

構造物診断を目的とした非接触微動測定法

Non-contact microtremor measuring method for vibration diagnosis of railway structures

上半文昭*・目黒公郎**

Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

1. はじめに

本研究では、振動測定を利用した鉄道構造物の診断技術への適用を目的として、微動の非接触測定技術を開発した。構造物の振動モード形を同定する場合、構造物上の複数点の振動を測定する必要がある。その場合、センサの接着やケーブル類の配線、および、それらの撤去に多くの時間を要している。また高架橋の柱上端等にセンサを設置する場合、危険を伴う高所作業が発生する。これらは、作業の効率と安全性を低下させる要因となっている。そこで、構造物の振動測定を効率良く安全に行うために、レーザドップラ速度計（以下、LDV）を利用した微動の非接触測定法を提案した。LDVは、主として精密機器などの機械振動の測定に利用されてきた装置であるが、近年、構造物の維持管理分野への適用も検討されはじめて¹⁾いる。本研究では、著者らがこれまでに研究してきた鉄道RCラーメン高架橋の微動測定による損傷度検査手法^{2,3)}への適用を主たる目的として、構造物の1次モードの固有振動数と振動モード形をLDVによる非接触の微動測定で同定する手法を検討した。LDV本体の振動を別のセンサで測定することにより微動の測定精度を向上する手法、および、一つのレーザドップラ速度計を用いて構造物の振動モード形を同定する手法を提案し、模型実験と屋外での実RCラーメン構造物測定によりその適用性を検証した。

2. レーザドップラ速度計

レーザドップラ速度計（LDV）は、運動する物体にレーザ光を照射してその反射光を受光し、「ドップラ効果」を利用して物体の運動速度を非接触で検出するセンサである。ある一定の周波数成分 f_0 を持つ入射レーザ光を、ある

速度で移動している物体（図1）に当てると、移動物体の持つ速度成分に比例して反射レーザ光の周波数が f_D （ドップラ周波数）だけ変化する。物体の速度を v 、照射するレーザ光の波長を λ_0 、レーザ光の照射方向と物体の移動方向とがなす角度を θ とすると、ドップラ周波数 f_D は、次式で得られる。

$$f_D = \frac{2v \cdot \cos \theta}{\lambda_0} \dots \dots \dots (1)$$

LDVで使用されるレーザ光の波長 λ_0 はきわめて安定しているため、ドップラ周波数 f_D とターゲットの移動速度 v は比例関係にある。レーザ光の照射方向と物体の移動方向とのなす角 θ が得られれば、ドップラ周波数 f_D を測定することにより、物体の持つ照射方向の移動速度を求められる。

なお本検討では、グラフテック社製のLDV(AT 0023センサとAT 3600復調器、図2)を使用した。

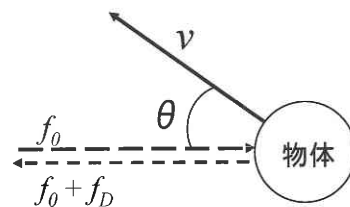


図1 移動物体へのレーザ照射と反射光の周波数変化

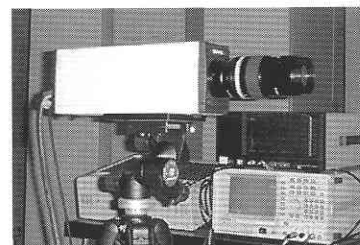


図2 レーザドップラ速度計（LDV）

*鉄道総合技術研究所

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

3. 構造物の非接触微動測定手法

3.1 LDV による微動測定の問題点

センサと測定対象間の相対速度を検出する LDV を用いて、振幅レベルの非常に小さい微動（起振機や打撃による加振によらない常時の極微小な振動）を測定する場合、測定記録に占める LDV 本体の振動の影響が大きくなる。屋外での構造物測定では、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できない。特に地震後の損傷度検査に適用する場合には、復旧工事などによる高いノイズレベル下で計測を行う必要があり、その影響が深刻である。

3.2 LDV 本体の振動除去技術

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による LDV 本体の振動の影響を取り除き、より高精度な微動測定を実現するためのアイデアとして、測定対象の振動周波数領域において LDV と等価な感度を有する接触型の微動センサを LDV に取り付けて、LDV 本体の振動速度を同時測定し、その測定記録を用いて LDV 本体の振動の影響を除去する手法を提案する（図 3）

ある時刻 t における LDV の速度記録 $V_L(t)$ は、構造物上の測定点と LDV 間の相対速度である。LDV 本体の振動速度を微動センサで記録し、時刻 t におけるその値を $V_S(t)$ とすれば、LDV 本体の振動の影響を取り除いた測定点の絶対速度 $V_M(t)$ ($= V(t)$) が次式で求められる。

$$V_M(t) = V_L(t) + V_S(t) \dots\dots\dots (2)$$

得られた時系列データをスペクトル処理すれば、構造物の振動特性 $S_M(f)$ が得られる（図 4）。

3.3 振動方向とレーザ照射方向のなす角度の補正

高架橋などの実構造物を測定する場合には、その立地条件から構造物の振動方向とは異なる方向からレーザ光を照射しなくてはならない状況が生じる。構造物上の測定点の振動方向と、レーザ光の照射方向とが異なる場合にも、微動センサで LDV 本体のレーザ照射方向の振動を測定する。時刻 t における LDV の速度記録を $V_L(t)$ 、LDV 本体に取り付けた微動センサの速度記録を $V_S(t)$ とすれば、振動方向と角度 θ だけずれた位置から測定した場合の測定対象の絶対速度 $V_M(t)$ は次式で求まる。

$$V_M(t) = \frac{V_L(t) + V_S(t)}{\cos \theta} \dots\dots\dots (3)$$

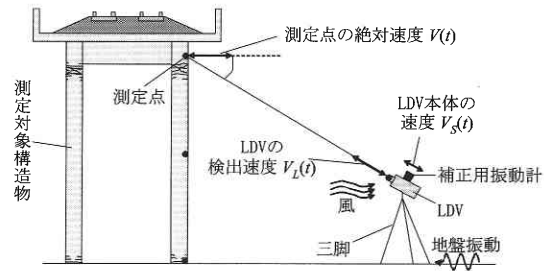


図 3 非接触微動測定と LDV 本体の振動除去技術

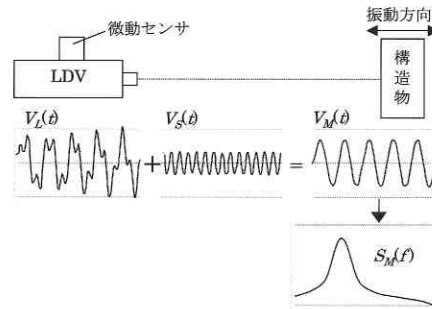


図 4 補正手法の概要

4. 1 台の LDV による振動モード形推定手法

構造物の振動モード形を得る場合には、構造物上の複数点の振動測定を実施する必要がある。複数の LDV で同時測定すれば振動モード形を容易に得られるが、現状では LDV が高価であるため、鉄道現場に普及している振動測定装置と同程度の価格で多点測定用の非接触振動測定装置を構成することは難しい。一方、一つの LDV で構造物をスキミングして振動モード形を同定する手法が考えられる。ただし、微動を用いる場合には微動の時間的な非定常性の影響を考慮する必要がある。その解決法として、構造物各部の微動を非接触測定する際に、構造物上のある基準点に従来（接触型）の振動計を取り付けて微動を同時測定し、対象とするモード成分のスペクトル振幅（各部測定時の基準点の振動レベル）を調べ、その値で非接触測定による構造物各部の振動のスペクトル振幅を除し、各部測定時の振動レベルで基準化したモード振幅を得ることとする。基準点は、対象とするモードの振動成分を検出できる任意の位置に設定してよい。構造が単純な構造物では、低次の振動モード形の概形は予測可能であるので、得られたモード振幅値を用いて構造物の振動モード形を同定できる。

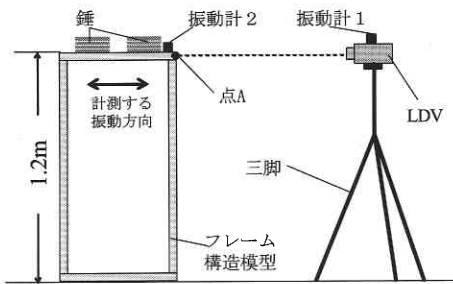


図5 LDV 本体の振動の除去技術の実験概要

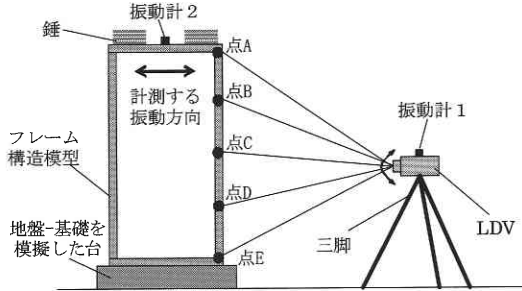


図7 1台のLDVによる振動モード形推定の実験概要

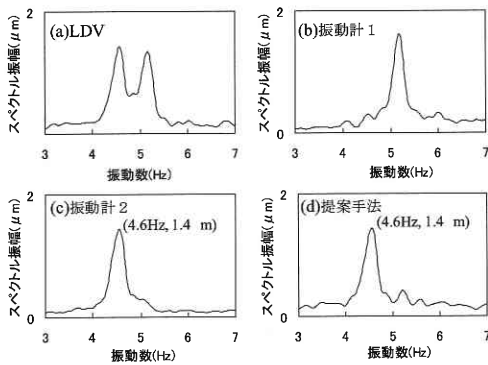


図6 振動速度記録のフーリエスペクトル

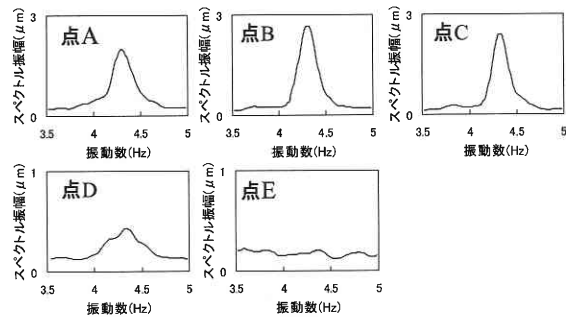


図8 模型各部の振動速度のフーリエスペクトル

5. 模型実験による提案手法の検証

5.1 LDV 本体の振動の除去技術の実験

LDVで測定された微動記録から、LDV 本体の振動の影響を除去する手法の効果を模型実験で確認する。鉄道RCラーメン高架橋をモデルとして作成したフレーム構造模型上の点Aの微動を三脚上に設置したLDVで測定した(図5)。また、LDV 本体の振動を振動計1、フレーム構造模型上の点A付近の振動を振動計2で同時測定した。フレーム構造模型は、4本のL字鋼で錘を載せた桁を支えた構造を有しており、実験室の床上に固定されている。LDVは構造物上の点Aの振動方向とずれの無い位置に設置した。各センサで微動を約41 sec間、時間刻み0.01 secで測定し、データを保存した。

実験で得られた振動速度記録のフーリエスペクトルを図6に示す。LDVの測定結果(a)は、LDV 本体の振動(b)の影響を受けているが、提案手法で得られた結果(d)は、点Aの振動特性の正解値である振動計2の測定結果(c)とほぼ等しい振動特性を与えることを確認できた。

5.2 1台のLDVによる振動モード形推定の実験

微動の非接触測定により、フレーム構造模型の1次振動

表1 モード振幅の推定結果

	高さ (m)	スペクトルピーク値		1次モード振幅同定値
		非接触測定	基準点	
点A	1.17	2.00	2.00	1.000
点B	0.90	2.66	2.99	0.878
点C	0.60	2.39	4.44	0.500
点D	0.30	0.43	1.94	0.129
点E	0.03	0.21	1.97	0.000

モード形を推定する。図7のA~E点をLDVで、LDV 本体を振動計1で測定し、振動計2を基準点の微動センサとして用いた。LDV 本体の振動の影響を除去した各点の振動速度記録のフーリエスペクトルを図8に示す。各スペクトルの卓越振動数はいずれも模型の1次固有振動数(4.3 Hz)を示しているが、振幅値は微動の非定常性の影響により、予想される振動モード形には整合しないため、各スペクトルの4.3 Hzの振幅値を同時測定で得られた振動計2(基準点)の4.3 Hzの振幅値で除して補正した。さらに、補正後の点Eの振幅値を模型の水平振動に含まれる並進成分であるとみなして各点の振幅値から減じ、模型各点の1次モード振幅を得た。得られた模型各点の1次モード振幅値を、点Aの振幅を1として表1に、点Aの高

研 究 速 報

さも1として理論値とあわせて図9に示す。同定された1次振動モード形は理論値（下端固定—上端回転固定の柱の1次振動モード形）とよく一致しており，提案手法の妥当性を確認できた。

6. 実構造物の振動モード形推定

鉄道高架橋などの実構造物の振動診断への適用性の検証を目的として，RC ラーメン構造物の屋外測定を実施した。非接触微動測定による対象構造物の1次振動モード形を数値解析結果と比較してその精度を調べる。

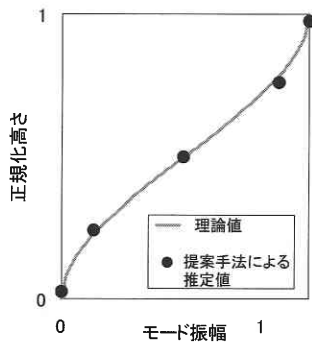


図9 振動モード形の理論値と推定結果



図10 測定対象の2層RC ラーメン構造物

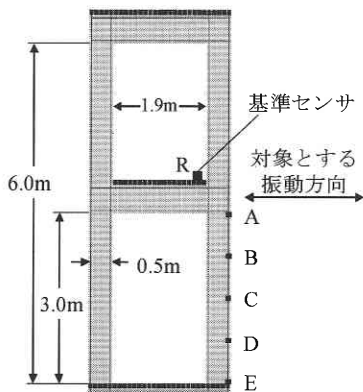


図11 対象構造物の断面形状 (数値解析モデル)

対象構造物の外観を図10に，対象とする振動方向の断面形状を図11に示す。対象構造物は2層RC ラーメン構造であるが，手摺や壁などが設置されておらず振動モード形の解析が容易な下層部の柱を検討の対象とした。図12に示すように構造物から約5m離れた地盤上から接触型の微動センサを付加したLDVで構造物上のA～E点の微動を順番に時間刻み0.01 secで測定した。各点測定時にR点に設置した基準センサで微動を同時測定した。

図13にA点の測定時に得られた各センサの記録と提案手法で補正した点Aの微動の非接触測定結果を示す。無補正のLDVの記録 $V_L(t)$ がLDV本体の振動 $V_S(t)$ の影響を強く受けているのに対し，提案手法 $V_M(t)$ は，基準センサの記録 $V_R(t)$ （点Aの微動の正確値。ただし，点Aより高い位置にセンサが設置されているため振幅はやや大きい。）に似た波形となった。図14に点A～Eで得られた振動速度記録のフリエスペクトルを示す。 $S_L(f)$ と $S_S(f)$ から，無補正のLDVの記録はLDV本体の振動の影響（10～20 Hz）を強く受けていることがわかる。提案手法による $S_M(f)$ では基準センサのスペクトル $S_R(f)$ に見られる約3.6 Hzの成分のみが強く現れている。この成分が構造物の1次固有振動数に対応していると考えられる。

次に，提案手法によりRC ラーメン構造物の下層部の柱の1次振動モード形を推定する。著者らが一連の研究で用いてきた応用要素法 (AEM)⁴⁾による1次振動モード形の解析結果を図15に示す。点A～Eの $S_M(f)$ の3.6 Hzの成分 (S_M^{max})を $S_R(f)$ の同周波数成分の値 (S_R^{max})で除して各点測定時の振動レベルで基準化し，基準化したモード振幅 S_n^{max} を求め，5.2と同様の手法でRC ラーメン構造物の下層部の柱の1次振動モード形を求めた。結果を点Aのモード振幅および高さを1として，応用要素法による1次振動モード形の数値解析結果とあわせて図16に示す。解析値と提案手法による推定値はよく一致しており，提案手法の妥当性が示されたものとする。

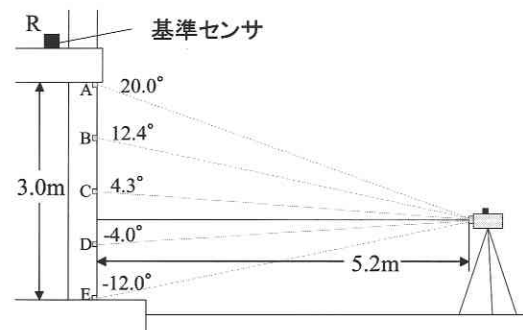


図12 測定概要

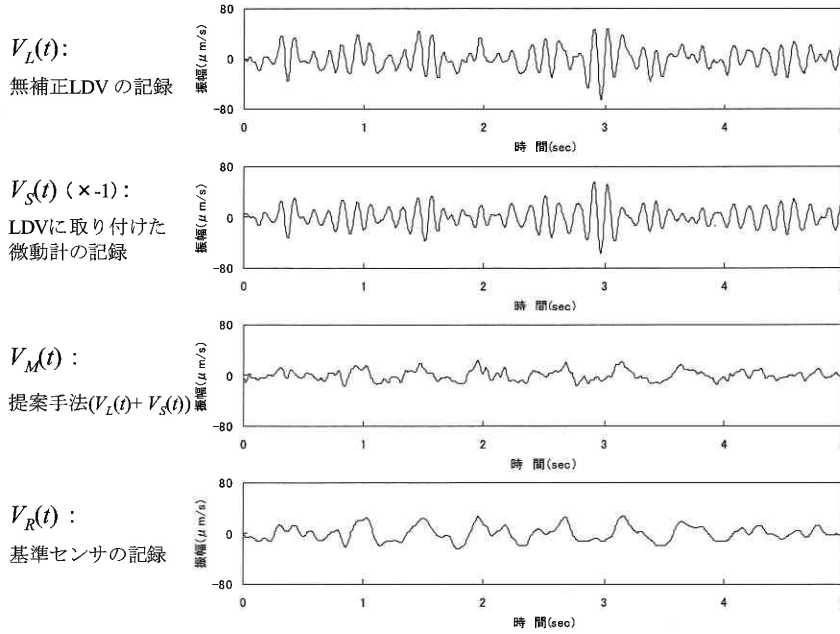


図13 A点測定時に得られた各センサの記録と提案手法による点Aの微動の非接触測定結果

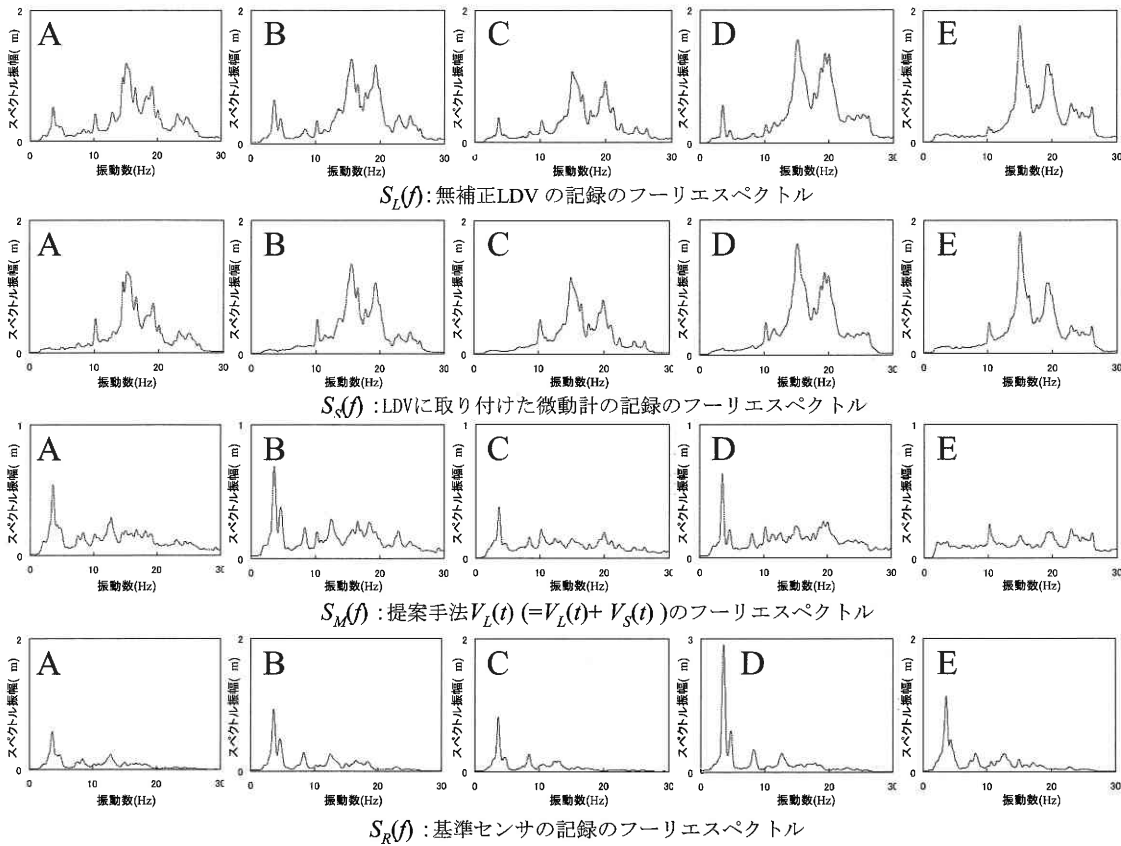


図14 構造物上各点の振動速度記録のフーリエスペクトル

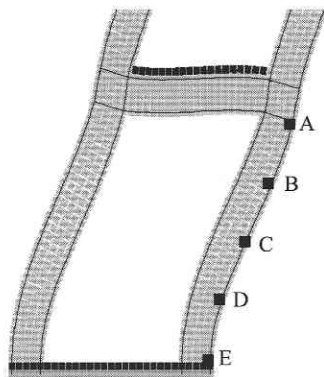


図 15 1次振動モード形の解析結果 (AEM)

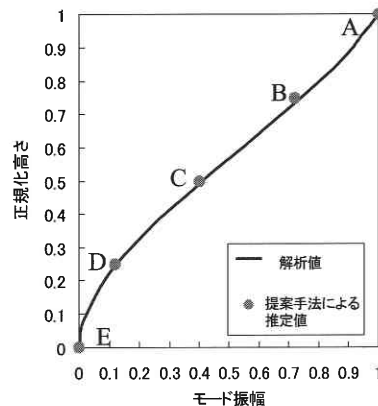


図 16 1次振動モード形の解析値と推定値

6. ま と め

微動の高精度な非接触測定法を提案し、模型実験と実構造物測定により、その有効性を確認した。提案手法を用いれば、構造物の振動特性を無加振かつ非接触で同定できるようになり、構造物の劣化、地震時の損傷や復旧施工効果などの振動診断の効率と安全性を飛躍的に向上できるものとする。今回は、振動特性の推定が容易なラーメン構造物の1次モードの振動特性のみを検討の対象としたが、更なる検討により提案手法の適用範囲の拡大を試みたい。

(2003年10月17日受理)

参 考 文 献

- 1) Kiyoyuki Kaito, Masato Abe, Yozo Fujino and Hidenori yoda: Detection of structural damage by ambient vibration measurement using laser Doppler vibrometer, Proceedings of the fifth International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp. 127-135, 2000.
- 2) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析によるRC構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp. 621-628, 2000.
- 3) 上半文昭, 目黒公郎: 微動測定を利用した地震時構造物損傷度検査手法に関する実験的研究, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集 (CD-ROM), 2002.
- 4) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No. 30, pp. 103-116, 1997.