

京都大学	博士（工学）	氏名	小柴 孝太
論文題目	Improvement of Signal Analysis for Surrogate Bedload Monitoring at Sediment Bypass Tunnels (排砂バイパストンネルにおける掃流砂間接計測のための信号解析手法の高度化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本研究は、ダムの堆砂対策として有力な排砂バイパストンネル (SBT) を通過する掃流砂の流下特性を間接的に計測する手法としてのインパクトプレートの信号特性を明らかにし、その計測精度を高めるための信号処理技術の提案とトンネル実運用への適用性について研究を行ったもので、全体7章で構成されている。</p> <p>第1章では、論文の背景、研究目的および論文構成を解説している。研究目的として、ダムの堆砂対策の重要性およびその対策としての SBT の位置付けについて紹介し、次に、本研究の主テーマであるトンネル底面の摩耗問題と、これに関連するトンネル内の掃流砂量のモニタリングの重要性について説明している。</p> <p>第2章では、ダムの堆砂対策の類型化、その中での SBT に関する世界の現状と課題、トンネル底面の摩耗量予測に関する既往の研究、さらに本研究でフィールドとした天竜川小渋ダムの SBT の技術的特徴について説明している。SBT 内には、本研究で対象とする掃流砂計測用のインパクトプレートが SBT の出口付近に横断方向に5セット設置されており、その信号記録の詳細を解説している。</p> <p>第3章では、掃流砂の間接計測法の一般的な原理について解説し、スイスおよび日本で開発・発展してきた既存の計測システムの類型および取得されたデータの分析方法についてレビューを行っている。特に、計測媒体としてのプレート/パイプ、インパクトの記録媒体としてのマイク/振動計 (Geophone を含む) の特性について概説している。その上で、本研究で対象とした、計測感度と靱性を高めるために開発された新しいデバイスであるインパクトプレートの特性を概説している。</p> <p>第4章では、本研究の手法のうち、流砂を用いた検証実験として、スイス連邦工科大学 (ETH) および (独) 土木研究所で行った屋内水路実験、さらに、小渋ダムの SBT 内に人工的に置き土を行って清水を流下させて行った野外実験の計画とデータ計測手法について概説している。次に、インパクトプレートから得られたデータの信号処理の体系的なプロセスである、信号のノイズ除去、特性値抽出、統計解析について説明している。</p> <p>第5章では、ノイズ除去と特性値抽出のために利用可能な分析手法について論じている。ここでは、非周期性や急激な信号変化の特性を考慮し、信号のノイズを除去するために離散ウェーブレット変換 (DWT) を適用している。特性値抽出は、日本で多く使用されているインパルスカウント法を継承し、対象の計測データは、屋内水路実験および野外実験を通じて得られたものを用いている。その上で、インパクト信号をもとに衝突した粒子の粒径を区別するための分析手法として、通常のフーリエ変換を用いたフィルタリングよりも DWT が効果的であることを、PCA 解析によって可視化して示すことに成功している。</p> <p>第6章では、抽出された特性値を流砂量と粒径分布に変換するために、ガウス過程 (GP) を用いた</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	小柴 孝太
------	---------	----	-------

統計分析手法を提案している。GP の顕著な利点は、表現力と解釈性が高いことであり、提案したモデルは、従来の単純な線形回帰よりもはるかに優れたパフォーマンスを発揮し、さらに、GP の高い解釈可能性により、水路実験および野外実験のデータから実際の SBT 操作時のデータへの外挿が可能になることを実証的に示している。これを用いて、インパクト信号をもとにした粒子の粒径および掃流砂量の予測手法について論じており、さらに、高流速になるほど粒子がプレートを飛び越えてしまう確率が上がることから、Auel の提案した粒子の跳躍距離を用いることで予測精度向上を図っている。

第 7 章では、これまでに提案した分析手法を小渋ダム SBT に適用した結果について論じている。小渋ダムでは、2016-2018 の 3 年間に合計 8 回の SBT の運用実績があり、洪水ハイドログラフに応じた SBT 内の流砂量の時間的变化、さらに SBT 内の流砂量と平均粒径の横断的变化の分析を行っている。ガウス過程 (GP) を用いることで、プレートを通過した流砂量と平均粒径の推定値の平均に加えて、その標準偏差を求めることに成功している。推定された平均粒径は概ね 100mm 以下であり、特に粗い粒径はトンネル入口上流側が開水路流になる条件でトンネル内に流入していることを明らかにした。また、横断方向特性については、トンネルに流入する流量が大きい場合に、洪水ハイドロのピーク付近では、流下する粒径が比較的細かいものが多く、二次流の影響が強いためにトンネル曲線部の内側に流砂が偏ることを示した。一方、トンネル入口上流側が開水路流になる洪水ピーク後には、比較的粗い土砂多く、二次流の影響が弱いためにトンネル中央部に流砂が集中することを示した。

第 8 章では、本研究で検討したインパクトプレートで得られた信号の処理手法について、総括的な討議を行っており、離散ウェーブレット変換は通常のフーリエ変換によるローパスフィルタよりも高い信号ノイズ処理特性を発揮し、ガウス過程 (GP) を用いた統計分析手法は、抽出された特性値を流砂量と粒径分布に変換するために極めて有効であることを示している。

第 9 章では、本研究の主要な結論をまとめるとともに、今後の課題について整理を行っている。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、ダムの堆砂対策として有力な排砂バイパストンネルを通過する掃流砂の流下特性を間接的に計測する手法としてのインパクトプレートの信号特性を明らかにし、その計測精度を高めるための信号処理技術の提案とトンネル実運用への適用性について研究を行ったもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ダムの堆砂対策として有力な排砂バイパストンネルにおいては、コンクリート底面の摩耗問題が重要であり、その対策のためには掃流砂量の観測が重要である。本研究で用いたインパクトプレートによる掃流砂の間接計測法は、十分な長期安定性と計測感度を有しており、小渋ダムを対象にそのデータ取得と分析を実証的に行うことに成功した。
2. インパクトプレートから得られたデータの信号処理のプロセスは、信号のノイズ除去、特性値抽出、信号統計解析に体系化され、それぞれのプロセスに着目して既往研究のレビューを行った。その結果、特性値抽出の改良に関する研究事例は多いものの、信号のノイズ除去と信号統計解析に関するものは限定的であった。
3. インパクトプレートから得られた信号のノイズ除去手法として、非周期性や急激な信号変化の特性を考慮し離散ウェーブレット変換 (DWT) を適用し、特性値抽出は、日本で多く使用されているインパルスカウント法を継承し、屋内水路実験および野外実験を通じて得られたデータの分析に成功した。
4. 抽出された特性値を用いて、流砂量と粒径分布に変換するための新たな統計分析手法として、ガウス過程 (GP) を用いたモデルを提案した。その結果、従来の単純な線形回帰よりもはるかに優れたパフォーマンスを発揮し、さらに、GP の高い解釈可能性により、水路実験のデータから実際の SBT 操作のデータへの外挿が可能になることを実証的に示すことに成功した。このモデルは、SBT やさまざまな自然河川において一般的に適用可能であると期待される。
5. この GP を用いたモデルを小渋ダム SBT に適用した結果、これまで未解明であった SBT 内の土砂輸送の時空間的な動態を明らかにすることに成功し、推定された掃流砂と摩耗の SBT 内の分布形状は、他の SBT で観測されているものと良好に一致していることを示した。

以上のように、本研究は、これまで詳細な検討が困難であった、間接的掃流砂計測手法のデータ分析方法について、ノイズ除去、特性値抽出の観点、さらには、得られたデータから土砂輸送の実態解明までを系統的に研究したもので、今後の排砂バイパスを用いたダムの堆砂対策の進展に大いに貢献し、水工計画学術上、實際上寄与することが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 2 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、(令和 3 年 2 月 28 日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。