

付けられている。ユニット9は、船舶が入港しやすいように 30° の角度に配置されている。模型の前面取付板は、着脱が可能である。前面取付板を取付けた時にはケーソン係船岸の様な非透過性の係留施設に相当し、取りはずした時には棧橋の様な透過性の係留施設に相当する。透過性および非透過性の係留施設とは別に、ユニット6～9の前面取付板を取りはずし、この面が透過性で、ユニット1～5の面が非透過性の係留施設を考えた。以上の3種類の係船岸をそれぞれ、壁面両側非透過（以下、両側非透過）、壁面両側透過（以下、両側透過）、壁面片側透過・片側非透過（以下、片側透過）とする。

b) 防衛工

船舶が船舶係留誘導装置に沿って入港する際には、防衛工に圧縮とせん断を与えながら入港する。本研究においては、係船岸法線方向の接岸力のみを検出することとし、船舶係留誘導装置の模型の前面にベアリングを取り付け、前進速度およびサージ、ヒーブによる前後および上下のせん断力を軽減し、係船岸の法線に直角方向の接岸力のみを防衛工に伝えるようにした。

防舷材は実際の係船岸において、ばね定数がおよそ 240 tf/m （模型換算 0.42 kgf/cm ）相当のものが1ユニット当たり15個設置されているものとする。防舷材1個の模型換算のばね定数が極めて小さいために、模型製作が困難であったので、1ユニット当たりの合計のばね定数を2個の模型防舷材で代表させた。すなわち、模型防舷材のばね定数は 3.16 kgf/cm （実機換算 $1,778 \text{ tf/m}$ ）である。

c) 係留索

模型係留索はワイヤにコイルスプリングを取り付けたものとした。ワイヤはコイルスプリングに較べて十分に硬く伸び率が小さいので、係留索の伸びはコイルスプリングの伸びと同一とみなせる。実機で $\phi 50 \text{ mm}$ 、長さ 40 m のナイロンロープを使用するものとして、新品ロープの変位復元力特性の原点と切断荷重の $1/3.8$ に対する点とを結んだ平均ばね定数をもって係留索のばね定数とした。模型係留索のばね定数は 7.14 gf/cm （実機換算 4.02 tf/m ）である。

2.2 接岸実験の方法と実験ケース

a) 接岸実験の方法

接岸実験は静水中と波浪中において、前進速度をもつ場合およびもたない場合のそれぞれについて行った。

接岸速度は、船舶が接岸する時の速度 V を係船岸法線方向の成分 V_x とそれに直交する成分 V_y に分けた時の V_y をいう。 V_y は船舶の接岸直前の速度 V と係船岸法線に対する角度 θ を測定して、式(1)で求めた。

$$V_y = V \times \sin \theta \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V ：船舶の速度 (cm/s)、ビデオカメラによ

って撮影し、コマ送りをして模型船舶のマーク点を読み取り解析した速度、 θ ：船舶の接岸角度 (deg) である。

通常、船舶は波高 $0.5 \sim 0.7 \text{ m}$ において 0.3 m/s 以下の速度で接岸する。この接岸速度を模型換算すると 3.46 cm/s である。船舶係留誘導装置に作用する接岸力の模型実験では、港口部の波浪条件を $2 \sim 3 \text{ m}$ と想定しているので操船に困難さが伴い、接岸速度が 3.46 cm/s を超えることが予想されるので、これをやや上回る接岸速度を目標に実験を行った。また、接岸角度を変えて実験を行った。

b) 測定項目および実験ケース

接岸実験においては模型防舷材の荷重計によって防衛工の反力を測定した。また、容量式波高計を用いて波高および周期を測定した。さらに、ビデオカメラを使用し、模型船舶が前面受圧板と接触した時の、接岸速度、接岸速度の方向と係船岸法線とのなす角度、船体と係船岸法線とのなす角度、船体が前面受圧板と接した位置と防衛工までの距離を測定した。接岸実験は静水中と波浪中において行った。波浪中接岸実験は不規則波中で、波向は 0° および 30° の2種類、有義波高は $1.0 \sim 2.67 \text{ cm}$ の5種類、有義波周期は $0.577 \sim 1.732 \text{ s}$ の5種類について行った。これらを実機換算すると、有義波高は $0.75 \sim 2.0 \text{ m}$ 、有義波周期は $5 \sim 15 \text{ s}$ である。接岸実験は、静水中においては50回、波浪中においては各波浪条件毎に10回行った。

2.3 動揺実験の模型と実験ケース

a) 動揺実験の模型

図-2は対称係留系における防衛工と係留索の配置を示したものである。非対称係留系は対称係留系と同一の防衛工および係留索が片側のみにについているものとする。後述する計算結果からみて、非対称係留系に比べ対称係留系が有利であるので、動揺実験は対称係留系についてのみ行った。

b) 測定項目および実験ケース

動揺実験においては防衛工の反力、係留索の張力、波高、周期を測定する。また、6自由度計を用いて船舶の動揺6成分を測定する。波浪条件は接岸実験と同様に、不規則波について波向2種類、有義波高5種類、有義波周期5種類である。

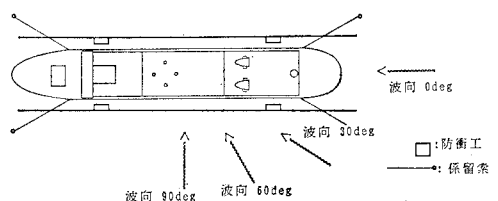


図-2 対称係留系における防衛工と係留索の配置

3. 船舶係留誘導装置に作用する接岸力の実験結果

3.1 静水中の接岸力

a) 実験結果の整理の方法

技術基準に基づいて、船舶の接岸エネルギーを式 (2) によって計算する (上田, 1981; 日本港湾協会, 1989b).

$$E_f = \frac{W_s \cdot V_y^2}{2g} \times C_e \times C_m \times C_s \times C_o \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_f : 船舶の接岸エネルギー (tf・m), g : 重力加速度 (9.8 m/s²), W_s : 船舶の排水量 (0.0263 t, 模型船舶の重量), V_y : 船舶の接岸速度 (法線に直交する方向成分, m/s), C_e : 偏心係数, C_m : 仮想質量係数, C_s : 柔軟性係数, C_o : パースの形状係数である.

仮想質量係数 C_m は 1.8 として計算し、実験値と比較した. このほか柔軟性係数 C_s およびパースの形状係数 C_o は 1.0 とした.

b) 実験結果

図-3 (1) および (2) は静水中における前進速度をもつ場合ともたない場合の接岸力の実験結果である. 図の横軸は接岸速度 V_y , 縦軸は接岸力 P である. また, 図-4 (1) および (2) は, 前進速度をもつ場合ともたない場合の接岸力の計算結果である. 船舶係留誘導装置に作用する接岸力は, 前進速度の有無にかかわらず計算値と実験値の上限がほぼ一致しており, 接岸力は係船岸の法線に直角方向の速度成分 V_y を接岸速度として, 技術基準の方法に従って計算してよいと言える. ただし, 接岸速度が 4 cm/s を超えるときには接岸力の実験値は接岸

速度に比例せず, 接岸力は 1~1.2 kgf とほぼ一定値になっている. この原因は明確ではないが荷重計の性能に起因すると考えられる.

3.2 波浪中の接岸力

有義波高, 有義波周期および波向を変えて接岸実験を行い, 波浪条件が接岸力へ及ぼす影響を調べた. 図-5 は, 波向 0°, 有義波高 2.0 cm で, 有義波周期 1.732 s の場合の実験結果を示したものである. なお, 図の上部に示した数値は最小自乗法によって求めた回帰式の勾配であるが, ここには図示していない有義波周期 0.577 s, 0.805 s, 1.115 s, 1.386 s の場合を含めてその値を示すと, 有義波高 1.0 cm の場合には順に, 0.185, 0.182, 0.199, 0.205, 0.215 kgf/(cm/s), また, 有義波高 2.0 cm の場合には順に, 0.273, 0.230, 0.218, 0.201, 0.268 kgf/(cm/s) となっており, 長周期波中および波高が大きいために接岸力が大きいことがわかる. 波浪中の接岸実験結果と図-4 に示した静水中の接岸力の計算値とを比較すると, 長周期波中では静水中よりも接岸力が大きい. これらの現象は船舶の動揺に起因すると言える.

4. 対称係留系における動揺実験の結果

4.1 自由振動実験

実験水槽において模型船舶のロールの自由振動実験を行い減衰定数 n および固有周期を求めた. 模型船舶のロールの固有周期は 2.18 s, 減衰定数は 0.14 である. 計算では, 渦の発生によるロールの減衰力を評価できないので, 5. に示す数値シミュレーションにおいては自由振動実験によって得られたロールの減衰定数を用いる.

4.2 係船岸の壁面の構造と動揺量の相違

図-6 および図-7 は, 対称係留系において係船岸の壁面の構造を両側非透過, 片側透過, 両側透過として, 動揺の両振幅の有義値と有義波周期の関係を示したものである. ただし, 波向 30°, 有義波高 1.5 m の実験ケースについて比較する. 図面の数値はすべて実機換算値である.

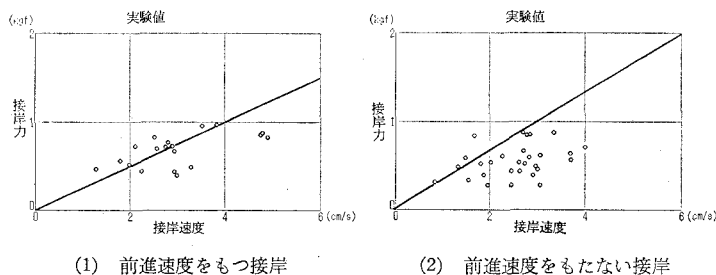


図-3 静水中接岸実験の接岸力と接岸速度 (実験値)

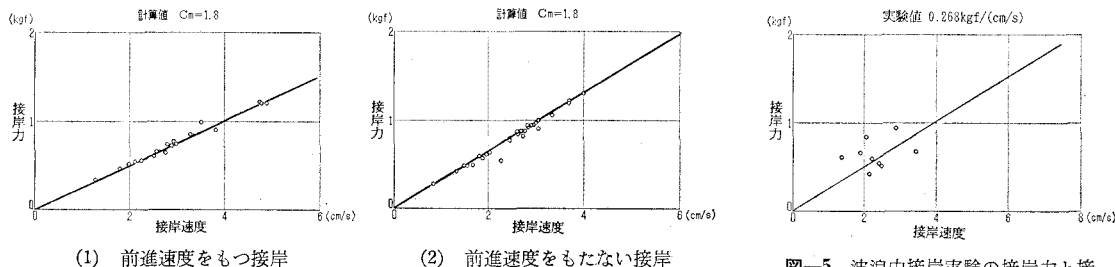


図-4 静水中接岸の接岸力と接岸速度 (計算値)

図-5 波浪中接岸実験の接岸力と接岸速度

図-6 はスウェイの有義両振幅を示すが、片側透過および両側透過の場合には両側非透過の場合に比べてスウェイの動揺が著しく大きい。両側非透過の場合は波が回折して船舶に対する作用角度がほぼ 0° に近いのに対して、片側透過および両側透過については 30° の波が直接作用してくるので動揺量が大きい。しかも、片側透過の場合には両側透過に比べ係船岸前面の反射波が加わるので、3形式のうちでは最も動揺振幅が大きい。なお、ここには図示していないが、ロール、ヨウについてもスウェイとほぼ同様な傾向がみられる。

図-7 はサージの有義両振幅を示すが、両側透過の場合が他の構造様式のものより小さい。係船岸の構造を透過性にすることによってサージの動揺量が小さくなるが、図-6 に示したようにスウェイの動揺両振幅が大きくなっている。また、離島等では、防波堤の片側を係船岸として利用することが多いので、一方が非透過の状態である。したがって、両側透過という構造は現実的ではない。そこで、サージの動揺両振幅を小さくするには、非透過性係船岸の反射波を小さくして、防波堤や係船岸に沿って入ってくる波を抑えるのがよいといえる。なお、ここには図示していないが、ヒープ、ビッチについてもサージとほぼ同様な傾向がみられる。

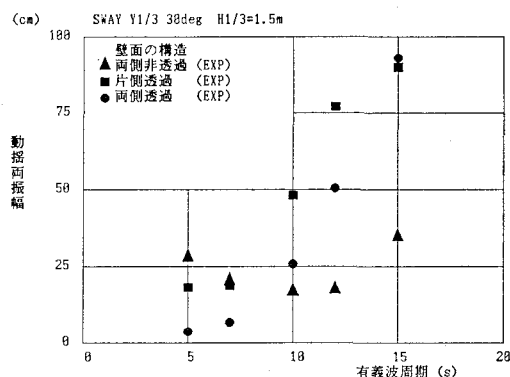


図-6 壁面の構造による動揺両振幅の差異 (スウェイ)

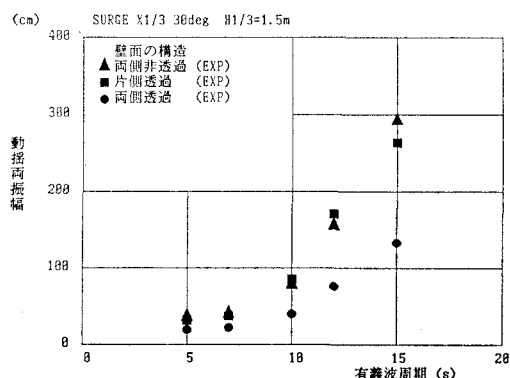


図-7 壁面の構造による動揺両振幅の差異 (サージ)

5. 動揺シミュレーションによる検討

5.1 検討の手順

模型船舶の実機諸元について港湾技術研究所で開発した係留船舶の動揺計算プログラム (上田, 1984) を用いて動揺シミュレーションを行った。計算においては波漂流力および流れによる力は微小であるとして無視する。また、防舷材および係留索の変位復元力特性をモデル化し、動揺シミュレーションに入力した。

5.2 計算値と実験値との比較

図-8 および図-9 は波向 30° 、有義波高 1.0m で片側透過および両側透過のときのサージおよびヒープの計算値と実験値について、動揺両振幅の有義値を示したものである。

図-8 はサージの動揺両振幅について実験値と計算値とを比較したものである。片側透過の場合には実験値と計算値とがおおむね一致している。片側透過においては、非透過性係船岸による反射波と透過性係船岸の脚による波の干渉が係留船舶の動揺に影響を及ぼすが、前者の影響の方が大きい。したがって、計算では透過性係船岸の脚による波の干渉は考慮していないものの、実験値と計算値とがおおむね一致している。両側透過の場合に

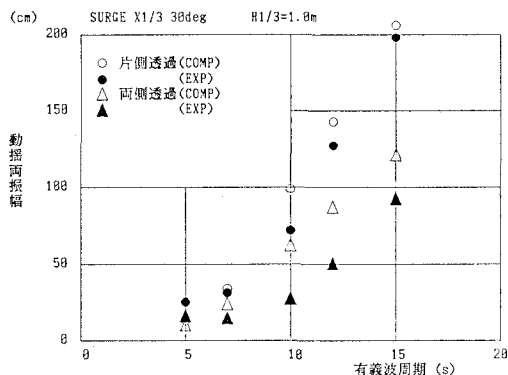


図-8 サージの実験値と計算値の比較

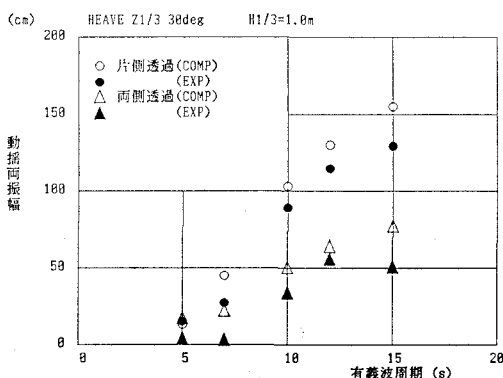


図-9 ヒープの実験値と計算値の比較

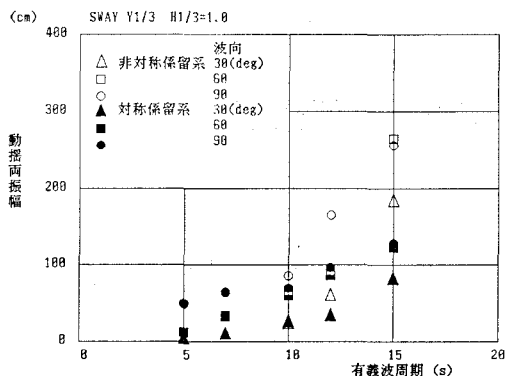


図-10 対称係留系と非対称係留系による動揺の差異

は波周期が長いところで実験値に比べて計算値が大きくなる。実験では両側の壁面が完全に透過ではなく、模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

図-9 はヒープの動揺両振幅について実験値と計算値とを比較したものである。片側透過の場合には実験値と計算値とがおおむね一致している。両側透過の場合には、実験値と計算値とを比較すると、全体的に実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先にも述べたように、模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少によるものと考えられる。

なお、ここには図示していないが、ロール、ピッチ、ヨウは実験値と計算値とがおおむね一致している。しかしながら、スウェイについては実験値と計算値とではやや相違があった。

5.3 対称係留系と非対称係留系との比較

図-10は対称係留系および非対称係留系で波向 30°, 60° および 90° で有義波高 1.0 m のときのスウェイの両振幅の有義値と有義波周期との関係を図示したものである。対称係留系および非対称係留系のいずれについても有義波周期が長くなると動揺両振幅が大きくなる傾向にあるが、有義波周期 10 s を超えると対称係留系に比べ非対称係留系の方が波周期の影響が大きく動揺量が增大する。

なお、ここには図示していないが、サージ、ロール、ヨウについても対称係留系の動揺両振幅が非対称係留系の動揺両振幅よりも小さい。ただし、ヒープ、ピッチについては係留系の影響が小さいので両係留系による動揺両振幅の差異はない。

6. 結 論

1) 船舶係留誘導装置に作用する接岸力は、前進速度

をもつ接岸の場合も前進速度をもたない接岸の場合も計算値と実験値がほぼ一致しており、接岸力は係船岸の法線に直角方向の速度成分 V_y を接岸速度とし、これをもって技術基準の方法に従って計算してよいといえる。

2) 波浪中においては長周期波中または波高が大きいときには船舶の動揺が大きいために、接岸力は静水中よりも大きいので、設計上留意する必要がある。

3) 対称係留系と非対称係留系について動揺シミュレーション計算を行った結果を比較すると、対称係留系においてはサブハーモニックモーションが抑制されるため、サージ、スウェイ、ロール、ヨウについて、非対称係留系より係留船舶の動揺が小さい。

4) 対称係留系において、係船岸の構造を、両側非透過、片側透過、両側透過として、それらの動揺量を比較してみると、スウェイ、ロール、ヨウについては両側非透過が、またサージ、ヒープ、ピッチについては両側透過の動揺量が他の形式のものよりも小さい。

5) 係留船舶の動揺シミュレーション結果は実験結果とおおむね一致した。

7. あとがき

本研究は港湾施設の係留および荷役の稼働率の向上を目的として、係留船舶の動揺特性に着目して船舶の動揺を抑制する係留システムを提案し、係留船舶の動揺を模型実験および動揺シミュレーションによって検討した。また、このシステムを利用するに当たり入港時の操船の困難さを解消するための船舶係留誘導装置に作用する接岸力を実験により求めた。対称係留系は係留船舶の動揺を低減する効果があることが確認され、この施設の有効性が確認された。対称係留系および船舶係留誘導装置は全天候バース、スーパーライナー用バース、離島等の外洋性港湾などにおける活用が期待される。

参 考 文 献

- 上田 茂 (1981): 大型タンカーの接岸力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻, 第 2 号, pp. 168-209.
- 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, 372 p.
- 上田 茂・白石 悟・板生考司 (1992): 対称係留系における船舶の動揺と船舶係留誘導装置に作用する接岸力, 港湾技研資料, No. 730, 42 p.
- 久保雅義・斎藤勝彦・大宮宗昭 (1990): 漁船の入港援助施設に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 728-732.
- 日本港湾協会 (1989a): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, p. 12.
- 日本港湾協会 (1989b): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 上巻, pp. 17-20.