津波の引き波が岸壁係留船舶に与える影響に関する基礎的研究

長瀬 貴洋¹・増田 光弘²・南 清和³・高畑 航⁴

A Fundamental Study on the Influence of the Backwash due to Tsunamis upon the Mooring Vessel

Takahiro Nagase, Mitsuhiro Masuda, Kiyokazu Minami and Wataru Takahata

Abstract

When tsunamis attack the harbors, the first attack of tsunamis has two forms; leading waves and backwash. And, it is difficult to predict the form of the first attack of tsunamis. Also, because leading waves and backwash are alternated in tsunami, it is necessary that damage protection measures of mooring vessels against both leading waves and backwash are considered. Authors have been mainly studying about damage protection measures of mooring vessels against the leading waves. However, backwash have hardly been studied. In this study, the influence of backwash against mooring vessels at a wharf was examined. The three dimensional MPS (Moving Particle Semi-implicit) method was used. Backwash was expressed as the dam break phenomenon. Outflow angle, flow velocities and mooring conditions were considered. As a result, a safety of the mooring against backwash was evaluated.

Keywords : port and mooring, vessel, backwash, tsunami protection, MPS method

キーワード: 港湾・係留、船舶、引き波、津波防災、MPS 法

1. 緒言

津波は押し波と引き波という二つの現象を併せ持っている。このうち、押し波は沖から岸に向かって進行するのに対し、もう一方の引き波は沖方向に津波が進行する現象である。これらの現象が繰り返して発生することで、港湾や沿岸域に甚大な被害をもたらす。しかしながら、津波が押し波と引き波のどちらから始まるのかは、津波・地震の発生メカニズムに依存するため、予め予測することは難しい。過去の地震による津波被害においても、第一波が押し波の場合と引き波の場合の両方が観測されている。

例えば、2011 年の東日本大震災では押し波から始まったのに対し、1923 年の関東大震災は引き波から始まり、相模湾にて岸から約 600~700m ほどの海底の露出⁽¹⁾が生じた。よって、津波防災・減災対策を考えるには両方についての備えが求められる。著者らはこれまで押し波中の岸壁係留船舶の津波防災・減災対策について検討を行っており、増しもやい対策 Install More Mooring Lines (以下、IMML)⁽²⁾や浮体式津波対策用岸壁⁽³⁾を提案し、その有効性を確認している。しかしながら、これらの上述した津波対策を施していても、押し波後の引き波によって係留

¹ 学生会員 東京海洋大学大学院海運ロジスティクス専攻 (〒116-0012 東京都荒川区東尾久 4-2-8-1003) m175028@edu.kaiyodai.ac.jp

² 正会員 東京海洋大学大学院海洋工学系 masuda@kaiyodai.ac.jp

³ 正会員 東京海洋大学大学院海洋工学系 minami@kaiyodai.ac.jp

⁴ 非会員 東京海洋大学大学院海運ロジスティクス専攻 m185010@edu.kaiyodai.ac.jp

索の破断による船舶の沖への漂流が確認された。この現象に対しては津波係留ビット⁽⁴⁾が提案されているが、引き波から始まる場合の船舶および係留索の被害の性状については検討が行われていない。そこで著者らは津波が引き波から始まる場合の岸壁係留船舶の被害の状況および著者らが提案してきた防災・減災対策の有効性を明らかにすることを目的として、CFD シミュレーションによる数値実験を行う。ただし、港湾内における引き波から始まる場合の津波の水位変動や流速の計測事例は極めて少なく、また当該現象を対象とした研究事例も多くない。そこで、本研究ではCFD シミュレーションにおける引き波の再現方法を独自に提案する。

2. 数値計算手法

本研究では、検討手法として MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いる。MPS 法は、越塚⁽⁵⁾ら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⁽⁶⁾されている。よって、本研究では先行研究と同様の手法を使用するものとする。また、具体的な離散化および各モデル化について越塚らの論文⁽⁵⁾および著者らの論文⁽⁷⁾に詳細が記載されているため割愛する。

3. 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

計算領域および船舶の諸元を Fig. 1、Fig. 2、Table 1 に示す。対象とする船舶は 3,000DWT の半積載状態の貨物船とし、本研究では船舶および岸壁の諸条件を海難防止協会の資料⁽⁸⁾を基に設定する。水領域は Fig. 1、Fig. 2 における X 軸方向を正とし、領域の右端から流出させる。流出方向については 2 方向とし、船首尾方向に対して平行に流出していく場合を 0 度流出、船首尾方向に対して直交する方向に流出していく場合を 90 度流出とする。水領域の長さは 0 度流出、90 度流出ともにそれぞれ 3 パターンとし、0 度流出では船尾先端から水領域右端まで、90 度流出では左側面から水領域右端までの距離を 300m、200m、100m とする。水深は 10m とする。なお、MPS 法では計算の開始とともに粒子間相互作用によって粒子が動き始めるため、形状を固定されていない

水粒子で構成される水領域のボリュームが計算開始後大きくなる。そこで粒子間相互作用が水深 10m で安定する初期粒子配置をあらかじめ算出し、水領域の高さ方向を 9 層 (水深 9m の状態) として配置する。本研究では、船舶の係留状態と引き波の流出角度および速度の違いがもたらす影響について検討を行う。船舶の係留状態については、係留索の本数にて通常係留と増しもやい対策を施した状態とで場合分けを行う。さらに、より実際上の係留索数を再現することを目的に、著者らの研究⁽²⁾において通常係留状態としてきた条件よりも少ない本数による係留状態について検討を行う。係留索は本数の少ないケースから順に Case1、Case2、Case3 とし、各係留索の諸元について Table 2 に示す。また、係留索の配置は将来的な先行研究結果との比較検証を視野に入れ、先行研究と同様に、資料⁽⁸⁾を参考に Fig. 3 のように配置する。加えて、係留索には著者らが既存の研究⁽⁷⁾において提案している線形ばね条件による拘束条件を用いる。係留索の材質は、索径 60mm のポリアミド系 (ナイロン) エイトロープを仮定し、ばね定数および破断時伸び率を設定する。係留索の Fig. 3 に示すように船首尾方向に対してヘッドライン Line 1 およびスターンライン Line 2 を 30 度の角度で配置する。次にフォアスプリング Line 3、アフトスプリング Line 4 を 45 度の角度で配置する。Case1 は対象船舶のサイズにおいて用いられている一般的な係留索の本数として Line 1、2 に 2 本ずつ、Line 3~6 に 1 本ずつ係留索を用いる。Case2 では Line 1、2 に 4 本ずつ、Line 3~6 に 2 本ずつ増しもやいを施す。Case3 は Case2 に対して全係留箇所に 2 本ずつ係留索の本数を増やしている。係留索の本数は各係留点のばね定数を Table 2 に示すばね定数を本数倍することによって表現する。係留索はロープの特性から初期長さの 50%を超えた時点で破断が生じるように設定している。なお、本研究ではウィンチドラムによるブレーキ力や巻き出し、巻き込みは考慮していない。東日本大震災の事例ではウィンチドラムからの巻き出し等の事例⁽⁹⁾が確認されているが、一方で港湾技術研究所の資料⁽¹⁰⁾では「船員等の経験によれば係留索が破断に至るような状態においてもブレーキドラムが回転することはほとんど無い。」という記述もあり、これらを考慮することは複雑となる。よって、本研究では将来的な既存の研究結果との比較検証を行うことを念頭におき、これまでと同様の係留方法を採用する。

Fig. 1 Calculation setup system in 0 degrees

Fig. 2 Calculation setup system in 90 degrees

Table 1 Calculation condition of vessel and wharf

DWT	3,000
Displacement [t]	2,937
Length overall (L) [m]	88.0
Molded breadth (B) [m]	13.0
Molded depth (D) [m]	10.0
Molded draft (d) [m]	5.0
Initial water depth (h) [m]	9.0
Calculated water depth (h) [m]	10.0
Wharf height [m]	12.0
Clearance of wharf to vessel [m]	1.0

Table 2 Calculation conditions of mooring lines

Length of Line 1,2 [m]	18.6
Length of Line 3,4 [m]	5.2
Length of Line 5,6 [m]	5.0
Spring constant of Line 1,2 [kN/m]	4.987
Spring constant of Line 3,4 [kN/m]	17.853
Spring constant of Line 5,6 [kN/m]	18.554
Elongation at break [%]	50
Number of Line 1, 2 (Case1) [number]	2
Number of Line 3 to 6 (Case1) [number]	1
Number of Line 1, 2 (Case2) [number]	4
Number of Line 3 to 6 (Case2) [number]	2
Install more mooring lines [number]	2

Fig. 3 Calculation setup system of mooring lines

3.2 引き波のシミュレーション条件

本研究では、引き波を水位の低下を伴いながら沖側へ水が流出していく現象と定義し、ダム崩壊現象を用いて引き波を再現する。一般的なダム崩壊現象について水塊が崩れていくまでの様子を Fig. 4(a), (b)に示す。これら Fig. 4(a), (b)はX軸を水平方向、Z軸を鉛直方向とした2次元MPS法によるダム崩壊のシミュレーションであり、Fig. 4(a)は水塊の崩壊前、(b)では崩壊中のスナップショットである。ダム崩壊現象は重力に従って水塊が崩れることで、Fig. 4(b)のように水位の低下を伴いながら一方へ水が流出する現象である。また、ダム崩壊現象では崩壊時の流速は水塊の規模に依存する。そこで水域の長さを調整することによって、流速を調整することを試みる。引き波の水位の変動と水平流速の時系列波形を Fig. 5、Fig. 6に示す。Fig. 5、Fig. 6は、Fig. 1、Fig. 2の計算領域から船舶を除いた状態で計測を行っている。水位の変動および水平流速は、Fig. 5の90度流出のケースでは左舷船側の位置で計測を行い、Fig. 6の0度流出のケースでは船尾先端の位置で計測を行っている。また、Table 3に0度流出、90度流出共通して300mから100mへ水領域が短くなるとともに流速が早くなっていくことが確認できる。Fig. 5、Table 3から0度流出の場合は水領域長さ100mの場合、最大水平流速が3.05m/sとなっている。90度流出の場合ではFig. 6とTable 3より水領域長さ100mの場合では、最大水平流速が0.31m/sとなっている。0度流出と90度流出での水位の低下の性状および水平流速が異なる要因は、0度流出の場合はFig. 1に示すように船首からその先の水領域を長くとしているため、船首より後方からの水塊が流れ出ていく影響によるものだと考えられる。引き波から始まる津波の流速に関する資料は少なく、著者らは引波から始まる津波の湾口部での映像を基に簡易的に流速を計測することを試みたが、誤差を考慮しても1.0m/s～2.0m/s程度の流速が発生するケースがあることが確認されている。また、陸上での押し波後の引波の計測事例⁽¹¹⁾では2.8m/s～7.5m/sの流速が確認されており、本研究での水平流速は実現象と比べて大きく異ならないと考えられる。ただし、引波の流速についてはさらに検討する必要がある。

Fig. 4(a) Calculation of dambreak phenomenon
(Initial placement of water (0.00[sec]))

Fig. 4(b) Calculation of dambreak phenomenon
(Breaking of water (0.25[sec]))

Fig. 5 Water elevations and flow velocities of
backwash in 0 degrees

Fig. 6 Water elevations and flow velocities of
backwash in 90 degrees

Table 3 Maximum horizontal flow velocities on each
simulation cases

Water Area length [m]	Maximum horizontal flow velocity [m/s]	
	0 degrees	90 degrees
100	3.05	0.37
200	1.96	0.13
300	1.20	0.07

4. 結果および考察

Table 4 に検討を行ったケースを示す。Table 5 は Table 4 の各ケースにおける係留索の破断時長さに対する最大伸び率についてまとめた表である。伸び率が 30%を超える値は赤色で強調している。また、Fig. 7～9 はそれぞれ係留索の破断時長さに対する伸び率を時系列で表している。これらのグラフにおいて Fig. 7 は Case 1A-1、Fig. 8 は Case 1B-2、Fig. 9 は Case 3A-2 についてそれぞれ示している。

0 度流出の場合では、Table 5 および Fig. 7 から係留索によって作用する張力の大きさが異なっていることがわかる。流出方向に対して作用するように張られている Line 1、Line 4 と船首側に対して垂直に張られている Line 5 に張力がかかり、その他の Line 2、Line 3、Line 6 は弛みが生じている。特に Line 4 は Line 1 や Line 2 ほど長く設定されておらず、船体に対し垂直に張られていることから、0 度流出の全結果において他の係留索より伸び率が高くなる。このように 0 度流出では特定の係留索に張力が集中する場合があるが、本研究での流速の範囲においては係留索の破断は発生しにくいと考えられる。また、Table 5 の Case 1A-1 から最大伸び率が 47%を超える Line 4、5 では、Case 3A-1 のように係留索の本数を増やすことによって最大伸び率を 10%未満に抑えることが可能であることが確認できる。ここで、Case 3A-2 と Case 3A-3 では増しめや対策が施されてはいるが、全ての係留索の最大伸び率が係留索本数の少ない Case 2 よりも大きい結果となっていることが確認できる。これは、係留索に線形ばねを用いているために各係留索の復元力が生じた際に船舶が船首尾方向に振動運動を引き起こすことが原因と考えられる。船舶の振動運動は Case 3A-2 の船舶の重心位置の軌跡について縦軸を X 方向、横軸を時間としてその重心位置についてまとめたグラフである Fig. 10 から確認できる。

90 度流出の場合、流出が始まるとともに係留索が伸びていくが Fig. 8 のように、ある一定まで伸びた後に係留索の復元力が生じることで係留索が弛み始めていることがわかる。その後、再び係留索は伸び始め、流速が最大になるとともに係留索の伸び率も最大となっている。このとき、係留索の最大伸び率は係留索の長さと張り方、本数に影響されることが Table 5 からわかる。Case 1B-1 では船体に対して垂直に張られている Line 5, 6 の最大伸び率が 40%

を超えているが、Case 1B-1、Case 2B-1、Case 3B-1 と係留索の本数が増えるに従って、伸び率が小さくなり、伸びは10%未満にまで抑えられている。0度流出と係留索の伸び率を比較した場合、流出速度は0度流出の10分の1程度であるが、Case 1において約30~40%の最大伸び率が生じており、既存の押し波の研究^{(2),(3)}と同様に引き波においても90度方向の水による負荷に対しては一般的な船舶の係留方法はあまり強くない傾向があると考えられる。

全てのケースを通して係留索の破断は発生せず、船舶の流出も生じなかった。この結果から従来の係留方法においても引き波のみでは船舶は流出しない可能性がある。しかしながら、係留索の中には伸び率が47%に達するケースも存在し、これらは破断寸前であったと考えられる。また、Fig. 5, 6において5m以下となった時点で船底が着底している。本研究で用いたMPS法プログラムコードでは摩擦や表面張力などを考慮していないため、船底が着底しても係留条件による引き戻しが発生するが、実際の場合では係留索が伸びた状態で着底し、その場にとどまる可能性が高いと考えられる。また、津波は水位が押し波と引き波を繰り返す現象であるため、引き波の後に来襲する押し波を考えた場合、ある程度係留索が伸びた状態で着底してしまうと押し波によって係留索が破断する可能性があると考えられる。また、本研究においては係留索に線形ばねを係留条件として適用しているが、独立行政法人海上安全技術研究所の資料⁽¹²⁾を基に係留索の伸びに伴うばね定数の変化を考慮した場合、本係留索条件においては伸び率が約43%程度で破断が生じる可能性がある。そのため、引き波から始まる津波においては安全を考慮して係留索の伸び率を少なくとも20%以下に抑えておくことが好ましいと考えられる。

Table 4 Simulation cases

Incident angle [degree]	Water area length [m]	Mooring condition		
		Normal (Case 1)	IMML 1 (Case 2)	IMML 2 (Case 3)
0	100	Case 1A-1	Case 2A-1	Case 3A-1
	200	Case 1A-2	Case 2A-2	Case 3A-2
	300	Case 1A-3	Case 2A-3	Case 3A-3
90	100	Case 1B-1	Case 2B-1	Case 3B-1
	200	Case 1B-2	Case 2B-2	Case 3B-2
	300	Case 1B-3	Case 2B-3	Case 3B-3

Table 5 Max growth rate of mooring lines on each case

Case	Tensile elongation [%]					
	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6
1A-1	21.88	1.34	24.10	48.21	47.77	24.83
1A-2	15.27	0.41	7.49	35.36	23.96	10.15
1A-3	13.49	1.56	2.92	28.82	13.19	5.71
2A-1	16.36	0.90	3.43	26.83	16.15	4.48
2A-2	8.82	0.78	2.22	15.10	10.54	3.83
2A-3	9.51	0.59	2.22	14.17	7.48	3.02
3A-1	7.83	0.24	1.81	8.56	9.92	2.17
3A-2	12.85	7.75	13.39	29.76	20.83	7.96
3A-3	12.11	7.95	14.22	24.53	15.61	4.59
1B-1	7.81	7.48	32.95	30.70	43.10	41.02
1B-2	3.74	4.32	11.23	13.30	16.31	19.82
1B-3	3.83	4.16	7.58	13.63	14.26	19.25
2B-1	3.53	4.41	8.77	12.67	15.13	19.11
2B-2	2.68	2.87	8.29	7.29	12.35	10.19
2B-3	3.06	2.80	5.08	4.29	6.04	7.47
3B-1	2.22	2.55	1.88	3.06	5.23	7.78
3B-2	1.78	1.71	2.38	2.14	4.86	3.67
3B-3	3.24	1.50	1.81	2.26	2.58	2.66

Fig. 7 Tensile elongation of mooring lines of Case1A-1

Fig. 8 Tensile elongation of mooring lines of Case1B-2

Fig. 9 Tensile elongation of mooring lines of Case3A-2

Fig. 10 Tracking of the center of gravity at vessel model in Case3A-2

5. 結言

本研究では引き波が岸壁係留船舶に与える影響について検討を行い、以下のような知見を得た。

- (1) ダム崩壊によって引き波の再現を行った。ダム崩壊では、水領域の長さを調整することによって流速を調整することが可能であるが、水位の低下速度については更なる検討が必要である。
- (2) 全シミュレーションにおいて、係留索の破断は生じなかった。ただし、短い係留索では伸び率が45%を超える係留索があり、引き波後の押し波を考慮した係留索本数の設定が求められる。
- (3) 増しもやい対策は引き波に対しても有効であることがわかった。伸び率が40%以上の係留索に対して増しもやい施すことで、10%未満まで伸び率を抑えることができることがわかった。
- (4) 引き波においても係留索全体への負荷は90度流出の方が大きいことがわかった。ただし、0度流出では張力が一部の係留索にしか作用せず、特定の係留索における破断の可能性が高くなる。

今後は、係留索の非線形的な伸び特性やウィンチドラムによるブレーキ力や巻き出し・巻き込みなどを考慮し、より実現象に則した詳細な係留索の引張の性状について検討を行う必要がある。また、本研究や既存の研究では船舶や岸壁、係留索の諸条件の設定に昭和56年の資料を参考に行っているが現在の基準との比較を行い、必要に応じて現在の基準に基づいた検討も必要であると考えられる。さらに、引き波についても本研究で対象とした引き波から始まるものだけでなく、押し波後に発生する引き波や引き波後に押し波が来襲する場合についても検討を行い、津波に対する統合的な被害の性状および津波防災・減災対策を明らかにしていく必要がある。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究科費補助金若手研

究(A)によって行われたことを付記いたします。

参考文献

- (1) 山下文男：津波てんでんこ-近代日本の津波史、新日本出版、pp. 66-68、2011.
- (2) 増田光弘、南清和、増田光一、居駒智樹：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2）、日本船舶海洋工学会論文集、第25号、pp. 183-190、2017.
- (3) 増田光弘、南清和、増田光一：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3）-浮体式津波対策用岸壁の提案-、日本航海学会論文集、第131巻、pp. 131-138、2014.
- (4) 増田光弘、佐藤千昭、南清和：引き波を考慮した浮体式津波対策用岸壁による岸壁係留船舶の防災対策について、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第21号、CD-ROM、2015.
- (5) Seichi 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.
- (6) 増田光弘、増田光一、居駒知樹、庄司邦明：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、2010.
- (7) 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、第127巻、pp. 51-56、2012.
- (8) (社)日本海事協会：海難防止の調査研究事業報告書-地震に伴う津波に対する安全防災対策の調査研究-、1981.
- (9) 国土交通省 地方運輸局：津波に遭遇した船の行動事例集、2011.
- (10) 港湾技術研究所：港湾技研資料 No. 427 係留柱にかかるけん引力について、pp. 9、1982.
- (11) 太田外氣晴、山中浩明：東日本大震災における津波の伝搬特性の評価と避難の問題点、日本地震工学会論文集、第13巻、第5号、pp. 1-17、2013.
- (12) 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.