

脆弱な地層が分布する法線是正区間における 河床低下抑制のための現地発生材使用による 対策工法の提案

A PROPOSAL OF MEASURES METHOD WITH THE UTILIZATION OF SOIL
GENERATED AT THE SITE FOR DEGRADATION OF RIVER BED IN THE
SECTION WHICH ALIGNMENT OF DYKE CORRECTION THAT FRAGILE THE
NATURE OF THE SOIL IS DISTRIBUTED

松田 龍朋¹・倉光 宏一²・木原 恒二²・柳田 公司³・服部 敦⁴
釜瀬 明日香⁵・倉吉 一盛⁵・伊藤 寛之⁶・岩谷 栄林⁷・長谷川 清史⁸
Ryuhou MATSUDA, Koichi KURAMITSU, Koji KIHARA, Koji YANAGITA, Atsushi HATTORI
Asuka UKESE, Kazumori KURAYOSHI, Hiroyuki ITO, Shigeki IWAYA, Kiyofumi HASEGAWA

¹非会員 熊本県土木部河川課 (〒862-0901 熊本市中央区水前寺6丁目18番1号)

²非会員 熊本県県央広域本部 土木部災害対策課
(〒862-0901 熊本県熊本市東区東町3丁目11-63)

³非会員 国土交通省九州地方整備局 地域河川課
(〒812-0013福岡市博多区博多駅東2丁目10番7号 福岡第二合同庁舎)

⁴正会員 工博 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 (〒305-0033 茨城県つくば市旭1番地)

⁵正会員 工修 株式会社建設技術研究所九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

⁶正会員 工修 株式会社建設技術研究所九州支社土工部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

⁷正会員 株式会社 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)

⁸非会員 理修 株式会社建設技術研究所九州支社地圏環境室 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

In this paper, we report the measures method with the utilization of soil generated at the site for degradation of river bed in the section which alignment of dyke correction that fragile the nature of the soil. To be concrete, we set up design condition by quasi three-dimensional analysis of flow regime, all kinds of geological exploration and verified function of measures method and structure justification by hydraulic model experiment.

Key Words : *fragile the nature of the soil is distributed, curve section, alignment of dyke correction, degradation of river bed, hydraulic model experiment, 2-dimentional river bed configuration analysis, the utilization of soil generated at the site*

1. はじめに

平成24年九州北部豪雨で観測史上最高水位を記録する洪水が発生した白川の龍田陳内地区(熊本県管理区間)では、504戸が床上浸水する等の甚大な被害を受けたことを契機に河川激甚災害対策特別緊急事業(以下、「激特事業」と称す)が採択され、再度災害防止を目的として法線是正による河道改修が計画された(図-1参照)。当該予定地で地質調査等を実施したところ、河道掘削後

の計画河床面は未固結の砂礫層や火山灰質の非溶結阿蘇4火砕流堆積物(以下、「A4」と称す)といった侵食に対して脆弱な地層であることが明らかになった。この地層は掃流力に対して弱いため、洗掘対策の他、護床工下面からの土砂吸出し防止に留意した河床低下対策工が必要であった。

本論文では、河床勾配1/200程度の急流かつ脆弱な地層が分布する強湾曲部区間において、河床低下抑制を図ることを目的とした現地発生材の玉石・砂礫による対策工法を提案するとともに、水理解析による脆弱な地層に配

慮した河道計画の実施，河床変動解析による河床の安定性の確認と設計条件の設定，水理模型実験を用いた機能確認，現地試験施工を通じた品質確認を実施し，平成26年12月より施工を行っているので報告する。

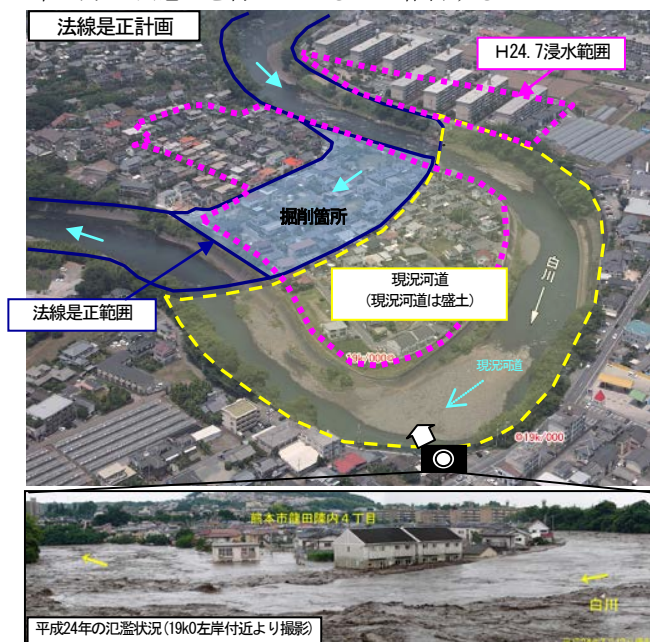


図-1 河道法線是正計画（龍田陳内地区）と平成24年九州北部豪雨の白川の氾濫状況

2. 河床低下対策工の概要

(1) 従来工法の課題

細粒分の吸い出しにも対応した河床低下対策工としては，コンクリートブロックの下部に吸出し防止シートを敷設することが一般的である。しかし，人工材料であり，河床材料との馴染みが悪く，コンクリートの摩耗やシートの劣化に対する補修も困難であり，維持管理上の課題を有している。

そのため前野ら¹⁾は，洗掘及び吸出しの防止に加え，河床との馴染み，耐久性等の観点から，下層から徐々に粒径を大きくした多層構成の砂礫材（石礫層フィルター：図-2参照）で河床を置換する方法を提案している。

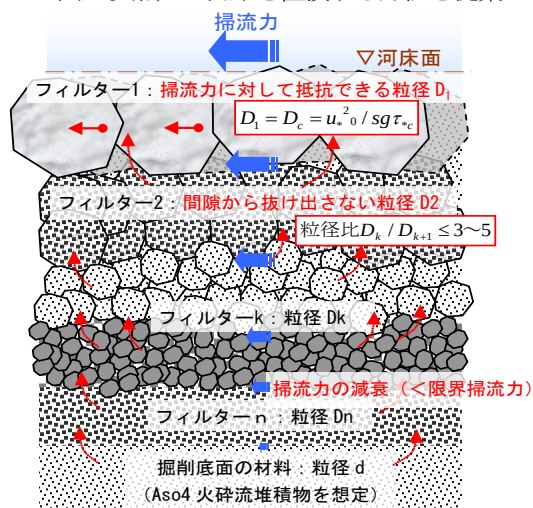


図-2 石礫層フィルターによる対策原理

前野らの研究では，水理模型実験により，単一粒径を前提として，石礫層フィルター層の吸出し防止効果を確認している。一方，実現場において石礫層フィルターを採用する場合は，資材調達，施工性，経済性の観点から実現場に則した構造とする必要がある。

(2) 現地発生材を活用した河床低下対策工の提案

(1)の課題がある他，白川の激特事業では，洪水により河道に堆積した土砂（玉石，砂礫を含む）を掘削し，河積を確保することが急務であり，さらに土砂の有効利用も課題となっている。これを踏まえ，河道掘削土を河床低下対策工の材料として活用することを前提とし，構造も単純化することでコスト・施工期間の縮小が期待できる対策工を提案した（図-3参照）。

本論文で提案する河床低下対策工は，現地発生の玉石（移動限界粒径以上の石礫；以下，Dd材と称す）を複数層敷設し，Dd材の間隙を現況河床材料程度の砂礫（以下，「マトリクス材」と称す）で充填する構造である。マトリクス材は，吸出し防止フィルターの機能を有するものであるが，河床面付近では，マトリクス材粒径は移動限界粒径に対して小さく，掃流力が減衰するまでの一定層厚の流出を許容する構造となる。

構成材料	Dd材	マトリクス材
機能	被覆機能 掘削面を被覆し、掃流力に対して安定させ、洗掘を防止	フィルター機能 掘削面の吸出し力を減衰し、下層土砂の抜け出しを防止
調達可能 現地材料	玉石 ($\phi 300 \sim 1000\text{mm}$)	砂礫 ($D_{50} = 8\text{mm}$, $D_{max} = 200\text{mm}$)
概要図		

図-3 現地発生材を活用した河床低下対策工

(3) 法線是正区間の地質条件の把握

当初は地質条件が面的に不明であり，地質上の主な課題として，①阿蘇4火砕流堆積物（A4:軽石混じり砂層）の性状の把握，②保田窪砂礫層（Dg:玉石混じり砂礫層）の性状の把握，③侵食に弱い阿蘇4火砕流堆積物が河道掘削面にどの程度出現するのか，が挙げられた。この課題を踏まえて，露頭調査，ボーリング調査，表面波探査，トレンチ調査を実施し，一帯の地質分布と性状を詳細に把握した（図-4，5参照）。法線是正区間上流端に分布する固結砂礫層（以下，「DgH」と称す）は礫支持の巨礫層であり，現河道内で露頭する程度に耐侵食

性の高い強固な層である。一方、玉石混じり砂礫層（以下、「DgL」と称す）、A4は砂、火山灰が主体で、侵食に対して脆弱な地層である。

以上を踏まえ、掘削面の地質に対応した洗掘・吸出しへの対応方針を表-1に整理する。

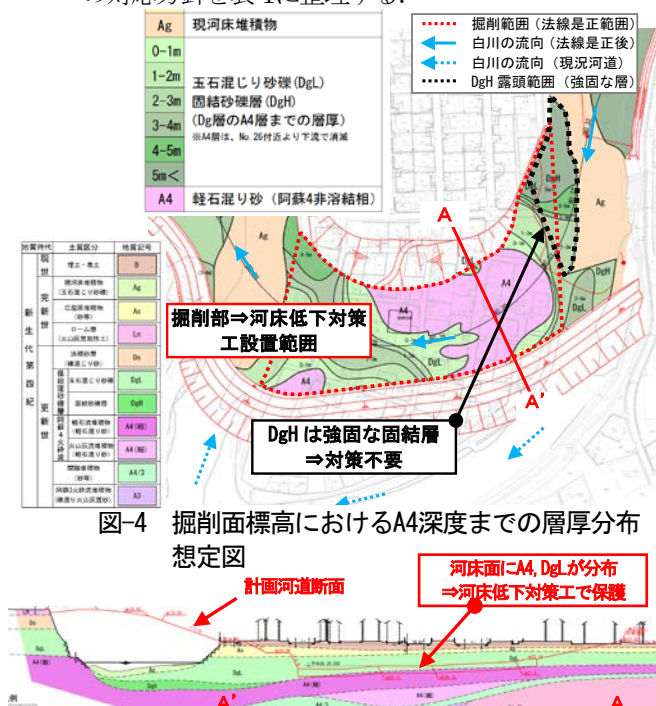


図-4 掘削面標高におけるA4深度までの層厚分布想定図

図-5 法線是正区間における地質断面図（図4のA-A'断面）

表-1 掘削面地質の特徴/洗掘・吸出しへの対応方針

地質区分(記号)	特徴	洗掘、吸出しへの対応方針
阿蘇4火砕流堆積物 (A4)	・火山灰流堆積物と軽石流堆積物で構成（非固結の火山灰、軽石） ・粒径、比重が極めて小さい（流失しやすい）	河床低下対策工を敷設 ⇒細粒土の洗掘、吸出しを防止（A4分布範囲は特に注意が必要）
玉石混じり砂礫層 (DgL)	・最大礫径は約50cm ・礫間の基質は砂分が主体（基質支持） ・礫間の砂分は非固結（流失しやすい）	
固結砂礫層 (DgH)	・最大礫径は約300cm ・礫間の基質は細礫が主体（礫支持） ・礫間の細礫は固結（露頭部）	存置（掘削しない）※ ⇒固結度が高く、洗掘、吸出しは無い（現露頭部において確認） ※層厚2m以下の薄層部は帯工等で置換

3. 強固な固結砂礫層を活かした河道計画

河床低下対策工に先立ち、脆弱な地層が露出する計画河床面において、高速流が極力発生しないような河道法線と断面形状を設定する必要がある。そこで、河道法線に沿って空間分解が可能であり、湾曲部の二次流を精度高く表現できる一般座標系準三次元平面流況解析を用いて河道形状を設定した。このとき、対象流量は計画高水流量とした。

まず、既往の整備計画河道（以下、「一次案」と称す）において流況解析を実施し、高速流が発生している箇所を抽出した。その結果、一次案の場合、脆弱な地層であるA4付近（横断No. 31右岸上流）に7m/s以上の高速

流が発生することを確認した（図-7左参照）。そこで、横断No. 31右岸上流に分布する耐侵食性の高いDgH付近をあえて残して水衝部とすることで、A4付近の高速流を軽減させる案（以下、「見直し案」と称す）を設定した（図-6参照）。その結果、一次案ではA4付近で高速流が発生していたが、河道を見直すことで高速流発生箇所が上流側のDgH上に移った（図-7右参照）。以上の結果から、強固な固結砂礫層を活かした見直し案を採用した。

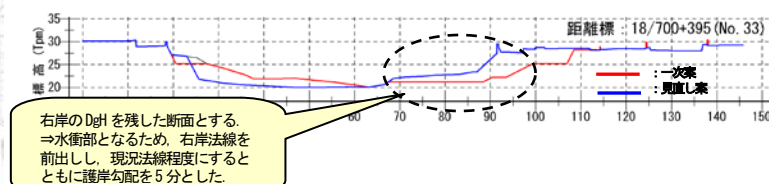


図-6 一次案と見直し後の横断面図

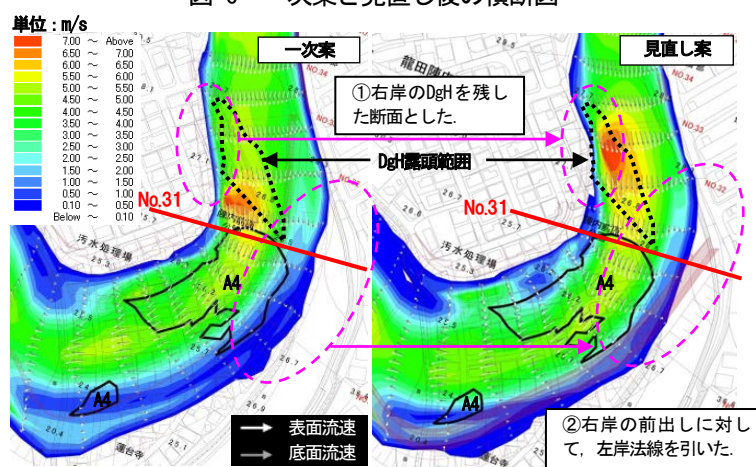


図-7 流況解析による流速コンター図・ベクトル図

4. 河床の安定性の確認及び設計条件の設定

河床の安定性の確認及び河床低下対策工の設計条件の設定を行うため、一般座標系準三次元流況+平面二次元河床変動解析により、法線是正直後から31年後の河床変動を予測し、さらに、準三次元流況解析により、法線是正直後（初期河床）及び河床変動後の河道で設計条件（摩擦速度）を把握した。このときの対象流量は、計画高水流量とした。

河床変動解析の結果より、湾曲内岸にて約2.0mの堆積傾向となるが（図-8参照）、流下能力上問題はないことを確認した。また、河床変動後は流向が外岸側へ移行するが、外岸側の河床変動量は小さいことから、法線是正後の河床は安定性を確保していると言える。

さらに、初期河床と河床変動後の流況解析結果より、河床変動前後で最大流速エリアが移動するものの、最大流速値に差が見られない（図-9参照）。そのため、河床低下対策工の設計条件は、法線是正区間上流（横断No. 29より上流）では摩擦速度最大0.6m/s、下流では最大0.56m/sを採用した（図-10参照）。

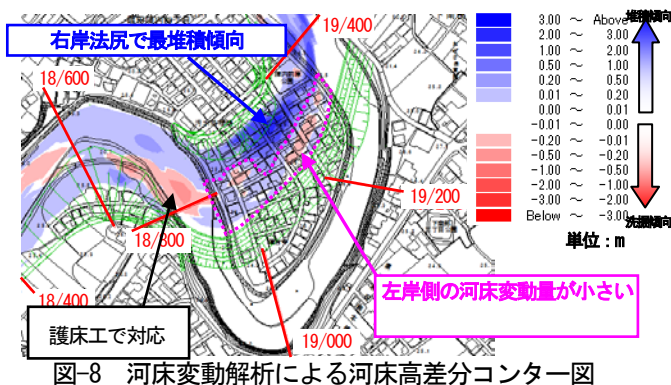


図-8 河床変動解析による河床高差分コンター図

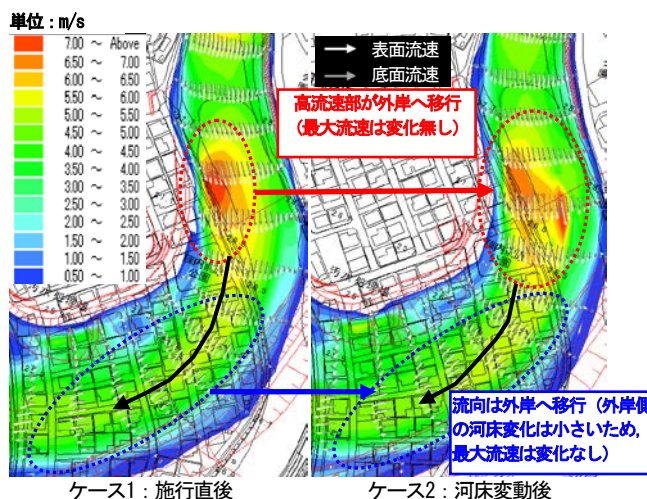


図-9 洪水ピーク時の流速コンター図・ベクトル図
(河床変動前後の河床高での流況解析結果)

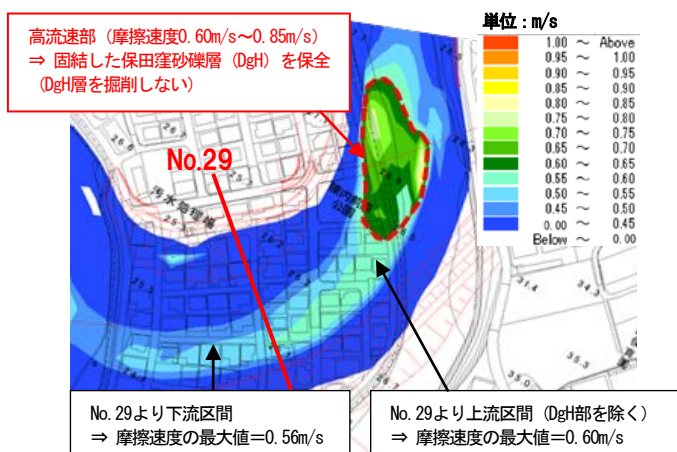


図-10 洪水ピーク時の摩擦速度コンター図
(河床変動解析後河床高)

5. 水理模型実験による機能確認

(1) 水理模型実験の概要

a) 実験の目的

河床低下対策工の諸元設定にあたり、「Dd材が移動しない粒径の把握」と、「マトリクス材の吸出しの影響範囲の把握」が必要となる。「移動しない粒径」は、一

般に岩垣式等を用いて設定するが、河床低下対策工で用いるDd材は粒径が大きい数十cmの石であるため、適用性が低い。そのため、水理模型実験により、河床低下対策工のDd材粒径を設定するとともに、マトリクス材の効果を検証した。

b) 実験施設の概要

水理模型実験は、国土交通省国土技術政策総合研究所の高流速回流水路実験装置(図-11参照)を用いて行った。実験は、現地材料をスケールダウンした材料を用いて実施した。実験では、縮尺1/7.4として、現地材料を用いて、流量及び通水時間を再現した。

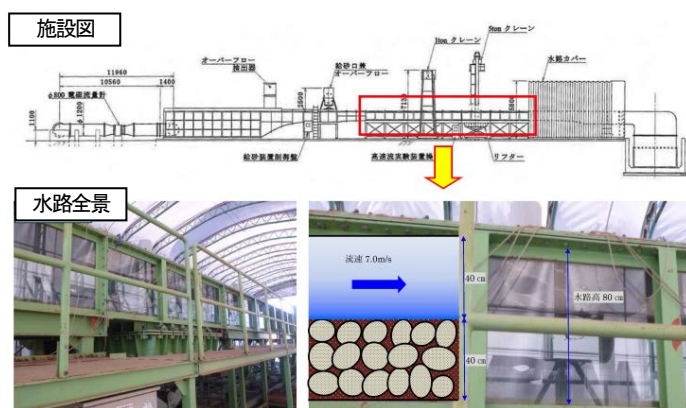


図-11 河床低下対策工実験施設の概要

c) 実験の内容 (Dd材粒径の設定方法)

実験では、複数の流量条件で水路側面のガラス面よりDd材及びマトリクス材の挙動をモニタリングするとともに、図-12のフローに従って、水路内水理量を計測及び無次元掃流力の算出を行い、Dd材粒径の設定に資する条件を明らかにした。

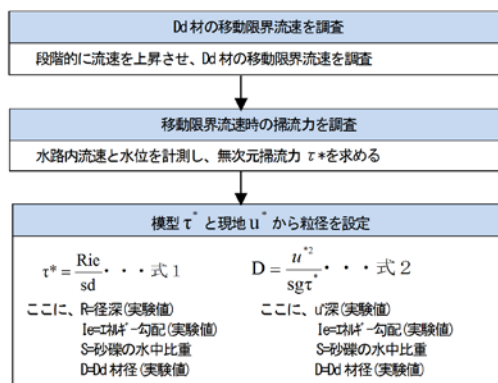


図-12 Dd材粒径の設定フロー

(2) 水理模型実験結果

a) Dd材の挙動

Dd材は、玉石が密に配置されていることで流水に対する耐力を発揮している。実験では通水流量を徐々に増加させ、一定の流量を越えるとDd材の密度が小さい箇所から徐々に流出し始めた。その後、Dd材が流出した箇所を中心に洗掘されることを確認した。このDd材が

挙動を示す（流出し始める）際の無次元掃流力を算出したところ、0.027～0.040であった（6.(1)河床低下対策工の設計で詳述）。

また、対策工の維持管理の視点で、洪水発生後の対策工に対し、Dd材が欠落した場合について実験で確認を行った。その結果、欠落部周辺においてDd材間の空隙が大きくなるが、流出はほとんどないことを確認した（写真-1）。このことから、Dd材が一部欠落しても、即時に対策工の安定性には問題がないと考えるが、モニタリングによる経過監視が必要である。



写真-1 通水前後の欠落部の状況

b)マトリクス材の挙動

計画高水流量通水時のマトリクス材は、Dd材の表層より掃流され、河床高は徐々に低下した。河床の低下は、時間の経過とともに緩やかになり、洪水末期には、Dd材の表層より2層目付近で停止した（図-13参照）。このとき、マトリクス材は河床低下に伴いマトリクス材の表層がアーミングされていた（写真-2参照）。Dd材が欠落した場合の実験においても、マトリクス材は同様の挙動を示した。

これは、Dd材の下層にいく程、掃流力が低下することに加え、マトリクス材の表層がアーミングされることで掃流力<限界掃流力となるためである。

以上の結果から、白川において様々な粒径を有する現地材料をマトリクス材として使用する場合、Dd材の層厚を2層とすると、A4層が露出し、吸出し防止のためのフィルター機能を確保できないため、層厚を3層にすることで河床の安定性を確保できることを明らかにした。

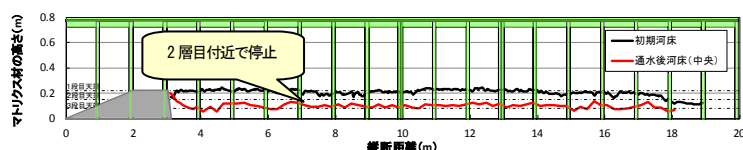


図-13 通水後のマトリクス材表層の河床高（Dd材3層敷設、通水時間：5時間）



写真-2 通水後のマトリクス材の表層部

6. 河床低下対策工の品質確認

(1)河床低下対策工の設計について

a)河床低下対策工の設定

実験結果を踏まえ、Dd材必要層厚を3層とし、その上流を帯工等で固定させる形状を設定した（図-14参照）。



図-14 対策工形状の模式図（Dd材3層敷設）

Dd材の粒径については、図-12より河床低下対策工の必要粒径を算定し、上流区間で80cm、下流区間で60cmとした。なお、無次元掃流力は実験結果を採用し、上流及び標準部は0.04、下流擦り付け部は0.027とした。これは上流及び標準部のDd材が群体として設置しているため移動しにくく、一方で下流擦り付け部のDd材は、下流に支えるものが存在せず、移動しやすくなるためである。また、摩擦速度は河床変動後の流況解析結果（計画高水流量流下時）を用いて必要粒径を算定している。

b)上流擦り付け部の地質状況に応じた河床低下対策工の配置計画

法線是正区間上流部は、固定部（DgH層）に取り付けることを想定している（図-14参照）。このため、DgH層の分布、DgL、Ag層との境界面を把握したうえで、未固結部との取り付けは帯工等による対応が必要となる（図-15参照：実掘削状況に応じて適宜見直し）。

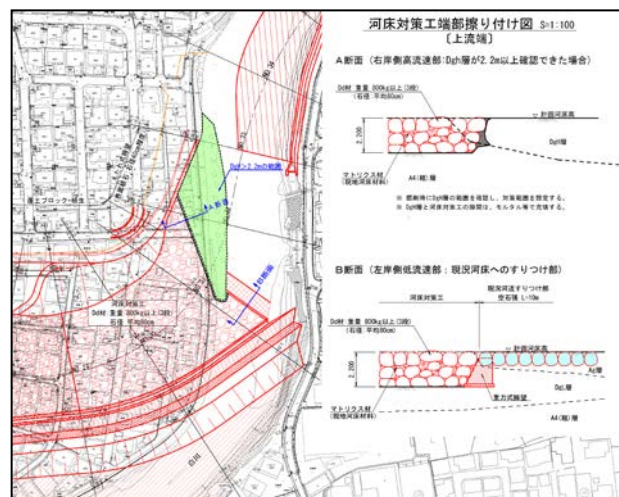


図-15 計画平面図

(2)試験施工の実施

a)試験施工の目的

河床低下対策工の実際の施工にあたっては、模型実験の構造を現地縮尺で構築し、確認する必要がある。特に、Dd材の滑動、マトリクス材の吸出しに対する抵抗を大きくするには、Dd材をかみ合わせよく密に配置し、かつ、マトリクス材を確実に充填することが重要である。

このため、本工事に先立ち、Dd材の粗密、マトリクス材の充填方法を複数ケース設定した試験施工（表-2、写真-3参照）を実施し、それぞれ施工性やマトリクス材の充填度合を確認した。

表-2 試験施工ケース

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
Dd材 密度	粗 (△)	密 (○)	粗 (△)	密 (○)
施工 手順	1層づつ敷設 (マトリクス充填：○) (施工性：△)		2・3層目は同時敷設 (マトリクス充填：○) (施工性：○)	
評価	—	—	—	採用



写真-3 試験施工写真

b) 試験施工での確認

Dd材の配置密度によるマトリクス材の充填度合については、各ケースで有意な差は無く、全てのケースで密に充填されていることを確認した。また、施工手順として、1層づつDd材、マトリクス材を構築する方法（ケース1、2）、2・3層目は一括施工する方法（ケース3、4）を比較した結果、マトリクス材の充填度合に有意な差はなかった。ただし、ケース1、2は、表層Dd材の敷設天端高の調整が難しく、施工に時間を要した。以上より、所定の機能を確保可能で、施工性に優れているケース4による施工方法を採用し、現地での本工事を行った。

c) 河床低下対策工の品質確認

本工事においては、マトリクス材の品質確認のため、施工後の材料を用いた粒度試験を実施した（図-16参照）。現地における水締め後のマトリクス材の粒度分布は、細粒分が濁水とともに流出し粗粒化したため、水路実験におけるアーミング後の粒度に近い性状を示している。したがって、実施工で敷設されたマトリクス材は、実験より掃流されにくい材料（実験諸元より安全側の材料構成）となっていることを確認した。

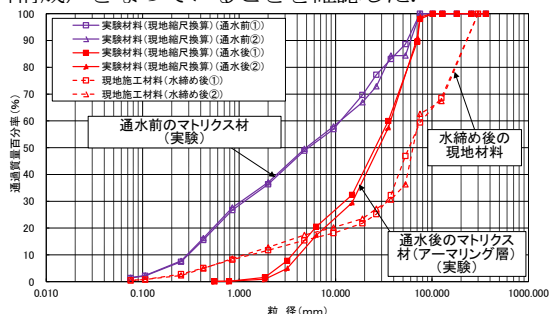


図-16 マトリクス材の粒度分布
（水路実験、現地施工の比較）

7. まとめと課題

(1) 所見及び成果

本稿で得られた所見及び成果を以下に示す。

- ・洗掘・吸出し防止対策として、現地発生材の玉石を複数層配置し、玉石間に河床掘削土砂をフィルター材として活用した新工法を提案した。
- ・各種地質調査により、脆弱な地層（A4層、DgL層）・強固な地層（DgH層）の分布等を把握し、これを考慮した河道形状、対策工の最適配置を計画した。
- ・準三次元流況解析により、高速流が極力発生しない河道法線と断面形状を設定した。また、一般座標系準三次元流況+平面二次元河床変動計算により、設定した河道法線・形状の長期予測を行い、河床の安定性を確認した。さらに、河床変動後の河道で流況解析を実施し、河床低下対策工の設計条件（摩擦速度）を設定した。
- ・水理模型実験により、現地発生材料を用いた検証実験を実施し、河床材料による吸出し防止効果（フィルター効果）を確認した。また、河床低下対策工に必要な層厚は3層であることを確認した。さらに、流況解析により設定した設計条件（摩擦速度）と、実験から得られた無次元掃流力から、河床低下対策工の必要粒径を設定した。
- ・現地試験施工により、実施工で敷設されたマトリクス材は、実験諸元より安全側の材料構成となっていることを確認した。

(2) 今後の課題と展望

現在は、河道を切り替えていない施工途中の段階であり、上下流の現況河道とのすりつけ方法、実際の出水後のモニタリング方法等の課題もあるため、検討を継続している。これらの課題を解決し、本工法の妥当性・適用性等を検証することで、今後より本工法が一般化され、他河川で適用されることが期待される。



写真-4 現地施工の様子

参考文献

- 1) 前野詩朗，藤田修司：逆フィルターを用いた洗掘防止工に関する研究，土木学会河川技術論文集，第9巻，2003年6月
(2016. 4. 4受付)