

张彦玲,李璇,杨燕龙,等.柔性人行悬索桥竖向自振特性及人致振动试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):471-480.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240417
ZHANG Yanling,LI Xuan,YANG Yanlong,et al.Experimental research on vertical natural vibration and human-induced vibration of flexible suspension footbridge[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):471-480.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240417

柔性人行悬索桥竖向自振特性及人致振动试验研究

张彦玲^{1,2}, 李璇^{1,2}, 杨燕龙^{1,2}, 朱连任^{1,2}, 张旭^{1,2*}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 针对柔性人行悬索桥的人致振动问题, 以跨越建筑楼顶的人行悬索桥为研究对象, 通过自振特性测试和人致振动试验, 评估其工作状态及行人舒适度, 并基于行人弹簧-质量-阻尼模型的有限元分析, 对高阶共振特性进行研究。研究表明: 当行人以不同阶共振频率过桥时, 加速度与共振型呈现显著相关性; 高阶共振步频及半频、倍频和接近低阶模态频率的步频均可激发较大振动响应。加速度最大值随行人数量增加而上升; 较大加速度工况下结构阻尼会相应增大。考虑上述因素影响, 该桥行人密度在0.2~1.5人/m²范围内, 行人舒适度均处于“很舒适”等级。研究结论为揭示柔性人行桥高阶人致共振机理提供理论依据。

关键词: 人行悬索桥; 人致振动; 自振特性; 高阶共振; 行人舒适度

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0471-10

Experimental research on vertical natural vibration and human-induced vibration of flexible suspension footbridge

ZHANG Yanling^{1,2}, LI Xuan^{1,2}, YANG Yanlong^{1,2}, ZHU Lianren^{1,2}, ZHANG Xu^{1,2*}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Regarding the pedestrian-induced vibration issues of flexible foot suspension bridges, although there are many literatures have conducted vibration tests on pedestrian bridges, there is still relatively little research focusing on multiple and high-order order resonances. By conducting natural vibration tests and human-induced vibration tests on a suspension footbridge spanning the rooftop of buildings, the operation status and pedestrian comfort were evaluated, and the high-order resonance characteristics were studied combining the finite element analysis under the spring mass damping (SMD) model of the pedestrian. The results show that when pedestrians cross bridges with different resonant step frequencies, there is a great correlation between the acceleration time history and the shape of the resonant mode. The high-order resonant step frequencies and their half and double frequencies, and the step frequencies close to low-order modal frequencies can excite significant responses. The maximum acceleration is accompanied by an overall increasing trend in the number of people. The structural damping will increase when the acceleration is high, and considering its impact, the bridge is in a comfortable state for pedestrians within the pedestrian densities ranging from 0.2 to 1.5 persons per square meter. The conclusions of this study provide a theoretical foundation for elucidating the mechanism of high-order pedestrian-induced resonance in flexible pedestrian bridges.

Keywords: suspension footbridge; human-induced vibration; natural vibration characteristics; higher-order resonance; pedestrian comfort

收稿日期: 2024-11-20 修回日期: 2024-12-30 接受日期: 2025-01-20 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778377); 中央引导地方科技发展资金项目 (246Z5409G); 石家庄铁道大学研究生创新资助项目 (YC202405)

作者简介: 张彦玲 (1973-), 女, 河北 沧州人, 博士, 教授, 主要从事桥梁结构分析方面的研究。E-mail: 06mzhang@163.com

通信作者: 张旭 (1990-), 女, 河北 石家庄人, 博士研究生, 主要从事桥梁结构分析方面的研究, E-mail: zhangxu_sjz9696@163.com

0 引言

人致振动是影响人行桥正常使用和行人舒适度的主要因素。由于人行悬索桥具有跨度大、刚度小的特点,其自振频率较低,行人步频容易与桥梁自振频率产生共振,从而加剧桥梁振动,甚至可能引发关停或伤亡事故^[1]。

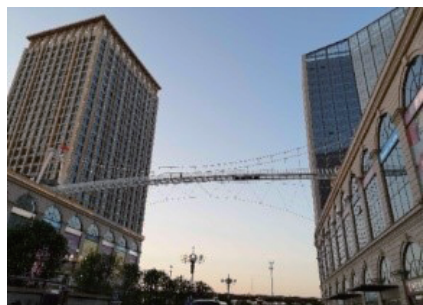
学者对人行桥的自振特性、行人载荷模型、人致振动响应以及人-桥相互作用等方面展开了深入研究。研究表明,人行桥(尤其是人行悬索桥)的模态及频率较为集中,在较窄的频率范围内可能存在多阶模态振型,且易与行人步频范围重合^[2-4]。在行人载荷模型方面,主要包括力模型^[5]、弹簧-质量-阻尼(SMD)模型^[6]、以倒摆模型为代表的生物动力学模型^[7]和随机载荷模型^[8]。WANG等^[9]以伦敦千禧桥为研究对象,对比分析了力模型、倒摆模型和SMD模型的适用性。LI等^[10]采用力模型和不同形式的SMD模型,对人行玻璃悬索桥的人致振动进行分析。为评估桥梁使用状态、评价行人舒适度,并验证行人载荷模型的准确性,学者对不同结构形式人行桥开展自振特性及人致振动的现场测试,包括人行斜拉桥^[11]、钢人行悬索桥^[2]、教堂内的悬挑玻璃人行桥^[12-13]、双塔三跨自锚式钢箱梁人行悬索桥^[14]、三跨连续梁桥^[15]、大跨度异形钢箱梁人行桥^[16]、世界上最长的空间主缆人行悬索桥^[17]、上承式索拱混合人行桥^[18]、简支轻型铝合金中承式人行桁架梁桥^[19]、在役桁架天桥^[20]

等。上述研究对不同结构类型的人行桥进行了振动测试及人致振动分析,但人行悬索桥具有柔性大、频率低等特点,行人步频不仅容易与高阶振型产生共振,且由于频率分布密集,往往同时存在多个振型处于行人步频区间,针对此类高阶和多阶共振的专门研究仍较为缺乏。

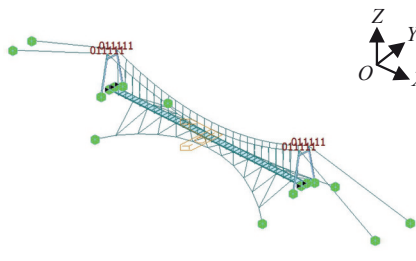
基于此,本文以一座位于建筑楼顶的78 m玻璃桥面人行悬索桥为研究对象,通过现场测试获取桥梁的自振特性,并测量单人和多人以不同步频原地踏步及过桥时的人致振动响应,以此评估该桥的工作状态和行人舒适度,并结合测试结果,采用基于行人载荷SMD模型的有限元分析方法,深入研究柔性人行悬索桥的高阶共振响应规律。

1 工程概况及有限元模型

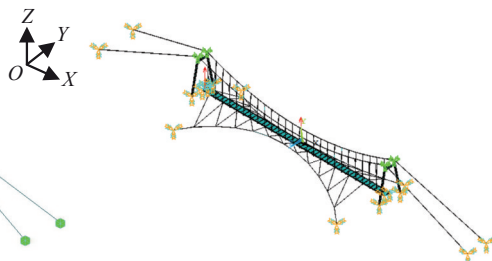
该人行悬索桥位于建筑楼顶,见图1(a),采用三跨布置,跨度分别为36.91 m、78 m和38.66 m,中跨矢跨比为1/10。顺桥向吊杆间距为3 m,桥面左右两侧吊杆间距为2.75 m,桥面计算宽度为2.3 m。抗风缆计算跨度为70 m,面内矢跨比为1/5,与桥面夹角为27.863°。东西两侧桥塔高度均为13.5 m。主缆共2根,每根主缆采用成品索,由127根 $\Phi 5$ mm平行钢丝组成。抗风缆采用两根 $\Phi 36$ mm的ZAA 6×19WS+IWR 1670钢丝绳,抗风缆拉索采用两根 $\Phi 10$ mm的ZAA 6-7+FC 1770钢丝绳。主梁由工字钢和槽钢焊接而成,标准节段长度为3 m。桥面采用3层12 mm厚的钢化夹层玻璃。



(a) 桥梁



(b) Midas 模型



(c) Ansys 模型

图1 桥梁图片及有限元模型

Fig.1 picture and finite element models of the suspension footbridge

采用Midas/Civil和Ansys软件协同建立桥梁的有限元模型。Midas/Civil软件具有便捷的悬索桥建模助手功能,因此首先利用该软件完成初始模型建立、主缆和抗风缆找形,以及静力精确平衡分析。Midas Civil模型仅支持移动行人力模型的人致振动分析,无法进行行人SMD模型分析,因此将成桥平衡状态下各构件内力及节点坐标导入Ansys

软件重建模型。两种有限元模型的边界条件设置一致:主缆和抗风缆端部、桥塔底部采用固结约束;主缆与桥塔顶点耦合,约束除顺桥向外的所有自由度;主梁两端采用简支约束。桥梁的两种有限元模型模型分别见图1(b)和图1(c),模型中各部件材料参数和单元类型见表1。

表1 桥梁有限元模型各部件建模参数

Tab.1 modeling parameters of each component in finite element modal of bridge

部件	弹性模量 E/MPa	泊松比	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	单元类型	部件	弹性模量 E/MPa	泊松比	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	单元类型
主缆	2.05×10^5	0.3	8 005	索单元	桥塔混凝土	3.25×10^4	0.2	2 549	梁单元
纵梁	2.06×10^5	0.3	7 850	梁单元	抗风缆	2.06×10^5	0.3	11 980	索单元
横梁	2.06×10^5	0.3	7 850	梁单元	抗风缆拉索	2.05×10^5	0.3	10 786	索单元
吊杆	2.06×10^5	0.3	7 850	梁单元	桥面玻璃板	7.20×10^4	0.2	3 894	板单元
桥塔钢管	2.06×10^5	0.3	7 850	梁单元					

采用Ansys模型进行桥梁的自振特性及人致振动分析。行人载荷模型采用可以考虑人-桥耦合作用的SMD模型,见图2。

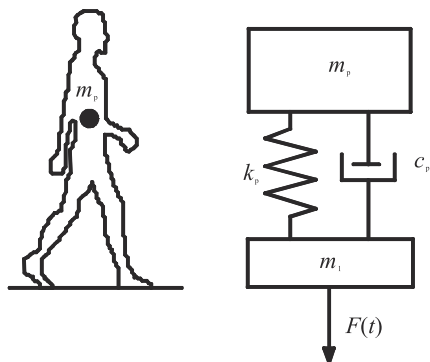


图2 SMD模型

Fig.2 SMD model

该模型将行人模拟为具有一定刚度和阻尼的弹簧质量体,由弹性质量 m_p 、刚性质量 m_1 、人体刚度 k_p 和人体阻尼 c_p 组成。 m_p 等效到行人质心处, m_1 与行人所在位置的桥梁节点耦合,激励力 $F(t)$ 表示为

$$F(t) = G + G \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sin(2\pi f_p t + \varphi_i), \quad (1)$$

式中: G 为行人自重, N; t 为时间, s; f_p 为步频, Hz, 按结构固有频率取值; α_i 、 φ_i 分别为竖向行人载荷的第 i 阶动载因子和相位角。根据德国规范EN03^[21], 取竖向行人载荷阶数为一阶, G 取700 N, α_1 取0.4, φ_1 取0 rad。

人体质量、阻尼、刚度^[6]满足

$$\begin{cases} m_p = 97.082 + 0.275M - 37.518f_p \\ c_p = 29.041m_p^{0.833} \\ k_p = 30\,351.744 - 50.261c_p + 0.035c_p^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, M 为行人总质量, $M = m_p + m_1$ 。

2 自振特性试验及数值分析

为获得人致振动时的共振步频, 首先采用环

境振动法进行自振特性测试。采用DASP动态采集仪及941B型传感器的中速档采集桥面结构在外部环境激励下产生的竖向动态速度信号, 并对信号进行自谱分析及互谱分析, 得到悬索桥的自振频率、振型及阻尼比。

测点布置在悬索桥主跨, 测点布置见图3。由于试验仅关注竖向振动, 故图3仅显示竖向传感器。共布置竖向传感器12个, 其中主跨北侧7个, 间距6.5 m, 南侧5个, 间距6.5 m。测点3、5、11和6、12在后续人致振动试验中进行加速度的测试。

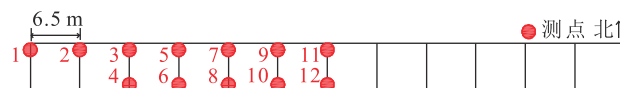


图3 竖向测点布置

Fig.3 arrangement of vertical measuring points

由于测点1、4、8发生故障, 仅对剩余9个竖向测点的时域信号通过快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)进行频谱分析, 并结合有限元分析结果提取前五阶竖向自振频率。同时利用DASP分析软件自谱分析模块中的INV阻尼计得到各阶振型的阻尼比, 开展模态分析。因试验仪器限制, 测点只布置半桥, 模态阶数的判定考虑以下因素: 除跨中测点和支座外, 半桥其余测点振型的中零点个数、峰值个数及符号; 跨中测点数据与振型峰值的接近程度。

半桥振型特征、实测频率及振型结果见表2。具体判定规则为: 除跨中测点和支座外, 半桥响应有1个峰值和0个零点, 且跨中响应远小于峰值时, 可认为半桥内有1个正弦波, 扩展为全桥则为2个, 判定为竖向二阶振型; 半桥响应有1个峰值和1个零点, 但跨中响应接近峰值时, 可认为半桥内有1.5个正弦波, 全桥则为3个, 判定为竖向三阶振型; 依此类推, 可判断竖向四、五、六阶振型。

表2 竖向自振频率及振型
Tab.2 vertical natural vibration frequencuse and modes

模态阶次	半桥振型特征			实测振型	振型描述	实测 频率/Hz	模拟 频率/Hz	相对 误差/%	阻尼比/%
	峰值个数	零点个数	跨中响应						
2	1	0	远小于峰值		竖向二阶	0.675	0.678	0.44	1.922
3	1	1	接近峰值		竖向三阶	0.913	0.886	-2.96	0.917
4	2	1	远小于峰值		竖向四阶	1.363	1.338	-1.83	0.858
5	2	2	接近峰值		竖向五阶	1.938	1.998	3.003	0.571
6	3	2	远小于峰值		竖向六阶	2.475	2.467	-0.324	0.503

注:半桥振型中的峰值个数不包括跨中,零点个数不包括支座和跨中;相对误差=(模拟频率-实测频率)/实测频率×100%。

由表2可见,竖向四阶和五阶振型对应的频率处于常见行人竖向步频为1.25~2.30 Hz^[21],是竖向人致振动中重点考虑的频率。竖向六阶振型频率为2.475 Hz,当行人快走或慢跑时,易激起共振。同时,因行人载荷半谐波的存在,竖向二阶和三阶振型对应的频率也可认为是人致振动的敏感频率。

竖向二阶振型所对应的阻尼比为1.922%,相较于一般钢结构桥梁的阻尼比偏大,这是玻璃桥面及其下方的橡胶垫层所致。各阶竖向振型的阻尼比随阶数的增大逐渐减小。

该桥首先出现的竖向振型为反对称竖弯振型,属于竖向二阶振型,在行人竖向步频范围内未出

现一阶正对称竖弯振型。行人竖向步频范围内,实测竖向自振频率与有限元模拟结果误差小于3%,说明有限元模型正确,可用于后续人致振动的计算分析。

3 人致振动现场试验及数值分析

3.1 工况设置

试验共设置7种工况,其中行人数量包括单人、双人、4人和6人4种,运动状态包括步行过桥和原地踏步2种,每种运动状态都包括多种步频。采用DASP动态采集仪及941B型传感器采集测点3、5、11和6、12在行人激励下的加速度。各工况实验现场情况见图4。测试工况见表3。

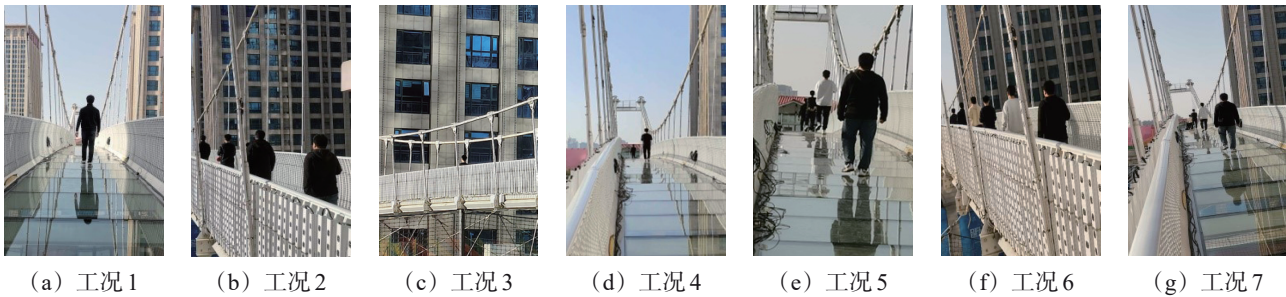


图4 人致振动试验载荷工况现场

Fig.4 loading cases in human-induced vibration test

表3 人致振动试验激励工况

Tab.3 loading cases in human-induced vibration test

工况	工况描述	平均体重/kg	试验说明
1	单人分别以1.35 Hz、1.90 Hz和2.40 Hz的步频步行过桥	76.0	行人间距3 m,依次排列,采样从第一个行人上桥开始,最后一位行人下桥结束
2	4人同时分别以1.35 Hz、1.90 Hz和2.40 Hz的步频步行过桥	79.0	

续表 3

工况	工况描述	平均体重/kg	试验说明
3	单人分别以 1.35 Hz、1.90 Hz 和 2.40 Hz 的步频原地踏步	76.0	行人在桥上均匀站立, 开始踏步时采样开始, 在条件允许的情况下, 采样时间应尽可能长
4	双人同时分别以 1.35 Hz、1.90 Hz 和 2.40 Hz 的步频原地踏步	73.5	
5	4 人同时分别以 1.35 Hz、1.90 Hz 和 2.40 Hz 的步频原地踏步	79.0	
6	6 人同时以 1.3 Hz~2.3 Hz 的步频步行过桥	79.0	每次测试步频增加 0.2 Hz, 过桥时行人间距 3 m, 原地踏步时行人均匀站立
7	6 人同时以 1.3 Hz~2.3 Hz 的步频原地踏步	79.0	

3.2 行人过桥工况下的人致振动响应分析

(1) 加速度分析

行人以间距 3 m 列队过桥时, 1.35 Hz、1.90 Hz 和 2.40 Hz 的步频分别与悬索桥的竖向四阶振型频率 (1.363 Hz)、五阶振型频率 (1.938 Hz) 和六阶振型频率 (2.475 Hz) 发生共振。可选用 2s 均方根 (2sRMS) 作为人行桥加速度的评估指标^[22], 其表

达式为

$$a_{\text{RMS},2}(t_0)=\sqrt{\frac{1}{2}\int_{t_0-t}^{t_0}a^2(t)dt},\tag{3}$$

式中, a 为加速度, m/s^2 。
不同数量行人以不同步频过桥时, 加速度值及 2sRMS 值的实测值与有限元模拟值见图 5。

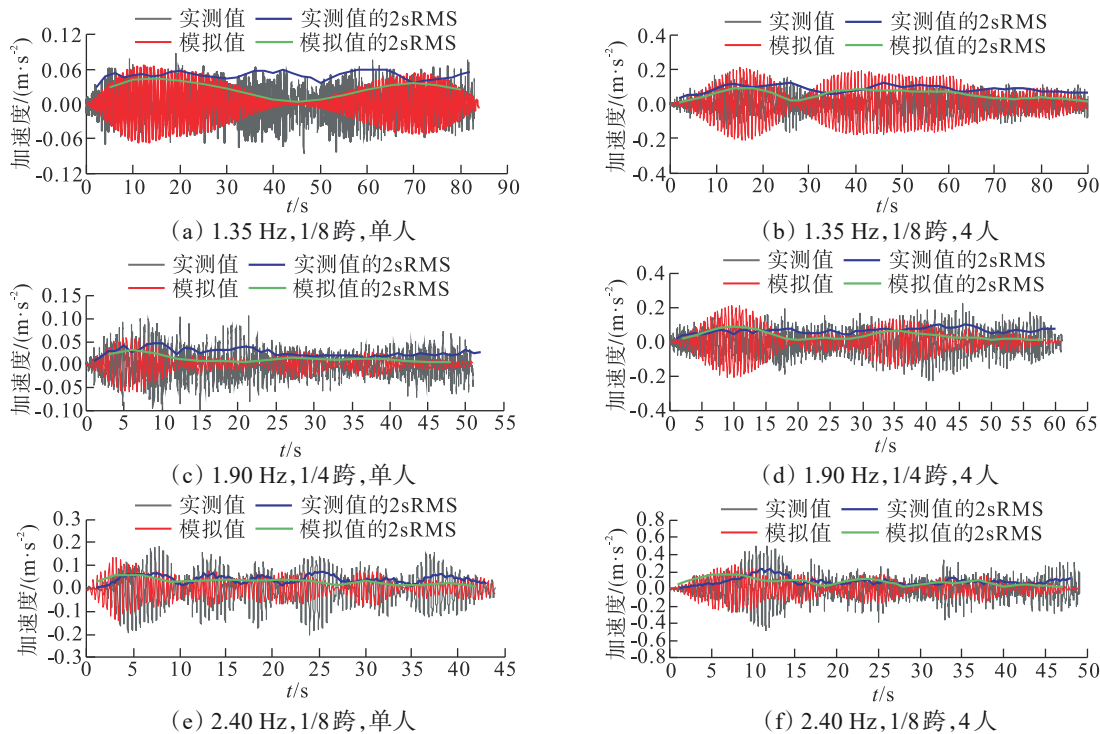


图 5 行人过桥时的加速度时程及 2sRMS
Fig.5 acceleration time history and 2-second RMS of pedestrains passing bridge

由图 5 (a)、图 5 (b) 可知, 单人过桥时有有限元模拟加速度出现 2 个峰值, 4 人过桥时出现 4 个峰值, 总体来说均与竖向四阶振型有关。但由于悬索桥模态密集, 行人步频半谐波 (0.675 Hz) 恰好与二阶振型频率相同 (0.675 Hz), 也可激起二阶共振, 因此整体波形更接近竖向二阶振型。
单人和 4 人分别以 1.90 Hz 和 2.40 Hz 过桥时, 有限元模拟加速度分别出现 5 个和 6 个波峰, 分别对应桥梁的竖向五阶和六阶振型, 人数较多时峰值出现的时间略有滞后。

步频为 1.35 Hz 和 1.90 Hz 时, 实测加速度受环境影响, 规律不明显, 但加速度最大值与有限元模拟加速度最大值接近, 实测加速度 2sRMS 曲线与有限元模拟 2sRMS 曲线形状比较接近。步频为 2.40 Hz 时, 实测加速度时程则与有限元模拟结果均出现 6 个明显的峰值, 且 2sRMS 值与有限元模拟结果吻合良好。
(2) 频谱分析
以单人过桥为例, 对各关键截面的实测加速度响应进行 FFT 频谱分析, 见图 6。

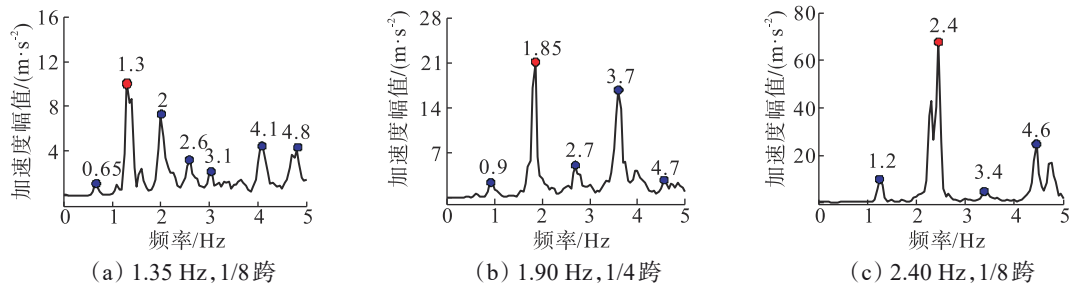


图6 单人过桥时的加速度FFT频谱

Fig.6 FFT of acceleration with single pedestrian passing bridge

由图6可知,单人以不同频率过桥时FFT幅值均在步频处出现最大值,第一个峰值对应的频率均近似为步频的一半。例如,以1.35 Hz步频过桥时,在1.3 Hz处峰值最大,而第一个峰值出现在0.65 Hz处,对应竖向二阶振型。同理,以1.90 Hz步频过桥时,在1.85 Hz处及其半倍频0.9 Hz处出现峰值。以2.40 Hz步频过桥时,在2.4 Hz处及其半倍频1.2 Hz处出现峰值。

以步频的半倍频为基数,半步频的倍频处均产生了峰值。例如,以1.35 Hz步频过桥时,半倍频(0.65 Hz)、1.5倍频(约2 Hz)、2.0倍频(约2.6 Hz)、2.5倍频(约3.1 Hz)等处均出现峰值,其他步频时类似。

图6(b)和图6(c)中,步频倍频处的峰值均大于半倍频处的峰值。图6(a)中,除最大值外,2 Hz处峰值最大,这是因为2 Hz与五阶自振频率(1.938 Hz)接近,激励起五阶振型的振动。

3.3 行人踏步工况下的人致振动响应分析

(1) 加速度分析

在工况3、4、5下,行人在桥上均匀站立,在行人开始踏步并趋于稳定后开始采样,采样时间为30 s。根据行人位置与不同阶振型之间的相对关系,当行人步频与四阶和六阶竖向频率共振时,只分析双人和4人工况。与五阶竖向频率共振时,只分析单人和双人工况。不同行人数量以不同步频原地踏步时的加速度时程及2sRMS值见图7。

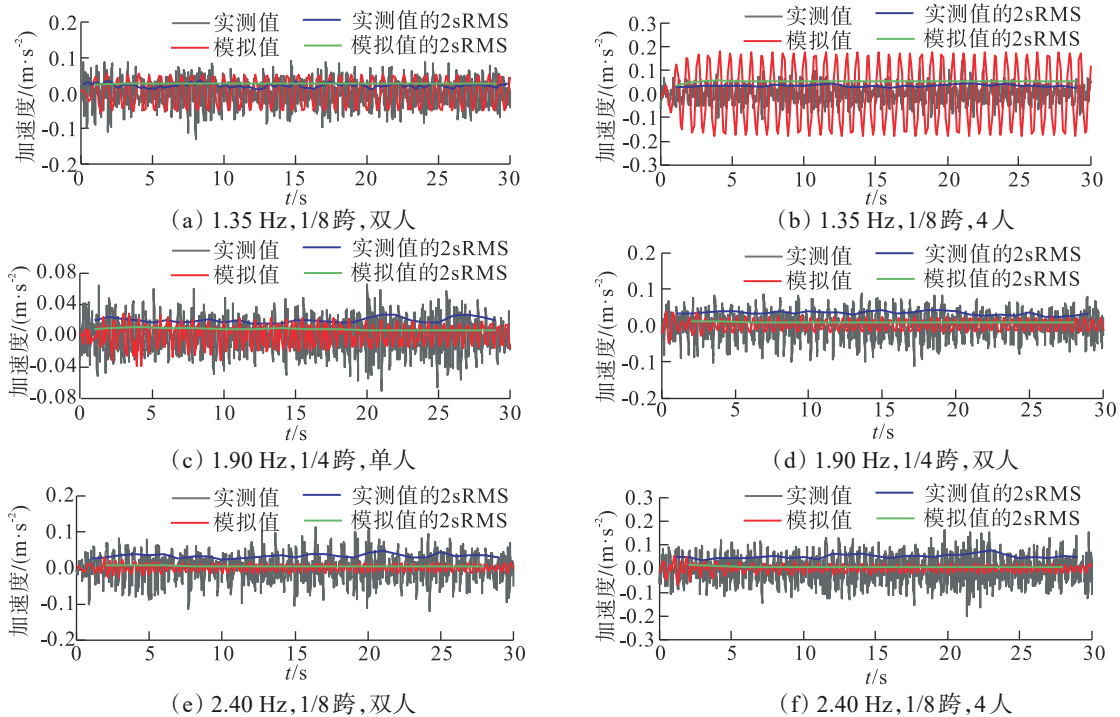


图7 行人踏步的加速度时程及2sRMS

Fig.7 acceleration time history and 2-second RMS of pedestrians marching in place

由图7可知,行人以不同步频原地踏步时,有限元模拟加速度值均在初期逐渐增大或略有振荡,

一段时间后趋于稳定,2sRMS值呈直线变化;由于外界环境的干扰,实测加速度的稳定性不如有限元模拟值。

限元模拟的加速度,但仍能看出趋于稳定的变化趋势,2sRMS值基本呈直线变化。

步频为1.90 Hz和2.40 Hz时,由于环境噪声的影响,加速度的实测值均大于有限元模拟值。步频为1.35 Hz,双人时加速度的实测值略小于有限元模拟值,4人时则明显减小。这是由于有限元模拟未考虑环境噪声和结构阻尼随振幅的变化,结构阻尼会随振幅的增大而增大,因此步频为1.35 Hz时,较大的振幅使桥梁的实际阻尼增加,导致实测值小于有限元模拟值。

与工况1、工况2相比,行人原地踏步时的加速度2sRMS值最大值均有所减小,这是因为双人和4人在桥上均匀分布且相互同步时,部分位置的振型相位与行人相位相反,削弱了总反应;而单人在跨中原地踏步并激发五阶共振时,其2sRMS值小于单人过桥时在第一个峰值处的最大加速度,见图5(c)。

(2) 频谱分析

以工况4为例,对各关键截面的实测加速度响应进行FFT频谱分析,见图8。

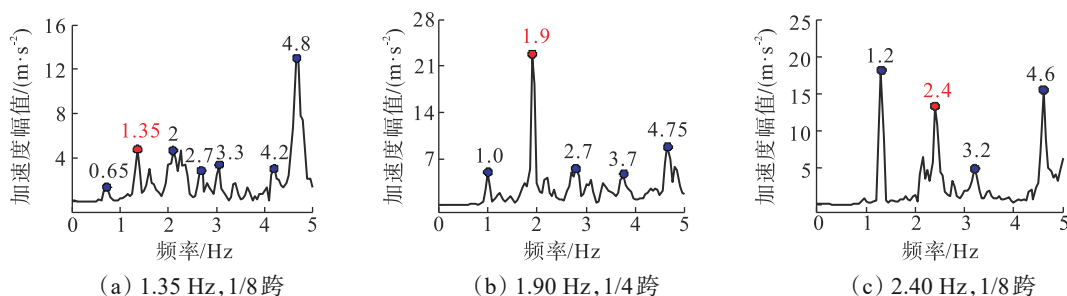


图8 双人原地踏步时的加速度FFT频谱

Fig.8 FFT of acceleration with two pedestrians marching in place

由图8可知,双人以不同阶共振频率原地踏步时,图8(a)和图8(c)的FFT幅值与行人过桥时不同,均未在步频处出现最大值,这是因为四阶和六阶振型为反对称,部分位置人-桥反相,所以在共振频率处振幅较小;图8(b)中,1.9 Hz步频五阶共振下FFT幅值最大值对应频率与行人过桥时一致,均在共振频率处出现。

图8(a)在4.8 Hz出现最大值,图8(b)在4.75 Hz出现第二峰值,经有限元模拟分析发现,在4.7 Hz处出现了1个竖向振型,与行人步频的半谐波发生共振。图8(c)在1.2 Hz出现幅值的最大值,这是由于该点接近四阶自振频率(1.35 Hz),图8(c)在4.6 Hz也出现了第二峰值。

4 人致振动响应参数分析及行人舒适度评价

4.1 行人数量的影响

1.35 Hz步频下1/8跨、1.90 Hz步频下1/4跨和2.40 Hz步频下1/8跨在不同人数过桥时的加速度2sRMS最大值如图9所示。实测工况最多只有4人,因此只对SMD模型下的有限元模拟值进行分析。根据德国EN03规范^[21]的计算方法,当最大行人密度为2.0人/m²时,可得出最大同步行人数量为35人。行人过桥时前后间距保持3 m,原地踏步时行人均匀分布。

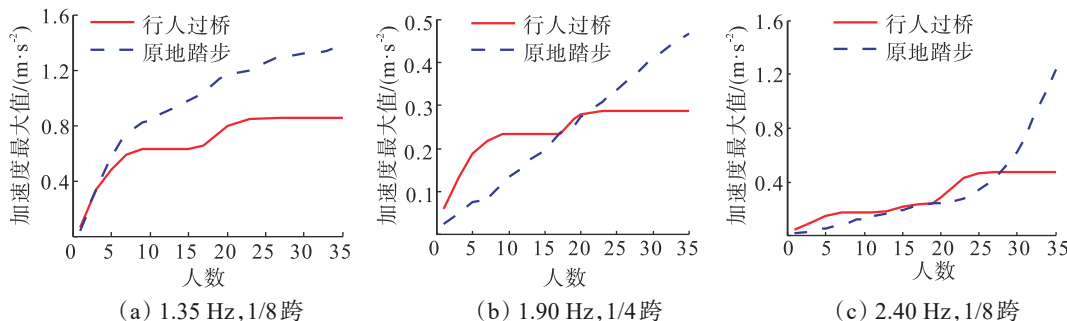


图9 加速度2sRMS最大值随行人数量的变化

Fig.9 variation of maximum 2-second RMS of acceleration with pedestrians number

由图9可知,行人过桥时,不同步频下加速度2sRMS最大值均随行人数量呈总体增大趋势,但

变化曲线会在部分人数区间内出现平台,这是由于1.35 Hz、1.90 Hz和2.40 Hz步频分别与桥梁的

第四、五、六阶频率发生共振,使得加速度总体表现出共振型的形状,见图5。因此随着行人过桥人数增加,人-桥同相和人-桥反相现象会交替出现,而人-桥反相时人数虽然增加,但响应减小。图中记录的是总时程中的最大值,因此在人-桥反相时,表现的仍是人-桥同相时的最大值,此时曲线出现平台段。

行人原地踏步时,加速度2sRMS最大值也随行人数量呈增大趋势,但由于行人均匀分布,曲线未出现平台,且在人数较多时保留在桥上的人数会多

于行人以3 m间距过桥,因此加速度最大值较大。

4.2 行人步频的影响

选取步频较多的工况7和工况8进行分析。工况7中,行人过桥时的步频为1.3~2.3 Hz,每次测试增加0.2 Hz,行人数量为6人,间距为3 m,依次列队通过悬索桥;工况8中,行人原地踏步时步频为1.3~2.3 Hz,每次测试增加0.2 Hz,行人数量为6人,在桥上均匀站立,间距为11.14 m。1/2跨和1/8跨处行人以不同步频过桥和原地踏步时的加速度实测值及有限元模拟值的2sRMS最大值见图10。

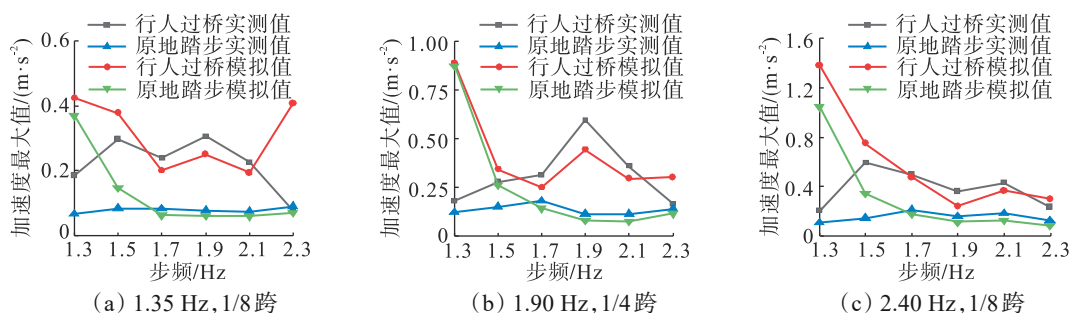


图10 加速度2sRMS最大值随行人步频的变化

Fig.10 variation of maximum 2-second RMS of acceleration with pedestrians step frequencies

由图10可知,行人过桥时,在步频为1.3 Hz、1.5 Hz和2.3 Hz时,最大加速度的实测值均小于有限元模拟值,且有限元模拟值越大,与实测值的差距也越明显。其原因在于过小或过大的步频均偏离行人常见步频范围,行人之间难以完全同步。在有限元分析中,阻尼比取自环境振动下的实测值,仅适用于振动响应较小时的计算,而实际阻尼比会随振动幅值增大而增大,因此实测加速度值较小。在其余步频条件下,加速度的实测值均大于有限元模拟值,二者平均相对误差约为12%。此外,3个测点的有限元模拟加速度最大值均出现在1.3 Hz处,这是由于1.3 Hz与桥梁低阶自振频率更接近,尤其是其半谐波频率0.65 Hz恰好与竖向一阶振型频率(0.674 Hz)相近。

同理,原地踏步时,3个测点的加速度最大值在行人步频为1.3 Hz和1.5 Hz时的实测值均小于有限元模拟值,而在其余步频下实测值均大于模拟值,二者平均相对误差约为20%。与行人过桥时相似,行人原地踏步的步频为1.3 Hz时,3个测点的模拟值最大。

4.3 行人最不利加载工况分析及舒适度评价

由图5和图7可知,4人过桥时,步频为1.35 Hz时的加速度最大值为0.184 m/s²,步频为1.9 Hz时的加速度最大值为0.228 m/s²,步频为2.4 Hz时的加速度最大值为0.498 m/s²。4人原地踏步,步频为

1.35 Hz时的加速度最大值为0.137 m/s²,步频为2.4 Hz时的加速度最大值为0.199 m/s²;双人原地踏步,步频为1.9 Hz时的加速度最大值为0.112 m/s²。根据德国EN03规范^[21]的行人舒适度评价标准,以上工况均属于很舒适状态。

EN03规范的舒适度评价方法基于等效同步行人桥上原地踏步的假设。然而,试验中的原地踏步工况均采用行人沿桥梁轴向均匀布置的方式,这无法得到最不利响应。因此,本节采用基于人-桥共振振型的最不利加载方法:令行人在桥上原地踏步,步频取桥梁固有频率,且所有行人相位均按对应振型形状设置为同相状态。以竖向五阶振型为例,其加载方式见图11。

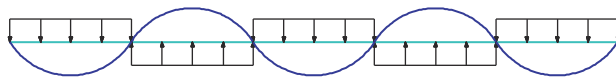


图11 行人载荷加载示意

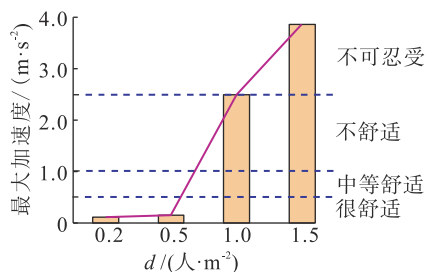
Fig.11 scheme of pedestrians load

考虑行人密度从稀少到密集的范围,选取 d 分别为0.2人/m²、0.5人/m²、1.0人/m²和1.5人/m²这4种工况,根据EN03规范^[21],按步频计算行人荷载折减系数 ψ 。当竖向步频为1.9 Hz时, ψ 为1;竖向步频为1.35 Hz和2.4 Hz时, ψ 分别为0.22和0。因此,仅针对1.9 Hz这一最不利步频进行行人竖向舒适度分析。

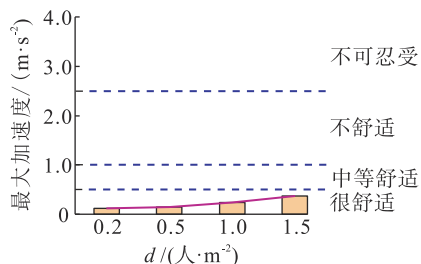
EN03规范采用的行人载荷模型为力模型,即

在式(2)中取 m_p 、 k_p 和 c_p 均为0,仅考虑 $F(t)$ 的作用。行人步频为1.9 Hz,阻尼比采用实测竖向五阶振型的阻尼比0.571%,得到力模型下跨中、1/4跨和1/8跨截面处的加速度最大值及基于EN03规范的舒适度评价结果,见图12(a)。

由图12(a)可知,随着行人密度的增加,最大加速度快速增长。当行人密度为0.2~0.5人/m²时,行人舒适度等级为“很舒适”;当行人密度达到1.0人/m²时,进入“不舒适”状态;当行人密度达到1.5人/m²时,则进入“不可忍受”状态。由4.2节中1.3 Hz步频处的实测值远小于有限元模拟值这一结果可知,在振动响应较大时,桥梁实际阻尼比不应继续采用环境振动下测得的小阻尼比。EN03规范规定,钢结构人行桥在振动响应较大时,阻尼比取4%。因此,本文对1.0人/m²和1.5人/m²行人密度下的加速度最大值重新计算,取阻尼比为4%,结果见图12(b)。修正阻尼比后,行人密度为0.2~1.5人/m²时,最大竖向加速度为0.366 m/s²,对应行人舒适度等级均为“很舒适”。



(a) 阻尼不随振动响应变化



(b) 阻尼随振动响应增大而增大

图12 最大加速度及行人舒适度

Fig.12 maximum acceleration and comfort of pedestrian

5 结论

针对某建筑楼顶的人行悬索桥,通过自振特性试验和人致振动试验对该桥的正常工作状态和行人舒适度进行了评估,并结合SMD模型下的有限元分析,对其竖向高阶共振特性进行研究,得出以下结论。

(1) 桥体自振频率较低且频率分布较为集中,竖向振型中的第四阶和第五阶自振频率处于行人

常见竖向步行频率范围内;实测频率与模拟频率比较接近,说明该桥在使用过程中未发生明显的刚度下降。

(2) 行人以共振频率过桥时,加速度时程与对应共振振型具有一定的相关性,证实共振模态主导总响应。但由于悬索桥频率分布密集,行人半步频和倍步频也会激起较大的响应。

(3) 行人过桥和原地踏步时加速度2sRMS最大值均随行人数量呈总体增大趋势;除共振步频外,对应低阶振型频率的较小步频激起的响应也较大,说明共振振型和低阶振型都有较大的参与度。

(4) 实测结果表明,结构阻尼比随响应的增大而增大,基于环境振动获取的模态阻尼比,并不适用较大人致振动响应的数值分析,会导致数值结果远远大于实测值,应进一步研究以行人为激励的振动模态。

(5) 通过施加最不利行人载荷,并考虑阻尼比随振动响应的变化,根据德国EN03规范,在最不利步频1.9 Hz下,行人密度0.2~0.5人/m²(阻尼比为0.571%)及1.0~1.5人/m²(阻尼比为4%)时,行人舒适度均为“很舒适”等级。

参考文献(References):

- [1] DALLARD P, FITZPATRICK A J, FLINT A, et al. The London millennium footbridge [J]. Structural Engineer, 2001, 79(22): 17-33.
- [2] 王泽涵, 李晨光, 许雅倩, 等. 人行桥人致横向振动及横向锁定分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(4): 462-470.
- WANG Zehan, LI Chenguang, XU Yaqian, et al. Analysis of human-induced lateral vibration and lock-in phenomenon on footbridge [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(4): 462-470.
- [3] 华旭刚, 王圣淇, 唐煜, 等. 大跨径悬带桥颤振特性研究 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 57-65.
- HUA Xugang, WANG Shengqi, TANG Yu, et al. Flutter characteristics of long-span stress-ribbon bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 57-65.
- [4] 沈文爱, 曾东鋈, 朱宏平. 基于MTMD的大跨度人行悬索桥人致振动控制 [J]. 计算力学学报, 2022, 39(2): 178-184.
- SHEN Wenai, ZENG Dongjun, ZHU Hongping. Vibration control on long-span pedestrian suspension bridge based on MTMD system [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(2): 178-184.
- [5] 陈隽, 彭怡欣, 王玲. 基于步态分析技术的三向单足落步荷载曲线试验建模 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 79-87.
- CHEN Jun, PENG Yixin, WANG Ling. Experimental investigation and mathematical modeling of single footfall load using motion capture technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 79-87.
- [6] DA SILVA F T, BRITO H M B F, PIMENTEL R L. Modeling of

- crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(12): 1196-1204.
- [7] MACDONALD J H G. Lateral excitation of bridges by balancing pedestrians[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009, 465(2104): 1055-1073.
- [8] 朱前坤, 李宏男, 杜永峰, 等. 不同行走步速下人行桥振动舒适度定量化评估[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 97-104.
- ZHU Qiankun, LI Hongnan, DU Yongfeng, et al. Quantitative evaluation of vibration serviceability of pedestrian bridge under different walking speed[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 97-104.
- [9] WANG Z H, LI C G, LI Y S, et al. Pedestrian-induced lateral vibration of footbridges: a comparison study of different loading models[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 135: 109-130.
- [10] LI Y S, ZHANG X, WANG C, et al. Human-induced vertical vibration of a glass suspension footbridge: experimental study and numerical analysis[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2025, 21(4): 656-674.
- [11] NAKAMURA S I, FUJINO Y. Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge[J]. Structural Engineering International, 2002, 12(4): 295-300.
- [12] BEDON C. Diagnostic analysis and dynamic identification of a glass suspension footbridge via on-site vibration experiments and FE numerical modelling[J]. Composite Structures, 2019, 216: 366-378.
- [13] BEDON C. Experimental investigation on vibration sensitivity of an indoor glass footbridge to walking conditions[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101195.
- [14] 邹卓, 宋旭明, 李璋, 等. 基于 TMD 的自锚式人行悬索桥人致振动控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2574-2582.
- ZOU Zhuo, SONG Xuming, LI Zhang, et al. Study of pedestrian-induced vibration of self-anchored suspension footbridge based on TMD[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2574-2582.
- [15] VAN NIMMEN K, VAN HAUWERMEIREN J, VAN DEN BROECK P. Eeklo footbridge: benchmark dataset on pedestrian-induced vibrations[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(7): 05021007.
- [16] 杨毅. 大跨度异形钢箱梁人行桥的舒适性评价与振动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-77.
- [17] TADEU A, ROMERO A, BANDEIRA F, et al. Theoretical and experimental analysis of the quasi-static and dynamic behaviour of the world's longest suspension footbridge in 2020[J]. Engineering Structures, 2022, 253: 113830.
- [18] DENG D Y, WANG Z J, ZHANG X Q, et al. Experimental investigation on pedestrian walking load in steel footbridges[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 922545.
- [19] WEN Q J, GUAN M H, KONG C. Coupling vibration response of lightweight aluminum alloy footbridges due to synchronous excitation of low-density crowd[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2024, 38(5): 04024040.
- [20] TANK Y R, VESMAWALA G R. Serviceability assessment of lively skywalk footbridge under dynamic loadings of human motions in the Vadodara metropolitan area[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2025, 26(2): 617-634.
- [21] Research Fund for Coal and Steel. HiVoSS: Design of Footbridges [S]. Guideline EN03, Germany: Hivoss, 2008: 4-31.
- [22] International Organization for Standardization. Bases for design of structures--serviceability of buildings and walkways against vibrations[S]. ISO, 2007: 1-44.