急流河川における蛇行発達メカニズムと堤防防 御対策について

柿沼孝治¹・渡邊康玄²・泉典洋³・永多朋紀¹・桑村貴志⁴ Takaharu KAKINUMA, Yasuharu WATANABE, Norihiro IZUMI, Tomonori NAGATA and Takashi KUWAMURA

¹正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
²正会員 工博 北見工業大学 社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町165番地)
³正会員 工博 北海道大学 工学研究院(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
⁴正会員 北海道開発局 帯広開発建設部(〒080-8585 帯広市西4条南8丁目)

Last September, two nationally managed rivers in Hokkaido experienced dike-washout. In both cases, the bank erosion of the main channel reached the dike while the flood water level was far below the High water level.

In this study, numerical simulations are applied to the Otofuke River, which is one of the two said rivers. The simulations are based on two dimensional flow and sedimentation model, and the meandering shapes of the river channels are approximated by sine waves. In the simulations of actual flood discharge, good results are shown with regard to the meandering shapes of the main channel. And also some basic understandings on the characteristics of meandering are obtained in the simulations of constant discharge. Lastly, some advises are made in terms of risk management and flood control plan.

Key Words: bank erosion, meandering, sine wave, phase, amplitude, wave length, iRIC

1. はじめに

平成23年9月に生起した出水により北海道の2つの1級 河川の急流区間(十勝川水系音更川及び石狩川水系辺別 川)で浸食による堤防の一部流出が発生した.これら両 河川とも危険水位には達していなかったにもかかわらず, 低水流路の変動に伴い堤防が被災した.急流河川におけ る堤防の被災は,流速の速い氾濫流が生じることから,河 岸浸食のメカニズムを解明し,今後の河川管理に反映す ることがきわめて重要と考えられる.

本研究では、十勝川水系音更川を事例として、流路の蛇 行特性に着目して、被災調査で明らかになった洪水時の 蛇行特性変化を数値計算で再現するとともに、流量規模 ごとの蛇行発達特性について考察する.また、河川管理実 務上の視点から、河川監視体制や堤防防御対策の検討に 関して、数値計算による簡易的な蛇行発達予測の活用に ついて述べる.



図-1 音更川位置図



図-2 洪水ハイドログラフ(音更観測所)



図-3 堤防流出箇所

2. 堤防流出に関する現地調査

(1) 洪水の概要

平成23年9月2日から7日にかけて十勝川流域で強い降 雨があり、1次支川である音更川(流域面積740km², 幹川 流路延長94km)において出水があり、随所で河岸侵食や 流路変動が発生し、堤防の一部が流出した.堤防流出箇所 は図-1に示すとおりであり、この区間の河床勾配は 1/164でセグメント1に分類される.

堤防流出箇所から約8km下流に位置する音更水位流量 観測所の流量ハイドログラフは図―2のとおりである.な お,ピーク流量は548m³/s(暫定値)であった.

図-3に示すように、被災個所では蛇行流路の外湾部が 堤防まで達し、堤防の一部が流出した.

(2) 現地調査

寒地土木研究所と北海道開発局では、出水中および出 水後に各種調査を実施し、報告書¹¹としてまとめている. その内容のうち、現地踏査、土質調査、河道平面形状調査、 河道断面測量にかかる部分の概要を以下に記す.

現地踏査では,植生の傾倒方向を調べ,出水中の流向を 推定した.その結果を図ー4に示す.出水中の大まかな主 流線を黄線で,砂州上の流向を水色で示している.

土質調査のうち,堤防の一部流出箇所近傍(KP18.2)の河床及び砂州上の調査結果を図-5に,高水敷上の調



図-4 現地踏査結果(流向)





図-6 土質調査(高水敷)



図-7 出水前後の航空写真

査結果を図ー6に示す. 流路や高水敷に比べて, 砂州上で はやや細粒分が多いが, 調査地点すべてで砂礫質であっ た.

出水前後の河道平面形状の変化を図-7に示す.出水前の H22年8月と出水後のH23年9月16日に撮影された航空写真 を比較して,出水前の主流路を赤,出水後の主流路を青で それぞれ示し,出水後の図には出水前の流路を重ね合



わせてある.

報告書¹では、土砂移動を生じさせる掃流力に注目して、 今回の出水で堤防流出にいたった要因を分析している. 今回の出水は、既往最大であったH15年に生起した出水よ りピーク流量が小さいにも関わらず、より大きな流路変 動が生じている.その理由として、図-8に示すように、無 次元掃流力が限界無次元掃流力0.05程度あるいはそれを 上回った時間がH15年出水に対して今回の出水では約1.7 倍だったとしている¹.

3. 出水前後の河道蛇行特性

報告書¹⁾によれば、堤防流出は、低水路内を蛇行する流路がその振幅を増大させる過程で発生した可能性が高いことから、本研究では、流路の蛇行波形に注目することにした.蛇行波形は、波長・振幅・位相の3つの要素の組合せとして説明できる.この3つの要素のうち、今回の出水では、出水前に比べて波長と振幅が増加し、位相は流下方向に進んだ.kp14~21までの区間において出水前後の主流路線形を比較した(図-9).主流路の位置は航空写真判読から得られたものを用い、低水路河岸の位置は各年直近の横断測量データから推定した.なお、流路の線形は、低水路の中心を基準とした左右岸への距離として整理を行った.被災箇所周辺(KP17~19区間)では蛇行振幅が約1.8倍に増加し(115m→215m),主流路延長が約4.5%増加している.

また、本研究では、堤々間の砂州形状の変化が流路変動の大きな要因になっていると考えて、河道断面の変化にも着目した.出水前後の河道横断形状の変化を知るために、H21年測量の横断面と、出水後のH23年9~11月に測量された横断面を重ね合わせたものを図-10に示す.出水前の横断形状を赤で、出水後の横断形状を青で示してい



図-11 主流線のサインカーブ近似

るが、流路が対岸に移動したり、大きな砂州が形成された ことがわかる.また、出水前後で最深河床高をより深くす るような局所洗掘は生じていないが、これは下方より側 方の浸食が卓越したためか、あるいは洪水後期に埋め戻 されたためと考えられる.

4. 数値計算による検討

(1)河道条件

流量の変化による河道の蛇行特性の変化をより明確に 知るため、現地の河道形状を単純化し、主流路をサインカ ーブで近似した河道の河床変動計算を行った.今回の 出水前後の主流路をサインカーブ近似すると図-11のよ



図-12 計算条件



図-13 洪水ハイドロを与えた計算結果(流速)

| | 波長(m) | 振幅(m) |
|--------|-------|-------|
| 現地出水後 | 720 | 200 |
| 粒径30mm | 622 | 130 |
| 粒径40mm | 760 | 160 |
| 粒径50mm | 622 | 140 |
| 粒径60mm | 622 | 130 |
| 粒径70mm | 570 | 160 |

うになる. 初期河道は出水前の平面形状,図-12に示す 河道条件とした. なお,主流路と高水敷は同じ河床材料、 堤々間を河床変動範囲とした. 計算は北海道河川財団か ら無料配布されているiRICのうち,非定常平面2次元流 れと河床変動を計算するNays2Dを使用した². なお,現地 において浸食された河岸がほぼ垂直にたっていたことか ら,安息角を考慮する河岸浸食プログラム²は無効とした.

(2) 洪水ハイドロを与えた計算

洪水ハイドロは堤防流出箇所から約12km上流に位置する士幌観測所のH23年9月の暫定値を用いた.計算では河床材料が単一粒径のモデルを使用したが,現地の代表粒径が約44mmなので,粒径30mmから70mmまでの10mm刻みの粒径を設定して計算を行った.その結果を図-13に示す.計算結果から読み取った蛇行の波長と振幅を,現地(音更川KP17~19)の出水後の値と比較したところ,表-1に示すとおり40mmのケースの再現性が最も良好であった.

この粒径40mmのケースにおける水深の時間変化を図ー









14示す.また,上下流端の影響を考慮して,区間中央の波形(図-14に赤色で示す)について,おおよその位相,波長,振幅の時間変化を読み取った結果を図-15に示す.ここで,位相は流下方向を正とした.結果について整理すると次のとおりである.

- 位相は、流量が200m³/sを超えて、ピークを過ぎて 300m³/sを下回るまで増加した
- 振幅は、流量が 300m³/s を超えて、ピークを過ぎて 200m³/s を下回るまで増加した
- 波長は、流量がピークを越えたあたりで増加したが、変化はわずかであった



図-16 横断図 (Q=300m³/s時点,ピーク前)



図-17 横断図 (Q=300m³/s時点,ピーク後)

 ・ 蛇行の発達は、洪水後期により顕著であった 以上の結果から、位相や振幅が大きく変化し始める流 量は、ほぼ低水路が満杯になる300m³/s程度であると考え られる.これは、低水路の特性が低水路満杯流量程度で決 まると言われていることと符合する.また、蛇行が発達し 始めるには時間を要すること、位相や振幅と比べると、波 長の変化はより大きな流量で発生することが示唆される.

次に、洪水後期に蛇行が発達した要因について検討す るため、流量ピークを挟んで流量が同じ約300m³/sである 2つの時点の横断面を図-16,17示す.両図を比較すると、 ピーク後では砂州が発達し、外岸では主流路が狭くなり、 湾曲の影響で水位が高くなり高水敷が冠水していること がわかる.これにより、流路の外岸部にあたる高水敷の洗 掘が進み、平面的には蛇行の振幅が増加していったと考 えられる.なお、報告書¹⁰によれば、堤防流出箇所の痕跡水 位は高水敷高+0.8mに対して、計算における最高水位は 高水敷高+1mであり、概ね妥当と考える.

以上,数値計算を用いて概ね現地の再現を行い,また, 蛇行発達のメカニズムについて考察した.

(3) 定常流量を与えた計算

前節の計算から得られた知見を踏まえて,より流量と 蛇行発達の関係を知るために,定常流量を2日間与えて蛇 行特性の時間変化を調べた.流量は100m³/sから500m³/sま で100m³/s刻みの5ケース行ったところ,各ケースの通水2 日後の水深を図-18に,蛇行の位相,振幅および波長の時 間変化を図-19,20,21に示す.



図-18 定常流の計算結果 (水深)



図-19 位相の時間変化



図-20 振幅の時間変化



図-21 波長の時間変化

なお, 流量が400m³/sと500m³/sのケースでは, 蛇行振幅が 計算領域をほぼ超えるまでとした. 結果について整理す ると次のとおりである.

- ・ 100m³/sのケースは蛇行発達が見られない.
- 位相と振幅は、200m³/s以上で増加するが、300m³/s 以上になると短時間で増加し始める。
- 振幅は,400m³/s以上になると増加が顕著になる.
- ・ 波長は、500m³/s以上になると増加が顕著になる.

ここで,洪水ハイドロを与えた計算と定常流量の計算 を比較して考察する.洪水ハイドロを与えた計算では,位 相,振幅,波長は,流量がそれぞれ200m³/s,300m³/s, 500m³/sを越えたあたりで増加し始めたが,これは,定常 流量の結果とおおむね整合する.また,洪水ハイドロを与 えた計算では,振幅が最終的には初期値の1.6倍程度とな り,定常流量のケースでは流量が200m³/sあるいは300m³/s の結果と近い.これは,洪水ハイドロが200~300m³/s程度 の時間が大部分であったことから説明でき,蛇行発達特 性を決めるのは短時間のピークではなく,洪水期間中の 代表的な流量であることが示唆される.

以上,流量規模と蛇行発達について整理するとともに, 洪水ハイドロを与えた計算結果と定常流量の計算結果を 比較し検討した.

(4) 数値計算の課題

ここで、蛇行発達の観点から、数値計算の課題を述べて おきたい.本研究ではiRICに組み入れられている、安息角 を考慮した河岸侵食モデルは無効とし、あくまで河床変 動計算として解いた.ただし、長谷川³⁰の方法による流砂 式の勾配補正を用いているので、河岸の流砂量は大きめ に計算されている.結果は、おおむね現地の蛇行発達の特 性をとらえることができたが、振幅はやや小さめに計算 された.今回の洪水においては、堤防流出が発見された時 にはピーク流量を過ぎており、河岸浸食が発生した時刻 やその時の水位、浸食の様子はわかっていない.このため、 今後は、河岸侵食に関する模型実験等も併用しながら、計 算手法の更なる精度向上を図ることが重要と考える.

5. 数値計算による蛇行発達予測の活用

本研究の結果を踏まえて、急流河川における河川管理 実務上の留意点として、蛇行発達による危険性を予め簡 易的に検討することの重要性について述べる.定常流に よる計算結果によれば、音更川では蛇行が発達する流量 は低水路満杯流量程度であったが、このような河川では、 必ずしも警戒体制が発令される水位に到達しないでも堤防が浸食によって流出する危険がある.そこで,定常流量による数値計算により蛇行が発達する最低の流量と,蛇行が発達し始める継続時間を予め検討しておき,河川監視体制を検討することを提案したい.音更川の場合では,200m³/sの流量が8時間以上継続する,あるいは流量が300m³/sを越えることが予想される場合,注意が必要であろう.また,音更川の河川整備計画⁴⁾では目標流量を900m³/sとしている.定常流量を与えた計算では,洪水継続時間が2日を越えると400m³/s以上のケースで蛇行の振幅が堤々間に迫る結果となったことを考慮すると,低水護岸を配置しない場合は堤防が流出する可能性が高い.当面は堤防防御ラインを設定して,低水護岸等により河岸侵食を防止することが重要である。

なお、川幅に余裕がある河川では,蛇行発達を考慮し た低水路幅を設定することで,堤防の安全性を確保する ことも考えられる.

6. おわりに

本件研究では十勝川水系音更川の洪水時河道変遷に関 して,蛇行特性に注目して数値計算を行い,以下の結論を 得た.

- 主流路をサインカーブで近似した河道の数値計算 によって、蛇行振幅がやや小さめに算定されたも のの、おおむね洪水時の蛇行発達特性をとらえる ことができた。
- ・ 定常流量の計算により,流量と蛇行発達の関係を おおむね把握することができた.
- 河川管理実務の視点から、数値計算による簡易的 な蛇行発達予測の活用について述べた。

参考文献

- 1)北海道開発局,寒地土木研究所:平成23年9月2日からの停滞前 線による大雨災害,十勝川水系音更川の堤防の一部流出に関 わる調査報告,2012
- 2) 北海道河川財団:Nays2D Solver Manual,<u>http://i-</u> <u>ric.org/ja/download/get/Xozn8x</u>
- 3) 長谷川和義:沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する 水理学的研究,北海道大学博士論文, pp. 1-184, 1984.
- 4) 北海道開発局:十勝川水系河川整備計画, 2010

(2012.4.5受付)