

論文 列車走行時の加速度応答を用いた開床式橋梁の振動特性の同定

松岡 弘大^{*1}・貝戸 清之^{*2}・杉崎 光一^{*3}・渡辺 勉^{*4}

要旨: 老朽化が進む鉄道橋を適切に維持管理していく上で、1) 列車走行時における橋梁の実挙動を把握すること、同時に 2) 固有振動数、減衰比や振動モード形といった振動特性を同定することは、重要な課題の 1 つである。本研究では、特に開床式橋梁に着目して、走行列車荷重を利用した実験解析を行う。これにより固有振動数および振動モード形を同定することができ、通常のインパルスハンマー打撃では励起できないモードがあること等が明らかとなった。さらに、実挙動に占める各モード成分の寄与率を算出することで両試験時の応答特性の相違を定量的に評価し、走行列車荷重を用いた振動モニタリングの意義について言及する。

キーワード: 開床式橋梁, 走行列車荷重, 振動特性, モード寄与率, 振動モニタリング

1. はじめに

鉄道橋では、その総数に占めるコンクリート橋の割合が高い。特に、高速走行を伴う路線においては、高架式橋梁が数多く建設され、さらにそれらのほとんどで閉床式構造が採用されている。維持管理が主たる課題となっている現在では、閉床式橋梁の保有性能（耐久性、耐荷力等）の評価と損傷の予防・対策に関する研究が数多く蓄積されている¹⁾。実際に本研究で着目する固有振動数、減衰比や振動モード形などの振動特性（以下、振動特性と略記する）の同定は、従来から実施されており、すでに騒音や地震等の対策を行う際の定量的指標として実用化されている。

一方で、一部の積雪寒冷地域では、上述した閉床式構造ではなく、床版構造を格子状の開床式構造とした高架橋が存在する。開床式構造とすることで、橋上での積雪を抑え、列車走行時の安全性確保、雪荷重の軽減などを実現できる。また、床版構造を合理化することにより、コスト低減にも貢献している。しかしながら、その振動特性は床版による連成効果が得られないことから通常の開床式構造とは異なることが予想される。加えて、近年の橋梁の老朽化や列車の高速化を踏まえると、開床式橋梁の動的挙動および振動特性を把握することへの重要性は高まるものと考えられるが、著者らの知る限り、このような検討事例は見当たらない。

鉄道橋の振動特性の同定に際して、既往の研究のほとんどが常時微動、あるいはインパルスハンマー等を用いた強制力を橋梁への加振源として利用している。これらは加振が簡便である上、応答波形の信号処理が容易であるという利点を有する。しかし、構造物に対して波高が非常に小さいこと、低次モードを励起しづらいこと等の

問題点が指摘されている。これに対して、本研究では、走行列車荷重を利用して橋梁の振動特性の同定を行うことで、これらの問題点の解決を試みる。また、走行列車荷重を加振源として採用することで、橋梁の実際の動的挙動を把握することができるという利点がある。ただし、その一方で入力荷重の計測が困難であること等、新たな問題点の発生も懸念される。

以上の問題意識の下、本研究では開床式コンクリート高架橋を対象に、走行列車荷重を用いた振動計測試験を行い、その固有振動数と振動モード形を同定する。さらに、インパルスハンマーを用いた衝撃加振試験の同定結果との比較、列車条件の違いによる同定結果のばらつき、実挙動に占める各モード成分の寄与率の評価を通して、開床式橋梁の振動特性を考察するとともに、走行列車荷重を用いた振動モニタリングの意義について言及する。

2. 振動特性の同定方法

周波数領域における同定手法では通常、周波数応答関数を用いる。周波数応答関数とは構造系から観測された出力応答を入力応答で除すことで算出できる関数であり、これに基づいて系の振動特性を同定することができる。しかしながら、本研究では加振源として走行列車荷重を用いており、列車から橋梁への入力応答を計測することは困難である。そこで、未知入力荷重の作用下における同定手法を適用することで、振動特性の同定を試みる。なお、手法の詳細については参考文献²⁾に譲るが、以下にその概要を示す。

複数の計測点の中から、ある計測点を基準点に設定し、各計測点と基準点との周波数応答関数を算出する。これは基準点の出力応答を入力荷重に見立てて周波数応答関

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点 特任講師 博士 (工学) (非会員)

*3 株式会社ビーエムシー 主任研究員 経済学修士 (正会員)

*4 財団法人鉄道技術総合研究所 鉄道力学研究部 構造力学研究室 研究員 工修 (正会員)

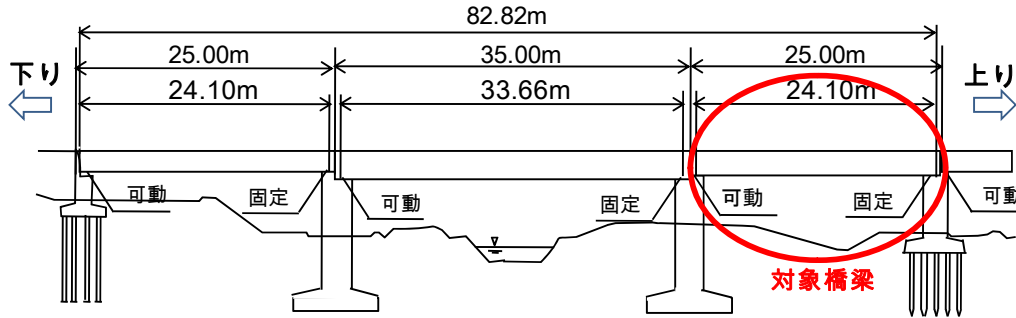


図-1 計測対象橋梁の側面図

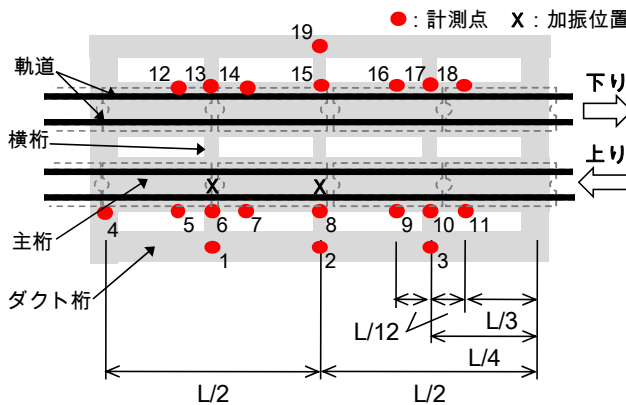


図-2 橋梁上面図と加速度計の配置

表-1 使用列車概要

	進行方向	列車種別	速度(km/h)
t1	下り	貨物	71
t2	上り	貨物	84
t3	下り	特急	135
t4	上り	特急	138
t5	下り	貨物	84
t6	下り	貨物	85
t7	上り	貨物	80
t8	上り	特急	135

数を算出する手法であるが、①構造系に対する未知入力をホワイトノイズと仮定できる、②構造系の減衰が小さく、各モードの固有振動数が近接していない、という2つの条件を満たす場合には、入力が既知の場合の同定手法と等価となる。これにより各計測点と基準点との間で相関の高い固有振動数成分が周波数応答関数で卓越することになり、振動特性を同定することができる。なお、上述した2つの条件に関して、①は列車の振動特性が影響する可能性は排除できないが、列車のバネ振動は一般に5Hz未満であり、無視しうる範囲にある³⁾、②は通常コンクリート構造物の減衰は2%程度であることから上の条件を満たしていると判断して、以降の議論を進める。

3. 開床式橋梁を対象とした振動特性の同定

3.1 対象橋梁と振動計測の概要

振動計測試験では、T桁を有するスパン24.1mの開床式コンクリート高架橋を対象とした。当該橋梁への加振法として、インパルスハンマーによる衝撃加振と走行列車荷重を利用した強制加振を採用した。インパルスハンマーによる衝撃加振試験は、走行列車荷重試験との比較を主目的とする。両試験を通して計測された加速度応答から固有振動数と振動モードの同定を行った。

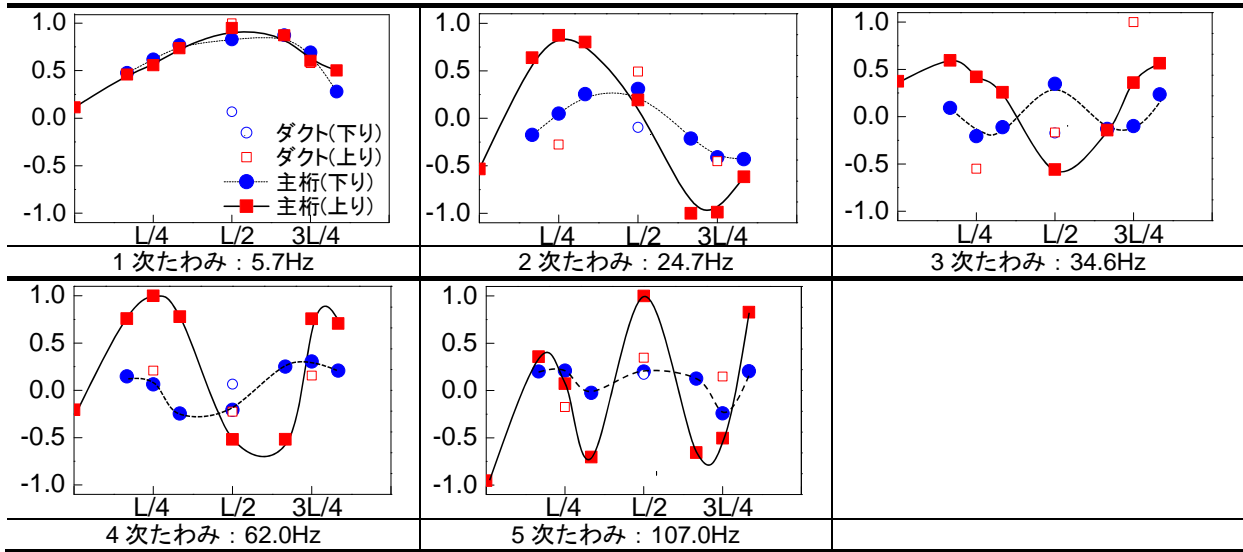
当該橋梁の概要を図-1と図-2に示す。図-2のとおり、

本橋は開床式構造となっており、2本の主桁と2本のダクト桁がそれぞれ3本の横桁で連結されている。構造全体系の振動特性を同定するために、圧電型加速度計を主桁上とダクト桁上に全19台設置した。加速度計の配置状況を図-2に併せて示す。配置図からわかるように、構造全体系の動的挙動として、特に主桁に着目した。これらの19点の加速度応答を、サンプリング周波数2kHzで収録した。なお、1kHz以上の周波数成分は、低域通過フィルターの一種であるアンチエイリアシングフィルターを介して除去している。さらに振動計測時間に関して、インパルスハンマーによる衝撃加振試験では20秒、列車走行試験では120秒と設定した。また、走行列車試験に利用した列車数は、貨物5本、特急3本の合計8本であった。各列車を通過順にt1からt8までの番号で識別し、進行方向、種別および通過速度を表-1に整理する。

3.2 インパルスハンマーによる衝撃加振試験

インパルスハンマーによる加振は、図-2に×で示した上り側主桁のL/2点とL/4点を中心に行った。計測点7における加振時の加速度応答を図-3(a)に示す。衝撃加振時点の振幅が最も大きくなり、その後応答が減衰する自由振動波形が見てとれる。加速度の振幅は異なるものの、いずれの計測点においても同様の傾向を示した。これらの加速度応答を用いて振動特性の同定を試みた。

表-2 固有振動数および振動モード形の同定結果（衝撃振動試験，加振位置：L/2 点）



※凡例は表中すべての図で共通

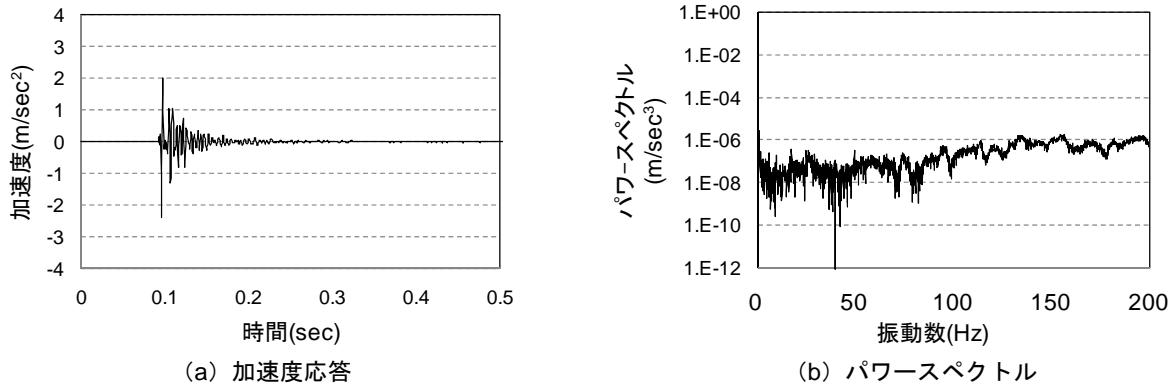


図-3 振動計測結果（計測点 7）

はじめに、周波数分解能として 0.1Hz 程度を確保するために 10 秒間の加速度応答を切り出した。切り出した全計測点の加速度応答をフーリエ変換し、計測点 4 を基準点とする周波数応答関数を算出した。参考までに、計測点 7 のパワースペクトルを図-3(b)に示す。また、基準点は、加振される桁の最も端の点（上り桁：計測点 5，下り桁：計測点 12）とした。これは入力に最も近く、いずれの振動モード形の節とならない計測点である。

つぎに、2. で示した方法により固有振動数と振動モード形の同定を行った。その結果を表-2 に示す。表-2 の振動モード形の同定は、インパルスハンマーで衝撃加振を行った桁（上り主桁）のみに着目して実施したが、表中には参考までに下り主桁，上下線のダクト桁のモード振幅も示す。なお、各振動モード形は、それぞれの最大振幅が 1 となるように基準化を行っている。上り主桁の振動特性として、1 次たわみの振動モードを 5.7Hz，2 次たわみを 24.7Hz，3 次たわみを 34.6Hz，4 次たわみを 62.0Hz，5 次たわみを 107.0Hz で同定することができた。

一方で、インパルスハンマーで直接加振をしていない

桁（下り主桁）に着目する。表-2 には先述したように、上り側主桁の 5 つの固有振動数に対応する振動モード形を示している。上り主桁の振動モード形が正弦波の特徴を示しているのとは対照的に、下り主桁では幾何学的な特徴を見出せないモードも存在している。この点に関しては、対象橋梁の主桁が 3 本の横桁のみで連結されているために、加振力が伝達されなかったものと考えられる。インパルスハンマー程度の衝撃力では橋梁全体を励起することは難しい。実際に、次節の走行列車試験では同定することができたねじれモードが、衝撃加振試験では同定不可能であったことから、加振力不足が推察できる。

3.3 走行列車を利用した振動計測試験

利用した列車は、貨物列車（約 20 両編成）5 本と特急列車（6 両編成）3 本の合計 8 本であり、それぞれの平均速度は、約 80km/h と約 130km/h であった。

列車 t1（下り貨物）通過時の計測点 7 の加速度応答を図-4(a)に示す。列車が橋梁に進入し、退出するまでの応答が同図より見て取れる。最大振幅は約 30m/sec²であり、

表-3 全通過列車に対する固有振動数の同定結果

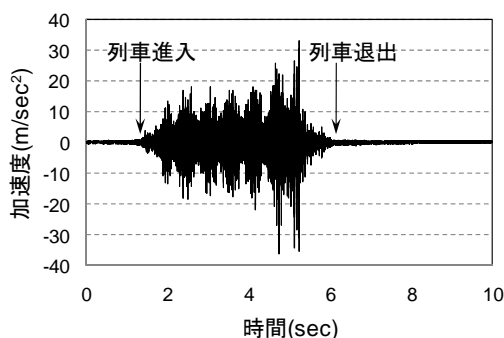
(a)固有振動数とその平均

		1次たわみ	1次ねじれ	2次たわみ	2次ねじれ	3次たわみ	3次ねじれ	4次たわみ	4次ねじれ	5次たわみ	5次ねじれ
t1	下り 貨物	5.65	10.15	22.15	25.35	42.35	50.45	73.35	110.4	98.9	100.8
t5	下り 貨物	6.3	9.25	21.2	26	44.8	52.35	71.6	108.7	103.2	128.65
t6	下り 貨物	5.5	9.6	21.75	25.25	41.45	44.4	75.95	108.8	88	136.6
t2	上り 貨物	-	8.75	20	24.7	43.35	45.3	70.65	108.45	98.9	105.95
t7	上り 貨物	5.65	8.85	23.5	25.85	44.4	52.5	74.65	105.6	97.3	136.2
t3	下り 特急	5.5	8.8	20.5	25.1	41.9	46.0	77.2	109.6	95.9	106.1
t4	上り 特急	5.6	9.1	21.6	24.9	40.9	51.3	75.1	-	93.9	136.3
t8	上り 特急	5.7	-	21.4	24.9	40.2	51.1	79.3	110.7	99.1	107.7
平均	貨物	5.78	9.32	21.72	25.43	43.27	49.00	73.24	108.39	97.26	121.64
	特急	5.60	8.95	21.17	24.97	41.00	49.47	77.20	110.15	96.30	116.70
	全体	5.70	9.21	21.51	25.26	42.42	49.18	74.73	108.89	96.90	119.79

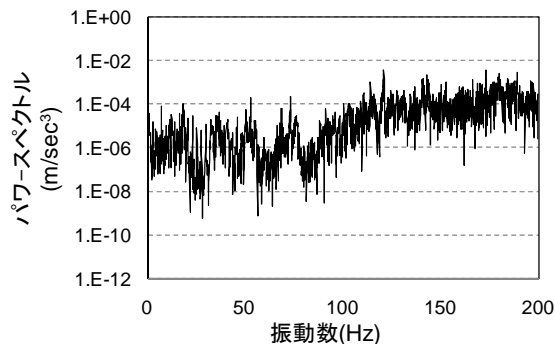
[Hz]

(b)列車種別ごとの変動係数

		1次たわみ	1次ねじれ	2次たわみ	2次ねじれ	3次たわみ	3次ねじれ	4次たわみ	4次ねじれ	5次たわみ	5次ねじれ
変動係数	貨物	0.062	0.062	0.059	0.020	0.032	0.079	0.030	0.016	0.058	0.140
	特急	0.018	0.024	0.028	0.005	0.021	0.061	0.027	0.007	0.027	0.146



(a) 加速度応答



(b) パワースペクトル

図-4 振動計測結果 (計測点 7)

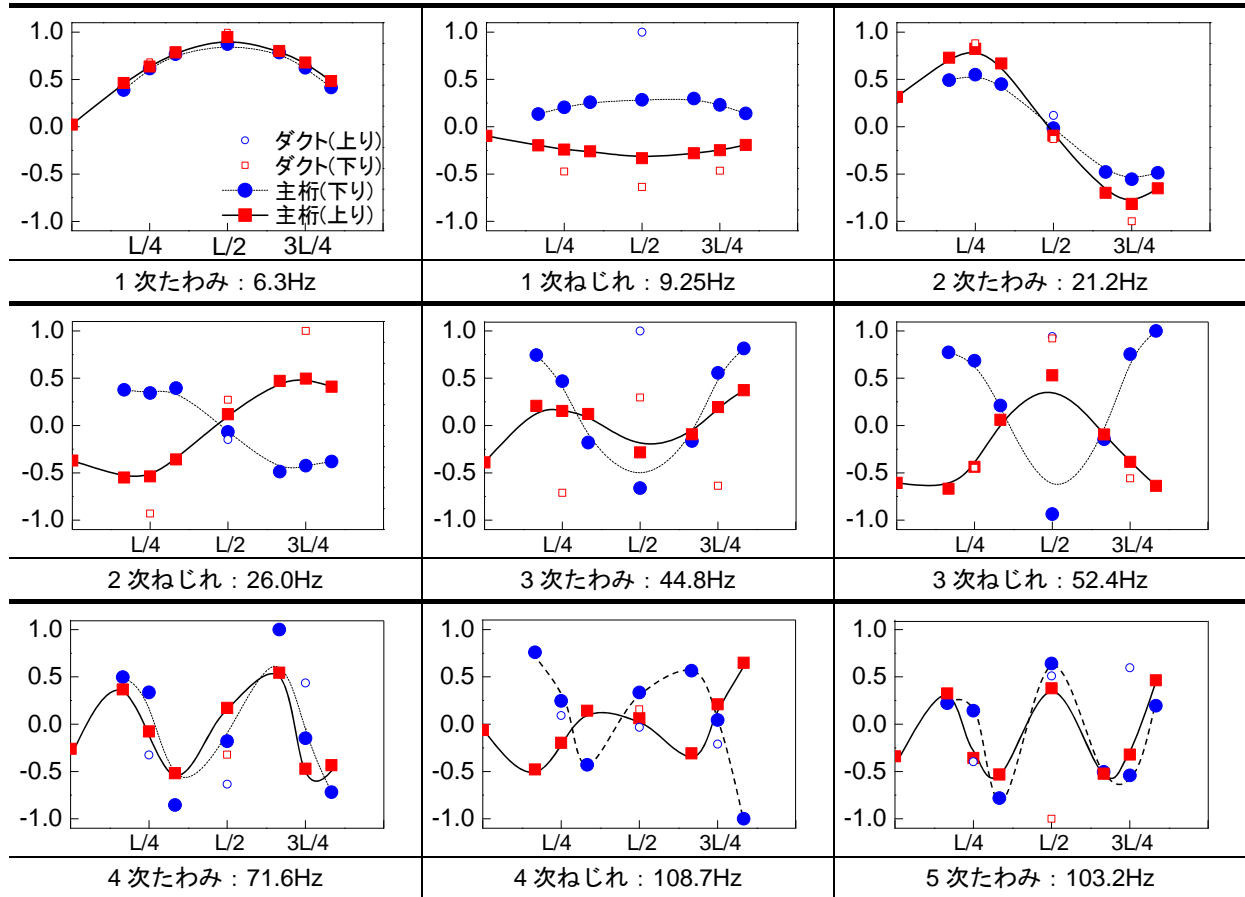
先のインパルスハンマーによる衝撃加振時の 10 倍程度の振幅が励起されていた。今回の試験では、波形の切り出し長を貨物列車の場合には 20 秒 (周波数分解能: 0.05Hz), 特急列車の場合には 10 秒 (同: 0.1Hz) に設定した。列車 t1 通過時の全計測点における周波数応答関数 (基準点: 計測点 4) を算出した。参考までに、計測点 7 のパワースペクトルを図-4(b)に示す。衝撃加振試験のパワースペクトル (図-3(b)) と比較すると、同定対象となっている 200Hz 以下の周波数領域においては、列車通過時の方が 10^2 から 10^3 倍程度のエネルギーが得られていることがわかる。

つぎに、2. で示した方法により固有振動数と振動モード形を同定した。各列車通過時の加速度応答から同定された固有振動数を表-3 に示す。表-3(a)より全ケースの固有振動数の平均は、1次たわみ:5.7Hz, 1次ねじれ:9.2Hz, 2次たわみ: 21.5Hz, 2次ねじれ: 25.3Hz, 3次たわみ: 42.4Hz, 3次ねじれ: 49.2Hz, 4次たわみ: 74.7Hz, 4次ねじれ: 108.9Hz, 5次たわみ:96.9Hz, 5次ねじれ:119.8Hz

となった。また、同表(a)において、列車種別が同定結果に及ぼす影響を検討するために、貨物と特急それぞれの固有振動数の平均値を算出しているが一定の傾向をつかむことはできない。さらに、表-3(b)に列車種別ごとの固有振動数の変動係数を示す。表中の変動係数は列車ごとの固有振動数に対する標準偏差をその平均で除したものである。貨物については変動係数が 2~8%であるのに対し、特急については 3 次ねじれモードの 6%程度が最大で、その他は 2~3%となっている。これは、これらの振動特性に影響を及ぼすと考えられる車両編成, 列車速度, 重量が貨物より特急の方が均一な条件となっていたためであると推察できる。実際に、貨物列車は、先頭の機関車の重量が、その後続く貨車の重量よりも格段に重く、その一因となっていると指摘できる。

列車 t5 (下り貨物) が通過したときの振動モード形を表-4 に示す。インパルスハンマーによる衝撃加振試験と比較して、①振動モード形がより正弦波に近い安定した結果である、②列車が通過した主桁と通過していない主

表-4 固有振動数および振動モード形の同定結果（走行列車荷重試験, t5（下り貨物）通過時）



※凡例は表中すべての図で共通

桁のモード振幅の差異がほとんどない、③ねじれモードも同定可能であるという結果が得られた。これは、前述のパワースペクトルの比較で指摘したとおり、インパルスハンマーと走行列車によって得られる加振力の相違に起因するものと判断することができる。これらの傾向は掲載していない5次ねじれモードについても同様であった。なお、表-4には一例として、列車t5に対する同定結果を記載したが、その他の列車に対する同定結果も概ね同様であったことを付記しておく。

ただし、走行列車荷重を利用して同定されたこれらの振動特性は、あくまでも橋梁と列車の複合系の振動特性であって、橋梁単体の振動特性とは異なることに留意されたい。しかしながら、インパルスハンマーによる衝撃加振試験では確認することができない実際の列車通過時の動的挙動を把握できる点に走行列車試験を実施する意義がある。例えば、1次ねじれモードに着目されたい。衝撃加振試験では、ねじれモードの同定そのものが不可能であった。これに加え、表-4の同モードを確認すると、L/2点において主桁よりもダクト桁のモード振幅が3倍程度卓越していることがわかる。同様に、走行列車荷重が直接作用する主桁よりもダクト桁の振動が卓越する傾向を、他のいくつかのモ

ードでも確認することが可能である。また、以上より、橋梁全体の振動特性もさることながら、部材レベルの局所的な振動特性に着目した振動モニタリングが必要であることも理解できる。部材振動については別の機会に発表する。

4. モード寄与率による動的挙動の評価

本章では、開床式橋梁の列車走行時の動的挙動を把握するために、走行列車試験で得られた加速度応答に対する各モード成分の寄与率を定量的に評価する。さらに列車走行時とインパルスハンマー衝撃加振時の加速度応答に対するモード寄与率と比較することで、走行列車試験の意義について考察を加える。

任意の計測点*i*における*r*次のモード寄与率を、

$$\kappa_i^{(r)} = \frac{\sum_{j=(\omega_r - \sigma_r)/\Delta\omega}^{(\omega_r + \sigma_r)/\Delta\omega} |A_i(j)|}{\sum_{r=1}^N \sum_{j=(\omega_r - \sigma_r)/\Delta\omega}^{(\omega_r + \sigma_r)/\Delta\omega} |A_i(j)|} \quad (1)$$

と定義する。式中、 A_i は計測点*i*での離散フーリエスペクトル、 N は考慮するモードの総数、 ω_r は*r*次の固有振動数、 σ_r は ω_r を中心とするモード寄与率の算定周波数範囲、 $\Delta\omega$ は周波数分解能をそれぞれ示す。当然

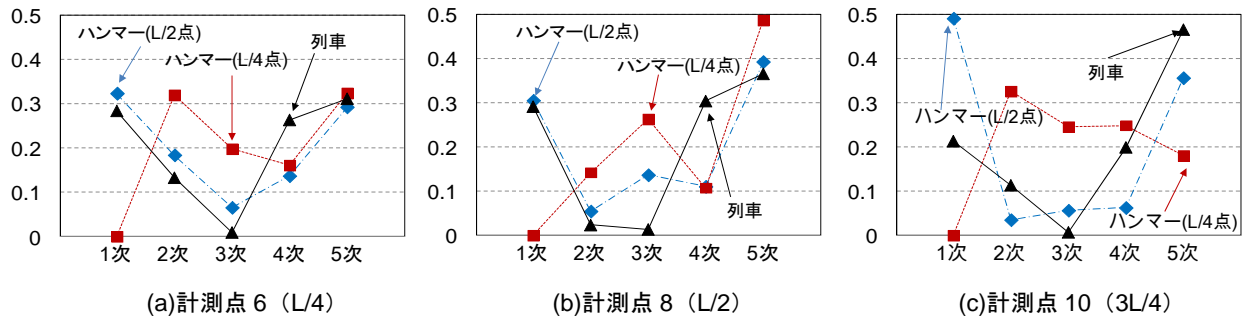


図-5 各点でモード寄与率

のことながら、

$$\sum_{r=1}^N \kappa_i^{(r)} = 1 \quad (2)$$

が成立する。本研究では、3.の同定結果を踏まえて、5次モードまでの影響を考慮するものとし、 $N=5$ と設定した。その上で、走行列車荷重およびインパルスハンマーによる衝撃加振によって励起される加速度応答に対して、モード寄与率を算出して両者の特性を比較する。モード寄与率 $\kappa_i^{(r)}$ は計測点ごとに存在するが、ここでは列車が走行する側の主桁を対象とし、L/4 点、L/2 点および 3L/4 点について比較することとした。

図-5 に、代表的な計測点（計測点 6 : L/4 点、計測点 8 : L/2 点、計測点 10 : 3L/4 点）での加速度に対するモード寄与率を示す。列車ケースは t5（下り貨物）を用いた。各図より、走行列車荷重（▲）に対しては、どの計測点においても 1 次、4 次、5 次モードの寄与率が大きいことが理解できる。特に、計測点 10（3L/4 点）では 5 次モードの寄与率が大きくなっている。これに対して 3 次モードの寄与率はどの点でもほぼ 0 であり、2 次モードは計測点 8（L/2 点）のみ小さい値となっている。したがって、列車通過時の動的挙動では、3 次モードを励起する加速度成分が相対的に少ないといえる。また計測点 8 については、同点がスパン中央であり、2 次モードの節となったためであると考えられる。これに対してインパルスハンマーによる衝撃加振の際（L/2 : ◆、L/4 : ■）には、特に L/2 点加振（同図（b））で走行列車荷重と傾向的には一致するものの、3 次と 4 次の寄与率に差異が見られる。つまり、インパルスハンマーによる衝撃加振試験で励起される加速度応答から橋梁の振動特性を同定することはできるが、その動的挙動に占める各モードの寄与率は、列車が通過した際の実際の動的挙動とは異なる。したがって、列車走行に伴う振動や騒音等の原因を究明し、効率的な対策を講じるためには、列車通過時の実際の動的挙動を把握し、振動特性を同定することが望ましいといえる。

5. おわりに

本研究では、開床式橋梁の動的挙動の把握および振動特性の同定を目的として、走行列車荷重を利用した振動モニタリングを試みた。さらにその有効性を検証するために、実際のコンクリート高架橋を対象とした振動計測実験を実施した。これにより、開床式橋梁の固有振動数と振動モード形を同定することが可能であり、さらに実際の動的挙動をモード寄与率により評価できることを示した。しかし、走行列車試験における振動特性のばらつきが、列車条件の相違によるものか、あるいはそれ以外の要因によるものか等、を精査しなくてはならない。したがって、今後は、同形式や他形式の橋梁への適用事例を増やし、手法の信頼性を向上させるとともに、振動特性の同定結果を蓄積していくことが重要である。また、走行列車荷重を利用した振動モニタリング手法を、橋梁の全体振動のみならず、部材レベルの局所的な振動特性の同定や、損傷同定、および何らかの補修効果の定量的評価などへも適用し、その実用性を検討することが必要である。

謝辞：本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、曾我部正道 他：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No. 724/I-62，pp.83-102，2003.
- 2) 原田和洋，杉崎光一，貝戸清之，曾我部正道：鉄道橋の動的応答における部材振動性状の簡易同定法，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 3，2008.
- 3) 石井博典，藤野陽三，水野裕介，貝戸清之：営業車両の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステム（TIMS）の開発，土木学会論文集 F，Vol.64，No.1，pp.44-61，2008.2