

長崎大学 工学部

正員 ○岡林 隆敏

(株)大日本コンサルタント

正員 河野 孝明

(株)片山鉄工所

正員 西川 敏明

日立造船 (株)

正員 細川 賢慈

1. はじめに 走行車両による道路橋の振動は、路面不整や伸縮継手などの路面凹凸と走行する車両と橋梁の連成振動となっている。路面凹凸を確率過程で表現することにより、道路橋の振動を不規則振動論の観点から解析した研究が多くなされている。橋梁の応答解析において 高次振動まで考慮する必要がある場合、走行車両の解析モデルと走行車両の台数により、不規則振動論では直接解くことが困難である。本研究は共分散方程式によるR.M.S.応答解析をラングー橋の振動解析に適用し、いくつかの仮定を用いて解析を試みた。また、最大R.M.S.応答を推定する定常応答解析の有効性について検討した。各種の解析の比較と、車両台数および車頭間隔 または伸縮継手のR.M.S.応答に及ぼす影響について述べる。解析モデルおよび路面凹凸は、実橋より測定したものをを用いた。

2. 橋梁-車両系の運動方程式 走行車両を図3のような2自由度系でモデル化する。i台目の車両の重心位置 $Z_{ie}(t)$ と重心の回転角 $\theta_{ie}(t)$ の方程式は

$$m_i \ddot{Z}_{ie} + \sum_{j=1}^2 C_{iej} \dot{V}_{zie} + \sum_{j=1}^2 K_{iej} V_{zie} + J_{ie} \ddot{\theta}_{ie} + \sum_{j=1}^2 C_{iej} \dot{V}_{zie} + \sum_{j=1}^2 K_{iej} V_{zie} \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 $V_{zie} = (Z_{ie} - (-1)^{\lambda_{ie}} \theta_{ie} - y_{vie} - r_{ie})$, $V_{oie} = (\lambda_{ie} \theta_{ie} + (-1)^{\lambda_{ie}} Z_{ie} - (-1)^{\lambda_{ie}} y_{vie} - (-1)^{\lambda_{ie}} r_{ie})$,

r_{ie} , m_i , J_{ie} = i台目車両の質量と慣性モーメント, C_{iej} , K_{iej} = i台目車両の減衰係数とばね係数, y_{vie} = i台目車両の車輪直下のたわみ。 $\ell = 1, 2$ は、それぞれ前輪と後輪を表す添数である。i台目の車両の接地力は、次式で与えられる。

$$P_{ie} = C_{iej} \dot{V}_{zie} + K_{iej} V_{zie} \quad (2)$$

一方、橋梁の動的たわみは、S次元振動まで考慮すると、S次元ベクトルである基準関数 $\phi(x)$ と基準座標 $q(t)$ により、

$$y(x, t) = \phi(x)^T q(t) \quad (3)$$

となる。k次元の基準関数は

$$\phi_k(x) = \sum_{m=1}^S A_{km} \sin(k\pi x/L) \quad (4)$$

で与えられる。k次の基準座標は、方程式

$$\ddot{q}_k + 2h_k \omega_k \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = \frac{1}{M_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 P_{iej} \phi_k(v_{ie} - \ell_{ie} - S_{ij} \lambda_{ie})$$

で与えられる。ここに、 $M_k = \int_0^L \phi_k(x)^2 dx$, S = 橋梁全質量, v = 車両の走行速度, λ_{ie} , ℓ_{ie} = i台目の車両の車軸距離と車間距離, S_{ij} = フロント軸のデルタである。

実測より得られた路面凹凸を $Sr(\lambda) = A/(\alpha^2 + \lambda^2)$ の形でモデル化する。これは、次式の定常解過程で表すことができる。

$$r_{ie}(t) + \beta r_{ie}(t) = w(t - (\ell_{ie} - S_{ie} \lambda_{ie})/v) \quad (5)$$

ここに、 $w(t)$ は平均値0, パワースペクトル密度 $S_w = 2\pi\alpha A$ で表される白色雑音過程である。

3. 不規則振動論による解析 (3) 橋梁-車両-路面系を状態空間で表示する。橋梁系とi台目の車両の状態変数 $\{x_i(t)\}$, $\{z_i(t)\}$ と次式で表す。 $\{x_i(t)\} = [\xi_{i1} \dots \xi_{is} \xi_{i, s+1} \dots \xi_{i, s+2}]^T$

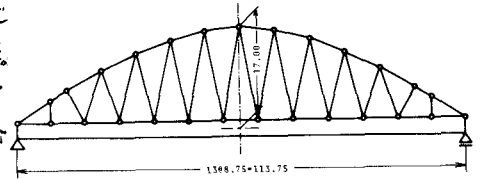


図-1 荒川橋

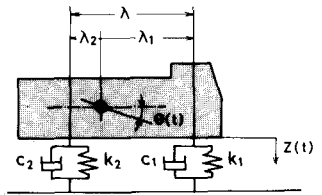


図-2 走行車両の解析モデル

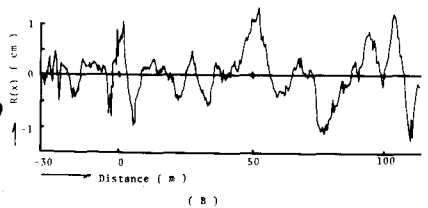
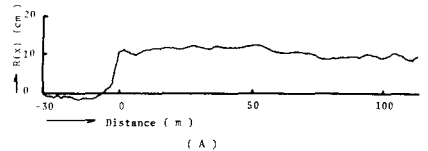


図-3 路面形状と凹凸

$$\dot{Z}_i(t) = [\dot{Z}_i \dot{Z}_i^T \dot{Y}_i \dot{\theta}_i \dot{\theta}_i^T \dot{Y}_i^T]^T$$

橋梁-車両-路面系の状態変数を X とすると、これは、

$$X(t) = [Y(t) Z^T(t) \cdots Z_n^T(t)]^T \text{-----(7)}$$

で表される。この系は、次の確率微分方程式を満足する。

$$\dot{X}(t) = A X(t) X(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij}(t) \text{-----(8)}$$

ここに、 $F_{ij}(t)$ は、(6)式の右辺の白色雑音より構成される、白色雑音過程ベクトルである。

橋梁の応答として、応答の分散に着目する。平均値回りの変動を考えると、

$$E[Y(x,t)^2] = \Phi(x)^T E[\xi(t) \xi(t)^T] \Phi(x) \text{-----(9)}$$

従って、 $R_X(t) = E[X(t) X(t)^T]$ の解析に帰着する。 $R_X(t)$ の時間的

変化は次の共分散方程式で表される。なお、この共分散方程式は単一車両に対する式である。 n 台の車両については講演当日発表する。

$$\begin{aligned} \dot{R}_X(t) = & A X(t) R_X(t) + R_X(t) A^T + Q_1 X(t) + Q_2 X(t) \\ & + Q_2 X(t) + Q_1 X(t) + Q_2 X(t) + Q_1 X(t) \end{aligned} \text{-----(10)}$$

ここに、 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 は $F_{ij}(t)$ の共分散行列であり、 $\Phi(x,t)$ は、(8)式の状態遷移行列、 $\tau = \lambda_1/\mu$ である。(10)式の Q_1, Q_2 の項は、車軸間の相関を表す項である。簡便法として定常応答を考慮することができる。この場合、(10)式は連立方程式となる。

$$A X R_X + R_X A^T + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 X(t) + \Phi(x,t) Q_1 = 0 \text{-----(11)}$$

3. 数値解析と考察 本研究の解析の対象に11橋梁の諸元と諸元を、図1と表-1に示した。実測および解析に用いたダンプトラックの寸法と諸元を図4と表-2に示した。解析モデルは、図-2のような自由座系モデルである。図-3(A)は実測より得られた路面形状であり、(B)図は凹凸のみを抽出したものである。図から明らかなようにかなりの初期段差がある。図-5は図-3(B)の波形の最大エントロピー法によるパワースペクトル密度である。

図-5は、1台の車両を走行させた場合、 $x=1/4$ 点の動的応答を、解析結果と実測について示したものである。解析結果は路面形状(図-3(A)による応答である。両者はほぼ良い一致を示している。図-6に、車両が2台走行する場合、車頭間隔をパラメータに、各種の解析結果を示した。なお、解析ではいずれも4次の振動次数まで考慮した。非定常応答解析は車両間の相関を無視したものである。定常解析のCase1は、全ての相関を考慮、Case2は車両間の相関を無視したもので非定常応答解析に対応する。Case3は全ての相関を無視したものである。車両間の相関を考慮すると、車頭間隔によつて応答は変動する。定常応答解析は、スパン長が長い橋梁では有効な簡便法になることが確認できた。図-7は、初期段差を考慮したR.M.S.応答である。スパン長の長い橋梁では、初期段差の変位応答に及ぼす影響は小さい。[参考文献] (1)川谷・小松：第35回年次講演会、(2)吉村・平井：土木学会論文報告集101号、(3)岡林：第36回年次講演会。

表-1 橋梁の諸元

項目	単位	値
全長	(m)	113.75
全幅	(m)	10.00
床版厚	(m)	8.00
床版単位重量	(t/m ³)	2.40
床版単位弾性係数	(t/m ²)	7.014
床版単位変位係数	(t/m ²)	43.1 × 10 ⁻³
床版単位変位係数	(t/m ²)	0.02

表-2 車両の諸元

項目	単位	値
総重量	(t)	24.4
ばね定数	(t/m)	96.5
減衰係数	(t·sec/m)	799.1
走行速度	(km/hr)	36

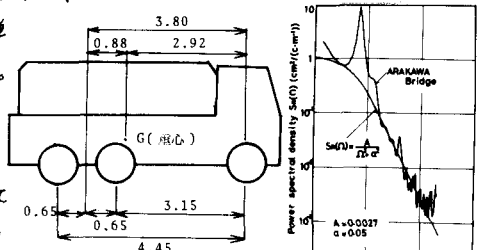


図-4 走行車両の寸法

図-5 路面凹凸のスペクトル

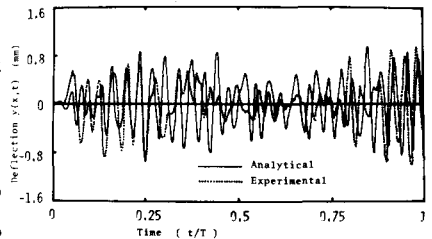


図-5 実測と解析結果(1台走行)

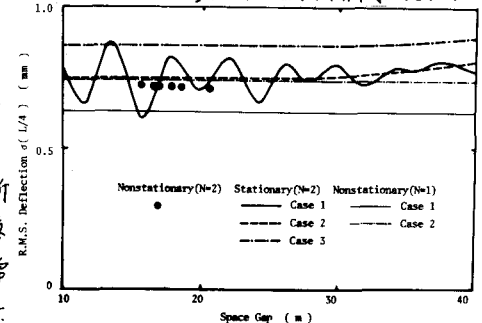


図-6 各種解析による応答の比較

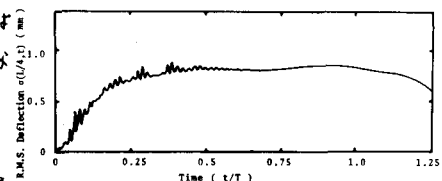


図-7 R.M.S. 変位応答