

# 河床の洗掘による根固め工の変形特性 に関する研究

## STUDY ON DEFORMATION OF FOOT PROTECTION WORKS DUE TO BED SCOURING

内田龍彦<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・福島琢二<sup>3</sup>

Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA and Takuji FUKUSHIMA

<sup>1</sup> 学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 環境工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>2</sup> 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)

<sup>3</sup> 正会員 工修 島根県庁 (〒693-8511 出雲市大津町 1139)

Flow in curved channels causes bed scouring near the outer bank. If the influence of bed erosion reaches the foundation of the revetment structure, then the whole structure can collapse. In order to prevent this damage, foot protection works are installed. The foot protection works are required to cover a certain range to avoid subsidence of the structure near the revetment foundation. So, when foot protection works are designed, it is necessary to understand the mechanism of deformation and further failure of the revetment structure. In this study, characteristics of flow, bed scouring and deformation mechanism of the structure are examined for flow in a curved channel installed foot protection works at the outer bank. Also, we consider an estimation method of deformation for an arrangement of foot protection works, which is adapted in numerical analysis of flow and bed profiles.

*Key Words : curved channel flow, bed scouring, foot protection works, deformation mechanism, numerical analysis*

### 1. 序論

護岸の被災は、主に、護岸近くの河床洗掘が基礎工底部まで及ぶことによって、法覆工が破壊されることが多い<sup>1)</sup>。特に、河道湾曲部の外岸では、遠心力に起因する二次流によって著しい河床洗掘が生じるため、護岸被害を受けやすい。このような箇所では、護岸基礎工の前面に根固め工を設置する必要がある。

根固め工には流水の外力に対する安定性と、流速低減という水理機能が求められる<sup>2)</sup>。このため、設計の際にはこれらの水理機能についての十分な理解が必要である。福岡ら<sup>2,3)</sup>はブロックに作用する流体力を計測し、流水に対するブロックの安定性とブロック群による流速低減を検討している。そして得られた知見を踏まえて、護岸工、根固め工の水理設計法を示している。根固め工は、護床

工と同様に、周囲の河床洗掘によって破壊される問題をもつ。神田ら<sup>4)</sup>は、代表的な護床工ブロックを対象とし、護床工下流部における動的洗掘について詳細な検討を行い、河床洗掘に対するブロックの安定性から見た護床工の設計法と、護床工下流の洗掘軽減法を提案している。これらの研究では、ブロック群がすべて固定された条件で行われている。根固め工や護床工の破壊は流れや河床洗掘によるブロック群の変形やブロックの流失の過程を経て広がるため、ブロック群の変形、破壊過程に関して検討することが必要であると考えられる。

本研究では、河道湾曲部に根固め工が設置された場合の流れと河床変動、および根固め工変形特性を実験的に把握する。そして、根固め工の変形・沈下量の推定法を検討し、河床変動と根固め工の変形の数値解析手法を構築することを目的とする。

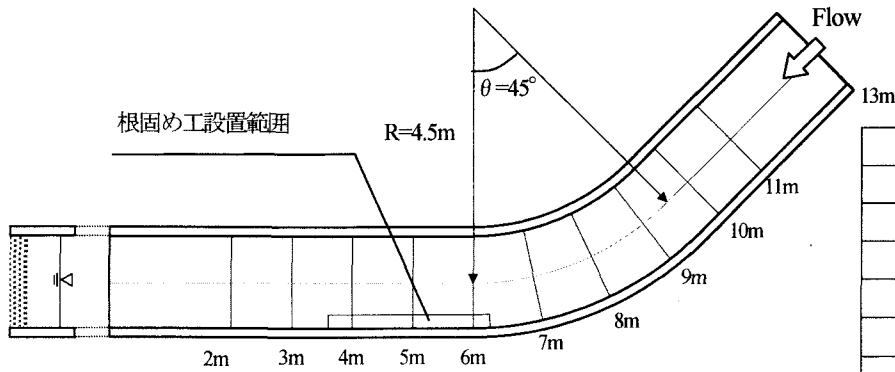


図-1 実験水路

表-1 実験の諸元

初期河床勾配	1/800
実験流量( $\ell/s$ )	32.0
給砂量( $\ell/h$ )	12.0
河床砂粒径(mm)	0.8
平均水深(cm)	5.6
平均流速( $cm/s$ )	38.0
Fr数	0.5

※平均水深、平均流速およびFr数は水路下流端から2mの横断面のものを用いている。

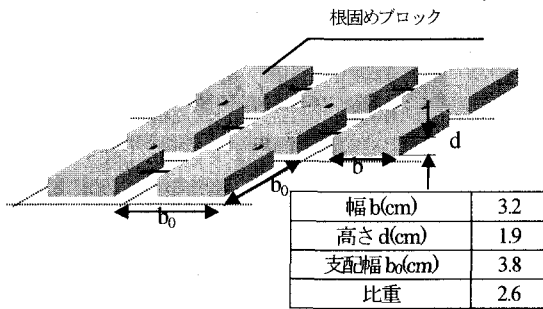


図-2 根固めブロック諸元の定義

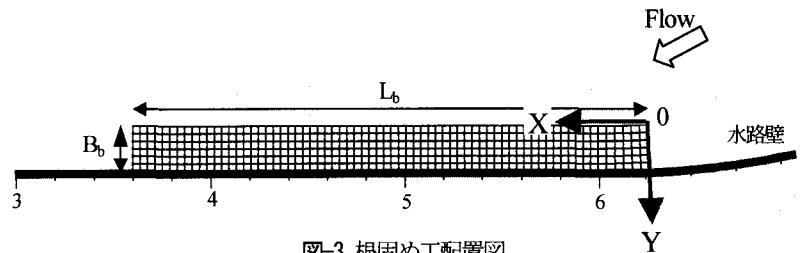


図-3 根固め工配置図

## 2. 根固め工の変形実験

### (1) 実験方法

実験水路は全長 13m、幅 1.5m であり、図-1 に示すように、水路中央線に沿って下流から 6.0~9.5m の区間に極率半径  $R=4.5m$  の一様湾曲部をもつ移動床湾曲水路である。下流実験の諸元は表-1 に示す。図-2 は根固めブロックの諸元の定義を示す。ブロックは幅  $b=3.2cm$  四方、高さ  $d=1.9cm$  であり、ブロック一個あたりの支配幅  $b_0=3.8cm$  である。ブロックは糸で連結して配置している。図-3 は根固め工の配置図を示す。ここで、根固め工の敷設長さを  $L_b$ 、敷設幅を  $B_b$  とする。また、本論文では図-3 に示すように縦断方向を  $X$ 、横断方向を  $Y$  としたときの  $X/L_b=0$  を根固め工の上流面、 $X/L_b=1$  を根固め工の下流面、 $Y/B_b=0$  を根固め工側面と呼ぶ。

実験 Case について説明する。Case1 は根固め工を設置しない場合、Case2,3 は根固め工を設置する場合である。Case2 では、ブロック下部に布を敷き、砂の吸出しを防止している。Case3 では、砂の吸出しが根固め工の変形に及ぼす影響と吸出し防止対策の効果を検査するため、直接河床にブロックを配置している。図-4 (a) は根固め工を設置しない場合(Case1)の河床形状であるが、外岸側では下流から約 5m を中心に河床洗掘が生じる。ここでは、根固め工は河床洗掘が著しい下流から 3.6m~6.2m の区間に配置している。本来ならば根固め工は、その上下流部で河床洗掘が生じないように縦断方向に十分な敷設長さ  $L_b$  で配置されるべきであるが、本研究では根固め工の縦断方向の変形特性を調べるため、敷設長さ  $L_b$  は短く設定

している。また、根固め工の敷設幅  $B_b$  は、実験の最大洗掘深を参考に横断方向の変形に対して十分大きい  $B_b=23.0cm$  に設定している。根固め工の敷設高さはブロックの天端高が初期河床高と一致するように配置している。根固めブロックは縦断方向に  $N_x=70$  個、横断方向に  $N_y=6$  個配置している。

### (2) 実験結果および考察

河道湾曲部に根固め工を設置した場合の流れと河床変動について検討する。図-4 (a) は Case1,2 における通水 8 時間後と Case2 における通水 15 時間後の河床形状の比較を示す。図-4 (b) は Case1,2 における水深平均主流速分布の比較を示す。Case1 では、二次流によって内岸側で堆積、外岸側で洗掘が生じる。これによって、流れは外岸側に集中し、河岸近傍で大きな流速が生じる。これに対し、Case2 では、根固め工を配置することによって洗掘位置が河道中央方向に移動するため、内岸の堆積域が減少し、外岸の洗掘量も減じている。また、Case1 で生じる外岸寄りの速い流速が内岸方向に移動している。このことから、根固め工を設置することで、河道湾曲部の流況は改善されているといえる。通水 15 時間後では、通水 8 時間後の下流から 5m 付近の洗掘域が上下流に広がる。また、根固め工上流面の河床洗掘が顕著になる。これは、後述するように根固め工上流部の沈下を引き起こす。本研究では、一般に護床工下流端部付近で見られる河床洗掘<sup>4)</sup> はあまり見られない。これは、根固め工の上面を砂が流れることによって根固め工下流部に砂が供給されることと、根固め工が流れに及ぼす抵抗が小さいためと考えられる。この点については護床工の構造との関係で今後の検討が必要である。

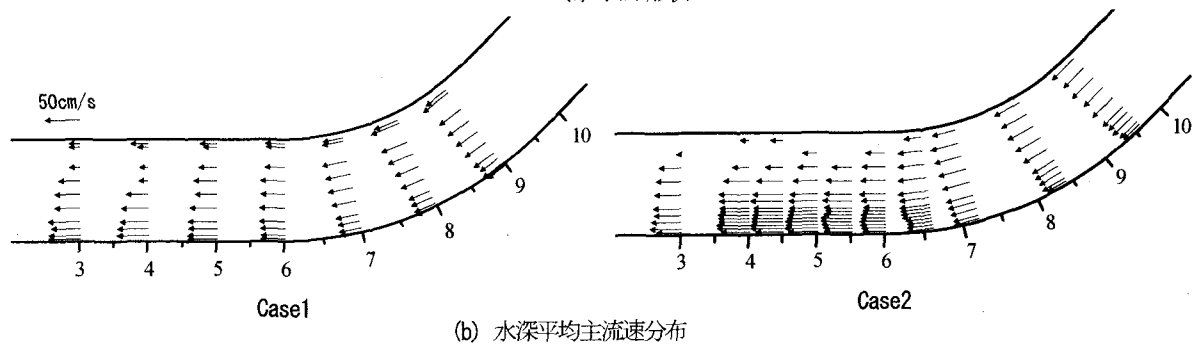
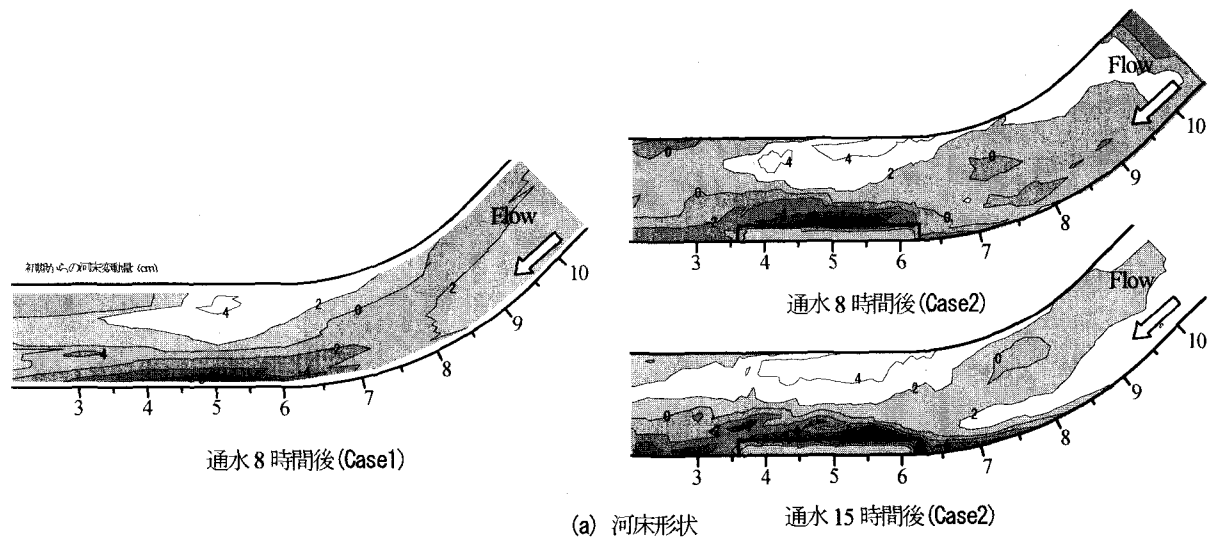


図-4 Case1 と Case2 の流れと河床形状の比較

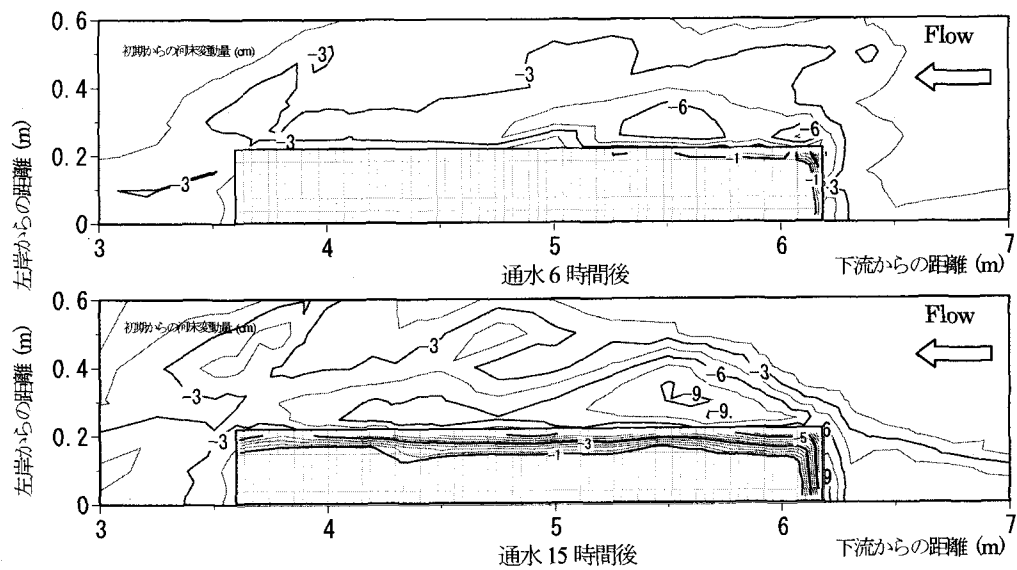


図-5 根固めブロックの沈下状況と周囲の河床形状 (Case2)

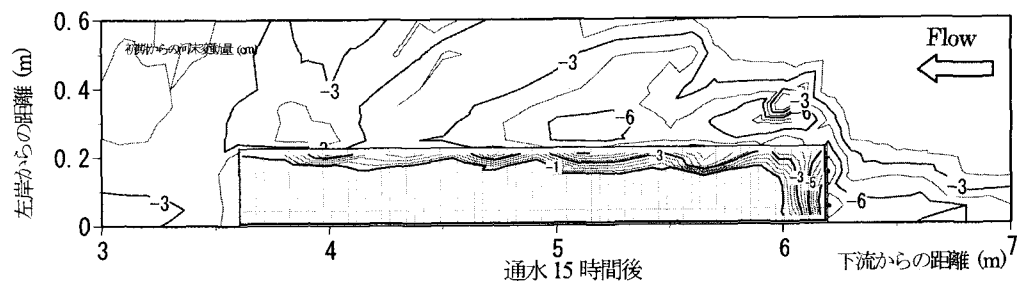


図-6 根固めブロックの沈下状況と周囲の河床形状 (Case3)

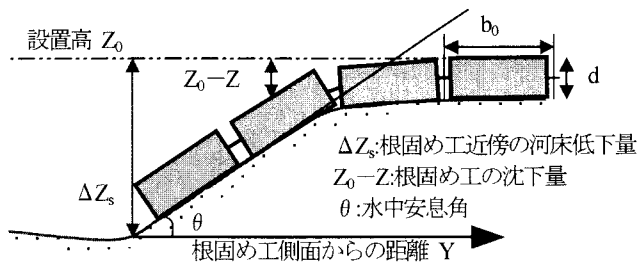


図-7 側面からの根固め工変形の模式図

図-5はCase2における根固めブロックの沈下状況と周囲の河床形状を示す。通水6時間後では、河床洗掘は根固め工側面上流側を中心に生じるため、根固め工の沈下はこの位置を中心に生じる。さらに通水を続けると、根固め上流の外岸側で河床洗掘が生じ、根固め工まわりの河床低下が進行するため、根固め工上流面は水衝部となる。このため、根固め工上流面では、橋脚前面に見られるような渦による河床洗掘<sup>5)</sup>と水制工前面と同様に、水跳ねによる洗掘<sup>6)</sup>が生じる。通水15時間後では、以上の機構によって生じた河床洗掘によって根固め工上流部の沈下が顕著になる。上流部の沈下を防ぐためには、根固め工上流の外岸部で洗掘が生じない程度まで、敷設範囲を上流に延長する必要がある。上流端敷設範囲は、緩傾斜河岸の設計において西村・福岡ら<sup>7)</sup>が提案した外岸部近傍の底面せん断力と河床砂の限界掃流力の関係からを決定する方法が有効であると考えられる。次に、Case2,3の実験結果の比較から、ブロック底面の河床砂の吸出しが根固め工の変形に及ぼす影響を検討する。図-6はCase3における根固めブロックの沈下状況と周囲の河床形状を示す。根固め工下部の砂の吸出しの影響により、Case2(図-5)に比べて全体的に根固め工の変形範囲が広がる。特にCase3では、水衝部となる根固め工側面上流側や根固め工上流面における根固め工の変形範囲が内部まで進行している。流れの水衝部となる箇所では、掃流力が大きく、根固め工ブロック下部の砂が吸い出されやすくなるため、根固め工の吸出し防止対策が特に重要である。

### 3. 根固め工の変形・沈下量の算定法

根固め工の敷設範囲を決定するためには、その変形範囲やブロックの沈下量を適切に見積もる必要がある。ここでは、ブロックの変形を一次元的に考える。図-7は側面からの根固め工変形の模式図である。ブロック下部の砂は、根固め工近傍の河床の洗掘 $\Delta Z_s$ によって根固め工近傍側面下部から流失し、その斜面角度は静的なつりあい条件である水中安息角 $\theta$ をとると仮定すると、各根固めブロックの沈下条件と沈下量は、それぞれ式(1),(2)で表される。

$$\frac{\Delta Z_s - d}{Y \tan \theta} \geq 1 \quad (1)$$

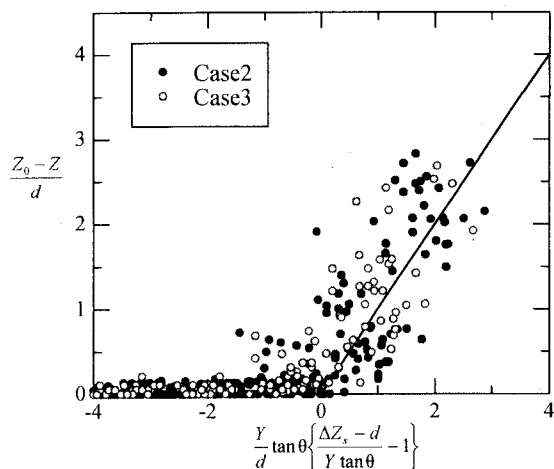


図-8 根固め工側面からの沈下量の算定値と実験値の比較

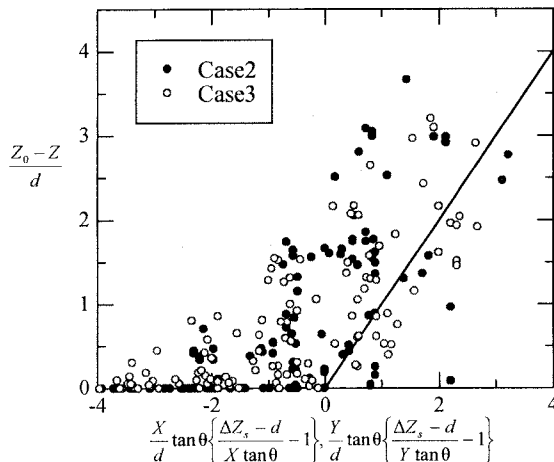


図-9 根固め工上流部における沈下量の算定値と実験値の比較

$$\frac{Z_0 - Z}{d} = \frac{Y}{d} \tan \theta \left\{ \frac{\Delta Z_s - d}{Y \tan \theta} - 1 \right\} \quad (2)$$

図-8は式(1),(2)から計算されるブロック沈下量の算定値とCase2,3の実験値を比較したものである。実験値は、根固め工上流部の変形を除く範囲 $X/L_b > 0.15$ (図-3参照)において通水15時間までに計測したすべての値を示している。図-8の横軸は正のとき式(1)を満たし、直線は式(2)の計算値を示す。水中安息角は $\theta = 35^\circ$ としている。式(1)の範囲(横軸が正)では、いずれのCaseにおいても、ほぼすべてのブロックが沈下している。しかし、全体的に実験値は直線よりも上の領域でばらついている。これは、ある時点でのブロックの沈下量はそのときの洗掘深 $\Delta Z_s$ でなく、それまでの最大の洗掘深 $\Delta Z_{smax}$ によって生じるためと考えられる。 $\Delta Z_{smax}$ を用いることにより、式(1),(2)のブロックの沈下量の算定値は改善されると考えられる。

次に、根固め工上流部( $X/L_b < 0.15$ )の変形について考察する。図-9は、根固め工上流部における沈下量の算定値と実測値の比較したものである。根固め工上流部ではブロック下部の砂は上流面からも流失するため、式(2)の値と式(2)のYをXに置き換えた場合の値を比較し、大きい方を沈下量の算定値とする。ブロック上流部では、式

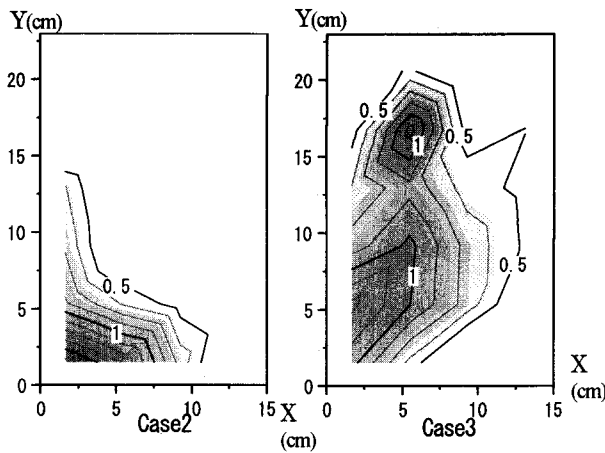


図-10 上流部における沈下量の実験値と算定値の差の平面分布 (1)を満たさない範囲においてもブロックが沈下し、実験値は直線よりも多く位置している。この理由を考察する。図-10は無次元沈下量 $(Z_0-Z)/d$ の実験値と算定値の差の平面分布を示す。コンターの値が大きくなるほど、実験値は算定値よりも大きいことを示す。Case2では、実験値と算定値のずれは根固め工先端部で生じる。これは、根固め工先端部では、ブロック下部の砂が根固め工上流面と側面の両方から流失するため、一次元釣り合い式が適用できないことを示す。しかし、実験値と算定値のずれが生じる範囲は狭く、Case2の根固め工変形は式(1),(2)を用いて概ね表すことができるといえる。Case3では、実験値と算定値のずれが根固め工上流部全体で生じる。これは、根固め上流部では、水衝部となり砂が吸出されるため、静的釣り合い条件でブロック底面の砂面形状が決まらないためである。

#### 4. 根固め工の変形計算

##### (1) 計算方法

式(1),(2)を用いて根固め工の変形計算を行うためには、根固め工近傍の河床低下量 $\Delta Z_s(\Delta Z_{s,max})$ を精度よく見積る必要がある。本章ではブロック下部の砂の吸出しがないCase2を対象とし、数値解析によって根固め工周辺の河床形状と根固め工の変形計算を行う。ブロック下部の砂の流失については $\Delta Z_{s,max}$ を用いて以下のように取扱う。図-11(a)に示すようにある時間 $t$ における単位長さあたりの累積流失量 $W^t$ は、ブロック先端からの水中安息角 $\theta$ の直線とブロック底面がつくる三角形の面積( $W^t = \Delta Z_s^2 \tan \theta$ )で計算する。砂の連続条件を満たすため、 $\Delta t$ 間の土砂の流失量 $\Delta W = W^t - W^{t-\Delta t}$ に見合う分だけ、近傍の河床高を上昇させる。この過程は、構造物周りの局所洗掘問題を扱う数値計算に用いられている限界勾配を設定して砂面のSlide現象を考慮する方法<sup>9)</sup>と同様である。ブロックの沈下量は以下の方法で計算する。水中安息角の直線とブロック底面の交差点がブロックの中央線を越

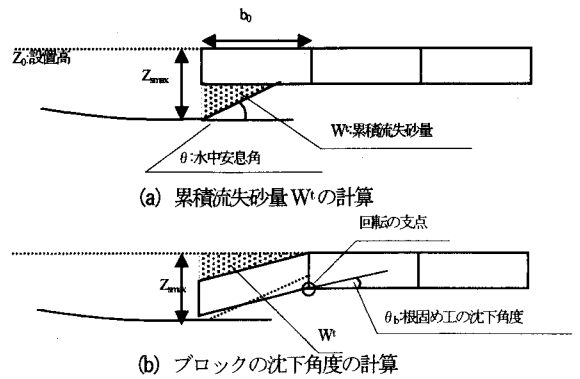


図-11 根固め工変形のモデル化

えたとき、ブロックは沈下する(式(1))。ブロックの最終沈下角度は水中安息角 $\theta (=35^\circ)$ とし、式(2)を用いて沈下量を計算する。ブロックの沈下角度が最終沈下角度に至るまでの過程は以下のように仮定する。図-11(b)に示すようにブロックの沈下は洗掘と反対側を中心とする回転によって生じるとする。このとき、沈下角度 $\theta_0$ は累積流失量 $W$ が等しくなるようにする。なお、ブロックが沈下しても、平面的なブロックの大きさや位置は変化しないとしている。

流れと河床変動の計算方法は、河道湾曲部や蛇行部における流れと河床変動を再現できる実用的な方法として知られている福岡らの準三次元解析法<sup>8)</sup>を用いる。根固め工上面は河床として扱う。根固め工上流面の水跳ねの影響を考慮するため、根固め工上流メッシュでは水制と同様に、式(3)で流体力を与える。

$$F_s = \frac{C_D}{2\Delta S} \int_0^d u|U|dz, F_n = \frac{C_L}{2\Delta S} \int_0^d u|U|dz \quad (3)$$

ここで、 $F_s, F_n$ : S, N 方向流体力、 $C_D, C_L$ : 抗力係数、揚力係数、 $u, v$ : S, N 方向流速、 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 、 $d$ : 根固め工前面の河床から根固め工設置高さまでの鉛直距離、 $\Delta S$ : S 方向のメッシュ間隔である。N 方向流速 $v$ による流体力の方向成分は無視している。

##### (2) 計算結果および考察

図-12は通水15時間後における河床形状の計算結果を示す。計算結果は実験値(図-4(a))と比べると洗掘量、堆積量が小さめであるが、全体的な河床形状を概ね表している。計算で河床変動量が小さくなる理由は、静水圧分布の仮定や平行流砂量式を用いたことが主な原因に挙げられる。図-13は根固め工の沈下状況と周囲の河床形状の計算結果を示す。計算結果は実験値(図-5)に比べて根固め工側面の沈下の下流への進行範囲が若干小さい。これは、計算では内岸の堆積領域が下流にあまり発達しないため、根固め工側面の洗掘領域の深部が短くなったためとブロック同士の相互作用力を考慮していないためなどが考えられる。また、根固め工上流面において、解析では、根固め工上流面の洗掘機構は水跳ねの影響による横断方向掃流力によって表現されており、渦による土砂の巻き上がりが考慮されていないため、根固め工変

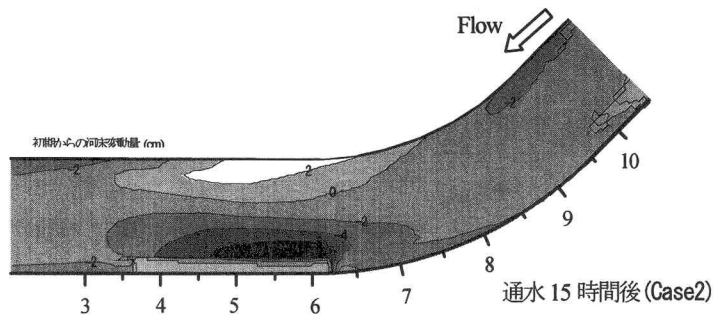


図-12 根固め工を有する河道湾曲部の河床形状の計算結果

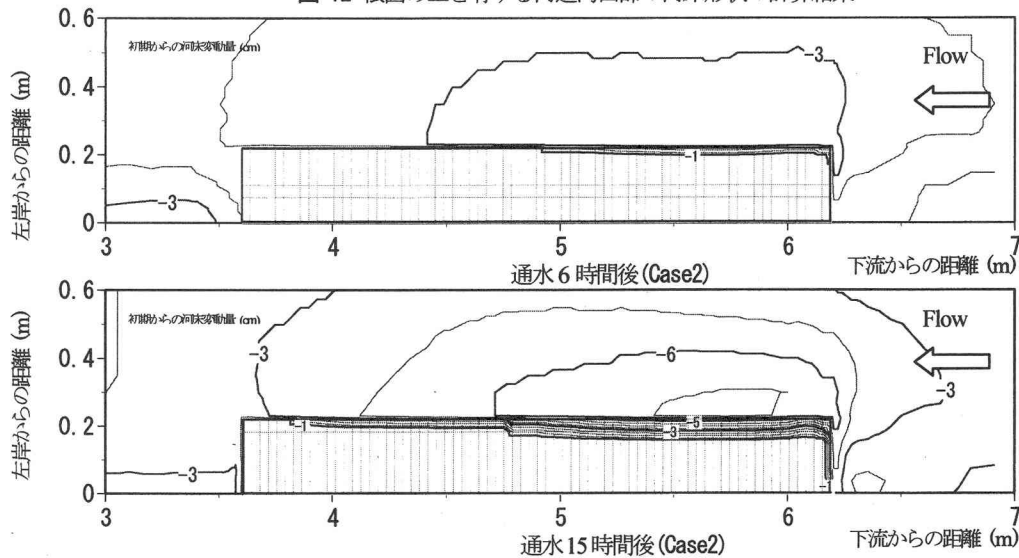


図-13 根固めブロックの沈下状況と周囲の河床形状の計算結果

形の進行速度とブロックの沈下量は実験に比べて小さい。計算精度の向上のためには局所的な流砂機構と根固め工変形の伝達機構を検討する必要がある。しかし、解析結果は全体的には実験で生じた根固め工変形の進行過程やブロックの沈下状況の特徴を説明しており、根固め工の変形範囲や沈下量を検討するために有意であると考えられる。

## 5. 結論

以下に、本研究の結論を示す。

- 1) 河道湾曲部外岸に根固め工を配置することによって、洗掘位置が河道中央方向に移動する。二次流の発達が抑制され、内岸の土砂堆積と外岸の洗掘量が低減される。また、外岸寄りの速い流速が内岸方向に移動し、河道湾曲部の流況は改善される。
- 2) 初期の根固め工の沈下は、根固め工を設置していない場合の最大洗掘深の発生位置を中心に生じる。根固め工上流の河床洗掘が進行すると、根固め工上流面の沈下が顕著になる。
- 3) 根固め工の一次元沈下量算定式は根固め工側面からの沈下を見積ることができるが、根固め工上流部では

平面的な砂の移動や吸出しの影響により誤差を含む。

吸出しの影響が無い場合、実験値と算定値のずれは根固め工先端部の狭い範囲に限られ、一次元沈下量算定式を用いて根固めブロックの沈下を算定できる。

- 4) 数値解析は定量的な評価に課題を残すが、実験で生じた根固め工の沈下の進行過程や沈下状況の特徴を説明する。

## 参考文献

- 1) 護岸の力学設計法, (財)国土開発技術研究センター, 山海道, 1998
- 2) 福岡捷二, 藤田光一, 森田克史: 護岸工覆工の水利特性に関する研究, 土木技術資料 30-3, pp.3-8, 1988
- 3) 福岡捷二, 藤田光一, 森田克史: 護岸工の水利設計法, 土木技術資料 30-3, pp.9-14, 1988
- 4) 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
- 5) 長田信寿, 細田尚, 中藤達昭, 村本嘉雄: 円柱周りの流れと局所洗掘現象の3次元数値解析, 水工学論文集 第45巻, pp.427-432, 2001
- 6) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司: 越流水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集 第42巻, pp.997-1002, 1998
- 7) 西村達也, 福岡捷二, 安田実, 桐山和晃, 堀田哲夫: 緩傾斜河岸の配置法の研究, 土木学会論文集 No.553, pp.75-85, 1996
- 8) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集 No.443, pp.27-36, 1992

(2002. 4. 15 受付)