

防波堤開口部における長周期波のエネルギー消散モデル

京大防災研 正員 中村重久

1. 緒言 海岸や港湾にかける波の制御の目的で、古くから不透透性防波堤が実用に供されてきた。この防波堤はとくに波高減少という制御効果が顕著と考えられる。この効果のあらわれの機構として、従来、内部粘性や底面摩擦によるエネルギー損失が検討され(岩垣・村上, 1972)¹⁾、そのほか防波堤周辺の渦や乱れなどによる波のエネルギー損失が予想されていた。ここでは、微小振幅浅水波のモデルによって、不透透性防波堤周辺に形成される渦とそのため波の変形がどのようになるかを検討する。

2. モデルの設定 簡単のために、水深および水路幅一定の水路内に図-1のように防波堤を設けた場合を考える。防波堤開口部の流速 u_0 によって、防波堤背後に渦ができる。この渦のため水面形に凹部ができるが、その変形は無視できる程度に小さいと考える。渦の問題を検討するにすぎないため、簡単のため、防波堤背後の渦は円形渦におさかまて考えることができるものとする。

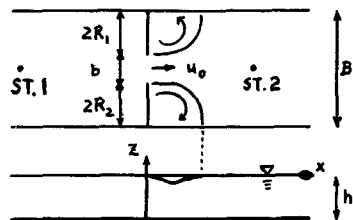


図-1 防波堤のモデル

3. エネルギー・フラックス 進行波が防波堤を通過するとき、半周期の間 ST.1 側に渦ができる場合、次の半周期では ST.2 側に渦ができる。いま、時間 Δt におけるエネルギー・フラックスの収支を図-3の断面 A, B, C について考える。すなわち、

$$BF_1 \Delta t = bF_1 \Delta t + \sum_j \int E_v dV' + \varepsilon \Delta t \quad (1)$$

$$bF_1 \Delta t = BF_2 \Delta t + \varepsilon \Delta t \quad (2)$$

こゝに、 E_v は渦による水単位体積あたりのエネルギー消散、 ε は内部粘性、底面摩擦その他の原因によるエネルギー損失。波が渦にエネルギーを供給し、その渦のエネルギーは半周期ごとに消散するものとする。 $\varepsilon \Delta t$ が微小のとき、 Δt を T とすると、波のエネルギー・フラックスに関する(1),(2)より次式が得られる。すなわち、

$$BF_1(T) = BF_2(T) + \sum_j \int \left(\frac{1}{2} \rho u_j^2 \right) dV \quad (3)$$

この(3)の関係は波のどの半周期をとっても同じである。こゝに、

$$F_i = (1/16) \rho g H_i^2 \sqrt{(gL/2\pi) \tanh(2\pi h/L)} \left(1 + (4\pi h/L) / \sinh(4\pi h/L) \right) \quad (4)$$

また、(3)の渦に関する積分を渦の占める空間全域にわたって進行すると($j=1, 2$)

$$I_j = \int \left(\frac{1}{2} \rho u_j^2 \right) dV = \int_0^{R_j} \int_{-h}^0 \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho u_j^2 dr d\theta dz = \frac{\pi \rho h}{4} u_0^2 R_j^2, \quad R_j \ll L, \quad u_j = \frac{r}{R_j} u_0 \quad (5)$$

$$\text{したがって、} \quad \left(\frac{H_2}{H_1} \right) = 1 - \frac{8\pi h u_0^2 \sum_j R_j^2}{BTgH_1^2 \sqrt{(gL/2\pi) \tanh(2\pi h/L)} \left(1 + (4\pi h/L) / \sinh(4\pi h/L) \right)} \quad (6)$$

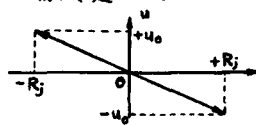


図-2 円形渦モデル

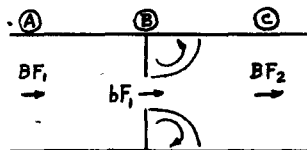


図-3 エネルギー・フラックス

4. 長波近似の場合 $(h/L) \rightarrow 0$ の条件に対して

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - \frac{8\pi h^2 u_0^2 \sum_j R_j^2}{BT H_1^2 g^{3/2}} \quad (7)$$

とすると、長波に対して防波堤開口部において

$$u_0 = \sqrt{g/h} \cdot H_1 \quad \text{と仮定することができらる}$$

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 8\pi \sum_j R_j^2 / (BT\sqrt{gh}) \quad (8)$$

5. 対称性の効果 図-1 で与えた条件により $R_2 = \frac{1}{2}(B-b-2R)$.

(6), (7), (8) において $\sum_j R_j^2$ は $(H_2/H_1)^2$ を定めた因子の1つである。この $\sum_j R_j^2$ の意味は、すなわち、防波堤の対称性に関するものにほかならない。ちなみに

$$R = R_1^2 + R_2^2 = R_1^2 + \frac{1}{4}(B-b-2R_1)^2$$

と仮定すると、その関数形からわかるように、 $\partial F / \partial R_1 = 0$ の場合

R は極小値をとる。そして、そのとき $(H_2/H_1)^2$ は極大値をとる。図-5 開口部が複数の場合

$\partial F / \partial R_1 = 0$ において、 $b = B - 4R_1$ なる関係が満たされているから、結局、防波堤が左右対称の場合、 $(H_2/H_1)^2$ は極大となることを意味している。

しかし、現状までの実験ではこのような傾向は確認されていない。これは、図-1 と模型実験との境界条件にも関連している問題とみられる。

$$\text{防波堤が対称の場合には (8) より } \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 16\pi R_1^2 / (BT\sqrt{gh}) \quad (9)$$

6. 複合モデル 防波堤がカスケード状に配列されているような場合(図-4)、隣接した防波堤の影響が相互にみられなければならない。そして、防波堤開口部を通過した波の周期、波形などの基本特性に変わりがないならば、 n 組の防波堤を通過した波について

$$\left(\frac{H_{n+1}}{H_1}\right)^2 = \left(\frac{H_{n+1}}{H_n}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_n}{H_{n-1}}\right)^2 \cdot \dots \cdot \left(\frac{H_{k+1}}{H_k}\right)^2 \cdot \dots \cdot \left(\frac{H_3}{H_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2.$$

したがって、防波堤が2段がまみの場合には、 $\left(\frac{H_3}{H_1}\right)^2 = \left(\frac{H_3}{H_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2$

しかし、防波堤と波に対する条件を考慮すれば、近似的に $\left(\frac{H_3}{H_1}\right)^2 = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^4$.

開口部が複数ある場合には、たとえば図-5 のように考え、 $\sum_{jk} R_{jk}$ を考えなくてはならない。

ただし、この場合、 $u_{0k} = u_{01} = u_{02}$, $R_{02} = R_{11}$ (島堤部に対して) の条件づけが必要である。また、図-4 と図-5 との複合型も考えられる。

7. 簡単な計算例 図-1 のような境界条件に対して (9) を数値的に検討すると、たとえば、つぎのようになる。(a) $B = 700 \text{ cm}$, $b = 80 \text{ cm}$ ならば $R_1 = 155 \text{ cm}$ 、そして、 $h = 10 \text{ cm}$ ならば $\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 17.24/T$ (ただし、 T は波の周期で秒単位)。また、(b) $B = 90 \text{ cm}$, $b = 10 \text{ cm}$ ならば $R_1 = 20 \text{ cm}$ 、そして、 $h = 10 \text{ cm}$ ならば $\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 0.56/T$ 。さらに、(c) 上の (b) の例で $b = 30$ および 50 cm に対しては、それぞれ $\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 1.25/T$ および $\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 = 1 - 2.23/T$ 。これらの結果は図-6 で特長づけられ、類似の境界条件における実験結果³⁾と比較すると興味ある結論を導くことができる。

参考文献 1) 岩垣・村上: 19 海工, '72. 2) 中村: 17 海工, '70. 3) 中村: 21 海工, '74.

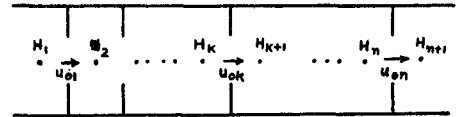


図-4 カスケード港湾モデル

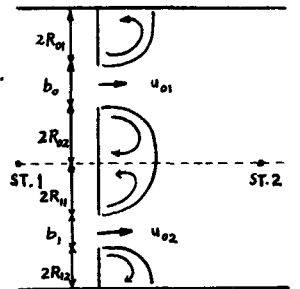


図-5 開口部が複数の場合

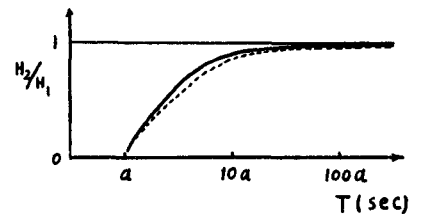


図-6 計算例