

九州大学工学部

正員

井島武士

=

=

吉田明徳

=

学生員 〇北山 奇

1. まえがき

外海からの入射波によって引き起こされる港湾内の水面振動の理論解析に関しては、多くの解析法が示されているが、いずれも解析にあたっては基本仮定として長波近似を用いるか、あるいは湾内の幾何学的形状に制限を設ける事を必要としている。本論文は、任意の水深と形状を有する港湾泊地における水面振動を、厳密な理論的取り扱いにより解析するため、湾外においては一定水深を仮定して速度ポテンシャルに対し2次元グリーン公式を適用し、湾内の流体閉領域の速度ポテンシャルに対しては、3次元グリーン公式を適用して解析を行う方法を示すもので、解析法の概略と数値計算例について述べ、さらに実験を行って本解析法の妥当な事を示した。

2. 理論解析

図-1に示すように座標軸を取り、湾外は一定水深 h の海域(領域(I))で、 x 軸と θ の角度で角周波数 ω 、振幅 Q_0 の微小振幅正弦波が入射するものとし、湾内は静水面 S_1 、領域(I)との境界面 S_2 、および側面と底面より成る任意形状の境界面 S_3 より成る閉領域(領域(II))である。流体運動は $(gQ_0/\omega) \cdot \phi(x, y, z) \exp(i\omega t)$ の形の速度ポテンシャルをもつ、非圧縮性完全流体の無渦運動と仮定し、領域(I)と(II)に対し、ポテンシャル関数 ϕ をそれぞれ ϕ^I, ϕ^{II} で表わすことにする。すると領域(I)および(II)における自由表面条件と水底条件、および領域(I)と(II)の境界面における連続条件は次式で与えられる。

$$\partial \phi^I / \partial z = (\partial^2 \phi^I / \partial x^2 + \partial^2 \phi^I / \partial y^2) \phi^I \quad (z=0), \quad \partial \phi^I / \partial z = 0 \quad (z=-h) \quad \text{----- (1.1)}$$

$$\partial \phi^{II} / \partial z = (\partial^2 \phi^{II} / \partial x^2 + \partial^2 \phi^{II} / \partial y^2) \phi^{II} \quad (S_1 \text{上}), \quad \partial \phi^{II} / \partial n = 0 \quad (S_3 \text{上}) \quad \text{----- (1.2)}$$

$$\partial \phi^I / \partial n = \partial \phi^{II} / \partial n \quad (S_2 \text{上}), \quad \phi^I = \phi^{II} \quad (S_2 \text{上}) \quad \text{----- (1.3)}$$

(1) ポテンシャル関数 $\phi^I(x, y, z), \phi^{II}(x, y, z)$

領域(I)でのポテンシャル関数 ϕ^I を、入射波、港口を含めた直線海岸での完全反射波、および港口からの散乱波のポテンシャル関数の線形重ね合わせと考え、散乱波のポテンシャル関数に関して、Lee¹⁾と同様の取り扱いによれば、境界面 S_2 上の任意点 (ξ, η, ζ) における領域(I)のポテンシャル関数 ϕ^I は次式で与えられる。

$$\phi^I(\xi, \eta, \zeta) = [2 \exp(-ik\zeta \cos \theta) + \frac{i}{2} \int_A^B H_0^{(1)}(k|\xi - \xi'|) \frac{\partial \phi}{\partial n} d\xi'] C(\zeta) \quad \text{----- (1.4)}$$

ここで (ξ, η, ζ) は境界面上の点であることを意味し、 k は入射波の波数、 $C(\zeta) = \cosh k(\zeta + h) / \cosh kh$ で $\phi(x, y, z)$ が散乱波のポテンシャル関数を表わす。

閉領域(II)における境界面上の任意点 (ξ, η, ζ) におけるポテンシャル関数 $\phi^{II}(\xi, \eta, \zeta)$ は、領域(II)に対し3次元グリーン公式を適用し、さらに式(1.2), (1.3)の境界条件を用いて次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \phi^{II}(\xi, \eta, \zeta) = & \frac{1}{2\pi} \iint_{S_1} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) - \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \right) \phi^{II}(\xi, \eta, \zeta) \right] dS - \frac{1}{2\pi} \iint_{S_2} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial \phi^I}{\partial n} + \phi^{II}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \right) \right. \\ & \left. - \frac{1}{2\pi} \iint_{S_3} \left(\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \right) \phi^{II}(\xi, \eta, \zeta) dS \quad \text{----- (1.5)} \end{aligned}$$

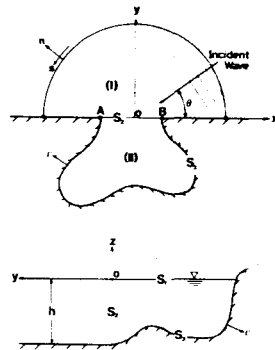


図-1

よって、式(1.4)と式(1.5)を連立して数値的に解く事により、領域(Ⅱ)の境界面 S_1 と S_2 上の $\phi^{(2)}$ 、および S_2 上の $\partial\phi/\partial n$ (即ち ϕ'' , ϕ''') が得られ、港内水面任意点における水面振動の増幅率(水面振動の振幅/入射波の振幅) $\bar{A}$ は、 S_1 上のポテンシャル関数 $\phi^{(2)}$ により $\bar{A}=|\phi^{(2)}|$ で与えられる。

3. 数値計算と実験

数値計算例として図-2に示すような(C-1), (C-2), (C-3)の3ケースについて計算を行った。式(1.5)および式(1.4)を数値的に解くための境界面の要素分割の概略は、自由表面 S_1 については32個の正方形要素、境界面 S_2 については50個の矩形要素、また境界面 S_3 については、C-1は85個、C-2は69個、C-3は96個に分割した。計算には九州大学大型計算機センターのFACOM M-200システムを用い、上記計算におけるCPU時間は4.0~4.7(秒/1周波数)であった。図-2は湾後端より $1/8$ 前方の点Qでの水面振動の増幅率 $\bar{A}$ を0.5倍して示したもので、図中黒丸と黒の正方形でプロットしたのは、MATTIOLI²⁾による shallow water theory を用いた解析解で、それぞれC-1, C-2に対する湾後端P点における値である。C-1, C-2, C-3とも $kh=0.5 \sim 0.6$ 近傍で増幅率は極大値を取り、C-3の場合には増幅率はほぼ96(入射波振幅の96倍)に達している。C-1の場合本解析法による解とMATTIOLIの解を比較すると、両者はほぼ一致しているといえるが、C-2の水底が $1/4$ の一様勾配をなす場合には、 $2kh > 20$ において両者の値は著しく異なり、MATTIOLIの解は本解析法による解に比べ高周波域での極大値を取る周波数が低周波側に拘るとともに、その値も30%程度大きく現われている。これはMATTIOLIの解は長波近似によるもので、このため波長が短くなるにしたがい水底面の影響を過大に評価することによると考えられる。

本解析法の検証のため、図-2中のC-1, C-3についての港湾模型を2次元水路(幅1m×深さ0.6m×長さ20m)に設置し、その水面振動を測定し本解析法による計算値と比較した。水深は0.3mとし、したがって模型の平面寸法は港口幅0.3m、奥行0.6mである。波高は容量式波高計で測定し、その出力をペン書レコーダに記録し読み取った。入射波高は模型前方10mで測定し、湾内の波高は湾後端より前方38cm、側面より11cmで、中心線に対し対称な左右の2点で測定しその平均を用いた。これらの測定点は数値計算における計算点と一致している。入射波の波高は0.9~1.4cmで $kh=0.45 \sim 2.1$ につき $kh=0.05$ きざみで2回づつ測定を行った。図-3中(a)で示したのがC-1についての計算値と実験値で、(b)で示したのがC-3についてである。 $kh=20$ 近傍では実験値に幾分ばらつきがみられ、また計算値とのずれも大きくなっているが、計算値と実験値の一致の程度は、ほぼ満足できるものと考えられる。

4. あとがき

上述のように本解析法によれば、任意の平面形状と任意水深を有する湾内の水面振動が容易に解析出来ることになる。数値計算に要する労力および計算時間も、有限要素法等を用いるのに比べ著しく軽減されるものと考えられる。本文では、湾の境界面はすべて不透過壁として取り扱っているが、実際には消波構造の岸壁、護岸などがあるのが一般であり、このような場合についても検討することにしていく。

参考文献

- 1) J.I. Lee: Wave induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, J.F.M. Vol.45, part 2, 1971
- 2) F. Mattioli: Wave-induced oscillations in harbours of variable depth, Computer and Fluid, Vol.6, 1978

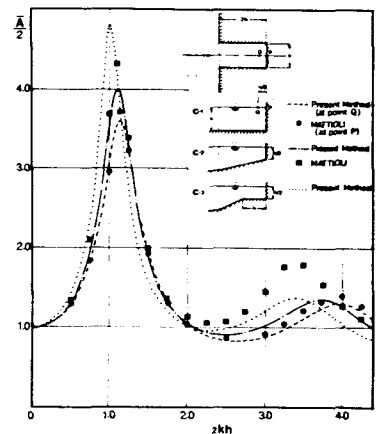


図-2 水面振動増幅率

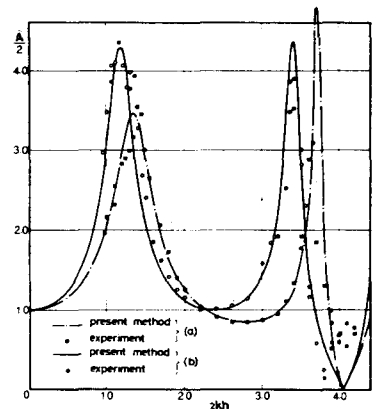


図-3 計算値と実験値の比較