

根固め工の変形・滑り破壊に関する研究

STUDY ON DEFORMATION AND SLIDE FAILURE OF FOOT PROTECTION WORKS DUE TO BED SCOURING

内田龍彦¹・福岡捷二²・盧庚範³・土井豆政廣⁴・山形勝巳⁵

Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA, Kyongbum ROH,
Masahiro TSUCHIZU and Katsumi YAMAGATA

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学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 社会環境システム専攻 (同上)

⁴学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 社会環境システム専攻 (同上)

⁵正会員 国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)

Foot protection works are installed in the outer bank of a curved channel to protect the foundation of revetment structures from bed scouring. The conventional design method that the width of foot protection works is decided by geometric conditions without the dynamic consideration has not been assessed. The purpose of this study is to clarify the mechanism of the deformation and sliding failure of the foot protection works due to bed scouring. This paper indicates by experiments that the upstream-end of the foot protection works is a weak point because of the local scour at the front of the structure. The forces to make the foot protection works slide down are measured. Then, the necessary width of foot protection works not to slide against the local scour is presented by the dynamic consideration.

Key Words : curved channel flow, bed scouring, foot protection works, deformation and sliding failure

1. 序論

根固め工は、河道湾曲部などの河床洗掘が著しい箇所において護岸基礎工を保護する代表的な洗掘対策工のひとつである¹⁾。根固め工の破壊は護岸の被災原因となるため、根固め工の設計法を確立することは重要な事項である。根固め工先端は、洗掘部の速い流れに晒されることから、洪水外力に対する安定性と、洗掘に対して柔軟に屈撓する機能が求められる。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¹⁾。

根固め工や類似の構造物である護床工に関する研究を概観する。福岡ら^{2,3)}は、護岸ブロックや根固めブロックに作用する流体力を評価し、ブロックの突起形状と流速低減効果の一般的な関係と流水に対するブロックの安定性を示し、現在の護岸工の水理設計法¹⁾の基盤となる考え方を提案している。護床工の被災要因となる下流の河床洗掘や下部砂の流失に着目した研究では、神田⁴⁾らは、様々な護床ブロックの種類や河床材料を用いて護床工下流部の洗掘過程を検討し、河床洗掘に対するブロックの安定条件から捨石工を用いた洗掘対策法を提案している。前野ら⁵⁾は護床工からの底面土砂の抜け出しと変動水圧の関係を実験により調べている。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が流失する過程を経て広がるため、その設計法の確立のためにはブロック群の変形、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。流体力による構造物の変形・破壊機構に関する研究には、自然石を用いた堰の破壊機構⁶⁾、護床工下流部の変形・流失機構^{7,8)}などがある。しかし、洪水流によって生じる構造物の変形・破壊機構は複雑なため、変形まで考慮に入れた構造物設計法は著者らの知る限り存在しない。

従来の根固め工の設計法では、図-1に示すように洗掘深 Z_s による根固め工の変形が護岸等基礎工まで伝わらないようにするため、根固め工の必要な敷設幅 B_{d0} は式(1)で与えられている¹⁾。

$$B_{d0} = L_n + \frac{Z_s}{\sin \theta} \quad (1)$$

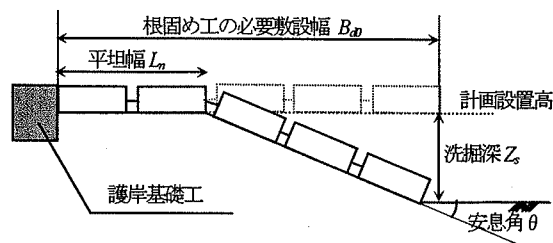


図-1 従来の根固め工の敷設幅 B の考え方

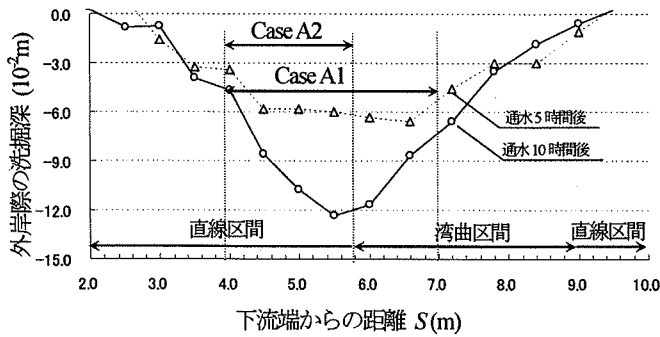


図-2 根固め工を設置しない場合の外岸際の洗掘深と根固め工の敷設範囲

表-1 各 Case の根固め工の設置範囲

	敷設範囲 S (m)	敷設範囲 B (m)
Case A0		設置なし
Case A1	4.0~7.0	1.8×10^2 (4列)
Case A2	4.0~6.0	2.3×10^2 (5列)

しかし、式(1)は力学的条件を考慮せず、幾何学的な条件から求められたものであり、式(1)の妥当性の検討は十分に行われていない。著者ら⁹⁾は河道湾曲部外岸に設置された根固め工前面の河床洗掘による根固め工の変形を含めた簡易な解析法を示した。しかし、根固め工の変形から破壊まで至るプロセスについての検討は不十分であった。

一般に根固め工の上流端では局所洗掘が発達し、被害を受けやすい弱点箇所となると考えられることから、本研究では、根固め工の上流端に着目し、局所洗掘と根固め工の変形と滑り破壊機構を明らかにすることを目的としている。そして、根固め工の滑り破壊限界と滑らないために必要な敷設幅の算定法を力学的に考察している。最後に、今後の課題を示している。

2. 河道湾曲部に設置された根固め工の局所洗掘による破壊進展機構

(1) 実験方法

実験水路は、全長 13m、幅 1.5m であり、水路中央線に沿った下流からの距離 $S=6.0-9.5$ m の区間に曲率半径 $R=4.5$ m の一様湾曲部とその上下流に直線部をもつ移動床湾曲水路である⁹⁾。実験 Case を表-1 に示す。実験条件は、流量 $Q=5.0 \times 10^2$ (m³/s)、初期河床勾配 $i_0=1/800$ 、水路下流端水深 $h_0=8.3 \times 10^2$ (m) である。水路全体として動的平衡状態で実験を行うために、水路の上流端からは下流端の流砂量に相当する量 $Q_s=1.6 \times 10^2$ (m³/hr) を与えている。図-2 に根固め工を設置しない Case A0 の通水 5、10 時間後における外岸(水路右岸壁近傍)洗掘深の縦断分布と、Case A1、Case A2 の根固め工敷設範囲を示す。湾曲部では下流ほど二次流が発達し、洗掘深が大きくなるため、外岸

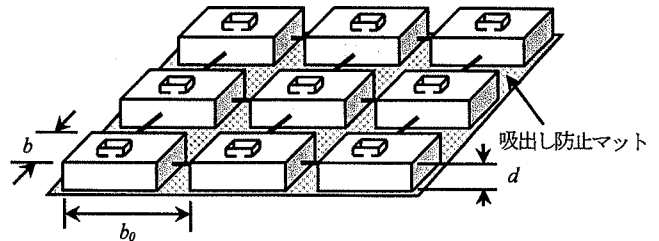


図-3 根固めブロックの諸元

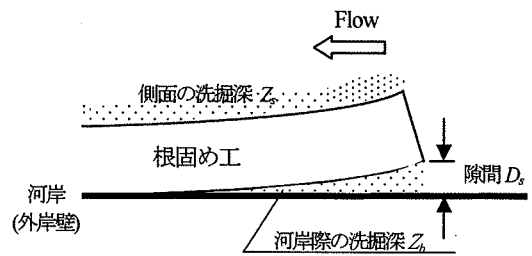


図-4 変数の定義

の最大洗掘深は湾曲部の下流端の付近 $S=6.0$ m で生じる。根固め工の上流方向の敷設範囲が十分でなく、根固め工上流端の河床が二次流により洗掘されると、根固め工上流面が水衝部となって大きな洗掘に発達するため、根固め工の上流方向の敷設範囲は外岸部で洗掘が生じない程度まで延長する必要がある⁹⁾¹⁰⁾。Case A1 では二次流があまり発達していない断面から根固め工を設置しているが、Case A2 では、根固め工上流端の局所洗掘の影響を検討するため、上流方向の敷設範囲を敢えて短く設定している。また、Case A1 と Case A2 で敷設範囲を変え、河床洗掘による根固め工の滑り破壊を検討する。図-3 に根固め工の諸元の定義を示す。ブロックは $b=4.0 \times 10^2$ m 四方、高さ $d=1.8 \times 10^2$ m であり、連結部を含めたブロック一個あたりの支配幅 $b_0=4.8 \times 10^2$ m である。ブロックは糸で連結して配置しており、河床洗掘に対して柔軟に屈曲できるようにしている。ブロックは一層積みとし、ブロック下部には布を敷き、根固め工上部からの砂の吸出しは無いようにしている。本実験では河床洗掘による根固め工上流端の滑り破壊に着目しており、滑り破壊に関する諸量として、根固め工の側面の洗掘深 Z_s 、根固め工の河道中央方向の滑りによって生じる根固め工と河岸の隙間(根固め工の滑り距離) D_s 、河岸近傍に生じる洗掘深 Z_b を図-4 に示すように定義する。

(2) 実験結果及び考察

図-5 に Case A1、Case A2 における根固め工側面の洗掘深 Z_s の縦断分布を示す。また、写真-1 は根固め工の滑り破壊の様子である。Case A1 では湾曲による二次流が発達していない断面から根固め工を設置しているため、通水 8 時間以降で水撥ねの影響による局所洗掘が見られるものの、上流端側面の洗掘深は大きくない。しかし、根

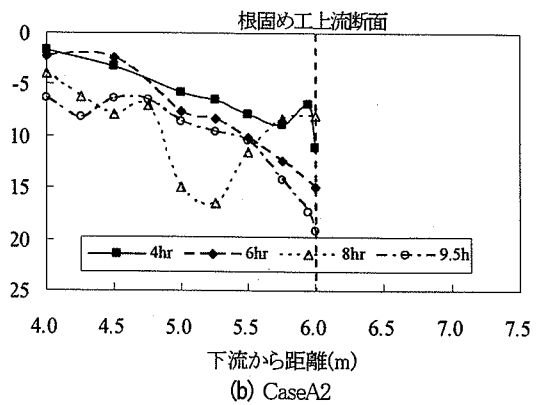
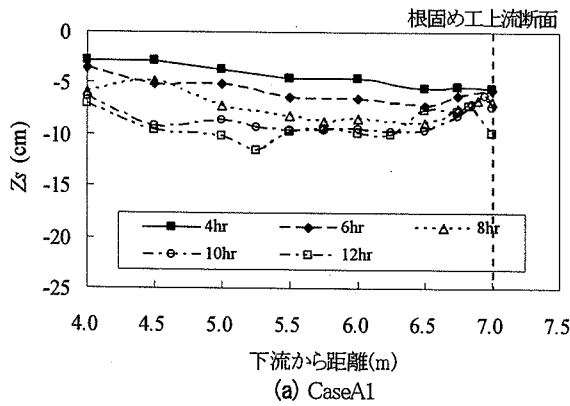


図-5 根固め工側面の洗掘深 Z_s の縦断分布

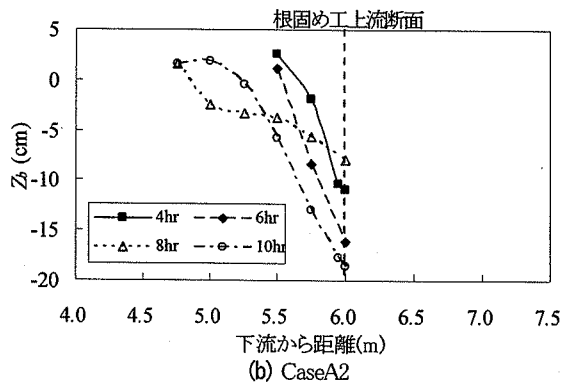
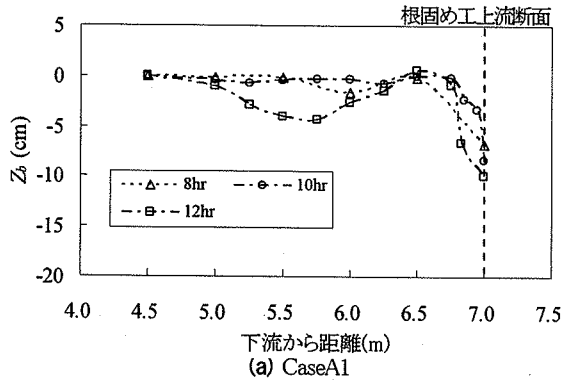
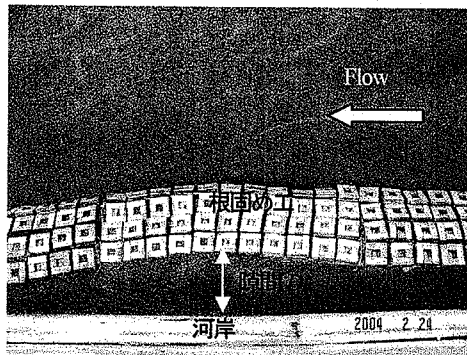
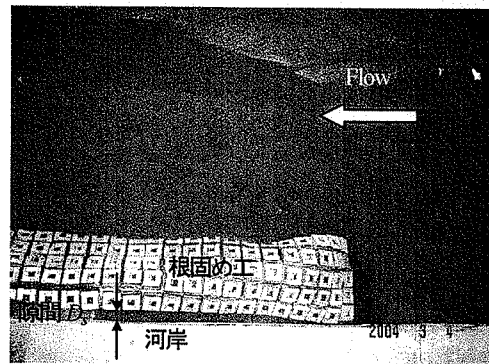


図-6 河岸際の洗掘深 Z_b の縦断分布



(a) Case A1 (中流部)



(b) Case A2 (上流部)

写真-1 根固め工のすべり破壊の様子

固め工の敷設幅 B が小さいため、写真-1(a)に示すように側面の洗掘深 Z_b が大きいところを中心に根固め工の滑りが広がる。根固め工上流端が洗掘を受けない場合でも、洗掘に対して敷設幅が小さいと河床洗掘によって根固め工の滑りが生じる。

Case A2 では、二次流が発達しているため、通水初期段階から根固め工上流端が洗掘され、また上流端の側面では水撥ねにより局所洗掘が生じるため、根固め工側面の最大洗掘深は上流端で生じる。根固め工の滑りは洗掘の大きい上流端から生じ、下流に伝達している。図-5(b)より、上流端の洗掘は通水6時間後まで発達した後、通水8時間後で一端埋め戻され、その後さらに洗掘は発達している。これは、河床波と根固め工の相対的な位置関係や洗掘による変形、滑りによって根固め工上流端の抵

抗が変化するためと考えられる。上流端が埋め戻されると、大きな洗掘が下流に移動するため、根固め工の滑り範囲が下流方向に拡大する。このように、根固め工上流端の局所洗掘が生じると、根固め工上流端の滑りがきっかけとなって根固め工全体が滑るようになる。

図-6は河岸近傍の洗掘深 Z_b の縦断分布である。両Case共に、根固め工上流端の河岸際の河床が著しく侵食されており、写真-1(b)からも分かるように、上流端では根固め工の機能を失っている。根固め工上流端は水衝部となるため、根固め工が僅かでも滑って河岸と根固め工の間に隙間が生じると、そこに流れが集中する。河岸際の河床が侵食されると、根固め工が変形するため、さらに流れが集中し、根固め工上流端の侵食は発達する。

以上のことから、根固め工は河床洗掘に対して滑らな

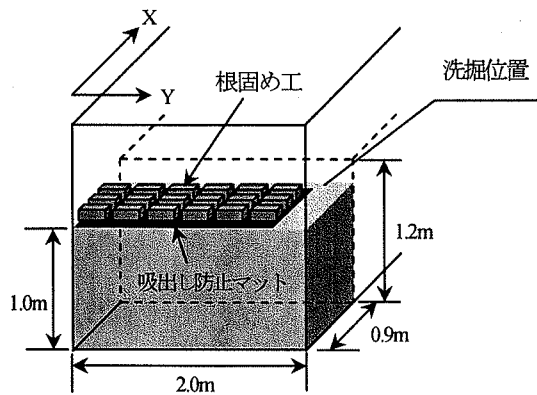


図-7 実験施設

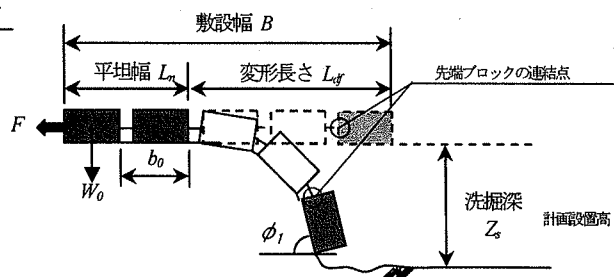


図-8 諸量の定義

表-2 実験 Case

	根固め工の敷設幅 B (m)	吸出し防止マット	滑り力 F の測定
Case B1	1.09 m (横断方向にブロック 5 個連結)	有	有
Case B2	0.86 m (横断方向にブロック 4 個連結)	有	有
Case B3	1.09 m (横断方向にブロック 5 個連結)	無	有
Case B4	1.33 m (横断方向にブロック 6 個連結)	有	無
Case B5	1.33 m (横断方向にブロック 6 個連結)	無	無

いために十分な敷設幅をもつ必要がある。特に、根固め工上流端では、水撥ねによる大きな局所洗掘が生じることとその上流にブロックが無いことから、上流端根固め工の変形量が大きく、河道中央方向に滑りやすい。さらに、根固め工上流端は水衝部となるため河岸と根固め工の間に隙間が生じると、河岸近傍の河床は著しく侵食される。河岸近傍の河床が侵食されると護岸基礎工が洗掘に晒され、法覆工の被災を起こす原因となることから、根固め工上流端の滑りは構造物の被災原因に繋がりがやすく構造物の弱点箇所となることが実験により明らかとなった。

3. 根固め工の変形特性と滑り破壊

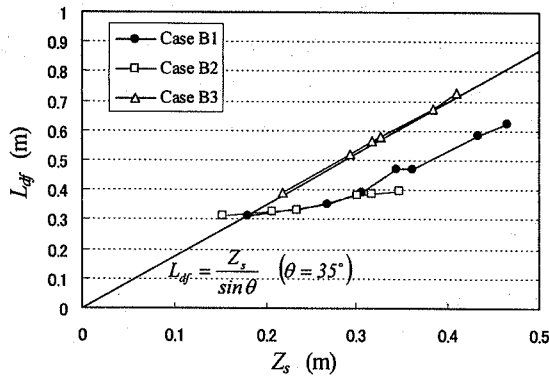
(1) 実験装置と実験方法

根固め工の滑り破壊が生じない設計を検討するため、厳しい河床洗掘を受ける根固め工上流端を想定し、根固め工の変形過程と滑り破壊機構を検討する。実験施設(図-7)は、長さ0.9m、幅2.0m、高さ1.2mの大型水槽で平均粒径0.8mmの一樣砂を河床材として高さ1.0mになるように敷き詰めている。図-7のX方向を縦断、Y方向を横断とする。上流ブロックがなく局所洗掘の影響が根固め工の変形に伝わる根固め工上流端を想定し、図-7のように根固めブロックを縦横断に連結して配置している。根固めブロックは幅 $b=0.15$ m、高さ $d=0.10$ mのコンクリートブロックを用い、支配幅 $b_0=0.24$ mで設置している。根固め工上流端側面の局所洗掘による根固め工底部にある砂の流出による滑り破壊を再現するため、静水状態において根固め工側面で強制的に洗掘を生じさせ、根固め工の破壊進展機構を調べる。図-8に示すように、初期河床

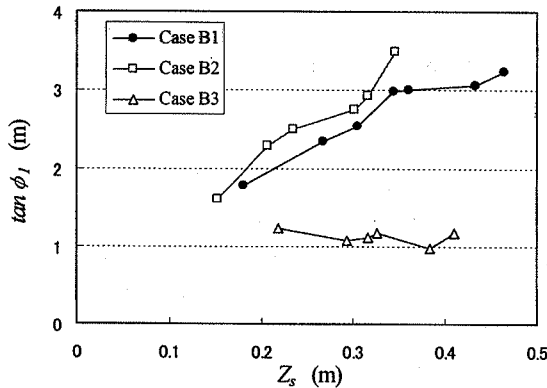
高から先端ブロック下部の最深高までの河床の低下量を Z_s 、根固め工敷設幅を B 、根固め工平坦幅を L_m 、ブロック一個の水中重量を W_0 とする。また、先端ブロックの角度を ϕ_1 、根固め工の変形長さを L_d とする。根固め工の滑り破壊機構と滑り破壊まで至らないような設計条件を検討するため、Case B1~B3では滑りの駆動力となる河岸とブロックの連結力 F (以下、滑り力と呼ぶ)を測定する。Case B4,B5では滑り破壊機構を調べる。Case B1,B2,B4は吸出し防止マットを根固め工下部に敷いた場合、Case B3,B5はブロックを直接砂の上に設置した場合の実験である。実験Caseをまとめて表-2に示す。

(2) 実験結果及び考察

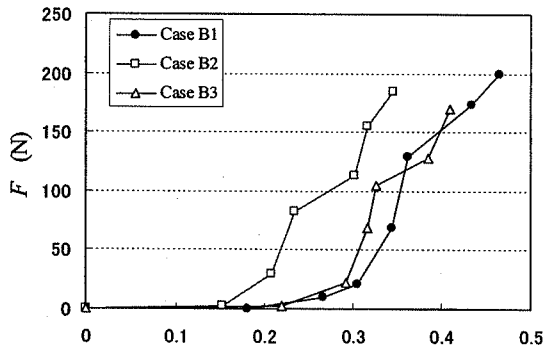
図-9にCase B1~B3の河床洗掘による根固め工の変形長さ L_d 、最先端ブロックの勾配 $\tan \phi_1$ 、及び滑り力 F を示す。Case B1では、根固め工の変形長さ L_d は $Z_s < 0.3$ mまでほとんど増加しない(a)。これは、図-8に示すように最先端ブロックの連結点を支点とし、洗掘深の増加に伴い砂面方向に回転する成分のモーメントが発生し、最先端ブロックの角度を増加させながら根固め工が変形するためである(b)。最先端ブロック角度 ϕ_1 は砂の安定勾配である水中安息角 θ より大きく、 $\tan \phi_1$ の増加は根固めブロック下部からの土砂流出及び変形範囲の広がりを抑制する。このため、 $Z_s < 0.3$ mでは根固め工平坦幅 L_m での摩擦抵抗はほとんど減少せず、滑り力 F は小さい。 $0.3 < Z_s$ となると、 $\tan \phi_1$ が増加しなくなり、根固めブロック下部にある土砂が流出するようになる。このため、根固め工の変形範囲が広がり、滑り力 F は大きくなる。同様にCase B2においても、 $Z_s < 0.3$ mでは L_d の増加が抑制される。しかし、滑り力 F は増加している。これは、



a) 洗掘深 Z_s と変形長さ L_{dq}



b) 洗掘深 Z_s と先端ブロック勾配 $\tan \phi_1$



c) 洗掘深 Z_s と滑り力 F

図-9 河床洗掘による根固め工の変形と滑り力の関係

Case B2 では、敷設幅 B が Case B1 よりも短く、最先端ブロック角度の増加に伴う滑り方向へのブロック重力成分の増加に抵抗するブロックが確保できないためと考えられる。

吸出し防止マットが無い Case B3 では、ブロックとブロックの間から土砂が流失するため、最先端ブロック勾配は増加できず、根固め工の変形長さ L_{dq} は吸出し防止マットがある Case B1, B2 に比べて大きく、水中安息角から計算されるものと同程度である。このため、同一の洗掘深 Z_s に対して根固め工の変形範囲が大きく、Case B1 に比べて滑り力 F は大きくなる。Case B4, B5 では、滑りが発生した洗掘深はそれぞれ、0.40m, 0.34m であり、吸出し防止マットには根固め工のすべりを抑制する効果がある。

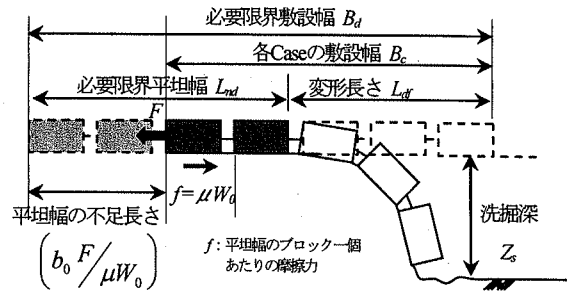


図-10 洗掘深 Z_s に対する必要限界敷設幅 B_d の考え方

以上のことから、根固め工の滑りは、前面河床の洗掘による根固め工の変形が河岸方向に伝わることによって、滑りに抵抗できる根固め工の範囲(平坦幅 L_m)が減少し、摩擦力が低下することによって生じる。根固め工上流端では河床洗掘による根固め工の変形が伝わりにくすることが重要である。根固め工の変形は、第一義的には河床洗掘により根固め工下部の砂が流失することによって生じるため、吸出し防止マットなどの設置は砂の流失を抑えることで根固め工の変形を抑制し、根固め工の滑りに対する抵抗力を大きくする。また、先端ブロック角度の増加による土砂流出と変形範囲の抑制の効果を生かすためには、洗掘深 Z_s の増加に対して先端ブロック角度の増加率が大きい根固め工変形過程で根固め工の滑りを抑制する根固め工平坦幅を最低限確保することが必要である。4章でこれについて考察する。

4. 河床洗掘による根固め工の滑り限界と根固め工の必要限界敷設幅の検討

河床洗掘による根固め工の滑り限界を求め、洗掘に対して滑り破壊が生じない必要な敷設幅を検討する。滑り力 F は根固め工に滑りが生じないための摩擦抵抗の不足分であるため、根固め工と底面砂の静止摩擦係数 μ を用いれば、図-10 に示すように平坦幅の不足長さに置き換えることができる。洗掘深 Z_s に対して根固め工が滑らない必要限界敷設幅 B_d は、滑り力 F と F を計測した各 Case の敷設幅 B_c を用いて式(2)で表される。

$$B_d = B_c + b_0 \cdot \frac{F}{\mu W_0} \quad (2)$$

根固め工の全敷設幅 B は、洗掘深 Z_s に対して滑らないために、 $B > B_d$ を満足する必要がある。

従来の設計法(式(1))と本実験結果を比較し検討する。図-11 は Case B1, B2 について式(2)より求められた洗掘深 Z_s に対する必要限界敷設幅 B_d と、式(1)の B_{d0} 、Case B4 の滑り破壊実験における滑り距離 D_s の比較である。ここで、式(1)の平坦幅 L_m は Case B1 の実験条件に対する一定値($L_m = 2b_0$)が与えられている。また、図-12 は Case B1, B2 について、洗掘深 Z_s に対する必要限界平坦幅 L_{md} を求めたものである。 L_{md} は式(2)の B_d から、図-9(a)に示す変形

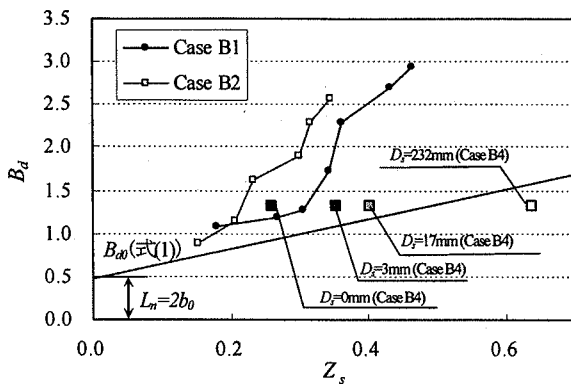


図-11 洗掘深 Z_s に対する必要限界敷設幅 B_d

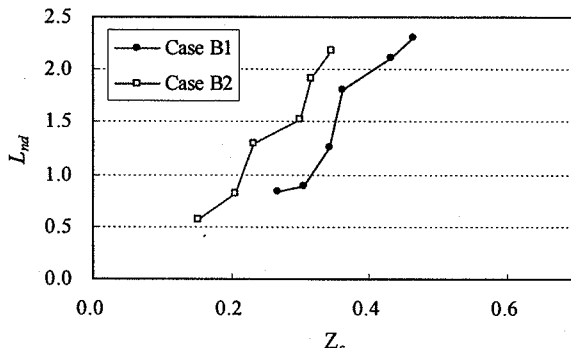


図-12 洗掘深 Z_s に対する必要限界平坦幅 L_{nd}

長さ L_{df} の実験値を差し引いて、

$$L_{nd} = (B_c - L_{df}) + b_0 \cdot \frac{F}{\mu W_0} \quad (3)$$

より求める。

図-9(a)に示したように、式(1)の変形長さ L_{df} はCase B1, B2の実験結果よりも大きい。図-11ではCase B4の滑りは式(1)よりも大きい B_d で生じており、本実験条件では式(1)の敷設幅 B_{d0} は滑り破壊に対して十分でない。根固め工が滑らないように敷設幅を決定する場合、平坦幅 L_n は図-12に示すように一定値ではなく、力学的な条件を考慮し、式(3)に示すような洗掘深の関数に設定すべきものである。

以上のように滑り破壊が生じない根固め工の敷設幅を検討するためには、主に幾何学的な条件から求めた式(1)では不十分であり、力学的条件を考慮した式(2)、もしくは式(3)のような考え方が必要である。図-11に示すように、滑り力 F の計測実験では、 F の計測を行った敷設幅よりも大きい範囲の必要限界敷設幅 B_d が洗掘深 Z_s に対して式(2)から求まる。しかし、 B_d は同一のブロック条件、初期条件においては、 Z_s に対して一義的に決まるべきものであるが、Case B1, Case B2の B_d は異なる。これは、図-9に示したように、洗掘初期段階において滑り力 F の増加特性が異なるためと考えられる。図-11よりCase B4の滑り限界が $D_s=0\text{mm}$ と $D_s=3\text{mm}$ の洗掘深 Z_s の間で生じることから、必要限界敷設幅 B_c は種々のCaseで求めた Z_s-B_d 曲線の包絡線で表されると考えられる。

しかし、実験結果は $B_d=0.86\sim 1.33(\text{m})$ の狭い範囲に限

られている。今後の課題としては、 B_d が大きい領域において、 Z_s-B_d 曲線を滑り破壊実験と滑り力 F の測定実験からさらに検討すること、洗掘深 Z_s に対する滑り力 F の定量的な評価方法を確立することである。

5. 結論

以下に、本研究の結論を示す。

- 1) 根固め工上流端では、大きな局所洗掘により根固め工の変形量が大きく、河道中央方向に滑りやすいだけでなく、水衝部となるため河岸と根固め工の間に隙間が生じると、河岸近傍の河床は著しく侵食される。このため、根固め工上流端は、護岸基礎工が洗掘被害を受ける危険性が高く、法覆工や周辺構造物の被災に繋がりやすい弱点箇所となる。
- 2) 根固め工の滑りは、洗掘による根固め工の変形が河岸方向に伝わることによって滑りに抵抗できる根固め工の範囲が減少し、摩擦力が低下することによって生じる。吸出し防止マットなどの設置により砂の流失を抑えることは、根固め工の変形を抑制し、根固め工の滑りに対する抵抗力を大きくする。
- 3) 根固め工の滑り力の計測結果から、根固め工の滑り破壊が生じない敷設幅の算定法を示した。

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: 護岸工覆工の水理特性に関する研究, 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: 護岸工の水理設計法, 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: 護末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) 前野詩朗, 山縣正明, 里本公明: 護末工からの土砂の抜け出しに及ぼす変動水圧の影響に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.409-414, 2001.
- 6) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 大西利典: 捨石堰の破壊機構のモデル化, 水工学論文集, 第47巻, pp.781-786, 2003.
- 7) 川口広司, 諏訪義雄, 高田保彦, 末次忠司: 護末工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非正常性と護末工の応答特性, 河川技術論文集, pp.243-248, 2002.
- 8) 内田龍彦, 田中幸志, 福岡捷二: 護末工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験, 水工学論文集, 第48巻(1), pp.841-846, 2004.
- 9) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二: 河床の洗掘による根固め工の変形特性に関する研究, 河川技術論文集, 第8巻, pp.237-242, 2002.
- 10) 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.

(2004. 4. 7受付)