

令和元年洪水被災分析と土丹が露出する 河道条件下における河川横断工作物の保全対策

RESPONSE OF RIVER CROSSING STRUCTURES AGAINST SCOURING OF
EXPOSED SHALES BED DURING THE 2019 OCTOBER FLOOD

大浪裕之¹・下條康之²・後藤勝洋³・福岡捷二⁴

Hiroyuki OONAMI, Yasuyuki SHIMOJO, Katsuhiko GOTO and Shoji FUKUOKA

¹非会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所調査課専門官
(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

²非会員 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所工務課長
(〒230-0051 神奈川県横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)
(前) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所調査課長

³正会員 工修 中央大学研究開発機構専任研究員 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー会員 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)

In the middle reach of the Tama River, measures against erosion work such as groundsills have been taken in order to create a river that is in harmony with flood control and the environment. Although the 2019 flood caused damage of groundsills and riverbed, measures against scouring conducted so far have been effective in spite of the severe flood.

We have thought that exposed shales are easily scoured by floods and cannot be trustable for the foundation of hydraulic structures, but it is found that some shales are good for the ground foundation. The groundsill equipped with a notch portion makes the movement of fish possible notches installed near the end of groundsills caused the erosion around end structure. The location of notch portion was transferred near the center so as not to cause improper flow around the end of groundsills.

Key Words : *Tama River, river crossing structure, scouring measures ,shale*

1. 研究の背景と目的

多摩川中流部は、河床勾配が約1/220～1/720と比較的急勾配になっており、洪水時には土砂移動が激しい河道特性を有している。かつての中流部の河道は、幅広く浅い流れの礫河原河川を呈していたが、高度経済成長による建設事業の増大により砂利採取が盛んに行われ、河床低下が進行し、橋梁基礎の露出や用水取水への支障、護岸の不安定化といった治水上、利水上の問題が生じた。このため、昭和39年には砂利採取が全面的に禁止された。その後も河床は徐々に低下し、昭和50年代には、粘土及びシルトが固結した新第三紀層（以下、「土丹」という。）の露出範囲が拡大した。土丹の露出範囲の拡大や河川横断工作物での土砂移動の不均衡により、濬筋の固定化、狭い流路への洪水流の集中に伴う局所洗掘や河床低下、河道の二極化が進行した。これらの河道変化によ

る河川管理施設や河川横断工作物の管理の難しさが、多摩川の長年にわたる河道管理問題をもたらしてきた。

そのような状況の中で、令和元年10月、計画高水流量に匹敵する出水により、大規模な土丹の洗掘や河川横断施設の袖部の損傷等が生じた。

本研究では、大規模出水により土丹河床の洗掘や河川横断施設の損傷に至った過程を技術的に明らかにするとともに、保全効果を発揮した対策を検証する。また、土丹の強度を調べることにより、土丹が露出する河道条件下における施設の基盤としての土丹の信頼性を明らかにし、具体的な対策法を示すことを目的としている。

2. 多摩大橋周辺地区の河道管理対策

多摩大橋周辺地区では、河道の二極化の進行が著しく、このまま放置した場合、堤防や河川横断工作物の安全性

が低下し続け、河川生態環境の多様性も減少し続けることが懸念された。このため、治水・環境の共通課題である土砂移動の不均衡に伴う滞筋の固定化と局所洗掘を解消し、治水と環境の調和した川づくりを目指すため、平成25～28年度に河道管理対策を行ってきた。

対策内容は、図-1に示すように、縦断方向に帯工を複数設置し、河床低下区間に石礫等の埋戻し実施により、河道の二極化を防ぐ対策を行った。

帯工は概ね200m間隔で設置し、昭和40年代の最深河床高程度を維持することを目指した。帯工の幅が100m程度であることから、帯工天端高を一様にした場合、河川流量が少ない状態では水深が数cm程度となり、魚類の移動に支障を来すおそれがあることから、帯工部に切欠き状の水通しを設置した。

3. 洪水による帯工付近の河床洗掘等の損傷状況

(1) 令和元年洪水による多摩川の出水概要

令和元年10月12日から13日にかけて、東日本の広範囲で記録的な大雨となり、図-2の等雨量線に示すように、多摩川流域でも、各雨量観測所で観測史上最高の2日雨量を観測した。この降雨に伴い、日野橋地点では、計画高水流量4,700m³/sに匹敵する約4,600m³/sの流量を観測する出水となった。

この洪水により、多摩川直轄管理区間内では堤防区間内の約半分において計画高水位を超過したが、堤防を越水することなく流下した。一方で、樋管等からの外水の逆流等による内水被害が各地で発生した。さらに、高水敷の大部分が冠水し、礫河原の形成、瀬・淵の平坦化など、大量の土砂移動に伴う河床変動が、河道内の各所で現れた。加えて、日野橋等河川横断工作物周辺において、局所洗掘が発生し著しい被害をもたらした。

(2) 洪水後の河道内変化の把握

洪水後の河道内変化は、水域の3次元地形を取得できるALB (Airborne Laser Bathymetry) 測量により、洪水前の平成28年9月と、洪水後の令和2年3月の河床地形データの比較により、図-3に示すように、全体的に洗掘傾向となっていたが、帯工E下流では堆積傾向であった。

a) 水通しの位置による河道への影響

写真-1は、帯工A1～帯工B1において洪水前後を比較した斜め写真を、図-4は帯工A1および帯工B1の洪水前後の河床変化を示している。

帯工B1右岸袖部では、洪水前と比較して河床が最大約3mの洗掘を受け、土丹が露出した。また、上流の帯工A1右岸側においても堆積土砂が洗掘されて、右岸寄りにあった水通しに洪水流が集中し、帯工B1右岸袖部に洪水流が流下して洗掘に至った。水通しの位置が河岸寄りにあったことで、袖部の損傷に影響を与えた。

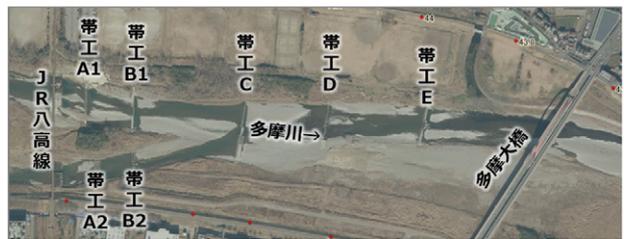


図-1 多摩大橋周辺地区の帯工設置位置

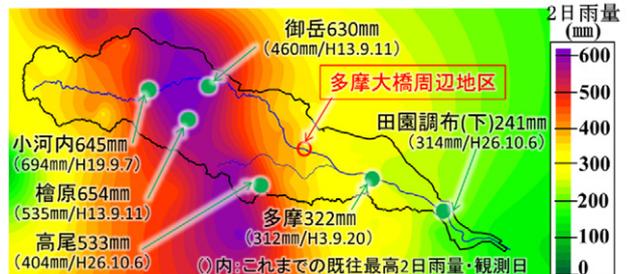


図-2 令和元年10月12日～10月13日の等雨量線

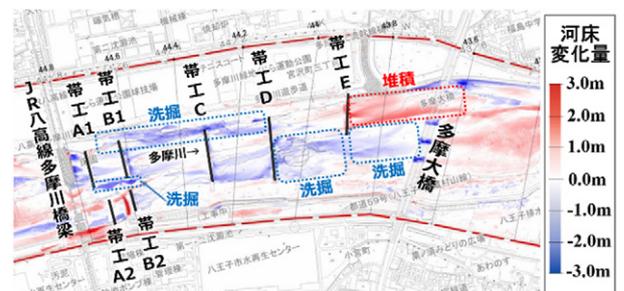


図-3 洪水前後の河床地形変化 (ALB測量)



写真-1 帯工A1～帯工B1における洪水前後の斜め写真

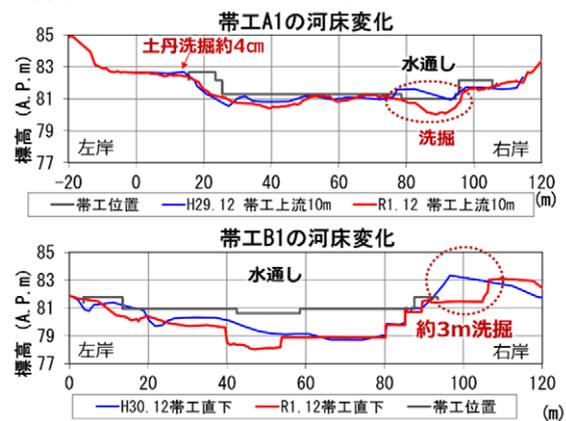


図-4 帯工A1およびB1の洪水前後の河床変化

図-5は洪水前後の河床高コンターを比較したものである。帯工D水通しの下流では、河床洗掘により大きな落差が形成され、帯工ブロック群の流出が発生した。洪水前には、帯工Cからの流れが帯工Dの水通しに分散する河道形状であったが、洪水により、帯工C左岸袖部からの流れも相まって水通しに集中するように砂州が形成された。水通しに集中するように河道地形が形成されたことで、河床洗掘や帯工等の損傷に影響を与えていた。

b) これまでとは異なる土丹の傾向

写真-2は、帯工C～帯工Dにおいて洪水前後を比較した斜め写真を示している。帯工C左岸袖部や帯工D水通し付近では、堆積土砂が洗掘されて土丹が露出し、ブロック群の流出などの損傷が生じた。特に、帯工D下流では、写真-2に示すように、洪水により露出した土丹が溝状に洗掘された。

一方で、帯工A1左岸袖部では、写真-1に示すように、洪水前から土丹が露出し、洪水流に対して洗掘を受けやすい弱点部として、改良型袋詰玉石工により袖部の土丹を防護していたことにより、土丹は、図-4に示したように、洗掘量が約4cmにとどまっていた。

土丹は露出すると洪水で洗掘されやすく、基盤として期待できないとして対策を行ってきたが、今次洪水での土丹の露出によって、洪水で洗掘されにくい土丹があることが分かった。

4. 土丹の耐力調査

令和元年10月洪水では、河床に露出した土丹で、洗掘された土丹と洗掘されなかった土丹が見られた。このため、多摩川では、露出している土丹が帯工等の河川横断工作物の洗掘対策の基盤として期待できるかどうか、土丹の強度を定量的に評価し、保全対策に反映させることが必要となった。

(1) 土丹強度の定量化方法

土丹の強度の定量化に当たっては、北海道開発局・寒地土木研究所により、岩盤強度と圧裂引張強度との相関性が高い原位置試験である針貫入試験から式(1)に表される換算式により土丹の圧裂引張強度を求めたり。

$$\sigma_T = 0.0335 \times N_p^{0.9282} \quad (1)$$

ここに、 σ_T :換算圧裂引張強度 (MPa) , N_p : 針貫入勾配 (N/mm) である。

岩盤の侵食されやすさは、 $\sigma_T=0.25\text{MPa}$ 未満が弱く、 $\sigma_T=0.25\text{MPa}$ 以上が強いとしている。

調査は、図-6に示すように、土丹が露出している15箇所の表層部において面的に調査を行った。また、露出している土丹に洗掘が生じた場合に、洗掘対策の基盤とし

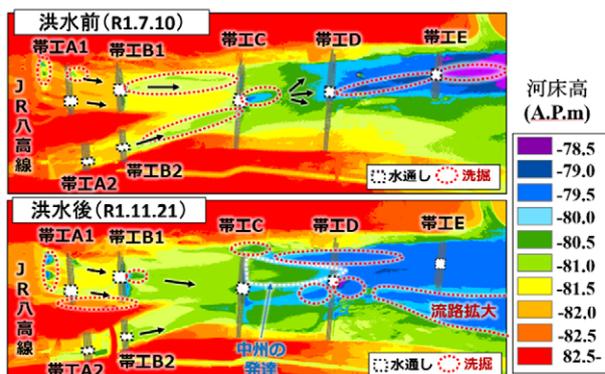


図-5 洪水前後の河床高コンター



写真-2 帯工C～帯工Dにおける洪水前後の斜め写真

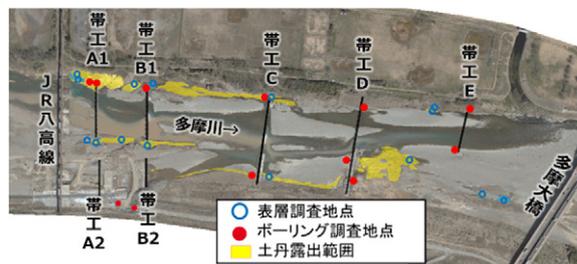


図-6 土丹強度の調査位置

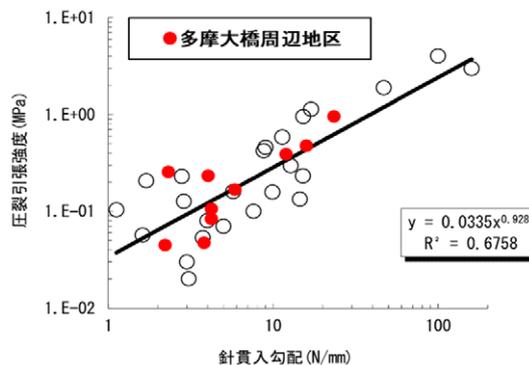


図-7 圧裂引張強度と針貫入勾配との関係

て強度が期待できるかどうかを把握するため、帯工袖部の12地点で約10mのボーリング調査を行い、地中にある土丹の強度についても鉛直方向に1m毎に1～2回及び岩相変化毎に1回の調査を行った。

本調査に用いた北海道開発局・寒地土木研究所の評価

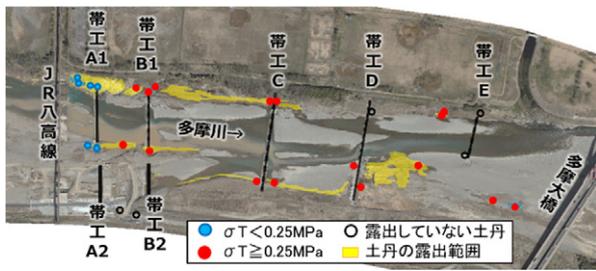


図-8 表層部の土丹強度調査結果

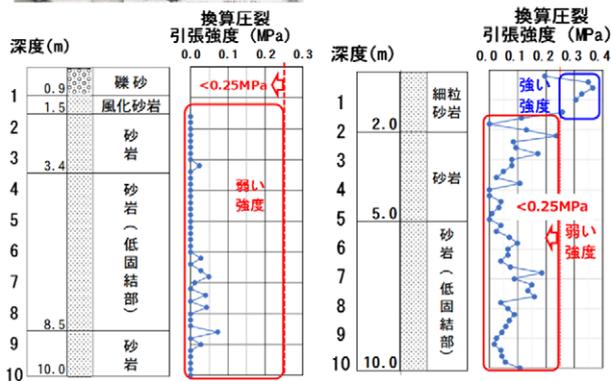
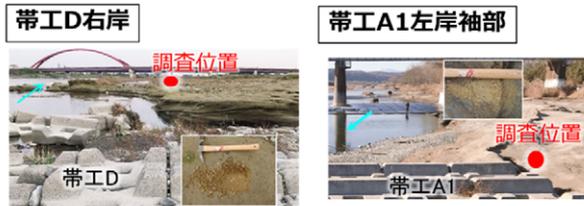


図-9 地中部の土丹強度調査結果（帯工D右岸，帯工A1左岸）

法が、多摩大橋周辺地区の土丹強度の評価に適用できるかを確認するため、北海道開発局・寒地土木研究所による針貫入勾配と圧裂引張強度との換算式グラフ¹⁾に、多摩大橋周辺地区の調査結果をプロットした。

検討には、表層部における針貫入試験結果の針貫入勾配 N_p と、針貫入試験と同一地点で採取したコアサンプリングを用いて室内岩石試験(JGS2551-2009)により把握した圧裂引張強度 σ_T との関係を用いた結果、図-7に示すように、北海道開発局・寒地土木研究所の調査結果と同様な結果となることが確認された。式(1)を用いた土丹強度の評価法を多摩大橋周辺地区でも適用することとした。

(2) 土丹強度の定量化結果

図-8は、露出している土丹の表層部における強度測定結果を示す。

今次洪水により溝状に洗掘された帯工D下流側の土丹は、 $\sigma_T=0.007\text{MPa}$ と 0.25MPa を大幅に下回る弱い強度であり、洗掘されやすい土丹であった。さらに、ボーリング調査による地中の土丹は、図-9に示すように、今回調査した深さ約10mまで $\sigma_T=0.25\text{MPa}$ 未満の弱い強度の土丹が堆積しており、洗掘が進行した場合には、帯工の安全性にも影響する。

一方で、帯工A1左岸では、図-9に示すように、 $\sigma_T=0.25\text{MPa}$ 以上の強い強度の土丹が約1.5m堆積しており、

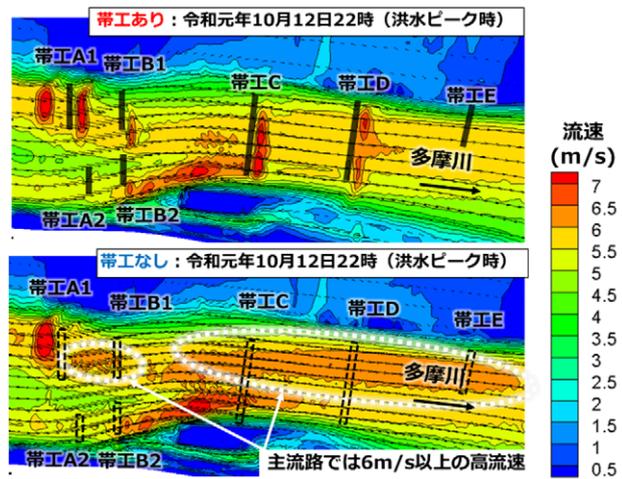


図-10 帯工有無による水深平均流速流向分布

洪水により洗掘されにくい土丹であることが裏付けられた。しかし、強い土丹の下には、 $\sigma_T=0.25\text{MPa}$ 未満の弱い強度の土丹が深さ約10mまで厚く堆積していた。弱い土丹が露出した場合には洗掘されやすく、維持管理として定期的なモニタリングを行うことが必要であるといえる。

5. 準三次元洪水流・河床変動解析による分析

本章では、洪水後の調査結果をもとに、これまでの多摩大橋周辺地区における対策の効果を調べ、帯工付近の損傷に至った洗掘過程を明らかにするため、準三次元洪水流・河床変動解析を行った。

(1) 準三次元洪水流・河床変動解析法

本検討では、帯工等の河川横断工作物が複数設置された多摩大橋周辺地区全体の流れと土砂移動を精度よく解析するため、洪水流解析には、竹村・福岡の水深積分モデルの枠組みで三次元の流れを表現できる非静水圧準三次元解析法であるQ3D-FEBS法²⁾を用いた。この解析法では、流速鉛直分布に三次式を仮定し、水深平均流速に加え、水面流速・底面流速を解析することで、三次元流を近似的に解いている。また、河床変動については、洪水時における砂礫粒子の非平衡移動を考慮している長田・福岡の河床変動解析法³⁾を用いた。

解析対象区間は、多摩大橋周辺地区を含む日野橋～拝島橋と設定した。洪水前のLP測量データ（平成30年1月計測、1m格子DEMデータ）と横断測量データ（平成29年3月計測）を解析初期地形とし、当該区間に設置されている14箇所の水位データを境界条件並びに水面形の再現性を確認した。また、解析初期値として、平成30年度の河床材料調査結果より、粒度分布の平均値（ $d_{60}=31\text{mm}$ 、 $d_{80}=54\text{mm}$ ）を解析区間全川及び表層～下層に与えるものとした。

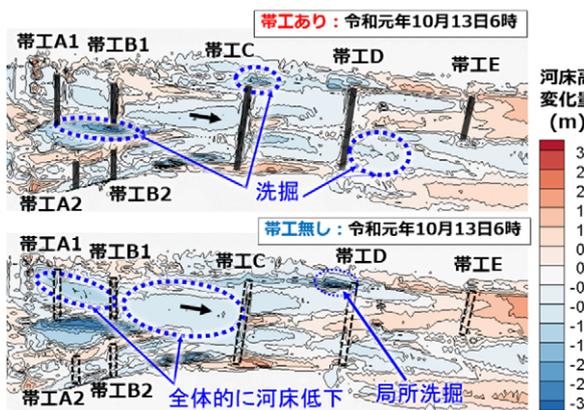


図-11 帯工有無による河床高変化量

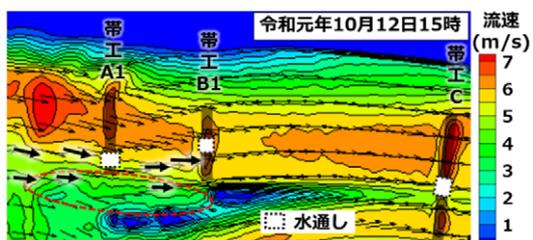


図-12 帯工A1～B1の表面流向流速分布

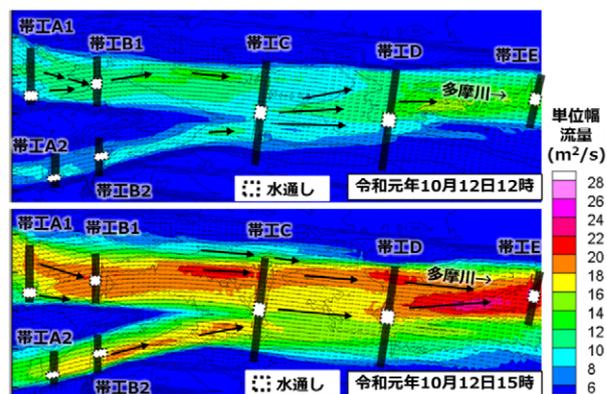


図-13 帯工A1～B1の単位幅流量流向分布

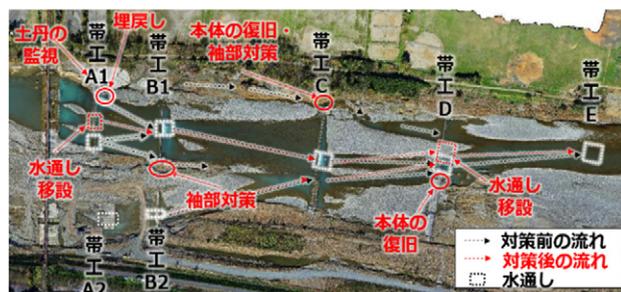


図-14 多摩大橋周辺地区の保全対策内容

(2) これまでの対策効果の検証

本節では、多摩大橋周辺地区において実施してきた帯工等による対策の効果を検証するため、令和元年10月洪水を外力条件とし、帯工の有無の場合について、準三次元洪水流・河床変動解析を行い、比較を行った。帯工無しと帯工を設置せず帯工有りと同じ河床高さに埋戻しのみを行った河道条件とした。

図-10は、帯工の有無による洪水ピーク時の準三次元洪水流解析による水深平均流速流向分布を示す。帯工無しと比較して、帯工有りでは、帯工A1～帯工B1の下流側と帯工B1～帯工Dの左岸側に生じていた6m/s以上の高速流及び河床低下が緩和されている。

図-11は、帯工有りとなしとの河道について河床変動解析による洪水後の河床高変化量を示す。帯工無しで生じた帯工D左岸側、帯工A1や帯工B1付近の河床低下が帯工によって軽減する効果を発揮していることがわかった。

一方で、洪水で損傷を受けた各帯工では、河川横断工作物である帯工袖部付近で洗掘が大きくなっていった。このため、袖部の侵食対策を工夫し効果的な工法を実行する必要がある。

(3) 水通しへの集中による帯工周辺の洗掘過程の検証

図-12は、洪水流が帯工B1右岸河床高に到達する10月12日15時頃の表面流向流速分布を示す。表面流の流向は、帯工A1右岸寄りの水通しに流れが集中した後、河岸沿いに帯工B1右岸に向かう流れが確認できる。帯工B1右岸袖部の上流側に4m/s前後の流速域が確認でき、これが袖部の洗掘を進行させる要因になっていた。

図-13は、10月12日12時（洪水初期）、15時（水位急

上昇期）における単位幅流量流向分布を示す。洪水初期の12時時点では、帯工C水通しから帯工Dに対し分散して流下していた。水位が急上昇した15時時点では、帯工C左岸袖部からの流れが帯工Dの左岸側に集中した流れと、帯工C水通しから帯工Dの水通しに集中した流れが確認できる。さらに帯工D水通しの下流側にも流量が大きい範囲が確認できることから、30cm低い水通しに流れが集中したことで、ブロック群の流出や洗掘に至った。

6. 土丹が露出する河道条件下における保全対策

本章では、これまでの調査・解析から明らかとなった結果を踏まえ、土丹が露出する河道条件下における保全対策の検討を行った。

(1) 保全対策の考え方

令和元年10月洪水で生じた帯工袖部における洗掘や水通し付近のブロック群の流出は、洪水流が帯工の水通しに集中するような河道条件が要因であった。水通しの位置は、比較的低い洪水水位に洪水流が水通しに集中することで、帯工本体や弱点部となる帯工袖部に影響する。このため、河岸寄りに位置していた帯工A1および帯工Dの水通しは、河道中央に移設することとした。

帯工袖部において、強度の弱い土丹が露出している場合には、洪水により洗掘が生じ、帯工本体にも影響を与えることになる。このため、調査の結果、強度の弱い土丹が露出している帯工B1右岸袖部、帯工C左岸袖部につ

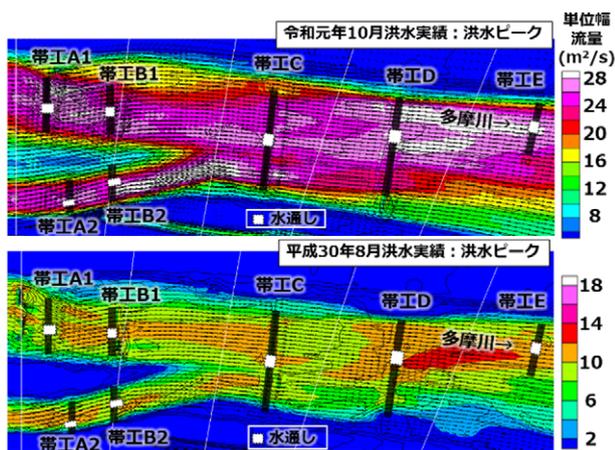


図-15 洪水ピーク時の単位幅流量流向分布

いては、令和元年10月洪水に対して帯工下流の河岸侵食保護工、帯工の袖部保護工として十分に機能を果たした改良型袋詰玉石工⁹⁾で防護することとした。なお、強度が強い露出している土丹箇所については、洪水後のモニタリングを行い、河床状況を監視する。

多摩大橋周辺地区の保全対策としては、図-14に示すように対策を行うこととした。

(2) 保全対策による効果・影響確認

主要な保全対策は、帯工袖部の洗掘抑制が目的であるが、新たな洗掘箇所を生じる可能性がある。そこで、準三次元洪水流・河床変動解析により、水通し位置の移動の影響を調べ、効果を確認した。計算条件は、令和元年10月洪水後の河床を初期河床として、令和元年10月洪水ハイドロに加えて、平均年最大流量相当の平成30年8月洪水ハイドロの2ケースで解析を行った。

図-15は洪水ピーク時の単位幅流量流向分布を、図-16は洪水後の河床高変化量を示す。帯工袖部に集中していた洪水流は、水通しの移設や袖部の対策後には、河道中央に是正され、概ね分散して流下する。特に、頻度の高い平成30年8月洪水では、帯工袖部を迂回することなくスムーズに流下し、洗掘が緩和された。しかし、令和元年10月洪水では、帯工B1左岸袖部に洪水流が集中し、洗掘傾向が現れる結果となった。

7. まとめ

本研究では、令和元年10月洪水により河床洗掘や施設の損傷が生じた多摩大橋周辺地区において、洪水後の調査や準三次元洪水流・河床変動解析により河床洗掘要因分析を行い、保全対策の検討を行った。

土丹は、露出すると洪水により洗掘されやすく、基盤として期待できないとして対策が行われてきた。しかし、令和元年10月洪水により土丹の一部には、洗掘されにくい土丹があることが判明した。この洗掘されにく

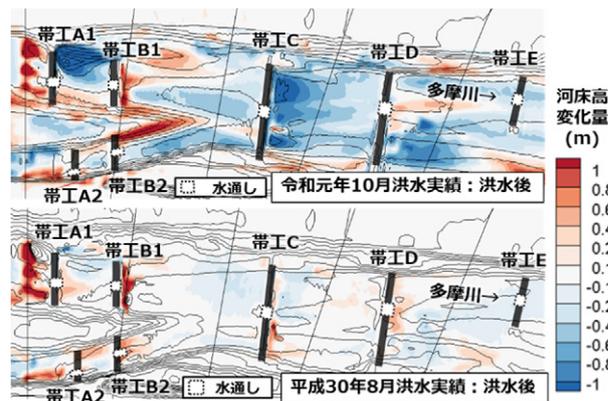


図-16 洪水後の河床高変化量

かった土丹の強度を調べた結果、構造物の基盤土として期待できる強度を有していることがわかった。

平常時における魚の移動に支障を来すことがないように設置した水通しは、帯工の横断位置と洪水時の主流線との関係によっては、水通しに洪水流が集中することによって、水通し付近の帯工袖部や水通しの下流側においてブロックの損傷や河床洗掘が発生する可能性があることが明らかとなった。

このため、水通しの位置は、袖部や水通しに洪水流が集中しないように移設を行うことで、袖部や水通しへの集中が緩和されることを解析により確認した。

今後は、多摩大橋下流側においても帯工等の対策を実施する計画としており、これまでと同様、土丹の露出や河道の二極化、水衝部対策が課題となる。本研究の成果を踏まえ、土丹の耐力を評価した上で、帯工袖部の洗掘や危険な偏流が生じないように改修事業を進める予定である。

参考文献

- 1) 北海道開発局, 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所: 岩盤河床における河床低下危険度評価の手引き(案), 2017.
- 2) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 3) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸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, Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 4) 福岡捷二: 札内川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦・横断形状に関する研究, 一般財団法人北海道河川財団研究所紀要, XXIV, pp.123-164, 2013.
- 5) 佐久間清和, 澁谷慎一, 福岡捷二: 2019年台風19号洪水に対する「改良型袋詰玉石工」の洗掘防止効果, 河川技術論文集, 第26巻, 2020.

(2021. 4. 2受付)