

1. はじめに

計算機技術の飛躍的發展に伴って、CFD(数値流体力学)の手法を用いた波のダイレクト・シミュレーションが海岸・港湾工学の実務へ適用されるようになってきている。数値波動水路^{1), 2)}は、その代表的な手法の一つで、水理模型実験に用いられる波動水路とはほぼ同じ機能を持たせることによってコスト、労力等の削減につながる事が期待されている。

本論文は、数値波動水路の海岸・港湾構造物への適用性研究の一環として、ステップ式消波堤の消波特性を取り上げる。数値波動水路による計算結果を考察するとともに、反射率、透過率に関して既往の実験結果³⁾と比較することによって、数値波動水路のステップ式消波堤への適用性を検討する。

2. 数値波動水路の概要

数値波動水路^{1), 2)}は、以下に示す2次元非圧縮性流体の連続式および Navier-Stokes 方程式を基礎方程式としている。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0,$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right),$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right),$$

ここで、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分、 ρ : 密度、 P : 圧力、 ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g : 重力加速度、 γ_v : 空隙率、 γ_x, γ_z : 水平、鉛直方向面積透過率であり、 C_M を慣性力係数として $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M$, $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$, $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M$ である。また、抵抗係数を C_D として抗力 R_x, R_z を以下に示す流速の2乗に比例する形でモデル化している。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2}, \quad R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2}.$$

自由表面の取り扱いには、汎用性が高く複雑な自由表面が計算可能である VOF 法を採用している。VOF 関数 F の移流方程式は、以下の通りである。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0.$$

3. ステップ式消波堤への適用

図-1 は、以前に実施したステップ式消波堤の実験セットアップ状況³⁾を示している。ステップ式消波堤の前後に2本ずつ容量式波高計を設置して、2点の同時波形から入反射分離法でそれぞれ反射率、透過率を算定している。図-2 は、数値波動水路の計算モデルを示している。水平方向 20m、鉛直方向 1.5m を解析対象領域として、格子はそれぞれ水平方向に 400 分割($\Delta x = 0.05m$)、鉛直方向に 150 分割($\Delta z = 0.01m$)した。境界条件は、それぞれ左側で造波境界、右側でフリーとした。波条件は、実験で設定したもののうち、波高 10cm として、周期 1.12s, 1.34s, 1.57s, 1.79s, 2.01s の5種類の規則波を対象として数値波動水路を適用した。

キーワード：数値波動水路、ステップ式消波堤、透過率、反射率

連絡先：〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島技術研究所 TEL 0424-89-7085 FAX 0424-89-7087

反射率、透過率に関しては、実験条件と整合と取るために、容量式波高計設置位置に対応する計算点における波形から同様の手順で算定した。なお、右側境界はフリーとしても微小な反射波が発生するので、ステップ式消波堤前後において安定した波が数波形成されている時間をサンプリングの対象とした。

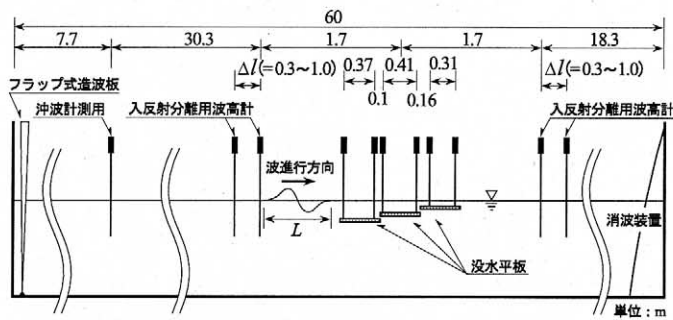


図-1 実験セットアップ状況

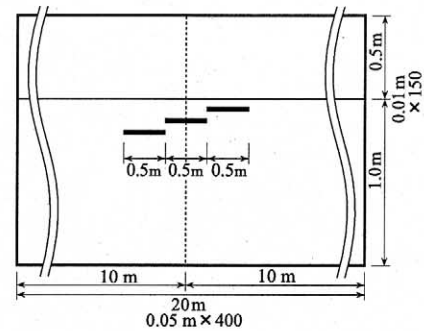


図-2 計算モデル

4. 計算結果

図-3 は、入射波(周期 1.12s)がステップ式消波堤上を進行していく時の波形変化を示している。通過した波が、短波長の成分波に分裂していく様子がよく表現されている。碎波前後で水中に気泡が混入している現象も見られるが、瞬間的なもので消波特性に関する検討においてはほとんど影響ないと考えられる。図-4、5 は、それぞれ計算結果と実験結果に基づく透過率と反射率を示している。図中の横軸は、堤体幅波長比 $B(=1.5\text{m})/L$ を取っている。これらの図より、計算結果は実験結果と良好な一致を示していることがわかる。

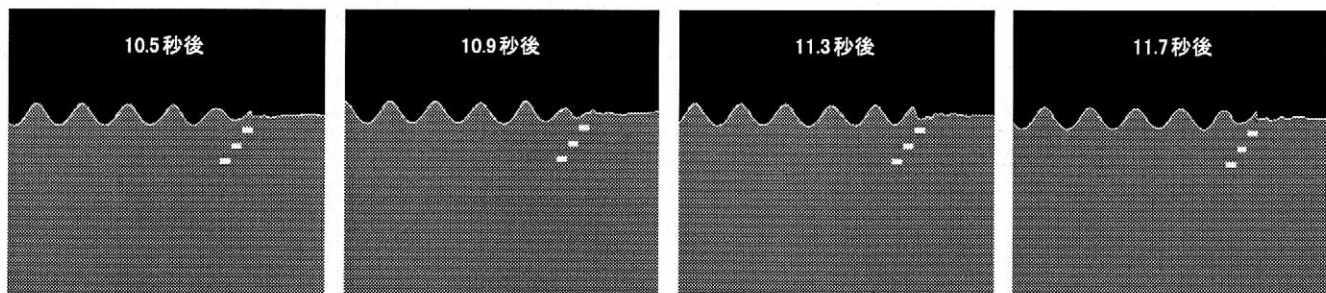


図-3 波形変化

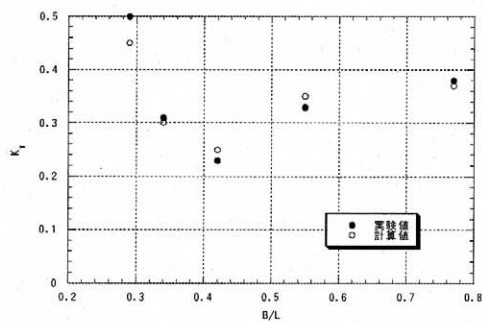


図-4 透過率

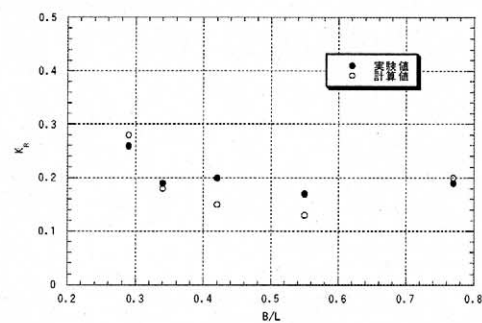


図-5 反射率

5. おわりに

数値波動水路をステップ式消波堤に適用して、その計算結果を考察するとともに実験結果と比較したところ、非常に有効であることが判明した。今後は、ステップ式消波堤周辺の流速特性、波力特性に関する数値波動水路の適用性を検討していくとともに、不規則波に対してもより詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本研究で用いた数値波動水路は、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(代表：東京大学磯部雅彦教授)で開発、改良されてきているものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献：1)磯部雅彦他(1999)：海洋開発論文集，第 15 巻，No.2，pp.321-326，2)磯部雅彦他(1999)：海岸工学論文集，第 46 巻，pp.36-40，3)藤田良一他(1992)：海岸工学論文集，第 39 巻，pp.561-565。