

論文 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

上半 文昭¹

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学研究室（〒185-8540 東京都国分寺市2-8-38）
E-mail:uehan.fumiaki.41@rtri.or.jp

レーザを用いた遠隔非接触測定技術で、鉄道PC斜張橋の維持・管理のための振動測定調査を効率化・安全化する手法を提案した。まず、長大橋測定用に開発した長距離型Uドップラーで、PC斜張橋のケーブルの常時微動と張力を測定する手法を提案し、実橋りょうの現地測定試験を行って従来手法の測定結果と比較することで測定精度を調査した。次に、遠方に位置するケーブルの自動視準手法と同手法を適用した自動視準機能付き長距離型Uドップラーを開発し、室内試験と現地試験で機能を確認した。その結果、開発した非接触振動測定システムは、鉄道PC斜張橋の振動特性調査の効率化に有用であることが確認できた。

Key Words : cable-stayed bridge, non-contact measurement, LDV, microtremor, autocollimation

1. はじめに

鉄道橋におけるPC斜張橋の採用実績はまだ少なく、斜材（吊りケーブル）のリラクゼーションや各部材の疲労など、その経年特性の定期的な検査が必要であると考えられる。しかしながら、PC斜張橋は一般に長大かつ多数の部材で構成されることから、検査・状態監視作業の効率化・高度化が重要な課題である。

従来、斜張橋の斜材張力は個々の斜材に加速度計を取り付けてハンマー加振して調査されてきた。主桁の動的たわみは主桁にピアノ線を取り付けて地上のたわみ計で測定する手法などが用いられてきた。これらは、いずれも時間と労力を要する調査手法であった。

一方、鉄道総研では、レーザを用いた非接触振動測定技術の構造物検査への応用に取り組んできた¹⁾。非接触測定で高所等へのセンサ類の設置作業を省略するもので、[図-1](#)に示すように、PC斜張橋の斜材や主桁などの部材の振動特性調査に適用できれば、作業を大幅に効率化・安全化できるものと期待できる。

そこで、PC斜張橋などの長大構造物の遠隔非接触測定に適用するために、非接触測定距離を延長するとともに、極めて遠方に位置する測定対象を正確かつ効率的に視準する機能を加えた新たな非接触振動測定システムを開発し²⁾、その機能を確認した。以下、まず開発したシステムの概要を説明し、次に実橋りょうの現地測定試験を行い従来手法の結果と比較することでPC斜張橋の振

動特性調査に遠隔非接触測定を適用可能であることを確認²⁾し、さらに新たに提案した斜材の自動視準手法の機能と効果を室内試験と現地試験で検証した。

2. 長大構造物の非接触振動測定システムの開発

(1) 非接触振動測定システム「Uドップラー」

鉄道総研では、構造物の振動を非接触で測定する装置

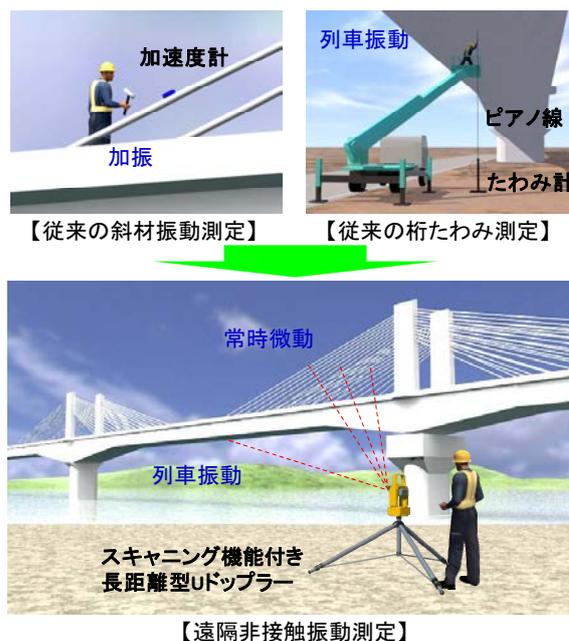


図-1 長大橋振動特性調査への遠隔非接触測定の適用

として、レーザドップラー速度計（LDV：Laser Doppler Velocimeter）に着目し、同センサに屋外での大型構造物測定に適用するための改良を施して、構造物診断用の非接触振動測定システム¹⁾を開発・実用化した。後述する自己振動の補正技術が同システムの主たる特長であるため、同システムを、外乱の影響を受けない LDV という意味を込めて「Uドップラー（Undisturbed laser DOPPLER velocimeter）」と呼ぶこととした。

LDV は、一定の周波数成分を持つレーザ光を、ある速度で移動している物体に照射すると、移動物体の持つ速度成分に比例して反射光の周波数が変化することを利用して、測定対象の振動速度を非接触計測する装置である。LDV はセンサと測定対象間の相対速度を検出するので、測定記録には LDV 本体の振動成分も含まれるため、屋外で構造物の微小振動を測定する場合には、LDV と三脚からなる系の固有振動や地盤に入力される各種ノイズ振動および風等の外乱の影響を無視することができない。そのため、Uドップラーでは、LDV の光学センサとは別途、Uドップラーセンサ筐体内に測定対象の振動周波数領域において LDV と等価な感度および位相特性を持つ接触型の振動センサを内蔵して振動速度を記録し、その記録を用いて Uドップラーセンサ本体の揺れ（自己振動）の影響をリアルタイム補正する手法を開発・導入した。

(2) 長距離型Uドップラー

図-2 に示す現場向けの Uドップラーシステム¹⁾²⁾は、赤色 LDV を活用しており、測定対象に反射材を設置しない場合には、測定可能距離は数 10m 程度であった。一方、長大橋の測定では、測定距離が数 100m に及ぶ場合がある。そこで、人の目に障害を与える危険が低い不可視光を高出力で照射することによって、人体への安全性を確保しながらより長距離の非接触測定を行うことができる不可視光 LDV（Polytec 社製 RSV-150）に自己振動の補正機能を付加して、図-3 に示す長距離型 Uドップラーを開発した。

(3) 水平鉛直回転台

図-4 に長距離型 Uドップラーを搭載して、遠方に位置する測定対象を高精度に視準させる装置として製作した水平鉛直回転台を示す。2系統のモータとエンコーダ、およびそれらの制御プログラムによって、搭載物を水平鉛直の2方向に回転させる装置で、総重量約10kgに達する不可視光LDV、自己振動補正装置、測量用距離計などを搭載した状態で、測量機器と同レベルの高い測角・制御機能（測角精度0.003°，回転繰返し精度0.008°）を発揮することができる。

回転台の制御装置には、LDVの視準方向の同軸カメラ



(a)UドップラーⅠ (b)UドップラーⅡ

図-2 現場向けのUドップラーシステム



図-3 長距離型Uドップラー



図-4 水平鉛直回転台

映像が表示され、同映像を参考にしながら、LDVを任意位置に視準させることができる。

(4) 測定対象の自動視準プログラム

長距離型Uドップラーを用いても、測定距離が極めて長い場合、測定対象面に鋭角にレーザを照射する場合、測定対象の表面状態が非接触測定（レーザの入射方向への反射）に適さない場合などには、LDVによる非接触測定に十分な反射レーザを受信できないことがある。その場合、測定に適した点の探索に長い作業時間を要するだけでなく、低ノイズで高質なデータを取得できないことがある。

そこで、非接触測定に適した高反射強度点を自動検出

する手法を検討し、水平鉛直回転台を自動制御して測定対象を自動視準するプログラムを開発した。

図-5に測定対象および対象表面上の高反射強度点の探索アルゴリズムの概要を示す。先に示した通り、回転台の制御装置にはLDVの視準方向の同軸カメラ映像が表示されている。まず、LDVを概ね測定対象方向に向け、同カメラ映像上で、探索範囲の始点と終点ならびに鉛直方向の分割数を指定する。次に、水平鉛直回転台を制御してLDVに探索経路1を自動探索させる。探索中、LDVの

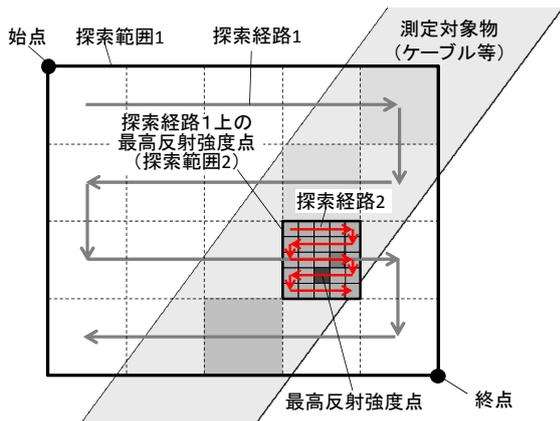


図-5 高反射強度点探索アルゴリズム

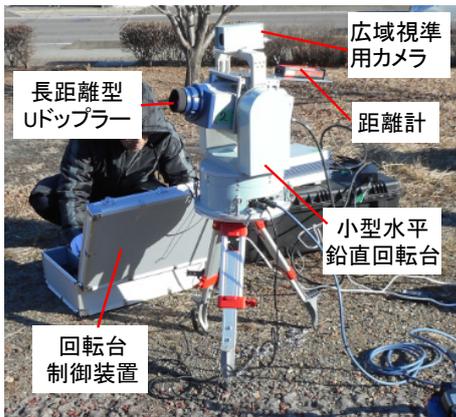


図-6 自動視準機能付き長距離型Uドップラー

表-1 自動視準機能付き長距離型Uドップラーの仕様

項目	仕様
応答周波数範囲	DC~25kHz
測定速度範囲	0.2 μ m/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
測量機能	測距・測角による3次元位置座標測量
標準測距精度	\pm 1mm(0.05~300m)

反射レーザー光の強度をモニタリングすることで、探索範囲内の反射強度分布が得られ、測定対象の輪郭が把握できる。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、非接触測定により適した点を検出する。このように検出された点を視準点として振動測定を実施する。

(5) 自動視準機能付き長距離型Uドップラー

(2)-(4)の機能を集約し、長大構造物検査用の非接触振動測定システムである「自動視準機能付き長距離型Uドップラー(図-6)」を構築した。表-1にその主な仕様を示す。測定対象を自動視準して長距離の非接触振動測定を実施することができるシステムであり、水平鉛直回転台に測量用の距離計を搭載すれば、視準点の3次元位置座標を測量・記録することもできる。

3. 鉄道斜張橋の振動特性調査

(1) 斜張橋の振動測定試験

まず、長距離型Uドップラーを用いた遠隔非接触測定で、鉄道PC斜張橋の斜材の常時微動、ならびに、列車通過時の主桁の動的たわみを計測可能であるか確認するための現地試験を実施した³⁾。なお、本現地試験は、測定対象の自動視準機能の開発以前に実施しており、長距離型Uドップラーを熟練した測定作業員が操作して、視準および測定を実施した。

(2) 測定対象橋りょう

図-7に示す対象橋りょうは、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で支間長133.9mの主桁を支持する構造のPC斜張橋である。主桁と主塔は剛結、桁端は単純支持されている。1996年に完成し、1997年から供用されている新幹線鉄道で初めてのPC斜張橋で

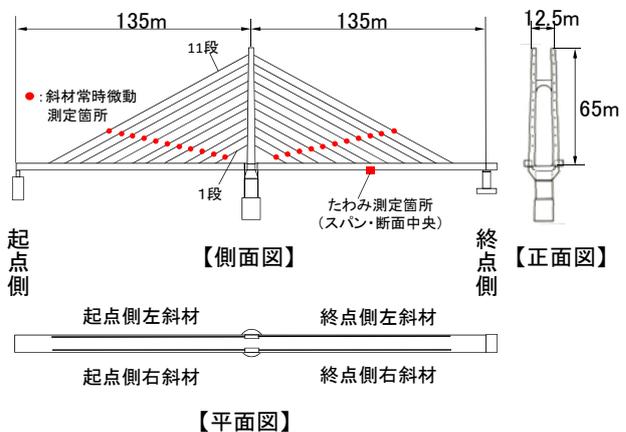


図-7 測定対象橋りょうと測定箇所

ある。

斜材ならびに主桁の測定は 2016 年 1 月（日中）に長距離型 U ドップラー（サンプリング周波数 1kHz）を用い、斜材 1 本あたり 30 秒、主桁は 80 秒の測定を実施した。図-7 中に橋りょう上の測定箇所を示す。また、図-8 に長距離型 U ドップラーの設置位置を、図-9 に斜材の測定状況例、図-10 に主桁たわみの測定状況をそれぞれ示す。長距離型 U ドップラーと測定対象間の非接触測定距離は 10~150m 程度であり、斜材および主桁下面に



図-8 長距離型 U ドップラーセンサ設置位置



図-9 斜材の常時微動測定状況例



図-10 主桁の動的たわみ測定状況

反射材等は設置せずノンターゲットでの測定を実施した。

(3) 測定結果

a) 斜材の張力推定結果

図-11 に斜材の常時微動の測定波形例、図-12 に常時微動のフーリエスペクトル例を示す。最大速度振幅 0.3mm/sec 以下の微小な振動が測定できており、斜材が長くなる程、振動周期が長くなる傾向も確認できる。フーリエスペクトルには、一次（基本）振動数とその整数倍の高次振動数の卓越が確認できる。弦の n 倍振動の固有振動数は、基本振動数の整数倍の値を示すことから、測定結果は斜材の振動特性を適切に捉えているものと考えられる。

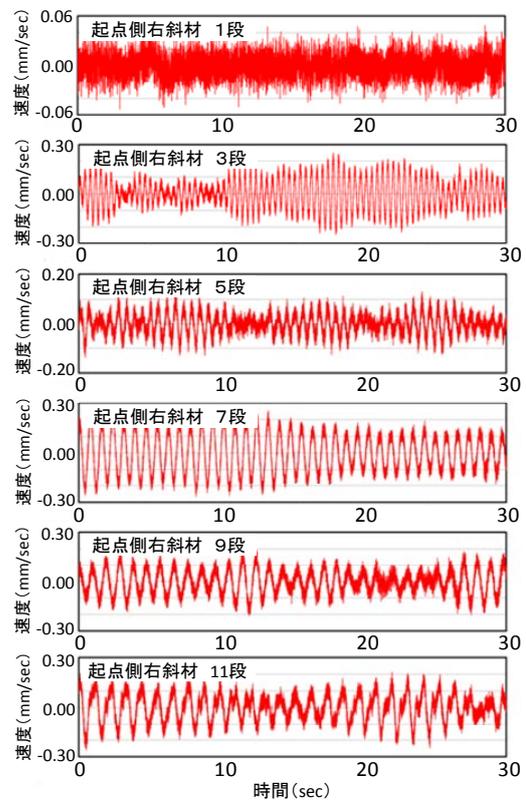


図-11 斜材常時微動の測定波形例

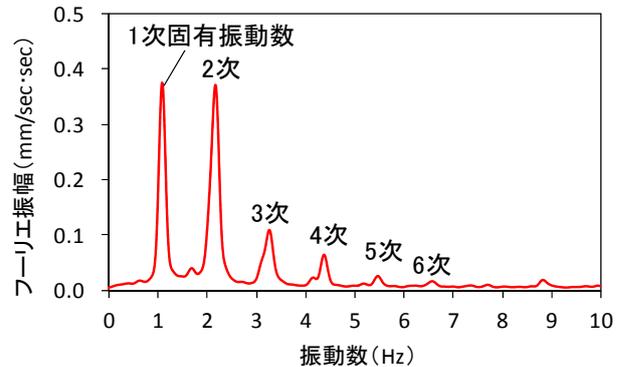


図-12 斜材常時微動の周波数特性（起点型右斜材 9 段）

図-13に常時微動から推定した全斜材の固有振動数を2008年12月（夜間）に実施されたハンマー打撃と加速度計による調査結果と併せて示す。両者の十分な一致が確認でき、2008年に対する固有振動数の低下は平均0.54%であった。

図-14に固有振動数から求めた各斜材の張力を示す。張力は、橋りょう建設時の斜材の張力調整値と固有振動数に基づいて設定された特性値（比例定数）に本計測で得られた固有振動数の2乗値を乗じることにより簡易に推定した。推定結果によれば、全ての斜材の張力が、建

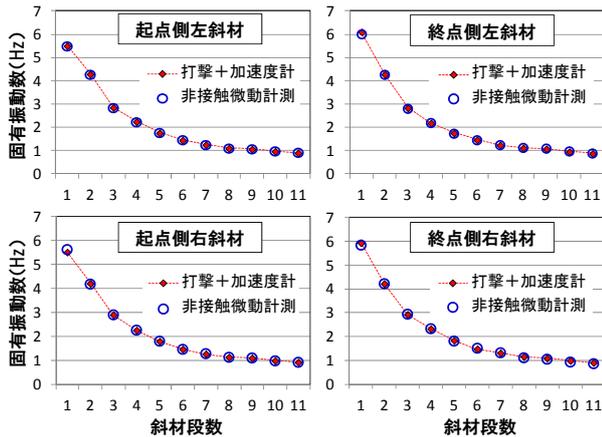


図-13 斜材固有振動数の推定結果

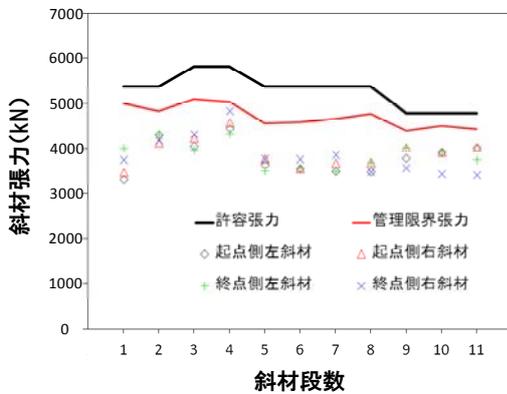


図-14 斜材張力の推定結果

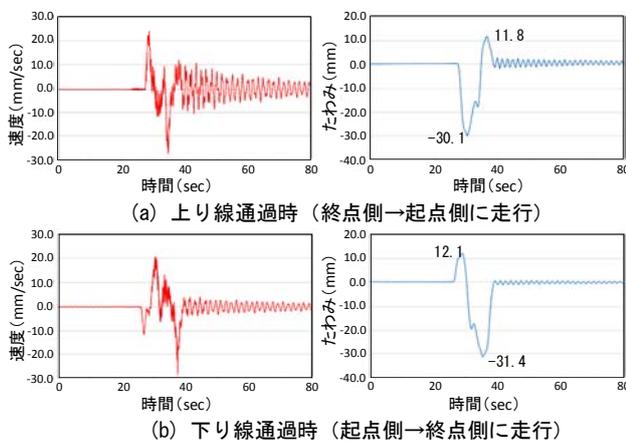


図-15 列車通過時の主桁の動的たわみの測定結果

設時に算定された許容張力⁴⁾から列車荷重分を差し引いた管理限界張力値以下であった。

b) 主桁の動的たわみ測定結果

図-15に列車通過時の終点側主桁の動的たわみの非接触測定結果例を示す。Uドップラーは速度計であるため、80秒間の速度記録を積分して、変位であるたわみ波形を算出した。列車が終点側から起点側に向けて走行する際には、まず下方に約30mmたわみ、走行列車が起点側に移動して起点側を下方に押し下げるにつれて起点側の桁が上方に12mm程度押し上げられている。列車が起点側から終点側に向けて走行する際にはその逆の性状を示している。

対象橋りょうでは、1997年から2005年に従来手法によるたわみ測定が複数回実施されており、各測定の下方向のたわみ量の平均値が29.8~31.1mm⁵⁾と報告されている。供用中に列車条件（車種、速度等）が変化していることもあり一概には比較できないが、非接触測定で得られたたわみ量が過去の測定結果と同程度であることが確認できた。

これらの結果から、長距離型Uドップラーによる遠隔非接触測定で、対象PC斜張橋の斜材の常時微動ならびに主桁の動的たわみを測定可能であり、斜材張力や動的たわみ量の評価に活用可能であると考えられる。

4. ケーブルの自動視準手法の検証

(1) 自動視準手法の検証実験

長大橋りょうのケーブル振動をLDVを用いて非接触測定する場合、極めて遠方に位置する小径かつ円筒状の表面形状を有するケーブルの表面からレーザ反射性に優れた点を探査し、レーザを照射する必要があった。同作業を自動化・高速化できれば、検査作業を効率化することができ、測定データの質も高められる。

そこで、3章に示した測定対象の自動視準プログラムを搭載した自動視準機能付き長距離型Uドップラーで、ケーブルの自動探索、自動視準が可能であるか確認するために、円筒試験体を用いた室内実験、ならびに、実橋梁ケーブルの自動視準および常時微動測定の現地試験を実施した。

(2) 室内実験による探索機能の検証

a) 実験方法

図-16に示すように、自動視準機能付き長距離型Uドップラーを用いて、15m離れた場所に設置した直径65mmの円筒試験体の検出ならびに高反射強度点の探索実験を行った。円筒試験体として、図-17に示す3種類を用いた。(a)銀（アルミ）はレーザを鏡面的に反射しやすいアルミ

箔, (b)白(紙)は比較的レーザ反射性が優れた白色の上質紙, (c)黒(フェルト)は一般にレーザ反射性に劣ると考えられる黒色のフェルト生地を, 円筒に巻きつけて作成したものである。なお, 図-17(b)白(紙)上の光点は測定位置確認用の緑色レーザの照射点である。

3種の円筒試験体の中腹部とその左右の空間を探索範囲とし, 円筒表面の反射強度分布を調査した。

b) 実験結果

図-18に自動視準機能付き長距離型Uドップラーによる反射強度分布の測定結果を示す。上図が各円柱試験体の探索範囲と最終視準点(最高反射強度点)を, 下図が反射強度分布を凡例に示す色分布で示したものである。

(a)-(c)の何れのケースも非接触測定の実施に十分な反射強度が得られた。反射強度の分布から円柱試験体の輪郭を推定できており, Uドップラーから見て正面側の点が最高反射強度点として選定された。

それぞれの試験体の反射強度分布の特徴は, (a)銀(ア

ルミ)は, 表面材質が鏡面反射を起こしやすい光沢のあるアルミであるため円筒の正面側の縦方向の細い領域に高反射輝度点が集中し, 側面側はレーザが斜め後方に反射されるため反射輝度が低くなる傾向が見られた。一方, (b)白(紙)は全体的に高い反射輝度を, (c)黒(フェルト)は全体的に低い反射輝度を示した。

これらの結果から, 提案した自動探索手法は, 測定対象の検出, 表面状態の把握, および最高反射強度点の検出に有効であると考えられる。

(3) 現地測定試験による検証

a) 測定方法

3章と同じ斜張橋の吊りケーブルを対象として, 自動探索手法の検証試験を実施した。測定対象ケーブルから150m離れた位置から自動視準機能付き長距離型Uドップラーでケーブルおよび高反射強度点の自動探索を行い, 自動視準点の常時微動を測定した。

b) 測定結果

図-19は自動視準プログラムのメイン画面を示したものであり, 左図で測定対象ケーブル周辺に探索範囲を設定し, 右図で探索範囲の鉛直方向の分割数, 水平方向の



図-16 円筒試験体の高反射強度点探索実験

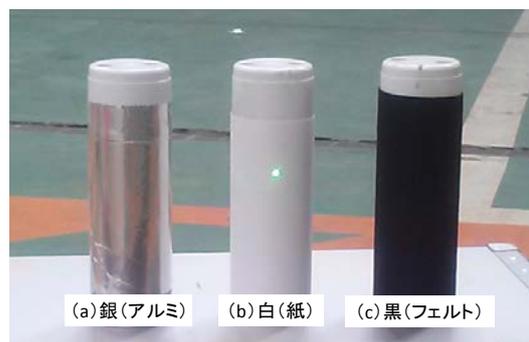


図-17 円筒試験体

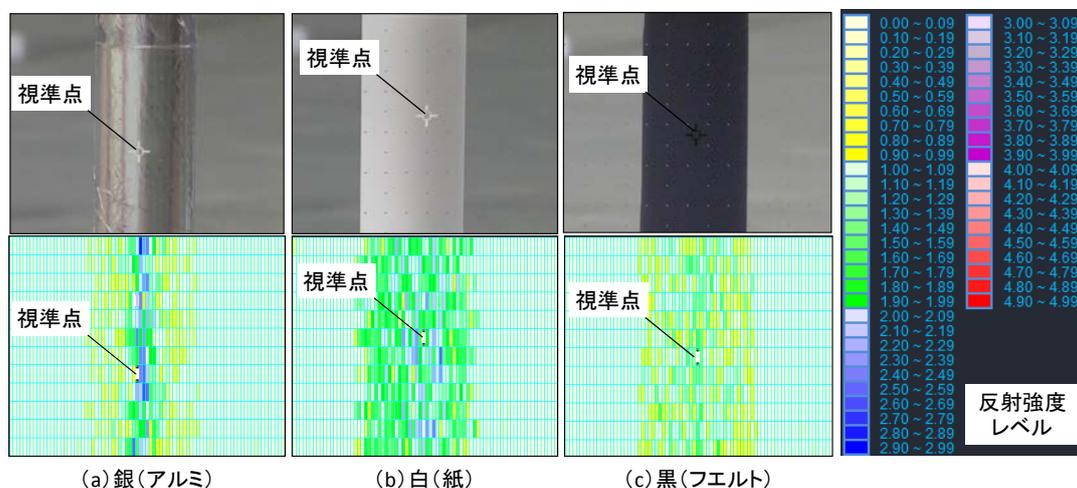


図-18 円筒試験体の高反射強度点探索実験結果



図-19 回転台制御プログラム画面と実斜張ケーブルの高反射輝度点探索結果

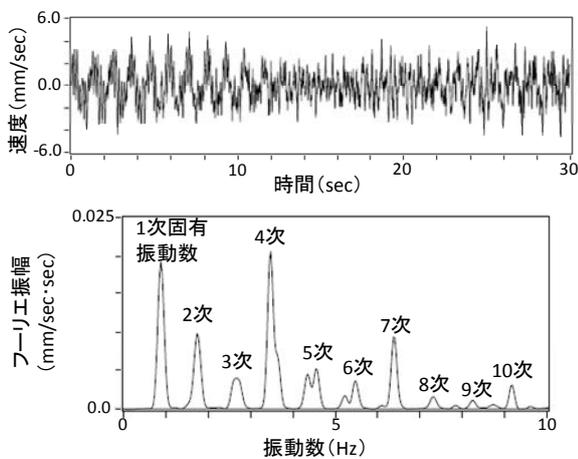


図-20 自動探索による常時微動測定結果例

探索速度を設定して自動探索を行う。ここでは、探索範囲全体をスキャンして最大反射強度点を探すのではなく、ノイズの少ない良質な非接触測定を行うのに十分な反射強度の閾値をプログラム上で事前に設定し、探索経路1上に閾値を上回る点が検出されると、その点の周辺の微小領域をより詳細な探索経路2で探索し、最大反射強度点を求めた。その結果、探索された視準点を図-19中に示した。視準点の探索に要する時間は、探索範囲、探索速度、鉛直分割数、および反射強度閾値の設定により変化するが、概ね数秒から30秒程度であり、熟練作業員が視準する場合より短時間または同程度である。

図-20に自動視準機能付き長距離型Uドップラーで測定した視準点の常時微動測定結果の一例を示す。測定対象は、起点側右斜材の11段ケーブルである。反射レーザー光の不足によるノイズの影響がない良質な測定データが得られており、そのフーリエスペクトルで1次から10次程度までの高次固有振動数を検出することができた。

これらの結果から、提案した自動探索手法は、実橋梁ケーブルの測定にも適用可能であり、測定作業の効率化

ならびに質の高い振動データ収集に有用であると考えられる。

5. おわりに

鉄道PC斜張橋の健全度評価のための振動特性調査の効率化・高度化を目的として、遠隔非接触振動測定システムを開発し、実橋りよりの測定ならびに室内実験を行ってその有効性を検証した。

- (1) 不可視光LDVに自己振動の補正機能を付加した長距離型Uドップラー、ならびに同装置に測定対象とその表面上の高反射強度点を自動探索する機能を付加した自動視準機能付き長距離型Uドップラーを開発した。
- (2) 長距離型Uドップラーを用いれば、反射材等を設置することなく長大橋の部材の常時微動や列車通過時振動を測定でき、従来測定手法による結果との比較から測定結果の妥当性が確認できた。
- (3) 自動視準機能付き長距離型Uドップラーを用いれば、斜張橋の吊りケーブルおよびその表面上の高反射強度点を短時間で自動視準し、ノイズの少ない常時微動データを取得できることが確認できた。

以上より、開発した自動視準機能付き長距離型Uドップラーは、鉄道PC斜張橋の振動特性調査の効率化・高度化に有効であると考えられる。今後は、自動視準機能付き長距離型Uドップラーを用いて、鉄道PC斜張橋の振動特性調査を継続するとともに、連続する高架橋群や架線柱・防音壁等付帯構造などの遠隔非接触測定による検査手法の開発に取り組む計画である。

謝辞：現地試験にご協力いただいた(株)東日本旅客鉄道長野支社、長野土木技術センター各位に深甚なる謝意を表

する。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。

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：構造物を遠隔非接触計測で診断する，RRR，Vol.74，No.2，pp.24-27，2017
- 3) 上半文昭，松尾賢，小林泰一郎，竹村禎修：遠隔非接触測定による鉄道PC斜張橋の振動特性調査，土木学会第71回年次学術講演会，I-074，pp.147-148，2016
- 4) 田中淳一，小松朗，秋山あかね：北陸新幹線PC斜張橋の経年特性，土木学会第65回年次学術講演会，IV-360，pp.719-720，2010

(2017.4.7 受付)

VIBRATION CHARACTERISTICS INVESTIGATION TECHNIQUE FOR RAILWAY PC CABLE-STAYED BRIDGE BY REMOTE NON-CONTACT MEASUREMENT

Fumiaki UEHAN

New efficient techniques and measurement systems were developed to investigate the vibration characteristics of a cable-stayed bridge by remote non-contact measurement. Firstly, a method for efficiently estimating the natural frequencies and the tensile forces of cable stayed bridge cables was proposed using long-distance U-Doppler which was developed for the inspection of long-span bridges. Secondly, the autocollimation technique and system of cable-stayed bridge cables were developed for further speedup of the remote measurement works. The accuracy and effectiveness of the proposed techniques and developed systems were confirmed by measurement experiments of a real bridge and laboratory experiments.