

複数列配置した潜堤による波浪制御

喜岡 渉*・松野 忠幸**・源川 秀樹***

1. はじめに

沖合における消波構造物として潜堤は水質保全上や景観上優れた性質を有している反面、大水深域においては碎波による消波効果を得ることが構造上むづかしく、反射による波の阻止効果も天端上水深が大きくなると著しく低下するなどの問題が指摘されている。具体的には、不透過潜堤についてポテンシャル接続法を用いた井島・佐々木(1971)の理論的研究、同じく不透過潜堤による波の通過率を実験的に検討した三浦・遠藤(1979)の研究などがあり、潜堤高が水深の7割以下であるような低い潜堤の場合には通過率は1.0程度の値となり、その消波効果はほとんど期待できないことが報告されている。

本研究は、従来の研究例において消波効果が全く見い出されなかった堤体高が低くかつ堤体幅も比較的小さな潜堤を複数列配置することによって得られる波の制御効果に関する可能性を検討するもので、ここでは個々の潜堤を同一の断面をもつ不透過潜堤として調べることにする。

こうした複数列配置した潜堤による波の反射に関しては、多段砂州のように周期的に変動する海底地形による Bragg scattering の問題として取り扱った二、三の研究例(例えば、Meiら(1988)の研究)があるものの、それらの解析結果は理論上の制限からそのまま実際の潜堤には適用することができない。そこで本研究では、喜岡(1989)によってすでに与えられているポテンシャル接続法に基づく計算結果を用いて、その近似理論解を新たに検討するとともに、これら理論解によって予想される波の遮断効果について模型実験によって検討を加える。

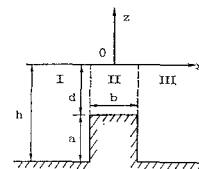
なお、堤体を複数列配置することによって入射波との干渉を利用して波を制御する試みは、二つの浮防波堤を取り扱った Wu・Liu(1988)らによってもなされている。また、自由表面に発生渦によるエネルギー損失も見込める複数鉛直版を配置することによる消波効果を取り

扱った Stiassnie ら(1986)の研究、同じく複数鉛直版を潜堤状に配置することによる波浪制御について検討を加えた吉田ら(1988)の研究があるものの、幅のある潜堤を複数列配置した場合の波浪制御効果については現在のところ十分な検討がなされていない。

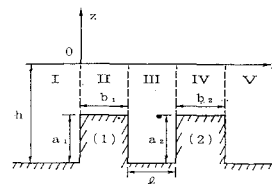
2. WIDE-SPACING 近似による理論解

非粘性、非圧縮 および 非回転の二次元流体運動を考え、座標系としては図-1に示すように x 軸を静止水面と一致させ、鉛直上向きに z 軸をとる。水深は一定で h とし、角周波数 ω の微小振幅波が x の正の方向へ入射するものとする。

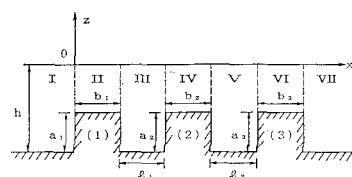
図-1(a)に示すような高さ a 、幅 b の矩形断面を有



(a) 単一潜堤



(b) 二列潜堤



(c) 三列潜堤

図-1 座標系と記号の定義

* 正会員 Ph. D. 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科
 ** 学生員 名古屋工業大学大学院 工学研究科
 *** 正会員 日本国土開発(株)

する潜堤による反射率 K_R および通過率 K_T については、ポテンシャル接続法を用いることにより比較的簡単に算定することができ、図に示す各領域における速度ポテンシャル $\phi = Re(\phi e^{-i\omega t})$ を表示すると次のようである。

$$\phi_1 = (e^{ik(x+b/2)} + R_0 e^{-ik(x-b/2)}) \cosh k(z+h) + \sum_{n=1}^{\infty} R_n e^{k_n(x+b/2)} \cos k_n(z+h) \quad \dots\dots (1)$$

$$\phi_2 = (A_0 e^{-ik'x} + B_0 e^{ik'x}) \cosh k'(z+d) + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n e^{k_n'x} + B_n e^{-k_n'x}) \cos k_n'(z+d) \quad \dots\dots (2)$$

$$\phi_3 = T_0 e^{ik(x+b/2)} \cosh k(z+h) + \sum_{n=1}^{\infty} T_n e^{-k_n(x-b/2)} \cos k_n(z+h) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 k , k_n , k' および k_n' はそれぞれ次式で決まる固有値である。

$$\omega^2/g = k \tanh kh \quad \dots\dots (4)$$

$$\omega^2/g = -k_n \tanh k_n h \quad \dots\dots (5)$$

$$\omega^2/g = k' \tanh k' d \quad \dots\dots (6)$$

$$\omega^2/g = -k_n' \tanh k_n' d \quad \dots\dots (7)$$

上式中の複素未知係数 R_n , A_n , B_n , T_n ($n=0, 1, 2, \dots$) は、領域の境界における圧力と流速の連続性と固有関数の直交性を利用することによって求めることができ、得られた解から複素係数としての K_R , K_T はそれぞれ R_0 , T_0 として与えられる。

次に、図—1 (b) に示すように間隔 l で潜堤を2列設置した場合を考える。この場合も、個々の潜堤が矩形断面を有するものとする、上述のポテンシャル接続法を用いて解析することができる。ただし、予備実験の結果、潜堤間隔 l が小さい場合には単一潜堤と比べて有意な防波効果の向上は見られず、 l を堤体幅の数倍程度とったときの反射特性がより重要となることから、ここでは任意の列数の潜堤の問題に比較的容易に対応することができる wide-spacing 近似による理論解を検討することとする。この近似方法は Srokosz・Evans (1979) および Wu・Liu (1988) によるもので、個々の潜堤の散乱波成分は考慮するが散乱波の潜堤間の干渉による影響は無視できるものとして取り扱うものである。すなわち、潜堤上以外の領域 I, III, V における速度ポテンシャルを次のように近似する。

$$\phi_1 = (e^{ikx} + R_0 e^{-ikx}) \cosh k(z+h) \quad \dots\dots (8)$$

$$\phi_3 = (C_0 e^{-ikx} + D_0 e^{ikx}) \cosh k(z+h) \quad \dots\dots (9)$$

$$\phi_5 = T_0 e^{ikx} \cosh k(z+h) \quad \dots\dots (10)$$

上式中の未知係数はそれぞれの潜堤を図—1 (a) に示すように単一で設置したときの反射率および通過率を用いると次のように表わすことができる。

$$K_R = R_0 = K_R^{(1)} e^{ikb_1} + K_T^{(1)} C_0 \quad \dots\dots (11)$$

$$C_0 = K_R^{(2)} e^{ik[2(b_1+l)+b_2]} D_0 \quad \dots\dots (12)$$

$$D_0 = K_T^{(1)} + K_R^{(1)} e^{-ikb_1} C_0 \quad \dots\dots (13)$$

$$K_T = T_0 = K_T^{(2)} D_0 \quad \dots\dots (14)$$

ここに、上付き添え字 (i) は i 番目の潜堤の複素係数値を示し、係数には図—1 (a) と (b) における原点の位置の差による位相差を補正してある。式(11)~(14)を解くことによって2列潜堤による反射率 K_R および通過率 K_T として次式を得る。

$$K_R = K_R^{(1)} e^{ikb_1} (K_T^{(1)})^2 K_R^{(2)} e^{ik[2(b_1+l)+b_2]} / [1 - K_R^{(1)} K_R^{(2)} e^{ik(b_1+b_2+2l)}] \quad \dots\dots (15)$$

$$K_T = K_T^{(1)} K_T^{(2)} / [1 - K_R^{(1)} K_R^{(2)} e^{ik(b_1+b_2+2l)}] \quad \dots\dots (16)$$

上式で与えられた係数値は、当然のことながら、全ての散乱波成分を無視する長波 (plane-wave) 近似のものと異なる。なお、 $|K_R|^2 + |K_T|^2 = 1$ は近似的にのみ成り立つことになる。式(16)から明らかなように、2列潜堤の通過率は個々の潜堤の配列順によらず、間隔 l が一定の場合には同じ値を得る。

図—1 (c) に示すような3列潜堤についても、同様に wide-spacing 近似を用いることによって、領域 I, III, V, VII の速度ポテンシャルのうち ϕ_1 , ϕ_3 , ϕ_7 はそれぞれ順に式(8), (9), (10)と同一の表示式で与えられ、 ϕ_5 は次式で表わされる。

$$\phi_5 = (E_0 e^{-ikx} + F_0 e^{ikx}) \cosh k(z+h) \quad \dots\dots (17)$$

未知係数 R_0 , C_0 , D_0 , E_0 , F_0 および T_0 のうち R_0 と D_0 についてはそれぞれ式 (11), (13) と同一のものとなり、他の係数については次の関係式が成り立つ。

$$C_0 = K_R^{(2)} e^{ik[2(b_1+l_1)+b_2]} D_0 + E_0 K_T^{(2)} \quad \dots\dots (18)$$

$$E_0 = K_R^{(3)} e^{ik[2(b_1+l_1)+2(b_2+l_2)+b_3]} F_0 \quad \dots\dots (19)$$

$$F_0 = K_T^{(2)} D_0 + K_R^{(2)} e^{-ik[2(b_1+l_1)+b_2]} E_0 \quad \dots\dots (20)$$

$$K_T = T_0 = K_T^{(3)} F_0 \quad \dots\dots (21)$$

以上の連立方程式を解くことにより3列潜堤に対する複素係数として次式を得る。

$$K_R = [K_R^{(1)} e^{ikb_1} - (K_R^{(1)})^2 K_R^{(2)} e^{ik[2(b_1+l_1)+b_2]} + (K_T^{(1)})^2 K_R^{(2)} e^{ik[2(b_1+l_1)+b_2]} + (K_T^{(1)})^2 \times (K_T^{(2)})^2 K_R^{(3)} \times e^{ik[2(b_1+l_1)+2(b_2+l_2)+b_3]} F_0 / (K_T^{(1)} K_R^{(2)})] \times [1 - K_R^{(1)} K_R^{(2)} e^{ik(b_1+2l_1+b_2)}] \quad \dots\dots (22)$$

ただし、

$$F_0 = K_T^{(1)} K_T^{(2)} / [1 - K_R^{(1)} K_R^{(2)} e^{ik(b_1+2l_1+b_2)} - K_R^{(2)} K_R^{(3)} e^{ik(b_2+2l_2+b_3)} + K_R^{(1)} (K_R^{(2)})^2 K_R^{(3)} e^{ik[b_1+2l_1+2(b_2+l_2)+b_3]} - K_R^{(1)} K_R^{(3)} (K_T^{(2)})^2 \times e^{ik[b_1+2l_1+2(b_2+l_2)+b_3]}] \quad \dots\dots (23)$$

通過率 K_T については式(23)を式(21)に代入することによってただちに得ることができる。

個々の潜堤の高さ a と幅 b がともに等しく、かつ間隔 l を等しくするときには、単一潜堤の反射率と通過率をそれぞれ $\bar{K}_R$, $\bar{K}_T$ とすると、2列潜堤による通過率は、

$$K_T = (\bar{K}_T)^2 / [1 - (\bar{K}_R)^2 e^{2ik(b+l)}] \dots\dots\dots (24)$$

3列潜堤については、

$$K_T = (\bar{K}_T)^3 / [1 - 2(\bar{K}_R)^2 e^{2ik(b+l)} + (\bar{K}_R)^2 [(\bar{K}_R)^2 - (\bar{K}_T)^2] e^{4ik(b+l)}] \dots\dots (25)$$

として与えられる。

3. 実験方法

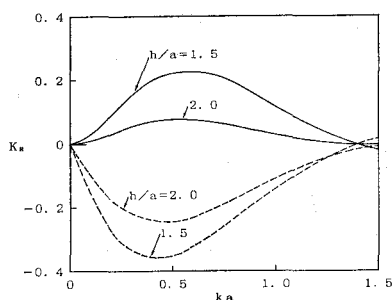
実験には長さ27m、幅0.6m、高さ1.2mの両面ガラス張りの造波水槽を用い、造波板より約15m離して、一辺の長さが20cmの正方形断面を有する木製の潜堤を、間隔 l で設置した。水槽後端には勾配1/20の消波用斜面を設けて波の反射の影響を防いだが、完全に抑制することは困難であり、測定結果にはそこからの反射が5%程度見込まれる。

入射波の周期 T は0.76~2.95 secの範囲で12種類変化させ、入射波の波高はほぼ一定で5.5cmとした。潜堤の配置間隔 l は、潜堤数2列としたとき40cm、80cm、120cmで、3列のときには40cm、80cmとし、水深 h は30cm、40cmの2種類とした。以上の組み合わせにより合計10通りの実験を行なった。入射波高と通過波高はそれぞれ反射側、通過側の3点における計測値の平均値として求め、反射率の測定にはヒーラーの方法を用いた。

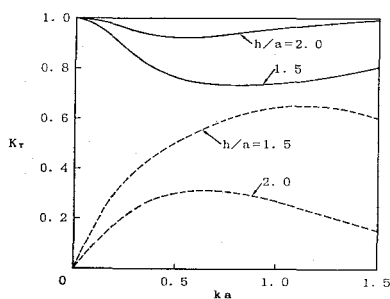
4. 2列潜堤による通過率

図-2は、実験結果と対応するように、潜堤幅 b と高さ a の比を $b/a=1.0$ 、水深 h と潜堤高さ a の比を $h/a=1.5$ および2.0とした単一潜堤による反射係数 K_R と通過係数 K_T の計算結果を示したもので、ポテンシャル接続法を用いて求めたものである。図の(a)、(b)の係数値の絶対値をとったものがそれぞれ反射率と通過率となる。単一潜堤の場合通過率は大きく、天端上水深が小さい $h/a=1.5$ のケースにおいてもその最小値は0.9程度である。

図-3と図-4は、上述の潜堤 ($b/a=1.0$) と同一のものを間隔 $l/a=2.0$, 4.0 および6.0と変化させて2列配置したときの反射率 $|K_R|$ (図中の実線) と通過率 $|K_T|$ (図中の破線) に対する wide-spacing 近似による理論解を示したもので、それぞれ $h/a=1.5$, 2.0の計算結果である。図中の点線は喜岡(1989)が散乱波成分を全



(a) 反射係数



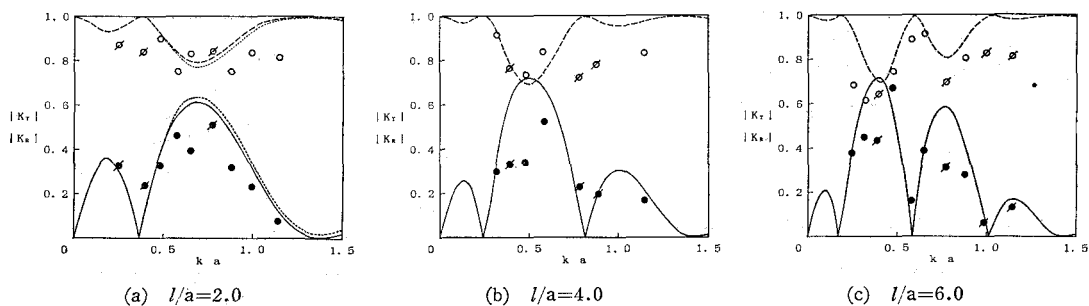
(b) 通過係数

図-2 単一潜堤 ($b/a=1.0$) による反射係数と通過係数 (実線は実部、破線は虚部を示す。)

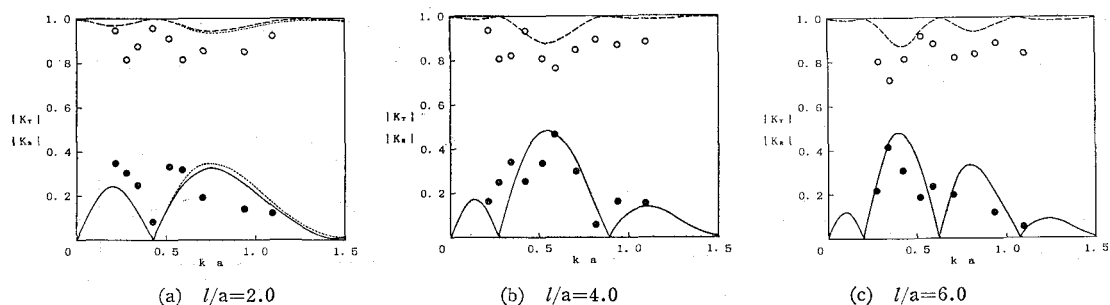
て含む形でポテンシャル接続法を用いて別途計算した理論値を示す。両図とも潜堤間隔が最も小さい $l/a=2.0$ のケースでは、 $ka>0.5$ においては厳密解と比べて反射率の値は若干小さく、通過率の値は若干大きくなっている。ただし、他のケースについては両理論はグラフ上の差異が見られない程度に一致したので、以下では wide-spacing 近似による理論解を用いて検討を加える。

図-3に示した $h/a=1.5$ のケースの理論解から、反射率については全てのケースにおいて第2のピーク値が最も大きく、その値が生じるときの ka の値については $l/a=2.0$ のときはやや過大値となるものの近似的に $ka = \pi a / (2b+l)$ が成り立つことがわかる。また、そのピーク値は潜堤間隔 $l/a=4.0$, 6.0の両ケースの方が $l/a=2.0$ のケースに比べて大きくなっており、かつ l/a が大きいほどピークを示す曲線は狭帯化するとともに長周期側にシフトしていく傾向が見られる。図中の黒丸、白丸はそれぞれ反射率、通過率の実験値を示し、斜線を引いてあるものは目視によって碎波の発生が認められたケースを示している。ここで示した碎波は、主として入射側の潜堤後端付近から潜堤間のほぼ中央部において観測された。実験値は全体にばらついており、反射率のピーク値は実験値のほうが小さくなっているが、通過率のピーク値については理論値と良く一致している。

天端上水深が比較的大きい図-4の結果を図-3の結



図—3 2列潜堤 ($b/a=1.0$, $h/a=1.5$) による反射率と通過率の理論値と実験値



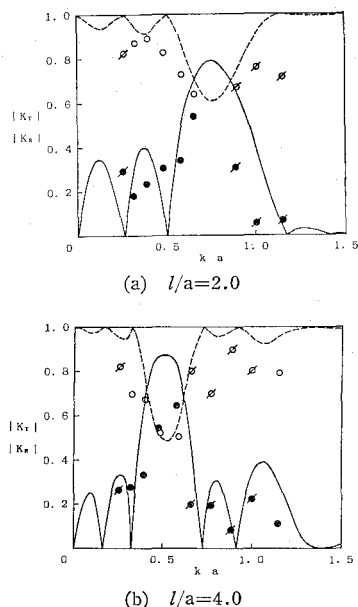
図—4 2列潜堤 ($b/a=1.0$, $h/a=2.0$) による反射率と通過率の理論値と実験値

果と比べると、理論値および実験値ともに反射率は小さく、また通過率は大きくなっている。なお、このケースにおいては碎波は観測されなかった。反射率の最大値(通過率の最小値)の発生周期は $h/a=1.5$ のケースと比べるとやや短周期側になるので、 $ka=\pi a/(2b+l)$ とすると若干長周期側の値を与えることになる。通過率の理論値は実験値と比べると過小な値を与える傾向が見られるが、その理由については明らかでない。

5. 3列潜堤による通過率

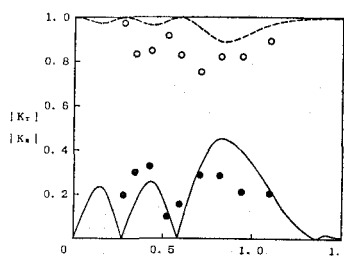
3列潜堤に対する wide-spacing 近似理論解および実験値を前述の2列潜堤と同様に図—5 と図—6 に示す。水深比 h/a が同じケースの2列潜堤の場合と比べると、理論値および実験値ともに反射率の最大値はさらに増加し、通過率の最小値は減少していることがわかる。反射率の理論値の最大値は、全てのケースで3番目のピークで生じ、その発生周期は2列潜堤の場合と比べると、 $l/a=2.0$ では短周期側となるが $l/a=4.0$ のときはほぼ一致している。最小の通過率を得るのは、理論値および実験値ともに $h/a=1.5$ で $l/a=4.0$ のときである。平均的に見れば、通過率についての理論値は実験値と比べて過小な傾向にある。なお、3列潜堤についても $h/a=2.0$ のケースでは碎波は観測されなかった。

図—7 は、理論解の適用性についてさらに検討を加えるために、図—5 の (a) に示した結果で $ka=0.88$ の場

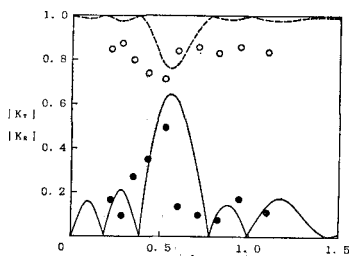


図—5 3列潜堤 ($b/a=1.0$, $h/a=1.5$) による反射率と通過率の理論値と実験値

合の潜堤付近の水位変動について理論値と実測値を比較したものである。このケースでは入射側から1番目と2番目の潜堤間で部分重複波性の碎波が観測されており、碎波が発生した他のケースも含めて理論値と実測値はあまり良く一致していない。こうしたケースについては、



(a) $l/a=2.0$



(b) $l/a=4.0$

図-6 3列潜堤 ($b/a=1.0$, $h/a=2.0$) による
反射率と通過率の理論値と実験値

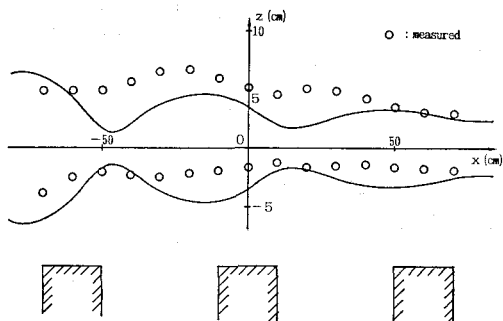


図-7 3列潜堤 ($b/a=1.0$, $h/a=1.0$, $l/a=2.0$, $ka=0.88$) 付近における振幅の理論値と実測値

波の上下非対称性も著しくなり、潜堤と入射波の干渉において波の非線形性の影響を無視することができなくなるものと考えられる。

6. 結 語

潜堤高が比較的小さい潜堤を複数列配置することによって得られる波の遮断効果を実験および理論的に調べた。その結果、ここで検討した wide-spacing 近似に基づく理論解は、防波効果が期待される潜堤間隔に対する解析には有用であることがわかった。通過率は、配置間隔を堤体幅の数倍程度以上大きくとったとき、潜堤数を増やすことによって、特に長周期の入射波に対して減少させることができるが、その減少の度合いは天端上水深に著しく影響される。

参 考 文 献

- 井島武士・佐々木富雄(1971): 潜堤の効果に関する理論的研究—1. 不透過潜堤—, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 141~147.
- 喜岡 渉(1989): 複数列設置した潜堤による波の反射, 土木学会論文集, II. (印刷中)
- 三浦 晃・遠藤茂勝(1979): 潜堤による伝達波の特性について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 304~308.
- 吉田明徳・木佐貫徹・古賀諭志・小島治幸(1988): 複数鉛直版潜堤による波の制御, 第35回海岸工学論文集, pp. 537~541.
- Mei, C. C., Hara, T. and Naciri, M.(1988): Note on Bragg scattering of water waves by parallel bars on the seabed, J. Fluid Mech., Vol. 186, pp. 147~162.
- Srokosz, M. A. and Evans, D. V.(1979): A theory for wave-power absorption by two independently oscillating bodies, J. Fluid Mech., Vol. 90, Part 2, pp. 337~362.
- Stiassnie, M., Boguslavsky, I. and Naheer, E.(1986): Scattering and dissipation of surface waves by a biplate structure, Applied Ocean Res., Vol. 8, No. 1, pp. 33~37.
- Wu, J. and Liu, P. L-F.(1988): Interactions of obliquely incident water waves with two vertical obstacles, Applied Ocean Res., Vol. 10, No. 2, pp. 66~73.