

床止め工下流部の局所洗掘の 数値解析モデルの開発

内田龍彦¹・福岡捷二²・渡邊明英³

¹正会員 博(工) 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

³正会員 博(工) 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

床止め工などの河道横断構造物の直下流部に生じる河床洗掘は構造物の安定性を低下させるだけでなく、付近の護岸工や堤防の破壊を引き起こす原因となり得る。このため、床止め工下流には一般に護床工が設置される。しかし、構造物の下流端となる護床工下流では、床止め工下流と同様に河床洗掘が生じるため、構造物下流の洗掘を防ぐ抜本的な解決法が求められている。本研究では、構造物の下流端で生じる河床低下、洗掘を設計論的に許容することで、下流河床に柔軟に対応しつつ、洗掘孔内の流体混合により洗掘力を軽減させる工法に着目した。このために、床止め工下流の流れや局所洗掘を見積もれる数値解析モデルを検討している。そして、設計に洗掘孔を適切に活用することにより構造物下流の流況が改善されることを示し、床止め工下流の河床洗掘の防護方法を提案している。

Key Words: *ground sill, local scour, vertical two-dimensional model, bed protection work, submerged jet, non-equilibrium sediment transport, countermeasure*

1. 序論

床止め工などの河道横断構造物の直下流部に生じる河床洗掘は、構造物の安定性を低下させるだけでなく、時には付近の護岸工や堤防の欠壊を引き起こす原因となることがある。このため、一般的な床止め工は床止め工本体に水叩き工が付随し、その下流に護床工が設置される構造をもつ。しかし、護床工直下流でも同様に河床洗掘が生じる¹⁾²⁾。また、上流からの土砂供給量の低下などにより、下流河床高が低下すると、新たな水叩き部が下流端に生じることになる。このように護床工下流端では床止め工下流と同様に洗掘が生じるが多く、構造物下流端の洗掘に対する抜本的な解決法が求められている。

設計論として下流端処理を確立するためには、第一に、水理構造物下流の洗掘孔内の流れや洗掘深を明らかにする必要がある。水理構造物下流の河床洗掘は噴流形式によって起こり、噴流の形態によって洗掘過程が異なる。構造物前後で大きな水頭差をもつダムや水門下流を対象とした研究では、水平噴流³⁾や跳水に伴う渦による局所洗掘⁴⁾などがある。本論文では、構造物下流端処理として、護床工や床止め工など落差が小さい構造物を考える。道上・鈴木ら⁵⁾は床止め工下流の洗掘過程を検討し、これを表現する数値解析法を検討している。しかし、床止め工を越流する流れの条件などには実験式が適用されて

おり、適用範囲には問題がある。川島・福岡⁶⁾は平面二次元解析を用いた床止め工下流の河床変動計算法を提案しているが、鉛直方向の流れの変化が考慮できないため、局所洗掘を表現するには不十分である。水理構造物を越流する流れは急変流となり、流線の曲率に支配されることが多いことから、福岡・福岡⁷⁾はポテンシャル理論を応用し、水理構造物周辺の流れと圧力場を理論的に検討している。近年では、このような急変流れを計算できる数値解析モデル⁸⁾が提案されているが、局所洗掘を扱うには至っていない。

構造物の下流は必ず河床低下、洗掘が生じることを考えると、洗掘を抑制しようとする替わりに、洗掘孔を利用し、流況を改善すると考える方が自然な発想かもしれない。落差が小さい構造物の下流では、設計論的に河床洗掘を構造物の基礎を脅かさない程度に許容することが可能と考えられる。このためには、下流河床高に洗掘孔が柔軟に対応しつつ、洗掘孔内の流体混合により洗掘力を軽減させることにより、構造物の下流端の洗掘問題が改善できる可能性がある。著者ら⁹⁾は、河床低下、洗掘を見込んだ構造が護床工ブロックに作用する流体力を軽減し、河床洗掘を軽減できる工法の一つとなり得る可能性を示している。

本研究では、落差の小さい床止め工を想定し、第一に床止め工下流の流れと局所洗掘現象を計算できる鉛直二

次元数値解析モデルを構築する。著者ら¹⁰⁾は洗掘孔を有する床止め工直下流の流れを表現できる解析法を示している。しかし、潜り噴流の流れを表現するために導入した移流断面の評価方法は、河床形状も含めた境界急変部の一般的な解析法とするには検討が不十分であった。また、移動床では、河床変動に伴って鉛直方向の流速分布特性が場所的、時間的に大きく変化するため、河床変動解析において、底面せん断力で渦動粘性係数を決める0方程式モデルは不十分であると考えられる。本論文では、上述の点について改良し、床止め工下流の局所洗掘解析の解析結果を合わせて考察している。次に、このモデルを用い、局所洗掘孔を見込むことによる構造物の下流の流況改善効果と洗掘孔の防護方法を検討し、新しい洗掘対策法について論じている。

2. 解析手法

解析法の枠組みは既報¹⁰⁾と同様であるのでここでは、要点のみを示す。床止め工下流の変動を伴う河床および水面の境界形状を取り込むため、基礎方程式には物理成分表示の σ 座標系を導入している。

(1) 基礎方程式

図-1に σ 座標系の計算格子と諸量の定義を示す。 σ 座標系では、共変 ξ 軸方向は任意であるが、共変 σ 軸は z 軸に一致するように定義される。逆変換のマトリクスは、一般座標系では反変軸上の物理長さをを用いて表される¹¹⁾が、本 σ 座標系では、 ξ 方向の反変軸、 σ 方向の共変軸(z 軸)の物理長さ($d\xi, dz$)を用いて無次元化し、式(1)のように表すこととする。

$$\begin{pmatrix} \tilde{\xi}_x & 0 \\ \tilde{\sigma}_x & \tilde{\sigma}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d\xi \cdot \xi_x & 0 \\ dz \cdot \sigma_x & dz \cdot \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \phi & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{pmatrix} \xi_x & 0 \\ \sigma_x & \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{1}{x_\xi z_\sigma} \begin{pmatrix} z_\sigma & 0 \\ -z_\xi & x_\xi \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} d\xi \\ dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |x_\xi| \\ |z_\sigma| \end{pmatrix}$$

である。 ϕ は x 軸と共変 ξ 軸の間の角度で反時計回りを正とする。添え字は偏微分、上付きの \sim は物理成分を示す。また、($d\xi, dz$)は、図-1に示すように、それぞれ σ 座標系の反変 ξ 軸方向、共変 z 軸方向の格子距離と定義される。流速ベクトルの σ 座標系と(x, z)座標系との変換は式(2)で表される。

$$\begin{pmatrix} \tilde{U} \\ \tilde{W} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \phi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix} \quad (2)$$

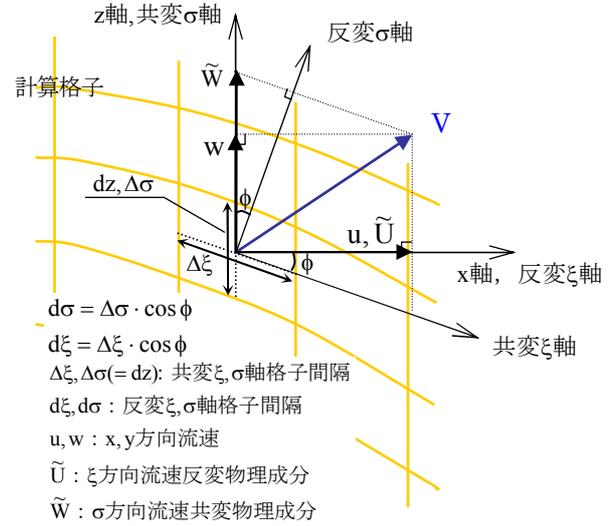


図-1 σ 座標系の計算格子と諸量の定義

鉛直方向のグリッドの移動速度 w_g を考慮に入れ、これらの変換則に従って鉛直二次元場の流れの基礎方程式を変換すると、式(3)~(5)の σ 座標系の流れの基礎方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial u}{\partial \tilde{\xi}} + (\tilde{W} - w_g) \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial \tilde{\xi}} - \tan \phi \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{1}{d\xi dz} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} (dz \tilde{\tau}_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (d\xi \tilde{\tau}_{\xi\sigma}) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial w}{\partial \tilde{\xi}} + (\tilde{W} - w_g) \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{d\xi dz} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} (dz \tilde{\tau}_{z\xi}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (d\xi \tilde{\tau}_{z\sigma}) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} (dz \tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (d\xi \tilde{W}) = 0 \quad (5)$$

ここで、

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} = \frac{\partial}{d\xi \cdot \partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{dz \cdot \partial \sigma}$$

である。応力テンソルの添え字は応力の作用面と作用方向を表し、それぞれ次式で表される。

$$\tilde{\tau}_{\xi\xi} = 2\nu_t \left[\frac{\partial u}{\partial \tilde{\xi}} - \tan \phi \frac{\partial u}{\partial z} \right]$$

$$\tilde{\tau}_{\xi\sigma} = -\tan \phi \tilde{\tau}_{\xi\xi} + \tilde{\tau}_{z\xi}$$

$$\tilde{\tau}_{z\xi} = \nu_t \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial \tilde{\xi}} - \tan \phi \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

$$\tilde{\tau}_{z\sigma} = \nu_t \left[\frac{\partial \tilde{W}}{\partial z} - \tan \phi \frac{\partial w}{\partial \tilde{\xi}} + \frac{1}{\cos^2 \phi} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + u \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right]$$

水理構造物を越流する流れを扱う場合は乱流モデルが重要とならない場合が多い^{7),8),10)}が、河床変動解析を行う場合、流体混合や河床付近の剥離など乱れエネルギー分布を考慮する必要がある。渦動粘性係数の計算には

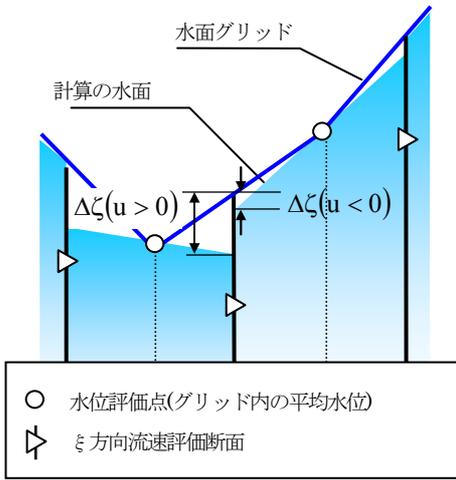


図-2 計算の水面形状の定義

式(6)に示すスマゴリンスキーモデルを採用する。

$$v_i = (C_s \Delta)^2 \cdot |\bar{S}| \quad (6)$$

ここで、

$$\Delta = \sqrt{d\xi \cdot dz}$$

$$|\bar{S}| = \left(2\tilde{S}_{\xi\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + 2\tilde{S}_{\xi z} \frac{\partial u}{\partial z} + 2\tilde{S}_{z\xi} \frac{\partial w}{\partial \xi} + 2\tilde{S}_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tilde{\tau}_{ij} = 2\nu_i \tilde{S}_{ij}$$

と定義される。また、 $C_s=0.2$ としている。

基礎方程式はスタガード格子を用いて、差分により計算している。計算グリッドは水面と河床面に沿って作成し、構造物の壁面境界で不透過の条件が直接考慮できるように流速評価断面を設けている($d\xi=0.025\text{m}$, 水深 15 分割(床止め工上は 5 分割))。ξ 方向移流項は三次精度の風上差分法、他の項は二次精度の中央差分で計算する。圧力は HSMAC 法による繰り返し計算で求めている。

(2) 境界条件

水位ζは水深積分した連続式(7)で表し、水面の鉛直方向流速は式(8)の運動学的境界条件で与える。

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \int_0^h \tilde{U} dz + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \quad (8)$$

水位ζは繰り返し計算で式(7)を用いて更新する。計算グリッドは水面と河床の移動に伴い再構築し、グリッド移動速度 w_g を計算する。

水面付近の流れの解析法について示す。潜り噴流状態では、床止め工直下の水面で流れが剥離し、水面の曲率が急変する。このような箇所では、水面に沿った計算グ

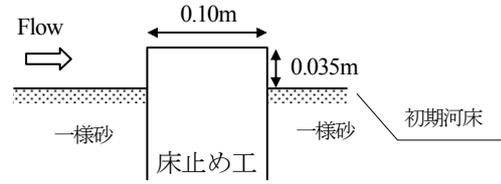


図-3 床止め工の設置状況

表-1 実験条件

水路長	8.0 m
水路幅	0.30 m
初期河床勾配	1/166.7
実験流量	0.0072 m ³ /s
下流端水深	0.054 m
河床砂の平均粒径	0.8 mm

リッドで水面付近の移流を精度よく評価することが困難である。そこで、図-2のように計算の水面形を平均水面勾配の直線分布で表し、FAVOR法^{8),12)}と同様の考え方で、流体の通過可能な断面積を考慮する。ξ方向の流体輸送に関する項では $dz' = dz + \Delta\zeta$ の鉛直断面を用い、流体の体積に関する項ではコントロールボリューム内の dz' の平均値を用いている。スタガード格子では、図-2に示すようにξ方向流速評価断面で計算の水面形が不連続となる。そこで、上流側の流体がこの断面を通過すると考えて、図-2のように流速の正負により、上流側の水位を用いて $\Delta\zeta$ を求めることとしている。以上の方法は、河床面境界においても同様に適用されるが、河床面を流体は通過しないと考え、ξ方向流速評価断面の河床高は高い方を用いる。

流れの計算は実験水路(表-1)の全範囲で行っている。上下流端の境界条件として、水路の上流端で水深方向の流速分布の相似性を仮定して流量を与え、水路の下流端で実験水位を与えている。河床面と構造物上面の壁面せん断力は対数則で与える。構造物の鉛直壁面の境界条件は Slip 条件を与えている。

(3) 実験

図-3は実験に用いた二次元床止め工で水路の上流端から2.05mの断面に設置した。実験条件を表-1に示す。床止め工上流の河床洗掘を想定し、あらかじめ床止め工上面の高さは初期河床高から0.035m高く設置している。本研究で重要視する潜り噴流状態では、床止め工直下流の砂の輸送量と河床洗掘量が他の区間に比べて遥かに大きい。床止め工直下の局所洗掘は静的洗掘現象として扱える。そこで、床止め工上流部では限界掃流力以下とする事実上の固定床として扱い、下流の河床洗掘は静的洗掘の条件で実験を行っている。

床止め工直下の河床孔が十分発達し、波状跳水和潜り噴流状態が繰り返されるようになり、それぞれの流れの

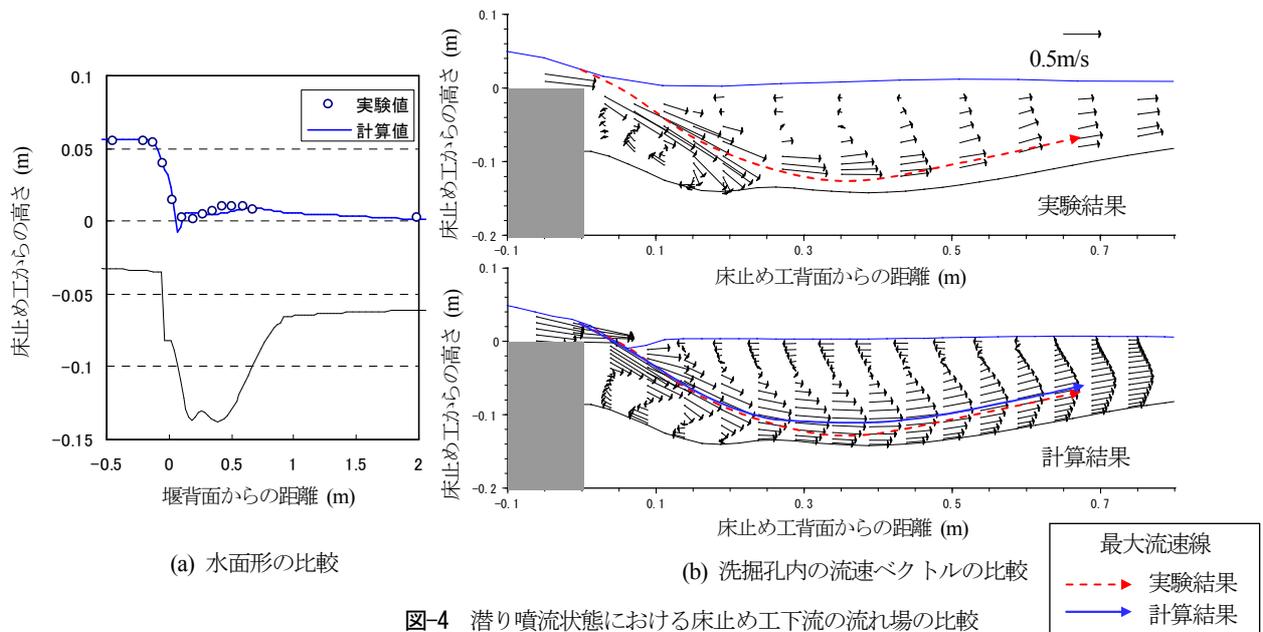


図-4 潜り噴流状態における床止め工下流の流れ場の比較

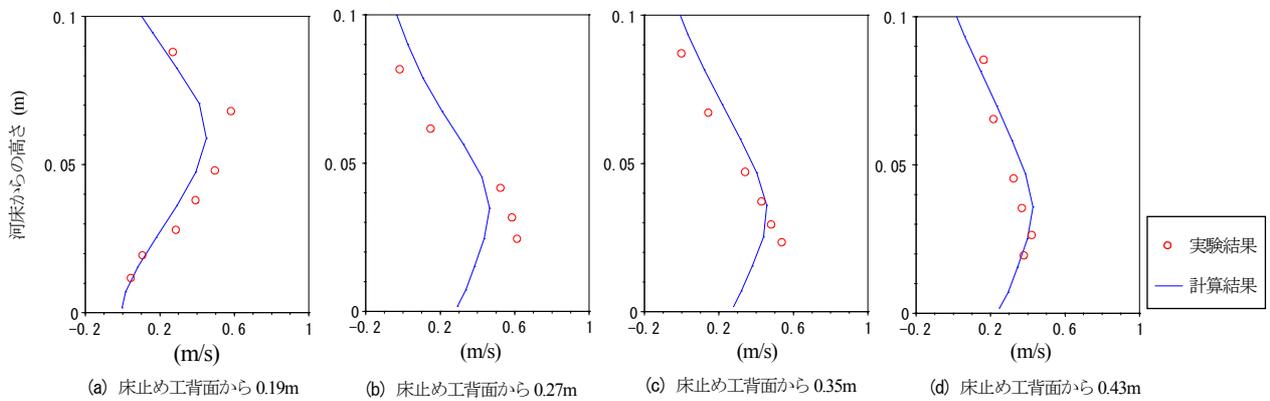


図-5 潜り噴流状態における水叩き部付近の流下方向流速の鉛直分布の比較

状態で生じる河床変動が時間的にあまり変化しなくなる(本実験では通水後 2 時間)まで通水を行った後、流れと洗掘孔の発達過程の様子をビデオ撮影により記録した。そして、河床形状を維持しやすい波状跳水状態において通水を止め、河床形状を硬化剤で固め、移動床実験と同じ水理条件で潜り噴流状態(図-4)と波状跳水状態(図-6)における洗掘孔内の横断平均の流れ場について計測している。なお、流速測定には KENEK 社の電磁流速計を用いている。

3. 床止め工直下の洗掘孔内の流況解析

局所洗掘解析に先立ち、洗掘孔内に生じる波状跳水状態と潜り噴流状態の二つの流れが解析モデルで再現できるかを検討する。

同一の水理条件で起こる異なる二つの流れ場を計算するためには、対象とする流れ場に適した初期状態と計算方法が必要となる。波状跳水状態の計算では、下流端水

深が十分大きい状態で計算をはじめ、流れ場がある程度発達した後、下流端水深を徐々に実験水深まで下げている。潜り噴流状態の計算では、堰下流の水深が小さい状態で計算を行い、潜り噴流状態が形成された後、実験水深まで水深を上げている。波状跳水状態と潜り噴流状態の計算における最終的な水理条件は同じとなるように設定している。

図-4 は潜り噴流状態における縦断水面形と洗掘孔内の流速ベクトル、図-5 は水叩き部付近の鉛直流速分布における実験値と計算値の比較である。図-4 (b)には、実験結果と計算結果の最大流速線を示し、計算ベクトル図には比較のため実験の最大流速線も合わせて示している。潜り噴流状態では、床止め工を越流する流れの慣性力によって、河床付近まで運動量が輸送され、床止め工直下で水叩き部となる。床止め工の下流では河床に沿って流れ、水面付近に逆流域が生じる。最大流速線は曲率をもち、せん断力の縦断勾配が大きくなり、河床形状は短時間に大きく変形する。計算結果はこのような潜り噴流状態の流れの特徴について説明できているが、計算結果の

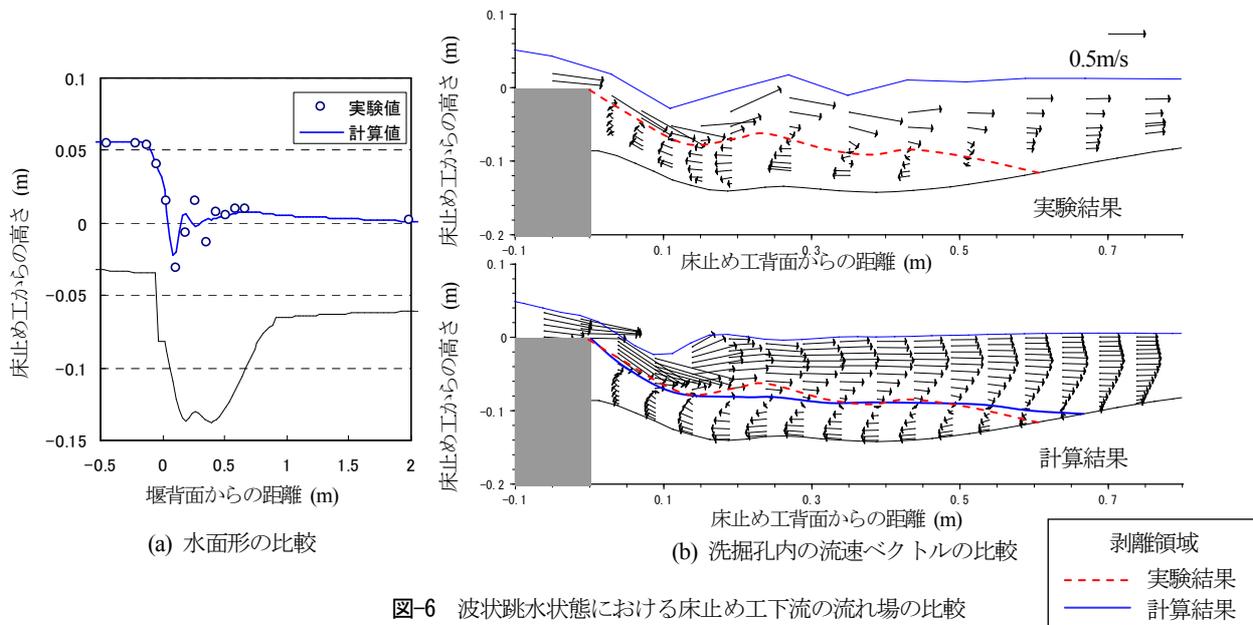


図-6 波状跳水状態における床止め工下流の流れ場の比較

最大流速線は実験結果に比べて水叩き部で河床から離れた位置を通り、曲率が小さくなっている。このため、図-5(c)に示すように水叩き部の河床近傍流速が小さく、流速分布の縦断変化が小さい。これは、図-4に示すように計算結果では水面の剥離点付近において噴流方向に対してやや上向きに流れが生じている点など、計算グリッドを横切る噴流を十分に評価できていないためと考えられる。また、水面の剥離点付近から供給される空気の混入が考慮されていないことも噴流の流速分布が鈍くなった原因のひとつとして挙げられる。これらの流れの計算精度が局所洗掘解析に及ぼす影響については4章で考察する。

図-6は波状跳水状態における縦断水面形と洗掘孔内の流れの実験値と計算値の比較である。図-6(b)には、実験結果と計算結果の剥離領域を示している。波状跳水状態では、河床付近まで運動量が輸送される前に、河床付近の圧力が上昇し流れが上向きに曲げられる。この結果、床止め工下流では水面に沿う流れとなり、床止め工背後の剥離領域は大きくなる。計算結果は水面付近の再現性があまりよくない。波状跳水状態では、潜り噴流状態と共存する水理条件に近い場合、水面が不安定となる。このような条件では、解析モデルは、図-6に示すように水面付近の流れが減速され、小さい波状水面形状が形成されて安定するようである。これは2章で示した水面境界の評価方法や σ 座標系導入に伴う数値粘性などが原因と考えられる。このため、計算結果は水面形の影響を強く受ける床止め工直下の逆流域の形が再現できていない。しかし、流れの再付着点を含めた下流の逆流域の形状や、最付着点から逆流の強さが上流に向かって大きくなり、0.2mの断面付近から小さくなる実験結果の傾向を概ね再現していると言える。

以上のことから、構築した解析モデルは波状跳水状態と潜り噴流状態のそれぞれの移行限界と共存領域が存在でき、また計算上同一の水理条件で両者が起こり得ることを確かめることができた。さらに両者の河床付近の流速分布特性を再現可能であることが示された。

4. 床止め工直下の局所洗掘解析

波状跳水状態と潜り噴流状態が繰り返される床止め工直下の局所洗掘現象を解析するためには、砂の輸送量が多く、洗掘形状を決定付ける潜り噴流状態の局所洗掘過程を表すことが重要である。また、潜り噴流状態は、河床付近で高速流が生じることとそれによって河床が洗掘されることにより、構造物や周辺河岸、および堤防の被害を生じさせる危険性が高いと考えられる。実験条件では、潜り噴流の発生条件は、波状跳水状態の洗掘孔の埋め戻しと洗掘孔下流の河床低下によって生じる。これに加えて、河川では、床止め工上流の水位の上昇、下流水位の低下、上流からの土砂供給による洗掘孔の埋め戻しなどによって、床止め工下流で潜り噴流状態の流れが発生する危険性がある。このため、構造物下流で河床洗掘を許容する場合、洪水時に潜り噴流状態の流れが生じることを想定し、最大洗掘深とその発生位置を見積もり、それによって構造物の基礎が脅かされないように十分な根入れ深さを設ける必要がある。ここでは、潜り噴流状態で生じる局所洗掘、堆積域の発達、これらが波状跳水への移行に伴って減衰する過程を表す河床変動解析法を検討する。

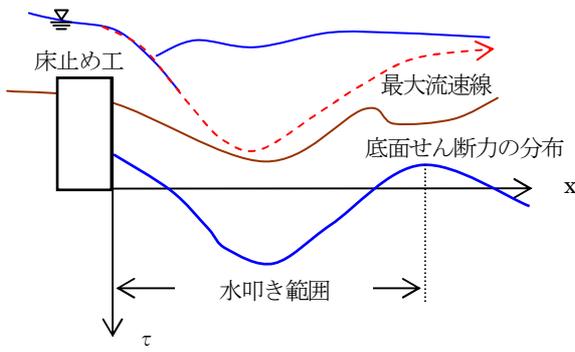


図-7 噴流状態の流れの水叩き範囲の設定

(1) 解析方法

平衡流砂量の算定には、斜面上の限界掃流力と重力による付加掃流力を考慮し¹³⁾、芦田・道上式を用いている。流砂の連続式から求まる河床変動速度を河床面の計算グリッドの移動速度とし、流れの計算と連立させている。限界角以上の勾配をもつ斜面が形成された場合は、砂面が崩落し、限界角の斜面が瞬時に形成されるとしている¹⁴⁾。床止め工下流の局所洗掘解析法を検討するために、平衡流砂量を用いる場合(Run EQ)と非平衡流砂量式を用いる場合(Run NE)を比較し、検討する。非平衡流砂量式には福岡・山坂¹³⁾の式(9)を用いる。

$$\frac{\partial q_B}{\partial \xi} = \kappa_B (q_{Be} - q_B) \quad (9)$$

ここで、 q_B ：非平衡流砂量、 q_{Be} ：平衡流砂量である。非平衡パラメータ κ_B は式(10)で与えている^{6),15)}。

$$\kappa_B = \frac{C}{\tau_*} \left(\frac{sg}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

ここで、 s ：砂の水中比重である。 κ_B は砂粒子の移動距離 L の逆数に相当することから、 $d \cdot \kappa_B = 1/50 \sim 1/150$ となるように $C = 5.0 \cdot 10^{-5}$ を与える。

解析の初期条件($t=0$)は、実験の河床形状で計算した潜り噴流状態の流れ場(図-4)を与える。局所洗掘解析法について述べる。計算では、水叩き部の土砂の輸送量が少なく、潜り噴流時の局所洗掘の発達速度が実験に比べてかなり遅い(実験の $t_s=30$ (s)程度に対して、図-8~11の計算では $t_s=8.5 \times 10^2$ (s)； t_s は潜り噴流状態の洗掘孔発達過程の継続時間)。このため、本解析モデルで床止め工下流の全範囲で計算すると、潜り噴流時に洗掘孔下流の河床が低下する問題があった。これを解決するためには、3章で述べたような流れの計算精度の他に、水叩き部の激しい流体混合による土砂の輸送能力の増大を考慮できる流砂量式の開発が必要であるが、現状では流砂量を普遍的に表すことは難しい。潜り噴流状態の局所洗掘現象では継続時間は短いことから、工学的には潜り噴流状態の洗掘の進行速度よりも最大洗掘深やそのときの河床形状が重要である。このため、局所洗掘解析においては洗掘孔の下流の水力条件を一定と見なし、水叩き部の砂の輸送の

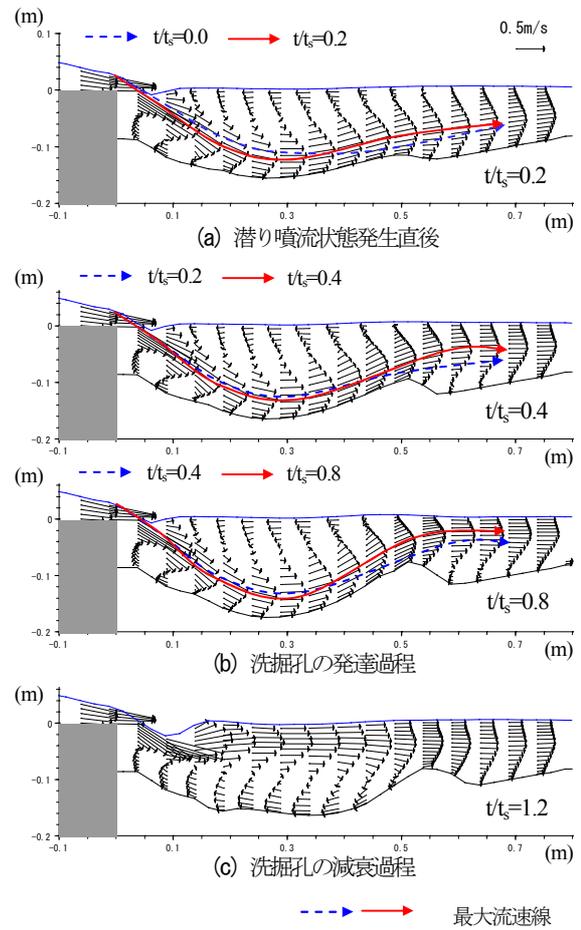


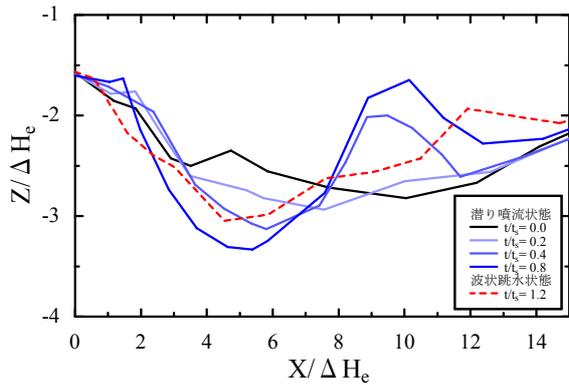
図-8 河床変動に伴う洗掘孔内の流れの変化 (Run EQ)

みを考慮すれば十分と考えられる。潜り噴流状態における床止め工直下の掃流力分布は図-7に示すように、水叩き部で大きくなり、その下流で極小値をもつ。そこで、床止め工背面から掃流力の極小値までを水叩き部と定義し、水叩き範囲で河床変動計算を行う。

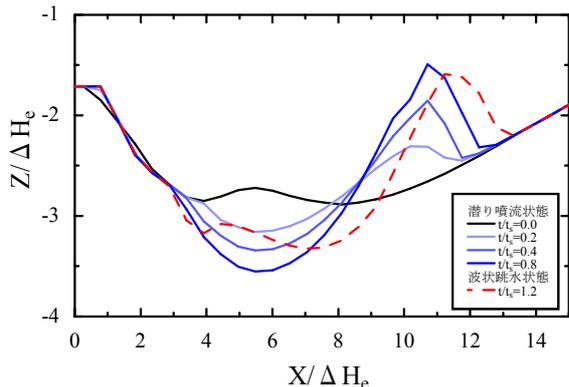
(2) 平衡流砂量式による潜り噴流状態の局所洗掘解析

図-8は河床変動に伴う洗掘孔内の流れ場の計算結果である(Run EQ)。また、図-8には河床変動に伴う最大流速線の変化を示している。河床変動計算の開始直後、床止め工直下の再付着点付近で河床が低下することにより、圧力が低下し、最大流速の発生位置は上流に移動する。その後、水叩き部下流に堆積域が形成され、その背後に剥離が生じる。河床形状は最大流速線に沿う形となる。洗掘、堆積の発達に伴い、最大流速線の曲率が大きくなり、水面付近の逆流域は小さくなり、やがて波状跳水状態へ移行する。波状跳水状態へ移行後、流れの再付着点が堆積域頂部となって、堆積が減衰するとともに洗掘孔が埋め戻される。

図-9、図-10は、それぞれ河床形状の経時変化及び最大洗掘深($t/t_s=1.0$)の計算結果と実験結果の比較である。図-9は計算条件とほぼ同様の水力条件で生じた潜り噴流の実験結果の平均値を示している。図-9(a)の実験結果



(a) 実験結果



(b) 計算結果(RunEQ)

図-9 潜り噴流状態の洗掘孔発達過程の比較

は、そのうちの一例である。実験では、波状跳水状態から潜り噴流状態に移行した時間を $t=0.0s$ として示している。ここで、 X, Z はそれぞれ床止め工背面からの縦断距離と床止め工上面からの高さとし、床止め工直下の洗掘孔内の損失水頭 ΔH_c で無次元化している。 ΔH_c は $t/\Delta H_c = 1.0$ における Run EQ の計算結果 ($\Delta H_c = 0.048m$) より算出している。床止め工直下の砂面形状は、実験では水叩き部からの砂の供給と砂面の崩落が繰り返されるため、変動しているが、計算では限界角の砂面が形成され安定する。また、実験では潜り噴流状態から波状跳水状態へ移行する過程で堆積域が即座に減衰するのに対して、計算では波状跳水状態においてゆっくりと減衰する。しかし、計算は、埋め戻された砂が潜り噴流に移行した直後に上下流に輸送される過程 ($t/\Delta H_c = 0.2$)、最大洗掘深の位置をほとんど変えずに発達し、堆積域は堆積頂部が下流に移動しながら大きくなる過程 ($t/\Delta H_c = 0.4, 0.8$) などの実験で生じた潜り噴流状態の洗掘孔発達過程を表現できている。また、最大洗掘深発生時の河床形状では、計算結果は、実験結果に比べて床止め工直下の砂面形状がやや低下し、実験結果よりも洗掘孔が発達しているが、全体的に局所洗掘形状をよく再現していると言える。河床形状は底面流速の場所的な変化によって生じる河床変動の積分値であるため、一般に、流れの計算の誤差が計算結果に顕著に現

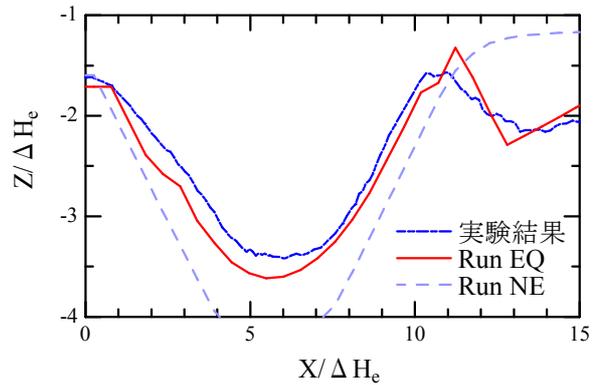


図-10 最大洗掘深:波状跳水状態へ移行する直前($t/\Delta H_c = 1.0$)の河床形状の比較

れやすい^{16),17)}。しかし、図-4~図-6で示したような流れの計算の誤差は、図-9、図-10の河床形状にはあまり影響していないように思える。これは、潜り噴流状態の局所洗掘形状が噴流に応じた形状になることと、最大洗掘深が噴流形態や潜り噴流状態から波状跳水状態への移行限界によって決まるためと考えられる。特に、本研究で対象とするような鉛直二次元流れでは、河床変動と流れの対応が三次元流れのものに比べると複雑でないことが局所洗掘解析を可能としていると思われる。また、水面の剥離点からの空気混入は、波状跳水状態から潜り噴流状態へ移行した直後は顕著であるが、潜り噴流状態の局所洗掘が発達するとほとんど見られなくなることが移動床実験で観察されている。このとき、図-8に示したように、全体的に噴流に沿う河床形状が形成される。このため、潜り噴流状態の局所洗掘が発達した場合、本解析モデルで比較的表現しやすい流れ場と考えられる。

以上より、本解析モデルは潜り噴流状態の局所洗掘、堆積域の発達と、これらが波状跳水への移行に伴って減衰する過程を計算でき、最大洗掘深発生時の洗掘孔の河床形状など実験結果を再現できることが明らかとなった。

(3) 非平衡流砂運動の解析法の検討

洗掘、堆積などの河床変動は流砂の非平衡性が引き起こす問題であり、強い非平衡性によって生じる構造物周辺の局所洗掘問題では、非平衡流砂量式が適用されることが多い^{6),14),18)}。特に平面二次元解析などで流れの計算精度が不十分である場合は非平衡流砂量式が必要であることが指摘されている。しかし、図-8~図-10の解析結果(Run EQ)は平衡流砂量式でも非平衡性が強い床止め工直下の局所洗掘の形状を精度良く計算できることを示している。先に述べたように、潜り噴流状態から波状跳水状態への移行現象は床止め工直下の河床形状に支配されている。ここでの流砂の非平衡運動は掃流力の縦断変化によって直接的に生じるため、平衡流砂量を用いた河

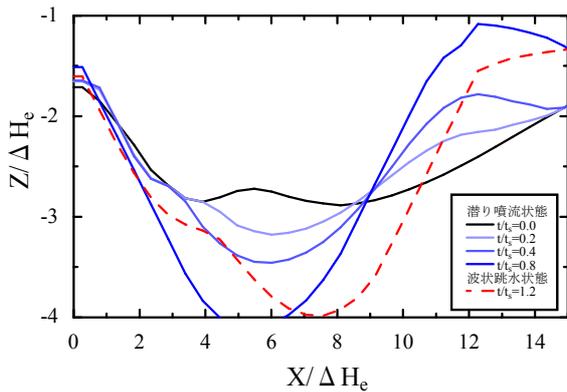


図-11 非平衡流砂量式を用いた場合の床止め工下流の局所洗掘の発達過程の計算結果(Run NE)

床変動解析は、流れの計算と合わせて時間積分されることにより、流砂の非平衡性が考慮されることになる。図-8のように河床形状に応じて流れの再付着点などの底面流速分布が変化することにより、図-9(b)に見られるような潜り噴流状態で堆積域頂部が下流に移動する現象や波状跳水状態の埋め戻し過程が表現できる。このため、掃流力の場所的な変化によって生じる洗掘、堆積が発達した河床形状は、河床付近の流れを精度良く解ければ、平衡流砂量式で表現可能であると考えられる。一般に、非平衡流砂現象の多くはこの場合であり、河床変動計算においては掃流力分布を精度良く見積もることが重要といえる。

一方で、平衡流砂量の計算結果(Run EQ)は、潜り噴流に移行した直後($u/cr=0.2$)に下流に輸送される砂の距離が短く、実験値と比べるとやや鋭い堆積形状となっている。また、発達した堆積域背面が実験結果よりも小さくなっている。これらは上流部からの砂の輸送が計算に反映されていないためである。図-11は非平衡流砂量式を用いた場合(Run NE)の河床形状の経時変化である。実験結果と同様に洗掘孔下流まで砂が輸送されており、潜り噴流移行直後の河床形状($u/cr=0.2$)はRun EQと比べると実験結果に近い傾向となっている。しかし、堆積域が形成されることなく洗掘孔が発達し、実験結果に比べて最大洗掘深が大きく計算されている(図-10)。本解析では、式(10)で $C=1.0 \times 10^{-4}$ 程度まで大きくすると、堆積域が形成されるようになるが、Run EQとほぼ同じ結果となる。このとき、 κ_B に対応する砂粒子の平均移動距離は明らかに実現現象よりも小さい0.01m程度となり、本来の物理的な意味を失っている。これは、先に示したように計算流砂量が実現現象と対応していないためである。このため、非平衡流砂運動を表現するには、掃流力と平衡流砂量を精度よく見積もることが第一に重要である。また、式(10)はせん断力が縦断的に変化しない条件で導かれており、

堆積域が発達し、砂粒子の運動形態が堆積域頂部を境に変化する場合は評価できない。この問題を解決するためには、直接的には砂粒子の運動解析¹⁹⁾が必要であるが、河床変動解析の全体の枠組みを考慮に入れると、実用上は κ_B の算定方法や非平衡流砂モデルの改良が必要と考えられる。この点に関して、掃流力の算定方法と合わせ今後の課題とする。

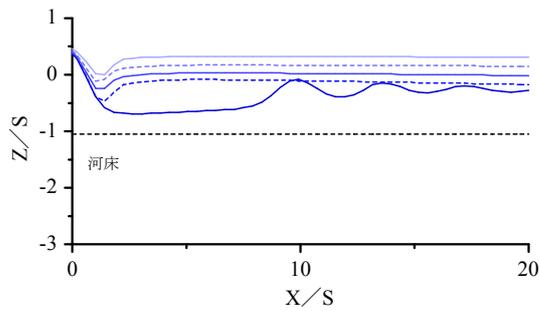
5. 構造物下流端の洗掘対策の検討

前章までに、構造物下流で河床洗掘を許容する場合に重要と考えられる潜り噴流状態の局所洗掘形状を解析モデルを用いて見積もることが可能であることを示した。本章では、このモデルを用いて床止め工下流の問題点を示し、洗掘孔をあらかじめ見込むことによる構造物下流の流況改善と床止め工下流の河床の防護方法について検討する。

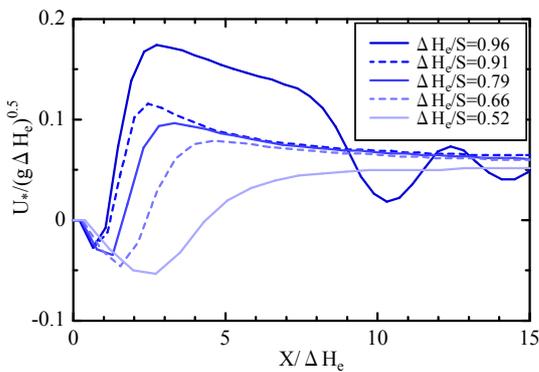
計算条件を示す。Case1は床止め工下流が平坦固定河床であり、床止め工の高さ $S=0.062\text{m}$ である。Case2は床止め工下流に洗掘孔を有する場合である。流量、床止め工の高さは前章で検討したケースと同じであり、各Caseで下流水位のみを変化させる。Case2の洗掘孔形状は実験結果(2章(4))を単純化したものであり、図-13(a)のように与えている。また、 ΔH_c の計算には、 $X/S=19.4$ の断面を用いている。

図-12は、床止め工下流が平坦固定河床の場合(Case1)において、種々の下流水深 h_0 (床止め工背面から1.2mの水深)に対する床止め工下流の水面形と底面摩擦速度の縦断変化を示す。潜り噴流状態では、下流水位が低下するほど、水叩き部で生じる最大摩擦速度は大きくなる。これは、下流水位の低下によって床止め工背後の落水水脈の角度が大きくなり、河床付近の運動量交換が活発化するためである。さらに下流水深が低下すると、床止め工の下流で射流が生じ、跳水を経て下流水深に接続する。潜り噴流状態と比べると、水叩き部で生じる摩擦速度は遥かに大きくなり、跳水発生断面まで摩擦速度の低下は小さい。床止め工の護床工の設計においては、このように護床工区間で跳水を生じさせるように設計が行われている²⁰⁾。護床工下流の水位が低下する場合や急勾配河道では、護床工の設置範囲は非常に長くなる。この対策として、護床工の粗度を大きくするか、減勢工を用いて強制跳水を生じさせるなどの方法が考えられるが、これらの方法は下流河床材料との粗度の違いが大きくなる等、構造物下流端処理が問題となる。さらに、射流が護床工区間で生じるため、護床工は底面砂の吸出しや流体力による破壊の危険にさらされることになる。

床止め工下流の洗掘を緩和し、護床工範囲を短くする

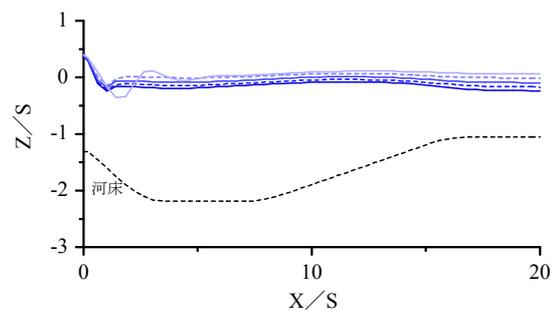


(a) 水面形

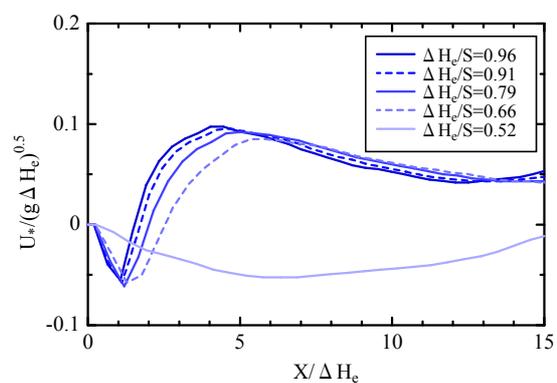


(b) 摩擦速度

図-12 床止め工下流を平坦床に保護した場合(Case1)の下流水深の変化に伴う流況の変化



(a) 水面形



(b) 摩擦速度

図-13 床止め工下流に洗掘孔を残し保護した場合(Case2)の下流水深の変化に伴う流況の変化

には、床止め工下流の洗掘から完全に護るよりも、ある程度の深さまでは洗掘を許容することにより、洗掘エネルギーを減ずる方法も考えられる。図-13 は、床止め工下流に洗掘孔がある場合 (Case2) について、水面形と底面摩擦速度の縦断変化を図-12 と同様に示したものである。洗掘孔を有することによって水深が確保されるため、波状跳水状態に移行しやすく、下流水深が低下しても原理的には床止め工下流で射流が生じず、潜り噴流状態の流れ場が維持される。4 章で示したように、潜り噴流状態では流体混合により、水たたき部の最大せん断力は比較的小さく、短い流下距離で底面せん断力は減少する。洗掘孔を有する場合は、洗掘孔内の深い水深により流体が混合するため、河床せん断力は洗掘孔内で洗掘孔の下流のせん断力よりも小さくなり、洗掘孔の下流斜面で最小値をとる。このため、洗掘孔がない平坦固定河床の場合の潜り噴流状態のものと同様に、短い区間で河床せん断力が低下する。また、洗掘孔下流のせん断力まで河床せん断力が低下するのに要する区間は、下流の水位が変化してもほとんど変わらないことがわかる。

次に、洗掘孔を許容する場合の床止め工下流の防護方法を検討する。この場合、基礎を保護し、構造物の安定性を確保するため、あらかじめ洗掘孔内に護床工を設けることになる。洗掘孔を許容すると、床止め工下流で射流が生じないため、潜り噴流状態が設計対象となる。潜

り噴流状態では、洗掘孔内の流体混合によって短い区間で河床せん断力が低下することとその区間が下流の水位条件によってあまり変化しないため、洗掘孔内の護床工は、平坦河床で射流を想定する場合よりも、設置区間を短くできる。また、ブロックの粗度によって護床工に流水抵抗をもたせる必要性は小さい。このため、洗掘孔内の護床工ブロックは流水に対して安定性の高い構造に設計でき、結果として構造物本体の安全性を高めることになると考えられる。

以上より、床止め工直下において見られる複雑な洗掘問題は、洗掘孔を許容し、それ以上洗掘されないように保護工を施工することによって、改善できることが示された。今後は、具体的に大きな外力に対し長期的に安定な防護工をどのように設計するかであり、検討課題である。

6. 結論

本研究では、構造物下流の洗掘を許容することで、下流河床に柔軟に対応しつつ、洗掘孔内の流体混合により洗掘力を軽減させる工法に着目した。このために、まず床止め工直下の流れや局所洗掘を見積もれる数値解析モデルを検討した。そして、洗掘孔をあらかじめ見込むことによ

る床止め工下流の流況改善と河床を防護する方法を検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 変動を伴う水面と河床形状を評価できる σ 座標系の二次元数値解析モデルを構築した。解析モデルは、境界面付近の計算法に工夫を加えており、水面や河床面形状が複雑に変化する場合にも適用可能である。
- 2) 流れの解析モデルは床止め工下流で生じる特徴的な二つの流れ場である波状跳水状態と潜り噴流状態に適用可能である。局所洗掘解析モデルは、床止め工直下の洗掘孔内で生じる潜り噴流状態の局所洗掘、堆積域の発達と、これらが波状跳水への移行に伴って減衰する過程と最大洗掘深などの局所洗掘形状を精度良く見積もることができる。
- 3) 掃流力の場所的な変化によって生じる洗掘、堆積が発達した河床形状は、河床付近の流れを精度良く解ければ、平衡流砂量式で表現可能である。
- 4) 構築した数値解析モデルを用いて床止め工直下における洗掘問題に対し、洗掘孔を許容し、これを防護することによって流況を改善できることを示した。

参考文献

- 1) Hoffmans, G. J. C. M. and Booij, R.: Two-Dimensional Mathematical modelling of Local-Scour Holes, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.31, No.5, pp.615-634, 1994.
- 2) 神田佳一, 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 護床工下流部における局所洗掘とその軽減法に関する研究, 土木学会論文集, No.551, pp.21-36, 1996.
- 3) 岩垣雄一, 土屋義人, 今村正孝: 水門下流部における局所洗掘に関する研究 (1), 京都防災研究所年報, 第 8 号, pp.1-15, 1965.
- 4) Farhoudi, J. and Smith, K. V. H.: Local Scour Profiles Downstream of Hydraulic Jump, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.23, No.4, pp.343-358, 1985.
- 5) 道上正規, 鈴木幸一, 川津幸治: 床止め直下流部の流れと局所洗掘過程のモデル化, 京都防災研究所年報, 第 25 号 B-2, pp.493-507, 1982.
- 6) 川島幹雄, 福岡捷二: 床止め工周辺の河床変動計算法に関する研究, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.689-694, 1995.
- 7) 福岡捷二, 福嶋祐介: 円頂せき上の開水路急変流の力学, 土木学会論文報告集, 第 329 号, pp.81-91, 1983.
- 8) 梶川勇樹, 道上正規, 松原雄平, 檜谷治, 中本英利: 断落ち部における常射流混在流れの数値解析, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.823-828, 2003.
- 9) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二, 田中正敏: 大型粗度上の浅い流れの平面二次元解析とその応用, 土木学会論文集, No.691, pp.93-103, 2001.
- 10) 内田龍彦, 福岡捷二, 渡邊明英, 山崎幸栄: 二次元水理構造物を越流する流れの数値計算, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.817-822, 2003.
- 11) 渡邊明英, 福岡捷二, Alex Gorge Mutasingwa, 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常二次元解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.427-432, 2002.
- 12) Hirt, C. W.: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, *J. of Wind engineering*, No.52, pp.333-344, 1992.
- 13) 福岡捷二, 山坂昌成: 直線流路の交互砂州, 第 27 回水理講演会論文集, pp.703-708, 1983.
- 14) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉男, 中藤達昭, 村本嘉雄: 3 次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684, pp.21-34, 2001.
- 15) 金舜範, 福岡捷二, 山坂昌成: 流砂の非平衡性を規定するパラメータ κ_B の決定, 第 38 回年次学術講演会公演概要集, pp.539-540, 1983.
- 16) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似 3 次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1015-1020, 1998.
- 17) 渡邊明英, 福岡捷二: 複断面蛇行流路における流れと河床変動の 3 次元解析, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.665-670, 1999.
- 18) 福岡捷二, 富田邦裕, 堀田哲夫, 宮川朝浩: 橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発, 土木学会論文集, No.497, pp.71-79, 1994.
- 19) 関根正人: 土砂粒子の運動の解析を基礎とした河床波の形成過程のシミュレーションの試み, 土木学会論文集, No.691, pp.85-92, 2001.
- 20) (財)国土技術研究センター: 床止め構造設計の手引き, 山海堂, 1998.

(2003. 7. 22. 受付)

VERTICAL TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS FOR LOCAL SCOUR JUST DOWNSTREAM FROM A GROUND SILL

Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA and Akihide WATANABE

The local scour just downstream from a ground sill undermines the foundation of the structure and expose the structure to danger from failure. To prevent it, bed protection works are installed in the downstream of the structure. Bed scour also take place just downstream from the bed protection works. Because complete protection against the local scour is almost impossible, the design method that makes allowance for a certain degree of the local scour should be considered. The vertical two-dimensional numerical model describing the flow and local scour just downstream of a ground sill is developed. The model showed that allowance of the local scour could improve the flow field and shear velocity distribution.