

中小河川の災害復旧における 地域合意形成について ～模型実験等を活用した復旧河道の見える化～

上杉 幸輔¹・古賀 満¹・坂井 靖幸¹

¹筑後川河川事務所 九州北部豪雨復興出張所

(〒838-1511 福岡県朝倉市杷木池田483番地1 朝倉市役所杷木支所3階)

平成29年7月九州北部豪雨により筑後川右岸流域では多数の人的被害や家屋被害が生じた。その中でも赤谷川流域は被害が甚大であったため、権限代行制度を適用した災害復旧工事に着手している。平成30年5月末で概ね応急復旧が完了し、順次復旧の計画について住民説明を行い、工事に着手している。住民説明においては、地域の不安解消及び合意形成のため、模型実験等を活用し復旧河道の見える化を図っている。地域住民と地域全体の復興のイメージを共有しながら、地域の安全、安心に向けた災害復旧を進めているところである。

キーワード 九州北部豪雨, 模型実験, 見える化, VR

1. はじめに

平成29年7月5日の昼頃から夜にかけて、九州北部の福岡県から大分県に強い雨域がかかり、短時間に記録的な雨量を降らせ、特に朝倉市から日田市北部においては観測史上最大の雨量であった。この九州北部豪雨により、同時多発的に斜面崩壊が発生し、大量の土砂や流木が流下した。このため、福岡県の管理河川である赤谷川流域や白木谷川流域等の筑後川右岸流域で多数の人的被害や家屋被害が生じた。特に、被害が甚大であった赤谷川及び乙石川、大山川について、福岡県知事の要請を受け、「権限代行制度」を全国で初めて適用し、福岡県に代わって河川災害復旧工事を実施することとなった。

さらに、赤谷川流域は斜面崩壊が特に多く発生しているため、溪流や河道に大量の不安定土砂や流木が堆積している。このため、これら土砂等の再移動による二次災害発生を防止するため、同じく福岡県知事からの要望を受け、河道整備と一体的に災害対策を進めるよう、国による砂防事業を実施しているところである。

赤谷川流域において、応急復旧が完了した今日、復旧河道の計画について模型実験等を活用し、地域の安全・安心に向けた災害復旧を進めているところであり、本稿においては、その内容について現状を報告する。

2. 平成29年7月九州北部豪雨の概要

平成29年7月5日、朝鮮半島から中国地方に伸びた梅雨前線の南下に伴い、前線に向かって南から温かく湿った空気が次々と流れ込み、バックビルディング型の線状降水帯が形成され、短時間に記録的な雨量を観測した。

この豪雨により、小石原川（福岡県朝倉市）から花月川（大分県日田市）までの筑後川右岸流域において、死者40人、行方不明者2人、全壊家屋約300戸、半壊約1,100戸、床上浸水約180戸、床下浸水約1,600戸（2018年1月16日時点）の被害が発生した。このように人的被害を含む甚大な被害が発生した要因としては、河床勾配が急で幅の狭い谷底平野を形成する中小河川において、豪雨に伴い斜面崩壊が同時多発的に発生し、大量の崩壊土砂と流木が下流域まで流出したことが挙げられる。これらの土砂と流木は、赤谷川、乙石川の河道を埋め尽くし、民家等を破壊しながら宅地や農地等に堆積し被害を拡大させた。

3. 赤谷川等の災害復旧工事

(1) 応急復旧工事

発災直後は、土砂や流木が河道内を埋め尽くしており、次期出水に耐えられない上に、周辺の排水施設も機能していない状況であった。このため、家庭排水や雨水も排

水できず、住民の暮らしは非常に危険な状況にあった。そこで、流木の撤去、堆積土砂の掘削等で排水機能を復活させること、通常の雨程度であれば流下させることのできる河道断面を確保し、住民の最低限の日常生活を取り戻すことを最優先に考え復旧にあたった。

被災前河道と同程度の断面の確保、土砂止め工の整備、大型土のうや袋詰玉石の設置による家屋等の保護、流路の安定化等の応急的な復旧工事は、発災から約11ヶ月後の平成30年5月末で概ね完了した。

(2) 復旧工事

赤谷川流域の復旧工事は、大きく原形復旧区間と改良復旧区間に分けられる。原形復旧は赤谷川の上流域、大山川の中上流域を対象としている。これらの区間の工事は、主に河床洗掘や土砂の吸出しを受け被災した護岸や落差工等を、元の位置に復旧するものである。現在、順次工事に着手し、復旧を進めているところである（写真-1）。

改良復旧は、赤谷川と大山川の上記以外の区間および乙石川を対象としている。主に、河道の拡幅、河床勾配の是正、湾曲部の解消、河道法線の是正等を実施し、再度災害の防止を図ることとしている。赤谷川下流の東林田地区は、出水時に河道埋塞を起し、大量の土砂とともに洪水が住宅地を流下した。応急復旧においては、この流下した部分を仮河道として整備したが、改良復旧においても、この仮河道をベースとして掘削、護岸整備等を実施し新河道を整備する方針としている（写真-2）。乙石川は特に河床勾配が急であることから、河道拡幅、法線是正等と併せて落差工の設置により勾配を是正する方針である。その他、朝倉市の農地改良復旧事業と併せた宅地農地の嵩上げなども複合的に実施することで、一体的に赤谷川流域の治水安全度を向上させる。一方、このような改良復旧計画の中で、洪水流の流れ、外力の働き方等の想定が極めて難しい地点が、赤谷川・乙石川・小河内川の三川合流部であり（写真-3、写真-4）、本区間において模型実験を実施している。

4. 模型実験について

(1) 模型実験の概要

a) 目的

平成29年7月の豪雨で被害の大きかった乙石川合流点周辺は、大きな湾曲箇所があり、急勾配で流速の速い3河川（赤谷川・乙石川・小河内川）が近接して合流しているため、複雑な流れが発生すると考えられる。そのため、洪水の安定した流下と局所的な土砂堆積を是正する観点から、乙石川及び小河内川の赤谷川へのスムーズな合流形状について、机上の検討と併せて模型実験により確認を行い、最適な河道法線、縦横断面形状を決定することを目的とする。



写真-1 原形復旧の様子



写真-2 東林田地区



写真-3 三川合流部

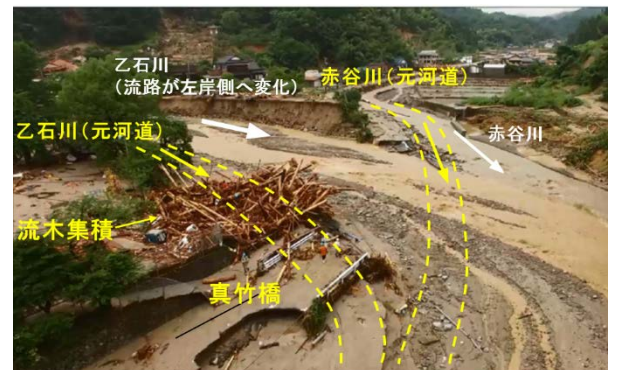


写真-4 乙石川(上)・小河内川(下)合流部の被災状況



図-1 模型対象区間



写真-5 被災前河道(左)と計画河道(右)の模型

b) 対象区間と当時の被災状況

模型実験の対象区間は、赤谷川：3k000～4/500，乙石川：合流点～0k900，小河内川：合流点～0k100である(図-1，写真-5)。この区間では、以下に示す様々な被害が発生した。①赤谷川上流，乙石川，小河内川から大量の土砂や流木が流下してきたことで，乙石川合流後の区間で河道が埋塞。②乙石川合流点の真竹橋，小河内川合流点直下流の小河内橋の流木集積により河道が閉塞し，流路が変更(写真-4)。③乙石川合流部の斜面浸食(写真-3)。④小河内川合流部の護岸の被災(写真-4)。⑤松末小学校周辺の護岸の被災。このように，当該区間は非常に複雑な流れが発生し，被害が拡大したと想定され，計画河道において水理計算では表現できない実際の流れを確認できるよう模型実験を実施する必要があると考えた。

c) 模型実験の着眼点

模型実験にあたって，明らかにしたい事象を以下のとおり整理した。

①整備後の河道による効果

被災前河道における氾濫状況と水理計算結果等で検討

した計画河道での流下状況を比較する。

②支川の合流角度による影響

合流部において上流部への背水による水位上昇や偏流の助長の程度，有無を確認する。

③乙石川湾曲部による影響

水位上昇，水衝部の高流速化，流速の低減・土砂堆積による本川への負担軽減等を確認する。

④両支川の近距離合流による影響

水位上昇，土砂堆積の助長について確認する。

⑤水流の不安定化

常斜流の混在によるうねりの発生状況を確認する。

⑥複断面形状との接合付近の流況

単断面形状から複断面形状に切り替わる区間の流況変化を確認する。

主に，以上の観点に着目して模型実験を実施することとした。

d) 実験模型の諸元

実験模型の諸元は，表-1(次頁)に示す通りである。模型の縮尺1/30は各諸元の制約条件を考慮して選定した。まず，河道の最小水深について，水の粘性の影響を無視

表-1 模型縮尺と各諸元

項目	単位	現地	縮尺(1/N)				
			20	30	40	50	60
再現区間	m	1,500	75.00	50.00	37.50	30.00	25.00
河道の最小水深	m	1.5	0.075	0.05	0.038	0.03	0.025
最大河幅	m	20.9	1.045	0.697	0.523	0.418	0.348
計画流量(下流端)	m ³ /s	260	0.145	0.053	0.026	0.015	0.009
被災流量(下流端)	m ³ /s	400	0.22	0.081	0.04	0.023	0.014
乙石川平均粒径	mm	5.0	0.25	0.17	0.13	0.1	0.08
今次災害での堆積土砂粒径	mm	2.0	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03
粗度係数		0.032	0.019	0.0182	0.0173	0.0167	0.0162
流れのレイノルズ数		3104569	106,172	57,793	37,538	26,880	20,433

※赤字: 制約条件不足



写真-6 粗度調整の様子

できる最低水深は0.03m以上であるが、模型で1cm程度の突起を用いて粗度調整する場合、突起の5倍程度の水深は必要となることから、0.05m以上とした。次に、流量は再現精度が確保できる最小流量0.01m³/s以上とした。また、給砂の際に必要な土砂の粒径に関して、容易に入手が可能な砂(8号珪砂)の粒径0.07~0.08mm以上とした。最後に、模型の製作場所は、地域の方にも確認していただくため、筑後川河川事務所の資材置き場を選定した。そのため、施設規模で制約がかかり、量水槽、帰還水路の設置範囲も考慮すると、この土地では最大50mの模型に抑える必要があった。これら制約条件を満足する縮尺1/30を採用し、模型を製作した。なお、粗度係数(模型材料となるモルタルの粗度係数0.013以上)、レイノルズ数(粘性の影響なく乱流が形成できる約2,000以上)はいずれの縮尺においても満足している。

河床は、水理特性を詳細に把握するため、水面変動(うねり)、高流速域、落差工周辺の局所流れ等の水理現象を確認することに適している固定床とした。粗度は計画の河床を再現できるよう次のとおり調整した。模型河床はモルタル製のため粗度係数が0.013(現地換算で0.0229)程度である。だが、これは計画の河床の粗度係数(0.035~0.042)を満足できていない。そこで、模型河床に小石を任意の密度で設置し、計画の河床の粗度係数を再現することとした。設置する小石の密度の調整にあたっては、実験模型とは別に、赤谷川、乙石川の代表断面を直線水路で再現した模型を作成した(写真-6)。この模型を用いて調整した密度、粗度の大きさで、実験模型の河床も粗度付けし、計画の河床を再現した。

表-2 実験ケースの概要

実験ケース	河道形状	実験項目	対象流量	実験条件
ケース1	被災前河道	水理量	計画流量、被災流量	定常流通水
ケース2	計画河道(原案)	水理量	計画流量、被災流量	定常流通水
		土砂堆積状況	計画流量	ハイドロ流通水
ケース3	改良案	水理量	計画流量	定常流通水
		土砂堆積状況	計画流量	定常流通水
ケース4	最終案形状	水理量	計画流量、被災流量	定常流通水
		土砂堆積状況	計画流量	ハイドロ流通水

※(乙石川合流後)計画流量260m³/s、被災流量400m³/s

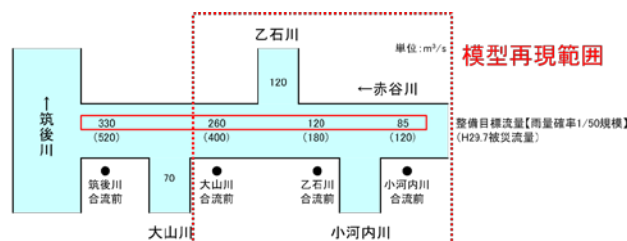


図-2 流量配分図

(2) 実験ケース

実験は、以下に示すとおり、大きく4つのケースに分けて実施した(表-2)。現在、ケース4を実施し、地域の方へ最良案をお示しし、法線等にご理解を得たところである。なお、図-2に示すとおり、乙石川合流後で計画流量が260m³/s、平成29年7月の被災流量が400m³/sである。

a) ケース1(被災前河道の洪水流下・氾濫特性把握)

整備後の効果を確認するために、まず被災前の河道を再現することで、平成29年7月の洪水がどのように流下し氾濫したのか、その特性を把握する。被災前河道に計画流量、被災流量を流し、水位縦断、流速分布の計測及び流況、氾濫状況の観察を行う。土砂流木抜きの実水条件で、主に、乙石川湾曲部の水位、支川合流点水位の計測、氾濫開始流量、氾濫位置の把握を目的とする。

b) ケース2 (水理解析により設定した河道の効果検証と問題点把握)

実験前に水理解析等の結果を用いて設定した計画河道が、実現象において洪水を安全に流下させ得る断面や合流点の形状となっているのかを把握する。主に、乙石川湾曲部の水位、支川合流点の水位、流速、土砂堆積位置、氾濫箇所の有無等を計測、観察し、被災前河道の結果と比較することで、計画河道の効果及び問題点を把握することを目的とする。

c) ケース3 (改良案の効果検証と問題点把握)

ケース2で把握した問題点に対して、改良案を検討し、模型の改造を行う。改良後の河道で計画流量を流下させ、特にケース2で抽出した問題点が改善されているか確認し、必要であれば改良案の検討・模型改造・実験をくり返し実施する。

d) ケース4 (最良案の水理特性把握)

ケース3の改良案の検討により、洪水を安全に流下させ得る最良案が決定した後に、それを最終案の河道形状として、計画流量及び被災流量を流下させる。その結果から、乙石川湾曲部の水位、支川合流点の水位、土砂堆積位置、氾濫箇所の有無を把握し、被災前河道との比較を行うことで、三川合流部の改修効果を明確にする。

(3) 実験結果

本稿においては、被災前河道、計画河道及び改良後の河道に対して、計画流量 $260\text{m}^3/\text{s}$ (乙石川合流後の流量)を流下させた場合の結果について報告する。

a) 被災前河道

計画流量に対し、越水や反転流・死水域の形成が各所でみられた。赤谷川では主に、堰下流で跳水が発生することによる越水、湾曲外湾水衝部からのもどりによる水位上昇による越水、偏流が顕著となることによる主流線部対岸での死水域形成等が確認された。乙石川では、偏流の発生による主流線部での越水が確認された。特に合流前の湾曲部では、遠心力と二次流の作用により外湾が越水し、さらにそのもどりにより対岸が越水した。小河内川では赤谷川との合流部付近で越水が確認された(写真-7)。また、乙石川、赤谷川合流部では、堰直下で跳水が発生し、流速低下に伴う水位上昇により合流部対岸が顕著に水位上昇、かつ合流部直下で反転流が形成されるといった非常に複雑な流れが確認された(写真-8)。

b) 計画河道

被災前河道に比べ、湾曲部を是正した法線となっているため越水する箇所は減少した。しかし、赤谷川では単断面から複断面への変化点で水面変動が大きく越流が見られた。また、赤谷川・小河内川合流部において、赤谷川に設置した落差工下流で発生した跳水により、その下流で水位が上昇した。そのため、小河内川の出発水位が高くなり、背水の影響で小河内川の下流部で越水が発生した(写真-7)。さらに、赤谷川・乙石川合流部では、

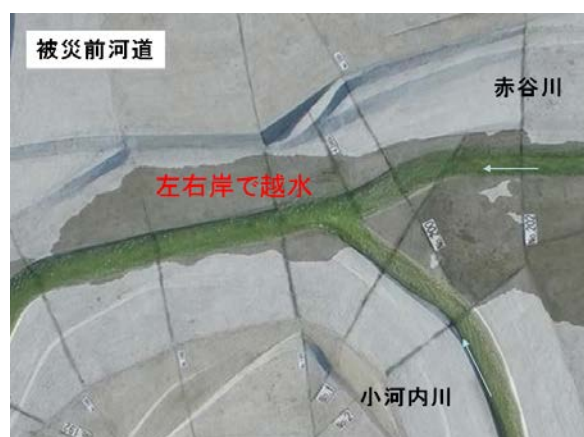


写真-7 赤谷川・小河内川合流点

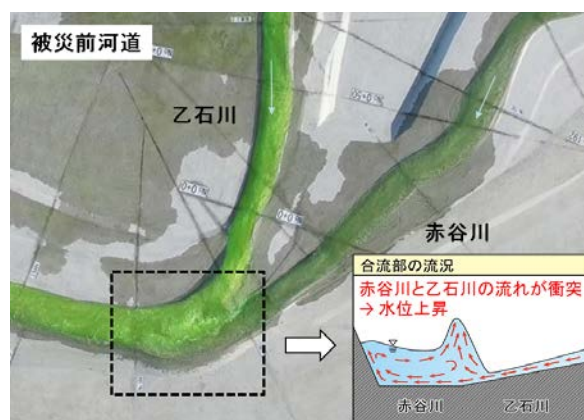


写真-8 赤谷川・乙石川合流点



写真-9 模型を用いた説明の様子

乙石川からの高流速の流入により赤谷川で水位が上昇、かつ死水域の形成も確認された（写真-8）。このように、被災前の河道と比べ改善はされたものの、水理解析では分かりえなかった課題も見つかった。

c) 改良案の河道

当初の計画河道で抽出された課題に対し、支川の合流線形、落差工の位置や高さ、堤内地盤高の見直し等の検討を行った改良案での実験の結果、水位の上昇、越水等は抑えられ、改善がみられた。ただし、一部で課題は残っているため、現在も更なる改良案を検討しているところである。

5. 復旧河道の見える化

(1) 模型を活用した地域の方々への説明

これまで、地域の方々に対して、計画の法線や断面等を説明する際には、図面を使っでの説明であった。そのため、おおよその河道の位置は分かるものの、周囲との位置関係や地盤からの高さ関係などが詳しく伝わらないこともあった。平成30年10月には、計画の法線に沿って現地に幅杭を設置し、実際に現地を地域の方と歩きながらの法線の説明も行ったが、やはり川の流れに対して伝わりづらい部分が残った。

そこで、平成31年3月30日に、初めて模型を活用した地域の方々への説明を行った（写真-9）。約40名の地域の方が参加した当説明会では、計画河道（前述ケース2）に計画流量、被災流量を流下させ、計画河道についての説明を行った。見学した住民からは、「どこにどのような川ができるのかイメージができた」「洪水の流れの速さが伝わった」などの意見が挙がった。これこそが模型の利点だと考えられる。直感的に川の位置や広さ、深さなどが伝わりやすいのはもちろんだが、流れの速さ（洪水の恐ろしさ）を感じてもらえたのもポイントではないかと思う。計画流量や被災流量が何 m^3/s と言われても、我々も含めイメージするのは難しいのではないかと。特に赤谷川流域は河床勾配が急で、流速が非常に速くなる。被災前の河道に比べ安全に流れるようになっていること



写真-10 VRで見る東林田復旧河道の様子

を知ってもらうのも大事だが、早期避難を促すという観点からは、危険性が伝わることも大事だと思う。もちろん伝わりやすいからこそ、地域からは要望等もいくつか出てくる。このような要望等も踏まえつつ、計画河道の改良案を検討し、模型の改造、実験を繰り返し最良案を検討してきた。令和元年8月17日には、法線等を確定させた最終案で、地域の方へ2度目の説明会を実施し、地域の方からご理解を得たところである。

(2) VRを活用した復旧河道の見える化

見える化のもう一つの事例とし、河道閉塞を起こし、ショートカットするように洪水が流下した東林田地区において、現在計画河道の検討と併せてVR動画も作成している（写真-10）。これも復旧河道の見える化の一つである。若干の法線是正を行う他の地区と比べ、東林田地区は現在の計画では被災前と比べ大きく様子が変わることになる。たとえば、前述したショーカット河道や、一部新たにできる有堤区間である。以前はなかった川が家の前にくることになる方もいる。地区がどのような風景になるのかイメージするのは容易ではない。そこで、模型同様、直感的にイメージしてもらえるよう、VRを作成している。これを用いれば、周囲を自分の目線で360°見渡すことができ、前後に移動することも可能である。家からどのくらい離れているのか、川の深さはどうなっているのかなど、イメージしやすくなると考えられる。現在は作成途中であり、まだ活用はできていないが、今後説明会等での活用も考えていく。

6. おわりに

被災から2年が過ぎ、復旧が進む赤谷川流域において、一層地域の方々のご理解、そして信頼を得ることが重要となってくる。これまで同様真摯に向き合い丁寧な説明を心がけるとともに、地域の方々も明確に将来の地域の姿を思い浮かべた状態で合意形成を図れるよう、模型やVR等を活用し、地域の安全・安心に向けた災害復旧計画を進めていく所存である。