

河川湾曲流の三次元数値解析

鳥取大学工学部 正 員 道上 正規
鳥取大学工学部 正 員 檜谷 治
鹿島建設 (株) 正 員 ○山根 正樹
鳥取大学大学院 学生員 松ヶ下伸介

1. はじめに 河川湾曲部における流れは三次元性が強く、この性質が河床形態および流路の変動を特徴づけている。二次流の形成や流速場の偏りによる側岸域の洗掘・堆積の発生とこれに伴う流路変動は、洪水流による堤防決壊に直接結び付くものであり、河川湾曲部の流れの解明および河床変動の予測は河川工学の必須課題の一つといえる。本研究は、この河川湾曲部の流れを比較的簡易な準三次元モデルを用いて数値解析したものであり、実験値との比較によりその妥当性・適用性を検討した。

2. 基礎方程式および計算法 本研究では、座標系を図-1に示す曲線座標系をとし、流れを非圧縮流体の非定常流と考え、鉛直方向の運動方程式に静水圧分布を仮定することにより、以下の基礎方程式を得た。

$$\langle \text{運動方程式} \rangle \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} + g \frac{\partial \xi}{\partial s} - \frac{\partial}{\partial s} (2\varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial s}) - \frac{\partial}{\partial n} (\varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial n}) - \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} + g \frac{\partial \xi}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial s} (\varepsilon_h \frac{\partial v}{\partial s}) - \frac{\partial}{\partial n} (2\varepsilon_h \frac{\partial v}{\partial n}) - \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_v \frac{\partial v}{\partial z}) = 0 \quad (2)$$

$$\langle \text{連続式} \rangle \quad \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial rv}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u, v, w はそれぞれ流速の s, n, z 方向成分、 ξ は水位変動量、 r は曲率半径であり、簡略化のため $ds = ds_0 \times r/r_0$ (r_0 : 水路中心の曲率半径)と表記した。 ε_v は鉛直渦動粘性係数であり、次式で与えた。

$$\varepsilon_v = \kappa u_* z(1-z/h) \quad (4)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 h は水深、 u_* は摩擦速度である。

また、 ε_h は水平渦動粘性係数であり、道上らの研究¹⁾を踏まえ、便宜的に側壁から水深分だけ離れた距離を壁面領域と考え、その領域の壁面で0、水路中央部との接線で $\kappa u_* h/6$ となるような分布を次式で与えた。

$$\varepsilon_h = (n/B) \cdot \kappa u_* h/6 \quad (0 \leq n/B < 0.1), \quad \varepsilon_h = \kappa u_* h/6 \quad (0.1 \leq n/B < 0.9), \quad \varepsilon_h = (1-n/B) \cdot \kappa u_* h/6 \quad (0.9 \leq n/B < 1.0) \quad (5)$$

ここに、 n は横断方向距離である。

式(1)~(3)に示した基礎方程式を解く際に以下のような境界条件を与えた。

1) 水面での境界条件：水面に作用するせん断応力はないと仮定し、次式で与える。

$$\varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\xi} = 0, \quad \varepsilon_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=\xi} = 0 \quad (6)$$

2) 路床での境界条件：路床での境界条件はNon-slip条件とする。

3) 側壁での境界条件：側壁では、側壁に平行な流速成分を許容し、側壁に垂直方向の流速成分は0とする。

4) 上流端での境界条件：上流端では、所定の流量となるように流速を断面一定で与える。

5) 下流端での境界条件：下流端では、一定の水位を与える。

以上の境界条件のもとに、基礎方程式を時間積分法に Fractional step 法、水平方向および鉛直方向の離散化に差分法および有限要素法とする Fractional Step Finite Difference Method を用いて非定常解析を行い、その収束値を定常解とした。

3. 解析結果 本計算法の妥当性を調べるために、玉井ら²⁾が行った実験結果と比較し検討した。玉井らは、

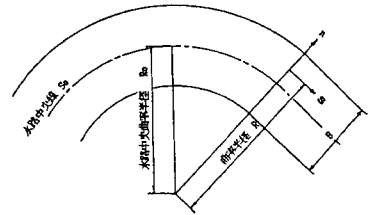


図-1 座標系

その中心軸として、蛇行流路曲線(sine generated curve)を近似した円弧と直線とが反転して連続する形状を持つ実験水路を用いて、湾曲流の主流および二次流の測定を行っており、その実験の諸元は表-1に示す通りである。実験では湾曲部は10個連続するが、解析では計算時間および湾曲入口での流速分布の影響を考え、2つの湾曲部を対象として行い、結果の考察には、下流側の湾曲部の結果を用いた。図-2に一湾曲分のメッシュを、また図-3に断面番号およびその位置を示してある。解析結果を主流および二次流の鉛直分布として図-4に示した。まず主流についてであるが、湾曲部入口付近の外岸側・出口付近の内岸側で最大流速の発生位置に多少のずれがあるものの全体としては実験値と良好な一致を示しているといえる。つぎに二次流については、全体的に水面付近での減衰の程度が小さく、湾曲中央部の水路中央付近では、実験値と逆の位相となっている。これらについては、実験の水深-水路幅比 h/B が1/10程度であるため側壁の影響が無視できないものと思われ、解析ではこの影響の評価が十分でなかったこと等が原因として考えられる。しかし、二次流についてもその遷移過程等を良好に再現できており、本計算法がある程度有効なものであると思われる。

解析ではこの影響の評価が十分でなかったこと等が原因として考えられる。しかし、二次流についてもその遷移過程等を良好に再現できており、本計算法がある程度有効なものであると思われる。

4. おわりに 本研究は、鉛直方向に静水圧を仮定した準三次元モデルを用いて連続湾曲部の流況を解析したが、全体的に見て主流および二次流ともに実験値との対応の良い結果を得ることができたと思われるが、壁面の影響の評価等をさらに検討する必要がある、今後の課題といえる。

表-1 実験条件

水路形状	連続湾曲
水路中心軸の曲率半径	60 cm
水路幅	30 cm
湾曲中心角	90°
湾曲間の直線流路長	30 cm
水路勾配	1/1000
流量	1.98 l/s
平均水深	2.93 cm
断面平均流速	22.3 cm/sec
フルード数	0.42

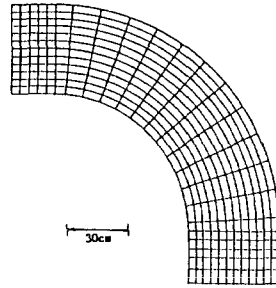


図-2 解析メッシュ

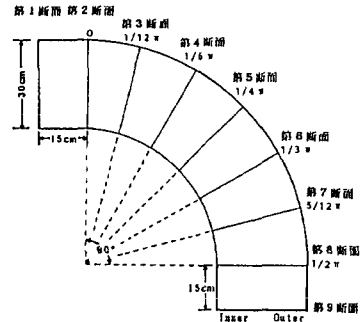
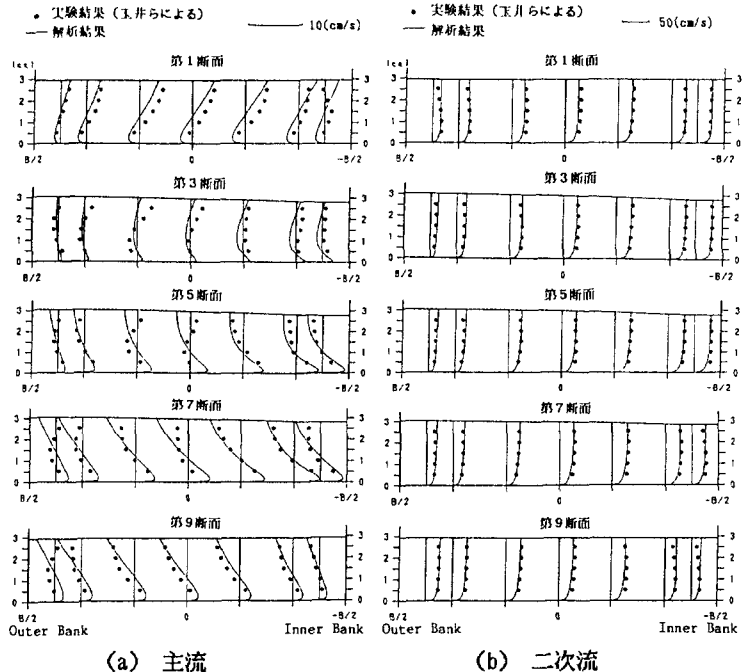


図-3 断面番号



(a) 主流

(b) 二次流

図-4 解析結果

〔参考文献〕

- 道上正規, 檜谷治: 不透過水制周辺の準三次元流計算, 第44回年次講演会, pp.577-578, 1989.
- 玉井信行, 池内幸司, 山崎晶: 連続わん曲水路内における流れの実験的研究, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.83-89, 1983年3月.