Table 3 より、入射波高 5.0m の場合、入射角度や入射波形にかかわらず、短い係留索 Line 2, 3, 5, 6 はすべて破断していることが確認できる。それに対して長い係留索 Line 1, 4 は、孤立波 5.0m の場合は入射角度が異なっても破断には至らないことが確認できる。しかしながら、孤立波 6.0m の場合、横波および斜波入射時は Line 1, 4 とともに破断には至らず、さらに Table 4 より斜波入射時は横波入射時よりも被害の程度が小さいことが確認できる。ただし、縦波入射時は波下側の Line 1 以外の係留索がすべて破断している。これは、Line 1~6 の係留索はそれぞれ係留索の張られる向きによって伸びる係留索と弛む係留索があることが原因として挙げられる。縦波入射後まもなく短い係留索が破断し、Line 1, 4 のみ残るが、その際、波上側の Line 4 が伸び、波下側の Line 1 は弛む。そのため、一か所の係留のみで津波に耐えている状況となるため、波上側の Line 4 が破断する。Line 1 のみ破断せずに残る理由としては、孤立波の波長が船長とほぼ同じ長さであるため、Line 1 が破断に至る前に入射波が船体を通過するためであると考えられる。そこで段波の結果を見てみると、入射角度にかかわらずすべての係留索が破断していることが確認できる。横波入射時は乗り揚げりとともにすべての係留索が破断し、Fig. 9 のようにそのまま押し流されていることが確認できる。縦波入射時は Fig. 10 のように段波の入射とともに押し流され、すべての係留索が破断し漂流する。斜波入射時は Fig. 11 から、船首側から乗り揚げり、そのまますべての係留索の破断に伴い、入射波方向に対して 0 度に

なるまで回転した後、漂流する様子が確認されている。このように、第一波がほぼ同じ波高・流速であっても、より水位の継続時間の長い段波になると係留索がすべて破断してしまうことから、係留索の破断および岸壁への乗り揚げには水位の継続時間が大きく影響していると考えられる。ただし、本研究では防舷材―船体間の弾性影響や摩擦を考慮していないため、これらの結果はより安全側に評価されている可能性もあると考えられる。そのため、今後は水位の継続時間および防舷材の影響について検討を行う必要があると考えられる。なお、本報では浮体運動モデルにクォータニオンを用いているが、前報¹⁾で同様のシミュレーションを行っている縦波、横波入射時ともに3次元回転行列を用いた前報の結果と大きな違いはなかったことが確認されている。

Table 3 Chart of break of mooring tethers.

Incident angle	Mooring tether	Solitary wave (5m)	Solitary wave (6m)	Bore
Transverse wave (90 degrees)	Line 1	○	○	×
	Line 4	○	○	×
	Line 2,3,5,6	×	×	×
Longitudinal wave (0 degrees)	Line 1	○	○	×
	Line 4	○	×	×
	Line 2,3,5,6	×	×	×
Oblique wave (45 degrees)	Line 1	○	○	×
	Line 4	○	○	×
	Line 2,3,5,6	×	×	×

Table 4 Chart of tsunami damage.

Incident angle	Solitary wave (5m)	Solitary wave (6m)	Bore
Transverse wave (90 degrees)	△	×	×
Longitudinal wave (0 degrees)	-	-	-
Oblique wave (45 degrees)	○	△	×

a) Time = 42 sec.

b) Time = 60 sec.

Fig. 9 Snapshots of simulation result (Bore, Transverse wave).

a) Time = 47.5 sec.

b) Time = 80 sec.

Fig. 10 Snapshots of simulation result (Bore, Longitudinal wave).

a) Time = 60 sec.

b) Time = 64 sec.

Fig. 11 Snapshots of simulation result (Bore, Oblique wave).

4. 縦波に対する効果的な係留方法の検討

4.1 数値シミュレーション概要

前報¹⁾より、縦波の孤立波に対しては波高 6.0m の場合、2本の増しもやいで防災・減災が可能であることが確認されているが、前章の検討から段波のように高い水位の継続時間が長い場合、より多くの本数の増しもやいが必要になると考えられる。そこで前報および前章を基に、Fig. 8 の段波を用いて、縦波に対するより効果的な係留方法について検討を行う。縦波に対して係留索によって防災・減災対策を行う場合は、①係留索をなるべく長く取ること、②係留索全体のばね定数をできるだけ大きくかつ、等しくすること、③係留索と岸壁のなす角度をなるべく小さくすることが重要であると考えられる。そこで係留索を以下のように設定し検討を行う。この時、船舶および岸壁の諸元は前章の縦波時と同様である。

係留索は、前章と同様の通常の係留状態 (Type 1)、Type 1 に対して増しもやいを行う状態 (Type 2)、係留索を長く取れるよう係留索の取り方を改良した状態 (Type 3) の3タ

イブについて検討を行う。係留索の材質は前章と同じポリアミド系エイトロープとする。係留索は、ヘッドライン Line 1a, 1b およびスターンライン Line 4a, 4b, フォアスプリング Line 2a, 2b およびアフトスプリング Line 3a, 3b, フォアブレストライン Line 5a, 5b, アフトブレストライン Line 6a, 6b とする。係留状態および係留索の諸元は Fig. 12, Fig. 13, Table 5 のようになっている。先に述べたとおり、係留索の破断を防ぐためには、係留索を長く取り、さらに全体のばね定数をできるだけ等しくする必要がある。しかしながら、係留索を長く取るとばね定数は小さくなる。Type 1 の索径は 60mm であるが、Table 5 から、Type 1 の Line 1a, 4a と Line 2a, 3a を比較すると係留索の長さが 3 倍程度長くなると、ばね定数も 3 倍近く小さくなることが確認できる。前報での検討より、波高 6.0m の孤立波では Type 2 のように 2 本の増しもやいで長い係留索の破断を防げることが確認されている。そこで Type 3 では、すべての係留索を Type 1 の Line 1a, 4a に増しもやい 2 本を追加したばね定数に相当するようばね定数を設定する。そして、係留索と岸壁のなす角度を小さくしながら Type 1 に比べて係留索を最低でも 1.5 倍程度長く取ることができるような係留索の張り方として、Fig. 13 のような係留方法を提案する。この時、Type 3 ではばね定数を大きく保つために索径 100mm の係留索を用いる必要がある。係留索の本数は、Type 1 では、Line 1a, Line 4a を 4 本ずつ、それ以外を 2 本ずつとする。Type 2 では、前報で波高 6.0m の孤立波に対して効果が確認されている増しもやいの本数として、Type 1 の Line 1a~6a それぞれの係留索に対して 2 本ずつ増しもやいを行う。Type 3 では、Line 1b~6b すべて 2 本ずつとする。Table 5 に示すように、Type 3 の係留索はその長さに対してばね定数が大きく、例えば Line 1b, 4b はそれぞれ 2 本で 191kN/m となっている。これは Type 2 の Line 1a, 4a を 6 本とした時の 185.4kN/m を上回っている。係留索の破断荷重は Table 5 に示すように、索径 60mm で 603kN、索径 100mm で 1,540kN とする。

Fig. 12 Calculation arrangement of mooring system (Type 1, Type 2).

Fig. 13 Calculation arrangement of mooring system (Type 3).

Table 5 Calculation conditions of mooring tethers.

Tether type	Polyamide	
Tether diameter [mm]	60	100
Mass per unit length [kg/m]	2.24	6.05
Allowable tensile stress [kN/m ²]	75.4	192.5
Stretch rate [%]	13	7
Breaking force [kN]	603	1540
Initial mooring system (Type 1)		
Length of Line 1a, 4a [m]	18.6	
Length of Line 2a, 3a [m]	5.2	
Length of Line 5a, 6a [m]	4.2	
Spring constant of Line 1a, 4a [kN/m]	30.9	
Spring constant of Line 2a, 3a [kN/m]	99.4	
Spring constant of Line 5a, 6a [kN/m]	102.5	
Number of Line 1a, 4a	4	
Number of Line 2a, 3a, 5a, 6a	2	
Install more mooring tethers (Type 2)		
Number of Line 1a, 4a	6	
Number of Line 2a, 3a, 5a, 6a	4	
Tsunami protection mooring system (Type 3)		
Length of Line 1b, 4b [m]	28.8	
Length of Line 2b, 3b [m]	31.4	
Length of Line 5b [m]	30.5	
Length of Line 6b [m]	25.6	
Spring constant of Line 1b, 4b [kN/m]	95.5	
Spring constant of Line 2b, 3b [kN/m]	87.6	
Spring constant of Line 5b [kN/m]	90.2	
Spring constant of Line 6b [kN/m]	107.4	
Number of Line 1b to 6b	2	

4.2 数値シミュレーション結果および考察

Fig. 14 は、Type 1~Type 3 の船舶の鉛直変位の時刻歴を比較したグラフである。横軸は時間、縦軸は鉛直変位を船舶の深さ D で無次元化したものである。Fig. 15 は、Type 1~Type 3 の船舶の水平変位の時刻歴を比較したグラフである。横軸は時間、縦軸は水平変位を船長 L で無次元化したものである。Fig. 16, Fig. 17 は、Type 1~Type 3 の船舶の水平移動速度を比較したグラフである。横軸は時間、縦軸は船舶の水平移動速度 V_s を段波の最大流速 V_H で無次元化したものである。Fig. 17 は、Fig. 16 の 40 秒~48 秒の間を拡大して示したグラフである。Table 6 は Type 1~3 の係留索の破断の有無を示したものである。Fig. 18, Fig. 19 は、それぞれ Type 2, Type 3 の結果のスナップショットである。

まず、鉛直変位では Fig. 14 から確認できるように Type 1~3 の結果に大きな違いは見られない。水平変位では、Fig. 15, Fig. 19, Table 6 から、Type 3 によって係留された場合は押し流されることはなく、係留索の破断も発生しないことが確認できる。それに対して、Type 1, Type 2 では Fig. 15, Fig. 18 に示すように大きく船首方向に押し流されていることが確認できる。この時、Type 1, Type 2 の係留索は Table 6 に示すように最終的にすべて破断している。また、Type 2 は増し

もやいによってばね定数を大きくしているにもかかわらず、Type 1 より船首方向に押し流されていることが確認できる。そこで、Fig. 16 を部分的に拡大した Fig. 17 の水平移動速度を見てみると、Type 2 の場合、模擬津波入射後、水平移動速度が 45 秒付近で僅かに低下し、その後再び上昇していく。その際、係留索は 50 秒付近で短い係留索がすべて破断し、60 秒付近で Line 1a が破断することが確認されている。増しもやいを行った Type 2 が Type 1 より船首方向に押し流される原因としては、Type 2 の方が Type 1 より拘束力が強いいため、それらが失われた際、Type 1 に比べて押し流される速度が速くなったと考えられる。また、増しもやいを行っている Type 2 の係留索がすべて破断し漂流する要因としては、水位の継続時間に加えて全体の係留索の長さと第一波の波荷重が考えられる。Fig. 15 から、Type 3 においては第一波の入射に伴い、船舶は最大 7.5m 程度押し流されている。この時、Type 3 においてはすべての係留索が 7.5m 程度押し流されても破断しないよう十分な長さが取られているが、Type 2 の場合は第一波の入射に伴い、7.5m 程度押し流される間に短い係留索がすべて破断してしまう。そのため、第二波入射時には全体の係留索張力が小さくなってしまい、係留索の破断が発生したと考えられる。本結果から、本研究で提案する Type 3 の有効性が確認されたとともに、第一波の波荷重に耐えることができるように係留索全体のばね定数と係留索長さを等しくすることの重要性が示されたと考えられる。

Fig. 14 Comparison of vertical displacement of vessels.

Fig. 15 Comparison of horizontal displacement of vessels.

Fig. 16 Comparison of horizontal velocity of vessels.

Fig. 17 Comparison of horizontal velocity of vessels of enlarged view.

Table 6 Chart of break of mooring tethers.

Mooring type	Mooring tether		
	Line 1a	Line 4a	Line 2a,3a,5a,6a
Type 1	×	×	×
Type 2	×	×	×
Mooring type	Line 1b	Line 4b	Line 2b,3b,5b,6b
	○	○	○

a) Time = 47.5 sec.

b) Time = 80 sec.

Fig. 18 Snapshots of simulation result in Type 2.

a) Time = 53 sec.

b) Time = 80 sec.

Fig. 19 Snapshots of simulation result in Type 3.

5. 結 言

本研究によって、以下のような知見を得た。

- (1) 前報¹⁾で検討を行った縦波、横波に加えて、斜波を用いて岸壁係留船舶の津波中被害の性状について検討を行った。その結果、斜波入射時は横波入射時に比べて岸壁への乗り揚げ被害の程度が小さくなる傾向にあることがわかった。このことから、横波と斜波では、横波の方が船舶の乗り揚げに対して、より危険な状況であるということが出来る。
- (2) 模擬津波として前報でも用いている孤立波と、高い水位の継続時間の長い段波を用いて岸壁係留船舶の津波中被害の性状について検討を行った。その結果から、船舶の津波被害は段波のように水位の継続時間が長い方が大きくなることがわかった。そのため、津波の防災・減災対策を検討する際にはより水位の継続時間の長い模擬津波を用いて検討を行う必要がある。
- (3) 剛体の回転運動のアルゴリズムにクォータニオンを適用した。それにより、斜波入射時の浮体挙動を詳細にシミュレーション可能となった。この時、3次元回転行列を用いた前報の結果と比べても、縦波時、横波時の係留索の破断や漂流挙動はアルゴリズムによって大きな違いは発生しないことを確認することができた。
- (4) 縦波対策用に係留索を長く取るとともに、全体のばね定数をできるだけ大きくかつ等しくし、さらに係留索と岸壁のなす角度を小さくできる係留方法を提案し、その有効性を検討した。それによって、通常時や増しもやい対策では係留索が破断してしまう段波のような水位の継続時間が長い津波であっても、船舶の漂流を防ぐことができることを示すことができた。
- (5) 本研究から、係留索は津波の第一波入射時の波荷重に耐えることができるように係留索全体のばね定数と係留索長さを設定することが重要であることがわかった。

今後は、大きさの異なる船舶についての検討を行っていく予定である。また、水位の継続時間や第一波到達時の波荷重が岸壁係留船舶の津波被害に与える影響について更なる検討を行っていく必要がある。さらに、防舷材が船体挙動に与える影響についても検討を行っていく必要がある。

なお、次報では本報では検討していない横波に対するより効果的な津波防災・減災対策として、著者ら²⁾が提案する浮体式津波対策用岸壁の有効性について報告する予定である。

謝 辞

本研究成果の一部は、一般財団法人みなと総合研究財団「平成 27 年度 未来のみなとづくり助成(調査研究助成)」によって行われたことを付記いたします。

参 考 文 献

- 1) 増田光弘, 南清和, 増田光一, 居駒知樹: 増しもやいによる岸壁係留船舶の津波防災対策に関する研究(その 1), 日本船舶海洋工学会論文集, 第 19 号, pp.61-68, 2014.
- 2) Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA and Kuniaki SHOJI: Behavior of a Pontoon Supported by a Mooring Dolphin in a Tsunami (First Report), Journal of OMAE, Vol. 135, No. 2, pp.021102-1-7, 2013.
- 3) 増田光弘, 笹原裕太郎, 南清和, 増田光一: 係留浮体の波浪中応答解析に対する MPS 法の適用性に関する研究, 日本航海学会論文集, 127 号, pp.51-56, 2012.
- 4) 増田光弘, 増田光一, 居駒知樹, 庄司邦昭: 津波によって岸壁に乗り上がった浮体による衝突力に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 12 号, pp.101-106, 2011.
- 5) 増田光弘, 居駒知樹, 増田光一, 前田久明, 小林昭男: 2 次元 MPS 法による岸壁近傍に設置された浮体式構造物の津波中挙動解析に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 9 号, pp.37-44, 2009.
- 6) 増田光一, 居駒知樹, 樋口直人, 村田一城: MPS 法による津波中の岸壁係留された浮体式構造物の挙動特性に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号, pp.65-68, 2012.
- 7) Seiichi KOSHIZUKA, Atsushi NODA and Yoshiaki OKA: Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, Int. J. Numer. Mech. Fluids, 26, pp.751-769, 1998.
- 8) 小笠原敏紀・菊池重友・砂川透吾・堺茂樹: MPS 法による固液間の相互作用を考慮した 3 次元流体-剛体 連成解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.41-45, 2010.
- 9) 原正一, 谷澤克治, 山川賢次, 星野邦弘, 湯川和浩, 他: 荒天化における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 4 巻, 第 2 号, pp.269-287, 2004.