

堤防越流による洗掘計算

東北大学 学生会員 野手 武
 東北大学 正会員 有働 恵子
 東北大学 正会員 真野 明

1. はじめに

越流による破堤の物理的機構を考える上で、堤防越流による洗掘の様子を知ることは重要である。洗掘を再現することができれば、汎用的な越流破堤モデルの構築へ発展させることができると考える。

そこで本研究では、流れの計算、土砂輸送の計算を通じて、越流による堤防裏法面洗掘を再現する理論的手法開発を目指す。

2. 実験の概要

計算結果との比較では、国土交通省東北地方整備局によって行われた越流実験を参考にした。実験の中で堤防の形状は、高さと天端の長さがそれぞれ 3m、川裏側斜面の勾配が 1/2 であった。越流条件は、流入量 1m³/s、越流幅 4m であり、越流水深は 0.3m と想定されている。また、河床構成材料は開削面の様子よりほぼシルトであった¹⁾。

3. モデル

3.1 越流計算

連続式と運動方程式はそれぞれ以下ようになる。

$$(1) \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$(2) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2}{\partial x A} = -gDB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{n^2 g |Q|}{D^{7/3}} Q$$

ここに、 η ：水位(m)、 Q ：流量(m³/s)、 B ：水路幅(m)、 A ：流水断面積(m²)、 g ：重力加速度(m/s²)、 D ：水深(m)、 n ：Manning の粗度係数である。越流幅方向の場所的变化は考慮せずに流下方向に対する変化のみを考慮した。

3.2 浮遊土砂濃度計算

浮遊土砂濃度は以下の輸送方程式より求めた。

$$(3) \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{1}{BD} \frac{\partial (\bar{C}Q)}{\partial x} = \frac{\bar{C}}{BD} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{\varepsilon}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) - \frac{w_0}{D} C_{bottom} + \frac{w_0}{D} C_a$$

ここに、 \bar{C} ：水深平均の浮遊土砂濃度、 w_0 ：沈降速

度(m/s)、 $\bar{\varepsilon}_x$ ：水深平均の拡散係数、 σ_s ：乱流 Schmidt 数である。右辺の第 3 項は沈降を、右辺の第 4 項は巻き上げを示す。

沈降を示す項において、鉛直方向の濃度分布は沈降と拡散が釣り合うとして求められた Rouse の分布を仮定して、河床付近の濃度を C_{bottom} とし、平均濃度と河床付近の濃度を関係づけた。

また巻き上げを示す項においても、van Rijn の基準点濃度式を仮定して、浮遊土砂濃度を C_a とし、平均濃度と浮遊土砂濃度を関係づけた。

4. 計算条件

堤防の形状に関しては国土交通省より提供された資料の値を用いた。法尻より流下方向の勾配に関しては、等流水深を決定するために 1/100 とした。

粒径と Manning の粗度係数は、国土交通省より提供された資料を参考にして設定した。実際の開削面の様子よりほぼシルトで占められていたことから、粒径は 30 μ m とした。また、Manning の粗度係数は 0.03 とした。

初期条件では、流量は全計算範囲において 1m³/s で一定とし、水深はそれぞれの河床勾配に対する等流水深とした。

境界条件は、上流端で水深を限界水深、流量と浮遊砂濃度はそれぞれ初期条件と同様に 1m³/s、 1×10^{-4} とした。下流端では浮遊砂濃度を下流端よりひとつ前の格子ステップでの浮遊砂濃度と等しいとし、流量と水深はそれぞれ初期条件と同じとした。

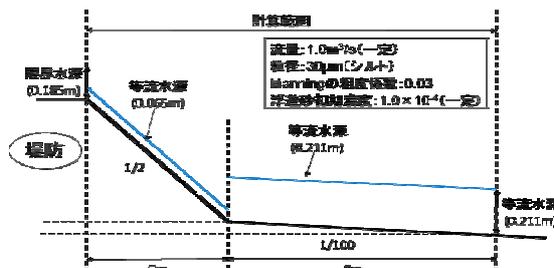


図 3 計算条件

これらの計算条件のもと、差分法を用いて格子間

隔 0.1m, 時間 step 間隔 0.0001sec として計算を行った。時間と空間に関しては, 原則的に中央差分を用い, 移流加速度項だけは, 安定性を確保するために風上差分を用いた。この格子間隔と時間 step 間隔の関係は CFL 条件を満足するものである。

5. 計算結果

図4は10秒における河床位(m)と水位(m)を表している。10秒付近で水面形はほぼ安定した。

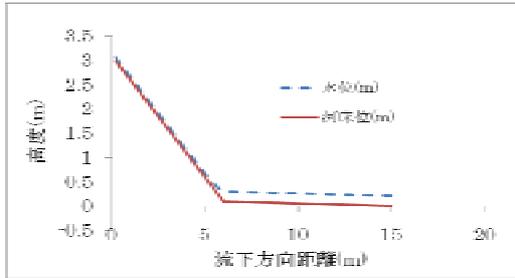


図4 越流計算結果

図5は10秒における C_a , C_{bottom} , 浮遊土砂濃度を表している。

C_a の値より, 法肩から法面中央付近にかけて巻き上げが激しく起きていることが考えられる。また C_{bottom} の値より, 法尻より少し下流で沈降が起きていることが考えられる。

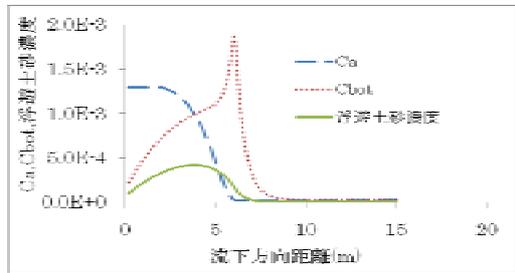


図5 浮遊土砂濃度計算

越流計算, 浮遊土砂濃度計算を基に行った洗掘計算の結果を図6に示す。図6は30分における河床位, 河床位差を表したものである。多少極端な堆積が法尻付近で見られるが, 法肩から法面中央付近まで洗掘が顕著に見られ, 法尻付近で堆積が起こる様子がわかる。

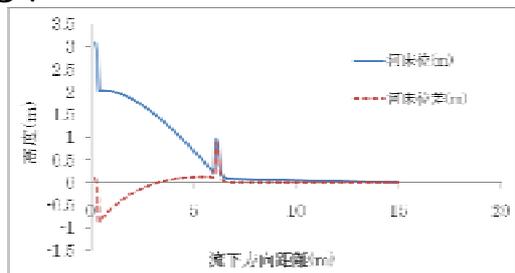


図6 洗掘計算

6. 計算結果と実験結果との比較・検証

図7は国土交通省からいただいた実験の資料で, 時間ごとでの法面の様子を表している。今回の計算では天端の洗掘は考慮していないが, 実際の法面洗掘においても, 法肩から法面中央付近まで激しく洗掘が起こり, 法面中央付近から法尻にかけては洗掘が緩やかであることが越流10分後, 越流23分後の法面の様子からわかる。したがって, 浮遊土砂濃度の計算結果から考察したようなメカニズムで実験の洗掘も起きていることが推測できる。つまり, 法肩から法面中央付近にかけて土砂が激しく洗掘されるため浮遊土砂濃度は徐々に大きくなっていき, 法面中央付近から法尻にかけては巻き上げと沈降の平衡を経て, 法尻で勾配が変わることにより土砂の堆積が起こるのである。

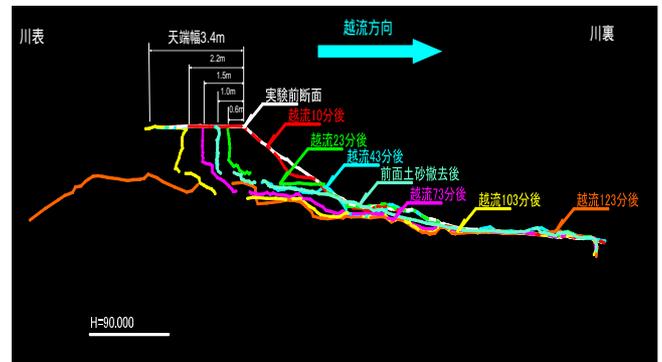


図7 実験における洗掘の様子¹⁾

7. まとめ

以上本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

- ・堤防越流した流れが射流から跳水を経て常流になる現象を安定して計算できることを示した
- ・浮遊砂輸送を巻き上げと沈降とで別個に評価した非平衡モデルを提案した
- ・洗掘場所と堆積場所とのメカニズムがわかった
- ・土砂輸送の計算を通じて, 現地実験の洗掘の様子を表すことができた

参考資料

- 1) 山形河川国道事務所: 旧堤を用いた堤防浸透・越流実験の経過報告【最上川支川須川】, 2007。