

京都大学大学院 学生会員 ○ 八木 哲生
京都大学大学院 正会員 角 哲也

1. はじめに

ダムの洪水吐きなどに代表される、水理構造物の漸縮部を通過するフルード数の高い高速流（射流）の主な問題の一つとして、衝撃波の発生による流れの不均一性の予測とこの影響を考慮した壁面の余裕高の設計が挙げられる。このような水理構造物は、数値計算による射流流れの再現が必ずしも十分ではないことにより、未だに水理模型実験の結果を元に設計されているのが現状である。

本研究の目的は、上記のような漸縮部をもつ水平水路を流れるフルード数の高い高速流の挙動を、平面二次元流れの基礎式を元にした数値解析によりどこまで再現できるかを調べることである。Hager によれば、漸縮部を流れる高速流のパターンは図-1 のように示され、水路の壁際及び対称軸上に生じる最高水位について、Hager の実験結果と数値解析結果の比較を行なう。なお、射流状態の流れが水路の屈曲部に達すると、ここで生じた攪乱はその大きさと流れの状態によって下流の方向へ一つの不連続面となって伝わるが、この水面の不連続面のことを衝撃波と定義する。

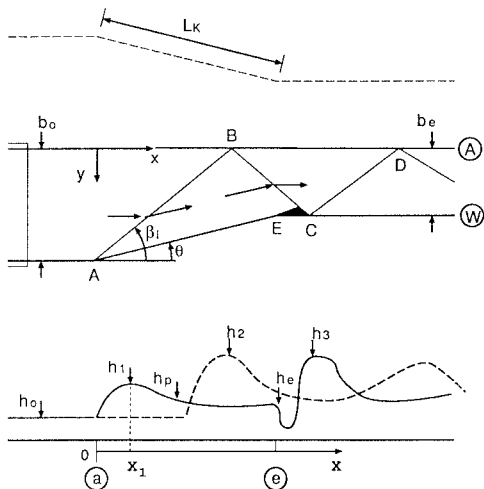


図-1 水平な水路の漸縮部を流れる高速流 (Hager)

2. 数値解析手法の概要

本研究では、漸縮する水路を通過する高速流を再現するために、村本、細田、長田らの開発した平面二次元非定常モデルを用いて数値計算を行なった。

支配方程式としては、連続式、Navier-Stokes 方程式を静水圧と仮定して水深方向に積分した浅水流方程式を用いている。底面剪断力については、マンニングの粗度係数を用いて評価している。また、水深平均レイノルズ応力では、Nezu and Nakagawa が求めた鉛直方向の水深平均乱れエネルギーの分布に関する実験式を水深方向に積分して得られた式を用いている。以上の式を一般座標形に変換し、有限体積法により数値解析を行なった。なお、各変数はスタッガード格子により定義し、時間差分については Adams-Bashforth 法、空間差分については一次風上差分法を用いている。境界条件としては、上流端の水深とフルード数を与え、また下流端の水深を水深勾配が等しいという仮定の下で外挿によって与える。また、水路の壁面境界条件を簡単な為、流出入する流量がゼロとして与える。

3. 解析条件

Hager の水理実験を参考にして、図-2 に示す漸縮水路を設定した。全幅 1.0m が 0.6m に漸縮する水路の片側半分を計算対象としている。計算格子は下流端に空の格子を 2 断面付け加えることにより、縦断方向に 100 断面、横断方向に 50 断面の計算格子を構築した。なお、 x 座標の原点は、漸縮開始地点の 0.5m 前にとってある。助走区間を設けたのは、上流の計算対象から外れている区間などの影響を防ぐためである。その他の計算条件を表-1 に示す。

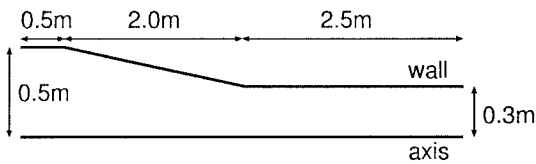


図-2 水路形状

表-1 計算条件

上流端水深 (h_0)	0.050m
上流端フルード数 (F_0)	5.0
マンニングの粗度係数 (n)	0.000(case0) 0.010(case1) 0.015(case2)

4. 解析結果

解析結果の一例 (case1) は、図-3 から図-6 に示すとおりである。漸縮部始端から発生した衝撃波は対称軸にぶつかり、さらに壁と対称軸の間を次々に折り返しながら水位の極大値を示しており、数値計算でも流れの基本的なパターンは再現されている。

次に、軸際の水位と壁際の水位の解析結果を Hager の実験式や実験結果 (図-1) と比較する。実験結果との相違点としては、まず、漸縮開始地点から最初の極大値がでるまでの距離 x_1 が短い。次に、壁際や対称軸際の波高の極大点の水深 (h_1, h_2, h_3) については、実験結果より明らかに下回っており、 h_1, h_2, h_3 に関して極大値であるはずの地点を通り過ぎても水深が上がり続けている。これらは平面二次元計算により鉛直上方加速度の影響を考慮していないことが考えられる。そして、全体的に水面形の変化がにぶい。これは低次精度の空間差分スキームを用いているからと考えられる。しかし、それらの点を除けば大体高速流の漸縮部の水面形を表現できている。

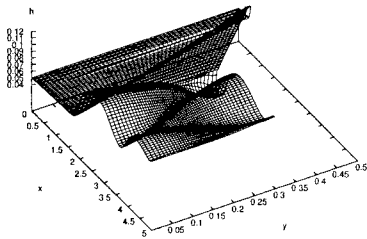


図-3 case1 (水位, $n=0.010$)

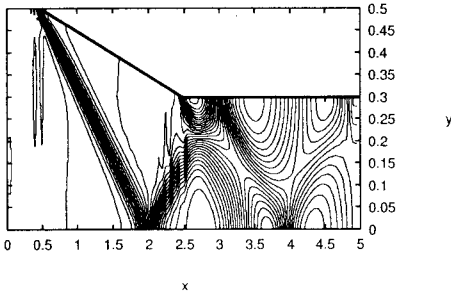


図-4 case1 (水位, $n=0.010$)

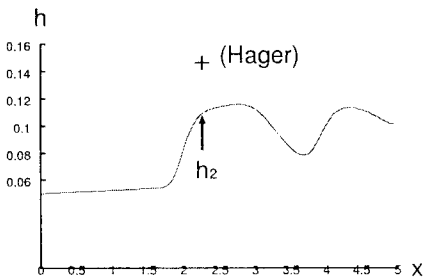


図-5 case1 (対称軸際の水位, $n=0.010$)

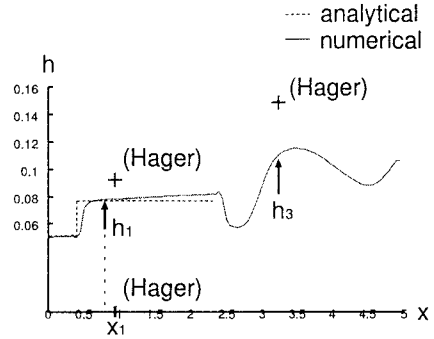


図-6 case1 (壁際の水位, $n=0.010$)

5. 結論

本研究により、漸縮部を有する水平開水路を流れる高速流を平面二次元モデルの数値解析で十分再現できることが分かった。今後、ダムの洪水吐導流部の設計などにおいて実際に用いられることが期待される。なお、本研究の今後の課題を以下に示す。

- ブシネスク方程式等を用いて、平面二次元モデルに鉛直上方加速度の影響を組み込む。
- 水面形の変化を鮮明に再現するため、スキームを一次風上差分の代わりに TVD-MacCormack スキーム等の高次精度のスキームを組み込む。
- より現実の流体の条件に近付けるため、壁面境界条件に壁法則や対数則を採り入れる等を行なう。

参考文献

1. Ippen, A. T.: Mechanics of supercritical flow, *Trans. 116*, ASCE, pp. 265-295, 1951.
2. Nezu, I. & Nakagawa, H.: Turbulence in open channel flows, in *IAHR Monograph*, Balkema, Rotterdam, pp. 53-56, 1993.
3. Reinauer, R. & Hager, W. H.: Supercritical Flow in Chute Contraction, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 1, ASCE, pp. 55-61, 1998.
4. 長田 信寿: 一般座標系を用いた平面 2 次元非定常流れの数値解析, 「水工学における計算機利用の講習会」テキスト, 土木学会, pp. 23-31, 1999.

謝辞

京都大学大学院土木工学専攻の細田尚助教授と長田信寿助手には本研究で用いたプログラムを提供していただき、また同時に数々の示唆を与えていただきました。ここに記して謝意を表します。