

円形断面水路における高速蛇行流の数値解析

国土交通省近畿地方整備局 正会員 ○成田 良子
鳥取大学工学部 正会員 檜谷 治

鳥取大学 フェロー 道上 正規
鳥取大学大学院 学生員 梶川 勇樹

1.はじめに

現在、我が国ではダム下流域での河床位の低下や海岸侵食等の問題が発生しており、ダムに堆積する土砂を如何にして排砂するかということが重要な課題となっている。従来、排砂対策として、貯砂ダムを設けて浚渫・掘削を行い排砂する方法、あるいは排砂ゲートを用いてフラッシング排砂を行う方法等が採用されていたが、環境問題等の条件において有効な対策とは言い難く、より効果的な排砂施設が求められていた。そこで、近年河川環境への負担が比較的小さく、また既存ダムの再開発にも有効的な、バイパストンネルを用いた排砂方法が注目されている。しかし、バイパストンネル内では土砂の流下によるインバート部の磨耗侵食、蛇行が問題となっており、侵食メカニズムの解明が大きな課題となっている。そこで本研究では、将来的に磨耗の原因となる土粒子の挙動、および磨耗位置を予測するための足掛かりとして、数値解析によるトンネル内における流況の再現を目的とする。

2.実験および数値解析の概要

図-1 に実験水路の概形を、また表-1 に実験条件を示す。実験ではトンネル形状を再現するため、簡易的に水路内にアクリル板を設置し半円管とした。また、トンネル内の蛇行流を再現するため、図-1 に示すように上流部を半断面堰止め蛇行流を発生させ、水面形の計測を行なった。

本計算法¹⁾では、実用性を重視し、レイノルズ応力の評価に渦動粘性係数の θ -方程式モデルを採用している。また、座標系には計算アルゴリズムが比較的容易に考えられるデカルト座標系を採用し、これにより発生する境界問題を、複雑境界形状でも滑らかに境界条件を課すことのできる FAVOR 法²⁾を基礎式に導入し計算を行う。

FAVOR 法では境界上の流れにおいて、格子中に流体部分と境界部分とが混在すると考え、任意の格子で流体の占める体積率を V 、 i 方向に垂直な断面において流体の占める面積率を $A_{(i)}$ と定義する。図-2(a) に面積率の定義方向を示す。また、基礎方程式として(1)に連続式、(2)に運動方程式、(3)に 2 次元連続式を示す。ここに、 u_i は i 方向の速度成分、 $\varepsilon_{(ij)}$ は渦動粘性係数、 p は圧力である。さらに、 h は水深、上付横線は断面平均量を示しており、 S 、 L_x および L_y は、図-2(b) に示すように水面における格子を平面的にみた場合、その格子中の流体の占める面積率を S 、各軸に対して垂直なメッシュ幅において流体の占める線分率を L_x および L_y としている。これらの式を、従来より常射流混在場においてよく用いられている MacCormack 法により差分化し計算を行う。計算条件として、離散間隔 $\Delta t=0.002\text{sec}$ 、 $\Delta x=\Delta y=2.0\text{cm}$ 、 $\Delta z=0.5\text{cm}$ とし、境界条件として下流端で等流水深を与えた。

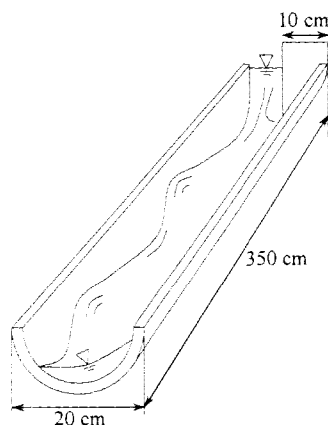


図-1 実験水路

表-1 実験条件

水路勾配 I	1/30
流量 Q (l/s)	6.15
水路幅 B (cm)	20.0
水路長 L (cm)	350.0
粗度係数 n	0.008

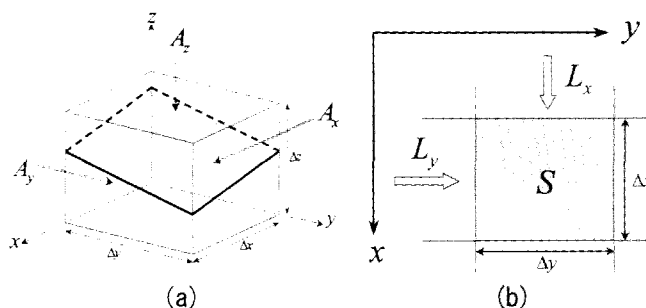


図-2 面積率および線分率の定義方向

【連続式】…(1)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} A_{(i)} u_i = 0$$

【運動方程式】…(2)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ A_{(j)} u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_{(ij)} \varepsilon_{(ij)} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\}$$

【2次元連続式】…(3)

$$\frac{\partial}{\partial t} (Sh) + \frac{\partial}{\partial x} (L_x \bar{u} h) + \frac{\partial}{\partial y} (L_y \bar{v} h) = 0$$

3. 計算結果および考察

計算では、まず実験と同条件において、矩形断面水路を対象とした流況計算を行なった。計算結果として、図-3 に矩形断面水路における(a)水面形コンター図、および水深平均流速による(b)平面流速ベクトル図を示す。図からも分かるように、矩形断面水路では上流側左岸より発生した衝撃波が反対側側壁に衝突を繰り返しながら流下し、明確な蛇行流が再現されている。次に、実験同様の半円形断面における計算結果を示す。図-4 は、図-3 同様、(a)水面形コンター図、および水深平均流速による(b)平面流速ベクトル図である。ここで、図-4(a)の水面形は水路中央部(最底面)からの高さである。図より、流れは円管流入後左岸方向に拡散し、その後は弱い蛇行を示しながら流下しているものの、矩形断面ほどの明確な蛇行形状を示していない。図-5(a)は円形断面水路における横断流速ベクトル図を、また図-5(b)は計算結果と実験結果による横断水面形比較図を示しており、上から順に流入部から下流方向 10cm, 30cm, 50cm の図である。これらの図より、計算では流れがトンネル内に流入した直後、左岸側壁に衝突した際に発生する水位上昇量が実験値よりも小さな値となっており、さらに水面変動の減衰が実験より早く生じていることが分かる。このことから、本計算では流入部左岸での水位上昇量が実験値よりも小さくなったことにより、それに起因する下降流および右岸方向への横断流速が実験値よりも小さく再現され、水面変動の減衰も早くなり、水路内で明確な蛇行流が形成されなかったものと考えられる。この流入部での水位上昇量が実験値より小さく評価された原因として、本計算モデルには河床の干上がり・水深の回復に日下部ら³⁾と同様の方法を導入しているが、円形断面では側壁部において常にこの干上がり・回復が発生しており、この現象をうまく再現できなかったことが原因であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、排砂バイパストンネルにおける土砂流下に伴うトンネル内部の磨耗侵食現象の予測を目的とし、その前段階として、3 次元数値解析による矩形断面および半円形断面水路における流況計算を行なった。それにより、矩形断面水路では上流側側壁部から発生する蛇行流を良好に再現できたが、円形断面水路ではその蛇行形状は小さく、今後よりモデルの改良が必要であると考えられる。

【参考文献】1) 梶川ら：急勾配蛇行水路における高速流の数値解析，第 54 回中支，pp.211-212，2002。 1) C. W. Hirt: Volume-fraction techniques: Powerful tools for wind engineering, Journal of Wind Engineering No.52, pp.333-344, 1992。 3) 日下部ら：急勾配拡幅部付近の跳水を伴う流況とそのシミュレーション，水工学論文集第 42 巻，pp.661-666，1998。

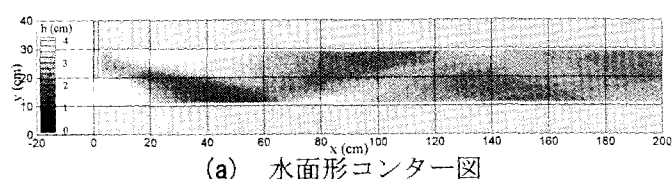


図-3 矩形断面水路における計算結果

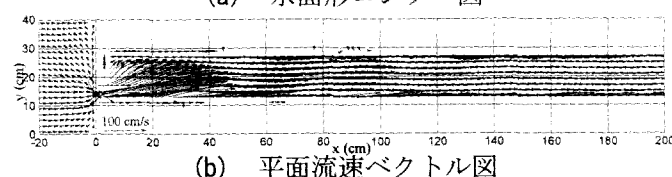
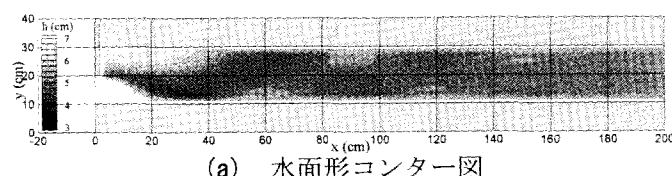


図-4 円形断面水路における計算結果図

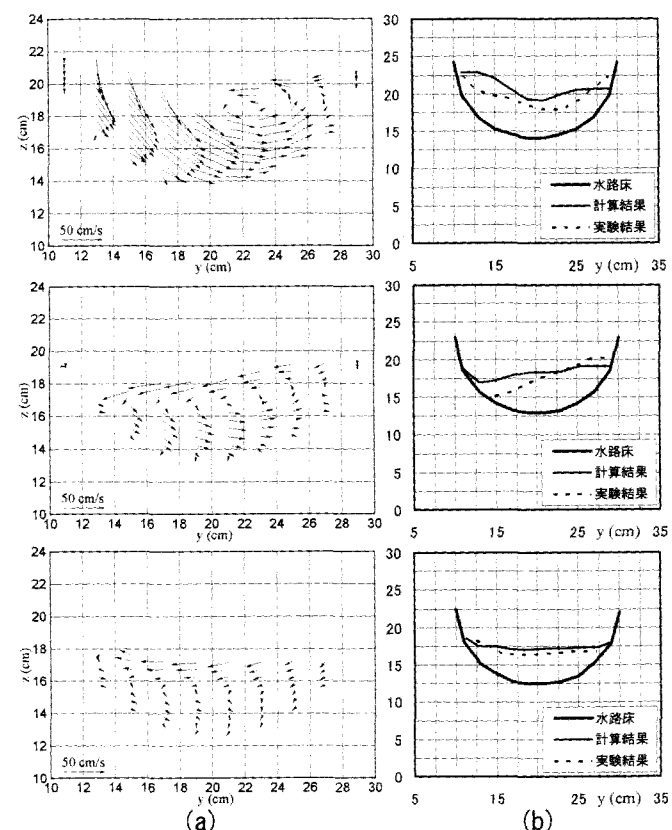


図-5 横断方向流速ベクトル図および水面形