

遠隔非接触計測による鉄道橋健全度の評価手法の開発

上半 文昭*

Development of Remote Noncontact Evaluation Method of Railway Bridge Soundness

Fumiaki UEHAN

In order to improve the method of soundness inspection of railway bridges, remote noncontact inspection techniques using LDV and UAV were developed by RTRI. Firstly, we developed a long-distance type LDV endowed with auto-collimation function and applied it to the cable inspection of a long-span cable-stayed bridge. Secondly, UAVs were developed that perform hammering tests or rebar explorations while running beneath the underside of bridge girder using crawlers. Furthermore, by applying the developed UAV and LDV, we proposed a noncontact measurement method of the elastic wave velocity that is related to the RC members' strength and rigidity.

キーワード：非接触測定，U ドップラー，UAV，長大橋，鉄筋探査，弾性波速度

1. はじめに

鉄道総研では、遠隔位置からの非接触測定技術の応用により、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）を用いた遠隔位置からの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⁾。また、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マルチコプタードローンに代表される UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の活用を検討し、構造物検査用 UAV を提案してきた²⁾。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ことで、鉄道分野への UAV の適用性を高めたものである。このような LDV と UAV をキーツールとして、図 1 に示すように鉄道橋健全度を全体挙動から局所変状に至るまで遠隔非接触で評価可能とし、検査業務の効率化、安全化を図ることが一連の研究の目標である。

本報告では、上記のキーツールである LDV と UAV をさらに改良し、鉄道橋健全度の評価技術の向上ならびに適用対象の拡大に向けた検討を行った。具体的な開発目標は以下のとおりである。

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

- (1) 長大橋計測における LDV の計測精度および作業効率を向上する手法の開発。
- (2) コンクリートの剥落や内部鉄筋腐食の影響因子となる、かぶり厚さを UAV を用いて遠隔測定する手法の開発。
- (3) コンクリートの強度や剛性と相関がある弾性波速度を LDV と UAV を用いて遠隔測定する手法の開発。

以下では、上記を実現するための計測システムの改良内容と改良したシステムの鉄道橋への適用手法を説明し、検査実務への適用性の観点から実施した現地検証試験結果を熟練者による検査結果と比較して紹介する。

2. 計測システムの改良

2.1 長距離型 U ドップラー

2.1.1 概要

図 2 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 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。回転台は測量機器レベルの回転制御性能を有しており、付属の距離計の測定データを用いて、LDV の振動測定点の位置測量にも活用できる。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。

2.1.2 測定対象の自動視準機能の開発

測定対象と U ドップラー間の距離が極めて長い場合、測定対象面へのレーザ入射角度が大きい場合、測定対象

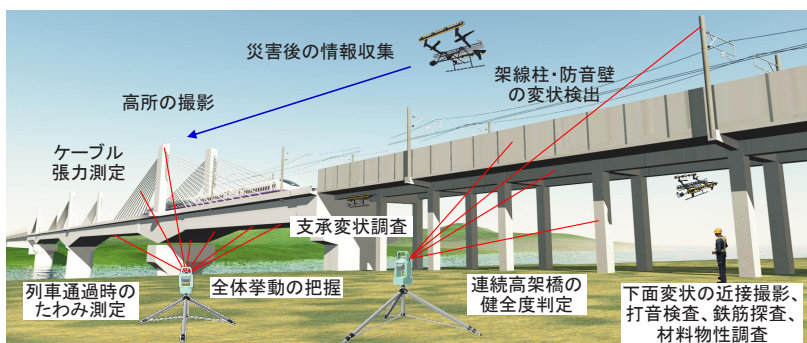


図1 鉄道橋健全度の遠隔非接触評価手法

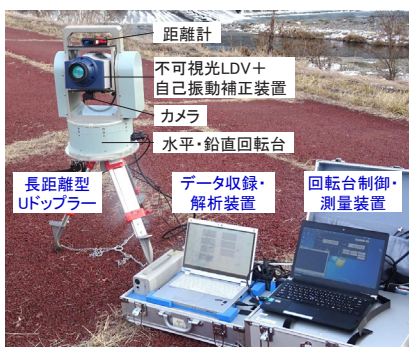


図2 長距離型 U ドップラーシステム

表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 (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)

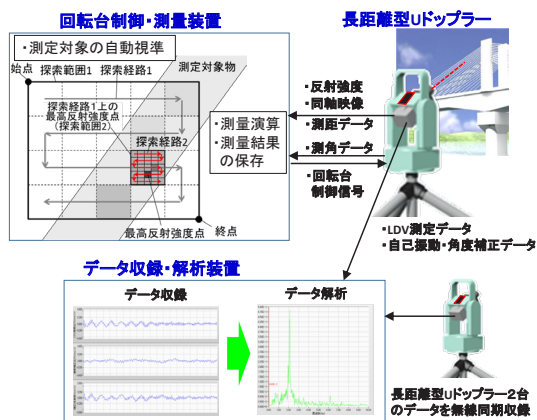


図3 自動視準測定の流れ

の表面状態が非接触測定（レーザーの入射方向への反射）に適さない場合には、長距離型を用いても非接触測定に十分な反射レーザーを受信できないことがある。その場合、

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し、高質なデータを取得できない場合がある。

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 ドップラーに適用した³⁾。図3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に沿ってレーザーを照射し、探索範囲内の反射レーザー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ー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に最初に閾値を超えた小領域内を自動探索することで、探査時間を短縮できる。

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。開発したシステムでは、このような測定・解析作業を2台の長距離型 U ドップラーを同期させて実施することができる。

2.2 構造物検査用 UAV

2.2.1 概要

UAV は高所の情報収集に有用であるが、鉄道橋の検査に適用する場合、線路への侵入・墜落による事故を防ぐ工夫が不可欠であった。そこで、橋りょうの桁下部の調査に特化した「付着走行用 UAV」(図4)を開発した²⁾。同装置は、マルチコプター型 UAV の上昇力を利用して下面に付着し、機体上部に搭載した電動式の無限軌道で走行しながら変状箇所の撮影を行う装置で、サイズは縦 800 × 横 800mm × 高さ 350mm である。気流の乱れや GPS 信号の途絶が生じやすい橋りょうの桁下部においても安定移動が可能で、操縦ミスなどで UAV が橋りょう

上部に侵入するリスクを低減することができる。

2.2.2 付着走行用 UAV の鉄筋探査機能の開発

付着走行用 UAV のコンクリート橋の鉄筋探査への応用を検討した。図4中に示すように、電磁誘導法⁴⁾による鉄筋探査装置 (Proceq 社製 PM-630) のプローブを搭載することで、桁下面や高架橋床版裏コンクリートのかぶり厚さの測定装置を構築した。電磁誘導法は、プローブ内の励磁コイルが発生させた磁場の变化から周辺に存在する磁性体 (鉄筋) の位置を検出する手法である。付着走行用 UAV は、機体上部と下面との離隔を一定距離に保ちながら移動できるので、弾性支持されたプローブの上面を常に構造物下面に接触させることができる。

2.2.3 打音検査が可能な小型 UAV の開発

図5に付着走行用 UAV を小型化 (縦 400 × 横 425mm × 高さ 175mm) して有線給電にするとともに、打音検査の機能を付加した「構造物表面変状検査装置⁵⁾」を示す。本装置も、UAV の上昇力を利用して下面に付着し、機体上部に取り付けられた電動タイヤで走行移動する。広角カメラならびに簡易な加振装置と收音装置で構成した小型の打音検査装置を搭載し、付着走行しながら、付着面の近接画像撮影や打音測定を行うことができる。撮影画像ならびに打音データは無線送信され、地上でほぼリアルタイムでモニタリングすることができる。有線給電のため、頻繁なバッテリー交換が不要で、連続して検査を実施でき、橋りょう上部への UAV の侵入を物理的に防止することもできる。

3. 改良システムの鉄道橋への適用方法の提案

2章で改良した計測システムについて、本章では具体的な適用方法について提案する。

3.1 長大橋ケーブル張力の非接触測定

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ードロード橋は一般に長大かつ高所にある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 ドップラーによる遠隔非接触測定で調査できる。

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) 振動数とその整数倍の高次振動数の卓越が確認できる。弦の基本振動数の n 倍振動の固有振動数 v_n は、弦の長さを l 、線密度を ρ 、張力を T とすると式 (1) で示



図4 鉄筋探査装置を搭載した付着走行用 UAV

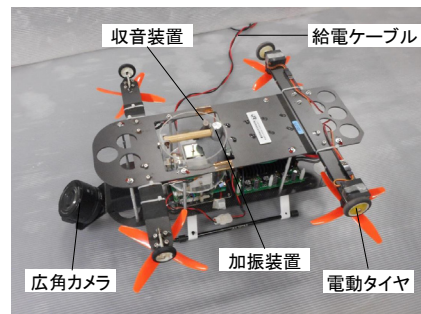


図5 構造物表面変状検査装置 (小型 UAV)

され、固有振動数が既知であれば張力 T を算出できる。

$$v_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (1)$$

3.2 鉄筋のかぶり厚さの UAV 測定手法

コンクリート橋の鉄筋を覆うコンクリートの厚さ (かぶり厚さ) の不足は、コンクリート片の剥落や鉄筋腐食の原因となる。特に劣化予測においては、水分浸透と剥落部分の耐力の両方に影響する重要な因子である。そのため、かぶり厚さの調査は、既設コンクリート橋の変状危険個所の抽出に役立つが、道路や河川上の橋りょうの桁下面や背の高い高架橋の床版裏の調査には足場架設や高所作業車が不可欠である。

提案手法では、図6に示すように鉄筋探査プローブを搭載した付着走行用 UAV で、コンクリート面を走行することで、プローブが通過する測線上の鉄筋のかぶり厚さを検出する。一般に鉄筋コンクリートの表面付近の配筋は、軸方向鉄筋、配力鉄筋等が密に配置されている。調査対象とする鉄筋以外の鉄筋がプローブ近傍に存在すると、かぶり厚さの測定誤差が大きくなるため、人が測定を行う場合には、事前に設計図面と電磁波レーダ⁶⁾などを用いて鉄筋配置を調査し、調査対象鉄筋以外の鉄筋の影響を受けにくい位置を調査する (図7)。提案手法では、初回の走査で良好な測定結果が得られない場合には、設計図書を参考に、調査対象鉄筋に直交する鉄筋間隔の 1/2 程度、UAV の走行位置を側方にずらして再測定するなどの試行により適切な測線を検出する。

特集：鉄道力学

3.3 弾性波速度のLDVとUAVによる測定

コンクリート構造物の損傷・劣化による振動特性変化ならびに健全度は、コンクリート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測定で推定できれば構造物健全度の評価精度向上に貢献できる。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⁷⁾の遠隔非接触計測による推定法を提案する⁵⁾。

提案手法は、小型UAVで加振して発生させた衝撃弾性波を遠隔位置から長距離型Uドップラーで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8に提案手法の概要を示す。まず、UAV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。

4. 改良システムの鉄道橋での検証試験

4.1 長大橋ケーブル張力の非接触測定

4.1.1 試験方法

図9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ノンターゲットでの測定を実施した。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。比較のため熟練者による測定を、同一測定日に技術者が手動で斜材を視準して実施した。なお、遠隔非接触常時微動測定によるケーブル張力の推定精度は、前報²⁾にて従来手法との比較により検証済みであるので、ここでは自動視準機能による振動測定性能と作業効率の向上効果を検証する。

4.1.2 試験結果

図10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11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。自動視準で良好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。斜材上の測定位置によって卓越する振動次数が異なるため、必ずし

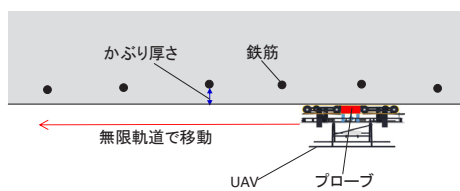


図6 UAVによるかぶり厚さ測定手法

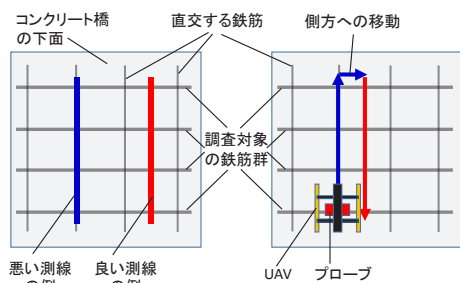


図7 かぶり厚さの調査測線の設定方法

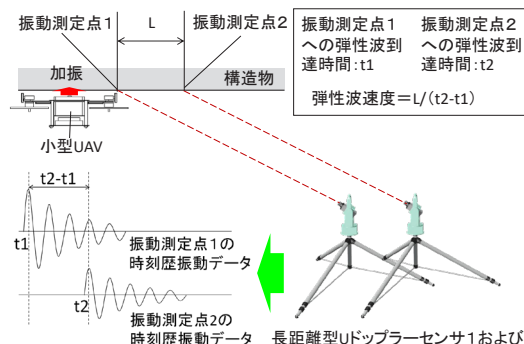


図8 弾性波速度の推定手法

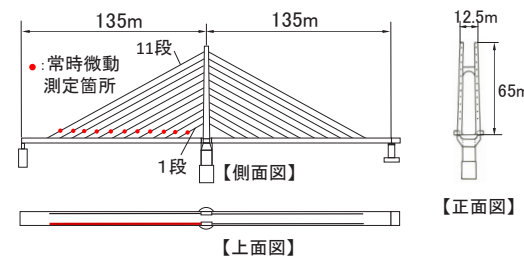


図9 測定対象橋りょう

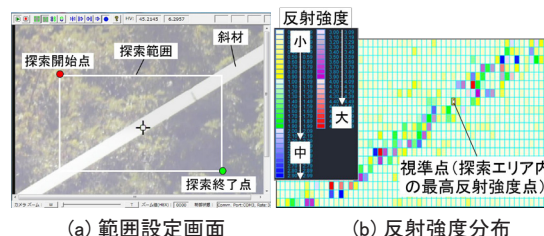


図10 探索範囲の設定画面と反射強度分布

も1次固有振動成分のスペクトル振幅が最大とはならないが、その整数倍の高次振動成分が現れることから、斜材上の測定位置によらず1次固有振動数を容易に推定できた。図12に自動視準と熟練者視準による常時微動測定で得られた斜材固有振動数を比較して示す。両者は十分に

一致し、自動視準機能の斜材常時微動測定作業への適用性が確認できた。また、斜材 11 本の視準、測定、解析に要した時間は、自動視準の場合が 20 分、熟練技術者による場合が 40 分であった。本事例においては、自動視準により作業効率を約 2 倍に高めることができた。

4.2 鉄筋のかぶり厚さの UAV 測定

4.2.1 試験方法

実橋りょうの桁下面を対象として、UAV を用いたかぶり厚さ測定手法の検証試験を実施した。図 13 に UAV によるかぶり厚さ測定状況と比較のため実施した熟練者による測定状況を示す。なお、プローブは、非金属の支持材で UAV を構成する金属部材と極力離して設置し、測定前の初期化も機体に設置した状態で行った。

4.2.2 試験結果

対象橋りょう下面は、検査対象鉄筋に直交する鉄筋の間隔が密であり、スペーサなどの金属埋設物も存在したため、熟練者が手動で同一測線上の検査を試みてもわずかな位置のずれで結果にばらつきが生じる環境であった。そのため、UAV 測定と熟練者測定の結果の比較にやや苦労したが、ほぼ同一測線上を走査できれば、図 14 に示すようにかぶり厚さの分布傾向を捉えることができ、熟練者測定との誤差の標準偏差 (3.6mm) も熟練者による複数の手動測定データ間の誤差の標準偏差 (3.8mm) と同程度であった。

4.3 弾性波速度の LDV と UAV による測定

4.3.1 試験方法

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。図 15 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、事前に赤外線調査および簡易な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、同一箇所足場に架設して人力のハンマー加振で調査した結果と比較することで、提案手法の妥当性を検証した。

小型 UAV 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, サンプル周波数 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、UAV, 人力加振ともに計 10 ケースの測定を実施した。

4.3.2 試験結果

図 16 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合わせて示す。小型 UAV の衝撃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

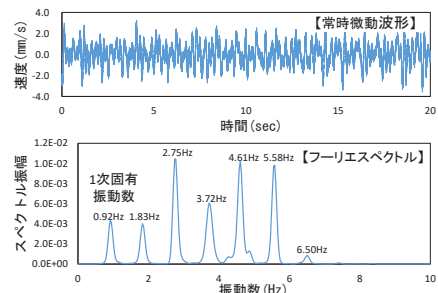


図 11 自動視準による常時微動測定結果 (10 段)

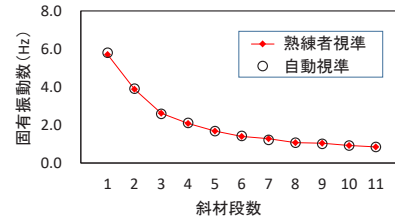


図 12 自動視準と熟練者視準による測定結果



図 13 かぶり厚さの測定状況

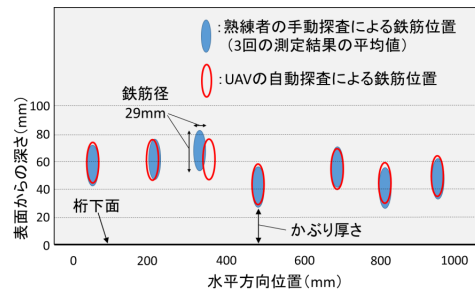


図 14 かぶり厚さの測定結果



図 15 弾性波の測定・加振状況

小な弾性波を長距離型 U ドップラーで非接触かつノンターゲットで計測できることが確認できた。また、2 点

特集：鉄道力学

間距離 10cm ~ 100cm の測定点の 2 点同期計測で得られた波形から 2 点間の到達時間差を検出できた。

図 17 に 2 点間の距離と弾性波到達時間差の関係を示す。2 点間距離と弾性波動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 1.85km/sec であった。この値は、比較のため実施した足場架設での人力ハンマー加振による測定結果に対して誤差が 2.2% と十分に小さく、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。

5. おわりに

LDV と UAV による鉄道橋健全度の遠隔非接触評価手法の計測技術の向上ならびに適用対象の拡大を目的として、長距離型 U ドップラーの自動視準化, UAV の鉄筋探査への応用, LDV と UAV を用いたコンクリートの弾性波速度推定法を提案し、以下の結論を得た。

- (1) 自動視準機能を付加した長距離型 U ドップラーで、熟練者視準による測定と同等の高品質な振動データを取得でき、作業効率を 2 倍程度改善することができた。
- (2) 構造物検査用 UAV を用いてコンクリート橋下面のかぶり厚さ測定装置を構築し、熟練者による測定結果と概ね一致する測定結果を取得できることを確認した。
- (3) UAV で加振した衝撃弾性波を 2 台の長距離型 U ドップラーで同期測定することで、コンクリート部材の弾性波速度を推定する手法を提案し、人力加振と遜色のない測定結果が得られることを確認した。

今後は、非接触振動計測の多点同期測定化、ならびに、局所変状の検出精度向上を目的として、鉄道橋の遠隔非接触計測に動的かつ多次元の画像計測技術の応用を検討する計画である。

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。

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各位に心より感謝する。

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

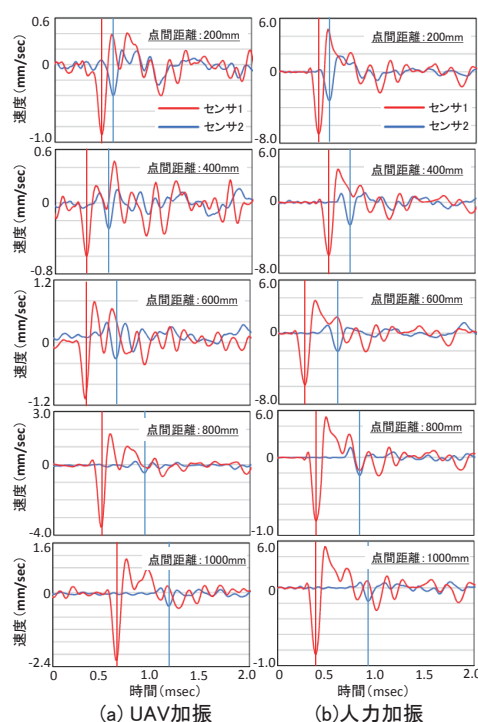


図 16 衝撃弾性波の測定波形例

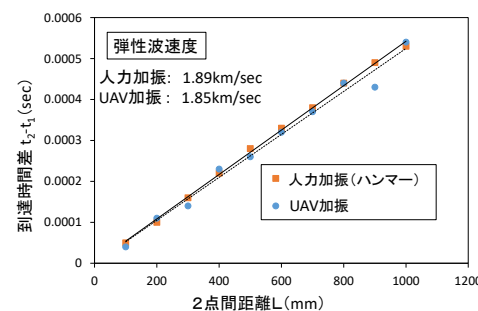


図 17 2 点間距離と弾性波到達時間差の関係

- 3) 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
- 4) 榎田佳寛, 森濱和正, 濱崎仁：電磁波レーダおよび電磁誘導による鉄筋探査の日本非破壊検査協会規格の制定, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.15-21, 2011
- 5) 上半文昭：UAV と LDV を用いた構造部材の弾性波速度推定手法の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, CS14, pp.31-32, 2017
- 6) 榎田佳寛, 森濱和正, 濱崎仁：電磁波レーダおよび電磁誘導による鉄筋探査の日本非破壊検査協会規格の制定, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.15-21, 2011
- 7) 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