

NATMによる 河床堆積物区間の掘削について

小波津 健太¹・香西 陸²

¹近畿地方整備局 大和川河川事務所 工務課 (〒582-0009大阪府柏原市大正2丁目10番8号)

²株式会社安藤・間 水海川トンネル出張所 工事係 (〒910-2556福井県今立郡池田町松ケ谷22字-11)

足羽川ダム建設事業では、足羽川下流域における洪水被害軽減を目的として、洪水調節専用のダム及び分水堰と導水トンネルから構成される水海川分水施設の整備を進めている。水海川導水トンネルは、足羽川の支川である水海川から、足羽川ダムへ導水するためのトンネルであり、2017(平成29)年2月の1期工事から始まり、2026(令和8)年8月現在は3期工事にて、掘削を完了し、呑口工事の進捗を待って、貫通する予定である。3期工事では、トンネル掘削の終盤が対象区間であり、切羽の自立を前提としたNATMではあまり遭遇することのない河床堆積物が確認された。本稿では、この河床堆積物区間における施工時の工夫について報告する。

キーワード 導水トンネル、トンネル掘削、未固結地山、安全対策、施工

1. 足羽川ダム建設事業の概要

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川(福井県今立郡池田町小畑地先)(図-1参照)に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千 m^3 、有効貯水容量(洪水調節容量)28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである。下流地域の洪水被害軽減を目的としており、平常時は水を貯留しない洪水調節専用の流水型ダムである。

また、足羽川ダム建設事業では、ダム本体を足羽川支川の部子川に構築するとともに、足羽川支川の水海川からダムへトンネルで結び導水する。将来計画では、さらに足羽川本川上流部等の3河川からも導水する予定である(図-2参照)。

水海川導水トンネルは、洪水時に水海川からダムへ導水するための全長4,720.55mの長大トンネルであり、福井県今立郡池田町と福井県大野市の境界に位置する部子山から北西に伸びる尾根を貫く。この尾根は、足羽川支流の部子川流域と水海川流域を分ける分水嶺となっている。水海川導水トンネル工事においては、導水路の吐口に当たる金見谷川側から呑口に当たる水海川側へ全長4,720.55mの長距離を片押しによって施工している(図-3参照)。

本稿では、水海川導水トンネル3期工事におけるトンネル掘削終盤に出現した、水海川側坑口部の河床堆積物への対応の工夫について述べる。



図-1 足羽川ダム位置図

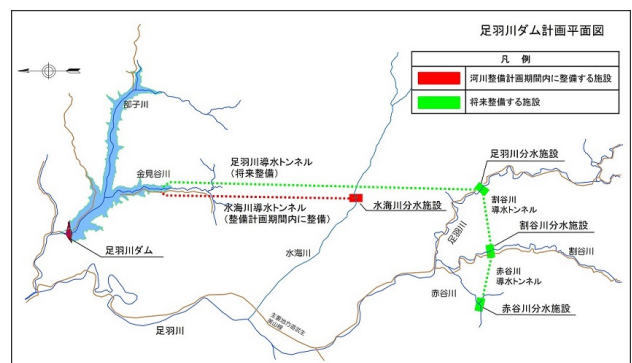


図-2 足羽川ダム計画平面図

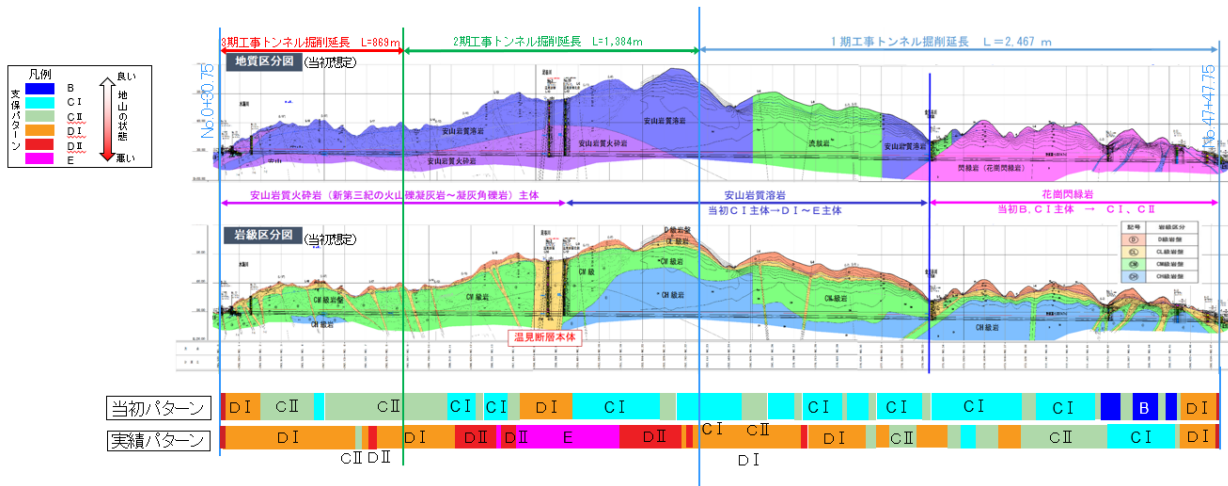


図-3 水海川導水トンネル地質図

2. 水海川導水トンネルの概要

(1) トンネル概要

水海川導水トンネルは、全長4,720.55m、内径8.5m、縦断勾配1/170のトンネルであり、仕上がり内径は直径8.5mの円形、底部は床版コンクリートを設置する。

トンネル部の地質は大きく2種類に分けられ、吐口側より約1,500mが花崗閃緑岩、呑口側より約3,200mが安山岩溶岩、火砕岩類を主として構成される。

また、TD（トンネル吐口からの距離）3,000m付近では、濃泥断層帯を構成する活断層の一つである温見断層との交差区間（図-4）が確認され、周辺では脆弱な自破砕状溶岩の分布が確認された。

(2) 吞口部側概要

呑口側では、呑口構造物のほか、水海川の洪水を足羽川ダムに導水するための分水堰と、分水堰設置箇所に

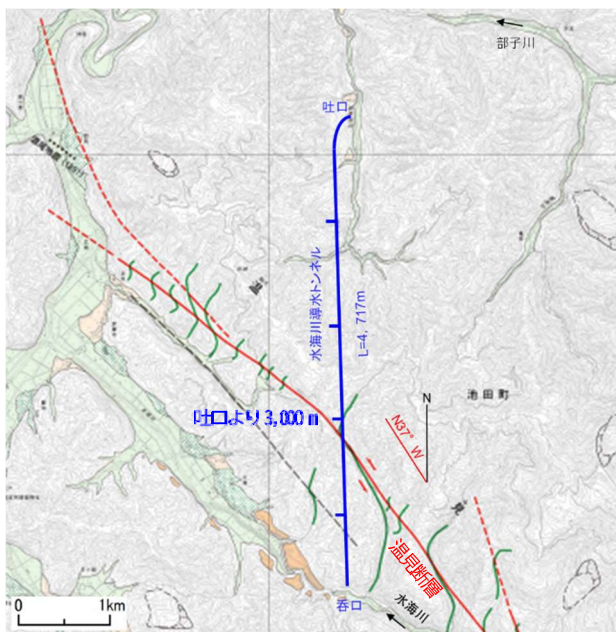


図-4 水海川導水トンネルと温水断層の位置関係 1)に加筆

現存し、撤去予定の番屋堰堤（写真-1参照）の機能を代替する貯砂ダムを上流に構築する（図-5参照）。



図-5 呑口側全体図

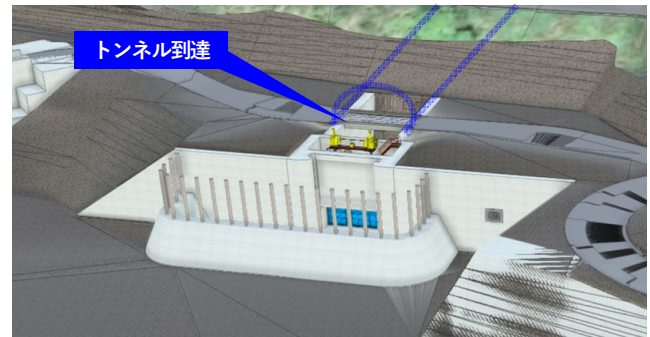


図-6 呑口構造物



写真-1 番屋堰堤（既存）

3. 呑口部のトンネル掘削について

呑口区間のトンネル掘削において、以下のような課題が挙げられた。

(1) 施工時の課題

a) 河床堆積物の出現

トンネル呑口部には、前述の番屋堰堤により上流からの土砂が堆積し、トンネルの呑口区間（TD4,700m付近）にはトンネル掘削範囲内に河床堆積物（土砂）が出現することが想定された（図-7参照）。

b) 周辺施設の状況

呑口部では、軟質な河川堆積物に加え、トンネル上部に、福井県道熊河池田線が存在する（写真-2、図-8参照）。本県道については、一般の通行のみならず、分水

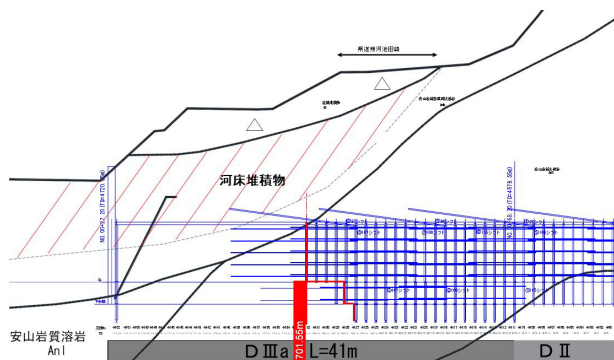


図-7 トンネル縦断面図



写真-2 呑口部

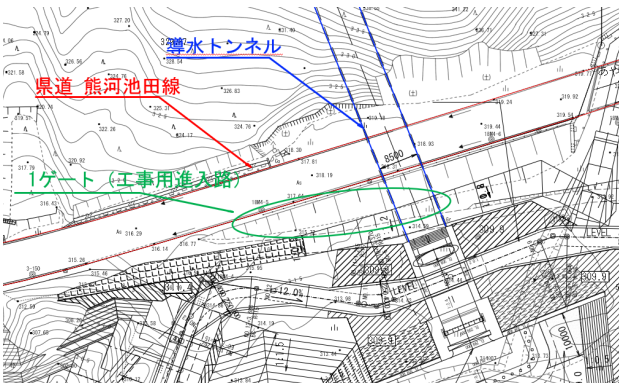


図-8 呑口部平面図

施設全体の進入路として、ダンプトラックや重機等を搭載した大型車両が通行するため、安全に通行できるよう対策が必要となった。

(2) 地質の確認

事前のボーリングおよび切羽確認によって、軟質な河床堆積物の存在（写真-3、図-9、表-1参照）を確認した。もともと岩盤を対象とした山岳工法であるNATMであるが、近年、その対象地盤が、軟質な地盤に拡大されてきた。とはいえ、今回のような代表N値2程度の軟質な河床堆積物区間を掘削することは極めてまれで、適用に当たり、慎重な検討を行った。

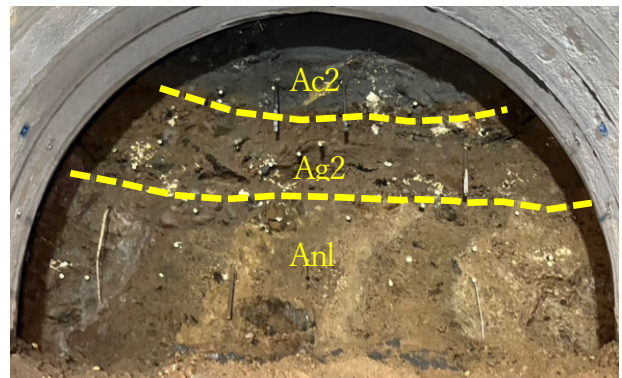


写真-3 トンネル切羽 (TD4,705.55m)

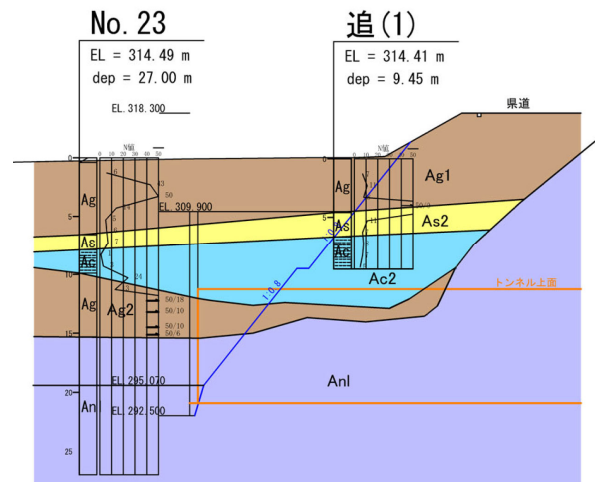


図-9 呑口部地質縦断面図

表-1 地盤定数

地質	単位体積重量 γ (kN/m ³)	代表N値	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
礫混じり砂 (Ag1)	19.0	5	0	30
砂 (As2)	17.0	5	0	30
砂混じり粘土 (Ac2)	16.0	2	13	0
礫混じり砂 (Ag2)	20.0	10	0	40
軟岩 (AnI)	23.0	50以上	482	34

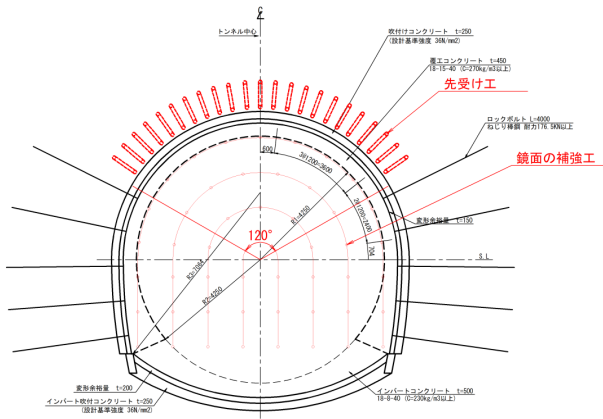


図-10 補助工法追加イメージ

(3) 対策方法

前述した課題を踏まえ、対策方法の検討を行った。

本施工においては、トンネル天端及びトンネル切羽の補強を目的として、先受け工及び鏡ボルトの追加を実施した(表-2, 3参照)。

補助工法は、切羽天端部を長尺鋼管フォアパイリング、鏡面を小口径長尺鋼管先フォアパイリングとし、切羽の状況に応じて打設シフト、打設間隔の変更、注入材量を増量する等の対策を臨機に実施した。

表-2 補助工法比較検討表(切羽天端の補強)

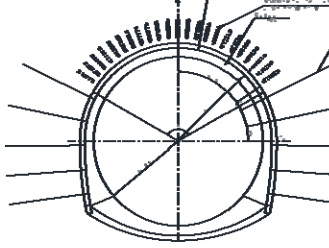
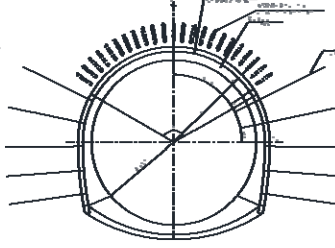
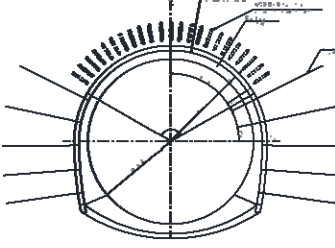
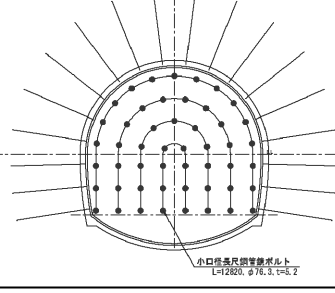
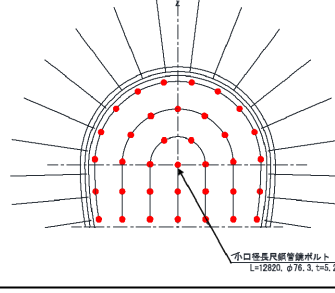
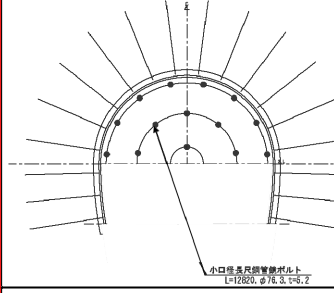
項目	1案: 小口径長尺鋼管フォアパイリング	2案: 長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)	3案: 長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)
概要			
概要	鋼管径: $\phi 76.3\text{mm}$ 打設長: 12.920m 打設ピッチ: 0.45m 打設本数: 23本/シフト 打設シフト: 4シフト×9.0m	鋼管径: $\phi 114.3\text{mm}$ 打設長: 12.920m 打設ピッチ: 0.45m 打設本数: 23本/シフト 打設シフト: 4シフト×9.0m	鋼管径: $\phi 114.3\text{mm}$ 打設長: 12.920m 打設ピッチ: 0.45m 打設本数: 23本/シフト 打設シフト: 4シフト×6.0m
施工概要	・トンネル断面外周にドリルシャフトにより二重管方式で小口径の鋼管($\phi 76.3\text{mm}$, $L=12.92\text{m}$)を一定間隔に穿孔推進し、注入材により鋼管周囲の地山改良を行う。長尺鏡ボルトを併用することにより前方地山の先行変位を抑制し、切羽・天端崩落等を防止する。	・トンネル断面外周にドリルシャフトにより二重管方式で鋼管($\phi 114.3\text{mm}$, $L=12.92\text{m}$)を一定間隔に穿孔推進し、注入材により鋼管周囲の地山改良を行う。長尺鏡ボルトを併用することにより前方地山の先行変位を抑制し、切羽・天端崩落等を防止する。天端崩落防止効果は大きい。	・トンネル断面外周にドリルシャフトにより二重管方式で鋼管($\phi 114.3\text{mm}$, $L=12.92\text{m}$)を一定間隔に穿孔推進し、注入材により鋼管周囲の地山改良を行う。長尺鏡ボルトを併用することにより前方地山の先行変位を抑制し、切羽・天端崩落等を防止する。天端崩落防止効果は大きい。
施工性	・二重管掘のため、孔壁が不安定な地山でも施工可能。 ・小口径の鋼管はAGF鋼管に比べて軽い(半分程度)ため、扱いやすい。 ・打設ピッチを9mとしているため、①案に対し、施工性に優れる。	・二重管掘のため、孔壁が不安定な地山でも施工可能。 ・重量物(AGF鋼管: 50kg/本)を扱うため、安全性に留意して作業を行う必要がある。 ・打設ピッチを9mとしているため、①案に対し、施工性に優れる。	・二重管掘のため、孔壁が不安定な地山でも施工可能。 ・重量物(AGF鋼管: 50kg/本)を扱うため、安全性に留意して作業を行う必要がある。 ・打設ピッチを6mとしているため、①案に対し、施工性に優れる。
概算工費(直工)	・小口径長尺鋼管先受け工: 859 千円/ m (基準)	・長尺鋼管先受け工: 1,058 千円/ m (差額 + 139 千円/ m)	・長尺鋼管先受け工: 1,643 千円/ m (差額 + 784 千円/ m)

表-3 補助工法比較検討表(鏡面の補強)

設計パターンⅠ	設計パターンⅡ	設計パターンⅢ
地山等級: E等級	地山等級: D等級	地山等級: C等級
		
@1200mm×50本 (上半: 34本, 下半: 16本)	@1500mm×36本 (上半: 22本, 下半: 14本)	@1800mm×14本
$\phi 76.3\text{mm}$ 50本 9mシフト (シリカレジンを注入)	$\phi 76.3\text{mm}$ 22本 6mシフト (シリカレジンを注入)	$\phi 76.3\text{mm}$ 14本 9mシフト (シリカレジンを注入)
2,620千円/m	1,768千円/m	700千円/m

掘削補助工法の採用は、TD4,651m以降から開始し、TD4,666mで小口径長尺鋼管鏡ボルトのシフト長を9mから6mへ変更、TD4,679.55mで長尺鋼管フォアパイリング（AGF）（9mピッチ）への変更、TD4,701.55mでAGFのシフト長を9mピッチから6mピッチ、注入材量を155kg/本から232kg/本へ変更、TD4,710.55mで注入式フォアポーリングの追加を実施した。

また、トンネルの沈下対策、上部の県道の沈下対策として、インバート支保を1mごとに早期閉合した。

(4) 結果

結果として、適切な補助工法の採用により、河床堆積物であってもNATMにより無事に掘削を完了することができた。また、河床堆積物が確認された以降の掘削については、河床堆積物による軟弱な地質状況であるため、発破によらずバックホウ・大型ブレーカを用いた機械掘削（写真4参照）とした。

県道への影響については、日々朝夕2回の計測により変位を観測、道路管理者への報告を実施した。



写真4 機械掘削状況

4. まとめ

本稿では、水海川導水トンネルにおけるNATMによる河床堆積物掘削の工夫を紹介した。

結果として、NATMによる河床堆積物の掘削は多くの補助工法が必要となり、非常に難しい施工であるといえるが、トンネルの地質状況は設計段階では読めない部分があり、山岳工法で遭遇した場合の一助となれば幸いである。

謝辞：本稿の作成にあたって適切な助言をいただきました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 金田，杉戸，田力，中田：1:25,000 活断層図「大野」，国土地理院，2018