

| |
|-------|
| 鉄道一般 |
| 車両 |
| 施設 |
| 電気 |
| 運転・輸送 |
| 防災 |
| 環境 |
| 人間科学 |
| 浮上式鉄道 |

構造物を遠隔非接触計測で診断する

地震や水害などの自然災害の発生頻度が高く、高度経済成長期に建設された数多くの構造物の老朽化や不適格化の課題を抱えるわが国では、構造物の健全性や耐災害性を確認するための検査・診断技術の高度化や省力化が重要な課題となっています。ここでは、鉄道分野で古くから研究・実用化されてきた振動測定による構造物検査技術の高度化、省力化を目的として開発に取り組む、レーザー計測やドローンを用いた遠隔位置からの非接触計測技術について紹介します。



上半 文昭
Fumiaki Uehan
鉄道力学研究部
構造力学研究室長
[専門分野] 構造力学、
地震工学、計測工学

はじめに

度重なる自然災害、社会インフラの老朽化、熟練技術者の減少などの課題を抱えるわが国では、鉄道においてもこれを支える構造物の検査技術の高度化・省力化が必須の課題となっています。そこで、構造物検査に非接触測定技術を適用することによって、高所作業や線路内への立ち入り作業を省略し、検査作業を安全化、効率化するための技術開発に取り組んでいます。これまで、レーザーを用いた非接触振動測定技術を検査業務に適用し、検査手法の開発や技術の普及を進めるとともに、無人航空機(UAV: Unmanned Aerial

Vehicle)などの新技術の活用も検討してきました(図1)。ここでは、振動測定による構造物の検査技術について概要を解説した後、レーザーとUAVを用いた遠隔非接触測定による検査手法を紹介します。

振動測定による構造物検査

構造物は主として技術者による目視で検査されていますが、科学技術の進歩にともない、数値データに基づく客観的な観測結果によって、目視の結果を補うことのできる非破壊検査技術の重要度が高まっています。

鉄道では、古くから列車の走行など

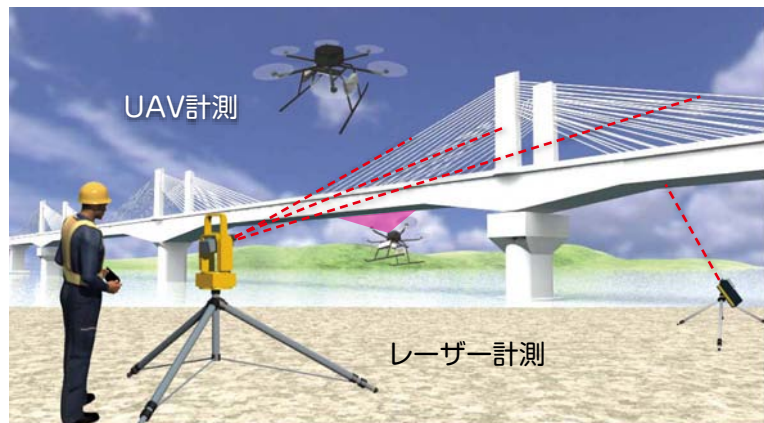


図1 遠隔非接触計測による構造物検査のイメージ

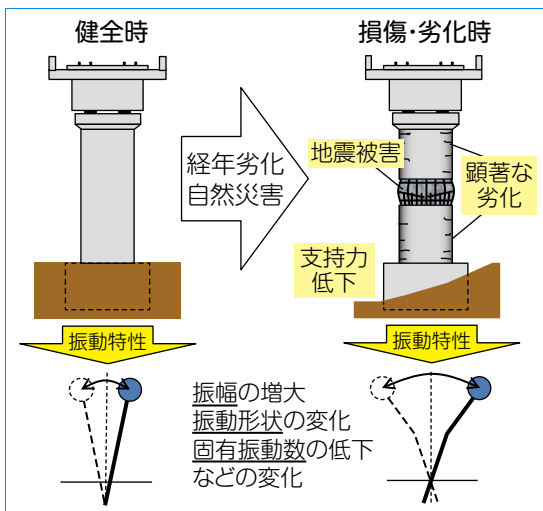


図2 変状にともなう構造物の振動特性の変化

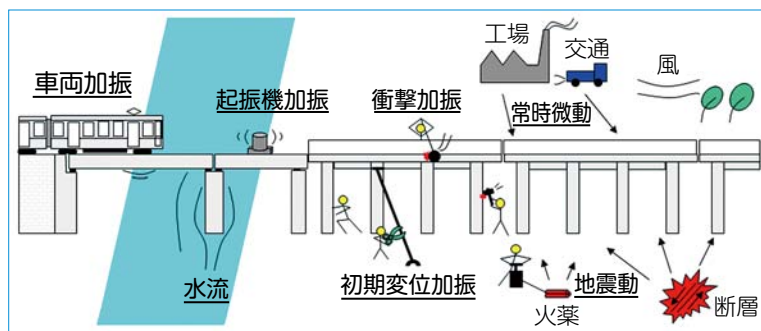


図3 構造物振動の加振源

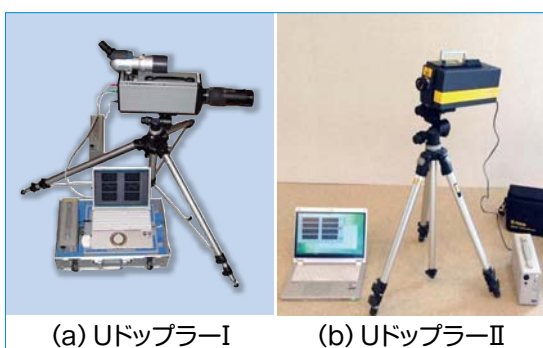


図4 構造物診断用非接触振動測定システム「U Doppler」

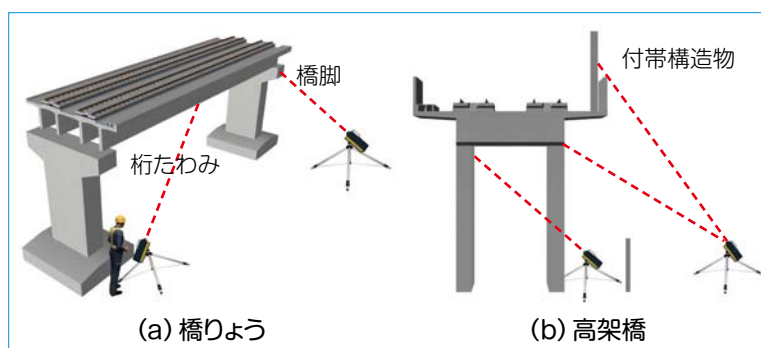


図5 U Dopplerによる構造物振動測定

にともなう構造物の振動を測定する検査手法が研究、実用化されてきました。構造物振動の振幅やその固有振動数は、地震による損傷、顕著な劣化、河川増水などによる支持力低下によって変化します(図2)。構造物の検査では、走行列車、重錘打撃のような人為加振、常時微動(☞参照)などを加振源として、構造物の振動を測定します(図3)。測定した振動データの振幅や固有振動数などを、健全時の値や設計基準値または統計的／解析的に算出した基準値と比較することによって、構造物の損

傷や劣化の有無・程度を評価します。従来の振動測定による検査作業では、センサーやケーブルなどの設置と撤去に多くの時間を要していました。また、高所や線路近接位置などの危険箇所での作業をとまなう場合もありました。そこで、構造物の振動測定作業を効率化、安全化するために、非接触振動測定技術の適用を試みました。

構造物診断用非接触振動測定システム「U Doppler」

レーザー光を照射することによって遠隔位置から非接触で対象物の振動を測定できるセンサーであるLDV(☞

参照)を応用して、鉄道構造物の振動を非接触測定するシステム「U Doppler¹⁾」を開発しました。U Dopplerは2007年に実用化され現場への普及が進み、2016年にさらなる小型軽量化や無線通信化を図った「U Doppler II」を開発しました(図4)。

U Dopplerは、レーザーを照射することによって1m～100m程度遠方に位置する構造物の振動を測定できるシステムで、主に列車通過時の橋りょうの振動(たわみ)測定や高架橋・橋脚の固有振動数測定などに活用されています(図5)。

LDVには、風や地盤振動などの影

☞ 常時微動

地表面は、波浪・風などの自然の外力や、交通機関・工場・工事などの人工的な外力を受けて、ごく微小ではあるものの常に揺れ動いています。この小さな揺れを常時微動と呼んでいます。

☞ LDV (レーザー Doppler 速度計)

光のドップラー効果を利用して速度を計測する装置です。レーザーを運動する物体に照射すると、ドップラー効果によって反射レーザー光の周波数が物体の速度に応じて変化します。LDVは、この周波数変化から物体の振動速度を検出します。

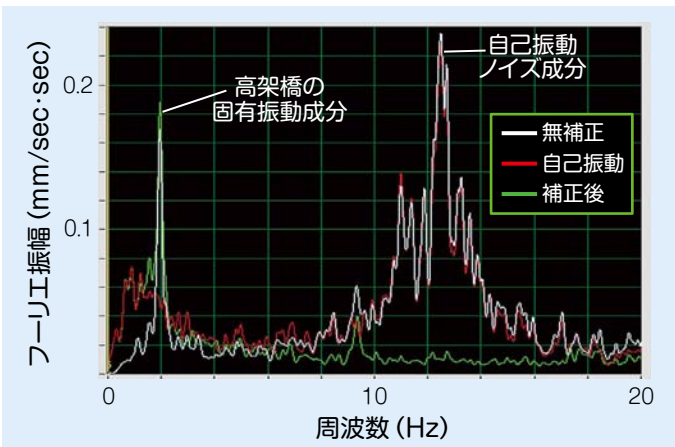


図6 高架橋の非接触常時微動測定結果のフーリエスペクトル



図7 長距離型Uドップラー

響を受けてLDVセンサー自身が揺れると物体の振動を正しく検出できなくなるという課題がありました。UドップラーにはLDV自身の動きを振動計と角度計で測定して自己振動の影響を補正する技術が適用されており、外乱の多い屋外環境においても微小な振動を計測することができます。図6にUドップラーで測定した高架橋の常時微動のフーリエスペクトル(☞参照)を示します。図中の白線が自己振動の補正を行っていないLDV、赤線がLDVの自己振動、緑線が自己振動の補正を行ったUドップラーの測定結果のスペクトルであり、Uドップラーを用いれば自己振動ノイズの影響を補正して高架橋の固有振動数を正しく推定できることがわかります。

このUドップラーを用いれば、高所や危険箇所への振動計設置作業を省略することができ、振動測定による構造物検査を大幅に効率化、安全化することができます。

☞ フーリエスペクトル

振動波形をフーリエ変換すると、さまざまな周波数を持った正弦波の組み合わせとして表現することができ、各正弦波の振幅も求められます。フーリエスペクトルは、フーリエ変換によって得られた各正弦波の周波数と振幅の関係をグラフ化したもので、振動波形にどのような周波数成分がより多く含まれているのかを知ることができます。

長大構造物の検査への応用

これまでに、Uドップラーを用いた列車通過時の橋桁のたわみ測定や高架橋の固有振動数測定の構造物検査手法としての実用化・普及を果たすことができました。これらの測定では比較的近距离(10~30m)からの簡単な非接触測定が行われています。

次のステップとして、長大構造物の検査への適用性向上を目的として、不可視光LDVの適用による測定可能距離の延長、高性能な回転台装置による測定箇所の視準性能の向上を図った「長距離型Uドップラー」(図7)の開発に着手しました。

図8に、長距離型Uドップラーの長大橋の検査への適用例を示します。吊りケーブルに支持された長大橋では、ケーブルの張力の把握・管理が必要です。従来はケーブルをハンマーで打撃して起こした振動をケーブルに取り付けた振動計で測定し、得られたデータを分析することで張力を調べていま

た。一方、長距離型Uドップラーを用いれば、遠隔位置からケーブルを順次視準して常時微動を測定することでケーブルの張力を推定できることが確認できました²⁾。また構造の大型化によって、センサー類の設置作業の難易度が高まった主桁、主塔(ケーブルを支えるタワー)、橋脚などの各部の振動特性の把握も、長距離型Uドップラーを用いることにより一括して実施することができます。

UAVの活用

振動測定による構造物検査手法は、変状にともなう構造物の力学的な特徴の変化を定量的に検出する手法です。一方、振動特性の変化の原因となった構造物の変状の位置や種別の特定は、目視で行っています。この外観変状の目視調査も遠隔非接触で行えるようになれば、災害後の調査の安全化や長大構造物の調査の効率化を図ることができます。

近年、小型のマルチローターヘリコプターを用いたドローンなどのUAVを用いた空撮技術が飛躍的な進歩を遂げています。UAVは人が容易に近づけない高所や危険箇所の外観情報の収集に活用できるため、構造物検査へも有効に適用できるものと考えられます。

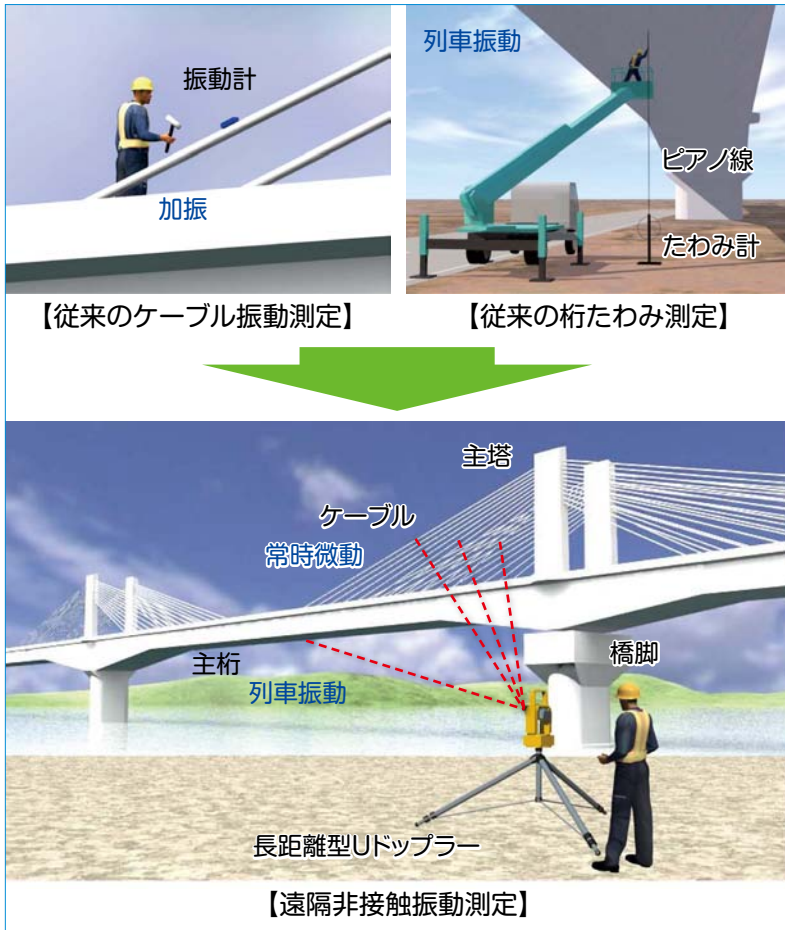


図8 長距離型Uドップラーの長大橋の検査への応用例

しかしながら、一般的なドローンは、線路への侵入・墜落の危険が避けられません。そのため、鉄道分野では、災害で列車が運行停止した状況下での空撮調査などへの活用の期待が高まる一方、日常の点検作業への応用には、車両、軌道、架線などへの支障の危惧から、抵抗があるのが実情です。

そこで、その解決策の一つとして、図9に示す機体上部に無限軌道を搭載した「付着走行用UAV」を提案しました。

この付着走行用UAVは橋りょうの桁の下面などに付着して電動無限軌道で走行するため、構造物上の任意位置に高い位置精度で接近して近接画像を

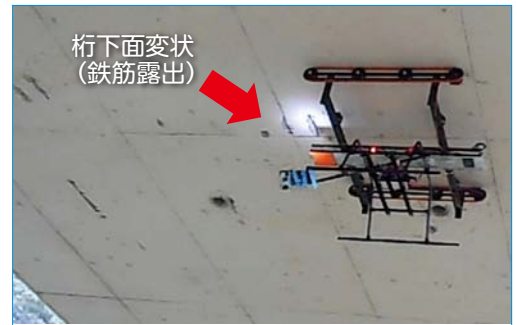
取得できます(図10)。ドローンの機体制御用のGPS信号の途絶や、気流の乱れが生じやすい橋りょうの桁下部においても、付着走行することにより操縦不能に陥ることなく安定して検査を実施できます。

おわりに

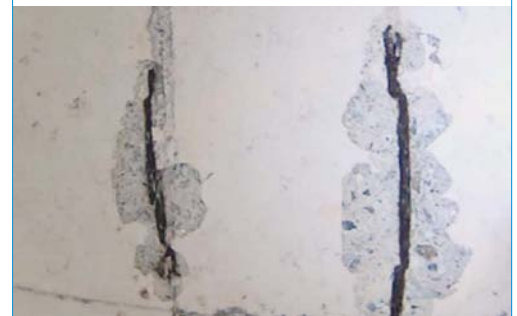
レーザーやUAVを用いて離れた位置から構造物を検査する手法を紹介しました。このほかにも、画像計測や列車上からの振動計測の構造物検査への応用、数値シミュレーションや構造同定手法を用いた構造物の評価・診断技術の開発にも取り組んでおり、今後も、鉄道構造物の維持管理や災害耐力向上



図9 付着走行用UAV



(a) 付着走行による変状調査状況



(b) 撮影画像例

図10 付着走行用UAVによる外観変状調査

に有用な検査・評価技術を提案していきたいと考えています。

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ました。RRR

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，松尾賢，小林泰一郎，竹村禎修：斜張橋のケーブル張力および主桁たわみの遠隔非接触計測の試み，日本鉄道施設協会誌，Vol.54，No.11，pp.49-51，2016