

柔構造浮体による波高低減効果に関する実験

Experimental Study on Wave Transmission and Reflection of Flexible Floating Board

高山知司*・平石哲也*

Tomotsuka Takayama and Tetsuya Hiraishi

A long flexible floating board made of the complex of needle-trees has been developed to moor small vessels like pleasure boats. The present paper investigates experimentally the wave transmission and reflection of the board. The transmission coefficient K_T and reflection coefficient K_R do not depend on the relative width of the board (width/wave length) but on the incident wave steepness. The value of K_T decreases and K_R increases as the wave steepness becomes large. The wave transmission coefficient becomes much smaller as the draught of the front float is deepened.

Key Words: Hydraulic model test, Floating body, Flexible board, Marina

1. まえがき

マリーナ内の小型船舶係留用栈橋としては、杭などの固定式とともに、連結した複数のボンツーンを杭あるいは係留索によって繋いだ浮栈橋がおもに用いられている。浮栈橋の場合、ボンツーンの連結部の強度が不足したときには、破断等の被害が起こることがある。そこで、連結部をなくした一体構造の浮栈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、杭で繋いだもので、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、浮栈橋以外の用途にも応用できると思われる。柔構造の板の波浪中における変形については、鶴飼・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、反射率等を調べ、消波効果を明かにすることを目的とした。

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 ($10\text{Kg}^2/\text{cm}^2$)	曲げ強さ (Kg/cm^2)	曲げヤング係数 ($10\text{Kg}^2/\text{cm}^2$)	曲げ強さ (Kg/cm^2)	曲げヤング係数 ($10\text{Kg}^2/\text{cm}^2$)	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

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栈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。この構造物の特徴としては、波に追従して動くために係留用のポールに作用する水平力がボンツーンなどより小さいこと、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こと、ボンツーン連結部の強度が不足して生じる破断事故が生じないこと、栈橋は杭(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ことが挙げられる。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透過率および反射率について実験を行った。模型実験の縮尺は水槽規模および実験精度を考慮して 1/10 とした。表-1 は J I S 規格が定めた針葉樹集成材の曲げヤング係数 E と曲げ強さを示したものである。表-1 より針葉樹集成材の場合には曲げヤング係数は約 1000 kg/mm^2 と推定できる。現地における部材の厚さは標準で 125mm である。したがって、単位長さ当たりの曲げ剛性 $E I$ は $1.63 \times 10^8\text{ kgmm}^2/\text{mm}$ となる。模型では単位長さ当たりの曲げ剛性 $E I$ が相似するように模型部材の種類および

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 (239 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

び部材厚を決定した。模型では、合成樹脂材で約 80kg/mm^2 の曲げヤング率を持つ版を用いた。載荷試験を行って正確にヤング率を測定した後に部材厚を調整して、模型において単位長さ当たりの曲げ剛性が $1.63 \times 10^4 \text{ kgmm}^2/\text{mm}$ となるようにした。模型における部材厚は 15mm になった。したがって、部材厚については相似させていない。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。実機の吃水は標準タイプで 15cm である。図-1 に本実験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。4 隅に径 50mm の穴が明けられており、その中に径 40mm の浮体に比べて十分剛性な係留ポールが設置されている。係留ポールと設置穴の間は十分滑らかになるように浮体側に小さなプラスチック製のボールベアリングを取り付けた。1 個のフロートは実機では幅、長さともに 1m 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-1 に示すように、模型フロートは、長さおよび幅がともに 20cm (現地 2m) の正方形として長さ方向に 6 ヶ、幅方向に 1m 当たり 5 ヶ取り付けられるものとした。

図-2 は実験水槽および模型設置方法を示す。実験水路は長さ 40m 、幅 140cm 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 (平口ら、1990) 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ており、規則波を用いても連続的な造波が可能である。水槽中央部は 3m にわたって水槽側壁がガラス張りとなっている。水槽中央部に柔構造浮体を設置し係留ポールの基部は動かないように水路床上に固定した。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反射分離計算 (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と、浮体から反射される反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 650cm 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。表-2 は、実験条件をまとめたものである。実験で用いた浮体長は 140cm で一定として、水路長方向の浮体幅

B は、浮体幅の影響を調べるために、 1 (実機 10m)、 2m (20m) および 3m (30m) の 3 種類とした。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 50cm (現地 5m) 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 5cm (50cm) で一定とし、周期 T および有義波周期 $T_{1/3}$ を 0.8 (現地 2.5s)、 1.0 (3.2)、 1.4 (4.4)、 1.8 (5.7)、 2.2 (7.0) および

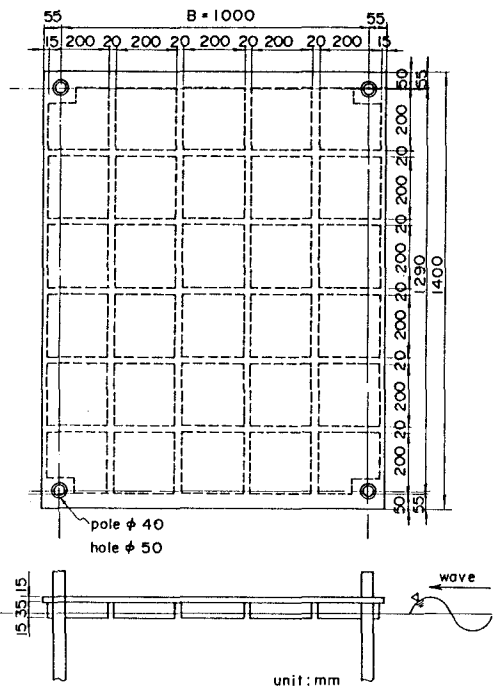


図-1 模型浮体

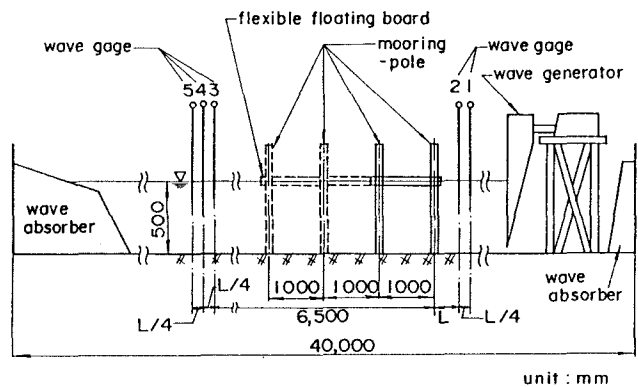


図-2 実験水槽と模型の配置

表-2 実験条件

水 深 h (cm)	500 (50)						
波 高 $H_{1/3}$ (cm)	50 (5)						
周 期 $T_{1/3}$ (s)	2.5 (0.8)	3.2 (1.0)	4.4 (1.4)	5.7 (1.8)	7.0 (2.2)	8.2 (2.6)	
波形勾配 H/L	0.050	0.033	0.020	0.014	0.011	0.0091	
堤 体 幅 B (m)	10 (1), 20 (2), 30 (3)						

現地量 (模型量)

2.6 (8.2s) として変化させた。

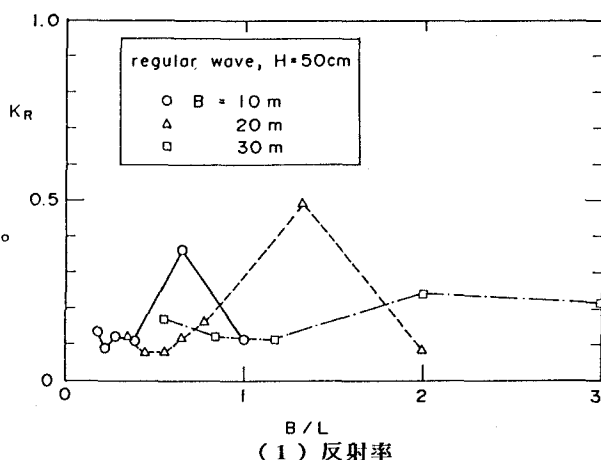
実験では、波高計で収録したデータは、規則波および不規則波について波周期の1/15程度をサンプリング間隔として 2048 個のデジタルデータに変換し、コンピュータで解析して、各ケースにおける入射波高 H_I 、反射波高 H_R 、透過波高 H_T を求めた。なお不規則波は連を変えて 2 回計測を行ってその平均値を採用した。

柔構造浮体の透過率 K_T 、反射率 K_R および浮体による波エネルギー逸散率 ΔE はそれぞれ次式で求められる；

$$K_T = H_T / H_I$$

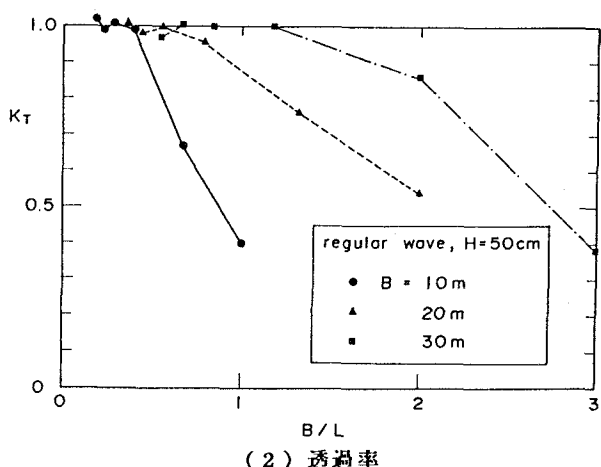
$$K_R = H_R / H_I$$

$$\Delta E = 1 - (K_T)^2 - (K_R)^2$$



3. 実験結果

実験結果は現地量で整理した。水面に固定された剛な水平板の場合、堤体幅は堤体の波高低減効果を決定する大きな要素であり堤体幅と波長の比 B/L によって堤体の透過率、反射率などが変化する。井島ら(1970)の理論計算によれば水平板の B/L が大きくなるほど、 K_T は減少する。没水平板の場合には、波の K_T は B/L と没水深によって決まり、最小透過率を与える B/L が理論的に求められる。(小島・井島・吉田、1990) 本実験で対象とした柔構造浮体についても B/L と K_T および K_R の関係を調べた。図-3 は柔構造浮体に規則波を作用させた場合の B/L に対する



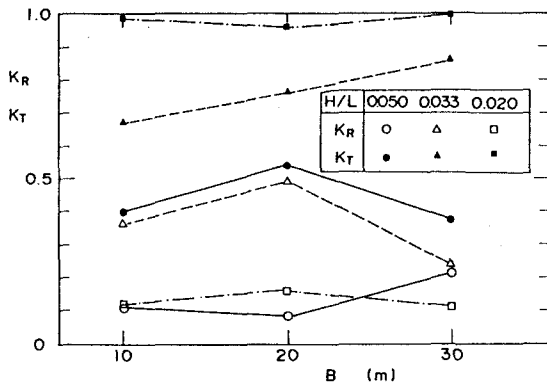
(1) 反射率および (2) 透過率 の関係を示したものである。

図-3 B/L と消波効果の関係

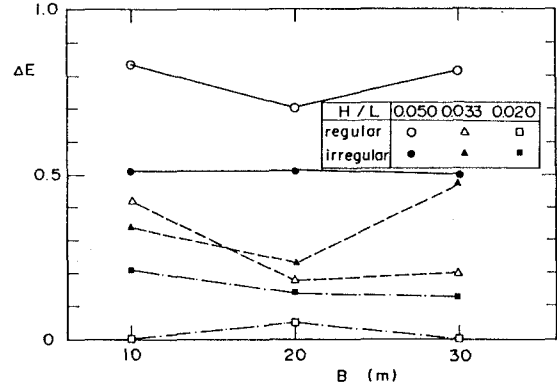
(1) において K_R はある B/L の値に対して極大値を取るような分布を示し、 K_R が極大となる B/L の値は浮体幅 B によって異なる。 $B = 10, 20$ および $30m$ の場合、その値はそれぞれ 0.66、1.26 および 2.0 である。したがって、 K_R の大きさは B/L だけで決まらずに堤体幅 B によって変化する。(2) の透過率は B/L が増加するに従って減少する。しかし、その値は B/L によって決定されず、堤体幅 B によって異なる。たとえば透過率が 0.5 程度になるのは、 $B = 10, 20$ および $30m$ の場合にそれぞれ異なり、 B/L は 1.0、2.0 および 3.0 の時である。以上のことから、柔構造体の場合には K_R および透過率が堤体幅と波長の関係で決定されるのではなく別の要素が大きな影響を与えていることが推測できる。

浮体幅の影響をより詳しく検討するために、 B による K_T 、 K_R および ΔE の変化を調べた。図-4 は、一定の波形勾配について、堤体幅 B が変化した場合の (1) K_T と K_R 、(2) ΔE を調べた図である。(1) は規則波を作用させたときの K_T と K_R の変化を示す。黒い記号で示した K_T の場合、 H/L が 0.02 のときはほとんど変化せず 1 に近い。 H/L が 0.033 のときは B にしたがって増加するもののその増加率は小さく、 K_T の値はほぼ 0.75 程度である。 H/L が 0.05 のときは、 $B = 20m$ の時に最大値を取る。しかしながらその変化は小さくせいぜい 0.15 程度で平均すると 0.45 である。したがって、 K_T は堤体幅 B が 10m から 30m 迄大きく変化しても、余り大きく変化しない。それよりも波形勾配による変化の方が大きく、波形勾配が 0.05 から 0.02 になると K_T は 0.45 から 1.0 になる。白い記号で示した K_R についても同様のことが推測でき、波形勾配が 0.05 および 0.02 のときは、 K_R は約 0.15 になり、 H/L が 0.033 の時、 K_R は 0.4 程度になる。(2) は ΔE の変化を規則波と不規則波の両方の場合について示したものである。 H/L が 0.05 のときは ΔE が B によらず一定であることが良く示されており、規則波の時は ΔE は約 0.75、不規則波の時は約 0.5 になる。そのほかの波形勾配の時はデータのばらつきはあるものの ΔE は B によらず一定で、波形勾配による影響を大きく受けることがわかる。

そこで、波形勾配をパラメータとして、実験における K_T 、 K_R および ΔE の変化を調べた。図-5 は規則波および不規則波を作用させた場合の K_T 、 K_R および ΔE を示したものである。図-5 (1) の規則波作用



(1) 反射率と透過率



(2) エネルギー逸散率

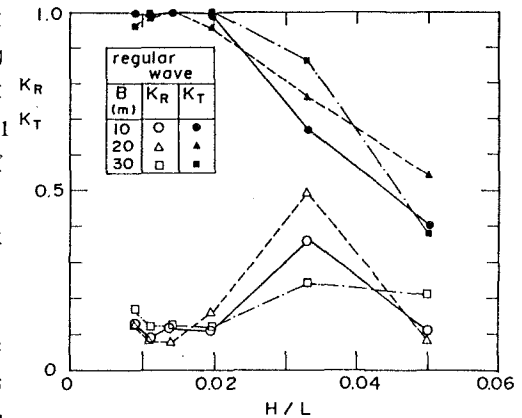
図-4 Bによる消波効果の変化

次の K_R と K_T の変化を調べると、 K_T については、 H/L が増加するにつれて一様に減少することがわかる。すなわち、浮体前面の波の波高が大きいほどあるいは波長が短いほど K_T は減少する。堤体幅 B が変化しても H/L が同一であれば K_T は大きく変化せずほぼ同じ値になる。 K_R は H/L が0.033のときに極大値になる分布形を示す。その極大値は B によって少しことなるけれども、 H/L によって K_R が大きく変化することが示される。

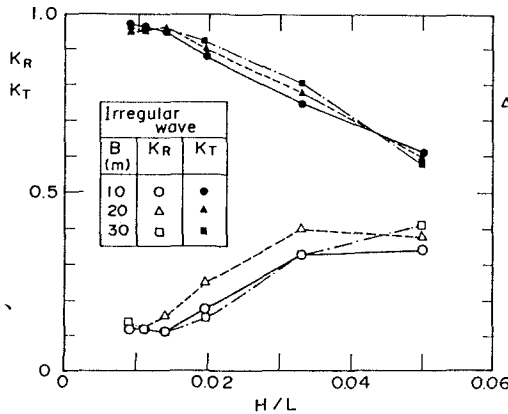
図-5(2)で示した不規則波のケースでは、 K_T は H/L が増加するにしたがって減少する。 B が変化しても各ケースの K_T の差は非常に小さく、明らかに K_T は波形勾配によって大きく影響されている。 K_R は規則波の場合とことなり、 H/L が増加するとそれに従って増加する。ただし K_R が0.4になるとそれ以上 K_R は増加せずほぼ一定値となる。堤体幅 B による影響は小さく K_R も H/L に大きく影響される。図-5(3)は ΔE について、規則波および不規則波の場合の変化を調べたものである。規則波の場合 H/L が0.02より小さい場合はほぼ0であるが、 H/L が0.02より大きくなると ΔE は非常に大きくなり H/L が0.05のとき ΔE は約0.8程度になる。不規則波の場合は ΔE はそれほど大きくならないけれども、 H/L にしたがって大きくなる。図-5(1)、(2)および(3)において示したように、データにばらつきはあるものの、 K_T 、 K_R および ΔE は波形勾配によって大きく影響され、堤体幅 B によって大きく変化することはない。したがって、3種類の B による実験結果を平均して H/L だけによる影響を検討することができる。

図-6は、3種類の B による実験結果を平均して規則波および不規則波それぞれについて波形勾配 H/L と K_T 、 K_R および ΔE の関係を調べたものである。ただし、 H/L が0.14より小さい場合には H/L による変化が小さかったので、図では H/L が

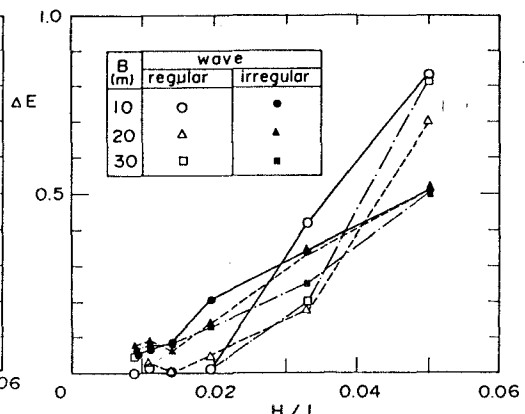
0.014より小さい場合には各諸量は一定で変化しないものとしてデータをまとめた。 K_T は H/L が0.014より小さい場合、規則波では1.0であるが不規則波では0.96程度で1にはならない。これは、



(1) 規則波の K_T ・ K_R



(2) 不規則波の K_T ・ K_R



(3) ΔE

図-5 H/L と消波効果の関係

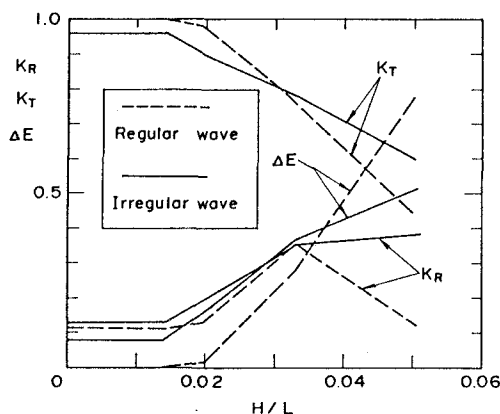


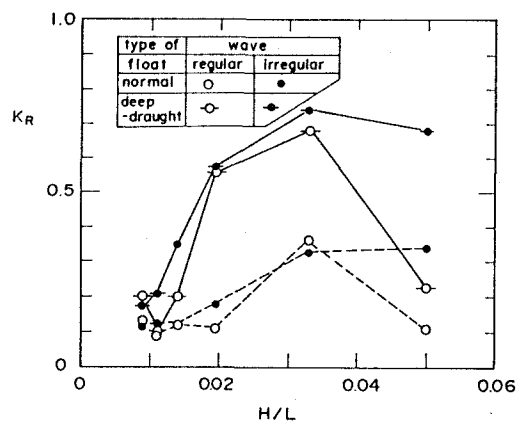
図-6 柔構造浮体の消波効果

柔構造浮体の場合には浮体自体が波と追従して波面と同じ運動をするので波のエネルギーが浮体運動によって減衰されることはない。すなわち、浮体前面の反射および波高減衰によって波の透過するエネルギー成分が定まればそのまま透過波となって浮体後方へ伝搬する。そのために、浮体幅が大きくなっても浮体内部で波のエネルギーが減衰することはないので浮体幅が変化しても K_T は変化しない。ただし、浮体の変形は曲げ剛性 $E I$ に関係する。本浮体の場合には曲げ剛性が小さく波とはほぼ完全に追従する運動を示したけれども、曲げ剛性が大きくなると、ある程度浮体の運動が拘束され、さらに曲げ剛性が大きくなると浮体は剛構造として機能し、 B によって K_T は変化するようになるものと推測される。したがって、今後は、浮体の曲げ剛性がどの程度になれば浮体幅が K_T などに大きく影響してくるかなどを検討しなければならない。

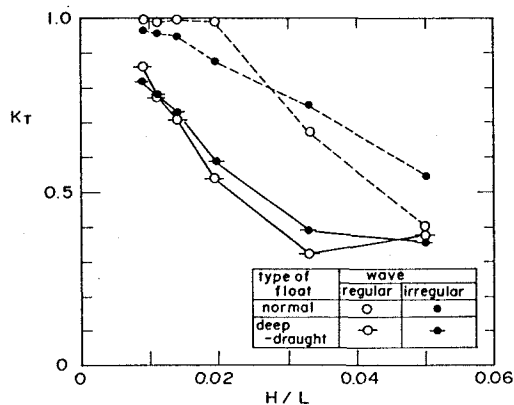
4. 深吃水型フロートによる波高低減効果

本浮体のように、曲げ剛性が小さく波に追従した運動をする柔構造を持つ場合は、浮体の波高低減効果は浮体幅に関係しない。したがって、第1列のフロート形状だけを変化させることによって、波高低減効果を高め消波堤としての機能を高めることができる可能性がある。ここでは、フロートの吃水を深くした場合の波高低減効果について調べた。本実験では、図-1の平面図において、最も右側と最も左側、すなわち外側の列のフロートの吃水を 24cm (現地240cm) とした '深吃水型' フロートを検討した。ただし、同一材料の時には発砲スチロールの高さを大きくしただけでは吃水は深くならず、模型では、

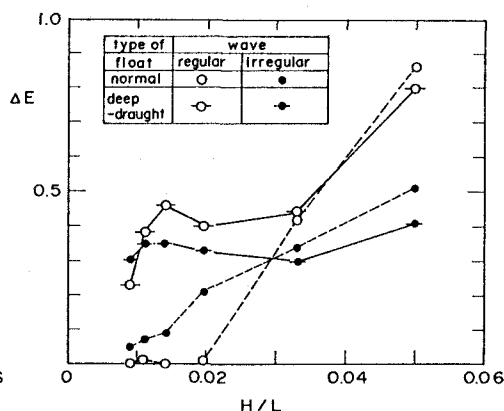
フロート上部に鉛製の重りをおいて浮体の重さを局所的に従来の型より重くしている。図-7は深吃水型フロートを用いた場合の K_T 、 K_R および ΔE を調べたもので、図中 'normal' は従来の吃水が浅いフロートを用いた



(1) 反射率



(2) 透過率



(3) エネルギー逸散率

図-7 深吃水型フロートの効果

ケースであることを示し、' deep draght' が深吃水型フロートを用いた浮体であることを示す。堤体幅は 10m である。(1) の KR を見ると、フロートの吃水が変化しても KR が極大となる H/L は 0.033 で変化しない。しかし、深吃水型を用いると、KR は大きくなり極大値の時は 0.7 程度になる。(2) の KT は深吃水型の場合にも H/L が大きくなると KT は減少する。しかし、0.3 程度になると一定値となりそれ以上は小さくならない。したがって、 H/L が 0.05 程度になると、フロートの吃水に関わらず KT は一定で 0.4 程度になる。 H/L が 0.04 より小さくなり、従来型フロートでは KT が 0.7 以上になる場合に深吃水型フロートを用いると効果が大きい。(3) は ΔE を比較したものである。図より、 H/L が 0.04 より小さい場合には従来型フロートの ΔE が小さく、深吃水型を用いる効果がある。 H/L が 0.04 以上になると、従来形の ΔE も大きくなり深吃水型とほとんど違わない。 H/L が大きい、すなわち周期が短い場合には、波による水粒子の運動は水面に近い浅い部分だけで生じ、従来形の吃水の小さいフロートを用いても消波効果を上げることができる。周期が長い場合には、水粒子の運動する範囲は深いところまで達するので、ある程度吃水の深いフロートを用いないと消波効果を上げることができない。

5. あとがき

本実験では、小型船舶を係留するために用いられている柔構造浮体の消波機能を模型実験によって調べた。その結果、(1) 柔構造浮体の反射率・透過率は堤体幅によらず波形勾配に関係する。波形勾配が大きくなると、透過率は減少し、反射率は大きくなる。(2) 波形勾配が小さいときは第 1 列目のフロートの吃水を大きくすることによって消波効果を高めることができる、等が明かとなった。今後はボールに作用する水平力についても検討を行い、波力低減効果について調査を進める予定である。

本模型実験は、沿岸開発技術研究センターからの委託で行ったもので、柔構造浮体の材質および構造については(株)マリーナ ベンチャーズ ジャパン から資料を提供していただいた。関係者の皆様に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 鶴飼恵三・日野幹雄(1971)；水面上の弾性板の波による振動、Technical Report, No.10, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, pp.213-223.
- 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰(1970)；水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究(2)、第 17 回海岸工学講演会論文集、pp.97-106.
- 小島治幸・井島武士・吉田明德(1990)；没水平板の消波特性と波分裂による波浪制御効果、第 37 回海岸工学講演会論文集、pp.594-598.
- 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、港湾技研資料, No.248, 24p.
- 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.
- 平口博弘・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.26-30.