

透過型潜堤の重み付差分・境界要素結合法による数値解析

九州産業大学 正員 ○中村直史
九州産業大学 正員 奥菌英明

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

海岸構造物やダム堤体などその影響を受ける構造物に作用する流体力を定量的に評価するためには、流況および自由表面形状を正確に求める必要がある。筆者らは、これまでに潜堤による消波効果の解析を取り上げ、自由表面を含む問題を境界要素法(BEM)を用いて解析を行ったが、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把握する目的で、自由表面流れ問題に重み付差分法(WFDM)を適用することについて述べる。更に、WFDMとBEMを結合した解析手法について検討を行い、重み付差分・境界要素結合法として提案を行ったことについて述べ、模型実験結果との比較・検討することで、数値解析手法の有効性を示す。

2. 二次元造波模型実験

透過型潜堤実験は、図1に示すような二次元造波模型装置を用いて行った。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、三種類の模型を用いて比較を行っている。入射波は、規則波でかつ非砕波を対象とし、その他の実験条件について表1に示している。また、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。更に、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、フロートの動きを明確に把握するためにブラックライトを用いて撮影を行っている。

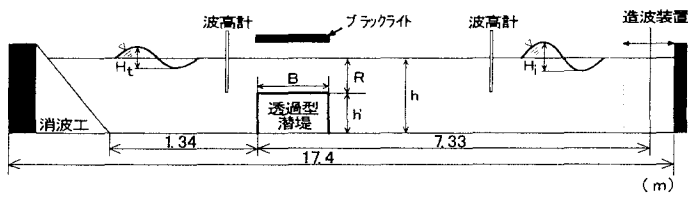


図1 実験装置の概略図

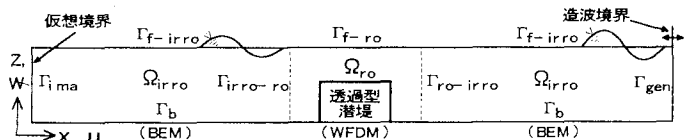
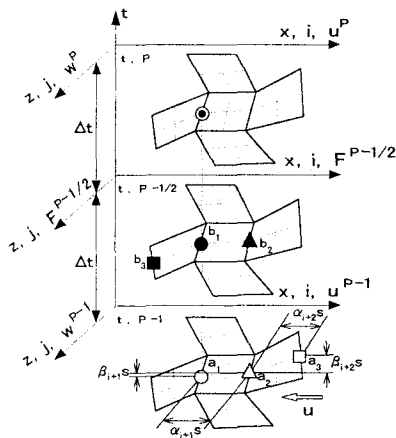


図2 解析領域



◎ : 求める点
●▲■ : 既知点
○△□

図3 陽形式重み付差分モデル

3. 重み付差分・境界要素結合法

実験結果を再現するための数値解析手法として、渦なし流れ領域にBEMを用いるが、透過型潜堤近傍の領域については、渦あり流れとしてWFDMを適用する重み付差分・境界要素結合法を用いる。その解析領域を図2に示している。

3.1 基礎方程式

(a) 渦なし流れ領域

時間依存型の速度ポテンシャル $\phi(x,z,t)$ 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。

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

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

$$\partial \phi / \partial t - 1/2(u^2 + v^2) - gz - P/\rho = 0 \quad \text{領域 } \Omega_{\text{irro}} \text{ 内} \quad (2)$$

(b) 渦あり流れ領域

WFDM で解析するこの領域では、連続の式(3)と Navier-Stokes 方程式(式(4))に Z 方向計算時のみ示す)を用いた。

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

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

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

$$(\Gamma_{\text{ro-irro}}, \Gamma_{\text{irro-ro}})$$

$\Gamma_{\text{ro-irro}}$ 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、 $\Gamma_{\text{irro-ro}}$ 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。

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

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

$$\partial \phi / \partial n = -u_n \quad \Gamma_{\text{irro-ro}} \text{ 上} \quad (7)$$

(b) 渦なし領域の自由表面境界($\Gamma_{\text{f-irro}}$)

自由表面の $\Gamma_{\text{irro-ro}}$ 上でポテンシャル ϕ は、非線形な二つの境界条件(8)、(9)を満たす。

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

$$D\phi / Dt = -g_z z + 1/2 \cdot \nabla \phi \nabla \phi - Pa / \rho \quad \Gamma_{\text{f-irro}} \text{ 上} \quad (9)$$

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) 渦あり領域の自由表面境界($\Gamma_{\text{f-ro}}$)

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

$$P = 2\nu \frac{\partial u_n}{\partial n} \quad \Gamma_{\text{f-ro}} \text{ 上} \quad (11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = w \quad \Gamma_{\text{f-ro}} \text{ 上} \quad (12)$$

(n:法線方向、s:接線方向)

(d) 造波境界($\Gamma_{\text{f-ro}}$)

波は、ピストン型造波装置で作られる。その境界 $\Gamma_{\text{f-ro}}$ の運動 \bar{x} 、及び造波板の速度は、下のように表す。

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

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

(e) 潜堤不透過部(Γ_w)、底部(Γ_b)

$$\partial \phi / \partial n = 0 \quad \Gamma_w, \Gamma_b \text{ 上} \quad (15)$$

3.3 二次元重み付差分モデル^{1), 2)}

本解析で用いる重み付差分モデルを図3に示している。

4. WFDM の潜堤解析への適用について

WFDM 解析は、変化する自由表面形状を忠実に表すことができている。(図4)

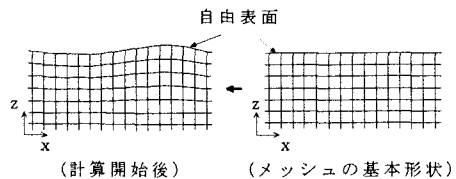


図4 WFDM メッシュ概要

5. おわりに

WFDM の潜堤解析への適用については、時々刻々と自由表面が移動し、波の伝播が良好に再現された結果を得ている。現在、実験値および重み付差分・境界要素結合法による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) 中村ら：二次元重み付差分法の浅海流への適用，土木学会論文集 No.747 / II-65, pp.125-134, 2003