疲労設計用衝撃係数に対する車種の影響に関する解析的検討

長崎大学工学部　正会員　　中村聖三　　長崎大学工学部　学生会員　　○杉本辰紀
長崎大学工学部　フェロー　　高橋和雄

1. はじめに

近年，交通量の増大，大型車重量の増加に伴い，鋼道路橋において疲労損傷の発生事例が増大している．道路橋示方書(1)（以下，道示）では疲労も設計時に照査すべき限界状態の 1 つとなり，具体的な照査方法が鋼道路橋の疲労設計指針(2)（以下，指針）に示された．道示における衝撃係数の算定式は，支間長のみの関数として与えられており，指針では道示の値の 1/2 が規定されているが，この値が適切に疲労損傷度に対する動的効果を考慮しているか否かは必ずしも明確ではない．そこで本研究では，単一走行車両による動的応答解析とモンテカルロシミュレーションを組み合わせた疲労設計用衝撃係数算定法により，車両重量を確率変量とした場合の解析を行う．その際，橋梁支間と車種を変化させて，疲労設計用衝撃係数を算出し，指針の規定の妥当性を評価する．

2. 解析方法

2.1　疲労設計用衝撃係数の算定の流れ

疲労設計用衝撃係数の算定の流れを**図-1** に示す．まず，車両重量が対数正規分布に従うものとして，モンテカルロシミュレーションにより車両重量を決定する．車両および橋梁モデルの諸元は確定量とし，あらかじめ設定しておく．次に，車両－橋梁の連成振動系を**図-2** のようにモデル化し，動的応答解析を行う．ここで，荷重作用関数 $\mathbf{b}(vt)$，変位内挿関数 $\mathbf{d}(t)$ の概念を用いると，車両－橋梁系の運動方程式は式(1)から(3)のようになる．これらを Newmark β 法を用いて解く．

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_1(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}_2(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_2 & c_1+c_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{z}}_2(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} k_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_1+k_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1(t) \\ \mathbf{z}_2(t) \end{bmatrix}$$

$$\underset{\mathbf{m}_{v1}}{}\qquad\underset{\mathbf{c}_{v1}}{}\qquad\underset{\mathbf{k}_{v1}}{}$$

$$+\underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -c_2\,\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{e}_{v1}(vt)}\dot{\mathbf{y}}(t)+\underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -k_2\,\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}_{v1}(vt)}\mathbf{y}(t)=\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_2 & c_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}_{v1}}\begin{bmatrix} \mathbf{r}(t) \\ \dot{\mathbf{r}}(t) \end{bmatrix} \qquad \cdots(1)$$

$$\mathbf{M}_b\,\ddot{\mathbf{y}}(t)+(\mathbf{C}_b+c_2\,\mathbf{b}(vt)\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}})\dot{\mathbf{y}}(t)+(\mathbf{K}_b+k_2\,\mathbf{b}(vt)\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}})\mathbf{y}(t)$$

$$+\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -c_2\,\mathbf{b}(vt) \end{bmatrix}}_{\mathbf{e}_b(vt)}\dot{\mathbf{z}}(t)+\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -k_2\,\mathbf{b}(vt) \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}_b(vt)}\mathbf{z}(t)=\underbrace{\mathbf{b}(vt)\begin{bmatrix} -k_2 & -c_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}_b}\mathbf{r}(t) \qquad \cdots(2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & 0 \\ 0 & \mathbf{m}_{v1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}(t) \\ \ddot{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \mathbf{C}_b+c_2\,\mathbf{b}(vt)\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}} & \mathbf{e}_b(vt) \\ \mathbf{e}_{v1}(vt) & \mathbf{c}_{v1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{y}}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} \mathbf{K}_b+k_2\,\mathbf{b}(vt)\mathbf{d}(vt)^{\mathrm{T}} & \mathbf{g}_b(vt) \\ \mathbf{g}_{v1}(vt) & \mathbf{k}_{v1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{y}(t) \\ \mathbf{z}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \mathbf{b}(vt)\mathbf{h}_b \\ \mathbf{h}_{v1} \end{bmatrix}\mathbf{r}(t)+\mathbf{w}_1(t) \qquad \cdots(3)$$

ここに，$\mathbf{z}(t)$：車両の鉛直変位，$\mathbf{y}(t)$：橋梁の鉛直変位，$\mathbf{r}(t)$：路面の凹凸である．解析結果より得られた着目部位の曲げモーメント時刻歴をレインフロー法によって処理し，曲げモーメント範囲の頻度分布を求める．最後に，線形累積被害則を用いて疲労損傷度を算定し，式(4)を用いて衝撃係数を算定する．

$$i_f=\sqrt[3]{\frac{\text{動的に作用させた場合の疲労損傷度}F_d}{\text{静的に作用させた場合の疲労損傷度}F_s}}-1 \qquad \cdots(4)$$

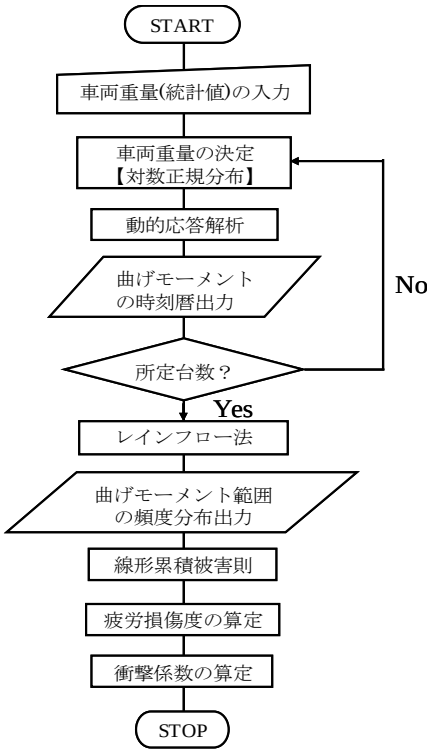

図-1　衝撃係数算定の流れ

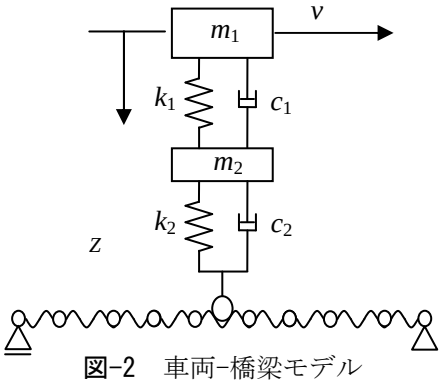

図-2　車両-橋梁モデル

2.2 解析条件

走行車両として大型トラック，中型トラック，大型ダンプを想定した．車両諸元は株式会社日野自動車様から頂いた数値[4] や，文献 3)を参考にし，**表-1** に示すように設定した．橋梁は 2 車線単純合成桁橋を想定した節点数 11 の等断面はりモデルとし，曲げモーメントの着目部位は支間中央とした．橋梁の構造諸元は文献 5)を参考に，**表-2** に示すように設定した．路面凹凸は式(5)に示すパワースペクトル密度 $S(\Omega)$でモデル化する．式(5)のパラメータは文献 6)を参考にし，路面状態をＩＳＯの規格より最も標準的なものを使用し，α=0.077，A=0.025 とする．

$$S(\Omega)=\frac{A}{\Omega^2+\alpha^2} \quad \cdots(5)$$

A：路面の良否を示すパラメータ(cm^2/cycle/m)，Ω：単位長さ当たりの凹凸数(cycle/m)，α：測定結果より決定する定数(cm^2/cycle/m)である．

表-1 車両の構造諸元

	大型トラック	中型トラック	大型ダンプ
ばね上部質量平均値m_1(kg)	14104	5358	16954
ばね下部質量m_2(kg)	2646	832	2666
ばね定数k_1(kN/m)	6098	1864	6701
ばね定数k_2(kN/m)	11898	3637	13075
減衰定数c_1(N/m/s)	20519	7583	24035
減衰定数c_2(N/m/s)	24623	9099	28841
ばね上部固有振動数(Hz)	2.66	2.39	2.55
ばね下部固有振動数(Hz)	12.83	13.06	13.84

表-2 橋梁の構造諸元

支間長(m)	20	30	40
断面積（m^2）	0.6164	0.6584	0.6801
断面 2 次モーメント(m^4)	0.0598	0.1197	0.2344
1 次固有振動数(Hz)	6.23	3.79	2.94
単位体積重量(kg/ m^3)	7852		
ヤング係数(N/m^2)	2.0×10^{11}		

3. 研究結果と考察

本研究によって得られた結果を**表-3** に示す．指針の規定値では支間長の増加に比例し，衝撃係数が減少しているが，本解析結果では逆に増加している．各々の条件の橋梁と車両の平均固有振動数比を**表-4** に示すが，いずれの車種においても支間長の増加に伴い振動数比が 1.0 に近づいている．そのため，本解析結果では支間長の増加により，衝撃係数が大きくなったものと考えられる．

また，道路橋示方書の衝撃係数は動的解析と静的解析の曲げモーメント比の最大値 r_m を考慮して規定されていることから，**表-5** に車種ごとの本研究の衝撃係数 i_f と r_m に基づく指針における衝撃係数$(r_m-1)/2$ を比較して示す．$(r_m-1)/2$ に対して本研究で得られた各衝撃係数 i_f は，全て規定値内に収まっていることから，最大値と疲労設計で考慮すべき衝撃係数の比に着目すると，指針の規定は安全側であると考えられる．

表-3 車両，支間長別の衝撃係数

支間長(m)	20	30	40
大型トラック	0.142	0.165	0.200
中型トラック	0.140	0.119	0.142
大型ダンプ	0.119	0.110	0.121
規定値	0.143	0.125	0.111

表-4 車両と橋梁の平均固有振動数比

支間長(m)	20	30	40
大型トラック	0.43	0.70	0.90
中型トラック	0.38	0.63	0.81
大型ダンプ	0.41	0.67	0.87

4. まとめ

今回の研究では，単一走行車両による動的応答解析とモンテカルロシミュレーションを用いた疲労設計用衝撃係数算定法を提案した．その際，本研究で得られた結果と指針の規定値の比較において，いくつかの条件の車両で規定値を上回る結果が得られた．今後は車両 1 台ごとの固有振動数比と衝撃係数の検討や，異なる橋梁諸元や路面諸元による検討などを実施し，疲労設計用衝撃係数の定式化を図りたいと考える．

表-5 i_f と$(r_m-1)/2$ の比較

支間長(m)	20		30		40	
衝撃係数	i_f	$(r_m-1)/2$	i_f	$(r_m-1)/2$	i_f	$(r_m-1)/2$
大型トラック	0.142	0.466	0.165	0.374	0.200	0.397
中型トラック	0.140	0.314	0.119	0.333	0.142	0.269
大型ダンプ	0.119	0.295	0.110	0.246	0.121	0.315

参考文献

1）日本道路橋会：鋼道路橋の疲労設計指針
2）日本道路協会：道路橋示方書・同解説
3）橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析
4）株式会社日野自動車：各種車両諸元表
5）吉村虎蔵ら：単一走行荷重による道路橋の非定常ランダム応答の解析
6）本田秀行ら：道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査