

歩行者により励起された橋桁水平振動の応答値推定法に関する考察

(株)復建エンジニアリング 正会員 川崎 俊次
 東海大学大学院 学生会員 ○ 辻 匡明, フェロー 中村 俊一

1. はじめに

近年、吊形式橋において歩行者により橋桁が水平振動する現象が相次いで報告されている。T橋¹⁾(日本)、ミレニアム橋²⁾(イギリス)、ソルフェリーノ橋²⁾(フランス)、M橋³⁾(日本)などである。人が歩行する際に重心が左右にふれるため水平力が生じ、これが橋の固有振動数と共振するためである。筆者らは、T橋(図-1,2)およびM橋(図-3,4)において現地振動計測を実施し、振動数・振動モード・振幅を把握している。また、歩行者の水平方向起振力特性を把握するため、被験者を水平振動する加振台上で足踏みさせ、水平反力を測定し起振力を算出している(図-5)⁴⁾。これらの研究をふまえ、本論文では水平振動応答値の推定法を提案する。そして、その推定法をT橋およびM橋の2つの実橋に適用し、実測値と比較検討を行う。

提案式を右に示す¹⁾。式(1)は運動方程式であり、 x_B は桁の水平変位、 \dot{x}_B は桁の速度、 \ddot{x}_B は桁の加速度を表す。 M_B は橋のモード質量、 C_B はモード減衰係数、 K_B はモード剛性である。 F_p は橋上の全歩行者の水平力である。式(2)は外力を表した式であり、 k_1 は歩行者の起振水平力と体重の割合、 k_2 は同調する歩行者の割合を示す。式(3)は歩行ペースを表した式であり、 k_3 は歩行における形状係数を示す。ミレニアム橋では、歩行者起振力は桁の速度に比例して起振力が増加すると仮定した²⁾。しかし、桁の速度が増加すると、歩行者は危険を感じ歩行ペースが落ちる、あるいは歩行を中断すると考えられる。この影響を考慮し、同式を提案した¹⁾。式(4)の $G(f_B)$ は桁の固有振動数である。一般的には、式(1)~(4)は非線形方程式であるために数値計算が必要となるが、Niallはこれらの式を数学的に解いた簡易式を提案している⁵⁾。

$$M_B \ddot{x}_B + C_B \dot{x}_B + K_B x_B = F_p(t) \dots \dots (1)$$

$$F_p(t) = k_1 k_2 H(\dot{x}_B) G(f_B) M_p g \dots \dots (2)$$

$$H(\dot{x}_B) = \frac{\dot{x}_B(t)}{k_3 + |\dot{x}_B(t)|} \dots \dots (3)$$

$$G(f_B) = 1.0 \dots \dots (4)$$

2. 推定法と実測値との比較

図-5より応答値が20mm以下は $k_1=0.08$ 、20mm以上は $k_1=0.1$ とした。過去の研究より多人数が水平振動している桁上を歩行する際、桁に同調する人の割合は約40%であった⁴⁾。また、歩行者個人の位相差が異なるため起振力が小さくなるということを考慮し、 $k_2=0.4 \times 0.5=0.2$ とした。 k_3 は過去の研究より $k_3=0.01$ とした¹⁾。T橋およびM橋の推定値と実測値との比較を表-1に示す。T橋は1種類のデータ、M橋は測定時の歩行者密度分布に変化があるため8種類のデータを比較した。その結果、推定法(数値解析およびNiall簡易式)と実測値の比は0.6-2.0とばらつきが大きかった。その主要因は、歩行者密度および橋の減衰定数の正確な把握が難しかったためと思われる。したがって、今後さらにデータの収集をはかり、精度を向上させる必要がある。

参考文献 1) Nakamura, S.: Model for Lateral Excitation of Footbridges by synchronous Walking, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.130, Issue 1, pp.32-37, 2004. 2) Dallard, P. et al.: The London Millennium Footbridge, The Structural Engineer, Vol.79, No.22, pp.17-35, 2001. 3) 川崎俊次, 中村俊一, 大野克紀: 歩行者により生じた吊橋の水平振動計測, 土木学会論文集, No.777/VI-65, 97-107, 2004. 4) 川崎俊次, 中村俊一, 勝浦啓, 横山薫: 水平振動する床上での歩行時水平起振力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.794/I-72, 281-290, 2005. 5) Niall, R.: Discussion of "Model for Lateral Excitation of Footbridges by Synchronous Walking" by Shun-ichi Nakamura, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, Issue 7, pp. 1150-1152, 2005.

表-1 推定値と実測値の比較表

ケース番号	T-1	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
振動モード	対称1次	対称4次	対称4次	逆対称3次	対称4次	逆対称3次	逆対称3次	逆対称3次	逆対称3次
振動数 (Hz)	0.93	1.025	1.025	0.879	1.025	0.879	0.879	0.879	0.879
歩行者密度 (人/m ²)	0.938	0.044 ~ 0.898	0.014 ~ 1.039	0.051 ~ 0.622	0.133 ~ 0.674	0.061 ~ 0.343	0.038 ~ 0.343	0.024 ~ 0.343	0.076 ~ 0.343
減数定数 h	0.0091	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
k1	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08
k2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
k3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
推定値 (Simulation)(mm)	27.0	59.8	71.0	47.1	42.5	14.6	14.9	11.5	17.9
推定値 (Niall)(mm)	21.4	46.9	55.7	37.3	33.4	11.7	12.0	9.3	14.3
実測値 (mm)	13.3	40.1	41.3	34.8	31.7	14.4	14.8	14.7	26.7
比率 (Simulation)	2.03	1.49	1.72	1.35	1.34	1.01	1.01	0.78	0.67
比率 (Niall)	1.61	1.17	1.35	1.07	1.05	0.81	0.81	0.63	0.54

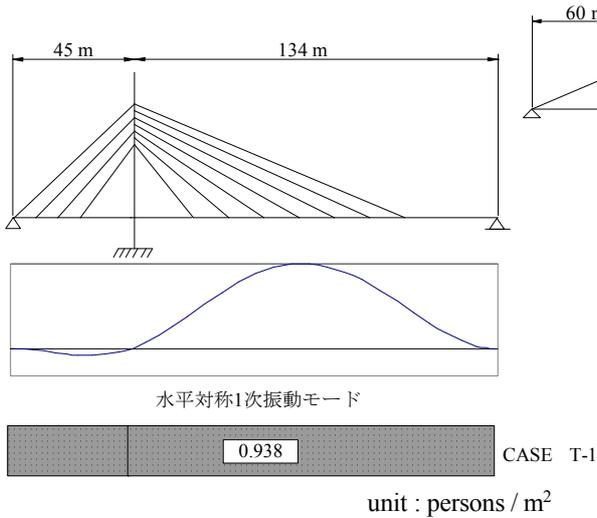


図-1 T橋の振動モードと歩行者密度分布

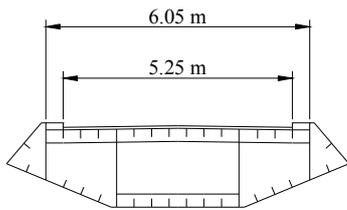


図-2 T橋の桁断面

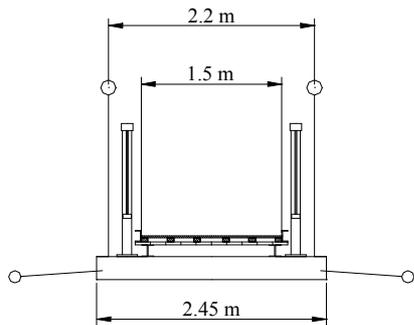


図-4 M橋の桁断面

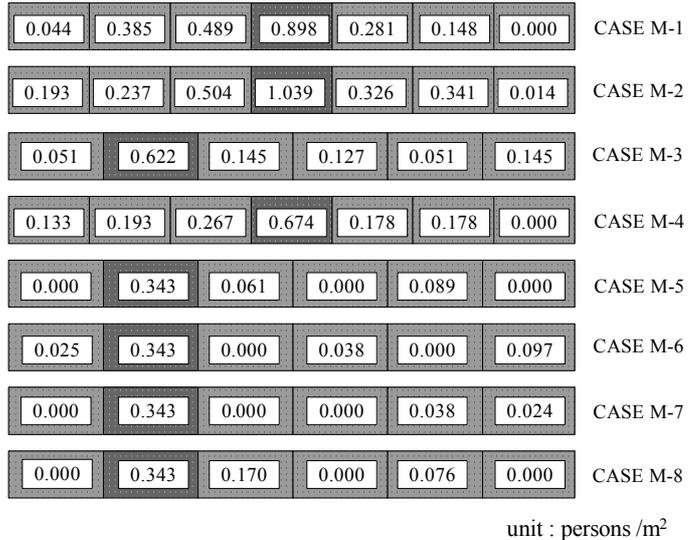
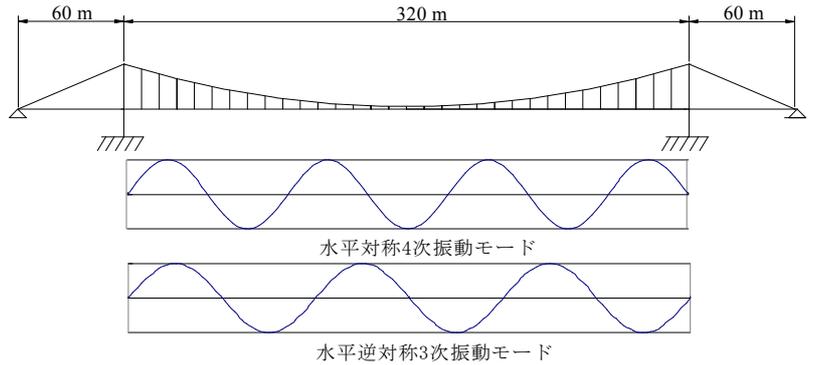


図-3 M橋の振動モードと歩行者密度分布

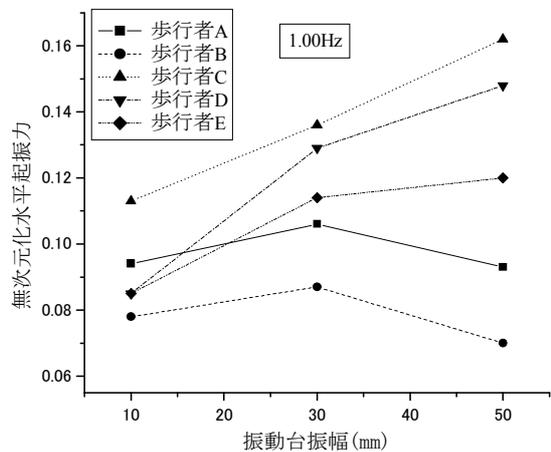


図-5 歩行者の無次元化水平起振力