# 2DOFと5DOF車両モデルによる曲線2主桁橋交通振動応答の比較

Evaluation on curved twin I-girder bridge vibration using 2DOF and 5DOF vehicle models

北海道大学工学部	○学生員	下田剛史 (ShimodaTakeshi)
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

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、製作コスト縮減による経済 性の向上を図ることができる。さらに、将来的な維持管理の面 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 ている。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 である。一方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, コスト縮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のみならず,地盤振動や低周波音振 動といった環境振動問題を周辺環境にもたらす可能性がある。 少数主桁曲線橋の動的問題を検討するに当たって,走行車両に よる橋梁振動性状を解明することが必要と考えられる<sup>3</sup>。

以上の課題を検討するために、実験による現象の解明は多大 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。そのため、少数主桁曲線橋と走行車両との連成振動を高精 度で再現できる解析的手法が望まれる。そこで本研究では、曲 線橋と走行車両との連成振動シミュレーション手法の開発を行 い、走行荷重下の少数主桁曲線橋振動性状を解明することを目 指す。本報告では、初期成果として、2自由度および5自由度車 両モデルによる曲線2主桁橋の交通振動応答の比較検討を行い、 車両モデルの違いによる橋梁振動への影響を評価する。

## 2. 車両の振動方程式

本研究では、車両モデルとして 5 自由度大型ダンプトラック を使用している。図-1 に示している j 両目の質点--ばね系車両 モデルについて、D'Alember 原理に基づき、各自由度における力 の釣り合いによる車両振方程式は次のようになる。

# 2.1 車体の振動方程式

上下振動 (Bouncing)

$$m_{j}\ddot{z}_{j} + \sum_{l=1}^{lx(j)} v_{jl}(t) = 0$$
<sup>(1)</sup>

回転振動 (Pitching)

$$I_{j}\ddot{\theta}_{j} + \sum_{l=1}^{l_{x}(j)} (-I)^{l} \lambda_{jl} v_{jl} (t) = 0$$
<sup>(2)</sup>

$$\begin{array}{l} \sum \mathbb{C} \\ v_{jl}(t) = k_{jl} \left\{ z_{j} - z_{jl} + (-1)^{l} \lambda_{jl} \theta_{j} \right\} \\ + c_{jl} \left\{ \dot{z}_{j} - \dot{z}_{jl} + (-1)^{l} \lambda_{jl} \dot{\theta}_{j} \right\} \end{array}$$
(3)

ここで、*j*は車両の番号を表す。*l*は車体と台車に関する変数 で、l=1,2はそれぞれ車体の前後を表す。ここで、lx(j)は*j*両目 の車両におけるばね下質量を表す関数である。また、 $v_{jl}(t)$ は車 体と台車を連結するばねの伸張によって発生する力を表す(伸張 は正とする)。

#### 2.2 ばね下質量の振動方程式

上下振動 (Bouncing)

$$m_{jl} \ddot{z}_{jl} - \sum_{l=1}^{lx(j)} v_{jl} \left(t\right) + \sum_{l=1}^{jx(l)} \sum_{k=1}^{l(k(l))} v_{jlk} \left(t\right) = 0$$
(4)

回転振動 (Pitching)

$$I_{j} \dot{\theta}_{j} + \sum_{l=1}^{l_{x}(j)} (-I)^{l} \lambda_{jl} v_{jl} (t) = 0$$

$$\simeq \simeq \overline{C}$$
(5)

$$v_{jlk}(t) = k_{jlk} \left\{ z_{jl} + (-1)^k \lambda_{jx(lx(j)+l)} \theta_{jl} - w_{jlk} \right\} + c_{jlk} \left\{ \dot{z}_{jl} + (-1)^k \lambda_{jx(lx(j)+l)} \dot{\theta}_{jl} - \dot{w}_{jlk} \right\}$$
(6)

k=1.2はそれぞれ車軸における前後輪軸を表す。kx(l)は車軸の 関数で、その車軸における輪軸数を表す。 $v_{jk}(t)$ は車軸とタイヤを 連結するばねの伸張量(正をプラスとする)によって発生する力 を表す。ここで前輪に一輪軸しかない為、 $\lambda_{jx(kt(t)+1)} = \lambda_{jx3} = 0$ となる。 また、k=k(l)の上限値は2となる。

w<sub>w</sub>は接地点における橋梁床版の変位と路面凹凸による車輪の 変位で、以下のように示す。

$$w_{jlk} = w_{z}\left(t, x_{jlk}\right) + z_{o}\left(t, x_{jlk}\right)$$
(7)

ここで  $w(t, x_{jt})$ と  $z_d(x_{jt})$ はそれぞれ車輪と床版との接触点における床版の変位と凹凸を表す。

$$w (t, x_{jlk}) = \Psi_{jlk}^{T}(t) w_{b}$$
(8)

ここでw<sub>b</sub>は、橋梁モデルの変位ベクトルである。Y<sub>µ</sub>(t)は分配 ベクトルであり、輪重を要素の節点に分配する役割を持つと同 時に、線形補間に基づき節点変形から要素任意位置の変形を求 めることが出来る。はりの要素の場合、Y<sub>µ</sub>(t)は以下のように表 現することが出来る。

$$\boldsymbol{\Psi}_{jlk}\left(t\right) = \left\{0; \cdots; 0; \psi_{n,jlk}; \psi_{n+1,jlk}; 0; \cdots; 0\right\}^{T}$$
(9)

また、輪重は以下のように計算される。

$$P_{jlk}(t) = -\frac{1}{kx(l)}g\left\{\left(1 - \frac{\lambda_{jl}}{\lambda_j}\right)m_j + m_{jl}\right\} + v_{jlk}(t)$$
(10)

ここで $m_j, m_j$ はそれぞれ車体およびばね下の質量で、gは重力加速度である。

上記の定式化により,各式を展開・代入すると

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{\ddot{w}}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{\dot{w}}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{w}_{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{\nu}} \tag{11}$$

ここに, $M_{v}$ , $C_{v}$ , $K_{v}$ および $F_{v}$ はそれぞれ質量マトリクス,減衰 マトリクス,剛性マトリクスおよび外力ベクトル項である。 $w_{v}$ は 全車両の自由度からなる変位ベクトルである。

なお,2自由度車両モデルの振動方程式については,5自由度 モデルからばね下質量を死荷重として単純化したものである為 省略する。2自由度車両モデルは図-2に示す。







図-2 2 自由度車両モデル

#### 3. 橋梁の振動方程式

橋梁の振動方程式は、有限要素および振動理論に基づき、次式 でで表される。

$$\boldsymbol{M}_{b}\boldsymbol{\ddot{w}}_{b} + \boldsymbol{C}_{b}\boldsymbol{\dot{w}}_{b} + \boldsymbol{K}_{b}\boldsymbol{w}_{b} = \boldsymbol{F}_{b} \tag{12}$$

 $M_{b}$ ,  $C_{b}$  および  $K_{b}$  は、それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、および剛性マトリクスである。ここで、 $C_{b}$ はレイリー減衰を用いる。

外力ベクトル $F_b$ は,

$$F_{b} = \sum_{j=1}^{h} \sum_{l=1}^{2} \sum_{k=1}^{2} \Psi_{jlk}(t) P_{jlk}(t)$$
(13)

ここで,  $P_{\mu}(t)$  は輪重で,  $\Psi_{\mu}(t)$  は分配ベクトルである。h は車両の数である。

橋梁の変位ベクトル $w_b$ について、固有振動ベクトルと一般化座標で表すと、

$$\boldsymbol{w}_{b} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\varphi}_{i} \boldsymbol{q}_{i} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{q}$$
(14)

ここで、 $q_i$ は一般化座標で $\boldsymbol{q}_i$ は固有ベクトルで、nは考慮される最高モード次数である。

w<sub>b</sub> を橋梁の振動方程式に代入し、**の**を式の両辺に乗じ、固有 ベクトルの直交性を利用すると、橋梁振動方程式は以下のよう に連立せず、独立な式となる。

$$\boldsymbol{M}_{i}\boldsymbol{\ddot{q}}_{i} + \boldsymbol{C}_{i}\boldsymbol{\dot{q}}_{i} + \boldsymbol{K}_{i}\boldsymbol{q}_{i} = \boldsymbol{F}_{i} \tag{15}$$

#### 4. 橋梁 - 走行車両連成振動解析

#### 4.1 曲線2 主桁橋モデル

使用する橋梁モデルは図-3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50mの曲線橋である。床板にはPC床板を用いており、横桁は中段配置で、全支間長を10等分する5m間隔で設置している。部材断面は表-1の通りである。なお、垂直補剛財は幅250mm、板厚25mmの鋼板を使用し、横桁同様5m間隔で設置している。

本研究では、解析手法の開発を主な目的とすることから、ま ず基本的なはり要素による橋梁モデルを用いることとする。図 -4に前述2主桁橋上部構造の三次元有限要素解析モデルを示す。 主桁、横桁および床版はすべて一節点 6 自由度を有する三次元 はり要素でモデル化する。主桁の桁高を考慮するために各要素 間を剛なオフセット部材を用いて連結する。総接点数は 92,総 要素数は 128 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。

#### 4.2 解析条件

逐次積分法である Newmarks'  $\beta$  法に基づく連成振動解析プ の ういを作成し、示した理論、モデルに対して、連立 2 階微分方程 式の解を数値解析で求める。 $\beta=1/4$  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。

解析条件としては車両一台を,静止している状態の橋梁上を時速 V=40 km/h で走らせ,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。この際の車両の変数に ついては表-3,諸元値については表-4に示す。また、今回の 解析では2自由度モデルと5自由度モデルを同条件で走行させ た場合の比較(走行レーンは橋梁の端)、さらに5自由度モデル について走行レーンを橋梁の中央と端にしての比較を行った。



図-3 曲線2主桁橋断面図



表-1 鋼部材断面諸元			
主桁・横桁断面寸法			
	主桁	端横桁	中間横桁
$\mathbf{B}_{\mathrm{u}}$	500	300	300
T <sub>u</sub>	30	25	25
Н	3000	2000	1000
t <sub>w</sub>	24	16	16
B	800	300	300
tı	50	25	25

表-2	材料定数
~ ` -	1 4 1 1/ - // -

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

表-3 5自由度車両モデル各変数

Definition	Notation
Bounching of vehicle body	$Z_j$
Parallel hop of the front unsuprung mass	$Z_{j1}$
Parallel hop of the rear unsuprung mass	$Z_{j2}$
Pitching of the suprung mass	$ heta_j$
Windup of the rear susuprung mass	$ heta_{j2}$

## 表-4 5自由度車両モデル諸元値

Definition	Notation	Value
Sprung mass including payload	$m_{j}$	17.87 t
Front unsprung mass	$m_{_{jl}}$	0.4 t
Rear unsprung mass	$m_{j^2}$	1.6 t
Moment of inertia of sprung mass	$I_{j}$	55.532 t•m
Moment of inertia of rear unsprung mass	$I_{j2}$	0.697 t•m
Sprung constant of front suspension	$k_{jl}$	68.2 tf/m
Sprung constant of rear suspension	$k_{j^2}$	543.7 tf/m
Sprung constant of front tires	$k_{j11}$	257 tf/m
Sprung constant of rear tires	$k_{j^{2k}}$	1027.7 tf/m
Damping coefficient of front suspension	$c_{jl}$	1.2 tf•s/m
Damping coefficient of rear suspension	$c_{j2}$	2.84 tf•s/m
Damping coefficient of front tires	$c_{jll}$	0.74 tf•s/m
Damping coefficient of rear tires	$c_{j2k}$	2.98 tf•s/m
Distance between front and rear axles	$\lambda_{j}$	4.0 m
Distance between front axles and body centroid	$\lambda_{jI}$	2.95 m
Distance between rear axles and body centroid	$\lambda_{j^2}$	1.05 m
1/2 distance of tandem axles	$\lambda_{i4}$	0.68 m







図-8 橋梁加速度応答 (5 自由度モデル)





図-10 橋梁加速度応答(5 自由度モデル,中央走行)

# 5. 解析結果

# 5.1 2自由度と5自由度モデルによる結果の比較

振動解析で得られた2自由度5自由度車両モデルによる橋梁 動的変位応答をそれぞれ図-5と図-6に、加速度応答をそれぞ れ図-7と図-8に示す。

この結果より、変位については車両進入開始2.5秒前後に車両 が橋桁中央部付近を通過した時に中央部の変位、加速度共に増 加していることがわかる。

#### 表-5 車両モデルの違いによる最大変位及び加速度

	最大変位	最大加速度
2 自由度モデル	6.6mm	60.92gal
5 自由度モデル	7.37mm	115.3gal

表-6 走行レーンの違いによる最大変位及び加速度

	最大変位	最大加速度
走行レーン端	7.37mm	115.3gal
走行レーン中央	3.93mm	79.6gal

また,各自由度の最大変位及び最大加速度は表-5に示す。最 大変位,加速度の両方が5自由度モデルの方が大きい値となっ た。これは5自由度モデルのばね下質量の振動が橋梁に影響を 与えているということが考えられ,車両モデルを詳細なものに して検討する必要性があると言える。

### 5.2 走行レーンでの比較

走行レーンが中央である場合の結果を図-9 と図-10 にそれ ぞれ示す。走行レーンの違いによる最大変位及び最大加速度は 表-6 に示す。最大変位,最大加速度の両方で走行レーンが端の 方が大きい値となった。これは中央レーン走行では,車重が二 本桁で分散され,さらにねじり振動の影響が小さいことによる ものと考えられる。この現象から,橋梁振動の評価において, もっとも不利な走行レーンによる応答を照査する必要があると 考えられる。

#### 6. あとがき

本研究では2自由度と5自由度車両モデルを構築し、橋梁交 通振動応答の比較を、車両モデルおよび走行レーンの違いにつ いて比較を行った。詳細車両モデルを構築することの重要性や、 橋梁振動応答を検討する際に車両走行位置を注意する必要性を 確認した。今後はさらに詳細な車両および橋梁モデルを構築し、 曲線少数主桁橋の振動特性の検討を行っていく予定である。

## 7.参考文献

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) 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.