

## 土砂による河川構造物の摩耗・損傷対策および維持管理に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 31

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：石神孝之、宮脇千晴、櫻井寿之

### 【要旨】

貯水池の長寿命化やダム下流の河川環境保全の観点から、ダムから土砂を流す施設として排砂設備・土砂バイパス・流水型ダムの洪水吐き等が設置され、運用されるようになってきている。これらの施設は、砂礫が高速で流下することによる摩耗・損傷のリスクがある。そこで、本研究では、ダム施設を主とした河川構造物の土砂による摩耗・損傷状況を把握し、その摩耗・損傷量の予測手法と対策および維持管理手法を提案することを目的としている。27年度は、河川構造物の摩耗・損傷状況に関する情報の収集と知見の整理を行うとともに、河川構造物を流下する土砂のうち 2mm 程度以上の礫が掃流形態で高速にて流下する量を把握することを目的とした計測手法の検討を実施した。

キーワード：河川構造物、土砂バイパストンネル、摩耗・損傷、プレート型センサ

### 1. はじめに

貯水池の長寿命化やダム下流の河川環境保全の観点から、ダムから土砂を流す施設として排砂設備・土砂バイパス・流水型ダムの洪水吐き等が設置され、運用されるようになってきている。これらの施設は、砂礫が跳躍・転動・滑動しながら高速で流下することによる摩耗・損傷のリスクが高く、施設の機能への影響が生じる可能性も考えられる。そのため、摩耗代の事前設定と補修、ライニング材の設置と交換による維持管理等の対策が講じられているが、条件の限られた現地実験や模型実験等による知見に基づくものであり、摩耗・損傷対策の設計・維持管理手法は未だ確立していない。

そこで、本研究では、ダム施設を主とした河川構造物の土砂による摩耗・損傷状況を把握し、その摩耗・損傷量の予測手法と対策および維持管理手法を提案することを目的としている。

27年度は、河川構造物の摩耗・損傷状況に関する情報の収集と知見の整理を行った。また、摩耗・損傷量の予測を行う際には外力条件として礫の流量を把握することが重要である。そこで、28年度より試験運用が開始される予定の天竜川支川の小渋川に建設中の小渋ダム土砂バイパストンネルへの適用を想定しつつ、施設を通過する土砂のうち 2mm 程度以上の礫が掃流形態で通過する量を把握することを目的として計測手法の検討を実施した。掃流砂の計測手法の既往研究としては、京大穂高砂防観測所での観測など砂防分野で多くの検討が行われているハイ

ドロフォン<sup>1)</sup>やスイスでのジオフォン<sup>2)</sup>などの研究事例がある。本研究では小渋ダム土砂バイパストンネルで想定されている高速流（最大 15m/s 程度）を考慮して、耐久性の高いプレート型センサ（プレートマイクロフォン）<sup>3)</sup>を用いた計測の検討を行った。

### 2. ダム施設を主とした河川構造物の土砂による摩耗・損傷状況

ダム施設の土砂による摩耗・損傷状況に関する情報の収集を行う目的で、第1回 土砂バイパストンネルに関する国際ワークショップ（International Workshop on Sediment Bypass Tunnels）に参加した。このワークショップは、2015年4月27日から29日にかけて、スイスのチューリッヒにて、スイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETH-Zurich）水理・水文・氷河学研究所（VAW）主催のもと開催された。ワークショップでは、日本からの15名の参加を含み、ヨーロッパやアジアを中心に13カ国から合計90名が参加し、専門家やダム管理者によって、土砂バイパストンネルに着目した情報交換と議論が行われた。

ワークショップで報告されたダム等および土砂バイパストンネルの諸元を表-1に示す。日本とスイスの報告事例が多く、両国が土砂バイパストンネルに関して国際的に先進的な取り組みを行ってきている状況にある。

ワークショップで収集した施設の摩耗・損傷に関する知見の概要を以下に示す。

表-1 ダム等及び土砂バイパストンネルの諸元

ダム名	国名	管理者	ダム及び貯水池						土砂バイパストンネル						
			完成年	目的	流域面積 (km <sup>2</sup> )	貯水容量 (m <sup>3</sup> )	型式	ダム高 (m)	完成年	延長 (m)	勾配 (%)	幅 (m)	高さ (m)	断面形状	最大流量 (m <sup>3</sup> /s)
布引ダム	日本	神戸市	1900	水道用水	9.8	759,521	重力式 コンクリート	33.3	1908	264	1.33%	3.00	3.00	幌型	39
旭ダム	日本	関西電力	1978	揚水発電 (下池)	39.2	15,470,000	アーチ	86.1	1998	2,350	2.94%	3.80	3.80	幌型	140
美和ダム	日本	国土交通省 中部地方整備局	1959	発電、灌漑、 洪水調節	311.1	29,952,000	重力式 コンクリート	69.1	2005	4,308	1.00%	7.80	7.00	馬蹄形	300
松川ダム	日本	長野県	1975	洪水調節、生活用 水、灌漑	60.0	7,400,000	重力式 コンクリート	84.3	2015	1,417	4.00%	5.20	5.20	幌型	200
小洪ダム	日本	国土交通省 中部地方整備局	1969	発電、灌漑、 洪水調節	288.0	58,000,000	アーチ	105.0	建設中 (2016)	3,982	2.00%	7.90	7.20	馬蹄形	370
Pfaffensprung ダム	スイス	国有鉄道会社 SBB	1922	調整池 (発電)	30.6	200,000	石積アーチ	32.0	1922	280	3.00%	4.70	4.85	馬蹄形	220
Palragne ダム	スイス	電力会社 Ofima	1953	発電	138.0	4,860,000	重力式 コンクリート	72.0	1977	1,760	2.00%	6.20	6.13	馬蹄形	250
Runcahez ダム	スイス	電力会社 TFB	1961	発電	-	480,000	重力式 コンクリート	33.0	1962	572	1.40%	3.80	4.50	幌型	110
Solisダム	スイス	電力会社 ewz	1986	発電	900.0	4,100,000	アーチ	61.0	2012	968	1.80%	4.40	4.68	幌型	170
石門ダム (Shihmen)	台湾	政府	1963	灌漑、生活用水、 発電、洪水調節、 レクリエーション	762.4	310,000,000	ロックフィル	133.1	2012年に発電用放流管を濁水排出用に改良 バイパストンネルについて検討中						
南化ダム (Nanhua)	台湾	Taiwan Water Co.	1993	生活用水	108.3	158,000,000	アースフィル	87.5	計画中 (2018)	1,287	1.85%	9.50	9.50	馬蹄形	1,000
Rizzaneseダム	フランス	電力会社 EDF-CIH	2012	発電	-	1,000,000	RCC	40.0	計画中	133	6.90%	4.20	4.20	円形	280
Chespiダム (Chespi-Palma Realプロジェクト)	エクアドル	-	-	発電	4500.0	4,400,000	ダブルカーブ アーチ	63.0	計画中	2,240	1.71%	6.60	6.60	-	400
Patind 水力発電事業	パキスタン	-	2016 予定	発電	-	6,000,000	重力式 コンクリート	44.0	計画中	約150	-	9.00	9.00	円形	650

1) 旭ダム

旭ダム<sup>4)</sup>では、1998年の土砂バイパストンネル建設当初は、圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>のコンクリートでトンネル底面のライニングを行っていたが、補修の際に徐々に高強度(70N/mm<sup>2</sup>)のコンクリートに変更され、2003年以降は高強度コンクリートが70%以上を占めている。土砂のトンネル通過量と摩耗量との関係が分析されており、図-1に示すように、コンクリートの強度毎に相関関係が認められている。

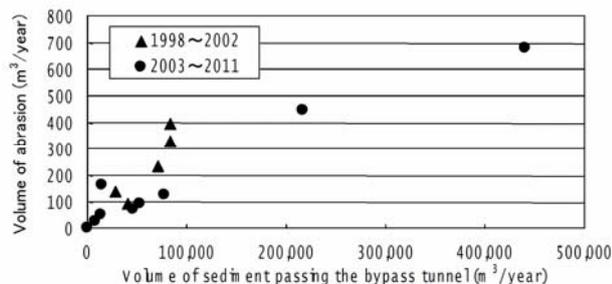


図-1 摩耗量とバイパストンネル通過土砂量の関係<sup>4)</sup>

2) 美和ダム

美和ダムの土砂バイパストンネル<sup>5)</sup>は2005年に建設され試験運用が行われている。美和ダムでは粒径約0.2mm以下のウォッシュロードのみをバイパスする設計がなされており、試験運用の結果、これまでにトンネル内にほとんど損傷がないことが確認されている。

3) 小洪ダム

小洪ダムの土砂バイパストンネル<sup>6)</sup>は2016年に試験運用が開始される予定で建設が進められている。トンネルの水路底面のライニングには、圧縮強度50N/mm<sup>2</sup>のコンクリートが用いられており、維持管理用の摩耗代として、160mmが設定されている。またバイパスの呑口部の表面には、ラバースチール(鋼板が入ったゴムパネル)による保護が行われている。

4) Pfaffensprung ダム

スイスのPfaffensprungダムの土砂バイパストンネル<sup>7)</sup>は1922年にダムの建設と同時に建設された。水路底面の損傷は湾曲部では内側で大きく、出水によっては30cm~50cmに達することもあった。近年では、花崗岩のブロックや高強度コンクリート、繊維補強コンクリート等の

ライニング材を設置して年間の損傷量の観測と研究が実施されている。

5) Paragnedra ダム

スイスの Paragnedra ダムの土砂バイパストンネル<sup>8)</sup>は 1977 年に建設されたが、翌年の 1978 年の大出水により、玄武岩のタイルでライニングされた水路底面が大きく損傷し、地山の岩盤まで侵食された。圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup> のコンクリートで補修が実施され、その後、レーザー計測による損傷のモニタリングが実施されている。

6) Runcahez ダム

スイスの Runcahez ダムの土砂バイパストンネル<sup>9)</sup>はダム建設の翌年の 1962 年に建設された。圧縮強度 40～70N/mm<sup>2</sup> のコンクリートでインバートが作られた。1960 年代後半に最初の損傷の報告があり、ほぼ毎年の修復が必要となっている。近年では、5 種類のコンクリート材料を設置して損傷の検討が実施されており、1995 年～2014 年にかけての損傷について、図-2 に示すような損傷量の結果が報告されている。

7) Solis ダム

スイスの Solis ダムの土砂バイパストンネル<sup>10)</sup>は 2012 年に建設された新しい施設である。トンネルの一部区間には、各種のライニング材料を設置した試験区間が設けられ、損傷の観測が実施されている。また、トンネル出口にはジオフォンを用いた土砂流量の観測の試みがなされている。

3. 河川構造物の土砂による摩耗・損傷量予測手法の検討

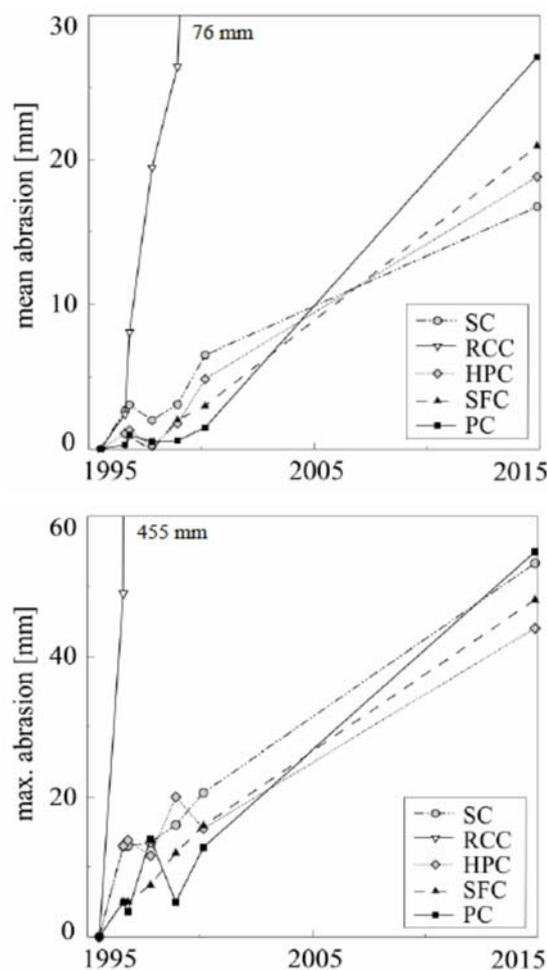
3.1 土砂バイパスを通過する土砂（礫）のモニタリング手法の検討

28 年度より試験運用が開始される予定の天竜川支川の小渋川に建設中の小渋ダム土砂バイパストンネルへの適用についても想定しつつ、土砂バイパストンネルを通過する土砂のうち 2mm 程度以上の礫が掃流形態で通過する量を把握することを目的として計測手法の検討を実施した。

掃流砂の計測手法の既往研究としては、京大穂高砂防観測所での観測など砂防分野で多くの検討が行われているハイドロフォン<sup>1)</sup>やスイスでのジオフォン<sup>2)</sup>などの研究事例がある。本研究では小渋ダム土砂バイパストンネルで想定されている高速流（最大 15m/s 程度）を考慮して、耐久性の高いプレート型センサ（プレートマイクロフォン）<sup>3)</sup>を用いた計測の検討を行った。

3.2 検討方法

実験装置の概要を図-3 に示す。給水用のポンプからの水流を高さ 0.2m×幅 0.5m の長方形の出口を持つノズルで



SC: Steel fiber concrete  
 RCC: Roller compacted concrete  
 HPC: High performance concrete  
 SFC: Concrete containing silica fume  
 PC: Polymer concrete

図-2 摩耗量の経年変化<sup>9)</sup>

整流し、高さ 0.5m、幅 0.5m、長さ 10m、勾配 1/50 の鋼製水路（底面はステンレス製）に通水を行った。水路の下流端に図-4 に示すプレート型センサを図-3 において水路底面に対する反時計回りの角度を 0° と 10° の 2 条件で設置した。プレート型センサは、長辺 0.5m×短辺 0.36m×厚さ 15mm の鋼製プレートと裏面に設置された 3 つのセンサから構成される。センサは、音響センサ（ハイドロフォン）と振動センサおよびジオフォン（スイスの土砂バイパストンネルで採用事例があるセンサ）の 3 つである。

実験では、通水を行った状態で上流端付近から単一の礫を水面付近から落下させる方法で投入し、センサから出力される電圧を 20 μs 毎（50kHz）に記録した。

実験に用いた礫の材料は小渋ダム土砂バイパストンネ

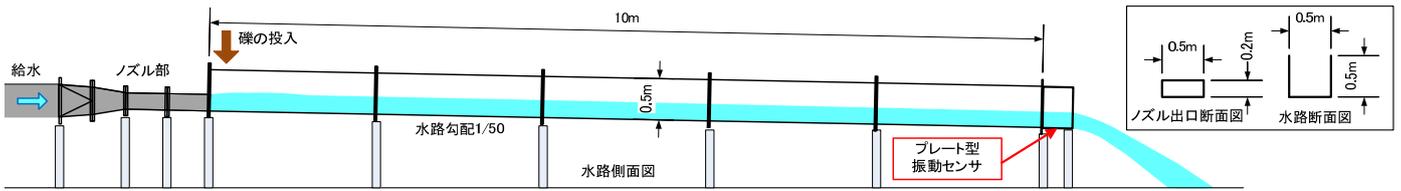


図-3 実験装置の概要

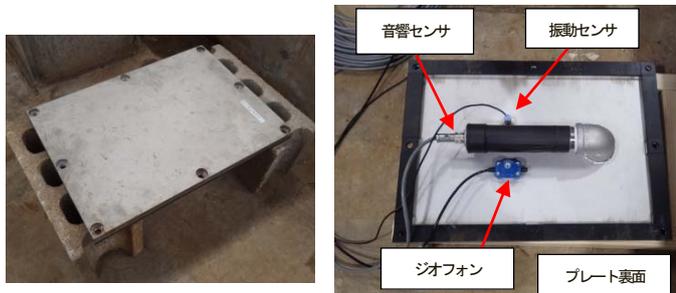


図-4 プレート型センサの概要

### 3.3 検討結果

実験装置に通水をした状態で、水路中央の水面形（目視による時間平均）を計測した結果、水面形はおおむね安定しているが、流速 10m/s の場合は、水脈の乱れや空気混入による水深の増加およびプレート設置角度が 10° の場合に下流端の水面の上昇がみとめられた。水路上流端からの距離 2m~8m の水深の計測値を平均して水流の平均流速を算定すると、上流端流速 5m/s の場合で 4.75m/s、10m/s の場合で 8.62m/s であった。

礫を流下させた際の計測結果の例として、ケース B-2-4 とケース B-2-6 の計測結果を図-5 に示す。時間軸は計測波形が立ち上がった時点を 0sec としている。ここに示した例以外の計測波形も確認した結果、波形の振幅と継続時間は、概ね粒径との相関がみられ、音響センサの結果にその傾向が顕著にみられた。振動センサは、小さい粒径にも反応し感度がよいが、小さい衝撃でも振幅が計測上限値に達してしまい、振幅から粒径の大きさを判別することは難しいと考えられる。ジオフォンは、振動センサの波形と似ているが、小さい粒径の場合の振幅が小さめになり、振幅の低減時間が長めとなる傾向がみられた。

50 回の試行の中で、上記のような波形の変化が認められた回数の割合を検知率と定義して、図-6 に各ケースの結果をまとめて示した。プレートの設置角度を 10° とすると、全体的に検知率が増加している。また、同じプレート設置角度では、流速が小さいと検知率が大きくなる傾向がみられその傾向はプレート設置角度 0° の方が顕著である。なお呼び粒径 2mm については、初めにプレート角度 10°、上流端流速 10m/s の条件で検討したところ、波形の変化がほとんど認められなかったため、他の条件では実施していない。しかしながら補足の実験で 2mm の土砂を 100g 投入すると、波形の変化が確認されたため、今後詳細な検討を行いたい。

表-2 実験に用いた礫材料の諸元

呼び粒径 (mm)	ふるい目サイズの上限と下限 (mm)	平均質量 (g)(注)	質量の標準偏差 (g)(注)	平均密度 (g/cm <sup>3</sup> )	一個当りの平均体積 (cm <sup>3</sup> )	平均体積を有する球体と仮定した場合の直径 (mm)
2	2.00~2.80	0.019	-	2.72	0.0070	1.96
5	4.75~5.60	0.261	-	2.67	0.0976	4.72
10	9.52~13.20	2.765	1.02	2.68	1.0308	10.35
20	19.1~22.4	15.591	3.92	2.66	5.8690	18.47
50	45~63	251.453	79.64	2.66	94.6839	46.68
100	90~100	1670.423	295.50	2.67	625.2399	87.58

表-3 実験条件

実験ケース	プレート設置角度	流量 (L/s)	水路上流端流速 (m/s)	呼び粒径 (mm)	試行回数 (回)
A-1-1	0°	500	5	5	50
A-1-2				10	50
A-1-3				20	50
A-1-4				50	50
A-1-5				100	50
A-2-1		1000	10	5	50
A-2-2				10	50
A-2-3				20	50
A-2-4				50	50
A-2-5				100	50
B-1-1	10°			500	5
B-1-2		10	50		
B-1-3		20	50		
B-1-4		50	50		
B-1-5		100	50		
B-2-1		1000	10		
B-2-2				5	50
B-2-3				10	50
B-2-4				20	50
B-2-5				50	50
B-2-6				100	50

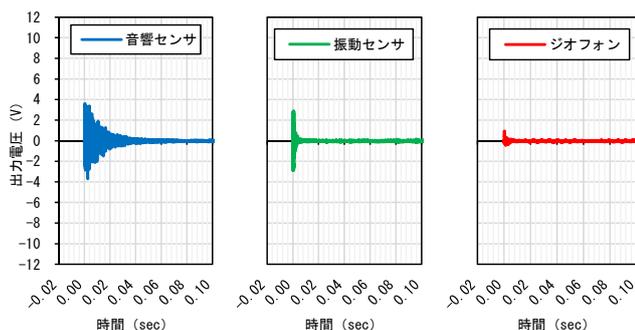
ルの流入部直上流付近の河床から採取した土砂をふるい分けし、表-2 に示す 6 つの一樣粒径とした。

実験ケースは、プレート型センサの設置角度と流量（流速）と粒径をパラメータに表-3 に示す 21 ケースとし、各ケースの同条件で 50 回の計測を実施した。

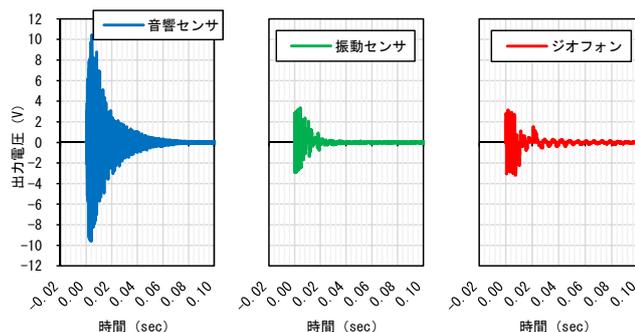
## 4. まとめ

### 4.1 ダム施設を主とした河川構造物の土砂による摩耗・損傷状況に関して得られた知見

第 1 回 土砂バイパストンネルに関する国際ワークショ



(a) ケースB-2-4の計測結果



(b) ケースB-2-6の計測結果

図-5 礫を流下させた際の実出力電圧計測結果の例

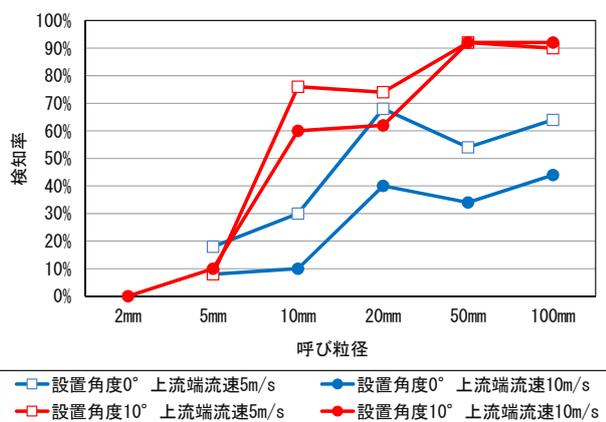


図-6 礫を流下させた際の実出力電圧による検知率

ップに参加することにより、世界の土砂バイパス施設の諸元等の概要を把握することができた。また、世界の中で日本とスイスが土砂バイパスの分野で先進的な国であることが確認され、日本とスイスの土砂バイパス施設の摩耗・損傷状況の知見を得ることができた。旭ダムの事例からは、コンクリート強度を大きくすることによって、損傷量が減少する傾向が確認され、スイスの Runcahez ダムの事例からは、コンクリートの種類による損傷状況が異なり、ローラーコンパクトドコンクリートと比較して各種の補強コンクリートは損傷量が大きく減少することが確認されている。

## 4.2 河川構造物の土砂による摩耗・損傷量予測手法に関して得られた知見

実験により高速流中を流下する礫のプレート型センサによる計測の基礎的な知見を得ることができた。プレート型センサは、粒径 100mm の礫が 10m/s 程度の高速流中で流下した場合にも問題なく出力電圧の計測ができた。音響センサは粒径が大きくなるに伴い、出力電圧の最大値が大きくなる傾向がみられた。振動センサは、小さい粒径にも反応し感度がよいが、小さい衝撃でも振幅が計測上限値に達してしまい、振幅から粒径の大きさを判別することは難しいと考えられる。ジオフォンは、振動センサの波形と似ているが、小さい粒径の場合の振幅が小さめになり、振幅の低減時間が長めとなる傾向がみられた。

プレートの設置角度を  $10^\circ$  とすると、 $0^\circ$  とした場合と比較して、検知率の増加がみとめられた。

## 4.3 今後の課題と研究の方向性

今後は、摩耗・損傷の予測手法を検討するために定量的な検証データを得ることが必要であり、摩耗・損傷状況の調査事例を増やすとともに、2016 年秋に完成予定の小渋ダム土砂バイパストンネルでの現地試験等を実施して、知見を蓄積したい。

また、掃流砂の計測手法については、通過土砂量を定量的に把握することを目標に、複数粒径や混合粒径の条件についての検討や出力結果の解析方法についての検討を進めたい。

## 謝辞

本研究の実施に際して、京都大学防災研究所の角哲也教授、小柴孝太氏のご助言、ご協力をいただき、また、実験に用いる石礫材料の採取においては、天竜川ダム統合管理事務所の皆様にご多大なご協力をいただいた。ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 堤大三, 野中理伸, 水山高久, 藤田正治, 宮田秀介, 市田児太郎: 掃流砂観測におけるプレート型ジオフォンとパイプ型 hidroフォンの比較, 京都大学防災研究所年報, (57), pp. 385-390, 2013.
- 2) Michelle Hagmann, Ismail Albayrak, Robert M. Boes: Field research: Invert material resistance and sediment transport measurements, Proc. Int. Workshop on Sediment Bypass Tunnels, VAW-Mitteilung 232 (R. Boes, ed.), ETH Zurich, Switzerland, pp. 123-135, 2015.

- 3) 小柴孝太, 角哲也, 堤大三: プレート型振動センサを用いた掃流砂量計測手法に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 72, No. 4, I\_925-I\_930, 2016.
- 4) Hiroshi Nakajima, Yusuke Otsubo, Yuji Omoto: Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam, 2)と同様, pp. 21-32, 2015.
- 5) Toshiyuki Sakurai, Keiji Kobayashi: Operations of the sediment bypass tunnel and examination of the auxiliary sedimentation measure facility at Miwa Dam, 2)と同様, pp. 33-44, 2015.
- 6) Josuke Kashiwai, Shuji Kimura: Hydraulic examination of Koshibu dam's intake facilities for sediment bypass, 2)と同様, pp. 45-53, 2015.
- 7) Bärbel Müller, Martin Walker: The Pfaffensprung sediment bypass tunnel: 95 years of experience, 2)と同様, pp. 247-258, 2015.
- 8) Andrea Baumer, Riccardo Radogna: Rehabilitation of the Palagnedra sediment bypass tunnel (2011-2013), 2)と同様, pp. 235-245, 2015.
- 9) Frank Jacobs, Michelle Hagmann: Sediment bypass tunnel Runcahez: Invert abrasion 1995-2014, 2)と同様, pp. 211-221, 2015.
- 10) Christof Oertli, Christian Auel: Solis sediment bypass tunnel: First operation experiences, 2)と同様, pp. 223-233, 2015.

## A STUDY ON THE DEVELOPMENT AND THE OPERATION METHOD OF THE SEDIMENT SUPPLY MEASURES FROM A DAM RESERVOIR CONSIDERING RIVER ENVIRONMENT

**Budget** : Grants for operating expenses (General account)

**Research Period** : FY2015-2019

**Research Team** : River and Dam Hydraulic Engineering  
Research Team (Hydraulic Engineering  
Research Group)

**Author** : ISHIGAMI Takayuki

MIYAWAKI Chiharu

SAKURAI Toshiyuki

**Abstract** : From the viewpoint of lengthening the life of the reservoir and conserving the river environment downstream from the dam, sediment flushing facility, sediment bypass facility, flood discharge facility of stream type flood control dam (dry dam), and so on are installed and operated as a facility to supply sediment from the dam to downstream. These facilities are at risk of abrasion and damage due to gravel flowing down at high speed. Therefore, in this research, we aim to grasp the abrasion and damage situation of river structures mainly dam facility due to sediment and to propose methods of predicting abrasion and damage amount, measures against damage and maintenance method. In FY2015, we gathered information on the abrasion and damage situation of river structures and organized their knowledge. And we investigated the measurement method aimed at grasping the amount of bed load about 2 mm or more particle size flowing down the river structure at high speed.

**Key words** : river structure, sediment bypass tunnel, dam reservoir, abrasion and damage, plate type sensor