東北地方太平洋沖地震津波来襲時の栈橋係留大型石炭船の挙動再現について

榊原 繁樹¹・阿部 郁男²・津金 正典³・久保 雅義⁴

Reproduction on Dynamic Behavior of a Moored Large Coal Carrier during the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami

Shigeki SAKAKIBARA, Ikuo ABE,
Masanori TSUGANE and Masayoshi KUBO

Abstract

The 2011 Tohoku earthquake and tsunami at 14:46 JST on March 11, 2011 affected large areas of the eastern and northern part of Japan, and many sea disasters against vessels moored along terminal inside harbor basins occurred. We conducted surveys upon sea disasters of a VLCC at S-Port and an Aframax tanker at O-Port. There was also a severe disaster of large coal carrier at H-Port, which encountered a tsunami of tsunami wave height beyond 10 meters and damaged mooring equipment such as fenders and mooring lines, and unloader of coal, entirely. In this paper, we have also tried to reproduce the ship's behavior and analyze the mooring loads during the tsunami through a numerical simulation of tsunami and ship motion.

Keywords : *Ship mooring, Tsunami, Ship motion, Mooring equipment, Unloader, Ocean engineering*

キーワード: 港湾・係留, 津波, 船体運動, 係留施設, アンローダー, 海洋工学

1. 緒言

著者らは東北地方太平洋沖地震津波来襲に伴い被災したS港原油栈橋で荷役・係留中であったVLCCを対象として、急激な押し波とこれに対抗するために発動した本船推進力、また大きな船体運動による係留索の巻き出し・切断および防舷材の過圧縮の発生など、船長・乗組員の方々が遭遇した過酷かつ危険な船舶の係留状況について津波および船体動揺シミュレーションを通して被災当時の定量的な把握を試みた⁽¹⁾。またO港では係留避泊に成功したアフラマックスタンカー(10万トン級原油タンカー)の状況把握や係留避泊を可能にした要因分析について、同様なシミュレーションなどを用いて検討した⁽²⁾。

東北地方太平洋沿岸の他の港でも多数の大型船の被災実態が報告されているが⁽³⁾、本研究では、H港で津波高さ10m超の津波来襲に遭遇して係留・荷役施設および本船に甚大な被害を受けた大型石炭船の挙動につき、可能な限り入手できた被災状況を整理すると共に、合わせて津波および船体動揺シミュレーションを実施して被災当時の船体挙動や係留力の再現を行い当該大型石炭船が遭遇した被災状況の定量的な把握を試みる。

2. 津波来襲時の大型石炭船の係留状況

2.1 対象港湾およびバース

対象港湾は、外郭施設として北防波護岸・北防波堤および南防波護岸・南防波堤が配置され、港口は

¹ 正会員 東海大学 海洋学部 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)
² 非会員 常葉大学 社会環境学部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 325)
³ 正会員 前東海大学 海洋学部 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)
⁴ 正会員 神戸大学名誉教授 (〒658-0022 兵庫県神戸市深江南町 5-1-1)

南東方向に開いている。対象バースのある揚炭棧橋には2隻の大型石炭船が同時係留可能であり、棧橋の法線はほぼ南北方向（方位 348 度）である。そして対象バースは当該棧橋の南側バースであった。港内は当該棧橋前面およびターニングベイスンを含み水深-14m 以上を確保しているが、南防波護岸の港内側にある揚油バース前面では水深-5～-9m と浅くなっている。また北および南防波護岸の港外側は水深-10m 以下の浅い海岸線となっている。

2.2 対象船舶の諸元および係留図

Table 1 および Fig. 1 に津波来襲時の当該大型石炭船の船体諸元および係留図を示すが、左舷付けであった。 ω は津波の波向きで X 軸から Y 軸向きを正とし、 k_x , k_y , k_z は各軸周りの船体の慣動半径である。Fig. 1 に示すように当該石炭船は $\phi 65\text{mm}$ ナイロンロープ 16 本および棧橋標準ブロック（幅 28m）ごとに設置された防舷材 6 基で係留される状況であった。係留索の初期張力は当該石炭船の一般的な値として一律に 49kN(5ton) と設定した。Table 2 に係留条件詳細をまとめるが、Sway, Surge の固有周期も合わせて追記した。Fig. 2 には係留索の特性曲線を示す。一方防舷材は Fig. 3 にバネ特性を示すが、反力漸増型の空気式 $\phi 2000\text{mm}$ （直径） $\times 2000\text{mmH}$ （高さ）で

Fig.1 Mooring arrangement of the coal carrier

ある。規定の圧縮率は高さの 65% であるが、85% 圧縮率（圧縮量 1.7m）の過圧縮時までを設定した。

座標系は船体重心位置を原点とした空間固定座標系として船体座標系を設定し、X 軸正方向が右舷、Y 軸正方向が船首および Z 軸正方向が鉛直上向きの右手系としている。

Table 1 Ship dimensions

Ship type	Coal carrier
DWT	77,739
Loa(m)	229.0
Lpp(m)	218.0
B(m)	36.5
D(m)	18.5
d_m (m)	12.1
Disp(ton)	83,197
GM(m)	4.65
KG(m)	10.58
k_x (m)	69.76
k_y (m)	11.97
k_z (m)	69.76

Table 2 Mooring condition

Ship type	Coal carrier
Lines	Type
	Nylon
	dia(mm)
	65
	number
Fenders	16
	Pre-tension(kN)
	49
	SWL(kN)
	241
Natural period(s)	BL(kN)
	917
	Type
Jetty type	Pneumatic
	2000H x 2000D
	Interval(m)
Water depth(m)	28
	number
	6
	Sway
	151
	Surge
	187
	Pier
	14

Fig.2 Mooring line property of the coal carrier

Fig.3 Fender reaction force property of the coal carrier

2.3 ヒアリング調査から把握される船体挙動、海面状態および被災状況

被災が甚大であったことから津波来襲当時の船体挙動や海面状態の状況を詳細に把握することは困難であったが、バースマスターへのヒアリングおよび被災後の本船や係留施設などの状況をできる限り収集し、把握できた事項・できなかった事項を Table 3 のように整理した。Table 3 から被災当時の本船の状況を要約すると次のようである。

本船は揚げ荷役を開始直後でほぼ満載状態で地震および津波の来襲を受けた。揚炭機（アンローダー）は No. 2 ホールドに挿入されて当初荷役を行っていたが、地震によりアンローダ先端部はホールド内に残された。津波高さは痕跡高さから 10m 超で、防波堤や護岸を越える越流が生じた。津波第 1 波来襲時に大きな Pitch や Roll が生じたと報告されている。また、棧橋設置の防舷材 6 基が破損して、当該石炭船が棧橋に接触したと思われる棧橋損傷もみられた⁽⁴⁾。合わせて係留索 16 本全数が破断または巻き出された。これに伴い大きな船体動揺が生じ、本船はアンローダ先端部を引きちぎり棧橋から流出した。そして港内を漂流し、最終的には港内浅瀬部に座礁した。

Table 3 Summary of obtained information of sea disaster of the coal carrier

No.	Item	Obtained data	not obtained data
1	Ship (Body, Anchor, Main engine)	Ship dimensions (Loa, Lpp, B, d, W), Mooring arrangement, Cargo handling, 16:10~AIS data, Grounding position, Ship motion at the initial onset of tsunami	AIS data, Anchor usage, Main engine activation
2	Tsunami	Tsunami profile during 14:46~16:46(7200s) by simulation, Tsunami height over 10m, Current over 10k/t	It is essential how to investigate the simulation result. Several tsunami survey reports were published.
3	Fenders	Six fenders broken (over comp. → broken)	Which order were the fenders broken by ?
4	Mooring lines	All lines pulled out / broken.	Which order were the lines broken by ?
5	Pier	Fenders broken → Top side concrete on the pier damaged → Piles of the pier safe	Spring constant of the pier ?
6	Unloaders	Leader of one unloader remained in No.2 hold by the earthquake → Large ship motion induced by tsunami → The boom bended and leader broken	Weight of unloader: 1100ton ? Spring constant of the boom ? Breaking load of the boom and leader ?
7	Tsunami wave forces	Elevation and currents in time series	Predominant wave direction ?

3. バース前面での津波計算と大型石炭船に作用する外力の設定

3.1 バース前面津波の水位変動および流速の再現計算

当該津波来襲時の大型石炭船の挙動再現に当たっては、対象バース前面における津波の水位変動と流速データが必要となる。これに関しては東北地方太平洋沖地震による津波浸水範囲を良好に再現できる地震断層モデルが東北大学から提案されており、それらの地震断層モデルをもとに津波の初期水位分布を推定し、非線形長波理論（格子間隔 50m）による津波シミュレーションを用いて当該棧橋周りの津波の水位変動と流速を算出した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

(a) At 15:39:10 (3190s)

(b) At 15:40:08 (3248s)

(c) At 15:41:01 (3301s)

(d) At 15:42:20 (3380s)

(e) At 15:44:01 (3481s)

Fig. 4 Numerical results of tsunami elevation and current around the coal carrier

Fig. 5 Numerical results of tsunami profile for the moored coal carrier (14:46-16:46 on March 11)

対象栈橋周辺には港口からの津波来襲と合わせて南防波護岸からの越波が来襲していたことがヒアリング調査などから把握されている。このことから船体に作用する津波の水位変動や流速の設定に際しては、Fig. 4 に示すように当該栈橋周りの防波堤を

含み概ね港内全域に渡る東西方向 1100m、南北方向 1000m 範囲の平面的かつ時系列的な流況を算出し確認した。Fig. 4(a)は港口より押し波が来襲した船体周りおよび港内の流況を示している (15 時 39 分 10 秒, 3190s)。Fig. 4(b)は押し波が栈橋前面の当該石炭船に直撃したときの流況でほぼ右舷正横から津波が来襲している様子がわかる (15 時 40 分 8 秒, 3248s)。Fig. 4(c)は港口から来襲した押し波が港内を 1 周した状況 (15 時 41 分 1 秒, 3301s) で、Fig. 4(d)は南防波護岸からの越流が栈橋に來襲した状況である (15 時 42 分 20 秒, 3380s)。Fig. 4(e)は港内全域が 10m 超の津波高さとなり、港内中央で 10kt を超える流速が生じている。また陸域にも越流が広い範囲で来襲し、押し波来襲から約 5 分で港湾のほぼ全域が津波高さ 10m 超となっていたことがわかってきた。また当該石炭船の栈橋周りでは、南東側の港口から来襲する津波と南防波護岸・南防波堤からの越流が陸側から来襲する複雑な流況になっていたこともわかってきた。このため船体に作用する津波の水位変動および流速の代表波形としては、船体中心付近で算定された Fig. 5 に示す津波データを用いた。津波の水位変動および流速データは 2 時間分のデータを設定し、水位変動、東西および南北流速の最大・最小値はそれぞれ +10.9m (押し波)、-5.0m (引き波)、+0.8m/s (東流)、-1.4m/s (西流) および +0.9m/s (北流)、-1.5m/s (南流) となった。

3.2 大型石炭船に作用する外力計算および設定

3.2.1 波力

当該石炭船に作用する津波波力を求めるに際しては、従来のように卓越波向きを設定した線形波力の重ね合わせによる波力算定方法を試みた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし Fig. 6 に示す流速のリサージュ図を作成したところ、卓越波向きの設定が困難なほど流向が全方向に変動していることがわかった (港口からの津波来襲だけでなく陸側からも栈橋に越流あり)。そこでモリソン公式を用いる方法と船体周りの波形勾配から算出する方法 (船体長さに対して十分に津波の波長が長いことを確認している) の 2 種類の波力算定方法を、以下に示すように運動モード毎に適用した。

Sway, Surge, Yaw 波力は抗力および慣性力を考慮するモリソン公式を用いて算定した (Yaw は抗力のみ)。ここに抗力係数は水深影響と流れ向きから変化させて与え、慣性力係数は 2.0 とした⁽⁷⁾。

Fig. 6 Lissajous figure of the tsunami profile of Fig.5

(a) in longitudinal(for pitch)

(b) in lateral (for roll)

Fig. 7 Wave slope calculated by surface elevations around the coal carrier

Heave 波力は船体重心位置付近の Fig. 5 に示す水位変動から与えた。また Pitch, Roll 波力は Fig. 5 に示す水位変動に対して、船首尾位置および船体左右位置での水位変動から波形勾配 $\theta_p = \theta_p(t)$ および $\theta_r = \theta_r(t)$ を算出して、有効波傾斜係数を考慮して算定した⁽⁸⁾。ここに有効波傾斜係数は 1.0 とした。Fig. 7(a) には Fig. 5 に示した船体中央付近での水位変動に対して船首尾方向へそれぞれ 100m 離れた位

置での水位変動、およびこれらから算出した船首尾方向への波形勾配(Pitch に相当)を示している。押し波来襲時の計算点位置による違いを見やすくするため、時刻 3210s から 3420s の変動を合わせて示した。15 時 40 分(3240s) 頃に船首側から水位上昇が始まることから、プラス Pitch 角が生じている。また 15 時 42 分 20 秒(3380s) 頃に南防波護岸からの越流が栈橋に来襲した際には船尾側から水位上昇することからマイナス Pitch 角となっている。同様に Fig. 7(b) には Fig. 5 に示した船体中央付近での水位変動に対して左右方向へそれぞれ 50m 離れた位置での水位変動、およびこれらから算出した左右方向への波形勾配(Roll に相当)を示す。15 時 40 分(3240s) 頃に右舷側から水位上昇が始まり、マイナス Roll 角が生じていることがわかる。

3.2.2 アンローダによる拘束力

上述のように、地震により当該石炭船のアンローダ先端部はホールド内に残された。ヒアリング調査によると、津波第 1 波来襲時に大きな Pitch が生じた際にはアンローダ先端部も船体動揺に合わせて上下動をしていたとのことである。そこでアンローダ内に残された石炭重量を船体に荷重として与えることを考えたが、微小として無視した。一方 Sway, Surge に大きな船体動揺が生じてアンローダ先端部がホールドハッチコーミングに接触するときおよび引きちぎられる際に発生する船体拘束力については、Fig. 8 に示すように区分的に線形バネ定数と接触変位を設定することで、Sway, Surge および Yaw に考慮した。ここにバネ定数などは栈橋バネと同等として以下のように設定した。

初期バネ定数 : $Ku1=78,400\text{kN/m}(8,000\text{tf/m})$

2 次バネ定数 : $Ku2=7,840\text{kN/m}(800\text{kf/m})$

一次変位 : $X_{ss}=1\text{m}$

二次変位 : $X_{sb}=2\text{m}$

なお接触変位が X_{sb} を越えるとアンローダは倒壊するものとして拘束力ゼロとした。また当該ホールドハッチ開口部寸法は幅 16.4m、長さ 27.3m、開口部中央位置は船体重心から前方へ 38.83m とした。合わせてアンローダ先端部の断面形状は 3m 角の正方形とし、初期位置はホールド内中央とした。

3.2.3 着底力および船底摩擦力

当該栈橋周辺の水深と Fig. 5 に示す津波の水位変動および当該石炭船の喫水状況から、押し波来襲前

Fig. 8 Modeling of unloader restricted force

の引き波時に本船船底が海底に着底する可能性が考えられた。そこで着底力と船底摩擦力を考慮したモデル化を流用した⁽⁹⁾。

3.2.4 防舷材および棧橋からの反力

係留船に作用する防舷材反力は、規定の圧縮率以内で防舷材を使用する場合では一般に防舷材単体の反力特性を流用して船体への反力として与えていた。しかし今回は大きな船体動揺により防舷材は破損し、さらに棧橋と本船が接触して上部工が損傷する状況となった。従来と異なる当該被災状況下での船体動揺や係留力の再現シミュレーションを行うに際して、防舷材と棧橋のバネ特性を合わせた新たなモデル化を行った。

棧橋は防舷材取付け間隔に相当する 28m ブロック単位としてバネ定数を設定した。ここに類似の棧橋詳細データを参照して、φ 1400mm の鋼管杭 20 本をブロック当りに配置し、杭頭から海底面までの長さ (18.7m)、水平地盤反力係数などを設定した。そして棧橋標準ブロック当りバネ定数を $K_p=73,380 \text{ kN/m}$ (7,488tf/m) とした⁽¹⁰⁾。また防舷材が 85% 圧縮するまでは防舷材と棧橋は直列バネとして同時に変形し (変位 1.81m まで)、その後船体が棧橋に接触する場合は棧橋バネのみにより反力が与えられるようにモデル化した。Fig. 9 には防舷材単体、棧橋と合わせた直列バネおよび棧橋のみのバネ特性を示す。

Fig.9 Fender and pier reaction force property of the coal carrier

3.2.5 その他の外力

当該石炭船に作用するその他の外力としてはまず風圧力が考えられるが、当時の風況としては微弱であったことからゼロとした。また船体と防波堤間に生じる側壁影響による吸引力や回頭モーメントの影響は考えられるが今回考慮しなかった。

4. 津波来襲時の大型石炭船の挙動再現

4.1 係留船舶の時系列解析

当該地震津波来襲による大型石炭船の挙動再現に際しては、式 (1), (2) の運動方程式を解くことで船体運動量および係留力を算定するものとする。

$$\sum_{j=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \ddot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^6 \int_{-\infty}^t \dot{x}_j(\tau) \cdot L_{ij}(t-\tau) d\tau + \sum_{j=1}^6 D_{ij} \cdot \dot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^6 C_{ij} \cdot x_j(t) + G_i = F_i(t), (i=1,2,\dots,6) \quad (1)$$

$$F_i(t) = F_{ei} + F_{cei} + F_U + F_{fr}, (i=1,2,\dots,6) \quad (2)$$

ここに添字 i, j は j モード運動による i モード運動への寄与を表し、 $i, j=1 \sim 6$ は運動モード Sway, Surge, Heave, Pitch, Roll, Yaw である。 $x_j(t)$ は船体動揺の変位または回転角、 M_{ij} は船体の質量または慣性モーメント、 $m_{ij}(\infty)$ は不変付加質量または不変付加慣性モーメント、 L_{ij} はメモリー影響関数、 D_{ij} は粘性減衰係数、 C_{ij} は静的復原力係数、 G_i は非線形係留力ベクトル、 F_i は外力項である。外力項は津波波力 F_{ei} 、遠心力 F_{cei} 、アンローダ拘束力 F_U および船底接触による着底力・摩擦力 F_{fr} により構成される。また防舷材および棧橋からの反力は非線形係留力ベクトルに加味した。粘性減衰力は Sway, Surge, Roll, Yaw に考慮し、合わせて係留索の張力算定において係留索の巻き出しやウインチのブレーキ力を考慮したモデルを用いた⁽¹⁾。

4.2 船体挙動と係留力の再現

以上の設定に基づき、式(1)、(2)の運動方程式を解くことで当該地震津波来襲時の石炭船の船体運動や係留力を算定した。ここに Fig. 5 に示す水位変動および流速において、地震発生後約 40 分頃 (2400s) から急激な引き波、引き続き押し波が来襲し流速変化も生じている。このことから船体動揺シミュレーションは14時46分の地震発生時から行っているが、15時26分(2400s)から15時51分(3900s)を表示する。

4.2.1 波力

3.2.1 に示した津波波力算定方法により船体に作用する津波波力を求めた。Fig. 10 に当該波力の時系列計算結果を示す。

Heave に関しては津波の水位変動に一致した波力となっている。Pitch 波力は時刻 15 時 42 分頃 (3382s) に船尾を持ち上げる急激な波力が発生している。これは陸岸からの越流が当該栈橋に来襲した時刻に一致し、Fig. 7(a)に示した船首尾方向波形勾配に対応している。同様に Fig. 7(b)に示した船体左右方向波形勾配に対応して、Roll 波力には押し波来襲時の時刻15時40分頃(3241s)に右舷側を持ち上げる急激な波力が発生している。Sway, Surge 波力も

Fig. 10 Numerical results of the coal carrier's exciting forces during the tsunami

比較的顕著であるが、Sway には 15 時 40 分頃 (3240s) に船体を栈橋側へ押し付ける急激かつ大きな波力が生じている。Yaw 波力は流速に対応した波力となっているが、概ね左舷回頭モーメントとなっていることがわかる。

4.2.2 船体運動

船体動揺量の時系列計算結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 に示すように Sway, Surge, Heave および Yaw が顕著である。Heave に関しては津波の水位変動に一致した動きであるが、水深 14m に対して喫水 12.1m であることから、3060s 頃から引き波最下点 3232s (-3.3m) まで船体は着底している。Sway は押し波来襲(3240s 頃)に -2m となり、その後は沖側への動揺に伴いアンローダ拘束力により保持されるが、3394.5s にアンローダーを引きちぎり沖側へ移動している。Surge は 押し波来襲により船尾側へ移動するが 3300s 頃アンローダ拘束力により船首側へ移動している。その後前後に移動するが、3394.5s にアンローダーを引きちぎり、その後船首側へ移動している。上述の Sway, Surge からアンローダーは No. 2 ホールドの左舷側船尾角で引きちぎられた可能性が考えられる。

Pitch は押し波来襲時の当初は船首が持ち上げられるが、3385s 頃の大きな船尾上昇は南防波堤を越

Fig. 11 Numerical results of moored coal carrier motions during the tsunami

えてきた越流に起因する。Roll は押し波来襲から±2deg であるが、3517s 頃に-10deg 程の大きな動揺が生じている。これはYaw の大きな正回転により船首側防舷材(F1)に船体が接触し、合わせて水位上昇により船体重心位置が防舷材取付けレベルの上側になったためマイナスのRoll (左舷揺れ) となった。Yaw は津波波力やアンローダによるYaw モーメントにより正回転 (左舷回頭) が生じ、その後は防舷材反力 (栈橋反力) や係留索の巻き出しが合わさり右舷回頭となる大きな動揺が生じている。

4.2.3 アンローダによる拘束力

アンローダーによる船体拘束力の時系列計算結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12 に示すように Sway 方向拘束力がマイナスのみ発生していることから、Sway 沖側への動揺により、アンローダ先端部はホールドハッチコーミングの左舷側に接触していたことがわかる。またこれに伴いYaw には左舷回頭モーメントを誘発している。Surge 方向拘束力は船首側および船尾側へ変動しているが、アンローダ先端部はNo. 2 ホールドの左舷側船尾角で引きちぎられていることが Fig. 11 の船体動揺と合わせてみることで理解される。

4.2.4 着底力および船底摩擦力

船体の着底による海底からの反力およびこれに伴う摩擦力の時系列計算結果を Fig. 13 に示す。Heave には引き波に合わせた船体着底力が反力として生じてことがわかる。一方 Sway, Surge には押し波来襲による摩擦力が生じている。摩擦力は当該動揺速度の符号に対して逆向きに与えているため押し波来襲時のマイナス Sway 動揺速度によりプラスの Sway 摩擦力が生じている。また Surge についても、押し波来襲時のマイナス Surge 動揺速度によりプラスの Surge 摩擦力が生じている。いずれも押し波による波力に対抗して作用するが、Fig. 10 の津波波力に較べれば小さく船体動揺を抑制するほどではない。

4.2.5 係留力

(1) 係留索張力

Fig. 14(a), (b)に係留索 L1(head line), L3(head line), L7(Forward spring line), L10(Aft spring line), L11(Aft breast line), L16(stern line)の張力および索長さの時系列計算結果を示す。

ヒアリング調査を参照して、係留索 L3, 4, 8, 9, 13, 14 は索長が短いことから、船体の大きな動揺発生初期に切断したものとした。津波第1波が到達する時刻15時40分(3240s)頃から、大きな船体動揺の誘発に伴い、ウインチブレーキ力を超える張力が各

Fig. 12 Numerical results of unloader restricted forces of moored coal carrier during the tsunami

Fig. 13 Numerical results of grounding forces of coal carrier during the tsunami

索で生じ、係留索が漸次巻き出されている様子がわかる。索長さは200mを基準としたが、係留索 L1, 7, 10, 11, 16 などでは15時51分(3900s)までに全長さが巻き出されて張力ゼロとなっている。係留索 L3 の場合、索長さを短く設定しているためにこれを超えると張力ゼロとなり、索が破断したことを表している。

(2) 防舷材反力

Fig. 15 に防舷材反力の時系列計算結果を示す。Fig. 15(b)には押し波来襲時の防舷材の状況 (反力8000kNで破損) や栈橋との接触状況を見やすくするため、時刻3210sから3420sの反力時系列結果を合わせて示した。津波第1波が到達する時刻15時40分(3240s)までは、船体は防舷材に密着して全ての防舷材に反力が生じ、係留索の初期張力と防舷材の反力がバランスし緩やかな緊張係留が確保されている。その後の津波第1波来襲による Sway, Roll および Yaw の船体運動に対応して反力が生じ、3242s までに6基全ての防舷材に85%圧縮率に至る変形が生じ、3244sには13000~15000kNに及ぶ反力が発生している (栈橋のみバネによる)。Fig. 16 に防舷材反力と

(a) Line tension

(b) Line length

Fig. 14 Numerical results of line tension and length during the tsunami

変位の時系列計算結果から算出した各防舷材の特性曲線を示している。津波第1波が到達した際の時刻3244sでの栈橋変形量は約0.2mである。ここに変形

(a) at 2400-3900s

(b) at 3210-3420s

Fig. 15 Numerical results of fender reaction force during the tsunami

量1.81m(圧縮率90.5%)までは防舷材と栈橋を合わせた直列バネ特性により船体には反力が与えられ、圧縮率100%を超えた場合には栈橋のみのバネ特性により反力が与えられることから、急激な反力が生じていることがわかる。特に船首側の防舷材F1では、時刻15:44:31頃(3511s)に100,000kNに及ぶ大きな反力と栈橋への変形量1.358mが生じている。これは防舷材の破損、アンロード先端部の引きちぎり、さらには係留索巻き出しが進み本船が流出し始めた際に生じたYawの大きな左舷回頭に起因している。

Fig. 16 Numerical results of fender performance during the tsunami

5. 結語

本研究では東北地方太平洋沖地震津波来襲時に津波高さ 10m 超の津波来襲に遭遇して係留・荷役施設および本船に甚大な被害を受けた大型石炭船の挙動につき、可能な限り入手できた被災状況を整理すると共に、合わせて津波および船体動揺シミュレーションを実施して被災当時の船体挙動や係留力の再現を行い当該大型石炭船が遭遇した被災状況の定量的な把握を試みた。得られた主な結論を要約すると以下のようになる。

- ①東北地方太平洋沖地震発生 53 分後の 15 時 39 分頃には津波が港口に到達し、押し波来襲から約 5 分で港内全域に 10m 超の津波高さおよび港内中央に 10kt を超える流速が生じ、また陸域にも越流が広い範囲で来襲して、港湾のほぼ全域が津波高さ 10m 超となる津波状況であった可能性を明らかにした。
- ②当該大型石炭船棧橋周りでは、地震発生 54 分後の 15 時 40 分に南東側の港口から押し波が到達すると共に、南防波護岸・南防波堤からの越流が 15 時 42 分頃に陸側から来襲する複雑な流況になっていたことを明らかにした。
- ③地震津波来襲により甚大な被害を受けた当該大型石炭船および荷役・係留施設の被災状況につき、

棧橋設置の防舷材破損や棧橋バネのモデル化、ホールド内に残されたアンローダ先端部による船体拘束力のモデル化、また船体の着底効果のモデル化、さらには複雑な棧橋周りの流況での津波波力のモデル化を行うことで、被災当時の船体動揺量や係留力などを定量的に明らかにした。

本研究では、東北地方太平洋沖地震津波来襲時に H 港で津波高さ 10m 超の津波来襲に遭遇して係留・荷役施設および本船に甚大な被害を受けた大型石炭船の挙動につき定量的な把握を試みたが、AIS データなどの船体実測挙動は入手できず当時の状況を知る方からのヒアリング調査結果などに基づいている。また防舷材の過圧縮時の特性や棧橋のバネ特性、アンローダ先端部による船体拘束力のモデル化、さらには津波高さ 10m 超に加え越流も混在する流況での船体に作用する津波波力には大胆な仮定・設定に基づき行っている。結果として係留施設や荷役施設の破損・損傷状況の再現は概ねできたが、モデル化については課題が残されている。本件の上述のモデル化改良をさらに進めると共に、引き続き東日本大震災で被災した係留船舶の挙動分析や定量的解析を行いたく考えている。

本研究が地震津波来襲時の船舶係留の安全性についての定量的な評価・把握および今後の対策・減災への一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp. 57-68，2012.
- (2) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時のアフマックス tanker 係留避泊に関する一考察，日本航海学会論文集，第 129 号，pp. 19-30，2013.
- (3) (社)日本海難防止協会：大地震及び大津波来襲時の航行安全対策調査報告書 -津波影響による船舶避難行動と被災状況等に係る基礎調査-，2012. 3.
- (4) 斉藤知秀・森 吉之・内海 博：東日本大震災による火力発電所土木構造物の被害と対策，電力土木，第 360 号，pp. 7-11，2012.
- (5) 今村文彦・越村俊一・村嶋陽一・秋田善弘・新谷勇樹：東北地方太平洋沖地震を対象とした津

波シミュレーションの実施, 東北大学モデル

(version 1.1, version 1.2),

http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf 2011. 11, 2012. 4.

- (6) 阿部郁男・今村文彦：リアルタイム津波予測実現に向けた計算方式の評価と改良, 土木学会地震工学論文集, No. 27, pp. 319-325, 2003.
- (7) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波による栈橋係留の超大型原油タンカーの被災実態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. 816-820, 2012.
- (8) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学, 成山堂, 第 128 号, pp. 97-101, 1982.
- (9) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：港内係留船舶のかく坐による津波対策に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 第 128 号, pp. 251-260, 2013.
- (10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.