

連行自動車荷重による道路橋の定量的な動的評価に及ぼす車両モデルの影響について

鹿児島工業高等専門学校 正口 谷 保
南日本高圧コンクリート 新村 光二

1. まえがき

走行車両による道路橋の動的応答は、橋面不整や伸縮装置部の凹凸等を確率的に取り扱い、この上をばね-質量系にモデル化された車両が走行するときの車両と道路橋の連成振動の問題として不規則振動論を用いた解析法により求められている。このとき、走行車両のばね-質量系へのモデル化に関してはその機械的性質から種々のタイプが考えられ、このモデル化の違いは道路橋の走行車両による動的応答にかなりの影響を及ぼすものと思われる。特に、衝撃係数の合理的な定量的評価を目的とするような場合や振動感覚、低周波空気振動等に関係すると思われる道路橋の振動速度や振動加速度の定量的評価を行う場合などには、走行車両のモデル化は重要な要素の一つと考えられる。本文は、現在よく用いられている図-1(a),(b),(c)に示すようなタイプの代表的なばね-質量系にモデル化された連行車両を考え、表-1に示すような諸元を有する単純桁道路橋を対象として定常ランダム応答解析を行い、その解析結果の比較検討を行ったものである。解析に際しては橋面不整のみを考慮し、伸縮装置部の凹凸等は無視した。また、応答の着目点は支間中央とし、たわみ応答と曲げモーメント応答の標準偏差を静的最大たわみおよび静的最大曲げモーメントで除した値(動的増幅率と呼ぶ) μ_y, μ_m で結果を整理した。

表-1. 単純桁道路橋の諸元

支間 l (m)	総重量 W (t)	曲げ剛性 ($10^5 \text{tf} \cdot \text{m}^2$)	1次固有振動数 f_n (Hz)	静的最大たわみ Y _{ST,MAX} (cm)		静的最大曲げモーメント M _{ST,MAX} (tf-m)		減衰定数 η_h
				TYPE-A,B	TYPE-C	TYPE-A,B	TYPE-C	
20	48.4	6.21	6.23	0.537	0.518	100.0	92.0	0.02
30	77.6	12.42	3.79	1.159	1.145	165.0	155.5	0.02
40	106.8	24.41	2.93	1.808	1.793	290.0	282.0	0.02
50	136.0	42.20	2.45	2.377	2.365	415.0	407.0	0.02
60	165.2	65.78	2.11	3.113	3.103	570.0	553.0	0.02

2. 連行車両-橋梁系の運動方程式と応答の標準偏差の算定

図-1に示すように、橋面不整 $\Delta(x)$ (平均値零の定常ランダム過程) を有する橋梁に3タイプのばね-質量系にモデル化されたN台の連行車両がある固定された位置で走行中の不規則振動を及ぼしているものとする。このとき、橋梁のたわみ応答 $Y(x,t)$ は定常ランダム過程となり、その平均値は静的たわみ $Y_{ST}(x)$ を示し、平均値からの偏差(動的増加たわみ) $y(x,t)$ は平均値零の定常ランダム過程となる。また、 $y(x,t)$ はn次の固有振動モード $\phi_n(x)$ 、基準座標 $g_n(x)$ を用いて次式で表わされる。

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) g_n(x) \quad (1) \quad \text{ここに、} g_n(x) \text{ は平均値零の}$$

定常ランダム過程であり、次式に示すような微分方程式を満足する。

$$\ddot{g}_n(x) + 2\lambda_n \omega_n \dot{g}_n(x) + \omega_n^2 g_n(x) = -\frac{1}{M_n} \sum_{j=1}^N P_{nj}(t) \quad (2)$$

ここに、 ω_n, λ_n, M_n は橋梁のn次の固有円振動数、減衰定数、換算質量である。また、 $P_{nj}(x)$ は図-1に示すそれぞれのタイプの走行車両による動的接地力にその車両の作用位置における橋梁の固有振動モードの値を乗じたものであり、この $P_{nj}(x)$ および車両の変位に関する運動方程式は各タイプに對して次のようになる。

$$\text{○タイプA} \quad m_j \ddot{z}_{vj}(x) + c_j \{\dot{z}_{vj}(x) - \dot{g}_{vj} - \Delta(x_j)\} + k_j \{z_{vj}(x) - g_{vj} - \Delta(x_j)\} = 0 \quad (3)_a, \quad P_{nj}(t) = m_j \ddot{z}_{vj}(x) \phi_n(x_j) \quad (3)_b$$

ここに、 $m_j = P_j/g$, c_j, k_j は車両jの質量、減衰係数、ばね定数であり、 $z_{vj}(x), g_{vj}, \phi_n(x_j), \Delta(x_j)$ は鉛直変位および作用位置の動的増加たわみ、固有振動モード値、橋面不整である。(j=1, 2, ..., N)

$$\begin{aligned} \text{○タイプB} \quad & m_{js} \ddot{z}_{js}(x) + c_{js} \{\dot{z}_{js}(x) - \dot{z}_{jT}(x)\} + k_{js} \{z_{js}(x) - z_{jT}(x)\} = 0 \quad (4)_a \\ & m_{jt} \ddot{z}_{jt}(x) + m_{jt} \ddot{z}_{jT}(x) + c_{jt} \{\dot{z}_{jt}(x) - \dot{g}_{vj} - \Delta(x_j)\} + k_{jt} \{z_{jt}(x) - g_{vj} - \Delta(x_j)\} = 0 \quad (4)_b \\ & P_{nj}(x) = \{m_{js} \ddot{z}_{js}(x) + m_{jt} \ddot{z}_{jt}(x)\} \phi_n(x_j) \quad (4)_c \end{aligned}$$

ここに、 $m_{js} = P_{js}/g$, $m_{jt} = P_{jt}/g$, $c_{js}, c_{jt}, k_{js}, k_{jt}$ は車両jの懸架部(jS)とタイヤ部(jT)の質量、減衰係数、

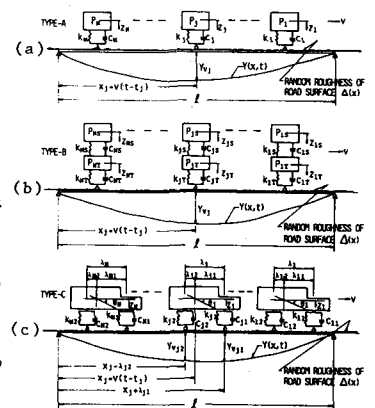


図-1. 連行車両-橋梁系の解析モデル

ばね定数であり、 $z_{js}(x), z_{jt}(x)$ は鉛直変位である。(j=1, 2, ..., N)

・タイプC $m_j \ddot{z}_{jt}(x) - \frac{\gamma}{2\alpha} (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x) = 0 \dots (5)_a, J_j \ddot{\theta}_{jt}(x) - \frac{\gamma}{2\alpha} (-1)^j \ddot{\theta}_{jt}(x) = 0 \dots (5)_b, P_{jn}(x) = -\frac{\gamma}{2\alpha} \ddot{z}_{jn}(x) \phi_n(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jn}(x) \dots (5)_c$
 $Q_{jn}(x) = G_{jn} \{ \ddot{z}_{jt}(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x) \} - \ddot{z}_{jn}(x) - \Delta [\ddot{z}_{jt}(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x)] + G_{jn} \{ \ddot{z}_{jt}(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x) \} - \ddot{z}_{jn}(x) - \Delta [\ddot{z}_{jt}(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x)] \} \dots (5)_d$

ここに、 m_j, J_j は車両jの質量、回転慣性であり、 $G_{jn}, \ddot{z}_{jn}, \ddot{\theta}_{jn}, \phi_n(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jn}(x), \Delta [\ddot{z}_{jt}(x) - (-1)^j \ddot{z}_{jt}(x)]$ は前輪(i=1)後輪(i=2)の減衰係数、ばね定数およびそれらの作用位置の動的増大たわみ、固有振動モード値、橋面不整である。また、 $z_j(x), \theta_j(x)$ は鉛直変位と回転変位をそれぞれ表わしている。(j=1, 2, ..., N)

いま、橋梁の動的増大たわみ $y(x, t)$ は式(1)で与えられ、その2乗平均値はたわみ応答の分散を与えるので、標準偏差 $\sigma_Y(x)$ は次式で求められる。 $\sigma_Y(x) = \sqrt{E[y^2(x, t)]} = \sqrt{\sum_n \phi_n^2(x) \phi_n^2(x) E[\xi_n(x) \xi_n(x)]} \dots (6)$ また、曲げモーメント応答の標準偏差 $\sigma_M(x)$ は、 $\sigma_M(x) = \sqrt{E[-EI \partial^2 y(x, t) / \partial x^2]^2} = EI \sqrt{\sum_n \phi_n^2(x) \phi_n^2(x) E[\xi_n(x) \xi_n(x)]} \dots (7)$ で求められる。ただし、 $\phi_n(x) = d^n \phi_n(x) / dx^n$ である。式(6), (7)中の $E[\xi_n(x) \xi_n(x)]$ は橋面不整 $\Delta(x)$ (パワースペクトル密度 $S_\Delta(\omega) = 2\pi v Q / (\omega^4 + \alpha^2)$, Qは平滑度パラメータ)を定常ランダム入力として、定常不規則振動論より式(2)~(5)を解いて求められる。動的増幅率 μ_Y, μ_M は表-1に示す静的最大たわみ $Y_{st, max}$ および静的最大曲げモーメント $M_{st, max}$ が生ずる連行車両の載荷状態に対して式(6), (7)より求められた標準偏差 $\sigma_Y(x/2), \sigma_M(x/2)$ を用いて次式で定義する。 $\mu_Y = \sigma_Y(x/2) / Y_{st, max} \dots (8)_a, \mu_M = \sigma_M(x/2) / M_{st, max} \dots (8)_b$

3. 数値計算例

本文で用いた連行車両は、現行道路橋示方書に規定されているL-20荷重相当の大型自動車荷重列を図-1に示すタイプのばね-質量系にモデル化して用いた。表-2に本数値計算に用いた車両パラメータを示す。タイプBの懸架部とタイヤ部の質量比やばね定数比、減衰定数およびタイプCの前後輪のばね定数比や減衰定数等は文献1~3)を参照して決定した。また、橋面不整の平滑度パラメータは $Q=0.005 \text{ cm}^3/\text{m}$ とした。図-2, 3は、支間 $l=20, 40, 60 \text{ m}$ の橋梁の動的増幅率 μ_M を車両の1次固有振動

表-2 車両パラメータ

	TYPE-A	TYPE-B	TYPE-C
減衰定数	$\eta_1=0.03$	$\eta_1=0.03, \eta_2=0.1$	$\eta_1=0.03, \eta_2=0.06$
ばね定数比		$k_{12}/k_{11}=3.0$	$\sqrt{k_{12}/k_{11}}=2.5$
質量比		$m_{12}/m_{11}=6.0$	
車軸間隔			$\lambda_1=4 \text{ m}$ ($\lambda_{11}=3.2 \text{ m}, \lambda_{12}=0.8 \text{ m}$)
1次固有振動数	$f_1=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 \text{ Hz}$		
走行速度	$v=5, 10, 15, 20 \text{ m/s}$		

数値および走行速度 v を変化させて各タイプごとに求めた値をプロットしたものである。表-3は各支間の橋梁における μ_M のタイプCに対するタイプA, Bの比を上記の車両パラメータに対して示したものである。定性的には各タイプ共ほぼ同様の傾向を与えるようであるが、定量的には車両パラメータの組合せによ、こかなりの差異が生じている。特に、支間が短くなる程その差異は大きくなり、車両モデルの違いによる影響は顕著に現われるようである。故に、比較的短い支間(15m以下)の橋梁を対象として走行車両による定量的な動的評価を行う場合には、車両モデルの選択は重要な要因の一つと云えよう。[参考文献] 1) 山田小堀: 土木学会論文集 No. 148, 2) 川谷・小松: 第35回年次講演会, 3) 岡林他: 第37回年次講演会, 4) 内谷: 土木学会論文報告集 No. 320.

表-3 動的増幅率 μ_M のタイプCに対するタイプA, Bの比

支間	TYPE-Cと TYPE-A, B との比	f_1 (Hz)					v (m/s)			
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5	10	15	20
20	A/C	0.91	0.98	1.13	1.30	1.56	1.40	1.13	1.06	1.32
	B/C	0.57	0.63	0.74	0.88	1.08	1.03	0.74	0.69	0.86
30	A/C	1.03	1.39	1.23	1.18	1.23	1.38	1.23	1.50	1.76
	B/C	0.57	0.67	0.81	0.89	1.09	1.21	0.81	1.40	1.55
40	A/C	1.04	1.09	1.40	1.38	1.40	1.64	1.40	1.92	2.20
	B/C	0.52	0.98	0.67	0.87	1.20	0.95	0.67	1.05	1.51
50	A/C	1.79	1.71	1.11	1.09	1.21	2.31	1.11	1.44	1.85
	B/C	1.51	1.09	0.81	0.89	0.98	2.02	0.81	1.24	1.30
60	A/C	2.38	1.95	1.76	1.71	1.76	1.49	1.76	1.15	1.50
	B/C	2.14	0.93	1.30	1.21	1.21	1.02	1.30	0.74	1.22

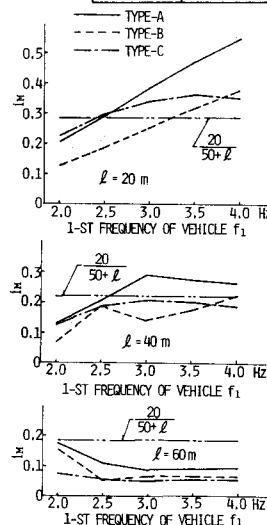


図-2 車両の1次固有振動数 f_1 に対する μ_M の変化 ($v=10 \text{ m/s}$)

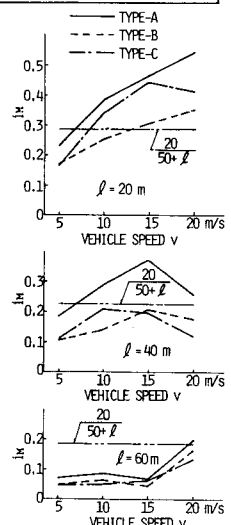


図-3 走行速度 v に対する μ_M の変化 ($f_1=3.0 \text{ Hz}$)