岸壁に係留された船舶の津波防災・減災対策に関する研究 —増しもやいによる津波対策について—

増田 光弘¹・増田 光一²・南 清和³・居駒 知樹⁴

¹正会員 東京海洋大学大学院助教 海洋工学系海事システム工学部門
(〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)
E-mail:masuda@kaiyodai.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

³東京海洋大学大学院教授 海洋工学系海事システム工学部門
(〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)
E-mail:minami@kaiyodai.ac.jp

⁴日本大学准教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:ikoma.tomoki@nihon-u.ac.jp

津波来襲時、荷役作業中の船舶や船員不在の船舶などは、緊急離浅し、安全な海域に避航できない可能性がある。そのような場合、岸壁に係留された船舶は、岸壁に係留されたまま係留索の破断や岸壁への乗り揚げり、他船や陸域の建築物などとの衝突といった津波の脅威に備えなければならない。岸壁に係留された船舶の津波対策の一つとして、増しもやい対策が考えられる。本研究では、3次元MPS法プログラムを用いて3,000DWTの船舶を一例として津波高と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い、係留索破断チャートを作成した。そして、その係留索破断チャートを基に、係留索の本数を増やすことによる増しもやい対策が係留索の破断に与える影響について数値シミュレーションを行い、増しもやい対策の有効性や課題点について検討を行った。

Key Words : tsunami, moored vessels, chart of moored vessels break, the mps method

1. 緒言

荷役作業中の船舶や船員不在の船舶などは、津波来襲時、安全な海域に避航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、津波来襲時の岸壁に係留された船舶の被害を予測し、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の一つとして、増しもやい対策が考えられる。増しもやい対策は、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。その他の津波対策としては、増し錨や津波対策用岸壁などが考えられる。ただし、増し錨は津波来襲時に要する揚投錨の作業時間を考慮する必要があるのに加えて、通常航海時における錨や錨鎖、揚錨機が必要とする場所や重量の増加、設置に伴うコストなど課題が多い。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となる。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、上述した対策に比べてコスト面を含めて実現可能性が高いと考えられる。

本研究の目的は、岸壁に係留された船舶の津波防災・減災対策の一つである増しもやい対策について、数値シミュレーションを用いてその有効性および問題点を検討し、津波来襲時の岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に寄与することである。そこで、津波高や津波の入射角度の違いが係留索の破断に与える影響および増しもやい対策による係留索の本数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う。

2. 数値計算手法

(1) MPS法

本研究では、検討手法としてMPS (Moving Particle Semi-implicit または Moving Particle Simulation) 法を用いた。MPS法は、越塚ら¹⁾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。著者ら²⁾は、津波来襲時の船舶の津波中挙動を明らかにするためのMPS法プログラムを独自に整備し、これまで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きた。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¹⁾および著者らの論文²⁾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節に記す。

(2) 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、その計算精度はこれまでの研究³⁾によって確認されている。

図-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。

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

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

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

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

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

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

図-1 係留索モデル諸元

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

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

3. 数値シミュレーション

(1) シミュレーション概要

本研究では、3,000DWTのコンテナ船を一例として津波の入射角度が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、計算解像度を決定する粒子間距離は1.0m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。本研究では、積荷の状態は半載状態とし、喫水を5.0mとした。0度入射では入船の状態に係留されており、船尾から津波が入射することとした。船舶の諸元は図-2~図-5、表-1のようにになっている。防舷材は直径1.0mの粒子一つで表現し、図-2、表-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、本研究での防舷材粒子は、実際の防舷材が持つゴム弾性や摩擦は考慮していない。

本研究では、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、フォアブレストラインLine 5、アフトブレストラインLine 6によって係留した。係留状態および係留索の諸元は図-2、図-3、表-2、表-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。表-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⁴⁾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、本研究では非線形性は

考慮されていない。ただし、本研究では模擬津波として孤立波を用いるため、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考えられる。そこで第2章第2節の係留索モデルを適用した。

本シミュレーションでは、シミュレーションが長時間に及ぶことによる時間的コストを考慮して、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。本MPS法プログラムにおける造波境界にはピストン式造波板を用いた。模擬津波は孤立波を採用した。模擬津波高は2.0m~12.0mとし、1.0m刻みで造波した。模擬津波の最大入射波高および最大水平流速を表-4に示す。例として表-4中のCase 5の入射波高および水平流速の時系列波形を図-6に示す。図-6の入射波高および水平流速は、90度入射の場合の岸壁手前100mの位置の波高および水平流速である。

図-2 船舶および係留索の配置図 (x-y平面図)

図-3 船舶および係留索の配置図 (x-z 立面図)

表-1 船舶および岸壁の諸元

DWT at full load condition [t]	3,000
Displacement [t]	2,937.2
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

表-2 係留索の諸元

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

表-3 係留索の計算条件

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

図-4 MPS法における船舶の配置図 (90度入射)

図-5 MPS法における船舶の配置図 (0度入射)

表-4 模擬津波の入射波条件

	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	7.00	6.76
Case 7	8.11	7.93
Case 8	9.12	8.67
Case 9	10.04	10.05
Case 10	11.03	11.89
Case 11	11.93	14.06

図-6 模擬津波の入射波高と水平流速 (Case 5)

(2) シミュレーション結果と考察

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図-7である。本シミュレーションから、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かった。しかし、津波高5.0mでは0度入射の場合、Line 1, Line 4以外の係留索がすべて破断した。さらに津波高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。これらの結果を考慮して本研究では、2.0m以上5.0m未満の範囲を係留索安全エリア、5.0m以上6.0m未満の範囲を係留索危険エリアとし、6.0m以上の範囲を係留索破断エリアとした。また、90度入射の場合、津波高が6.0mを超えると船舶が岸壁に乗り揚がることを確認できた。そこで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。本係留索破断チャートを用いることにより、係留

索の破断の有無とともに、岸壁の乗り揚げりの有無についても確認することができる。

表-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津波高に対して、増しもやい対策を施した場合の係留索の破断の有無を表-4中のCase 4, Case 5, Case 7の結果を用いてまとめたものである。表-5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。表-5より、増しもやい対策を施すと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、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。津波

高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、0度入射ともに、Line 1, Line 4以外の係留索は破断した。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以下の津波による係留索の破断は増しもやい対策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と考えられる。なお、Line 1, Line 4の6本分のばね定数は索径85mmの係留索のばね定数に相当し、Line 2, Line 3, Line 5, Line 6の4本分のばね定数は索径100mmの係留索のばね定数に相当する。このことから、より太い索径の係留索を用いることによって、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と考えられる。

図-7 係留索破断チャート

表-5 増しもやい対策による係留索の破断の有無

90 degree			Existence of break of mooring tethers						
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	Case 4	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	○	○	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	○	○	○	○	○	○	○
	Case 5	Line 1, 4	×	×	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	×	○	○	○	○
	Case 7	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×
0 degree			Existence of break of mooring tethers						
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	Case 4	Line 1, 4	○	○	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	○	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	○	○	○	○	○
	Case 5	Line 1, 4	×	×	○	○	○	○	○
		Line 2, 3	×	×	×	○	○	○	○
		Line 5, 6	×	×	×	○	○	○	○
	Case 7	Line 1, 4	×	×	×	×	×	×	×
		Line 2, 3	×	×	×	×	×	×	×
		Line 5, 6	×	×	×	×	×	×	×

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

しかし、90度入射の場合は図-7の初期係留状態と同様に、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船舶が岸壁に乗り揚げってしまう例が確認された。本研究では、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、船舶の大きさ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れない場合と乗り揚が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ぐことが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。

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、増しもやいととも、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、船舶の喫水の状態や潮の満ち引きによる天端高の違いが係留索の破断の性状に影響を及ぼす可能性もあるため、それらについて検討する必要がある。また、本研究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続け、徐々に津波高が高くなる場合もある。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。さらに、本結果は3,000DWTの船舶を対象としたものであるため、船舶の大きさが異なる場合の検討も行っていく必要がある。

4. 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) 船舶の係留索破断チャートを作成した。それにより、係留索の破断の有無は津波高ごとに係留索安全エリア、係留索危険エリア、係留索破断エリアに分けて

対策を行う必要があることがわかった。

- (2) 津波高5.0m以下の津波の場合、津波の入射角度が違っ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。
- (3) 津波高6.0m以上の津波の場合、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や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げることがわかった。
- (4) 90度入射の場合、津波高6.0m以上の場合は係留索の破断を防ぐことができて、岸壁への乗り揚げってしまうことがわかった。

今後は船舶の大きさや船舶の喫水、天端高の違いを考慮して検討を行っていく必要がある。また、波長や波形、流速の影響、係留索の非線形性や防舷材の影響、係留設備、係留索のモデル化の手法などについても検討していく必要がある。さらに、係留索の破断だけでなく、浮体の乗り揚げりに対する対策も検討する必要がある。

参考文献

- 1) Koshizuka, S., Noda, A. and Oka, Y.: Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, *Int. J. Numer. Mech. Fluids*, Vol.26, pp.751-769, 1998.
- 2) 増田光弘, 増田光一, 居駒知樹, 庄司邦昭: 3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予測法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, pp.148-153, 2011.
- 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) 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.
- 5) 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, 193p., 2011.

A STUDY ON TSUNAMI DAMAGE CONTROL OF MOORED VESSELS AT THE WHARF —ABOUT THE INSTALL MORE MOORING TETHERS—

Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Kiyokazu MINAMI and Tomoki IKOMA

When tsunami attacks in harbors, vessels moored at a wharf may be unable to evacuate. Vessels should prepare for the break of mooring tethers, grounding on a wharf, drift to land areas and the collision with buildings. The present paper describes the tsunami simulation and the motion analysis of moored vessels at a wharf. The chart of the break of mooring tethers was created. The chart shows the relation of wave height and the break of mooring tethers. And the influence of the install more mooring tethers to the break of mooring tethers was considered.