

石灰岩地帯における導水路トンネルの設計と施工 ～ 新帝釈川発電所 導水路トンネル ～

The Design and Construction of the Headrace Tunnel of Hydroelectric Power Plant at Limestone Area
— Shin-Taisyakugawa Hydroelectric Power Plant Headrace Tunnel —

二岡克己 Katsumi NIOKA (中国電力(株) 新帝釈川発電所建設所)
小西克文 Katsufumi KONISHI ()

中国電力(株) 新帝釈川発電所の導水路トンネルは、全長 4.5km のうち上流側約 1km 区間で石灰岩域を通過するため、設計時においてトンネル掘削時に石灰岩特有の溶食空洞やこれに起因する大量湧水に遭遇し工事に支障をきたすことが懸念された。本稿では、溶食空洞位置の把握のため実施した種々の調査とその結果に基づくトンネルルートの設定について述べるとともに、施工実績によるルート設定の妥当性についても検証を行った。

また、上流から約 2.3km 付近でも当初想定にない石灰岩が出現するとともに地質境界部の溶食空洞から約 2m³/min の被圧した大量湧水に遭遇した。その発生状況、施工対策事例についても併せて紹介する。

キーワード：導水路トンネル、石灰岩、ドリーネ、大量湧水 (IGC : B-2, C-7, H-5)

1. はじめに

新帝釈川発電所は、広島県北東部に位置する高梁川水系帝釈川を堰き止める帝釈川ダムの保全対策工事（洪水処理能力の向上および構造上の補強）に併せ、帝釈川ダムの未利用落差（最大約 35m）の有効活用を図る目的として、既設帝釈川発電所（大正 13 年運開、4,400kW）の再開発として計画されたダム水路式発電所（最大出力 11,000kW、最大使用水量 10m³/s、有効落差 129m）である（図-1）。平成 15 年 6 月 12 日に着工し、約 3 年間の工期を経て平成 18 年 6 月 30 日に営業運転を開始した。

本稿では、この新帝釈川発電所 導水路トンネルが上流から約 0.3km 地点において石灰岩地帯特有のドリーネの直下部を通過し、地質不良部への遭遇が懸念されたため、各種地質調査を実施しルート変更を行うとともに、掘削によりルートの妥当性を検証した結果の紹介と約 2.3km においても掘削中予期せぬ石灰岩に遭遇し、その溶食空洞から大量湧水が発生したことに対する調査結果、施工対応等について報告するものである。

乳洞が形成される。このため、ドリーネでは周辺地下水の変動等に伴い地表部に堆積した崩積土が堅穴を通じて下部の鍾乳洞に落ち込み、地盤陥没が発生する。また、石灰岩域の地下水は、複雑に連結された溶食空洞を流路とし、地下河川の形態を呈して大量に流れていることも知られている。

このため、トンネル掘削時にこれらに遭遇した場合、一度に大量の地表崩積土をトンネル内へ引き込む落盤事故や大量地下水発生に伴う工事の難航が懸念される。



図-1 発電所位置図

2. 石灰岩の地質的特徴および工事上の問題点

石灰岩は水溶性を有するため、地盤内の浸透水により長い年月をかけて鍾乳洞（溶食空洞）やカルスト地形が形成されることが知られている。わが国では山口県の秋吉台が特に有名である。

カルスト地形の微地形として最も特徴的なものはドリーネであり、これは石灰岩内の節理等の開口部に雨水が浸透、溶解してできた凹地形である（図-2）。

ドリーネの最深部には、通常吸い込み穴（ポノール）が存在し、堅穴を通じて浸潤した雨水等により下部に鍾

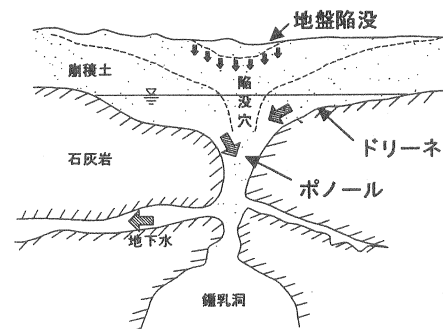


図-2 ドリーネ周辺地質構造の模式図

3. 導水路トンネル経過地の地形・地質概要

新帝釈川発電所 導水路トンネルは、広島県北東部の帝釈台地（石灰岩）の一角に位置する神龍湖（帝釈川ダム貯水池）左岸を起点とし、周辺一帯に「吉備高原面」と呼ばれる EL. 450m～600m 前後のなだらかな浸食小起伏台地の下部を通過する。

経過地の地質構造は、基盤岩となる石灰岩（古生代石炭紀～二畳紀）が導水路下流方向に緩勾配で傾斜し、これを不整合に覆うように安山岩（中生代白亜紀）、備北層群（礫岩、新第三紀中新世）が分布する（図-3、図-4）。

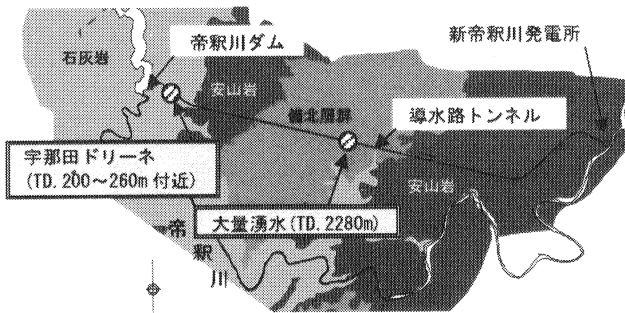


図-3 導水路経過地地質平面図

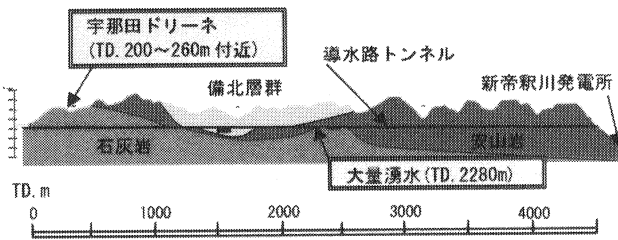


図-4 導水路経過地地質断面図

導水路トンネルは全長 4.5km であり、図-4 に示すようにトンネル経過地の地質は、上流側から約 1.1km が石灰岩域、次いで約 1km が備北層群（礫岩）域、最後の約 2.4km が安山岩域と想定していたが、上流から約 2.3km 地点の安山岩域を下流側に掘削中、当初想定外の石灰岩に遭遇し、その境界部の溶食空洞からの大量湧水が発生した。

4. 調査地の地質状況とトンネルルートの設定²⁾

4.1 調査地の地質状況

調査の対象となった宇那田地区は、神龍湖東側約 300m 地点に位置し、以下の地質的特徴がある（図-5）。

- ① 地区の中央部には長軸直径 100m 程度のドリネ（宇那田ドリネ）が存在する。その北側の道路沿いの谷に複数のドリネ群が存在するが、南側には認められない。宇那田ドリネの南端にはポノールがあり、上流の谷から流れ込む地表水はここに集められ地下へ消えていき、下流は涸れ沢となっている。
- ② 神龍湖（帝釈川ダム貯水池）から宇那田ドリネ方向

へ枝状に分岐したひん岩脈の貫入が見られる。

- ③ 宇那田ドリネ近傍のボーリング調査結果から、神龍湖の貯水位とボーリング孔内水位は高い相関を有しており、掘削時に神龍湖の水を大量に引き込んでしまう可能性がある。

4.2 導水路ルート選定時における問題点

導水路トンネルルートは、当初経済性を重視し可能な限り延長を短くなるように設定していた（最短ルート）。しかし、トンネルは取水口から約 300m 地点においてドリネの直下を通過することが判明し、溶食空洞や大量湧水への遭遇が懸念されるため、ルートの再検討を行うこととした。

代替ルートは、別のドリネ群が存在する北側を避けた南側とし、比較的地質が良いとされる尾根を結ぶように設定した。

このルートの妥当性を検証する目的として以下の調査を実施した。

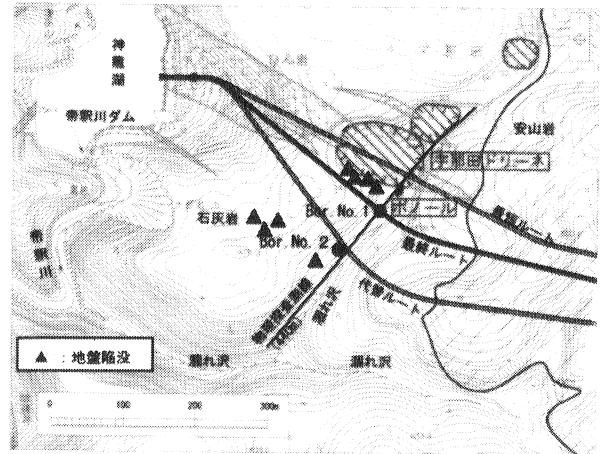


図-5 ドリネ周辺の地質状況および調査位置図

4.3 調査内容および結果

(1) 空中写真判読および地表地質踏査

リニアメントは連続性に乏しいが、その中では NW-SE 方向の連続性が最もよい。石灰岩の割れ目の走向は NW-SE 系が最も卓越し、神龍湖側から宇那田ドリネ方向に貫入したひん岩脈の走向と調和的である。さらにひん岩脈との境界部には直径約 1～2m 程度の地盤陥没が断続的に確認されている（図-5）。

(2) ボーリング調査（ポアホールスキャナー含）

ボーリングはドリネの南側の 2 箇所（No. 1, No. 2）において実施した（図-5）。その簡易柱状図を図-6 に示す。

両孔ともに概ね石灰岩を主体とするが、No. 2 ではひん岩脈の貫入が見られる。

No. 1 は地表部からの水みちを示唆する褐色化した開口割れ目や流入粘土が比較的少ない。特にトンネル施工標高（GL. -85m）付近では C_M～C_H 級の堅硬な岩盤性状を呈する。

反面、代替ルート近傍のNo.2付近では、岩盤が褐色風化し流入粘土を挟在した開口割れ目が多く見られ、No.1と比較すると一部区間では神龍湖側から貫入するひん岩脈が派生したと想定される小岩脈や小規模な溶食空洞も確認された。ひん岩脈自体強風化しており、岩級区分はD~C₁級の脆弱な岩盤性状を呈していた。

割れ目の走向傾斜は、No.1, No.2ともにNW-SE系が卓越し、傾斜はそれぞれ南傾斜、北傾斜が卓越していた。

地下水面は両孔ともGL. -70m付近にあった。

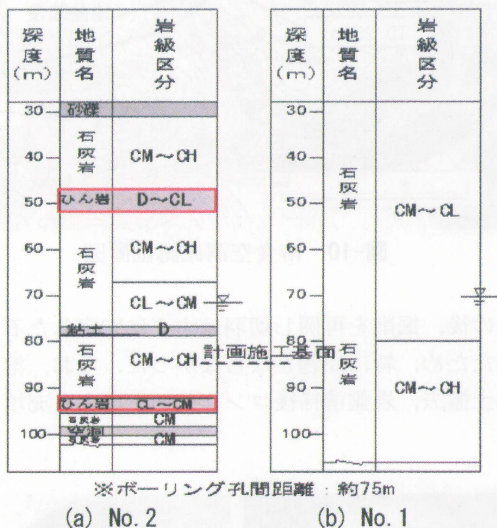


図-6 ボーリング簡易柱状図

(3) 物理探査

ドリーネの規模、形状ならびに溶食空洞位置を2次的に捕らえることを目的として、ドリーネをほぼ北東-南西方向に縦断する測線(440m)を設定し、物理探査を実施した。調査対象がドリーネ、溶食空洞であることから、複数の探査手法の物理特性を生かし、総合的に評価するのが合理的であると考え、電気探査、弾性波探査(屈折法)を実施した。また、探査測線として2本のボーリング孔(No.1, No.2)を利用し、調査対象を取り囲むような測線配置(トモグラフィ解析)とすることにより、調査精度の向上を図った。

① 電気探査

電気探査結果を図-7に示す。

距離程 300m~350m にかげ北側傾斜したすり鉢状の低比抵抗部は、宇那田ドリーネ内に堆積した崩積土と想定される。距離程約 280m 地点付近に比抵抗の段落ち部は、地表面に見られるポノールと想定され、その形状からドリーネの南端であると想定される。また、150m 付近の地表に小規模ながらドリーネと想定されるすり鉢状の低比抵抗部、それ以後はひん岩脈および空洞に起因する地質不良部が確認される。反面、No.1 付近ではEL. 390m 以深で 5,000Ω-m を超える高比抵抗部が見られ、良好な岩盤性状が想定される。

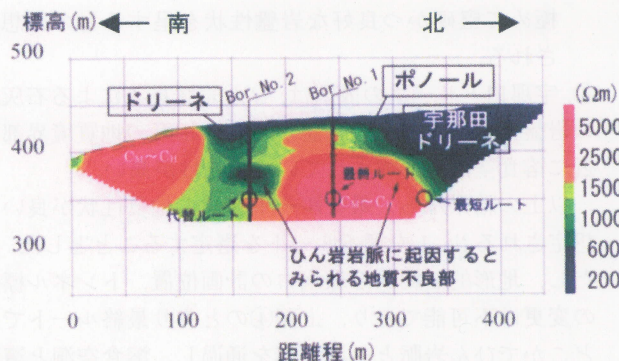


図-7 電気探査結果

② 弾性波探査(屈折法)

弾性波探査結果を図-8に示す。

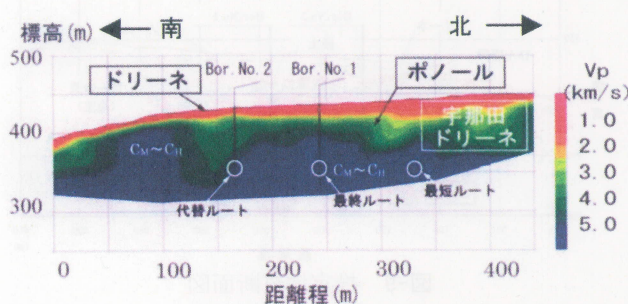


図-8 弾性波探査(屈折法)結果

No.1 のEL. 380m 以深は速度値が高く、極めて良好な岩盤性状を呈するものと想定される。反面、距離程 150m 付近、300m 付近および 400m 付近にそれぞれ小規模ドリーネ、ポノール、宇那田ドリーネと想定される低速度帯が見られる。

(4) 既存文献からの評価

北備後台地団体グループ¹⁾によると、帝釈峽の鍾乳洞の形成標高と河岸段丘の標高には、関連性があることが報告されている。この研究成果をもとに鍾乳洞の標高を推定してみるとEL. 400m, EL. 350m, EL. 330m に位置すると推定され、ボーリング No.2 で確認された溶食空洞標高EL. 402m, 350m, 330m と極めて調和的である。このため、導水路トンネル施工標高(EL. 350m 付近)には溶食空洞が存在する可能性が高い。

(5) 総合評価

上記調査結果を総合的に取りまとめた推定地質断面図を図-9に示す。この結果から、以下のことが考えられる。

- ① 最短ルートは想定どおりドリーネの直下を通過することになり、掘削時に崩積土をトンネルまで引き込んでしまう可能性が高い。
- ② 代替ルートにも小規模ながらドリーネが存在しており、このルートを選択した場合少なからずこの影響を受ける可能性がある。
- ③ No.1 付近は、溶食空洞やひん岩脈の影響を受けず、

極めて堅硬かつ良好な岩盤性状を呈するものと想定される。

④ 宇那田ドリーネの成因は、ひん岩脈貫入による石灰岩の岩盤劣化によるものと想定され、相互の地質境界部付近に溶食空洞が形成されている可能性が高い。

以上の結果から、最終ルートは最も地質性状が良いと想定されるNo.1を通るルートを選定することとした。ただし、地形的制約から取水口の計画位置、トンネル標高の変更は不可能であり、上記④のとおり最終ルートでもどこかでひん岩脈との境界部を通過し、溶食空洞と遭遇する可能性はあるため、当該箇所掘削時は施工時の対応として先行ボーリングを行い、切羽前方確認を行いながら慎重に施工することとした。

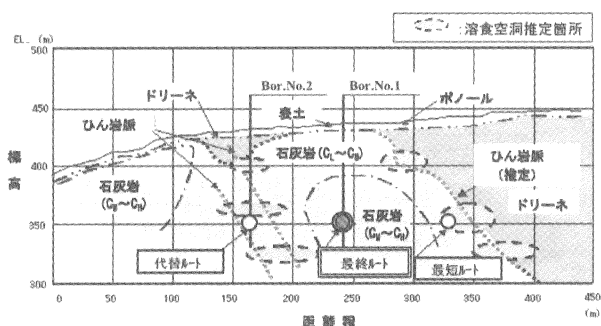


図-9 推定地質断面図

5. 溶食空洞との遭遇とその対策³⁾

石灰岩地帯のトンネルのうち、宇那田地区を含む450m区間の掘削は平成16年2月に着手し、同年7月完了した。

トンネル断面は、直径3m程度の小断面であることから、経済性に優れ、地山の急激な変化に対応しやすい矢板工法により掘削を行った。

調査段階において、ドリーネ近傍地下水位と神龍湖水位とが連動することにより、トンネル掘削中に神龍湖を供給源とする大量湧水が懸念されたが、トンネル工事に合わせダム・取水工事も行われ、その転流工呑口標高をトンネル施工高以下としたため、大量湧水は発生しなかった。

また、トンネル掘削中において工期延長、莫大な費用の増嵩を必要とするような溶食空洞に遭遇することはなかったが、一部区間において小規模な溶食空洞（内部は流入粘土により充填）に遭遇した。溶食空洞の確認位置を図-10に示す。溶食空洞確認位置付近の地質状況を以下に示す。

5.1 溶食空洞① (TD. 220m 付近) の状況

TD. 210m 付近から急激に節理の褐色化や流入粘土が頻繁になり、TD. 220m 付近で発破と同時にアーチ部から30~40m³程度の流入粘土が坑内へ一気に流出した(写真-1)。調査結果から、側壁からアーチ部にかけて奥行約4m、幅約1m、さらにその上部にも高さ6m以上、幅0.5mの縦方向の溶食空洞が存在することが判明した。溶食空洞は切

羽右アーチ部であったため、先行ボーリングでは事前に確認できなかった。なお、インバート部は堅硬な石灰岩であった。

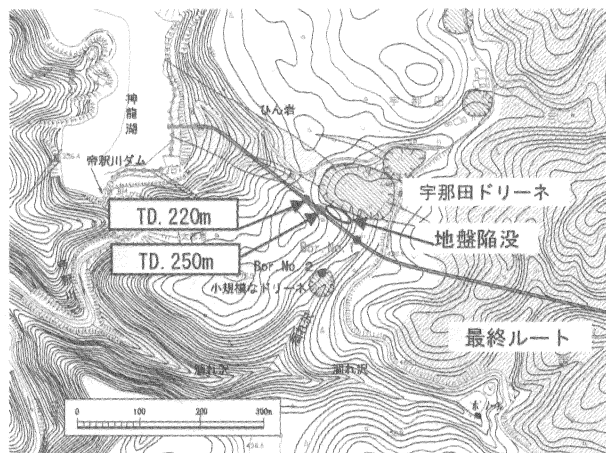
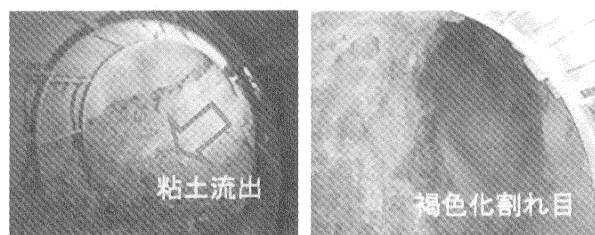


図-10 溶食空洞確認位置図

その後、掘削を再開し切羽はすぐに安定した石灰岩が現れたため、特に問題とならなかった。なお、溶食空洞は粘土撤去、岩盤清掃後コンクリートにより充填を行った。



(a) 切羽写真 (b) 空洞拡大図 (切羽右上部)
写真-1 溶食空洞①状況 (TD. 220m 付近)

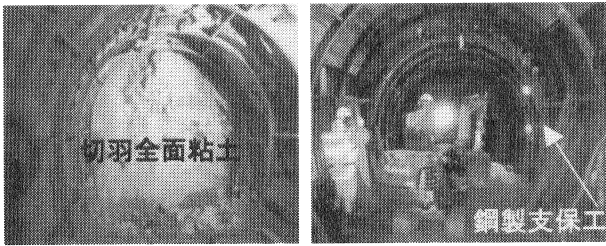
5.2 溶食空洞② (TD. 250~260m 付近) の状況

上記溶食空洞通過後、比較的地質性状は良好であったが、①と同様溶食空洞から約10m手前となるTD. 240m付近から節理に褐色化が見え始め、次いで流入粘土の挟在が顕著になり、TD. 248m 付近で切羽は全面茶褐色化した直後、切羽全面粘土層となった(写真-2(a))。

切羽は自立し、トンネル内への粘土流出がなかったため、縫地により当該区間を突破したが、上載荷重に対し支保工下部地盤の支持力不足から、支保工の右踏まえ部が約20cm沈下し、傾いた。このため、ロックボルトで支保工を固定した後、AGF工法により上部粘土層の流出を抑え、縫い返しにより所定の断面を確保した(写真-2(b))。

調査の結果、溶食空洞は延長方向に約10m、インバート下約4m(幅3m程度)程度であった(図-11)。

対策工としては、狭隘なトンネル内で粘土をすべて撤去し、コンクリートへ置換することは困難であることから、トンネル下部に鋼管杭を打ち込み、コンクリート床板でトンネルを支持する工法を採用した。



(a) TD250m 付近切羽状況 (b) 縫い返し状況
写真-2 溶食空洞②状況 (TD. 250~260m 付近)

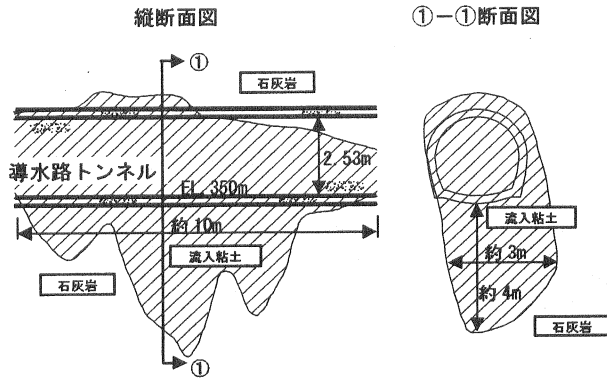


図-11 溶食空洞模式図

6. トンネル掘削実績に基づく地質再評価

6.1 溶食空洞付近の地質的特徴

トンネルの掘削実績から明らかになった溶食空洞周辺の地質的特徴を以下に示す。

- ① 溶食空洞の位置は、想定どおり地表部の陥没が見られた宇那田ドリーネの端部となるひん岩脈と石灰岩の境界部付近（標高 EL. 350m 前後）であった。空洞周辺のひん岩脈は、褐色風化を受け、非常に脆い状態となっていた。
- ② 宇那田ドリーネから下流約 500 m 離れた地点で見られたひん岩脈は、①の状況と異なり、風化・変質の程度は弱く、またひん岩脈と石灰岩の境界は概ね密着していた。また、岩質は比較的新鮮であり、溶食空洞は確認されなかった。
- ③ 溶食空洞は、流入粘土を挟在し、割れ目の発達した風化石灰岩確認後に現れた。
- ④ トンネル湧水量は、晴天時には $0.12 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度であるが、降雨時は、降雨量に比例し急増した。
($4.8 \text{ m}^3/\text{min}$: H16.10.20 台風 23 号接近時、累計雨量 82mm (気象庁東城雨量観測所))。降雨後、湧水はほぼ時間差なしで溶食空洞から流出することから、湧水は宇那田ドリーネ内のポノールに流入した降雨が直接的に流出してきているものと想定される。

6.2 溶食空洞付近の地質評価

前項②で述べたように、石灰岩内へのひん岩脈の貫入は溶食空洞確認箇所以外でも見られるが、ひん岩脈自体

の脆弱化、石灰岩の風化、流入粘土の挟在は見られなかった。

また、前項①で述べたように、地表部に石灰岩が露出しドリーネを通じた地表水の流入が見られる箇所においては、流入粘土を挟在した褐色化割れ目が存在した。

このため、本地点における溶食空洞は、ひん岩脈の貫入に起因する周辺石灰岩の劣化と地表からの開口割れ目を通じた水の流入が相俟って発生したものと考えられる。

掘削により確認された溶食空洞は概ね事前調査時に推定された位置において確認されるとともに、ドリーネを避けることにより、当初懸念された地表土砂流入や大量湧水への遭遇等の工事に支障となる事象を回避することができた。

7. 溶食空洞からの大量湧水への対応事例⁴⁾

7.1 大量湧水発生時の状況

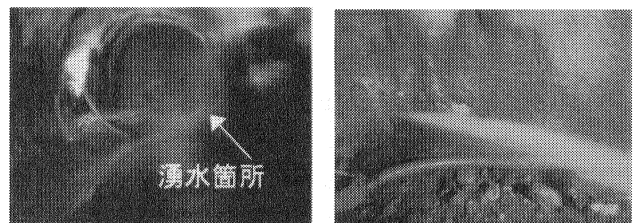
平成 16 年 4 月 19 日、TD 2,280m 付近で切羽右下隅部の発破装薬孔を穿孔中 ($L=1.2\text{m}$)、突発湧水 (約 $2\text{m}^3/\text{min}$) が発生した (写真-3)。

掘削断面は 9m^2 程度と小さく、下り勾配であったことから、切羽は瞬時に冠水した。このため、直ちに排水系列を増設し、既の所で掘削機械の水没は免れた。

湧水発生時の切羽は安山岩溶岩 (割れ目は方解石により充填) であり、切羽右側にはトンネル軸に沿う方向で幅 5~10cm の変質帯、その手前約 70m 区間の切羽にもネット状の変質した薄層粘土が分布していた。

湧水については、手前数 m で右側壁部の一次吹付後にクラックが発生したため、湧水はこの変質帯に規制された安山岩の被圧地下水と想定していたが、掘削再開後切羽には石灰岩に変わり、湧出箇所は直径 20cm 程度の溶食空洞であることが判明した。

前述のとおり、石灰岩はトンネル下流方向に緩勾配傾斜し、トンネルよりも下位に存在すると想定していたが、実際には図-2 のとおり部分的に盛り上がり、トンネルはこの最頂部付近に遭遇したものと考えられる。



(a) 遠景 (切羽全面) (b) 近景 (切羽右踏まえ部)
写真-3 大量湧水 ($2\text{m}^3/\text{min}$) の発生状況

7.2 大量湧水の対策工

(1) 調査ボーリング (ポアホールカメラ)

その後の掘削方法を再検討するうえで必要な切羽前方の地質・地下水性状を把握することを目的として、切羽進行方向に左右約 2° 程度で調査ボーリング ($\phi 70\text{mm}$, 削孔長

30m) 2本とこの中でボアホールカメラ(φ50mm)観察を行い、節理の走向傾斜および湧水位置の特定を行った(図-12)。

その結果、切羽前方3~8mで完全に石灰岩に変わり、最も大量の湧水は石灰岩の開口割れ目(t=3cm)から湧出していることを確認した。

(2) 水抜きボーリング

湧水発生時に湧水状況から、かなりの高水圧を有して

アグラムに整理した(図-13)。その結果、湧水の成分に大きな経時変化はなく、いずれも、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} の溶存成分が60~80%を占める典型的な HCO_3^- - Ca^{2+} 型の地下水であった。

また、電気伝導度は $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 、pHは8前後で一定値を示した。雨水、地表水が $10\sim 20\mu\text{S}/\text{cm}$ であるため、湧水は雨水が直接流出したものではないと考えられる。

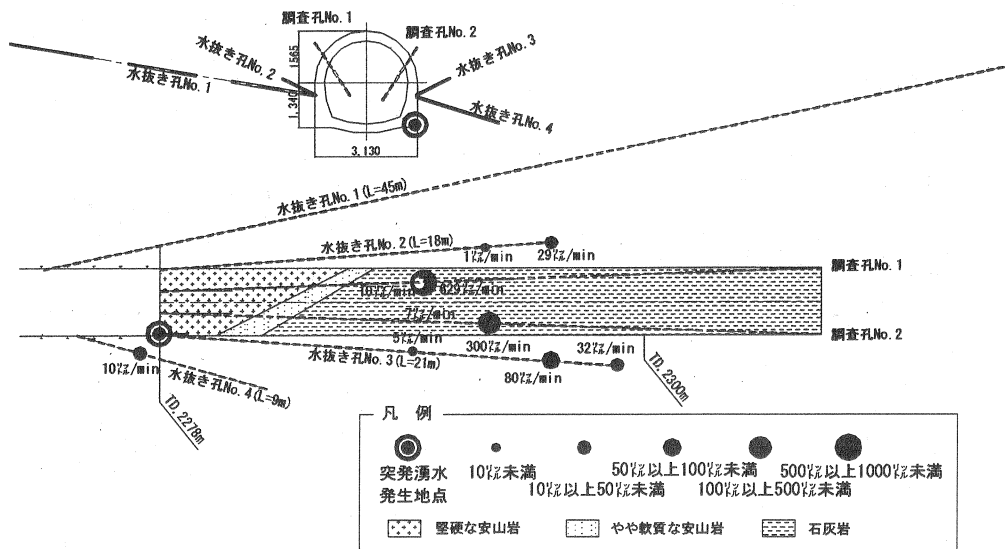


図-12 湧水箇所周辺状況

いることが想定されたため、切羽からの湧水の水みちを変水抜きボーリング(φ70mm)4本を行った(図-12)。

水抜き孔位置は調査ボーリングから得られた走向・傾斜から水みちを想定して決定したが、幾分減少した程度で十分な減水効果は得られなかった。

以上の調査結果から、湧水は石灰岩内を蜂の巣状に発達した複雑な開口割れ目(溶食空洞)内を選択的に流れていると想定される。

突発湧水の発生から約1ヶ月が経過し、湧水量はほぼ半減($Q=1.1\text{m}^3/\text{min}$)したことで、排・濁水処理設備が整備されたこと、さらに前述した調査ボーリング結果より石灰岩の岩質自体は硬質であることから、特に補助工法を併用することなく、慎重に掘削を再開した。

再開後、TD 2,300mまでは切羽に顕著な開口割れ目が現れると切羽手前の湧水は減少し、代わってこれより湧水が噴出するという現象を何度も繰り返したが、水圧は大幅に低下していたため、浸水しながら掘削を続けた。その後、開口割れ目の頻度も減り、さらにTD 2,320m付近で安山岩区間に入ると切羽からの湧水は全く見られなくなった。なお、さらにTD 2,370m付近を掘削後、再度石灰岩に遭遇したが、湧水はほとんど見られなかった。

7.3 大量湧水の性状およびその対応策

(1) 水質分析

当湧水の供給機構の解明を目的として、湧水発生直後、半年後に湧水を採取、主成分分析を実施し、ヘキサダイ

(2) 湧水量変化

湧水は発生当初約 $2\text{m}^3/\text{min}$ を記録したが、時間の経過とともに漸減し、最終的に約 $0.7\text{m}^3/\text{min}$ 程度で収束した。

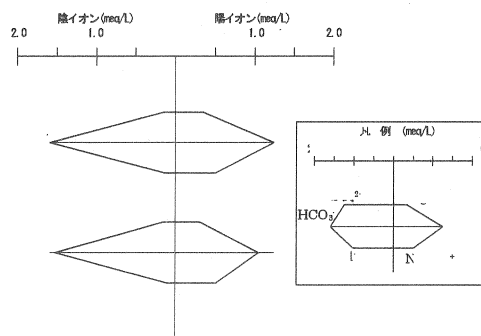


図-13 水質分析結果(発生直後,半年後)

(3) 周辺地表水・地下水の状況

湧水の起源の特定および湧水発生に伴う周辺地下水への影響把握を行うため、工事開始前から周辺利水箇所において継続観測中の導水路経過地周辺のボーリング孔、溪流、河川の自記水位計データおよび目視観測結果を確認した。

その結果、湧水発生から2年以上が経過するが、いずれのデータにも水位、水量低下は確認されなかった。

(4) 湧水圧測定

湧水の圧力上昇により、過度の応力が覆工に作用し、

トンネル構造安定性に支障を及ぼすことが懸念されたため、湧水の最大水圧を確認する目的として水圧測定を実施した。

掘削中の測定は物理的に不可能なため、覆工コンクリート打設後に一部開口部を設け、これにパッカーを設置して水圧測定を行った。測定水圧は、あらかじめ構造計算により覆工内応力が許容応力以下となる外水圧を算定し、これを上限とした。測定結果を図-14に示す。

測定は、約1.5ヶ月間行った。その結果、測定開始直後は急激な水圧上昇傾向が見られたが、1ヶ月経過後から徐々に漸減傾向が見られ始め、最終的に最大水圧は0.46MPa程度で一定になった。当該水圧は設計水圧以下でありトンネルの構造安定上問題ないことが確認された。なお、降雨後における水圧増加傾向は見られない。

(5) まとめ

以上の結果から、湧水はトンネル近傍の石灰岩地下水からの供給だけではなく、広域的な石灰岩地下水を起源としているものと想定される。

なお、当該湧水はトンネル構造安定性に問題はないが、湧水を排水することによる周辺環境への影響がないことが確認できたことから、想定外の地下水位上昇に伴う不測の事態等を考慮し、覆工コンクリートにウィーブホール(φ150mm)を設けた。

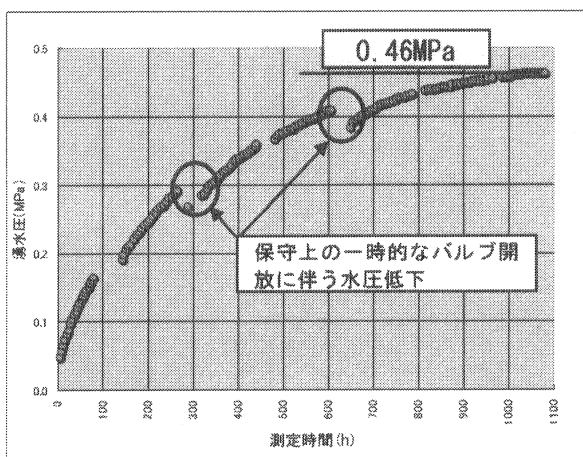


図-14 湧水圧測定結果

8. あとがき

本稿では、ボーリング、物理探査等の各種地質調査結果を総合的に評価することにより、導水路トンネルルートを選定を行うとともに、施工実績からルート選定の妥当性の検証を行った。その結果、概ね当初想定どおり一部地質不良箇所遭遇したものの、大幅な工程遅延や設計変更を伴う規模のものではなく、当該ルート選定は妥当なものであった。

また、事前の調査結果からは想定できなかった地質分布(石灰岩の盛り上がり)があり、大量湧水に遭遇したが、迅速かつ適切な対処を行い、特に大きな問題となることなく工事を完了することができた。

石灰岩地帯は全国的に散在して分布するが、一部の地域を除きまとまって存在する箇所は少ない。また、石灰岩は特有の地質特性(水溶性)を有することからダム、トンネル等の工事には適さず、石灰岩地帯において実施された工事報告例は少ない。本調査や工事報告が、今後同種工事を行ううえでの参考資料となれば幸いである。

謝辞

最後に本調査・検討にご協力いただいた岡山大学 環境理工学部 西垣教授をはじめ、(財)電力中央研究所 志田原上席研究員、中川上席研究員、鈴木上席研究員に深謝します。

参考文献

- 1) 北備後台地団体グループ：鍾乳洞の形成期について、地質学雑誌, Vol. 75, No. 5, 1969.
- 2) 小西克文, 吉岡一郎ほか：物理探査等による溶食空洞分布調査とその評価～石灰岩地域におけるトンネル調査の例～, 日本応用地質学会平成15年度研究発表会論文集, 2003.
- 3) 吉岡一郎, 市原昭司ほか：新帝釈川発電所新設工事石灰岩地帯における導水路トンネルの溶蝕空洞対策, 電力土木, No. 315, pp. 37-41, 2005.
- 4) 二岡克己, 小西克文ほか：石灰岩および上部未固結礫岩における大量湧水を克服—中国電力 新帝釈川発電所導水路トンネル—, トンネルと地下, Vol. 36, No. 11, pp. 25-32, 2005.

(2006年6月30日 受付)