

オフショアマリーナの実験的研究

東海大学海洋学部 学生会員 上羽 譲司
東海大学海洋学部 正会員 長崎 作治
鶴田辺製作所 正会員 石川 和男

1. はじめに

海洋レクリエーションは、国民の生活水準の向上及び労働時間の短縮などによる余暇志向の高まりの中で、海水浴、釣り、海上遊覧、海中展望塔などの鑑賞型のレクリエーションに加え、ヨット、モーターボート、ダイビング、サーフィンなどのマリンスポーツ型など多種多様なレクリエーションが盛になってきている。特に、このスポーツ型のレクリエーションについては、FRPを素材としたプレジャーボートの開発等により船艇価格の低廉化が進んだため、国民各層に普及してきている。このマリンスポーツの受け皿となるのはマリーナである。マリーナは全国に約368所存在するが、各ボートの増加に伴い現在のマリーナは必ずしも需要を満たしているとは言えず、現に各地で放置艇の問題がクローズアップされている。この様な背景を受け各地でマリーナを中心とする海洋開発が高まりを見せている。しかし、マリーナの立地条件を満たす場所である入江、河川などの静穏な海域は、昔から漁業活動により占有されており、マリーナとの共存はしにくく、海面利用の調整は困難となっている。そこで従来の様に気象、海象の安定した海岸、入江、港内にマリーナを建設するのではなく、また、マリーナを中心として鑑賞型のレクリエーションとスポーツ型のレクリエーションを備えたオフショアマリーナを考案し、各波浪条件下に対する構造体の浮遊状態での運動特性、構造体の内面係留域に及ぼす波浪の影響について、二つの基礎的な実験を行ったのでここに報告する。

2. オフショアマリーナの概要

オフショアマリーナを図-1～3に立面図、A-A'断面図、B-B'断面図で示す。波浪に対して十分安定するよう円筒形状(直径100m、高さ149m、吃水深80m、総重量627,500t)とし、下部のシェル(Cell)室①へ海水と砂を注排水することにより重心を低くし、安定性を高め、重力式による海底面着底状態と、重量を作用外力と釣り合わせ浮遊状態とに制御可能としている。図-2に示すよう構造体内部には、ヨット、ボートなど係留可能な海面係留域②と、海面上に吊り上げ立体的に保管する棚③を設け、係留域に45隻、棚に110隻のヨット、ボートを保管できる。なお、荒天時には可動式水門④を閉じて船舶を安全に保管する。この上部に図-3に示すよう潜水訓練プール⑤、公認スイミングプール⑥、海水淡水化施設⑦等を設けている。さらにこの上部には、200人用のホテル、レストラン、展望台等を設けている。この様に一つの円筒形構造体の内外部に、各種施設を一体に形成することにより、海洋性レクリエーション全体を満たす総合リゾートマリーナを計画するものである。

オフショアマリーナの設計条件を一例として以下に示す。

- (1) 位置: H島東端 1.4Km 沖
- (2) 水深: 82m (3) 地盤: 砂質
- (4) 潮位差: 高高潮面 H_{HWL}+1.924m, 低潮面 L_{WL}-0.042m, 潮位差 1.966m
- (5) 潮流: 2ノット(1m/sec) (6) 風速: 60m/sec
- (7) 波浪: 波向 NNE, 波高 有義波高 $H_{1/3}$ =3.6m, 周期 T=10sec, 最大設計波高 $H_{max}=1.86 \times 3.6m=6.7m$
- (8) 地震: 建築基準法による震度=0.2+(149m-16m)/4m×0.01=0.53
: 港湾構造物設計基準による震度=0.15(地域別)×1.2(地盤種別)×1.5(重要度)=0.25
- (9) 重心, 浮心, 傾心: キール上(構造体底面) 35m, 40m, 48m

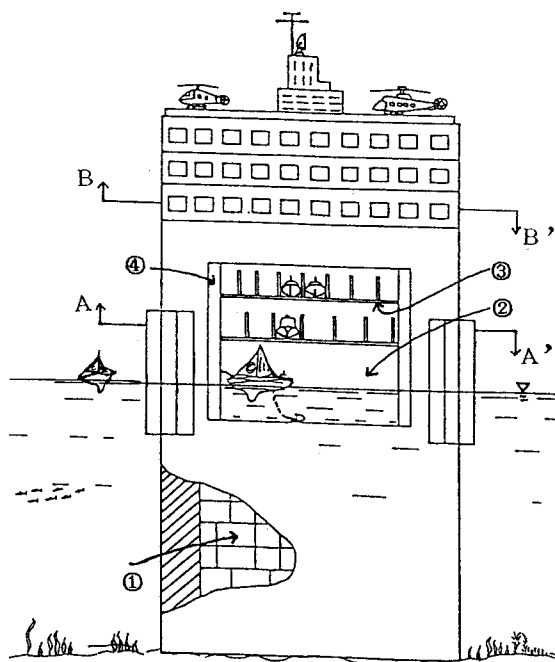


図-1 オフショアマリーナ立面図

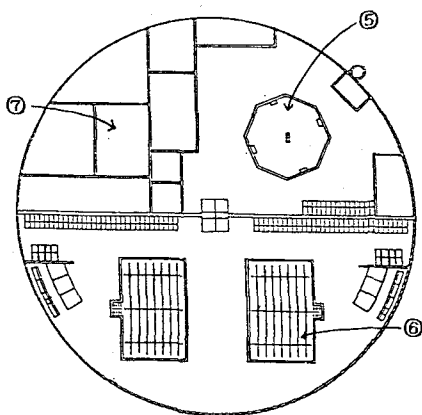


図-2 A-A'断面図

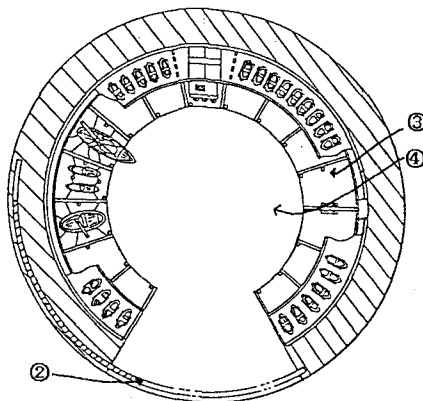


図-3 B-B'断面図

3. 波漂流力に関する実験

3.1 実験概要

オフショアマリーナは、着底状態と浮遊状態とに制御可能としている。このため海底面上2m位置（吃水深80m）における浮遊状態とし、縮尺1/100で、水槽幅23m、長さ22mを幅5.0m、長さ17.4mに仕切り、水路の中央部に構造体を設置し、表-1に示す各種の波浪条件下に対する運動特性（ヒービング、サージング、ピッチング）を、三成度成分測定器により求めるとともに波漂流力も求めた。なお可動式水門は閉じた状態とした。

表-1 波浪条件

現 場	吃水82.0m
周 期 (sec)	波 長 (m)
8.0	99.82
10.0	155.56
12.0	220.45
14.0	288.91
16.0	357.07
18.0	423.71
20.0	488.76
波	6.0m
	6.7m
高	10.0m

3.2 波漂流力の測定

図-4に示すように、三成度成分測定器により測定されたヒービングとサージングとの位相のずれ ϵ' を読み取り、これをレコーダーのチャートスピードで割り位相の時間的ずれ ϵ_1 を求める。

これを次式に代入し位相差 ϵ を求める。

$$\epsilon = 2\pi \epsilon_1 / T \quad (1)$$

この位相差を次式に代入して波漂流力係数Cを求める。

$$C = \cos^2 \epsilon \quad (2)$$

波漂流力係数Cを次式に代入し波漂流力Fを求める。

$$F = n \rho g C (H/2)^2 D \quad (3)$$

ρ : 流体(水)の密度 H : 入射波高 D : 受圧幅(直径)

$n = 1/2(1 + 2\kappa h / \sinh 2\kappa h)$ κ : 波数 h : 水深 T : 周期

3.3 実験結果および考察

各運動特性について、図-5～7に示す。ヒービングは D/L （直径と波長の比）0.50までは、減少の傾向を示すが、 $D/L=0.50$ 以上は増加の傾向を示す。それに対しサージングとピッチングは D/L の増加に伴い減少の傾向を示す。しかし $D/L=0.10$ では、ピッチングは波高6.0m、サージングは3種類の波高とも $D/L=0.12$ より低い値を示した。これは入射波の周期が $T=1.2\text{sec}$ 以上の時は、三成分とも入射波の周期に影響を受けた周期で各運動をする。 $T=1.0\text{sec}$ 以下は、サージング、ピッチングとも $T \geq 1.2\text{sec}$ の時と同一の運動をするが、特にヒービングは固有振動周期に近い周期で運動したことによるものである。

また、ヒービングとピッチングはサージングに比べ $D/L=0.12$ 以上は波高による影響を大きく受ける。

各運動は最大設計波高6.7mの場合、周期20sec付近ではヒービング2.3m、サージング6.0m、ピッチング4.5°となり設計周期10secではヒービング0.6m、サージング1.4m、ピッチング0.4°とかなり小さいものとなった。

次に図-8に示す波漂流力は、各波高とも D/L の増加に伴い波漂流力は減少する。最大設計波高6.7m、 $D/L=0.2$ すなわち周期20secの場合、420tとなり $D/L=0.64$ すなわち周期10secの場合、170tとなった。波漂流

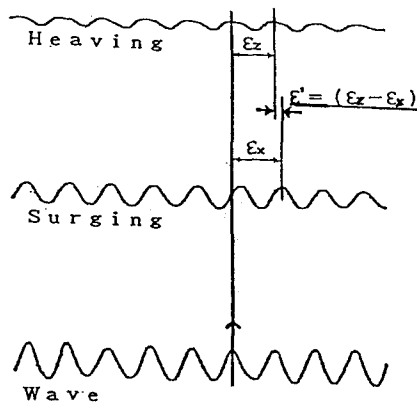


図-4 波形のずれの読み取り

力はヒービングとピッチングと入射波の周期が同調するとき極大値となるが、この構造体の固有振動周期は、ヒービング35sec,ピッチング31sec であり、入射波の周期に比べかなり大きな値となっている。つまり同調周期を避けて設計されている。

以上のように、この構造体は吃水と水深の比が1に非常に近いため、三成分の運動と波漂流力はかなり小さくなっており、実用性は高いにあると思われ、さらに海底面にバラスト調整により重力式で着底させればさらに安定性は増加することとなる。

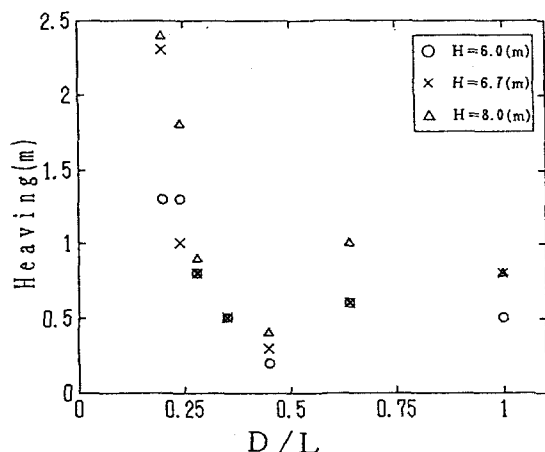


図-5 ヒービングとD/Lの関係

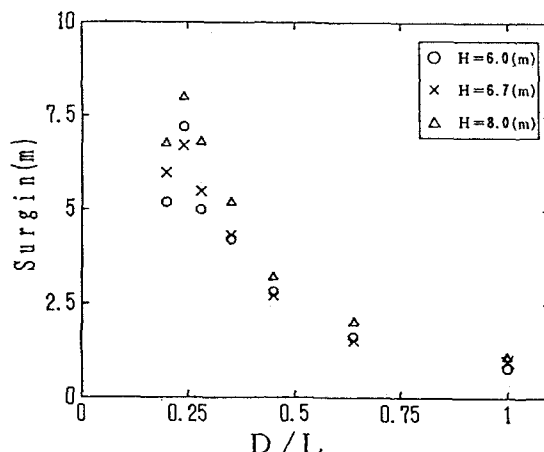


図-6 サージングとD/Lの関係

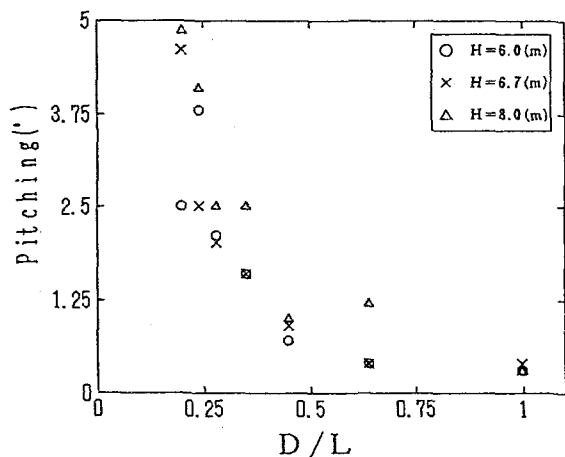


図-7 ピッチングとD/Lの関係

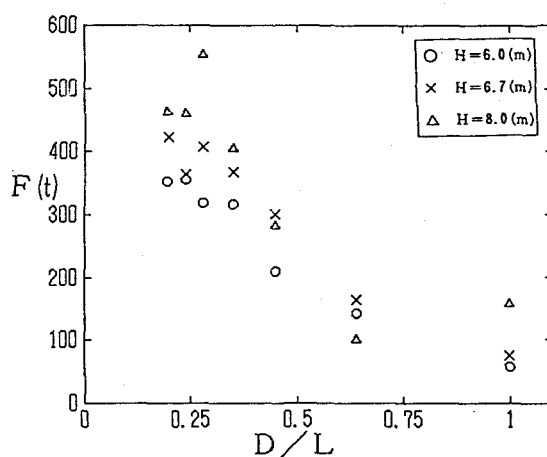


図-8 波漂流力FとD/Lの関係

4. 内面係留域に関する実験

4-1 実験概要

オフショアマリーナは内面係留域を持ち、ここにヨット、ボートなどを海面に係留でき、荒天時には水門を閉じ船舶を安全に保管することができる。このためここでは、前節で用いたモデルを改造し、同水槽で、45°, 60°, 90°, 120°に開閉できる水門を設け、波浪に対し構造体が動かないように海底に着底させ、水門が開いた状態において、最大設計波高6.7mについて各周期での内面係留域に及ぼす波浪の影響について、水位増減率 M_b (各波高計の最大水位高と入射波振幅の2倍の比) を求めた。

この水位増減率 M_b を求めるにあたり、内面係留域に4本と、水門の入り口付近に1本と、入射波高を測定するため構造体からの反射波を受けにくい位置に1本、計7本の水位波高計を図-9に示すように配置した。

なお、水門の開閉位置は設計では入射波の進行方向に

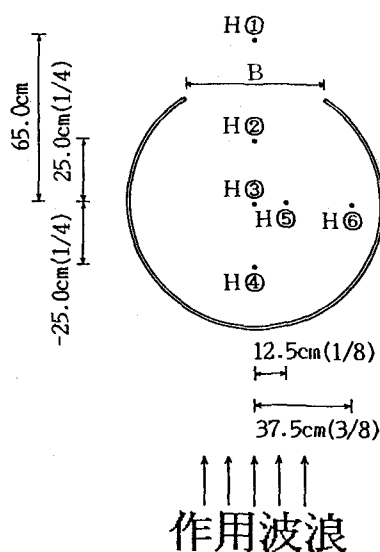


図-9 波高計の配置図

対し反対側に設けることとしているため、実験でも同じ状態とし、また内面係留域の水深は、一般船舶でも入出港できるよう、10mとした。

各実験条件を表-2に示す。

4. 2 実験結果および考察

a. 水門角度における各波高計位置の水位増減率 M_D

図-10~13は横軸に R/L (構造体半径 R と波長 L の比)縦軸に水位増減率 M_D (各波高計の最大水位高と入射波振幅の2倍との比)を取り、各々の4種類の水門角度における各々の波高計位置別に、水位増減率 M_D を示したものである。

図-10は水門角度 45° 、 $R/L \geq 0.23$ の場合、水位増減率 M_D は0.5程度となっている。波高計 $H①$ は、入射波の進行方向の反対側に水門があるため、波浪が構造体の側面を回り込み、水門入り口での水位増減高を測定するために置かれたものである。 $R/L = 0.17$ の場合、 $H①$ の水位増減率 M_D に比べ $H②$ と $H③$ が高い値を示している。また $H⑤$ は全ての R/L に対して $H①$ より低い値を示している。

図-11は水門角度 60° 、 $R/L = 0.12$ の場合以外は、水位増減率 M_D は1以下となっている。特に $R/L = 0.17$ の場合 45° の場合と同じように、 $H②$ と $H④$ が $H①$ に比べ高い値を示している。これは $R/L = 0.32$ の場合も同じことが言える。 $H⑤$ は全ての R/L に対して $H①$ より低い値を示している。 $H③$ は $H①$ より低いか同一の値を示す。

図-12は水門角度 90° 、 $R/L \geq 0.23$ の場合、水位増減率 M_D は1以下となり、 $R/L = 0.12$ 以外は $H①$ に対し水位増減率 M_D は高い値を示す位置があるが、これは $H②$ か $H④$ である。それに対し全ての R/L に対して $H③$ 、 $H④$ 、 $H⑤$ は $H①$ により低い値を示している。

図-13は水門角度 120° 、相対的にこれより小さい水門角度より高く、特に $H①$ 、 $H⑤$ 、 $H⑥$ が非常に高い。 $R/L = 0.12$ 、 0.32 、 0.50 の場合、 $H④$ は $H①$ に比べ特に高い値を示している。 $H③$ と $H④$ は全ての R/L に対して $H①$ より低い値を示している。

以上のように全ての水門角度に対して $H④$ は、ある R/L の時に $H①$ よりも増幅されやすいと言え、 $H②$ もかなり増幅されやすい位置であると言える。これに対し $H④$ 、 $H⑤$ は R/L に関係なく $H①$ より減衰する位置であると言える。これらのことは、水門から入った波浪(水位増減高)により構造体内部の水面が強制振動された時に、内部水面が振動を起こし、 $H②$ と $H④$ が振動の腹(水位増減が最も大きい点)と成りやすい。この振動については一般に円形湖や円形港湾などで自由振動する場合は、振動は原点に対象となり節線は円となり、また湾外からの波浪による強制振動の場合は、波浪は湾の海岸線に垂直な方向から来るとしており、今回の条件とは異なり比較しがたい。

次に各水門角度に対する $H①$ に注目すると、水門角度

表-2 各実験条件

水門開閉角度($^\circ$)	45	60	90	120
水門長さ B (m)	35.7	50.0	70.7	86.6
波高 (m)	6.7	水深 (m)	80.0	
周期 (sec)	8.0~20.0まで2secおきに7種類			
内面係留域の水深 (m)	10.0			

ただし値はすべて現場値

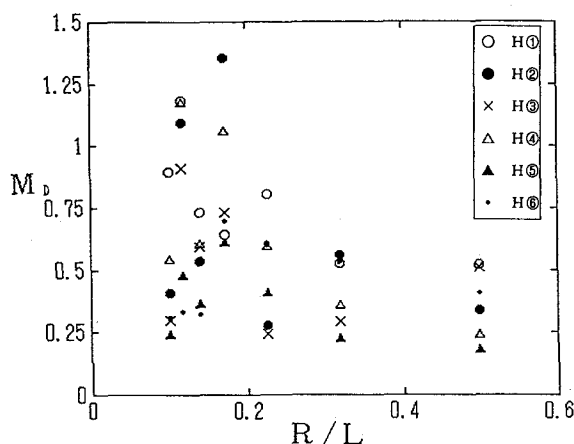


図-10 水門角度 45° M_D と R/L の関係

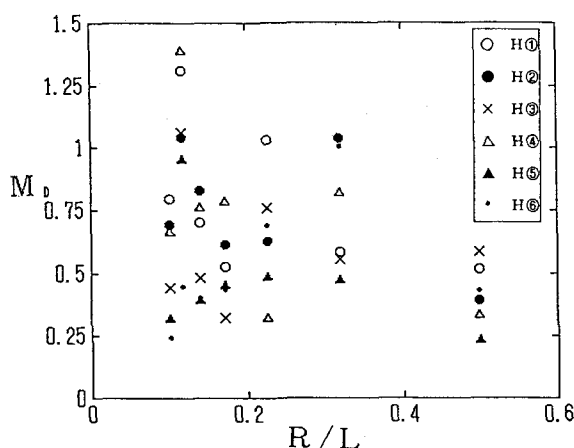


図-11 水門角度 60° M_D と R/L の関係

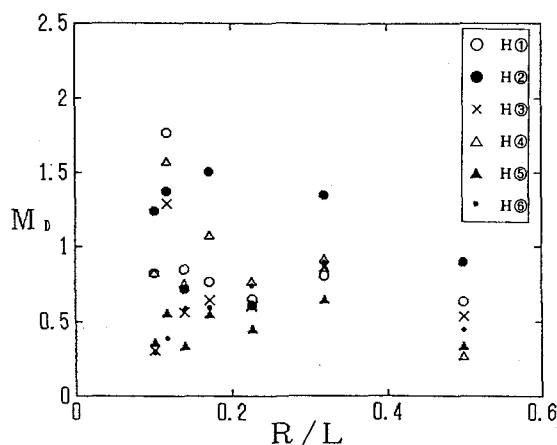


図-12 水門角度 90° M_D と R/L の関係

45°～90°までは水位増減率 M_b は同一値をとることが多い。これは構造体側面を回り込み水門に入射する水位増減率 M_b は、水門角度120°以外は水門角度にさほど関係なく、 R/L に大きく関係する。この R/L と水位増減率 M_b の関係については、 R/L が大きくなるにつれ水位増減率 M_b は低くなっていくが、 $R/L=0.12$ より $R/L=0.10$ の方が低い値を示している。

b. 構造体中心部が最大上昇高を示した場合の水門に垂直線方向の水位増減率 M_1

図-14～20は構造体中心部の波高計H③が最大水位上昇高（水面からの上昇）の場合に、H①(65cm), H②(25cm), H④(-25cm)がどのように水位変化するかをした。横軸に内面係留域の中心を0cmとした各位置までの距離 X 、縦軸に各位置での水位増減率 M_1 を示している。ただし、水位増減率 M_1 は各波高計位置での水面を基準0とし、上昇高、または下降高と入射振幅との比である。

図-14は $R/L=0.50$ の場合であり、各水門角度とも中心位置のH③が最大水位上昇高を示したときは、他の3位置は常にそれより低い値を示す傾向にある。

図-15は $R/L=0.32$ の場合であり、各水門角度とも図-14($R/L=0.5$)に比べH②の位置が高く、H③との差が少なくなる傾向にある。

図-16は $R/L=0.23$ の場合であり、各水門角度とも図-14($R/L=0.5$)と同一傾向を示すが、水門角度120°は、H③と他の位置との差が大きくなっている。

図-17は $R/L=0.17$ の場合であり、水門角度120°はH①でかなり高い値を示すが、他の水門角度は図-14($R/L=0.50$)と同一傾向を示す。

図-18は $R/L=0.14$ の場合であり、各水門角度とも図-17($R/L=0.17$)と同一傾向を示し、水門角度120°は X に対し同一値の水位増減率 M_1 を示す。

図-19は $R/L=0.12$ の場合であり、各水門角度とも $R/L=0.50, 0.23$ と同一傾向を示す。

図-20は $R/L=0.10$ の場合であり、水門角度45°と60°は同一の傾向を示し、90°の場合はH③よりH④の方が高い値を示す。120°は図-18($R/L=0.14$)と同一傾向を示し、全ての X に対し同値の水位増減率 M_1 を示す。

以上のように各水門角度とも中心が最大上昇した場合は、他の位置はほとんどがH③よりも低い値を示していることが分かる。45°と60°は全体的に同様の傾向を示し、120°は R/L により大きく傾向が変わる。これらのことは、水門から入り込み構造体内部側面に当り反射した波浪と、新たに入り込む波浪とが重なり合い、ある周期の振動が構造体内部水面域で起こることによるものである。

a, b二つの見方から、内面係留域に及ぼす波浪の影響について考えてきたが、実際、水門が開いた状態で、この内面係留域に最大設計波高6.7mの波浪が作用した場合、船舶を安全に係留しておくことは無理であるため、水門を閉じなければならない。しかし、円形湖や円形港

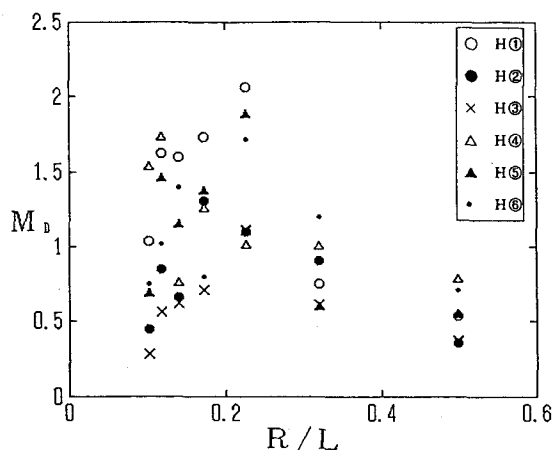


図-13 水門角度120° M_b と R/L の関係

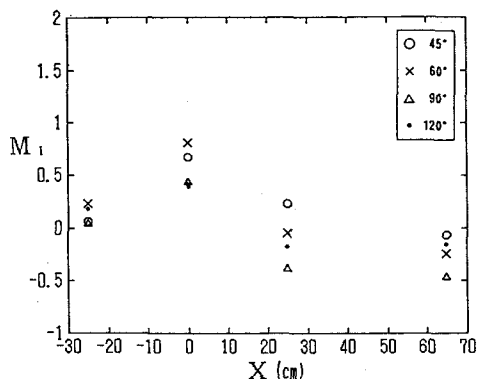


図-14 波高計位置と M_1 の関係($R/L=0.50$)

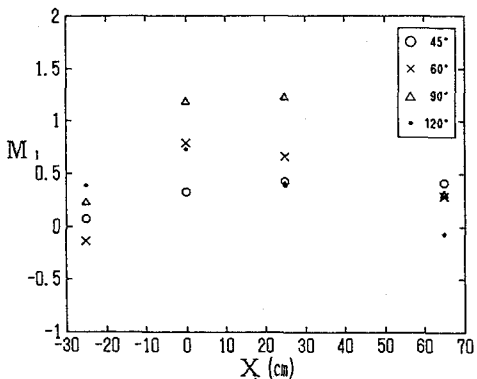


図-15 波高計位置と M_1 の関係($R/L=0.32$)

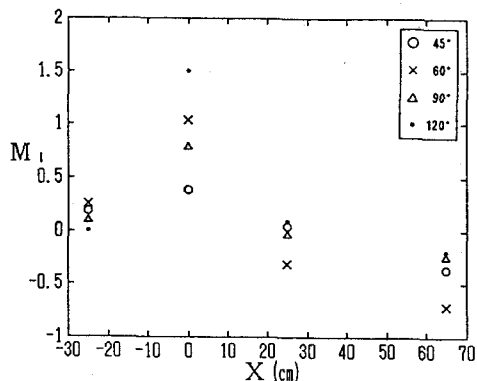


図-16 波高計位置と M_1 の関係($R/L=0.23$)

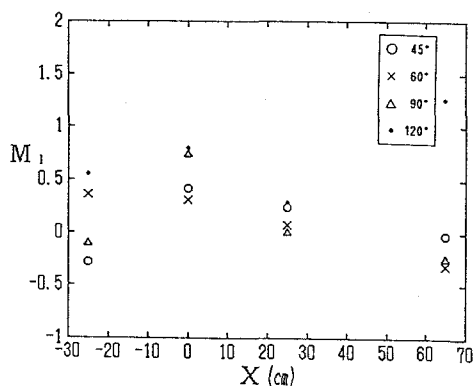


図-17 波高計位置と M_1 の関係 ($R/L=0.17$)

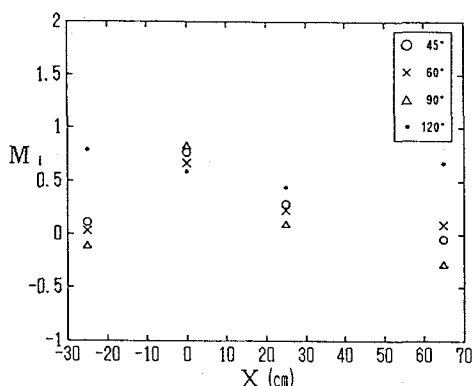


図-18 波高計位置と M_1 の関係 ($R/L=0.14$)

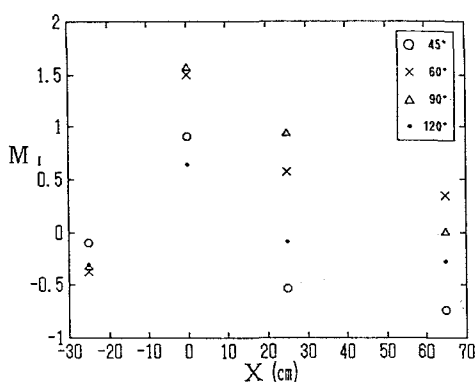


図-19 波高計位置と M_1 の関係 ($R/L=0.12$)

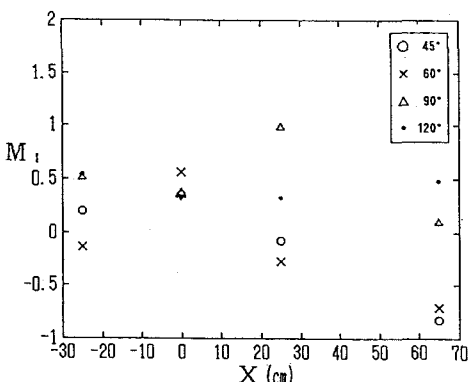


図-20 波高計位置と M_1 の関係 ($R/L=0.10$)

湾の場合の自由振動や、外海からの波浪による強制振動については、波高に影響を受けないとされている³⁾ため、この実験より与えられた水位増減率 M_D 、 M_1 は、入射振幅がその2倍との比をとっているため、各波高に対する内面係留域の水面の上昇下降を確認するには、必要なものとなるはずである。

5. まとめ

オフショアマリーナについて各波浪条件に対し、構造体が浮遊状態での運動特性に関してと、構造体の内面係留に及ぼす影響に関してと二つの実験を行った。その結果をまとめてみると、

・運動特性と波漂流力について

- (1) 三成分の運動は周期が大きくなるにつれ、揺れの大きさが増加し、その割合も大きくなる。
- (2) 波漂流力 F も三成分の運動と同じく、周期が大きくなるにつれ増加する。
- (3) 吃水と水深の比が1に非常に近いため、三成分の運動と波漂流力はかなり小さいものとなった。

今後、吃水が深い場合についての理論的な解析が必要とされ、最終的には海底面を考慮し、軟着底状態での運動特性や、波力の解析などを行っていく必要がある。

・内面係留域について

- (1) 水門角度 $45^\circ \sim 90^\circ$ までは水門角度により、内面係留域に及ぼす影響はさほど関係ない。
- (2) 内面係留域内で中心付近が、構造体内部側面からの反射波と外からの入射波とにより増幅されやすい。
- (3) 内面係留域の中心位置が最大上昇量を示す時は、他の位置はほとんどの場合それより低い値を示す。
- (4) 水門角度が小さくなるにつれ、水門両端で大きく発生する渦が水門全面に設置した波高計に影響する。

今後、さらに内面係留域に水位増減率を測定する位置を多数設け実験を行い、理論的解明を行う一方さらに、水門に入射する波浪の方向による影響についても研究を進めていかなければならない。

[参考文献]

- 1) 長崎作治; 海洋重力型コンクリート構造物の設計と施工, 東海大学出版会発行, 1977年11月
- 2) 長崎作治; ヨットに関するオフショアマリーナと立体的保管(駐艇)施設に関する考察, Marine, 朝日新聞社発行, PP.85~PP.95, 1988年11月
- 3) 岩垣雄一, 榎木亨; 海岸工学, 共立出版株式会社発行, 1979年4月