

大阪市立大学 正会員 角野 昇八
 大阪市立大学 学生員 ○ 山野 恵一

1. はじめに 波浪制御構造物の1つとして最近注目されている人工リーフのような透水礫層内外での波浪変形の解析を、従来の研究の様に速度ポテンシャルに関する境界値問題としてではなく、運動方程式および連続の式を支配方程式とする手法により解析を行った。得られた結果は実験値及び従来の手法による解析解と比較し、理論の妥当性を検証した。

2. 本解析手法の概要 従来、この種の問題に対しては、速度ポテンシャルを未知関数とするラプラスの方程式を種々の境界条件を満足させるように解くという手法が主流であった。

これに対し、本手法では未知関数に圧力、流速をとり、オイラー流の運動方程式および連続の式を支配方程式として、境界条件を満足する解を得ようとするものである。すなわち、

$$\rho S \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - F_x \quad \rho S \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - F_z \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$S = \frac{(1-\lambda)C_M + 1}{\lambda} \quad (3)$$

を支配方程式とし、水面 ($z=0$) での運動学的、力学的境界条件

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w \quad (4)$$

$$p = \rho g \eta \quad (5)$$

および、水底での運動学的境界条件

$$w = 0 \quad (6)$$

を満足する圧力 p 、水平、鉛直方向水粒子速度 u 、 w を得ようとするものである。その際、 p および u 、 w は $e^{i(kx-\omega t)}$ に比例する関数であると仮定する。式中の F_x 、 F_z は粘性抵抗力、 C_M は付加質量係数であり、透水礫層内でのその値は出口¹⁾の実験値より $C_M = 0.1$ とする。 λ は空隙率、 ρ は流体の密度、 η は水面変動量を表す。

本手法を従来の手法と比較した場合、その利点として各種の外力を理論に直接取り込めるため、現象との対応が直接的であり、複雑な問題への理論の拡張が容易であると考えられる。

なお、本手法は、人工海藻周辺の流体運動を解析するに際し、Kobayashi ら²⁾が用いた手法を拡張したものである。

3. 理論解析 ここでは図-1に示すような不透水層上の無限長透水礫層とその上の波動場を対象として解析する。透水礫層の深さは d 、その上の水深は h であり、透水礫層構成材の平均粒径は d_{50} で透水礫層全体に均一であるとする。座標系は x 軸を静水面に一致させ、上向きに z 軸をとる。この領域に対し、 x 軸の正の方向に角周波数 ω の微小振幅波が波形 η で進行するものとする。

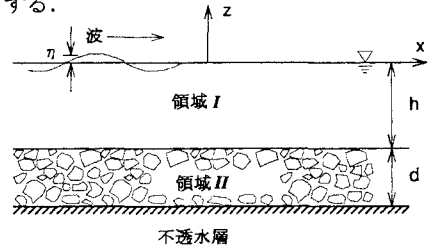


図-1: 解析領域の分割

一般に波動場に構造物が存在する場合、構造物は流体抵抗（粘性抵抗および慣性抵抗）を受ける。本研究では、透水礫層内の粘性抵抗は層流的なものに比べ乱流的なものの方が支配的であるとし、流速の2乗に比例する形で、例えば水平方向の抗力 F_x については、

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D (1-\lambda) u |u| \quad (7)$$

とした。ここに C_D は抗力係数であり、Wang ら³⁾によれば、それは

$$C_D = b_0' \frac{1}{\lambda^3 d_{50}} \quad b_0' = 1.0 \sim 2.2$$

の様に与えられる。本研究ではさらに、合流速方向の粘性抵抗の x 、 z 成分、例えば x 成分に対しては、

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D (1-\lambda) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (8)$$

についても考慮して解析を行う。

また、透水礫層内での粘性抵抗力の他に透水礫層表面での摩擦抵抗力の影響についても考察する。この抵抗力 F_b は、透水礫層表面での水平方向水粒子速度 u_b の2乗に比例する形で、

$$F_b = \frac{1}{2} \rho C_D' k_1 (1-\lambda) u_b |u_b| \quad (9)$$

の様に表す。ここに C_D' は透水礫層表面の抗力係数であり、ここでは $C_D' = 0.8$ とした⁴⁾。また、 k_1 は石の形状およびレイノルズ数を考慮した係数であり、ここでは $k_1 = 0.8$ とした⁴⁾。

これらの粘性抵抗力は非線形であり、解析解を得るためには次式のように線形化する必要がある。

$$F_x = \rho D_x u \quad F_z = \rho D_z w$$

ここに D_x 、 D_z は線形減衰係数であり、その抗力係数との関係はローレンツの等価仕事則により決定する。

図-1 中の領域 (I)、(II) において課した支配方程式 (式 (1) および式 (2)) を水面、水底での境界条件 (式 (5) および式 (6))、および透水層表面での圧力と鉛直方向流速の連続条件を満足するように解き、得られた圧力関数 p_1 、 p_2 と水面での運動学的境界条件 (式 (4)) より、図-1 に示すような場における分散関係式が次式のように得られる。

$$\omega^2 = gk \frac{\Omega k \tanh kh + \beta \tanh \beta d}{\Omega k + \beta \tanh kh \tanh \beta d} \quad (10)$$

ここで、

$$\Omega = \frac{S\omega + iD_z}{\omega} \quad \beta = \sqrt{\frac{S\omega + iD_z}{S\omega + iD_x}} k$$

である。また、 k は複素波数 ($k = k_r + ik_i$) であり、その実部 k_r は慣性抵抗による効果を、虚部 k_i は粘性抵抗による効果を表している。

4. 理論の検証 図-2 には、透水礫層上の波高減衰率に関する本手法の解析解と従来の手法による解析解¹⁾、および実験値¹⁾との比較を、図-3 には本手法の解析解と今回新たに行った実験結果の比較の1例を示す。出口¹⁾による従来の手法の解では、抗力成分はその方向の流速成分の2乗に比例する形で表され、また礫層表面での抗力は考慮されていなかったため、本手法でも同様としている。また今回の実験は、長さ 50m、幅 1m、高さ 1.5m の2次元造波水槽を用い、透水礫層厚さ $d = 15\text{cm}$ 、その上の水深 $h = 15\text{cm}$ として行った。また、透水礫層の空隙率は 0.4、平均粒径は 3.5cm であった。なお、図-3 の実験値との比較において、理論中の透水礫層内の抗力項には表-1 に示す4種類の表現を用い、そのそれぞれについて実験値との比較を行った。

表-1: 抵抗力の取り扱い

case	F_x, F_z	F_b
A	$F_x \propto u_2 \sqrt{u_2^2 + w_2^2}$	考慮する
B	$F_x \propto u_2 \sqrt{u_2^2 + w_2^2}$	考慮しない
C	$F_x \propto u_2 u_2 $	考慮する
D	$F_x \propto u_2 u_2 $	考慮しない

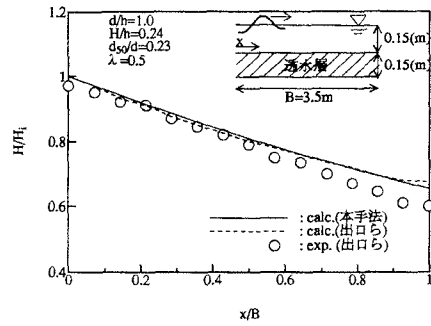


図-2: 従来の手法との比較

図-2 によれば、本手法の解析解は従来のものとよく一致し、また実験値とも良好に一致し、本手法およびそこに導入された係数値の妥当性が証明されている。

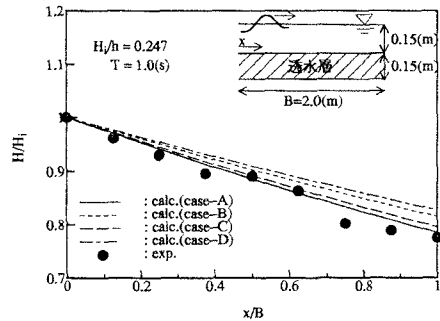


図-3: 波高減衰率の実験値との比較

図-3 によれば、case-A～D の抗力項の表現の違いによる結果の差はわずかであるが、case-A が最も良く実験値と一致している。

5. まとめ 圧力、流速を未知関数とし、運動方程式及び連続の式を支配方程式とした解析手法を導入して、透水礫層内外の波浪変形を解析した。本手法により得られた解析解を従来のもの及び実験値と比較し、その妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 出口一郎: 透過性構造物による波の変形, 第30回夏期講Bコース, pp.7-1~7-16, 1994
- 2) N.Kobayashi, A.W.Raiche, and T.Asano: Prediction of wave attenuation by vegetation and seaweed, Research Report of the Center for Applied Coastal Research, No.CACR-91-07, pp.175~213, 1991
- 3) H.Wang and Zhihao.Gu: Gravity waves over porous bottoms, Coastal Engineering, vol.15, pp497~524
- 4) David Stephenson: Rockfill in Hydraulic Engineering, Elsevier Scientific Publishing Co., 1979