

コロナ禍を乗り越え，北スマトラに全長 10 km に およぶ水力発電所を建設

アサハン第3水力発電所 Lot I 土工工事

高岡 秀明

アサハン第3水力発電所プロジェクトは世界最大のカルデラ湖であるトバ湖から流れ出るアサハン川の水を利用して，インドネシア共和国北スマトラ州に流れ込み式の水力発電所（174 MW）を建設するものであり，電力需給が逼迫する北スマトラ系統の電力供給の安定性改善を目的とする国際協力機構（JICA）による円借款事業（ODA）である。当報文では，このプロジェクトのうち，当社（清水建設）が施工する Lot I 土工工事について，コロナ禍での取組や ICT 技術の活用と合わせて報告する。

キーワード：インドネシア，水力発電所，取水堰，トンネル，地下発電所，立坑，水圧管路，ICT

1. はじめに

アサハン川はインドネシア共和国北スマトラ州に位置し，世界最大のカルデラ湖であるトバ湖（標高 905 m）からマラッカ海峡に流れ出る唯一の河川である。水力発電に理想的なその地形から，これまでに第2発電所（603 MW，1983年竣工）と，その上流に第1発電所（180 MW，2010年竣工）が建設され，いずれも稼働中である。アサハン第3水力発電所（174 MW，使用水量 106.8 m³/sec，最大落差 198 m，2024年竣工予定）は電力需給が逼迫する北スマトラ系統の電力供給の安定性改善を目的として第2発電所の下流直下に建設される流れ込み式の水力発電所である。図-1に

プロジェクトの位置図を，図-2に全体平面図を示す。プロジェクトは表-1に示す通り，全5Lotに分けて発注されており，当社（清水建設）は Lot I 土工工事（Civil Works）を施工している。当報文では，多工種な水力発電所工事の中から，代表工種についての施工概要に加えて，コロナ禍での取組や ICT 技術の活用について報告する。

2. 工事概要

当社が施工中の Lot I 土工工事（Civil Works）の工事概要を表-2に示す。



図-1 プロジェクトの位置図



図-2 全体平面図

表-1 アサハン第3水力発電所プロジェクト

Lot I	土工工事（Civil Works）
Lot II	鉄管・ゲート工事（Metal Works）
Lot III	電気機器工事（Electro-Mechanical Works）
Lot IV	送電線工事（Transmission Line Works）
Lot V	遠隔制御・洪水警報システム （Telemetry and Flood Warning System）

表一 2 Lot I 土建工事 (Civil Works) 概要

工事名称	アサハン第3水力発電所 Lot I 土建工事
発注者	インドネシア共和国 国営電力会社 PT PLN
設計・監理	日本工営㈱
請負者	清水建設・アディカリヤ共同企業体
資金源	国際協力機構 (JICA) 一般円借款
契約約款	FIDIC Red Book MDB 版 (2010年)
着工日	2019年3月28日
工期	当初48ヶ月+延長9ヶ月
工事内容	取水堰1式, 取水設備1式, 導水路 (カルバート・開水路) 延長1,828 m, 取水庭1式, 導水路トンネル 延長7,788 m, 調圧水槽2箇所 (導水路・放水路), 水圧管路トンネル 延長298 m, アクセストンネル 延長350 m 枝坑720 m, 地下発電所1式, ケーブルトンネル 延長171 m, 放水路トンネル 延長479 m, 放水口1式, 工事用道路 5,788 m (トラス橋60m×2箇所), 各種管理棟および守衛室 計8棟, 他 トンネル総延長 10,911 m コンクリート量 (契約数量) 355,000 m ³ 鉄筋量 (契約数量) 14,200 ton

3. 取水堰・取水設備

取水堰はアサハン第2水力発電所の放水口(左岸側)の下流直下, アサハン川が右岸側へと蛇行する箇所に位置している。取水設備が位置する左岸側では吹付けコンクリートおよびのり枠工を合わせて10段切土を施工し, 右岸側では吹付けコンクリートにより7段切土を施工後に厚さ50cmの鉄筋コンクリートにて延長285mの転流水路を構築した。2021年2月にアサハン川の転流を実施し, 取水堰構築エリアの上下流に転石, 大型土嚢, のり面掘削ずりを利用して仮締切堤体を構築した。転流後は河床掘削を行い, 2022年3月のLot IIゲート工事への引渡しに向けて, ゲートタワーおよび取水設備の躯体構築を進めた。引渡し後はLot IIゲート工事と並行して上下流のスラブおよびのり面コンクリートの施工を進めており (写真一



写真一 取水設備・取水堰・転流水路

1), 再転流および取水設備への注水開始が2023年10月に予定されている。

4. 導水トンネル

導水トンネルは仕上り内径φ6,600 m, 総延長7,788 mであり, 3箇所横坑からそれぞれ上下流に向けて, 最盛期には5切羽で並行して掘削を行った。地質に恵まれ, 全長の94.5%を厚さ5cmの吹付けコンクリートのみ支保パターンTypeBにて, 1発破進行L=4mの長孔発破を継続して掘削した。

(1) 掘削機械編成

削孔には2ブーム1バスケットコンピュータジャンボ(古河ロックドリルJTH2100R)を使用した。地下発電所および周辺アクセストンネルでの使用を含め, 合計6台を新車にて日本から調達した。掘削・コソクにはショートアーム仕様のバックホウ(コマツPC128US)およびブレイカ(コマツPC138LS)を使用し, ずり出しはサイドダンプ式ホイールローダ(コマツWA380)および前後進対応型20t/25tダンプトラック(Volvo A20U TS/A25C TS)を使用した。ダンプトラックおよびトラックミキサの離合および転換のため, 延長100mごとに下半側壁を鉛直に落とした離合帯, 延長500mごとに転換坑を設けた。吹付けコンクリートはリモートコントロール制御方式の吹付けロボット(Putzmeister PM407)を使用し, 作業員が切羽に近づくことなく吹付け作業を可能にした。

(2) 使用爆薬および支保材料

雷管は, 落雷サージ電流による誘導爆発を防ぐ目的で非電気式雷管を使用した。爆薬にはサイトミキシングバルクエマルジョンを採用した。これは含水爆薬と同じ原料であるが, 気泡を含んでいないため爆発しない状態(エマルジョンフェーズ)での運搬・貯蔵が可能である。従来型のカードリッジ式含水爆薬では一つずつ詰め棒を用いて装薬するのに比べて, バルクエマルジョン爆薬は自動装填機のノズルを挿入してボタンを押すだけで既定量を密充填することが可能である。当現場で実施した1発破進行長4mの長孔発破では特に, 施工サイクル改善, 切羽直下作業時間の短縮による安全性向上, 密充填による発破効率の向上, 耐水性および後ガスも良好等, その利点が発揮された。

吹付けコンクリートには液体急結剤を使用し, 粉じん量低減により坑内環境の改善を行った。ロックボル

トは鉄筋棒を現場にて加工して使用した。注入材はプレミックスモルタルをMAIポンプにて充填した。地山不良区間で使用する補助工法について、当初設計で予定された坑口区間には自穿孔タイプのAGF長尺先受鋼管を日本から輸入した。それ以外の区間では現場で孔開けおよび先端を円錐状に加工したφ50 mm 鋼管をφ65 mm ビットで削孔した孔に挿入し、セメントミルクを注入して先受け工とした。

(3) 覆工コンクリート工

導水トンネルの覆工コンクリートの施工には、同じ断面形状である排水トンネル(L=500 m)を含めて打設スパン12 mのニードルビーム(写真-2)計4台を転用して使用した。サイクルタイムの改善の結果、36時間サイクルを確立し、目標とする月進200 mを継続的に達成することができた。コンクリート配合はポリカルボン酸系高性能減水剤を使用することで練混ぜ後のスランプ20 cm、90分経過後でもスランプ18 cmの流動性を確保しつつ、打設後10時間での脱枠強度を3 N/mm²とする早期強度も満足するものとした。

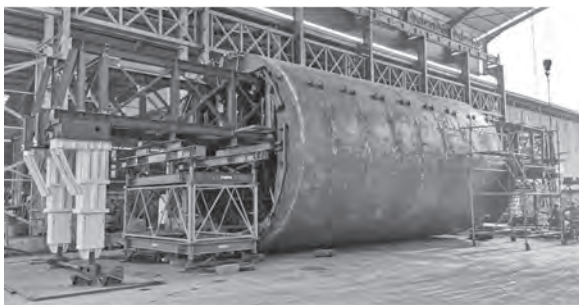


写真-2 ニードルビーム全景

(4) グラウト工

ニードルビームが通過した後の覆工コンクリート内部には、削孔台車、注入足場台車、およびミキサー・アジテーター・グラウトポンプをまとめた注入設備台車を用意し、覆工コンクリート打設の進行に合わせ、並行してバックフィルグラウト、コンソリデーショングラウトおよび必要箇所へのウィープホール施工を行った。削孔はレッグドリルを使用し、空圧式足サポートを削孔台車の作業床に設置することで天端・肩・側壁のいずれの角度へも削孔できるよう工夫した。

(5) コロナ禍での施工

2020年3月に国内で初めて新型コロナウイルス感染者が確認された首都ジャカルタから遅れること6ヶ月後、当現場内でも初めて陽性者が確認された。その

後も各種感染対策を実施しながら工事を継続したが、2021年1月には現場内でのスクリーニングにより、40人以上のクラスターが確認された。レイズボーリングマシンのオペレータやニードルビームの組立指導員といった、国外からの技能者の渡航も制限された。さらに、コスト優位性からマレーシアより輸入していた爆薬、ロックボルト用プレミックスモルタル、吹付けコンクリート用液体急結剤の調達ロックダウンにより一時中断した。そのような状況にあっても、代替材料の新規国内調達、渡航可能な第三国からの指導員の招へい、一部工区の作業中断等の対策を実施し、全体工程でクリティカルとなる工区の施工は継続することでプロジェクト全体への影響を最小限に抑えた。

5. 地下発電所

地下発電所は高さ39 m、幅22 m、長さ107 mで、弾頭型の断面を有し、総掘削量は6.1万m³、最大断面積は788 m²である。アサハン川左岸の急傾斜な断崖の地中、土被り約160 mの深度に位置しており、周辺の岩盤は古生代石炭紀の終わりからペルム紀の初めに堆積したと推定されるおよそ3億年前の密実な礫混り砂岩からなる。割れ目は存在するものの、ほとんどがB/CH～CM級と判定された。地下発電所および周辺トンネルの鳥瞰図を図-3に示す。

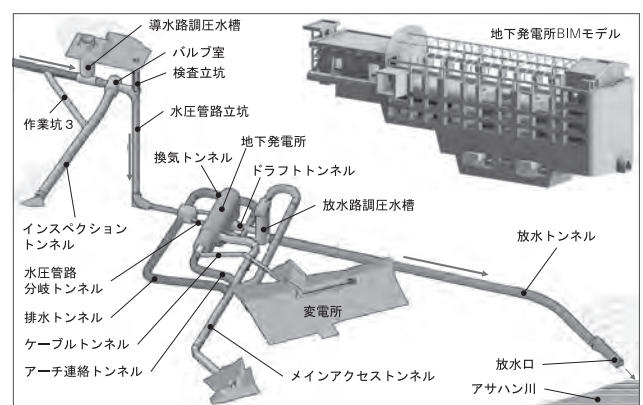


図-3 地下発電所および周辺トンネル鳥瞰図

(1) 地下発電所掘削

地下発電所の支保パターン、加背割り、および掘削順序を図-4に示す。支保は吹付けコンクリート(アーチ部および側壁中段まで:2層×8 cm 鋼繊維入り+1層×8 cm 鋼繊維無しの計3層、側壁下段:1層×8 cm 鋼繊維入り+1層×8 cm 鋼繊維無しの計2層)、ロックボルト(D25, L=4 m, 約1,000本)、PSアンカー(L=8 m, アーチ部:P=600 kN×220本、側壁:P=

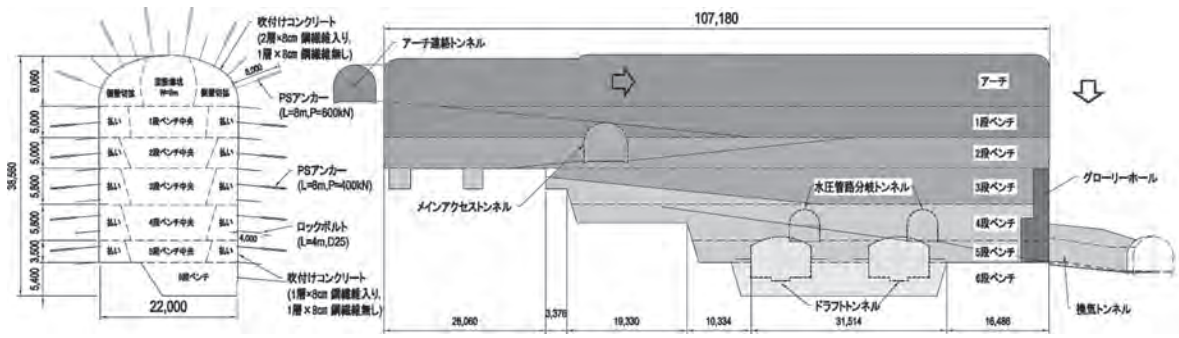


図-4 地下発電所の支保パターン・加背割り・掘削順序

400 kN×199本) を組み合わせて構成された。

アクセス道路の施工後、2020年1月より10%下り勾配のメインアクセストンネルの掘削を開始し、2020年6月5日、アーチ連絡トンネルより地下発電所の頂設導坑に到達した。頂設導坑の掘削完了後、天端PSアンカーを緊張した後にアーチ左右への切り拡げを行った。その後、より低い位置の各周辺トンネル(メインアクセストンネル、水圧管路分岐トンネル、換気トンネル、ドラフトトンネル)から斜路を設け、アクセスを切り替えながらベンチ掘削を進め、高さ5mを標準に6段ベンチまで順次切り下がった。2段ベンチ掘削完了後、換気トンネルより上向きにグローリーホールを開け、ずり出しに活用した。そのため、換気トンネル断面はサイドダンプでのずり出しが可能なように拡幅した。A計測の結果、最大天端沈下量は32.5mm、最大内空変位量は41.4mmを示し、大きな変状なく、翌年2021年6月17日に概ね1年で掘削を完了することができた(写真-3)。

(2) 使用機械

ベンチ中央の大背部の削孔は油圧クロラドリル2台により鉛直に行い、ベンチ両端の土平での削孔はコンピュータジャンボにより水平に実施した。ずり出し



写真-3 地下発電所掘削完了

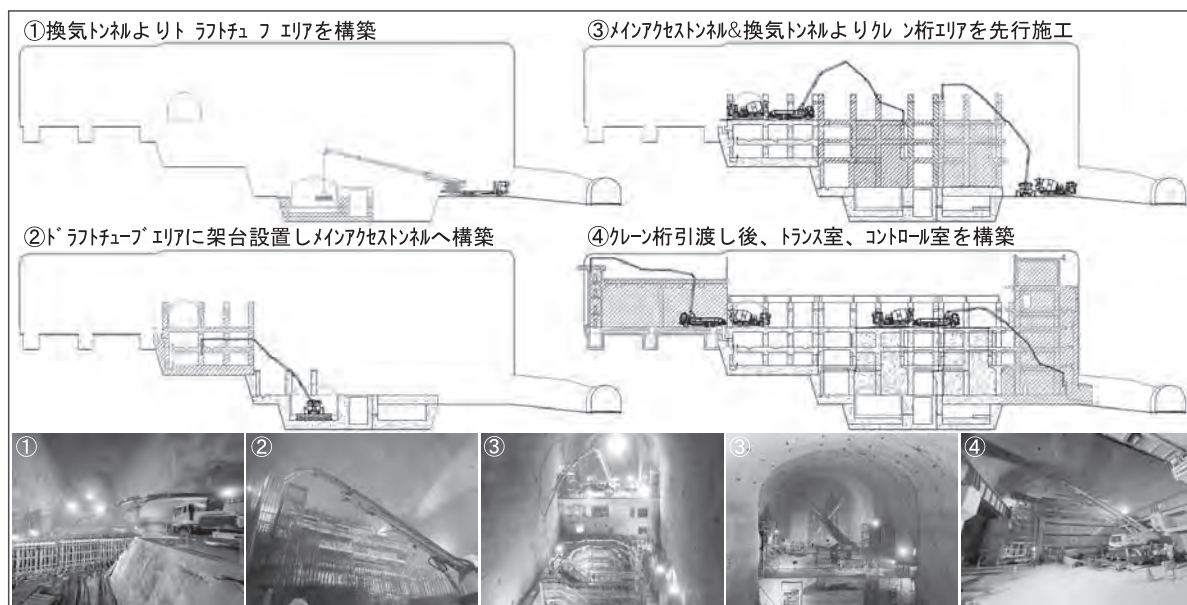
は1.3m³バックホウとサイドダンプ式ホイールローダ(コマツWA380)を併用した。吹付けコンクリートは導水トンネルで使用した物より大型でコンプレッサー搭載型の吹付けロボット(Putzmeister PM500)を使用し、遠隔からブームを伸ばして吹付けを実施することでずり出しとの並行作業を可能にした。アーチ部上向きへのPSアンカーの削孔には、油圧クロラドリルのブームを上下逆向きに改造した。これによりロッドチェンジャーの使用が可能となり、削孔サイクルおよび安全性が向上した(写真-4)。



写真-4 油圧クロラドリル上向き削孔(頂設導坑)

(3) 躯体コンクリート

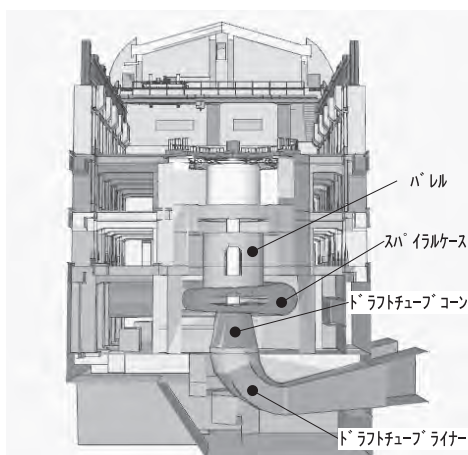
地下発電所の躯体コンクリートの施工では、使用できるアクセスが限られており、クレーンやコンクリートポンプ車を内部に配置するスペースの確保が難しい。そこで、詳細な施工ステップの検討を実施した結果、断面拡幅した換気トンネルをアクセス利用し、さらにドラフトチューブ内部に仮設架台を追加設置することで、50tラフタークレーンおよび36mブーム式コンクリートポンプ車を用いて全エリアの躯体構築を可能にした。図-5に施工ステップを示す。躯体最上段の天井クレーン用桁エリアの施工を優先し、2022年3月にLot III電気機器工事への引渡しを完了した。



図一5 地下発電所躯体構築施工ステップ

(4) 2次コンクリート

地下発電所の躯体コンクリートの施工後，Lot III 電気機器工事が下部より順に設置する発電設備（ドラフトチューブライナー，ドラフトチューブコーン，スパイラルケース，バレル）に合わせてその外周に2次コンクリートの打設を行った。地下発電所 BIM モデルの発電設備を図一6に示す。2023年3月15日，全2ユニットの施工を完了し，Lot III 電気機器工事への引渡しを完了した。



図一6 地下発電所 BIM モデルの発電設備

6. 立坑

当現場では表一3に示す計4箇所の立坑と斜坑を施工した。

(1) レイズボーリング

放水路調圧水槽（L=37 m），検査立坑+水圧管路立坑（L=203 m），導水路調圧水槽（L=42 m）の3箇所の立坑では，この順番に連続してレイズボーリング（鉦研工業 BM-150）にてφ1.500 mのグローリーホール（ずり落とし導坑）を施工した。レイズボーリングの施工は3段階に分けて行われた。

- ①初めにパイロットビットφ270 mmにて下部水平坑まで下向きに削孔する。
- ②貫通後に拡径ビットφ350 mmに付け替えて上向きにパイロット孔を拡孔。
- ③再度ロッドを下部水平坑まで継ぎ足した後，下端にφ1.500 mのリーミングビット（写真一5）を取付け，上向きにリーミング掘削。

いずれの立坑も偏芯誤差0.3%以内の高い精度で施工を完了することができた。

表一3 立坑・斜坑一覧

立坑・斜坑	種別	延長 (m)	仕上内径 (m)	掘削方式
取水庭立坑	立坑	17.00	φ12.00	機械掘削+ずりバケットをクレーンにて地上へ搬出
導水路調圧水槽	立坑	52.00	φ14.00	レイズボーリング (L=42 m)+拡幅発破掘削
検査立坑+水圧管路立坑	立坑	40.20+173.05	φ6.2-φ6.3	レイズボーリング (L=203 m)+拡幅発破掘削
放水路調圧水槽	立坑	44.40	小判型 10.4×19.6	レイズボーリング (L=37 m)+拡幅発破掘削
ケーブルトンネル斜坑部	斜坑 (30°)	85.00	H2.30×W2.50	発破掘削+ずり鋼車をウィンチにて坑外搬出



写真-5 レイズボーリングφ1.500mリーミングビット

(2) 拡幅掘削

各立坑では、レイズボーリングの施工後レッグドリルにて削孔し拡幅発破を行った。掘削ずりはバックホウによりグローリーホールに落とし、下部水平坑にてサイドダンプ式ホイールローダでダンプトラックに積込んだ。吹付けコンクリートは品質管理の容易さから湿式とし、ホッパーにて立坑内に下したコンクリートをアリバ257を用いて吹付けた。将来の躯体構築時の吹付けコンクリートの剥離・落下防止のため、地山面に金網を設置し吹付けを行った。削孔 & 装薬、吹付けコンクリート用それぞれのプラットフォームを製作し、作業毎にクレーンにて立坑内に降ろした。

(3) 水圧管路2次コンクリート打設

Lot II 鉄管工事が鋼管 (L=6.0 m) を3本接続する毎に鋼管外周の2次コンクリートの打設を行った。コンクリートはガントリークレーンと3m³ホッパーにて鋼管上部に設置した打設用プラットフォームへ運搬し、シュートの先に接続した6インチサニーホースを通してプラットフォームの18m下へ打設した。パイプブレータはロープに繋いで締め固めを行った。施工前に拡幅掘削中の導水路調圧水槽立坑内にてモデル施工を実施し、材料分離が生じないことを確認した。

7. ICT 技術の活用

(1) BIM

着工後2年以上経過した後に、発注者 PLN より現場全体の BIM モデル作成の指示を受け、3D モデルを作成した。Lot I 土工事に限らず、Lot II および Lot

III のモデルを統合し、コンサルタントの BIM Manager により干渉チェックが行われ、施工図面へ反映された。特に地下発電所内部では Lot I 土工事のコンクリート躯体、建築仕上げ、建築設備に加えて Lot III 電気機器工事の発電設備が複雑に配置されており、それらの干渉を事前にチェックすることで工事の手戻り防止に役立った。さらに、トンネル工事で得られた各種情報 (坑内 A 計測データ、コンピュータジャンボの穿孔エネルギーデータ、吹付けコンクリート表面の3D スキャンデータ、切羽写真、地質展開図) を Navisworks にて統合したトンネル BIM (図-7) も作成した。将来のメンテナンスに活用されることを期待する。

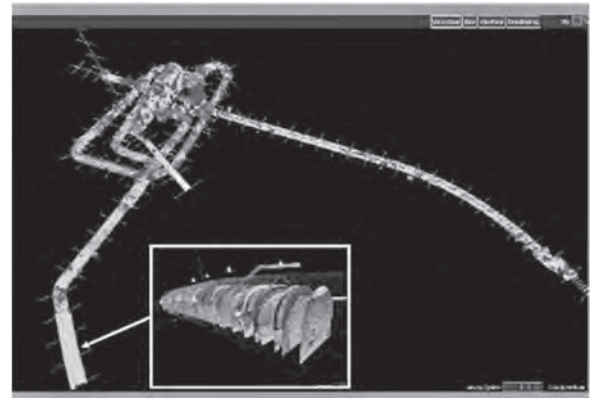


図-7 トンネル BIM モデル

(2) インターネット網整備と現場 CCTV

トンネル坑内を含め、全長10kmを超える山岳エリアに伸びる各現場と事務所間の通信環境は下記の通り整備した。

- ① 近隣の町から各現場エリアを通過して事務所まで光ファイバ回線を整備した。
- ② 山岳アクセス道路の中腹に携帯電話の基地局を追加設置し、事務所周辺での携帯電話の通信状況を改善した。
- ③ トンネル坑内には LAN ケーブルを配置し、切羽にて Wi-Fi を利用できるようにした。
- ④ 各トンネル切羽 & 坑口、および各明かり工区に CCTV を設置し、JV だけでなくコンサル・発注者それぞれの事務所に配置した大型モニターで現場状況を確認できるようにした (写真-6)。

8. おわりに

2019年3月着工後、アクセス道路の伐採より着手した。2023年7月末現在の進捗率は96%に達してお



写真—6 事務所内 CCTV 用大型モニタ

水力発電所工事というトンネル屋冥利に尽きる経験をすることができた。若手技術者達が、近い将来この現場での経験を活かして世界の現場で活躍してくれることを願っている。アサハン第3水力発電所が完成することで、毎日のように発生する停電が無くなり、北スマトラの発展に貢献することができれば幸いである。

JCMA

【筆者紹介】

高岡 秀明 (たかおか ひであき)

清水建設㈱

土木国際支店土木部アサハン第3水力発電建設所
工事長



り、2023 年末の竣工を目指して鋭意施工中である。
長大トンネル、斜坑、立坑、地下発電所と、他工種な

