

超過洪水流の時空間三次元エネルギー分布 に基づく河道計画・設計法

CHANNEL PLANNING AND DESIGN METHOD BASED ON SPATIO-TEMPORAL THREE-DIMENSIONAL ENERGY DISTRIBUTION OF EXCESS FLOOD

福岡捷二¹・加藤宏季²
Shoji FUKUOKA and Hiroki KATO

¹フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 機構教授
(〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

²学生会員 工修 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程後期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日1丁目13-27)

令和元年東日本台風における多摩川中流部の超過洪水流の三次元エネルギー分布について解析し、洪水流の全エネルギー水頭の縦横断等値線分布より、低水路のみお筋沿いをエネルギーが集中して流れていること、最大全エネルギー水頭がH.W.L.を越えるようになると、低水路河道線形との関係で流れの三次元エネルギー分布に大きな変化が起こり、橋脚等の構造物の損壊や堤防越流等に伴う被災の危険性がカタストロフィックに高まることを論じている。さらに、全エネルギー水頭の等値線が下流側に張り出し、その分布形が急峻となる箇所ではエネルギーが高くなり、その大きさ、分布に対応するように抵抗の小さい河道の縦・横断面形である船底形河道形状に変化することを示している。

堤防・河道の計画・設計の基本は、洪水流の三次元エネルギー分布の大きさに応じて低水路の川幅を自在に変化させ得る船底形河道であり、これを河道設計の中心に据えた川づくりを行うための河道計画・管理のありかたを論じている。

Key Words: three dimensional energy distribution, energy gradient, excess flood, channel planning

1. まえがき

河道と堤防に囲まれた空間を流れる洪水流が、安全に流下するためには河道と堤防からなる器が必要な大きさと強さを有していなければならない。近年水位がH.W.L.を超えたり、堤防天端高さに達するような洪水が頻繁に起こっており、堤防や河道等の河川構造物が破壊に至る危険性が高まっている。河川災害の頻発化は、外力増大に対する河川施設及び技術の脆弱性に対する自然からの警鐘であり、安全な河道の計画・設計のための技術開発と実装に真剣に取り組まなければならない。

堤防・河道の器と洪水流との関係には、河床面、水面の他に、もう一つ流れの速度水頭と圧力の非静水圧水頭が足されたエネルギー水頭面が重要な役割を果たしている。通常の洪水では、流速がそれほど大きくないために、エネルギー水頭面は水面よりそれほど高くはならず、水面の縦断勾配で洪水の流れを考えることが可能である。しかしH.W.L.を超える超過洪水時には、洪水流のもつエ

ネルギーは著しく大きく成り、洪水はそのエネルギー勾配で流れ、大きな破壊ポテンシャルを有している。

複雑な河道線形と断面形、樹木群や二極化した低水路河道、不安定な砂州や多数の横断構造物等は洪水流下の抵抗要素となる。これら抵抗要素の影響は、大洪水に対しては大きくなり、危険な水位上昇となって現れる。洪水流は、流下阻害となる障害物を流れやすい形に変形し、変形しない構造物は破壊してでも流れようとする。超過洪水に対しては、この変形と破壊に至る機構に立脚した河道計画・設計技術が必要とされている¹⁾。

福岡²⁾は、2023年の河川技術シンポジウムで、流れによるすべての外力項を考慮した三次元エネルギー解析に言及し、洪水流の三次元エネルギー分布を考慮した河道と堤防の一体的設計法の必要性を論じている。しかし、実河川での三次元エネルギーによる検証が課題として残されていた。

本研究では、福岡の考え²⁾を令和元年東日本台風による多摩川中流部の洪水流に適用する。まず、非静水圧準

三次元解析(Q3D-FEBS³)を用いた洪水流・河床変動解析から得られる流速分布, 圧力分布を用い, 底面から水面までの全てのエネルギー分布を考慮した全エネルギー水頭の評価法を示す. 次に, 多摩川中流部における全エネルギー水頭の縦横断分布を示し, 縦横断的に分布する全エネルギー水頭の最大値と堤防天端の高さとの関係を調べ, 河道被災について論ずる. また, 大きなエネルギーを有する洪水流に対する河道の応答は, 抵抗の小さい船底形の縦横断形に変化させる重要な作用があることを示し, 自然の営力を活用したエネルギー的に見ても望ましい船底形河道の計画・管理について論ずる.

2. 超過洪水流の三次元エネルギー分布の評価法

洪水時の河道断面形変化の要因は, 河岸や河床に大きな力が作用するためであり, この力は流れの連続方程式と運動方程式を境界条件のもとに解いて求めている. この考えは, 洪水の作用力により連続的に変化する境界の形状を追い続けることが出来ることに基づいている. これは河川砂防技術基準で規定している堤防に対する「流水の通常的作用」に相当するものである⁴⁾.

しかし, 洪水流量が増大し水位がH.W.L.を超えると堤防の破壊危険性が高まる. すなわち, ① H.W.L.を超えると堤防の浸透, 侵食, 越流破壊および河床の侵食, 堆積またはこれらの重なり合いによる堤防破壊の可能性が高まり, 堤防と河道の一体設計が必要となる⁵⁾. ②低水路が蛇行する複断面流れにあつては, H.W.L.付近の水位になると, それより低い水位のときに比して流れの構造とエネルギー分布が不連続的に変化する際にはカタストロフィックな被災の危険性が高まる⁶⁾. ③流量増大とともに河道内の各種障害物から受ける抵抗が増大し, 水位が増大する. これにより場所によっては, エネルギー水頭がH.W.L.はもとより堤防天端を超え堤防破壊の危険にさらされる.

重力場で起こっている水理現象は流れの運動方程式と連続式で表現されるが, H.W.L.を超える激しい水理現象に対し堤防等の設計を行うときに運動方程式(運動量)を用いて行うか, 運動量よりも速度がもう次元高いエネルギー式を用いて行うかで現象に対する説明力が異なると考えられる. 超過洪水による河川構造物の破壊現象は, 局所的な力の釣り合いにより起こると言うよりも三次元的な流れ場での大きなエネルギーによって引き起こされると考え, その評価を行う.

河川砂防技術基準では, H.W.L.を超える超過洪水の作用は, 「流水の通常的作用」ではなく, むしろ異常で堤防は破壊を起こすと考えている. 「流水の通常的作用」で流れている洪水の水理現象と超過洪水時の水理現象を分けて考える現在の河川管理の考え方は, 本研究でも引き継がれている.

堤防のように不均質な土でできた構造物の破壊は, 構造物の耐力と強く関係するために, 定量的に見積もることが困難であることから, H.W.L.を超えると河川堤防は破壊するとみなし, 河川管理責任の外に置いてきたものと考えられる. しかし, H.W.L.を越える洪水流の頻発, 破堤のもたらす被害の甚大さを考えたとき, 堤防の破壊は起こるものと考え, 起こっても氾濫被害を小さくする対応策を考え, また, 確かな技術に基づいて出来るだけ安全な河道・堤防の器づくりを目指していくことが求められる. 前者の対応策については, 流域治水の施策のなかで検討が進められており⁷⁾, 一方, 後者については, 以下に述べる構造物に及ぼすすべての力に基づくエネルギー的考察により河道の応答を考えた検討を行う⁸⁾.

複雑な平面形状と横断形状を有する河道を流れる洪水流は三次元的な挙動をする. このような河川の流速や圧力の三次元分布は非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS³)と河床変動解析法⁹⁾を用いて解くことができる. 重要なことは, 洪水流の水面の上には洪水流の持つ速度水頭と圧力水頭の非静水圧成分が加わった全エネルギー水頭の面が存在し, H.W.L.を超える洪水流ではエネルギー水頭面が本質的な役割を果たすことにある. Q3D-FEBSによって解かれた局所的な流速や非静水圧成分を含む圧力の値を式(1)に代入することによりエネルギー水頭 H を評価し, 式(2)より, 全エネルギー水頭 H_{all} を求めている.

エネルギー水頭の時空間分布は式(1)で表される.

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + z \quad (1)$$

そして, その場所のエネルギー水頭を底面から水面まで積分し, 全エネルギー水頭の縦横断分布を評価する式(2)を得る.

$$H_{all}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz \quad (2)$$

ここに, H : 洪水流の局所的なエネルギー水頭, H_{all} : 洪水流の全エネルギー水頭, u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の局所的な流速, p : 非静水圧成分を含む圧力, ρ : 水の密度, h : 局所水深, g : 重力加速度, z : 基準からの高さである.

式(2)は水深平均を行なっているが, 水深平均エネルギー水頭と呼ばず, 全エネルギー水頭と呼ぶ理由は以下のとおりである. 対象とする流れは三次元であり, 断面内の各位置で異なる運動エネルギー, 圧力エネルギーを持っており, これを確実に取り込んでエネルギー的考察で堤防・河道を設計するのが本研究の狙いである. 式(2)はすべての局所エネルギー水頭を水面まで足し, それを水深平均している. 一次元解析での断面平均量, 水深平均量を用いて求める全エネルギー水頭と区別するため, 式(2)を全エネルギー水頭と定義している. また, 三次元



図-1 洪水前における日野橋周辺区間の航空写真と日野橋P5橋脚沈下の状況

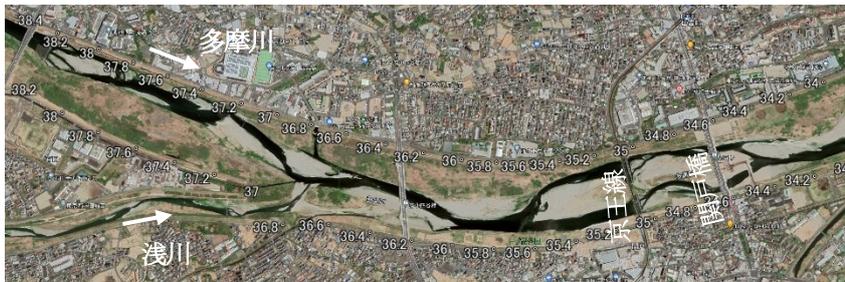


図-2 洪水前における京王線周辺区間の航空写真と京王線直下流左岸高水敷洗掘の状況

●最大水位 ▲最大全エネルギー水頭 —天端高さ(左岸) —天端高さ(右岸) —H.W.L

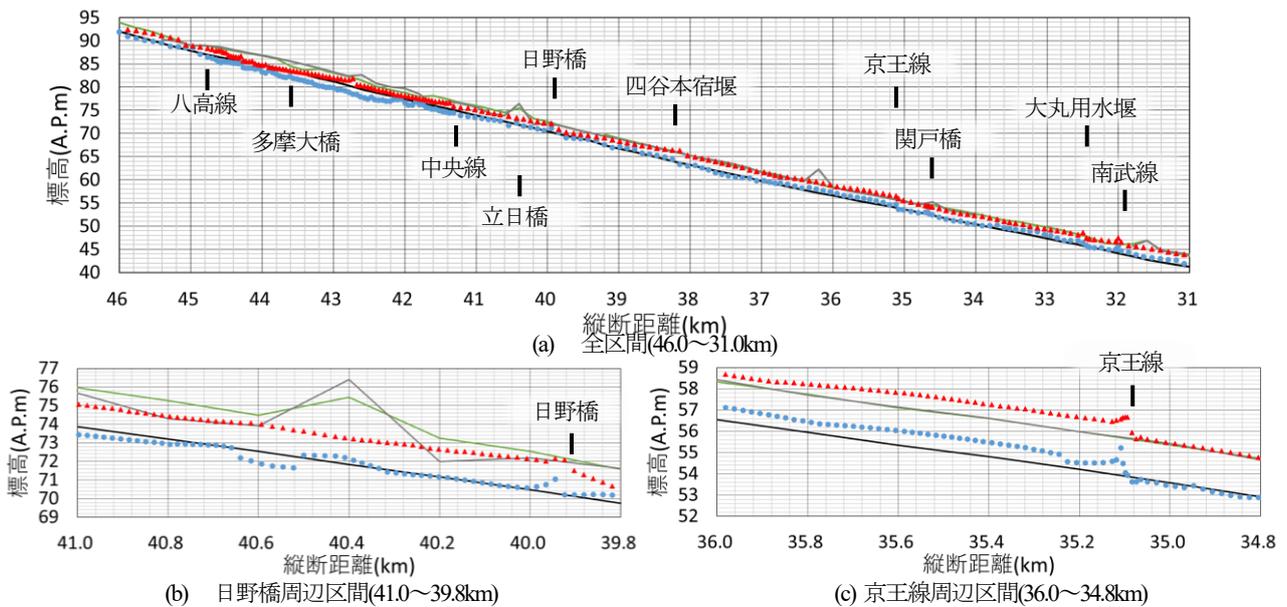


図-3 多摩川中流部における最大全エネルギー水頭と堤防天端との高さ関係

洪水流では、河床の変動が大きく、全エネルギー水頭の分布に応じて河道の形状が変化する。このため流れのQ3D-FEBSと非平衡流砂モデル⁹⁾を用いた河床変動解析を行い、全エネルギー水頭を求める。

3. 多摩川中流部河道での全エネルギー水頭分布

(1) 令和元年東日本台風時の多摩川洪水の概要と多摩川中流部の特徴

令和元年東日本台風時には、基準地点の石原地点でH.W.L.を超過する大規模な洪水が発生した。検討区間で

ある多摩川中流域(46.0~26.0km)では、この洪水によって日野橋P5橋脚が沈下する被害や、京王線直下流左岸高水敷が洗掘する被害、下流の六郷橋付近で堤防からの溢水被害が発生した。洪水前に撮影された日野橋周辺区間、京王線周辺区間の航空写真とそれぞれの区間での被災状況を図-1、図-2に示す。日野橋、京王線橋梁の川底には河床の低下から橋脚を保護する護床工が設置されており、両橋周辺区間の左右岸には低水護岸、高水護岸が施工され洗掘対策が行われている。

多摩川中流域において浅川合流点(37.0km)より上流区間は、土砂移動量の減少により低水路(滞筋)が低下、固定化し二極化が進行している。一方、浅川合流点より下

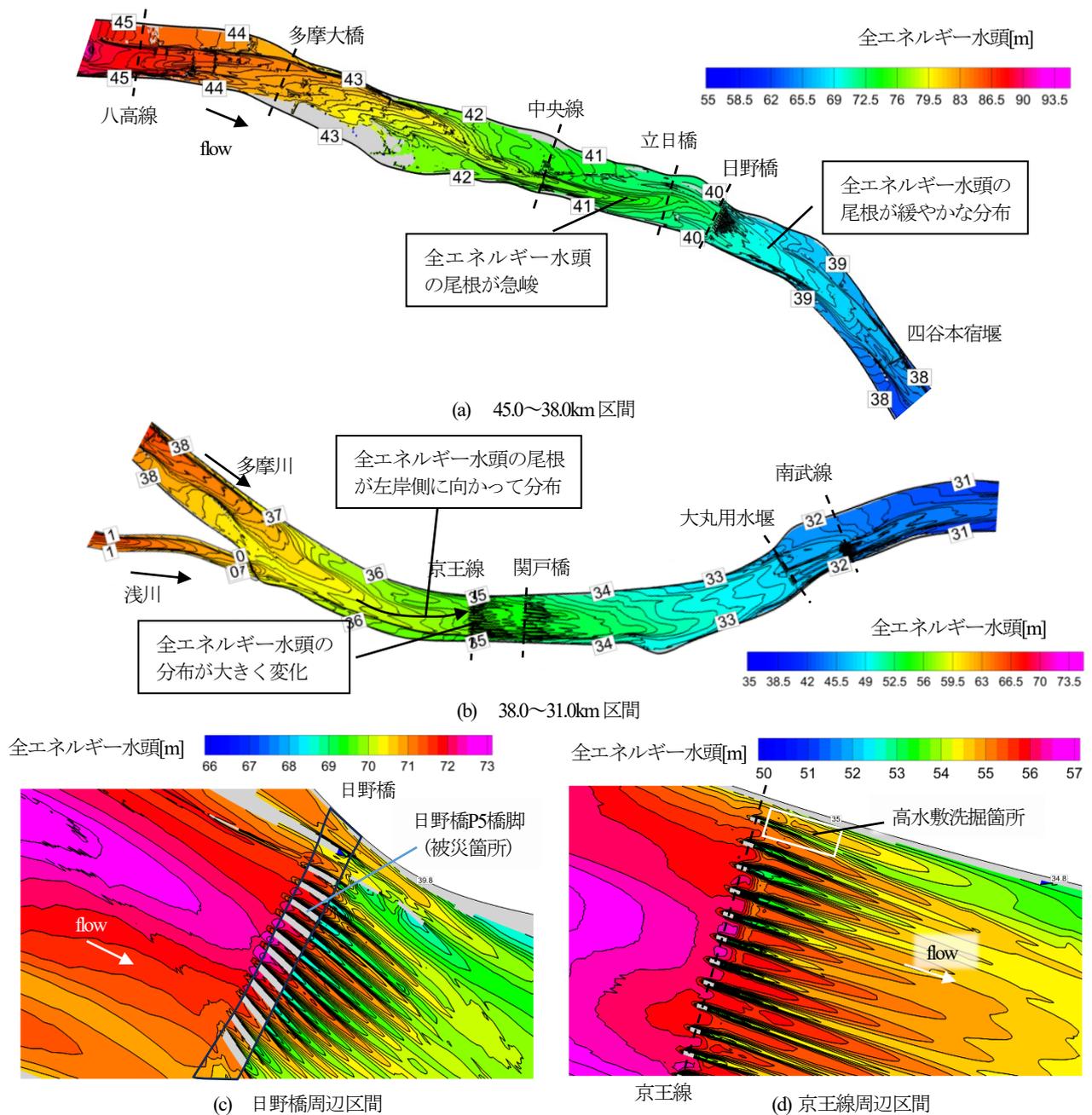


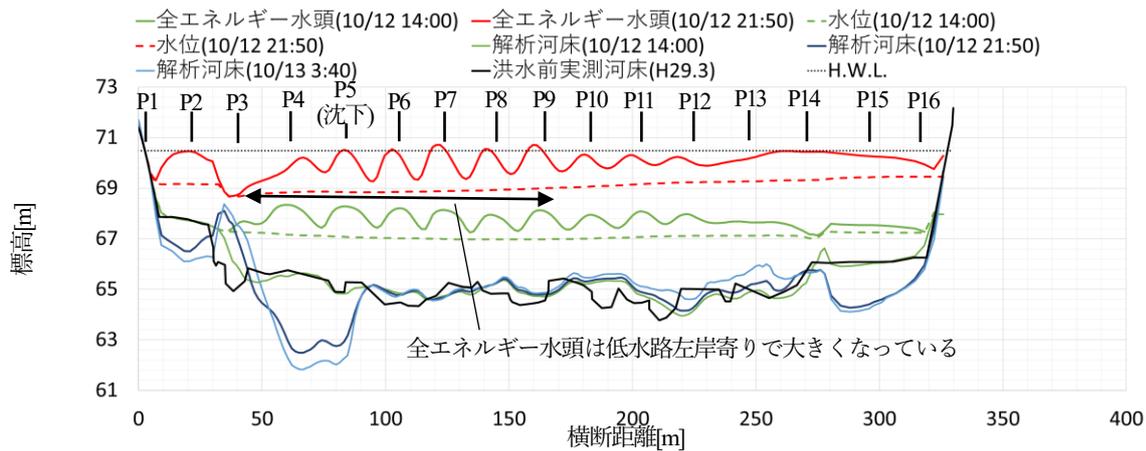
図4 全エネルギー水頭の縦横断分布(洪水ピーク時)

流区間は、浅川からの土砂供給と大丸用水堰、京王線橋梁による下流への土砂の移動抑制のため不安定な砂州の形成が見られ、洪水流に影響を与えている⁹⁾。

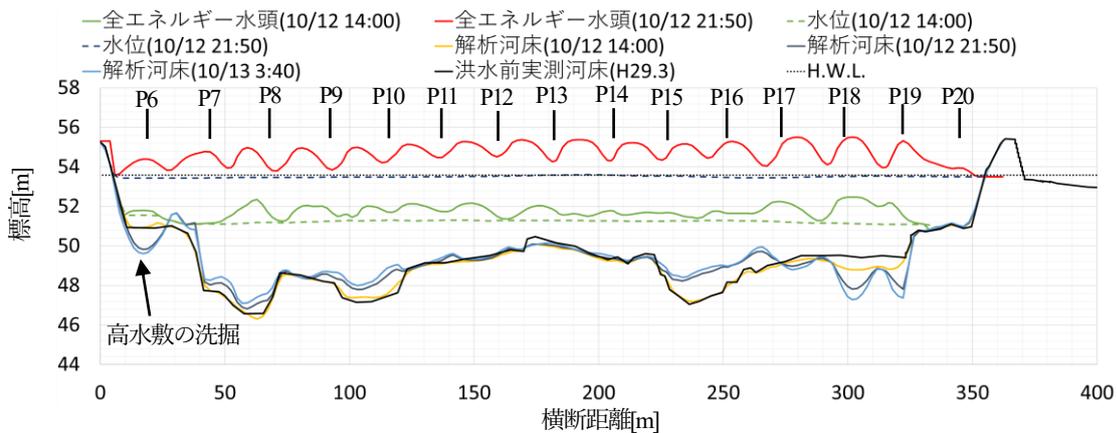
(2) 最大全エネルギー水頭の縦断分布と堤防天端高さの関係

図-3は、令和元年東日本台風による多摩川中流部での洪水位観測から見てきた最大全エネルギー水頭の値と河川堤防の高さの比較検討結果を示す。図には最大水位とH.W.L.も併せて示している。最大全エネルギー水頭と最大水位は、それぞれ洪水時の河道各縦断位置における横断面内の全エネルギー水頭と水位の最大値を示す。図-3(a)より、41.0kmより下流区間では、全体的に最大全

エネルギー水頭が堤防天端高さ程度かそれ以上となっている。特に、日野橋(39.9km)周辺区間や四谷本宿堰(38.2km)周辺区間、京王線(35.1km)周辺区間、大丸用水堰(32.4km)～南武線(31.9km)区間では、最大全エネルギー水頭が堤防天端高さを超えている。図-3(b), (c)にはそれぞれ、被災した日野橋(39.9km)周辺区間と京王線周辺区間の最大全エネルギー水頭と堤防天端高の関係を拡大して示す。これらの区間では、構造物上流で最大全エネルギー水頭が堤防天端高さ程度かそれ以上の値となっている。全エネルギー水頭が堤防天端高さ程度になると、水面上の波とうねりの発生、水衝部での水位の高まり、構造物の存在による水位上昇、堤防際の樹木群への流木の集積等により、大きなエネルギーを有する流れが天端を



(a) 39.8km(日野橋直下流)



(b) 35.0km(京王線直下流)

図-5 39.8km(日野橋直下流)と35.0km(京王線直下流)における横断面形の時間変化

超えることも起こり危険である。特に、全エネルギー水頭に対応した水面上の波浪の大きさや水衝部での水位の高まりの発生機構を明らかにし、その大きさ、被災の機構及び対策について今後詳細に調べる予定である。

(3) 全エネルギー水頭の縦横断分布と被災形態

図-4に、多摩川中流部における洪水ピーク時の全エネルギー水頭の等値線の縦横断分布を示す。等値線が下流側に張り出している箇所は、全エネルギー水頭の尾根と呼び、周囲より高い値を持つ。尾根は低水路のほぼ滞筋沿いに現れており、浅川合流点(37.0km)より上流区間では、全エネルギー水頭の尾根が急峻な形となっている。一方で、浅川合流点(37.0km)より下流区間では砂州の形成等によって低水路が複数形成され、それに伴い全エネルギー水頭の尾根が複数存在している。

図-4(c)(d)には、それぞれ日野橋周辺と京王線周辺の全エネルギー水頭の拡大図を示す。日野橋周辺と京王線周辺では河道内の橋脚群のため、橋脚上・下流の間で大きな水位差と最大全エネルギー水頭の差が見られる。日野橋周辺区間、京王線周辺区間共に、橋脚によって洪水流が激しく乱され橋を境に全エネルギー水頭の縦横断分布が大きく変化している。図-5(a) (b) は、日野橋直下流及び京王線直下流における全エネルギー水頭の横断分布の

時間変化と河道横断面形の時間変化を示す。図-4(c), 図-5(a)より、日野橋直下流(39.8km)では、10/12 14:00(流量約 $2,000\text{m}^3/\text{s}$)及び洪水ピーク時(流量約 $5,000\text{m}^3/\text{s}$)には、全エネルギー水頭の最大値が低水路左岸寄りに発生し、これがP5橋脚沈下の主要な原因と考えられる。

次に、京王線P6橋脚直下流の左岸高水敷の洗掘について検討する。図-2に示す左岸高水敷の洗掘被害が生じた35km地点の上流区間では、図-4(b) (d)より全エネルギー水頭の尾根が滞筋に沿うように左岸に向かって分布している。10/12 14:00(流量約 $2,000\text{m}^3/\text{s}$)の時点では京王線橋脚の影響を受けているものの、その影響は大きくない。一方、10/12 21:50(洪水ピーク、流量約 $6,800\text{m}^3/\text{s}$)の時点では、35.0km地点(京王線直下流)において、洪水流に及ぼす橋脚の影響が大きく、全エネルギー水頭が横断的に凹凸の激しい分布となっている。

左岸高水敷の洗掘は起こったものの堤防被災等の大きな災害に至らなかった。これは、長年にわたって行われてきた縦断河床の安定化対策⁹⁾、低水路護岸、高水敷護岸等治水事業によるところが大きい。橋脚間隔の狭い橋であったにもかかわらず、流れの巨大なエネルギーをうまく緩和する河道作りが行われてきた結果であると言える。設置年度が古い橋梁にあっては、現在の設置基準に整合していない橋梁は多い。特に、橋脚間隔が狭く、低水

路と高水敷の境界付近に橋脚が設置されている場合は、洪水流の大きなエネルギーが、堤防や河道を危険にさらす可能性が高い。河道内の橋脚の構造、設置位置、被災履歴等について調べ、洪水流のエネルギーの観点から十分な検討が必要である。

4. 全エネルギー分布に対応する船底型河道の計画・設計の考え方

H.W.L.を超える流れは「流水の通常的作用」を満足する流れには程遠く、堤防決壊の可能性が高いと考えられてきた。これは、長年にわたる技術者の経験の蓄積によるものと考えられるが、その判断の技術的根拠について明確にする必要がある。我が国の河川の多くは複断面形で低水路は蛇行しており、洪水位がH.W.L.を超えると、複断面形河道の流れの構造が大きく変化することが近年の調査研究で明らかになった⁹⁾。超過洪水時の水理現象は連続的に変化するというよりも不連続的に変化し、大きな洪水エネルギーを通過させる堤防・河道の設計には、カタストロフィックな変化に対応可能な流れの三次元エネルギー分布に基づく解析方法を用い、超過洪水時の三次元エネルギー水頭に立脚して越流破堤や洗掘破堤を起こさない設計法が必要とされる。この時、風波や波浪、流木等の集積、河床の洗掘、堆積等河床高の変化による水位上昇分は、堤防・河道の一体的設計に考慮されなければならない。

これまで、余裕高は構造的な余裕として設定されている。水理的に評価することが可能で、計画的に設計に取り込める水位上昇は確定量として評価し、堤防の余裕高の算定には加えなくてよいような技術的裏付けが待たれる。余裕高は純粋に、風波や波浪による水面上のうねり、樹木群等による流木等の集積、河床変動による水位の増加、水防作業の利用空間など構造的に必要な高さとする。

日本の大河川の多くは蛇行する低水路を有する複断面河道である。洪水エネルギーは、大きな自然の営力で複断面蛇行河道を抵抗の小さい断面形状に変え、滑らかなエネルギー分布を有する船底形断面とるように変化させる。船底型河道形成のために重要なことは、低水路の河床縦断面形を安定化させることである。縦断面形の安定化技術は河川ごとに異なるが、これは、対象河道の河道変遷のデータに基づいて検討されるべきものである。多摩川中流部では⁹⁾、時空間的に十分な河道変化のデータを集め、多摩川の河道安定化の方策を作り上げてきた。この検討が不十分な場合は、低水路は二極化し、前述の船底型河道は形成されないし、形成されたとしても維持は困難である。河床縦断面形が安定化することによって、はじめて横断方向への自由な拡幅が起こり船底型河道に変化していく。船底型河道の形成を促すためには、低水路の

断面形を縦断的に大きく変化させないこと、水路護岸を施工しないこと等によって、自然の営力により低水路幅は自在に変化させることを可能にし、これにより超過洪水を適切に流下させる河道づくりが可能となる。

5. まとめ

洪水流の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の設計の考え方は、運動方程式に基づくせん断力的考察に基づく従来の設計法とは異なっている。これは、堤防の破壊が不連続的に起こり、時にはカタストロフィックな現象であり、三次元エネルギー分布に基づくのが適切であると考えているためである。本研究では全エネルギー勾配、局所エネルギー勾配の河川構造物等に及ぼす影響は、紙面の制約上省いており、次の機会にまとめた。また、全エネルギー水頭の高さがどの程度の高さになると破堤するかの問いには答えていない。現地堤防で起こっている現象から全エネルギー水頭と破壊に関する閾値を地道に調べ、明らかにすることが期待される。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 福岡捷二：超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体設計の考え方，河川技術論文集，第29巻，pp.209-214，2023。
- 3) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程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，No.1，pp.61-80，2019。
- 4) 国土交通省：河川砂防技術基準 設計編，2023。
- 5) 福岡捷二：浸透破壊，侵食破壊，越流破壊の危険性の小さい堤防・河道の一体的設計法，河川技術論文集，第26巻，pp.25-258，2020。
- 6) 後藤岳久，長谷部夏希，向田清峻，福岡捷二：蛇行する低水路を有する複断面河道における洪水流の流下機構と河道内被災の分析と対策—令和2年7月球磨川洪水を例として—，河川技術論文集，第29巻，pp.341-346，2023。
- 7) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp.457-462，2022。
- 8) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.1，pp.1-20，2012。
- 9) 後藤勝洋，寺西浩三郎，後藤岳久，福岡捷二：多摩川中流部における河道の長期変遷(1947~2020年)から見た低水路河道の安定・不安定と河川植生の相互関係の分析，河川技術論文集，第28巻，2022。

(2024. 4. 3受付)