

保存型 CIP 陽解法を用いた複断面蛇行流れの非定常二次元解析

広島大学大学院 学生会員 ○森下祐
 広島大学大学院 正会員 内田龍彦

広島大学大学院 フェロー会員 河原 能久

1. 序論

洪水流が複断面河道を流下する際、河道内貯留によるピーク流量の逓減が生じる。低水路が蛇行し、高水敷粗度が大きい程、この現象が顕著に生じることが知られている¹⁾。この流量ハイドログラフの変形を適切に評価することは河道計画や治水安全度評価に対して重要な課題である。本研究では、複断面蛇行水路における非定常実験の結果²⁾に対し、内田ら³⁾が提案した二次元浅水流の保存型 CIP 陽解法を適用し、流量ハイドログラフの算定を試みる。

2. 解析方法

2.1 基礎方程式と数値解析法

以下に流体占有率を考慮した基礎方程式(1), (2)を示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{Vh} \left(V \frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} \right) = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - \frac{\tau_{0i}}{h} - \frac{f_i}{h} + \frac{1}{Vh} \frac{\partial A_j h \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、添字 ij は総和規約に従い、1,2 は x,y 方向を示す。 h は水深、 u_i は i 方向流速、(ζ : 鉛直方向)であり、 $A_j V$ は i 方向断面と流体占有率(空隙率)である。 τ_{0i} はマンニングの粗度係数 n を用いた底面せん断応力、 τ_{ij} は水平せん断応力であり、渦動粘性係数 ν_t は $1/6ku^*h$ にスマゴリンスキーモデルによる渦粘性係数が加えられたものが用いられている。 f_i は計算で直接表現できない境界形状による抵抗であり、本研究では0としている。数値解析法については、文献2)を参照にされたい。

2.2 地盤高(河床高)急変部の取り扱いについて

本解析モデルでは、任意の壁面形状をデカルト座標系で表現できるという利点を有する。しかし、地盤高急変部においては、図-1(a)に示すように水際位置を直接考慮できないため、水位によっては低水路面積が過小評価されるという問題がある。そのため、図-1(b)に示すように平均河床高ではなく、流体占有率を与え、壁面形状を考慮することで水際位置を正確に評価する。

この違いが流れに及ぼす影響を数値実験により検討する。数値実験は、case1(平均河床高)、case2(流体占有率)について、後述する実験水路を解析対象とし、上流から単断面流れとなるように流量を流下させた。図-2に縦断水位分布、図-3に図-2に示す区間での case1, case2 における平面流況(コンター: 水位, ベクトル: 流速)を示す。図-2より、case1 は case2 に比べ、水位が増加していることがわかる。これは、低水路面積の過小評価や河床高の増加に伴う河床抵抗の増大が考えられるが、図-3より低水路際において、case2 では壁面に沿う流れをおおむね再現できているものの、case1 では流速が小さく、死水域に近い状態の領域が多いことからわかる。

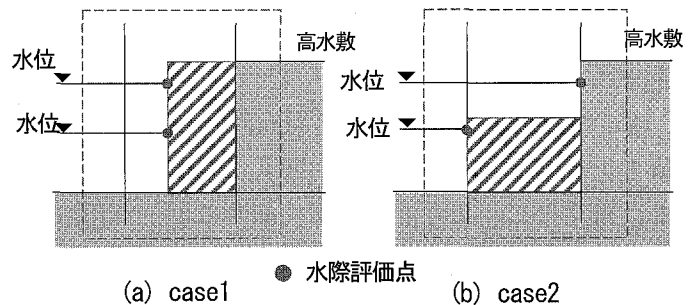


図-1 低水路壁面の評価方法のイメージ

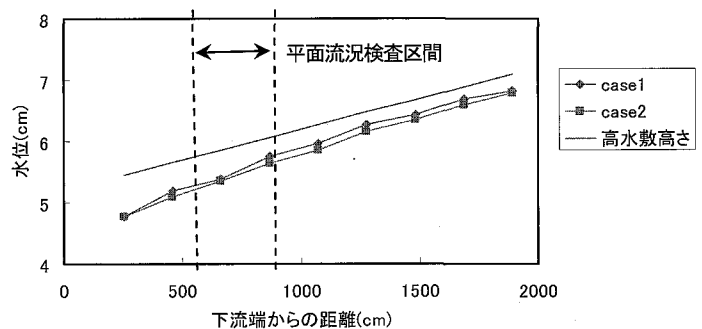


図-2 縦断水面形

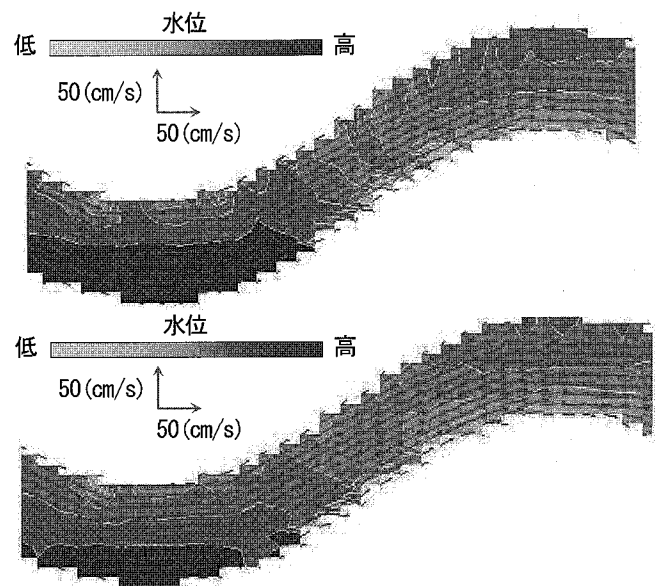


図-3 平面流況(上:case1 下:case2)

3. 実験概要及び解析条件

実験²⁾では、高水敷と低水路からなる大型複断面蛇行水路(図-4(a))を用いる。低水路の蛇行度は1.10, 幅0.5m, 高水敷高さは4.5cm, 低水路はほぼ滑面の固定床, 高水敷は人工芝を貼り, 低水路よりも大きな粗度である。実験では, 図-4(b)に示す非定常流を流下させ, 縦断水位の時間変化を測定した。各断面の流量は, 上流断面は図-4(b)と同様とし, それより下流断面は, 縦断水位の時間変化から貯留量を求め, 下流方向に追従計算していくことで算出した。

解析では, 計算格子を $\Delta x=0.1\text{m}$, $\Delta y=0.05\text{m}$ で与え, $\Delta t=0.01$ 秒で計算した。境界条件は上・下流断面にそれぞれ, 流量, 水位ハイドログラフを与える。未知量となる粗度係数は, 既往の研究¹⁾の値を参考にし, 縦断面水面形の解析結果が実験結果と一致するように与えている(低水路:0.010, 高水敷:0.019)。氾濫フロントの移動限界水深は0.1cmとし, 高水敷高さは人口芝の高さ(0.7cm)を含め, 5.2cmとした。

4. 解析結果の考察及び実験結果との比較

図-5(a), (b)に増水期と減水期の縦断水面形, 図-6に上, 中, 下流断面の流量ハイドログラフを示す。図-5より, 解析結果と実験結果をおおむね一致させているが, 相対水深 Dr (高水敷からの水深/低水路河床からの水深)が小さい領域($Dr < 0.3$)では多少の誤差が生じている。これは, 既往の実験において $Dr = 0.3$ 付近で河道内貯留量がピークを向えることから示されるように, 水の乗り上げや落ち込み, 二次流を伴う低水路と高水敷の相互作用など様々な抵抗特性が, 複雑に作用し合っていることや高水敷の人工芝の影響が考えられる。図-6より, 相対水深が小さい領域を除いて, おおむね実験結果と一致しており, ピーク流量の低減や遅れを精度良く再現できていることがわかる。

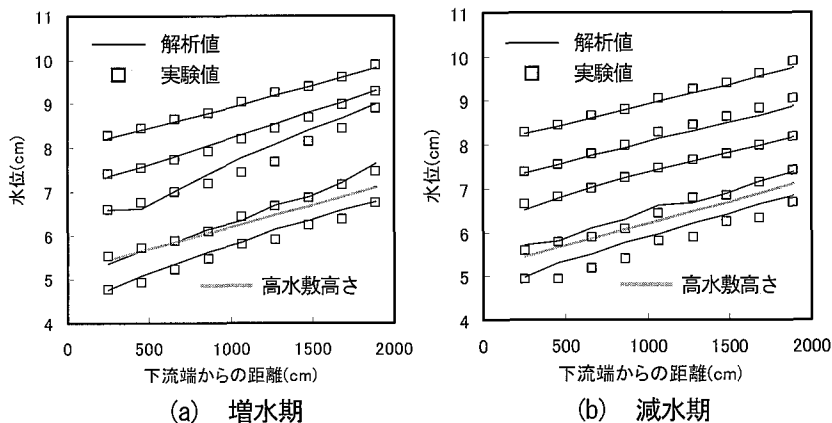


図-5 縦断水面形

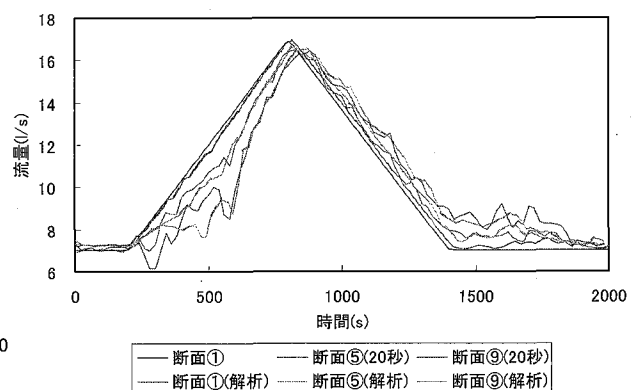


図-6 流量ハイドログラフ

5. 結論

本研究では, デカルト座標系における地盤高急変部の評価方法を検討し, その手法の妥当性を示した。次に複断面水路の非定常実験と比較し, 流下に伴う流量ハイドログラフの変形とそれに伴うピーク流量の低減や遅れを, 本手法で精度良く算定することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 渡邊明英, 福岡捷二, A.G. Mutasingwa*, 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp427-433, 2002.
- 2) 森下祐, 渡邊明英, 内田龍彦, 河原能久: 複断面蛇行河道における洪水流の増水期と減水期の流れ構造, 応用力学論文集, Vol.9, pp977-985, 2006.
- 3) 内田龍彦, 河原能久: 地形変化を有する二次元浅水流の保存方CIP陽解法, 応用力学論文集, Vol.9, pp917-924, 2006.