

自然流体力で土砂流入を防止する用水構造設計 ～歴史的河川構造物を参考とした「象の鼻」構造の採用～

松田 征之助¹・関谷 賢正¹・長野 紋子¹

¹九州地方整備局 筑後川河川事務所 調査課 (〒830-8567 福岡県久留米市高野1-2-1)

筑後川水系隈ノ上川では、筑後川水系河川整備計画に基づき河川改修として引堤に着手している。引堤に伴い既設伏越しを改築(延伸)する必要があり、用水の維持管理の観点から、これまで以上に土砂の流入に対する対策を講じる必要が生じている。この課題に対し、歴史的河川構造物である石井樋(嘉瀬川)の「象の鼻」を参考とした伏越しの構造設計を行ったことから、その内容を報告するものである。

キーワード 象の鼻, 土砂流入防止, 螺旋流, 導流堤, 反転水路, 自然排砂機能

1. はじめに

筑後川水系隈ノ上川は、日田郡前津江村の奥耳納山地に発し、うきは市に入った後、九州でも有数な棚田による農作地域を貫流し合所ダム(福岡県管理)を通り小塩川を合わせ、筑後川河口から56.5km地点に左支川として合流する流域面積68km²、流路延長14.1kmの一級河川である。筑後川合流点から上流側に3.4kmまでの区間を国土交通省にて直轄管理を行っている。(図-1)



図-1 筑後川流域図

隈ノ上川は、川幅が狭く、堤防も低いことから水害に対する安全度が低く、平成24年7月九州北部豪雨等、過去から家屋等の浸水被害が発生している。このため、筑後川水系河川整備計画に基づき河道掘削、橋梁架替、及び引堤に着手している。また、周辺には、隈ノ上川と筑後川の合流点から0.3km上流に位置する大石堰を取水口とする灌漑を目的とした大石用水路が整備されており、隈ノ上川を長野伏越しにて下越ししている。

一般に用水路では、用水の取水時に河川水とともに土砂が混入してくることから、通水量の確保のためには定期的な土砂の排土管理が必要となる。伏越しは、河川を地下で横断する施設であることから、設置深度が深く、また、常に満水状態であることから、土砂の排除には非常に労力を要する。引堤により堤防間の距離を広くすることに伴い、既設伏越しを改築(延伸)する必要があり、用水の維持管理の観点から、これまで以上に土砂の流入に対する対策を講じる必要が生じている。(図-2)

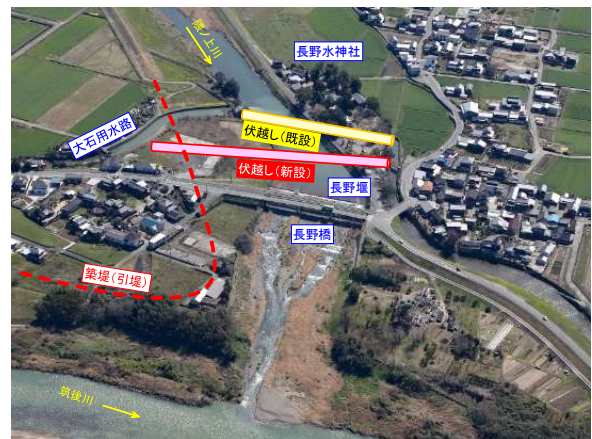


図-2 隈ノ上川改修の概要

本稿は、この土砂流入の課題に対し、嘉瀬川(佐賀県)の歴史的河川構造物である石井樋の「象の鼻」(図-3)を参考として、下流からの用水を上流に反転させる水路により土砂を沈降させる仕組みを採用すると同時に、洪水時の流れを利用した排砂機能を持たせるなど、自然の流体力を用いて伏越しへの土砂流入を防止する構造の設計を行ったことから、その内容を報告するものである。



図-3 石井樋(嘉瀬川)

2. 長野伏越しの概要

大石用水は、寛文4年(1664年)本松平右衛門を始め五庄屋の発起により、久留米藩の丹波頼母重次の指導監督によりうきは市浮羽町高見地先の現在地に筑後川を堰き止めて左岸より取水を始めて以来、徐々に灌漑面積を広げるとともに水路を延伸し現在に至っている。取水口である大石堰の水利権は表-1のとおりである。

長野伏越しは、大石用水の取水口である大石堰から大石用水の約3.1km下流側に位置する農業用水施設(許可工作物)である。隈ノ上川の南側へ用水を運ぶために隈ノ上川を伏越し形式で下越ししている。長野伏越し(既設)の構造諸元を表-2のとおり示す。なお、大石用水は、年間を通して灌漑に利用されていることから、工事中においても通水を停止することができない状況である。

表-1 大石堰の水利権

目的	内容
取水位置	かんがい用水 大石堰(うきは市浮羽町高見字水道1番1地先)
最大取水量	夏期灌漑期 : 16.000m ³ /s 冬期灌漑期 : 6.665m ³ /s
灌漑面積	1,932.4ha
灌漑期間	夏期灌漑期 6/14~10/10(内、代かき期6/14~6/23) 冬期灌漑期 10/11~6/13

表-2 長野伏越し(既設)構造諸元

	伏せ越し本体	余水吐き樋管
断面形	φ1800×3連	下流側: B1.2m×H1.0m×2連 上流側: B2.6m×H1.5m×2連
本体構造	ヒューム管	RCボックスカルバート
基礎形式	直接基礎	不明
ゲート形式	手動ラック式 鋼製スライドゲート	手動ラック式木製ゲート
建設年	昭和34年(供用開始から61年経過: 令和3年現在)	
施設位置	隈ノ上川 0k325付近	

用水の伏越しへの流入方法は、用水路から直接伏越し呑口に入り、暗渠であるヒューム管(φ1800mm×3条)を通して河川を横断している。

余水吐は、呑口の上下流に樋門が設置され、隈ノ上川へ放流されている。この呑口付近の用水路形状は、右に湾曲しており、用水に混入した土砂は、外岸側をとおり上流側の余水吐樋門から隈ノ上川に流出する形態となっている(図-4)。

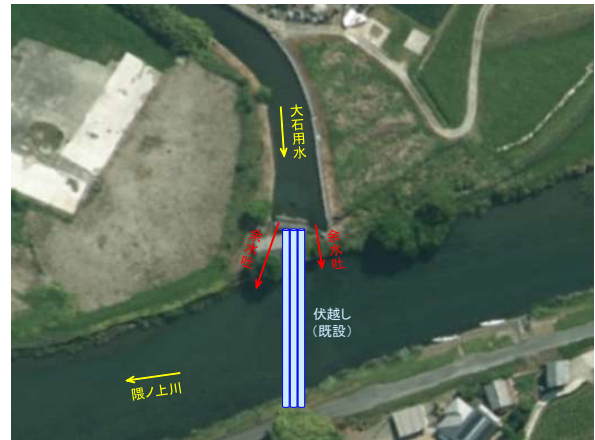


図-4 余水吐の現状

3. 長野伏越し改築計画

(1) 改築計画の概要

伏越し改築は、堤内地状況、隈ノ上川の河川法線、左右岸側の用水路の取り付け位置、通年の灌漑用水を確保するための施工上の制約等から、現施設の下流側に建設するものとした。また、余水吐は工事の進捗より伏越しとは別工事となることから、工事の影響範囲以上の隔離を確保する位置とした(図-5)。

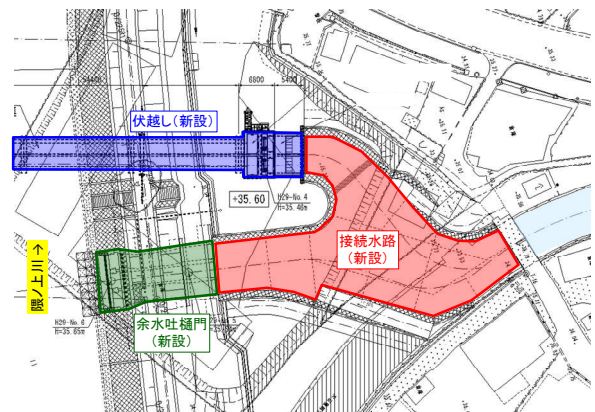


図-5 既往設計: 長野伏越し改築(呑口側)

(2) 土砂流入に対する課題

用水の取水口に求められる機能は、灌漑期に必要な用水量を確保すると同時に、維持管理の観点から土砂や浮遊物の流入を防止することである。

現在の用水路は、毎年冬期に用水を停止して土砂撤去が行われており、用水への土砂混入が多い状況にある。伏越し改築の既往の設計も伏越し本体への土砂流入や、余水吐樋門への分水部付近の急拵する箇所へ土砂堆積が懸念され、その対策方法が課題であった(図-6)。

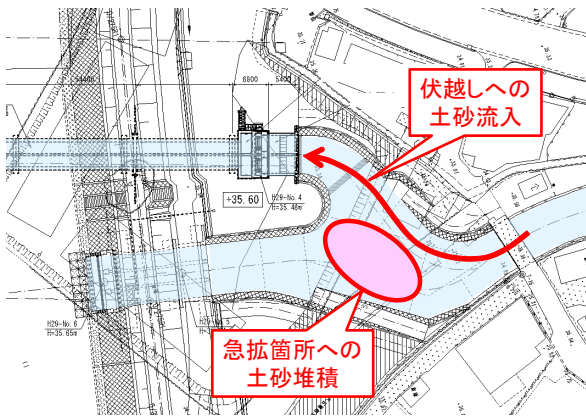


図6 伏越し改築に伴う課題

4. 象の鼻水路計画

通常、用水には降雨等により土砂(浮遊砂)が混入しており、伏せ越し直前の沈砂池での土砂流入対策が講じられることが多い。

本伏越しでは、沈砂池に加え、用水路から伏越し間の接続水路に、嘉瀬川(佐賀県)の歴史的河川構造物である石井樋の「象の鼻」(図-3)を参考として、後述する「導流堤」、また、「反転水路」を設けることで、自然の流体力を利用し伏越しへの土砂を防止すると同時に、堆積した土砂を洪水時の流れを利用し自然に排砂させる機能を持たせることで、維持管理性を向上させる計画とした。

(1) 湾曲部での流れ

湾曲部の外岸では、直進性をもつ流れが外岸の制約を受けて下降し螺旋流を生じる。螺旋流は曲線部を進むにつれて強くなり、水衝点で最大となった後、下流に向かって拡散していく(図-7,図-8)。螺旋流が強くなるにつれて掃流力が増加するため土砂は堆積できず、一方で、水衝点の対岸にあたる水裏部には強い掃流力が発生せず土砂が堆積する。水衝点を過ぎると流れが拡散するため、流速が低下して掃流力が小さくなり土砂が堆積しやすくなる。

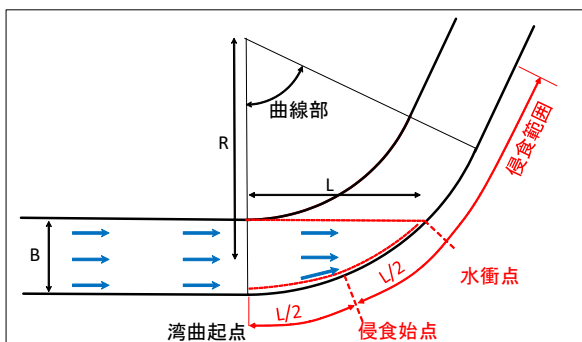


図-7 湾曲部での流れ

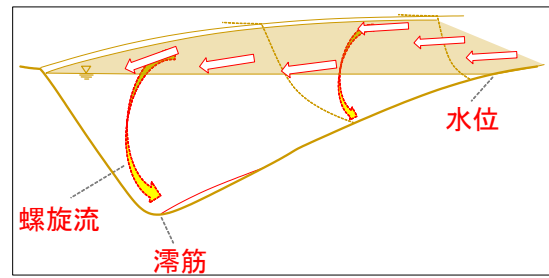


図-8 螺旋流の概念図

(2) 導流堤による螺旋流の安定と上澄み取水

伏越し上流側の用水路は、左岸に湾曲していることから、外岸側である右岸側に螺旋流を形成する。螺旋流は下向きの流れを発生させ土砂を内岸側に押し流す力が作用する。これにより、土砂含有の少ない外岸側の上澄み水を取水するために、螺旋流を下流側まで安定して発生させる機能、及び越流機能を有した「導流堤」を設けることとした(図-9)。浮遊砂は底層付近に多く含まれることから、螺旋流を利用し、湾曲部外岸で浮遊砂の少ない表流水を取水することで土砂流入の防止を図ることを目的としている。これは、嘉瀬川の石井樋に用いられている、越流部の「野越」、及び下流側の導流堤である「象の鼻」からなる構造を参考とした。



図-9 湾曲部の流れと越流部

a) 平面線形

浮遊砂が少ない状態の表流水を取水するためには、湾曲部内岸側に堆積する土砂が移動せず停止し、水路内の濡筋が安定する平面形状である必要がある。

濡筋の安定性の評価については、実験水路による実験結果により、河川の蛇行長(Lm)と水路幅(b)の比、及び水路の屈折角(θ)と、砂礫堆の移動限界の関係¹⁾が明らかにされている(図-10,図-11)。これを用いて砂礫堆が停止する平面形状を設定し濡筋を安定させるものとした。なお、図-10に加筆した①が用水路接続部、また、②が導流堤周辺の設計形状の評価結果であり、それぞれ砂礫堆が停止するエリアであることから、濡筋が安定すると判断できる。

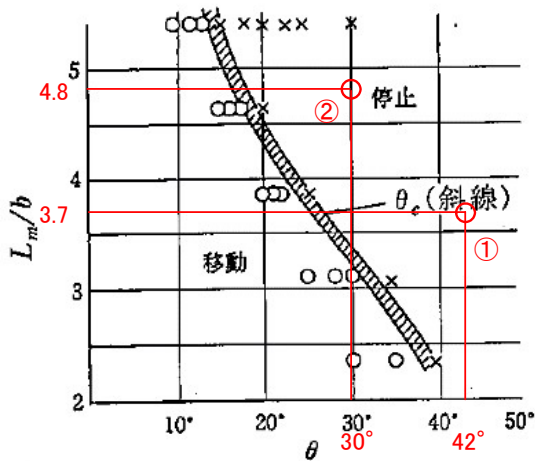


図-10 屈折蛇曲水路における θ_c に一部加筆

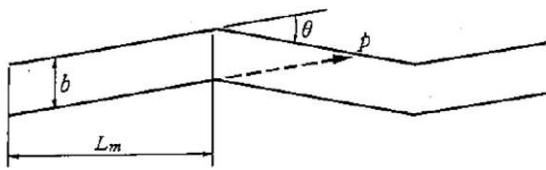


図-11 湾曲の幾何学的条件

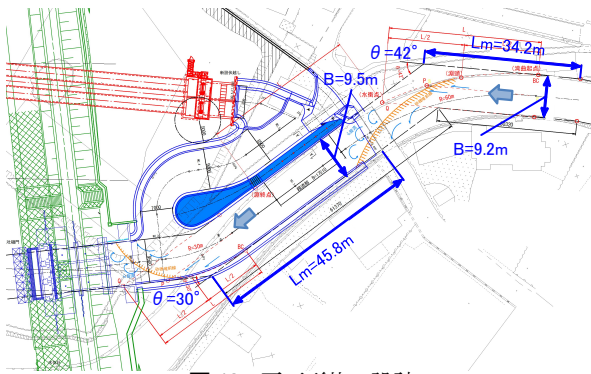


図-12 平面形状の設計

b) 断面形状

取水する越流部は、湾曲部下流の螺旋流が安定している区間とし、越流堤高は水理解析結果を基に冬期灌漑期の水位よりも若干高く、夏期灌漑期に越流できる高さに設定した。また、取入口(越流部)の敷高は、河川の含砂量の鉛直分布は設計取水位の水面から $0.6H$ 辺りから急増し $0.8H$ 付近で最大となり、含砂量の少ない $0.4H$ 以内が望ましいとされている²⁾ことから、これも満足する高さに設定した。(H取入口前の水深)

水路底面は、螺旋流の機能が安定するように横断方向に2%の片勾配を設けて外岸側の水路高を下げ、また、法勾配を1:0.5の急勾配とした(図-13)。

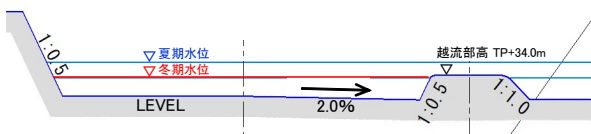


図-13 越流部断面形状

(3) 反転水路の計画

導流堤先端部から伏越し呑口部までの用水路形状については、導流堤で下流に導いた用水を余水吐近傍で上流に反転させる「反転水路」を計画し、流路長を長くすることで浮遊砂を沈降させることとした。さらに、反転させた後は水路の縦断を上り勾配とし、また、水路幅は間口部(B=7.0m)を狭く、上流側を広く(B=9.0m)することで流速を低減して掃流力を下げ、導流堤区間を通過した土砂の沈降を促すものとした(図-14)。

これらを実現するために、導流堤に象の鼻形状を採用し、導流堤先端部の幅を広くすることで反転水路の入口を狭くすることとした。なお、導流堤区間を通過した土砂が、伏越しに流入しないよう反転水路入口付近に堆積させる計画としている。

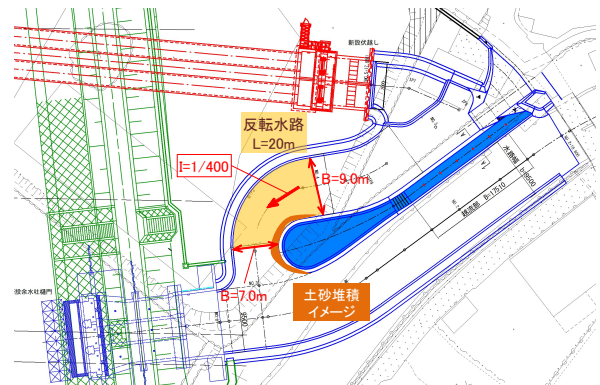


図-14 反転水路計画

(4) 取水方法の工夫

用水量の少ない冬期は浮遊砂も少ないため反転水路のみで土砂流入を抑制し、用水量の多い夏期は浮遊砂量も多いことから、導流堤の越流部に生じる螺旋流を活用し、浮遊砂の少ない上澄み水を越流させるものとした(図-15)。

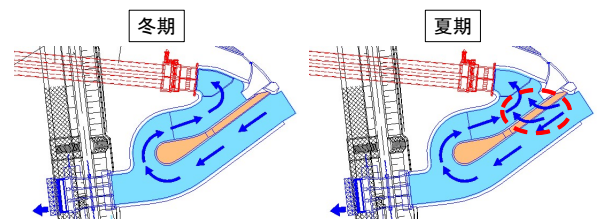


図-15 冬期・夏期の流れ

(5) 洪水時の流れを利用した排砂機能

豪雨等で用水路の水位が上昇した場合、余水吐樋門のゲートを全開して用水を限ノ上川へ放出する。この状態の際に自然の流体力を用いて排砂が可能となるように工夫を行った。

余水吐樋門の位置は、用水路から滑らかな線形の延長上とし、また、象の鼻付近の接続水路の縦断勾配を変化させ、流速を上げて掃流力を向上させる計画とした。水路の縦断勾配の設定にあたっては、現況水路勾配の流速を把握の上、勾配を急にすることによる流速増加割合、

及び射流として堆積土砂のフラッシュを促すためにフルード数($Fr=1.0$ 以上)を目安に設定した(表-3)。

表-3 接続水路勾配の比較検討

	CASE1	CASE2	CASE3	備考
水路勾配I	1/540	1/360	1/260	
流量(m ³ /s)	16.0	16.0	16.0	
流速(m/s)	2.17 (1割増)	2.47 (1.2割増)	2.71 (1.4割増)	現況2.0
水深(m)	0.75(0.20)	0.66(0.11)	0.60(0.04)	()内は象の鼻付近の越流水深
限界水深(m)	0.65	0.65	0.65	
フルード数Fr	0.80	0.97	1.11(射流)	
採否			採用	

CASE1: 橋梁部の現況水路高と計画の樋門敷高の水路縦断勾配(水路高低差10cm)
CASE2: 橋梁部の現況水路高と計画の樋門敷高-5cmの水路縦断勾配(水路高低差15cm)
CASE3: 橋梁部の現況水路高と計画の樋門敷高-10cmの水路縦断勾配(水路高低差20cm)

また、余水吐樋門付近の右湾曲部については、螺旋流の効果を向上させるため、水路の外岸側(左岸側)が低くなるように片勾配を設けることとし(図-16)、さらに導流堤の越流部から反転水路を下って排砂できる構造とすることで、堆積土砂の排砂効果を向上させた(図-17)。

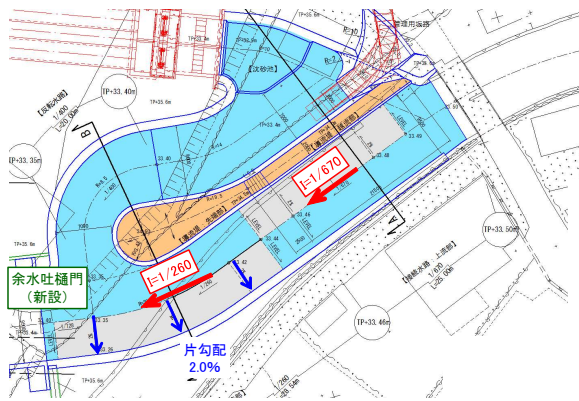


図-16 接続水路の縦断勾配と片勾配

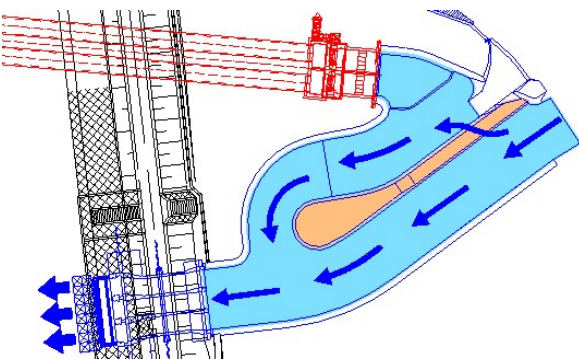


図-17 自然排砂時(洪水時)の流れ

(6) 完成イメージ・計画図

以上により設計を行った象の鼻構造による接続水路計画の完成イメージを図-18のとおり示す。また、これまでの工夫を取りまとめた接続水路の計画図を図-19のとおり示す。

5. 関係機関との合意形成を円滑に行うための工夫

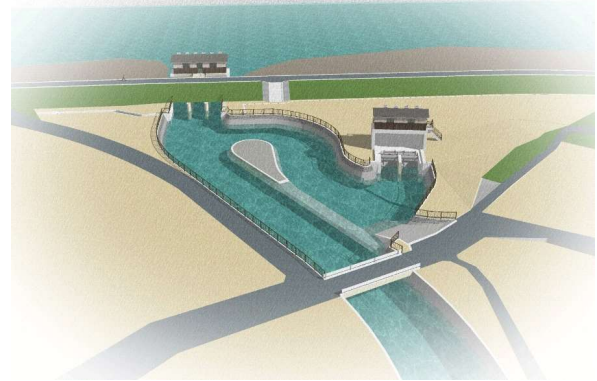


図-18 完成イメージ(夏期の流れ)

象の鼻構造は、通常の用水路とは形状が大きく異なることから、設計に際しては、土地改良区等の関係者との合意形成を円滑に図る工夫を行った。

その中で、導流堤、越流部、反転水路の仕組みを視覚的に理解して、効果を実感していただくため、模型を製作し説明を行うと共に、参考とした嘉瀬川の取水施設の紹介も併せて行った。(写真-1)。



写真-1 模型を活用した関係機関協議(大石堰土地改良区)

6. おわりに

長野伏越しの改築にあたっては、土砂流入の課題に対し、嘉瀬川(佐賀県)の歴史的河川構造物である石井樋の「象の鼻」を参考として、先人の知恵を借りつつ現地の地形に即した施設設計を行うことで、土砂流入を防止する構造の設計を行った。

今後は、長い歴史のある大石用水、及び長野水神社を踏まえた樋門の上屋の景観検討等により、周辺の景観と調和した施設の計画を行うなど、地域の観光資源の価値を保全する施設整備の必要があると考える。

参考文献

- 1) 木下良作・三輪式 砂礫堆の位置が安定化する流路形状 新砂防(1974)
- 2) 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 [頭首工] (H20.3)

接続水路計画図

設計思想
 改良事業計画基準（頭首工）における取水位置の選定及び防砂の観点
 ● 土砂の流入を抑制し、流況（淵の形成）の考えを取り入れる。
 ● 夏季灌漑と冬季灌漑の流量に応じ、流れを変化させ伏越しに土砂が入りにくい工夫をする。
 ● 洪水時は治水に影響がないようスムーズに排水ができる水路縦形とし、かつ堆砂のフラッシュ効果を得られる工夫をする。

PINT③：反転水路の工夫
 ● 反転水路の入り口は狭くし、通常時には土砂の流入防止、フラッシュ時には土砂が排出されやすいよう伏越しを付けて逆勾配をつける。

PINT①：越流堤（島の鼻）による取水口の工夫
 ● 取水口は、水路湾曲部頂点から外岸側頂点直下を通過し、下流部を通過する。よって、伏越しの前縁を形成する。よって、伏越しの前縁を形成する。よって、伏越しの前縁を形成する。
 ● 越流堤の高さは冬季灌漑の水位より高くし、夏季は反転水路を通過する。よって、伏越しの前縁を形成する。よって、伏越しの前縁を形成する。
 ● 越流堤の断面は水路の法線勾配を高いままに保ち、土砂が上流に溜まるのを防ぐ。よって、伏越しの前縁を形成する。よって、伏越しの前縁を形成する。
 ● 越流堤の断面は水路の法線勾配を高いままに保ち、土砂が上流に溜まるのを防ぐ。よって、伏越しの前縁を形成する。よって、伏越しの前縁を形成する。

PINT②：接続水路の工夫
 ● 水路勾配は下流部で勾配を上げて、フラッシュ時の流速を増加させて土砂を排出しやすくする。
 ● 越流堤の越流部付近及び下流の湾曲部では、ら旋流が生じやすいよう、水路に片勾配をつける（A-A、B-B断面）。

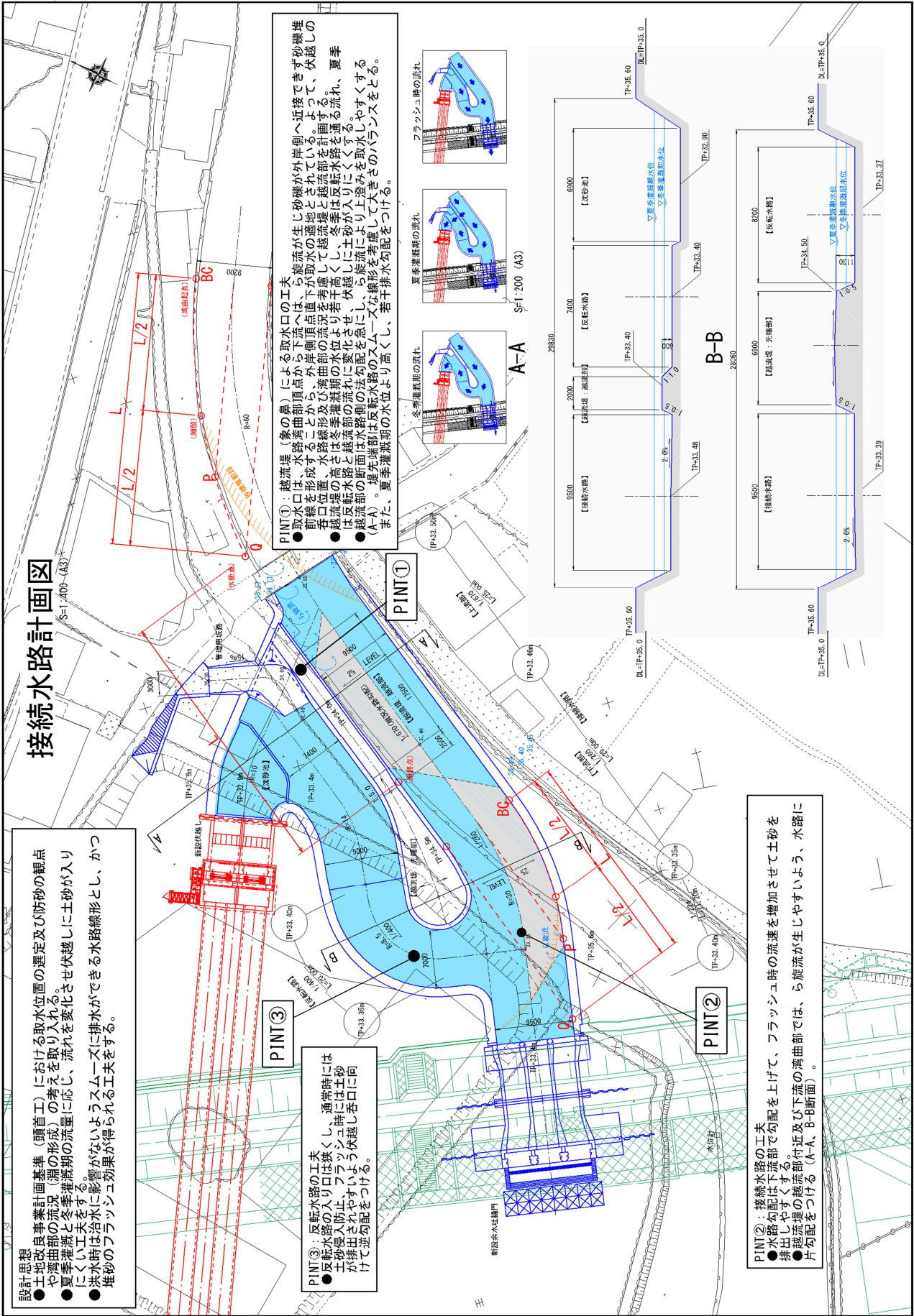


図-19 接続水路計画図