

## 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

## A Floating-Type Attenuator of Reflection Waves by using Wave Slamming Phenomena

中村孝幸\*・矢原 崇光\*\*・河野 徹\*\*\*

Takayuki Nakamura and Takamitsu Yahara and Toru Kono

In coastal and harbor developments, a construction of vertical sea walls and breakwaters in the sea is often necessary to make a calm water region. Secondly effects of such a construction on the neighboring coastal and ocean environment must be reduced. High reflection waves from the vertical sea wall of the new construction area may become one of such concerns. In order to reduce the reflection waves effectively, a floating-type wave attenuator that causes wave energy dissipations due to wave slamming is proposed. Model tests show that the floating attenuator is effective for reducing reflected waves from a vertical sea wall, especially for comparatively short waves. It was recommended that the floating attenuator must be near the anti-node position of standing waves.

Keyword; floating body, wave-reflection attenuator, wave slamming

## 1. まえがき

沿岸開発に伴い埋立や人工島建設は避けられない状況にある。これらの開発造成地は、波の作用による侵食を避けるため、一般にケーソン堤などの直立壁で海と境界される。しかしながら、ケーソン堤などの直立壁は、波の反射作用が強く、周辺海域に二次的な影響を及ぼしやすい。このため、従来では、消波ブロックを直立堤の前面に設置するなどして、反射波の低減を計ってきている。しかし、この低減工法も設置海域の水深が深くなると、被覆断面が大きくなるため、建設コストが膨大なものになりやすい。

ここでは、大水深海域での反射波の低減工として、新たに浮体形式のものを提案する。浮体形式の反射波低減工は、海域の水深にほとんど依存せず、大水深海域でも容易にしかも経済的に建設可能な利点があると考えられる。従来、浮体式構造物は、浮防波堤に見られるように、透過波の低減という観点からは検討されてきているが、直立堤の前面に設置して反射波の低減を目的として検討された例はほとんどない。

本研究では、反射波の低減機構として、主に水面付近に設けた部材と波面との衝突現象（スラミング現象）による逸散現象を利用して、より効果的な浮体式反射波低減工の開発を行う。特に、ここでは、より効果的に反射波を低減するための浮体式低減工の動特性および浮体式低減工の直立堤よりの離岸距離の設定法を水理模型実験により検討したものである。

## 2. 反射波低減工のモデルの提案

従来、用いられている反射波低減工の一つにブロック堤がある。このブロック堤において、堤体内での渦流れ等の発生によるエネルギー逸散のみならず、水面付近に位置する部材と波面との衝突現象（スラミング現象）によるエネルギー逸散も重要になることが中村ら<sup>1),2),3)</sup>により指摘されている。そして、鉛直流体運動の卓越する短周期波の条件下では、このスラミング現象によるエネルギー逸散が大部分

を占めるようになることなども報告されている。また、中村ら<sup>3)</sup>は水面付近の部材のみを残した下部透過型の構造体でも、反射波の低減に有効であることを理論および実験により示している。

本研究では、このような研究成果を踏まえて、反射波低減工として、図-1に示すように水面付近のみに水平円柱を複数本配置した構造体を採用した。ただし、固定式ではなく、水平円柱部材の両側に設けた浮力体で浮遊する浮体式とした。

このモデルでは、やはり波面と水平円柱群とのスラミング現象による流体エネルギー逸散を利用して反射波を低減するため、浮体は鉛直流体運動が卓越する重複波の腹の位置付近に設置することを原則とした。また、浮体が共振動揺

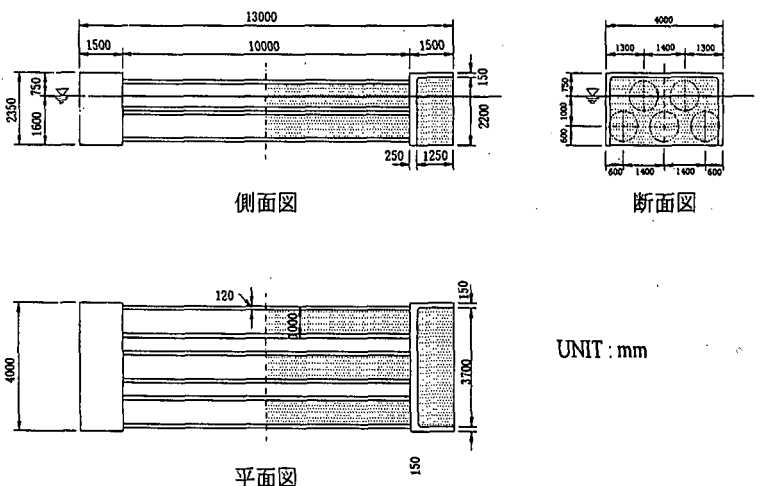


図-1 浮体式反射波低減工（現地量）

\* 正会員 中村 孝幸 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

\*\* 矢原 崇光 国土総合建設（株）

\*\*\*正会員 河野 徹 復建調査設計（株） 沿岸開発部

を呈す付近では、運動変位が増大すると共に波面と浮体の運動の間に位相差が生じるようになり、スラミング現象によるエネルギー逸散がより増大することが期待される。このため、浮体の鉛直動揺の固有振動周期は、後述するように消波対象波の上限の周期程度に設定することとした。

そして、この反射波低減工では、航走波などの短周期波を対象にした反射波の低減を目的としており、現地において周期 $T=2\sim4\text{sec}$ 、波高 $H=1\text{m}$ 程度を想定した。このとき、従来の中村ら<sup>3)</sup>による、鉛直壁の前面海域に固定された形式の水平円柱群モデルでの結果では、円柱設置幅と波長の比 $B/L$ が0.3付近で反射率は最小値を示している。これを浮体式反射波低減工に適用すると、代表周期 $T=3\text{sec}$ のとき必要設置幅 $B$ は図-1に示すように約4m程度になる。また、この低減工の鉛直動揺の固有振動周期 $T_n$ は、上記した理由により、消波対象波の代表周期 $T=3\text{sec}$ 程度となるように設定した。

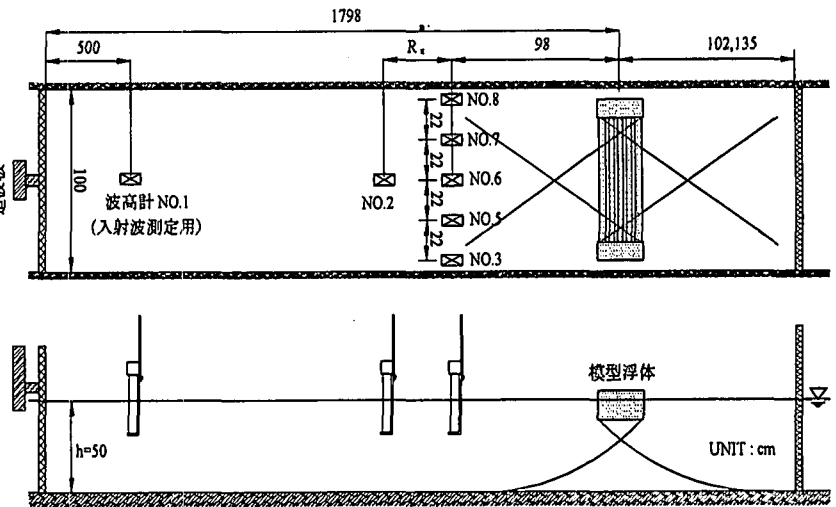


図-2 実験水槽と波高計および模型浮体の設置状況

### 3. 実験装置および実験方法

#### 3-1. 実験装置

##### (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。直立壁を想定した反射壁は、図-2に示すように、造波板より約18mの位置に設けた。この反射壁は、可動式で、浮体模型との間の離岸距離を各種に変化できるようにした。

波高計は、図-2に示すように、入射波測定用に1台、反射波測定用に6台の計7台の容量式波高計を用いた。水槽の幅方向に、5台の波高計を等間隔に配置したのは、浮体式低減工が規則的に直線配列された状態を想定して実験していることによる。既に中村ら<sup>4)</sup>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 $\lambda$ より短くなると、斜波成分が発生するようになり、反射波領域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-2に示すような直線アレイの波高計群により、方向性を考慮した反射波の測定が必要になる。ここでは、入・反射波の分離推定法と方向スペクトルの測定法とを組み合わせた中村ら<sup>4)</sup>の方法を用いて反射波を分離解析した。なお、この実験での $\lambda$ は、実験水槽の幅に等しい1mである。

模型浮体の動揺変位は、3台の加速度計を用いた間接法と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る直接測定の2方法で測定した。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) 模型浮体および係留チェーン

表-1 模型浮体の動的諸量

| 項目          | 原型    | 1/15模型                                           |
|-------------|-------|--------------------------------------------------|
| 長さ          | $L_0$ | 13.00m                                           |
| 幅           | $B$   | 4.00m                                            |
| 高さ          | $D$   | 2.35m                                            |
| 吃水          | $d$   | 1.60m                                            |
| 排水重量        | $W$   | 50.55t                                           |
| 重心位置 (水面より) | $Z_c$ | -0.48m                                           |
| 重量慣性モーメント   | $I_x$ | $1.046 \times 10^3 (\text{tf} \cdot \text{m}^2)$ |
|             | $I_y$ | $1.085 \times 10^3 (\text{tf} \cdot \text{m}^2)$ |
|             | $I_z$ | $7.890 \times 10 (\text{tf} \cdot \text{m}^2)$   |
| 慣性半径        | $r_x$ | 4.60m                                            |
|             | $r_y$ | 4.68m                                            |
|             | $r_z$ | 1.26m                                            |
| ライン単位長水中重量  | $w$   | 27.0 kgf/m                                       |
| 係留ライン長      | $S$   | 20.4m                                            |
| ライン水平投影長    | $X_s$ | 16.6m                                            |
| ライン鉛直投影長    | $Z_s$ | 5.9m                                             |

表-2 模型浮体の固有振動周期  $T_n$

| CASE | 平板寸法<br>長さ×幅×厚さ(cm) | 固有振動周期 $T_n$ |       |
|------|---------------------|--------------|-------|
|      |                     | Heave        | Roll  |
| 1, 4 | 標準型 (平板なし)          | 0.855        | 1.295 |
| 2    | 50×16×1.5           | 1.061        | 2.265 |
| 3    | 30×16×1.5           | 0.907        | 1.260 |

模型浮体には、原則的に図-1に示す現地浮体の1/15のものを用いた。模型の材質はアクリルで円筒管内部にはE P S材（発泡スチロール）の円柱部材、両サイドタンク内部には浮力体として同じくE P S材の矩形部材を取り付けた。浮体の重量および慣性モーメントの調整には、両サイドタンク内部に鉄板と鉛の延板を取り付けた。この時の浮体の動的諸量を表-1に原型のものと併せて示す。

浮体の係留方式としては、図-2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。表-2中には、模型浮体の係留に用いたチェーンの諸量についても原型量と併せて示す。

本実験では、反射波の低減に及ぼす固有振動周期 $T_n$ の影響についても一部実験を行っている。この場合、図-1に示す浮体の左右にある矩形浮力体の下部に平板を取り付け、それによる付加質量の増加で、鉛直動揺の固有振動周期を増加させた。平板には、広さの異なる2種類を採用した。表-2は、これらの平板の寸法および平板を付加したときと付加しない標準型の浮体（係留状態下）の固有振動周期 $T_n$ を一覧にして示す。

### 3-2. 実験条件

#### (1) 水深および作用波の条件

まず、模型浮体の設置水深 $h$ は全実験を通じて50cmと一定にした。模型浮体に作用させた入射波は設定周期として、 $T=0.59\text{sec}$ から $1.30\text{sec}$ の10種類、同じく設定波高として4.0cm、7.0cmの2種類とした。この入射波の周期条件は波長堤体幅比 $L/B$ で表すと約2.0から8.6の範囲にあり、現地での消波対象波である $L/B=3.6$ を含むように設定してある。

#### (2) 離岸距離の条件

反射波の低減効果を検討する上で、注意すべき項目として離岸距離が挙げられる。ここでは、消波対象波の波長を考慮して、離岸距離 $X_{OFF}$ としては102.0および135.0cmの2種類について実験を行った。

### 4. 実験結果とその考察

本論に入る前に、以下での説明を容易にするため、固有振動周期 $T_n$ を波の周期とする波長を $L_n$ と定義しておく。

#### 4-1. 基本設定での反射波の低減効果

まず最初に、上記のモデルの提案の所で述べたような反射波低減に関する予測が妥当なものかどうかを検討してみた。すなわち、浮体式低減工の設置位置としては、重複波の腹の位置で、しかも鉛直動揺の固有振動周期を消波対象波の周期にほぼ等しくする設定である。この場合、重複波の腹の位置は、反射壁の前面およびそれより半波長の整数倍離れた場所があるが、係留ラインの設置スペース等を勘案すると、1波長に相当する $L_n$ を選択してもよいと考えられる。

図-3は、このとき（CASE1と称する）の反射率 $C_R$ の実験結果を示すもので、横軸には重複波上における模型浮体の位置を示すために離岸距離 $X_{OFF}$ と波の波長 $L$ の比である $X_{OFF}/L$ が採ってある。図中において、短峰性の波変形が現れる $\lambda/L \geq 1$ の条件下では、水路中央部に位置する波高計のみの記録を用いて求めた断面2次元な反射率（●印）と反射波の各

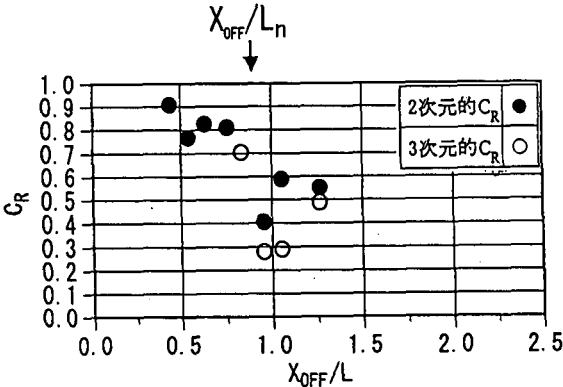


図-3 基本設定での反射率 $C_R$   
( $X_{OFF}=102\text{cm}$ , CASE1,  $H=7\text{cm}$ )

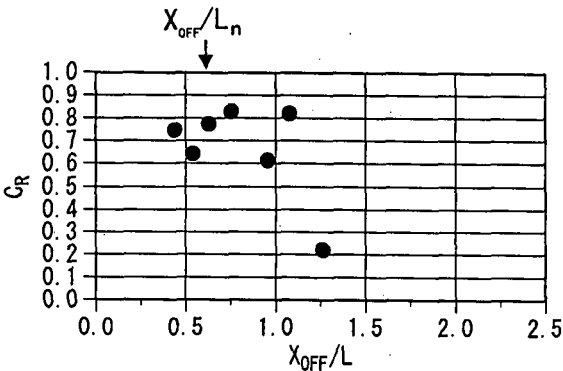


図-4 (a) 平板付き浮体の反射率 $C_R$   
(CASE2,  $H=7\text{cm}$ )

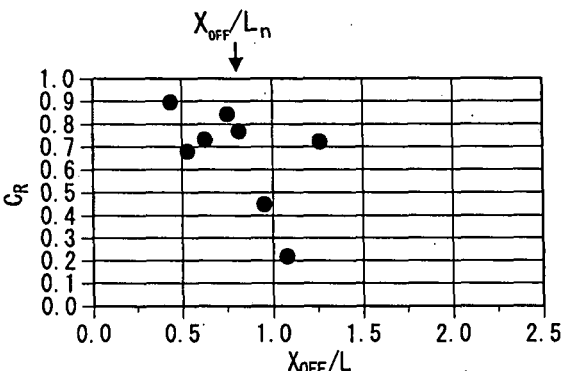


図-4 (b) 平板付き浮体の反射率 $C_R$   
(CASE3,  $H=7\text{cm}$ )

波向き成分を考慮して求めた3次元的な反射率（○印）の両者がプロットしてある。また、図中には、上記で定義した $L_n$ を用いて求められる $X_{OFF}/L_n$ に相当する条件も明記してある。

この図より、基本設定での反射率 $C_R$ は、その定義にかかわらず、 $X_{OFF}/L=1$ 付近で急激に低下する傾向が見られる。このような急激な反射率の低下は、上記したように浮体位置が重複波の腹の位置にあり、しかもその波周期条件が浮体の鉛直動揺の共振周期にほぼ等しく、鉛直動揺量が大きくなったことが原因と言え、結果的にスラミング現象により波の逸散を強く誘ったものと考えられる。

この図において、 $X_{OFF}/L=0.5$ に相当する波周期の条件は、やはり重複波の腹の位置に浮体があることになるが、この場合、反射波の低減効果は顕著でない。これは、より長周期の条件であるため、浮体の吃水が十分でないこともあるが、作用波の周期が鉛直動揺の共振周期より大きく、浮体と水面がほぼ同位相で運動するため、結果的にスラミング現象が見られないことによるものと推測される。

したがって、スラミング現象により反射波の低減を引き起こすには、予測通り①固有振動周期、②離岸距離の2つの要素が重要と言えよう。以下では、反射波が低減可能な有効周期帯を拡大するため、上記した2つの要素に着目して、個別に検討してみる。

#### 4-2. 固有振動周期の効果

模型浮体の固有振動周期 $T_n$ を変化させるために表-2中に示すように模型浮体の両サイドタンク底部にアクリル製の平板を取り付けた。以下では、大きいサイズの平板に関する実験をCASE 2、小さいサイズの平板に関する実験をCASE 3と称する。

図-4 (a), (b) は、これらCASE 2、3における反射率 $C_R$ の実験結果を図-3と同様にして示す。これらの図より、鉛直動揺の固有振動周期を長周期側に変化させても、反射波低減の有効周期帯は、有意に拡大しないことがわかる。確かに、固有振動周期を長周期側に変化させると、基本設定の場合に比較して、 $X_{OFF}/L=0.5$ 付近のより長周期の条件で反射率は低下する傾向が見られる。しかしながら、 $X_{OFF}/L=1$ 付近では逆に反射率は増加するなどの傾向も認められる。そして、反射波低減に及ぼす影響としては、浮体の設置位置の方が、固有振動周期よりも強いことが推測される。

#### 4-3. 離岸距離の効果

ここでは、CASE 1の基本設定において、模型浮体の位置に重複波の節がきているため、反射率が高くなったと推定される周期 $T=0.94\text{sec}$ のときの波長である $L=135\text{cm}$ を離岸距離に設定してみた。これをCASE 4と称する。このCASE 4は、鉛直動揺の固有振動周期を波周期とする波長 $L_n$ の約1.3倍の長さを離岸距離とするもので、波長 $L_n$ の波にとってほとんど節の位置に浮体があることになる。このような設定にしたのは、固有振動周期に等しい波周期が作用するとき、浮体は多少の波力が作用すれば、大きく揺れ、結果的にスラミング現象による逸散は大きいのではないかと類推したことによる。このため、浮体が重複波の腹に位置する波周期の条件は、むしろ非共振周期で反射波の低減度が十分でない条件を選定した。

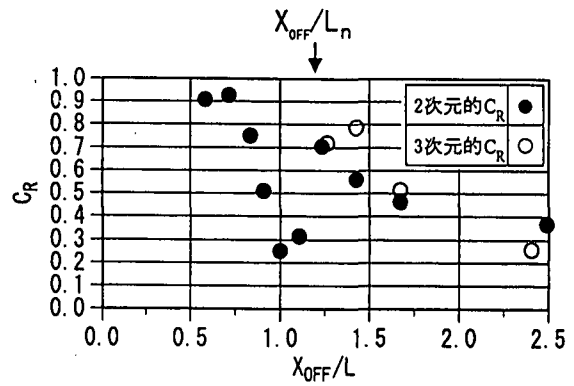


図-5 (a) 離岸距離を変えたときの反射率 $C_R$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=4\text{cm}$ )

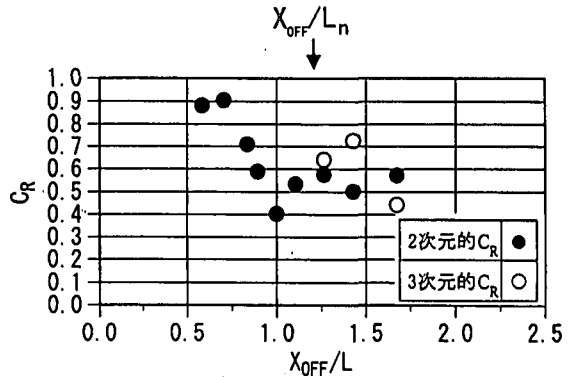


図-5 (b) 離岸距離を変えたときの反射率 $C_R$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

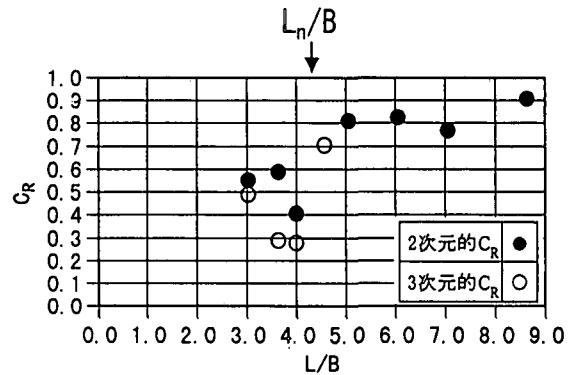


図-6 (a) 基本設定での反射率 $C_R$   
(CASE1,  $H=7\text{cm}$ )

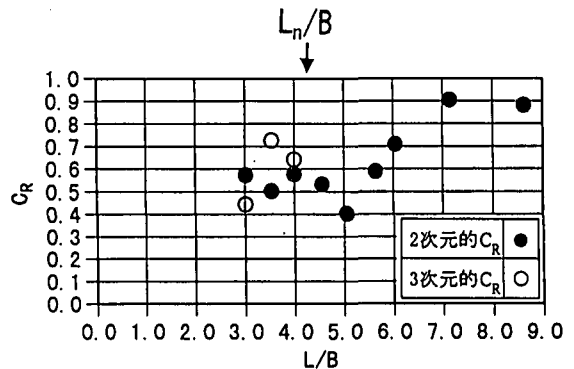


図-6 (b) 離岸距離を変えたときの反射率 $C_R$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

図-5 (a), (b) は、このCASE 4における反射率  $C_R$  の実験結果を、作用波高別に示す。この図より反射率  $C$  は、やはり  $X_{OFF}/L=1.0$  の条件で極小値を示す。基本設定の場合の図-3の結果と比較すると、同一波高 ( $H=7\text{cm}$ ) の条件である図-5 (b) では、 $X_{OFF}/L=1.25$  付近で浮体の位置に重複波の節がくる条件でも、反射率はある程度の低下が見られる。

図-6 (a), (b) は、同一スケールで基本設定 (CASE 1) とCASE 4の比較が行えるように、横軸に波長・堤体幅の比 ( $L/B$ ) をとり、これらのケースの反射率を再プロットしたものである。この図から、離岸距離を  $X_{OFF}/L_n=1.3$  程度にすると、反射率を有意に低減できる範囲が  $L/B$  で6程度までと長周期側に拡大できることがわかる。

#### 4-5. 動揺変位と係留力

図-7 は、反射波の低減効果が大きかったCASE 4 ( $H=7\text{cm}$ ) における鉛直動揺変位を示す。図中では、無次元鉛直動揺変位  $Y^*$  として、次式による値がプロットしてある。

$$Y^* = Y/H \quad (1)$$

ここに、 $Y$ : 鉛直動揺変位の正負ピーク値の和、 $H$ : 入射波高である。

この図より、鉛直動揺変位は、浮体位置に重複波の腹が形成される条件で大きく、節が形成される場合に小さくなっている。全般的に、波周期  $T$  が固有振動周期  $T_n$  より短周期側で鉛直変位は小さく、長周期側では平均的に大きいと言える。これは長周期側では水面の上下動に追従して浮体が動揺するようになるためである。

次に、図-8 (a), (b) は、動揺変位と同じくCASE 4 ( $H=7\text{cm}$ ) における係留チェーンの張力変化を示す。図 (a), (b) は対角線上の沖側、岸側それぞれの係留チェーン1本あたりに作用する張力の正側ピーク値  $F_T$  (引張力) を示すもので、係留ラインの水中重量  $Sw$  で除した無次元張力で表示してある。これらの図より、張力が大きいのは浮体位置に重複波の節が、反対に張力が小さくなるのは重複波の腹が形成される条件になっている。これは、波の節の位置では水平流体運動が卓越するため強い水平力が作用すること、および浮体の水平移動によるラインの張力変化が、鉛直移動によるものよりかなり大きいことによるものと考えられる。このように、反射波低減工では、鉛直動揺による係留力よりも、むしろ水平動揺による係留力に注意する必要がある。

#### 5. 結語

以上、本研究では、新たに提案した浮体式の反射波低減工について、より効果的に反射波を低減するための動特性の設定法や直立堤よりの離岸距離の設定法などを検討してきた。本研究で得られた、主要な結果をとりまとめると次のようになる。

- (1) 本研究で提案したスラミング現象を利用した浮体式の反射波低減工では、その鉛直動揺の固有振動周期を消波対象波の周期と同程度にすると、効率的に反射波が低減でき、反射率としては0.3程度のものが実現できる。
- (2) 反射波の低減効果は、直立堤と反射波低減工の間の離岸距離により変化する。効率的に反射波を低減するためには、反射波低減工を重複波の腹の位置付近に設置することが望ましい。
- (3) 反射波低減工の有効周期帯を拡大するためには、直立堤と反射波低減工との離岸距離を固有振動周期を波周期とする波長の1.25倍程度にするとよい。

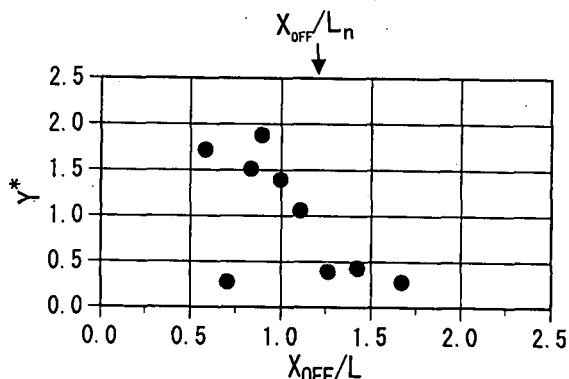


図-7 鉛直動揺変位  $Y^*$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

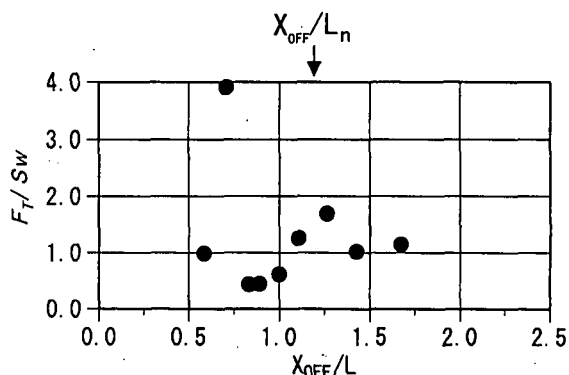


図-8 (a) 沖側チェーンの変動係留力  $F_T/Sw$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

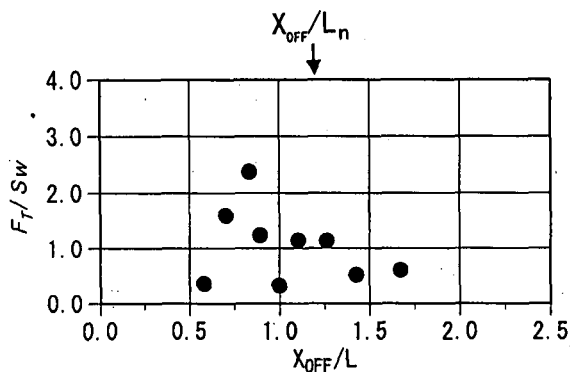


図-8 (b) 岸側チェーンの変動係留力  $F_T/Sw$   
(CASE4,  $X_{OFF}=135\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

#### 参考文献

- 1) 中村孝幸・小野塚孝(1988): 異形ブロック堤における部材波力の特性とエネルギー逸散機構について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 712~716.
- 2) 中村孝幸・西平和彦(1991): ブロック堤の部材波力の特性と流体力係数について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 581~585.
- 3) 中村孝幸・西平和彦・小野修史・終 大輔(1993): スラミング現象を考慮した解析法のブロック被覆堤への適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 791~794.
- 4) 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, 海岸論文集, 第37巻, pp. 534-538.