

平面配置された多列水平円柱型浮消波堤の効果について

EFFECTIVENESS OF ARRAYED DISSIPATIVE-TYPE FLOATING BREAKWATERS WITH A BUNDLE OF HORIZONTAL CIRCULAR CYLINDERS

中村孝幸¹・塚原靖男²・高木伸雄³・中山哲蔵⁴

Takayuki NAKAMURA, Yasuo TSUKAHARA, Nobuo TAKAKI and Akiyoshi NAKAYAMA

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 三井造船(株) 鉄構・物流事業本部 (〒870-0395 大分市日吉原3番地)

³正会員 農博 (独) 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部長
(〒314-0421 茨城県波崎町海老台)

⁴正会員 (独) 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部水理研究室長
(〒314-0421 茨城県波崎町海老台)

Floating breakwaters have been adopted in the comparatively deep-sea area with a mild wave climate, such as inland seas. In that area, various aquacultural facilities, such as fishponds, oyster farming facilities and so on, are usually installed. The development of highly dissipative floating breakwaters has been devoted in that sea area for reducing both transmitted and reflected waves from newly constructed breakwaters. We have already studied a new type of floating breakwater intending to reduce both the reflected and transmitted waves. The breakwater consists of a bundle of horizontal cylinders at the center and rectangular floats at the both ends. Major dissipation mechanism is the wave slamming loss of the horizontally installed circular cylinders near the water surface. Here, spatial arrangement of such breakwaters is precisely examined for effective reduction of both reflected and transmitted waves in the real sea. For the comparison, the conventional floating breakwater, such as a pontoon-type floating breakwater, is also adopted in the experiment.

Key Words : array of floating breakwaters, effective arrangements, dissipative-type floating breakwater, wave slamming loss

1. はじめに

著者らは波面と部材の衝突現象であるスラミング現象を利用した多列水平円柱型浮消波堤についてその波浪制御効果の改善を目的に、主に断面2次元の検討を進めてきた¹⁾。本研究では、その検討の中で最も効果的と判定された浮体断面を採用して、それを平面的に配置するときの波浪制御効果を検討するとともにより効果的な配置法について明らかにする。このとき、比較のため、従来のポンツーン型浮消波堤も合わせて検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験模型と実験条件

実験に用いた浮防波堤の模型は、図-1に示すように水平円柱を中央部にもつ形式のもので、水平円柱

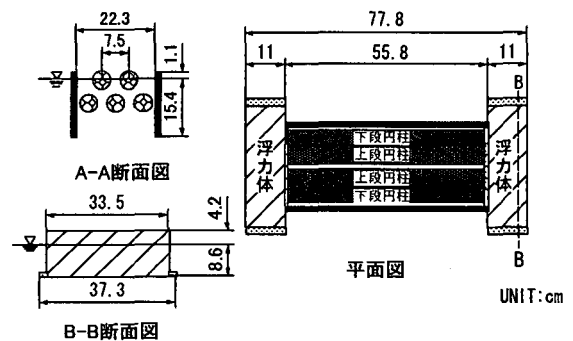


図-1 多列水平円柱型模型(単基浮体)

と波面との衝突現象(スラミング現象)による波エネルギーの逸散が生じやすい構造にしてある。想定した模型縮尺は現地の約1/18である。

浮体式構造物において、特に重要となる項目とし共振動揺があり、それを端的に表すパラメータとして固有振動周期がある。多列水平円柱型では波面

と部材との衝突現象による逸散に着目していることから、鉛直動揺の固有振動周期を、ポンツーン型では動揺発散波により透過波を低減していることから回転動揺の固有振動周期をそれぞれ測定した。これらの固有振動周期を、排水重量と慣性半径を併せて表-1に示す。

模型浮体に作用させた入射波は、波高Hが4cmと8cmの2種類で、周期Tが0.7~1.2sの範囲の17~18種類とした。このとき、水深hは67.5cmと一定にした。

模型の係留には市販のチェーンを用い、1基当たり4本を使用した。係留の方法は図-2に示すように堤体の左右に展張するようにラインを設置した。係留ライン長は260cm、単位水中重量は843dyn/cmである。またラインの反力特性を強化する目的から係留ラインに中間シンカーを設置した。中間シンカーの重量は2.9Nでラインの総重量の約1.3倍である。中間シンカーは係留ライン上で係留点側から68cmの所に設置した。

(2) 配列条件

実験では図-1に示す模型堤体およびこれを2基連結して1ユニットとしたものの2種類を用いた。後者の堤体長は1ユニットで155.6cmとなる。

堤体の空間的な配置法は、最も経済的な配列法である直線配列で開口率10%、15%と22%の3種類および、波向き方向に対して開口部を遮断できる千鳥配列(開口率0%)を採用した。また堤体長による効果を検討する目的から図-1に示す単基浮体で開口率22%とした実験も行った。採用した配列状況を図-2に、配列の諸量を表-2に一括して示す。

なお千鳥配列は、従来の研究²⁾で堤体同士の衝突を避けるため堤体前後の間隔を堤体幅程度としてあり、本研究でもこれに習い堤体の前後間隔を堤体幅と等しくしている。

表-1 模型浮体の動的諸量

	堤体幅(cm)	重量(N)	慣性半径(cm)	固有振動周期(s)
多列水平円柱型	24.3	113.2	11.36	0.80
ポンツーン型	27.8	364.6	8.59	0.76

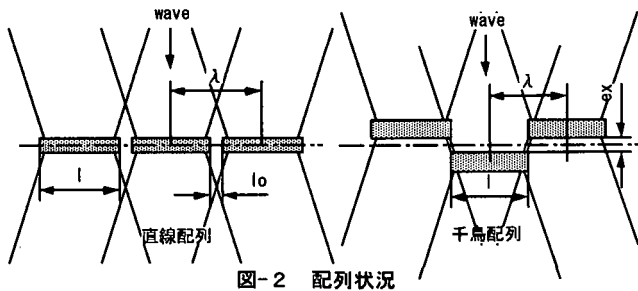


図-2 配列状況

表2 配列諸量

配列方法	堤体長l (cm)	開口長lo (cm)	開口率(%)	配列ピッチ長λ (cm)	堤体間隔ex (cm)
直線配列	155.6	17.3	10.0	172.9	-
	155.6	27.7	15.1	183.3	-
	155.6	44.4	22.2	200.0	-
	77.8	22.2	22.2	100.0	-
千鳥配列	155.6	0	0	155.6	33.5

(3) 実験方法

実験は、水産工学研究所の長さ28m、幅10mの平面水槽を用いた。この水槽には、一端には造波装置が設置されており、他端には碎石とスロープよりなる勾配1/10の消波工が設置されている。ただし、堤体長の短い単基浮体の実験は、愛媛大学工学部の長水路2次元造波水槽を用いた。このときの堤体長は77.8cm、水槽幅は100cmであり、水槽側壁を完全反射として鏡像効果を考えると、ピッチ長1mで開口率22%で直線状に規則的に配列した場合と同じになる。

実験では、図-3に示すように入射波測定用に1台、反射波測定用に7台、透過波測定用に6台の波高計を用いた。このように複数の波高計を用いて透過・反射波の測定を行ったのは、開口部をもつ浮防波堤において、波長Lと配列ピッチ長λとの比が、 $L/\lambda \leq 1.0$ の範囲では、入射波の作用方向と異なる方向にも透過・反射波の成分が発生するためである³⁾。

反射波は中村ら⁴⁾の方法によって波向き別の方向成分に分解した後に、入・反射波の分離推定法⁵⁾により求めた。単基浮体の実験でも同様な方法で透過・反射波を測定した。

動揺変位の測定には、水平方向の変位用に2台、鉛直方向の測定用に2台の計4台のレーザー式変位計を用いた。堤体の中心部には、浮体の重量に比較して十分軽い発砲スチロールとバルサ材よりなるレーザー光反射板を設け、変位計センサー部とこの反射板との距離を測定して、間接的に動揺量を測定した。このときの浮体の動揺量としてはSway, Heave, Rollの3変位を分離推定した。

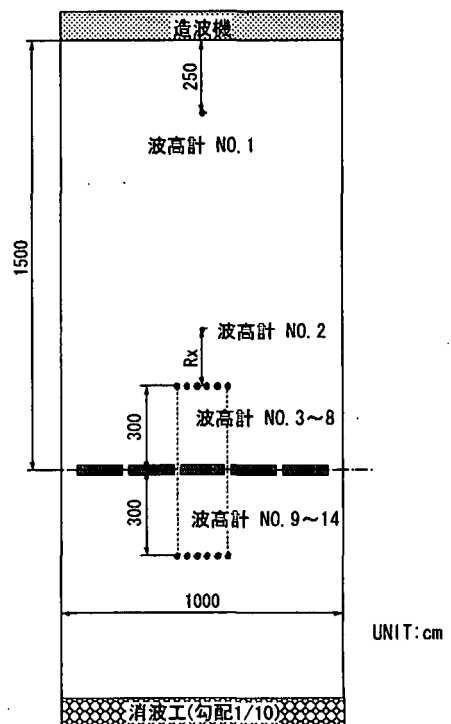


図-3 波高計の設置状況

3. 減衰波理論による近似算定法

ここでは、開口部の影響や堤軸方向に複数の異なる断面で構成されている浮体を取り扱えるように、ストリップ法に基づく近似理論解析法を用いた。この近似解析法では、従来の解析法²⁾のように規則的配列された堤体群まわりの波変形を厳密に取り扱うことができない。しかしながら、各断面ストリップに対しては、渦流れ等の発生による逸散が考慮できるように断面2次元の減衰波理論⁶⁾を適用しており、逸散効果の考慮できない従来の厳密解析法より現実的な予測が可能になると考えられる。

近似算定では、図-1に示す浮体のように複数の異なる断面で構成され、さらに両端に開口部がある場合を想定する。各断面の長さを l_i とし、これら各々に対して2次元解析法が独立に適用できるものとする。このとき、開口部を含め、各断面を透過するエネルギー流束および各断面より反射されるエネルギー流束に着目すると、次式により近似的に反射波高比 K_r 、透過波高比 K_t が求められる。

$$K_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(C_n^2 \frac{l_i}{\lambda} \right)} \quad (1)$$

$$K_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_n^2 l_i) + l_0}{\lambda}} \quad (2)$$

ここに、 l_0 ：開口長、 λ ：隣接する堤体の中心間距離で配列ピッチ長に等しい。 C_n, C_n ：各断面における反射率と透過率で、ここでは断面2次元の減衰波理論とストリップ法による動揺計算を介して求めた。

4. 堤体構造による比較

この章では、開口率を15%と共通にして従来形式のポンツーン型と多列水平円柱型の構造的な違いによる波浪制御効果の相違について検討する。

図-4、-5は多列水平円柱型とポンツーン型の両者について透過・反射波に関する特性量の波周期による変化を示す。ここで特性量とは、透過・反射波高のrms値と入射波高の比で与えられる透過波高比 K_t 、反射波高比 K_r を用いた。これらの比は、波と浮体列の干渉により生じる斜波成分の影響を除けば、式(1)、(2)の定義による比と一致する。そして、図中では、横軸に波長に関する無次元量として波長堤体幅比 L/B と波長・配列ピッチ長比 L/λ の両者が採っている。

図-4の反射波高比 K_r について両堤体で比較すると、短周期側では多列水平円柱型が低く、長周期側

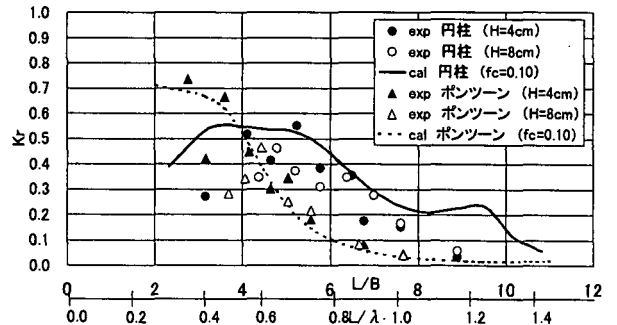


図-4 堤体構造の違いによる比較、反射波高比 K_r (ポンツーンと多列円柱型の比較 開口率15%)

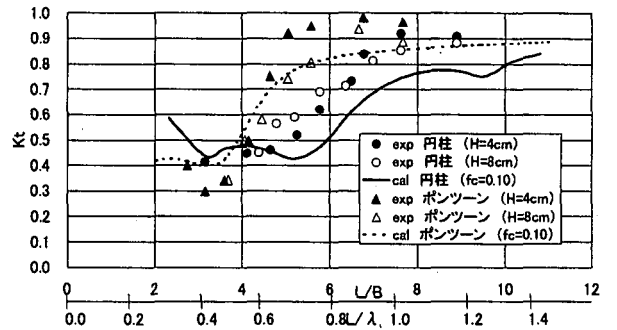


図-5 堤体構造の違いによる比較、透過波高比 K_t (ポンツーンと多列円柱型の比較 開口率15%)

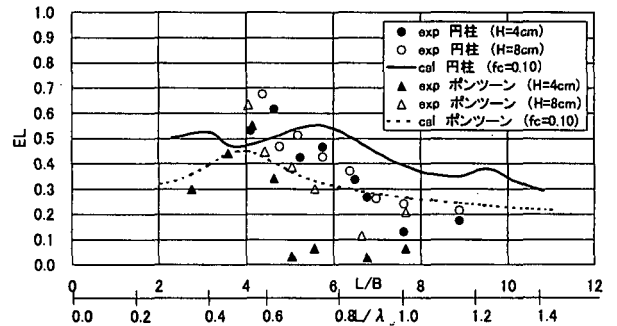


図-6 堤体構造の違いによる比較、エネルギー逸散率EL (ポンツーンと多列円柱型の比較 開口率15%)

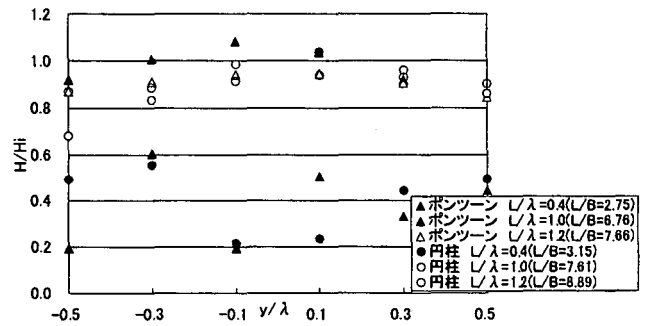


図-7 堤体構造の違いによる比較、透過側波高分布 (開口率15%)

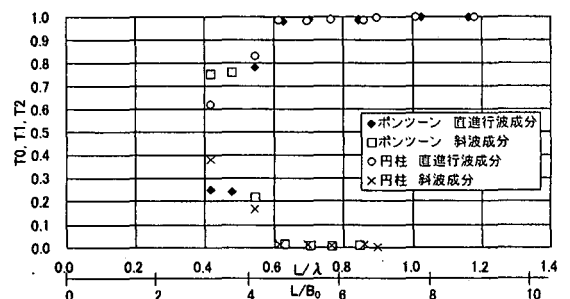


図-8 堤体構造の違いによる比較、透過側各波向き成分比 (開口率15%)

では逆にポンツーン型の方が低くなっている。これは、多列水平円柱型堤体では、短周期側でスラミング現象による逸散が顕著になるため、長周期側ではポンツーン型堤体の吃水(8.6cm)に比較して側方版の吃水(15.4cm)が深いことによる影響と考えられる。

実験結果と算定結果を比較すると、多列水平円柱型で特に短周期側で相違が見られるが、これは算定において斜波成分の影響およびスラミングによる逸散が考慮されていないためと推測される。

図-5の透過波高比 K_t を比較すると、ほぼ全ての周期条件で多列水平円柱型の方が低い。そして、ポンツーン型では、長周期の条件になると急激に K_t が上昇するなどの特性が認められる。このような差は特に吃水の影響によるものと考えられる。

図-6は両堤体のエネルギー逸散率 EL の比較を同様にして示すものである。多列水平円柱型のHeaveの共振点付近である $L/B=6$ 付近において両構造形式間で差が大きく、この差は多列水平円柱型のHeaveの共振動揺によりスラミング逸散が増大することによるものと推定される。なお、多列水平円柱型堤体の動揺特性については、一括して後述したい。

次に各堤体列まわりの波高分布が L/λ によりどのように変化するか、またその時の波向き成分比がどのような状況にあるかを検討する。

図-7は透過側の波高分布の比較を示す。斜波成分が発生する条件、境界領域、斜波成分が発生しない条件の代表例として $L/\lambda=0.4, 1.0, 1.2$ の結果が選定してある。図中では各測点での透過波高を入射波高で除した波高比の分布を配列ピッチ長にわたり示す。斜波成分が発生する $L/\lambda=0.4$ ではポンツーン型の波高分布はピークが2つ見られる複雑な分布を示すのに対して、多列水平円柱型では側方版の影響により中央部で低下する凹型の波高分布に近いことが認められる。両構造形式とも斜波成分が発生しない $L/\lambda=1.0$ と 1.2 では、浮体下部よりの透過波が卓越するようになるため、ほぼフラットな分布に近く、波高値も両者で差が見られない。

図-8は、両構造形式の透過波全エネルギーに占める各波向き成分エネルギーの割合の L/λ による変化を示す。各波向き成分としては、入射波と同方向に伝播する直進行波成分とそれとは異なる方向に伝播する斜波成分に分離してある。第2横軸には、多列水平円柱型の波長堤体幅比 L/B についても示す。

この図より、ポンツーン型堤体で $L/\lambda=0.4$ のときには、直進行波成分よりも斜波成分が卓越することが分かり、このため図-7に示したように平面的に複雑な波高分布を呈したと考えられる。このとき、多列水平円柱型では、未だ直進行波成分が卓越する状況にあり、上記したように長峰性の波面形状に近い結果になったものと解釈される。

以上より、多列水平円柱型浮消波堤は、従来形式のポンツーン型浮消波堤より透過波の制御可能な有効周期帯が広く、しかもそのとき透過波高の平面分布は平坦に近いこと、また短周期側では高反射波も

低減できるなど有効な構造形式と判定される。

5. 各種配置条件に対する結果

(1) 配列方法による比較

ここでは、直線配列(開口率15%)と波向き方向に対して開口部が遮断できる千鳥配列(開口率0%)の結果を比較検討する。図-9~11に直線配列と千鳥配列の場合の波変形の実験結果を示す。図中には付加的な横軸として千鳥配列での波長配列ピッチ長比 L/λ_0 と直線配列の波長配列ピッチ長比 L/λ_1 を示す。ここで千鳥配列の配列ピッチ長 λ_0 は、隣接する堤体の中心間距離としている。

図-9の反射波高比 K_r を見ると、短周期側では波向き方向に対して開口部をもたない千鳥配列の方が高く、長周期側では逆に直線配列の方が高くなる傾向が認められる。これは、千鳥配列の場合、前後堤体よりの反射波が空間的に位相差をもつことなどによる影響と考えられるが、定かでない。

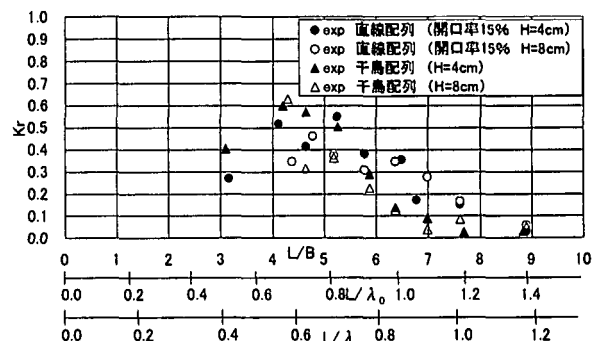


図-9 配列構造の違いによる比較、反射波高比 K_r

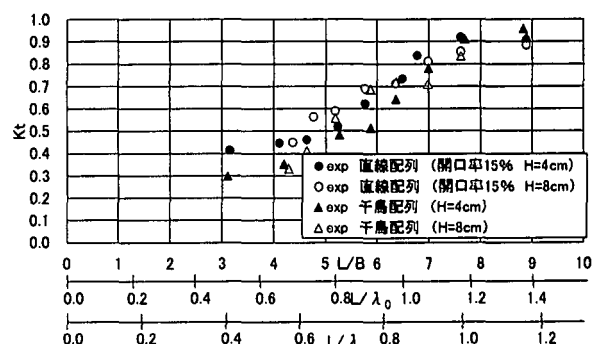


図-10 配列構造の違いによる比較、透過波高比 K_t

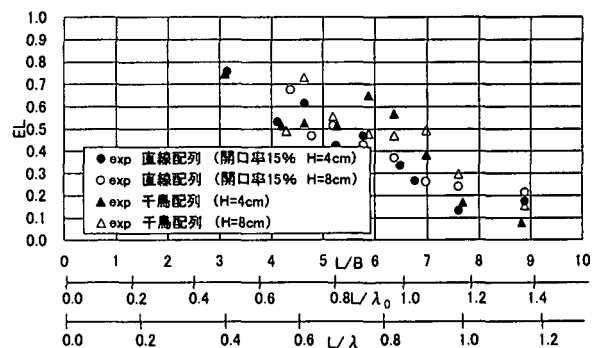


図-11 配列構造の違いによる比較、エネルギー逸散率 EL

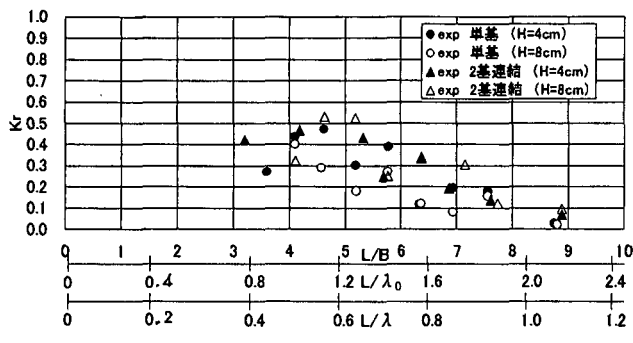


図-12 反射波高比 K_r の堤体長による変化 (開口率22%)

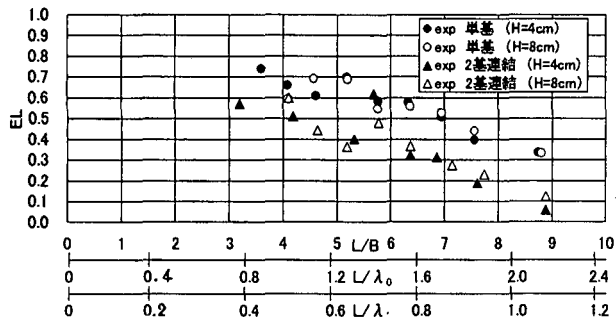


図-14 エネルギー逸散率の堤体長による変化 (開口率22%)

一方、透過波高比 K_t は、図10に見られるように全体的には千鳥配列の方が低く、この傾向は透過波高が小さな短周期側で顕著である。これはやはり見かけの開口部がないことによると考えられる。図-11は、上記の K_r 、 K_t を用いて求めたエネルギー逸散率 EL を示すが、全体的な傾向としては千鳥配列の方が多少ながら高くなるようである。これは、波向きに対して密に構造体が配列されていることによる影響と考えられる。

以上の検討より、ここで採用した千鳥配列では、直線配列に比較すると、見かけの開口部がないため、特に透過波が低減できることなどが判明した。ただし、堤体間の前後間隔の影響などについては今後さらに検討すべき余地がある。

(2) 堤体長による比較

ここでは、開口率22%と固定して、2基連結浮体とその半分の堤長である単基浮体の2種類を対象にして堤体長の効果を検討してみる。なお、単基浮体の結果は、長水槽での実験によるもので、水槽側壁を完全反射と仮定してその鏡像効果により直線状の規則的な配列を再現していることに注意されたい。

図-12~14は、単基浮体と2基連結浮体による波変形の実験結果を示す。図中には斜波成分の発生の有無が判定しやすいように、第2横軸として、単基浮体の波長配列ピッチ長比 L/λ_0 と2基連結浮体の波長配列ピッチ長比 L/λ も示す。

反射波高比 K_r は、2基連結浮体と単基浮体の両者共にばらつきが大きく明確な比較は難しいが、全体的には、単基浮体の方が多少ながら低くなる傾向が認められる。このようなばらつきは、平面波浪場での反射波の分解方法およびその精度に起因するものと考えられる。

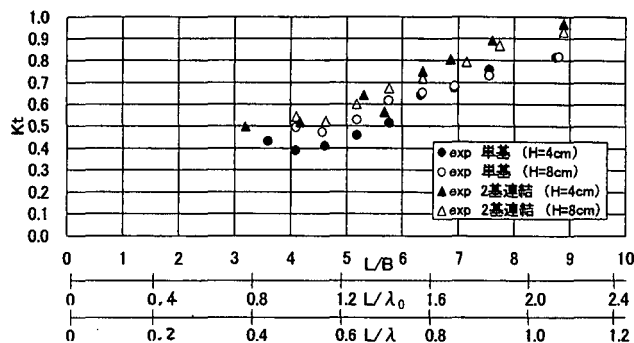


図-13 透過波高比 K_t の堤体長による変化 (開口率22%)

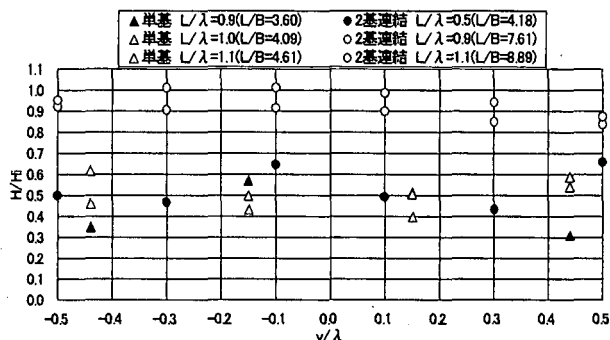


図-15 堤体長の違いによる透過側波高分布の比較 (開口率22%)

一方、透過波高比は単基浮体の方が2基連結浮体に比較して0.1程度低くなる特性が見られ、これは中村ら²⁾により指摘されているような斜波成分の発生の有無による影響と考えられる。事実、2基連結浮体では、ほとんどの場合において図中に示すように $L/\lambda < 1$ と斜波成分が発生する条件下にある。また、図-14に示すエネルギー逸散率 EL は、単基浮体の方が大きく、これは単基浮体ではほとんどの L/B で波長に比べて配列ピッチ長が短いため斜波成分が発生せず、このため長峰性の1次元的な波面形状となり効果的にスラミング等により波エネルギーが逸散できるためと考えられる。

図-15は、透過側の波高分布の比較を示す。この図から、堤体長に関係なく、 L/λ が1より小さい条件下では、斜波成分の発生があることから、波高の空間変動が比較的大きくなることや、1より大きい条件下ではほぼ平坦な長峰性の波面形状に近くなる傾向などが認められる。特にこのような傾向は、堤体下部よりの透過が少ない透過波高比が小さな条件下で見られる。このように、堤体長の影響としては、直接的には斜波成分の発生の有無に関係して現れることが指摘でき、透過波の制御効果を高めるには、波長堤体幅比のみならず波長配列ピッチ長の影響についても考慮する必要がある。

6. 動揺量

図-16~18は、Sway, Heave, Rollの3変位についてそれぞれ示すもので、図中には水平円柱型浮体で2基連結型・千鳥配列、直線配列で2基連結型の開

口率15%, 22%および単基浮体で開口率22%のケースの計4種類の結果について併せ示してある。

このとき、分離推定した各変位の実験結果は、SwayとHeaveの並進変位については、両振幅を入射波高で除した無次元量で、また回転変位のRollについては両振幅回転角に堤体幅の半分 $B/2$ を乗じた後に入射波高で除した無次元量で表してある。なお図中には開口部や中間シンカーの影響が考慮されていないが、参考データとして減衰波理論による算定結果も併せ示した。

図-16に示すSway変位は、周期と共に増大する傾向が見られるが、他の変位に比較して、単基浮体と2基連結浮体の間で差が大きい。これは、Sway運動に対する復元力は係留力しかなく、同一の係留ライン・方式を両形式堤体で使用しているため、結果的に1基堤体についての相対的な係留復元力が単基浮体で大きくなることによるものと考えられる。そして、2基連結浮体のSway変位は、配列方法や開口率による明確な差異があまり見られず、このような影響をほとんど受けないと判定される。

そして、Heave, Roll変位(図-17, -18)についても、同様に配列方法や開口率による差異は、ほとんど認められない。また、これらの変位については、単基浮体と2基連結浮体の間でほとんど差が見られないが、これは静水力学的な復元力が係留復元力に比較して卓越した大きさをもつためと考えられる。

スラミング現象によるエネルギー逸散に関するHeave変位に着目すると、ほぼ $L/B=6$ 付近でピークを示し、前出のエネルギー逸散率 EL がピークとなる条件にほぼ対応することが分かる。そして、Heave変位の L/B による変化は、減衰波理論による算定結果と定性的に一致することも確認できる。

最後にRoll変位に着目すると、実験の範囲内では増大傾向にあることからピーク条件を特定できないが、算定結果を参照するとほぼ $L/B=9$ 付近にあると推定される。そして、算定結果ではかなり大きなRoll変位を予測するが、これは従来の研究⁶⁾でも指摘されているように係留ライン等による構造減衰や共振点付近で流体抗力の非線形性の影響によるものと推測される。

7. 結語

(1) 多列水平円柱型浮消波堤は、従来形式のポンツーン型浮消波堤に比べて透過波の有効周期帯が広く、反射波に関しても短周期側で低減できるため、有意な構造形式である。

(2) 直線配列と千鳥配列を比較すると、反射波高比は周期条件により大小に変化するが、透過波高比はほとんどの周期条件下で千鳥配列の方が低くなる。

(3) 配列された浮防波堤群では、透過波に各種の波向き成分が含まれ、波長が配列ピッチ長より短い条件になると、斜波成分が増大する傾向にあり、透過波の制御効果を高めるには、波長堤体幅比のみならず波長配列ピッチ長の影響も重要になる。

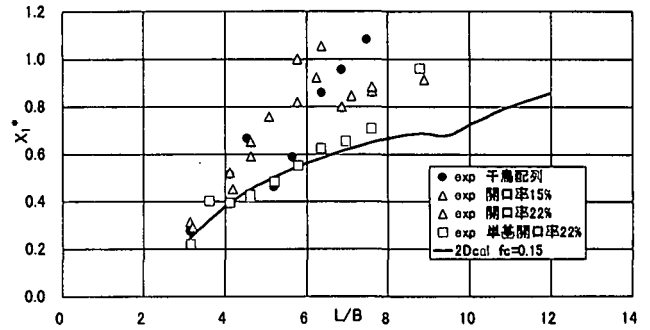


図-16 各配列別動揺量 Sway変位
($X1=X1/(H/2)$ $H=4\text{cm}$)

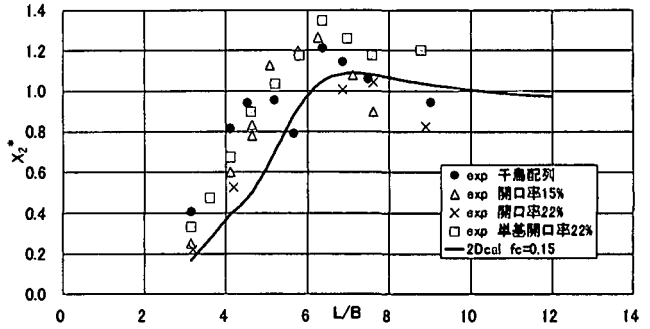


図-17 各配列別動揺量 Heave変位
($X2=X2/(H/2)$ $H=4\text{cm}$)

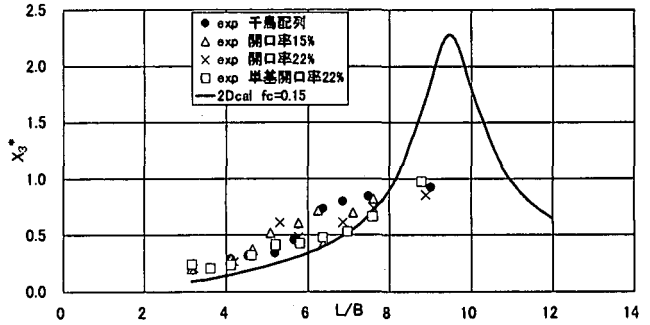


図-18 各配列別動揺量 Roll変位
($X3=X3(B/2)/(H/2)$ $H=4\text{cm}$)

参考文献

- 1) 中村孝幸, 塚原靖男, 高木伸雄, 中山哲蔵, 河野徹, 楨本一徳: 多列円柱型浮体式消波工による消波効果の増大工法について, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 77-82, 2001.
- 2) 中村孝幸, 野村周吾, 泉川学文, 森田知志: 浮防波堤の平面的な配置法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp531-535, 1992.
- 3) 中村孝幸: 配列構造物と波の平面的な干渉, 水工学に関する夏期研修会講義集, ppB2-1-B2-20, 1997.
- 4) 中村孝幸, 小野正順, 長田和久: 波向き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, 1990.
- 5) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地 治: 不規則波実験における反射波の分離推定法, 港湾技研資料, NO. 248, pp199-245, 1976.
- 6) 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.
- 7) 中村孝幸, 野村周吾, 泉川学文, 森田知志: 直線配列された浮防波堤の波浪制御効果に関する研究: 海洋開発論文集, 第8巻, pp277-282, 1992.