

# 洪水流のエネルギー水頭を考慮した堤防、河道の一体設計の重要性

エネルギー水頭 複断面蛇行河道  
堤防と河道の一体設計

中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡捷二

## 1. まえがき

気候変動を含む近年の洪水外力の増大は、これまでの治水施設の設計法について検証の必要性を示す事例が増えている。河川構造物や河道での土砂移動、河床変動の評価に、新しい知見を考慮した科学的検討が必要である。もちろん、従来の方法の実問題に対する対応力は実証されているものも多いため、従来の方法を生かしながら新しい技術開発が求められている。本論文では、堤防と河道の一体的設計にあたって必要なエネルギー水頭の重要性を述べている。

## 2. 堤防余裕高の考え方

洪水流によって、河川堤防は、浸透、洗掘、越流による破堤や、損傷被害を受ける懸念があることから、河川堤防の設計、管理等をどのようにすべきか重要な課題である。著者が先に提案した被害を最小化するための河川堤防と河道の一体的計画・設計の考え方<sup>1)</sup> (写真-1) はその一つの方策である。必要なことは、洪水に対して堤防のみの設計ではなく、堤防と河道を一体的に計画、設計し、管理できることが求められる。

### 堤防と河道設計の基本的考え方(写真-1)



画像: 平成28年8月台風10号による十勝川の増水(豊頃町茂岩橋、ハルニレの木周辺十勝川左岸の映像) 2016.8.31, 10:30~11:30頃(撮影者片山昇一)

河川管理施設等構造令では、計画高水位以下の条件で、「流水の通常的作用」の下では、堤防はその機能を発揮できるものなければならないとしている。これについては、河川管理施設構造令の解<sup>2)</sup>において、洪水中には河床の土砂が移動し、河岸侵食が発生し水衝部が移動する等により、堤防侵食の危険性が生ずるなど、計画高水位以下であっても堤防は安全ではないと言っている。今日のように、洪水の解析技術や観測が進み、洪水流の理解が進んで来た中で、堤防の設計法とともに、「流水の通常的作用」はどのような水理現象を指すのかについて検討が必要であると考えられる。堤防は、河川水が堤内地に流れ出さないようにする重要な役割を有する。河道を流れる洪水流は巨大なエネルギーを持って流下している。その巨大な洪水流のエネルギーを如何に安全に流下させるかは、河川管理者の重要な責務であり、堤防と河道の設計に洪水流のエネルギーをどのように取り入れるべきかを考える。

河道を流れる洪水の持つエネルギーの大きさは水の高さで表現するのが一般的である。大きな流域を流れ下っている洪水流は、そのピーク時の流量、水位は、ほぼ一定値を取るようになり、ピーク時の洪水流は準定常流として扱える。この時の全エネルギー水頭は、式 (1) の位置水頭 ( $z$ ) と圧力水頭 ( $p/\rho g$ ) と速度水頭 ( $v^2/2g$ ) の和で表わされる。

$$z + p/\rho g + v^2/2g \quad (1)$$

洪水流は、時間的、空間的に緩やかに変化する流れであるので、圧力分布は静水圧分布で近似できることから、式 (1) 第 2 項の圧力水頭は水深で表すことが出来、位置水頭と圧力水頭の和 ( $z + p/\rho g$ ) は水位 ( $H = z + h$ ) で表すことが出来る。今流下方向を  $x$ -軸で表すとエネルギー水頭は式 (2) で表され、洪水流は式 (3) のエネルギー水頭の縦断勾配で流れる。

$$H + v^2/2g \quad (2)$$

$$d(H + v^2/2g)/dx \quad (3)$$

これまでは、速度水頭 ( $v^2/2g$ ) の大きさ及びその縦断変化が小さいものとして、式 (3) に代えて水位およびその縦断変化に着目し、洪水流の解析、観測が行われてきた。観測水位の縦断変化を既知としてこれを説明する洪水流の水面形に基づく洪水流解析結果は、洪水水理に関わる多くの問題を解決してきた。しかし、式 (3) が示すように、洪水は、水位の縦断的な変化というよりも、エネルギー水頭の縦断的な変化によって駆動されている。特に巨大な豪雨が頻発化し、河道の流量増大が生じやすく、また河道縦・横断面形の変化が大きい河道区間では、速度水頭の変化が大きくなる。そのような河道や河道区間では速度水頭およびその縦断変化は無視できない。これは、堤防、河道の作り方に密接に関係することから、エネルギー勾配の縦断変化に基づく洪水流解析の必要性について、今後検討されなければならない。

次に、河川の水位に着目して決められている堤防の高さ、特に堤防の余裕高について、洪水流、河道、堤防を一体的に捉え、洪水流のエネルギー水頭およびその縦断形との関係で堤防の高さはどうあるべきかを議論する。

余裕高は、船舶工学の分野で大洋を航行する船舶の船首部分に造る波が、上甲板に悪影響を与えないように、船舶の満載喫水線上に設定する高さ、Free Board を船舶の大小に対応して設定された。河川の堤防の余裕高も河道の H. W. L. から堤防天端までの高さとして、洪水流量や、水位との関係で大きさが決められてきた。堤防と河道縦横断面形との一体的考え、エネルギー水頭との関係の中で、現在の堤防余裕高の考え方、決め方が適切なのかについて議論が必要であると考え。洪水流は、私たちが見ている水面の上に運動エネルギー分、すなわち速度水頭が乗った全エネルギー水頭の面があり、このエネルギー水頭面の勾配で流れている。洪水時の水面は決して平らでなく、早い流れでは水面は波立っている。堤防高さが堤防際の洪水流のエネルギー水頭より高ければ、河道から洪水流が越流することなく流れる。洪水流ハイドログラフと河道の縦・横断面形に応じてエネルギー水頭が決まっており、堤防高さがエネルギー水頭より高いときに、堤防法線と構造は洪水流をコントロールしていることになる。この時、H. W. L. で洪水が流れている場合を考えると、その時の流速水頭によるエネルギー増加分の高さは、堤防余裕高の高さ中に収容されていると考えることができる。

洪水時の堤防の余裕高に及ぼす洪水エネルギー水頭の重要性を示す例として、支川からの洪水が本川の洪水に流入する河川合流部の流れの状況を考える。合流部では、本川エネルギーに支川エネルギーが加わるため合流部ではエネルギーが増大する。実際には、本川合流部の川幅や河積の増大による、本川流れと支川流れの間の激しい混合等によるエネルギーの損失があり、また、下流への洪水エネルギーの流下により、両者のエネルギーを足し合わせたものとはならないが、それでも合流点では、支川から流入するエネルギーによって、合流点のエネルギーは高くなる。このためエネルギー水頭は上昇し本川上下流に向かって水位上昇が生じる。合流点付近では、堤防強化や河積の拡大、下流河道の改修等によって水位上昇が生じても溢れないように改修が進められているが、それでも、エネルギー水頭が高くなるため合流点では氾濫が生じやすい場所となる。

改定・河川管理施設等構造令の解説では、堤防の余裕高は、洪水時の風浪、うねり、跳水等の一次的な水位上昇や、流木等の流下物への対応、洪水時の巡視や水防活動を実施する場合の安全の確保、等にとって必要な余裕の高さであり、構造上必要とされる高さの余裕として位置づけられている。しかし余裕高には計画上の余裕は含まれていないとしている。この理由は、河床変動による水位上昇、湾曲による水位上昇、水位計算の誤差等は計画上の水位に考慮されるためであるとしている。しかし、これまで述べた河道の横断面形の縦断変化が大きく、そのため流速が縦断的に大きく変化する場合や、また、後述する複断面蛇行河道を洪水が流下する過程において、相対水深が 0.3 以上になる場合、及び合流点等では、H. W. L. 程度の水位であっても、速度水頭を足したエネルギー水頭が堤防天端の

高さに達する可能性は十分起こり得る。この時には、洪水流の有するエネルギーが高く、河川施設に及ぼす仕事は大きくなり破壊力は大きい。同様に、洪水流の有するエネルギーの大きさに対して、それを受ける河道の河積が広くなければ、また、下流河道の縦横断面形との関係でエネルギーの輸送が滑らかに行われ得ないような河道では、異常な水位上昇が起こり激しい氾濫が起こることが考えられる。具体的に、どれくらいのエネルギー上昇が起こるかを水理的に検討し、これを考慮した H. W. L. の持つ意味や計画上の余裕として堤防の余裕高を位置づけることについても考えてみる必要がある。

都市河川にあっては掘り込み河道多く、このため堤防があっても余裕高は低くてもよいとしているが、中小河川は急流であることが多い。流速が早いこと、水位上昇速度が大きいこと等から、掘り込み河道をほぼ満杯水位で洪水が流れる時には、地盤高や堤防高よりエネルギー水頭は高くなり、激しい溢水、氾濫が生じることになる。都市中小河川では、エネルギー水頭に着目した余裕高の検討が望まれる。

### 3. 複断面蛇行河道における堤防と河道の一体的設計の必要性

河道蛇行部では、洪水流の集中の程度は大きく、特に、堤防際のエネルギー水頭は高くなる。このように、洪水の流れ方、その持つエネルギー水頭の大きさは、河道断面形・低水路線形と堤防線形の違いによって著しく異なり、これらをどのように考えて河道と堤防の設計をするかが課題となる。

近年、利根川、球磨川等、大きな高水敷を有する複断面蛇行河道における大洪水において、1990年代後半から2000年代前半の福岡<sup>3) 4) 5) 6) 7)</sup>が明らかにした洪水ピーク水位付近で起こっている流動機構及びそれに伴う河床や河岸の侵食、堆積等の重要な流動機構が現地河川で観測、解析された。すなわち、大きな高水敷を有する複断面蛇行河道の洪水においては、相対水深（高水敷水深/低水路水深）が0.3以下と、以上では断面内の二次流の回転の向きが変わること、すなわち相対水深が0.3以上になると二次流の回転の向きが時計方向に変化し、これに伴い内岸河床、内岸河岸の洗掘が起こる複断面的蛇行流れになること、水位が減じ再び遠心力が効いてくるようになると、反時計周りの二次流が再び発生し、外岸河床の洗掘、内岸河床の堆積による単断面的蛇行流れとなること、洪水減衰時は長く続くため、洪水後には、通常蛇行部で見られる湾曲外岸河床が洗掘される河床形状に現れることを実験水路及び福岡、渡辺<sup>5)</sup>の三次元数値解析で明らかにしていたが、実洪水では、これまで注目されることはなかった。実河道における今回の解析結果と実測結果によって、統合的に説明できることとなったが、三次元解析という複雑な解析法を用いての結果のために、この重要な現象を河道設計に取り込むことはなかった。しかし、2018年の竹村・福岡<sup>8)</sup>による二次元解析の枠組みで非静水圧分布流れを考慮した準三次元解析法によって三次元解析と同様の結果が示されたことの意義は大きい。これによって、この重要な流れの機構を、河川技術に容易に取り込むことが出来るようになる。この重要な水理現象の理解は、今後の治水対策の技術として活用されることが望まれる。すなわち、複断面蛇行河道において、洪水ピーク時付近の内岸側の河床、河岸の洗掘による断面拡大が、流過能力の拡大として働き、治水計画上この効果を河道設計に取り込むことはきわめて有効である。それらは、河道改修における内岸河床の掘削と内岸樹木の伐採による流過能力の拡大を狙いとしてこれまで事業が行われてきたが、その効果の評価が十分でなかった。今回、内岸河床を掘っても洪水後に埋まることから、根拠が薄いが内岸掘削を行うという施策に、理論的根拠を与えることになった。これはまた、河道内の樹木群の流失による流木化を軽減する効果も加わることになる。この結果を受けて、複断面蛇行河道において、内岸河床をどの程度掘り下げ、内岸砂州上の樹木群をどのように伐採すればどの程度の治水効果が上がるのか、どのような蛇行形状の河道で、どのような水位であれば複断面的蛇行河道流れに遷移し、どれ程の効果があるのかを、非静水圧分布を考慮した準三次元洪水流解析法を適用し明らかにすることが、今後の堤防と河道の一体的設計に基づいて治水を行う上で重要な課題となる。

上述のように、大流量時の複断面蛇行流れの解析は、静水圧分布を仮定する平面二次元解析ではなく、非静水圧分布を考慮した準三次元流れによる解析が不可欠である。大きな湾曲河道では洪水水位が高くなると平面二次元解析でも、蛇行部では内岸側の流速が早くなる。しかし、これは単に、水位、流量が高くなると洪水流の直進性が高まり、主流が内岸に寄ることを示しているだけで、より重要な、内側流速が早くなり、二次流が逆転することを説明できていない。高水敷流れと低水路流れが強く混合し、流速分布が変形し、圧力分布が非静水圧になることを考慮していないために、相対水深が0.3以上になると遠心力に起因する二次流と反対方向に回転する二次流に遷移する流速分布を持つ複断面的蛇行流れを平面二次元解析では表現することが出来ない。非静水圧分布を用いた流れの三次元的解析によって、複断面的蛇行流れの特異な主流、二次流の出現を説明できることになる。

前述したように、複断面的蛇行流れでは、洪水ピーク時付近で河床形状も特異な変化過程を示す。一般に、蛇行流れでは、遠心力が働くことにより、反時計回りの二次流が発生し、外岸側の河床が深ぼれし、深ぼれた土砂を内岸側に輸送し内岸側に堆積させる。しかし、相対水深が0.3を超えると、二次流が時計方向に回り始め、内岸河床を洗掘し、外岸河床に運ぶようになる。高い洪水流量で高い水位が長く続くほど内岸河床及び低水路寄りの内岸高水

敷が掘れ、外岸河床が埋まることになる。このことは、先に述べた洪水ピーク付近で河積が増大し、断面内の洪水通過能力が増えていることになり、複断面蛇行河道では、洪水流解析と河床変動解析は、同時に進めなければならないことを示している。洪水水位が減り相対水深が0.3以下になると再び外岸河床の洗掘が始まり、最終的には私たちが平常時見る外岸寄りが高ぼれる河床となる。

河床変動解析モデルの適用性の検証は、初期河床条件を与えて解析し、解析結果と最終河床との一致度で適合性の検証をすることが多い。しかし、複断面蛇行河道では、相対水深が増大すると河床の状況は相対水深が低いときと異なる方向に変化することから、河床変動モデルの現在の検討方法は不十分であると言える。洪水水位変化する段階、特に、ピーク付近の流れと河床がどう変化しているのかについての現地調査と洪水中の河床高の実測値に基づく河床変動モデルの検証が期待される。

このためには、複断面蛇行河道の内岸固定砂州上にトレンチを掘って、その土砂の堆積構造を調べることによって、洪水中に内岸河床で起こった土砂の洗掘堆積変化過程を知ることが出来る可能性がある。以上のことは、複断面蛇行河道では、流れの流速分布が洪水中に変化することを考えると、洪水のエネルギー水頭の視点から堤防の高さ、余裕高について、合流点で論じたと同様に議論が行われなければならない。

また、複断面蛇行河道では、また内岸が侵食を受けやすいことから、橋脚の設置位置が内岸寄りの場合には、平均流、二次流構造の変化等により橋脚周辺の洗掘が大きくなり橋脚の被災に繋がりがやすい。また、複断面蛇行河川では、低水路内岸に護岸の施工が見られるが、前述の機構の被災を受けた（受けたように見える）可能性がある。

また、複断面蛇行河道では、洪水流によって内岸側の堤防が破壊した事例がいくつかあると思われる。これまでは、複断面蛇行流路であっても遠心力の影響が卓越し、堤防の破壊があるとすれば、外岸側堤防が破壊すると考えられてきた。このために、内岸側堤防が壊れる原因がよくわからないと結論付けることが多かった。しかし、近年明らかにされてきた複断面的蛇行流れによるピーク水位付近の内岸側の高流速の発生、内岸に向かう二次流や、それに伴う河床や河岸の洗掘の発生は、洪水の高い水位の継続時間との関係性も高く、内岸側の堤防破壊を引き起こす原因となりうることから、複断面的蛇行河川での複断面的蛇行流れの発生とその影響についてさらなる検討が必要である。

これらの橋脚、護岸、そして内岸側の堤防破壊については、いずれも災害につながる大きな原因となる。このため、具体的に起こったと思われる洪水流を再現し、どのようなことが洪水中に起こっていたのかを解析的に調べ、結果を今後の河道計画や河川構造物の設計法に活かすことが喫緊の課題である。

#### 4. あとがき

大きなエネルギーをもつ洪水流を河道で安全に流すには、河川堤防と河道の計画、設計を、一体的に行うことが必要である。これまで外力として洪水水位を中心に検討されてきた河道の計画・設計は、洪水流の速度水頭が無視できるほど小さいことが前提にあった。本文では、速度水頭が無視できないような河川にあつては、水位に代えてエネルギー水頭を用いた河道と堤防の計画・設計を考える必要があることを示している。

#### 参考文献：

- 1) 福岡捷二：浸透破堤、侵食破堤、越流破堤の危険性の小さい堤防・河道の一体的設計法、土木学会河川技術論文集、第20巻 2020
- 2) 解説・河川管理施設等構造令改定、財団法人、国土技術研究センター編。
- 3) 福岡捷二、高橋宏尚、加村大輔：複断面蛇行河道に現れる複断面的蛇行流れと単断面的蛇行流れ、一洪水航空写真を用いた分析一、水工学論文集、第41巻、pp. 971-976、1997.
- 4) 福岡捷二、大串弘哉、加村大輔、平尾昭二：一、複断面蛇行流路における洪水流の水利、土木学会論文集、No. 579/II - 41、pp. 83-92、1997.
- 5) 福岡捷二、渡邊明英：複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析、土木学会論文集、No.586/II-42、pp. 9-50、1998.
- 6) 岡田将治、福岡捷二、貞宗早織、複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度、相対水深を用いた領域区分、水工学論文集、第46巻、pp. 761-766、2002.
- 7) 福岡捷二：洪水の水利と河道の設計法、治水と環境の調和した川づくり、森北出版株式会社、2005.
- 8) 竹村吉晴、福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減水区間における境界面（水面・底面）上の流れの方定式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS）、土木学会論文集B1、（水工学）、Vol. 75, No1, pp. 61 - 80、2019