

「巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工」の 洪水被災と機能確保の技術検討

ENSURING TECHNICAL FUNCTIONS OF SANDBARS WITH BOULDERS FOR BANK PROTECTIONS IN THE JYOGANJI RIVER

池田大介¹・齋藤充²・吉田和弘³・大利泰文⁴・福岡捷二⁵
Daisuke IKEDA, Atsushi SAITOH, Kazuhiro YOSHIDA, Yasufumi OHRI and Shoji FUKUOKA

¹非会員 国土交通省北陸地方整備局 富山河川国道事務所 調査第一課長
(〒930-8537 富山県富山市奥田新町2-1)

²非会員 国土交通省北陸地方整備局 河川部 河川管理課長
(元 富山河川国道事務所 技術副所長) (〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町1-1-1)

³非会員 国土交通省北陸地方整備局 河川部 河川計画課 河川環境係長
(元 富山河川国道事務所 調査第一課 河川調査係長) (同上)

⁴非会員 国土交通省北陸地方整備局 富山河川国道事務所 調査第一課
(〒930-8537 富山県富山市奥田新町2-1)

⁵フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The bank protection work using sandbars with boulders in rapid rivers, which maintains and restores sandbars present originally at riversides, has been recently executed in many rivers in Japan. However, these works are in the process of accumulating technical and practical knowledge for ensuring bank protection functions during floods in rapid rivers.

The paper shows the results of investigation securing functions of the bank protection works based on the results of monitoring and analysis of a large flood experienced in the Jyoganji river. The improved design method of sandbars with boulders are investigated and proposed.

Key Words : Jyoganji river, rapid river, bank protection work, sandbar with boulder, monitoring

1. はじめに

常願寺川は我が国有数の急流石礫河川であり、河岸侵食、河床洗掘による破堤氾濫の危険性が高いことから、根継護岸などコンクリート護岸を主体とした対策を実施してきている。しかし、護岸を主体とした対策工では、護岸際への流路の固定化により、護岸前面で流速の増大による河床洗掘をもたらし、さらには、護岸下流にある砂州の侵食・縮小化により河岸侵食が堤防まで到達する危険性が高まることが示されている¹⁾。そこで、富山河川国道事務所では、中央大学研究開発機構と共同で、本来河岸際に存在する砂州を保全・回復させ、河道の維持管理において効果を発揮する「巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工」^{1),2),3),4),5)} (以下、本工法)の現地施工を行っている。

巨石付き盛土砂州は、現地河床材料を利用した維持管理が容易な構造であり、既設の護岸と一体的に予防保全

的に配置することにより河川管理施設の長寿命化が期待されている。近年全国各地で施工が行われているが、現地施工後のモニタリング調査に基づいた機能確保に係る実践的、技術的知見は蓄積途上にある。

そのような中、常願寺川において平成28年7月27日に平均年最大流量(瓶岩地点700m³/s程度)を上回る規模の洪水(瓶岩地点874m³/s)が発生した。現地施工後最大規模で、洪水流が砂州上に1m程度乗る洪水であり、盛土砂州に対して最も洗掘力の大きい規模の洪水であった。そのため、盛土砂州が一部流失する被災が発生した。

本論文では、巨石付き盛土砂州の洪水前後のモニタリング調査および長田・福岡⁶⁾の石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた洪水流・河床変動解析を実施し、本工法が発揮した治水機能を評価するとともに一部流失した要因を検証する。次に、洪水被災後の機能確保に当たり、より望ましい巨石付き盛土砂州の構造の改良案について考察する。

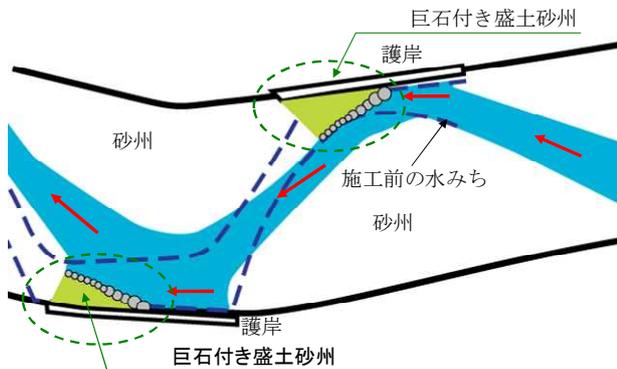


図-1 「巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工」の機能

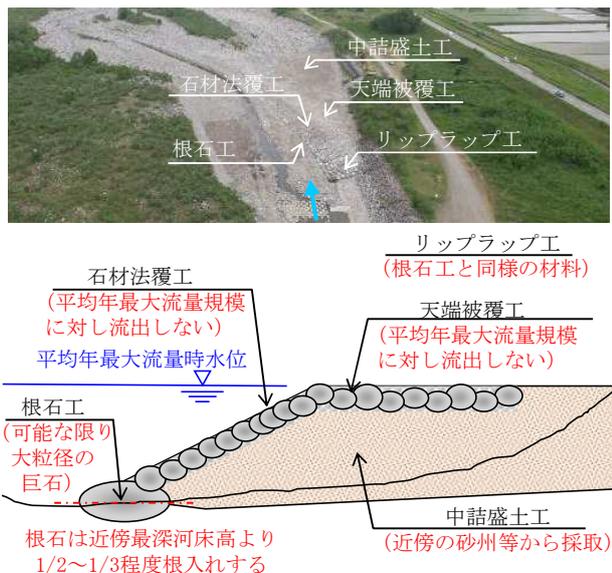


図-2 「巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工」の構造

2. 巨石付き盛土砂州の機能および適用

急流河川では、護岸際に流れが集中し、護岸前面の河床の洗掘が進行するとともに、流路が護岸沿いに下流へ伸び、護岸の下流への延伸が必要となる。本工法は、図-1に示すように河岸沿いに存在する砂州の上流端に巨石を配し、護岸沿いの洪水流をはねるとともに、巨石と一体化した砂州により滑らかに河道中央に洪水を導き、安定で自然性の高い河岸の形成および既設護岸の長寿命化を図るものである。巨石付き盛土砂州は、河岸際の砂州の侵食・洗掘の力が強く作用する高水敷が冠水する程度の流量規模の中小洪水に対し機能を発揮する。大流量の規模に対しては、堤防法線に沿って直進する流れとなることから、堤防と護岸で防護を図ることとなる。

巨石付き盛土砂州の構造は、図-2に示すように、根石工、石材法覆工、中詰盛土工、天端被覆工および上流先端部のリップラップ工から構成される。現地発生材料を使用することから、施工や補修も容易にでき、砂州を保全・回復する自然性の高い治水と環境の調和した工法である。

本工法を用いた河道管理においては、河川全体を見通した流れに着目し、河岸際で高速流の発生、洗掘が予測

表-1 現地施工後に発生した12洪水

NO	発生日	瓶岩ピーク流量	天端冠水の有無
1	H24.7.7	435.7m ³ /s	有
2	H25.6.19	523.0m ³ /s	有
3	H25.7.27	336.8m ³ /s	無
4	H25.7.29	481.7m ³ /s	無
5	H25.8.1	323.4m ³ /s	有
6	H25.8.23	502.2m ³ /s	有
7	H25.9.16	518.8m ³ /s	有
8	H26.10.14	367.9m ³ /s	無
9	H27.4.21	551.6m ³ /s	無
10	H27.7.23	450.4m ³ /s	無
11	H27.10.2	438.4m ³ /s	無
12	H28.7.27	874.3m ³ /s	有

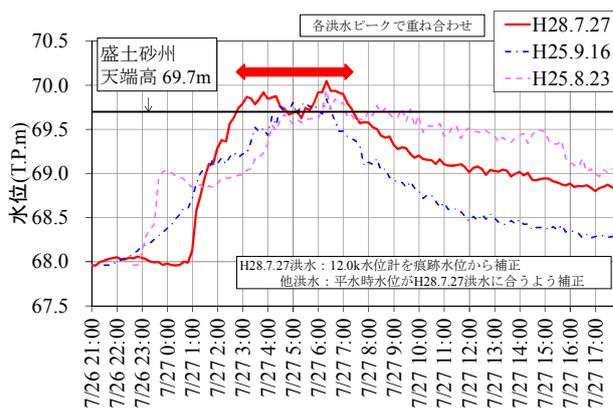


図-3 右岸11.7kにおける洪水水位ハイドログラフ

される箇所を対象となる。常願寺川では、試験施工を経て、河道の変遷および水理解析結果を活用し、現在までに右岸9.2k、右岸11.7k、右岸13.5k、および左岸8.2kの計4箇所で現地施工を行っている。

3. 平成28年7月洪水における巨石付き盛土砂州の機能評価と一部流失要因の検証

(1) 平成28年7月27日洪水における河道変化の状況

常願寺川において、本工法の現地施工後に発生した12洪水を表-1に示す。H28.7.27洪水(瓶岩地点874m³/s)は、現地施工後最大規模で、初めて平均年最大流量(瓶岩地点700m³/s程度)を上回った。右岸11.7kにおける洪水水位ハイドログラフの比較を図-3に示す。過去の洪水においても洪水ピーク前後に巨石付き盛土砂州の天端への乗り上げが発生したが、本洪水は天端高を乗り越えた時間が最も長く続いた。

航空写真による右岸11.7k付近における河道変化を図-4に示す。H24施工以降、繰り返し中小洪水が発生したが、みお筋が巨石付き盛土砂州の法線に沿って滑らかに中央に導かれている。本洪水後では、巨石付き盛土砂州の一部流失が発生したものの、主流は引き続き巨石付き盛土砂州に誘導されている。

巨石付き盛土砂州の一部流失が見られた右岸11.7kの縦断測量結果および巨石の状況を図-5に示す。リップラップ部背面では階段状に河床低下が発生し、洗掘深は最大2.6m程度であった。巨石の流出も確認されたが、その多くは巨石付き盛土砂州の前面法線沿いに盛土保護の

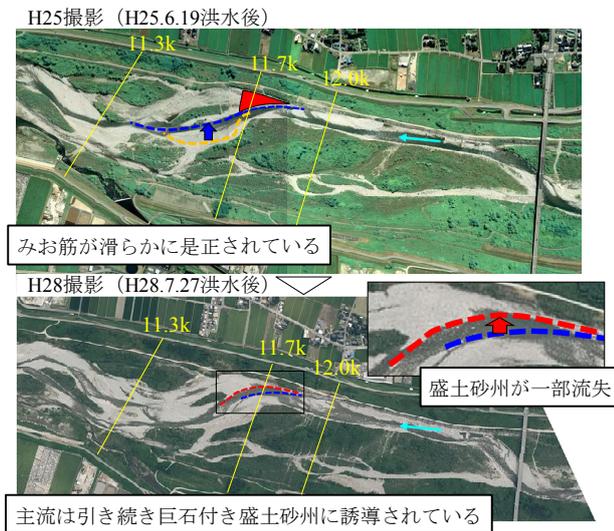


図-4 航空写真による右岸11.7kの河道変化

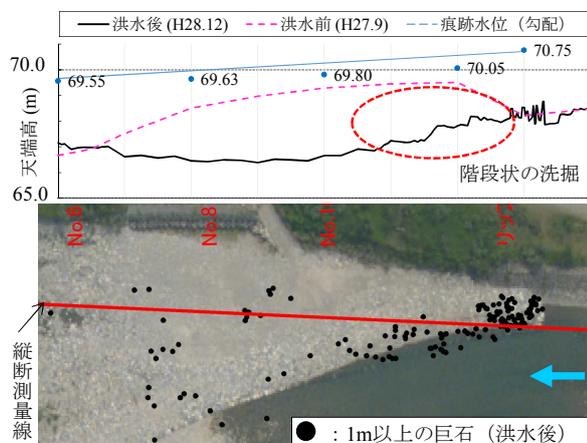


図-5 右岸11.7kにおける縦断変化および巨石の状況

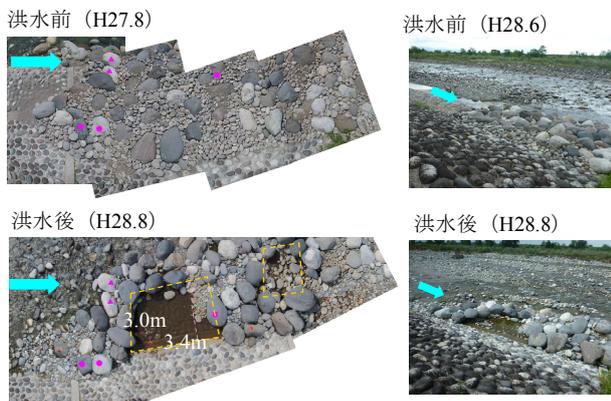


図-6 リップラップ部の流出状況

ため設置されたものであった。

上流からの洪水流のエネルギーを最も強く受けるリップラップ部の洪水後の流出状況を図-6に示す。洪水前は巨石の間に中間径の礫が存在し、群体として設置されていた。洪水後はリップラップ部の先端の巨石は残存し、その背面の巨石および礫が3.0m×3.4mの範囲で流出した。

本洪水は巨石付き盛土砂州天端上の水深が0.5～2m程度の最も河床洗堀力が大きくなる規模であり、しかも過去の洪水の2倍以上の冠水時間を持ったことから、巨石



図-7 右岸11.7k付近の流況 (定点監視)

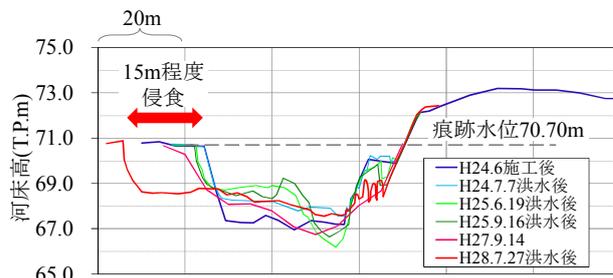


図-8 リップラップ部の横断面図の比較

で構成されたリップラップ部の巨石の変状および背面の盛土砂州の一部流失が生じた。

(2) 本工法の機能評価および被災要因の検証

H28.7.27洪水において本工法が発揮した機能について検証する。定点監視を行った右岸11.7k付近の流況を図-7に示す。洪水ピークに到達する前の6:00時点では、洪水流がはねられ、主流が滑らかに河道中央に導かれ、リップラップ部背面は緩やかな流れとなっている。リップラップ部の横断面図の比較を図-8に示す。本洪水では、洪水後対岸の中州が15m程度侵食され、低水路の拡幅が生じていた。よって、このことは、リップラップ部の水はね効果により、みお筋が河岸中央に導かれ、河岸や下流砂州の侵食を抑制する機能が発揮されたことを示している。

次に、長田・福岡⁹⁾の石礫河川の二次元河床変動解析法を用い、洪水後河道断面における同規模洪水時の流速を計算した。表-2、図-9に示す検討条件での流速ベクトル図を図-10に示す。流速3m/s以上の高速流が河岸沿いを直進し、一部流失した巨石付き盛土砂州上を流下し、下流に到達している。これより、再び同規模の洪水が発生すると下流の砂州が侵食される危険が高まっており、右岸11.7k地点において、本工法の機能確保を図る必要性が確認された。

被災要因について前述のモニタリング調査結果および石礫河川の二次元河床変動解析法から明らかにする。洪水流・河床変動解析の検討条件および時系列で見た流速

表-2 検討条件

□メッシュサイズ 縦断：25m 横断：7.5m	□外力 H28.7.27洪水ハイドロ
□河道条件 H28.7洪水後測量（測量外はH24.6LPデータ）	□境界条件 上流端：流量 下流端：水位（H27 HQ式）

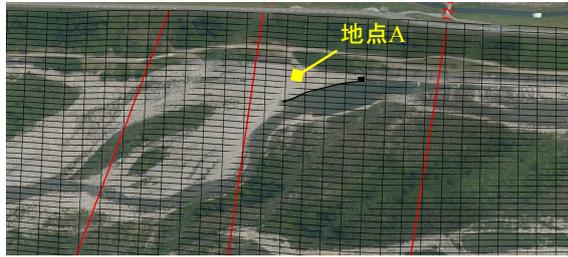


図-9 計算メッシュ

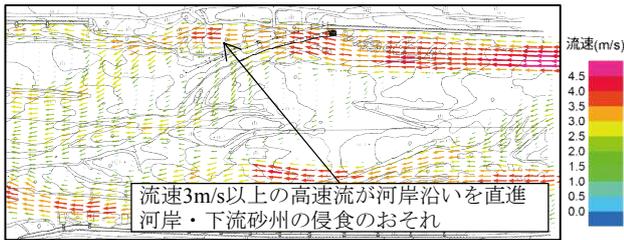


図-10 洪水後河道断面における同規模洪水ピーク時の流速ベクトル図

ベクトル図をそれぞれ表-3、図-11に示す。一山目の洪水ピークの4:00時点の流速ベクトルを見ると、盛土砂州天端上で流速4m/s以上の直進的な高流速となり、二山目の洪水ピークの7:00時点では高流速域の拡大が顕著になっている。

次に、図-9に示す地点Aにおける流況および河床変動の解析結果を図-12に示す。リップラップ背面の盛土砂州上で流速4m/s程度の高流速が5時間程度継続し、土砂の流出が見られる。特に、流速が4m/sに達するとφ300～1,000mmの大粒径礫の流砂量が増大していることが分かる。

本解析結果に対する同時刻の定点監視において、7:30前後で盛土砂州上の樹木の流出が確認され、直進的な流れが一山目より卓越していた。また、前述の洪水後の縦断測量結果（図-5）において、河床はリップラップ部を起点に階段状に洗掘・低下していた。

前述の定点監視（図-7）において、河岸沿いの洪水流がリップラップ部に衝突し、乗り上げたことによる水位の局所的な上昇が確認されており、洪水ピークとなる7:30時点で、リップラップ部の水位上昇が減じ、卓越した直進的な流れが確認されている。

以上より、流速4m/s程度の河岸際の洪水流がリップラップ部に衝突して鉛直方向にはね上げられ、後方への「落込み流」の発生が長時間継続し、激しく盛土砂州上面をたたくことによって、リップラップ部の巨石の一部流出および盛土砂州の階段状の洗掘を引き起こしたことが示唆された（図-13）。

表-3 検討条件

□メッシュサイズ 縦断：25m 横断：7.5m	□外力 H28.7.27洪水ハイドロ
□河道条件 河道部：H27.9平板測量 高水敷：H24.6LPデータ	□境界条件 上流端：流量 下流端：水位（H27 HQ式）
□計算メッシュ 図-9と同じ	

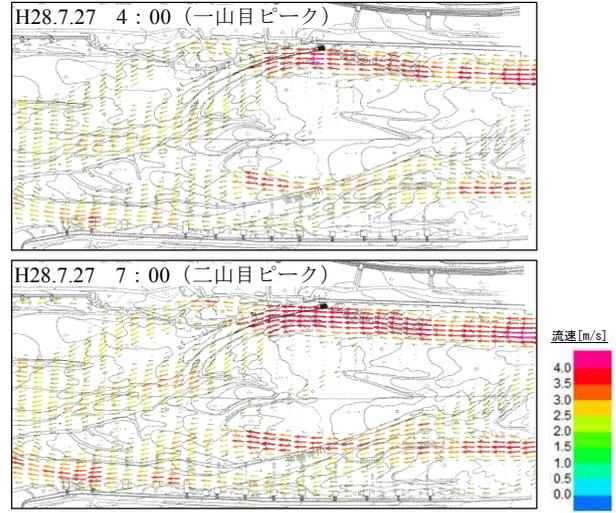


図-11 流速ベクトル図（H28.7.27洪水）

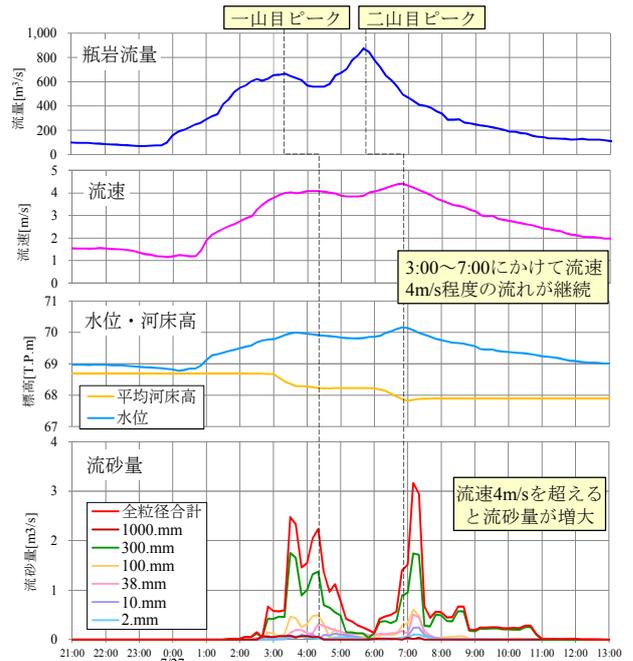


図-12 流況および河床変動の解析結果

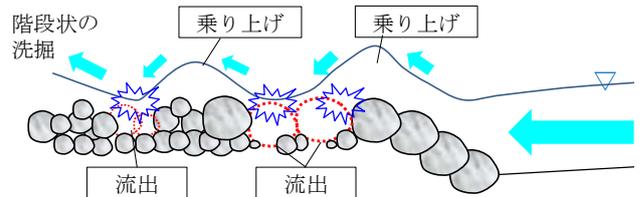


図-13 「落込み流」による洗掘・流出のメカニズム

(3) 河道断面の安定性の検証

被災した右岸11.7kにおける機能確保の検討に資するため、沖積地河川の安定的な河道形成の指標である無次

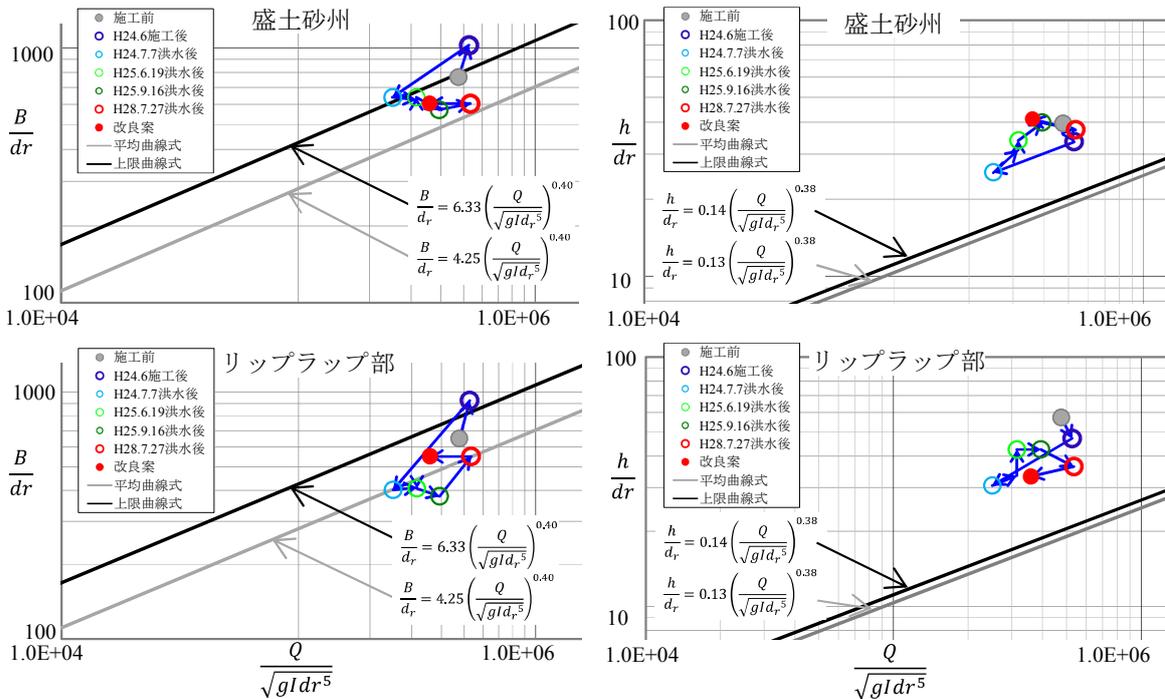


図-14 平均年最大流量（瓶岩地点700m³/s程度）流下時の無次元流量と無次元川幅，無次元水深の関係

元流量と無次元川幅，無次元水深の関係（福岡式）および蛇行度と相対水深の関係⁷⁾より，当該区間の河道断面の評価を行う。

施工前～H28.7.27洪水後の河道断面を用いて，平均年最大流量（瓶岩地点700m³/s程度）流下時の無次元流量と無次元川幅，無次元水深の関係を図-14に示す。巨石付き盛土砂州中央部では，H24.6（施工後）からH24.7にかけての施工後最初の洪水で川幅が狭く河床が急勾配となり変化が著しい。その後，川幅は徐々に狭く緩勾配となる傾向で推移し，自然河道断面に近づきつつあったと考えられる。リップラップ部でも同様の傾向を示し，加えてH25.10時点で望ましい無次元川幅の下限線を下回っている。また，両断面で無次元水深のプロットは上限線より上で推移している。よって，本洪水前の低水路河道は，中小洪水に対する川幅が不足していたことが示唆された。現地施工後の河道変化の特性を踏まえ，機能確保においては，安定した河道断面形を目指し，望ましい川幅が確保されているかについて評価する。

次に，表-4の定義に拠って，巨石付き盛土砂州の現地施工箇所を含む一連区間における蛇行度と相対水深の関係を図-15に示す。4.6～6.2k区間は複断面的蛇行流れの特性を示し，この区間より上流の区間は，単断面的蛇行流れの特性を示す領域Ⅰに区分された。領域Ⅰは低水路の蛇行による遠心力が卓越し，二次流の発達によって蛇行部外岸寄りに最大流速が現れる。本洪水での被災が突出していた右岸11.7kを含む11.3～12.0k区間は，河道中央の砂州高が高く砂州上水深が0mの単断面河道状態であり，主流が狭い低水路内を流下し，外岸側に強いエネルギーが集中していたと考えられる。

表-4 相対水深および蛇行度の定義

相対水深	砂州上水深と低水路水深の比 砂州上水深：平均年最大流量水位－平均砂州高 低水路水深：平均年最大流量水位－低水路平均河床高
低水路平均河床高	1/3平均年最大流量（瓶岩地点250m ³ /s）水位以下の平均河床高（河積/水面幅）
平均砂州高	1/3平均年最大流量水位以上の砂州高
蛇行度	蛇行長/蛇行波長

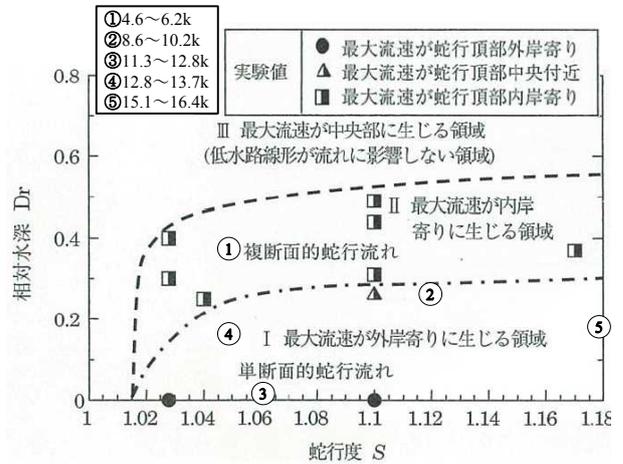


図-15 最大流速発生位置の流れの領域区分⁷⁾

4. 機能確保に向けた改良とその効果

3. の検証に基づき，これまでで最も洗掘力の大きい本洪水のような外力に対する右岸11.7kでの機能確保を図る上で，より望ましい構造とする改良案とその効果を示し，改良後の河道断面の安定性について評価する。

(1) リップラップ部の改良

本洪水でリップラップ部の巨石が一部流出した要因が

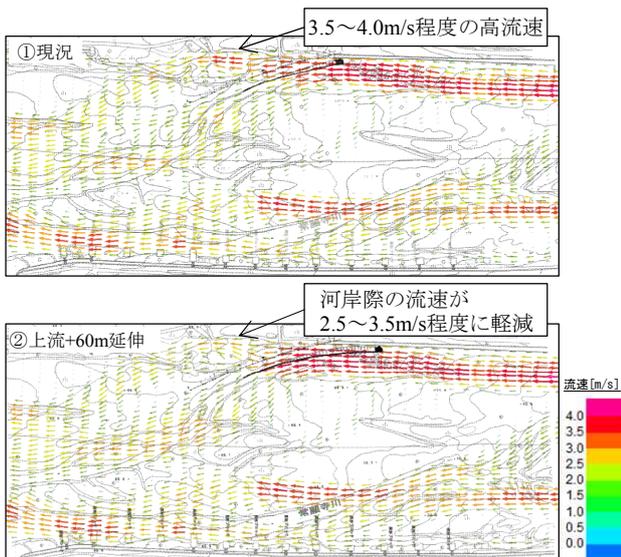


図-16 洪水ピーク時における流速ベクトル図の比較

図-13に示すリップラップ部へ衝突した高速流がもたらす「落込み流」であったことから、機能確保においては、落込み流のエネルギーを極力低減させるよう背面の盛土砂州まで滑らかに摺りつく構造とすることが重要である。リップラップの先端部は、勾配を緩くすることにより、乗り上げた流れのエネルギーを減じ、落込み流による天端の損傷を軽減させる形状とする。粒径については、リップラップ部先端の巨石は、概ね洪水後も移動せず残存していることから、当初施工時と同じφ1000mm以上とする。

(2) 平面形（線形）の改良

3. (3)で示された単断面的蛇行流を示す河道特性を踏まえ、外岸側に働く強いエネルギーへの影響を軽減するためには、流向に対しなるべく滑らかな線形とすることが望ましい。よって、洪水の主流を緩やかに河道中央に導くことで、盛土砂州に乗り上げる流れの流速を軽減させる平面形として、現況（ケース1）および現況+60m上流延伸（ケース2）の2ケースで比較する。前出の表-2、図-9に示す条件での流速ベクトル図を図-16に示す。いずれのパターンも河岸際の高流速の流れが軽減され、滑らかに河道中央に導かれ機能が確認でき、ケース2の方が、上流側に向かって法線が緩やかなことから、乗り上げた直進的な流れの流速が軽減され、下流砂州の侵食を抑制する効果が発揮されている。よって、平面形は上流側に向かって線形が緩やかな構造とする。

(3) 改良後の河道断面の安定性

(2)で示した平面形について、福岡式を用いて施工後の河道の安定性を評価した結果を図-14に示す。改良案では、水深は望ましい無次元水深の上限線より上に外れているものの、川幅は望ましい無次元川幅の範囲内にあり、概ね安定的な河道断面と評価できる。

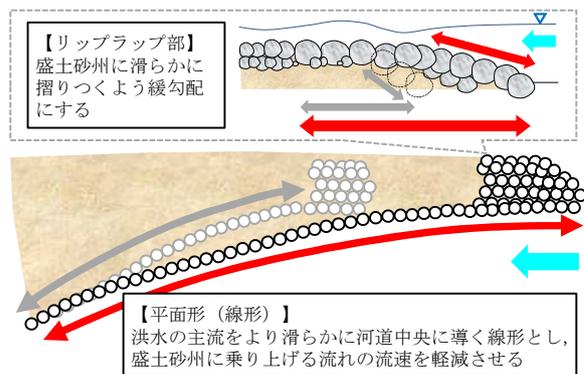


図-17 被災要因の検証に基づく本工法の改良点

5. おわりに

本工法を現地に適用する常願寺川において、盛土砂州に対し最も洗掘力が大きくなる規模の洪水が発生した。そのような洪水外力に対し、水はね効果により河岸や下流砂州の侵食を抑制する機能が発揮されたことを示し、盛土砂州が一部流失した被災後の機能確保を図る上で、被災要因の検証に基づく改良案とその効果を示した。より望ましい構造として、先端のリップラップ部を乗り上げた高速流が激しく砂州上面をたたく「落込み流」の発生を抑制するため、リップラップ部を盛土砂州にかけて滑らかに摺りつくことが重要であること、洪水の主流をより緩やかに導く平面形の改良が効果的であることを示した（図-17）。今後、現地施工後のモニタリング等により、適切な維持管理に係る更なる知見を蓄積し、全国の類似する河川に役立てるための手引き⁵⁾の更新を行う。

参考文献

- 1)長田健吾, 安部友則, 福岡捷二: 急流礫床河川における低水路護岸沿いの深掘れ流路形成とその特性, 河川技術論文集, 第13巻, pp.321-326, 2007.
- 2)澤原和哉, 須賀正志, 安部友則, 福岡捷二: 急流河川における巨石を用いた新たな河岸侵食対策の立案と検証, 河川技術論文集, 第14巻, pp.109-114, 2008.
- 3)長田健吾, 福岡捷二, 氏家清彦: 急流河川における砂州を活かした治水と環境の調和した河道計画, 河川技術論文集, 第18巻, pp.227-232, 2012.
- 4)小池田真介, 石井陽, 岩井久, 石川俊之, 福岡捷二: 水衝部対策を施工した砂州による自然性の高い河岸防護工の創出, 河川技術論文集, 第18巻, pp.233-238, 2012.
- 5)国土交通省北陸地方整備局河川部・急流河川研究会: 治水と環境の調和した新たな河岸防護技術の手引き〜巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工〜, 2013.
- 6)長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床高移動機構と表層石礫の凸凹分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1 (水工学), vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 7)福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, pp.37-39, 森北出版, 2005 (2017. 4. 3受付)