

水力発電所施設改修および震災被害復旧 —白川発電所 建屋補修・水車発電機基礎工事—

寺井昌栄* 土屋任史* 中須賀大樹* 松田敏**

JNC 株式会社が所有する白川発電所（熊本県菊池郡大津町）は1914年（大正3年）に竣工し、100年以上経過した建屋がレンガ造りの出力約9,000kWを有する歴史ある発電所である。

白川発電所リニューアル工事における水力発電所の発電施設改修と、平成28年熊本地震および大雨被害からの震災被害復旧の施工記録を記す。特に導水路については、トンネルが地震により閉塞した落盤部および、大雨による沢の流出によりトンネルが露出した損壊部の復旧工事の施工は、貴重な事例であるのでここに紹介する。

キーワード：水力発電所，導水路トンネル，復旧工事，崩落，補修補強，熊本地震

1. はじめに

白川発電所は、発電所、水圧鉄管、水槽、導水路トンネル（内径2.273m、延長3,078m）、沈砂池、取水堰で構成される流れ込み式の水力発電所である。建屋はレンガ造りの出力約9,000kWを有する歴史ある発電所である。平成29年4月より改修工事を予定していたが、平成28年4月の熊本地震により発電停止し、発電施設で一部倒壊や損傷等の甚大な被害を生じた。主な被害は、発電所建屋は半壊し、水槽は法面崩壊や中央壁の横ずれや各所ひび割れが発生した。中でも導水路トンネルは、大きく損傷し、落盤による坑内閉塞や、沢の流出によるトンネル本体の損壊が発生した。また、地震後の大雨による河川増水に伴い、沈砂池から落盤部までの1,490m間に土砂が流入し堆積した。

本稿では、これらの施設を復旧し運転再開するため、白川発電所リニューアル工事と合わせ、震災被害復旧工事を実施した施工記録を報告するものである。Photo.1に白川発電所建屋の着工前（震災前）の全景を示す。



Photo. 1 白川発電所（震災前）

2. 発電所改修工事

2. 1 建屋補修・水車発電機基礎工事

発電所の更新工事は設計・施工であり、建屋は新築し、水車発電機基礎工事は既設基礎を取壊し撤去後、新規水車発電機を組立（別途工事）ながら基礎を構築する計画であった。地震により建屋が半壊し、崩れかかっていたことから、先行して取壊しを実施した。Photo.2に建屋損傷状況（震災後）、Photo.3に建屋取壊し状況を示す。



Photo. 2 地震による建屋損傷状況



Photo. 3 建屋取壊し状況

* 九州支店 土木部 電力土木工事所
** 土木事業本部 インフラ再生事業部

既設の建屋および水車発電機を取り壊した後、設計に基づき、新たに建屋を新設し、水車発電機基礎を構築した。完成写真を Photo. 4, Photo. 5 に示す。



Photo. 4 新設建屋



Photo. 5 新設水車発電機

3. 水槽復旧工事

3. 1 法面保護工事

水槽の山側斜面にて一部崩落、損傷が発生したことから、水槽・沈砂池修復調査設計を基に法面吹付による吹付法砕工および鉄筋挿入工、落石防護工、ロープ掛工により復旧、補強した (Photo. 6, Photo. 7 参照)。



Photo. 6 斜面崩壊巨石による水槽の閉塞



Photo. 7 水槽山側法面保護工 完了

3. 2 水槽内部補修

水槽の内部は、中央隔壁の水平打継ぎ面で、横ずれが生じ、側壁や底版もひび割れが発生した。調査設計を基に水槽中央隔壁を再構築し、水槽内部を側壁はポリマーセメントモルタルによる断面修復および表面被覆、底版はレジンコンクリート製パネル (AS フォームパネル) にて被覆した。また合わせて歩廊や階段等の付帯設備の更新を実施した (Photo. 8, Photo. 9 参照)。



Photo. 8 水槽中央隔壁の損傷



Photo. 9 水槽内部補修 完了

4. 導水路復旧工事

4. 1 導水路トンネル概要と被害状況

導水路は、幅2.273m、高さ2.651m~2.703mの馬蹄形、全長3078.136mのトンネルであり、「第1号隧道」~「第5号隧道」と定義されている。Fig.1に示すようにトンネル断面はアーチ部が岩盤の無巻部と、コンクリートで全面覆工されている巻立部の区間がある。

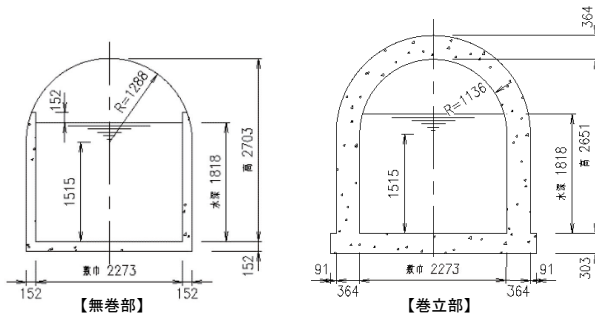


Fig. 1 導水路トンネル断面図

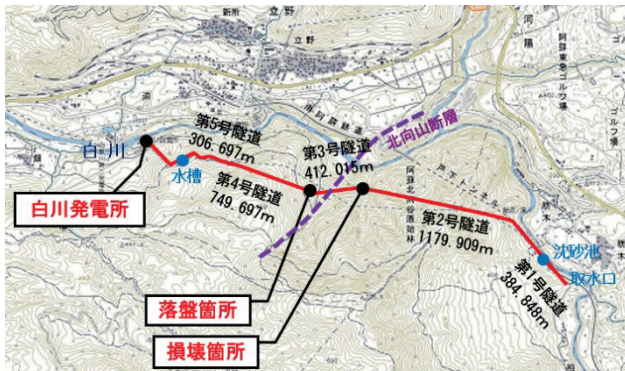


Fig. 2 導水路トンネル落盤部および損壊部位置図

熊本地震やその後に発生した豪雨による河川氾濫等の影響により導水路各所が大きく損傷した。主な被害状況を下記に示す。

(1) 堆積土砂

「第2号隧道」坑口部付近は、導水路内が土砂や岩塊の流入により閉塞されていた。「第2号隧道」坑口から落盤部までは、深さ約350~750mmのへドロ状の土砂が堆積しており、歩行も困難であった (Photo. 10, Photo. 11参照)。



Photo. 10 巨石および土砂流入状況



Photo. 11 堆積土砂状況

(2) 損壊部

地震後の大雨により沢が流出し、「第2号隧道」と「第3号隧道」の交差点部が地上に露出した (Fig.2参照)。当該箇所は土被りの小さい沢部に位置しており、周辺に土石流の影響により一部滑落した露頭が認められたことから、土石流の影響により交差点部が地上に露出したと推測される。なお、「第3号隧道」も土砂および岩塊による閉塞がみられた。本工事では当該箇所の地表露出部を「損壊部」と称した (Photo. 12, Photo. 13参照)。



Photo. 12 損壊部 (地上に露出した導水路の状況)



Photo. 13 損壊部 第2号隧道終点付近

(3) 落盤部

下流側では、「第3号隧道」と「第4号隧道」の交差点部より約100m「第4号隧道」側にて天端崩落が発生し導水路内が閉塞した (Fig.2参照)。本工事では「落盤部」と称した。Photo. 14, Photo. 15に落盤部状況写真を示す。



Photo. 14 落盤部（下流側の崩落状況）



Photo. 15 落盤部掘削工 切羽状況

(4) その他の被害状況

導水路全線において、巻立部は地震による変状が激しい区間があり、アーチ部や側壁覆工が破壊している部位もあり非常に危険な状態であった（Photo. 16参照）。特に水槽に到達する「第5号隧道」の坑口部区間18mでは、土被りが小さいこともあり変状が激しく、覆工補強が必要な状態であった。無巻部においては側壁コンクリートで倒壊、押し出し、圧壊が生じていた。



Photo. 16 側壁コンクリートの倒壊状況

インバートは圧壊ひび割れが生じ、打替えが必要な箇所もあった。また全線にわたり摩耗洗堀が生じており、機能的維持のためにも補修が必要であると判断した。

4. 2 導水路トンネル復旧工法の選定

導水路全線を原形復旧することが決定され、特に落盤部および損壊部区間を復旧する際、二次災害の恐れのない安全性が確保された工法であることが求められたため、以下に示す方法を採用した。

- ① 堆積土砂の撤去及び落盤部や損壊部の早期復旧の必要性から、上下流の両方からの施工とする。上流側は堆積土砂量が多いため坑内に軌条設備を設けて土砂運搬、機材運搬の作業効率向上を図る。
- ② 落盤部の施工方法は、断面が小さく、同様な条件下で実績のある2006年に広島県で実施した送水用トンネル復旧工事¹⁾や2007年に愛知県で実施した導水路トンネル復旧工事²⁾を参考に、補助工法を併用した山岳トンネル工法を選定する。
- ③ 落盤部手前の覆工コンクリートには、ひび割れが多く発生し危険な状態なため、落盤部掘削の影響が、ひび割れ発生区間に及ぶ恐れがある状況も考慮して、この区間を安全に通行できるよう支保工で補強する。
- ④ 損壊部は、施工時に沢からの落石や土石流等が懸念されることから、安全に施工するため防護壁として支保工を設置する。また大雨による中止・退避基準を設ける。
- ⑤ 損壊部覆工は現場打ちコンクリートが困難なことから、二次製品のプレキャストアーチカルバートを設置する。

4. 3 導水路トンネル復旧工事の流れ

導水路復旧工事の施工の流れを Fig. 3 に示す。

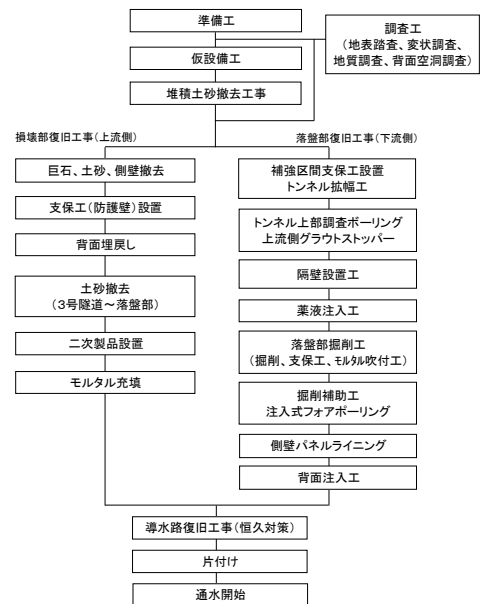


Fig. 3 復旧工事の流れ

4. 4 仮設備工

Table 1 に仮設備一覧を示す。上流側と下流側にそれぞれ荷役、電気、給排水、濁水、換気、通信設備を配備した。Photo. 17 にバッテリーカーを示す。

Table 1 仮設備一覧

設備名	場所	仕様・規格	数量
荷役運搬設備	上流側	モルラー バッテリーカー 門型クレーン	2t積載 CBD-500特CEB 2.8t吊 1台 1台
	下流側	モルラー 索道	2t積載 1t吊 1基 1基
電気設備	上流側	高圧受電設備 分電盤、配線	6600V 240KVA @200m 1式
	下流側	発電機 分電盤、配線	100KVA @200m 1台
給排水設備	上流側	フラッシャーポンプ 2吋水中ポンプ	BDSMD-63.7、5.5 KTV-55 2台 5台
	下流側	フラッシャーポンプ 2吋水中ポンプ	BDSMD-63.7 KTV-55 1台 3台
濁水処理設備	上流側		10t/h 1式
	下流側		10t/h 1式
換気設備	上流側	送風式	SF425-10/10B-2.2(2)TRR 1基
	下流側	送風式	SF425-10/10B-2.2(2)TRR 1基
照明設備	上流側	坑内照明@5m 非常照明@50m	LED40W ハイライト40W 1式
	下流側	坑内照明@5m 非常照明@50m	LED40W ハイライト40W 1式
通信設備	上流側		酸素・ガス警報システム 1式
	下流側		インターホン、非常警報 1式



Photo. 17 バッテリーカー運行状況

4. 5 堆積土砂撤去工事

坑内に堆積している土砂（ヘドロ）1,760^m³や礫、コンクリート塊 137^m³を撤去した。また無巻部において落石等の恐れがある箇所にもルタル吹付を実施した。

堆積土砂撤去の上流側の坑内使用機械は、初期掘削（坑口から 100m）は、0.4 ^m³級ホイールローダーで掘削・積込を行い、その後、段取替えにてバッテリーカーの軌条を設置し、0.04 ^m³級バックホウで掘削を実施した。下流側の礫やコンクリート塊の撤去として、0.04 ^m³級バックホウで掘削し、運搬機械は不整地運搬車 1t 積みで運搬した。また作業時の安全対策として、天端および側壁の岩塊やコンクリート塊の落下防止のため、リペアエース（株式会社ファテック）による急結モルタル吹付を行った。

4. 6 落盤部復旧工事

落盤部の復旧工事は下流側から着手した。

(1) 補強区間支保工設置, トンネル拡幅工

落盤部付近の巻立部天端が大きくひび割れが発生して

おり安全に通行するため、仮設として支保工を 1m ピッチで設置し天端を木矢板にて養生した。また、重機同士が離合できるよう無巻部側壁を一部（10m 程度）撤去し、離合および転回区間を設けた（Fig. 4 参照）。

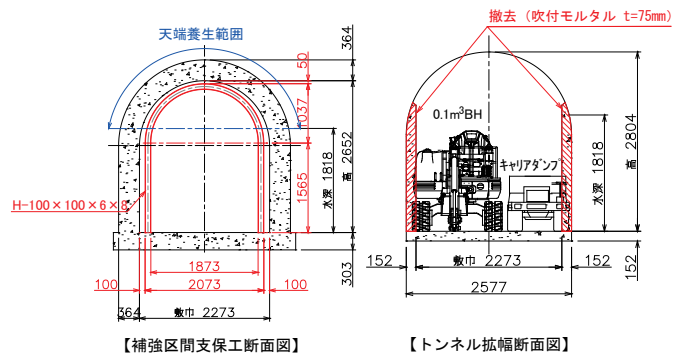


Fig. 4 補強区間支保工設置およびトンネル拡幅断面図

(2) トンネル上部調査ボーリング

崩落箇所の延長は上流側にも土砂が堆積していたため調査することができなかった。このため下流側より調査ボーリングを実施し工事に着手した（20m 先に空洞が存在しており実際の閉塞は 161.2m であった）。トンネル直上の岩盤層が崩壊し、その崩落土（岩）がトンネル内部に流入堆積しているものと想定したが、地質状況やトンネル崩落形態については、データが不十分で、対策工検討結果の妥当性を評価することが困難と判断し本格的な対策工を実施する前にトンネル上部の地質状態について、上方に 2 本、側方に 2 本の計 4 本のボーリング調査を実施した（Fig. 5 参照）。なお、地表踏査により、崩落が地上まで達していないことを確認した。

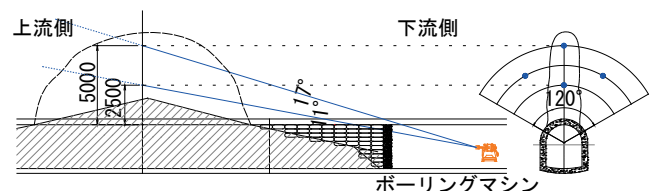


Fig. 5 上部調査ボーリング計画図

(3) 上流側グラウトストッパー

落盤部は下流側から崩落土砂を薬液注入により固化させて再掘削をするため、リーク防止のために上流側にグラウトストッパーを設けた。下流からボーリングを行い、充填用の注入管（VP40）を挿入する。挿入した注入管から充填材を送液し、グラウトストッパー壁を構築した。その概念図を Fig. 6 に示す。

グラウトストッパーの材料は 2 液性の瞬結性グラウト（サンコーハード AQ2-10 秒）を選択した。配合表を Table 2 に示す。施工順序は、下流側から上流崩落箇所までトンネル天端になるような削孔角度で削孔し、注入配管（VPφ 40：スリーブバルブ付き）を挿入する。注入作業は 2 液送液が可能な注入内管（ダブルパッカー）を用いてグラウト材料を充填した。注入量は 12 ^m³であった。

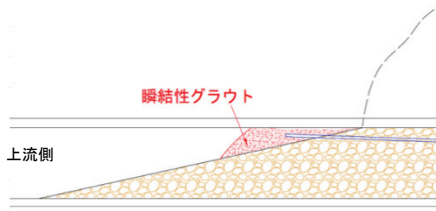


Fig. 6 グラウトストッパー壁概要図

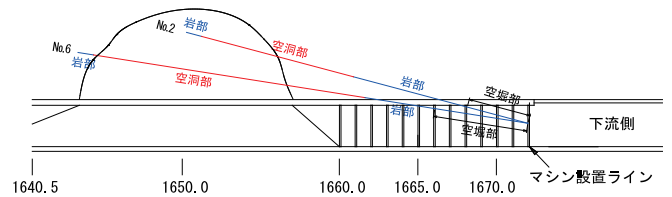


Fig. 8 薬液注入工施工図

Table 2 サンコーハードAQ2-10秒 配合表

A液 200ℓ(500ℓ)		B液 200ℓ(500ℓ)	
高炉セメントB種		サンコーハードAQ2-10秒	
5袋 125kg(312.5kg)		硬化剤 1袋 24kg(60kg)	
サンコーハードAQ2-10秒			
促進剤 1袋 12kg(30kg)			
水 154ℓ(385ℓ)		水 196ℓ(490ℓ)	

(4) 隔壁設置工

薬液注入材料の対象範囲外への逸走防止を目的として、隔壁を設置する。隔壁は、覆工内側に鋼製支保工(H-100)を建て込み、さらにその内部を土のうで充填した。隔壁設置工の詳細を Fig. 7, Photo. 18 に示す。

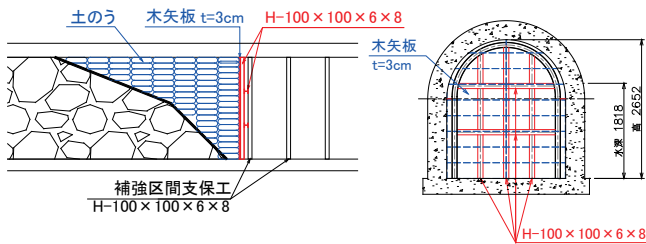


Fig. 7 隔壁設置工概要図



Photo. 19 薬液注入工施工状況



Photo. 18 隔壁設置工施工状況

(5) 薬液注入工

落盤部掘削に先立ち、崩落部上部の空洞充填および緩んだ落盤部の地山を改良するため、薬液注入を行った。削孔方法は、トンネル坑内から小型ロータリーパーカッション方法(RP式)にて施工し、削孔完了後、二重管ロッドを挿入して注入を行った。充填材料は瞬結性グラウト(サンコーハードAQ1-1分)を使用し、合計14箇所にて98.6m³の注入量であった。薬液注入工の詳細を Fig. 8, Photo. 19 に示す。

(6) 落盤部掘削工

薬液注入により空洞充填および崩落土砂を改良した後、掘削を開始した。復旧断面図を Fig. 9 に示す。施工機械は掘削0.1m³級バックホウ、ブレーカーおよび積込み0.04m³級バックホウで行い、掘削土の運搬は坑内を不整地運搬車1t積みで運搬した。支保工はH-100を1mピッチで組立、天端に鋼矢板を設置した。掘削補助工法は注入式フォアボーリングとして、自穿孔ボルト(KATアンカー3m)を使用し、打設範囲は120°で5本/断面でシリカレジンを60kg/本、計画注入とした。施工機械は0.1m³級バックホウにアタッチドリルUDRWを装備し穿孔作業を機械化施工した。

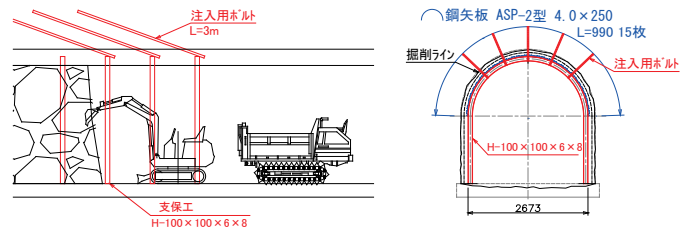


Fig. 9 落盤部復旧断面図

掘削工は最終的に全長161.2mとなり、昼夜施工で1.5m/日の進捗で8.5ヶ月要した。地質としては、落盤下流20m～114m付近までは安山岩自破砕部や溶岩が分布し114m～161.2m付近までは均質な凝灰角礫岩が分布していた。

また落盤部の上流終点部には「平成28年度熊本地震」の震源断層となる「北向山断層」が位置し(Fig. 2参照)、断層を挟んでトンネルは概ね3.5m程度北東側に変位していた。掘削は、ズレもなく水路が繋がりが原形復旧した。落盤部掘削工の施工状況を Photo. 20, Photo. 21 に示す。

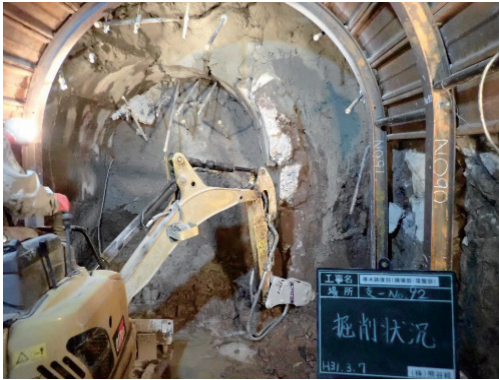


Photo. 20 落盤部掘削状況



Photo. 21 貫通地点

(7) 側壁仕上げ工

側壁の仕上げとして、レジンコンクリートパネルによるライニング工法を実施した。パネル背面の充填工は、上流側ヤードにモルタルミキシングプラントを設置し、注入箇所まで圧送管2吋を2系統にて約1,800m圧送ラインを形成した。また、使用する粉体の材料（セメント、MP グラウト）は、資材置場に大型車両搬入し、プラントまで4t 車にて小運搬した。



Photo. 22 側壁パネルライニング 完了

(8) 背面注入工

落盤部に建て込んだ支保工と地山との空隙を発泡ウレタン（20倍発泡）により充填し補強した。注入は天端にトンネル延長方向3m間隔で注入管を設置し行った。

4. 7 損壊部復旧工事

損壊部はプレキャストコンクリートにて復旧した（延長7.8m）。Fig. 10に復旧断面図を示す。

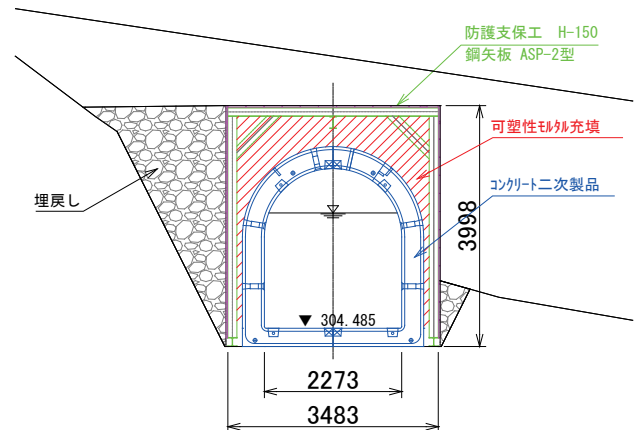


Fig. 10 損壊部復旧断面図

(1) 巨石，土砂，側壁撤去

損壊部復旧にあたり、支障となる堆積土砂，巨石，側壁を撤去した。巨石（最大5.5m×4.6m）が多くあり、ガンサイザーで大割破碎し，削岩機，セリ矢にて小割破碎を行い，上流坑口から搬出した。

(2) 支保工（防護壁）設置

施工時に沢からの落石や土石流等が懸念されることから，安全に施工するため防護壁として支保工を設置した。支保工材はH-150を使用し，600mmピッチで建込み，外周を鋼矢板で覆う形状とした（Photo. 23参照）。防護支保工設置後，下流の「第3号隧道」の土砂撤去を進めることで，落盤部の上流位置を確認することができ，導水路の被害状況全貌がようやくわかった。



Photo. 23 防護支保工設置状況

(3) プレキャストコンクリート覆工設置

覆工は，プレキャストアーチカルバートを設置した。工場で作成したものを大運搬で事務所近辺の資材置場に仮置きし，ユニックにて現場仮設ヤードへ小運搬した。狭い坑内を運搬するため，1ピースを幅30cm，鉛直に2分割（1,320kg/1ピース）した。現地ではモノレールから

沈砂池に設置した門型クレーンを経由し、トンネル内は製作した牽引台車を不整地運搬車で慎重に運搬した。組立はピース間、リング間を高力ボルトで接続し、ボルトボックスは無収縮モルタルにて仕上げた。Photo. 24 にプレキャスト設置状況を示す。



Photo. 24 プレキャスト設置状況

設置後、支保工内部の空隙は可塑性モルタルを充填した。また覆工内部の既設との擦付け箇所は急結モルタル吹付にて仕上げた。

4. 8 導水路復旧（仕上げ）

導水路全線を変状調査し損傷箇所に応じた対策を提案、施工した。主な補修内容を Table 3 に示す。

5. おわりに

熊本地震発生から発電停止という予期せぬ事態になり、白川発電所施設全体に大きな被害をもたらした。これまでに経験の少ない工事であった。協力業者、九州支店、本社の総力を結集することにより、約 4 年の工事を経て工程通りの令和 2 年 4 月 1 日に運転開始した。

Table 3 導水路復旧補修内容

工種	仕様および主な材料	施工延長
打替え工	既設覆工取壊しパネルライニングおよび背面モルタル充填 品名：鋼製支保工H-100、レジンコンクリートパネル、裏込め充填材	63.3 m
空洞充填工	巻立部全線を注入用素吹き $t=10\text{mm}$ 、発泡ウレタン20倍にて空洞充填 品名：AGSR-FIA20s、AGSR-FIB	993.4 m
FRPグリッド補強工（上半）	巻立部上半のみFRPグリッド補強およびポリマーセメントモルタル吹付 品名：AGG-HT-4、断面積 6.6mm^2 、リフレモセットSP	26.0 m
FRPグリッド補強工（全周）	巻立部全周（底版除く）FRPグリッド補強およびポリマーセメントモルタル吹付 品名：AGG-HT-4、断面積 6.6mm^2 、リフレモセットSP	69.2 m
急結モルタル吹付	無巻部天端に急結モルタル吹付 $t=50\text{mm}$ 品名：デンカPFモルタルTYPE-K、デンカサブショットK	183.4 m
側壁倒壊部補修	無巻部の側壁倒壊部を撤去し急結モルタル吹付 $t=75\text{mm}$ 品名：デンカPFモルタルTYPE-K、デンカサブショットK	165.9 m
ロックボルト工	落盤部貫通地点補強にてロックボルト $6\phi 2000\text{mm}$ 打設し急結モルタル吹付 品名：ロックボルト（R32 $\times 1.0\text{m}\times 2$ ）、デンカPFモルタルTYPE-K、デンカサブショットK	12.0 m
クラック補修	全線においてひび割れ開口幅または段差が大きく顕著な箇所の補修 品名：ポリマーセメントモルタル	123.0 m
1号隧道補強工	湧水が多い巻立部にて水抜き孔4箇所設置しFRPグリッド補強+空洞充填 品名：AGG-HT-4、断面積 6.6mm^2 、リフレモセットSP、発泡ウレタンKOD-M、ワイフホール	5.0 m
覆工内巻補強	第5号隧道坑口部18m区間にて全周（底版除く）パネルライニングし擦付けFRPグリッド補強 品名：鋼製支保工H-150、レジンコンクリートパネル、裏込め充填材、FRPG材	18.0 m
インパर्ट工	インパर्ट全線を洗浄清掃後、無収縮グラウトコンクリート打設 $t=30\text{mm}$ 品名：プレユーロックスGG	3,033.2 m
水路沈砂池補修	水路沈砂池の側壁補修にて表面被覆、断面修復、目地補修 品名：マスターエマコC150、マスターエマコS992、HSPU目地	45.0 m

本工事が今後増加が予想される老朽化した構造物に対する復旧・補強対策の一助となると考える。

謝辞

今回の工事にあたっては、関連市町や近隣住民の方々のご理解とご協力、発注者である JNC 株式会社様、JNC エンジニアリング株式会社様をはじめ関係者の方々からご指導・ご支援を受け、無事故で竣工することができました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉良義宣・多田正樹・森康雄・畔高伸一・片山政弘：供用中の送水トンネル崩落に伴う緊急復旧工事，熊谷組技術研究所報告，NO. 66，pp. 97～104，2007. 12
- 2) 糸瀬巖・成富裕樹・辻栄太郎・畔高伸一・森康雄：犬山系導水路トンネル崩落事故に伴う緊急復旧工事報告，熊谷組技術研究所報告，NO. 67，pp. 145～152，2008. 1

Renovation of Hydroelectric Power Station and Restoration from Earthquake Disaster -Building Repairs and Hydrogenerator Foundation Work at Shirakawa Power Station-

Shouei TERAJ, Tadashi TSUCHIYA, Daiki NAKASUGA and Satoshi MATSUDA

Abstract

Owned by JNC Corporation, Shirakawa Power Station (Otsu-cho, Kikuchi-gun, Kumamoto Prefecture) was completed in 1914 (Taisho 3). Featuring a brick building more than 100 years old, the historic power station has output capacity of approximately 9,000 kW.

This report presents construction records of the renovation of the hydraulic power generation facility as part of renewal work for Shirakawa Power Station as well as the restoration of damage caused by the Kumamoto Earthquake and heavy rainfall in 2016. In particular, the headrace required restoration of a portion that collapsed due to the earthquake, blocking the tunnel. Restoration also targeted a damaged portion where the tunnel was exposed by the outflow of mountain runoff caused by the heavy rain. These cases of restoration work serve as valuable examples.

Key words: Hydroelectric Power Station, Headrace Tunnel, Restoration Work, Collapse, Repair and Reinforcement, Kumamoto Earthquake