ISSN 1346-7328 国総研資料 第1169号 令 和 3 年 9 月

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.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

- ** 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)

電話:046-844-5019 Fax:0468-42-9265 e-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

^{*} 港湾研究部港湾施設研究室 室長

^{****} 港湾研究部

^{*****} 港湾研究部 主任研究官

^{〒239-0826} 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

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 preform 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

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265

e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

^{*} 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	۲
---	---

1. はじめに
2. 船舶牽引力の算定手法
2.1 概要 ···································
2.2 動的解析による船舶牽引力の算定方法
2.3 静的解析による船舶牽引力の既往算定方法
2.4 静的解析による船舶牽引力の算定方法(簡易法)
 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 ·································
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
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
4.3.2 比較検討の結果と考察
5. おわりに
謝辞 24
参考文献 ····································
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) ····································
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)
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)

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(ω₀) 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ω₀ に対応), N(ω₀)は造波減衰係数マト リクス (波角周波数ω₀に対応), Bは静水圧的復元カマ トリクス, R(x) は係船索張力・防舷材反カベクトル, 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), x は船体の動揺速度ベクト ル (6成分), 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*(ω₀)]*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*(ω₀)*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⁾





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(k₁)の あと第2勾配(k₂)を経て,設計反力を越える場合には第 3勾配(k₃)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(k₄)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(k₅) 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.

$F_x = \frac{1}{2}\rho_a U^2 A_x C_{F_x}$	••••	 	 ·· (2-a)
$F_y = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_y C_{F_y}$		 	 · · · (2-b)
$F_M = \frac{1}{2} \rho_a U^2 A_y L_{pp} C_y$	F_M	 	 · · · (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)

 $R_{x} = 0.0014S_{x}V_{x}|V_{x}| + (M + m_{x})\frac{\partial V_{x}}{\partial t} \cdots (3-a)$ (船側方向) $R_{y} = \frac{1}{2}\rho_{w}C_{y}S_{y}V|V| + (M + m_{y})\frac{\partial V_{y}}{\partial t} \cdots (3-b)$ 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 (i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, c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.

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

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_v 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.

$$T = \frac{1}{2} F_y \frac{1}{\sin \theta \cdot \cos \alpha} \tag{5}$$

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 \qquad \dots \qquad $
$T_i = k_i \cdot \Delta t_i \tag{6-2}$
$F = \sum k_i \cdot \Delta t_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $







(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の



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) $\sim \Delta Y$ だけ変位したとし、 ΔY が 微小で、現地調査の結果より仰角 α_i =10°~20°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.

$$\Delta t_{i} \approx \Delta Y \sin \theta_{i} \qquad (6-4)$$

 $T_{i} = k_{i} \cdot \Delta t_{i} \approx k_{i} \Delta Y \sin \theta_{i}$ = $k_{i} \frac{F}{\sum k_{i} \cdot \sin^{2} \theta_{i} \cdot \cos \alpha_{i}} \sin \theta_{i}$ $\approx k_{i} \frac{F}{\sum k_{i} \cdot \sin^{2} \theta_{i}} \sin \theta_{i}$(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(a)) 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るかった,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 れから船体が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).強制変位の方向は, 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, $\mathbf{2-2.8}$ に示すとお り,強制変位 (ΔY)に伴い各係船素iの素長も長くなり (初期の係船素長 l_{o_i} から l_{o_i}' へ変化),その増分 Δl_{o_i} 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)に示す係船素の伸び率 ϵ (ΔY)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.

$$\Delta t_{0_i} = t'_{0_i} - t_{0_i} \qquad (7-3)$$

$$\mathcal{E}_{i}(\Delta Y) = \frac{l_{0_{i}}' - l_{0_{i}}}{l_{0_{i}}} = \frac{\Delta l_{0_{i}}}{l_{0_{i}}} \qquad (7-4)$$

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の増分、 ϵ_i (ΔY): 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.





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)



$$\cos(\alpha_{i}') = \frac{l_{0h_{i}}'}{l_{0_{i}}'} \qquad (7-6)$$
$$l_{0h_{i}}' = \sqrt{x_{0_{i}}^{2} + (y_{0_{i}} + \Delta Y)^{2}} \qquad (7-7)$$

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), \mathbf{l}'_{0h_i} :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*Thi*を求める.さら に,式(7-9)により*Thi*のy方向(船側方向)成分*Tyi*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Tyは,式(7-10)より求めることができ る.

$T_{h_i} = T_i \cos \alpha_i \qquad \cdots$	•••		•					•	• •	•	•	•	•		•	(7-8))
---	-----	--	---	--	--	--	--	---	-----	---	---	---	---	--	---	-------	---

 $T_{y_i} = T_{h_i} \sin \theta_i$ = $T_i \sin \theta_i \cos \alpha_i$ (7-9)

$$T_{y} = \sum_{i=1}^{N} T_{y_{i}}$$
 (7-10)

ここに, *T_{hi}*:係船索*i*に作用する張力の水平方向成分, *T_{yi}*: *T_{hi}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,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 Syおよび流圧力係数 Cy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)

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,図中に示すとお



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,ブレストラ 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)

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

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.

項目	動的解析	静的な力の釣合い計算に基	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	港研資料 No.102	港研資料 No.427	簡易法							
	港空研資料 No.1213	(本資料 2.3(1))	(本資料 2.3(2))	(本資料 2.4(1)(2))							
管定方法の基	(平貢科 2.2) 船舶を剛体として仮定し 船体の動	船舶を剛体として仮定し	- 定堂流として船体	に作用する風またけ流							
本的な考え方	揺んの運動方程式を時系列的に数	れによる1方向の荷重と係	船索張力が静的に釣る	う状態を規定すること							
	値積分して計算し、係船索張力を算定	により,係船索張力を算定	ミする.								
	する.風や流れは,非定常である.	船体の変位(係船索 船体の変位(係船索が張力を受けて伸び									
		が張力を受けて伸びる	ることにより発生)	を考慮する、すなわ							
		ことにより発生)は無	ち、初期の係船索の	配置が船体への荷重を							
		祝し、初期の除船系の 配置け変化したいと仮	受けて変化するとし 合い状能から係船索	, その状態での静的的 張力を質定する							
		定する.	係船索の伸び量	係船索の伸び量の							
			の算定において、	算定において、近似							
			幾つかの近似を仮	はしていない.							
			定している.								
風による船体	風速は、ダベンボート型の風速スペ	風速は,1方向の定常流	ことして与える. + + + 本次判由の主の)に	ニナロロナギにトの管							
仰里	クトルを用いて, 変動風(小規則に変 動する国連) として与うる	風による船(4)への何里(完する(動的解析と同じ)	よ, 平貢科中の式(2)に	小り風圧力式により昇							
	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.										
流れによる船	流速は、非定常流として与える.	流速は,1方向の定常流	として与える.								
体何里	流れによる船体への何重は、本資料 中の式(2)にテオモリソン式に上り質定	流れによる船体への何 動創ち向け木容料中の式()	1411、正常流に対する。 1511、1511、1511、1511、1511、1511、1511、151	船体の流体抵抗として, に上り質定する かせ							
	する モリソン式では 船体質量(付	品関力向は本員科中の式(これらの式け 式(3)に示す	アルーモル向は八(0)	により昇足りる. なわ, や荷重項を取り除いたも							
	加質量を含む)に流体の加速度を乗じ	のである.									
	た動的な荷重が考慮される.										
係船索条件	・係船索の本数に制限はない.	・係船索は2本を前提.	・係船索の本数に制	限はない.							
 本数 	・係船索の配置に制限はない.	・係船索の配置は、船体	・係船索の配置に制	限はない.							
・配置 - 進力レ伸び	、宇欧の反動毒にわけて進力し曲が変の	の前後で対象と仮定.	、反朳声の正力し	宇欧の長釟声にわ							
率の関係	 ・ 夫院の保留条にわける振力と伸び率の 非線形関係を考慮している 	・保留系の成力と仲の挙の関係け老庸できか	・保船系の振力と 値び家の関係を	 ・ 夫际の保船糸にわ ける張力と他び家 							
		N.	弾性(バネ定数	の非線形関係を考							
			一定)と仮定し	慮している.							
			ているため,非								
			線形関係は考慮								
			できない.								

表-2.1 牽引力の算定手法の比較

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.

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.+4.0mとしている.岸壁の前面水位は D.L.±0.0m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箇所で,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(10 m/s, 15 m/s, 20 m/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1.23×10⁻³(t/m³)としている.

表-3.1 比較検討の解析ケース

		主要	船舶諸	元等			その	の他主要彡	条件
総ト ン数 (GT)	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 設 間 (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		25	510	
5万	255	39.2	15.2	6928.9	14.2		45	796	10
10万	313	47.8	19.1	10963.4	17.3	0.925	45	906	15
15万	352	53.6	21.7	14338.9	19.4		45	1040	20
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	水面上仍影		風による荷重(kN)						
	心下ン <u>奴</u> (GT)	不面工12家	抗力係数	風速	風速	風速				
	(01)	Ⅲ1頁(Ⅲ)		10 m/s	15 m/s	20 m/s				
	1万	2387.5		135.8	305.6	543.3				
-	5万	6928.9		394.1	886.8	1576.5				
	10万	10963.4	0.925	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ブレストラインでは,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,いずれもブレストライン1(表-3.3(a) の係船柱番号B1)またはブレストライン2(表-3.3(a)の係 船柱番号B2)である.これらのブレストラインは,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)とその状態でのブ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

(4) 200001												
	<u>ا</u>	虱速1()m/s	J	風速15	5m/s	風速20m/s					
係船柱	牽引フ	力(kN)	牽引力比	牽引	力(kN)	牽引力比	牽引フ	ታ(kN)	牽引力比			
番号	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

	J	虱速1()m/s	ļ	風速15	5m/s	風速20m/s				
係船柱	牽引フ	力(kN)	牽引力比	牽引ス	力(kN)	牽引力比	牽引ス	力(kN)	牽引力比		
番号	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

	J	風速1	0m/s	Ĵ	虱速15	5m/s	風速20m/s			
係船柱	牽引フ	力(kN)	牽引力比	牽引力(kN) 牽引力比		牽引フ	力(kN)	牽引力比		
番号	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

風速10m/s				J	虱速15	im/s	風速20m/s			
係船柱	牽引え	力(kN)	牽引力比	牽引	力(kN)	牽引力比	牽引フ	圴(kN)	牽引力比	
番号	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

				(\mathbf{v})	1/5 0				
		風速1	0m/s	風速15m/s 風速20		20m/s			
係船柱	牽引	力(kN)	牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引フ	圴(kN)	牽引力比
番号	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 とブ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. 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



図-3.3 動的解析の結果(15万GT・風速15 m/s)

国総研資料 No. 1169



図-3.4 動的解析の結果(5万GT・風速15 m/s)

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)

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に示しているので,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、桟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

			主要船	的舶諸元等			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 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)
15	120	<u></u>	7.0	1027.0	16	3450	25	338	船側	0.6	1.0
175	130	22.2	7.9	1027.0	4.0	3430	23	(\$\$ 45mm)	船首尾	2.8	1.5
5万	260	22.2	12.8	2442.0	16	10200	25	796	船側	0.7	1.0
575	209	32.3	12.0	3443.0	4.0	10800	23	(\$\$ 70mm)	船首尾	1.9	1.5
10万	220	15.2	146	4701.2	16	17170 57	20	796	船側	0.5	1.0
10/5	330	45.5	14.0	4701.2	4.0	1/1/0.5/	30	(\$\$ 70mm)	船首尾	0.5	1.5
165万	270	52.0	16.2	6122.6	16	22242.06	20	906	船側	0.6	1.5
10.5/J	3/8	52.0	10.2	0123.0	4.0	23242.80	30	(\$\$\phi\$ 75mm)	船首尾	0.4	1.5

表-4.1 比較検討の解析ケース

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(t/m³) 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

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.

表−4.2 流れ(定常流)による船体に作用する荷重一覧

盐化舌	ł	船側方	向	船首尾方向			
戦員里 量トン 数 (DWT)	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こと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-4.4 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)

		船	側方向の流	れ	船首尾方向の流れ			
ラインタサ (枢帆計タサ)	反创志委日	(;	流速 0.6 m/s	;)	(流速 0.4 m/s)			
ノイン石林(床加性石林)	你加米留万	牽引力	J(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	
ブレストライン(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	
ブレストライン(B2)	9+10	1818.7	1887.6	0.96	1437.7	2.1	684.62	
スターンライン (A2)	(1)+(12)	254.5	257.9	0.99	240.6	1.2	200.50	

(a) 16.5万DWT

(b) 10万DWT

		船	側方向の流	n	船首尾方向の流れ (流速05m/s)			
ライン名称	係船索番号	牽引オ	元座 0.5 m/s J(kN)	。 牽引力比	▲ (加速 0.5 m/s 牽引力(kN)		室引力比	
		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	
ブレストライン(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	
ブレストライン(B2)	9+10	689.2	585.0	1.18	351.4	2.2	159.73	
スターンライン (A2)	(1)+(12)	150.0	115.6	1.30	84.2	1.4	60.14	

(c) 5万DWT

		船	側方向の流	れ	船首尾方向の流れ			
コインタサ	压的击死日	(1	流速 0.7 m/s	;)	(流速 1.9 m/s)			
ノイン名称	沭加杀省万	牽引ナ	J(kN)	牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	
		動的 簡易 重		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	
ブレストライン(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	
ブレストライン(B2)	9+10	1392.7	1389.1	1.00	1295.6	20.9	61.99	
スターンライン (A2)	(1)+(12)	370.4	338.6	1.09	348.8	13.9	25.09	

(d) 1万DWT

		船	側方向の流	れ	船首尾方向の流れ			
コインタチャ	反创声委旦	(1	流速 0.6 m/s	;)	(流速 2.8 m/s)			
ノイン名称	沭加杀金万	牽引ナ	J(kN)	牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	
		動的 簡易 郵		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	
ブレストライン(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	
ブレストライン(B2)	9+10	272.5	153.9	1.77	223.2	12.7	17.57	
スターンライン (A2)	(1)+(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,本実験では桟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85s・170s・254s(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24N(破断強度)は現地換算で3,000kN(=50³×24N)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と なる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となる浸水面積は,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

十一次的学习这	津波				
土安加加珀兀守	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) 20 min (170 s) 30 min (254 s) 10 min (85 s) 20 min (170 s) 30 min (254 s)	1.8 m/s (25.5 cm/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

	船俱	方向	船首尾方向		
流速 (m/s)	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つのブレストライン(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,ブ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.

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.

				(d) 70 19.	ЛЛЫ				
ラインタサ (区創社タ	津波周期:10 min			津泊	皮周期:20	min	津泊	皮周期:3	0 min
ノイン名称 (保加性名 か)	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比	牽引力(kN)		牽引力比
7757	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
ブレストライン(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
ブレストライン(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

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)

(~) 秋间七白

(い) 松苦屋古向

				(~)//10107					
ニノンタサ (反動社々	津波周期:10 min			津	皮周期:20	min	津波周期: 30 min		
ノイン 石 你 (休 加 仕 石	牽引力(kN) 牽引力比		牽引ス	牽引力(kN)		牽引力(kN)		牽引力比	
小小)	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
ブレストライン (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
ブレストライン(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 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: 10 min) 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:10~30 min)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 階で利用することが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エ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

- 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.
- 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.
- 国土交通省 HP:海・船の視点から見た港湾強靭化 検討委員会 (https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk7_000026.ht ml) (2021 年 8 月 6 日閲覧)
- 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.
- 国土交通省 HP:海・船の視点から見た港湾強靭化 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15m/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

l			主要	船舶諸	元等			その	他主要条	件
ſ	総ト	全長	型幅	満載	水面上	乾舷	抗力	曲柱設	係船索の	風速
	ン数	(m)	(m)	喫水	投影面	(m)	係数	置間隔	破断強度	(m/s)
	(GT)			(m)	積(m ²)			(m ²)	(kN)	
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、各係船柱や船舶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.

$$F_{y} = \frac{1}{2} \rho_{a} U^{2} A_{y} C_{F_{y}}$$
 (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_{F_y} : 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.

$$C_{\gamma} = 1.012 \sin \theta + 0.054 \sin 3\theta$$
 (A1.2)
-0.033 sin 5 θ - 0.017 sin 6 θ

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	ŋ	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(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 *ΔY*=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 Ti 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 a_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_{yi} 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).

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

$$T_{y} = \sum_{i=1}^{N} T_{y_{i}}$$
 (A1.4), (7-10)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 Ty 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 Δ Y=25.6 m)

	列筆号 																		
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	20列
		/27.00 ==	动能带重		初期配置		初期張力有 2011期配置	初期張力無	准备	伯母	変位後	変位後	変位後	伸动家	ZE -ft	平面系	鉛直系	張力	(kN)
係船柱	係船索	術船深	HIXE/THUE	Х	Y	Z	係船索長	係船南長	9X /4	1/17-9	係船索長	狭角	俯角	140-44	JR 73	張 力	張 力	X方向	Y方向
		ш - у	kN	R.	R	R	n.	n.	deg	deg	n.	deg	deg	%	kN	kN	kN	kN	kN
1	バウ1	Ð	906	81.00	29.75	11.91	87.11	69.69	20.17	7.86	98.83	34.35	6.92	33.45	355.87	353.28	42.88	291.67	199.34
1	バウ2	0	906	81.00	23.05	11.91	85.05	68.04	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	65.33	32.79	10.50	36.54	474.85	466.90	86.54	392.50	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	6	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	66.37	34.20	10.34	37.68	524.24	515.73	94.10	426.55	289.88
6	スタ1	Ø	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	35.93	6.79	34.06	378.17	375.52	44.71	304.07	220.35
																	Y方向朝	け合計	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^{b1)}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,桟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.曲柱の設置 間隔については 30 m 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 796 kN 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,算定に必要となる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)

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

					衣-	AZ. I 丹牛化	カクーへの権	玩安			
			主要船	沿舶諸元等			係留	?条件	津沥	皮(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)	船側	0.5	1.0

表-A2.1 解析ケースの概要

図-A2.1 係船索の配置(コンテナ船:10万DWT)

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

掛化舌見		船	側方向		
戦員里里 トン数	喫水面下側	流圧	流体	流速	船体に作
(DWT)	面投影面積	力係	密度	(m/s)	用する
· /	(m ²)	釵	(t/m³)	· /	何 重(kN)
10万	4701.2	4.6	1.03	0.5	2784.3

$$R_{y} = \frac{1}{2} \times (1.03) \times (4.6) \times (4701.2) \times (0.5)^{2}$$
$$= 2784.3 \text{(kN)}$$

(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

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 Δ Y=36.1 m)

									and a set									
									列畨号									
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
		100 410	动能芬香		初期配置		初期	Xtt. 474	伯母	変位後	変位後	変位後	/day अत्रेस्	7E -++	平面系	鉛直系	張力	(kN)
係船柱	係船索	係船索 番号	미있는//1이 또	Х	Y	Z	係船索長	沃用	1/11/2#9	係船索長	狭角	俯角	140.46	75 //	張力	張力	X方向	Y方向
			kN	m	m	m	m	deg	deg	m	deg	deg	%	kN	kN	kN	kN	kN
61	ملر الار	0	796	85.44	33.04	11.59	92.34	21.14	7.21	110.52	38.98	6.02	19.69	55.59	55.28	5.83	42.97	34.77
01		0	796	85.44	29.82	11.59	91.23	19.24	7.30	108.54	37.65	6.13	18.97	50.13	49.84	5.35	39.46	30.44
D1	-11.	3	796	55.44	23.48	11.59	61.31	22.95	10.90	82.21	47.06	8.11	34.09	352.51	348.98	49.73	237.74	255.48
DI	10	٩	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
01	77	\$	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	360.50	371.22
01	~/	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
0.9	77	Ø	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
02	~/	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	360.50	371.22
DO		3	796	55.44	17.59	11.59	59.31	17.60	11.27	78.04	44.08	8.54	31.58	272.73	269.71	40.50	193.75	187.63
D2	1	0	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
49	77	0	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
42	~~	¢	796	85.44	35.71	11.59	93.33	22.68	7.14	112.21	40.05	5.93	20.23	60.08	59.76	6.21	45.75	38.45
																1	合計流圧力	2776.80

列目), 更に表中の 16 列目を式(A2.2)によって, 各張力 *Ti*から船側方向の合力 *Tyi*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 *Ty*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).

 $T_{y_i} = T_{h_i} \sin \theta_i \qquad \dots (A2.2), \quad (7-9) \mathcal{O}$ 再掲 = $T_i \sin \theta_i \cos \alpha_i$ $T_y = \sum_{i=1}^N T_{y_i} \qquad \dots (A2.3), \quad (7-10) \mathcal{O}$ 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 Ty 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靭化検 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^{e1)}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,算定に必要となるパラメータの設定方法を 以下に示す.

(船首尾方向)

 $F_{x} = 0.0014S_{x}V_{x}^{2}$ (A3.1), (9)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(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 ΔX =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

					<u></u>	10.1)1+1		<u>%</u> ×			
			主要船	的船諸元等			係留	条件	津波	皮(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

表-A3.1 解析ケースの概要

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に分かれる. 図 -A3.1の場合,船首側(図面の右側)の4本の係船索(バ ウライン①,②,ブレストライン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 Ti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、各係船素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 a_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).

ここに、 T_{hi} :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靭化検 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(船側方回)による船体に作用する何里一覧(流速0.5 m/s,船体変位 Δ <i>X</i> =0.9 n	.一覧(流速0.5 m/s,船体変位 ⊿ <i>X</i> =0.9	(流速0.5 m/s,	荷重一覧	による船体に作用す	(船側方向)	₹-A3.3 流れ
--	------------------------------------	-------------	------	-----------	--------	-----------

	列番号 1851 9361 9361 4.3511 5.351 7.351 9361 9361 10361 11361 11361 11361 113511 11351 11551 11551 113511 113511 11351																	
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
		107.000.000	动此芬香		初期配置		初 期	滋み	(由44	変位後	変位後	変位後	価が支	ZE -11	平面系	鉛直系	張力	(kN)
係船柱	係船索	係船索 番号	비었는/11이 또	Х	Y	Z	係船索長	须用	10179	係船索長	狭角	俯角	140.46	275 7.7	張 力	張 力)(方向	Y方向
		H 15	kN	m	m	m	m	deg	deg	R	deg	deg	%	kN	kN	kN	kN	kN
	<u>بر بر</u>	Ð	796	85.44	33.04	11.59	92.34	21.14	7.21	93.17	20.94	7.15	0.90	0.66	0.65	0.08	0.61	0.23
01	~ ~	0	796	85.44	29.82	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
DI	-11	3	796	55.44	23.48	11.59	61.31	22.95	10.90	62.13	22.62	10.76	1.34	0.98	0.96	0.18	0.89	0.37
DI	10	4	796	55.44	20.31	11.59	60.17	20.12	11.11	61.00	19.82	10.96	1.38	1.01	0.99	0.19	0.93	0.34
01		6	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
01		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
09		Ø	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
02	~	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
DO	-0.	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
DZ	1	10	796	55.44	20.31	11.59	60.17	20.12	11.11	60.17	19.82	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40		0	796	85.44	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
AZ	~~	@	796	85.44	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
										-	-	-				今計法区十	5.92	

【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)

		动脉毒素		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	冲石	体备
係船索	係船索 悉号	110时间里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏円	1府"月
	ш /у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
バウ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
バウ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
スプ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
スプ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	1	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

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)

図-B.1 係船索の配置(貨物船:20万GT)

		动脉出毛		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	本ム	枯み
係船索	係船索 番号	100月11月里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏角	加打用
	ш.у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
バウ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
バウ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
スプ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
スプ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	\bigcirc	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

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)
------	--------------------	------	-----	-----

		动脉毒手		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	オーム	広告
係船索	係船索 番号	収別们里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏用	1府7月
	ш , у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
バウ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
バウ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
スプ1	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
スプ2	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	1	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

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)

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)

		动躯齿毛		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	神界	広告
係船索	係船索 悉号	110时间里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏円	加打用
	ш /у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
バウ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
バウ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
スプ1	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
スプ2	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	1	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)

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

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)
-------	-------------------	------	-----	-----

		动脉发手		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	があ	应告
係船索	係船索 悉号		Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	狹角	附用
	ш , у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
バウ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
バウ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
ブレ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
ブレ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	1	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)

			动脉志手		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	オオンス	ht: 42.
係船柱	係船索	係船索 悉号	100町111里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏円	11时円
		ш , у	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
A 1	13 H	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
AI	~ ~ ~	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
DI	-11.	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
BI 70	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	7-1	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
CI	~/	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
C9	7-1	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
02	~/	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
D.0	-71.	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
D2	10	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
4.0	7 7	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
AZ	~?	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

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)

図-C.1 係船索の配置(コンテナ船: 16.5万DWT)

			动脉击手		船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	オーム	lidit da
係船柱	係船索	係船索 悉号	100时何里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏円	11行7月
		E S	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
A 1	心中	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
AI	~ ~ ~	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
D1	ゴレ	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
B1 ブ	10	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	7-1	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
01	~/	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
<u></u>	7 7	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
12	~)	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
DO	-11.	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
B2		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
19	7 4	1	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
n2	~7	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

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)

図-C.2 係船索の配置 (コンテナ船:10万DWT)

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

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)

					船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	Xite 42	lidit 47.
係船柱	係船索	係船索 番号	100町何里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏円	附用
		H	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
4.1	这百	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
AI	~ ~ ~ ~	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
D1	71.	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
B1 ブ		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	7-1	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
UI	~/	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
C9	7-1	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
02	~/	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
D.0	-71,	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
D2		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
4.9	7 4	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
AZ	~?	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

 $= \frac{25.0}{100} = \frac{$

A2 B2	C2	СП	BI AI	
	スプリングライン⑦.⑧	Y スプリングライン(5), ⑥		
	ブレストライン⑨, ⑩	-X	23.4	
	スターンライン⑪, ⑫	バウライ	20.2	
	2	69. 0	>	

図-C.3 係船索の配置 (コンテナ船:5万DWT)

					船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	オーム	litit da
係船柱	係船索	係船索 悉号	100时何里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏角	1府7月
		.81. 12	kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
4.1	<u>بار الار</u>	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
AI	79	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
D1	ゴレ	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
B1	10	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	7-7	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
CI	~/	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
<u></u>		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
02	~)	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
D.O.	71.	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
B2	10	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
4.9	7 4	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
A2	~?	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

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)

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)

					船舶側			岸壁側			初期配置		初 期	オオム	liti Z.
係船柱	係船索	係船索 番号	100时何里	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	係船索長	伏角	11行円
			kN	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	deg	deg
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 7	71.	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
	10	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	スプ	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	スプ	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
DE	-11.	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
B-9)//	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

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)

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

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

国土技術政策総合研究所資料 No.1169