

図-3 令和2年6月30日～7月16日のダム運用状況

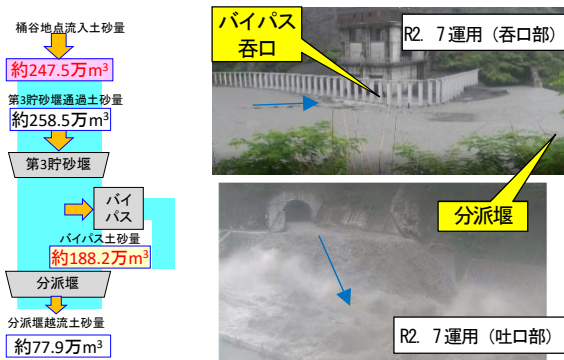


図4 令和2年7月洪水時の土砂収支（計算値）及び流況

(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 m^3 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、呑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た。

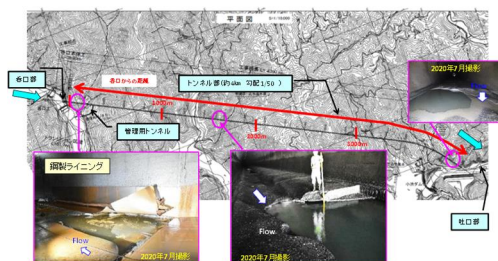


図-5 令和2年7月洪水時のインバート摩耗状況

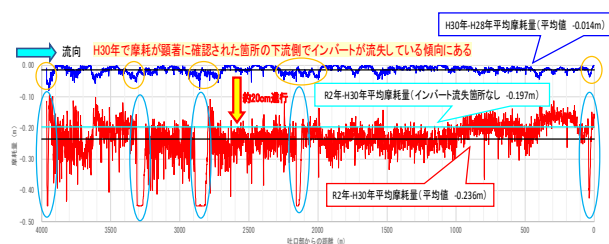


図-6 摩耗量縦断面図（断面平均値）



図-7 呑口直下の勾配変化点周辺摩耗状況

鋼製ライニング コンター図（凡例 レンジ幅拡大）

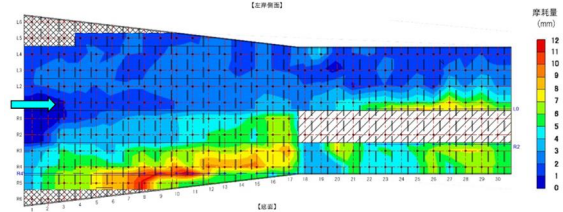


図-8 呑口直下鋼製ライニング部摩耗量

(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、呑口部では、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。

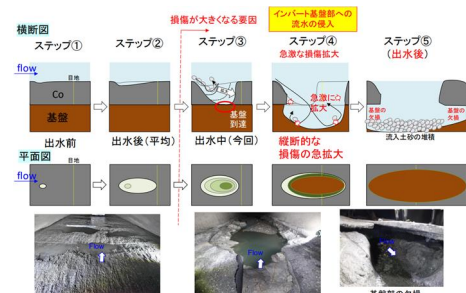


図-9 インバートの摩耗進行のメカニズム

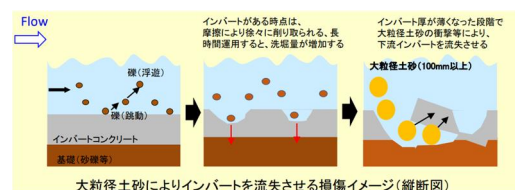


図-10 インバートが流出するメカニズム

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 $50\text{N}/\text{mm}^2$ で施工されていたが、復旧工事にあたり可能な限り耐磨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 $70\text{N}/\text{mm}^2$ 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。

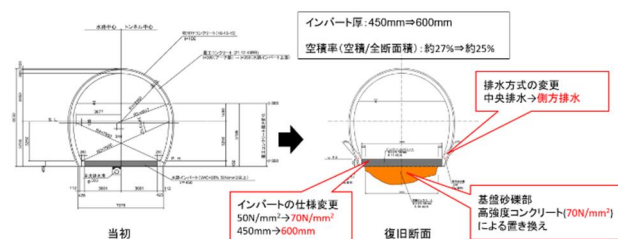


図-11 従来と復旧後のトンネル断面図

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バート厚の設定
インバート厚	①最小補修施工	160mm
	②摩耗予測量	324mm
	③余裕厚	100mm
	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) 呑口直下ライニング方法の見直し

呑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磨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)

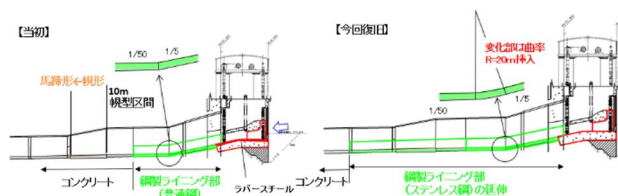


図12-見直し後の呑口直下のライニング方法

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（Aue1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

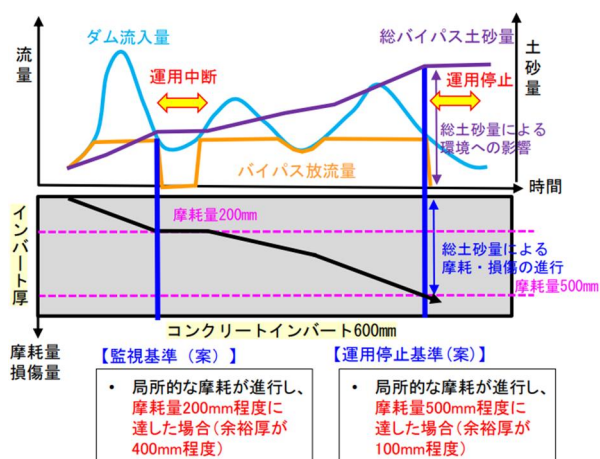


図-13 バイパスの運用方法のイメージ

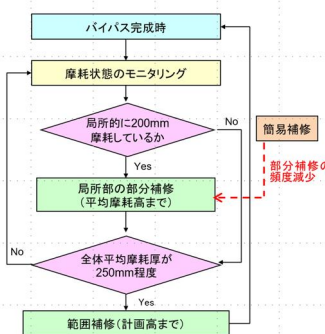


図-14 設定した補修フロー

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（ $\approx 250\text{mm}/20\text{mm}/\text{年}$ ）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に達した時点に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）

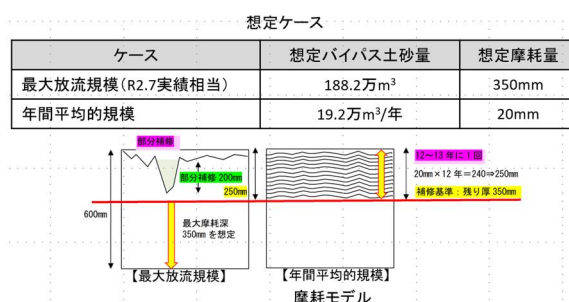


図-15 平均的摩耗に対する範囲補修イメージ

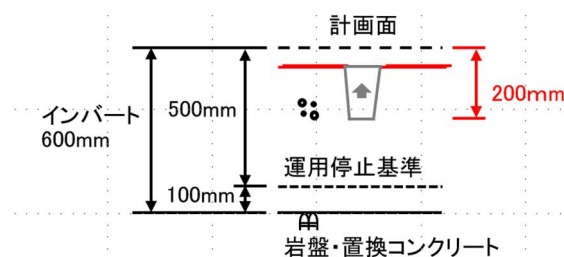


図-16 局所洗掘に対する部分補修補修イメージ

(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。