越水による堤防決壊過程に関する混合粒径型モデルを用いた数値解析

金沢大学大学院 学生会員 〇岩倉浩士 金沢大学 石井蒼也 金沢大学 正会員 楳田真也

1. はじめに

河川堤防の破堤現象は重大な被害を引き起こすた め,破堤リスクの評価や防災対策の高度化を検討する 上で、地先における破堤・氾濫特性の理解が重要であ る. 越水破堤に関する研究は実験的・数値解析的に多 く行われている. ほぼ実スケールの堤防を用いた越水 破場実験 1)が行われ、直線場防の切欠きからの越水に よる破堤口の拡幅機構や堤内地への土砂堆積特性等に 関して貴重なデータや知見が得られている. また, 越 水破堤に関するモデルの開発と適用性の検討が行われ ているが、破堤・氾濫過程は河川・堤防・堤内地の水 の流れ、底質や地形の相互作用系の非定常性が強いた め,一般に数値解析による破堤拡幅の定量的な評価は 容易でない. 著者の一人は、堤防材料の粒度分布に着 目して, 混合粒径型モデルを用いて, 実スケールの破 堤拡幅実験 1)の再現計算を行い、破堤・氾濫現象への 数値解析モデルの適用可能性を示した 2). さらに本研 究では本モデルの整合性を検討するために, 異なる河 川流況・堤体材料・堤防断面の条件下で生じた複数の 破堤現象を再現計算し、結果を考察した.

2. 解析対象, 方法および条件

実河川の堤防と同程度のスケール(堤防高 3m×天端幅 3m)で行われた既存の破堤実験 1)を解析対象とする. 川幅や法勾配は河床幅 8m の水路沿って 2 割勾配の堤防と氾濫域を設定した. 越水破堤のきっかけとして堤防天端に深さ 0.5m, 底幅 1m の切欠き(縦断距離 x=0m地点付近)に与える. 本研究では,先行研究 2)で解析した実験条件 Case 4 に比べて,堤防天端幅が半減し,堤体材料は砂礫成分が増加し,さらに河川の水面勾配が約 1/3500 と緩くなった Case 2 を解析対象とする.

解析モデルには、洪水時の流れと河床変動、河川堤防の越水による破堤と氾濫の過程を統一的に解析するため、流れ・底質輸送・地形変動の結合モデルである Delft3D-flow³⁾を用いた. 底質輸送と地形変化に関しては、混合粒径の河床・堤体材料を複数の粒径集団に

分けて、砂礫の選択的輸送・堆積を考慮して破堤拡幅 過程を解析した.河床・堤防・基礎地盤も表層部の交 換層と下層の複数の貯留層に分割した.計算格子セル の各層における各粒径集団の体積比率を変数として、 各粒径集団の体積保存式および混合粒径全体の体積保 存式を満たすように地形変化を計算した.なお、本研 究で用いた解析モデルの詳細設定は、参考文献²⁾を参 照されたい.

実験では、堤防の切欠き上流 20m(x=-20m)より上手側の堤防表法面はブロックで固定されていたため、計算では固定床とした。河川の上流境界は切欠き上流80m地点に設置し、実験の観測流量を与えた。河川の下流境界は切欠きから100m下流に設置し、水位勾配を1/3500とした。氾濫域の縦断勾配は縦断勾配を1/500とした。格子点間隔は破堤口周辺ではより正確なデータを取るために0.5m、その他では1.0mの直交格子とした。マニングの粗度係数は0.023 s/m^{1/3}で与えた。堤防・河床材料は図-1に示す実験で用いた堤体材料の粒径分布図から3集団の混合粒径とした。

3. 解析結果および考察

破堤実験終了後の河川・堤防・堤内地の地形変化や河床・堤体材料の堆積状況の再現性を確認するため,破堤・氾濫後の最終地形を実験と計算結果で比較した(図-1).破堤部から上流側で河床の低下,下流側で土砂が堆積し河床が上昇している様子や,上流側の河床材料は下流側に運ばれる以外に破堤口より堤内地側に運ばれ,堤体の崩壊によって流入した堤体材料とともに氾濫原に流入・堆積している様子をよく再現できている。また氾濫流によって堤体裏法に落堀の形成などの地形変化の特徴もよく捉えており,実験と計算で越形状は概ね一致していた。ただし,堤内地の砂礫堆積範囲が実験よりも横断方向に広くなっていた。この傾向は Case 4 を対象にした先行研究と同じであった。

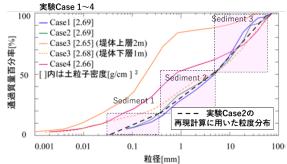


図-1 破堤実験の堤体材料の粒度分布 1) と計算の粒径設定

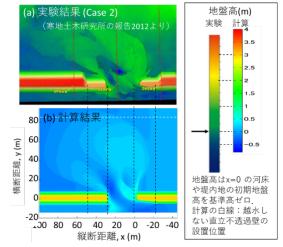


図-2 破堤後の最終地形の比較(上:実験値,下:計算値)

次に、破堤口の拡幅幅の時間変化を比較したものを 図-3に示す。破堤実験の結果リに合わせて、破堤口の 下流端が下流方向へ拡大する距離を正値で、上流端が 上流方向へ拡大する距離を負値で示した。上流方向へ の拡幅は、破堤開始の初期段階で終わっており、実験 での拡幅進行過程を計算は良好に再現できている。ま た下流方向の拡幅幅についても実験値の傾向をよく捉 えていた。ただし、越流開始後 20 分から 40 分の間の 拡幅量が実験値と比較してやや小さくなったが、本モ デルでは実験で確認された、越流が破堤口の広がりが ない初期段階、徐々に破堤口が上下流方向に広がる開 始段階、急激に拡幅が下流方向に広がる加速段階、十 分に破堤口が広がり拡幅が減速する減速段階の 4 段階 の破堤過程の各段階の特徴を良好に再現できることが 分かった。

最後に、破堤過程における河川流量と氾濫流量の定量的な評価のため、破堤口の上流側と下流側の河川断面の流量および破堤口の断面で測定された氾濫流量について、実験値と計算値の比較を図-4で行った。破堤口の拡幅が進行し、破堤口が急拡大することで堤防からの越流流量が急増する部分をよく再現できていた。また、破堤口下流の河川流量についても、破堤口が急拡した後に流量が急減する特徴を再現できていた。た

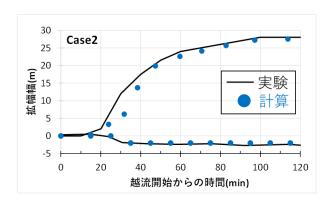


図-3 破堤口の拡幅幅の時間変化の実験 1)と計算結果の比較

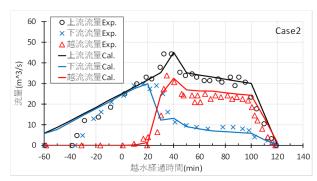


図-4 河川上・下流断面の流量と破堤口の氾濫流量

だし、ピーク流量を与えた越流開始からおよそ 40 分 経過後の越流量が実験値と比較してやや小さい結果が 得られたが、破堤過程に伴った各断面における流量の 時間変化の特徴を良好に再現できることが分かった.

4. まとめ

本研究では、先行研究 ²⁾と同様に Delft3D を用いた 混合粒径モデルを用いて、異なる河床勾配、堤防断面 や堤体材料の条件で発生した破堤現象の再現計算を行った. その結果、複数の実験条件で観測された一連の 破堤進行過程や河道・氾濫原の地形変化を概ね再現す ることができ、本モデルの整合性を示すことができた. なお、その他の実験条件の再現計算の結果や均一粒径 として扱ったモデルとの結果の比較は、研究発表会の 時に行う予定である.

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局寒地土木研究所:河川堤防の越水 破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書,192p, 2012
- 2) 楳田真也,根岸和憲: 河川堤防の越水破堤・氾濫過程への 混合粒径型モデルの適用性,土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 74, No. 5, I 799-I 804, 2018.
- 3) Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, T. M., and Stelling, G. S.: Development and validation of a three-dimensional morphological model, *Coastal Engineering*, Vol. 51, pp. 883-915, 2004.