

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

白石 悟*・久保雅義**・上田 茂***・桝原繁樹****

1. 緒 言

穏やかな海象・気象にもかかわらず、係留船舶に大きな長周期動揺が生じる事例が近年各地で明らかになってきた。この現象はしばしば底うねりと呼ばれ、副振動などの長周期波による影響であることが指摘されているが、これに対する具体的な対策案が提案されていないのが現状である(松良ら, 1994)。外洋に面するバースにおいて、バース稼働後係留索切断が多発する事例があった。係留索切断は秋季および冬季に発生し、係留索の増取りなど荒天係留対策を行ったにもかかわらず、60,000 DWT 級の船舶に Surge 両振幅で 6~8 m、沖側への Sway で 1~2 m の動揺(目視)が発生し、係留索切断のみならず、防舷材の過圧縮やせん断圧縮がみられた。また気象・海象条件が厳しいことから、係留船舶に大きな動揺が発生した場合、早い時期での本船の冲出しやこれに伴うタグボートの手配などを余儀なくされていた。したがって荷役稼働率の向上はもとより、係留限界の向上や係留システムの安全性維持が急務の問題となっていた。そこで係留索切断時の港外・港内波および風、天気図や気圧配置等の分析などを行い、係留船舶の大きな動揺の発生原因が港外からの長周期波によって港内で増幅された副振動と周期 2~3 分の Surge との共振と推定した。そして係留システムの特性に着目して、係留系の固有周期を調整することにより、直接的に船舶の動揺を抑制させる対策が検討され、実施された。

本研究では、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立案・実施の経緯を詳述すると共に、係留システム変更後に行った係留船舶の動揺量等の現地観測結果を用いて、係留システム変更による改善効果および長周期波と風波の共存する波動場での動揺シミュレーション手法の有効性について検討する。

2. 係留船舶の動揺抑制対策の立案・実施の経緯

(1) 対象港湾および船舶・係留状況

当該港湾の形状は、図-1 に示すように防波堤により港内を遮蔽する典型的な埋立式港湾であり、当該バースは図中の位置にある。冬季の海象条件は厳しく、West 方向から風速 25 m/s を超える強風が吹き、防波堤からの越波や港内に白波が発生する状況となることがあった。

当該棧橋を利用する船舶は、60,000 DWT パナマックス船型と約 90,000 DWT 級の船舶である。図-2 に、

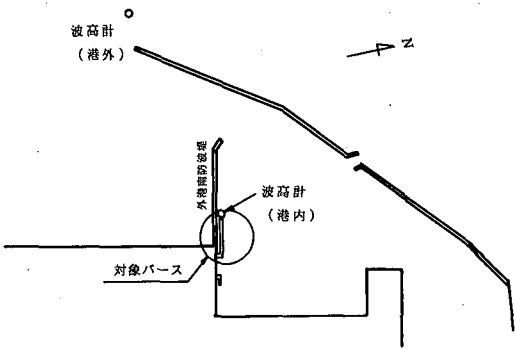


図-1 港湾形状

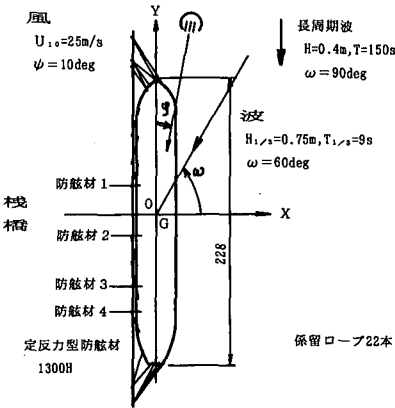


図-2 係留状況 (60,000 DWT 船、荒天時) (単位: m)

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室長
** 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座
*** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
**** 工博 横浜ゴム(株) MB 開発本部 開発推進部

60,000 DWT 船の荒天時にとった係留状況を示す。係留システムは、係留索が $\phi 100$ mm および $\phi 65$ mm ナイロンロープ合わせて 22 本と防舷材が定反力型防舷材 1300 H であった。

(2) 改善対策の検討

a) 係留船舶の大きな動揺の発生原因の究明

桟橋に船舶が係留中、天候が悪化して動揺量が大きくなり、係留索切断が発生した。この前後での港外および港内波の波高・周期の変化を図-3 に示す。またこの時の港内波の時系列を図-4 に示す。詳細にはスペクトル解析をする必要があるが、風波による $T_{1/3}=9$ 秒, $H_{1/3}=0.75$ m に、周期約 $T=150$ 秒, 波高 $H=0.4$ m の長周期波が重なった時系列波形となっていることが判明した。これ以前に発生した係留索切断時の天気図や気圧配置を調べると、この時と同様に低気圧が急激に発達し、強風および高波が連続して来襲していたこともわかった。したがって係留索切断の原因、すなわち係留船舶の大きな動揺の発生原因は、冬季の季節風により発生した連続した高波の来襲による長周期波と Surge との共振と推定した。

b) 改善対策の検討手順

港内に存在する長周期波を抑制または防止する当面の対策として、係留船舶の固有周期を調整して長周期波との共振を防止し、動揺を抑制する方法を検討した。

そこで係留船舶の動揺シミュレーションを行って、以下の手順で対策案が検討された。

- ① 長周期波発生状況下における係留船舶の長周期動揺の再現性の確認
- ② 長周期波発生状況下における係留船舶の長周期動揺を抑制する係留システムの選定
- c) 長周期波発生状況下における係留船舶の長周期動揺の再現性の確認

係留索切断が発生した時の係留船舶の動揺量や係留索張力を再現するため、動揺シミュレーションを行った。動揺シミュレーション手法は、風波と長周期波が共存する波浪条件を扱う必要があることから、メモリー影響関数を用いる手法を採用した (久保ら, 1988)。

計算対象船舶は 60,000 DWT 船とし、その係留条件は図-2 とする。外力条件は、波外力については図-4 の波形時系列を再現するようにかつ簡易化のため、長周期波については卓越成分のみとした。すなわち短周期成分については、 $T_{1/3}=9$ 秒, $H_{1/3}=0.75$ m の不規則波、長周期成分については $T=150$ 秒, $H=0.4$ m の規則波とした。風外力は係留索切断時に発生していた記録より $U_{10}=25$ m/s, $\psi=10$ deg と設定した。

この条件での Surge 両振幅は約 8 m, 周期は約 150 秒であるが、目視による動揺は 6~8 m 程度であり、また、

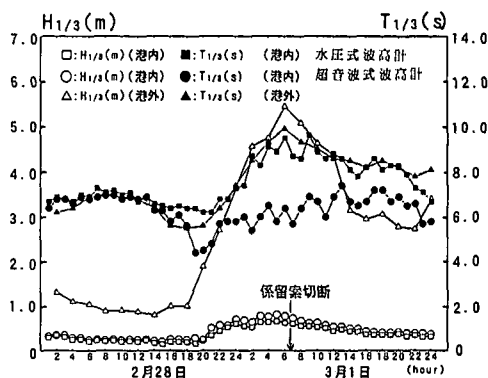


図-3 係留索切断前後での港外および港内波の波高・周期の変化

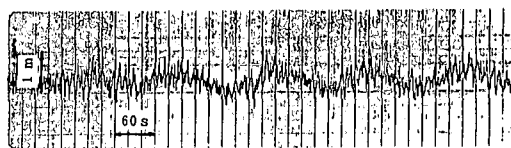


図-4 係留索切断直後の港内波の時系列

計算による係留索の最大張力は 35 tf 程度である。これは長周期動揺に伴う当該係留索の摩耗時破断荷重と概ね一致し、長周期波の影響を考慮することにより、数値シミュレーションは現地の状況を再現できることが確認された。

(3) 係留船舶の長周期動揺を抑制する係留システムの選定

外力条件は波については前述の再現波とし、風については風向を前述のように固定して、風速については $U_{10}=10$ m/s の荷役限界時と実質的な係留限界と考えられる $U_{10}=18$ m/s の 2 種類を考えた。

係留システムは、係留索および防舷材の変更、さらにはドルフィン増設による係留索の取り方の変更など代替案として考えられる様々な係留システム案 (Khanna et al., 1977; 久保・神原, 1991) を作り、各々について動揺シミュレーションを行って発生する動揺量・係留力の比較を行った。その結果、係留索・防舷材の変更および係留ドルフィンの増設による係留システムにおいて、係留系の固有周期の調整による動揺抑制効果が得られた。ここに係留索は、既設では $\phi 100$ mm ナイロンロープ、改善案ではナイロンテイル付テクミロンとした。係留索本数は、同じく 18 本で初期張力は一律 5 tf としている。図-5 にテクミロンおよびナイロンロープの変位復元力特性を示す。図-6 には既設防舷材と改善案での防舷材の特性曲線を示す。

図-7(a), 図-7(b) に既設および改善案での Sway,

Surge の時系列結果を示す。係留システムを変更することにより Sway のサブハーモニックモーションや Surge の大きな動揺をかなり抑制できる様子がわかる。また防舷材反力および係留索張力を低減する効果が得られることも確かめられた。

本論文で示す係留システムの変更案は、長周期波の卓越周期に対して係留船舶の固有周期をずらすことを主旨としており、係留索変更とビット増設により Sway の固

有周期を 220 秒に保持したまま Surge の固有周期を 140 秒から 80 秒へずらし、また防舷材の変更により、大きな Surge と、Sway 方向係留力の変位復元力特性の非対称性に起因する Sway のサブハーモニックモーションを抑制するものである。

上述の動揺シミュレーションの結果に基づいて、係留システムの改修が行われた。

3. 係留船舶の動揺量等の現地観測と改善効果の検証

(1) 係留船舶の動揺量等の現地観測結果

バース改修後、平成 7 年 1 月 29 日～2 月 4 日の間に 90,000 DWT 級船舶 ($L=240$ m, $B=43$ m, $d=9.33$ m, $W=75,590$ t) を用いて係留船舶の動揺量、係留索張力および防舷材の変形量、また港外・港内波、港内流速、風速・風向の現地観測を行った。対象船舶の係留および観測状況を図-8 に示す。

動揺量は本船重心近くの船側に、標定板 (8.4 m $\times$ 2 m, 格子付) と箱尺を設置し、これをビデオカメラで追尾することで Sway, Surge, Heave を測定した。係留索張力は歪ゲージを添付した応力棒をビットと索エンドの間に挿入することで測定した。防舷材の変形量は変位計を用いて測定すると共にビデオカメラで変形の状況を監視し

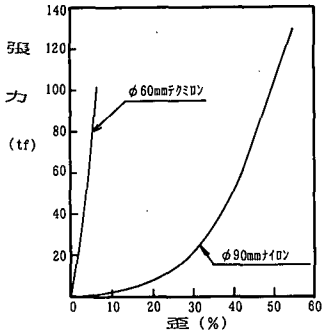


図-5 テクミロンおよびナイロンロープの特性

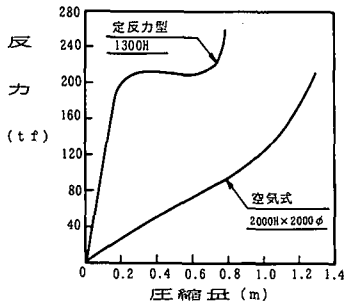


図-6 防舷材の特性

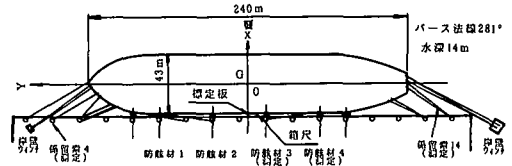


図-8 現地観測状況

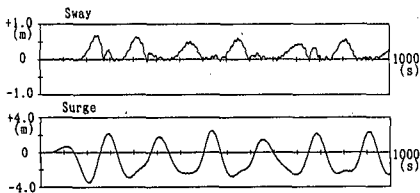


図-7(a) Sway および Surge の時系列 (既設)

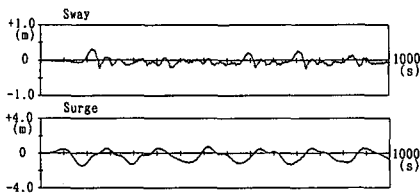


図-7(b) Sway および Surge の時系列 (改善案)

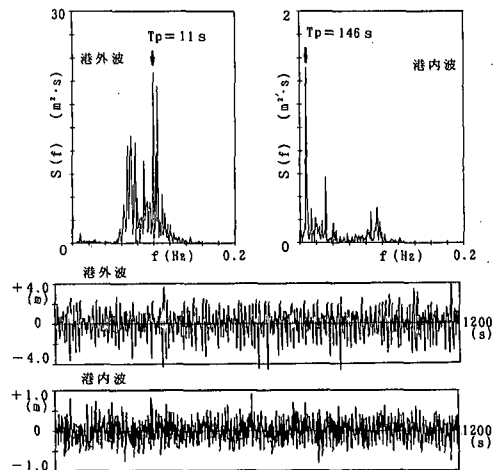


図-9 港外・港内波の時系列とスペクトル
(1 月 31 日 16:00～16:20)

た。

港外・港内波は既設の超音波式波高計を用い、また流速計を港内波高計の近くに新たに設置した。風速・風向は棧橋近くにある風速計を用いた。

1月29日の本船接岸後、直ちに荷役は開始された。低気圧の接近に伴い1月30日早朝より15 m/s以上の強風のため荷役は中止され、天候はさらに悪化した。1月31日には風雪・波浪注意報等が発令され、強風と高波の防波堤越波・港内の白波が続く、係留船舶の動揺が次第に大きくなってきた。そこで動揺量がほぼピークとなった1月31日午後4時から観測を開始した。

図-9に16:00~16:20の港外・港内波の時系列と各々のスペクトルを示す。また図-10に同時刻の風速・風向の時系列を示す。図-9において、港外波のスペクトルのピーク周期は11秒、港内波のピーク周期は146秒であることがわかる。これは久保らが指摘しているような(久保ら, 1992), 港内に長周期波が存在する波浪条件である。このように観測時の気象・海象条件は平均風速約

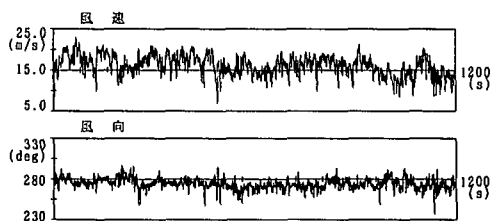


図-10 風速・風向の時系列 (1月31日16:00~16:20)

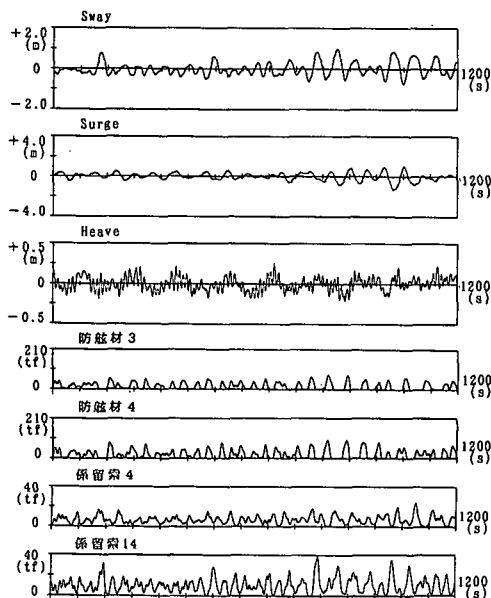


図-11 動揺量等の現地観測結果

18 m/s, 風浪成分の他に長周期波が含まれる典型的な冬季の外力下で行うことができた。

図-11に観測時の動揺量, 防舷材反力および係留索張力を示す。防舷材反力は実測した防舷材変形量から防舷材の変位復元力特性を用いて換算した。Surgeは両振幅で2 m, 風向が船首を中心に海側と棧橋側で変動したことからSwayは沖側へ1 m程度離れる動揺が発生したが, 当該係留システムにおいて, 係留索切断や防舷材の過圧縮は生じず, 安全に荒天係留避泊を行うことができた。

(2) 動揺シミュレーションによる現地観測結果の再現

2.で示したように係留船舶の動揺量抑制対策で用いた動揺シミュレーション手法は, 目視観測による動揺量を概ね再現できることを確認しているが, 現地観測結果を用いて, より詳細に把握された外力条件の下で動揺シミュレーション結果との対比を行う。

外力条件の内, 風外力については図-10の風速データから外力を求めた。波外力は, 本来港外波から湾水振動計算により港内の波浪パターンを算出して, 船体に作用する波外力を与える必要があるが, 本シミュレーションにおいては棧橋先端に設置した流速・波向計データを参照して, 図-9の港内波データを長周期波成分を含めて考慮し, 波向 $\omega=60$ degの進行波として与えた。また係留索の初期張力を各索どの程度に見積もるかはかなり難しいが, 本船ウィンチの巻き締め力やロープ毎の用途などから, 操船用のナイロンロープは1 tf, 船首尾の岸壁ウィンチに係留される索は10 tf, その他は5 tfに設定した。

表-1は上述のように設定した外力・係留条件に基づく動揺シミュレーションの最大・最小値を示す。計算結果の方が実測値よりかなり大きく評価されていることが

表-1 動揺量等の最大・最小値

		実測結果				計算結果			
係留システム		新 設		新 設		新 設		従 来	
粘性項の有無		—		な し		あ り		あ り	
Sway (m)	max.	1.00	2.40	1.44	1.39				
	min.	-0.74	-0.82	-0.64	-0.10				
Surge (m)	max.	1.07	2.11	1.44	2.83				
	min.	-1.32	-2.99	-2.28	-3.33				
Heave (m)	max.	0.26	0.18	0.18	0.18				
	min.	-0.21	-0.14	-0.13	-0.13				
防舷材 3	(tf)	80.0	91.6	76.9	160.0				
防舷材 4	(tf)	98.7	190.6	95.7	214.6				
係留索 4	(tf)	24.3	35.4	19.6	—				
係留索 14	(tf)	38.6	47.4	20.5	—				

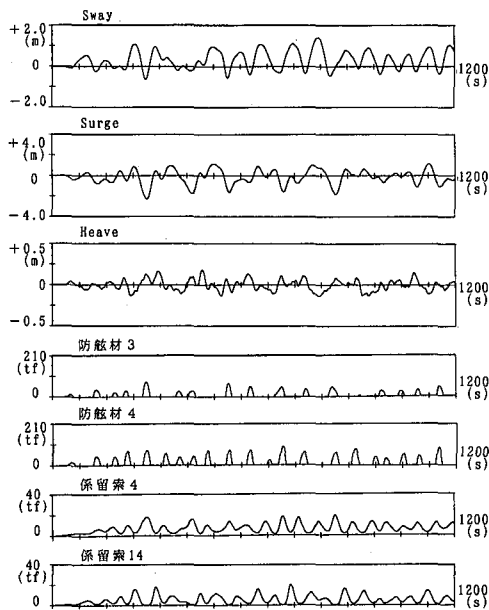


図-12 動揺量等の計算結果 (新設の係留システム)

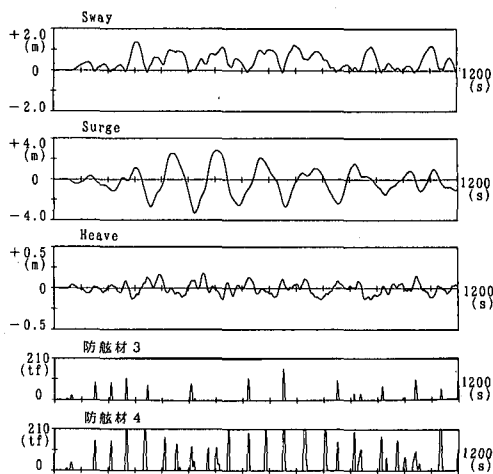


図-13 動揺量等の計算結果 (従来の係留システム)

わかる。この原因としては波外力を湾水振動としてではなく単一方向の進行波として与えていることや係留索の初期張力の不均一性などが考えられるが、係留索のヒステリシスや線形理論で扱えない船体動揺に伴う粘性抵抗力の効果が影響しているものと考えられる。そこで久保ら (久保ら, 1980; 1988) を参照して, Sway・Surge に粘性抵抗力を考慮して計算を行った。図-12 に動揺量等の時系列結果および表-1 に最大・最小値を示す。計算値は実測値よりもやや大きい, 粘性抵抗力を考慮することで, 実測結果を概ね表現することがわかった。

(3) 係留システム変更による改善効果の検証

係留システム変更による動揺量の改善効果の確認のため, 現地観測における外力条件を用いて, 従来の係留システムでの船舶の動揺の状況を再現した。なお粘性抵抗力を考慮して計算している。

図-13 に動揺量および防舷材反力の時系列結果を示す。また表-1 に最大・最小値を示す。係留索については係留索本数および取り方が異なり単純に比較できないことから示していない。図-12 および表-1 に示すように, 係留システムの改善により, Sway 沖側の動揺量はほぼ同じであるが, Surge の両振幅を約 55 % に低減させ, かつ動揺周期をかなり短周期側に変化させられることが確認された。また防舷材反力は, 約 50 % 低減できている。

4. 結 語

以上, 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について検討した。その結果を要約する

と次のようになる。

① 係留船舶の長周期動揺を詳細に観測した。これにより, 港内に存在する長周期波が, 係留船舶の動揺を引き起こすことを現地観測および動揺シミュレーションを通して確認することができた。

② 係留索と防舷材の変位復元力特性を調整することによる係留システムの改善が, 長周期動揺に対して効果的であることが確認された。

③ 動揺シミュレーションに係留索のヒステリシスや非線形抵抗の粘性抵抗力を考慮することで, 係留船舶の動揺量等の現地観測結果を概ね再現できることがわかった。

なお, 波外力に風波成分の他, 港内の副振動などの長周期波成分が含まれる場合, 動揺シミュレーション手法の精度向上には湾水振動による波浪強制力の算定が望まれる。今後, 湾水振動を考慮した動揺シミュレーション手法の構築を検討したいと考えている。

参 考 文 献

- 久保雅義・今枝彬郎・奥村宗行 (1980): 長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について, 神戸商船大学紀要, pp. 289-298.
- 久保雅義・斎藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について, 海岸工学講演会論文集, 第 35 巻, pp. 687-691.
- 久保雅義・榎原繁樹 (1991): 防舷材からみた船舶係留システムの安全性について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 746-750.
- 久保雅義・Volker Barthel (1992): ラグーン内バース係留船の船体運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 831-835.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 71-75.
- J. Khanna et al. (1977): Soft Mooring System at Exposed Terminals, Port 77, pp. 355-365.