

重み付差分-境界要素結合法による潜堤解析

九州産業大学 学員 中村直史
九州産業大学 正員 奥園英明

九州産業大学 正員 加納正道
福岡大学 正員 黒木健実
九州産業大学 正員 赤坂順三

1. はじめに

景観的に有効でかつ良好な消波効果が期待できる透過型潜堤の消波効果に関する模型実験を行い、消波現象を再現するための数値解析手法について検討を行った。筆者らは、これまでに境界要素法(BEM)を用いて潜堤の解析を行ってきたが¹⁾、本報では、透過型潜堤の間隙を通過する回転流や乱流の影響を考慮するために、BEMに重み付差分法(WFDM)を結合させた数値解析モデルへの改良を行い、模型実験結果との比較・検討することで、透過型潜堤および数値解析手法の有効性を示す。

2. 二次元造波模型実験

実験は、二次元造波装置と直立透過型潜堤を用いて、波高、周期を変化させて行った。入射波は、規則波でかつ非碎波を対象とした。実験装置、実験条件の概要は、図1および表1の通りである。堤体条件に関しては、直立潜堤の天端のみにスリットを設けたもの、天端および側壁部両面にスリットを設けたもの、三種類の模型¹⁾を一つずつ用いて比較を行っている。潜堤の前後に波高計を設置して、入射波高、伝達波高を測定し、伝達率を求めた。また、潜堤周辺の流況把握のためフロートを投入し、VTR撮影を行った。なお、スリット間の流れを明確にするためにブラックライトなどを用いて撮影を行っている。

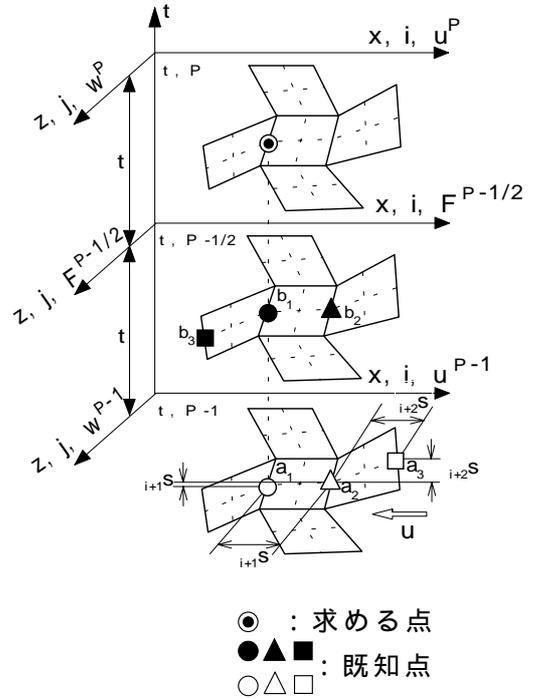


図3 陽形式重み付差分モデル

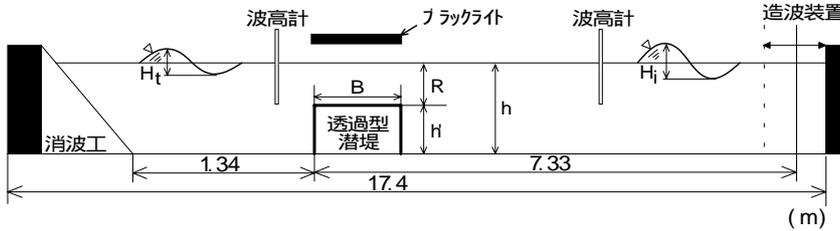


図1 実験装置の概略図

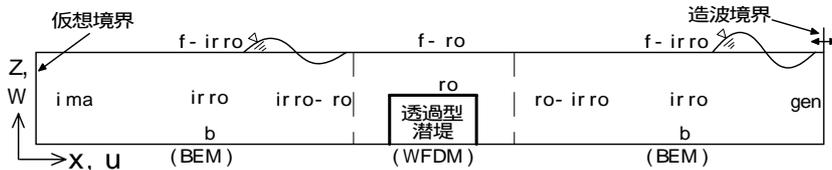


図2 解析領域

表1 実験条件（空間縮尺 1/36）

	実海域	模型
水深 h (m)	12.6, 13.32, 14.4	0.35, 0.37, 0.40
天端上水深 R (m)	2.52, 3.24, 4.32	0.07, 0.09, 0.12
波形勾配 (H/L)	0.01 ~ 0.05	
周期 T (s)	6.0 ~ 12.0	1.0 ~ 2.0
波長 L (m)	51.12 ~ 132.84	1.42 ~ 3.69
波高 H (m)	0.504 ~ 2.808	0.014 ~ 0.078

3. 重み付差分-境界要素結合法

渦なし流れ領域に境界要素法を用いるが、透過型潜堤の間隙を通過する回転流や乱流を考慮するために、潜堤近傍の領域については、二次元重み付差分法を用いて数値解析を用いる。

3.1. 基礎方程式

基礎方程式として、鉛直(x,z)平面における、Laplace方程式とNavier-Stokes方程式、および、連続の式を用いている。

(a) 渦なし流れ領域

時間依存型の速度ポテンシャル(x,z,t)を用いて、二次元渦なし流れをポテンシャルで表示するために、

式(1)に示すLaplace方程式を採用した。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{領域 } irro \text{ 内} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - 1/2(u^2 + v^2) - gz - P/\rho = 0$$

$$\text{領域 } irro \text{ 内} \quad (2)$$

(b)渦あり流れ領域

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{領域 } r_0 \text{ 内} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \quad \text{領域 } r_0 \text{ 内} \quad (4)$$

ここに、 g_z は、重力加速度を表す。

3 2. 境界条件

(a) 渦あり領域と渦なし領域との境界 (r_0 - ir_0 , ir_0 - r_0)

r_0 - ir_0 上では、BEM 側のポテンシャルから計算される流速値(u, w)と式(2)より示される圧力(P) (式(6))で接続する条件として与え、 ir_0 - r_0 上では、WFDM より得られる流速値をもとに BEM に式(7)に示すように、フラックスに関する条件を与えた。

$$\phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \Delta t \{ 1/2(u + w) + g_z w + P/\rho \} \quad r_0\text{-}ir_0 \text{ 上} \quad (5)$$

$$P = \rho \{ (\phi^{t+\Delta t} - \phi^t) / \Delta t - 1/2(u + w) - g_z w \} \quad r_0\text{-}ir_0 \text{ 上} \quad (6)$$

$$\partial \phi / \partial n = -u_n \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (7)$$

(b) 渦なし領域の自由水面境界 (f - ir_0)

自由表面の ir_0 - r_0 上でポテンシャルは、非線形な二つの境界条件(8)、(9)を満たす。

$$D\mathbf{r} / Dt = \mathbf{u} = \nabla \phi \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (8)$$

$$D\phi / Dt = -g_z z + 1/2 \cdot \nabla \phi \nabla \phi - P_a / \rho \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{r} は、自由表面の流動性粒子の位置ベクトルを表し、 P_a は大気圧であり、 ρ は、水の密度である。

(c) 渦あり領域の自由水面境界 (f - r_0)

$$\frac{\partial u_n}{\partial s} + \frac{\partial u_s}{\partial n} = 0 \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (10)$$

$$P = 2\nu \frac{\partial u_n}{\partial n} \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = w \quad (n: \text{法線方向}, t: \text{接線方向}) \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (12)$$

(d) 造波境界 (f - r_0)

波は、ピストン型造波装置で作られる。その境界 r_0 の運動 \bar{x} 、及び造波板の速度は下のよう示す。

$$\bar{x} = A/\omega (1 - \cos \omega t) \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (13)$$

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = v_n = -A \sin \omega t \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (14)$$

(e) 潜堤不透過部 (w) , 底部 (b)

, 仮想境界部 (ima)
 $\partial \phi / \partial n = 0 \quad ir_0\text{-}r_0 \text{ 上} \quad (15)$

3 3. 二次元重み付差分モデル

本解析で用いる重み付差分モデルを図3に示す。(x 方向計算時のみ示す) 図3をもとに、以下に示す重み付差分式により渦あり流れ領域における流速値が得られる。

$$i, j u^{t+\Delta t} = a_1 \cdot i, j u^t + a_2 \cdot i+1, j u^t + a_3 \cdot i+2, j u^t + b_1 \cdot i-1, j F^{t-\Delta t/2} + b_2 \cdot i, j F^{t-\Delta t/2} + b_3 \cdot i+1, j F^{t-\Delta t/2} \quad \text{領域 } r_0 \text{ 内} \quad (16)$$

ここに、 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ は、基礎方程式(4)を満足する多項式群を用いて算出される重みを表し、 F は式(4)の非同次項により計算される値である。

4. 模型実験結果と BEM 解の比較

BEM のみによる解析結果と実験の伝達率の比較を図4に、また流速ベクトルの比較を図5に示す。実験結果と比較して全領域を渦なし流れとして解析を行った BEM 解は傾向的に妥当な解析結果が得られていることを確認している。

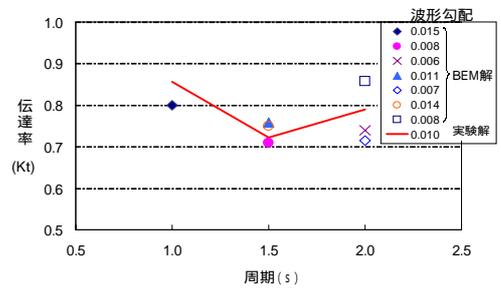


図4 伝達率の比較

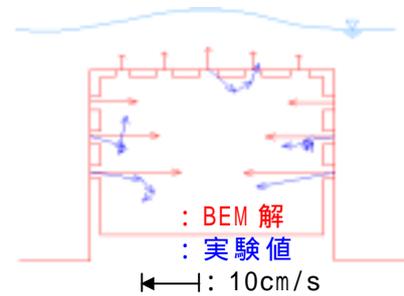


図5 流速ベクトルの比較

5. おわりに

BEM 解と実験値の比較を示したが、傾向的に良い結果が得られている。現在、BEM と WFDM とを結合した数値解析結果について比較・検討中であり、発表時において、数値解析手法の検討結果および実験結果の再現性を示す。

参考文献

1) 加納ら：透過型潜堤による消波効果に関する解析，平成14年度西部支部 講演概要集
 2) M.Kanoh, H.Okuzono, N.Nakamura and T.Kuroki ; Combined boundary element and weighted finite difference method for water flow, of 15th Int.Conf. on Boundary Element Technology, Detroit, USA, 2003