



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405846

引用格式:王少杰,李德仓,吕思潭.风环境下温度对混凝土变截面连续梁桥轴向应力的影响[J].科学技术与工程,2025,25(21):9140-9147.

Wang Shaojie, Li Decang, Lü Sitan. Axial stress variable cross-section concrete continuous beam bridges under temperature in wind environment[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 9140-9147.

风环境下温度对混凝土变截面连续梁桥轴向应力的影响

王少杰¹, 李德仓^{1,2*}, 吕思潭²

(1. 兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学机电技术研究所, 兰州 730070)

摘要 为研究各风速场下温度对大跨度混凝土变截面连续梁桥轴向应力的影响,提出根据桥梁顶板厚度不一致分别计算竖向温度梯度,并用谱解法模拟横向脉动风速场。首先,通过采用混凝土热传导方程、日最高最低温度、变截面连续梁桥顶板厚度计算竖向温度梯度变化及变化深度;其次,通过 Midas Civil 进行桥梁建模并采用中国规范标准静活载模拟列车移动荷载;最后,对桥梁施加静阵风荷载和脉动风荷载。结果表明:基于采用混凝土热传导方程、日最高最低温度和变截面连续梁桥顶板厚度得到的竖向温度梯度变化及变化深度的方法,得到的左右车道轴向应力要比现有的研究要大;当桥梁处在同一种风速场模型下,梯度升温下对桥梁的危害最大、梯度降温次之、无温度变化最低;当桥梁呈同一种温度模型时,脉动风荷载时的桥梁轴向应力和轴向应力幅度都比无风和静态风要更大更急,对桥梁的危害也更大。研究成果可为大跨度混凝土变截面连续梁桥的结构设计以及安全运营提供参考。

关键词 风速场; 温度梯度; 变截面连续梁桥; 顶板厚度差异; ZKH 标准静活载

中图分类号 U443.35;

文献标志码 A

Axial Stress Variable Cross-section Concrete Continuous Beam Bridges under Temperature in Wind Environment

WANG Shao-jie¹, LI De-cang^{1,2*}, LÜ Si-tan²

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Mechatronics T & R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

[Abstract] To investigate the impact of temperature on axial stress in large-span concrete variable-section continuous beam bridges under various wind speed fields, a method was proposed to calculate vertical temperature gradients separately based on inconsistent deck slab thickness and simulate lateral fluctuating wind speed fields using the spectral method. Firstly, vertical temperature gradient variations and their depths were calculated by employing the concrete heat-conduction equation, daily maximum and minimum temperatures, and deck slab thickness of the variable-section continuous beam bridge. Secondly, bridge modeling was performed using MIDAS Civil, and ZKH standard static live loads were simulated to represent moving train loads. Finally, static array wind loads and pulsating wind loads were applied to the bridge. The results indicate that the axial stresses in the left and right lanes obtained from the proposed method, which uses vertical temperature gradients and their depths derived from the concrete heat-conduction equation, daily temperature extremes, and bridge deck slab thickness, are larger compared to existing studies. Under the same wind speed field model, the harm to the bridge is greatest under gradient heating, followed by gradient cooling, while no temperature change results in the least impact. When the bridge is subject to the same temperature model, both the axial stress values and amplitudes of the bridge under pulsating wind loads are larger and more severe than those under no wind or static wind conditions, posing greater hazards to the bridge. The research findings can provide references for the structural design and safe operation of large-span concrete variable-section continuous beam bridges.

[Keywords] wind speed field; temperature gradient; variable-section continuous beam bridge; deck thickness variation; ZKH standard static live loads

收稿日期: 2024-08-04 修订日期: 2025-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(72061021); 甘肃省科技计划(25JRRA955)

第一作者: 王少杰(1999—), 男, 汉族, 河南商丘人, 硕士研究生。研究方向: 风荷载下车桥耦合振动。E-mail: 942750438@qq.com。

* 通信作者: 李德仓(1976—), 男, 汉族, 甘肃白银人, 博士, 副教授。研究方向: 轨道交通装备检测技术与控制。E-mail: lidecang1978@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

中国幅员辽阔,地形复杂,交通多依赖于桥梁,铁路桥梁对经济发展和抢险救灾起到重要作用,尤其是混凝土连续梁桥,其具有安全性、经济性、施工便捷的特点。但混凝土连续梁桥也有弊端,比如:过大的轴向应力会导致桥梁结构产生变形,甚至引发裂缝;长期受到轴向应力的影响可能导致桥梁结构的疲劳损伤,加速结构老化,降低使用寿命等。因此对桥梁进行轴向应力分析具有重要意义。

聂利英等^[1]根据现场温度测量与仿真分析了CRTS II型板式无砟轨道在整体温度升降、温度梯度作用下的翘曲变形对车线动力响应。王多银等^[2]通过建立温度-应力模型,对钢筋混凝土桩的横向拉伸应变、纵向压缩应变等进行研究,结果表明:混凝土轴向压缩应变和横向拉伸应变会随温度的增加而逐渐升高。惠迎新等^[3]应用有限元数值模拟计算方法,建立了现浇梁段精细化有限元模型,分析了大跨径变截面混凝土箱梁施工期的水化热温度效应。冯青松等^[4]通过建立简支梁桥上板式无砟轨道无缝线路模型,分析了不同温度荷载工况作用下无缝线路纵向力及几何形位的特性。戴公连等^[5]研究了夏季和冬季两种外界环境温度下混凝土箱梁水化热温度场的时变规律,并提出适用于不同外界环境温度条件下的混凝土箱梁水化热温度荷载模。Lei等^[6]应用有限元分析等数值模拟技术对温度变化下的桥梁结构进行模拟,以评估温度对桥梁结构性能的影响。Wang等^[7]使用有限元分析(finite element analysis, FEA)数值模拟技术对钢箱梁在温度变化的行为进行详细模拟,研究温度变化对钢箱梁的影响,并提出了相应的对策和措施。樊学平等^[8]采用移动平均法对温度和车辆荷载耦合产生的监测极值应力进行平滑处理,取处理后的低频数据为趋势项信息,初始数据减去趋势项数据为车辆荷载效应信息,然后,建立双变量贝叶斯动态线性趋势性模型对低频极值应力进行预测分析。王桢等^[9]为解决混凝土箱体结构的温度裂纹问题,研究了自控温装置安装前、后混凝土箱体腹板外侧的温度和温度应力。以上研究在温度荷载对桥梁轨道的影响和温度荷载建模做出大量成果并且指出应力所产生的影响,但并没有考虑列车经过时对桥梁不同车道的影响,也未考虑变截面桥梁顶板厚度不一致而直接对桥梁进行温度荷载模拟,并且在自然界中风荷载对桥梁的影响并不可以忽略。

针对上述问题,现考虑变截面连续梁桥顶板厚

度差异对温度梯度的影响,通过Midas Civil对桥梁进行建模,并对列车移动荷载进行模拟,接着采用谱解法对脉动风荷载进行横向模拟,分析桥梁在不同风速场和温度梯度下的轴向应力,旨在为大跨度混凝土变截面连续梁桥的轴向应力影响分析提供理论依据。

1 模型构建

1.1 车辆及桥梁模型

以8节车辆编组的CRH3型客运列车为研究对象,采用ZKH标准静活载来模拟列车移动荷载。以黄柏河特大桥(64+128+64m)m为例。桥梁整体布置如图1所示,桥梁全长256m,其中63~192m为桥梁主梁,桥梁宽12.6m,桥梁标准断面底宽7m,最大高度9.182m,最小高度4.432m,利用Midas Civil建立全桥有限元模型,桥面、主梁及桥墩均采用梁单元进行模拟,全桥共计节点409个,梁单元396个,主梁和桥墩采用弹性连接,因为桥梁的前5阶振型均以主梁振动为主,故提取主梁的前五阶振型及自振频率如图2~图6所示,其中 f 为振动频率。

对桥梁的左右车道进行轴向应力分析,由南到北的车道视为右车道,由北到南的车道视为左车道。

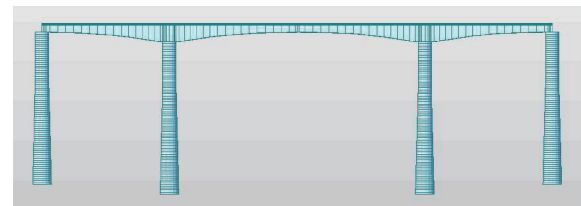


图1 桥梁布置

Fig. 1 Bridge layout

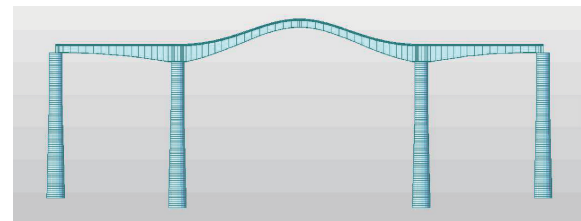


图2 第一种振型($f = 2.573$ Hz)

Fig. 2 The first mode shape ($f = 2.573$ Hz)

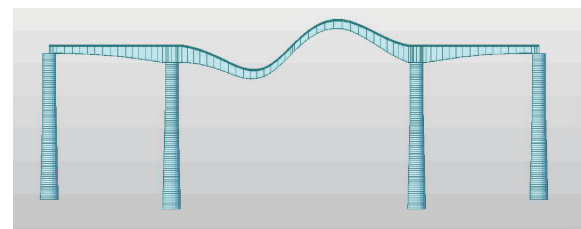
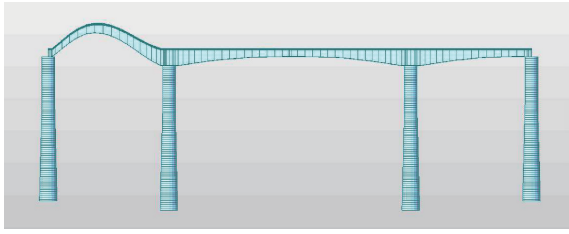
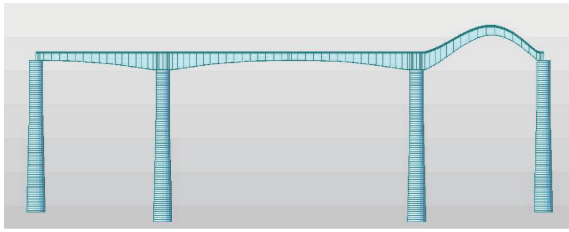
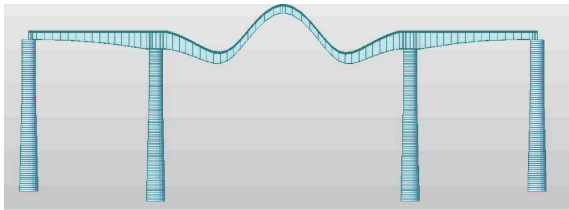


图3 第二种振型($f = 5.361$ Hz)

Fig. 3 The second mode shape ($f = 5.361$ Hz)

图4 第三种振型 ($f = 6.744$ Hz)Fig. 4 The third mode shape ($f = 6.744$ Hz)图5 第四种振型 ($f = 9.959$ Hz)Fig. 5 The fourth mode shape ($f = 9.959$ Hz)图6 第五种振型 ($f = 9.340$ Hz)Fig. 6 The fifth mode shape ($f = 9.340$ Hz)

1.2 风荷载模型

1.2.1 等效静阵风速场模拟

进行等效静阵风荷载模拟时,由东向西静阵风荷载为正向静阵风荷载。

横向风作用下桥梁单位长度上的等效静阵风荷载 F_g 可表示为

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

式(1)中: F_g 为作用在桥梁单位长度上的顺风向等效静阵风荷载, N/m; ρ 为空气密度, 取为 1.25 kg/m^3 ; U_g 为等效静阵风速, 取为 25 m/s ; C_H 为主梁横向力系数; D 为桥梁特征高度, m。

1.2.2 横向脉动风速场模拟

由东向西脉动风荷载作为正向脉动风荷载, 采用谱解法模拟桥梁的横向脉动风速场。沿桥梁从左到右共设置了 110 个风速点, 各风速点之间的间距并不完全相等。风速时程计算时间步长取 0.06 s , 样本长度为 7 s 。脉动风速的功率谱采用《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[10] 的风速谱密度函数。平均风速为 25 m/s 时, 桥梁横桥向脉动风荷载时程曲线, 如图 7 所示。

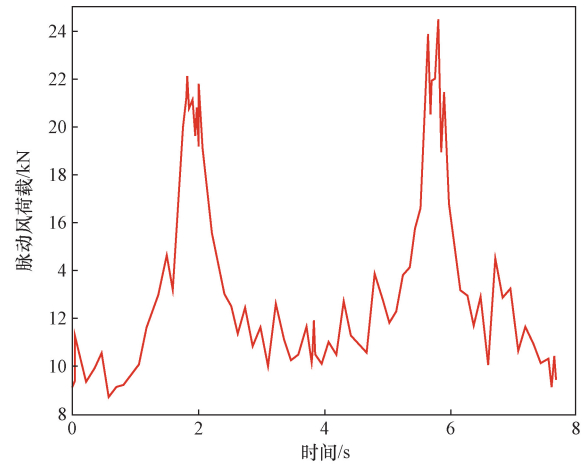


图7 脉动风荷载时程曲线

Fig. 7 Pulsating wind load time history curve

1.3 温度模型

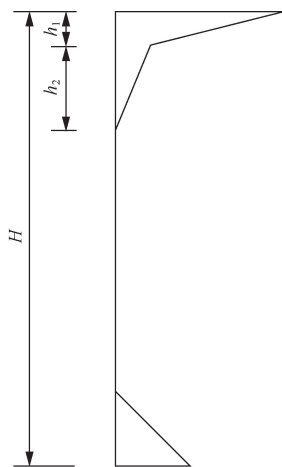
混凝土因其隔热性和热容量,其温度变化相对于环境温度变化存在一定的时间滞后性^[11]。由于秋季的最大正温度梯度幅值低于夏季,最大负梯度幅值低于冬季^[12],故主要针对夏季这一个极端季度进行分析。通过查询此桥梁当地近 30 d 气象数据可知,夏季最高温度在 $34 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$,最低温度在 $19 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$,故在此实验中箱梁顶板顶面温度选取 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为最高温度,选取 $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为最低温度,假设此时太阳直晒到箱梁顶板顶面,箱梁顶板顶面温度相对一致^[13]。当外界处于最高温度时,受混凝土隔热性和热容量的影响,箱梁顶板底面的温度低于顶板顶面,温度呈现逐渐上升的趋势,即梯度升温。当外界处于最低温度时,此时箱梁顶板底面的温度会高于顶板顶面,所以从箱梁顶板底面到顶板顶面,温度会逐渐降低,即梯度降温。为了进行对比分析,采用箱梁顶板整体温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况,简称为“无温度变化”。关于竖向温度梯度变化和变化深度,参见文献[14-16]。箱梁顶板竖向梯度温度模型,如图 8 所示。

2 桥梁轴向应力比较

2.1 无风荷载

在考虑桥梁自重、收缩徐变、二期荷载、列车静活荷的情况下,桥梁整体呈无温度变化、梯度升降温时,对桥梁左右车道的轴向应力进行分析,分别如图 9 ~ 图 11 所示。

如图 9 所示,当桥梁整体呈无温度变化时,列车通过右侧和左侧车道的桥梁轴向应力最大值为 8.09 MPa 和 9.73 MPa ,增加约 16.9% 。在 $60 \sim 70 \text{ m}$ 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 7.58 MPa 和 9.12 MPa ,增加约 20.3% 。在主梁处,右



H 为梁高, m ; h_1 , h_2 分别为箱梁顶板顶面与箱梁顶板底面温度对应的深度, m

图 8 箱梁竖向温度梯度

Fig. 8 Box girder vertical temperature gradient

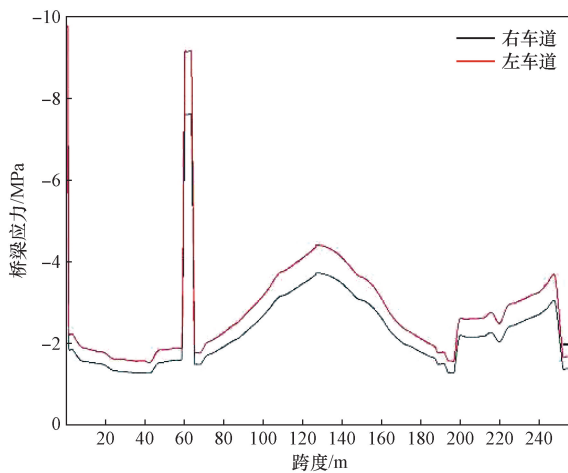


图 9 无风下无温度变化时桥梁轴向应力
Fig. 9 Axial stresses in bridges without temperature changes under windless conditions

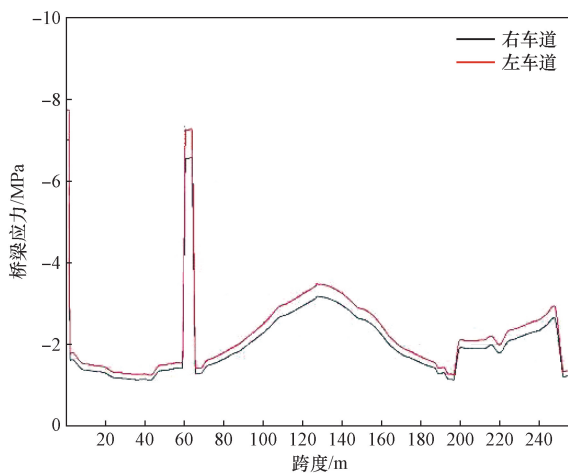


图 10 无风下梯度降温时桥梁轴向应力
Fig. 10 Axial stresses in bridges during gradient cooling under no wind

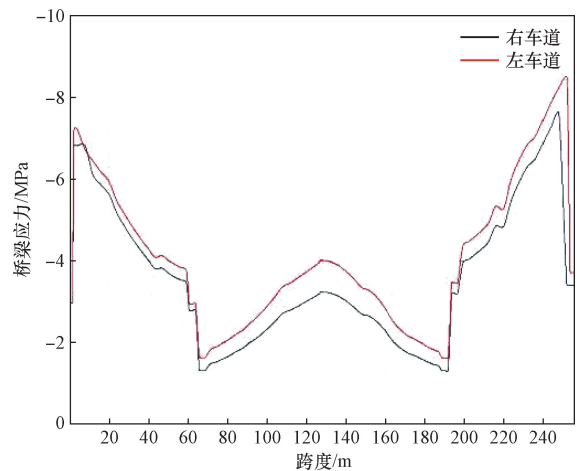


图 11 无风下梯度升温时桥梁轴向应力
Fig. 11 Bridge axial stresses during gradient warming under no wind

侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 3.72 MPa 和 4.4 MPa, 增加约 18.3%。

如图 10 所示, 列车通过右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 7 MPa 和 7.74 MPa, 增加约 9.6%。在 60 ~ 70 m 处, 右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 6.55 MPa 和 7.25 MPa, 增加约 10.7%。在主梁处, 右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 3.16 MPa 和 3.46 MPa, 增大约 9.5%。

如图 11 所示, 列车通过右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 7.61 MPa 和 8.49 MPa, 增加约 10.4%, 且轴向应力最大值出现在 240 ~ 256 m 处。在主梁处, 右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 3.20 MPa 和 3.97 MPa, 增加约 24.06%。参见文献[17]可知, 和无温度变化下的轴向应力相比, 此种梯度降温下的轴向应力要更小。

无风时, 左车道的轴向应力大于右车道轴向应力。无温度变化下的主梁轴向应力明显大于其余两种情况下的主梁轴向应力, 但桥梁在梯度升温情况下, 除主梁轴向应力外, 其余处轴向应力值和变化幅度明显增大, 对其余处桥梁危害较大。

2.2 由东向西静阵风荷载

在考虑桥梁自重、收缩徐变、二期荷载、列车静活荷的情况下, 桥梁整体呈无温度变化、梯度升降温时, 对桥梁左右车道的轴向应力进行分析, 分别如图 12 ~ 图 14 所示。

如图 12 所示, 在 60 ~ 70 m 处, 右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 7.65 MPa 和 9.34 MPa, 增加约 22.1%。在主梁处, 右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 3.77 MPa 和 4.52 MPa, 增大约 19.9%。

如图 13 所示, 在 0 ~ 60 m 处, 右侧和左侧车道

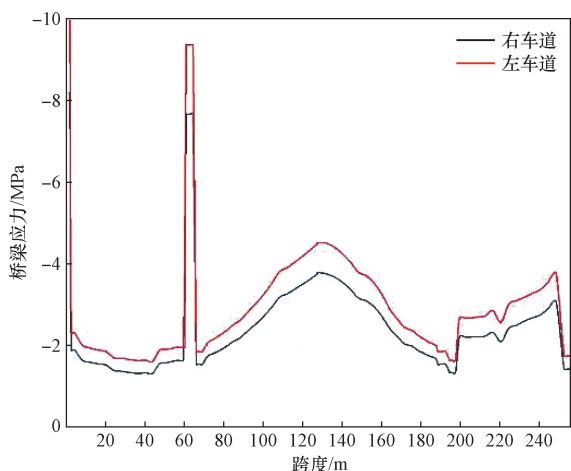


图 12 正向静阵风下无温度变化时桥梁轴向应力
Fig. 12 Axial stresses in bridges without temperature changes under windless conditions

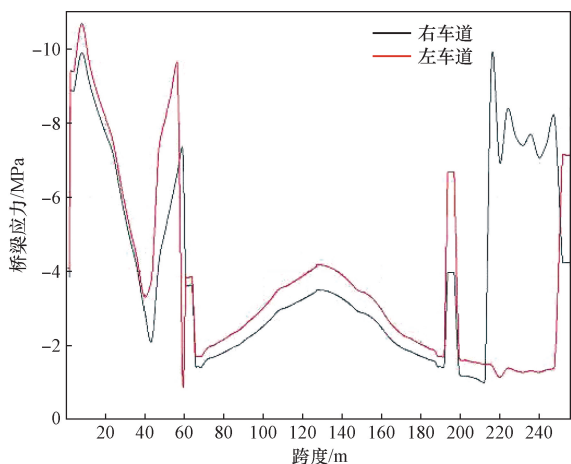


图 13 正静阵风下梯度降温时桥梁应力
Fig. 13 Bridge stresses during gradient cooling under positive static gusts

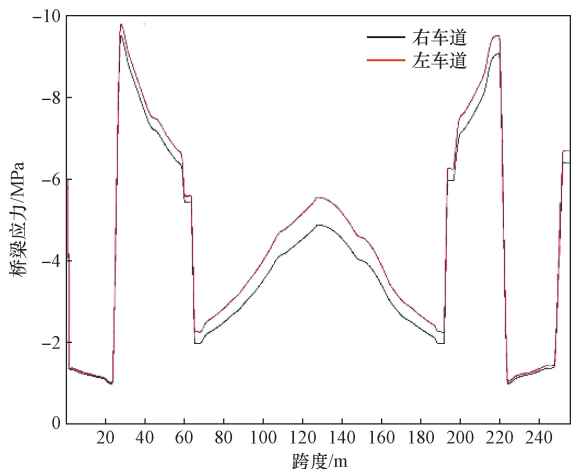


图 14 正向静阵风下梯度升温时桥梁轴向应力
Fig. 14 Axial stresses in bridges during gradient warming under a positive static gust wind

的轴向应力最大值为 9.91 MPa 和 10.07 MPa,增加约 1.6%,在 43 ~ 60 m 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 7.28 MPa 和 9.57 MPa,增加约 31.5%。在主梁处,右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 3.49 MPa 和 4.17 MPa,增加约 19.5%。在 190 ~ 200 m 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值分别为 3.97 MPa 和 6.68 MPa,增大约 68.3%。在 210 ~ 250 m 处,右车道的轴向应力明显大于左车的轴向应力。

如图 14 所示,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 9.44 MPa 和 9.73 MPa,增大约 2.9%。在 30 ~ 50 m 和 200 ~ 220 m 处,桥梁轴向应力明显高于桥梁其余处应力。在主梁处,右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 4.87 MPa 和 5.55 MPa,增大约 13.96%。

正向静阵风作用时,梯度升温下主梁轴向应力明显大于其余两种情况下的主梁轴向应力,且桥梁整体的轴向应力变化幅度更大,所以梯度升温下对桥梁的危害更大。由西向东静阵风荷载下的桥梁轴向应力趋势与正静阵风趋势相似,但轴向应力值较小。

2.3 由东向西脉动风荷载

在考虑桥梁自重、收缩徐变、二期荷载、列车静活荷的情况下,桥梁呈无温度变化、梯度升降温时,对桥梁左右车道的轴向应力进行分析,分别如图 15 ~ 图 17 所示。

如图 15 所示,在 60 ~ 64 m 处,左右车道的轴向应力相差较大,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 1.06 MPa 和 8.7 MPa,增加约 720.8%。在主梁处,右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 4.35 MPa 和 5.18 MPa,增加约 19.1%。

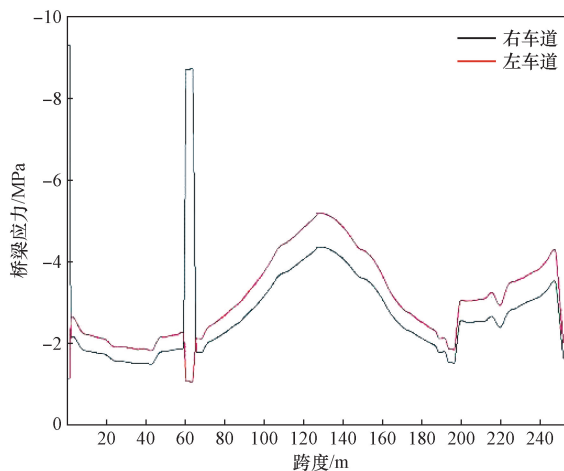


图 15 正向脉动风下无温度变化时桥梁轴向应力
Fig. 15 Axial stresses in bridges without temperature changes under positive pulsating winds

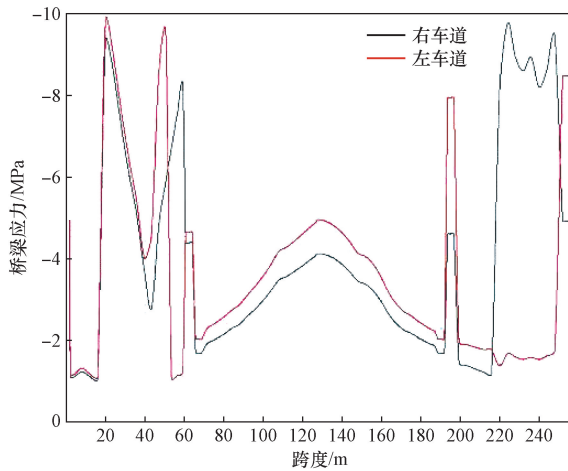


图 16 正向脉动风下梯度降温时桥梁轴向应力

Fig. 16 Axial stresses in bridges during gradient cooling under positive pulsating winds

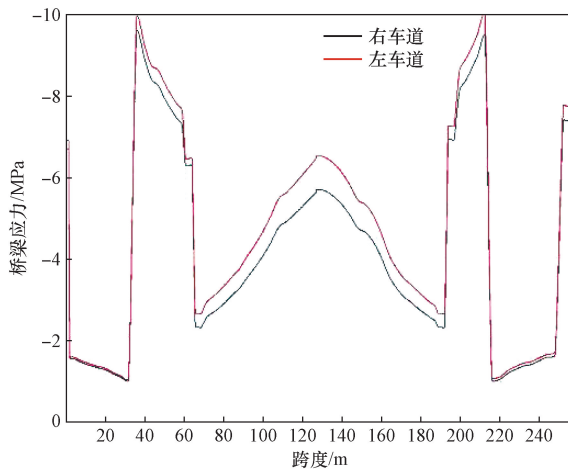


图 17 正向脉动风下梯度升温时桥梁轴向应力

Fig. 17 Axial stresses in bridges during gradient warming under positively pulsating winds

如图 16 所示,在 0~60 m 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 9.3 MPa 和 9.81 MPa,增加约 5.5%。在 43~60 m 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 9.57 MPa 和 1.24 MPa,右侧车道的轴向应力最大值明显大于左侧车道的轴向应力最大值。在主梁处,右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 4.1 MPa 和 4.92 MPa,增加约 20%。在 190~200 m 处,右侧和左侧车道的轴向应力最大值分别为 5.94 MPa 和 9.22 MPa,增加约 55.2%。在 210~250 m 处,右车道应力明显大于左车道应力。

如图 17 所示,右侧和左侧车道的轴向应力最大值为 9.52 MPa 和 9.99 MPa,增加约 4.9%。在 30~50 m 和 200~220 m 处,桥梁轴向应力明显高于其余处轴向应力。在主梁处,右侧和左侧车道的主梁轴向应力最大值分别为 5.68 MPa 和 6.51 MPa,增

加约 14.61%。

正向脉动风作用时,梯度升降温下的轴向应力变化幅度和静态风荷载下的相似,但轴向应力值比静态风下的大,可见当桥梁处于梯度降温或梯度升温时,脉动风对桥梁的危害更大。负向脉动风下的桥梁轴向应力和变化幅度小于正向脉动风下的。

2.4 各温度梯度下轴向应力

由图 9~图 17 可知,左车道的轴向应力普遍大于右车道轴向应力,且负向风荷载轴向应力小于正向风荷载轴向应力,故用左车道轴向应力去观察桥梁在不同风荷载下的轴向应力变化。当桥梁在无风,静态风、脉动风情况下,桥梁整体呈无温度变化,梯度升降温时,对桥梁轴向应力进行分析,分别如图 18~图 20 所示。

如图 18 所示,脉动风下的轴向应力整体大于静态风和无风。在主梁处,脉动风、静态风和无风下的最大轴向应力为 5.18、4.52 和 4.4 MPa,脉动风下的最大轴向应力比静态风和无风下的最大轴向应力增大约 14.6% 和 17.7%,静态风下的最大轴向应力比无风下的最大轴向应力增大约 2.7%,可见在

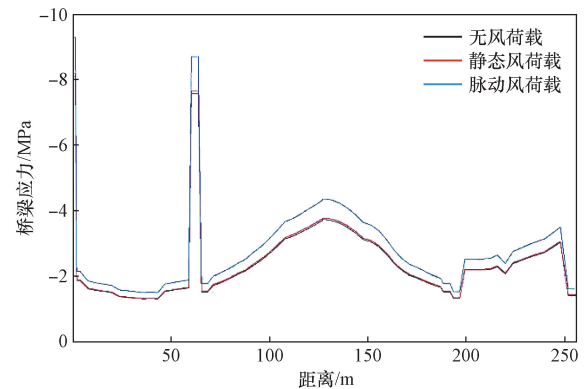


图 18 无温度变化时的桥梁轴向应力

Fig. 18 Axial stresses in bridges without temperature changes

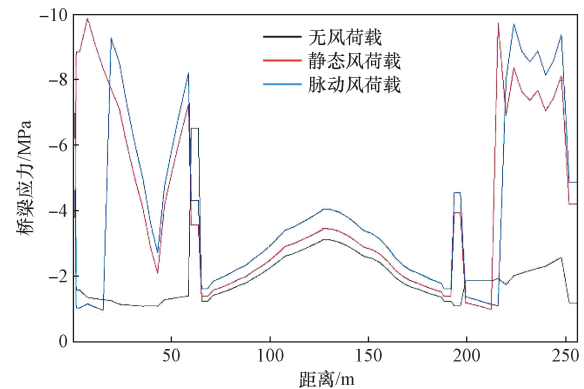


图 19 梯度降温时的桥梁轴向应力

Fig. 19 Axial stresses in bridges during gradient cooling

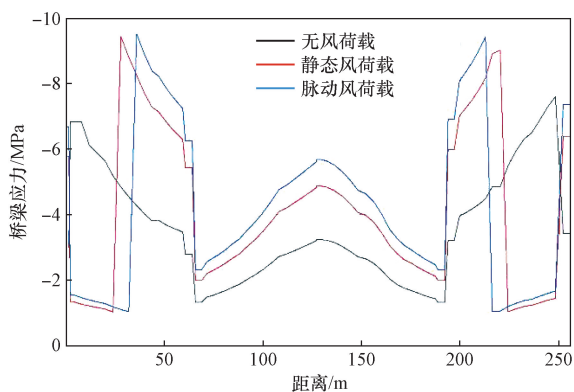


图 20 梯度升温时的桥梁轴向应力

Fig. 20 Axial stresses in bridges during gradient warming

无温度变化时,脉动风对桥梁主梁的危害要比静态风和无风的情况下更大。

如图 19 所示,在 66 ~ 199 m 处,脉动风下的轴向应力整体大于静态风和无风,但在 0 ~ 66 m 处,各种风荷载下的轴向应力变化较大。在主梁处,脉动风、静态风和无风下的最大轴向应力为 4.92、4.17 和 3.46 MPa,脉动风下的最大轴向应力比静态风和无风下的最大轴向应力增大 18% 和 42.2% ,

静态风下的最大轴向应力比无风下的最大轴向应力增大 20.5% ,与图 18 相比,脉动风对桥梁主梁的危害还是比静态风和无风对桥梁主梁的危害大。

如图 20 所示,在 0 ~ 24 m 和 224 ~ 256 m 处,桥梁在无风下的轴向应力大于脉动风和静态风下的轴向应力。但在 60 ~ 64 m 处,脉动风下的轴向应力明显大于静态风和无风下的轴向应力。在主梁处,脉动风、静态风和无风下的最大轴向应力为 6.51、5.55 和 4.01 MPa,脉动风下的最大轴向应力比静态风和无风下的最大轴向应力增大 17.3% 和 62.3% ,静态风下的最大轴向应力比无风下的最大轴向应力增大 38.4% ,可见在无温度变化时,脉动风对桥梁主梁的危害要比静态风和无风的情况下更大。

当桥梁整体呈无温度变化、梯度升降温时,在脉动风荷载情况下。无论是轴向应力值还是轴向应力变化幅度,都比其余两种情况要大,对桥梁的危害也更大。

3 结论

以某大跨度混凝土变截面连续梁桥为研究背景,对其因顶板厚度差异进行温度梯度建模,建立风荷载-列车-桥梁-温度荷载相互作用模型,得出如下主要结论。

(1)当桥梁不受风荷载且桥梁整体呈无温度变化、梯度升降温时,增加列车静活载后,桥梁轴向应

力增大,梯度升温时对桥梁的危害要比其余两种情况更大,梯度降温时,无论是桥梁轴向应力值还是轴向应力变化幅度,与静态风荷载和脉动风荷载相比,有着明显的降低和缓解。

(2)当桥梁处在同一种风况时,梯度升温下主梁最大轴向应力比无温度变化和梯度降温增大 22% ~ 33% ,虽然梯度降温时的主梁轴向应力比无温度变化时的小,但其余处的轴向应力和变化幅度比无温度变化时的更大、更剧烈,但不如梯度升温时的轴向应力值和变化幅度,所以梯度升温下对桥梁的危害最大、梯度降温次之、无温度变化最低。

(3)当桥梁整体呈同一种温度模型时,脉动风下,主梁轴向应力比无风和静态风分别增大 14% ~ 18%、18% ~ 43% 和 17% ~ 63% ,且脉动风时的桥梁轴向应力和轴向应力变化幅度,与无风和静态风相比,要更大更急,对桥梁的危害也更大。

参 考 文 献

- [1] 聂利英,刘明坡,朱倩,等. 基于实测的混凝土箱梁底板温度梯度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 8-14.
Nie Liying, Liu Mingpo, Zhu Qian, et al. Study on temperature gradient of concrete box girder bottom plate based on field measurement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2017, 36(10): 8-14.
- [2] 王多银,陈杰,陈昊然,等. 温度与荷载共同作用下钢筋混凝土桩的细观损伤[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(6): 2562-2572.
Wang Duoyin, Chen Jie, Chen Haoran, et al. The fine view damage of reinforced concrete piles under the combined effect of temperature and load[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(6): 2562-2572.
- [3] 惠迎新,孙晓荣,王红雨,等. 大跨变截面混凝土箱梁施工期温度效应研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 98-105.
Hui Yingxin, Sun Xiaorong, Wang Hongyu, et al. Study on temperature effect during construction of large-span variable cross-section concrete box girder[J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2023, 40(1): 98-105.
- [4] 冯青松,孙魁,徐金辉,等. 桥梁温度分布情况对桥上无砟轨道的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 20-26.
Feng Qingsong, Sun Kui, Xu Jinhui, et al. Analysis of the influence of bridge temperature distribution on ballastless track on bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 20-26.
- [5] 戴公连,岳喆. 混凝土箱梁早期温度测试与分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(2): 139-144.
Dai Gonglian, Yue Zhe. Early temperature testing and analysis of concrete box girder[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2019, 52(2): 139-144.
- [6] Lei X, Jiang H W, Wang J. Temperature effects on horizontally curved concrete box girder bridges with single-column piers[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(3): 4019008.

- [7] Wang J F, Xu Z Y, Fan X L, et al. Thermal effects on curved steel box girder bridges and their counter measures[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(2): 4016091.
- [8] 樊学平, 杨渡, 李九谕, 等. 温度和车辆荷载耦合产生的桥梁极值应力预测[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*, 1-7[2025-04-21]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231358>.
Fan Xueping, Yang Du, Li Jiuyu, et al. Prediction of extreme stress in bridges due to the coupling effect of temperature and vehicle loads[J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 1-7 [2025-04-21]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231358>.
- [9] 王桢, 周建庭, 廖棱, 等. 混凝土箱体桥梁自控温装置设计与温度分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(5): 2100-2107.
Wang Zhen, Zhou Jianting, Liao Leng, et al. The design and temperature analysis of automatic temperature control device for box structure of concrete bridge[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(5): 2100-2107.
- [10] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京, 人民社会出版社, 2018.
Tongji University. Code for wind resistance design of highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: People's Social Publishing House, 2018.
- [11] 龚君范. 混凝土的热容量[J]. *建筑技术*, 1988(7): 60-61.
Gong Junfan. Thermal capacity of concrete [J]. *Building Technology*, 1988(7): 60-61.
- [12] 潘旦光, 郭馨远, 丁民涛, 等. 单箱三室混凝土箱梁温度分布研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 513-520.
Pan Danguang, Guo Xinyuan, Ding Mintao, et al. Temperature distribution study of single-box three-room concrete box girder[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(6): 513-520.
- [13] 杜元, 王璐华, 范旭涛, 等. 梯度温度作用下装配式混凝土箱梁温度应力分析[J]. *交通科技*, 2021(1): 6-10.
Du Yuan, Wang Luhua, Fan Xutao, et al. Thermal stress analysis of prefabricated concrete box girder under gradient temperature effects[J]. *Transportation Science and Technology*, 2021(1): 6-10.
- [14] 李庶安, 章清涛, 魏琨, 等. 大跨径预应力混凝土连续梁桥温度场试验研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(4): 214-217.
Li Shuan, Zhang Qingtao, Wei Kun, et al. Experimental study on temperature field of large-span prestressed concrete continuous beam bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Technology (Applied Technology)*, 2020, 16(4): 214-217.
- [15] 王永宝, 赵人达. 混凝土箱梁温度梯度取值研究[J]. *世界桥梁*, 2016, 44(5): 43-47, 61.
Wang Yongbao, Zhao Renda. Study on temperature gradient of concrete box girder [J]. *World Bridges*, 2016, 44(5): 43-47, 61.
- [16] 安平和, 邬晓光, 殷悦, 等. 基于表面温度的混凝土箱梁温度场的计算[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(5): 423-427.
An Pinghe, Wu Xiaoguang, Yin Yue, et al. Calculation of temperature field of concrete box girder based on surface temperature [J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science Edition)*, 2019, 31(5): 423-427.
- [17] 王新宇. 日照下混凝土桥面铺装层温度场和温度应力分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
Wang Xinyu. Temperature field and temperature stress analysis of concrete bridge deck pavement layer under sunshine [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.