大型係留船の動揺特性に与える初期張力と防舷材仕様の影響に関する模型実験

榊原 繁樹¹・砂原 俊之²・伊藤 格³・久保 雅義⁴

Physical Model Tests on Dynamic Behavior of a Moored Large Bulk Carrier affected by Pretension and Fender Type under Wave

Shigeki SAKAKIBARA, Shunji SUNAHARA, Kaku ITO
and Masayoshi KUBO

Abstract

In our previous study, investigations on property of ship motions due to characteristic of mooring system such as mooring line and fender was conducted through a numerical simulation and a field observation of ship motions and mooring loads. From the investigations, it was concluded that large sway motion, namely sub-harmonic motion which was caused by an asymmetrical mooring of mooring line and fender, and large roll motion were induced in beam seas. In this study, we have conducted a physical model test on ship motions and mooring loads for a large vessel moored along dolphin to confirm the effect of pretension of mooring line and fender property.

Keywords: Ship mooring, Ship motion, Mooring load, Roll, Sub-harmonic motion

キーワード: 港湾・係留, 船体運動, 係留力, Roll, サブハーモニックモーション

1. 緒言

著者らは外洋に面する港湾において、長周期波作用下に Roll 共振動揺を伴う港内係留中の大型鉱石船の船体動揺特性に関して、現地観測を行うと共に、係留事故事例につき船体動揺シミュレーションや波浪分析による検討を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。また船体動揺シミュレーションを活用して大型船・小型船の船体動揺に与える初期張力の影響についての検討も行っている⁽³⁾。これらの既往研究から、非線形係留下の大型船がほぼ正横からうねりを受ける場合には、Roll および Sway に大きな船体運動を生じる可能性があり、特に船体動揺シミュレーションを用いた検討でも防舷材と係留索のバネ定数比の違いにより Sway のサブハーモニック誘発の可能性が指摘されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そこで本研究では、船体動揺シミュレーションを用いた現地実験の再現等の検討ではなく、波浪中(横波中)の実際の大型船、特に KG が大きく、 GM_T が比較的小さい場合の大型船の係留状況を設定して、船体動揺特性に与える係留索の初期張力および防舷材仕様による影響について、また船体重心位置と係留索の係留点および防舷材の取付け位置の影響について、模型実験を行うことを通じて実験的に検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実船の船体諸元および係留図

2.1.1 船体諸元

対象船舶は大型バルク船とし、船体諸元を Table 1 に示す。ここに船体コンディションは満載状態とし、

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 東海大学 海洋学部	(〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)
³ 正会員 株式会社日本海洋科学	(〒212-0013 神奈川県川崎市幸区堀川町 580)
⁴ 正会員 神戸大学名誉教授	(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

Table 1 Ship dimensions (Proto/ Model)

		Ship dimensions	
		Proto ship	Model ship
全長	LOA	289.5 m	-
垂線間長	Lpp	277.0 m	99.0 cm
幅	B	49.0 m	49.0 cm
深さ	D	27.0 m	27.0 cm
喫水	d	11.43 m	11.4 cm
質量	M	104,953 ton	55.447 kg
重心高さ	KG	21.1 m	21.1 cm
慣動半径	k_{yy}	15.6 m	15.6 cm
横メタセンター	GM _T	3.46 m	2.1 cm
水深	h	14 m	14 cm

KGが大きく（船体重心 G は岸壁天端より上方）、GM_Tが比較的小さい（Roll 固有周期長い）場合とした。

2.1.2 係留図

Fig. 1 に当該大型船の係留状況を示す。係留索はヘッドライン(L1)、フォア・ブレストライン(L2)、フォア・スプリングライン(L3)、アフト・スプリングライン(L4)、アフト・ブレストライン(L5)およびスタンライン(L6)が 16~18 本配置されることが一般的であり、各索の張力特性は Fig. 2 に示すφ44mm の高張力化繊ロープ（φ100mm ナイロンテイルロープ付き）とし、初期張力は各索に一律 10ton(98kN) 与えられるものとした。防舷材は Fig. 3 に示す反力特性を持つ高さ2250mmの定反力型防舷材が4基設置されるものとした（Fig. 1 のF1~F4）。なお当該防舷材の反力特性は、圧縮率約15%で一定の反力となり、規定圧縮率52.5%（圧縮量1.18m）を超えると急激に

Fig.1 Mooring arrangement of the proto ship

Fig.2 Mooring line property of the proto ship

Fig.3 Reaction force property of the proto fender

Fig.4 Mooring force property in sway of the proto ship

上昇する特性を持つ。Fig. 4 には係留索および防舷材を合わせた当該大型船の Sway 方向係留力を示す。

2.2 模型船の船体諸元、実験配置および係留図

2.2.1 船体諸元

模型船は縮尺 S=1/100 の模型とし、模型船の船体諸元は Table 1 に併記している。なお模型船の船体諸元において、慣動半径および重心高さについては実船に合わせたが、横メタセンターは二次元模型船（矩形船）のため、波周期と Roll 固有周期を鑑みて設定した（後述 3.2）。

2.2.2 模型実験の配置および係留図

模型実験では長さ 38m×幅 1m の東海大学海洋学部所有の二次元水槽を用い、水深は 14cm と一定とした。

Fig. 5 に模型係留船の実験配置状況を示す。模型係留船から約 12m 離れた位置にフラップ式造波機および消波板を設置した。水位変動は船体前方に 2 本 (WG1、WG2) および後方に 2 本 (WG3、WG4) 容量式波高計を 3m 間隔で設置して計測し、波速の計測にも流用した。

Fig. 6 に模型船の係留状況および計測装置の配置を示す。船体運動は 3D トラッカーシステムで 6 モードの船体運動を計測した⁽⁶⁾。係留索張力は当該係留索の張力特性を模した線形バネ端に設置した張力計により計測し、防舷材反力はレーザ変位計で変形量を計測して換算した。

模型係留索および防舷材のバネ定数は、Fig. 4 に示した Sway 方向係留力を参照して、フルード則に基づき設定した。ここに実スケールでの係留索および防舷材のバネ定数はそれぞれ $KL = 2775kN/m$ および $KFs = 29329kN/m$ であり、断面模型船の三次元模型船に対する質量分担率 (0.542) から係留索と防舷材のバネ定数を設定し、係留索および防舷材はそれぞれ 2 基として係留索の 1 本当りバネ定数 $kl = 75N/m$ および防舷材の 1 基当りバネ定数 $kfs = 794N/m$ と設定した。また初期張力は実船で各索 10ton (98kN) を与える場合として 1 本当たり 0.7N と設定した。模型係留索のバネ部自由長は約 130mm、防舷材は高さ 30mm とした。

2.2.3 実験条件

波外力は規則波として、波高 $H = 1.0cm$ と固定して波周期を $T = 0.6 - 2.0s$ まで 0.2s 間隔で変化させた。ただし Surge や Yaw が大きくなり二次元実験が困難な場合は省略した。なお当該模型係留船の Sway および Roll の自由振動実験を行い、予め固有周期を求めて実船の固有周期と比較検証した。

また係留索の初期張力がゼロの場合、係留索バネ定数が変化するため、Fig. 4 に示した Sway 方向係留力特性から別途設定し、1 本当り $kl_0 = 13N/m$ とした。合わせて防舷材の反力特性による船体動揺への影響を検証するため、Fig. 4 に追記した吸収エネルギー性能が同等の反力漸増型防舷材を選定し、模型バネ定数を 1 基当り $kfa = 192N/m$ と設定した。

3. 実験結果および考察

Fig.5 Set-up of the model test

Fig.6 Model ship mooring condition and layout of measuring equipment

3.1 波速および実験継続時間

模型係留船の前方および後方に設置した波高計により、沖波の入射波 (WG1) だけでなく、船体からの反射波 (WG2) および透過波 (WG3) の水位変動を計測している。また波速は波高計 (WG1) と波高計 (WG2) の水位変動時系列結果から、対応した波の峰の通過時間差から波速を計測し (当該波高計の設置間隔 (3m))、実験継続時間の設定に活用した。一例として Fig. 7 に、波周期 1.6s における水位変動の時系列波形 (4 本の波高計 (WG1、WG2、WG3、WG4)) を示す。沖波入射波 (WG1) に続き、船体前方の波高計 (WG2) に水位変動が生じ、船体後方の波高計 (WG3、WG4) は水位変動が小さくなっていることがわかる。このことから消

Fig.7 Surface elevations at wave gauges(WG1, WG2, WG3, WG4) at $T=1.6s$

Fig.8 Comparison on wave velocities(C and Cg) related to water depth/wave length

波板で概ね消波されていること、合わせて入射波は概ね係留船で反射していることがわかった。また Fig. 8 に実測波速の周期特性を示すが、微小振幅波理論による計算波速 C_{cal} と群速度 Cg_{cal} と比較すると、計算波速に近いことがわかった。また水深波長比 h/λ との比較からも今回行った波周期では浅海波領域の実験であったことが確認された。

以上の検討より、実験継続時間は、入射波が係留船に到達してから、当該係留船からの反射波が造波機で再び反射して船体に到達するまでの時間として、約 20 秒間とした。

3.2 Roll および Sway の固有周期について

Table 2 に Roll および Sway の固有周期を実船と模型船でまとめる。固有周期は空中および水面上の係留中で示しているが、実船および模型船の固有周期は数値計算および自由振動実験から求めた。

Table 2 Natural periods in sway and roll(Proto/ Model)

		Ship dimensions	
		Proto ship	Model ship
重心高さ	KG	21.1 m	21.1 cm
	BM	-	17.6 cm
浮心	KB	-	5.7 cm
横メタセンター	GM_T	3.46 m	2.1 cm
喫水	d	11.43 m	11.4 cm
慣動半径	k_{yy}	15.6 m	15.6 cm
Roll 周期	Tr_air	16.8s	2.15s
	Tr_obs	(26.4s)	3.6s
Sway 周期 with Pretension	Ts_air	39s	3.8s
	Ts_obs	(42s)	4.2s
Sway 周期 without pretension	Ts_air	92s	9.0
	Ts_obs	(101s)	9.6

Roll の固有周期に関して、慣動半径 k_{yy} および重心高さ KG については実船に合わせたが、模型船を矩形船としているため浮心 KB や BM は実船に合わせることができなかった。したがって模型船の GM_T が実船より小さくなっていることから、模型船の固有周期の方が長い。ただし実験は波周期 $T = 0.6 - 2.0s$ として共振周期から外れていることから、このまま模型船の Roll 固有周期とした。Sway の固有周期は船体質量とバネ定数から算定したが、実船の固有周期と模型船の固有周期が概ね一致していることから、適切にスケールダウンが行なわれたことが確認できる。なお空中とは付加質量（または付加慣性モーメント）を考慮しない場合であり、水面上とは浮体が水面上にあり付加質量またはモーメントが付加される場合であり、空中の場合に比べ水面上の固有周期の方が長くなっている。

3.3 初期張力の船体動揺への影響

3.3.1 初期張力ありの場合

Fig. 9 に Sway、Heave、Roll および係留索 L1、L2 の張力、防舷材 F1、F2 の実験時に発生した反力の時系列内最大・最小値の周期特性をまとめる。図中黒線が初期張力ありの場合で、一例として Fig. 10(a) に波周期 1.6s の場合の Sway、Heave、Roll および係留索 L1、L2 の張力、防舷材 F1、F2 の反力の時系列実験結果を示す。

(1) Roll

Fig. 9 より波周期が長くなるに伴い Roll に岸壁側への傾斜（マイナス側）となる大きな動揺が生じていることがわかる。初期張力は係留索 1 本当たり 0.7N であり、当該初期張力が復原力と均衡する傾斜角は -0.4deg 程度である。ここに当該傾斜角 θ は

Fig. 11 に示すように Roll 復原力と係留力によるモーメントのつり合い式から簡易的に式(1)を用いて求めた⁽⁷⁾。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{M\ell + Mf}{M \cdot g \cdot GM_T} \right),$$

$$M\ell = T \cdot L\ell, \quad Mf = R \cdot Lf \quad (1)$$

ここに $M\ell$ および Mf は係留索張力および防舷材反

Fig.9 Maximum and minimum values of test results on ship motions and mooring loads with and without pretension in buckling type fender usage

(a) with pretension

(b) without pretension

Fig.10 Test results in time series on ship motions and mooring loads at T=1.6s with/without pretension in buckling type fender usage

力によるモーメント、 Ll および Lf は船体重心と係留点および防舷材取付け位置とのレバー長さであり、 $Ll = 5.9\text{cm}$ 、 $Lf = 5.7\text{cm}$ である。

Fig. 10(a)の波周期 1.6s の場合、Roll 負値最小値は -1.7deg が生じている。また Fig. 10(a)の時系列実験結果を参照すると、Roll が負値最小値程となるときは、Heave は正值最大値となっているが、Sway は負値最小値程となっていることから、係留索張力はゼロ、防舷材反力はほぼ最大値を生じている。つまり初期張力ありの場合における大きな Roll (マイナス側)を生じときの船体姿勢は、Fig. 12(a)に示すように係留索の初期張力による Roll 傾斜と合わせて防舷材反力によるマイナス傾斜が付加されたものと考えられる。ただし Roll の動揺周期は波周期に対応している。

(2) Sway

Fig. 9より波周期が長くなるに伴い Sway が大きくなっている。Fig. 10(a)の時系列実験結果を参照すると、特に Sway 沖側 (プラス側)への大きな動揺が波周期に対応して生じている。また Sway の沖側最大値となるときは、係留索張力は最大値、防舷材反力はゼロとなっている。一方 Sway の岸側最小値となるときは、係留索張力はほぼゼロ、防舷材反力は最大値となっていることがわかる。

(3) 係留力

Fig. 9より波周期が長くなるに伴い、係留力が大きくなっていることがわかる。また Fig. 10(a)の時系列実験結果を参照すると、係留索張力が最大値のとき防舷材反力はゼロ、一方係留索張力がゼロのとき防舷材反力は最大値を取り、逆位相となっていることがわかる。また係留力は波周期に対応して生じていることも確認された。

3.3.2 初期張力ゼロの場合

Fig. 9には初期張力をゼロとした場合の船体運動および係留力の最大・最小値の周期特性を図中赤線で追記している。一例として Fig. 10(b)に、Fig. 10(a)と同じ波周期 1.6s の場合の Sway、Heave、Roll および係留索 L1、L2 の張力、防舷材 F1、F2 の反力の時系列実験結果を示す。

(1) Roll

Fig. 9に示すように初期張力ありの場合と比較すると、波周期 1.2s 程度までは最大・最小値共に初期張力ありの場合より小さいかほぼ同じである。しかし波周期 1.2s 以降急激に増加することがわかった。

Fig.11 Calculation of roll angle by mooring line tensions and fender reaction forces

(a) with pretension

(b) without pretension

Fig.12 Roll moment by mooring line tensions and fender reaction forces with/without pretension

また Fig. 10(b)の時系列実験結果を参照すると、Roll には波周期とは異なる大きな自由振動が生じている。Roll が負値最小値程となるときは、波が船体に作用する初期では係留索張力はゼロであるが、防舷材反力が生じている。しかし Roll 自由振動が顕著となる頃から負値最小値程となるときは、係留索張力および防舷材反力は共にゼロとなっている。一方 Roll がほぼ最大値を生じるときには、係留索張力ゼロではあるが防舷材反力が最大となり、Sway の岸側最小値ともなっている。このときの船体姿勢を Fig. 12(b)に示す。ここに式(1)を用いて防舷材反力の最大合力 8.5N による傾斜角を求めると 2.3deg と

なるが、この傾斜角は概ね Fig. 10(b) の自由振動時の Roll 振幅に相当する。以上より、大きな Roll 自由振動の誘発は防舷材の大きな反力による Roll モーメントに起因するものと考えられる。

(2) Sway

Fig. 9 より、波周期が長くなるに伴い Sway が大きくなっている。Fig. 10(b) の時系列実験結果も参照すると、Sway に波周期に対応した運動ではないサブハーモニックモーションが誘発されていることが確認された。

(3) 係留力

Fig. 9 より初期張力ありの場合と比較すると、係留索張力は大幅に低減し、防舷材反力も減少することがわかった。Fig. 10(b) の時系列実験結果を参照すると、係留索張力は主に Sway に対応して生じ、概ね波周期で発生していることがわかる。一方防舷材反力は、波が船体に作用する初期では Sway に対応して概ね波周期に対応して生じているが、Sway にサブハーモニックモーションが発生し Roll 自由振動が顕著になると、当該 Roll 自由振動周期および Sway のサブハーモニックモーション周期に対応して発生し、かつ波周期に対応して反力が生じる船体動揺初期に較べ大きな反力が生じることが確認された。

3.4 防舷材仕様の船体動揺への影響

3.4.1 防舷材の反力特性

前述までは、防舷材は Fig. 3 に示す反力特性を持つ高さ 2250mm の定反力型防舷材として係留索の初期張力の影響を調べた。ここでは、Fig. 3 に追記した反力特性の異なる反力漸増型防舷材（高さ 2400mm）の空気式防舷材を選定して、船体動揺特性への影響を検討した。ただし吸収エネルギー性能は同等とした。

3.4.2 反力漸増型防舷材の場合

Fig. 13 に初期張力をゼロとして防舷材をバネ特性の異なる反力漸増型に変更した場合の船体運動および係留力の最大・最小値の周期特性を図中青線で示す。図中には定反力防舷材を用いる場合も黒線で併記している。一例として Fig. 14 に、Fig. 10 と同じ波周期 1.6s の場合の Sway、Heave、Roll および係留索 L1、L2 の張力、防舷材 F1、F2 の反力の時系列実験結果を示す。

(1) Roll

Fig. 13 に示すように定反力型防舷材を用いる場

Fig.13 Maximum and minimum values of test results on ship motions and mooring loads without pretension in buckling type and pneumatic fender usages

合と比較すると、波周期が長くなっても+0.5deg、-0.7deg 以内で保持されていることがわかる。また Fig. 14 の時系列実験結果を参照すると、Roll の自由振動は発生せず、波周期に対応した Roll 運動を生じて安定していることが確認される。

Fig.14 Test results in time series on ship motions and mooring loads at $T=1.6s$ without pretension in pneumatic type fender usage

(2) Sway

Fig. 13 より、波周期が長くなるに伴い Sway の最大・最小値は定反力型防舷材を用いる場合と同程度に大きくなっている。ただし Fig. 10 (b) と Fig. 14 の時系列実験結果を比較すると、Sway のサブハーモニックモーションが抑制され、波周期に対応した運動となり安定している。若干ではあるが Sway 沖側への動揺が低減している。Fig. 15 に Fig. 10 および Fig. 14 による Sway、Heave および Roll の船体運動時系列結果を用いて船体重心点 $G(0, 9.7)$ および係留索の船体係留点位置 $A(-24.5, 15.6)$ における平面運動をまとめる。重心点運動ではどの係留システムでもあまり違いが見られないが、係留索の係留点位置では Roll の影響が顕著に反映され、定反力型防舷材を用いる場合で初期張力ゼロの場合、大きな左右方向(X)および上下方向(Z)運動が生じている。一方反力漸増型防舷材を用いる初期張力ゼロの場合、船体動揺が抑制されている。

(3) 係留力

Fig. 13 より、定反力型防舷材を用いる場合と比較

(a) with pretension in buckling type fender usage

(b) without pretension in buckling type fender usage

(c) without pretension in pneumatic type fender usage

Fig.15 Test results in time series on ship motions at $T=1.6s$ with/without pretension in buckling type fender usage, and without in pneumatic type fender usage

すると、係留索張力は主に Sway に対応して生じることから概ね同じであるが、防舷材反力は 1/4 程度に減少することが確認された。また Fig. 14 の時系列実験結果を参照して Fig. 10 (b) と比較すると、係留索張力および防舷材反力共に、波周期に対応して発生しており安定している。これは Roll の自由振動発生や Sway のサブハーモニックモーションが抑制され、波周期に対応して安定した船体運動が保持されていることに起因するものと考えられる。

4. 結言

本研究では KG が大きく（船体重心 G は岸壁天端より上方）、 GM_T が比較的小さい（Roll 固有周期長い）場合の大型船の係留状況を設定して、波浪中（横波中）の船体動揺特性に与える係留索の初期張力・係留点および防舷材仕様・取付け位置による影響について模型実験を行なうことで実験的に検討を行った。得られた主な結論を要約すると以下のようになる。

- ①大型船の一般的な係留となる初期張力ありの場合、Sway、Heave、Roll の船体運動、係留索張力および防舷材反力は、波周期の増加に伴い大きくなることがわかった。
- ②初期張力ゼロの場合、大きな Roll や係留力を低減できるが、波周期 12s（実船換算）を超えると Roll 自由振動を誘発して急激に Roll が大きくなる。また Sway にサブハーモニックモーションを発生し、さらには船体動揺初期の波周期に対応して反力が生じる場合に比べ大きな防舷材反力が生じることがわかった。そして船体重心位置と係留索の係留点および定反力型防舷材の取付け位置の関係が、Roll 自由振動の発生や Sway にサブハーモニックモーションの誘発、さらには大きな防舷材反力発生へ起因することを実験的に確認した。
- ③初期張力をゼロとして防舷材をバネ特性の異なる反力漸増型に変更した場合、係留索張力の低減だけでなく、防舷材反力の大幅な減少をもたらし、また Sway のサブハーモニックモーション発生を抑制する効果のあることを模型実験によっても確認した。さらには波周期 12s（実船換算）を超える長周期波来襲時においても、Roll 自由振動の誘発を防止する効果を模型実験より見出した。

本研究では、外洋に面する港湾の大型係留船における船体動揺特性について、従来から船体動揺シミュレーションによる検討から指摘されていた非線形係留下の正横からうねりを受ける場合の大きな Roll および Sway のサブハーモニックモーション発生を模型実験により明らかにした。今後も船体動揺シミュレーションを用いた検討だけでなく、模型実験による定量的検討も加えて、外洋に面する港湾における船舶係留の安全性向上および対策に関する研究を進めたく考えている。

謝辞

本研究を行うに際して関係各位殿から貴重なデータの提供や多大なご支援・ご協力を頂いた。また当時東海大学海洋学部航海工学科の学生であった川西航君、石田大也君、白石崇人君、谷岡裕也君、高橋直生君には実験準備や実施および膨大なデータの整理などに尽力頂いた。上記皆様に対して深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 榊原繁樹・斎藤勝彦・久保雅義・白石悟・永井紀彦・島ノ江哲：長周期波作用下での Roll 共振動揺により誘発される港内係留船舶の長周期動揺特性について，日本航海学会論文集，第 104 号，pp.187-196，2001.
- (2) 榊原繁樹・久保雅義：大型鉱石船が荷役中に遭遇した気象・海象条件と船体運動の相関に関する調査研究，日本航海学会論文集，第 133 号，pp.1-11，2016.
- (3) 久保雅義・斎藤勝彦・榊原繁樹・北野正夫・沢田 守：大型船・小型船における船体運動に与える初期張力の影響について，日本航海学会論文集，第 102 号，pp.153-162，2000.
- (4) 久保雅義・榊原繁樹：係留システムのバネ定数比からみた係留船舶のサブハーモニックモーションについて，第 39 回海岸工学講演会論文集，pp.801-805，1992.
- (5) 久保雅義・榊原繁樹：年間荷役稼働率からみた係留システムの比較について，第 40 回海岸工学講演会論文集，pp.941-945，1993.
- (6) 株式会社ライブラリー：リアルタイムトラッカーRadish/3D、3 次元動画計測ソフトウェア Move-tr/3D.
- (7) 榊原繁樹・小林英一・大竹祐一郎・原田賢治・久保雅義：防舷材変更による津波来襲時の LNG 船の動揺低減について，日本航海学会論文集，第 120 号，pp.107-115，2009.