

浮防波堤の平面的な配置法に関する研究

中村孝幸*・野村周吾**・泉川学文***・森田知志****

1. まえがき

比較的大水深の海域に適する防波堤としては、浮防波堤があり、これは一般に直線状に多数基配置されるのが通例である。そして、従来の浮防波堤の設計では、断面2次元的な波浪制御効果を考慮して、堤体幅などの断面寸法を設定した後に、構造的な側面を重視して一基当りの堤体長などが決定されている。しかしながら、浮防波堤の平面的な配置に関する堤体長や開口幅などの諸量は、水理学的な側面からも考察されるべきで、例えば制御の対象にする波の波長と堤体長や開口幅などの関係による制御効果の変動特性についても熟知しておく必要がある。しかしながら、従来においては、浮防波堤列まわりの平面的な波変形やその波浪動揺変位の特性はほとんど知られておらず、それらの理論的解析法についても明らかにされていないのが現状である。

本研究は、浮防波堤のような3次元浮体が規則的に配列されるときに理論的解析法を明らかにすると共に有効な波浪制御効果が得られる浮防波堤の平面的な配置法を波高値のみならず波向きにも着目して見出すものである。

2. 浮体列まわりの波浪ポテンシャルの算定法

解析モデルおよび座標系を図-1に示す。ここでは、一定水深 h の波動場中に左右対称な浮体が配列ピッチ長 λ で y 軸方向に規則的に弾性係留され、これに平面波が x 軸の負方向より作用する、いわゆる直角入射の条件を想定している。流体は非圧縮性の完全流体、波動運動は非回転で、微小振幅波理論により表現できるものとする。このとき、入射波の速度ポテンシャル ϕ_I は次式のように定義できる。

$$\phi_I(x, y, z; t) = \phi_I(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\phi_I(x, y, z) = -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{ikx} \quad \dots\dots\dots (2)$$

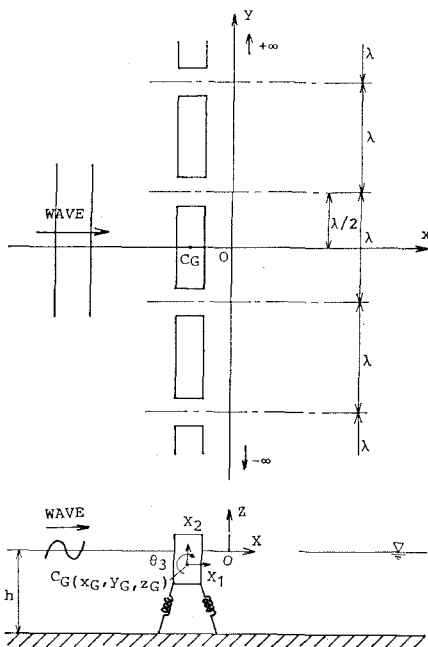


図-1 解析モデルおよび座標系

また、 $i = \sqrt{-1}$ 、 g : 重力加速度、 H : 入射波の波高、 k : 入射波の波数 ($=2\pi/L$, L : 波長)、 ω : 入射波の角振動数 ($=2\pi/T$, T : 周期) である。

そして波浪動揺量も微小とすると、図-1のような浮防波堤列まわりの波浪境界値問題は線形となり、浮体が固定されている時の回折波ポテンシャルと静止流体中で浮体が運動するときの発散波ポテンシャルを各々求める問題に分離できる。

直角入射と浮体形状の左右対称性および同一形状浮体の規則的配列を想定すると、配列浮体の運動は x, z 軸方向への並進運動 (Sway, Heave) と重心を通る y 軸に平行な軸まわりの回転運動 (Roll) の3モードに限定される。今これらの振動変位を一括して以下のように表す。

$$X_j = \hat{X}_j \exp(-i\omega t) \quad (j=1; \text{Sway}, j=2; \text{Heave}, j=3; \text{Roll}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、上添字 $\hat{}$ は各変位の複素振幅である。なお回転

* 正員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

** 正員 工修 NTT

*** 学生員 愛媛大学大学院 工学研究科

**** 正員 工修 (株)熊谷組 技術研究所

角変位 X_0 は、次元を統一するため、回転角 θ を浮体の代表長 R_B を用いて $X_0 = \theta R_B$ と定義してある。

このとき、浮体列まわりの全速度ポテンシャルの複素振幅 $\phi(x, y, z)$ は、各ポテンシャル線形和を考えて次式で与えられる。

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^3 \hat{X}_j \phi_{Rj} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ϕ_D : 回折波ポテンシャルの複素振幅、 ϕ_{Rj} : X_j 方向への単位振幅振動による発散波ポテンシャルの複素振幅である。

中村・野村 (1990) は、グリーン関数法に基づく3次元物体列まわりの回折波ポテンシャルの算定法を明らかにしており、これによると ϕ_D は次式により求められる。

$$\phi_D(x, y, z) = 2 \int_{S_+} f_D(X, Y, Z) G(x, y, z; X, Y, Z) dS(X, Y, Z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 S_+ : 規則的配列された浮体群の中の1浮体に着目して、その対称面 ($x-z$ 平面) で分割したとき $0 \leq y \leq \lambda/2$ の範囲の没水面、 f_D : 回折波に対する S_+ 上の点 (X, Y, Z) におけるわき出し強さ、 G : 図-1 に示すような構造物の規則的配列を想定したときの3次元波動場のグリーン関数で、既に中村・野村 (1990) により導かれている。

ϕ_{Rj} が満足すべき基礎方程式ならびに境界条件は、運動学的な境界条件を除くと、 ϕ_D と同様であり、 ϕ_{Rj} は式 (3) と類似した次式により算定できる。

$$\phi_{Rj}(x, y, z) = 2 \int_{S_+} f_{Rj}(X, Y, Z) G(x, y, z; X, Y, Z) dS(X, Y, Z) \quad (j=1 \sim 3) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 f_{Rj} は各運動モード方向への単位振幅振動による発散波に対するわき出し強さである。

わき出し強さ f_D , f_{Rj} は、浮体没水表面の運動学的な境界条件を考えて決定できる。

そして、 ϕ_I と ϕ_D を用いて浮体に作用する波力やモーメントが、また ϕ_{Rj} を用いて浮体の付加質量係数や造波減衰係数が算定できる。このように、作用波力や動的流体力係数が求められると、係留ラインなどの弾性支持系の復元力や静水力学的な復元力と併せて、力学的な境界条件を表す浮体の振動方程式が導ける。この方程式を解いて、波浪動揺変位が決定でき、式 (4) に代入することで浮体列まわりの全速度ポテンシャルが求められる。

式 (5), (6) に見られるように、規則的配列された浮体群まわりの波浪ポテンシャルは、その中の1堤体のみを取り扱って解析することが可能で、より効率的な算定が行えることになる。

3. 浮体列まわりの波変形の評価法

既に中村・野村 (1990) は、固定された浮体列背後の

透過波には、入射波と同方向に伝播する成分波 (直進行波成分) のみならず、各開口部よりの回折波の平面的な干渉により入射波とは異なる方向に伝播する成分波 (斜波成分) が発生することを理論と実験により示している。このような斜波成分の発生限界は、規則的配列された3次元物体まわりのグリーン関係の表示式から明確に求められ、浮体列への直角入射の条件を想定する場合、 $\lambda/L \geq 1$ (L : 波長) で与えられる。そしてより一般的に第 n 次の斜波成分が発生する条件は次式で示される。

$$\lambda/L \geq n \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (7)$$

そして、3次元物体列まわりの波変形は $\lambda/L < 1$ の範囲で長峰性の1次元的なものに、 $\lambda/L \geq 1$ の範囲では斜波成分を含む短峰性の2次元的なものになる。Dalrymple ら (1990) は、ホイヘンスの原理を用いて、上述したような斜波成分の発生を図的に簡潔に説明している。

本研究で対象とするような動揺時の浮体列まわりの波変形は、式 (5), (6) に見られるように発散波も回折波と同じグリーン関係を用いて表現できることから、斜波成分の発生限界などは固定時と同様になる。

中村・小野 (1990) は、堤体列まわりの平面的な波変形について、特に波向き特性を考慮する評価法を提案している。これは、①透過波に含まれる各成分波の方向別のエネルギー比 (方向分布特性) と②方向を考慮せずに加算した透過波の全エネルギーと入射波のエネルギーの比の平方根 (波高特性) の両者を用いるもので、後者の波高特性量は、堤体の配列方向における透過波高の rms 値と入射波高との比に一致することから、rms 波高比と呼ばれている。

本研究でも、方向分布特性量と波高特性量を用いて浮体列まわりの平面的な波変形を評価することとし、これらの理論的な算定式を求めてみた。

浮体列背後の透過波に含まれる各方向成分波の平均エネルギー E_{ln} ($n=0 \sim N$, N : 式 (7) を満足する n の最大値) は、上記した ϕ_D , ϕ_{Rj} の算定式を参照すると次式のように導ける。

$$\left. \begin{aligned} E_{l0} &= \left(1 + 2 \operatorname{Real} \left[2 \int_{S_+} f_{A0} dS \right] + \left| 2 \int_{S_+} f_{A0} dS \right|^2 \right) E_I \\ E_{ln} &= \frac{1}{4} \left| 2 \int_{S_+} f_{An} dS \right|^2 E_I \quad (n \geq 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $n=0$ が直進行波成分、 $n \geq 1$ が斜波成分に対応する。また、 E_I : 入射波の単位水表面積当り平均エネルギー ($= \rho g H^2/8$)、 f_A : 回折波および発散波のわき出し強さの線形和で次式で与えられる。

$$f_A(X, Y, Z) = f_D(X, Y, Z) + \sum_{j=1}^3 \hat{X}_j f_{Rj}(X, Y, Z) \quad \dots\dots\dots (9)$$

g_n : グリーン関数の中の進行波モード成分に比例する項に関係し、次式で定義される。

$$g_n(X, Y, Z) = -\frac{2i\epsilon_n}{\lambda\mu_n} \frac{k^2 - k_0^2}{(k^2 - k_0^2)h + k_0} \cosh(kh) \times \cosh\{k(h+Z)\} \cos(q_n Y) \times e^{-i\mu_n X} \quad (n=0 \sim N) \dots (10)$$

ここに、 $k_0 = \omega^2/g$ 、 μ_n と q_n はそれぞれ第 n 次斜波成分の波数の x, y 方向成分で定義される。

$$q_n = 2n\pi/\lambda, \quad \mu_n = \sqrt{k^2 - q_n^2} \dots (11)$$

また、 $\epsilon_0 = 1/2$ 、 $\epsilon_n = 1 (n \geq 1)$ である。

上記までの式は、式 (9) を除けば、固定された浮体列の場合 (中村・野村, 1990) と同じである。ただ、動揺時では、わき出し強さとして、回折波と各発散波に対するわき出しの線形和が用いられているだけである。

(1) 透過波側での rms 波高比 K_T : K_T は、式 (8) の E_{tn} を用いて次式で算定できる。

$$K_T = \sqrt{\left(E_{t0} + 2 \sum_{i=1}^N E_{ti}\right) / E_I} \dots (12)$$

ここで、 $n \geq 1$ の E_{tn} が 2 倍されているのは、左右の斜波成分が発生することによる。なお K_T は、 $\lambda/L < 1$ の 1 次元的な波変形が生じる条件下では、透過率の定義に一致するものであることを付記しておく。

(2) 透過波側での各方向成分波のエネルギー比 T_n ($n=0$: 直進行波成分, $n \geq 1$: 第 n 次斜波成分): T_n は、やはり式 (8) の E_{tn} を用いて次式のように求められる。

$$T_n = 2\epsilon_n E_{tn} / \left(E_{t0} + 2 \sum_{i=1}^N E_{ti}\right) \quad (n=0 \sim N) \dots (13)$$

4. 算定および実験条件

本研究で採用した浮防波堤のモデルは、図-2 に示すような片持ち梁支持の動揺式堤体である。この堤体は、底版の中心線上の異なる 2 カ所に設けた弾性鋼棒により支持され、水平および回転方向にのみ動揺変位が生じる構造になっている。このような構造の支持系を採用したのは、支持系のばね定数が明確で、動特性の調整が容易なことによる。

浮防波堤の平面的な配置は、実際場での設置例がほぼ堤体長 l_B と堤体幅 B の比 $l_B/B = 3 \sim 5$ 、開口率 $\alpha = 10 \sim 20\%$ の範囲にあることから (神瀬, 1987)、 $l_B/B = 4$ 、 $\alpha = 20\%$ で直線配列される場合を基本型としてまず採用した。これに引き続き、堤体の断面形状や振動特性および開口率 ($\alpha = 20\%$) を基本型と同一にして、斜波成分の発生を抑えるという観点から、堤体長 l_B (または配列ピッチ長 λ) を $l_B/B = 2.7, 2.0, 1.33, 1.0$ と順次短くして、透過波の変動特性などを算定した。

また、直線配列時に比較すると、配列ピッチ長 λ が倍

増する千鳥配列についても、上記の基本型の堤体を対象にして算定を行った。千鳥配列を採用したのは、堤体を前後に配置できることから、作用波の方向から見たとき開口部を遮断できる利点があり、このような見かけの開口部の遮断が、透過波にどのように影響するのかわかるためである。千鳥配列の場合、前後堤体の間隔が新たな影響要素になるが、ここでは前後堤体の外縁間隔 e_x を堤体幅に等しい距離に固定した。そして、配列軸への射影開口率については、基本型と同じ 20% と完全に遮断した場合の 0% の 2 種類に変化させた。

実験では、直線配列について $l_B = 4B, 1.33B$ の 2 種類を採用して、平面水槽および長波水槽を用いて透過波や動揺変位を測定した。このときの模型堤体の設置条件、堤体寸法ならびに実験条件を表-1 に示す。なお、千鳥配列時の堤体の寸法および動特性は、基本型と同じで、その配列法は上記の算定時と同じにした。

実験に用いた波の諸元は、周期 T が $0.6 \sim 1.65$ sec の範囲の 15 種類、入射波高 H がほぼ 4 cm の 1 種類で、堤体の設置水準 h は 40 cm と一定にした。

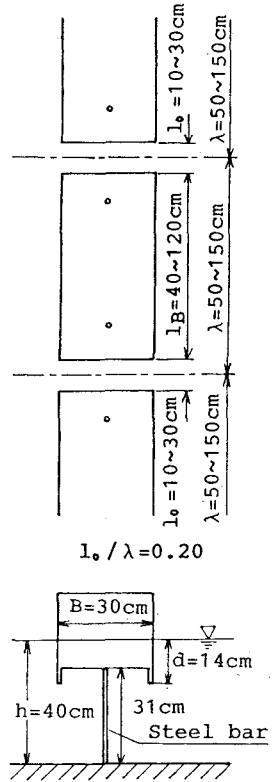


図-2 模型堤体

表-1 模型堤体の設置条件と寸法および実験条件

実験ケース		I	II
設置条件	配列ピッチ長 λ (cm)	150.0	50.0
	開口長 l_e (cm)	30.0	10.0
	開口率 α (%)	20.0	
	設置水深 h (cm)	40.0	
堤体寸法	堤体幅 B (cm)	30.0	
	堰水 d (cm)	14.0	
	堤体長 l_B (cm)	120.0	40.0
	l_e/B	4.00	1.33
実験条件	周期 T (sec.)	0.6 ~ 1.7	
	波高 H (cm)	4.0	
	λ/L (L : 波長)	0.5 ~ 2.5	0.2 ~ 0.8

5. 波浪制御効果

(1) 基本型の浮体列

図-3 は、基本型 ($l_B/B = 4.0$) の浮防波堤列の透過波側における rms 波高比 K_T の実験結果と算定結果の

比較を示すもので、第1横軸に λ/L 、第2横軸に浮防波堤の消波効果を表すときによく用いられる波長と堤体幅の比 L/B を採り示す。なお、図中には開口部の効果を無視した断面2次元的な波浪ポテンシャル理論(中村ら1987)による透過率 C_T の算定結果も比較のため併せ示してある。この図より、浮防波堤列の透過波高は、 $\lambda/L=1.0, 2.0$ の横波共振点付近を除き実験値、算定値とも0.6以上と開口部の効果を無視した2次元理論の算定値より大きく、特に $\lambda/L > 1$ ($L/B < 5$) の短周期波側でその差異が顕著になっている。そして、浮防波堤の制御対象とする波の波長は、一般に堤体幅の5倍程度以下とされており、このような条件下で従来より開口部を無視した2次元的な解析により波浪制御効果を予測すると、十分でないことが理解できよう。

図-4は、この時の透過波の波向き特性 T_n を図-3と同様にして示す。この図より、 $\lambda/L > 1$ ではほぼ斜波成分が卓越し、浮防波堤列背後では短峰性の平面的な波変形になっていることが推測できる。そして、図-3のように配列時の K_T が2次元理論の透過率 C_T を大きく上回るのは、浮防波堤列の場合に特有な斜波成分が透過波に卓越して含まれるようになるためと言える。

(2) 配列ピッチ長(堤体長)の効果

図-5は、開口率を20%と固定して、堤体長(or配列ピッチ長)を各種に変化させたときの K_T の算定結果を、横軸に λ_0/L と L/B の両者を採り示す。ここで λ_0 は代表ピッチ長で、基本型の $L/B=4.0$ の配列ピッ

チ長($\lambda=150$ cm)が用いてある。また、図中に●^{2.0}で示すのは、 $L/B=2.0$ の浮防波堤列の横波共振点を示す。この図より、 K_T は堤体長すなわち配列ピッチ長を短くしても、基本型($L/B=4.0$)のときに斜波成分が発生しない $\lambda_0/L < 1$ の長周期の領域ではほとんど差異が見られず、このような条件下で堤体長は波浪制御効果に影響しないことがわかる。一方、基本型($L/B=4.0$)で斜波成分が発生する $\lambda_0/L > 1$ の短周期側の領域では、堤体長が短くなるほど波浪制御効果は改善され、広い L/B の範囲で2次元理論により予測される C_T と同程度かそれ以下になるのがわかる。しかしながら、堤体長を短くすると、比較的短周期の条件下で K_T が1に近いピークを示すなどの副作用もあることに注意する必要がある。図-6は、 $L/B=1.33$ のときの K_T, K_R の実験結果と算定結果の比較を示す。ここで、 K_R は反射波についての rms 波高比である。この場合、本実験で採用した波条件の範囲内では、斜波成分は発生せず、堤体列まわりの波変形は長峰性の1次元的なものになっている。実験結果と算定結果を比較すると、後者が極値を示す条件を除けば、両者はほぼ一致していることが認められる。そして、基本型の場合の図-3との比較から、堤体長を短くすると、実験的にも波浪制御効果が向上でき、従来の堤体断面にのみ着目した1次元的な波浪制御効果に近くなることなどが確認できる。このように、配列ピッチ長を制御対象波の波長よりも短くすると、斜波成分の発生が抑えられることから、波浪制御効果は向上

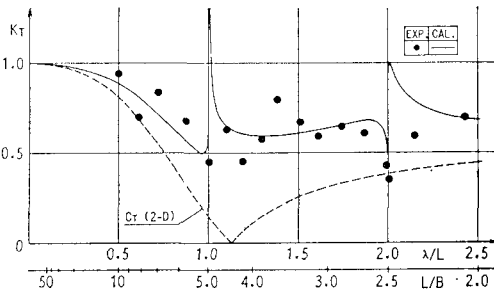


図-3 浮防波堤列の透過波側での rms 波高比 ($L/B=4.0$, $\alpha=20\%$)

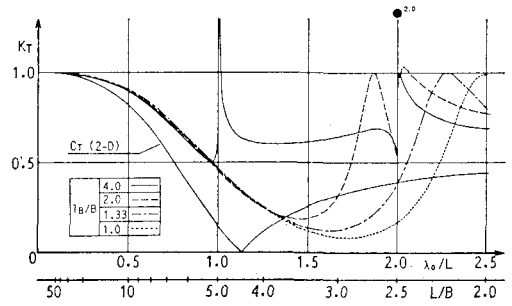


図-5 堤体長を変化させたときの透過波側での rms 波高比の変化 ($\alpha=20\%$)

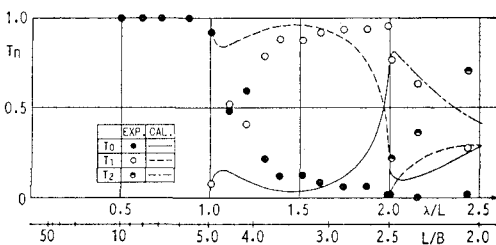


図-4 浮防波堤列の透過波側での波向き特性 ($L/B=4.0$, $\alpha=20\%$)

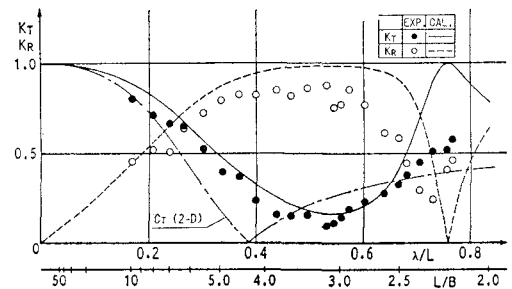


図-6 浮防波堤列の K_T, K_R ($L/B=1.33$, $\alpha=20\%$)

できることがわかる。

(3) 開口部の遮蔽効果

図-7 は、基本型の堤体を、作用波の方向より見たとき開口部が遮蔽されるように、千鳥に配列したときの K_T の実験結果と算定結果の比較を示す。図中には、直線配列時の比較に用いた断面2次元的な解析による C_T も併せて示した。なお図中の横軸には、基本型との比較を容易にするため、基本型の配列ピッチ長に関する λ_0/L も付記してある。この図と基本型の図-3 との比較から、千鳥配列で射影開口長を0にすると、広い周期帯で K_T が0.5 以下になるなど、有効な波浪制御効果の得られることが分かる。

そして、断面2次元的な解析による透過率 C_T と比較すると、 K_T はそれと類似したものになっており、千鳥配置で開口部を遮蔽する方法は有効なものと考えられる。しかしながら、 K_T は $\lambda/L=1$ 付近の長波長の波に対して、1 程度とかなり大きくなる特性も見られる。これは千鳥配置で開口部を遮断することの影響を受けることによるものと推測される。

図-8 は、このときの透過波の波向き特性を示す。ただし、図中で波向き特性量は、透過波の波向き成分を直進行波成分の T_0 とそれ以外の斜波成分を加算した

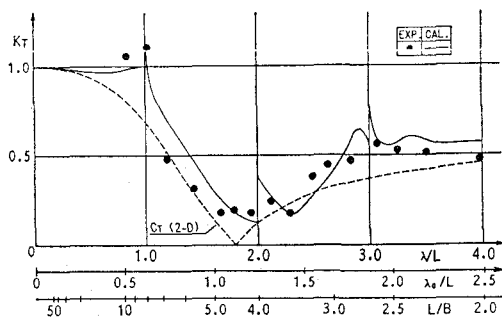


図-7 千鳥配列時の K_T ($l_B/B=4.0$, $\alpha=0\%$, $e_x/B=1.0$)

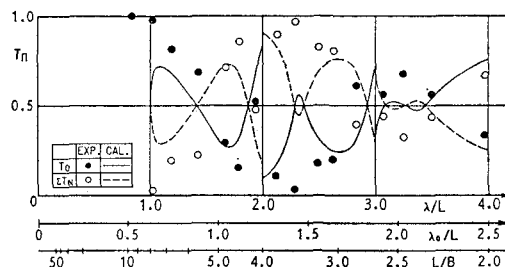


図-8 千鳥配列時の波向き特性 ($l_B/B=4.0$, $\alpha=0\%$, $e_x/B=1.0$)

ΣT_N の2つのみで表示してある。これは、千鳥配列の場合、直線配列に比較して斜波成分の数が倍増し、各斜波成分毎の表示を行うと複雑になり、判別が困難になることから採用したものである。この図より、 $\lambda/L>1.5$ の領域では、やはり斜波成分が卓越するかあるいは有意な大きさで含まれるなど、透過波側では短峰性の波面形状になることが推測できる。

なお本研究では、上記のような波浪制御効果に加え、堤体の波浪動揺変位についても検討しているが、動揺変位は、千鳥配列時を除けば、断面2次元的な解析によっても近似的に推定できるなど、堤体長(配列ピッチ長)の影響をほとんど受けないことを確認している。

5. 結 語

(1) 現地に設置されているような浮防波堤列では、その配列ピッチ長が制御対象となる波の波長より長くなることが多く、この場合、堤体列による波浪制御効果を、開口部の影響を無視した断面2次元的な解析や実験で推定すると過大評価することになる。これは、断面2次元的な考察で考慮されていない斜波成分が、透過波中に卓越して含まれることによる。

(2) 浮防波堤の堤体長を短くし、その配列ピッチ長を制御対象とする波の波長よりも短いものにすると、堤体列まわりでは長峰性の1次元的な波変形となるため、浮防波堤列による波浪制御効果を大幅に改善できる。

(3) 浮防波堤を千鳥配置で、しかも波の作用方向から見て開口部を遮断するように配置すると、波浪制御効果を大幅に改善できる。このとき、配列ピッチ長や堤体長は、現在稼働している浮防波堤とほぼ同規模のものでよく、波浪制御効果を改善する最も現実性のある解決法と言える。

参 考 文 献

- 神瀬 哲 (1987): 漁港における浮防波堤の現状と課題, 浮防波堤の現状と課題, (社)国際海洋科学技術協会, pp. 3-8.
- 中村孝幸・森田知志・小野正順 (1987): 斜波中における任意断面浮体まわりの波浪変形の算定法, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 65-70.
- 中村孝幸・野村周吾 (1990): 規則配列された3次元物体まわりの波浪境界値問題の解析法, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 524-528.
- 中村孝幸・小野正順 (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37巻, 土木学会, pp. 534-538.
- Dalrymple, R. A. and Martin, P. A. (1990): Wave diffraction through offshore breakwaters, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 727-741.