

小断面トンネル工事における突発湧水に対する出水対策

ー 福岡導水施設地震対策2号トンネル併設水路下口工区工事 ー

Water Discharge Countermeasures for Sudden Water Inflow in Small-Section Tunnel Construction

告中修平*1 星野毅志*2

概 要

本報告は、福岡導水施設地震対策2号トンネル併設水路下口工区工事において発生した突発湧水に対する対策工法の検討から実施効果までを報告するものである。本工事は延長3,009.6mの水路トンネルを小断面 NATM 工法により施工中、掘削2,231.2m地点において毎分1.6m³の突発湧水が発生した。発生直後の緊急対応から恒久的な止水対策まで、一連の技術的対応について詳述する。止水工法としてウレタン系減水止水剤を用いた注入工法を採用し、約50%の減水効果を確認した。本事例は小断面トンネルにおける突発湧水対策の技術的知見として有用である。

key words : 突発湧水、止水工法、ウレタン系減水止水剤、水路トンネル、小断面 NATM

1. はじめに

1.1 工事概要

福岡導水施設は筑後川からの導水を担う重要なインフラ施設であり、終点部には延長5.5kmの既設トンネルが存在する。本工事は、この既設トンネルのバイパス機能を担う新設水路トンネルの建設工事である(図-1、図-2)。

施工対象区間はトンネル延長5.5kmの内下流側の約3,000mを下口工区として位置づけ、NATM工法により施工した。本トンネルの特徴は掘削断面積7.3m²という小断面にあり、一般的な道路トンネル(65m²)の約9分の1という極めて狭小な断面である(図-3)。



図-1 現場周辺地図

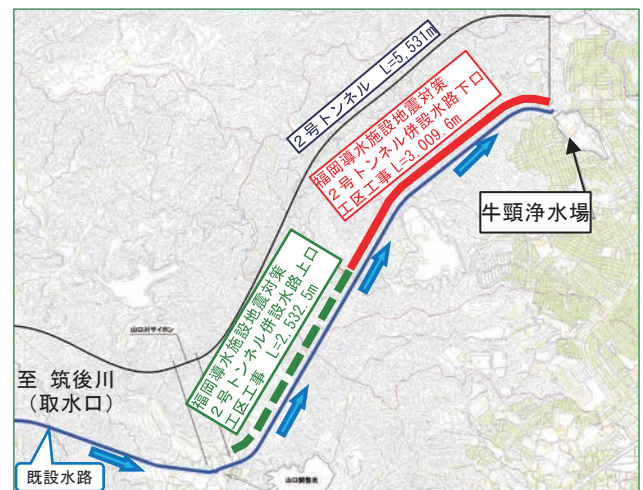


図-2 全体平面図

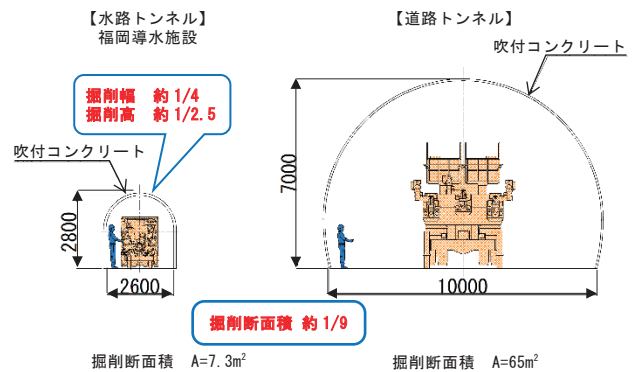


図-3 トンネル断面図比較

*1 Shuhei TSUGENAKA

九州支店土木部

*2 Takeshi HOSHINO

九州支店土木部 作業所長

最終仕上がり断面は直径 2m の円形水路となるため、覆工コンクリート施工後の内空断面は更に縮小される。このような小断面トンネルにおける施工管理は、一般的な道路トンネルとは異なる技術的配慮が必要となる。

2. 突発湧水発生状況

2.1 突発湧水発生の概要

2024 年 5 月 20 日、トンネル掘削 2,231.2m 地点において作業中に毎分約 1.6m³ の突発湧水が発生した。発破掘削直後、ずり搬出作業開始前の段階で大量の湧水が確認され、直ちに作業を中断し緊急対応に移行した。

この突発湧水により坑内全線 2,200m にわたって最大 200mm の冠水が発生し(写真-1)、約 1.5 ヶ月間の作業停止を余儀なくされた。小断面トンネルという制約条件下での突発湧水対応は、技術的に高度な判断と迅速な対応が求められる事例となった。

2.2 発生時の状況

突発湧水は発破掘削実施直後に発生した。

ずり搬出作業に先立つ地山状況確認の段階で、切羽鏡面からではなく主に底盤部からの湧水が確認された。トンネル縦断勾配が掘削方向に上り 0.04%であったため、湧水は坑口方向に向かって流下し、立坑坑口部へと順次流れ込む状況となった。

坑内には 500m 間隔で機械退避用の拡幅部が設置されているが、これらの箇所にも大量の湧水が流入した。

2.3 地質条件と湧水発生要因

発生箇所の地質縦断図によると、土被りは 110m 程度であり、岩盤は CH 級花崗岩で構成されている。

設計支保パターンは C タイプが適用され、節理が多いものの硬質な岩質であった。直近の掘削では湧水はほとんど見られず、にじみ程度の状況であった。

注目すべきは、発生箇所から約 200m 後方の既設トンネル施工時に破碎帯と呼ばれる不良地山が出現し、毎分 200L の突発湧水が記録されていたことである。しかし、当該箇所の掘削時には不良地山は確認されたものの湧水は発生しなかった。

設計図書における当該地点の湧水に関する記載は特になく、今回の突発湧水は予見困難な事象であったと判断される。

3. 緊急対応と設備対策

3.1 発生直後の緊急対応

突発湧水発生直後の最優先課題は坑内設備の保護と安全確保であった。特に高圧受電設備への浸水は重大な安全上の問題となるため、緊急的に枕木による嵩上げ措置を実施した(写真-2)。



写真-1 坑内冠水状況



写真-2 受電設備の嵩上げ

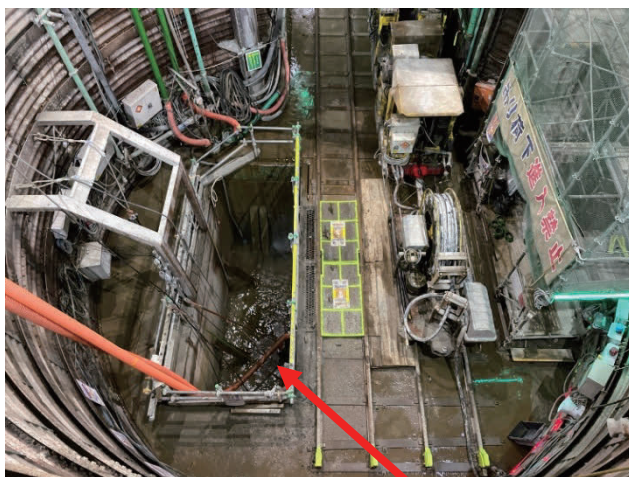


写真-3 緊急対応状況写真

立坑坑口部では既設の集水柵とポンプ設備では処理能力が不足し、ずりピット（搬出用ピット）への流入が継続した。排水対応については、既設の濁水処理設備では処理能力が大幅に不足したため、立坑湧水によるトンネル内への逆流を防止するため、非常時用に常備していた4インチ排水ポンプを緊急設置し、河川への直接排水を実施した(写真-3)。

切羽に向かう上り勾配と立坑部の緊急排水ポンプ設置により、水位の更なる上昇は阻止できたが、坑内全線の冠水状態は継続した。

3.2 仮設備の増強対策

切羽作業再開に向けた対策として、濁水処理設備と排水設備の大幅な増強を実施した。濁水処理設備については、切羽作業再開時の発生濁水量は最大120m³/hであり、既存設備を差し引いた処理能力90m³/hの増設が必要と算定した。実際の手配では処理能力30m³/hと60m³/hの設備を確保し、合計90m³/hを増設した(写真-4、図-4)。

狭隘な仮設ヤードであったが、配置計画の見直しにより必要設備の設置を完了した。

坑内排水設備については、従来の4インチ管に加えて6インチ管を全線にわたって増設した。大口径管設置により、切羽からの直接排水能力を大幅に向上させた。

4. 止水工法の検討と選定

4.1 対策方針の決定

発注者である水資源機構の設計思想では、坑内湧水は外部に排出せず、最終的に覆工コンクリート施工により止水する方針であった。この方針に基づき、排水による対応ではなく止水による根本的解決を目指すこととした。小断面トンネルにおける止水工法の選定では、施工空間の制約と作業効率を十分に考慮する必要がある。また、水路トンネルという用途から、将来的な水密性確保も重要な検討要素となった。

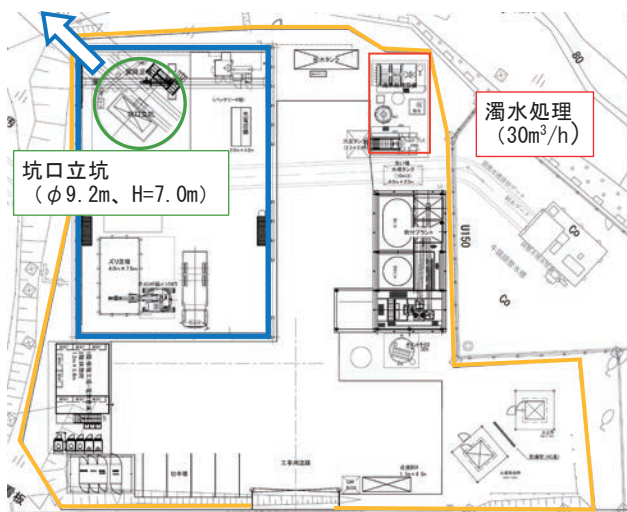


増設前

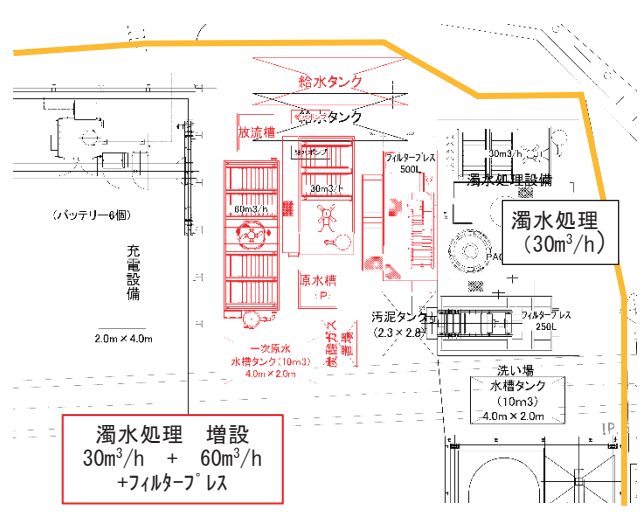


増設後

写真-4 濁水処理設備



仮設ヤード(増設前)



仮設ヤード(増設後)

図-4 濁水処理設備増設増強図

4.2 止水工法の選定

各種止水工法の比較検討の結果、ウレタン系減水止水剤「KOD-M (カバードエム)」(図-5)を選定した。選定の主要な理由は豊富な施工実績と近隣現場での使用実績による信頼性の高さである。カバードエムは注入ボルトを用いた薬液注入工法であり、水みちに対して直接注入することで完全な止水を目指す工法である。

注入システムはパッカーと呼ばれる膨張式シール装置を備えており、薬液や水の逆流を防止しながら順次奥部への注入が可能である。

使用する注入ボルトは、1mのHIPREXボルト(パッカー付き)(図-6)と4mのパワースレッドを組み合わせた5m仕様とした。

注入剤はA・B液の2液混合タイプで、水との接触により発泡し止水効果を発揮する。

5. 止水工の実施と効果

5.1 事前調査(水抜き工)

止水工の実施に先立ち、現状の湧水量と湧水箇所の詳細把握を目的として水抜き工を実施した。

トンネル断面の左右下部から湧水が確認されていたため、掘削範囲に孔が残らないよう斜め外方向に(L=12.0m)計画した。

初期の左右2箇所の水抜き工では十分な導水効果が得られなかったため、中央部への追加施工を実施した。約6m地点において毎分250Lの湧水を確認し、最低でも6m範囲までの止水が必要であることが判明した(写真-5)。ただし、全湧水量(毎分1.6m³)に対して水抜き工による回収量は一部に留まり、大部分は底盤部からの湧出であることが確認された。

5.2 止水工の施工計画

水抜き工の結果を踏まえ止水工の施工計画を策定した。

注入ボルト1本あたり5mの到達距離と、Cタイプでの掘削サイクル1.2m×3回=3.6mを1シフトとして計画した。最低2シフト、必要に応じて3シフトの継続施工とした。

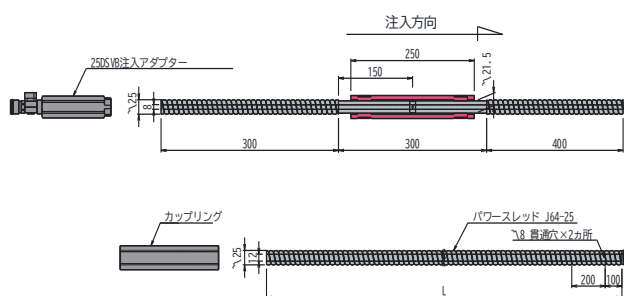
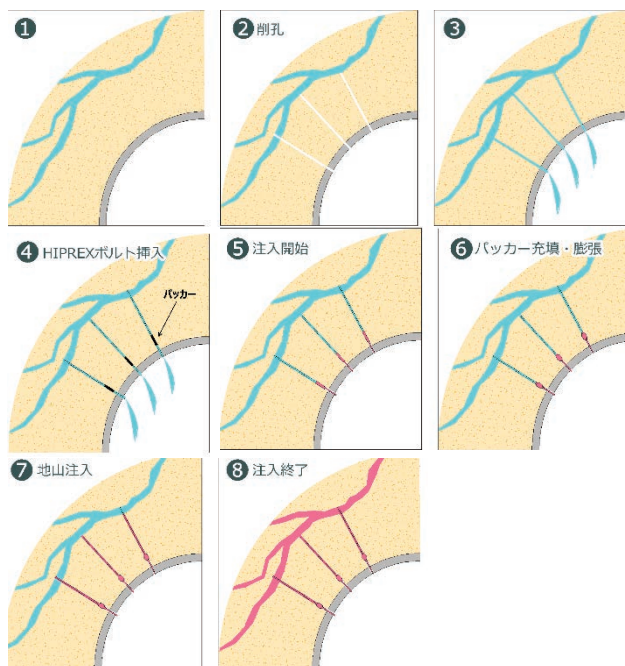


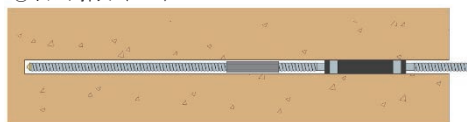
図-6 注入ボルト(HIPREXボルト)



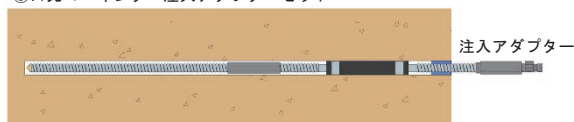
①穿孔(湧水を確認するまで穿孔、6.0~10.0m程度)



②ボルト挿入(L=5m)



③口元コーキング・注入アダプターセット



④注入

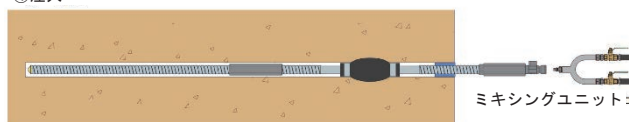


図-5 KOD-M(カバードエム)



写真-5 水抜き工実施状況

注入パターンは湧水状況に応じて設定し、下部については湧水の確認されている底盤方向への斜め注入を基本とした。上部についてはトンネル進行方向への水平削孔を実施し、湧水が確認された場合に注入を行う計画とした。

5.3 施工実績と効果

1シフト目の施工では、計画箇所に加えて現場判断による追加注入を多数実施した(図-7、写真-6)。前方6m地点での湧水確認により、計画通りの注入を実施したが、底盤の亀裂部への湧水の逃げにより完全止水には至らなかった。

2シフト目以降も継続して施工を実施し、最終的に5シフト目まで、総延長19.4m(約20m)の止水工を完了した。

各シフトにおいて前方6m地点での湧水が継続的に確認され、地下水の連続性が確認された。

止水効果としては、当初の1.6m³/minから約0.8m³/minへの減水を達成し、約50%の減水効果を確認した。完全止水には至らなかったものの、掘削作業再開に必要な水準まで湧水量を抑制することができた。

1シフト目の底盤部では現在も湧水が継続しており、レール沈下防止のためインバートコンクリート版を施工し、サンドポンプによる排水を継続している。5シフト目の一部区間でも計画以上の湧水が確認され、止水効果が限定的であった箇所については、掘削が進んだのちに再度の止水工を実施した。

6. 考察と今後の課題

6.1 技術的考察

止水工完了後、土木地質コンサルタント会社 UGS 宇津木氏による技術指導を受ける機会を得た。指導内容の要点は以下の通りである。

地山の節理方向の読み取りが止水工法の成否に決定的な影響を与えるとの指摘を受けた。調査設計資料の地質平面図等からの節理方向の把握は困難であるが、極めて重要な技術要素である。

注入方法については、トンネル断面に対する斜め注入が特に有効であった。

水みちを仮定した場合、斜め注入により広範囲への薬液浸透が可能となり、掘削時の壁面への水みち露出リスクも軽減される。水平注入では止水効果が限定的となる可能性が高い。

6.2 反省点と改善策

今回の施工における最大の反省点は、注入方向の選定である。トンネル進行方向に対する水平注入を多用したため、5シフト目での湧水残存の一因となったと考

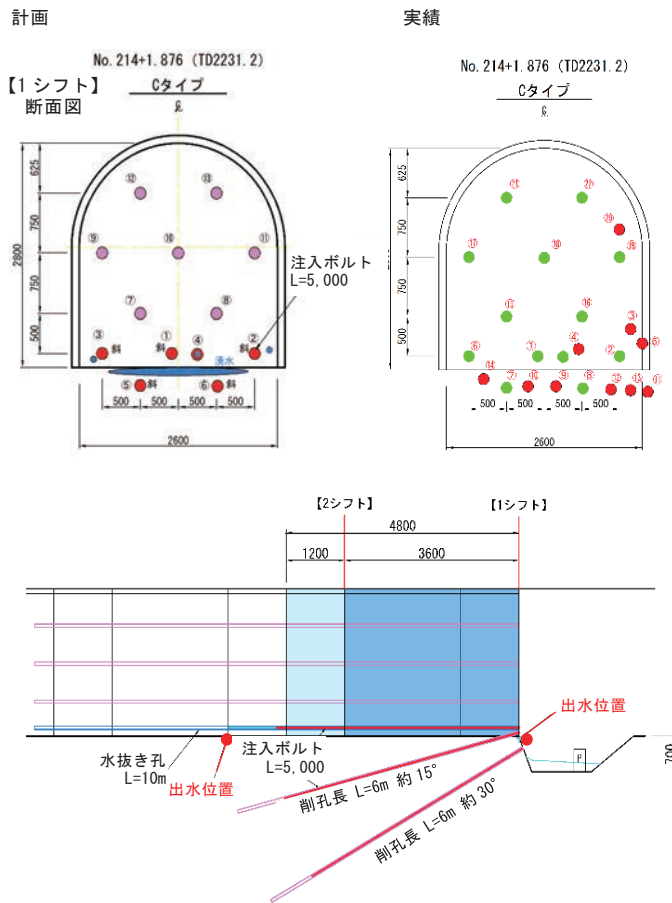


図-7 水抜き工実施状況

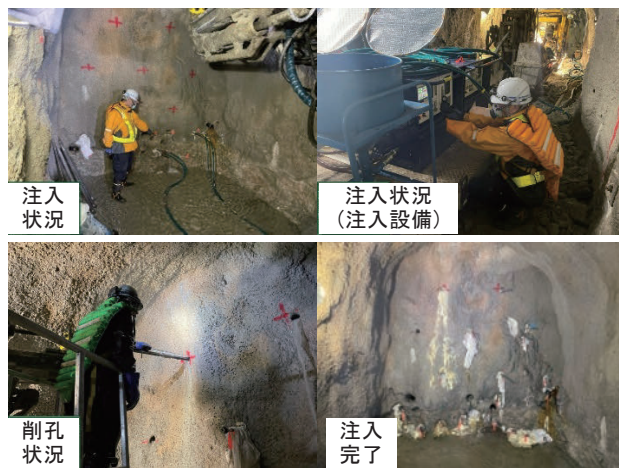


写真-6 各シフト施工状況写真

えられる。斜め注入を基本とすべきであった。

地質調査資料の活用についても改善の余地がある。既設トンネルでの湧水記録や地質縦断図からの節理方向の推定など、事前の検討をより詳細に実施すべきであった。

突発湧水の予見は極めて困難であるが、過去の施工実績や地質情報からある程度の想定は可能であったと考えられる。ただし、事前準備の実施は現実的に困難な面もある。

6.3 今後の展望

今回の突発湧水以後は目立った湧水もなく、掘削作業を完了した。止水工については完全止水には至らなかったものの、一定の効果を確認できた。

地山の節理や水の流れを読む技術力の向上が今後の重要な課題である。突発湧水への対応は事後対応とならざるを得ないが、迅速な対応のためには発注者、協力業者、社内の一体となった体制構築が不可欠である。

本事例で得られた技術的知見は、類似の小断面トンネル工事における突発湧水対策の参考として活用されることを期待する。特に水路トンネルのような特殊用途トンネルでは、一般的な道路トンネルとは異なる技術的配慮が必要であり、本報告がその一助となれば幸いである。

7. おわりに

本工事における突発湧水対応は、小断面 NATM 工法における貴重な技術的経験となった。完全止水には至らなかったものの、約 50%の減水効果により掘削作業の継続が可能となった。今後も類似事例への技術的貢献を目指し、継続的な技術向上に努めたい。

最後に、本工事の実施にあたりご指導いただいた関係者各位に深く感謝申し上げます。