

不規則波に対する配列式沖合防波堤の波浪制御効果について

Effectiveness of an Array of Offshore Breakwaters for Irregular Waves

中村孝幸*・森田知志**・岩崎和弘***

Takayuki NAKAMURA*, Satoshi MORITA** and Kazuhiro IWASAKI***

Wave transformation by an array of offshore breakwaters is examined in multi-directional irregular waves. Especially, concerning the ratio of an array pitch length to a representative wave length, plane wave interactions with the arrayed breakwaters are examined extensively. It is pointed out that the wave height variation behind the breakwater array changes from a long-crested pattern to a short-crested one with increasing a pitch length of periodically arrayed breakwaters as compared to a wave length.

Key words: Arrayed offshore breakwaters, Effective array pitch, Directional waves, Irregular waves

1. まえがき

従来、堤体列による平面的な波変形を検討した例としては、既に中村ら¹⁾や清川ら²⁾による無限堤体列や有限堤体列を対象にした研究などがある。これらの研究では、主に各開口部を通過する波の平面的な干渉効果に着目して、堤体列の透過側で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、それとは異なる方向に伝播する成分波（斜波成分）も発生することや、斜波成分の発生は配列ピッチ長と作用波の波長の比に依存することなどが示されている。しかしながら、従来の研究では、規則波を対象にしたものがほとんどで、実際場で見られるような不規則波に対する検討は十分に行われていない。ここでは、主に有限基で構成される堤体列まわりの波高分布の特性を、多方向不規則波を対象にして、平面水槽を用いた模型実験および成分波の線形重ね合わせを仮定した理論解析に基づき明らかにする。この際、従来よりの規則波に対する結果との比較も行い、不規則波に対する効果的な配列ピッチ長の設定法などについても考察する。

2. 理論解析法

2. 1 解析法の概要

本研究で用いた理論解析法は、鉛直線グリーン関数法（VLG法）と呼ばれる方法である。鉛直線グリーン関数法は、境界積分法に属する一手法で、特徴として未知数の数が少なく、効率的な算定が行える利点がある。この理論解析法はIssacson³⁾により提案され、その後、中村ら⁴⁾により構造物の壁厚が波長に比較して十分小さくなる場合にも適用できるように修正されている。

このような解析では、一定水深および線形波動理論が仮定されており、鉛直式構造物による回折散乱波の速度ポテンシャル Φ_s は、次式で示すような進行波モードのみの表現式で与えられる。

$$\Phi_s(x, y, z; t) = \phi_s(x, y) \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

ここに、 ϕ_s : 回折散乱波ポテンシャルの複素振幅、 h : 水深、 ω : 角振動数($=2\pi/T$, T : 周期)、 i : 虚数、 (x, y, z) : 波動場中の任意点の座標、 k : 進行波モードの波数($=2\pi/L$, L : 波長)である。

式(1)を3次元のラプラス方程式に代入すると、この解析での基礎方程式で、平面座標にのみ依存するヘルムホルツ方程式へと導かれる。

$$\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial y^2} + k^2 \phi_s = 0 \quad (2)$$

鉛直線グリーン関数法では、ヘルムホルツ方程式の特異解で円筒波を表す鉛直線グリーン関数を基礎解とするもので、これは次式で示される。

$$G(x, y; X, Y) = -\frac{i\pi}{4} H_0^{(1)}(kR) \quad (R = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}) \quad (3)$$

*愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790 松山市文京町3番)

**熊谷組技術研究所

***東亜建設工業

ここに、 $H_0^{(1)}$: 0次の第1種ハンケル関数、 R : 一般点 (x, y) と湧出し点 (X, Y) との間の平面距離を表す。

鉛直線グリーン関数法では、式(3)で示される円筒波型の解を周辺境界に密に分布させて、防波堤などの不透過条件や低反射条件を満足させるように波源強度を決定した後に ϕ_s を算定する。具体的な算定式は、次式で示される。

$$\phi_s(x, y) = \int_C f_s(X, Y) G(x, y; X, Y) dC(X, Y) \quad (4)$$

ここに、 C : 構造物の周辺境界に沿っての曲線を示し、その曲線上の座標点が (X, Y) で、湧出し関数であるグリーン関数 G の置かれる位置である。また、 $f_s(X, Y)$: 湧出しの強さを示し、固定境界上での反射特性を考慮して決定できる。

いま、鉛直式構造物に、入射角 θ (x 軸と波の伝播方向とのなす角で定義) で、次式で示すような規則的な平面波が作用するものとする。

$$\eta_I(x, y) = \frac{H}{2} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (5)$$

ここに、 η_I : 入射波の水面変動波形、 H : 入射波高、 k : 入射波の波数($=2\pi/L$ 、 L : 入射波の波長)、 $k_x = k \cos \theta$ 、 $k_y = k \sin \theta$ 、 ω : 角振動数($=2\pi/T$ 、 T : 入射波の周期) である。

このとき、入射波の速度ポテンシャル ϕ_I は、次式で定義できる。

$$\begin{aligned} \phi_I(x, y) &= -\frac{igH}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} \\ &= \phi_I(x, y) \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 g : 重力加速度である。

そして、上記のような入射波が構造物に作用するとき、構造物境界上での反射特性を考慮した境界条件は次式のようになる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \int_C f_s(X, Y) \left\{ ik\alpha(x, y) G(x, y; X, Y) + \frac{\partial G(x, y; X, Y)}{\partial n} \right\} dC \\ = - \left\{ ik\alpha(x, y) \phi_I(x, y) + \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right\} \Big|_{(x, y) \in C} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\alpha(x, y) = \frac{1 - C_{abs}(x, y) e^{i\delta(x, y)}}{1 + C_{abs}(x, y) e^{i\delta(x, y)}} \Big|_{(x, y) \in C} \quad (8)$$

ここに、 $\partial/\partial n$: 構造物の没水面上での法線微分、 $\alpha(x, y)$: 吸収率、 $C_{abs}(x, y)$: 周辺境界 (x, y) における反射率、 $\delta(x, y)$: 反射波の位相差で、鉛直不透過面よりの完全反射時における反射波よりの遅れの位相角を表す。

式(7)は $f_s(X, Y)$ を未知数とする1次元の積分方程式になっており、これを解くことにより湧き出し強さが求められる。このように、式(7)を解くことにより湧出し強さが、さらにこれを式(4)に代入することにより回折散乱波の速度ポテンシャルが算定できる。

平面波浪場の任意点 (x, y) における回折係数 K_D は、上記のようにして求められた回折散乱波の速度ポテンシャルを用いて次式により算定できる。

$$K_D(x, y) = \frac{|\phi_I(x, y) + \phi_s(x, y)|}{|\phi_I(x, y)|} \quad (9)$$

2. 2 多方向不規則波の取り扱い

一般に多方向不規則波は、線形理論を仮定する場合、無数の周波数および波向きの成分波が重なりあって合成されると考えられている。合田⁵⁾は、このような考え方にに基づき、防波堤による回折係数の推定法などを提案している。この推定法の特色は、入力として各種の周波数および波向きの成分を考慮して、各成分波に対する回折係数等をエネルギー的に平均化することで不規則波の回折係数を求めることにある。いずれにしても、このような線形重ね合わせによる解析では、不規則波の成分波、すなわち各周期、各波向き条件下での規則波に対する回折係数が必要になる。

実際の算定では、周波数方向スペクトルを、周波数および波向きの両者について有限個の区間に分割して、各代表周期および各代表波向きのスペクトル成分をまず算定する。この後、各代表周期および各波向きの成分波に対する回折係数 K_D を、上記で紹介したVLG法により求める。最後に、各周期および各波向きに対する回折係数をエネルギー的に平均化して、多方向不規則波についての有効回折係数(K_D)_{eff}が算定できる。この際、周波数方向スペクトルの離散化手法については、合田⁵⁾により提案されている方法を用いた。

3. 水理模型実験による結果と算定結果の比較

3. 1 実験装置および実験方法

本実験では、フルードの相似則を採用して、模型堤体および作用波の条件等を決定した。実験で用いた模型縮尺は1/40程度である。以下、これらの実験状況について紹介する。

(1) 造波水槽

実験には、図-1に示す熊谷組技術研究所の長さ40m、幅20m、深さ1.5mの平面水槽を使用した。図中に示すように水槽の一端にはピストン式パドル40枚（一枚当たり幅47.5cm）からなる不連続型の多方向造波装置が設置されており、終端側には壁面からの再反射を防ぐため、厚さ1mの消波材が設置されている。

(2) 模型堤体

本実験で用いた模型は、離岸堤などに代表されるような配列式構造物である。実験に用いた堤体列は、図-2に示す堤体長150cmの矩形堤体を開口率が0.2になるように5基配置した堤体列、および図-3に示す堤体長43cmの矩形堤体を開口率が0.2になるように17基配置したもの2種類である。前者の堤体列の配置等は、現地で一般に施工されている離岸堤の配列長や堤体長を参照して決定しており、以下この堤体列を基本形堤体列と称する。そして、後者の堤体列は、後述する作用波の波長に比較して、配列ピッチ長 λ を十分に短くなるように設定したもので、基本形堤体列に比較するとその堤体長は1/4程度に短くしてある。実験では、両堤体列ともに設置水深は40cmと一定にした。

(3) 実験方法および実験条件

a) 規則波実験：入射波の条件は、その作用方向を直角入射に固定し、周期 $T=0.95, 1.35\text{sec}$ の2種類とした。また、入射波高 H は3cm程度とした。これらの周期は、それぞれの波長が、基本形堤体列の配列ピッチ長 λ (187.5cm)に比較して、短くなる場合および長くなる場合に対応している。なお、それぞれの入射波の周期は後述する不規則波実験の有義波周期と一致するように選択してある。

堤体列は、造波装置から20m離れた位置に設置した。波高分布の測定は、14本の波高計を堤体列と平行に50cmピッチで直線配置して行った。また、その測定位置は、堤体列から透過側に約1/2波長、1波長、2波長離れた位置と反射側に約1/2波長、1波長離れた位置の5測線とした。

b) 不規則波実験：多方向不規則波の造波条件は、標的スペクトルをブレットシュナイダ・光易型スペクトルとして、その卓越方向 θ_p を直角入射(0°)に、有義波高 $H_{1/3}=3\text{cm}$ 程度に固定して、有義波周期 $T_{1/3}=0.95, 1.35\text{sec}$ の2種類に変化させた。この際、方向集中度パラメータ $S_{\text{max}}=20$ とした。堤体列の設置位置や波高分布の測定方法等は、規則波実験と同様にした。入射波スペクトルの測定は、造波板から15m離れた位置に星型波高計アレーを設置し、堤体列が設

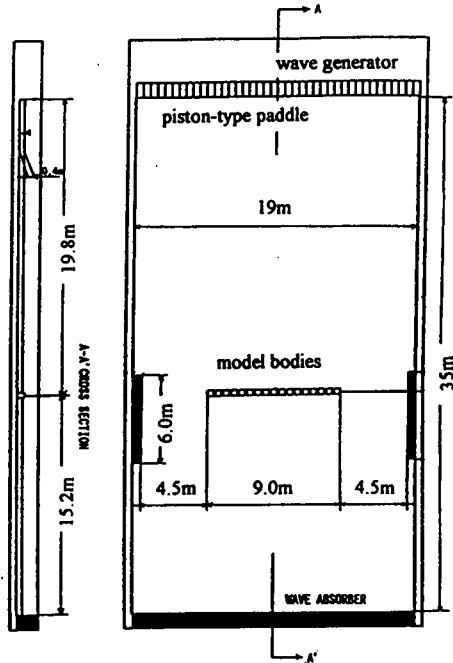


図-1 実験水槽と堤体列の配置状況

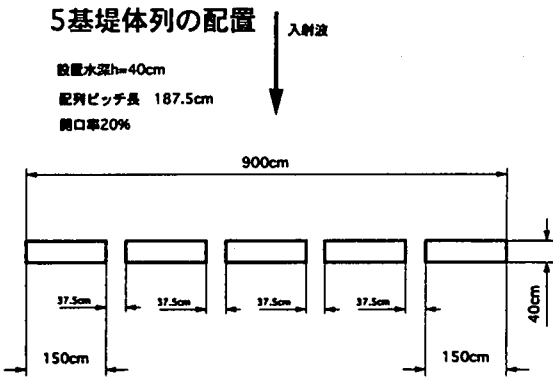


図-2 基本形堤体列 (5基堤体列)

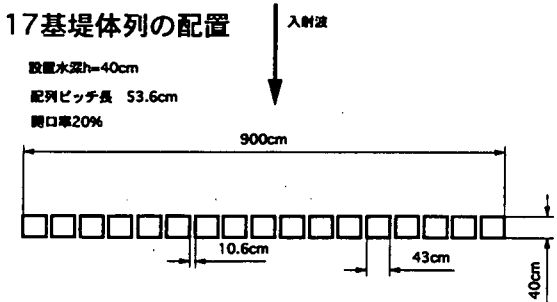


図-3 堤体長を短くした模型堤体列 (17基堤体列)

置されていない状態で行った。

3. 2 実験結果および算定結果

(1) 規則波の場合

ここでは、後述する多方向不規則波の有義波の諸元をもつ波を、規則波として堤体列に作用させたときの波高分布の結果について紹介する。図-4~7は、代表例として周期 $T=0.95\text{sec}$ のときの実験および算定結果を入射波との波高比 K_D で示す。図-4、5は、基本形堤体列の場合、図-6、7は堤体長を短くした17基堤体列の結果に対応する。この周期条件では、基本形堤体列の場合、 λ/L (=配列ピッチ長/波長) が1より大きく、斜波成分が発生する条件に、17基堤体列では1より小さくそれが見られない条件に相当している¹⁴⁾。これらの堤体列まわりの波高分布の比較から、既に著者らが無限配列された堤体列に対して指摘しているように、 λ/L の比が1より大きいと小さいかにより透過側の波面形状は大きく異なり、 λ/L が1より大きいと配列方向に重複波が形成され、短峰性の波面形状が顕著に現れることなどが再確認できる。

一方、堤体長が短く、 $\lambda/L < 1$ となる図-6では、透過側の波高はほぼ一様で長峰性の波面形状に近いことがわかる。実験結果と算定結果を比較すると、図-5、7に見られるように、反射側に1波長離れた測線を除けば、両結果はよく一致している。

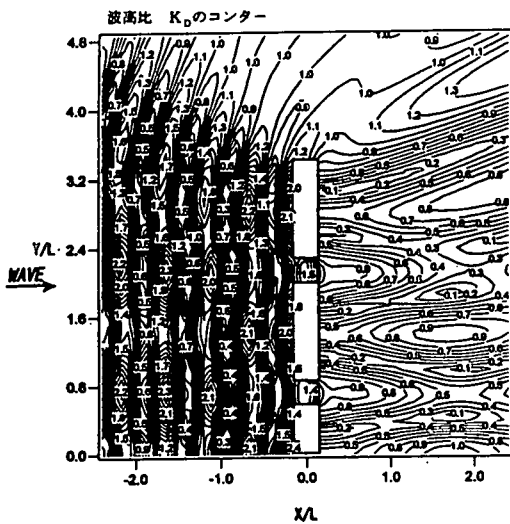


図-4 規則波に対する基本形堤体列まわりの波高分布の算定結果($H=3.1\text{cm}$, $T=0.95\text{sec}$, $\lambda/L=1.4$)

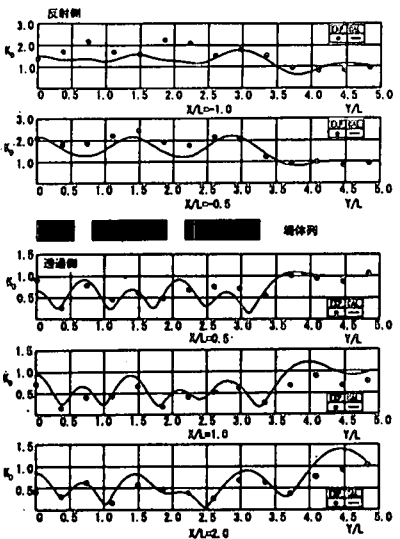


図-5 代表的な測線上での規則波に対する波高分布 (基本形堤体列、 $H=3.1\text{cm}$, $T=0.95\text{sec}$, $\lambda/L=1.4$)

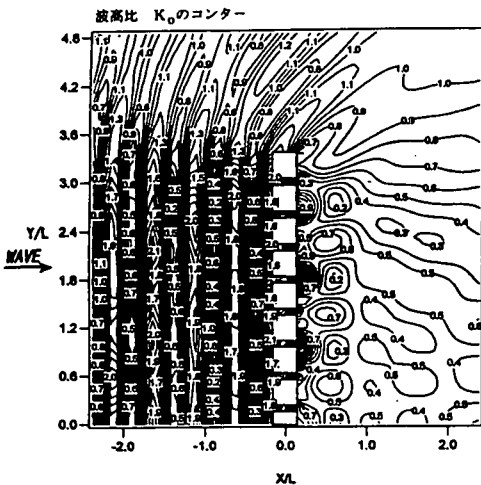


図-6 規則波に対する17基堤体列まわりの波高分布の算定結果($H=3.1\text{cm}$, $T=0.95\text{sec}$, $\lambda/L=0.4$)

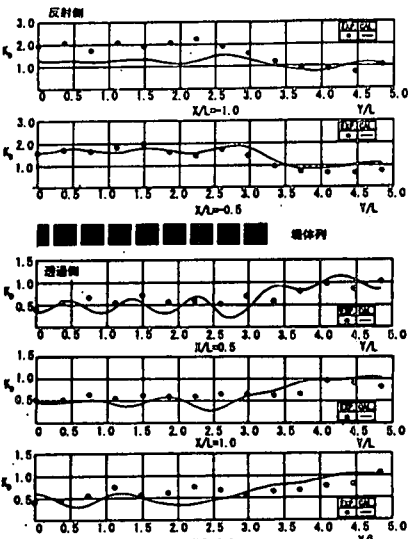


図-7 代表的な測線上での規則波に対する波高分布 (17基堤体列、 $H=3.1\text{cm}$, $T=0.95\text{sec}$, $\lambda/L=0.4$)

このように、 λ/L の値により、堤体列背後の波高分布は大きく異なり、沿岸域での一様な波浪の静穏化という観点からは、 $\lambda/L < 1$ となるように堤体長や開口長を設定することが望ましい。

(2) 不規則波の場合

図-8～11は、上記の2種類の堤体列に多方向不規則波を作用させたときの算定結果および実験結果を示す。ここでは、代表例として、有義波周期 $T_{1/3}=0.95\text{sec}$ に対する結果を示す。理論算定では、入射波の周波数方向スペクトルを、周期に関して4分割、波向きに関して8分割して、波高分布が求めている。両堤体列の算定結果を示す図-8、10と比較すると、基本形堤体列の図-8では、堤体長を短くした17基堤体列の図-10の場合に比較して、規則波の場合ほど顕著でないが、透過側での空間的な波高変動が多少大きくなることなどが認められる。このような傾向は、実験結果を示す図-9、11の比較からも確認でき、比較的波高変動が大きいのは基本形堤体列のときである。しかし、不規則波の回折係数($K_{d, \text{eff}}$)の実験値は、算定値に比較して1割程度高く現れている。この原因としては、実験領域が有限であるため、水槽側壁や模型堤体よりの再反射波が影響して、結果的に波高値が大きく現れたものと推定され

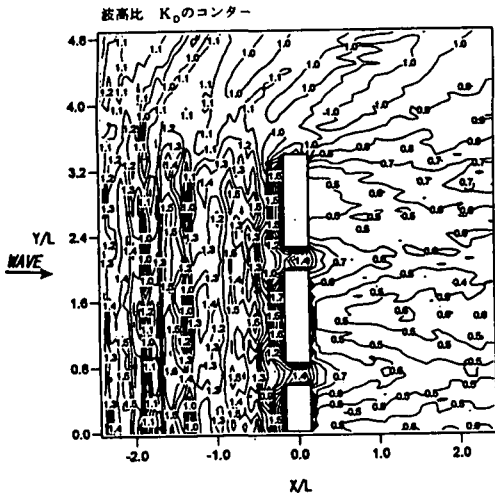


図-8 不規則波に対する基本形堤体列まわりの波高分布の算定結果($H_{1/3}=3.1\text{cm}$, $T_{1/3}=0.95\text{sec}$, $\lambda/L_{1/3}=1.4$, $S_{\text{max}}=20$)

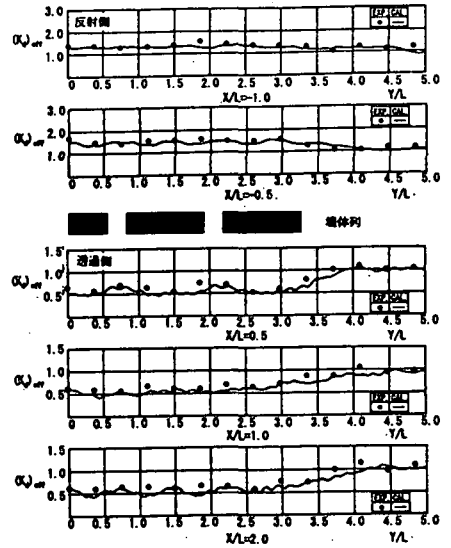


図-9 代表的な測線上での不規則波に対する波高分布(基本形堤体列, $H_{1/3}=3.1\text{cm}$, $T_{1/3}=0.95\text{sec}$, $\lambda/L_{1/3}=1.4$, $S_{\text{max}}=20$)

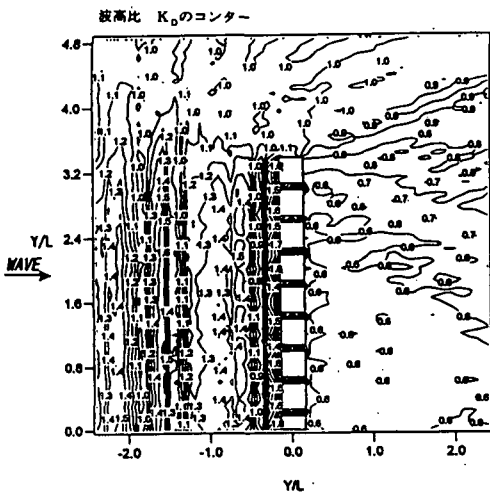


図-10 不規則波に対する17基堤体列まわりの波高分布の算定結果($H_{1/3}=3.1\text{cm}$, $T_{1/3}=0.95\text{sec}$, $\lambda/L_{1/3}=0.4$, $S_{\text{max}}=20$)

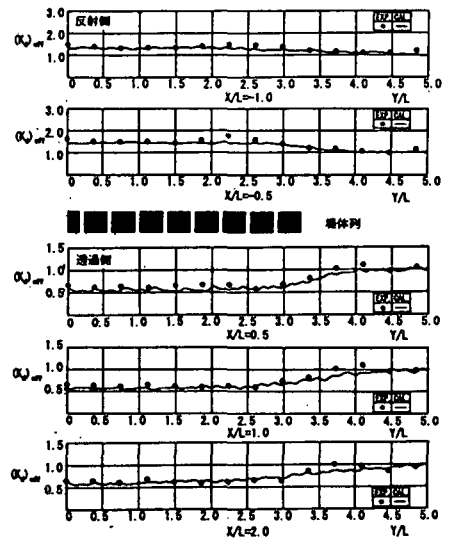


図-11 代表的な測線上での不規則波に対する波高分布(17基堤体列, $H_{1/3}=3.1\text{cm}$, $T_{1/3}=0.95\text{sec}$, $\lambda/L_{1/3}=0.4$, $S_{\text{max}}=20$)

る。このような傾向は、特に多方向不規則波の実験で生じやすく、これは定常状態下での結果を測定するために長時間にわたり波を作用させなくてはならないことによる。

以上の検討から、多方向不規則波の場合でも、代表波の波長に比較して、配列ピッチ長が短くなるように堤体長を設定すると、規則波ほど顕著ではないが、透過側の空間的な波高変動が小さくなることや、このような特性は本研究で提案した解析法によりほぼ予測できることなどが確認された。

4. 結語

(1) 不規則波が作用するときの堤体列まわりの波高分布は、規則波の場合ほど顕著でないが、堤体の配列ピッチ長 λ と有義波の波長 $L_{1/3}$ との比により、斜波成分が発生して短峰性の波面形状になる場合とそれが発生せず長峰性の波面形状になる場合の2種類に大別できる。これらの波高分布の特性は、鉛直線グリーン関数法に基づく数値解析法を用いてほぼ予測できる。

(2) 堤体の配列ピッチ長を作用波の代表波長より短くすると、斜波成分の発生が抑制されるため、堤体列の背後ではより広範囲にわたり様な波高分布が現れ、効果的な波高制御が可能になる。そして、不規則波の場合、配列ピッチ長は、有義波の波長の約3割から5割程度に設定することが望ましい。

< 参考文献 >

- 1) 中村孝幸・小野正順：規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 海岸工学論文集、第35巻、pp. 527-531, 1988.
- 2) 清川哲志・V. モテイカ：無限列任意断面柱体群による波の散乱問題の解析のためのグリーン関数の誘導とその応用、清水建設研究報告、第52号、pp. 53-63, 1989.
- 3) Issacson, M. Q. : Vertical cylinder of arbitrary section in waves, Jour. of Waterways, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 309-322, 1978.
- 4) 中村孝幸・奥吉雄：任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について、第32回海岸工学講演会論文集、pp. 594-598, 1985.
- 5) 合田良實：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp. 9-84, 1977.
- 6) 中村孝幸・岩崎和弘：直線配列された消波堤による平面的な波変形に関する研究、海岸工学論文集、第40巻、pp. 626-630, 1993.