

## 学位請求論文要旨

### 山間狭隘河道における洪水流の水位・流量ハイドログラフの変形・伝播機構に関する研究 PROPAGATION AND TRANSFORMATION MECHANISM OF WATER LEVEL AND DISCHARGE HYDROGRAPHS OF FLOOD FLOWS THROUGH RIVER VALLEY

土木工学専攻 竹村吉晴  
Civil Engineering, Yoshiharu TAKEMURA

#### 【研究の背景と目的】

近年の降雨特性の変化は、洪水流出特性の変化と洪水流量の増大をもたらし、各地で大規模な水災害が起こっている。我が国では、戦後から、河道や洪水調節施設等の整備を段階的に進め、流域の治水安全度を向上させてきた。しかし、未だ整備水準が十分でない河川は多い。洪水流量の増大による河川への土砂流出量の増加、流下能力不足による氾濫危険性の増大、河道内樹林化による流下能力低下、みお筋の固定化による河床高の二極化による河岸や河床の洗掘災害の増大等治水上の多くの問題が生じる中で、確かな技術力を持って河道改修や河川の管理を適切に行っていくことが求められている。そのためには、まずは、上流から河口まで各区間における、洪水流の水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフの伝わり方を、洪水流と河道の平面形や縦横断面形状等との関係から十分理解し、河川が本来有する河道貯留機能を評価し、これを活かした計画・管理とすることが重要である。

我が国の河川上流域には、山地河道や扇状地河道のような勾配の急な河川のほかに、川幅の狭い溪谷の間に河岸段丘や谷底低地の発達した比較的勾配の緩い区間が見られる。後者の河道区間では大出水時には水面幅、流速等が場所的に急激かつ大きく変化する。(本研究ではこのような河道を山間狭隘河道と呼ぶ)。ほぼ一様幅の直線的な河道であれば、水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形・伝播は同様と考えられているが、山間狭隘河道のように平面形や横断面形の縦断変化が大きい河川では、両者の関係はどのようになるのか、下流河道の洪水流にどのような影響を与えるかについて十分明らかにされていない。さらに、山間狭隘河道に流入する支川群も、本川の水位・流量ハイドログラフの変形・伝播に影響を与えるため、支川流入を伴う山間狭隘河道の洪水解析法を構築し、それらの影響を定量的に評価することが必要である。しかし、山間狭隘河道における洪水流については、沖積地河川の中下流域に比較し、技術・学術両面での検討が不十分な状態にとどまっている。

近年、沖積地河川の中下流域では、観測技術・計算技術の向上によって、洪水現象の理解が進んできている。福岡らは、洪水時に観測された水位の縦断形の時間変化には、洪水流や河道の状態、河道の抵抗等が表れているとの考えから、観測水面形の時系列を解として洪水流を解析することで、任意断面における流れ場および流量ハイドログラフや洪水貯留量を実用上十分な精度で算出している。また、内田らは、観測データのない支川流域からの流入流量を、本川の観測水位データから推定する方法を提示している。このように実河川における洪水解析が進展してきたものの、洪水流の水位・流量ハイドログラフの変形・伝播機構については洪水流や河道特性の多様性のために今なお理解が十分でないのが現状である。

このような背景のもと、本研究の目的は、第一に本川の観測水位データに基づいた支川流入を含む洪水解析法を構築し、これを江の川山間狭隘河道に適用し、その有効性を検討する。第二に、洪水流の伝播に関する既往研究を概観し、洪水流研究の課題を明らかにした上で、河道構造(例えば河道横断面形)の縦断的に変化する河川における洪水流の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形・伝播機構の違いおよび河道貯留の新しい考え方を提示する。最後に、研究結果の河川計画・河川管理に活かすための考え方を示す。

## 【本論文の内容と成果】

本論文は6章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、研究の背景、目的および本研究の構成を示す。

第2章「洪水流の伝播に関する既往研究と課題」では、一様な矩形断面水路における洪水流の線形解析から近年福岡らによる実河川における洪水流に関する研究を概観し、その成果と課題を明らかにしている。洪水流の線形解析では、洪水流の主要部分は準定常・擬似等流の仮定から導かれる Kinematic wave として伝わるとされている。しかし、実河川では、河道の縦横断面形や平面形の変化、河道内樹木群による流水断面積の変化等に伴い洪水流の非定常性、非線形性が卓越するようになり、Kinematic wave の理論からでは洪水流の主要部分の変形・伝播を説明できないことを、事例を用いて示している。

近年では、洪水流の実態解析が行えるようになってきたが、実河川の洪水流の変形・伝播を河道構造や河道内樹木群との関係から定量的に評価することの必要性を述べている。

第3章「河道構造が縦断的に変化する河川における洪水流の変形・伝播と洪水貯留量の新しい考え方」では、河道構造が縦断的に変化する河川における洪水流の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形・伝播機構の違いとそれらに及ぼす洪水貯留量の新しい考え方について考察している。

はじめに、無次元化した非定常一次元の運動方程式と連続式から、洪水流の水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形・伝播の基礎式を導き、流量変化は断面平均流速の時間に関する偏微分と流水断面積の積で表せること、水位変化は、さらに流水断面積や水面幅の空間に関する偏微分が関係することを理論的に示した。この検討から、準定常流・擬似等流を仮定した場合のみ、水位・流量ハイドログラフの変形・伝播は一致すること、しかし、河道構造が縦断的に変化する河道区間では、水位・流量ハイドログラフの変形・伝播は異なることを明らかにしている。

洪水流の非定常性は、河道貯留を発生させる主要原因であり、これと河道構造が一体となって大きな河道貯留をもたらす。河道貯留は下流河道での流量低減および洪水流の遅達を引き起こすが、連続式のみから表現される従来型の河道貯留式では、流量増大期であれば流入量が流出量よりも大きいため、必然的に洪水貯留量は時間とともに増大していくことになる。それに対し、運動方程式と連続式から導出した流量伝播の基礎式では、断面平均流速で移動する座標系から見た場合、流量は $\partial U/\partial t$ が正の場合に増大し、負の場合に減少する。このことから、流量増大期において、流量が対象とする区間を流下するとともに低減することによって生じる洪水貯留量は、洪水流の伝播特性、特に流量ハイドログラフの伝播の遅れを増大させることを表す重要な指標となる。この洪水貯留量を新しく洪水遊水量と定義し考察している。

一般に、変形しながら伝播する洪水流は、各断面において断面平均流速、流量、水位の順に最大値が生じる。このため、流量ピーク付近においても、流量増大期の断面平均流速が減少する時間帯が常に存在する。一様な矩形断面水路の場合、断面平均流速の減少は僅かな時間帯に限られる。一方、河道漸縮部や漸拡部のように河道構造が縦断的に変化する河川では、長い時間帯において、流量増大期の断面平均流速が減少する区間が存在することを理論解析に基づき考察し、洪水遊水量の分布とそれが洪水流量の伝播に及ぼす影響を実河川の洪水流と河道構造との関係から検討することの必要性を述べている。

第4章「支川からの流入を含む山間狭隘河道の洪水解析法」では、はじめに、洪水流の観測データの不足する山間狭隘河道における洪水解析法を確立する必要性を述べ、本川の観測水位時系列データを用いた本川と支川の洪

水流量ハイドログラフの解析方法を示す。

これまで、本川および支川において、水位・流量や横断測量データ等が揃っている場合には、観測された洪水流の水面形の時間変化を説明するように、本川と支川の洪水流を同時に解析することで、本川の流量ハイドログラフおよび支川からの流入流量ハイドログラフを高精度に計算できることが示されてきた。本章では、水位・流量の観測されていない支川からの流入流量ハイドログラフを、合流点下流の本川水位観測点における水位時系列データを用いて計算し、求めた支川流入流量ハイドログラフが本川河道の洪水伝播に与える影響を検討した。

江の川山間狭隘河道における近年の主要洪水である平成7年7月、平成11年6月洪水の川本観測所(36.3 km)～川平観測所(9.2 km)区間に本解析法を適用した。解析結果は、両洪水ともに観測された本川水位・流量ハイドログラフおよび痕跡水位の縦断形を十分説明でき、観測データの不足する支川群からの流入流量ハイドログラフを見積もることができることから、支川流入の影響が顕著な山間狭隘河道の洪水解析に有効な解析法であることを示した。また、第3章での非定常一次元基礎方程式から理論的に導いた、水位は流量に比べ河道や洪水流の流下状態を敏感に反映する量であるとの結論は、江の川と北上川の山間狭隘河道に適用した非定常平面二次元解析結果から、水位ハイドログラフの各断面への到達時間は、河道構造の変化に伴う洪水流の非定常性及非線形性の高まりから、流量ハイドログラフの到達時間に比べ変動幅が大きく、かつ遅れることを示すことによって証明された。

第5章「山間狭隘河道における流量ハイドログラフの変形・伝播機構」では、河道構造が山間狭隘河道における洪水流量ハイドログラフの変形・伝播に与える影響を定量的に評価している。

河道内の水塊は、流水断面積および移動速度、すなわち断面平均流速を変化させながら流下する。第3章で導出した流量伝播の基礎式から、流量変化は断面平均流速の時間に関する偏微分に関係することから、定常流の場合では、水塊の持つ流量は変化せず、水塊と流量の伝播は一致すること、非定常流の場合は、各流下断面での断面平均流速の時間変化に伴い、水塊の持つ流量は変化し、水塊と流量の伝播は異なること、流量変化は、洪水遊水量が大きい程、流量は水塊の伝播に遅れることを示した。河道構造が流量の伝播に与える影響は、各流量段階によって異なることから、流量ハイドログラフにおいて、洪水の立ち上がりから低水路満杯流量までの範囲をフロント部分、平水時の流量からの増加流量が最大増加流量の9割より大きい部分をピーク部分と定義し、それぞれの伝播速度と河道内の水塊の平均移動速度の関係を、江の川山間狭隘河道の平成7年7月、平成11年6月洪水、北上川山間狭隘河道の平成19年9月洪水の非定常平面二次元解析の結果から調べ、洪水貯留量および洪水遊水量の大きさから考察した。

流量ハイドログラフのフロント部分の伝播する時間帯では、洪水流は低水路のみを流れるため、水面幅は縦断的に大きく変化せず、洪水貯留量の縦断的な変化も小さいことから、洪水遊水量はほとんど値を持たず、フロント部分の伝播速度 $C_f$ と河道内の水塊の平均移動速度 $U_{fave}$ の比 $C_f/U_{fave}$ はKinematic waveの伝播速度 $C_k$ と断面平均流速 $U$ の比 $C_k/U$ 程度となることを示した。一方、流量ハイドログラフのピーク部分の伝播機構は、河道構造の異なる区間毎に異なる。ピーク部分の伝播速度 $C_p$ と河道内の水塊の平均移動速度 $U_{pave}$ の比 $C_p/U_{pave}$ は、洪水貯留量に占める洪水遊水量の割合が大きくなるほど、これまで一般的に用いられてきたKinematic waveの伝播速度 $C_k$ と断面平均流速 $U$ の比 $C_k/U$ に比べ小さくなる。このことから、洪水貯留量のほとんどを洪水遊水量が占める狭窄部上流区間や複断面区間においては、ピーク部分の伝播速度 $C_p$ は河道内の水塊の平均移動速度 $U_{pave}$ を下回ることを示した。流量ハイドログラフの変形・伝播に及ぼす洪水遊水量の役割を明らかにしたことは、本研究の大きな成果である。

最後に、本研究成果の河道計画、河川管理への適用について述べている。すなわち、河川管理上重要な区間では、水面形の時間的な観測値に基づき、流量ハイドログラフと水位ハイドログラフの到達時間や変形特性について検討することが重要であること、山間狭隘河道についても、その貯留効果や遊水効果が下流河道に与える影響の定量的な評価が必要であり、そのためには簡易な水位計の設置による洪水流の水面形の観測およびそれに基づ

く洪水流解析が急がれることを述べた。また、洪水流について多くの検討がなされている沖積地河川中・下流域においても、河道内の砂州や樹木群が繁茂している区間では、洪水遊水量が大きくなり、洪水流量ハイドログラフの伝播に影響することが推定できることから、その評価の必要性を述べた。

第6章「結論と今後の課題」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べている。

本研究では、本川の観測水位時系列データに基づいた、支川流入を含む洪水解析法を構築し、江の川山間狭隘河道における近年の主要洪水に適用することで、支川流入の影響が顕著な山間狭隘河道の洪水解析に有効な解析法であることを示した。また、無次元化した非定常一次元の運動方程式と連続式から、洪水流の水位・流量の伝播の基礎式を導き、山間狭隘河道のように河道構造が縦断的に変化する河川の洪水流では、従来の準定常流・擬似等流の仮定は適切でなく、水位ハイドログラフと流量ハイドログラフの変形・伝播の機構および両者の値が異なること、洪水貯留量が洪水流量の伝播に及ぼす影響は、対象区間の断面平均流速の時間変化の正負によって異なることを示した。ここで、流量増大期において、流量が流下により低減することによって生じる洪水貯留量を洪水遊水量と定義し、これが流量ハイドログラフの伝播の遅れを表す重要な指標であることを述べ、江の川と北上川山間狭隘河道の近年の主要洪水における実測水位・流量データ等を説明する非定常平面二次元解析から、これらの結果を実証した。

河道貯留は自然河川が本来有する機能であることから、本研究で提案した洪水貯留量および洪水遊水量の考え方は、山地河川のみでなく、山地から河口まですべての河川区間で成立するものであり、治水と環境の調和した自然豊かな川づくりのための基本的な考え方、算定方法を与えるものである。

今後の課題を以下にまとめる。

洪水遊水量は、洪水貯留量に占める割合との関係から議論したが、対象区間を流下する洪水流のボリュームとの関係について検討し得ていない。これは、流量ハイドログラフの変形に与える洪水貯留量および洪水遊水量の影響の程度と関係することから、今後の検討が必要である。また、第3章で考察したように、洪水遊水量の増大は、下流河道への流量低減を増大させることから、下流河道への具体的な影響の程度に関しても検討し、洪水遊水量の持つ治水上、環境上の重要性をより明確にしていくことが課題である。

一般に、山地河川は河床勾配が急なことから、河道貯留は小さいと考えられてきた。本研究で対象とした江の川と北上川の山間狭隘河道は、江の川で1/1000程度、北上川で1/2000~1/5000と比較的緩勾配の区間であった。より急勾配の区間においてもその貯留効果、遊水効果および水位・流量ハイドログラフの伝播の関係について検討する必要がある。洪水調節施設の多くは、河川上流域に設置されることから、これらの適切な操作・運用との関係からも洪水流の水位と流量ハイドログラフの変形・到達時間を正しく見積もることは重要な課題である。

沖積地河川の中下流域では、近年、樹林化による河道の流下能力低下や二極化した河床による河道洗掘災害の増大等の治水上の問題を抱えている。沖積地河川の中下流域を流下する洪水流についても、適切な河道の平面形や縦横断面形、河道内樹木群の伐採・保存をより合理的に判断するためにも洪水貯留量および洪水遊水量の実態を明らかにする必要がある。

また、本研究では、対象区間における洪水前後の河床変動は比較的小さいものとして、河床変動の影響を無視し議論を進めてきたが、土砂移動の活発な河道区間では、その影響は無視し得ないと考えられる。そのような区間では、縦断的に水位計を設置し、観測された水面形の時間変化を説明するように洪水流と河床変動を一体的に解析し、洪水貯留量、洪水遊水量と水位・流量ハイドログラフの変形・伝播および流砂量ハイドログラフの関係を調べることで、洪水流と土砂移動の関係を明らかにし、治水と環境の調和した川づくりを進める必要がある。