

マリーナの静穏度に及ぼすスロープの影響 に関する数値的検討

Neumerical Investigation of the Effect of Slope on Tranquility of Marina

森田修二*・出口一郎**

Shuji.Morita and Ichiro.Deguchi

Number of people enjoying sailing and cruising is increasing. Accordingly, number of pleasure boats, especially illegally moored boats, is increasing. To prepare space for mooring of those boats, various marinas or yacht harbors are planned to be constructed. In such planning, full investigation of the harbor tranquility is hardly done and rough waves often cause various troubles in exsiting marinas. Here, the effect of slope of the marina on the harbor tranquility is investigated through numerical and physical model experiment and a procedure for determining the best position of the slope is proposed.

Keywords: (Slope, Marina, Harbor tranquility)

1. まえがき

近年、ヨット、モーターボートをはじめとする海洋レジャーが急速にかつ広範に普及し始め、特に不法係留のプレジャーボートの数の増加は社会問題になっている。今後さらに増え続けると予想されるプレジャーボートに対応するために、数多くのマリーナ、ヨットハーバーの建設が予定されている。従来、このようなマリーナの建設計画においては、その静穏度あるいは係留される予定のプレジャーボートの動揺問題について詳細な検討が行われることは希であり、通常は既存資料に基づいた経験的な手法によって行われる。その結果、港内の静穏度が保たれず係船上の問題を抱えているマリーナも少なくない。マリーナの静穏度を確保する最も効果的な方法は、外郭施設によって来襲波を少しでも多く遮蔽することである。しかし、遮蔽すればするほど出入港に不便をきたす。一方、通常のマリーナはディングあるいはその他の陸置き艇の上下架のためのスロープが設置される。その勾配は、通常1/10程度であり、反射率は他の護岸や岸壁部よりもはるかに小さい。本研究の目的は、このスロープの消波効果に着目し、マリーナの静穏度を可能な限り高めることのできる最適な位置について、マリーナに侵入した波浪変形に関する非定常数値解析を行うことによって検討を加えることである。本論文では、マリーナのモデルを想定し、スロープの無い場合とスロープの配置が効果的と思われる場合を含め幾つかの配置について、非定常の数値解析によって港内の静穏度の評価を行った。また、実験による検証も行った。

2. 解析モデルと解析手法

図-1に解析を行ったマリーナのモデルを示した。マリーナの規模は、汀線方向に120m、岸沖方向に60m、港口幅は25mである。スロープの幅は15mとし、図中に示すように5カ所の場合について港内の静穏度に及ぼす影響を検討した。数値計算の条件は以下の通りである。

周期	$T = 5 \text{ 秒}, 3 \text{ 秒}$
水深	3 m
波高	30 cm
波向	図中の2種類
スロープの反射率	0.2
その他の反射率	1.
空間差分間隔	$\Delta x = 50 \text{ cm}, \Delta y = 50 \text{ cm}$
時間差分間隔	$\Delta t = T / 100 \text{ 秒}$

解析領域 岸沖方向150m、沿岸方向200m

計算時間は、港内に約10波入射するまでとした。港内

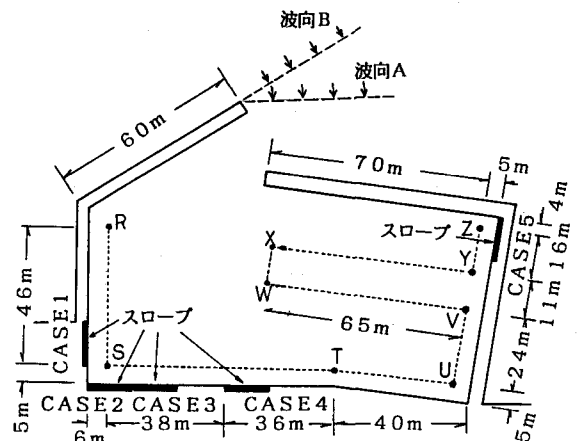


図-1 マリーナのモデル

* 正会員 榎奥村組・電算センター (545 大阪市阿倍野区松崎町2丁目2番2号)

** 正会員 大阪大学工学部土木工学科

の静穏度は、係留地点を想定した図中の点線部分の約120の代表地点について評価を行った。

スロープの反射率については、一様勾配斜面に対する反射率としてヒーリーの方法により図-2⁽¹⁾のように示される。本解析の波形勾配は、周期5秒の場合で0.012、3秒の場合で0.024である。スロープの勾配を10%とすると反射率は5~10%になる。通常のマリーナのスロープは、のり先がステップになっており、一様勾配斜面の場合より反射率が大きくなっている。ここでは、スロープの効果を過大評価することがないように反射率を20%として検討を行った。スロープの配置は、港内で波高が高くなる位置が効果的と予想される。スロープの無い場合の解析結果から、港内で比較的に波高の大きい4カ所（CASE-1~CASE-4）を設定した。また、参考のために波高の小さい位置についても1カ所（CASE-5）だけ設定した。

次に解析手法であるが、本解析の条件としては、波の回折と反射が扱えることであり、スロープの反射率を考慮する必要がある。ここでは、次式に示した規則波に対する非定常の緩勾配方程式に差分法による数値解析を行った。ここで、 Q は線流量、 c は波速、 ζ は水面変動量、 k は波数、 h は水深である。

$$\dot{Q} + 1/n \cdot c^2 \nabla(n\zeta) = 0 \quad (1)$$

$$\dot{\zeta} + \nabla \cdot Q = 0 \quad (2)$$

$$n = 1/2 \cdot (1 + 2kh/\sinh 2kh) \quad (3)$$

本解析では、実際のマリーナの波高を再現することはできないが、港内の静穏度に対するスロープの効果を評価することは可能である。また、非定常解析を行うことで、波高の時間的な推移から波の反射状況を確認することができる。ここで、非定常解析を行う際に問題となるのは、境界条件の処理方法である。特に、港内におけるスロープの反射境界の処理に工夫が必要である。本解析では、任意反射率境界における波の入射角を設定するために、港口付近の構造物による波の回折を数値解析によって求めた。この方法では、港内の反射波に対する任意反射率境界の処理はできないが、スロープの幅は相対的には小さなものであり、非定常解析のある限られた計算時間の範囲では問題はないと考えられる。また、非定常解析における計算時間の制約を考慮して、参考のために定常解析による検討も行った。定常解析には、規則波に対してグリーン関数を用いたLee⁽²⁾の解析手法に任意反射率境界の評価を加えた数値解析法を適用した。

3. 解析結果と考察

図-3には、 $T=5$ 秒で波向Aの代表地点における波高を示したものである。図中の波高は、港内に約10波入射（ $t=70$ 秒）した時点での波高であり、入射波高で無次元化した値を示している。横軸はR点から測線上の延長距離を示している。図-3の上から順に、CASE-1~CASE-5の計算結果（太線）にスロープの無い場合の計算結果（細線）を合わせて示している。

スロープのない場合の波高を見ると、多くの地点で入射波高の50%以下になっている。港内の多重反射により波高のばらつきは見られるが、港内で最初に反射波が生じると考えられる地点（s点付近）では比較的に波高が大きく、入射波の80%を越える地点も存在する。したがって、この領域にスロープを設置すれば効果的になると予想される。

CASE-1~CASE-4の結果を見ると、スロープの無い場合の波高がスロープのある場合に比べて小さくなっている部分もあるが、全体的にはスロープの効果により波高が低下しているのがわかる。特に波高が大きい部分でより小さくなっている。スロープ付近では当然波高の低下は大きい、その他の波高の大きい部分（Y点付近）でも波高の低下が比較的に大きくなっているのがわかる。

CASE-2、CASE-4の結果を見ると、全体的にはCASE-1とほぼ同様の傾向を示していると考えられる。部分的に見ると、s点の波高の低下はCASE-2の方が大きいこと、Y点付近ではCASE-2、CASE-4は波高の低下が見られないこと、等があげられる。これらの波高の相違は、反射波の進行方向と関係が深いと考えられる。CASE-2、CASE-4のスロープの反射波はY点付近よりもW、Xの方向へ進行するため、W、X付近の波高の低下が相対的に大きくなっていると考えられる。これらの結果は、港内の静穏度を評価する上では、入射波の最初の反射あるいは反射波の評価が重要であることを示唆している。

CASE-3の結果では、代表地点の中での最大波高の低下が最も大きい。CASE-3は、スロープの無い場合に波高が最大となる境界にスロープを配置したもので、代表地点の最大波高（スロープ無し）もこの境界に近い点となっている。また、スロープの無い場合との波形の位置的なずれが、他のケースに比較して大きくなっている。この

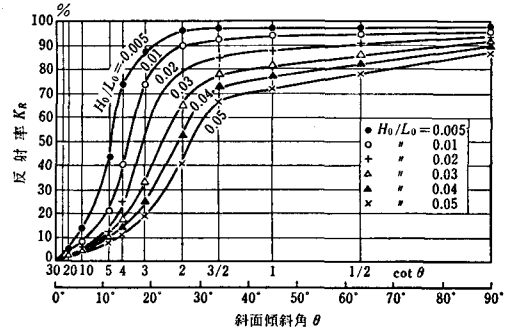


図-2 一般勾配斜面の反射率

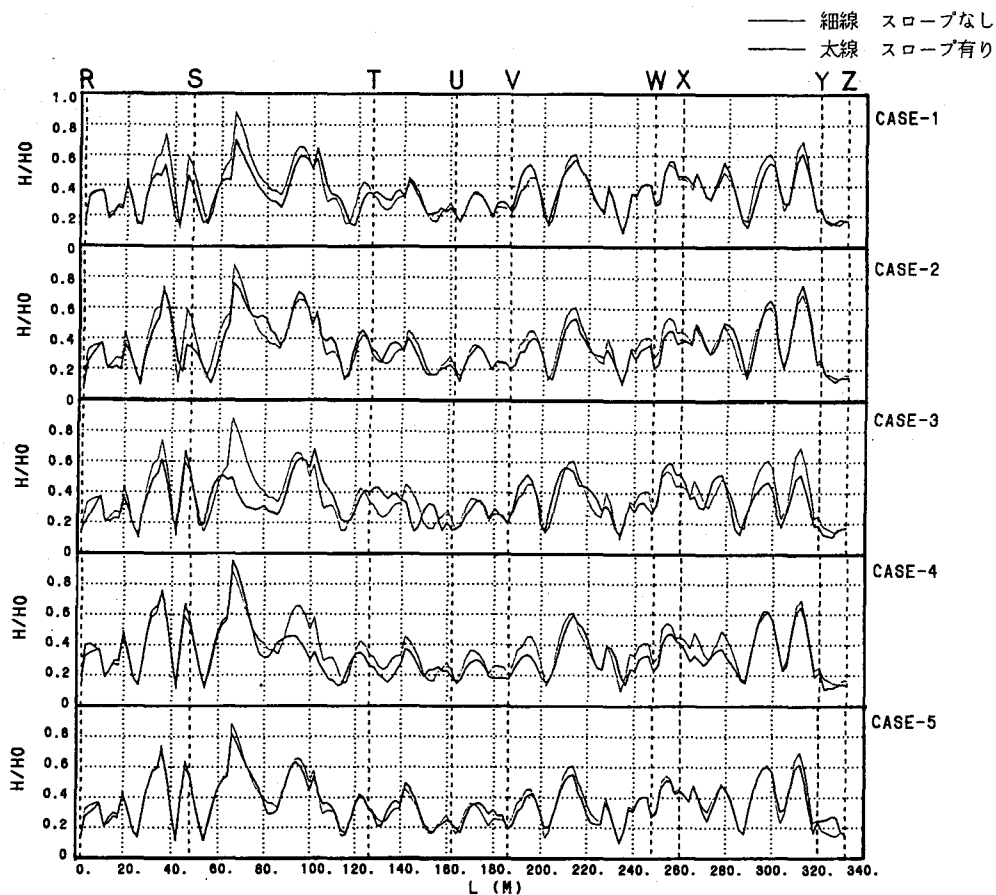


図-3 代表点の波高 (非定常解析)

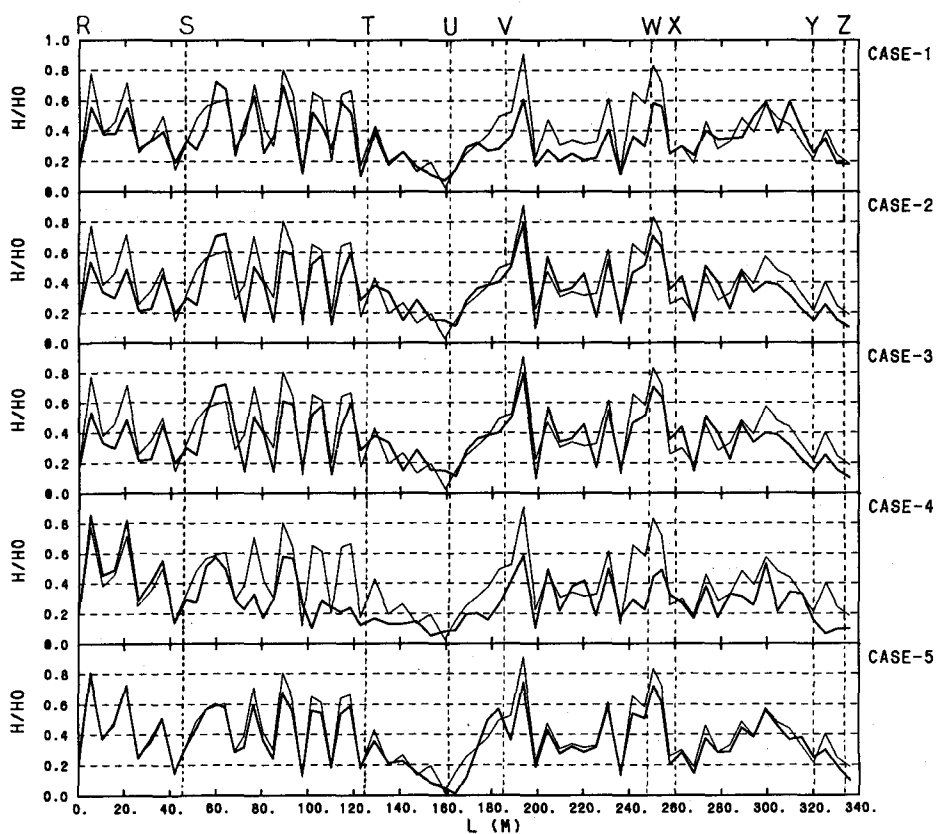


図-4 代表点の波高 (定常解析)

結果から、CASE-3の場合が最も港内の全域に影響を及ぼしていると考えられる。

CASE-5の結果を見ると、スロープによる波高の低下がかなり小さいことがわかる。他のケースではスロープの無い場合の波高が大きい境界にスロープを配置したが、CASE-5は波高の大きくない境界にスロープを配置した。したがって、スロープの効率的な配置はスロープの無い場合の結果から推測できることがわかる。

図-4には、定常解析による結果を示した。図の示し方は図-3の同様である。ただし、港内の反射率を0.9 スロープは0.2 として計算を行った。定常解析では非定常解析に比較して反射波の影響が大きくなるため、反射率を下げて比較することにした。本文には記述していないが、港内の反射率が1.0の場合の解析も計算を行った。反射率が0.9の場合と比較して波高は大きくなるが、波形は類似しており、比例的な関係にあると言える。

スロープの無い場合の結果を非定常解析と比較すると波高が大きくなる地点やT~Vの比較的静穏な領域等、全体的には良く一致していると考えられる。スロープの効果についても、非定常解析と同様の傾向が見られる。したがって、非定常解析の $t=70$ 秒の結果は、ほぼ定常解析に近い結果が得られていることがわかる。

図-5と図-6には、図-3と図-4の自乗平均波高と最大波高を示した。非定常解析については計算時間が30秒後（港内に約1波が入射）から10秒毎の結果を示している。図-5では、スロープの有無や配置に関わらず時間の経過に伴いほぼ同様に波高が増加している。非定常解析で最も波高の小さいのは、CASE-3あるいはCASE-4であるが、定常解析では、CASE-4が最も小さく、CASE-3は比較的大きい。

図-6の最大波高では共通して周期的な振動を示しているが、CASE-3は比較の変動が小さく絶対値も小さい。CASE-4は自乗平均波高は小さいが、最大波高は逆に大きくなっている。これは図-3からわかるように、CASE-4の場合はs点付近の波高の低下がほとんど見られないためである。定常解析の結果では、CASE-2の最大波高が最も小さくなっている。図-3と図-4の比較からわかるように、波高が最大になる地点が非定常解析と定常解析では異なるためである。

図-7と図-8には、波向Bの場合の自乗平均波高と最大波高を示した。図-7の自乗平均波高は、波向Aの波高の大きさや経時的な変化と大きな違いはない。時間的に初期の段階では、波高が小さくなっており、港内への波の伝播が遅れているのがわかる。波向Bは波向Aに比較して港内に波が侵入しにくいと考えられる。スロープの効果では、波向Bの場合でもCASE-3が最も波高が小さくなっている。本文では記述していないが、港内の境界において波高が最大となる地点は波向Aと同様であり、CASE-3のスロープが最も効果的であるためと考えられる。

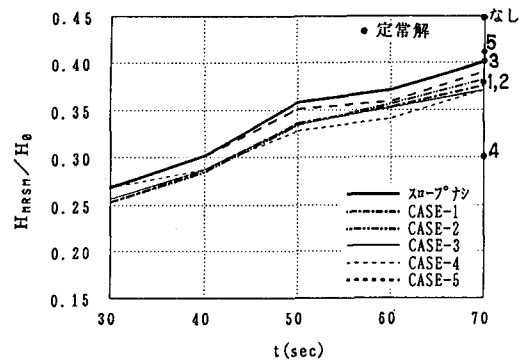


図-5 自乗平均波高（波向A）

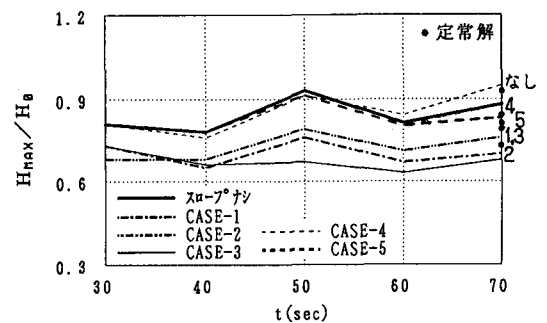


図-6 最大波高（波向A）

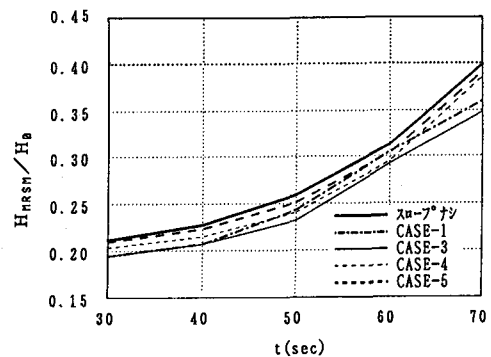


図-7 自乗平均波高（波向B）

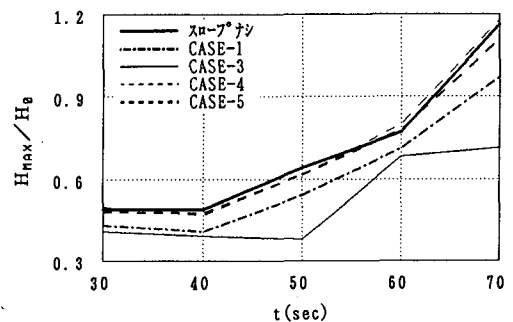


図-8 最大波高（波向B）

図一8の最大波高は波向Aと異なり、周期的な振動は見られず、経過時間とともに波高が大きくなっている。波向Bは港内に波が徐々に侵入することから波高の振動も小さくなると考えられる。時間的に初期の段階では波高が小さくなっていることやCASE-3の場合の波高が最も小さくなっているのは自乗平均波高と同様である。

図一9と図一10には、同じく周期5秒、波向Aの場合で、スロープの無い場合とCASE-3の70秒後の波高のコンター図を示した。図一9の港口から波が入射して港湾内で最初に反射して波高が大きくなっている地点にCASE-3のスロープを設置している。CASE-3のスロープの右側で波高が大きくなっている地点がCASE-4のスロープの位置である。港内で最も波高が大きいのは、CASE-3のスロープの位置とその位置からの反射波の影響と考えられる防波堤の背面である。

図一10では、波高がかなり低下しているのがわかる。最も低下しているのはスロープの位置である。また、防波堤の背面の波高も低下しており、スロープの無い場合に港内で最も波高が大きかった位置で波高の低下が見られるのがわかる。

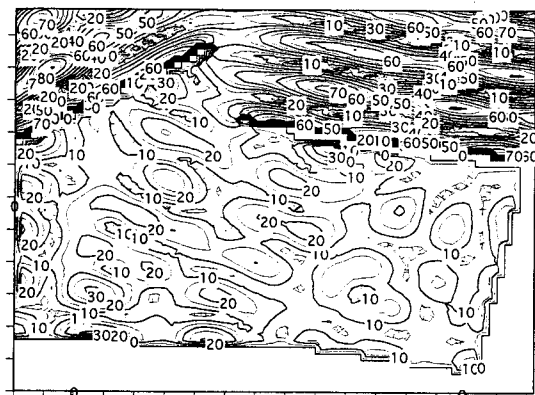
以上に述べたように、数値解析による検討結果から、港内静穏度におけるスロープの効果が確認された。スロープの配置によってもその効果に違いがあり、スロープの効果がほとんど見られない場合もある。効果的な位置は、港内で最も波高が大きくなる位置、あるいは港口から入射した波が最初に反射する位置である。本文では、非定常解析を用いて検討を行ったが、10波程度の港内への波の入射があれば、定性的には定常解析とほぼ同様の結果が得られることがわかった。また、本文には記述できなかったが、周期 $T=3$ 秒の場合には、 $T=5$ 秒と比較して、港口からの回折が変化する。港内で波高が最も大きくなる位置がCASE-4の位置になるため、CASE-4の場合が最も効果的になった。

4. 実験による検証

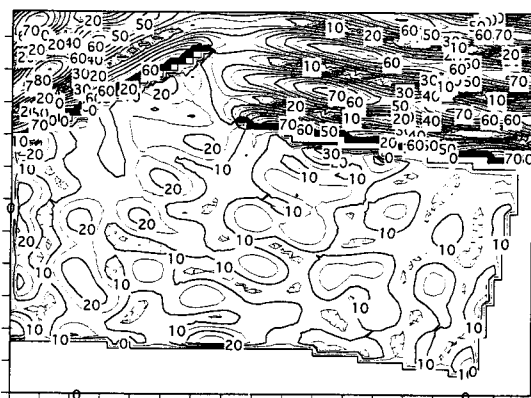
数値解析による検討結果を検証するために実験を実施した。図一11に示すように、平面水槽にマリーナの模型を設置した。実験は周期 $T=5$ 秒、3秒の場合で、計6ケースについて実験を実施した。実験の縮尺は数値モデルの1/20であり、造波板による波高は碎波のないように調整した。実験の条件を以下に示す。

波向	A (図一1)
周期	1.12秒、0.67秒
波高	3cm
水深	15cm
スロープ位置	無し、CASE-3、CASE-4
スロープ形状	傾斜部の勾配1/10 (水深0cm~10cm) 直立部 (水深10cm~15cm)

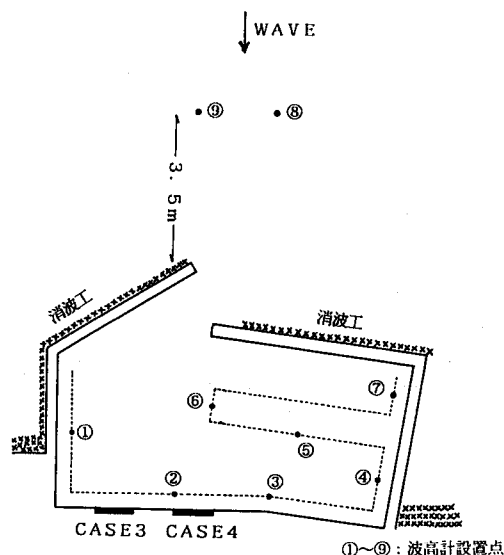
図一11に示した港内の7点と港外の2点の波高を容量式波高計により測定を行った。実験時間は2分程度とし、非定常状態の波高に加えて、参考のために定常時の波高の測定も行った。そのためマリーナの防波堤の前面に、碎石により消波工を施し反射波を極力消すように留意した。実験の状況を見るかぎり、特に問題となるような反射波はなかった。図一12~図一15には、周期5秒の場合の波高の経時変化について解析と実験値の比較を示した。実験値には黒丸をつけた。図一3と同様に2周期毎の



図一9 波高のコンター (スロープ無し)



図一10 波高のコンター (CASE-3)



図一11 実験の状況

波高を示している。実験値は、港外の波高を入射波の波高として、港外の波高に対する比を取っている。図-12～図-14には、測点②、④、⑥の値を示した。

スロープなしの結果では、②と⑥は時間とともに波高が同様に増大しているが、④の実験値は途中でピークをとる形になっている。このような大きな変動が見られるのは測点の中で④の実験値だけである。

CASE-3の結果では、④と⑥にはスロープによる波高の低下はなく、逆に僅かながら増大している。②には波高の低下が見られる。これらの傾向は解析と実験で一致している。ただし、②の実験値は初期の波高低下が大きいことや、④の実験値には初期にのみ波高の低下が見られる点で相違がある。

CASE-4の結果では、解析は④と⑥に波高の低下が見られるが、②には見られない。実験ではすべての測点で波高の低下が見られ、低下量も実験値の方が大きくなっている。

図-15には、①～⑦の自乗平均の経時変化を示した。また、参考のために、定常解との比較も示した。解析では、スロープによる波高の低下は見られるものの低下量は僅かである。一方、実験では、CASE-3の定常値を除きスロープによる低下が明確になっている。定性的には、解析、実験ともにCASE-4が最も波高の低下が大きいためである。項目3の図-5では、CASE-3が最も波高の低下が大きくなっているが、図-3の中で、実験で選んだ測点ではCASE-4が最も波高の低下が大きくなっているためである。

以上の結果を見ると、定量的には解析と実験で相違点も見られるが、定性的には時間変化やスロープの効果において良く一致している。

5. あとがき

本研究では、マリーナにおけるスロープの波高の低減効果について数値的検討を加え、実験による検証もおこなった。検討の結果、スロープの効果はスロープ近辺だけでなく、港内全体に影響することがわかった。スロープの効率的な配置は、スロープの無い場合の解析結果において、港内で最も波高の大きい位置あるいは港内に入射して最初に反射する位置であることがわかった。

解析手法には、緩勾配方程式による非定常解析を用いたが、本研究のマリーナのモデルでは、港内に10波程度の波が入射するまで計算を行えば妥当な検討ができることがわかった。このことは、定常解析との比較や実験による検証から確認できた。今回は実験による検証にとどまったが、今後は現地調査による検証を実施する予定である。

参考文献

- 1) 岩垣雄一、榎木 享：「海岸工学」、共立出版、(1985.11)
- 2) LEE, J. J. : "Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry", J. Fluid. Mech. vol. 45, part 2, (1971), pp. 375~394

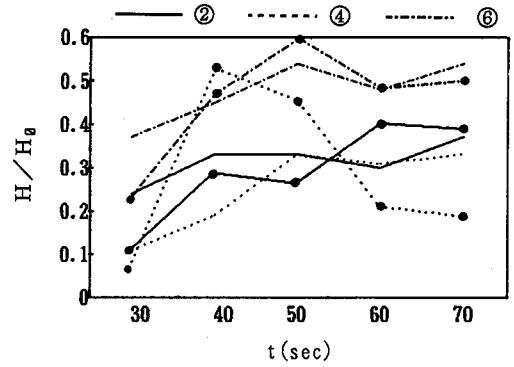


図-12 測点の波高(スロープなし)

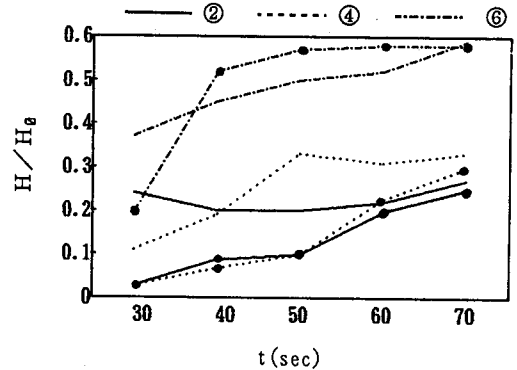


図-13 測点の波高(CASE-3)

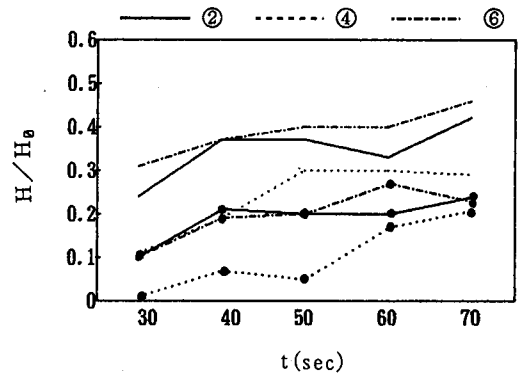


図-14 測点の波高(CASE-4)

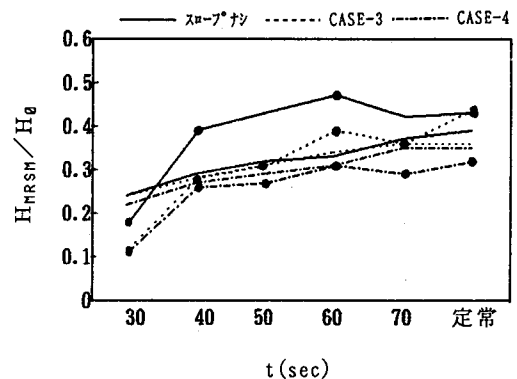


図-15 測点の自乗平均波高