2023/03/17
令和4年度
第17回十勝川千代田実験水路等アドバイザー委員会
第23回十勝川千代田実験水路等実験検討会

資料2

急流河川の湾曲部における堤防侵食実験結果

1.背景・目的
2.令和4年度 千代田実験の結果及び縮尺模型実験の結果
3.まとめ

国土交通省 北海道開発局
寒地土木研究所

1. 背景・目的

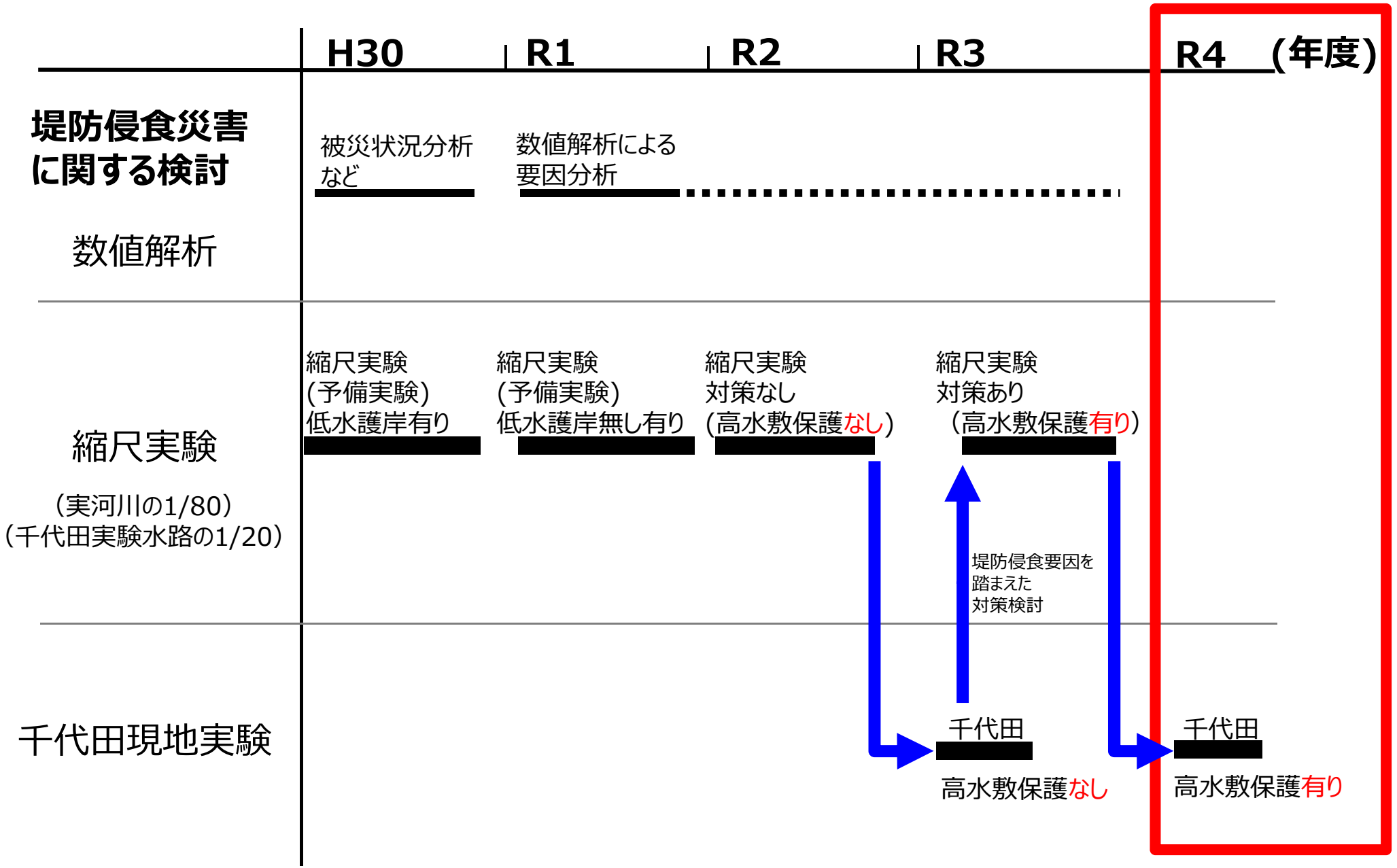
急流の複断面河川湾曲部における堤防侵食防止の確立の必要性

■H28.8洪水では急流河川（複断面）の湾曲部において侵食による堤防災害が多く発生した。

・湾曲部外岸側には低水護岸がすでに設置されている場合がほとんどでも、
　低水護岸の裏側から侵食が高水敷・堤防に及んでいる。
・この堤防侵食、決壊に至るまでの過程が明らかではない。

急流河川の湾曲部における堤防侵食に対するメカニズムの解明と
効果的・効率的な侵食防止・堤防防護方法の確立が必要

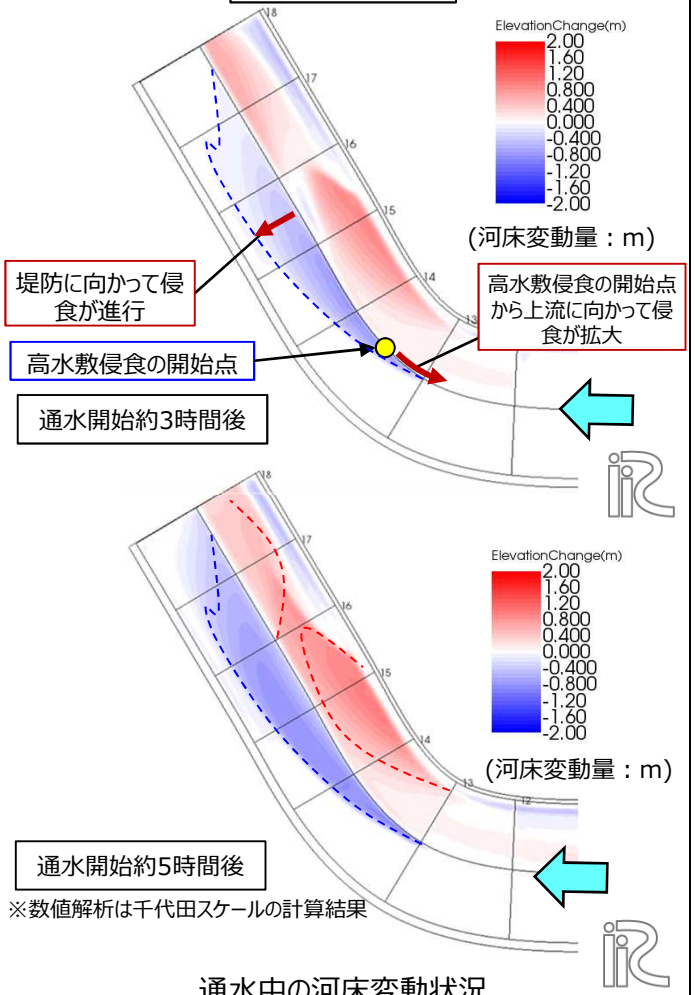
堤防侵食災害に関する検討のスケジュール



堤防侵食に至る過程について 【数値解析・縮尺模型実験・千代田現地実験】

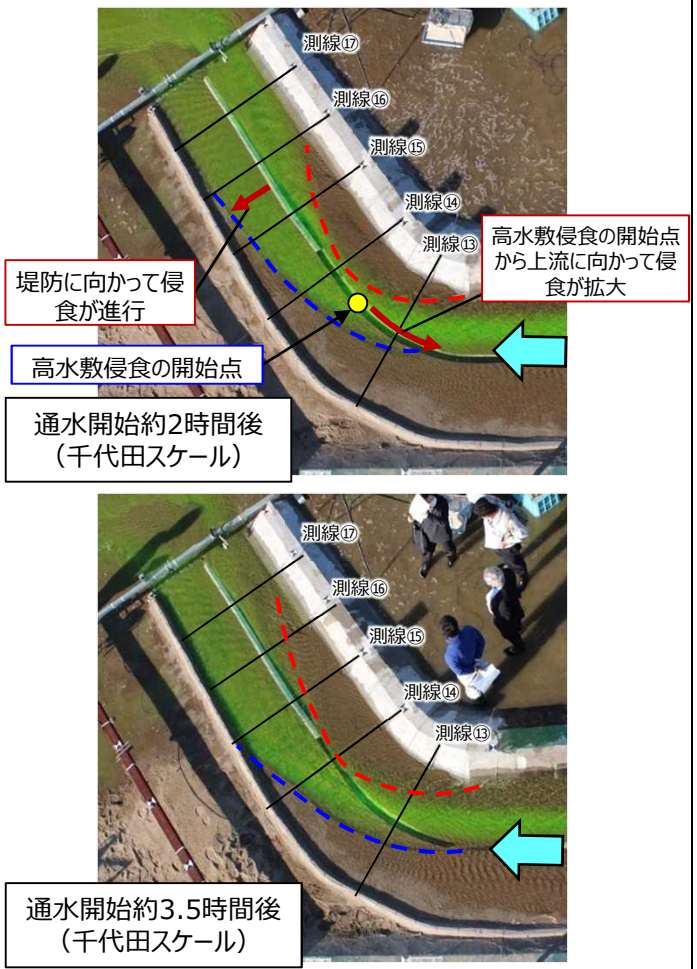
■急流河川の湾曲部外岸において、高水敷上の侵食が堤防に到達することで、低水護岸がある場合でも堤防決壊に至る現象を数値解析や縮尺模型実験、千代田現地実験から確認した。

数値解析



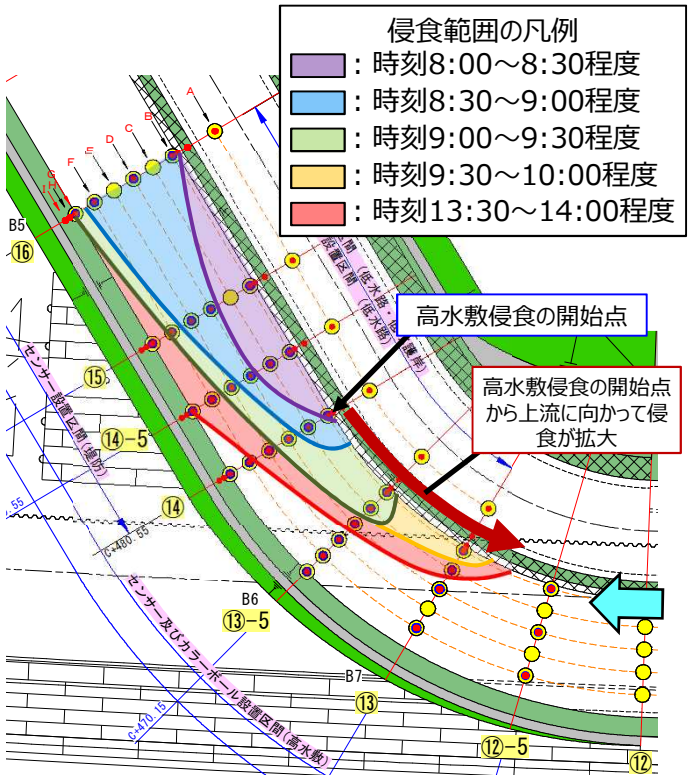
通水中の河床変動状況

縮尺模型実験



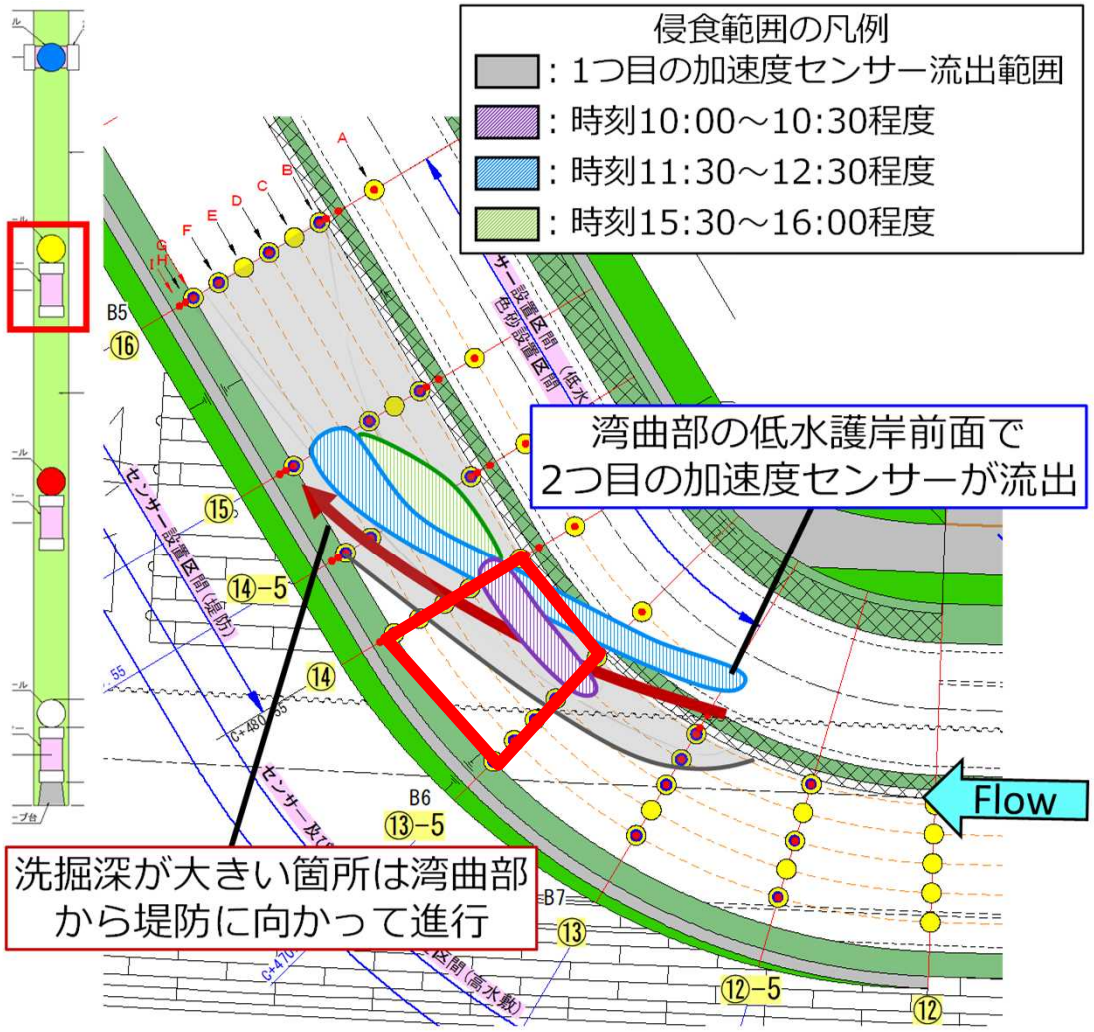
通水中の河床変動状況

千代田現地実験



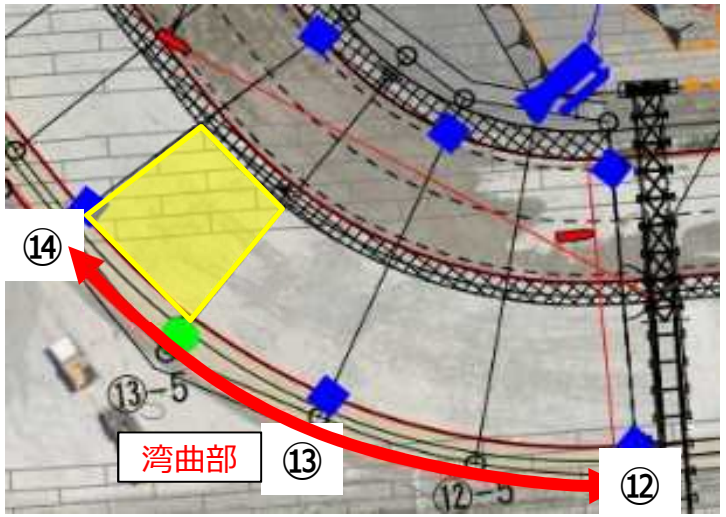
時間別の高水敷侵食範囲

■初期の深掘れが確認された箇所（No.13.5～No.14)を保護し侵食が堤防に拡大しない案を検討した。



※深さ方向2つ目：初期河床面から0.6mの深さ

Case2対策範囲

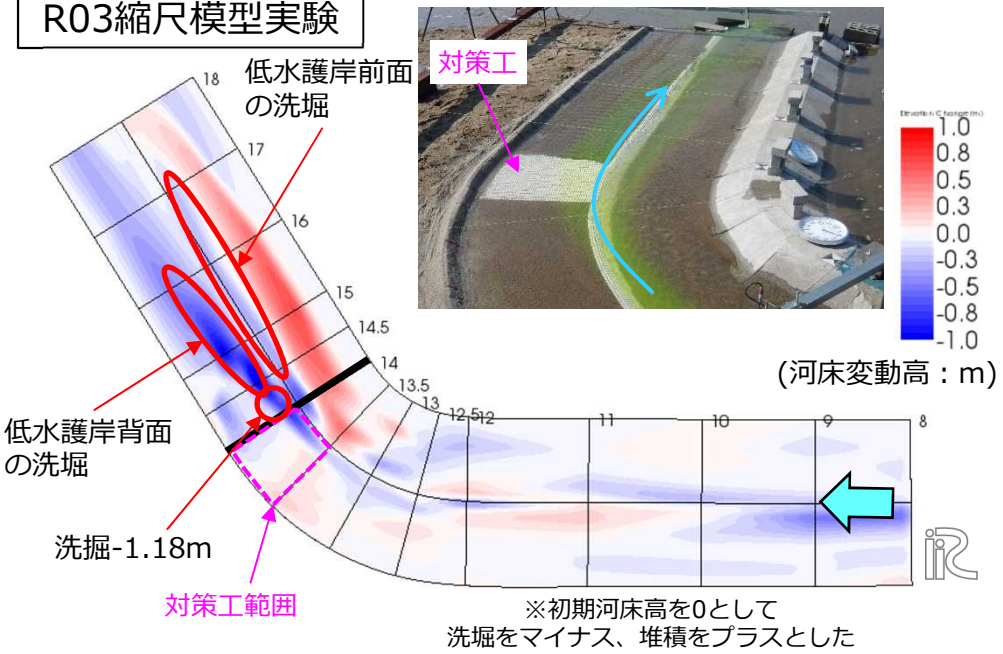


Case1で大きな洗堀が
発生しなかったことから下流端は無対策

対策工の検討

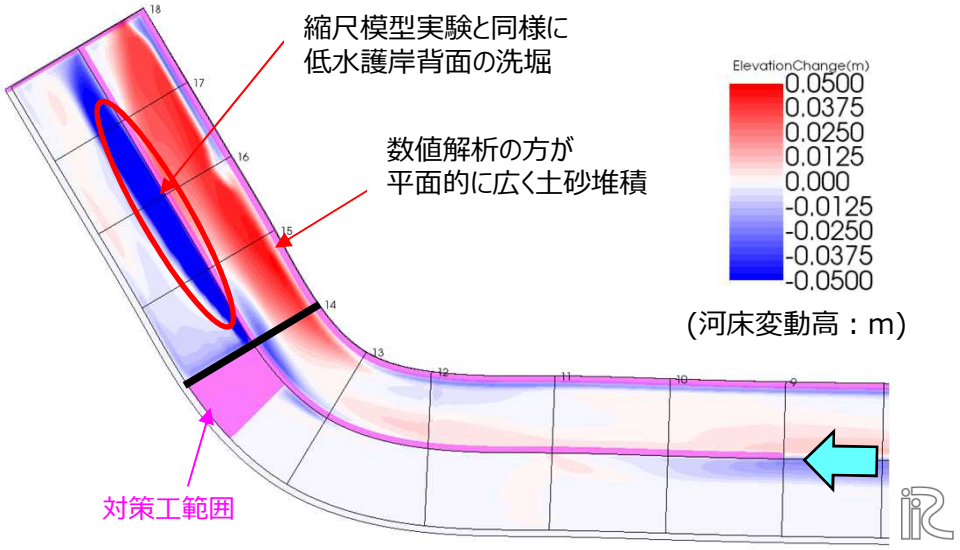
■高水敷侵食が堤防へ拡幅するような現象は見られなかった。
■昨年度に実施した縮尺模型実験や数値解析の結果を比較すると、侵食状況に相違があったことが確認された。
■令和4年度では、実現象との相似の現象が確認できる千代田実験水路で実験を行い、対策工の設置による効果や現象を把握する。

R03縮尺模型実験



河床変動コンター図

R03数値解析



河床変動コンター図

令和4年度では、高水敷保護工を用いた実験を千代田実験水路で実施

観測計画（全体観測項目、観測機器等）

■流量・流速・水面形

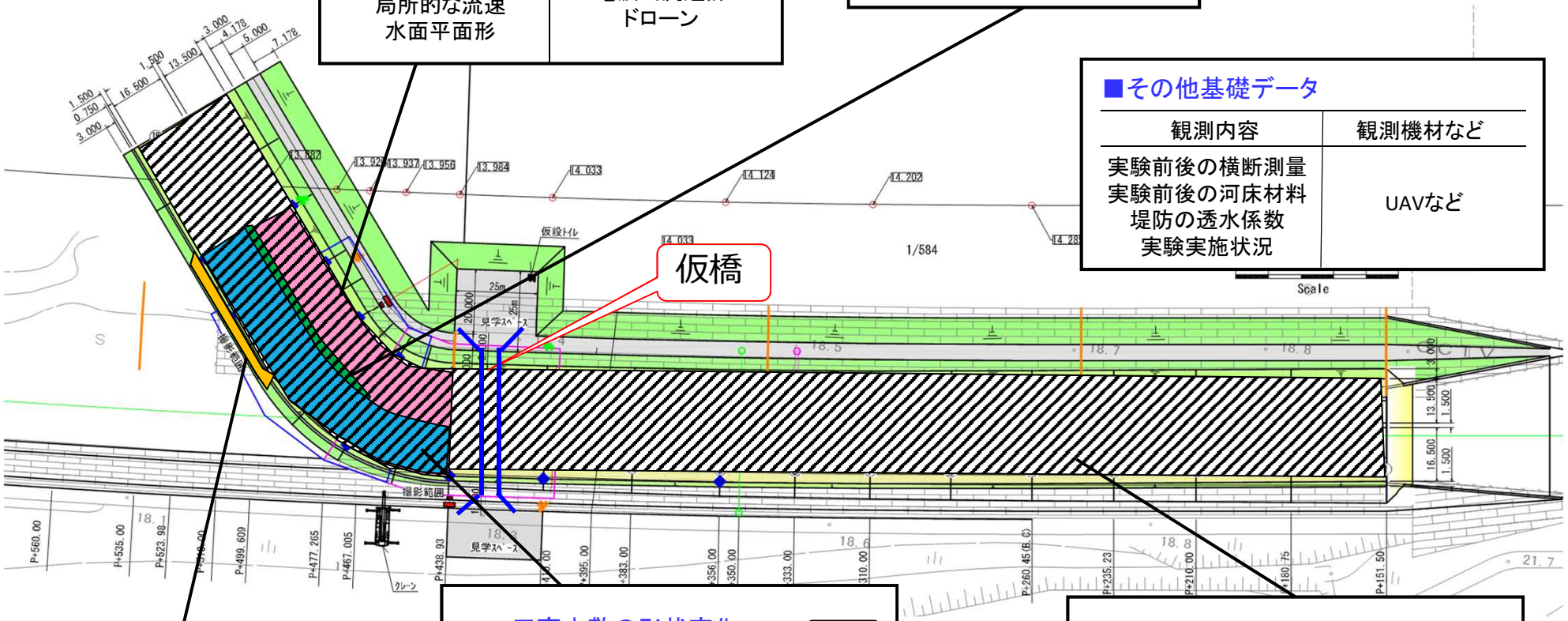
観測内容	観測機材など
流量 表面流速 水面下の流速分布 局所的な流速 水面平面形	ADCP PIV 電波式流速計 ドローン

■低水護岸

観測内容	観測機材など
通水中の挙動	加速度センサー

■その他基礎データ

観測内容	観測機材など
実験前後の横断測量 実験前後の河床材料 堤防の透水係数 実験実施状況	UAVなど



■堤防

観測内容	観測機材など
侵食時間 侵食状況	加速度センサー

■高水敷の形状変化

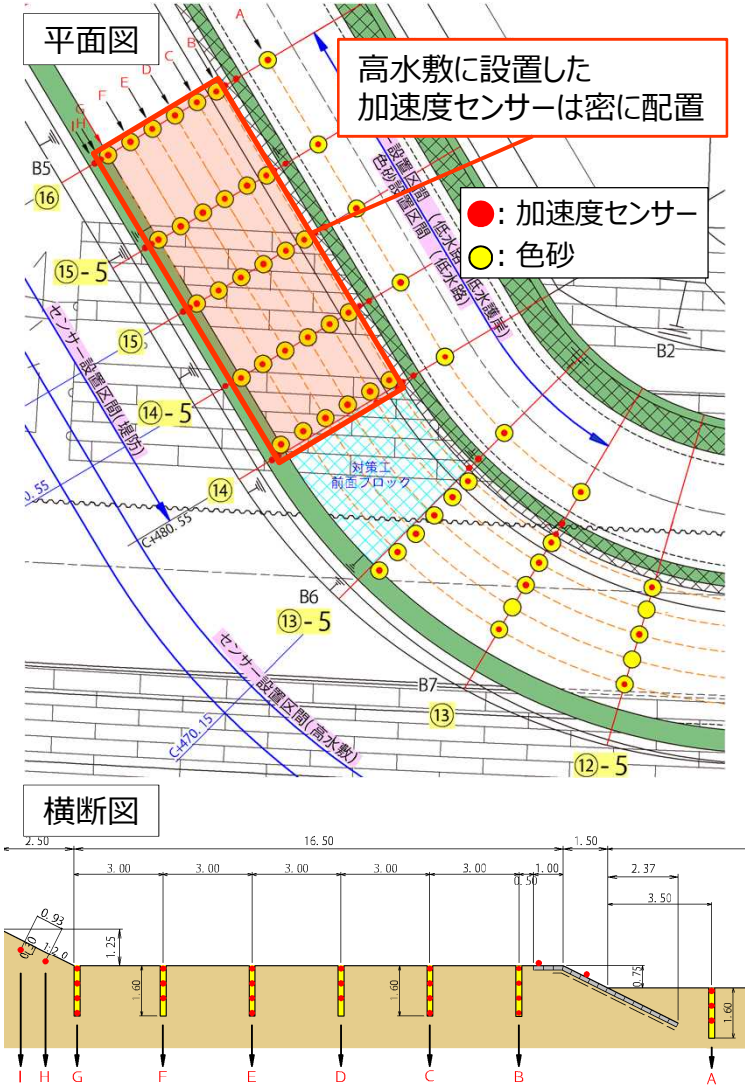
観測内容	観測機材など
高水敷の形状	加速度センサー 色砂

■土砂の移動

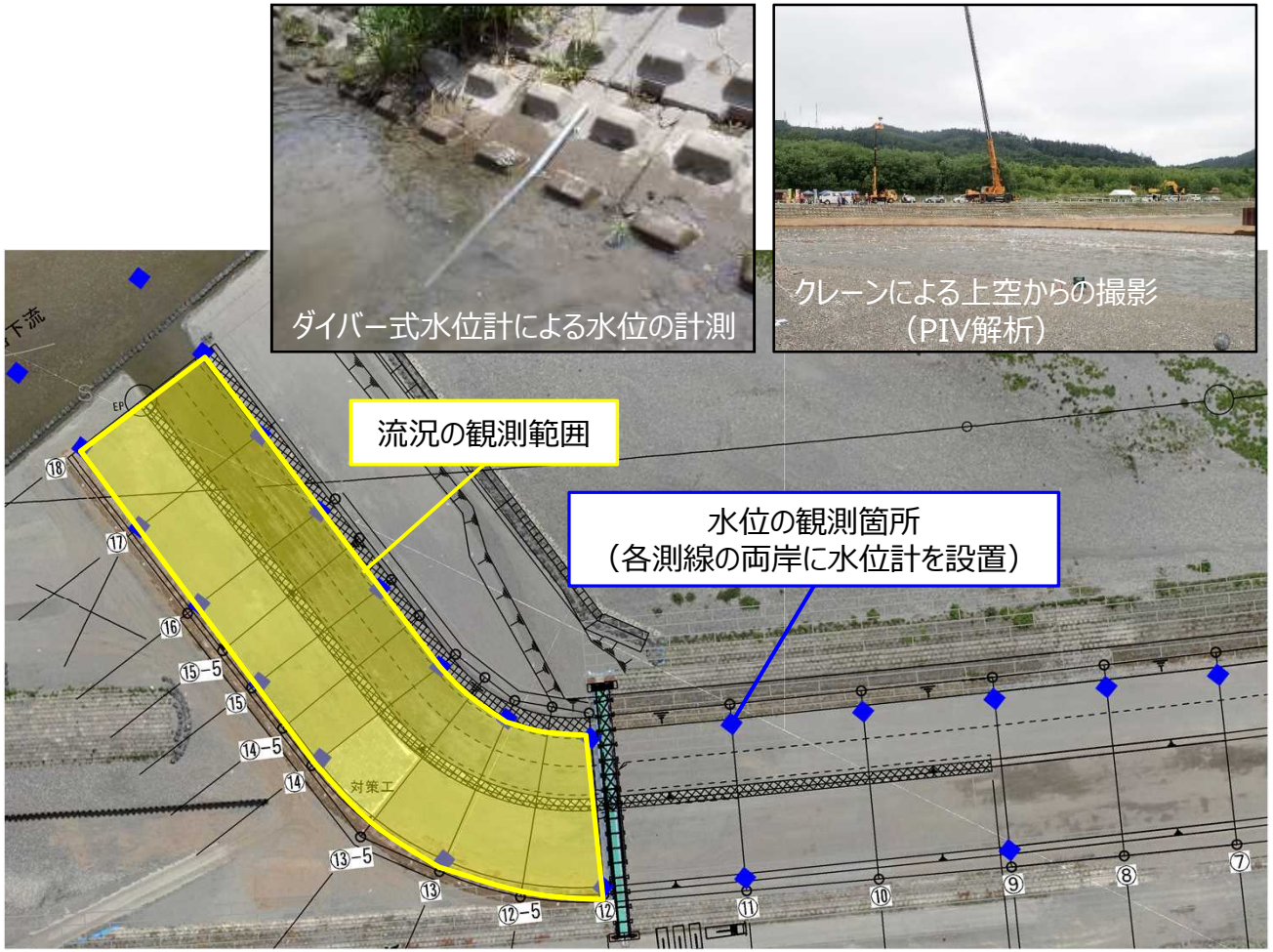
観測内容	観測機材など
通水前後の土砂収支	グリーンレーザー プロファイラ

令和3年度 委員会にて頂いた観測計画に関するご意見

■通水中の水位、流況、河床形状の時系列の変化が把握できるような観測を取り組んで欲しいというご意見を頂いた。
■今年の実験では、高水敷の侵食が予測される箇所に加速度センサーを昨年度よりも密に入れて観測を行った。
■また、ダイバー式水位計を用いた水位の観測やPIV解析による流況の観測も行った。



加速度センサーの配置図



実験水路平面図
（水位・流況の観測）

2. 令和4年度 千代田実験の結果

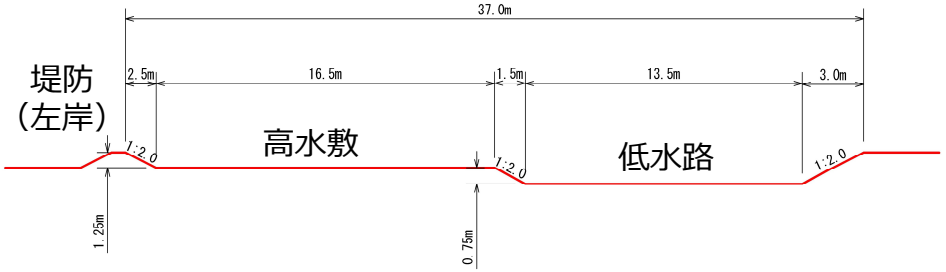
令和4年度 千代田実験水路の概要

■令和4年度千代田現地実験で実施した水路形状は、令和3年度千代田現地実験と同様の水路形状とした。
■通水流量についても令和3年度千代田現地実験と同様の流量で通水した。
■令和4年度千代田現地実験では、高水敷侵食が堤防に向かって進行する現象を防ぐため、湾曲部の高水敷に対策工を設置した。

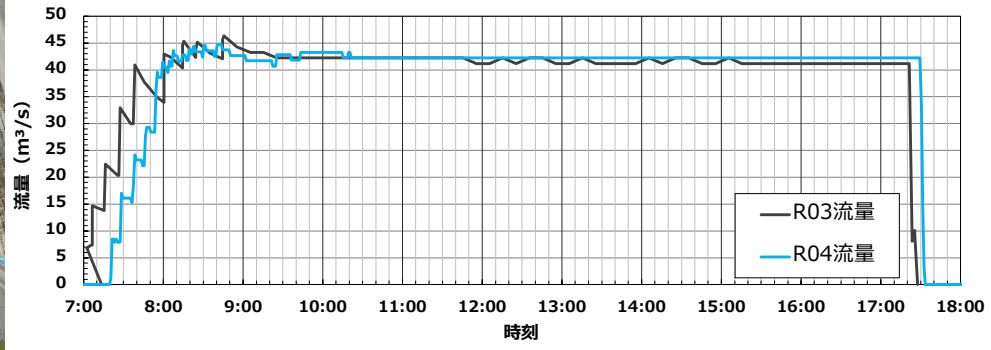
実験水路形状

縮尺	河床勾配	低水路幅 (m)	高水敷幅 (m)	水路延長 (m)	曲率半径 (m)	低水路高 (m)	代表粒径 (d_{60})	砂の水中比重
千代田/実河川:1/4程度	1/200	13.5	16.5	約400	50	0.75	11.14mm	s=1.65

実験水路　標準断面図

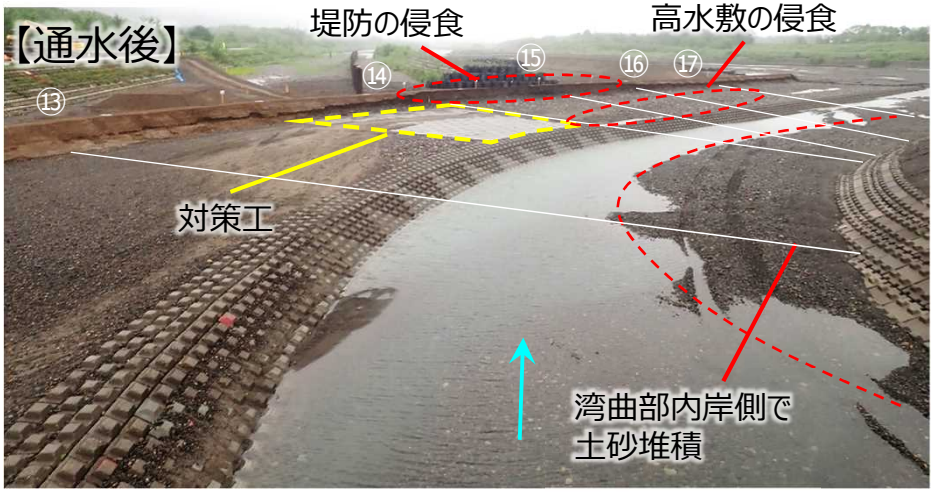


実験流量（ゲート流量）：42m³/s程度



令和4年度 千代田実験結果の概要

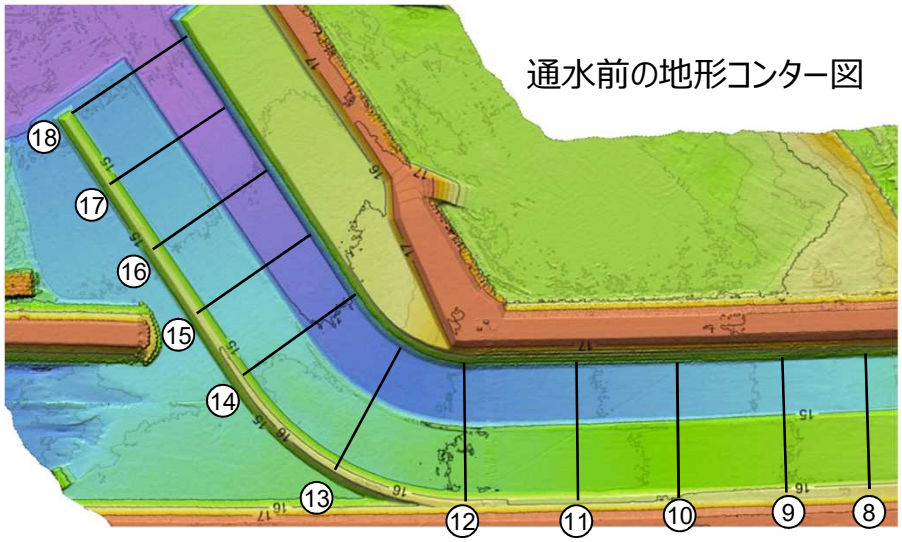
■通水全体を通して、流れは河道形状に沿って流下していた。
■時間経過とともに、対策工の下流端から落ち込むような流れが大きくなり、対策工下流端周辺の洗堀が進行した。
■通水後の高水敷の侵食範囲は、対策工下流端の低水護岸背面で拡大していた。また、低水路の湾曲部内岸側では土砂が堆積し、砂州が形成された。
■堤防侵食を防ぐために湾曲部に対策工を設置したものの、堤防天端の侵食が確認された。

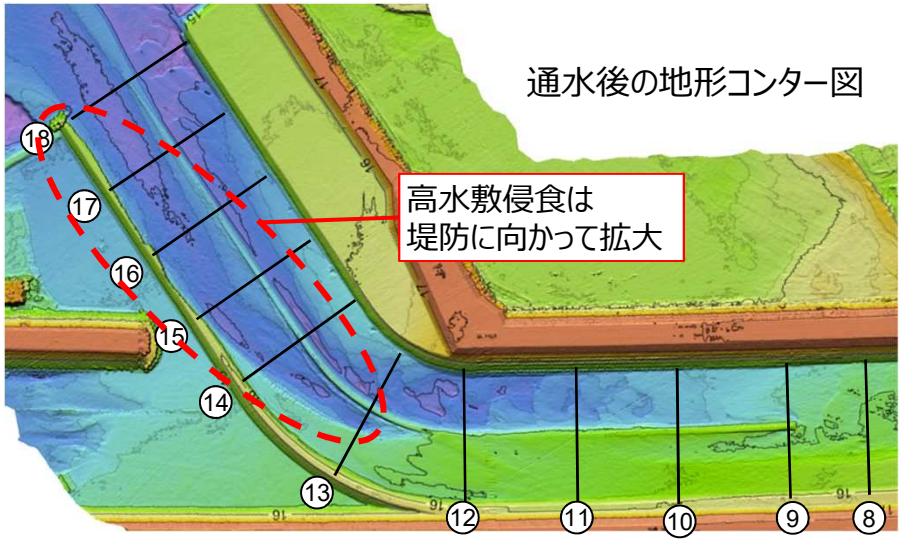


昨年と今年の通水後の地形の違い

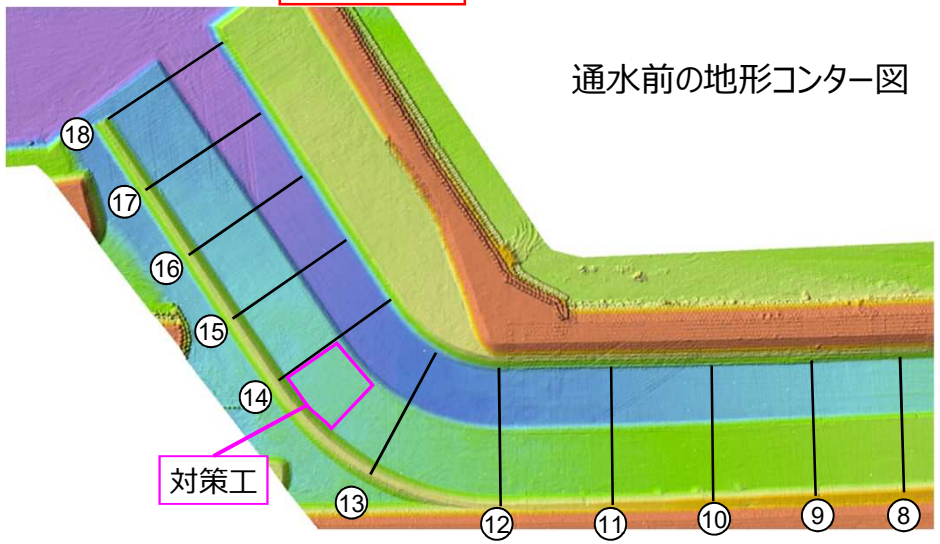
■高水敷の侵食について、昨年（無対策）は、低水護岸背面から堤防に向かって拡大している。
■一方、今年（対策あり）は、対策工の下流端から低水護岸背面に沿って進行している。
■低水路の土砂堆積については、今年は、昨年に比べて土砂の堆積量がやや小さいく、深掘も進行している。

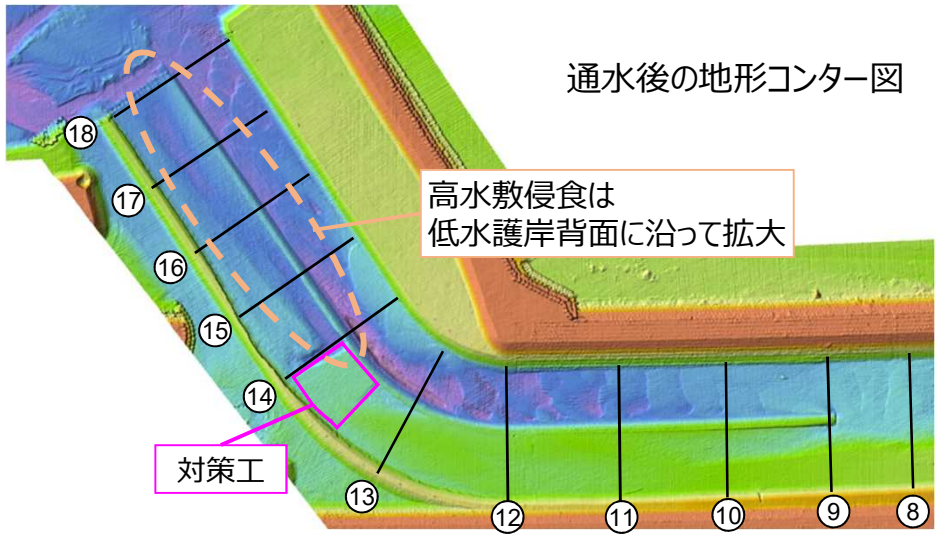
令和3年度 千代田実験

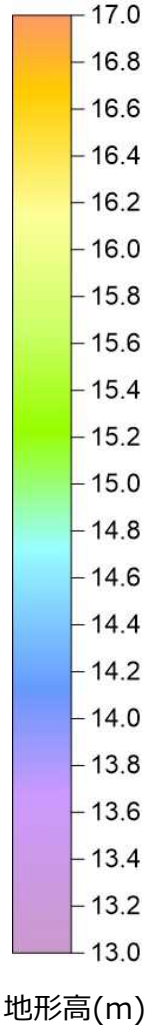




令和4年度 千代田実験



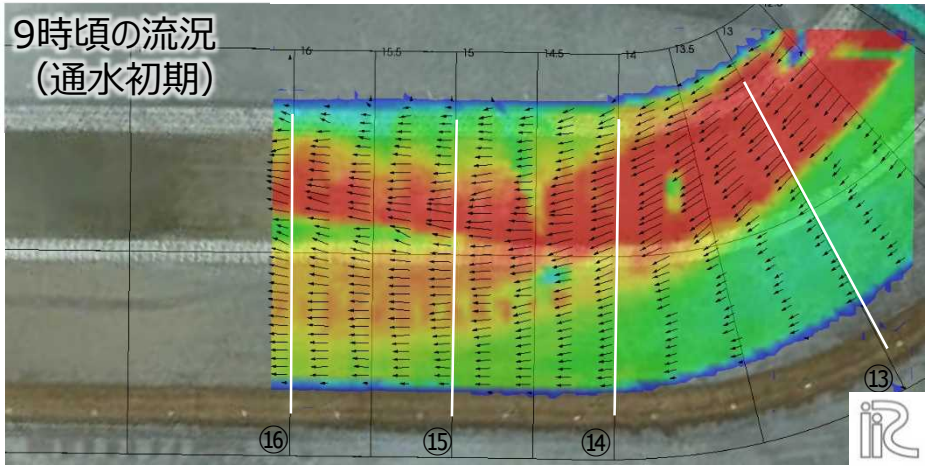


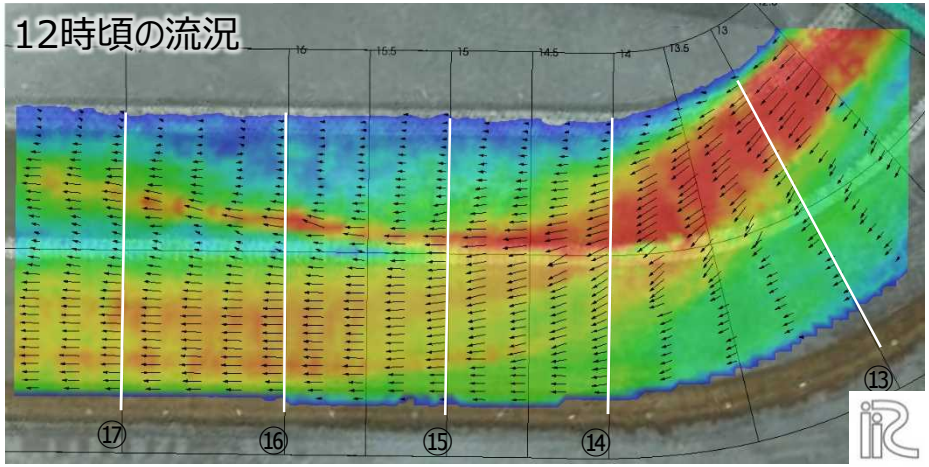


通水中の流況（流速）①

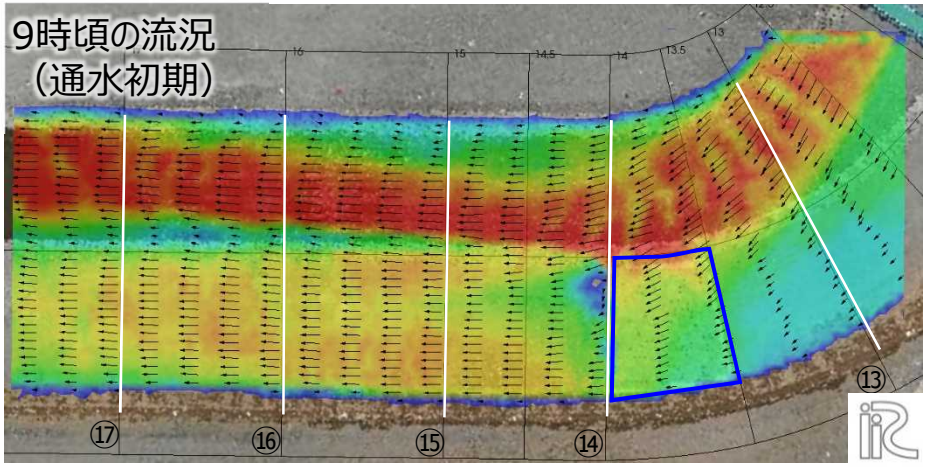
■通水初期において、湾曲部から上流の高水敷では、対策工設置による流況の違いはほとんど見られない。
■低水路の流速は、昨年（無対策）の方が速い傾向であった。
■対策工を設置すると、時間経過とともに、対策工の下流端で落ち込む流れが大きくなり、湾曲部より下流の高水敷の流速は遅くなる傾向であった。

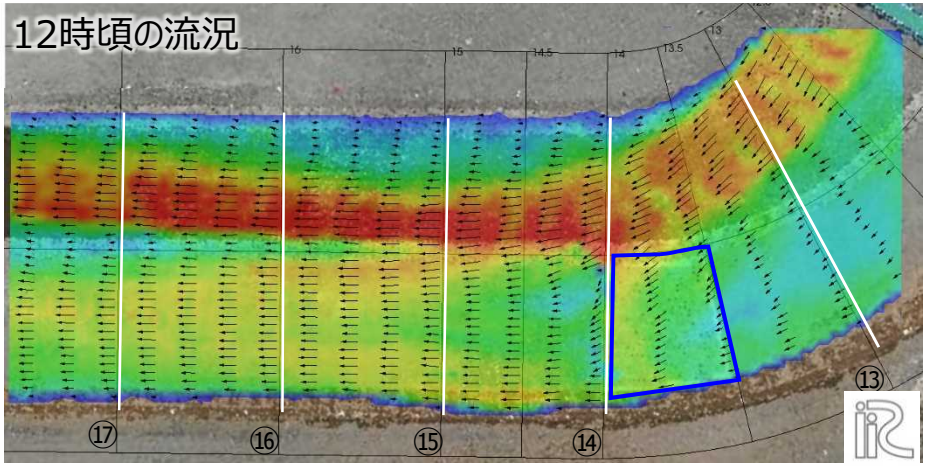
令和3年度 千代田実験

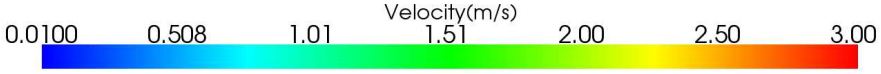




令和4年度 千代田実験



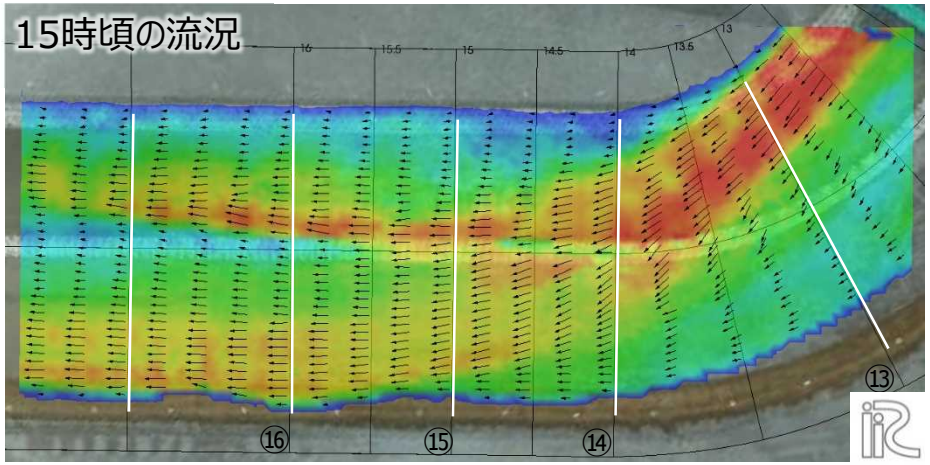


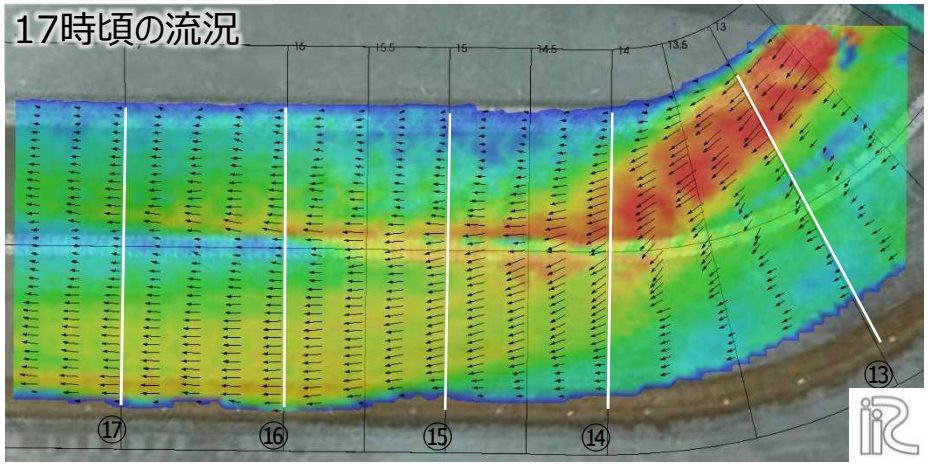


通水中の流況（流速）②

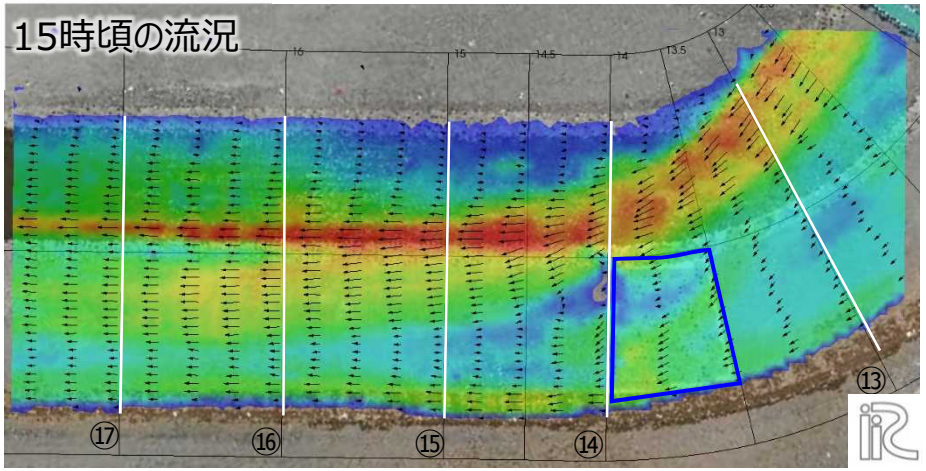
■昨年（無対策）の場合、時間経過とともに主流は低水路から高水敷に乗り上げ、堤防に向かって流下した。
■対策工を設置することで、主流は堤防に向かって流下することはなく、低水護岸背面に沿って流下する傾向であった。
■また、高水敷の流速は減衰する傾向であった。

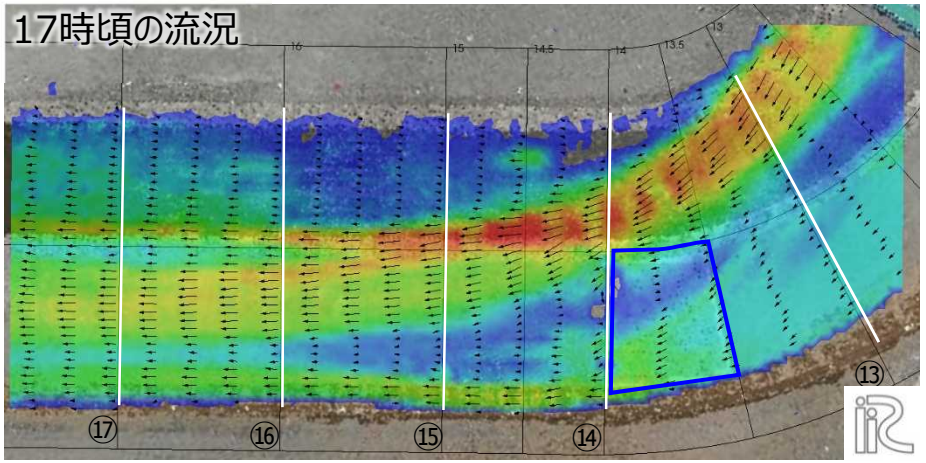
令和3年度 千代田実験

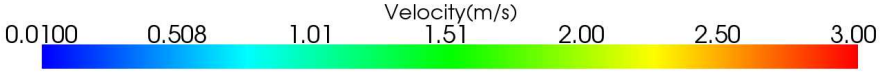




令和4年度 千代田実験

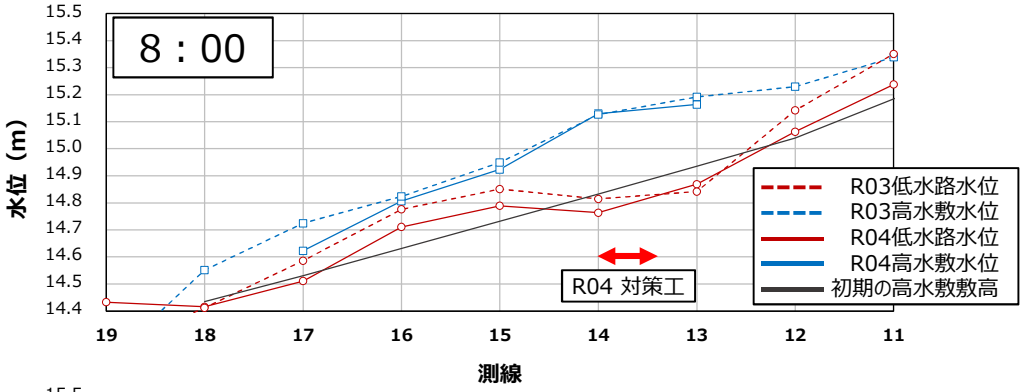


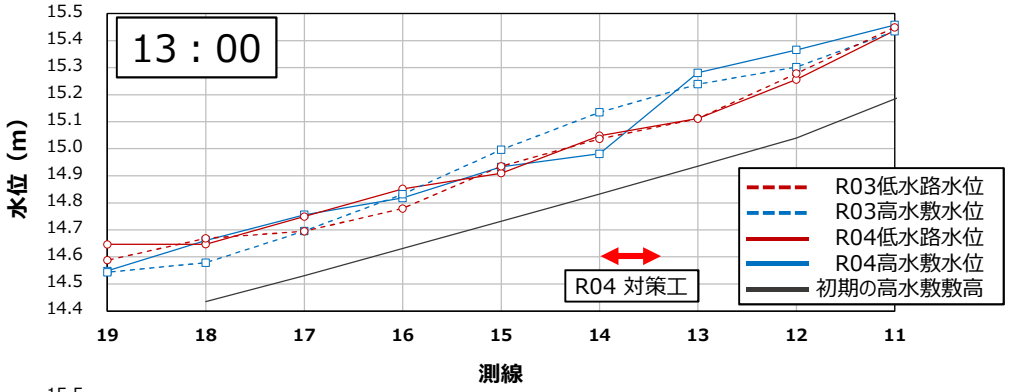


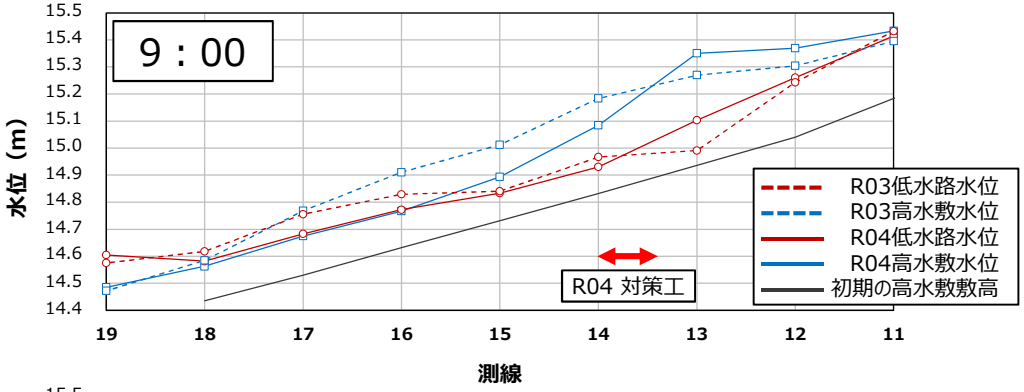


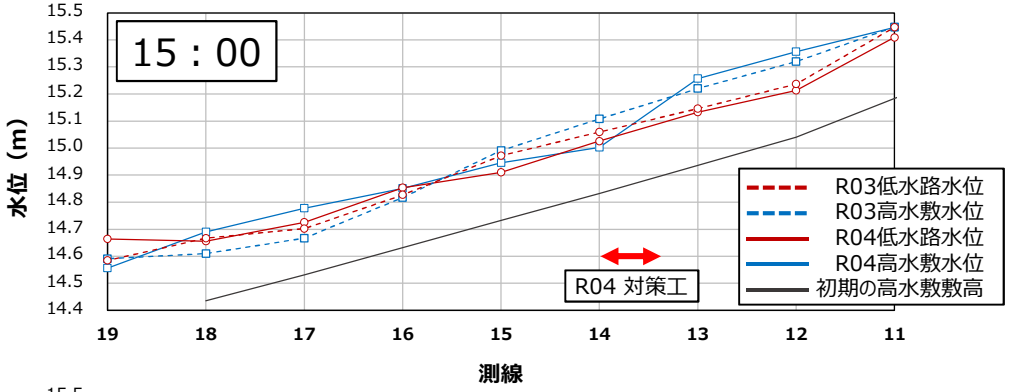
通水中の水位

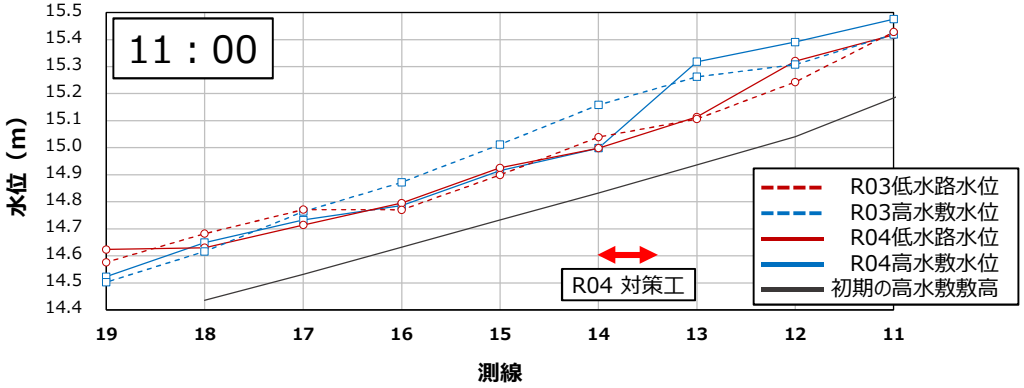
■時刻8:00（目標流量到達時点）の水位は、昨年（無対策）と大きな違いは見られない。
■時刻9:00の水位縦断について、測線⑭～⑰の高水敷の水位は、今年（対策あり）の実験の方が10cm程度低い。
■低水路の水位は、通水全体を通して、昨年（無対策）と大きな違いは見られない。

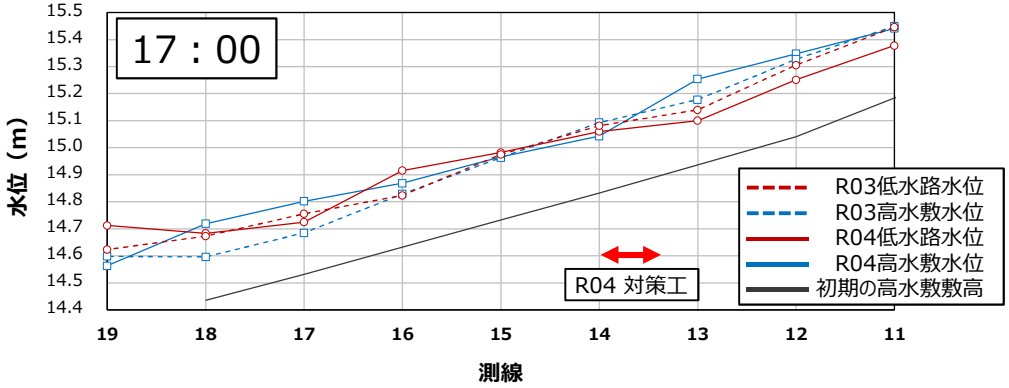






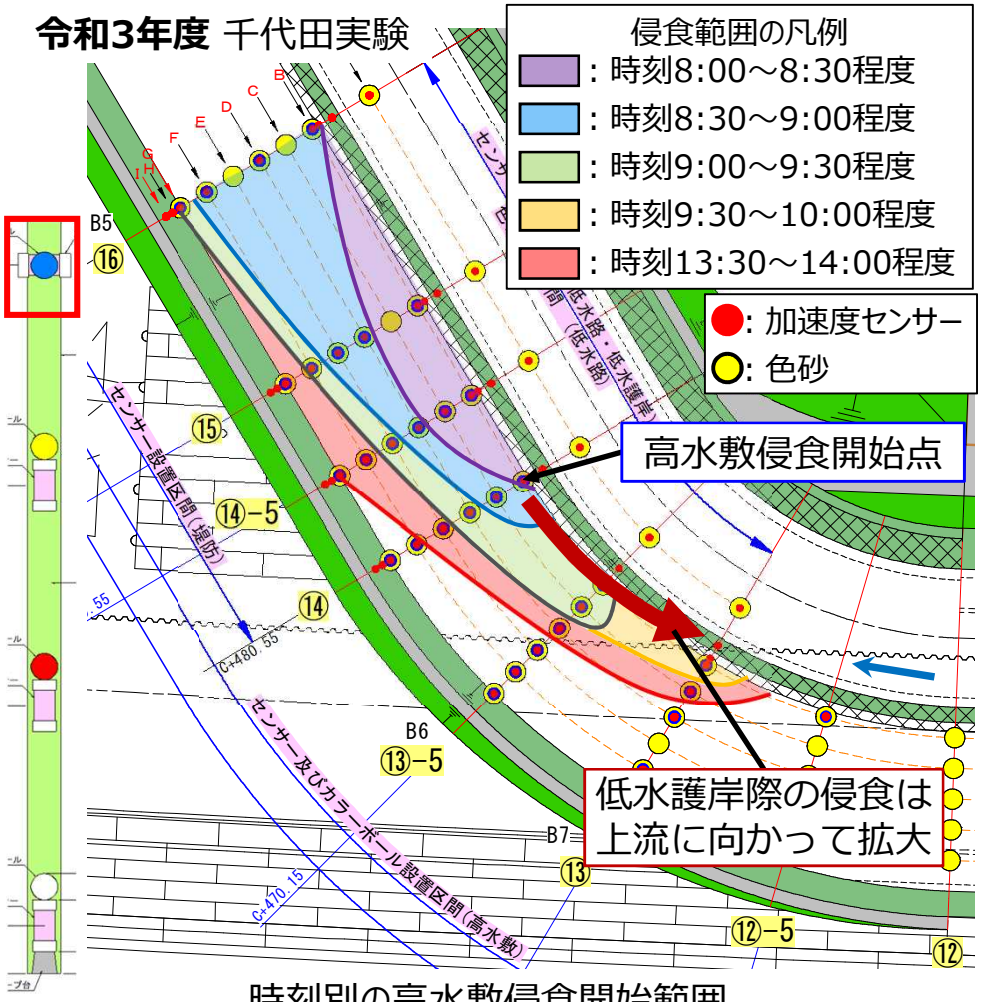






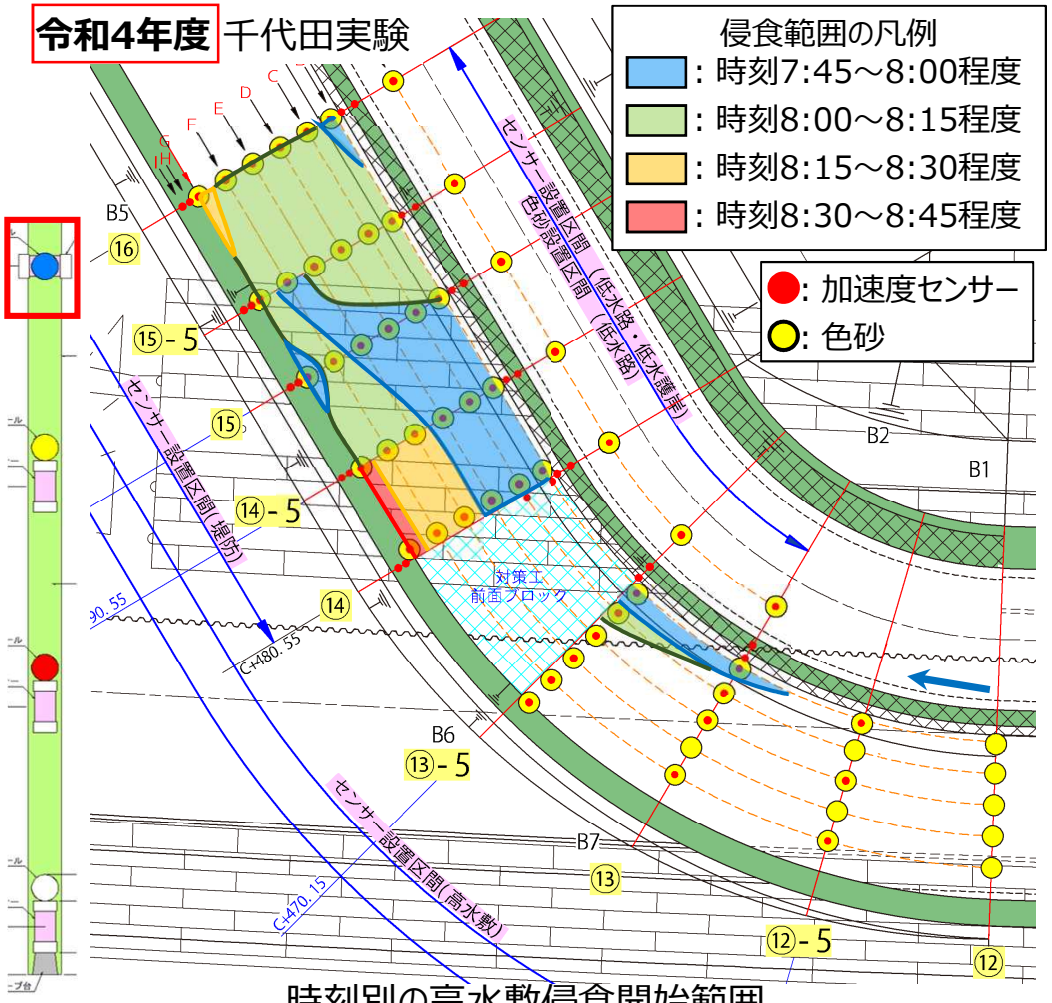
高水敷の侵食

■高水敷の侵食は、対策工の下流端から開始した。
■対策工より下流に設置した深さ方向1つ目（深さ0.1m）の加速度センサーは早期にすべて流出した。
■昨年（無対策）のように、高水敷の侵食が堤防に向かって拡大することはなかった。



時刻別の高水敷侵食開始範囲

※深さ方向1つ目の加速度センサーより推定
（初期河床面から0.1mの深さ）

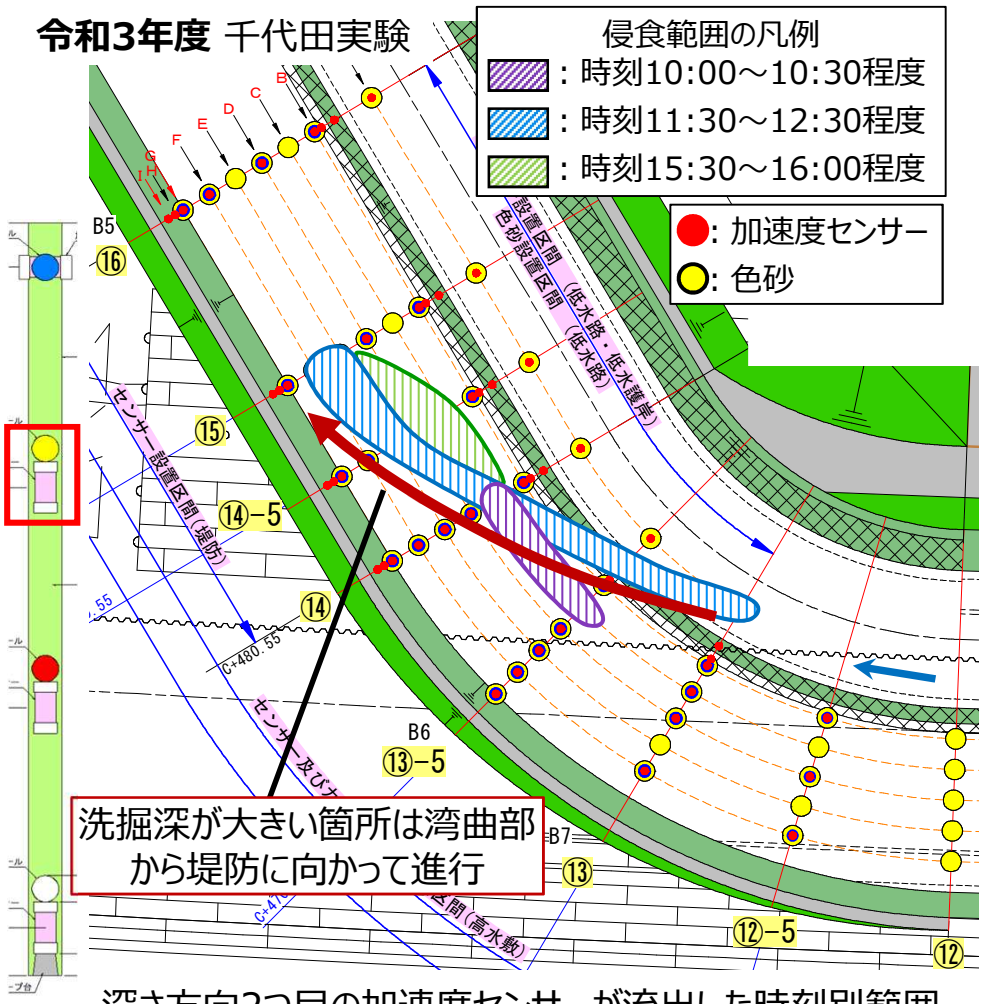


時刻別の高水敷侵食開始範囲

※深さ方向1つ目の加速度センサーより推定
（初期河床面から0.1mの深さ）

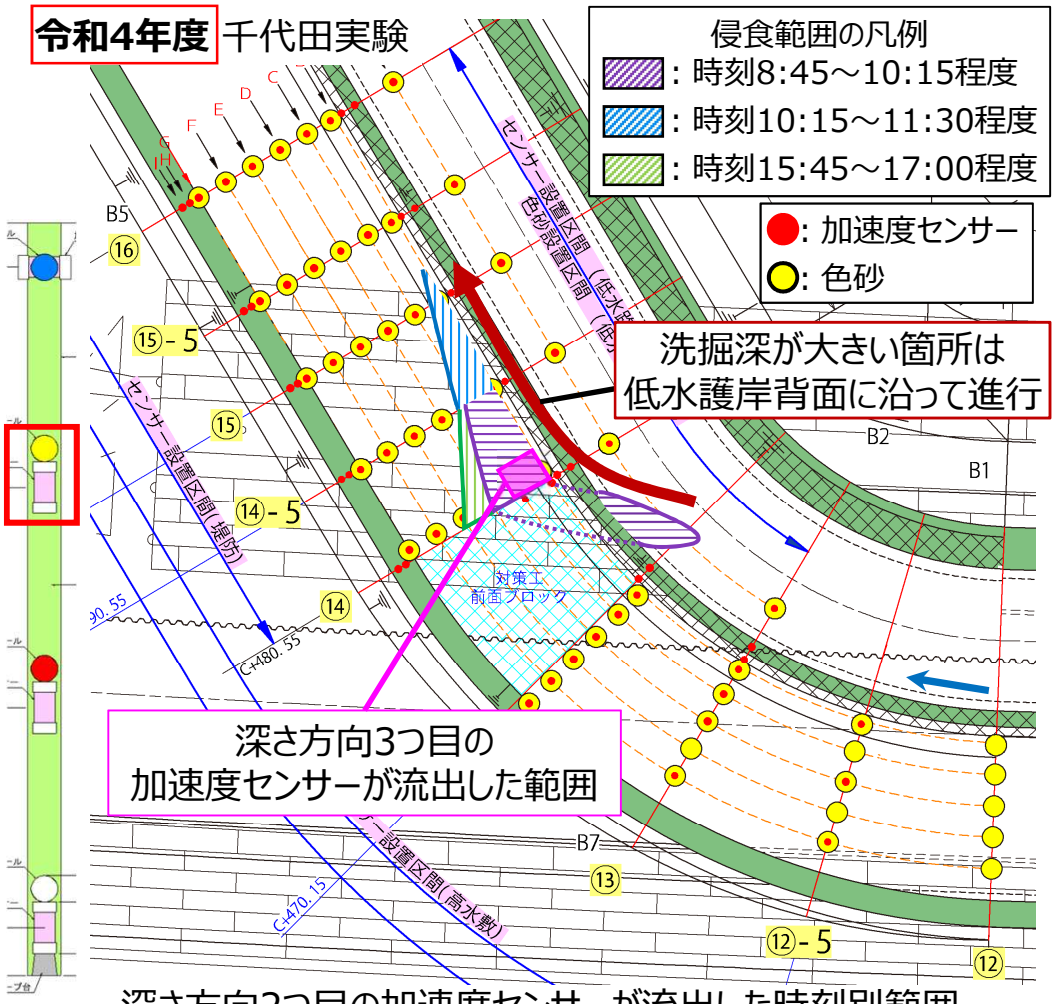
高水敷の洗堀

■深さ方向2つ目（深さ0.6m）の加速度センサーは、対策工の下流端と低水護岸背面に設置した箇所で流出した。
■昨年（無対策）のように、高水敷の洗堀が大きい箇所は堤防に向かって進行することはなかった。
■また、時間経過とともに、落ち込む流れが大きくなった対策工の下流端では、深さ方向3つ目（深さ1.1m）の加速度センサーの流出が確認された。なお、昨年は深さ方向3つ目の加速度センサーの流出は確認されなかった。



深さ方向2つ目の加速度センサーが流出した時刻別範囲

※深さ方向2つ目の加速度センサーより推定
（初期河床面から0.6mの深さ）



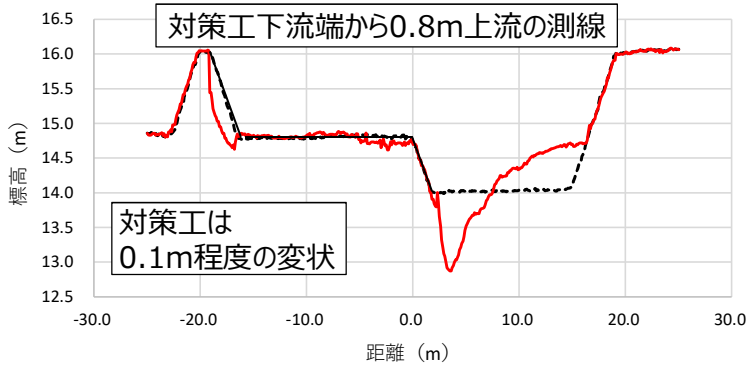
深さ方向2つ目の加速度センサーが流出した時刻別範囲

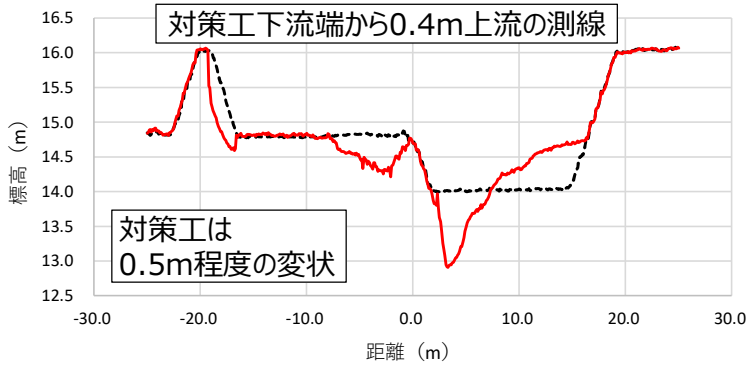
※深さ方向2つ目の加速度センサーより推定
（初期河床面から0.6mの深さ）

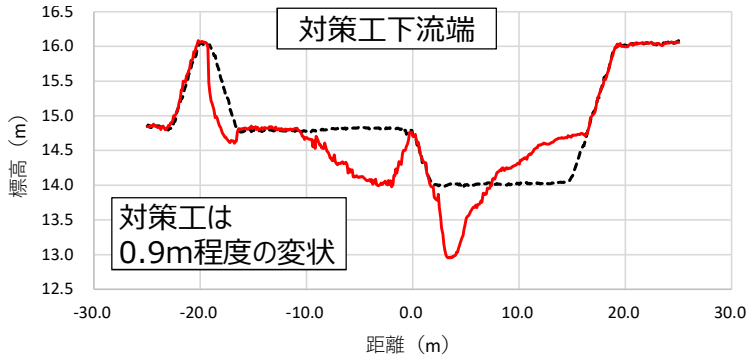
通水後の対策工について

■対策工の下流端では洗堀が大きく生じており、対策工が屈撓していた。
■変状した対策工の範囲は、対策工下流端から2.0m程度上流の範囲であった。

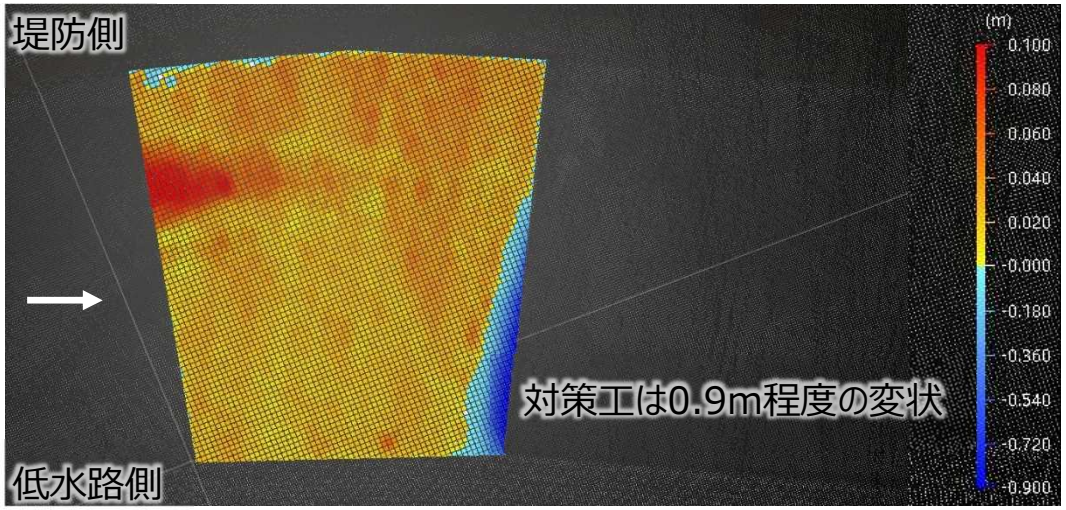
赤線：通水後の横断形状（UAV測量）
黒点線：通水前の横断形状（UAV測量）







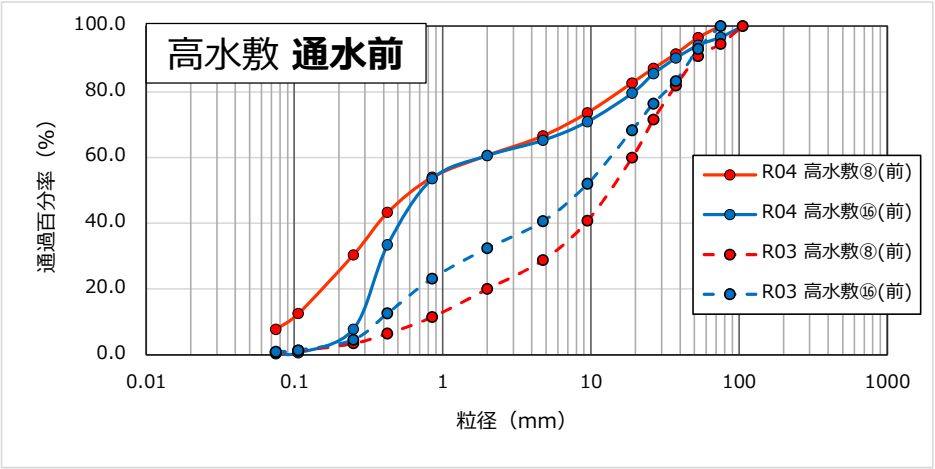
通水後の対策工の状況（UAVより撮影）

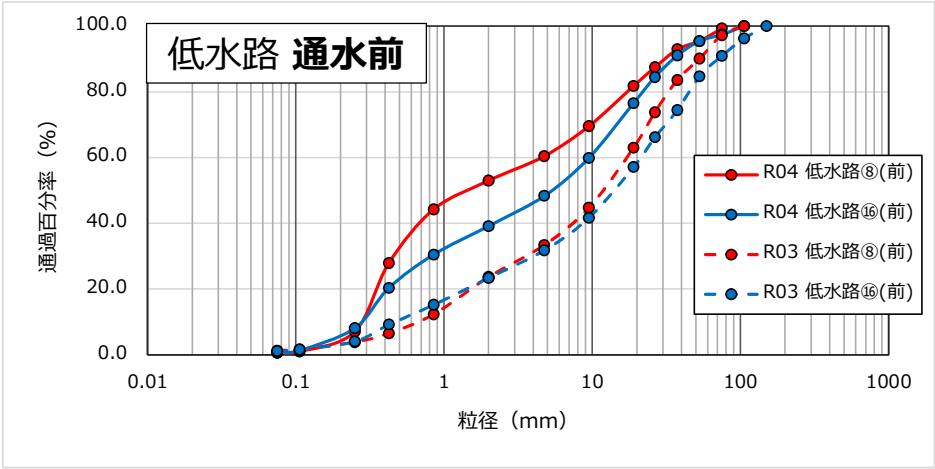


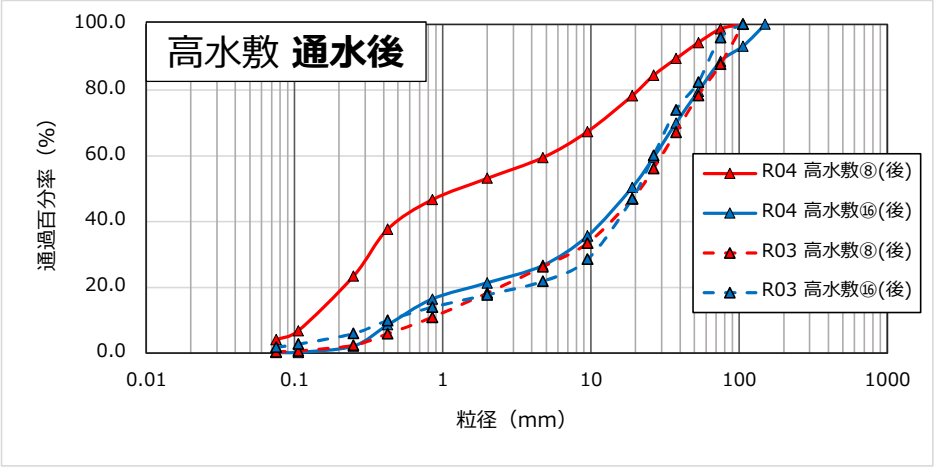
通水後の対策工変状コンター図

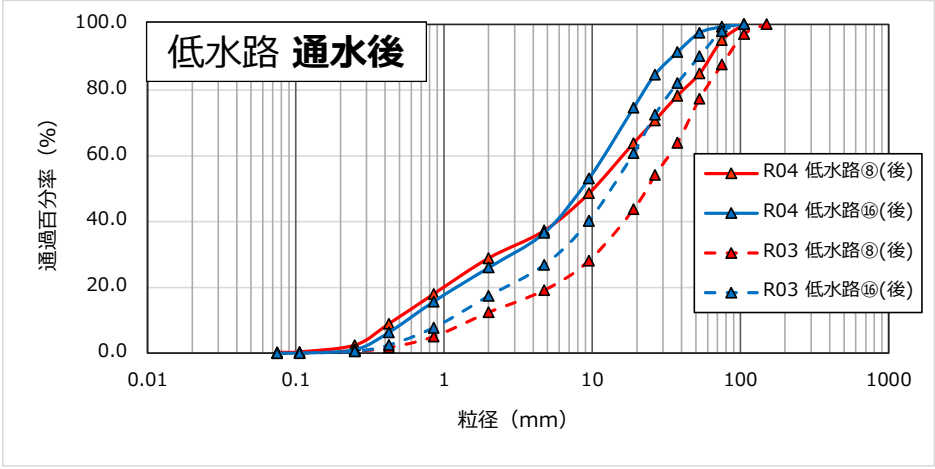
河床材料調査について

■昨年の河床材料調査結果を比較すると、今年の河床材料は細かい傾向にある。（実線：今年　点線：昨年）
■堤防天端の侵食箇所周辺の高水敷の粒径は細かいため、通水開始早々に侵食が開始した可能性がある。







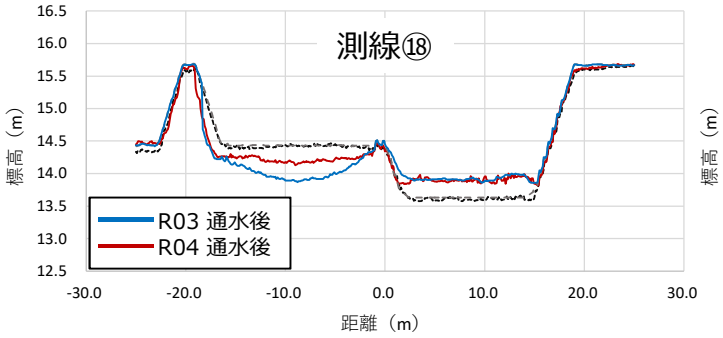


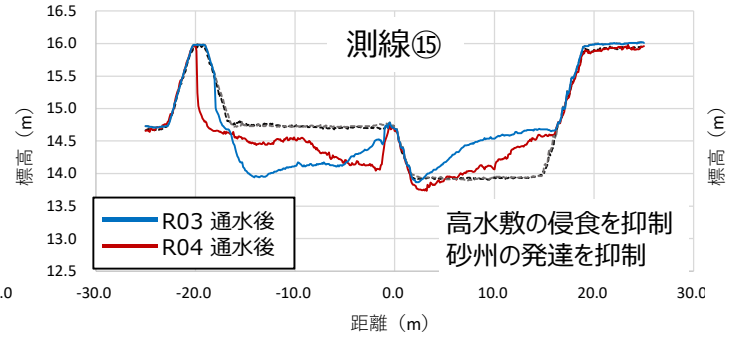
高水敷 D_{60}（mm）	測線⑧		測線⑯	
	R03	R04	R03	R04
通水前	19.00	1.84	13.35	1.87
通水後	29.88	4.96	26.37	26.86

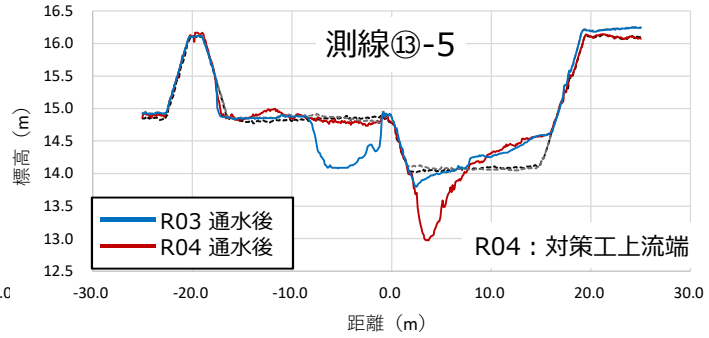
低水路 D_{60}（mm）	測線⑧		測線⑯	
	R03	R04	R03	R04
通水前	17.5	3.80	21.2	9.54
通水後	32.8	15.96	19.1	11.86

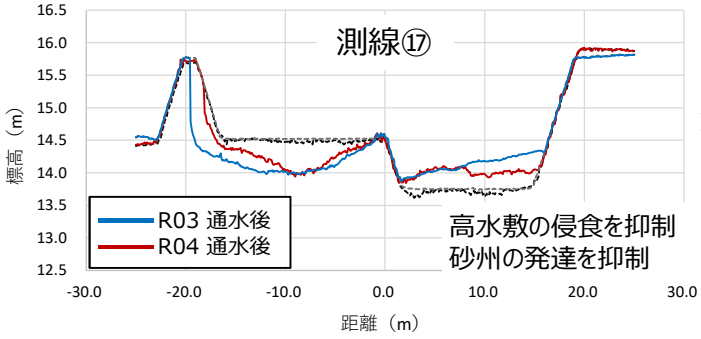
通水後の横断図

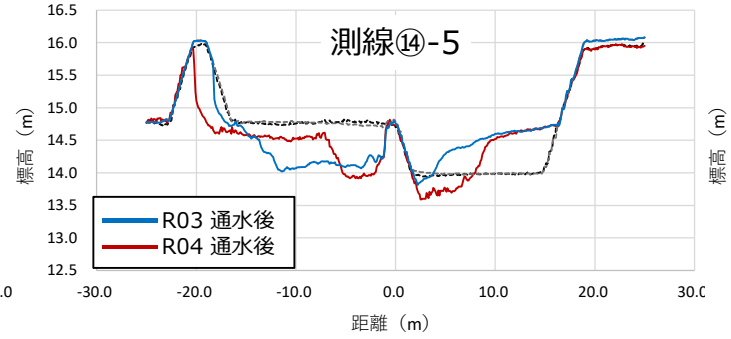
■昨年（無対策）は、高水敷で生じた深掘れは堤防に向かって拡大・進行し、堤防法尻に到達している。
■一方、今年（対策あり）では、低水護岸背面に沿って拡大しており、高水敷全体の侵食も抑制している。
■また、高水敷の侵食を抑制することにより、低水路の土砂堆積（砂州の発達）が抑制されている。

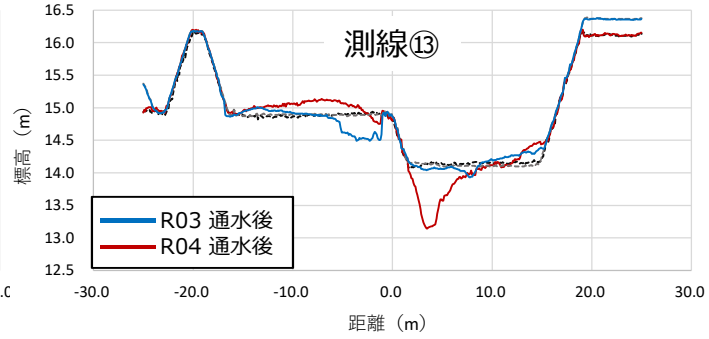


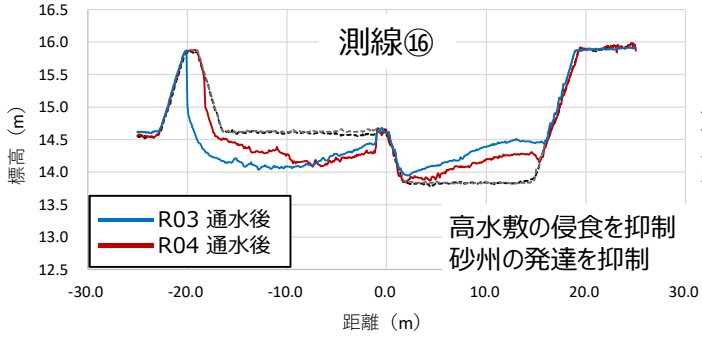


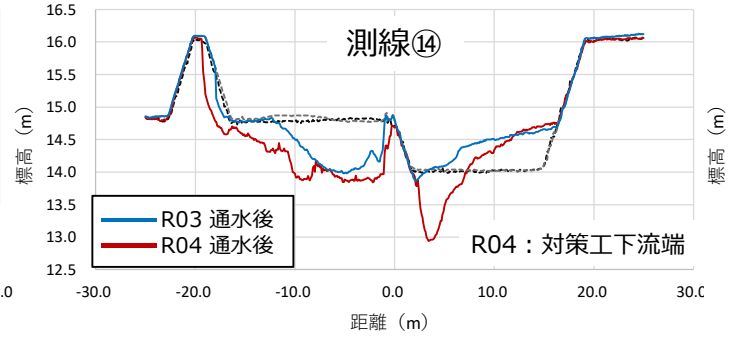


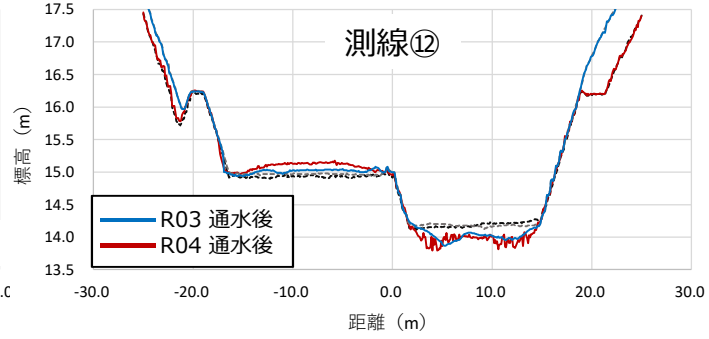






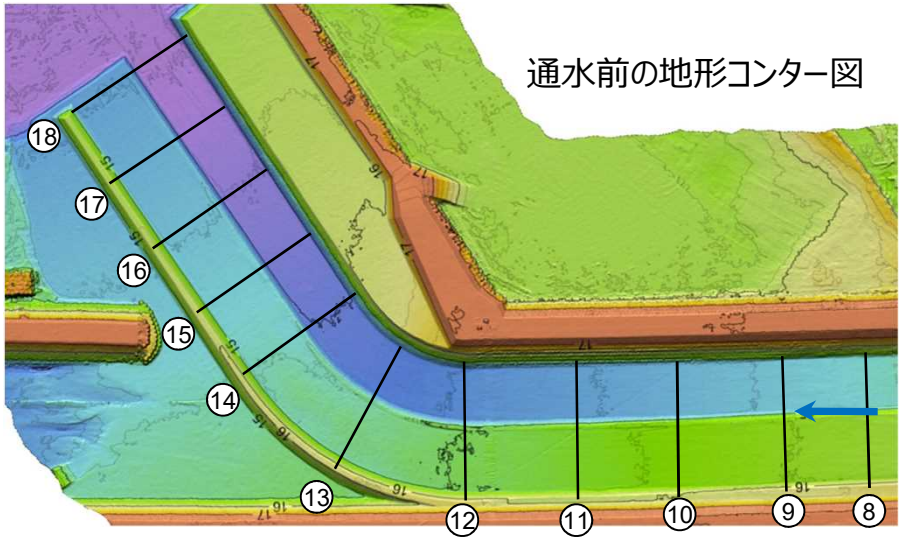


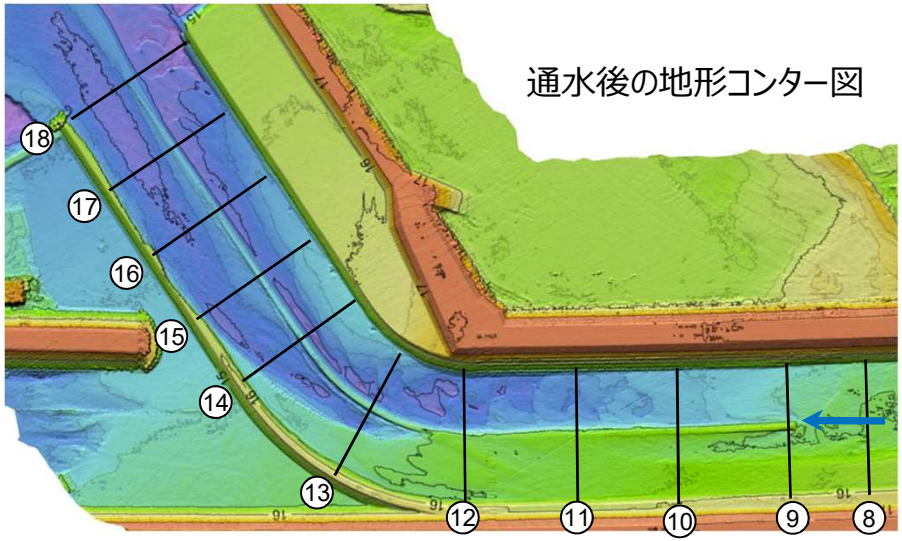




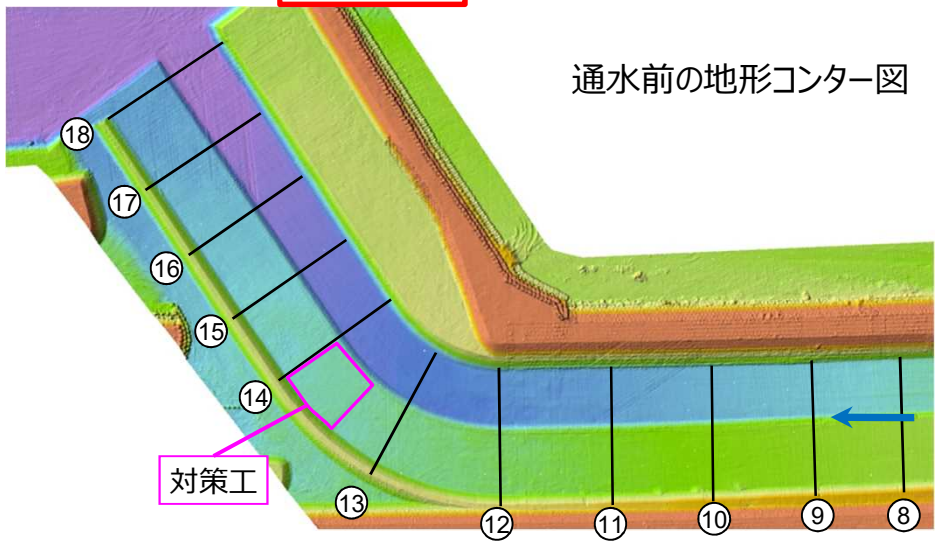
■**対策工を実施した結果、堤防へ向かう高水敷侵食を抑制することができた。**
■低水路内でも河積が確保され、土砂の堆積が抑制されている。

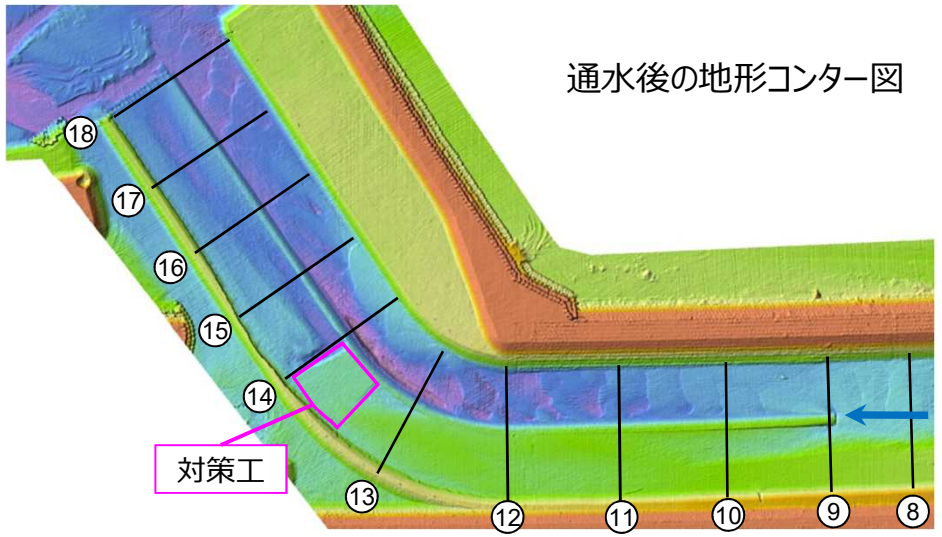
令和3年度 千代田実験

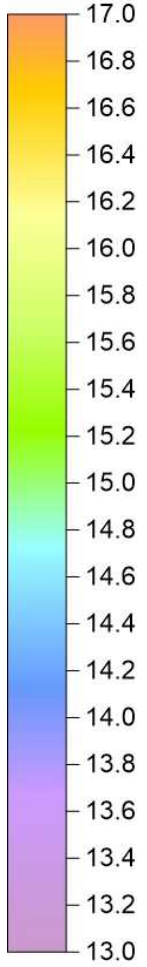




令和4年度 千代田実験

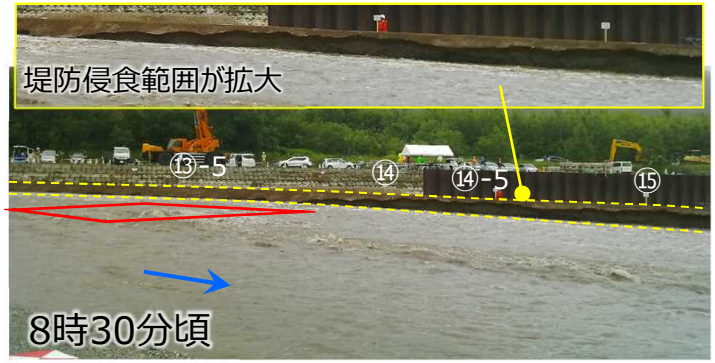


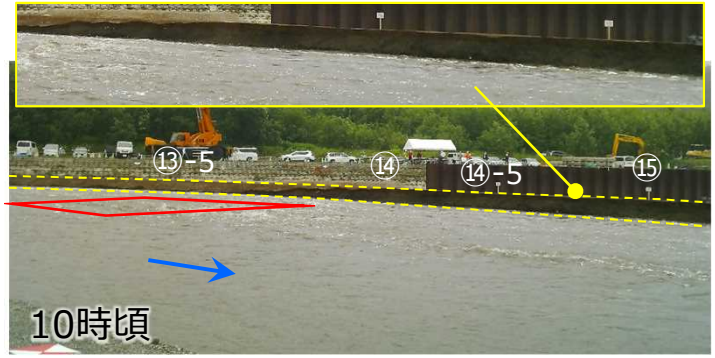


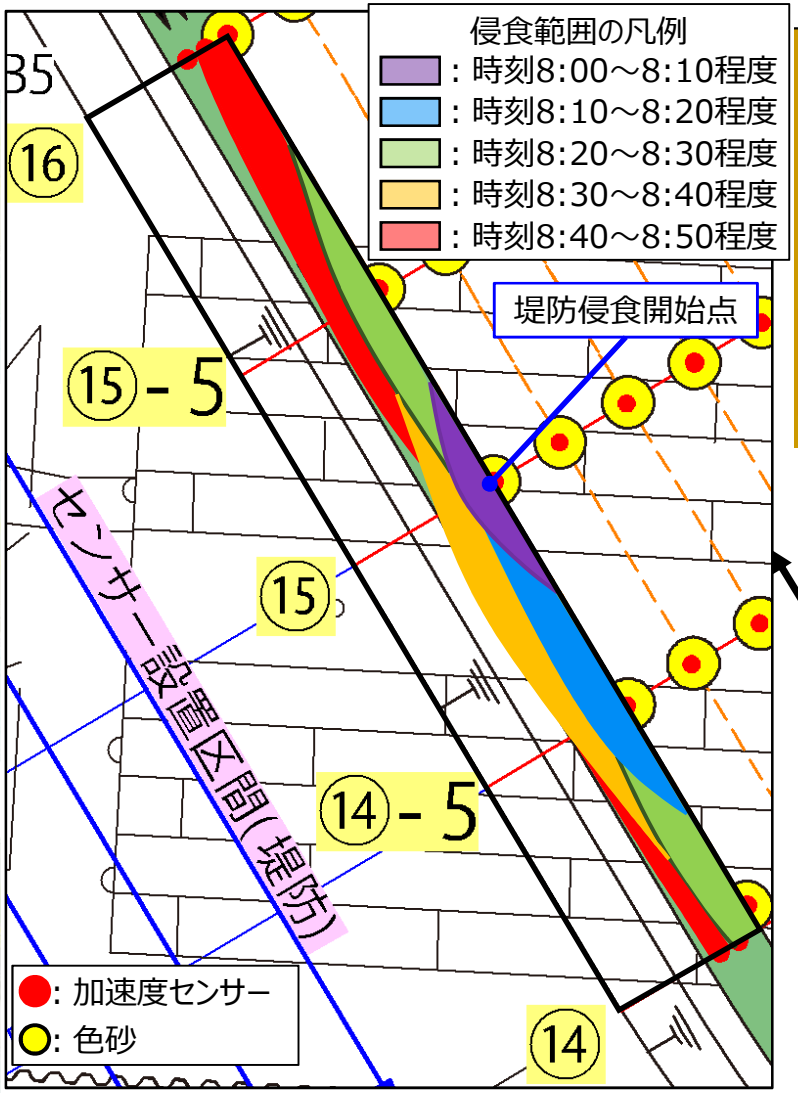


堤防の侵食

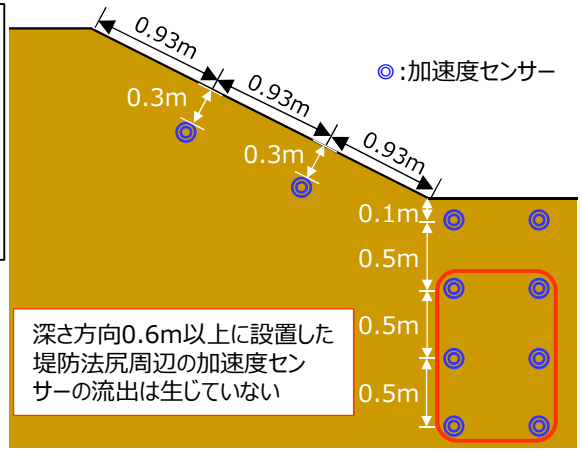
■堤防の侵食は、通水初期から発生した。侵食範囲は時間経過とともに、上下流へ拡大した。
■堤防法尻周辺に設置した深さ方向2つ目の加速度センサーの流出は生じておらず、高水敷侵食が堤防に到達して堤防侵食が生じた可能性は低い。



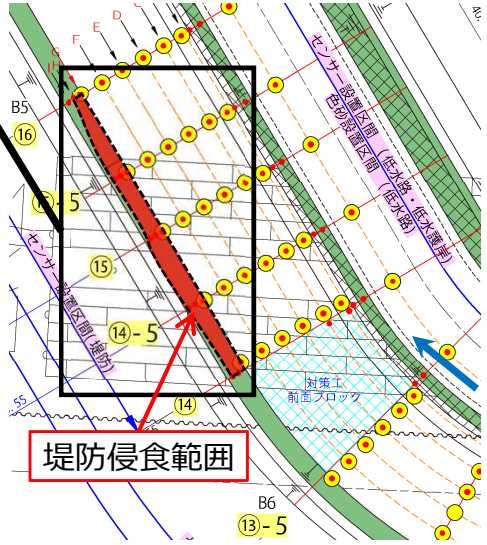




時刻別の堤防法面の侵食範囲拡大図



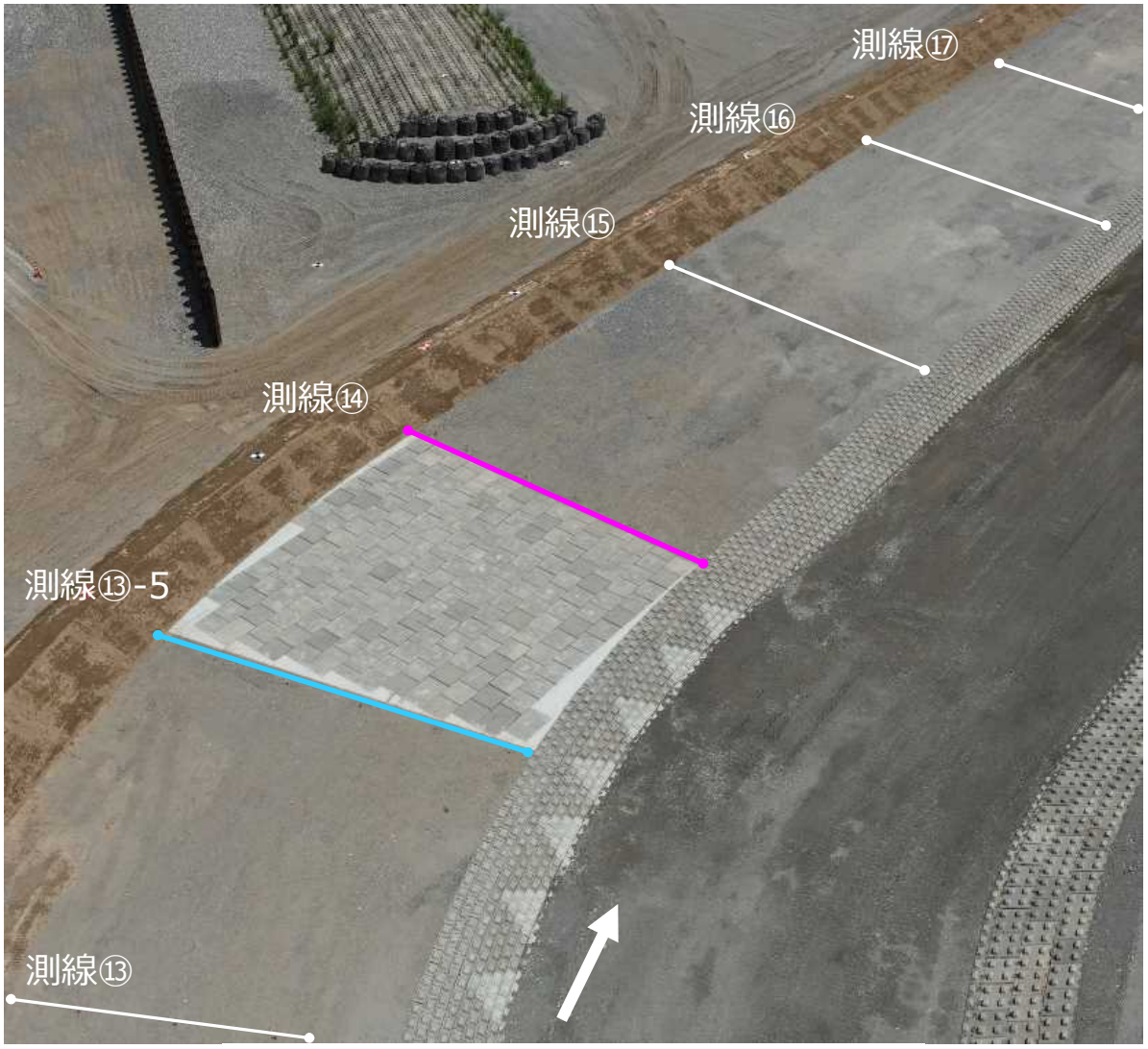
加速度センサー配置詳細図



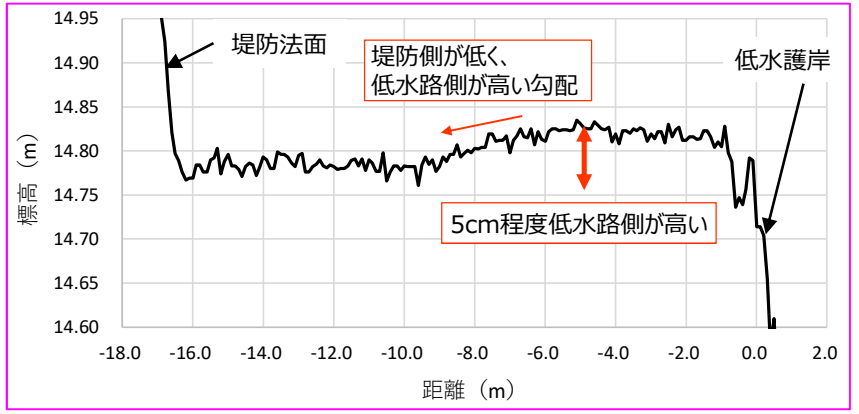
湾曲部周辺の
加速度センサー設置平面図

堤防の侵食要因想定①-1

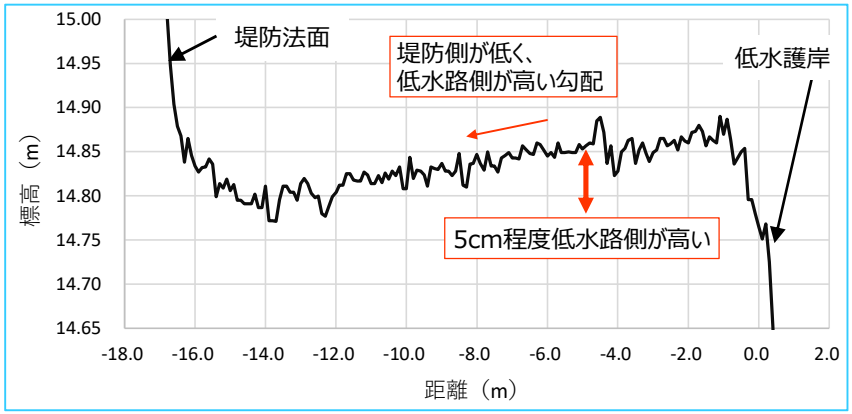
■通水前の対策工設置後の横断形状を確認すると、やや低水路側が高い状態になっている。
■対策工周辺の高水敷上の流れは、堤防側に向かって流下しやすい状態であった可能性がある。



通水前の対策工周辺の状況（UAVより撮影）



測線⑭の高水敷初期形状
（対策工下流端）

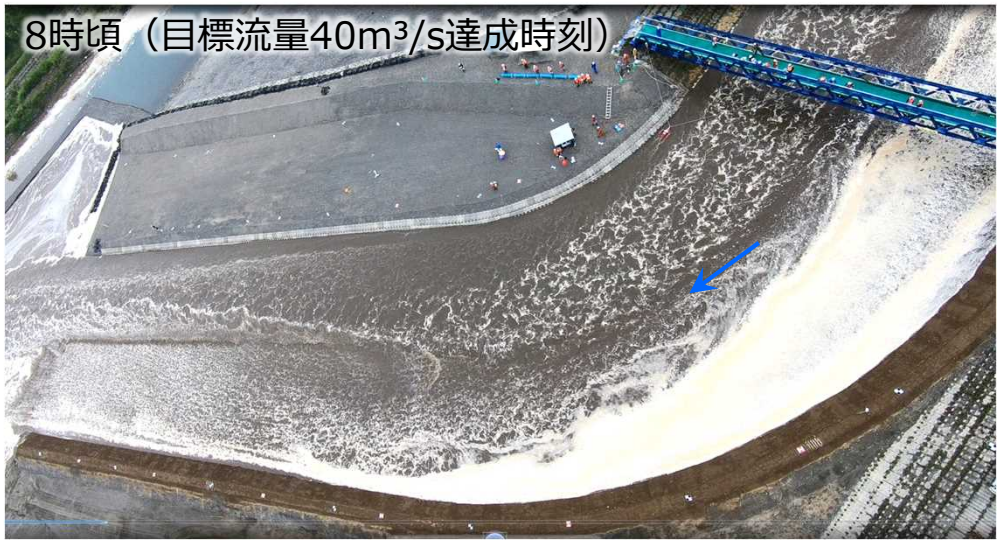


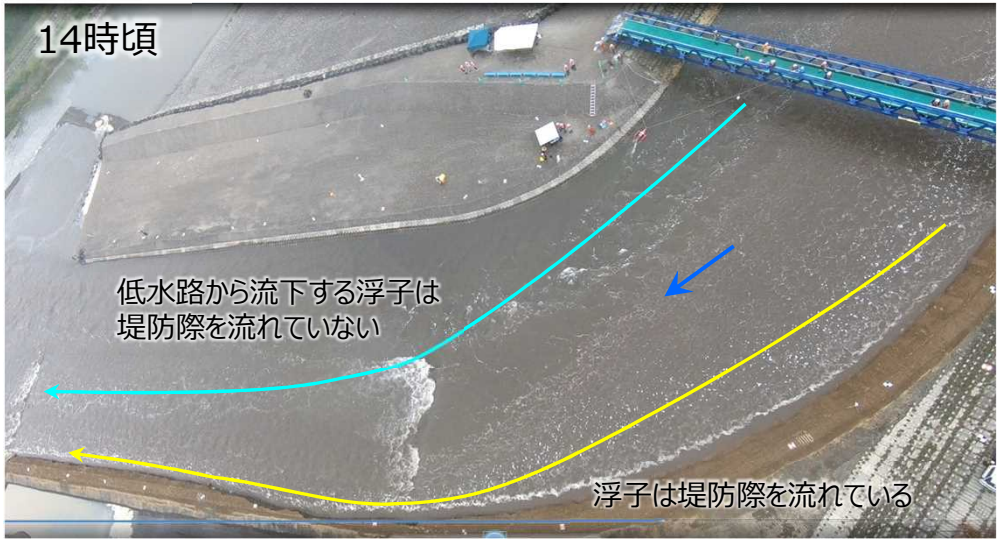
測線⑬-5の高水敷初期形状
（対策工上流端）

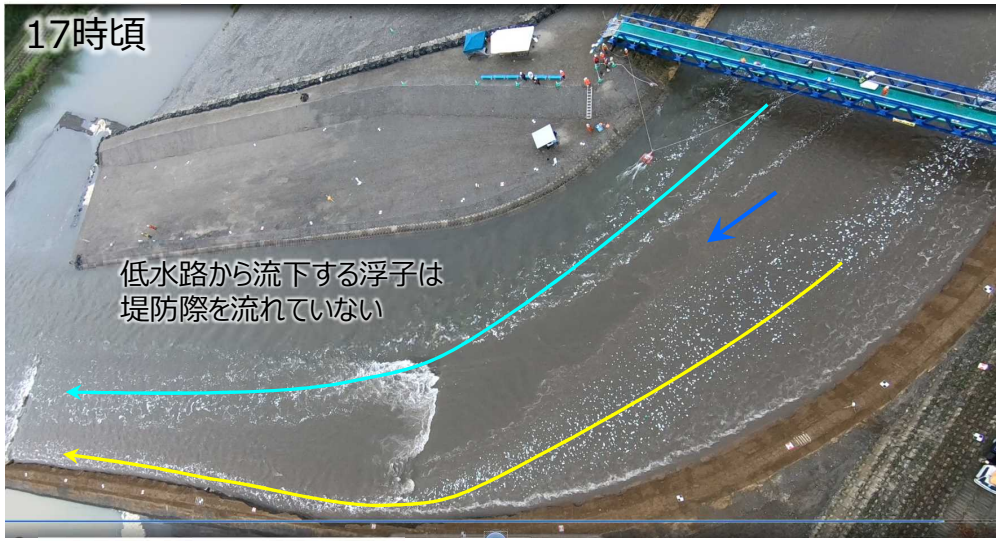
※横断図はUAV測量でデータより作成

堤防の侵食要因想定①-2

■クレーン撮影による浮子の流下状況を確認すると、対策工周辺を流れている浮子は終始、堤防付近を流れており、対策工周辺の地形は堤防側が低く、堤防に向かって流れやすい状況であった可能性がある。



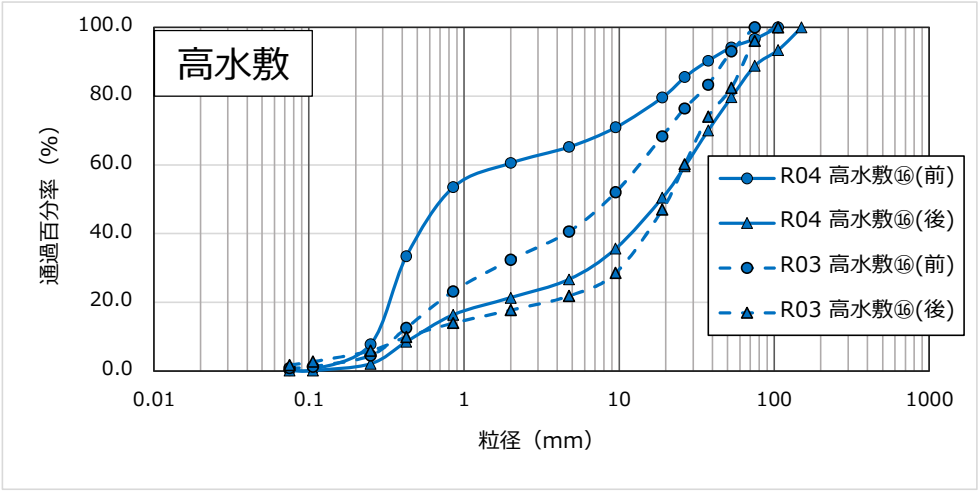




浮子は堤防際を流れている

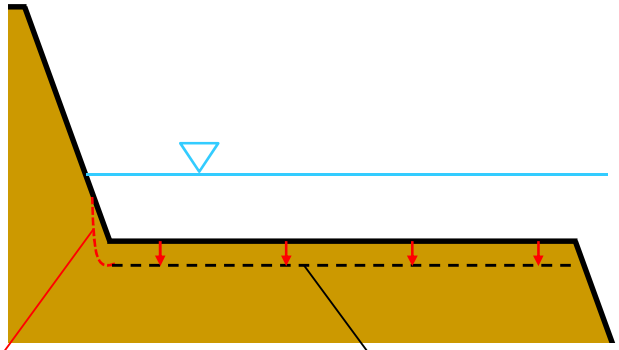
堤防の侵食要因想定②

■堤防の侵食箇所周辺の高水敷の河床材料は、昨年度よりも細かい傾向である。
■昨年と今年の通水初期について、測線⑮周辺より下流の流速値に大きな違いは見られないものの、今年は表層の細かい土砂が早期に掃流されやすい状態であったため、堤防侵食が助長された可能性がある。



高水敷測線⑯の粒径加積曲線

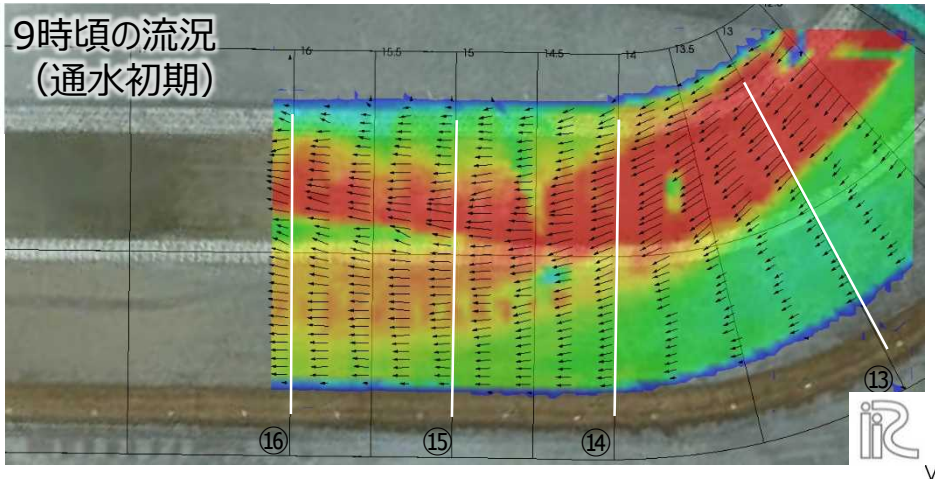
高水敷 D_{60}(mm)	測線⑯	
	R03	R04
通水前	13.35	1.87
通水後	26.37	26.86



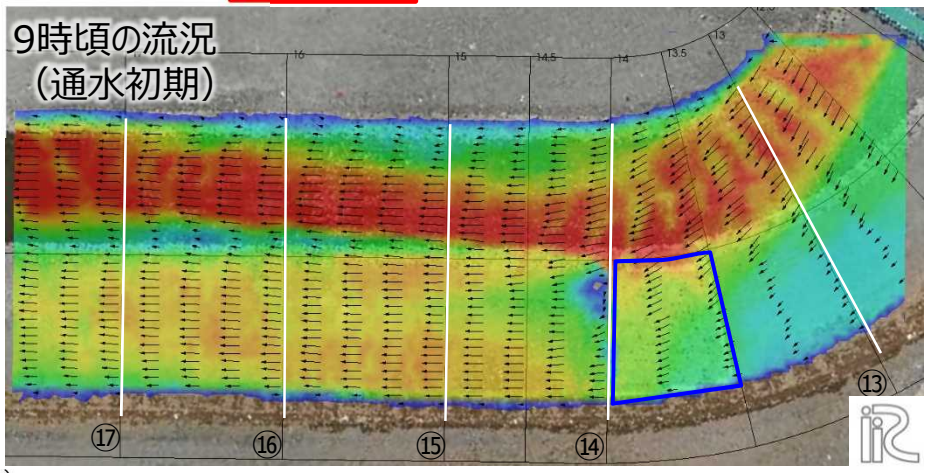
高水敷全体の低下により
堤防法尻の侵食が助長された

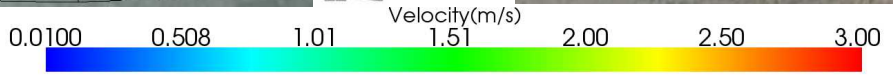
昨年度よりも表層の粒径が細かく、
早期に高水敷全体が低下

令和3年度 千代田実験



令和4年度 千代田実験





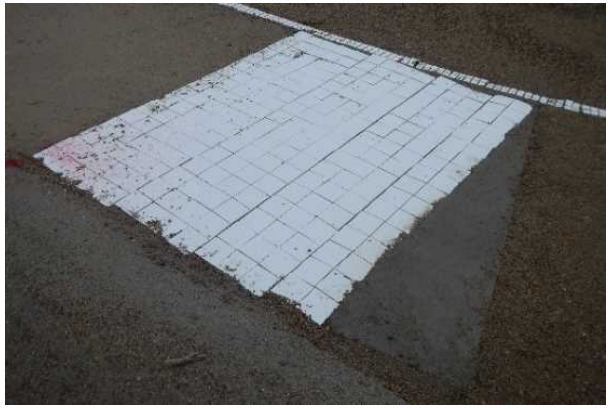
3. 縮尺模型実験の実施

縮尺模型実験の目的及び実験条件

■目的：千代田現地実験で生じた堤防侵食現象を縮尺模型実験で概ね再現できることを確認すること。
■実験条件は、千代田現地実験により近い条件となるように設定した。

○対策工

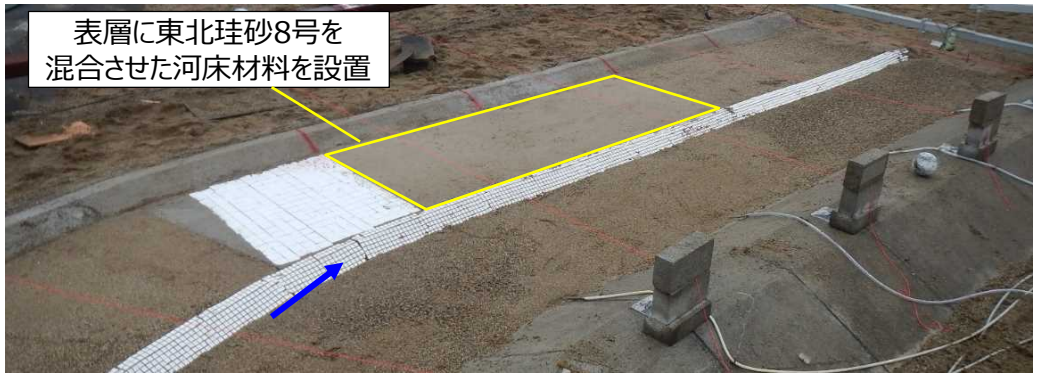
- 対策工周辺の地形は、現地に近い状況になるように成型した。
  （低水路から堤防へ傾斜をつけている）
- 対策工の表面の凹凸が極力なくなるようし、対策工に使用するタイルは現地ブロック相当のタイル(45㎜×45㎜)で製作した。

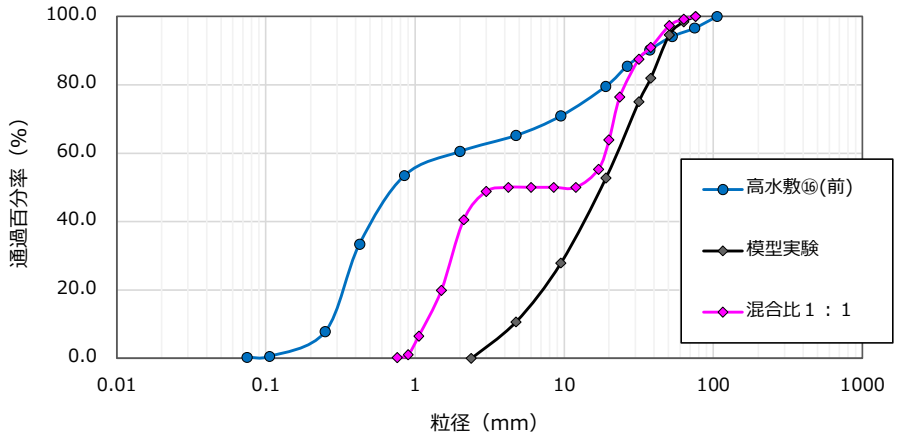


対策工の設置状況

○河床材料

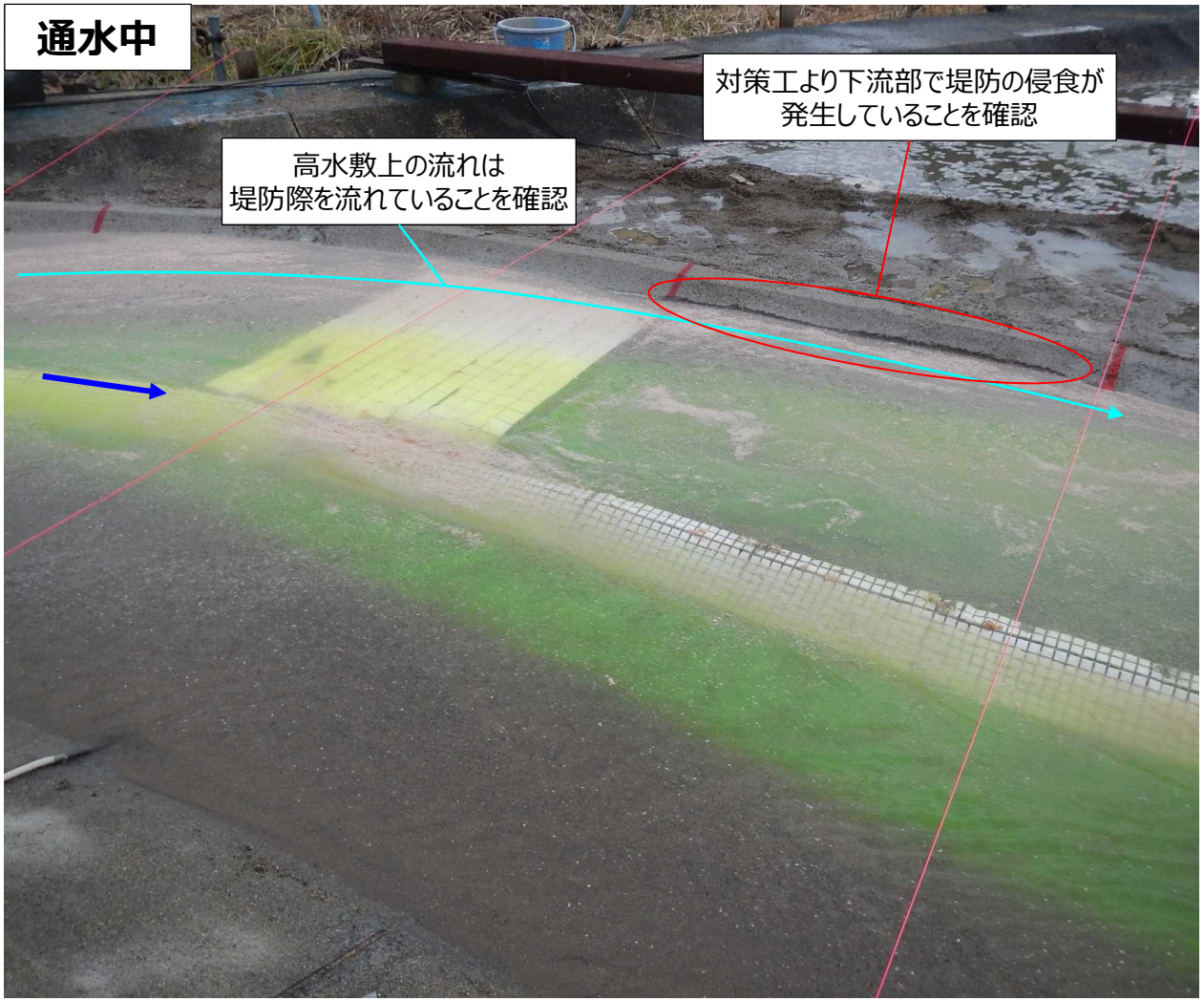
- 現地は、測線⑯の高水敷に細かい土砂が多く含まれていたため、模型実験の材料と東北珪砂8号を1：1で混合した河床材料とした。使用範囲については、
  ・深さ方向は、5㎜（現地スケールで10㎝）
  ・平面的な範囲は、下流端の水位等に影響が出ないように測線⑭(対策工下流端)～測線⑯の区間とした。

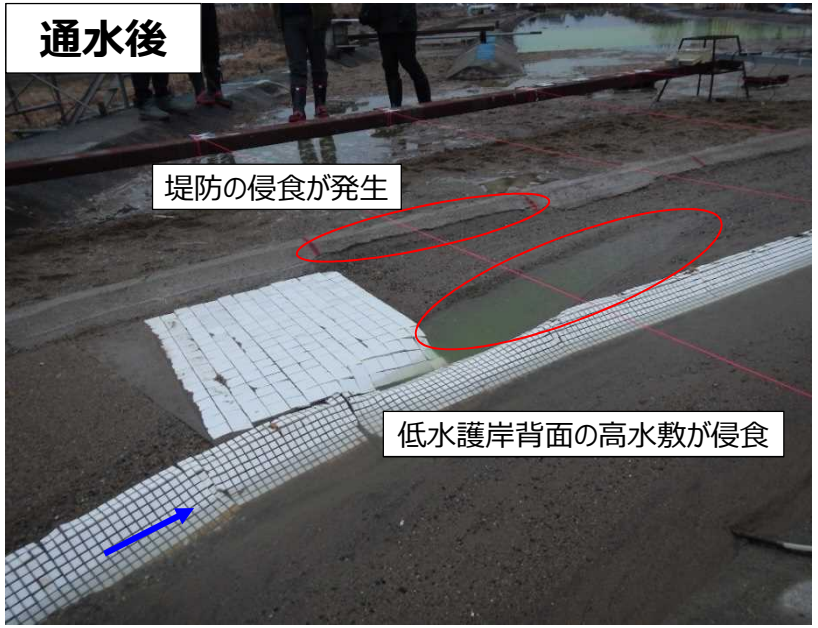


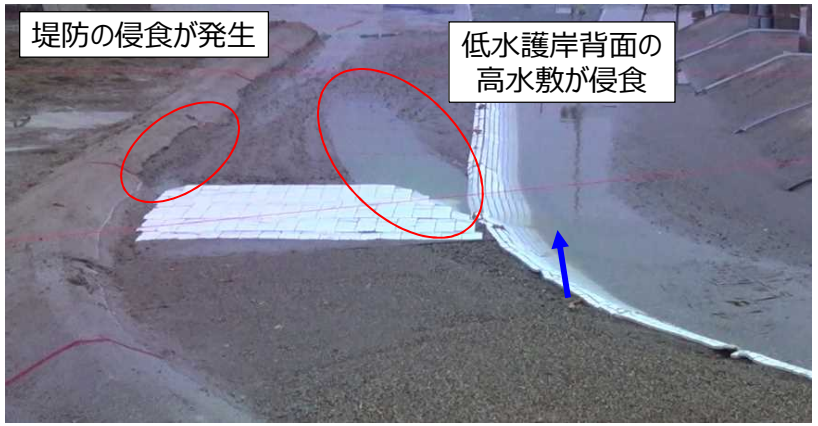


令和4年度 縮尺模型実験の実験結果の概要

■通水時間全体を通して、主流は低水路を流下していた。
■ただし、高水敷上の流れは堤防際を流下しており、時間経過とともに、対策工より下流部で堤防の侵食が発生した。
■通水後の高水敷の侵食範囲は、低水護岸背面から拡大しているものの、堤防に向かって進行しなかった。
■堤防の侵食は、対策工より下流部で堤防法面の侵食が発生した。



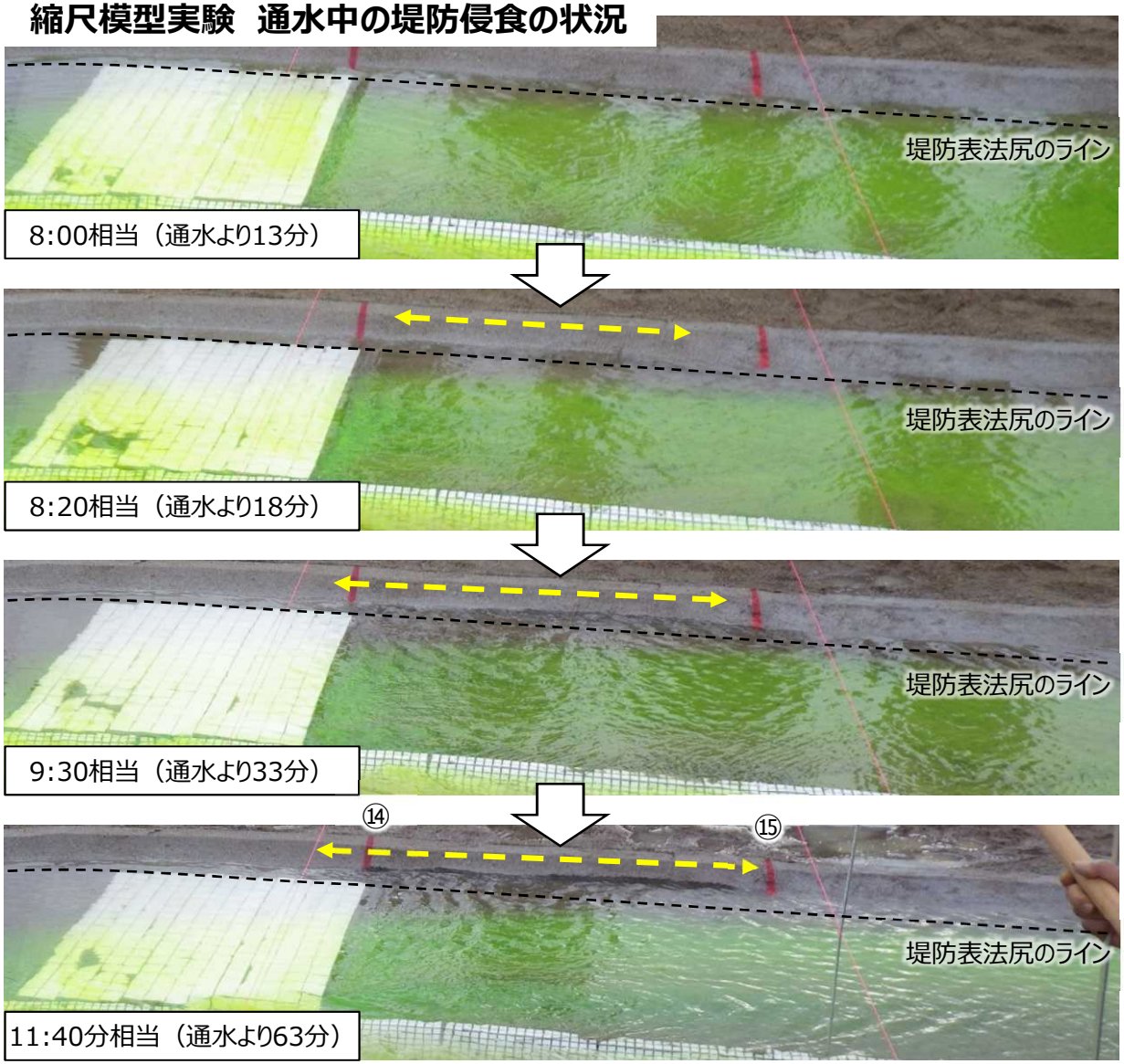


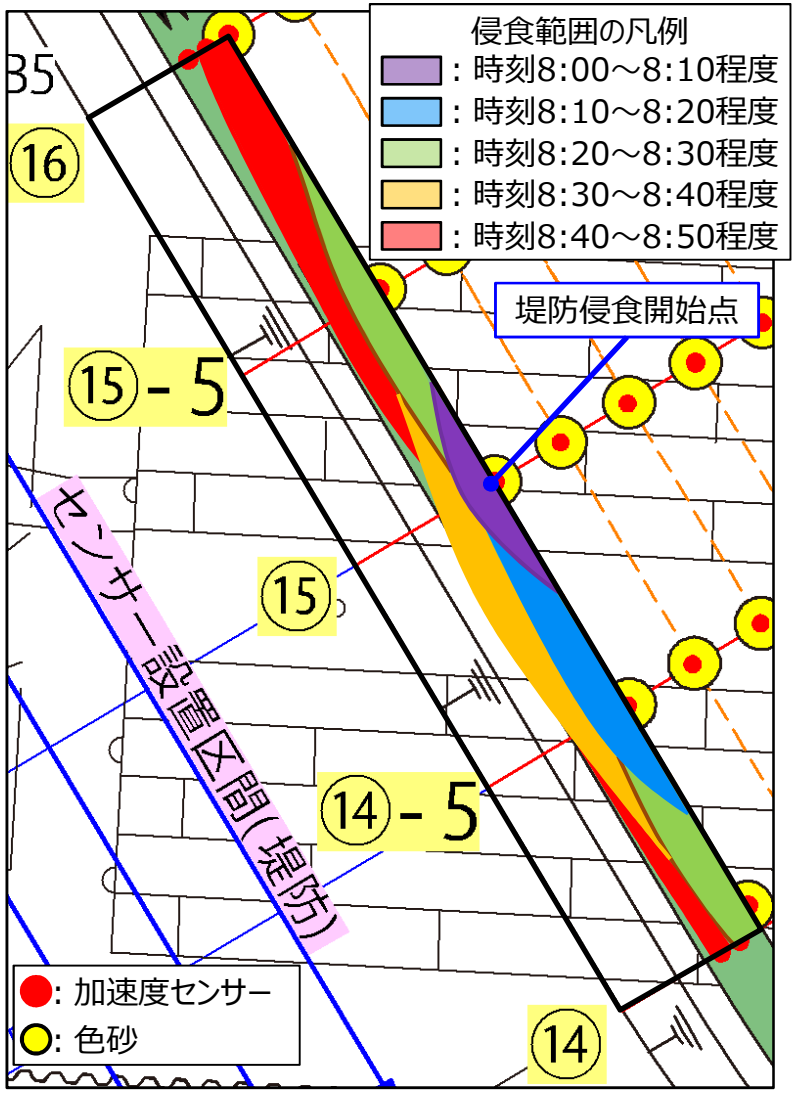


R04縮尺模型実験の実験結果～堤防の侵食状況

■対策工下流の測線⑭～⑮付近で堤防の侵食が生じており、上下流へ向けて侵食範囲が拡大する傾向である。
■千代田現地実験では測線⑮付近から上下流に侵食範囲が拡大しており、同様の侵食傾向が確認された。

縮尺模型実験　通水中の堤防侵食の状況

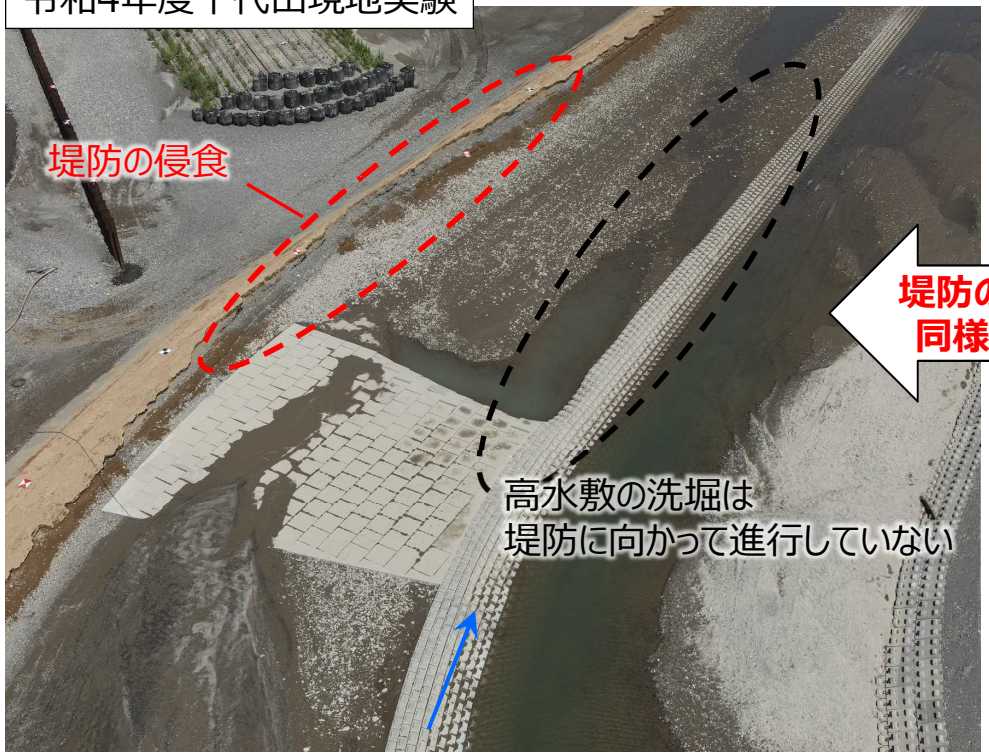




千代田現地実験結果
時刻別の堤防法面の侵食範囲拡大図

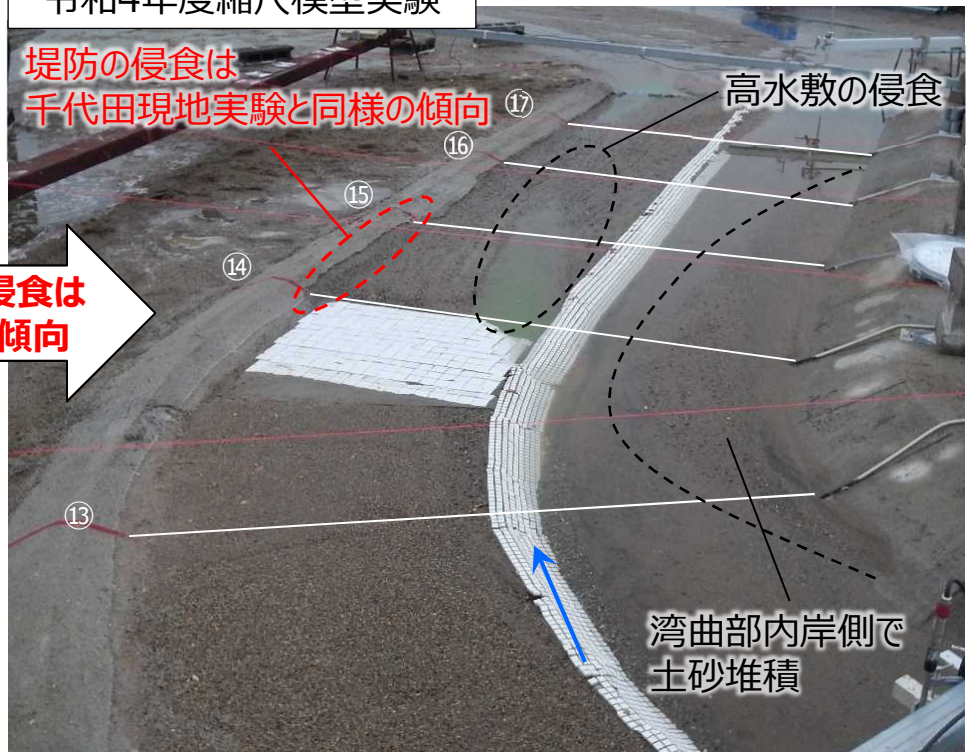
■令和4年度の縮尺模型実験では、高水敷侵食状況だけでなく、千代田現地実験の堤防侵食状況等を概ね再現できた。

令和4年度千代田現地実験



堤防の侵食は
同様の傾向

令和4年度縮尺模型実験



急流の複断面河川湾曲部における堤防侵食の検討に関するまとめ①

これまでに得られた知見

急流の複断面河川湾曲部において生じる堤防侵食のメカニズム

＜水の流れ＞

- 湾曲部内岸周辺の流速が徐々に遅くなり、流れの直進性が強くなり、主流は外岸へ偏る。
- 外岸へ偏った主流は、低水路から高水敷へ乗り上がり、流下する。
- 高水敷の侵食が生じると、侵食箇所をきっかけに高水敷上で堤防に向かう流れが発達しやすい状況になる。

＜土砂の動き＞

- 湾曲部内岸側の低水路では土砂が堆積し、砂州が形成される。形成した砂州は、徐々に発達する。
- 低水路を流れる土砂は、高水敷へ乗り上がらず、高水敷上の土砂収支はマイナスとなり、湾曲部外岸の低水護岸背面から高水敷の侵食が生じる。
- 高水敷の侵食範囲は、湾曲部外岸の低水護岸背面から堤防に向かって拡大・進行し、やがて堤防を侵食する。

侵食メカニズムに対して施した対策工法の評価

- 高水敷の一部（初期に生じた高水敷洗堀箇所）に保護工を設置することで、高水敷の侵食は、低水護岸背面に沿って進行し、堤防へ接近する現象を抑制する効果がある。
- 高水敷保護工は、堤防に向かって流れる主流も抑制し、高水敷の流速を遅くさせる効果がある。

現地の不確定さについて

- 高水敷保護工の形状が、堤防側が少しでも低い場合、高水敷の流れが堤防側へ寄り、保護工と堤防の境界部が侵食しやすい状況となる危険性がある。
- 高水敷保護工より下流部の河床材料が細かい場合、特に保護工よりも下流では侵食が生じやすい（土砂が移動しやすい）状況になるため、より堤防侵食を助長することがある。
- 堤防において、部分的に脆弱な箇所がある場合、その箇所から現象が拡大することがある。

その他

- 数値解析（実務で一般的に用いられる平面二次元河床変動解析）において、湾曲二次流の影響が反映された数値解析モデルを用いることで、高水敷・堤防侵食状況を再現することが可能となる。
- ただし、構造物周辺の局所的な洗堀や低水路内岸の土砂堆積が過大であり、構造物周辺の三次元的な流れの再現性や混合粒径モデルへの適用には課題がある。

急流の複断面河川湾曲部における堤防侵食の検討に関するまとめ②

各河川への適用にあたって

対策工検討に関する考え方

- 低水路から高水敷に乗り上げた流れによる高水敷侵食が堤防へ広がることを防ぐ対策を検討する。
- 現地の条件や湾曲二次流の影響が反映された数値解析モデルを用いることで、高水敷・堤防侵食状況を再現することが可能となり、堤防侵食の危険性の概略検証の検討に有効である。
- 河川によって様々な条件の違いがあるため、現地の条件を出来る限り反映させた、数値解析による堤防侵食危険性の概略検証と縮尺模型実験での検証を組合せた有効的な検討を行う。
- 各河川の対象箇所ごとで現地の条件をできるだけ正確に反映することに留意する。

現地で施工する際の留意点

- 保護工の設置範囲等については、実験条件等を十分に考慮する必要がある。
- 保護工の形状が堤防側が低い場合や高水敷の河床材料が細かい場合、堤防侵食を助長する可能性があるため、現地の状況を十分に考慮する必要がある。

今後に向けて

将来的に各河川の対策事例や対策箇所の洪水後モニタリングデータを収集整理し、対策のための技術資料作成を検討