

河床洗掘による根固め工の滑り限界と必要限界敷設幅の力学的検討

広島大学大学院 学生会員 ○土井豆政廣 広島大学大学院 正会員 内田龍彦
 広島大学大学院 正会員 渡邊明英 中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡捷二

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一つである。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。従来の根固め工の設計法では、図-1 に示すように根固め工が砂の安定勾配である水中安息角 θ の限界斜面に沿うように変形すると想定し、洗掘深 Z_b 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。

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

しかし、式(1)は用いる材料や重量、洗掘深 Z_b を受けたときに根固め工に作用する力など力学的条件が考慮せずに変形の幾何学的条件のみによって決められたものであり、適用性について十分検討されてはいない。そこで本研究では、河床洗掘による根固め工の変形・破壊機構を力学的に明らかにし、根固め工に滑り破壊の生じない敷設幅の算定法を考えることを目的としている。

2. 根固め工に滑りが生じない敷設幅の考え方

図-2 に根固め工に滑り破壊の生じない敷設幅の考え方を示す。図中の変形部と平坦部の接続部に作用する力は、根固め工に滑りを生じさせる駆動力(本論文では、この駆動力を以下滑り力 F と定義する)であると考えることができる。滑り破壊に対して滑り力 F に平坦部の摩擦で抵抗することから、滑り力 F を等価な摩擦抵抗を有するブロック幅に換算すると、変形長 L_{df} にこれを足し合わせれば、洗掘深 Z_b に対する滑りの生じない必要限界敷設幅 B_d を式(2)により求めることができる。

$$B_d(Z_b) = L_{df} + B_{b0} \cdot \frac{F}{\mu_n \cdot W_b} \quad (2)$$

ここで、 B_{b0} はブロック 1 個の連結幅、 μ_n は平坦部静止摩擦係数、 W_b はブロック 1 個の水中重量である。洗掘深 Z_b に対する B_d を算定するためには、 Z_b が生じたときの滑り力 F を明らかにしなくてはならない。

3. 滑り力の検討と必要限界敷設幅の定式化

3-1 実験方法

実験施設(図-3)は、長さ 2.0m、幅 3.0m、高さ 2.0m の大型水槽であり、その中に河床材量が平坦に敷き詰められている。X, Y 方向はそれぞれ河川に対する縦断(流下)方向、横断(河岸から河道中央)方向を示す。根固めブロックはコンクリートブロックを用い、変形の自由度が確保できるような間隔(B_{d0})で連結して設置し、根固め工下部には吸出し防止マットを敷く。根固め工底部にある砂の流出による破壊を再現するため、静水状態において根固め工先端で強制的に洗掘を生じさせる。

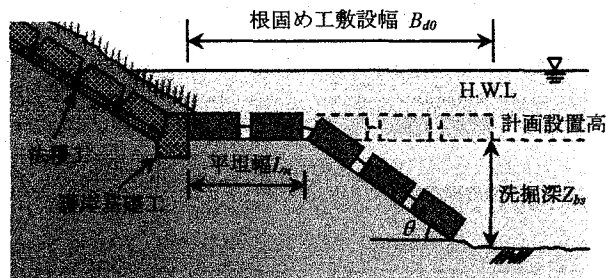
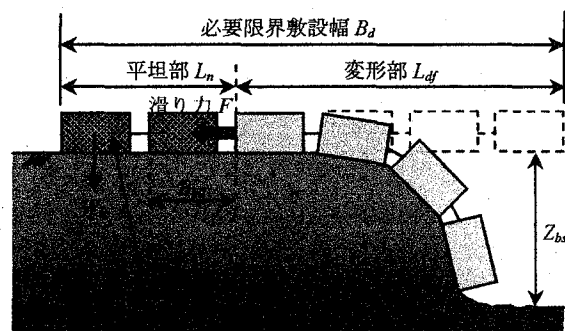
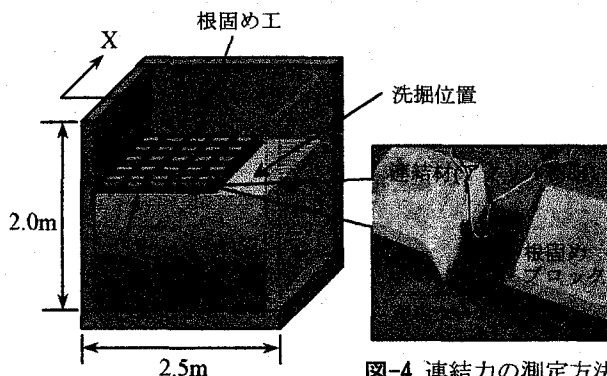
図-1 従来の根固め工の敷設幅 B_{d0} の考え方図-2 洗掘深 Z_b に対する必要限界敷設幅 B_d の考え方

図-3 実験施設

図-4 連結力の測定方法

滑り力の測定方法を以下に示す。図-4 に示すように、ブロックとブロックを連結している部分に防水型の歪みゲージを添付し、ブロック間に作用する連結力(滑り力 F)を測定する。

3-2 根固め工の変形プロセス

本実験条件のように、静水状態において根固め工先端部で洗掘を与えると、図-5(a)に示すように、根固め工は洗掘深 Z_b の増加に伴い、最先端ブロックの連結点を支点として砂面方向に回転する成分のモーメントが発生し、最先端ブロックから角度を増加させながら変形する²⁾。この時ブロック下部には流出を抑制された土砂領域が存在する(図-5(a)のハッチ部)が存在する。これは、連結ブロックが砂面上にあるため、下部土砂粒子に働く有効応力が増加し、流出に対する抵抗性が増加するためである。この土砂領域は連結力によって維持されている不安定な状態のものであり(以下不安定土砂と定義する)。

流水の作用を受ける実河川では流出する可能性がある。不安定土砂が完全に流出すれば、そして完全に流出すると、根固め工は従来の設計法で想定されている水中安息角の砂面に沿った形状となる(図-5(b))。以上より、根固め工は洪水時の河床変動と外力変動に伴い、不安定土砂を有する状態、流出した状態の2つの限界状態を繰り返しながら変形する。

3-3 滑り力の計算法と必要限界敷設幅の定式化 (ブロック下部に不安定土砂を有する状態)

写真-1は、ブロック下部に不安定土砂を有する変形プロセスにおいて、根固め工の滑り限界を撮影したものである。根固め工の滑り破壊は、ブロック下部土砂の円弧滑りを伴って生じるのが確認できた。よって、滑り力 F を考えるためには、ブロックのみの釣り合いではなく、下部土砂の滑りを考慮し破壊形態を取り入れる必要がある。そこで本検討では、根固め工と下部土砂を一体とした斜面であると考え、斜面安定解析(Fellenius法)により滑り力 F を計算する。本実験条件では、写真-1に見られるように、下部土砂の滑り面はほぼ直線であり、滑り面の終点は平坦部への接続点と一致している。これは、Fellenius法により数値的に計算した解と一致する結果であった。そこで図-6のように、滑り面を直線近似し、その終点位置を平坦部への接続点に一致させ、根固め工下部の砂面に根固めブロック重量を連続体の等分布荷重として与えると、力の釣り合いにより、滑り力 F を次式により得る。

$$F(Z_{bs}) = W(\tan\theta' - \tan\theta)$$

ここで、 W は滑り面上の土砂とブロックを足し合わせた全重量であり、 θ' は滑り面角度である。滑り力 F を式(2)の考え方により平坦幅に換算すれば、必要限界敷設幅 B_d を定式化できる。

$$B_d(Z_{bs}) = \int_0^{Z_{bs}} \sqrt{1+f'(x)^2} dx + \frac{W(\tan\theta' - \tan\theta)}{\mu_n \cdot q_b} \quad (3)$$

ここで $f(x)$ は、先端ブロック下部の点を x - z 座標原点とした時に、根固め工下部の砂面形状を表す関数である。
(不安定土砂が流出した状態)

根固め工下部から不安定土砂が完全に流出した状態は、従来の設計法で想定されている変形状に等しい(図-1)。よって、河床洗掘を受けて変形した変形部の、洗掘孔方向へのブロック重力成分を変形部及び平坦部のブロックでの摩擦で抵抗する力の釣り合いから滑り力 F を得ることができ、これを平坦幅に換算して必要限界敷設幅 B_d を定式化できる。

$$B_d(Z_{bs}) = \frac{Z_{bs}}{\sin\theta} + \frac{Z_{bs}}{\mu_n} (1 - \mu_{df} \cdot \cot\theta) - B_0 \quad (4)$$

ここで、 μ_{df} は変形部摩擦係数である。

4. 根固め工の設計法についての考察及び結論

図-7は、根固め工下部に不安定土砂を有する状態と不安定土砂が流出した状態について、滑り力 F の実験値を用いて、式(2)より求めた必要限界敷設幅 B_d の実験値と定式化した計算値(式(3),(4))との比較を表す。同図には、幾何学条件から根固め工の変形量を見積もり、平坦

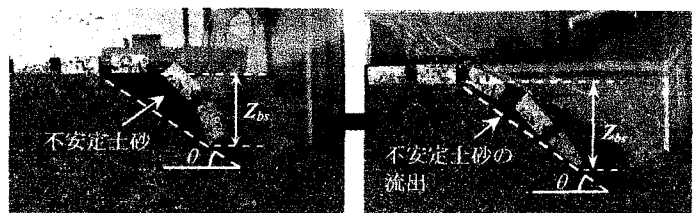


図-5 根固め工の変形と不安定土砂

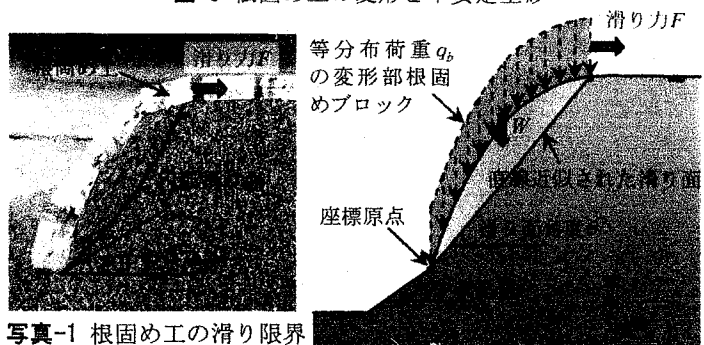


図-6 滑り力計算の模式図

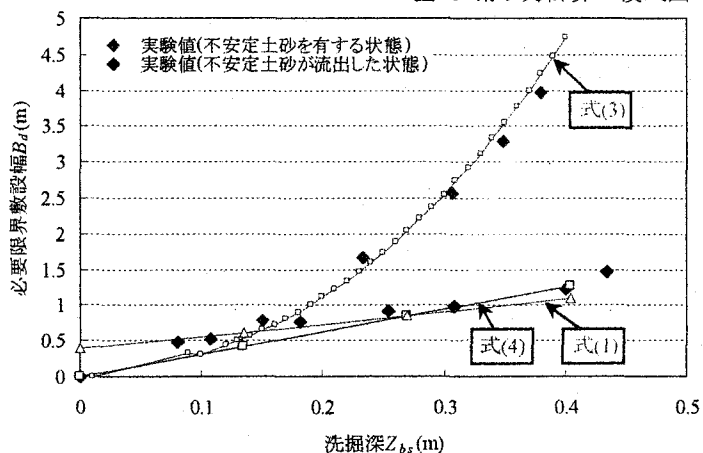


図-7 必要限界敷設幅 B_d の実験値と計算値の比較

幅 L_n にブロック2個を置くという従来の設計法(式(1))についても示している。

根固め工下部に不安定土砂を有する状態は、流出した状態と比較し、滑り限界の敷設幅を示す B_d が大きくなっている。これは、不安定土砂の流出を抑制するため、ブロックに作用する土圧が大きくなり、滑り力が増大するためであると考えられる。不安定土砂の存在による B_d の増加を計算値は実験値を適切に説明できている。

従来の設計法を見ると、対象とする変形状が同様である式(4)にほぼ一致しており、力学的根拠がないもののその算定値は妥当だったという結果が得られた。しかし、洗掘の進行に伴う不安定土砂量の増加及び滑り力の増加を考慮できていないため、従来の設計法は滑り破壊が生じる危険性が高くなると言える。

5. 結論

1) 河床洗掘による根固め工の変形特性(不安定土砂の有無)と滑り破壊の形態を考慮して、洗掘深 Z_{bs} に対する必要限界敷設幅 B_d を定式化した。

2) 根固め工を設計する際には、不安定土砂を有する滑りの危険性の高い状態を想定し、必要限界敷設幅 B_d を式(3)により定めることが望ましい。