

鉄道構造物の振動診断を目的とした 非接触微動測定法の開発

上半文昭¹・目黒公郎²

¹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 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: uehan@rtri.or.jp

²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助教授
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

鉄道構造物の振動診断において、構造物の振動モード形が診断の指標として用いられる。その場合、モード形を得るのに十分な複数点の振動を測定する必要がある。構造物へのセンサの接着やケーブル類の配線、および、それらの撤去作業に多くの時間を要している。また地震後の損傷度診断や復旧効果確認作業では、高所等危険箇所へのセンサ設置は余震等による2次災害の危険性を高める。そこで、構造物の振動診断を効率よく安全に行うために、レーザドップラ速度計(LDV)による微動の非接触測定の適用を検討した。微動の測定精度を低下させるLDV本体の振動の影響を除去する手法とLDV1台で構造物の振動モード形を得る手法を提案し、模型実験と屋外測定を実施してその有効性を確認した。

Key Words : LDV, non-contact measurement, microtremor, vibration diagnosis, AEM

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いる。依田ら¹⁾、貝戸ら²⁾は、LDVで鋼板などの高次モードの振動モード形を同定する手法を提案し、構造物の損傷検査への適用の可能性を示している。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^{3),4)}への適用を主たる目的として、構造物の低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

(1) ドップラ効果を利用した物体の速度計測

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を持つレーザ光を、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その周波数が変化する。物体に照射するレーザ光(入射光)の周波数を f_0 、物体の速度を v 、照射するレーザ光の波長を λ_0 、照射するレーザ光を当てる方向と物体の移動方向とがなす角度を θ とすると、物体からの反射光の周波数 f_r は次式で表される。

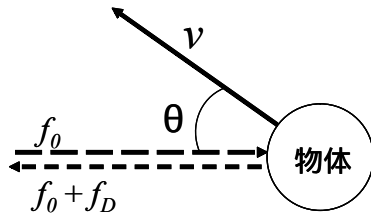


図-1 移動物体へのレーザ照射と反射光の周波数変化

$$f_r = \frac{\lambda_0 \cdot f_0 + v \cdot \cos \theta}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos \theta} \cdot f_0 \quad (1)$$

よって、入射光に対する反射光の周波数の変化量 f_D は、

$$f_D = |f_0 - f_r| = \left(1 - \frac{\lambda_0 \cdot f_0 + v \cdot \cos \theta}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos \theta} \right) \cdot f_0$$

$$= \frac{2v \cdot \cos \theta \cdot f_0}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_0 \cdot f_0 \gg v \cdot \cos \theta$ であるので、ドップラ周波数 f_D は、次式で得られる。

$$f_D = \frac{2v \cdot \cos \theta}{\lambda_0} \quad (3)$$

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。

(2) 本研究で使用するLDVの特性

以下の一連の検討では、グラフテック社製の LDV (AT0023 センサと AT3600 復調器) に、屋外での構造物測定を目的として望遠レンズを付加した装置を使用する (図-2)。同装置の計測範囲は図-3 の通りであり、本研究の対象である周波数が数 Hz 程度、速度振幅が数 $\mu\text{m/s}$ ~ 数 $100 \mu\text{m/s}$ (変位振幅で数 μm 程度) の微動の測定にも使用可能である。

3. 非接触微動測定手法

(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



図-2 レーザドップラ速度計 (LDV)

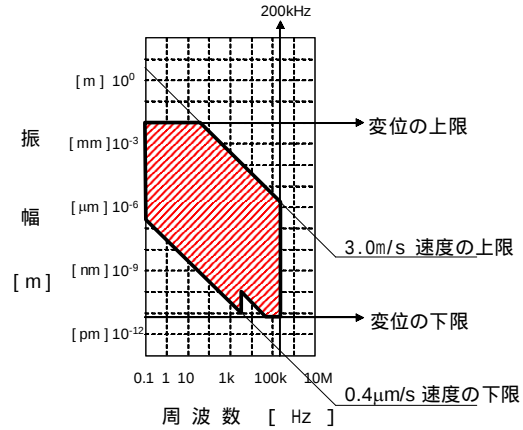


図-3 使用 LDV の計測範囲

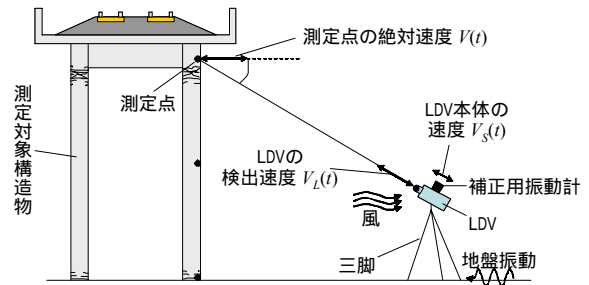


図-4 非接触微動測定と LDV 本体の振動除去技術

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と考える。

(2) LDV 本体の振動の除去技術

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 本体の振動速度を記録し、その記録を用いて LDV 本体の振動の影響を除去する手法を検討する (図-4)。

まず、構造物の振動方向とレーザの照射方向が一致している場合を対象として、LDV と微動センサの測定する速度データの完全な同時測定により構造物の微動の時系列データを得る手法を説明する。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

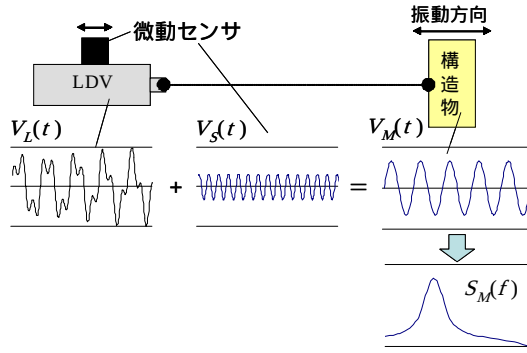


図-5 補正手法の概要

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 $V_M(t)$ が次式で求められる。

$$V_M(t) = V_L(t) + V_S(t) \quad (4)$$

$V_M(t)$ は測定点の絶対速度（図-4 中では $V(t)$ に相当）であるが、提案手法で補正して求めたことを強調するために添字 M を付けた。得られた構造物振動の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-5）。本手法を用いる場合、測定対象の周波数領域における感度および位相特性が LDV と等価な微動センサを用いること、及び、LDV と微動センサの速度の記録に位相差が生じないことに十分注意して測定を実施することとする。

(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、構造物上のある測定点の振動方向とは異なる方向からレーザ光を照射する必要がある。構造物上のある測定点をその振動方向と角度 θ だけずれた位置から LDV で測定し、その記録を LDV 本体に取り付けた微動センサの記録で補正する手法は次の通りである。
(3)式より、測定対象の振動方向と角度 θ だけずれた位置から測定した場合の LDV の速度記録は、実際の測定対象の速度に $\cos\theta$ を乗じた値になる。また、LDV は LDV 本体と物体との相対速度を記録しているので、測定対象の振動レベルに対して LDV 本体の振動の影響を無視できない場合には、まず LDV の速度記録から測定対象の振動方向と角度 θ をなす方向の LDV 本体の振動の影響を除去し、次に $\cos\theta$ で除することにより、測定対象の振動速度を求められる。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 $V_M(t)$ は次式で求められる。

$$V_M(t) = \frac{V_L(t) + V_S(t)}{\cos\theta} \quad (5)$$

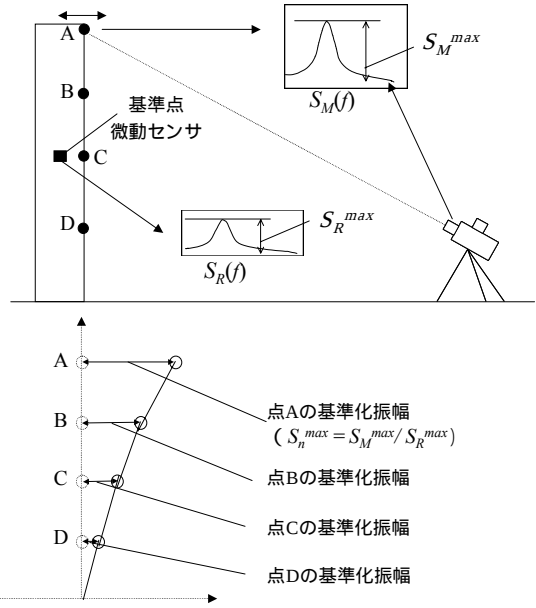


図-6 LDV1 台による振動モード形の推定法

4. 構造物の振動モード形推定手法

(1) 非接触微動測定による構造物の振動モード形推定の問題点

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。従来は、複数の振動計を構造物に設置して振動を同時測定することにより、振動モード形の推定を実施してきた。LDV についても、複数の LDV を用いて同時測定を行えば振動モード形を容易に得られるが、現状では LDV は従来の構造物検査用振動計の 10 倍以上の価格であるため、普及している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 を用いて構造物をスキャン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。

本手法の適用を検討している屋外の現場測定の分野では、低価格で操作が簡単な装置の開発が望まれているので、よりシンプルな装置構成で上記の問題を解決し、微動の非接触測定により構造物の固有振動数と振動モード形を得る手法を検討した。

(2) 1台のLDVによる振動モード形の推定法

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の（接触型）の微動センサを取り付けて微動 $V_R(t)$ 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） S_R^{max} 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 S_M^{max} 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 S_n^{max} を得ることとする（図-6 上図）。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

設定できる．鉄道高架橋などの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可能である（図-6 下図）．

5．模型実験による検証

(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．鉄道構造物として多用されるラーメン高架橋をイメージして作成した図-7，図-8 に示すフレーム構造模型上点 A の微動を三脚上に設置した LDV で測定した．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．振動計 1 および 2 として，構造物の微動測定に用いる微動センサ（物探サービス製 CR-4.5 2S）を使用した．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，実験室の床の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．また，本実験では高剛性の三脚をコンクリート製の実験室床上で使用しており，実際の現場測定などに比べて LDV 本体のノイズ振動の影響が少なくなると予想されたので，ノイズの多い測定状況を模擬するために三脚の上部のアームを伸ばして剛性をやや低めた状態で測定を実施した．各振動計で微動（起振機や打撃による加振によらない常時の振動）を約 41sec 間，時間刻み 0.01sec で測定し，データを保存した．

図-9 に各センサで記録された微動の速度記録のフーリエスペクトル（バンド幅 0.5 の Parzen ウィンドウを用いて平滑化）を示す．図中(c)にフレーム構造模型上に設置した振動計 2 で記録された微動のフーリエスペクトルを示す．その卓越振動数（1 次振動モードの固有振動数に相当）は 4.6Hz であり，同振動数における振幅は $1.4\mu\text{m}$ であった．一方，同図(a)に示す LDV の速度記録のフーリエスペクトルには，2 つの明瞭なピークが現われている．同図(b)に示す LDV 上に設置した振動計 1 で記録された速度記録のフーリエスペクトルには，振動数 5.2Hz のピークがあり，これは LDV 本体の振動の特性をあらわしているものと考えられる．図(a)の 2 つのピークはそれぞれ，振動数 4.6Hz，振幅 $1.4\mu\text{m}$ と振動数 5.2Hz，振幅 $1.3\mu\text{m}$ であり，後者のピークは LDV の振動特性の影響を受けたものであることがわかる．提案手法で得られたフーリエスペクトル(d)の 1 次の卓越ピークは，振動数 4.6Hz，振幅 $1.4\mu\text{m}$ であり，点 A の振動特性の正解値である振動計 2 の結果と等しい値を示した．

(2) LDV1 台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 次振動モード形を推定する．図-10 の A～E 点を LDV



図-7 フレーム構造模型

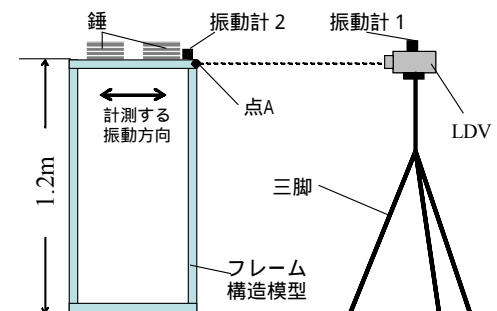


図-8 LDV 本体の振動の除去技術の実験概要

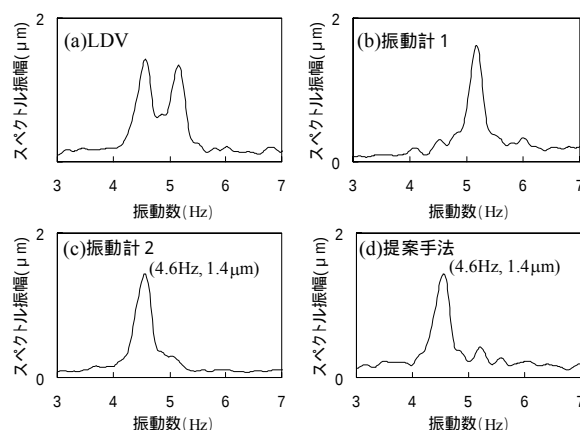


図-9 振動速度記録のフーリエスペクトル

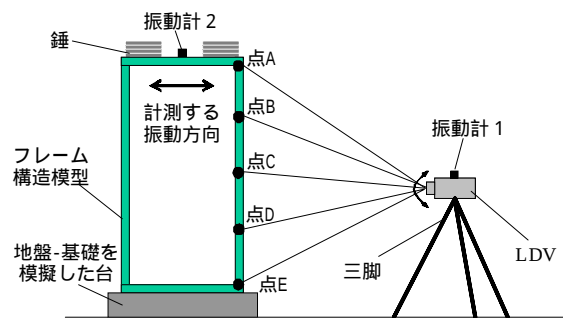


図-10 LDV1 台による振動モード形推定の実験

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-11 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（4.3Hz）を示して

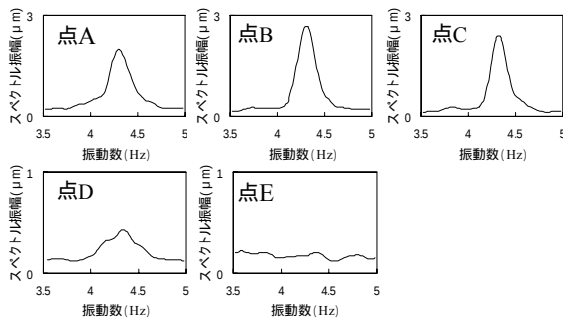


図-11 模型各部のフーリエスペクトル

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

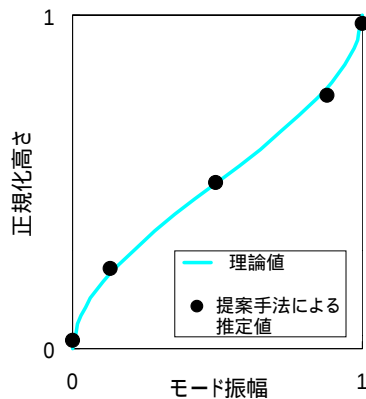


図-12 振動モード形の理論値と推定結果

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4.3Hzの振幅値(S_M^{max})を同時測定で得られた振動計2(基準点の微動センサ)の4.3Hzの振幅値(S_R^{max})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次モード振幅を得る。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の高さも1として理論解とあわせて図-12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



図-13 測定対象の2層RCラーメン構造物

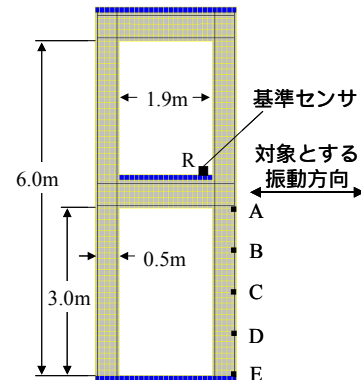


図-14 対象構造物の断面形状(解析モデル)

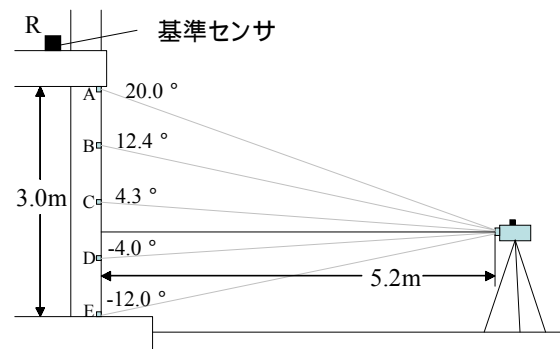


図-15 測定概要



図-16 改良LDV

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。

対象構造物の外観を図-13に、対象とする振動方向の断面形状を図-14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-15に示すように構造物から約5m離れた地盤上から図-16に示す接触型の微動センサを付加した改良LDVで構造物上のA~E点の微動

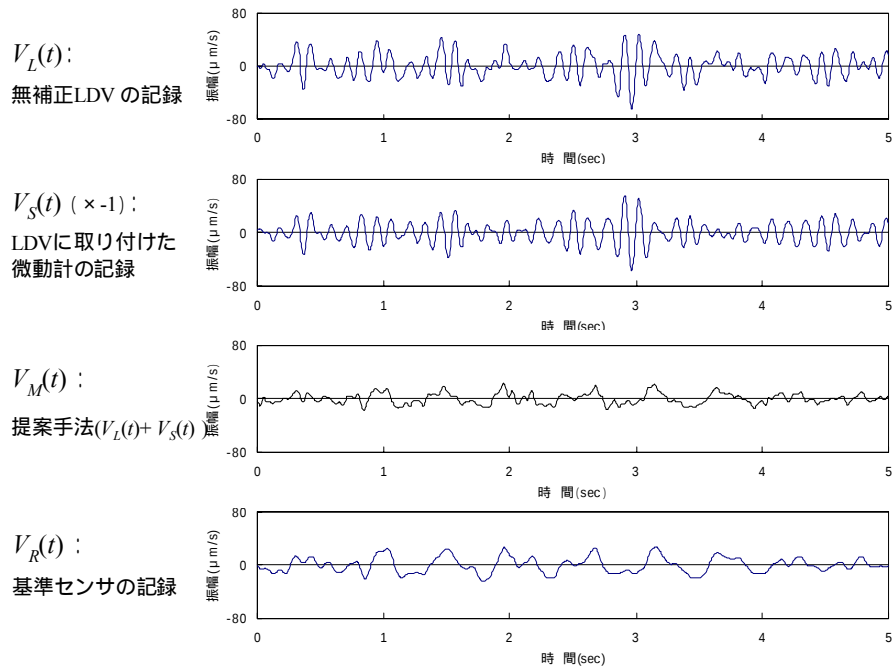


図-17 A点測定時に得られた各センサの記録と提案手法による点Aの微動の非接触測定結果

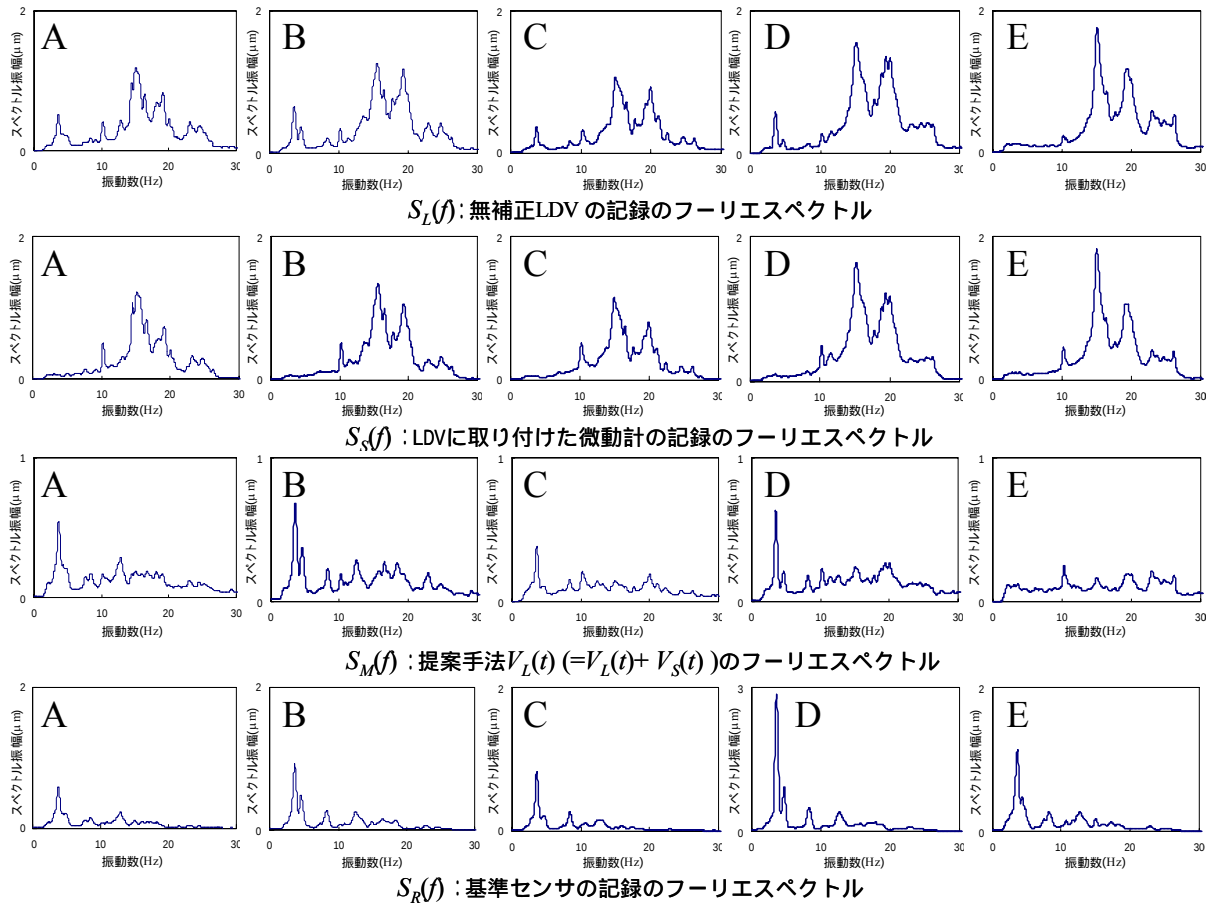


図-18 構造物上各点の振動速度記録のフーリエスペクトル

を順番に時間刻み 0.01sec 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-17 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 の微動の正解値．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．) と似た波形となった．図-18 に点 A～E で得られた振動速度記録の

フー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 10～20Hz の LDV 本体の振動の影響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 3.6Hz 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）⁵⁾による 1 次振動モード形の解析結果を図-19 に示す．点 A～E の $S_M(f)$ の 3.6Hz の成分（ S_M^{max} ）を $S_R(f)$ の同振動数成分の値（ 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} を得た．結果を点 A のモード振幅および高さを 1 として解析結果とあわせて図-20 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考ええる．

7．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考ええる．ただし，提案する 1 台の LDV による振動モード形の推定手法は，RC ラーメン高架橋の柱の 1 次振動モード形を得ることを前提として開発したものであり，他種の構造物への適用や高次振動モード形の推定については今後の検討課題である．しかし今回，著者らの考える鉄道構造物の損傷度診断技術に適用するのに十分な測定精度を確認できたので，今後は提案手法を構造物の振動特性の解明や地震対策分野に活用する予定である．

謝辞：測定作業にご協力いただいたグラフテック株式会社および物探サービス株式会社各位に深甚の謝意を表する．

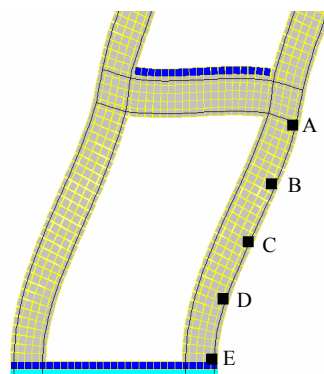


図-19 1 次振動モード形の解析結果（AEM）

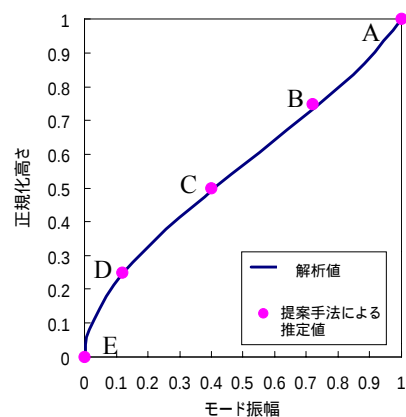


図-20 1 次振動モード形の解析値と推定値

参考文献

- 1) 依田秀則, 阿部雅人, 藤野陽三, 貝戸清之: レーザドップラ速度計を用いた実験的モード解析, 第54回年次学術講演会概要集(CD-ROM), 1999.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.

(2003. 7. 10 受付)

DEVELOPMENT OF NON-CONTACT MICROTREMOR MEASURING METHOD FOR VIBRATION DIAGNOSES OF RAILWAY STRUCTURE

Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

An accurate non-contact measuring methods for structure microtremor is proposed by using an improved Laser Doppler Velocimeter. The microtremor measurements of a miniature frame model and an RC rigid-frame viaduct are presented in order to verify the efficiency of the proposed method. Dynamic characteristics such as the 1st mode natural frequency and mode shape of the model and viaduct were accurately estimated by the proposed methods.