

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 9 日現在

機関番号：32422

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350457

研究課題名(和文)スマートケーブルを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発

研究課題名(英文)Development of Structural Health Monitoring System using Smart-Cable

研究代表者

北條 哲男 (HOJO, TETSUO)

ものづくり大学・技能工学部・特別客員研究教授

研究者番号：30348346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：吊橋・斜張橋等の重要部材である構造用ケーブルの予防保全的な維持管理を行うため、光ファイバを利用したヘルスマニタリングシステムの開発に関する実験的研究を行った。光ファイバ装着可能な新たなケーブル構造体や定着部を開発し、光ファイバセンサを用いてケーブルの張力・湿度変化を把握するモニタリングシステムを構築できる見通しが得られた。

研究成果の概要(英文)：An experimental research on development of a health monitoring system using optical fiber was conducted in order to maintain structural cables, which are important members such as suspension bridges and cable-stayed bridges. A new cable structure including cable anchorage system that enables installation of optical fiber was developed, and it was obtained that a monitoring system that can grasp cable tension and humidity change using optical fiber sensor in the cable is able to construct.

研究分野：土木工学、構造工学

キーワード：維持管理 モニタリング 診断システム ケーブル 橋梁 光ファイバ

1. 研究当初の背景

(1) わが国の社会基盤構造物に関して、これまでは発生する損傷に対して定期点検などにより事後的に対応してきたが、社会資本ストックを効率よく維持管理・更新するためには、先進的な予防保全的な維持管理技術の開発が極めて重要となる。しかし、従来から吊橋・斜張橋等に用いられてきた構造用ケーブルに関しては、構造ヘルスマモニタリングを考慮した維持管理に関する研究は極めて少ない。

(2) このような背景のもとで、致命的欠陥が発現する前に速やかに対策を講じることを可能とする予防保全の概念を構造用ケーブル部材に適用し、光ファイバセンサと一体化したケーブル構造体の開発、およびケーブル部材の諸特性を把握する優れたモニタリング法などを構築することが望まれている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、社会基盤構造物の安全・安心を確保するため、吊形式構造物に用いられるケーブル部材の構造ヘルスマモニタリングを可能とするスマートケーブルを開発し、リスク要因を定量的に把握して維持管理のための診断の効率化・高度化を目指すことを目的とする。

(2) スマートケーブルシステムの実現のため、光ファイバセンサを内蔵するケーブル構造体の開発、およびケーブル内部に発生する歪・湿度などのデータのセンシング技術の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 構造ヘルスマモニタリングを行うためには、ケーブル部材にセンサを内蔵可能とすることが必要であり、まずセンサと一体化したケー

ブル構造体の開発を行う。特に、ケーブル定着部には、センサに熱影響を与えないようにするため、従来の金属鑄込みに変わる高機能な樹脂を用いた構造を考案する。

(2) 光ファイバを用いてケーブル内部状況をモニタリングする技術開発のため、張力・湿度に関するセンサの情報伝達特性の把握を行う。そのため、光ファイバを内蔵したケーブル試験体を試作し、既存の測定方法と比較することにより光ファイバの測定精度等を検証しデータ検出方法を確立する。

4. 研究成果

(1) ケーブル構造体の開発

ケーブル定着構造の開発

わが国では、合金鑄込みを前提とした日本工業規格に船用ワイヤソケットに関する記載があり、道路橋示方書において一般的な橋梁構造物に対しては JIS に基づいた設計法が提示されている。一般的には合金鑄込みによるソケット加工が多いが、溶融金属は熱により鑄込み部のケーブルに強度低下を及ぼす。高い疲労強度等特別な性能が要求される斜張橋用ケーブル等の場合には、種々の構造・材料を用いたソケット定着法が開発され、実橋で使用されている。常温鑄込みが可能な高強度な樹脂を用いれば熱の影響を受けにくく、加工性や強度特性が向上する。

本研究では、ケーブル定着部に樹脂を用いた鑄込み法を検討するため、まず樹脂の基本的な特性を把握する材料試験を行い、樹脂を用いた設計法について検討を行う。

適用樹脂材の材料特性

本研究ではポリエステル樹脂に着目し、JIS 試験法に基づいて樹脂材の基本特性について調査した(表1)。

圧縮特性に関しては、JIS に基づき作成した試験体（横 50×縦 10×厚さ 4mm）と海外規格の試験法に準拠した試験体（40×40×40mm）の二種類の試験体で行い、比較した。その結果、ポリエステル樹脂の圧縮強度は立方体形状の実測値は 140N/mm² となった。

表 1 材料試験結果

評価項目	測定値	備考
比重	1.85	JIS K 7112
圧縮強度 (N/mm ²)	87.2	JIS K 7018
圧縮強度 (N/mm ²)	140	ISO 604
弾性係数(N/mm ²)	7,900	JIS K 7203
せん断強度(N/mm ²)	47	JIS K 7058

ケーブル構造の引張試験

試験体ケーブルとして直径 7 mm (ワイヤ引張強度 1,770N/mm²) のワイヤ 61 本で構成された平行線ケーブル (規格破断荷重 4,160kN) を用いた。ソケットの一端は、ポリエステル樹脂を鑄込み材として使用して加工し、他端は通常の亜鉛銅合金止め加工を施してケーブルの引張試験を行った。試験に用いたポリエステル樹脂加工を用いたソケットの外形寸法を表 2 (D:ソケット外径、L:ソケット長) に示す。

表 2 試験体寸法

試験体	D(mm)	L(mm)
試験体1	180	310
試験体2	180	310
試験体3	180	288
試験体4	180	288

引張試験 (表 3) の結果、いずれの試験体

の破断荷重も規格値 4,160kN を満足した。解体調査した結果、断線発生位置は全てケーブル一般部であり、ソケット近傍での破断は見られなかった。この試験結果から、ポリエステル樹脂を用いたソケット定着構造は亜鉛銅合金止めと同等以上の性能を持つことが把握

表 3 引張試験結果

試験体	破断荷重(kN)	破断値/規格値%
試験体1	4,350	105
試験体2	4,340	104
試験体3	4,340	104
試験体4	4,360	105

できた。

(2) モニタリング技術の開発

光ファイバを用いた張力計測法

FBG センサを用いたケーブル引張試験により、センサの精度等に関する検討を行った。張力計測に用いたケーブル試験体(図 1)は、直径 7mm のワイヤ 19 本で構成された平行線ケーブルで、ケーブル長 1,580mm である。ケーブル表面のひずみゲージおよび FBG センサを



取り付け位置を図 2 に示す。

図 1 ケーブル試験体

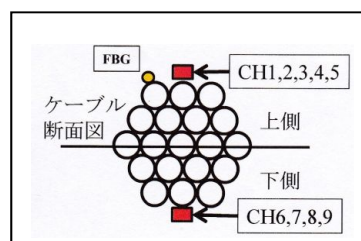


図2 センサ取り付け位置

ケーブル試験体に油圧ジャッキを用いて段階的に引張荷重を載荷し FBG センサの測定値をひずみゲージの結果と比較した。図3は縦軸にひずみゲージ、FBG センサの計測結果を用いて算出された張力、横軸に油圧ジャッキの荷重を示した一例である。これらの結果から、どの計測結果でも概ね高い精度で導入張力を算出できることが分かる。また、FBG センサによる計測結果を用いた算出結果はひずみゲージによるものよりも精度が良いことが示された。従って、FBG センサを用いた本システムによる計測法により、張力の測定が精度良くできることが確認できた。

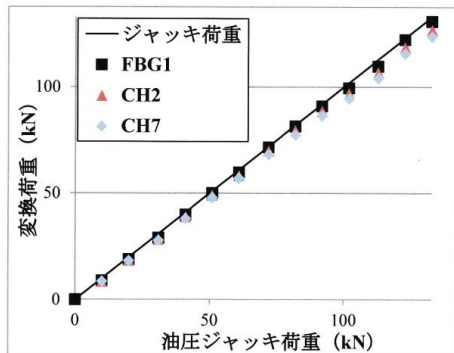


図3 ひずみゲージとFBG センサの比較

光ファイバを用いた水分の検知法

ケーブルの温度変化から、ケーブル内部の湿度状況を把握することに着目した実験的研究を行った。即ち、光ファイバセンサ (FBG) を温度センサとして使用し、ケーブル内の水分の存在によって温度変化率が異なる原理を利用してケーブル内部の湿度状況を推定する方法である。

図1と同様の諸元の試験体を使用し、湿度(濡れ状態)の異なる3種類に対して温度変

化を与えてその変化状況を3日間にわたり計測した。図4は、外気温の変化に伴う各光ファイバセンサの温度変化曲線を示したものである。縦軸は、測定開始時における温度を基準温度(0)とみなし、この基準温度からの温度差を示したものである。

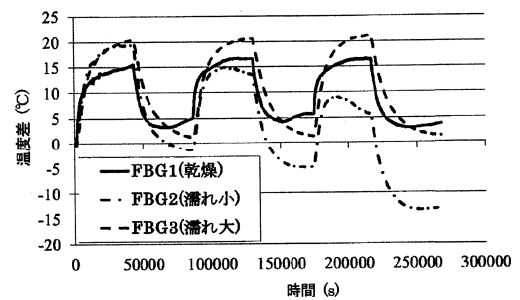


図4 FBG センサの温度変化

図5は、図4に示すFBGセンサのそれぞれについての温度変化曲線の勾配値を示す。温度勾配はそれぞれのセンサの温度変化曲線を微分することにより算出したものである。

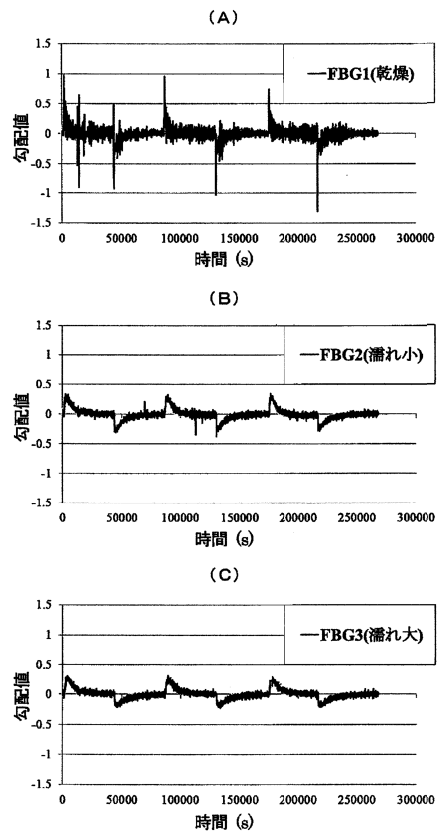


図5 各センサの温度勾配

乾燥状態(A:健全部)の温度変化曲線は比較的大きい勾配を含んでいる。従って、温度勾配の最大値を特徴値として捉え、温度勾配の最大値が所定の閾値を超えていればその部位は健全部と判定することができる。また、(B)と(C)を比較すると、水含有量(濡れ状態)の程度が大きいと、最大の勾配値が小さくなることが分かる。

このように、温度勾配の最大値所定の閾値以下であればケーブル内部に水が存在すると判定し、さらに温度勾配の最大値が小さいほど水含有量の程度が大きいこと判定することができ、本手法によりケーブル内部の湿度状況をモニタリングすることができる。

(3)まとめ

センサの装着を可能とするため、ケーブル末端部のソケットに用いる樹脂材としてポリエステル樹脂材を選定し、材料の基本的特性を把握した。ポリエステル樹脂の定着構造で構成されたケーブル構造の引張試験により十分な強度特性を持つことを確認し、モニタリングを可能とするケーブル構造体を開発した。

光ファイバのセンサとデータ特性調査から、ケーブル張力の計測に適しているFBG光ファイバセンサを用い、センサ挿入ケーブルの張試験および環境試験により実用上の課題を検討した。ケーブル張力計測試験の結果、機械的な固定装置を用いた光ファイバのケーブル構造体の測定精度は十分であり、張力測定方法の見通しが得られた。また、FBG光ファイバを用いて、ケーブル内部の温度変化曲線からケーブル内部の水分の有無およびその程度

を推定できる見通しが得られた。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 1件)

北條哲男、甲斐康幸、山口健悟：樹脂材を用いたケーブルの定着構造に関する研究、平成28年度土木学会全国大会 第71回年次学術講演会

[産業財産権]

出願状況(計 1件)

名称：ケーブル診断システムおよびセンシング・ケーブル

発明者：勝地弘、西尾真由子、山田均、飯山拓馬、矢野守俊、甲斐康幸、北條哲男

権利者：横浜国立大学、東京製綱株式会社、ものづくり大学

種類：特許

番号：特願 2015-243119

出願年月日：平成27年12月14日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

北條 哲男 (H0J0, Tetsuo)

ものづくり大学・技能工芸学部・特別客員
研究教授

研究者番号：30348346

(2)研究分担者

勝地 弘 (KATSUCHI, Hiroshi)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション
研究院・教授

研究者番号：80303080