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 STUDY ON BEDLOAD MEASUREMENT BY PLATE-TYPE VIBRATION

SENSOR

小柴孝太1·角 哲也2·堤 大三3 Takahiro KOSHIBA, Tetsuya SUMI and Daizo TSUTSUMI

1学生会員 学士(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
2正会員 博士(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)
3正会員 博士(農)京都大学防災研究所流域災害研究センター(〒506-1422高山市奥飛騨温泉郷中尾436-13)

Measuring the bedload transport rate is utmost interest to understand and quantify all sediment transport related phenomena. Three existing bedload measuring systems are 1) the hydrophone, 2) the geophone, and 3) the plate microphone as their modified system. All systems estimate transport rate based on sediment impact, whereas each has respective disadvantages. In this paper, as the other improved system, plate-type vibration sensor is discussed. Calibration experiment is conducted and the system is compared with the other plate hydrophone. In the experiments, impact data is perceived as both vibration pressure and vibration pulse, and analyzed the same as plate microphone. Although it has been clarified that fine sediments lower than 10 mm are not detectable with plate hydrophone, plate-type vibration sensor detected vibration pulses of them clearly. Moreover, detection rate can be linked to the sediment bulk density and the gravel jump length.

Key Words : plate-type vibration sensor, bedload measurement, flume experiment, grain size

1. はじめに

日本には約3,000箇所のダムが所在するが、堆砂 問題が顕在化しており, 適切な貯水池土砂管理手法 の開発が急務である. その中では、上流から流下す る土砂をダム下流へとバイパスさせることにより貯 水池内の堆砂を防止する排砂バイパストンネルは世 界の中で日本とスイスがリードする最先端技術であ り、日本においては、新宮川水系旭ダム、天竜川水 系美和ダム等で実施されており、同じ天竜川水系の 小渋ダム,松川ダムでも導入が進められている.し かし、トンネル内部の土砂動態をどのように把握す るのかは未確立であり特に、長期的な維持管理に直 結するトンネルインバートの摩耗対策を進めるため には、トンネル内部の水理特性と土砂輸送機構の解 明が必須である.また、ダム下流に排出された土砂 がその後の洪水でどのように輸送されるかは、河道 の治水および環境管理の両面で重要事項である.土 砂の輸送機構のうち、 ウォッシュロードや浮遊砂に ついては、濁度計を用いてその動態が把握されてき ている一方、掃流砂の現地観測は極めて難しいのが 現状である.

これまで掃流砂に関しては、例えばハイドロフォ ンを用いた観測が京大穂高砂防観測所などで実施さ れてきている¹⁾. ハイドロフォンは鋼製パイプ内に マイクロフォンを導入し、砂礫の衝撃を発生する音 圧とパルスで計測するものである.これに対して, 日本と同様な山岳河川を有するスイスにおいては, 鋼製プレートに振動センサを設置したジオフォンが 開発され、スイスのSolisダムの排砂バイパストンネ ルに導入され、平成25年より観測が開始された2). ハイドロフォンは、2mm程度の粒径から感知が可 能であり、小粒径に対する感度が高いといえる一方, 大粒径の砂礫が衝突した際にパイプが変形してしま い、正確な計測が困難になるという脆弱性を持って いる.これに対して、ジオフォンは巨石の衝突に対 して変形しにくいという長所があるものの、検知可 能な最小粒径が1cm程度とされ、感度の低さが欠点 となっている.

そこで、これらの長所と欠点を鑑みて著者らはプレートマイクロフォンを提案した.プレートマイクロフォンを提案した.プレートマイクロフォンはジオフォン同様の鋼製プレートマイクロフォンを設置した装置であり、計測原理はマイクロフォンに則っている.プレートマイクロフォンは、

高感度と巨石に対する強度を併せ持つことを想定し て提案され、人工水路を用いたキャリブレーション 実験を行った³⁾. その結果、高流速による掃流砂量 の計測可能性は明らかになってきているものの、現 段階ではマイクロフォンに迫る細粒土砂までの感度 の高さは確認されていない. そこで、新たに掃流砂 量計測手法として提案された鋼製プレートにジオ フォンとは異なる原理の振動センサを設置し、この プレート型振動センサに関するキャリブレーション 実験を行った.本研究では当実験結果をもとに、プ レート型振動センサの基本的な特性を明らかにし、 従来の計測手法との比較を行う.

2. 検討方針

本研究ではプレート型振動センサによって計測される振動値の基礎的な性質を検証するため、プレー トマイクロフォンと同条件、同解析でのキャリブ レーション実験を行った.振動センサによって計測 されるデータは、プレートマイクロフォンと同じく 以下の3項目であり、これらの計測結果を用いて比 較を行う.

- (1) 生波形:土砂の衝突により生じた振動(プレートマイクロフォン,ハイドロフォンの場合は音)を電圧に変換し,波形として表したもの.
- (2) パルス数:電圧値に関して6段階の閾値を設定し、その値を越える値の数をカウントした数.
- (3) 電圧平均値:電圧値の一定時間毎の時間平均 値.

パルス数は生波形に現れたピークの数であり、衝 突した礫の数に比例すると考えられる.しかし、プ レートマイクロフォンを用いた実験では、衝突礫数 が多くなるに伴いピーク同士が干渉しあうことに よってピーク数が過小評価されることがわかった4. そこで、礫が衝突した際のエネルギーをより正確に 反映する値として波形の時間積分値が提案された。 これは一定間隔でサンプリングされている電圧値を 単位時間(10秒)間隔に区切って平均値を求めたも のである.しかし、電圧平均値においても、衝突礫 が重複するにつれ衝突礫数との比例関係よりも減少 することがプレートマイクロフォンに関して明らか になっており、このような特性についてプレート型 振動センサについても検証する.また、比例関係か らの減少を説明するパラメータとしてパルス数を用 いた検出率5を導入し一定の関連性を確認したが, 本研究においても同様にプレート型振動センサにお ける検出率の有効性についても確認を行う.

3. 実験方法

(1) プレート型振動センサ

プレート型振動センサは間接的に掃流砂量を計測



図-1 実験水路に設置されたプレート型振動センサ

表-1 実験材料諸元

Grain Size (D:)	B-axis [mm]	Average Weight [g]			
2 mm	2.00-2.36	3.2 of 200 particles			
5 mm	5.00-6.00	14.3 of 100 particles			
10 mm	10.0-12.0	2.1			
50 mm	45.0-55.0	159.2			
100 mm	95.0-105.0	2937.6			



図-2 実験に使用した礫(D_s=100mm)

する手法であり、従来の計測手法であるジオフォン と異なる周波数特性をもつ振動センサを用いている. 本実験で使用した振動センサはKEYENCE社のGA-313A(応答周波数40~8kHz)また、変換器として 同社GA-223(応答周波数100~8kHz)を用いている. よって双方を考慮した応答周波数は100~8kHzとな る.振動センサは厚さ2cm、長辺49cm、短辺36cm の鋼製プレートに内蔵されている(図-1参照).一般 的に、短辺に平行な方向に流水があるように設置さ れ、本実験でも流路と短辺が平行となるよう実験用 水路に設置した.

(2) 実験材料

実験に用いる石材には、2mm、5mm、10mm、 50mm、100mm、5種類の粒径の礫を用いた. それ ぞれの粒径と平均重量は表-1に示す通りである. 平 均重量より計算した50gあたりの粒子個数は粒径 2mmは3125個、粒径5mmは350個である. また、礫 の密度は2.7g/cm³である. 実験材料の礫の形は様々 であり、図-2の例にあるように、球形に近いものか ら扁平なものまで多様である.

(3) 実験水路

本実験はスイス連邦工科大学チューリヒ校(ETH) 水理・水文・氷河学研究所(VAW)の人工水路を用



図-5 電圧平均値の計算過程

	Flow		Sediment	
Case	Q	V	Ds	W
No.	[m ³ /s]	[m/s]	[mm]	[g]
1	0.10	2.5 (Low)	2	50
2	0.10	2.5 (Low)	5	50
3	0.10	2.5 (Low)	10	50
4	0.10	2.5 (Low)	50	20stones
5	0.10	2.5 (Low)	100	20stones
6	0.18	4.5 (High)	2	50
7	0.18	4.5 (High)	5	50
8	0.18	4.5 (High)	10	50
9	0.18	4.5 (High)	50	20stones
10	0.18	4.5 (High)	100	20stones

表-2 実験条件

いて行った.実験水路の諸元は図-3に示す通りである.全長8.00m,幅0.50m,高さ0.60m,底面はコン クリート,また側面はガラス製の水路でありプレー ト型振動センサは上流から7.56mの地点に設置され ている.上流のポンプから水が供給され,下流プ レート型振動センサ直下には排水口及び礫の集石 ネットが設置されている.勾配はなく,流速は上流 側のジェットボックスにより水路断面積を変化させ ることにより調節する.

実験では、まず、ジェットボックスを用いて実験 条件の流速の流水を流し、ジェットボックス直下よ り礫を投入した.投入時よりデータロガーを作動さ せ、プレート型振動センサに衝突した礫のエネル ギーが電圧値としてロガーに記録した.

(4) 記録方法

全ての実験において、計測された衝突エネルギー は生波形、パルス数、電圧平均値の3通りのパラ メータである.それぞれの計測原理を以下に示す.

a) 生波形

礫の衝突による電圧は20μs毎に計測され,波形 データとして記録された.図-4は記録波形データの 例であり,縦軸が電圧値,横軸が時間である.

b) パルス数

生波形データの絶対値を用いてパルス数を求めた. パルス数は電圧値に一定の閾値を設定し、その値を 超過した電圧値の数を勘定した値である.具体的に は、生波形の絶対値を2倍、4倍、16倍、64倍、256 倍、1024倍の6段階に増幅しそれぞれ2Vの閾値を超 える電圧値の数をパルス数として勘定した.パルス 数は、礫の衝突の重複がない場合に衝突エネルギー に比例し、またそれぞれの増幅率に応じて衝突礫サ イズが推定できると考えられる.すなわち、小さな 礫は衝突エネルギーも小さいので、高増幅しなけれ ばパルスとして数えられないが、大粒径の礫が衝突 した場合は低増幅率でもパルスとして現れる.

c) 電圧平均值

電圧平均値は、図-5に示された手順で計算された. まず、計測された波形データは絶対値変換され、バ ンドパスフィルタを用いて特定周波数帯のデータの みが抽出される.その波形の振幅データのみ(包絡 線)を抽出し、電圧値とした.この電圧値の時間平 均値(本実験では10秒間)を電圧平均値とした.

(5) 実験条件

本実験の実験条件を表-2に示す.水深は一定 (0.08m)に保たれ,流速V及び流量Qは高流速 (4.5m/s)と低流速(2.5m/s)2種類が用いられた. ただ,一般的に排砂バイパストンネル内の土砂流下 流速は10m/sを越え⁰,十分であるとは言えないが, 流速の違いによる特性の比較を行うことができた. Wは投入土砂量であり,粒径2mm,5mm,10mmの 礫については50gを量り投入した.また,粒径 50mm,100mmについては各20個を,それぞれの実 験において重量を計測して投入した.これらを踏ま え,それぞれのケースについて50回ずつ,合計500 回の実験を行った.

4. 実験結果及び考察

(1) 実験結果

a) 生波形データ

図-6, 図-7の下段の波形は計測した衝突データ の一例である.図-6はCase10(粒径100mm,高流速 4.5m/s)の結果,図-7はCase6(粒径2mm,高流速 速4.5m/s)の実験結果である.



図-7 Case6生波形(粒径2mm, 高流速4.5m/s)

また、参考としてそれぞれ上段にはプレートマイク ロフォンの同条件での実験結果を示している.これ より、振動センサの結果はマイクロフォンによる波 形と比べてピークが鋭く明確である.また、Case6 の粒径2mmの実験結果を比べると、プレートマイ クロフォンでは波形が流速のノイズに隠れているの に対し、振動センサでは明確にピークを示している.

b) パルス数

図-8に全実験における増幅率別のパルス数の結果 を示す.(a)が低流速実験,(b)が高流速実験である. これらより,増幅率が増大するにつれパルス数も増 大することが明らかである.増幅率16倍以上では, 平均パルス数の大きさの順が10mm<5mm<2mm< 50mm<100mmとなっている.これより,10mm以下 では礫の投入個数がパルス数に大きく反映され, 50mm以上では,礫1つあたりの衝突エネルギーの 影響が卓越して反映されていると考えられる.

c) 流砂量と電圧平均値の関係性

図-9に実験より得られた流砂量と電圧平均値の関 連性を示す.(a)は低流速実験,(b)が高流速実験で ある.これらより粒径が大きくなるに連れ1mVから 1000mVまで幅広く電圧平均値が増大している.た だし,粒径2mm及び5mmでは,ほとんど0mVに近 く,検出できていない.50mm以上では,大きくそ れぞれの粒径のグループにわかれた.10mmとその 他の区別は付いているが,50mmと100mmでは明確 な差がでておらず,波形が干渉し飽和していると予 測される.これらの結果は,プレートマイクロフォ ンを用いた実験結果と大きな差異は見られなかった.

(2) 実験結果の分析

a) 検出率

全投入礫数に対しどの程度のパルスが検知された かを明らかにするために、検出率R_dを導入した.検 出率は検知されたパルス数を投入土砂数で除した 値である.図-10は検出率と増幅率の関係を表して おり、(a)は低流速実験、(b)が高流速実験である.



図-8 パルス数と増幅率の関係. (a)低流速実験 (2.5m/s), (b)高流速実験(4.5m/s)



増幅率を大きくするに伴い検出率も単調に増加している.小粒径(2mm,5mm)については増幅率2,4倍では極めて低い検出率であるが,中高増幅率では大粒径と類似性のある明確な単調増加がみられ,衝突が検知できていると考えられる.これらの関係性は高流速,低流速共に見られ,検知可能な最低増幅率は16倍程度である.

高流速,低流速を比べると低流速の結果の方が全体的に大きな値となっている.これは,低流速であるほど1つの礫が複数回プレートに衝突する可能性が高くなるからと考えられる.実際,単一礫を流下, 衝突させると複数回の衝突が起きることが生波形から確認されている.そこで,衝突回数はプレート上に石が存在する時間に比例,つまり流速の逆数に



図-10 検出率と増幅率の結果 (a) 低流速 (b) 高流速



図-11 低流速実験結果を低流速に対する高流速の 比で除した値と高流速実験結果との比較

比例すると仮定し,低流速実験結果を低流速に対す る高流速の比1.8で除した値と高流速実験結果とを 比較した(図-11参照).これにより,増幅率16倍 以上では概ね双方の値が一致していることがわかる. しかし,2種類の流速だけでは十分な結果とは言え ず,今後より多様な流速で実験を行い確認する必要 がある.

b) 飽和度

検出率を定量的に算出することが可能であれば, 実験結果と算出された検出率を用いてプレート上を 流下した土砂量を再現することが可能である.そこ で検出率の定量化を目的とし,これに関係するパラ メータとして飽和度を設定した.飽和度は一度にプ レート上を流れる土砂の密度を表し,この値と検出 率は負の相関を持つと仮定できる.そこで,その密 度を表す指標として飽和度Rsを導入した.飽和度は 以下の式で求められる.

$$R_{s} = \frac{\Delta t \times P_{n}}{T}$$
(1)

ここに、 Δt :単一礫の衝突によって生じるパルスの時間幅、 P_n :一度の実験での投入礫数、T:一度の実験での、1つ目の礫の衝突から最後の衝突までの間の時間である. 図-12に各パラメータを図示する.

図-13に粒径50mm,低流速における飽和度の計算結果を示す.この結果より,増幅率1024倍では明確な検出率と飽和度の反比例性がみられるが,その他の増幅率では不明瞭であった.これは,生波形データからもわかるように,プレートマイクロフォンによる波形はピークの減衰が緩やであるのに対し,プレート型振動センサの波形はピークが鋭く,減衰も早いことが原因と考えられる.



図-13 飽和度と検出率の関係(粒径50mm,低流速) 増幅率は(a)1024倍(b)256倍(c)64倍(d)16倍

c) 衝突率

飽和度の他に検出率を左右するパラメータとして, 流下する礫の飛躍長に関係する衝突率が挙げられる. ここでは,これらの飛躍長を考慮した衝突率を以下 の式⁷に則り計算した.

$$\frac{L_{p}}{Ds} = 251\theta \tag{2}$$

ここに、 L_p :飛躍長、 D_s :礫の粒径、 θ :シールズ 数であり、シールズ数は以下の式で求めた.

$$\theta = \frac{\tau_{\rm b}}{\rho G_{\rm s} {\rm gDs}} \tag{3}$$

ここに、 G_s : 礫の比重、g: 重力加速度、 τ_b は以下の式で計算した.

$$\tau_{\rm b} = \rho u_*^{\ 2} \tag{4}$$

ここに, ρ: 水の密度, u_{*}: 摩擦速度でありここで,

$$u_* = \sqrt{ghi_h} \tag{5}$$

 $i_b: 水路勾配(本実験では水路勾配がないためエネ$ ルギー勾配を用いている)である.これらをもとに、 $衝突率<math>P(L_p)$ を

$$P(L_p) = \frac{B}{L_p}$$
(6)

で計算した. ここで, Bはプレート長である.

図-14に増幅率256倍における検出率に対する衝突率の計算結果を示す.図よりどの粒径においても流速が大きくなると衝突率が減少していることがわかる.これは、流速が速いほど飛躍長が大きくなり、 プレートに衝突する確率も低くなるので、それに伴い検出率が減少することを示している.



図−14 増幅率256倍における検出率と衝突率の関係

5. 結語

本研究では新たな流砂量計測装置として提案され たプレート型振動センサの高流速下でのキャリブ レーション実験を行った.電圧平均値については既 存のプレートマイクロフォンによる実験結果と大き な差異は現れなかったが、生波形及びパルス数の結 果より、粒径2mm程度の小粒径への適用の可能性 を示すことができた.また,飽和度,衝突率と検出 率との関係について一定の方向性を明らかにするこ とができた. 今後, 実験結果から掃流砂量を再現す ることを目指すに当り、さらなる実験を通して飽和 度や衝突率から定量的に検出率を算出する手法を提 案することが必要である. プレート型振動センサ及 びプレートマイクロフォンは平成28年度より運用が 開始される長野県小渋ダムの排砂バイパストンネル 出口に設置される予定となっており、 今後は、 現地 での土砂流下実験も併せて行うことにより、実機で のキャリブレーションを進める予定である.

謝辞:本研究では、スイス連邦工科大学チューリヒ 校(ETH)水理・水文・氷河学研究所(VAW)より実験 水路の提供を受けた.また、本研究はJSPS科研費 26257304および国土交通省河川砂防技術開発地域課 題研究の助成を受けた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1)堤大三,野中理伸,水山高久,藤田正治,宮田秀介, 市田児太朗:掃流砂観測におけるプレート型ジオフォ ンとパイプ型ハイドロフォンの比較,京都大学防災研 究所年報,(57), pp. 385-390, 2013.
- 2) Hagmann, M., Albayrak, I. and Boes, R.M.: 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,竹門康弘,堤大三: Flume Experiment on Bedload Measurement with a Plate Microphone,京都大学防災研究所年報B= Disaster Prevention Research Institute Annuals, B 58, 2016.
- 4) 鈴木拓郎,水野秀明,小山内信智,平澤良輔,長谷川祐治: 音圧データを用いたハイドロフォンによる掃流砂量計測手法に関する基礎的研究,砂防学会誌,62(5), pp.18-26,2010.
- 5) 堤大三, 平澤良輔, 水山高久, 志田正雄, 藤田正 治: 山地流域における音響法を用いた流砂量観測, 京都 大学防災研究所年報 B= Disaster Prevention Research Institute Annuals, B 53(B), pp. 537-544, 2010.
- 6) Auel, C. and Boes, R.M.: Sediment bypass tunnel design review and outlook, Proc. ICOLD Symposium Dams under changing challenges (A.J. Schleiss & R.M. Boes, eds.), 79th Annual Meeting, Lucerne. Taylor & Francis, London, UK, pp. 403-412, 2011.
- Auel, C.: Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels.Doctoral dissertation, ETH Zürich, No. 22008, 2014.

(2015.9.30受付)