

## 流れの非静水圧性を考慮した堤体の越流侵食過程の数値解析

新潟大学大学院自然科学研究科  
株式会社 キタック  
新潟大学災害・復興科学研究所

正会員 〇仮澤 広晃  
正会員 五十嵐 拓実  
正会員 安田 浩保

### 1. はじめに

近年の豪雨災害では、流量規模が大きい洪水の増加により長時間かつ広範囲において洪水が堤防を越流して、さらに堤体裏法面がその越流水により侵食され決壊に至る事例が増えている。堤防調査委員会の資料<sup>1)2)</sup>等によると、このような越流侵食の進行過程は、一般的に川裏法尻の洗掘から始まるとされているが、越流侵食過程における物理機構は不明である。実河川の堤防の越流侵食現象の解明にあたり、これを再現しうる解析法の確立は社会的要請も高いと言える。

数値解析による越流侵食現象の記述には、堤体形状の変化を記述する土砂輸送だけでなく、その駆動源となる流れの再現も重要であろう。ここで論点となる事項の一つとして、圧力分布の取り扱いが挙げられる。従来の越流侵食解析において越流水の記述に頻用される浅水流のモデルは静水圧の仮定に基づく。しかし、流れの場である堤体上は法肩部および法尻部で底面勾配の急変が伴い、このような箇所では水面の曲率が大きく非静水圧性が顕著になることが知られている<sup>3)</sup>。そのため、解析において流れの非静水圧性を考慮した場合には、法面上の水位や流速が静水圧条件下に比べ大きく異なる分布を持つことが推測され、これに伴い堤体の越流侵食過程における底面の侵食量にも違いが生じる可能性がある。しかし、非静水圧性を考慮した堤体の越流モデルはいくつか提案されてはいるものの、堤体の侵食過程まで検討された既往の研究は、著者らの知る限りない。

本研究では、実河川の堤体越流侵食過程を再現しうる数値解析法の構築に向け、流れの非静水圧性を考慮したモデル(以下、非静水圧モデルと呼ぶ)および従来の静水圧の仮定に基づくモデル(以下、静水圧モデルと呼ぶ)を用いて堤体上を流れる越流水の再現を比較し、越流侵食解析への適用を試みた。

### 2. 数値解析手法

#### (1) 流れのモデル

非静水圧モデルには、以下の連続の式(1)と運動の式(2)で表される後藤の式<sup>4)</sup>を採用した。

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{D^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} - \frac{\tau}{\rho} \quad (2)$$

ここに、 $M$ は単位幅流量、 $\eta$ は水位、 $D$ は水深、 $g$ は重力加速度を表す。

静水圧モデルである浅水流方程式は、連続の式(1)および以下の運動の式(3)で表される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\tau}{\rho} \quad (3)$$

(2)、(3)式中の $\tau$ は底面せん断力であり、式(4)に示す Manning の等流流速式から得られるものとした。

$$\tau = \frac{\rho g n^2 M |M|}{D^{7/3}} \quad (4)$$

ここに、 $n$ は Manning の粗度係数を表す。

#### (2) 土砂輸送モデル

堤体材料にはしばしば使用される粘着性土の土砂輸送機構は砂礫とは全く異なり、土粒子の剥離(侵食)が現象を支配するため、本研究では、土砂輸送モデルには式(5)で表される侵食速度式を適用する。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{E}{1-\lambda} = 0 \quad (5)$$

ここに、 $\lambda$ は間隙率、 $E$ は侵食速度である。侵食速度 $E$ は、Parker ら<sup>5)</sup>の算定式(6)により求める。

$$E = \begin{cases} \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 $\tau_c$ は限界せん断応力を表し、 $\alpha$ および $\gamma$ は材料定数である。すなわち、本研究では土砂輸送モデルには侵食量のみを取り扱い、堆積量は無視するものとする。

#### (3) 計算条件

本研究では、堤高約6.7m、法面勾配1/3の台形堤防の正面越流を想定して計算領域を設定した。空間の離散間隔は $\Delta x = 1.0$  m、時間の離散間隔は $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$  sとした。Manning の粗度係数は $n = 0.03$ を仮定し、境界条件には堤防上流端に単位幅流量 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 、下流端に等流水深を仮定して水位分布を与えるものとした。

### 3. 数値解析結果

#### (1) 越流水の再現の比較

まずは、流れのモデルによる越流水の解析結果を比較する。なお、底面は固定床とし越流水による侵食を生じないものとする。

図-1はある一時刻における越流水の水位および底面位(茶線)を示す。青線は非静水圧モデル、緑線は静水圧モデルの解析結果である。同図より、堤防の川裏側( $x = 40 \sim 80$  m 区間)では流れのモデルにより水位に明確な違い

**Key Words:** 数値解析, 越流, 侵食, 堤防, 非静水圧  
〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050 TEL 025-262-7053

が確認できる。まず、非静水圧モデルの場合では、堤体の裏法肩部から法尻部にかけて波打つように周期的な水面の振動が生じており、これに対して静水圧モデルの場合は、底面勾配の急変部を除き直線的な水面形となっている。非静水圧モデルでの解析結果に見られる法面上の水面の振動は、急勾配斜面上の流れに発生する転波列のような現象を再現しているものと考えられる。法肩部の下流からこのような波列の発生の要因は非静水圧を考慮したためと考えられる。

図-2 は同時刻における越流水の流速を示し、青線は非静水圧モデル、緑線は静水圧モデルである。法面上の流速はどちらの流れのモデルにおいても下流に向かって増大する傾向であるが、流速の分布は異なっているようである。静水圧モデルの場合における各地点の流速は、裏法肩部と法尻部で急変し、それ以外では漸変するか、およそ一定の値となっている。これに対し、非静水圧モデルの場合における流速分布は、裏法肩部で発生した波形に合わせて流速が増減している。また、図-2 はある一時刻の流速分布を示したものであるが、静水圧モデルでは法面上の流速はどの地点でも一定の値であるのに対し、流れの非静水圧性を考慮した場合での堤体法面上における流速分布は、非静水圧を考慮した解析において特有の波状性を伴う結果となった。

また、図-1 および図-2 から、法尻部より下流側の水位、流速は非静水圧モデルの方が大きく、すなわち越流量が異なることが示唆される。これらの差異は、非静水圧性が顕著となる裏法肩部を境に生じていると考えられる。一方で川表側 ( $x = 90 \sim 100\text{m}$  区間) では、非静水圧モデル、静水圧モデルの水位および流速は程良く一致しており、静水圧近似が成り立つものと考えられる。

## (2) 越流侵食解析結果

次に、前節の図-1 の結果から底面の侵食解析を開始し、計6分の越流侵食解析を行った。ここに、図-3 は各地点における底面位変化量であり、すなわち侵食量を示す。青線は非静水圧モデル、緑線は静水圧モデルでの底面位変化量である。

同図からは、堤体の裏法尻部である  $x = 60\text{m}$  前後で堤体が大きく洗掘されていることがわかる。しかし、侵食量は流れのモデルにより明確な差異があり、全体的に非静水圧モデルの方が多くなる結果となった。また、侵食箇所についても大きく異なり、非静水圧モデルでは裏法尻部よりやや上流側 ( $x = 65 \sim 70\text{m}$  区間) まで侵食が及んでいるのに対し、静水圧モデルの場合は局所的である。これは、越流侵食の弱点の推定や対策を講じる場合などにおいて重要な問題となりかねない。また、前節の解析結果を踏まえると、越流水の流れに静水圧近似を用いた場合には法面上の流速は小さくなり、結果として越流水による堤体の侵食量の過小評価となりうると考えられる。したがって、流れの非静水圧性を考慮するか否かによって、堤体の越流侵食過程は大きく異なる可能性が示唆される。一般に流線の曲率が大きな箇所において非静水圧の効果の考慮が必要となる。今回の結果は、静水圧モデルと非静水圧モデルとで流れの解析結果は大きく

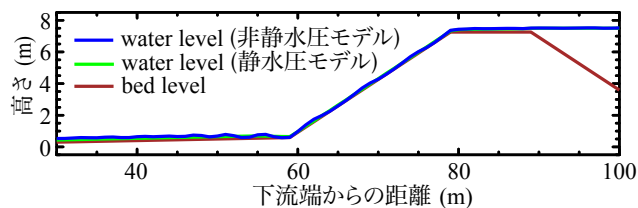


図-1 越流水の水位分布

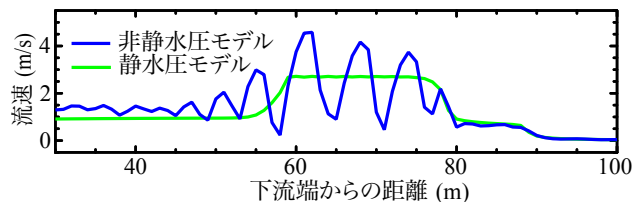


図-2 越流水の流速分布

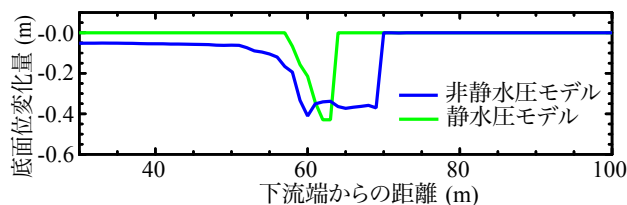


図-3 底面位変化量

異なり、非静水圧を考慮した解析の方が現実の堤体法面上における流れやそれを駆動源とした土砂輸送の物理と整合性するものと考えられる。

## 4. おわりに

本研究では実河川の堤体越流侵食の侵食過程を再現しうる解析手法の構築に向け、異なる2つの流れのモデルを用いて越流水の解析と、越流による堤体の侵食解析を実施した。その結果、法肩部の前後で流れのモデルにより水位と流速の分布に差異が生じ、静水圧の条件下では、流れの非静水圧性を考慮した場合に比べて流速が小さくなることが示された。また、流れの非静水圧性を考慮した場合での堤体法面上における流速分布は、非静水圧を考慮した解析において特有の波状性を伴う結果を得た。このことから、流れの再現に静水圧モデルを用いた場合、越流水による法面上の侵食量が過小評価される可能性が示唆された。今後は堤体模型を用いた実験を行い、本研究の数値解析結果の妥当性を検証する予定である。

## 参考文献

- 1) 千曲川堤防調査委員会:千曲川堤防調査委員会報告書, 2020.
- 2) 国土交通省 関東地方整備局:第2回 鬼怒川堤防調査委員会資料, 2015.
- 3) 本田隆英,小俣哲平,織田幸伸,伊藤一教:津波越流時の海岸堤防に生じる局所圧力に関する固定床水理実験,土木学会論文集B3(海岸開発),Vol.72, No. 2, I.539-I.544, 2016.
- 4) 後藤智明:アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式,土木学会論文集,第351号, pp.193-201, 1987.
- 5) Gary Parker, Norihiro Izumi:Purely erosional cyclic and solitary steps created by flow over a cohesive bed, *J. Fluid Mech.*, Vol. 419, pp. 203-238, 2000.