

神戸大学工学部 学生員 ○松井 聰知
神戸大学工学部 正員 中山 昭彦

1. はじめに

最近、土木事業の景観への配慮が注目される中で、河川工学の分野でも人間の憩いの場や生体系の保全を考えた河道計画がますます必要とされてきている。中でも、河床条件が急変する流れは河床状態、上流、下流の流量によってさまざまな水面形を有し、その流れを解析する事は、非常に興味深いものである。本研究においては、自由水面を有し、河床高さが急変する段落ち流れの数値計算をいくつか行い、実験結果と比較、検討し、また水底構造物の一つとして、三角形床止め回りの流れの解析も行ってみた。

2. 計算方法と計算領域

本研究では、壁回りの流れに関して非常に効果的である kawaskima - Kawahara の $k-\epsilon$ モデル¹⁾を用い、2次元の定常な開水路乱流場を解く事とする。運動方程式・ k 方程式・ ϵ 方程式は表-1のように与えられる。

次に本研究では水面の変化を考慮した計算方法として2次元非定常流のナビエーストークスの式をHirt and Nichol の改良によるSOLA-VOF法に基づいて解析を行った。SOLA 法は圧力勾配項を除いた運動量方程式を陽的に時間積分し近似速度場を計算する。VOF 法は水面勾配が急な場合はもちろん水面高が水平位置の多価関数になる複雑な水面形の場合にも最適である。また、水面では表面張力の効果も入れられ不安定化を防ぐ効果も期待できる。

次に、計算領域は図-1のようである。流入側の高さ H_1 を一定とし、また段落ち部分の高さは2cmで、段落ちの影響の及ばないところに堰を設け、単位幅流量 $q=0.017m^2/s$ とする事により富永らの実験²⁾の数値と合わせ比較できるようにした。。そして堰の高さを調節する事によりいろいろな水面形を作り出す事を試みた。解析に当たっては、計算領域を 117×44 のメッシュに分割し段落ち付近と河床付近の間隔を密にし、有限体積法により支配方程式を離散化し、さらに移流項には3次精度風上差分を用いて解析を行った。

運動方程式	$DU/Dt = -1/\rho \partial P/\partial x + \partial/\partial y (v \partial U/\partial y - v_t \partial U/\partial y)$ $v_t = c_\mu f_\mu k^2/\epsilon \quad \epsilon = \epsilon - \epsilon \quad \epsilon = 2v(\partial \sqrt{k}/\partial y)^2$
k 方程式	$Dk/Dt = \partial/\partial y \{ (v + v_t/\sigma_k) \partial k/\partial y \} + v_t (\partial U/\partial y)^2 - \epsilon + \pi_k$ $\pi_k = -1/2 v_t \partial/\partial y (k/\epsilon f_\mu \partial \epsilon/\partial y) \quad f_\mu = (\epsilon/\epsilon)^2$ $\sigma_k = 1.0 - 0.7 \exp\{-(y_t/8)^2\}$
ϵ 方程式	$D\epsilon/Dt = \partial/\partial y \{ (v + v_t/\sigma_\epsilon) \partial \epsilon/\partial y \} + C_{\epsilon 1} v_t (\partial U/\partial y)^2 (\epsilon/k) - C_{\epsilon 2} \epsilon^2/k - \epsilon \epsilon/k + C_{\epsilon 3} v v_t (\partial^3 U/\partial y^3)^2$ $C_{\epsilon 1} = 1.40 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad C_{\epsilon 3} = 1.0$ $f_\mu = 1 - f_w/f_{w2} \quad f_{w1} = \exp(-y_t/285) \quad f_{w2} = \exp(-(y_t/15)^3)$ $1/y_t^2 = 1/y_1^2 + 1/(60yL)^2 \quad y_1 = y(\epsilon/v^3)^{0.25} \quad y_L = y(\epsilon/k^{1.5})$

表-1 支配方程式

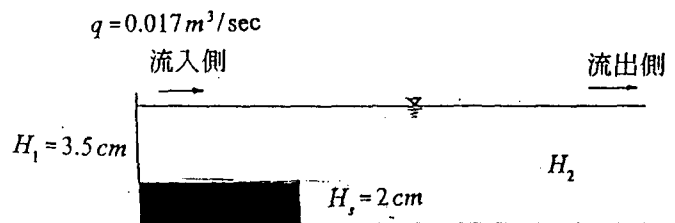


図-1 計算領域

3. 解析結果

1. 段落ち流れ

開水路の段落ち流れでは、上流側のフルード数や下流側の水深に応じて水面がさまざまな形を作り出す非常に複雑な流れとなる。今回の解析においては、case-2, case-3の2つのパターンを試し、後方の堰の高さはcase-2で0.3cm, case-3で2.4cmとした。図-2に実験結果を示す。case-1では段落ち上流側から徐々に水深が下がり、case-2では段落ち直後に水深が一度最小水位をとった後そこから下流にかけて跳水が発生しているため特にこのケースでの解析が難しいものと思われる。最後に case-3 では段落ちの前方でcase-1, case-2よりも水面は下がらず、段落ち直後で少し下がってから波打つように上昇している。

図-3に case-3 に於ける解析領域全体の流速ベクトル図を載せている。この図で分かるように今回の計算では最終的に定常の状態とならず、実験の結果と比較するにはお粗末な柄不十分である。現在その原因を究明中である。

右図-4-1, 2にはそれぞれのケースの段落ち付近部の拡大図を載せてあるが、case-2では最小水位の位置が段落ち部の少し後方に現れておりそこから下流にかけて超水が発生しているが実験の結果とはわずかながら異なっている。次に、case-3でもcase-2と同じように段落ちの少し後方で緩やかに水面が下がり下流へと向かうにつれて水位が上がるが、こちらも実験結果とは異なっている。

2. 三角形床止め

図-5の様な結果を得た。メッシュ数は、 72×41 で行い三角形の頂点を中心にメッシュ間隔を密にし解析を行っている。この解析に於いては、流れが定常の状態になっており頂点付近を越える辺りから水深が減少していく様子がよく分かる。

4. おわりに

一般に水面形状の穏やかに変化する流れの数値解析は、比較的容易にできるものと思われるが、今回の case-2 のように、より急勾配の流れになればなるほどそれだけ十分な結果を出すのに困難を要した。メッシュ数の量を増やす事や、支配方程式に関するさらなる改良を求めて、実験の結果と比較しながら、開水路乱流に対応できるものを研究していかなければならない。

参考文献

- 1) 川島、河村：第7回数値流体力学シンポジウム講演論文集pp. 315-318. 1993
- 1) 富永、劉、神谷、禰津：第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集pp. 337-340. 1994

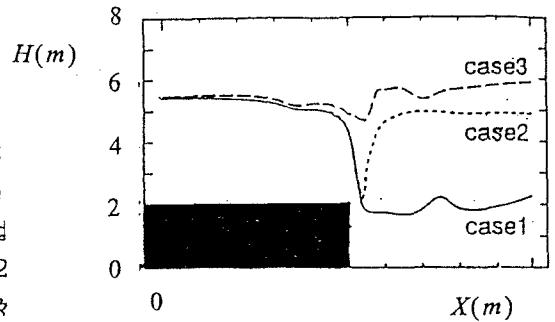


図-2 実験結果



図-3 計算領域の流速ベクトル図

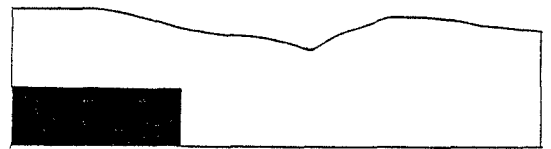


図-4-2 計算結果 case-2

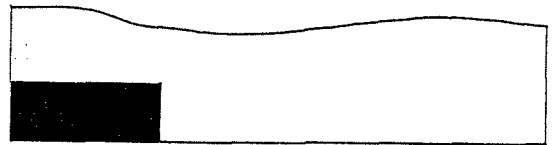


図-4-2 計算結果 case-3

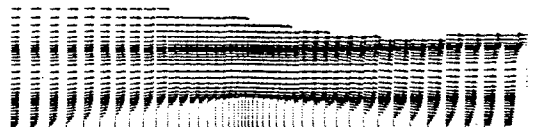


図-5 三角形床止めの計算結果