

先鋭的な出水特性をもつ中小河川の水理現象

HYDRAULIC PHENOMENA IN SMALL RIVERS WITH SHARP HYDROGRAPHS

藤堂 正樹¹・浜口 憲一郎¹・福岡 捷二²
Masaki TODO, Kenichirou HAMAGUCHI and Shoji FUKUOKA

¹ 正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

² フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Hydrographs of small rivers with drainage areas of several hundreds square kilometers tend to be characterized by sharp peaks. It is generally known that in a river section consisting of a succession of sharp bends or of sharp widenings or constrictions, distinctive phenomena due to the river's unique channel characteristics occur, but these phenomena have not yet been fully explained.

In this study, phenomena that occur in stream channels with sharp peak flow characteristics, such as water level rise, aggradation/degradation and sandbar formation, were investigated through hydraulic model experiments. With the knowledge thus gained, considerations in drawing up a channel plan for a small river with sharp peak flow characteristics were identified.

Key Words : *sharp hydrograph, smaller rivers, sharp bends, sharp widenings or constrictions, aggradation or degradation*

1. 目的

流域面積が数百 km² 以下程度のいわゆる中小河川では、河川規模に応じた特有の出水特性を有し、また河道の平面形や横断形に応じた固有の河道特性に起因する水理現象が発生する。特に急湾曲部や狭窄部等が連続する河川での洪水時の現象については、既往の個別実験^{1) 2)} 等で指摘はなされているものの、十分に現象説明が行われているとは言い難い。これまで、中小河川の水理現象に基づく河道計画は、大河川の計画手法を準用して行うことが多かった。しかし、先鋭的な洪水ハイドログラフの流下によって中小河川の河道内で生じる現象把握は、中小河川特有のものであり、この点に着目した河道計画が必要である。

本報は、その緒として、これまでの中小河川の河道計画の技術書³⁾ の中では十分に触れられていない事柄について、先鋭的なハイドログラフ形状を持つ流量を流下させた模型実験を行い、中小河川に特有の河道計画を検討する上での課題を明らかにすることを目的とする。

2. 検討内容

(1) 先鋭的なハイドログラフ形状を持つ流量流下時の現象把握の必要性

- ・先鋭的な出水特性を有する中小河川では、河道の平面形、横断形に対応して特徴的な水位変動を呈したり、流量増加時/低減時に水衝部位置の移動の可能性があることが指摘されており、また、顕著な埋め戻し現象や、流量低減時にも河岸沿いの洗掘が発生する等の可能性があることが指摘されているが、現象説明は十分でない。
- ・先鋭的な出水特性が、河道内の土砂移動を急激に引き起こし、これが災害に直結することが知られており、現象説明の必要性が高い。
- ・模型実験では、計画流量のピーク流量を外力条件として、定常流で流下させて現象把握、対策の検討を行うことが多い。実験レベルでも非定常の流量を流下させて洪水継続時間内の一連の現象把握を行うことは稀である。

(2) 検討の着眼点

本報では、先鋭的な流量ハイドログラフを与えて実験を行い、現象の解明を行う。その際の着眼点は、以下の2点とした。

- ①水衝部の移動機構を明らかにする。
- ②河岸沿いの水位及び洗掘・堆積の発生機構を明らかにする。

3. 流量ハイドログラフ流下実験

(1) 実験概要

実験対象の河道は、複雑な平面形、特に急湾曲部と急拡・急縮部とが連続する河床勾配 1/100 程度の急勾配の中小河川である。これを縮尺 1/50 でモデル化した。図1に平面形を示す。河道内には人工的な高水敷は造成されておらず、横断形はほぼ単断面と見なすことができる。模型と実河川の水利諸元値を表1に示す。

実験に用いたハイドログラフは、実河川の洪水継続時間を参考としながら設定した。対象とする実河川の洪水継続時間は約 15 時間である。本実験では、この継続時間内で 300m³/s の流量が流下する現象を追跡した。実験に用いたハイドログラフは図2の通りである。流量が段階状となっているのは、実験施設における流量操作上の理由による。

実河川の河床材料粒径は、主に 10~300mm の範囲で分布し平均粒径は 62mm である。実験では、この分布形に合わせ、平均粒径 1.2mm の砂を用いた。

なお、実験水路の河床勾配は 1/100 程度でかなりの急勾配であるが、本報では河川区間の上流域で生じる水利現象に着目しており、その観察には適切な模型であると判断した。

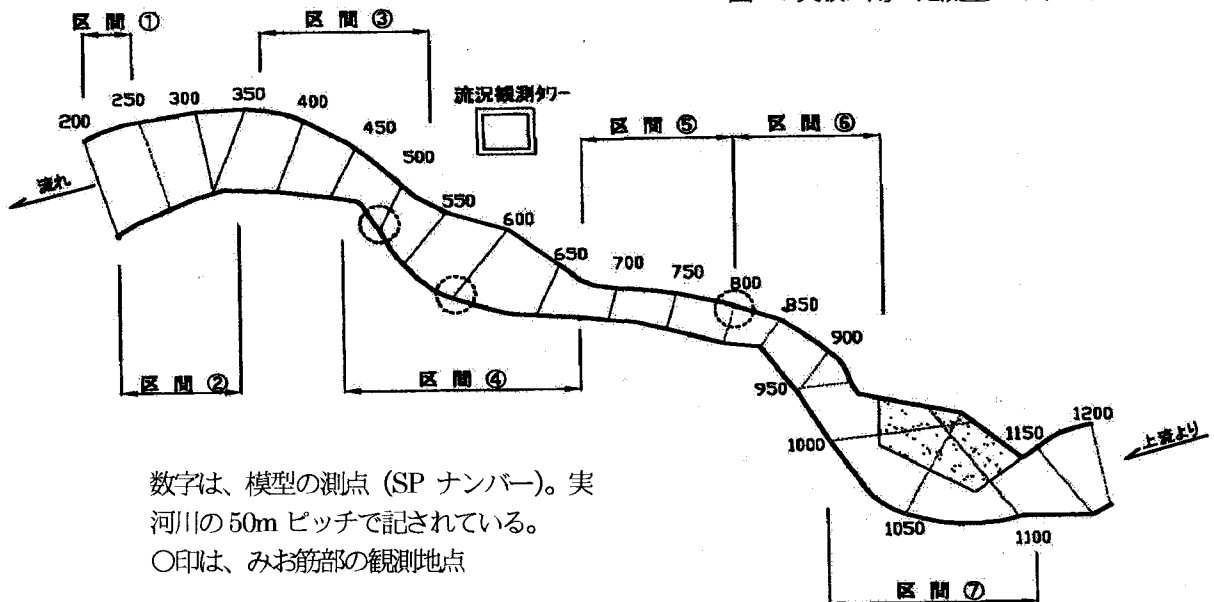
(2) 着目地点と測定項目

模型平面図は図1のとおりである。実際の模型は、区間⑦の上流側に十分な助走区間を有する。

このうち、急湾曲部と急拡/急縮部の連続する、

- ・ 区間④ : SP500~600
- ・ 区間⑥ : SP750~950

に着目して水利現象の把握をおこなった。測定項目は、



数字は、模型の測点 (SP ナンバー)。実河川の 50m ピッチで記されている。
○印は、みお筋部の観測地点

計測対象区間【SP200~SP1200】

図1：模型平面図

- ・ 水位の経時計測
 - ・ 表面流速ベクトルの経時計測
 - ・ 河床高の経時計測
 - ・ 通水前後での河床材料調査
 - ・ 砂州の消長等の観測
- である。

表1：模型実験の諸元

項目	模型諸元	実河川の諸元
模型縮尺	1/50	—
河川延長	約50m	約2500m
河道幅	約0.6~1.6m	約30~80m
流量	0~0.017m ³ /s	0~300m ³ /s
ハイドロ流下時間	2時間	15時間
平均河床勾配	1/100	1/100
河床材料平均粒径	1.2mm	62mm
河床材料比重	2.64	2.64
粗度係数n	0.022	0.042
無次元掃流力 τ_*	1.05 : ピーク時	

※初期河床形状は、平坦に生成した河床上に、平均年最大流量を数時間流下させて作成した。

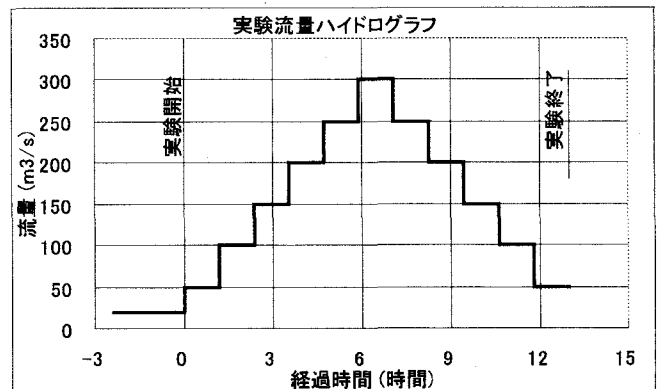


図2：実験に用いた流量ハイドログラフ

(3) 実験結果概要

実験結果を記す。なお、水位、洗掘深等の数値は現地換算値で記述する。

水位については、各断面で異なる変動を示すことが観察された。一連の流下過程で水位変動の最も大きい SP600 断面では、ピーク時と実験終了時の水位差は 2.05m であったが、SP700 断面では 0.60m の水位差しか生じなかった。これは、後述するように急拡部での土砂堆積やみお筋の変動が、当該断面や上流側断面の水位変動に影響を与えていることが原因と考えられる。

実験開始時、ピーク流量時、実験終了時のみお筋部の河床高を図 3 に示す。この図から河床の変動は断面ごとに異なることが判る。水位変動の大きかった SP600 では、河床高変動は 0.65m 程度で、観察断面中最小の変動幅であった。また、急拡～急縮に移行する SP500 断面では、河床高変動が大きく、初期河床から 2.4m 程度の洗掘が発生するが、その後減水時にはほぼ同程度堆積し埋め戻されるため、通水前後だけを見ると河床高変動は認めら

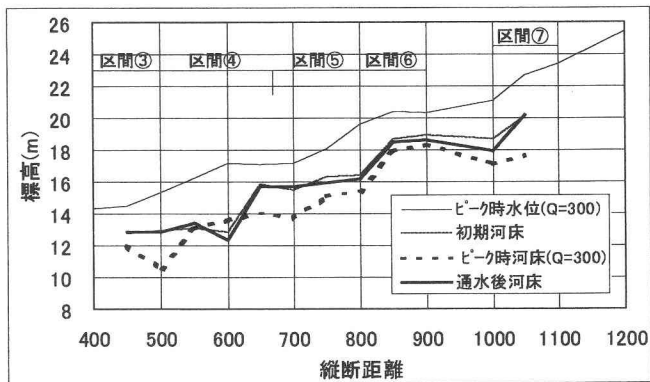


図 3 : みお筋部河床高の経時変化

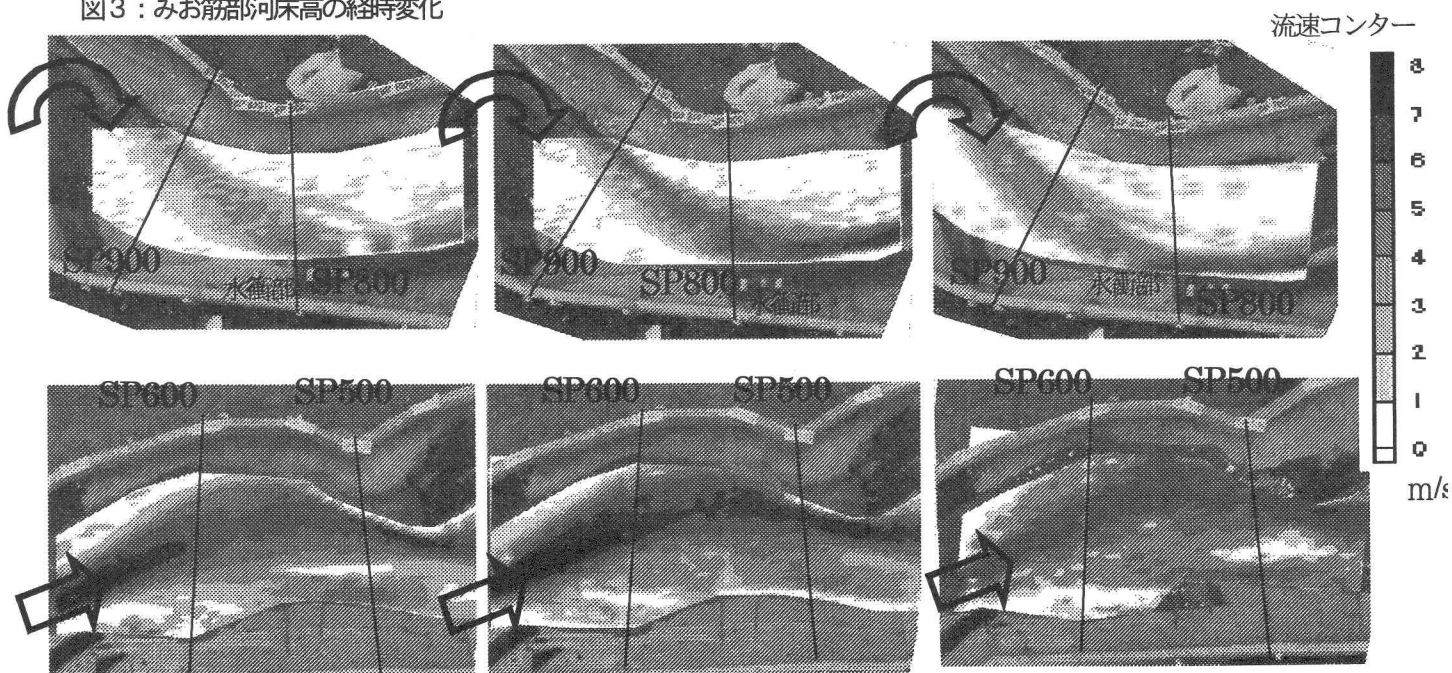


図 4 : 流況図上段 : SP800 付近水衝部、流量は、左から 100m³/s 増水時、300m³/s ピーク時、100m³/s 減水時

下段 : SP600～500 付近の急拡～急縮部、流量は左から 200m³/s 増水時、300m³/s ピーク時、200m³/s 減水時

れない結果となった。

こうした河床変動は砂州の形成と密接に関係している。実験開始時点では、全断面ほぼ一様な粒度分布であったが、砂州形状の変化が顕著に認められた SP800 及び 600 付近の通水後の河床材料粒径は、みお筋部となった箇所と、ピーク流量時のみ流下する砂州上の箇所とは大きな差異が見られた。この点についても次節で考察を加える。

4. 考察

(1) 水衝部の経時変化

顕著な水衝部の流況検討結果について記述する。

水衝部近傍の流況を PIV 手法によって観察した。図 4 上段は、SP800 付近の流況コンターである。左が上流側であり、上流の湾曲外岸から SP800 付近に主流が直進してくる様子が見られる。

流量増加と共に SP800 付近の水衝位置が下流側に移行し、ピーク流量時には、初期の水衝部から 30m ほど下流側に移動している。また 300m³/s 流下時には、SP900 付近の左岸内岸側に沿って最大 6.2m/s 程の高流速が発生し、その後直進流となり SP800 付近で右岸が水衝部となっている。この原因は、上流側湾曲形状の影響が大きい。流量規模が大きいほど遠心力により外岸の湾曲に沿った流れが長く続き、その後直進流となる。なお SP800 右岸水衝部のやや上流の湾曲部外岸は、死水域となっている。

高流速の発生位置は、当該地点の上流側河道法線形とその後の直進流の発生状況を考慮して判断すべきである。

(2) 河床高の経時変化

SP800 及び SP500 の断面について河床高の経時変化の考察を加える (図5 及び図6)。

SP800 の水衝部の河床高変化は比較的小さい。増水時の河床は徐々に低下し、ピーク時には初期河床から 1.3m 程度低下する。その後上昇傾向となり、通水終了時点ではピーク時に比べ約 1.0m 上昇する。結果、初期河床との差分は 0.3m 程度である。

SP500 の水衝部の河床変動は顕著である。増水過程では 2.4m 程度の河床低下が発生する。減水時には 150m³/s 程度までは洗掘が生じたままであるが、それ以降は埋め戻しが顕著となり 2.2m 程度河床上昇する。結果、通水前後での河床変動量は 0.2m 程度と僅かである。しかし実河川では、洪水ピーク時の護岸基礎部洗掘は深刻な状況となる。

SP800 と 500 とで現象の差異が認められた理由は、上流側河道の横断形状が原因と考えられる。SP800 は、上流側河道が比較的一様であるが、SP600~500 にかけての河道区間は、急拡~急縮に移行する区間であることが

影響を与えている。

図4下段の PIV 解析結果にもあるように、SP500 の上流 SP600 付近の流況は、増水時には全断面流下となるがピーク時を過ぎると右岸側は堆積域となる。増水時には上流からの供給土砂は急拡部である SP600 に緩やかに堆積し続けるため下流への供給が少なくなる。このため流水の集中する SP500 のみお筋部では河床低下が生じる。その後、減水時には SP600 の堆積域上に細い筋状のみお筋が形成される。SP600 の断面は、減水時には、増水時と同一流量時には河積が小さくなるため、掃流力が増加し、下流への土砂供給が生じる。結果、SP600 左岸のみお筋部及び増水時に形成された堆積域上のみお筋部から、SP500 左岸のみお筋部に流水及び土砂が集中するため、SP500 の河床が上昇するものと推察される。

洗掘深の評価には、当該断面上下流の平面形、断面形が重要であり、ここでは水面勾配の変化や河床材料の分級現象は顕著となる。断面の急拡、急縮等の形状変化の大きい中小河川では、平面特性及び断面特性の把握を行った上で、土砂の移動形態を予測する必要がある。

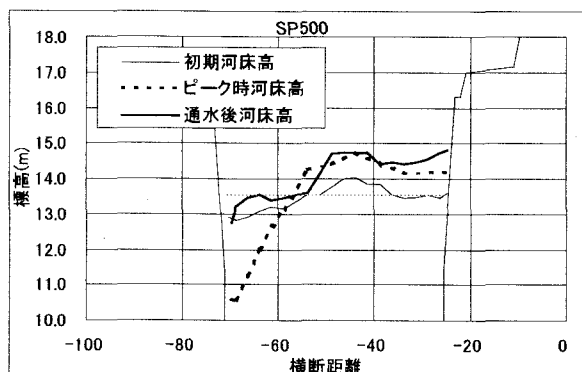
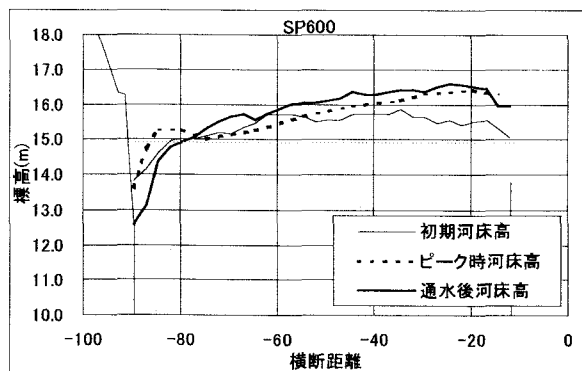
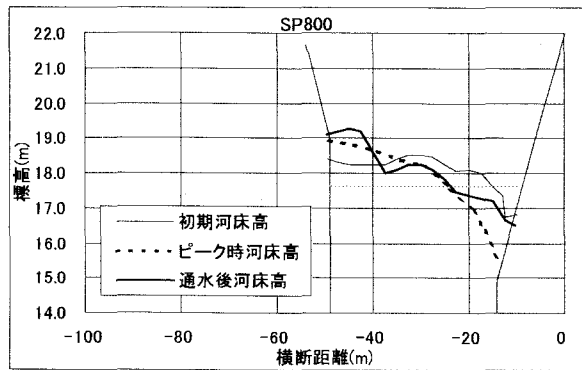


図5：通水前後での横断形状変化

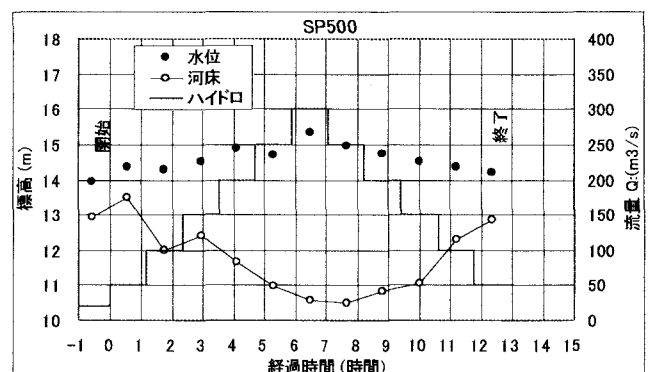
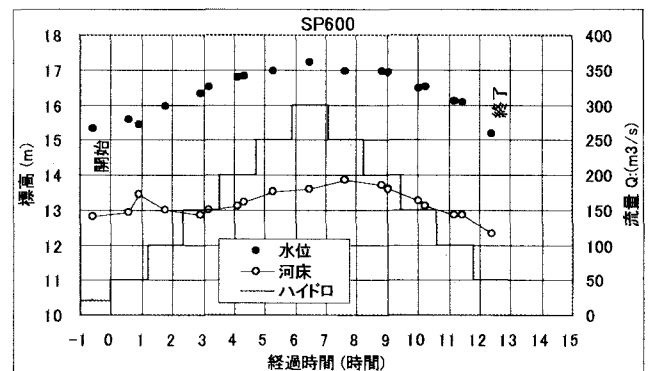
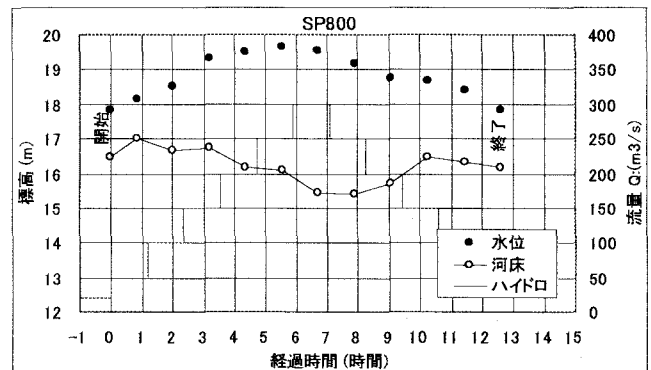


図6：みお筋部の水位/河床高の経時変化

また、これらの3つの断面では、水位、河床高の変動にそれぞれ特徴が認められる。図6は、各断面の洗掘部の現象を経時的に追ったものである。

SP800では、流量に応じて水位及び河床高が変動している。結果、水深の増減がほぼ流量の増減に応じた値となっている。

SP600は、上述したように急拡部であり、下流側狭窄部の影響で、図8に示す様に増水時の無次元掃流力は低減傾向となる。このため増水中は断面全体が土砂堆積域となり、図6に示すみお筋部においても河床は上昇傾向となる。減水時には、堆積域の拡大の影響もあって有効河積が縮小し、再びみお筋に流水が集中するようになり、SP600のみお筋部で河床低下が生じる。水位も河床変動と同様の傾向を示しており、みお筋部の水深は流量の増減によらず一定である。これは流量の増減には断面全体の河積の変動で対応していることによるものである。

SP500では、流量の増減に応じた水位変動は小さく、河床変動量が大きい。河床高は、上流のSP600の河床変動に強く支配されている。水深の変化は、ほぼ流量に応じた応答を示している。

図7は、3断面の水位と流量の関係を示す実測H-Q図である。水位測定点は各断面のみお筋部である。流量の値は、上流端での供給流量を用いた。

H-Q関係は、主に断面特性に応じた河床変動を反映した結果であり断面によって特徴が現れる。固定床を前提としてH-Q図を作成した結果とは異なるものであり、この点に留意が必要である。

また、勾配の緩い下流域の河川に見られるように、H-Q図がループを描く現象は顕著には認められなかった。急勾配河川での現象であるため、貯留効果よりも河床変動の影響が大きかったものと考えられる。

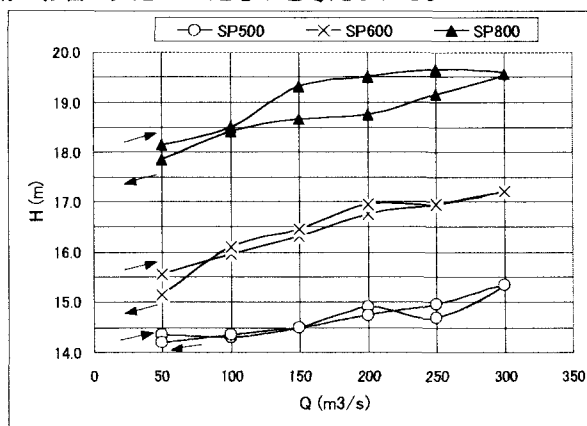


図7：水位と流量の経時変化 (H-Q 図)

(3) 分級現象

図8は、SP800、SP600及びSP500のみお筋部における無次元掃流力 τ_* の経時変化である。

水衝部であるSP800においては、ピーク流量時に最大値1.05を取り、その後低下傾向になるが、減水時の値は増水時の同一流量の値よりも若干大きめとなっている。

SP600のみお筋部は、流量増加に伴い掃流力が低減し、減水時に上昇している。これは先述した通り、河床高変化に応じた河積変動が影響を与えていると考えられる。下流側水衝部であるSP500では、ピーク流量時に最大値0.89となり、その後、流量に応じた減少傾向を示す。

なお、減水時の τ_* は、後述するように河床粒径が初期値から変化していることと、水面勾配のとり方も問題であることから正確な評価法が課題と考えられる。

一連の実験過程を通じて、河床材料の移動形態は次の通りであった。SP900~800にかけては、河積が比較的一様であるため、上流側湾曲部内岸に沿った主流部を中心とした土砂移動が見られた。主流部では、上流側からも土砂供給があるため顕著な洗掘が生じることはなかった。既往研究⁴⁾においても相対水深(高水敷水深/低水路部水深)が大きな場では、内岸側に沿った洗掘と下流水衝部の洗掘現象が抑制されることが指摘されており、同一の傾向となった。

流況観察では、主流部には河床材料のうち比較的大粒径のものが認められた。ピーク時に主流部であり、減水時には堆積により少ない流量となる箇所にも大粒径粒子は認められた。

図9は、SP800のみお筋部と堆積域(増水時の主流部)での通水後の河床材料の粒径分布曲線である。実験開始時には平均粒径1.2mm(模型値)で分布していたものが、通水終了時にはみお筋部で0.4mm程度、堆積域(ピーク時の主流部)で2.0mm程度となっている。SP800地点の水衝部表層には、既往研究⁵⁾の指摘に見られるように、減水時の掃流力に応じた移動土砂の粒径集団である細粒土砂分が堆積した結果と考えられる。

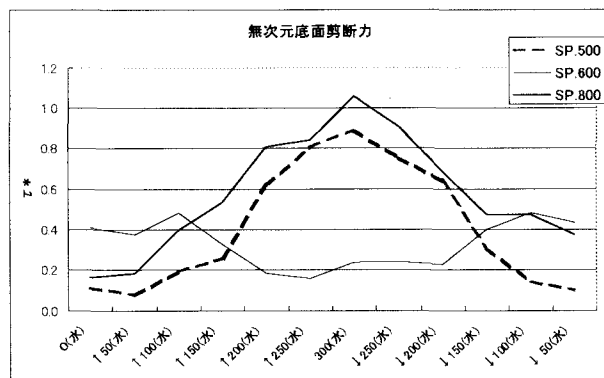


図8：無次元掃流力

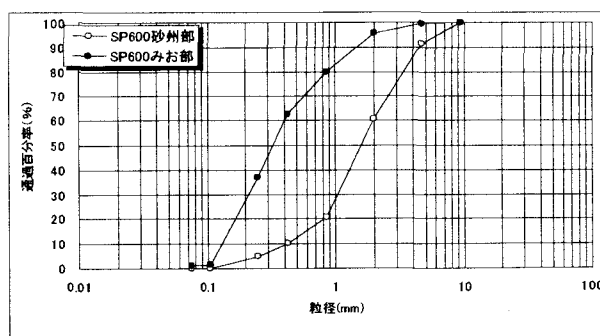


図9：河床材料粒径の分布

5. 中小河川河道計画上の課題

一連の実験過程を通じて、先鋭的な出水特性を有する中小河川で河道計画を作成していく上で、留意すべき課題を整理すると以下のようである。

(1) 留意を要する場

中小河川では、大河川と呼ばれる下流域の河道と比較して、水位変動、河床変動等に特徴的な現象が生じる。

その理由は、急流部という特性に加え、急湾曲部が存在したり、急拡部と急縮部とが連続することによるためである。しかもこれらの断面特性は短区間で変化するため、現象はより複雑なものとなる。

また、流域面積が小さいことから出水時にハイドログラフが先鋭となりがちで、このことが水理現象を急激に起こさせることになる。

(2) 特徴的な水理現象と河道計画上の課題

①水位の評価

通常の河道計画で水位計算を行う場合は、流量と河床高を与えて不等流計算を行うことが多い。しかし、本実験結果に見られるように、水位は必ずしも流量に応じた応答を示していない。また、水位変動は、隣接断面の形によっても大きく異なる。

このように水位変動を規定しているのは、主に土砂移動である。したがって、このような場で水位評価を行う場合には、土砂移動の把握が重要である。

②水衝位置と発生流速の評価

急湾曲部の連続する箇所では、水衝部は流量の増減と共に変化する。これは、当該湾曲部の影響よりも上流側湾曲の法線形と相対水深の影響が大きい。

また、河道条件によっては流量に応じた水位変化は顕著でなく、河床低下による水深調節によって流量変動に対応するような現象が生じる。このような箇所では水位上昇が大きくないとしても流速値そのものが大きくなるため、河道計画では留意が必要である。

③洗掘現象の評価

急拡部と急縮部が連続する場では、増水時から減水時にかけての河床材料の移動と堆積・洗掘により、断面形状の変化、これに伴う河積の変化が当該断面及び隣接断面の河床変動に影響を及ぼす。例えば減水時であっても洗掘が生じるのはその一例である。したがって水衝部に特化して洗掘を評価する場合でも、隣接断面の特性を考慮して洪水期間中の一連の河床変動を考慮する必要がある。

また、河床高の増減、特に埋め戻しに留意する必要がある。本実験ではピーク時洗掘深が2mを越えるような場であっても、通水終了時には初期河床と同程度までの埋め戻しが生じた。河道計画及び護岸基礎部の計画を行う場合には、洪水終了後の断面だけからピーク時の洗掘

深を評価することは危険であり、重要な箇所については実験による検証が必要となる。

④河床材料の分級現象と粗度係数の評価

河床材料の分級現象にも留意が必要である。一連の通水を通じて主流部には比較的大粒径のものが存在する。ただし主流部そのものが移動する場合には通水後堆積域となる場合も大粒径化が進むことが認められた。また、みお筋部の表層には減水時の掃流力に応じた細粒分が堆積する場合もある。ただし細粒分の堆積については、当該河川の土砂流出量そのものが大きい小さいかによっても規定される点は留意が必要である。

河道計画で低水路粗度係数を評価する場合、河床材料粒径からの推定が一般的となっている。その際、平水時のみお筋の材料だけから推定するのではなく、洪水時の主流部を想定した粒径評価が必要である。

(3) 本実験結果の一般化

実際の河道では、様々の波形と大きさのハイドログラフを持つ洪水が流下する。従って本実験は洪水流の一例に過ぎないが、洪水波形が先鋭的に変化する波形であれば、ここで述べた内容と同じ水理現象は発生するものと考えられる。

ただし、より一般的で定量的な評価手法に向けては今後の検討課題である。

謝辞：本論文作成にあたり、パシフィックコンサルタンツ(株)の木下晴雄氏、平林政徳氏、熊谷利彦氏には実験遂行でご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川研究室、保津峡上流部水理模型実験報告書、昭和60年10月、土研資料2316号。
- 2) 建設省土木研究所河川研究室、最上川大淀地区の河道計画に関する検討、平成7年3月、土研資料3326号。
- 3) 中小河川計画検討会、中小河川計画の手引き(案)、平成11年9月。
- 4) 岡田将治、福岡捷二、非定常複断面断行流れにおける河床変動と流砂量、土木学会第55回年次学術講演会 II263、2000.9。
- 5) 福岡捷二、小俣篤ら、複断面断行河道における洪水流と河床変動、土木学会論文集 No621/II-47、p.p.11-22,1999。

(2002.4.15 受付)