

斜張橋の多機能型斜材点検ロボットの開発

コロコロチェッカー[®]

原 田 耕 司

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・保全である。斜張橋の斜材は、保護管、定着部、斜ケーブル（PC 鋼材）、制振装置および充填材で構成されている。これらの点検に関しては、斜材が高所に位置する部分が多い等の理由から、合理的な点検技術の開発が進んでいなかった。例えば、斜材の保護管の点検では、高所作業車等を用いた目視点検が実施されているが、従来の点検方法では点検員の落下の危険や、点検精度等に課題があった。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）等を点検できる多機能型斜材点検ロボット「コロコロチェッカー[®]」を開発した。

キーワード：橋梁，斜張橋，維持管理，斜材，点検ロボット，多機能

1. はじめに

斜張橋は、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310橋が架橋されている¹⁾。斜張橋の特長としては、斜材の配置範囲を広くとることにより長支間化ができることであり、本州四国連絡橋の多々羅大橋は、中央支間長が890 mと国内第7位の支間長となっている。

斜張橋は吊橋と並び道路ネットワークを形成する重要なインフラ構造物であり、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。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・保全である。例えば、斜材の構成材である斜ケーブル（PC 鋼材）の腐食が進行すると落橋の危険性が生ずる。

斜材は、保護管、定着部、斜ケーブル、制振装置および充填材で構成されており、斜材の各部材に関する変状としては、表1のようなものが挙げられる²⁾。これらの点検に関しては、斜材が高所に位置する部分

が多い等の理由から、合理的な点検技術の開発が進んでいないのが現状である。例えば、斜材の保護管の点検では、高所作業車等を用いた目視点検が実施されているが、従来の点検方法では、点検員の落下の危険や、点検精度等に課題があった。

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多機能型斜材点検ロボット「コロコロチェッカー[®]」（以下、本ロボットと呼ぶ）を開発した。

2. 本ロボットの概要

本ロボットは、写真1に示す昇降装置を有する基本ユニットと水分測定ユニットで構成されている。基本ユニットと水分測定ユニットは連結されており、水分測定を実施しない場合は基本ユニットのみで点検を行う。

表1 斜材の変状および点検方法

部材	変状	点検方法
保護管	損傷・変形・変色	目視
定着部	損傷・変形・腐食・水分の侵入	目視
斜ケーブル（PC 鋼材）	張力の減少・振動	強制振動法および磁歪センサー等
制振装置	損傷・変形・さび等	目視
充填材	充填材の漏出	目視等

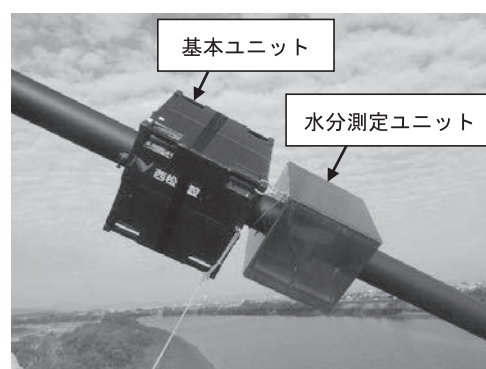


写真1 多機能型斜材点検ロボット全景

基本ユニットの仕様を表一2に示す。基本ユニットの外形寸法は500×500×500mm、質量は30kgであり、2人で斜材への設置が可能な仕様となっている。基本ユニットの内部には、リチウムイオン電池、モーターおよび駆動輪が搭載されており、最大6m/minで走行できる。地上から、昇降、停止等の操作を無線で行い、操作用の無線の通信距離は300m以上となっている。

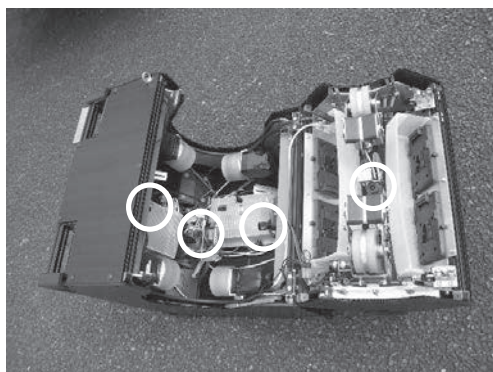
表一2 基本ユニットの仕様

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

本ロボットでは、保護管および定着部の点検、保護管内部の水分測定、斜ケーブルの張力点検を行うことができる。以下にそれぞれの概要を述べる。

(1) 保護管および定着部の目視点検

本ロボットの基本ユニットの内部には、写真一2に示すフルハイビジョンカメラ4台を搭載しており、保護管の全周・全延長を撮影できる。また、主塔定着部点検用に、基本ユニット前面には写真一3に示すように外部カメラを3台搭載できる。なお、分析作業時間およびコスト削減の目的から、内部カメラで撮影した画像より、保護管の損傷を自動で抽出できる自動損傷検出ソフトも開発している。



写真一2 内部カメラ (○印)



写真一3 外部カメラ (○印)

(2) 保護管内部の水分測定

(a) 概要

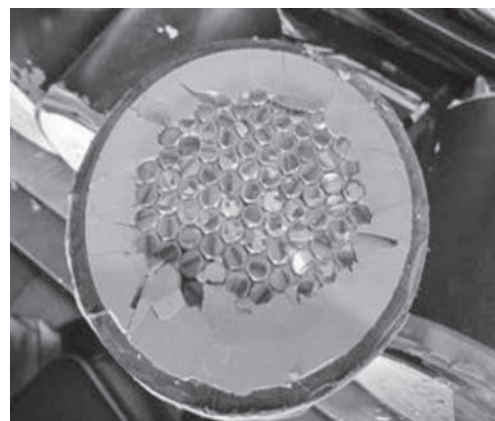
保護管内の水分の有無は、斜ケーブルの腐食に関係するため、斜張橋を維持管理する上で重要な情報となる。そこで本ロボットでは、非破壊で保護管内部の水分を連続的に測定できる仕様となっている。

(b) 水分測定技術

水分測定技術としては、表一3に示す2つの技術がある。この2つの技術に関して、写真一4に示す模擬斜材で実験を行い、どちらの技術が斜材の水分測定に適しているか検討を行った。その結果、マイクロ

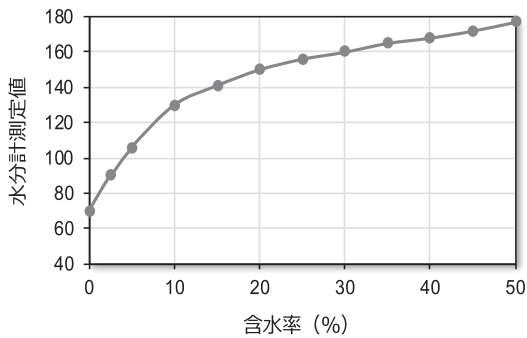
表一3 非破壊で水分量を測定する技術

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 MHz	測定物に電流を流して、その電気容量の変化を水分値に置き換え表示する。



写真一4 模擬斜材

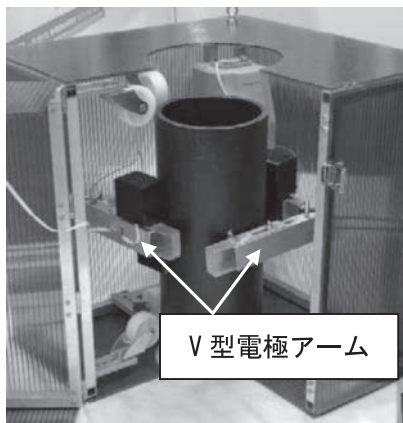
波式は、保護管内部の水分と水分計測定値に相関が見られなかったが、電気容量式については、**図一1**に示すように水分（含水率）と水分計測定値に高い相関があることが分かった。以上より、本ロボットでは、電気容量式を採用することとした。



図一1 電気容量式の試験結果

(c) 水分測定ユニットの概要

水分測定ユニットは、**写真一1**に示すように基本ユニットに牽引されて斜材保護管をガイドとして移動しながら水分量を測定する。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**写真一5**および**図一2**に示すような構造のV型



写真一5 V型電極アーム

電極アームを採用している。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。水分計測定値は、水分以外に斜ケーブルの保護管内での位置の影響を大きく受け、変動することが考えられる。このため、V型電極アームは、**図一2**に示すように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。

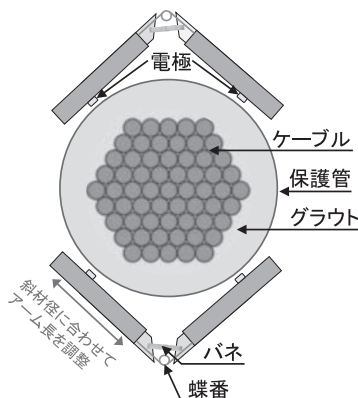
(3) 斜ケーブル（張力）点検

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（従来法）では、斜材の端部に加速度計を取り付け、**写真一6**のように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。従来法では、加速度計を取り付ける場所が点検員によりセットできる橋面上付近となることから、一般に振動（加速度）が小さいため精度の高い測定結果が得られない場合があった。

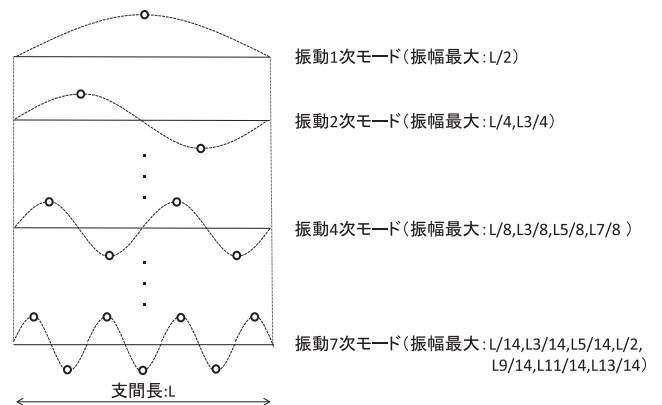
基本ユニット内部には加速度計が搭載されており、斜材の任意の位置での加速度を測定できる。すなわ



写真一6 加振状況例



図一2 V型電極アームの模式図



図一3 加速度測定ポイント（図中○印）

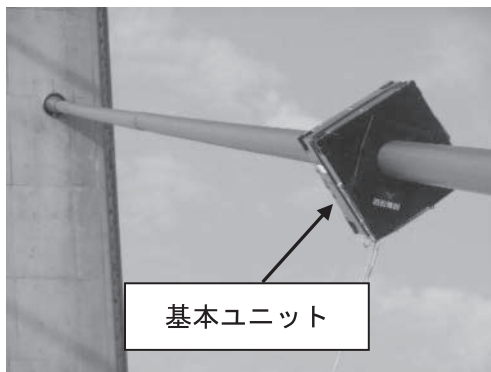
ち、**図—3**のように振幅が最も大きくなる斜材の振動モードの腹の位置に本ロボットを停止させることで高い精度での加速度の測定が可能となる。また、斜材長が長いものでは、人力加振無しでも常時振動で加速度計測を行うことができる。

3. 橋梁での点検事例

本ロボットは、これまでに6橋の点検実績がある(2023年4月時点)。ここでは、その一例を紹介する。

(1) 保護管および定着部点検

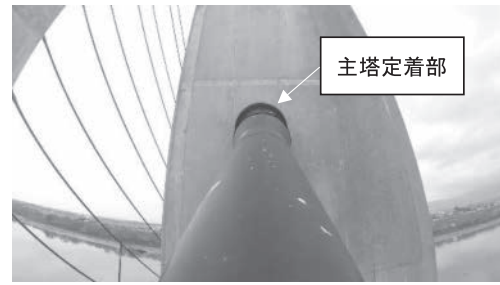
写真—7に本ロボットでの点検状況を示す。本ロボットによって斜材の全周・全延長の画像を取得し、その画像データを自動損傷検出ソフトで分析した結果の一例を**写真—8**に示す。自動損傷検出ソフトを用いることで、データ分析の効率化を図れるとともに、従来の点検方法では見落としがちな小さな損傷まで抽出することができる。さらに、自動損傷検出ソフトでは、損傷の大きさや位置情報を含めて斜材全体の損傷図(展開図)を作図することもできる。また、定着部の撮影例を**写真—9**に示す。なお、点検により、本橋梁の保護管および定着部には問題となる損傷がないことを確認した。



写真—7 点検状況



写真—8 分析結果例



写真—9 主塔側定着部の状況

(2) 保護管内部の水分点検

斜材下端部のグラウト注入孔の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が侵入する可能性があっ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。

水分測定の結果は、**表—4**に示すように注入孔の下側も含め全ての測定位置において水分がないと判定され、本橋梁の斜材に関して保護管内部は健全な状態であることを確認した。

表—4 水分測定の結果

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	

(3) 斜ケーブル(張力)点検

張力点検では、L/2点、L/4点、L/8点の3箇所です本ロボットを停止して、常時振動で5分程度の加速度データを取得し張力を求めた。なお、比較のために橋面付近に加速度計を設置してロープにより人力加振を行う従来法も実施した。従来法では人力加振で約5分の加速度データを取得した。

図—4には、本ロボットで得られた加速度データをFFT解析した一例を示す。**表—5**には2つの方法で求められた張力を示す。本ロボットで求めた張力は、従来法とほぼ同じ値となっており、従来法に代わる技術として適用できることが分かった。なお、本橋梁に関しては、張力の減少はなく、健全な状態であることを確認した。

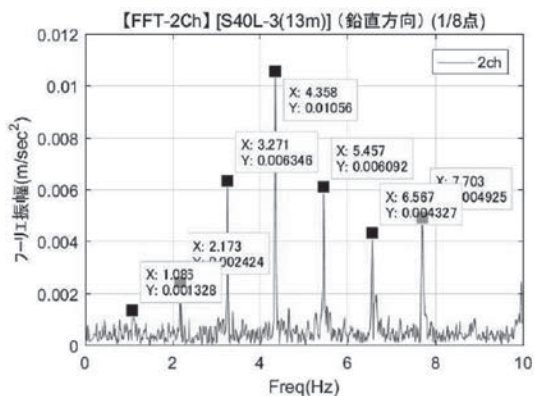


図-4 FFT解析の一例

表-5 張力推定結果

張力 (kN)		比率
①従来法	②多機能型点検ロボット	(②/①)
5,252	5,053	0.96

4. おわりに

以下にまとめを示す。

- ①斜張橋斜材の保護管の損傷、水分測定および張力を1台で点検できる、多機能型斜材点検ロボット「コロコロチェッカー®」を開発した。
- ②高所作業車等による従来の点検方法と比較し、本ロボットによる保護管の損傷の点検精度は高く、また、自動損傷検出ソフトを用いることによりデータ分析

の効率化が図れる。

- ③水分および張力測定の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であった。

当社では、本ロボット以外にも、水路トンネルを自律飛行で点検できるロボット「トンネルマンボウ®」³⁾等も開発しており、社会資本の点検業務の省人化・効率化を目指して、さらなる開発を進める予定である。

謝辞

張力測定においてご協力頂きました大日本コンサルタント(株)の平山博氏、実橋梁での測定にご尽力頂きました第一復建(株)の園田耕平氏に対して、感謝の意を表します。



《参考文献》

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報，2019
- 2) (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，2012
- 3) 原田耕司：飛行船型の水路トンネル調査ロボットの開発「トンネルマンボウ」，建設機械施工，pp.59-63，Vol.73，No.4，2021

【筆者紹介】

原田 耕司 (はらだ こうじ)
西松建設(株)
技術研究所 主席研究員

