

種々の水深積分モデルを用いた湾曲部三次元流れ機構と適切な解析法の考察

中央大学研究開発機構 正会員 ○内田 龍彦
フェロー 福岡 捷二

1. 目的

河道湾曲部に生じる遠心力二次流は、外岸沿いの高流速や局所洗掘問題にも直結するため、湾曲部の流れの三次元性の評価方法は古くから検討されてきた重要な課題である。しかし、河道湾曲流路に対して、三次元流れの発生機構やその適切な解析法については未解明な点が残されている。著者らは、これまで渦度方程式を用いた水深積分モデル(一般底面流速解析法)について、鉛直流速や圧力の静水圧成分、底面付近の非平衡粗面抵抗則などの評価法を検討し、局所流れに対する適用性を向上させてきた¹⁾。本研究では、平面二次元解析法～一般底面流速解析法までの種々の水深積分モデルを用いて湾曲流れに適用し、比較することで湾曲部の三次元流れ機構とその適切な解析法を明らかにすることを目的とする。

2. 解析方法と解析対象湾曲流れ

一般底面流速解析法は、底面の薄い渦層の上の三次元流れを解析するため、三次元 RANS 方程式から種々の積分操作によって導かれる方程式を連立して解く手法である。図-1に示すように、解く方程式は、RAされた連続式、運動方程式であり、いずれの式も少なくとも水深積分された方程式が解かれる。流れの三次元性を考慮するために、連続式は水深重積分、運動方程式は水面のものと渦度方程式に変換し、水深積分した水平方向渦度方程式が解かれる。なお、鉛直方向運動方程式については、水面のものや水深二重積分されたものも考えられるが、本研究では水深積分された方程式のみが用いられる。また、乱れエネルギーについては、局所平衡が仮定され、乱れエネルギーの輸送方程式を解かずしてゼロ方程式モデルが用いられている。これらの方程式は一般座標系に変換されて解かれる。

一般底面流速解析法では、図-1に示す方程式の全てが用いられるが、図-2に示すように、浅水流の仮定や流速鉛直分布の簡略化により、解くべき方程式を減らした解析法も可能である。本研究では、すべての方程式を解く一般底面流速解析法を GBVC3(3は三次多項式の鉛直流速分布を意味する)、浅水流の仮定を用いて鉛直方向流速の場所的变化を無視し、静水圧分布の仮定をするものを SBVC3、さらに水表面の運動方程式を解かずして流速鉛直分布から $u_{si} = U_{si} + \delta u_i/3$ ($\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$) で与える方法を SBVC2(二次多項式の鉛直流速分布)、渦度方程式を解かずして等流状態の鉛直流速分布を与える場合(二次元解析法)を 2DC と呼び、これらの解析結果を比較する。

図-2の解析法を Rozovskii による急湾曲水路を対象とした実験²⁾に適用する。実験は 3~4mm の細礫を用いて平坦河床に粗度を付けし、流量 $Q=12.3\text{ l/s}$ 、流入部水深 6.3cm の条件で行われた。詳細は文献²⁾を参照にされたい。解析では上流端に実験流量、下流端に水位を与え、底面粗度は相当粗度 $k_s=3.5\text{ mm}$ 、側壁粗度はマンギングの粗度係数 $n=0.010$ とした。

3. 湾曲部の三次元流れ機構と適切な解析法の検討

図-3に GBVC3, 2DC による解析結果と実験結果²⁾の水深平均流速ベクトルの分布の比較を示す。湾曲流入部においてはポテンシャル勾配の大きい内岸の流速が大きいが、

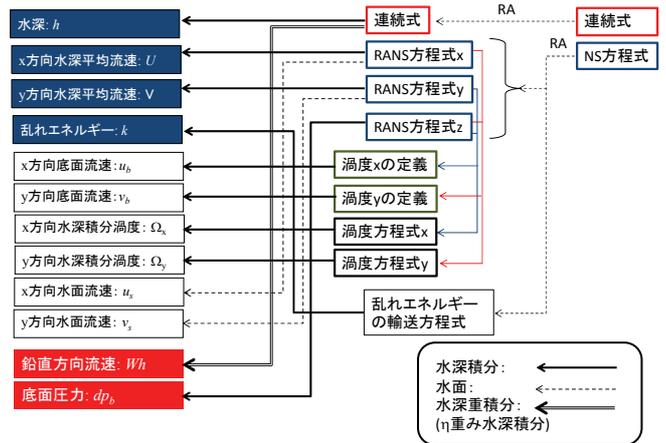


図-1 一般底面流速解析法の基礎方程式

解析法		未知量	基礎方程式	
GBVC3	SBVC3	2D C	h	DI 連続式
			U_i	DI 水平方向運動方程式
			δu_i	DI 水平方向渦度の定義式
			Ω_i	DI 水平方向渦度方程式
			u_{si}	水面の水平方向運動方程式
			W	水深重積分連続式
			dp_b	DI 鉛直方向運動方程式

DI : 水深積分

図-2 一般底面流速解析法に基づく種々の水深積分解析法に用いる基礎方程式

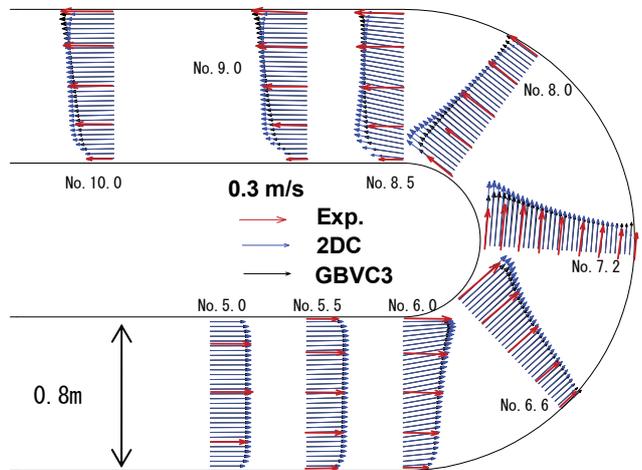


図-3 実験結果²⁾, GBVC3, 2DC 法の水深平均流速の比較

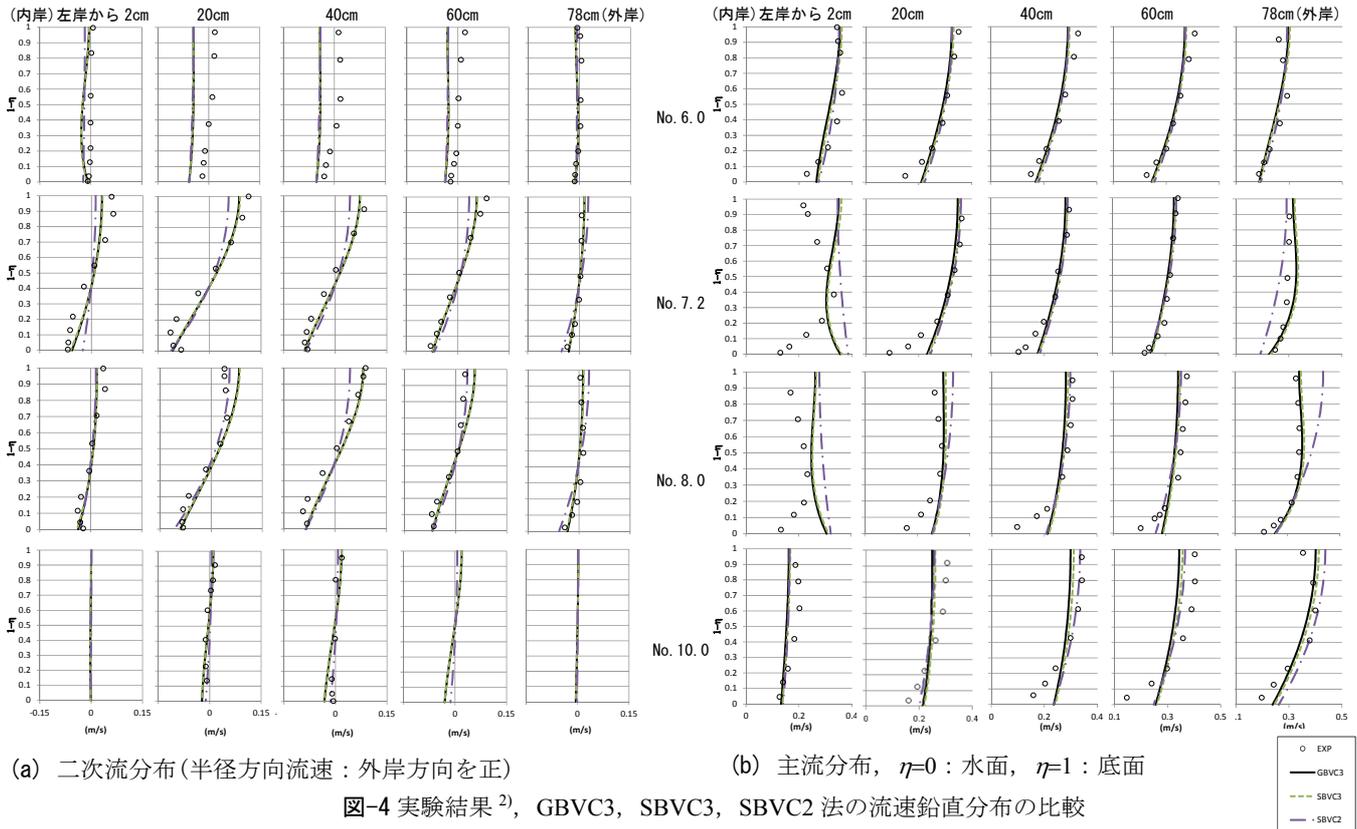


図-4 実験結果²⁾, GBVC3, SBVC3, SBVC2法の流速鉛直分布の比較

湾曲部の二次流による外岸方向への運動量輸送により、湾曲出口からは外岸の流速が大きくなっている。2DC 結果は、湾曲流入部における内岸の流速の増大は解析できているが、二次流が考慮できないために、内岸流速を過大評価し、湾曲出口における外岸の流速の増大を解析できない。GBVC3による解析結果は、No.8.0において内岸の流速が実験結果よりも大きく、No.8.5より下流では内岸際の流速が実験結果よりもやや小さいが、水深平均流速分布の平面分布の特徴をよく再現できている。図-4に主流速と二次流流速の鉛直分布について、実験結果²⁾と種々の解析法(GBVC3, SBVC3, SBVC2)の比較を示す。ここでは急湾曲水路における三次元流れ機構を検討するために、本条件において既往文献に示されたすべての計測断面の流速分布を示している。GBVC3による二次流の解析結果(a)は、湾曲部二次流が水路中央で強く、壁面付近で弱いことや、湾曲部下流の直線部で減衰する過程をよく説明できている。一方、GBVC3による主流速の解析結果(b)は、内岸近くの底面近傍の再現性が悪い。これは、本解析法では内岸の加速する流れを解析する場合、強い渦度成分が渦層に押し込められてしまい、底面から鉛直方向に渦度が滑らかに減少することを表現できないためである¹⁾。この問題に対しては、渦度方程式の底面境界条件である渦度の生産項の導出過程¹⁾に課題があると考えている。しかし、解析結果は湾曲部の二次流による主流速の変形の特徴を捉え、外岸近傍の流速分布は再現できていると言える。次に、浅水流の仮定を用い、鉛直方向流速の空間分布と圧力の非静水圧成分を無視したSBVC3とGBVC3法の解析結果を比較すると、いずれの断面においても、二次流と主流の鉛直分布の両解析結果はほぼ一致している。特に、壁面近傍における二次流の減衰においても、鉛直方向流速を無視した影響はほとんど見られなかった。このことから、局所三次元性の強い水衝部の馬蹄形渦の場合¹⁾と異なり、湾曲部二次流に与える壁面効果は渦度方程式の中で表現されており、鉛直方向流速の影響は極めて限定的であると言える。一方、SBVC2法の解析結果を見ると、水路中央の二次流強度がやや弱く、壁面付近の減衰が十分説明できていない。また、主流の流速鉛直分布においても外岸際の複雑な流速分布の変形が説明できていない。このことから、急湾曲水路における流速鉛直分布の変形を解くためには単調な二次の多項式の流速鉛直分布を用いたSBVC2法では十分でなく、水表面流速を解くなど流速鉛直分布の自由度と次数を上げることが必要である。

4. 結論

一般底面流速解析法は、内岸際近傍の加速する流れの主流速の流速鉛直分布の計算に課題を残すが、急湾曲水路における主流と二次流の鉛直方向分布を説明でき、二次流による水深平均流速の平面分布特性を再現できることを示した。急湾曲水路の流れの計算においては、壁面近傍であっても浅水流場の仮定の影響はほとんど見られず、静水圧分布を仮定し鉛直方向流速の場所的变化を無視するSBVC3で十分であるが、水面流速を解かず鉛直流速分布を二次曲線と与えるSBVC2では主流速分布の変形や二次流の発達・減衰を再現できないことを明らかにした。

参考文献: 1) 内田・福岡, 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1, 搭載決定. 2) Rozovskii, I. L. 1961. Flow of Water in Bends of Open Channels, Academy of Sciences of the Ukrainian S.S.R., The Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.