氏　　名	MD. SHAHNEWAZ ISLAM CHOUDHURY
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第 248 号
学位授与年月日	平成 30 年 9 月 21 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	ESTIMATION OF SCOUR DEPTH FOR A BALANCED CANTILEVER BRIDGE WITH CENTRAL HINGE BASED ON NATURAL FREQUENCIES （固有振動数に基づく有ヒンジラーメン橋における洗掘深さの推定）
論文審査委員	委員長　教　授　松本　泰尚 委　員　教　授　奥井　義昭 委　員　教　授　牧　　剛史 委　員　教　授　齊藤　正人

論文の内容の要旨

Scouring around bridge piers is one of the primary causes of bridge failures in the United States and around the world. After construction, the assessment of scour during the service life of the bridge remains an important part of bridge maintenance scheme. In-situ scour depth measurement using bathymetric technique or diver inspection around a bridge foundation is often inaccurate due to vicinity of the bridge pier or dangerous due to turbulence and some depth measuring instruments cannot be used conveniently due to relative cost, susceptible to debris damages because of underwater installation. In this context, the estimation of scour depth around bridge pier using dynamic properties of bridges identified from vibration measurement at superstructure has come up as promising methods. To the authors' knowledge, field testing of real balanced cantilever bridges of the central hinge type has yet to be performed to estimate the scour depth using vibration data. To this end, this study investigated scour estimation based on natural frequencies for an existing multi-span pre-stressed concrete box girder balanced cantilever bridge having an actual scour problem in soft soil. The field condition was more complicated due to the deteriorated performance of the central hinges. A systematic assessment scheme has been proposed, verified and discussed for a bridge with no prior structural health monitoring data.

Some important outcomes are noted in this study. The vibration time history data measured from the top of the pier location under field conditions were sensitive to scour. Scour was found to increase the time period of the free vibration of the time history data and shift the natural frequency under the 'with-scour' condition compared to the signal under the 'no-scour' condition due to a loss of pier stiffness. The transverse bending mode of pier (TBP) mode can be used to detect the presence of scour by comparing the natural frequency with an adequate benchmark. The scour depth was reasonably estimated from the natural frequencies of the TBP mode identified from the vibration measurements at the superstructure in combination with the Finite Element (FE) model results. The effects of the deteriorated central hinges, through which adjacent structural sections (SECs) were dynamically coupled, are considered. The estimated scour

depths were in reasonable agreement with independent bathymetric surveys. Significant effects of the soft soil condition on the estimation of scour depth were examined via comparison between soft soil, hard soil and fixed soil conditions in the considered soil-structure interaction model.

The results demonstrated the possibility of using the proposed methodology for estimating scour depth considering only a single SEC and a few sensors, especially for balanced cantilever bridges with central hinges. The outcomes of the present study supplement the insufficient evidence regarding the applicability of scour depth estimation based on natural frequencies obtained through vibration measurements at the superstructure to real scoured bridges in the literature. Nonetheless, the field verification of the proposed approach justifies merit for application to other balanced cantilever bridges with central hinges, preferably those already constructed because of its simplicity in structural design. The approach can be used to estimate the possible range of scour depth during devastating flood periods before performing any expensive, as well as dangerous due to turbulence, in situ scour depth measurement techniques. Further direct field validations, if possible in the future, can shed light on the sensitivity and reliability of the proposed scheme.

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会が平成30年8月8日に実施した論文発表会、およびそれに先立って行われた学位論文審査委員会各委員による個別の論文審査における、当該学位論文の審査結果を以下に要約する。

当該学位論文は、河川敷内に設置された橋梁の橋脚・基礎の周辺で発生する洗掘を、橋梁の振動特性を利用して検知し、さらに洗掘深さを推定することをテーマとしている。橋脚やその基礎周囲の支持地盤が洗掘されると、橋脚・基礎が沈下や傾斜、転倒などの構造安全性に関わる影響を受けることがあり、また下部構造が洗掘の影響を受けた場合、橋梁上部構造にも変形等の影響が生じ得るため、車両等の通行が出来なくなる場合もある。しかし、水中部に設置されている橋脚や基礎を対象とした洗掘状況の調査はコストが高く、調査員の安全性の観点からも問題がある。また、開発途上国においては、調査員の技術不足などの理由により調査自体が難しい場合も多い。本論文は、比較的容易に実施可能な供用中の橋梁に生じる振動の上部構造における計測により同定できる固有振動数に基づいて、洗掘深さを推定する手法について、かつて数多く建設され、開発途上国にも多く存在する有ヒンジラーメン橋を対象に検討している。有ヒンジラーメン橋を対象とした理由は、洗掘が進んでいた実際の橋梁での振動計測の機会が得られたことにもよる。

当該学位論文は、6章で構成されている。

第1章は、上述のような研究の背景と目的を述べている。

第2章は、関連する既往研究のレビューを記述している。まず、洗掘による橋梁の損傷や崩壊の過去の事例、および学位申請者の母国であるバングラデシュのベンガル扇状地の洗掘が生じやすい特性について述べた後、現行の洗掘調査手法についてまとめている。つぎに、振動特性を利用した構造ヘルスモニタリングについて概観した後、振動特性を利用した洗掘状態の推定に関する既往の研究について述べている。その中で、橋脚・基礎周囲に洗掘が生じると、支持地盤が一部失われるため、橋脚や杭基礎の曲げ変形を含む振動モードの固有振動数が低下することは、模型実験や数値解析による既往の研究において確認されていることを述べている。さらに、近年、振動特性同定のための振動計測において、重錘による打撃や大型加振装置の利用などの特別な加振を必要としない、車両走行等により生じる振動を利用する方法に関しても検討が行われた事例があることが報告されている。一方で、振動特性を利用した橋梁における洗掘の状態推定手法の適用性や妥当性を、振動特性に関する不確定要素の多い実際の橋梁で示した例は限られており、この手法の研究開発は初期段階にあるとの指摘があることも示されている。特に、本論文で対象としている有ヒンジラーメン橋は、橋脚・基礎に片持ち構造の橋桁が両側に張り出す形で剛結されたT字形の構造体が、中間ヒンジを介して、隣接する同形式の構造体と動的に連成する構造システムであるため、ある特定の橋脚・基礎に生じる洗掘が構造システムとしての橋梁の固有振動数に与える影響は明確ではない。これらを踏まえて、研究を進めたことが述べられている。

第3章は、実在する有ヒンジラーメンプレストレストコンクリート（PC）橋で実施された振動計測に基づく振動特性同定について述べている。当該橋梁は、バングラデシュのメグナ川において1991年に竣工した13径間の有ヒンジラーメン橋である。モンスーン期には洪水が頻発するなど、洗掘の発生が懸念される地域であり、中間ヒンジ部の損傷に端を発して2012年に管理者により実施された調査において、顕著な洗掘の存在が確認された。その後、本研究で実施された振動計測は、現地で実施し得た少数の速度センサを利用したものであり、全センサを一つの構造体に配置した車両走行による振動の計測が、構造体ごとに行われた。振動特性同定のためのモード解析には、ERA（Eigensystem Realization Algorithm）法が用いられており、

車両通過後の自由振動部分を利用した解析が行われ、本研究で着目する当該橋梁の主要な振動モードとして、橋脚・基礎の曲げ変形が卓越する振動モードと、橋桁の曲げ振動が卓越する振動モードが同定された。なお、計測時に、センサ間の同期が可能なシステムを用いることができなかったため、相互相関関数を用いた事後同期により、振動モード形状の推定が行われた。

第４章では、第３章で特定した主要な振動モードの固有振動数と洗掘の関係について議論している。当該橋梁は構造的な対称性を有しており、同一の構造諸元を有する構造体が５対存在する。このうち３対は、河床横断方向において一部のみに生じている洗掘との関係で、同一の構造諸元で洗掘の発生状況が異なる対となっていた。そこで、これら３対の構造体を対象に、これらの構造体で実施された振動計測から同定された固有振動数と、他機関により別途実施された洗掘調査の結果を比較することで、固有振動数と洗掘深さの関係について検討されている。その結果、洗掘の発生が確認されている構造体では、洗掘が確認されていない構造体に比べて固有振動数が低いことが確認された。ただし、報告されている洗掘深さと固有振動数の低下量は一様でなく、洗掘深さが深いほど固有振動数の低下量が大きいといった関係は明確には認められなかったことが述べられている。

第５章では、有限要素モデルを利用して、第４章で述べられた洗掘深さと固有振動数の関係について、理論的な検討を行った結果が述べられている。有限要素モデルの構築にあたり、構造体については、設計時の情報に基づき構造諸元や材料の物性値が定められており、下部工周辺の地盤についても、設計時に得られていた地盤情報に基づき、杭基礎の深さ方向に複数の地盤ばねを配することでモデル化されている。このように構築されたモデルについて、まず、洗掘の発生が確認されていない構造体について、モデルの固有値解析から同定された振動モード特性と、第３章で述べられた計測から得られた振動モード特性を比較することで、モデルの妥当性が議論されている。この際、設計時の情報からは得られない、損傷を受けた中間ヒンジが与える固有振動数への影響についても、モデルの中間ヒンジ位置にばね要素を配することで検討されている。つぎに、洗掘の発生が確認されている構造体について、モデルの地盤ばねを河床面に近い位置から順次除いていくことによる橋脚・基礎の曲げ変形が卓越する振動モードの固有振動数の低下量を算出し、その結果と計測で得られた固有振動数を比較することで、モデルを利用した洗掘深さの推定について議論されている。損傷の評価が困難で精度良くモデル化できない中間ヒンジの影響も考慮した洗掘深さの推定が行われ、推定された洗掘深さの範囲と洗掘調査から得られる洗掘深さの推定結果とが比較された結果、計測により得られる固有振動数と設計段階に得られる情報に基づく有限要素モデルを利用することで、洗掘深さの概略的な推定を行えることが確認できたことが述べられている。

第６章は、以上を踏まえた結論および今後の課題を述べている。本研究では、対象とした有ヒンジラーメン橋について、比較的簡易な上部工での振動計測と設計段階で得られる情報に基づく有限要素モデルにより、橋梁の固有振動数に基づき洗掘の有無およびその深さの概略的な推定が行えることが示された。一方で、今後の課題として、より精度の高い洗掘深さの推定には、中間ヒンジの影響のより適切な評価や、地盤モデルの精緻化などが挙げられている。

以上のように、当該論文は、対象とした橋梁のみならず、有ヒンジラーメン橋一般に対して、固有振動数を利用して洗掘深さを概略的に推定できる可能性を示しており、国内外で過去に多く架設された有ヒンジラーメン橋の維持管理において、学術的、工学的に有用な知見が示されている。よって、学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位を授与するに十分値するものと認め、合格と判定した。

なお、本論文の内容に基づく１編の論文が、土木・建築構造のヘルスモニタリングに関する国際学会が発行している論文集である Journal of Civil Structural Health Monitoring に掲載が決定されており、また２編が査読付き論文として国際会議 Advances in Bridge Engineering-III, IABSE-JSCE Joint Conference および

Infrastructure Maintenance and Management, 2nd JSCE-CICHE Joint Workshop のプロシーディングスに掲載されている。