第65回(2021年度) 北海道開発技術研究発表会論文

急流河川における侵食被災に関する 大規模水理実験 —護岸背後の高水敷洗掘から堤防侵食に

至るメカニズムの検証—

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 〇川村 里実
北海道開発局 帯広開発建設部 長谷川 武春
北海道開発局 建設部 河川計画課 松原 寛

河川の急流区間では、越流によらず堤外側からの侵食による堤防被災が頻発している。特に、 河道湾曲部の外岸側では、低水護岸の整備箇所にも関わらず、護岸背後の高水敷が侵食され堤 防侵食に至る事例が散見される。今後効率的に対策を実施するためには、堤防侵食に至るメカ ニズムの把握が重要となる。本研究では、護岸背後の高水敷洗掘から堤防侵食に至る過程を大 型実験(千代田実験水路)で再現し、その被災メカニズムを検証した。

キーワード:堤防侵食、高水敷侵食、低水護岸、千代田実験

1. はじめに

急流な河川は一般に流れが速く、特に出水時には速い 流れに伴って大量の河床材料が動くために河道の形状が 大きく変化しやすい。中でも、一出水のうちに侵食や洗 掘が大規模に進行するような河道の変化は、堤防侵食等 の被災を招く危険な現象である。実際に、北海道の急流 河川では、近年頻発する出水時に、越流によらず堤外側 からの侵食による堤防被災が多く発生している 1,2) (図-1、図-2 および図-3)。侵食の特性や被災要因との関連 性はいくつかの研究で検討されてはいるが 3,4,5、実河川 においては、河道の特性やその時点での整備の状況によ って、発生した被災特性や要因は大きく異なる。しかし、 河道の特性や整備の状況に応じた被災特性や要因につい ては十分に検討されていないのが現状である。侵食対策 を効果的かつ効率的に実施するためには急流河川におい て計画的・段階的な整備が必要であり、そのためにも河 道特性や整備状況に応じた被災特性や要因の把握が重要 となる。

主に急流区間では、出水時に堤外側からの侵食によっ て堤防被災の危険性がある箇所には低水護岸等の対策が 実施される。しかし、整備された低水護岸の被災が残念 ながら従来多く報告されている。低水護岸の被災として は、低水路の河床低下や出水時の河床洗掘による護岸根 入れ部の損傷が代表的な事例であろう。これに対して、 平成 28 年出水では、北海道のいくつかの急流河川で低 水護岸の背後の高水敷が侵食される事例が非常に多く報 告されている。ただし、低水護岸や高水敷が被災しても

KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan

堤防の被災を防いだのであれば一定の効果があったと評価すべきである。ところが、河道の湾曲部において、外岸側の低水護岸背後の高水敷が侵食されて堤防被災に至る事例が同出水時に発生している。このため、堤脚部を防護する護岸の整備が限定的な急流河川においては、低水護岸の整備箇所であっても、出水時の堤防(堤体および基盤)侵食に対する安全性を再度評価し、必要に応じて計画的・段階的に対策していくことがより一層強く求められる。

このような現状において、まずは低水護岸背後の高水 敷の侵食がどのように進行して堤防被災に至るのか、そ の特性を把握することが肝要となる。特に、河道の湾曲 部の外岸側において、平成28年出水時に発生したような 堤防の侵食に至った被災メカニズムを明らかにすること は優先すべき課題である。急流河川では、経験的に(既 往出水時の侵食規模より)堤防の防護に必要な高水敷幅 が確保されていることが多いため、低水護岸の直背面で 侵食が生じても直ちに堤防侵食に危険が及ぶとは考えに くい。むしろ幅広い高水敷にも関わらず、低水護岸背面 から堤防位置まで横断方向への侵食域が拡大していくこ とが危険となるため、対策を検討するためにもこの過程 を明らかにする必要がある。本研究では、千代田実験水 路を活用し、低水護岸背面の高水敷洗掘から堤防の侵食 被災に至る過程を大型実験で再現することによって、そ の被災メカニズムを検証することを目的とする。実験は、 令和3年6月24日に実施された。本稿は、当検討に至った 経緯を示し、千代田実験水路で実施した実験結果を速報 として報告するものである。



図-1 音更川における堤防侵食箇所



図-2 空知川における堤防侵食箇所



図-3 辺別川における堤防侵食箇所

2. 河川の急流区間における堤防の侵食被災

(1) 堤外側からの侵食による堤防の被災事例

近年の出水時に北海道内の河川(直轄区間)で発生し た堤外側からの侵食による堤防被災の事例を以下に示す。 音更川や札内川では、平成28年出水時に流路変動に 伴う大規模な側方侵食により堤防が決壊する被害が発生 した。音更川では平成23年出水時にも同様な堤防の侵 食被災が生じている(図-1)。これらは、護岸未整備の 箇所で大規模な側方侵食が生じて堤防の決壊に至った被 災事例である。なお、両河川とも低水護岸の整備箇所で は堤防の被災はなく、低水護岸による整備は一定の効果 があったと評価できる %。しかし一方で、低水護岸背面 の高水敷の侵食が多くの箇所で発生し、侵食域が堤防付 近まで及んだ箇所も散見される状況であった^{9,7}。音更 川における高水敷の侵食状況の例を図-4 に示す。コン ター図は平成 28 年出水前後の LP 測量(帯広開発建設 部)の地盤データの差分値である。低水護岸が整備され ているにも関わらず、高水敷が堤防付近まで侵食されて いる箇所が図から確認できる。

空知川や辺別川では、低水護岸が整備されていた箇所 で堤防の被災が発生した。空知川(図-2)では、流れが 堤防を越流したことが決壊要因の一つとされてはいるが、

KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan



図-4 低水護岸背後の高水敷の侵食事例"

低水護岸背面の高水敷が侵食されていたことから、堤防 が堤外側から侵食されたことも決壊要因であるという可 能性が空知川堤防調査委員会において指摘されている⁸。 なお、同委員会報告書⁸では、図-5 中に示された低水護 岸は出水後も残存していたことが確認されている。また、 辺別川においても、低水護岸が残存していながらも、背 後の高水敷が侵食されて堤防の侵食被災に至ったことが 図-3 よりわかる。空知川と辺別川の被災箇所はいずれ も河道が大きく湾曲した地点の外岸側である。このよう な湾曲部外岸側においては、低水護岸が整備されていて も堤防侵食に対する安全性は確保できない可能性をこれ らの事例が示している。

(2) 当実験で検討対象とする侵食被災および現象

本検討では、近年発生した堤外側からの侵食による堤防の被災事例に鑑みて、特に堤防侵食の危険性が高い河 道湾曲部の外岸側における被災現象を対象とすることと する。図-5に空知川の被災箇所の詳細を示す。図-5左の 画像をみると、湾曲した河道の内岸側には土砂堆積が確 認できる。また、図の右側に示すように、低水護岸が残 存していながらも出水前後で主流路位置が外岸側の高水 敷上に移動していることがわかる。堤防の侵食被災のメ カニズムを把握するために、このような出水時の河道変 化を再現し、被災に至る過程を観測することが当実験の 目的である。

3. 千代田実験水路における水理実験

(1) 水路概要および実験条件

急流河川の湾曲外岸部を想定し、表-1および図-6に示 すような河道形状を千代田実験水路内に形成した(図-7)。ここで、空知川や辺別川の被災箇所周辺は、内岸



図-5 空知川の堤防侵食箇所の詳細



図-6 実験水路平面図および断面図

側の片岸が山付きの河道であり、その地形に沿って河道 が湾曲し、外岸側だけに高水敷と堤防が配備されている ことから、実験の河道も湾曲部外岸側に高水敷を有する 複断面河道とした。

平均河床勾配は1/200とし、低水路幅や高水敷幅や粒 径等については実河川の1/4スケールを想定している。 図-6に示すように、水路上流側に測線①から測線⑫まで 約233mの直線区間を設け、その下流側の測線⑫から測 線⑭までの延長約42mの区間を曲率半径50mの湾曲部と した。さらにその下流側には80m(測線⑭から測線⑲) の直線区間を設けている。低水路外岸側(左岸)には、 測線⑨より下流側の範囲に低水護岸を敷設した。なお、 水路右岸側には全延長に護岸を敷設している。河道形成 後の河床材料調査によると、代表粒径は約17mm(低水 路21.22mm、高水敷13.35mmの平均値)であった。

KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan

通水流量は図-8に示すように約40m³/sを約9時間維持した。河道の湾曲部においては、低水路の速い流れが外岸 側の高水敷の流れに影響するため、高水敷上の一部で流 速が大きくなる。当実験の初期形状において、流量 40m³/sを流すと、低水路外岸に隣接する高水敷の極一部 で無次元掃流力が0.07以上(洗掘が発生しやすいとされ る無次元掃流力⁹⁾となるが、高水敷幅が十分にあり、 図-6の複断面形状が維持されている限りは無次元掃流力 が0.07以上の範囲は堤防まで及ばないことを事前に実施 した数値計算により確認している。この流量条件下では、 直線区間における高水敷上の無次元掃流力は約0.03と小 さく、直線部であれば高水敷上で容易に河床変動が生じ るような規模の流量ではない。このように、設定した河 道横断形状に対して著しく大きい外力ではなく、計画の 範囲内で想定し得る流量規模を実験条件として設定した。



図-7 通水前の千代田実験水路



(2) 計測項目

当実験では、主に次のような観測を実施した。通水前 後の地形状をUAVレーザー測量により計測した(グリ ーンレーザーによる計測を試みたが、通水中は河床形状 を計測できなかった)。通水中の高水敷洗掘の時間経過 は、平面的に配置した加速度センサーの動きを解析する ことによって把握することとした。クレーンで上空から 撮影した画像を用いたPIV解析によって、各時刻の平面 的な流況を把握した。本稿では速報として上記の計測結 果についてを示す。その他にも、水位計測(縦断的に左 右岸において)、トレーサー追跡、水面形計測などを実 施したが、本稿では詳細な説明は割愛する。

4. 実験結果

(1) 通水状況および堤防の侵食状況

通水前後および通水中の状況を図-9に示す。①は通水 前の湾曲部の水路の様子である。②は通水初期の状況で あり、低水路の速い流れが一部高水敷に乗り上がってい る状況が確認できる。③は数時間経過後の通水中の状況 である。測線⑭付近で低水護岸背後で水面が低くなって おり、低水路の流れが低水護岸背面へ落ち込むように高 水敷に向かっている状況が確認できる。④は通水後の状 況である。測線⑭付近で低水護岸背面に洗掘がみられ、 通水中はこのあたりに流れが集中したと考えられる。

通水後の堤防の侵食状況を図-10に示す。測線適付近 で堤体の侵食が最も進行した。通水中、堤体の侵食は崩 落によって進行する様子を確認している。

(2) 通水前後の河道変化

通水前後の河床変動量を図-11に示す。測線⑪付近で KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan



図-9 通水前後および通水中の状況



図-10 堤防の侵食状況

低水護岸背面に洗掘深の大きい箇所がみられ、洗掘深の 大きい範囲が下流へ延伸して堤防位置へ近づいているの がわかる。一方、低水路の内岸側で堆積が生じていた。

図-12に通水前後の横断面形状を示す。測線13~49では、高水敷の洗掘範囲が護岸背面だけにとどまっているものの、低水路の河床高さ程度まで比較的大きく洗掘されている。また、その下流側では、洗掘範囲が広がるとともに最深位置が堤防へ向かい、洗掘の範囲が堤防法尻



図-12 通水前後の横断面形状

に到達した測線⑮では、最深箇所がかなり堤防に接近し ていることがわかる。この洗掘範囲が堤体に達し、底部 が侵食されることによって堤体の材料が崩落して侵食が 進行したと考えられる。また、低水護岸の天端高さは通 水前後でほとんど変化が無い。低水護岸にほとんど損傷 がなく、天端高さが維持されたとしても、このように堤 防の侵食被災に至るということが確認できる。

(3) 通水中の高水敷の洗掘過程

通水中の各時刻における高水敷の洗掘状況を図-13お よび図-14に示す。図-13は、鉛直方向に10cmの深さに配 置した加速度センサーの流失した範囲を時刻毎に示す。 比較的浅い侵食が側線④~⑮付近の低水護岸背面から始 まり、徐々にその侵食範囲が上流側と外岸側へと拡大し ている。これは、高水敷上に乗りあがった湾曲した速い 流れが徐々に外岸側へ偏ることにともなって侵食範囲が 上流側へも進行したと考えられる。10時頃(通水約2時

KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan







図-14 高水敷の洗堀過程(初期河床面から 0.6mの深さ)

間経過後)までに、側線⑬~⑬-5付近まで侵食範囲が拡 大したのがわかる。図-14は、鉛直方向に60cmの深さに 配置した加速度センサーが流失した範囲を示す。図をみ ると、10時頃(通水約2時間経過後)、つまり前述の浅 い侵食範囲が側線⑬~⑬-5付近まで拡大した直後、今度 はその側線⑬-5付近の低水護岸背面で大きな洗堀が生じ、 12時半頃までには、側線⑬~⑬-5の低水護岸付近から側 線⑮の堤防付近に向かって洗堀深の大きい範囲が拡大し ている。側線⑬~⑭付近は、流れが低水路から高水敷に 直線的に乗りあがる位置であることから、この付近にお いて低水護岸背面で洗堀が生じると、低水路の流れが高 水敷に導かれやすくなり、その流れにより洗堀深の大き い侵食がこの付近から生じた可能性がある。

(4) 通水中の流況の変化と堤防侵食に至る過程

通水中の流況(PIV解析結果)を図-15に示す。

9時頃(通水初期)の流況をみると、主流位置が低水 路沿っているものの、早い流れが高水敷上にもみられ、 この流れが前節で示したように比較的浅い侵食の範囲を 拡大させたと考えられる。



図-15 通水中の流況の変化 (PIV 解析)

12時頃(通水約4時間経過後)の流況をみると、主流 位置が高水敷上に移動しているのがわかる。前節でも、 この時間帯に洗堀深の大きい範囲が低水護岸付近から堤 防付近に向かって拡大しており、前節で述べたように、 流れが低水路から高水敷に直線的に乗りあがる位置で低 水護岸背面の洗堀が生じたことで、低水路の流れが高水 敷に導かれやすくなり、主流の位置が高水敷へ移動しや すくなったと考えられる。また、この時点で内岸側(低 水路)の流速が大きく低下していることから、既に内岸 側の土砂堆積が進行していたこも主流位置が変化した要 因の一つと考えられる。

17時頃(通水約9時間経過後)の状況をみると、主流 の位置がさらに外岸へ偏っており、主流が堤防に接近す る付近で堤防の侵食が発生している。

以上より、当実験で示された堤防侵食に至る過程は次 のとおりである。流れが低水路から高水敷に直線的に乗 りあがる位置で低水護岸背面の洗堀が生じると、低水路 の流れが高水敷に導かれやすくなり、主流の位置が高水 敷上へ移動した。高水敷上のこの流れによって、洗堀深 の大きい範囲が堤防に向かって拡大したことによって堤 防の侵食が生じた。

(5) 侵食が堤防に至る被災のメカニズム

低水護岸背面の侵食が堤防の被災に至る要因として当 実験で確認された現象を以下に示す。

・ 通水中の流況:湾曲した主流は外岸へ偏るため、低水

KAWAMURA Satomi, HASEGAWA Takeharu, MATSUBARA Kan

護岸背面の侵食を誘発する。

・低水路の土砂堆積:湾曲部内岸では土砂が堆積し、低水路の流れを阻害する。

・高水敷の侵食:主流が低水護岸を乗り上げて高水敷を 侵食する。侵食範囲が湾曲部外岸の低水護岸背面から堤 防に向かって拡大する。

・堤防の侵食:高水敷侵食が低水護岸背面から堤防に向かって進行し、提体に至ることで堤防が侵食される。

急流河川の湾曲外岸部において、上記のような現象が 生じることによって、低水護岸がある場合でも堤防の侵 食被災に至ることが確認された。

なお、当実験と併せて、縮尺模型実験や数値計算によ る検討も実施している。今後は、それらの検討も含めて、 効果的な対策の検討を進める予定である。

6. おわりに

河道湾曲部の外岸側における堤防の被災を対象とし、 低水護岸背面の洗堀が堤防の侵食に至る被災のメカニズ ムを把握するために、大型実験(千代田実験水路)によ る検討を実施した。本稿では、実施した実験結果を速報 として報告し、また、低水護岸背面の侵食が堤防の被災 に至る要因として当実験で確認された現象を示した。今 後は、縮尺模型実験や数値計算による検討も併せて効果 的な対策の検討を行う。

謝辞:十勝川千代田実験水路での実験実施にあたっては 十勝川千代田実験水路実験検討会および同アドバイザー 委員会から助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 2016年8月北海道豪雨災害調査団:2016年8月北海道 豪雨災害調査団報告書,土木学会,2017.
- 2) 桑村貴志,永多朋紀,旭一岳:出水時における音更川の 流路変動特性と堤防防護の対策について,平成24年度 北海道開発技術研究発表論文,2013.
- 3) 永多朋紀, 渡邊康玄, 安田浩保, 伊藤丹: 砂州地形に誘発 された蛇行発達, 土木学会論文集 B1(水工学), 69, No.4, I 1099-I 1104, 2013.
- Iwasaki T., Shimizu Y. and Kimura I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, Advances in Water Resources, 93, A, pp.118-134, 2015.
- 5) 山口里実, 久加朋子, 清水康行, 泉典洋, 渡邊康玄, 岩崎 理樹: 河道内の土砂動態と流路変動の関係, 土木学会論 文集 B1(水工学), 74, No.4, pp. I_1153-I_1158, 2018.
- 6) 柏谷和久,桑村貴志,泉典洋,渡邊康玄,山口里実,横山 洋:音更川における堤防侵食対策の効果と課題-流路変 動にともなう大規模河岸侵食に対して実施した危険度 評価の検証-,河川技術論文集,26,503-508,2020.
- 7) 山口里実, 久加朋子, 岡部和憲, 桑村貴志: 急流河川における低水護岸背後の高水敷侵食特性に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B1(水工学), 75, No.2, pp. I_955-I_960,2019.
- 8) 空知川堤防調査委員会:報告書,2017.
- 9) 国土交通省北陸地方整備局: 急流河川における浸水想 定区域検討の手引き参考資料, 2003.