

流砂を伴う急流河川とバイパス管路の 合流方法の検討

STUDY ON CONFLUENCE IN STEEP RIVER AND BYPASS PIPELINE WITH SEDIMENT TRANSPORT

河崎昇司¹・竹林洋史²・瀧川紀子³・藤原望⁴

Shoji KAWASAKI, Hiroshi TAKEBAYASHI, Noriko TAKIGAWA and Nozomi FUJIWARA

¹正会員 サンスイコンサルタント(株)本社技術部 (〒600-8108 京都市下京区)

²正会員 博士(工学) 京都大学防災研究所流域災害研究センター 准教授 (〒612-8235 京都市伏見区)

³正会員 サンスイコンサルタント(株)本社技術部 (〒600-8108 京都市下京区)

⁴非会員 サンスイコンサルタント(株)本社技術部 (〒600-8108 京都市下京区)

It is difficult to widen the steep river that flows through urban area. Therefore, the flow capacity is enhanced by a 2-way river with a bypass pipeline and an original open channel. At the confluence between the pipeline and the open channel, water level tends to be higher and sedimentation is occurred under coexisting conditions of sub- and super-critical flows. However, at present, sufficient knowledge has not been obtained on the design method of river confluence under the flow existing both sub- and super-critical flows with sediment transport. Therefore, in this study, the method of confluence of a steep river and a bypass pipeline considering sedimentation is discussed using numerical analysis and flume experiments. According to the experiment, sedimentation area is formed under sub-critical flow in the original open channel due to backwater. However, the sediment was washed away to the downstream area under super-critical flow, if the discharge rate between the pipeline and the open channel is controlled using a suitable fixed weir.

Key Words : *confluence, sub- and super-critical flows, numerical analysis, flume experiment, steep river*

1. はじめに

高度に利用されている氾濫原を流れる流下能力の低い河川では、川幅を広くすることが困難であるため、管路と開水路を併設した2wayの河川とする場合がある。このようなバイパス管路は、本川との合流部において洪水時に土砂が堆積し、治水及び維持管理上の課題となっている。

対象とするA川は、鉄道の下を暗渠水路として流れている区間があるとともに宅地が密集しており、鉄道周辺で流下能力が非常に小さくなっている。そこで、既設水路の下に伏せ越しによるバイパス管路を併設して分派させるとともに鉄道下流で合流させて流下能力を向上させる計画である。A川は、川幅3~5m、河床勾配 $I=1/50\sim 1/80$ の急流河川であり、河床は石張やコンクリート張で多くの領域で射流となっている。

従来から、バイパス管路と既設河道が合流する地点における水位上昇および堆砂の問題が発生している。そのため、数値解析などを用いた合流点の流況及び流砂特性の研究が進められている¹⁾²⁾³⁾。しかし、流砂を伴う常射流混在場における河川合流部の設計手法について十分な知見が得られていないのが現状である。

そこで、本研究では流砂を考慮した急流河川とバイパス管路との合流方法について、数値解析と模型実験を用いて検討する。

2. 数値解析による合流部の河道形状の検討

(1) 合流部概要

バイパス管路は流出立坑より放水路を設けて既設河道に合流させる。合流部上下流の既設河道は、上流川幅5m、下流川幅が4mと下流の方が狭い。このため、合流

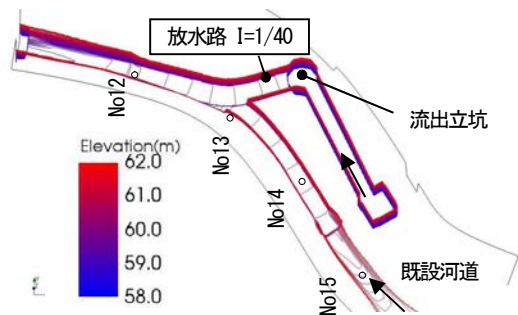


図-1 Case1 右岸流入(I=1/40)河床コンター図

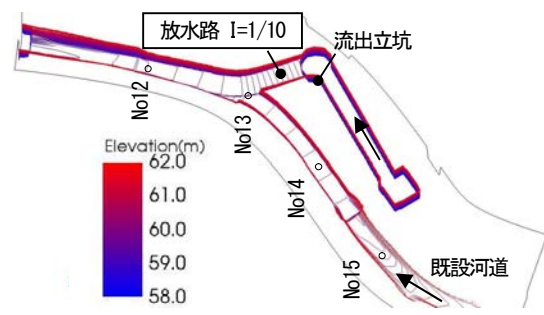


図-4 Case3 右岸流入(I=1/10)河床コンター図

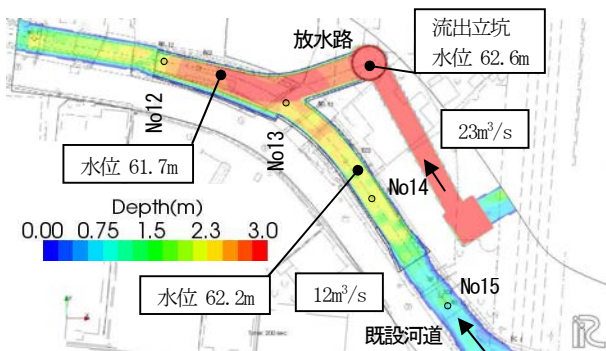


図-2 Case1 右岸流入(I=1/40)水深コンター図

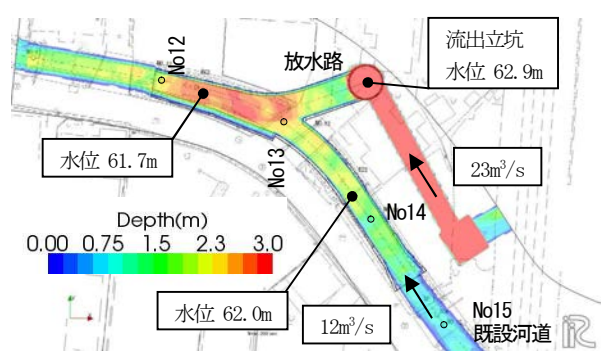


図-5 Case3 右岸流入(I=1/10)水深コンター図

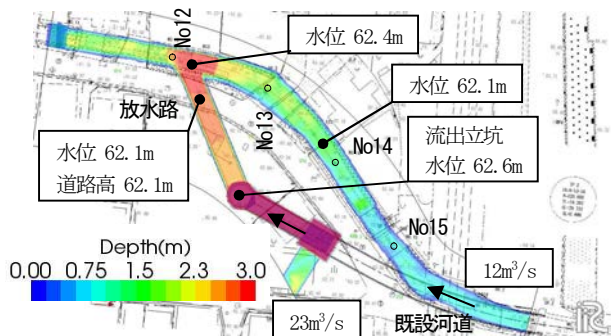


図-3 Case2 左岸流入(I=1/40)水深コンター図

による流量の増加や断面の急縮による水位上昇が想定される。そこで、ピーク流量時の合流部周辺の水位が既設堤防天端よりも低くなるよう合流部の河道形状を数値解析により検討する。

(2) 数値解析の概要

数値解析には河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアであるiRIC-Nays2DHを用い、流れの計算は直交座標系の連続方程式および運動方程式を一般座標系に変換して任意格子形状の計算を行う⁴⁾。測量設計図面を用いて、検討する合流形状の地形データを作成した。流出立坑は流速が非常に小さい静水池とし、バイパス管路の損失水頭を合計した流入立坑の水位を流入の境界条件とした。既設河道のマニングの粗度係数は、流量観測および圧力式水位計による水位観測を行い、観測結果が平面二次元解析上で再現されるよう石張粗度 $n=0.035$ 、コンクリート河床粗度 $n=0.018$ を与えた。

解析に用いる流量はピーク流量とし、既設河道から

12m³/s、バイパス管路には23m³/sを定期的に与えた。格子サイズは15cmとし、固定床にて解析を行った。

(3) 合流河川形状の比較検討

バイパス管路の流出立坑から現況河道への放水路の配置について流況解析を行い適切な河道形状を検討する。

a) 平面線形

放水路が右岸から流入した場合をCase1(図-1、図-2)、左岸からの流入をCase2(図-3)として検討を行う。なお、Case2のように左岸から流入させる場合は、既設河道左岸に沿った既設道路の下を通して放水路からの水を既設河道に流入させる必要がある。

図-3に示すようにCase2である左岸からの流入では放水路内の水位が62.1mと道路敷高等しく、函渠工の頂版や余裕高を考慮すると道路下を通すことは困難であることがわかる。一方で図-2に示すように、Case1右岸流入の場合の合流点での水位は61.7mであり、Case2左岸からの流入時の62.4mに比べ0.7m低下する結果となった。これは既設河道に対する放水路の屈曲角度がCase1で30°とCase2の60°の半分の角度であり、また、合流する既設河道の流入がCase1では湾曲外岸側からとなることで、湾曲部外岸側への流れの集中が抑えられたと考えられる。Case2では既設河道と放水路の合流点の湾曲が反時計方向であり、合流点のすぐ上流の既設河道の曲がりと同じ方向のため、湾曲外岸側(右岸側)へ流れが集中して合流部で大きな水位上昇が生じている。

以上により、放水路の流入方向は、合流部および放水路の水位が低くなる右岸からの流入(Case1)を採用する。

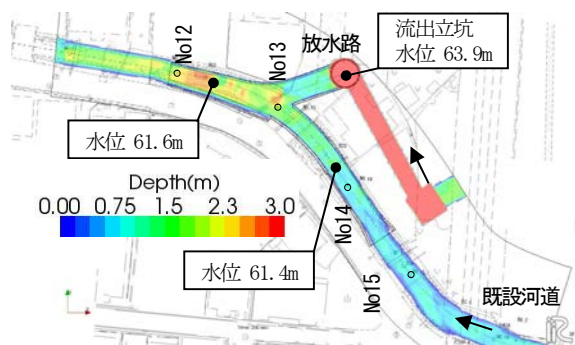


図-6 Case.4 右岸流入I=1/5河床コンター図

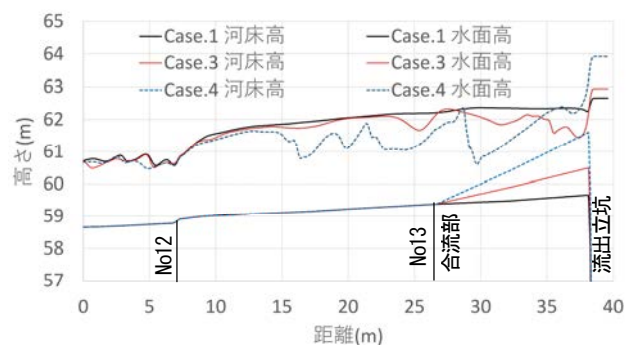


図-9 放水路縦断面図

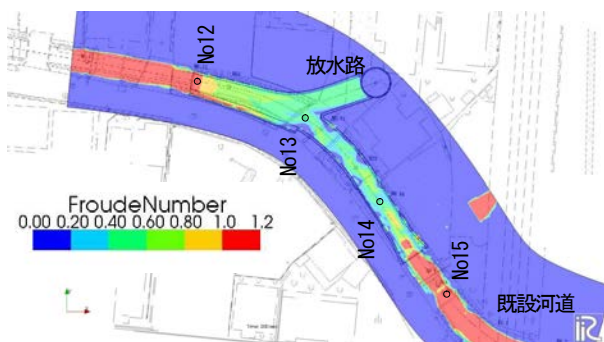


図-7 Case.1 フルード数コンター図

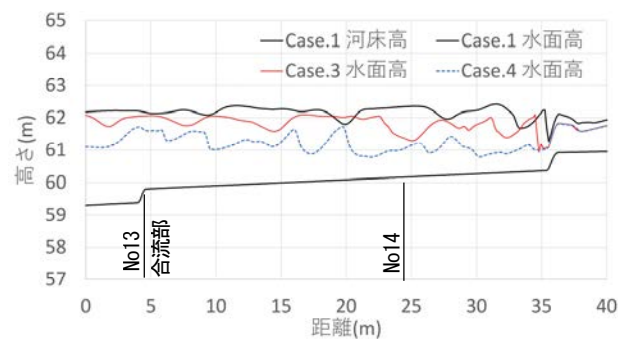


図-10 既設河道縦断面図

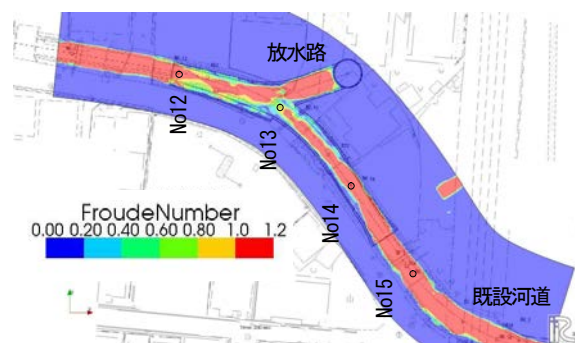


図-8 Case.4 フルード数コンター図

表-1 検討ケース水位一覧

	放水路 勾配	合流下流 既設河道 水位	立坑 水位	合流上流 既設河道 水位
Case1	1/40	61.7m	62.6m	62.2m
Case2	1/40	62.4m	62.6m	62.1m
Case3	1/10	61.7m	62.9m	62.0m
Case4	1/5	61.6m	63.9m	61.4m

b) 縦断勾配

次に放水路の縦断勾配を検討する。Case1では合流区間下流のすりつけ部は常流域となる。ここで、放水路の流速を上げることで合流部の常流域を射流に変化させることによる水位抑制効果について検討する。Case1では放水路縦断勾配が1/40であるが、Case3(図-4)では1/10として流況を検討する。図-5より、流出立坑からの放水路の水深がCase1に比べ浅くなっていることがわかる。しかし、合流点下流では水位が61.7mとCase1と等しく、河積に余裕が無い合流点下流断面の水位低下には至らなかった。一方、合流点上流の既設河道の水位はCase1で62.2mであったものがCase3で62.0mと0.2m低下した。

次に放水路勾配を1/5 (Case4) として再度検討を行った。図-6に示すようにCase4では合流区間下流の水位が61.6mとCase1とCase3に比べ低下している。

流れの状態を確認するため、フルード数の平面分布図(図-7, 図-8)を示す。Case1(図-7)では合流区間が常流域

($Fr < 1$)となっているが、Case4(図-8)では全区間にわたり $Fr > 1$ の射流域となっていることがわかる。既設河道においても $Fr > 1$ となり合流部が射流となっていることがわかる。

図-9, 図-10に放水路と既設河道の縦断面図を示す。図-9の放水路縦断面図より、Case1では常流となり水面が安定している。一方、Case3, Case4は立坑直下のスロープで跳水が発生し、Case4では合流部で大きく水面が低下する。しかし、放水路の勾配を大きくしたことで立坑水位が1m上昇する。また、水位低下が見られる断面もあるが、波状跳水の形成により、最高水位はCase1およびCase3と同程度である。よって、放水路河床勾配の急勾配化による合流点下流の既設河道内水位低下効果は小さいことがわかる。

一方で、Case4では、合流点上流の既設河道の広い範囲で水位低下がみられ、合流部の流れを射流とすることによる効果を確認した。ただし、 $Fr = 1.5$ 前後となり、波状跳水により水面が上下している。



図-11 模型全体図

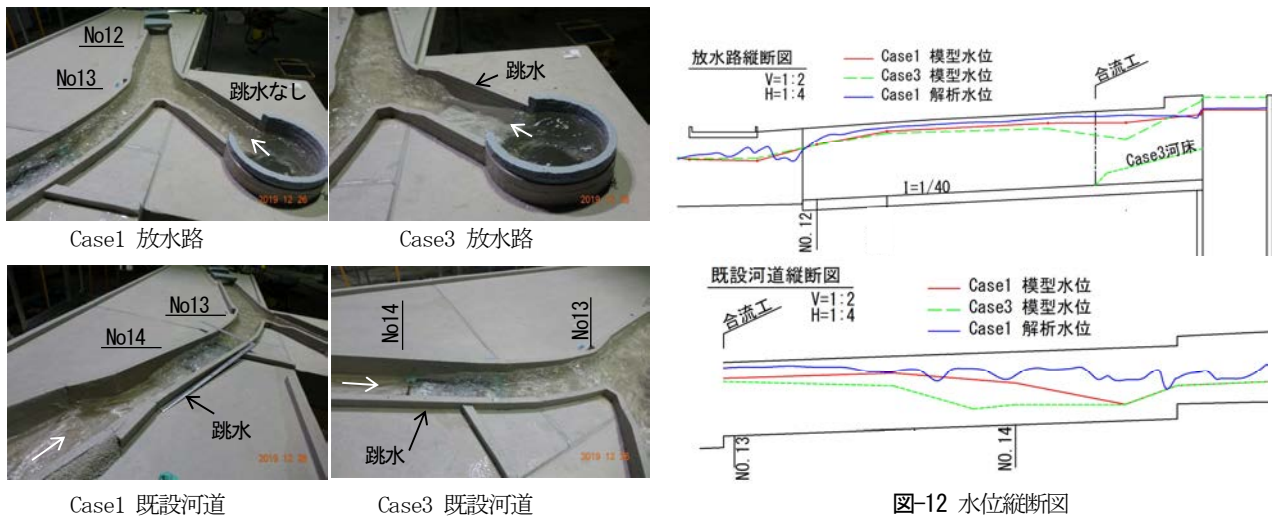


図-12 水位縦断面図

写真-1 合流部流況

以上の検討結果から得られた水位の一覧を表-1に示す。この中から合流部下流と立坑で水位が低いCase1とCase3を選択し、模型実験を行う。

3. 固定床合流部の模型実験

数値解析によって有効性が確認された放水路右岸流入のケースについて、模型実験を行い、解析により得られた河道形状の妥当性を検証する。

模型尺度は河川規模およびトンネル粗度の再現性等を考慮し1/30とし、表面を硬化防水コーティングした発泡スチロールで作成した。模型の全体図を図-11に示す。河床粗度は、現地調査と数値解析の結果に基づいて、河床に7号珪砂を貼り付けて調整した。

(1) 実験結果

解析で検討したCase1, Case3について模型実験を行った結果を写真-1に示す。また、模型実験と模型寸法でCase1を解析した結果を合わせた水位縦断面図を図-12に示す。

す。写真-1と放水路縦断面図よりCase1では立坑水位と放水路の水位に大きな差はなく、流れは常流で水深の縦断変化は少なかった。一方、Case3では立坑から流出直後に射流となった。その結果、既設河道との合流下流でCase1よりわずかに水位が低下している。しかし、立坑水位が数値解析と同様に高く、バイパス管路上流の流れへ影響することから不採用とした。合流点上流の既設河道では、Case3の合流部の水位がCase1より4mm程度下がったことにより跳水の位置が下流に移動し、数値解析と同様に、既設河道水位が全体的に低下した。ただし、跳水発生位置より上流においては、Case1とCase3での水位差はみられなかった。模型サイズで行った数値解析結果は、前項の実寸での解析結果のCase1と同様の水面形を示し、放水路下流と既設河道でそれぞれ波状跳水と考えられる水面の動揺が現れている。図-12に示す模型水位は、水面の測定縦断間隔が広くて波の形状を表現ができていないが、写真-1に示すように、実際には細かな波による水面の変動が発生していた。

以上より、既設河道とバイパス管路の合流方法決定に考慮した現象について、数値解析と模型実験で同様の現象が確認され、数値解析を用いた検討の有効性が示された。

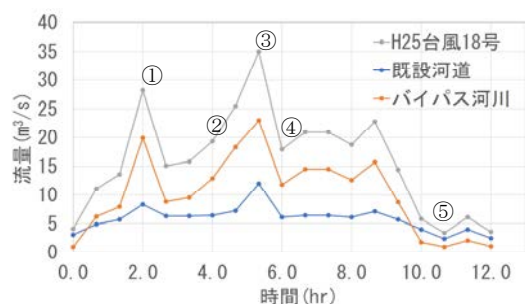


図-13 H25台風18号ハイドログラフ



写真-2 A川河床材料



写真-3 S川河床材料

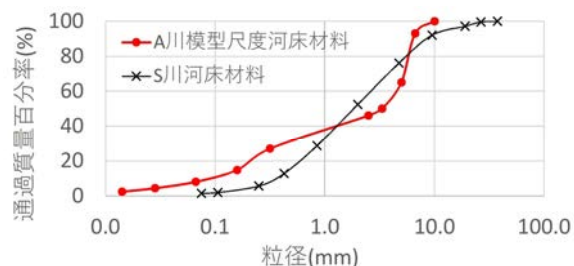
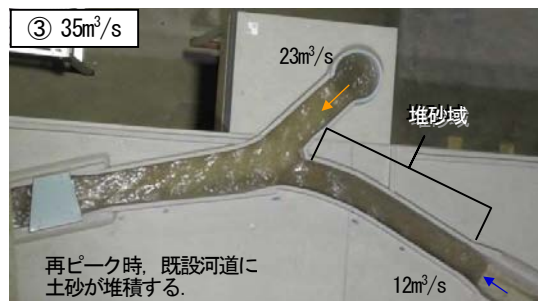
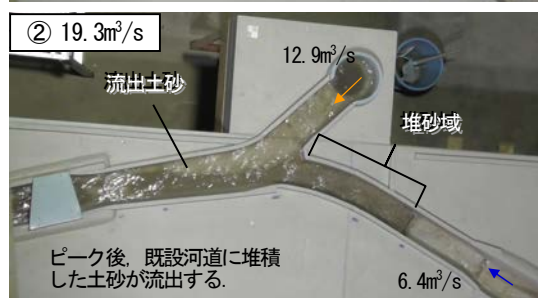
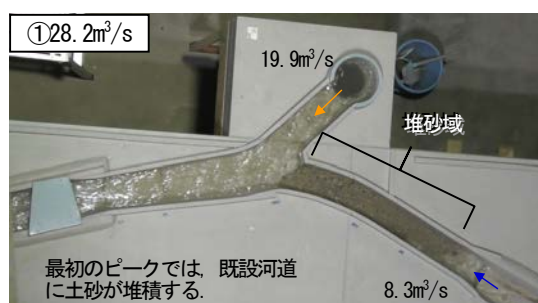


図-14 A川模型縮尺とS川の粒度分布

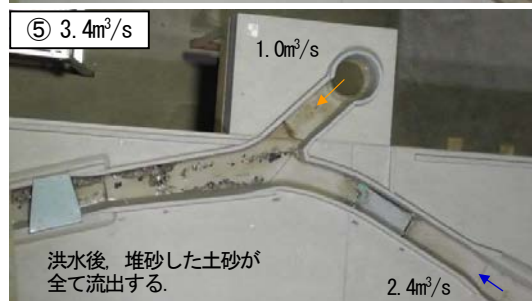
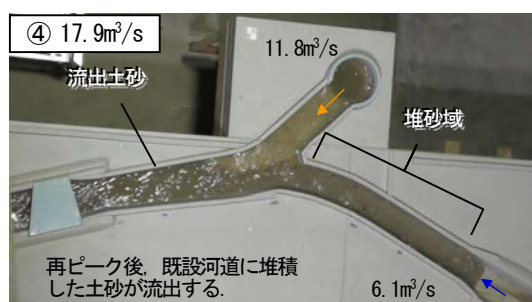


写真-4 合流部の堆砂状況の推移

4. 合流部堆砂実験

(1) 概要

解析結果および模型実験により有効性が確認されたCase1の合流方法について検討を行う。放水路についてはバイパス管路上流に沈砂池を設けており、洪水時に土砂が流れることはない。一方で、既設河道については上流から流下する土砂が堆積することが考えられる。そこで土砂の堆砂による河道の閉塞や河積不足による越水が生じないよう、実洪水を想定した非定常給水件で実験を行い、安全で効率的な土砂流下方法について検討を行う。

(2) 対象洪水

計画規模の洪水であるH25年台風18号の洪水を対象に非定常給水条件で実験を行う。対象洪水のハイドログラフを図-13に示す。上流の固定分派堰にて分配される既設河道とバイパス管路の流量について測定した結果を合わせて示した。総流量 $7\text{m}^3/\text{s}$ より少ない場合は既設河道の流量がバイパス管路よりも大きくなり、 $7\text{m}^3/\text{s}$ を超える場合はバイパス管路の流量が大きくなる。

(3) 河床材料

実験に用いる河床材料は、既設河道の河床(写真-2)の粒度分布を確認し、実スケールの無次元掃流力 τ_* と模型縮尺の無次元掃流力 τ_* が等しくなるよう実験で用いる粒径を設定する。洪水ピーク時に実スケールで $\tau_*=0.05$ とな

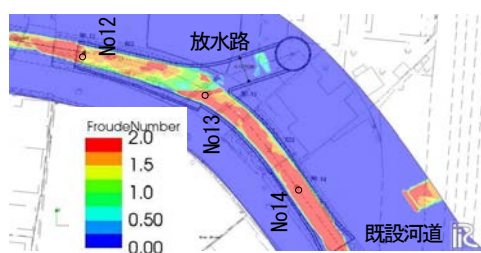


図-15 ⑤3.4m³/sフルード数コンター図

る河床材料の粒径は120.6mm、模型では4.0mmとなり、実スケールの粒度分布の τ_b に合うよう模型尺度で河床材料の粒度分布を算出したところ、砂河川であるS川の河床材料(写真-3)の粒度分布が近くなったことから、S川の河床材料を用いて実験を行った。河床材料の粒度分布を図-14に示す。同材料による平衡流砂量を模型上流端から投入する。

(4) 実験結果

時間(流量)ごとの堆砂状況を写真-4に示す。写真-4の各流量の時間を図-13に①～⑤で示す。最初のピークである①では、合流前の既設河道側のみに堆砂が生じる。その後、②で流量が減少すると、既設河道に堆積した土砂が合流部下流へ流下する。そこから最大流量の③でバイパス河川からの流量が大きく増加し合流付近の土砂は流下するが既設河道で再び土砂が堆積する。この時、堆砂土砂の厚さは32mm(実スケール96cm)を示した。その後、④で流量減少とともに既設河道に堆積した土砂が合流点よりも下流に流出し、⑤では既設河道とバイパス管路の流量が逆転し、合流点付近の土砂はすべて流下する結果となった。

(5) 考察

③ピーク時の実験結果は図-7に示したように、合流部では流量の少ない既設河道で背水により常流域が生じることで土砂が堆砂する。しかし、合流点上流の既設河道は、③ピーク流量時においても河積に余裕があるため、実験で得られた堆積厚程度では越水しない。一方、河積に余裕が無い合流点下流の既設河道については、ピーク流量の半分程度の流量である②や④の時点では土砂の堆積が見られるが、③のピーク流量時には土砂の堆積がほとんど無く、土砂の堆積による越水は発生しない。これは、既設河道流量に対するバイパス管路流量の比を流量が大きい時は大きく、流量が少なくなるとともに小さくし、小流量時には1以下となる(既設河道流量の方がバイパス管路流量よりも大きくなる)ように上流の固定分派堰の形状を決定しているためである。

バイパス管路からの流量が減少すると、背水の影響が減少し、既設河道に堆積した土砂が下流に流出する。そこで、上流にある分派堰で小流量時の流量配分をバイパス管路<既設河道となる構造とした。これにより小流量時

⑤のフルード数コンター図(図-15)に示すように既設河道で $Fr > 1.5$ となり射流域が形成され、小流量ながら土砂を流すには十分な掃流力となり、土砂の流出が促される。

以上より合流部では既設河道とバイパス管路の流量配分を変化させることで、越水しないように土砂の堆積域をコントロールするとともに、頻度の多い小規模出水時に土砂の流下を促進し、浚渫等の維持管理の頻度を削減できる方法が示された。

5. 結論

流砂を考慮した急流河川とバイパス管路との合流方法について、数値解析と模型実験を用いて検討した。既設河道湾曲外岸側にバイパス管路からの放水路を設置することにより、流れの集中が緩和され、最高水位を低下させることが可能であることが数値解析によって明らかとなった。また、放水路の勾配を上げることにより、放水路内および合流部の流れが射流となり水位が低下した。同時に、合流部の水位が下がることで既設河道上流側の背水影響区間が短くなった。これらについて、水理模型実験においても同様の現象が確認され、数値解析で検討した合流形状の有効性が示された。しかし、放水路の勾配を急勾配にしすぎると立坑水位が高くなり、上流河道に影響を与えるため、対象河川では採用しなかった。

既設河道の合流部上流域は、洪水ピーク時に背水の影響を受け、堆砂域が形成される。そこで、バイパス管路と既設河道の流量配分について、大流量時はバイパス管路>既設河道、小流量時にはバイパス管路<既設河道となるよう上流の固定分派堰の形状を決定し、洪水減水期に既存河道の流量をバイパス管路より大きくした。その結果、大流量時に既存河道に堆砂した土砂を減水時に流下させることが可能であることが示された。

謝辞：本研究の実施にあたり京都市建設局土木管理部河川整備課から多くのサポートを受けた。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 舩甚 甲介, 清水康行: 河川合流点を含む流れに関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.529-534, 2005
- 2) 笠井 美青 丸谷 知己: 山地源流域における合流点での土砂の滞留現象, 砂防学会誌, Vol. 49, No. 6, pp. 17~23, 1997
- 3) 岡田将治, 吉川和宏, 張 浩: 四万十川と後川合流部における土砂堆積軽減策に関する研究, 河川技術論文集, 第25巻, 2019年6月
- 4) iRIC : <http://i-ric.org/ja/>

(2020. 4. 2受付)