

単一動荷重に対する応答スペクトルの一考察

金沢大学工学部 正会員 小堀 為雄
 福井工業大学 正会員 梶川 康男

1 まえがき 橋梁の使用性は設計基準の重要な要素である。現行示方書では活荷重によるたわみを制限することによって、車両の安全な走行の保障や歩行者に与える不快感の排除を考えている。また、限界状態設計法においては極限限界状態のほか使用限界状態を考えることによって、ひび割れ・変形・振動などの影響を考慮することになっている。今後、さらに限界状態設計法を進展させるためには安全性と同様に、使用性に関する研究が望まれている。筆者らは使用性のうち、橋梁振動が歩行者に与える影響¹⁾を考えているが、橋梁の動的応答計算は一般に複雑であり直接、設計に用いるには多くの問題点が残るものと思われる。そこで、耐震設計でよく用いられている応答スペクトル図と同様な図表を求めることができれば、動的応答を容易に評価できるものと思われる提案してきた²⁾。本文では、橋面の凹凸と自動車の振動とに対する実験結果を示し、アーチ系・連続系橋梁の応答スペクトルについて述べる。

2 橋面凹凸のスペクトル 路面性状の測定は多くのプロファイルメータあるいは自動車振動からの推定法などが考案され、一般道路に対して行われている。ところが、橋面での測定は皆無に近い。そこで、筆者らは10cm 間隔にレベル測量をし、読み取り値から縦断の放物線勾配を差し引き、スペクトル解析を行った。その結果を図-1に示した。図-1より、橋面の凹凸スペクトルも一般道路と同様に路面周波数と指数関係にあると言える。また、橋面では一般道路ほど短波長の凹凸は少なく、今後の測定は30~50cm 間隔でも十分であろう。

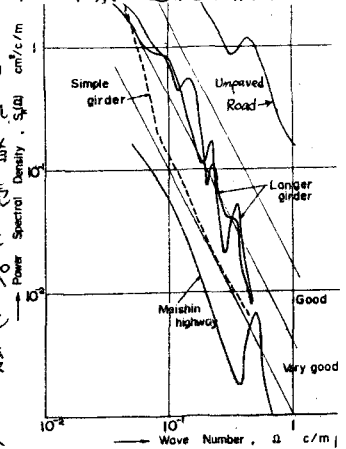


図-1 橋面凹凸のスペクトル

3 自動車の加速度スペクトル 橋梁の動的応答スペクトルを求めるのに、20トンの大型車を2質点系にモデル化した。実際の自動車はさまざまな特性をもっているし、2質点系では十分にモデル化できないことが予想される。そこで、橋面に与える外力をより単純化して有帯域のホワイトノイズスペクトルを仮定した。図-2には、20トンのダンプトラックが平滑な路面を走行したときの懸架部と後車軸における加速度スペクトルを示した。なお、破線は筆者らが20トン車を2質点系にモデル化した車の加速度スペクトルである。ピークの高さは路面性状が異なることもあって、かなり相違があるが周波数特性は大差なく、ほぼ妥当なものであると言える。

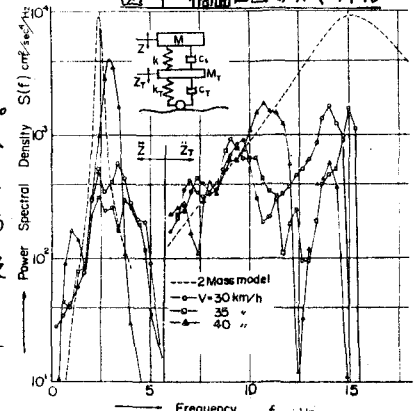


図-2 自動車の加速度スペクトル

4 動的応答スペクトル

振動上の使用限界の発生は、安全性と同様に発生確率で評価する必要があろう。ところが、載荷状態などは橋梁ごとに大いに異なるので現段階としては、図-3のように丁荷重相当の大型車1台が走行したときの動的応答を対象とし、載荷確率などはつぎの段階として考える。橋面の凹凸によって大型車が橋面に与える動的外力を $f(t)$ とし、定常であるとすれば橋梁の運動方程式は各モードごとに

$$\ddot{g}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{g}_n + \omega_n^2 g_n = f(t) \varphi_n(x) \quad (1)$$

が成り立つ。ここで、 $\varphi_n(x)$ は正規化された正規モード $\sqrt{\frac{2}{\rho L}} \sum_{m=1}^M b_{nm} \sin \frac{m\pi x}{L}$ (正規条件 $\sum_{m=1}^M b_{nm}^2 = 1$) で表わされるものとする。そして、 g_n の自己相関関数は外力のパワースペクトル密度を $S_f(\omega)$ とすると、つぎのように表わされる。

$$R_{g_n}(t_1, t_2) = \frac{2}{\rho L \omega_n^2} \int_0^\infty S_f(\omega) \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} e^{-\zeta_n \omega_n (t_1 - \xi_1)} \sin \omega_n (t_1 - \xi_1) \sum_{m=1}^M b_{nm} \sin \frac{m\pi \xi_1}{L} \times e^{-\zeta_n \omega_n (t_2 - \xi_2)} \sin \omega_n (t_2 - \xi_2) \sum_{m=1}^M b_{nm} \sin \frac{m\pi \xi_2}{L} \cos \omega (\xi_1 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 d\omega \quad (2)$$

式(2)において、 t_1, t_2 として荷重が橋梁に載っている時間 (L/V) を考え、いろいろな ω_n について計算した値を応答の乗平均スペクトルと定義する。各形式橋梁の固有振動モード $\Phi_n(x)$ はつぎのように表わされる³⁾⁴⁾。

(A) 単純桁単純トラスの振動、アーチ系橋梁の逆対称振動

$$\Phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (3)$$

(B) アーチ系橋梁の対称振動

$$\Phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho L}} \sum_{m=1,3,5,\dots}^M \frac{1}{m(\omega_{g1}^2 - \omega_n^2)} \sin \frac{m\pi x}{L} \quad (4)$$

ここで、 ω_{g1} は曲げ作用による1次振動数である。

(C) 3径間連続橋 {側径間/中央径間 (l) = a とする}

$$\Phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho(1+2a)l}} \sum_{m=1}^M \frac{D}{m^2 \omega_{g1}^2 - \omega_n^2} \sin \frac{m\pi a}{1+2a} \sin \frac{m\pi x}{(1+2a)l} \quad (5)$$

ここで、 D は対称振動の場合 $1 - \cos m\pi$ 、逆対称振動の場合 $1 + \cos m\pi$ であり、 ω_{g1} は中間支点を除いた単純桁の1次振動数である。以上よりモードが確定するので図4のように応答スペクトル (R_v) が計算される。この R_v を用いて着目点の動的応答の乗平均値は次式にて表わされる。

$$E[\dot{y}^2(L/V, x)] = \left(\frac{2}{\rho L}\right)^2 \sum_n \left\{ R_v \left(\sum_{m=1}^M b_{nm} \sin \frac{m\pi x}{L} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

5 むすび

また、いろいろと問題はあつたが、このような応答スペクトルによって固有値問題と実際の橋梁設計問題とを結びつけることが、今後必要であると思われる。

参考文献 1) 小堀 規川; 橋梁振動の人間学的評価法, 土木学会論文報告集第230号, 1974.10, 2) 小堀 規川; 振動が感覚からみた単一動荷重に対する道路橋の動的応答, 土木学会論文報告集第248号, 1976.4 (登載予定), 3) 吉村 平井, 橋脚アーチおよびつり橋の動的共通解析, 土木学会論文報告集第115号, 1965.3, 4) 平井, 結合法による弾性土を有する連続橋の動的解析, 土木学会論文報告集第104号, 1964.4

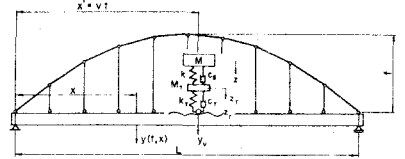


図-3 振動系模型

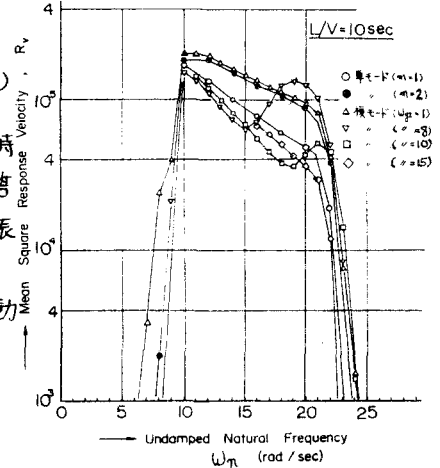


図4(a) アーチ系橋梁の応答スペクトル

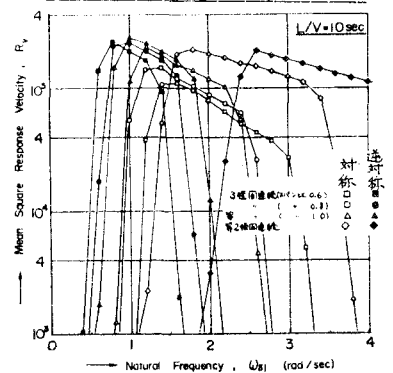


図4(b) 連続橋の応答スペクトル