

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	長大特殊橋維持管理のためのデジタル画像相関法およびGNSS変位計測の適用に関する研究
氏名(Name)	有井 賢次

長大特殊橋は、一般的に海上、河川上や溪谷などに架橋されることや、架橋位置の条件に応じた種々の構造検討のもとに建設されたものが多く他橋との類似性が低いことから、これら長大特殊橋では、橋毎に「個別施設維持管理計画」を定めている事例が多く見られる。例えば、斜張橋の詳細点検では、「近接目視点検」および「橋体観測」の2手法を設定し、5年に1回の頻度で実施することが規定されており、橋体観測では、温度測定(気温・部材表面)、縦断線形測定および斜張橋ケーブル張力測定を行うことにより、異常の有無と経年的な変化を把握し、橋梁の全体的な健全度評価を行う。

縦断線形測定では、従来の光波測量を用いた測量作業が実施されているが、長大特殊橋は測定距離が長く測量作業に時間を要することや、交通振動や風などによって測量精度が低下する状況が度々発生している。また、斜張橋ケーブル張力測定では、対象ケーブルに加速度計を直接設置する方法が一般的であるが、ケーブルの定着位置によっては計測装置の取り付けに危険が伴うケースや、容易に近接できる場合でも通行車両による振動の発生によって計測装置の取り付けに時間を要する。その他、ケーブルのクリープ現象による道路縦断の低下や、単径間吊橋において、主ケーブルが定着の斜面の緩みによる落橋事例も見られ、ケーブル張力や橋梁全体の変位モニタリングは、道路利用者の安全を確保する上で非常に重要な維持管理手法として認識する必要がある。

このような長大特殊橋に特有の維持管理上の課題を解決するため、本研究では、斜張橋ケーブル張力測定を遠隔から非接触に実施することが可能な画像解析技術であるデジタル画像相関法(Digital Image Correlation, 以下、DIC法)と、長大橋梁の全体的かつ三次元的な変形挙動を常時監視できるGNSS(Global Navigation Satellite System)モニタリング技術に着目し、これらの技術の実際の維持管理作業への適用に焦点を当てた2つの研究を行った。

本研究の目的は、損傷による社会的影響が大きな長大特殊橋において、新しい点検技術と常時モニタリング技術の適用性を検討し、損傷の早期発見と橋梁性能の定量化に繋がる技術の実用性検証を行うことである。本研究で実施した2つの実用化技術における具体的な目的とその成果をそれぞれ以下に整理する。

1つ目の研究は、画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測である。

本研究では、斜張橋の精密点検におけるケーブル張力計測で一般的に用いられている加速度計を用いた振動計測に対し、DIC法を用いた振動計測が同等の精度が得られることを確認し、その具体的な適用手法と特徴を明らかにすることを目的としている。本研究は、共用荷重下にある鋼5径間連続斜

張橋の斜張ケーブルの張力計測におけるDIC法の適用性の検討である。通行車両によって振動するケーブルを画素数が異なる2種類(2Kおよび4K)のカメラで撮影した動画像に対し、DIC法を適用してケーブル振動の変位時刻歴波形を求め、得られた波形からFFT(Fast Fourier Transform)を行って卓越振動数を算定する。この算定結果と加速度計による計測より同様に得られた卓越振動数との比較を行い、DIC法においても同等の精度で計測可能であることを確認した。また、DIC法適用過程において、ケーブル画像とサブセットサイズおよびサブセット位置の適性範囲を求めるとともに、2Kカメラと4Kカメラの比較において、4Kカメラが高次振動数抽出への適用性が高いことを確認した。

2つ目の研究は、スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の変位モニタリングである。

本研究では、大規模トラス橋において、スタティック測位法で取得した三次元変位データと、種々のモニタリングデータや構造解析結果との比較により、荷重載荷時や温度変化時の変形挙動の解明を通じて、橋梁モニタリングへの適用性を検証することを目的としている。本研究は、岩盤、斜面やトンネルの分野におけるモニタリング技術として多くの研究と適用実績を有するGNSS変位モニタリング技術の橋梁への適用性の検討である。船舶衝突により大きな損傷を受けた鋼3径間連続下曲弦プラットラス橋にGNSS受信機を設置し、橋梁の復旧工事過程と工事完了後を含む約2年間に及ぶGNSS変位モニタリング結果をもとに、スタティック測位方式で取得した3次元変位データと種々のモニタリングデータとの比較を行うことにより、載荷荷重に対する橋梁のたわみおよび温度変化に起因する比較的長期かつ周期的な三次元変形挙動に対して、必要な精度で計測可能であることを示した。また、構造解析や計測データの解析結果に基づき、長期および短期の変位挙動把握に関する検討を行った。

本論文は、以下の5章から構成される。第1章は、本研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成を述べる。第2章は、研究を行った2つのモニタリング技術概要と、それぞれの分野でこれまでに行われた主要な研究成果を紹介し本研究の意義を述べる。第3章は、「画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測」に関する研究成果について述べる。第4章は、「スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリング」に関する研究成果について述べる。第5章は、本研究を総括するとともに、本研究の成果、課題と今後の展望を述べる。

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	Application of Digital Image Correlation and GNSS Displacement Measurement for the Maintenance of Long Span Bridges
氏 名(Name)	ARII KENJI

Long-span special bridges are generally constructed at sea, on rivers, or in canyons, and are often constructed based on various structural considerations according to the conditions of the bridge location. For example, the detailed inspection of cable-stayed bridges is required to be conducted once every five years by using two methods: "close-up visual inspection" and "bridge observation". The longitudinal alignment measurement is used to evaluate the overall health of the bridge.

Conventional optical wave surveying has been used for longitudinal alignment measurement, but the surveying of long-span special bridges is time-consuming due to the long measurement distance, and the surveying accuracy is often degraded by traffic vibration and wind. However, depending on the cable anchorage position, it may be hazardous to install the measurement device, and even when it is easily accessible, it may take time to install the device due to the vibration caused by passing vehicles. In addition, there have been cases of bridge failures due to the degradation of road cross-sections caused by cable creep and the loosening of slopes where the main cables are anchored on single-diameter suspension bridges.

In order to solve such maintenance issues unique to long-span special bridges, this study introduces the Digital Image Correlation (DIC) method, an image analysis technique that enables remote, non-contact measurement of cable-stayed bridge cable tension, and the DIC method, a method that enables the overall and three-dimensional deformation behavior of long-span bridges to be monitored at all times. The two studies focused on the application of these technologies to the actual maintenance and management of long-span bridges.

The purpose of this study was to examine the applicability of new inspection and constant monitoring technologies to long-span special bridges, where the social impact of damage is significant, and to verify the practicality of the technologies that lead to early detection of damage and quantification of bridge performance. The specific objectives and results of the two practical application technologies conducted in this study are summarized below.

The first study is the measurement of cable-stayed bridge cable vibration using image analysis technology.

The objective of this research is to confirm that the vibration measurement using the DIC method is as accurate as the vibration measurement using an accelerometer, which is commonly used for cable tension measurement in the precision inspection of cable-stayed bridges, and to clarify the specific application method and characteristics of this method. This study examines the applicability of the DIC method to tension measurement of cable-stayed cables of a steel 5-span continuous cable-stayed bridge under shared load. The DIC method was applied to video images of cables vibrated by passing vehicles taken with two types of cameras with different pixel counts (2K and 4K) to obtain displacement time history waveforms of the cable vibration. The calculated results were compared with the excitatory frequency obtained from accelerometer measurements, and

it was confirmed that the DIC method can be used to measure the excitatory frequency with the same accuracy. In the process of applying the DIC method, the cable image, subset size, and subset position were determined to be suitable ranges, and a comparison between a 2K camera and a 4K camera showed that the 4K camera was more applicable to higher-order vibration frequency extraction.

The second study is a displacement monitoring of bridges using GNSS with static positioning.

The objective of this study is to verify the applicability to bridge monitoring by comparing three-dimensional displacement data acquired by static positioning with various monitoring data and structural analysis results for large truss bridges, and by clarifying the deformation behavior under load and temperature changes. This study examines the applicability of GNSS displacement monitoring technology to bridges, which has been widely studied and applied as a monitoring technology in the fields of rock mass, slopes and tunnels. GNSS receivers were installed on a steel 3-span continuous lower curved string Pratt truss bridge that was severely damaged by a ship collision, and the results of GNSS displacement monitoring over a period of about two years, including during and after the bridge restoration work, were used to compare 3D displacement data acquired using the static positioning method with various monitoring data. The results show that the 3D displacement data acquired by the static positioning method can be used to measure the relatively long-term and periodic 3D deformation behavior of bridges due to deflection and temperature changes under applied loads with the necessary accuracy. Based on the results of the structural analysis and the measurement data, the long-term and short-term displacement behavior of the bridge is discussed.

This paper consists of the following five chapters. Chapter 1 describes the background and purpose of this study and the structure of this paper. Chapter 2 outlines the two monitoring technologies studied, introduces the main research results in each field, and describes the significance of this study. Chapter 3 describes the results of the research on "Vibration Measurement of Cable-stayed Bridge Cables Using Image Analysis Techniques". Chapter 4 describes the research results on "Automatic Continuous 3D Displacement Monitoring of Bridges Using GNSS with Static Positioning Technique". Chapter 5 summarizes this research and describes the results, challenges and future prospects of this research.

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	有 井 賢 次
審 査 委 員	主 査： 渡 邊 学 歩
	副 査： 中 村 秀 明
	副 査： 麻 生 稔 彦
	副 査： 河 村 圭
	副 査： 中 島 伸 一 郎
論 文 題 目	長大特殊橋維持管理のためのデジタル画像相関法およびGNSS変位計測の適用に関する研究 (Application of Digital Image Correlation and GNSS Displacement Measurement for the Maintenance of Long Span Bridges)
<p>【論文審査の結果及び試験，試問の結果】</p> <p>長大特殊橋は，通常海上や河川上，渓谷などに架橋され，他の橋とは異なる構造や条件に基づいて建設されるため，個別の施設維持管理計画が必要であり，斜張橋では定期的な点検が行われる。しかし，測定作業は時間がかかる上に，交通振動や風などによる測定精度低下，ケーブルの定着やクリープ現象による問題など課題も多い。本研究では，長大特殊橋の維持管理の省力化・高度化への効果が期待されるデジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method)や GNSS モニタリング技術の長大特殊橋への適用に関して研究を行った。本論文は5章から構成されている。</p> <p>第1章では，研究の背景および目的と本論文の構成について述べられている。</p> <p>第2章では，研究を行った2つのモニタリング技術の進展の経緯と，研究内容を記述するにあたり必要なそれらの技術の基本原理や考え方について記述され，それらの分野でこれまでに行われた主要な研究成果が整理され，本研究の意義が述べられている。</p> <p>第3章では，画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測に関する研究成果が述べられている。実橋において2Kおよび4Kカメラで撮影した動画像にDIC法(Digital Image Correlation Method)を適用して，斜張橋ケーブル着目部の振動状況を変位時刻歴波形として取得し，それと同時に計測を行った加速度計測結果との比較を行って，DIC法が加速度計による振動数計測と同等の精度が得られることが確認されている。また，DIC法の適用過程において，4Kカメラが高次振動抽出への適用性が高いことが確認されている。</p> <p>第4章では，スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリングに関する研究成果が述べられている。既存橋梁の安全監視へのGNSSによる変位計測の適用性を明らかにすることを目的に，センサーの設置方法の工夫，長期計測の安定性，変位計測の精度などを調査し，GNSS変位計測が橋梁の複雑な変位挙動把握の有効な手段になり得る可能性が考察されている。研究では，スタティック測位方式で取得した三次元変位デ</p>	

(様式 14 号)

ータと種々のモニタリングデータとの比較により、載荷荷重に対する橋梁のたわみおよび温度変化に起因する比較的長期かつ周期的な三次元変位挙動に対して、必要な精度で計測可能であることが示され、構造解析や計測データの解析結果に基づき、長期および短期の変位挙動把握の可能性に関する検討結果が報告されている。

第5章では、研究の総括と今後の展望が述べられている。

公聴会に先立ち実施された本審査(1回目)での意見を受けて、申請時の論文題目「長大特殊橋維持管理のためのデジタル画像相関法およびGNSSスタティック測位法の適用に関する研究(Application of Digital Image Correlation and GNSS Static Positioning for the Maintenance of Long Span Bridges)」について、「長大特殊橋維持管理のためのデジタル画像相関法およびGNSS変位計測の適用に関する研究 (Application of Digital Image Correlation and GNSS Displacement Measurement for the Maintenance of Long Span Bridges)」に修正された。

公聴会には学内外より約30名の参加があった。公聴会における主な質問内容は、デジタル画像相関法については、計測結果の精度評価、誤検出の有無、画像撮影時のカメラの振動に対する対処法および画像解析時における計算負荷に関する質問が出され、GNSS変位モニタリングについては、計測された変位挙動の原因究明、1日の外気温変化に対するGNSSによる計測変位の追従性、計測環境が計測結果に及ぼす影響および構造解析結果との比較における解析方法の工夫に関する質問が出された。さらに、GNSS変位モニタリングでは、風速とGNSS変位との相関、GNSS変位モニタリングの普及への課題、GNSS変位モニタリングを有効活用するための着目変位の想定に関する質問が出され、今後取り組むべき新たな研究課題に関する質疑が行われた。いずれの質問に対しても、発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は新規性、有用性、信頼性、完成度などにおいて、博士(学術)に十分値するものと判断した。なお、単位取得退学後1年を経過し3年以内の申請のため、外国語及び専攻学術に関する試問を免除した。また、審査、公聴会での試問応答など総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連論文 計3編)

- 1) 有井 賢次, 渡邊 学歩, 幸左 賢二: 画像解析技術を用いた斜張橋ケーブルの振動計測, 土木学会論文集(構造・地震工学), Vol.77, No.4(地震工学論文集第40巻), pp. I_626-I_637, 2021.7.
- 2) 西村 勇輝, 渡邊 学歩, 有井 賢次, 今田 吉貴: GNSS変位観測に基づく鋼連続トラス橋の日変動リアルタイムトレンド推定, AI・データサイエンス論文集, 3巻J2号, pp. 621-630, 2022.11.
- 3) 有井 賢次, 渡邊 学歩, 武智 国加, 清水 則一: スタティック測位法を用いたGNSSによる橋梁の自動連続三次元変位モニタリング, 土木学会論文集, Vol.79, No.6, 23-00002, 2023.6.