

斜材保護管点検ロボットの多機能化

Development of Multi-inspection robot for the cable of cable-stayed bridge

原田 耕司* 伊藤 幸広**
 Koji Harada Yukihiro Ito
 高原 裕介*** 手塚 裕紀****
 Yuusuke Takahara Yuki Tezuka

要 約

斜張橋の斜材は、重要な構造部材の一つである。著者らは、斜材保護管の目視点検の自動化を目的とする斜材保護管点検ロボット（コロコロチェッカー[®]）を開発し、実橋梁での点検に使用されている。しかし、斜材の点検項目には、斜材保護管の目視点検以外、張力測定、保護管内部の水分測定等も重要な項目として挙げられる。そこで、斜材保護管点検ロボットの点検技術の多機能化を行った。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 斜材保護管点検ロボットの概要
- § 3. 多機能化技術の概要
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

斜張橋は、吊り橋と同様にケーブルの張力を利用した構造物であるが、力学的には大きく異なる特徴を持っている。例えば、桁に掛かる力は、吊り橋がハンガーロープで桁を吊っている構造のため垂直方向だけであるが、斜張橋は橋軸方向の圧縮力も作用する。また、斜張橋の景観は、曲線美が特徴の吊り橋とは異なり、直線的で洗練されたイメージが強くなっている。我が国では、1960年に神奈川県津久井郡の旧勝瀬橋（橋長：128.6 m、幅員：4 m）で初めて斜張橋が建設されて以来、人道橋から長大橋まで数多くの橋梁に採用され、道路橋だけでも約 320 橋が架橋されている¹⁾。

このように多くの実績がある斜張橋は、道路ネットワークを形成する重要なインフラであり、その保全を怠れば道路ネットワークの分断に繋がり時間的、経済的損失が膨大なものとなる。実際に、海外では斜張橋の落橋等により道路ネットワークに支障を来した例もある²⁾。斜張橋の維持管理を行う上で重要なポイントは、斜材の点

検・保全であり、斜ケーブル（PC 鋼材）の腐食が進行すると落橋の危険性が生ずる。

著者らは、斜張橋の斜材保護管の点検を目的とした斜材保護管点検ロボット（コロコロチェッカー）を開発し^{3,4)}、既に実橋梁の点検に用いられている。しかし、斜材の各部材に関する変状としては、表一1のようなものが挙げられ⁵⁾、張力測定、水分の侵入等も効率的に点検できる技術が望まれていた。

そこで、斜張橋斜材の保護管、定着部および斜ケーブル（張力）等を一つの装置で効率的に点検できる斜材保護管点検ロボットを多機能化する点検技術を開発した。

表一1 斜材の変状

部材	変状
保護管	損傷・変形・変色
定着部	損傷・変形・腐食・水分の浸入
斜ケーブル	張力の減少・振動
制振装置	損傷・変形・さび等
充填材	充填材の漏出

§ 2. 斜材保護管点検ロボットの概要

斜材保護管点検ロボットは、写真一1に示す斜材をガイドに昇降するカメラを搭載した基本ユニットと、基本ユニットを無線で操作する写真二1に示すコントロールユニットで構成されている。基本ユニットに搭載したカメラで、斜材保護管の全周および全長を撮影することにより、近接目視と同等レベルで、その損傷・変形・変色等の変状を点検できる。また、撮影された斜材保護管の

* 技術研究所

** 佐賀大学理工学部

*** 技術研究所先端技術グループ

**** 土木技術部リニューアル課



写真-1 基本ユニット

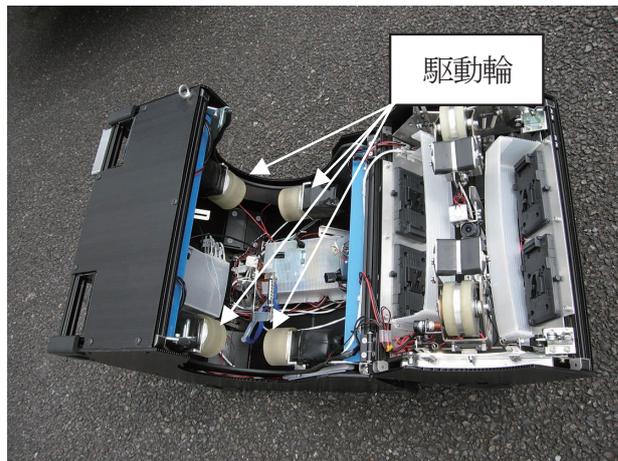


写真-3 駆動輪



写真-2 コントロールユニット

画像から、損傷を画像解析により自動で検出するシステム（自動損傷検出ソフト）も開発している。

2-1 基本ユニット

基本ユニットの仕様を表-2に示す。基本ユニットの外形寸法は500×500×500mm、質量は30kgと小型・軽量であり、2人で運搬および斜材への設置が可能な仕様となっている。斜材傾斜角40°時の走行速度は最大

表-2 基本ユニットの仕様

項目	仕様
外形寸法	500×500×500mm
質量	30kg
走行速度	最大 6m/min (斜材傾斜角 40°)
昇降性能	最大傾斜角 65°
走行路面	段差 5mm 以下
対応斜材直径	φ90～φ230mm
稼働時間	2時間以上
無線通信	最大到達距離 300m 以上
撮影機器	フルHDカメラ4台 1,920×1,080画素
バッテリー	リチウムイオンバッテリー (4個)
使用温度	0～40℃
使用湿度	85%以下

6m/minであり、昇降可能な斜材の最大傾斜角は65°となっている。写真-3に示す4つの駆動輪を調整することにより直径90～230mmの斜材に対応でき、5mm以下の段差ならば走行できる。基本ユニットにはリチウムイオンバッテリーが搭載されており、カメラおよび無線等に電源を供給するとともに、昇降用のモーターを駆動させる。バッテリーの稼働時間は2時間以上であるため、全長が300mの斜材でも点検が可能である。

2-2 コントロールユニット

コントロールユニットは、基本ユニットの制御および撮影画像表示のためのノートパソコン、無線装置、アンテナおよびバッテリー等から構成され、小型のワゴン内に収納されたコンパクトなものであるため、路肩や中央分離帯などの狭隘なスペースでも設置して点検が可能である。

写真-4には、ノートパソコンのモニターに表示された斜材の画像例を示す。4台のカメラの画像は4分割画面でリアルタイムにモニターに表示される。リアルタイム表示により点検者が斜材で損傷を発見した場合、直ちに基本ユニットを停止させる命令を無線で送り、損傷の確認や詳細な観察を行うことができる。画面中央下側に表示されている数字は、基本ユニットの移動距離、すなわち斜材の基点からの距離であり、これにより損傷等の発生位置が確認できる。



写真-4 コントロールユニットの画像

2-3 自動損傷検出ソフト

自動損傷検出ソフトは、撮影したデータを元に、自動で損傷を検出できるシステムである。自動損傷検出ソフトで分析した例を写真-5に示す。自動損傷検出ソフトを用いることで、従来の点検員による近接目視点検では見落しがちな細かい損傷を、確実に検出することができる。また、検出した全ての損傷は、その大きさや斜材上の位置情報を含めて斜材全体の展開図として作図することもできる。さらに、自動損傷検出ソフトでは、画像を人が分析するより、大幅に分析スピードを向上できることも大きな特長である。

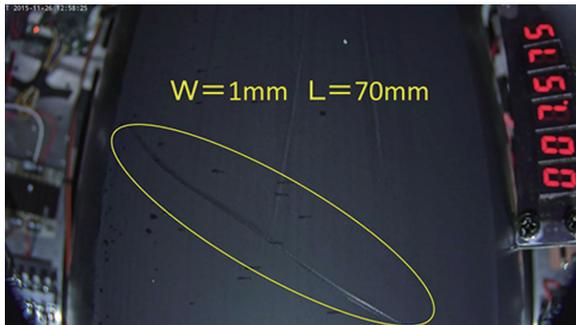


写真-5 検出結果例

§3. 多機能化技術の概要

斜材保護管点検ロボットでは、斜材保護管の損傷の点検のみであったが、多機能化を目的として以下の点検技術の開発を行った。

3-1 主塔定着部の点検

これまでの主塔定着部の点検では、主塔に点検員が昇り行っていたので、作業性および安全性に課題があった。しかし、基本ユニットの前面に写真-6に示すように外部カメラ(1,000万画素)を3台設置することにより、斜材保護管の点検と写真-7に示すように主塔定着部の点検が同時できるようにした。なお、外部カメラは、取り



写真-6 外部カメラ (黄色丸内)



写真-7 主塔定着部撮影例

外しができるようになっており、仕様の異なる外部カメラを取り付けることにより、細部の確認も行える。

3-2 張力測定

(1) 張力測定の概要

斜張橋の維持管理において斜ケーブルの張力管理は重要な点検項目の一つである。これまでの斜ケーブルの張力測定では、写真-8のように斜材の端部に加速度計を取り付け、強制的に人力で斜材を加振して斜材の加速度を求め張力を推定していた。この方法では、加速度計を取り付ける場所が、点検員により取り付けできる橋面上付近となることから、一般に振動(加速度)が小さく精度の高い測定結果が得られない場合があった。

一方、基本ユニットは、無線操作で斜材の任意の位置に停止することができる。すなわち、図-1のように振



写真-8 従来の加速度計取り付け状況

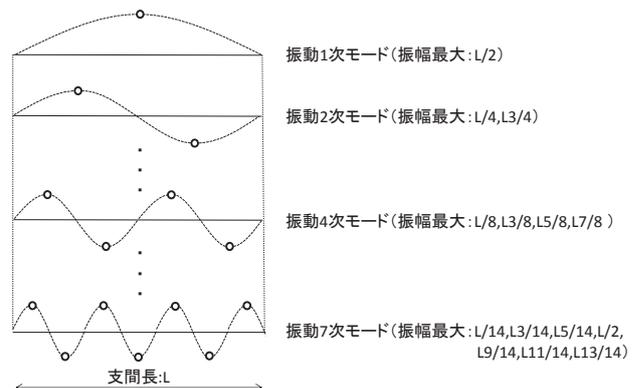


図-1 基本ユニットの停止位置

幅が最も大きくなる斜材の振動モードの腹の位置に基本ユニットを停止させることで、高い精度での加速度測定が可能となる。また、斜材長が長いものでは、人力加振無しで常時微動で加速度計測を行うことができる。なお、以降では、基本ユニットに搭載した加速度計で任意の位置で加速度データを取得することを、任意点加速度取得法と呼ぶ。

(2) 加速度計取り付け位置

基本ユニット内部に写真-9に示す加速度計を搭載している。加速度計は、基本ユニット固有の振動をノイズとして拾わないよう、斜材に密着するブレーキ装置の裏側に取り付け、斜材の振動のみを入手できるようにした。

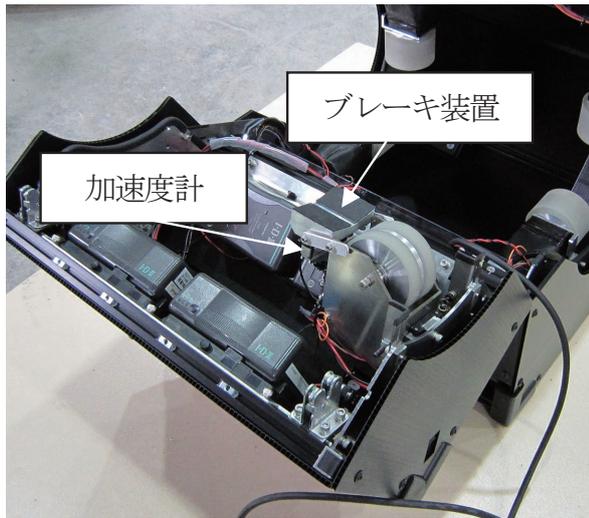


写真-9 加速度計取り付け位置

(3) 張力測定例

実橋梁で、任意点加速度取得法で加速度データを取得した。具体的には、基本ユニットをL/2点、L/4点、L/8点の3箇所まで停止して、常時微動で5分程度の加速度データを取得した。得られた加速度をFFT解析した結果の一例を図-2に示す。この結果を用いてカーブフィッティング法⁶⁾で斜材の張力を求めたところ、従来法で求めた張力とほぼ同じ値となり、精度的に問題がないことを

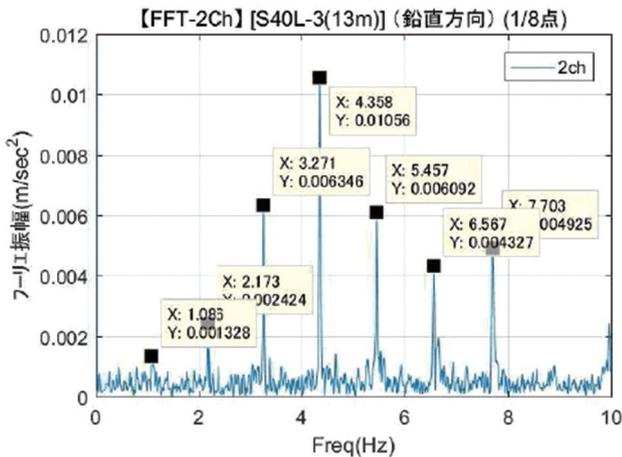


図-2 FFT解析の結果例

確認した。なお、比較のための従来法では、ロープにより人力加振を行う手法を用いた。すなわち、任意点加速度取得法では、人力加振を行わなくても精度の高い張力が求められ、省人化およびコストダウンに貢献できる技術であると言える。

3-3 水分測定の概要

保護管を貫通するような損傷がある場合や定着部の防水性能に問題がある場合、保護管内部へ水が浸入し斜ケーブルを腐食させる原因となる。したがって、保護管内の水分の有無は、斜張橋を維持管理する上で重要な情報となる。そこで、斜材の内部の水分の有無を非破壊で測定する装置の開発を行った。

(1) 水分測定方法

非破壊で物体内部の水分量を測定する技術としては、表-3に示す2つの技術がある。マイクロ波式はマイクロ波の波長の減衰率を計測して水分値に置き換える技術で、主に木材の水分測定に用いられている。電気容量式は、電気容量の変化を水分値に置き換える技術で、主にコンクリートの水分測定に用いられている。

この2つの技術に関して、写真-10に示す模擬斜材を用いて基礎的な検討を行った。その結果、マイクロ波式に関しては、図-3に示すように、保護管内部の水分量と測定値に相関が見られなかった。一方、電気容量式については、図-4に示すように水分(含水率)と水分計測定値に高い相関があることが分かった。なお、マイク

表-3 非破壊で水分測定する技術

種類	発信周波数	概要
マイクロ波式	1.0 GHz	水分によるマイクロ波の波長の減衰率を計測して、水分値に置き換え表示する。
電気容量式	100 kHz~ 20 GHz	測定物に電流を流し、その電気容量の変化を水分値に置き換えて表示する。

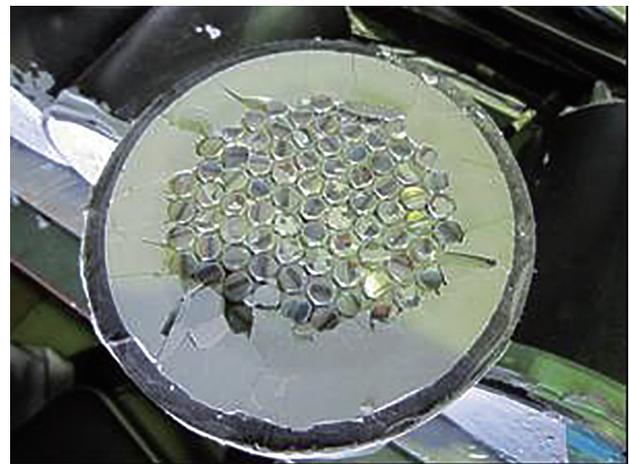


写真-10 模擬斜材

口波式の誤差が多いのは、マイクロ波は鉄筋の影響を受けやすく、斜材のPC鋼材の影響で誤差が大きくなったものと考えられる。そこで、電気容量式を用いた保護管内の水分測定装置（水分測定ユニット）を開発した。

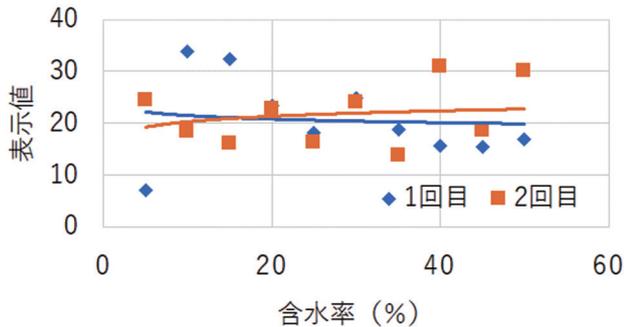


図-3 マイクロ波式の実験結果

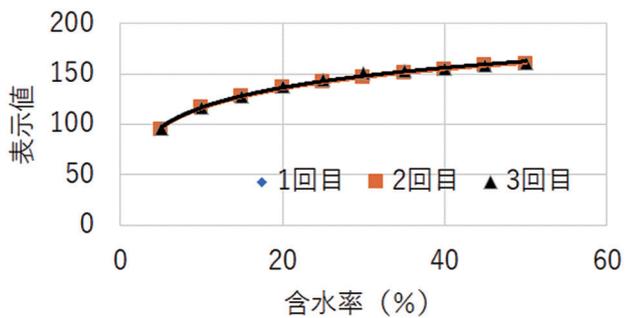


図-4 電気容量式の実験結果

(2) 水分測定ユニット概要

基本ユニットに電気容量式の電極を取り付けることが困難であったため、水分測定では、写真-11に示す水分測定ユニットを新たに開発した。水分測定ユニットには、昇降用のモーターを搭載せず、水分測定を行う場合には、基本ユニットが牽引するようにした。



写真-11 水分測定ユニットの牽引状況

(3) 水分測定ユニットの仕様

水分測定ユニットの仕様を表-4に示す。水分測定ユニットの外形寸法は415×415×415mmであり、基本ユニットより若干小さくなっている。また、計測できる斜材の直径は85～220mmとなっている。

表-4 水分測定ユニットの仕様

項目	仕様
外形寸法	415×415×415 mm
測定可能直径	85～220 mm
水分測定方式	電気容量式
データ記録方式	メモリー方式
昇降方法	基本ユニットが牽引

(4) 水分測定ユニットの構造

水分測定ユニットには、電気容量式水分計の2つの電極が斜材に常に密着するように写真-12および図-5に示すような構造のV型電極アーム構造を採用している。V型電極アームは、アーム長を伸縮させて電極位置を調整することで、直径85～220mmの斜材に適用が可能である。水分測定値は、水分以外に斜ケーブル(PC鋼材)の保護管内での位置の影響を大きく受け、測定値が変動することが考えられる。このため、V型電極アームは、斜材を挟んで上下に2台配置しており、斜ケーブル位置の偏りに対して測定精度を確保することができるようにしている。

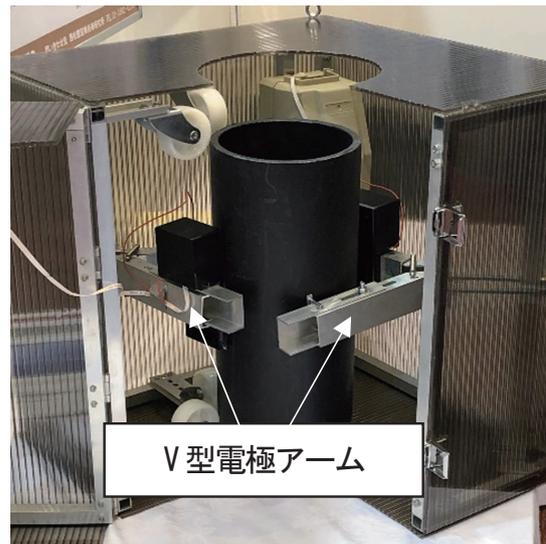


写真-12 V型電極アーム

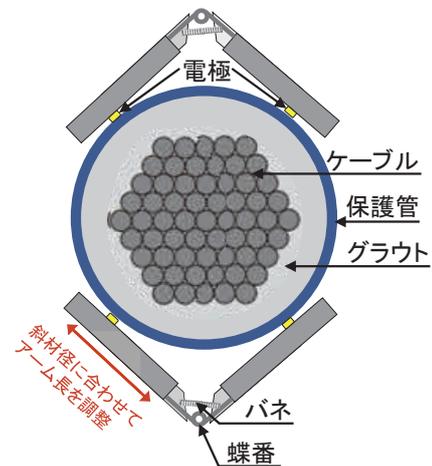


図-5 V型電極アームの概略

(5) 保護管内部の水分測定例

実橋梁において、斜材下端部のグラウト注入孔において、グラウトキャップが浮き上がった箇所があり、注入孔との隙間から雨水等の侵入が懸念されたため、保護管内の水分の状況を測定した。水分測定は、注入孔無しの斜材1本と、注入孔有りの斜材2本について実施した。なお、注入孔有りの斜材に関しては、注入孔の上側（主塔側）と下側（橋面側）で測定を実施し、注入孔隙間からの雨水侵入の有無を確認した。

水分測定の結果、表-5に示すように注入孔の下側も含め全てにおいて水分が無いことが分かった。

表-5 水分測定結果

斜材 No.	測定位置	水分判定		備考
		上面	下面	
1	-	無	無	グラウト注入孔無し
2	注入孔上側	無	無	グラウト注入孔有り
	注入孔下側	無	無	
3	注入孔上側	無	無	
	注入孔下側	無	無	

§4. まとめ

以下に、まとめを示す。

- ① 開発済みの斜材保護管点検ロボットに、さらに主塔定着部、張力および保護管内部の水分の有無を点検できる機能を追加した。

- ② 多機能化により、斜材の多くの点検項目を効率的に点検することが可能になった。
- ③ 開発した多機能化技術は、実橋梁での適用性は高く、張力測定では従来法と同等の結果を得た。

著者らは、斜材保護管点検ロボットの他にも、水路トンネル点検ロボット（トンネルマンボウ）も開発している。今後ますます重要となるインフラ構造物の点検・調査の省人化を目指して、さらなるロボット化技術の開発を進める予定でいる。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2021
- 2) 特集イタリア「モランディ橋」はなぜ落ちた？, 日経コンストラクション, pp. 44-45, 2018
- 3) 迫綾子ほか：斜材保護管表面の自走式点検ロボットの性能および調査事例, 土木建設技術発表会概要集, pp. 88-87, 2013
- 4) 原田耕司：斜張橋の斜材保護管の外観調査技術について, 新技術・新工法に関する講習会, pp. 48-53, 2014
- 5) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC斜張橋・エクストラドーズド橋維持管理指針, 2013
- 6) 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 杉井謙一, 本田祐嗣：ケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法, 神戸製鋼技報, Vol. 49, No. 2, pp. 12-15, 1999