津波来襲時における岸壁に係留された船舶の 防災・減災対策に関する研究（その 1）

増田 光弘*・南 清和**・増田 光一***

A Study on Damage Control of Vessels Moored to the Wharf in Tsunamis (Part 1)

Mitsuhiro MASUDA, Kiyokazu MINAMI and Koichi MASUDA

Abstract

When the tsunami attacks in harbors, the vessels moored at a wharf may be unable to be evacuated. For example, it may happen the situations that the vessel is under cargo handling, the vessel has no crew or only foreign crew without knowledge of tsunami. In such a case, the following damages are assumed; breaking the mooring tether, grounding on a wharf, drifting to land areas and destroying buildings. This present paper describes the tsunami simulation and the motion analysis of vessel moored at a wharf using the MPS method (Moving Particle Semi-implicit method).

In this research, the 3D-MPS method is applied. The chart of mooring tether break was created. The wave height of tsunami and the relation of the break of the mooring tether were shown by the chart of mooring tether break. Then, the chart of mooring tether break is proposed for various scale of tsunami including the effect of incident angle of the mooring tether can be easily estimated against to the scale of tsunami and mooring system.

Keywords : Ocean engineering, Tsunami, Moored vessel, Chart of mooring tether break, MPS method

キーワード: 海洋工学, 津波, 係留船舶, 係留索破断チャート, MPS 法

1. 緒言

津波来襲時、荷役作業中の船舶や船員不在の船舶、津波に対する知識の乏しい外国船などは、緊急離棧し、安全な海域に避航することができない可能性がある。そのような場合、係留索の破断に伴う岸壁への乗り揚げりや漂流、他船や陸域の建築物との衝突などの被害が発生することが想定される。そのため、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。

岸壁に係留された船舶の津波対策としては、増しもやいや増し錨、津波対策用岸壁などが考えら

れる。ただし、増し錨は通常航海時における錨や錨鎖、揚錨機が必要とする場所と重量、津波来襲時に要する揚投錨の作業時間などについて、事前に検討しておく必要がある。また、岸壁係留船舶の場合、錨および錨鎖が十分に機能しない可能性も考えられる。津波対策用岸壁は津波来襲に備えて岸壁そのものを改修する方法だが、そのためには膨大な費用と港湾機能の変更が必要であり、現実的な対策とは言い難い。その点、増しもやいは、係留索を本船側・陸上側のどちらで用意するのか、綱取りボートや要員の確保・安全性などについて事前に検討しておく必要があるが、上述した対策

* 正会員 東京海洋大学大学院海洋工学系 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) masuda@kaiyodai.ac.jp

** 正会員 東京海洋大学大学院海洋工学系 minami@kaiyodai.ac.jp

*** 非会員 日本大学理工学部 masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

に比べて実現可能性が高いと考えられる。

著者ら^{1), 2), 3)}は、増しもやいによる津波対策に着目し、前報¹⁾において 3,000DWT の船舶を一例として津波高の違いが係留索の破断に与える影響および係留索の本数、索径、係留状態の違いが係留索の破断に与える影響についての検討を行い、それぞれに対する評価手法の一例を示した。ただし、前報およびこれまでの研究^{2), 3)}では船舶の岸壁への乗り揚げりを中心に検討を行ってきたため、津波の入射角度の違いが係留索の破断に与える影響について詳細な検討は行っていない。

本研究は、岸壁に係留された船舶を対象として、上述したような津波対策の有効性について検討を行うとともに、新たな津波対策を提案することによって津波来襲時の岸壁係留船舶の防災・減災対策に寄与することを目的としている。本報では、前報で提示した岸壁に係留された船舶の津波による係留索破断に関する評価手法を用いて、前報と同様に 3,000DWT の船舶を対象として津波の入射角度の違いが係留索の破断に与える影響について検討を行う。そして、津波の入射角度が前報で示した増しもやいによる津波対策に与える影響を明確にすることを本報の目的とする。

2. 数値計算手法

本研究では、検討手法として MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いた。MPS 法は、越塚ら⁴⁾によって開発された粒子法であり、各微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて粒子によって構成される連続体の支配方程式を離散化する手法である。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、その適用性は確認されている。³⁾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⁴⁾および著者らの論文^{3), 5)}に詳細が記載されているため割愛するが、本報において重要となる係留索のモデル化の手法については次章に記す。

3. 係留索モデル

本研究では、係留索を模擬した拘束条件を浮体モデルの係留点と岸壁上の係留点との 2 点間に作用するばね条件として表現した。本手法は著者らが考案した MPS 法における係留索影響を考慮する一手法であり、著者らの既存の研究⁹⁾においてその計算精度は確認されている。

Fig. 1 に示すように係留索を模擬した拘束条件

を浮体モデルの係留点と岸壁上の係留点との 2 点間に線形ばね条件を導入した。線形ばね条件は、式(1)のように係留力 F_r をばね定数 k および係留点間の距離 r によって表すことができる。そして、式(2)のように MPS 法の半陰的なアルゴリズムにおける陰的な圧力勾配項 ∇P^{k+1} によって生じる速度の修正量 $\vec{u}'_i$ である運動方程式に、係留力 F_r を付加することで係留状態をモデル化した。この時、 m_i は係留する物体を構成する粒子の体積である。本係留力は係留点とした浮体モデルの任意の粒子 i のみに付加する。係留力は式(3)～(5)のように x 、 y 、 z 方向成分に分解し、式(6)～(8)のように各方向の速度の修正量に付加する。

$$F_r = kr = k \cdot \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} \quad (1)$$

$$\vec{u}'_i = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla P_i^{k+1} + \frac{\Delta t}{m_i} F_r \quad (2)$$

$$F_x = F_r \cos \theta \quad (3)$$

$$F_y = F_r \sin \theta \quad (4)$$

$$F_z = F_r \tan \theta \quad (5)$$

$$\rho_0 \frac{d\vec{u}'_i}{dx} = \frac{dP_i^{k+1}}{dx} - \frac{dF_r}{dx} \quad (6)$$

$$\rho_0 \frac{d\vec{u}'_i}{dy} = \frac{dP_i^{k+1}}{dy} - \frac{dF_r}{dy} \quad (7)$$

$$\rho_0 \frac{d\vec{u}'_i}{dz} = \frac{dP_i^{k+1}}{dz} - \frac{dF_r}{dz} \quad (8)$$

Fig. 1 Mooring system of three dimensions

4. 数値シミュレーション

4.1 シミュレーション概要

前報¹⁾では、3,000DWTの船舶を対象に船首尾方向に対して90度から津波が入射した場合を想定して係留索の本数および索径の違いが係留索の破断に与える影響について検討を行った。本報では、津波の入射角度が90度のケースと0度のケースについて検討を行い、津波の入射角度の違いが係留索に与える影響について検討を行った。なお、船首尾方向に対して90度から津波を入射させるケースを90度入射、船尾方向に対して0度から津波を入射させるケースを0度入射と表記する。シミュレーションのスケールは1/100とした。

90度入射の計算領域は、海域を長さ300m、奥行き100m、陸域を長さ100m、奥行き100mとした。0度入射の計算領域は、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とした。どちらも水深を10m、岸壁の高さを12mとした。本論文では、前報の結果に対して入射角度の違いが与える影響を調査するために前報と同様に3,000DWTの船舶を対象とし、積荷の状態は半載状態、喫水5mとした。0度入射では入船の状態で係留されており、船尾から津波が入射することとした。船舶の諸元はFig. 2～Fig. 5、Table 1のようになっている。

本報では、船舶をヘッドライン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、フォアプレストラインLine 5、アフトプレストラインLine 6によって係留した。係留状態および係留索の諸元はFig. 2、Fig. 3、Table 2、Table 3のようになっている。係留索の材質はナイロンとし、索径の初期条件は60mmとした。Table 3の各係留索のばね定数と破断荷重は係留索1本分のばね定数と破断

荷重であり、独立行政法人海上安全技術研究所の資料⁶⁾を参考にして算出した。係留索の本数は、各係留索に複数本分のばね定数を与えることで表現した。初期条件では、係留索Line 1、Line 4を4本、Line 2、Line 3、Line 5、Line 6を2本とし、破断が確認された場合、それぞれに一本ずつ係留索を増やしていった。係留索は、それぞれの本数分の破断荷重もしくは破断時伸び率50%を超えた時点で破断するよう設定し、係留点間の距離が係留索長さ以上になるまで係留索張力は作用しないとした。係留索は、本来非線形な変位復元力特性を考慮する必要があるが、本報では非線形性は考慮されていない。ただし、本研究で扱う模擬津波は孤立波であることから、浮体応答および係留索張力はそれほど非線形性が強くないとし、第3章の係留索モデルを適用した。

防舷材は直径1.0mの粒子一つで表現し、Fig. 2、Fig. 3、Table 1のように10m間隔で岸壁上面から1.0mの位置に配置した。なお、本報では防舷材粒子の連続の式にのみ圧縮性の項を導入することにより、疑似的に圧縮性の効果を持たせているが、ゴム弾性および摩擦は考慮していない。

本シミュレーションでは、長時間津波が流入する過程における係留索の破断や船舶の乗り揚げではなく、津波の第一波到達時における係留索の破断および船舶の乗り揚げを対象としてシミュレーションを行った。模擬津波の諸元をTable 4に示す。造波境界にはピストン式造波板を用いた。模擬津波は孤立波とし、水槽実験から得られた流速を用いて造波した。Table 4の入射波高および流速は、90度入射の場合の岸壁手前100mの位置の最大波高および最大流速である。例としてCase 5の入射波高および流速をFig. 6に示す。

Fig. 2 Calculation arrangement (x-y)

Fig. 3 Calculation arrangement (x-z)

Fig. 4 Calculation setup system of 90 degree

Fig. 5 Calculation setup system of 0 degree

Table 1 Calculation conditions of vessel

DWT at full load condition [t]	3,000
Displacement [t]	2,937.20
Particle numbers	623,671
Particle numbers of structure	10,429
Density of structure's particles [kg/m ³]	474.5
Particle distance [m]	1.0
Ship length over all (L) [m]	88.0
Ship breadth (molded) (B) [m]	13.0
Ship depth (molded) (D) [m]	10.0
Ship draft (molded) (d) [m]	5.0
Water depth (h) [m]	10.0
Crown height (H ₁) [m]	2.0
Crown to fender (H ₂) [m]	1.0
Clearance (b) [m]	1.0
Fender diameter (f) [m]	1.0
Distance between fenders (c) [m]	10.0

Table 2 Calculation conditions of mooring system

Basic point of vessel (n ₁) [m]	1.0
Basic point of vessel (n ₂) [m]	2.0
Basic point of wharf (a) [m]	1.0
Length of mooring point (x ₁) [m]	9.0
Length of mooring point (x ₂) [m]	4.0
Length of mooring point (x ₃) [m]	5.0
Breadth of mooring point (y ₁) [m]	4.0
Breadth of mooring point (y ₂) [m]	3.0
Breadth of mooring point (y ₃) [m]	6.0
Depth of mooring point (z ₁) [m]	4.0
Depth of mooring point (z ₂) [m]	4.0
Depth of mooring point (z ₃) [m]	4.0
Distance of mooring point (r ₁) [m]	11.53
Distance of mooring point (r ₂) [m]	6.4
Distance of mooring point (r ₃) [m]	6.4

Table 3 Calculation conditions of mooring tether

Tether type	Nylon
Tether diameter [mm]	60.0
Cross section [mm ²]	2826.0
Tether mass [kg/m]	2.24
Tensile load [kN]	603.0
Tension [kN/m ²]	60.3
Stretch rate [%]	11
Stretch rate at tether's break [%]	50
Length of Lines to r ₁₋₃ [%]	10
Length of Line 1, Line 4 [m]	12.69
Length of Line 2, Line 3 [m]	7.04
Length of Line 5, Line 6 [m]	7.04
Spring constant of Line 1, Line 4 [kN/m]	41.73
Spring constant of Line 2, Line 3 [kN/m]	82.09
Spring constant of Line 5, Line 6 [kN/m]	82.09
Breaking force [kN]	1704.08
Number of Line 1, Line 4	4
Number of Line 2, Line 3	2
Number of Line 5, Line 6	2

Table 4 Calculation conditions of incident wave

	Wave height [m]	Flow velocity [m/s]
Case 1	1.90	2.56
Case 2	2.96	3.28
Case 3	4.04	3.72
Case 4	5.07	5.30
Case 5	6.26	6.20
Case 6	8.11	7.93
Case 7	10.04	10.05
Case 8	11.93	14.06
Case 9	14.08	20.87
Case 10	15.17	24.25

Fig. 6 Incident wave height and flow velocity of calculation (Case 5)

4.2 シミュレーション結果と考察

以下にシミュレーション結果をまとめたものを示す。Fig. 7はTable 4に示すCase 1～Case 10の津波高のうち、Case 1～Case 7までの津波による係留船舶の乗り揚げシミュレーションを行った結果を用いて作成した津波高と水平流速に対する係留索の破断チャートである。Table 5は90度入射、0度入射それぞれ係留索Line 1～Line 6の初期条件において係留索の破断が確認された模擬津波に対して、係留索の本数を増やした場合の係留索の破断の有無をCase 4～Case 6までの結果を用いてまとめたものである。Table 6は初期条件での係留索の破断に対して、係留索の本数を増やすのではなく、索径を太くした場合の係留索の破断の有無についてまとめたものである。Table 5、Table 6の○印は二か所とも係留索が破断しなかった場合、×印は係留索が二か所とも破断した場合、△印は係留索が一か所のみ破断した場合を示している。Fig. 8、Fig. 9はCase 5のとき、それぞれの係留索を2本ずつ増やした場合の90度入射のシミュレーション結果であり、Fig. 8はスナップショット、Fig. 9は係留索張力の時系列グラフである。Fig. 10、Fig. 11はCase 5のとき、それぞれの係留索を2本ずつ増やした場合の0度入射のシミュレーション結果であり、Fig. 10はスナップショット、Fig. 11は係留索張力の時系列グラフである。Fig. 9、Fig. 11の係留索張力は各係留索の自然長 l_1 、 l_2 、 l_3 からの伸びから算出し、係留点間の距離の時間的変動を確認できるようマイナスの値を残して表している。

増しもやいによる津波対策を施した場合、Table 5を見ると90度入射の場合、5.0m以下の津波に対しては初期条件の係留索の本数でも係留索が破断することはなかった。しかし、0度入射では津波高5.0mとなると、Line 1、Line 4以外の係留索はすべて破断した。これは、90度入射の場合、Fig.

8、Fig. 9から船舶が岸壁に乗り揚がる際、すべての係留索に張力がかかっているが、0度入射の場合はFig. 10、Fig. 11のように係留索が張られている向きによって張力のかかり方が異なるためだと考えられる。前報¹⁾で減災対象津波高の境界としている6.0mの津波に対しては、90度入射、0度入射ともにLine 1～Line 6それぞれに2本ずつ係留索を増やすことによって係留索の破断を防げることが確認できた。ただし、90度入射の場合はFig. 9を見てもわかるように、Line 1、Line 4は6本分の破断荷重である10224.5kNを超えることはなかったが、Line 2、Line 3、Line 5、Line 6は4本分の破断荷重6816.3kNを超えており、Line 1、Line 4以外の係留索は破断した。0度入射の場合はFig. 11を見てもわかるように、90度入射時のようにすべての係留索が同じ方向に引っ張られるわけではないため、破断しなかったのはLine 1、Line 4のみではなく、短い係留索であってもLine 5は破断せず、また船尾のLine 4には強い力がかかっていた。津波高が8.0m以上となった場合はLine 1～Line 6それぞれに6本ずつ係留索を増やしても係留索の破断を防ぐことはできなかった。このことから、津波高6.0mの津波の第一波到達時の係留索の破断については増しもやいによって防ぐことができるが、6.0mを超える津波に対しては増しもやい以外の対策を施す必要がある。

次に、Table 6のように索径を太くすることで係留索数を初期条件から変えずに係留索の破断を防ぐことを試みた。本結果から、90度入射、0度入射ともにLine 1、Line 4を85mm、Line 2、Line 3、Line 5、Line 6を100mmにすることによって、係留索数を増やすことなく6.0mの津波による係留索の破断を防ぐことができることが確認できた。

本数値シミュレーション結果から作成した初期係留条件における3,000DWTの船舶の係留索破断チャートがFig. 7である。Fig. 7の係留索破断チャートは、90度入射、0度入射ともに津波高2.0m～4.0mの範囲ではどの係留索も破断することはないが、津波高5.0mでは0度入射の場合、Line 1、Line 4以外の係留索が破断し、津波高6.0mを超えた場合は90度入射、0度入射ともにすべての係留索が破断したことを考慮して作成した。本研究では、2.0m以上5.0m未満の範囲を係留索安全エリア、6.0m以上の範囲を係留索破断エリアとし、5.0m以上6.0m未満の範囲を係留索危険エリアとした。また、岸壁に乗り揚げたケースを●印、岸壁に乗り揚げなかったケースを○印で示した。し

かし、係留索の非線形影響や防舷材の影響、津波の周期、流速によって必ずしも本研究での波高と同等の津波高であっても本係留索破断チャートが適用できるとは限らないと考えられる。ただし、船舶の乗り揚げりは久保⁷⁾が提案した水深 h 、波高 η 、水面から岸壁までの高さ a 、喫水 d から求められる浮体の乗り揚げの条件式の式(9)からわかるように、岸壁に係留された船舶の乗り揚げは津波の来襲に伴う水面の上昇の影響が非常に大きい。

$$h + \eta \geq h + a + d \quad \therefore \eta \geq a + d \quad (9)$$

また、一般的に津波の流速 V は式(10)のように水深と波高、重力加速度 g によって決まる。

$$V = \sqrt{g(h + \eta)} \quad (10)$$

よって、本研究で用いた波高および流速の範囲の津波であれば、本破断チャートは適用性があると考えられる。より一般性のあるチャートとするために、今後は式(10)に基づいた流速による検討を行う必要がある。また、係留索や防舷材の影響で各エリアの大きさが変わってくる可能性があるが、それは津波被害を過小評価することに繋がる可能性もあるため、十分に検討する必要がある。

これらの結果から、係留索の破断の対策として増しもやいを用いる場合、増しもやいを行うとともに、索径の太い係留索を用いることで係留索数をそれほど増やすことなく、係留索の破断を防ぐことができると考えられる。ただし、係留索の装備状況や係留索用設備、綱取りボートや要員の確

保・安全性などについて検討していく必要がある。

本研究から増しもやいによる津波防災・減災対策が可能な津波高は 6.0m 以下であると考えられる。よって、岸壁係留船舶の津波防災・減災対策を考える場合、5.0m 以下は防災し、6.0m 以上は減災するというように波高によって対策を分けて考える必要があると考えられる。さらに、Fig. 8 にも示されているように、90 度入射の場合は、増しもやい対策によって係留索の破断を防ぐことができても船舶が岸壁に乗り揚げってしまうことが確認されている。本報のシミュレーション結果では、6.0m を超えると浮体が岸壁に乗り揚げることが確認されている。津波高や波長によって岸壁への乗り揚げりが避けられない状況においては、増しもやい対策は船舶の流出を防ぐ以上の意味をなさないと考えられる。よって、岸壁に係留された船舶の津波被害対策は、船舶が岸壁に乗り揚げらない場合と乗り揚げる場合に分けて考える必要がある。今後は増しもやい対策では防ぎできない乗り揚げりに対する対策についても検討していく必要がある。

本報では津波の第一波到達時の係留索の破断の有無について検討したが、津波によってはより長時間にわたって流入し徐々に波高が高くなるものもある。そのような場合には津波の流入過程で係留索が破断する可能性があり、著者らの論文¹⁾においてもそのような結果が確認されている。よって、そのような状況における防災・減災対策についても検討する必要がある。また、本結果は 3,000DWT の船舶を対象としたものであるため、船種がより小さい場合、より大きい場合の検討を行う必要がある。

Fig. 7 Chart of mooring tether break

Table 5 Table of verification by the number of mooring tether

90 degree			Existence of break of mooring tether						
Number of mooring tethers (Line 1, 4, Line 2, 3 and Line 5, 6) [number]			4, 2 and 2	5, 3 and 3	6, 4 and 4	7, 5 and 5	8, 6 and 6	9, 7 and 7	10, 8 and 8
Wave height [m]	5.0	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	○	○	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	○	○	○	○	○	○	○
	6.0	Line 1, 4	×	×	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	×	○	○	○	○
	8.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×
0 degree			Existence of break of mooring tether						
Number of mooring tethers (Line 1, 4, Line 2, 3 and Line 5, 6) [number]			4, 2 and 2	5, 3 and 3	6, 4 and 4	7, 5 and 5	8, 6 and 6	9, 7 and 7	10, 8 and 8
Wave height [m]	5.0	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	○	○	○	○	○
	6.0	Line 1, 4	×	×	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	△	○	○	○	○
	8.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×

* Line 1: Head line, Line 2: Fore spring, Line 3: Aft spring, Line 4: Stern line, Line 5: Fore breast line, Line 6: Aft breast line

Table 6 Table of verification by the diameter of mooring tether

90 degree			Existence of break of mooring tether								
Mooring tether Diameter [mm]			60mm	65mm	70mm	75mm	80mm	85mm	90mm	95mm	100mm
Wave height [m]	5.0	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	6.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×	×	○
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×	×	○
	8.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×	×	×
0 degree			Existence of break of mooring tether								
Mooring tether Diameter [mm]			60mm	65mm	70mm	75mm	80mm	85mm	90mm	95mm	100mm
Wave height [m]	5.0	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	○	○	○	○
	6.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×	×	○
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×	×	○
	8.0	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×	×	×

* Line 1: Head line, Line 2: Fore spring, Line 3: Aft spring, Line 4: Stern line, Line 5: Fore breast line, Line 6: Aft breast line

Fig. 8 Snapshots of calculation result in Case 5
(90 degree, Number of mooring tethers: 6, 4 and 4)

Fig. 10 Snapshots of calculation result in Case 5
(0 degree, Number of mooring tethers: 6, 4 and 4)

Fig. 9 Comparison of mooring tether tensions of
Line 1 to 6 in Case 5
(90 degree, Number of mooring tethers: 6, 4 and 4)

Fig. 11 Comparison of mooring tether tensions of
Line 1 to 6 in Case 5
(0 degree, Number of mooring tethers: 6, 4 and 4)

5. 結言

本論文では、3,000DWTの船舶を対象に津波による岸壁に係留された船舶の係留索破断シミュレーションを行い、以下のような結論を得た。

- (1) 津波高 5.0m 以下の津波の場合、津波の入射角度が違っていても通常の係留状態で係留索の破断を免れることができることがわかった。
- (2) 津波高が 6.0m を超える場合、通常の係留状態では係留索の破断は免れないが、津波高 6.0m であれば増しもやい対策および索径の太い係留索を用いることによって係留索の破断を防ぐことができることがわかった。
- (3) 入射角度を考慮した係留索の破断状況係留索破断チャートを作成した。それによって、本条件下における津波高の違いが係留索破断に与える影響をチャートとしてまとめるとともに、評価手法の一つを提案することができた。

本報は 3,000DWT の船舶を一例としたが、今後はそれ以外の船舶についての検討を行っていく必要がある。また、流速や波長、係留索の非線形性や防舷材の影響、係留設備やオペレーションに関わる要因などについて検討する必要がある。さらに、係留索の破断だけでなく、浮体の乗り揚げも反映したチャートを作成する必要がある。

参考文献

- (1) 増田光弘・南清和・増田光一：MPS 法による津波シミュレーションと係留船舶の津波中挙動解析，日本航海学会論文集，127 号，pp. 41-49, 2012.
- (2) 増田光弘・庄司邦昭・南清和・増田光一：押し波と引き波を考慮した係留船舶の津波中挙動シミュレーションに対する MPS 法の適用，日本航海学会論文集，126 号，pp. 135-141, 2012.
- (3) 増田光弘・庄司邦昭・南清和・増田光一：MPS 法を用いた津波中の浮体による衝突力に関する研究，日本航海学会論文集，124 号，pp. 329-336, 2010.
- (4) 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.
- (5) 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.

- (6) 独立行政法人海上技術安全研究所，付録 1. ロープに関する資料¹⁾⁻¹¹⁾，2008.
- (7) 久保 雅義：防災用人的シミュレーションの研究開発，2003.
- (8) 高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・他：2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231, 2011.
- (9) (社) 日本海難防止協会：海難防止の調査研究事業報告書 一地震に伴う津波に対する安全防災対策の調査研究一，1981.

質疑応答

中村紳也（日本海洋科学）：

今回想定された津波の周波数成分（周期）はどのようなものとされたのか。また、流れについてはどのように考えられているのか、今後の研究の方針を含めてご教示ください。

増田光弘：

本報では津波の第一波到達時の係留索の破断を対象としているため、実際の津波よりも波長の短い孤立波を用いています。ただし、より長い波長の津波が流入することによる係留索の破断や岸壁への乗り揚げの可能性があり、今後検討していく必要があると考えています。しかしながら、時間的計算コストを考慮し、まずは波長の短い孤立波を用いて船種の違いや他の津波対策を施した場合などの検討を行い、その後に津波の周期や流れに着目して検討を行いたいと考えています。

高嶋恭子（東海大学）：

モデルによる津波の再現に関して、引き波についての考慮はなされているのでしょうか。

増田光弘：

前報¹⁾および著者らの既存の研究²⁾において押し波後の引き波の再現を行っています。前報では実際の津波の流入時間と波高の時間推移を考慮してシミュレーションを行っております。ただし、まだ十分な検討が行われているといえず、また引き波から始まる津波についての検討は行っておりません。押し波後の引き波および引き波から始まる津波についての検討も岸壁に係留された船舶の防災・減災対策を検討するうえで非常に重要な課題ですので、これからの研究で検討していきたいと考えています。