

孤立波底面境界層の乱流構造に関する数値解析

東北大学工学部 学生員 ○小西 絵里子
 東北大学大学院 正会員 S u n t o y o
 東北大学大学院 正会員 山路 弘人
 東北大学大学院 フェロー 田中 仁

1. はじめに

海浜底質の移動・堆積機構を考える際には、波動境界層内部の流速分布、底面せん断応力の理解が重要である。これまで、波動境界層に関する研究は数多くなされてきたが、そのほとんどは正弦振動流を対象としたものであり、非正弦波動下における波動境界層に関する研究は正弦振動流のものに比べて極めて少ない。津波のように静止状態の水域に入射する波動下においては、急激な加速効果により、規則波動とは全く異なる特性を示すものと考えられる。孤立波理論はこのような波動現象を表現するのに適している。しかしながら、孤立波下における底面境界層に関する研究はほとんど行われていない。そのため、本研究では、孤立波発生装置を試作し、乱流条件下における底面境界層特性に関する実験、数値解析を行うことで孤立波の底面境界層特性について、主に流速変化の面から明らかにした。

2. 孤立波

孤立波は、静止水面よりも盛り上がった一つの山の部分のみで構成され、波形を変えることなく進行する非線形波である。クノイド波の波長を増大させ、無限大とした結果得られるものであり、水平方向に x 、鉛直方向に z をとり、水面からの最大波高を H 、静水位を h とすると、孤立波の水面高さ η 、波速 c として次式で与えられる¹⁾。

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \{ \alpha(x - ct) \} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha = \sqrt{3H/(4h^3)}$ 、 t : 時刻、 g : 重力加速度である。このとき、式(1)による孤立波の波形は図-1 のようになる。

また、 $t^* = \alpha ct$ とおくと、 $x = 0$ の位置における境界層外部の流速分布は以下の式で表される。

$$U = U_c \operatorname{sech}^2(t^*) \quad (3)$$

ここで、 U_c : 水粒子速度の最大値である。境界層内部の流速を u とすると、鉛直方向の流速分布、底面せん断応力は次式で与えられる。

$$u = U - \frac{2U_c}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \operatorname{sech}^2 \left(t^* + \frac{\alpha c z^2}{4\nu \beta^2} \right) e^{-\beta^2} d\beta \quad (4)$$

$$\tau_0^* = \frac{4U_c}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\alpha c}{\nu}} \int_0^\infty \operatorname{sech}^2(t^* + \beta^2) \tanh(t^* + \beta^2) d\beta \quad (5)$$

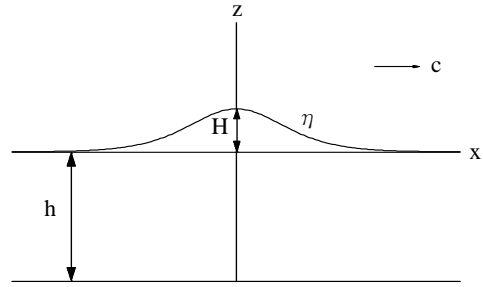


図-1 孤立波

ここで、 z : 鉛直座標、 ν : 動粘性係数である。

3. 実験方法

3. 1. 実験装置

実験装置は図-2 のような管内振動流装置を用い、孤立波底面境界層を管内に発生させた。装置は主に、断面が縦 100mm、横 150mm、全長が 4m の管路部分と、下流端開閉装置、ヘッドタンクから成り立っている。装置の概要を図-2 に示す。

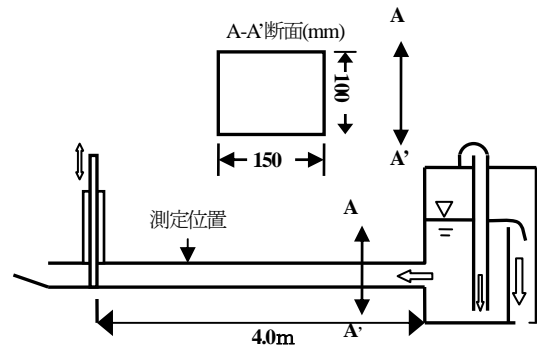


図-2 実験装置

管路は塩化ビニル板を張ることにより滑面とし、実験流体には水を使用した。ヘッドタンクは断面が 60cm × 60cm であり、オーバーフローをすることにより一定水位を保つようになっている。また、水位の高さはヘッドタンクの一方の壁面の高さを変えることにより、任意に設定することが可能である。流速の測定にはレーザー流速計を使用し、管路出口に設置してある開閉部の影響を考慮して、下流端から 1.3m 離れた位置に設置する。

流速の測定ポイントは計 13 ヶ所に設定し、5mw レーザー流速計を用いて測定を行った。流速計の高さは

ネジ式精密ジャッキを用いて変え、高さの測定には1/100mmの精度を持つデジタルノギスを使用した。

得られたデータは次式に示されるようなアンサンブル平均を行い、1周期の流速分布を得た。

$$u(z, \sigma) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ins}[z, \sigma\{t + (i-1)T\}] \quad (6)$$

$$\sqrt{u'^2(z, \sigma)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_{ins}[z, \sigma\{t + (i-1)T\}] - u(z, \sigma)]^2} \quad (7)$$

ここで、 N ：平均を行う波数、 T ：周期、 σ ：角速度、 z ：底面からの距離、 t ：時間、 u_{ins} ：瞬間流速、 u ：平均流速、 u' ：乱流成分である。

3. 2. 実験条件

サンプリングサイクル数は20周期、サンプリング間隔は1/100sで測定を行った。また、表-1に実験条件を示す。ここで、 RE ：レイノルズ数、 S ：ストローハル数であり、振動流においては以下の式のように定義される。

$$RE = \frac{U_c^2}{\sigma \nu} \quad (8)$$

$$S = \frac{U_c}{\sigma y_h} \quad (9)$$

ここで、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 y_h ：底面から境界層外部流速までの距離、である。

表-1 実験条件

T (s)	ν (cm ² /s)	U_c (cm/s)	RE	S
4.24	1.3×10^{-2}	48.4	1.6×10^5	6.53

4. 結果と考察

4. 1. 解析方法

境界層内特性の数値解析にはMenter²⁾により提案されたBSLモデルを用いた。このモデルにおいて、実験で得られた境界層外の流速から圧力勾配を計測して与え、数値計算を行った。

4. 2. 結果と考察

底面からの高さごとに測定された流速をアンサンブル平均した流速波形を図-3に示す。また、実験によって得られた流速の無次元値と、BSLモデルでの数値解析の結果を重ね合わせたものを図-4に示す。

流速の一周期の時間変化の波形を見ると、対称ではなく、幾分歪んだものとなっている。これは、境界層内部だけではなく、境界層外の流速も同様であることから装置の特性によるものと考えられる。

また、正弦波における流速分布とは異なり、孤立波の境界層外の流速には負の流速が存在しないため、境界層外流速がゼロの付近では底面近くの流速が先走り現象によって負の流速をとっている。

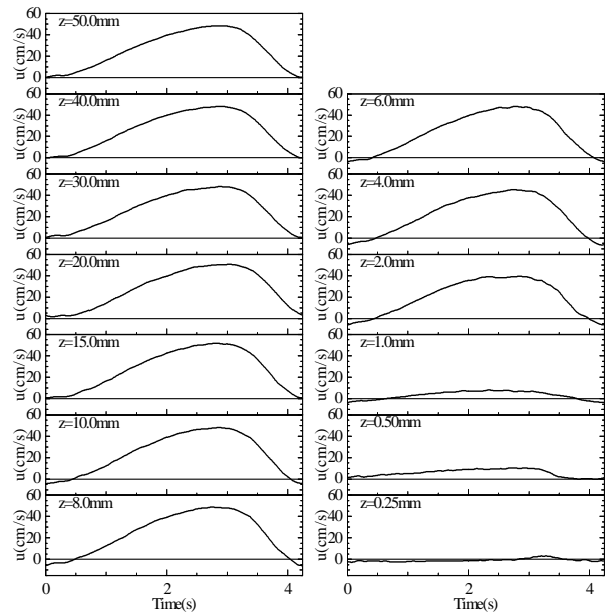


図-3 底面からの高さ別の流速の時間変化

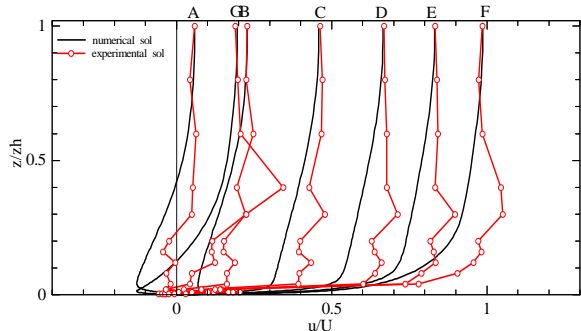
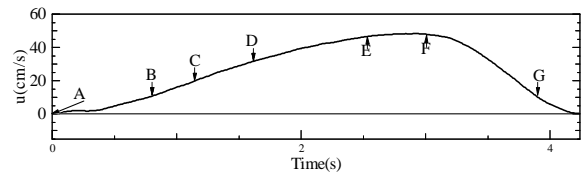


図-4 流速の時間変化と数値計算

また、数値計算と実験値を比較してみると、境界層外部の流速はほぼ一致しているが、境界層内部の値は異なっている。特に、実測値は全体的にプラス側にシフトした分布をしている。今後、せん断力、乱れ強度なども含め、総合的な検討を行う必要がある。

5. まとめ

孤立波の乱流構造に関して数値解析を行い、孤立波の特性の一部を明らかにするとともに、実験により数値解析との比較検討を行った。

参考文献

- 1) Samad, M.A. and Tanaka, H.: Bottom boundary layer properties under solitary waves, Civil and Environmental Engineering Conference, pp.III13-III19, 1999.
- 2) Menter, F. R.: Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp.1598-1605, 1994.