

高水圧仮締切の開発と自動化施工の導入

—奥只見増設発電所取水口工事への適用—

橋本長幸・坂田 淳・田路隆茂・甚内郁郎

奥只見増設発電所は、既設奥只見ダムより直接取水する再開発計画で、取水口は貯水池満水位より深さ40mに位置している。取水口をドライ状態で施工するには仮締切が必要となるが、在来工法では水深約15mが限界でそれより深い場合は、ゲート搬入時等に貯水位制約が必要となる。本河川下流利水状況から貯水位制約の導入は困難なため、水深50mの水圧に耐える仮締切を開発するとともに、タイトな工程、高い施工精度、深部潜水作業等の課題を克服するため、仮締切工事に自動化施工機械を開発・導入し、平成14年10月末に取水口工事を完了した。本報文では、高水圧仮締切の開発と自動化施工機械の導入について述べる。

キーワード：ダム、高水圧、仮締切、自動施工、ゲート

1. はじめに

奥只見増設発電所は、阿賀野川水系只見川の最上流部にある奥只見貯水池を利用して、最大出力20万kWをパワーアップするもので、平成11年より工事に着手し、平成15年6月に運転開始した。

本地点の特徴は、ダム発電所近傍に希少猛禽類の営巣地があり、希少鳥類保護のため明り工事は非営巣期(7月～10月)に制限する等、環境保全を最優先に工事が実施された点である。取水口は、地表改変面積の低減と工程短縮のため、貯水池満水位より約40mの深さのダム上流面にレイアウトし、堤体に穴を開けダムより直接取水する方式を採用した。

在来型締切工法のうち高水圧に適用可能な締切工法として蓋付鋼製チャンネル型仮締切があるが、ゲート扉体据付等の天蓋開放時に貯水位を仮締切天蓋標高以下に下げなければならない。奥只見ダムは発電専用ダムで、明り工事可能期間(7～10月)の貯水位は高水位運用される。奥只見貯水池下流に現存する水力発電所、内水面漁業者等の多数の利水者を考慮すると、この期間の貯水池運用の変更は不可能と判断し、50mの水圧に耐える仮締切を開発することとした。本報文では、高水圧仮締切と新たに開発された自動化施工機械について述べる。

2. 高水圧仮締切の設計¹⁾

(1) 構造

仮締切の設計において、以下の3つの制約条件を満足しなければならない。

① ドライスペースは幅約16mを確保しゲート搬入のため鉛直方向に連続したスペースにすること

② 水深約50mに耐える安定性と止水性を確保すること

③ 工程短縮のため、仮締切を容易に設置・撤去できるスリムな構造であること

仮締切形状を矩形にした場合は、仮締切は重構造となりスリム化の条件を満足できないため、大断面、高水圧とスリム化という相反する条件を満足する鍵は形状にあると考え、孤長約2m、幅0.65mのボックス型鋼矢板を円周方向に13枚、鉛直方向に4段、合計52枚を組合わせた半円筒形とし、鋼矢板内部はコンクリートで充填したサンドイッチ構造とした(図-1)。

また迅速に撤去できるよう、1枚の鋼矢板に配置された5箇所ウェップのうち中央部を2枚の合わせウェップ構造とすることで、フランジ鋼板だけを切断すれば仮締切が分断できるよう工夫した。

半円筒形サンドイッチ構造の採用により、水圧載荷時に発生する軸力と地震時および真円からのずれにより発生する曲げ応力は、各々コンクリートと鋼矢板で分担することで65cmの薄肉化が可能となった。

仮締切の各接合部は、止水性確保のため以下に示す構造とした。

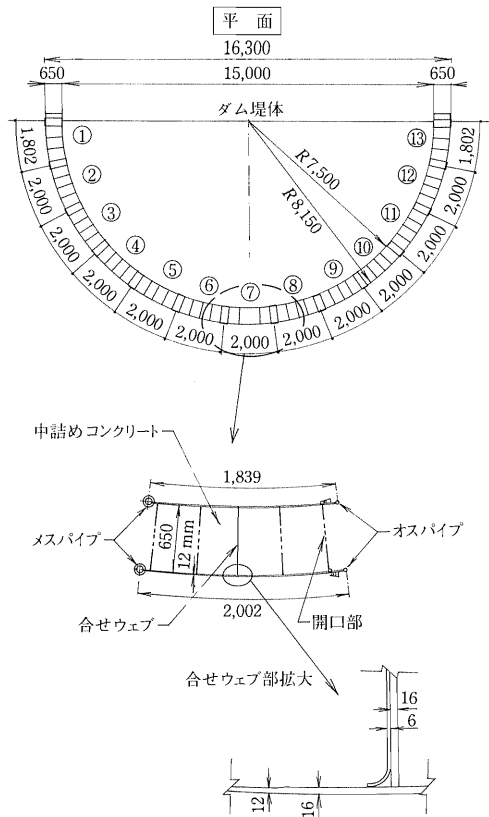
(a) 鋼矢板間の結合部

52枚の鋼矢板は、円周方向は嵌合継ぎ手、鉛直方向は添接板によるボルトで相互に結合されている。嵌合継ぎ手内部はグラウトミルクを充填し、継ぎ手の内外側はばね鋼板配置と水膨張性ゴムの膨張による締込み、継ぎ手の隙間を閉塞することにより止水性を確保した(図-2)。

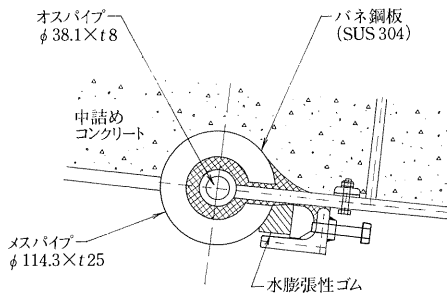
(b) 仮締切底部の接合部

仮締切底部は、取水口基礎および止水性を合わせ持たせた最大高さ13mの台座コンクリートを打設し、鋼矢板基礎部の根入れ長は34～70cmを確保した。

(c) 仮締切～ダム壁面間の接合部



図一 仮締切一般図



図二 嵌合継手部詳細

貯水池空虚時にダム上流方向に発生する地震荷重に抵抗するため、約60箇所に補強プレートをダム堤体にボルト結合した。また、ダム壁面は深さ30cm掘込み、ダム壁体～鋼矢板との間にモルタルを充填し、隙間にはグラウトジャケットにグラウトミルクを充填・膨張させて止水性を確保した(図-3)。

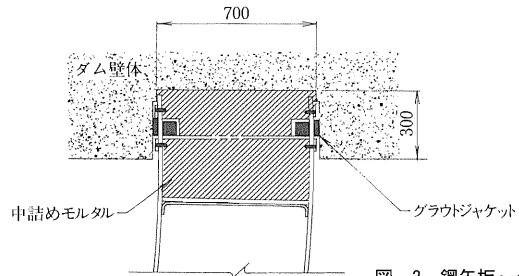


図-3 鋼矢板～ダム接合部詳細

(2) 設計

仮締切の安定計算は、まず台座コンクリート頂部を解析対象断面として、二次元骨組解析により常時、地震時、貯水位等の荷重条件についてクリティカルとなる荷重条件を選定した。なお、仮締切～ダム壁体接合部の支承条件は、完全固定とヒンジ固定の中間状態と想定されたため、剛結合、ヒンジ結合の2種類でモデル化を行った。解析の結果、最大曲げ圧縮応力はダム～仮締切の接合部で発生し、荷重条件は、常時満水時、支承条件は剛結合がクリティカルであった。

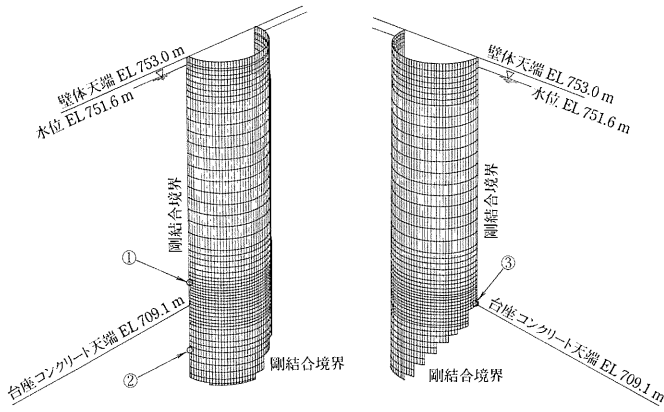
第2ステップでは、三次元FEM解析により詳細検討を行い、安定性を確認するとともに、最大応力は台座コンクリート頂部付近のダム～鋼矢板接合部近傍で発生することが判明した(図-4)。

仮締切の安定性確保のためには真円形維持が重要なため、施工精度向上のため真円形の定規となる導棒を設置した(図-5)。この導棒は鋼矢板建込み時のガイドとともに、鋼矢板底面掘削、ダム接合部切削時の走行ガイドとしての役目もある。しかしこのガイドを利用し入念に鋼矢板を建込んでも、鋼矢板据付け時のオス、メスパイプの隙間によるずれや、台座、中詰めコンクリート打設時の側圧や外水圧によるずれが生じることから、三次元FEM解析を行い真円からのずれが仮締切の安定性に与える影響を評価し、施工管理基準策定に反映した。

支承条件は剛結、ヒンジとし、ずれは外折れ、内折れについて5cm、10cmのずれを想定した(図-6)。

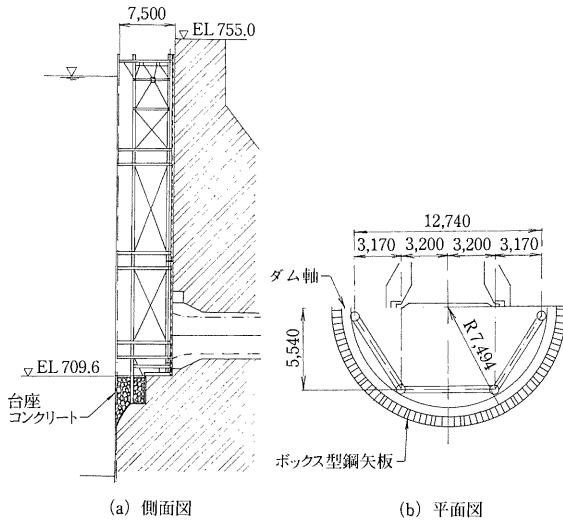
解析結果から、外折れの場合は10cmのずれが発生しても問題ないが、内折れの場合は5cmで安定性に影響があることが判明した。

以上のことから施工管理基準では、内折れは認めな



番号	応力状態
①	円周方向；圧縮応力最大
②	円周方向；引張応力最大
③	円周方向；せん断応力最大

図—4 最大応力発生位置



図—5 導枠詳細図

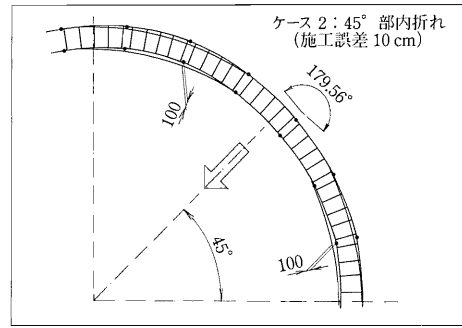
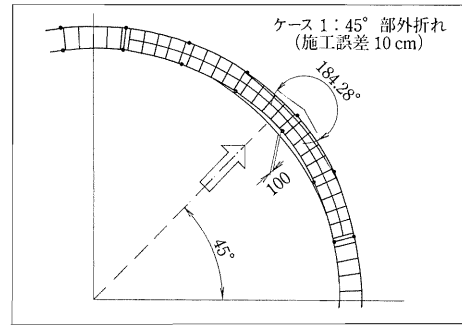
いこととし、外折れは鋼矢板建込み時の1次管理基準値が3 cm、2次が5 cmとし、中詰め、台座コンクリート打設、抜水時の施工管理基準は、1次が8 cm、2次は10 cmとした。ここで、2次管理基準とは基準値を超過した場合は対策が必要な段階とし、1次管理基準とは要注意段階とした。これらの検討の他に、台座コンクリートはひび割れ防止、中詰めコンクリートは打設時の側圧低減の観点から配合設計¹⁾を行った。

3. 高水圧仮締切の施工

(1) 施工上の課題

仮締切の施工手順は、

- ①導枠設置⇒②底面掘削⇒③鋼矢板建込⇒④壁面切削⇒⑤中詰めコンクリート打設⇒⑥台座コンクリート打設⇒⑦抜水
- の7工程からなり、撤去は



図—6 内折れ、外折れ概要図

⑧導枠撤去⇒⑨充水⇒⑩2～4段部鋼矢板切斷⇒⑪1段部鋼コンクリート切斷

である。上記施工フローの中で、特に下線付け工程は長時間深部潜水作業が伴う工程で、①～④は仮締切の真円形状確保のため高い施工精度が要求される工程である。

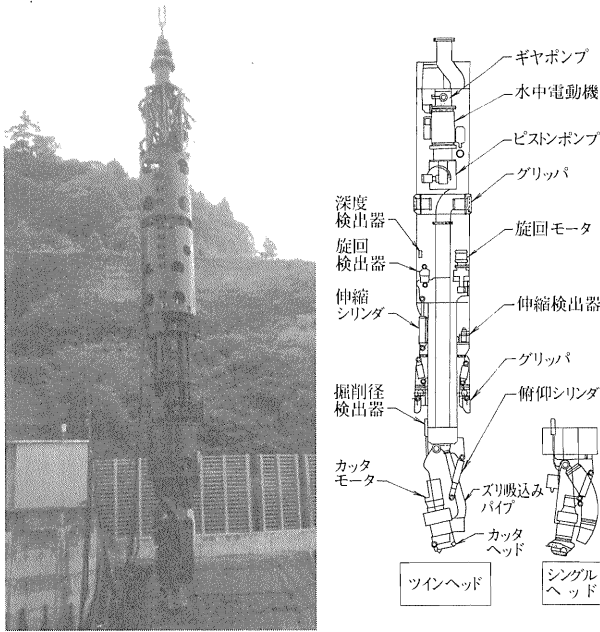
施工精度確保と効率施工のために、②④⑩⑪の4工程で自動機械化施工を導入するとともに、深部潜水作業効率の向上のため飽和潜水システムを導入した。

高水圧仮締切施工のために新たに改良、開発した底面掘削機、ダム壁面切削機、鋼矢板切斷機、鋼コンクリート切斷機について述べるとともに、深部潜水作業効率化のため導入した飽和潜水システムを紹介する。

(2) 底面掘削機

鋼矢板最下端部は、底面からの漏水を防止するため、ダムフィレットコンクリートを掘削し根入れを行った。底面掘削は、カッタービットを装着したカッターヘッドを回転・旋回し削孔するハイロックドリル工法(写真—1)を採用し、導枠の半円形状に沿って連続して削孔することにより掘削溝を形成した。

施工方法としては、鋼矢板建込みの際にガイドとして使用する導枠リングの外周を移動する横行装置を2段設置し、これにケーシングパイプを挿入し油圧にて固定する。ハイロックドリル本体はこのケーシングパイプ内に設置し、横行装置の移動(油圧モータによる)により掘削箇所を決定する。掘削はハイロックドリル



写真—1 ハイロックドリル機械

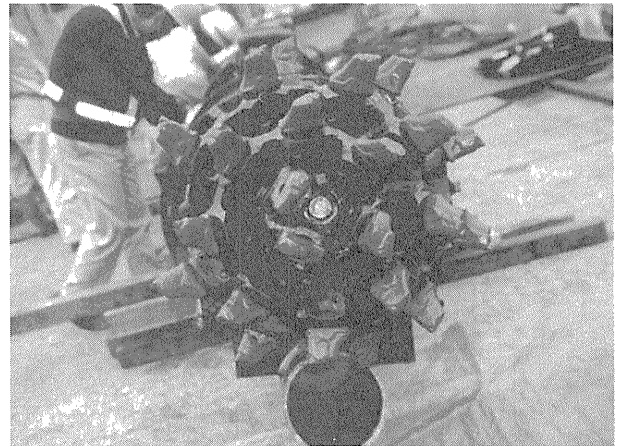
とケーシングパイプの上下動をクレーンで吊下げて行い、削孔時に発生するガラは、エアリフトでダム天端に搬送し濁水処理を行う（図—7）。

ハイロックドリルの運転状況は、削孔機械先端に取付けた CCD カメラの映像と油圧計器を確認しながらカッタヘッドの旋回スピードと1回当りの伸縮量等を調整し、ダム天端から遠方制御した。

ハイロックドリルは、主に軟岩掘削に適用され、堅硬なダムコンクリートでの施工例は少ない。施工当初は、ダムコンクリート骨材（玉石）が堅硬で削孔が困

難であったため、カッタヘッドをツインタイプからシングルタイプへ変更しトルク低下を防止するとともに、カッタビットも数種類試用選定し、削孔速度を向上した（写真—2）。削孔径は1,100 mm で、孔数は36孔、1孔当り掘削長は70~520 cm で累計削孔長は約70 mであった。

施工実績は、削孔日数は約40日、削孔速度は約20 cm/hであった。



写真—2 カッタヘッド（シングルタイプ）の状況

（3）ダム壁面切削

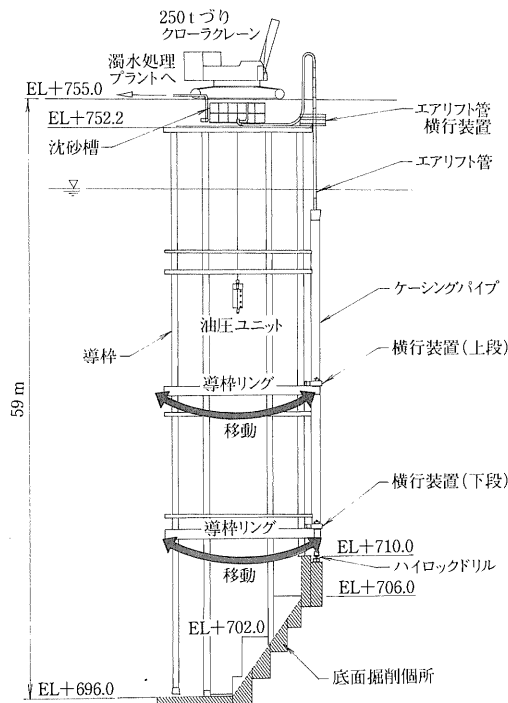
仮締切とダム壁面の接合部は、仮締切全体の構造強化と止水性を確保するために、ダム壁面を幅70 cm、深さ30 cmの溝を切削することとし、鋼矢板建込み後に行うモルタル打設の施工性確保のため、コンクリートカッタで切断目地を入れ平滑にし、ツインヘッドでその内側を切削する方法を採用した。

壁面切削の施工精度を向上するため、図—1に示す②から⑫までの11枚の鋼矢板を据付けた後、②、⑫の端部の鋼矢板継ぎ手部をガイドとして走行できる切削機を開発した。切削機ヘッドはコンクリートカッタとツインドラム双方を装着できるようにし、切断と切削兼用機械とした（図—8）。

切断と切削はそれぞれカッタブレードおよびカッタヘッドを油圧モータで回転させながら、俯仰シリンダの伸縮により正面から下方向に回転移動する構造とし、切断切削時の油圧力の上昇を運転員が監視しながらシリンダの伸縮によるカッタブレードやカッタヘッドの俯仰速度を制御した（図—9）。

実施工に先立ち気中部で試験施工を行い、切削能力と運転管理方法等の情報を収集した。

実施工では、工期短縮とトラブル対応に備えて切削機械を2台準備した。施工実績は、切断日数が7日、切削日数が16~17日で、施工速度は切断が1.7~3.7



図—7 底面掘削施工図

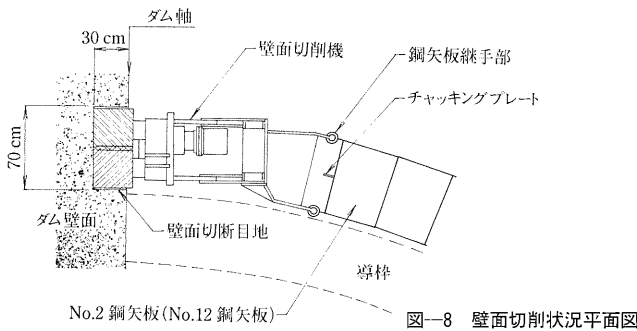


図-8 壁面切削状況平面図

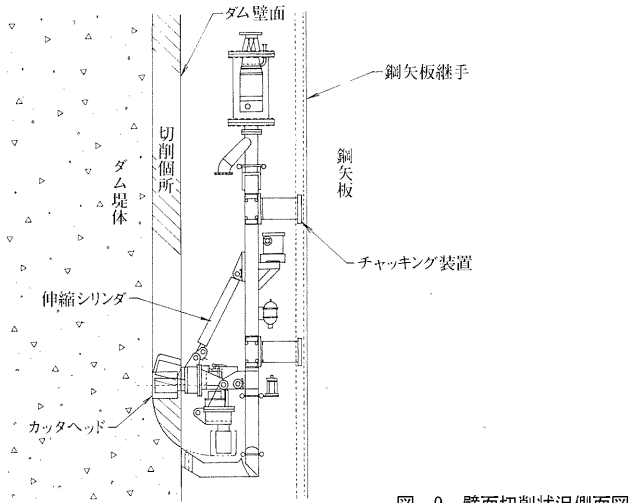


図-9 壁面切削状況側面図

m/h, 切削が 0.5 m/h であった (写真-3)。

(4) 鋼矢板切断

仮締切は、クレーンで吊上げられる重量に切断し、ダム天端でさらにトラックで運搬可能な重量に分断し、産業廃棄物中間処分場で鉄～コンクリートに分別し有効利用した。仮締切の分割数は、円周部で 12 分割、鉛直部で 4 分割、計 48 ブロックで、鉛直高さは 1 段目が 2 m, 2 段目が 13.9 m, 3・4 段目が 14 m, 円周長は約 2 m である。なお、1 段目と 2 段目の接合部を台座コンクリート頂部にすれば 1 段目撤去は不要とな

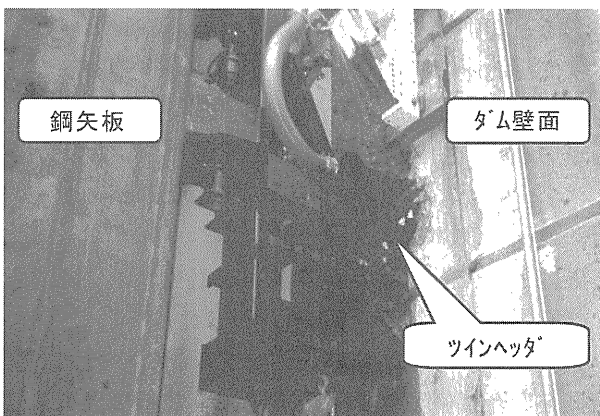


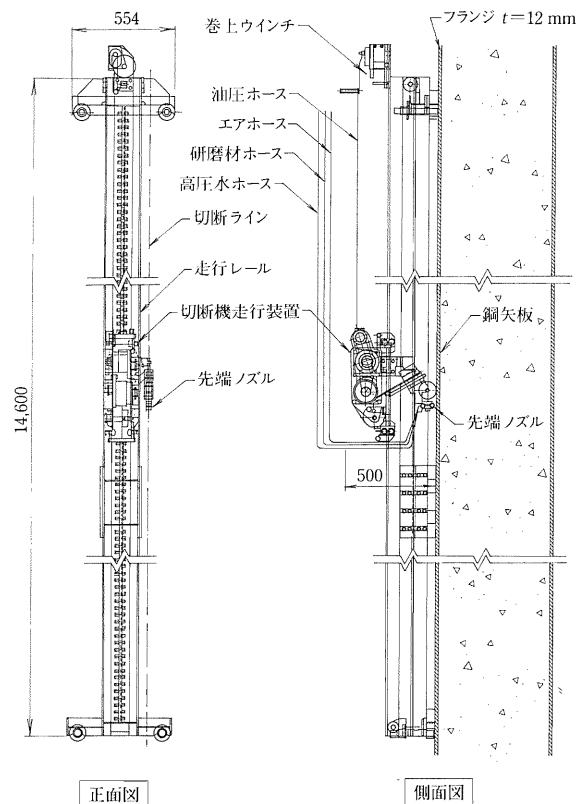
写真-3 壁面切削状況

るが、最大応力が発生することから、2 m 上方にずらすことにした。

鉛直方向の切断は、1 ブロック当り 14 m, 総切断長 530 m と長いため、切断作業時間を短縮する必要がある。フランジ鉄板 (板厚 12 mm, 16 mm) は潜水時間の短縮化から、アブレイシブウォータージェット工法により切断した。アブレイシブウォータージェット工法とは、従来のウォータージェットに研磨材を添加し切断可能領域を拡大したもので、研磨材にはガーネットを使用した。なお、円周方向の仮締切接合箇所は、添接板のボルトを潜水作業により撤去し、アブレイシブウォータージェット工法により鋼コンクリートを切断したが、中詰めコンクリートを完全に切断できないため、2~4 段部では切残したコンクリートを油圧ジャッキにより押折った。なお、1 段部は「(5) 鋼コンクリート切断」で記述する方法により切断した。

アブレイシブウォータージェット機は、ノズルを装着した切断走行装置と鋼矢板に取付けられた走行レールからなり、先端ノズルが切断位置に合うようあらかじめ鋼矢板製作時にナットが取付けられている。

走行装置は油圧モータの回転を減速機からスプロケットに伝達し、走行レールに取付けたチェーンに嚙込んで上下動する構造とし、油圧モータの油量を調整することにより、走行スピードを調節する (図-10, 写真



正面図

側面図

図-10 アブレイシブウォータージェット機器配置図

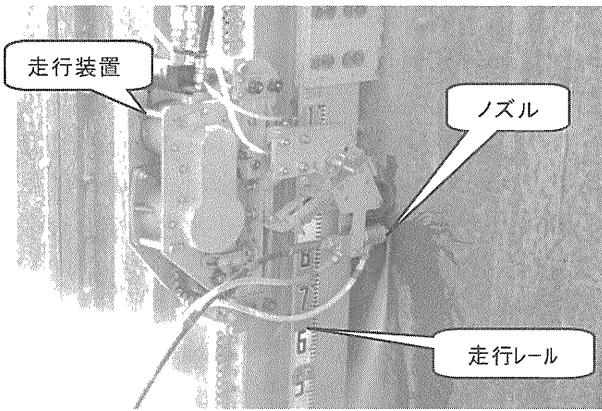


写真-4 鋼矢板切断状況

—4)。切断機は、水圧、研磨材供給量、空気量、走行装置速度等をダム天端から遠隔操作制御した。

アブレイシブウォータージェット工法による施工では、従来研磨材の供給は操作員が目視確認していたが、トラブル発生後迅速かつ容易に復旧できるよう、研磨材供給ホースに設置した光ファイバーセンサにより研磨材の供給停止を検知できるシステムを開発した。

実施工に先立ち、制御方法の確立と切断能力、施工速度、高水圧下での機械の安定稼働を確認する目的から、気中および高水圧下で切断実験を実施した。表-1に機械の仕様と制御項目を示す。施工実績は、全切断長1,040mを25日で切断し、平均切断速度は95mm/min、平均研磨材供給量は約2kg/minであった。

表-1 鋼矢板切断機械開発内容および仕様一覧表

項目	仕様
超高圧水圧*	2,400~2,500 kg/cm ²
研磨材供給量*	2.0 kg/min
研磨材安定供給の確認方法*	研磨材チェッカを装備
空気圧*	約10.5 kg/cm ²
走行スピード*	100 mm/min (t=12 mm) 75 mm/min (t=16 mm)
ノズル交換頻度	切断延長約50mに1回
スタンドオフ量とその確保* (ノズル先端と鋼矢板との隙間)	スタンドオフ: 10 mm (ゴム車輪と扁平コイルばねで確保)
走行装置の移動・巻上げ	クラッチ機能と巻上げウィンチを装備
レール固定方法	上下4箇所をボルトナットにて固定
耐水性の確保*	耐水性油圧モータの使用 減速機: 耐圧シールの加工

*印の項目については実証実験にて確認した。

(5) 鋼コンクリート切断

1段目の切断は、前面に取水口がありジャッキによる押折りは困難なため、当初はアブレイシブウォータージェット工法による切断を試みたが、施工試験結果から切断能力に限界があることが判明し、鋼板と中詰めコンクリートを同時にかつ完全に切断できる方法として水中ワイヤソー工法を開発した。

通常のワイヤソー工法は、その駆動モータが気中にセットされるが、深水下では水中抵抗が大きく、ワイヤを安定した回転速度に保つ事は困難なため、駆動油圧モータ、ワイヤおよびプーリを搭載した走行アームと架台を水中にセットし、ワイヤを回転させながら走行アームをスライド用ウインチで移動させることにより、鋼矢板を切断できる構造とした(図-11、写真-5)。

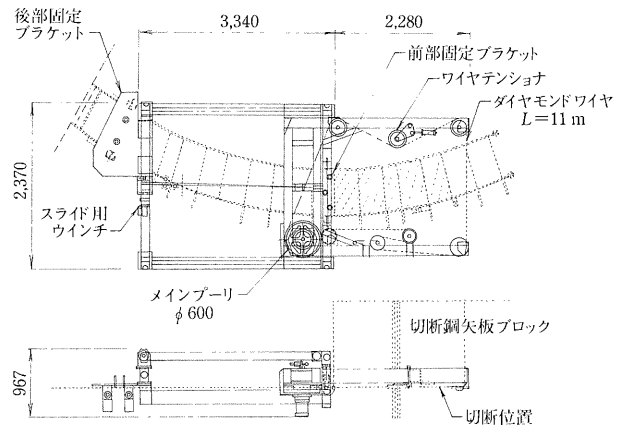


図-11 水中ワイヤソー機械図

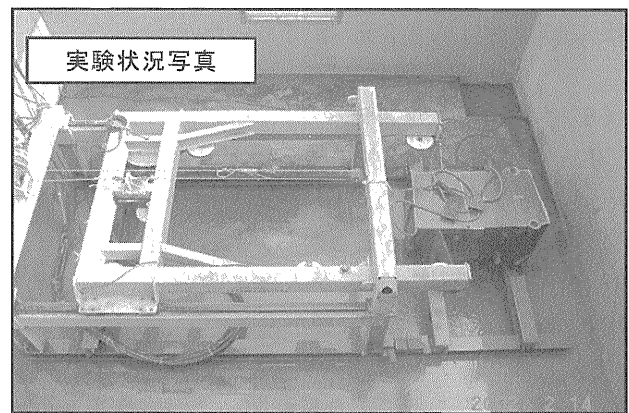


写真-5 鋼矢板切断実験状況

水中ワイヤソーは、ダム天端より遠方操作を行い、その制御方法は、ワイヤスピードはプーリの回転数を確認しながら油圧モータへの油量調整を行い、走行アームの移動スピードは、ワイヤに生じているテンション、走行スピードおよび位置確認を行いながらスライド用ウインチの回転数を制御した(表-2)。

当工法の採用にあたっては、実施工に先立ち試験施工を行い下記項目について確認した。

- ① 鉄筋コンクリート構造物と異なる鋼殻コンクリートに適合したワイヤの選定、回転スピード等の制御方法の把握。
- ② 工程短縮のためワイヤの交換頻度を少なくする

表-2 水中ワイヤソー機械仕様一覧表

項目	仕様
ダイヤモンドワイヤ*	FZEP-B: エンドレスタイプ ダイヤ0.4~0.3mm 電着型
ワイヤ速度*	約13~19m/sec ブリー回転数にて管理
走行アームスピード*	約7mm/min (平均) ワイヤのテンションを確認
ワイヤテンションおよび余長調整	バネ機構, 油圧シリンダ
ダイヤモンドワイヤの寿命*	1.3m ² 以上 (1断面)を確保, 1断面毎に交換
仮設架台の固定方法	ボルト・ナットによる締込み レバーブロックによる固定
切断状況の確認方法	メインとサブブリーの回転数 音声マイクによる集音 水中CCDカメラ
耐水性の確保	耐水性油圧モータの使用

*印の項目については実証実験にて確認した。

ためにワイヤの消耗度と消耗時における切断能力低下の確認。

③ 耐久性, 経済性の観点から最適ワイヤビーズの選定。

ワイヤは破断した場合には施工中断や深水部潜水作業時間が増加するため, 継手箇所を有しないエンドレスタイプワイヤを製作し, 1切断ブロック毎にワイヤを取替えることにより切断能力の低減防止を図った。

施工実績は, 全切断面積 16.3m²を13日で切断し, 平均切断速度は約0.3m²/hであった。

(6) 飽和潜水システム

50mの水深下で潜水作業を行う場合は, 大気圧との圧力差が大きいため, 1日当りの実潜水作業時間は1時間弱に制限されることから, 作業効率が低下するとともに, 空気中の窒素が人体に吸収されるために「窒素酔」になり安全上問題がある。

飽和潜水システムは, ヘリウム混合ガスを人体に吸収・飽和させることにより長時間高圧潜水作業を行っても「窒素酔」にかからず, 深水部で長時間連続潜水作業が可能となる。貯水池水面に設置した台船上の船上居室から潜降・浮上する水中昇降装置により深水作業場所へ移動し, 船上居室と水中昇降装置はヘリウム混合ガスで飽和され高圧に保たれている。

施工実績として, 平成11~12年に延8ヵ月間本システムにより, 連続潜水作業を行った。

4. 結 論

水深50mに耐える高水圧仮締切を開発するとともに, 工程短縮および潜水作業低減を目的として自動化施工機械を開発し, 奥只見増設発電所取水口工事に適用した。自動化施工機械の開発では可能な限り試験施

工を実施し, 現場への即応性を高めた結果, 平成14年10月末に予定通り工事を完了するとともに, 重大労働災害もなく, 施工管理基準以下の精度の高い施工を行い, 締切内漏水量はダムフィレットと仮締切接合部に集中したものの最大80~90L/min (最終的に約15L/minに収束)で, 安定性, 止水性, 安全性を確保することができた。

環境保全については, 4年間の工事期間のうち平成12年, 14年に工事区域近傍の営巣地において希少猛禽類の繁殖が成功し, 環境保全と開発との共生に向けて一定の成果が得られたと思われる。

5. おわりに

当取水口仮締切工事は, 厳しい工程, 環境, 施工条件下で, 設計・施工上の困難な技術課題を創意工夫と試験施工により克服した。本報文が今後のダムの再開発や施工機械の自動化の一助になれば幸いである。

最後に, 仮締切と施工機械の開発, 工事の実施にあたり, 多大なるご指導ご協力頂いた関係各位に深く感謝を申し上げます。

JCMIA

【参考文献】

- 1) 渡部正道・橋本長幸・坂田 淳: 奥只見ダム再開発の設計と施工, 大ダム, No.182, pp.84-99, 2003.1

【筆者紹介】



橋本 長幸 (はしもと おさゆき)
電源開発株式会社
エンジニアリング事業部
水域環境事業グループ
グループリーダー



坂田 淳 (さかた じゅん)
電源開発株式会社
奥只見・大鳥増設建設所
土木グループ
グループリーダー



田路 隆茂 (たじ たかしげ)
東洋建設株式会社
東関東支店
両総水門作業所
所長



甚内 郁郎 (じんない いくお)
鹿島建設株式会社
北陸支店
土木部
工事管理部
部長