

配置するときの効果や配置法による差異などについても明らかにする。

2. 効果的な断面浮体の選定

(1) 実験装置および実験方法

a) 模型浮体：模型の断面は、図-1に示すように、原則的に矩形浮体の両側面に垂下版式の低反射工を設け、さらに浮力体下部に没水平版を取り付けた構造である。想定した模型縮尺は現地の約1/20である。

既に前報告¹⁾において、遊水室型の低反射工の影響や没水平版の鉛直方向位置の影響などについて報告済みであることから、ここでは、特に没水平版の長さ B_p の影響と鋼製やコンクリート製で異なる浮体重量の影響について検討を進める。浮体重量については、浮体中央部の矩形浮力体の底部にバラストを装着することで実現した。

用いた模型浮体は、没水平版の幅 B_p に着目すると、 B_p を全堤体幅と等しくした断面（長水平版型）、内側の矩形浮力体幅と等しくした断面（短水平版型）、図-1に示すようにこれら2つの中間にした断面（中水平版型）の3種類があり、これらの各々についてバラストを付加した3種類の計6種類である。またバラストの無い状態で、没水平版を取り外した断面（基本型断面）も比較のため用いた。このとき、模型浮体の長さは、共通して水槽幅より多少短い97cmとした。そして、没水平版幅 B_p と吃水深 d を除く断面諸寸法は、図-1に示す値に固定している。

表-1は、これら7種類の模型浮体の中で代表的な4種類のものについて動的諸量などを一括して示す。なお、表中で深吃水型と称するものが、バラストを装着した模型に相当する。表中には、鉛直方向(Heave)と回転方向(Roll)の固有振動周期およびその周期に対応する波長と堤体幅（中央部浮力体幅）の比、 L/B についても付記した。

b) 実験方法および波条件：この実験には長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元造波水槽を用いた。

波高計は入射波測定用に1台、反射波測定用に2台、透過波測定用に1台を使用した。浮体の動揺量はキーエンス社製の高速・高精度画像処理システムを用いて水平・鉛直・回転動揺量を測定した。

係留ラインの張力は、リングゲージ式張力計を浮体側の係留点に取り付けて測定した。浮体の係留には市販の鋼製チェーンを用い、4点係留とした。その展張方法は、水槽幅が長水槽であり限定されるこ

とからチェーンが浮体の左右の係留点とそれぞれのアンカー点との間で交差するクロス係留とした。このとき、ラインの反力特性を強化する目的から中間シンカーを設置した。中間シンカーは水中重量で5.4Nである。

模型浮体に作用させた入射波は、波高 H が5cm, 7.5cm, 10cmの3種類で、周期 T が0.6~1.3sの範囲の18~48種類とした。このとき、水深 h は65cmと一定にした。

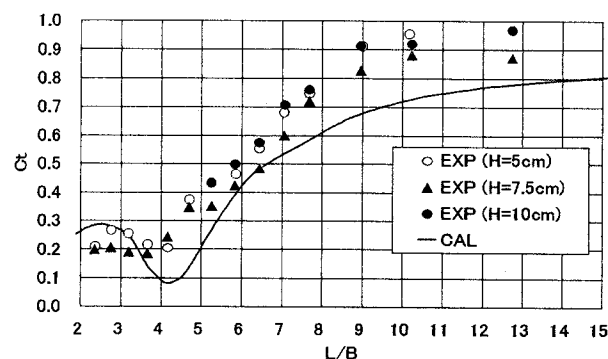


図-2 基本型における透過率 C_t

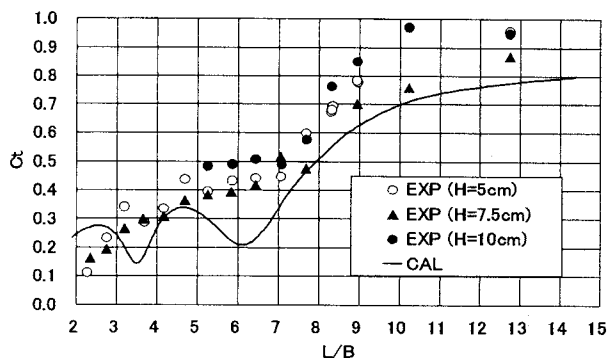


図-3 短水平版型における透過率 C_t

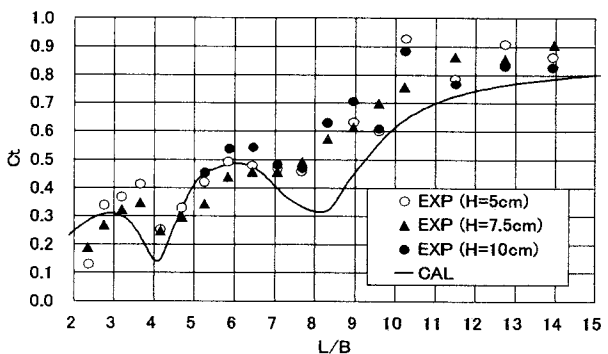


図-4 中水平版深吃水型における透過率 C_t

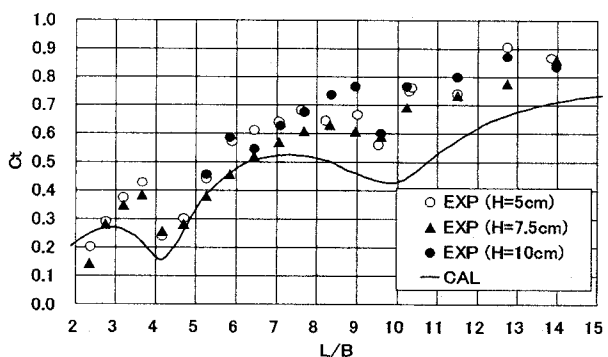


図-5 長水平版深吃水型における透過率 C_t

表-1 各実験模型の動的諸量

			基本型	短水平版 型	長水平版 深吃水型	中水平版 深吃水型
固有振動 周期	Heave	(s)	0.75	0.92	1.25	1.16
		L/B	3.7	5.5	9.6	8.4
	Roll	(s)	1.13	1.18	1.45	1.25
		L/B	8.1	8.7	12.1	9.6
重量		(N)	156.8	200.9	258.7	248.9
重心(水面から)		(cm)	2.2	3.6	6.7	6.1
乾舷		(cm)	6	5.5	3.6	3.7
吃水 d		(cm)	6.0	6.5	8.4	8.3
没水平版幅 Bp		(cm)		24.0	36.4	30.2
慣性モーメント		(kg・cm ²)	1971.1	2459.8	3016.1	5316.1
慣性半径		(cm)	11.1	11.0	10.8	14.6

(2) 実験結果と考察

以下において各種の水理特性量や動揺量を紹介するが周期の無次元量については、共通して波長堤幅比 L/B を用いる。また、理論的な予測という観点から、減衰波理論²⁾による算定結果も併せ示す。

a) 没水平版の効果：図-2, 3は、それぞれ基本型、短水平版型の浮防波堤の透過率 C_t を示す。これらの図から没水平版を取り付けることで透過波低減に有効な周期帯は、長周期側に有意に拡大することが分かる。これは、表-1に示すHeaveおよびRollの

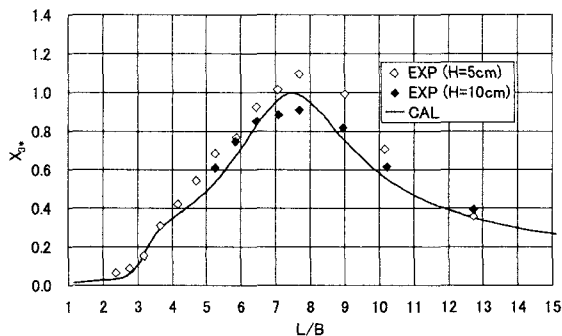


図-6 基本型 回転動揺量 $X_{3*} = X_3 \cdot (B/2)/H$

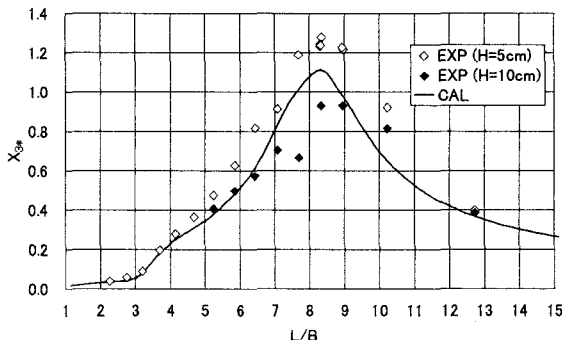


図-7 短水平版型 回転動揺量 $X_{3*} = X_3 \cdot (B/2)/H$

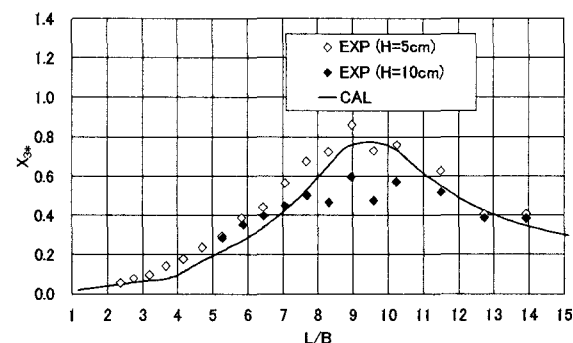


図-8 中水平版深吃水型 回転動揺量 $X_{3*} = X_3 \cdot (B/2)/H$

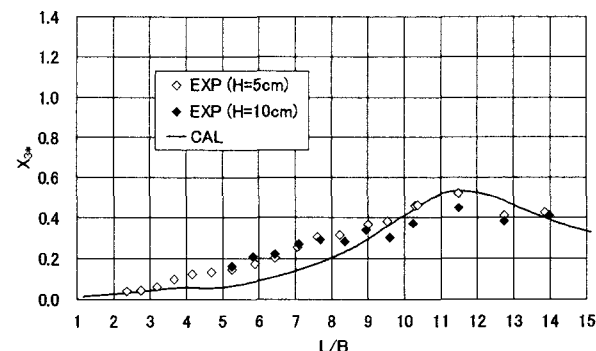


図-9 長水平版深吃水型 回転動揺量 $X_{3*} = X_3 \cdot (B/2)/H$

共振周期が没水平版を取り付けることで長周期側に移行するため、動揺発散波による位相干渉の影響が強くなり、長周期の条件まで C_t を低減できると考えられる。また、算定結果において水平版型では、Heaveの共振周期付近で C_t が低下する傾向が見られるものの実験結果との定量的な差が認められる。これは、算定において動揺発散波による位相干渉を過大に評価することによるものと推測される。

b) 没水平版の幅の検討：図-4, 5は、代表例として、それぞれ中水平版深吃水型、長水平版深吃水型の C_t の結果を示す。没水平版を長くすると、 L/B の大きな長周期側で C_t が低下する傾向が認められ、特に算定結果では C_t の第二極小値の現れる L/B の値が順次長周期側に移行することが分かる。ただし、実験結果は算定結果ほど顕著に上下動する傾向は見られない。このような没水平版の長さによる C_t の変化の傾向は、水平版長さに伴う付加質量や付加慣性モーメントの増大化による影響と考えられる。

しかしながら、水平版を長くし過ぎると、長水平版深吃水型の結果に見られるように、 $L/B=5 \sim 6$ 付近の中間的な周期帯で、逆に C_t が増大する傾向も認められ、動特性を踏まえて適切な長さの水平版にする必要があるといえよう。なお、 L/B の小さな短周期側で現れる C_t の第一極小値は、浮体側面に取り付けた遊水室型低反射工による影響であることを付記しておく。

そして、本研究で検討した範囲内で、最も効果的と判定される断面は、 $L/B=5 \sim 6$ 付近の中間的な周期帯で C_t が比較的低く、しかも $L/B=10$ 付近まで透過波の低減効果が認められる中水平版深吃水型といえる。

c) 代表断面に対する波浪動揺量：ここでは、上記で透過率の結果を紹介した代表断面について波浪動揺量を検討してみる。図-6～9は、それぞれ基本型、短水平版型、中水平版深吃水型、長水平版深吃水型の回転動揺量 X_3 (Roll)を示す。回転動揺量は、その両振幅 X_3 に浮体幅 B の1/2を乗じて一旦長さの次元にし、これを入射波高で除して無次元化してある。これらの図の比較から、没水平版が長くなると、Roll変位の極大値は L/B の大きな長周期側に移行することやその絶対値も低下することが認められる。そして、図-6～8の比較から、Roll変位を抑制するためには、水平版を側方遊水室の下部まで延長することが必要であることも分かる。また、このような傾向や特性は、理論的にもほぼ予測できることも確認できる。

このようにRoll変位の大小に着目すると長水平版型が最良であるが、上記した透過波の制御効果を考え合わせると、Roll変位が比較的小さい中水平版深吃水型が検討した堤体中で最も優れていると結論される。なお、本研究では、係留ラインの張力に関する比較も行っているが、その大小関係はほぼRoll変位量の大小関係に酷似していたことを確認しており、ここに付記しておく。

3. 配列浮防波堤による平面的な波浪制御効果

ここでは、2. の検討で最も効果的と判定された浮防波堤を対象にして、これを複数基配列するときの平面的な波浪制御効果について検討する。

(1) 実験装置および実験方法

a) 模型浮体と実験条件：実験に用いた浮体断面は、上記の2. の検討で効果的と判定された中水平版深吃水型浮防波堤と同一のものである。ただし、その堤体長は、図-10に示すように平面配置条件等を考慮して200cmと長くしてあり、ほぼ断面実験のときに比較して倍増している。そして、断面実験のときと動特性を一致させるため、模型重量や重心を通る水平軸まわりの慣性モーメントなどは堤体長の増加分に応じて増大させてある。

模型浮体に作用させた入射波は、波高 H が5cm、10cmの2種類で、周期 T が0.7~1.6sの範囲の11~

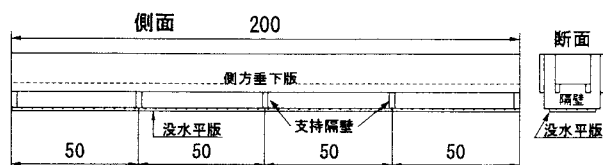


図-10 三次元実験での模型浮体 単位:cm

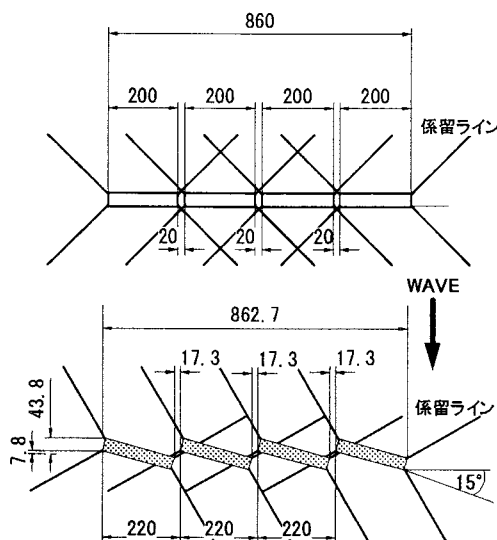


図-11 浮防波堤の配列状況

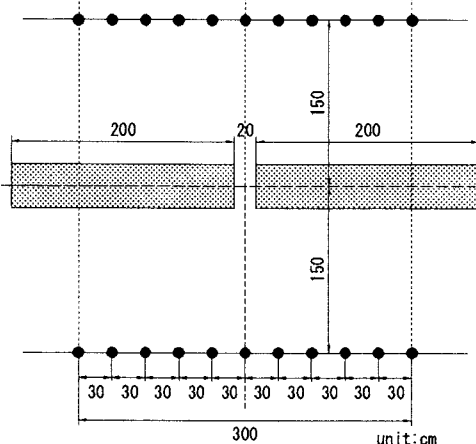


図-12 波高計の設置状況

16種類とした。このとき、水深 h は水槽の物理的な制約から、断面実験のときより多少浅い62cmと一定にした。

b) 実験水槽：実験は、水産工学研究所の長さ34m、幅20mの平面水槽を用いた。水槽の一端には20台のピストン型造波機よりなる多方向造波装置が設置されており、後述する斜め入射波も造波できる能力を備えている。

c) 配置方法：上記した200cm長さの堤体を全部で4基使用した。配列方法は、開口率9%(開口幅20cm、配列ピッチ長220cm)と固定して、①真直ぐ配置の直線配列と②配置ユニットを15°傾斜させて(傾斜配置ユニット)直線配列とする方法の2種類を用いた。図-11は、直線配置、傾斜配置ユニット(15°傾斜配置)の配列状況を示す。

d) 実験方法：実験では、大別して二種類の方法により浮体群による波浪制御効果を検討した。一つは、浮体列の中央部に位置する2つのユニットに着目して、反射波および透過波の特性を開口部の影響を含めて検討するもので、図-12に示すように、計12台の波高計群をそれぞれ反射側と透過側の代表的な離岸距離に直線アレイで配置して、配列方向の波高分布を測定し、それらのrms値を求めた。

一方、もう一つ方法は、浮体列まわりの平面的な波高分布を検討する実験で、浮体列の周辺領域を格子状に分割して、各格子点上で波高を測定した。測線は、浮体列の透過側に平行に設け、全部で4~6測線とした。このときの波条件は、 $T=0.8s$ 、 $H=5cm$ と $T=1.1s$ 、 $H=6cm$ の2種類とした。

浮体の波浪動揺量および係留ラインの張力は、2.で紹介したものと同一の方法で計測した。

e) 係留方法：係留ラインは、このときの堤体長が断面2次元のときのほぼ2倍であることを考慮して、2. で用いたものより1.4倍程度重くしてある。また、中間シンカーの重量は、調整が容易であるため、断面2次元のときのほぼ2倍にした。ラインの展張方法は、図-11に概略的に示すように実際場で推奨されている45°傾斜で堤体の左右に展張する係留法とした。

(2) 直線配置ユニットの効果

a) 断面2次元結果との比較：図-13は、代表例として浮体の直線配列の状況で直角入射を作用させたときの透過波高比 K_t を示す。この K_t は、図-12で示す波高計配置で得られる透過波高の空間的なrms値と入射波高との比で定義される。この場合の K_t は、図-4で示す断面実験での透過率 C_t とほぼ類似した結果となっており、開口部の影響がほとんど見られない。これは、平面配置において開口率が9%程度と比較的小さいことや波高測定が浮体列の中央部を対象にしているためと考えられる。

b) 入射角の影響：図-14は、直線配置の条件で斜め入射(15°)のときの透過波高比 K_t を示す。図-13の直角入射のときの K_t と比較すると、両入射角の条件下で K_t はほぼ同様であり、15度程度の小さな傾

斜角では入射角の影響はほとんど認められない。

c) 波高分布：真直ぐ配置，直角入射の状況で最も透過波の低減効果が認められた $T=0.8s$ ($L/B=4.2$)， $H=5cm$ と Kt が0.5を超えない最も長周期側の $T=1.1s$ ($L/B=7.6$)， $H=6cm$ の波条件を対象に，堤体群背後の波高分布を検討した。このとき，理論算定による予測も行った。

理論算定には，浮防波堤の断面2次元的な反射・

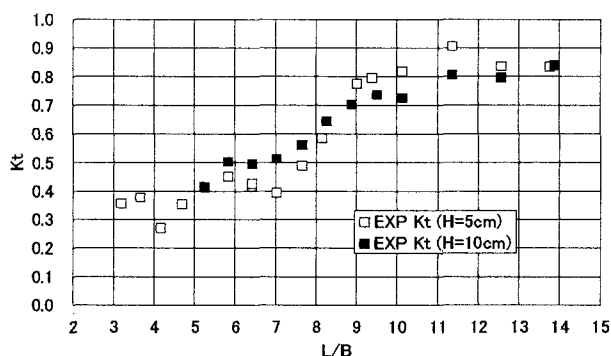


図-13 透過波高比 Kt 直線配置 直角入射

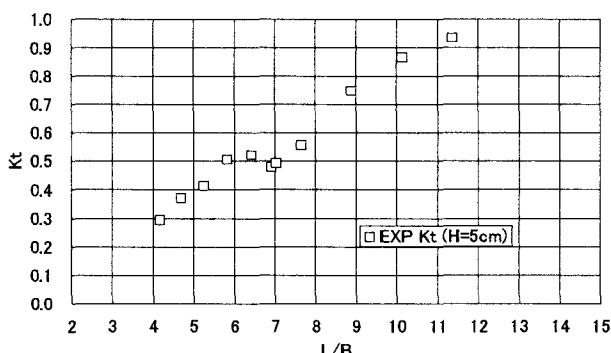


図-14 透過波高比 Kt 直線配置 斜め入射

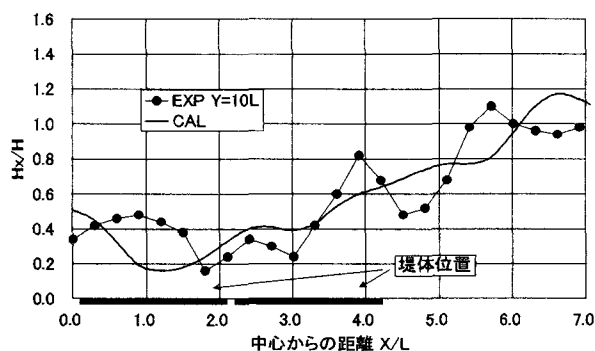


図-15 横断波高分布(基準線から10L, $T=0.8s$, $H=5cm$)

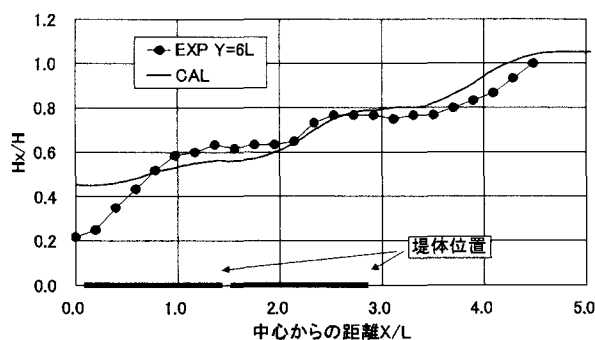


図-16 横断波高分布(基準線から6L, $T=1.1s$, $H=6cm$)

透過率を入力として，近似的に透過波の影響を取り扱う鉛直線グリーン関数法による数値算定法³⁾を用いた。この算定法では，浮体の動揺特性などは考慮されておらず，単に反射・透過率のみで浮防波堤による波変形を評価していることから，浮体の運動による発散波の影響は厳密には考慮できない。

図-15，16は，それぞれ $T=0.8s$ と $1.1s$ の条件下での浮体列透過側の代表測線における波高分布を示す。これらの図の比較から， $T=0.8s$ と比較的短周期の条件では，横断方向における波高変動が大きく，開口部の影響を受けやすいことがわかる。そして，両周期条件共に，浮体列の中央ユニット背後付近では断面実験と同程度の遮蔽効果が期待できるが，浮体列の端部ユニット背後付近では波の回り込みの影響が強く，効果はほとんど期待できない。特にこの傾向は，周期の長い $T=1.1s$ の条件のときに顕著である。

算定結果との比較を行うと，周期の長い $T=1.1s$ のときにはある程度の対応が見られるが，比較的短周期の $T=0.8s$ のときには実験結果に見られるような複雑な波高変動を十分に予測できていない。これは，やはり理論において浮体の動揺発散波の影響が考慮されていないことによると考えられる。

(3) 傾斜配置ユニット(15° 傾斜配置)の効果

中村・水谷⁴⁾は浮体の配置を傾斜配置とすることで静穏化領域が拡大できることを報告している。ここではこのような方法の有効性を検討してみる。

a) 配置方法の効果：図-17は，傾斜配置ユニットで直角入射を作用させたときの透過波高比 Kt を示す。図-13に示す真直ぐ配置の Kt と比較すると，傾斜配置にすることで， Kt は特に L/B の大きな長周期側で減少する傾向が見られる。これは，傾斜配置にすることで波力特性や動揺特性が変化することによると考えられる。具体的には，堤軸方向に沿う波力の相殺効果が現れることや真直ぐ配置のときにはないPitch動揺などが新たに現れることなどである。

b) 波高分布：真直ぐ配置と同様の条件下で傾斜配置の場合について堤体群背後の波高分布を検討してみた。図-18，19は，検討結果の代表例を示すもので，それぞれ $T=0.8s$ ， $1.1s$ の条件に対応する。このとき，堤体群背後の波高分布が左右で非対称になる可能性があることから，全堤体列の背後域を対象にして検討した。

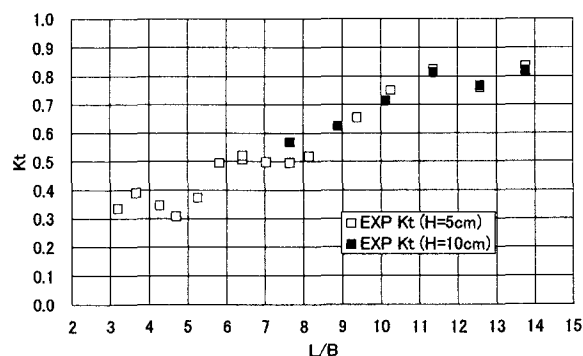


図-17 透過波高比 Kt 傾斜配置ユニット 直角入射

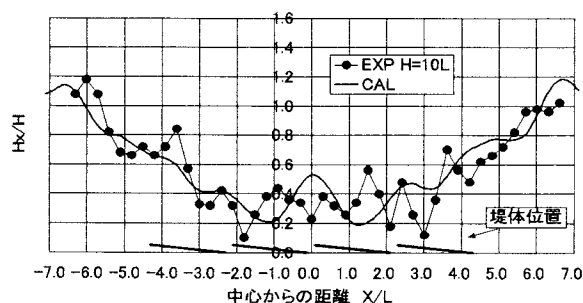


図-18 横断波高分布(基準線から10L, $T=0.8s$, $H=5cm$)

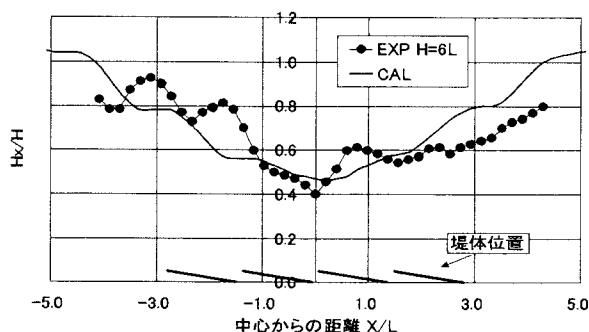


図-19 横断波高分布(基準線から6L, $T=1.1s$, $H=6cm$)

これらの図と真直ぐ配置のときの図-15, 16を比較すると, $T=0.8s$ の場合にはそれほど差異が見られない。しかし, 周期の長い $T=1.1s$ の条件になると, 傾斜配置では波の進行方向の右岸側において低く, 左岸側で高くなるなど横断分布に非対称性が現れるようになる。このような傾向は, 図-18にも多少見られるが, それほど明確でない。そして, 波の遮蔽効果は, 浮体列の右岸側に限定されるが, 傾斜配置にすることで向上することが分かる。

傾斜配置のときに波高分布の非対称性が現れる主要な原因としては, 傾斜配置された浮体列により透過波の伝播方向が変化することが挙げられる。既に中村ら⁵⁾は, 傾斜配置された固定式の矩形堤体列により, 透過波の主伝播方向が変化できることを報告している。

そして, このような傾斜配置ユニットの浮体列を用いると, 浮体列の右岸あるいは左岸に防護すべき海域があるときには主伝播方向を変化させることで, 遮蔽効果を高めることが可能になると推測される。このような波向きの変化特性については, 今後さらに実験的な検討を加え, その詳細を明らかにしていきたい。

4. 結語

(1) 没水平版の幅を長くすると回転動揺の共振周期が長周期側に移行し, 透過波の制御周期帯が長周期側に拡大できる。このとき, 回転動揺量も低減することができる。ただし, 短周期帯での透過波の低減効果が低下するなどの副作用も見られる。

(2) 低反射工として外側垂下版の吃水深を本体側に設けた垂下版と同吃水とし, 没水平版の幅を外側垂下版と浮力体側垂下版の中間まで延長すると, 広い周期帯で透過波の低減効果が得られ, しかも動揺量も低減できるなど, 本研究で検討した範囲内では最も効果的である。

(3) 直線配列された浮防波堤の波浪制御効果は, 配列開口率が1割程度と比較的小さいときには断面2次元的なそれとほぼ同程度である。ただし, 配列の両端部付近では, 堤体群端部よりの回折波の影響により制御効果は低下する。

(4) 浮防波堤をその中心まわりに平面的に回転させた傾斜配置ユニットにすると, 浮体列の背後域で波高分布が非対称になる傾向が見られ, これは浮体列により透過波の主波向きが変化することによるものと推測される。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 浅井 威人: 浮防波堤の消波効果に及ぼす遊水室型低反射工と没水平版の効果について, 海洋開発論文集, Vol.19, pp. 565-570, 2003.
- 2) 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.
- 3) 中村孝幸, 佐伯信哉: 透過堤を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 339-344, 1999.
- 4) 中村孝幸, 水谷法美, 許 東秀, 金 度三: 浮防波堤の配置方法と波浪制御効果に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 299-304, 2002.
- 5) 中村孝幸, 長田和久, 栗田清光: 矩形堤体列まわりの平面的な波変形の特性と波向き制御法に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 536-540, 1992.