

千米级斜拉桥在各类环境荷载作用下的梁端变位特征

杨文博, 陈宁

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月20日

摘要

以沪苏通长江公铁大桥为背景, 通过数值计算方法对比分析了各类环境荷载作用下的梁端变位特征。研究表明: 梁端纵向位移主要受主梁温度变化与顺桥向风荷载影响, 位移幅值与温度正相关, 对伸缩装置等结构性能提出更高要求; 横向位移同样以温度为主要影响因素, 且随离梁端中心点距离增大而增大; 竖向位移主要由基础不均匀沉降引起, 其他环境因素影响很小; 梁端扭转角与竖向转角对环境荷载响应均不显著, 变化幅度极小。研究进一步指出, 基础不均匀沉降是导致梁端横向转角增大的关键因素, 当不均匀沉降量超过10 cm时, 横向转角将超过1.0‰ rad的限值, 严重影响梁端处轮轨接触关系与高速列车经过梁端的安全性。因此, 在桥梁运维中应重点加强梁端结构的维护与不均匀沉降的监测控制, 以保障轨道平顺性与行车安全。

关键词

铁路桥梁, 千米级跨度, 环境荷载, 梁端变位特征

The Displacement Characteristics of the Beam End of the Kilometer Cable-Stayed Bridge under Various Environmental Loads

Wenbo Yang, Ning Chen

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: March 16, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 20, 2026

Abstract

Based on the background of Shanghai-Suzhou-Nantong Yangtze River Bridge, the displacement

characteristics of beam end under various environmental loads are compared and analyzed by numerical calculation method. The research shows that the longitudinal displacement of the beam end is mainly affected by the temperature change of the main beam and the wind load along the bridge, and the displacement amplitude is positively correlated with the temperature, which puts forward higher requirements for the structural performance of the expansion device. The transverse displacement also takes temperature as the main influencing factor, and increases with the increase of the distance from the center point of the beam end. The vertical displacement is mainly caused by the uneven settlement of the foundation, and other environmental factors have little effect. The response of torsion angle and vertical rotation angle of beam end to environmental load is not significant, and the change range is very small. The study further points out that the uneven settlement of the foundation is the key factor leading to the increase of the lateral rotation angle at the beam end. When the uneven settlement exceeds 10 cm, the lateral rotation angle will exceed the limit value of 1.0‰ rad, which seriously affects the wheel-rail contact relationship at the beam end and the safety of the high-speed train passing through the beam end. Therefore, in the operation and maintenance of the bridge, the maintenance of the beam end structure and the monitoring and control of the uneven settlement should be strengthened to ensure the track smoothness and driving safety.

Keywords

Railway Bridge, Kilometer Span, Environmental Load, Beam End Displacement Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高速铁路网络不断向更广范围、更高密度与更大规模拓展,跨越宽阔江河海峡的交通需求日益凸显。在此背景下,一批主跨达到千米级的铁路桥梁已陆续从蓝图变为现实,并逐步投入运营。这包括了已经投入运营的沪苏通长江公铁大桥与五峰山长江大桥,以及正在建设的李埠长江公铁大桥、西堠门公铁两用大桥、马鞍山长江公铁大桥、G3 铜陵长江公铁大桥。这些重大工程不仅代表着我国桥梁建设的技术高峰,也标志着高速铁路网已进入跨越地理天堑、贯通关键走廊的新阶段。

千米级跨度桥梁因其巨大的跨径,导致结构整体刚度低、柔度大。与中小跨径桥梁相比,此类轻柔结构在温度荷载、风荷载及不均匀沉降等环境荷载作用下的主梁整体变形更为敏感与显著,并在梁端处产生明显的空间变位。所以需要在梁端区域安装过梁端伸缩缝装置以及钢轨伸缩调节器,以保证主桥、引桥梁缝处轨道的平顺性以及列车在经过梁端区域的安全性。

目前国内外关于千米级桥梁梁端变位的研究较少, TB 10002-2017《铁路桥涵设计规范》中对跨度不超过 168 m 钢梁的梁端竖向转角限制做了规范。TB 10621-2014《高速铁路设计规范》对跨度 96 m 以下的有砟、无砟轨道混凝土梁,在 ZK 荷载作用下的梁端竖向转角限值做了规定[1]。向活跃[2]等基于车桥耦合振动模型与规范,研究了 400 km/h 高速铁路桥梁的梁端竖向转角限值,分析表明其值较 350 km/h 时降低约 16%~20%,但仍满足现行规范限值并具有安全储备。李永乐[3]-[5]等分析了大跨度铁路桥梁梁端伸缩装置对列车行走性的影响,研究了梁端竖向折角对列车动力响应与运行平稳性的控制作用。郭辉[6]等提出了高速铁路大跨度钢桥梁端伸缩装置的梁-轨一体化设计方法,重点关注梁端竖向转角等变位特征,并通过对比分析与试验验证,为装置选型与约束体系优化提供了依据。刘晓光[7]等基于五峰山长江大桥案例,分析了多种设计荷载作用下大跨度铁路悬索桥的三维梁端变位特征,指出横向位移与转角也

是关键控制指标, 并提出了结构与约束体系优化建议。综合现有研究可知, 当前规范对于大跨度铁路桥梁梁端变位的标准主要基于传统跨度桥梁的研究, 而并不适用于千米级跨度桥梁。

大跨度桥梁梁端变位会直接在轨道上形成局部的折角严重破坏轨道的平顺性状态, 从而影响列车在梁端区域的行车安全性。本文以沪苏通长江公铁大桥为研究对象, 通过数值计算, 对比各种环境荷载作用下梁端变位特征。

梁端变位限值

我国目前由于技术条件的限制以及出于列车行驶安全性、可靠性方面的考虑, 大跨度铁路斜拉桥一般采用有砟轨道。关于有砟轨道桥梁梁端的竖向转角, 我国相关规范给出了对应的限值, 见表 1。在相关设计规范 TB 10002-2017 与 TB 10621-2014 中关于高速铁路桥梁的竖向转角的限值规范是相同的, 200 km/h 及以下设计速度的桥梁取 $3.0‰$ rad, 250~350 km/h 设计速度的桥梁取 $2.0‰$ rad。

梁端区域的行车安全性, 传统上主要关注梁端竖向转角与横向转角的影响。然而, 梁端自身的其他位移响应(包括纵向伸缩、竖向位移等空间变位)同样是不可忽视的关键因素, 其直接影响轨道结构的几何形态与轮轨接触关系。因此, 为系统研究环境荷载对梁端变位的影响, 本文将对风荷载、温度荷载及基础不均匀沉降等多种典型环境作用下的梁端变位特征进行综合对比分析, 以明确各类荷载的影响及其量级关系。

Table 1. The limit value of vertical rotation angle of bridge end of ballasted track in the specification

表 1. 规范中有砟轨道桥梁梁端竖向转角限值

线路类型	车速/(km/h)	竖向转角/(‰ rad)	横向转角(‰ rad)
客货共线/城际铁路	200 以下	3.0 (桥台与桥梁之间)	\
		6.0 (相邻两孔梁间)	
高速铁路	250~350	2.0 (桥台与桥梁之间)	1.0
		4.0 (相邻两孔梁间)	

2. 工程背景

2.1. 工程概况

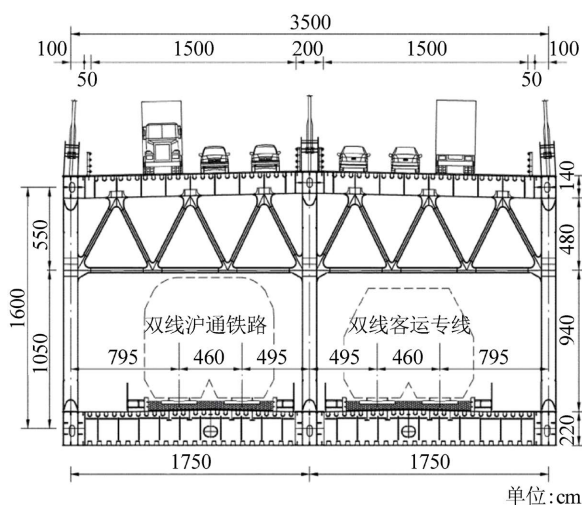


Figure 1. Cross section of Shanghai-Suzhou-Nantong Yangtze River Bridge
图 1. 沪苏通长江公铁大桥横断面

沪苏通长江公铁大桥主桥为孔跨布置(140 m + 462 m + 1092 m + 462 m + 140 m)斜拉桥, 主桥全长为 2300 m, 沪苏通长江公铁大桥是全球首座跨度超过千米的公铁两用斜拉桥[8]。桥梁主梁采用板桁组合结构体系。其主体为三片主桁, 桁高 16 米, 桁宽 35 米, 标准节间长度 14 米, 如图 1 所示。上层公路桥面采用正交异性钢桥面板、下层铁路桥面采用钢箱结构两者与主桁结合, 共同参与整体受力, 形成板桁组合结构。

桥梁上层公路布置双向 6 车道高速公路, 下层铁路布置 4 线铁路包含了 2 线客货共线铁路 + 2 线客运专线, 铁路设计速度采用 2 线 200 km/h + 2 线 250 km/h 的方案[1]。

2.2. 有限元仿真模型

建立沪苏通长江公铁大桥的有限元模型如图 2, 使用梁单元模拟桥梁的桥塔、桥墩、钢桁梁; 使用索单元模拟桥梁的斜拉索; 使用弹性支撑来模拟竖向支座、横向抗风支座; 使用刚性连接来模拟斜拉索与主梁之间的耦合[1]。

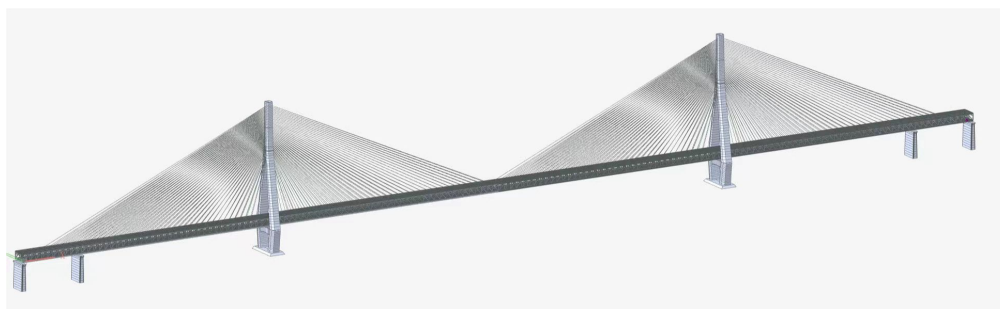


Figure 2. Bridge finite element model
图 2. 桥梁有限元模型

3. 各荷载作用下的梁端变位

3.1. 温度荷载

沪苏通长江公铁大桥位于我国江苏省长江下游河段, 地处亚热带季风气候区。该区域气候受海洋与大陆共同影响, 年温差变化显著, 为钢结构桥梁带来了显著的整体温度荷载, 导致主梁产生轴向伸缩, 直接影响梁端纵向位移。同时, 强烈的日照在钢桁梁、桥面板等不同构件间形成复杂的不均匀温度场(温度梯度), 可能引起主梁挠曲变形, 进而诱发梁端转角。这种特定的地理与温度环境, 与大桥超大跨度(主跨 1092 米)及全钢桁梁的结构特性相结合, 使得温度效应成为影响其梁端变位最核心、最持续的环境荷载因素之一, 是分析桥梁梁端变形不可忽略的关键背景[9] [10]。沪苏通长江公铁大桥设计温度为 20℃, 本文主要研究整体升降温对桥梁梁端变位的影响, 所以取整体升降温±5℃、±10℃、±20℃。计算结果见图 3, 主梁各个升降温引起的最大梁端变位见表 2。

根据图 3, 在桥梁整体升降温工况下, 斜拉桥梁端变形呈现出明显的规律性。整体温度变化主要引起梁端的纵向、横向、竖向位移, 而对各类转角的影响相对较小。具体表现为: 梁端纵向位移与竖向位移随着温度的幅值增加而增加, 且基本不受其横向位置影响; 但横向位移则与距梁端中心点的距离显著相关, 即离中心越远, 横向位移越大, 且所有变位均随主梁整体温度升降而同步增减。由表 2 可知, 当主梁温度达到±20℃的时候纵向位移、横向位移、竖向位移、扭转角、横向转角、竖向转角的最大值分别是: 269.556 mm、4.212 mm、8.066 mm、0.005‰ rad、0.006‰ rad、0.127‰ rad。

综合而言, 温度荷载作用下, 斜拉桥梁端以巨大的纵向位移为核心响应, 同时伴随具有特定分布规律的、量级较小的横向位移。这主要由于主梁热胀冷缩受约束而产生的轴向力, 其位移幅值与整体升温

成正比。

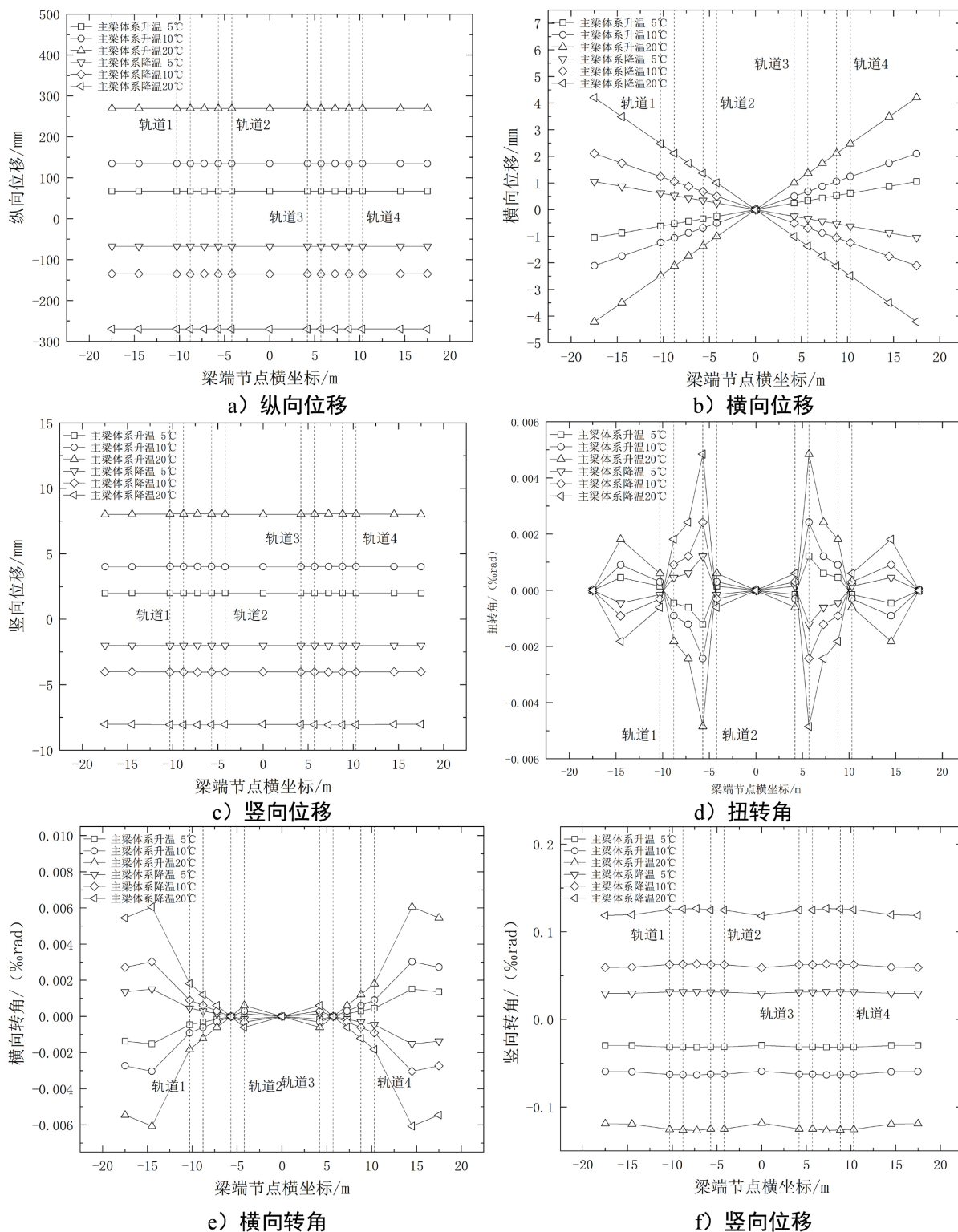


Figure 3. Beam end displacement caused by system temperature rise and fall

图 3. 体系升降温引起的梁端位移

Table 2. The maximum displacement of the beam end caused by the temperature rise and fall of the main beam
表 2. 体系升降温引起的梁端变位最大值

梁端变位	体系升温 5℃	体系升温 10℃	体系升温 20℃	体系降温 5℃	体系降温 10℃	体系降温 20℃
纵向位移/mm	67.389	134.778	269.556	67.389	134.778	269.556
横向位移/mm	1.0529	2.106	4.212	1.053	2.106	4.212
竖向位移/mm	2.0164	4.033	8.066	2.016	4.033	8.065
扭转角/‰ rad	0.001	0.002	0.005	0.001	0.002	0.005
横向转角/‰ rad	0.002	0.003	0.006	0.002	0.003	0.006
竖向转角/‰ rad	0.032	0.063	0.127	0.038	0.063	0.127

3.2. 风荷载

风荷载是引起大跨度铁路桥梁梁端变位的重要环境荷载之一。在静力风作用下, 基于《铁路桥梁抗风设计规范》(Q/CR 9162-2023)等规范确定的设计风压和通过风洞试验或数值模拟获得的主梁断面静力三分力系数(阻力、升力、力矩系数), 可以计算出作用在结构上的静力风荷载(铁路桥梁抗风设计规范 Q/CR 9162-2023)这些荷载会诱发桥梁产生整体变形, 其中横向风荷载(阻力)引起的主梁横向弯曲是导致梁端横向位移的主要原因(设计荷载作用下大跨度铁路悬索桥的梁端变位特征)。在 TG/01-2014《铁路技术管理规程》(高速铁路部分)规定: 环境风速不大于 25 m/s 时, 列车运行速度不大于 200 km/h。各个风速下列车行驶速度见表 3。

Table 3. The speed of the train at each wind speed
表 3. 各个风速下列车的行驶速度

环境风速条件	动车组列车运行限速规定	行车状态说明
≤15 m/s	可正常速度运行	正常行车条件
15 m/s < V ≤ 20 m/s	运行速度不得超过 300 km/h	进入限速警戒, 开始采取预防性降速措施
20 m/s < V ≤ 25 m/s	运行速度不得超过 200 km/h	中度限速, 以保障侧向抗风稳定性
25 m/s < V ≤ 30 m/s	运行速度不得超过 120 km/h	严格限速, 确保运行安全
>30 m/s	严禁动车组列车进入风区	安全红线, 禁止行车

按照沪苏通长江公铁大桥的设计速度, 桥上允许行车的最大风速取为 25 m/s [1]。本研究不同风速风荷载对桥梁梁端变位的影响。参考 TG/01-2014《铁路技术管理规程》中与行车安全密切相关的风速限值, 将最大研究风速设定为 25 m/s。为系统分析不同风速等级的影响, 风速变量以 5 m/s 为梯度递减, 直至 5 m/s, 从而形成涵盖 5 个工况的风速序列(即 5、10、15、20、25 m/s)。

(一) 静风荷载的模拟

参考抗风体系比较完善的 QCR9162-2023《铁路桥梁抗风设计规范》作为模拟静风荷载的依据。规范要求, 平均风对桥梁结构的影响可通过计算桥梁上的等效静风荷载来表示, 横桥向风作用下主梁长度单位上的横向、竖向与扭转等效静风荷载公式如下:

横向等效静风荷载:

$$F_H = \frac{1}{2} \rho U_s^2 C_H D \quad (1)$$

竖向等效静风荷载:

$$F_V = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_V D \quad (2)$$

竖向等效静风荷载:

$$M = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_M B^2 \quad (3)$$

式中 F_H 、 F_V 、 M 分别表示横风作用下主梁单位长度上的横向、竖向与扭转等效风荷载(N/m); ρ 表示空气密度(kg/m^3); U_g 表示等效静风风速(m/s); C_H 、 C_V 、 C_M 分别表示横风作用下主梁横向、竖向与扭转静气动力系数; D 表示主梁特征高度(m); B 表示主梁特征宽度(m)。

桥梁顺桥向单位长度上的风荷载公式如下:

$$F_{fr} = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_f s \quad (4)$$

式中 ρ 表示空气密度(kg/m^3); U_g 表示等效静风风速(m/s); F_{fr} 表示单位长度的摩擦力(N/m); C_f 表示摩擦系数, 取值如表 4 所示; s 表示主梁周长(m), 对桁架断面取其外轮廓周长。

Table 4. The value of friction coefficient

表 4. 摩擦系数的取值

桥梁主梁上下表面情况		摩擦系数 C_f
	光滑表面	0.01
	粗糙表明	0.02
	非常粗糙表面	0.04
桁架断面	单层行	0.065
	双层行车	0.10

桥墩、桥塔、斜拉索以及主缆上横桥向风作用下等效静风荷载公式如下:

$$F_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_D D \quad (5)$$

式中 F_g 表示构件单位长度上的等效风荷载(N/m); ρ 表示空气密度(kg/m^3); C_D 表示构件的阻力系数; U_g 表示基准高度上的等效静风风速(m/s); D 表示构件特征尺寸。

斜拉索上顺桥向风作用下等效静风荷载公式如下:

$$F_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_D D \sin^2 \alpha_c \quad (6)$$

式中 F_g 表示顺桥向风作用下的斜拉索单位长度上的等效风荷载(N/m); ρ 表示空气密度(kg/m^3); C_D 表示斜拉索的阻力系数; U_g 表示基准高度上的等效静风风速(m/s); D 表示斜拉索的外径(m); α_c 表示斜拉索的倾斜角($^\circ$)。

(二) 静风荷载下的梁端变位

各个横桥向风速下梁端变位结果见图 4, 各个横向风速引起的最大梁端变位见表 5。

由图 4、表 5 可知在横桥向风作用下梁端产生的梁端位移与梁端转角值都非常小; 随着横桥向风风速不断增大, 梁端的位移与转角均不断增大且在横风风速 25 m/s 时出现最大的梁端位移与转角分别是 0.302

mm 与 0.093‰ rad。

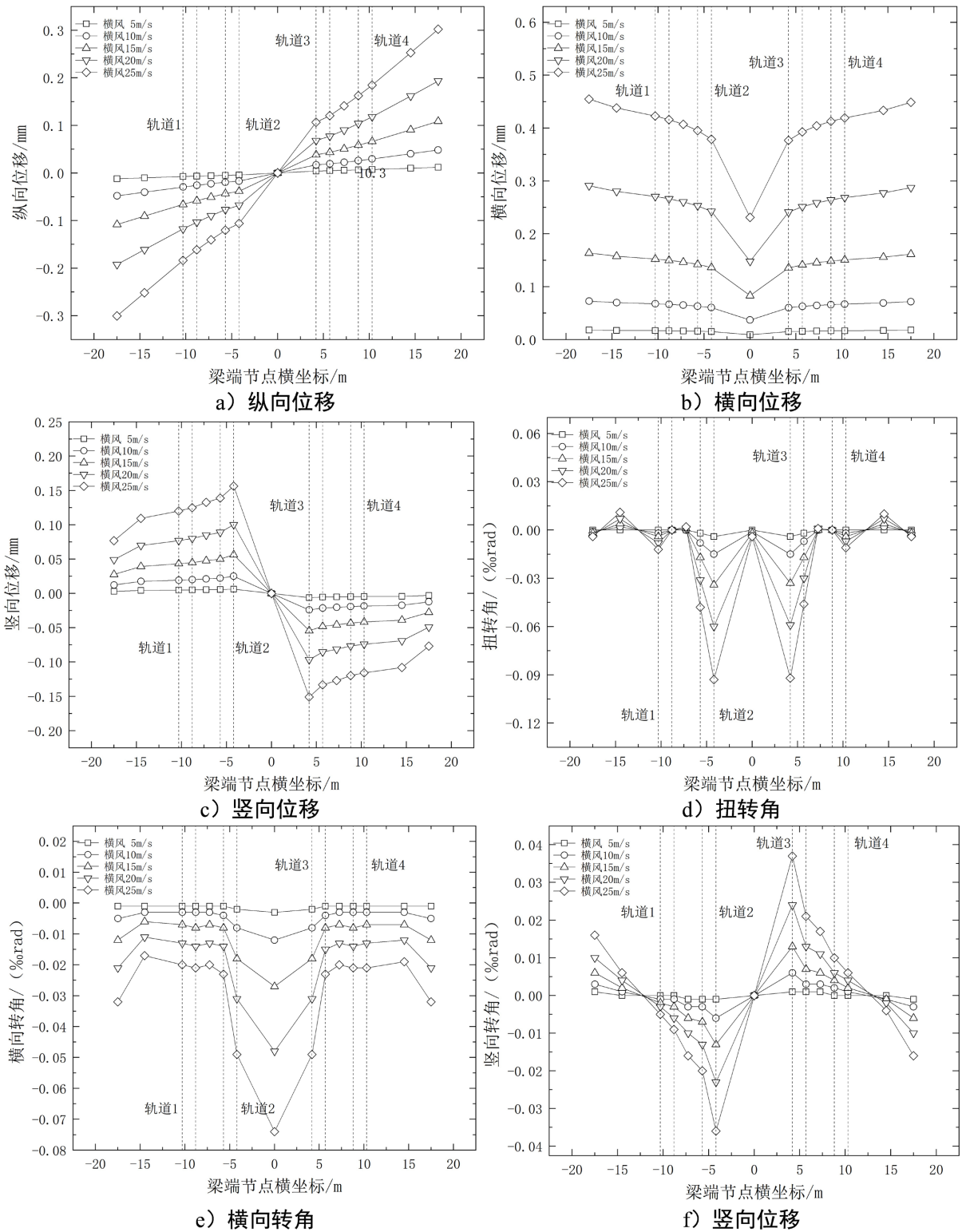


Figure 4. Beam end displacement caused by cross-bridge wind
图 4. 横桥向风引起的梁端位移

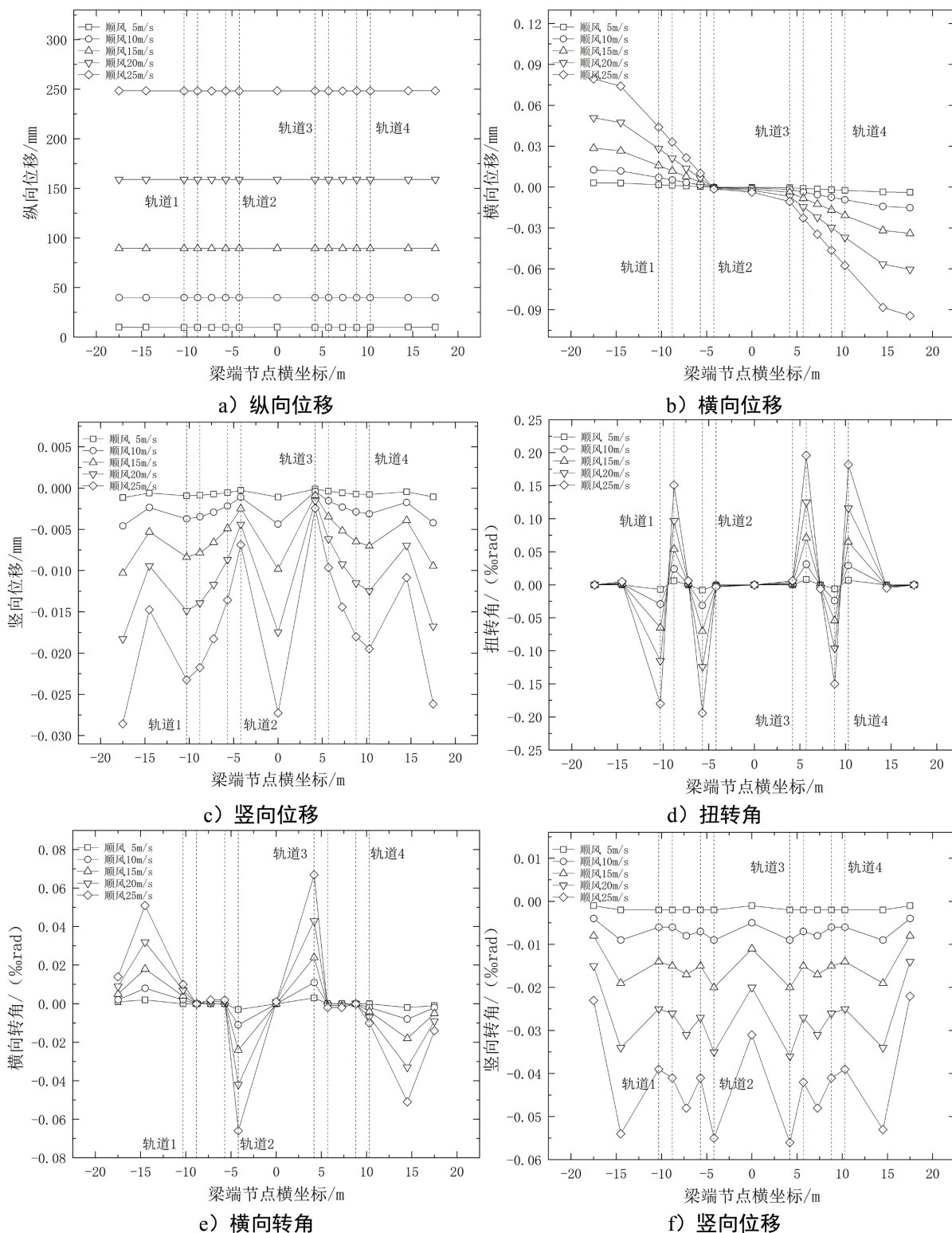


Figure 5. Beam end displacement caused by along-bridge wind

图 5. 顺桥向风引起的梁端变位

在横桥向风的作用下, 斜拉桥梁端产生的都是一些量级较小的梁端位移与梁端转角, 梁端各处纵向

位移的大小不仅与横桥向风速有关也与其所在梁端横向位置有关, 其表现为横风风速越大、离梁端中心越远纵向位移越大; 梁端横向位移与竖向转角在梁端中心处出现最大值, 这可能是由于横桥向风荷载使主梁发生了整体横向变形且在梁端中心处约束最弱所以产生的横向位移与竖向 S 转角最大。

Table 5. The maximum deflection of beam end caused by transverse wind of bridge

表 5. 横桥向风引起的梁端变位最大值

梁端变位	横风 5 m/s	横风 10 m/s	横风 15 m/s	横风 20 m/s	横风 25 m/s
纵向位移/mm	0.012	0.048	0.109	0.193	0.302
横向位移/mm	0.018	0.073	0.164	0.291	0.455
竖向位移/mm	0.006	0.025	0.056	0.100	0.156
扭转角/‰ rad	0.004	0.015	0.034	0.060	0.093
横向转角/‰ rad	0.003	0.012	0.027	0.048	0.074
竖向转角/‰ rad	0.001	0.006	0.013	0.024	0.037

各个顺桥向风速计算结果见图 5, 各个横向风速引起的最大梁端变位见表 6。

Table 6. The maximum displacement of beam end caused by along-bridge wind

表 6. 顺桥向风引起的梁端变位最大值

梁端变位	顺风 5 m/s	顺风 10 m/s	顺风 15 m/s	顺风 20 m/s	顺风 25 m/s
纵向位移/mm	9.943	39.770	89.484	159.082	248.565
横向位移/mm	0.004	0.015	0.034	0.060	0.094
竖向位移/mm	0.001	0.005	0.010	0.018	0.029
扭转角/‰ rad	0.008	0.031	0.071	0.125	0.196
横向转角/‰ rad	0.003	0.011	0.024	0.043	0.067
竖向转角/‰ rad	0.002	0.009	0.02	0.036	0.056

由图 5 可知顺桥向风仅对梁端纵向位移的影响显著对其余梁端变位的影响都很小且随着风速逐级增加梁端纵向位移的增幅不断增大, 这是因为顺桥风直接作用在主梁、桥塔与斜拉索上产生数值巨大的水平推力及在桥梁结构上产生了巨大的顺桥向静力荷载, 在弹性范围内构件产生的纵向位移与所受静力荷载成正比, 因此随着风荷载增加桥梁各构件受到的静力荷载增幅也在增大这导致了桥梁梁端的纵向位移的增幅也不断增大。

由表 6 可知在顺桥向风速为 25 m/s 时纵向位移达到最大值为 248.565 mm, 其余梁端变位的最大值都很小, 这是因为沪苏通长江公铁大桥为纵向半漂浮体系, 主梁支座可纵向滑动, 且纵向布置的阻尼器不提供刚度, 结构纵向整体刚度较小[1]。

3.3. 不均匀沉降

桥梁基础的不均匀沉降会显著改变结构的受力状态与几何线形, 是引起梁端变位的关键性因素。本文将研究边墩沉降对桥梁梁端变位的影响, 主塔沉降不变, 边墩沉降 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm。

不同不均匀沉降计算结果见图 6, 各不同不均匀沉降引起的最大梁端变位见表 7。

由图 6 可知不均匀沉降主要导致桥梁梁端的纵向位移、竖向位移与竖横向转角, 由表 7 可知当边墩沉降值持续增加并超过主塔沉降, 且两者差值达到 15 cm 以上时, 梁端横向转角的数值将超过 1.0‰ rad

这一高速铁路有砟轨道桥梁的限值, 对列车过桥时的行车安全构成潜在风险。

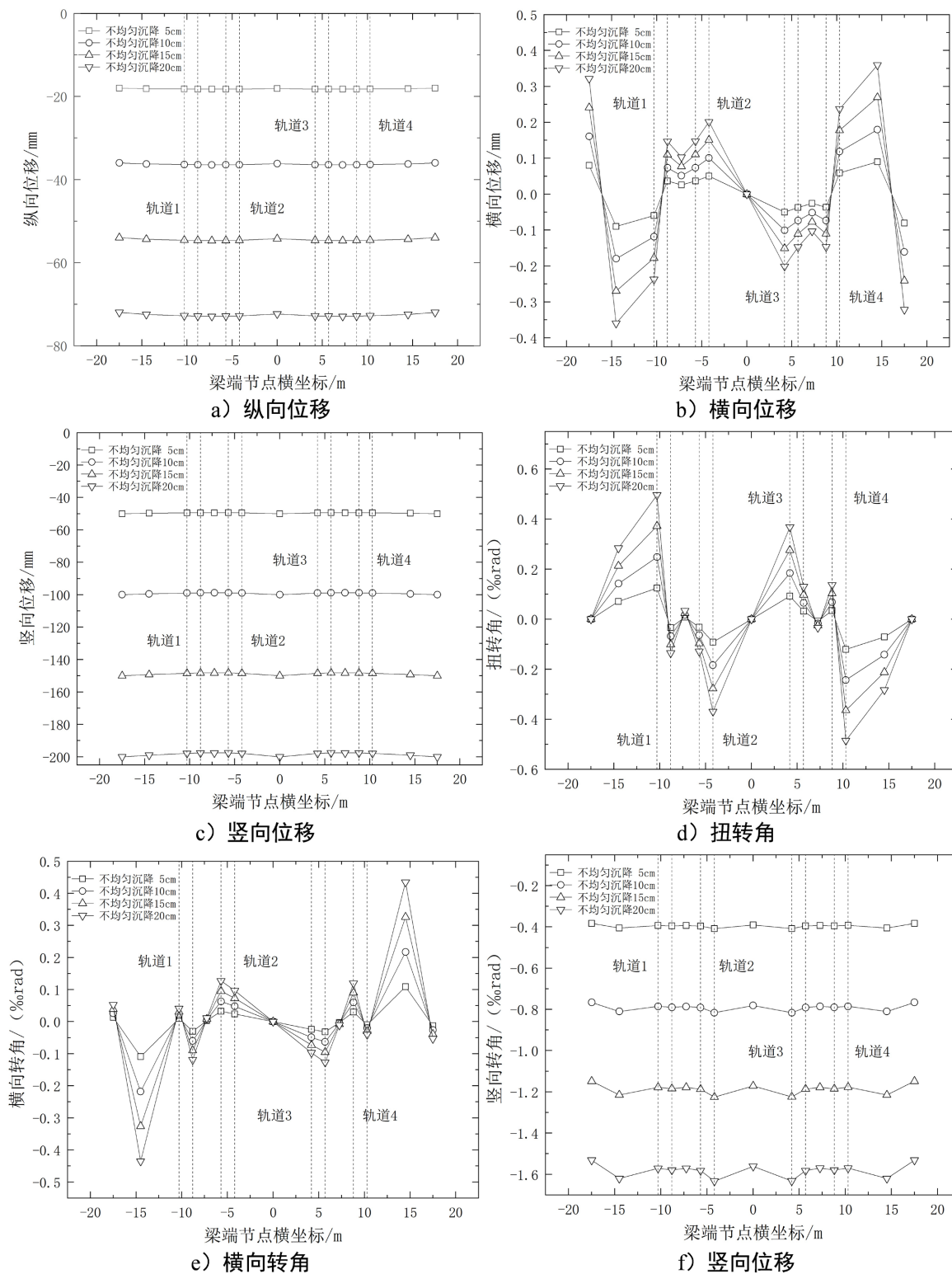


Figure 6. Beam end displacement caused by uneven settlement
图 6. 不均匀沉降引起的梁端变位

Table 7. The maximum displacement of beam end caused by uneven settlement
表 7. 不均匀沉降引起的梁端变位最大值

梁端变位	不均匀沉降 5 cm	不均匀沉降 10 cm	不均匀沉降 15 cm	不均匀沉降 20 cm
纵向位移/mm	18.228	36.456	54.684	72.912
横向位移/mm	0.090	0.180	0.270	0.359
竖向位移/mm	50.004	100.007	150.011	200.015
扭转角/‰ rad	0.124	0.248	0.372	0.496
横向转角/‰ rad	0.109	0.218	0.326	0.435
竖向转角/‰ rad	0.408	0.816	1.225	1.633

4. 环境因素对梁端变位的影响

上述研究表明, 温度、风荷载及基础不均匀沉降等环境因素, 与桥梁梁端变位响应之间存在明确的关联性与渐进性。随着各类环境因素的作用强度加剧(如温度升高、风速增大或沉降差增加), 梁端在纵向、横向及竖向的位移与转角均呈现增长。

Table 8. The main beam end displacement types and maximum values caused by different levels of environmental loads
表 8. 不同等级环境荷载引起主要梁端变位类型及最大值

环境荷载类型及等级		纵向位移 /mm	横向位移 /mm	竖向位移 /mm	扭转角 /‰ rad	横向转角 /‰ rad	竖向转角 /‰ rad
主梁升温	升温 5℃	67.389	1.053	2.016	/	/	0.032
	升温 10℃	134.778	2.106	4.033	/	/	0.063
	升温 20℃	269.556	4.211	8.066	/	/	0.127
风速	横桥向风速 5m/s	/	0.018	/	/	/	/
	横桥向风速 10 m/s	/	0.073	/	/	/	/
	横桥向风速 15 m/s	/	0.164	/	/	/	/
	横桥向风速 20 m/s	/	0.291	/	/	/	/
	横桥向风速 25 m/s	/	0.4547	/	/	/	/
	顺桥向风速 5 m/s	9.943	/	/	/	/	/
	顺桥向风速 10m/s	39.770	/	/	/	/	/
	顺桥向风速 15 m/s	89.484	/	/	/	/	/
	顺桥向风速 20 m/s	159.082	/	/	/	/	/
顺桥向风速 25 m/s	248.565	/	/	/	/	/	
不均匀沉降	不均匀沉降 5 cm	18.228	/	50.004	0.124	0.109	0.408
	不均匀沉降 10 cm	36.456	/	100.007	0.248	0.218	0.816
	不均匀沉降 15 cm	54.684	/	150.011	0.372	0.326	1.225
	不均匀沉降 20 cm	72.912	/	200.015	0.496	0.435	1.633

注: /代表非主要引起的梁端变位类型。

为明确各类环境荷载对主要引起的梁端变位类型及量级, 表 8 归纳了不同工况(主梁变温、风速、不均匀沉降)下引起的主要梁端变位类型及最大值。可知梁端纵向位移对环境因素最为敏感, 其中主梁温度

变化是其主要因素, 顺桥向风速也有显著影响; 横向位移则主要由主梁温度变化与横桥向风速变化共同控制; 各类转角变位则普遍以基础不均匀沉降为最关键因素, 其中横向转角在沉降差超过 10 cm 时将突破限值, 构成直接的行车风险, 而扭转角与竖向转角还同时受到横桥向风速变化的明显影响; 竖向位移则几乎由不均匀沉降所导致。

5. 结论

(1) 斜拉桥梁端纵向位移受到整体温度、风荷载等多种环境因素有显著影响, 其中温度变化是主要因素, 顺桥向风荷载同样具有重要影响。梁端纵向位移的幅值与温度成正比, 温度越高纵向位移幅值越大。纵向位移幅值越大, 对梁端伸缩装置等结构性能要求更高, 所以应重视对斜拉桥梁端结构的维护工作。

(2) 斜拉桥梁端横向位移主要受到整体温度、风荷载的影响, 其中温度变化是主要原因; 受到温度影响时, 横向位移与距梁端中心点的距离显著相关: 离中心点越远, 横向位移越大; 且所有变位均随主梁整体温度升降而同步增减。

(3) 斜拉桥梁端的竖向位移几乎完全由基础不均匀沉降导致, 其他环境因素对其影响甚微; 而扭转角与竖向转角对各种环境荷载的响应均不敏感, 即使环境因素加剧, 其变化幅度也极小。

(4) 在各类环境荷载中, 基础不均匀沉降是斜拉桥梁端横向转角的重要因素。数据分析指出, 当不均匀沉降量超过 15 cm 时, 梁端横向转角将突破 1.0‰ rad 的安全限值。此状态将导致梁端轨道出现显著的横向高差变化, 恶化轮轨接触关系, 对高速列车的过桥安全性构成直接威胁。因此, 在桥梁的运营过程中, 必须将不均匀沉降的监测与控制置于优先地位, 以防范由此引发的行车风险。

(5) 本文所采用的工况为单一变量设置, 即仅考虑某一种荷载在施加过程中对斜拉桥梁端变位的影响; 但在实际场景下, 桥梁往往同时受到多种荷载的共同作用。因此后续研究可以从多种荷载共同作用对斜拉桥梁端变位的影响展开。

参考文献

- [1] 严乃杰, 杨文博, 陈宁, 郭辉, 苏永华, 刘万里. 千米级跨度铁路桥梁梁端变位特征对比研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(12): 69-75.
- [2] 向活跃, 陈绪黎, 张玲, 李永乐. 400 km/h 高速铁路桥梁竖向刚度限值研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14): 114-120.
- [3] 李永乐, 龙俊廷, 向活跃, 马虎, 何孟松, 谢佳桃. 基于风-车-桥的城市轨道交通桥横向挠跨比建议值研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24): 211-217.
- [4] 李永乐, 吴梦雪, 臧瑜, 强士中. 大跨度悬索桥梁端竖向折角对列车走行性的影响研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 114-120.
- [5] 李永乐, 向活跃, 万田保, 任红全. 大跨度铁路桥梁梁端伸缩装置对列车走行性影响的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 94-99.
- [6] 郭辉, 蒋金洲, 高芒芒, 刘晓光, 赵会东, 苏朋飞, 朱颖, 何东升. 高速铁路大跨度钢桥梁端伸缩装置设计研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 1-7.
- [7] 刘晓光, 郭辉, 高芒芒, 胡所亭, 易伦雄, 蒋金洲, 朱希同. 千米级铁路桥梁线-桥一体化设计研究及探讨[J]. 中国铁路, 2021(9): 32-39.
- [8] 陆满成. 台风作用下沪苏通长江公铁大桥关键监测指标变化特征分析[J/OL]. 铁道标准设计: 1-11. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202506180004>, 2026-04-14.
- [9] 张浩, 刘丁一, 赵维刚, 丁森洋, 刘颖, 杨建科, 卢文龙. 公铁两用钢桁梁温度场边界条件及分布研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 91-101.
- [10] 杨欣, 张举兵, 李小龙, 何秋雨, 李子欣, 周毅. 基于监测数据的钢桁梁桥温度变形研究[J]. 工程力学, 2024, 41(S1): 310-316.