

傾斜海浜に設置した二列潜堤による波浪制御

喜 岡 渉*・水 谷 幸 平**

1. はじめに

離岸潜堤は水質保全上や景観上優れた性質を有するとともに、入射波高が小さいほど伝達率は大きくなるという波浪制御効果を有する。反面、潜堤による波浪制御効果については、大水深になると碎波による消波効果を得ることが構造上難しく、反射による波の阻止効果も天端水深が大きくなると著しく低下するという問題と、高波を伴うような長周期の波に対してはその消波効果はほとんど期待できないという問題点がすでに報告されている。さらに、高波については潜堤天端上で碎波させるため、潜堤背後の平均水位は潜堤が無い場合より大きくなる傾向が見られ、背後の海浜の安定上必ずしも有利ではないことが指摘されている。

こうした問題の対応策の一つとして、喜岡ら(1989)はすでに潜堤高が比較的小さな潜堤を岸沖方向に複数配置することによって得られる波の制御効果を実験および理論的に調べており、単一では防波効果がほとんど見られない潜堤高が水深の7割以下であるような低い潜堤でも複数配置することによって、特に潜堤設置間隔のほぼ2倍の波長を持つ波が入射するとき防波効果が見られることを示している。しかしながら、得られた結果は一定水深下のものであり傾斜海浜における効果については明らかでないということと、理論モデルにも波の非線形性の影響が考慮されていないなどの問題が残されている。本研究では、緩傾斜海浜に潜堤を2列設置したときの波浪制御効果を具体的に調べるもので、理論モデルにおいても波の非線形性を考慮した Boussinesq 方程式に基づく検討を行うものとする。

2. 計算モデル

Liu ら(1985)はすでに Boussinesq 方程式に基づき波の非線形性を考慮した前進型の放物型方程式による平面2次元の屈折・回折方程式を導いている。ここでは、Yoon・Liu(1987)と同様に、Liu らの方程式を反射波

を考慮することによって書き換え、 x 方向のみに伝播するときの反射・回折方程式を導き計算モデルとして用いることとする。

すなわち、 x' 軸を静止水面と一致させ、 z' 軸を鉛直上向きにとり、入射波の角周波数を ω すると、基礎方程式は無次元表示された次の Boussinesq 方程式である。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h + \varepsilon \zeta)u = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{3} \mu^2 d^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、二つのパラメータ ε 、 μ^2 および独立変数 ($x, z; t$)、水位変動 ζ 、鉛直平均の流速 u 、水深 h は、代表水深を h_0 、入射波の代表振幅を a_0 とすると、それぞれ式(3)および(4)で示される無次元量である。

$$\varepsilon = a_0/h_0, \quad \mu^2 = \omega^2 h_0/g \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= x' \omega / (gh_0)^{1/2}, \quad z = z'/h_0, \quad t = \omega t' \\ \zeta &= \zeta'/a_0, \quad u = u'/[\varepsilon(gh_0)^{1/2}], \quad h = h'/h_0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

さらに、水深 h については、潜堤による水深変動部分 D と海底面 d を分離して次のように表示できるものとする。

$$h(x) = d(x) + D(x) \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(2)の誘導に当たっては、二つのパラメータ ε 、 μ^2 がともに小さく、かつ同じオーダーであるという仮定のほかに、水深とその変動のオーダーに関して次の仮定が成り立つものとしている。

$$\left. \begin{aligned} d &\sim O(1), \quad D \sim O(\mu^2) \\ d(d)/dx &\sim O(\mu^2), \quad dD/dx \sim O(\mu^2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、未知量 ζ 、 u をそれぞれ次のようにフーリエ級数展開して表す。

$$\left. \begin{aligned} \zeta(x, t) &= \frac{1}{2} \sum_n \zeta_n(x) e^{-int} \\ u(x, t) &= \frac{1}{2} \sum_n u_n(x) e^{-int} \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} n &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 (ζ_{-n}, u_{-n}) は (ζ_n, u_n) の共役複素数を示すものとする。式(7)をそれぞれ式(1)、(2)に代入した上で u_n を消去し、 ε^2 、 $\varepsilon \mu^2$ および μ^4 以上のオー

* 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科

** 名古屋港管理組合 計画部

ダーの項を省略すると次の楕円型の微分方程式を得る.

$$\begin{aligned} d \frac{d^2 \zeta_n}{dx^2} + \frac{d}{dx} (d+D) \frac{d \zeta_n}{dx} + n^2 \left(1 - \frac{D}{d} + \frac{1}{3} \mu^2 n^2 d \right) \zeta_n \\ = \varepsilon \sum_{\substack{s \neq 0 \\ s \neq n}} \left[\frac{n^2 - s^2}{2d} \zeta_s \zeta_{n-s} - \frac{n+s}{2(n-s)} \frac{d \zeta_s}{dx} \frac{d \zeta_{n-s}}{dx} \right], \\ n=1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

なお, $n=0$ に対応する平均水位 ζ_0 と平均流速 u_0 はともに $O(\varepsilon^2)$ となるので上式からは落とされている.

潜堤周辺の波動場に適用するため, ζ_n を次式のように通過成分 A_n^+ と反射成分 A_n^- に分けて表示する.

$$\begin{aligned} \zeta_n = A_n^+(x) \exp \left[i n \int \frac{dx}{(d)^{1/2}} \right] \\ + A_n^-(x) \exp \left[-i n \int \frac{dx}{(d)^{1/2}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

ここに, 振幅 $A_n^\pm$ の変動量は次のオーダーで与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d A_n^\pm}{dx} \sim \frac{d}{dx} d \sim \frac{d}{dx} D \sim O(\mu^2) \\ \frac{d^2 A_n^\pm}{dx^2} \sim O(\mu^4) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(9)を式(8)に代入して ε^2 , $\varepsilon \mu^2$, μ^4 のオーダー以上の高次項を省略した上で $\exp \left[i n \int (1/d^{1/2}) dx \right]$ と $\exp \left[-i n \int (1/d^{1/2}) dx \right]$ の項に分けて整理すると次の放物型の連立微分方程式が得られる.

$$\begin{aligned} d^{1/2} \frac{d A_n^+}{dx} + \left[\frac{1}{2} \frac{d(d)^{1/2}}{dx} + \frac{1}{6} i \mu^2 n^3 d \right] A_n^+ \\ = -\frac{i \varepsilon}{4d} \sum_{\substack{s \neq 0 \\ s \neq n}} (n+s) A_s^+ A_{n-s}^+ \\ - \left[\frac{1}{2} i n \frac{D}{d} - \frac{d(D)^{1/2}}{dx} \right] \exp \left[-2 i n \int \frac{dx}{(d)^{1/2}} \right] A_n^- \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} d^{1/2} \frac{d A_n^-}{dx} + \left[\frac{1}{2} \frac{d(d)^{1/2}}{dx} + \frac{1}{6} i \mu^2 n^3 d \right] A_n^- \\ = \frac{i \varepsilon}{4d} \sum_{\substack{s \neq 0 \\ s \neq n}} (n+s) A_s^- A_{n-s}^- \\ + \left[\frac{1}{2} i n \frac{D}{d} - \frac{d(D)^{1/2}}{dx} \right] \exp \left[2 i n \int \frac{dx}{(d)^{1/2}} \right] A_n^+ \end{aligned} \quad (12)$$

モデル方程式(11), (12)は A_n^+ と A_n^- について適当な境界条件が与えられれば数値積分を行うことによって比較的容易に解くことができる. ここでは, 計算領域の沖側 ($x=0$) では入射波 A_n^+ , 岸側 ($x=X$) では反射波 A_n^- の条件をそれぞれ次の式(13), (14)で与える.

$$\begin{aligned} A_n^{'+}(0) = \frac{2\pi^2}{\kappa^2 K^2} \left(\frac{n \gamma^n}{1 - \gamma^{2n}} \right), \quad \gamma = \exp \left[-\frac{\pi K(\kappa')}{K(\kappa)} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$A_n^-(X) = 0 \quad (14)$$

ここに, K は第1種完全楕円積分を示し, κ は母数で $\kappa'^2 = 1 - \kappa^2$ である. すなわち, 入射波としてはクノイド波の第1次近似解を仮定し, 岸側(汀線)からの反射は無いものと仮定する. なお, 入射波の振幅は次式によって与えられるので, その振幅を代表振幅として, 式(13)の $A_n^{'+}$ は $A_n^+ = A_n^{'+}/a_0$ により無次元表示される.

$$a_0 = [\sum_n (A_n^{'+})^2]^{1/2}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

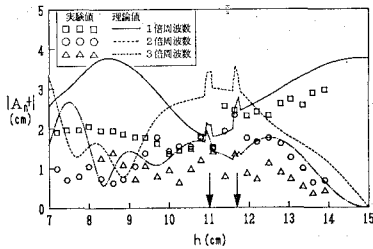
微分方程式(11), (12)の数値積分には4次の Runge-Kutta 法を用いる. ただし, 両式を連立させて解くのは困難であるため次のような繰返し法を用いる. まず第1ステップとして, 全ての反射成分 A_n^- を無視して式

(11) から入射成分 A_n^+ を計算し, 得られた A_n^+ を用いて式(12)から反射成分 A_n^- を計算する. 第2ステップでは, 第1ステップで計算された A_n^- を用いて式(11)により A_n^+ を求め, ついで求めた A_n^+ を用いて式(12)により A_n^- を計算する. 以上の繰返し計算をあらかじめ設定した収束条件を満足するまで行うことによって, 各点での振幅 A_n^+ , A_n^- を求めることができる. 収束に必要なステップ数は入射波の条件, フーリエ級数の打ち切り数, 潜堤形状などにより変化するが, 本研究で対象とした計算条件では繰返し計算による変動分が $\pm 0.2\%$ 以下になるために必要なステップ数は最大で5回であった. 潜堤高が大きいき, すなわち D の変動が大きいきときには, 最初の1, 2ステップでは $D/2$ として計算した方が幾分収束が早くなるが, その差はせいぜい1, 2ステップである.

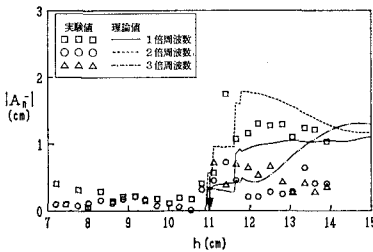
3. 模型実験

実験には長さ26m, 幅0.6m, 高さ1.2mの片面ガラス張りの造波水槽を用いて, 造波板から2.5m離して勾配1/100のステンレス製斜面を設置した. 図-1に示すように, 水深11cmの地点に一つ目の潜堤を設置し, そこから沖へ $l=70$ cm 離して二つ目の潜堤を設置した. 二つの潜堤形状は同じで, それぞれ潜堤高 $hc=7$ cm, 天端幅10cm, 底面幅24cmの台形断面とし, ともにモルタル製の不透過潜堤とした. 水位変動の測定には容量式波高計を用い, 入・反射分離を行うため各測定点には2本の波高計を18cm離して設置した. 各測定点の水位変動はサンプリング間隔0.02secでAD変換した後, デスケットに記録した.

入射波の周期 T は1.5sec前後で3種類変化させ, 波高は一定水深部で常にほぼ5cmになるようにした. 一定水深部の水深は常に27cmとした. なお, 水槽後端には碎石を敷いて波の反射の影響を防いだが, 完全に抑制することは困難であり, 測定結果にはそこからの反射が数%程度見込まれる.



(a) 入射波の振幅の変化



(b) 反射波の振幅の変化

図-5 正弦波を入力波形とした時の計算結果との比較 (2列潜堤)

潜堤背後ではむしろ増幅される傾向にある。入射波の振幅のうち2倍, 3倍周波数成分のものは潜堤の列数によってほとんど変化していないが, 基本周波数の振幅は2列潜堤の方が背後での低減率が大きくなるため, 2列潜堤においては相対的に通過側での高次成分が大きくなる。ただし, こうした傾向は実験結果からは明かでない。反射成分については計算領域での変動は小さく, 基本周波数成分が常に卓越している。

図-5は沖側境界における入力波形を正弦波 ($A_1^+(0)=1$ で, $n \geq 2$ では $A_n^+(0)=0$ とした時の計算結果をプロットしたもので, 図-4の結果と比べると, 特に入射波の各振幅については実験値とよく一致している。このことは, 潜堤沖側ですでに入射波は変調する波となっていることを示しており, 非線形干渉による変動の影響が著しいものになっている。

5. 反射率の変化特性

潜堤通過後の波高低減効果については, 非線形干渉によるエネルギーの移流と同時に砕波によるエネルギー逸散が影響するので, その評価には本計算モデルは適用できない。ここでは反射による防波効果に着目して潜堤の波浪制御機能を評価することとし, 次式によって反射率を求め, その変化特性を調べる。

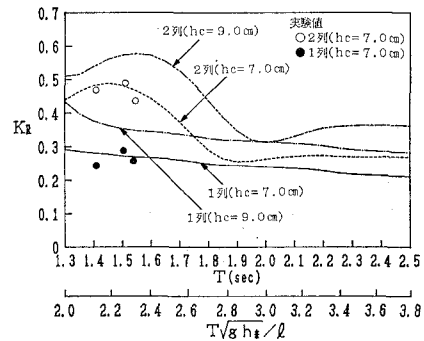
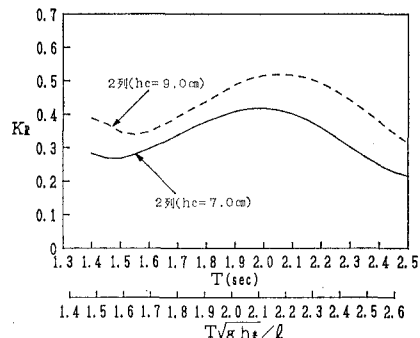
$$K_R = \left(\frac{\sum_{n=1}^3 |A_n^-|^2}{\sum_{n=1}^3 |A_n^+|^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (16)$$

上式では実験値との対応から $n=3$ までの項のみで定義しているが, ここに示すような計算条件では $n=4, 5$ の高次項の影響はきわめて小さい。なお, 式 (16) の算定

は水深 $h=15$ cm の地点で行うものとした。

実験条件と同じ潜堤高 $hc=7.0$ cm, 潜堤設置間隔 $l=70$ cm に対して入射波の周期 T を変えたときの反射率 K_R の計算結果を実験値とともに 図-6 に示す。図にはまた潜堤高 hc を 9.0 cm にしたときの計算結果も示す。図からわかるように, 反射率は1列潜堤では周期 T が増加するにしたがってほぼ単調に減少するが, 2列潜堤では $hc=7.0$ cm のとき $T=1.45$ sec で, $hc=9.0$ cm のときには $T=1.55$ sec でそれぞれピーク値をとり, その付近では2列潜堤にすることによる効果が大きい。2列潜堤設置位置の中間点の水深を h_* としていわゆる Bragg の共鳴条件を決めるパラメーター $T(gh_*)^{1/2}/l$ を求めると, $hc=7.0$ cm では 2.2 , $hc=9.0$ cm では 2.3 となり, 2.0 より幾分か大きい値をとる。2列潜堤においても潜堤高を高くすることによって反射率を増加させることができるが, その増加の度合いは1列潜堤における潜堤高による変動分とほぼ同程度のものとなっている。実験値は理論値とよく一致しているが, 実験は非定形波を用いたものになっているため, この結果から反射率の計算結果の妥当性を議論することはできない。

図-7に2列潜堤の設置間隔 l を 100 cm としたときの計算結果を示す。ピーク値の発生周期は $l=70$ cm の結果に比べてともに長周期側に移るとともに, ピーク値は幾分か小さくなっている。ピーク値の発生周期から $T(gh_*)^{1/2}/l$ を計算すると, $hc=7.0$ cm のときには 2.1 ,

図-6 周期 T による反射率 K_R の変化 ($l=70$ cm)図-7 周期 T による反射率 K_R の変化 ($l=100$ cm)

$hc=9.0\text{ cm}$ のときには 2.2 となった。

図-8 は潜堤高 $hc=9.0\text{ cm}$ ，設置間隔 $l=70\text{ cm}$ として斜面勾配 S を変化した時の反射率の計算結果を示す。1列および2列潜堤ともに S が大きくなるにしたがって反射率は減少する傾向にある。その減少の度合いは2列潜堤で K_R が極大値をとる付近で著しくなっている。また，2列潜堤におけるピーク値の発生周期は勾配が急になるほど高周波数側へ移動してゆく傾向が見られる。

斜面勾配 S が大きくなることによる反射率の低減には，2列潜堤の場合，沖側に設置した2列目の潜堤天端水深が S が大きいほど大きくなることによる影響も受けている。図-9 は2列目の潜堤高を S に対応して高くさせて二つの潜堤の天端水深を常に一定にした時の計算結果である。図-8 の結果と比べると，反射率は S によらず大きくなっており，またピーク値の発生周期は低周波数側にシフトしている。ただし， S の増大に伴う反射率の減少傾向は変わっていない。

図-10 は一定水深部における入射波の波高を 5 cm から 7 cm へ変えて計算した結果で，入射波高以外については図-8 の計算条件と同じである。図から，入射波高が大きくなることによる反射率の増加は2列潜堤で斜面勾配 S が小さいときに著しいことがわかる。また，反射率の極小値は図-8 の結果と比べると逆に小さくなって

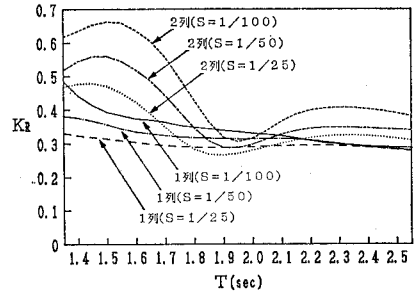


図-10 入射波高を大きくした時の反射率 K_R の変化

おり，極大値の発生周期は短くなっている。計算結果を見る限りにおいては，2列潜堤は入射波高が大きいほど反射率は大きくなるという波浪制御効果を有していることになる。

6. おわりに

傾斜海浜において岸沖方向に2列配置した潜堤による波浪制御効果を Boussinesq 方程式に基づく計算モデルと模型実験によって調べた。造波上の問題から模型実験によっては計算精度を十分に明らかにすることができなかったが，計算結果からは2列潜堤による波浪制御効果に関して次のことがわかった。

- ① 2列目の潜堤の設置間隔を入射波のほぼ半波長とするとき反射による防波効果を著しく高めることができるが，反射率が最大となる設置間隔は潜堤高，斜面勾配および入射波高によって幾分変わる。
- ② 2列潜堤では通過側で基本周波数の振幅の低減率が大きくなるため相対的に高周波数成分の割合が大きくなる。
- ③ 斜面勾配が急になるほど反射による防波効果は低減する傾向である。
- ④ 入射波高が大きいほど反射による防波効果は増大する傾向にある。

最後に，本研究は文部省科学研究費（重点領域研究（1），代表 岩垣雄一名城大学理工学部長）の補助を受けたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 喜岡 渉・松野忠幸・源川秀樹 (1989): 複数列配置した潜堤による波浪制御，海岸工学論文集，第36巻，pp. 549-553。
 喜岡 渉・姜 林 (1990): クノイド波による湾水振動の解析，海岸工学論文集，第37巻，pp. 160-164。
 Liu, P.L.-F., Yoon, S. B. and Kirby, J. T. (1985): Non-linear refraction-diffraction of waves in shallow water, J. Fluid Mech., Vol. 153, pp. 185-201。
 Yoon, S. B. and Liu, P.L.-F. (1987): Resonant reflection of shallow-water waves due to corrugated boundaries, J. Fluid Mech., Vol. 180, pp. 451-469。

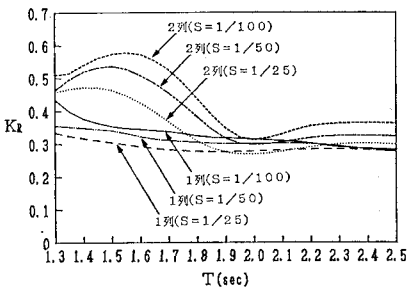


図-8 斜面勾配による反射率 K_R の変化 ($hc=9.0\text{ cm}$, $l=70\text{ cm}$)

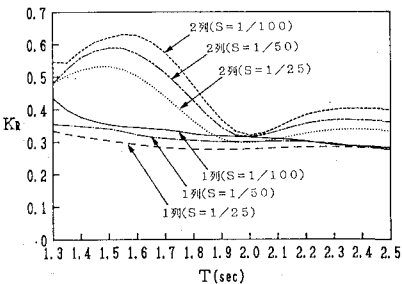


図-9 2列潜堤の天端水深を同一にした時の反射率 K_R の変化