

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1341 March 2018

係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討

米山 治男

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 研究内容	4
3. 船舶および係留施設	4
3.1 船舶条件	4
3.2 係留施設条件	7
3.3 防舷材条件	8
3.4 係留索条件	9
4. 動揺シミュレーション手法	12
4.1 係留船舶の動揺シミュレーション	12
4.2 シミュレーション条件	13
5. 牽引力の計算結果	16
5.1 概要	16
5.2 曲柱のみを用いる場合（平常時）	16
5.3 曲柱および直柱を用いる場合（暴風時）	19
6. 牽引力の評価	28
6.1 概要	28
6.2 曲柱のみを用いる場合（平常時）	28
6.3 曲柱および直柱を用いる場合（暴風時）	29
6.4 牽引力の標準値の提案	33
7. 結論	34
8. おわりに	34
謝辞	34
参考文献	34
記号表	35
付録A 繊維ロープの切断荷重（鋼船規則）	36
付録B 係船柱の位置および係留索の配置状況（曲柱のみを用いる場合）	37
付録C 係船柱の位置および係留索の配置状況（曲柱および直柱を用いる場合，係留配置1）	41
付録D 係船柱の位置および係留索の配置状況（曲柱および直柱を用いる場合，係留配置2）	45
付録E 係船柱の位置および係留索の配置状況（曲柱および直柱を用いる場合，係留配置3）	49

Study on Tractive Forces of Ships Acting on Mooring Posts and Bollards

Haruo YONEYAMA*

Synopsis

In this study, I calculated and evaluated the tractive forces acting on mooring posts and bollards by carrying out the simulation of oscillation for moored ships subjected to wind loads. The object ships are 13 types of ballasted cargo ships ranging from 500 to 200,000 gross tonnage (GT). Based on the calculation results, I discussed the characteristics of the tractive forces of moored ships acting on the mooring posts and bollards. I also compared the calculated values with the standard ones of tractive forces of ships presented in the current technical standards. As a result, I confirmed that the standard values of tractive forces for ships of 100,000 gross tonnage (GT) or less, which are indicated in the current technical standards, are roughly set to the safe side. I also proposed that for ships of 100,000 to 200,000 gross tonnage (GT) for which the standard values of tractive forces are not specified, the standard values of the tractive forces should be set to 1,500kN or 2,000kN for bollards and 2,000kN for mooring posts, respectively.

Key Words: mooring post, bollard, tractive force, moored ship, wind load, simulation of oscillation

* Director, Coastal and Ocean Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5114 e-mail: yoneyama@pari.go.jp

係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討

米山 治男*

要 旨

本研究では、係船柱に作用する係留船舶による牽引力を定量的に評価するために、500～200,000 総トン (GT) の 13 種類の空載状態の貨物船に対して風荷重作用時における係留船舶の動揺シミュレーションを実施し、係船柱に作用する牽引力を算定した。その結果を用いて、係留船舶により係船柱に作用する牽引力の特徴について考察するとともに、現行の技術基準において提示されている船舶の牽引力の標準値と比較検討した。これにより、現行の技術基準で示されている 100,000 総トン (GT) 以下の船舶に対する牽引力の標準値は、全体的に概ね安全側の設定であることを確認した。また、牽引力の標準値が規定されていない 100,000～200,000 総トン (GT) の船舶については、曲柱に作用する牽引力の標準値として 1,500kN または 2,000kN の値、また直柱に作用する牽引力の標準値として 2,000kN の値を設定することを提案した。

キーワード：係船柱，曲柱，直柱，牽引力，係留船舶，風荷重，動揺シミュレーション

* 海洋研究領域長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5114 e-mail: yoneyama@pari.go.jp

1. はじめに

近年、スケールメリットによるコスト削減を目的として船型の大型化が進展しており、船舶の標準諸元が変化してきている。しかし、現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年版）」（日本港湾協会，2007）（以下、現行技術基準と記す）に基づいて係船柱を設計する際には、100,000総トン（GT）を超える大型船舶に対して牽引力の標準値が提示されていないため、このような船型の大型化を考慮した船舶の牽引力を設定することができない状況にある。

現行技術基準では、係船柱の設計が簡便に実施できるように、200～100,000総トン（GT）の船舶（貨物船を標準とする）に対して船舶の牽引力の標準値が提示されている。これらの船舶の牽引力の標準値は、稲垣ら（1970）、福田ら（1982）による検討成果を参考にして規定されている。稲垣ら（1970）は、風荷重等に対する係留船舶の静的荷重計算により、係船柱に作用する牽引力を算定して設計牽引耐力を示すとともに、係船柱の設計法および標準形を提案している。このときに提案された係船柱の標準形は、港湾工事共通仕様書（日本港湾協会，2017）（以下、港湾工事共通仕様書と記す）において係船柱の標準寸法として規定され、現在も係船柱の設計時に採用されている。また、福田ら（1982）は、風荷重等に対する係留船舶の動揺シミュレーションによる動的計算やそれを簡易化した静的荷重計算により、係船柱に作用する牽引力を算定して新たに設計牽引耐力を提案している。しかし、これらの検討は、30年以上前の研究事例であることや100,000総トン（GT）を超える大型船舶を対象としていないことから、係船柱を設計する場合に、近年の船型の大型化や船舶の標準諸元の変化を考慮できていないと考えられる。

そこで、本研究では、200,000総トン（GT）までの大型の係留船舶により係船柱に作用する牽引力を算定して、係船柱を設計する際に用いられる船舶の牽引力の標準値を新たに提案することを目的とする。具体的には、係船柱に作用する係留船舶による牽引力を定量的に評価するために、500～200,000総トン（GT）の13種類の貨物船（空載状態）に対して風荷重作用時における係留船舶の動揺シミュレーションを実施し、係船柱に作用する牽引力を算定する。その結果を用いて、係留船舶により係船柱に作用する牽引力の特徴について考察するとともに、現行技術基準において提示されている船舶の牽引力の標準値と比較検討する。そして、現行技術基準において牽引力の標準値が規定されていない100,000～200,000総トン（GT）の船舶も対象として、合理的な牽引力の標準値を提案する。

2. 研究内容

係船柱には、曲柱および直柱の2種類がある。曲柱は、頭部が一方に曲がった形状をしており、岸壁の水際線付近に設置されて主に平常時の船舶の係留に用いられる。一方、直柱は、頭部が全方向に広がった形状をしており、一般的に岸壁の水際線から陸側に離れた位置に設置されて主に暴風時の船舶の係留に曲柱とともに用いられる。本研究では、船舶の係留における曲柱と直柱の役割を考慮して係留船舶による牽引力を評価し、それに基づいて船舶の牽引力の標準値を提案する。なお、本資料では、係船柱と表示する場合には、曲柱と直柱の両方を意味するものとする。

本研究では、まず、風荷重に対する係留船舶の動揺シミュレーションを行う上で、500～200,000総トン（GT）の13種類の大きさの船舶を対象として、船舶および係留施設の諸元などの条件を設定する。主に、風荷重に関する係留船舶の諸元、防舷材および係船柱の諸元・配置、係留索の諸元・配置などについて設定する。ここで、係留索の配置については、平常時に曲柱のみを用いる場合と暴風時に曲柱および直柱を用いる場合の2種類に分けている。そして、設定した13種類の大きさの船舶および係留施設に対して、風荷重作用時における係留船舶の動揺シミュレーションを実施する。また、算定された係船柱に対する船舶の牽引力の特徴について考察し、現行技術基準における船舶の牽引力の標準値と比較する。これらの検討結果を考慮して、500～200,000総トン（GT）の船舶に対して、曲柱および直柱に作用する牽引力の標準値を新たに提案する。

3. 船舶および係留施設

3.1 船舶条件

(1) 船種および船型

係船柱に作用する標準的な牽引力について検討するため、船種の中で最も船舶数の多い貨物船を対象とする。また、載貨状態については、風荷重が作用する場合に係留船舶による牽引力が大きくなるように、船舶の風荷重に対する受圧面積が大きくなる空載状態とする。

貨物船の大きさを示す指標として総トン数（GT）を使用する。対象とする貨物船の大きさは500～200,000GTの13種類である。対象船舶の総トン数（GT）を表-3.1に示す。この表には、現行技術基準において牽引力の標準値について記載のある船舶の総トン数の範囲についても併せて表示している。現行技術基準においては、100,000GTの

表-3.1 対象船舶の総トン数

船舶の総トン数 (GT) (トン)	現行技術基準
500	あり
1,000	
2,000	
3,000	
5,000	
10,000	
20,000	
50,000	
100,000	
120,000	
150,000	なし
170,000	
200,000	

船舶までの牽引力の標準値しか提示されていないため、本研究では、100,000GT以上の船舶についても検討することとし、最大で200,000GTの船舶まで対象としている。

ここで、総トン数 (GT) を載貨重量トン数 (DWT) に変換する必要がある場合には、現行技術基準に示されている以下の貨物船に対する回帰式 (日本港湾協会, 2007) を利用することとした。

$$GT = 0.529DWT \quad (1)$$

ここで、 GT は船舶の総トン数 (トン)、 DWT は船舶の載貨重量トン数 (トン) である。なお、この回帰式は、統計解析 (回帰分析) におけるカバー率50%に対するものである。カバー率とは、回帰式周りのデータ分布から推定される確率分布形の累積確率にあたり、例えば、カバー率50%の船舶の総トン数とは、その値以下の船舶の総トン数をとる確率が50%であることを意味する。すなわち、カバー率とは、回帰分析における信頼水準を表している。

(2) 船舶の主要寸法に関する諸元

船舶の全長、型幅、喫水、水面上投影面積などの主要寸法に関する諸元を設定するために、船舶の載貨重量トン数 (DWT) から各諸元を算定する回帰式を用いる。基本的には、現時点で最新の船舶の主要寸法に関するカバー率75%の回帰式 (高橋ら, 2006) を採用しているが、船舶の諸元によっては掲載されていないものもある。その場合には、これ以前の港湾技研資料等に提示されている回帰式を使用している。ここで、カバー率75%の回帰式を用いることにより、平均的な船舶の諸元よりも多少大きめの船舶の諸元を採用していることになる。

船舶の全長、垂線間長、型幅および満載喫水は、高橋ら (2006) に基づいて、以下の貨物船に対する回帰式より算

定する。ただし、回帰式の係数については、小数第4位を四捨五入した係数に変更している。

$$L_{oa} = 8.734DWT^{0.295} \quad (2)$$

$$L_{pp} = 7.486DWT^{0.304} \quad (3)$$

$$B = 1.497DWT^{0.285} \quad (4)$$

$$d = 0.394DWT^{0.328} \quad DWT < 30,000 \quad (5)$$

$$d = 0.375DWT^{0.323} \quad 30,000 \leq DWT \quad (6)$$

ここで、 L_{oa} は全長 (m)、 L_{pp} は垂線間長 (m)、 B は型幅 (m)、 d は満載喫水 (m)、 DWT は船舶の載貨重量トン数 (トン) である。なお、これらの回帰式は、統計解析におけるカバー率75%に対するものである。満載喫水の算定では、船舶の載貨重量トン数 (DWT) が30,000DWT未満と30,000DWT以上の場合に対して回帰式を使い分ける。

船舶の空載喫水については、高橋ら (2006) に空載喫水の回帰式が提示されていないため、寺内ら (1980) が提案している一般貨物船に対する満載時喫水 (満載喫水) と空船時喫水との回帰式を用いて、満載喫水から空載喫水を推定することとした。ここで、船舶の空船時とは、乗組員、燃料、バラスト水等を積載し、貨物を積載しない状態 (すなわち、バラストコンディション状態) を意味しており、本研究では、この状態を船舶の空載時とする。なお、この回帰式はカバー率50%のものであることから、カバー率75%の回帰式に変換するために、カバー率と回帰式の関係 (高橋ら, 2006) を適用して以下のように求める。

$$d' = 0.352d^{1.172}10^{k\sigma} \quad (7)$$

ここで、 d' は空載喫水 (m)、 d は満載喫水 (m)、 $k\sigma$ はカバー率75%の回帰式にするための移動量であり、 k は平行移動量のパラメータでカバー率ごとに規定された定数、 σ は回帰式周りの誤差の標準偏差である。ここでは、カバー率75%に対する k の値として $k = 0.674$ (高橋ら, 2006) とし、船舶の空載喫水の標準偏差として一般貨物船の空船時喫水の標準偏差 $\sigma = 0.063$ (寺内ら, 1980) を用いた。

船舶の型深さについては、高橋ら (2006) に型深さの回帰式が提示されていないため、阿式ら (1989) が提案している一般貨物船に対する型深さと載貨重量トン数との回帰式を用いた。ただし、この回帰式はカバー率50%のものであることから、カバー率75%の回帰式に変換するために、空載喫水のとくと同じ方法を適用している。

$$D = 0.267DWT^{0.321}10^{k\sigma} \quad (8)$$

ここで、 D は型深さ (m)、 DWT は船舶の載貨重量トン数 (トン)、 k は平行移動量のパラメータ、 σ は回帰式周りの誤差の標準偏差である。ここでは、カバー率75%に対する k の値として $k=0.674$ (高橋ら, 2006) とし、船舶の型深さの標準偏差として一般貨物船の型深さの標準偏差 $\sigma=0.066$ (阿式ら, 1989) を用いた。なお、船舶の乾舷 d^* は、型深さ D から満載喫水 d または空載喫水 d' を差し引くことで求めることができる。

船舶の満載時の排水量については、高橋ら (2006) にカバー率75%に対する満載排水量の回帰式が提示されていないため、現行技術基準に示されている以下の貨物船に対する関係式 (日本港湾協会, 2007) より算定する。

$$DT = 1.174DWT \quad (9)$$

ここで、 DT は船舶の満載時の排水量 (t)、 DWT は船舶の載貨重量トン数 (トン) である。なお、この回帰式は、統計解析におけるカバー率75%に対するものである。

船舶の水面上投影面積は、高橋ら (2006) に示されているバラスト状態 (空載状態) の貨物船に対する水面上投影面積 (正面, 側面) と載貨重量トン数との回帰式を用いた。ただし、この回帰式はカバー率50%のものであることから、カバー率75%の回帰式に変換するために、空載喫水のときと同じ方法を適用している。

$$A_X = 0.099DWT^{0.615}10^{k\sigma} \quad (10)$$

$$A_Y = 0.479DWT^{0.662}10^{k\sigma} \quad (11)$$

ここで、 A_X は水面上正面投影面積 (船首方向の投影面積) (m^2)、 A_Y は水面上側面投影面積 (舷側方向の投影面積) (m^2)、 DWT は船舶の載貨重量トン数 (トン)、 k は平行移

動量のパラメータ、 σ は回帰式周りの誤差の標準偏差である。ここでは、カバー率75%に対する k の値として $k=0.674$ (高橋ら, 2006) とし、船舶の水面上投影面積の標準偏差として正面に対して $\sigma=0.037$ 、側面に対して $\sigma=0.101$ (高橋ら, 2006) とした。ただし、標準偏差は、小数第4位を四捨五入した値に変更している。

500~200,000GTの13種類の貨物船に対して設定した船舶の主要寸法に関する諸元について、取りまとめて表-3.2に示す。

(3) 船舶の動揺特性に関する諸元

係留船舶の動揺特性を特徴づける船舶の諸元として、船舶の重心、浮心、メタセンター高さ、環動半径および横揺れ固有周期がある。これらの船舶諸元については、基本的に造船設計便覧 (第4版) (関西造船協会, 1983) (以下、造船設計便覧と記す) を参考にして設定している。

船舶の重心の位置については、船底から重心までの距離として設定する。この位置の関係は、造船設計便覧に示されている船舶の垂線間長に対する船底・重心間の距離と型深さとの比に関する相関図 (船舶諸元データの分布図) を参考にして、船舶の空載状態に対して以下の式で計算することとした。これらの関係式は、この相関図を基に近似的に設定したものである。

$$KGD = 0.8 \quad L_{pp} \leq 100 \quad (12)$$

$$KGD = 0.8 - 0.002(L_{pp} - 100.0) \quad 100 < L_{pp} \leq 200 \quad (13)$$

$$KGD = 0.6 \quad 200 < L_{pp} \quad (14)$$

ここで、 KGD は船底から重心までの距離 KG を型深さ D で除した比 (KG/D)、 L_{pp} は垂線間長 (m) である。船舶の重心位置の算定では、船舶の垂線間長 L_{pp} の大きさによって関係式を使い分ける。

表-3.2 船舶の主要寸法に関する諸元

総トン数 (GT) (トン)	載貨重量トン数 (DWT) (トン)	全長 (Loa) (m)	垂線間長 (Lpp) (m)	型幅 (B) (m)	満載喫水 (d) (m)	空載喫水 (d') (m)	排水量 (DT) (t)	乾舷 (d*) (m)	型深さ (D) (m)	水面上投影面積 (m^2)	
										正面(A_X)	側面(A_Y)
500	945	66	60	10.6	3.7	1.8	1,110	3.6	5.4	89.9	328.6
1,000	1,890	81	74	12.9	4.7	2.4	2,219	4.4	6.7	137.6	519.9
2,000	3,781	99	91	15.7	5.9	3.1	4,439	5.3	8.4	210.8	822.7
3,000	5,671	111	103	17.6	6.7	3.6	6,658	6.0	9.6	270.5	1076.0
5,000	9,452	129	121	20.3	7.9	4.4	11,096	6.9	11.3	370.3	1508.9
10,000	18,904	159	149	24.8	10.0	5.7	22,193	8.4	14.1	567.1	2387.5
20,000	37,807	195	184	30.2	11.3	6.7	44,386	11.0	17.7	868.6	3777.7
50,000	94,518	255	243	39.2	15.2	9.5	110,964	14.2	23.7	1526.0	6928.9
100,000	189,036	313	300	47.8	19.1	12.3	221,928	17.3	29.6	2337.1	10963.4
120,000	226,843	330	317	50.3	20.2	13.2	266,314	18.2	31.4	2614.4	12369.8
150,000	283,554	352	339	53.6	21.7	14.3	332,892	19.4	33.7	2999.0	14338.9
170,000	321,361	366	352	55.6	22.6	15.0	377,278	20.1	35.1	3238.9	15577.6
200,000	378,072	384	370	58.2	23.9	16.0	443,856	21.0	37.0	3579.4	17347.1

船舶の浮心の位置については、早瀬の式（関西造船協会、1983）を用いて算定する。この式は、以下のように表される。

$$\frac{KB}{d} = \frac{1}{1 + C_V} \quad (15)$$

$$C_V = \frac{C_B}{C_W} \quad (16)$$

ここで、 KB は船底から浮心までの距離 (m)、 d は喫水 (m)、 C_B はブロック係数、 C_W は水線面積係数である。ブロック係数とは、船舶の垂線間長、型幅、喫水を掛け合わせた直方体の体積に対する船舶の水線面以下の排水体積の比である。また、水線面積係数とは、船舶の垂線間長と型幅を掛け合わせた長方形の面積に対する船舶の水線面積の比である。

船舶のメタセンター高さについては、重心とメタセンター（傾心）との距離で表される。まず、浮心とメタセンターとの距離を以下の式を用いて算定する（小山ら、1997）。

$$BM = \frac{nB^2}{C_B d} \quad (17)$$

ここで、 BM は浮心とメタセンターとの距離 (m)、 n は水線面積係数 C_W により決定される係数、 B は型幅 (m)、 C_B はブロック係数、 d は喫水 (m) である。係数 n は、水線面積係数との関係図（小山ら、1997）から決定することができる。なお、船舶の水線面積係数に対する浮心とメタセンターとの距離に関する相関図（船舶諸元データの分布図）（関西造船協会、1983）を用いて、浮心とメタセンターとの距離 BM を推定することもできる。

次に、以下の式を用いてメタセンター高さを算定する。

$$GM = BM + KB - KG \quad (18)$$

ここで、 GM はメタセンター高さ（重心とメタセンターとの距離）(m)、 BM は浮心とメタセンターとの距離 (m)、 KB は船底から浮心までの距離 (m)、 KG は船底から重心までの距離 (m) である。

船舶の環動半径については、船舶の長軸（ x 軸）回り、短軸（ y 軸）回りおよび垂直軸（ z 軸）回りの3種類の環動半径がある。船舶の長軸回りの環動半径は、以下の式を用いて算定する（関西造船協会、1983）。

$$R_{xx} = 0.385B \quad (19)$$

ここで、 R_{xx} は船舶の長軸（ x 軸）回りの環動半径 (m)、 B は型幅 (m) である。この式では、軽荷時の貨物船に対する係数の範囲 0.37~0.40 から、平均値である 0.385 を係数としている。また、船舶の短軸回りおよび垂直軸回りの環動半径は、現行技術基準に示されている船舶のヨーイングに関する環動半径の近似式（日本港湾協会、2007）を参考にして、以下の式を用いて算定する。

$$R_{yy} = 0.25L_{pp} \quad (20)$$

$$R_{zz} = 0.25L_{pp} \quad (21)$$

ここで、 R_{yy} は船舶の短軸（ y 軸）回りの環動半径 (m)、 R_{zz} は船舶の垂直軸（ z 軸）回りの環動半径 (m)、 L_{pp} は垂線間長 (m) である。これらの式では、ブロック係数が0.75程度となる船舶に対応する係数を用いている。

船舶の横揺れ固有周期とは、船舶の横揺れ運動（ローリング）の固有周期であり、船舶の長軸回りの環動半径とメタセンター高さの関数として近似的に計算することができる（関西造船協会、1983）。

$$T = \frac{2\pi R_{xx}}{\sqrt{gGM}} \quad (22)$$

ここで、 T は船舶の横揺れ固有周期 (s)、 R_{xx} は船舶の長軸（ x 軸）回りの環動半径 (m)、 GM はメタセンター高さ (m)、 g は重力加速度 (m/s^2) である。

500~200,000GTの13種類の貨物船に対して設定した船舶の動揺特性に関する諸元について、取りまとめて表-3.3に示す。なお、レバー長とは、風荷重の作用点と船体重心との距離を意味しており、係留船舶の動揺シミュレーションにおいて、係留船舶に作用する風荷重を計算する際に必要となるものである。本研究では、風荷重の作用点は、船舶の乾舷の1/2の位置であると仮定してレバー長を設定している。

3.2 係留施設条件

(1) 岸壁

係留柱に作用する標準的な牽引力について検討するため、岸壁は一般的な重力式直立岸壁とする。岸壁のバース長は、500~200,000GTの13種類の貨物船の全長にそれぞれ対応させている。岸壁の天端高については、DL+4.0mとした。また、バースの水深は、対象船舶の最大喫水×1.1として、0.5mラウンドアップで設定した（日本港湾協会、

表-3.3 船舶の動揺特性に関する諸元

総トン数 (GT) (トン)	船幅 (B) (m)	垂線間長 (Lpp) (m)	船底から 浮心までの 距離 (KB) (m)	船底から 重心までの 距離 (KG) (m)	浮心とメ タセン ターと の距離 (BM) (m)	メタセ ンター高 さ (GM) (m)	環動半径 (m)			横揺れ 固有周期 (s)	レバー長 (m)
							R _{xx}	R _{yy}	R _{zz}		
500	10.6	60.0	0.97	4.32	4.45	1.10	4.06	14.99	14.99	7.8	-0.71
1,000	12.9	74.0	1.26	5.40	5.04	0.90	4.95	18.51	18.51	10.5	-0.84
2,000	15.7	91.4	1.65	6.74	5.79	0.70	6.03	22.84	22.84	14.5	-0.98
3,000	17.6	103.3	1.93	7.59	6.25	0.59	6.77	25.83	25.83	17.8	-0.98
5,000	20.3	120.7	2.34	8.60	6.85	0.60	7.83	30.17	30.17	20.3	-0.74
10,000	24.8	149.0	3.06	9.89	7.81	0.98	9.54	37.24	37.24	19.4	0.05
20,000	30.2	183.9	3.56	11.12	10.02	2.46	11.63	45.96	45.96	14.9	1.04
50,000	39.2	242.8	5.04	14.22	11.94	2.76	15.09	60.71	60.71	18.3	2.36
100,000	47.8	299.7	6.55	17.76	13.63	2.42	18.39	74.94	74.94	23.7	3.19
120,000	50.3	316.8	7.02	18.83	14.12	2.31	19.37	79.20	79.20	25.6	3.45
150,000	53.6	339.0	7.64	20.23	14.73	2.14	20.64	84.76	84.76	28.4	3.80
170,000	55.6	352.2	8.01	21.06	15.09	2.04	21.39	88.04	88.04	30.1	4.01
200,000	58.2	370.0	8.51	22.18	15.98	2.30	22.41	92.49	92.49	29.7	4.29

2007). 表-3.4は、対象船舶の総トン数 (GT) に対応したバース前面の水深を示したものである。

潮位は、風荷重が作用する場合に係留船舶による牽引力が大きくなるように、係留索の水平に対する角度が小さくなるLWL (=+0.0m) とした。また、波に対する岸壁の反射率は、重力式直立岸壁であることから、一般的に用いられている0.9を採用している。

(2) 防舷材の設置高さ

防舷材の設置高さについては、岸壁天端から0.5m下がりのDL+3.5mの位置に防舷材の上端が位置するように設定した。

(3) 係船柱の設置位置

曲柱については、一般的な係留施設における係船柱の配置を参考にして、岸壁法線から後方に0.5mの位置とする。また、直柱については、基本的には岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の距離に設置されるものとする (稲垣ら, 1970)。ただし、係留索の配置状況によっては、直柱

に作用する船舶の牽引力が小さめに算定される可能性があることから、直柱の設置位置は、岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の距離、岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の半分の距離、また対象船舶の係留配置におけるブレストラインに等しい長さの係留索が配置される距離の3種類とした。

3.3 防舷材条件

(1) 防舷材の設置間隔

防舷材は、一般的に5~20mの間隔に取り付けられている (日本港湾協会, 2007)。これを参考にして、防舷材の設置間隔については、表-3.5のように設定した。

(2) 船舶の接岸速度および接岸角度

対象船舶に対する防舷材の規格を決定するためには、船舶の接岸エネルギーを求める必要がある。船舶の接岸エネルギーを求めるための主要なパラメータとして、船舶の排水量、船舶の接岸速度、仮想質量係数および偏心係

表-3.4 バースの水深

総トン数 (GT) (トン)	載貨重量トン数 (DWT) (トン)	バース水深 (m)
500	945	4.5
1,000	1,890	5.5
2,000	3,781	6.5
3,000	5,671	7.5
5,000	9,452	9.0
10,000	18,904	11.0
20,000	37,807	12.5
50,000	94,518	17.0
100,000	189,036	21.0
120,000	226,843	22.5
150,000	283,554	24.0
170,000	321,361	25.0
200,000	378,072	26.5

表-3.5 防舷材の設置間隔

総トン数 (GT) (トン)	防舷材間隔 (m)
500	7.5
1,000	7.5
2,000	10.0
3,000	10.0
5,000	10.0
10,000	12.0
20,000	12.0
50,000	20.0
100,000	20.0
120,000	20.0
150,000	20.0
170,000	20.0
200,000	20.0

表-3.6 防舷材の規格

総トン数 (GT) (トン)	載貨重量トン数 (DWT) (トン)	接岸エネルギー (kNm)	防舷材の種類		吸収エネルギー (kNm)	防舷材長さ (m)	防舷材高さ (m)	防舷材取付高 (DLから) (m)
500	945	8.2	V型	150H×2000L	11.0	2.00	0.15	2.50
1,000	1,890	15.7	V型	250H×1500L	19.6	1.50	0.25	2.75
2,000	3,781	32.1	V型	400H×1000L	38.3	1.00	0.40	3.00
3,000	5,671	46.7	V型	400H×1500L	58.9	1.50	0.40	2.75
5,000	9,452	75.8	V型	600H×1000L	92.0	1.00	0.60	3.00
10,000	18,904	152.0	V型	600H×2000L	177.0	2.00	0.60	2.50
20,000	37,807	278.0	V型	800H×2000L	314.0	2.00	0.80	2.50
50,000	94,518	722.2	受衝板付サークル型	1450H F1	876.0	1.80	1.45	2.60
100,000	189,036	1414.2	受衝板付サークル型	2000H F2	1990.0	2.40	2.00	2.30
120,000	226,843	1687.1	受衝板付サークル型	2000H F2	1990.0	2.40	2.00	2.30
150,000	283,554	2096.4	受衝板付サークル型	2000H F0	2590.0	2.40	2.00	2.30
170,000	321,361	2372.6	受衝板付サークル型	1600H F0 ×2	1320.0 ×2	2.00	1.60	2.50
200,000	378,072	2781.9	受衝板付サークル型	2000H F2 ×2	1990.0 ×2	2.40	2.00	2.30

数がある。このうち、船舶の排水量と仮想質量係数は、船舶の主要寸法に関する諸元を用いて算定することができる。一方、偏心係数を算定するためには、船舶の主要寸法に関する諸元のほかに船舶の接岸角度が必要になる。

まず、船舶の接岸速度については、現行技術基準における接岸速度に関する調査結果によると、一般貨物船では大半が0.1m/s以下となっている（日本港湾協会，2007）。そのため、ここでは船舶の接岸速度として0.1m/sと設定した。また、船舶の接岸角度については、一般的に0～10°程度とする場合が多いが、ここでは3.0°と設定した（沿岸技術研究センター，2007）。

(3) 防舷材の種類

防舷材の種類については、貨物船を対象としていることを考慮して、我が国における一般的な事例からV型防舷材を基本とする。ただし、水深が-14mを超えるような大水深の場合、受衝板付の防舷材が使われることが多いため、50,000GT以上の船舶に対しては受衝板付の防舷材を採用することとした。

(4) 防舷材の選定

500～200,000GTの13種類の貨物船について接岸エネルギーを計算し、その接岸エネルギーに十分対応できるような吸収エネルギー特性を有する防舷材を選定する。このとき、防舷材の吸収エネルギーは、その性能公差を考慮して10%割り引いた値を用いる。

選定した防舷材の規格を表-3.6に示す。なお、170,000GTおよび200,000GTの船舶に対しては、防舷材のサイズの関係から、受衝板付防舷材を2基選定している。

3.4 係留索条件

(1) 係船柱の設置間隔

係船柱のうち曲柱の設置間隔については、船舶の大きさに対する曲柱の最大間隔の標準値10～45m（日本港湾協会，

表-3.7 曲柱の設置間隔

総トン数 (GT) (トン)	曲柱間隔 (m)
500	10
1,000	15
2,000	15
3,000	20
5,000	25
10,000	25
20,000	35
50,000	45
100,000	45
120,000	45
150,000	45
170,000	45
200,000	45

2007)を参考にして、500～200,000GTの13種類の貨物船に対して表-3.7のように設定した。現行技術基準では、100,000GTまでの船舶に対して曲柱の最大間隔が提示されている。一方、一般に係留索は船舶の船首および船尾の甲板上に装備されており、大型の船舶に対しても曲柱の設置間隔を極端に大きく取る必要はないと考えられる。そこで、100,000GTを超える船舶については、曲柱の設置間隔は45mを上限とした。なお、曲柱の間隔からその設置基数を概算的に求めると、船舶の全長に対応して曲柱を設置し、かつ船首側および船尾側に各1基の曲柱を付加的に設置するとした場合、少なくとも100,000GTの船舶に対しては10基程度、150,000～200,000GTの船舶に対しては12基程度が必要となる。

また、実際の設計で採用されている曲柱の設置間隔について、係留施設を対象とした設計事例の収集資料から曲柱の設計図面を抽出し、調査を実施している。この資料は、国土交通省国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室が、港湾施設設計における性能照査方法の見直しのため、全国の港湾を対象として平成11年度から平

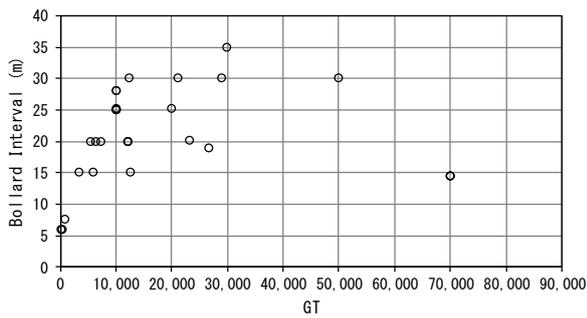


図-3.1 船舶の総トン数と曲柱の設置間隔の関係

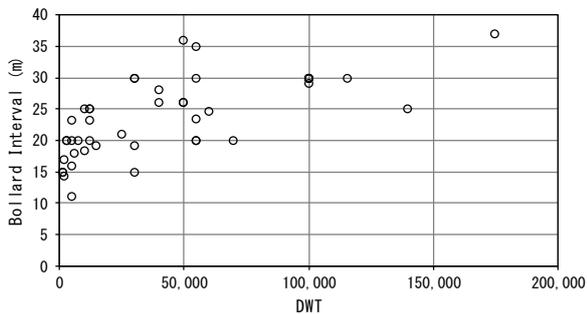


図-3.2 船舶の載貨重量トン数と曲柱の設置間隔の関係

成26年度に実施された外郭施設および係留施設の設計事例を対象に収集したものである。

図-3.1および図-3.2は、それぞれ船舶の総トン数(GT)および載貨重量トン数(DWT)と曲柱の設置間隔の関係について示している。これらの図から、船舶の総トン数または載貨重量トン数が大きくなるにつれて、曲柱の設置間隔は広くなるが、最大でも40m程度であることがわかる。また、一部例外はあるが、概ね現行技術基準に提示されている曲柱の最大間隔以下の値となっている。これは、現行技術基準に提示されている曲柱の最大間隔を限界条件として、曲柱の配置が決定されているからである。ただし、最大の船型は70,000GTおよび175,000DWTであり、100,000GTを超える大型の船は含まれてないことに注意が必要である。

一方、直柱については、通常は1バースに対して2基、最大でも4基程度が設置されていると考えられる。そこで、本研究では、直柱は対象船舶の船首側に1基、船尾側に1基の合計2基を設置するものとした。

(2) 船舶の接岸方向

船舶の接岸方向については、左舷接岸、右舷接岸のいずれでも係留船舶の動揺シミュレーションにおいて大きな違いはないと考えられるが、ここでは全ての船舶に対して左舷接岸を採用することとする。

(3) 係留索の本数

図-3.3は、船舶係留時の各係留索の名称を示す。本研究では、バウライン、プレストライン、スプリングラインおよびスターンラインという名称を使用している。

本研究では、船舶の大きさにかかわらず、曲柱に係留される係留索の本数は合計8本、また、直柱に係留される係留索は船首側および船尾側について各1本とし、対象船舶に対して全体として合計10本の係留索を用いるものとした。各係留ラインの本数は、以下のように設定している。

■ 係留索の本数

(曲柱)

バウライン、スターンライン：各2本

プレストライン：船首側1本、船尾側1本

スプリングライン：船首側1本、船尾側1本

(直柱)

プレストライン：船首側1本、船尾側1本

このように各船舶における係留索の本数を一定にすることにより、係留柱に作用する牽引力について船舶の大きさごとに相互比較することが容易になる。なお、実際には、500~200,000GTクラスの船舶では、通常4~20本程度の係留索が装備されていることに注意が必要である。

(4) 係留索の規格

係留索の種類は、全ての船舶に対してナイロンエイトロープの1種類とする。係留索の径を設定するためには、鋼船規則 C編(日本海事協会, 2017a)に基づいて船舶の艀装数を計算する必要がある。しかし、艀装数を計算するために必要となる船舶の詳細な諸元が不明であることか

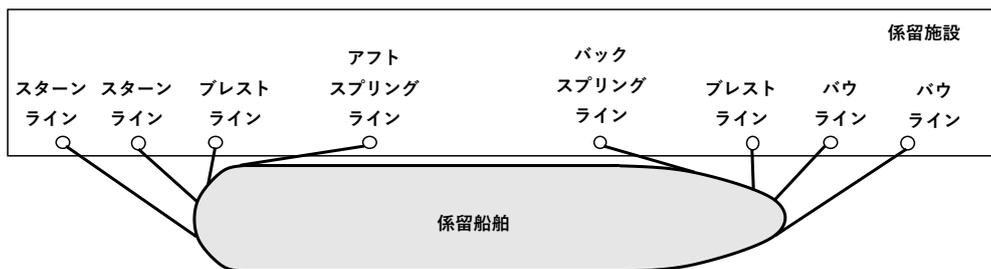


図-3.3 係留索の名称

表-3.8 係留索の径および切断荷重

総トン数 (GT) (トン)	載貨重量トン数 (DWT) (トン)	係留索の径 (mm)	切断荷重 (kN)
500	945	22	95
1,000	1,890	28	147
2,000	3,781	35	219
3,000	5,671	40	276
5,000	9,452	45	338
10,000	18,904	55	510
20,000	37,807	60	603
50,000	94,518	70	796
100,000	189,036	75	906
120,000	226,843	80	1040
150,000	283,554	80	1040
170,000	321,361	80	1040
200,000	378,072	85	1130

ら、ここでは一般貨物船に対する艀装数の回帰式(寺内ら、1980)を用いて、各船舶に対して係留索に必要な径を算出した。各船舶に対して設定した係留索の径および切断荷重を表-3.8に示す。すなわち、各船舶に対して、径および切断荷重の異なる係留索が、曲柱のみを用いる場合はそれぞれ8本ずつ、また直柱と曲柱を用いる場合はそれぞれ10本ずつ装備されることとなる。なお、採用した係留索の切断荷重は、繊維ロープメーカーT社のカタログに掲載されているナイロンエイトロープのものである。この切断荷重は、鋼船規則 L編(日本海事協会、2017b)(以下、鋼船規則と記す)に示されている繊維ロープ(ナイロン索)の切断荷重よりも大きい値となっている。鋼船規則に示されている繊維ロープの切断荷重については、付録Aに掲載する。

(5) 係留索の配置高さ

係留索の設置高さについては、船舶側は乾舷の高さとし、岸壁側は天端の高さととして設定した。

(6) 係留索の水平角度

曲柱に係留される係留索の水平角度については、福田ら(1982)を参考にして、以下に示す角度を目標として設定することとした。

■係留索の水平角度

バウライン：30°

プレストライン(船首側)：60°

スプリングライン(船首側)：160°

スプリングライン(船尾側)：20°

プレストライン(船尾側)：120°

スターンライン：150°

なお、ここで示している水平角度は、岸壁法線と係留索がなす角度であり、岸壁法線から係留索に向けて反時計回りに測った角度である。

また、直柱については、現行技術基準に示されているように、船軸と直柱に係留される係留索のなす角度ができるだけ直角となるように配置することが一般的である。そこで、直柱に係留される係留索の水平角度については、係留索が岸壁法線に対して垂直(90°)となるように設定することとした。また、直柱に係留される係留索は、通常、プレストラインと呼んでいる。

(7) 船舶側の係留索の位置

曲柱に係留される係留索の船舶側の設置位置については、船舶の垂線間長 L_{pp} および型幅 B を用いて、全ての船舶に対して以下のように係留索設置位置の x 座標(船舶の長軸方向)および y 座標(船舶の短軸方向)を算定することとした。これは、10,000DWT級貨物船の標準的な係船設備の配置事例を参考にして設定したものである。なお、直柱に係留される係留索の船舶側の設置位置については、スプリングラインおよびプレストラインの船舶側の設置位置の中央とした。

■船舶側の係留索の位置

(曲柱)

バウライン：(0.48 L_{pp} , -0.07 B), (0.48 L_{pp} , 0.07 B)

プレストライン(船首側)：(0.42 L_{pp} , 0.36 B)

スプリングライン(船首側)：(0.40 L_{pp} , 0.43 B)

スプリングライン(船尾側)：(-0.40 L_{pp} , 0.43 B)

プレストライン(船尾側)：(-0.42 L_{pp} , 0.32 B)

スターンライン：(-0.48 L_{pp} , -0.14 B), (-0.48 L_{pp} , 0.14 B)

(直柱)

プレストライン(船首側)：(0.41 L_{pp} , 0.40 B)

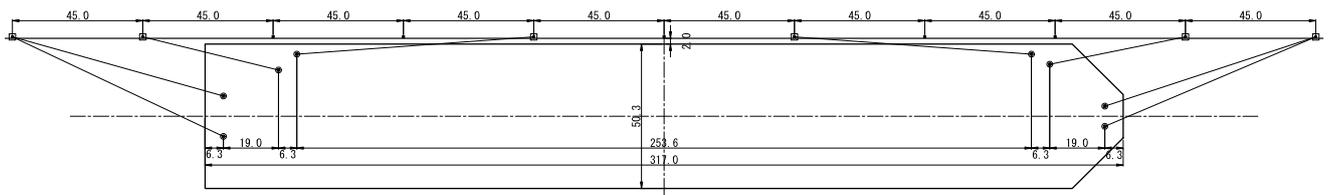
プレストライン(船尾側)：(-0.41 L_{pp} , 0.38 B)

(8) 係留索の配置(曲柱のみを用いる場合)

曲柱のみを用いる場合の係留索の配置について、120,000GTの船舶に対する曲柱の位置および係留索の配置状況を図-3.4に示す。なお、全ての大きさの船舶に対する曲柱の位置および係留索の配置状況は、付録Bに掲載する。これらの係留索の配置図では、m単位の小数第2位を四捨五入した数値で表記し、船舶の表示は垂線間長を用いている。

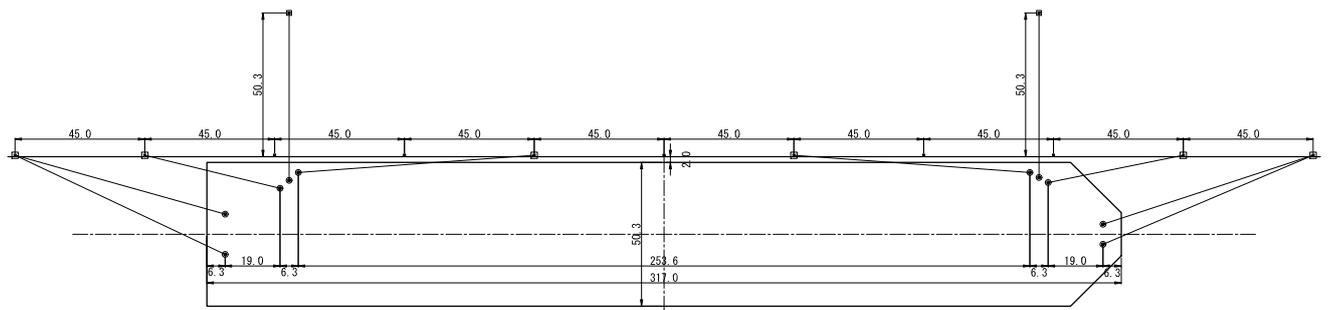
(9) 係留索の配置(曲柱および直柱を用いる場合)

本研究では、直柱については、岸壁法線からの距離が3種類の設置位置を対象として検討している。ここでは、直柱が、岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の距離に設置されるケースを係留配置1、岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の半分の距離に設置されるケースを係留配置2、また対象船舶の係留配置におけるプレストラインに等しい長さの係留索が配置される距離に設置されるケースを係留配置3とする。



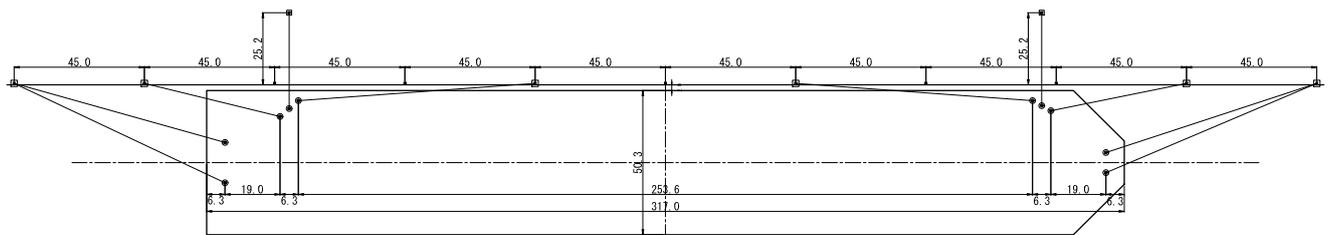
(単位：m)

図-3.4 係留索の配置 (120,000GT, 曲柱のみ)



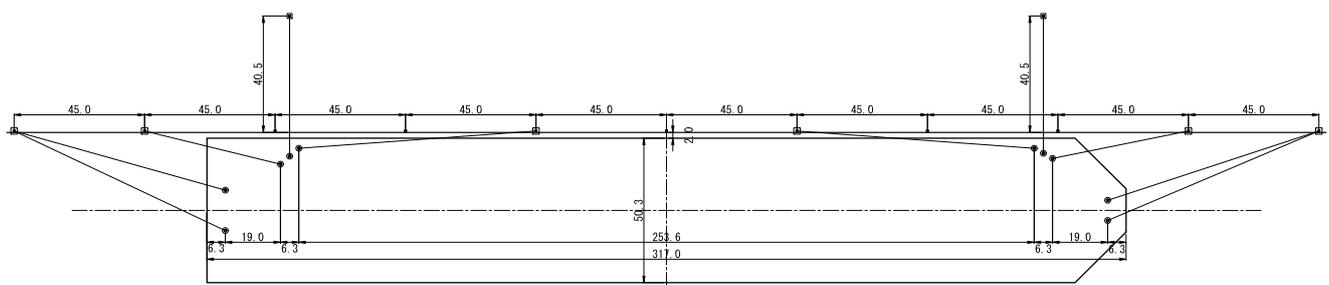
(単位：m)

図-3.5 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置 1)



(単位：m)

図-3.6 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置 2)



(単位：m)

図-3.7 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置 3)

曲柱および直柱を用いる場合の係留索の配置について、係留配置1、係留配置2および係留配置3における120,000GTの船舶に対する係船柱の位置および係留索の配置状況をそれぞれ図-3.5、図-3.6および図-3.7に示す。なお、係留配置1、係留配置2および係留配置3における全ての大きさの船舶に対する係船柱の位置および係留索の配置状況は、付録C、付録Dおよび付録Eに掲載する。これらの係留索の配置図では、m単位の小第2位を四捨五入した数値で表記し、船舶の表示は垂線間長を用いている。

4. 動揺シミュレーション手法

4.1 係留船舶の動揺シミュレーション

(1) 外力

係留船舶により係船柱に作用する牽引力を算定するために、本研究では、係留船舶の動揺シミュレーションを用いる。係留船舶による牽引力については、これまでの研究成果(稲垣ら, 1970; 福田ら, 1982)から、風荷重が岸壁側から係留船舶に作用する場合に大きくなる傾向にある

ことが明らかになっている。また、風速が大きい場合においては、波浪荷重や流れ荷重の係留船舶の牽引力に与える影響は、風荷重と比較してそれほど大きくないことも確認されている。これらのことから、係留船舶の動揺シミュレーションは、風荷重が係留施設側から係留船舶の舷側に垂直に作用する場合について実施することとした。

(2) 運動方程式

係留船舶の動揺シミュレーションでは、一般的に用いられる係留船舶の動揺6成分の運動方程式を時系列的に計算する（上田ら，1983）。風荷重が作用する場合の係留船舶の動揺に関する運動方程式は、次式のように表される。

$$[M + m(\omega_0)]\ddot{x} + N(\omega_0)\dot{x} + Bx + R(x) = F \quad (23)$$

ここで、 M は船舶の質量・慣性モーメントマトリクス、 $m(\omega_0)$ は船舶の付加質量・付加慣性モーメントマトリクス（波角周波数 ω_0 に対応）、 $N(\omega_0)$ は造波減衰係数マトリクス（波角周波数 ω_0 に対応）、 B は静水圧的復元力マトリクス、 $R(x)$ は防舷材反力・係留索張力ベクトル、 F は風荷重ベクトル、 x は動揺変位ベクトル、 \dot{x} は動揺速度ベクトル、 \ddot{x} は動揺加速度ベクトルである。なお、粘性抵抗力は一般的に考慮しない。

波力および流体力は、船体断面形状をルイスフォーム（Lewis Form）近似により設定し、流体力を計算するストリップ法により算定している。運動方程式では、流体力は、ある特定の波周期に対して一定値とする方法（上田ら，1983）を採用しており、波の有義波周期に対応した流体力を用いる。また、風荷重は、ダavenport（Davenport）型の風速スペクトルを用いて不規則風を生成し、風荷重の算定式から求める。なお、係留船舶の動揺シミュレーションにおけるシミュレーション時間は、1,500s（0.2s×7,500タイムステップ、ただし、1,000GT以下の船舶に対しては1,000s）として、係留索に切断荷重を超えた張力が作用した場合でも動揺シミュレーションは継続している。

(3) 船体断面形状

係留船舶の動揺シミュレーションでは、対象船舶の喫水面下の船体断面形状を設定する必要がある。船体断面形状は、一般的に用いられているルイスフォーム（Lewis Form）近似によって作成する。本研究では、10,000DWT級貨物船の半載状態の船型を標準船型として、これに対象船舶の全長比、型幅比および喫水比を乗じることにより、船舶の大きさに対応する相似な船体断面形状を算定した。

波力および流体力は、船首尾方向に概ね一定間隔で20程度に分割した船体断面形状に対して計算される。船舶

全体に作用する波力および流体力は、この各船体断面における波力と流体力をそれぞれ船首尾方向に加え合わせることで算出する。

(4) 係留系のモデル化

係留船舶の動揺シミュレーションを実施するときには、防舷材および係留索の変位復元力特性をモデル化する必要がある。ここで、防舷材および係留索の変位復元力特性は、一般的に波浪荷重や流れ荷重が作用する場合に係留船舶の動揺特性に大きな影響を与えると言える。しかしながら、風荷重を係留施設側から係留船舶に作用させる場合には、防舷材の変位復元力特性については係留船舶による牽引力に与える影響は比較的小さいと考えられる。

4.2 シミュレーション条件

(1) 風荷重の算定式

a) 風向

係留船舶に作用する風荷重が牽引力に与える影響が大きくなるように、陸側から海側へと風が吹く状況として設定した。このとき、船舶による牽引力の特徴を抽出しやすいうように、係留船舶の前後方向の動揺を低減させて左右方向の動揺を増加させるために、係留施設側から船舶側へと垂直に風荷重が作用するものとした。

b) 風抗力係数

風荷重を計算するために必要となる風抗力係数については、上田ら（1993）が提案している風抗力係数の算定式を適用する。風抗力係数の算定式として、以下のような一般貨物船（船体中央にエンジンがあるタイプ）の空載状態のものを採用した。

$$C_x = -(0.008 + 0.957 \cos \theta - 0.110 \cos 3\theta - 0.049 \cos 5\theta) \quad (24)$$

$$C_y = 1.012 \sin \theta + 0.054 \sin 3\theta - 0.033 \sin 5\theta - 0.017 \sin 6\theta \quad (25)$$

$$C_M = 0.0117 \sin \theta + 0.1157 \sin 2\theta - 0.0074 \sin 4\theta + 0.0055 \sin 6\theta \quad (26)$$

ここで、 C_x は船舶の船首尾方向（ x 軸方向）の風抗力係数、 C_y は船舶の船側方向（ y 軸方向）の風抗力係数、 C_M はミッドシップ（船体中央）回りの風圧モーメント係数、 θ は風向（ $^\circ$ ）（ここでは、船体側面に垂直）である。

また、表-4.1および図-4.1は、風抗力係数の算定式を用いて16方位の風向ごとに求めた風抗力係数を示す。これらの風抗力係数は、風向によって大きく変化するが、ここでは係留施設側から船舶側へと垂直に風荷重が作用する

表-4.1 船舶の風抗力係数および風圧モーメント係数

風向 (°)	C_x	C_y	C_M
0.0	-0.806	0.000	0.000
22.5	-0.869	0.394	0.083
45.0	-0.797	0.794	0.118
67.5	-0.431	0.915	0.104
90.0	-0.009	0.925	0.012
112.5	0.413	0.939	-0.082
135.0	0.780	0.761	-0.102
157.5	0.853	0.420	-0.074
180.0	0.790	0.002	0.000
202.5	0.853	-0.417	0.074
225.0	0.782	-0.759	0.102
247.5	0.417	-0.939	0.083
270.0	-0.006	-0.925	-0.011
292.5	-0.428	-0.915	-0.104
315.0	-0.795	-0.796	-0.119
337.5	-0.869	-0.398	-0.083

条件であるため、風向270°の風抗力係数を使用する。

c) 風速

風荷重を計算するために必要となる風速については、風を変動風として、風速のスペクトルとしてダベンポート (Davenport) 型スペクトルを使用する。この風速スペクトルの重要なパラメータは、10分間平均風速である。本研究では、船舶は、曲柱のみにより係留される場合と、曲柱および直柱により係留される場合を対象としている。

稲垣ら (1970) は、係留船舶による牽引力の算定において、台風時に船舶に避難勧告の発令される風速 15m/s を根拠にして曲柱に作用する牽引力を求めるとともに、気象資料から当時の既往最大風速を概ね 30m/s 程度として直柱に作用する牽引力を算出している。また、福田ら (1982) も、稲垣ら (1970) と同等の風速を対象として牽引力を算定している。現行技術基準に提示されている船舶の牽引力の標準値は、これらの文献に基づいており、曲柱については風速 15m/s、また直柱については 1,000GT 以下の船舶に対して風速 35m/s、10,000GT 以下の船舶に対して風速 30m/s、10,000GT を超える船舶に対して風速 25m/s において安全に係留できることを考慮している。

したがって、船舶が曲柱のみにより係留される場合には、船舶に係留可能な限界風速は 15m/s 程度であることから、ここでは、10 分間平均風速としてこの限界風速を含む、5m/s、10m/s、15m/s および 20m/s の 4 ケースを設定した。一方、船舶が曲柱に加えて直柱を用いて係留される場合は、季節風や低気圧による風などの暴風時が想定される。このような暴風時の風速は、概ね 20m/s 以上であると考えられることから、ここでは、10 分間平均風速として、20m/s、25m/s、30m/s および 35m/s の 4 ケースを設定した。表-4.2 は、風速に関する設定条件を取りまとめて示したものである。ここでは、曲柱のみを用いる場合の

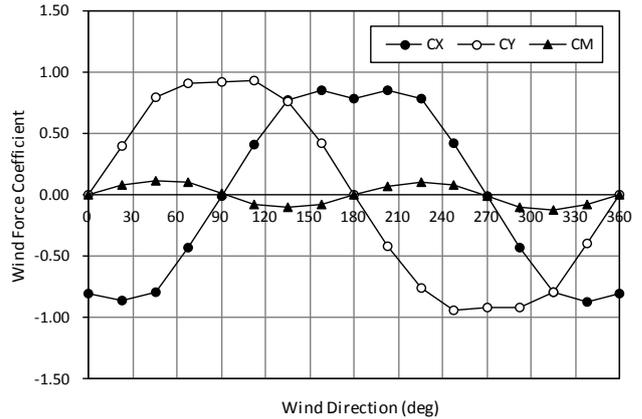


図-4.1 船舶の風抗力係数および風圧モーメント係数

表-4.2 風速条件

係船柱	状況	風速 (10 分間平均)
曲柱のみ	平常時	5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s
曲柱・直柱	暴風時	20m/s, 25m/s, 30m/s, 35m/s

風の状況を平常時 (風速: 5~20m/s)、また曲柱および直柱を用いる場合の風の状況を暴風時 (風速: 20~35m/s) と定義している。

d) 風荷重の算定式

係留船舶の動揺シミュレーションでは、風荷重は、以下の算定式により計算する。

$$R_x = \frac{1}{2} \rho U^2 A_x C_x \quad (27)$$

$$R_y = \frac{1}{2} \rho U^2 A_y C_y \quad (28)$$

$$R_M = \frac{1}{2} \rho U^2 A_y L_{pp} C_M \quad (29)$$

ここで、 R_x は風荷重合力のx方向成分 (kN)、 R_y は風荷重合力のy方向成分 (kN)、 R_M は風荷重合力のミッドシップ (船体中央) 回りのモーメント成分 (kNm)、 ρ は空気の密度 (kg/m^3)、 U は変動風速 (m/s)、 A_x は水面上正面投影面積 (m^2)、 A_y は水面上側面投影面積 (m^2)、 L_{pp} は垂線間長 (m)、 C_x は船舶の船首尾方向 (x軸方向) の風抗力係数、 C_y は船舶の船側方向 (y軸方向) の風抗力係数、 C_M はミッドシップ (船体中央) 回りの風圧モーメント係数である。

風荷重は、係留施設側から係留船舶の舷側に垂直に作用することから、係留船舶の動揺シミュレーションでは風荷重合力のy方向成分 R_y のみが外力として用いられる。なお、図-4.1によると、風向270°のときの風抗力係数 C_y は最大に近い値であるが厳密には最大値ではないため、

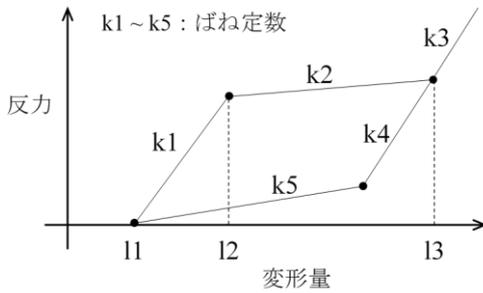


図-4.2 防舷材の変位復元力特性のモデル化

この風向において係留船舶に作用する風荷重は最大にはならない. そこで, 各風向に対する風荷重合力を試算して, 他の風向の場合の最大値と風向270° の場合の値を比較してみると, その差異は約2%と非常に小さかった. このため, 係留施設側から船舶側へと垂直に風荷重が作用するという条件でも, 船舶による牽引力の最大値を概ね推定することができると思われる.

(2) 防舷材の変位復元力特性

実際の防舷材の変位復元力特性は定反力型の曲線形状であるが, 係留船舶の動揺シミュレーションを実施する上では, 以下の①~⑤の手順でその特性を直線で近似した変位復元力特性にモデル化する(上田, 1984). 図-4.2は, 防舷材の変位復元力特性のモデル化における特性形状を示している.

- ①第1勾配(k1)は元の特性の最大初期勾配を利用する.
- ②圧縮量20~40%の範囲の極大反力と設計圧縮量(V型の場合47.5%, 受衝板付の場合55.0%)の反力(設計反力)を結んだ勾配を第2勾配(k2)とする. ただし, 第2勾配は負にならないものとする.
- ③最大反力と設計反力を結んだ勾配を第3勾配(k3)とする. ただし, 最大反力と設計反力が一致する場合は, 最

大反力点での勾配を第3勾配とする.

④第4勾配(k4)は第1勾配と等しいとする.

⑤第4勾配で第1折れ点まで減少させた反力と原点を結んだ勾配を第5勾配(k5)とする.

表-4.3は, 防舷材のモデル化された変位復元力特性の設定値を示す. この表のk1~k5は, モデル化された変位復元力特性のばね定数を表し, 図-4.2のそれぞれの線分の部分における勾配を意味している. 本研究では, 防舷材メーカーS社の防舷材のカタログから図面を引用して, 防舷材の変位復元力特性をモデル化している.

(3) 係留索の変位復元力特性

係留索については, 全ての船舶に対してナイロンエイトロープとして設定する. 係留索の変位復元力特性は, 繊維ロープメーカーT社のカタログに掲載されているロープの荷重-変位曲線(強伸度曲線)を採用した. 図-4.3は,

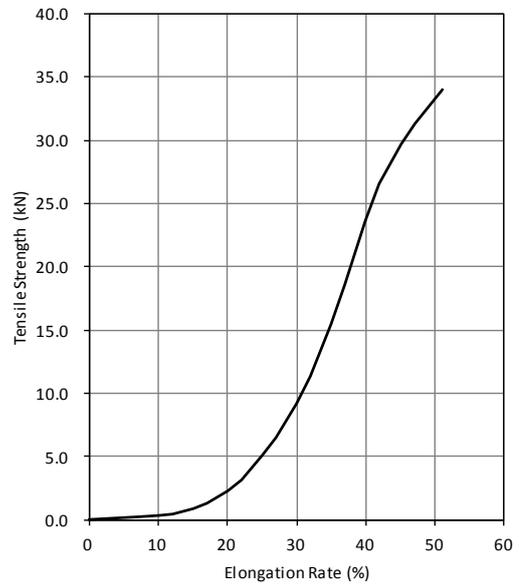


図-4.3 ナイロンエイトロープの強伸度曲線

表-4.3 防舷材の変位復元力特性の設定値

総トン数 (GT) (トン)	防舷材の規格	k1 (kN/m)	k2 (kN/m)	k3 (kN/m)	k4 (kN/m)	k5 (kN/m)
500	V型 150Hx2000L	8,046	1,564	11,733	8,046	3,368
1,000	V型 250Hx1500L	6,207	1,290	7,656	6,207	2,525
2,000	V型 400Hx1000L	4,224	774	5,500	4,224	1,678
3,000	V型 400Hx1500L	6,337	1,161	8,250	6,337	2,516
5,000	V型 600Hx1000L	4,183	792	5,500	4,183	1,667
10,000	V型 600Hx2000L	8,365	1,583	11,000	8,365	3,334
20,000	V型 800Hx2000L	8,598	1,522	10,890	8,598	3,414
50,000	サークル型 1450H F1	8,131	239	3,338	8,131	1,877
100,000	サークル型 2000H F2	9,937	379	5,867	9,937	2,237
120,000	サークル型 2000H F2	9,937	379	5,867	9,937	2,237
150,000	サークル型 2000H F0	12,229	365	4,916	12,229	2,915
170,000	サークル型 1600H F0 ×2	19,281	540	9,723	19,281	4,712
200,000	サークル型 2000H F2 ×2	19,873	757	11,733	19,873	4,472

ナイロンエイトロープの強伸度曲線を示したものである。この図では、縦軸は引張強さ、横軸は伸び率特性を表しており、径12.5mmのロープの特性を示している。ロープの切断荷重は、34.0kNである。係留索の変位復元力特性のモデル化についても、上田（1984）で説明されている方法を参考にして実施した。なお、係留索の初期張力は切断荷重の7%の値、また切断荷重時の伸び率は51%とし、荷重－変位曲線は、18分割してモデル化した。ここで、船舶ごとに設定されている係留索の切断荷重および索長に対して、この図に示されているナイロンエイトロープの荷重／切断荷重の比率および伸び率を乗じることにより、任意の径を有する係留索の荷重－変位特性を算定することができる。

5. 牽引力の計算結果

5.1 概要

平常時における風荷重に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより、曲柱のみを用いる場合について各係留索の張力および各係船柱に作用する牽引力を計算した。同様にして、暴風時における風荷重に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより、曲柱および直柱を用いる場合について各係留索の張力および各係船柱に作用する牽引力を計算した。ここでは、曲柱のみを用いて船舶が係留される場合と曲柱および直柱を用いて船舶が係留される場合をそれぞれ対象として、船舶の大きさ（総トン数（GT））と係留索の張力あるいは係船柱に作用する牽引力の関係について考察する。

動揺シミュレーション結果における係留索張力の時系列を見ると、係留索張力の時間的変動は小さく、一定時間後に概ね一定値に収束していた。これは、外力として、係留施設側から係留船舶側へ作用する風荷重のみを考慮しているからである。そこで、係留索の張力および係船柱に作用する牽引力は、それらの時系列データにおける最大値を採用することとした。なお、以下の文章中では、係留

索の張力の最大値を係留索の最大張力、また係船柱に作用する牽引力の最大値を最大牽引力と表記する。

5.2 曲柱のみを用いる場合（平常時）

平常時に曲柱のみを用いて船舶が係留される場合について、5～20m/sの風速ごとに、500～200,000GTの13種類の船舶に対する係留索の張力および曲柱に作用する牽引力の特徴について考察する。図-5.1は、係留索の名称・番号および曲柱の番号の設定を示したものである。係留索の名称・番号は、船首側から船尾側に向けて、バウライン①、バウライン②、プレストライン①、スプリングライン①、スプリングライン②、プレストライン②、スターンライン①およびスターンライン②である。また、曲柱は全部で6基使用しており、船首側から船尾側に向けて、1～6の番号を付けている。なお、曲柱1および曲柱6には、係留索が2本係留されている点に注意が必要である。

表-5.1～表-5.4は、それぞれ風速5m/s、10m/s、15m/sおよび20m/sにおける船舶の総トン数（GT）に対する係留索の最大張力および曲柱に作用する最大牽引力を示す。また、図-5.2～図-5.9は、これらの表を係留索の最大張力および曲柱に作用する最大牽引力についてグラフとして表示したものである。なお、表には、係留索の切断荷重も併せて示している。

これらの図表から、風速が増加するにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることがわかる。また、基本的に、船舶の総トン数が大きくなるにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることもわかる。風速5m/sの場合では、全ての係留索に同程度の張力が作用している。これは、この風速条件では係留船舶に作用する風荷重が小さく、概ね係留索の初期張力のみが作用している状態であるためと考えられる。風速10m/s以上の場合では、係留索により張力の違いが見られ、プレストライン①・②、バウライン①・②あるいはスターンライン①・②、そしてスプリングライン①・②の順に張力が大きい傾向となっている。これは、プレストラインの索長が短く、相対的に係留索のばね

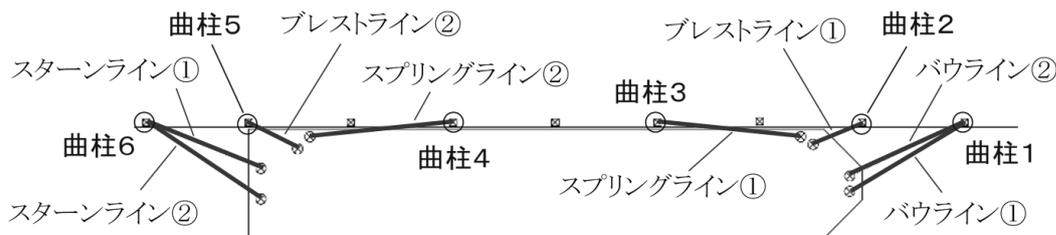


図-5.1 係留索の名称・番号および係船柱の番号（曲柱のみの場合）

表-5.1 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 5m/s）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))									
		バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)
500	95	6.64	6.65	13.29	6.66	6.70	6.66	6.76	6.70	6.69	13.39
1,000	147	10.29	10.30	20.59	10.29	10.32	10.30	10.32	10.31	10.31	20.62
2,000	219	15.24	15.23	30.47	14.89	15.43	15.23	15.10	15.31	15.25	30.56
3,000	276	19.30	19.28	38.58	19.15	19.35	19.19	19.21	19.28	19.27	38.56
5,000	338	23.71	23.71	47.42	23.65	23.69	23.65	23.68	23.72	23.71	47.43
10,000	510	35.59	35.54	71.13	34.66	35.87	35.43	34.94	35.60	35.48	71.09
20,000	603	42.45	42.37	84.82	42.32	42.67	42.34	42.46	42.37	42.36	84.73
50,000	796	56.91	56.51	113.42	55.95	57.18	55.03	56.03	55.70	55.34	111.04
100,000	906	68.83	67.64	136.48	66.65	66.12	63.27	67.46	66.10	66.81	132.91
120,000	1040	77.46	76.32	153.78	74.97	75.14	72.52	76.11	74.70	74.66	149.37
150,000	1040	77.89	76.70	154.58	75.39	74.86	72.47	76.43	74.76	74.50	149.26
170,000	1040	78.07	76.83	154.90	75.55	74.82	72.51	77.15	75.17	74.79	149.96
200,000	1130	81.98	80.99	162.97	79.11	81.09	78.75	79.93	79.35	78.99	158.34

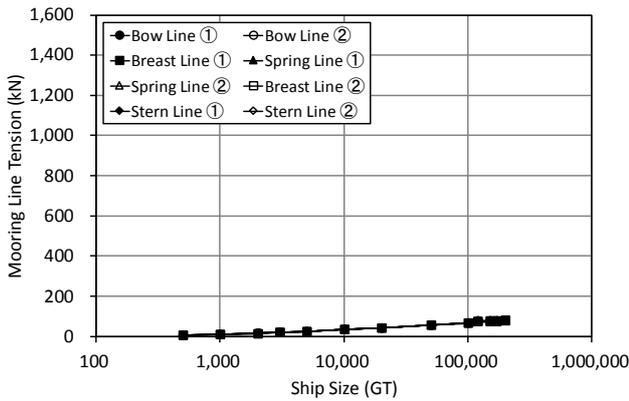


図-5.2 係留索の最大張力（風速 5m/s）

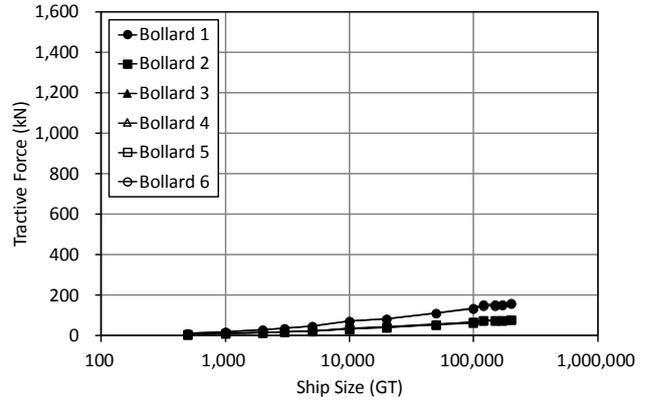


図-5.3 最大牽引力（風速 5m/s）

表-5.2 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 10m/s）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))									
		バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)
500	95	10.67	9.92	20.59	16.98	9.36	8.83	15.78	9.55	10.37	19.91
1,000	147	17.09	15.53	32.62	21.86	19.04	18.21	22.70	14.65	17.19	31.84
2,000	219	23.37	22.14	45.51	37.50	20.75	18.51	35.49	20.27	21.07	41.33
3,000	276	32.45	29.76	62.21	42.21	30.19	26.73	42.63	26.97	31.46	58.43
5,000	338	39.37	36.15	75.52	49.31	45.70	42.05	48.51	32.37	37.71	70.08
10,000	510	51.67	47.51	99.17	71.75	40.53	36.05	72.17	44.75	47.74	92.49
20,000	603	79.28	72.53	151.82	108.07	68.10	59.53	108.55	65.27	76.80	142.07
50,000	796	121.62	111.18	232.80	190.76	97.08	83.28	190.47	100.22	117.72	217.94
100,000	906	163.09	149.58	312.67	192.17	116.77	105.50	197.69	137.09	161.14	298.23
120,000	1040	186.22	170.97	357.20	222.53	107.78	95.17	229.27	155.83	182.76	338.60
150,000	1040	196.91	181.85	378.75	254.33	92.70	85.23	264.33	166.92	191.73	358.65
170,000	1040	204.92	188.92	393.84	276.05	88.81	81.38	288.15	174.00	196.86	370.85
200,000	1130	215.10	203.36	418.46	314.39	92.12	83.48	323.73	189.10	205.06	394.16

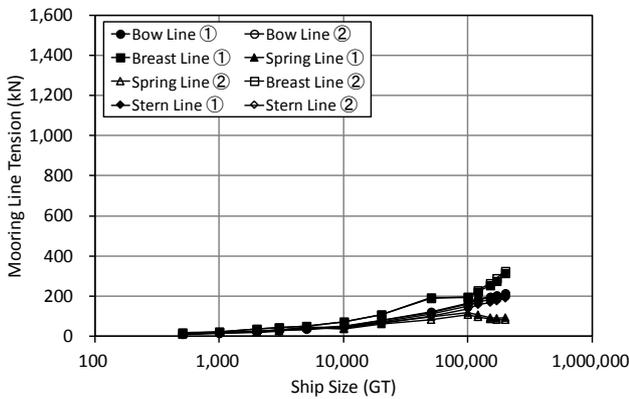


図-5.4 係留索の最大張力（風速 10m/s）

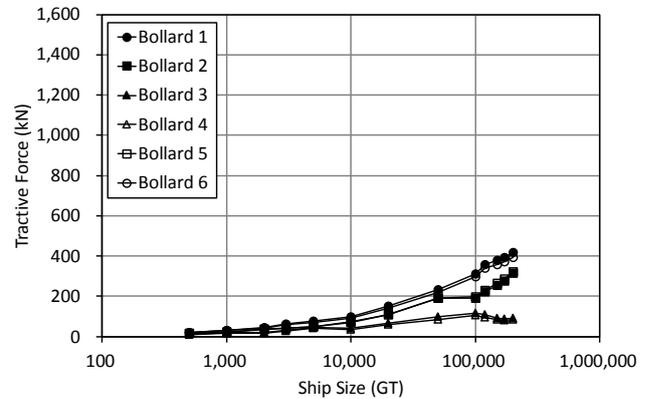


図-5.5 最大牽引力（風速 10m/s）

表-5.3 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 15m/s）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))									
		パウ ライン ①	パウ ライン ②	パウ ライン 合計 (曲柱1)	プレスト ライン ① (曲柱2)	スプリング ライン ① (曲柱3)	スプリング ライン ② (曲柱4)	プレスト ライン ② (曲柱5)	スターン ライン ①	スターン ライン ②	スターン ライン 合計 (曲柱6)
500	95	30.55	29.42	59.97	85.76	21.44	20.48	79.45	25.34	28.03	53.37
1,000	147	43.86	39.90	83.76	96.44	94.11	89.76	108.98	40.09	48.54	88.64
2,000	219	43.76	40.42	84.18	137.98	29.84	23.04	137.56	41.80	44.21	86.02
3,000	276	53.81	49.19	103.00	101.80	55.74	51.55	101.26	44.46	52.48	96.95
5,000	338	62.99	57.87	120.86	106.70	99.70	92.71	104.16	51.89	61.16	113.05
10,000	510	88.96	81.26	170.22	201.62	51.47	40.75	205.13	76.27	87.00	163.27
20,000	603	129.88	115.81	245.69	263.36	123.12	106.14	260.17	104.50	125.57	230.07
50,000	796	197.20	177.45	374.66	458.34	165.41	139.11	453.77	158.03	192.43	350.47
100,000	906	344.41	304.92	649.33	553.83	243.70	212.85	557.91	272.90	336.46	609.36
120,000	1040	388.82	342.86	731.68	646.29	196.52	167.42	652.02	310.33	377.93	688.27
150,000	1040	414.32	369.77	784.09	741.01	148.99	120.35	751.06	331.35	398.52	729.87
170,000	1040	425.27	386.22	811.49	796.58	128.06	99.89	806.50	344.45	408.12	752.57
200,000	1130	427.89	399.17	827.06	880.63	114.37	92.80	882.14	366.09	402.49	768.58

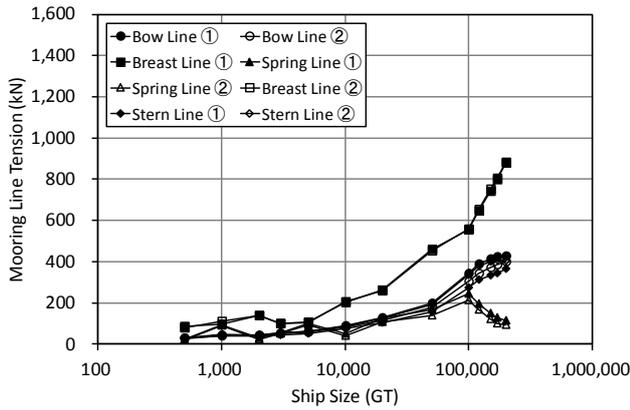


図-5.6 係留索の最大張力（風速 15m/s）

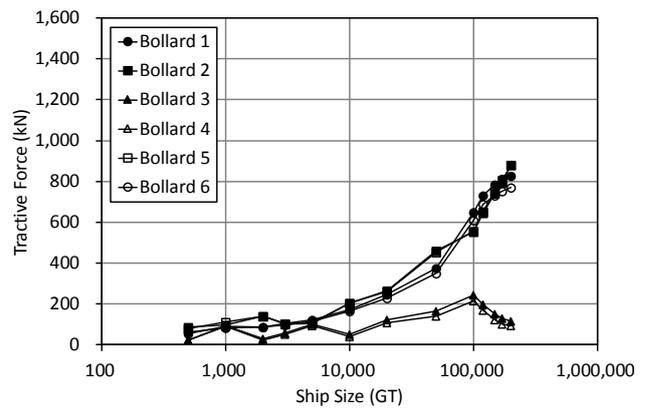


図-5.7 最大牽引力（風速 15m/s）

表-5.4 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 20m/s）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))									
		パウ ライン ①	パウ ライン ②	パウ ライン 合計 (曲柱1)	プレスト ライン ① (曲柱2)	スプリング ライン ① (曲柱3)	スプリング ライン ② (曲柱4)	プレスト ライン ② (曲柱5)	スターン ライン ①	スターン ライン ②	スターン ライン 合計 (曲柱6)
500	95	59.34	55.34	114.68	127.43	46.00	40.42	115.72	54.81	54.65	109.45
1,000	147	65.91	57.62	123.53	139.67	141.50	140.27	136.63	48.92	63.11	112.03
2,000	219	55.65	51.18	106.83	188.26	27.06	18.83	172.47	44.54	50.34	94.88
3,000	276	88.07	79.68	167.76	222.55	117.91	107.98	226.73	73.96	89.96	163.91
5,000	338	90.16	81.90	172.05	196.69	185.61	175.27	190.72	71.89	87.57	159.46
10,000	510	131.84	119.42	251.26	406.08	68.28	49.09	402.65	110.39	129.70	240.10
20,000	603	184.98	166.47	351.45	466.62	195.23	167.49	461.49	149.23	180.80	330.04
50,000	796	304.40	267.61	572.01	734.04	267.58	228.02	726.58	238.98	295.89	534.87
100,000	906	565.90	513.37	1079.27	850.00	429.24	379.50	847.14	460.29	554.80	1015.09
120,000	1040	654.03	594.77	1248.80	992.23	314.21	266.46	992.69	538.93	640.82	1179.75
150,000	1040	725.35	675.54	1400.88	1077.77	219.83	180.27	1076.74	620.61	708.32	1328.93
170,000	1040	758.68	719.45	1478.13	1132.56	181.61	148.74	1132.44	665.31	734.50	1399.81
200,000	1130	786.81	760.03	1546.84	1253.69	151.54	120.90	1242.85	716.45	750.11	1466.56

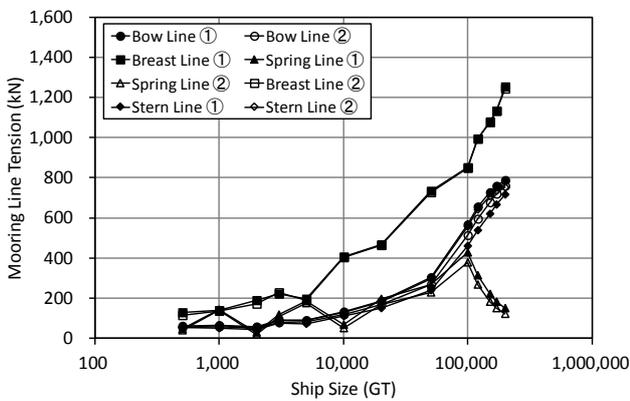


図-5.8 係留索の最大張力（風速 20m/s）

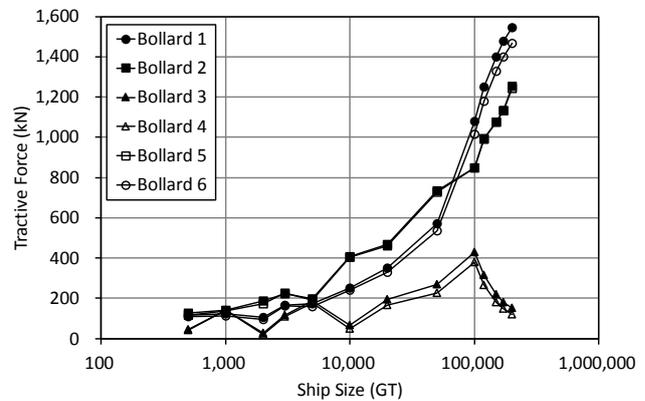


図-5.9 最大牽引力（風速 20m/s）

定数が大きくなることになり、他の係留索と比べて風荷重を負担する割合が大きいためと考えられる。風速10m/s以上の場合では、100,000GTを超える船舶において、総トン数が増加するにつれ、スプリングライン①・②の張力が減少する傾向が見られる。これは、100,000GTを超える船舶に対しては、他のラインの索長に対するスプリングラインの索長の比が相対的に長くなり、スプリングラインによる風荷重の負担の割合が減少しているためと考えられる。また、2,000GTの船舶および10,000GTの船舶においても、スプリングラインの索長は相対的に短くなっており、スプリングライン①・②の張力は減少している。

係留索の張力と係留索の切断荷重を比較してみると、風速15m/sの場合には、切断荷重に達するような係留索張力は発生していないが、風速20m/sの場合では、索長の短いプレストライン①・②において切断荷重に達する係留索張力が発生していることがわかる。係留索の張力には索長が与える影響が大きいことから、船舶に対する係留索の配置において相対的に短い係留索がある場合には、その係留索張力が大きくなる傾向がある。そこで、一部の係留索に対する風荷重の負担を軽減させるために、船舶を係留する際に全ての係留索ができる限り同じ長さになるようにバランスよく係留索を配置することが重要である。また、本研究では、平常時において曲柱のみを用いる場合には、船舶の大きさにかかわらず、全体で8本の係留索により船舶を係留するように条件設定している。このため、実際には8本以上の係留索を使用している大きな船舶になるほど、1本のあたりの係留索が負担する風荷重の割合が大きくなり、係留索張力が切断荷重に達しやすくなる。しかしながら、大型の船舶の場合には、より多くの本数の係留索を装備していることから、現実的には風速20m/sの場合の風荷重に対して係留索の張力が切断荷重にまで達する可能性は低いと考えられる。

曲柱に作用する牽引力については、係留索張力の場合と

同様に、風速が増加するにつれて、また基本的に船舶の総トン数が増加するにつれて、牽引力は増加する傾向にある。風速10m/s以下の場合では、バウライン2本およびスターンライン2本の係留索が係留されている曲柱1および曲柱6に作用する牽引力が、また風速15m/s以上の場合では、これらに加えてプレストラインが係留されている曲柱2および曲柱5に作用する牽引力が大きくなっている。なお、風速15m/sの場合では、曲柱に作用する牽引力は、50,000GTの船舶に対して約450kN、100,000GTの船舶に対して約650kN、また200,000GTの船舶に対して約900kNが最大となっている。

5.3 曲柱および直柱を用いる場合（暴風時）

暴風時に曲柱および直柱を用いて船舶が係留される場合について、3種類の係留配置に対して、20～35m/sの風速ごとに、500～200,000GTの13種類の船舶に対する係留索の張力および係留柱に作用する牽引力の特徴について考察する。

(1) 係留配置1

係留配置1では、直柱は岸壁法線から後方に、対象船舶の型幅に等しい距離に設置されている。図-5.10は、係留配置1について係留索の名称・番号および係留柱の番号の設定を示したものである。係留索の名称・番号は、船首側から船尾側に向けて、バウライン①、バウライン②、プレストライン①、プレストライン③、スプリングライン①、スプリングライン②、プレストライン④、プレストライン②、スターンライン①およびスターンライン②である。また、曲柱は全部で6基使用しており、船首側から船尾側に向けて、1～6の番号を付けている。一方、直柱は2基使用しており、船首側が直柱1、船尾側が直柱2である。ここで、曲柱1および曲柱6には、係留索が2本係留されている。

表-5.5～表-5.8は、係留配置1について、それぞれ風速20m/s、25m/s、30m/sおよび35m/sにおける船舶の総トン数

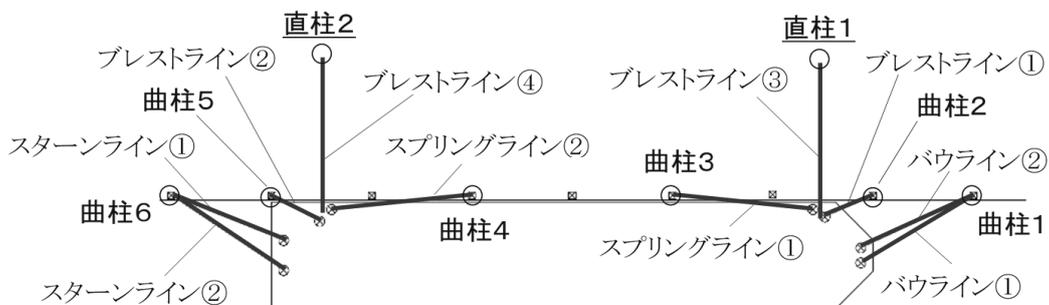


図-5.10 係留索の名称・番号および係留柱の番号（係留配置1）

表-5.5 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 20m/s, 係留配置 1)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	26.61	25.92	52.53	80.11	31.90	27.98	79.81	26.66	26.69	53.35	48.52	55.81
1,000	147	20.03	18.18	38.21	26.98	22.57	20.64	26.17	16.12	19.04	35.16	77.29	86.86
2,000	219	39.17	36.58	75.74	110.41	20.48	18.39	110.12	34.21	38.53	72.74	64.75	71.88
3,000	276	44.36	40.70	85.06	70.54	42.77	41.89	74.00	37.98	45.11	83.09	186.29	195.03
5,000	338	43.44	39.80	83.24	56.61	53.14	51.38	58.70	37.29	44.02	81.31	206.77	217.96
10,000	510	92.05	84.63	176.68	216.34	47.91	43.56	223.92	78.61	91.46	170.07	177.50	201.47
20,000	603	91.26	83.47	174.73	138.09	79.48	74.01	144.14	77.36	92.07	169.43	335.70	366.13
50,000	796	145.34	133.20	278.53	263.85	115.30	107.94	271.38	121.86	144.39	266.25	532.08	574.95
100,000	906	234.03	211.11	445.14	316.50	164.36	143.42	317.42	186.70	226.86	413.56	837.52	879.63
120,000	1040	291.85	264.70	556.55	436.31	155.19	137.00	440.91	236.56	283.75	520.31	875.21	930.00
150,000	1040	380.46	339.30	719.76	670.78	138.68	116.88	679.01	307.00	364.37	671.38	819.29	873.93
170,000	1040	434.95	396.52	831.46	813.02	125.28	105.27	821.50	354.19	421.51	775.69	762.46	824.76
200,000	1130	509.88	483.63	993.51	993.79	118.38	99.23	998.37	449.54	491.81	941.35	650.11	721.80

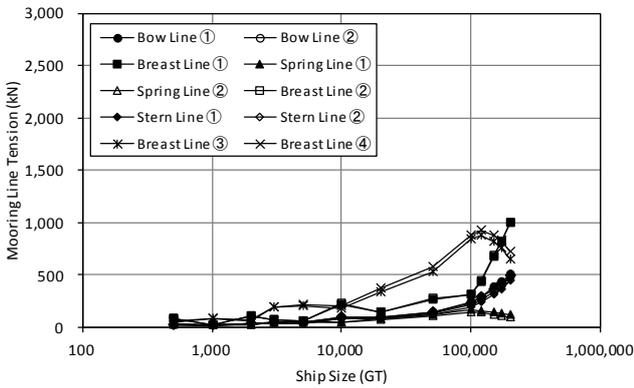


図-5.11 係留索の最大張力 (風速 20m/s, 係留配置 1)

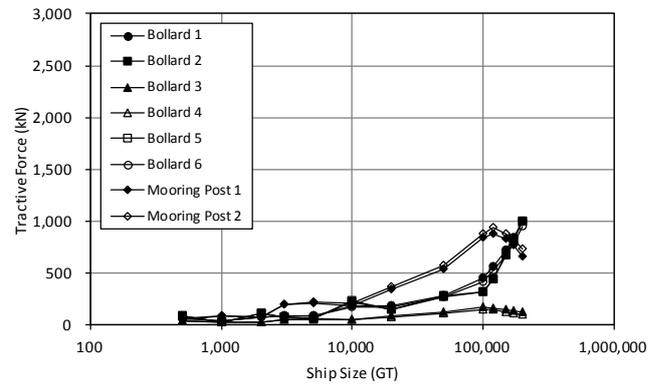


図-5.12 最大牽引力 (風速 20m/s, 係留配置 1)

表-5.6 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 25m/s, 係留配置 1)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	43.62	45.25	88.87	106.28	51.22	44.87	108.83	49.59	44.23	93.82	77.36	84.88
1,000	147	24.18	21.87	46.04	37.20	29.00	33.16	43.29	22.12	26.35	48.48	125.11	119.95
2,000	219	50.86	46.83	97.69	174.67	24.87	19.80	178.17	45.32	52.03	97.35	96.05	105.84
3,000	276	63.18	56.96	120.15	132.47	66.49	59.81	118.27	47.53	56.76	104.29	245.40	261.02
5,000	338	59.10	54.14	113.24	93.95	87.91	80.98	92.08	48.38	57.28	105.66	303.19	316.86
10,000	510	130.93	119.03	249.96	399.97	63.18	53.16	402.45	109.54	130.69	240.23	285.61	320.08
20,000	603	124.75	112.06	236.81	242.88	113.82	103.12	241.90	101.10	121.29	222.39	499.59	529.97
50,000	796	216.36	195.47	411.82	535.28	182.77	153.53	525.11	173.42	210.27	383.70	731.99	766.13
100,000	906	422.07	378.91	800.98	693.41	293.24	254.94	685.25	328.01	407.01	735.02	1061.53	1109.93
120,000	1040	515.35	470.02	985.37	860.17	252.46	208.00	860.02	415.03	503.11	918.14	1108.50	1160.91
150,000	1040	673.59	623.67	1297.26	1036.37	204.50	169.02	1031.54	561.92	648.72	1210.65	1047.19	1094.29
170,000	1040	764.11	724.73	1488.84	1134.87	180.82	148.94	1129.75	661.48	732.46	1393.94	1005.34	1049.74
200,000	1130	848.68	831.85	1680.54	1312.51	156.90	129.24	1293.95	780.90	809.11	1590.01	961.64	1012.95

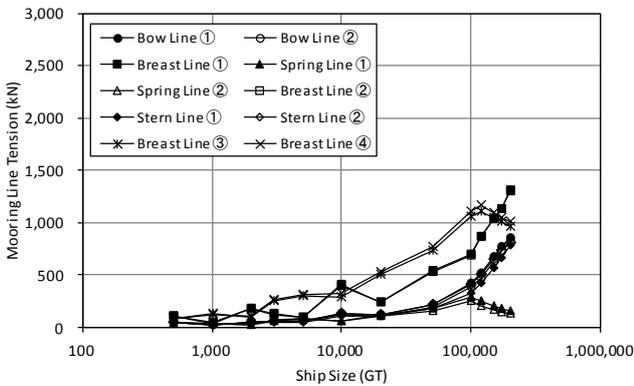


図-5.13 係留索の最大張力 (風速 25m/s, 係留配置 1)

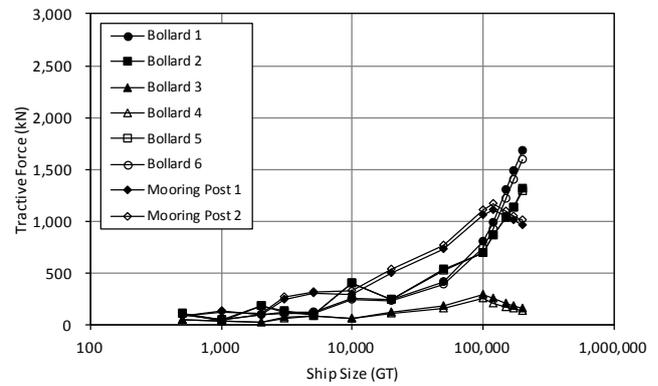


図-5.14 最大牽引力 (風速 25m/s, 係留配置 1)

表-5.7 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 1)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	63.90	64.52	128.42	149.37	72.42	50.13	130.83	70.75	69.88	140.63	91.41	106.92
1,000	147	33.89	30.16	64.05	70.16	50.00	56.06	73.52	28.37	34.92	63.29	149.87	149.69
2,000	219	77.86	70.82	148.69	237.70	36.02	28.19	242.75	73.28	84.55	157.83	161.65	171.22
3,000	276	80.77	72.76	153.53	193.93	98.61	76.55	175.11	59.66	71.77	131.43	274.85	294.42
5,000	338	83.24	75.15	158.39	171.96	168.43	145.89	166.18	65.19	79.79	144.97	365.67	383.38
10,000	510	184.61	164.83	349.44	512.66	82.88	69.49	501.85	146.29	173.82	320.12	400.79	430.81
20,000	603	181.40	162.90	344.30	451.04	187.05	160.94	440.20	143.98	174.88	318.86	611.97	640.55
50,000	796	352.12	315.13	667.25	784.32	316.94	265.04	773.69	268.73	340.39	609.12	885.02	922.93
100,000	906	679.14	629.30	1308.44	931.14	539.66	472.22	922.14	561.30	658.03	1219.33	1284.19	1337.64
120,000	1040	828.27	782.69	1610.96	1131.90	432.80	354.15	1128.02	723.66	817.03	1540.70	1343.57	1399.90
150,000	1040	976.33	961.33	1937.66	1384.69	327.41	282.42	1348.71	908.62	946.46	1855.08	1280.90	1338.20
170,000	1040	1048.53	1040.63	2089.16	1564.73	288.72	250.13	1511.98	989.13	1008.80	1997.93	1243.15	1301.11
200,000	1130	1156.15	1163.10	2319.25	1830.90	233.10	199.21	1752.04	1116.02	1107.98	2224.00	1207.75	1261.47

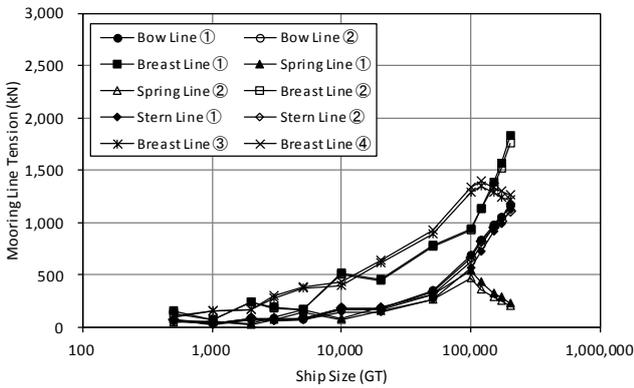


図-5.15 係留索の最大張力 (風速 30m/s, 係留配置 1)

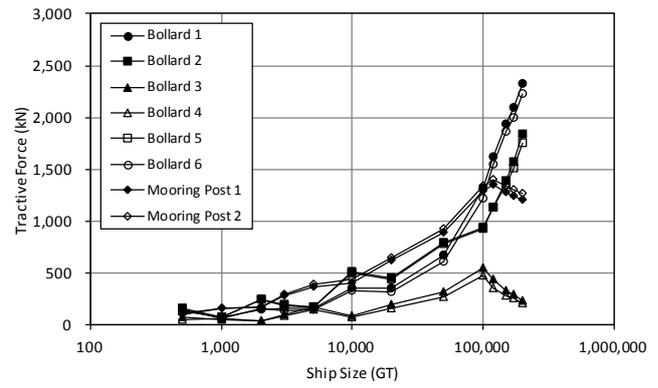


図-5.16 最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 1)

表-5.8 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 1)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	119.57	127.03	246.60	259.10	121.21	122.00	244.97	127.57	111.15	238.73	109.86	126.24
1,000	147	55.13	47.52	102.66	126.04	103.88	84.75	115.92	39.38	47.64	87.01	171.43	184.27
2,000	219	125.38	117.77	243.15	312.69	54.42	43.71	318.97	127.39	138.91	266.31	211.97	213.87
3,000	276	109.48	96.89	206.37	256.70	160.56	135.46	257.90	88.83	111.41	200.25	325.15	338.25
5,000	338	117.74	105.64	223.38	277.66	278.70	254.50	271.30	92.51	111.39	203.90	431.39	451.88
10,000	510	265.38	245.94	511.32	624.03	126.10	90.39	603.92	224.06	254.80	478.86	475.25	504.44
20,000	603	273.63	244.25	517.88	593.20	315.57	277.91	586.75	209.78	264.80	474.58	718.57	747.51
50,000	796	535.88	487.39	1023.27	974.04	537.64	472.74	958.73	433.04	519.21	952.25	1041.24	1082.11
100,000	906	873.56	853.94	1727.50	1176.95	824.41	773.08	1147.67	805.82	851.14	1656.96	1528.21	1600.98
120,000	1040	1052.22	1030.19	2082.41	1464.36	750.64	677.76	1420.20	975.58	1016.54	1992.12	1612.07	1685.53
150,000	1040	1213.45	1206.79	2420.24	1835.62	624.44	545.02	1777.58	1153.42	1171.62	2325.04	1570.07	1637.17
170,000	1040	1312.88	1317.74	2630.62	2091.45	533.26	471.46	2011.17	1260.11	1256.85	2516.96	1529.84	1596.95
200,000	1130	1463.90	1493.03	2956.93	2480.47	391.12	344.84	2353.62	1435.63	1389.38	2825.01	1490.78	1553.14

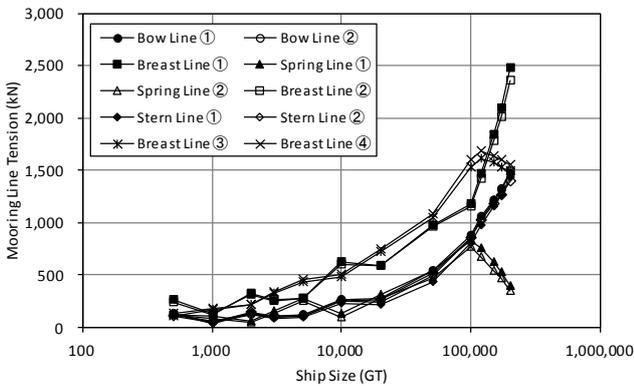


図-5.17 係留索の最大張力 (風速 35m/s, 係留配置 1)

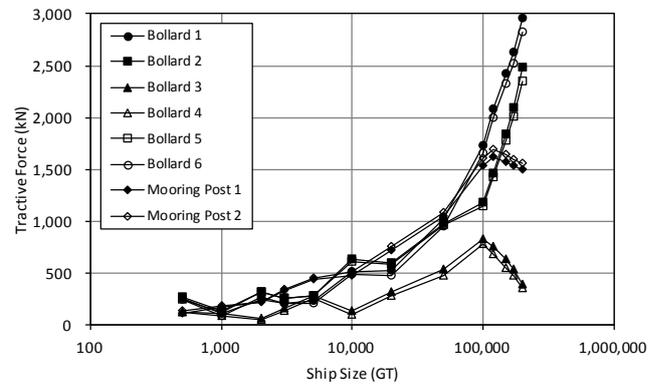


図-5.18 最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 1)

(GT) に対する係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力を示す。また、図-5.11～図-5.18は、これらの表を係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力についてグラフとして表示したものである。なお、表には、係留索の切断荷重も併せて示している。

これらの図表から、風速が増加するにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることがわかる。また、基本的に、船舶の総トン数が大きくなるにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることもわかる。強風時においては、船舶に作用する風荷重が大きくなるが、係留索の角度や長さなどの配置条件に対応して船舶と風荷重との力の釣り合いが変化することにより、各係留索に分担される荷重も変化することになる。

100,000GT以下の船舶では、船舶の大きさに対応して各係留索の張力は増大している。100,000GT以上の船舶では、バウライン①・②、プレストライン①・②、スターンライン①・②の係留索張力は船舶が大きくなるにつれて増大しているが、プレストライン③・④およびスプリングライン①・②の係留索張力は減少している。これは、各係留索に荷重が分担される際に、索長が短い係留索に分担される荷重が他の係留索に比較して相対的に大きくなるのが原因である。100,000GT以下の船舶では、プレストライン③・④が係留されている直柱に大きな牽引力が発生しているが、100,000GT以上の船舶については、索長が短いプレストライン①・②が係留されている曲柱2および曲柱5と、バウラインおよびスターンラインが係留されている曲柱1および曲柱6で牽引力が最大となっている。

係留索の張力と係留索の切断荷重を比較してみると、風速25m/s以上の場合に、特に100,000GT以上の大型船舶に対して、主に索長の短いプレストライン①・②および直柱に係留されているプレストライン③・④において切断荷重に達する係留索張力が発生していることがわかる。これは、曲柱のみを用いる場合と同様に、船舶に対する係留索の配置において相対的に短い係留索に風荷重が負担さ

れやすいことや、暴風時において曲柱および直柱を用いる場合には、船舶の大きさにかかわらず、全体で10本の係留索により船舶を係留するように条件設定していることが理由である。なお、風速30m/sの場合では、直柱に作用する牽引力は、50,000GTの船舶に対して約900kN、100,000GTの船舶に対して約1,350kN、また200,000GTの船舶に対して約1,250kNが最大となっている。

(2) 係留配置2

係留配置2では、直柱は岸壁法線から後方に、対象船舶の型幅の半分に等しい距離に設置されている。図-5.19は、係留配置2について係留索の名称・番号および係船柱の番号の設定を示したものである。係留索の名称・番号および係船柱の番号は、係留配置1の場合と同様である。ただし、直柱1に係留されるプレストライン③と直柱2に係留されるプレストライン④は、係留配置1の場合と比べて索長が相対的にかなり短くなる。

表-5.9～表-5.12は、係留配置2について、それぞれ風速20m/s、25m/s、30m/sおよび35m/sにおける船舶の総トン数(GT)に対する係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力を示す。また、図-5.20～図-5.27は、これらの表を係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力についてグラフとして表示したものである。なお、表には、係留索の切断荷重も併せて示している。

これらの図表から、風速が増加するにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることがわかる。また、基本的に、船舶の総トン数が大きくなるにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることもわかる。係留配置1と比較して、直柱に係留されるプレストライン③・④において係留索張力が増大しており、120,000GT以下の船舶に対しては、全ての係留索の中で最も大きな張力となっている。

係留配置1の場合と同様に、100,000GT以下の船舶では、船舶の大きさに対応して各係留索の張力は増大している。100,000GT以上の船舶では、係留配置1の場合と同様に、バウライン①・②、プレストライン①・②、スターンライン

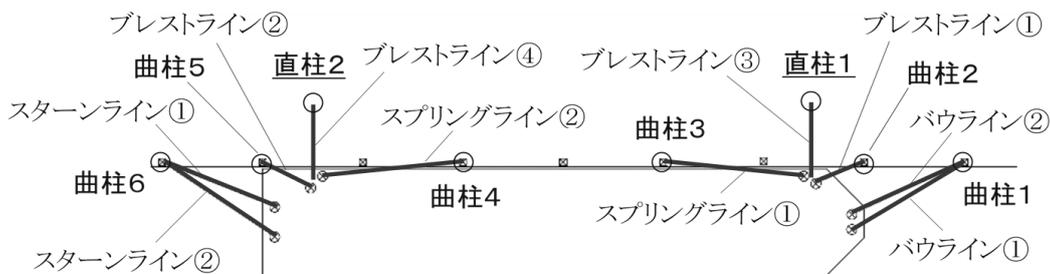


図-5.19 係留索の名称・番号および係船柱の番号 (係留配置2)

表-5.9 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 20m/s, 係留配置 2）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係留柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)	プレストライン ③ (直柱1)	プレストライン ④ (直柱2)
500	95	22.69	21.35	44.04	69.45	15.55	14.41	62.35	20.81	21.09	41.90	71.08	78.56
1,000	147	18.38	16.49	34.88	21.72	18.96	18.10	19.68	13.76	16.85	30.61	119.32	134.84
2,000	219	31.30	29.32	60.62	65.85	18.38	17.78	69.89	28.12	31.81	59.94	99.06	103.23
3,000	276	31.73	29.21	60.94	40.48	26.56	26.81	41.24	26.58	31.50	58.08	204.22	215.76
5,000	338	34.24	31.55	65.79	40.20	36.01	36.16	41.44	29.89	34.58	64.47	266.02	275.58
10,000	510	77.91	71.59	149.50	145.54	42.91	41.88	152.60	66.43	78.25	144.67	279.73	308.96
20,000	603	70.41	64.69	135.10	90.78	56.99	55.65	95.28	60.25	71.48	131.74	421.71	448.85
50,000	796	112.70	103.24	215.94	165.91	86.76	80.17	170.78	94.83	112.23	207.05	647.38	692.06
100,000	906	178.77	162.46	341.23	218.24	125.92	113.92	217.79	145.69	171.33	317.02	981.49	1040.18
120,000	1040	231.48	208.31	439.79	298.36	126.59	112.64	298.37	184.70	222.02	406.72	1054.08	1118.40
150,000	1040	307.84	280.15	587.99	500.81	120.57	101.98	503.99	250.50	294.74	545.24	1037.20	1099.09
170,000	1040	356.12	325.98	682.10	648.39	113.38	93.35	649.78	291.40	336.18	627.58	1009.02	1069.94
200,000	1130	409.19	381.19	790.39	835.64	107.09	94.25	838.78	350.59	385.36	735.95	961.06	1036.80

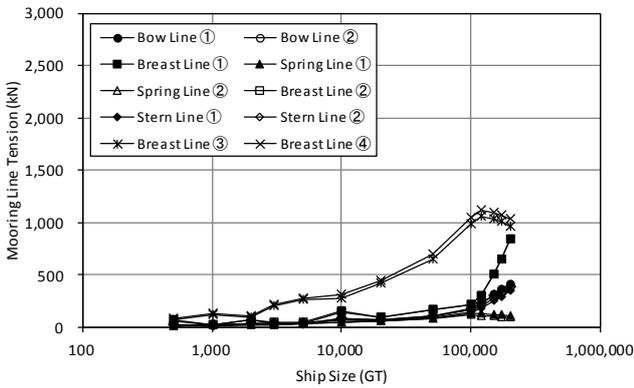


図-5.20 係留索の最大張力（風速 20m/s, 係留配置 2）

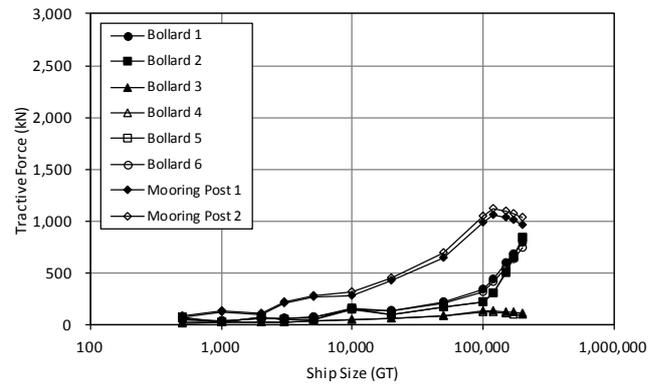


図-5.21 最大牽引力（風速 20m/s, 係留配置 2）

表-5.10 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 25m/s, 係留配置 2）

切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係留柱に対しては牽引力(kN))											
	バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)	プレストライン ③ (直柱1)	プレストライン ④ (直柱2)
95	35.26	35.10	70.36	95.54	28.58	25.24	95.98	34.37	34.76	69.13	93.35	101.95
147	34.48	29.96	64.44	58.63	46.86	38.52	57.12	26.33	32.29	58.62	197.04	213.73
219	44.07	40.79	84.86	143.74	23.13	19.28	150.88	40.10	45.69	85.79	173.52	186.03
276	36.76	33.62	70.39	49.92	33.70	30.66	50.38	30.39	35.94	66.33	244.14	261.18
338	45.78	41.85	87.63	60.20	55.89	52.97	61.34	38.41	45.48	83.89	353.20	368.57
510	106.65	96.44	203.09	274.64	50.68	48.09	264.82	85.29	100.99	186.28	427.11	457.64
603	96.69	88.21	184.90	150.55	84.27	75.91	150.98	79.40	94.57	173.97	589.04	624.20
796	176.28	157.59	333.86	377.22	141.21	125.01	372.97	141.11	170.94	312.05	896.23	950.82
906	315.98	283.92	599.90	496.11	220.91	196.81	486.55	248.56	301.91	550.47	1345.19	1421.17
1040	410.81	364.78	775.59	687.61	198.96	175.57	678.39	318.79	392.90	711.69	1408.88	1492.76
1040	547.63	506.84	1054.47	934.31	175.04	148.15	930.77	452.22	528.03	980.25	1335.76	1411.66
1040	649.12	604.45	1253.57	1039.99	159.86	134.11	1036.79	545.07	617.88	1162.96	1295.41	1367.31
1130	750.72	722.23	1472.95	1218.69	144.48	118.58	1205.37	667.99	707.57	1375.56	1247.19	1313.83

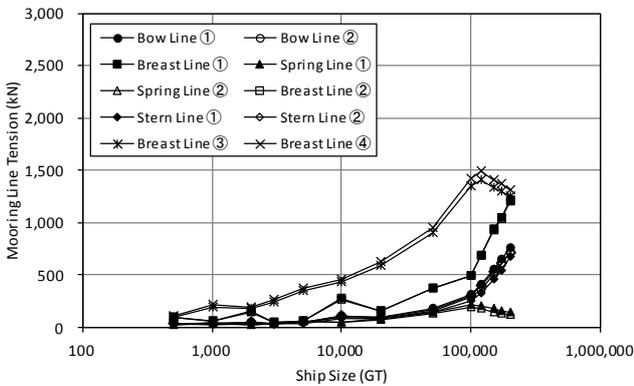


図-5.22 係留索の最大張力（風速 25m/s, 係留配置 2）

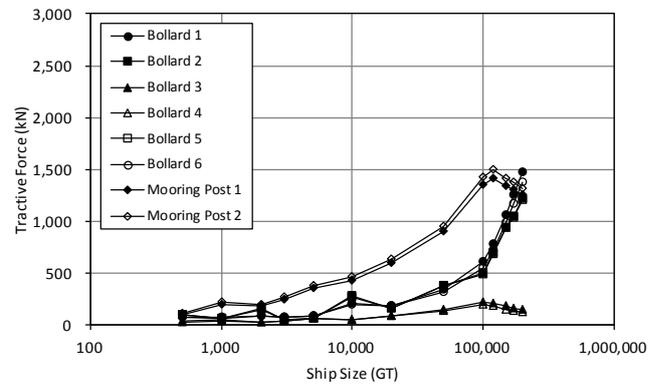


図-5.23 最大牽引力（風速 25m/s, 係留配置 2）

表-5.11 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 2)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	44.05	45.97	90.02	112.39	45.83	40.63	126.78	59.55	59.13	118.68	127.31	133.26
1,000	147	45.72	39.94	85.66	94.62	82.62	80.86	120.04	43.77	55.02	98.78	261.41	252.14
2,000	219	114.82	112.64	227.45	270.18	48.69	51.83	274.11	95.53	109.32	204.86	273.91	260.65
3,000	276	51.95	47.70	99.65	94.35	54.29	48.31	94.29	43.35	51.10	94.45	324.25	345.34
5,000	338	62.84	57.59	120.43	105.69	102.91	88.84	103.29	51.63	60.76	112.39	452.45	484.54
10,000	510	144.58	132.26	276.84	437.48	85.40	62.57	446.77	131.86	149.50	281.36	518.50	553.59
20,000	603	144.19	129.26	273.46	309.40	136.97	120.71	305.91	113.80	140.12	253.92	766.00	811.08
50,000	796	264.49	238.81	503.29	673.52	227.81	198.78	662.66	210.39	255.51	465.91	1123.11	1189.09
100,000	906	524.52	474.97	999.49	814.99	386.09	339.81	805.81	420.70	504.78	925.48	1681.48	1769.25
120,000	1040	676.10	617.10	1293.21	1006.28	317.62	275.13	1000.12	546.49	651.50	1197.99	1754.80	1851.84
150,000	1040	871.53	841.54	1713.07	1224.43	265.62	226.63	1206.96	784.95	845.68	1630.63	1674.84	1763.32
170,000	1040	959.34	944.85	1904.19	1387.13	236.93	201.38	1357.97	893.03	925.97	1819.00	1632.29	1722.56
200,000	1130	1073.24	1074.90	2148.14	1654.41	200.90	175.55	1597.66	1034.83	1036.14	2070.97	1573.51	1662.54

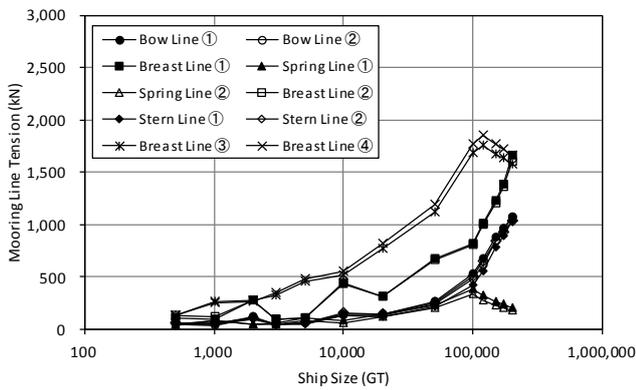


図-5.24 係留索の最大張力 (風速 30m/s, 係留配置 2)

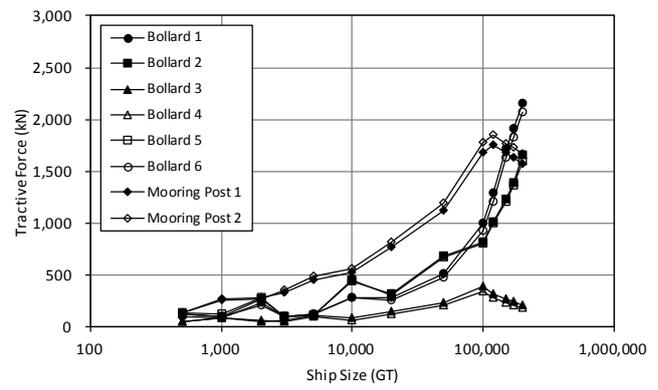


図-5.25 最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 2)

表-5.12 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 2)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	78.38	79.56	157.93	154.72	66.36	65.89	145.35	73.65	71.22	144.87	152.36	160.14
1,000	147	98.87	89.47	188.34	148.40	144.76	138.64	155.35	79.99	97.48	177.47	321.92	325.11
2,000	219	180.45	181.73	362.19	346.79	160.72	139.01	369.50	204.21	196.09	400.31	329.85	334.89
3,000	276	77.43	70.12	147.55	193.50	99.02	90.19	206.82	67.78	81.98	149.76	429.01	442.52
5,000	338	88.10	79.86	167.96	190.97	190.74	166.76	188.89	71.71	86.68	158.39	566.00	600.07
10,000	510	206.79	184.12	390.91	546.59	104.14	67.99	546.37	180.15	212.97	393.12	608.47	661.50
20,000	603	203.40	183.03	386.42	504.93	217.86	190.64	497.04	160.89	196.05	356.94	928.05	980.53
50,000	796	414.96	380.72	795.68	857.44	393.90	346.58	845.31	332.09	404.29	736.38	1371.04	1442.88
100,000	906	758.79	725.61	1484.40	1011.37	659.11	589.68	1001.00	669.98	743.32	1413.30	2034.96	2138.39
120,000	1040	937.90	909.28	1847.17	1267.44	543.32	480.18	1248.01	852.47	914.03	1766.49	2137.65	2252.32
150,000	1040	1100.75	1089.73	2190.48	1620.34	463.09	408.51	1567.25	1035.24	1061.59	2096.83	2095.21	2209.14
170,000	1040	1195.43	1194.07	2389.50	1859.07	410.89	349.46	1798.72	1144.45	1151.99	2296.43	2063.35	2176.56
200,000	1130	1346.29	1366.14	2712.43	2237.54	320.96	283.23	2143.11	1322.77	1291.36	2614.12	2000.52	2109.10

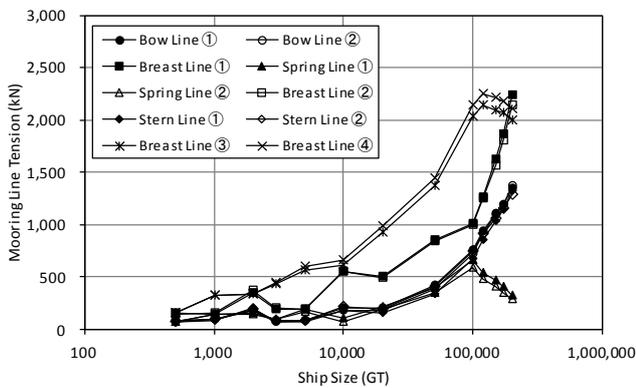


図-5.26 係留索の最大張力 (風速 35m/s, 係留配置 2)

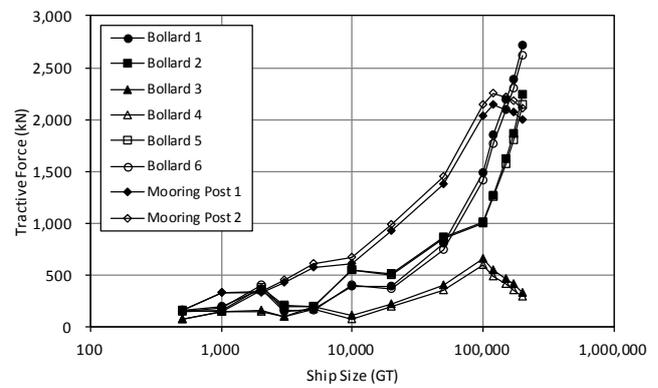


図-5.27 最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 2)

①・②の係留索張力は船舶が大きくなるにつれて増大しているが、プレストライン③・④およびスプリングライン①・②の係留索張力は減少している。これは、各係留索に荷重が分担される際に、索長が短い係留索に分担される荷重が他の係留索に比較して相対的に大きくなるのが原因である。120,000GT以下の船舶については、プレストライン③・④が係留されている直柱に大きな牽引力が発生しており、係留配置1の場合に大きな牽引力が発生していたパウライン、スターンラインおよびプレストライン①・②が係留されている曲柱では牽引力は低減している。これは、係留配置1と比べて、直柱に係留されているプレストラインの長さが半分と短くなっているため、他の係留索よりも荷重を多く分担しているからである。

係留索の張力と係留索の切断荷重を比較してみると、既に風速20m/sの場合でも、100,000GT以上の大型船舶に対して、直柱に係留されているプレストライン③・④において切断荷重に達する係留索張力が発生していることがわかる。これは、先に述べたように、直柱に係留されているプレストラインの索長が、係留配置1の場合よりも短くなっていることが原因である。なお、風速30m/sの場合では、直柱に作用する牽引力は、50,000GTの船舶に対して約1,200kN、100,000GTの船舶に対して約1,750kN、また200,000GTの船舶に対して約1,650kNが最大となっている。

(3) 係留配置3

係留配置3では、直柱は、対象船舶の係留配置におけるプレストラインに等しい長さの係留索が配置されるように設置されている。図-5.28は、係留配置3について係留索の名称・番号および係船柱の番号の設定を示したものである。係留索の名称・番号および係船柱の番号は、係留配置1の場合と同様である。なお、この図では、直柱1に係留されるプレストライン③および直柱2に係留されるプレストライン④の長さは、それぞれプレストライン①およびプレストライン②の長さと同じため、図-5.19に示した係留配置2の場合と比べても索長が短くなっている。た

だし、このような状況は船舶の大きさとそれに対応する係留索の配置によって異なるため、直柱に係留されるプレストラインの長さは係留配置1の場合と同等の長さになることもある。

表-5.13～表-5.16は、係留配置3について、それぞれ風速20m/s、25m/s、30m/sおよび35m/sにおける船舶の総トン数（GT）に対する係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力を示す。また、図-5.29～図-5.36は、これらの表を係留索の最大張力および係船柱に作用する最大牽引力についてグラフとして表示したものである。なお、表には、係留索の切断荷重も併せて示している。

これらの図表から、風速が増加するにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることがわかる。また、基本的に、船舶の総トン数が大きくなるにつれて、係留索の張力は増加する傾向にあることもわかる。係留配置3の場合は、100,000GT以上の船舶に対しても、直柱に係留されるプレストライン③・④の係留索張力はプレストライン①・②の係留索張力と同程度の大きさとなり、船舶が大きくなるにつれて係留索張力も増大する。また、係留配置1および係留配置2の場合とは異なり、全ての船舶において、船舶の大きさに対応してプレストラインの係留索張力は増大している。全ての船舶において、プレストライン③・④が係留されている直柱に大きな牽引力が発生しているが、索長が長いことから、係留配置2と比較すると150,000GT以下の船舶に対してはほとんどの場合で牽引力が減少している。

係留索の張力と係留索の切断荷重を比較してみると、係留配置2の場合と同様に、既に風速20m/sの場合でも、150,000GT以上の大型船舶に対しては、直柱に係留されているプレストライン③・④において切断荷重に達する係留索張力が発生していることがわかる。この理由は、係留配置3の場合は、直柱に係留されているプレストラインの索長が、係留配置1の場合よりも相対的に短くなっているからである。なお、風速30m/sの場合では、直柱に作用す

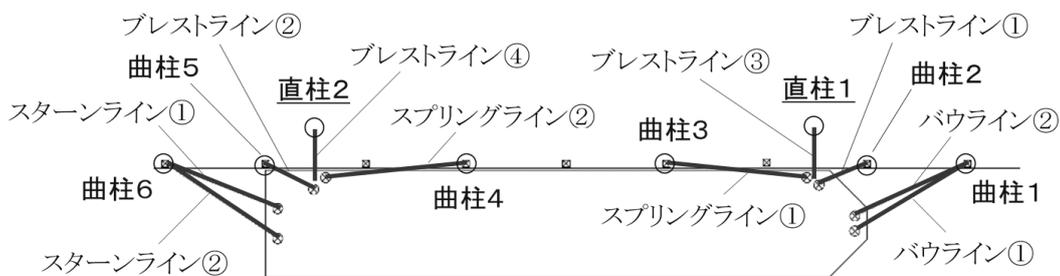


図-5.28 係留索の名称・番号および係船柱の番号（係留配置3）

表-5.13 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 20m/s, 係留配置 3）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))											
		バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)	プレストライン ③ (直柱1)	プレストライン ④ (直柱2)
500	95	19.84	19.88	39.72	54.41	16.35	15.62	58.10	19.80	19.01	38.81	87.45	86.58
1,000	147	18.97	17.19	36.15	25.27	22.53	21.09	26.27	16.26	19.22	35.49	80.43	86.69
2,000	219	28.37	26.67	55.03	53.99	18.59	18.16	60.84	26.80	29.95	56.75	125.19	114.62
3,000	276	41.77	38.40	80.17	63.79	38.30	40.41	67.21	35.82	42.86	78.68	209.66	211.80
5,000	338	44.44	40.69	85.13	58.44	55.20	53.04	60.77	38.24	45.14	83.38	198.49	209.81
10,000	510	73.78	67.69	141.48	130.31	42.31	41.07	140.11	63.80	75.17	138.97	310.89	342.04
20,000	603	83.16	76.10	159.26	116.44	70.72	66.89	123.28	70.96	84.45	155.41	366.80	397.34
50,000	796	127.04	116.31	243.34	205.73	98.00	92.51	210.36	106.38	126.34	232.72	598.56	638.56
100,000	906	234.04	211.12	445.16	316.53	164.36	143.44	317.42	186.70	226.85	413.55	837.53	879.63
120,000	1040	269.99	244.69	514.68	379.14	146.23	126.48	381.90	216.32	261.03	477.35	943.72	993.76
150,000	1040	319.35	291.22	610.57	528.92	123.93	104.65	532.06	260.37	306.42	566.79	994.23	1054.48
170,000	1040	350.84	322.44	673.28	636.95	112.44	93.09	638.65	287.91	332.69	620.60	1025.13	1087.84
200,000	1130	382.23	359.67	741.90	776.36	104.34	92.71	772.55	328.50	359.53	688.03	1077.87	1153.02

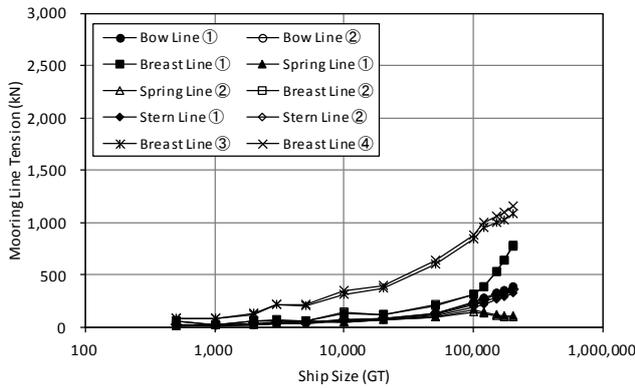


図-5.29 係留索の最大張力（風速 20m/s, 係留配置 3）

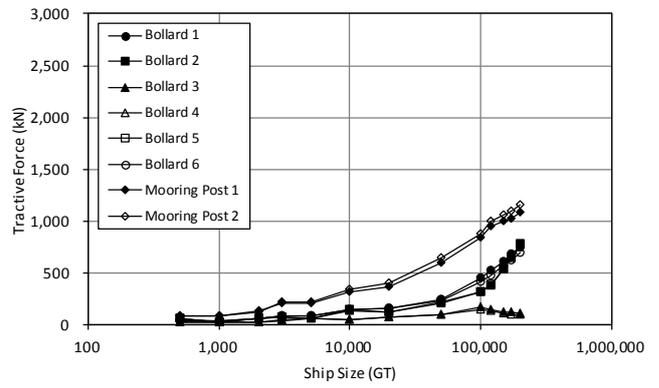


図-5.30 最大牽引力（風速 20m/s, 係留配置 3）

表-5.14 係留索の最大張力および最大牽引力（風速 25m/s, 係留配置 3）

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力 (kN) (係留柱に対しては牽引力 (kN))											
		バウライン ①	バウライン ②	バウライン 合計 (曲柱1)	プレストライン ① (曲柱2)	スプリングライン ① (曲柱3)	スプリングライン ② (曲柱4)	プレストライン ② (曲柱5)	スターンライン ①	スターンライン ②	スターンライン 合計 (曲柱6)	プレストライン ③ (直柱1)	プレストライン ④ (直柱2)
500	95	26.48	25.08	51.56	81.50	20.70	21.23	80.83	25.47	26.01	51.48	98.40	110.63
1,000	147	23.10	20.93	44.02	35.72	28.26	31.20	40.75	21.20	25.18	46.39	123.88	120.22
2,000	219	49.44	45.97	95.40	164.15	25.00	24.01	194.16	51.81	60.33	112.14	243.64	232.99
3,000	276	52.13	47.99	100.12	95.13	52.13	48.98	90.30	42.20	49.83	92.03	247.61	260.85
5,000	338	60.74	55.70	116.44	99.06	91.88	85.30	96.48	49.60	58.72	108.32	296.67	311.04
10,000	510	99.66	91.38	191.03	246.96	50.31	48.42	237.06	80.16	94.84	175.00	454.80	480.43
20,000	603	112.86	103.00	215.86	199.38	102.73	92.28	199.15	92.85	110.37	203.23	533.68	563.44
50,000	796	196.86	176.99	373.85	451.83	161.63	138.37	444.15	156.10	191.06	347.16	811.82	856.78
100,000	906	422.05	378.88	800.93	693.33	293.30	254.74	684.98	327.85	406.82	734.67	1062.17	1109.92
120,000	1040	483.18	436.40	919.58	817.77	234.99	195.28	814.08	378.93	466.51	845.44	1203.12	1262.90
150,000	1040	571.11	530.21	1101.32	960.48	181.06	152.56	955.95	476.65	550.80	1027.44	1270.30	1342.15
170,000	1040	639.71	594.95	1234.66	1032.51	158.26	132.93	1029.33	537.22	608.52	1145.74	1319.51	1393.60
200,000	1130	697.16	669.14	1366.30	1173.82	137.42	114.80	1161.94	611.87	655.47	1267.34	1405.37	1488.61

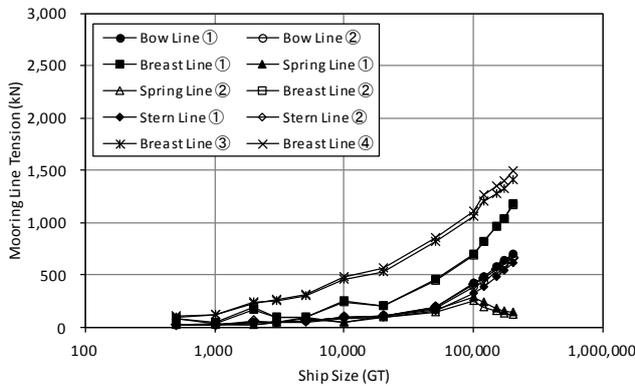


図-5.31 係留索の最大張力（風速 25m/s, 係留配置 3）

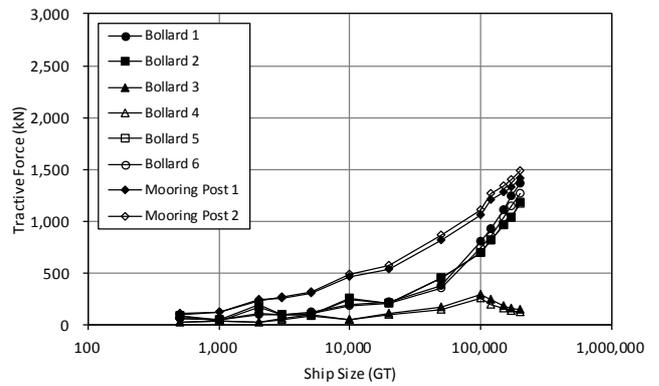


図-5.32 最大牽引力（風速 25m/s, 係留配置 3）

表-5.15 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 3)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	47.52	46.30	93.82	108.70	29.94	28.28	118.27	45.73	53.68	99.42	144.22	138.43
1,000	147	33.78	30.06	63.85	69.76	49.67	54.67	72.74	28.18	34.66	62.84	151.54	151.84
2,000	219	185.77	202.17	387.94	388.92	207.47	196.88	384.63	218.16	196.08	414.24	355.41	414.40
3,000	276	73.19	66.16	139.34	167.47	85.23	67.36	148.23	53.69	65.24	118.93	286.78	310.78
5,000	338	85.50	77.32	162.81	179.05	175.29	154.11	173.50	67.43	82.25	149.68	357.29	373.70
10,000	510	134.38	122.90	257.27	408.26	77.75	59.51	424.28	122.85	140.62	263.47	550.81	589.93
20,000	603	168.54	151.82	320.36	406.92	171.24	146.97	400.22	134.95	163.67	298.62	661.96	695.84
50,000	796	309.67	272.56	582.22	737.48	267.66	230.02	727.56	239.44	297.78	537.22	999.58	1050.75
100,000	906	679.11	629.26	1308.38	931.08	539.70	471.77	921.86	560.87	657.63	1218.50	1285.52	1337.60
120,000	1040	787.22	734.59	1521.81	1092.04	394.27	324.01	1087.71	667.22	768.59	1435.81	1473.16	1539.05
150,000	1040	898.68	868.05	1766.73	1257.87	278.02	237.65	1237.18	818.62	869.33	1687.96	1584.90	1668.76
170,000	1040	951.97	935.85	1887.82	1374.00	233.22	197.97	1345.93	883.66	918.06	1801.72	1664.90	1757.14
200,000	1130	1028.32	1027.17	2055.48	1562.73	188.25	163.02	1519.75	984.62	991.82	1976.45	1788.30	1897.66

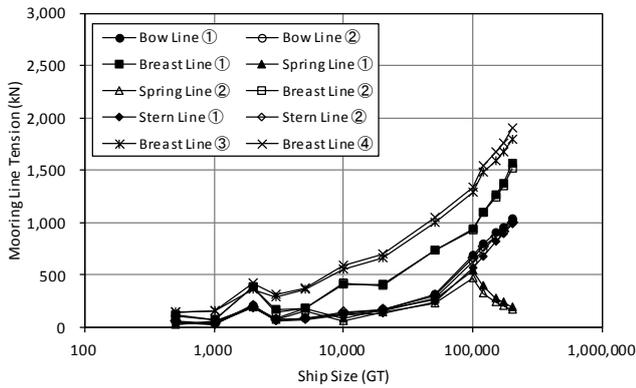


図-5.33 係留索の最大張力 (風速 30m/s, 係留配置 3)

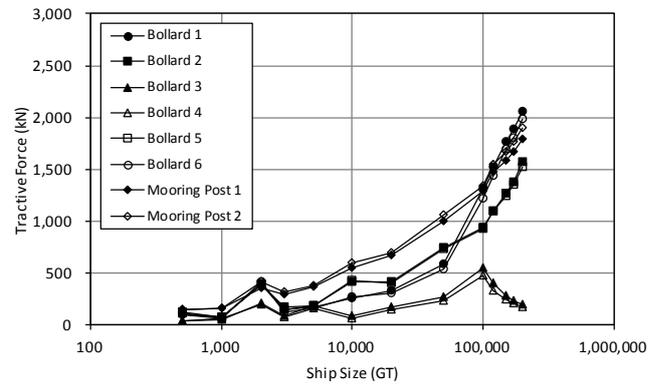


図-5.34 最大牽引力 (風速 30m/s, 係留配置 3)

表-5.16 係留索の最大張力および最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 3)

総トン数 (GT)	切断荷重 (kN)	係留索張力(kN) (係船柱に対しては牽引力(kN))											
		バウライン①	バウライン②	バウライン合計 (曲柱1)	プレストライン① (曲柱2)	スプリングライン① (曲柱3)	スプリングライン② (曲柱4)	プレストライン② (曲柱5)	スターンライン①	スターンライン②	スターンライン合計 (曲柱6)	プレストライン③ (直柱1)	プレストライン④ (直柱2)
500	95	60.30	59.26	119.56	130.11	41.30	39.10	127.78	57.25	54.94	112.19	163.97	166.10
1,000	147	60.99	52.15	113.14	130.45	115.81	91.63	123.35	44.19	54.89	99.08	178.69	192.71
2,000	219	179.96	186.55	366.51	342.81	157.99	157.45	333.82	193.04	175.46	368.49	391.86	389.80
3,000	276	103.34	91.11	194.45	249.39	147.22	131.76	253.22	85.91	107.27	193.18	355.14	367.74
5,000	338	122.50	108.92	231.42	284.40	284.79	263.45	276.30	94.58	114.32	208.90	418.34	438.30
10,000	510	194.71	172.31	367.02	529.80	93.31	65.91	527.34	165.05	197.48	362.54	653.57	712.86
20,000	603	247.70	218.64	466.34	566.57	290.81	241.80	565.89	194.82	246.27	441.10	784.44	820.70
50,000	796	477.80	430.78	908.58	920.34	467.09	408.31	905.64	386.01	462.73	848.74	1198.72	1254.32
100,000	906	873.53	853.90	1727.43	1176.84	824.43	772.46	1147.16	805.43	850.82	1656.25	1530.22	1600.91
120,000	1040	1018.10	995.42	2013.52	1403.25	682.52	607.62	1363.35	939.96	985.68	1925.64	1777.15	1860.76
150,000	1040	1125.98	1115.85	2241.82	1668.55	494.55	440.15	1612.99	1060.47	1085.27	2145.73	1978.09	2082.26
170,000	1040	1186.44	1184.64	2371.07	1840.85	400.26	340.98	1780.52	1134.40	1142.87	2277.27	2107.47	2223.46
200,000	1130	1283.01	1298.54	2581.55	2102.77	288.59	254.69	2021.54	1258.33	1235.07	2493.40	2298.31	2436.71

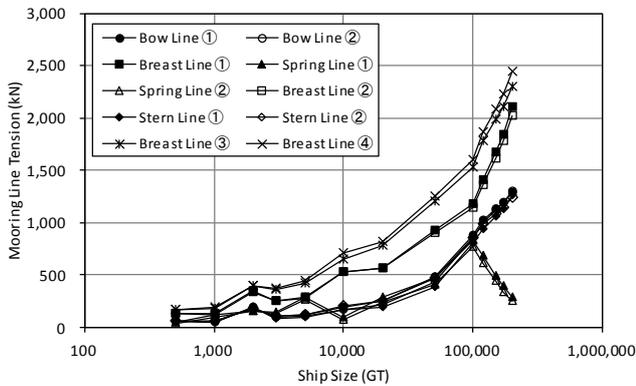


図-5.35 係留索の最大張力 (風速 35m/s, 係留配置 3)

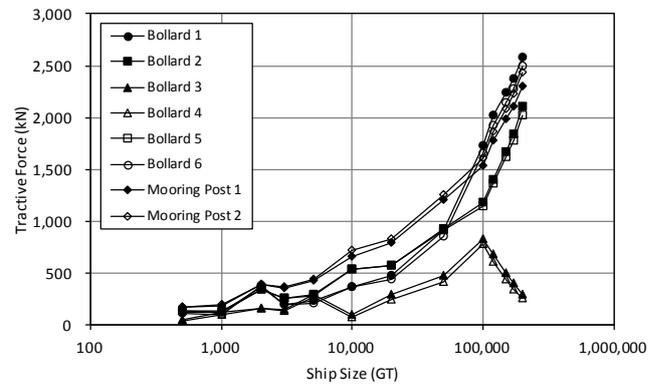


図-5.36 最大牽引力 (風速 35m/s, 係留配置 3)

る牽引力は、50,000GTの船舶に対して約1,050kN、100,000GTの船舶に対して約1,350kN、また200,000GTの船舶に対して約1,900kNが最大となっている。

6. 牽引力の評価

6.1 概要

風荷重に対する係留船舶の動揺シミュレーションにより算定された係留船柱に作用する牽引力について、現行技術基準において提示されている船舶の牽引力の標準値と比較検討する。また、その検討結果を考慮して、500～200,000GTの船舶に対して、曲柱および直柱に作用する牽引力の標準値を新たに提案する。ここでは、5. 牽引力の計算結果と同様に、平常時において曲柱のみを用いて船舶が係留される場合と暴風時において曲柱および直柱を用いて船舶が係留される場合をそれぞれ対象として、係留船柱に作用する牽引力の評価を実施する。

6.2 曲柱のみを用いる場合（平常時）

(1) 現行技術基準の標準値との比較

平常時に曲柱のみを用いて船舶が係留される場合について、曲柱に作用する牽引力を現行技術基準における船舶の牽引力の標準値と比較検討する。現行技術基準では、曲柱に対する船舶の牽引力の標準値は、曲柱のみで風速15m/sまで船舶を係留できるような係留船柱の設計条件として規定されている。そこで、算定した曲柱に作用する最大牽引力と現行技術基準における牽引力の標準値について、風速15m/sに対して比較した。

表-6.1は、現行技術基準に提示されている船舶の牽引力の標準値（日本港湾協会，2007）である。この表では、総トン数が100,000GTまでの船舶に対する牽引力が示されている。また、図-6.1は、現行技術基準における曲柱に作用する船舶の牽引力の標準値と本研究で得られた風速15m/sの場合の曲柱に対する最大牽引力を比較して示し

表-6.1 船舶の牽引力の標準値（現行技術基準）

船舶の総トン数 (GT)	曲柱に作用する牽引力 (kN)	直柱に作用する牽引力 (kN)
200 を超え 500 以下	150	150
500 を超え 1,000 以下	250	250
1,000 を超え 2,000 以下	250	350
2,000 を超え 3,000 以下	350	350
3,000 を超え 5,000 以下	350	500
5,000 を超え 10,000 以下	500	700
10,000 を超え 20,000 以下	700	1,000
20,000 を超え 50,000 以下	1,000	1,500
50,000 を超え 100,000 以下	1,000	2,000

たものである。この図から、現行技術基準で示されている牽引力の標準値は、曲柱については全体的に安全側の設定であることがわかる。これは、福田ら（1982）が示しているように、これらの標準値が当時の鋼船規則における係留索（ナイロン索）の切断荷重を基にして設定されているためと考えられる。先に述べたように、動揺シミュレーションによる計算結果では、風速15m/sの場合には、全ての船舶について切断荷重に達するような係留索張力は発生していない。しかしながら、風速20m/sの場合では、特に150,000GT以上の船舶について索長の短いプレストラインにおいて切断荷重に達する係留索張力が発生している。このときの100,000GT以上の船舶が装備している係留索の切断荷重は、概ね1,000kN以上である。このことから、安全性を考慮した曲柱の設計を行うためには、平常時に100,000GT以上の船舶が係留される岸壁においては、少なくとも1,000kN以上の牽引力に対応できる曲柱を使用することが必要と考えられる。

(2) 曲柱に対する牽引力の標準値の検討

係留船舶の動揺シミュレーションによる曲柱に作用する牽引力の計算結果を基に、500～200,000GTの船舶に対して曲柱に作用する牽引力の標準値について検討する。これまでの考察および比較の結果から、風速15m/sの場合の曲柱に対する最大牽引力を用いて、曲柱に作用する牽引力の標準値を設定した。

図-6.2は、曲柱に対する牽引力の標準値として設定した提案値を示したものである。図には、風速15m/sの場合の曲柱に対する最大牽引力について、各船舶における6基の曲柱に作用する最大牽引力の平均値および最大値も示している。また、現行技術基準における牽引力の標準値と比較するための一つの指標として、最大牽引力の平均値および最大値に対してそれらの2倍の値も併せて示して

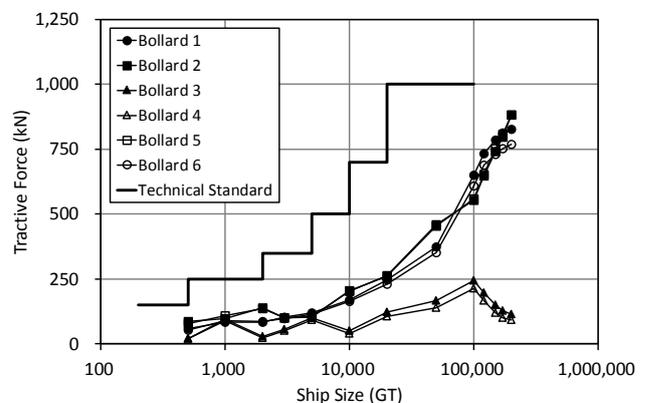


図-6.1 現行技術基準における牽引力の標準値との比較（曲柱，風速15m/s）

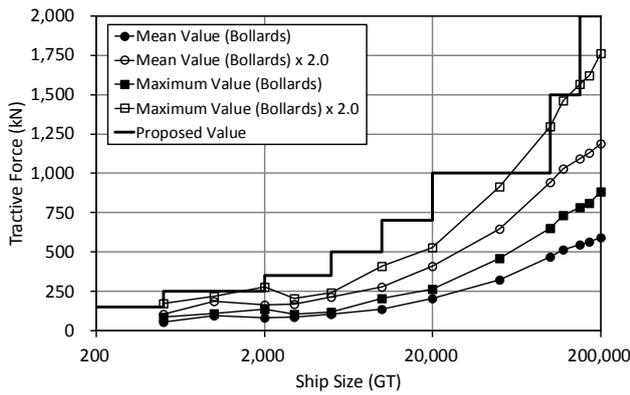


図-6.2 曲柱に対する牽引力の提案値

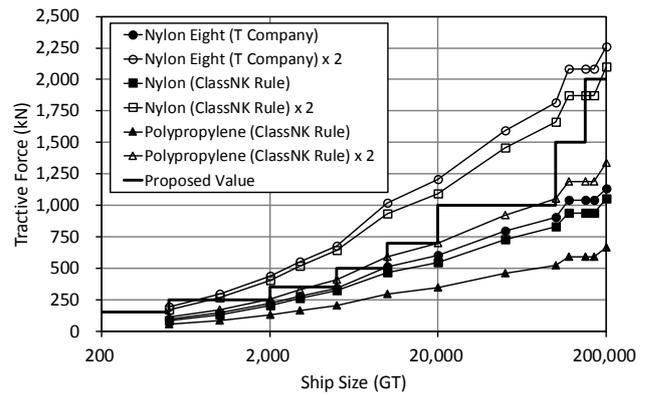


図-6.3 曲柱に対する牽引力の提案値と係留索の切断荷重の比較

いる。曲柱に対する牽引力の提案値については、100,000GTの船舶までは、現行技術基準における牽引力の標準値で十分に安全側の設定であるため、この部分は現状通りとした。図からわかるように、この部分の牽引力の提案値は、各曲柱に作用する最大牽引力の平均値の2倍の値および最大値の2倍の値を概ね満足している。すなわち、100,000GT以下の船舶に対する牽引力の提案値は、風速15m/sの場合に係留船舶により曲柱に作用する牽引力の2倍程度の安全性を有していると言える。そこで、100,000GTを超える船舶に対しても同様に、各曲柱に作用する最大牽引力の平均値の2倍の値および最大値の2倍の値を基準として、曲柱に作用する牽引力の標準値を設定することとした。このことから、100,000GTを超えて150,000GT以下の船舶に対しては1,500kN、また150,000GTを超えて200,000GT以下の船舶に対しては2,000kNとする牽引力の標準値を提案した。

また、図-6.3は、曲柱に対する牽引力の提案値を係留索の切断荷重と比較して示したものである。図には、ナイロンエイトロープ（繊維ロープメーカーT社）、ナイロン索およびポリプロピレン索（鋼船規則）の切断荷重とそれらの2本分の値を示している。曲柱に対する牽引力の提案値は、概ね係留索1本の切断荷重以上の値となっており、切断荷重の小さいポリプロピレン索のように、係留索の種類によっては係留索2本の切断荷重に相当していることがわかる。つまり、曲柱に対する牽引力の提案値は、鋼船規則に提示されている係留索1～2本の切断荷重まで耐えられる値であると考えられる。

6.3 曲柱および直柱を用いる場合（暴風時）

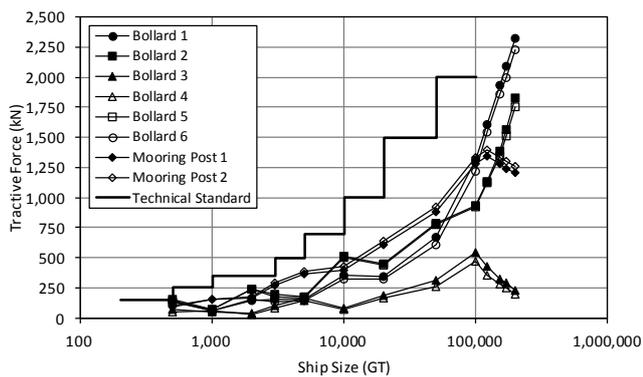
(1) 現行技術基準の標準値との比較

暴風時に曲柱および直柱を用いて船舶に係留される場

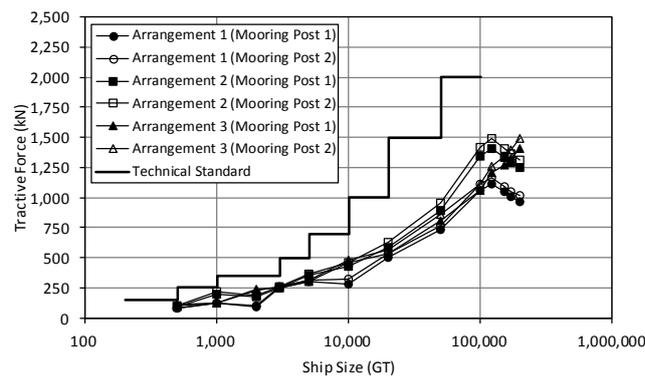
合について、直柱に作用する牽引力を現行技術基準における船舶の牽引力の標準値と比較検討する。現行技術基準では、直柱に対する船舶の牽引力の標準値は、直柱によって風速25～30m/sまで船舶に係留できるような係留柱の設計条件として規定されている。このとき、係留船舶による牽引力を算定するための風速として、1,000GT以下の船舶に対しては35m/s、1,000GTを超えて10,000GTまでの船舶に対しては30m/s、10,000GT以上の船舶に対しては25m/sを設定している（稲垣ら、1970；福田ら、1982）。これらを参考にして、ここでは、算定した直柱に作用する最大牽引力と現行技術基準における牽引力の標準値について、風速30m/sを基準とし風速25～35m/sに対して比較した。

現行技術基準に提示されている直柱に対する船舶の牽引力の標準値は、曲柱に対する船舶の牽引力の標準値とともに既に表-6.1に示している。図-6.4は、現行技術基準における直柱に作用する船舶の牽引力の標準値と本研究で得られた風速30m/sの場合の曲柱および直柱に作用する最大牽引力を係留配置ごとに比較して示したものである。また、図-6.5は、現行技術基準における直柱に作用する船舶の牽引力の標準値と本研究で得られた直柱に作用する最大牽引力を風速（25～35m/s）ごとに比較して示したものである。

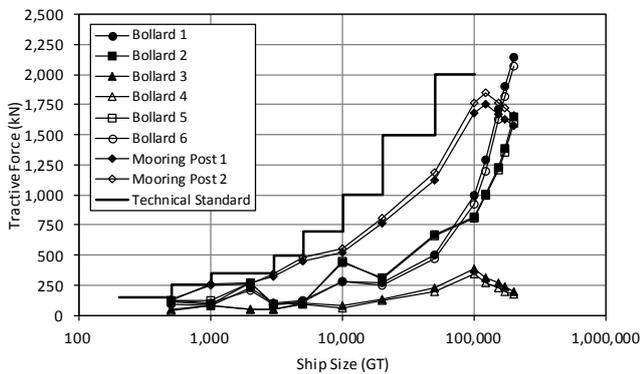
図-6.4から、現行技術基準で示されている牽引力の標準値は、100,000GT以下の船舶に対しては、直柱についても全体的に概ね安全側の設定であることがわかる。また、100,000GTを超える船舶に対しては、直柱に作用する牽引力は最大でも2,000kN以下となっていることから、牽引力の標準値において最大値である2,000kNを超える牽引力が直柱に作用する可能性は低いと考えられる。ただし、係留配置によって直柱の設置位置が異なるため、牽引力が最大となるときの船舶の大きさは係留配置ごとに異なっ



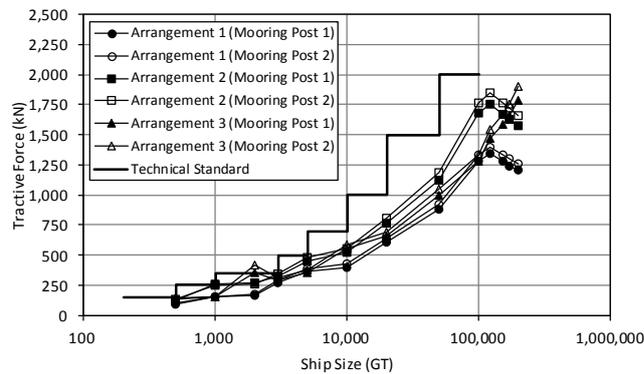
(1) 係留配置1



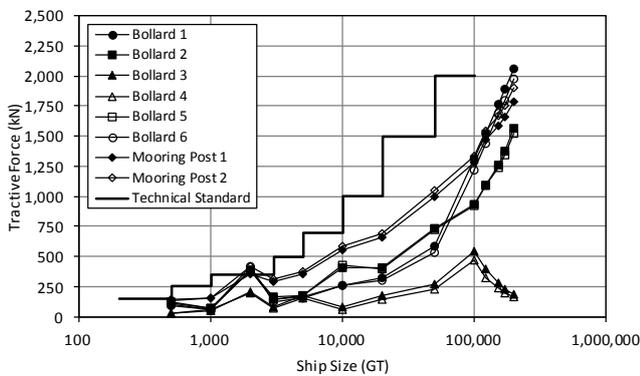
(1) 風速25m/s



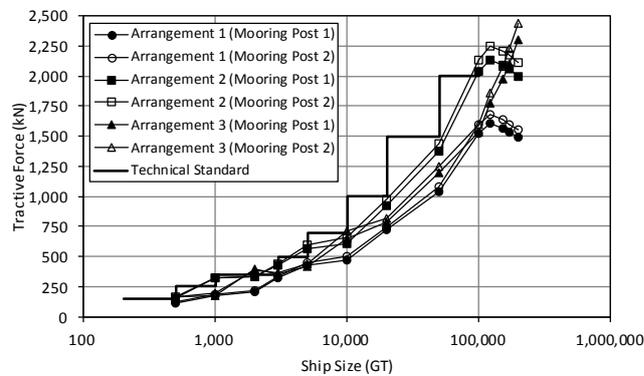
(2) 係留配置2



(2) 風速30m/s



(3) 係留配置3



(3) 風速35m/s

図-6.4 現行技術基準における牽引力の標準値との比較 (風速 30m/s)

図-6.5 現行技術基準における牽引力の標準値との比較 (直柱)

ている。一方、曲柱について見ると、係留配置1の場合には、120,000GT以上の船舶に対して直柱に作用する牽引力よりも曲柱に作用する牽引力の方が大きくなっており、最大で約2,300kNを示している。このとき、牽引力が大きくなっている曲柱は、パウライン2本が係留されている曲柱1とスターンライン2本が係留されている曲柱6である。このような直柱および曲柱に作用するアンバランスな牽引力については、直柱の位置の影響も大きい、現実的には船舶を係留している係留索を適切に配置することによ

り低減させることができる。すなわち、係留船舶に外力が作用する場合には短い係留索に大きな張力が作用するため、船舶を係留する際にできる限り同じ長さになるようにバランスよく係留索を配置する方法を採用することで対応は可能である。

また、図-6.5によると、当然のことながら、風速が大きくなるにつれて直柱に作用する牽引力も大きくなる傾向にあり、風速35m/sの場合には最大で2,500kNにまで達していることがわかる。しかし、風速30m/sの場合では、直柱

に作用する牽引力は最大でも2,000kN以下であり、風速25m/sの場合には、技術基準に提示されている牽引力の標準値は全体的にかなり安全側の設定となっている。すなわち、風速30m/s以下の条件において船舶に係留する場合には、100,000GT以上の船舶に対しても直柱の設計上の牽引力として2,000kNを採用することができると言える。

以上のことから、船舶に係留索が適切に配置されることを前提とした上で安全性を考慮した係船柱の設計を行うためには、暴風時に100,000GT以上の船舶に係留される岸壁においては、2,000kN程度の牽引力に対応できる直柱を使用することが必要と考えられる。

(2) 直柱に対する牽引力の標準値の検討

係留船舶の動揺シミュレーションによる曲柱および直柱に作用する牽引力の計算結果を基に、500~200,000GTの船舶に対して直柱に作用する牽引力の標準値について検討する。これまで述べてきたように、現行技術基準における直柱に対する船舶の牽引力の標準値は、直柱によって風速25~35m/sまで船舶を安全に係留できるように決定されたものである。しかしながら、船舶の牽引力の算定に静的荷重計算を用いていることや船舶の大きさによって設計対象とする風速が異なっていることなど合理的ではない部分も見受けられる。そこで、本研究では、これまでの考察および比較の結果も考慮して、船舶の大きさにかかわらず風速30m/sの場合の直柱に対する最大牽引力を用いて、直柱に作用する牽引力の標準値を設定した。

図-6.6は、直柱に対する牽引力の標準値として設定した提案値を示したものである。図には、風速30m/sの場合の直柱に対する最大牽引力について、各船舶における全ての係留配置に対する2基の直柱に作用する最大牽引力の平均値も示している。また、現行技術基準における牽引力の標準値と比較するための一つの指標として、最大牽引力の平均値に対してその1.25倍の値も併せて示してい

る。暴風時における風速30m/sは平常時における風速15m/sの2倍となっており、風荷重は風速の2乗に比例することから、暴風時には風荷重が平常時の場合の4倍になる。これを考慮して、暴風時には平常時よりも安全性の余裕代を1/4に低減しても妥当であると考えられるため、平常時において曲柱に対する牽引力の提案値が有する2倍程度の安全性を基に1.25倍の倍率を決定した。直柱に対する牽引力の提案値については、100,000GTの船舶までは、現行技術基準における牽引力の標準値で概ね安全側の設定であるため、この部分は現状通りとした。また、100,000GTを超えて200,000GT以下の船舶については、先に示したように現在用いられている最大の直柱で十分対応できることから、牽引力の標準値を2,000kNとして提案した。図からわかるように、直柱に対する牽引力の提案値は、船舶の大きさによって若干の差異はあるが、各係留配置において直柱に作用する最大牽引力の平均値の1.25倍の値を概ね満足している。すなわち、直柱に対する牽引力の提案値は、風速30m/sの場合に係留船舶により直柱に作用する牽引力の1.25倍程度の安全性を有していると言える。

また、図-6.7は、直柱に対する牽引力の提案値に係留索の切断荷重と比較して示したものである。図には、ナイロンエイトロープ（繊維ロープメーカーT社）、ナイロン索およびポリプロピレン索（鋼船規則）の切断荷重とそれらの2本分の値を示している。直柱に対する牽引力の提案値は、係留索1本の切断荷重以上の値となっており、ナイロン索については概ね係留索2本の切断荷重に相当していることがわかる。つまり、直柱に対する牽引力の提案値は、鋼船規則に提示されている係留索2本程度の切断荷重まで耐えられる値であると考えられる。

(3) 曲柱に対する牽引力の提案値の評価

暴風時に船舶が岸壁に係留される場合には、直柱を用いると同時に曲柱も使用している。暴風時では、平常時と

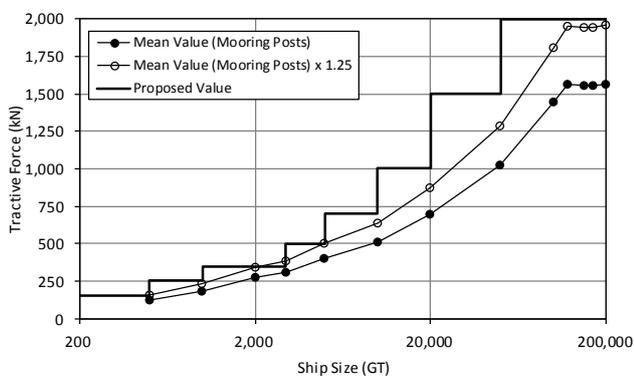


図-6.6 直柱に対する牽引力の提案値

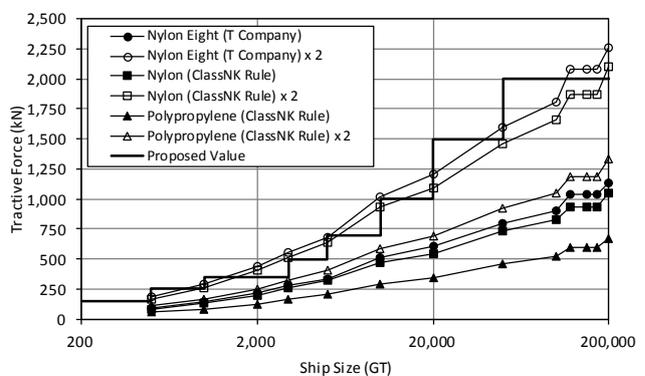


図-6.7 直柱に対する牽引力の提案値と係留索の切断荷重の比較

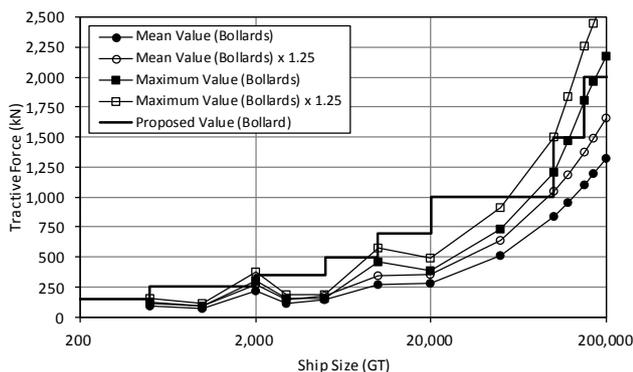
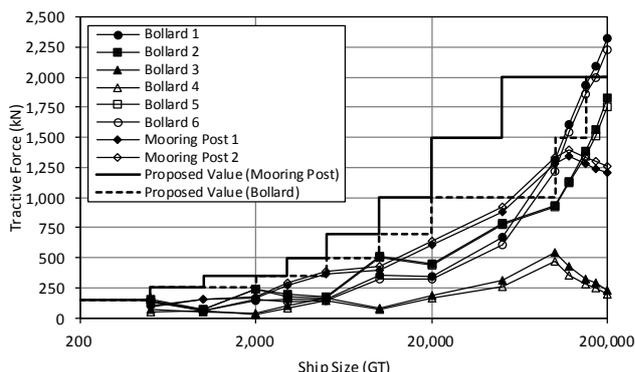


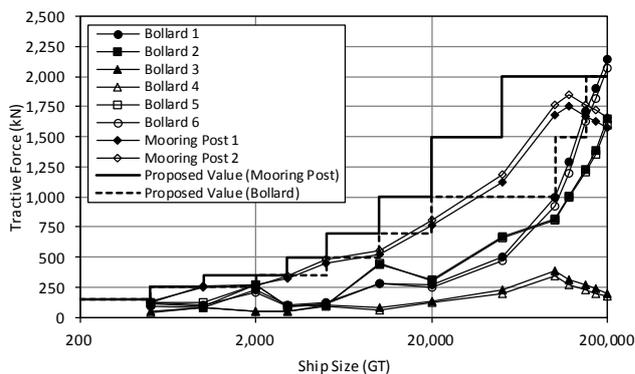
図-6.8 曲柱に対する牽引力の提案値と
暴風時に曲柱に作用する最大牽引力の比較

異なり風速が大きくなるため、この場合に曲柱に作用する船舶の牽引力が本研究で提案している曲柱に対する牽引力の標準値を満足していることを確認しておく必要がある。図-6.8は、暴風時に曲柱および直柱を用いて船舶が係留される場合について、曲柱に対する牽引力の提案値と曲柱に作用する最大牽引力を比較したものである。図には、風速30m/sの場合の曲柱に対する最大牽引力について、各船舶における全ての係留配置に対する6基の曲柱に作用する最大牽引力の平均値および曲柱ごとの平均値のうち最大値を示している。また、直柱の場合と同様に、最大牽引力の平均値および最大値に対してそれらの1.25倍の値も併せて示している。

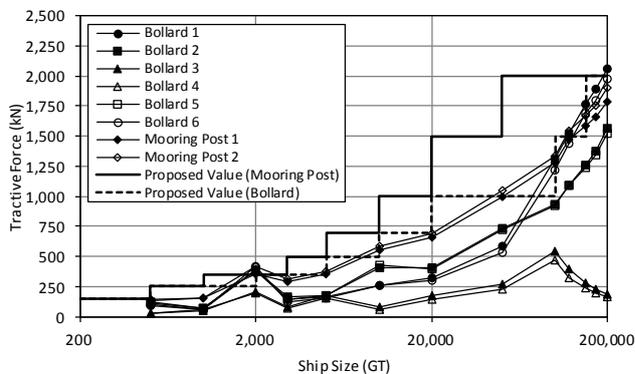
この図から、暴風時に曲柱に作用する牽引力の平均値は曲柱に対する牽引力の提案値よりも全体的に小さくなっており、曲柱に作用する牽引力の最大値は曲柱に対する牽引力の提案値と概ね同等であることがわかる。また、曲柱に対する牽引力の提案値は、各係留配置において曲柱に作用する最大牽引力の平均値の1.25倍の値を概ね満足しているが、最大牽引力の最大値の1.25倍の値に対しては特に100,000GT以上の船舶について満足していないこともわかる。これは、風速30m/sの暴風時においては、大型船舶に対する係留索の配置状況によっては、曲柱に作用する牽引力が曲柱に対する牽引力の提案値を超えることがあり、係留柱の安全性が低下することを意味している。したがって、このような暴風時において大型船舶を係留する場合には、曲柱および直柱を用いて係留索を同じ長さになるように可能な範囲内でバランスよく配置して船舶を係留する必要がある。なお、現実的には風速30m/sのような暴風条件下で大型船舶を係留することは非常に稀であると推測されるため、ここで提示している曲柱に対する牽引力の提案値は実用上は安全側の設定であると考えられる。



(1) 係留配置 1



(2) 係留配置 2



(3) 係留配置 3

図-6.9 直柱および曲柱に対する牽引力の提案値と
暴風時における最大牽引力の比較

(4) 直柱および曲柱に対する牽引力の提案値の評価

直柱および曲柱に対する牽引力の提案値について、3種類の係留配置における係留柱に作用する牽引力とそれぞれ比較することにより、その妥当性について評価した。図-6.9は、直柱および曲柱に対する牽引力の提案値と風速30m/sの場合の直柱および曲柱に作用する最大牽引力を係留配置ごとに比較して示したものである。係留配置1については、100,000GT以上の船舶に対しては、バウライン2本が係留されている曲柱1とスターンライン2本が係留

表-6.2 本研究で提案する船舶の牽引力の標準値

船舶の総トン数 (GT)		曲柱に作用する牽引力 (kN)	直柱に作用する牽引力 (kN)
200 を超え	500 以下	150	150
500 を超え	1,000 以下	250	250
1,000 を超え	2,000 以下	250	350
2,000 を超え	3,000 以下	350	350
3,000 を超え	5,000 以下	350	500
5,000 を超え	10,000 以下	500	700
10,000 を超え	20,000 以下	700	1,000
20,000 を超え	50,000 以下	1,000	1,500
50,000 を超え	100,000 以下	1,000	2,000
100,000 を超え	120,000 以下	1,500	2,000
120,000 を超え	150,000 以下	1,500	2,000
150,000 を超え	170,000 以下	2,000	2,000
170,000 を超え	200,000 以下	2,000	2,000

されている曲柱6において最大牽引力が曲柱に対する牽引力の提案値を超えているが、その他の係船柱に作用する牽引力はそれぞれ直柱および曲柱に対する牽引力の提案値よりも小さくなっている。また、係留配置2については、150,000GT以上の船舶に対しては、同様に曲柱1および曲柱6において最大牽引力が曲柱に対する牽引力の提案値を超えているが、その他の係船柱に作用する牽引力はそれぞれ直柱および曲柱に対する牽引力の提案値以下となっている。一方、係留配置3については、100,000GT以上の船舶に対して、曲柱1および曲柱6において最大牽引力が曲柱に対する牽引力の提案値よりも大きくなっており、2,000GTの船舶に対しては、最大牽引力が曲柱および直柱に対する牽引力の提案値を超えている。この2,000GTの船舶における牽引力の傾向は、係留配置において曲柱および直柱に係留されるプレストラインの索長が短いことによる影響と考えられる。また、大型の船舶に対して過大となっている曲柱1および曲柱6に作用する牽引力については、1基の曲柱に係留されている2本の係留索を1本ずつそれぞれ1基の曲柱に係留することにより低減させることができる。これらのことから、暴風時に船舶に係留する際に係留索が適切に配置されることを前提にすると、本研究で提示した直柱および曲柱に対する牽引力の提案値は概ね妥当であると考えられる。

6.4 牽引力の標準値の提案

係留船舶の動揺シミュレーションによる曲柱および直柱に作用する牽引力の計算結果に基づいて、500～200,000GTの船舶に対して曲柱および直柱に作用する牽引力の標準値について検討した。その結果を取りまとめて、表-6.2に示すように曲柱および直柱に対する船舶の

牽引力の標準値として提案する。本研究で提案する船舶の牽引力の標準値は、100,000GT以下の船舶については、現行技術基準における標準値と同一である。また、100,000GTを超える船舶については、曲柱に作用する牽引力の標準値として、100,000GTを超えて150,000GT以下の船舶に対しては1,500kN、また150,000GTを超えて200,000GT以下の船舶に対しては2,000kNとし、一方、直柱に作用する牽引力の標準値として、100,000GTを超えて200,000GT以下の船舶に対しては2,000kNとすることを提案する。

また、本研究において提案した船舶の牽引力の標準値について評価した結果を以下に取りまとめて示す。

■曲柱に作用する牽引力の標準値

- ・風速 15m/s のときに曲柱のみを用いて船舶に係留される場合に、係留船舶により曲柱に作用する牽引力に対して2倍程度の安全性を有する。
- ・風速 30m/s のときに曲柱および直柱を用いて船舶に係留される場合に、係留船舶により曲柱に作用する牽引力に対して1.25倍程度の安全性を有する。
- ・鋼船規則に提示されている係留索1～2本の切断荷重に相当する。

■直柱に作用する牽引力の標準値

- ・風速 30m/s のときに曲柱および直柱を用いて船舶に係留される場合に、係留船舶により直柱に作用する牽引力に対して1.25倍程度の安全性を有する。
- ・鋼船規則に提示されている係留索2本程度の切断荷重に相当する。

7. 結論

本研究では、係船柱に作用する係留船舶による牽引力を定量的に評価するために、500~200,000 総トン (GT) の13種類の空載状態の貨物船に対して風荷重作用時における係留船舶の動揺シミュレーションを実施し、係船柱に作用する牽引力を算定した。その結果を用いて、係留船舶により係船柱に作用する牽引力の特徴について考察するとともに、現行技術基準において提示されている船舶の牽引力の標準値と比較検討した。これにより、現行技術基準で示されている100,000 総トン (GT) 以下の船舶に対する牽引力の標準値は、全体的に概ね安全側の設定であることを確認した。また、牽引力の標準値が規定されていない100,000~200,000 総トン (GT) の船舶については、曲柱に作用する牽引力の標準値として1,500kN または2,000kN の値、また直柱に作用する牽引力の標準値として2,000kN の値を設定することを提案した。

8. おわりに

本研究では、曲柱および直柱に対する船舶の牽引力の標準値を提案したが、これらの標準値は、他の諸条件が不明な場合に対象船舶の総トン数 (GT) という条件のみにより簡易的に係船柱の規格を選定するときに用いるものである。一方、風荷重作用時における係留船舶による牽引力は、船舶の大きさや風圧面積、係留索の本数や配置状況、風速・風向などの影響を大きく受ける。このため、対象船舶の諸元、係留索の諸元や配置状況などが判明している場合には、これらの諸条件を考慮した上で静的荷重計算あるいは動的計算 (動揺シミュレーション) に基づいて係留船舶による牽引力を算定し、係船柱の規格を選定する方がより適切である。また、特に暴風時における係留船舶および係船柱の安全性を確保するためには、船舶を係留する際に係留索を同じ長さになるように可能な範囲内でバランスよく配置することが重要である。なお、係船柱のうち1,500kN および2,000kN の曲柱の標準形については、港湾工事共通仕様書に規定されていないことから、これらの牽引力に対応した適切な曲柱の標準形について今後検討する必要がある。

(2017年11月2日受付)

謝辞

本研究において、曲柱の設置間隔の整理で用いた係留施設の設計事例に関する資料は、国土交通省国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室から提供して頂

いたものである。この資料の収集は、国土交通省港湾局技術企画課技術監理室、北海道開発局、各地方整備局および内閣府沖縄総合事務局、並びに全国の自治体の担当の方々による多大なるご協力の基に行われている。また、海洋研究領域海洋利用研究グループの玉田和也客員研究員には、係留施設の設計事例に関する資料から曲柱の設置間隔に関する情報を抽出し整理して頂いた。ここに記して関係の方々に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 阿式邦弘・根木貴史・村田利治 (1989) : 船舶の主要寸法の統計解析, 港湾技研資料, No.652, 43p.
- 稲垣紘史・山口孝市・片山猛雄 (1970) : けい船柱の標準設計 (案), 港湾技研資料, No.102, 133p.
- 上田茂・白石悟 (1983) : 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告, 第22巻第4号, pp.181-218.
- 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, 372p.
- 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, 57p.
- 沿岸技術研究センター (2007) : 港湾構造物設計事例集 (平成19年改訂版), 沿岸技術ライブラリーNo.24.
- 関西造船協会 (1983) : 造船設計便覧 (第4版), 海文堂, pp.414, pp.464-465.
- 小山健夫・藤野正隆・前田久明 (1997) : 改訂版船体と海洋構造物の運動学, 元良誠三監修, 成山堂書店, pp.13.
- 高橋宏直・後藤文子・安部智久 (2006) : 統計解析による船舶諸元に関する研究—船舶の主要諸元の計画基準 (案)—, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.28, 125p.
- 寺内潔・吉田行秀 (1980) : 船舶の主要寸法と力学的諸量の関係, 港湾技研資料, No.348, 115p.
- 日本海事協会 (2017a) : 鋼船規則 C編 船体構造及び船体艤装, 360p.
- 日本海事協会 (2017b) : 鋼船規則 L編 艤装品, 39p.
- 日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 国土交通省港湾局監修, pp.392-412, pp.943-947, pp.1172-1182.
- 日本港湾協会 (2017) : 港湾工事共通仕様書, 国土交通省港湾局監修, pp.1-163-1-167.
- 福田功・柳生忠彦 (1982) : 係船柱にかかるけん引力について, 港湾技研資料, No.427, 57p.

記号表

A_X : 水面上正面投影面積 (船首方向の投影面積) (m²)
 A_Y : 水面上側面投影面積 (舷側方向の投影面積) (m²)
 B : 型幅 (m), または静水圧的復元力マトリクス
 BM : 浮心とメタセンターとの距離 (m)
 C_B : ブロック係数
 C_M : ミッドシップ (船体中央) 回りの風圧モーメント係数
 C_W : 水線面積係数
 C_X : 船舶の船首尾方向 (x 軸方向) の風抗力係数
 C_Y : 船舶の船側方向 (y 軸方向) の風抗力係数
 D : 型深さ (m)
 DT : 船舶の満載時の排水量 (t)
 DWT : 船舶の載貨重量トン数 (トン)
 d : 満載喫水 (m), または喫水 (m)
 d' : 空載喫水 (m)
 F : 風荷重ベクトル
 GM : メタセンター高さ (重心とメタセンターとの距離) (m)
 GT : 船舶の総トン数 (トン)
 g : 重力加速度 (m/s²)
 KB : 船底から浮心までの距離 (m)
 KG : 船底から重心までの距離 (m)
 KGD : 船底から重心までの距離 KG を型深さ D で除した比 (KG/D)
 k : 平行移動量のパラメータ (カバー率に対する定数)
 L_{oa} : 全長 (m)
 L_{pp} : 垂線間長 (m)
 M : 船舶の質量・慣性モーメントマトリクス
 $m(\omega_0)$: 船舶の付加質量・付加慣性モーメントマトリクス (波角周波数 ω_0 に対応)
 $N(\omega_0)$: 造波減衰係数マトリクス (波角周波数 ω_0 に対応)
 n : 水線面積係数 C_W により決定される係数
 $R(x)$: 防舷材反力・係留索張力ベクトル
 R_M : 風荷重合力のミッドシップ (船体中央) 回りのモーメント成分 (kNm)
 R_X : 風荷重合力の x 方向成分 (kN)
 R_Y : 風荷重合力の y 方向成分 (kN)
 R_{xx} : 船舶の長軸 (x 軸) 回りの環動半径 (m)
 R_{yy} : 船舶の短軸 (y 軸) 回りの環動半径 (m)
 R_{zz} : 船舶の垂直軸 (z 軸) 回りの環動半径 (m)
 T : 船舶の横揺れ固有周期 (s)
 U : 変動風速 (m/s)
 x : 動揺変位ベクトル
 \dot{x} : 動揺速度ベクトル

\ddot{x} : 動揺加速度ベクトル
 θ : 風向 (°)
 ρ : 空気の密度 (kg/m³)
 σ : 回帰式周りの誤差の標準偏差
 ω_0 : 波角周波数 (rad/s)

付録A 繊維ロープの切断荷重（鋼船規則）

表-A.1 繊維ロープの切断荷重
（鋼船規則 L編 艀装品）

表 L5.2 繊維ロープの切断荷重 (kN)

ロープ 径 (mm)	マニラ* ロープ	合 成 繊 維 ロ ー プ							
		ビニロン*		ポリエチレン**		ポリエ* スチル	ポリプロピレン**		ナイ* ロン
		1種	2種	1種	2種		1種	2種	
10	7.06	9.32	15.7	9.71	12.7	15.6	10.8	12.7	18.1
12	9.90	13.4	21.8	13.9	17.7	22.0	15.7	17.7	27.5
14	13.1	17.9	28.4	18.6	23.5	29.2	20.6	23.5	36.6
16	16.9	22.9	36.3	23.8	29.4	37.5	26.5	29.4	46.9
18	21.0	28.6	45.1	29.7	37.7	46.7	32.4	37.3	58.3
20	25.6	34.8	54.9	36.1	44.1	56.8	39.2	44.1	70.9
22	30.5	41.6	65.7	43.1	54.9	67.8	47.1	54.9	84.6
24	35.9	48.8	77.5	50.7	63.7	79.6	54.9	63.7	100
26	41.6	56.7	89.2	58.8	73.5	92.4	63.7	73.5	116
28	47.8	65.1	103	67.5	83.4	106	73.5	83.4	132
30	54.3	74.0	117	76.8	97.1	121	83.4	97.1	151
32	61.2	83.5	131	86.5	108	136	94.1	108	170
35	72.3	99.0	155	102	127	161	111	127	201
40	95.4	127	198	131	164	206	142	164	258
45	119	157	247	163	203	260	177	203	321
50	144	191	300	198	250	312	214	250	390
55	173	228	358	237	294	373	255	294	466
60	203	269	421	279	348	438	300	348	547
65	235	312	487	324	402	508	348	402	635
70	271	358	559	371	461	583	399	461	729
75	307	407	635	422	525	663	453	525	829
80	346	459	716	476	593	747	511	593	935
85	387	514	801	533	667	837	572	667	1,050
90	431	571	895	592	735	931	635	735	1,170
95	477	632	981	655	814	1,030	702	814	1,280
100	525	694	1,080	721	897	1,140	772	897	1,410

(備考)

* 乾燥状態でのロープを室温で引張ったときの切断荷重

** 35±2℃の温水中に30分以上浸漬したロープを室温で引張ったときの切断荷重

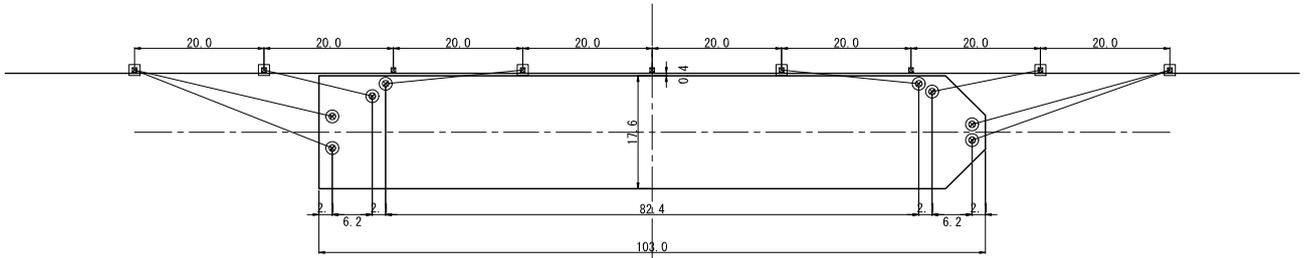


図-B.4 係留索の配置 (3,000GT)

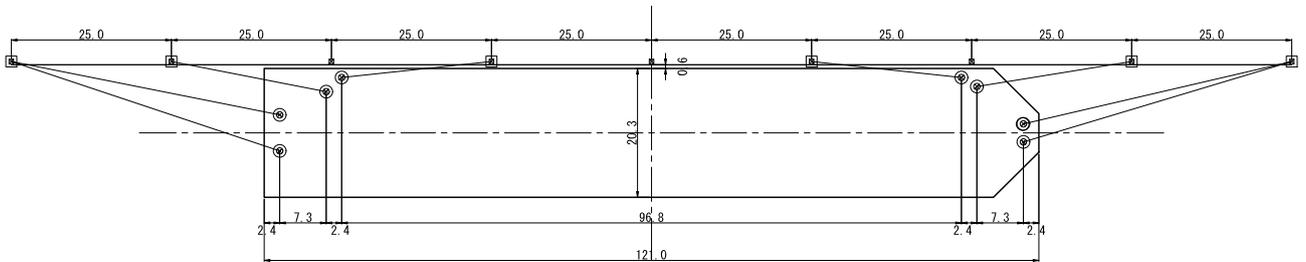


図-B.5 係留索の配置 (5,000GT)

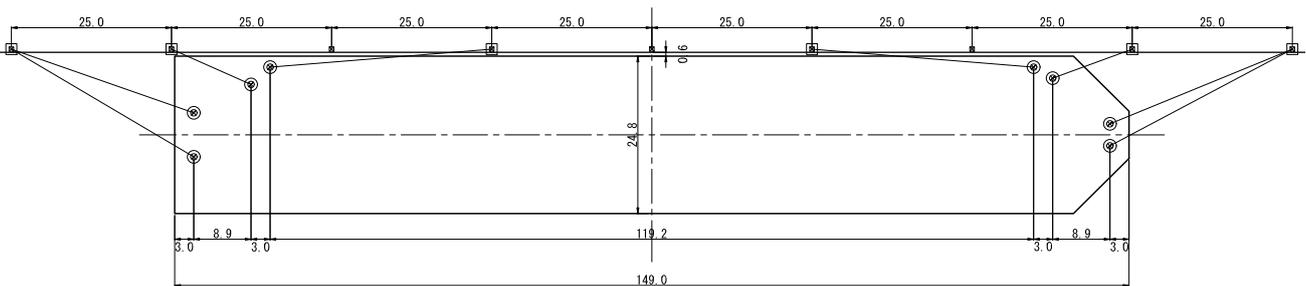


図-B.6 係留索の配置 (10,000GT)

(単位：m，小数第2位を四捨五入)

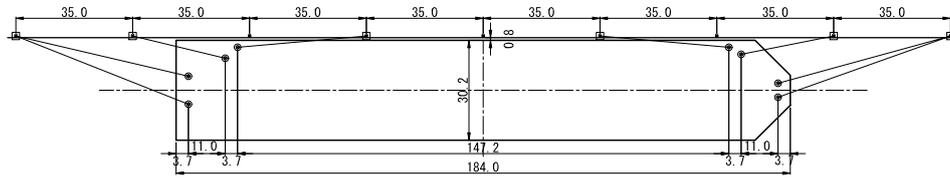


図-B.7 係留索の配置 (20,000GT)

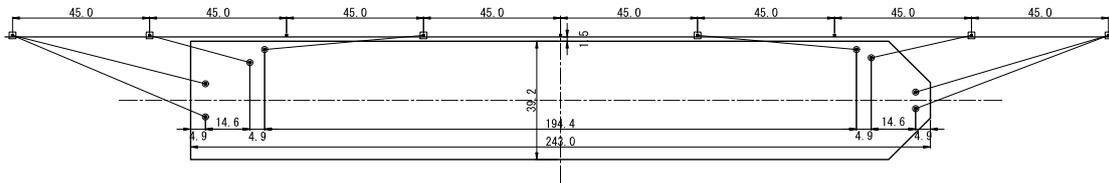


図-B.8 係留索の配置 (50,000GT)

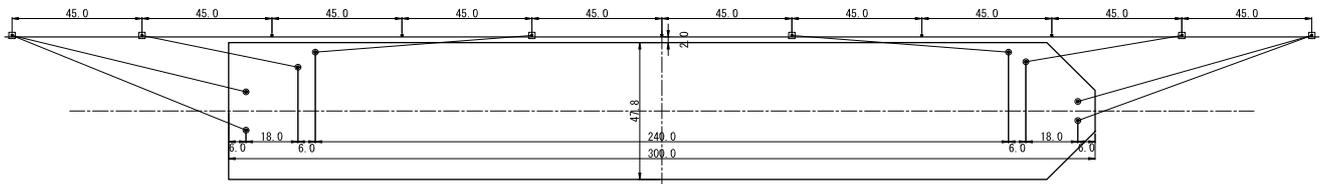


図-B.9 係留索の配置 (100,000GT)

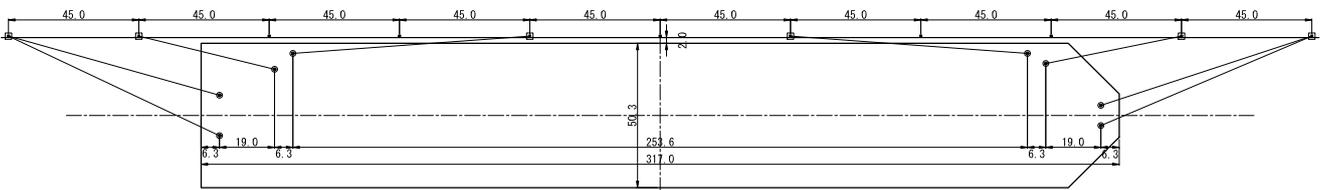


図-B.10 係留索の配置 (120,000GT)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

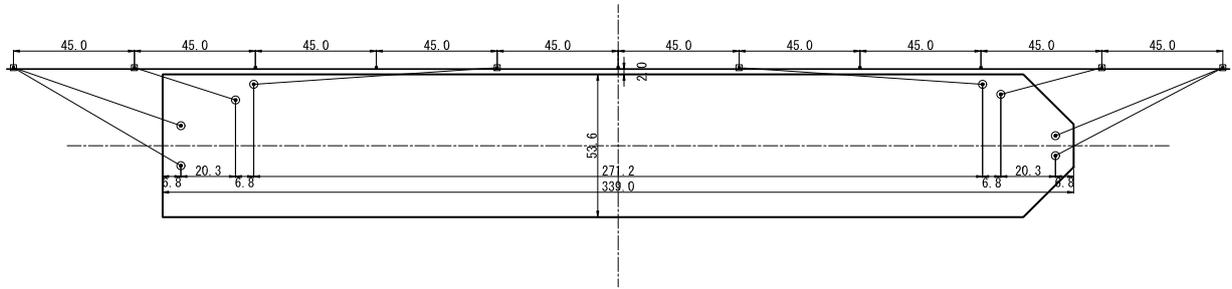


図-B.11 係留索の配置 (150,000GT)

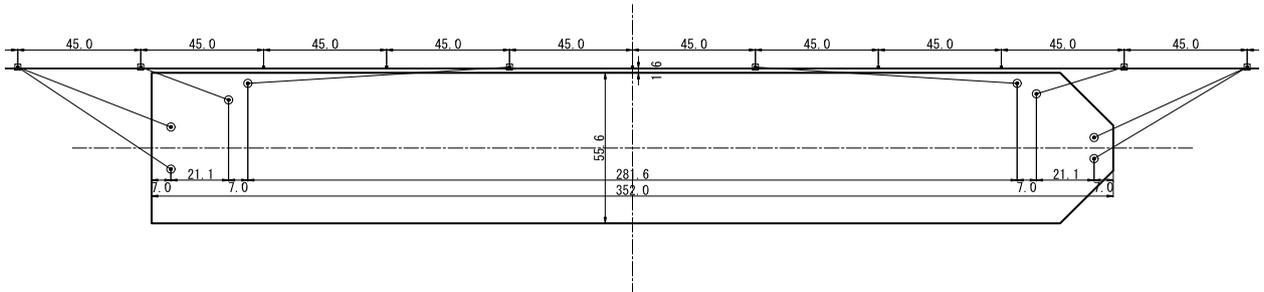


図-B.12 係留索の配置 (170,000GT)

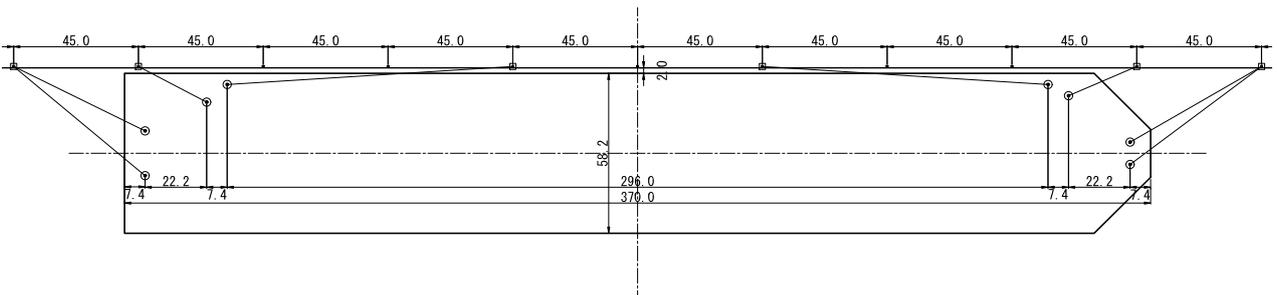


図-B.13 係留索の配置 (200,000GT)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

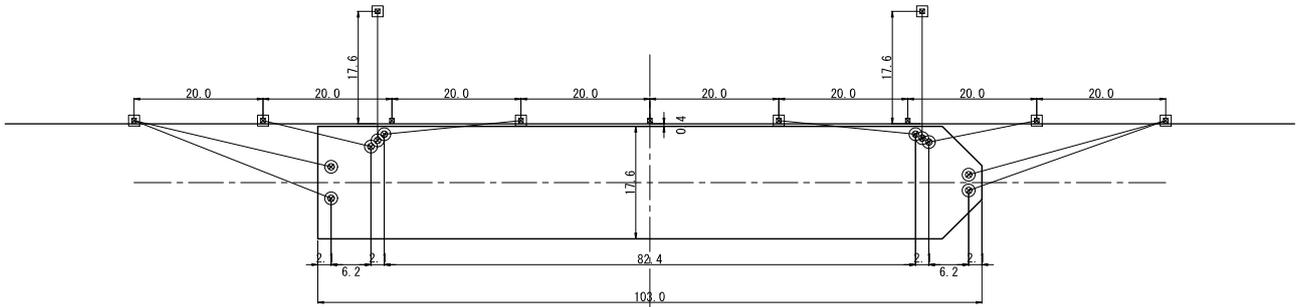


図-C.4 係留索の配置 (3,000GT, 係留配置1)

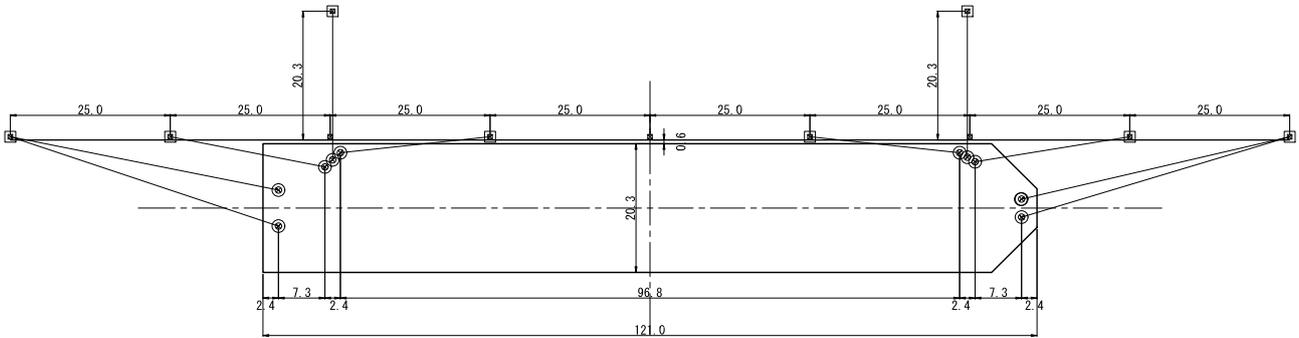


図-C.5 係留索の配置 (5,000GT, 係留配置1)

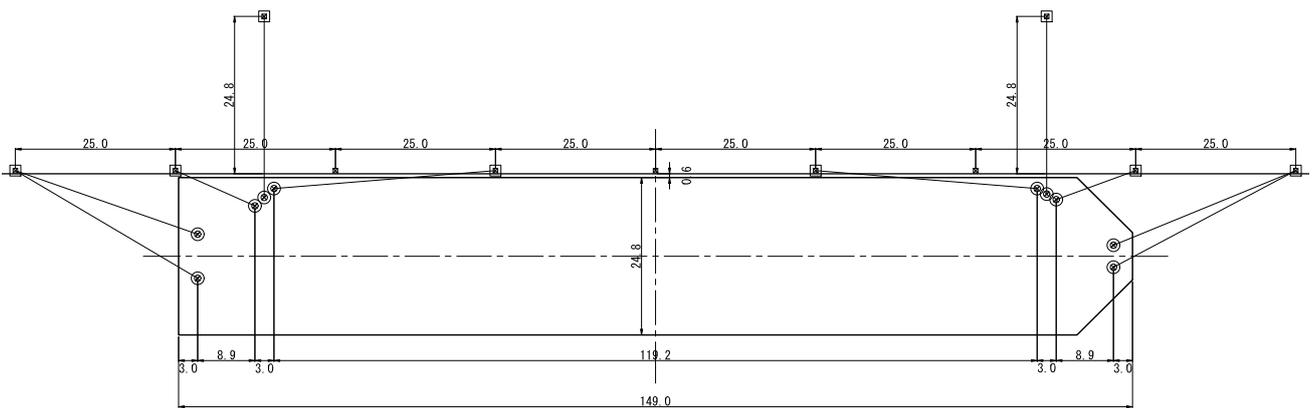


図-C.6 係留索の配置 (10,000GT, 係留配置1)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

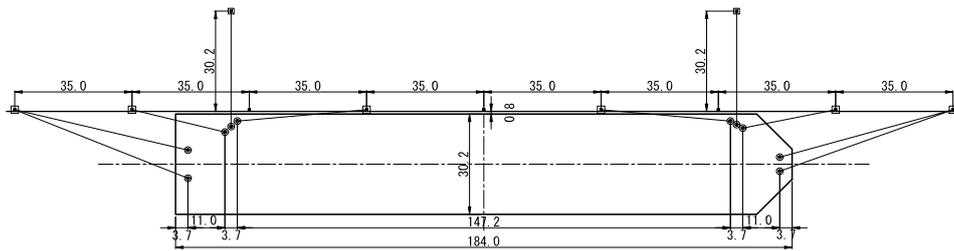


図-C.7 係留索の配置 (20,000GT, 係留配置1)

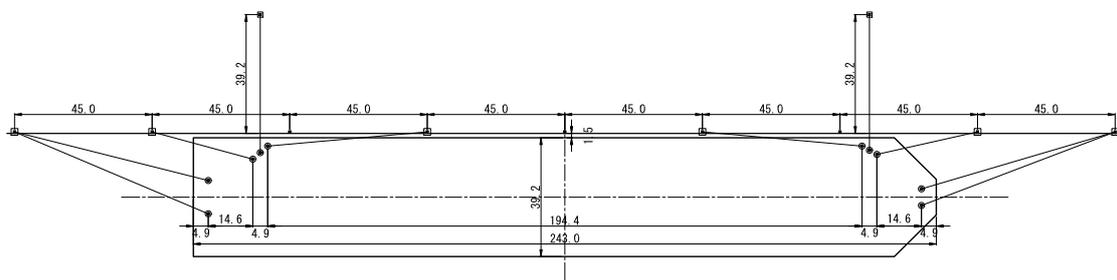


図-C.8 係留索の配置 (50,000GT, 係留配置1)

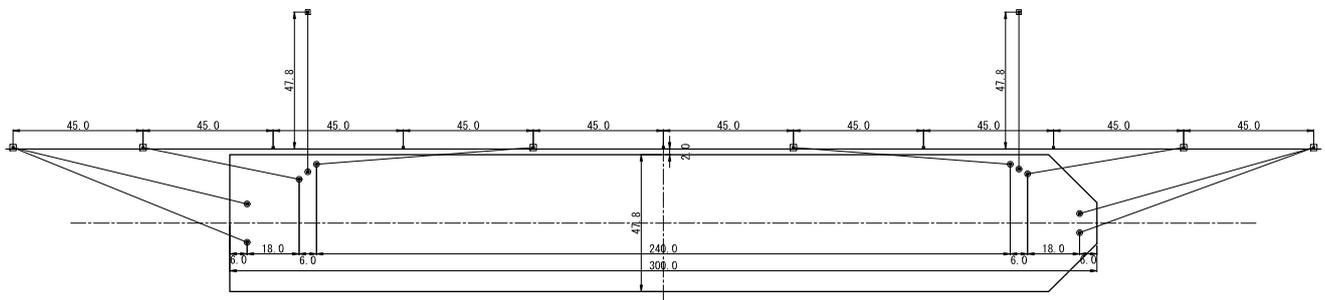


図-C.9 係留索の配置 (100,000GT, 係留配置1)

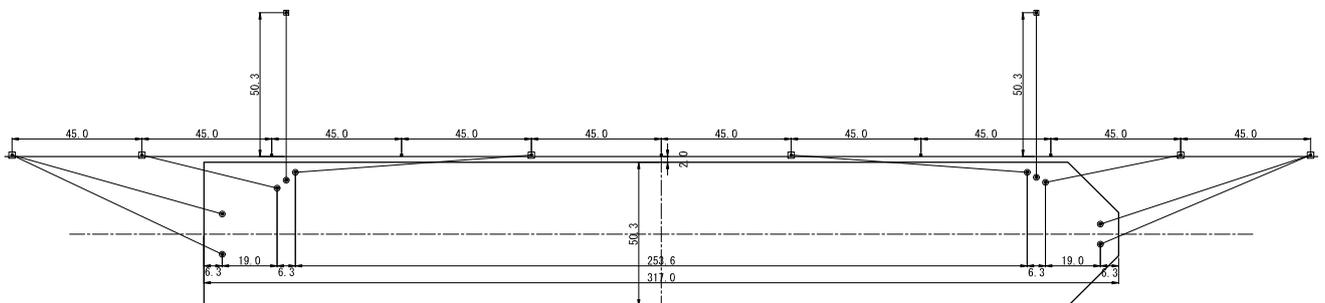


図-C.10 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置1)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

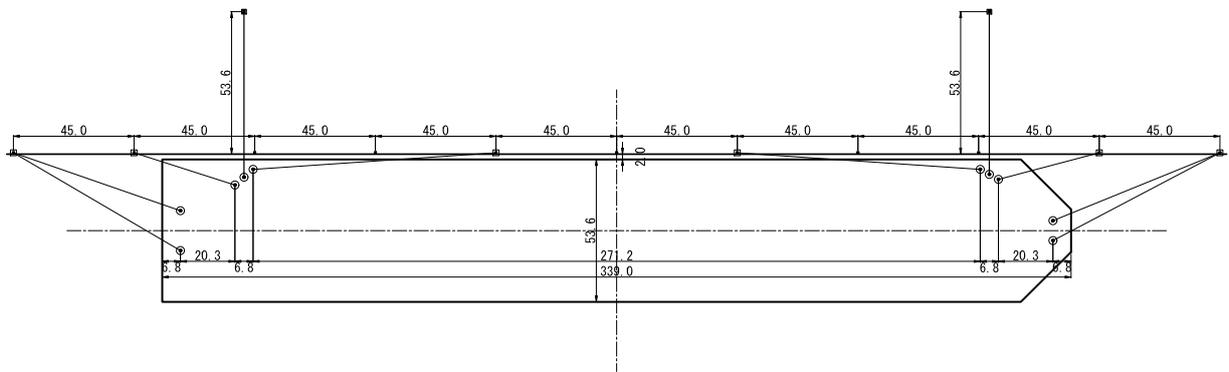


図-C.11 係留索の配置 (150,000GT, 係留配置1)

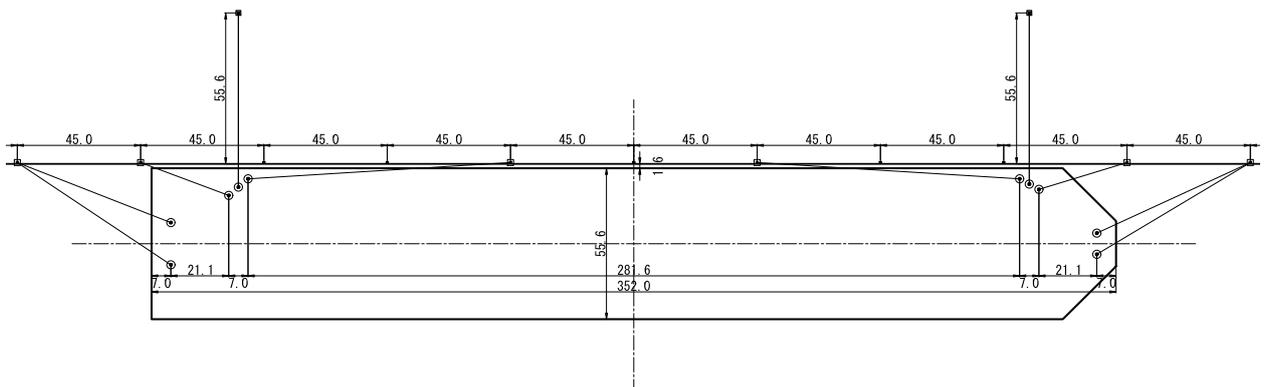


図-C.12 係留索の配置 (170,000GT, 係留配置1)

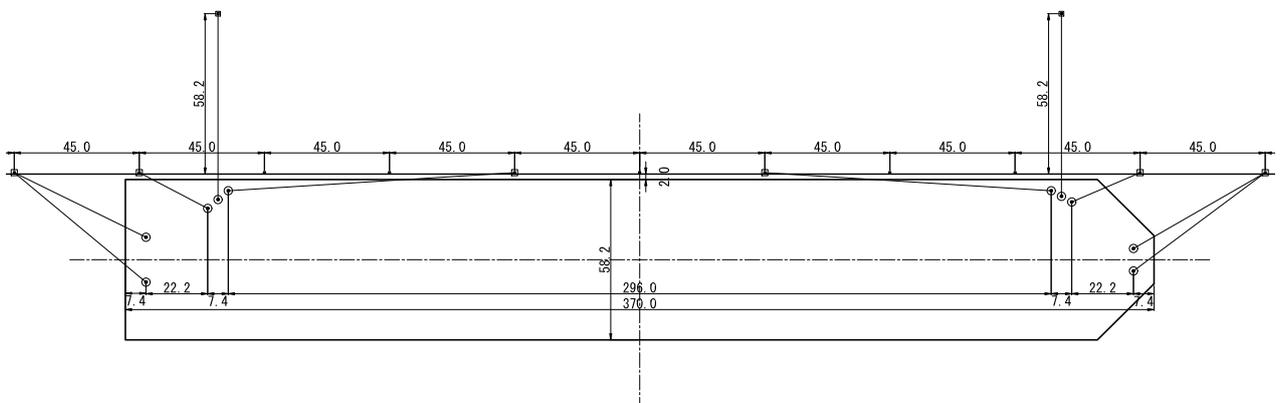


図-C.13 係留索の配置 (200,000GT, 係留配置1)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

付録D 係船柱の位置および係留索の配置状況
 (曲柱および直柱を用いる場合、係留配置2)

係留配置2では、直柱は、岸壁法線から後方に対象船舶の型幅の半分に等しい距離に設置されている。

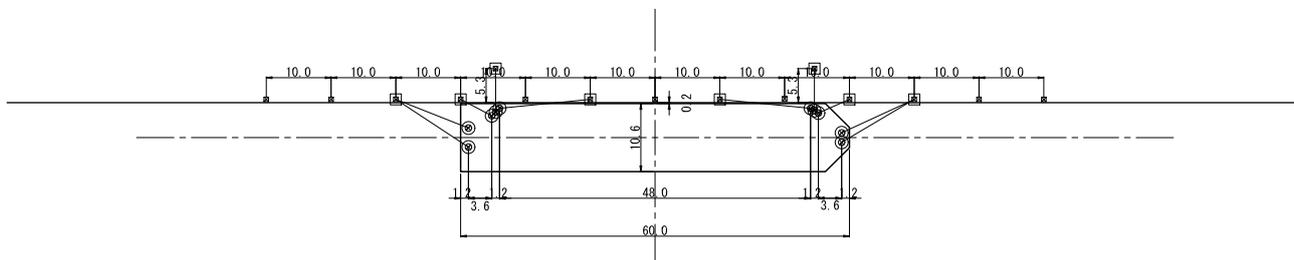


図-D.1 係留索の配置 (500GT, 係留配置2)

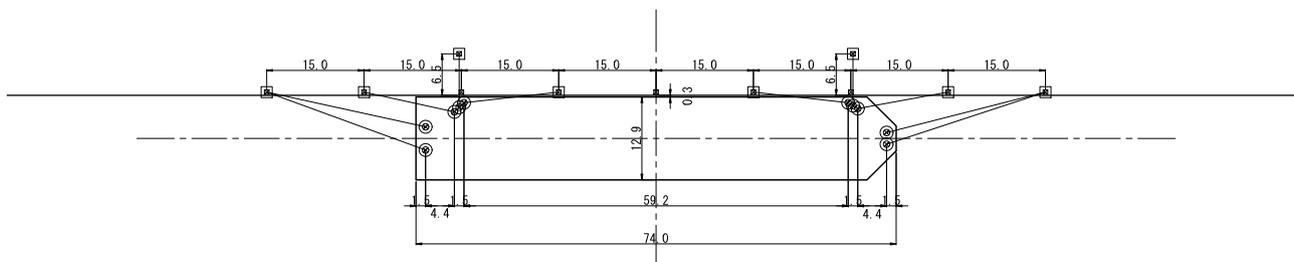


図-D.2 係留索の配置 (1,000GT, 係留配置2)

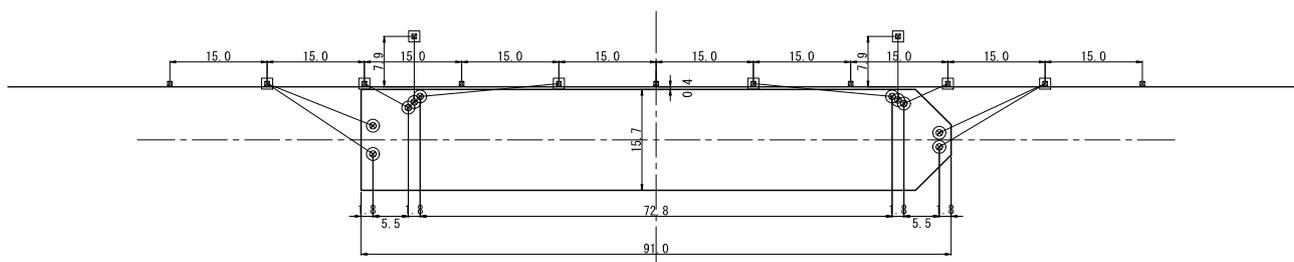


図-D.3 係留索の配置 (2,000GT, 係留配置2)

(単位：m, 小数第2位を四捨五入)

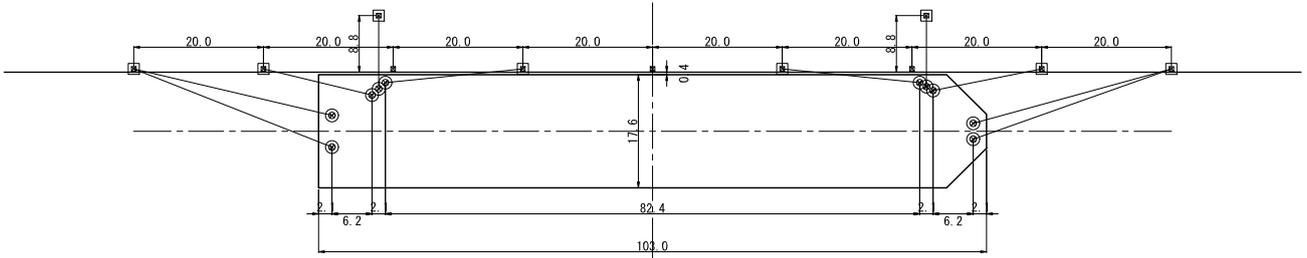


図-D.4 係留索の配置 (3,000GT, 係留配置2)

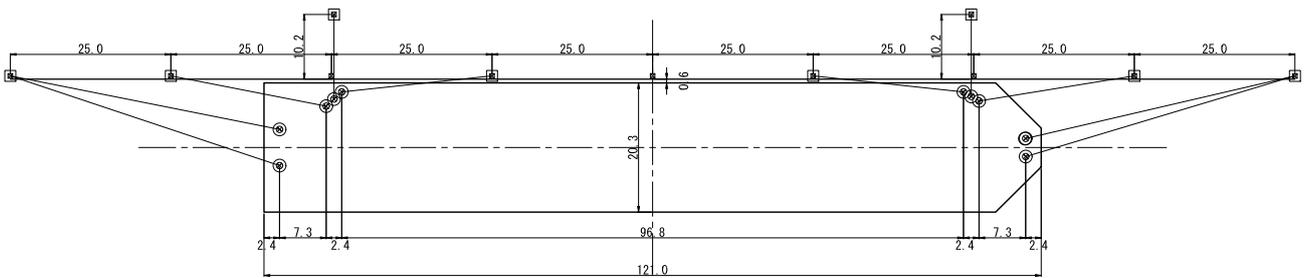


図-D.5 係留索の配置 (5,000GT, 係留配置2)

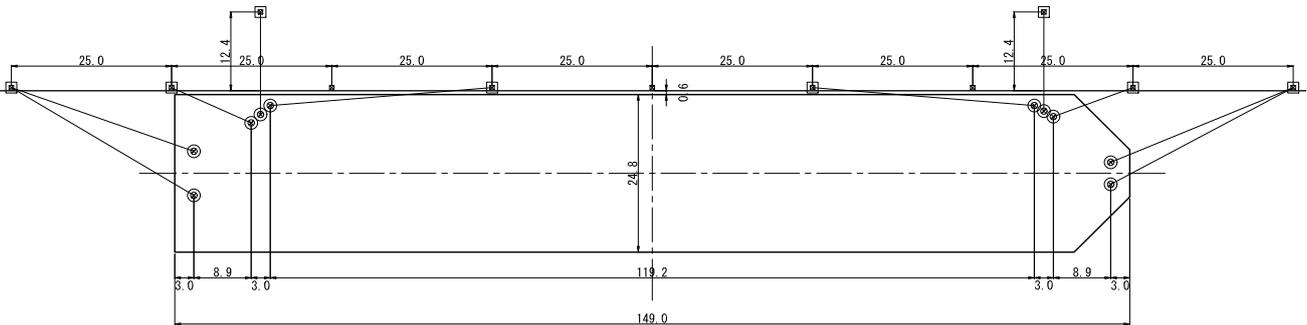


図-D.6 係留索の配置 (10,000GT, 係留配置2)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

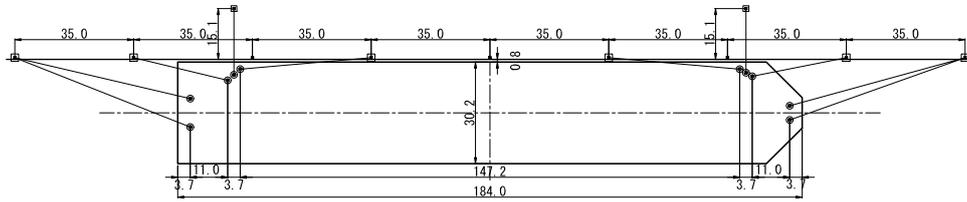


図-D.7 係留索の配置 (20,000GT, 係留配置2)

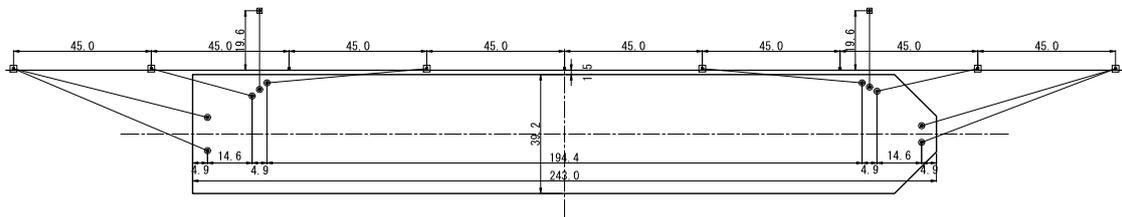


図-D.8 係留索の配置 (50,000GT, 係留配置2)

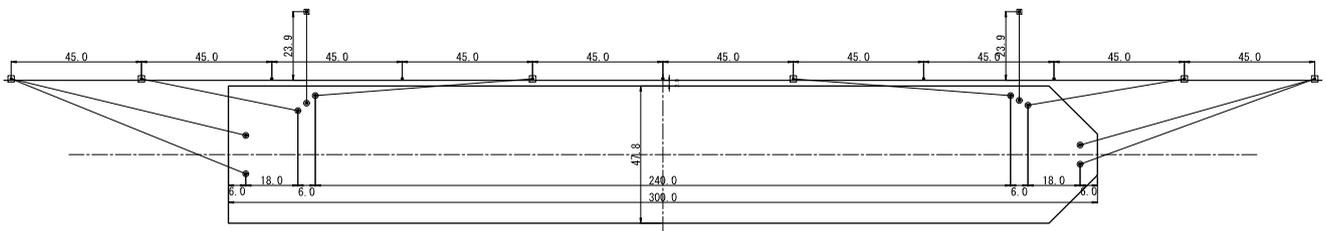


図-D.9 係留索の配置 (100,000GT, 係留配置2)

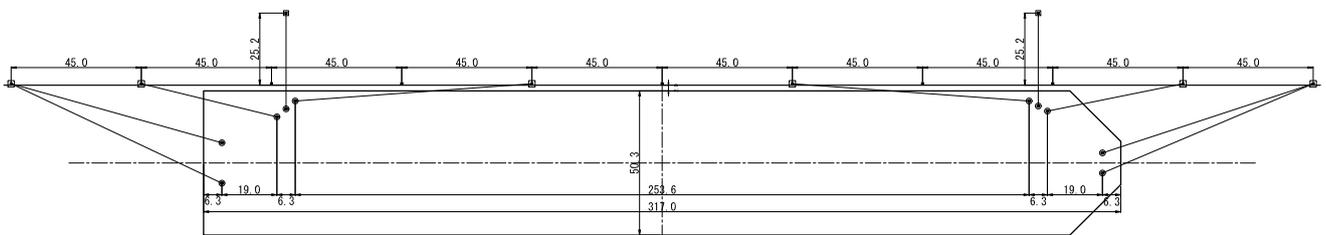


図-D.10 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置2)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

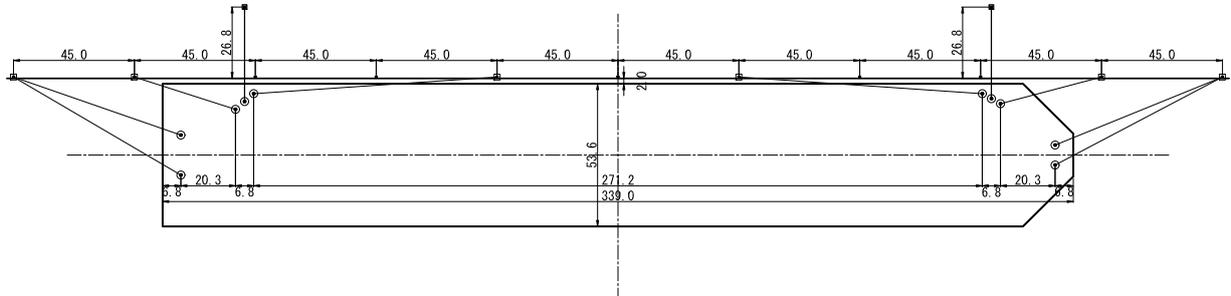


図-D.11 係留索の配置 (150,000GT, 係留配置2)

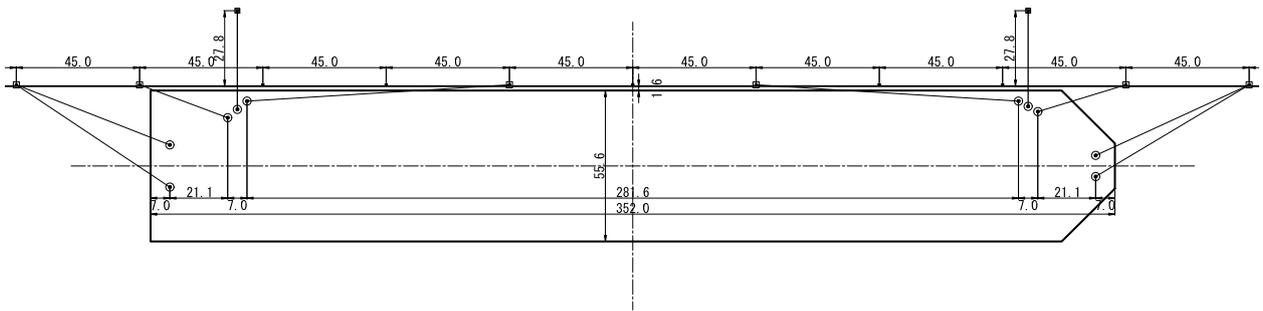


図-D.12 係留索の配置 (170,000GT, 係留配置2)

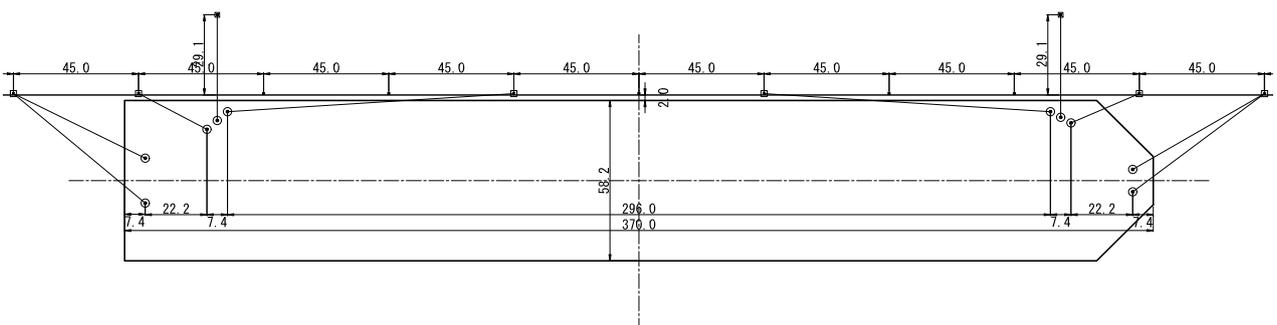


図-D.13 係留索の配置 (200,000GT, 係留配置2)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

付録E 係船柱の位置および係留索の配置状況
 (曲柱および直柱を用いる場合、係留配置3)

係留配置3では、直柱は、対象船舶の係留配置におけるブレストラインに等しい長さの係留索が配置されるように設置されている。

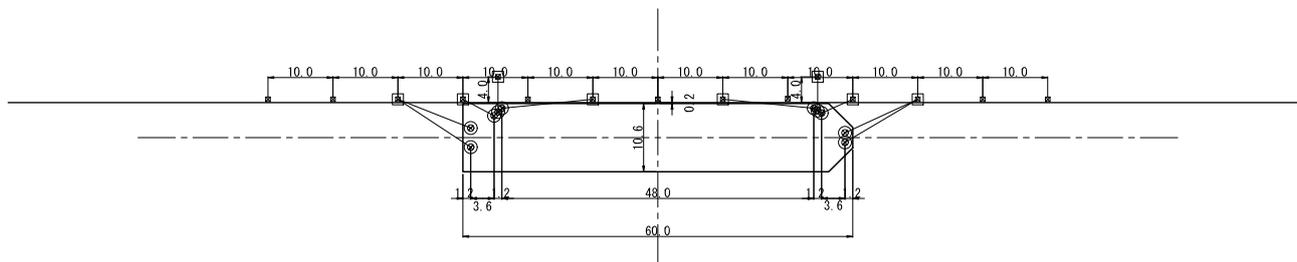


図-E.1 係留索の配置 (500GT, 係留配置3)

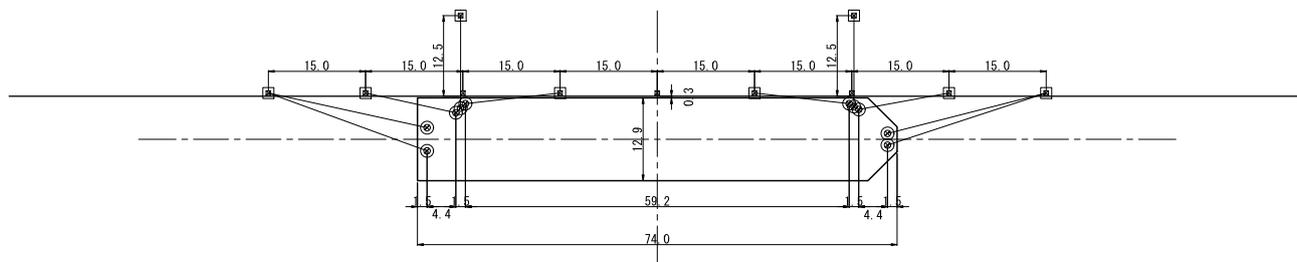


図-E.2 係留索の配置 (1,000GT, 係留配置3)

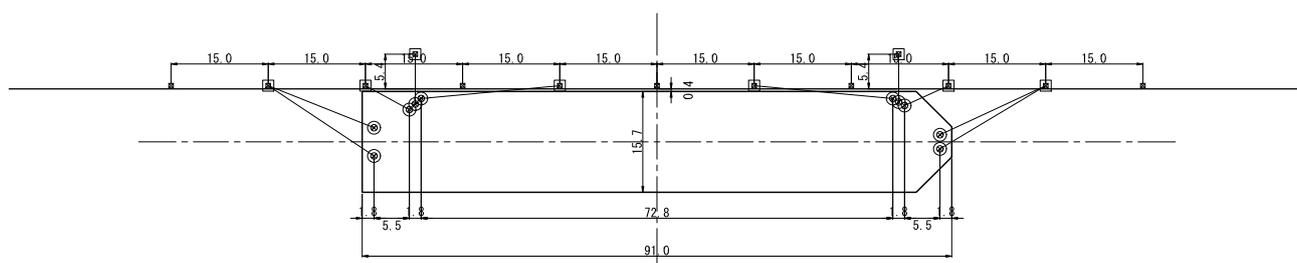


図-E.3 係留索の配置 (2,000GT, 係留配置3)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

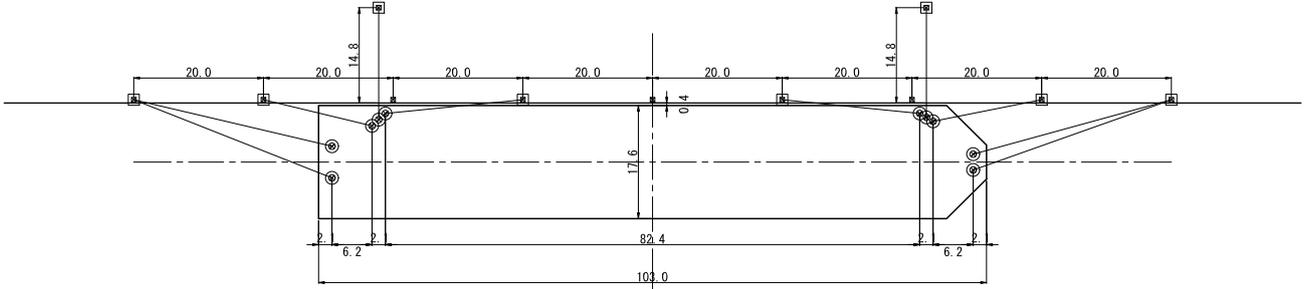


図-E.4 係留索の配置 (3,000GT, 係留配置3)

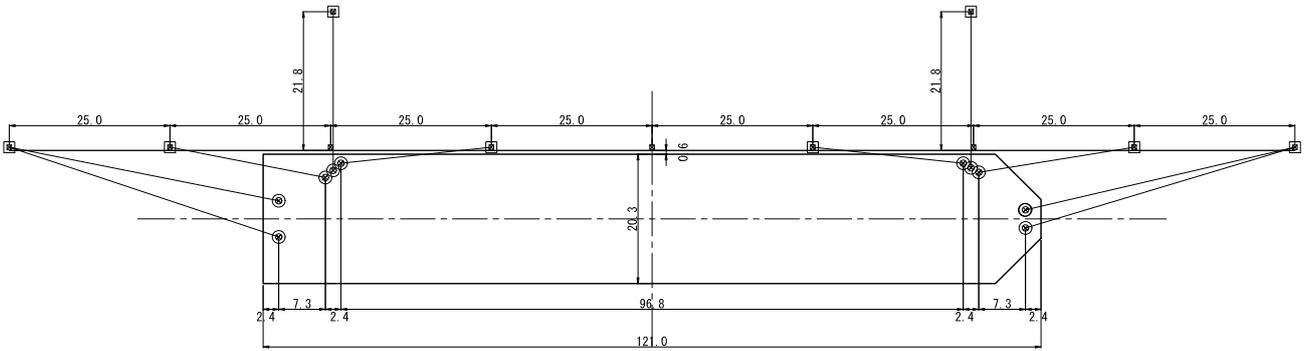


図-E.5 係留索の配置 (5,000GT, 係留配置3)

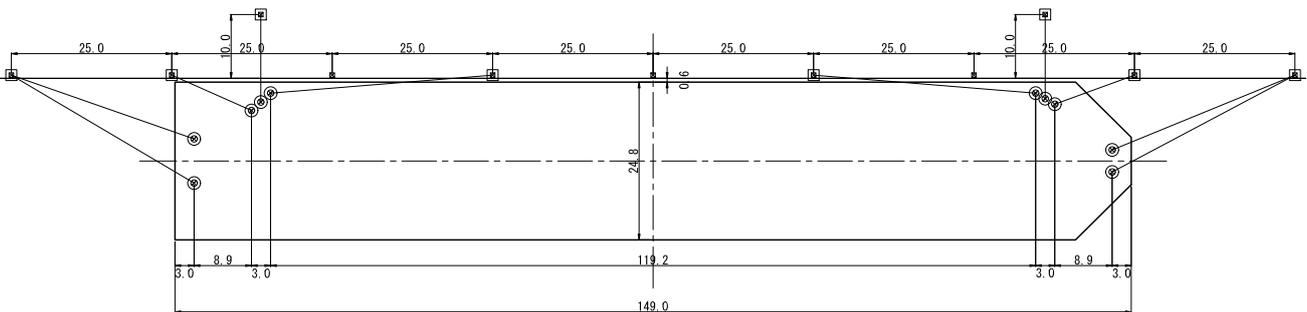


図-E.6 係留索の配置 (10,000GT, 係留配置3)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

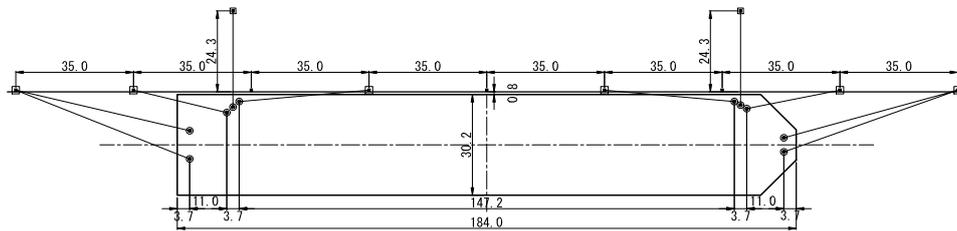


図-E.7 係留索の配置 (20,000GT, 係留配置3)

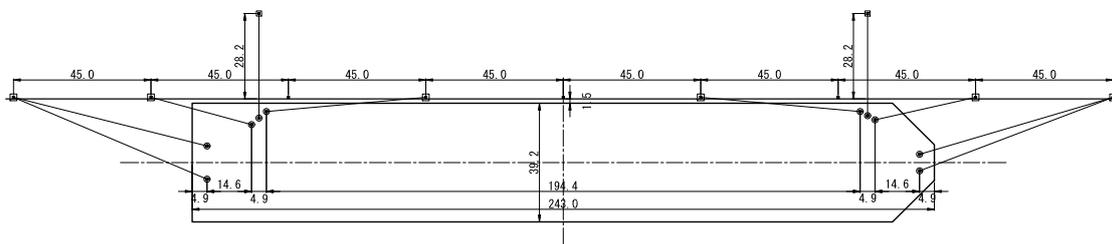


図-E.8 係留索の配置 (50,000GT, 係留配置3)

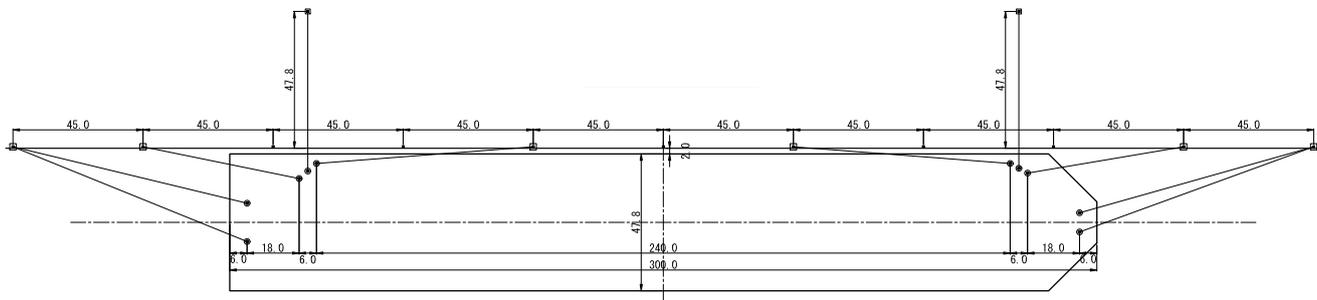


図-E.9 係留索の配置 (100,000GT, 係留配置3)

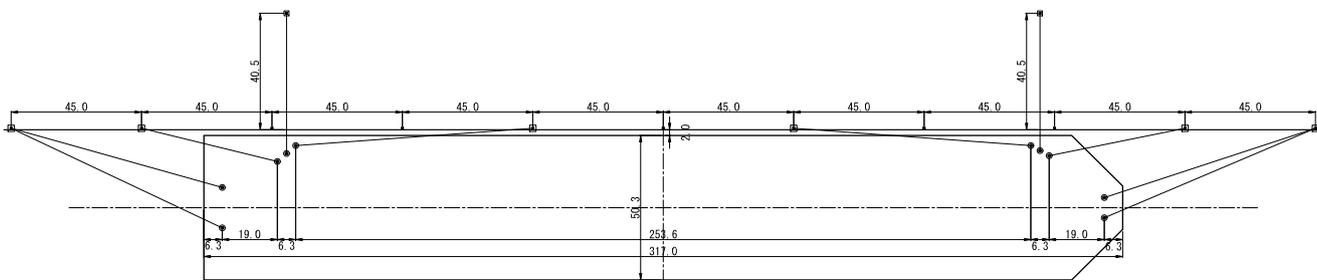


図-E.10 係留索の配置 (120,000GT, 係留配置3)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)

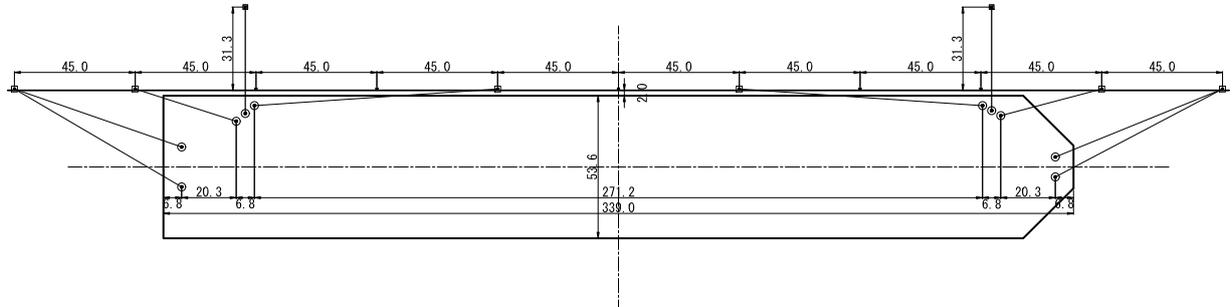


図-E.11 係留索の配置 (150,000GT, 係留配置3)

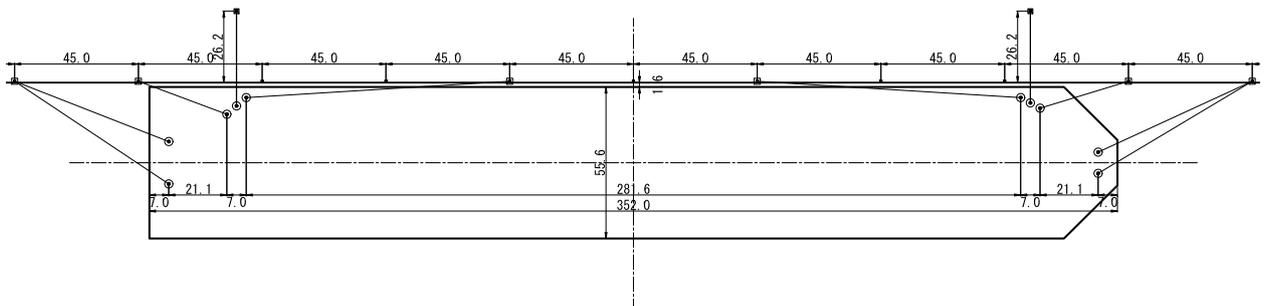


図-E.12 係留索の配置 (170,000GT, 係留配置3)

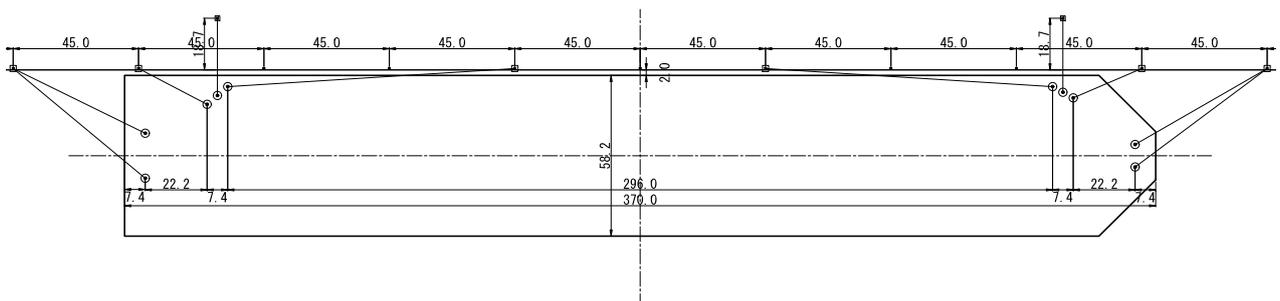


図-E.13 係留索の配置 (200,000GT, 係留配置3)

(単位 : m, 小数第2位を四捨五入)