

# 防波堤開口部周辺の波浪性状について

正員 杉本修一

明石工業高等専門学校 正員 西村益夫

舞鶴工業高等専門学校 正員 前野賀彦

防波堤開口部周辺の波浪性状を検討することは、船舶の港への出入、あるいは、防波堤の配置の問題などに関連して有意義である。ここでは、防波堤として、無限に延びた直線状のものを考え、その1ヶ所に開口部がある場合を想定することにした。この開口部を通過する波浪については、従来より多くの研究者によって報告がなされている。例えばLamb<sup>(1)</sup>は、彼の名著 Hydrodynamics<sup>(1)</sup>に、この問題の近似計算を述べている。また、Sommerfeld<sup>(2)</sup>は、半無限長の直線の先端を回折する波について、波動方程式を放物線座標を用いて変換し、その変換された方程式について厳密解を示した。Schwarschild<sup>(3)</sup>は、この半無限長の直線の先端を回折する波についての Sommerfeld の解を2つ重ね合せて、それに境界条件を満足するような修正項を加えた解を発表している。一般に、波長に比して開口部が相当大きい場合には、Schwarschildの解で良いとされ、また、開口部が波長に比して小さい場合には、Lambの近似計算で良いとされている。そこで、著者等は、開口部の幅と波長との関係を条件とすることなしに、無限に延びた直線の防波堤の1ヶ所に開口部がある場合のより厳密な解を求めるものとする。この解については、以前に一つの列法を提案した。その列法とは、波動方程式を楕円座標を用いて変換して、直接的に解を得ようとするものであった。また、前回その式を用いて、実際に、いくつかの例について数値解の結果を報告した。しかし、その結果は、防波堤開口部を通過した波浪に関してのもので、開口部周辺の波浪性状を検討する上で、完全なものではなかった。今回、入射波が入ってくる下半面をも含めた数値解の結果を報告するものとする。その数値解の結果の検討により、波長が小さくなるに従って、乱れが生ずる傾向が認められ、三角波が生ずると考えられる、また、波長が小さくなると波浪が曲がりやすく、回折の生じる傾向が大きくなるということなど、従来から言われていることが、解析結果においても認められた。

次に、以前に提案した式の説明を簡単に示す。なお問題を簡単にするため、等深とする。長波については、静水面りの水位上昇 $\zeta$ は、(1)式として与えられる。

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = g \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2}, \quad d: \text{水深一定} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $\zeta = \psi \cdot e^{i\omega t}$  として楕円座標  $x + iy = c \cosh(\zeta + i\eta)$  を用いれば、(2)式も得る。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + \frac{\sigma^2 c^2}{2gd} (\cosh 2\zeta - \cos 2\eta) \psi = 0 \quad \dots\dots(2)$$

(2)式は、変数分離が可能である。そこで、入射波が入ってくる下半面と、開口部を通過してから以後の上半面の2つの部分について分けて考えることにする。

I) 下半面 無限遠より平面波が、角度 $\theta$ で入射してくるものと考えれば、その入

SHUICHI SUGIMOTO, MASUO NISHIMURA, YOSHIIHIKO MAENO

射波  $\psi_1$  は、(1)式で与えられる。

$$\psi_1 = \text{Re} \cdot \exp \{ i k c (\cosh \zeta \cos \eta \cos \theta + \sinh \zeta \sin \eta \sin \theta) \} \quad \dots (2)$$

さらに、 $\cosh \zeta \cos \theta = P \cos \zeta_0$ ,  $\sinh \zeta \sin \theta = P \sin \zeta_0$ ,  $P^2 = \cosh^2 \zeta \cos^2 \theta + \sinh^2 \zeta \sin^2 \theta$  という関係にあり、(1)式は、(4)式と表わされる。

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \text{Re} \cdot \exp \{ i k c p - \cos(\zeta_0 - \eta) \} \\ &= \text{Re} \cdot [ J_0(kcp) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n J_n(kcp) \cos n(\zeta_0 - \eta) ] \quad \dots (4) \end{aligned}$$

$$= J_0(kcp) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(kcp) \cos 2n \zeta_0 \cos 2n \eta + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(kcp) \sin 2n \zeta_0 \sin 2n \eta$$

防波堤に相当する直線上においては、 $(\partial \psi / \partial \eta)_{\eta=0} = 0$  でなければならぬので、 $\psi_2$  なる関数を新たに加えて、 $\psi_u = \psi_1 + \psi_2$  が境界条件を満足するようにすれば、その関数  $\psi_u$  は(5)式として与えられる。

$$\psi_u = J_0(kcp) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(kcp) \cos 2n \zeta_0 \cos 2n \eta \quad \dots (5)$$

II) 上半面 波が開口部を通過してから後は、波が回折するか、無限遠方に至れば、波は消えるであろう。この性質を考慮して、(6)式に示す関数  $\psi_0$  を仮定する。

$$\psi_0 = J_0(kcp) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m e^{-\lambda_m \zeta} \cos 2m \eta \quad \dots (6)$$

(6)式は、防波堤上つまり直線上においては、 $(\partial \psi_0 / \partial \eta)_{\eta=0} = 0$  の境界条件をすでに満足している。(6)式中の  $\lambda_m$  と  $B_m$  の2つの未知係数については、参考文献(4),(5)に詳しいが、略述すると、 $B_m$  については、開口部において、 $(\psi_u)_{\zeta=0} = (\psi_0)_{\zeta=0}$  という条件から(7)式として求まる。

$$B_m = 2 \cdot (-1)^m J_{2m}(kcp) \cos 2m \zeta_0 \quad \dots (7)$$

さらに、 $\lambda_m$  については、(8)式に(6)式を代入して(8)式を最小にする  $\lambda_m$  を求めれば良い。

$$I = \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \left[ \left( \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} \right)^2 + \left( \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right)^2 - \frac{\sigma^2 c^2}{2gd} (\cosh 2\zeta - \cos 2\eta) \psi^2 \right] d\zeta d\eta \quad \dots (8)$$

すなわち(8)式を解けば良い。

$$A \quad \frac{\partial I}{\partial \lambda_s} = 1 - \frac{\sigma^2 c^2}{\lambda_s^2} + \frac{\lambda_s^2 + 1}{(\lambda_s^2 - 1)^2} g \quad , \quad g = \frac{\sigma^2 c^2}{2gd} \quad (s = 1, 2, \dots, \infty) \quad \dots (9)$$

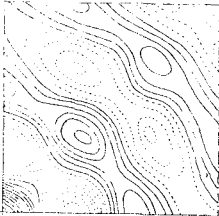
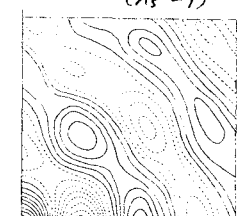
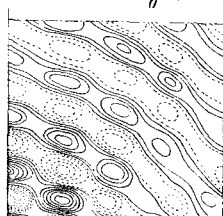


Fig. 2.a

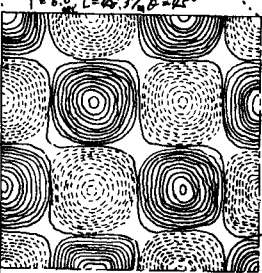


$\theta = 30^\circ$  Fig. 2.c

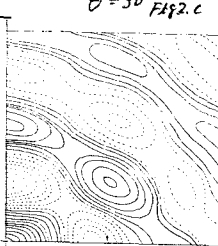


$T = 4.0$ ,  $L = 24.65$ ,  $\theta = 60^\circ$  Fig. 3.a

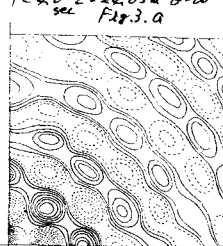
- (1) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th. Ed. 1959, pp. 553.
- (2) Sommerfeld, A.: Mathematische Theorie der Diffraction, Math. Ann. Bd. 47, 1896, S. 317.
- (3) Schwarzschild: Die Beugung und Polarisation des Lichts durch einen Spalt, Math. Ann. Bd. 55, 1902
- (4) 小本修一, 西村盛夫: 防波堤開口部を通過する波について, 昭和43年土木学会第23回年次学術講演会 講演要録巻第 99, 25~26.
- (5) 前野賢高, 小本修一, 西村盛夫: 防波堤D部を通過する波について, 昭和44年土木学会第24回年次学術講演会講演要録 99, 59~60.



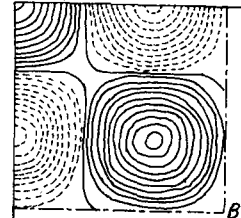
下半面 B Fig. 2.b



$\theta = 60^\circ$  Fig. 2.d



$\theta = 45^\circ$  Fig. 3.b



$T = 10.0$  sec  
 $L = 92.3$  m  
 $\theta = 45^\circ$   
下半面 B  
Fig. 4