

考虑边界条件影响的波形钢腹板箱梁温度梯度效应研究

雷尧^{1,2},李明^{2,3},鲁乃唯²,刘扬²

(1.湖南省建设工程质量检测中心有限责任公司,湖南长沙 410007;2.长沙理工大学 土木工程学院,湖南长沙 410114;
3.四川省交通工程质量监督站,四川成都 610041)

摘要:为研究竖向温度梯度荷载作用下的波形钢腹板箱梁的受力特征,该文采用土木结构非线性仿真软件Midas FEA建立波形钢腹板箱梁桥三维有限元分析模型,对比分析简支结构和连续结构两种约束条件下的波形钢腹板箱梁在竖向温度梯度荷载作用下的温度效应。研究表明:在竖向温度梯度荷载下,波形钢腹板箱梁产生的温度效应显著,不可忽略;相比简支结构,连续结构约束条件下的波形钢腹板箱梁在温度梯度荷载作用下产生的温度效应更为显著,应综合考虑边界约束条件对波形钢腹板箱梁桥的温度效应影响;顶、底板混凝土与波形钢腹板连接构造处得到最大温度应力,设计时应重点关注该构造的峰值应力问题。

关键词:波形钢腹板;有限元;温度梯度;边界条件;温度应力

中图分类号:U444+.2

文献标志码:A

0 引言

波形钢腹板组合箱梁因其轻质高强、造型美观和抗震性能好等特点,近年来在国内外公路桥梁建设中得到了广泛应用^[1-6]。该组合结构在箱梁腹板处采用波形钢板替换传统混凝土并与顶、底板混凝土通过连接件连接形成组合结构箱梁,使传统预应力混凝土箱梁桥在腹板处开裂的问题得到了有效解决^[7-10]。但由于该类结构是由不同材料属性的混凝土、钢材组合而成,这两种材料导热性能的差异导致了结构在复杂环境温差作用下产生不同的温度效应^[11-13]。

目前,国内外研究学者主要针对温度荷载对混凝土桥梁结构的影响展开了大量研究^[14-16],研究结果表明温差荷载对混凝土结构受力影响显著,但对于钢-混组合箱梁结构的研究相对较少^[18-19]。丁幼亮等^[20-21]基于润扬长江大桥现场实测温度数据统计研

究发现,在夏季日照辐射的影响下,钢桥面板在竖向存在很大的温度梯度,最大温差达40℃;陈彦江等^[22]通过对钢-混组合结构桥梁的实测温度场数据进行拟合,得到了该组合箱形梁的竖向温度梯度分布函数,并基于有限元法对比分析了与现行规范中竖向温度梯度效应差异;赵品等^[23]基于某波形钢腹板连续箱梁桥长期温度效应监测数据,提出了波形钢腹板箱梁桥在竖向温度梯度荷载下的计算模型,研究表明温度梯度荷载作用下产生的温度效应与车辆荷载效应相当,温度梯度荷载对波形钢腹板桥梁结构的温度效应影响显著,不容忽视。

本文以某波形钢腹板箱梁为研究对象,采用土木结构非线性仿真分析软件Midas FEA建立简支结构和连续结构两种不同边界约束条件的波形钢腹板箱梁桥有限元分析模型,研究波形钢腹板箱梁桥在竖向温度梯度荷载作用下的温度效应,表明边界约束条件对波形钢腹板箱梁桥温度效应的影响规律。

收稿日期:2023-10-29(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);国家自然科学基金资助项目(编号:51978068,52178108);长沙理工大学桥梁工程领域开放基金资助项目(编号:18KC01);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2021JJ30720)

作者简介:雷尧,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:424247449@qq.com

1 温度梯度分布模型及取值

目前,中国关于在波形钢腹板箱梁的温度设计中取值主要参考现行规范《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)中的竖向梯度温度分布模型^[15],如图1所示。对关键部位的温度取值,主要以基准温度为依据,采用线性内插法得到各部位的温度,相应的温度取值如表1所示。

表1 中国规范竖向温度梯度参数取值

铺装类型	温升/℃		温降/℃	
	T_1	T_2	T_1	T_2
混凝土铺装	25	6.7	-12.5	-3.3
50 mm 沥青混凝土铺装层	20	6.7	-10	-3.3
100 mm 沥青混凝土铺装层	14	5.5	-7	-2.7

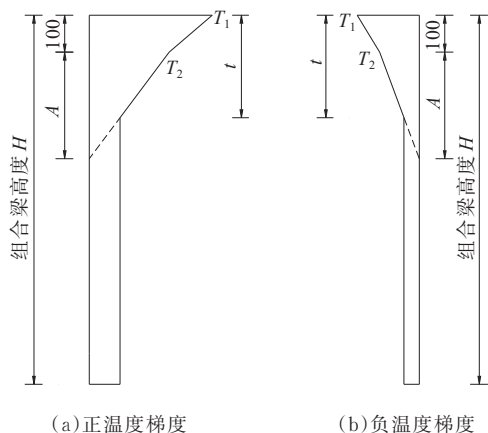


图1 竖向梯度温度分布模式(单位:mm)

中国规范规定混凝土结构的竖向负温度梯度数值为竖向正温度梯度数值的1/2。在混凝土结构中,梁高 $H \leq 400$ mm时,计算竖向温度梯度时 $A = (H - 100)$ mm;当梁高 $H > 400$ mm时, $A = 300$ mm;对于钢-混组合结构而言, $A = 300$ mm。其中,图中参数 t 为混凝土桥面板厚度。

2 数值模拟仿真模型

2.1 工程概况

以主梁构造为波形钢腹板箱梁的实桥为研究对象,研究简支结构和连续结构的波形钢腹板箱梁在温度梯度荷载作用下的温度梯度效应。主梁构造截面形式为单箱单室的波形钢腹板箱梁,横断面图如

图2(a)所示。箱梁高4.5 m,顶、底板分别宽12 m和5.9 m,底板厚0.3~0.6 m,顶板厚0.2~0.6 m。波形钢腹板单位波长的构造尺寸如图2(b)所示,波形钢腹板的厚度为14 mm,单波的高度为0.22 m,单波的长度为1.6 m,水平子板的宽度为0.43 m,斜板宽为0.37 m,平板与斜板夹角为 30.7° ,采用内径 $R = 15t$ (为波形钢腹板的厚度)的圆弧曲线段在连接段进行过渡。主梁的顶、底板混凝土等级为C50,腹板为Q345钢材的波形钢板,顶、底板混凝土与波形钢腹板之间的连接方式通过埋入式连接件进行连接,桥面铺装层采用厚度为100 mm的沥青混凝土。

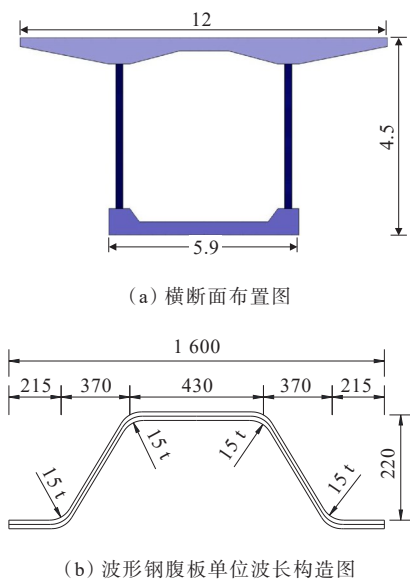


图2 波形钢腹板箱梁几何尺寸(单位:mm)

2.2 有限元模型

采用土木工程非线性仿真分析软件 Midas FEA 建立波形钢腹板箱梁桥三维精细化有限元分析模型。为研究不同边界条件对温度梯度荷载作用下波形钢腹板箱梁的温度效应的影响,将规范中日照竖向温度梯度分布模式分别加载在简支结构约束(跨径为70 m)和连续结构约束[跨径为 $(20 + 30 + 20)$ m = 70 m]的波形钢腹板箱梁。箱梁的顶板混凝土和底板混凝土的模拟均采用热传导三维实体单元,波形钢腹板采用热传导三维板单元进行模拟,顶、底板混凝土与波形钢腹板接触面之间的相对滑移效应在本文中不予考虑,采用共节点的连接方式进行模拟。有限元模型共有节点51 490个,单元34 560个。有限元模型如图3所示,有限元模型材料参数见表2。

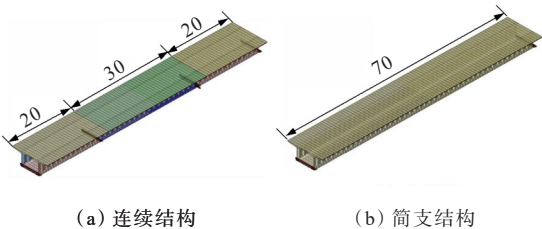


图3 三维有限元模型(单位:m)

表2 20℃时的材料特性

材料	弹性模量 E/MPa	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	热膨胀 系数/ $(^\circ\text{C})^{-1}$	传导率/ $[\text{W} \cdot (\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	比热/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	泊松 比
混凝土 C50	34 500	25.00	1×10^{-5}	0.97	250	0.2
Q345 钢材	206 000	76.98	1.2×10^{-5}	0.48	480 000	0.3

3 温度效应分析

3.1 简支结构约束

简支结构约束条件下,波形钢腹板箱梁桥在竖向正、负温度梯度荷载下的温度应力分布分别如图4、5所示,各结构部位的温度效应极值如图6所示。

由图4~6可知:正、负温度梯度荷载对简支结构约束的波形钢腹板箱梁产生的温度效应影响程度最大的是波形钢腹板,顶板混凝土次之,底板混凝土最

小;在竖向正温度梯度荷载下,波形钢腹板与顶板混凝土的连接构造的波形钢腹板处产生温度应力峰值,最大拉、压应力值分别为28.86 MPa、-75.04 MPa,在竖向负温度梯度荷载下,波形钢腹板与顶板混凝土的连接构造的波形钢腹板处产生温度应力峰值,最大拉、压应力值为37.52 MPa、-14.03 MPa,波形钢腹板的最大应力均小于Q345钢材的强度设计值;在竖向正温度梯度荷载下,顶板混凝土表现为上缘受压,最大压应力值为-4.13 MPa,下缘受拉,最

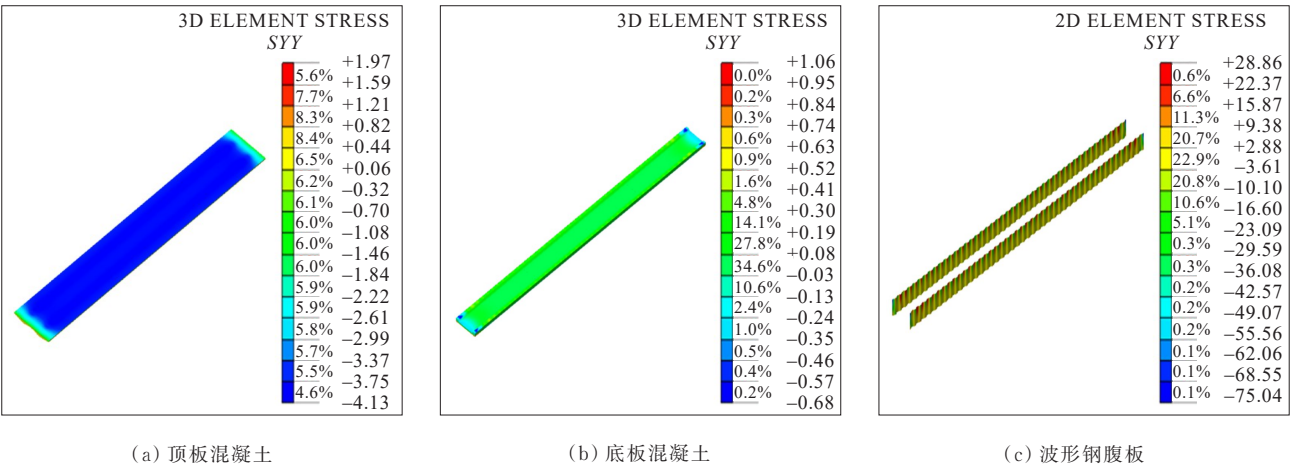


图4 正温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

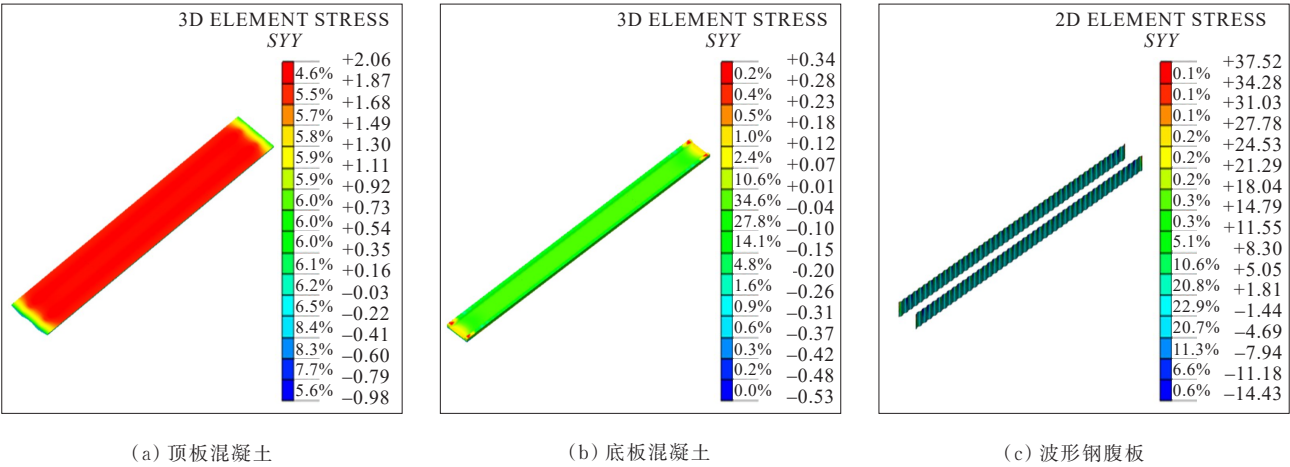


图5 负温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

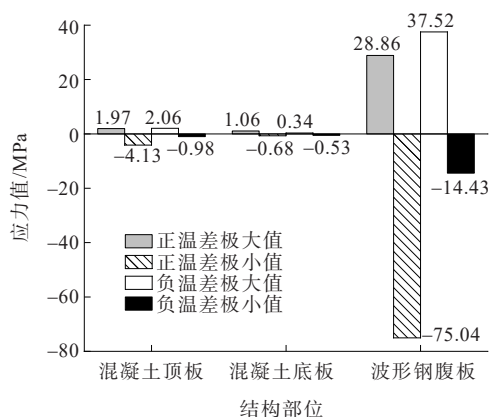


图6 应力极值分析

大拉应力值为 1.97 MPa, 底板混凝土表现为上缘受拉, 最大拉应力值为 1.06 MPa, 下缘受压, 最大压应力值为 -0.68 MPa, 顶、底板混凝土的最大拉、压应力均小于 C50 混凝土强度设计值。在竖向负温度梯度荷载作用下, 顶板混凝土表现为上缘受拉, 最大拉

应力值为 2.06 MPa, 下缘受压, 最大压应力值为 -0.98 MPa, 底板混凝土表现为上缘受压, 最大压应力值为 -0.53 MPa, 下缘受拉, 最大拉应力值为 0.34 MPa, 顶、底板混凝土的最大拉、压应力值均小于 C50 混凝土强度设计值。

3.2 连续结构约束

连续结构约束条件下, 波形钢腹板箱梁在竖向正、负温度梯度荷载作用下的温度应力分布分别如图 7、8 所示, 各结构部位的温度效应极值如图 9 所示。

由图 7~9 可知: 正、负温度梯度荷载对连续结构约束的波形钢腹板箱梁产生的温度效应影响程度最大的是波形钢腹板; 在竖向正温度梯度荷载下, 底板混凝土与波形钢腹板的连接构造的波形钢腹板处产生温度应力峰值, 最大拉、压应力值分别为 30.70 MPa、 -62.62 MPa, 在竖向负温度梯度荷载下, 底板混凝土与波形钢腹板的连接构造的波形钢腹板处产

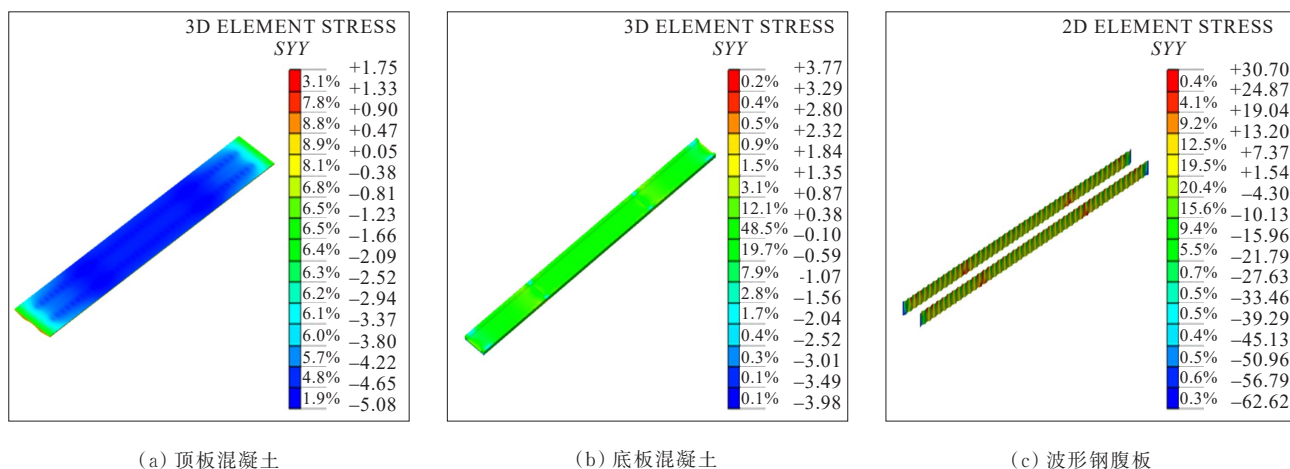


图7 正温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

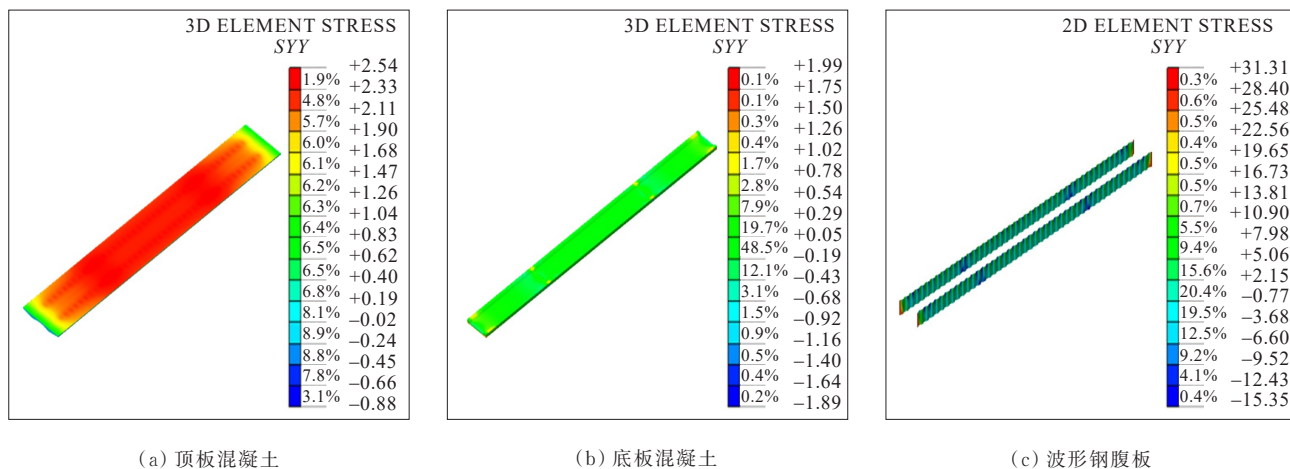


图8 负温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

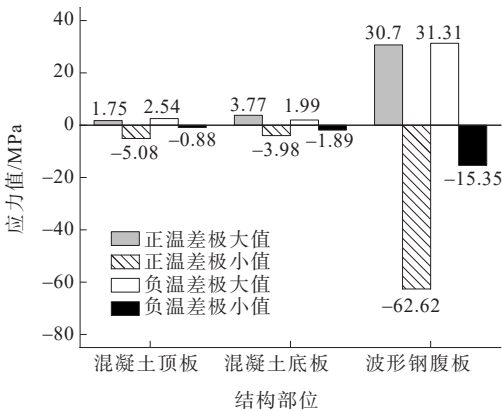


图9 温度应力极值对比分析

生温度应力峰值,最大拉、压应力值分别为31.31 MPa、-15.35 MPa,波形钢腹板的最大应力值均小于Q345钢材的强度设计值;在竖向正温度梯度荷载下,顶板混凝土表现为上缘受压,最大压应力值为-5.08 MPa,下缘受拉,最大拉应力值为1.75 MPa,顶板混凝土的最大拉、压应力值均小于C50混凝土强度设计值,而底板混凝土表现为上缘受拉,最大拉应力值为3.77 MPa,下缘受压,最大压应力值为-3.98 MPa,底板混凝土的最大拉应力超过了C50混凝土抗拉强度设计允许值,底板混凝土可能会出现裂缝。在竖向负温度梯度荷载下,顶板混凝土表现为顶板上缘受拉,最大拉应力值为2.54 MPa,下缘受压,最大压应力值为-0.88 MPa,底板混凝土表现为上缘受压,最大压应力值为-1.89 MPa,下缘受拉,最大拉应力值为1.99 MPa,顶板混凝土的最大拉、压应力均小于C50混凝土强度设计值。

3.3 简支和连续结构温度效应对比分析

正、负温度梯度作用下,波形钢腹板箱梁在简支约束和连续约束条件下,各构造部位产生的温度应力极值如表3所示。

表3 竖向温度梯度模式计算结果

结构部位	应力极值	正温度梯度效应/MPa		负温度梯度效应/MPa	
		简支结构	连续结构	简支结构	连续结构
顶板混凝土	极大值	1.97	1.75	2.06	2.54
	极小值	-4.13	-5.08	-0.98	-0.88
波形钢腹板	极大值	28.86	30.70	37.52	31.30
	极小值	-75.04	-62.62	-14.43	-15.35
底板混凝土	极大值	1.06	3.77	0.34	1.99
	极小值	-0.68	-3.98	-0.53	-1.89

注:负为压应力,正为拉应力。

在竖向正、负温度梯度荷载下,简支结构约束和连续结构约束两种条件的波形钢腹板箱梁均在波形钢腹板处出现峰值应力,简支结构约束条件下,波形钢腹板箱梁的顶板混凝土与波形钢腹板连接构造的波形钢腹板处产生温度应力峰值,而连续结构约束条件下,波形钢腹板箱梁的底板混凝土与波形钢腹板连接构造的波形钢腹板处产生温度应力峰值;正温度梯度荷载作用下,简支结构约束条件下的混凝土顶、底板的应力范围分别为-4.13~1.97 MPa和-0.68~1.06 MPa,连续结构约束条件下的混凝土顶、底板的应力范围分别为-5.08~1.75 MPa和-5.08~1.75 MPa,简支约束条件下混凝土顶板最大拉应力大于连续结构约束,最大压应力值小于连续结构约束,混凝土底板的最大拉、压应力均小于连续结构约束;负温度梯度荷载作用下,简支结构约束条件下的混凝土顶、底板的应力范围分别为-0.98~2.06 MPa和-0.53~0.34 MPa,连续结构约束条件下的混凝土顶、底板的应力范围分别为-0.88~2.54 MPa和-1.89~1.99 MPa,简支结构约束条件下的混凝土顶板的最大拉应力小于连续结构约束,最大压应力值大于连续结构约束,混凝土底板的最大拉、压应力均小于连续结构约束。

4 结论

本文基于有限元分析方法,对比分析不同约束条件下的波形钢腹板箱梁在竖向温度梯度荷载下的温度效应,主要结论如下:

- (1) 温度梯度荷载作用下的波形钢腹板箱梁的温度效应显著,正温度梯度荷载作用下,连续结构波形钢腹板箱梁的顶板混凝土最大温度应力达3.77 MPa,超过C50混凝土强度设计允许值。
- (2) 温度梯度荷载作用下,波形钢腹板箱梁的混凝土顶、底与波形钢腹板连接构造的波形钢腹板处得到最大拉、压应力,设计时应重点关注该构造的峰值应力问题。
- (3) 不同边界约束条件对波形钢腹板箱梁桥的温度效应影响显著,与简支结构相比,竖向温度梯度荷载对连续结构波形钢腹板箱梁产生的温度效应更显著,考虑温度梯度荷载影响时,应综合考虑边界条件对该组合结构的温度效应的影响,以确保结构的

安全。

为了研究温度梯度荷载下波形钢腹板箱梁桥的温度效应,本文对规范中温度荷载模型下的波形钢腹板箱梁桥的温度效应进行了数值仿真,采用的温度荷载模型未考虑实际温度荷载梯度模型,后续研究中将对实际桥梁温度荷载进行统计分析,采用实测的温度荷载模型对波形钢腹板的温度效应进行研究。

参考文献:

- [1] 王力,刘世忠,路韡,等.新型波形钢腹板组合箱梁温度效应[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(4):675-683.
- [2] 邓文琴,刘朵,冯杰,等.波形钢腹板箱梁桥异步施工节段足尺模型试验研究[J].桥梁建设,2019,49(1):53-58.
- [3] 袁卓亚,李立峰,刘清,等.波形钢腹板组合箱梁横向内力分析及试验研究[J].中国公路学报,2015,28(11):73-81.
- [4] 黎海堤,杨磊.基于断裂力学的波形钢腹板结构疲劳分析研究[J].中外公路,2023,43(2):91-95.
- [5] 姜竹昌,高华睿,曹洪亮,等.大跨径波形钢腹板箱梁桥截面竖向温度梯度研究[J].中外公路,2021,41(4):125-130.
- [6] 刘阳帆,钟扬,樊林杰,等.日照下波形钢腹板箱梁桥竖向温度分布研究[J].公路与汽运,2022(3):86-89,103.
- [7] 彭长军.波形钢腹板连续梁桥收缩徐变效应研究[J].工程建设,2020,52(7):24-29.
- [8] SHI F, WANG D S, CHEN L. Study of flexural vibration of variable cross-section box-girder bridges with corrugated steel webs[J]. Structures, 2021, 33: 1107-1118.
- [9] 李晓超.PC梁截面温度梯度对钢绞线预应力影响规律研究[J].中外公路,2021,41(2):172-176.
- [10] 施智,罗吉智,彭蓉.大跨径波形钢腹板预应力混凝土箱梁设计与研究[J].中外公路,2021,41(4):172-177.
- [11] 强俊涛,姚晨,张峰,等.波形钢腹板组合桥梁温度效应研究[J].公路,2016,61(3):54-57.
- [12] 管怀金.波形钢腹板箱梁桥竖向温度梯度效应研究[J].公路与汽运,2019(2):110-113,117.
- [13] 杨文斌.大跨径单箱双室箱梁桥温度梯度研究[J].中外公路,2023,43(4):110-117.
- [14] 卫俊岭,王浩,茅建校,等.混凝土连续箱梁桥温度场数值模拟及实测验证[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3):378-383.
- [15] 龙志林,李龙,涂光亚,等.大跨度预应力混凝土斜拉桥温度效应研究[J].中外公路,2014,34(4):132-135.
- [16] 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.
- [17] 薛嵩,戴公连,闫斌.预应力混凝土槽型梁日照温度荷载模式研究[J].中国科学(技术科学),2016,46(3):286-292.
- [18] 赵品,叶见曙.波形钢腹板箱梁桥面板横向温度效应分析[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(5):974-978.
- [19] 杨永伟,李凯,邓露等.独塔斜拉桥钢-混结合段的试验与数值研究[J].中外公路,2022,42(6):62-71.
- [20] 丁幼亮,王高新,周广东,等.基于现场监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁温度场全寿命模拟方法[J].土木工程学报,2013,46(5):129-136.
- [21] 丁幼亮,王高新,周广东,等.基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性[J].中国公路学报,2013,26(2):94-101.
- [22] 陈彦江,王力波,李勇.钢-混凝土组合梁桥温度场及温度效应研究[J].公路交通科技,2014,31(11):85-91.
- [23] 上海市城市建设设计研究总院,同济大学.钢-混凝土组合桥梁设计规范:GB 50917—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.