

人行桥设计中的人体舒适度研究

陈娟婷, 陈素华, 曹菲

(东南大学 建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对中国现行人行桥设计规范对于振动分析的不足, 采用目前国际上推行的限制动力响应法和舒适度指标研究人行桥设计中的人体舒适度, 并采用该方法对某工程实例的振动舒适度进行了评价。

关键词: 桥梁; 人行桥; 动力响应; 振动舒适度

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0115-03

在人行桥不断向大跨、轻柔和纤细化发展的同时, 桥梁振动带给桥上行人不舒适、不安全的感觉得日益成为工程界的突出问题。目前, 国内外规范在人行桥共振问题上的规定基本可归纳为频率调整法和限制动力响应法两种。中国现行人行桥设计规范仅对结构的自振频率作了限制, 要求其不小于 3 Hz, 这一规定过于粗略, 不仅没有交代自振频率是否考虑二期恒载或其上人群荷载, 而且设计仍然停留在许用应力的水准上, 与目前结构设计规范普遍采用的基于概率的设计方法和今后将要进一步发展的基于功能的结构设计方法极不适应。国外有些规范引进了限制动力响应法, 如英国规范 BSI(1978) 和加拿大安大略省规范 OHBDC(1991), 比频率法迈进了一大步。该文采用限制动力响应法来研究人行桥中的人体舒适度问题。

1 限制动力响应法

1.1 动载因子

动力响应分析的关键是如何确定行人动载因子和选用舒适度标准。按照英国规范 BSI(1978), 行人动载因子为 0.257, 但动载因子的选定应分别考虑对应于不同频率范围及明显具有不同强度的 1、2 阶人行谐波特性。因此, 文献[2]在参考英国规范的基础上, 综合研究 1978 年前后的行人荷载试验数据, 建议调整行人动载因子, 按照不同频率段给出动载因子。根据试验结果, 在 1.6~2.4 和 3.2~4.8 Hz 两个行人敏感频率范围内的动载因子分别为 0.36、0.13, 其中具有代表性的试验包括 1977 年的步态机器试验、1986 和 1990 年的三大类 17 m 平台试验、1996 年的 40 组平台试验。最终得到竖向人行荷载计算公式如下:

$$F_{pv}(t) = \begin{cases} 0.36 \times 700 \sin(2\pi f_0 t) & (1.6 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 2.4 \text{ Hz}) \\ 0.13 \times 700 \sin(2\pi f_0 t) & (3.2 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 4.8 \text{ Hz}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中动载因子 0.36 和 0.13 来自文献[2]汇总的几个相关试验研究结果的平均值。侧向人行荷载的计算公式为:

$$F_{pl}(t) = \begin{cases} 0.033 \times 700 \sin(2\pi f_0 t) & (0.8 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 1.2 \text{ Hz}) \\ 0.009 \times 700 \sin(2\pi f_0 t) & (1.6 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 2.4 \text{ Hz}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的动载因子 0.033 和 0.009 来自文献[3]的试验结果。

1.2 舒适度指标

舒适度指标是未引起行人感觉不适的加速度允许值, 一般表示为主频的函数。目前国内外还没有统一的舒适度指标, 但相关标准和规范中有很多类似指标, 如铁路列车的 J aneway 舒适度系数 J (等舒适度评定法)、Sperling 舒适度指标 W_z (平稳性指标评定法)、Diekmann 指标 K、欧洲 ECCS 规范指标、ISO 10137 规范指标、中国列车车体加速度指标及一些国家的船舶舒适度标准等。其中 ISO 10137 为国际性通用标准, 具有代表性, 一些国家的规范将其修正后作为人行桥振动的使用性指标。BS 6472 (1984) 就是在 ISO 基础上提出的相对简洁的评价体系, 其中振动剂量值 VDV 和振动加速度均方根值 a_{rms} 的关系见表 1。根据该规范, 在建筑物中, 不管振动时间有多长, 如果竖向振动的 VDV 值低于 0.2~0.4, 则住户发生抱怨的可能性很小; VDV 值达到 0.4~0.8 时, 住户就可能发生抱怨; 如果 VDV 值超过 0.8, 则发生抱怨的人数会相当多(见表 2)。

表1 振动剂量值 VDV 和振动加速度均方根值 a_{rms} 的关系

乘数	X、Y 轴振动		Z 轴振动	
	$a_{rms}/$	VDV/	$a_{rms}/$	VDV/
	($m \cdot s^{-2}$)	($m \cdot s^{-1.75}$)	($m \cdot s^{-2}$)	($m \cdot s^{-1.75}$)
1.0	0.003 6	0.078	0.005 0	0.108
1.4	0.005 0	0.108	0.007 0	0.152
2.0	0.007 2	0.156	0.010 0	0.217
4.0	0.014 4	0.312	0.020 0	0.434
8.0	0.028 8	0.625	0.040 0	0.868
12.0	0.043 2	0.938	0.060 0	1.302
16.0	0.057 6	1.251	0.080 0	1.736
20.0	0.072 0	1.564	0.100 0	2.170
24.0	0.086 4	1.877	0.120 0	2.604
28.0	0.100 8	2.190	0.140 0	3.038
36.0	0.129 6	2.816	0.180 0	3.906

表2 不同区域可接受的振动剂量值 VDV

地点	VDV 值		
	抱怨可能性低	可能出现抱怨	出现抱怨
苛刻工作环境	0.1	0.2	0.4
住户	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1.6
办公室	0.4	0.8	1.6
车间	0.8	1.6	3.2

2 工程实例

2.1 工程概况

某跨径 60 m、使用宽度 7 m 的人行桥,出于景观考虑,桥梁结构刚度在横向分配上不均匀(见图 1、图 2)。主拱肋为 1 000 mm×1 000 mm×24 mm×24 mm 焊接箱形断面,系杆 1 为 1 200 mm×1 000 mm×20 mm×20 mm 焊接箱形断面(内灌砼压重),系杆 2 为 1 200 mm×800 mm×20 mm×20 mm 焊接箱形断面(内设体外预应力钢绞线)。经初步计算,结构的竖向刚度较小,拱肋的横向位移、系杆 2 的竖向挠度需通过张拉钢绞线和拱肋上的吊杆

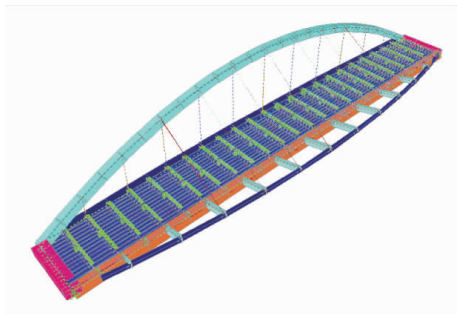


图1 某人行桥结构有限元分析模型

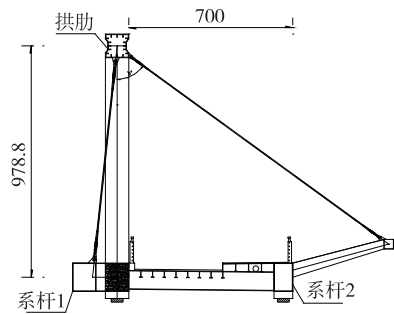


图2 某人行桥的横断面(单位:mm)

才能得以控制,但预应力的施加并不能改变结构的动力特性,结构过柔导致振动频率过小的问题仍然存在。表3和图3分别为结构的自振频率和振型。

表3 某人行桥结构的固有频率

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
1	1.654 0	7	6.217 7
2	1.872 7	8	6.663 6
3	2.679 9	9	6.937 6
4	4.212 0	10	7.786 4
5	4.329 9	11	9.049 1
6	4.678 3	12	10.216 0

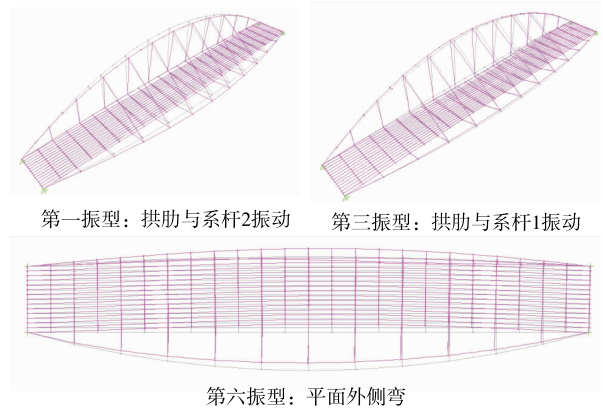


图3 某人行桥结构的自振振型

2.2 振动舒适度评价

根据上述计算结果,该人行桥结构的一阶竖弯主要为第一和第三振型,一阶侧弯主要为第六振型。规范只对竖弯的振动频率加以限制,而侧弯并未提及。经过比对,第一、第三振型的振动频率均不满足规范要求,而按照动力响应法,结构的第三振型、第六振型频率不在人体竖向振动敏感频率范围,因而仅需对第一振型进行验算。下面通过弹性时程分析计算结构竖向振动的动力响应,验算结构是否满足人体舒适度指标要求。

行人正常行走的速率为 1.6 m/s,则桥上人的

行走安全距离为 1 m(纵横向),推算出该桥上可同时存在 427 人。按照式(1),动载因子取 0.36,可得桥梁各监测点的加速度响应的最大值(见图 4、图 5)。按照表 2 可得振动剂量 VDV ,桥梁上静止或行走状态的人基本上与表 3 中办公室的状态类似。各监测点的舒适度指标计算结果见表 4。

根据表 4,人群仅在四分点内侧对该桥梁结构的振动发生抱怨的可能性稍大。但由于该区域为非

表 4 各监测点舒适度指标计算结果

位置	监测点	$a_{rms}/$ ($m \cdot s^{-2}$)	$VDV/$ ($m \cdot s^{-1.75}$)	用户评价
跨中	外侧	0.006 1	0.128	抱怨可能性低
	内侧	0.011 2	0.243	抱怨可能性低
1/4 跨	外侧	0.013 4	0.291	抱怨可能性低
	内侧	0.028 0	0.608	可能抱怨

机动车行驶区,实际使用中不会出现抱怨行为。综上所述,该桥梁结构的人体舒适度指标较好。

3 结语

国内有些人行桥由于造型特异,按照国内规范,其自振周期往往不能满足要求;而利用国外规范中相对成熟的限制动力响应法,其结构舒适度在可接受范围。中国规范中的频率限制在某些工程中偏于保守,建议在设计数据超规范时,采用限制动力响应法作进一步分析。上述对某人行桥舒适度的评定是基于理论分析得出的结果,还需与实桥实测结果加以对比,以便更好地指导后续设计。

参考文献:

[1] 孙利民,闫兴非.人行桥人行激励振动及设计方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(8).

[2] Pimentel R L,Pavic A,Waldron P.Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking[J].Canadian Journal of Civil Engineering,2001,28.

[3] Fujino Y,Packeco B M,Nakamura S I,et al.Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1993,22.

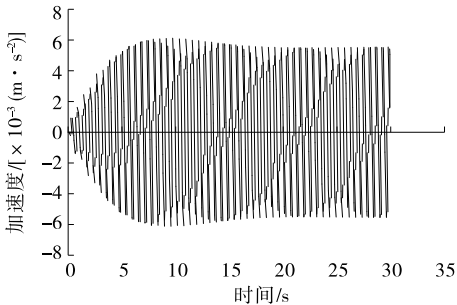
[4] British Standard 6472,Guide to the evaluation of human exposure to vibration in building[S].

[5] 肖学双,张涛,五定一.人行激励下钢结构人行桥减振研究[J].公路与汽运,2009(4).

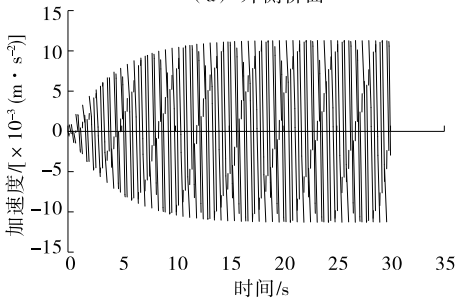
[6] 金飞飞.轻质 FRP 人行桥振动舒适度设计方法研究[D].北京:清华大学,2012.

[7] 陈璞.人行桥振动舒适度的设计与评价理论研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[8] 樊健生,陈宇,聂建国.人行桥的 TMD 减振优化设计研究[J].工程力学,2012,29(9).

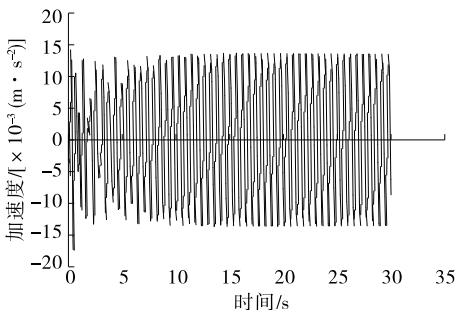


(a) 外侧桥面

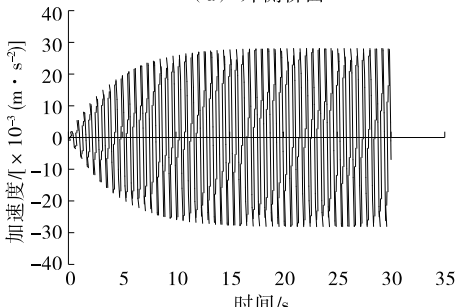


(b) 内侧桥面

图 4 桥梁跨中加速度响应时程曲线



(a) 外侧桥面



(b) 内侧桥面

图 5 桥梁 1/4 跨处加速度响应时程曲线