

マリーナにおける二重鉛直板付矩形浮体の 港内波制御に関する研究

STUDY FOR WAVE CONTROL BY THE FLOATING BREAKWATER WITH DOUBLE BARRIERS IN MARINA

加藤雅也¹・津嶋了²・濱中建一郎³・大橋正臣⁴・佐藤幸雄⁵・佐伯浩⁶
Masaya KATO, Satoru TSUSHIMA, Ken-ichiro HAMANAKA, Masami OHASHI, Yukio SATO
and Hiroshi SAEKI

¹正会員 日本データサービス株式会社 総合解析室 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

²西田鉄工株式会社 マリーナ事業部 (〒869-0494 熊本県宇土市松山町4541)

³正会員 工博 北海道東海大学教授 工学部海洋開発工学科 (〒005-8601 札幌市南区南沢5-1)

⁴学生員 工修 北見工業大学大学院工学研究科 (〒090-8507 北見市公園町165)

⁵正会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

⁶フェロー 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

This paper discusses the characteristics of wave fields around the Double Barriers Floating Breakwater (DBFB) which is proposed as a new floating breakwater against wind waves or ship waves in a marina. The DBFB has a rectangular body and double vertical plates to make energy dissipation with vortex flow around the tip of plates. The current study has been attempted to analyze experimentally and numerically some of the wave fields around the DBFB. It is found that the DBFB is much more effective as a breakwater than the simple rectangular floating breakwater by hydraulic model tests. Moreover it is found that the vertical motion of the DBFB is smaller than the simple rectangular floating breakwater. The numerical analysis is performed, based on two dimensional linear potential theory and an energy loss model by the vertical motion of the DBFB. The numerical results have good agreement with hydraulic model test.

Key Words : Marina, Double barriers, Vertical plate, Floating breakwater, Wave field, separation

1. はじめに

水際における社会問題の一つに「プレジャーボートの放置」という問題がある。平成8年10月に、当時の関係3省庁(運輸省・水産庁・建設省)は、放置艇の現状把握のため全国の全ての港湾・漁港・河川区域で調査を行った。その結果、「約13.8万隻の放置艇が確認された」と報告している。これまでに、放置艇の受皿となるプレジャーポート用係留施設の整備は全国で徐々に進んでいるが、需給のバランスは未だとられておらず、ソフト面・ハード面共に充実したサービスを安価に提供できるマリーナ施設の整備を今後も積極的に促進していく必要がある。マリーナの係留料金(利用料金)を低減するためには、まず設備投資を低減する必要がある。そのためには、プレジャーポートスポット(PBS)事業やフィッシャリーナ事業のように既存の港湾施設を利用する方法

が有効である。しかしながら、既存港湾の遊休水域は、小型船を係留するには比較的静穏度が低く既存の状態では利用が困難な場合がある。また、沖からの波に対する防波堤の波浪制御効果が十分な場合でも、港内で発生する風波や航走波によって係留施設等が破損する場合がある。航走波の問題については、その特徴や係留小型船に与える影響等の研究(例えば、斎藤ら¹⁾や小林ら²⁾)が行われ、航行速度を制限する等の利用者のマナーに委ねる対策がとられているが、養殖施設の損壊、係留施設や係留船の破損、さらに海中への落水等の人的被害が無くならないのが現状である。そこで、既存港湾に対して、①安価で、②施工性が良く、③比較的小規模で、④景観や水質環境等を損なわない、局所的波浪制御方法が求められている。著者らは既に、平常時はピジター・バースや作業ヤードとして利用することができて、荒天時には浮消波堤として機能するような比較的喫水の深い浮桟橋兼浮消波堤を提案し、実海域で供用

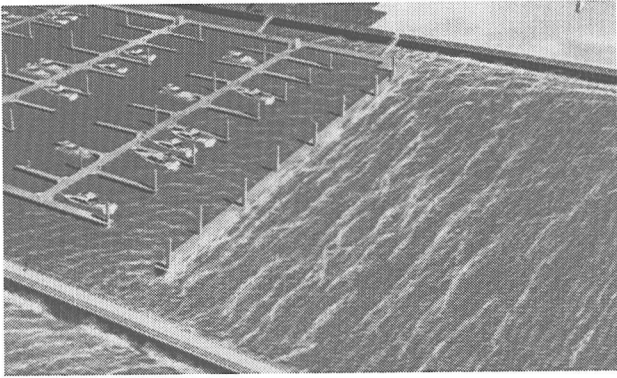


図-1 浮栈橋と浮消波堤の併用概念図

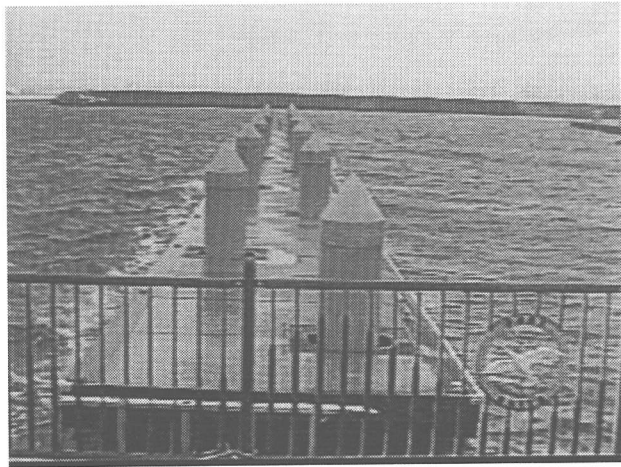


図-2 浮栈橋と浮消波堤の併用実施例

されている（図-1，図-2参照）．矩形浮体に関しては，これまでに様々な研究が行われ多くの知見が得られているが，浮体周辺のエネルギー損失を考慮した研究は比較的少ない．しかしながら，浮体を消波構造物として扱う場合は，構造物周辺のエネルギー損失を考慮することは重要であり（例えば，金ら³⁾，中村ら⁴⁾），積極的にエネルギー消散を引き起こす構造・機構を用いることで波浪制御効果を向上できる可能性がある．そこで本研究では，マリーナ内で発生する風波や航走波を対象として，比較的簡易な浮体式構造物を用いて効率的に波浪制御するために，矩形浮体の岸沖両側に鉛直板を取り付けて剥離流れによるエネルギー消散を増大させる方法を提案し，その効果を水理模型実験により調べた．さらに，今後の実海域での広範な条件下における設計に資するため，浮体運動に伴うエネルギー損失を考慮した数値解析手法を提案し，その妥当性を検証した．

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

実験は，長さ22m，幅0.25m，高さ0.5mの二次元造波水路を用いて行った．水路には，片側に吸収型造波機，他端に碎石で斜面を構成した消波装置が設け

られている．実験は，図-3に示す浮体模型を水路中央に設置し，模型岸側と沖側で容量式波高計により水位を計測した．さらに中立粒子と浮体の運動をビデオ撮影し，流れの可視化および浮体の動揺振幅の計測を併せて行った．

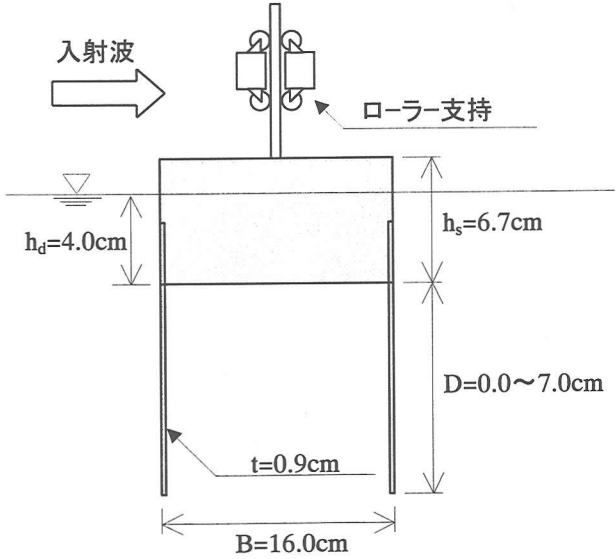


図-3 浮体模型

(2) 実験条件

表-1に実験条件を示す．本研究ではマリーナ内に発生する風波や小型船の航走波に対する波浪制御効果の解明を主たる目的としているため，比較的周期の短い波を対象としている．

表-1 実験条件

case No.	水深 h (cm)	波高 H (cm)	周期 T (s)	鉛直板長 D (cm)
A1	23.3	2.0	0.6~1.3	0.00
A2				2.33
A3				4.67
A4				7.00
B1	40.0			0.00
B2				2.33
B3				4.67
B4				7.00

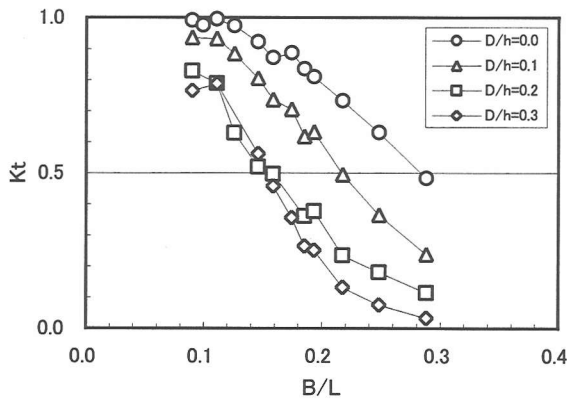
(3) 実験結果

図-4に，二重鉛直板付き矩形浮体（以下ダブルバリア型と記す）の水深 $h=23.3$ cmにおける消波特性を示す．比較のため，鉛直板を設置しない矩形浮体の結果も合わせて示している．ダブルバリア型の場合も矩形浮体の場合と同様に，浮体幅波長比 B/L が大きくなるに従い，透過率が減少し反射率が増加する．また，ダブルバリア型の鉛直板の長さが増加すると，空間的に遮蔽効果が増加して透過率が減少し反射率が増加する．さらに，鉛直板を取り付けることにより，広範な周波数領域でエネルギー損失が大きくな

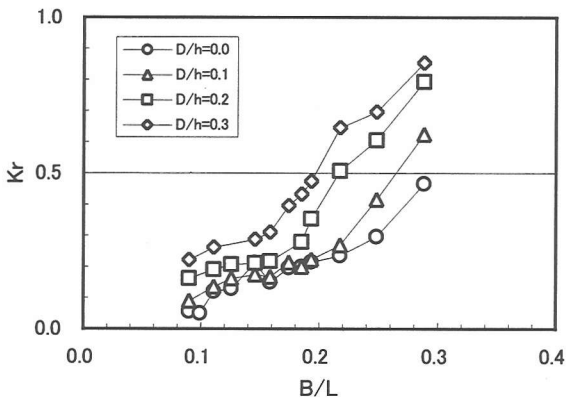
り、その損失率は最大80%におよんでいる。このエネルギー損失の主な原因は、杭とローラの摩擦や鉛直板先端等からの剥離せん断流によるものと考えられる。そこで、沖側鉛直板周辺の流れの様子を、中立粒子を用いて可視化した結果、鉛直板の長さスケールと同等な大きな渦が形成されていることがわかった（図-5参照）。一般に、構造物隅角部からの

剥離渦は、作用する波の周期が長いほど規模が大きくなり、エネルギー損失も大きくなると考えられる。しかしながら、本実験における浮体によるエネルギー損失率は、入射波周期に対してピークをもつ特性となり、長周期側でエネルギー損失率の減少が見られる。また、その周波数特性は、鉛直板が長くなると、ピーク値をとる入射波周期が長周期側に移動し、エネルギー損失率のピーク値は大きくなる。このような現象は、浮体運動と流体運動の複雑な相互作用によるもので、そのメカニズムの詳細な解明は今後の課題である。なお、図-4は水深 $h=23.3\text{cm}$ の結果を示すものであるが、 $h=40.0\text{cm}$ の場合についても同様な結果が得られた。

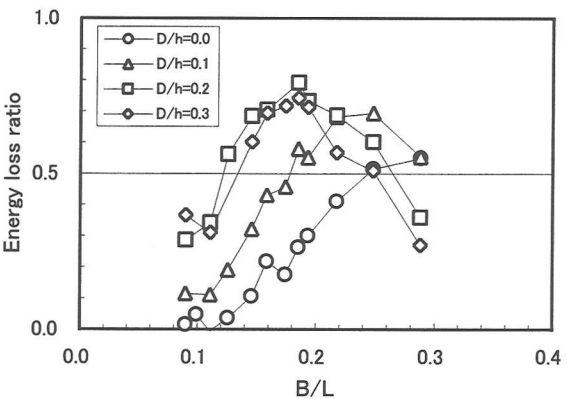
図-6は、浮体の鉛直動揺振幅について調べた結果である。浮体幅波長比 $B/L < 0.2$ では二重鉛直板による浮体の鉛直運動への影響がほとんど見られないが、 $B/L \geq 0.2$ では二重鉛直板の効果により浮体の鉛直運動が著しく低減している。これは、平常時に作業ヤードやビジター・バースとして利用する際に有利である。



(a) 透過率

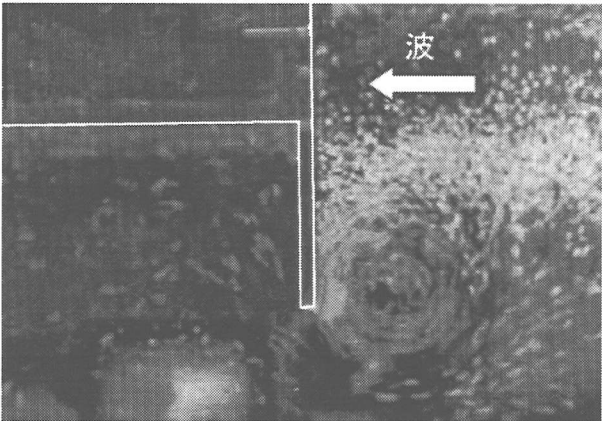


(b) 反射率

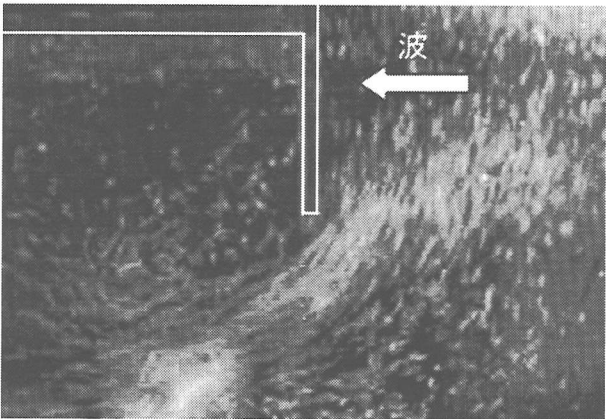


(c) エネルギー損失率

図-4 二重鉛直板付矩形浮体の消波効果 ($h=23.3\text{cm}$)

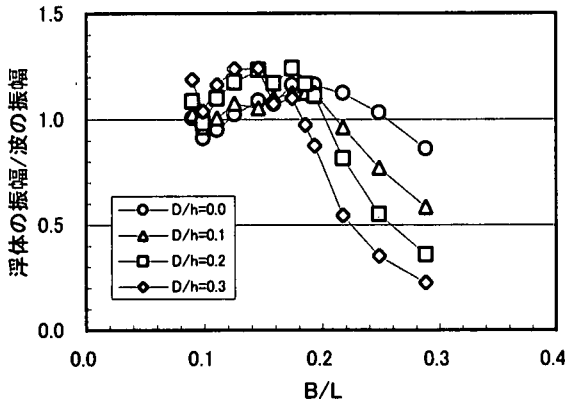


(a) 波谷通過時

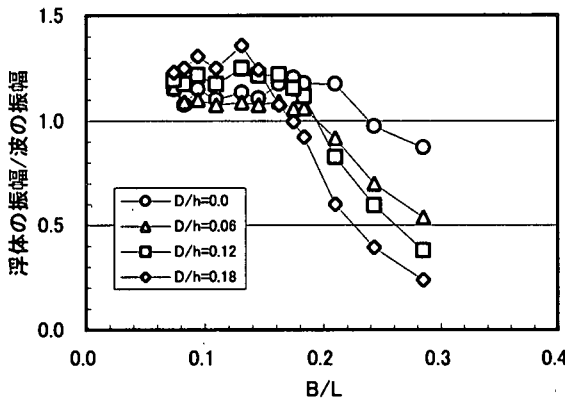


(b) 波峰通過時

図-5 沖側鉛直板周辺の流れ (case A3, $T=1.3\text{s}$)



(a) $h=23.3\text{cm}$



(b) $h=40.0\text{cm}$

図-6 浮体の鉛直動揺特性

3. 数値計算

(1) 基礎方程式と境界条件

図-7に数値計算領域と座標系を示す。流体をポテンシャル流とし、流体運動ならびに浮体運動に対して線形の周期解を仮定すると、基礎方程式と境界条件は以下の(1)～(5)式となる。なお、浮体に関する運動方程式中に、浮体の運動速度に比例する抵抗を取り入れることによりエネルギー損失をモデル化している((5)式右辺第三項)。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi \quad (z=0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z=-h) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} e^{-i\omega t} = \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (\text{on } S_B) \quad (4)$$

$$M \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = \int_{S_B} n_z p ds - Mg - C \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (5)$$

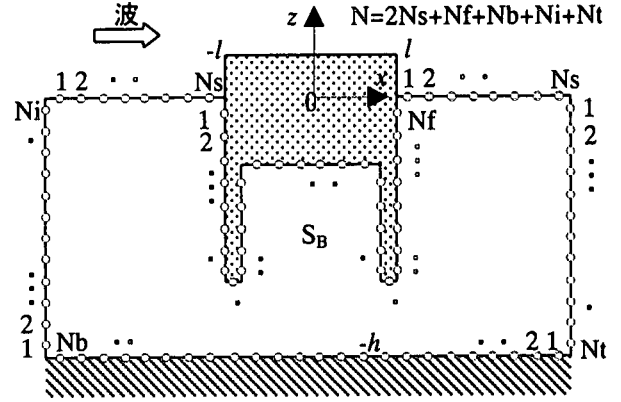


図-7 数値計算領域と座標系

ここで、 ϕ は流体の速度ポテンシャル、 ω は入射波の角周波数、 g は重力加速度、 M は浮体の質量、 S_B は浮体の没水面、 n_z は浮体表面の法線方向単位ベクトル鉛直方向成分、 p は圧力、 C は抵抗係数である。 Z は、浮体表面の z 座標で、浮体の初期位置の座標を z_0 、浮体の鉛直運動振幅を α とすると、次の(6)式で表される。

$$Z = z_0 + \alpha \cdot e^{-i\omega t} \quad (6)$$

また、圧力 p は、下式で表される。

$$p = -\rho \frac{\partial(\phi e^{-i\omega t})}{\partial t} - \rho g z \quad (7)$$

したがって、(4)式と(5)式を、 ϕ と α を使って整理すると、以下に示す(8)式と(9)式になる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = -i\omega \alpha \quad (\text{on } S_B) \quad (8)$$

$$(M\omega^2 + iC)\alpha + i\omega\rho \int_{S_B} n_z \phi ds = 0 \quad (9)$$

ただし、 ρ は水の単位体積重量。

次に、沖側境界と岸側境界について記す。入射波の振幅を a_i 、反射波の振幅を a_m とすると、沖側境界上の速度ポテンシャルは、(10)式のように表すことができる。

$$\phi = a_i e^{-k_0(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=0}^{\infty} a_m e^{k_m(x+l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (10)$$

また、透過波の振幅を b_m とすると、岸側境界上の速度ポテンシャルは、(11)式のように表すことができる。

$$\phi = \sum_{m=0}^{\infty} b_m e^{-k_m(x-l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (11)$$

ここで、 k_m は波数。なお、実際の計算では減衰定常波成分を有限項で打ち切り計算する。

(2) 計算手法の概要

流体運動が(1)式の二次元ラプラス方程式に支配されているので、グリーンの公式から境界上の速度ポテンシャルに対して次の境界積分方程式が得られる。

$$\pi\phi_i = \int_S \left(\phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} - G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right) ds \quad (12)$$

ここで、 ϕ_i と ϕ_j は境界上の速度ポテンシャル、 G_{ij} は(13)式に示す主要解、 $\partial/\partial n$ は領域内から外に向かう境界上の法線微分である。

$$G_{ij} = \log r_{ij} \quad (13)$$

ただし、 r_{ij} は*i*点と*j*点の距離。

計算領域の境界を図-7に示すように*N*個の微小要素に分割すると、(12)式は次のように離散化される。ただし、 $i = 1, 2, \dots, N$ 。

$$\pi\phi_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial E_{ij}}{\partial n} \phi_j - E_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right) \quad (14)$$

ここで、*j*番目の要素の長さを ΔS_j とすれば、 $i \neq j$ の場合、

$$E_{ij} = \Delta S_j \log r_{ij} \quad (15)$$

$$\frac{\partial E_{ij}}{\partial n} = \frac{\partial (\log r_{ij})}{\partial n} \quad (16)$$

$i = j$ の場合、

$$E_{ii} = \Delta S_i \left(\log \frac{\Delta S_i}{2} - 1 \right) \quad (17)$$

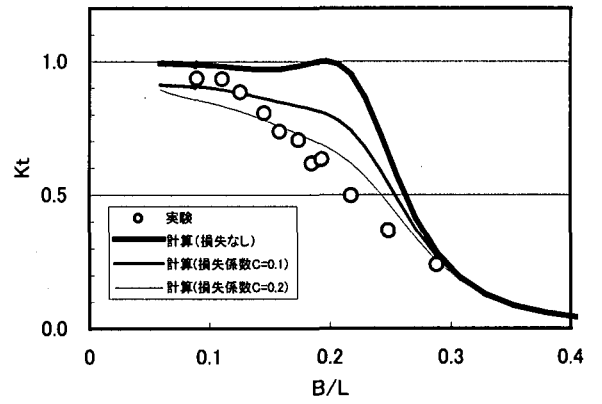
$$E_{ii} = 0 \quad (18)$$

となる。ただし、 $i = j$ の場合は特異点上の積分となり、主値積分を用いている。

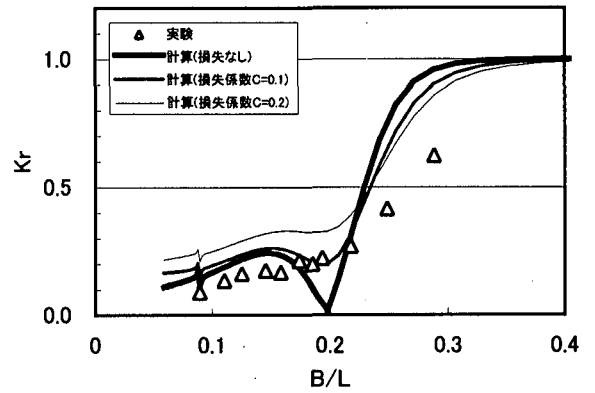
最終的に、(14)式に(2)、(3)、(8)、(10)、(11)式の境界条件を適用し、さらに(9)式を加えて、未知数(境界上の速度ポテンシャル、反射波振幅、透過波振幅と浮体の鉛直運動振幅)の数と方程式の数を一致させて連立方程式を解くことにより解を得る。

(3) 計算手法の検証

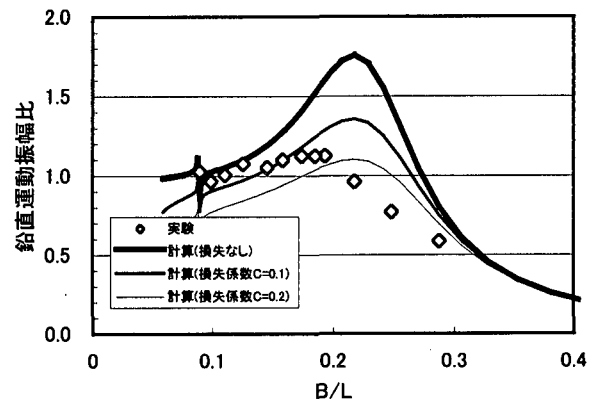
図-8に数値計算と実験結果の比較の一例を示す。エネルギー損失を考慮しない場合、波浪制御特性および浮体の鉛直動揺特性は、数値計算結果と実験結果が定性的には概ね一致しているが、定量的な精度については十分とはいえない。しかしながら、エネルギー損失を考慮することにより、定量的な精度についても改善されていることがわかる。したがって、実海域における設計に際し、本計算手法を用いることによりダブルバリア型の消波特性および鉛直動揺特性を概ね算定することができる。ただし、解析精度をさらに向上するためには、剥離流れによるエネルギー消散に関する高精度なモデルの構築が必要で



(a) 透過率



(b) 反射率



(c) 鉛直動揺特性

図-8 計算と実験の比較 (case A2)

ある。

4. おわりに

マリーナ内で発生する風波や航走波を対象とした波浪制御構造物として、二重鉛直板付き矩形浮体を提案し、その波浪制御特性や鉛直動揺におよぼす鉛直板の効果を水理模型実験により調べた。さらに、実海域での広範な条件下における設計に資するため、

二重鉛直板付き矩形浮体に関する数値解析手法を提案し、その妥当性を検証した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- ・ 中立粒子による可視化により、鉛直板先端部で激しい剥離流れが発生していることが確認された。この剥離流れに伴うエネルギー消散と鉛直板自体の遮蔽効果の増加により透過率が著しく減少する。
- ・ 鉛直板の長さによって、エネルギー損失量やその周波数応答特性が異なるので、設計に際しては対象となる波の周期に対して最適な長さを選択する必要がある。
- ・ 浮体幅波長比 $B/L < 0.2$ では二重鉛直板による浮体の鉛直運動への影響がほとんど見られないが、 $B/L \geq 0.2$ では浮体の鉛直運動を著しく低減することが出来る。これは、平常時に作業ヤードやビクター・バースとして利用する際に有利である。
- ・ 数値解析結果は実験結果と概ね良く一致している。ただし、解析精度をさらに向上するには、剥離流れによるエネルギー消散に関する高精度

なモデルの構築が必要である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、西田鉄工株式会社の常務取締役村田優氏ならびに小田健次氏に大変お世話になりました。また、島田建設(株)の恩田祐貴氏（当時北見工大）には実験を手伝っていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤勝彦，塩谷茂明，藤富信之：航走波による係留小型船の動揺実測，海洋開発論文集，Vol.13，pp.195-200，1997.
- 2) 小林豪，谷本勝利，倉田克彦：水路幅による浅水航走波の変化と非定常性，海岸工学論文集，第47巻，pp.26-30，2000.
- 3) 金憲泰，樺木亨，青木伸一：摩擦を考慮した杭係留浮体の非線型動揺解析と波浪制御機能について，海岸工学論文集，第41巻，pp.946-950，1994.
- 4) 中村孝幸，井出善彦：減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.856-860，1997.