

論文 LDV を用いた鉄道高架橋の振動特性評価に関する一考察

吉田 幸司^{*1}・関 雅樹^{*2}・田川 謙一^{*3}・八代 和幸^{*4}

要旨：構造物の振動特性を適切かつ効率的に把握・診断することは維持管理上重要であり，そのための新たな計測技術や測定結果の評価手法が必要である。本研究では，鉄道高架橋を対象に，レーザードップラ速度計（LDV）を用い，高架橋の常時微動と強制加振時の振動特性把握を実施し高架橋の複数の卓越周波数と振動モードが計測可能であること，強制加振による動的な振動特性の把握が可能であることを示した。

キーワード：LDV，非破壊検査，卓越周波数，振動モード，常時微動，鉄道高架橋

1. はじめに

構造物の健全性が何らかの要因によって損なわれた場合，ひび割れ，列車通過時の桁や梁のたわみの増加，構造物の応答等に健全な構造物とは異なる特異な現象が現れる。こうした現象を適切かつ効率的に把握・診断することが維持管理上重要である。また，そのための新たな計測技術（モニタリング技術）や測定結果の評価方法が必要である。

一般に構造物の健全度は目視検査を主体とした検査により診断される。東海道新幹線では，1991年より目視検査を補完するRCラーメン高架橋の健全度評価手法として，固有振動数に着目した衝撃振動試験^{1)~4)}を採用し，固有振動数の把握による健全度評価を実施してきた。本手法は，高架橋躯体あるいは基礎に何らかの変状が発生した場合，固有振動数が低下することから，その低下割合により健全度を評価するものである。また，衝撃振動試験では，特定の振動モードを励起するように衝撃力を与え，その時の速度応答を高架橋に設置した速度計センサーにて測定するものである。

一方，近年のセンサー計測精度や技術の飛躍的な発展に伴い，検査対象に計測センサー等の付

加的な質量等を与えない非接触での振動特性の把握手法の研究が進められている。最近では，貝戸ら^{5),6)}による光学系計測機器であるレーザードップラ速度計（以下，「LDV」という。）を用いた非接触のスキャニング振動計測システムの研究・開発ならびに道路橋での実証測定や，上半ら⁷⁾による高架橋の常時微動計測・解析評価による主要な固有振動数に着目した構造物の損傷度評価に関する研究がなされている。

構造物の健全度評価（損傷同定）には，一つの振動モードにおける卓越振動数だけでなく，複数の振動モードにおける卓越振動数を用いることが有益であると考えられる。そこで，本研究では，鉄道高架橋を対象に，LDVを用いた振動計測を実施し，空間的な振動情報である振動モード形と卓越周波数を把握する基礎的な実験検討を実施し，LDVによる鉄道高架橋の振動計測の可能性を論じる。

2. LDVによる高架橋の振動測定

LDVは，レーザ光を測定対象へ照射し，その照射光と反射光とのドップラ効果による位相差 $\Delta\theta$ から式(1)を用いて速度を検出する光学式干渉計である。

*1 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部 技術開発部 主幹研究員 博(工) (正会員)

*2 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部 技術開発部 次長 博(工) (正会員)

*3 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部 技術開発部 研究員 (正会員)

*4 ジェイアール東海コンサルタンツ（株） 調査事業部 修(工)

$$\Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} V \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 V : 測定対象の速度、 λ : レーザー光の波長である。その特徴として、①計測対象に計測センサー等の付加的な質量等を加えない非接触かつ長距離計測が可能、②速度分解能が高く周波数帯域が広いこと、③常時微動のような微小振動を高周波数成分まで計測可能である。③LDV センサー内部に取り付けた反射鏡の回転により、レーザー照射角を制御し多点計測（スキヤニング計測）が可能であり、空間的な振動情報である振動モード形が推定できる等が挙げられる。スキヤニング計測においては、各測定点は順次測定されるものであり、同期測定ではない。そのため、リファレンス用 LDV を用い、スキヤニングする各測点と同期をとった基準点測定を実施し、スキヤニングした各測点の測定結果の位相を合わせ、空間的な振動情報とする。LDV 計測システム概念図を図-1 に、LDV の性能諸元を表-1 に示す。

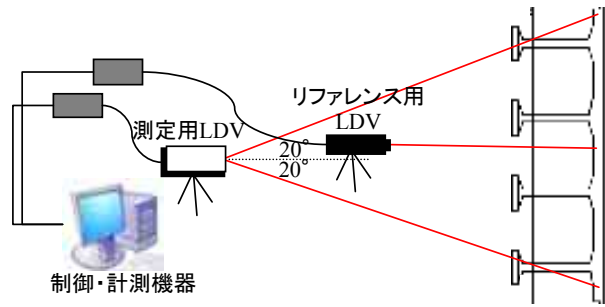


図-1 LDV 計測システム概要図

表-1 LDV 性能諸元

レーザータイプ	He-Ne
波長	633[nm]
計測可能距離	100[m]
計測可能周波数帯域	0-35k[Hz]
速度分解能	0.5[μm/s]
レーザー照射角度	-20~+20[degrees]
照射角度分解能	0.01[degrees]

表-2 測定対象高架橋

No.	橋長 (m)	柱断面寸法 (m)	高さ (m)	基礎種別	杭長 (m)	衝撃振動試験結果 (Hz)
T高架橋	24.0	0.6×0.6	7.0	直接	—	2.8
A高架橋	24.0	0.6×0.6	6.5	RC杭	10.0	2.5
B高架橋	24.0	0.6×0.6	7.0	RC杭	10.0	2.5

3. LDV による測定結果および考察

3.1 LDV による測定検証

はじめに、LDV による高架橋の振動特性の測定の検証として、これまで鉄道高架橋で実施してきた衝撃振動試験による固有振動数測定との比較を実施した。測定対象とした高架橋は、東海道新幹線の標準的高架橋を再構築した T 高架橋（2005 年竣工）である。高架橋の諸元を表-2 に示す。なお、表-2 には後述する営業線高架橋（A 高架橋、B 高架橋）についても併記する。また、LDV の測定点を図-2 に、測定条件を表-3 に示す。T 高架橋では、計 17 測点にて計測し、基準点とするリファレンス用測点を高架橋天端中央位置に設定した。なお、表-3 には後述する営業線高架橋での測定条件も併記している。

図-2 に示すように、3 つの測定点で三角形要素を構成し、要素内を直線で内挿することで全体の振動モードを面的に表示することで視覚的に捉えることとした。

表-3 LDV 測定条件

No.	測定項目	測定時間	測定点数	周波数分解能
T高架橋	常時微動	288sec	17	62.5mHz
	衝撃力加振	72sec	17	250mHz
A高架橋	常時微動	400sec	25	62.5mHz
	列車走行時	36sec	17	500mHz
B高架橋	常時微動	400sec	25	62.5mHz
	列車走行	36sec	17	500mHz

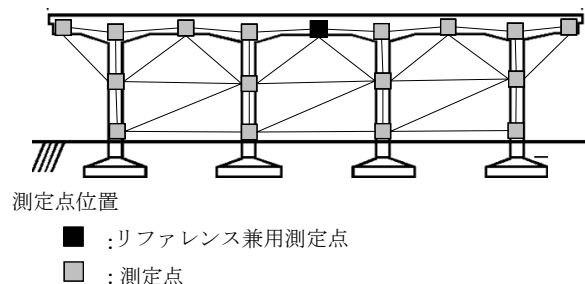


図-2 LDV 計測点概要図 (T 高架橋)

ここで、比較検討の衝撃振動試験は、高架橋

全体の橋軸直角方向の水平振動モードでの固有振動数を得ることを目的に、同振動モード形状を励起するよう、高架橋の中央部天端位置を重錘にて打撃して強制振動させ、速度計センサーにより応答波形を測定する。測定は同一条件で10回繰返し得られた測定波形を重ね合わせてノイズを相対的に小さくし、フーリエ解析により、固有振動数を算出する。衝撃振動試験の結果を表-2示す。

(1) 常時微動測定結果

T 高架橋における常時微動測定の周波数分析結果を図-3に示す。周波数分析結果の図は、以降に示す各図ともに、高架橋天端中央（リファレンス兼用測点）での応答を示す。また、各卓越周波数での振動モード図を図-4～図-6に示す。なお、振動モード図は、以降に示す各図中ともにモードの概要図を付記している。

卓越周波数 2.88Hz は、高架橋全体系が水平方向（橋軸直角方向）に振動するモードであり、6.31Hz は高架橋中央部を回転中心とした全体系が回転するねじれモード、13.56Hz は橋軸方向張出し部の振動するモードであると推定される。このように、複数の卓越周波数と振動モードが計測、判別できる。

(2) 衝撃力加振時測定結果

LDV による測定結果の検証として、衝撃振動試験と同様の方法で、重錘による打撃を加え、衝撃力による高架橋の速度応答を測定する。

測定結果の周波数分析結果を図-7に、各卓越周波数の振動モード図を図-8、図-9に示す。

衝撃力加振により、2.75Hz、34.25Hz の卓越周波数が把握できる。卓越周波数 2.75Hz は、高架橋全体系が水平方向（橋軸直角方向）に振動するモードであり、衝撃振動試験にて対象とする振動モードである。LDV : 2.75Hz に対し、衝撃振動試験 : 2.8Hz と両者はよい一致をみており、衝撃振動試験と同等以上の精度で LDV による振動計測が可能であると判断できる。翻れば、加えた衝撃力により、衝撃振動試験で想定する高架橋全体の水平方向の振動モードが励起されて

いることが再確認できる結果である。また、卓越周波数 34.25Hz は衝撃力による高架橋中央部と端部との位相が異なる 2 次的な振動モードであることが確認できる。

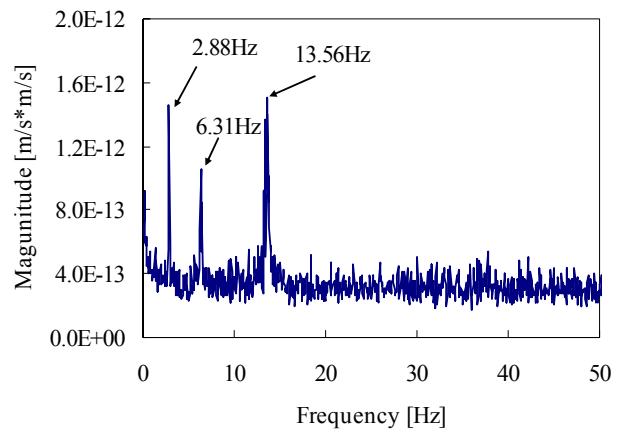


図-3 常時微動測定 (T 高架橋)

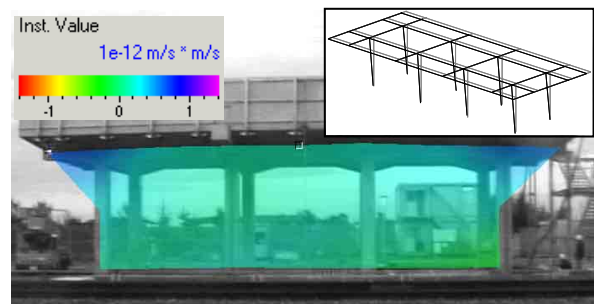


図-4 常時微動測定 2.88Hz (T 高架橋)

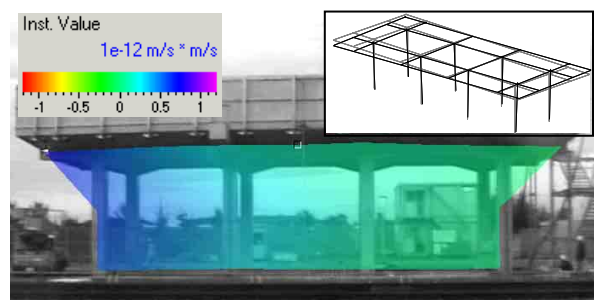


図-5 常時微動測定 6.31Hz (T 高架橋)

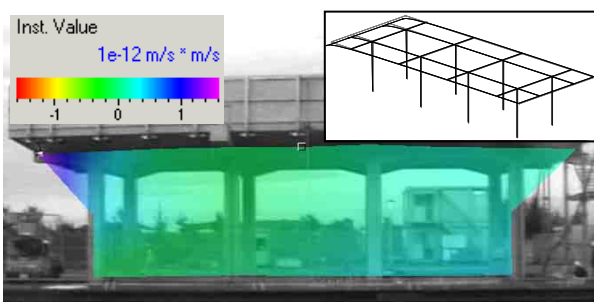


図-6 常時微動測定 13.56Hz (T 高架橋)

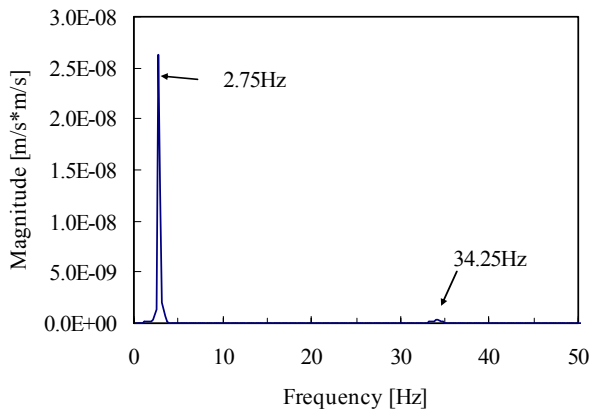


図-7 衝撃力加振時 (T 高架橋)

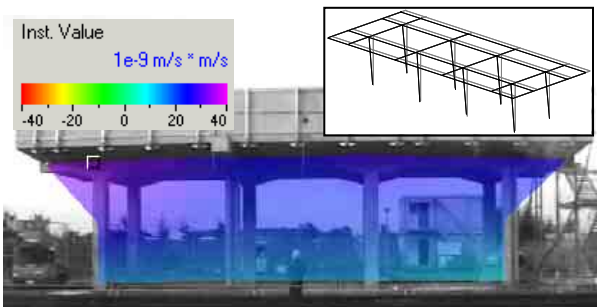


図-8 衝撃力加振時測定 2.75Hz (T 高架橋)

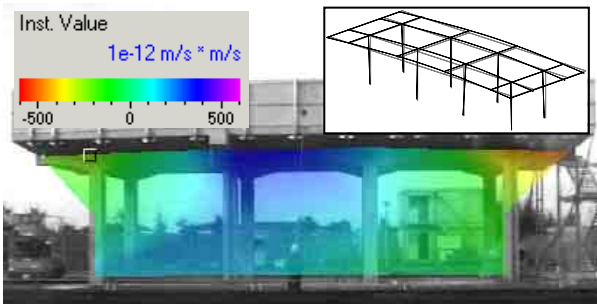


図-9 衝撃力加振時測定 34.25Hz (T 高架橋)

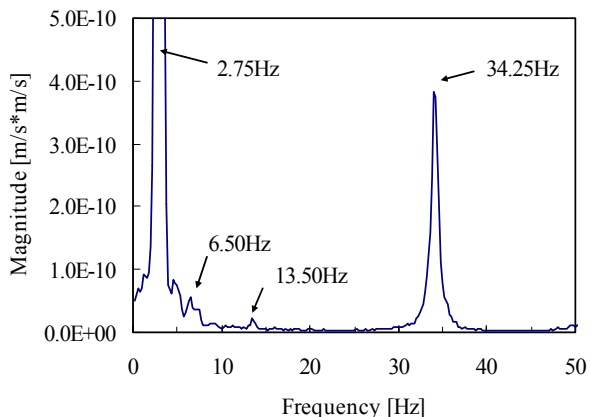


図-10 衝撃力加振時 (T 高架橋) 拡大図

また、図-7 の縦軸を拡大すると (図-10)、常時微動計測での 6.50Hz, 13.50Hz 付近の常時微動計測で確認された卓越振動数も確認できる。

3.2 列車走行時の振動測定

次に、T 高架橋と同様に東海道新幹線の標準的な高架橋 2 ブロック (A 高架橋, B 高架橋) を対象に、高架橋の常時微動と列車走行時の動的応答を LDV により計測する。列車走行時の高架橋の振動計測は、特別な加振装置を用いない一種の強制加振試験でもあり、また、供用上の着目すべき振動モードならびに卓越周波数が把握できれば維持管理上有益である。列車走行時の計測は 1 列車走行中の 4 秒間で測定点 2 点を計測 (2sec/point) し、9 列車分を重ねる方法とした。表-3 に LDV 測定条件を、図-11、図-12 に常時微動、列車走行時の測定点をそれぞれ示す。

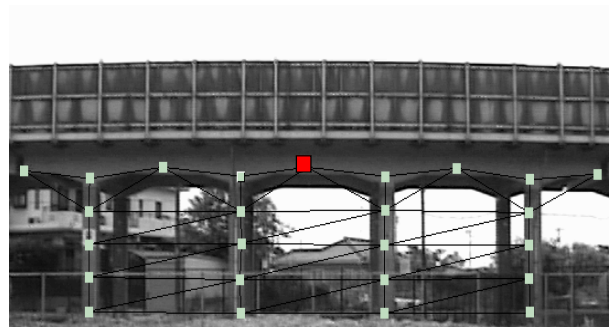


図-11 常時微動計測 (A 高架橋)

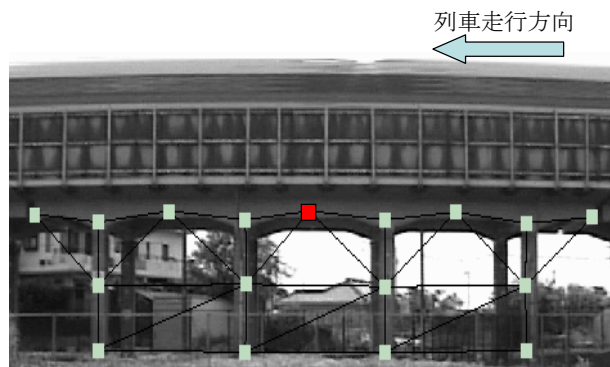


図-12 列車走行時計測 (A 高架橋)

(1) 常時微動測定結果

A 高架橋における常時微動測定の周波数分析結果を図-13 に示す。また、各卓越周波数での振動モード図を図-14、図-15 に示す。

2.56Hz は高架橋全体が振動する振動モード (1 次モード) であり、11.31Hz は張出し部の振動するモードである。なお、卓越する周波数に差異はあるが、B 高架橋も概ね同傾向である (図-16)。ここで、1 次モードに着目すると、A 高架橋

2.56Hz, B 高架橋 2.75Hz と A 高架橋の方が低い。両高架橋は高さを除き概ね同形式であり、高さが低い A 高架橋 (0.5m 低い) が理論上 1 次モードの固有振動数が高くなるはずである。近接する高架橋のため地盤条件が概ね同様であると考えれば、A 高架橋において固有振動数を低下させる要因 (例えば、剛性低下等) が生じている可能性が考えられる。

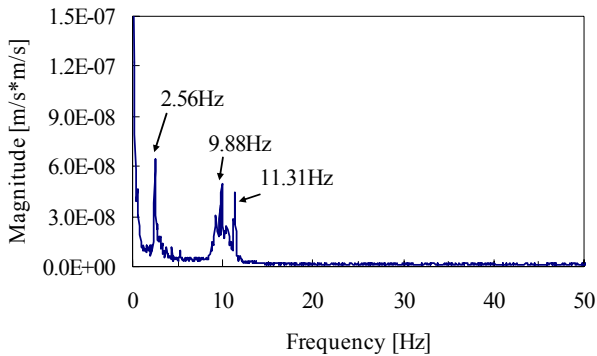


図-13 常時微動測定 (A 高架橋)

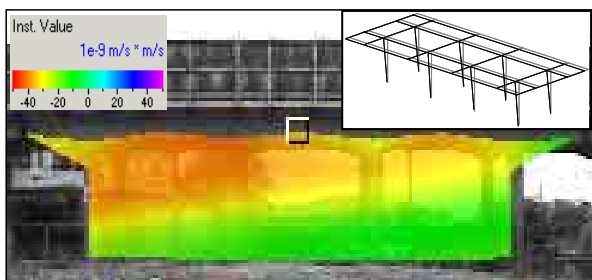


図-14 常時微動 2.56Hz (A 高架橋)

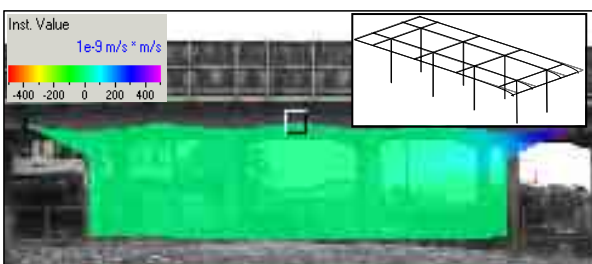


図-15 常時微動 11.31Hz (A 高架橋)

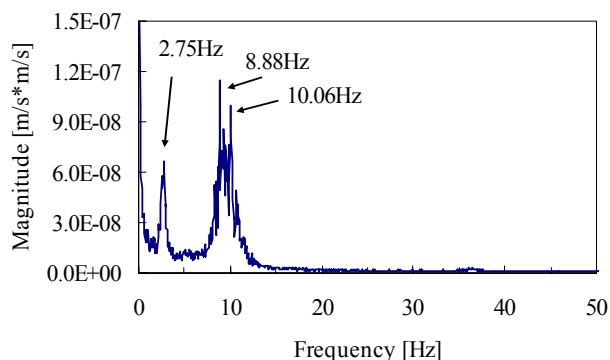


図-16 常時微動測定 (B 高架橋)

(2) 列車走行時測定結果

A 高架橋における列車走行時の動的応答の周波数分析結果を図-17 示す。測定時の周波数分解能が異なるため周波数の値には若干の差異があるが、常時微動で卓越した 2.5Hz 付近、10Hz 付近に卓越が見られる。また、常時微動では卓越しなかった 20Hz 付近 (19.5Hz) にも卓越周波数が見られる。この振動モードは張出し部の振動が卓越するもの (図-18) で、この傾向は B 高架橋においても同様に確認できる (図-19 : 19.0Hz)。また、同振動モードならびに卓越振動数は、走行列車により励起される特徴的な振動モードであると考えられ、列車走行時の高架橋振動では張出し部の応答に着目すべきという既往の知見^{8),9)}とも一致する。

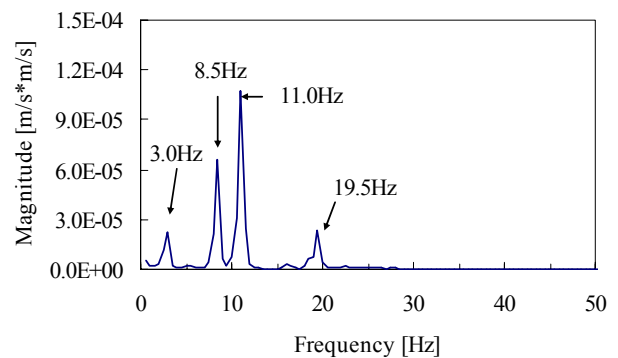


図-17 列車走行時測定 (A 高架橋)

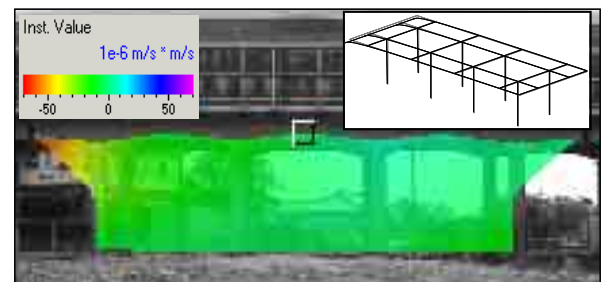


図-18 列車走行時 19.5Hz (A 高架橋)

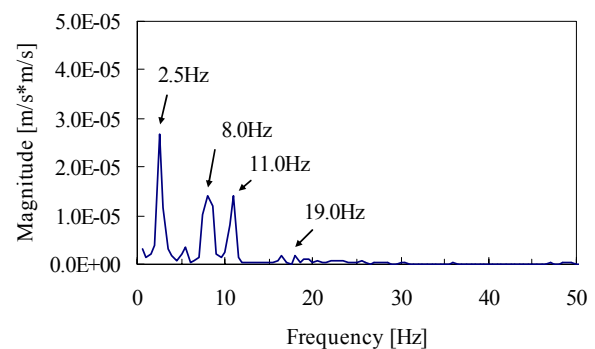


図-19 列車走行時測定 (B 高架橋)

4. まとめ

LDV を用いた RC ラーメン高架橋の振動特性の実験的検討より、以下の知見を得た。

(1) LDV による常時微動計測により、高架橋の複数の卓越振動数ならびに空間的な情報である振動モードの測定が可能である。

(2) 衝撃振動試験と同じ衝撃力加振の条件下の高架橋の振動特性について、LDV による振動測定結果と衝撃振動試験による測定結果とよい一致が見られ、非接触測定 of LDV による計測手法が従来の衝撃振動試験と同等以上の精度を有することを確認した。また、衝撃振動試験における固有振動数が想定とおりの振動モード形状のものであることを LDV による振動モード形状把握より再確認した。

(3) 営業線高架橋 (A, B 高架橋) における LDV 振動測定により、列車走行時の高架橋の振動特性を把握可能であることを示した。特に、衝撃振動試験や LDV 常時微動測定では把握できない列車走行により励起される振動モード形状ならびに卓越振動数を把握した。

(4) 本検討での営業線高架橋における列車走行時の測定では、500mHz の周波数分解能として測定したが、測定精度としては、その倍の 250mHz の確保が必要である。

今回の LDV を用いた基礎的な検討より、同手法による高架橋の振動特性の把握が可能であると考え。今後は推定したい損傷レベルや着目部位など、損傷同定 (健全度判定) 手法として最適な測定仕様 (測定点の配置、測定する周波数分解能等) について更なる検討を進め深度化していくとともに、実測データの積み上げによる測定手法の研鑽を進めていくことが必要と考えている。

「参考文献」

- 1) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価手法の研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.9, 1990.9.
- 2) 関 雅樹, 水谷健太, 中野 聡, 西村昭彦: 兵

庫県南部地震によるラーメン高架橋の振動特性に関する考察, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.145-153, 1996.1.

- 3) Seki, M., Tsutsumi, Y., Mizutani, K., Nishimura, A., Nakano, S. : An Evaluation Method of the Serviceability of Rigid Frame Bridges in Tokaido Shinkansen, WCRR, Vol.B, pp.531-537, Firenze, Nov. 16-19, 1997.
- 4) 田中宏昌, 関 雅樹, 下村 勝, 中野 聡: ラーメン高架橋の健全度に関わる柱の剛性評価法の研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1019-1028, 2001.3.
- 5) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.183-199, 2001.10.
- 6) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 木村 均: 実構造物の非接触スキャニング振動計測システムの開発, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.173-186, 2001.12.
- 7) Uehan, F., Meguro, K. : Assessment of Seismic Damage to Railway Structures using Applied Element Method and Microtremor Measurement, 13WCEE, No.1407, Aug.2004.
- 8) 原 恒雄, 吉岡 修, 神田 仁, 舟橋秀磨, 根岸 裕, 藤野陽三, 吉田一博: 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工法の開発, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.325-338, 2004.
- 9) 吉田幸司, 関 雅樹, 曾布川竜, 西山誠治, 川谷充郎: 鉄道高架橋の部材剛性低下による振動特性への影響評価, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.447-458, 2005.3.