

第19回河川技術シンポジウム  
令和5年6月23日

# 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

中央大学研究開発機構  
福岡捷二

## 1. はじめに

近年，異常な洪水が全国の河川流域で起こっており，これまでの河川の計画，設計，管理では考えられて来なかった河道の水理現象が見られた。

この水理現象は，洪水流量の大きさと低水路の蛇行，高水敷の平面配置，高水敷の面積割合等と関係して起こり，大流量時の河道構造と堤防の関係を論ずる上で重要な現象である。

この水理現象は治水のみならず河川環境，河川利用からも重要で，今後の総合的な川づくりに結び付く課題であり，この現象を取り込んだ河道計画，設計技術の開発に向けて高精度な洪水流解析技術が必要とされる。

本論文は，最初に超過洪水に対して，洪水防御計画，特に堤防と河道の設計の在り方を論じている．次に，洪水流の三次元エネルギー分布解析の必要性とその解析法を提示し，これを用いた堤防と河道の一体的設計法の考え方を提言し論じている．

## 2. 超過洪水に対する河川技術の抱えている課題

河川技術には、単純で分かり易い技術が良いという経験主義が根底にあり、河川技術の科学化が著しく遅れている。単純で分かり易い技術は多くの河川の水理現象の理解、解明に必要な場合は多い。しかし、それだけでは超過洪水がもたらす異常な水理現象、災害の発生に対し説明は出来ず、備えは不十分である。

BIM/CIM、都市の三次元プラットフォーム等土木工学分野では、三次元的解析技術は当然のように使われている。しかし、河川の洪水流の解析技術については、一次元、二次元解析技術が中心である。もちろん、一次元、二次元的技術は有効な場合が多いが、超過洪水では三次元的な水理現象への対応が求められている、

超過洪水に対応可能な堤防と河道を一体とした計画、設計、管理技術が必要であり、これを行うためには洪水流の三次元的解析技術が不可欠であることを認識し、実行に向けての道を切り拓くことが喫緊の課題である。

### 3. 洪水流の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体的設計の必要性

河川管理施設等構造令の中で、河川堤防は、計画高水位以下の条件で、「流水の通常的作用」の下では、堤防の機能を発揮できなければならないとしている。

「流水の通常的作用」に該当しない水理現象はどのような洪水流、河道条件で生ずるかを検討し、堤防と河道の計画・設計を一体的に行う技術の確立が必要である。

「流水の通常的作用」に該当しない以下の水理現象が、大洪水時のHWL付近で見られ、堤防と河道の設計上考慮が必要である。

蛇行している複断面河道では、洪水流の高水敷水深に対する低水路水深の比で定義される相対水深が0.3以上になると高水敷流れと低水路の流れの混合が顕著になり、図-1に示すように遠心力による二次流（第一種二次流）と逆向きに回転する二次流が生じ、内岸寄りの流速が増大し、内岸河床の洗掘が生じHWL近くの水位に達すると内岸側高水敷の洗掘が生ずる。このように、堤防の線形や河道の構造によっては、従来の堤防と河道の設計で考えられていた「流水の通常的作用」と異なる流れが発生する。

堤防と河道の計画、設計、管理は、計画高水流量と計画高水位(HWL)の縦断分布を基準に判断しているが、この考え方が適切であるかの検証が必要であると考える。

# 複断面蛇行河道における洪水流の特徴

(複断面的蛇行流れ)

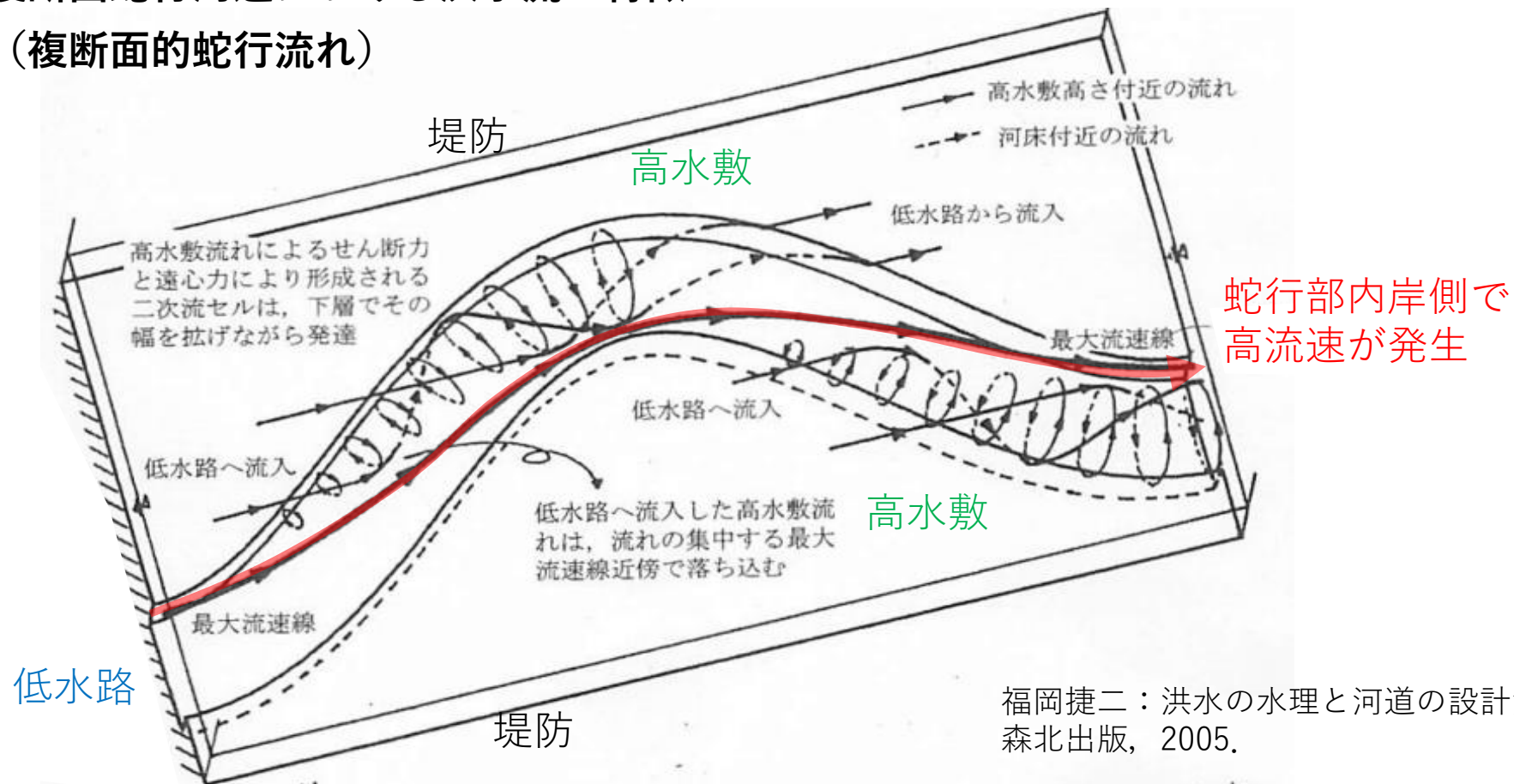


図-1 遠心力による二次流と逆向きの二次流の発生 (複断面的蛇行流れ)

### 3-1. 洪水流のエネルギー方程式

図-2は、本支川合流部における河床面、水面、全エネルギー水頭面の関係を模式的に示したものである。

洪水流では、私たちが見ている水面の上に運動のエネルギーを水頭換算した速度水頭が乗った全エネルギー水頭の面がある。洪水流は、重力の作用下で全エネルギー水頭の勾配で流れており、この物理機構は、HWL 付近の水位で生じている水理現象にとって支配的である。

複雑な河道平面形、河床形状を持つ河川の大洪水は、時間・空間的に変化する三次元流れとなり、エネルギー分布の違いが流速分布、水面の変動や水面高さの変化になって表れる。

このことは堤防と河道は水理的に一体であり、洪水水位だけでなく洪水流の持つ三次元エネルギー分布を考え堤防と河道の設計を検討する必要性を示している。

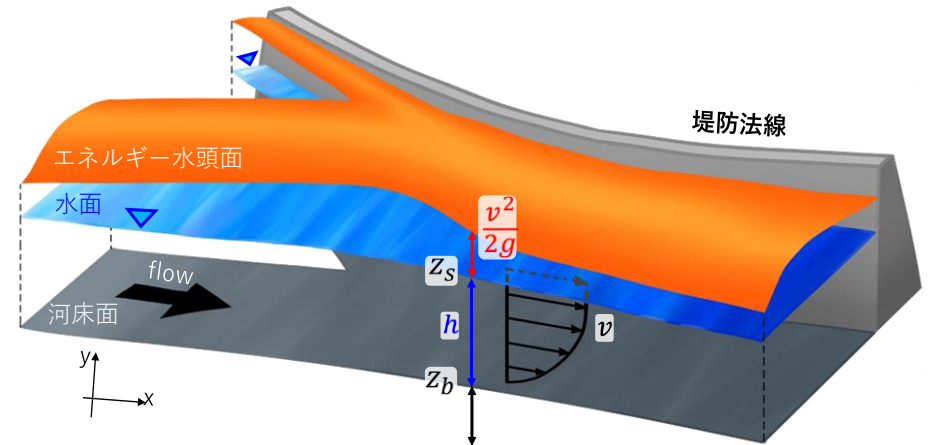


図-2 本川と支川の合流点付近の三次元的なエネルギー水頭分布、水位分布

流速の3成分を $u, v, w$ , 圧力を $p$ とすると, 河道での全エネルギー水頭 $H_0$ は, 位置水頭 $z$ と圧力水頭 $p/\rho g$ と速度水頭 $(u^2 + v^2 + w^2)/2g$ の和となり, 式(1)で表現される. 洪水はエネルギー水頭の流れ方向の勾配で流れる.

$$H_0 = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \quad (1)$$

エネルギー水頭は, その時間, 場所でのエネルギーの高さを示しており, 複雑な形状を有する河道の洪水流は三次元的な流れとなり, このとき式(1)の $p$ は, 非静水圧分布となる. 三次元的なエネルギー式(1)に各位置の流速を乗じ, さらにこれらを流水断面積 $A$ 内で断面平均とると一次元的なエネルギーフラックス $E_0$ を得る.

$$E_0 = \frac{1}{Q} \int_A \left\{ z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \right\} u \, dA \quad (2)$$

洪水流量が大きく, また縦・横断面形の変化が激しい河道区間では, 流れの速度水頭及びその変化が大きくなり, 水位とエネルギー水頭の縦横断変化が重要になる. 流れの構造によっては, 運動エネルギー水頭や圧力水頭は大きく堤防からの越水や堤防侵食による損傷, 破壊が懸念される.

### 3-2. 堤防と河道設計の考え方

洪水流による破堤は、越流、洗掘、浸透が原因で起こるが、これらの破堤原因を現在の技術で解結するのは不十分である。現在は、洪水流がHWLを超えると堤防は破壊するとしてHWL以下の水位で安全となる堤防の計画、設計、管理が行われている。

現行の堤防の高さは、対象とする河道のHWLに計画高水流量に関係する高さ分（余裕高）を加えたものである。HWLを超える洪水の発生頻度が高まり、堤防被災が懸念される中で、堤防の高さの決め方をより科学的に検討する必要がある。

堤防等河川構造物の侵食破壊は、洪水外力に対する構造物の耐力との大小関係で決まるが、どこが、どのような状態になって危険になるかを判断するのは容易ではない。

これまで河道設計と関係する洗掘や堆積などの解析は、運動方程式に基づきその場所の流速、せん断力、乱れエネルギー等局所的な水理量に基づいて検討されて来たが、河床変動解析を除いては有力な方法になり得ていない。

洪水時の河床の洗掘、堆積等河床面の変動については、重力の作用による局所的なせん断力が卓越しており、運動方程式に基づき流速分布等からせん断力を求め河床変動解析を行っており、工学的に有効な解析法である。



河岸や堤防と河道の設計や危険個所の対応には、両者の一体解析が不可欠である。これには局所的なせんだん力が卓越する河床変動と異なり、河川の縦横断面形と関係する連続する壁面に作用する圧力勾配、慣性力、重力等すべての力を考慮した三次元的な流れのエネルギー分布に基づき議論することが重要である。今日の高精度な洪水流の解析から、破壊の可能性の高い河道の危険個所の絞り込みが可能になりつつあることと関係する。

これはまた、堤防や河道等の河川構造物は大きな広がりを持つ構造体であり、局所的な外力よりも堤防、河道の構造に起因する洪水流の三次元的エネルギー分布が、構造体の耐力に勝るようになった場所付近で破壊に至ると考え検討するのがよいと思う。

このような河岸や堤防の洗掘、堆積箇所を含む河道の危険区間について、まずは非静水圧準三次元運動方程式より求まる時空間的な三次元水理量を求め、次にこれらの水理量を用いて洪水流のエネルギー分布を求め、構造物の破壊との関係を調べることになる。

具体的には、エネルギー分布の時空間変化の大小関係を知り、結果的にどこに、どれくらいの大さの損傷が生じたか、構造物の破壊はどのようなエネルギー分布の場所で生じたのかを判断することになる。堤防等の構造体の耐力は、現地河川での洪水時のこのような検討を通して理解を増し、設計技術に高めていくことになる。

### 3-3. 洪水流の三次元エネルギー分布の見積もり

前述の堤防の越流破壊や侵食破壊を洪水流のエネルギー分布の視点から論じるため、洪水流の連続方程式と非静水圧分布を考慮した準三次元運動方程式 (Q3D-FEBS) とエネルギー水頭を示す式 (1) を用いて洪水流の三次元エネルギー分布を算定する。エネルギー損失の影響は、非静水圧準三次元解析において求まる流速、圧力の値に既に考慮されており、これを式 (1) に代入することにより、洪水流の三次元エネルギー分布が求まることになる。

式(3)、式(4)は連続方程式と非静水圧分布を考慮した準三次元運動を扱う基本式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$h \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \bar{p}'}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\partial h \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (4)$$

流速  $u$ ,  $v$ ,  $w$  は、それぞれ次式で与えられる。

$$u_i = (u_{si} - U_i) \cdot (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + (u_{si} - u_{bi}) \cdot (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (5)$$

$$w = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_i \left( \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( h \int_0^\eta u_i d\eta \right) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{z_s - z}{h} \quad (7)$$

改定・河川管理施設等構造令の解説<sup>5)</sup>では、堤防の余裕高は、洪水時の風浪、うねり、跳水等の一時的な水位上昇や、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。

計画上の余裕は余裕高には含まれていない。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、本支川合流による水位上昇、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、一次元解析法、準二次元解析法では、計画に含まれているとされるこれらの諸量の計算精度は高くない。また河道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合流点、水衝部等では、HWL付近の水位内にあったとしても、エネルギー水頭が堤防天端の高さに達することは起こり得る。同様に、洪水流の持つエネルギーに対して、それを受ける河道の河積が広くなければ、また、狭窄部や河川構造物により下流へのエネルギーの輸送が滑らかに行われない河道区間や洪水中に流下障害が起こり局所的に大きなエネルギー上昇が起こる河道では、越流氾濫が起こることも考えられる。

中小河川では余裕高の無い掘り込み河道が一般的である。しかし、都市中小河川の掘り込み河道ではひとたび溢流すると急激で激しい氾濫流が生じ被害が大きくなることから、エネルギー水頭に考慮した余裕高の検討が必要である。

最後に、以上の議論を踏まえて気候変動下において洪水流の三次元的なエネルギー変化を取り込むことによる河道と堤防の一体設計の考え方をまとめる。

福岡は、先にわが国の一級河川の基準点において計画高水位を超えないように計画高水流量 $Q$ が流れた時の計画断面形諸元（河幅と水深）を用いて、無次元計画高水流量に対する、無次元計画川幅、無次元計画水深の関係を整理し図-3を与えた。図-3は、計画高水流量が計画高水位で流れたとき、水理的に安全に流れる河道断面形（川幅と水深）を与えており、洪水に対する河道と堤防高さを一体とする河道設計の基本的考え方である。

気候変動の影響を考慮した流量変更による計画高水流量は、現在の計画流量の1.2倍程度と考えており、図-3の計画流量の値に1.2倍の流量を用いることで新しい計画に対応することが出来る。さらに、余裕高として図-3より求まる計画高水位相当の水面高さに、計画流量に対応する運動エネルギー分を加えることによって、計画高水流量に対する堤防と河道を一体的に考えた堤防高さや河道断面形を得ることが出来る。

浸透破壊に対しては、図-4に示すように河道の洪水の水位、継続時間、堤防の断面形、土質特性等を考慮した堤防脆弱性指標  $t^*$  を用いて浸透に対する堤防の安全性を評価し、これに気候変動の影響を考慮した図-3の福岡の式に基づく堤防の侵食破壊や越流破壊を減ずる河積を確保するように設計ことによって、侵食、越流、浸透破壊の危険性の小さい堤防と河道の一体的設計法（図-3と図-4）の基本的考え方を提示する。

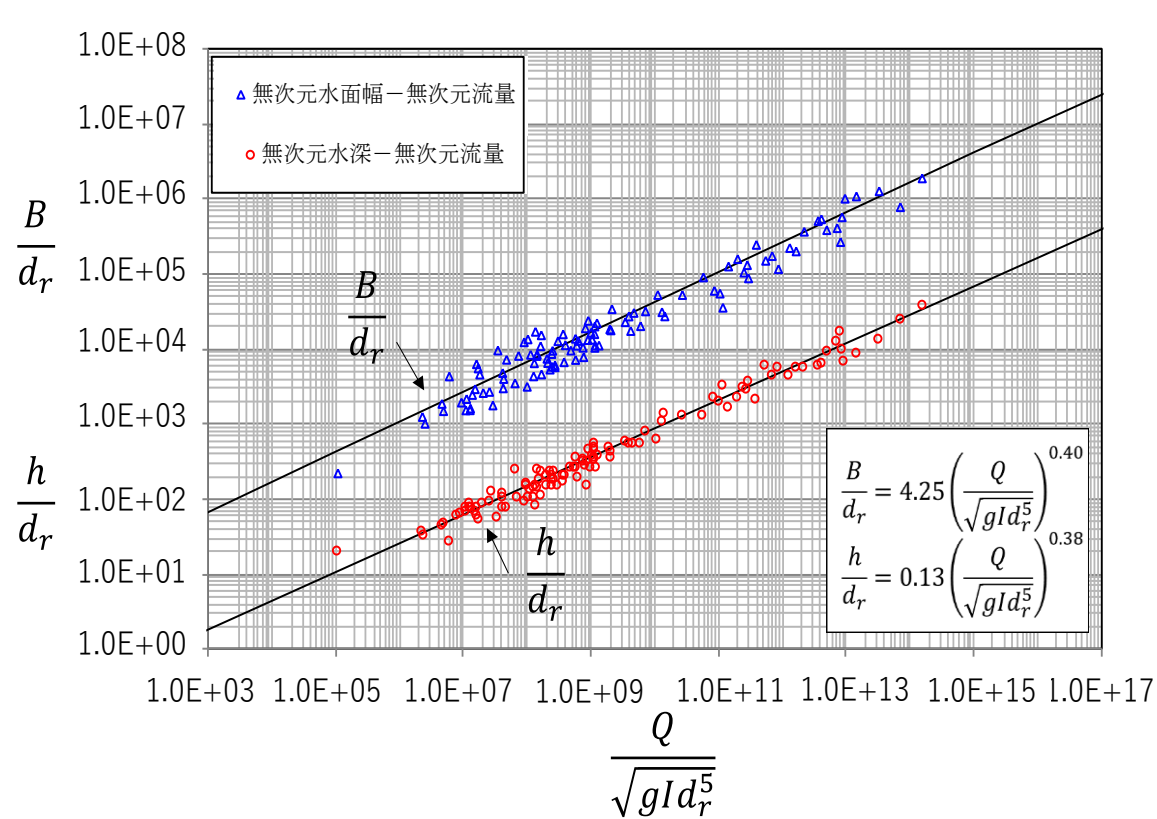


図-3 計画河道における無次元計画流量と無次元水面幅，無次元水深の関係<sup>6)7)</sup>

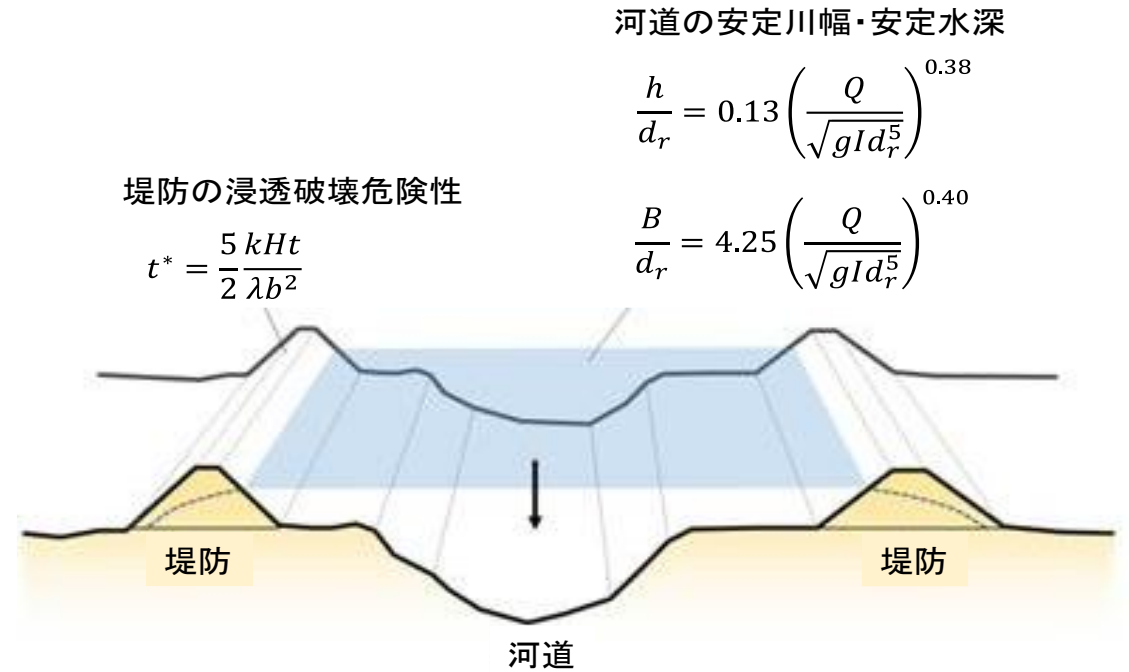


図-4 堤防と河道の一体的設計の考え方

## 4. おわりに

本論文では、近年のHWLを越える大洪水において、現在の技術基準では説明が困難な新しい水理事象の発生が見られること<sup>3)4)</sup>、気候変動下においては洪水流と河道の特性に応じた選択可能な多様な洪水解析法の整備と新しい水理事象の説明には非静水圧分布を考慮した準三次元洪水流解析法が必要なこと、堤防や河道の設計にあたって三次元エネルギー分布の導入を考える必要があること等が述べられた。

主要な結論は以下のとおりである。

1. 超過洪水に対する堤防と河道の設計法の課題を示し、一体的設計法の必要性を論じた。
2. 一体的設計のために、非静水圧分布を有する準三次元運動方程式、連続方程式から洪水流の三次元エネルギー分布を求める方法を提示し、新しい解析法の必要性を論じた。
3. 堤防と河道の一体的設計に関して水位を指標とする現在の技術基準と洪水のエネルギー水頭を指標とする堤防高さの決め方を論じ、今後のさらなる検討の必要性を論じた。