

土砂バイパストンネル内における摩耗損傷の 進展過程に関する研究

RESEARCH ON PROGRESS OF ABRASION DAMAGE IN SEDIMENT BYPASS TUNNEL

石田卓也¹・中西哲²・石神孝之²

Takuya ISHIDA, Satoru NAKANISHI and Takayuki ISHIGAMI

¹正会員 工修 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ 水理チーム
(〒305-0816 茨城県つくば市南原1-6)
(現 国土交通省水管理国土保全局河川環境課)

²正会員 工修 国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ 水理チーム
(〒305-0816 茨城県つくば市南原1-6)

Sediment bypass tunnels are a countermeasure for reservoir sedimentation. However, it is known that abrasion damage occurs on the tunnel bottom invert because the sediment flows with high velocity condition. In this paper, we focused on process of abrasion damage at Koshibu dam sediment bypass tunnel, which has been operated since 2016. In order to analyze the abrasion volume, DEM images were created using 3D point cloud data obtained by MMS. As a result, it was clarified that the damage progress is not uniform in the longitudinal direction. Furthermore, by defining the local gradient and calculating the load variation before and after the abrasion, the mechanism of local abrasion damage was satisfactorily explained.

Key Words : Sediment bypass tunnel, Abrasion damage, Digital Elevation Model ,

1. はじめに

近年, 日本国内においても恒久的な堆砂対策として土砂バイパストンネルが建設される例が増えており, 今後, ダム堆砂の進行とともに更なる建設事例が増えると考えられる. 既に運用されている土砂バイパストンネルでは, 流下する土砂の粒径や流速によっては, トンネル内の底部インバートに顕著な摩耗損傷が発生することが報告されている¹⁾.

コンクリートの摩耗損傷は古くから研究されており, 堰堤, ダム洪水吐等の河川構造物ではその対策工法に関する研究がなされている^{2~6)}. しかしながら, 摩耗損傷に関する力学的なメカニズムの複雑さや, 流砂量計測の難しさから, 理論的な摩耗量の予測に関する知見は少なく^{3,6,7)}, 確定的なものは得られていない.

一方で, 仮排水路トンネルにおける摩耗損傷に関する研究としては, 福岡らの研究^{8~10)}があげられるが, トンネル延長やコンクリート強度が大きく異なることから実際の土砂バイパストンネルにおける摩耗損傷の進展過程を明らかにすることが重要である. 本論文においては,

平成28年より試験的に運用されている小渋ダム土砂バイパストンネルに着目し, 摩耗損傷に関する時間的な進展過程について検討を行った.

2. 小渋ダム土砂バイパストンネルについて

小渋ダムバイパストンネルの平面図, 断面図をそれぞれ図-1, 図-2に示す. 平面的には呑口から3,400mが直線区間であり, その下流では右岸側に曲率半径1,000mの単曲線により曲がり, 吐口に接続している. 本論文の分析においては, トンネルの平面線形による影響を回避するために, 呑口より3,000mの範囲を対象として議論する.

小渋ダム土砂バイパストンネルはNATM工法により建設されているため, 地山の状況によって覆工やその構造が細かく変更されているが, 基本的な構造は図示したとおりである. また, 断面図に示す通り水路底面のインバートは, 側壁に近い部分のみが異なる配合となっている. これは, 覆工コンクリートと一体として打設を行う必要があったためである. 小渋ダム土砂バイパストンネルの諸元を表-1に示す. 計画放流量を放流する際に断面



図-1 小湫ダム土砂バイパストンネル平面図

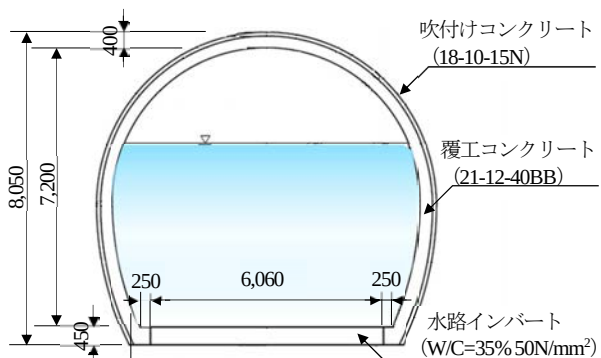


図-2 小渋ダム土砂バイパストンネル標準断面図

表-1 小渋ダム土砂バイパストンネルの諸元

計画放流量	370m ³ /s
延長	3,999m
縦断勾配	1/50
最大流速	14.4m/s
コンクリート強度	覆工 21N/mm ² 水路部 50N/mm ²
対象	ウオッシュロード, 浮遊砂, 掃流砂



図-3 試験運用時の吐口の状況

の8割水深となるように設計されており、縦断勾配は呑口・吐口を除き1/50で一定である。

試験運用時における吐口の状況を図-3に示す。小渋ダムの土砂バイパストンネルでは、表-2に示すように試験運用から3年間に計8回の出水に対し運用されており、砂礫を含む土砂が下流河川にバイパスされていることが示されている。なお、排砂量については推計値である。

小浜ダム土砂バイパストンネルモニタリング委員会資料¹¹⁾によれば、呑口付近において摩耗が著しく、運用開始3年後の時点において、最大15cm程度の損傷を受けていることが明らかとなっている。

表-2 土砂バイパストンネルの運用状況

年月日	最大放流量 (m ³ /s)	延放流時間 (時間)	排砂量 (千m ³)
H28.9.20～9.21	80	16	約 10.2
H28.9.23	60	5.8	
H29.7.4～7.5	117	3.1	約 1.4
H29.10.22～10.23	183	9.7	約 15.4
H29.10.29～10.31	86	48.8	約 16.8
H30.7.4～7.8	141	10.7	約 16.2
H30.9.4～9.6	170	44.2	約 115.1
H30.9.30～10.4	195	69.5	約 84.7

小渋ダム土砂バイパストンネルでは、各年度の出水期後にMMS (Mobile Mapping System) によりトンネル内部の点群データが取得されている。この点群データからインバート部分のみを抽出し、2 cm格子の数値標高データであるDEM (Digital Elevation Model) を作成した。なお、点群データからDEMを作成する際には、オープンソースの点群処理ライブラリであるPDALを使用し、各画素内の点群データを平均化することによりDEMの標高を与えている。なお、トンネル内でMMS測量を実施しているため、GPS等による精度が低下しており、標高については年度間でその値を比較する際には誤差を含むことに注意が必要である。また、摩耗損傷部に水が溜まっていた箇所や、土砂が堆積していたことにより正しいインバートの標高が計測されていない領域も存在する。

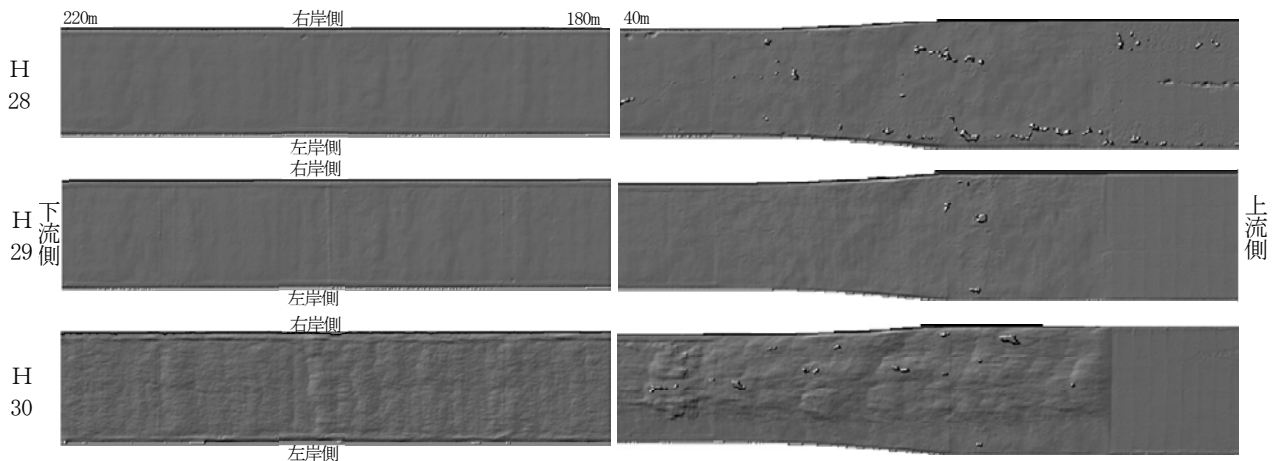


図-4 DEMから作成した陰影図の一例

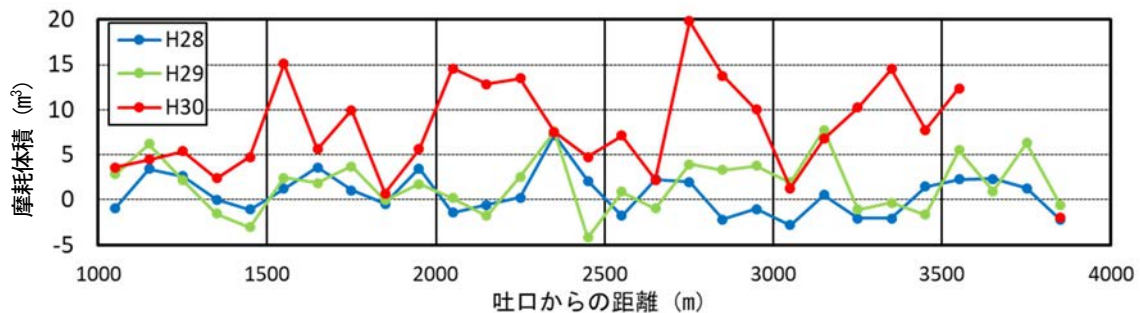


図-5 摩耗体積の縦断分布

3. 解析結果

(1) 面的な損傷状況について

DEMから作成した陰影図の一例を図-4に示す。図示した区間は、バイパストンネル呑口の直下流および、呑口から180mから220mの区間であり、運用を行うごとに凹凸状況が表れていることが読み取れる。H30年度の測量データでは、呑口周辺においては右岸側に偏っていることが確認できる。また、180mから220mの区間では、横断方向に筋が表れており、縦断方向には小規模な波状の損傷を受けていることが確認できる。他の区間においても同様に損傷を受けていることが確認できた。

摩耗の分布状況をマクロな視点から確認するため、対象区間を100m毎に分割した場合における摩耗したコンクリートの体積を図-5に示す。摩耗量については、設計値の標高を与え、その差分から計算を行い区間ごとの合計により算出している。後述の普通コンクリート部分における摩耗を含めないために、計算範囲をトンネル中央から左右岸に2.8mずつとした。また、以下の3点に留意が必要である。①完成後の標高が明らかでないため、摩耗体積が負値となっている区間が存在する。②H30における3,600m～3,800mの区間においては、管理用トンネル内に堆積した土砂を仮置きしていたため摩耗体積の算出が不可能であったため表示を行っていない。③3,900～4,000mの区間（呑口区間）における摩耗体積は、他の区間に比べ1桁大きく、H28から順に150.3m³、152.6 m³、

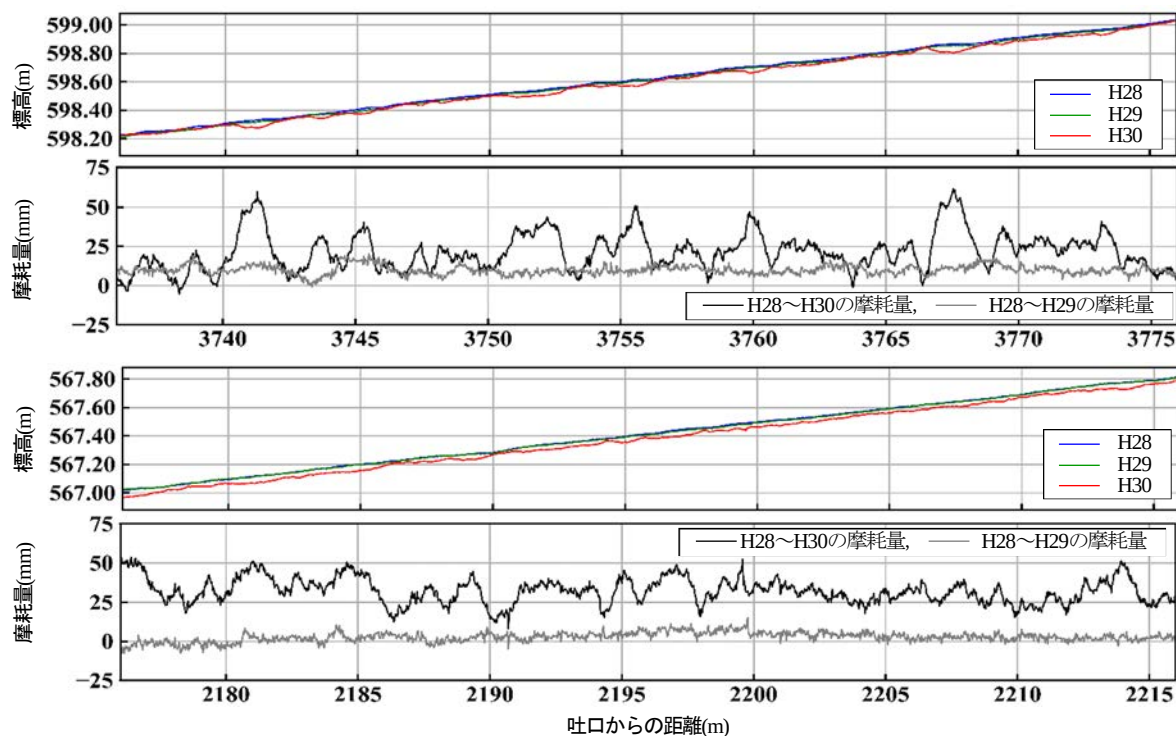
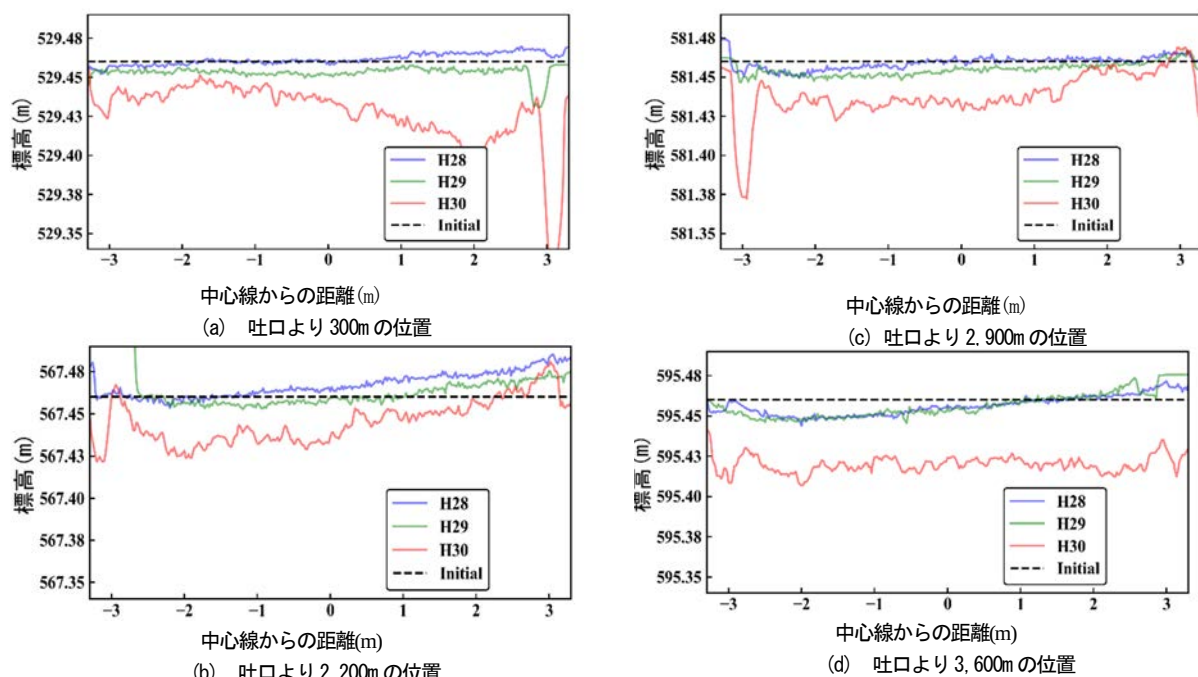
189.2m³であり図上に表示を行っていない。

図より、摩耗体積は縦断方向に対して様ではなく、ばらつきが存在する。特にH29からH30の摩耗体積の増分が大きく、100mあたり15m³もの摩耗が発生している区間が存在する一方で、摩耗体積がほとんど増加していない区間もあることから、摩耗予測式を構築する際には摩耗量が同様であると仮定することは難しいと考えられる。

(2) 横断方向の損傷状況について

横断方向における摩耗状況を図-6に示す。参考までに計画時の標高を記載している。(a), (b), (c)のそれぞれの断面では、側壁付近の摩耗が顕著である。これは、前述のとおり、バイパストンネルの施工時に水路インバートと異なる配合のコンクリートが使用された影響であると考えられている。覆工コンクリートは高強度コンクリートと比較し圧縮強度が低く、摩耗量が多いことは既往の知見とも合致する傾向である³⁾ ¹²⁾。また、H28, 29の2年間は、バイパストンネルを通過した土砂が少なかったことから、摩耗量も少ないことが表れている。H30の断面を比較すると、(a)吐口付近では右岸側に損傷が偏り、(b)2,200m地点および(c)2,900m地点では左岸側に偏っていることが確認できる。トンネル内は直線であることからトンネルの線形が影響を及ぼしている可能性は考えにくい。

このような左右岸における摩耗量の差が継続すると、横断方向における通過土砂量の分布が変化し、掃流砂の



内、とりわけ粒径の大きな礫が摩耗損傷を受けた箇所に偏り、さらに摩耗損傷が加速する可能性が考えられる。

(3) 縦断方向の損傷状況について

バイパストンネルの中心線における標高縦断面図および計測年ごとの標高の差分である摩耗量縦断面図を図-7に示す。この図より、図-5で確認されたように摩耗の進展は縦断方向に対して、波打つような形状であることが確認できる。H29の測量結果では、摩耗深の縦断方向に対す

るばらつきが小さいが、H30では局所的に40mm程度の大きく摩耗する区間が表れている。

(1)において考察したように、摩耗量が区間全体で一様であると考えるのは難しいが、さらに縦断方向では1m単位で摩耗量が増減していることが明らかになった。このような局所的な損傷が進展すると、摩耗予測式の結果を基に策定された維持管理計画の修正が必要となる恐れがある。よって、局所的な損傷がどのようなメカニズムにより発生するか明らかにする必要がある。

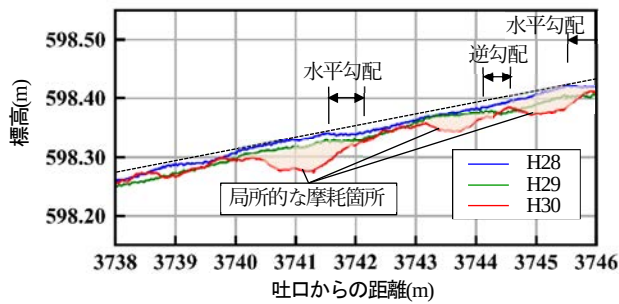


図-8 拡大した標高縦断面図

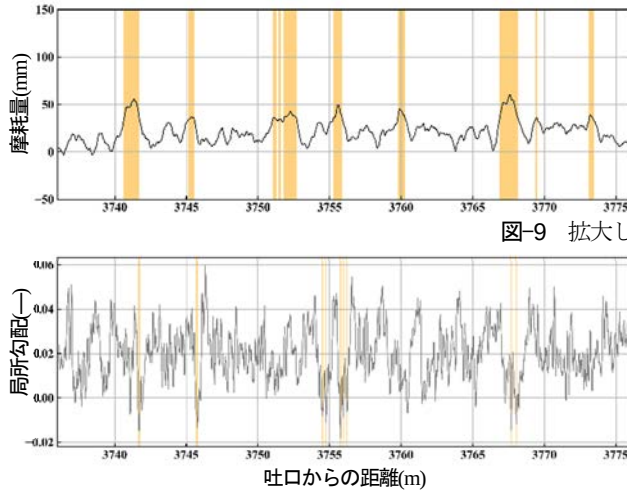


図-9 拡大した摩耗深縦断面図

図-10 拡大した摩耗深縦断面図および局所勾配

4. 縦断方向の局所的な摩耗損傷に関する分析

局所的な損傷箇所においては、摩耗量が大きくその要因を明らかにすることが、摩耗損傷対策において重要であると考えられる。図-7に示した標高縦断面図の一部分に着目し、拡大したものを図-8に示す。ここで摩耗深が大きくなっている箇所について考察を行う。この局所的な摩耗損傷が発生している区間の上流側では、H28, 29の時点において、勾配が水平、もしくは流下方向に対して逆勾配になっていることが確認できる。これは、他の区間においても同様の傾向であった。

これを定量的に評価するために、次の式(1)により局所勾配 G_L を定義する。

$$G_L(i) = \frac{\sum_{k=-2}^2 \{h(i+k) - h(i+k-5)\}}{5l} \quad (1)$$

ここで、 $h(i)$ は標高縦断面図の*i*番目の標高、 l は各画素間の距離（本論文では 2cm）を示している。

図-7に示したH28とH30を比較した摩耗深縦断面図のうち、一部分を拡大した結果を図-9に示す。なお、図中において強調した箇所は、表示した区間内における摩耗深の平均に標準偏差を加えた値を超えた区間である。

次に図-9に示した摩耗深縦断面図を対象として局所勾配を計算した結果を図-10に示す。なお、図中において強調した箇所は、局所勾配が表示された区間内の平均値から標準偏差を引いた値を下回った区間である。H28の標

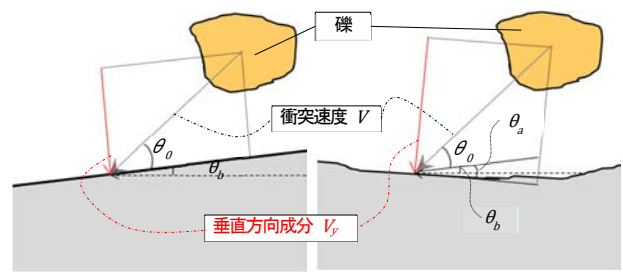
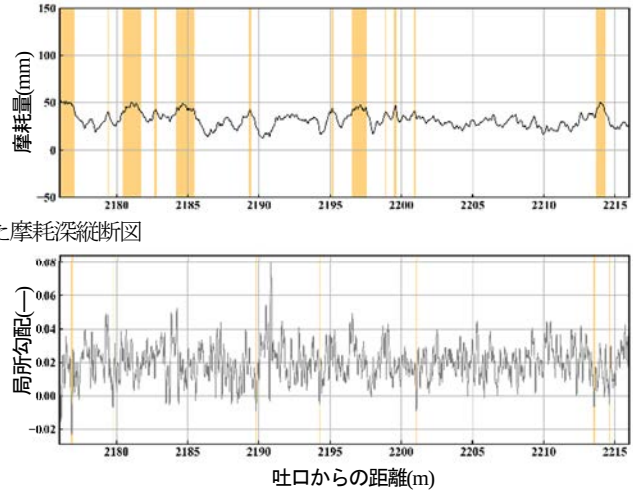


図-11 摩耗損傷による衝突状況の変化



高を基に算出した結果であるが、3,736～3,776mを表示した図においては、局所的に摩耗した箇所と良い一致を示している。

このように、局所的な水路勾配によって摩耗損傷が進むと考えられ、以下のように説明ができる。図-11に水路インバートの摩耗損傷前後における礫の衝突状況の模式図を示す。礫が水路インバートに衝突する際の速度は、損傷前後で変わらないと仮定し、水路底面の方及びそれに直行する成分に分解する。礫の速度ベクトルと衝突位置における水路底面の勾配の成す角を、それぞれ θ_0 と θ_a と表記すると、衝突速度の水路底面に垂直な方向の成分 V_y はそれぞれ、 $V \sin \theta_0$ と $V (\sin \theta_0 + \theta_a)$ と表せる。 V が等しいと仮定しているため、垂直方向成分は角度にのみ依存する。

また、小渋ダム土砂バイパストンネルの勾配は1/50であることから、局所的な水路インバートの勾配によって、垂直方向成分の大小関係が変化する。特に流下方向に対して勾配が小さい、もしくは逆勾配になると垂直方向成分が大きくなる。

ここで石橋の成果⁹⁾を引用すると、底面に直交する方向の圧縮力の最大値 f_{max} は次の式(2)のように表せる。

$$f_{max} = \left(\frac{5}{2}\right)^{\frac{3}{5}} n_1^{\frac{2}{5}} \left(\frac{d}{2}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{mv_y^2}{2}\right)^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$

$$f_{max} \propto v_y^{\frac{6}{5}} \quad (3)$$

ここで n_1 は、衝突面と砂礫の特性で決定される係数であり、 d は砂礫の粒径、 m は衝突する砂礫の質量を示す。式 (2) において垂直方向の速度に着目すると、圧縮力の最大値 $f_{\max}$ は式(3)のように表せ、 v_y の6/5乗に比例することがわかる。

ここで、図-11に従い、損傷前後における衝撃力の最大値 $f_{\max}$ の変化倍率 α を式(4)により計算した。

$$\alpha = \left(\frac{\sin(\theta_0 + \theta_a)}{\sin\theta_0} \right)^{\frac{6}{5}} \quad (4)$$

計算した α を図-12に示す。ここでパラメータとした角度は θ_a であり、トンネルの縦断勾配 1/50 ($\theta_b = 1.146^\circ$) を含む形式である。損傷後もトンネルの縦断勾配が変化しない場合、すなわち θ_a が 1.146° とした場合の変化倍率 α は θ_0 にかかわらず 1 となる。

図より礫の水路底面への衝突角度 θ_0 に関わらず変化倍率は1より大きくなっており、特に θ_0 が小さいときには極端に大きな倍率となる。さらに、 θ_a が負の値をとるような場合には、単位延長当たりの礫の衝突数そのものが減少すると考えられる。

これより、土砂バイパストンネルの運用初期に形成された凹凸が、その後の礫の衝突数および衝突時の損傷量の違いに大きな影響を与えている。

5. 結論

本論文においては、土砂バイパストンネル運用後の点群データを用いてDEM画像を作成し、水路インバートの摩耗損傷に関する分析を行った。その結果、以下のよう結果が得られた。

- 1) 100m単位における摩耗体積は縦断方向に一様でなく、呑口直下を除いた区間においては、最大で15m³程度である一方で、摩耗量がほとんど増加していない区間も存在することが明らかとなった。
- 2) 横断方向については、摩耗量が左右岸に偏る箇所が存在することが確認された。また側壁付近の覆工コンクリート部における損傷が特に大きいことが確認された。
- 3) 縦断方向に対しては、摩耗深が数m単位で大きく変化しており、局所的な摩耗現象の存在が確認された。
- 4) 縦断方向に対する局所的な摩耗損傷のメカニズムとして、衝突角度に関する考察を行った。局所勾配を定義し比較することで、局所的な摩耗箇所と良い一致を示すことが明らかとなった。
- 5) 局所勾配に関する考察に加え、礫の衝撃力の変化倍率を計算することにより、縦断方向における局所的な摩耗損傷の発生メカニズムを提案した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、天竜川ダム統合管理

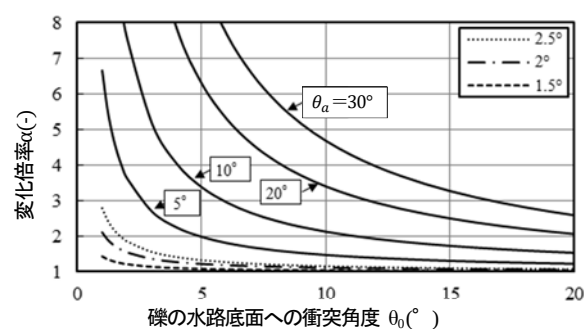


図-12 衝撃力の最大値の変化倍率

事務所から計測データの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 西川亨, 山根雄一, 大本雄二: 旭ダム排砂バイパスにおけるトンネル摩耗量とその対応策について, 第4回APGシンポジウム&第9回EADC, pp.80~85, 2016.
- 2) Michelle Mueller-Hagmann, Christian Auel, Ismail Albayrak and Robert M. Boes: Bedload transport and hydro-abrasive erosion at steep bedrock rivers and hydraulic structures, River Flow, 2018.
- 3) 柏井条介, 井上清敬, 箱石憲昭: 排砂による直線コンクリート水路の摩耗・損傷量の推定, ダム技術, No.27 pp36-51, 2009.
- 4) 豊田高司, 高須修二: 排砂水路の摩耗対策, 大ダム No.138, pp.61-66, 1991.
- 5) 鈴木裕一, 涌井国宏, 岩本順: 塩郷えん堤エプロン摩耗対策材の検討と施工, 電力土木, No.299, pp.39~43, 2002.
- 6) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第334号, pp.103~112.
- 7) Christian Auel, Robert M. Boes & Tetsuya Sumi: Abrasion prediction at Asahi sediment bypass tunnel based on Ishibashi's formula, Journal of Applied Water Engineering and Research, Vol. 6, No. 2, 125~138, 2018
- 8) 福岡捷二, 森田義則, 藤原博昭, 萬屋敦啓: 大量の砂礫を伴う洪水流による仮排水路トンネルインバートの浸食蛇行, 河川技術に関する論文集, 第5巻, 1999.
- 9) 福岡捷二, 篠原康寛, 正木丈也, 重村一馬, 藤堂正樹, 岡田将治, 斉藤一正: 排砂水路底面の摩耗進展機構の実験的検討, 水工学論文集, 第48巻, 2004.
- 10) 重村一馬, 福岡捷二, 篠原康寛, 斉藤一正: 排砂水路を流下する礫群の運動と水路底面の磨耗進展機構, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.227-228, 2004.
- 11) <https://www.cbr.mlit.go.jp/tendamu/dam/monitoring/index.html> (2019.3.31訪問)
- 12) 杉田英明, 永松武教, 大竹竹史: 小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.885-888, 1986.

(2020. 4. 2受付)