

## 曲線 2 主桁橋の交通振動応答における車両走行条件の影響評価

Influence evaluation of vehicle running conditions on traffic-induced vibration of curved twin-I girder bridges

|               |      |                           |
|---------------|------|---------------------------|
| 北海道大学大学院工学院   | ○学生員 | 下田剛史(Takeshi Shimoda)     |
| 北海道大学大学院工学研究院 | 正 員  | 何 興文(Xingwen He)          |
| 北海道大学大学院工学研究院 | フェロー | 林川俊郎(Toshiro Hayashikawa) |
| 神戸大学大学院工学研究科  | フェロー | 川谷充郎(Mitsuo Kawatani)     |
| 北海道大学大学院工学研究院 | 正 員  | 松本高志(Takashi Matsumoto)   |

### 1. まえがき

近年、社会基盤の建設コスト削減施策が強く求められ、鋼橋の設計・製作・架設の各段階において新しい素材・構造を適用し、コスト削減を図る動きが急速に広がっている。高強度、高耐久性を有する PC 床版あるいは各種合成床版、さらに断面が大型化された主桁を用いることにより実現された少数主桁橋<sup>1), 2)</sup>は主桁本数を 2, 3 本程度とし、対傾構や横構を省略して構造が簡素化され、製作架設時の省力化が可能となる。また、材片数を大幅に減少し、製作コスト削減による経済性の向上を図ることができる。さらに、将来的な面で、主桁本数減少による維持管理の容易さや塗装面積の減少等による維持管理費の削減効果を有しているものとして期待されており、今後も架設事例が増えていくことが予想される。しかし、このような省力化・合理化を意図して建設された少数主桁橋の実例を見ると、平面線形については直線橋あるいは曲率半径の非常に大きい曲線橋を対象としたものが多く、本格的な曲線橋を対象としたものは少ない。曲率半径の小さい曲線橋には箱桁橋や格子桁橋がねじり変形に抵抗する上で有利であり、少数主桁橋では断面を大きくすることで曲げ剛性を増大させることができるが、基本的に開断面構造であるためねじり剛性は極めて小さいという難点がある。しかしながら、コスト削減要求がますます高まれば、本格的な曲線橋も積極的に少数主桁橋が採用されると考えられる。そのため、ねじり剛性の確保など少数主桁曲線橋の動的特性を十分に検討する必要がある。

さらに近年、道路交通荷重の大型化に伴い、道路橋の交通振動問題が取り沙汰されている。大型車両の走行により引起される過大な橋梁振動、特に路面状況が劣る区間やジョイント部などを通過する際に発生する衝撃振動は、橋梁部材に疲労損傷等を与える恐れがある<sup>3)</sup>。

以上の諸課題を検討するために、実験のみによる現象の解明は、長時間および多大なコストを要する上、多種多様な構造形式への検討は困難である。そこで本研究では曲線橋と走行車両との連成シミュレーションを行い、走行荷重下の少数主桁曲線橋振動性状を解明し、その振動特性の向上方策を確立することを目標としている。

本論文では典型的な曲線 2 主桁橋の交通振動性状を検証するため、橋梁の固有振動数と車両走行条件による共振現象をシミュレーション結果より検討し、得られた知見について報告を行う。

### 2. 数値モデルおよび解析理論

#### 2.1 曲線 2 主桁橋モデル

使用する橋梁モデルは図-1 に示す横断面を有する曲線 2 主桁橋を用いる。本橋は、支間長が 50 m の曲線橋である。床版には PC 床版を用いており、横桁は中段配置で、全支間長を 10 等分する 5 m 間隔で設置している。部材断面は表-1 の通りである。なお、垂直補剛材は幅 250 mm、板厚 25 mm の鋼板を使用し、横桁同様 5 m 間隔で設置している。

本研究では、はり要素による橋梁モデルを用いる。2 主桁橋上部構造の三次元有限要素解析モデルを図-2 に示す。総節点数は 92、総要素数は 138 である。モデル化において用いた PC 床版および鋼桁の部材材料定数は表-2 の通りである。端部の拘束境界条件は、単純支持とする。なお、曲率半径  $R = 200$  m としている。

#### 2.2 車両モデル

本研究では、前輪一軸後輪二軸を有する一般的な大型ダンプトラックを、図-3 に示すような 12 自由度質点一ばね振動系にモデル化する。左右輪位置での横断勾配差や路面凹凸の差に伴う車両の三次元挙動を考慮し、上下・左右の車輪接地力を評価できる立体モデルであり、鉛直振動のみならず、水平両方向の振動も厳密に考慮できるモデルである。車両諸元は表-3 の通りである。

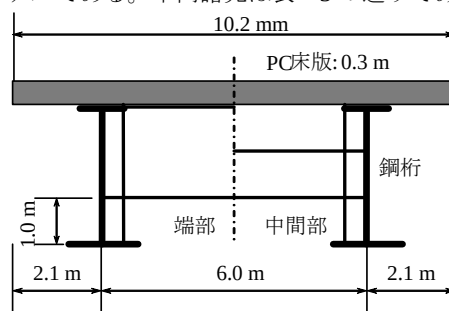


図-1 曲線 2 主桁橋断面図

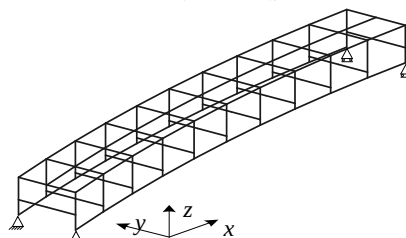


図-2 曲線 2 主桁橋有限要素モデル

### 2.3 連成振動定式化および解析手法

有限要素法および D'Alembert の原理により、以下のような橋梁の振動方程式を作成できる。

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{w}_b = \mathbf{F}_b \quad (1)$$

$\mathbf{M}_b$ ,  $\mathbf{C}_b$ ,  $\mathbf{K}_b$  および  $\mathbf{F}_b$  は、それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクス、外力ベクトルである。ここで、 $\mathbf{C}_b$  は Rayleigh 減衰を用いる。橋梁の変位ベクトル  $\mathbf{W}_b$  はモーダルアナリシスを用い、固有ベクトルと一般化座標で表す。固有ベクトルの直交性を利用すると、一般化座標に関する橋梁振動方程式が得られる。

D'Alembert の原理に基づき、車両の各自由度における力の釣り合いによる車両振動方程式を作成し、以下の車両振動方程式のマトリクス形が得られる。

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{w}_v = \mathbf{f}_v \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{M}_v$ ,  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{K}_v$  および  $\mathbf{f}_v$  はそれぞれ質量マトリクス、減衰、剛性マトリクスおよび外力ベクトル項である。

車両および橋梁の振動方程式を連立させると、以下に示すような計算機プログラム作成用の詳細なマトリクス形式が得られる。これを逐次数値積分を用いて振動応答を求める。詳細な定式化のプロセスについて参考文献<sup>4)</sup>に参照されたい。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b^* & 0 \\ \text{Sym. } \mathbf{M}_v & \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{w}}_b \\ \ddot{\mathbf{w}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^* & \mathbf{C}_{bv} \\ \text{Sym. } \mathbf{C}_v & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{w}}_b \\ \dot{\mathbf{w}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b^* & \mathbf{K}_{bv} \\ \text{Sym. } \mathbf{K}_v & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_i \\ \mathbf{w}_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_v \end{Bmatrix} \quad (3)$$

上記定式化を用い、逐次積分法である Newmarks'  $\beta$  法に基づく連成振動解析プログラムを作成し、示した解析モデルに対して、連成振動微分方程式の解を数値積分で求める。 $\beta=1/4$  とし、各時間間隔における収束判定は加速度について  $1/1000$  とする。

### 3. 固有振動解析および橋梁-車両連成系の固有振動数

固有値解析は QR 法により行う。橋梁の固有振動数を表-4 に示す。表中の V は鉛直振動モード、T はねじり振動モード、H は水平振動モードを示す。また、車両の固有振動数、およびモード図を図-4 に示す。

また、橋梁-車両連成系の固有振動数は、橋梁或いは車両単独の場合の固有振動数と異なり、若干シフトすることが知られている。これを示すため、図-5(a)に示すような質量-ばね系車両と単純梁橋梁連成系を、さらに図-5(b)のような橋梁と車両とともに 1 自由度振動系に簡略化した場合の計算過程を以下に示す。ここで、 $m^*$  は橋梁の単位長さ当りの質量とし、 $m_b$ ,  $m_v$  はそれぞれ橋梁と車両の等価質量を示す。 $q_b$ ,  $q_v$  は橋梁、車両の変位を示す。車両、橋梁の連成振動を式(4)と(5)に、そのマトリクス形を式(6)にそれぞれ示す。

$$m_v \ddot{q}_v + k_v(q_v - q_b) = 0 \quad (4)$$

$$m_b \ddot{q}_b + k_v(q_v - q_b) + k_b q_b = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_v \\ \ddot{q}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_v^2 & -\omega_v^2 \\ -\mu\omega_v^2 & \omega_b^2 + \mu\omega_v^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_v \\ q_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\omega_b$  および  $\omega_v$  は単独な橋梁および車両の固有振動数、 $\mu = m_v/m_b$  である。

式(6)を  $[\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}] = 0$  として、固有値解析をすると、連成系としての固有振動数は、以下の式で表すことができる。

$$\omega^2 = \omega_b^2 \times \frac{1}{2} \left[ 1 + \beta^2 + \mu\beta^2 \pm \sqrt{(1 + \beta^2 + \mu\beta^2)^2 - 4\beta^2} \right] \quad (7)$$

ここで、 $\beta = \omega_v/\omega_b$  を表す。この式から  $\omega$  は 2 つの解を

得られ、大きい値を示した振動数は、橋梁と車両の固有振動数における大きい方がシフトしたものとなり、小さい値も同様にもう一方の振動数からシフトしたものである。通常、連成系質量において大きい割合を占める橋梁の固有振動数からシフトしたものが、連成系の応答に対して支配的となる。本論文では、橋梁の卓越振動応答について、上記式(7)で算出された固有振動数（以下、連成系振動数と呼ぶ）を用いて評価する。

表-1 鋼部材断面諸元

|       | 主桁   | 端横桁  | 中間横桁 |
|-------|------|------|------|
| $B_u$ | 500  | 300  | 300  |
| $T_u$ | 30   | 25   | 25   |
| $H$   | 3000 | 2000 | 1000 |
| $t_w$ | 24   | 16   | 16   |
| $B_l$ | 800  | 300  | 300  |
| $t_l$ | 50   | 25   | 25   |

表-2 材料定数

| 部材名   | ヤング係数<br>E [N/mm <sup>2</sup> ] | ポアソン比<br>$\mu$ | 単位体積重量<br>w [kN/m <sup>3</sup> ] |
|-------|---------------------------------|----------------|----------------------------------|
| PC 床板 | 2.857×10 <sup>4</sup>           | 0.2            | 24.5                             |
| 鋼部材   | 2.000×10 <sup>4</sup>           | 0.3            | 77.0                             |

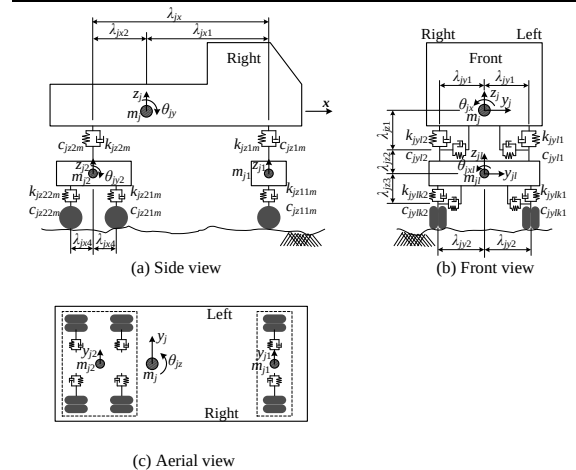


図-3 12 自由度走行車両モデル

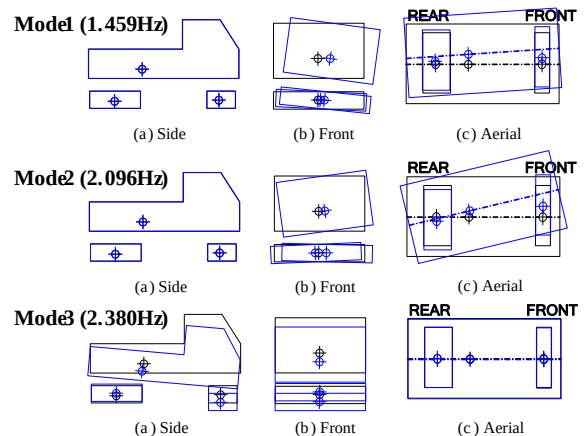


図-4 車両固有振動モード図

表-3 12 自由度車両モデル諸元

|                       |                 |                                                |
|-----------------------|-----------------|------------------------------------------------|
| 車体質量                  | $m_j$           | 17.87 t                                        |
| 前輪ばね下質量               | $m_{j1}$        | 0.40 t                                         |
| 後輪ばね下質量               | $m_{j2}$        | 0.60 t                                         |
| 車体慣性モーメント (X 軸回り)     | $I_{jx}$        | 568.04 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$ |
| 車体慣性モーメント (Y 軸回り)     | $I_{jy}$        | 544.21 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$ |
| 車体慣性モーメント (Z 軸回り)     | $I_{jz}$        | 280.77 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$ |
| 前方懸架装置慣性モーメント (X 軸回り) | $I_{jz1}$       | 3.18 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$   |
| 後方懸架装置慣性モーメント (X 軸回り) | $I_{jz2}$       | 12.70 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$  |
| 後方懸架装置慣性モーメント (Y 軸回り) | $I_{jy2}$       | 6.83 $\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}$   |
| 前方懸架装置ばね定数 (Y 軸方向)    | $k_{jy1m}$      | 269.50 $\text{kN/m}$                           |
| 前方懸架装置ばね定数 (Z 軸方向)    | $k_{jz1m}$      | 668.36 $\text{kN/m}$                           |
| 後方懸架装置ばね定数 (Y 軸方向)    | $k_{jy2m}$      | 1666.00 $\text{kN/m}$                          |
| 後方懸架装置ばね定数 (Z 軸方向)    | $k_{jz2m}$      | 5328.26 $\text{kN/m}$                          |
| 前輪ばね定数(Y 軸方向)         | $k_{jy11m}$     | 1259.30 $\text{kN/m}$                          |
| 前輪ばね定数(Z 軸方向)         | $k_{jz11m}$     | 2518.60 $\text{kN/m}$                          |
| 後輪ばね定数(Y 軸方向)         | $k_{jy2km}$     | 5035.73 $\text{kN/m}$                          |
| 後輪ばね定数(Z 軸方向)         | $k_{jz2km}$     | 10071.46 $\text{kN/m}$                         |
| 前方懸架装置減衰定数 (Y 軸方向)    | $c_{jy1m}$      | 4.70 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$                |
| 前方懸架装置減衰係数 (Z 軸方向)    | $c_{jz1m}$      | 11.76 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$               |
| 後方懸架装置減衰定数 (Y 軸方向)    | $c_{jy2m}$      | 8.72 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$                |
| 後方懸架装置減衰係数 (Z 軸方向)    | $c_{jz2m}$      | 27.83 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$               |
| 前輪減衰係数 (Y 軸方向)        | $c_{jy11m}$     | 3.63 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$                |
| 前輪減衰係数 (Z 軸方向)        | $c_{jz11m}$     | 7.25 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$                |
| 後輪減衰係数 (Y 軸方向)        | $c_{jy2km}$     | 14.60 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$               |
| 後輪減衰係数 (Z 軸方向)        | $c_{jz2km}$     | 29.20 $\text{kN}\cdot\text{s/m}$               |
| 車両寸法                  | $\lambda_{jx}$  | 4.00 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz1}$ | 2.95 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz2}$ | 1.05 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz4}$ | 0.68 m                                         |
|                       | $\lambda_{jy1}$ | 0.90 m                                         |
|                       | $\lambda_{jy2}$ | 0.90 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz1}$ | 0.70 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz2}$ | 0.30 m                                         |
|                       | $\lambda_{jz3}$ | 0.50 m                                         |

表-4 横桁直角配置モデルの固有振動[Hz](R=200m)

|          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| $f_{V1}$ | $f_{T1}$ | $f_{H1}$ | $f_{V2}$ | $f_{T2}$ |
| 2.241    | 3.460    | 6.247    | 8.118    | 9.706    |

表-5 輪荷重加振振動数

|       | 40km/h   | 50km/h   | 60km/h   |
|-------|----------|----------|----------|
| ① - ② | 3.346 Hz | 4.180 Hz | 5.018 Hz |
| ① - ③ | 8.169 Hz | 10.25 Hz | 12.25 Hz |
| ② - ③ | 2.373 Hz | 2.956 Hz | 3.559 Hz |

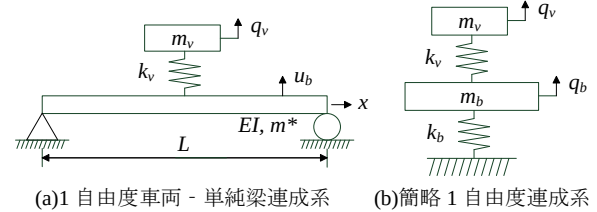


図-5 橋梁-車両連成系モデル

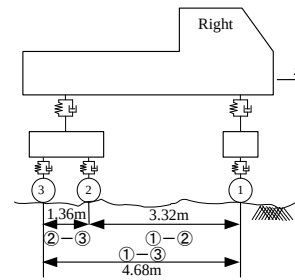


図-6 車輪間距離

#### 4. 車両速度による輪荷重加振振動数および解析条件

橋梁と車両の共振現象の検討するために、本研究では車両速度によって値が変化する輪荷重加振振動数を計算する。輪荷重加振振動数は速度を車輪間距離で割ることで示される。各車輪間距離を図-6に、時速40km/h、50km/h、60km/hそれぞれの輪荷重加振振動数を表-5に示す。この結果から40km/hでは橋梁鉛直1次固有振動数(V1)、ねじり1次固有振動数(T1)共に加振振動数と近い値を示すことが分かる(輪荷重加振振動数②-③、①-②)。60km/hでは、ねじり1次固有振動数(T1)と加振振動数が近い値を示していることが分かる(輪荷重加振振動数②-③)。

解析条件としては車両5台を、初期条件が静止状態の橋梁上を走行させる。車間距離は各車両速度に対し一般的に道路走行で必要とされる距離を設定する。出力は最もたわみが大きい橋桁中央部の加速度と変位の時刻歴応答とする。橋梁上の路面凹凸については一般的な最大高低差が6cmの道路橋の値を使用する。

#### 5. 解析結果

##### 5.1 車両速度の違いによる動的応答評価

図-7に加速度時刻歴応答、図-8に変位時刻歴応答、また最大変位および加速度を示す。この結果より加速度時刻歴応答、変位時刻歴応答について、橋梁鉛直1次(V1)、ねじり1次固有振動数(T1)の値と近い加振振動数を有する40km/hの場合の応答が大きいことが分かる。次いで、輪荷重加振振動数とねじり1次固有振動数(T1)の値に近い60km/hの応答が2番目に大きいことが確認できる。

##### 5.2 橋梁応答の卓越振動成分に関する分析

各速度の加速度応答フーリエスペクトルに式(4)から算出した連成系振動数をプロットしたもの(○で表す)を図-9に示す。さらに図-9では振幅が共通して大きい箇所の振動数を示す。この結果から応答スペクトルの卓越成分の多い箇所では連成系振動数のプロット数も多く点在していることがわかり、車両走行時の橋梁卓越振動応答の評価に用いることが有効であることがわかる。また、振幅の大きい箇所では影響の大きい、橋梁および車両の固有振動数、連成系振動数を表-6に示す。括弧中はどちらの固有振動数からシフトしたかを示している。

全ての速度で最も成分の大きい2.05Hzは、橋梁ねじり1次(T1)と車両2次固有振動数、および橋梁鉛直1次(V1)と車両3次固有振動数から算出した連成系振動数(共に2.07Hz)と近い値を示し、応答に影響していると考えられる。また、各速度で影響の大きい2.49Hzでは橋梁鉛直1次固有振動数を除く固有振動数(T1, H1, V2, T2)と車両3次固有振動数との連成系振動数(2.34~2.37Hz)による値に近い値を示す。以上のことから、共通して卓越成分の大きい箇所では、車両の鉛直方向の振動モード関係していることが分かり、橋梁の鉛直方向の振動応答に対して影響が大きいことが分かる。

##### 5.3 輪荷重加振振動数影響評価

各速度の応答スペクトルから40km/hの応答が最も大きいことがわかる。特に卓越成分が多い2.0~4.0Hzの間は最も差が見られる。この範囲は橋梁鉛直1次およびねじり1次固有振動数と、車両1次から5次固有振動数で算出された卓越振動成分の影響が大きく、輪荷重加振

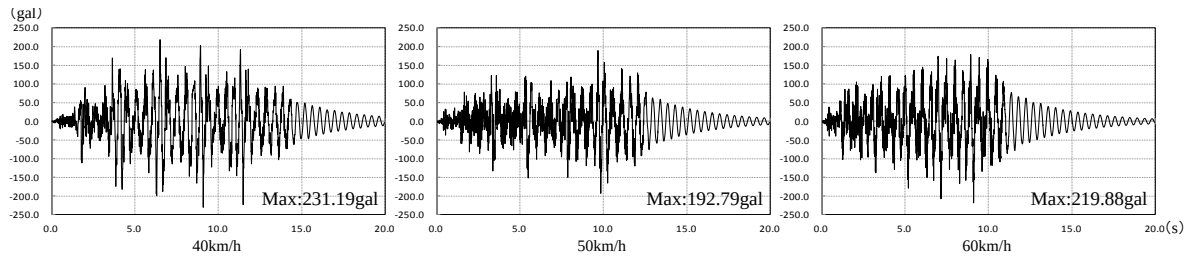


図-7 加速度時刻歴応答

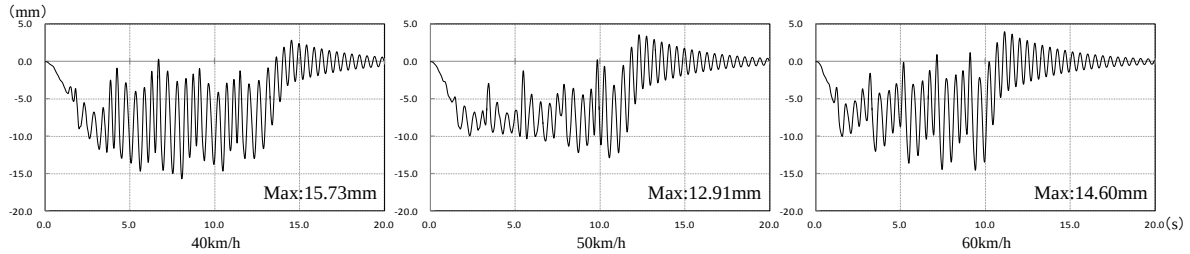


図-8 変位時刻歴応答

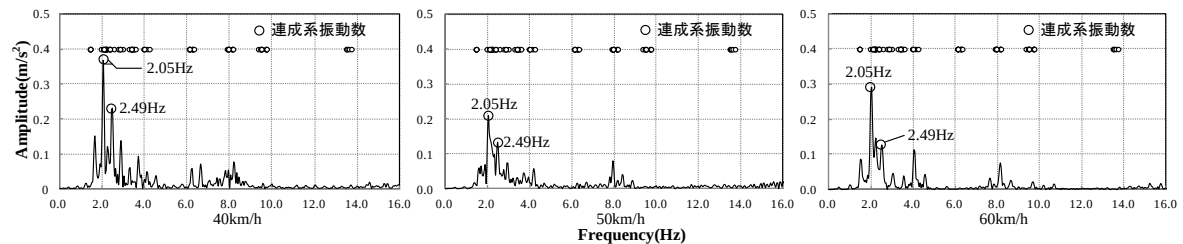


図-9 フーリエスペクトル，連成系振動数プロット図

振動数と橋梁鉛直 1 次およびねじり 1 次固有振動数共に値に近い 40km/h では共振現象が発生することで、この範囲の応答成分が増大し、動的応答が大きくなったと考えられる。以上のことから鉛直方向での橋梁-車両振動応答は輪荷重加振振動数が影響し、橋梁鉛直 1 次、ねじり 1 次固有振動数と値に近いものがあるほど共振現象が発生し増大する傾向があることが言える。

## 6. あとがき

本論文では一般的な構造諸元を有する曲線 2 主桁橋を三次元梁要素でモデル化し、12 自由度ダンブトラックモデル走行時の橋梁振動をシミュレーションした。そして、車両速度が関係する輪荷重加振振動数が車両走行時の橋梁振動応答に影響するかを調べるため、車両速度を変えた場合の動的変位、加速度応答の比較をした。その結果、輪荷重加振振動数と橋梁の固有振動数が近い値を示した場合、振動応答が増大することが確認できた。

また、加速度のフーリエスペクトルについて、橋梁固有振動数と車両固有振動数から連成系振動数を算出し、応答スペクトルの卓越成分と比較をおこなうことで車両走行時の橋梁卓越振動の原因を調べた。その結果、車両の鉛直方向の低次振動モードが橋梁鉛直方向の振動応答に対して影響が大きいことを確認した。

次いで加速度応答スペクトルを車両速度で比較したところ、2.0~4.0Hz の応答に大きな差が見られた。橋梁鉛直 1 次、およびねじり 1 次固有振動数から算出される連成系振動数が大きく影響している範囲であり、そのことから輪荷重加振振動数との共振効果から橋梁の振動応答が増大したことを確認した。

表-6 卓越振動成分

| 卓越成分   | 連成系振動数      | 橋梁モード       | 車両モード          |
|--------|-------------|-------------|----------------|
| 2.05Hz | 2.073Hz(車両) | T1(3.460Hz) | Mode2(2.096Hz) |
|        | 2.077Hz(橋梁) | V1(2.241Hz) | Mode3(2.380Hz) |
| 2.49Hz | 2.340Hz(車両) | T1(3.460Hz) | Mode3(2.380Hz) |
|        | 2.372Hz(車両) | H1(6.247Hz) |                |
|        | 2.377Hz(車両) | V2(8.118Hz) |                |
|        | 2.377Hz(車両) | T2(9.706Hz) |                |

本論文では車両速度が関係する、輪荷重加振振動数の影響報告のみ行ったが、振動特性向上対策を行った橋梁の場合や梁の疲労・耐震・使用性に関わる諸問題の検討等も行い振動性状を確認していく必要がある。また、より詳細な橋梁モデルの構築や交通振動の実測結果と比較し妥当性を検証する必要性がある。

## 参考文献

- (1) (社)日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生，資料編，1998.
- (2) (社)土木学会：鋼橋の新たな技術展開，土木学会誌，Vol.84, Apr, pp.4-15, 1999.
- (3) 梶川康男，上中勝，服部幸雄：高架橋の振動制御と橋梁環境問題，振動制御コロキウム PART B 講演論文集，pp.1-7, 1991.7.
- (4) 野田泰英，何興文，林川俊郎，松本高志：曲線少数主桁橋と走行車両との連成振動解析手法の開発，土木学会北海道支部論文報告集第 65 号，A-10, 2009