

斜張橋の斜材外観調査ロボットの開発

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

原田 耕司*

Koji Harada

盛重 知也***

Tomoya Morishige

伊藤 幸広**

Yukihiro Ito

迫 綾子*

Ayako Sako

要 約

斜張橋の斜材の保護管の外観調査には、高所作業車を用いる場合が多いが、調査範囲の制限などの課題があった。そこで、保護管の外観を調査するための外観調査ロボットを開発した。開発した外観調査ロボットの外形寸法は566×566×566 mm、質量は31.6 kgであり、2人で運搬、設置および調査が可能である。また、外観調査ロボットには、保護管外観全周を調査できるように4台のCMOSカメラが搭載されており、その画像は、地上のモニターによりリアルタイムで確認出来るとともに動画として保存が可能であり、記録した動画から損傷のサイズを計測できる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 外観調査ロボットの概要
- § 3. 性能評価実験
- § 4. 実構造物での調査事例
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

斜張橋は、神奈川県津久井郡に1960年に建設された旧勝瀬橋（橋長：128.6 m、幅員：4 m）が我が国での初めての事例であり、その後、道路橋だけでも約320橋と多くの斜張橋が建設されている¹⁾。

この様に多くの斜張橋が我が国でも建設されているが、近年、斜張橋の経年化に伴い、その維持管理の重要性が増してきている。斜張橋の維持管理を行う上で重要なポイントは、その生命線とも言える斜材の機能保持が挙げられるが、斜材の調査に関する技術開発に関しては、ほとんどなされていないのが現状である。斜材は、斜ケーブル、定着部、制振装置、保護管および充填材で構成されているが²⁾、これらの中で保護管は、常に外的要因にさらされており劣化の可能性が高い部材である。

保護管の調査では、高所作業車を用いて目視により行う場合が多いが、橋面上30 m程度の高さまでが限界であり、それ以上高い箇所に関しては、望遠鏡による遠望

目視が行われているため、大きな損傷以外は確認できなかった。

そこで、小さな損傷まで調査するために、斜材をガイドに自動で昇降し、斜材保護管の外観全周を撮影できる小型軽量のロボット（以下、外観調査ロボットと呼ぶ）を開発した。

§ 2. 外観調査ロボットの概要

開発した外観調査ロボットは、図-1に示すように、斜材をガイドに昇降するカメラを搭載したロボット本体と、ロボット本体を無線により遠隔操作するコントロールボックスにより構成される。

ロボット本体およびコントロールボックスとも小型軽量であるため、十分な設置スペースが確保出来れば、通常は交通規制を行うことなく調査が可能である。

以下に、ロボット本体とコントロールボックスの仕様および機能について述べる。

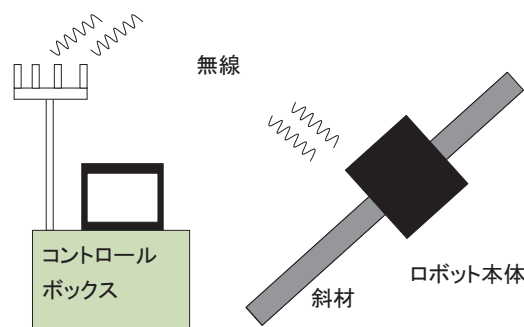


図-1 外観調査ロボットの構成イメージ

* 技術研究所土木技術グループ

** 佐賀大学大学院

*** 関東土木（支）足柄（作）

2-1 ロボット本体

(1) 外形・質量

ロボット本体の外観を写真-1に、その仕様を表-1に示す。外形寸法は566×566×566 mm（突起物を除く）であり、その質量は31.6 kgである。橋面上の斜材定着装置周辺の狭隘な場所でも、作業員2人で運搬、設置および調査ができるよう小型軽量のものとした。

ロボットの外周には、黒色のプラスチック板を取り付けている。黒色を採用した理由は、撮影画像の色調を安定させるための遮光板の機能と交通事故防止のために走行車両の運転者から視認され難くしたためである。

ロボット本体の下側1/4の部分は、ヒンジにより開閉できる構造となっており、下側部分を開けて斜材への設置を行う構造となっている。

(2) 昇降装置

ロボット本体は、図-2に示すようにギヤヘッド付きのACモータにより駆動する鼓形のローラーを、PE管の上面に2個配置することにより昇降させる。

鼓形ローラーの昇降装置はロボット本体内の前後に1組ずつあり、4輪駆動となっている。ローラーの表面には、保護管との摩擦を大きくするために、凹凸の付いたゴムシートを貼付けている。ACモータには、減速比1：90のギヤヘッドを接続させ、ローラーの無負荷時の回転速度は20 rpm、トルクは3.9 N・mとした。

(3) カメラ

保護管の撮影には、写真-2に示す4台のワイヤレスCMOSカメラを、照明には同様に4台のLEDライトを採用した。カメラは、59.5(W)×60(H)×131(L) mmであり質量は235 gである。また、有効画素数は約30万画素であり、撮影された動画は無線で伝送し、地上の受信機により受信、リアルタイムでモニタによる確認や記録ができるものとした。

なお、撮影した動画の受信可能な距離は約150 mである。

(4) 電源

ロボット本体の電源は、搭載した制御弁式のバッテリー（12V）から供給するものとした。ACモータの駆動はインバータを介して行った。したがって、ロボットは電源供給およびカメラの画像伝送ともコードレスとなっており、現場での作業性に優れている。

電源供給や画像伝送にコードを使用すると、調査する斜材が長い場合にはコードの質量が大きな負荷となるため、ロボット本体の駆動系を大きくする必要があるが、開発した外観調査ロボットはコードレスとしたことにより軽量化が可能となった。

2-2 コントロールボックス

コントロールボックスを写真-3に示す。4台のワイヤレスカメラに対応するために4台の受信機を設置した。各受信機にはSDカードが内蔵され、カメラから送信された動画の記録を行うことができる。4台の受信機に受



写真-1 ロボット本体の外観

表-1 ロボット本体の仕様

項目	仕様
外形寸法	566×566×566 mm
質量	31.6 kg
昇降装置	電動モーターによる自走式
調査速度	2.5 m/min（傾斜角 25°）
撮影機器	ワイヤレス CMOS カメラ
撮影画像	動画（AVI 形式）
電源	VRLA（制御弁式）バッテリー

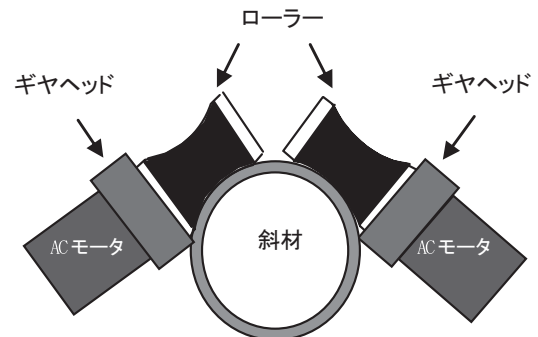


図-2 昇降装置の概要

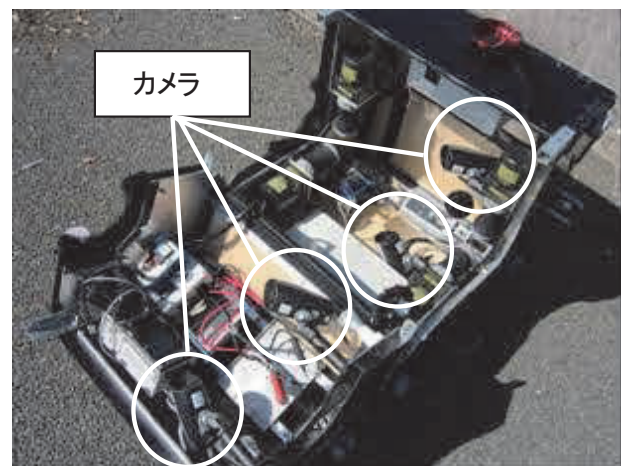


写真-2 ロボット本体の内部

信された画像は、画像分割器を通して液晶モニタに同時に表示することができる。

前述のロボット本体の各操作は、現場での作業性を考慮して、受信機上のボタンを押すだけで遠隔操作ができるよう単純化した。このシステムにより、地上でリアルタイムに保護管を観察しながらロボット本体の始動/停止、損傷箇所の動画の記録などが可能となった。

§3. 性能評価実験

開発した外観調査ロボットの性能を調べるため、室内において施工性能実験および損傷の計測精度検証実験を、屋外において性能実験を実施した。以下に、その概要を述べる。

3-1 施工性能実験

(1) 実験概要

ロボット本体の走行性能を調べるために、**図-3**のように保護管を設置し走行速度および牽引力の測定を行った。使用した保護管は、直径 140 mm、厚さ 10 mm のポリエチレン製とした。

実験要因は、傾斜角および風速、風向の影響とした。具体的には、保護管の傾斜角を 25°、30°、35° および 40° と変化させ、各角度における走行速度とバネばかりにより牽引力を測定した。

風速、風向の実験においては、傾斜角の実験と同じ条件で大型扇風機を用いて風をロボット本体側面から当てるケースと正面から当てるケースの 2 通りについて検討を行った。風速は、2.5 m/s、5.0 m/s、7.5 m/s および 10.0 m/s と変化させた。風速を 10.0 m/s までとした理由は、平均風速 10.0 m/s で現場作業が中止となることが多いためである。

なお、牽引力は、ロボット本体が回収用ロープを牽引できるかを確認するために計測したものである。すなわち、ロボット本体には、何らかのトラブルにより調査中に途中停止した場合のために、回収用ロープを取付けているため、その牽引が可能かを検討した。例えば、調査高さが 100 m 程度、傾斜角 40° の斜張橋の場合、回収用ロープの総質量は約 2 kg となり、牽引力として 13N が必要となる。

(2) 実験結果

無風で傾斜角を変化させた実験において、走行速度および牽引力の測定結果をそれぞれ**図-4** および **図-5** に示す。

走行速度は傾斜角 25° で最大となり 2.50 m/min であり、傾斜角が大きくなるほど走行速度が低下している。傾斜角 30° では走行速度が 2.25 m/min であり、40° では 1.70 m/min と傾斜角度 25° に比べ約 32% 低下しているが、現場での調査作業において支障のない走行速度であると考えられる。



写真-3 コントロールボックス

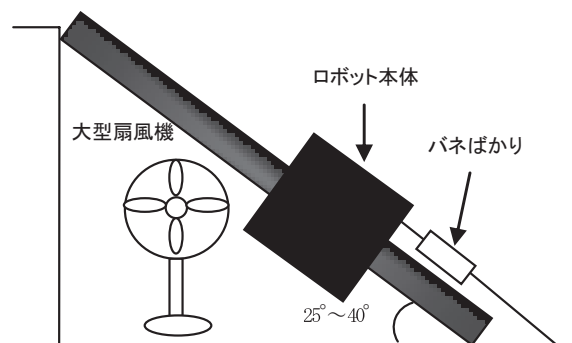


図-3 走行性能実験の概要

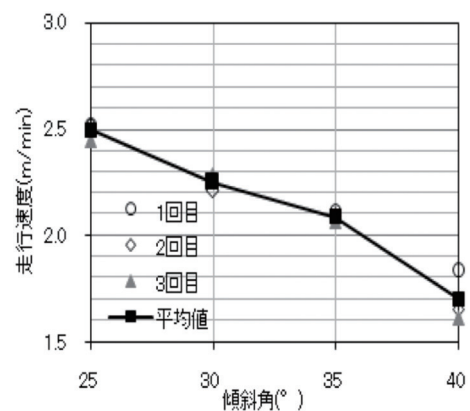


図-4 傾斜角と走行速度の関係

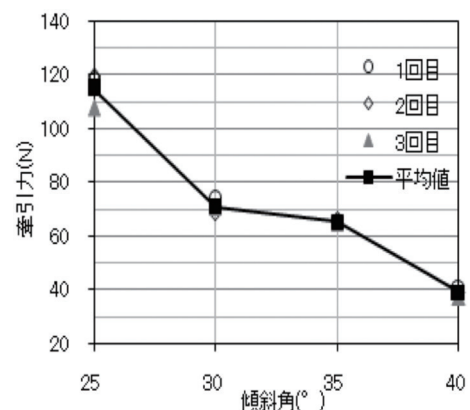
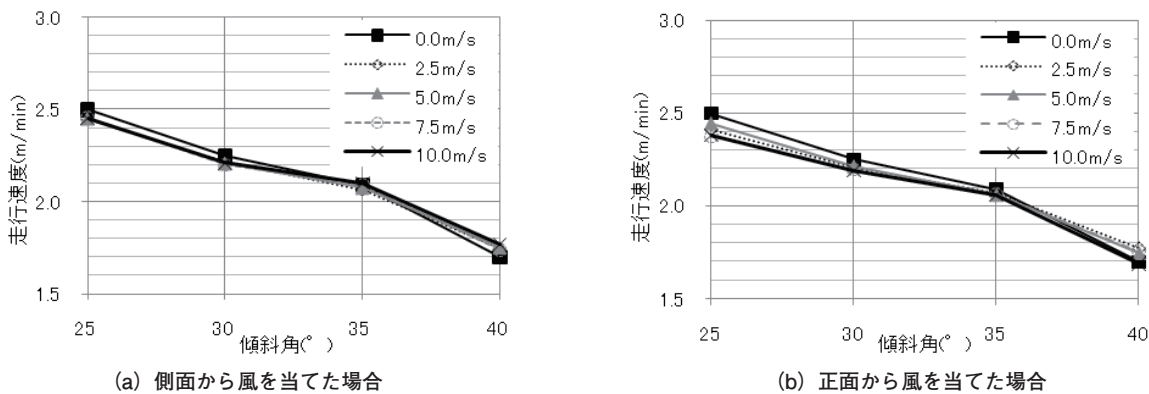
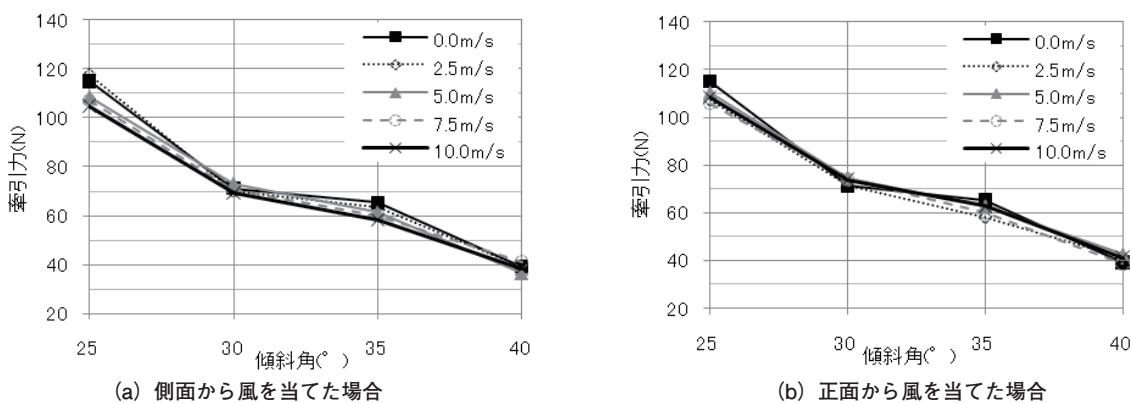


図-5 傾斜角と牽引力の関係



図一六 走行速度に与える風の影響



図一七 牽引力に与える風の影響

牽引力に関しては、傾斜角が大きくなるほど減少し40°の時に39Nとなるが、高さ100m以上の斜張橋であっても、回収用ロープを牽引できる性能を有していることが分かった。

ロボット本体の走行性能に及ぼす風の影響について検討を行った結果を図一六および図一七に示す。なお、いずれのグラフのプロットも3回の測定結果の平均値を示したものである。

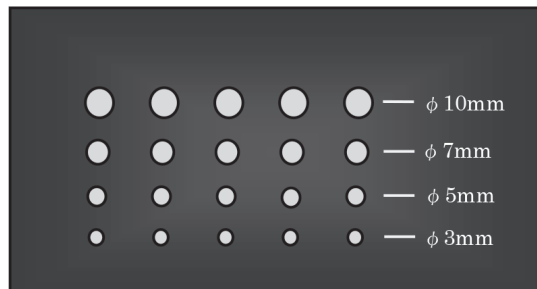
走行速度は、側面および正面から風を当てた場合でもほとんど影響がないことが分かる。傾斜角30°で正面から風を当てた場合、無風時と風速10.0m/sとは約0.06m/minの低下が見られる程度である。牽引力も同様に風速による影響は小さく、傾斜角40°で風速10.0m/sの風を側面から当てたケースでも牽引力は38.5Nであり、十分な能力を有していると言える。

3-2 損傷の計測精度検証実験

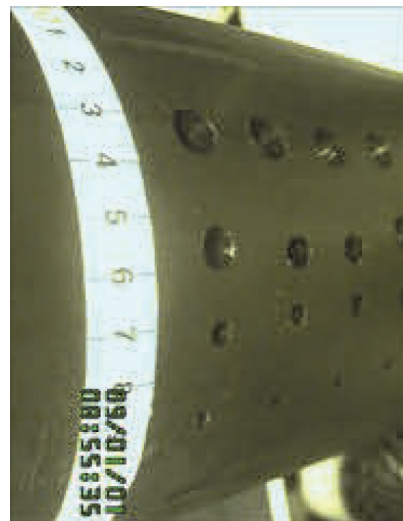
(1) 実験概要

保護管の損傷の形状・寸法は、腐食環境の評価や補修設計の重要な資料となるため、保護管に人工的に損傷を作成し、開発した外観調査ロボットによる損傷の計測精度について検証を行った。

損傷は、図一八および写真一四に示すような円筒形の溝とした。この円筒形の溝は、φ3mm、φ5mm、φ7mmおよびφ10mmのエンドミルを用いて作成した。



図一八 損傷の種類と配置



写真一四 損傷の種類と配置の状況

外観調査ロボットによる損傷の計測方法は、撮影された動画より静止画を切り出し、画像解析により損傷の形状・寸法を計測した。実験では、人工的な損傷を有した保護管をロボット本体内にセットし、静止した状態で動画を撮影した。計測精度の検証は、ノギスにより計測した溝の直径の実測値と比較することにより行った。

(2) 実験結果

ノギスによる実測値と外観調査ロボットにより取得した静止画から画像解析によって求めた解析値の関係を図-9に示す。単回帰式の傾きは0.826であり、決定係数は0.989である。画像による解析値とノギスによる実測値とは相関性は高いが、画像による解析値は15~20%程度大きく計測される傾向があったが、実用上問題のない範囲であると考えられる。

以上より、室内試験の結果、外観調査ロボットは実用上十分な計測精度を有していることが分かった。

3-3 屋外における性能実験

(1) 実験概要

外観調査ロボットの屋外での操作性や損傷の計測精度を調べるため、屋外に長さ約17mの保護管を設置し性能実験を行った。

保護管の傾斜角は30°とし、その表面には図-10に示すような損傷を付けた。損傷の種類としては、20mm、40mm、60mmおよび80mmの4種類の長さの溝（溝の幅1.1mm、深さ0.5mm）を保護管の円周方向および長手方向に付けた。実際の保護管での損傷は、室内試験で測定した円形の溝より、図-10のような線状の傷が多いと考えられるため、屋外ではこのような損傷を採用した。

保護管には図-10の損傷を2箇所につけ、2台のカメラで走行中に動画を撮影した。走行実験は3回行い、画像解析より求めた解析値とメジャーによる実測値との比較を行った。

(2) 実験結果

円周方向の溝に関する計測結果を図-11に、長手方向に関する計測結果を図-12に示す。円周方向および長手方向ともに、単回帰式の傾きが1に近く、決定係数が0.99以上と高い相関性が見られた。

溝の長さが長くなるほど誤差が大きくなり、長さ80mmの時に誤差が最大で、円周方向は6mm、長手方向は3.7mmであった。この理由としては、溝が長くなるほど画像処理の段階において溝の先端部が特定しづらくなり誤差が大きくなったものと考えられる。

作業性に関しては、バッテリー取付けなどの準備から、ロボットを保護管に設置し走行開始するまでに要する時間は20分程度であり、操作も簡易で良好なものであった。

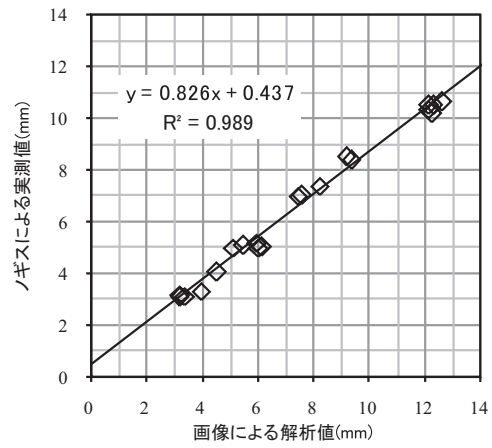


図-9 ノギスによる実測値と画像解析により求めた解析値の関係

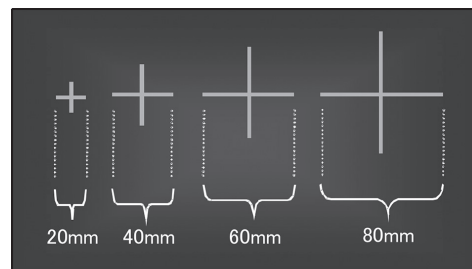


図-10 損傷の種類と形状

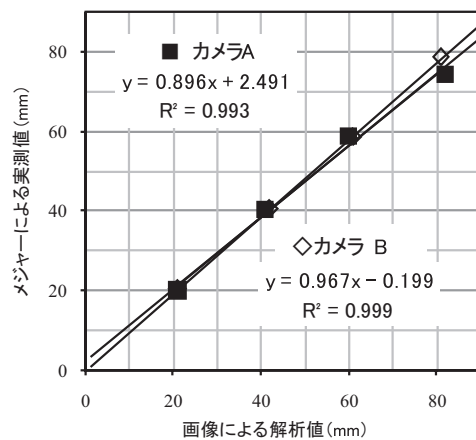


図-11 円周方向の計測結果

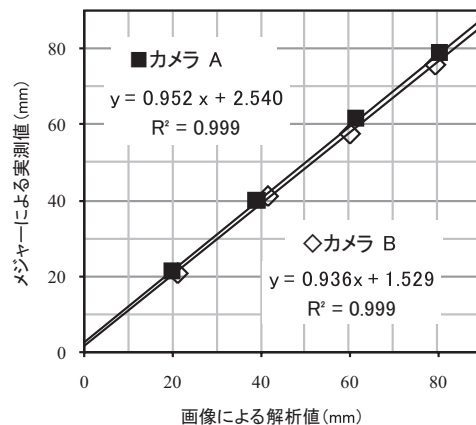


図-12 長手方向の計測結果

§4. 実構造物での調査事例

以上により性能を確認した外観調査ロボットを、実際の斜張橋に適用した。調査対象の斜張橋は、東名高速道路の東名足柄橋である。

東名足柄橋の斜材の諸元を表一2に示す。斜材の本数は合計80本あり、最も長い斜材は約100mである。

調査状況を写真一5に示す。合計80本の斜材を約1ヶ月かけて無事に全数の調査を完了した。

§5. まとめ

以下にまとめを示す。

- (1) 斜張橋の斜材保護管を、精度よく安全に損傷等を調査できる自走式の外観調査ロボットを開発した。
- (2) 風速10.0 m/sまでの範囲内であれば、外観調査ロボットの走行速度および牽引力は風の影響をほとんど受けず、調査作業に支障がないことが分かった。
- (3) 斜材保護管の損傷等の長さを、実用上問題のない精度で計測できることを確認した。
- (4) 実構造物の斜材保護管の調査に外観調査ロボットを適用し、合計80本の斜材の調査を無事に完了した。

参考文献

- 1) 道路統計年報2011, 全国道路利用者会議, 2012
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会: PC斜張橋・エクストラードード橋維持管理指針, 2013

表一2 斜材の諸元

項目	諸元
斜材数	80本
最大長さ	約100m
外径	φ140mm, φ160mm
傾斜角度	約30°



写真一5 調査状況