

スラミング現象を利用した浮防波堤の波浪制御効果について

Performance of a Floating Breakwater by the Use of Wave Slamming Phenomena

中村孝幸*・加藤健一**・河野 徹***・上村 稔***

Takayuki Nakamura*, Kenich Kato**, Toru Kono*** and Minoru Uemura***

A new type of floating breakwaters, mainly using the wave dissipation mechanism caused by wave slamming to a bundle of cylindrical members near the water surface, was developed. It aims attenuations of both reflected and transmitted waves from the breakwater. Model tests show that the basic model of a floating breakwater consisting of a bundle of circular cylinders and rectangular floating units at both ends of the cylinders is not sufficient to reduce transmitted waves. The improvements, such as additions of footing plates and vertical thin walls to the basic model, are very effective to reduce both reflected and transmitted waves.

Keyword; floating breakwater, wave slamming, wave energy dissipation

1. まえがき

浮防波堤は、水深の比較的深い海域や海底地盤が軟弱な海域を中心にして、来襲波浪の制御を目的として、数多く設置されてきている。現在では、設置海域での水環境に及ぼす影響が小さいことから、海面漁業のための防波施設や漁港での簡易防波堤としても利用されるようになってきている。

しかしながら、浮防波堤は重力式の防波堤に比較すると、機能面である波浪制御効果が十分でない。現在よく利用されているポンツーン形式の浮防波堤では、堤体の流体力学的な慣性効果を利用して、波を反射させることにより透過波を低減している。このため、透過波が低減可能な周期条件下では、逆に反射波は大きく、堤体の反射側の海域では設置以前よりも波高はかなり増大することになる。また、透過波の制御効果は、堤体幅の4～5倍程度以下の波長の波に限定される。

ここでは、周辺海域に及ぼす反射波災害の低減化や海洋空間の有効利用を目的として、透過波のみならず反射波も低減可能な浮防波堤の開発を目指す。このような形式の浮防波堤では、エネルギーの保存則から考えて、何らかのエネルギー逸散機構を利用して、波エネルギーの逸散量を増大させるしか方法はない。浮防波堤は、元々長周期波に対して十分な制御効果が期待できないことから、内海や内湾などで卓越する短周期波を対象にして建設されている。ここでは、このような現状を踏まえて、比較的短周期の波を対象にして、透過波および反射波の両者を低減できる浮防波堤の開発を目指す。

従来、波の逸散機構としては、物体間の狭窄部や隅角部からの渦流れの発生によるものがよく知られている（例えば 榎木 1991）。この他に、比較的短周期の波で卓越しやすい逸散機構として、水面付近の部材と波面との衝突による飛沫等の発生による逸散現象（以下このような逸散をスラミング現象による逸散と称する）も知られている（中村ら 1986）。

中村ら（1997）は、水面付近に配列された円柱部材と水面とのスラミング現象を利用した浮体式の反射波低減工を提案しており、それによる鉛直壁よりの反射波の低減効果を実験的に検討している。そして、この低減工により、比較的短周期の波を対象にして反射波が有意に低減できることなどを報告している。

本研究では、やはり逸散機構として、水面付近の部材と波面とのスラミング現象によるものを主対象にして、浮防波堤としての透過波および反射波の制御効果を検討する。浮防波堤の形式としては、スラミング現象による逸散が生じやすいと考えられる水平円柱部材を水面付近に配列した多列円柱式の浮体構造とした。これと類似した構造体は、反射波の低減工として、既に中村ら（1997）により使用されている。一方、本研究では、新しいモデルとして、円柱列前後に隔壁を設けたものも提案する。これは、隔壁内での波浪の増幅現象を利用して、水面付近に配列した多列円柱のスラミング現象を増幅させ、結果的により大きな逸散を生じさせることを目的としている。

2. 実験装置および実験方法

2. 1 実験水槽と計測装置

実験には、愛媛大学の長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いた。この水槽には、一端に反射波吸収式の造波装置が、他端に砕石よりなる1/5勾配の消波工が設置されている。

波高計は、図-1に示すように、沖側での入射波測定用に1台、反射波測定用に2台、透過波測定用に5台の計

* 正会員 愛媛大学工学部 環境建設工学科 〒790 愛媛県松山市文京町3番

** 広建コンサルタンツ(株)

***正会員 復建調査設計(株) 沿岸開発部

9台の容量式波高計を用いた。透過波の測定において、水槽の幅方向に5台の波高計を等間隔に配置したのは、一定の開口幅をもって浮防波堤が規則的に直線配列されている状態を想定して実験していることによる。既に中村ら(1990)により明らかにされているように、このような配列式構造物では、長峰性の波が作用するときでも、波長 L が配列ピッチ長 λ より短くなると斜波成分が発生するようになり、特に堤体列の透過側では短峰性の波面形状が形成されるようになる。このため、図-1に示すような直線アレイの波高計群により、方向性を考慮した透過波の測定が必要になる。ここでは、透過波の方向性を考慮した中村ら(1990)の方法を用いて透過波を分離解析した。なお、この実験での配列ピッチ長 λ は、水槽幅に等しい1 mになる。

模型浮体の動揺変位は、水槽側面よりのビデオカメラで模型浮体の運動を撮影することにより測定した。また、係留チェーンの張力は、鋼製のリングゲージを模型浮体の4隅にある係留点に取り付けて測定した。

2. 2 模型浮体および係留チェーン

浮防波堤の模型は、基本形として図-2に示すものを用いた。これは、水平円柱部材を水面付近に配列した多列円柱式の構造体で、水線面付近に3本、水中に4本の円柱が配置してある。そして、この構造体は、水平円柱部材の両側に設けた矩形の浮力体で浮遊するようにしてある。これらの模型の外壁および円筒管はアクリル樹脂製で、円筒管内部には円筒形状のEPS材(発泡スチロール)が、また両端の浮力体にも矩形のEPS材が用いてある。また、浮力体部分には、浮体の重量および慣性モーメントを調整するため、鉄製の板と鉛製の延板を取り付けた。

本研究では、上記した基本形の浮防波堤に加え、図-3、4に示す模型についても実験を行った。図-3の模型は、浮体の鉛直動揺の固有振動周期を変化させる目的から、基本形の模型

浮体の両端にある浮力体の底部に500×160mmで厚さ15mmのアクリル板を取り付けた底版付きの模型浮体である。一方、図-4は、堤体の前後面にL字型部材を設け、円柱部材のある堤内での水位変動を増幅して、スラミング現象を活用して結果的により大きな逸散を生じさせることを目的とした模型である。以下、この模型浮体を π 字板付き浮体と称する。また、図-4に示す

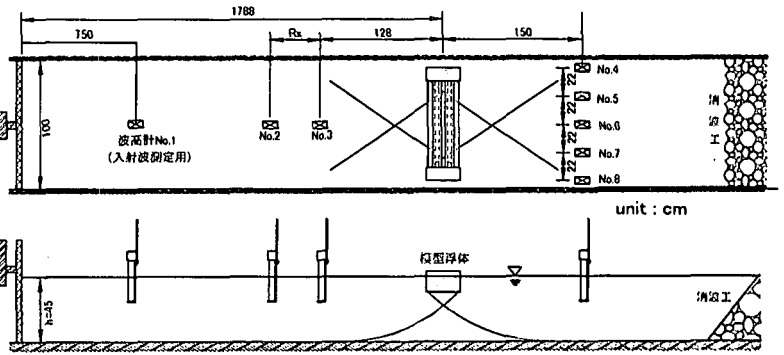


図-1 実験水槽および実験状況

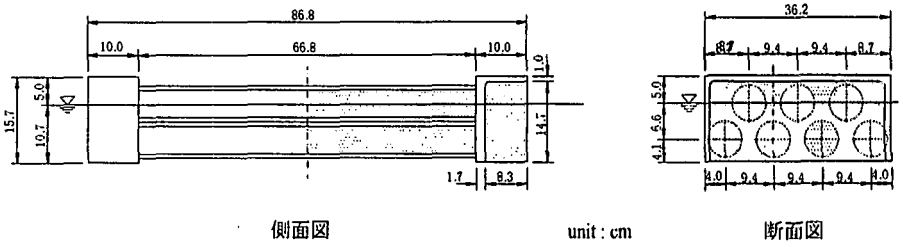


図-2 基本形の浮防波堤

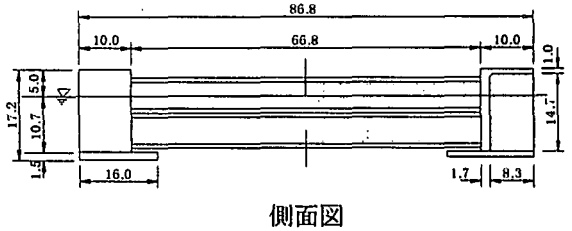


図-3 浮力体下部に底版を設けた模型浮体

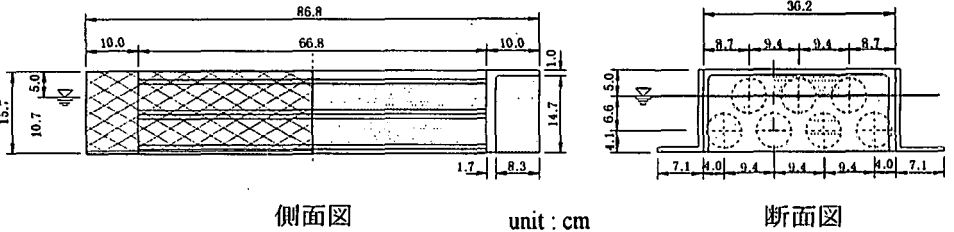


図-4 π 字板付き模型浮体

表-1 模型浮体の動的諸量

項目	基本形浮体	底版付き浮体	π 字板付き浮体
長さ	l_B	86.9cm	86.9cm
幅	B	36.2cm	36.2cm(+17.4cm)
高さ	D	15.7cm	17.2cm
吃水	d	10.7cm	12.2cm
排水重量	W	18.47kgf	21.48kgf
重心位置(水面より)	Z_0	-3.2cm	-4.4cm
慣性半径	r	10.9cm	16.3cm
鉛直動揺固有周期	Tn	0.85s	1.26s

模型浮体の変形として、沖側の
L字型部材を取り除いて、片面
にのみL字型部材のある模型浮
体についても実験の対象とした。

浮体式構造物において、特に
重要となる項目に共振動揺があり、それを短的に表すパラメータとして固有振動周期がある。ここでは、波面と部材との衝突現象によるエネルギー逸散に着目していることから、その逸散と直接的に関係すると考えられる鉛直動揺 (Heave) の固有振動周期 T_n を測定した。表-1は、上記の各模型浮体の鉛直動揺 (Heave) の固有振動周期 T_n (係留状态下) および動的諸量を一括して示す。

浮防波堤の係留方式としては、
図-1中に見られるように係留
チェーンが模型浮体の左右の係
留点から浮体下部で交差し、か
つ異なる側面においても同様に
交差するように設置した。

2. 3 実験条件

模型浮体の設置水深 h は全実験
を通じて45cmと一定にした。模
型浮体に作用させた入射波は規
則波で、その設定周期として、
 $T=0.7s$ から $1.4s$ の範囲の10種類、
同じく設定波高として3.5cm、
7.5cmの2種類とした。これらの
入射波の周期条件は波長堤体幅
比 L/B で表すとほぼ2から7の範
囲にある。

3. 実験結果とその考察

3. 1 基本形の浮防波堤に対する結果

図-5、6は、このときの透
過率 K_t 、反射率 K_r の周期によ
る変化を示すもので、周期に関
する無次元量としては波長・堤
体幅比 L/B が用いてある。これ
らの図中には、中村・井手
(1997)の断面2次元の減衰波理
論による算定結果についても併
せ示してある。算定結果におい
て、 fc は線形減衰係数を表し、
 $fc=0.0$ の結果は非減衰状態での

それで、いわゆるポテンシャル流れを想定した結果に相当する。これらの図より、特に K_t は特定の周期条件で極小値を示す傾向が見られる。ただし、この傾向は、入射波高 H によっても左右される。このように K_t が極小値を示すのは、後述するように浮体の鉛直方向への共振動揺によるもので、共振点近傍で浮体と流体との相対運動が

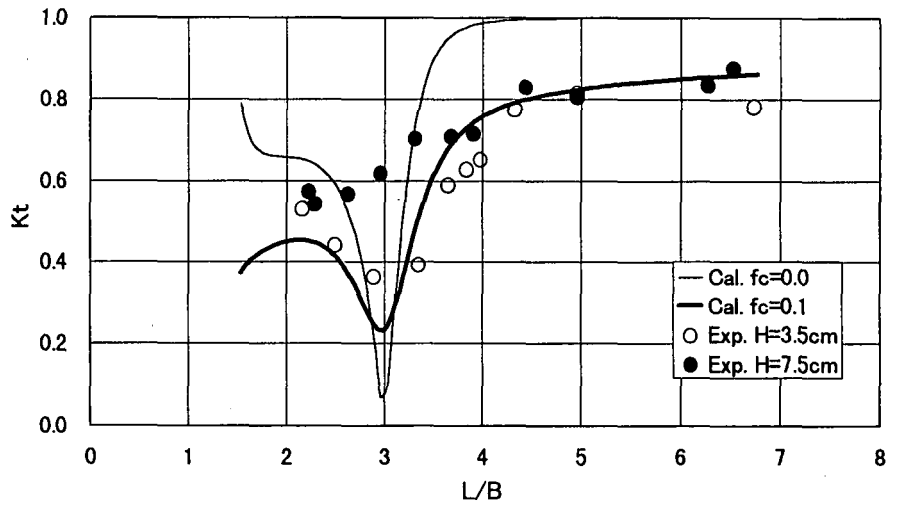


図-5 基本形の浮防波堤による透過率

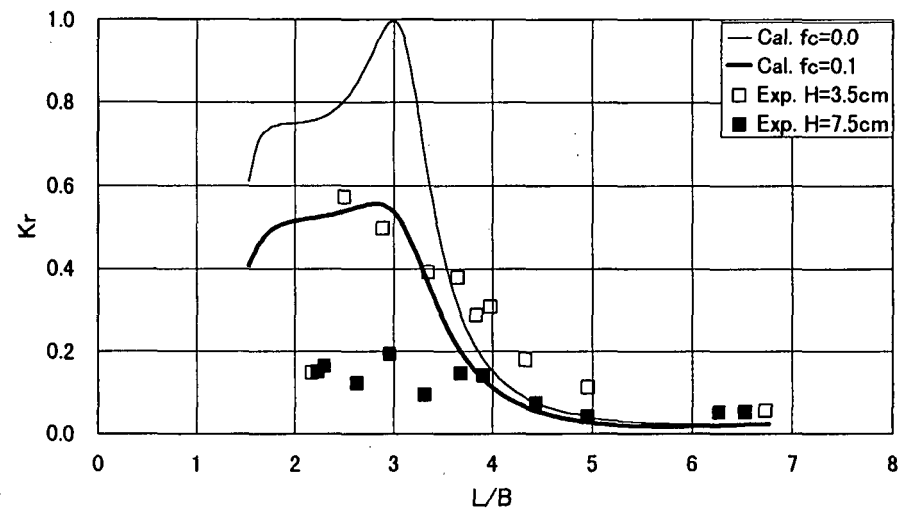


図-6 基本形の浮防波堤による反射率

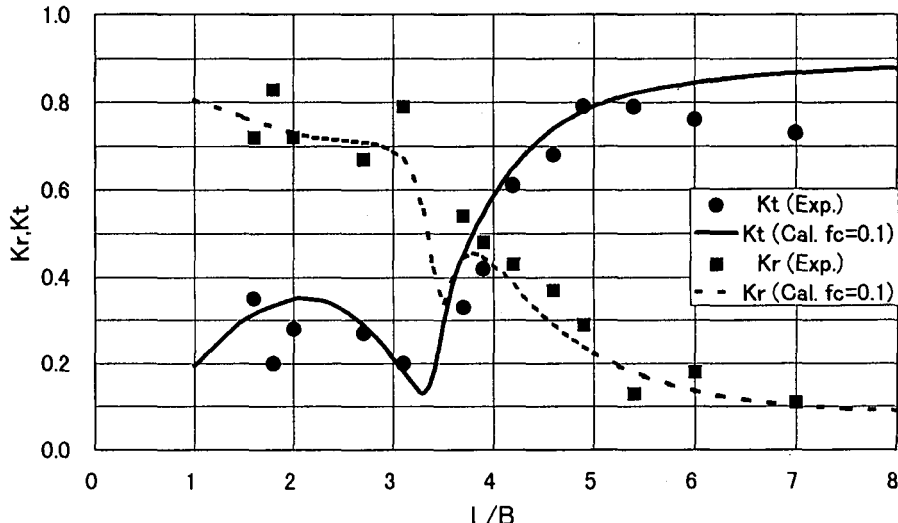


図-7 矩形ポンツーンによる反射率と透過率(H=4cm)

増加して、結果的にエネルギー逸散が増大することによると推測される。また、入射波高による反射率 K_R 、透過率 K_T の差異は、やはりこの共振点近傍で大きくなるが、これは水面付近でのスラミング現象による逸散が波高に伴い増大することによると考えられる。減衰波理論による算定結果と比較すると、低波高に対する実験結果と線形減衰係数 $fc=0.1$ とした算定結果とは比較的よい一致度が見られる。しかしながら、高波高に対する実験結果との一致度は十分でない。これは、やはり算定法において、水面付近でのスラミング現象による逸散を直接的にモデル化していないことや開口部の影響を無視していることなどが原因と考えられ、今後さらに算定モデルの改良を進めていきたい。

図-7は、中村ら(1995)による矩形ポンツーンの反射率 K_R 、透過率 K_T の結果を示す。用いられている矩形ポンツーンの幅は、図-2の基本形の模型とほぼ同じ幅($B=38\text{cm}$)であるが、吃水は約1.5倍程度に深く、しかも堤体の両側には開口部が全くない純2次元的な検討によることなどの差異があるが、一応比較のために示す。この図と前述した基本形の結果とを比較すると、 L/B の小さな短周期側において、基本形浮体の反射率はかなり低くなるものの、透過率は0.4~0.7と十分な制御効果が期待できない。そして、より効果的に透過波を低減するためには、スラミング現象による逸散を増大させる工夫などが必要と考えられる。

次に、図-8は基本形浮体の動揺変位の結果を示す。図中では、減衰波理論による3つのモード方向の動揺変位の算定結果および鉛直動揺の測定結果がプロットしてある。動揺変位は、次式による無次元量で表示してある。

$$X_{1 \text{ and } 2}^* = X_{1 \text{ and } 2} / (H/2) \quad (\text{For Sway and Heave}), \quad X_3^* = X_3 R_B / (H/2) \quad (\text{For Roll}) \quad (1)$$

ここに、 $X_i(i=1,2,3)$ は水平、鉛直動揺変位および回転動揺角の振幅、 R_B は堤体幅の $1/2$ の量である。

図中で実験結果は、入射波高の条件として $H=7.5\text{cm}$ のときの結果のみが示してある。この図より、無次元鉛直動揺変位 X_2^* は、ほぼ透過率が極小値を示す、 $L/B=3$ 付近で極大になることなどがわかる。また、極大変位の実験結果は、算定結果よりも低くなることも認められる。これは、実在流体中では、算定で仮定しているような速度に比例する抵抗力ではなく、速度の2乗に比例する抵抗力が作用することによると考えられる。

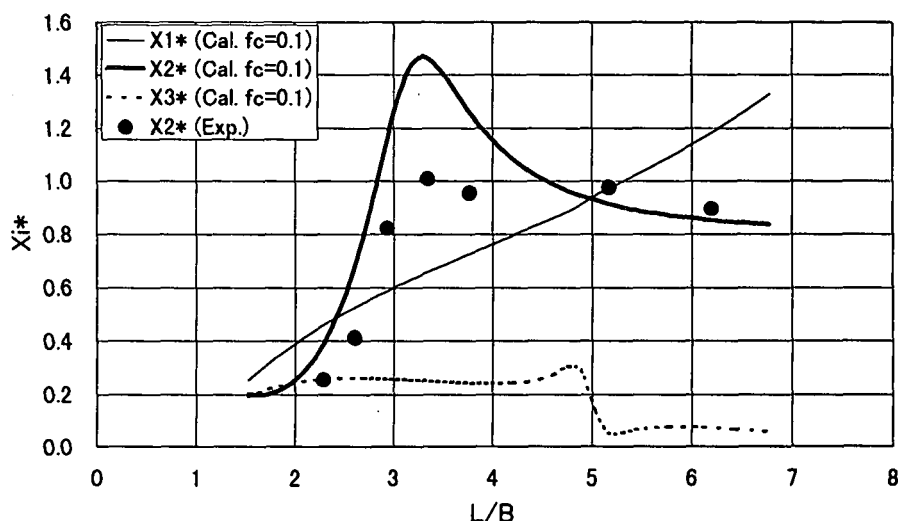


図-8 基本形浮体の動揺変位($H=7.5\text{cm}$)

3. 2 透過波の低減を目的とした各種の浮防波堤に対する結果

まず、図-9は図-3に示すように基本形の浮防波堤の浮力体下部に底版を取り付けたときの反射率 K_R 、透過率 K_T の L/B による変化を示す。この模型では、底版付加による付加質量の増加により、鉛直動揺の固有振動周期をより長周期側に移行させ、スラミング現象による逸散がより広い周期帯で生じるようにしたものである。この図と図-5、6との比較から、底版付加の効果により、透過率は L/B で

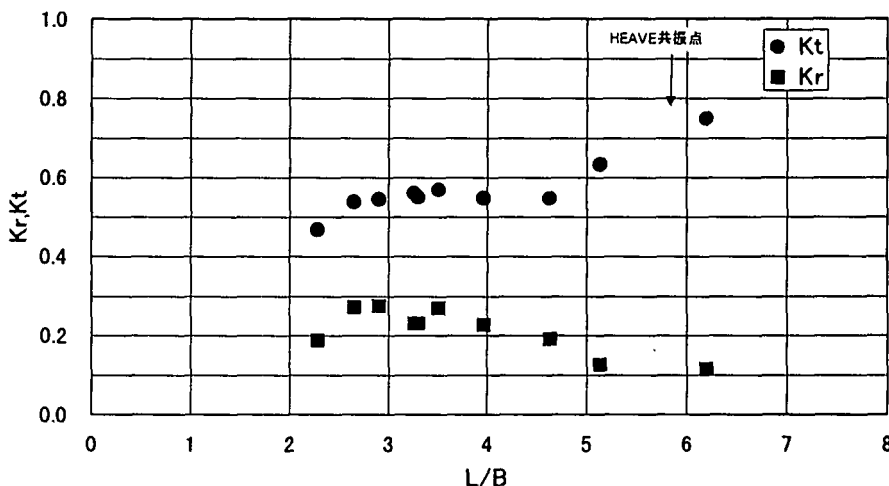


図-9 底版付き浮体による反射率と透過率($H=7.5\text{cm}$)

5 付近まではほぼ0.5程度と比較的広い周期帯にわたり低下できることがわかる。また、反射率については、底版付加により、多少の増加が見られるが、それほど有意なものでないことが認められる。このように、底版の付加に伴う固有振動周期の長周期側への移行により、透過波の制御効果の改善が可能であるといえよう。ただし、図-7の矩形ポンツーンによる透過率に比較すると、 L/B の小さな短周期側ではやはり十分でない。

次に、図-10は、図-4に示すように堤体の前後面にL字型部材を設けたときの反射率 K_r 、透過率 K_t の結果を示す。この図中には、2次元の減衰波理論による算定結果についても併せ示した。この図と前出の基本形浮体に対する結果との比較から、前後面にL字型部材を設けた π 字板付きの浮体では、 L/B の全範囲にわたり透過率の低下が認められる。一方、反射率はL字型部材の付加により多少の増加が見られるが、依然として低レベルにある。このように、透過率が低下する理由としては、L字型部材の付加により、堤内での水位の増幅現象や底版付きの浮体と同様に鉛直動揺の固有振動周期が長周期側に移行することから、スラミング現象による逸散が増加したことによるものと推測される。減衰波理論による算定結果と比較すると、一致度は十分でなく、やはり水面付近でのスラミング現象による逸散を直接的にモデル化する必要性があると考えられる。

最後に、図-11は上記してきた各種の浮防波堤についてのエネルギー逸散率 E_L の比較を総合的に比較した結果である。ただし、矩形ポンツーンについての実験結果は、入射波高 H が4cm程度と他の結果の場合($H=7.5\text{cm}$)に比較して、波高値が小さい条件となっている。この図より、エネルギー逸散率 E_L が最も高いのは、底版付き浮体のときで、これにつづき π 字板付き浮体となっている。そして、矩形ポンツーンの浮防波堤では、特に L/B の小さな短周期側でエネルギー逸散率 E_L が小さく、入射してくる波を反射させることで、透過波を低減していることが再確認できる。

4. 結語

- (1) スラミング現象を利用した多列円柱型浮防波堤では、ポンツーン形式の浮防波堤に比べて、特に短周期側での反射波を効果的に低減できる。しかしながら、透過波の制御効果については十分でなく、ポンツーン形式の浮防波堤によるそれよりも劣る。ただし、エネルギー逸散率は、ポンツーン形式の浮防波堤によるものより大きい。
- (2) 多列円柱型浮体の両端に位置する浮力体下部に底板を設けることで、透過波の制御周期帯を長周期側に拡大できる。これは、底板付加による付加質量の増大に伴い、鉛直動揺の固有振動周期が長周期側に変化することによるもので、効果的な改善法である。

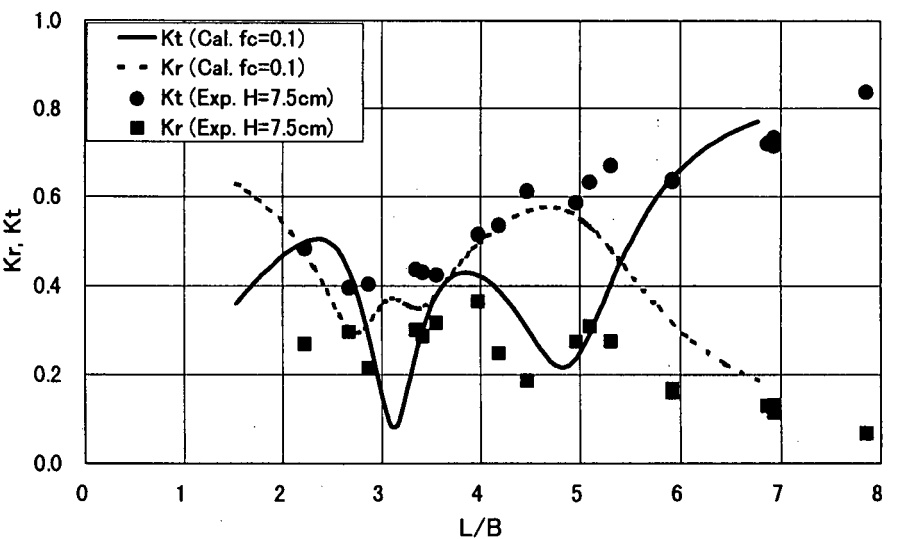


図-10 π 字板付き浮体の反射率と透過率($H=7.5\text{cm}$)

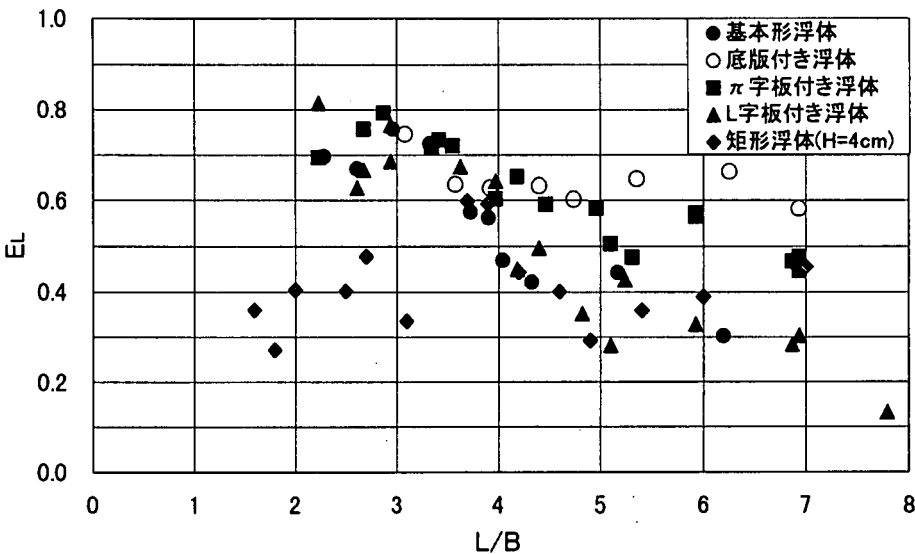


図-11 各種の浮防波堤によるエネルギー逸散率

(3) 多列円柱型浮体の前後に隔壁版を設け、堤内波浪の増幅現象を利用してスラミングによる逸散を増大する方法は、特に中周期から長周期の波に対して有効であり、このとき反射波も透過波も効果的に低減できる。そして、透過波の制御効果は、ポンツーン形式の浮防波堤と同程度かそれ以上になる。また、反射波の低減効果はポンツーン形式の浮防波堤に比較すると非常に高い。

(4) 逸散現象を近似的に考慮する減衰波理論により、多列円柱型浮体による透過波および反射波の波周期による変化がほぼ推定できる。この算定法は、スラミング現象による逸散を直接的にモデル化したものでなく、今後さらに算定法の改良が望まれる。

参考文献

榎木亨編著(1991)：波と漂砂と構造物、授報堂出版、pp. 199-245.

中村孝幸・奥 吉雄・本田典久(1986)：ブロック堤の消波効果に関する予測法とエネルギー逸散機構について、第33回海岸工学講演会論文集、pp.377～381.

中村孝幸・小野正順・長田和久(1990)：波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について、海岸工学論文集、第40巻、pp.620-630.

中村孝幸・大森禎敏・井手善彦(1995)：チェーン係留された浮防波堤列による波浪制御効果について、第42巻海岸工学論文集、pp.956～960.

中村孝幸・井手善彦(1997)：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、第44巻海岸工学論文集、pp.856～860.

中村孝幸・矢原崇光・河野徹(1997)：スラミング現象を利用した浮体式反射波低減工について、海洋開発論文集、第13巻、pp.597～602.