

沖合いに防波堤を有する港湾の副振動解析法

九州大学工学部 学生員 ○中原和彦
正会員 吉田明徳

1. まえがき 直線海岸に港口を有する港湾内副振動の解析法は現在まで数多く示されている。しかし、実際の港湾においては沖合いに防波堤や島などを有する場合が多く、これらの防波堤が港湾内副振動に及ぼす影響を推定するためには、従来の多くの解析法は必ずしも十分ではないと考えられる。

Mattioli¹⁾は、直線海岸の沖合いにある防波堤による波の散乱を直線海岸に関する防波堤の鏡像を考えることにより容易に解析する方法を示している。本文は、Mattioliの方法を沖合いに防波堤を有する港湾の副振動解析に拡張する方法を示したものである。

2. 理論解析 図-1に示すように、完全反射の直線海岸に港口を有する港湾の沖合いに任意の形状の防波堤があり、これに対し入射角 θ 、角周波数 σ 、振幅 ζ_0 の規則波が入射する場合を考える。流体運動は微小振幅波運動と仮定すると、速度ポテンシャル ϕ は次式で表わすことができる。

$$\phi(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, y) Z(z) \exp(-i\sigma t) \quad (1)$$

ただし、 g は重力加速度、 $Z(z) = \cosh k(z+h)/\cosh kh$ で、 k は入射波の波数である。また、 $\phi(x, y)$ はHelmholtzの方程式を満足する無次元関数(以後、ポテンシャル関数と呼ぶ)である。

解析の便宜上、流体域を外海領域(1)、防波堤と直線海岸の間の領域(2)、および港湾内領域(3)に分割し、各領域とも一定水深 h とする。

領域(1)のポテンシャル関数 ϕ_1 は、図-2に示すように次の3つのポテンシャル関数の線形和で表わされるものとする。

(a) ϕ_0 ・・・直線海岸のみの場合の入射波と反射波のポテンシャル関数の和

(b) ϕ_D ・・・FEDCが不透過壁より成るときのdiffraction waveのポテンシャル関数

(c) ϕ_R ・・・FE, DCからのradiation waveのポテンシャル関数

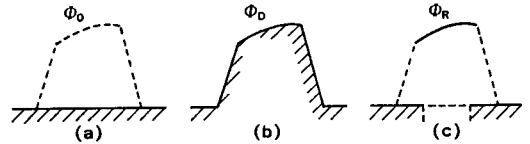


図-2 領域(1)に関するポテンシャル関数

ここで、 ϕ_D, ϕ_R は外海におけるradiation条件を満足する関数であり、直線海岸上において $\partial\phi_R/\partial n = \partial\phi_0/\partial n = \partial\phi_D/\partial n = 0$ であることから、図-3に示すように直線海岸に関して境界FEDCの鏡像を考え、 ϕ_0, ϕ_R, ϕ_D に対してそれぞれグリーンの定理を用いることにより領域(1)の任意点 X における ϕ_1 は次式で表すことができる。

$$\phi_1(X) = \varepsilon \int_{S_0+S_1} \phi_1(X_b) \frac{\partial}{\partial n} G(kR) - \varepsilon \int_{S_0} G(kR) \frac{\partial}{\partial n} \phi_R(X_b) ds - \varepsilon \int_{S_0+S_1} \left\{ \phi_0(X_b) \frac{\partial}{\partial n} G(kR) - G(kR) \frac{\partial}{\partial n} \phi_0(X_b) \right\} ds + \phi_0(X) \quad (2)$$

ただし、 $G(kR) = H_0^{(1)}(kR) + H_0^{(1)}(kR^*)$ 、 $H_0^{(1)}(kR)$ は0次の第一種ハンケル関数、 ε は X が境界上のときは $\varepsilon = i/2$ 、領域内のときは $\varepsilon = i/4$ をとる定数である。

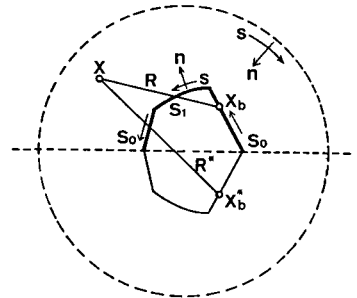


図-3 領域(1)の積分境界

領域(2),(3)のポテンシャル関数 ϕ_2, ϕ_3 はグリーンの定理より次式で表すことができる。

$$\phi_2(X) = -\varepsilon \int_{S_0+S_1+S_2+S_3} \left\{ \phi_2(X_b) \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(1)}(kR) - H_0^{(1)}(kR) \frac{\partial}{\partial n} \phi_2(X_b) \right\} ds \quad (3)$$

$$\phi_3(X) = \varepsilon \int_{S_3+S_4} \left\{ \phi_3(X_b) \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(1)}(kR) - H_0^{(1)}(kR) \frac{\partial}{\partial n} \phi_3(X_b) \right\} ds \quad (4)$$

領域(1),(2),(3)の境界線を十分に小さい要素に分割し、(2),(3),(4)式を X が境界上の点である場合に

ついて離散化し、これに各領域間の境界 S_0, S_3 での流体運動の連続条件および防波堤 S_1 , 直線海岸 S_2 , 湾内側壁 S_4 での不透過壁条件を用いて、連立して解くことにより、各領域の境界要素上のポテンシャル関数 ϕ と法線微分値 $\partial\phi/\partial n$ が決ることになる。

3. 解析法の検証と数値計算例 本解析法の妥当性を検証するため、C.C.Meï&R.V.Petroniが与えた円形湾についての解析解²⁾との比較を行った。それを示すのが図-4である。図中の $\bar{M}$ は次式で示される値である。

$$\bar{M}=2\sqrt{\int_0^a \int_0^{2\pi} A^2 r dr d\theta / \pi a^2} \quad (5)$$

ただし、 $\bar{A}=1$ と $(X)/2 \leq 0.1$ 、 $\xi(X)$ は湾内の任意点 X での水面振動の振幅である。この図より、共振モードにおけるピーク値は本解析法の解の方がMeï&Petroniの解より小さくなっている。本解析法は(5)式の算定において円形湾内領域を有限個の面要素に分割して近似計算を行うため、面要素の分割個数によりピーク値は若干変動し、分割数を多くするとピーク値は増大する。また、共振モードを与える入射波の波数はMeï&Petroniの解とよく一致しており、本解析法は妥当な解を与えているものと考えられる。

図-5(a),(b),(c)は、湾長と湾幅の比が2:1の矩形湾を例にとり5種類の防波堤配置における湾奥側壁中央での波高増幅率 $\bar{A}$ を示したものである。(a)に示すように沖合いに湾幅と同じ長さの防波堤を海岸と平行に設置した場合、この程度では防波堤がない場合とそれほど変化がないことがわかる。しかし、(b)に示すように防波堤が長くなると一次共振モードの増幅率が大きくなり、また $kl=2.2$ 近傍で新たに増幅率が大きくなっている。これは、防波堤と湾奥側壁を腹とする単節振動モードが生じやすくなるためである。(b)の破線で示すようにBC部分を閉じた場合には、特定の波長に対して増幅率が増大し、副振動対策上は必ずしも好ましくないと考えられる。ただし、(c)に示すように防波堤が角度($\theta=30^\circ$)を有する場合には、(b)の場合と比べて全体的に増幅率も小さくなり、またBC部分を閉じると(b)の場合と異なって増幅率はさらに小さくなる。

以上の例からも、長周期波による水面振動が考えられる場合には防波堤の設置角度の若干の変化が湾内の水面振動特性に大きく影響するといえ、この点を十分に考慮して防波堤設置の検討を行う必要があるといえよう。

4. あとがき 本解析法によれば、速度ポテンシャルに関する積分方程式を離散化して数値的に解くときの外海領域に関する計算点は防波堤および防波堤と海岸線上の任意点を結ぶ仮想境界線上のみに取ればよく、それ以外に計算点を取る必要はない。

本文では簡単のために一定水深の場合を対象としたが、本解析法は任意の水深変化を有する湾内の副振動解析法³⁾を用いれば、水深変化のある港湾に対しても容易に拡張することができる。

参考文献

- 1) F.Mattioli, Wave diffraction of breakwaters in the presence of a coastline, Applied ocean research, 1981, Vol.3, No.1
- 2) C.C.Meï&R.V.petroni, Wave in harbor with protruding breakwaters, J.of ASCE, 1973, WW2
- 3) 井島・吉田他, 任意形状と水深の湾内水面波の分布に関する数値解析 九大工学集報, 第54巻, 第2号, 1980

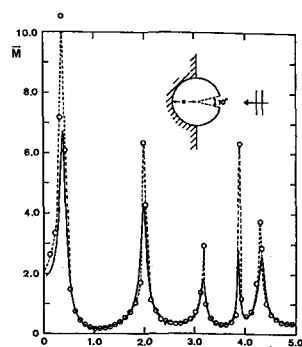


図-4 数値解との比較

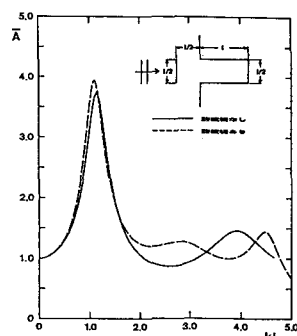


図-5(a) 湾奥の増幅率

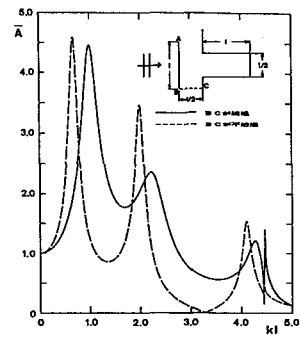


図-5(b) 湾奥の増幅率

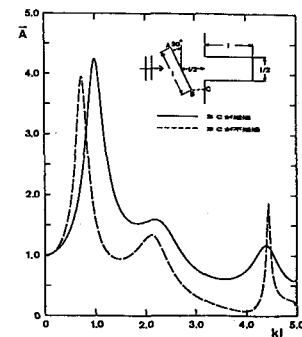


図-5(c) 湾奥の増幅率