

“U ドップラー” による構造物振動の遠隔非接触測定技術

鉄道力学研究部 構造力学
主任研究員 上半文昭

1. はじめに

鉄道では、古くから振動測定を利用した構造物検査法の研究に取り組んでおり、走行列車、重錘での打撃による衝撃、および常時微動などを加振源とする構造物振動を測定し、測定結果から得られる構造物の最大応答や固有振動数等を、健全な構造物が有すべき値と比較することによって構造物の健全性を検査する手法が開発されてきた。それらの検査における振動測定作業では、センサやケーブルなどの設置と撤去に多くの時間を要しており、また、高所や軌道近接箇所などの危険箇所へのセンサ類の設置を伴う場合がある。

そこで、構造物の振動測定をより効率良く安全に実施できるようにするために、構造物振動を遠隔非接触測定できるシステム「U ドップラー」を開発した¹⁾。U ドップラーを用いれば、振動測定作業に伴うセンサ類の設置および撤去の手間を大幅に削減できる。また、高所や地震で損傷した構造物の下などの危険箇所での作業量が軽減され、平時および災害後の検査作業の安全性が高まるものと期待できる(図1)。

以下では、U ドップラーの概要および構造物検査作業への適用性の検証を目的として実施した現地試験結果例を紹介する。

2. 構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」

U ドップラー(図2, 表1)は、レーザドップラ速度計(LDV)に、現場での構造物測定を精度良くかつ効率的に実施するための工夫を施し、さらに、データの収録および解析機能も一体化した「構造物診断用非接触振動測定システム」である。システムはセンサとデータレコーダで構成されている。センサからレーザ光を照射することによって構造物上の任意点の振動を測定し、結果をデータレコーダで保存、表示、解析することができる。

センサは、最大100m程度の測定距離と広い計測範囲を有している。U ドップラーのセンサ筐体内にはLDVとほぼ等価な感度および位相特性を有する接触型の振動計および角度計が内蔵されており、それらの記録を用いて収録データからU ドップラーセンサ本体の揺れや傾きの影響を取り除く技術を導入した。また、現場での使

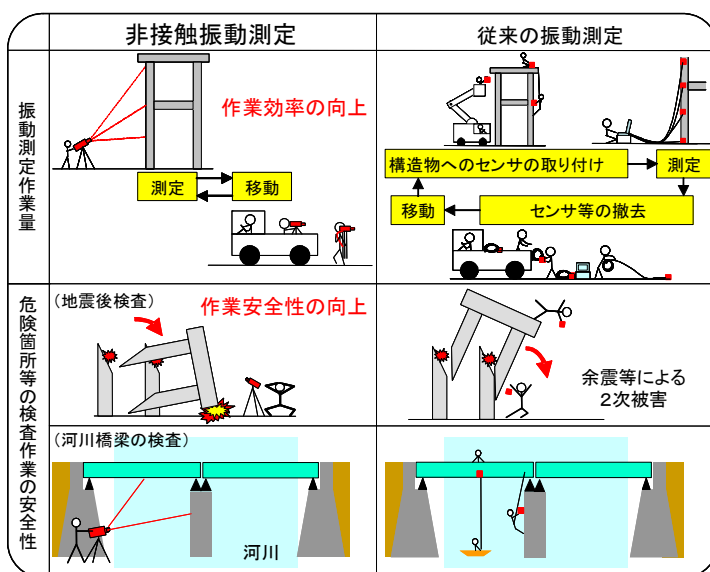


図1 振動測定作業へのU ドップラーの導入効果

いやすさを考慮して、装置構成の単純化、取り扱いの容易な安全規格クラス2レーザの使用、バッテリーによる駆動（連続約8時間）、遠方の測定点に正確にレーザ光を照射するためのスコープの採用などの工夫を施した。

データレコーダには、現場でのデータの収録、確認と分析、および報告書作成時のデータ整理などを実施できる専用のデータ収録／解析ソフトをインストールした。時系列波形およびフーリエスペクトルをリアルタイムで確認しながらデータを収録でき、収録データにスペクトル解析、微積分、フィルタ処理、基線補正などの演算を施して測定現地で構造物の固有振動数やたわみ量などを確認することができる。

Uドップラーは、2007年から製品として販売が開始され、既に鉄道事業者等に導入されている。その後も機能向上に取り組み、センサ配置の自由度を高めることを目的としたセンサとレコーダ間の無線通信化（図3）、測定箇所へのレーザ反射性向上を図るための反射ターゲット形成装置（図4）を開発した。

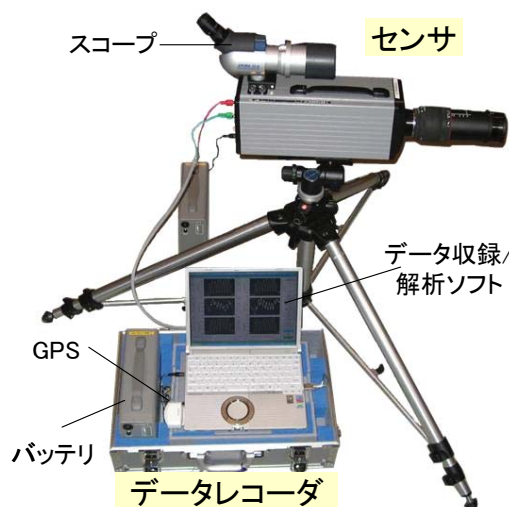


図2 Uドップラー外観

表1 Uドップラーセンサの仕様

	仕様
サイズ・重量	113(W)×141(H)×351(D) mm, 約5.5 kg
電源	専用バッテリー駆動式(DC16 V, 約8時間)
レーザ光量	安全規格クラス2 (He-Neガスレーザ)
測定速度範囲	0.2 μm/s～100mm/s (2レンジ切り替え)
応答周波数範囲	DC～600Hz
測定距離	約1～100 m (反射シール使用時, 環境条件による)
速度H.P.F	DC, 0.2Hz, 2Hz

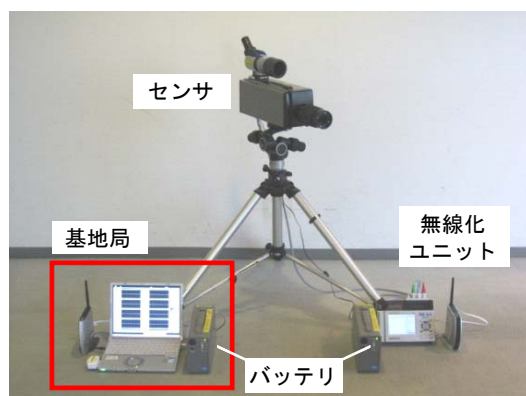


図3 無線通信化したUドップラー



図4 反射ターゲット形成装置

3. 非接触振動測定を利用した構造物検査法の検討

3.1 橋桁の動的たわみ測定への適用

橋梁の桁のたわみは、桁や支承部の健全度、および列車の乗り心地や走行性の評価指標となり得るが、桁に取り付けたピアノ線を介して地上に設置した変位計で測定する従来手法は、桁下が河川や道路の場合には実施が困難であった。そこで、たわみ測定作業の効率化と測定困難箇所への適用を目的としてUドップラーによる橋桁の動的たわみ測定法を開

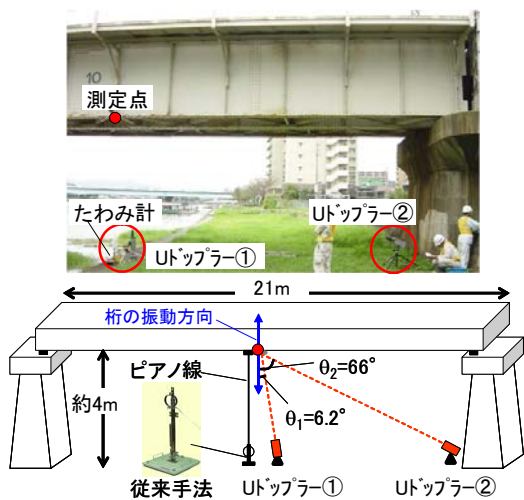


図5 桁たわみの測定方法

発した。速度計である U ドップラーでたわみ(変位)を測定するために、センサの出力電圧特性向上と積分アルゴリズム改良に取り組み、現地試験を実施して従来手法と測定精度を比較した。

スパン約 21m、桁下高さ約 4m の在来線の鋼上路桁を対象として列車通過時の桁たわみを測定した(図5)。図6に列車(普通列車, 10両編成, 時速 94km)通過時の従来手法および2台の U ドップラー(反射シール使用)によるたわみの測定結果を示す。最大たわみ(2.8mm)は実用範囲内で十分に一致することが確認できた。

3.2 RC ラーメン高架橋の常時微動測定

RC ラーメン高架橋は、常時微動による振動特性の同定が比較的容易な構造物であり、常時微動を利用した地震後の損傷度検査法等の開発が検討されている。振幅が非常に小さい常時微動を屋外で測定する場合には、三脚上に設置した U ドップラーセンサに生じる揺れの振幅が構造物の揺れを上回ることも多く、その補正が不可欠である(図7)。U ドップラーの補正技術が常時微動測定に有効であることを示す事例として、RC ラーメン高架橋の常時微動測定結果例を図8に示す。

無補正の記録でセンサ本体の振動の影響による 10~20Hz の高周波成分が卓越しているの

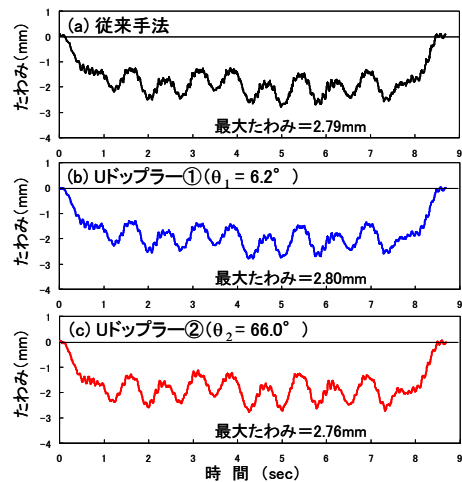


図6 たわみ測定結果の比較

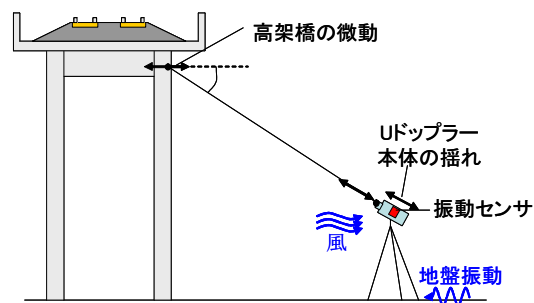


図7 高架橋の常時微動測定

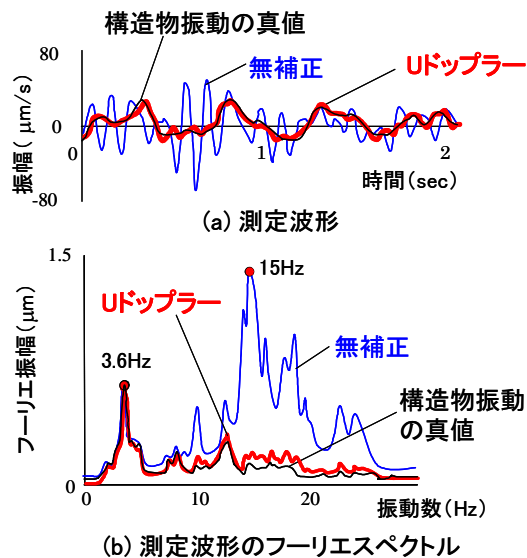


図8 高架橋の常時微動測定結果例

に対して、補正後の結果は、高架橋に設置した微動センサの記録（構造物振動の真値）と非常に近く、高架橋の1次固有振動数（3.6Hz）を推定可能であることが確認できた。

3.3 河川橋脚の固有振動数推定への適用

衝撃振動試験により得られる固有振動数が、橋脚の健全度評価指標として用いられている。橋脚検査のさらなる効率化と安全性向上を目的として、衝撃振動試験へのUドップラーの適用を検討した。

図9に示すようにUドップラーを河岸に設置して、重錘打撃による橋脚振動測定を実施した。本試験では、測定距離約40m、測定角度（測定対象の振動方向とレーザ光軸がなす角度）50°であった。図10に示すように、Uドップラーによる非接触測定結果と橋脚に取り付けた従来センサの結果はよく一致しており、Uドップラーを衝撃振動試験による橋脚の卓越振動数（3.7Hz）の推定に適用可能であることが確認できた。なお今後は、常時微動の非接触測定による橋脚検査手法の開発を検討する計画である。

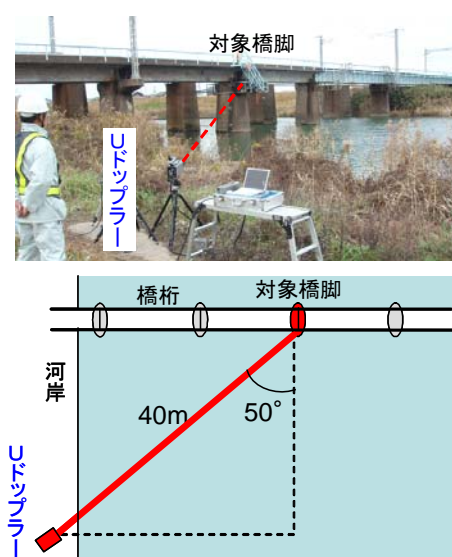


図9 現地測定状況

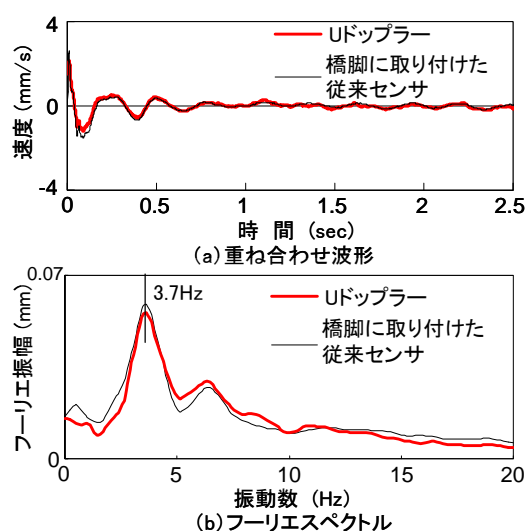


図10 衝撃振動測定結果の比較

4. おわりに

構造物の振動測定作業の効率化、安全化に役立つ非接触振動測定システム「Uドップラー」を開発・実用化し、健全度診断を目的とした橋桁の動的たわみ測定および橋脚等の固有振動数推定に活用できることを確認した。今後も引き続き、構造物振動の非接触測定技術の改良、および振動特性に基づいた構造物の健全度評価手法の開発に取り組み、Uドップラーによる診断対象構造物の拡大を図る計画である。

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，第21巻，第12号，pp.17-22，2007.12.