

多連結型マリーナ用浮き栈橋の 波浪応答計算手法に関する研究

Numerical Model of Dynamic Response of Flexible Floating Pier for Marina due to ocean waves

上原義正*・山本 剛**・野田英明・松原雄平・黒岩正光***・尹 吉秀****

Yoshimasa Uehara, Takeshi Yamamoto, Hideaki Noda, Yuhei Matsubara,

Masamitsu Kuroiwa and Gil-Su Yoon

This study is concerned with the development of numerical model for the dynamic response of flexible floating pier due to ocean waves. The numerical model was induced by improving a numerical method for rigid floating structure. The motions and the tension forces of mooring lines of the pier were calculated from the method. The results of numerical simulation were compared with those of laboratory tests. It was found that the flexibility of the joints is a dominating parameter for the vertical movements the floating pier.

Keywords : Flexible floating pier, Numerical simulation, Dynamic response

1. はじめに

近年、余暇の増加とともに、海洋性レジャーの普及が著しくなってきた。全国各地でマリーナ整備計画がなされている。一般に、マリーナ用の浮き栈橋は杭係留のものが広く用いられている。今後、景観にも優れ、どのような海域でも設置可能、すなわち、施工性の容易さ、耐波性などを備えた栈橋が必要である。著者らは、図-1に示すような従来のモノコックタイプの剛

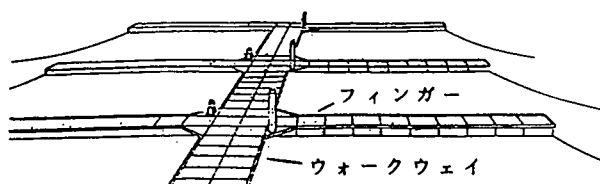


図-1 多連結型マリーナ用浮き栈橋の概念図

構造とは異なる柔構造を有するアンカーチェーン係留式のマリーナ用の浮き栈橋を提案した¹⁾。この栈橋はFRP製の小型ポンツーンユニットを多連結することによって一つの栈橋ユニットとするものである(図-2参照)。また、干満差の大きな海域に適用でき、さらに施工性の容易さ等を考慮した鎖式係留法を採用したものである。著者らは既に模型実験によって本栈橋の波による動的応答について検証した¹⁾。得られた結果から、柔構造にすることによって浮体に作用する波力を低減させること、栈橋の各ポンツーン下部に抵抗板を取り付けることにより鉛直方向の動揺量が低減することを確認した。このような柔構造を有する栈橋を実際に施工するのに必要な詳細な設計指標はなく、今後、確立していくことが必要である。また、柔構造を有する浮体に対する数値計算手法もほとんどない。そこで、本研究では、柔構造を有する栈橋の波による動揺量および係留索張力の計算手法を考案し、得られた計算結果を前報で報告した模型実験結果と比較し、数値モデルの妥当性について検討しようとするものである。

2. 模型の概要および実験方法

本研究で用いた浮体模型は実物の1/10縮尺で、図-2に示すようにFRP製の小型ポンツーンを幅方向に2個連結し、さらに長さ方向にそれをジョイントによって10個連結し、一つの栈橋ユニットとしたものである。下部には動揺低減を目的とした抵抗板が取り付けられている。栈橋の剛性は、長さ方向に連結しているジョイントの種類を変化させることによって代えることが可能である。ここでは4種類のジョイントを用いて実験した。また抵抗板は高さ $h_r=25\text{mm}$, 50mm の2種類を用いた。実験模型の諸元は表-1に示すとおりである。なお、model 1を剛構造、その他を柔構造モデルとする。実験は長さ25m、高さ1.1m、幅0.6mの鉛直2次元波動水槽を用いて行い、水深は30cmとした。模型は長さ120cm、 $\phi 3\text{mm}$ のチェーンを用いて係留した。波浪条件は入射波高を3, 6(cm)、周期を0.9~2.0(sec)とした。浮体の動揺量はビデオカメラで測定し、係留索張力は歪みゲージを用いて測定した。

* 正会員 八千代エンジニアリング(株)

** 正会員 ニッタ(株)

*** 正会員 鳥取大学工学部土木工学科(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

**** 釜山水産大学校海洋工学科

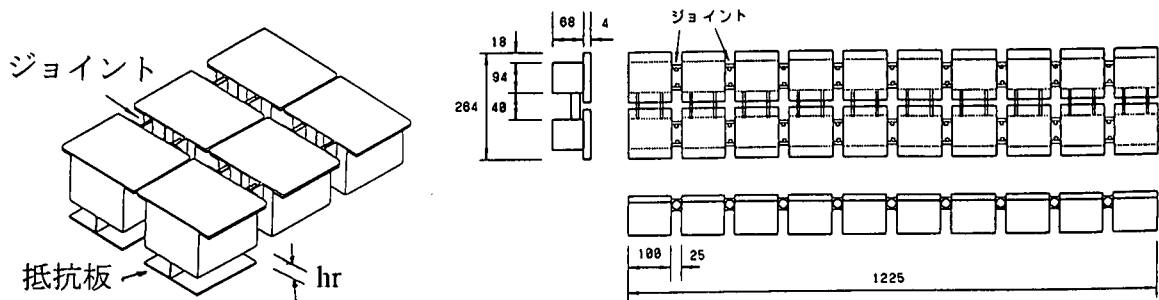


図-2 多連結型浮き棧橋模型の概要

表-1 模型の諸元

model	重量(gf)	重心(cm)	吃水(cm)	浮心(cm)	曲げ剛性 (gf・cm ²)	抵抗板高 (cm)
1	5226.0	3.810	2.780	1.390	19863	-
2	5686.0	3.916	2.950	1.475	1047	-
3	5465.0	3.847	2.837	1.419	311	-
4	5632.0	3.847	2.837	1.419	ピン	-
5	6550.0	3.190	3.077	1.538	1047	0.25
6	6620.0	2.956	3.088	1.544	1047	0.50

3. 棧橋の動揺計算手法の概略

単体の浮体構造物に関する動揺および波力を算定する手法は数多く提案されているが、本研究では井島ら²⁾の解析法を用いて計算を試みる。この方法は2次元境界値問題をポテンシャル関数に関するグリーン公式を数値的に解く方法で、大型構造物周辺に発生するような発散波および回折波を無視して計算を簡略化したものである。本研究で考案した小型ポンツーンを多連結した柔構造タイプにそのまま適用するのは困難であり、何等かの工夫が必要である。本研究において対象とする棧橋は、鉛直2次元運動、すなわち、Heave, Surge および Pitch の3成分であるが、柔構造を有する場合は、水平変位より鉛直変位に大きな影響を及ぼすため、鉛直方向変動量(Heave)の計算において改良を加えることにする。詳細な計算方法については井島ら²⁾の文献に譲るとし、以下簡潔に説明する。

浮体周辺のポテンシャル関数を計算するために、図-3に示すように領域(O)を入射波と反射波の領域、領域(O')を透過波の領域、領域(I)をラプラス方程式を満たす速度ポテンシャルが存在する3つの領域を考える。入射波を振幅 ϵ 、周波数 σ ($=2\pi/T$, T : 周期)の正弦波とし、この波により浮体は微小運動をするものとする。時刻 t における重心は点 (x_0, z_0) にあり、角度 δ だけ回転しているものとする。浮体運動は次式で表されるものとする。

$$x_0 - \bar{x}_0 = X e^{i\sigma t}, \quad z_0 - \bar{z}_0 = Z e^{i\sigma t}, \quad \delta = \Theta e^{i\sigma t} \quad (1)$$

ここに、 X , Z および Θ は水平、鉛直方向の変位および回転角の複素振幅である。点 $(\bar{x}_0, \bar{z}_0)$ は浮体静止時の重心位置である。また流体運動は非粘性、非圧縮性の微小振幅運動で、次式に示す速度ポテンシャル

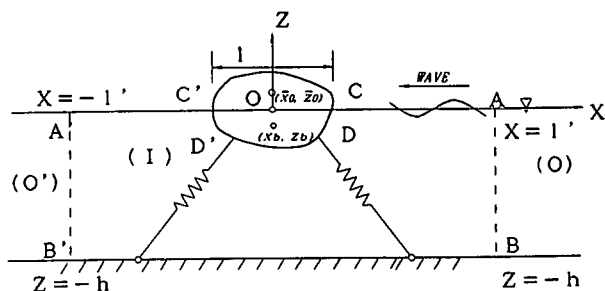


図-3 係留浮体モデルの座標系

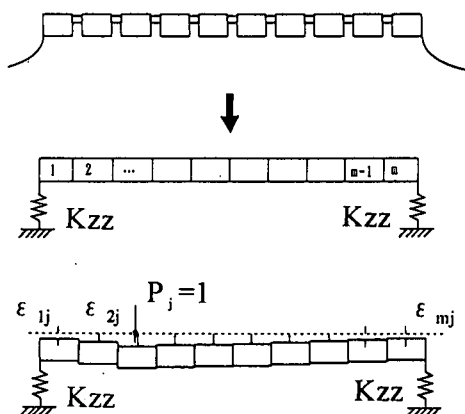


図-4 柔構造浮体モデルの説明

$\Phi(x, z; t)$ が存在し、 $\phi(x, z)$ は、ラプラスの方程式を満足する。

$$\Phi(x, z; t) = g\zeta / \sigma \phi(x, z) e^{i\sigma t} \tag{2}$$

運動方程式は係留浮体に作用する流体力を用いて次式のように表される。

$$M \frac{d}{dt^2} D(t) = F_s + F_m + F_e + F_A + F_c \tag{3}$$

ここで、 M は質量（慣性モーメント）、 $D(t)$ は運動変位（回転）、 F_s は静的復元力、 F_m は係留力、 F_e は波浪強制力、 F_A は付加質量力および F_c は減衰力である。これらは浮体の運動を微小と仮定すると線形化できる。

静的復元力は押し退けた水の重量であり、2次元で考えると Heave および Pitch のみに現れる。波強制力は浮体が存在しない場合の圧力を、仮想表面で積分することにより置き換えられるフルードクリロフ力で求められる。係留力は一般に非線形であるが、浮体の運動が微小の場合にはカテナリー理論を用いて線形化して取り扱うことが可能である。そこで、カテナリー理論を用いて線形バネ定数を求め係留力を算定する。付加質量力と減衰力は波高を0と置いたときの減衰振動と静的実験の結果と比較することにより、それぞれ加速度、速度に比例する係数として求められる。

ここで、栈橋の柔軟性を考慮するため、栈橋を浮体 CDD'C（前出し図-3）にあてはめ、図-4のように浮体全体をポンツーンの数に分割し、各ポンツーンが剛性を持つ梁で連結され、両端を線形化された係留力（バネ定数： K_{zz} ）で支えているものとする。ここで質点 j に単位力1を作用させたの質点 j の変位であるたわみ影響係数³⁾ ϵ_{nj} を用い、各浮体に作用する流体力から各ポンツーンの動揺 z_n をモデル化すると柔構造浮体の運動方程式は以下になる。

$$z_n = \sum_{j=1}^m \epsilon_{nj} P_j \quad (n=1 \sim m) \tag{4}$$

ここに、 P_j は要素 j に作用する流体力、 m はポンツーンの数である。実際には、鉛直方向成分の運動方程式は(3)式の右辺の流体力を P_j に代入することによって得られる。一方、水平成分の運動方程式は井島らの手法をそのまま用いて得られ、 X/ζ 、 Z_n/ζ および $\phi(i)$ を未知数とした、連立1次方程式となる。 $\phi(i)$ はグリーンの公式を用いて求められる。 i は1～ N までとし、 N は図-3に示した領域（I）における分割要素数を表す。最終的に、境界条件および各領域の連続条件を用いて、与えられた要素数と同数の連立一次方程式が得られ、さらに、運動方程式と連立させることにより浮体の動揺振幅、反射率、透過率などの未知数を求めることができる。なお、抵抗板モデルの計算方法は、抵抗板周辺の速度ポテンシャルは詳細には考慮せず、抵抗板の下面のみについて考え、さらに、抵抗板取付による栈橋全体重心および質量の変化を考慮して、簡易的な計算を試みた。回転成分については個々のポンツーンが異なった回転運動を呈するため、計算はより複雑になると思われ、本研究ではまず、鉛直成分についてのみ検討することにし、回転 θ については今後の研究課題とする。

4. 実験結果と計算結果との比較

(1) 栈橋の動揺量（抵抗板無し）

まず、抵抗板を取り付けていない場合の浮体の動揺量の計算結果について述べる。図-5(a)および(b)はそれぞれ model1 および2の浮体の水平動揺量（Surge）を表したもので、横軸は浮体長を波長で除した l/L 、縦軸は水平方向の浮体の全振幅 X を波高 H で除した無次元全振幅量 X/H を表している。図中に示す実線は計算結果を、□ならびに■は実験結果を表す。これらの図から両モデルとも計算結果において $l/L=0.4$ 付近で計算結果におい

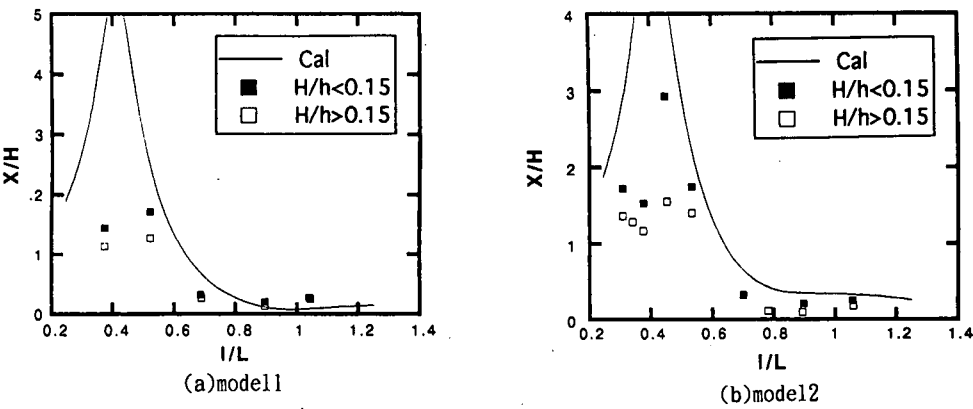
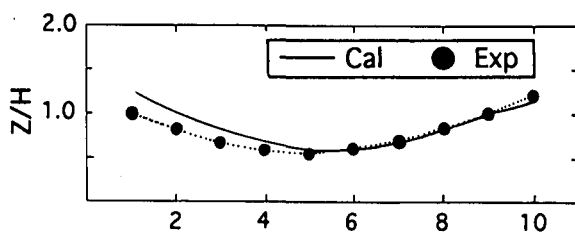


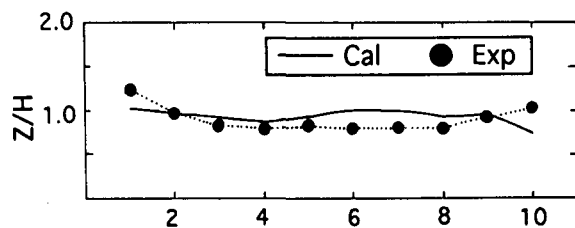
図-5 計算結果と実験結果との比較（水平動揺量，抵抗板無し）

て共振による X/H の増大が見られる。一方、実験結果ではそれほど大きな値は示していないが、計算値と実験値はほぼ同じ傾向を示していることがわかる。model 1と2を比較すると model 2の計算値ならびに実験値とも model 1に比較して若干大きくなっている。なお、その他のモデル (model 3～6) も同様な計算結果が得られている。

図-6 (a)および(b)はそれぞれ model 1と model 2における栈橋の各ポンツーンの鉛直方向の動揺量を表したものであり、縦軸は鉛直方向の浮体の全振幅 Z を波高 H で無次元化した値を表す。横軸はポンツーンの番号を表し、最も沖側を1番、岸側のポンツーンを10番とした。なお、波浪条件は波高6.0cm、周期1.5secである。これらの図から model 1では剛性が大きいので、実験値および計算値とも浮体中央部で極小値を示していることがわかる。一方、model 2では model 1の結果に比較して全体的に動揺量が大きく、各ポンツーンともほとんど同じ値を示しており、剛性低下による波への追随の影響が見られる。model 1の



(a)model 1

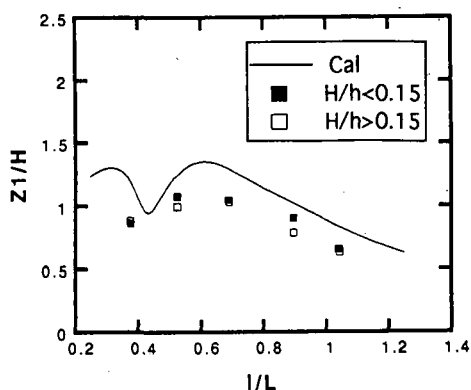


(b)model 2

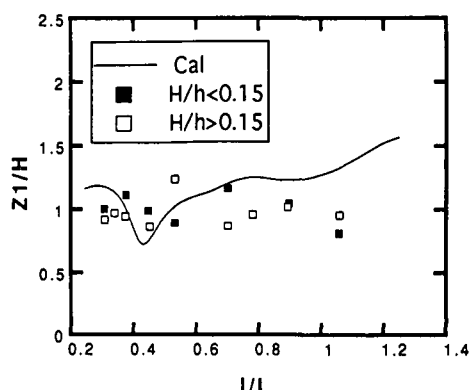
図-6 各ポンツーンの動揺量

計算値は実験値とよく一致しているが、model 2では浮体の両端部 (1番および10番) で若干の相違が見られる。

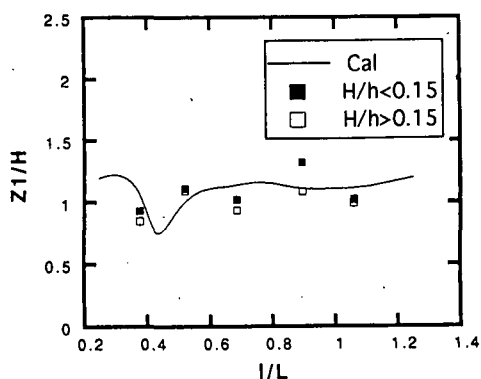
つぎに、栈橋の最も沖側の1番目とほぼ中央の5番目のポンツーンに着目し、鉛直方向の動揺量について本計算法の適用性について調べた。図-7 (a)～(d)の各図は沖側1番目のポンツーンの model 1～4の動揺全振幅を波高 H で除して無次元化した無次元鉛直動揺量 $Z1/H$ と $1/L$ との関係を示したものである。 $1/L$ がおよそ0.4より小さいところでは model 2～4 (柔構造モデル) の計算結果は model 1 (剛構造モデル) のそれに比較して小さくなっているのがわかる。一方 $1/L$ が大きくなるにつれ、柔構造モデルでは剛構造モデルに比較して実験値および計算値とも大きくなっているのがわかる。 $1/L$ が小さい場合、剛性が大きいものでは波に追随した動きをするが、 $1/L$ が大きくなると波に追随できず、波に抵抗するようになり動揺量が小さくなっている。また、すべてのモデルにおいて $1/L=0.4$ 付近で極小値を取っており、これは Surge の固有周期 (1.7sec) の条件に相当し、



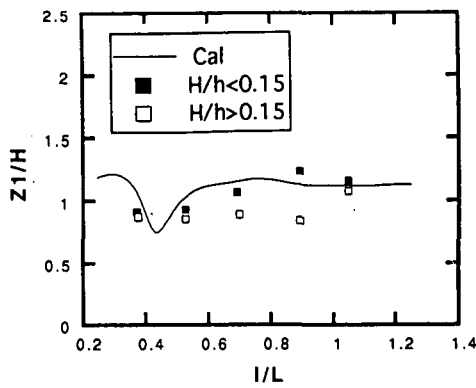
(a)model 1



(b)model 2

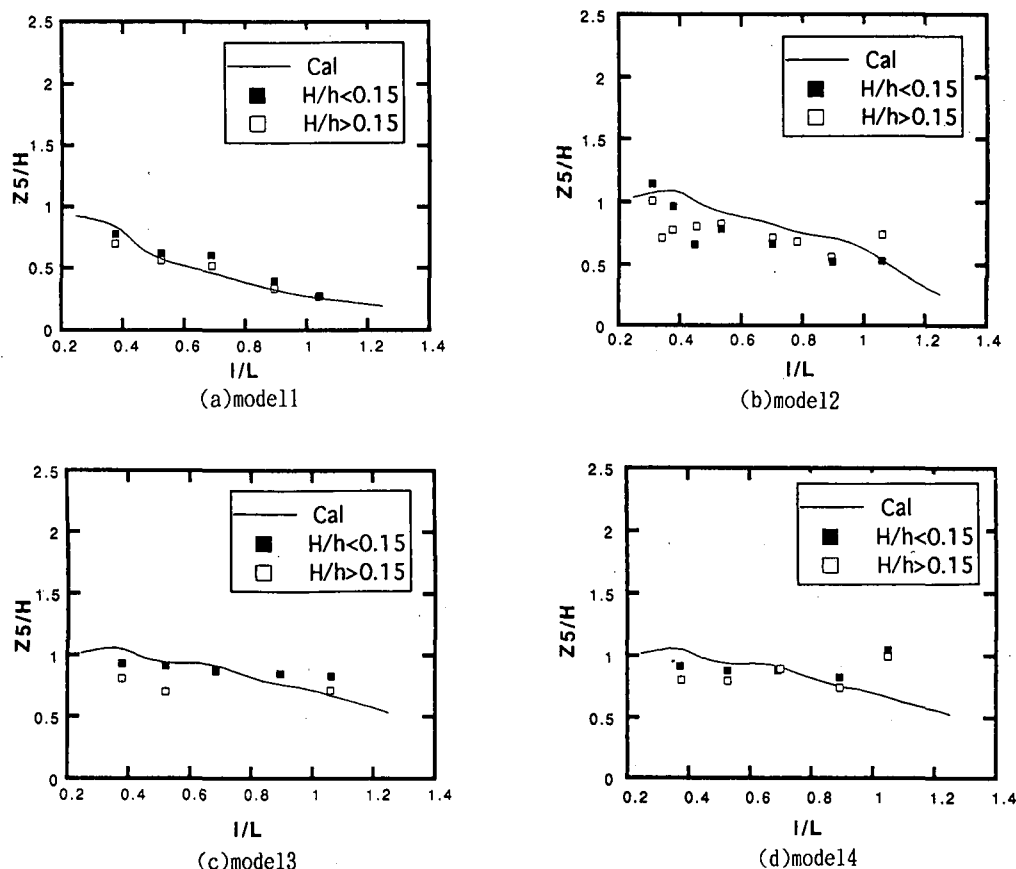


(c)model 3



(d)model 4

図-7 計算結果と実験結果との比較 (第1ポンツーンの鉛直動揺量, 抵抗板無し)



図－8 計算結果と実験結果との比較（第5ポンツーンの鉛直動揺量，抵抗板無し）

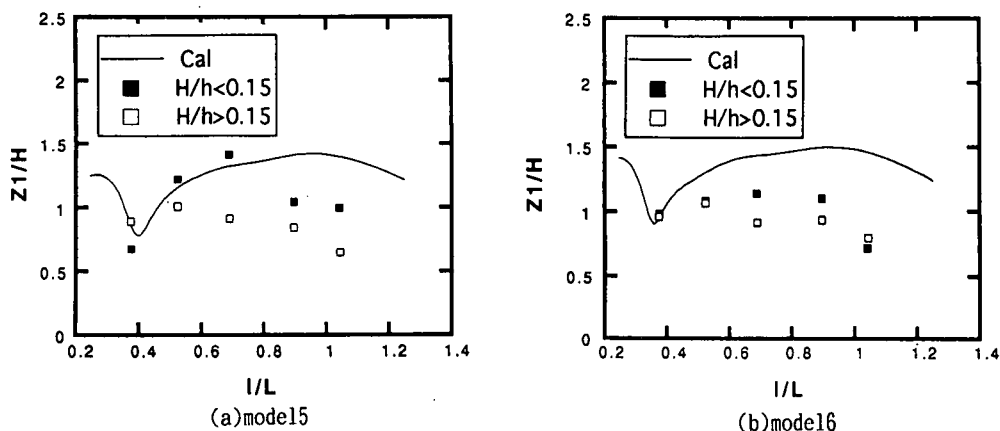
水平方向に大きく運動し，係留索による拘束力が働いているためであると考えられる．図－8(a)～(d)は5番目のポンツーンの同様の結果を示したものである．これらの図から1番目のポンツーンに比較して計算値と実験値は良く一致しているのがわかる．また，model1の剛構造モデルと他の柔構造モデルを比較すると剛性低下による動揺量の増加が良く再現されている．

（2）栈橋の動揺量（抵抗板有り）

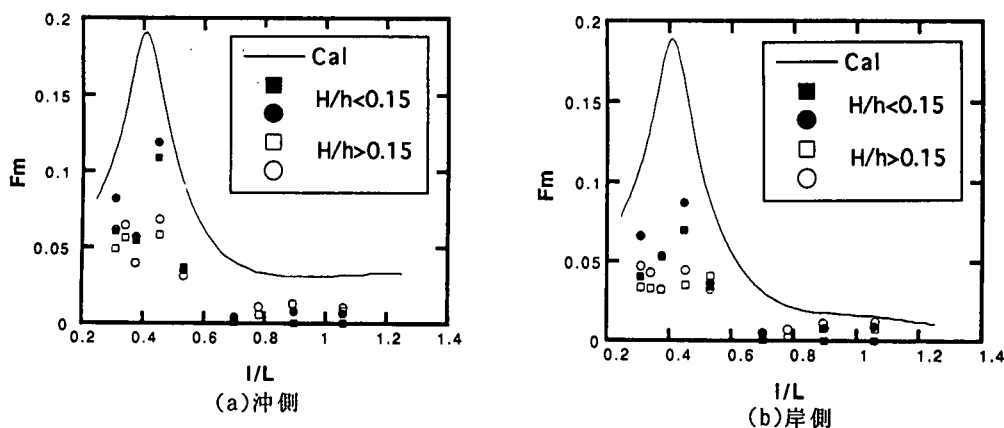
図－9(a)および(b)は抵抗板を取り付けた場合の鉛直動揺量の計算結果と実験結果を比較したものである．各図はそれぞれ model5 および model6 における沖側のポンツーン（1番目）の無次元鉛直動揺量 $Z1/H$ と l/L との関係を示したものである．なお，栈橋の剛性は model2 のものと同等である．これらの図から計算値と実験値は同様な傾向を示しているが，計算結果は実験値を過大評価していることがわかる．この原因は，抵抗板の影響を計算に取り入れる際に，抵抗板下面のポテンシャルと質量と付加質量のみしか考慮していないことであると考えられ，実際には抵抗板の周囲すべてのポテンシャルを詳細に求めることが必要であろう．また，実験値について，model2（抵抗板無し，図－7(a)）の結果と比較すると， l/L が約 0.8 以上の領域において $Z1/H$ は小さくなっているのがわかる．特に， $H/h > 0.15$ （波高約 6.0cm）の波浪に対し抵抗板の効果は顕著であることがわかる．計算結果について比較すると，抵抗板付加による固有周期の変化に伴って，共振点の位置，すなわち $Z1/H$ が極小となる l/L の値が model5 および 6 では model2 に比較してやや小さくなっている．また，抵抗板モデルでは， l/L が 1.0 付近で $Z1/H$ は最大となり，それ以上では減少傾向にあるようである．一方，model2 ではそれとは逆に増加傾向にあることがわかる．

（3）係留索張力（抵抗板無し）

最後に，係留索張力の計算結果について述べる．図－10(a)および(b)はそれぞれ model2 の沖側および岸側の係留索張力の計算値（実線）と実験値を比較したものである．縦軸は無次元索張力 $F_m (=F/wBH1)$ ， w ：水の単位体積重量， B ：浮体幅， F ：索張力）を表す．図中に示す四角印はアンカー部，丸印は浮体部における実験値を表している．これらの図から沖側と岸側の F_m を比較すると l/L が 0.4 付近では計算値は両者ともほぼ同じ大きさであるが，約 $l/L > 0.6$ では沖側の張力のほうが大きくなっているのがわかる．一方，実験結果をみると， $l/L > 0.6$ ではほぼ同値であるが共振点付近において沖側の張力が大きくなっている．全体的にみると，計算結果は実験結果と同様な傾向を示しているが，計算値は実験値を過大評価している．



図－9 計算結果と実験結果との比較（鉛直動揺量，抵抗板有り）



図－10 計算結果と実験結果との比較（係留索張力，抵抗板無し）

5. おわりに

本研究では柔構造を有するマリーナ用浮き桟橋の波による動揺量ならびに索張力の数値計算を試みた。得られた結果を要約すると以下のようである。

1) 従来，提案されている単体剛構造浮体の動揺量計算手法にたわみ影響係数を導入することにより，柔構造を有する桟橋の動揺量が計算できることがわかった。

2) 抵抗板モデルの計算では，抵抗板下面のみのポテンシャルと桟橋の質量変化を考慮することによりほぼ実験結果の傾向を再現することは可能であるが，今後，抵抗板周辺の速度ポテンシャルを詳細に評価し計算を行う必要がある。

3) 係留索張力について計算結果は実験結果の傾向をよく表すが，計算値は実験値を過大評価することがわかった。

本研究で提案した数値モデルは動揺量を簡易的に求める手法であり，張力や浮体の動揺に伴う波変形等の評価については不十分であり，今後さらに，モデルの改良が必要である。

《参考文献》

- 1) 山本 剛ら：多連結型マリーナ用浮き桟橋の開発に関する実験的研究，海洋開発論文集，VOL. 10，pp. 367～372，1994
- 2) 井島武士ら：任意断面浮体の2次元係留運動と波の変形，土木学会論文報告集 第272号，pp. 53～63，1978
- 3) 小西一郎ら：構造動力学，pp. 106～109，