

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1213 June 2010

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

米山 治男
大垣 圭一
津田 宗男
栗原 明夫
平石 哲也
青野 利夫

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 研究の内容	4
3. 模型実験	5
3.1 実験模型	5
3.2 実験条件	9
3.3 係留船舶の津波応答特性	10
3.4 津波による船体動揺量・係留力の最大値	12
3.5 津波に対する係留施設の安全性評価	20
4. 数値計算	22
4.1 数値計算手法	22
4.2 実験結果と計算結果の比較検討	22
5. 結論	26
謝辞	26
参考文献	26

Model Experiments and Numerical Simulation on Tsunami Impact to a Moored Ship

Haruo YONEYAMA*
Keiichi OHGAKI**
Muneo TSUDA***
Akio KURIHARA***
Tetsuya HIRAISHI****
Toshio AONO***

Synopsis

In the near future, tsunamis caused by the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes are anticipated to occur near the ports located in the Pacific coast of Japan. Then, there is a high possibility that the tsunamis directly impact on moored ships and mooring facilities inside the ports. However, there have been few studies on the tsunami impacts to the moored ships and the mooring facilities so far. Therefore, we carried out the model experiments for a transmission-type quay wall such as a piled pier to clarify the tsunami response characteristics of a moored ship and the tsunami impacts to mooring facilities. In addition, we performed the motion simulation of the moored ship by using the tsunami external forces expressed by Morrison's Equation, and then examined the validity of the numerical simulation method by comparing the experimental results with the simulation ones.

The results derived in this study are summarized as follows:

- 1) When the tsunami period is short, or the tsunami flow velocity is high, or the ship load capacity is full, the motions of the ship moored to the piled pier tend to be larger.
- 2) The tsunami response characteristics of the ship moored to the piled pier are greatly different for the tsunami incident directions. The moored ship moves in the same direction as the tsunami flow, and the ship motions become the largest when the tsunami acts in the transverse direction of the ship.
- 3) The mooring ropes and fenders can be particularly damaged by the tsunami with high flow velocity in the transverse direction of the moored ship. The safety of the mooring facilities is extremely reduced in this case.
- 4) For the ship motions, the mooring rope tensions and the fender reaction forces, the simulation results are largely in good agreement with the experimental ones. Therefore, the safety of ships and mooring facilities in a port can be accurately estimated by using the numerical simulation method proposed in this study.

Key Words: tsunami, moored ship, mooring rope, fender, model experiment, numerical simulation

* Yokohama Research and Engineering Office for Port and Airport, Kanto Regional Development Bureau,
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
(Former Research Director of Marine Environment and Engineering Department)

** TOA Corporation
(Former Trainee of Marine Environment and Engineering Department)

*** TOA Corporation

**** Director of Marine Environment and Engineering Department

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

Phone : +81-46-844-5036 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

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

米山 治男*
大垣 圭一**
津田 宗男***
栗原 明夫***
平石 哲也****
青野 利夫***

要 旨

近い将来、東海・東南海・南海地震が起こると予測されており、これらの地震に伴う津波の危険性が危惧されている。港湾域には多くのインフラが集中し、エネルギー港湾も多数存在するため、津波の影響が非常に大きなものになると予想されている。この時、港湾内の船舶の被害を防止するためには船舶の港外避難が最良の方法である。しかし、津波が港湾に近い場所で発生した場合は、船舶は港外へ避難することは難しく、津波が係留船舶や係留施設に直接影響を及ぼす可能性は高い。これまでのところ、津波作用時の係留船舶の挙動や係留施設への影響については十分に研究が進んでおらず、津波に対する係留船舶の安全性を適切に評価する手法がないのが現状である。

本研究では、港内に津波が来襲した場合の係留船舶の応答特性と係留施設へ及ぼす影響を解明するために、栈橋等の透過型岸壁を対象とした模型実験を実施した。また、津波外力をモリソン式で表現して係留船舶の動揺計算を行い、実験結果と計算結果を比較することにより、その数値計算手法の妥当性について検討した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 津波の周期が短い時、津波の最大流速が大きい時、船舶の積載量が大きい時ほど、栈橋に係留された船舶の動揺量は大きくなる傾向がある。
- 2) 栈橋に係留された船舶の津波応答特性は津波の入射角度によって大きく異なり、船舶は津波の流れと同じ方向へ動揺し、船幅方向から津波が作用する場合に船舶の動揺量が最も大きくなる。
- 3) 係留船舶の船首尾方向よりも斜め方向もしくは船幅方向から来襲する流速の大きい津波に対して、係留索や防舷材が損傷する可能性が高くなり、このような場合に係留施設の安全性は低下することになる。
- 4) 船舶の動揺量、係留索張力、防舷材反力について、模型実験による結果と数値計算による結果はおおむね精度良く一致していたことから、提案した数値計算手法により、実際の港湾における船舶や係留施設の安全性を予測することができる。

キーワード：津波，係留船舶，係留索，防舷材，模型実験，数値計算

* 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所（前 海洋・水工部 上席研究官）

** 東亜建設工業株式会社（前 海洋・水工部 依頼研修生）

*** 東亜建設工業株式会社

**** 海洋・水工部長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5036 Fax：046-844-1274 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

1. はじめに

近い将来、東海・東南海・南海地震が起これると予測されており、この地震によって発生する津波について、中央防災会議（2003）では、津波数値計算を行いその被害を予測している。この予測によると、津波は太平洋沿岸の広い範囲に及び、港湾域では地震や津波によって非常に大きな被害となることが示されている。港湾域は主要なインフラが集中し、太平洋沿岸には、いわゆるエネルギー港湾も複数存在するため、これらの施設が被害を受けてしまうとその影響は計り知れない。ここで、港湾内に係留された船舶に着目すると、港湾内に津波が来襲すると予想された場合、船舶は港外へ避難することでその被害を最小限に止めることができる。しかし、船舶の避難が完了するまでに残された時間は少なく、津波が港湾に近い場所で発生した場合、船舶は必ずしも港外へ避難できるとは限らない。特に、東海・東南海・南海地震では、津波が沿岸に近い場所で発生するため、津波が係留船舶に直接影響を及ぼす可能性は高い。津波が係留船舶に作用すると、風波とは異なる津波の長周期的特性から船舶は大きく動揺し、係留索や防舷材に非常に大きな荷重を与えると考えられる。船舶に作用する津波外力が大きい場合には、係留索が破断して船舶が港湾内を漂流したり、防舷材に激しく衝突して船舶や防舷材が損傷したりする危険性もある。また、漂流した船舶は他の船舶に衝突したり、港湾施設を破壊したりする可能性もあり、港湾全体の被害を最小限に止めるという観点からも、津波来襲時に係留船舶を安全に係留しておくことは防災上非常に重要な課題である。

日本には過去に多くの津波が来襲してきており、津波によって船舶が被災した事例が報告されている。例えば、1983年に発生した日本海中部地震津波では多数の漁船が陸上に乗り上げたり（谷本ら、1983）、1993年に発生した北海道南西沖地震津波では瀬棚港において1,000トンのバージ船が岸壁に乗り上げたりしたことがある（高山ら、1994）。日本国内でこれまでに被災した船舶のほとんどは漁船などの小型船舶である。しかし、スマトラ島沖地震津波では、インドネシアのバンダアチェにおいて、長さ約60m×幅約20mの比較的大きい発電バージ船が3km内陸まで流されたという被害も報告されている（富田ら、2005）。このため、東海・東南海・南海地震により引き起こされる大きな津波によって、小型船舶のみならず大型船舶も大きく影響を受ける可能性が高いと考えられる。

津波が係留船舶に作用した時の挙動に関して、中屋ら（2005）や榊原ら（2008）は数値計算により津波来襲時

の船舶の安全性を評価している。しかし、これらの結果は実験等による検証がなされておらず、津波外力と船舶の応答特性について十分な検討が加えられているとは言えない。また、津田ら（2006）は船幅方向から津波が来襲する場合について模型実験を行い、係留船舶の動揺や防舷材への衝突力などを評価している。しかし、この実験では全て船幅方向から津波を作用させており、津波の入射角度は考慮されていない。一方、池谷ら（2005）は直方体の浮体に作用する津波の波力について、模型実験による計測と数値計算による再現を行い、モリソン式により波力を評価できることを示している。しかし、船舶の形状は直方体とは異なり流線形であるため、この成果を係留船舶に対して適用することは難しいと考えられる。

そこで、本研究では、港内に津波が来襲した場合の係留船舶の応答特性と係留施設へ及ぼす影響を解明するために、模型実験を実施した。また、津波外力をモリソン式で表現して係留船舶の動揺計算を行い、実験結果と計算結果を比較することにより、その数値計算手法の妥当性について検討した。なお、本研究で対象とした岸壁は、栈橋等のような透過型岸壁であるため、本研究の成果の適用には注意が必要である。

2. 研究の内容

本研究で行った模型実験と数値計算の関係を図-1に示す。模型実験では、船舶の動揺量、係留索張力、防舷材反力を計測し、津波による係留船舶の応答特性を把握した。また、津波の最大流速、津波周期、津波の入射角度、船舶の積載量のパラメータごとに計測データの最大値を整理し、実験条件の影響を比較した。さらに、係留索の限界荷重と防舷材の限界荷重から、津波に対する係留施設の安全性を評価した。数値計算では、津波外力をモリソン式で表現した係留船舶の動揺計算手法を提案し、船舶の動揺、係留索張力、防舷材反力の時系列や最大値について実験結果と計算結果を比較し、本手法の妥当性について検討した。

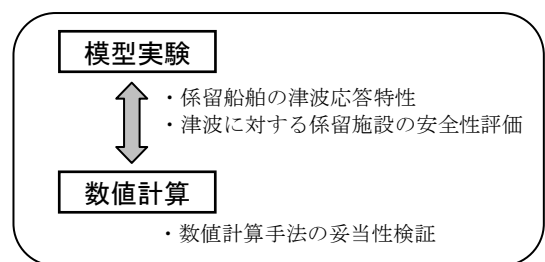


図-1 研究の内容

3. 模型実験

3.1 実験模型

実験では、模型縮尺を1/50として、フルード相似則を満足するように模型の寸法や特性を設定した。以下では、実験値とともに、()内に現地スケールでの値を併記する。

(1) 船舶模型

実験に使用した船舶の諸元を表-1に、また船舶模型の全景を図-2に示す。対象船舶は、50,000DWTのコンテナ船を想定した。船舶の積載量については、船舶模型の全重量の関係から空載条件を設定することができず、満載と半載の2種類とした。満載と半載とでは、船舶の諸元のうち、排水重量、垂線間長、喫水が異なる。

(2) 実験水槽

独立行政法人港湾空港技術研究所の環境インテリジェント水槽内に幅7.50m、長さ23.45mの水路を設置し、その水路内に実験模型を配置した。実際の津波では水位変動に伴って船舶の岸壁への乗り上げや着底等の被害が発生することも考えられる。しかし、本実験では、特に津波の流れが係留船舶や係留施設に与える影響を確認するために、水路に往復流を発生させて津波を模擬することとした。往復流は、水路の両端に設置されたポンプを用いて発生させている。なお、往復流の発生時には、水路内の水位の変動はほとんどない。

(3) 栈橋模型

係留岸壁については、船舶に対して様々な方向から津

波を作用させて実験を行うために、往復流の遮蔽面積が小さい透過型の栈橋式とした。船舶が栈橋に係留されている場合、船舶に対する津波の入射角度は、栈橋の配置や周辺地形、津波の発生源などによって異なる。一方、ケーソン式や矢板式等の不透過型岸壁に船舶に係留されている場合、津波の水位が岸壁よりも低い時には、津波は岸壁に沿った往復流となり、船首尾方向から津波が作用することが示されている(大垣ら, 2009)。よって、津波の流向が不透過型岸壁の法線と平行になる場合は、透過型岸壁に係留された船舶に船首尾方向から津波を作用させた実験の結果を限定的に適用することができる。

栈橋模型は、50,000DWTのコンテナ船に対応するバースとして、港湾基準を参考に栈橋の水深と延長を決定した(日本港湾協会, 2007a)。設定した栈橋の諸元を表-2に、また栈橋模型の全景を図-3に示す。

(4) 係留索模型

実験では、船舶の係留によく使用されているナイロンエイトロープを係留索の模型に選定した。係留索の諸元については、船舶の艀装数をもとに決定する方法がある(上田, 1984; 浜田ら, 1991)。しかし、本実験では津波を対象としているため、係留船舶の動揺量や係留索と防舷材に作用する係留力は風波を対象とした場合よりも大きいと予想された。そこで、船舶に作用する津波の流圧力の最大値を(1)式から推定し(日本港湾協会, 2007b)、その結果から係留索の径や配置を決定した。

$$R_f = 0.5\rho_0 CV^2 B \quad (1)$$

ここで、 B は喫水線下の船舶側面投影面積、 $C(=2.8)$ は流圧係数、 $V(=1.80\text{m/s})$ は流速、 ρ_0 は流体の密度である。

表-1 船舶の諸元

	単位	現地		模型	
		満載	半載	満載	半載
積載量					
排水重量	kN	470,400	274,400	3.76	2.20
全長	m	216.5	216.5	4.33	4.33
垂線間長	m	193.5	187.5	3.87	3.75
全幅	m	31.5	31.5	0.63	0.63
喫水	m	11.0	7.5	0.22	0.15



図-2 船舶模型の全景

表-2 栈橋の諸元

	単位	現地	模型
水深	m	15.0	0.30
延長	m	375.0	7.46

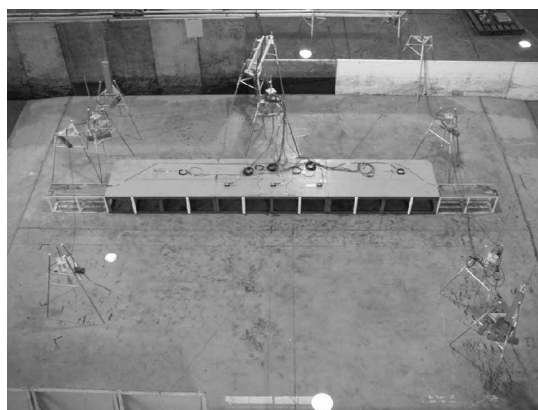


図-3 栈橋模型の全景

なお、流圧力が最大となるのは、船舶の船幅方向から津波が入射する場合である。表-3は、係留索の本数とロードセルの最大容量を示す。係留索模型は、ナイロンエイトロープ（ $\phi 100\text{mm}$ ）の2本分の張力特性を係留索模型1本で再現している。図-4は、実験で使用した係留索模型の外観を示す。

係留索の張力特性の設定値と係留索模型8本分の張力特性の検定結果を図-5に示す。係留索模型は、その張力特性がフルード相似則を満足するように作製した。この図より、係留索模型の張力特性は設定した係留索の張力特性を精度良く再現できていることが分かる。なお、船舶を係留する時に係留索を使用する場所によって、実験で計測される最大張力が異なることが考えられるため、表-3に示すように岸壁上の係留位置によってロードセル

表-3 係留索の本数とロードセルの最大容量

係留索		現地 (本)	模型 (本)	容量 (N)
船首側	ヘッドライン	2	1	10
	プレストライン	4	2	50
	スプリングライン	2	1	20
船尾側	スプリングライン	2	1	20
	プレストライン	4	2	50
	スターンライン	2	1	10

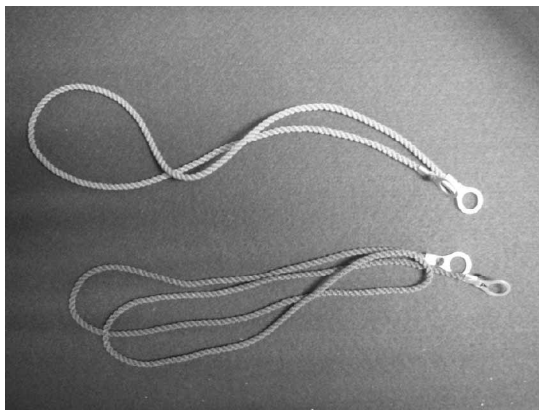


図-4 係留索模型

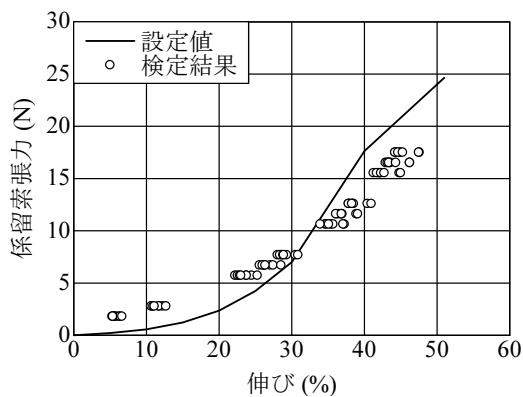


図-5 係留索の張力特性

の最大容量を変えた。また、実験開始時には、係留索の初期張力が0.63N (78.8kN)となるように調整した。

(5) 防舷材模型

防舷材については、船舶の接岸速度から接岸エネルギーを求めて、その諸元を決定する方法がある（日本港湾協会，2007c）。しかし、本実験では、船舶の接岸時よりも船舶への津波外力作用時に、防舷材に作用する外力が大きいと予想された。そこで、(1)式で推定した船舶に作用する津波の流圧力から防舷材模型の諸元を決定した。模型には定反力型の防舷材を選定し、その反力特性をモデル化した（上田，1984）。図-6は、実験で使用した防舷材模型の外観を示す。模型には、最大容量50Nのロードセルが組み込まれている。

図-7は、防舷材の反力特性の設定値と防舷材模型4基分の反力特性の検定結果を示す。防舷材模型も、その反力特性がフルード相似則を満足するように作製した。なお、防舷材模型はヒステリシス特性を考慮していない。この図より、防舷材模型の反力特性は設定した定反力型の防舷材の反力特性を精度良く再現していることが分かる。

(6) 模型配置

係留索模型と防舷材模型の配置を図-8に示す。係船柱模型を棧橋模型上の6カ所に設置し、船首側から船尾側に



図-6 防舷材模型

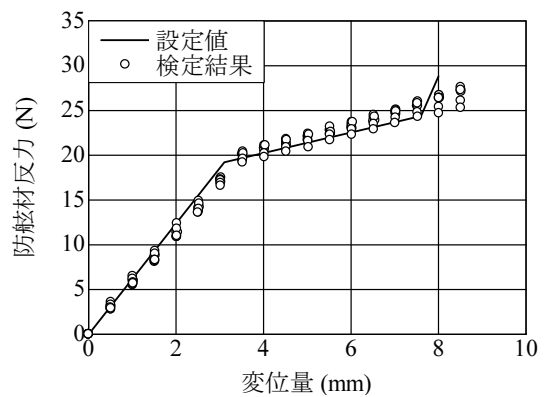


図-7 防舷材の反力特性

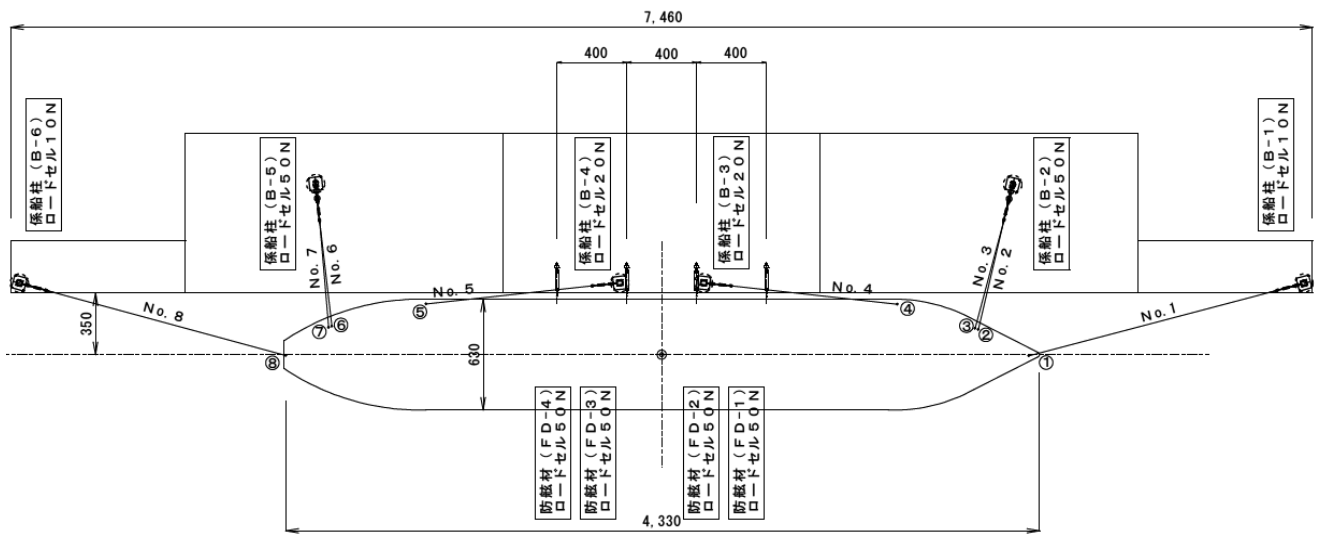


図-8 係留索模型と防舷材模型の配置

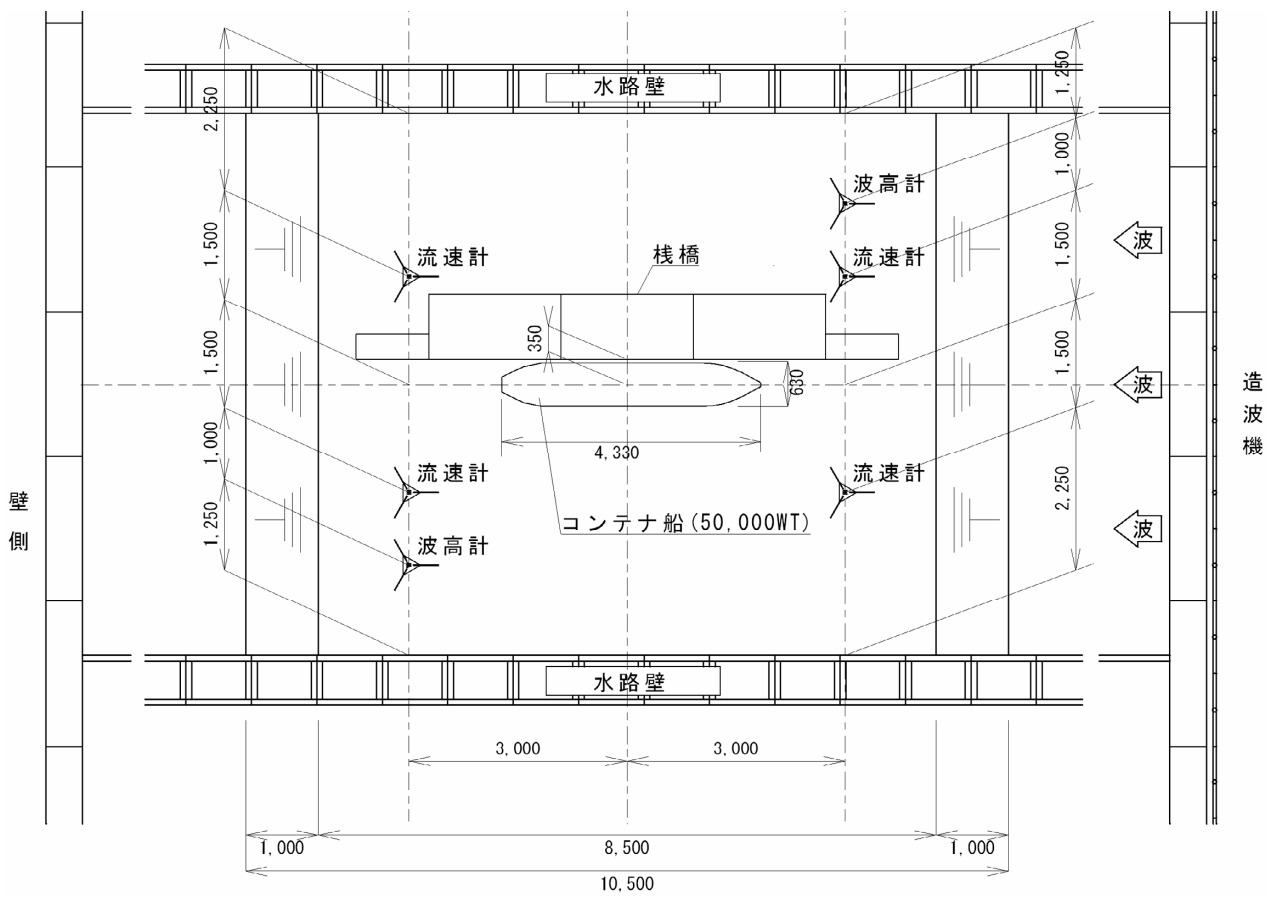


図-9 水路内の模型と計測器の配置

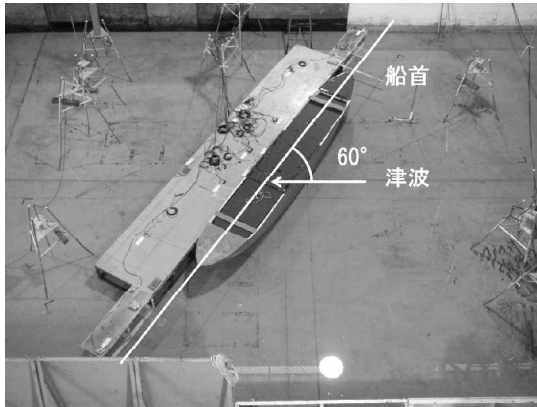


図-10 模型の配置状況（津波の入射角度60°）

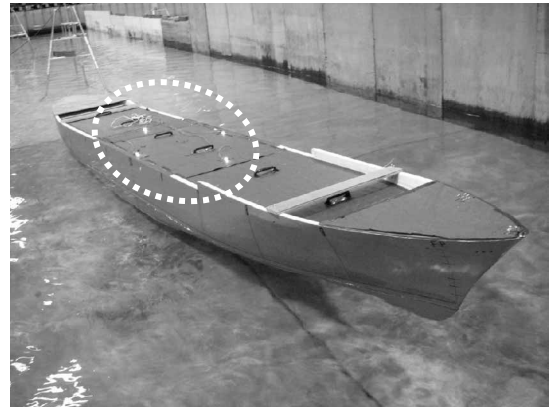


図-11 船舶の動揺計測用ターゲット

向けてB-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6と記号を付けた。この係船柱模型のロードセルを用いて係留索張力を計測している。係留索は全部で8本、また係船柱は全部で6基であるため、係船柱B-2, B-5にはそれぞれ2本の係留索をプレストラインとしてつなぎ、それぞれ2本分の係留索張力をまとめて計測した。防舷材模型については、50,000DWTの船舶に対する平均的な防舷材の設置間隔は20~25m程度とされている（北島ら, 1967）。そこで、実験では400mm (20m)間隔で防舷材模型を4基配置し、船首側から船尾側に向けてFD-1, FD-2, FD-3, FD-4と記号を付けた。図-9は、津波の入射角度0°のケースにおける水路内の模型と計測器の配置を示す。水路内には電磁流速計4台と容量式波高計2台を設置し、実験時の津波の流速と水位を計測した。図-10は、津波の入射角度60°のケースにおける模型の配置状況を示す。津波の入射角度を変更する場合には、このように船舶模型と栈橋模型の全体の向きを変えて配置して実験を行った。

(7) 係留船舶の動揺量の計測方法

係留船舶の動揺が3次元であり、津波外力により大きく動揺することが予測されたため、本実験では船舶の動揺量を3次元動揺計測システムを用いて計測することとした。このシステムは、2台のCCDカメラを使用して対象物の移動量を画像データとしてパソコンに記録し、画像解析により対象物の3次元動揺量を算出するものである。実験では係留船舶の動揺をCCDカメラで認識しやすいように、図-11に示すように船舶上の4カ所に発光ダイオードを動揺計測用ターゲットとして取り付けた。また、このターゲットを2方向から画像計測できるように、水槽脇にCCDカメラを2台設置した。画像計測の時間間隔は0.1sであり、この画像データをPTV法（Particle Tracking Velocimetry法、粒子追跡法）で画像解析して、ターゲットの3次元座標を求め、船舶の動揺6成分に変換した。ここで、船舶の動揺6成分は図-12に示す座標系で定義する。

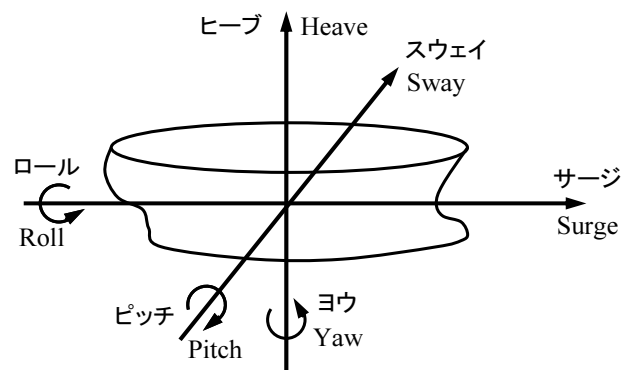


図-12 船舶の動揺6成分

3次元動揺計測システムでは、船舶の動揺量の計測精度が画像データの有効画素数に依存してしまうため、CCDカメラとターゲットの距離が重要になる。そこで、実験での本システムの計測精度について、計測範囲が限定されるもの高精度計測が可能なレーザー式変位計による計測結果と比較して検証している。図-13は、船舶の動揺量（ヨウ）について、船舶側面の岸壁上に配置した2台のレーザー式変位計の計測データから求めた時系列と3次元動揺計測システムにより計測した時系列を比較して示す。ここで、下の図は上の図の120~160sの区間を拡大したものである。この図から、数十秒スケールの大きな動揺のみならず、数秒程度の小さな動揺についても本システムの計測精度は十分高いということが分かる。なお、レーザー式変位計の計測結果において、ヨウが負方向に発散している部分はレーザー光線を係留索が横切った瞬間を計測したものであり、実際の船舶の動揺を表しているものではない。

(8) 実験データの処理方法

表-4は、流速、船体動揺、係留索張力、防舷材反力の各計測項目の計測間隔と計測データの処理方法を示す。流速データについては、データに含まれるノイズをロー

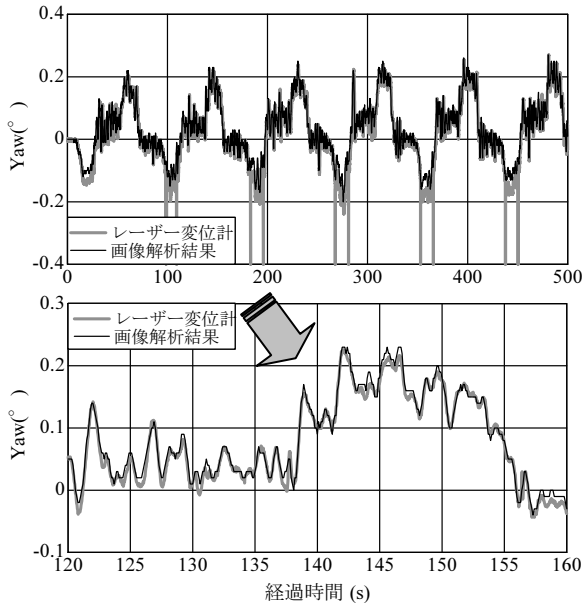


図-13 3次元動揺計測システムによる動揺量の計測精度

表-4 実験データの計測間隔とデータ処理方法

項目	計測間隔 (s)	ノイズ処理
流速	0.03	ローパスフィルター
船体動揺	0.10	—
係留索張力	0.03	5項移動平均
防舷材反力		

パスフィルターで処理した。一方、防舷材反力データには、ノイズの他に船舶の衝突に伴う衝撃的な反力が計測されていた。そこで、この衝撃的な反力が平滑化されないように、5項移動平均で計測データを処理することにした。係留索張力データも、同様に5項移動平均で処理した。また、船体動揺データには明確なノイズは含まれていなかったため、データ処理を実施しなかった。

3.2 実験条件

(1) 津波外力の設定

実験では、津波の往復流は(2)式に示すように、流速が規則波で変化するように調整した。

$$u = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2)$$

ここで、 A は最大流速、 T は津波の周期を表す。また、実験前に水路断面における津波の流速が均一となっていることを確認するために検定を行った。船舶の積載量が満載のケースにおける船舶模型の垂線間長は約4mであることから、水路を横断する方向に1.0m間隔で電磁流速計を5台配置して、4.0mの範囲における流速を計測した。図-14は、津波周期254s (30min)、最大流速255mm/s (1.80m/s) のケースについて、5台の流速計で計測された流速の時系

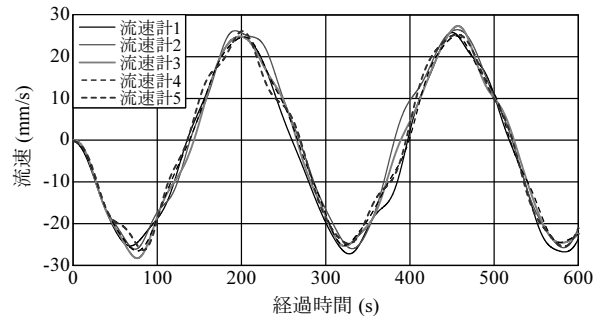


図-14 流速時系列の比較による津波の検定

表-5 実験ケース

実験 No.	入射角度 (°)	積載量	周期 (s)	最大流速 (mm/s)	津波初動
1	0	満載	85	99	引き
2	0	満載	85	152	引き
3	0	満載	85	255	押し・引き
4	0	満載	170	99	引き
5	0	満載	170	152	引き
6	0	満載	170	255	押し・引き
7	0	満載	254	255	押し・引き
8	0	半載	85	255	押し・引き
9	0	半載	170	255	押し・引き
10	0	半載	254	255	押し・引き
11	30	満載	85	255	押し・引き
12	30	満載	170	255	押し・引き
13	30	満載	254	255	押し・引き
14	60	満載	85	99	引き
15	60	満載	85	152	引き
16	60	満載	85	255	押し・引き
17	60	満載	170	99	引き
18	60	満載	170	152	引き
19	60	満載	170	255	押し・引き
20	60	満載	254	255	押し・引き
21	90	満載	85	255	押し・引き
22	90	満載	170	255	押し・引き
23	90	満載	254	255	押し・引き
24	90	半載	85	255	押し・引き
25	90	半載	170	255	押し・引き
26	90	半載	254	255	押し・引き

列を比較して示す。この図より、計測された流速の時系列波形は、周期と最大流速がともにほぼ設定通りであり、その変動が規則波に近い形状であることが確認できた。よって、水路断面における津波の流速は均一となっていることから、この往復流を実験で使用する津波外力として採用した。

(2) 実験ケース

表-5は、実験ケースの一覧を示す。各実験ケースは、津波の入射角度、船舶の積載量、津波の周期、津波の最大流速、津波の初期変動の5つの実験条件を組み合わせで設定した。

津波の入射角度は船首方向と往復流の流向のなす角度と定義する。栈橋に係留された船舶には様々な角度から津波が作用する可能性があるため、 0° 、 30° 、 60° 、 90° の4種類の入射角度を設定した。船舶の積載量については、船舶の排水重量の影響を比較するため、満載と半載の2種類とした。津波の周期は、85s (10min)、170s (20min)、254s (30min)、津波の最大流速は、99mm/s (0.70m/s)、152mm/s (1.07m/s)、255mm/s (1.80m/s)のそれぞれ3種類とした。また、津波の初期変動は押し波と引き波の2種類とした。なお、実験の再現精度が良いと予想されたため、実験は各ケースとも2回実施することとし、1回の実験につき津波5周期分のデータ計測を行った。

3.3 係留船舶の津波応答特性

津波に対する係留船舶の応答特性について、最も特徴的な事例であるケース16（津波の入射角度 60° 、津波の周期85s (10min)、津波の流速255mm/s (1.80m/s)、船舶の積載量満載）の場合について考察する。

図-15は、ケース16の実験において、津波による引き波が係留船舶に作用した状況を示す。(1)は、津波が作用する前の船舶の係留状況であり、(2)は、引き波によって係留船舶が栈橋から引き離されている時の状況である。この図から、津波による引き波が係留船舶に作用する場合には、スウェイが非常に大きくなることが分かり、それに伴い係留索の張力も大きくなると予想される。

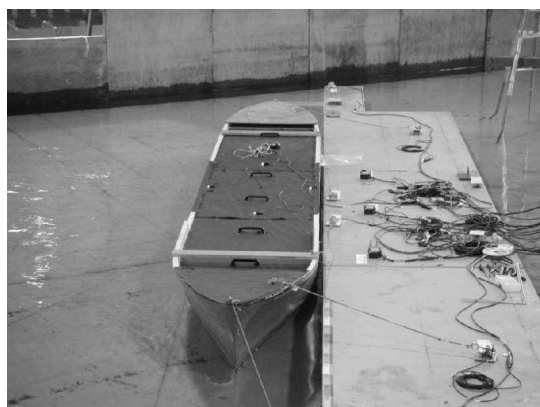
図-16は、ケース16について、津波の流速、船舶の動揺6成分、係留索張力（6ヵ所）、防舷材反力（4ヵ所）の時系列を示す。津波の流速については、その最大値が約250mm/s (1.77m/s)であり、津波の最大流速の設定値255mm/s (1.80m/s)より少し小さい。また、流速の時系列波形は、規則波形状から多少崩れていることが分かる。これは、水路断面の中央部に係留船舶が存在すると、津波

が遮蔽されて断面中央部の流速が小さくなり、その流れも乱されるからであると考えられる。

係留船舶の動揺量については、動揺6成分の中で特にスウェイが大きい。津波による引き波が係留船舶に作用する時、船舶は栈橋から離れる方向に外力を受ける。津波の流速が大きくなると津波外力は大きくなるが、スウェイは栈橋から離れる方向に最大で約280mm (14m)にもなっている。この時、係留索による張力が船舶の甲板にある係留点に作用し、同時に津波流れによる抗力が船舶の重心よりも下方に作用するため、ロールが最大で約 6.0° と大きくなっている。サージについては、係留船舶が栈橋から離れる時に最大約+60mm (3m)、逆に栈橋に押し付けられる時には最大約-40mm (2m)を示しており、津波の流向と同じ方向に動揺している。ヨウについては、栈橋から離れていた係留船舶が栈橋方向へ戻る時に反時計回りに約 1.0° を示しているが、その後防舷材に衝突した時に時計回りのヨウが瞬間的に大きくなっている。これは、係留船舶が船首側の防舷材から船尾側の防舷材へと順に衝突しているからである。ヒープやピッチは、実験で水位を変動させていないため非常に小さく、ヒープは最大でも1mm (5cm)程度、ピッチは 0.2° 以下である。

係留索張力については、特にプレストライン (B-2, B-5)の張力が大きく、津波の第2波以降の引き波でこれらの張力はいずれも30N (3750kN)以上になっている。一方、その他の係留索 (B-1, B-3, B-4, B-6)の張力は最大でも4N (500kN)以下であり、このケースではプレストラインの張力が大きくなり易いことが分かる。これは、プレストラインは索長が短く、津波の流れに平行に近い角度に配置されているのに対し、その他の係留索は索長が長く、津波の流れに垂直に近い角度に配置されているからである。

防舷材反力については、津波の1周期の間に2回大きな反力が発生している。1回目は、栈橋から離れていた係留



(1) 津波作用前



(2) 津波（引き波）作用時

図-15 津波による係留船舶の動揺（入射角度 60° ）

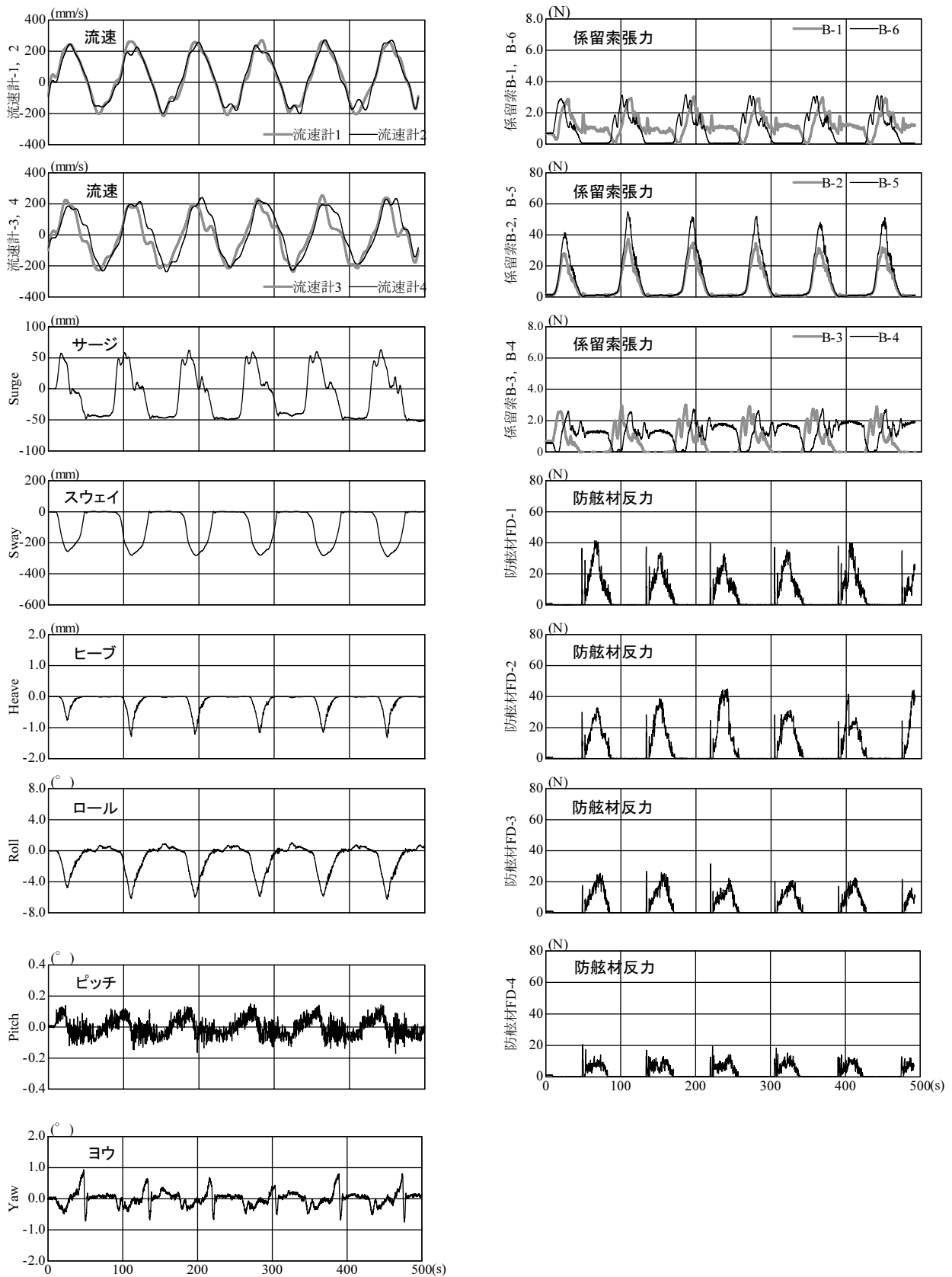


図-16 津波の流速・船体動揺量・係留索張力・防舷材反力の時系列（ケース16）

船舶が防舷材に衝突する時であり、瞬間的に大きな反力を示している。この時、船舶は船首側の防舷材 (FD-1) に最初に衝突し、その後時計回りに回転しながら防舷材 (FD-2, FD-3, FD-4) に順番に衝突している。防舷材に対する船舶の衝突速度は、防舷材 (FD-1) に衝突した後徐々に小さくなるため、4基の防舷材の中では、最初に船舶が衝突する防舷材 (FD-1) の反力が最も大きい。2回目は、係留船舶が押し波によって栈橋に押し付けられる時である。船舶が押し付けられている時間は、津波の1周期の約1/2の時間であり、1回目の防舷材反力と比較して非常に長く、準静的な反力として係留船舶に作用している。

3.4 津波による船体動揺量・係留力の最大値

津波による係留船舶の動揺量と係留施設による係留力の最大値について考察する。ここでは、各実験ケースで得られた船舶の動揺6成分、係留索張力、防舷材反力の最大値を津波の最大流速、津波の周期、津波の入射角度、船舶の積載量の4種類のパラメータごとに比較して示す。なお、ここで示す最大値とは、各ケースの実験回数ごとの計測データの最大値について平均を取ったものである。

(1) 津波の最大流速

図-17, 18, 19は、それぞれ船体動揺量、係留索張力、防舷材反力の最大値を津波の最大流速をパラメータとして比較して示す。これらの図では、船舶の積載量は満載条件である。

a) 船舶の動揺量

サージは、津波の入射角度 0° の場合に特に流速の影響が大きく、流速が大きいケースほど動揺量も大きい。入射角度 60° の場合では、流速による動揺量の相違は小さくなるが、流速が大きいほどサージが大きくなる傾向は変わらない。スウェイとロールは、津波の入射角度 0° の場合には動揺量が小さく、流速による動揺量の相違は小さい。一方、入射角度 60° の場合では、流速による動揺量の相違が大きく、流速が大きくなるにつれてスウェイやロールは大きくなっている。ヨウは、流速が大きいほど動揺量が大きいが、津波の入射角度 60° の場合に動揺量がより大きくなっている。ヒープとピッチは、他の動揺成分と比較して比較的小さい値である。

b) 係留索張力

ブレストライン (B-2, B-5) は、津波の入射角度 0° の場合には流速による張力の相違はほとんどないが、入射角度 60° の場合では流速が大きくなるほど張力も大きくなっている。津波の入射角度 60° の場合には、ブレストラインが津波の流れに平行に近い角度に配置されることになり、スウェイの影響を受け易く、係留索張力が大きくなると考えられる。一方、他の係留索 (B-1, B-3, B-4, B-6) は、津波の入射角度に関わらず、流速が大きいほど張力が大きくなっている。これらの係留索は、サージ方向に近い角度に配置されており、サージが大きくなることにより、係留索張力が大きくなると考えられる。

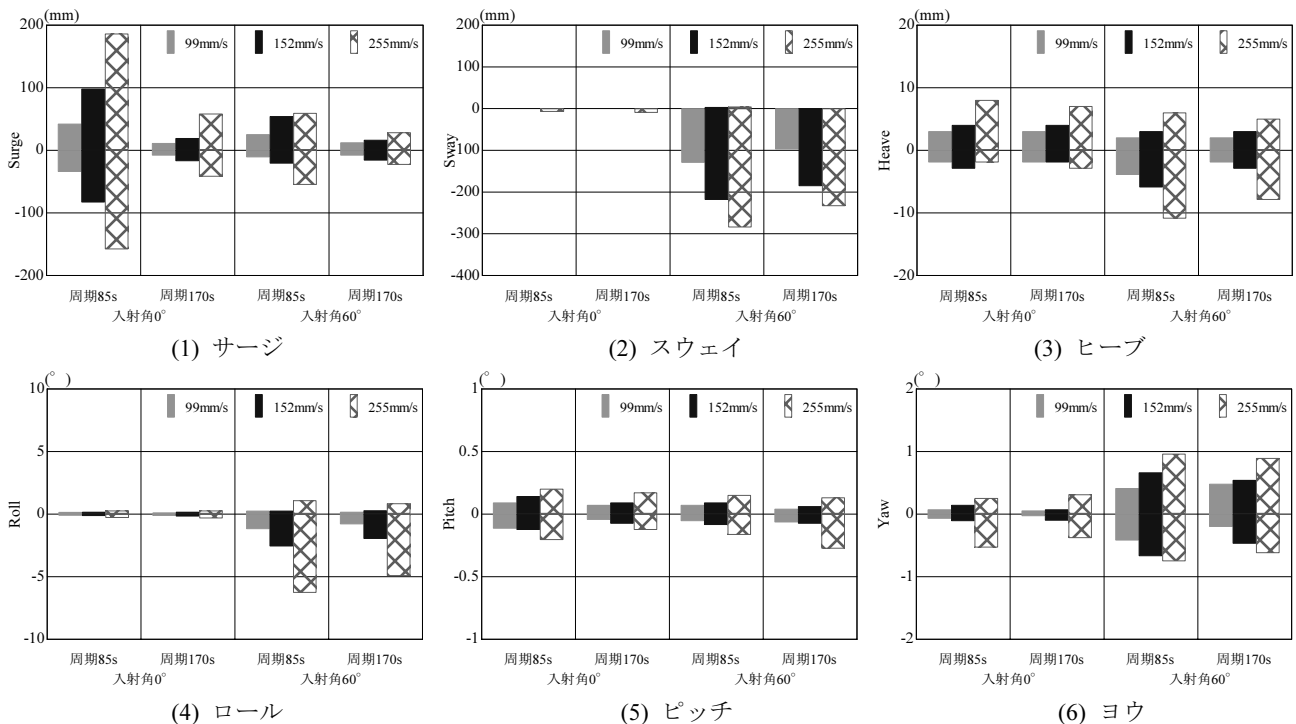


図-17 船体動揺量の最大値の比較 (パラメータ：津波の最大流速)

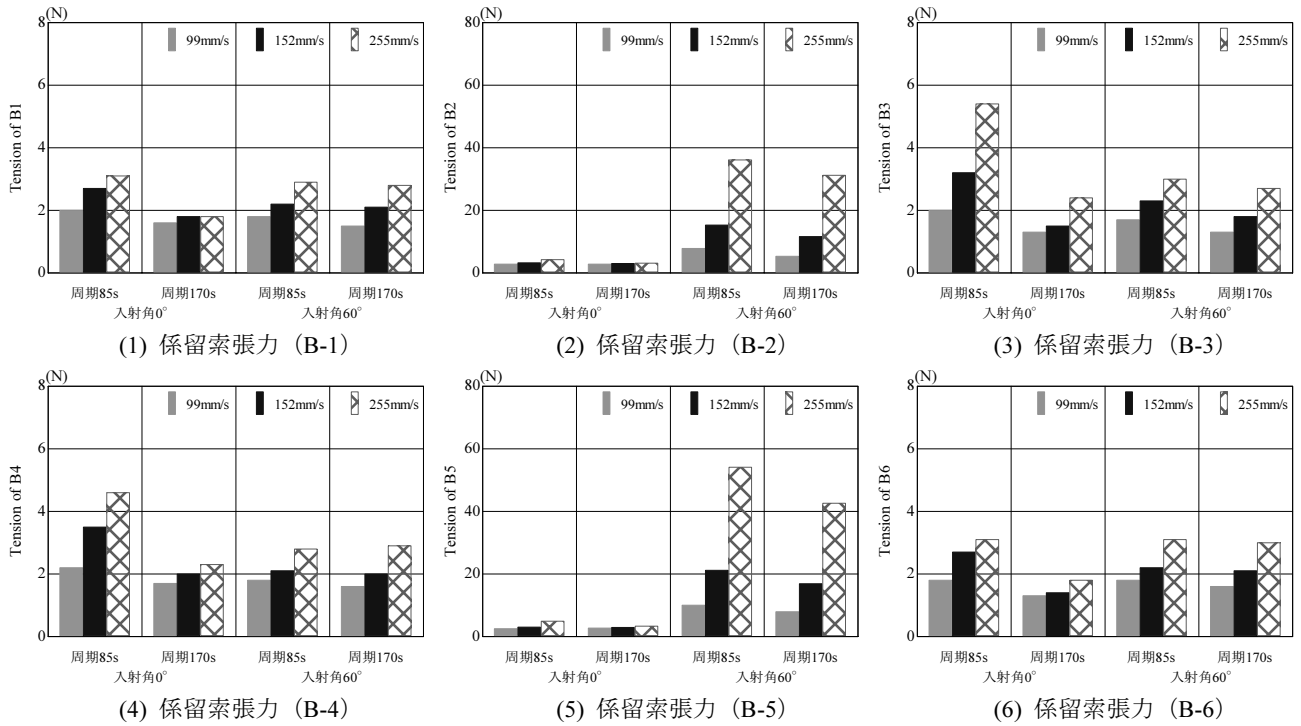


図-18 係留索張力の最大値の比較 (パラメータ：津波の最大流速)

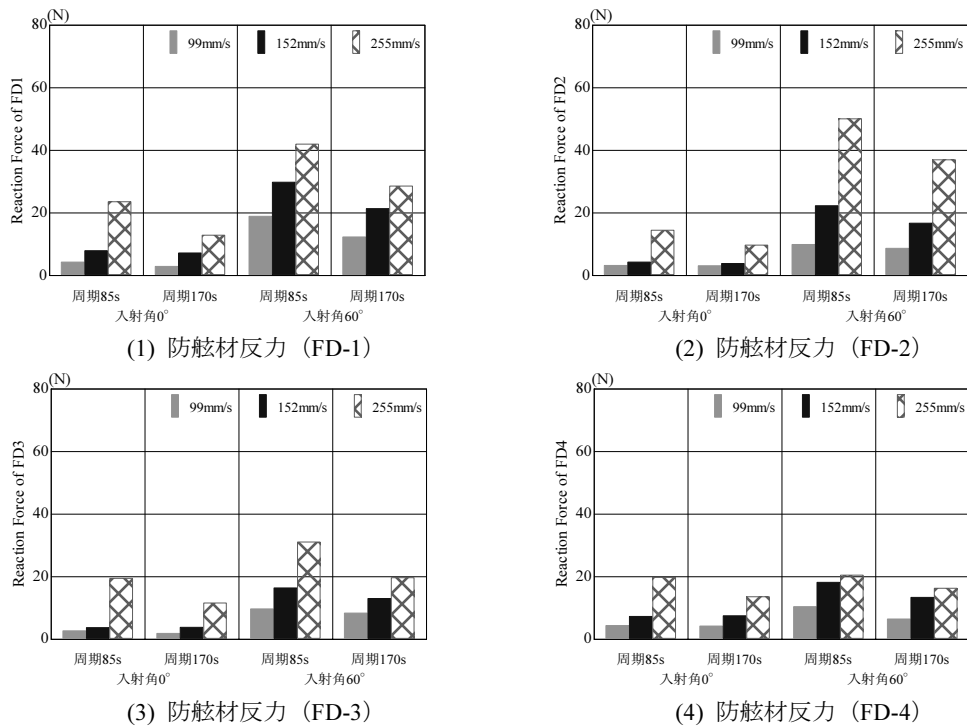


図-19 防舷材反力の最大値の比較 (パラメータ：津波の最大流速)

c) 防舷材反力

津波の入射角度 0° の場合には、いずれの防舷材についても流速が大きいほど反力が大きい。一方、入射角度 60° の場合でも、流速が大きいほど防舷材反力が大きくなっているが、防舷材によってその傾向は異なっている。津波の最大流速 152mm/s (1.07m/s) の場合には、船側側の防舷材 (FD-2) よりも船首側の防舷材 (FD-1)、船側側の防舷材 (FD-3) よりも船尾側の防舷材 (FD-4) の反力が大きい、最大流速 255mm/s (1.80m/s) の場合には大小関係が逆になっている。これは、前者の場合には船舶を防舷材に押し付ける津波外力が弱く、ヨウの影響により防舷材反力が発生するのに対し、後者の場合には津波外力により船舶が防舷材に強く押し付けられて反力が発生するためと考えられる。

(2) 津波の周期

図-20, 21, 22は、それぞれ船体動揺量、係留索張力、防舷材反力の最大値を津波の周期をパラメータとして比較して示す。これらの図では、船舶の積載量は満載条件、津波の最大流速は 255mm/s (1.80m/s) である。

a) 船舶の動揺量

サージは、津波の入射角度 90° の場合には津波の周期による相違は小さいが、入射角度 0° , 30° , 60° の場合には周期 85s (10min) の時の動揺量が最も大きく、周期 254s (30min) の時の動揺量が最も小さい。サージは、このように他の動揺成分と比較して津波の周期による動揺量の相

違が顕著であることが分かる。スウェイとロールは、津波の入射角度 0° , 30° の場合には津波の周期による動揺量の相違は小さいが、入射角度 60° , 90° の場合には周期 85s (10min) の時に動揺量が少し大きくなっている。ヒープは、津波の入射角度 0° の場合以外では津波の周期 85s (10min) の時の動揺量が大きい。ピッチとヨウは、津波の周期による相違はほとんどない。数万トンの一般的な船舶のサージの固有周期は $2\sim 3\text{min}$ 程度であり (沿岸技術研究センター, 2004), 津波の周期よりも十分に短いことから、係留船舶の固有周期と津波の周期の共振による影響は小さい。また、船舶に作用する波強制力は、津波のような長い周期の波の場合、周期が長いほど小さくなっていく。よって、船舶の動揺の固有周期よりも周期が長い津波を対象とする場合は、周期が長いほど船舶の動揺量は小さくなるものと考えられる。

b) 係留索張力

ほとんど全ての係留索について、津波の周期 85s (10min) の場合の張力は、周期 170s (20min) , 254s (30min) の場合の張力よりも大きくなっている。これは、津波の周期が短いほど係留船舶の動揺が大きい傾向にあるからである。一方、津波の周期 170s (20min) の場合の係留索張力より周期 254s (30min) の場合の張力の方が大きい時がある。これらは、津波の入射角度 60° , 90° の場合に多く、スウェイやロールの影響によるものと考えられる。全てのケースの中で津波の周期による係留索張力の相違が大きい

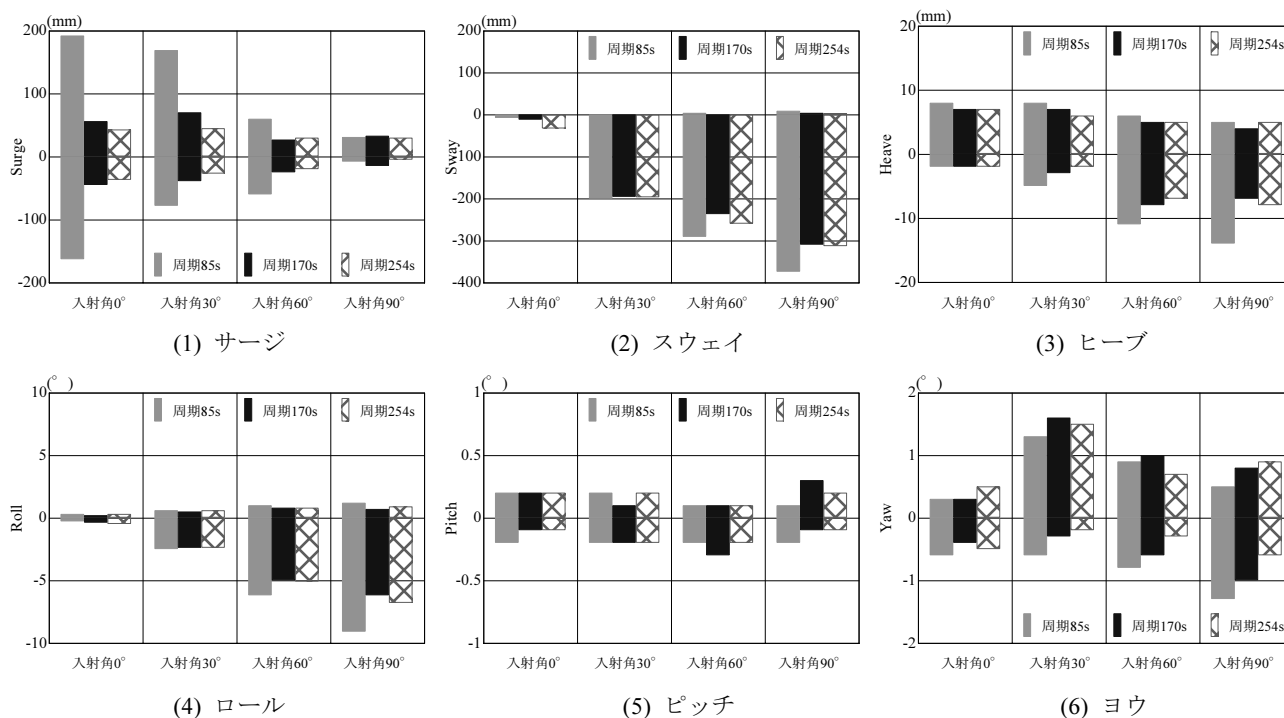


図-20 船体動揺量の最大値の比較 (パラメータ: 津波の周期)

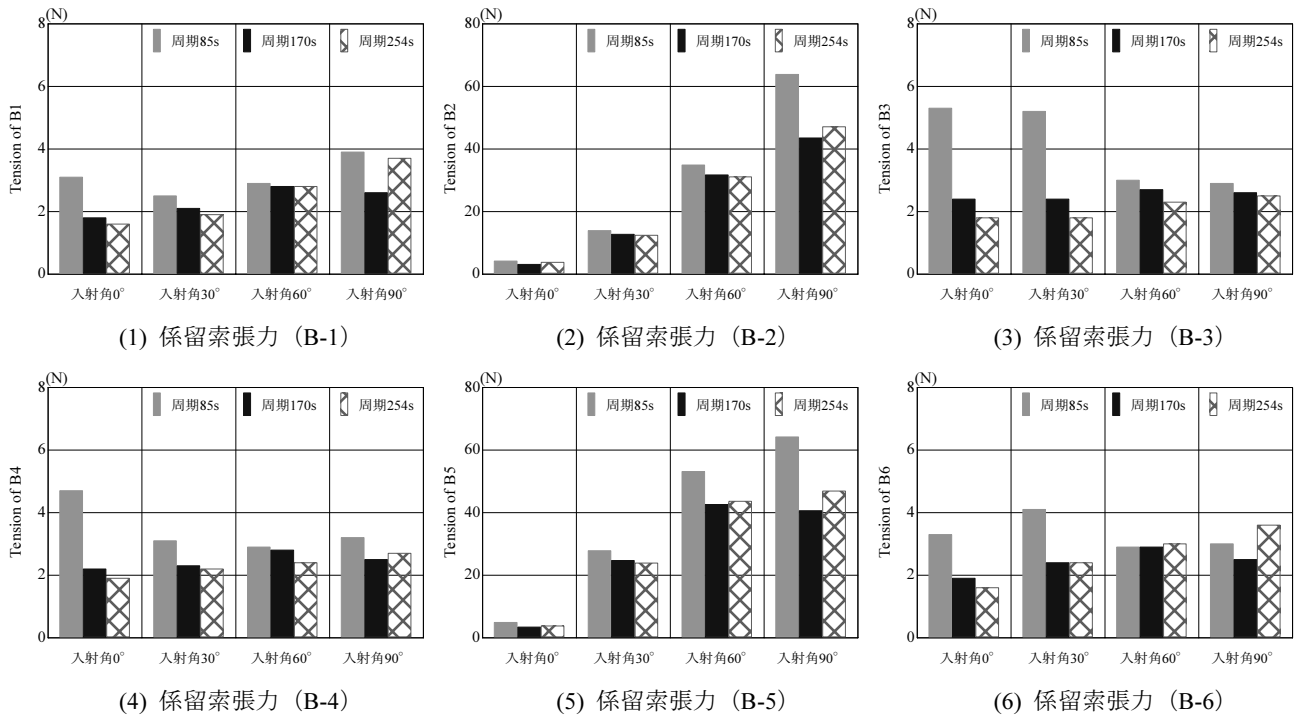


図-21 係留索張力の最大値の比較 (パラメータ：津波の周期)

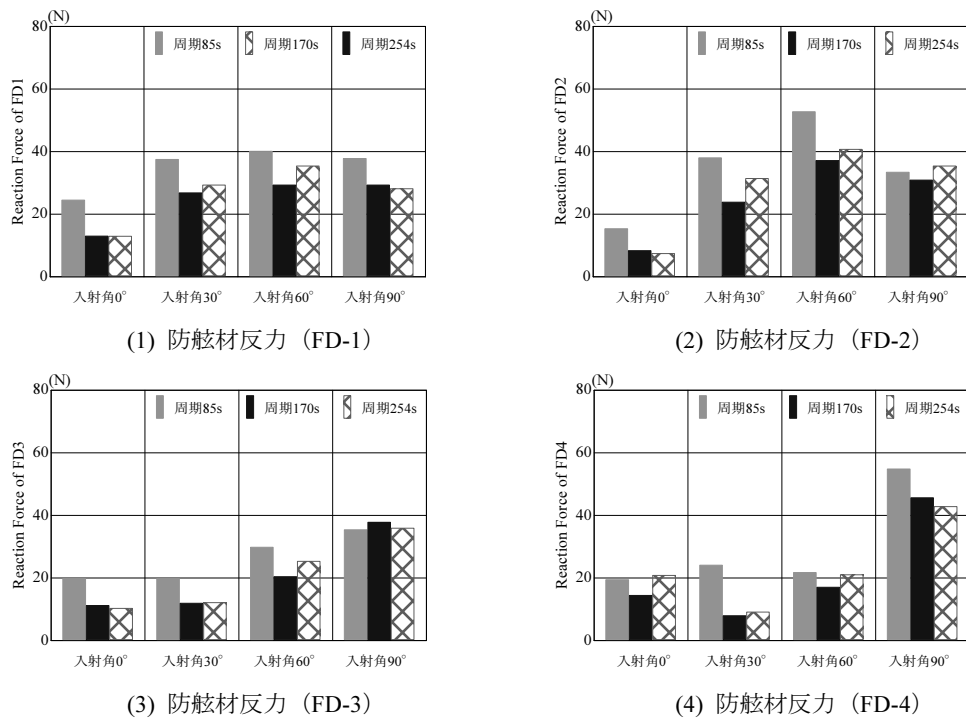


図-22 防舷材反力の最大値の比較 (パラメータ：津波の周期)

は、津波の入射角度 90° の場合のプレストライン (B-2, B-5) の張力と入射角度 0° の場合のスプリングライン (B-3, B-4) の張力である。これらの場合には、いずれも係留索が津波の流れと平行に近い角度に配置されている時に係留索張力の相違が大きくなっている。

c) 防舷材反力

防舷材は、津波の周期85s (10min)の場合に反力が最も大きくなっている。津波の周期が短いケースでは、船舶の動揺量も大きくなる傾向にあり、これに対応して防舷材反力も大きくなったものと考えられる。

(3) 津波の入射角度

図-23, 24, 25は、それぞれ船体動揺量、係留索張力、防舷材反力の最大値を津波の入射角度をパラメータとして比較して示す。これらの図では、船舶の積載量は満載条件、津波の最大流速は255mm/s (1.80m/s)である。

a) 船舶の動揺量

サージは、津波の入射角度 0° の場合に大きく、入射角度 90° の場合に小さくなっている。逆に、スウェイとロールは、津波の入射角度 0° の場合に小さく、入射角度 90° の場合に大きくなっている。サージとスウェイは水平面内の並進運動成分であり、津波流れと動揺成分の向きが一致する場合に津波の影響を大きく受けて動揺量が大きくなる。また、津波の入射角度が 60° あるいは 90° の場合にスウェイが大きくなる時には、同時に、船舶に作用する津波流れによる抗力の影響でロールも大きくな

っている。ヒープやピッチは、津波の入射角度による相違は小さく、いずれのケースでも動揺量は小さい。ヨウは、津波の入射角度 0° の場合に動揺量が最も小さくなっている。津波の入射角度 0° の場合以外では、係留船舶が栈橋から引き離される時があるため、船舶の水平面内の回転は許容されている。一方、津波の入射角度 0° の場合には係留船舶は常時栈橋に接触しているため、水平面内の回転は制限されている。よって、津波の入射角度によって係留船舶の動揺特性は大きく異なり、特にサージとスウェイに大きく影響すると言える。

b) 係留索張力

プレストライン (B-2, B-5) は、津波の入射角度が大きくなるほど張力が大きくなっている。スウェイが大きくなるとプレストライン (B-2, B-5) の張力が大きくなることから、スウェイが最も大きくなる入射角度 90° の場合に張力が最大となっている。他の係留索 (B-1, B-3, B-4, B-6) は、津波の周期170s (20min), 254s (30min)の場合では津波の入射角度が大きくなるほど張力が大きくなる傾向がある。津波の周期170s (20min), 254s (30min)の場合には、サージは小さいことからスウェイの影響を受けて係留索張力が大きくなると考えられる。一方、津波の周期85s (10min)の場合では、津波の入射角度 0° の場合に係留索張力が大きくなっている。津波の周期85s (10min)の場合には、サージが大きくなることから係留索張力が大きくなると考えられる。したがって、係留索張力はサ

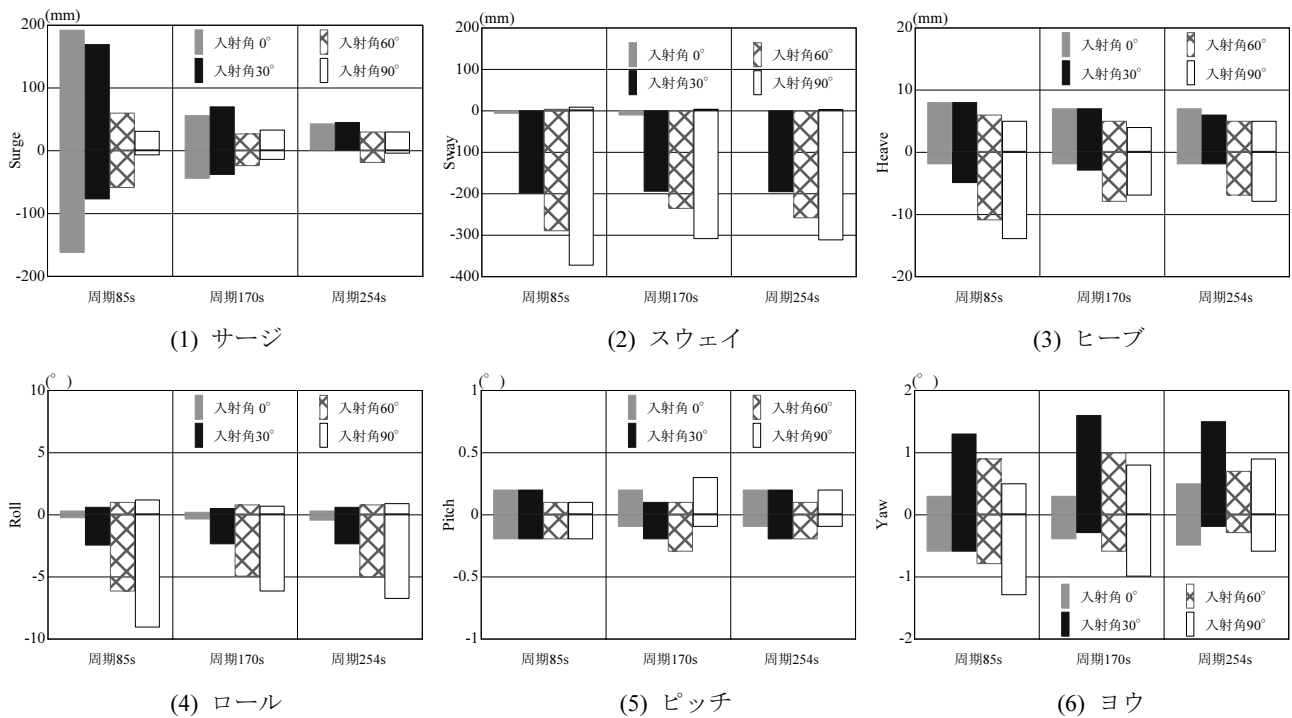


図-23 船体動揺量の最大値の比較 (パラメータ: 津波の入射角度)

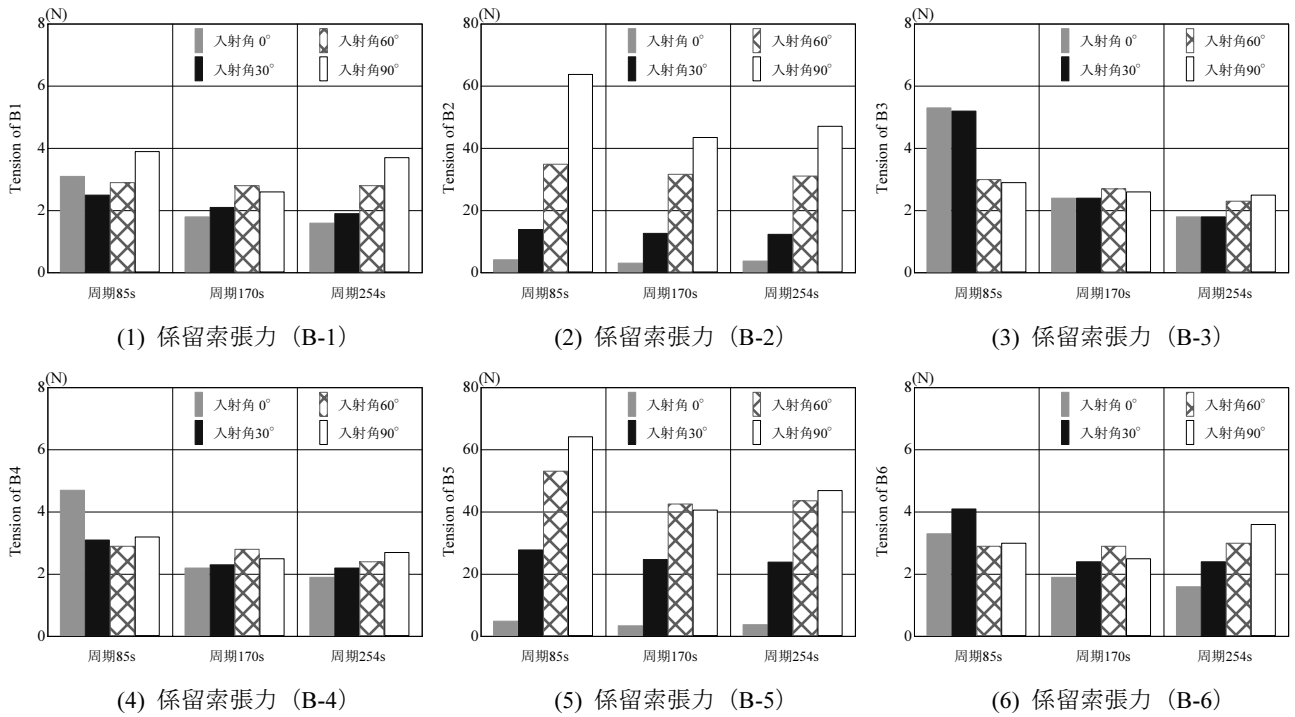


図-24 係留索張力の最大値の比較 (パラメータ：津波の入射角度)

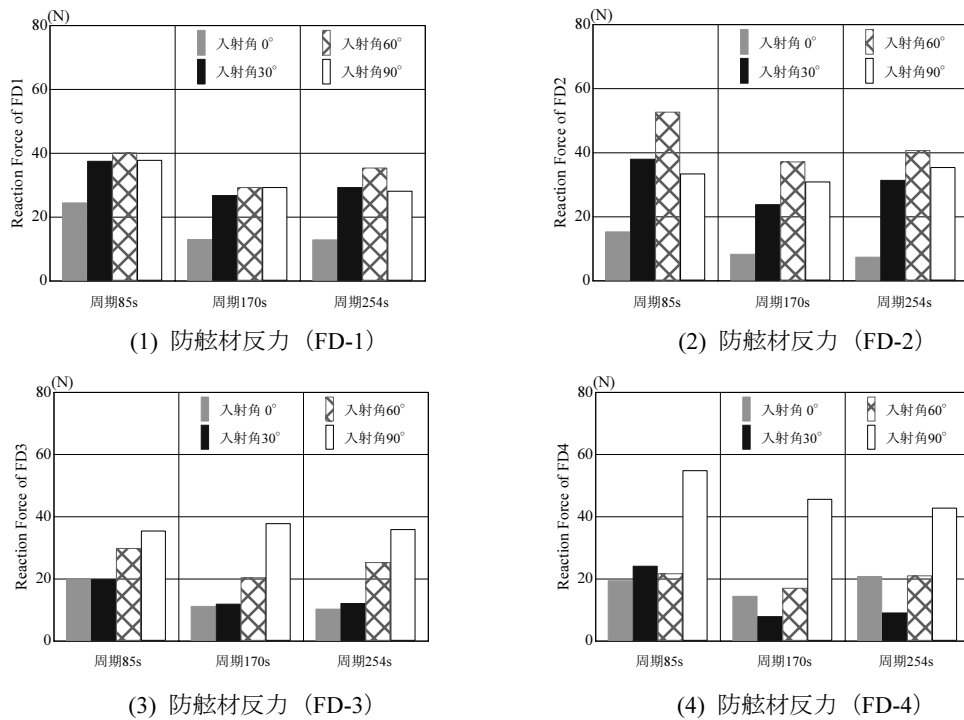


図-25 防舷材反力の最大値の比較 (パラメータ：津波の入射角度)

ージとスウェイの影響を大きく受けることが分かる。

c) 防舷材反力

防舷材反力は、津波の入射角度が大きくなるほど大きくなる傾向がある。これは、津波の入射角度が大きいほど津波の流れ方向の係留船舶の水面下の投影面積が大きくなるため、それに対応して船舶が受ける津波外力が大きくなるからである。

(4) 船舶の積載量

図-26, 27, 28は、それぞれ船体動揺量、係留索張力、防舷材反力の最大値を船舶の積載量をパラメータとして比較して示す。これらの図では、津波の入射角度は 90° 、津波の最大流速は 255mm/s (1.80m/s)である。なお、津波の入射角度 0° 、 90° の場合について船舶の積載量が満載と半載の実験を行っているが、ここでは積載条件の影響が明確になる入射角度 90° の場合について示す。

a) 船舶の動揺量

津波の入射角度 90° の場合には、サージやピッチは小さく、船舶の積載量による動揺量の相違はほとんど見られない。スウェイは、船舶の積載量による影響が明瞭に見られ、満載時の動揺量が大きくなっている。また、ヨウも、満載時の動揺量が大きい傾向にある。船舶の積載量が満載の場合は、半載の場合よりも喫水が大きくなるため、船舶の水面下の投影面積は大きくなり、逆に船底と海底とのクリアランスは小さくなる。このため、船舶の積載量が満載の場合は、津波流れによる抗力を受け易

く、また排水重量が大きいために慣性力も大きくなる。

このことから、満載時のスウェイやヨウが半載時よりも大きくなったものと考えられる。一方、ロールは船舶の積載量による動揺量の相違がほとんどないことが分かる。ロールは、係留船舶の長軸周りの回転運動成分であることから、船舶の積載量の大小に伴う喫水や排水重量の変化の影響をあまり受けないものと考えられる。このため、満載時と半載時のロールの動揺量がほぼ同じになったと考えられる。また、ヒープは、船舶の積載量による動揺量の相違はほとんど見られない。

b) 係留索張力

津波の入射角度 90° の場合には、船舶の積載量が満載時にスウェイが大きくなっているため、プレストライン (B-2, B-5) の張力もまた満載時の方が大きくなっている。他の係留索 (B-1, B-3, B-4, B-6) の張力については、船舶の積載量による差異は大きくはないが、いずれも満載時の方が係留索張力は大きくなっている。

c) 防舷材反力

津波の入射角度 90° の場合には、船舶の積載量が満載時にスウェイが大きくなっているため、全ての防舷材について満載時の方が反力は大きくなっている。また、4基の防舷材の中でも両端に配置された防舷材 (FD-1, FD-4) の反力は、船舶の積載量による影響が顕著であることが分かる。これは、満載時の方が半載時よりもヨウの動揺量が大きくなっていることが原因と考えられる。

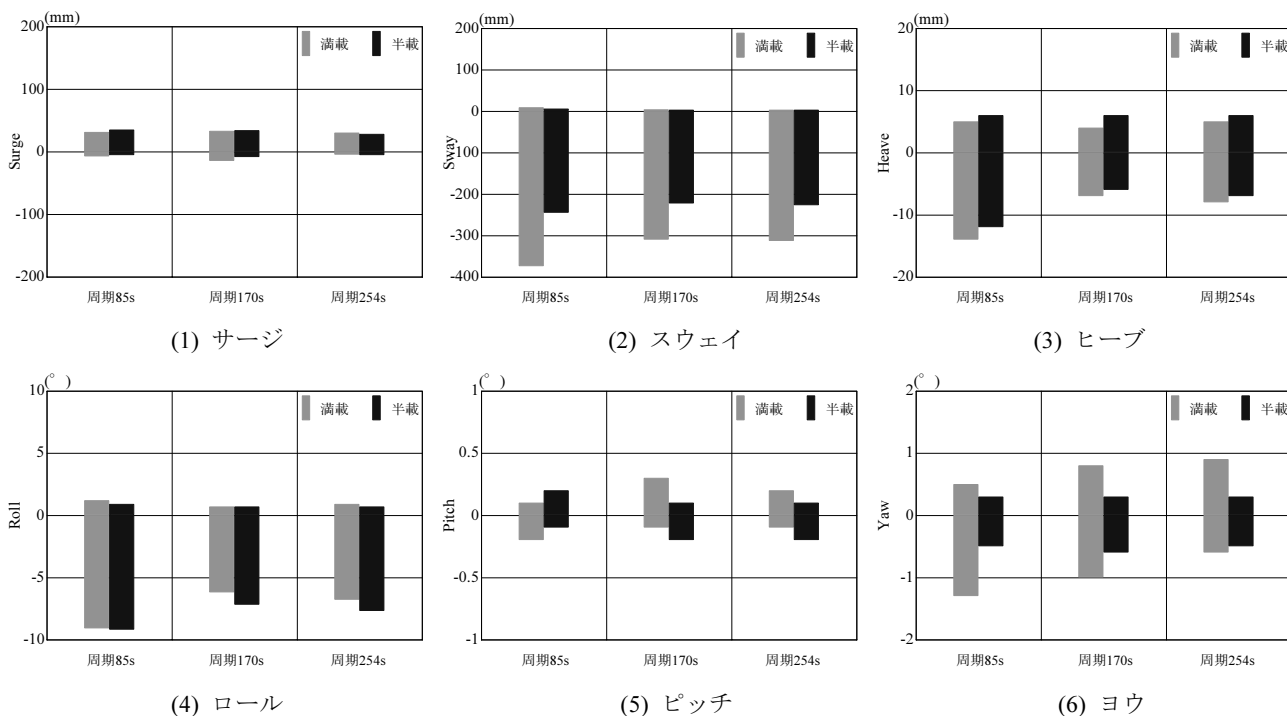


図-26 船体動揺量の最大値の比較 (パラメータ：船舶の積載量)

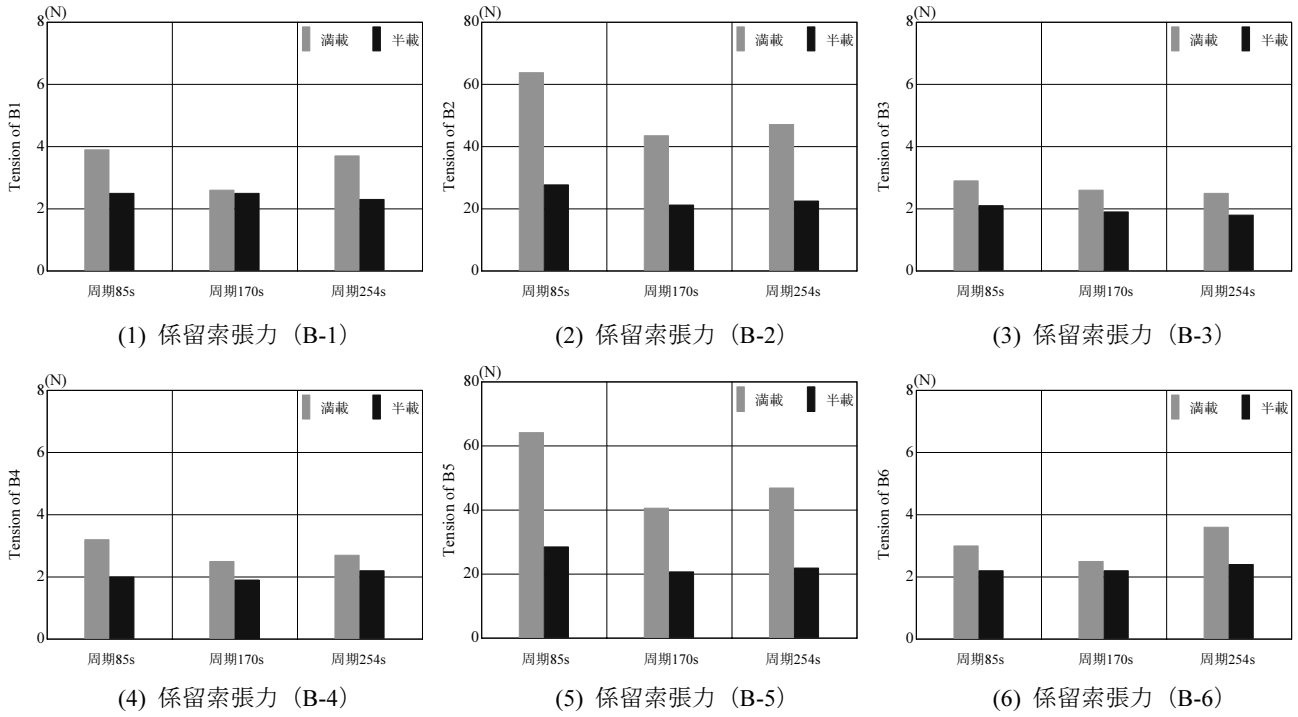


図-27 係留索張力の最大値の比較 (パラメータ：船舶の積載量)

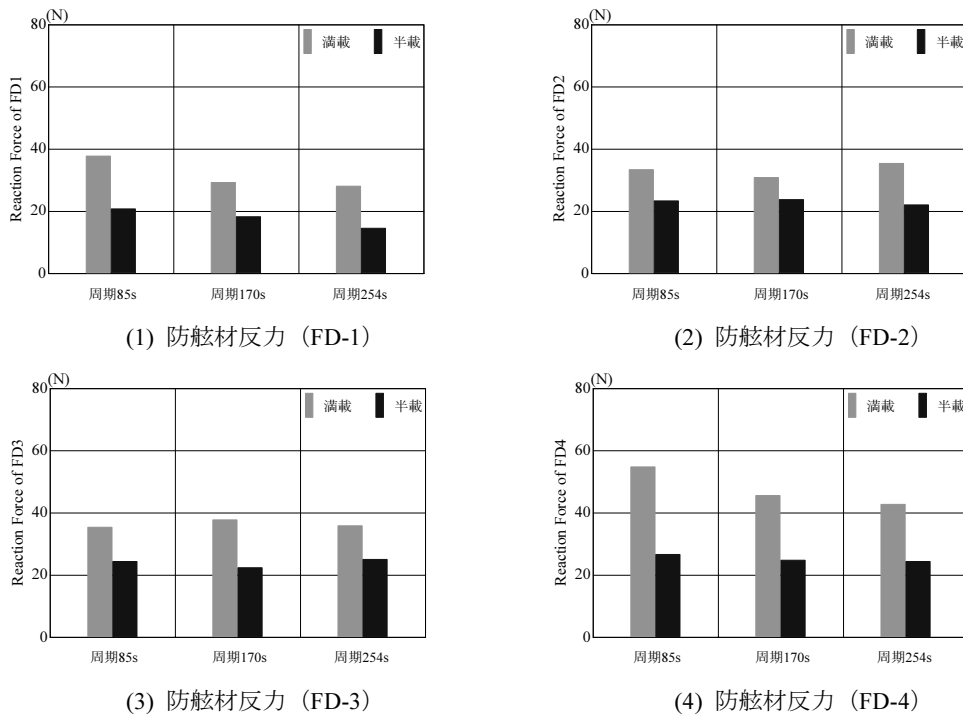


図-28 防舷材反力の最大値の比較 (パラメータ：船舶の積載量)

3.5 津波に対する係留施設の安全性評価

模型実験では、係留船舶に対して津波による外力が大きいが予想されたため、対象とした50,000DWTのコンテナ船に対して一般的に用いられる係留索や防舷材よりも破断強度や吸収エネルギー性能の大きいものを模型として使用している。そこで、対象船舶に対する通常の係留方法を想定して係留索の破断荷重と防舷材の限界荷重を設定し、本実験で検討した津波外力に対する係留施設の安全性を評価する。対象船舶である50,000DWTのコンテナ船の艀装数から係留索をナイロンエイトロープ（φ65mm）と、また接岸エネルギーから防舷材をV型防舷材（800H）と選定した。ナイロンエイトロープ1本の破断荷重は5.5N（688kN）であり、プレストライン（B-2, B-5）は2本の係留索が用いられているため、その破断荷重は11.1N（1388kN）となる。また、V型防舷材1基の圧縮限界荷重は24.7N（3088kN）である。そして、実験で計測された係留索張力と防舷材反力の最大値をそれぞれ係留索の破断荷重や防舷材の限界荷重と比較して、これらの荷重以下となる場合に係留施設は安全であると判断した。

表-6は、係留施設の安全性の評価基準であり、係留索の破断荷重と防舷材の限界荷重を模型値で示す。表-7は、係留施設の安全性を評価した結果を示す。また、表-8、9は、それぞれ実験で計測された係留船舶の動揺量の最大値と、係留索張力と防舷材反力の最大値を参考として示

表-6 係留施設の安全性の評価基準

種類	破断荷重/限界荷重 (N)	
係留索	B-1, B-3, B-4, B-6	5.5
	B-2, B-5	11.1
防舷材	FD-1~FD-4	24.7

表-7 係留施設の安全性評価

実験 No.	入射角度 (°)	積載量	周期 (s)	最大流速 (mm/s)	安全性	実験 No.	入射角度 (°)	積載量	周期 (s)	最大流速 (mm/s)	安全性
1	0	満載	85	99	○	14	60	満載	85	99	○
2	0	満載	85	152	○	15	60	満載	85	152	×
3	0	満載	85	255	○	16	60	満載	85	255	×
4	0	満載	170	99	○	17	60	満載	170	99	○
5	0	満載	170	152	○	18	60	満載	170	152	×
6	0	満載	170	255	○	19	60	満載	170	255	×
7	0	満載	254	255	○	20	60	満載	254	255	×
8	0	半載	85	255	○	21	90	満載	85	255	×
9	0	半載	170	255	○	22	90	満載	170	255	×
10	0	半載	254	255	○	23	90	満載	254	255	×
11	30	満載	85	255	×	24	90	半載	85	255	×
12	30	満載	170	255	×	25	90	半載	170	255	×
13	30	満載	254	255	×	26	90	半載	254	255	×

す。表-9の中で網掛けの部分は、係留索の破断荷重や防舷材の限界荷重を超過した係留索張力や防舷材反力を示している。

係留索については、津波の入射角度0° の場合には、係留索張力は破断荷重に達していないことが分かる。しかし、津波の入射角度30°、60°、90° の場合には、最大流速が小さいケース14とケース17を除いたケースでプレストライン（B-2, B-5）の張力が破断荷重よりも大きくなっている。これらの津波の入射角度では、津波が船幅方向に近い角度から船舶に作用することになるため、津波流れによる抗力が大きくなる影響によると考えられる。また、防舷材については、津波の入射角度0° の場合には、防舷材反力が限界荷重に達していないことが分かる。一方、津波の入射角度90° で船舶の積載量が満載の場合には、4基の全ての防舷材の反力が限界荷重を超えている。このように、津波が船幅方向から入射する場合で、かつ船舶の積載量が満載の場合には、係留索が破断し、防舷材も破損する可能性がある。

すなわち、係留船舶の船首尾方向から津波が作用する場合には、流速の大きい津波に対しても係留索や防舷材の係留施設の安全性は高いと考えられる。一方、係留船舶の斜め方向もしくは船幅方向から津波が作用する場合には、流速の大きい津波に対して係留索や防舷材が損傷し、係留施設の安全性が低下する可能性があると考えられる。ここで、本実験で対象とした岸壁は、栈橋等のような透過型岸壁であるため、ケーソン式や矢板式等の不透過型岸壁を対象とする場合に適用することはできない。ただし、津波の流向が不透過型岸壁の法線と平行になる場合は、係留船舶の船首尾方向から津波が作用する場合の係留施設の安全性評価結果を適用することができる。

表-8 船体動揺量の最大値

実験 No.	入射角度 (°)	積載量	周期 (s)	最大流速 (mm/s)	Surge(mm)		Sway(mm)		Heave(mm)		Roll(°)		Pitch(°)		Yaw(°)	
					+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
1	0	満載	85	99	42	-35	0	-1	3	-2	0.14	-0.16	0.09	-0.12	0.07	-0.08
2	0	満載	85	152	98	-84	1	-1	4	-3	0.15	-0.18	0.14	-0.13	0.14	-0.12
3	0	満載	85	255	192	-163	1	-8	8	-2	0.26	-0.34	0.19	-0.22	0.33	-0.60
4	0	満載	170	99	11	-9	0	-1	3	-2	0.09	-0.17	0.07	-0.05	0.05	-0.04
5	0	満載	170	152	19	-18	0	-2	4	-2	0.15	-0.22	0.09	-0.08	0.07	-0.11
6	0	満載	170	255	56	-45	1	-12	7	-2	0.25	-0.38	0.15	-0.13	0.34	-0.41
7	0	満載	254	255	41	-35	1	-30	7	-2	0.33	-0.49	0.16	-0.15	0.47	-0.49
8	0	半載	85	255	106	-70	3	-4	7	-2	0.27	-0.46	0.20	-0.23	0.21	-0.30
9	0	半載	170	255	24	-23	2	-4	7	-2	0.34	-0.41	0.15	-0.16	0.18	-0.18
10	0	半載	254	255	21	-16	2	-8	7	-2	0.36	-0.46	0.17	-0.18	0.19	-0.25
11	30	満載	85	255	169	-78	1	-200	8	-5	0.58	-2.51	0.18	-0.20	1.33	-0.63
12	30	満載	170	255	70	-39	1	-196	7	-3	0.55	-2.38	0.15	-0.17	1.59	-0.30
13	30	満載	254	255	45	-27	1	-197	6	-2	0.55	-2.39	0.16	-0.15	1.49	-0.17
14	60	満載	85	99	25	-12	2	-131	2	-4	0.24	-1.24	0.07	-0.06	0.41	-0.43
15	60	満載	85	152	54	-22	3	-220	3	-6	0.24	-2.61	0.09	-0.09	0.66	-0.68
16	60	満載	85	255	60	-60	4	-291	6	-11	1.02	-6.21	0.14	-0.18	0.93	-0.80
17	60	満載	170	99	12	-9	1	-99	2	-2	0.15	-0.85	0.04	-0.07	0.48	-0.21
18	60	満載	170	152	16	-17	2	-187	3	-3	0.27	-2.02	0.06	-0.08	0.54	-0.48
19	60	満載	170	255	27	-25	2	-237	5	-8	0.79	-4.97	0.13	-0.28	0.99	-0.64
20	60	満載	254	255	30	-20	2	-260	5	-7	0.84	-5.09	0.15	-0.18	0.68	-0.34
21	90	満載	85	255	31	-8	9	-374	5	-14	1.22	-9.07	0.11	-0.24	0.51	-1.34
22	90	満載	170	255	33	-15	4	-310	4	-7	0.68	-6.24	0.27	-0.06	0.80	-1.04
23	90	満載	254	255	30	-5	3	-313	5	-8	0.85	-6.76	0.19	-0.13	0.87	-0.57
24	90	半載	85	255	35	-6	6	-245	6	-12	0.91	-9.22	0.18	-0.09	0.31	-0.52
25	90	半載	170	255	34	-9	3	-223	6	-6	0.69	-7.15	0.11	-0.23	0.34	-0.58
26	90	半載	254	255	28	-6	3	-227	6	-7	0.69	-7.65	0.14	-0.17	0.33	-0.46

表-9 係留索張力・防舷材反力の最大値

実験 No.	入射角度 (°)	積載量	周期 (s)	最大流速 (mm/s)	係留索張力(N)						防舷材反力(N)			
					B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	FD-1	FD-2	FD-3	FD-4
1	0	満載	85	99	2.0	2.8	2.0	2.2	2.5	1.8	4.3	3.2	2.7	4.4
2	0	満載	85	152	2.7	3.2	3.2	3.5	3.0	2.7	7.9	4.3	3.7	7.3
3	0	満載	85	255	3.1	4.2	5.3	4.7	4.9	3.3	24.5	15.3	19.8	19.4
4	0	満載	170	99	1.6	2.8	1.3	1.7	2.7	1.3	2.9	3.1	1.9	4.2
5	0	満載	170	152	1.8	3.0	1.5	2.0	2.9	1.4	7.2	3.8	3.8	7.5
6	0	満載	170	255	1.8	3.1	2.4	2.2	3.4	1.9	13.0	8.3	11.2	14.4
7	0	満載	254	255	1.6	3.8	1.8	1.9	3.8	1.6	12.9	7.4	10.3	20.8
8	0	半載	85	255	2.3	2.6	3.2	2.8	2.9	2.7	11.0	12.6	10.6	15.2
9	0	半載	170	255	1.5	2.4	1.5	1.6	2.6	1.5	8.5	7.9	9.2	12.5
10	0	半載	254	255	1.3	2.8	1.5	1.6	2.8	1.5	9.8	7.1	8.0	13.4
11	30	満載	85	255	2.5	13.9	5.2	3.1	27.8	4.1	37.5	38.0	19.8	24.1
12	30	満載	170	255	2.1	12.7	2.4	2.3	24.7	2.4	26.8	23.8	11.9	7.9
13	30	満載	254	255	1.9	12.4	1.8	2.2	23.9	2.4	29.3	31.4	12.1	9.1
14	60	満載	85	99	1.8	7.8	1.7	1.8	10.0	1.8	18.9	9.9	9.7	10.4
15	60	満載	85	152	2.2	15.3	2.3	2.1	21.2	2.2	29.8	22.3	16.4	18.2
16	60	満載	85	255	2.9	34.9	3.0	2.9	53.1	2.9	40.1	52.7	29.8	21.7
17	60	満載	170	99	1.5	5.3	1.3	1.6	7.9	1.6	12.3	8.7	8.4	6.5
18	60	満載	170	152	2.1	11.6	1.8	2.0	16.9	2.1	21.4	16.7	13.0	13.4
19	60	満載	170	255	2.8	31.7	2.7	2.8	42.6	2.9	29.3	37.1	20.4	17.0
20	60	満載	254	255	2.8	31.1	2.3	2.4	43.6	3.0	35.4	40.7	25.3	21.0
21	90	満載	85	255	3.9	63.8	2.9	3.2	64.2	3.0	37.8	33.4	35.4	54.8
22	90	満載	170	255	2.6	43.5	2.6	2.5	40.6	2.5	29.3	30.9	37.8	45.6
23	90	満載	254	255	3.7	47.1	2.5	2.7	46.9	3.6	28.1	35.4	35.9	42.8
24	90	半載	85	255	2.5	27.7	2.1	2.0	28.5	2.2	20.8	23.4	24.4	26.7
25	90	半載	170	255	2.5	21.2	1.9	1.9	20.7	2.2	18.3	23.8	22.4	24.8
26	90	半載	254	255	2.3	22.5	1.8	2.2	21.9	2.4	14.6	22.1	25.1	24.4

4. 数値計算

4.1 数値計算手法

(1) 津波外力の表現方法

津波に対する係留船舶の動揺計算を高精度に行うためには、津波外力を正確に表現する必要がある。浮体に作用する津波の波力について、池谷ら(2005)は小口径部材に対して適用するモリソン式を浮体に拡張し、津波外力を慣性力と抗力で表現している。しかし、船舶は流線形をしているため、津波が作用する方向によって津波外力の特性が大きく異なることになる。そこで、本研究では、モリソン式を用いて、津波外力を船首尾方向に作用する力と船幅方向に作用する力とに分けて算定することとした。津波外力の算定式を船首尾方向について(3)式に、また船幅方向について(4)式に示す。

$$F_x = 0.0014S_x U_x |U_x| + (M + m) \frac{\partial U_x}{\partial t} \quad (3)$$

$$F_y = 0.5\rho CS_y U |U| + (M + m) \frac{\partial U_y}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 C は流圧力係数、 M は船舶の質量、 m は付加質量、 S_x は船舶の浸水面積、 S_y は船舶の喫水面下の側面投影面積、 U は流速の x, y 方向の流速を合成した流速、 U_x は流速の x 方向成分、 U_y は流速の y 方向成分、 ρ_0 は密度を表している。

(2) 係留船舶の動揺計算手法

係留船舶の動揺計算では、まず、船舶の2次元断面の流体力を特異点分布法により算定し、船長方向にストリップ法により積分して3次元の流体力を求める。そして、遅延関数型の運動方程式(久保ら, 1988)を用いて、係留船舶の動揺の時系列計算を行う。係留船舶の動揺計算手法で用いる遅延関数型の運動方程式を(5)、(6)、(7)式に示す。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ij} + m_{ij}(\infty)) \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left\{ \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau + D_{ij} \dot{x}_i \right\} + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j(t) \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad (5)$$

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (6)$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_0} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \sigma t dt \quad (7)$$

ここで、 $A_{ij}(\sigma)$ は周波数 σ に対する付加質量または付加慣性モーメント、 $B_{ij}(\sigma)$ は周波数 σ に対する造波減衰係数、 C_{ij} は静水圧的復元力係数、 D_{ij} は粘性減衰係数、 F_j は津波外力、 G_{ij} は係留力係数、 L_{ij} は遅延関数、 M_{ij} は質量または慣性モーメント、 m_{ij} は付加質量または付加慣性モー

メント、 t は時間、 x は変位である。流体力は、周期1~4,500sに対して計算を行い、粘性減衰係数は久保ら(1987)の実験値を参考にして、サージに0.5、スウェイに1.0を設定した。

4.2 実験結果と計算結果の比較検討

(1) 時系列の比較

図-29は、図-16で示したケース16(津波の入射角度 60° 、津波の周期85s(10min)、津波の流速255mm/s(1.80m/s)、船舶の積載量満載)の場合について、係留船舶の動揺、係留索張力、防舷材反力の時系列を実験結果と計算結果とで比較して示したものである。なお、計算結果と比較するため、実験結果を現地スケールに換算している。

係留船舶の動揺については、サージは、実験と計算とで最大値が非常に良く一致している。しかし、サージが負の値を示した時の動揺特性には相違がある。この時、実験ではサージが一定になる時間帯があるが、計算では一定にはなっていない。これは、実験において船舶模型と防舷材模型との間に発生する摩擦力に原因があると考えられる。実験では、押し波により船舶と防舷材が接触している時には、この摩擦力によりサージが抑制される。一方、計算では、船舶と防舷材との間に働く摩擦力を考慮していないため、船舶が防舷材に接触していてもサージは抑制されない。スウェイは、実験と計算とで時系列波形の位相と最大値がともに良く一致している。ヒープは、計算では0.2m以下となっているが、実験では0.5m程度となっている。計算では水位変動が全くない津波流れを船舶に作用させることができるが、実験では津波流れに擾乱による多少の水位変動があったため、このような相違が生じたものと考えられる。ロールは、負の値を示した時は、実験と計算とで時系列波形の位相と最大値が非常に良く一致している。ピッチは、実験と計算とでも小さい値を示している。ヨウは、スウェイが負の値を示す船舶と防舷材が接触していない時には、実験と計算とで時系列波形があまり一致していないが、スウェイが0mになる船舶と防舷材が接触している時には、ヨウもほぼ 0° になっている。

係留索張力については、プレストライン(B-2、B-5)の張力が特に大きくなっている。これらの張力は、実験と計算とで時系列波形の位相が良く一致している。また、これらの張力の最大値は、B-2では計算の方が約1,000kN大きく、B-5では逆に計算の方が約1,000kN小さいため、プレストラインの張力の合計は実験と計算とでほぼ同じ値であると言える。スウェイが大きくなった時に係留索張力も大きくなるが、この時に実験ではヨウがほぼ 0° で

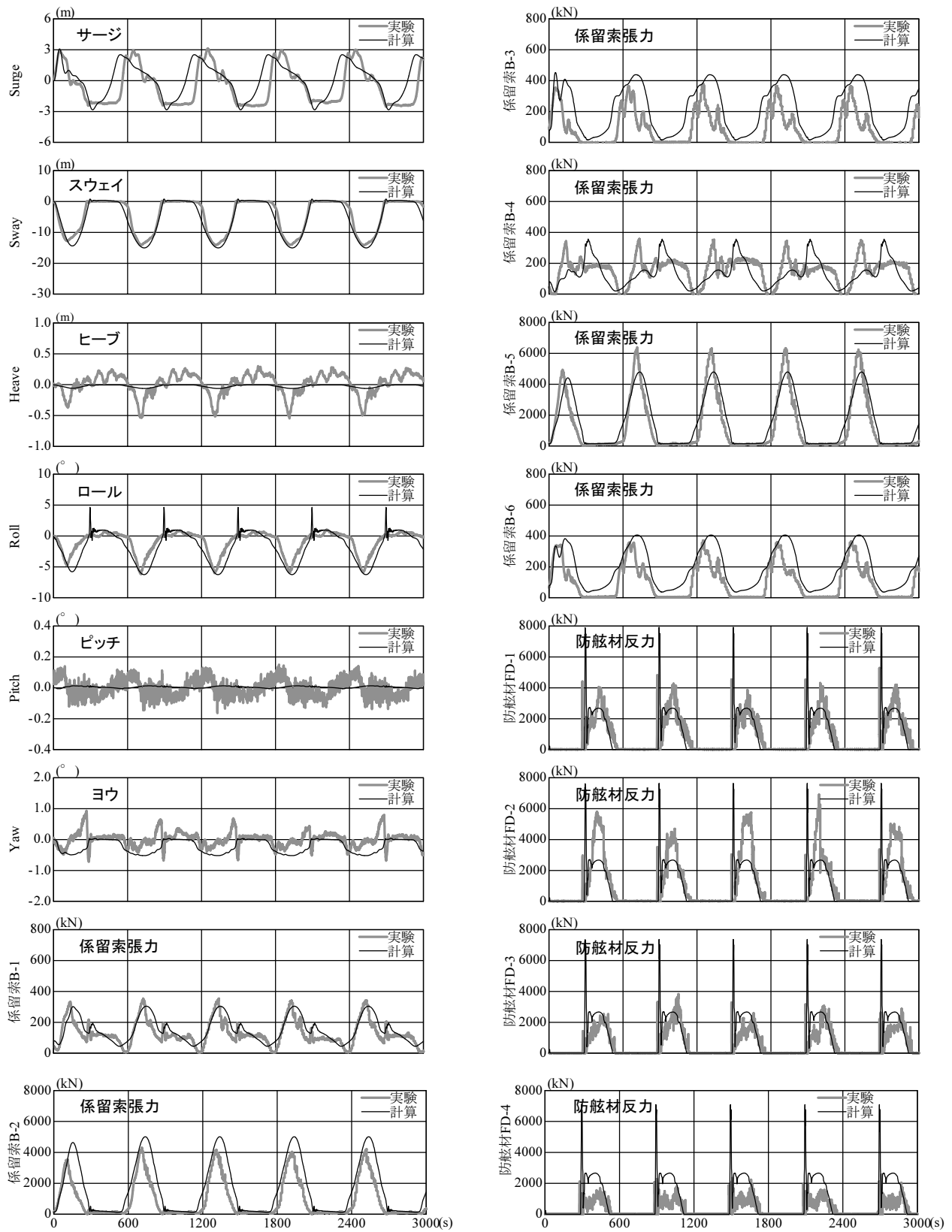


図-29 船体動揺量・係留索張力・防舷材反力の時系列の実験結果と計算結果の比較 (ケース16)

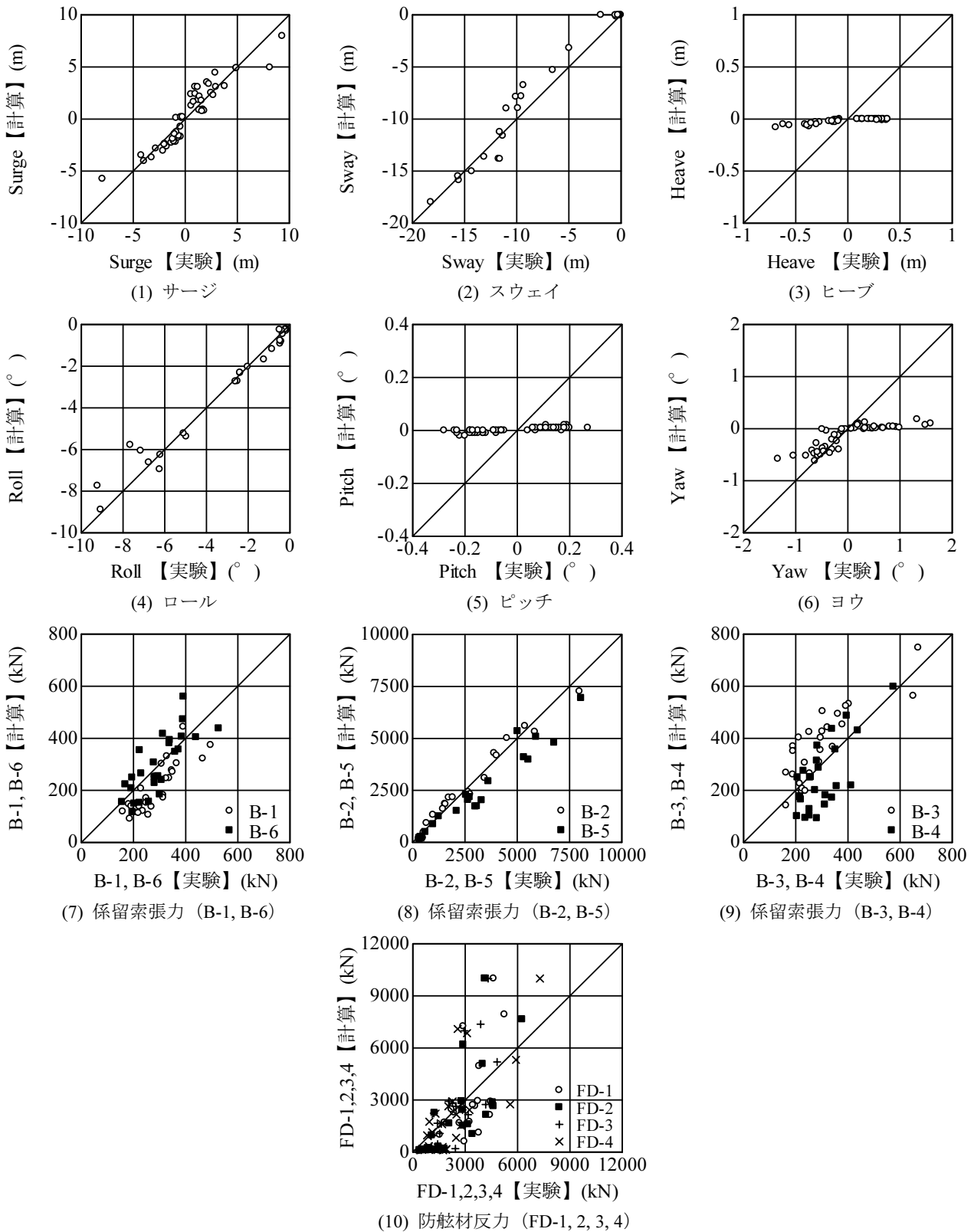


図-30 船体動揺量・係留索張力・防舷材反力の最大値の実験結果と計算結果の比較 (全ケース)

あり、係留船舶と棧橋はほぼ平行になっている。一方、この時に計算ではヨウが約 -0.5° になっており、船舶の船首よりも船尾が棧橋に近い状態になっている。このため、実験と計算ではB-2とB-5の張力に相違が生じたものと考えられる。他の係留索（B-1, B-3, B-4, B-6）は、ブレストライン（B-2, B-5）と比較して張力が非常に小さい。B-1, B-3, B-6の張力は時系列波形の位相や最大値がある程度一致しているが、B-4の張力は実験と計算とで時系列波形が異なっている。B-4の張力が最大値を示すのは、実験ではスウェイが最大になる時であり、計算ではサージが負の方向へ最大になる時である。これは、計算では船舶と防舷材との間の摩擦力を考慮していないため、サージの時系列波形が実験と計算とで正確に一致しなかったことも原因として考えられる。

防舷材反力については、先に示したように津波の1周期の間に2回反力が大きくなる特徴があるが、計算でもこの特徴を再現することができている。しかし、船舶が防舷材に瞬間的に衝突する時の反力は、全ての防舷材（FD-1, FD-2, FD-3, FD-4）について計算の方が過大になっている。一方、押し波によって船舶が防舷材に押し付けられる時の準静的な反力は、FD-1, FD-3では計算と実験とでほぼ同程度の大きさであるが、FD-2では計算の方が約2,000~4,000kN小さく、FD-4では計算の方が約2,000kN大きい。すなわち、防舷材の反力の合計は実験よりも計算の方が多少小さい値であると言える。

(2) 最大値の比較

図-30は、表-5で示した全ての実験ケースについて、係留船舶の動揺、係留索張力、防舷材反力の最大値を実験結果と計算結果とで比較して示したものである。なお、計算結果と比較するため、実験結果を現地スケールに換算している。

係留船舶の動揺については、サージ、スウェイ、ロールが他の動揺成分と比較して大きくなっている。サージの最大値が大きいケースでは、計算よりも実験の方が大きくなる傾向にあるが、サージは全体的に実験と計算とで最大値が一致している。また、スウェイは、実験と計算とで最大値が良く一致している。スウェイの最大値が小さいケースでは、計算よりも実験の方が多少大きくなっている。ロールの最大値が大きいケースでは、計算よりも実験の方が大きくなっているが、ロールは実験と計算とで最大値が良く一致している。ヒープとピッチについては実験と計算とで最大値がともに小さいが、計算と比較して実験の方が大きい傾向にある。計算では、水位変動のない津波流れを外力としているため、ヒープやピッチはほぼ0になっている。一方、実験では、水位変動の

ない津波流れを用いていたが、実際には擾乱によりわずかに水位が変動していたため、計算よりもヒープやピッチが大きくなったものと考えられる。ヨウは、計算よりも実験の方が最大値が大きくなっている。先に述べたように、スウェイが負の値を示す船舶と防舷材が接触していない時に、実験と計算とではヨウが異なっていたため、このように最大値にも相違が現れている。

係留索張力については、ブレストライン（B-2, B-5）の張力が特に大きくなっている。B-5の張力の最大値は計算よりも実験の方が多少大きい、B-2の張力の最大値は実験と計算とが良好に一致している。他の係留索（B-1, B-3, B-4, B-6）の張力の最大値については、B-2, B-5と比較してばらつきが大きい。B-1, B-3, B-4, B-6については、係留索張力が小さいため、計測誤差による影響が相対的に大きくなっているものと考えられる。

防舷材反力については、防舷材反力の最大値が小さいケースでは、計算よりも実験の方が大きくなる傾向がある。これは、実験において津波流れに含まれる乱れなどの影響が原因であると考えられる。一方、防舷材反力の最大値が大きいケースでは、実験よりも計算の方が大きくなる傾向がある。これらは、ケース16, ケース21, ケース24の場合であり、いずれも棧橋から離れていた船舶が防舷材に衝突する瞬間の反力が過大に計算されている。これらのケースでは、津波の最大流速が大きく、津波の周期が短いため船舶の衝突速度が大きいことから、瞬間的な反力が十分に再現できていないと言える。

(3) まとめ

津波が作用した時の係留船舶の動揺量と係留施設による係留力について、模型実験による結果と数値計算による結果とを比較検討した。数値計算では、津波外力をモリソン式で表現して係留船舶の動揺の時系列計算を行った。実験結果と計算結果の比較では、係留船舶の動揺、係留索張力、防舷材反力の時系列と最大値について検討した。その結果、実験において大きな動揺が確認されたサージ、スウェイ、ロールについては、数値計算により十分に再現できることが分かった。また、係留索張力についても、数値計算による再現精度が高いことが分かった。一方、防舷材反力については、船舶が防舷材に衝突する時の瞬間的な反力の再現精度は十分ではないが、押し波によって船舶が防舷材に押し付けられる時の準静的な反力はおおむね再現できることが確認できた。

5. 結論

本研究では、港内に津波が来襲した場合の係留船舶の応答特性と係留施設へ及ぼす影響を解明するために、棧橋等の透過型岸壁を対象とした模型実験を実施した。また、津波外力をモリソン式で表現して係留船舶の動揺計算を行い、実験結果と計算結果を比較することにより、その数値計算手法の妥当性について検討した。

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ①津波の周期が短い時、津波の最大流速が大きい時、船舶の積載量が大きい時ほど、棧橋に係留された船舶の動揺量は大きくなる傾向がある。
- ②棧橋に係留された船舶の津波応答特性は津波の入射角度によって大きく異なり、船舶は津波の流れと同じ方向へ動揺し、船幅方向から津波が作用する場合に船舶の動揺量が最も大きくなる。
- ③係留船舶の船首尾方向よりも斜め方向もしくは船幅方向から来襲する流速の大きい津波に対して、係留索や防舷材が損傷する可能性が高くなり、このような場合に係留施設の安全性は低下することになる。
- ④船舶の動揺量、係留索張力、防舷材反力について、模型実験による結果と数値計算による結果はおおむね精度良く一致していたことから、提案した数値計算手法により、実際の港湾における船舶や係留施設の安全性を予測することができる。

(2010年3月3日受付)

謝辞

本資料は、独立行政法人港湾空港技術研究所と東亜建設工業株式会社の共同研究「係留船舶の津波応答特性の評価と津波対策法に関する共同研究（平成19年11月～平成22年3月）」の成果として取りまとめたものである。

本研究の模型実験を実施するに当たり、京都大学名誉教授の高山知司博士には実験条件や実験方法について有益なご意見を頂いた。また、株式会社エコーの長谷川巖氏、鈴木誠一氏には実験実施作業にてご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 池谷毅，朝倉良介，藤井直樹，大森政則，武田智吉，柳沢賢（2005）：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第52巻，pp.761-765.
- 上田茂（1984）：係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.504，pp.337-342.
- 沿岸技術研究センター（2004）：港内長周期波影響評価マニュアル，pp.17-19.
- 大垣圭一，米山治男（2009）：大規模地震津波による港内係留船舶の動揺特性に関する数値計算，海洋開発論文集，第25巻，pp.51-56.
- 北島昭一，阪本浩，岸正平，中野拓治，柿崎秀作（1967）：港湾構造物設計基準作成に当たっての諸問題について，港湾技研資料，No.30，pp.53-64.
- 久保雅義，岡本俊策（1987）：岸壁前面係留浮体の遅延関数を用いた時系列解析の精度向上に関する研究，第34回海岸工学講演会論文集，pp.611-615.
- 久保雅義，斎藤勝彦，下田直克，岡本俊策（1988）：岸壁前面係留浮体の不規則波による船体運動の時系列解析について，第35回海岸工学講演会論文集，pp.687-691.
- 榊原繁樹，久保雅義，小林英一，大竹祐一郎，原田賢治（2008）：津波来襲時の港内係留船の船体運動の違いについて，日本航海学会論文集，117号，pp.159-168.
- 高山知司，鈴木康正，鶴谷広一，高橋重雄，後藤智明，永井紀彦，橋本典明，長尾毅，細山田得三，下迫健一郎，遠藤仁彦，浅井正（1994）：1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害，港湾技研資料，No.775，pp.91-98.
- 谷本勝利，高山知司，村上和男，村田繁，鶴谷広一，高橋重雄，森川雅行，吉本靖俊，中野晋，平石哲也（1983）：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No.470，pp.97-112.
- 中央防災会議（2005）：東南海，南海地震等に関する専門調査会（第16回）資料，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/index.html>
- 津田宗男，大木泰憲，高山知司，東野洋司，林秀和（2006）：津波による係留船舶の動揺特性および係留施設への衝突力に関する模型実験，海洋開発論文集，第22巻，pp.535-540.
- 富田孝史，本多和彦，菅野高弘，有川太郎（2005）：インド洋津波によるスリランカ，モルディブ，インドネシアの被害現地調査報告と数値解析，港湾空港技術研究所資料，No.1110，pp.31-35.
- 中屋行雄，津田宗男，青野利夫，杉浦秀之，本多将人

(2005) : 港湾内に進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.133-138.

日本港湾協会 (2007a) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.943-947.

日本港湾協会 (2007b) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.406-410.

日本港湾協会 (2007c) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.399-406.

浜田賢二, 松本英雄, 黒田祐一, 早藤能伸 (1991) : 外力算定のための船舶諸元およびマスト高の解析, 港湾技研資料, No.714, 63p.

港湾空港技術研究所資料 No. 1213

2010.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。