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2） -浮棧橋係留の有効性について-

増田 光弘¹・橋本 洋佑²・南 清和³・増田 光一⁴

A Study on Damage Control of Vessels Moored to The Wharf in Tsunamis (Part 2) -About the Validity of Floating Pier Mooring-

Mitsuhiro MASUDA, Yosuke HASHIMOTO,
Kiyokazu MINAMI and Koichi MASUDA

Abstract

When the tsunami attacks in harbor, the vessels moored at a wharf may be unable to be evacuated. In this case, the flowing damages are assumed; breaking the mooring tether, grounding on a wharf, drifting to land areas and destroying buildings. As the measure which prevents these, increase mooring tethers, increase anchors and a floating pier is mentioned. This present paper focused on the floating pier and describes the tsunami simulation and the motion analysis of vessel moored at a floating pier using MPS method (Moving Particle Semi-implicit method).

In this research, the 3D-MPS method is applied. Examination was carried out about mooring to effectiveness of the floating pier at the time of a disaster occurring. At the time of “The Great East Earthquake” that occurred on March 11, 2011, the case that a sightseeing ship moored at a floating pier was the safety was referred. The situation such as the outbreak of the earthquake and the attack of the tsunami was reproduced.

Keywords : Ocean engineering, Tsunami, Moored vessels, Floating pier mooring, MPS method

キーワード: 海洋工学, 津波, 係留船舶, 浮棧橋係留, MPS 法

1. 緒言

著者ら^{1) 2)}は、これまで増しもやいによる津波対策に着目し、津波による船舶の乗り揚げに対する有効性について数値シミュレーションを用いて検討を行ってきた。それにより、増しもやい対策は、一

定の効果を示すことが確認できたが、津波高や津波の入射角度によっては係留索の破断や乗り揚げが発生してしまう可能性があることが確認された。そこで著者ら³⁾は、東日本大震災時、宮城県塩釜港湾内に設置されていた浮棧橋に係留されていた観光船

¹ 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

² 学生会員 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 m145010@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 日本大学理工学部 masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

が無事であった事例に着目し、浮体式津波対策用岸壁を構想した。そして、その基礎的な適用性について数値シミュレーションによって確認を行った。しかしながら、浮栈橋は海底に固定された係留柱によってドルフィン係留されており、地震が発生した際、係留柱とともに浮栈橋自体も振動し、そこに係留された船舶と衝突し、沖側に押し出すことにより、係留索が破断するような事態が発生することが想定され、そのような場合、船舶は不完全な係留状態で津波に備えなければならない可能性がある。

そこで本研究では、東日本大震災時、宮城県塩釜港湾内に設置されていた浮栈橋および観光船の事例を参考に浮栈橋の有効性について数値シミュレーションによる検討を行う。その際、地震発生時から津波来襲までの状況について統一的にシミュレーションを行うことによって、震災時における浮栈橋係留の課題点についても検討を行う。

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。具体的な離散化及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^{5) 6)}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概要

本研究では 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災発生時、浮栈橋に係留されていた観光船が無事だった宮城県塩釜港の事例を参考とし、地震動が係留索および船舶に与える影響および、地震後の津波来襲によって船舶が受ける影響について検討を行う。

3.1 地震動による係留柱振動に伴う係留索破断予測シミュレーションの概要

浮栈橋と船舶の諸元を Fig. 1、Fig. 2 および Table 1 に示す。船舶は長さ 30m、幅 6m、深さ 4m、喫水 2m、浮栈橋は長さ 51.5m、幅 9m、深さ 2.5m、喫水 1.5m とする。浮栈橋は長さ 1.5m、高さ 8.5m、奥行き 1.5m の係留柱 4 本にドルフィン係留されている。シミュレーションのスケールは実スケールとし、粒子間距離を 0.5m とする。

船舶と浮栈橋は、震災発生時に撮影された映像から、ヘッドライン Line 1 およびスターンライン Line 4、フォアブレストライン Line 2 およびアフトブレストライン Line 3 の 4 本の係留索で係留されているとする。係留状態および係留索の諸元を Fig. 1、Fig. 2、Fig. 3、および Table 2 に示す。係留索の材質はナイロンエイトロープとし、係留索径は 30mm、40mm および係留索なしの状態を比較する。係留索は著者ら⁵⁾が考案した線形ばねによる係留索モデルを用い、それぞれの係留索の伸び率が 50%を超えた時点で破断するとする。

地震動について検討を行うケースを Table 3 に示す。本シミュレーションでは、東日本大震災発生時、宮城県塩釜市から約 7km 離れた地点である宮城県松島町で観測された速度波形を係留柱に与え、係留柱を強制的に動揺させている。塩釜港に設置されていた浮栈橋は南側に岸壁、北側に船舶に係留するように設置されていたため、シミュレーションでは、 x 方向を南北方向、 y 方向を東西方向、 z 方向を上下方向とする。また、より大きな地震が発生した場合の被害を予測するために、福島県浪江町で観測された速度波形および、その波形を 1.5 倍、2.0 倍した波形も用いる。浪江町で観測された地震の南北、東西、上下方向の速度波形をそれぞれ Fig. 4 から Fig. 6 に示す。浪江町の速度波形より、より船舶に大きな影響を与えるため、卓越振動方向である東西方向に対し船舶が垂直になるように、シミュレーションでは x 方向を東西方向、 y 方向を南北方向、 z 方向を上下方向とする。なお、本研究では係留柱を完全剛体として扱っており、係留柱の弾性変形は考慮していない。また、本研究においては防舷材の影響は考慮していない。

Fig. 1 Calculation arrangement (x - y)

Fig. 2 Calculation arrangement (x - z)

Fig. 3 Calculation setup system

Table 1 Calculation conditions of vessel and pier

Displacement of vessel[t]	272.48
Displacement of pier[t]	709.02
Particle numbers	578,604
Particle numbers of vessel	4,624
Particle numbers of pier	9,090
Density of vessel's particles[kg/m ³]	471.42
Density of pier's particle[kg/m ³]	624.0
Particle distance[m]	0.5
Ship length over all(L_v)[m]	30.0
Ship breath(molded)(B_v)[m]	6.0
Ship depth(molded)(D_v)[m]	4.0
Ship draft(molded)(d_v)[m]	2.0
Pier length (L_p)[m]	51.5
Pier breath (B_p)[m]	9.0
Pier depth (D_p)[m]	2.5
Pier draft (d_p)[m]	1.5
Water depth(h)[m]	5.0
Breath of dolphin(x_3)[m]	1.5
Length of dolphin(y_4)[m]	1.5
Crown height of dolphin(z_7)[m]	2.5

Table 2 Calculation conditions of mooring tether

Tether type	Nylon	Nylon
Tether diameter[mm]	30.0	40.0
Stretch rate of mooring tethers[%]	50.0	50.0
Length of Line 1, Line 4[m]	4.15	4.15
Length of Line 2, Line 3[m]	2.45	2.45
Spring constant of Line 1, Line 4[kN/m]	37.2	60.4
Spring constant of Line 2, Line 3[kN/m]	63.1	102.43
Number of Line 1 to 4	1	1

Table 3 Combination of seismic wave and tether

	Tether	Seismic wave
Case 1	40mm	Matsushima
Case 2	Nothing	Namie (One amount)
Case 3	30mm	Namie (One amount)
Case 4	40mm	Namie (One amount)
Case 5	40mm	Namie (One and half times)
Case 6	40mm	Namie (Twice)

Fig. 4 Seismic wave of North-South (Namie)

Fig. 5 Seismic wave of East-West (Namie)

Fig. 6 Seismic wave of Up-Down (Namie)

3.2 浮桟橋に係留された船舶の津波被害予測シミュレーションの概要

ここでは、津波来襲時の浮桟橋係留の有効性について検討する。津波の入射角度は0度および90度とし、船尾から入射するケースを0度入射、左舷正横から入射するケースを90度入射と表記する。なお、震災当時の塩釜港では、震災時の船舶の係留状態および湾口の向きより、船尾方向から津波が入射したと考えられる。

0度入射の計算領域は、海域を長さ750m、奥行き30mとし、浮桟橋端部から造波境界までを500m、船舶後端から造波境界側の浮桟橋端部までを10mとする。また、0度入射においては岸壁を設置しない。90度入射の計算領域は、海域長さ500m、奥行き100m、陸域を長さ50m、奥行き100mとする。どちらも水深を5mとし、岸壁からの離岸距離を1mとする。

対象とした船舶と浮桟橋は前節と同様であるが、計算領域の拡大に伴う計算時間の増大を抑制する目的で粒子間距離を1.0mとしたため、Table 1と異なるパラメーターのみ、Table 4に示す。船舶および浮桟橋はFig. 7、Fig. 8のように配置する。

係留状態は前節と同様であるが、上述した理由でTable 2と異なるパラメーターのみTable 5に示す。係留索の材質はナイロンとし、係留索径は40mmとする。係留索は係留索の伸び率が50%を超えた時点で破断するとする。

本シミュレーションでは、模擬津波として実際の津波のように複数の大波が連続して押し寄せる段波を用いる。模擬津波高は、東日本大震災発生時に宮城県塩釜港で観測された津波高を参考に 3.0m 程度とする。Fig. 9 は 0 度入射および 90 度入射の入射波の時系列波形である。0 度入射は造波板側の浮栈橋端部から 100m の位置、90 度入射は岸壁端部から 100m の位置で計測している。それぞれの最大波高は、第二波が第一波に乗り揚がるため、0 度入射の場合は 3.73m、90 度入射の場合は 3.88m となっている。また、90 度入射において 85 秒付近で波高が高くなっているのは、岸壁からの反射波のためである。

Table 4 Calculation conditions of vessel and pier

Displacement of vessel[t]	253.76
Displacement of pier[t]	433.99
Particle numbers(0 degree)	301,722
Particle number(90 degree)	524,290
Particle numbers of vessel	566
Particle numbers of pier	1,294
Density of vessel's particles[kg/m ³]	448.34
Density of pier's particle[kg/m ³]	335.39
Particle distance[m]	1.0
Pier length (L_p)[m]	50.0
Pier depth (D_p)[m]	3.0
Pier draft (d_p)[m]	1.0
Breath of dolphin(x_3)[m]	2.0
Length of dolphin(y_4)[m]	2.0
Crown height of dolphin(z_l)[m]	7.0

Table 5 Calculation conditions of mooring tether

Tether type	Nylon
Tether diameter[mm]	40.0
Stretch rate of mooring tethers[%]	50
Length of Line 1, Line 4[m]	3.6
Length of Line 2, Line 3[m]	2.2
Spring constant of Line 1, Line 4[kN/m]	69.6
Spring constant of Line 2, Line 3[kN/m]	112.2

Fig. 7 Calculation setup system (0 degree)

Fig. 8 Calculation setup system (90 degree)

Fig. 9 Incident wave height

4 シミュレーション結果および考察

4.1 地震動が与える影響について

Fig. 10 に Case 3 における係留柱の x-y 平面の変位を示す。係留柱の変位は Y 軸正方向が北、負方向が南、X 軸正方向が東、負方向が西として表している。Table 6 に Case 1 から Case 6 における Line 1 から Line 4 の係留索の最大伸び率を示す。Case 2 は係留索なしの状態であるが、伸び率の比較のため係留点間の距離から伸び率を算出している。

Fig. 10 より係留柱は東西方向に大きく振動し、このときの最大変位は約 0.38m となることが確認できる。Table 6 より、松島町の地震波形を用いた場合 (Case 1) では、係留索の最大伸び率はすべての係留索において 10%以下であり、係留索の破断が発生しないことが確認できる。しかし、浪江町の地震動を用いた場合は Line 2、Line 3 といった短い係留索の伸び率が 30%を超え、大きな力が加わっていることが確認できる。さらに、浪江町の地震波形を 1.5 倍、2.0 倍した波形を用いた場合においては、短い係留索が破断してしまうことが確認できる。なお、防舷材の影響が考慮された場合、防舷材は船体-浮栈橋間に働く硬いばねと仮定できるため、船体が防舷材と衝突すると、大きく船体が海側に弾き出されることが考えられ、本シミュレーション結果よりも係留索張力が大きくなると考えられる。また、地震により、係留索が一度大きく伸びてしまうと、索の強度が低下するため、地震後に津波が来襲した場合、係留索は十分な性能を発揮出来ない可能性がある。これらのことから、地震発生時の係留索の状態を予め予測しておくことが重要であると考えられる。

Fig. 10 Horizontal displacement of dolphin in Case 3

Table 6 Maximum tether's stretch rate

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Case 1	0.8%	3.69%	5.72%	9.02%
Case 2	14.48%	34.45%	33.41%	12.65%
Case 3	13.58%	32.37%	32.71%	12.82%
Case 4	13.17%	31.43%	32.21%	12.66%
Case 5	21.98%	Break	Break	24.91%
Case 6	27.76%	Break	Break	31.74%

4.2 津波シミュレーションの結果および考察

Fig. 11 は 90 度入射のシミュレーション結果のスナップショットである。Fig. 12 は 90 度入射における船舶と浮桟橋の鉛直変位の時系列波形である。Fig. 13 は 90 度入射の Line 1~Line 4 のそれぞれの係留索の伸び率の時系列波形である。Fig. 14 は 0 度入射のシミュレーション結果のスナップショットである。Fig. 15 は 0 度入射の Line 1~Line 4 のそれぞれの係留索の伸び率の時系列波形である。係留索の伸び率については、係留索の初期長さをゼロとし、縦軸の係留索の伸びをプラス、弛みをマイナスで表している。

Fig. 11、Fig. 12 より、90 度から津波が入射すると、津波によってまず船舶が浮き上がり、その後すぐに浮桟橋が浮き上がることで、船舶の乗り揚げを防ぐことができることが確認できる。また、Fig. 13 より、浮桟橋が船舶を追従するように浮き上がるため、係留索の破断を防ぐことができていることも確認できる。しかしながら、80 秒以降では引き波によって船舶が海側に押し流されることにより、一部の係留索が破断している。塩釜の事例では引き波による係留索の破断は確認されていないが、本研究で用いた模擬津波は波形勾配が大きく波長が短いため、短時間に水位が大きく変動し、入射波の通過直後に引き波が発生する。そのため、係留索の破断が発生したと考えられる。

0 度入射の場合を見てみると、塩釜の事例は 0 度入射に近かったと考えられるが、塩釜の事例と異なり、Fig. 14、Fig. 15 より津波の入射とともに船舶が押し流され、係留索がすべて破断し、流出してしまっただことが確認できる。この原因は、上述した模擬津波の影響であると考えられる。船舶の上昇に伴ってすべての係留点に張力が発生する 90 度入射時と異なり、波上側の係留点から順に張力が発生していくため、本研究で用いた模擬津波のように波形勾配の大きい孤立波が入射した場合、実際の津波以上に係留索の破断が発生しやすいと考えられる。

これらの結果から、引き波に対する対策を検討す

る必要はあるものの、90 度入射における船舶の乗り揚げに対する浮桟橋の有効性については確認することができたといえる。しかし、東日本大震災時の塩釜港の事例と同様の津波高の模擬津波で検討を行ったものの、90 度入射時では引き波による一部の係留索の破断、0 度入射時では全ての係留索の破断が発生している。著者らは、船舶の乗り揚げ現象においては津波の波高や水深、浮体の喫水などの鉛直方向のパラメーターが支配的であることと、数値計算上の都合により、津波高を重視し、孤立波を用いて検討を行ってきたが、入射津波の波形勾配の影響は大きく、実際の津波被害の状況を再現することを考えた場合、最大津波高だけでなく、津波の時間経過を再現できるようにする必要があると考えられる。ただし、上述したように船舶の乗り揚げ防止効果については本検討方法でも実用上問題のない範囲で適用可能であると考えられる。しかし、本研究では防舷材の影響を考慮していない。防舷材の影響を考慮した場合、船体 - 防舷材間に働く摩擦力によって 0 度入射時の船舶の挙動や 90 度入射時の乗り揚げ挙動が異なってくる可能性がある。そのため、今後は防舷材の影響を考慮して検討を行っていく必要があると考えられる。

Fig. 11 Snapshot of simulation results (90 degrees)

Fig. 12 Vertical displacement of vessel and floating pier (90 degrees)

Fig. 13 Tether's stretch rate (90 degrees)

Fig. 14 Snapshot of simulation results (0 degrees)

Fig. 15 Tether's stretch rate (0 degrees)

5. 結言

本研究では、東日本大震災における塩釜港での事例を参考に、災害時における船舶の浮棧橋係留の有効性について検討を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 地震による浮棧橋の動揺によって、浮棧橋に係留された船舶は沖側に弾き出される。その際、係留索が破断することはなかったが、特に短い係留索には大きな張力が加わることがわかった。また、係留柱の揺れ方によっては短い係留索が破断する可能性があることがわかった。
- 2) 90度入射では、浮棧橋係留によって船舶の係留索の破断に伴う乗り揚げを防ぐことができる

ことがわかった。しかし、引き波により一部の係留索が破断する可能性があることがわかった。

- 3) 0度入射においては、津波波形によっては津波の入射とともにすべての係留索が破断し、船舶が流出する可能性があることがわかった。本研究では、東日本大震災において浮棧橋に係留された船舶が無事であった宮城県塩釜港の事例を参考に、同じ津波高の模擬津波を用いた数値シミュレーションを行ったが、係留索の破断の検討においては入射津波の波形勾配の影響が大きく、津波波形の時間経過を再現し、検討を行う必要があることがわかった。

今後は、より実際の津波に近い模擬津波による検討を行うとともに、引き波に対する対策や防舷材の影響を考慮したシミュレーションなどを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 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1），日本航海学会論文集，128号，pp. 29-37，2013.
- 2) 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2），日本航海学会講演会予稿集，vol. 1, No. 1, K128-05, pp. 15-16, 2013.
- 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—，日本航海学会講演会予稿集，vol. 1, No. 2, K129-08, pp. 25-28, 2013.
- 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) 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, 2013, pp. 021102-1-7.
- 6) 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.