

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1169

September 2021

風・流れによる船舶牽引力の評価への 静的釣合い計算の適用性検討

宮田正史・米山治男・柴下達哉
平田悠真・佐々木宏和・竹信正寛

Applicability of Calculation Method based on Static Equilibrium
to the Evaluation of Ship Tractive Force due to Wind and Current

MIYATA Masafumi, YONEYAMA Haruo, SHIBASHITA Tatsuya
HIRATA Yuma, SASAKI Hirokazu, TAKENOBU Masahiro

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

風・流れによる船舶牽引力の評価への静的釣合い計算の適用性検討

宮田正史*・米山治男**・柴下達哉***
平田悠真****・佐々木宏和*****・竹信正寛*****

要 旨

港湾基準における船舶の牽引力は、貨物船を対象にした風に対する船体の動揺解析（動的解析）により、係船柱に作用する牽引力の算定結果を求め、船型ごとに標準値として設定されている。一方、近年、外航船の大型化傾向に伴い、岸壁設計当初に想定していた船種・船型と異なる船舶が着岸する機会が増えてきている。また、津波来襲時に港外退避できない船舶の係留避泊の安全性を高めるための検討も進められている。風や津波に対する係留船舶の動的解析を行う際には、動的解析に関する専門的知識が要求され、船舶諸元や係船索の配置状況など詳細な解析条件を設定しなければならないため、容易に実施することは難しい。このような背景から、船種・船型や係留方法等に応じて、風や津波に対する船舶牽引力を動的解析によらず簡単に評価できる手法が必要とされている。

本検討では、この課題に対して、船体に作用する風や津波による荷重と係船索による牽引力との静的釣合いに基づく簡易的な手法（以下、簡易法）を提案し、その適用性を確認した。風に対する検討は、岸壁側から船体側面（船側）に垂直に当たる条件を対象として、既往の動的解析（港空研資料No.1341）による最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、簡易法の適用性を確認した。また、津波に対する検討は、津波を流れとして考え、流れが風の検討と同じ船側方向から作用する条件に加え、船首尾方向から作用する場合も対象とし、既往の水理模型実験（港空研資料No.1213）および既往の動的解析から得られた牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、同じく簡易法の適用性を確認した。

これらの確認の結果、船体に風や津波が船側方向に作用した際の最大牽引力（動的な影響が考慮された牽引力）は、簡易法による牽引力に一定の倍率を乗じることで、推定可能であることを示した。

キーワード：係留船舶，牽引力，静的解析，動的解析，風，津波

* 港湾研究部港湾施設研究室 室長
** 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 海洋利用研究領域 領域長
*** 前 港湾研究部港湾施設研究室 交流研究員（㈱日本港湾コンサルタント）
**** 港湾研究部
***** 港湾研究部 主任研究官

Applicability of Calculation Method based on Static Equilibrium to the Evaluation of Ship Tractive Force due to Wind and Current

MIYATA Masafumi*
YONEYAMA Haruo**
SHIBASHITA Tatsuya***
HIRATA Yuma****
SASAKI Hirokazu****
TAKENOBU Masahiro*****

Synopsis

Generally, dynamic analysis of moored ships is performed to provide a precise evaluation of ship tractive force under wind and tsunami conditions; however, such analysis is not easy to perform because it requires an expert knowledge of the dynamic analysis process. Therefore, there is a practical need for a method that enables evaluation of ship tractive force against wind and tsunami without having to perform dynamic analysis.

In this study, a simple method based on the static equilibrium between the load caused by wind or tsunami acting on the hull and the tractive force caused by mooring ropes was proposed to solve this problem, and the applicability of the proposed method confirmed. Confirmation of the applicability of the proposed method was validated by comparing the maximum tractive force of past dynamic analysis results (Technical Note of the Port and Airport Research Institute, No. 1341) and the tractive force by the proposed method under the condition of the wind acting on the side of the ship vertically (side direction of ship) from the quay side. Confirmation of applicability of the method was also validated for tsunami current acting on the ship in both the side direction and bow and stern directions of the ship. For tsunami, the tractive force calculated using the proposed method was compared with the maximum tractive forces of the results of past dynamic analysis and the results of past hydraulic model experiments (Technical Note of the Port and Airport Research Institute, No. 1213).

As a result, it was demonstrated that the maximum tractive force due to wind or tsunami current in the side direction of the ship, which takes into account the dynamic effects of wind or tsunami on a ship, can be estimated by multiplying the tractive force calculated using the proposed method by a certain coefficient.

Key Words: Moored ship, Tractive force, Static analysis, Dynamic analysis, Wind, Tsunami current

- * Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
- ** Director, Coastal and Ocean Development Department, Port and Airport Research Institute
- *** Ex-Visiting Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(Japan Port Consultants, Ltd.)
- **** Port and Harbor Department, NILIM
- ***** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM

目 次

1. はじめに	1
2. 船舶牽引力の算定手法	1
2.1 概要	1
2.2 動的解析による船舶牽引力の算定方法	1
2.3 静的解析による船舶牽引力の既往算定方法	3
2.4 静的解析による船舶牽引力の算定方法（簡易法）	5
3. 風に対する簡易法と動的解析による牽引力の比較	9
3.1 比較検討の概要	9
3.2 比較検討の条件	9
3.3 比較検討の結果と考察	11
4. 流れに対する簡易法と動的解析および水理模型実験による牽引力の比較	16
4.1 比較検討の概要	16
4.2 簡易法と動的解析による牽引力の比較	16
4.2.1 比較検討の条件	16
4.2.2 比較検討の結果と考察	17
4.3 簡易法と水理模型実験による牽引力の比較	20
4.3.1 比較検討の条件	20
4.3.2 比較検討の結果と考察	22
5. おわりに	23
謝辞	24
参考文献	24
付録A1 風に対する簡易法を適用した計算事例（船側方向）	25
付録A2 流れに対する簡易法を適用した計算事例（船側方向）	27
付録A3 流れに対する簡易法を適用した計算事例（船首尾方向）	30
付録B 貨物船の係船索配置に関する詳細情報（3章の解析条件）	32
付録C コンテナ船の係船索配置に関する詳細情報（4.2の解析条件）	35
付録D 貨物船の係船索配置に関する詳細情報（4.3の解析条件）	37

1. はじめに

港湾基準（港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾）における船舶の牽引力は、貨物船を対象にした風に対する船体の動揺解析（動的解析）により、係船柱に作用する牽引力を算定した結果をもとに、船型ごとに標準値として設定されている²⁾。一方、近年、外航船の大型化傾向に伴い、岸壁設計当初に想定していた船種・船型と異なる船舶が着岸する場合が増えてきている。また、津波来襲時に港外退避できない船舶の係留避泊の安全性を高めるための検討も進められている³⁾。風や津波に対する係留船舶の動的解析を行う際には、動的解析に関する専門的知識が要求され、船舶諸元や係船索の配置状況など詳細な解析条件を設定しなければならないため、容易に実施することは難しい。このような背景から、船種・船型や係留方法等に応じて、風や津波に対する船舶による牽引力（船舶牽引力）を動的解析によらず簡単に評価できる手法が必要とされている。

本検討では、この課題に対して、船体に作用する風や津波による荷重と係船索で発生する張力との静的釣合いに基づく簡易的な手法（以下、簡易法）を提案し、その適用性の確認を目的とした。風に対する検討は、岸壁側から船体側面に垂直に当たる条件（船側方向）を対象として、既往の動的解析²⁾（港空研資料 No.1341）による最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、簡易法の適用性を確認する。また、津波に対する検討は、津波を流れとして捉え、流れが風の検討と同じ船側方向から作用する条件に加え、船首尾方向から作用する場合も対象とし、既往の水理模型実験⁴⁾（港空研資料 No.1213）および既往の動的解析（国土交通省委員会資料⁵⁾）から得られた最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、同じく簡易法の適用性を確認する。

なお、本資料では、1本または複数の係船索が1基の係船柱に掛けられている状態において、係船柱に作用する係船索張力の合力を「牽引力」または「船舶牽引力」と呼称する。このため、係船柱に掛かる係船索が1本の場合には、係船索張力と牽引力（船舶牽引力）は同じ荷重を意味する。

2. 船舶牽引力の算定手法

2.1 概要

本章では、船舶牽引力の算定手法として、動的解析および静的釣合いに基づく手法の概要を紹介する。動的解析については、既往の動的解析（港空研資料No.1341²⁾、

港空研資料No.1213⁴⁾）に基づく手法の概要を紹介する。静的釣合いに基づく手法については、既存の手法（港研資料No.102⁶⁾、港研資料No.427⁷⁾）と新たに提案する簡易法の内容を説明し、既存の手法と提案手法との相違点を示す。

2.2 動的解析による船舶牽引力の算定手法

本節では、風荷重に対する船舶牽引力の比較対象である港空研資料No.1341²⁾に基づき、動的解析による牽引力の算定手法の概要を紹介する。ただし、流れに対する動的解析では幾つかの相違点があるため、その点については港空研資料No.1213⁴⁾に基づき、説明を追加している。なお、一部の記号は本論文での定義に従うとともに、単位はSI単位系に変換している。算定手法の詳細については、以上に示した文献を参照されたい。

(1) 運動方程式と解析の概要²⁾

係留船舶の動的解析では、船舶を剛体として仮定し、船舶の動揺6成分の運動方程式を時系列的に数値積分して計算する。なお、図-2.1に動揺6成分の呼称を示す。本資料では、船体動揺の船首尾方向（図中のサージ成分）をx方向、船体動揺の船側方向（図中のスウェイ成分）をy方向とする。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(1)のように表される²⁾。

$$[M + m(\omega_0)]\ddot{x} + N(\omega_0)\dot{x} + Bx + R(x) = F \cdots(1)$$

ここで、 M は船体の質量・慣性モーメントマトリクス、 $m(\omega_0)$ は船体の付加質量・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、 $R(x)$ は係船索張力・防舷材反力ベクトル、 F は風荷重ベクトルまたは流れ荷重ベクトル、 x は船体の動揺変位ベクトル（6成分）、 \dot{x} は船体の動揺速度ベクトル（6成分）、 \ddot{x} は船体の動揺加速度ベクトル（6成分）である。なお、粘性抵抗力は一般的に考慮しない。

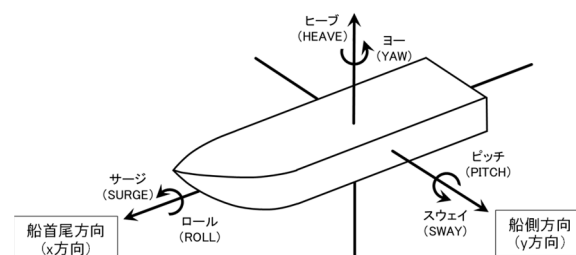


図-2.1 船体の運動成分²⁾

次に、式(1)の左辺の各項を説明する。なお、右辺については、(3)および(4)にて説明する。

左辺の第1項 ($[M + m(\omega_0)]\ddot{x}$) は、船体の慣性力である。質量および慣性モーメントとしては、船体の質量・慣性モーメントに加えて、船体の加速度に比例して船体に作用する流体力の効果として付加質量・付加慣性モーメントを考慮している。左辺の第2項 ($N(\omega_0)\dot{x}$) は、船体が動揺することに伴い船体に作用する造波抵抗力である。造波抵抗力は、船体速度に比例するものとして考慮される。左辺の第3項 (Bx) は、船体と水面との相対位置によって決まる静水圧による復元力である。左辺の第4項 ($R(x)$) は、船体の岸壁からの位置によって決まる船体に作用する係船索からの張力および防舷材からの反力である。

ここで、左辺第1項と第2項における船体の付加質量・付加慣性モーメントと造波減衰係数について説明を加える。これらの係数は流体力係数と呼ばれ、その設定方法として一定係数法と遅延関数法の2種類の方法がある。風に対する既往の動的解析(港空研資料 No.1341²⁾)では、一定係数法が採用されている。一方、津波に対する既往の動的解析(港空研資料 No.1213⁴⁾)では遅延関数法が採用されている。遅延関数法では、流体力にメモリー効果(ある計算時点における船体による造波が、それ以前の時間に発生した波の影響を受けること)を考慮しているため、流体力の計算方法としては、遅延関数法のほうが一定係数法よりも精度が良い。

(2)係船索および防舷材の特性

動的解析の実施にあたっては、式(1)の左辺第4項 ($R(x)$) に対応する、船体変位に応じて発生する係船索の張力の特性および防舷材の反力特性(変位復元力特性)の設定が必要となる。以下、既存の設定手法の概要を示す²⁾。

係船索については、張力と伸び率との非線形な関係を考慮している。港空研資料No.1341²⁾では、適用する係船索をナイロンエイトロープとし、その張力と伸び率の関係(張力特性)として、繊維ロープメーカーA社のカタログに掲載されているロープの張力特性が採用されている。図-2.2は、ナイロンエイトロープ(径12.5 mm)の張力特性を示したものである。この図では、縦軸は係船索の張力、横軸は伸び率(張力作用前後の係船索長さの増分を、初期長さで除したものを示している。本係船索の破断荷重は、34.0 kNである。なお、これと異なる係船索の場合は、各係船索の破断荷重を、本図に示されている破断荷重(34.0 kN)に入れ替えることにより、当該係船索の張力特性を設定している。

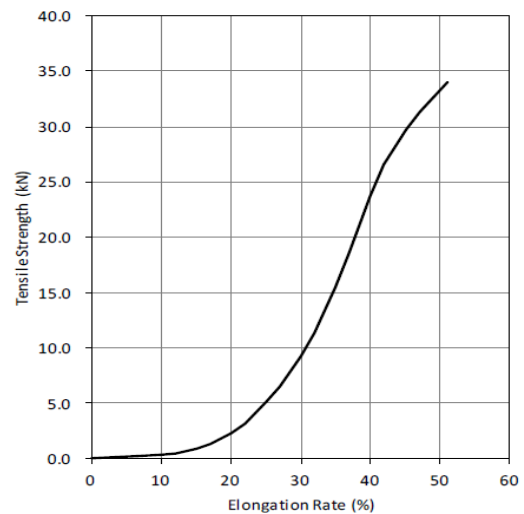


図-2.2 ナイロンエイトロープの張力と伸び率との関係²⁾

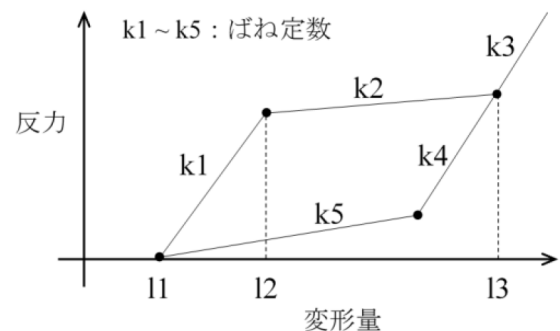


図-2.3 防舷材の変位復元力特性のモデル化²⁾

防舷材については、図-2.3に示すような座屈型の防舷材の変位復元力特性を採用している。これは、実際の防舷材の履歴を有する非線形な変位復元力特性を線形化したものである。防舷材の圧縮時は、初期勾配 (k_1) のあと第2勾配 (k_2) を経て、設計反力を越える場合には第3勾配 (k_3) に従うとしている。除荷時には、第1勾配と同じ勾配である第4勾配 (k_4) に従い反力は低減するとしている。ただし、反力が小さくなると最後は第5勾配 (k_5) で原点に戻るとしている。なお、岸壁側からの船側方向の風のみを考える場合で、風速が大きい場合には、船体は防舷材から離れてしまうため、船体は防舷材に接触することはなく、防舷材の反力特性は船体動揺や牽引力の評価に影響しない。

(3) 船体に作用する風荷重の設定²⁾

次に、式(1)の右辺 (F) に関して、風の場合について説明する。右辺は、喫水面より上方の船体に作用する風による荷重(風荷重)であり、時系列として与えられる。

船体に作用する風荷重は、以下に示す算定式から算出する。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_x C_{F_x} \dots\dots\dots (2-a)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_y C_{F_y} \dots\dots\dots (2-b)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_y L_{pp} C_{F_M} \dots\dots\dots (2-c)$$

ここで、 F_x は船体に作用する風荷重合力の船首尾方向 (x 方向) 成分 (kN)、 F_y は船体に作用する風荷重合力の船側方向 (y 方向) 成分 (kN)、 F_M は船体に作用する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 (kN・m)、 ρ_a は空気の密度 (t/m³)、 U は変動風速 (m/s)、 A_x は船体の水面上正面投影面積 (m²)、 A_y は船体の水面上側面投影面積 (m²)、 C_{F_x} は船体の船首尾方向 (x 方向) の風抗力係数、 C_{F_y} は船体の船側方向 (y 方向) の風抗力係数、 C_{F_M} は船体のミッドシップ (船体中央) 回りの風圧モーメント係数、 L_{pp} は垂線間長 (m) である。

なお、船体に作用する風荷重を計算するために必要となる風速は、ダベンポート (Davenport) 型の風速スペクトルを用いて、変動風 (不規則に変動する風速) として与えられる。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。

(4) 船体に作用する流れ荷重の設定⁴⁾

本項では、式(1)の右辺について、流れ荷重の場合について説明する。右辺は、流れにより喫水面より下方の船体に作用する流れ荷重であり、時系列として与えられる。

船体に作用する流れ荷重は、モリソン式を用いて、船首尾方向は式(3-a)により、船側方向は式(3-b)により算定する。

(船首尾方向)

$$R_x = 0.0014 S_x V_x |V_x| + (M + m_x) \frac{\partial V_x}{\partial t} \dots\dots\dots (3-a)$$

(船側方向)

$$R_y = \frac{1}{2} \rho_w C_y S_y V |V| + (M + m_y) \frac{\partial V_y}{\partial t} \dots\dots\dots (3-b)$$

ここで、 R_x は船体に作用する流れ荷重合力の船首尾方向 (x 方向) 成分 (kN)、 R_y は船体に作用する流れ荷重合力の船側方向 (y 方向) 成分 (kN)、 S_x は船体の浸水面積 (m²)、 S_y は船体の喫水面下の側面投影面積 (m²)、 ρ_w は海水の密度 (t/m³)、 V は x 、 y 方向の流速を合成した流速 (m/s)、 V_x は流速の x 方向成分 (m/s)、 V_y は流速の y 方向成分 (m/s)、 C_y は船体の船側方向 (y 方向) の流圧力係数、 M は船体の質量、 m_x は船体の船首尾方向 (x 方向) の付加質量、 m_y は船体の船側方向 (y 方向) の付加質量、である。

なお、船体に作用する津波による流れ荷重を計算するために必要となる流速は、港空研資料No.1213⁴⁾では水理模型実験での流況を再現するために、下式に示すような規則波に基づく往復流として設定されている。

$$v(t) = V_{max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $v(t)$ は津波の流速 (m/s)、 t は時間 (s)、 V_{max} は往復流の最大流速 (m/s)、 T は津波 (往復流) の周期 (s)、を表す。なお、水位の変動は、港空研資料No.1213⁴⁾における動的解析では、水理模型実験で水位変動を発生させていないことから、ゼロとしている。

2.3 静的解析による船舶牽引力の既往算定手法

本節では、風や流れに対する船舶牽引力を静的な力の釣合い計算に基づき算定する既往の手法について説明する。既往の手法は、港研資料 No.102⁶⁾および港研資料 No.427⁷⁾を対象とする。

(1) 港研資料No.102⁶⁾

港研資料No.102による牽引力の算定方法については、港研資料No.427においてその基本的な考え方と利用方法が整理されているため、港研資料No.427の記述を参考にポイントを述べる。なお、港研資料No.102では、風と潮流の両者を考慮し、船側方向と船首尾方向の両方向にも適用できる手法として提案されているが、港研資料 No.427では船側方向の風に特化した解説がなされているため、本節でも船側方向の風に対する手法として解説する。なお、以下に示す記号は本論文での定義に従っており、単位はSI単位系に変換している。

本手法では、船舶に作用する外力として、空載時の風圧力を考えておけば、おおむね危険な外力状態を想定したこととなり、それをもとに船舶の牽引力の計算を行っても良いとしている。そして、船体に作用する風荷重を

2本の係船索（2基の係船柱）で受け持つとし、静的な計算を行い（図-2.4），得られた係船索張力を牽引力（係船索1本の張力）としている。船側から作用する風による荷重 F_y は、前述した式(2-b)に従い算定することができる。

船体に作用するこの風荷重を用いることにより、係船柱に作用する牽引力は下式で算定される。

$$T = \frac{1}{2} F_y \frac{1}{\sin \theta \cdot \cos \alpha} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 T は係船柱に作用する牽引力（係船索1本の張力）（kN）， θ は係留角度（係船索と岸壁法線との狭角）， α は仰角（係船索が水平面となす角度）である。

この手法の特徴は、係留角度（ θ ）と仰角（ α ）を与条件としている点にある。この条件と船側方向の風荷重や流れ荷重が分かれば、牽引力を簡単に算定することができる。ただし、船舶の係留後に、海側への強い風や流れなどが発生すると、係船索が伸長し、船体が岸壁から離れ、両者の角度は変化するが、その影響は考慮することができない。また、異なる長さの係船索が多数配置されている場合には、各係船索の初期長さや配置に応じて、船体に作用している荷重が各係船索に分担されるが、その影響も考慮することができない。

(2) 港研資料No.427

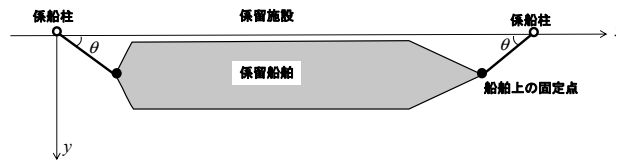
港研資料No.427では、2.2に示した動的解析を行うとともに、同じ計算条件下での静的計算も行い、両者の比較も実施している。以下、港研資料No.427の「6.2 船舶のけん引力の静的計算」に従い、静的計算の手法を紹介する。なお、記号は本論文での定義に従っている。

船側から作用する風荷重は、前述した式(2-b)に従い算出する。各係船索の張力は、係船索の弾性変形を考慮（係船索の張力特性における非線形性は考慮しない）した静的計算により算定している。さらに、静定的に解くために計算を単純化している。具体的には、船首側と船尾側において係船索が対称に係留されていると仮定し、外力は船側方向のみに働く力を考慮し、モーメント成分は無視している。計算式は、以下のとおりである。

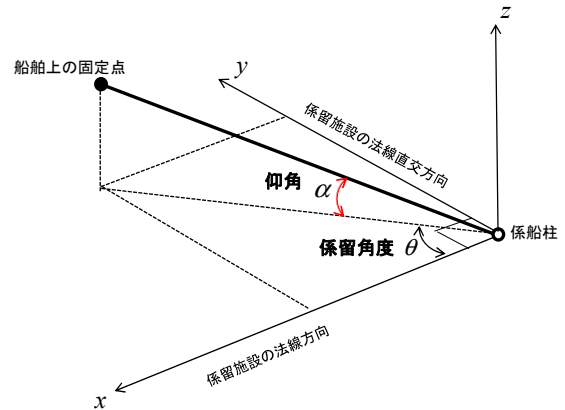
$$F = \sum T_i \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i \quad \dots \dots \dots (6-1)$$

$$T_i = k_i \cdot \Delta l_i \quad \dots \dots \dots (6-2)$$

$$F = \sum k_i \cdot \Delta l_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i \quad \dots \dots \dots (6-3)$$



(a)係留角度 θ （係船索と岸壁法線との狭角）



(b)仰角 α （係船索が水平面となす角度）

図-2.4 牽引力の算定時の条件⁶⁾

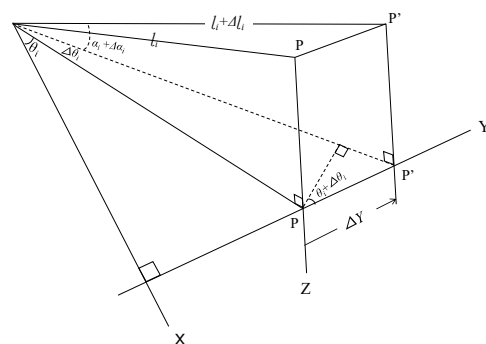


図-2.5 静的な係船索張力の計算⁷⁾

ここで、 F は船体に作用する風荷重、 T_i は係船索 i の張力、 θ_i は係船索 i における係留角度（係船索と岸壁法線との狭角）、 α_i は係船索 i における仰角（係船索が水平面となす角度）、 k_i は係船索 i のばね定数、 Δl_i は船体への荷重作用後の係船索 i の伸び量である。

さらに、港研資料No.427では、以下の仮定を置き、各係船索の張力を近似的に算定している。具体的には、船体が船側方向（ y 方向）へ ΔY だけ変位したとし、 ΔY が微小で、現地調査の結果より仰角 $\alpha_i = 10^\circ \sim 20^\circ$ とすれば、図-2.5より各係船索の張力は式のとおり算定できるとしている。

$$\Delta t_i \approx \Delta Y \sin \theta_i \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

$$\begin{aligned} T_i &= k_i \cdot \Delta t_i \approx k_i \Delta Y \sin \theta_i \\ &= k_i \frac{F}{\sum k_i \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \cos \alpha_i} \sin \theta_i \\ &\approx k_i \frac{F}{\sum k_i \cdot \sin^2 \theta_i} \sin \theta_i \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

本手法の特徴は、船体に作用する荷重を、複数の係船索の各種条件（ばね定数、係留角度（θ）、仰角（α））に応じて、各係船索への張力分担を算定できる点にある。また、港研資料No.102の方法では考慮できなかった、船体変位に伴い係船索が伸長し、船体が岸壁から離れることによる、係留角度および仰角の変化の影響も考慮できる。ただし、本手法では係船索の荷重変位特性における非線形性は考慮できない。また、式（6-4）および式（6-5）による近似を前提としているため、仰角が大きい場合など幅広い係船索の配置には対応できない。

2.4 静的解析による船舶牽引力の算定手法（簡易法）

(1) 簡易法の骨子

本資料にて提案する簡易法は、2.3 で示した静的な力の釣合い計算に基づく手法に分類される。ここで、簡易法において静的に力が釣合っている状態とは、風または流れから船体を受ける荷重によって船体が初期位置から当該荷重の作用方向に直線的に変位すると仮定し（1自由度を仮定）、その際に各係船索の伸びにより発生する各係船索張力の荷重作用方向成分の合力と船体に作用する荷重とが同値である（釣合う）状態を示している。

図-2.6 に簡易法による船舶牽引力の算定方法のイメージを示す。この図は、係留船舶に対して、岸壁側から

船側方向に風や流れが作用した際に、船体が流下方向（y方向）に直線的に移動している状況を示している。簡易法では、船体を流下方向に徐々に強制変位させて、船体に作用する荷重と係船索の張力が釣合う状態を探索することにより、各係船索の張力を求めることができる。なお、係船索の張力特性としては、図-2.2 に示したように任意の非線形な張力と伸び率の関係を考慮することができる。また、係船索の配置や本数なども任意に設定することができる。

(2) 簡易法による各係船索の張力の算定方法

1) 岸壁側から船側方向の風を受ける場合

図-2.7 に簡易法による各係船索の張力の算定手順を示す。この算定手順は、風が岸壁側から船側面に対して垂直方向に作用する場合を対象としている。なお、具体的に船舶諸元等を設定し、風に対する簡易法を適用した計算事例を付録 A1 に添付しているので、参考にされたい。

まず始めに各種の計算条件を設定する（①）。外力条件としては、牽引力を算定したい風速を設定する。船舶条件としては、式（2-b）に基づき船側方向の風荷重を算定するためのパラメータである、水面上側面投影面積および風抗力係数を設定する。係留条件については、図-2.6 に示すように、初期状態における船体と係船索や係船柱との位置関係（平面位置および鉛直高さ）を設定する。なお、各係船索は、係船柱の位置と船上の位置の両端で固定されているものとし、船体が移動してもそれらの固定条件は保たれたままと仮定する。また、初期状態における両固定点間の長さを初期の係船索長とする。そして、係船索条件については、図-2.2 に示したような係船索の張力特性を設定する。

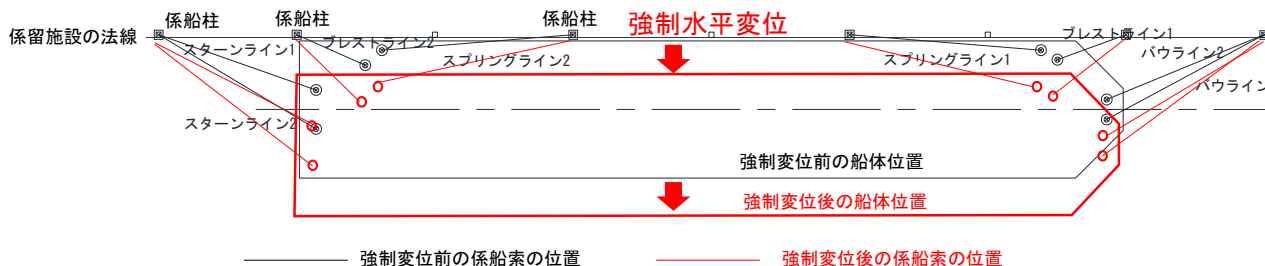


図-2.6 簡易法による船舶牽引力の算定方法のイメージ（船側から風または流れの作用を受ける場合）

次に、船体に作用する風荷重を計算する(②)。風荷重は、式(2-b)に基づき算定する。この風荷重が、静的な釣合い状態を探索するための与条件となる。

これ以降は、船体への強制変位(ΔY)を段階的に増加させていくことになる(③~⑤)。強制変位の方法は、風下方向(岸壁側から海側)に向かって直線であると仮定する。すなわち、船体の自由度は船側方向(y方向)の1方向のみとする。その条件下では、図-2.8に示すとおり、強制変位(ΔY)に伴い各係船索iの索長も長くなり(初期の係船索長 l_{0i} から l'_{0i} へ変化)、その増分 Δl_{0i} は式(7-1)~式(7-3)に示すとおり、幾何学的な関係から計算することができる。そして、式(7-4)に示す係船索の伸び率 $\varepsilon_i(\Delta Y)$ から、係船索の張力と伸び率との関係を用いて、各係船索の張力 T_i を算定することができる。

$$l_{0i} = \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2 + z_{0i}^2} \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

$$l'_{0i} = \sqrt{x_{0i}^2 + (y_{0i} + \Delta Y)^2 + z_{0i}^2} \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

$$\Delta l_{0i} = l'_{0i} - l_{0i} \quad \dots\dots\dots (7-3)$$

$$\varepsilon_i(\Delta Y) = \frac{l'_{0i} - l_{0i}}{l_{0i}} = \frac{\Delta l_{0i}}{l_{0i}} \quad \dots\dots\dots (7-4)$$

ここに、 ΔY : 船体に与える船側方向(y方向)の強制変位、 x_{0i} : 係船索iの固定点間(係船柱および船上)の船首尾方向(x方向)の距離、 y_{0i} : 係船索iの固定点間(係船柱および船上)の船側方向(y方向)の距離、 z_{0i} : 係船索iの固定点間(係船柱および船上)の鉛直方向(z方向)の距離、 l_{0i} : 係船索iの初期の係船索長、 l'_{0i} : 係船索iの船体の強制変位後の係船索長、 Δl_{0i} : 係船索iにおける船体の強制変位前後の係船索長の増分、 $\varepsilon_i(\Delta Y)$: 係船索iにおける船体強制変位後の係船索の伸び率、である。

次に、強制変位後の各係船索と係船柱との位置関係から、各張力の船体変位方向成分の張力 T_{yi} および全係船索の同方向成分の合力 T_y を、式(7-5)から式(7-10)を用いて計算することができる(④)。まず、 T_{yi} を算定するため、船体の強制変位後の各係船索iにおける係留角度 θ'_i (係船索と岸壁法線との狭角)と仰角 α'_i (係船索が水平面となす角度)を式(7-5)から式(7-7)を用いて算定する。

$$\sin(\theta'_i) = \frac{y_{0i} + \Delta Y}{l'_{0hi}} \quad \dots\dots\dots (7-5)$$

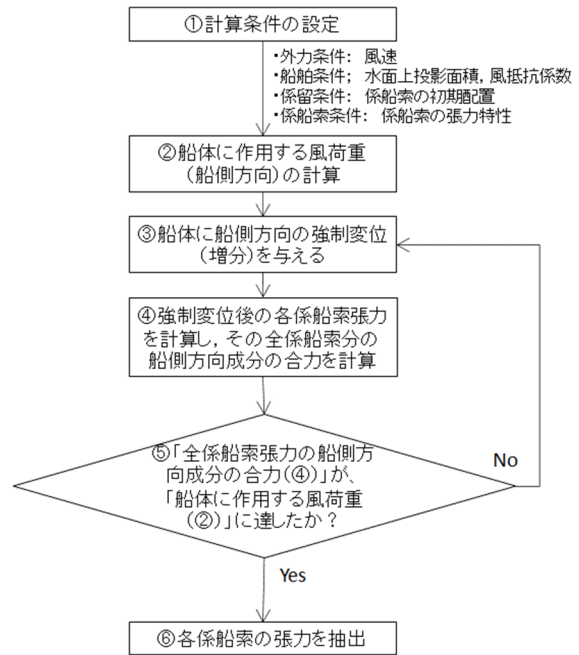
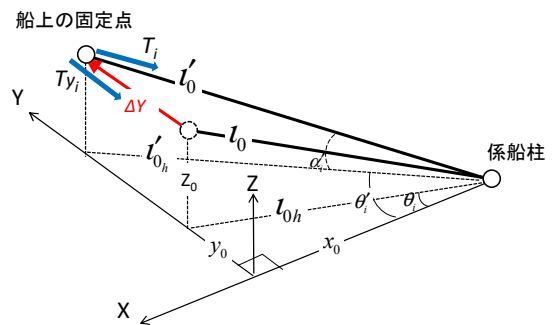


図-2.7 簡易法による各係船索の張力の算定手順



(図中の一部の記号は、添え字iを省略して記載している)

図-2.8 船体への強制変位前後の係船索位置の変化

$$\cos(\alpha'_i) = \frac{l'_{0hi}}{l'_{0i}} \quad \dots\dots\dots (7-6)$$

$$l'_{0hi} = \sqrt{x_{0i}^2 + (y_{0i} + \Delta Y)^2} \quad \dots\dots\dots (7-7)$$

ここに、 θ'_i : 船体の強制変位後の各係船索iにおける係留角度 θ'_i (係船索と岸壁法線との狭角)、 α'_i : 船体の強制変位後の各係船索iにおける仰角(係船索が水平面となす角度)、 l'_{0hi} : 船体の強制変位後の各係船索iを水平面(xy平面)に投影した長さ、である。

次に、式(7-5)および式(7-6)を用いて、下式(7-8)より各係船索に作用する張力の水平方向成分 T_{hi} を求める。さらに、式(7-9)により T_{hi} のy方向(船側方向)成分 T_{yi} を求める。

以上の結果から、係船索の本数が N 本である場合、船体変位 (ΔY) に伴い発生する全係船索の張力の船側方向 (y 方向) 成分の合計値 T_y は、式(7-10)より求めることができる。

$$T_{h_i} = T_i \cos \alpha_i \quad \dots\dots\dots (7-8)$$

$$\begin{aligned} T_{y_i} &= T_{h_i} \sin \theta_i \quad \dots\dots\dots (7-9) \\ &= T_i \sin \theta_i \cos \alpha_i \end{aligned}$$

$$T_y = \sum_{i=1}^N T_{y_i} \quad \dots\dots\dots (7-10)$$

ここに、 T_{h_i} : 係船索 i に作用する張力の水平方向成分、 T_{y_i} : T_{h_i} の船側方向 (y 方向) 成分、 T_y : 全係船索 (N 本) の張力の船首尾方向 (x 方向) 成分の合計値、である。

このようにして算定した係船索張力の船側方向 (y 方向) の合計値 T_y が、静的釣合いの与条件である船体に作用する風荷重と釣合うまで船体変位を増加させる(⑤)。そして、釣合い条件に達した状態で、所与の風速に対する各係船索の張力が算定されることになる(⑥)。

2) 岸壁側から船側方向の流れを受ける場合

岸壁側から船側方向の流れを受ける場合も、1)の風の場合と同じ手法で各係船索の張力を算定することができる。以下、風の場合とは異なる点のみ説明する。なお、具体的に船舶諸元等を設定し、船側方向の流れに対する簡易法を適用した計算事例を付録 A2 に添付しているので、参考にされたい。

まず、船体に作用する流れ荷重を算定するためのパラメータが必要となる。具体的には、張力を算定したい流速、および下式(8)に基づき船側方向の流れ荷重を算定するためのパラメータである、船体の水面下側面投影面積

S_y および流圧力係数 C_y の設定が必要となる。なお、式(8)は、モリソン式に基づく式 (3-b) において、流れの加速度に応じて発生する荷重 (第 2 項) を考慮せず、一定速度の流れに対する荷重 (第 1 項) のみを考慮したものである。なお、静的解析では、流岸壁から船体に向かう船側方向の定常流を対象とするため、式(8)では船側方向 (y 方向) に限定した流れ荷重の算定式としている。

(船側方向)

$$R_y = \frac{1}{2} \rho_w C_y S_y V_y^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 R_y は船体に作用する流れ荷重の船側方向 (y 方向) 成分 (kN)、 S_y は船体の喫水面下の側面投影面積 (m^2)、 ρ_w は流体の密度 (t/m^3)、 V_y は船側方向 (y 方向) の流速 (m/s)、 C_y は船体の船側方向 (y 方向) の流圧力係数、である。

3) 船首尾方向から流れを受ける場合

船首尾方向から流れを受ける場合も、1)の風の場合と同じ手法で各係船索の張力を算定することができる。以下、風の場合とは異なる点のみ説明する。なお、具体的に船舶諸元等を設定し、船首尾方向の流れに対する簡易法を適用した計算事例を付録 A3 に添付しているので、参考にされたい。

船首尾方向の流れに対する、簡易法による牽引力の算定イメージを図-2.9 に示す。図は、係留船舶に対して、船尾方向に流れが作用した際に、船体が流下方向 (船首尾方向、 x 方向) に直線的に移動している状況を示している。船側方向からの風や流れと同様に、船体を流下方向に徐々に強制変位をさせて、船体に作用する荷重と係船索の張力が釣合う状態を探索することにより、各係船索の張力を求めることができる。ただし、図中に示すと

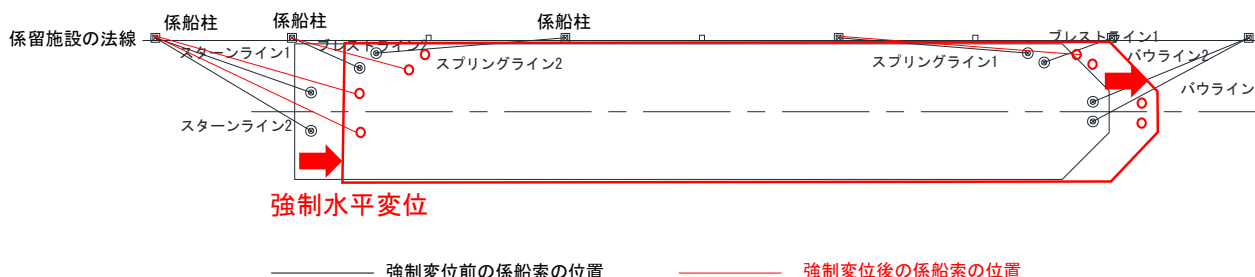


図-2.9 簡易法による船舶牽引力の算定方法のイメージ (船首尾方向から流れの作用を受ける場合)

り、船首尾方向に船体が移動した場合は、係船索の配置方向によっては、係船索長が伸びて張力が増加するものと、係船索が緩む方向で張力が作用しなくなるものとに分かれる。図の場合、船尾側（図面の左側）の3本の係船索（スターンライン1、スターンライン2、プレストライン2）と船首側（図面の右側）の1本の係船索（スプリングライン1）の合計4本のみで、船体に作用する流れ荷重を負担することになる。この点が、船側方向から流れを受ける場合とは異なる点である。

また、船首尾方向の流れ荷重を算定するためのパラメータが必要となる。具体的には、張力を算定したい流速、および式(9)に基づき船首尾方向に作用する流れ荷重を算定するためのパラメータである、船体の浸水面積 S_x の設定が必要となる。なお、下式は、モリソン式に基づく式(3-a)において、流れの加速度に応じて発生する荷重(第2項)を考慮せず、一定速度の流れに対する荷重(第

1項)のみを考慮したものである。なお、静的解析では、流速は船首尾方向の定常流を対象とするため、下式では x 方向(船首尾方向)に限定した荷重算定式となっている。

(船首尾方向)

$$F_x = 0.0014 S_x V_x^2 \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 F_x は船体に作用する流れ荷重合力の船首尾方向 (x 方向) 成分 (kN) , S_x は船体の浸水面積 (m^2) , V_x は船首尾方向 (x 方向) の流速 (m/s) , である。

(3) 簡易法の特徴

最後に、表-2.1 に簡易法の特徴をまとめる。比較対象は、2.2 に示した既往の動的解析、2.3 に示した静的な力の釣合い計算に基づく既存の算定手法(2種類の手法: 港研資料 No.102, 港研資料 No.427) とする。

表-2.1 牽引力の算定手法の比較

項目	動的解析	静的な力の釣合い計算に基づく方法 (静的解析)		
	港空研資料 No.1341 港空研資料 No.1213 (本資料 2.2)	港研資料 No.102 (本資料 2.3(1))	港研資料 No.427 (本資料 2.3(2))	簡易法 (本資料 2.4(1)(2))
算定方法の基本的な考え方	船舶を剛体として仮定し、船体の動揺6成分の運動方程式を時系列的に数値積分して計算し、係船索張力を算定する。風や流れは、非定常である。	船舶を剛体として仮定し、定常流として船体に作用する風または流れによる1方向の荷重と係船索張力が静的に釣合う状態を規定することにより、係船索張力を算定する。	船体の変位 (係船索が張力を受けて伸びることにより発生) は無視し、初期の係船索の配置は変化しないと仮定する。	船体の変位 (係船索が張力を受けて伸びることにより発生) を考慮する。すなわち、初期の係船索の配置が船体へ荷重を受けて変化するとし、その状態での静的釣合い状態から係船索張力を算定する。
風による船体荷重	風速は、ダavenport型の風速スペクトルを用いて、変動風(不規則に変動する風速)として与える。 風による船体への荷重は、本資料中の式(2)に示す風圧力式により算定する。	風速は、1方向の定常流として与える。 風による船体への荷重は、本資料中の式(2)に示す風圧力式により算定する(動的解析と同じ)。	係船索の伸び量の算定において、幾つかの近似を仮定している。	係船索の伸び量の算定において、近似はしていない。
流れによる船体荷重	流速は、非定常流として与える。 流れによる船体への荷重は、本資料中の式(3)に示すモリソン式により算定する。モリソン式では、船体質量(付加質量を含む)に流体の加速度を乗じた動的な荷重が考慮される。	流速は、1方向の定常流として与える。 流れによる船体への荷重は、定常流に対する船体の流体抵抗として、船側方向は本資料中の式(7)、船首尾方向は式(8)により算定する。なお、これらの式は、式(3)に示すモリソン式から動的な荷重項を取り除いたものである。		
係船索条件 ・本数 ・配置 ・張力と伸び率の関係	・係船索の本数に制限はない。 ・係船索の配置に制限はない。 ・実際の係船索における張力と伸び率の非線形関係を考慮している。	・係船索は2本を前提。 ・係船索の配置は、船体の前後で対象と仮定。 ・係船索の張力と伸び率の関係は考慮できない。	・係船索の本数に制限はない。 ・係船索の配置に制限はない。 ・係船索の張力と伸び率の関係を弾性(バネ定数一定)と仮定しているため、非線形関係は考慮できない。	・実際の係船索における張力と伸び率の非線形関係を考慮している。

まず、動的解析との比較においては、簡易法は一定の風速または流速作用下での静的な力の釣合いのみを考慮しているため、風速や流速の変化に伴う動的な荷重を考慮できない。また、船体の動揺についても、船体の共振現象なども再現できない。さらに、動的解析では船体の6成分（6自由度）の運動を考慮しているため、船体の回転に伴い、特定の係船索への張力分担の集中などを考慮できるが、簡易法ではこれを考慮することができない。このように簡易法の適用限界はあるものの、第3章および第4章では、動的解析と簡易法による比較から、両者で牽引力の算定値にどの程度の差異が発生するのかを確認する。

次に、静的な力の釣合い計算に基づく既往の算定手法と簡易法とを幾つかの観点から比較する。まず、港研資料 No.102 による方法では、船体の変位（係船索が張力を受けて伸びることにより発生）は無視し、初期の係船索の配置は変化しないと仮定し、かつ係船索は2本を前提とするなどの制限が課されている。一方で、簡易法および港研資料 No.427 では、初期の係船索の配置が船体に作用する荷重を受けて変化するとし（船体の変位を考慮）、その状態での静的釣合い状態から係船索張力を算定しており、港研資料 No.102 による方法よりも算定精度は向上していると考えられる。また、複数の係船索が任意の配置となっている場合にも対応できる点において優位である。次に、係船索の張力特性の関係の再現性に着目すると、港研資料 No.102 による方法では釣合い計算の前提条件として係船索の伸びを考慮することができない。港研資料 No.427 による方法では、張力と伸び率の関係は線形（弾性）を仮定しており、実際の係船索での非線形関係を考慮することができない。一方、簡易法では、実際の係船索における張力特性の非線形性を考慮することができる。以上のように、簡易法は既往の静的解析による方法と比較して、実際の係船索の特性や配置をより正確に反映した手法であると言える。

3. 風に対する簡易法と動的解析による牽引力の比較

3.1 比較検討の概要

本章では、風に対する牽引力の評価について、簡易法の適用性を確認する。具体的には、既往の動的解析²⁾（港空研資料No.1341）による最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、簡易法の精度と適用性を確認する。簡易法の計算条件は、既往の動的解析と同じ条件とし、動的解析による最大牽引力（時刻歴波形中の最大値）を真値とした場合に、簡易法による牽引力と真値との差異を確認することで、簡易法の適用性を確認する。

3.2 比較検討の条件

(1) 比較検討ケース

表-3.1に比較検討対象とした解析ケースの一覧を示す。簡易法の比較対象とした既往の動的解析²⁾（港空研資料 No.1341）では、総トン数の異なる貨物船（空載時）の全13船型を対象として解析を行っているが、本検討では5船型（1万GT、5万GT、10万GT、15万GT、20万GT）を比較対象とした。なお、簡易法による10万GTを対象とした詳細な計算過程は、2.4(2)で説明した付録A1に示しているので、参考にされたい。

まず、風速は、10 m/s、15 m/s、20 m/sの3ケースを比較対象とした。なお、簡易法では船側方向の風は、岸壁側から船体方向に吹く風とし、時間的に変動しない一定風速を想定している。一方で、動的解析では10分間平均風速を入力パラメータとしているが、平均風速を上回る変動風速も発生するため、簡易法と動的解析ではその点が異なることに注意を要する。

(2) 主要条件

簡易法における入力条件は、既往の動的解析²⁾（港空研資料No.1341）と同じ条件としている。以下、主要条件について示す。

係留施設は重力式岸壁（直立）とし、岸壁の天端高はD.L.+4.0 mとしている。岸壁の前面水位はD.L.±0.0 mと

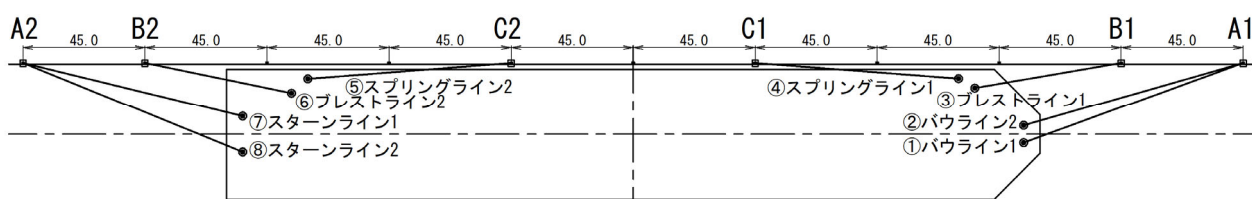


図-3.1 係船索の配置（貨物船：10万GT）²⁾

している。表-3.1中に示す各船舶の乾舷は、この前面水位からの甲板までの鉛直距離である。曲柱の設置間隔については、対象船舶1万GTでは25m間隔、それ以外の4船型では45m間隔としている。図-3.1に5船型の代表として10万GTの場合の係船索の配置と係船索番号を示す。また、全船型に対する係船索の配置は付録Bに示す。いずれの船型ケースも係船索の本数は合計8本である。また、各係船索は、岸壁の天端面に位置する係船柱と各船舶の甲板に位置する点の2箇所、両端を固定されていると仮定している。各係船柱や船舶側の係船索の固定点の座標値、初期の係船索の角度や長さ等の詳細情報については、付録Bにまとめて示す。

係船索は、図-2.2に示すナイロンエイトロープ(破断時の最大伸び率51%)とし、その張力特性は非線形性を考慮したものとした。各船型に利用した係船索の破断荷重は表-3.1に示すとおりである。なお、動的解析では、初期状態において係船索に初期張力(破断荷重の7%の張力)を与え、その後に風を作用させている。このため、簡易法でも、初期張力を考慮している。

船体に作用する風荷重の算定条件となる風抗力係数は、既往の動的解析²⁾(港空研資料 No.1341)と同じ数値を用

いる(表-3.1)。簡易法における静的釣合い状態を探索するための与条件となる、船体に作用する風荷重を表-3.2に示す。表中には、各船型の船体に作用する風荷重を風速別(10m/s, 15m/s, 20m/s)に算定した結果を示す。なお、これらの風荷重は、式(2-b)に基づき算定し、式中の空気の密度は $1.23 \times 10^{-3} (t/m^3)$ としている。

表-3.1 比較検討の解析ケース

総トン数 (GT)	主要船舶諸元等						その他主要条件		
	全長 (m)	型幅 (m)	空載喫水 (m)	水面上投影面積 (m ²)	乾舷 (m)	抗力係数	曲柱設置間隔 (m)	係船索の破断荷重 (kN)	風速 (m/s)
1万	159	24.8	10.0	2387.5	8.4	0.925	25	510	10 15 20
5万	255	39.2	15.2	6928.9	14.2		45	796	
10万	313	47.8	19.1	10963.4	17.3		45	906	
15万	352	53.6	21.7	14338.9	19.4		45	1040	
20万	384	58.2	23.9	17347.1	21.0		45	1130	

表-3.2 風(船側方向)による船体に作用する荷重一覧

総トン数 (GT)	水面上投影面積 (m ²)	抗力係数	風による荷重 (kN)		
			風速 10 m/s	風速 15 m/s	風速 20 m/s
1万	2387.5	0.925	135.8	305.6	543.3
5万	6928.9		394.1	886.8	1576.5
10万	10963.4		623.7	1403.3	2494.7
15万	14338.9		815.7	1835.3	3262.8
20万	17347.1		986.8	2220.4	3947.3

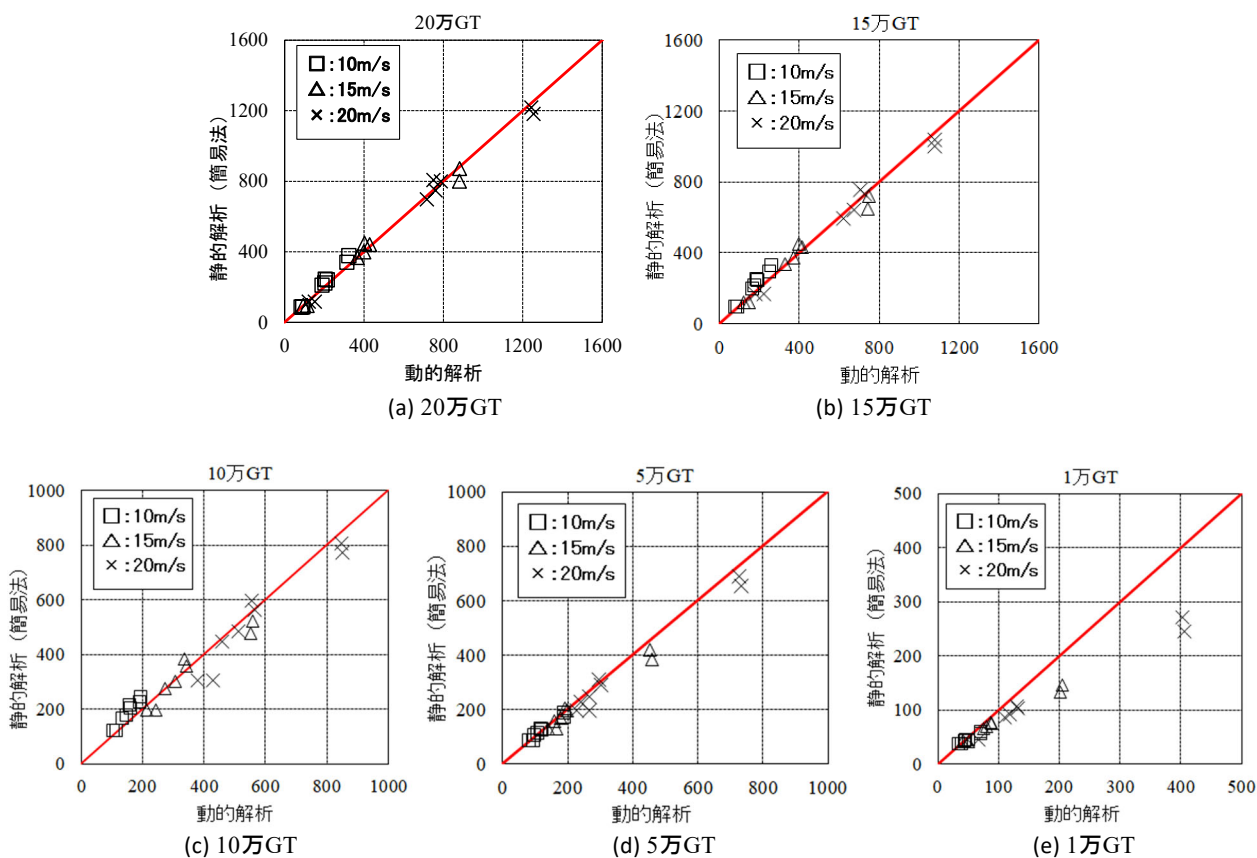


図-3.2 動的解析から得られた各係船索(8本)の最大張力と簡易法(静的解析)による張力の相関図(単位:kN)

3.3 比較検討の結果と考察

(1) 全係船索の張力の比較

図-3.2に、貨物船（5船型）について、動的解析から得られた各係船索（8本）の最大張力（時刻歴波形中の最大値）と簡易法（静的解析）から得られた対応する各係船索の張力（静的釣合い時の張力）の相関図を示す。各図中には、風速10 m/s（8本）、15 m/s（8本）、20 m/s（8本）の結果を全て一緒にプロットしている。また、動的解析と簡易法による各牽引力と、両者の牽引力比（動的解析／簡易法）の一覧を表-3.3に示す。なお、本検討では、図-3.1に示すとおり、スプリングラインおよびプレストラインでは、各係船柱に対して係船索が1本ずつ掛かっている状態であるため、係船索張力と牽引力（船舶牽引力）は同じ荷重である。

図-3.2(a)に示す20万GTの結果より、例えば風速20 m/sの結果（図中×のプロット）を見ると、8本のいずれの係船索も簡易法と動的解析による張力は概ね一致していることが分かる。また、風速15 m/s（図中△のプロット）および15 m/s（図中□のプロット）でも、両者の張力は概ね一致していることが分かる。なお、8本のうち最大張力が発生しているのは、いずれもプレストライン1（表-3.3(a)の係船柱番号B1）またはプレストライン2（表-3.3(a)の係船柱番号B2）である。これらのプレストラインは、他のラインよりも初期の係船索長が短いため、船体の海側への変位によって係船索の伸び率が大きくなり、より大きな張力が発生する。

次に、船型の小さなケースの比較結果を図-3.2(b)～(e)に示す。この結果からも、船型が15万GT～5万GTまでは、概ね簡易法と動的解析による係船索張力は一致していると言える。ただし、船型が小さくなると、やや動的解析による張力の方が大きくなる傾向にある。そして、1万GTのケースでは、明らかに動的解析の張力の方が大きくなり、簡易法による張力は、過小評価（危険側の評価）となることが分かる。次に、この理由について考察する。

(2) 動的解析の時刻歴波形との比較

図-3.3に、15万GT・風速15 m/sにおける動的解析の結果（時刻歴波形）を示す。図中には、船体の動揺量および各係船索の張力の時刻歴を示す。なお、図中には、簡易法による船体変位（船側方向の静的釣合い状態における変位）とその状態でのプレストラインの張力値も併記している。同様に、図-3.4に5万GT・風速15 m/sの結果を、図-3.5に1万GT・風速15 m/sの結果を示す。

これらの図を見比べると、15万GTの場合（図-3.3）は、風速を与えてから十分に時間を経た時間帯では、船体は海側へ大きくドリフトしているが、その動揺は小さく、

表-3.3 動的解析と簡易法による牽引力と牽引力比の一覧

(a) 20万GT

係船柱番号	風速10m/s			風速15m/s			風速20m/s		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易
A1	418.5	464.0	0.90	827.1	840.8	0.98	1546.8	1547.5	1.00
B1	314.4	341.4	0.92	880.6	800.6	1.10	1253.7	1181.5	1.06
C1	92.1	87.5	1.05	114.4	96.1	1.19	151.5	117.8	1.29
C2	83.5	87.5	0.95	92.8	96.1	0.97	120.9	117.8	1.03
B2	323.7	378.3	0.86	882.1	872.3	1.01	1242.9	1219.0	1.02
A2	394.2	454.9	0.87	768.6	816.4	0.94	1466.6	1503.9	0.98

(b) 15万GT

係船柱番号	風速10m/s			風速15m/s			風速20m/s		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易
A1	378.8	448.7	0.84	784.1	803.5	0.98	1400.9	1372.4	1.02
B1	254.3	290.8	0.87	741.0	651	1.14	1077.8	1002.8	1.07
C1	92.7	90.1	1.03	149.0	120.4	1.24	219.8	166.6	1.32
C2	85.2	90.1	0.95	120.4	120.4	1.00	180.3	166.6	1.08
B2	264.3	322.0	0.82	751.1	722.8	1.04	1076.7	1037.1	1.04
A2	358.6	442.3	0.81	623.3	788.6	0.79	1328.9	1349.7	0.98

(c) 10万GT

係船柱番号	風速10m/s			風速15m/s			風速20m/s		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易
A1	313.1	375.2	0.83	649.3	658.9	0.99	1079.3	1047.3	1.03
B1	192.2	221.9	0.87	553.8	475.8	1.16	850.0	771.9	1.10
C1	116.8	119.2	0.98	243.7	195.6	1.25	429.2	306.1	1.40
C2	105.5	119.2	0.89	212.9	195.6	1.09	379.5	306.1	1.24
B2	197.7	242.0	0.82	557.9	524.1	1.06	847.1	805	1.05
A2	298.2	374.6	0.80	609.4	659.0	0.92	1015.1	1042.7	0.97

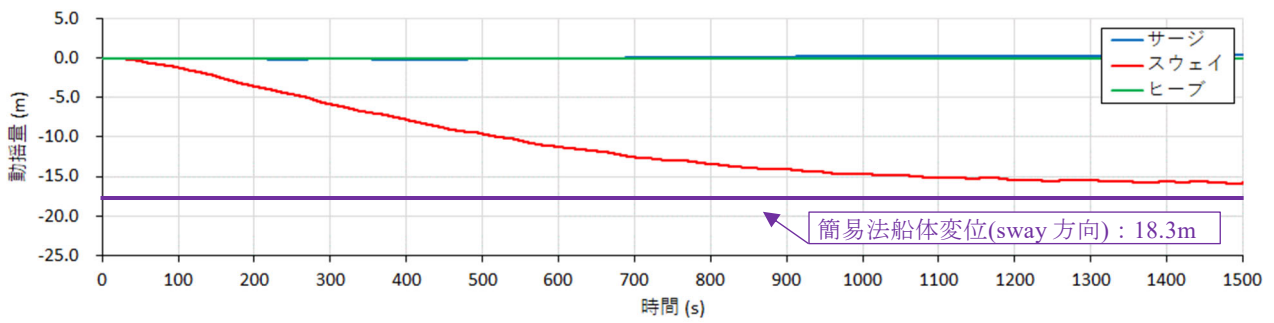
(d) 5万GT

係船柱番号	風速10m/s			風速15m/s			風速20m/s		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易
A1	232.8	230.4	1.01	374.7	366.6	1.02	572.0	540.6	1.06
B1	190.8	169.9	1.12	458.3	383.4	1.20	734.0	653.6	1.12
C1	97.1	82.5	1.18	165.4	130.9	1.26	267.6	195.4	1.37
C2	83.3	82.5	1.01	139.1	130.9	1.06	228.0	195.4	1.17
B2	190.5	187.3	1.02	453.8	421.2	1.08	726.6	688.2	1.06
A2	217.9	228.5	0.95	350.4	362.4	0.97	534.9	540.7	0.99

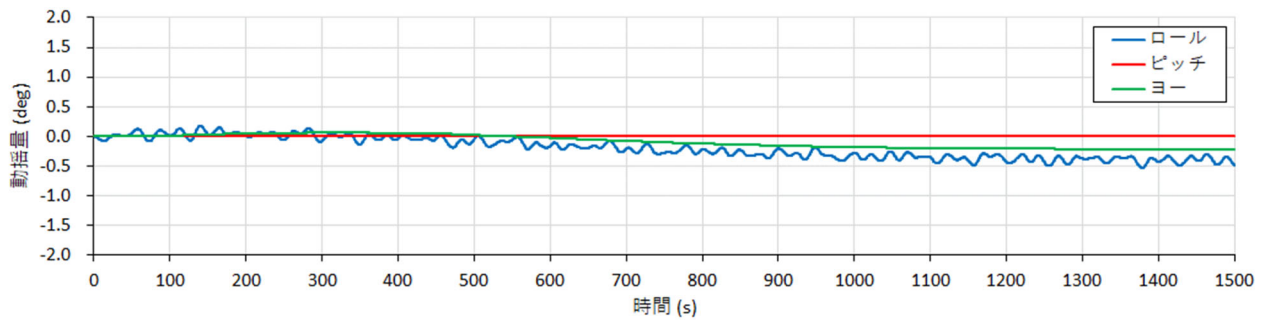
(e) 1万GT

係船柱番号	風速10m/s			風速15m/s			風速20m/s		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易	動的	簡易	動的/簡易
A1	99.2	86.9	1.14	170.3	145.7	1.17	251.2	195.9	1.28
B1	71.8	54.8	1.31	201.6	133.4	1.51	406.1	246.2	1.65
C1	40.5	37.3	1.09	51.5	41.7	1.24	68.3	45.8	1.49
C2	36.1	37.3	0.97	40.8	41.7	0.98	49.1	45.8	1.07
B2	72.2	58.3	1.24	205.1	147.3	1.39	402.7	270.9	1.49
A2	89.6	86.5	1.04	163.3	143.8	1.14	240.1	195.5	1.23

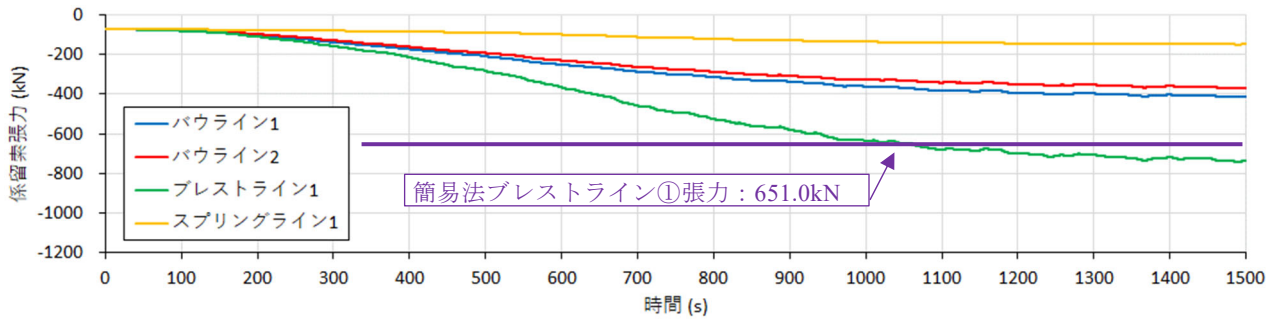
係船索張力の変動は小さくなっており、船体は安定していることが分かる。その安定している状態での船体変位とプレストラインの張力については、概ね簡易法による値と一致している。



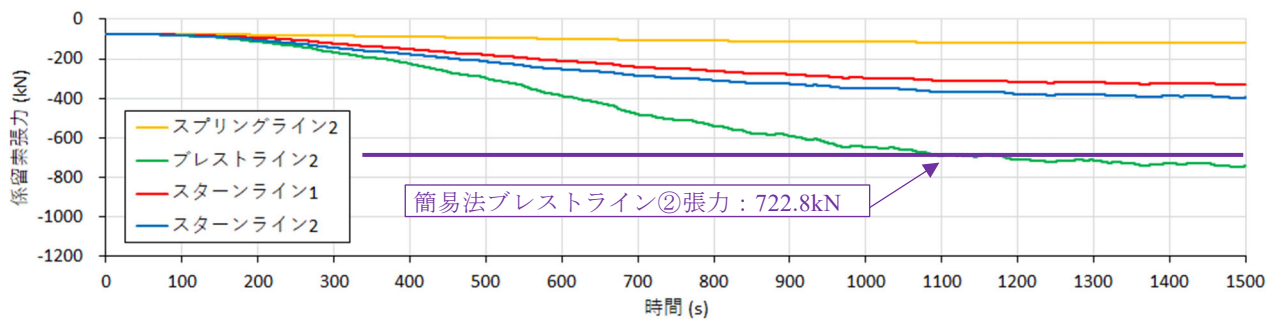
(a) 動揺量 (Surge (船首尾方向), Sway (船側方向), Heave (上下方向))



(b) 動揺量 (Roll, Pitch, Yaw)

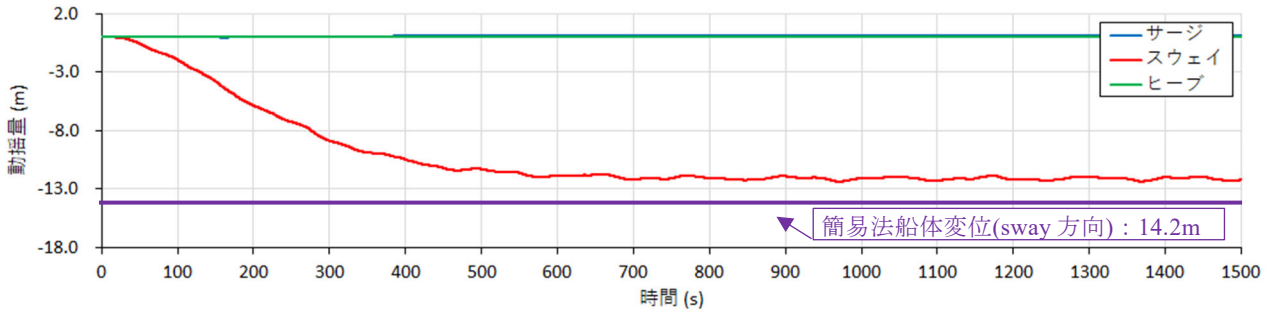


(c) 係船索の張力 (船首側の係船索 (4本))

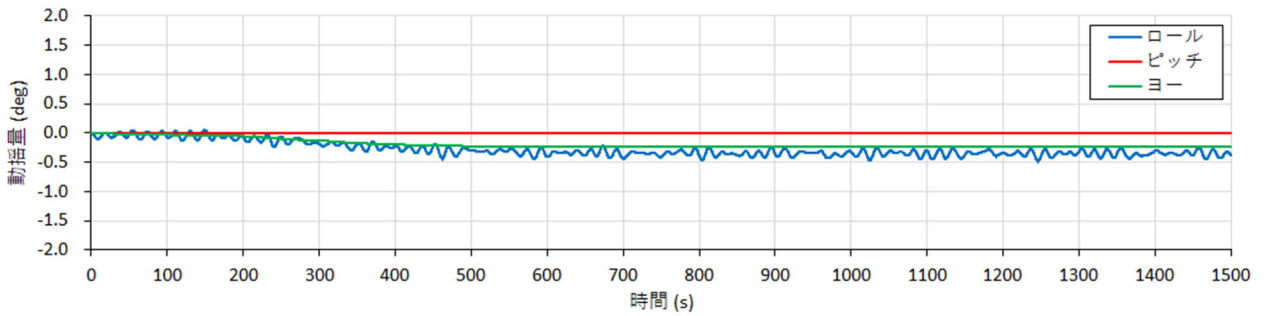


(d) 係船索の張力 (船尾側の係船索 (4本))

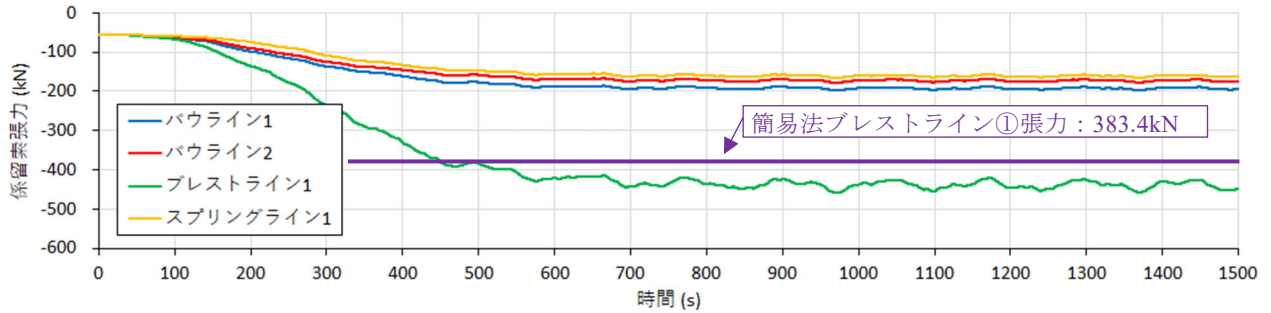
図-3.3 動的解析の結果 (15万GT・風速15 m/s)



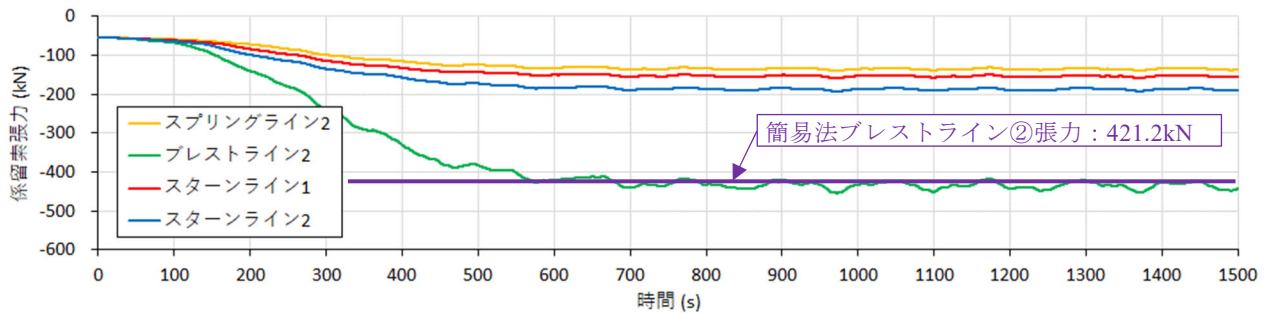
(a) 動揺量 (Surge (船首尾方向), Sway (船側方向), Heave (上下方向))



(b) 動揺量 (Roll, Pitch, Yaw)

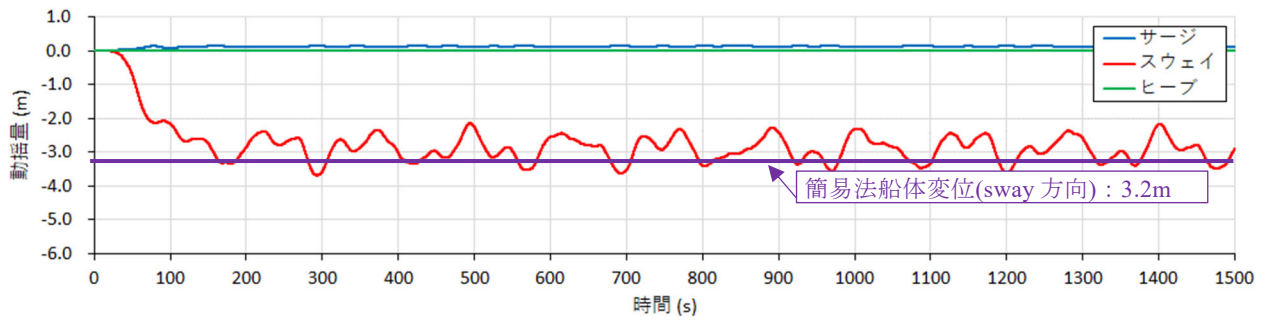


(c) 係船索の張力 (船首側の係船索 (4本))

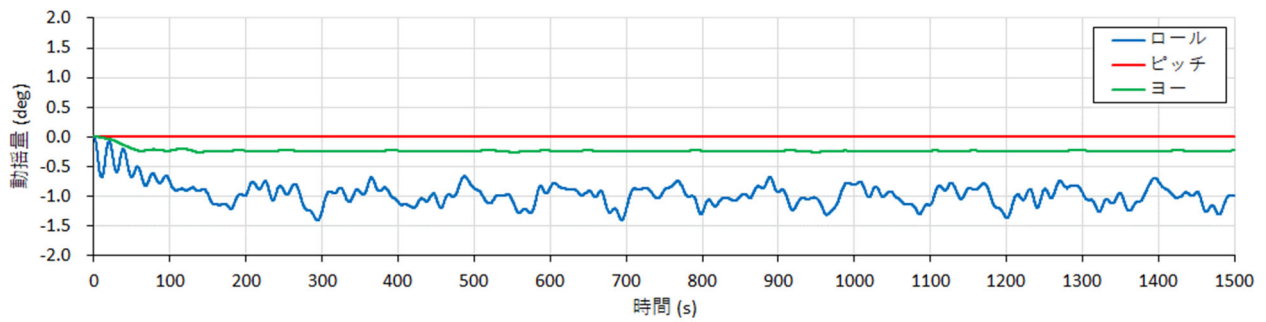


(d) 係船索の張力 (船尾側の係船索 (4本))

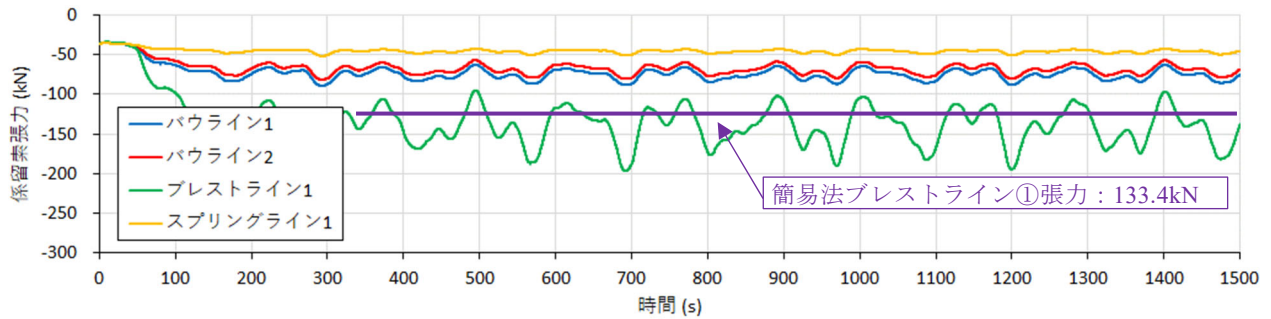
図-3.4 動的解析の結果 (5万GT・風速15 m/s)



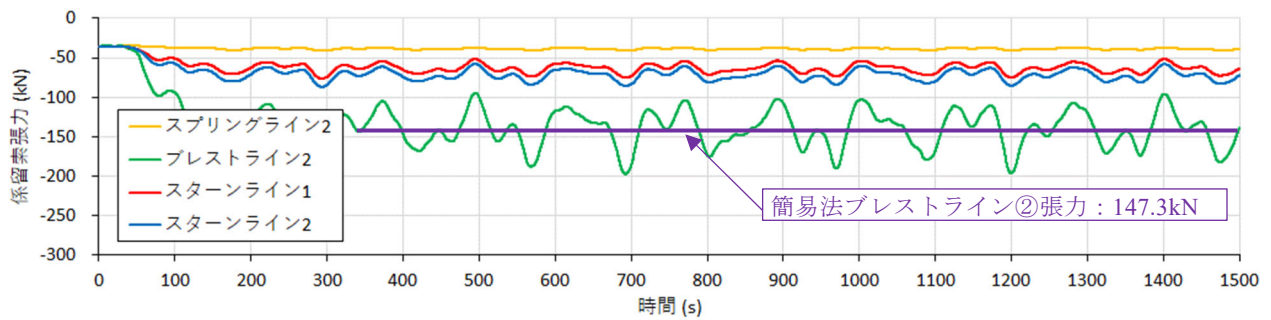
(a) 動揺量 (Surge (船首尾方向), Sway (船側方向), Heave (上下方向))



(b) 動揺量 (Roll, Pitch, Yaw)



(c) 係船索の張力 (船首側の係船索 (4本))



(d) 係船索の張力 (船尾側の係船索 (4本))

図-3.5 動的解析の結果 (1万GT・風速15 m/s)

一方、1万GTの場合(図-3.5)は、風速を与えてから十分に時間を経た時間帯であっても、船体の動揺が大きく、それに伴い係船索張力の変動も大きくなっていることが分かる。特に、船体の船側方向(y方向)の動揺は顕著であり、これが張力の大きな変動に影響している。動的解析の結果と簡易法による船体変位・張力とを比較すると、船体の動揺成分によって動的解析の張力が大きくなる時間帯があり、簡易法による張力は過小評価(危険側の評価)となることが分かる。なお、5万GTの場合(図-3.4)は、船体は若干動揺しているが、1万GTに比べるとその変動は小さく、結果として簡易法との船体変位・張力の差は比較的小さい範囲に留まっていることが分かる。

以上に示したとおり、今回の検討条件下では、船舶が風の変動成分により大きく動揺してしまう船型1万GT以外の条件下では、簡易法は概ね適用できるものと考えられる。次に、動的解析による最大牽引力を真値とした場合に、簡易法でどの程度の精度で真値を推定できるのかについて確認する。

(3) 簡易法の推定精度

簡易法による牽引力の推定精度は、動的解析²⁾(港空研資料No.1341)による各係船索で発生する最大牽引力を、簡易法から算定した牽引力で除した牽引力の比(以下、牽引力比と称する。)で評価する。牽引力比が1.0であれば、動的解析と簡易法による牽引力は一致する。一方、牽引力比が1.0を超過する場合は、動的解析の方が簡易法の牽引力を上回ることになる。この場合には、簡易法による牽引力は過小評価(危険側の評価)となり、牽引力比が大きいほど、その乖離は大きくなる。

表-3.3に、全ケースの牽引力比の計算結果を示してい

る。また、それらの結果を各船型・各風速別にプロットしたものが図-3.6である。なお、図中で、赤色で示したプロットは、動的解析による牽引力の大きさが上位1位および2位における牽引力比である。

本図より、5万GT以上の船型では、牽引力比が0.8~1.4程度であり、さらに牽引力の大きさが上位1・2位に限れば0.8~1.2程度であることから、動的解析による最大牽引力を簡易法により一定の精度で推定可能であることが分かる。より具体的には、最大牽引力に限れば、簡易法により算定された牽引力を1.2倍した牽引力は、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできることになる。以上の結果から、5万GT以上の船型では、簡易法による牽引力に一定程度の倍率を乗じることで、動的解析の最大牽引力を推定することができる。このため、簡易法は概略検討の段階では、動的解析の代替手法として利用可能であると考えられる。なお、概略検討は、係船柱の設計において、概略設計段階や既存岸壁への大型船入港に対する予備的検討段階などで風に対する牽引力の推定が必要とされる場合を想定している。

一方、1万GTの船型では、牽引力比は1.0~1.7程度であり、牽引力の大きさが上位1・2位の場合でも1.0~1.7程度であり、5万GT以上の船型と比較すると、簡易法の推定精度は低下することが分かる。すなわち、1万GTの船型では、簡易法により算定された牽引力に1.7倍程度を乗じないと、動的解析による最大牽引力をカバーできない。これは、先述したとおり、比較的小さい船型の場合、風により船体の動揺が大きくなり、動的成分の影響が大きくなるためである。このような条件下の場合には、簡易法の適用にあたっては十分な注意を要する。

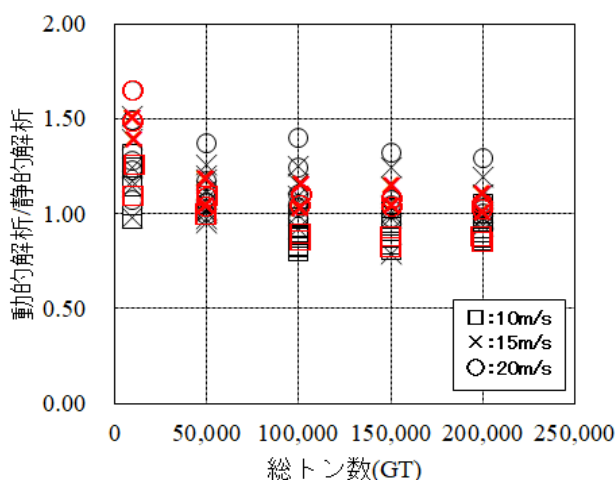


図-3.6 船型別の牽引力比(動的解析/簡易法)

4. 流れに対する簡易法と動的解析および水理模型実験による牽引力の比較

4.1 比較検討の概要

本章では、津波を模擬した流れに対する牽引力の評価への簡易法の適用性を確認する。具体的には、既往の動的解析⁵⁾および既往の水理模型実験⁴⁾(港空研資料No.1213)による最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較し、簡易法の精度と適用性を確認する。簡易法の計算条件は、既往の動的解析または模型実験と同じ条件とし、動的解析または模型実験による最大牽引力(時刻歴波形中の最大値)を真値とした場合に、簡易法による牽引力と真値との差異を確認することで、簡易法の適用性を確認する。なお、流れは津波を模擬した規則波に従う往復流が作用する場合を想定し、流れの方向は船側方向に加え、船首尾方向の岸壁法線に沿って並行となる方向も対象としている。

4.2 簡易法と動的解析による牽引力の比較

4.2.1 比較検討の条件

(1) 比較検討ケース

表-4.1に比較検討対象とした解析ケースの一覧を示す。既往の動的解析⁵⁾と同じ、載貨重量トン数の異なるコンテナ船の全4船型(1万DWT, 5万DWT, 10万DWT, 16.5万DWT)を比較対象とした。なお、簡易法による10万DWT

を対象とした詳細な計算過程は、船側方向の流れについては2.4(2)で説明した付録A2に、船首尾方向の流れについては付録A3に示しているの、参考にされたい。

動的解析では、津波による流れは周期10 minの正弦波に従う往復流を仮定し、船側方向と船首尾方向からの流れを与えている。往復流の最大流速は表-4.1に示すとおりである。なお、動的解析では、水位も正弦波に従い変化(水位が最大または最小になる時点で最大または最小の流速となるように変化)させているが、事前の解析の結果、水位変化が係船索張力に及ぼす影響は微小であることが分かっており、最大水位はゼロであると考えても問題はない。一方、簡易法では、津波による流れは定常流を仮定し、動的解析での最大流速が作用するとしている。

(2) 主要条件

簡易法における入力条件は、既往の動的解析⁵⁾と同じ条件としている。以下、主要条件について示す。

係留施設は、栈橋状の流れが透過する構造を仮定し、係留施設の天端高はD.L.+4.0 mとしている。係留施設の前面水位はD.L.+0.0 mとしている。曲柱の設置間隔については、対象船舶1万DWTおよび5万DWTでは25 m間隔、それ以外の2船型では30 m間隔としている。図-4.1に4船型の代表として10万DWTの場合の係船索の配置と係船索番号を示す。また、全船型に対する係船索の配置は付録Cに示す。いずれの船型ケースも係船索の

表-4.1 比較検討の解析ケース

載貨重量 トン数 (DWT)	主要船舶諸元等			係留条件			津波(周期10 min)				
	全長 (m)	型幅 (m)	満載 喫水 (m)	喫水面 下側面 投影面積 (m ²)	流圧力係 数	浸水面積 (m ²)	曲柱 設置間隔 (m)	係船索の 破断強度 (kN)	方向	最大流速 (m/s)	最大水位 (m)
1万	130	22.2	7.9	1027.0	4.6	3450	25	338 (φ45mm)	船側	0.6	1.0
									船首尾	2.8	1.5
5万	269	32.3	12.8	3443.0	4.6	10800	25	796 (φ70mm)	船側	0.7	1.0
									船首尾	1.9	1.5
10万	338	45.3	14.6	4701.2	4.6	17178.57	30	796 (φ70mm)	船側	0.5	1.0
									船首尾	0.5	1.5
16.5万	378	52.0	16.2	6123.6	4.6	23242.86	30	906 (φ75mm)	船側	0.6	1.5
									船首尾	0.4	1.5

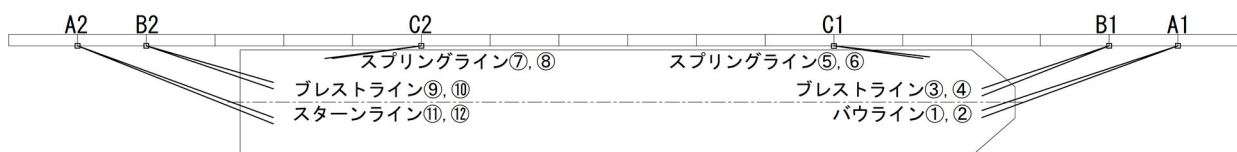


図-4.1 係船索の配置(コンテナ船:10万DWT)⁵⁾

本数は合計 12 本である。また、各係船索は、係留施設の天端面に位置する係船柱と各船舶の甲板に位置する固定点にて、両端を固定されていると仮定している。各係船柱や船舶側の係船索の固定点の座標値、初期の係船索の角度や長さ等の詳細情報については、付録 C に添付している。

係船索は、図-2.2 に示すナイロンエイトロープ(破断時の最大伸び率 51%)とし、張力特性は非線形性を考慮したものとした。各船型に利用した係船索の破断強度は表-4.1 に示すとおりである。なお、動的解析では、初期状態において係船索に初期張力を与えず、その後に流れを作用させている。このため、簡易法でも、初期張力を与えない条件で張力の計算を行った。

流れ荷重の算定条件となる船舶の流圧力係数、喫水面下側面投影面積および浸水面積は、既往の動的解析⁵⁾と同じ数値を用いる(表-4.1)。船側方向の流れに対する流圧力係数は、港湾基準に掲載されている図-4.2 を用いて設定されており、図中の相対流向 90° かつ水深 h と喫水 d の比が 1.1 の場合の流圧力係数 (4.6) を採用している。

簡易法における静的釣合い状態の探索の与条件となる、各船型に流速(定常流)が作用した場合の船体に作用する荷重を表-4.2 に示す。船体に作用する荷重は、船側方向については式(8)に基づき算定し、船首尾方向は式(9)に基づき算定した。なお、流体(海水)の密度は $1.03 \text{ (t/m}^3\text{)}$ としている。

4.2.2 比較検討の結果と考察

(1) 全係船索の張力の比較

① 船側方向の流れを受ける場合

図-4.3 に、船側方向の流れを受ける場合について、動的解析から得られた各係船索(12本)の最大張力(時刻歴波形中の最大値)と簡易法(静的解析)から得られた対応する各係船索の張力(静的釣合い時の張力)の相関図を示す。

図-4.3 を俯瞰すると、いずれの船型も、簡易法と動的解析による張力は概ね一致していることが分かる。この結果は、風が作用する場合(図-3.2)と同様の傾向である。一方、船型が小さい1万DWTの場合は、動的解析による張力が静的解析の値よりやや大きい結果であった。この理由も、風が作用する場合と同様であり、船体質量が小さい船型の場合、船体が大きく動揺(動的成分が卓越)し、静的解析との乖離が大きくなるためであると考えられる。

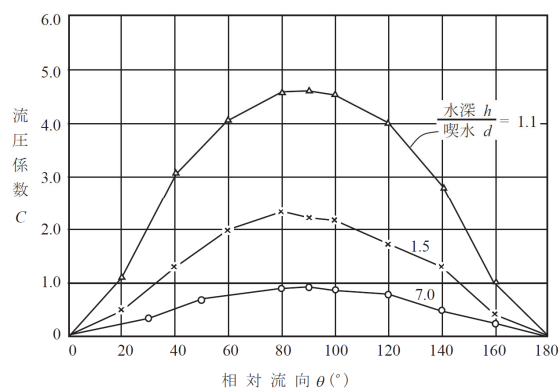


図-4.2 流圧力係数¹⁾

表-4.2 流れ(定常流)による船体に作用する荷重一覧

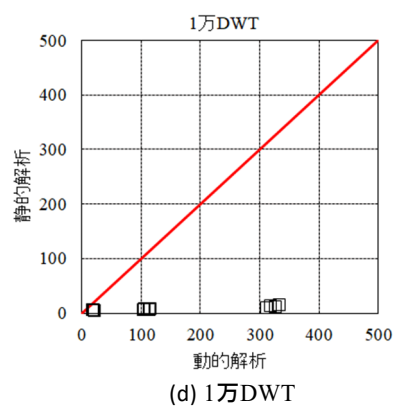
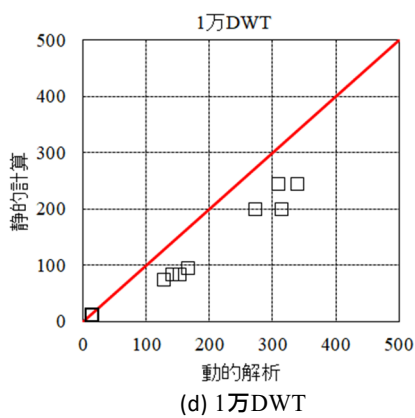
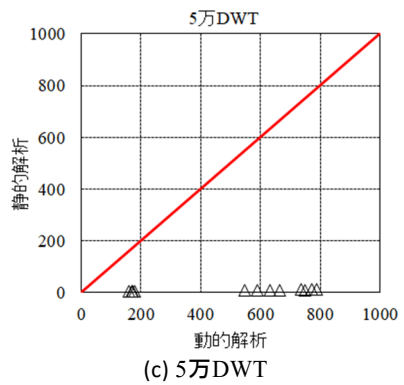
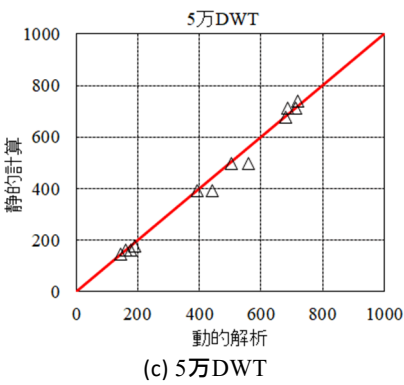
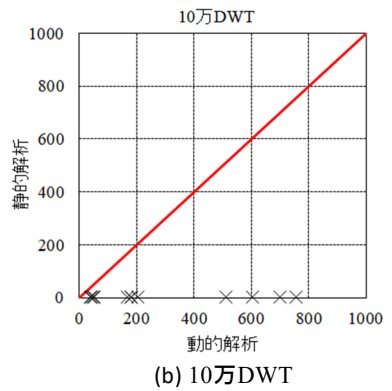
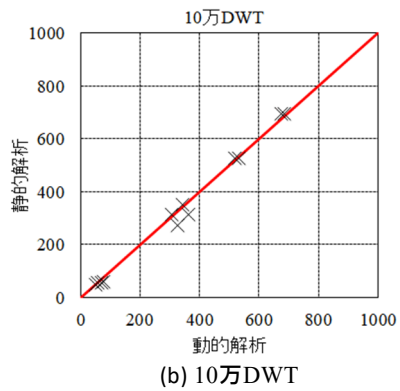
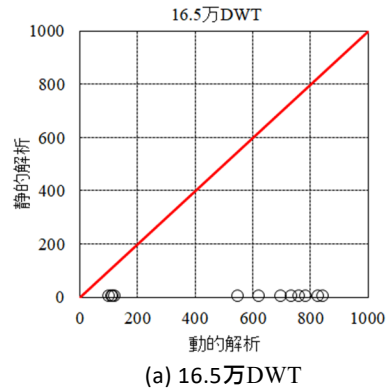
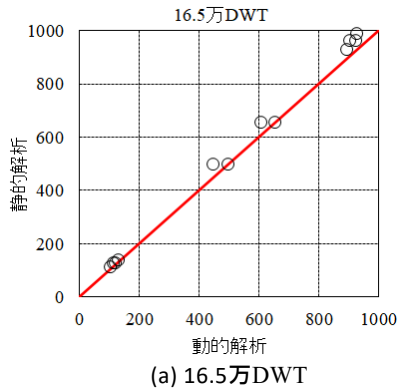
載貨重量 トン数 (DWT)	船側方向			船首尾方向		
	喫水面下 側面投影 面積(m ²)	流速 (m/s)	流れに よる荷重 (kN)	浸水 面積 (m ²)	流速 (m/s)	流れに よる荷重 (kN)
1万	1027.0	0.6	875.9	3450	2.8	37.9
5万	3443.0	0.7	3788.9	10800	1.9	54.6
10万	4701.2	0.5	2784.3	17178.57	0.5	6.0
16.5万	6123.6	0.6	3454.0	23242.86	0.4	5.2

② 船首尾方向の流れを受ける場合

図-4.4 に、船首尾方向の流れを受ける場合について、動的解析から得られた各係船索(12本)の最大張力(時刻歴波形中の最大値)と簡易法(静的解析)から得られた対応する各係船索の張力(静的釣合い時の張力)の相関図を示す。

本図より、船首尾方向の流れの場合には、簡易法による張力は動的解析による張力を再現できず、過小評価(危険側の評価)となっていることが分かる。これは、津波に対する動的解析の場合、船体に作用する流れ荷重はモリソン式を適用し、流れの加速度に応じて発生する荷重が考慮されており、さらに流れは定常流ではなく往復流であることなどのため、簡易法と比較すると、船体の動揺量が顕著に大きくなるのが理由と考えられる。

以上のことから、現時点では、本資料で提案する簡易法は、船首尾方向の津波による往復流に対しては適用することができない。船首尾方向の津波による流れに対して簡易法を適用するためには、往復流に対応できるように船体の動揺成分を考慮したモデル化が必要になると考えられ、今後の課題としたい。



(単位：kN)

図-4.3 動的解析から得られた各係船索(12本)の最大張力と簡易法(静的解析)による張力の相関図 (船側方向の流れ)

(単位：kN)

図-4.4 動的解析から得られた各係船索(12本)の最大張力と簡易法(静的解析)による張力の相関図 (船首尾方向の流れ)

表-4.3 動的解析と簡易法による牽引力および牽引力比（動的解析／簡易法）の一覧（流れの場合）

(a) 16.5万DWT

ライン名称（係船柱名称）	係船索番号	船側方向の流れ (流速 0.6 m/s)			船首尾方向の流れ (流速 0.4 m/s)		
		牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
		動的	簡易	動的／簡易	動的	簡易	動的／簡易
バウライン (A1)	①+②	220.8	233.6	0.95	216.8	1.3	166.77
プレストライン (B1)	③+④	1834.3	1946.0	0.94	1171.9	2.1	558.05
スプリングライン (C1)	⑤+⑥	1056.9	1148.3	0.92	1632.0	2.2	741.82
スプリングライン (C2)	⑦+⑧	1157.0	1148.3	1.01	1591.2	2.4	663.00
プレストライン (B2)	⑨+⑩	1818.7	1887.6	0.96	1437.7	2.1	684.62
スターンライン (A2)	⑪+⑫	254.5	257.9	0.99	240.6	1.2	200.50

(b) 10万DWT

ライン名称	係船索番号	船側方向の流れ (流速 0.5 m/s)			船首尾方向の流れ (流速 0.5 m/s)		
		牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
		動的	簡易	動的／簡易	動的	簡易	動的／簡易
バウライン (A1)	①+②	107.4	105.7	1.02	100.5	1.3	77.31
プレストライン (B1)	③+④	648.9	664.7	0.98	387.0	2.0	193.5
スプリングライン (C1)	⑤+⑥	1218.7	1220.1	1.00	1118.8	3.1	360.90
スプリングライン (C2)	⑦+⑧	1196.0	1220.1	0.98	1459.6	2.9	503.31
プレストライン (B2)	⑨+⑩	689.2	585.0	1.18	351.4	2.2	159.73
スターンライン (A2)	⑪+⑫	150.0	115.6	1.30	84.2	1.4	60.14

(c) 5万DWT

ライン名称	係船索番号	船側方向の流れ (流速 0.7 m/s)			船首尾方向の流れ (流速 1.9 m/s)		
		牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
		動的	簡易	動的／簡易	動的	簡易	動的／簡易
バウライン (A1)	①+②	308.3	309.6	1.00	330.4	10.9	30.31
プレストライン (B1)	③+④	1407.9	1452.0	0.97	1137.6	19.6	58.04
スプリングライン (C1)	⑤+⑥	1003.5	891.8	1.13	1535.4	21.9	70.11
スプリングライン (C2)	⑦+⑧	899.0	891.8	1.01	1508.7	26.7	56.51
プレストライン (B2)	⑨+⑩	1392.7	1389.1	1.00	1295.6	20.9	61.99
スターンライン (A2)	⑪+⑫	370.4	338.6	1.09	348.8	13.9	25.09

(d) 1万DWT

ライン名称	係船索番号	船側方向の流れ (流速 0.6 m/s)			船首尾方向の流れ (流速 2.8 m/s)		
		牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
		動的	簡易	動的／簡易	動的	簡易	動的／簡易
バウライン (A1)	①+②	33.0	19.6	1.68	44.0	4.1	10.73
プレストライン (B1)	③+④	323.1	175.1	1.85	220.4	7.9	27.90
スプリングライン (C1)	⑤+⑥	584.3	438.4	1.33	641.7	18.1	35.45
スプリングライン (C2)	⑦+⑧	657.0	438.4	1.50	655.9	26.4	24.84
プレストライン (B2)	⑨+⑩	272.5	153.9	1.77	223.2	12.7	17.57
スターンライン (A2)	⑪+⑫	32.9	21.4	1.54	40.3	7.6	5.30

(2) 簡易法の推定精度

本項では、船側方向の流れに対する、簡易法による船舶牽引力の推定精度を評価する。推定精度の評価は、動的解析により算定した各係船柱に作用する最大牽引力（係船索2本分）を、簡易法から算定した牽引力（係船索2本分）で除した牽引力の比（3章の定義と同じ、牽引力比）で評価する。牽引力比が1.0を超えれば、動的解析の方が簡易法の牽引力を上回ることになり、簡易法は牽引力を過小評価（危険側の評価）していることになる。なお、2本の係船索の方向は若干異なるものの、両者の角度差は小さいため、両者の張力は同じ方向に作用するとし、2本の係船索張力の和を牽引力として計算している。

全ケースの動的解析と簡易法による牽引力および牽引力比（動的解析／簡易法）の計算結果を表-4.3に示す。また、牽引力比を各船型別にプロットしたものが図-4.5である。なお、赤色で示した点は、6基の係船柱の中で動的解析による牽引力の大きさが上位1および2位となった牽引力を示している。10万DWTおよび1万DWTでは、図-4.1に示すスプリングライン（係船柱C1およびC2に対応）が上位であった。16.5万DWTおよび5万DWTでは、ブレストライン（係船柱B1およびB2に対応）が上位であった。

本図より、5万DWT以上の船型では、牽引力比が0.9～1.3程度であり、動的解析による最大牽引力を簡易法により一定の精度で推定可能であることが分かる。すなわち、簡易法により算定された牽引力を1.3倍程度すれば、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできることになる。ただし、船型1万DWTに対する牽引力比は1.3～1.9程度であり、5万DWT以上の船型と比較すると、動的解析と簡易法による牽引力の差は大きくなる傾向にあった。これは風の場合と同様、質量の小さい小型の船舶の場合、船体の動揺（動的成分）が大きくなり、静的釣合い状態では再現性が悪くなるためであると考えられる。

なお、牽引力の大きさが上位2位までの牽引力に限れば、全船型（1万DWTから16.5万DWT）に対して、簡易法により算定された牽引力を1.5倍程度すれば、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできることが分かる。以上の結果から、風の場合と同様、津波による船側方向の往復流の場合でも、簡易法による牽引力に一定程度の倍率を乗じることで、動的解析の最大牽引力を推定することができる。

4.3 簡易法と水理模型実験による牽引力の比較

4.3.1 比較検討の条件

(1) 比較検討ケース

比較検討対象とした既往の水理模型実験⁴⁾（港空研資料 No.1213）の実験状況を写真-4.1に示す。実験と現地の縮尺は1/50であり、本実験では栈橋に係留された全長4.33 m（現地換算：216.5 m）の船舶に対して津波を模擬した往復流を作用させ、各係船索の張力を測定している。本実験では多数の実験が行われているが、そのうち以下の表-4.4に示す解析ケースを比較対象とした。比較対象の実験は、満載状態の船体に対して、船側方向（入射角度90°）および船首尾方向（入射角度0°）の方向の正弦波に従う往復流を、周期85 s・170 s・254 s（現地換算で、10 min・20 min・30 min）、最大流速25.5 cm/s（現地換算：1.8 m/s）を目標として入射させたケースとした。なお、模型実験では、水位は変化させていない。

(2) 主要条件

簡易法における入力条件は、既往の水理模型実験⁴⁾（港空研資料 No.1213）と同じ条件としている。以下、主要な条件について示す。なお、以下に示す数値は全て現地換算とした数値として示す。

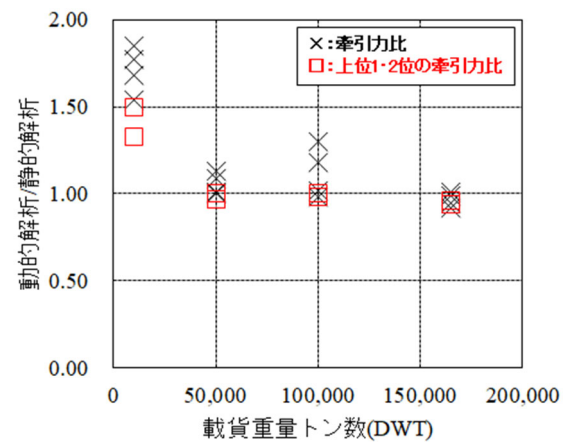


図-4.5 船型別の牽引力比（動的解析／簡易法）



写真-4.1 既往の水理模型実験の実験状況⁴⁾

係留施設は、流れが透過する構造を仮定し、係留施設の天端高は D.L.+0.0 m としている。また、係留施設の前面水位は D.L.±0.0 m としている。係船柱および係船索の配置は、図-4.6 に示すとおりであり、係船索の本数は合計 8 本である。各係船柱や船舶側の係船索の固定点の座標値、初期の係船索の角度や長さ等の詳細情報については、付録 D にまとめて示す。

係船索は、図-2.2 に示すナイロンエイトロープ(破断時の最大伸び率51%)を模擬したナイロン糸を利用している。模型実験で利用した係船索模型の張力の検定結果を図-4.7 に示す。図より、設定値(目標値)と検定結果は若干異なるが、簡易法による張力計算では図-2.2 に従う張力特性を利用した。力の相似側はフルード則となるため、図中の最大張力24 N(破断強度)は現地換算で3,000 kN (=50³×24 N)に相当する。なお、模型実験では、係船索の初期張力が78.8 kN(模型では0.63 kN)となるように調整し、その状態から流れを作用させている。

簡易法において、船側方向の流れ荷重の算定に必要な流圧力係数および喫水面下側面投影面積は、既往の模型実験⁴⁾と同じ数値を用いた(表-4.4)。流圧力係数は、水深と船舶喫水の比より、港湾基準に掲載されている図を内挿して設定された値である(図-4.2)。船首尾方向の流れ荷重の算定に必要な浸水面積は、船体の形状を矩形と仮定し、表-4.4 に示される全長・型幅・満載喫水から便宜的に設定した。

簡易法における静的釣合い状態の探索の与条件となる、各船型に作用する流れ荷重を表-4.5 に示す。船体荷重は、式(8)に基づき算定し、流体(海水)の密度は 1.03 (t/m³)としている。

表-4.4 比較検討の解析ケース

主要船舶諸元等	津波		
	方向	周期	最大流速
載貨重量トン数(DWT) : 50,000 排水重量(kN) : 470,400(3.76) 全長(m) : 216.5(4.33) 型幅(m) : 31.5(0.63) 満載喫水(m) : 11.0(0.22) 喫水面下側面投影面積(m ²) : 2128.5(0.85) 抗力係数 : 2.8 浸水面積(m ²) : 11045.0(4.42)	船側	10 min (85 s)	1.8 m/s (25.5 cm/s)
		20 min (170 s)	
		30 min (254 s)	
	船首尾	10 min (85 s)	
		20 min (170 s)	
		30 min (254 s)	

※表中の数値は現地換算の数値。()内の数値は模型実験の数値

表-4.5 流れ(定常流)による船体に作用する荷重の一覧

流速 (m/s)	船側方向		船首尾方向	
	喫水面下側面投影面積(m ²)	流れによる荷重(kN)	浸水面積(m ²)	流れによる荷重(kN)
25.5 cm/s	0.85	79.8	4.42	0.40

※表中の数値は、模型スケールでの値である。

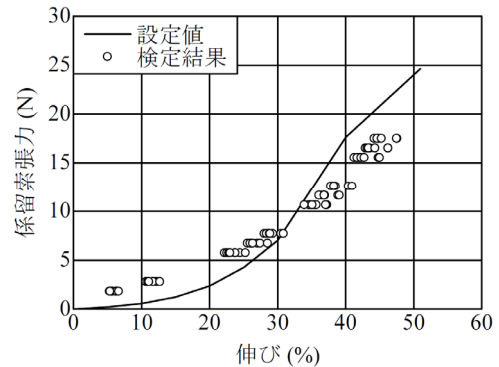


図-4.7 模型実験における係船索の張力特性⁴⁾

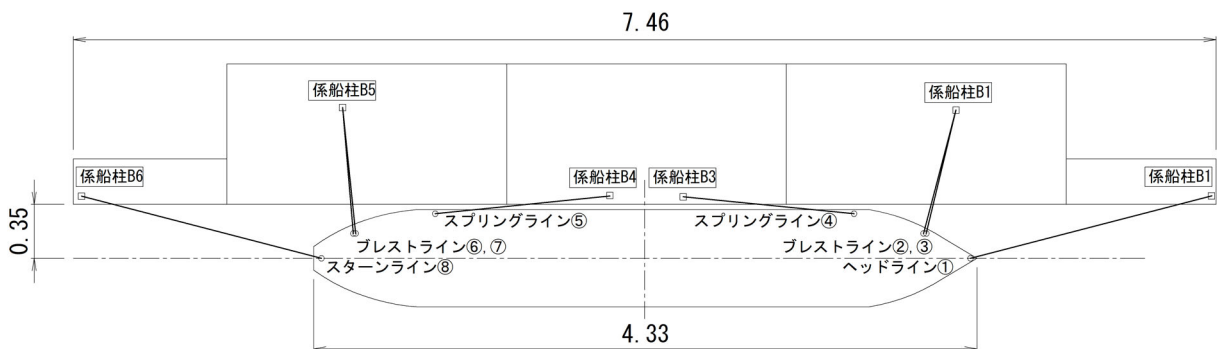


図-4.6 既往の水理模型実験における係船索の配置⁴⁾

4.3.2 比較検討の結果と考察

(1) 全牽引力の比較

① 船側方向の流れを受ける場合

図-4.8(a)に、船側方向の流れを受ける場合について、模型実験から得られた各牽引力(合計6箇所の係船柱に対応)の最大牽引力(時刻歴波形中の最大値)と簡易法(静的解析)から得られた対応する各牽引力(静的釣合い時の張力)の相関図を示す。なお、本図に示す張力は、現地換算ではなく、模型実験時の張力である。

本図を俯瞰すると、いずれの実験ケースでも、2つのプレストライン(B-2, B-5)で、船体に作用する流れ荷重のほとんどを負担していることが分かる。これらの負担の大きい牽引力に限ってみれば、模型実験の方が簡易法に比して、牽引力が大きくなる傾向にあることが分かる。また、この傾向は、津波の周期が短い(周期10 minの場合)とより顕著になる。これは、津波の周期が短いと、船体の動揺においてより動的な成分が卓越してくるためであると推察される。

② 船首尾方向の流れを受ける場合

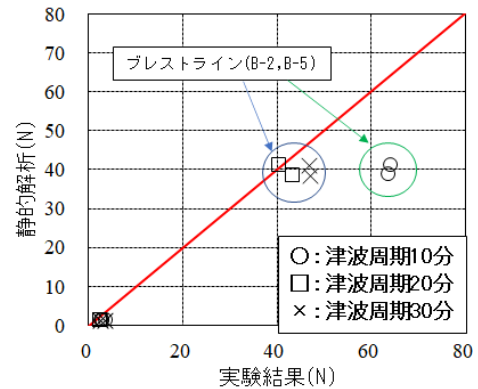
図-4.8(b)に、船首尾方向の流れを受ける場合について、模型実験から得られた各牽引力(合計6箇所の係船柱に対応)の最大牽引力(時刻歴波形中の最大値)と簡易法(静的解析)から得られた対応する各牽引力(静的釣合い時の張力)の相関図を示す。なお、本図に示す張力は、現地換算ではなく、模型実験時の張力である。

本図より、船首尾方向の流れの場合には、簡易法による牽引力は模型実験による牽引力を再現できず、過小評価(危険側の評価)となっていることが分かる。この結果と想定される理由は、4.2.2(1)②で示したとおりであり、水理模型実験でも同じと考えらえる。

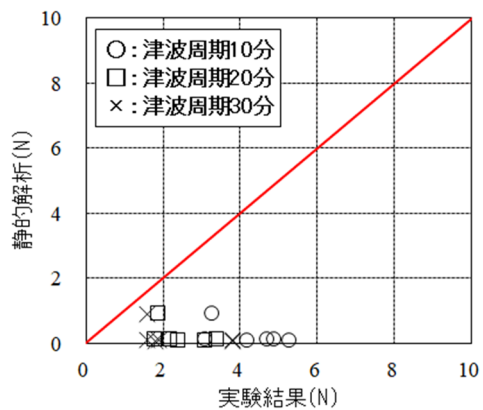
以上のことから、現時点では、本資料で提案する簡易法は、船首尾方向の津波による往復流に対しては適用することができない。

(2) 簡易法の推定精度

本項では、船側方向の流れに対する、簡易法による船舶牽引力の推定精度を評価する。推定精度の評価は、模型実験で計測された各係船柱に作用する最大牽引力を、簡易法から算定した牽引力で除した牽引力比で評価する。なお、模型実験では、プレストラインのみ係船索2本で構成され、その他のラインは係船索1本であるが、ここでは両者とも牽引力として取り扱う。なお、繰り返しの説明になるが、牽引力比が1.0であれば、模型実験と簡易法による牽引力は一致する。牽引力比が1.0を超えれば、模型実験の方が簡易法の牽引力を上回ることになり、簡易法は牽引力を過小評価(危険側)していることになる。



(a) 船側方向の流れ



(b) 船首尾方向の流れ

図-4.8 水理模型実験から得られた各牽引力(6箇所)と簡易法(静的解析)による牽引力の相関図

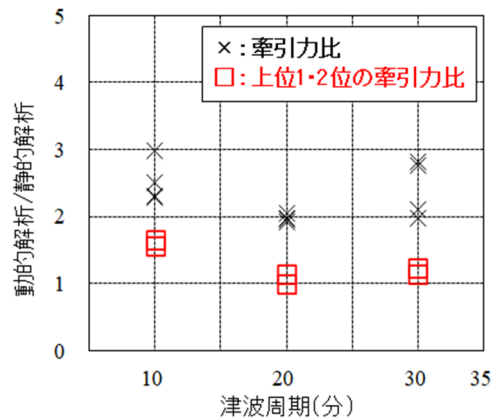


図-4.9 船型別の牽引力比(模型実験/簡易法)

模型実験と簡易法による牽引力および牽引力比(模型実験/簡易法)の計算結果を表-4.6に示す。また、牽引力比を津波周期別にプロットしたものが図-4.9である。なお、赤色で示した点は、6基の係船柱の中で模型実験による牽引力の大きさが上位1および2位となった牽引力(B2, B5)を示している。

表-4.6 水理模型実験と簡易法による牽引力および牽引力比（模型実験／簡易法）の一覧（流れ）

(a) 船側方向

ライン名称（係船柱名称）	津波周期：10 min			津波周期：20 min			津波周期：30 min		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	実験	簡易	実験／簡易	実験	簡易	実験／簡易	実験	簡易	実験／簡易
ヘッドライン (B1)	3.9	1.3	2.98	2.6	1.3	1.98	3.7	1.3	2.82
プレストライン (B2)	63.8	38.6	1.65	43.5	38.6	1.14	47.1	38.6	1.23
スプリングライン (B3)	2.9	1.3	2.28	2.6	1.3	2.05	2.5	1.3	1.97
スプリングライン (B4)	3.2	1.3	2.50	2.5	1.3	1.95	2.7	1.3	2.11
プレストライン (B5)	64.2	40.9	1.57	40.6	40.9	0.99	46.9	40.9	1.15
スターンライン (B6)	3.0	1.3	2.31	2.5	1.3	1.92	3.6	1.3	2.77

(b) 船首尾方向

ライン名称（係船柱名称）	津波周期：10 min			津波周期：20 min			津波周期：30 min		
	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
	実験	簡易	実験／簡易	実験	簡易	実験／簡易	実験	簡易	実験／簡易
ヘッドライン (B1)	3.1	0.09	34.44	1.8	0.09	20.00	1.6	0.09	17.78
プレストライン (B2)	4.2	0.07	60.00	3.1	0.07	44.29	3.8	0.07	54.29
スプリングライン (B3)	5.3	0.08	66.25	2.4	0.08	30.00	1.8	0.08	22.50
スプリングライン (B4)	4.7	0.09	52.22	2.2	0.09	24.44	1.9	0.09	21.11
プレストライン (B5)	4.9	0.11	44.55	3.4	0.11	30.91	3.8	0.11	34.55
スターンライン (B6)	3.3	0.91	3.63	1.9	0.91	2.09	1.6	0.91	1.76

本図より、船側方向の流れに対する全ての牽引力比は、1.0～3.0程度であり、模型実験と簡易法との乖離は大きく、簡易法の過小評価の程度は著しい。しかしながら、大きく牽引力を負担する2つの係船柱に限定すれば、牽引力比は1.0～1.7程度であり、簡易法により一定の精度で最大牽引力を推定可能であることが分かる。特定の実験条件下での結果ではあるが、簡易法により算定された牽引力を1.7倍程度すれば、津波周期の長短に関わらず、模型実験による最大牽引力をカバーできることになる。

5. おわりに

風や津波が船舶に作用した際の船舶牽引力を正確に評価するためには、動的解析を実施することが基本である。しかしながら、動的解析の実施にあたっては、専門的知識が要求され、船舶諸元や係船索の配置状況など詳細な解析条件を設定しなければならないため、コストや時間の問題もあり、容易に実施することは難しい。

このため、本検討では、風や津波が船舶に作用した際の船舶牽引力を、動的解析によらず簡単に評価できる手法として簡易法を提案し、その適用性を確認した。簡易法の骨子は、船体に作用する風や津波による荷重と係船索に作用する張力とを静的釣合い状態を探索することにより、係船索の張力を算定するものである。簡易法を、静的釣合いに基づく既往手法（港研資料No.102, 港研資

料No.427）と比較すると、簡易法は係船索の張力・伸び率特性における非線形性や各係船索の配置をより正確に反映できる点に優位性がある。

さらに、本検討では、過去に行われた風や津波に対する動的解析や水理模型実験の結果と簡易法による結果との比較により、動的解析に替えて簡易法による牽引力の評価を行う場合の適用性を確認した。その結果は以下のとおりである。

まず、風に対する適用性については、貨物船に岸壁側から船舶側面（船側）に垂直に風が当たる場合について、既往の動的解析（港空研資料 No.1341）による最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較した。その結果、両者の牽引力の相関は高く、簡易法による牽引力に一定程度の倍率を乗じることで、動的解析の最大牽引力を推定できることが確認された。具体的に示すと、動的解析による牽引力の大きさが上位 2 位までの牽引力に限れば、5 万 GT 以上の船型では簡易法による牽引力に 1.2 倍程度、5 万 GT 未満から 1 万 GT 程度までの船型では 1.7 倍程度を乗じれば、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできる。

津波に対する適用性については、既往の動的解析⁵⁾および水理模型実験（港空研資料 No.1213）から得られた最大牽引力と簡易法による牽引力とを比較することにより確認した。津波は、規則波に基づき流速が変化する往復流であり、船側方向と船首尾方向の流れを対象としている。比較検討の結果、船首尾方向の津波に対しては、簡

簡易法では動的解析や水理模型実験による牽引力は再現できず、簡易法は適用できないことが分かった。

一方、船側方向の津波については、風の場合と同様に、動的解析および水理模型実験による牽引力と簡易法による牽引力との比較の結果、牽引力の大きさが上位2位までの牽引力に限れば、簡易法による牽引力に一定程度の倍率を乗じることで、動的解析や水理模型実験の最大牽引力を推定できることが確認された。なお、動的解析との比較結果（コンテナ船：1万DWT～16.5万DWT、津波周期：10min）に基づくと、簡易法による牽引力に1.5倍程度を乗じれば、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできる。また、水理模型実験との比較結果（コンテナ船：5万DWT、津波周期：10～30min）からは、簡易法による牽引力に1.7倍程度を乗じれば、動的解析による最大牽引力を概ねカバーできる。これらを総合すると、津波時の船舶牽引力の評価への簡易法の適用にあたっては、安全側の評価として簡易法による牽引力に1.7倍程度を乗じる必要がある。

以上の結果より、船体に風や津波が船側方向に作用した際の最大牽引力（動的な影響が考慮された牽引力）は、簡易法による牽引力に一定の倍率を乗じることで、推定可能であることが示された。このため、本資料で提案した簡易法は、動的解析の代替手法として、概略検討の段階で利用できると考えられる。なお、概略検討としては、係船柱の設計において、概略設計段階や既存岸壁への大型船入港に対する予備的検討段階などで風に対する牽引力の推定が必要とされる場合を想定している。ただし、本資料で示した検討条件（船型、風速の範囲、津波波形（例：段波状の津波）、係留配置、係船索の張力・伸び率特性など）と大きく異なる条件に対して簡易法を適用する場合には、あらかじめ簡易法と動的解析とを比較して簡易法の推定精度を評価するなど、簡易法の適用性を事前に確認する必要がある。

（2021年8月31日受付）

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、港湾施設研究室の交流研究員である三上康光氏（出向元：三井共同建設コンサルタント株式会社）より貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。なお、本検討で利用した文献5)に示す解析結果は、国土交通省港湾局海岸・防災課より提供を頂いたものであり、解析の実施にあたっては株式会社アルファ水工コンサルタンツから技術的知見の提供を受けている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、公益社団法人日本港湾協会、2018。
- 2) 米山治男：係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討、港湾空港技術研究所資料No.1341、2018。
- 3) 国土交通省HP：海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会
(https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk7_000026.html) (2021年8月6日閲覧)
- 4) 米山治男、大垣圭一、津田宗男、栗原明夫、平石哲也、青野利夫：津波が係留船舶に及ぼす影響に関する模型実験と数値計算、港湾空港技術研究所資料No.1213、2010。
- 5) 国土交通省HP：海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会（第2回委員会資料1「津波が係留船舶に及ぼす影響に関する数値シミュレーション結果」）(<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001396041.pdf>) (2021年8月6日閲覧)
- 6) 稲垣紘史、山口孝市、片山猛雄：けい船柱の標準設計（案）、港湾技研資料No.102、1970。
- 7) 福田功、柳生忠彦：係船柱にかかるけん引力について、港湾技研資料No.427、1982。

【付録A1】

風に対する簡易法を適用した計算事例（船側方向）

A1.1 計算事例の概要及び条件設定

(1) 概要

本計算事例では、船側方向の風を受ける場合の簡易法への適用事例を示す。本事例では、貨物船を対象とした既往の動的解析（港空研資料 No.1341）^{a1)}のうち、本文中の表-3.1 に示す船型のうち 10 万 GT（総トン数）の船舶に風速 15 m/s が作用した場合とする。本解析ケースの概要を表-A1.1 に示す。

表-A1.1 解析ケースの概要

主要船舶諸元等						その他主要条件			
総トン数 (GT)	全長 (m)	型幅 (m)	満載喫水 (m)	水面上投影面積 (m ²)	乾舷 (m)	抗力係数	曲柱設置間隔 (m ²)	係船索の破断強度 (kN)	風速 (m/s)
10万	313	47.8	19.1	10963.4	17.3	0.925	45	906	15

(2) 主要条件

係留施設は重力式岸壁（直立）とし、岸壁の天端高は D.L.+4.0 m、前面水位は D.L.±0.0 m としている。係船柱の設置間隔は 45 m 間隔とし、係船索の配置は図-A1.1 に示すとおりである。係船索の本数は合計 8 本である。なお、各係船柱や船舷側の係船索の固定点の座標値や初期の係船索の角度や長さ等の詳細情報は後述する。

対象船舶で利用する係船索の破断強度は 906 kN とした。係船索の材質はナイロンエイトロープとし、図-A1.2 に示すとおり破断強度で伸び率 51% となるように設定した。なお、本解析では、初期張力として破断荷重の 7%（63.4 kN）を最初にかけているため、各係船索は初期張力に対応する伸び（20%）が初期の係船状態で発生していることになる。このため、船体変位に伴い発生する張力は、初期張力分も含まれた張力として算出される。なお、実際の張力計算では、係船索の張力と伸び率関係の全区間を 18 分割し、各分割点の間を線形補間することにより、任意の伸び率に対する張力を計算している。

次に、船体に作用する風荷重を算定するための式

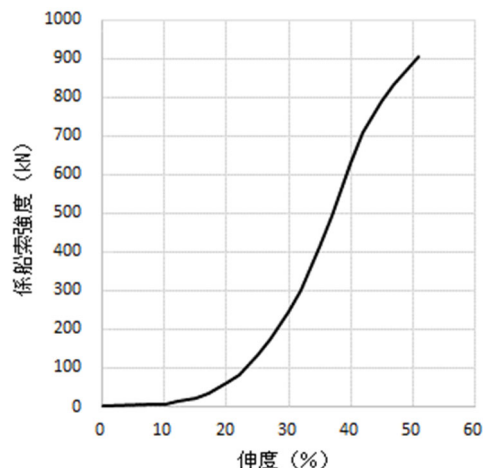


図-A1.2 ナイロンエイトロープの張力と伸び率との関係

(A1.1)に必要とされるパラメータの設定内容を示す。

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_y C_{Fy} \dots\dots\dots (A1.1), (2-b)の再掲$$

ここで、 F_y ：船体に作用する風荷重合力のy方向（船側方向）成分（kN）、 ρ_a ：空気の密度（t/m³）、 U ：風速（m/s）、 A_y ：船体の水面上側面投影面積（m²）、 C_{Fy} ：船体の船側方向（y軸方向）の風抗力係数、である。

水面上側面投影面積については、既往の動的解析^{a1)}の条件を設定する（表-A1.1 参照）。風抗力係数については、上田ら^{a2)}が提案した一般貨物船の空載状態を対象とした算定式(A1.2)を適用して、設定した。

$$C_y = 1.012 \sin \theta + 0.054 \sin 3\theta - 0.033 \sin 5\theta - 0.017 \sin 6\theta \dots\dots\dots (A1.2)$$

ここで、 θ は風向（°）であり、本検討では岸壁側から船側面に垂直に風が作用する条件であるため、表-3.1 に示す既往の動的解析と同じ条件となる風抗力係数の（0.925）を使用した。

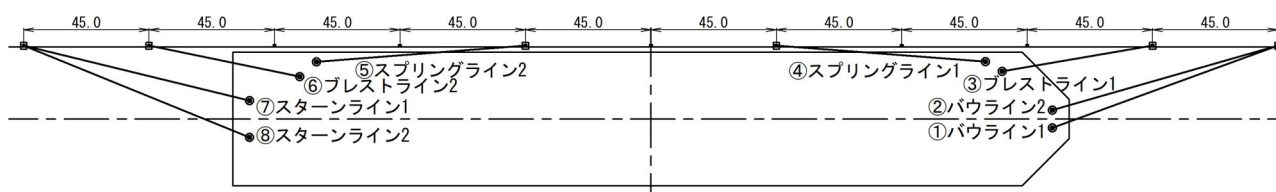


図-A1.1 係船索の配置（貨物船：10万GT）

A1.2 計算結果

(1) 船体に作用する風荷重

始めに、風速 15 m/s を受けた際の船体に作用する船側方向の荷重を計算する。空気密度を 1.23×10^{-3} (t/m³) と設定した上で、式 (A1.1) に基づき計算すると、船体に作用する荷重は 1403.3 (kN) となる。この船体に作用する風荷重を静的な釣合い状態を探索するための与条件とする。表計算ソフトを利用して計算した結果を表-A1.2 に示す。

表-A1.2 風により船体に作用する荷重 (船側方向)

総トン数 (GT)	水面上投影面積(m ²)	抗力係数	空気密度 (t/m ³)	船体に作用する荷重(kN)
				風速15 m/s
10万	10963.4	0.925	1.23×10^{-3}	1403.3

$$F_y = \frac{1}{2} \times (0.00123) \times (15)^2 \times (10963.4) \times (0.925) = 1403.3(\text{kN})$$

(2) 張力の算定

次に、船体に作用する風荷重と釣合う張力を計算する。具体的には、強制変位 (ΔY) を段階的に増加させていき、船体に作用する風荷重と張力が釣合うまで繰り返し計算を行う。ここでは、計算例として、表-A1.3 に静的釣合い状態となっている船体の強制変位 $\Delta Y=25.6$ m を与えた際の各係船索の張力の表計算ソフトの結果を示す。

表中の 5 列目から 7 列目に岸壁側と船舶側の係船索の座標より整理した初期配置の相対座標を示す。この値は張力を算出したい船型に合わせて設定する。8 列目から 11 列目の係船索長と狭角、仰角は係船索の座標値 (表中の 5 列目から 7 列目) より算出する。初期状態での各係船索の配置 (表中の 5 列目から 11 列目に示す箇所) と船体変位後の各係船索の位置 (表中の 12 列目から 14 列目に示す箇所) との関係から、各係船索の船体変位後の伸び率 (表中の 15 列目に示す数値) が算定される。そして、変位後の伸び率から各係船索 i の張力 T_i を、線形補間した係船索の張力と伸び率の関係を用いることで、算定す

ることができる (表中の 16 列目に示す数値)。

次に、各係船索 i の張力 T_i から、船側方向の合力 T_y を計算する。各係船索は、船体変位後にそれぞれ係留角度 θ_i (係船索と岸壁法線との狭角) および仰角 α_i (係船索が水平面となす角度) を有している (表中の 13 列および 14 列に示す箇所)。このため、表中の 16 列目を平面系張力と鉛直系張力に成分分解し (表中の 17 列目から 18 列目)、更に表中の 17 列目を式(A1.3)によって、各張力 T_i から船側方向の合力 T_y を計算することができる (表中の 20 列目に示す数値)。そして、これらの成分を合計することにより、船体変位後の全係船索 ($N=8$: 係船索の本数) の張力による船側方向の合力 T_y を式(A1.4)より算定することができる (表中の 20 列目の最下段に示す値 1400.16kN)。

$$T_{y_i} = T_i \sin \theta_i \dots \dots \dots (A1.3), (7-9) \text{の再掲}$$

$$= T_i \sin \theta_i \cos \alpha_i$$

$$T_y = \sum_{i=1}^N T_{y_i} \dots \dots \dots (A1.4), (7-10) \text{の再掲}$$

このようにして算定した係船索張力の y 方向の合力 T_y が、表-A1.2 に示す静的釣合いの与条件である船体に作用する風荷重と概ね同じ値となっていることがわかる。このため、船体変位 25.6 m の状態が、風速 15 m/s に対する静的釣合い状態になる。

さらに、各係船索の張力の値を見ると、⑥番の係船索で伸び率が最大となり (37.68%)、張力も最大 (524.24 kN) となっている。なお、当該係船索の伸び率は、破断荷重時の伸び率 51% には達していないため、この係留条件ではさらに大きな風速まで耐えることができる。

参考文献

- a1) 米山治男: 係船柱に作用する船舶の牽引力に関する検討, 港湾空港技術研究所資料 No.1341, 2018.
- a2) 上田茂, 白石悟, 浅野恒平, 大島弘之: 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, 1993.

表-A1.3 風 (船側方向) による船体に作用する荷重一覧 (風速15 m/s, 船体変位 $\Delta Y=25.6$ m)

列番号																																
1列	2列	3列	4列	5列			8列	9列	10列	11列	12列	13列	14列	15列	16列	17列	18列	19列	20列													
				初期配置																初期張力有初期配置係船索長	初期張力無係船索長	狭角	仰角	変位後係船索長	変位後狭角	変位後仰角	伸び率	張力	平面系張力	鉛直系張力	張力 (kN)	
				kN	m	m																									m	m
1	バウ1	①	906	81.00	29.75	11.91	87.11	89.89	20.17	7.86	98.33	34.35	6.92	33.45	355.87	353.28	42.88	291.87	199.34													
1	バウ2	②	906	81.00	23.05	11.91	85.05	88.04	15.88	8.05	95.23	30.99	7.18	31.97	302.01	299.64	37.75	256.87	154.28													
2	ブレ1	③	906	54.00	9.19	11.91	56.06	44.85	9.66	12.27	85.33	32.79	10.50	36.54	474.85	466.90	86.54	382.50	252.86													
3	スプ1	④	906	75.00	5.85	11.91	76.16	60.93	4.46	9.00	82.19	22.75	8.33	27.92	194.74	192.69	28.21	177.70	74.52													
4	スプ2	⑤	906	75.00	5.85	11.91	76.16	60.93	4.46	9.00	82.19	22.75	8.33	27.92	194.74	192.69	28.21	177.70	74.52													
5	ブレ2	⑥	906	54.00	11.10	11.91	56.40	45.12	11.62	12.19	86.37	34.20	10.34	37.68	524.24	515.73	94.10	426.55	289.88													
6	スタ1	⑦	906	81.00	19.71	11.91	84.21	67.37	13.68	8.13	93.57	29.22	7.31	31.12	277.60	275.34	35.32	240.30	134.41													
6	スタ2	⑧	906	81.00	33.09	11.91	88.31	70.65	22.22	7.75	100.73	35.83	6.79	34.06	378.17	375.52	44.71	304.07	220.35													
																	Y方向張力合計			1400.16												

【付録 A2】

流れに対する簡易法を適用した計算事例(船側方向)

A2.1 計算事例の概要及び条件設定

(1) 概要

本計算事例では、船側方向の流れを受ける場合の簡易法への適用事例を示す。本事例では、コンテナ船を対象とした既往の動的解析¹⁾のうち、本文中の表-4.1に示す船型のうち10万DWT(載貨重量トン数)の船舶に流れが作用した場合とする。本解析ケースの概要を表-A2.1に示す。

(2) 主要条件

係留施設は、棧橋状の流れが透過する構造を仮定し、係留施設の天端高はD.L.+4.0mとしている。曲柱の設置間隔については30m間隔とし、係船索の配置は図-A2.1に示すとおりである。係船索の本数は合計12本である。なお、係船索の固定点の座標値や初期の係船索の角度や長さ等の詳細情報は後述する。

対象船舶で利用する係船索の破断強度は796kNとした。係船索の材質はナイロンエイトロープとし、図-A2.2に示すとおり破断強度で伸び率51%となるように設定した。なお、動的解析では、初期状態において係船索に初期張力を与えず、その後に流れを作用させている。このため、簡易法でも、初期張力を与えない条件で張力の計算を行った。

次に、船体に作用する流れ荷重を式(A2.1)に基づき算定するが、算定に必要なパラメータの設定方法を以下に示す。

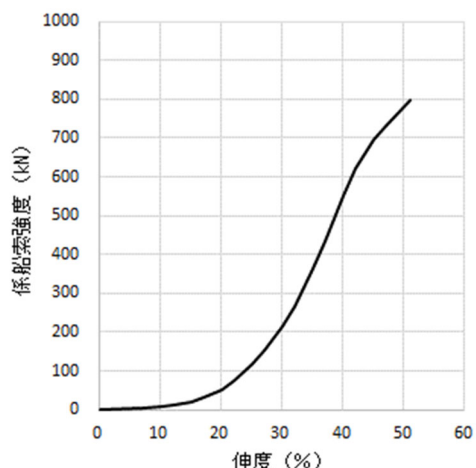


図-A2.2 ナイロンエイトロープの張力と伸び率との関係

(船側方向)

$$R_y = \frac{1}{2} \rho_w C_y S_y V_y^2 \dots \dots \dots (A2.1), (8) \text{の再掲}$$

ここで、 R_y は船体に作用する流れ荷重の船側方向(y方向)成分(kN)、 S_y は船体の喫水面下の側面投影面積(m^2)、 ρ_w は流体の密度(t/m^3)、 V_y は船側方向(y方向)の流速(m/s)、 C_y は船体の船側方向(y方向)の流圧力係数である。

喫水面下の側面投影面積は、既往の動的解析と同じ数値を用いる(表-A2.1)。船側方向の流れに対する流圧力係数は、港湾基準に掲載されている図-A2.3を用いて設定されており、図中の相対流向 90° かつ水深 h と喫水 d の比が1.1の場合の流圧力係数(4.6)を採用している。

表-A2.1 解析ケースの概要

主要船舶諸元等							係留条件		津波(周期10 min)		
載貨重量 トン数 (DWT)	全長 (m)	型幅 (m)	満載 喫水 (m)	喫水面 下側面 投影面積 (m^2)	流圧力 係数	浸水面積 (m^2)	曲柱 設置間隔 (m)	係船索の 破断強度 (kN)	方向	最大流速 (m/s)	最大水位 (m)
10万	338	45.3	14.6	4701.2	4.6	17178.57	30	796 (ϕ 70mm)	船側	0.5	1.0

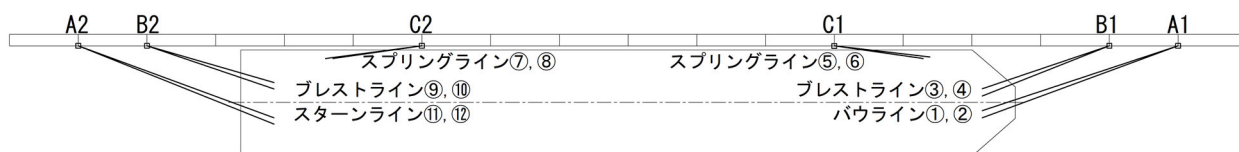


図-A2.1 係船索の配置(コンテナ船:10万DWT)

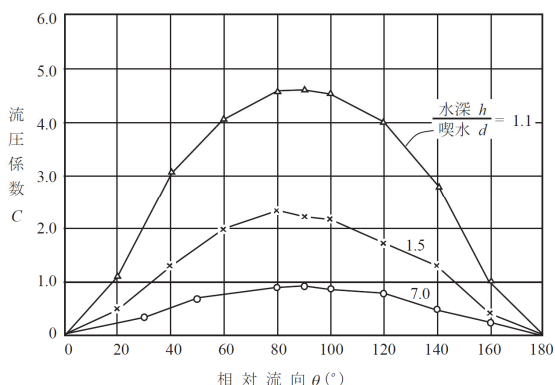


図-A2.3 流圧力係数^{b2)}

A2.2 計算結果

(1) 船体に作用する流れ荷重

始めに、流速0.5 m/sを受けた際の船体に作用する船側方向の荷重を計算する。流体密度を1.03 (t/m³) と設定した上で、式 (A2.1) に基づき計算すると、船体に作用する荷重は2784.3 (kN) となる。この船体に作用する流れ荷重を静的な釣合い状態を探索するための与条件とする。表計算ソフトを利用して計算した結果を表-A2.2に示す。

表-A2.2 流れ（定常流）による船体に作用する荷重一覧

載貨重量 トン数 (DWT)	船側方向				船体に作用する 荷重(kN)
	喫水面下側 面投影面積 (m ²)	流圧 力係 数	流体 密度 (t/m ³)	流速 (m/s)	
10万	4701.2	4.6	1.03	0.5	2784.3

$$R_y = \frac{1}{2} \times (1.03) \times (4.6) \times (4701.2) \times (0.5)^2$$

$$= 2784.3(\text{kN})$$

表-A2.3 流れ（船側方向）による船体に作用する荷重一覧（流速0.5 m/s, 船体変位 ΔY=36.1 m）

		列番号																	
1列	2列	3列	4列	5列	6列	7列	8列	9列	10列	11列	12列	13列	14列	15列	16列	17列	18列	19列	
																			初期配置
破断荷重		X	Y	Z	n	deg	deg	n	deg	deg	%	kN	kN	X方向	Y方向				
A1	バウ	①	796	85.44	33.04	11.59	82.34	21.14	7.21	110.52	38.98	6.02	19.69	55.59	55.28	5.83	42.87	34.77	
		②	796	85.44	29.82	11.59	91.23	19.24	7.30	108.54	37.65	6.13	18.97	50.13	49.34	5.35	39.46	30.44	
B1	ブレ	③	796	55.44	23.48	11.59	81.31	22.95	10.90	82.21	47.06	8.11	34.09	352.51	348.98	49.73	237.74	255.48	
		④	796	55.44	20.31	11.59	80.17	20.12	11.11	79.94	45.50	8.34	32.86	312.22	308.92	45.29	216.52	220.34	
C1	スプ	⑤	796	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22	61.42	45.84	10.88	39.02	526.93	517.46	99.46	380.50	371.22	
		⑥	796	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37	59.26	48.12	11.28	44.08	693.13	679.74	135.58	453.78	506.10	
C2	スプ	⑦	796	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37	59.26	48.12	11.28	44.08	693.13	679.74	135.58	453.78	506.10	
		⑧	796	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22	61.42	45.84	10.88	39.02	526.93	517.46	99.46	380.50	371.22	
B2	ブレ	⑨	796	55.44	17.59	11.59	59.31	17.80	11.27	78.04	44.08	8.54	31.58	272.73	269.71	40.50	193.75	187.63	
		⑩	796	55.44	20.31	11.59	60.17	20.12	11.11	79.94	45.50	8.34	32.86	312.22	308.92	45.29	216.52	220.34	
A2	スタ	⑪	796	85.44	32.99	11.59	92.32	21.11	7.22	110.49	38.96	6.02	19.68	55.51	55.20	5.82	42.92	34.71	
		⑫	796	85.44	35.71	11.59	93.33	22.88	7.14	112.21	40.05	5.93	20.23	60.08	59.76	6.21	45.75	38.45	
																	合計流圧力		2776.80

(2) 張力の計算

次に、流れによる船体荷重と釣合う張力を計算する。具体的には、強制変位 (ΔY) を段階的に増加させていき、船体に作用する流れ荷重と張力が釣合うまで繰り返し計算を行う。ここでは、計算例として、表-A2.3 に静的釣合い状態となっている船体の強制変位 ΔY=36.1 m を与えた際の各係船索の張力の計算結果（表計算ソフトの結果）を示す。

表中の 5 列目から 7 列目に岸壁側と船舶側の係船索の座標より整理した初期配置の相対座標を示す。この値は張力を算出したい船型に合わせて設定する。8 列目から 10 列目の係船索長と狭角、仰角は係船索の座標値（表中の 5 列目から 7 列目）より算出する。初期状態での各係船索の配置（表中の 5 列目から 10 列目に示す箇所）と船体変位後の各係船索の位置（表中の 11 列目から 13 列目に示す箇所）との関係から、各係船索の船体変位後の伸び率（表中の 14 列目に示す数値）が算定される。そして、変位後の伸び率から各係船索 i の張力 T_i を、多項式で整理した係船索の張力と伸び率の関係を用いることで、算定することができる（表中の 15 列目に示す数値）。なお、張力と伸び率との関係は、付録 A1（風の場合）では 18 分割して線形補間で近似したが、上述したような適切な関数で近似式することもできる。

次に、各係船索 i の張力 T_i から、船側方向の合力 T_y を計算する。各係船索は、船体変位後にそれぞれ係留角度 θ_i（係船索と岸壁法線との狭角）および仰角 α_i（係船索が水平面となす角度）を有している（表中の 12 列目および 13 列目に示す箇所）。このため、表中の 15 列目を平面系張力と鉛直系張力に成分分解し（表中の 16 列目から 17

列目) , 更に表中の 16 列目を式(A2.2)によって, 各張力 T_i から船側方向の合力 T_{yi} を計算することができる (表中の 19 列目に示す数値) . そして, これらの成分を合計することにより, 船体変位後の全係船索 ($N=12$: 係船索の本数) の張力による船側方向の合力 T_y を式(A2.3)より算定することができる (表中の 19 列目の最下段に示す値 2776.80 kN) .

$$T_{yi} = T_i \sin \theta_i \dots\dots\dots (A2.2), (7-9) \text{の再掲}$$

$$= T_i \sin \theta_i \cos \alpha_i$$

$$T_y = \sum_{i=1}^N T_{yi} \dots\dots\dots (A2.3), (7-10) \text{の再掲}$$

このようにして算定した係船索張力の y 方向の合力 T_y が, 表-A2.2 に示す静的釣合いの与条件である船体に作用する流れ荷重と概ね同じ値となっていることがわかる. このため, 船体変位 36.1 m の状態が, 流速 0.5 m/s に対する静的釣合い状態になる.

さらに, 各係船索の張力の値を見ると, ⑥番, ⑦番の係船索で伸び率が最大となり (44.08%) , 張力も最大 (693.13 kN) となっている. ただし, 当該係船索の伸び率は, 破断荷重時の伸び率 51%には達していないため, この係留条件では流速 0.5 m/s より大きな流速まで耐えることができる.

参考文献

b1) 国土交通省 HP : 海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会 (第 2 回委員会資料 1 「津波が係留船舶に及ぼす影響に関する数値シミュレーション結果」) (<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001396041.pdf>) (2021 年 8 月 6 日閲覧)

b2) 国土交通省港湾局監修 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 公益社団法人 日本港湾協会, 2018.

【付録A3】

流れに対する簡易法を適用した計算事例(船首尾方向)

A3.1 計算事例の概要及び条件設定

(1) 概要

本計算事例では、船首尾方向の流れを受ける場合の簡易法への適用事例を示す。本事例では、コンテナ船を対象とした既往の動的解析⁽¹⁾のうち、本文中の表-4.1に示す船型のうち10万DWT(載貨重量トン数)の船舶に流れが作用した場合とする。本解析ケースの概要を表-A3.1に示す。

(2) 主要条件

係留施設の条件、係船索の破断強度や係船索の配置や長さ等は付録A2と同じ条件である。

次に、船体に作用する流れ荷重を式(A3.1)に基づき算定するが、算定に必要なパラメータの設定方法を以下に示す。

(船首尾方向)

$$F_x = 0.0014 S_x V_x^2 \dots \dots \dots (A3.1), (9) \text{の再掲}$$

ここで、 F_x は船体に作用する流れ荷重合力のx方向(船首尾方向)成分(kN)、 S_x は船体の浸水面積(m²)、 V_x はx方向(船首尾方向)の流速(m/s)、である。

浸水面積は、既往の動的解析と同じ数値を用いる(表-A3.1)。

A3.2 計算結果

(1) 船体に作用する流れ荷重

始めに、流速0.5 m/sを受けた際の船体に作用する船首尾方向の荷重を計算する。流体密度を1.03 (t/m³)と設定した上で、式(A3.1)に基づき計算すると、船体に作用する荷重は6.0 (kN)となる。この船体に作用する流れ荷重を静的な釣合い状態を探索するための与条件とする。表計算ソフトを利用して計算した結果を表-A3.2に示す。

表-A3.2 流れ(定常流)による船体に作用する荷重一覧

載貨重量 トン数 (DWT)	浸水面積 (m ²)	流体 密度 (t/m ³)	流速 (m/s)	船体に作 用する 荷重(kN)
10万	17178.57	1.03	0.5	6.0

$$F_x = 0.0014 \times (17178.57) \times (0.5)^2 = 6.0(\text{kN})$$

(2) 張力の計算

次に、船体に作用する流れ荷重と釣合う張力を計算する。具体的には、強制変位(ΔX)を段階的に増加させていき、船体に作用する流れ荷重と張力が釣合うまで繰り返し計算を行う。ここでは、計算例として、表-A3.3に静的釣合い状態となっている船体の強制変位 $\Delta X=0.9$ mを与えた際の各係船索の張力の計算結果(表計算ソフトの結果)を示す。

なお、本検討では、船首から船尾方向に船体が移動した場合を検討しているため、係船索の配置方向によっては、係船索長が伸びて張力が増加するものと、係船索が

表-A3.1 解析ケースの概要

主要船舶諸元等							係留条件		津波(周期10 min)		
載貨重量 トン数 (DWT)	全長 (m)	型幅 (m)	満載 喫水 (m)	喫水面 下側面 投影面積 (m ²)	流圧力 係数	浸水面積 (m ²)	曲柱 設置間隔 (m)	係船索の 破断強度 (kN)	方向	最大流速 (m/s)	最大水位 (m)
10万	338	45.3	14.6	4701.2	4.6	17178.57	30	796 (φ70mm)	船首尾	0.5	1.5



図-A3.1 係船索の配置(コンテナ船:10万DWT) (図-A2.1の再掲)

緩む方向で張力が作用しなくなるものと分かれる。図-A3.1の場合、船首側（図面の右側）の4本の係船索（パウライン①，②，プレストライン③，④）と船尾側（図面の左側）の2本の係船索（スプリングライン⑦，⑧）の合計6本のみで、船体に作用する荷重を負担することになる。この点が、付録A2の船側方向からの場合とは異なる点である。

表中の5列目から7列目に岸壁側と船舶側の係船索の座標より整理した初期配置の相対座標を示す。この値は張力を算出したい船型に合わせて設定する。8列目から10列目の係船索長と狭角，仰角は係船索の座標値（表中の5列目から7列目）より算出する。初期状態での各係船索の配置（表中の5列目から10列目に示す箇所）と船体変位後の各係船索の位置（表中の11列目から13列目に示す箇所）との関係から，各係船索の船体変位後の伸び率（表中の14列目に示す数値）が算定される。そして，変位後の伸び率から各係船索*i*の張力*T_i*を，多項式で整理した係船索の張力と伸び率の関係を用いることで，算定することができる（表中の15列目に示す数値）。

次に，各係船索*i*の張力*T_i*から，船首尾方向の合力*T_h*を計算する。各係船索は，船体変位後にそれぞれ係留角度*θ_i*（係船索と岸壁法線との狭角）および仰角*α_i*（係船索が水平面となす角度）を有している（表中の12列目および13列目に示す箇所）。このため，表中の15列目を平面系張力と鉛直系張力に成分分解し（表中の16列目から17列目），更に表中の16列目を下式(A3.2)によって，各張力*T_i*から船首尾方向の合力*T_h*を計算することができる（表中の18列目に示す数値）。そして，これらの成分を合計することにより，船体変位後の全係船索（*N*=6：係船索の本数）の張力による船側方向の合力*T_h*を下式(A3.3)より算定することができる（表中の18列目の最下段に示す値5.82 kN）。

$$T_{hi} = T_i \cos \theta_i \quad \dots\dots\dots (A3.2)$$

$$T_h = \sum_{i=1}^N T_{hi} \quad \dots\dots\dots (A3.3)$$

ここに，*T_{h_i}*：係船索*i*に作用する張力の水平方向成分，*θ_i*：船体の強制変位後の各係船索*i*における係留角度（係船索と岸壁法線との狭角），*T_h*：全係船索（*N*本）の張力の*x*方向（船首尾方向）成分の合計値，である。

このようにして算定した係船索張力の*x*方向の合力*T_h*が，表-A3.2に示す静的釣合いの与条件である船体に作用する流れ荷重と概ね同じ値となっていることがわかる。このため，船体変位0.9 mの状態が，流速0.5 m/sに対する静的釣合い状態になる。

さらに，各係船索の張力の値を見ると，⑦番の係船索で伸び率が最大となり（2.07%），張力も最大（1.51 kN）となっている。しかし，本編にも記載のとおり，船首尾方向の流れの場合には，簡易法による牽引力は動的解析による牽引力を再現できず，過小評価（危険側の評価）となっている。このことから，現時点では，本資料で提案する簡易法は，船首尾方向の流れに対しては適用することができない。

参考文献

- c1) 国土交通省 HP：海・船の視点から見た港湾強靱化検討委員会（第2回委員会資料1「津波が係留船舶に及ぼす影響に関する数値シミュレーション結果」）
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001396041.pdf>
 （2021年8月6日閲覧）

表-A3.3 流れ（船側方向）による船体に作用する荷重一覧（流速0.5 m/s，船体変位 Δ*X*=0.9 m）

列番号																														
1列	2列	3列	4列	5列			8列	9列	10列	11列	12列	13列	14列	15列	16列	17列	18列	19列												
				初期配置															初 期 係船索長	狭 角	俯 角	変 位 後 係船索長	変 位 後 狭 角	変 位 後 俯 角	伸 び 率	張 力	平面系 張 力	鉛直系 張 力	張力(kN)	
				X	Y	Z																							X方向	Y方向
係船柱	係船索	係船索 番号	破断荷重 kN	m	m	m	m	deg	deg	m	deg	deg	%	kN	kN	kN	kN	kN												
A1	パウ	①	796	35.44	33.04	11.59	92.34	21.14	7.21	93.17	20.84	7.15	0.90	0.66	0.65	0.08	0.61	0.23												
		②	796	35.44	29.32	11.59	91.23	19.24	7.30	92.08	19.05	7.23	0.93	0.68	0.67	0.09	0.63	0.22												
B1	プレ	③	796	55.44	23.48	11.59	81.31	22.95	10.90	82.13	22.82	10.76	1.34	0.98	0.96	0.18	0.89	0.37												
		④	796	55.44	20.31	11.59	80.17	20.12	11.11	81.00	19.82	10.96	1.38	1.01	0.99	0.19	0.93	0.34												
C1	サブ	⑤	796	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22	44.18	9.49	15.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
		⑥	796	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37	41.13	10.24	16.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
C2	サブ	⑦	796	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37	41.98	10.24	16.03	2.07	1.51	1.45	0.42	1.43	0.26												
		⑧	796	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22	45.03	9.49	14.92	1.92	1.40	1.35	0.36	1.33	0.22												
B2	プレ	⑨	796	55.44	17.59	11.59	59.31	17.60	11.27	59.31	17.34	11.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
		⑩	796	55.44	20.31	11.59	80.17	20.12	11.11	80.17	19.82	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
A2	スタ	⑪	796	35.44	32.99	11.59	92.32	21.11	7.22	92.32	20.91	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
		⑫	796	35.44	35.71	11.59	93.33	22.68	7.14	93.33	22.47	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00												
																合計流圧力		5.82												

【付録B】

貨物船の係船索配置に関する詳細情報（3章の解析条件）

表-B.1 貨物船20万GTにおける係船索の配置（座標、長さ、角度）

係船索	係船索 番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初 期 係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
			m	m	m	m	m	m	m	m	m			
パウ1	①	1130	177.60	-4.07	47.49	225.00	31.60	30.50	47.40	35.67	16.99	61.71	36.97	15.98
パウ2	②	1130	177.60	4.07	47.49	225.00	31.60	30.50	47.40	27.53	16.99	57.39	30.14	17.22
ブレ1	③	1130	155.40	20.95	47.49	180.00	31.60	30.50	24.60	10.65	16.99	31.74	23.41	32.36
サブ1	④	1130	148.00	25.03	47.49	45.00	31.60	30.50	103.00	6.57	16.99	104.60	3.65	9.35
サブ2	⑤	1130	-148.00	25.03	47.49	-45.00	31.60	30.50	103.00	6.57	16.99	104.60	3.65	9.35
ブレ2	⑥	1130	-155.40	18.62	47.49	-180.00	31.60	30.50	24.60	12.98	16.99	32.59	27.81	31.42
スタ1	⑦	1130	-177.60	8.15	47.49	-225.00	31.60	30.50	47.40	23.45	16.99	55.55	26.32	17.81
スタ2	⑧	1130	-177.60	-8.15	47.49	-225.00	31.60	30.50	47.40	39.75	16.99	64.15	39.98	15.36

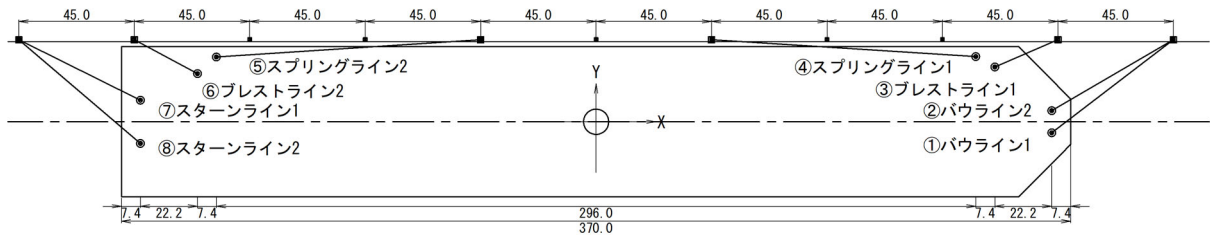


図-B.1 係船索の配置（貨物船：20万GT）

表-B.2 貨物船15万GTにおける係船索の配置（座標、長さ、角度）

係船索	係船索 番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初 期 係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
			m	m	m	m	m	m	m	m	m			
パウ1	①	1040	162.72	-3.75	43.38	225.00	29.30	28.00	62.28	33.05	15.38	72.16	27.95	12.30
パウ2	②	1040	162.72	3.75	43.38	225.00	29.30	28.00	62.28	25.55	15.38	69.05	22.30	12.87
ブレ1	③	1040	142.38	19.30	43.38	180.00	29.30	28.00	37.62	10.00	15.38	41.85	14.89	21.56
サブ1	④	1040	135.60	23.05	43.38	45.00	29.30	28.00	90.60	6.25	15.38	92.11	3.95	9.61
サブ2	⑤	1040	-135.60	23.05	43.38	-45.00	29.30	28.00	90.60	6.25	15.38	92.11	3.95	9.61
ブレ2	⑥	1040	-142.38	17.15	43.38	-180.00	29.30	28.00	37.62	12.15	15.38	42.42	17.90	21.25
スタ1	⑦	1040	-162.72	7.50	43.38	-225.00	29.30	28.00	62.28	21.80	15.38	67.75	19.29	13.12
スタ2	⑧	1040	-162.72	-7.50	43.38	-225.00	29.30	28.00	62.28	36.80	15.38	73.96	30.58	12.00

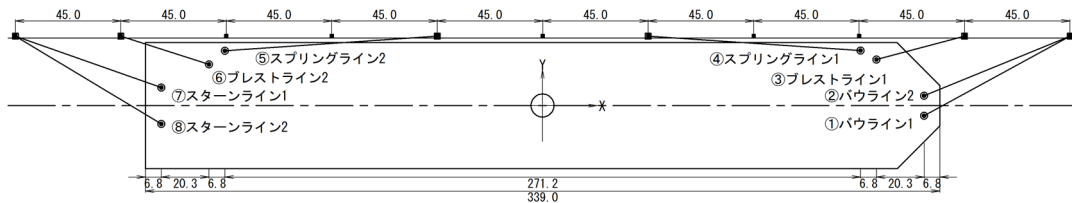


図-B.2 係船索の配置（貨物船：15万GT）

表-B.3 貨物船10万GTにおける係船索の配置 (座標、長さ、角度)

係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
			X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
パウ1	①	906	144.00	-3.35	38.31	225.00	26.40	25.00	81.00	29.75	13.31	87.31	20.16	8.77
パウ2	②	906	144.00	3.35	38.31	225.00	26.40	25.00	81.00	23.05	13.31	85.26	15.89	8.98
ブレ1	③	906	126.00	17.21	38.31	180.00	26.40	25.00	54.00	9.19	13.31	56.37	9.66	13.65
spb1	④	906	120.00	20.55	38.31	45.00	26.40	25.00	75.00	5.85	13.31	76.40	4.46	10.03
spb2	⑤	906	-120.00	20.55	38.31	-45.00	26.40	25.00	75.00	5.85	13.31	76.40	4.46	10.03
ブレ2	⑥	906	-126.00	15.30	38.31	-180.00	26.40	25.00	54.00	11.10	13.31	56.71	11.62	13.57
スタ1	⑦	906	-144.00	6.69	38.31	-225.00	26.40	25.00	81.00	19.71	13.31	84.42	13.67	9.07
スタ2	⑧	906	-144.00	-6.69	38.31	-225.00	26.40	25.00	81.00	33.09	13.31	88.50	22.22	8.65

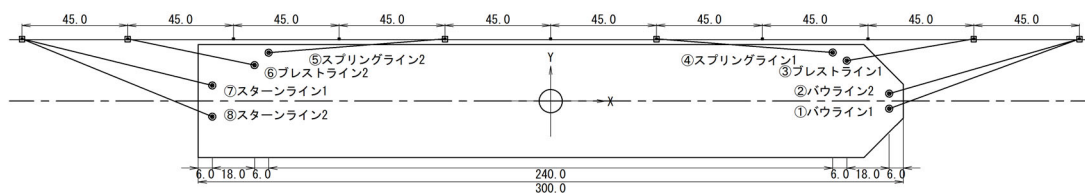


図-B.3 係船索の配置 (貨物船 : 10万GT)

表-B.4 貨物船5万GTにおける係船索の配置 (座標、長さ、角度)

係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
			X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
パウ1	①	796	116.64	-2.74	31.24	180.00	21.55	21.00	63.36	24.29	10.24	68.63	20.98	8.58
パウ2	②	796	116.64	2.74	31.24	180.00	21.55	21.00	63.36	18.81	10.24	66.88	16.53	8.81
ブレ1	③	796	102.06	14.11	31.24	135.00	21.55	21.00	32.94	7.44	10.24	35.29	12.72	16.87
spb1	④	796	97.20	16.86	31.24	45.00	21.55	21.00	52.20	4.69	10.24	53.40	5.14	11.06
spb2	⑤	796	-97.20	16.86	31.24	-45.00	21.55	21.00	52.20	4.69	10.24	53.40	5.14	11.06
ブレ2	⑥	796	-102.06	12.54	31.24	-135.00	21.55	21.00	32.94	9.01	10.24	35.65	15.29	16.69
スタ1	⑦	796	-116.64	5.49	31.24	-180.00	21.55	21.00	63.36	16.06	10.24	66.16	14.23	8.90
スタ2	⑧	796	-116.64	-5.49	31.24	-180.00	21.55	21.00	63.36	27.04	10.24	69.64	23.11	8.46

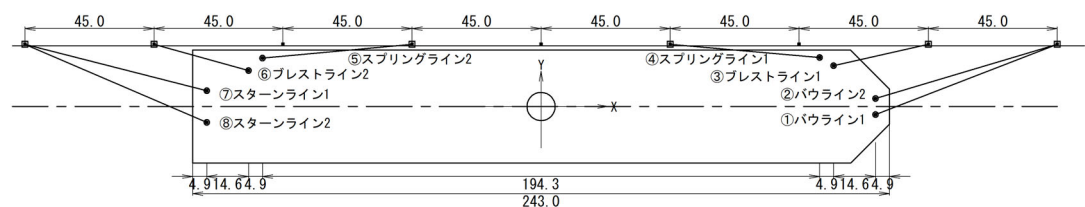


図-B.4 係船索の配置 (貨物船 : 5万GT)

表-B.5 貨物船1万GTにおける係船索の配置 (座標、長さ、角度)

係船索	係船索 番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期 係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
			m	m	m	m	m	m	m	m	m			
パウ1	①	510	71.52	-1.74	19.39	100.00	13.50	15.00	28.48	15.24	4.39	32.60	28.15	7.74
パウ2	②	510	71.52	1.74	19.39	100.00	13.50	15.00	28.48	11.76	4.39	31.13	22.44	8.11
プレ1	③	510	62.58	8.93	19.39	75.00	13.50	15.00	12.42	4.57	4.39	13.94	20.21	18.36
スプ1	④	510	59.60	10.66	19.39	25.00	13.50	15.00	34.60	2.84	4.39	34.99	4.69	7.21
スプ2	⑤	510	-59.60	10.66	19.39	-25.00	13.50	15.00	34.60	2.84	4.39	34.99	4.69	7.21
プレ2	⑥	510	-62.58	7.94	19.39	-75.00	13.50	15.00	12.42	5.56	4.39	14.30	24.13	17.88
スタ1	⑦	510	-71.52	3.47	19.39	-10.00	13.50	15.00	61.52	10.03	4.39	62.49	9.26	4.03
スタ2	⑧	510	-71.52	-3.47	19.39	-100.00	13.50	15.00	28.48	16.97	4.39	33.44	30.79	7.54

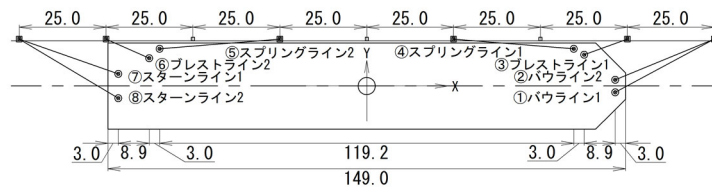


図-B.5 係船索の配置 (貨物船 : 1万GT)

【付録C】

コンテナ船の係船索配置に関する詳細情報（4.2の解析条件）

表-C.1 コンテナ船16.5万DWTにおける係船索の配置（座標、長さ、角度）

係船柱	係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	拱角 deg	俯角 deg
				X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
A1	パウ	①	906	172.80	-7.28	22.82	270.00	30.00	5.87	97.20	37.28	16.95	105.48	20.98	9.25
		②	906	172.80	-3.64	22.82	270.00	30.00	5.87	97.20	33.64	16.95	104.24	19.09	9.36
B1	ブレ	③	906	172.80	3.64	22.82	225.00	30.00	5.87	52.20	26.36	16.95	60.89	26.79	16.16
		④	906	172.80	7.28	22.82	225.00	30.00	5.87	52.20	22.72	16.95	59.40	23.52	16.58
C1	スプ	⑤	906	147.60	22.36	22.82	90.00	30.00	5.87	57.60	7.64	16.95	60.53	7.56	16.26
		⑥	906	144.00	22.36	22.82	90.00	30.00	5.87	54.00	7.64	16.95	57.11	8.05	17.27
C2	スプ	⑦	906	-144.00	22.36	22.82	-90.00	30.00	5.87	54.00	7.64	16.95	57.11	8.05	17.27
		⑧	906	-147.60	22.36	22.82	-90.00	30.00	5.87	57.60	7.64	16.95	60.53	7.56	16.26
B2	ブレ	⑨	906	-172.80	10.40	22.82	-225.00	30.00	5.87	52.20	19.60	16.95	58.28	20.58	16.91
		⑩	906	-172.80	7.28	22.82	-225.00	30.00	5.87	52.20	22.72	16.95	59.40	23.52	16.58
A2	スタ	⑪	906	-172.80	-7.28	22.82	-270.00	30.00	5.87	97.20	37.28	16.95	105.48	20.98	9.25
		⑫	906	-172.80	-10.40	22.82	-270.00	30.00	5.87	97.20	40.40	16.95	106.62	22.57	9.15

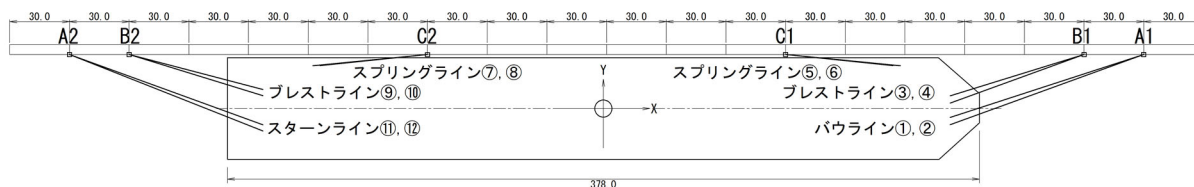


図-C.1 係船索の配置（コンテナ船：16.5万DWT）

表-C.2 コンテナ船10万DWTにおける係船索の配置（座標、長さ、角度）

係船柱	係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	拱角 deg	俯角 deg
				X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
A1	パウ	①	796	154.56	-6.34	18.70	240.00	26.70	7.11	85.44	33.04	11.59	92.34	21.14	7.21
		②	796	154.56	-3.17	18.70	240.00	26.65	7.11	85.44	29.82	11.59	91.23	19.24	7.30
B1	ブレ	③	796	154.56	3.17	18.70	210.00	26.65	7.11	55.44	23.48	11.59	61.31	22.95	10.90
		④	796	154.56	6.34	18.70	210.00	26.65	7.11	55.44	20.31	11.59	60.17	20.12	11.11
C1	スプ	⑤	796	132.02	19.48	18.70	90.00	26.65	7.11	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22
		⑥	796	128.80	19.48	18.70	90.00	26.65	7.11	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37
C2	スプ	⑦	796	-128.80	19.48	18.70	-90.00	26.65	7.11	38.80	7.17	11.59	41.13	10.47	16.37
		⑧	796	-132.02	19.48	18.70	-90.00	26.65	7.11	42.02	7.17	11.59	44.18	9.68	15.22
B2	ブレ	⑨	796	-154.56	9.06	18.70	-210.00	26.65	7.11	55.44	17.59	11.59	59.31	17.60	11.27
		⑩	796	-154.56	6.34	18.70	-210.00	26.65	7.11	55.44	20.31	11.59	60.17	20.12	11.11
A2	スタ	⑪	796	-154.56	-6.34	18.70	-240.00	26.65	7.11	85.44	32.99	11.59	92.32	21.11	7.22
		⑫	796	-154.56	-9.06	18.70	-240.00	26.65	7.11	85.44	35.71	11.59	93.33	22.68	7.14

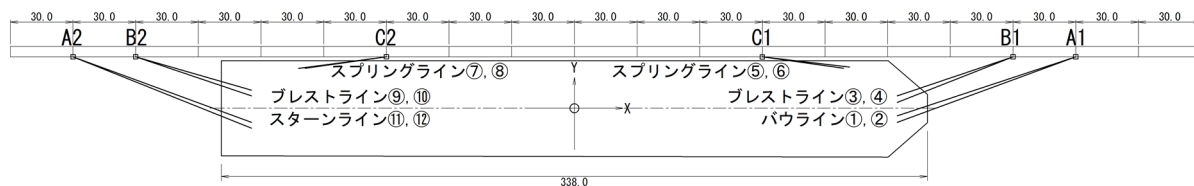


図-C.2 係船索の配置（コンテナ船：10万DWT）

表-C.3 コンテナ船5万DWTにおける係船索の配置 (座標、長さ、角度)

係船柱	係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
				X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
A1	パウ	①	796	122.40	-4.52	14.26	200.00	20.85	8.40	77.60	25.37	5.86	81.85	18.11	4.11
		②	796	122.40	-2.26	14.26	200.00	20.90	8.40	77.60	23.16	5.86	81.19	16.62	4.14
B1	ブレ	③	796	122.40	2.26	14.26	175.00	20.85	8.40	52.60	18.59	5.86	56.10	19.46	6.00
		④	796	122.40	4.52	14.26	175.00	20.85	8.40	52.60	16.33	5.86	55.39	17.25	6.08
C1	スプ	⑤	796	104.55	13.89	14.26	50.00	20.85	8.40	54.55	6.96	5.86	55.30	7.27	6.09
		⑥	796	102.00	13.89	14.26	50.00	20.85	8.40	52.00	6.96	5.86	52.79	7.62	6.38
C2	スプ	⑦	796	-102.00	13.89	14.26	-50.00	20.85	8.40	52.00	6.96	5.86	52.79	7.62	6.38
		⑧	796	-104.55	13.89	14.26	-50.00	20.85	8.40	54.55	6.96	5.86	55.30	7.27	6.09
B2	ブレ	⑨	796	-122.40	6.46	14.26	-175.00	20.85	8.40	52.60	14.39	5.86	54.85	15.30	6.14
		⑩	796	-122.40	4.52	14.26	-175.00	20.85	8.40	52.60	16.33	5.86	55.39	17.25	6.08
A2	スタ	⑪	796	-122.40	-4.52	14.26	-200.00	20.85	8.40	77.60	25.37	5.86	81.85	18.11	4.11
		⑫	796	-122.40	-6.46	14.26	-200.00	20.85	8.40	77.60	27.31	5.86	82.47	19.39	4.08

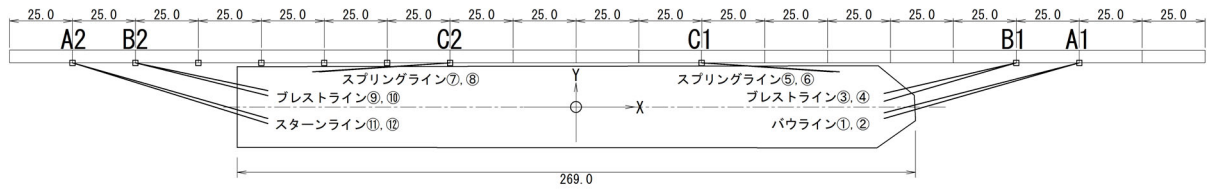


図-C.3 係船索の配置 (コンテナ船：5万DWT)

表-C.4 コンテナ船1万DWTにおける係船索の配置 (座標、長さ、角度)

係船柱	係船索	係船索番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
				X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m	X m	Y m	Z m			
A1	パウ	①	338	62.40	-3.11	7.49	125.00	15.12	7.75	62.60	18.23	0.26	65.20	16.23	0.23
		②	338	62.40	-1.55	7.49	125.00	15.12	7.75	62.60	16.67	0.26	64.78	14.91	0.23
B1	ブレ	③	338	62.40	1.55	7.49	100.00	15.12	7.75	37.60	13.57	0.26	39.97	19.84	0.37
		④	338	62.40	3.11	7.49	100.00	15.12	7.75	37.60	12.01	0.26	39.47	17.72	0.38
C1	スプ	⑤	338	53.30	9.55	7.49	25.00	15.12	7.75	28.30	5.57	0.26	28.84	11.14	0.52
		⑥	338	52.00	9.55	7.49	25.00	15.12	7.75	27.00	5.57	0.26	27.57	11.66	0.54
C2	スプ	⑦	338	-52.00	9.55	7.49	-25.00	15.12	7.75	27.00	5.57	0.26	27.57	11.66	0.54
		⑧	338	-53.30	9.55	7.49	-25.00	15.12	7.75	28.30	5.57	0.26	28.84	11.14	0.52
B2	ブレ	⑨	338	-62.40	4.44	7.49	-100.00	15.12	7.75	37.60	10.68	0.26	39.09	15.86	0.38
		⑩	338	-62.40	3.11	7.49	-100.00	15.12	7.75	37.60	12.01	0.26	39.47	17.72	0.38
A2	スタ	⑪	338	-62.40	-3.11	7.49	-125.00	15.12	7.75	62.60	18.23	0.26	65.20	16.23	0.23
		⑫	338	-62.40	-4.44	7.49	-125.00	15.12	7.75	62.60	19.56	0.26	65.59	17.35	0.23

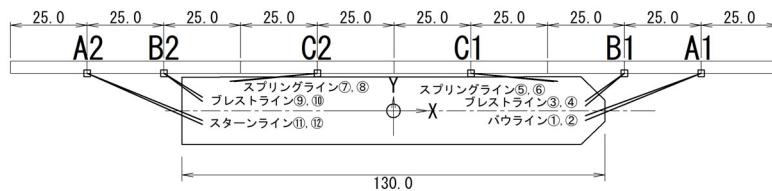


図-C.4 係船索の配置 (コンテナ船：1万DWT)

【付録D】

コンテナ船の係船索配置に関する詳細情報（4.3の解析条件）

表-D.1 コンテナ船5万DWT（模型縮尺）における係船索の配置（座標、長さ、角度）

係船柱	係船索	係船索 番号	破断荷重 kN	船舶側			岸壁側			初期配置			初期 係船索長 m	狭角 deg	俯角 deg
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z			
				m	m	m	m	m	m	m	m	m			
B-1	ヘッド	①	5.5	2.12	0.00	0.00	3.70	0.41	0.00	1.58	0.41	0.00	1.63	14.55	0.00
B-2	ブレ	②	5.5	1.84	0.16	0.00	2.03	0.96	0.00	0.19	0.80	0.00	0.82	76.64	0.00
		③	5.5	1.82	0.16	0.00	2.03	0.96	0.00	0.21	0.80	0.00	0.83	75.29	0.00
B-3	スブ	④	5.5	1.37	0.29	0.00	0.25	0.40	0.00	1.12	0.11	0.00	1.13	5.61	0.00
B-4	スブ	⑤	5.5	-1.37	0.29	0.00	-0.23	0.40	0.00	1.14	0.11	0.00	1.15	5.51	0.00
B-5	ブレ	⑥	5.5	-1.89	0.16	0.00	-1.97	0.98	0.00	0.08	0.82	0.00	0.82	84.43	0.00
		⑦	5.5	-1.90	0.16	0.00	-1.97	0.98	0.00	0.07	0.82	0.00	0.82	85.12	0.00
B-6	スタ	⑧	5.5	-3.68	0.40	0.00	-2.11	0.00	0.00	1.57	0.40	0.00	1.62	14.29	0.00

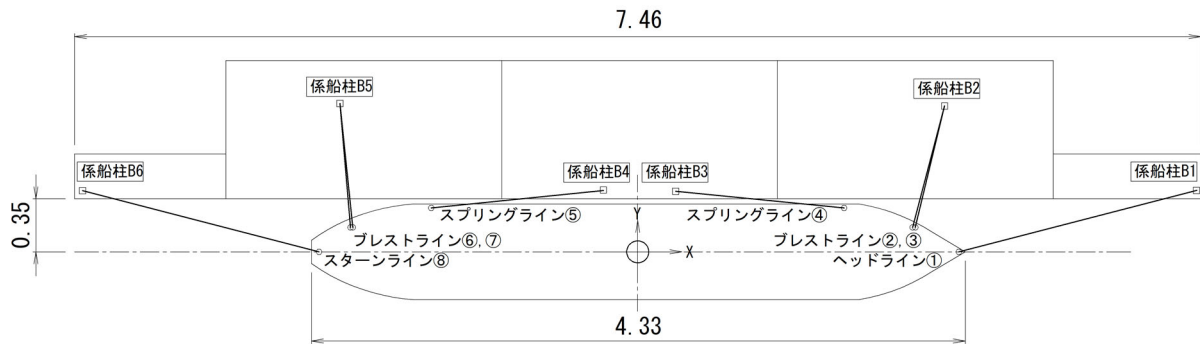


図-D.1 係船索の配置（コンテナ船：5万DWT（模型縮尺：1/50））

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1169 September 2021

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019 〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.169

風・流れによる船舶牽引力の評価への静的釣合い計算の適用性検討

September 2021