スリットを有する多重鉛直平板構造物の 周辺波動場解析

ANALYSIS OF WAVE REFLECTION AND TRANSMISSION FROM VERTICAL THIN WALLS WITH SLIT

折橋恒春¹・山野貴司²・岡崎拓人³・角野昇八⁴

Tsuneharu ORIHASHI, Takashi YAMANO, Takuto OKAZAKI, and Shohachi KAKUNO

¹学生会員 工修 大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²工修 東洋建設株式会社 東京支店 (〒102-0038 東京都千代田区麹町1丁目10番地)

³大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴正会員 工博 大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

To analyze the wave reflection and transmission from slit type structures, it is indispensable to estimate energy loss at slits. Several methods estimating energy loss have been proposed. However, most of the configurations have been treated are uniform shaped structures such as a row of cylinders.

Recently, structures of non-uniform configuration are often constructed as, say, seawater exchangeable breakwaters. Therefore, it is necessary to construct a new method suitable for non-uniform shaped structures. In the present study, a concept of complex blockage coefficient is adopted in the Boundary Integral Method, BIM, with some modification. Comparison of the BIM-results with experimental results and numerical results by the Volume Of Fluid method, VOF, shows the validity of the present method.

Key Words : boundary integral method, blockage coefficient, vertical thin walls with slit

1. 緒 言

近年, 港内や湾内といった閉鎖性水域の水質改善を目的として, 潮流導流堤や海水交換防波堤を建設するケースが多く見られる。これらの海水交換型防波堤の中には, 近年開発されている有脚式の離岸堤など, 堤体壁面にスリット状などの開口部を設けて消波および通水を行う構造をとるものが多い¹⁾。これらの海水交換型防波堤や離岸堤は, 堤体の前面および背面に開口部を設けて通水することが特徴であるが, この機能は二次的に付加されるものであって, まずは防災機能としての消波機能を十分に有することが大前提であるため, 消波機能の有効な解析手法を構築する必要がある。

防波堤等の効果を検討する波動場解析法としては, ポテンシャル理論による境界積分法(BIM)が有効であるが, スリットを有する構造物の場合, スリットにおけるエネルギー損失の効果を考慮する工夫が必要であり, 種々の損失効果導入手法が研究されてきた²⁾。これらの手法の多くは, 柱体列に例をみるように, 一様な断面形状を対象としているが, 近年開発されている海水交換型防波堤や有脚式の離岸堤の中には, 前面と背面の開口部位置が非対称であるな

ど複雑な形状を呈するものもあり, 従来の手法では対応しきれない状況になっている。一方, 近年は計算機的能力向上によってNavier-Stokes式を用いた数値計算法³⁾が開発され, このような問題に対して有効な解析手法となってきたが, 実用的な解析に対しては膨大な計算時間を要するのが難点となっている。

そこで本研究では, スリットにおけるエネルギー損失の効果を考慮した境界積分法(BIM)のうち, 角野ら(1986)⁴⁾による漸近展開接合法および複素係数のblockage coefficientの概念を導入した手法を拡張し, 任意形状の平板構造物の波動場解析に関する断面2次元問題をスリットにおけるエネルギー損失の評価を含めて解析可能な手法を提案するとともに, その検討結果について報告する。

2. 理 論

(1) 支配方程式と境界条件

解析領域は, 図-1に示す2重鉛直平板構造物で構成される断面2次元領域であり, 非回転・非圧縮, 微小振幅波を取り扱う。このときの速度ポテンシャル ϕ に関する支配方程式及び境界条件を以下に示す。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{in Reg.1, Reg.2, Reg.3} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} - v\phi = 0 \quad \text{on } y=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y=-h \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_u \quad (4)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - ik\phi \right) = 0 \quad \text{on } |x| \rightarrow \infty \quad (5)$$

ここに、 $v = \omega^2/g$ (g : 重力加速度), n : 境界外向き法線ベクトル, $\omega = 2\pi/T$ (T : 波の周期), S_u : 不透過部の境界面, k : 波数である。

図-1 解析対象領域

(2) 漸近展開接合法

漸近展開接合法とは、境界層理論におけるような構造物近傍の薄い境界層内に相当する領域の解(内部解)と、境界層外に相当する領域の解(外部解)をそれぞれ導出し、領域同士の接点に極限操作された解を等値することで全領域で満足するような近似解を求める手法である。

a) 平板を含む境界上での解(内部解)

本手法では、平板を含む境界上で平板、スリット部の存在に関わり無く、境界に垂直な方向の一樣流

$$\phi(\xi, \eta) = [\xi \pm C(\eta)] \cdot U(\eta) + C'_0(\eta) \quad (6)$$

(ξ, η): 領域内の任意点

を内部解として課す。式中の $U(\eta)$ は一樣流の流速振幅であり、速度ポテンシャルの壁面での x 軸方向微分値と関係付けられる。また $C'_0(\eta)$ は任意定数である。さらに、 $C(\eta)$ は *blockage coefficient* と呼ばれる定数であり、一樣流中の障害物の存在による慣性抵抗に相当する。また、その値は障害物の断面形状のみにによって決定される。

b) 複素 *blockage coefficient* C_c

複素 *blockage coefficient* (以下、C.B.C) とは、上

記の *blockage coefficient* を実部に持ち、虚部に適宜に定められた複素係数を用いるものである。すなわち、

$$C_c = C_R + iC_i \quad (7)$$

一方、スリットを通過する流速の2乗に比例する形の抵抗(その損失係数は f)によるエネルギー損失は「ローレンツの原理」を介して線形化し、それを上記の線形係数の虚部 C_i を通して評価した(式-8)。

従来の解析⁴⁾では、平面的に一樣な形状の柱体や平板列周辺波動場の平面2次元問題を扱っていたため、C.B.Cも構造物全体に一樣に付与していた。しかし、本研究で扱う形状は図-2に示すように一樣な形状として適用することは難しい。そこで、本研究では、図-2に示すように完全不透過部からなる要素部分にはきわめて大きな C_R の値を、また完全透過部からなる要素部分には $C_R = 0$ の値を与えて計算を行う手法を適用し、その妥当性を検証するとともに損失係数(f)を求める。

図-2 *blockage coeff.* の与え方 (本研究における手法)

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \int_0^T \int_{-h}^0 \int_{-a}^{+a} \{ (C_i \cdot v) \times v \} dy dz dt \\ W_2 &= \int_0^T \int_{-h}^0 \int_{-a}^{+a} f \frac{v^2}{2g} \times |v| dy dz dt \\ W_1 &= W_2, \quad v: \text{スリット通過流速} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

c) 境界積分方程式(外部解)

水平スリットを有する鉛直平板の場合には、図-1に示すように、流体領域を不透過板を含む鉛直面を境界として3つの領域に分け、それぞれの領域についてGreenの定理を適用すると次式を得る。これを外部解として用いた。

(Reg.1)

$$\phi(\xi, \eta) = \phi_0(\xi, \eta) + \int_{-h}^0 \left\{ \phi_0(0, y) \frac{\partial G_1}{\partial x}(0, y, \xi, \eta) - \frac{\partial \phi_0}{\partial x}(0, y) G_1(0, y, \xi, \eta) \right\} dy \quad (9)$$

(Reg.2)

$$\phi(\xi, \eta) = \int_{-h}^0 \left\{ -\phi_0(0, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(0, y, \xi, \eta) + \frac{\partial \phi_0}{\partial x}(0, y) G_2(0, y, \xi, \eta) \right\} dy + \int_{-h}^0 \left\{ \phi_0(l, y) \frac{\partial G_2}{\partial x}(l, y, \xi, \eta) - \frac{\partial \phi_0}{\partial x}(l, y) G_2(l, y, \xi, \eta) \right\} dy \quad (10)$$

(Reg.3)

$$\phi(\xi, \eta) = \int_{-h}^0 \left\{ -\phi_0(l, y) \frac{\partial G_3}{\partial x}(l, y, \xi, \eta) + \frac{\partial \phi_0}{\partial x}(l, y) G_3(l, y, \xi, \eta) \right\} dy \quad (11)$$

ここに、 $G_i(i=1,2,3)$ はそれぞれ1~3の領域におけるGreen関数でJohn(1950)⁵⁾によるものを用いる。

d) 内部解と外部解の接合

求められる外部解と内部解はそのままでは全領域に対する解としては十分でない。そこで、沖側の境界面($x=0$)の沖側と岸側、及び岸側の境界面($x=l$)の沖側と岸側それぞれにおいて内部解と外部解を接合し、離散化すれば、以下の式のように領域境界上の ϕ を得ることができる。

(境界1)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N U_1(y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \{G_1(0, y; 0, \eta) + G_2(0, y; 0, \eta)\} dy - C_1(\eta) U_1(\eta) \\ &= \phi_0(0, \eta) + \sum_{j=1}^N U_2(y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \{G_2(l, y; 0, \eta)\} dy \\ & \quad - \sum_{j=1}^N \phi_2(l, y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{\partial G_2}{\partial x}(l, y; 0, \eta) dy \end{aligned} \quad (12)$$

(境界2)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N U_2(y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \{G_2(l, y; l, \eta) + G_3(l, y; l, \eta)\} dy - C_2(\eta) U_2(\eta) \\ &= \sum_{j=1}^N U_1(y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \{G_2(0, y; l, \eta)\} dy \\ & \quad - \sum_{j=1}^N \phi_2(0, y_j) \int_{y_j}^{y_{j+1}} \frac{\partial G_2}{\partial x}(0, y; l, \eta) dy \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 $\eta_i (i=1, 2, \dots, N_1)$ 及び $y_j (j=1, 2, \dots, N_1)$ は以下の範囲の座標である。

$$-h < \eta_i < 0, \quad -h \leq y_j \leq 0 \quad (14)$$

e) 反射率、透過率の算出

反射率 K_R 及び透過率 K_T は、仮想無限遠方境界のポテンシャル値を入射波ポテンシャル値 ϕ_0 で割り、その絶対値を取って求めた。すなわち、

$$K_R = \left| \frac{\phi_{s12}|_{y=0}}{\phi_0} \right|, \quad K_T = \left| \frac{\phi_{s34}|_{y=0}}{\phi_0} \right| \quad (15)$$

3. 数値計算結果

(1) 解析手法の妥当性検証と損失係数(f)の提案

本手法の妥当性の確認と共に損失係数 f を決定するために、室内実験およびVOF法を用いた数値波動水路(CADMAS-SURF³、以下VOF)による結果と比較する。対象とする構造物は、水深 $h=1.0\text{m}$ 、水路幅 $D=2.0\text{m}$ に設置した、開口幅 $2a$ の一つの水平スリットを有する1枚の鉛直平板で、開口率はそれぞれ水深に対して $10\%(2a/h=0.1)$ とした(図-3)。BIMの水深方向の全要素分割数は20とし、開口部の分割数は2である。

図-3 実験模型 (1枚平板)

図-4 反射率 (1枚平板)

図-5 透過率 (1枚平板)

波浪条件は、周期: 1.2~5.1s、波長: 2.2~15.6m、波高: 2.6~9.2cm、波形勾配 $H/L=0.01$ とした。

種々の損失係数 f の値でBIM解析した結果と実験およびVOFの結果を比較し、最適な f の値を決定する。比較は反射率と透過率で行い、結果を図-4、5に示す。 f は0~8.0の間で計算し、 $f=3.5$ が良い一致を示した。図-4の反射率では、実験およびVOFの両者ともに $f=3.5$ が良く一致している。実験では造波装置の性能上、 $h/L < 0.2$ では波形勾配 $H/L=0.005$ となったが、この波形勾配の変化についても良い一致を示している。図-5の透過率については、実験値が全体的に低い結果となっているが、VOFの結果とは良い一致を示している。これは、透過波の波高が小さいため、実験では波高減衰の影響が大きかったためと考えられる。

以上より、損失係数を $f=3.5$ と決定した。図-6に

図-6 流速比(スリット通過流速/入射波の水平水粒子速度)

$f=3.5$ の時の流速比(スリット通過流速 v と入射波の水面での水粒子速度の振幅 v_1 との比; v/v_1)を示す。この結果からも $f=3.5$ が妥当な値であることが判る。

(2) 2重平板列への適用

前項で示した一つの水平スリットを有する1枚鉛直平板で決定した損失係数 ($f=3.5$) を用いて2重平板列へ適用した結果を示す。対象とした構造は、波の入射側(沖側)、透過側(岸側)ともに開口部を水深中央に設けた構造(HCCモデル)と沖側と岸側で開口部位置を変えた構造(HULモデル)の2ケースとした(図-7)。

図-8~11はHCCモデル、図-12~15はHULモデルの反射率、透過率、沖・岸スリットの流速比を示す。HCCモデルは、1枚平板と同様にBIMと実験およびVOFによる結果の比較を行った。HULモデルは、BIMと実験の結果比較とした。

図-7 2重平板モデル

図-8に示すHCCモデルの反射率は、1枚平板と同様に実験およびVOFによる結果と良い一致を示している。図-9の透過率については、BIMとVOFは良い一致を示し、実験結果が全体的に低い透過率を示す傾向にある。これは、1枚平板と同様に透過波の波高が小さいため、減衰の影響があるものと考えられる。 $h/L > 0.2$ のVOFの結果が極めて小さい理由は、計算メッシュに対して透過波の波高が小さいため、透過率がうまく算出できなかったものと考えられる。図-10, 11の流速比については、 $h/L=0.1 \sim 0.2$ でBIMの結果が実験およびVOFの結果よりも小さい値を示している。これは、BIMでは開口部の要素分割を2分割とし、それぞれに同じ f の値を与えているため、スリット部の流速分布が一樣として算定されているが、実際のスリット部の流れは、中央部が速く端部が遅い凸型の流速分布を成しているものと考えられるので、これが要因となって誤差が生じているのではないかと考えられる。しかし、全体的な傾向としては、実状をうまく表せているものと考えられる。

以上、それぞれ3者の反射率、透過率、流速比の結果比較から判断すると、本研究におけるBIM解析手法と一つの水平スリットを有する多重鉛直平板列構造の損失係数 $f=3.5$ は妥当であると考えられる。

次にHULモデルは、沖側のスリット開口位置が水粒子運動の激しい水面付近にあること、また、岸側スリット開口位置が底面付近にあるため、堤体内で大きな循環流が発生するなど複雑な運動を示す構造であるが、図-12の反射率など、解析結果と実験結

果は良い一致を示している。図-13の透過率については1枚平板およびHCCモデルと同様の傾向を示している。図-14の沖側スリットの流速比はHCCモデルと同様の傾向を示すが、図-15の岸側スリットについては、流速値が小さいため沖側流速比のような影響は小さく、解析と実験は良く一致している。

図-8 反射率 (HCCモデル)

図-9 透過率 (HCCモデル)

図-10 沖側流速比 (HCCモデル)

図-11 岸側流速比 (HCCモデル)

図-12 反射率 (HUL $\pi^* \ell$)

図-13 透過率 (HUL $\pi^* \ell$)

図-14 沖側流速比 (HUL $\pi^* \ell$)

図-15 岸側流速比 (HUL $\pi^* \ell$)

4. 鉛直スリット構造への適用

ここでは、前項までで述べた手法を図-16に示すような一つの鉛直スリットを有する多重平板列構造への適用を検討する。鉛直スリットの解析は、断面2次元問題である水平スリット解析を平面2次元場へ準用することで対応できる。理論展開は水平スリット構造とほぼ同じで支配方程式、境界条件およびグリーン関数を平面2次元場のものに変更するだけでよい。平面2次元場における支配方程式はヘルムホルツの式(式-16)となり、解析領域内では式-17~19に示す境界条件を満足する。グリーン関数は0次第1種ハンケル関数に基づくものを用いる。

図-16 解析領域 (鉛直スリット)

$$\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial y^2} + k^2 \phi_s = 0 \quad \text{in fluid domain} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } \Gamma_{11,13,21,23,31,33}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_s}{\partial n} \quad (\text{on } \Gamma_{14,24} \Gamma_{22,32}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} - ik \hat{\phi}_s = 0 \quad (\text{on } \Gamma_{12,34}) \quad (19)$$

$$\phi_i = \phi_0 + \phi_s \quad (\text{in Reg.1}) \quad (20)$$

$$\phi_i = \phi_s \quad (\text{in Reg.2, Reg.3}) \quad (21)$$

ϕ_0 : 入射波速度ポテンシャル

ϕ_s : 回折散乱波ポテンシャル

水平スリットと同様に1枚平板において本解析手法の妥当性を確認するとともに一つの鉛直スリットを有する平板における損失係数の値を決定した。対象とする構造は、堤体幅 ($D=2.0\text{m}$) の中央に幅 ($2a$) 20cm 、開口率10%のスリット有するものとし、その他の条件は水平スリットと同一とした。図-17, 18に1枚平板におけるBIM解析と実験結果の反射率、透過率を示す。横軸は、遊水室幅(l)または堤体幅(D)と波長(L)の比とした。これより、損失係数を

図-17 反射率 (1枚平板)

図-18 透過率 (1枚平板)

図-19 反射率 (2重平板)

図-20 透過率 (2重平板)

を $f=0.8$ とした。水平スリットの損失係数($f=3.5$)とは値が異なる結果となった。要因としては、波動による水粒子の運動は鉛直方向の軌道を示し、その規模は水深方向に異なった分布を示すことに対して本解析では開口部全体に一樣な損失係数の値を付与している、また鉛直方向の水粒子の運動に対してある水深のみに水平方向の開口部を設置することと水深(鉛直)方向全体に開口部を設置することによる違いなどが影響しているのではないかと考えられる。

図-19, 20に2重平板への適用結果を反射率、透過率の順に示す。鉛直スリット位置は、沖・岸側ともに堤体中央とし、開口率は10%とした。

水平スリット構造と同様に反射率、透過率ともにBIM解析結果と実験結果が良く一致しており、本解析方法および決定された f の値が妥当であるものと考えられる。

5. 結 言

本研究において、確認された結果を以下に示す。

- ① 構造物全体に複素blockage coefficientを付与する従来の手法を拡張し、各計算要素ごとに複素blockage coefficientを付与する手法の妥当性を確認した。

- ② 上記の複素blockage coefficient付与手法においてエネルギー損失を考慮できた。
- ③ 一つの水平スリットを有する多重鉛直平板構造における損失係数 $f=3.5$ を提案した。
- ④ 一つの鉛直スリットを有する多重鉛直平板構造における損失係数 $f=0.8$ を提案した。

参考文献

- 1) 例えば 浦田健一・中村瑛佳・大石英男・宇多高明・村井禎美：駿河海岸における新型離岸堤の建設とその後の追跡調査，海洋開発論文集，Vol.5，pp.309-314，1989。
- 2) 例えば 中村孝幸・井出善彦：波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法，海洋開発論文集，Vol.13，pp.177-182，1997。
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発(CADMAS-SURF)，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，2001。
- 4) 角野昇八・小田一紀・村本哲二・芳田利春：複素係数のblockage coef.を導入した漸近展開接合法，海岸工学論文集，第33巻，pp.407-411，1986。
- 5) John, F.: On the motion of floating bodies, II. Simple harmonic motions, *Comm. On Pure and Applied Math.*, Vol.3,1, pp.45-101, 1950。
- 6) 角野昇八・中木原宏文・塩崎禎朗・折橋恒春：多重連続薄壁堤体の周辺波動場解析に関する簡易手法，平成14年度関西支部年次学術講演概要，pp.II-97-1-2，2002。