

水圧変動下での鋼管矢板による 大水深締切について

加藤 達也¹

¹近畿地方整備局 浪速国道事務所 工務課 (〒573-0094 大阪府枚方市南中振3-2-3)

天ヶ瀬ダム再開発事業は既設天ヶ瀬ダムが持つ治水・利水の機能を向上するために、ダムの左岸側に全長617mのトンネル式放流設備を建設する事業である。ダム湖を運用しながらトンネルへ水を取り入れる流入部を施工するため、本事業では鋼管矢板によりダム湖の締切を行った。鋼管矢板はダム湖水位（最大水深約40m）による静水圧及び水位変動（最大水位差約20m）に耐える必要がある。本報告では、今後の同種事業の参考となるよう、鋼管矢板締切の設計方法や止水処理など、運用中のダム湖を締切る上で生じた課題を解決するために講じた対策を紹介する。

キーワード 締切, 鋼管矢板, 止水, 天ヶ瀬ダム, ダム再生

1. はじめに

厳しい財政状況等の社会経済情勢、洪水・渇水被害の頻発化、既設ダムの有効活用の様々な特長やこれまでの事例の積み重ねによる知見の蓄積、これを支える各種技術の進展等を踏まえれば、ソフト・ハード対策の両面から既設ダムを運用しながら機能向上を図るダム再生の重要性はますます高まっている。

平成30年7月豪雨がきっかけとなってまとめられた「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会」（国土交通省水管理・国土保全局河川環境課流水管理室）の提言においては、ダム再生の推進や加速化を図る施工に係る技術の開発・導入を促進することとされている。天ヶ瀬ダム再開発事業においても、先端的な技術の開発・導入、官民連携した技術開発によりダム再生に取り組んでいる。

2. 天ヶ瀬ダム再開発事業の概要

天ヶ瀬ダムは京都府南部の淀川水系宇治川に位置する1964年に完成したダムで、治水・水道用水補給・発電に用いられている多目的ダムである。位置及び集水域を図-1に示す。本事業は、天ヶ瀬ダム下流の宇治川・淀川の洪水調節及び琵琶湖周辺の浸水被害軽減、水道用水の安定供給、発電機能増強を目的として、天ヶ瀬ダムの放流能力を900m³/sから1500m³/sへ600m³/s増強させた

め、ダムの左岸側に全長617mのトンネル式放流設備（図-2）を建設する事業である。トンネル式放流設備は、流入部、導流部、ゲート室部、減勢池部、吐口部で構成される。そのうち流入部においては、主に洪水調節の影響により水位変動が大きい運用中のダム湖において、最大水深約40mという厳しい環境下にもかかわらず内径28mという規模で締切を行っており、実績が少ない貴重な施工事例といえる。



図-1 天ヶ瀬ダム集水域図



図-2 トンネル式放流設備のイメージ図

そこで本稿では、今後の運用中のダム湖における締切を行う上で参考となるように、本事業において鋼管矢板締切が静水圧及び水位変動に耐えられるよう行った設計及び施工上の対策を報告する。

3. 流入部建設工事の概要

流入部はトンネル式放流設備の最上流に位置するダム湖からの取水口となるもので、安定してトンネルに水を取り込めるよう最大水深約40mの位置にある。流入部の側面図を図-3、平面図を図-4に示す。流入部本体はコンクリート構造物であり、次のようなステップで構築する。まず、ダム湖上に作業ヤードを確保するため仮設栈橋を設置。岩盤を含む地盤の掘削（掘削土量約17,000 m³）を効率よく行えるように鋼管矢板でダム湖内を締切る。締切内を約40m掘削、流入部本体を構築する。トンネル式放流設備全体が完成後、鋼管矢板を一部切断してトンネルへ通水する。2019年6月現在、図-5に示すように流入部は本体構築まで完了している。

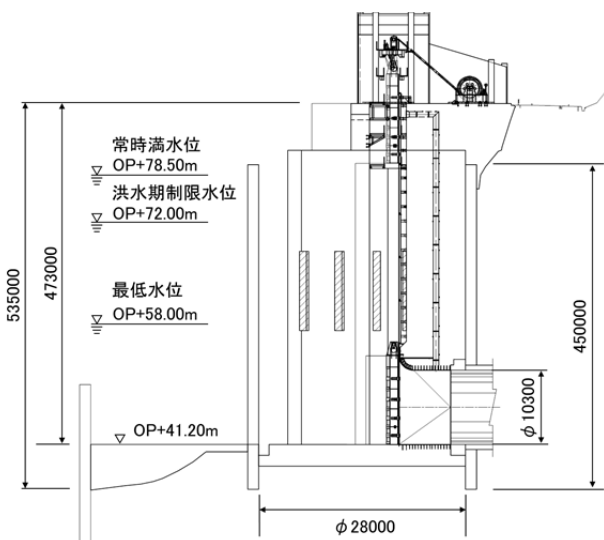


図-3 流入部側面図

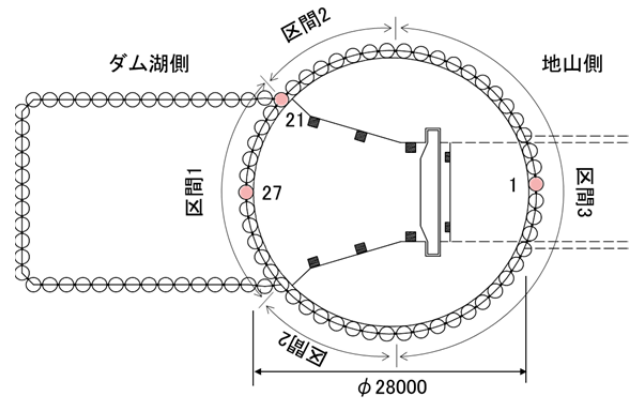


図-4 流入部平面図



図-5 流入部の施工状況（2019年6月）

4. 水圧に耐える締切の設計

流入部の締切は、運用中であるダム貯水池による静水圧及び水位変動に耐える必要がある。締切の方法は、地盤条件から鋼管矢板による締切を選定した。本事業では直径1,500 mm、長さ45 mの鋼管53本を円形状に打ち込んで締切を行い、締切内を掘削しながらリング状の支保工（円環支保工）を11段設置して締切を内側から支える。

(1) 貯水池条件と鋼管矢板締切の設計

天ヶ瀬ダムの貯水池運用条件は、常時満水位O.P. 78.5 m、最低水位O.P. 58.0 mである。施工時制限水位を設定して貯水池水位を低減させておくことで締切自体のコスト縮減は可能であるが、1ヶ月当たり12.5億円の発電補償が発生することが見込まれたため、本事業では設定できない。

作用する水圧から鋼管矢板と円環支保工について許容応力度計算を行い部材を選定する。計算は道路土工一仮設構造物工指針に基づき弾塑性法を用いる。貯水池の水位は、大きく分けて①最も高い水位（常時満水位O.P. 78.5 m）の場合と、②洪水調節のためにダム湖の水位が急速に低下（最低水位 O.P. 58.0 m）して地山側

(洪水時制限水位 O.P. 72.0 m) と水位差が生じた場合を想定する。締切内の条件は10次掘削を最終として掘削・支保工設置ごとにステップ計算を行う。締切は図-4に示すような3つの区間に分け、区間を代表する鋼管矢板 (No. 1, 21, 27) について計算を行った。これを基に、鋼管及び円環支保工に用いるH鋼の部材厚を検討する。

計算の結果、鋼管矢板に作用する応力が最も大きくなるのは、②の場合であることが判明した。そのときの計算結果を図-6に示す。曲線が掘削ステップごとの応力である。図-6から鋼管の深さ方向について作用する応力が大きく変化することがわかる。そのため、異なる部材厚の鋼管を深さ方向に溶接することで、必要な耐力を持たせつつ合理的な設計となるようにした。図-6のMrが選定した部材の短期許容応力、Myが降伏応力を示している。部材の選定結果を図-7に示す。鋼管矢板の最大部材厚は37mmとなり、これは一般的に製造されている鋼管矢板(最大部材厚25mm)の約1.5倍の厚さである。円環支保工に使用したH型鋼は一般に流通する大きさのものでは設計条件を満たせない箇所もあったため、厚さ90mmの鋼板を溶接して製作することとした。円環支保工は締切内を約3~5m掘削するごとに設置した。支保工の段数は11段、重量は合計約1,000tである(図-8)。

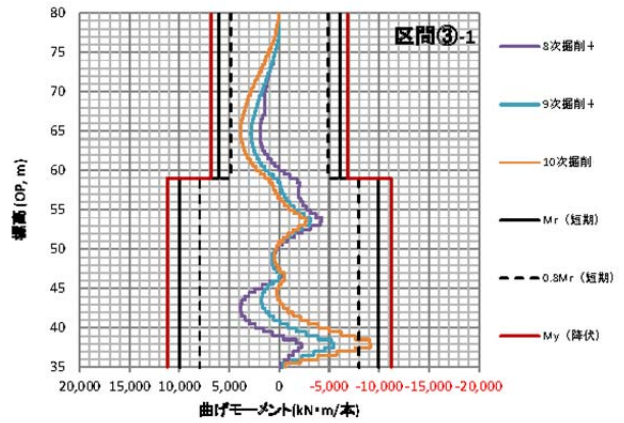


図-6-3 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 1)

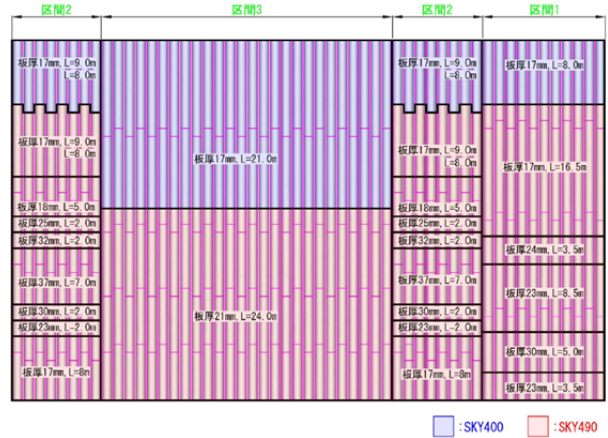


図-7 鋼管矢板の選定結果

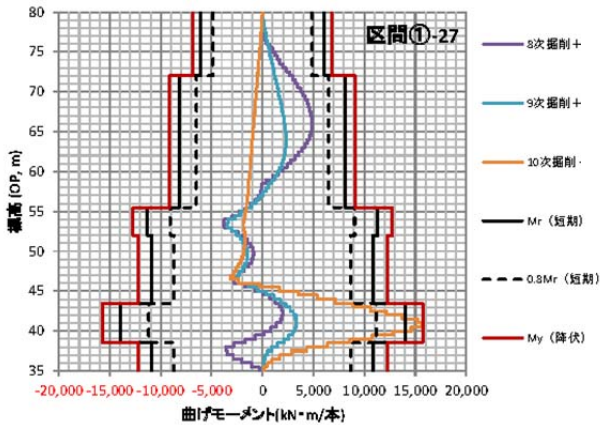


図-6-1 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 27)

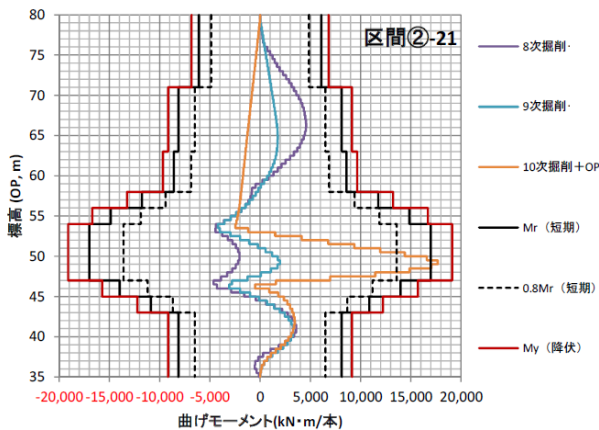


図-6-2 許容応力度計算の結果 (鋼管No. 21)

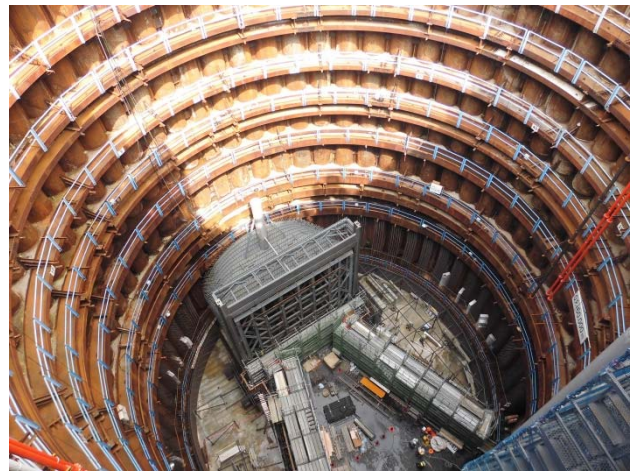


図-8 締切内の様子 (2017年8月)

(2) 止水計画

締切内は安全のため確実な止水性が求められる。本工事においては、図-9に示すように鋼管内カーテングラウチング、鋼管背面薬液注入、継ぎ手モルタル注入を行うことで止水性を高めている。

鋼管内カーテングラウチングは、立坑底盤側からの貯水の浸入を防止する目的で実施する。図-10に示すグラウト範囲は、グラウチング技術指針・同解説に基づき、透水性を表すルジオン値で改良目標(2 Lu以下)を設

定し、地盤の透水性から範囲を決定することで合理的な設計とした。施工は鋼管矢板建て込み後に鋼管内より実施した。

流入部締切の鋼管矢板は、全周回転掘削により掘削し、岩盤を砂に置換された孔に建込んでいるため、その砂が水みちとなる恐れがある。そのため、鋼管背面に薬液注入を行った。これは継ぎ手の止水性を向上させている。

継ぎ手は水密性の良いP-P型を採用しており、それに加えモルタル注入を実施して止水性を高めた。このことは、継ぎ手のせん断応力も向上させている。

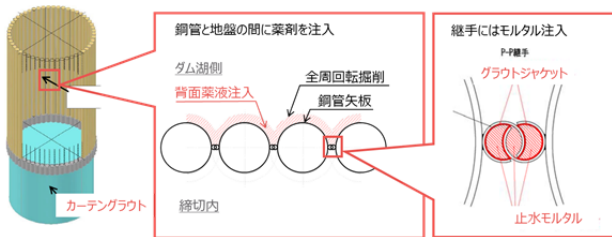


図-9 止水計画図

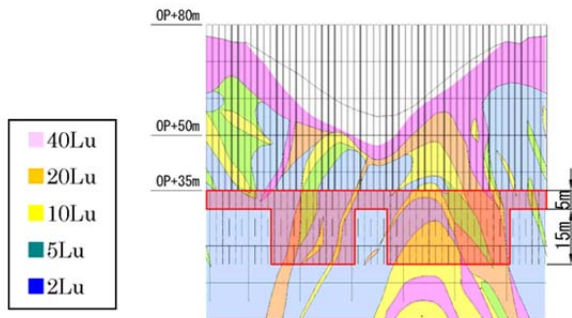


図-10 カーテングラウト施工範囲

5. 施工上の対策

(1) 鋼管矢板の打設

鋼管矢板(φ1500)を配置する箇所の地盤は岩盤であったため、直接そこに鋼管矢板を打込むことが困難であった。そのため、事前に岩盤を全周回転掘削機(φ2000)により鋼管矢板打設1箇所ごとに掘削し、砂及び砕石で置き換えた。その際に掘削機のビット摩耗が著しく工程の遅延が見込まれたが、施工機械を増やして先端ビットの修理・取り替えを繰り返しながら施工することで対応した。ビット摩耗の原因は、岩の強度が想定よりも高かったからである。円周回転掘削機を用いる場合は岩盤の一軸圧縮強さが大きいほど施工日数が増加する。ボーリングデータで岩級区分する場合、岩の亀裂や風化を総合的に判定するが、それに加えて一軸圧縮強さを把握して計画を立てることが重要であるとわかった。

鋼管矢板はパイプロハンマを利用して打設する計画であった。しかし、パイプロハンマのみでは埋戻砂部及び継手管部の摩擦抵抗により矢板を最終位置まで打ち込め

ないことが判明したため、より高い打撃性能を持つIHCハンマーを併用して打設した。

岩盤を精度良く砂に置換られなかった場合は鋼管矢板を打設できない可能性があるため、全周回転掘削の施工は位置及び傾斜の高い精度管理が求められる。鋼管矢板の打設は、施工基板より打設地盤面が30m以上下方にあること、鋼管矢板の長さは45mあることから、これも高い精度管理が求められる。そのため、自動計測を実施して施工を行うことで、鋼管矢板締切の閉合を精度良く行うことが可能となった。これは2方面からトータルステーションで施工座標を自動で計測、オペレータ用の画面にリアルタイムで表示するものである。鋼管矢板打設時にはガイドローラーを設置、その中心座標と鋼管の座標から傾斜を算出してモニターに表示させた。このシステムを図-11に示す。これらにより、鋼管の円周及び半径方向の打込み誤差は±2.5 cm以下、傾斜量の誤差は1/1000以下と、高い精度管理を実現した。

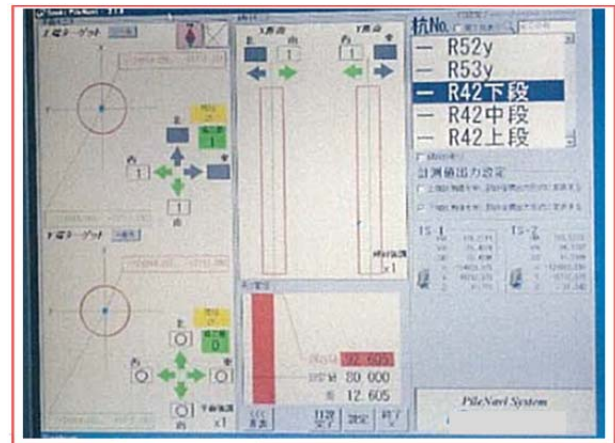


図-11 鋼管位置の自動計測システム

(2) 締切の自動計測管理システムの構築

工事の安全確保のために、締切後の鋼管矢板及び支保工の挙動を監視する計測管理を行った。計測項目及び計器を表-1に、図-12に計測器の配置を示す。挿入式傾斜計を用いて計測する以外の項目に関しては自動計測が可能で、1時間ごとにデータを収集し記録するシステムを構築した。管理値は道路土工一仮設構造物工指針を参考に設定し、自動計測項目が管理値を超えた場合にはメールで警報を発するシステムとした。

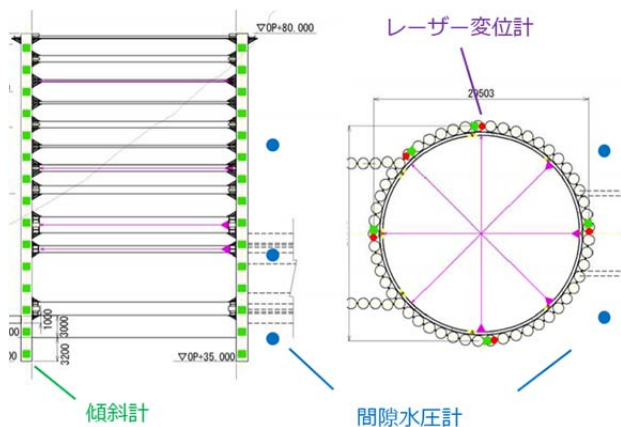


図-12 計測器の配置

(3) 鋼管矢板変位の状況

全鋼管矢板打設完了後から流入部本体のコンクリート打設完了（2016年11月～2019年3月）までに天ヶ瀬ダムが洪水調節を行った出水のうち、最大のものが2017年の台風21号であった。そのときの鋼管矢板の変位とダム湖水位を図-13 に示す。計測機器は鋼管矢板 No. 20 の頂部に設置されたもので、変位は半径方向で表しており、締切内側へ変位する場合にプラスとなる。図-14 に示す区間2 の鋼管矢板 No. 21 の解析において、洪水時制限水位 0. P. 72.0 mから最低水位0. P. 58.0 mへ水位低下させたときの変位は10次掘削後で242 mmであったのに対し、このときの変位は約16 mmであった。この要因は、解析よりも水位の変動幅が小さかった（約10 m）こと、流入部本体コンクリートの打設が0. P. 47.5 mまで完了しているため鋼管矢板の安定性が高まったことが考えられる。水位が上昇後も鋼管の変位が戻らないのは、残留応力が原因と考えられる。1ヶ月経過後も変位は約-40 mm までしか戻らなかった。

結果として、鋼管矢板締切は洪水調節によるダム湖水位の変動に耐え、その後も安全に施工を続けることができた。

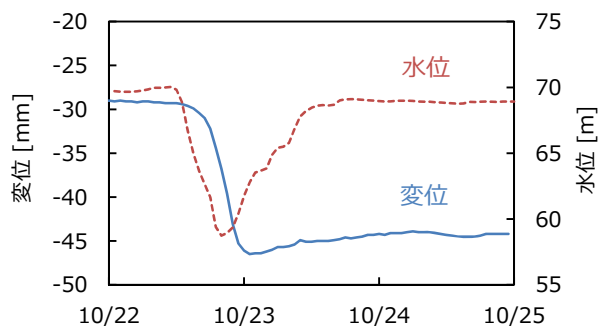


図-13 2017年の台風21号通過時の鋼管変位とダム湖水位

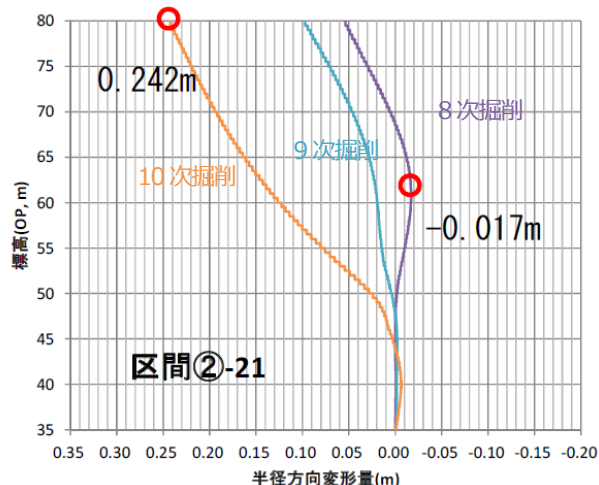


図-14 洪水調節を行ったときの鋼管矢板変位の解析結果（鋼管No. 21）

(4) 鋼管矢板変状への対応

流入部立坑において、掘削途中の段階（10 段支保工設置時）に図-15 のように一部の継手が外れて鋼管矢板が締切内側に変位していることが確認された。また、図-16 のように一部の鋼管矢板が内側に押しつぶされていることも確認された。

表-1 鋼管矢板締切の計測項目と管理値

対象	計測項目	使用計器	点数	管理 /参考	1次管理値	2次管理値
鋼管矢板	鋼管変位	傾斜計	75台	参考	-	-
		挿入式傾斜計	1台	参考	-	-
	締切 内空変位	レーザー 変位計	16台	管理	2次管理値の80%	躯体の鉄筋かぶりを 侵さない変形量
	応力	ひずみ計	150台	管理	2次管理値の80%か 設計値の小さい方	許容応力
円環支保工	応力 (軸力)	ひずみ計	80台	管理	2次管理値の80%か 設計値の小さい方	許容応力
周辺地山	背面水圧	間隙水圧計	6台	参考	-	-

鋼管矢板継手が外れた位置からの湧水は、ほとんど発生しなかった。これは、継手が外れるリスクや止水の信頼性向上のために、背面側に薬液注入を実施して止水強化を図った結果と考えられる。この事象が発生してから本体の構築が完了するまで1年以上かかることから、継手が完全に外れているところに関しては鋼管背面に薬液注入を再度行った。

継手には鋼管矢板締切全体の変位を抑えるためのせん断抵抗力を期待する設計となっている。そのため、継手が外れた部分はせん断抵抗力の不足部分を補うために図-17に示すような追加せん断プレートを設置した。

鋼管矢板のつぶれた箇所は鋼管の断面が小さくなっており、鋼管の鉛直方向の曲げ剛性が低下していると考えられるため、鋼材を用いて鋼管矢板の補強を行った。使用した補強リングH鋼により隣接する鋼管と一体化させることで、剛性が低下した鋼管矢板の補強を図った。これにより、立坑内側への鋼管矢板の変形を抑えることができる。鋼管矢板への補強を図-18に示す。

これらの変状が生じた箇所は締切の地山側であった。地山は亀裂が多いため緩みややすい状態であった。そのため山側から緩み土圧が作用し、これらの変状が生じたと考えられる。このことから今後類似の施工時には、地山の緩みに留意する必要がある。



図-15 継手の変状

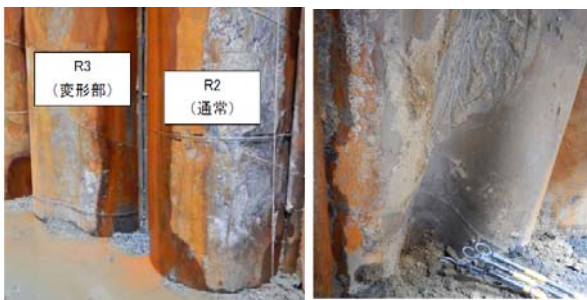


図-16 鋼管矢板の変状

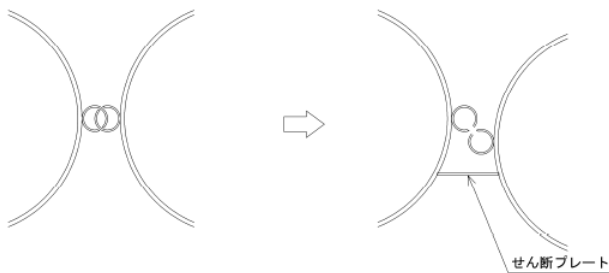


図-17 継手変状への対応

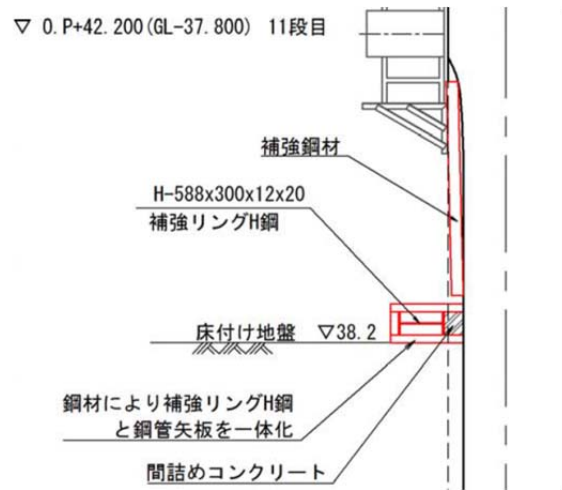


図-18 鋼管矢板変状への対応

6. おわりに

本事業では運用中のダム貯水池による静水圧及び水位変動に耐える鋼管矢板締切を設計・施工した。設計時の支配的な条件は、ダムが洪水調節を行ったときに、締切の地山側とダム湖側で水位差が生じた場合であることがわかった。施工時は鋼管矢板に変状が生じたが、補強で対応できる範囲内であった。継ぎ手が外れた箇所でも漏水はほとんど発生せず、多重の止水処理が有効であったことがわかった。この変状の原因として考えられる地山の緩みに今後の類似施工では留意が必要である。

2019年6月現在、流入部は本体構築まで完成している。今後、トンネル式放流設備全体を完成後させ、鋼管矢板を一部切断してトンネルへ通水する。本事業が安全に完了し、広く淀川流域の治水、利水に資することを願っている。

※本稿の内容は筆者の前所属である琵琶湖河川事務所工務課の所掌である。

謝辞：本稿の執筆にあたっては施工業者である大成建設の水野智亮さま、矢部和史さまからヒアリング、資料提供でご協力いただきました。また、本工事を担当していた琵琶湖河川事務所の方々からは本稿に関する助言等でお世話になりました。最後に、私が現在所属している浪速国道事務所の方々からは執筆内容に関する助言をいただいただけではなく、応援の言葉もいただき、おかげで本稿を作成することができました。末筆ながら、深く感謝の意を表します。

参考文献

1. 日本道路協会. 1999. 道路土工一仮設構造物工指針
2. 国土技術研究センター. 2003. グラウチング技術指針・同解説