

消波構造物による波の変形に関する数値解析

室蘭工業大学 正 員 近藤 俊郎

室蘭工業大学 正 員 藤間 聡

室蘭工業大学 学生員 〇高玉 佳育

1. まえがき

渚石あるいは奥形ブロックなどによる透過性構造物は、防波堤、消波工として従来より、数多く築造されている。このような透過性構造物による波浪の減勢機構および物理的特性に関する実験的研究、解析的研究がなされ、現在多くの成果を得ている。^{1),2),3)}しかしながら、これらの理論は、一般に数式の展開において煩雑である。

著者らは、数値解析法としては最も扱い易い特性曲線法を用い、透過性構造物に有限振幅長波を作用させた場合の変形機構に関する解析を行った。透過性構造物内での抵抗則は、乱流効果まで考慮しているForchheimer則を仮定している。解析値と既往の実験値との比較により、この数値解析法の適用性などについて検討した。

2. 基礎方程式

図-1に示す、一定水深での有限振幅長波の支配方程式は次式で表示される。

領域 I, III

この領域に関する物理量は、添字eを付けて表わす。

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} + u_e \frac{\partial u_e}{\partial x} + g \frac{\partial \eta_e}{\partial x} + g S_f = 0 \quad \dots (1a)$$

$$\frac{\partial \eta_e}{\partial t} + (h_0 + \eta_e) \frac{\partial u_e}{\partial x} + u_e \frac{\partial \eta_e}{\partial x} = 0 \quad \dots (1b)$$

$$dx \frac{\partial u_e}{\partial x} + dt \frac{\partial u_e}{\partial t} = du_e \quad \dots (2a)$$

$$dx \frac{\partial \eta_e}{\partial x} + dt \frac{\partial \eta_e}{\partial t} = d\eta_e \quad \dots (2b)$$

領域 II

この領域に関する物理量は、添字nを付けて表わす。

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} + \frac{u_n}{\lambda} \frac{\partial u_n}{\partial x} + g \lambda \frac{\partial \eta_n}{\partial x} + g \lambda F u_n = 0 \quad \dots (4a)$$

$$S_f = \frac{\kappa^2 |u_e| |u_e|}{(h_0 + \eta_e)^{\frac{5}{3}}} \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial \eta_n}{\partial t} + \frac{(h_0 + \eta_n)}{\lambda} \frac{\partial u_n}{\partial x} + \frac{u_n}{\lambda} \frac{\partial \eta_n}{\partial x} = 0 \quad \dots (4b)$$

$$dx \frac{\partial u_n}{\partial x} + dt \frac{\partial u_n}{\partial t} = du_n \quad \dots (5a)$$

$$dx \frac{\partial \eta_n}{\partial x} + dt \frac{\partial \eta_n}{\partial t} = d\eta_n \quad \dots (5b)$$

$$F = a + b |\bar{v}| \quad \dots (6)$$

$$|\bar{v}| = \sqrt{u_n^2 + v_n^2} / 2 \quad \dots (7)$$

ここに、 x :座標、 t :時間、 u :平均流速、 η :水位変動、 h_0 :平均水深、 g :重力加速度、 λ :空隙率、 S_f :水底摩擦項、 κ :Manningの粗度係数、 F :non-Darcy抵抗項、 a ・ b :定数、 $\bar{v}$:合成速度。

平均流速 u については、 y 方向に積分して平均化している。

(1a)、(4a)式は、運動の式、(1b)、(4b)式は、連続の式を表わし、(2)、(5)式は、各領域のそれぞれ、 u 、 η の x 、 t に関する全微分である。

透過性構造物内(領域II)の流れは複雑なる次元現象であるが、ここでは1次元的に取り扱う。長波性の入射波について、波高の大きい場合には、領域IIの流れは、乱流になる場合が多いと考えられる。抵抗則として、乱流による効果まで考慮しているForchheimer則を仮定している。 $|\bar{v}|$ は、流れとしての u_n のみならず、ポラシヤルによる y 方向流速 v_n も考慮した。 v_n は、自由水面では最大で、水底では零であると仮定した。 $|\bar{v}|$ を求め

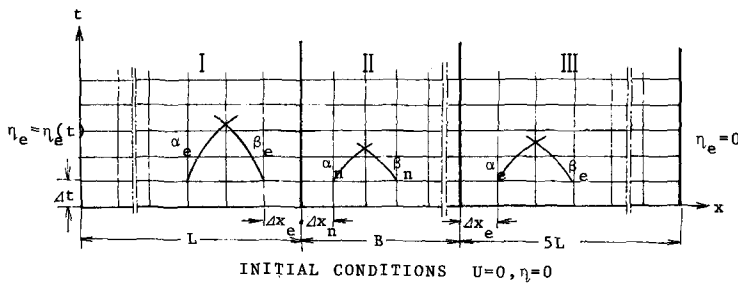


図-2 x-t 平面

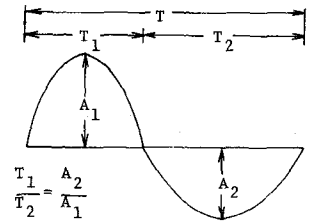


図-3 合成波形

る際、エネルギー一重み付き平均を考えた。

3. 特性曲線法

3-1. 特性曲線法と離散化 (1)式 および (4) 式は、 U と η を従属変数、 x と t を独立変数とする双曲型偏微分方程式である。(1)式、(4)式より、特性方向は、それぞれ次式になる。

$$\alpha_e = \frac{dx}{dt} \Big|_+ = U_e + C_e \quad \dots (8a) \quad \alpha_n = \frac{dx}{dt} \Big|_+ = \frac{U_n}{\lambda} + C_n \quad \dots (9a)$$

$$\beta_e = \frac{dx}{dt} \Big|_- = U_e - C_e \quad \dots (8b) \quad \beta_n = \frac{dx}{dt} \Big|_- = \frac{U_n}{\lambda} - C_n \quad \dots (9b)$$

ここに、 $C_e = \sqrt{g(h_0 + \eta_e)}$ 、 $C_n = \sqrt{g(h_0 + \eta_n)}$ 。

C_e は、領域 I、III の波速、 C_n は、領域 II の波速を表わす。

上式の特性曲線に沿う、運動の式は、それぞれ次式となる⁴⁾。

$$\frac{d}{dt}(U_e + 2C_e) = -gS_f \quad \text{on } \alpha_e \quad \dots (10a) \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{U_n}{\lambda} + 2C_n\right) = -g\lambda F U_n \quad \text{on } \alpha_n \quad \dots (11a)$$

$$\frac{d}{dt}(U_e - 2C_e) = -gS_f \quad \text{on } \beta_e \quad \dots (10b) \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{U_n}{\lambda} - 2C_n\right) = -g\lambda F U_n \quad \text{on } \beta_n \quad \dots (11b)$$

以上により、 U と C は、 $x-t$ 平面 (図-2) において、 α 、 β 曲線の交点のところで、それぞれ (10) 式、(11) 式から計算される。なお規定時間間隔⁵⁾による解の数値的安定性および収束性についての $x-t$ 平面の離散化はそれぞれ以下の条件を満足しなければならない。

$$\frac{\Delta t}{\Delta x_e} \leq \frac{1}{2}(U_e + C_e)^{-1} \quad \dots (12) \quad \frac{\Delta t}{\Delta x_n} \leq \frac{1}{2}\left(\frac{U_n}{\lambda} + C_n\right)^{-1} \quad \dots (13)$$

これらの式もまた、(8)式、(9)式に従っている。

3-2. 境界条件および初期条件 透過性構造物前面より 1 波長 ($1L$) 離れたところで、入射波として図-3 に示すような、2 つ異なる正弦曲線で合成された波形を与える。 T_1/T_2 の値は A_1/A_2 の逆数として変化すると仮定している。 A_1/A_2 および A_1+A_2 の値は、1 波長離れたところの実験値から決められた。

構造物前面の木面が上昇するとき、浸出点 P (図-1 参照) は、自由木面水位にほぼ一致する。この場合は、 $U_e = U_n$ 、 $C_e = C_n$ とし、(10a)、(11b) 式より U 、 C を求める。木面が降下するとき、降下速度 U_e が P の最大降下速度 U/λ に等しいか、それ以下のときは、木面の上昇と同じ手順を踏む。 U_e が U/λ より大きいとき、以下の手順による。

$$\eta_{n(t+\Delta t)} = \eta_{n(t)} - (U/\lambda) \cdot \Delta t \quad \dots (14)$$

(14) 式より、 C_n が計算され U_n は、(11b) 式より求める。連続の式より

$$C_n^2 \cdot U_n = C_e^2 \cdot U_e \quad \dots (15)$$

(15) 式の左辺は、今般既知であるから、 U_e について整理し、これを (10a) 式に代入すると、 C_e について 3 次方

様式になる。これを Newton 法により、 C_e を求め、(10a) 式より、 U_e を求める。

構造物後面の境界は、水面上昇時および降下時とも、 $U_n = U_e$, $C_n = C_e$ とし、(10b) 式、(11a) 式より、 U , C を求める。後方水域（領域Ⅲ）における境界条件は、構造物後面より長距離離れたところで、 $\eta_g = 0$ としている。

初期条件は、静水状態 $U_e = U_n = 0$, $C_e = C_n = 0$ とした。

計算においては、静水状態から直ちに、所定の液高の波を作用させず、助走時間を設け、3 周期まで η を徐々に大きくした。6 周期で定常状態になるとし、6 周期まで計算した。また、周期の短い波については、 $C_i = \sqrt{g h_0}$ と、 $C_0 = L/T$ との比より液速を補正した。

計算に用いた時間ステップ、空間ステップは、(12) 式、(13) 式より、 $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$, $\Delta x_e = 3 \sim 5 \text{ cm}$, $\Delta x_n = 3 \sim 6 \text{ cm}$ とした。

4. 実験装置および方法

対象とする透過性構造物には、立体格子構造物、碎石構造物を用いた。

4-1. 立体格子構造物 立体格子構造物は、外径 34mm の塩化ビニールパイプを外径と同間隔に、鉛直および水平方向に格子状に重ねたものである。この構造物の空隙率は次式により計算できる。

$$\lambda = \left[1 - \frac{2 \cdot (\pi D_p^2 / 4) \cdot 2 D_p}{(2 D_p)^3} \right] = 1 - \frac{\pi}{8} = 0.6073$$

ここに、 D_p はパイプの外径である。

Forchheimer 則の定数、 a , b は、著者の 1 人がすでに発表している算定式をもとにして決定した。

4-2. 碎石構造物 実験用碎石の比重 S 、空隙率 λ 、等価直径 D は任意に抽出した 466 個の碎石より決定した。 a , b の値は、長さ 17.5m、幅 0.6m、高さ 0.5m の定常流開水路に、長さ 0.53m、幅 0.6m、高さ 0.26m の碎石構造物を自由水面を有さないようにもぐらせ、動水勾配を種々変化させ、動水勾配と平均流速との関係より決定した。

表-1 構造物の物理的特性・水理的特性

	λ	$a \text{ (sec/cm)}$	$b \text{ (sec/cm}^2\text{)}$	
立体格子構造物	0.6073	0.0006	0.0002	$D_p = 34 \text{ (mm)}$
碎石構造物	0.4641	0.0033	0.0041	$D = 27.7 \text{ (mm)}, S = 2.69$

立体格子構造物、碎石構造物の物理的、水理的特性は表-1に示す。

4-3. 実験装置および方法 実験水槽は、長さ 18.5m、幅 0.4m、高さ 1.0m の片面ガラス張りの鋼製水槽であり、水槽一端には 0.5HP のプラップ型造波装置が設置してある。液高測定は、並行抵抗線型液高計を用いたが、碎石構造物内部の液高測定には、モータードライブカメラを使用し、構造物内部の水面形状を捉え、マイクログラフにて液高を読み取った。立体格子構造物内部の液高測定には、小型並行抵抗線型液高計を用いた。

実験に使用した入射波の諸元および構造物の幅員 B を以下に示す。

入射波高 $H_i = 2 \sim 4 \text{ (cm)}$ 周期 $T = 1.0 \sim 2.4 \text{ (sec)}$ 平均水深 $h_0 = 50.0 \text{ (cm)}$

立体格子構造物 $B = 54.4, 108.8 \text{ (cm)}$ 碎石構造物 $B = 60.0 \text{ (cm)}$

5. 実験結果および解析結果

図-4 は、 $T = 2.0 \text{ sec}$ の波が、立体格子構造物に進入した場合の液高分布を示している。解析値は実験値の傾

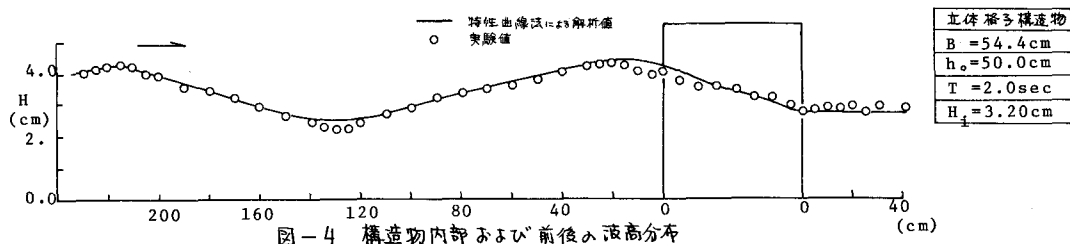


図-4 構造物内部および前後の液高分布

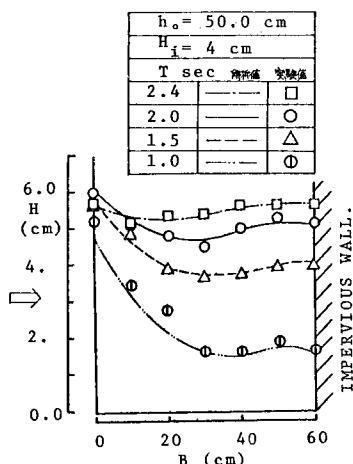


図-7 構造物内部の波高分布

向をよく捉えている。実験値をみると、構造物前面での波高分布は

腹が沖側にずれる傾向を示している。これは構造物の空隙率が大きいので、構造物前面は壁としての影響より、断面変化の影響が入りくると考えられる。図-5において、 $T=1.25 \text{ sec}$ の実験値および解析値を示す。この結果、本解析は、前方水域では波高分布の扁平化を示すが、構造物内部および伝達波高分布をよく推定できる。また、同図には著者の1人が長波理論により解析した結果も記載している。不透壁を置いた碎石構造物の場合を図-6に示す。この場合も、前方水域は、図-5と同様の傾向を示す。この傾向は、周期が短くなるにつれ著しい。これは、特性曲線法、本来の性質、すなわち、線型補間による平坦化および境界面での反射の影響を十分に考慮していないことによると考えられる。図-5と合わせて、構造物内部および伝達波高分布はForchheimer則を用いることにより現象を表現できることが認められる。図-7では、碎石構造物において4種類の周期についての波高分布を示したものである。構造物前半部では、周期が短くなるにつれ、急激なエネルギー損失が認められる。後半部については、波高分布は、平坦化され不透壁の影響がみられる。

6. あとがき

本解析法は、対象とした実験範囲では、前方水域波高分布についてはある程度の予測が可能、構造物内部波高分布および伝達波高分布については充分推定できることが確認された。今後は、水底勾配を有する場合を研究する所存である。

計算にあたり、北海道大学大型計算機センター FACOM 230-75 を使用して計算したこととを付記する。

参考文献

- 1). 富永正照・坂本忠彦：透水性構造物による波の変形に関する研究 (1), 第16回 海岸工学講演会講演集, 昭44.12, pp. 309~319.
- 2). 井島武士・江口泰彦・小林 彰：透水性防波堤と岸壁に関する研究, 第18回 海岸工学講演会論文集, 昭46.10, pp. 121~130.
- 3). 近藤俊郎・藤間 聡：透水性防波堤構造物の水理特性, 第17回 海岸工学講演会論文集, 昭45.11, pp. 155~162.
- 4). Nasser M.S. and J.A. McCorquodale: Wave Motion in Rockfill, Jr. of Waterway, Harbors and Coastal Engrg. Div., Proc. of ASCE, vol. 101, WW2, pp. 145-159, May 1975.
- 5). Zitta V.L.: Numerical Simulation of Flood Flows Subject to Bank Seepage, Virginia Polytechnic Institute, Ph.D., 1970.
- 6). 近藤俊郎・藤間 聡・高玉住青：消波工による波の変形に関する数値解析, 第30回土木学会年次学術講演会講演概要集(第2部門), 昭51.10, pp. 84, 85.