

数値解析と大規模水理模型実験を組合せた 九州北部豪雨の河道計画立案と合意形成

RIVER PLANNING AND CONSENSUS BUILDING OF THE HEAVY RAIN IN
NORTHERN KYUSHU BY COMBINING COMPUTATIONAL ANALYSIS AND
LARGE-SCALE HYDRAULIC EXPERIMENT

福岡泰斗¹・古賀満²・坂井靖幸²・上杉幸輔²・平生昭二¹

筈瀬明日香¹・木梨行宏¹・関谷明³・土屋大輔⁴・加藤翔吾⁴

Yasuto FUKUOKA, Mitsuru KOGA, Yasuyuki SAKAI, Kosuke UESUGI, Shoji HIRAO
Asuka UKESE, Yukihiro KINASHI, Akira SEKIYA, Daisuke TSUCHIYA, and Shogo KATO

¹正会員 (株)建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡県福岡市中央区大名2-4-12)

²非会員 国土交通省九州地方整備局 筑後川河川事務所 九州北部豪雨復興出張所
(〒838-1511 朝倉市杷木池田483番地1)

³非会員 (株)建設技術研究所 東京本社水理センター (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

⁴正会員 (株)建設技術研究所 東京本社水理センター (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

The Heavy Rain in Northern Kyushu in July, 2017 caused enormous flood disaster to the Akatani River. Although the river planning requires the stabilization of the flow, it is concerned the steep slope, numerous curved channels and falling works in this area cause turbulence and instability. To solve this problem, this research drafts the river planning by combing 2-D horizontal flow analysis and hydraulic model experiment. This research also aims to promote the initial work by opening the hydraulic experiment to the residents. Based on the experiment, shock wave caused by falling works and meandering flow caused by curved channels are the main reasons of this disaster. Therefore, the correction of the curve and lower height of the falling works can stabilize the flow conditions. Besides, the experiment can offer residents a visual understanding, which helps build the consensus.

Key Words : heavy rain in northern Kyushu, disaster recovery, river with steep slope and super-critical flow, large-scale field hydraulic experiment, 2-D horizontal flow analysis

1. はじめに

平成29年7月九州北部豪雨では、筑後川右支川の赤谷川、乙石川、小河内川において、確率1/200以上の洪水流量（赤谷川流末520m³/s）に加え、土砂や流木により河道が閉塞し、流路移動による氾濫被災を受けた¹⁾(図-1)。この被災を受け、赤谷川流域では河川と砂防事業が連携した洪水・土砂・流木への対応を計画しており、河川事業では、洪水時における安定した流況となる河道計画などが求められた。

乙石川合流点付近は河床勾配=1/30~1/75の急勾配、常射流混在河川で、被災前河道形態においても多数の湾曲部や落差工群が設置されていた。これまで、急勾配下

で落差工群を配置した影響について、水山ら²⁾は、多段落差工の落差と水位の関係から、落差工下流の壁面のせり上がり（最大水深）が等流水深の3倍以上に達することを水理模型実験で明らかにしている。また、射流場での落差工群の配置による改善案については、渡部ら³⁾は、



図-1 被災後の乙石川合流点の状況

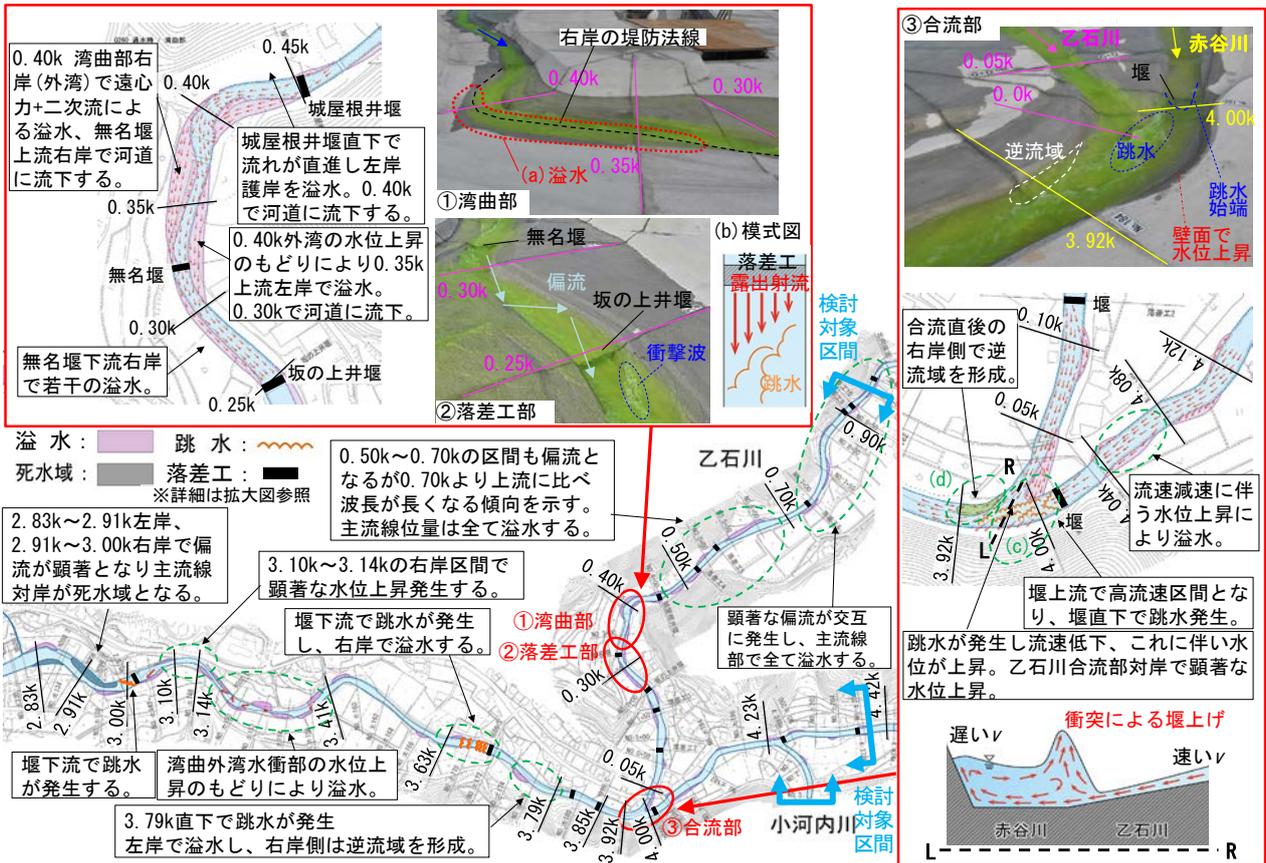


図-5 被災前の河道形状と通水状況(計画規模洪水 $Q=260\text{m}^3/\text{s}$)

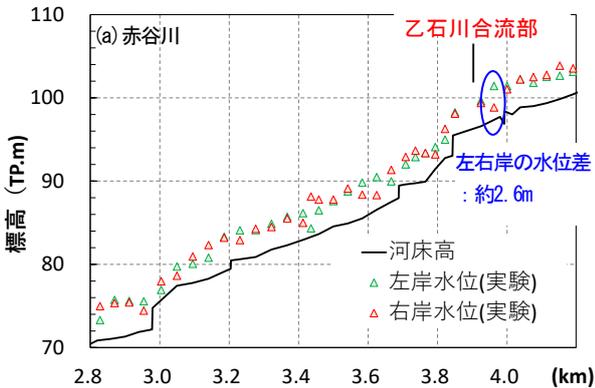


図-6 被災前河道の縦断水面形(計画規模洪水 $Q=260\text{m}^3/\text{s}$)

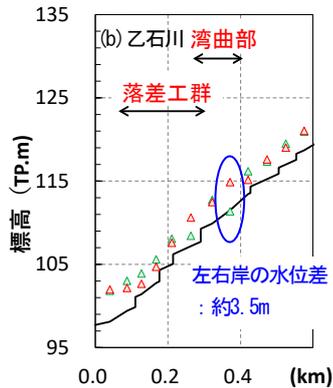


図-7 乙石川のFr数縦断分布

標系の平面二次元流況解析を用いた⁴⁾。対象区間は常射流が混在し、多数の落差工が存在することから数値解析が不安定となりやすい。そこで以下のサプレッションファクターを移流項に考慮し計算の安定化を図った。

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{for } Fr \leq 1 \\ 1 - (1 - Fr)^2 & \text{for } Fr > 1 \end{cases}$$

水面・流速分布を詳細に把握するため、メッシュ解像度は、横断方向に約1~2m程度(18分割)、縦断方向に約15~25m(54分割)とし、精度確保と解析時間短縮を図った。

4. 被災前河道の氾濫特性の把握(実験)

被災前河道を対象とした水理模型実験で氾濫特性を把

握した。被災前河道の形状と溢水状況(計画規模洪水)を図-5に示す。直線区間では溢水には至らなかったが、湾曲部、落差工下流、合流部等で溢水がみられ、ほぼ全区間で氾濫していることが確認された(凡例溢水箇所)。赤谷川と乙石川の縦断水面形を図-6に、乙石川のFr数の縦断分布を図-7に示す。図-5①(a)に示す乙石川0.3km~0.4kmの湾曲部では、遠心力による二次流に加えて、高い流入Fr数(約2.0)の影響により、左右岸の水位差は最大3.5mとなり右岸(外湾)で溢水した。図-5②に示す0.3km上流の落差工下流では、模式図(b)のように跳水始端が落差工に対して斜めに発生したため、その下流で顕著な偏流が交互に発生し、衝撃波が生じた。この偏流と衝撃波によって、主流線部では溢水した。図-5③(c)に示す赤谷川と乙石川の合流部では、赤谷川の流れは4.00k地点付近の落差工直下で跳水が生じ流速は5m/s程度と

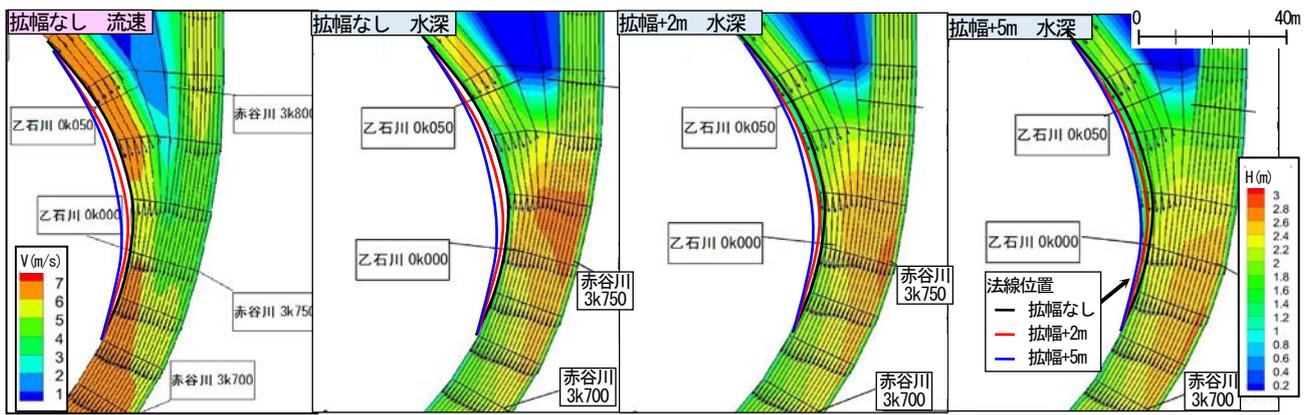


図-8 平面二次元流況解析による水深・流速分布図(計画規模洪水 $Q=260\text{m}^3/\text{s}$)

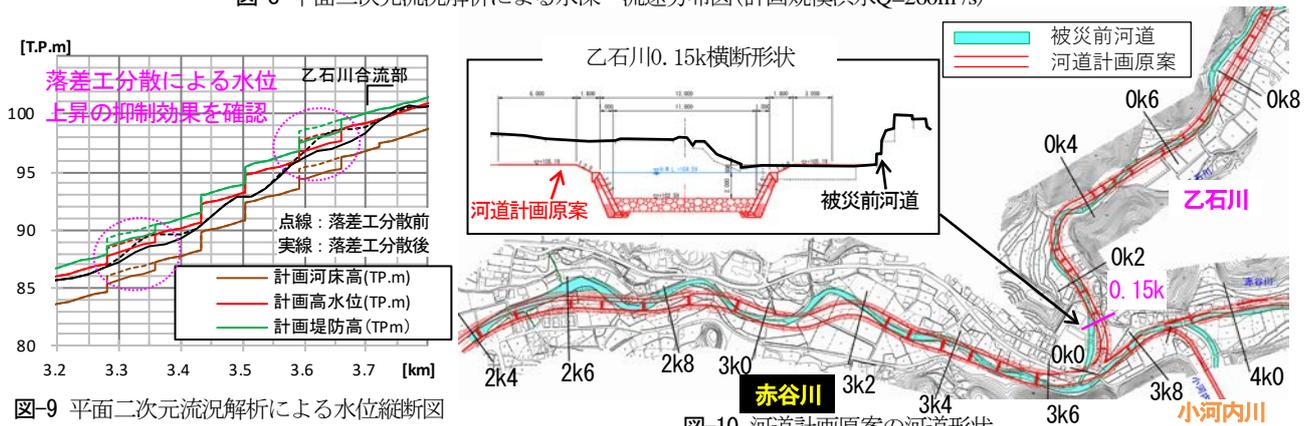


図-9 平面二次元流況解析による水位縦断面図

図-10 河道計画原案の河道形状

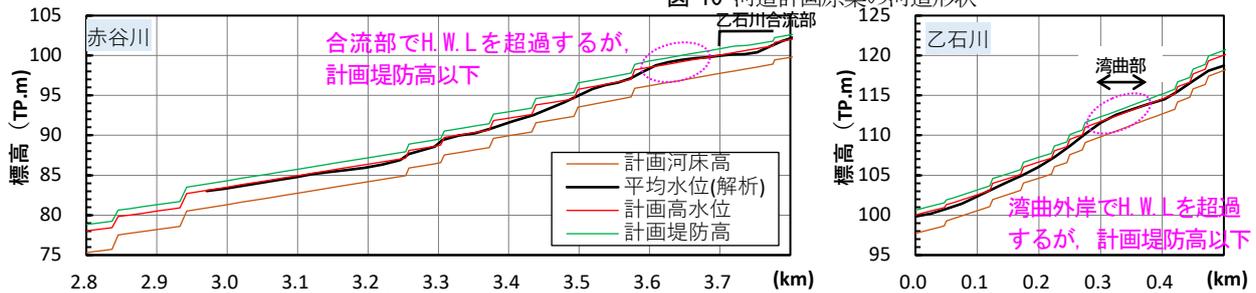


図-11 河道計画原案の解析結果の縦断面水面形(計画規模洪水 $Q=260\text{m}^3/\text{s}$)

なっている。一方、乙石川からは 10m/s 程度の高速流が流れ込み、衝突流による堰上げが生じるとともに、赤谷川の流れの下方に潜り込み、合流部対岸で顕著な水位上昇を示した(左右岸の水位差は最大 2.6m)。また、図-5③(d)の合流点直下では、乙石川からの流れで主流線が河道中央から左岸に集中したため、右岸側で剥離による逆流域を形成し、有効河積として機能していない。

以上より、氾濫被災の要因は、河積不足による越流だけでなく、落差工下流の斜め跳水による水面変動・偏流、湾曲部外岸の二次流や衝撃波による顕著な水位上昇に伴う溢水、乙石川合流部の高速流流入による顕著な水位上昇であると推測された。

5. 河道計画原案の設定(解析)

4章で示した氾濫特性・被災要因を踏まえ、河道計画原案の形状検討を行った。形状設定にあたっては、以下

に留意しつつ平面二次元流況解析により治水効果を確認し設定した。

①被災前河道では、河積不足による溢水が顕著であったため、河道計画原案では背後地に配慮しつつ河幅や水深を確保した。②湾曲入口や橋梁直上流には落差工を配置せず、かつ湾曲部を極力減らした。③乙石川合流直後の右岸側での剥離を踏まえ、滑らかな合流形状を設定した。④落差高が大きい落差工直下や湾曲部付近において水面変動が大きく、水位上昇が顕著であったため、落差高を小さく(計画水深の $1/2$ を目安)した。

特に、③④については、流況解析による感度分析を行い最適な形状を反映した。図-8に示すとおり乙石川合流点では拡幅幅に応じて水深の大きいエリアが下流側に移動することから、水面形を確認しながら法線形状を設定した。また、落差工を分散し1基あたりの高さを抑えることで水面形が安定し、過度な水位上昇を抑制できることがわかった(図-9)。

上記検討内容や地元要望も踏まえ設定した河道計画原

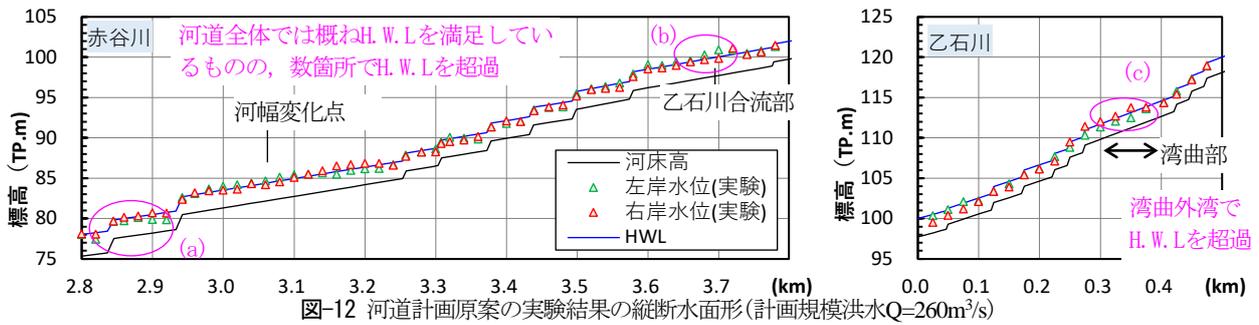


図-12 河道計画原案の実験結果の縦断水面形(計画規模洪水 $Q=260m^3/s$)

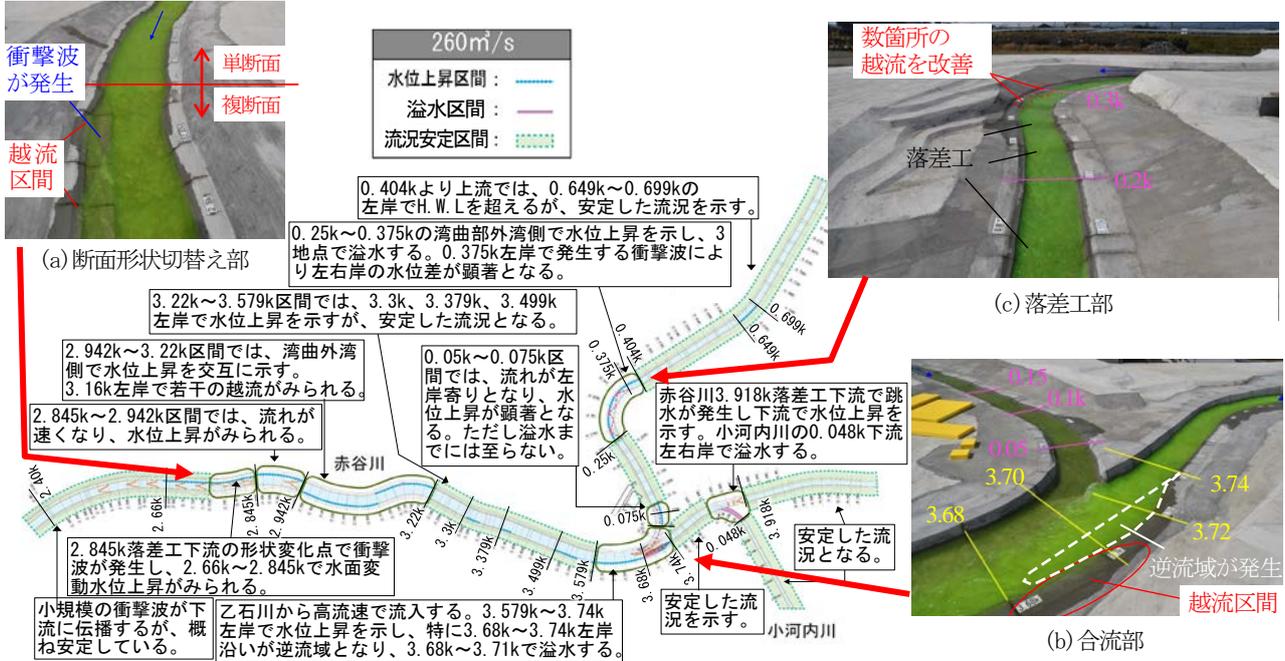


図-13 河道計画原案の流況(計画規模洪水 $Q=260m^3/s$)

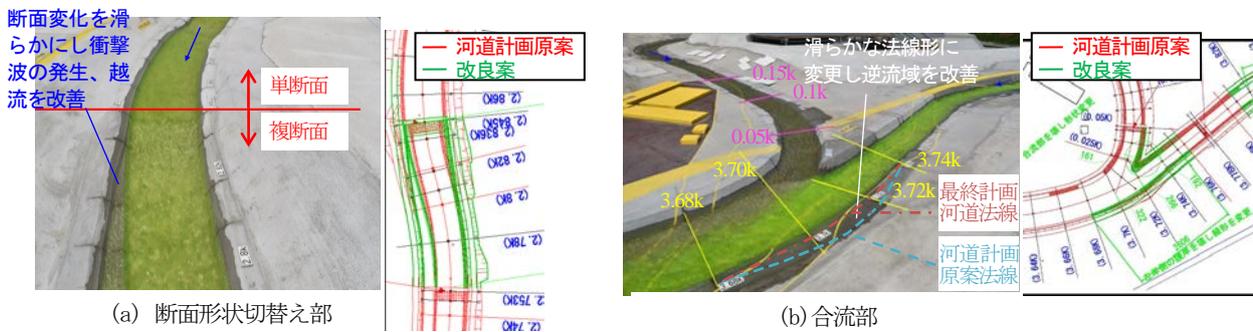


図-14 最終計画河道案の流況(計画規模洪水 $Q=260m^3/s$)

案の平面形状と代表横断の形状を図-10に示す。また、平面二次元流況解析結果として、赤谷川と乙石川の縦断水面形を図-11に示す。赤谷川・乙石川では計画流量流下時には、水位が概ねH.W.L.以下になるものの、一部でH.W.L.を超過する結果であった。ただし、H.W.L.を超過する箇所は、山付部であり、計画堤防高以下(余裕高の範囲)に収まった。

以上より、被災前河道の溢水傾向を改善し、H.W.L.を概ね満足した図-10を河道計画原案に設定した。なお、合流点のH.W.L.超過地点については、水理模型実験で流況を確認し、背割堤の形状等も含め改良することとした。

6. 最終計画河道への改良(実験)

5章で設定した河道計画原案を水理模型実験で検証した。図-12に赤谷川と乙石川の実験の縦断水面形をそれぞれ示し、図-13に流況結果を示す。河道全体では安定した流況を得られており、特に、被災前河道で顕著であった斜め跳水や偏流の発生が抑制されている。一方、解析結果と同様に、河道全体では概ねH.W.L.を満足したものの、超過する区間が数箇所発生した。

以下に、H.W.L.を超過した地点について示す。図-13(a)は単断面から複断面形状への切替え部、(b)は乙石川合流部、(c)は乙石川0.3k~0.4k湾曲部の流況である。

断面切替え部の下流では、H.W.Lを満足しているものの、衝撃波による水面変動により数箇所でも溢水した(図-13(a))。乙石川合流部では、被災前河道と同様に衝撃波が発生し、その左岸側は逆流域となり水位上昇を示すが(図-13(b))、右岸側の逆流は改善され、越流区間は3.68k~3.71kの区間のみで改善された(図-12(b))。湾曲部では、河幅の拡幅による流入 Fr 数の低下や河積の増大により、被災前河道より溢水範囲が狭くなる効果を得た(図-13(c))。しかし、湾曲部外湾側(右岸)で水位上昇を示し、0.275k, 0.31k, 0.35kの3地点でH.W.Lを超過し溢水した(図-12(c))。なお、連続する落差工群の下流では、被災前河道でみられた偏流による衝撃波は発生せず、安定した流況を示した(図-13(c))。

以上より、河道計画原案では、乙石川の支川合流部の溢水氾濫、湾曲部や断面切替え部での衝撃波発生に伴う水位上昇等の課題が明確になった。

このため、以下の改良を行った。断面切替え部は、単断面から複断面形状の法線変化、落差工上下流の河床擦り付けを滑らかにした。乙石川合流点も同様に、赤谷川左岸側の逆流域を解消するため滑らかな法線形とした。乙石川0.3k~0.4k湾曲外岸は、這い上がりによる溢水であるため、堤内地盤高を嵩上げし、氾濫の抑制を試みた。

図-14は河道計画原案を改良した(a)断面切替え部、(b)乙石川合流部の流況を示す。

河道計画原案の見直しによって、逆流域改善での有効河積の確保や衝撃波の発生抑制等により、水位が低下し、溢水氾濫を解消できた。以上より、本河道を最終計画河道とし、河道計画・設計に反映した。

7. 模型実験の合意形成ツールとしての利用

4章、6章で示した水理模型実験は、模型を被災地から1時間程の場所(九州管内に大型模型の設置は初)に製作し、被災された住民も含む多くの方々立ち会いの下で複数回にわたって実施した(図-15)。被災前河道での流況、氾濫状況を映像等で確認頂いたうえで、河道計画原案では流況改善や氾濫抑制を理解して頂くと共に、地域の方々の意見を収集、反映することで計画河道を改良し、最終計画河道案への地域の方々の合意を得た。



図-15 住民立会い実験の状況

8. 結論と今後の方向性

本研究で得られた結論と今後の方向性を示す。

- (1) 数値解析と水理模型実験の併用で、流況の安定化を図るために計画是正した事項(河道・合流線形、落差工と湾曲・合流点・橋梁の隔離、計画水深と落差工高さ、断面切替え部の擦り付け等)は、常射流が混在する中小河川の河道計画で有用であった。このような河川では、僅かな形状変化が衝撃波を発生させ、流況を不安定化することに留意が必要である。
- (2) 被災前河道実験では、落差工群直下で衝撃波が発生し、湾曲部で流れが左右岸に偏り下流に伝播する偏流を再現した。乙石川の湾曲部は遠心力のみならず、高流入 Fr 数による衝撃波により湾曲外岸側での水位上昇がより顕著となる。
- (3) (2)を踏まえた河道計画原案及び最終計画河道案は、蛇行部を減らし、曲率の小さな湾曲・合流線形への是正、落差工高さの抑制、及び極力河床勾配を緩く(流速低減)することで、斜め跳水及び衝撃波により発生する偏流を抑制し、安定した流況を得た。
- (4) 本検討の水理模型実験は、発注者や地域の方々の立ち合いのもとで行うことで、被災要因と対策効果を視覚的に説明し、河道計画の合意形成ツールとして用いることができた。

今後の課題として、災害からの復旧河道整備にあたっての、①治水と周辺環境とが調和した乙石川合流点周辺の多自然・親水拠点としての整備②土砂・流木への対応として計画されている遊砂地の諸元等の検討や、流域の状況を踏まえ、設置の必要性も含めた流木捕捉施設の位置・諸元等の検討が挙げられる。

謝辞: 本研究は、水理模型実験の計画、および被災洪水現象の把握、計画河道の改良等を行うにあたり国土交通省国土技術政策総合研究所より技術指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会報告書、筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会、2017.11.22
- 2) 水山高久、栗原淳一：多段落差工の水理と水位上昇防止工法、砂防学会誌、42巻、2号、pp.11-15、1989.
- 3) 渡部ら：射流場における落差工の縦断・平面線形に関する実験的研究、砂防学会研究発表会、R2-09、2016.
- 4) 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析、水工学における計算機利用の講習会講義集、土木学会水理委員会基礎水理部会、pp.61-76、1999.8.3

(2020. 4. 2受付)