

低水路が蛇行している複断面河道における三次元流れ場の解析

広島大学工学部 正会員○渡辺明英

広島大学工学部 正会員 福岡捷二

1. はじめに

低水路が堤防とは異なる線形で蛇行している河道に高水敷上にも水が流れる場合には、高水敷上の流水は堤防に沿った形で流れ、高水敷高さよりも下の低水路内の流れは低水路の線形に沿った形で流れるために、3次元的に複雑な流れ場を形成することが指摘されている^{1) 2) 3)}。しかし、位相差・蛇行度と流れ場及び河床変動の関係は十分に言及されていない。このような種々の条件下での流れ場を検討するには数値解析を行うことが望ましい。複断面蛇行流れの数値解析例としてJin・Egashiraらの研究⁴⁾や中辻らの研究⁵⁾があるが、これらは静水圧と浅水流を仮定したものである。Jin・Egashiraらは、高水敷の高さより上層と下層で流れが異なることに着目して、静水圧分布と2層流れの仮定を用いて2次元計算を行ったが、下層の流れは実験結果^{1) 2) 3)}と大きく異なっている。これは静水圧近似をすると、水面勾配が全水深にわたって作用することになるので、直線水路においてさえも低水路河岸付近の流れは実際の流れと異なっており、複断面蛇行の場合にはこれが一層顕著に生じ、大きく異なったものと思われる。本文では、非静水圧の3次元流解析を行うことにより、複断面蛇行河道における流れ場を解析し、実験結果の精度の高い再現を試みる。

2. 解析方法及び計算条件

基礎方程式は、 $x-y$ 平面直交座標から η 平面一般曲線座標に変換した3次元の運動方程式と連続式である。ここで、水路形状と流れ場が流下方向に周期的であると仮定して、3次元流速場 (u, v, w, p) と水位 z 並びに各計量テンソルを水路の蛇行波長を1次モードとしたフーリエ級数で表す。これらを運動方程式、連続式に代入して、2次精度の時間積分することにより流速 u, v, w を求められる。流下方向への微分は、フーリエ級数から求められる。ただし、フーリエ級数の乗算が3次になるために、非線形項等の高次の乗算は複雑で計算量が膨大になる波数空間では行わずに、FFTを用いたスペクトル選点法⁶⁾によって計算し、 $2/(n+1)$ 則(n : 乗算の次数、本計算では3)に従ってエイリアシングを防いでいる。FFTにはバタフライ法を用いた。断面内での微分は2次精度の差分で近似し、移流項は2次精度で風上化した。圧力 P は静水圧とそれからの偏差 δP に分離され、 δP はSMACスキーム⁷⁾によって計算される。 δP に関するポアソン方程式は、流下方向には各モード毎に分離して解かれており、横断面内での繰返し計算は1段のRed-Black法⁷⁾で行われている。 δP は表面セルでは0とし、表面で水位が与えられる。水位は水深積分した連続式から与えられ、表面の w は運動学的境界条件から与えられる。渦動粘性係数は $\kappa u_* h/6$ とし、境界ではスリップ条件を与え、抵抗係数でせん断力を評価した。

図1に、水路形状とそのメッシュイメージを示す。これより、格子点の座標を読み取って、その座標をフーリエ変換し、それを基に座標変換に用いる各計量テンソルを作成した。メッシュは32*60に分かれており、スペクトル選点法を用いる本モデルでは0~7次モードまで解析される。なお、低水路形状は最大角45°、幅50cmのsine-generated-curveであり、1区間の距離は x 座標で4.1mである。高水敷水深4cm、低水路水深8.5cmをそれぞれ水深方向に4分割(1cm*4)、8分割(1cm*4+1.125cm*4)した。水路勾配は1/600である。

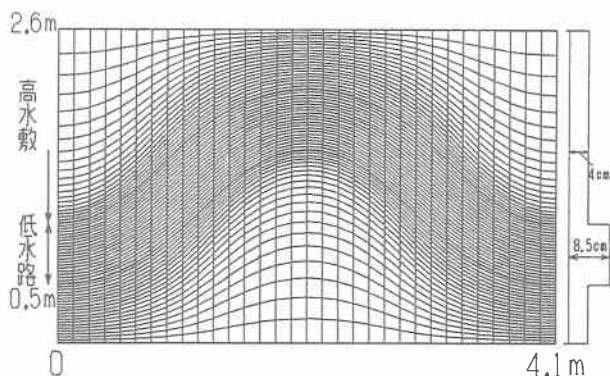


図1 水路形状とメッシュイメージ

3. 解析結果

図2は水位コンターを示す。低水路の外岸側で水位が高くなることや高水敷上では蛇行部の後でコンターの間隔が密で、流れが入り込む手前で間隔が広くなるなど²⁾の特徴が表れている。なお、水位は水深平均流速場で決まるので、静水圧分布を仮定しても同様な結果を得ることができる。図3は高水敷高さより上で平均した流速ベクトルとそれより下で平均した流速ベクトルを重ねて示したものである。高水敷よりも上の部分では堤防に沿った形で流れている。高水敷よりも下では低水路に沿って流れており、最大流速は内岸側から次の内岸側に向かって流れている。これにより、低水路部分、特に高水敷上の流れが低水路に入る箇所では、上層と下層とで流れの向きが大きく異なり、下層では外岸に向かう流れが生じている。3次元解析を行うことにより、このような特徴的な流れ場を表すことが可能となっている。図4は、高水敷高さより下で平均した圧力偏差を水頭で表したものである。流れが河岸に当たる側で圧力が最大で1mm弱程度上昇していること、内岸側で圧力が若干下降していることがわかる。なお、高水敷高さよりも上ではほとんど圧力偏差は生じていない。図5は、高水敷高さにおける鉛直流速 w の値をコンターで表したものである。低水路の流れが河岸に当たる部分で大きな上昇流が生じている。高水敷高さよりも上の流れは多くの部分で緩やかに潜り込む。内岸側下流の高水敷から流れが入り込む箇所では下に潜り込んだ流れが外岸に向かって沸き上がる螺旋流を形成している。

4. おわりに

非静水圧の3次元流解析モデルを適用することにより、低水路が蛇行している河道内の流れを特徴をおおよそ再現できることが確かめられた。

[参考文献]

- 1) 芦田他:水工学論文集第34巻pp. 397-402, 1990.
- 2) 武藤他:水工学論文集第34巻pp. 711-716, 1996.
- 3) 福岡他:水工学論文集第34巻pp. 941-946, 1996.
- 4) H. Jin, S. Egashira他:水工学論文集第40巻pp. 717-724, 1996.
- 5) 中辻他:水工学論文集第40巻pp. 1083-1088, 1996.
- 6) 保原充他編:数値流体力学, 東京大学出版, 1992.
- 7) 荒川忠一:数値流体力学, 東京大学出版, 1994

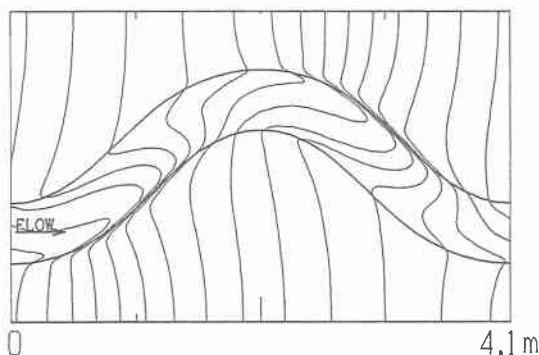


図2 水位コンター (間隔0.5mm)

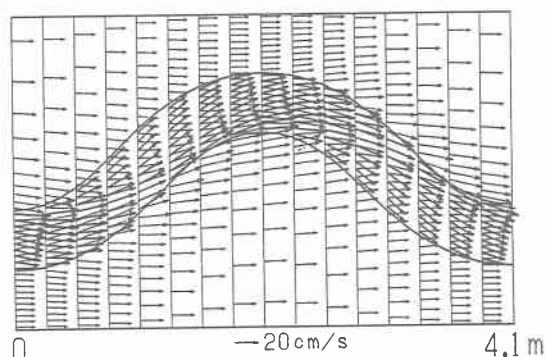


図3 流速ベクトル (太線: 下層の水深平均流速)

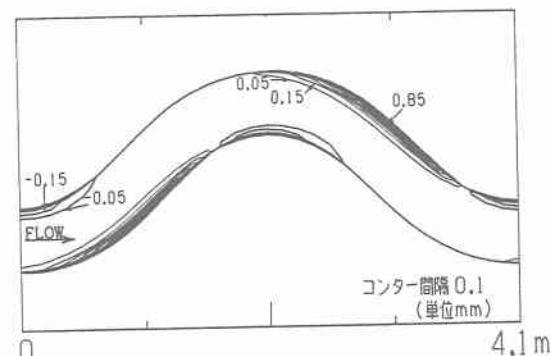


図4 圧力偏差 $\delta P / \rho g$

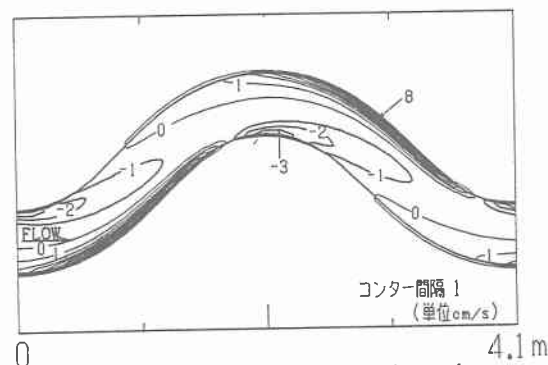


図5 高水敷高さでの鉛直方向流速コンター