

豊実発電所改修工事における放水路トンネルの施工 既設放水路トンネル直下に扁平大断面の新設トンネルを構築

工 藤 敏 邦・多 田 誠

豊実発電所改修工事は、既設の立軸フランシス水車・発電機6台と水路構造物を撤去し、同じ場所に新たに立軸バルブ水車・発電機2台と水路構造物を構築する工事である。新設放水路トンネルは扁平大断面であり周囲の岩盤の風化が進んだ既設放水路の直下での施工が求められた。また、工事期間中、発電所内に設置する機器を洪水から守るため、一時的に残置したプラグ部には止水性能が求められていた。このような複雑な条件のもと、縫地ボルトの施工、再生骨材コンクリートによる既設トンネルの充填、プラグ部の止水注入工等の対策を実施して、放水路トンネルを施工した事例について紹介する。

キーワード：水力発電所、トンネル、リニューアル、縫地ボルト、再生骨材コンクリート、薬液注入工、上半中壁分割工法

1. はじめに

豊実発電所は阿賀野川水系の東北電力(株)発電所群の中で下流から3ヶ所目に位置しており、昭和4年に発電を開始した出力56,400 kWのダム式発電所であった(図-1、写真-1)。当発電所は発電開始以来、約80年が経過し、水車・発電機を中心として経年劣化が進行していた。そのため、水車・発電機を立軸フランシス水車6台から立軸バルブ水車2台に整理統合し、最



写真-1 豊実ダム、豊実発電所施工前全景

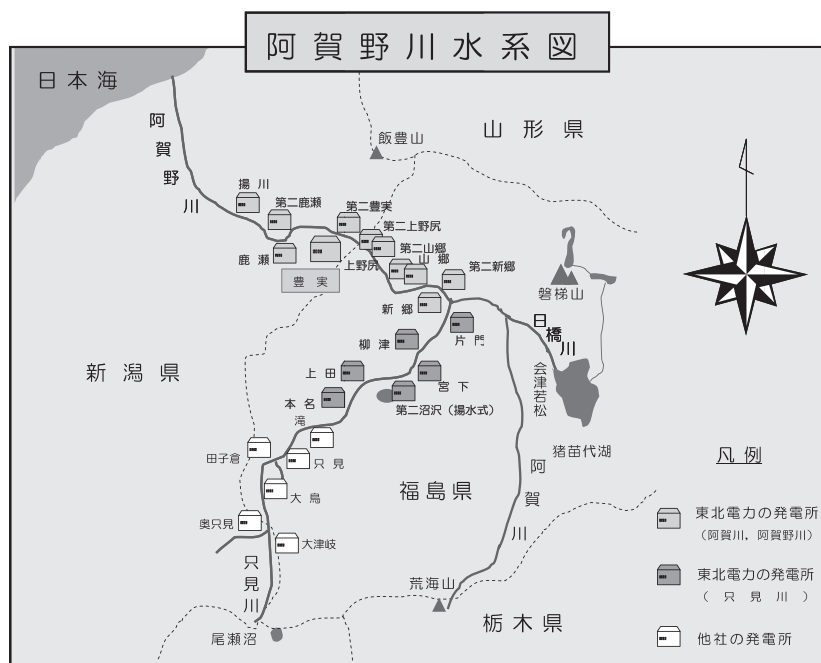
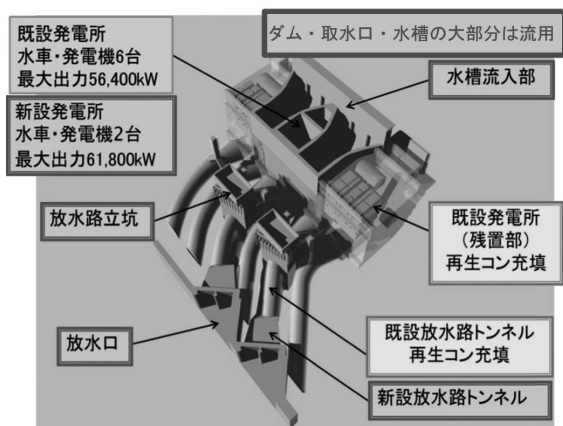


図-1 豊実発電所位置図



図—2 豊実発電所改修工事イメージ図

大使用水量を変えず機器効率のアップにより最大出力を 61,800kW に変更する大規模な改修工事に平成 20 年に着手し、平成 25 年 9 月 18 日に発電を再開したところである（図—2）。

本稿では当改修工事における放水路トンネルの施工概要について報告する。

2. 工事概要

(1) 工事概要

工 事 名：豊実発電所改修工事のうち土木本工事ならびに関連撤去工事

工事場所：新潟県東蒲原郡阿賀町豊実地内

工 期：平成 20 年 5 月 26 日～平成 25 年 3 月 29 日

工事内容：

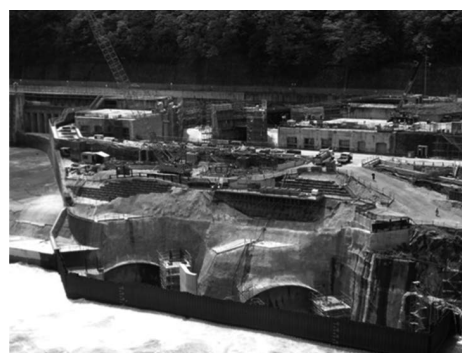
- ・ダムおよび取水口と水槽の大部分は既設設備を流用し、古い立軸フランシス水車・発電機 6 台を撤去して、新たに立軸バルブ水車・発電機 2 台を設置した。
- ・水車、発電機 2 台の新設に合わせて 2 本の放水路立坑、放水路トンネルを新設した。
- ・既設発電所の解体は、発電所改修に必要な最小限度の範囲にとどめ、発生したコンクリートガラは破碎して再生粗骨材として再利用した。既設発電所や既設放水路トンネル等残置箇所の空洞部は、再生粗骨材を用いた再生骨材コンクリートで充填した。
- ・放水口構造物施工のために継手付 H 形鋼矢板を使用し、仮締切を設置した。

(2) 地質条件

施工箇所の地質は表層 5.5 ～ 6.9 m は礫混じり砂の埋土であり、その下層部は花崗閃緑岩と角礫岩で構成



写真—2 建屋解体、放水路立坑掘削状況（平成 21 年 7 月）



写真—3 放水路トンネル明かり巻き施工状況（平成 21 年 11 月）

されている。花崗閃緑岩は、 $C_H \sim C_M$ 級、角礫岩は C_M 級が主体で岩質は比較的硬質である。しかし、上部には矢板工法で掘削した既設トンネルが存在しているため、岩盤の風化やゆるみが発生している可能性があった。

(3) 放水路トンネル概要

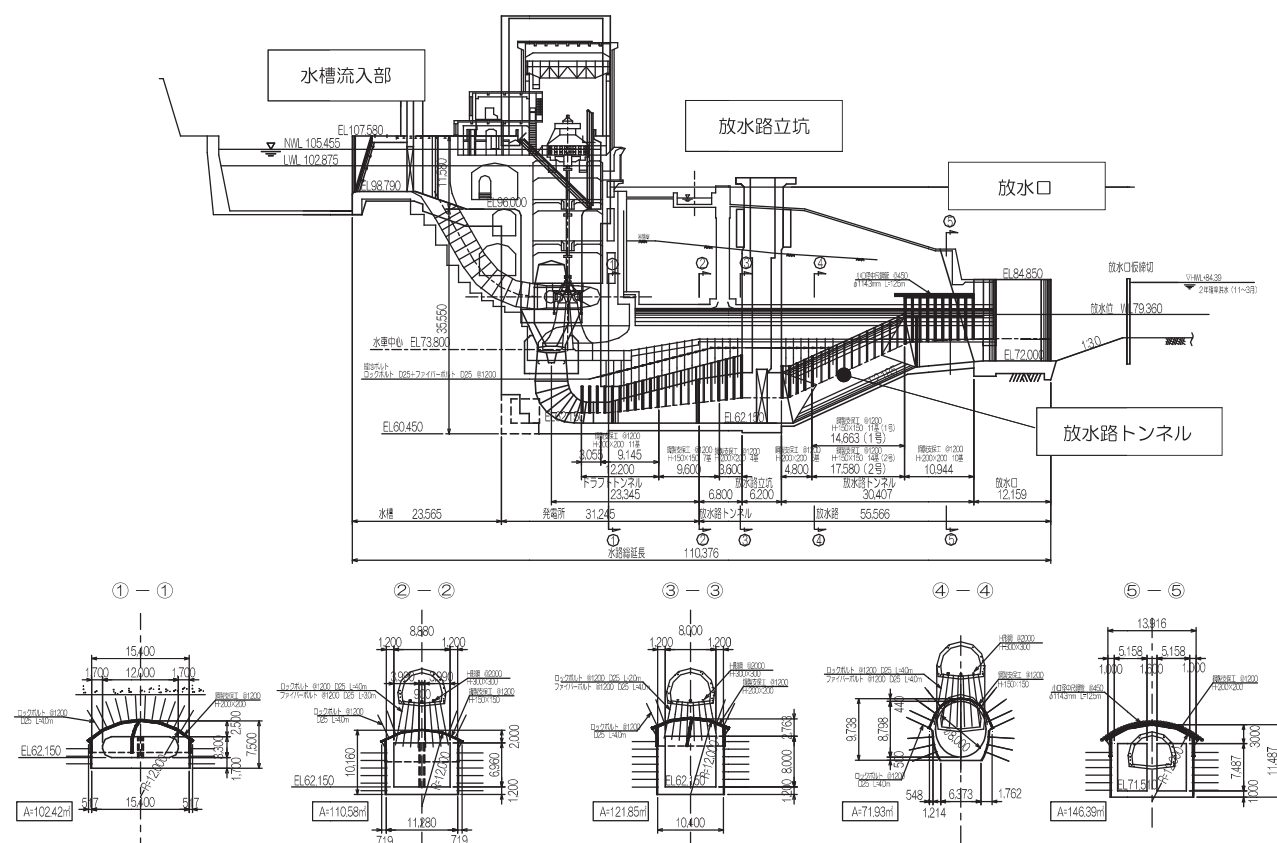
放水路トンネルは、発電所立坑から放水路立坑を経て放水口までの経路に計 2 本設置される。放水路トンネルの断面図を図—3 に示す。また、放水路トンネルの諸元を以下に示す。

■放水路トンネル諸元

断面形状：発電所から放水口に向かって、扁平～矩形～円形～矩形へと段階的に変化
 形 状：円形部 ϕ 8.0 m、矩形部 幅 8.0 m ～ 13.4 m、高さ 6.96 m ～ 12.85 m
 延 長：[1 号トンネル] 58.8m、[2 号トンネル] 61.7m
 勾 配：[1 号トンネル] 1:2.187、[2 号トンネル] 1:2.729

3. 全体施工フロー

豊実発電所改修工事全体の施工フローを表—1 に示す。



図—3 放水路トンネル（1号）断面図

放水口側が河川内の工事となるため、継手付H形鋼矢板による仮締切を設置した（①）。

当施工個所の河川が狹隘で過去数年間の最大流量に対して十分な仮締切の設置ができないことから、出水に伴い年数回冠水することを見越した高さに設定し、気象情報や上流ダム群の情報等から退避基準を定めて施工した。

放水路トンネルは、新設した放水路立坑を起点として、発電所側上半、放水口側上半、下半の順に掘削を実施した（①～⑤）。また、既設建屋及び発電所基礎の取壊し、発電所基礎の掘削も放水路トンネル掘削と並行して施工を進め、放水路トンネルが発電所基礎内に到達した後に発電所側を上部から掘削して、発電所基礎側の貫通となった（⑥）。

放水路トンネルの放水口側は、洪水時の河川水の侵入防止を図るため、プラグ部を残置した。明かり巻きを施工して放水口構造物を先行構築し、放水路制水門が設置された時点で貫通掘削及び覆工を施工した（⑧～⑨）。

4. 放水路トンネルの施工

（1）縫地ボルト

新設放水路上部に位置する既設放水路の周辺岩盤に

は、緩みがあることが想定されていた。また、新設放水路は扁平な形状で天端地山にグランドアーチが形成されにくく、亀裂や割れ目の入り方によっては天端の抜け落ちや崩落発生が懸念された。そのため、天端地山の緩みを抑えることを目的として、放水路トンネルの掘削に先立ち、上部の既設放水路トンネルから下向きに縫地ボルトを打設した。縫地ボルトの仕様はD25×1200mmピッチとし、後に掘削する箇所はファイバーボルトを採用した。図—4、写真—4に縫地ボルトの概要および施工状況を示す。縫地ボルトを施工することで、天端崩落や過大なゆるみ荷重が支保に作用することなく、掘削することができた。

（2）再生骨材コンクリートによる既設放水路の充填

既設放水路トンネルの空洞を残置したままでは、新設トンネル上の岩盤中の応力の伝達が不安定になるため、NATM工法としての掘削が困難となる。そのため、既設放水路は地山との一体化を図る目的で、縫地ボルトを施工後に再生骨材コンクリートで充填した（図—4、写真—5）。既設発電所の解体で発生したコンクリートガラからジョークラッシャーおよびインパクトクラッシャーによる簡易破碎設備により再生粗骨材を製造し、再生骨材コンクリートに有効利用した。

表-1 全体施工フロー

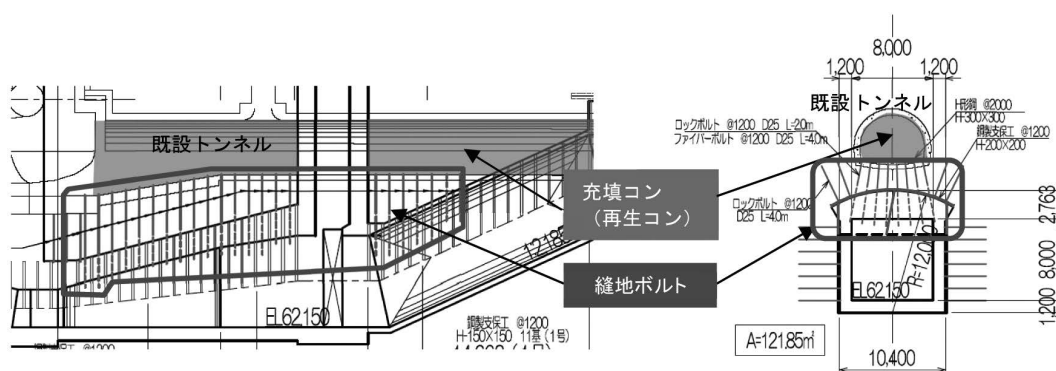
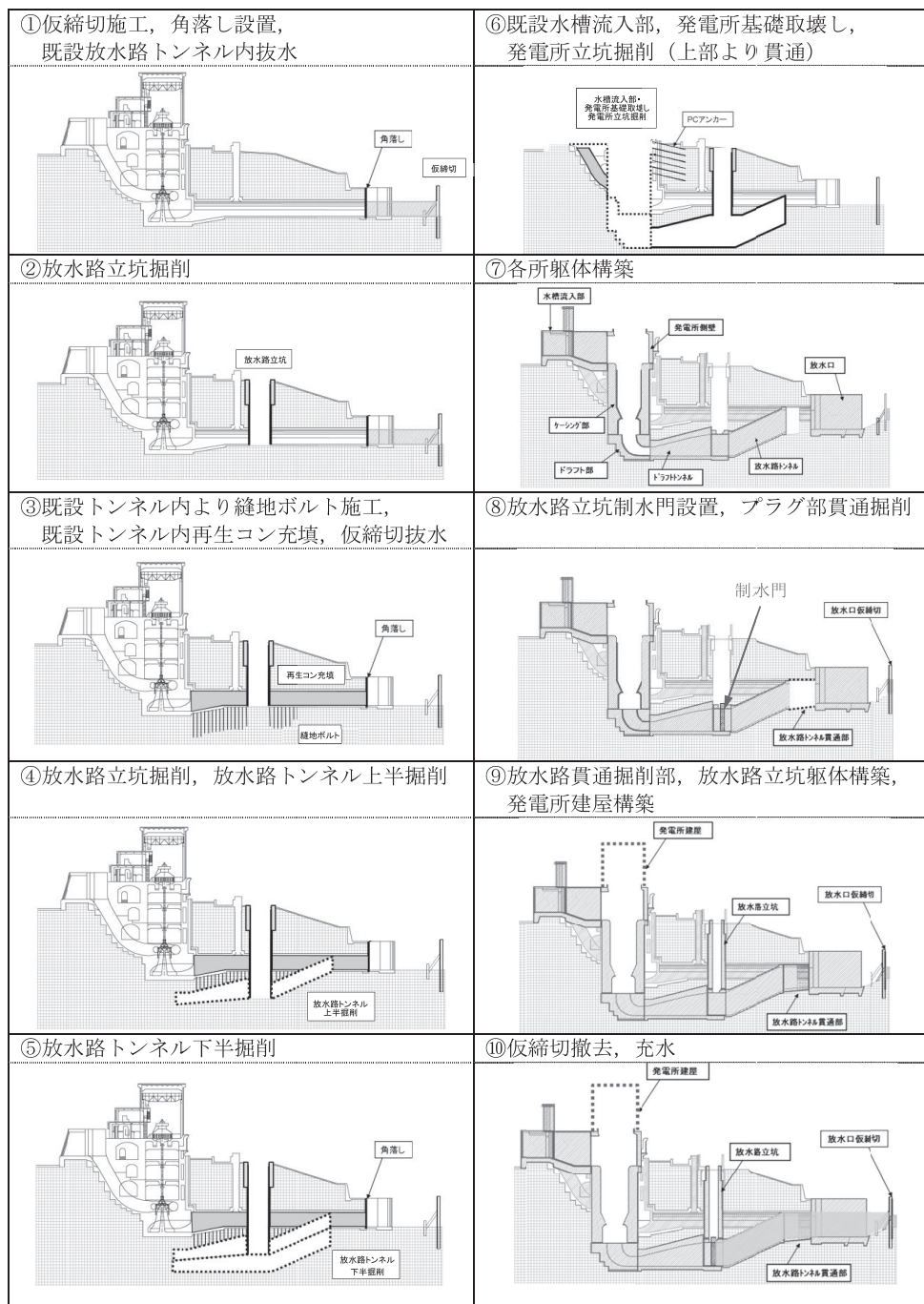
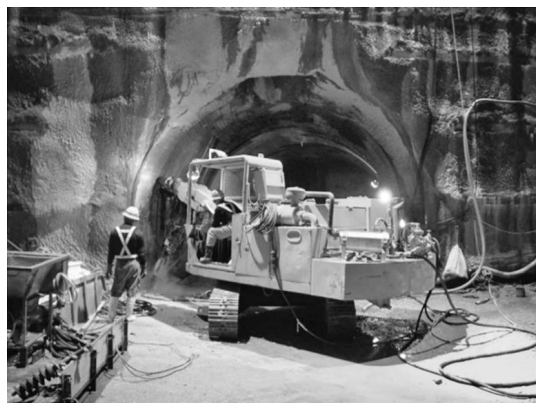


図-4 充填コンクリートおよび縫地ボルトの施工



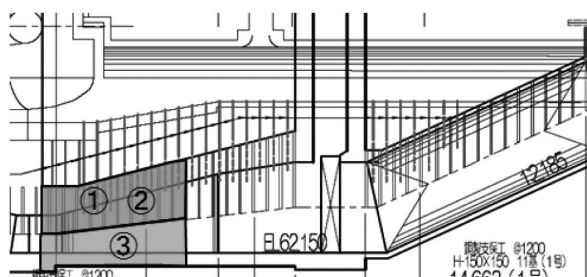
写真一4 縫地ボルト施工状況



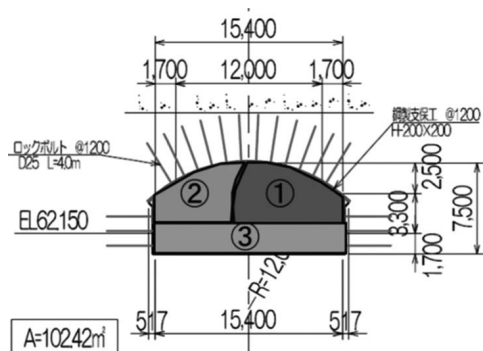
写真一5 既設放水路充填状況

(3) 加背割り

放水路トンネルの掘削は大断面となることから、上半・下半に分けて掘削することとし、発電所側に近い扁平断面部の上半については中壁分割工法を採用した



図一5 扁平部の掘削順序断面図



図一6 扁平部の掘削順序正面図

(図一5, 6)。放水路トンネルは短い延長の中で掘削断面形状が大きく変化するため、切羽進行と坑内変位との関係が複雑で通常の坑内変位のみでは計測管理が難しい。計測管理では天端沈下や内空変位の他に吹付けコンクリートおよび鋼製支保工に発生する応力に対しても管理基準値を設けるとともに、支保の応力状態から岩盤のゆるみや作用荷重の移り変わりを推定し、各支保が有効に機能していることを段階毎に確認しながら掘削を進めた。

(4) 放水口側プラグの設置

工事期間中、洪水時に発電所内へ河川水が流入することを防ぐため、放水路立坑部に放水路制水門を設置するまでの間、放水路トンネルは貫通させずに一部区間の地山をプラグとして残置した。放水路トンネルの放水口側は放水路立坑から放水口に向かって掘削し、放水口手前4m区間をプラグ部とした(写真一6)。

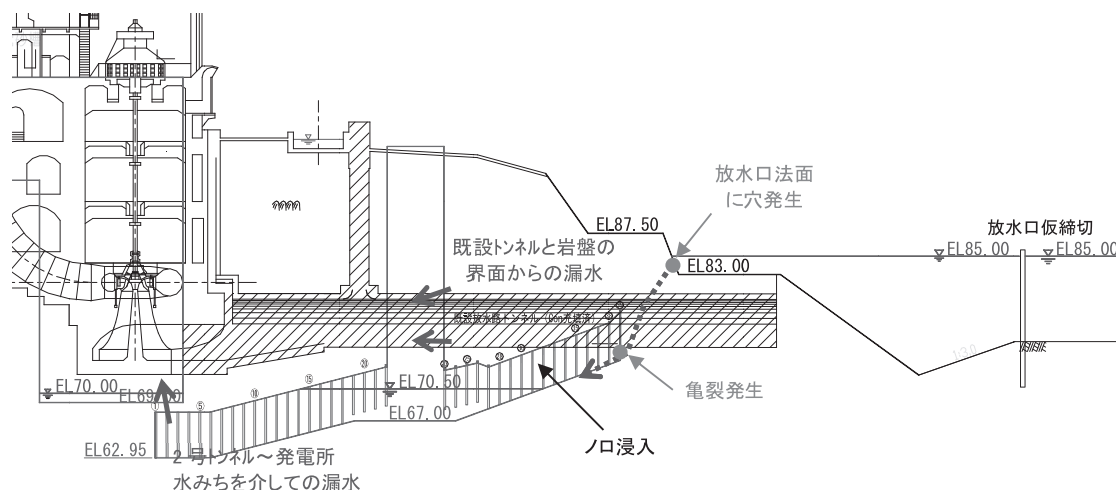
その後、放水口構造物を先行施工する目的で、放水口側から放水路トンネルを一部掘削し、明かり巻きを施工した。そして、放水路制水門設置後に放水口側からトンネル内に向けてプラグ部を掘削し、平成24年4月に放水路トンネルを貫通させた。その後、残りの放水路トンネルの覆工を施工した(写真一7)。



写真一6 放水口側削孔状況



写真一7 発電所側掘削完了



図一七 出水及び水没状況断面図（2号トンネル）

5. プラグ部の止水注入工

(1) 融雪出水に伴うトンネル、発電所立坑の水没

放水路トンネル（放水口側）上半掘削中の平成 22 年 4 月 12～14 日に融雪に伴う出水が発生して仮締切内が冠水した。それに伴い放水路トンネル内の全体で漏水が確認された。特に既設トンネル周辺、既設トンネル施工時の横坑跡、2号トンネル切羽周辺で漏水量が多い傾向にあった。その後、漏水量が増加した2号トンネルが水没し、2号トンネルと発電所掘削底盤間に発生した水みちを介して発電所立坑が水没した（図一七）。さらに1号トンネルも発電所立坑との接続部からの水の浸入により水没した。

(2) 漏水発生原因の推定

漏水発生原因としては以下の2点が推定された。

(a) 2号トンネル切羽付近の強風化層、土砂の存在
2号トンネル切羽には強風化岩盤による弱層が存在しており、トンネル排水後の調査で放水口掘削法面とトンネル内に湧水の跡を伴う穴が発見された。また、2号トンネルの切羽から探り削孔したところ、切羽から 1.0 m 先の上部は土砂であることが判明した。

(b) 既設トンネルの影響

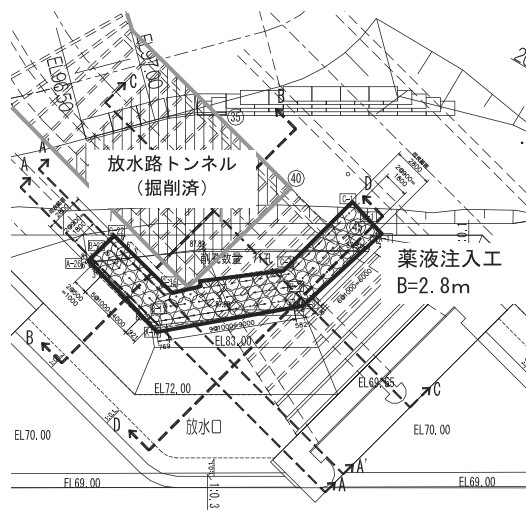
既設トンネルは矢板工法で施工しており、掘削時に岩盤に緩みを発生させているだけでなく、覆工コンクリートと地山間に木矢板等が存在しているため、既設トンネル周辺の止水性能が低下している。また、施工時の隣接トンネル間を接続する横坑の土砂で充填されている箇所が水みちとなっている可能性もある。

(3) 薬液注入工によるプラグ部補強工

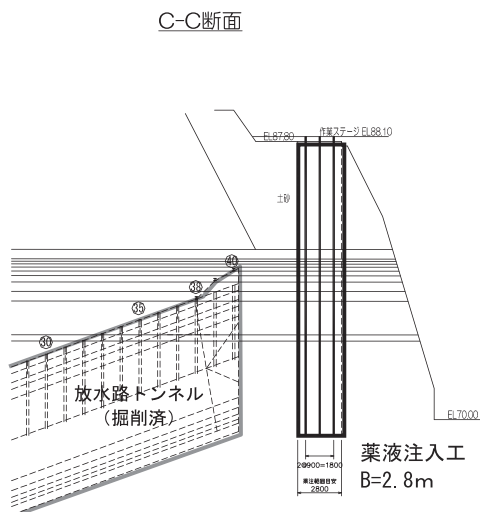
放水路制水門設置までの間、発電所内に設置する機

器を浸水から防護する必要があるため、プラグ部は出水に対する止水性の確保が課題であった。そのため、漏水量の多い2号トンネルに対して、放水口掘削法面の吹付コンクリートの増厚（20 cm）による遮水性の向上、および薬液注入工によるプラグ部の岩盤および土砂の強度増加を実施した。

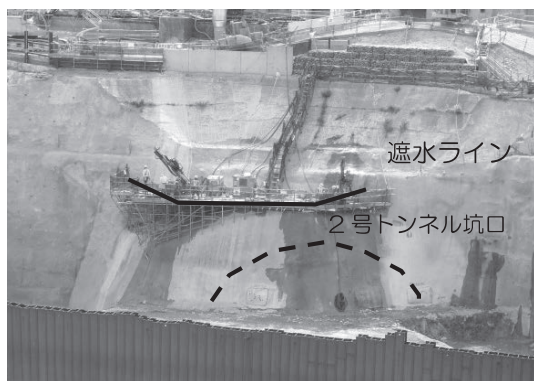
薬液注入工の材料の選定にあたっては、土砂、D級岩盤部への確実な浸透固化が可能なこと、プラグ部の補強であるため強度が必要とされること、2年間の耐久性が求められることから、ゲルタイムの調整が可能な恒久グラウトである「ハイブリッドシリカ」を採用した。削孔・注入はダブルパッカー工法で実施し、土砂部については1次注入としてセメントベントナイトによる粗詰めを施工後に、岩盤部については1次注入からハイブリッドシリカを注入した。薬液注入工配置平面図を図一八に断面図を図一九に施工状況を写真一八に示す。薬液注入工は3列にわたり施工し、幅2.8 mの改良壁を造成した。



図一八 2号坑口部薬液注入工平面図



図—9 2号坑口部薬液注入工断面図



写真—8 薬液注入工施工状況

プラグ部に薬液注入工を施工した結果、その後の洪水時において漏水が発生することはなく、施工を完了することができた。

6. おわりに

今回施工したトンネルは、延長 60 m 程度のトンネル 2 本でありながら、扁平かつ大断面の掘削形状、既設トンネル直下での施工、漏水に伴う止水対策工などの様々な問題があり、足掛け約 4 年の年月をかけて施工を完了した（写真—9）。



写真—9 豊実発電所竣工状況

戦後に建設されたインフラの老朽化が進んでいる中、環境負荷の少ない水力発電の役割は今後大きくなっていくと思われる。そのため、今後、本工事のようなリニューアル工事は増加してくる考えられ、今回の報告内容がその一助になれば幸いである。

謝 辞

最後に、本工事にご尽力いただいた関係者の方々に厚く感謝申し上げます。

J C M A

《参考文献》

- 1) 佐々木千好・永井志功：豊実発電所放水路トンネルの施工，No.352 電力土木 2011.3, pp40-44

【筆者紹介】

工藤 敏邦（くどう としくに）
前田建設工業㈱
土木事業本部 土木設計部
リーダー



多田 誠（ただ まこと）
東北電力㈱
いわき技術センター
土木課長

