

マリーナ用柔構造浮体の特性に関する水理模型実験

平石 哲也*・高山 知司**・鹿籠 雅純***・松永 栄****

1. ま え が き

近年の余暇時間の増加にともない、ウォーターフロントにおけるレクリエーション施設の充実が急務になっている。ウォーターフロントの豊かな水際線を利用した施設としては、海浜公園、マリーナ、魚釣り施設、景観に配慮した遊歩道などが考えられる。なかでもマリーナは、海上レジャーを促進するだけでなく、河川・港湾における小型船の不法係留を防ぐための基幹施設として、ウォーターフロントの開発には欠かせない施設である。マリーナのプレジャーボート用の係留施設としては、係船岸・棧橋・係船杭・係船ブイが考えられるが、その中では、狭い水域で多数の船舶を係留でき比較的建設が容易な棧橋が主に用いられている。

マリーナ内の小型船舶係留用棧橋としては、杭などの固定式とともに、連結した複数のポンツーンを杭あるいは係留索によって碇係した浮棧橋が主に用いられている。浮棧橋の場合、ポンツーンの連結部の強度が不足したときには、亀裂が生じたり、破断することがある。そこで、連結部をなくした一体構造の浮棧橋が最近考案されている。これは、針葉樹等の木材を合成して製作した一体の長い板を、杭で碇係したもので、非常に柔軟な浮体構造物と考えることができる。このような構造物は、連結部がないため、メンテナンスの費用が少なく経済的であるので、浮棧橋以外の用途にも応用できると考えられる。

柔構造浮体を、マリーナ係留浮体として、また海上イベント会場などの他の施設として今後幅広く応用して行くためには、浮体の消波機能と浮体に作用する波力を算定する手法を開発しておかなければならない。柔構造の板の波浪中における変形については、鵜飼・日野(1971)が、一端を固定した弾性板の変位をポテンシャル理論を用いて解析的に求めた例がある。しかし、両端が自由端となった場合の理論解は示されておらず、また模型実験

による理論の検証はなされていない。加藤ら(1969)は、ロープで係留されたシート型浮防波堤の消波効果を実験的に検討し、シート面での摩擦により良好な消波効果を期待し得ることを報告しているが、模型のシートの材質および曲げ剛性については検討しておらず、模型シートがどの程度柔軟であったのか明かではない。したがって、現在のところ、柔構造浮体による消波効果については定量的な検討が成されていない。そこで、本研究では、弾性変位を有する柔構造浮体について波の伝達率を調べ、その消波効果を明かにすることを目的とした。さらに、係留杭に作用する水平力を測定することによって、作用波力を定義し、曲げのない剛性浮体と比較して、どの程度作用波力が低減できるかを検討した。

2. 実験模型と実験方法

本研究で対象とした小型船舶係留用浮棧橋は、米州産の針葉樹等の木材から製作した板を張り合わせて一体化させた版からなり、非常に柔軟な構造になっている。現地での用途に応じて長さおよび幅を変更することができる。現地では、一枚の長い板が水面に浮かんだようになり、版の中に適当な間隔で穴を開け、その中に杭(ポール)を通して係留する。版の下にはある程度の乾舷が確保できるように発砲スチロール製のフロートを取り付ける。棧橋は杭(ポール)に沿って自由に上下方向へ運動できるので、大きな潮位変動にも対応できる。

本実験では、基礎的な検討をするために単純な形状の浮体による実験を行った。模型実験の縮尺は水槽規模および実験精度を考慮して、消波機能実験では1/10、波力実験では1/25とした。表-1はJIS規格が定めた針葉樹集成材の曲げヤング係数を示す。表から針葉樹集成材の曲げヤング係数 E は、 $70 \sim 120 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ で、曲げ強さは $285 \sim 495 \text{ kg/cm}^2$ と考えることができる。そこで、本研究では、針葉樹集成材の曲げヤング係数は約 1000 kg/mm^2 とした。現地における部材の厚さは標準で 125 mm である。したがって、単位長さ当たりの曲げ剛性 EI は $1.63 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ となる。模型では単位長さ当たりの曲げ剛性 EI が相似するように模型の材

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部 部長

*** 工修 (財)沿岸開発技術研究センター第二調査研究部長

**** 工修 (財)沿岸開発技術研究センター調査研究部

表-1 集成材の曲げヤング係数

樹 種 区 分	特 級		1 級		2 級	
	曲げヤング 係 数 (10^8 kg/cm 2)	曲げ強さ (kg/cm 2)	曲げヤング 係 数 (10^8 kg/cm 2)	曲げ強さ (kg/cm 2)	曲げヤング 係 数 (10^8 kg/cm 2)	曲げ強さ (kg/cm 2)
針葉樹A-1	120	495	110	435	100	365
針葉樹A-2	110	465	100	405	90	330
針葉樹A-3	100	435	90	375	80	315
針葉樹A-4	90	405	80	345	70	285
広葉樹 A	—	—	90	450	80	375
広葉樹 B	—	—	80	390	70	330

質および部材厚を設定した。

模型フロートは発砲スチロール製として、内部の一部を空洞化することによって実機の吃水を相似するようにした。実機の吃水は標準フロートタイプで 15 cm である。図-1 に、本実機で単純化して製作した模型浮体の外観図を示す。模型は図の横方向の長さを幅 B とする矩形体で、図の右手方向から波が作用するように長水路内に設置される。両端に径 50 mm の穴が明けられており、その中に径 40 mm の浮体に比べて十分剛性な係留ボールが設置されている。図は、波力実験時のボール取り付け位置を示しており、消波機能実験では、4 隅に穴を開けて、4 本の杭で係留し、浮体のねじれが生じないようにした。1 個のフロートは実機では幅、長さともに 1 m 以下である。それらを模型で製作すると、模型製作が非常に煩雑になるために、図に示すように、模型フロートは、長さおよび幅がともに現地換算値で 2 m の正方形とした。

図-2 は、実験水路における模型の設置状況を示したものである。実験水路は、長さ 40 m、幅 140 cm の 2 次元長水路で、水槽の一端には緩傾斜型の消波工が設置されている。水槽のもう一端には低反射型のピストン型造波装置が取り付けられている。この造波装置は模型からの反射波が造波板で再反射されるのを防ぐ機能を有し、規則波を用いても連続的な造波が可能である（平口ら、1988）。水槽中央部は 3 m にわたって水槽側壁がガ

ラス張りとなっている。実験では、水槽中央部に柔構造浮体を設置し、浮体上数点にカラーマーカーを取り付け、運動の様子をビデオトラッカー装置で測定した。この装置を用いると、マーカーの変位がデジタル量として解析できる。係留ボールの基部は、水路床上に固定した分力計に取り付け、波向方向の水平力を測定した。図-1 に示すように、実験では沖側と岸側の両地点の水平力を測

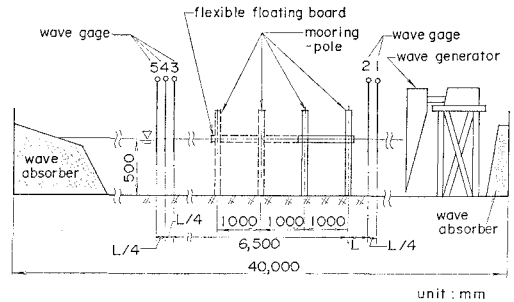


図-2 実験水槽と模型の配置

定したが、本報告では、沖側の水平力のみを解析した。

実験においては、模型から発生する定常減衰波の影響を受けないように、模型端部から造波板方向へ約 1 波長離れた地点に 2 本の波高計を設置し、水面変動の同時計測を行った。2 本の波高計の間隔は $1/4$ 波長とし、2 本の波高計の同時観測記録から入射波分離計算（合田・鈴木、1976）を行って浮体に作用する入射波の波高および周期を求めた。浮体の造波機側端部より造波機と反対側に 650 cm 離れた地点には No. 3, 4, 5 の 3 本の波高計を設置して、浮体通過後の波高を測定した。測定した 3 本の波高計のデータを平均して透過波の波高および周期を求めた。

消波機能実験では、浮体長は 140 cm で一定として、水路幅いっぱいに浮体が設置されるようにした。水路長方向の浮体幅 B は、浮体幅の影響を調べるために、実機換算値で 30 m、20 m、10 m、6 m および 3 m の 5 種類とした。波力実験では、浮体幅 $B=15, 30$ m、浮体長 $l=10, 5$ m とした。さらに、波力実験では、柔構造模型の両側面をアルミ製細棒で囲み、剛構造浮体として機能させた場合の実験を行った。

水深は、小型船舶用の係留施設は主に湾内あるいは港内に設置されるので、現地換算値で 5 m とした。波は、規則波と Bretschneider-光易型のエネルギースペクトルを持つ不規則波を作用させた。規則波高 H および不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ を 0.5 m で一定とし、周期 T

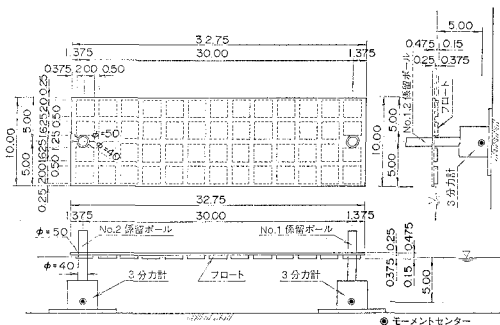


図-1 実験で用いた浮体の形状（波力実験）

および有義波周期 $T_{1/3}$ を 2.5, 3.2, 4.4, 5.7, 7.0 および 8.2 s として変化させた。

実験では、波高計で収録したデータは、規則波および不規則波について波周期の 1/15 程度をサンプリング間隔として 2048 個のデジタルデータに変換し、コンピュータで解析して、各ケースにおける入射波高 H_I 、透過波高 H_T を求めた。なお不規則波は連を変えて 2 回計測を行ってその平均値を採用した。浮体の消波機能を示す透過率 K_T は、 $K_T = H_T/H_I$ として算定できる。波力解析では、波の長周期漂流力、水槽の固有振動などによる長周期の変動成分が含まれるので、長周期成分を除去して、波による短周期の変動成分だけを取り出して、その最大値を最大水平力 $F_{\max}$ とした。また、波向方向に作用する水平力のピーク値を大きい順に並べたときの、上から 1/3 に含まれるピーク値の平均を、水平力の有義値 F とした。規則波を作用させたときでも、浮体と杭の衝突状況によって水平力は変動し、 $F_{\max}$ と F は一致しなかった。

3. 柔構造浮体の運動特性

図-3 は、マーカー変位の解析から求めた、波 1 周期間の実験浮体の鉛直面内の運動変位を示したものである。図で示したケースでは、 $B=30$ cm, $T=9$ s である。このとき波の波長は 60.4 m, 波高 0.5 m であり、浮体幅はほぼ 1/2 波長に等しい。図に示すように、「柔構造」の運動は波長 60.4 m の波形の半分とよく一致している。したがって、本研究で対象とする柔構造浮体が、浮体幅が十分大きい場合に、波に全く追従した運動を示すことがわかる。

なお、本実験ではアルミ製細棒で剛性を与えたが、細棒の幅が十分ではなく、図の「剛構造」で示すように、浮体の形状は常に直線状になるのではなく、変位が大き

い場合には若干柔性を示している。すなわち、本実験で比較対象とした剛構造は、完全な剛体ではなく、曲げ剛性が大きく剛体に近い柔構造体とみなすことができる。

4. 柔構造浮体の消波機能

マリーナ用柔構造浮体は、集成材を張り合わせた一体型構造であるために、その平面形状を自由に变化させることができる。したがって、通常のウォークウェイとフィンガーの組合せのほかに、一枚の大きな板として海上イベント会場に、あるいはマリーナ内の波除堤として機能させることが可能である。その場合には柔構造浮体の消波機能を明らかにしておくことが重要である。浮体の消波機能は、一般に透過率 K_T で表わされ、 K_T が低くなると消波機能が高いと考えることができる。

ポンツーンなどの剛構造浮体の透過率については、従来から理論的な研究が成されており、伊藤 (1970) は、ポテンシャル理論から導いた近似式を提案している。図-4 は、鉛直方向へのみ自由運動を行なう剛構造浮体に関する近似計算から求めた透過率 K_T と、実験で求めた柔構造浮体の透過率を比較したものである。丸、四角および三角記号で実験結果を、実線で計算結果をそれぞれ示している。剛構造浮体の場合は、実線で示したように、浮体幅 B が大きくなるにつれて、透過率が急激に低下し、 $B=30$ m の浮体の場合には、 $B/L=3$ のときに、 K_T は 0.1 以下になり、透過波高は非常に小さくなる。

柔構造浮体の実験結果でも、無次元浮体幅 B/L が大きくなれば K_T は低下して消波機能は増加している。しかし、実験浮体の幅 B が大きくなっても、その透過率が低下するわけではなく、入射波の周期が一定、すなわち L が同一であれば、浮体幅 B が増加しても透過率は小さくならない。たとえば、 $B=30$ m の場合、 $B/L=3$ のときに透過率は剛構造および柔構造についてそれぞれ約 0.1 および 0.4 になる。柔構造浮体の透過率は、浮体幅 B が小さくなると剛構造の計算値に一致するよう

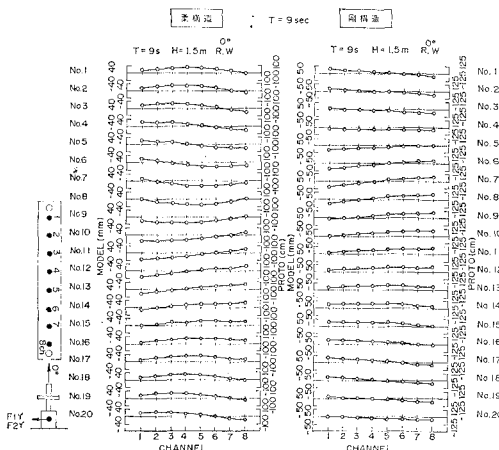


図-3 浮体の運動の様子

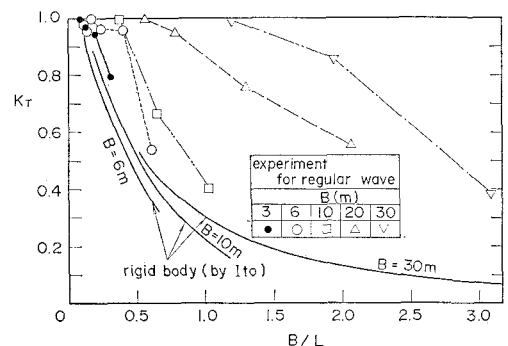
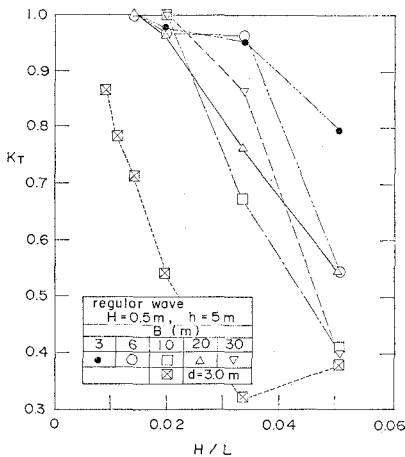


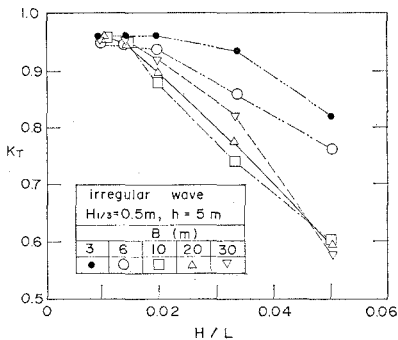
図-4 柔構造および剛構造浮体の透過率の比較

になり、本実験の場合には、 B が 6 m より小さくなると、その透過性能は剛構造の場合と変わらなくなる。

図-5 は、柔構造浮体の消波性能を、入射波高の波形勾配 H/L について調べたものである。図-5 (1) および (2) は、それぞれ規則波および不規則波の場合を示す。(1) の規則波の場合に示されるように、浮体幅 B が 6~30 m の場合には、消波性能は浮体幅 B によらずほぼ一定で、浮体前面の波形勾配だけで K_T は決定する。すなわち入射波の波高が 50 cm で一定の場合には、周期が短くなると透過率は低くなり 0.4 程度まで低下する。したがって、柔構造浮体の場合には、前面のフロート間の渦の発生による抵抗などで波のエネルギーを減少させた後は、浮体が波によって追従して運動するために、浮体底面と水面との摩擦などによって低減される波のエネルギーがほとんどなくなるため、浮体幅が大きくなっても消波性能は上昇しない。ただし、浮体幅が 3 m 程度まで小さくなると、固定浮体と同様の運動をして消波性能が期待できないので、柔構造浮体を消波機能を持った浮体として機能させる場合には、浮体幅としては、6~10 m 程度が適当である。



(1) 規則波の場合



(2) 不規則波の場合

図-5 柔構造浮体の消波性能

長周期の波に対しては消波性能が期待できないけれども、フロートの吃水を深くしてフロート間の渦による波のエネルギー低減効果を高め、透過率を低下させることができる。図に $d=3.0$ m として吃水を増加させた場合の透過率を示した。周期が短い場合には、標準フロートの場合と透過率は変化しないが、周期が短くなると、消波性能の差が大きくなり、周期が 2 s 程度の場合でも、0.5 程度の透過率が期待できる。

図-5(2) は、不規則波を作用させた場合の柔構造浮体の透過率を示したものである。規則波の場合に比べて、各作用波の周期にばらつきが生じるため、透過率が均一化され、 $H/L=0.05$ のときには約 0.6 程度になる。

以上の実験結果から、柔構造浮体は、その透過率が前面の波形勾配によってのみ規定されるので、浮体幅を大きくしても、透過率は低下しないことがわかる。また、10 m 程度の浮体を用いると最も効率よく消波できて、その場合の透過率は短周期の場合に、約 0.6 である。

5. 柔構造浮体の波力低減効果

マリーナ用係留施設として、柔構造浮体を利用する利点の一つとして、波力の低減効果が挙げられる。従来の剛構造浮体に比べて柔構造物により作用波力が低減できれば、係留索あるいは係留杭の規模を小さくすることができ、経済的であるばかりでなく、大きな係留施設がマリーナ内に必要でなくなるので、景観上も都合がよい。

図-6 は、沖側の分力計で測定された、杭支持部に作用する有義水平力を示したものである。浮体幅および浮体長さはそれぞれ、30 および 15 m である。図の三角記号は、浮体を設置しない場合の係留杭だけに作用する波力（水平力）を示す。剛構造および柔構造浮体を設置した場合の水平力は、それぞれ黒丸および白丸で示した。

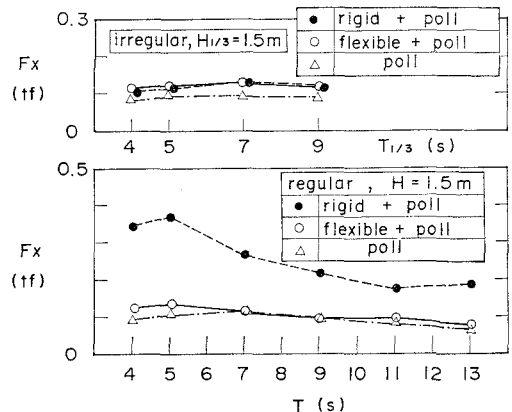


図-6 周期に対する水平力の効果

図の上段に示した不規則波の場合には、浮体を設置した場合と設置しない場合の水平力の差が小さい。すなわち、浮体のみに作用する水平力が非常に小さく、ボールの支持力は、ボールに作用する波力でほとんど決定されることがわかる。剛構造および柔構造浮体に作用する水平波力を比較すると、作用波力が小さく、本実験では、完全な剛性浮体との比較ができなかったため、不規則波の場合には、ほとんど差が生じなかった。

下段に示した規則波の場合には、柔構造浮体はその動きが滑らかに波に追従するので、作用波力が非常に小さくなり、浮体を設置した場合と設置しない場合の水平波力の差はほとんど生じない。剛構造の場合には、波形に対する追従性が悪くなり、水粒子運動が浮体によって妨げられることになるので大きな波力が作用する。剛構造体に作用する水平力の大きさは柔構造浮体に比べて、周期4～6秒の場合には3倍程度に大きくなる。

実際のマリーナは、内海あるいは港湾内に設置されるため入射波の周期も比較的短く、4～6秒程度の波に対して設計されることが多い。その場合には、剛構造浮体であれば、杭にかかる波力は、杭自体に作用する波力と浮体に作用する波力を合わせたものとなるのに対して、柔構造浮体の場合には、杭だけに作用する波力だけを考慮しておけばよいことになる。

図-7は、波高を変化させた場合の、水平力の最大値 F_{max} および有義値 F の変化を示したものである。波高が大きくなると、最大および有義波力とも大きくなり、係留系に作用する水平力は周期よりも波高に大きく依存することがわかる。波高が大きくなるにつれて、剛構造浮体と柔構造浮体の差が大きくなり、浮体を柔構造とすることによって係留力を小さくする効果が大い。

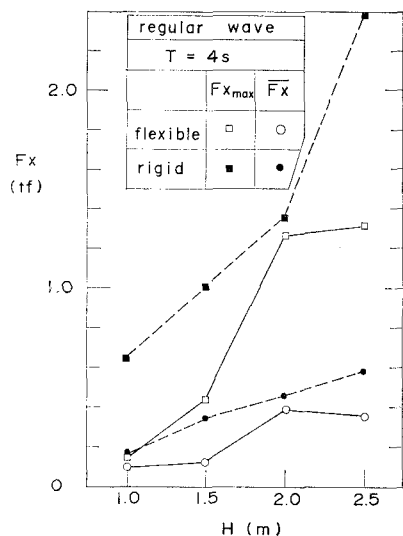


図-7 波高に対する水平力の変化

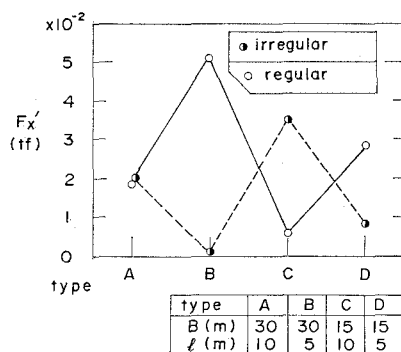


図-8 浮体の大きさに対する水平力の変化

がって、本実験で用いた柔構造浮体は経済的にも景観的にもマリーナ係留浮体として適している。

図-8は、柔構造浮体を対象として、作用波力から杭だけを設置した場合の波力を差し引いて、浮体だけに作用する波力を示したものである。浮体の大きさを、図に示すように、A, B, C, Dの4種類に変化させた。浮体幅および浮体長が変化しても水平波力の有義値はほとんど変化せず明瞭な差は生じなかった。これは、もともと作用波力が小さいために、浮体幅および浮体長の影響によって変化する値よりも、浮体と係留杭との隙間や側壁間の重複波の影響が大きく現われたためと思われる。

5. あとがき

本研究の結果、柔構造浮体の透過率は、浮体幅が6m以上であれば浮体幅によらず入射波の波形勾配だけで決まり、不規則波の場合でも透過率を0.6程度まで低下させることができること、また、剛構造浮体に比べて係留系に作用する波力を著しく低減でき、マリーナ係留施設として経済的および景観的に優れていることが判明した。

本研究の実施に当たっては、(株)マリーナベンチャーズ・ジャパンから浮体の曲げ剛性、フロート規格等について資料を提供していただいた。同社の皆様に深く感謝する次第である。

参考文献

- 伊藤喜行・千葉 繁 (1972): 浮き防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港研報告, Vol. 11, No. 2, pp. 137-166.
- 鶴岡恵三・日野幹雄 (1971): 水面上の弾性板の波による振動, Technical Report, No. 10, Dep. of Civil Eng., Tokyo Inst. of Technology, pp. 213-223.
- 平口博丸・鹿島遼一・川口 隆 (1988): 水面波形制御方式による無反射型造波機の不規則波実験への適用性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 30-34.
- 加藤重一・乃万俊文・萩野静也 (1969): シート型浮防波堤の消波効果について, 第16回海岸工学講演会論文集, pp. 297-299.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1976): 不規則波における入・反射波の分離推定法, 港研資料, No. 248, 24 p.