

外洋性港湾における波浪特性が船舶係留時の 防舷材の変形量に及ぼす影響分析

白石 悟*・永松 宏一**・海原 敏明***

1. はじめに

港湾内で係留された船舶は、波浪・風などの外力の影響によって、ときには係留索の切断、防舷材や船舶の損傷を引き起こす大きな動揺を生じることがある。このような係留船舶の大きな動揺と、それに伴う防舷材の損傷事故等については、観察された事例はあるものの、損傷時の船舶と外力条件とが特定されていることは極めて少ない。上田・大井(1987)は、ゴム防舷材の損傷の実態を調査し、損傷要因のひとつが係留船舶の動揺による過圧縮であることを示唆している。また、最近の研究では、外洋に面して立地する港湾において、比較的静穏な海象状況であっても Surge や Sway の長周期動揺が、周期の長いうねりとその中に含まれる長周期波の作用によって大きくなり、係留索が切断する危険性が指摘されている(例えば、著者ら, 1995)。

本研究では、防舷材損傷時の外力(波浪や風等)および船舶条件を得ることができた港湾において、船舶の動揺シミュレーションにより防舷材損傷状況の再現を試みるとともに、その再現性を検証する。また、研究対象とした港湾は、波浪の影響が非常に大きい外洋性の港であるため、船舶の動揺に及ぼす波浪特性、すなわち波のスペクトル尖鋭度や波向等の影響について考察し、防舷材の損傷要因や船舶係留時の動揺量、防舷材の変形量に及ぼす影響を検討する。

2. 防舷材損傷時の状況

(1) 海象・気象状況

太平洋側に面する A 港において、平成 8 年 12 月 24 日、低気圧の通過に伴う波浪の作用によって、防舷材が損傷する事故が発生した。事故発生時の係留船舶と外力の作用方向の関係を図-1 に示す。事故時の風況は、風向が WSW~SW で、風速は 5.1~6.6 m/s とさほど大きくなかったが、港外の波浪観測データによれば、事故前後の時刻における有義波高は 2.28~2.42 m、有義波周期は

16.4~16.6 s であり(以降、本論文では波高は有義波高を、波周期は有義波周期を示す)、長い周期のうねりが係留船舶に作用する状況下にあった。図-2 に示す事故前後の波浪スペクトルと波高および波周期の経時変化によれば、低気圧が通過した後の波高が減衰していく過程においても、長周期波のエネルギーはあまり減衰していないことがわかる。また、図-3 は事故時の波浪スペクトルと JONSWAP 型スペクトル($\gamma=7.0$)とを比較したものであり、事故発生時の波浪スペクトルは、尖鋭度が大きく、かつ長周期波成分が存在したことがわかる。このような波浪状況に起因する係留船舶の大きな動揺が生じていたことが伺える。

(2) 防舷材の損傷位置と船舶の動揺状況

防舷材損傷時にバースに係留していたのは鉱石運搬船であり、係留状況は図-4 に示すとおりであった。防舷材の損傷は、船尾側を中心に生じており、防舷材番号 F 9、F 10 が破損し、F 8 が外層ゴム剝離・変形により使用不可能となった。また、船舶にも損傷があり、損傷した防舷材が接触する左舷側やや後方に長さ 2~3 m に渡り約 10 cm の窪みを生じた。

当該バースにおいては、荒天時の係留船舶の Roll の動揺量が目視観察あるいはビデオ撮影によって表-1 のように測定されている。平成 8 年 12 月 24 日の事故以前に

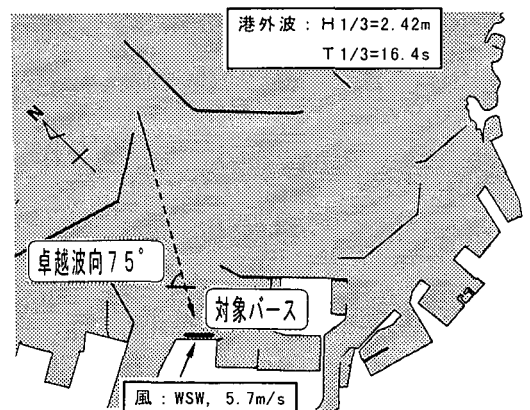


図-1 係留船舶と外力との位置関係

* 正会員 博(工) 運輸省 港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室長

** 正会員 工 修 株式会社 エコー 環境水理部 横浜分室長

*** 株式会社 エコー 環境水理部 横浜分室

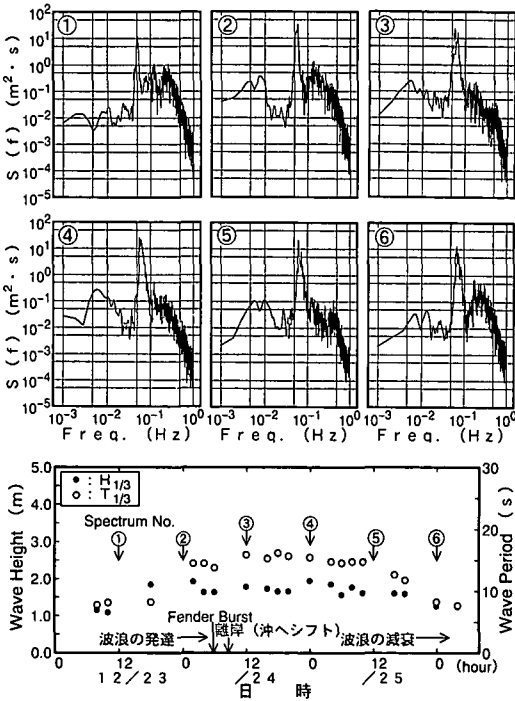


図-2 防舷材損傷事故前後の波浪状況

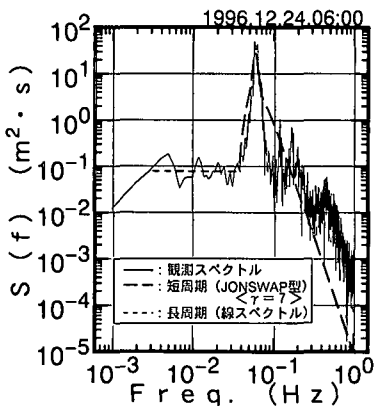


図-3 波浪スペクトルの比較

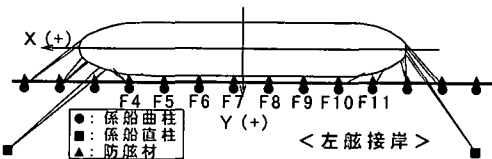


図-4 係留状況

も低気圧通過時に数回にわたって、沖に離棧する等の荷役障害を生じていた。船舶の動揺は、現地の観察記録から Roll が顕著であり、Sway および Yaw が Roll の動揺

表-1 主な荒天時における Roll の動揺量

日付	Roll	波高	波周期
3/22	12.0 deg	2.66 m	7.8 sec
5/16	3.0 deg	1.14 m	7.5 sec
5/18	4.9 deg	1.72 m	7.0 sec
6/15	1.5 deg	1.06 m	5.8 sec
10/ 2	1.5 deg	1.40 m	6.6 sec
10/26	1.0 deg	1.85 m	4.5 sec
12/24	4.0 deg	2.42 m	16.6 sec

*波浪諸元は、港外の波浪観測地点での値である。

に連成している状況にあった。

3. 解析条件および方法

(1) 再現シミュレーション

防舷材損傷時の諸条件をそのまま動揺シミュレーションの入力条件として、再現シミュレーションを実施した。そして、シミュレーション結果と現地の状況を比較し、再現性を検証した。なお、動揺シミュレーションの計算方法の詳細は上田 (1984) を参照されたい。

a) 船舶の条件

対象船舶は 40,000 DWT の鉱石運搬船であり、事故当時の荷揚作業中の载荷状態を考慮して空載としている。

b) 波浪条件

事故当時の波浪観測記録は、港外のデータしかなかったため、その後にバース前面で観測された記録から、波高が大きな 21 件を抽出して、港外波との関係を分析した。まず、港内外の波浪観測データをスペクトル解析し、周波数帯ごとのエネルギーの増幅率 (平均値) を求め、その応答関数を用いて図-5 に示すように事故当時の港外波のスペクトルから当該バース前面での波浪スペクトルを推定した。再現シミュレーションでは、推定したバース前面における波浪スペクトルをエネルギー分割して代表周波数および初期位相を乱数で与え、事故時の波浪の再現を試みた。長周期波成分 (40 s 以上) については、港内副振動と考えられる周期帯でエネルギーの増幅も見られたが、エネルギー増幅率が大きく、かつその要因も不明確であったため、本研究では港外の長周期波がそのまま岸壁前面に到達すると仮定した。また、入射波向は当該バースへの卓越波向である 75°を用いた。

c) その他の条件

風速は、防舷材損傷時に観測されている条件である 5.7 m/s を入力条件とし、船舶の風抗力係数を上田ら (1993) の手法に従って与えることで、事故当時の風向 (WSW) による荷重状態を再現した。また、防舷材および係留索の変位復元力特性についても現地の条件を適用した。

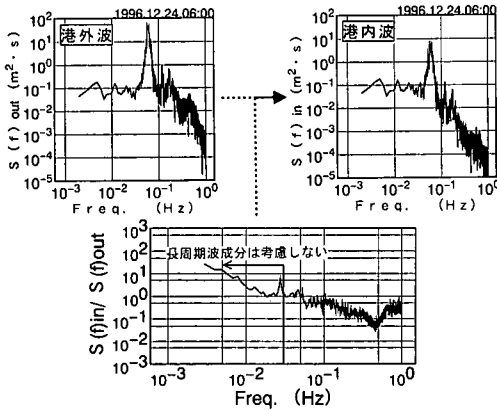


図-5 バース前面における波浪スペクトルの推定結果

(2) 波浪特性の影響分析シミュレーション

波浪特性の影響分析シミュレーションでは、船舶や係留系の条件は再現シミュレーションと同じように現地の条件をそのまま用いることとし、波浪諸元および風速は、未超過確率 97.5% に相当する諸元として、それぞれ波高 0.55 m、波周期 12.0 s、風速 10 m/s とし、波向や風向は卓越条件である波向 75°、風向 W を基本条件とした。

a) 波向の影響分析

波向が船舶の動揺および防舷材の変形量に与える影響を分析するため、波向条件をバースに対して 15°~90° まで 6 条件に変化させた。波浪スペクトルは Bretschneider-光易型を用いた。

b) 波浪スペクトルの影響分析

当該地区で観測された波浪スペクトルを解析した結果、波周期が長い (12.0 s 以上) ほど尖鋭度が大きくなって JONSWAP 型に近い形状を示し、波周期が短くなると尖鋭度は小さくなり、風波の標準スペクトルである Bretschneider-光易型スペクトルに近づく傾向にあることがわかった。このような波浪特性が防舷材の損傷を引き起こすような船舶の大きな動揺に与える影響を検討するため、波浪諸元を同じにして、スペクトルの尖鋭度や長周期波エネルギーの与え方を変えて動揺シミュレーションを実施した。つまり、スペクトル形状は、尖鋭度の大きい JONSWAP 型スペクトルと比較的尖鋭度の小さい Bretschneider-光易型スペクトルの 2 条件に変化させ、それぞれのスペクトルについて長周期波を考慮した場合としない場合とで計算を実施した。

c) 波周期の影響分析

係留船舶の動揺成分のうち、防舷材の設計 (圧縮変形) において特に重要になるのは、Sway, Roll, Yaw の 3 成分である。これら動揺成分の固有周期は、Sway や Yaw は長くなって長周期波成分に近接し、Roll は比較的短く風波成分に近くなる特性があるため、波周期によって船

舶の動揺量が大きく変化し、場合によっては係留系の変位復元力特性の非線形性に起因するサブハーモニックモーションにより、防舷材の変形量も大きくなることがある。そこで、波周期は現地波浪の出現頻度および対象船舶の固有周期を考慮して、8.0 s、10.0 s、12.0 s の 3 条件とした。

4. 動揺シミュレーションによる再現性の検証

防舷材損傷時の再現シミュレーションより得られた、防舷材の最大歪 $\delta_{\max}$ と許容歪 δ_a の関係を図-6 に、船舶の動揺量を表-2 に示す。表中には、対象とした船舶の動揺成分ごとの固有周期および荷役における許容動揺量 (Ueda ら, 1988) を併記している。

損傷する可能性が高い $\delta_{\max}/\delta_a > 1$ となっている防舷材の位置を、実際に損傷した箇所防舷材と比較すると、両者はほぼ一致しており、現地観測された尖鋭度の大きな波浪スペクトルを適用することで、損傷状況をよく再現できたと言える。防舷材損傷時の Roll の動揺量は 4.0°~5.0° 程度と観測されたが、シミュレーションから得られた動揺量は、観測記録とほぼ同じ 4.93° であり、船舶の動揺量もよく再現している。

再現シミュレーションによる計算結果から、許容動揺量を超過するのは Sway, Heave, Yaw の 3 成分であり、防舷材の圧縮に影響する 2 成分が含まれていることから、係留船舶の動揺が防舷材の損傷に強く影響していた

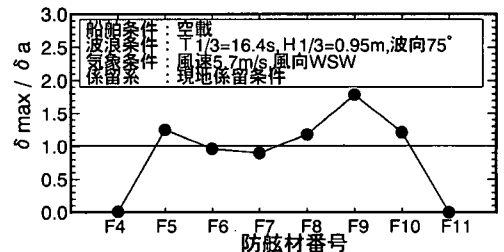


図-6 再現シミュレーションにおける防舷材変形量

表-2 再現シミュレーションにおける船舶の動揺量

動揺成分	固有周期	動揺量 (振幅量)	許容動揺量 (振幅量)
Surge	94.82 s	1.78 m	2.0 m
Sway*	128.89 s	2.12 m	1.0 m
Heave	9.33 s	2.11 m	1.0 m
Roll	10.90 s	4.93°	6.0°
Pitch	8.93 s	0.88°	2.0°
Yaw	59.63 s	4.23°	2.0°

*Sway は岸壁から離れる方向への動揺量である。

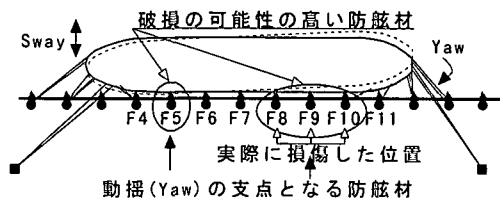


図-7 動揺シミュレーション結果と実際に損傷した防舷材の位置の比較

ことを表している。防舷材の損傷は、シミュレーションも実際に船尾側を中心に発生しており、シミュレーション結果より船体の中央で変形量が小さく、船首・船尾で変形が大きくなることがわかる。このような状況を総合的に判断すると、当該バースで発生した防舷材の損傷事

故は、図-7に示すような船首・船尾寄りの防舷材を支点とした船舶の動揺(Yaw)とその他の動揺成分(RollおよびSway)が連成した大きな動揺に起因するものと判断される。

5. 波浪特性が係留船舶の動揺、防舷材の変形量に及ぼす影響分析

係留船舶の動揺量は、固有周期に近い周期帯の波エネルギーが大きくなる時、その動揺量も増幅することが従来から知られている。また、長周期波が存在すると Surge の長周期動揺が大きくなるため、係留索が切断する危険性も高くなる。外洋に面した港湾では、このような波浪特性が船舶の動揺量に与える影響は非常に大きいと考えられ、当該バースも波浪の影響を受けやすい条件下にある

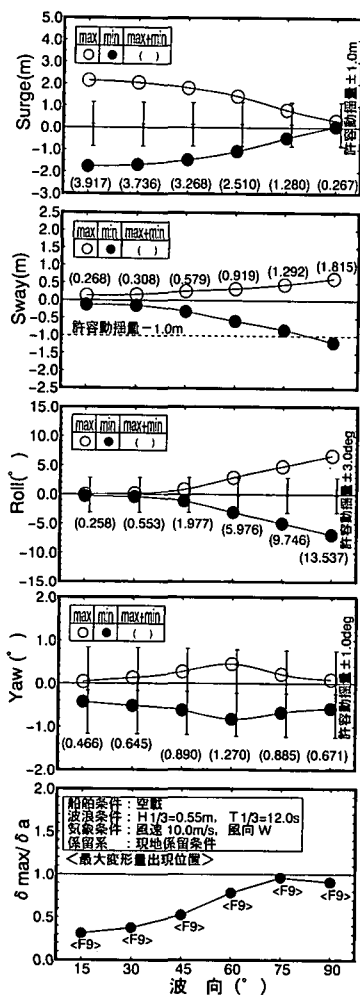


図-8 波向と動揺量・防舷材の変形量の関係

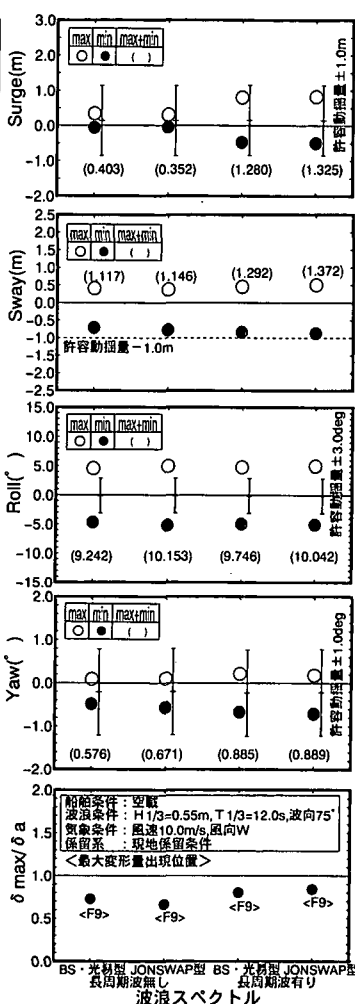


図-9 スペクトルと動揺量・防舷材の変形量の関係

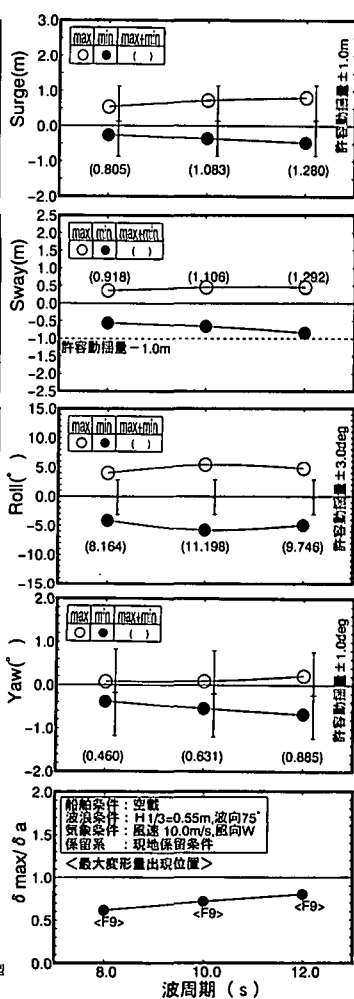


図-10 波周期と動揺量・防舷材の変形量の関係

ことから、波浪特性がどのように防舷材の変形量に影響するかを分析する。

(1) 長周期波の存在する条件における波向の影響

当該バースにおける波向と動揺量および防舷材の最大変形量との関係を図-8に示す。Surgeの長周期動揺が顕著となるのは波向 45° 以下の場合であって、当該バースの卓越波向である 75° では、荷役の許容値の範囲内にある。逆に波向が 60° 以上となるとSway, Rollが顕著となり、許容動揺量を超過する。以上のことから、当該バースにおいては、荷役支障に及ぼす長周期波の影響は比較的少ないことが確認された。再現シミュレーションでも示したように、現地での荷役支障の主たる要因としてRollが大きいたことが挙げられることから、この結果からもシミュレーションが現地の係留船舶の動揺状況をよく再現していると言える。

防舷材の圧縮変形にはSurgeの長周期動揺は影響しないため、SwayやRollの動揺が大きくなる波向 60° 以上で防舷材の変形量も大きくなり、波向 75° で最大となる。これは、SwayやRollの動揺が大きくなり、かつYawの動揺量が最大となる波向が $60^\circ \sim 75^\circ$ であるためである。

(2) 当該バースにおける波浪スペクトルの影響

スペクトル形状および長周期波が与える影響の比較結果を図-9に示す。長周期波成分を考慮した場合には、従来から知られているようにSurgeの動揺量が顕著に増加する。SwayやYawについても同じ傾向にあるが、増加率はSurgeに比べると極めて小さい。これらの成分の動揺量は、荷役の許容動揺量よりも小さいけれども、許容値を超過するRollは、尖鋭度の大きいJONSWAP型スペクトルのほうが動揺量も大きくなる。すなわち、当該バースにおけるRollの大きな動揺は、長周期波の影響によるものではなく、尖鋭度の大きい波浪スペクトル特性による影響を受けているものと考えられる。

(3) 波周期が船舶の動揺量に与える影響

波周期と防舷材の変形量および船舶の動揺量の関係を図-10に示す。SwayやYawの固有周期は比較的長いいため、波周期が長い場合に動揺量も大きくなる。Rollは、

固有周期(10.90s)に最も近くなる波周期10.0sで動揺量も大きい。防舷材の変形量は、これら3成分の動揺量に対応するように大きくなっており、波周期が長くなるほど変形量は大きくなる。ただし、波周期による防舷材の変形量の変化は、波向を変化させた場合ほど顕著でない。

6. あとがき

本研究では、防舷材損傷事故の再現を試み、防舷材の損傷要因を数値シミュレーションにより検証することができた。また、波浪スペクトルや波向等が係留船舶の動揺とそれによる防舷材の変形量に与える影響を分析し、検討対象バースのような外洋性港湾における特徴について考察した。本検討結果は、防舷材の設計(圧縮変形)において船舶の接岸エネルギーを考慮するだけでなく、波浪条件が厳しい場合において、係留船舶の大きな動揺が懸念される場合には、動揺シミュレーションにより防舷材の吸収エネルギーが十分であるか確認することの必要性を再認識させられるものであった。卓越する波向がバースに対して直角に近い角度で入射する場合には、防舷材の設計について、特に注意を払わなければならない。

最後に、本研究が今後の港湾整備計画の策定、係留システムの構築を図るための一資料として活用されることを期待し、結語とする。

参考文献

- 上田 茂 (1984): 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504, 372 p.
- 上田 茂・大井栄二郎 (1987): 港湾の係留施設における防衛工の設計について, 港湾技研資料, No. 596, pp. 59-77.
- 上田 茂・白石 悟・浅野恒平・大島弘之 (1993): 新しい風抗力係数の計算式の提案および係留船舶の動揺への影響の検討, 港湾技研資料, No. 760, pp. 30-45.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹 (1995): 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 941-945.
- Ueda, S. and S. Shiraishi (1981): The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4, pp. 3-61.