

レーザ振動計とドローンを用いた鉄道橋検査技術

上半文昭

鉄道橋の健全度検査手法の向上を目的として、筆者は、LDV (Laser Doppler Vibrometer: レーザドップラー振動計) ならびにドローンを用いた遠隔非接触検査技術を開発した。まず、自動視準機能を付与した長距離型の LDV を開発し、長大斜張橋のケーブル検査に応用した。次に、橋梁の桁下面や側面に付着して電動の移動機構で走行しながら変状箇所の撮影、打音検査、鉄筋探査などを行うことができる構造物検査用ドローンを開発した。また、開発した LDV とドローンを用いて、コンクリート部材の強度や剛性と関連する物性値である弾性波速度を推定する手法を提案した。

キーワード：鉄道橋検査、非接触測定、LDV、ドローン、ケーブル張力、かぶり厚さ、弾性波速度

1. はじめに

筆者は、遠隔位置からの非接触測定技術の応用で、鉄道橋の検査に必要であった高所作業や線路内への立ち入り作業を省略し、検査作業を効率化する技術の開発に取り組んでいる。具体的にはこれまで、レーザドップラー振動計 (LDV) による非接触振動測定技術の精度を向上して、現場向けの測定システム「U ドップラー (Undisturbed laser Doppler velocimeter)」を開発し¹⁾、列車通過時の橋りょうの動的たわみ測定や、平時の極微小な振動である常時微動による高架橋の固有振動数測定などを実用化するとともに、測定距離を長距離化して長大構造物への適用についても検討してきた²⁾。次に、局所的な変状を人が高所等に接近せずに把握する手法としてドローンの活用を検討し、構造物検査用

ドローン²⁾を提案した。同装置は、橋りょう桁下部や高架橋床版裏の付着走行による変状撮影に特化することで、変状の検出精度を高めるとともに、鉄道橋上部への侵入事故を防止するものである。このような LDV とドローンをキーツールとして、図-1 に示すように鉄道橋の健全度を遠隔非接触で評価可能とし、検査業務の効率化、安全化を図っている。

本報告では、LDV とドローンを用いた鉄道橋検査技術開発の検討状況を紹介する。非接触測定技術では、不可視光を用いた長距離型 U ドップラーに測定対象の自動視準機能⁴⁾を加えて測定作業の効率化を図った。ドローンでは、鉛直面の検査にも活用できる新型ドローンを開発するとともに、コンクリート橋の局所的な変状発生危険箇所の検出を目的として、かぶり厚さ測定や弾性波速度測定手法⁵⁾を提案した。



図-1 鉄道橋健全度の遠隔非接触評価手法

2. 長距離型非接触振動測定装置の開発

(1) 長距離型Uドップラー

写真一1に、長大構造物を効率的に非接触振動測定するために開発した長距離型Uドップラーを示す。表一1に同装置の主な仕様を示す。この長距離型Uドップラーは、自己振動の補正機能¹⁾を付加した高出力の不可視光LDVを、水平・鉛直2方向に制御できる回転台に搭載した装置である。本装置を用いれば、構造物上の測定点に反射材等のターゲットを設けることなく、微小な振動を高速サンプリングで計測することができる。



写真一1 長距離型Uドップラーシステム

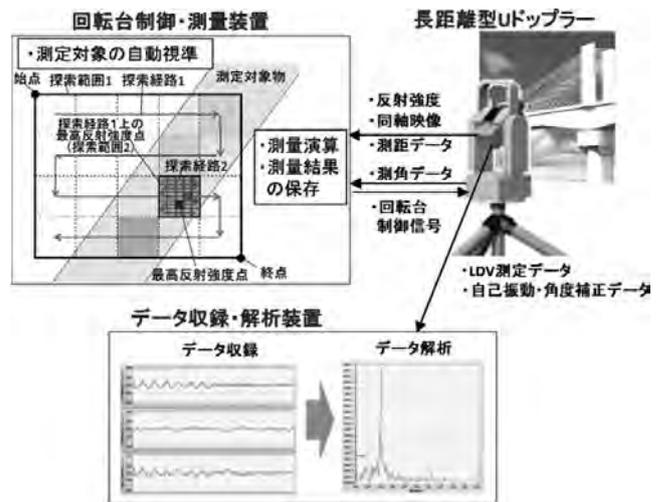
表一1 長距離型Uドップラーの主な仕様

項目	仕様
応答周波数範囲	DC~25kHz
測定速度範囲	0.2μm/sec~1m/sec
測定距離	5m~100m超(反射材不要)
レーザー光源	1550nm(赤外)
レーザー光量	出力10mW(クラス2)
自己振動補正機能	有り
測角精度	0.003°(水平および鉛直)
回転繰り返し精度	0.008°
自動視準機能	有り
標準測量精度	±1mm(0.05~300m)

(2) 測定対象の自動視準⁵⁾

測定対象とUドップラー間の距離が極めて長い場合などには、長距離型を用いても非接触測定に十分な反射レーザを受信できず、熟練者であっても測定に適した点の探索に長い作業時間を要する場合があった。

そこで、非接触測定に適した高反射強度点の自動検出アルゴリズムを検討し、水平鉛直回転台の自動制御で測定対象を自動視準する手法を長距離型Uドップ



図一2 自動視準測定の流れ

ラーに適用した⁴⁾。図一2に自動視準測定の流れを示す。まず、回転台制御装置に表示されるLDV視準方向の同軸カメラ映像を参考に、LDVを概ね測定対象方向に向け、同カメラ映像上で測定対象の探索範囲の始点と終点ならびに探索範囲の分割数を指定する。LDVは探索経路1に沿ってレーザを照射し、探索範囲内の反射レーザの強度分布を取得する。さらに、探索経路1上の最高反射強度点周辺の小領域を自動探索(探索経路2)して、より非接触測定に適した点を検出する。なお、測定に十分なレーザ反射強度の閾値を事前に設定しておけば、全探索範囲を検索せず最初に閾値を超えた小領域内を自動探索することで、探索時間を短縮できる。

検出された高反射強度点を視準点として振動測定を実施する。データ収録・解析装置はLDVが非接触測定した振動データとLDVの自己振動および傾斜角のデータを受信し、振動データに自己振動補正を施して収録するとともに、検査内容に応じたデータ解析処理を実施する。

3. 長大橋ケーブル張力の非接触測定

(1) ケーブル張力の非接触測定手法

近年、鉄道橋として採用されるようになった斜張橋やエクストラドーズド橋は、一般に長大かつ吊りケーブル等の多数の部材で構成されることから、検査や状態監視作業の効率化・高度化が課題である。そこで、長距離型Uドップラーで長大橋のケーブル張力を推定する手法を提案した²⁾。従来は個々のケーブルに加速度計を取り付けてハンマー加振して張力を調査してきたが、提案手法では、斜材の常時微動(人為加振によらない平時のごく微小な振動)を河岸等に設置した

長距離型 U ドップラーで測定して調査する。

張力の推定手法は次の通りである。ケーブルの常時微動を測定し、そのフーリエスペクトルを求めると、1次（基本）固有振動数とその整数倍の高次振動数の卓越が確認できる。1次固有振動数と弦の線密度がわかれば、弦の振動理論から張力を概算することができる。なお、本手法が十分な精度を有することは、文献2にて検証済みであるので、以下では自動視準によるケーブル常時微動の測定性能について示す。

(2) 自動視準による斜張橋ケーブルの振動測定

(a) 試験方法

図-3に対象橋りょうを示す。H型主塔からの2面吊り11段のハープ型マルチケーブル（斜材）で支間長133.9mの主桁を支持する構造のPC斜張橋である。河岸の地盤上に自動視準機能付き長距離型Uドップラーを設置し、起点側右斜材11本の測定を実施した。長距離型Uドップラーと測定対象間の距離は120～150m程度で、斜材に反射材等を設置することなく測定を実施した。自動視準の後、斜材1本あたり30秒間の常時微動測定（速度レンジ2mm/sec/V、サンプリング周波数1kHz）を行い、最初の20秒間をFFT解析対象として1次固有振動数を推定した。比較対象として、熟練者による手動視準での測定を同一測定日に実施した。

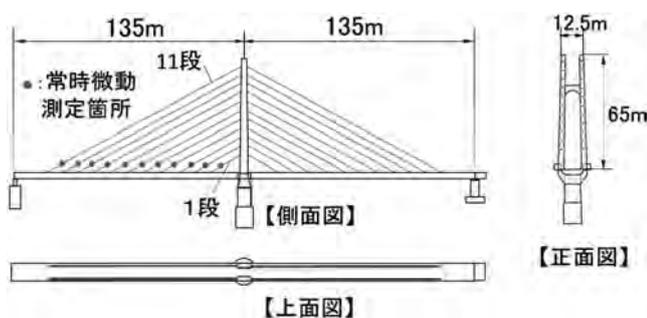


図-3 測定対象橋梁

(b) 試験結果

図-4に回転台制御装置に表示されたLDV視準方向の同軸カメラ映像と探索範囲の設定例と探索範囲のレーザ反射強度分布の測定結果を示す。斜材位置でのみ反射強度が高まること、斜材上でも反射強度にばらつきがあることが確認できた。図-5に自動視準による斜材常時微動の測定・解析結果例を示す。微小な常時微動波形を測定でき、そのFFT解析で1次固有振動数を推定できた。図-6に自動視準と熟練者視準による斜材固有振動数の推定結果を比較して示す。両者

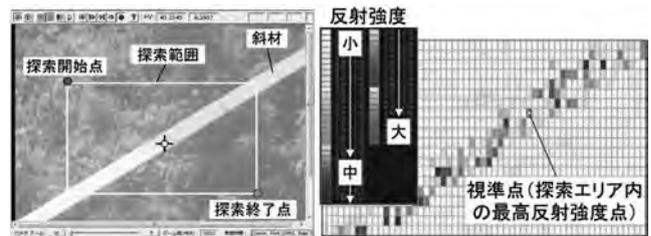


図-4 探索範囲の設定画面と反射強度分布

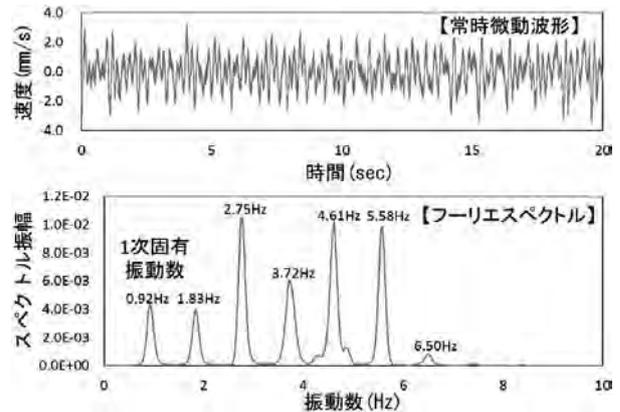


図-5 自動視準による斜材常時微動測定結果例

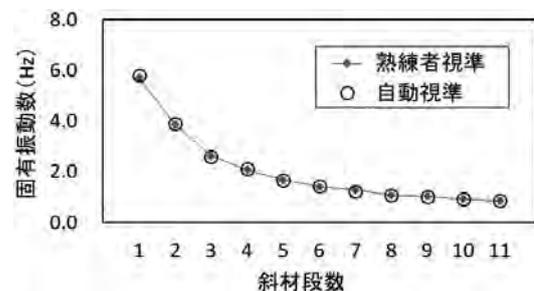


図-6 自動視準と熟練者視準による測定結果

が十分に一致することが確認できた。また、斜材11本の視準、測定、解析に要した時間は、熟練技術者による場合が40分で、自動視準の場合は20分に短縮できた。

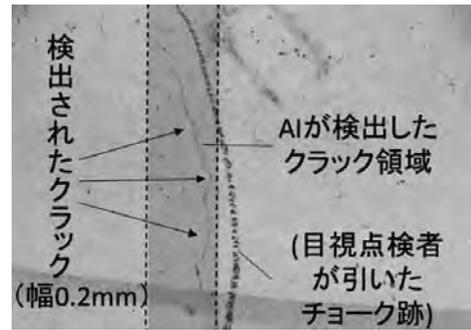
4. 構造物検査用ドローンの開発

高所の情報収集にドローンが有用であるが、鉄道橋の検査に適用する場合、線路への侵入や墜落による事故を防ぐ工夫が不可欠である。そこでまず、橋りょうの桁下部の調査に特化した写真-2に示す「付着走行ドローン」を開発した²⁾。同装置は、ドローンの上昇力で下面に付着し、機体上部に搭載した電動式の移動機構で安定走行しながら変状箇所の撮影を行う装置である。

付着走行ドローンに鉄筋探査機を搭載してコンクリート面を走行することで、鉄筋探査機が通過する測



写真一2 開発した付着走行ドローン例



図一7 撮影画像例とAIによるクラック検出



写真一3 鉛直面にも適用できる新型ドローン

線上の鉄筋のかぶり厚さ（コンクリート橋の鉄筋を覆うコンクリートの厚さ）を測定でき、小型の打音機を搭載して、打音検査を行うこともできる⁵⁾。

さらに、構造物検査用ドローンの適用対象の拡大をめざして、写真一3に示す鉛直面の検査を行える新型の構造物検査用ドローンも開発した。新型ドローンは、下面、鉛直面の両方に適用可能で、カメラ、鉄筋レーダ、打音機などを搭載でき、面の移動機構の性能を向上し、不陸のある面の追従性も高めたものである。

5. 変状箇所撮影

開発した構造物検査用ドローンは、面に付着した状態で撮影対象に自在に近づき、機体が安定した状態で画像撮影できるため、変状箇所を詳細に撮影することができる²⁾。

写真一4は新型ドローンによる実橋梁のコンクリート桁下面の撮影状況、図一7は撮影画像例である。現状、AIにより撮影画像上からクラックを自動検出する段階まで技術開発を進めている。



写真一4 桁下面の撮影状況

6. ドローンによるかぶり厚さ測定

実橋梁のコンクリート桁下面を対象として、かぶり厚さ測定を実施した。写真一5に新型ドローンによる内部鉄筋のレーダ探査状況を示す。図一8は新型ドローンによるかぶり厚さの測定結果を、比較のために実施した足場による熟練者測定結果と比較して示したもので、両者が十分に一致することが確認できた。

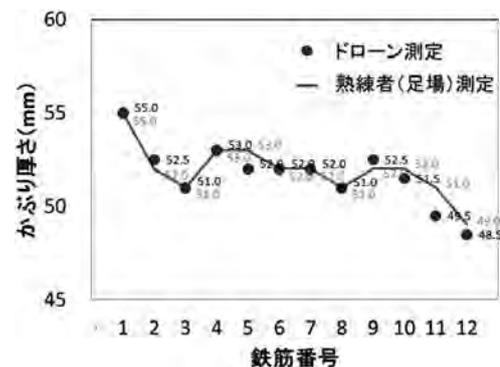
7. LDV とドローンによる弾性波速度測定

(1) 弾性波速度測定手法

構造物の損傷・劣化による振動特性変化ならびに構造物の健全度は、構造物の構成材料の剛性や強度と密接な関係にある。それらの材料物性を遠隔非接触で測定できれば構造物健全度の評価精度向上に貢献でき



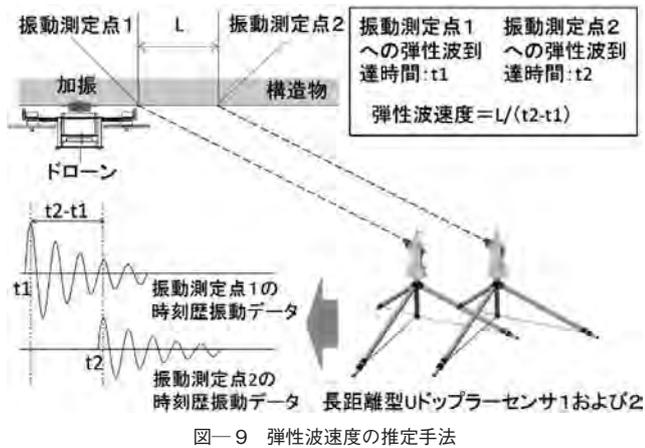
写真一5 内部鉄筋のレーダ探査状況



図一8 かぶり厚さの測定結果

る。そこで、材料の剛性や強度の評価指標となりうる弾性波速度⁶⁾をLDVとドローンを用いて遠隔非接触測定する手法を提案した⁵⁾。

提案手法は、ドローンの打音機で加振して発生させた衝撃弾性波を長距離型Uドップラーで非接触測定することで測定対象を伝播する弾性波の速度を求めるものである。図一9に提案手法の概要を示す。まず、ドローンで構造物下面を加振して衝撃弾性波を発生させる。次に、加振点を含めて一直線上に位置する2点間距離Lの2点の振動を、2台のLDVで非接触同期測定する。得られた振動データから、2つの測定点への弾性波の到達時間の差を求め、この到達時間差で2点間距離Lを除することで、弾性波速度を推定する。



(2) 測定事例

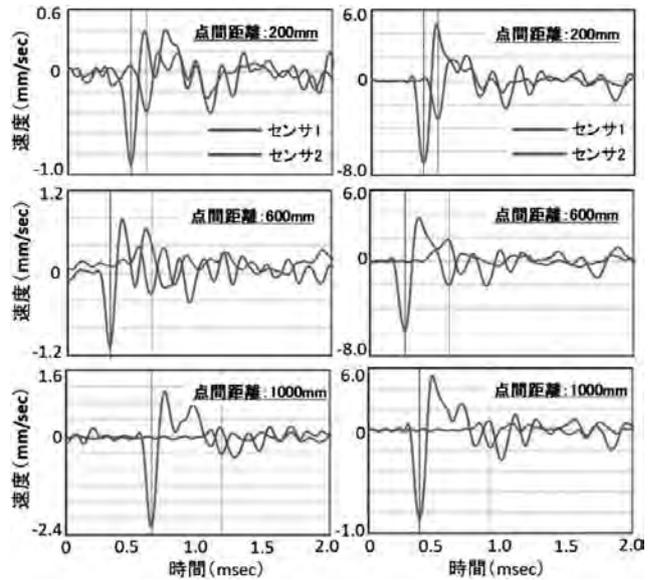
実橋りょうの桁下面を対象として、弾性波速度推定手法の検証試験を実施した。写真一6に対象橋りょうと測定、加振状況を示す。調査対象の桁は、経年した桁高700mmのRCホロー桁である。弾性波の伝播経路が複雑になる可能性があったので、事前に赤外線検査や打音検査を実施して内部変状がみられない場所を測定箇所として選定するとともに、足場を架設して熟練技術者がハンマー加振で調査した測定結果と比較することで、提案手法の妥当性を検証した。

ドローン加振または人力加振で桁下面に発生させた衝撃弾性波を地上に設置した長距離型Uドップラー（速度レンジ2mm/sec/V、サンプリング周波数100kHz）で測定した。センサ2の測定点をセンサ1の測定点から順次10cmずつ遠ざけて、ドローン加振、人力加振ともに計10ケースの測定を実施した。

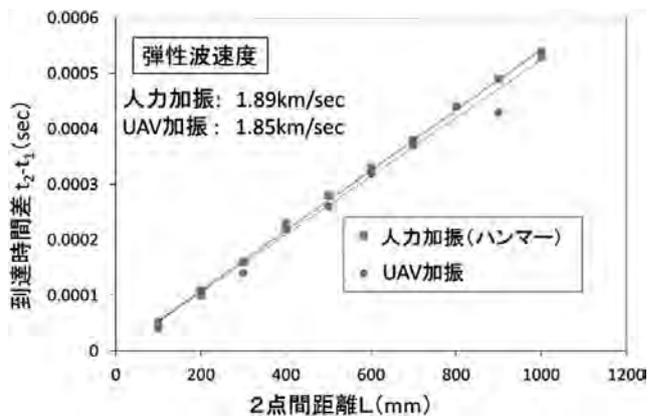
図一10に提案手法による衝撃弾性波の測定波形例を、人力加振による結果とともに示す。ドローン加振で発生した弾性波は、人力加振による弾性波と比較してその振幅が小さく、ばらつきもみられるが、その微



写真一6 弾性波の測定・加振状況



図一10 衝撃弾性波の測定波形例



図一11 2点間距離と弾性波到達時間差

小さな弾性波を長距離型 U ドップラーで非接触で計測できることが確認できた。また、2 点間距離 10 cm ～ 100 cm の測定点の 2 点同期計測で得られた走時から 2 点間の到達時間差を検出できた。図 11 に 2 点間の距離と弾性波到達時間差の関係を示す。2 点間距離と弾性波の到達時間差は正比例関係にあり、その傾きから推定した実橋りょうの桁下面コンクリートの弾性波速度は 1.85 km/sec であった。この値は、人力ハンマー加振による測定結果に対して誤差が 2.2% と小さく、限られた条件下ではあるものの提案手法の妥当性が確認できた。

8. おわりに

鉄道橋健全度の遠隔非接触評価手法の計測技術の向上と適用対象の拡大を目的として開発した、長距離型 U ドップラーと構造物検査用ドローンを紹介した。長距離型 U ドップラーの導入によって、従来は夜間作業 4 日間で行っているケーブル張力測定を日中 1 ～ 2 時間程度で実施可能とした。構造物検査用ドローンについては、新たな検査への応用の提案、撮影・測定デー

タの分析技術の向上、ならびに最新の機体制御技術の導入などの改良を現在も継続している。なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

J|C|MA

《参考文献》

- 1) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」の開発、鉄道総研報告、Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 2) 上半文昭：鉄道橋検査を目的とした遠隔非接触測定技術の開発、鉄道総研報告、Vol.31, No.4, pp.53-58, 2017
- 3) 上半文昭：レーザー計測とドローン空撮による落石危険度評価システム、JREA, Vol.59, No.6, pp.16-19, 2016
- 4) 上半文昭：遠隔非接触測定による鉄道 PC 斜張橋の振動特性調査手法、鉄道工学シンポジウム論文集、Vol.21, pp.99-106, 2017
- 5) 上半文昭：遠隔非接触計測による鉄道橋健全度の評価手法の開発、鉄道総研報告、Vol.32, No.6, pp.41-47, 2018
- 6) 岩野聡史、森濱和正、渡部 正：衝撃弾性波法と微破壊試験の併用による構造物コンクリートの圧縮強度推定方法の提案、土木学会論文集 E2, Vol.69-, No.2, pp.138-153, 2013

【筆者紹介】

上半 文昭（うえはん ふみあき）
（公財）鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部
部長

