

# 水没水制群を有する流れにおける底面流速の半直接解法と河床変動解析

中央大学研究開発機構  
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

水制工の設置は、河道内の流れと河床変動を変化させるため、その上下流に新たな水衝部などを生じさせる問題が指摘されている<sup>1)</sup>。このため、水制工を設置する際には、水制周辺の局所的な変化だけでなく、水制による河道スケールの流れと河床形状の変化を明らかにする必要がある。しかし、水制近傍の流速鉛直構造を解析できる三次元解析は計算負荷が著しく大きく、大きな時間・空間スケールの解析が求められる洪水流への適用は限られる。著者ら<sup>2)</sup>は、水深積分された水平方向渦度方程式と水表面流速の方程式を解くことで、流速、圧力の鉛直分布を直接使いずに底面流速が評価できる解析法を検討している。本研究では、この手法を水没水制群を有する流れと河床変動解析に応用し、移動床実験<sup>3)</sup>と比較、検証する。

## 2. 解析方法

河川流などの浅い開水路流においては、水表面流速の方程式と水深積分渦度方程式を解くことによって、底面流速を半直接的に評価できる。図-1に渦度を用いた底面流速の半直接解法<sup>2)</sup>を示す。基礎方程式系は、底面流速を評価する水深積分渦度と水表面流速の方程式と、水深積分渦度の輸送等々を評価するための水深平均流速場の方程式で構成される。構造物周辺では流速鉛直分布が場所ごとに異なることから、乱れの非平衡性を考慮するために、乱れエネルギーの輸送方程式が解かれる。詳細は文献<sup>2)</sup>を参考にされたい。

水没水制群を有する流れに底面流速の半直接解法を応用する場合は、水没水制が流れに与える影響を基礎方程式系の中で適切に評価する必要がある。図-2に水没水制の評価法を示す。水没水制群は、直接的には河床高(厳密には、河床変動計算においてそれ以上低下しない最低河床高)として考慮される。しかし、水深積分の運動方程式は静水圧分布を仮定しており、水没水制の形状抵抗は考慮されていない。本研究では、従来の水深積分モデルにおける水没粗度<sup>1)</sup>と同様に前面で流体力項を付加する。具体的には、流体力項は、図-2に示す水制高さまでの接近流速 $u_a$ による圧力上昇 $dp$ を抗力係数 $C_D=1.0$ で評価する。また、水没水制の前面では接近流速の持つ渦度の伸長に加え、図-2に示すように底面付近の強い渦度が鉛直壁を乗り越えられないことによって、渦度強度が増加する。そこで、水没粗度前面の格子から水没粗度上への渦度の移流は水没水制高 $z_g$ より上で考え、水面から水没粗度高さまでの渦度の平均値を渦度の移流フラックスに用いる。一方、水制背面においては剥離によって渦度が供給される。この渦度の供給は、河床急変部と同様の方法<sup>2)</sup>で計算する。

河床変動解析には、流砂の連続式、平衡流砂量式(芦田・道上式)を用いる。限界掃流力、掃流力及び流砂量方向は斜面勾配の影響を考慮し<sup>1)</sup>、水中安息角以上の斜面が形成されると瞬時にスライドが生じるとしている。また、水面形の時間変化が一致するように、底面粗度係数 $n$ 、流砂量の係数を与える。具体的には、図-3の縦断図より、まず初期水面形に合うように底面粗度係数 $n$ (0.017)を定める。次に、水面形の全体的な時間変化に合うように流砂量式の係数(17→9)を修正している。

## 3. 解析結果と考察

図-3に実験値<sup>3)</sup>と計算値の縦断水面形、河床形状の時間変化の比較を示す。縦断水面形・河床形状及びそれらの時間変化の解析結果は概ね実験結果と一致しており、解析では水路全体の流れの抵抗と流砂量について実験結果を再現できていると言える。図-4は30時間の水路全体の河床変動である。主流域に流れが集中し加速するため、掃流力が大きくなり、河床高が低下している。水制群上流端では、上流端水制による水撥ね効果で、5m程度の範囲で対岸の河床が洗掘している。水制設置区間の中流から下流部にかけて、主流

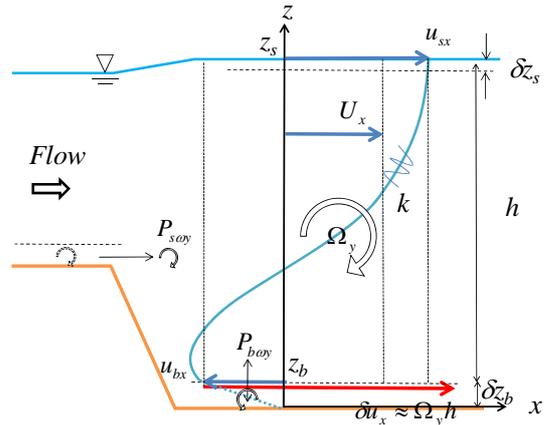


図-1 渦度を用いた河床面流速の半直接解法<sup>2)</sup>

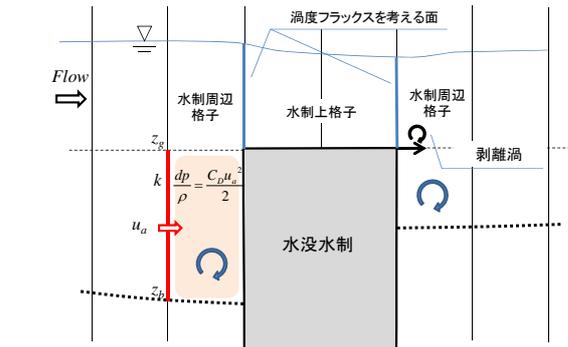


図-2 水没水制の評価方法

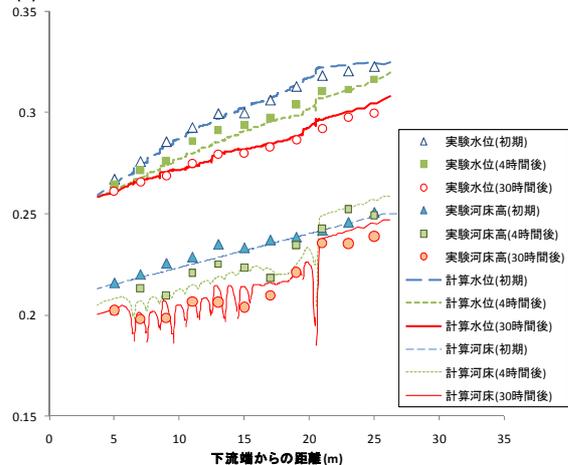


図-3 縦断水面形、河床形状の時間変化の比較

キーワード 局所洗掘, 水没水制群, 底面流速, 渦度, 水深積分モデル, 水表面流速

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31208 中央大学研究開発機, TEL 03-3817-1617

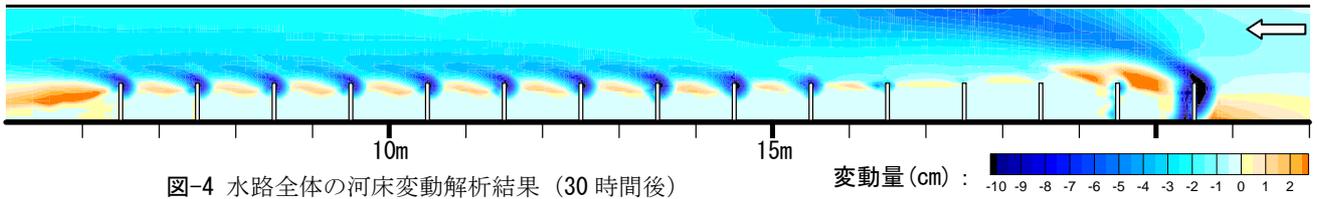


図-4 水路全体の河床変動解析結果 (30 時間後)

変動量 (cm) : -10 -9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2

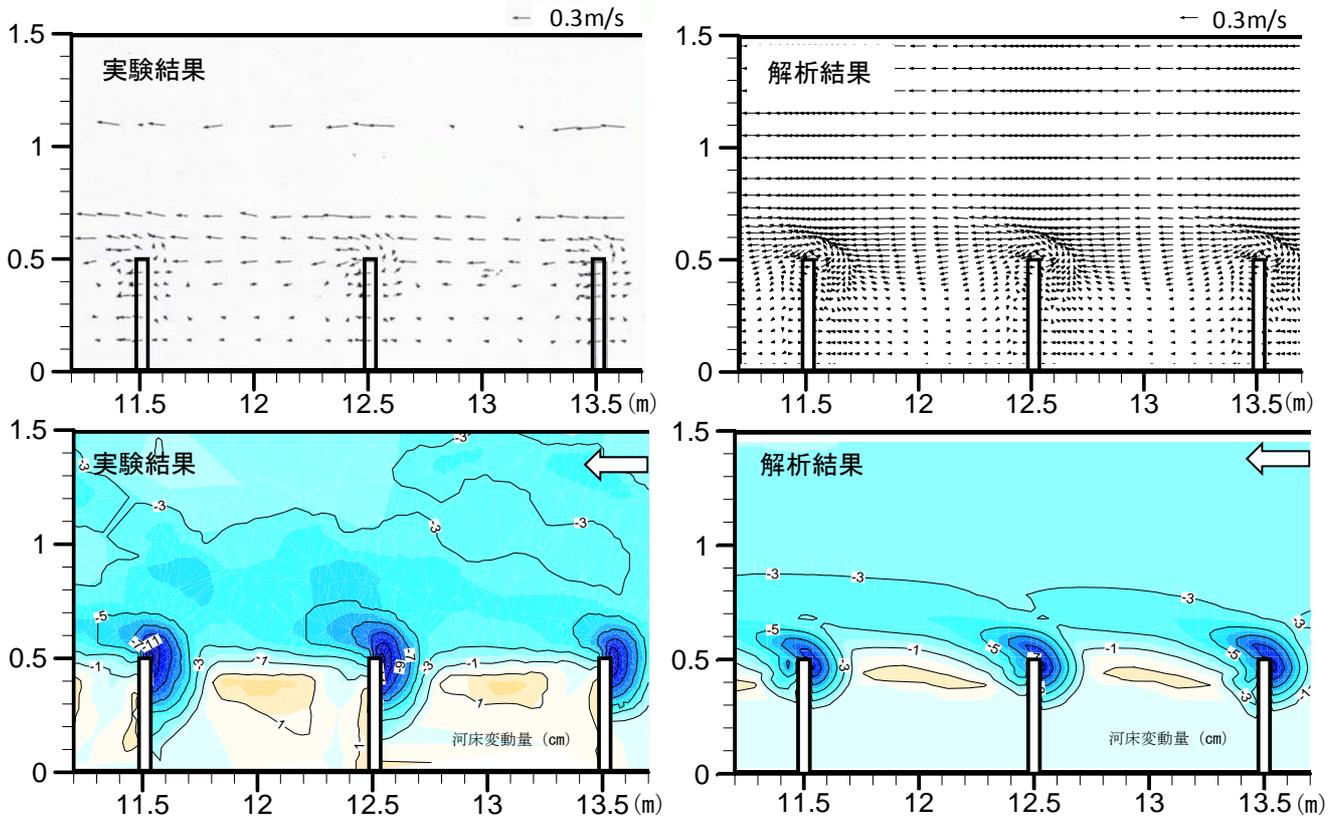


図-5 水制群内の底面流速分布 (上) と河床変動 (下) の比較 (30 時間後)

域の水制側の河床が縦断的に低下するとともに、水制前面で局所洗掘、背後で堆積が生じる。図-5 は、通水 30 時間後における、水制群内の底面流速分布 (上) と河床変動 (下) の実験結果<sup>3)</sup> と解析結果の比較である。水没水制前面では、前述のように横断方向の渦度が発達し、逆流が生じる。特に水制先端部では、接近流速が大きいため、渦度の供給量と渦の伸長作用が大きく、強い逆流領域が発生する。この流れによって、水制先端部は洗掘される。また、水制背後では水制域に巻き込む流れが発生し、土砂を堆積させる。底面流速の解析結果を見ると、水没水制前面の逆流を伴う複雑な実験結果の底面流速場を再現していることが分かる。また、水制背後で剥離によって逆流し、水制間の底面流速が低減される点も説明できている。河床変動解析結果を見ると、前面の局所洗掘解析結果は、実験結果と比べると水制域方向へあまり発達せず、洗掘域がやや小さい。このことが、解析の堆積域が実験結果より小さい理由と考えられる。これは、解析では掃流砂を対象としており、逆流による土砂の巻き上げ効果が考慮できていないためと考えられる。しかし、解析結果は主流域の水制側の縦断的な河床低下、水制先端の局所洗掘、水制背後の土砂堆積など水没水制群の周りに生じる特徴的な河床形状を説明できている。図-6 は局所洗掘深の縦断変化の比較である。上流端水制は、他に比べて洗掘が著しい。一方、その下流では、図-4 に示したように上流端水制の水撥ね効果により、対岸側に水みちができるために、上流部 5m 程度の区間において水制先端の洗掘が小さくなり、その下流ではほぼ一定の洗掘となっている。解析結果は実験結果に比べると、上流端以外の上流部の洗掘深が小さいが、実験の水制先端の洗掘深の縦断形の特徴を説明できている。

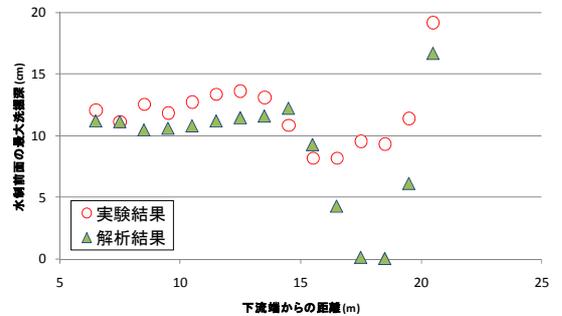


図-6 最大洗掘深の縦断分布の比較 (30 時間後)

#### 4. 結論

本研究では、水没水制群を有する流れにおける底面流速の半直接解法と河床変動解析法を構築した。解析結果は、水路全体の河床変動特性、水制近傍の底面流速場流れと局所洗掘と堆積、及びその縦断変化について実験結果を再現できることを示した。

参考文献：1) 福岡捷二，洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。2) 内田・福岡，水工学論文集，第 54 巻，pp. 841-846，2010。3) 福岡ら，水工学論文集，第 42 巻，pp. 997-1002，1998。