

破堤プロセスに関する簡易モデルの開発

Development of simple model for the dam breach

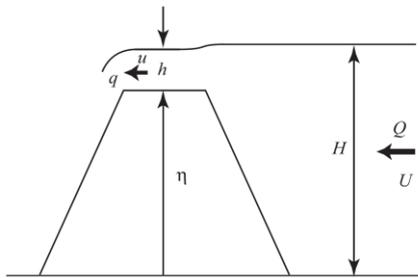
北海道大学大学院工学院 学生会員 徳川 亜衣子(Aiko Tokugawa)

北海道大学大学院工学院教授 正会員 泉 典洋(Norihiro Izumi)

1.はじめに

近年では、局所的集中豪雨によって既往最大雨量を越える雨量がしばしば報告されており、全国各地で洪水被害が多発している。破堤した時の被害は甚大なものであるうえ、局所的集中豪雨は今後も増加すると考えられているので、破堤時の被害を最小限に抑えることや堤防自体の安全性を高めることが重要となる。そのためには、破堤のメカニズムを解明する事が必要となってくるのだが、過去の実例から破堤が発生する要因としては、約8割が越水破堤によるものと判明している。越水破堤とは、洪水時に河川水位が上昇し、堤防を越流すると越流した流れによって堤防が侵食を受け崩壊していくものである。よって、本研究では越水破堤を扱う。前年度卒論生である宮脇が正面越流における破堤プロセスを再現するモデル式を構築してくれているのだが、実際の破堤では横越流の場合が多い。本研究では、横越流量と河川本川の間を理論と実験によって明らかにし、正面越流破堤のモデル式を横越流破堤の場合にも適用できるように拡張する事が目的である。また、現在、十勝川千代田堰堤において実物大スケールの越流破堤実験が行われているので、その実験結果を実験データとして使用する。

2.使用するモデル式



正面越流破堤の概念

宮脇の論文から、越流破堤プロセスのモデル式は次のようにまとめられる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\alpha \left\{ \rho C_f \left(\frac{Q^2}{3H^2} + \frac{2}{3} g(H-\eta) - \tau_{c2} \right) \right\}^m + \gamma D \dots (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\beta \left\{ \rho C_f \left(\frac{Q^2}{3H^2} + \frac{2}{3} g(H-\eta) - \tau_{c2} \right) \right\}^m \dots (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{wL} \left(Q'w - B \sqrt{g \left(\frac{2}{3} \left(\frac{Q^2}{2gH^2} + H - \eta \right) \right)^3} \right) \dots (3)$$

ここで、 η :堤防の天端高さ、 B :破堤口の幅、 H :河川の水深である。越流破堤は、まず鉛直方向に侵食が進行し、側面の下層が削られることで上層が不安定になり、崩落し振幅が生じるという過程で進行する事が分かっている。そこで、このモデル式では、正面越流による破堤状況を再現するために、堤防の天端高さの時間変化と水路の水深の時間変化の定式化を行っている。正面越流の概念図より、上流の流れと堤防の流れの間に次のエネルギー保存則が成り立つと仮定することができる。

$$\frac{u^2}{2g} + h + \eta = \frac{U^2}{2g} + H = E$$

ここで、 E は全水頭である。また、越流時には堤防上で常流から斜流へと変化することから、越流水深は限界水深であり、越流流速は限界流速であるとして求められた。

正面越流の場合では、堤防に対し直角に越流するため、エネルギー保存則が成り立つと仮定することができたが、横越流の場合では、堤防に対して斜め方向に越流するため、エネルギー保存則を仮定する事が出来ない。しかし、河川の水深から越流量を見積もる事が出来れば、式(1)~(3)のモデル式を横越流の場合にも適用できると考えられる。

4.横越流出の定式化

静水圧分布と流速分布が一様と仮定できる流れを対象に、横越流堰の上流端を原点として x 軸をとり、微小区間 dx において運動量保存則を用いて次の式が得られる。

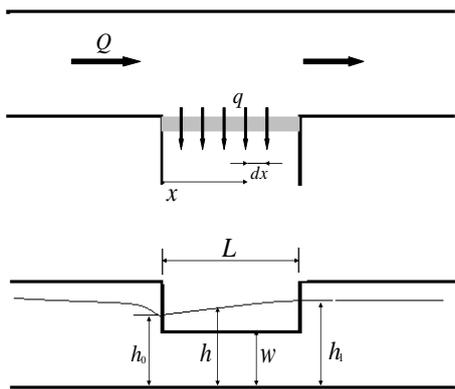
$$\rho(Q + dQ)(v + dv) - \rho Qv = P_1 - P_2 - W \sin \theta - F_f \dots (4)$$

ここで、 $P_1 - P_2$:水深変化分による dx 間の圧力差、 W :区間の水の重量、 F_f :水路底面および側壁からの摩擦力を現

している。そして(4)式を、 $v+dv=(Q+dQ)/(A+dA)$ 、 $v=Q/A$ の関係より整理していくと、次のような水面形方程式が求められる。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_0 - i_f - (2v - v_f) \frac{q^*}{gA^2}}{1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}} \dots\dots\dots(5)$$

h :水深、 i_0 :水路勾配、 i_f :摩擦損失勾配、 v :水路内の流速、 v_f :流出流れの流速である。横流出の場合なので、 $v_f = v(q < 0)$ と置く。



横越流破堤の縦断面図

さらに、De Marchi の公式を用いることにする。

$$L = \frac{\sqrt{2gB}}{C'} \left\{ \phi \left(\frac{h_1}{H} \right) - \phi \left(\frac{h_0}{H} \right) \right\} \dots\dots\dots(6)$$

$$\phi \left(\frac{h}{H} \right) = \frac{2H - 3w}{H - w} \left(\frac{H - h}{h - w} \right)^{\frac{1}{2}} - 3 \tan^{-1} \left(\frac{H - h}{h - w} \right)^{\frac{1}{2}}$$

L :横越流頂長、 C' :せきの流量係数、 h_0, h_1 :それぞれ横越流せき上流端、下流端での水深、 H :水路底を基準とするエネルギー水頭 $H = h + Q^2 / (2g(Bh)^2)$ である。また、横越流せきの単位幅あたりの越流量は、

$$q^* = -C'(h - w)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

とする。矩形断面水路において、比エネルギーが一定であり、かつ摩擦勾配と河床勾配が微小であるという仮定と式(7)より、式(5)は整理すると

$$dx = \frac{B\sqrt{g}(3h - 2H)}{C'\sqrt{2(H - h)(h - w)^3}} dh \dots\dots\dots(8)$$

となる。式(8)を x について積分していくことで式(6)が求められる。この式より横越流堰の上流端と下流端の水深から、横越流幅が求められる。また、連続式より、

$$\frac{dQ}{dx} = -q$$

式(6)より横越流幅が分かるので全越流量は、 $Q = \int_0^L q dx$ と

して求められる。式(1)~(3)において、 η :堤防の天端高さ、 B :破堤口の幅となっているが、横越流においては L :横越流頂長、 w :せき高となっている。よって、モデル式の中で用いられている $B \rightarrow L$ とし、 $\eta \rightarrow w$ とする。そして、式(1)~(3)のモデル式に式(6)、(7)を加えた連立式を横越流におけるモデル式と考える。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\alpha \left\{ \rho C_f \left(\frac{Q'^2}{3H^2} + \frac{2}{3} g(H - w) - \tau_{c2} \right) \right\}^m + \gamma D$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -\beta \left\{ \rho C_f \left(\frac{Q'^2}{3H^2} + \frac{2}{3} g(H - w) - \tau_{c2} \right) \right\}^m$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{BL'} \left(Q'B - L \sqrt{g \left(\frac{2}{3} \left(\frac{Q'^2}{2gH^2} + H - w \right) \right)^3} \right)$$

$$L = \frac{\sqrt{2gB}}{C'} \left\{ \phi \left(\frac{h_1}{H} \right) - \phi \left(\frac{h_0}{H} \right) \right\}$$

$$q^* = -C'(h - w)^{\frac{3}{2}}$$

ここに、 ρ :水の密度、 C_f :抵抗係数、 Q' :河川の単位幅流量、 B :水路幅、 L' :水路長である。

計算を行うにあたり、越流が終了するとき、どのような条件のときであるか、また、最大破堤口幅になった後はどうなるかなど境界条件について考える必要がある。また、中川・中川の論文からも横越流量 Q の推定誤差は L/B が大きいほど大きくなる傾向があるので、時間経過とともに破堤口が大きくなるにつれて計算結果の誤差が生じることに注意しながら計算を行っていきたい。

5.おわりに

最終的に、十勝川千代田堰実験水路における越水破堤実験の実験データを用いて、実験値と計算結果を比較することで、横越流の場合にも適応するモデル式に拡張できたかどうかを確認したい。

参考文献

- 1) 宮脇幸大(2010), 越水による破堤破堤プロセス
- 2) 中川博次・中川修, 横越流せきの越流特性について, 京大防災年報, 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, pp.249~252, 1985
- 4) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・常松智博・伊賀円, 接近流が常流の場合の有限な相対堰高を有する横越流堰の流量係数, 土木学会論文集, No.803, pp81~89, 2005