

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

中村孝幸*・岩崎和弘**・河野幸浩***

1. ま え が き

近年、わが国では沿岸海域の有効利用を目的として各種の沖合消波堤の開発が進められつつある。このような沿岸開発では、波変形に及ぼす堤体の断面形状の効果のみならず、堤体の平面的な配置や配列する堤体長などの効果についても知る必要がある。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無限堤体列を対象にした研究がある(中村ら;1988,1990)。しかしながら、これらの研究成果を、実際場で見られるような有限堤体列に適用するには、堤体端部からの回り波の影響などを含め、さらに検討が必要と考えられる。

本研究では、直線的に配列された消波堤群を対象にして、より有効な波浪制御効果が得られる堤体の配列法を、主に配列ピッチ長や堤体長の効果に着目して明らかにするものである。この際、堤体列としては、無限堤体列および有限堤体列の両者を採用して理論解析を行い、両堤体列についての算定結果の比較から、無限堤体列の算定結果の有限堤体列への適用性についても考察する。

2. 平面的な波変形の算定法と評価法の概要

(1) 無限堤体列を想定した解析法

本研究で用いた解析モデルおよび座標系を図-1に示す。解析では、一定水深 h の波動場中に、直立式堤体構造物が一定間隔 λ で y 軸方向に規則的に配置されており、これに平面波が直角に入射するものとしてある。

既に中村ら(1988)は、図-1のような直立式堤体列まわりの波浪ポテンシャル問題の解析法をグリーン関数法に基づき明らかにしている。ここでも同様な解析法を採用して矩形堤体列による波変形を算定した。ただし、ここでは堤体の反射特性(反射率および位相差)を考慮できるように修正した。そして低反射条件への修正は、堤体表面での不透過条件を部分吸収条件(例えば樁木;1991)に変更するだけで行える。このような修正を考慮した堤体没水面上での湧き出し強さ f_0 の決定方程式は

次式で示される。

$$\int_C f_0(X, Y) \left[ika(x, y)G(x, y; X, Y) + \frac{\partial G(x, y, X, Y)}{\partial n(x, y)} \right] dC(X, Y) = - \left[ika(x, y)\Phi_i + \frac{\partial \Phi_i(x, y)}{\partial n(x, y)} \right]_{(x, y)} \quad \text{on } C \cdots (1)$$

ここに、 C : 堤体列中の一堤体の周辺曲線、 i : 虚数、 k : 波数($2\pi/L$; L : 波長)、 G : 同一形状の堤体の規則的配列を想定した波動場でのグリーン関数、 $\partial/\partial n$: C 上での法線微分、 (X, Y) : C 上の湧き出し点の座標、 $a(x, y)$: 堤体表面 (x, y) の反射特性を表す量で次式で定義される。

$$\alpha(x, y) = \frac{1 - C_R(x, y)e^{i\delta(x, y)}}{1 + C_R(x, y)e^{i\delta(x, y)}} \cdots \cdots (2)$$

$C_R(x, y)$, $\delta(x, y)$ はそれぞれ C 上の点 (x, y) における反射率および反射現象に付随して生じる位相差である。式(1)で $\alpha=0$, すなわち式(2)で $C_R=1.0$, $\delta=0$ とおくと、式(1)は従来の完全反射の条件に一致する。

このような解析によると、無限堤体列の透過側では入射波と同方向に伝播する透過波成分(直進波成分)の

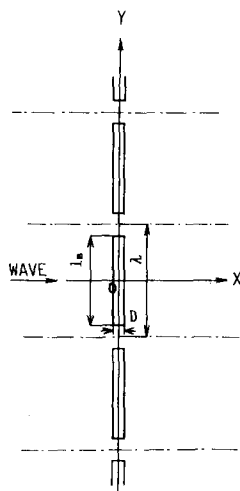


図-1 解析モデルおよび座標系

* 正 会 員 工博 愛媛大学助教授工学部土木海洋工学科
 ** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科
 *** 広島県立三次工業高等学校 教諭

みならず、それと異なる方向に伝播する成分(斜波成分)も発生することや、直角入射を想定する場合、斜波成分の発生条件は式(3)で与えられることが知られている。

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

ここに、 λ : 図-1中に示す配列ピッチ長である。式(3)で等号が成立する条件は、第 n 次斜波成分が現れるか否かの限界を示し、第 n 次の横波共振点と呼ばれる。

そして、図-1のような堤体列まわりの透過波および反射波のエネルギーフラックスを各波向き成分別にその波数ベクトル $\vec{k}$ と併せて示すと図-2のようである。なお図中では、直角入射で $2 > n > 1$ の条件が仮定してある。また、図中で $q_1 = 2\pi/\lambda$, E_{T0} , E_{R0} : 透過波, 反射波の直進行波成分のエネルギー, E_{T+1} , E_{R+1} : 同様の波の

第一次斜波成分のエネルギーで、添字中の $\pm$ は左右の斜波成分を表す。また C_g : 群速度である。

既に中村ら(1990)は、堤体列方向における透過・反射波高の rms 値と入射波の波高との比 K_T , K_R ならびに波向きに着目した成分波のエネルギー比 T_n , R_n を用いる評価法を提案している。ここでも同様な特性量を用いて波変形を評価する。これらの特性量は、図-2中の諸量を用いると以下の式で定義できる。

$$K_T = \sum_{n=0}^N (E_{Tn} + E_{T-n}) / E_T \quad (4)$$

$$K_R = \sum_{n=0}^N (E_{Rn} + E_{R-n}) / E_R \quad (5)$$

$$T_0 = E_{T0} / E_T, \quad T_n = (E_{Tn} + E_{T-n}) / E_T \quad (6)$$

$$R_0 = E_{R0} / E_R, \quad R_n = (E_{Rn} + E_{R-n}) / E_R \quad (7)$$

ここに、 N : 式(3)を満足する n の最大値, E_I : 入射波のエネルギーである。 T_n , R_n : それぞれ透過・反射波の波向き別のエネルギー比で、 $n=0$ のときが直進行波成分, $n \geq 1$ が斜波成分に対応する。また、 E_T , E_R : それぞれ透過・反射波の全エネルギーで、式(4), (5)の平方根中の分子量に等しい。

(2) 有限堤体列に対する解析法

解析モデルおよび座標系は図-1と同様であるが、配列する基数が有限である。ここで用いた理論解析法は、Issacson(1978)による鉛直線グリーン関数法である。ただし、無限堤体列の場合と同様に、堤体の反射特性が考慮できる境界条件を採用した。この境界条件は、積分領域およびグリーン関数が異なることを除けば、式(1)と同形である。

3. 無限堤体列による波変形

(1) 算定条件

算定の対象にした堤体列は、図-1に示すように矩形堤体を直線状に配列したものである。この際、配列開口率 $\alpha = (\lambda - l_b)/\lambda$ は 0.2 と一定にして、配列ピッチ長 λ (or 堤体長 l_b) を表-1に示す計 13 種類に変化させた。また、堤体の壁厚 D および水深 h は、それぞれ 15.5 cm, 35 cm と一定にし、壁面反射率の条件としては、ケーソン堤およびブロック堤を想定して、それぞれ $C_R = 1.0$ と 0.4 の両者を採用した。このとき、壁面反射率は堤体周囲で一様なものとした。

(2) 波変形の特性

図-3は、各配列ピッチ長(or 堤体長)の堤体列による透過側での波高比 K_T を示す。この際、横軸には相互に比較が行えるように、本研究で採用した最長の配列ピッチ長 $\lambda_0 = 150$ cm の堤体列を基本形と定義し、このピッチ長を用いた周期に関する無次元量 λ_0/D が表示してある。そして図中には、堤体長による差異が検討できるように、

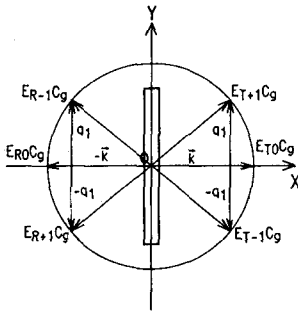


図-2 堤体まわりの各波向き成分 ($1 < \lambda/L < 2$)

表-1 算定条件 (単位: cm)

堤体長 l_b	ピッチ長 λ	l_b/D
120.0	150.0	7.5
84.7	105.9	5.5
65.5	81.8	4.2
53.3	66.7	3.4
45.0	56.3	2.9
38.9	48.6	2.5
34.3	42.9	2.2
30.6	38.3	2.0
27.7	34.6	1.8
25.3	31.6	1.6
23.2	29.0	1.5
21.5	26.9	1.4
20.0	25.0	1.3

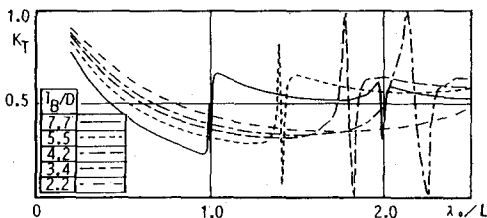


図-3 各配列ピッチ長のときの K_T ($C_R = 1.0$)

各堤体長と堤体の壁厚の比 l_b/D をパラメータとして示してある。

この図より、 l_b/D が減少して堤体長が短くなると、 K_T の急変する横波共振点が λ_0/L の大きな短周期波側に移行することや、この共振点を境にして K_T は急増することなどがわかる。これは後述するように、横波共振点より大きな λ_0/L の条件、すなわち作用波の波長が配列ピッチ長より短くなると、透過波には卓越した大きさに斜波成分が含まれるようになるためである。そして、配列する堤体長を短くすると、より広い周期帯で比較的良好な静穏化効果の得られることがわかる。しかし、 λ_0/L の小さな領域、すなわち長周期の条件下では、堤体長の長い場合に比較して K_T は高くなることも認められる。

図-4 は、代表例として基本形の堤体列 ($l_b/D=7.7$) による透過波の波向き特性を示すもので、 $\lambda_0/L > 1$ の横波共振点を越えた領域では、 T_1 , T_2 で示される斜波成分の卓越することがわかる。図-5 は、このように斜波成分の卓越する状況下 ($\lambda_0/L=1.5$) での堤体背後における波高分布 (波高比) を示す。この図より、斜波成分の卓越する状況下では、平面的に複雑な重複波が形成され、空間的な波高変動も大きいことなどが理解できる。ここでは示さないが、 $\lambda_0/L < 1$ の条件下では、波向き特性量は T_0 のみとなるため、透過波は長峰性の波面形状となり、図-5 のような重複波の波高変動は現れない。

このように堤体列背後の波高変動は、堤体長 (or ピッチ長) と波長との関係により大きく変化する。どのような堤体長を選択するかは、背後地での目的により異なる。例えば、越波対策や波浪の静穏化を想定するならば、有意なエネルギーをもつ最短波長よりも短いピッチ長となるように堤体長を設定することが賢明と言える。このように設定すると、堤体列背後の波面形状は長峰性のもので、しかも静穏化効果も比較的良好である。一方、海岸侵食対策として堤体背後でのトンボロの形成を促進する場合には、図-5 に示すような平面的な重複波が現れる方が効果的と考えられ、配列ピッチ長は、波長より長くすることが望ましい。

次に、図-6 は、図-3 と同様の条件下での反射側での波高比 K_R を示す。この図より K_R は、各堤体長に対応する共振点付近を除くと、堤体長による顕著な差異は見られず、0.9 程度とかなり高い値を示す。また反射波の波向き特性は、透過波と異なり、ピッチ長と波長の比に関係なく、直進行波成分の卓越する傾向が認められており、ここに付記しておく。

(3) 堤体の反射率の影響

図-7、図-8 は、それぞれ壁面反射率 $C_R=0.4$ の場合の各配列条件における K_T , K_R を示す。これらの図と前出の $C_R=1.0$ の場合との比較から、低反射条件にすると

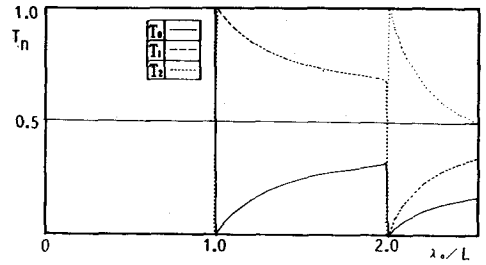


図-4 透過側における波向き特性 ($\lambda=150$ cm, $C_R=1.0$)

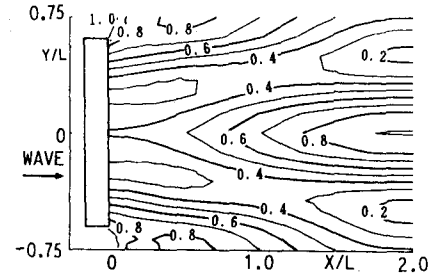


図-5 無限堤体列の透過側の波高分布 ($\lambda=150$ cm, $\lambda/L=1.5$, $C_R=1.0$)

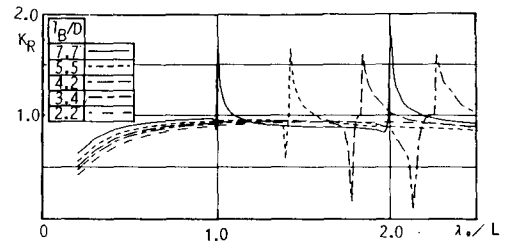


図-6 各配列ピッチ長のときの K_R ($C_R=1.0$)

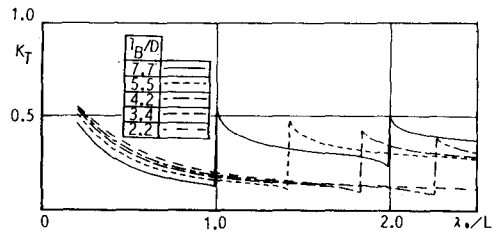


図-7 各配列ピッチ長のときの K_T ($C_R=0.4$)

K_R のみならず K_T をも有効に低減できることや、横波共振点付近での K_T , K_R の変化幅も小さくなることが分かる。また、 K_T , K_R の λ_0/L による変動傾向は、 $C_R=1.0$ の場合と類似していることなども認められる。したがって、堤体壁面を低反射構造にすることは、堤体列周辺域の波浪の静穏化に有効なものと言える。

4. 有限堤体列による波変形

(1) 算定条件

配列する堤体の条件は、表-1と同様の堤体寸法、配列ピッチ長を用いた。そして、有限堤体列で問題になる総堤体列長 l^* は、開口率 $\alpha=0.2$ の条件で基本形の堤体 ($l_B=120$ cm) を5基直線配列したときの $l^*=720$ cm に固定した。そして、開口率を上記の値に保持し、配列する堤体長および配列基数を各種に変化せしめ、堤体列まわりの波高分布の算定を行った。

(2) 波変形特性

図-9, 10 は、 $\lambda_0/L=0.75$ と長周期の条件下での、それぞれ堤体基数が5基, 17基のときの透過側の波高分布 (波高比) および波の同位相線を示す。波の同位相線図は、波面形状とほぼ相似形であることが知られており、これを用いて波向きなどが推定できる。なお、図中では、堤体列の左右で波高分布ならびに同位相線図が対称になるため、その半分の領域についてのみ表示してある。これらの図の比較から、短い堤体を多数基配置するよりも長い堤体を少数基配置する方が、堤体列背後の幾何学的な陰の領域で、波高比の絶対値は減少することがわかる。しかし、波高比の空間的な変動は、短い堤体の方が小さく、このことは同位相線図がより長峰性に近いことから認められる。そして、これらの波変形の結果と上記した無限堤体列のそれとを比較すると、図-3に見られるように、 $\lambda_0/L=0.75$ の波条件下では、短い堤体よりも長い堤体の方が K_T はやはり小さくなることや、 K_T の絶対値も有限堤体列の背後域における平均的な波高比にほぼ等しいなど、両堤体列による波変形の特性は概略的に一致している。

一方、図-11, 12 は、それぞれ図-9, 10に対応する配列基数で、 $\lambda_0/L=1.5$ と短周期の条件にしたときの結果を示す。これらの図には、対照的な2種類の波面形状が現れている。1つは、図-12の比較的波峰線の連なった長峰性のもので、波高分布も幾何学的に陰となる領域でほぼ一定値を示すもの。もう一つは、図-11に見られるような各開口部より離岸方向に波高値の高い部分が伸び、しかもそれらの中央部で顕著な重複波の腹が現れ、配列方向に波高変動が激しい短峰性の波面形状になるものである。そして図-11の波面形状は、対応する波条件下での無限堤体列の場合の図-5と酷似していることが認められる。両堤体列の背後で静穏化領域が広いのは、前者の場合に相当しており、長い堤体を少数基配列するよりも、短い堤体を多数基配列する方が効果的に透過波を低減できることがわかる。この結果は、無限堤体列の場合の対応する λ_0/L の条件下での結果と一致している。そしてこのときも、有限堤体列の背後域の平均的な波高

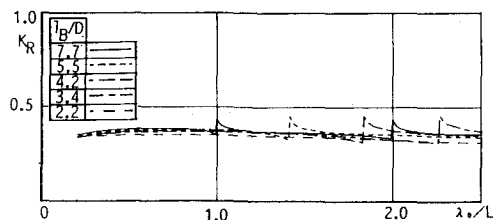


図-8 各配列ピッチ長のときの K_R ($C_R=0.4$)

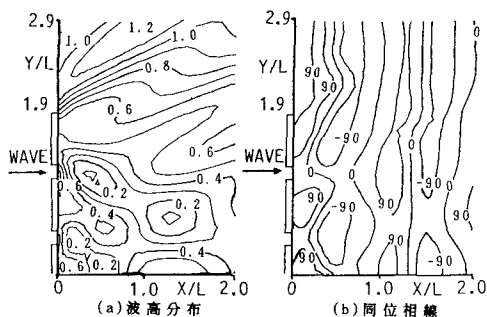


図-9 有限堤体列の透過側の波変形
(堤体基数5; $l_B/D=7.7$, $\lambda_0/L=0.75$, $C_R=1.0$)

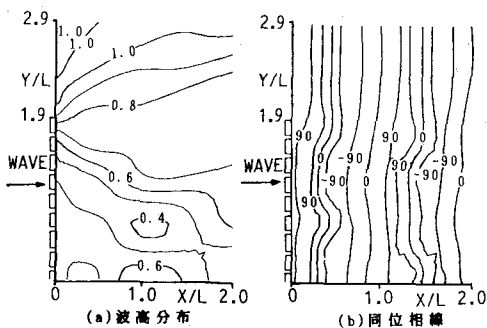


図-10 有限堤体列の透過側の波変形
(堤体基数17; $l_B/D=2.2$, $\lambda_0/L=0.75$, $C_R=1.0$)

比は、図-3に示す対応する無限堤体列の K_T とほぼ等しくなっている。

(3) 堤体の反射率による影響

図-13は、全配列堤体の壁面反射率を一律に $C_R=0.4$ にしたときの結果を示す。堤体の配列および波条件は図-9と同一である。この図と図-9の比較から、壁面反射率を小さくすると、無限堤体列の場合と同様に堤体列背後での波高は効果的に低減できることが認められる。しかしながら、波面形状は両者で大きな差異が見られず、壁面反射率は波向き特性には影響しないことが分かる。

5. 結 語

(1) 無限あるいは有限堤体列に関係なく、一堤体長

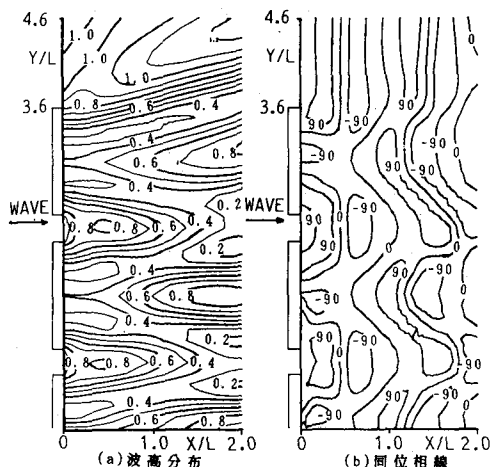


図-11 有限堤体列の透過側の波変形
(堤体基数 5 ; $l_B/D=7.7$, $\lambda_0/L=1.5$, $C_R=1.0$)

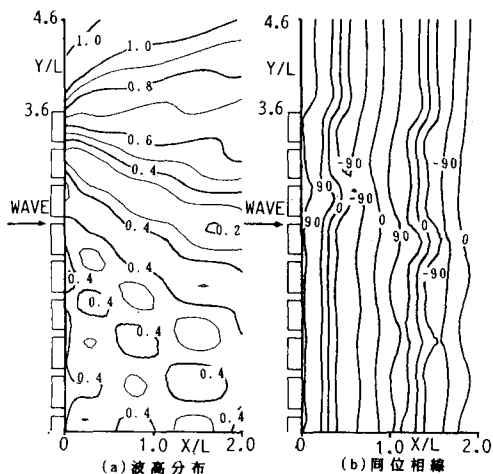


図-12 有限堤体列の透過側の波変形
(堤体基数 17 ; $l_B/D=2.2$, $\lambda_0/L=1.5$, $C_R=1.0$)

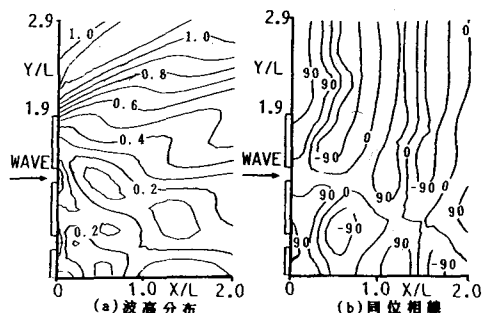


図-13 有限堤体列の透過側の波変形
(堤体基数 5 ; $l_B/D=7.7$, $\lambda_0/L=0.75$, $C_R=0.4$)

斜波成分の発生を抑制できることから、堤体列の背後では効果的に波高を低減できる。

(2) 配列する堤体を低反射構造にすると、堤体列よりの反射波高を有効に低減できるのみならず、透過波についても低減できる。しかしながら、低反射構造にしても、堤体列まわりの波面形状のパターンは変化しない。

(3) 直線配列された有限堤体列による波変形は、本研究で対象にした配列基数が 5 基以上で、しかも総堤体列長が波長の 3.5 倍程度以上の条件下では、堤体列の端部付近に位置する堤体の背後付近を除けば、無限堤体列を想定した算定結果で概略的に近似できる。

参考文献

- 樫本亨編著 (1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, pp. 272-273.
- 中村孝幸, 小野正順 (1988): 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, 第 35 回海講論文集, pp. 527-531.
- 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, 海岸論文集, 第 37 巻, pp. 534-538.
- Issacson, M. Q. (1978): Vertical cylinder of arbitrary section in waves, Jour. of Waterways, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 309-322.

(or 配列ピッチ長) を作用波の波長より短く設定すると,