

マリーナ内に係留されたプレジャーボートに働く 波浪外力に関する実験的研究

増田 光一*・佐藤 博**・高岩 千人***

1. 緒 言

近年マリンレジャーブームに伴い、国内のプレジャーボートの保有台数がここ数年で、かなりの増加を示している。こうした状況の中で、多くの大規模マリーナ開発プロジェクトが計画され具体化しようとしている。大規模マリーナの場合、多くのプレジャーボートが常時浮桟橋に係留されているため、暴風雨時における浮桟橋及びプレジャーボートに働く環境外力の特性を十分に把握し、安全性及び経済性に優れた係留施設の設計が必要となる。

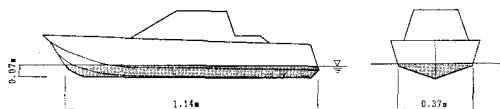
マリーナの設計を行う場合、風荷重の推定に関しては、船舶に働く風荷重の算定方法等いくつかの基準がある。一方、波浪外力の算定手法に関しては、係留中の大型船舶を対象とした回析理論による合田ら(1971)の波浪算定式をプレジャーボートに適用する場合があるが、浮体運動の影響を考慮した波浪外力の算定式や基準はないのが現状である。

そこで、本研究では、大規模マリーナ内の係留施設の合理的な設計手法を確立するための基礎資料となる、浮桟橋及び係留されたプレジャーボートに働く波浪外力及びその応答の特性を、水槽実験により明確にすることを目的とする。本論では、40 ft クラスのパワーボートを対象として、単体係留ならびに実際のマリーナを想定して3艇のボートが浮桟橋に連続係留されている場合の横波中での水平方向の波浪外力特性を調べた。さらに、単体係留については、3次元ハイブリット境界要素法により計算されたラディエーション流体力及び波強制力を用いて、運動応答及び波浪外力を計算し、実験結果との比較検討を行った。

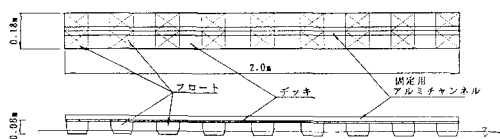
2. 実験概要

(1) 実験水槽

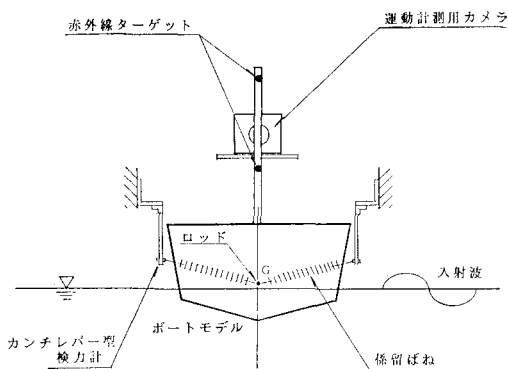
実験は、日本大学理工学部海洋建築工学科の平面水槽(全長:19 m, 幅:7 m, 深さ:1.5 m)で行った。なお、



図一1 パワーボートの供試模型



図二 浮桟橋の供試模型



図三 計測装置(単体係留)

水深は、実際のマリーナを考慮し、0.3 m (実機:3 m)となるように仮底を設けた。

(2) 供試模型

実験には、図一1,2に示すような40 ft パワーボートと浮桟橋の供試模型を使用した。縮尺率は1/10である。

(3) 計測装置

マリーナ内に係留されているプレジャーボートや浮桟橋に働く波浪外力を正確に計測するためには、運動の拘束条件を実機と合わせる必要がある。そこで、筆者らは、ボートについては上下揺、横揺、浮桟橋は上下揺の運動を自由にし、水平方向の波浪外力を高精度で計測できる装置を開発した。その概略図を図一3に示す。これ

* 正会員 工博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科

** 正会員 清水建設(株) 土木本部

*** 工博 清水建設(株) エンジニアリング本部

は、単体係留の計測装置を示したもので、ボートは、その重心位置に取付けられたロッドとカンチレバー型の検力計とを結び係留バネによって支持されている。このバネは、係留索でもやいを取られている状態を再現できるように特性を決めた。

図-4 は連続係留状態における計測装置の概略図を示したものである。基本的には、単体係留の計測装置を組み合わせたものであるが、入射波上側(No. 1)のボートは、実機と同等の特性を持つフェンダーの模型を介して浮桟橋にバネで係留されている。

浮桟橋の模型は鋼管杭にガイドされている状態を再現するため、上下揺を自由にした。また、No. 1 ボートの波浪外力は、浮桟橋との合力として浮桟橋の検力計で計測されるが、浮桟橋単体の分を差し引くことにより、ボートのみに働く波浪外力を評価する。

計測項目は、波浪外力の他にボートの運動、入射波、透過波についても同時に測定した。運動は赤外線ターゲットによる無接触型運動計測装置を、波高は容量式波高計を用いた。

(4) 実験波条件

本試験では、規則波のみを対象とした。採用した実験波を表-1に示す。表中の T , λ , H は、それぞれ入射波の周期、波長、波高である。

(5) 解析方法

計測されたデータは、まず、サンプリング 100 Hz で A/D 変換され、次にフーリエ変換することにより 1 次の振幅を求めた。

なお、単体係留及び連続係留の 2, 3 隻目(No. 2, 3 ボート)については、計測装置の構造上、上下揺の連成影響(水平波力に対して 10~20% 程度)が含まれてしまうので、上下揺の運動の時系列より連成成分を除去することにより左右揺の波浪外力を分離した。

表-1 実験波

$T(\text{sec})$	0.63	0.67	0.71	0.76	0.82	0.90	1.00	1.10	1.42	2.00
$\lambda(\text{m})$	0.62	0.69	0.77	0.88	1.00	1.17	1.37	1.69	2.19	3.26
H	0.02	○		○		○		○		○
H/λ	3.2		2.6		2.0		1.5		0.9	0.6
H	0.05	○	○	○	○	○	○	○	○	○
H/λ	8.0	7.5	6.7	5.7	5.0	4.4	3.6	2.9	2.3	1.5

($H/\lambda: \times 10^{-2}$)

3. 単体係留実験

(1) 理論計算

波浪中に係留された浮体の運動方程式は、浮体を剛体と仮定すると、一般に 6 自由度系となり次式のように表示できる。

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + m_{jk})\ddot{X}_k + N_{jk}\dot{X}_k + \bar{N}_{jk}(\dot{X}_k - \bar{U}_k)|\dot{X}_k - \bar{U}_k| + C_{jk}X_k] + G_j(X_1, X_2, \dots, X_6) = E_j(t) \quad (j=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 X_j は浮体重心の各方向変位で $j=1, 2, \dots, 6$ の順にそれぞれ前後揺、左右揺、上下揺、横揺、縦揺、船首揺れの各運動に対応する。 M_{jk} は浮体の広義の質量、 m_{jk} は広義の付加質量、 N_{jk} は造波減衰係数、 $\bar{N}_{jk}$ は粘性減衰係数、 C_{jk} は静的流体力によって生じる復原力である。 G_j は浮体に変位するとき生じる係留系の反力である。 $\bar{U}_k$ は k 方向の波粒子速度成分の平均値であり、 E_j は線形波強制力である。本論の計算では、運動方向を左右揺、上下揺、横揺の方向に限定した。なお、プレジャーボートの抗力が明確でないので、この項の効果は造波減衰係数を調整することにより考慮した。さらに、図-4 の係留バネの影響は左右揺に対して考慮した。

ラディエーション流体力(付加質量、造波減衰係数)

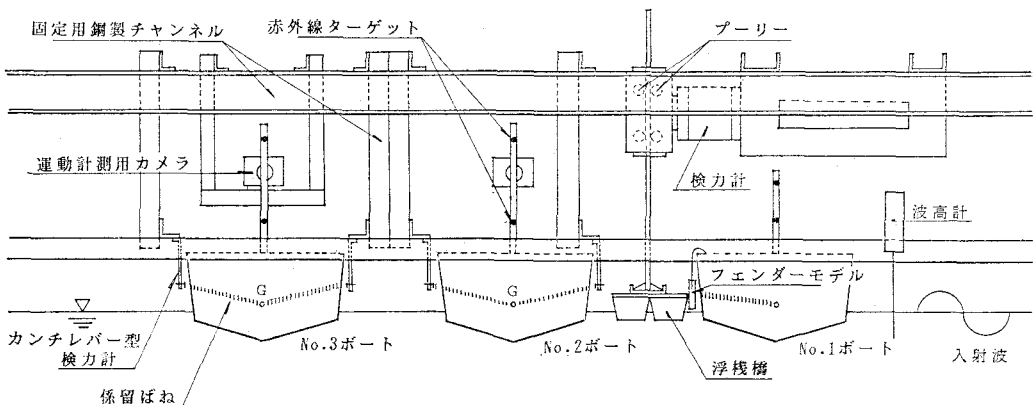


図-4 計測装置(連続係留)

と波強制力は、ボートを回転楕円体で近似し、3次元ハイブリット境界要素法増田ら(1991)を用いて計算した。計算に使用した要素は節点のアイソパラメトリック要素であり、分割数はである。波浪外力 F_2 は左右揺の加速度から慣性力として求めた。

(2) 結果及び考察

図-5~7に、ボートの左右揺、上下揺、横揺の変位振幅に関する計算値と実験値の比較を示す。左右揺、上下揺については入射波振幅 ζ_a で、横揺は入射波の波傾斜 $k\zeta_a$ (k : 波数) でそれぞれ無次元化した。横軸は、入射波周波数 ω を $\sqrt{B/g}$ (B : 模型の最大幅, g : 重力加速度) で無次元化した値である。また、 H/B 値は、入射波高 H を浮体の全幅 B で無次元化した値である。

図-5~7において、計算値と実験値は若干の差異はあるが、良い相関を示している。ボート単体の運動に関しては、本論の手法を用いて実用上十分な精度で推定が可能である。なお、図-5で計算による同調点が実験の同調点よりも若干短周期側にずれているのは、ボートの形状を楕円体で近似したため付加質量の値が若干異なっているからであると考えられる。

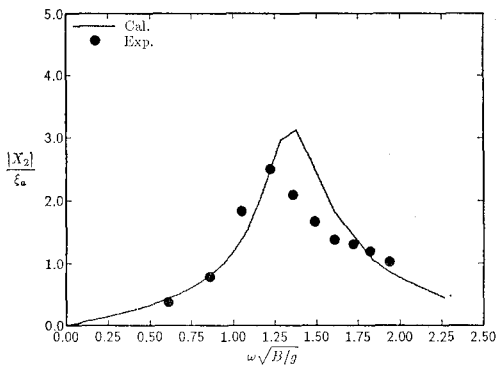


図-5 係留されたパワーボートの左右揺の運動応答関数 ($H/B=0.14$)

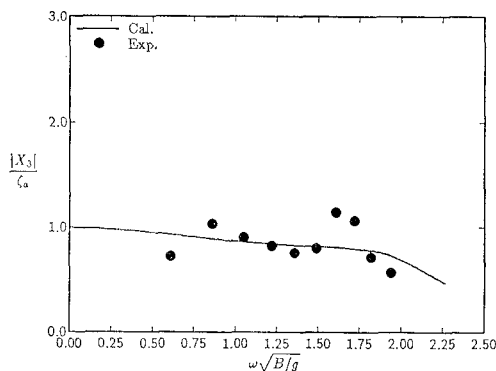


図-6 係留されたパワーボートの上下揺の運動応答関数 ($H/B=0.14$)

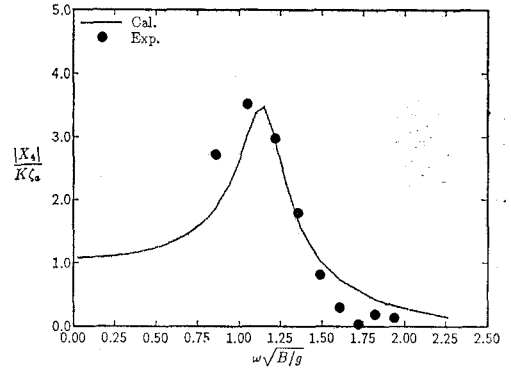


図-7 係留されたパワーボートの横揺の運動応答関数 ($H/B=0.14$)

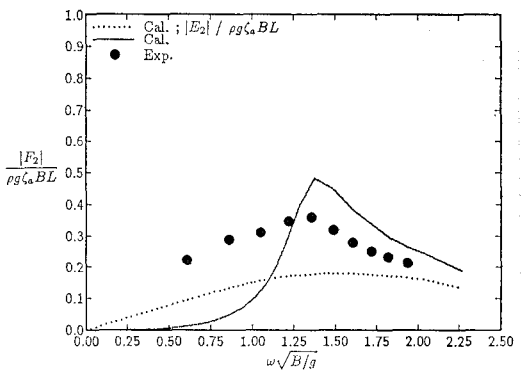


図-8 係留されたパワーボートに働く水平方向の波浪外力 ($H/B=0.14$)

図-8に、水平方向の波浪外力 F_2 に関する計算値と実験値の比較を示す。縦軸は、波浪外力 F_2 を $\rho g \zeta_a B L$ (ρ : 流体密度, g : 重力加速度, ζ_a : 入射波振幅, B : ボートの全幅, L : ボートの全長) で無次元化した値である。図中の黒丸は実験値、実線及び点線は、それぞれ波浪外力 F_2 と波強制力 E_2 の計算値である。図-8において運動を考慮した波浪外力の計算値は、長周期側 ($\omega/B/L < 0.75$) を除いて実験値の特性を良く説明している。長周期側での実験値と計算値の差異は、波浪外力の実験データ解析において上下揺による影響が完全に削除されていないためと思われる。また、浮体を固定状態にした場合の波力すなわち左右揺の波強制力に関する計算値は、実験値よりかなり低い値を示す。これは、浮体を固定状態として波浪外力を評価すると、設計において危険側の値を取る可能性があることを示唆している。

4. 連続係留実験

(1) 実験結果及び考察

図-9は連続係留状態における、波浪外力の波周波数特性を示したもので、比較のため、単体係留の実験値を

図中に載せた。

単体係留の実験値と入射波側 (No. 1) ボートの実験値とを比較すると、それぞれの値は、ほぼ同じオーダーとなっているが、横軸 1.6 以上の短周期側では、No. 1 ボートの値が 2 倍程度大きくなっている。これは、浮桟橋の計測システムの上下揺れに対する摩擦影響によるものと思われる。

No. 1 と No. 2 ボートの結果を比較すると、横軸 1.6 以下の長周期側で、No. 2 の値が大きくなっているが、これは、No. 1 ボート及び No. 3 ボートとの流体力学的相互干渉により、運動振幅が大きくなったためと考えられる。マリーナ内に連続係留されたプレジャーボートに働く波浪外力は、必ずしも入射波側に位置するボートで最大ではなく、その後方に位置するボートが最もその影響を受ける場合があることが分かった。また、No. 3 ボートの波浪外力は、No. 1 ボートの 10~20% 程度である。

図-10~12は、ボートの左右揺、上下揺、横揺の波周波数特性を示したものである。

図-10は、左右揺の実験結果である。全体的には、図-3で示した波浪外力の傾向と似ている。No. 1 ボートの値が他に比べて非常に小さくなっているが、これは、係留の拘束状態が No. 2, 3 と異なるためで、図-4で説

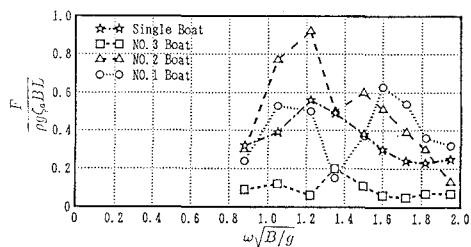


図-9 連続係留されたパワーボートに働く水平方向の波浪外力 ($H/B=0.05$)

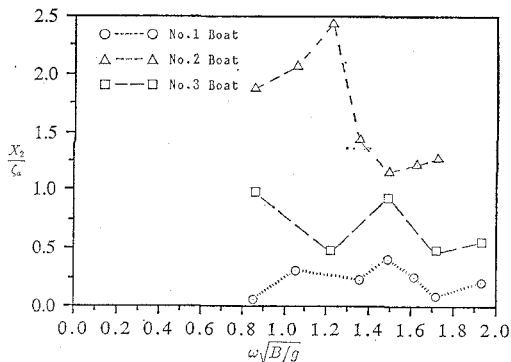


図-10 連続係留されたパワーボートの左右揺の運動応答関数 ($H/B=0.05$)

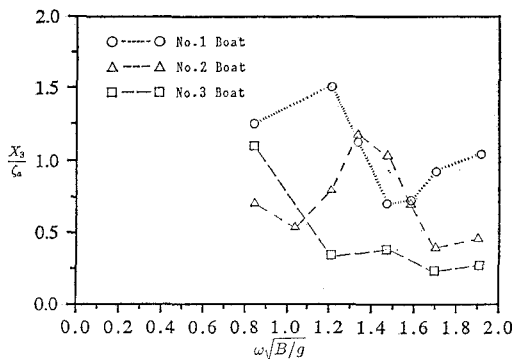


図-11 連続係留されたパワーボートの上下揺の運動応答関数 ($H/B=0.05$)

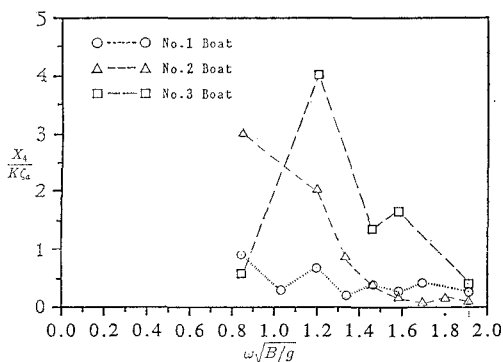


図-12 連続係留されたパワーボートの横揺の運動応答関数 ($H/B=0.05$)

明したように入射波側のボートは波漂流力により浮桟橋におさえられる。

図-11は、上下揺の実験結果である。No. 1 については、単体係留の場合と同様に、横軸 1.4 以下の長周期側で値はほぼ 1.0 付近に集まっている。No. 3 の応答関数は、No. 1 と比べ 1/2 程度になっている。

図-12は横揺の実験結果である。全体的な傾向としては、単体係留と同様に横軸 1.4 付近で動揺が小さくなり、それより長周期側で波傾斜の 2, 3 倍程大きく振動する。No. 1 が No. 2, 3 と比較して小さくなっているのは、左右揺同様、ボートの係留の拘束条件が異なるためである。

5. 結 言

マリーナ内に係留されたプレジャーボートや浮桟橋の動揺状態を正確に再現できる波浪外力の計測装置を開発し、その装置による水槽実験を実施した。本論で得られた結果を整理すると以下のようになる。

(1) 単体ならびに 3 艇連続して浮桟橋に係留されたプレジャーボートの、波浪外力及び動揺の波周波数特性が明確にされた。

(2) 係留された単体のパワーボートに働く波浪外力の理論値と実験値とは、長周期側を除いて良好な相関を示した。また、運動応答に関しては全体的に良い相関を示し、本論の手法により実用上十分な精度で推定が可能である。

(3) 波浪外力の特性は、ボートの運動の影響を強く受けるため、その算定に関しては運動特性を考慮する必要がある。

(4) 連続浮体にある波が入射した場合、中間に位置する浮体はその前後の浮体の運動による相互干渉影響を受け、波上側のボートより大きくなる場合がある。

(5) 連続係留された場合、入射波側から第3番目のボートに働く波浪外力は、単体係留ボートに働く場合の

1/2 以下になる。

謝 辞： 本研究において多くの支援、御指導、御協力を頂いた、清水建設㈱、辰巳勲氏、清川哲志博士、大山巧博士、蒲田浩久氏、ならびに実験実施に関して御協力頂いた 日本大学理工学部海洋建築工学科、居駒知樹君、今関太平君、柴田剛君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 合田良実・吉村知司 (1971): 海中に孤立した巨大構造物に働く波力の計算, 港研報告, 10 巻, 4 号, pp. 3-52.
増田光一・永井孝志・柴山泰亮 (1881): コーン型浮体に作用する 2 次波強制力における舷側傾斜影響について, 日本造船学会論文集, 第 170 号, pp. 289-297.