

大阪大学工学部 正員 樫木 亨
大阪大学工学部 正員 〇岩田 好一朗

1. 緒言

筆者らは、オ25回年次学術講演会において波の打ち上げ高さにおよぼす海洋構造物の形状効果をとりあげて、構造物の形状効果が波の打ち上げ高さに重要な寄与をすることと指摘した。その際、多列パイル構造物による波の打ち上げ高さおよび波の減衰について一部報告したが、今回はさらにこのパイル構造物をとりあげて、波の打ち上げ高さおよび波の減衰におよぼすパイル間隔とパイル列間隔の効果について明らかにする。水理実験は長さ30m×幅0.7m×高さ0.95mの片面ガラス張りの鋼製水槽で行なう。

なお、本報では波の打ち上げ高さにおよぼす構造物の大きさの効果についても述べるが、この実験は1/40勾配の模型海浜を一端に設けに長さ20m×幅40m×高さ0.5mの鋼製水槽で行なう。前回の報告同様、発生波は電気抵抗式波高計により計測し、反射率はHealyの方法により求める。また、構造物への波の打ち上げ高さについても前回と同様の計測方法と整理方法をとるものとする。

D/H_0	1.06 ~ 17.5
D/L_0	0.165, 0.087, 0.016
h/H_0	0.6 ~ 1.4, 3.65
X/L	0.116 ~ 1.00
$b/(b+D)$	0.386 ~ 0.756
S	0, 1/40

表-1 実験諸元

2. 波の反射率と透過率とエネルギー損失

多列パイル群による波の反射率と透過率をMéhauté¹⁾の考え方を拡張して算定するが、その場合、パイルを通過するとき形状抵抗によるエネルギー逸散量を導入することと困難である。1に比べて、まず単列パイル群による反射率と透過率とパイルの形状抵抗を導入して求め、この反射率と透過率と複列パイル群を構成する各々の列に対して適用されるものとして算定する。

(1) 反射率と透過率の算定式

まず、単列パイル群をとりあげるが、反射率と透過率の算定に際して、図-1に示す領域I-II, II-III, ...などは互に独立であり相互干渉はないと仮定する。1に比べて、パイル径 D とパイル間隔 b が全ての領域で等しければ、反射率 R と透過率 T は任意の領域について計算すればよい。いま、入射波： $\eta_i = a \cdot \sin(kx - \omega t)$ 、反射波： $\eta_r = R \cdot a \cdot \sin(kx + \omega t + \phi_r)$ 、透過波： $\eta_t = T \cdot a \cdot \sin(kx - \omega t + \phi_t)$ 、とする。ただし、 a ：波の振幅、 $\omega = 2\pi/T$ 、 $k = 2\pi/L$ 、ここで、 T 、 L は周期と波長とする、 ϕ_r 、 ϕ_t はそれぞれ入射波に対する反射波、透過波のパイルによる位相ずれとする。図-1の断面1-1と断面2-2の間にベルヌイ

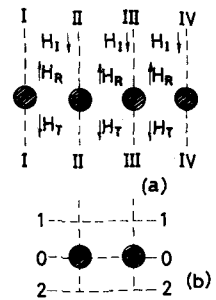


図-1 単列パイル群

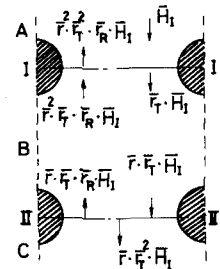


図-2 複列パイル群

一の定理を適用し、断面0-0と断面2-2間の流量保存を考へ、位相差 δ_T を共に零、 $kh < 1$ と仮定すると、透過率 γ_T は次式で与えられる。なお h は静水深である。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_T &= \frac{A}{a} \cdot \xi \cdot \left(-\xi + \sqrt{\xi^2 + \frac{2g}{A}} \right), \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{Cd}} \sqrt{\frac{b}{b+D}} \\ A &= \left(\frac{kh}{\omega} \right)^2 \left\{ g + \frac{\omega^2}{R} \cdot \frac{1}{\sinh kh} + \frac{1}{b} \cdot \frac{\omega^2 k^2 h^2}{R} \cdot \frac{1}{\sinh kh} \right\} \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

ここで、 g : 重力加速度、 Cd : $\omega t = (2m + \frac{1}{2})\pi$ に対して定義されるパイルの抗力係数である。なお、 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ の整数である。一方、反射率 γ_R は次式で与えられる。

$$\gamma_R = 1 - \gamma_T \text{----- (2)}$$

(1)式、(2)式より、パイル間隔 b/D が小さくなるにつれて、反射率は大きくなり、透過率は小さくなっていくことがいえる。つぎに2列パイル群をとりあげる。図-2において、入射波は断面I-Iで一部反射し、一部は透過する。この透過波は断面II-IIで一部反射し、一部は透過する。その後、断面II-IIで反射した波は再び断面I-Iへ進み以後領域I-IIで同様の過程を繰り返すものとし、反射波、透過波はこういった各素波の単純重ね合せにより表示できるものと仮定する。その際各断面での透過率と反射率は(1)式と(2)式で与えられるものとする。便宜上、入射波: $H_i = H_0 \exp(i\phi_i)$ 、反射率: $\gamma_R = \gamma_R \exp(i\phi_R)$ 、透過率: $\gamma_T = \gamma_T \exp(i\phi_T)$ 、領域I-II間の波高減衰率: $\beta = \beta \exp(-i\frac{2\pi X}{L})$ と表示する。なお、 H_0 : 波高、 γ_R : 反射係数、 γ_T : 透過係数、 ϕ_i , ϕ_R , ϕ_T : 位相差、 β : 減衰係数、 X : パイル列間隔、 L : 波長である。入射波が断面I-II間で無限に反射を繰り返すとき、A領域の反射波 H_R 、C領域における透過波 H_T はそれぞれ次式のようになる。

$$H_R = \left\{ \gamma_R + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_R^{2n-1} \cdot \beta^{2n} \cdot \gamma_T^{2n} \right\} H_i \text{----- (3)} \quad H_T = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\gamma_R^{2n-1} \cdot \beta^{2n-1} \cdot \gamma_T^{2n} \right) H_i \text{----- (4)}$$

(3)式と(4)式において、便宜上 β , γ_R , γ_T を共に零と考えると、2列パイル群の反射率 γ_{R2} 、透過率 γ_{T2} は次式のようになる。なお同式の γ_{R1} , γ_{T1} は既述の単列パイル群での値である。

$$\gamma_{R2} = \gamma_{R1} \frac{1 + 2\beta^2 (\gamma_{T1}^2 - \gamma_{R1}^2) \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 (\gamma_{T1}^2 - \gamma_{R1}^2)^2}{\sqrt{1 - 2\beta^2 \gamma_{R1}^2 \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 \gamma_{R1}^4}} \text{----- (5)} \quad \gamma_{T2} = \frac{\beta^2 \gamma_{T1}^2}{\sqrt{1 - 2\beta^2 \gamma_{R1}^2 \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 \gamma_{R1}^4}} \text{----- (6)}$$

なお、この考え方を n 列のパイル群に拡張すると、 n 列パイル群による反射率 γ_{Rn} 、透過率 γ_{Tn} は次式で与えられる。

$$\gamma_{Rn} = \frac{\sqrt{\gamma_{R1}^2 + 2\beta^2 \gamma_{R1} \gamma_{T1} (\gamma_{T1}^2 - \gamma_{R1}^2) \cos \frac{4\pi X}{L} + \gamma_{R1}^4 \cdot \beta^4 (\gamma_{T1}^2 - \gamma_{R1}^2)^2}}{\sqrt{1 - 2\gamma_{R1} \cdot \gamma_{T1} \cdot \beta^2 \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 \gamma_{R1}^2 \gamma_{T1}^2}} \text{----- (7)} \quad \gamma_{Tn} = \frac{\beta^2 \gamma_{T1} \cdot \gamma_{T1-1}}{\sqrt{1 - 2\gamma_{R1} \gamma_{T1-1} \cdot \beta^2 \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 \gamma_{R1}^2 \gamma_{T1-1}^2}} \text{----- (8)}$$

なお、添字 n , $n-1$ は n 列と $n-1$ 列パイル群での値を示すものである。(5)式~(8)式がらうことは、パイル列間隔 X により単調に反射率や透過率が増加あるいは減少しなく、透過率については、 $X = \frac{L}{4}(2m-1)$, ($m=1, 2, 3, \dots$)のとき極小に、 $X = \frac{L}{4}(2m-2)$ のとき極大になり、また反射率についてもほぼ同様のことがいえることであって、このことより、波の反射率と透過率におよぼすパイル間隔とパイル列間隔の効果は著しく異なっているといえる。

(ロ) エネルギー損失の算定式

波がパイル構築物を通過するときのエネルギー損失 E_L は次式で与えられる。なお E_L は入射波の単位幅一波長当りのエネルギーである。

$$E_L/E_I = (1 - \gamma_R^2 - \gamma_T^2) \quad \text{----- (9)}$$

単列パイル群の場合は $\gamma_R + \gamma_T = 1$ であるから、(9)式より次の(10)式を、また2列パイル群の場合には(5)式、(6)式を(9)式に代入すると次の(11)式となる。

$$E_L/E_I = 2\gamma_R(1 - \gamma_R) \quad \text{---- (10)} \quad E_L/E_I = 1 - \frac{\gamma_R^2 \{ 1 + 2\beta^2(\gamma_T^2 - \gamma_R^2) \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4(\gamma_T^2 - \gamma_R^2)^2 \} + \beta^4 \gamma_T^4}{(1 - 2\beta^2 \gamma_R^2 \cos \frac{4\pi X}{L} + \beta^4 \gamma_R^4)} \quad \text{---- (11)}$$

(11)式より、 $X = \frac{L}{4}(2m-1)$ の時エネルギー損失が極大に、 $X = \frac{L}{4}(2m)$ の時極小となり、多列パイル群に対してパイル間距離が重要な効果を示すものといえる。

(ハ) 水理実験による検証

単列パイル群による反射率と透過率は $\gamma_R, \gamma_T < 1$ を満す波については(1)式と(2)式で $C_d = 2.6$ と置くことにより与えられる。2列パイル群による反射率と透過率は $X/L < 0.1$ の範囲では(5)式、(6)式で $\beta = 1$ として与えられることは、著者らは既に実験的に確認している。しかし2列パイル群の場合で $X/L > 0.25$ になると図-3に示すように反射率はほぼ理論値と一致するが、透過率は理論値とはかなり異なってくる。この原因としては波とパイルの干渉が挙げられるが、こゝ長につきさらに検討を要する。図-4(a)、(b)はパイル群によるエネルギー損失におよぼすパイル間隔とパイル列間隔の効果を示すものであるが、図-4(a)に示すようにパイル間隔 $b/(b+D)$ が小さくなるとエネルギー損失が増加していき、(10)式で γ_R の値として理論値を用いた場合と実験値を用いた場合のエネルギー損失量は極めてよく一致している。しかし図-4(b)に示すようにパイル列間隔の効果は既に述べたように、パイル列間隔 $X = \frac{L}{4}(2m-1)$ のときエネルギー損失が極大に、 $X = \frac{L}{4}(2m)$ の時極小になるが、理論値の方が実験値より大きなエネルギー損失を示し、理論値と実験値に差異が認められる。これは図-3に示すように、(6)式では透過率は正確に算定できないことに帰因するためであろう。

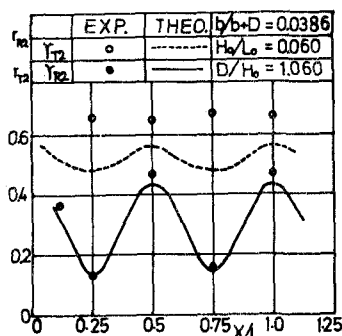


図-3 2列パイル群による反射率・透過率

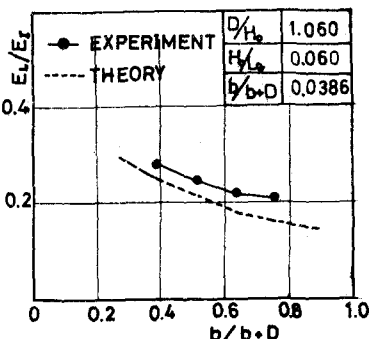


図-4(a) E_L/E_I に及ぼすパイル間隔の効果

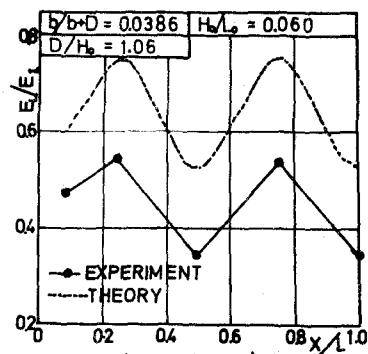


図-4(b) E_L/E_I に及ぼす X/L の効果

3. パイル構築物への波の打ち上げ高さ

前回の報告で述べたように、一本の円筒パイルにおける波の打ち上げ高さ R/H_0 を支配する量はBuckinghamの定理によれば次式で与えられる。

$$R/H_0 = f(D/H_0, D/L_0, \eta/H_0) \quad \text{----- (12)}$$

なお、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長である。図-5は h/H_0 をパラメーターにして、 D/H_0 の変化にともなう波の打ち上げ高さ R/H_0 の変化を示している。同図によれば、 D/H_0 の値が大きくなるにつれて、つまり波高に比して構造物の径が大きくなるにつれて R/H_0 が大きくなることが認められ、 $D/L_0 = 0.087$ で $h/H_0 = 1.40$ の場合は、 $D/H_0 = 1.5$ における値が $R/H_0 = 2.0$ であるのに対し、 $D/H_0 = 17.2$ では $R/H_0 = 13.1$ にも達している。したがって、パイル径を小さくする方が波の打ち上げ高さを低減することに有効であるといえる。またパイルの数を増していくと、波とパイルの干渉により打ち上げ高さは複雑な挙動を示すが、ここではパイル間隔の効果とパイル列間隔の効果に分けて考える。図-6に示すように、パイル間隔 $b/b+D$ が小さくなるにつれて R/H_0 が大きくなることが認められるが、これは(2)式で示されるように $b/b+D$ が小さくなると反射率が大きくなるにめと考えられる。また図-7によれば、 X/L の変化にともない2列パイル群への波の打ち上げ高さはオ1列目とオ2列目ではその傾向を逆にしていることが認められる。 R_1/H_0 (オ1列目への打ち上げ高さ)は(5)式で与えられる反射率と密接な関係があり $X/L = \frac{1}{4}(2m-1)$ のとき極大、 $X/L = \frac{1}{4}(2m)$ のとき極小をとっている。一方 R_2/H_0 (オ2列目への打ち上げ高さ)は R_1/H_0 と全く逆の傾向を示しており、逆にパイル群によるエネルギー損失と同じ傾向を示し、 $X/L = \frac{1}{4}(2m-1)$ のとき極大に、 $X/L = \frac{1}{4}(2m)$ のとき極小になっている。このことは波動エネルギーがパイル間領域に残るとき、つまりパイル構造物によるエネルギー損失が大きいときは、その領域では当然大きな水面振動をみることになり、パイルへの打ち上げ高さが大きくなるが、逆に波動エネルギー損失が小さいときは波の打ち上げ高さが小さくなるにめである。なお本実験は中西良次技官、高沢勲(本四連絡橋公団勤務)の両氏の労によるところが大きいと謝意を表す次第である。

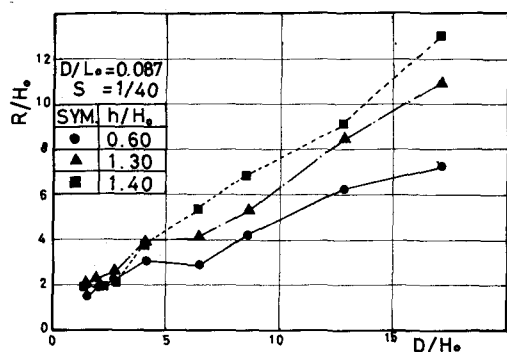


図-5 R/H_0 におおす D/H_0 の効果について

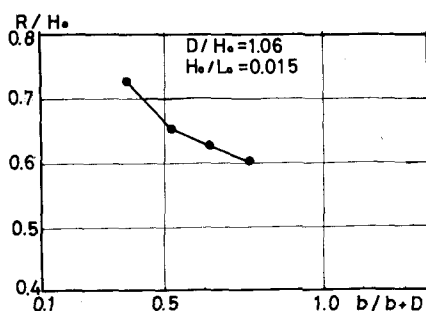


図-6 R/H_0 におおす $b/b+D$ の効果について

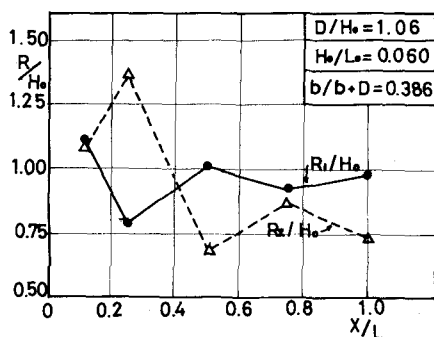


図-7 (2列パイル群) R/H_0 におおす X/L の効果について

- 1) Méhauté : Estuary and Coastlines Hydrodynamics by Ippen. 1966
- 2) T. Sawaragi, K. Iwata : Effect of Structural Shape on Wave Run-Up and Damping. Coast. Eng. in Jap. vol. 13. 1970.