小渋ダム土砂バイパストンネルにおける インバートコンクリートの摩耗対策

天竜川ダム統合管理事務所 寺沢 祐紀1

1天竜川ダム統合管理事務所 管理課 (〒399-3801 長野県上伊那郡中川村大草6884-19)

本論文は、令和2年7月洪水の運用中に被災し令和6年度運用再開した小渋ダム土砂バイパストンネルにおいて、被災要因を分析し、これらを踏まえた復旧と、再度被災防止についてとりまとめたものである。

キーワード 土砂バイパストンネル,摩耗

1. 小渋ダム土砂バイパストンネルの概要

小渋ダムは、南アルプス赤石岳を源流とする天竜川左支川の小渋川に多目的ダムとして昭和44年に完成した高さ105mのアーチ式コンクリートダムである。土砂バイパストンネルは小渋ダム堰堤改良事業として、貯水池への土砂流入を抑制し、ダム機能の長寿命化を図るとともに、ダム地点における土砂移動の連続性確保により下流の河川環境を保全・改善することを目的に平成12年より着手した。平成27年10月に土砂バイパストンネルが完成し、平成28年9月より土砂バイパストンネルの試験運用を開始している。土砂バイパストンネルの概要は、図-1、図-2、表-1に示す通りであり、分派堰でトンネルと貯水池に流水を振り分ける構造である。令和2年7月には大規模な出水によりバイパストンネルが損傷したため、令和5年度まで復旧工事を行い、令和6年度からは本運用を開始している。



図-1 小渋ダム土砂バイパストンネルの概要図





図-2 小渋ダム土砂バイパストンネル 呑口、叶口の外観図

表-1十砂バイパストンネルの概要

計画放流量	断面形状		延長	縦断勾配		対象土砂	最大流速
3 7 0 m³/s	一般部 馬蹄型	呑口部 幌型(一部)	3,999m	1/50	1/5 (呑口部)	礫 砂 シルト	14. 4m/s

2. 令和2年7月洪水による摩耗・損傷状況

(1) 令和2年7月洪水の概要

令和2年度は、梅雨前線に伴う降雨に対し、令和2年6月30日から7月16日までの17日間にわたり土砂バイパストンネルを運用した。この間5回にわたり洪水調節を行い最大流入量は図-3に示す通り約640m³/s、最大バイパス流量は202m³/sであった。この洪水によるバイパス土砂量は、図-4に示すように約188万m³(計算値)であった。

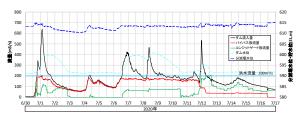


図-3 令和2年6月30日~7月16日のダム運用状況





図4 令和2年7月洪水時の土砂収支(計算値)及び流況

(2) インバート等の摩耗・損傷状況

令和2年7月のバイパス運用では、約188万㎡の土砂を17日間バイパスした結果、図-5に示すとおり、トンネルインバートの摩耗が進行した。また、図-6に示すように450mm厚のインバートがすべて流出した箇所は5箇所確認でき、インバート流失箇所を考慮しない平均摩耗量は、197mmであった。また、インバートの流出に伴い、基盤の洗掘が進行し、側壁基礎部が欠損した箇所も見られた。特に、吞口ゲート直下の勾配変化点周辺では、図-7に示すとおり、流況が乱れインバート上の鋼製ライニングが剥がれたほか、他の区間と比較し、洗掘深が大規模となった。25mm厚の鋼製ライニング板の最大摩耗量は、図-8に示すとおり12mmであり、全体平均摩耗量は3.4mmであった。右岸側の鋼製ライニングの摩耗が顕著であっ

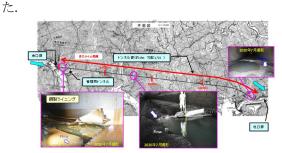


図-5 令和2年7月洪水時のインバート摩耗状況

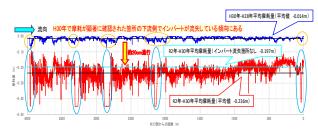


図-6 摩耗量縦断図(断面平均値)





図-7 吞口直下の勾配変化点周辺摩耗状況

鋼製ライニング コンタ一図(凡例 レンジ幅拡大)

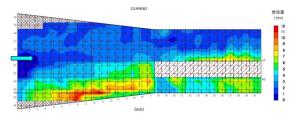


図-8 吞口直下鋼製ライニング部摩耗量

(3) 摩耗・損傷の要因分析

インバート損傷状況より、損傷が拡大したメカニズム として、以下に示す4つのステップを想定した. (図-9)

ステップ①:摩耗や骨材の抜けによる凹部が発生

ステップ②:摩耗により凹部が徐々に拡大

ステップ③: 凹部に入り込んだ礫による摩耗や衝突に

より洗掘が進行

ステップ④:インバートが流出し基盤部の洗掘が進行 土砂バイパストンネルは、浮遊砂だけでなく粒径が粗 い掃流砂、礫(粒径100mm以下)も流れ込み、バイパス トンネルを通して下流河道に排砂する計画である。令和 2年7月洪水では計画を上回る粒径500mm程度の巨石もト ンネル内で確認されたことを踏まえ、インバート損傷の 要因は、細粒分による摩耗に加え、巨石の衝突現象によ る破壊の影響であることも推察された。また、一部でイ ンバート下部の基盤が砂礫層となっている箇所が確認さ れたことを踏まえると、ステップ④においてインバート 流出後にさらに基盤の損傷が拡大したと考えられる。 (図-10)バイパストンネルは中央排水形式となっており、 インバート下部の中央部に排水用のパイプが埋設してあ ったため、摩耗に対し、構造上の弱点となっていた可能 性がある。

また、吞口部では、右岸側の鋼製ライニングの摩耗が 顕著であり、トンネル内の流況が均一ではなく偏って長 時間流下したと想定された.

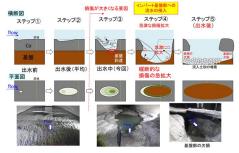


図-9 インバートの摩耗進行のメカニズム

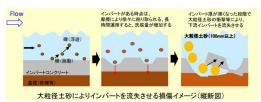


図-10 インバートが流出するメカニズム

3. インバートの復旧工事

令和2年7月の被災後から令和5年5月までの期間,土砂バイパストンネルの復旧工事を実施した.施設の被災状況を踏まえ,復旧方針は,以下に示す通りとした.

【復旧工事の方針】

- ・インバートコンクリートの高強度化
- インバート厚の見直し
- ・排水方法等のインバート構造の見直し
- ・ライニング区間、構造の見直し

(1) コンクリート強度の高強度化

インバートコンクリートの強度は、当初50N/mm²で施工されていたが、復旧工事にあたり可能な限り耐摩耗性をはじめとして耐久性を向上させることとした。耐久性と相関性を有するコンクリート強度に着目し、より高い強度のコンクリートを活用することとした。また、基礎砂礫層部を高強度コンクリートによる置き換えを実施した。(図-11)

近隣の市場調査を行い,実際に現地で調達可能な 強度として70N/mm²の高強度コンクリートを採用した.

(2) インバート厚の見直し

インバート厚は、図-11に示す通り、耐久性向上の 観点より、断面の余裕を活用した最大限の増厚を行 うこととし、被災前の450mmに対して600mmとした。当 初設計段階のインバート厚に対する計画洪水規模波 形における摩耗予測量190mmに対し、表-2に示す通り、 令和2年7月出水を踏まえた摩耗予測量324mmに見直し、 インバート厚は600mmを採用した。

インバート厚の増厚による定規断面の余裕は、インバート幅6.5mに対し高さで150mmとなった.これを現インバート厚450mmから600mmとしても、空隙率25%は満足できることとした.インバート厚の増厚は、内空断面積の余裕分を活用するものであり、バイパストンネルとしての安全性を損なわない範囲とした.

これにより、同じバイパス量に対する補修実施間隔を、約1.3倍に延ばせるとともに、想定外の摩耗進行リスクに対する余裕とした.

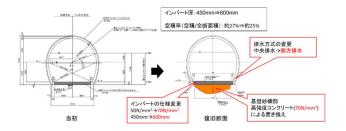


図-11 従来と復旧後のトンネル断面図

表-2 令和2年7月出水を踏まえたインバート厚

項目	R2.7出水を踏まえたインパート厚の設定				
インバート厚	①最小補修 施工	160mm	 インパート材料の品質確保、施工面からは、部分補修実施の ための最小施工厚として、強度が確保できる骨材最大粒径 Gmax=40mmの4倍の160mm程度以上が必要 (コンウリート示方書より) 		
	②摩耗予測 量	324mm	 R2.7洪水(パイパス土砂量188万m³)での実績摩耗量(上限値450mm)を考慮した摩耗予測式より、最大摩耗量を設定:圧縮強度に:70N/mm² Kv値:14152(最大摩耗量450mmより同定) 		
	③余裕厚	100mm	コンクリート強度が確保できるように、粗骨材25~40mmより 最大粗骨材寸法40mm程度以上とする。 骨材軽は強度と相関原にあることから、大粒径土砂 100mm以上と同程度の余裕厚を設定する。		
	1+2+3	583mm	⇒ 600mm		

(3) インバート下部の排水方法の見直し

バイパストンネルの排水方法は、当初はインバート下部からの中央排水方式を採用していたが、インバート付近まで摩耗が進行した場合の損傷拡大の一因となる可能性を考慮し、側面排水とした。また、インバート下部の耐久性を向上させるために、基盤に砂礫層が存在する箇所は高強度コンクリートによる置き換えを行った。(図-11)

(4) 吞口直下ライニング方法の見直し

吞口直下のライニング方法は、当初の鋼製ライニングから耐摩耗性の高いステンレス鋼に変更するとともに、流況不安定区間のライニング区間を延長した. さらに摩耗による洗掘深の大きかった勾配変化点においては、勾配の急変を緩和するために曲率部を挿入することとした. (図-12)

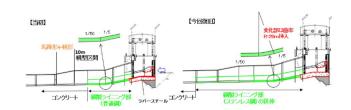


図12-見直し後の吞口直下のライニング方法

4. 運用による摩耗対策

バイパストンネルの摩耗対策として, ハード対策 とともに再度損傷を防止するためのソフト対策を検 討した.

(1) 摩耗予測を想定したバイパス運用

令和2年7月洪水の運用時には、17日間の長期の運用により、摩耗が進行しインバートが損傷した.洪水中にインバートの摩耗状況を直接把握することは困難であるが、施設の安定性を配慮し摩耗状況に応じて運用を適切に停止する必要がある。

平成28年度以降の試験運用期間中,バイパス土砂量を算定するための一次元河床変動モデルを構築し,実績摩耗量を検証材料として同定した摩耗予測式 (Auelの式)を作成している。また,河床変動モデルと摩耗予測式をダム流入予測システムに組み合わせることで,洪水中にリアルタイムでバイパス土砂量,摩耗量を予測し,バイパス運用に反映させるための検討を実施している。

現在、図-13に示すとおり、摩耗・損傷を監視しながら最大限バイパスを運用する方法として上記の予測された摩耗量が200mmに達した時点で、一時的にバイパス運用を一時停止し、直接摩耗状況を観測・検証する方針とした運用計画を作成している.

(2) 補修計画・メンテナンス計画の作成

バイパスの補修方法は、平均的摩耗に対する範囲 補修と局所洗掘に対する部分補修を設定した.

補修計画は、図-14に示す部分補修および範囲補修 のサイクルを基本とし、簡易補修により局所洗掘の 発生を抑制することで部分補修の頻度の減少を図る ものとした

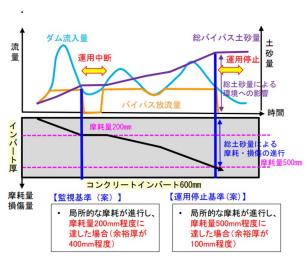


図-13 バイパスの運用方法のイメージ

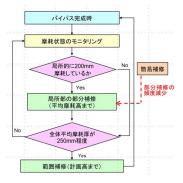


図-14 設定した補修フロー

a) 平均的摩耗に対する範囲補修

令和2年7月洪水と同程度運用した場合,インバート厚600mmに対し,1回の放流により350mmの摩耗が生じ,残り厚が最大250mmとなる想定される.よって,次の最大規模相当の放流に備えて,補修が必要となる.(図-15)

年間平均規模の放流については、最大規模相当の 放流に備えて常時350mmのインバート厚を保持するこ とを考えると、厚さ250mm (=600-350) の範囲内で運 用する必要がある.これは、12~13年 (≒250mm/20mm/ 年) に1回程度の頻度で補修を行うこととなる.

b) 局所洗掘に対する部分補修

局所洗掘に対する部分補修は、計画面からの摩耗 厚が200mmに達した時点を補修実施のタイミングとし、 周辺の高さ(平均的摩耗面)まで部分補修を実施す る. 部分補修は、補修範囲の規模が比較的小さいこ とから、短期間での対応が可能である. 非洪水期に 加えて洪水期も活用して補修を実施する方針とする. (図-16)

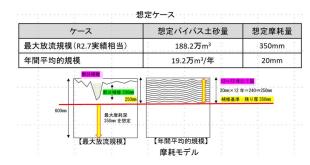


図-15 平均的摩耗に対する範囲補修イメージ

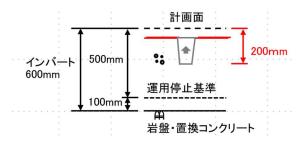


図-16 局所洗掘に対する部分補修補修イメージ

(3)モニタリング体制の強化

令和6年度からの本運用時の土砂バイパストンネル施設のモニタリング調査は、バイパス流量、土砂量、摩耗量を精度良く推定できるように、図-17に示すように、観測機器を配置し、モニタリングを強化することを予定している.



図-17 観測機器配置計画

5. 今後の対策

令和6年度からの本運用により、ダム湖への土砂流入が抑制されるが、現時点で堆砂量が計画堆砂量を約18%超過している。このため、更なる土砂バイパストンネルの効率化と損傷要因である巨石の流入対策に着手したところである。さらに計画的・集中的な予防保全対策(堆砂除去)の実施に向けて検討を進めることとしている.

謝辞:本対策の検討にあたっては小渋ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会(委員長:辻本哲郎名古屋大学名誉教授)委員の皆様にご指導賜りましたこと深く感謝を申し上げます.