

非结构因素对钢-玻璃组合人行结构 模态参数的影响

朱前坤, 马法荣, 张 琼, 杜永峰

(兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于模型现场试验测试, 研究了环境温度与运营环境状态(附加质量、行人步行频率)等非结构因素对钢-玻璃组合人行结构模态参数的影响; 建立了温度与结构模态参数之间的数学模型, 分析了附加质量与行人步行频率对结构模态参数的影响规律。结果表明: 一天内温度变化引起的结构模态频率变化可达 2.17%, 阻尼比变化达 87.1%, 同时给出了前 3 阶竖向模态频率关于温度变化的一次线性拟合表达式; 附加质量作用下由结构端部到跨中, 结构模态频率逐渐减小, 阻尼比逐渐增加, 且随着附加质量的增加模态频率降低, 阻尼比显著增大; 由大量试验数据统计规律可知行人作用下步频对结构模态频率影响较小, 结构频率略有减小, 模态阻尼比显著增加。因此分析非结构因素对结构模态参数的影响对结构健康检测和损伤识别具有重要意义。

关键词: 钢-玻璃组合人行结构; 模态参数; 环境温度; 附加质量; 行人步频

中图分类号: TU311.3; TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)06-1133-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.06.004

引 言

近年来, 随着旅游产业的高速发展以及人们对结构审美的提高, 钢-玻璃组合人行结构大量涌现。如张家界玻璃人行桥、临夏大墩峡玻璃人行桥、河北白石山玻璃栈道、上海环球金融中心观光厅等; 此类结构具有轻质、低频、弱阻尼的特性, 其动力特性更易受环境因素和运营状态^[1-2]的影响, 如温度、湿度、静态人群附加质量、行人步行频率等。模态参数^[3-5]是桥梁振动控制^[6-7]、状态检测、健康评估^[8]以及结构系统的振动特性分析^[9-10]等研究和应用中最常用的动力学参数。同时模态分析也可以评价现有结构系统的动态特性。不准确的模态参数在损伤识别和模型修正时将会带来很大的误差, 甚至是错误, 因此模态参数中的非结构因素必须予以剔除。

研究表明, 非结构因素引起的结构模态参数变化可以超过结构损伤引起的变化, 甚至会误导结构健康状态评估。Farrar 等^[11]对一座钢结构大桥长期监测, 其结果表明: 该桥 1 阶模态频率昼夜变化的幅度可达 5%。Roberts 和 Pearson^[12]对一座 9 跨 840 m 长的桥梁进行长期监测, 发现一年中日常环境变化引起的模态频率变化达到 3%-4%。Doebeling 等^[13]对新墨西哥州一座桥梁进行研究发现: 基频在一天内变化了 5% 的主要原因为桥面板温度变化。Xia

等^[14]对一块两跨钢筋混凝土连续板进行 2 年多的监测, 发现温度每上升 1 °C, 特征频率下降 0.2%, 湿度每上升 1 度, 特征频率下降 0.03%。文献[15]表明静态人群作用下会减小结构的 1 阶自振频率。Setareh 等^[16]讨论了非结构构件参与计算后, 楼盖振动频率的变化。王益利等^[17]在考虑附加质量的中心刚体-柔性梁系统的动力学特性研究中讨论了附加质量对系统的固有频率与振型的影响。刘浩等^[18]研究了桥面板厚对斜拉人行桥前 10 阶频率的影响。赵峰等^[19]在附加质量对结构模态影响实验研究中, 分析得出附加质量可使前 3 阶模态频率发生 10 Hz 以上的改变, 改变的相对幅值可达到 12%; 附加质量越大, 模态频率降低程度越大。Ohlsson^[20]提出用考虑阻尼的质量弹簧体系模拟留驻结构上的人体模型, 该模型能够反映结构由于人群留驻导致频率和阻尼改变的情况。Živanović 等^[21]在试验室环境下研究了低频大跨楼板在人群站立和行走作用下的动力特性变化情况, 采用模态激振器作为激振源, 利用布置在结构上的加速度传感器记录结构在人群站立和行走作用时的加速度响应, 通过频响函数得到结构的动力特性, 试验结果显示结构的阻尼比由空载时的 0.72% 增加到人群站立时的 3.62% 和行走时的 2.86%。Cappellini^[22]运用 OMA 模态参数识别技术, 研究了米兰圣西罗球场在足球比赛时由于现场观众影响, 结构的动力特性变化情况, 结果显示当看

台观众坐满时,结构阻尼由空载时的 1.3% 增加至 4.45%,自振频率由空载时的 3.15 Hz 减少至 3.10 Hz。Willford 等^[23]采用二自由度的生物力学模型模拟人群中的单个行人,通过可替换主体方法模拟人群运动,建立了人群-结构耦合系统的控制方程,通过模拟人群运动得到人群中每个行人的速度和方位,进而得到每个行人的步频,由此可得到人群整体动力学行为,进一步研究人群运动对结构动力特性的影响。

上述文献主要对温度、附加质量以及行人步频作用进行了单方面的模态参数研究,实际影响结构模态参数的因素较多;因此本文利用实验室搭建的钢结构玻璃人行桥模型较全面地研究了非结构因素对钢-玻璃组合人行结构模态参数的影响。

1 结构概况

1.1 钢-玻璃组合人行结构介绍

本文选用的钢-玻璃组合简支人行桥为研究对象,如图 1 所示,跨度 $L=10.1\text{ m}$,宽度 $B=1.6\text{ m}$,主梁与次梁均选用 20a 型工字钢,弹性模量为 $2.0 \times 10^{11}\text{ Pa}$,密度为 7.85 g/cm^3 ,采用对接焊接方式连接形成钢框架;桥面由五块 $2\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ 的双层夹胶钢化玻璃组成 ($10\text{ mm} + 2.28\text{PVB}$ (聚乙烯醇缩丁醛) $+ 10\text{ mm}$),弹性模量为 $7.2 \times 10^{10}\text{ Pa}$,密度为 2.5 g/cm^3 ,采用硅酮玻璃胶粘接在钢框架上,以防止玻璃滑动;支座采用高低可调的短柱悬臂支座,如图 2 所示;且在每个悬臂上缘焊接一根 $\Phi 8\text{ mm}$ 的光圆钢筋以模拟半刚性连接,钢框架搭接在短柱悬臂支座上,支座用地脚螺栓锚固在地面上。具体材料参数如表 1 所示。

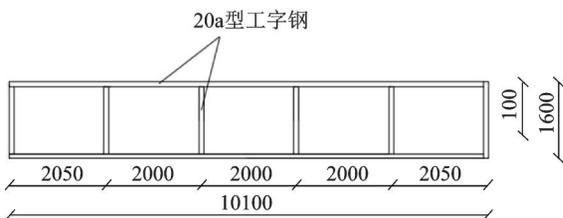


图 1 钢-玻璃组合人行桥(单位:mm)

Fig. 1 Steel-glass composite pedestrian bridge (Unit:mm)

1.2 理论与试验模态参数对比

基于 ANSYS 有限元软件建立钢-玻璃组合人

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

| | 截面类型 | 截面规格/mm | 数量 |
|-----|------------|-----------------|----|
| 主梁 | 焊接 I 型 | I200×100×7×11.4 | 2 |
| 次梁 | 焊接 I 型 | I200×100×7×11.4 | 6 |
| 玻璃板 | 矩形 | □2000×1600 | 5 |
| 支座 | 焊接 I 型 | I250×116×8×13 | 4 |
| 支座 | 矩形钢板(Q345) | □800×800×20 | 4 |

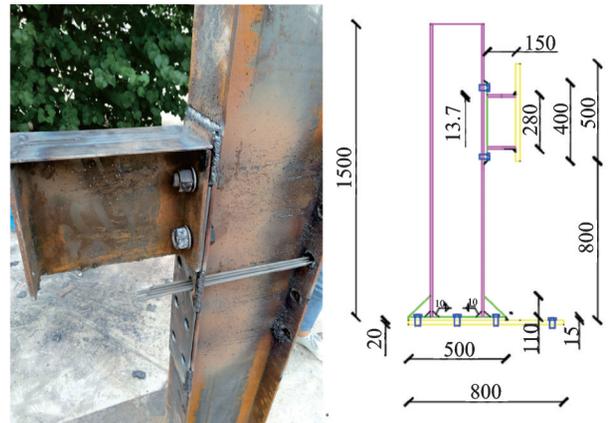


图 2 短柱悬臂支座(单位:mm)

Fig. 2 Short column cantilever support (Unit:mm)

行桥模型,对其进行模态分析,得到了结构的前 3 阶模态频率及振型;采用环境激励法测试钢结构玻璃人行桥模态。测点数共 18 个,采用移动拾振器的测试方法进行,共移动 3 组,每组 5 个测点加 1 个参考点。然后利用随机子空间法 (SSI) 进行数据处理,得到 20 °C 自然环境激励下结构空载的模态频率、阻尼比及振型;理论与试验模态参数对比如表 2 所示,振型云图如图 3 所示。

表 2 模态频率对比

Tab. 2 Modal frequency comparison

| 振型阶数 | 理论频率/Hz | 试验频率/Hz | 误差/% |
|------|---------|---------|------|
| 1 | 4.155 | 4.268 | 2.65 |
| 2 | 6.267 | 6.226 | 0.66 |
| 3 | 16.235 | 15.496 | 4.77 |

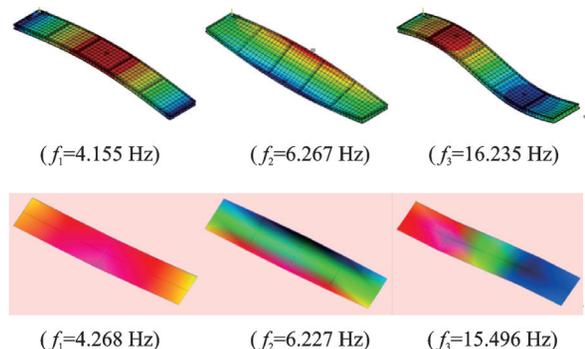


图 3 振型云图

Fig. 3 Mode cloud picture

1.3 试验仪器

本试验所使用的仪器包括加速度传感器、采集分析仪等,主要详细硬件如表 3 所示。

表 3 试验设备
Tab. 3 Experimental equipments

| 设备 | 型号 | 数量 |
|--------|----------------|----|
| 加速度传感器 | 941B 型竖向加速度拾震器 | 6 |
| 采分析集仪 | 东方所 INV 采集分析仪 | 1 |
| 线圈 | 双芯屏蔽线 | 6 |
| 温度计 | | 2 |
| 电子秤 | | 1 |

2 温度对结构模态参数的影响

2.1 温度对模态频率影响的机理分析

温度对模态频率的影响主要有以下两个方面:

1) 温度变化会引起材料的弹性模量 E 的变化。当温度升高, 钢材弹性模量降低, 结构力学中简支梁自振频率的表达式为

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2L} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

式中 n 为频率阶次, L 为梁的跨度, E 为弹性模量, I 为截面惯性矩, ρ 为材料密度, A 为截面面积。由上式可知, 模态频率 f 与 \sqrt{E} 成正比, 弹性模量变化势必会引起模态参数的变化。

2) 温度变化会引起材料长度以及边界条件的改变。

2.2 测试工况

温度影响下结构模态动力特性测试: 测试不同温度下钢-玻璃组合人行结构的模态参数变化, 温度计与加速度传感器测点布置如图 4 所示, 每次测试时都严格记录结构温度, 采样频率为 256 Hz, 采样时间为 900 s。

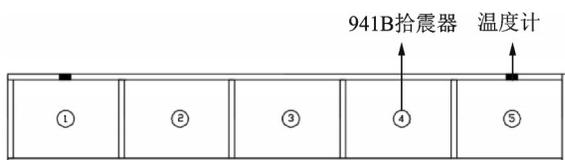


图 4 测点布置图

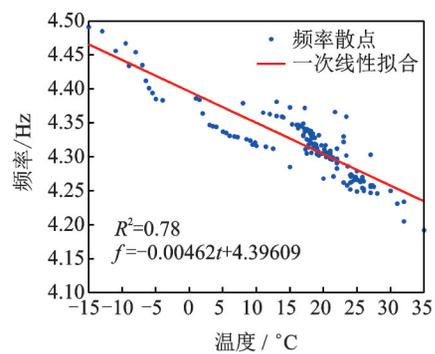
Fig. 4 Layout of measuring points

2.3 试验结果

本文对该结构进行了为期半年(2018年9月-2019年3月)的试验测试, 共采集有效加速度时程数据 125 组。利用随机子空间(SSI)法对试验数据进

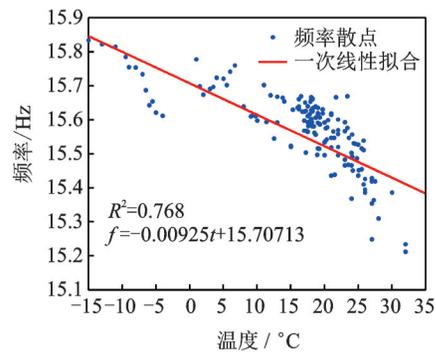
行处理, 得到了典型模态频率、模态阻尼比的分布及线性回归拟合式。

图 5 为典型竖向模态频率关于温度的分布散点及其一次线性回归结果, 将温度与各阶结构频率的关系进行拟合, 找出关系表达式; 由图可知, 各阶频率与环境温度拟合表达式的相关系数 (R^2) 分别为 0.78, 0.768, 0.812; 均大于 0.5, 说明温度与各阶频率具有较高的线性拟合可信度, 可反应温度与频率变化的大致关系。各阶模态频率受温度的影响程度有所不同, 由拟合表达式中的斜率值可知, 随着温度的升高, 结构模态频率都呈下降趋势, 且 1 阶模态频率变化率为 0.00462, 远小于 3 阶模态变化率 0.02825;



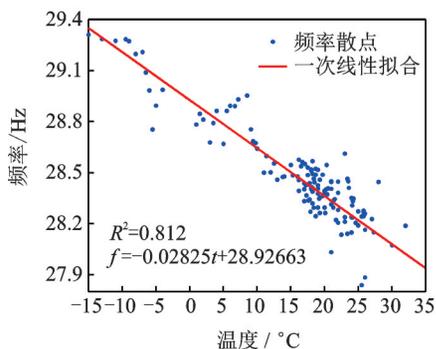
(a) 1阶竖向模态频率

(a) Vertical-order mode frequency of 1st order



(b) 2阶竖向阶模态频率

(b) Vertical-order mode frequency of 2nd order



(c) 3阶竖向模态频率

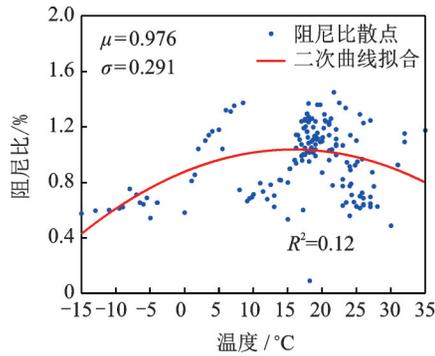
(c) Vertical-order mode frequency of 3rd order

图 5 典型竖向模态频率分布及线性回归

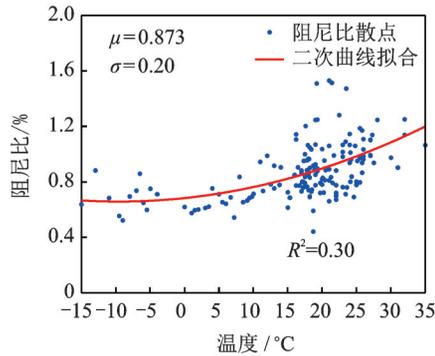
Fig. 5 Typical vertical modal frequency distribution and linear regression

故在考虑温度对结构频率影响时,其高阶模态频率变化应予以重视。

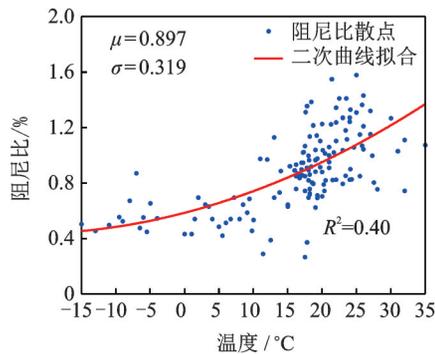
图6为典型竖向模态阻尼比关于温度的分布散点及统计数据。由图可知,1阶阻尼比变化范围为0.534%-1.449%,增幅为171.3%,变异系数 $C_v = \frac{\sigma}{\mu} = 0.298 > 0.15$;同理2,3阶阻尼比变异系数分别为0.229,0.356,表明结构模态阻尼比的离散程度显著;同时前3阶结构竖向模态阻尼比曲线拟合的相关系数均小于0.5,说明模态阻尼比受外界复杂测试环境影响较大,导致与温度的相关性不高,无法给出



(a) 1阶竖向阻尼比
(a) The 1st order vertical damping ratio



(b) 2阶竖向阻尼比
(b) The 2nd order vertical damping ratio



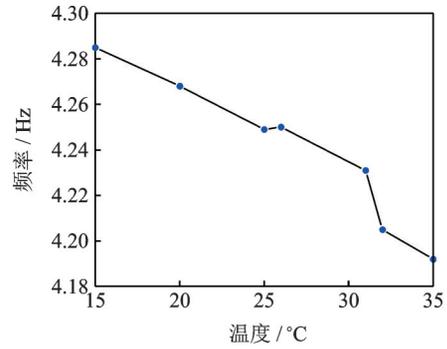
(c) 3阶竖向阻尼比
(c) The 3rd order vertical damping ratio

图6 典型竖向模态阻尼比分布及线性回归

Fig. 6 Distribution of damping ratio of typical vertical modes and linear regression

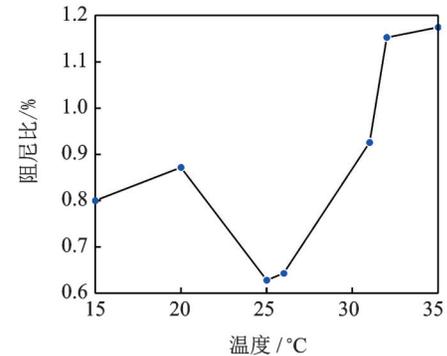
模态阻尼比与温度的线性表达式。对于结构阻尼比应做更加深入系统的研究。

图7所示为兰州8月14日(最低温度15℃,最高



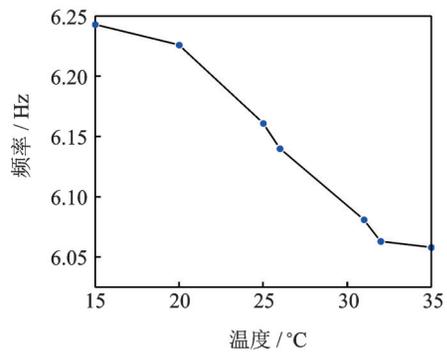
(a) 1阶模态频率

(a) The 1st order mode frequency



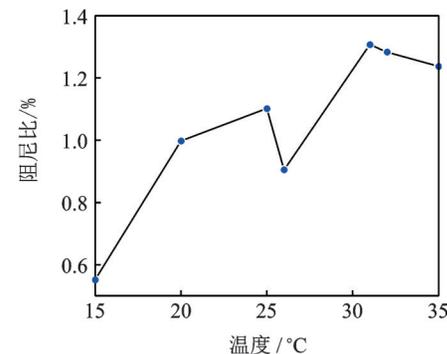
(b) 1阶模态阻尼比

(b) The 1st order mode damping ratio



(c) 2阶模态频率

(c) The 2nd order mode frequency



(d) 2阶模态阻尼比

(d) The 2nd order mode damping ratio

图7 一天内模态参数变化图

Fig. 7 Variation diagram of modal parameters in one day

35℃)温差 20℃下钢-玻璃组合人行结构前 2 阶模态参数的变化图。由图 7(a),(b)可知,在最大温差范围内结构 1 阶频率由 4.285 Hz 降为 4.192 Hz,降低了 2.17%;结构 1 阶阻尼比由 0.628% 升高到 1.175%,增加了 87.1%;由图 7(c),(d)可得结构 2 阶频率随温度升高也呈现下降趋势,由 6.243 Hz 降为 6.058 Hz,降低了 2.96%;阻尼比呈上升趋势,上升了 128.8%。说明随着环境温度的升高,结构模态频率逐渐降低,阻尼比呈上升趋势。可在结构状态评估时剔除温度的影响。

3 附加质量对结构模态参数的影响

3.1 机理分析

以简支梁物理模型为例,简支梁是一个无限多自由度的均布质量系统,可以简化为弹簧和质量的单自由度系统。梁的均布质量 m_0 可以折合成等效集中质量 m ,在单自由度系统模型参数实验中,已经计算和测出了梁的质量

$$m = \frac{17}{35} m_0 \quad (2)$$

结构模态频率计算公式如下

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + m'}} \quad (3)$$

式中 m' 为附加质量, k 为结构刚度。由上式可知结构模态频率与附加质量的平方根成反比。

3.2 测试工况

为探究附加质量对结构模态参数的影响规律,分别采集了集中荷载和均布荷载作用于结构不同位置处的加速度时程曲线,工况测试位置如图 8 所示,共 11 个测试区域,每位测试者和相应的等重质量块 (80 cm×40 cm×20 cm 加气块砖, $W=15$ kg/块) 从 1 号测试区域开始依次作用;均布荷载作用分别在 2,4,6,8,10 号位置处施加荷载,试验工况如图 9 所示,荷载作用形式包括静立行人和等重质量块。测试者统计数据如表 4 所示。

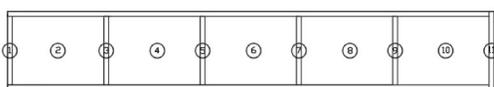


图 8 测试者位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of tester position

3.3 测试结果

测试当天环境温度为 16℃,此时钢-玻璃组合



图 9 均布荷载工况测试图

Fig. 9 Measurement diagram of uniformly distributed load conditions

表 4 测试者统计数据

Tab. 4 Statistics of the experimenter

| 测试者 | 性别 | 年龄/岁 | 体重/kg |
|-----|----|------|-------|
| 1 | 男 | 22 | 56.20 |
| 2 | 男 | 24 | 68.40 |
| 3 | 男 | 24 | 64.47 |
| 4 | 男 | 23 | 62.77 |
| 5 | 男 | 24 | 82.97 |

人行结构(空载)的 1 阶模态参数为 4.324 Hz, 1.288%。利用 SSI 法得出测试者 1、测试者 2 以及等重质量块作用于不同位置处的模态参数,具体结果如图 10 和 11 所示,均布荷载下的模态参数如表 5 所示。

表 5 均布荷载作用模态参数表

Tab. 5 Modal parameter table under uniform load

| | 频率/ Hz | 差值/% | 阻尼 比/% | 差值/% |
|-----------|-----------|------|-----------|--------|
| 空载 | 4.324 | | 1.288 | |
| 5 人均布静立 | 3.885 | 0.28 | 4.309 | 235.85 |
| 均布等重质量块 | 3.896 | | 1.283 | |
| 5 人跨中集中静立 | 3.542 | 1.0 | 5.064 | 296.24 |
| 集中等重质量块 | 3.578 | | 1.278 | |

由表 5 可知,5 人静立作用工况下,跨中处集中静立对结构模态参数影响较大,两种工况下结构模态频率分别为 3.885,3.542 Hz,与空载结构模态参数相比,频率依次降低了 10.15%,18.08%;阻尼比分别为 4.309%,5.064%,依次增加了 234.55%,293.17%。等重质量块作用工况下,跨中处结构模态频率降低幅度大,且与静立工况相比,结构模态频率相差仅 0.28% 和 1.0%。而结构阻尼比却与空载时结构阻尼比相近,无显著变化。说明结构频率变化取决于附加质量大小,而结构阻尼比变化取决于附加质量自身有无阻尼。

图 10 为两位测试者静立以及等重质量块作用

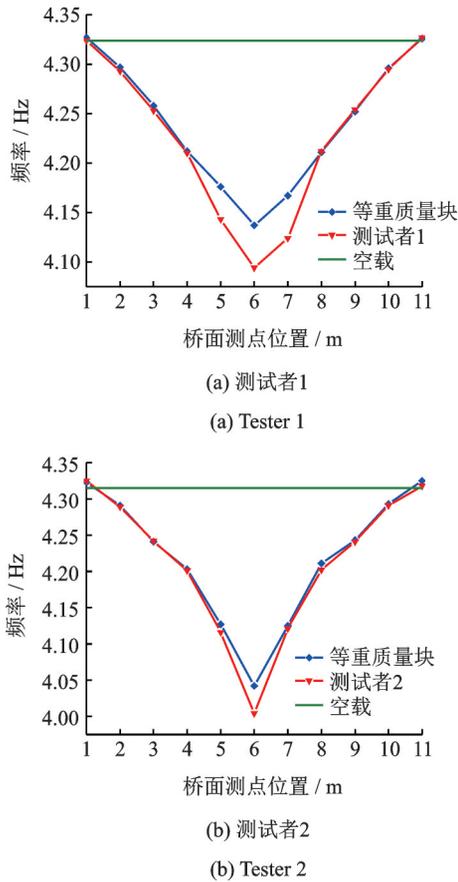


图10 附加质量对结构1阶模态频率影响

Fig. 10 Influence of additional mass on first-order modal frequency of structure

下结构1阶模态频率变化图,综合图10(a),(b)可知:静立行人与等重质量块作用于桥面上时,由端到跨中,结构1阶模态频率逐渐降低,且静立行人对结构模态频率影响稍大,两位测试者作用下的频率降幅分别为5.32%,7.40%;说明随着结构上作用的附加质量的增加,模态频率逐渐减小;并且等重质量块与静立行人对结构模态频率影响程度较为接近。说明试验结果同公式(3)中理论分析一致,附加质量与结构频率成反比例关系。

图11为两位测试者静立及等重质量块作用下结构1阶模态阻尼比变化图,由图11(a),(b)可知:静立行人作用下,由结构端部到跨中,结构模态阻尼比先增大后减小;与空载时相比依次增大了101.86%,119.64%;而等重质量块作用下结构阻尼比与空载时相近,几乎无变化。人体本身为高阻尼系统,阻尼比可达30%-50%,因此人体作用下产生人-结构相互作用,使得结构阻尼比显著增加,而质量块是无阻尼系统,作用于结构上时,结构阻尼比几乎无变化。

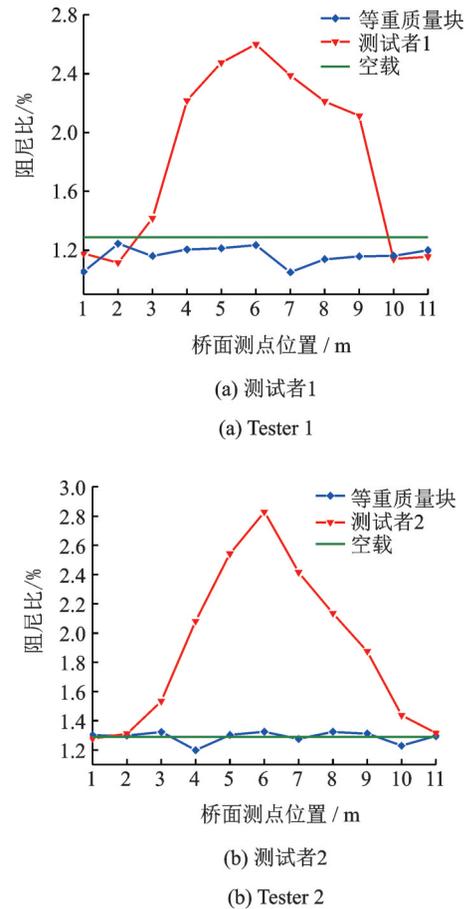


图11 附加质量对结构1阶模态阻尼比影响

Fig. 11 Effect of additional mass on first-order modal damping ratio of structures

4 行人步频和数量对结构模态参数的影响

4.1 测试工况

为研究行人步频对结构模态参数的影响,本文测试50名学生以不同步速行走的加速度时程(15名女性、35名男性),统计信息如表6所示。测试工况如下:每位测试者进行8组步行实验,包括五种步频分别为1.7,1.85,1.955,2.19(二次超谐波共振),2.35 Hz的固定步行频率试验以及慢速、中速、快速三种速率的自由行走试验;固定频率行走是试验者在电子节拍器的引导下,依据声响踏节拍完成的。每完成一组测试工况,转入下一工况时,均给予测试者一定时间在地面作预演适应,同时使桥面恢复平稳不再振动,以保证试验数据测试的准确性。

4.2 测试结果

测试当天温度为13℃,人行桥(空载)的1阶模态参数为4.380 Hz,0.747%。试验共得到50人次单人激励行走数据400组;20人次的单人、三人、四人、五人激励行走数据187组;每组测试工况数据包括5

表 6 测试者统计数据

Tab. 6 Testers statistics

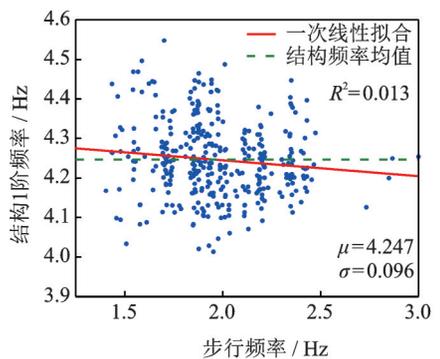
| 性别 | 人数 | 年龄/岁 | | 体重/kg | | 身高/cm | |
|----|----|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| | | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 |
| 男 | 35 | 24 | 19-28 | 68.5 | 42-83 | 173.2 | 160-183 |
| 女 | 15 | 23 | | 50.9 | | 165.4 | |

条竖向加速度时程曲线。图 12 为现场试验测试图。

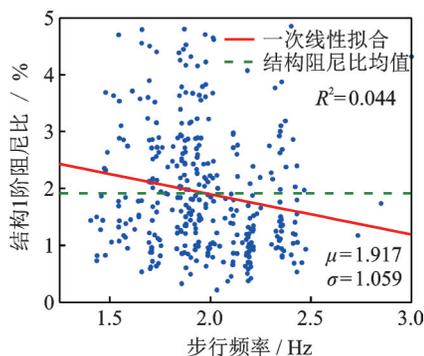


图 12 工况测试图
Fig. 12 Test diagram of working conditions

图 13 为单个行人步行频率对结构模态参数的影响图,由图 13(a)中所示的大量数据可知,单人以一定步行频率行走时,结构 1 阶频率由 4.380 Hz 变



(a) 频率分布散点
(a) Frequency distribution scatter



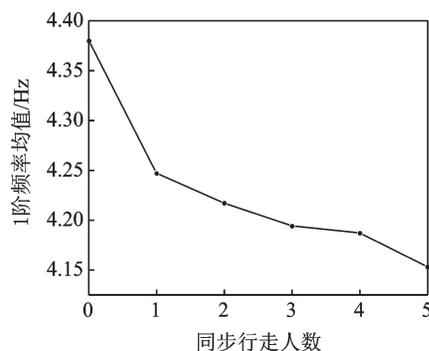
(b) 阻尼比分布散点
(b) Damped ratio distribution scatter

图 13 单人作用下结构模态参数变化图

Fig. 13 Variation diagram of structural modal parameters under the action of a single person

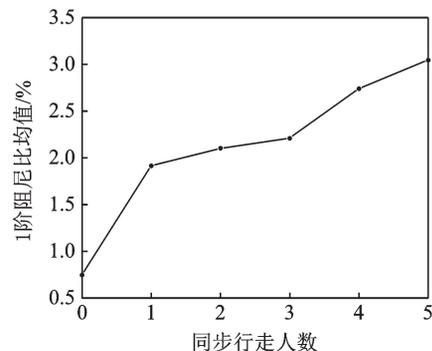
为 4.247 Hz,降低了 3.037%,且在一倍标准差范围内频率变化较小;步行频率与结构频率的拟合曲线 $R^2=0.013$,相关性较差。由图 13(b)可知,结构 1 阶阻尼比由 0.747% 变为 1.917%,上升了 156.6%,上升幅度较大,且在一倍标准差范围内阻尼比变化较大,同理, $R^2=0.044$ 。说明行人步频对结构模态频率影响较小,对模态阻尼比影响较大,且单个行人步行频率与结构模态参数相关性不大;说明行人在结构上行走时对结构模态参数影响较小。

图 14 所示为结构模态参数随同步行走人数的变化特性,由图 14 可知,由空载到五人同步同频(二次超谐波共振频率 2.19 Hz)行走时,结构的 1 阶模态频率依次降低了 3.037%, 0.706%, 0.545%, 0.167% 和 0.812%;结构 1 阶阻尼比依次升高了 156.6%, 9.703%, 5.136%, 24.02% 和 11.09%。说明结构模态频率随同步行走人数增加,频率逐渐降低,且变化率逐渐减小;结构模态阻尼比显著上升,变化率也呈降低趋势,且空载到单人行走时阻尼比变化率最大。



(a) 结构 1 阶频率变化

(a) 1st order frequency change of the structure



(b) 结构 1 阶阻尼比变化

(b) Structural 1st order damping ratio variation

图 14 结构模态参数随同步行走人数的变化特性

Fig. 14 Variation of structural modal parameters with synchronous walking population

5 结 论

基于对钢-玻璃组合人行结构进行模型试验测

试和有限元分析,研究了非结构因素对结构模态参数的影响,得到以下结论:

1)利用模型试验测试得出:一天内温度变化引起的结构1阶模态频率变化达2.17%,并且给出了此结构下前3阶竖向模态频率关于温度变化的1次线性拟合表达式;模态阻尼比受外界复杂测试环境影响较大,导致与温度的相关性不高。

2)随着附加质量的增加,结构模态频率逐渐降低,且在结构振型峰值点处降幅最大,单人作用下频率降低了5.32%;模态阻尼比由端部向跨中呈增大趋势,且大于空载时的阻尼比;阻尼比增大了101.86%,等重质量块作用下结构模态频率逐渐下降,阻尼比基本无变化。

3)基于大量行人步行频率试验可得:行人作用于结构上时,结构模态频率略有减小,相较于空载状态,单人作用下结构频率降低了3.037%;模态阻尼比显著增加,单人作用结构阻尼比增加了156.6%;由拟合曲线相关系数可知行人步行频率与结构模态参数相关性较差。且随着同步行走人数的增加,结构模态频率和阻尼比的变化率逐渐减小。

参考文献:

- [1] 董祥云,李芳芳.基于静载试验的桥梁运营状态评价分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):118-121.
Dong Xiangyun, Li Fangfang. Evaluation and analysis of bridge operation state based on static load test [J]. Road Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15(7): 118-121.
- [2] 周海芸,刘卫卫.动力荷载试验在桥梁运营状态评价中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(5):161-163.
Zhou Haiyun, Liu Weiwei. Application of dynamic load test in bridge operation state evaluation [J]. Road Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15(5): 161-163.
- [3] 茅建校,王浩,程怀宇,等.基于小波变换的台风激励下千米级斜拉桥模态参数识别[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(1):159-164.
Mao Jianxiao, Wang Hao, Cheng Huaiyu, et al. Modal parameter identification of kilometer cable-stayed bridge under typhoon excitation based on wavelet transform [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 159-164.
- [4] 徐健,周志祥,赵丽娜,等.基于AEEMD和改进DATA-SSI算法的桥梁结构模态参数自动化识别[J].土木工程学报,2017,50(7):87-98.
Xu Jiao, Zhou Zhixiang, Zhao Lina, et al. Automatic identification of modal parameter for bridges based on AEEMD and improved DATA-SSI[J]. Journal of Civil Engineering, 2017, 50(7): 87-98.
- [5] 陈永高,钟振宇.环境激励下桥梁结构信号分解与模态参数识别[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1267-1274.
Chen Yonggao, Zhong Zhenyu. Signal decomposition and modal parameter identification of bridge structure under environmental excitation [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1267-1274.
- [6] 张琼,陈凯,杜永峰,等.基于人体动力学模型楼梯振动舒适度及其控制研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):153-160.
Zhang Qiong, Chen Kai, Du Yongfeng, et al. Study on vibration comfort and control of steel stairs based on human dynamics model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 153-160.
- [7] 马如进,崔传杰,胡晓红,等.车辆激励下大跨径桥梁人非系统振动特性[J].振动与冲击,2018,37(12):96-101.
Ma Rujin, Cui Chuanjie, Hu Xiaohong, et al. Human non-system vibration characteristics of long-span bridges under vehicle excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 96-101.
- [8] 丁克良,刘明亮,宋子超,等.希尔伯特-黄变换在公路桥梁结构健康检测中的应用研究[J].北京建筑大学学报,2018,34(3):28-32.
Ding Keliang, Liu Mingliang, Song Zichao, et al. Application of Hilbert-Huang transform in structural health detection of highway bridges [J]. Journal of Beijing University of Architecture, 2018, 34(3): 28-32.
- [9] 王浩,李爱群,谢静,等.台风作用下超大跨度斜拉桥抖振响应现场实测研究[J].土木工程学报,2010,43(7):71-78.
Wang Hao, Li Aiqun, Xie Jing, et al. On-site measurement of buffeting response of super-large-span cable-stayed bridge under the action of typhoon [J]. Journal of Civil Engineering, 2010, 43(7): 71-78.
- [10] 汪志昊,皇幼坤,李晓克,等.大跨度钢网架-玻璃组合楼板动力特性研究[J].振动与冲击,2018,37(13):195-202.
Wang Zhihao, Huang Youkun, Li Xiaoke, et al. Dynamic characteristics of a long-span steel frame-glass composite floor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 195-202.
- [11] Farrar C R, Cornwell P J, Doebling S W, et al. Structure health monitoring studies of the Alamosa Canyon and I-40 bridge [R]. Los Alamos National Laboratory Report LA-13635-MS, 2000.
- [12] Roberts G P, Pearson A J. Health monitoring of struc-

- tures towards a stethoscope for bridges [C]. Proceedings of ISMA 23, the International Conference on Noise and Vibrations Engineering. Belgium, Leuven; Katholieke University Leuven, 1988: 885-889.
- [13] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B, et al. A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties[J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [14] Xia Yong, Hao Hong, Giovanna Zanardo, et al. Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect[J]. Engineering Structures, 2006, 28(3): 441-452.
- [15] Brownjohn J M W. Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction[J]. Shock and Vibration, 2001, 8(6): 315-323.
- [16] Setareh M. Vibration serviceability of a building floor structure. i: Dynamic testing and computer modeling [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 24(6): 497-507.
- [17] 王益利, 范纪华, 章定国, 等. 考虑附加质量的中心刚体-柔性梁系统的动力学特性研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(6): 1380-1386+1428-1429.
- Wang Yili, Fan Jihua, Zhang Dingguo, et al. A study on the dynamic characteristics of a central rigid-flexible beam system considering the additional mass [J]. Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(6): 1380-1386+1428-1429.
- [18] 刘浩, 陈波, 冯仲仁, 等. 桥面板厚度对斜拉人行桥动力特性影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(11): 61-66.
- Liu Hao, Chen Bo, Feng Zhongren, et al. The influence of the thickness of the bridge deck on the dynamic characteristics of the cable-stayed pedestrian bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(11): 61-66.
- [19] 赵峰, 曹树谦, 王良文, 等. 附加质量对结构模态影响实验研究[C]. 第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集. 2017: 792-800.
- Zhao Feng, Cao Shuqian, Wang Liangwen, et al. Experimental research on structural modes influenced by additional mass [C]. Proceedings of the Twelfth National Symposium on the Theory of Vibrations and Applications. 2017: 792-800.
- [20] Ohlsson S V. Floor vibrations and human discomfort [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1982.
- [21] Živanović S, Díaz I M, Pavić A. Influence of walking and standing crowds on structural dynamic properties [C]. Proceedings of IMAC-XXVII, Orlando, 2009: 9-12.
- [22] Cappellini A. An innovative approach to evaluate people's effects on the dynamic behavior of structures [D]. Milan: Politecnico di Milano, 2015.
- [23] Willford M. Dynamic actions and reactions of pedestrians [C]. Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges, 2002: 20-22.

Effect of non-structural factors on modal parameters of steel-glass composite pedestrian structure

ZHU Qian-kun, MA Fa-rong, ZHANG Qiong, DU Yong-feng

(Institute of Earthquake Prevention and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on field test, the influence of non-structural factors such as ambient temperature and operating environment (additional mass, pedestrian walking frequency) on modal parameters of the steel-glass pedestrian structure is studied. The mathematical model between temperature and structural modal parameters is established, and the influence of additional mass and pedestrian frequency on structural modal parameters is analyzed. The results show that the change of modal frequency and damping ratio caused by temperature change in one day can reach 2.17% and 87.1% respectively. At the same time, a linear fitting expression of the first three vertical modal frequencies with respect to temperature variation is given. From the end of the structure to the middle span under the action of additional mass, the modal frequency decreases gradually, and the damping ratio increases gradually. The increase of additional mass leads to high modal frequency and lower damping ratio. According to the statistical rule of a large number of experimental data, it can be seen that the footstep frequency has little influence on the modal frequency of the structure under the action of pedestrians. Therefore, it is of great significance to analyze the influence of non-structural factors on structural modal parameters for structural health detection and damage identification.

Key words: steel-glass composite pedestrian structure; modal parameters; ambient temperature; additional mass; pedestrian walking frequency

作者简介: 朱前坤(1981-),男,教授。电话:(0931)2976789; E-mail: zhuqklut@qq.com