

# 大跨人行悬索桥主梁涡振振幅限值研究

Research on the Amplitude Limit of Vortex of the Main Girder of Long-span  
Pedestrian Suspension Bridge based on the Comfort Level of Pedestrians

石紫琳<sup>1</sup>, 李玉学<sup>1,2,3</sup>, 胡志勇<sup>4</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 河北省风工程与风能利用工程技术研究中心, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 石家庄 050043;  
4. 中国铁路南昌局集团有限公司, 南昌 330002)

**摘要:** 为保证大跨人行悬索桥能够同时兼顾行人舒适性和结构安全性, 依托主跨 152 m 的景区人行悬索桥为工程背景, 采用计算和 CFD 数值模拟的方法, 得到该桥主梁涡振的竖弯振幅和扭转振幅限值, 通过设计最大风速和风攻角范围内该桥实际涡振最大竖弯和扭转涡振幅值, 进行舒适度分析。结果表明: 随着风攻角由正转负, 大跨人行桥主梁竖弯涡振性能变差, 最不利竖弯涡振出现在 0° 风攻角下, 可以满足符合安全的竖弯涡振振幅但超过了符合舒适度的涡振振幅限值; 随着风攻角由负转正, 大跨人行桥主梁扭转涡振性能变差, 其风速锁定区间向高风速区偏移, 最不利扭转涡振出现在 3° 风攻角下, 既超过满足符合安全的竖弯涡振振幅, 也超过了符合舒适度的涡振振幅限值。研究得出考虑行人舒适度的大跨人行悬索桥涡振振幅限值标准更为严格, 研究成果可为大跨人行悬索桥振幅限值计算提供依据。

**关键词:** 大跨人行悬索桥; 行人舒适度; 涡振限值; 竖弯幅值; 扭转幅值

**中图分类号:** U448.11; U448.25      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249(2025)06-0076-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.014

SHI Zilin<sup>1</sup>, LI Yuxue<sup>1,2,3</sup>, HU Zhiyong<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province,  
Shijiazhuang 050043, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety  
Control of China Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
4. China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 330002, China)

**Abstract:** To ensure that the long-span pedestrian suspension bridge can simultaneously take into account pedestrian comfort and structural safety, relying on the scenic area pedestrian suspension bridge with a main span of 152 meters as the engineering background, the limit values of the vertical bending amplitude and torsional amplitude of the vortex vibration of the main beam of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278314); 河北省自然科学基金资助项目(E2019210031); 中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G); 北京交通大学“结构风工程与城市风环境北京市重点实验室”开放课题(2023-1)。

作者简介: 石紫琳(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 桥梁工程。

收稿日期: 2025-02-24

the bridge were obtained by using the methods of calculation and CFD numerical simulation. Comfort analysis was conducted by designing the maximum vertical bending and torsional vortex amplitude values of the actual vortex vibration vibration of the bridge within the range of the maximum wind speed and wind attack Angle. The results show that as the wind attack Angle changes from positive to negative, the vertical bending vortex vibration performance of the main beam of the long – span pedestrian bridge deteriorates. The most unfavorable vertical bending vortex vibration occurs at a wind attack Angle of 0°, which can meet the safe vertical bending vortex vibration amplitude but exceeds the vortex vibration amplitude limit that meets the comfort level; As the wind attack Angle changes from negative to positive, the torsional vortex vibration performance of the main beam of the long – span pedestrian bridge deteriorates. The wind speed locking range shifts towards the high wind speed zone. The most unfavorable torsional vortex vibration occurs at a 3° wind attack Angle, which not only exceeds the vertical bending vortex vibration amplitude that meets safety requirements but also exceeds the vortex vibration amplitude limit that meets comfort requirements. The research concludes that the limit standards for vortex vibration amplitude of long – span pedestrian suspension Bridges considering pedestrian comfort are stricter. The research results can provide a basis for the calculation of amplitude limit values of long – span pedestrian suspension Bridges.

**Key words:** long span pedestrian suspension bridge; pedestrian comfort; eddy vibration limit; vortex amplitude; acceleration amplitude

## 0 引言

近年来，越来越多景区建造景观人行悬索桥，此类桥多建于悬崖和峡谷，风荷载作用明显。在风荷载作用下，结构易发生涡振，虽然涡振不会引起桥梁主体结构破坏，但其诱发的小幅振动会影响到桥上行人舒适度，景区人行悬索桥给行人提供视觉与感受冲击的同时，桥梁响应更容易使人产生生理以及心理上的不舒适<sup>[1-2]</sup>。为减小桥梁涡振对人体舒适度的影响，考虑行人舒适度的涡振振幅限值分析成为该类大跨人行悬索桥设计中需要重点关注的问题。

针对上述问题，学者们借助风洞试验和数值模拟等方法进行了研究，赵会东等<sup>[3]</sup>提出以车体加速度极值及其变化速率作为衡量指标的铁路桥梁竖向弯曲涡激振动振幅限值，给出基于车体加速度与最大倾角的振幅建议限值。郭向荣等<sup>[4]</sup>基于斜拉桥竖向涡振现象，系统探究了在不同振幅和初始相位桥梁发生竖向涡振的工况下，列车运行采用不同评价指标时的动态响应表现规律。陈阶亮等<sup>[5]</sup>通过对不同规范比较发现，在低频范围内（小于 2 Hz），各规范所规定的加速度指标都比较接近，而在高频范围内却相差甚大。曹张<sup>[6]</sup>针对人行桥梁振动舒适性控制，开展了结构模态参数辨识、调谐质量阻尼器（TMD）参数优化设计及减振效能评估等研究。陈豪<sup>[7]</sup>通过试验数据的采集分析以及有限元模型的精细化模拟，明确了玻璃景观桥风荷载构成特征。赵

鄂桂<sup>[8]</sup>围绕人行桥振动对人体舒适度的影响展开探讨，系统性梳理了目前人行桥舒适度研究与振动控制领域的研究进展。徐欣<sup>[9]</sup>借助有限元分析软件 Ansys 构建人行悬索桥的有限元模型，对所构建模型开展自振特性分析和舒适度评价。蔡辉等<sup>[10]</sup>比较和总结了国内外人行桥的设计规范，利用建议的评价标准对该人行桥振动舒适度进行评价。曹玉贵等<sup>[11]</sup>运用有限元软件 Ansys，利用分块兰索斯方法，分析了人行桥的振动特性，对人行悬索桥的竖向舒适度及侧向舒适度进行综合分析。朱斌<sup>[12]</sup>建立三维空间模型并进行分析，发现抑振措施具备良好的振动控制效果，加强谐振质量阻尼器的措施可以大幅减小桥梁的振动响应。孟万晨<sup>[13]</sup>针对风 – 人 – 桥多物理场耦合系统，探讨人行悬索桥在风致激励与人致振动作用下的舒适度评价问题。何春梅等<sup>[14]</sup>将人行悬索桥作为研究对象，依据行人的步行特征，对人行悬索桥舒适度的影响进行了深入探究。尹栋佳等<sup>[15]</sup>通过对国内外相关规范的系统比较与分析，采用限制动力响应值的方法构建有限元模型，对桥梁在行人激励下的动力响应进行计算，开展行人步行舒适度分析。

大跨度桥梁涡振限值综合考虑结构安全性和行人舒适度两方面要求，尤其对于景区大跨悬索桥来说应采用更为严格的标准，仅满足单个规范限值是不够的，应在保证安全的基础上同时满足行人舒适度。为确定考虑行人舒适度的大跨人行悬索桥涡振振幅限值要求，

## 道桥技术

以某景区大跨人行悬索桥为工程背景, 对其桥梁竖弯和扭转涡振响应下的行人舒适度进行研究。

### 1 涡振振幅限值研究

涡振振幅限值是桥梁涡振性能的直接评价指标, 也是控制桥梁涡振的主要依据之一, 对于桥梁结构设计, 需要明确合理的桥梁涡振振幅限值。对于大跨人行悬索桥抗风设计的控制指标, 考虑到行人舒适度评价通常以加速度为指标, 而涡振振幅限值通常以位移为指标, 因此探究考虑行人舒适度的涡振振幅限值, 需将评价舒适度的加速度限值转化为位移并与现行规范中涡振振幅限值进行比较, 从而确定满足行人舒适度的涡振振幅限值。

考虑到桥梁涡振一般表现为单一模态的简谐振动, 结合 DB13 (J) T 264—2018《景区人行玻璃悬索桥与玻璃栈道技术指标》(以下简称“景区悬索桥技术指标”)<sup>[16]</sup>, 将评价舒适度的加速度指标限值转化为振幅限值指标, 相应的加速度幅值容许值  $A_h$ 、 $A_\theta$  则和位移幅值容许值  $h$ 、 $\theta$  可由下式计算:

$$\begin{cases} [A_h] = [h] \cdot (2\pi f_h)^2 = 1.26 f_h \\ [A_\theta] = [\theta] \cdot (2\pi f_h)^2 \cdot \frac{\pi}{180} = \frac{\pi f_t}{B} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $[A_h]$ 、 $[A_\theta]$  分别为主梁竖弯、扭转加速度限值,  $\text{m/s}^2$ ;  $[h]$ 、 $[\theta]$  分别为主梁竖弯和扭转振幅限值,  $\text{m}$  和  $^\circ$ ;  $f_h$ 、 $f_t$  分别为主梁涡振竖弯频率和扭转频率,  $\text{Hz}$ ;  $B$  为桥面宽度,  $\text{m}$ 。

由式(1)可知, 容许加速度幅值与主梁竖弯和扭转频率成正比, 结合《景区悬索桥技术指标》中涡振振幅限值可得由容许加速度幅值转化的涡振振幅限值:

$$\begin{cases} [h_a] = \frac{[A_h]}{4\pi^2 f_h^2} \\ [\theta_a] = \frac{[A_\theta]}{4\pi^2 f_t^2} \cdot \frac{180}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

得到转化后的涡振振幅限值, 需与 T/CECS 1140—2022《景区人行悬索桥工程技术规程》(以下简称“规程”)<sup>[17]</sup>中的涡振振幅限值进行比较, 确定是否由符合行人舒适度转化后的振幅限值较桥梁

安全的舒适度限值更为严格。

根据式(2)得出满足行人舒适度的涡振振幅限值为:

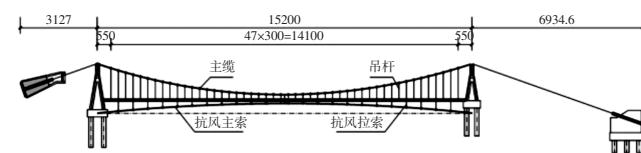
$$\begin{cases} [h_a] = \min \left[ \frac{0.013}{f_h^{1.5}}, \frac{0.018}{f_h^2} \right] \\ [\theta_a] = \frac{0.218}{f_t^{1.5}} \end{cases} \quad (3)$$

### 2 算例分析

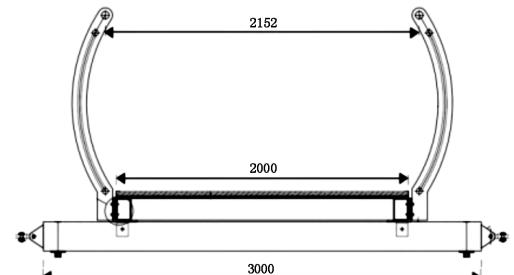
#### 2.1 工程背景

选取西藏·八宿·怒江 72 拐峡谷人行悬索桥为工程背景, 对其考虑行人舒适度的风致涡振限值进行分析。该人行悬索桥主跨为 152 m, 两个边跨分别为 31.27 和 69.346 m, 主梁不包括风嘴宽度, 桥面人行部分宽度 2 m, 桥面两侧栏杆为弧形, 栏杆顶部宽度 2.152 m, 如图 1 所示。

该桥位于西藏自治区, 桥梁设计风速 20.0 m/s。根据该桥结构形式, 建立有限元模型, 计算得到结构一阶竖弯频率为 0.371 2 Hz, 一阶扭转频率为 0.754 2 Hz。



(a) 立面图



(b) 主梁横断面图

图 1 桥梁总体布置图

Fig. 1 General layout of bridge

#### 2.2 主梁竖弯涡振振幅限值比较

将一阶竖弯频率 0.371 2 Hz 代入《规程》竖弯涡振振幅限值公式, 得到满足结构安全性的竖弯涡振振幅限值  $h$  为 86 mm。将竖弯频率 0.371 2 Hz 代入式(3), 得到满足行人舒适度的竖弯涡振振幅限值

$[h_a]$  为 58 mm。

主梁竖弯涡振振幅限值为 58 mm, 小于《规程》的竖弯涡振振幅限值 86 mm, 说明单纯考虑结构安全性的桥梁竖弯涡振振幅限值不能满足人行舒适度的要求。

### 2.3 扭转涡振振幅限值比较

将一阶扭转频率 0.754 2 Hz 代入《规程》扭转涡振振幅限值公式, 得到满足结构安全性的扭转涡振振幅限值  $\theta$  为 1.612°。将扭转频率 0.754 2 Hz 代入式(3), 得到满足行人舒适度的扭转涡振振幅限值  $[\theta_a]$  为 0.332°。

主梁扭转涡振振幅限值为 0.332°, 小于《规程》的扭转涡振振幅限值 1.612°, 说明单纯考虑结构安全性的桥梁扭转涡振振幅限值不能满足人行舒适度的要求。

## 3 主梁基于人行舒适度的涡振分析

### 3.1 主梁涡振响应数值计算

根据人行悬索桥加劲主梁结构几何特性以及结构自振频率等确定涡振响应计算相关参数, 单位长度质量为 476 kg, 单位长度质量惯性矩为 3 380 kg · m<sup>2</sup>; 根据相关规定竖弯和扭转阻尼比分别选为 0.77% 和 0.52<sup>[16]</sup>。

根据计算主梁涡振响应的 Newmark -  $\beta$  法<sup>[18-19]</sup>, 计算 -3°、0° 和 3° 三个风攻角下该主梁断面的涡振响应。建立 CFD 数值模型, 主梁表面设为无滑移壁面, 将流场入口与主梁迎风面距离设置为 5B (B 为特征长度), 流场出口与主梁背风面设置为 10B, 流场上、下边界距主梁中心长度设置为 5B。将模型左侧设为速度入口, 右侧设为压力出口, 流场上、下设为对称边界, 内外流体域通过 Interface 面进行数据交换。

采用差异化方法划分不同区域的网格, 由内到外按照刚体运动区域、动网格区域、静止网格区域的结构顺序对网格进行划分。在刚体区域, 为提升计算效率并保证计算精度, 采用四边形结构化网格进行划分。在动网格区域, 考虑到结构运动的复杂性和几何形状的不规则性, 采用三角形非结构化网格, 以更好地适应区域内的动态变化; 将弹性光顺法和局部重构法相结合对网格进行更新, 确保网格在运动过程中的质量, 避免网格畸变。静止网格区

域因与主梁距离较远, 计算精度较低, 所以网格划分采用尺寸较大的四边形结构。具体计算域及边界条件设置如图 2 所示。

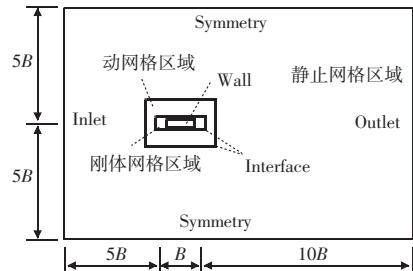


图 2 计算域、边界条件和网格范围示意图  
Fig. 2 Computational domain, boundary conditions and meshing range

数值求解过程中, 在求解软件中导入划分好的网格, 以 SST 模型设置为湍流模型, 通过 SIMPLEC 算法对速度场和压力场的耦合问题进行求解, 以二阶隐式积分对时间和二阶迎风格式进行空间离散, 将时间步长设置为  $T/400$  ( $T$  为主梁自振周期), 控制残差收敛在  $1.0 \times 10^{-5}$  以下, 设置速度入口边界湍流强度为 5%, 湍流黏性比设置为 10。

### 3.2 竖弯涡振行人舒适度分析

图 3 为 -3°、0° 和 3° 三个风攻角下主梁涡振振幅值随无量纲折减风速的变化曲线。横坐标风速转换为无量纲的折减风速  $U_r = U/f_n D$  ( $U$  为来流风速,  $D$  为特征高度)。当发生竖弯涡振时,  $f_n$  为一阶竖弯频率; 当发生扭转涡振时,  $f_n$  为一阶扭转频率)。

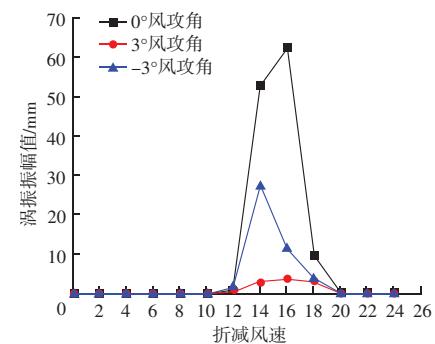


图 3 不同无量纲折减风速下主梁竖弯涡振响应  
Fig. 3 Vertical bending vortex vibration response of main beam under different dimensionless reduced wind speeds

3 个风攻角下的无量纲折减风速锁定区间基本一致, 在 10~20 之间。在 3° 风攻角下, 主梁在无量纲折减风速锁定区间内竖弯涡振较小, 振幅均小于 10 mm; 在 -3° 风攻角下最大竖弯涡振幅值为 27.37 mm; 2 个风攻角下的竖弯涡振振幅值既符合《规程》中满

## 道桥技术

足结构安全性的竖弯涡振振幅限值 86 mm，也满足根据式（3）得到的满足行人舒适度的扭转涡振振幅限值 58 mm。与  $3^\circ$  和  $-3^\circ$  风攻角相比，在相同无量纲折减风速下  $0^\circ$  风攻角的竖弯振幅更大，因此， $0^\circ$  风攻角为该主梁竖弯涡振的最不利风攻角； $0^\circ$  风攻角下主梁无量纲折减风速为 16 时，竖弯振幅最大值为 62.52 mm，超过式（3）计算出的竖弯涡振振幅限值 58 mm，但未超过《规程》中满足结构安全性的竖弯涡振振幅限值 86 mm。故该桥可能导致行人不舒适。

### 3.3 扭转涡振行人舒适度分析

由图 4 可知， $0^\circ$  和  $-3^\circ$  风攻角下有两个风速锁定区间，高风速锁定区间无量纲折减风速为 24 时，有扭转涡振最大幅值为  $0.86^\circ$ ，超过式（3）计算出的扭转涡振振幅限值  $0.332^\circ$ ，但未超过《规程》中满足结构安全性的扭转涡振振幅限值  $1.612^\circ$ 。 $3^\circ$  风攻角下无量纲折减风速在 26 和超过 30 时，扭转涡振幅值均大于式（3）计算出的扭转涡振振幅限值  $0.332^\circ$ ，故  $3^\circ$  风攻角为最不利风攻角。高风速下扭转振幅较大，极易引起行人不舒适。由此可见，文中提出的基于行人舒适度的涡振振幅限值相较于《规程》计算得出的满足结构安全的涡振振幅限值更为严格。

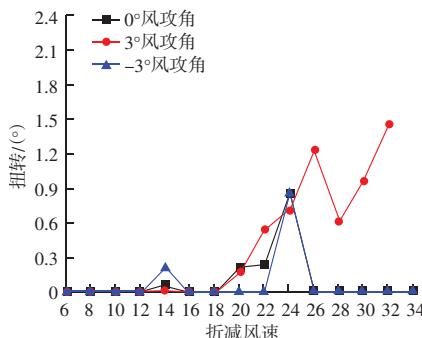


图 4 不同无量纲折减风速下主梁扭转涡振响应

Fig. 4 Torsional vortex response of main beam under different dimensionless reduced wind speeds

## 4 结论

基于现有大跨人行悬索桥的规范，研究提出了基于行人舒适度的大跨人行悬索桥主梁涡振振幅限值确定方法，得到以下主要结论：

(1) 在两种条件下求得的最小振幅作为振幅限值，得出竖弯涡振振幅不宜超过 58 mm，扭转涡振振幅不宜超过  $0.58^\circ$ 。结果显示将符合行人舒适度转化

后的振幅限值与满足桥梁安全的舒适度限值相结合后的涡振振幅限值标准更为严格。

(2) 随着风攻角由正转负，大跨人行桥主梁竖弯涡振性能变差，其风速锁定区间基本一致，最大竖弯涡振幅值增大；最不利竖弯涡振出现在  $0^\circ$  风攻角下，为 62.52 mm，最大风速可以满足符合安全的竖弯涡振振幅，但超过了符合舒适度的涡振振幅限值。

(3) 随着风攻角由负转正，大跨人行桥主梁扭转涡振性能变差，其风速锁定区间向高风速区偏移，最大扭转涡振幅值增大；最不利扭转涡振出现在  $3^\circ$  风攻角下，无量纲折减风速在超过 30 时，既超过满足符合安全的竖弯涡振振幅也超过了符合舒适度的涡振振幅限值。

## 参 考 文 献

- [1] 陈政清, 黄智文. 大跨度桥梁竖弯涡振限值的主要影响因素分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (9): 30–37.
- [2] LI M, SUN Y, JING H, et al. Vortex – induced vibration optimization of a wide streamline box girder by wind tunnel test [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22 (12): 5143–5153.
- [3] 赵会东, 陈良江, 肖海珠, 等. 高速铁路大跨度桥梁涡激振动振幅限值研究 [J]. 桥梁建设, 2022, 52 (1): 49–55.
- [4] 郭向荣, 岳道阔. 基于列车走行性的斜拉桥竖弯涡振振幅限值研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (11): 4233–4242.
- [5] 陈阶亮, 裴新谷. 人行桥振动舒适性评价方法及标准研究现状 [J]. 桥梁建设, 2010 (1): 75–78.
- [6] 曹张. 大跨人行桥-TMD 系统的动力参数识别与振动舒适性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [7] 陈豪. 玻璃景观桥风荷载特性及风致振动舒适度评价 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [8] 赵鄂桂. 人行桥振动舒适度评价及控制研究综述 [J]. 建材世界, 2009, 30 (2): 69–72.
- [9] 徐欣. 人行悬索桥舒适度评价及控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [10] 蔡辉, 何卫, 陈琳琳, 等. 人行桥动力特性测试及振动舒适度分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2013, 37 (2): 362–365, 368.
- [11] 曹玉贵, 胡隽, 李小青, 等. 人行索桁桥振动分析及舒适度评价 [J]. 镇江, 江苏大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (5): 605–610.
- [12] 朱斌. 大跨度人行悬索桥静动力特性分析、舒适度评价及振动控制 [D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [13] 孟万晨. 风与人行荷载作用下人行悬索桥振动舒适度评估 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. (下转第 102 页)

## 道桥技术

版), 2025, 42 (1): 82–89.

- [4] 郭森, 张柳煜, 郭元凯, 等. 基于桩-土作用效应的滚石撞击桥墩动力响应分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (1): 17–21, 112.
- [5] 杨慧. 基于修正摩尔-库伦模型的深基坑开挖数值模拟分析 [J]. 四川水泥, 2022, (12): 63–66.
- [6] 曾佳明, 朱忠义, 吕辉, 等. 考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (1): 69–82.
- [7] 陈晓广. 基于桩土相对位移特征的深厚湿陷性黄土地区桩基承载力计算方法 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (1): 137–142.
- [8] 焦驰宇, 霍鹏翔, 曹跃, 等. 地震输入方向及液化扩展场地的夹角对曲线桥抗震的影响 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (8): 3452–3462.
- [9] 邹作家. 土-结构相互作用对跨走滑断层悬索桥地震响应的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [10] 王楚皓. 考虑桩土相互作用的千米级悬索桥梁系统地震响应

(上接第 75 页)

- [8] 赵庆新, 才鸿伟, 安赛, 等. 水泥-磨细矿渣固化滨海盐渍土强度及机理 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (3): 625–630.
- [9] 徐超, 彭安琪, 于俊杰, 等. 考虑软土蠕变的大型锚碇基础变形与稳定性分析 [J]. 科技通报, 2025, 41 (5): 24–32.
- [10] 徐超, 郭宏峰, 杨晓明, 等. 普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (9): 2737–2740.
- [11] 柏延平, 夏懿, 马雷, 等. 粉煤灰基地聚物固化黄土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 8–13.
- [12] 吴云根. 粉煤灰-矿渣粉地聚物稳定碎石配合比设计及工程应

(上接第 80 页)

- [14] 何春梅, 宁晓骏, 李月富. 人行悬索桥结构参数对舒适度的影响研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (4): 427–432.
- [15] 尹栋佳, 聂科琴, 刘政伟. 人行景观斜拉桥舒适度研究 [J]. 交通科技, 2022 (4): 67–70.
- [16] 河北省工程建设标准. 景区人行玻璃悬索桥与玻璃栈道技术指标: DB13 (J) T 264—2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.

研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.

- [11] 占锋, 孙正财. 考虑桩-土效应的钢栈桥地震响应分析 [J]. 公路与汽运, 2025, 41 (5): 94–99, 104.
- [12] 邬歆. 桩土相互作用对桥轨系统近场脉冲地震响应的影响分析 [J]. 结构工程师, 2024, 40 (3): 61–67.
- [13] 张高, 张金, 唐孟. 不同桩-土模型对山区大跨度刚构桥地震易损性的影响分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47 (1): 155–164.
- [14] 张俊鑫. 近断层脉冲型地震作用下考虑桩土作用的斜拉桥地震响应分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [15] 吴鸣, 浦童刚. 考虑桩-土-水-结构相互作用的钢箱梁斜拉桥动力特性分析 [C] //中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2024 世界交通运输大会 (WTC2024) 论文集 (桥梁工程、隧道工程与轨道交通). 汕头大学土木与智慧建设工程系; 云南省公路科学技术研究院, 2024: 17–23.

用 [J]. 交通世界, 2025 (23): 35–37.

- [13] 骆展鹏, 石超, 熊春林, 等. 土壤固化剂研究进展 [J]. 四川水泥, 2025 (8): 69–71.
- [14] 骆展鹏, 熊春林, 韩泽军, 等. 矿渣-粉煤灰-玻璃粉复合固化盾构土力学性能及固化机制 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1803–1812.
- [15] 董雪妍, 丁坚平, 段先前, 等. 黔中地区岩溶深基坑抗浮水位及涌水量预测 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2017, 34 (1): 119–122.

- [17] 中国工程建设标准化协会标准. 景区人行悬索桥工程技术规程: T/CECS 1140—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [18] 李欢, 何旭辉, 王汉封, 等.  $\pi$  型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (7): 62–68.
- [19] 刘志文, 肖晗, 王雷, 等. II 型钢-混凝土结合梁断面涡激振动及气动控制措施 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 68–78.