

河川堤防決壊口における横越流量の算定

The Side of overflow discharge through river levee crevasses

北海道大学工学院環境フィールド工学専攻 ○学生員 徳川亜衣子 (Aiko Tokugawa)
北海道大学教授 工学研究院環境フィールド工学部門 正会員 泉典洋 (Norihito Izumi)

1. はじめに

近年、地球規模での気候変動によって局所的集中豪雨が増加している。既往最大雨量を越える雨量がしばしば記録され、大雨によって上昇した水位が堤防を越え越水破堤に到るケースも生じている。今後気候変動がさらに進行し局所的集中豪雨が増加することになれば、破堤の危険性はさらに増加することが危惧される。これに対応するには、堤防自体の安全性を高めると同時に、破堤時の被害を最小限に抑えることが重要となるが、そのためには、破堤の物理機構を明らかにする事が必要となる。

破堤の原因で最も多いのが越流破堤である。堤防のほとんどを占める土堤は越流侵食に弱く、一旦越流が発生すると高い確率で破堤に到る。越流の多くは、流れが破堤箇所に対して平行となる横越流である。ところが横越流による破堤は実験が難しいことから一部の例外を除いて¹⁾、これまでほとんど行われていない。

また、これまでも横越流量に関する研究は数多く行われているが、多くは後述する De Marchi の式をベースに、実験によって詳しい流量係数を導いたり^{2,3)}、数値計算を対象としたものであり⁴⁾、破堤プロセスを直接対象とした越流量式はほとんど存在していない。

そこで本研究では、越水破堤が生じた際の横越流現象を明らかにし、入手可能な情報から横越流量を予測する手法を提案する。

2. 横越流の予測式

2.1 De Marchi の公式

横越流に関する式として De Marchi の式がある。これは一様な長方形水路において比エネルギーが一定であるという仮定のもと得られた理論解である。

横越流堰の長さを L 、川幅を B 、堰の高さを w 、水深を h とする。また、静水圧分布と流速分布が断面でほぼ一様と仮定できる流れを対象に、横越流箇所の上流端を原点として x 軸をとる (図-1 参照)。このような条件において次のような De Marchi の式が導出される。

$$L = \frac{3B}{2C_M} [\phi(h_1) - \phi(h_0)] \quad (1)$$

$$\phi(h) = \frac{2E - 3w}{E - w} \sqrt{\frac{E - h}{h - w}} - 3 \tan^{-1} \sqrt{\frac{E - h}{h - w}} \quad (2)$$

ここで L は越流部の長さ、 h_0 は越流上流端での水深、 h_1 は越流下流端での水深である。

De Marchi の式を利用するためには越流区間における上流端と下流端の水深が必要となるが、実際の破堤において越流区間の上流端と下流端における水深を知るのは難しい。そこで De Marchi の式を基に h_0 および h_1 、越流量を求める方法を考える。

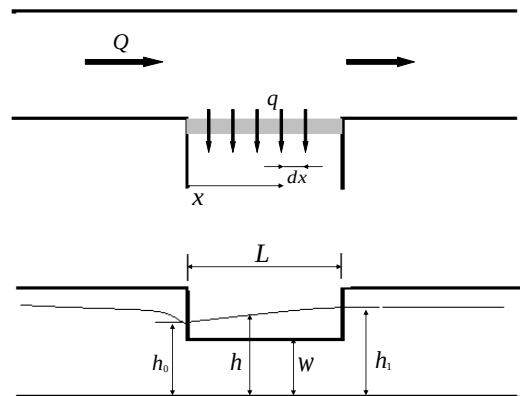


図-1 横越流の概念図 (a) 平面図, (b) 側面図

2.2 越流量の計算

決壊幅が十分小さいとき、越流区間全域で常流となり、決壊幅 L がさらに大きくなると、越流区間上流側で射流が現れ途中で跳水が生じる。これより、越流区間全域で常流である場合と越流区間で射流から常流に遷移する場合に分けて越流量予測式を求める。越流区間全域で常流である場合は(3)より、また越流区間内で射流が現れる場合は(4)より全越流量が求められる。

$$Q_w = 1 - M h_1^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

$$Q_w = -\frac{1}{2} + h_{ju} \sqrt{3 - 2h_{ju}} + \sqrt{2} (h_{jd} \sqrt{E_d - h_{jd}} - h_1 \sqrt{E_d - h_1}) \quad (4)$$

De Marchi の式を基にして、横越流現象を明らかにすると同時に、取得可能な情報から流量を推定する方法を提案した。河川決壊口から横越流する場合、a) 決壊口の幅が十分狭いと全区間で常流、b) 決壊口幅がある程度広くなると区間途中で常流から射流に遷移、c) 決壊口が十分広くなると全区間で射流の三つの場合が存在する。いずれの場合も、フルード数、越流幅/川幅、決壊口高さ/限界水深がわかれば横越流量を推定することが

可能である。横越流量は、越流区間に射流が現れると大きく減少し、決壊口が広がってもあまり増加しなくなる。決壊口の広がる速度が横越流量と関係付けられれば、越水破堤を簡便にモデル化することが可能となる。

3. 拡幅プロセス

横越流破堤における拡幅進行過程をモデル化するためには、越流によって堤防に生じるせん断力が重要になると考えられる。そこで、全越流量より単位幅当たり越流量を求めることから掃流量を求めて、最終的に破堤進行速度を提案したい。

千代田堰実験水路における破堤実験より、大まかな越水による破堤拡幅は段階的に進行することがわかった。第1段階では、破堤浸食が鉛直方向に進行しており越水しても破堤拡幅は進行せず、越流量もほとんど増加しない。第2段階では、上下流方向に破堤拡幅が徐々に進行し、越流量も徐々に増加し始める。第3段階では、破堤拡幅速度が急激に早くなり、氾濫流量も急増する。第4段階では、破堤の拡幅が緩やかとなり、氾濫流量は概ね一定で推移する。そして第5段階において破堤拡幅が終了する。特に第1段階においては、越水開始から拡幅開始までの段階であり、破堤拡幅が始まるのは堤体断面の大半が崩壊した以降である。これは堤外河川の流れを考慮しない正面越流の破堤実験と同様の結果であり、越流状態も同様である。よって、本研究では第2段階からを対象とし、河川堤防の天端から河床まで浸食され破堤拡幅についてのモデル式構築を目指す。2節で述べた越流量式は堰の高さも必要な値であるが、拡幅進行について注目するため堰はすべてないものとして考えていく。

砂礫粒子が河床上にあるとき、河床における掃流力あるいは摩擦速度が限界値を越えると粒子は移動を開始する。破堤において拡幅の進行が止まる時は、単位幅あたりの越流量が小さくなり掃流力が限界掃流力を越えなくなった時であると考えられる。現在一様粒径砂礫の限界掃流力の算定式としては、岩垣の式が最もよいとされている。岩垣の式を標準的な値、すなわち、砂粒の水中比重 $s=1.65$ 、動粘性係数 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ (20.3℃)、重力加速度 $g=980\text{cm}/\text{s}^2$ を使用して書き表すと、次式となる。(cm-sec 単位)

$$\left\{ \begin{array}{ll} d \geq 0.303 \text{ cm}; & u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303 \text{ cm}; & = 134.6d^{31/32} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118 \text{ cm}; & = 55.0d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565 \text{ cm}; & = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065 \text{ cm}; & = 226d \end{array} \right. \quad (5)$$

代表的な流砂量式として次式に示す Meyer-Peter-Müller の式がある。

$$q_B = 8(\tau_*' - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (6)$$

s : 砂粒の水中比重(砂の標準値1.65), d : 砂粒の粒径(cm), g : 重力加速度(980cm/s²)

ここで、 τ_*' は無次元有効掃流力といわれ、次式で書き表される。

$$\tau_*' = \frac{u_*'}{sgd} \quad (7)$$

有効掃流力の概念は、次のように考えるとよい。すなわち、今、河床に河床波がある場合に、それは流れの抵抗に対して形状抵抗として寄与するものと考え、形状抵抗として分離した残り砂面上の表面抵抗分を有効掃流力と定義する。したがって、河床波がない場合には $\tau_*' = \tau_*$ であり、(6)式は次式で書き表される。

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (8)$$

4. おわりに

実際に越水破堤が起こった場合、破堤拡幅速度・拡幅継続時間・最終破堤幅を把握することは非常に重要である。今後は、求めた掃流量と以前提案した横越流量を結び付けることで拡幅過程の時間的変化をモデル化する式の構築をめざす。理論式を求めた際には、千代田実験水路の拡幅データと比較することでさらに妥当性を検討したい。

参考文献

- 1) 島田友典・横山 洋・平井康幸・三宅 洋: 千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験, 水工学論文集 Vol. 55, S841-S846, 2010.
- 2) 中川博次・中川 修: 横越流ぜきの特性について, 京大防災研年報, 第11号B, pp. 249-265, 1968.
- 3) 室田 明・福原輝幸・鋤田義浩: 横越流堰の越流量の評価に関する研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, 1985.
- 4) 秋山壽一郎・重松末玲・大庭康平: 直線河道における破堤氾濫流の横越流特性と流量式の改善, 水工学論文集, 第55巻, 2011.
- 5) 吉田勝秀: 流砂の水理学, 丸善
- 6) 島田友典・渡邊康玄・横山洋・辻珠希: 千代田実験水路における横断堤越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第53巻, pp. 871-876, 2009.
- 7) 伊藤幸義・島田友典・横山洋・坂野章・茂木映治: 模型実験による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討, 土木学会河川技術論文集, 第16巻, pp. 371-376, 2010.
- 8) 島田友典・平井康幸・辻珠希: 千代田実験における越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第54巻, pp. 811-816, 2010.
- 9) 島田友典・渡邊康玄・横山洋: 十勝川千代田実験水路の基礎的な推理特性, 寒地土木研究所(658), pp19-28, 2008.
- 10) 荒井信行・清水康行: 現場のための水理学, 寒地土木研究所(413), 1987.