风荷载下人行桥行人舒适性的分析

王义超1，何向东2，王毅3，戴建国4，李永乐5

(1．西南交通大学土木工程学院，四川 成都 610031；2．西南交通大学土木工程学院，四川 成都 610031；3. 上海市政工程设计研究总院，上海 200000；4. 上海市政工程设计研究总院，上海 200000；5．西南交通大学土木工程学院，四川 成都 610031)

摘要：采用有限元瞬态动力响应分析方法，对某人行桥在脉动风荷载作用下、以不同人群密度循环过桥时的行人舒适性进行了详细的对比研究。分析时考虑了在循环过桥荷载模式下、不同风速及不同人群密度对行人舒适性的影响。结果表明：在所取循环过桥荷载模式下、该桥的行人舒适性，在较低风速下，主要由行循环过桥的人群密度控制；而当风速较高时，则主要由脉动风速的大小控制。同时，该桥钢主梁段的加速度响应要远大于混凝土梁段的响应，而混凝土梁段的横向振动对人群荷载的响应更为敏感。

关键词：有限元；瞬态动力响应；人行荷载；脉动风；行人舒适性

中图分类号：U 441.3 文献标志码：A

**Comfort Analysis of Pedestrians Passing by Footbridge under Wind Load**

Wang Yichao，He Xiangdong，Wang Yi，Dai Jianguo，LI Yongle

(School of Civil Engineering，Southwest Jiaotong University，Chengdu 610031，China)

**Abstract:** Using the finite element transient dynamic response analysis method, the pedestrian comfort of a pedestrian bridge under pulsating wind load was studied and analyzed. The analysis takes into account the effect of cyclic bridge load patterns on pedestrian comfort at different wind speeds and different crowd densities. The results show that the pedestrian comfort of the bridge is mainly controlled by the density of people crossing the bridge at lower wind speeds; when the wind speed is higher, it is mainly controlled by the magnitude of the pulsating wind speed. At the same time, the response of the steel main beam section of the bridge is much greater than the response of the concrete beam section, and the response of the concrete beam section to lateral vibration is more sensitive to crowd loads.

0 引言

随着城市化进程的加速，人行桥梁的设计与建造技术也获得了不断的发展。由于材料的进步，新型的人行桥，除了结构日趋新颖美观之外，还逐渐呈现轻、柔的特点。因此，人行桥的动力响应显得非常重要，与行人舒适度直接相关的主梁竖向与横向加速度的大小，往往成为设计的控制因素之一。

通常，人行桥所受荷载主要来自于行人，而行人荷载对人行桥的作用又可分为静力和动力荷载两种模式。其中，静力效应主要由行人自重所致使，而行人各种有节奏的运动（如步行、跳跃、跑步等）所产生的动荷载，则会引起桥梁结构的相应振动，即所谓人致振动。在某些情况下，人致振动响应可能较为显著，使得人们在进行人行桥的设计与建造时，不能不对其在人致振动下的安全性及行人舒适性进行分析，以探求对于行人舒适性合理评估的适当方法与标准。

历史上，人行桥因人行荷载作用而破坏的例子屡见不鲜。例如，1831年，英国的Broughton桥就曾因士兵们齐步通过时所诱发的剧烈振动而垮塌；此后尚有法国的Angers桥，同样也是在军队队列过桥时、因发生谐振而垮塌。由此可见，桥上人群的同步运动，很有可能引起桥梁的显著共振。日本学者Fujino[1]最早采用直接共振理论、研究了日本户田公园大桥的横向振动，并对该桥采取了相应的减振措施；鉴于伦敦千禧桥在行人作用下产生的大幅一阶侧向振动很难用直接振动法解释，Dallard等[2]根据该桥现场的实测数据、经过反演分析而得到人、桥相互作用的力的模型，并由此模型导出了该桥按模态的、横向动力稳定的判据，进而可导出临界行人数公式；随后，同样基于人桥相互作用理论，日本学者Nakamura[3]提出了模态共振激振力模型，以考虑同步现象的自我限制特征来完善Dallard模型[2]在此方面的不足；陈政清和刘光栋[4]介绍了人行桥的人致振动理论及动力设计方法，重点阐述了人行桥大幅横向振动分析的主要理论，并以国内某曲线人行斜拉桥为例，介绍了人行桥动力设计的整个过程；关山月[5]等研究了行人质量在不同人流密度下的对横向共振的扰度；何勇[6]等研究了多跨人行桥的均方根加速度响应谱法，袁许斌[7]等研究了人行桥的人致振动特性。

尽管为了避免类似千禧桥等垮塌的灾难重现，此后的人行桥，均已禁止人群再以类似齐步走的方式过桥。但由于现代人行桥桥的轻、柔特性，同时，在海滨城市的人行桥还会受到较大的风荷载，因此，研究在脉动风荷载作用下的行人舒适性，已具有相当的必要性与重要性。

目前对于行人舒适性的分析主要采用数值模拟法或现场试验法。在主梁上的不同位置设置加速度传感器并使不同的人数通过桥梁可以测得随机人群下的桥梁的最大加速度。由于现场试验法难以得到桥梁临界破坏情况，且受诸多现场条件限制，因此，通常采用数值模拟法、对人群过桥时的行人舒适性进行分析研究。

对于海滨人行桥而言，其所受的风荷载效应不可低估。在研究此类人行桥的行人舒适性时，有必要考虑脉动风的动力效应。而现有的研究中对风-人共同作用下的舒适性分析还较少。杨赐[8]等在颤抖振基础上叠加人群荷载研究悬索桥的动力响应，吴桂楠[9]等研究了景观悬索桥在风-人-桥共同作用的步行参数以及气动参数。本文详细研究了脉动风与人群密度对某海滨人行斜拉桥行人舒适性的影响。

在工程实践中，通常采用”结构一阶平动频率需大于3Hz”的标准控制人行桥的行人舒适性，但是由此往往导致桥梁材料使用率的降低。同时，根据国外相关规范，即使一阶平动频率大于3Hz，人行桥也会因发生二阶共振而造成破坏。

本文采用ANSYS软件，对方案桥在不同工况脉动风及不同人群密度行人过桥时行人舒适性进行了详细研究。

1工程背景

研究的工程背景是是一座主桥跨度169m（具体跨径布置为99m（薄壁钢箱梁）+（40+30）m预应力混凝土薄壁箱梁）的中央单索面、独塔、混合梁斜拉桥，塔高55m；钢箱梁与预应力混凝土箱梁即以该塔为分界。为增加预应力混凝土梁段的竖向刚度，在40m与30m预应力混凝土薄壁箱梁的连接处，设有一座2号辅助墩。

方案桥的结构简图如图1所示。



图1 斜拉桥结构简图 (单位: mm)

Fig. 1 Structure of cable-stayed bridge (unit: mm)

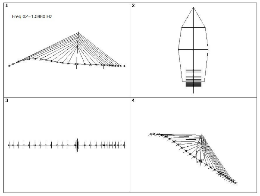
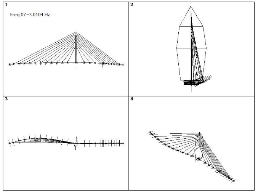
由动力特性分析得到的该桥的一阶竖弯频率为1.088Hz一阶横弯频率为2.6016Hz，相应的振型图如图2所示。 

图2 方案桥的一阶竖弯及横弯振型

Fig. 2 First-order vertical bending mode of bridge (f=1.088Hz)

2 人行荷载以及风荷载的确定

单人动荷载是研究人行荷载的基础。Andriacchi等[10]利用测力板进一步测量了单人荷载在竖向、侧向及纵向等三个方向上的分量、得到的典型单步荷载的三分量时程曲线如图3所示。该图表明：竖向力分量有两个波峰和一个波谷，波峰分别对应脚跟落地和脚尖离地两个时刻，单人荷载这一特征为后来众多研究者所证实并广泛采用。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

图3 正常行走时单步力的三分量

Fig. 3 Three components of one-step force during normal walking

Matsumoto[11]通过大量的落步实验统计出人行走时的落步规律，结果表明：行人的步频符合N（2，0.173）的正态分布。Bachmann[12]则认为正常行走的步频平均值为2Hz，标准差约为0.18Hz。Kerr和Bisshop[13]对40个人统计后得到的频率在2Hz左右，即在1.7~2.3Hz之间。众多学者对步行力的大量研究成果表明：行人激励在竖向和水平向引起的动力荷载基本是呈周期性的，而且行人产生的激励力随着步频的增加而逐步增大。基于此现象，可采用傅立叶级数表达行人激励产生的竖向、横向荷载。

本文采用孙利民等[6]给出的人行荷载计算公式，并采用陈政清等[14]测定的步频和步长，即取*f*v为步频*f*p所得人行动荷载如下：

其中：分别为行人的竖向力以及横向力。

基于上述研究，有MatLab按照所需人数、生成不同的人群荷载序列，然后加载到桥梁模型以模拟人群通过桥梁时的行人荷载。在具体模拟人群过桥的行人荷载时程时，采取了以下循环加载模式：人群从-100m处开始上桥，当有人行荷载在另一端出桥时，将有一个与之重量、相位，步频相同的人行荷载从-100m处（即主梁左端）上桥。

由于方案桥主梁高差变化很小，故在风场模拟时假定脉动风场仅沿跨度方向变化，而不考虑高度不同的影响。将主梁从左到右等间隔（10m）分布18个风速模拟点。采用西南交通大学自主研究开发的桥梁科研分析软件BANSYS（Bridge ANalysis SYStem）进行脉动风速场的模拟。横桥向脉动风的模拟采用如下常用的Simiu谱：

18个主梁风场模拟点沿主跨长度均匀分布，模拟点间距6m，故第9个（自左而右）主梁风场模拟点近似位于钢箱梁段的跨中位置。

图4为主梁第9个风速模拟点的横桥向脉动风速时程及功率谱。该图表明，所模拟的主梁脉动风场，与目标谱吻合良好。

作用于主梁的脉动风荷载，则采用基于Davenport准定常抖振力模型。



图4 主梁第9个风速模拟点的脉动风速时程及功率谱

Fig. 4 Time history and power spectrum of fluctuating wind speed at the 9th wind speed simulation point of the main beam

3计算结果及分析

目前国内尚无确定的关于人行桥的舒适性评价标准，仅在《公路桥梁抗风设计规范》JTG∕T 3360-01-2018[15]中8.5.1项的规定：在W1（10年重现期）风作用水平及以下风速范围内，有行人通行功能的桥梁抖振或涡激共振引起的竖向加速度峰值不宜超过1.1m/s2，横向加速度峰值不宜超过0.5m/s2。

本文即基于上述标准，对方案桥在所设定的不同荷载工况下的行人舒适性进行分析、评估。

结合方案桥桥址风环境及行人可以承受的风速，分别选取了5m/s、10m/s、15m/s以及17m/s风速下（虑及8级大风时、人行桥应关闭或仅有极少数行人，故以17m/s风速为计算上限），以1人/m2人群密度循环过桥（据此密度、方案桥上行人数为1700人），即工况一，以及在10m/s的风速下下，以1人/m2、4人/m2、6人/m2的人群密度循环过桥，即工况二的两组计算工况，对方案桥的行人舒适性进行分析与评估。

图5为工况一下方案桥的主梁竖向及横向加速度峰值。



（a）主梁各节点竖向加速度峰值



（b）主梁各节点横向加速度峰值

图5 工况一下主梁各节点加速度响应 (单位: m/s2)

Fig. 5 Acceleration response of each node of the main beam when 1 person /m2crossing the bridge (unit: m/s2)

由于行人舒适性评估的主要标准在于主梁的平动加速度封值，表1给出了工况一下方案桥主梁具体的加速度峰值。

由图5可知，在工况一下，随着风速的增加，桥梁的最大加速度响应也相应增加，但是风速较低时，钢梁段竖向加速度的响应增加不大；当风速较大时，其竖向加速度峰值明显增大。同时，钢梁段的主梁横向加速度峰值随着风速的增加而呈非线性趋势增加，而对于混凝土梁段而言，不同的风速对其横向加速度影响较大，对竖向加速度几乎没有影响。

表1 四种风速下、1700人循环过桥时桥梁加速度响应最大值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 风速m/s | 竖向加速度m/ s2 | 横向加速度m/ s2 |
| 5.0 | 0.0797 | 0.0130 |
| 10.0 | 0.0899 | 0.0508 |
| 15.0 | 0.1754 | 0.1137 |
| 17.0 | 0.2499 | 0.1531 |

由表1可知，方案桥在工况一下能满足文献【15】所要求的行人舒适性标准。

图6为工况二下方案桥的主梁竖向及横向加速度峰值。

表2则列出了工况二下方案桥主梁具体的加速度峰值。



（a）主梁各节点竖向加速度峰值



（b）主梁各节点横向加速度峰值

图6 工况二下主梁各节点加速度响应 (单位: m/s2)

Fig.6 Acceleration response of each node of the main beam with 10m / s (unit: m/s2)

表2 10m/s风速不同密度人群过桥时桥梁加速度响应最大值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 密度人/ m2 | 竖向加速度m/ s2 | 横向加速度m/ s2 |
| 1.0 | 0.0899 | 0.0508 |
| 4.0 | 0.1307 | 0.0504 |
| 6.0 | 0.1525 | 0.0529 |

由表31可知，方案桥在工况二下也能满足文献【15】所要求的行人舒适性标准。

从图6可知，在工况二，随着风速的增加，主梁加速度峰值也相应增加，但是加速度峰值的增加趋势，随着人数的增加而变缓，同时，混凝土梁段主梁加速度峰值明显小于钢梁段者。另外，钢梁段主梁段的横向加速度响应几乎没有变化，说明此时，钢梁段的响应主要由到风荷载控制，而桥梁混凝土梁段的横向加速度响应则随着人群的增加有明显的的增加，人数越多时，这种效应也会越加明显。

4 结论

通过对人行桥在风和行人共同作用下的舒适性研究，可得出结论如下:

（1）相比于混凝土梁段，钢梁段主梁的横向与竖向动力响应更加明显；

（2）受风速的影响，相同的人群荷载过桥时，风速越大，桥梁钢梁段的抖振响应越加明显，而且，风速越大时，桥梁的加速度响应峰值也增加越快。而混凝土梁段基本没有变化。同时可以看到，风速越大时，主梁的振动响应越由抖振因素决定，加速度响应图形类似于抖振响应的单峰图形。因此，在较高风速下，行人通过桥梁的舒适性更急速下降，应在大风速下设置警告；

（3）10m/s风速下，不同的人群密度循环过桥时，人群荷载对桥梁的动力响应更加明显，桥梁的动力响应图更类似于人群荷载的双峰图形。同时也可以看到，随着人群荷载的增加，钢梁段桥梁的竖向加速度增量明显减小，而混凝土梁段加速度变化较小，而横向加速度来说，混凝土梁段的横向振动增加更加明显。由于行人对于横向振动比较明显，因此，也需要设置行人通行数量；

（4）方案桥的基频虽然小于3Hz，但在所设定的两组不同工况下，其行人舒适性仍然满足工程需求。

参考文献:

[1] Fujino Y, Pacheco B M, Nakamura S, et al. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993,22(9):741-758.

[2] Dallard P, Fitzpatrick T, Flint A, et al. London Millennium bridge: Pedestrian-induced lateral vibration[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001,6(6):412-417.

[3] Nakamura S, Kawasaki T. Lateral vibration of footbridges by synchronous walking[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006,62(11):1148-1160.

[4] 陈政清, 刘光栋. 人行桥的人致振动理论与动力设计[J]. 工程力学, 2009(S2):148-159.

[5]关山月.大跨度人行桥的人致振动分析与设计方

法[J].防灾减灾工程学报,2010,30(S1):106-110.

[6]何勇,金伟良,宋志刚.多跨人行桥振动均方根加速度响应谱法[J].浙江大学学报(工学版),2008(01):48-53.

[7] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 同济大学, 2006.

[8]杨赐. 风与人群荷载共同作用下人行悬索桥的振动响应[D].长安大学,2018.

[9]吴桂楠. 风-人-桥系统的步行参数与气动参数研究[D].长安大学,2019.

[10] Andriacchi T P, Ogle J A, Galante J O. Walking speed as a basis for normal and abnormal gait measurements[J]. Journal of Biomechanics, 1977,10:261-268.

[11] Matsumoto Y, Nishioka T, Shiojiri H, et al. Dynamic design of footbridges, No. P-17/78[R].1978.

[12] Bachmann H, Ammann W, Deischl F, et al. Vibration problems in structures: Practical guidelines[M]. Birkhäuser Basel, 1994.

[13] Kerr S, Bishop N. Human induced loading on flexible staircases[J]. Engineering Structures, 2001,23(1):37-45.

[14]陈政清，华旭刚，人行桥的振动与动力设计，北京：人民交通出版社，2009

[15] JTG/T 3360-01-2018，公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京：人民交通出版社，2018