

東京都立大学 正員 伊藤 文人
本田公団 正員 ○平野 茂

1. まえがき 本研究では種々の橋梁形式に適用することができる車両と橋桁の動的相互作用に関する一般的な運動方程式を導き、引き続いて、単純桁および2径間連続桁上を新幹線車両1両が高速(144 km/h ~ 432 km/h)で走行する場合についてシミュレーションを行ない、車両と橋桁の動的挙動を橋桁の衝撃、車両の走行安全性、車両の乗心地の3つの面から検討した。

2. 運動方程式 力学モデルを図-1に示す。車両は2軸ボギー車で、 m , I , δ , C はそれぞれ質量、回転慣性、ばね定数、減衰係数である。橋桁を骨組要素に分割すると中立軸の変位 $y(x, t)$ は次式で与えられることができる。

$$y(x, t) = S(x)Y(t) = S(x)R\varphi(t) \quad (1)$$

ここで、 $S(x)$; shape-function, $Y(t)$; 節点変位, R ; 橋桁の固有ベクトル; $\varphi(t)$; 一般座標である。

P 番目の車両の P 車軸位置を x_{pg} , 初期位置を x_{opg} , 車両速度を v とすると、(2)式の関係がある。

$$x_{pg} = vt + x_{opg} \quad (2)$$

軌道形状 $f(x, t)$ が位置 x のみの関数である軌道の高低狂い $A_R(x)$ と、時々刻々変化する $Y(t)$ によって

$$f(x, t) = T_R(x)Y(t) + A_R(x) \quad (3)$$

で与えられ、車輪がこの軌道上を密着した状態で移動するならば、車輪の変位 z_{wpg} は(1), (2), (3)式より

$$z_{wpg} = f(x_{pg}, t) = T_R(vt + x_{opg})R\varphi(t) + A_R(vt + x_{opg}) \quad (4)$$

となる。車両の変位ベクトル z_{bp} (z_{bp} , θ_{bp} , z_{sp1} , θ_{sp1} , z_{sp2} , θ_{sp2})と一般座標 φ より各車両及び橋桁のポテンシャルエネルギー U_{bp} , U_g , 運動エネルギー T_{bp} , T_g , 散逸関数 F_{bp} , F_g が求まるから、系全体のポテンシャルエネルギー U , 運動エネルギー T , 散逸関数 F は次式で与えられる。

$$U = U_g + \sum U_{bp}, \quad T = T_g + \sum T_{bp}, \quad F = F_g + \sum F_{bp} \quad (5)$$

これをラグランジェの運動方程式に代入すると系全体の運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} M_g & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{z}_{b1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_g & C_{gb1} & \dots & C_{gbP} \\ C_{bg} & C_b & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{bPg} & 0 & \dots & C_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{z}_{b1} \\ \vdots \\ \dot{z}_{bP} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_g & K_{gb1} & \dots & K_{gbP} \\ K_{bg} & K_b & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{bPg} & 0 & \dots & K_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ z_{b1} \\ \vdots \\ z_{bP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_g \\ Q_{b1} \\ \vdots \\ Q_{bP} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、添字 g は橋桁、 b は車両、 P は車両総数を意味する。ところで、各係数マトリックスと外力ベクトルの要素の中で一付いたものは車両位置と共に時々刻々変化する、数値計算ではその都度求め直す必要がある。

3. シミュレーション 表-1の諸元を有する単純桁、2径間連続桁を対象にシミュレーションを行なった。表-1で静的変位 y_{st} , $\bar{y}_{st}$ はそれぞれ車両1両が載荷されたときの下方き、上方きの最大変位を意味する。車両の諸元を表-2に示す。なお、シミュレーションにおいては $A_R(x) = 0$, さらに桁端の角折れによる不都合を取り除くため、桁端部では軌道形状 f が緩急曲線になるように、他の桁区間では桁の中立軸の変位に一致するように $T_R(x)$ を定めた。図-2は単純桁のスパン中央の動的たわみであって、横軸には 1 車軸の通過時間比 x_{w1}/l をとっている。図-3Aは30m+20mの橋桁で、車両が長径間側から進入した場合の1次モードの衝撃係数である。図-3Bは q_{dy} が最大になる x_{w1}/l を示し、各台車の2軸が桁に進入することによ

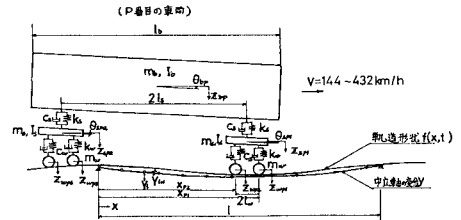


図-1 力学モデル

て生じた橋桁の1次自由振動成分が最大になる近似的な位相条件

$$\frac{\omega_1}{\ell} = \frac{v}{\ell f_{g1}^*} + \left(\frac{\omega_{p1} + \omega_{p2}}{2\ell} \text{ 又は } \frac{\omega_{p3} + \omega_{p4}}{2\ell} \right); \quad p=1 \quad (7)$$

を斜線で表わした。ただし、 f_{g1}^* は車両載荷時の橋桁の平均1次振動数である。図-3Bより η_{dy} の最大値は(7)式の条件に沿って生じ、特に斜線の交点の近傍では前後の台車が橋桁に進入することによって生じた自由振動成分がそれぞれ最大値で重なるため、衝撃係数はピークになっている。このことは他の橋桁についても言えることであって、衝撃係数が変化する様子を良く説明している。図-4に不等径間連続桁(30+20=50m)の各径間中央の衝撃係数を示す。この図より長径間中央の衝撃係数の方が短径間のその値より一般的に大きくなっていること、長径間中央では車両が長径間側より進入する場合の方が衝撃係数が大きいことが見られる。図-5は30m径間中央の衝撃係数を示したもので、 $\alpha_1 = v / (2\ell^* f_{g1}^*) \leq 0.3$ で各橋桁の衝撃係数が良く一致し、 $I_y < \alpha_1$ であることがわかる。ただし $\ell^* = 30\text{m}$ 。次に変位の動的変動幅が静的変動幅よりどれ程大きくなるかを図-6に示す。横軸 $\alpha = v / (\ell^* f_{g1}^*)$ の ℓ^* は連続桁の場合橋長 ℓ 、単純桁の場合 $\ell/2$ とする。この図より、変位の変動幅の増加率の起伏について似た傾向が見られるが、単純桁の値は連続桁の値よりかなり大きくなっている。

車両の走行安全性を検討する尺度として、輪重減少率を考える。輪重減少率の限界値を25%とすると、このシミュレーションで得られた結果(図-7)は十分安全側を示している。最後に乗心地について述べる。JANEWAYの乗心地限度を準用し、車体の応答加速の振動数を $f = v / (m/\text{SEC}) / \ell^*(\text{m})$; $\ell^* = 30\text{m}$ で近似すると、単純桁で $v > 320\text{ km/h}$ の場合、乗心地係数1より悪くなる。(図-8)

参考文献 松浦章夫 「高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究」 土木学会論文報告集 No.256 1976年12月

表-1 橋桁の諸元

橋桁の種類	単純桁	等径間連続桁	不等径間連続桁		
全長 l (m)	30	6.0	5.5	5.0	4.5
径間間隔 l_i (m)	—	3.0	2.5	2.0	1.5
スパン比 l/l_i	—	1/1	5/6	2/3	1/2
動荷重係数 E (kg/cm ²)	8.4×10^8	8.4×10^8	8.4×10^8	8.4×10^8	8.4×10^8
全重量 W (ton)	4.0	8.0	73.3	66.7	6.0
静載率 W_{st} (kg/cm ²)	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
静載率 W_{st} (kg/cm ²)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
1次	4.32	4.32	4.90	5.26	5.53
2次	17.0	6.74	8.49	12.0	17.1
3次	37.6	17.1	18.8	19.9	23.8
4次	—	21.6	27.8	37.6	41.1
車体重量 W_c (kg/cm ²)	4.08	4.14	4.65	4.95	5.15
車体重量 W_c (kg/cm ²)	1.286	1.248	1.195	1.116	1.035
車体重量 W_c (kg/cm ²)	—	1.248	0.638	0.337	0.167
車体重量 W_c (kg/cm ²)	1.286	1.813	1.526	1.344	1.177
車体重量 W_c (kg/cm ²)	—	1.813	1.067	0.639	0.334

表-2 車両の諸元

m/g	36000 kg
kg/g	36000 kg
m/g	3800 kg
kg/g	3800 kg
k _g	900 kg/cm
k _w	2600 kg/cm
c _g	44 kg sec/cm
c _w	40 kg sec/cm
m-g	950 kg
l _g	2500 cm
2l _g	1750 cm
2l _w	250 cm

図-2

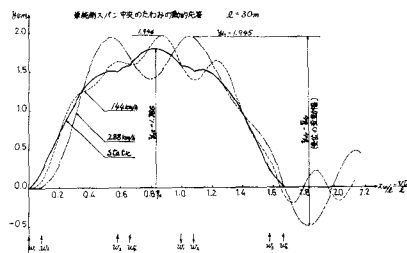


図-3

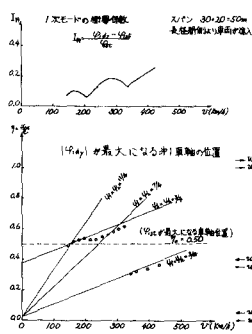


図-4

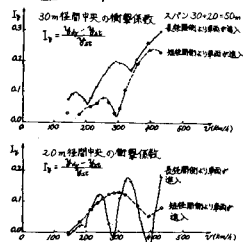


図-7

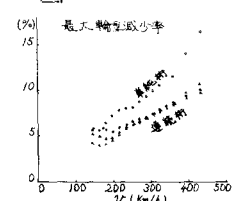


図-8

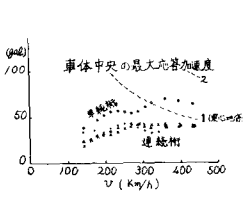


図-5

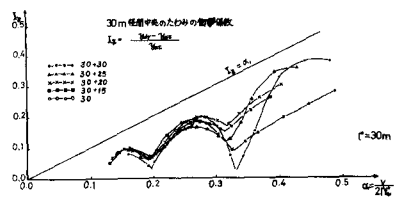


図-6

