

東京都立大学 正会員 ○ 長嶋文雄

東京鐵骨橋梁 同 入部孝夫

東京都立大学 同 伊藤文人

1. まえがき 橋梁上を走行する鉄道車両の地震動算のいわゆる非常時荷重に対する走行安全性の検討は橋梁自体の耐震性の検討とあいまって橋梁設計上一つの重要な課題である。この種の振動問題は i) 橋台^{1), 2)}は橋脚(橋端)部付近の軌道狂い、角折れの問題と、ii) 橋桁中間部での車両の走行安全性の二つの問題に大別されると考えられる。後者の問題に対しては種々の車両モデルのシミュレーション解析によって、ある周波数帯の振動に対して車両の走行安定性が低下することが明らかになっている。この結論は車両と橋梁の相互作用による影響は事実上僅かなものであるので、車両の走行シミュレーションと橋梁の振動応答解析は分離独立した扱いが十分可能であるという考え方に基づいたものであるが一般には相互作用による影響度は達成すべき各系の相互の動特性によって定まるので、このような実用的解析法が成立する範囲を明らかにすることも必要であると思われる³⁾。その基礎的な資料とすべく、二軸貨車モデルと単純梁を連成させ、橋軸直角横方向の支持点加振に対する振動応答解析を行なった。

2. 車両モデル 本報告で用いた二軸貨車モデルは図-1に示したように車体、車軸を剛体とみなし、これを減衰付きのバネで連結したもので、自由度は橋動に関する車体の左右動(x_b)、ローリング(ϕ_b)、ヨーイング(ψ_b)と車軸の左右動(x_{wi} , $i=1, 2$)、ヨーイング(ψ_i)の7自由度とした。運動方程式は変位ベクトルを

$$\{X_s\}^T = \{x_b, \psi_b, \phi_b, x_{w1}, x_{w2}, \psi_{w1}, \psi_{w2}\} \quad (1)$$

としてマトリックス表示すれば、式(1)と表-1で与えられる。

$$[M_s]\{\ddot{X}_s\} + [C_s]\{\dot{X}_s\} + [K_s]\{X_s\} = \{F\} \quad (2)$$

ここで外力ベクトル $\{F\}$ は車軸のローリング角変位を ϕ_{wi} 、橋圧を Q_{li} 、トルクを T_{li} として式(3)で示される。

$$\{F\}^T = [0, 0, C_y b^2 (\phi_{w1} + \phi_{w2}) + K_y b^2 (\phi_{w1} + \phi_{w2}), -Q_{1L} + Q_{1R}, -Q_{2L} + Q_{2R}, -T_{w1}, -T_{w2}] \quad (3)$$

また ϕ_{wi} は x_{wi} と軌道中心の変位 x_{RL} の相対変位の変動に対して変化する左右車輪の定常半径の増減により生ずるローリング角変位であり、陰に式(2)の左辺の変位ベクトルを含むものである。 Q_{li} , T_{li} もクリーフ係数、すべり率の変数であり同様なことから、逐次積分を行なう場合には工夫を要する。なお、二蛇行リンク機構に相当する左右バネ K_{xi} はハードスプリング・バイリニア型とした。また諸量については文献1)の値を準用した。

図-2は過渡振動を極力おさえる目的で円滑化した入力波

$$x_{RL} = A(1 - e^{-hw_0 t^2}) \cdot \sin 2\pi f t, \quad i=1, 2 \quad (4)$$

(ここで、 A : 片振幅、 hw_0 : 円滑化定数)に対するシミュレーション結果から得られた走行安全限界線で、輪重 P_L に対する橋圧 Q_L の比すなわち脱輪係数と、 P_L が瞬間的に零になるようなロッキングに關して示したものである。解析的に求めた下におよび上心ローリング

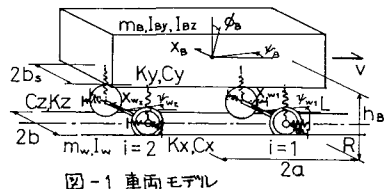


図-1 車両モデル

$$[M_s] = \begin{bmatrix} Z m_b, Z I_{yb}, Z I_{zb}, m_{w1}, m_{w2}, I_{w1}, I_{w2} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{「 } \vdots \text{」: diagonal}$$

$$[C_s] = \begin{bmatrix} 2C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2(\alpha^2 C_x + b^2 C_y) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z h_0 C_x & 0 & 2(h_0^2 C_x + b^2 C_y) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_x & -\alpha C_x & -h_0 C_x & C_x & 0 & 0 & 0 \\ -C_x & \alpha C_x & -h_0 C_x & 0 & C_x & 0 & 0 \\ 0 & -b^2 C_x & 0 & 0 & 0 & b^2 C_x & 0 \\ 0 & -b^2 C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & b^2 C_x \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

$$[K_s] = \begin{bmatrix} K_{x1} + K_{x2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha(K_{x1} - K_{x2}) & \alpha^2(K_{x1} + K_{x2}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_0(K_{x1} + K_{x2}) & \alpha h_0(K_{x1} - K_{x2}) & h_0^2(K_{x1} + K_{x2}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{x1} & -\alpha K_{x1} & -h_0 K_{x1} & K_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ -K_{x2} & \alpha K_{x2} & -h_0 K_{x2} & 0 & K_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & -b^2 K_x & 0 & 0 & 0 & b^2 K_x & 0 \\ 0 & -b^2 K_x & 0 & 0 & 0 & 0 & b^2 K_x \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

表-1 各マトリックス

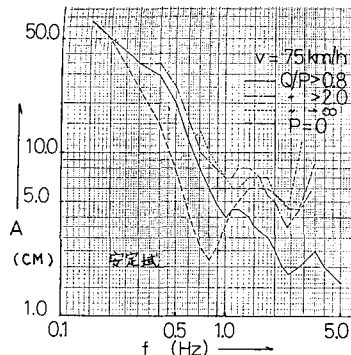


図-2 走行安全限界線

モードに対する固有振動数0.74, 2.25 Hz 付近にそれぞれ限界線の谷が存在している。

3. 連成系の運動方程式 梁の支点が X_0 で加振され、さらに支点から Z_L の点に外力 $F(t, Z_L)$ が作用する場合の梁の弾性変位 X_L は基準関数 X_m と基準座標 ϕ_m を用いて次式から求められる。(図-3参照)

$$\ddot{\phi}_m + 2hm\omega_m\dot{\phi}_m + \omega_m^2\phi_m = \sum_{i=1}^N \{F(t, Z_L)X_m(Z_L)\} / M_m - \beta_m \ddot{X}_0 \quad (5)$$

ここで $m=1, 2, \dots, \infty$, h_m : 減衰定数, ω_m : 固有円振動数, M_m : 換算質量, β_m : 制動係数である。連成系の運動方程式は式(2)と式(5)を下式で連成させることによって得られる。すなわち軌道中心変位は絶対変位で与えるべきであるから式(6)となり、また車両の横圧の異符号が外力として橋梁に作用するので式(7)となる。

$$X_{RL} = X_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(t) \cdot X_m(Z_L) \quad (6), \quad F(t, Z_L) = Q_{L1} - Q_{L2} \quad (7)$$

結局運動方程式は式(8)のようになるが、車軸変位に関する減衰及び剛性マトリックスと外力ベクトルはレールと車輪の接触状態(輪軸と軌道の相対変位が遊間以内であるか否か、あるいは車輪フランジ衝突による小返り変位があるか否か)で変化するため、応答計算の各ステップ毎に各マトリックスとベクトルの組替えをする必要がある。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{s1} & C_{s2} & 0 \\ C_{s3} & C_{s3} & C_{s3} \\ 0 & C_{B1} & C_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_{s1} \\ \dot{X}_{s2} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{s1} & K_{s2} & 0 \\ K_{s3} & K_{s3} & K_{s3} \\ 0 & K_{B1} & K_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{s1} \\ X_{s2} \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_T \\ F_B \end{Bmatrix} \quad (8)$$

上式中、 $\{X_{s1}\}^T = \{X_B, Y_B, \phi_B\}$, $\{X_{s2}\}^T = \{X_{w1}, X_{w2}, Y_{w1}, Y_{w2}\}$ である。

4. シミュレーション結果と考察 応答計算はレンヤ、クワタズを用い、時間刻みは0.004秒とした。図-4は連成系の解析による応答波形を示したものである。輪軸の左右変位に高周波成分があるが、これはレール小返りバネによる影響である。表-2はレール小返りバネ定数を変化させたときの結果であるが、脱線係数の最大値に着目するとレール小返りバネ定数に比例して大きくなっている。輪軸位置の橋梁変位波形は前後輪位置の橋梁の変位が殆んど同位相、同波形であることがわかる。従って車体のヨーイング角も小さいが、これは橋梁の桁中間部を走行する場合の特徴であり、軌道中心は時間的にさきざきに变化しても橋梁が殆んど1次元モード形で振動しているため軌道変位に対しての車輛の進入角が非常に小さいことを意味する。表-3は走行速度を変化させたときの比較をしたものであるが上記の理由から脱線係数の値は殆んど同じであり、速度による変化は小さいと考えられる。図-5は質量比 α (橋梁の車両に対する単位長さ当りの値) を変化させたときの前後輪位置橋梁変位波形を比較したものである。 α が小さくなるに従い相互作用の影響が強くなり、(c)の場合の波形が(a)の場合に比べて乱れがあり、また絶対値も違ってきている。本報告は1車両のみの考察であったが当然のことながら相互作用力が弱く、今後車両数を増し、また各パラメータも実橋に則した値を用いた解析が必要である。

参考文献 1) 松浦・満村 鉄道車両の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度, 土木学会論文報告集 No.291 1979-11. 2) 日本鉄道施設協会 本州四国連絡橋の列車走行に関する研究報告(走行分科会). 3) 長嶋, 伊藤 車両-橋梁構造物連成系の横方向に関する固有値解析, 交通概要集

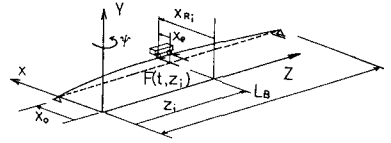


図-3 橋梁モデルと座標系

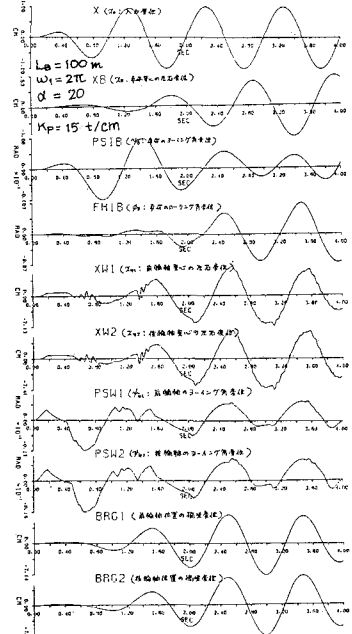


図-4 応答波形例

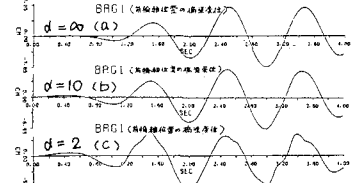


図-5 質量比による比較

A=10cm f=10Hz L _B =100m f _B =3.0Hz				
K _p (N/m)	橋梁の最大変位 (mm)		脱線係数	
	前輪位置	後輪位置	最大値	脱線時間 (0.004s刻み)
50	1.24	1.23	1.17	0.012
30	1.24	1.24	0.78	0.0
<15>	1.39	1.40	0.46	0.0
5	1.17	1.17	0.33	0.0

表-2 K_pによる比較 α=10
A=10cm f=20Hz L_B=100m f_B=3.0Hz

走行速度 (km/h)	橋梁の最大変位 (mm)		脱線係数	
	前輪位置	後輪位置	最大値	脱線時間 (0.004s刻み)
75	2.20	2.23	1.06	0.036
50	2.16	2.16	1.02	0.028
25	1.91	1.82	1.08	0.020

表-3 Vによる比較 α=10