

波形钢腹板箱梁桥竖向温度梯度效应研究

管怀金

(太平洋建设集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 波形钢腹板梁桥因其结构组合的特殊性,在不同温度场作用下结构受力状态复杂。为明确现行不同标准对波形钢腹板组合梁桥竖向温度梯度效应的计算差别,文中基于某波形钢腹板组合箱梁桥建立精细化三维有限元计算模型,对比分析中、美规范中竖向温度梯度分布模式下的温度效应。结果表明,不同规范关于温度梯度的分布模式和取值存在明显差异,波形钢腹板连续梁桥在温差作用下温度效应显著,不容忽视,可根据桥梁所处环境对现行规范进行优化;在正、负温度梯度作用下,波形钢腹板均受到最大拉、压应力;正温度梯度作用下,按照美国 AASHTO 规范中分布模式可获得最大拉、压应力;负温度梯度作用下,按照中国 JTG D60—2015 规范中分布模式可获得最大拉、压应力。

关键词: 桥梁;波形钢腹板;温度梯度;温度效应;应力

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)02-0110-04

波形钢腹板是一种钢混组合结构,其以波形钢板作为腹板通过连接件将两块腹板和砼顶底板结合起来,充分发挥两种材料的力学性能,具有结构轻、抗震性能好、受力合理、施工简便、工程造价经济等优点。桥梁结构长期处于大自然环境中,受气温、太阳辐射及风速等环境因素的影响,结构物断面上温度梯度分布十分复杂,其结构受力状态复杂。丁幼亮等通过对润扬长江大桥的温度实测,发现夏季由于日照的影响,在桥梁结构竖向断面上温度梯度明显,最大温差达 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;陈彦江通过对钢—砼组合结构梁桥温度场进行实测,拟合得到截面竖向最不利温度梯度分布模式与现行标准中竖向温度梯度分布模式存在一定差异。在温度梯度作用下,由于波形钢腹板和砼等材料的导热性能差异,波形钢腹板梁桥应力变化十分显著,在构件连接部位易出现裂缝、应力集中等现象,对结构产生危害。该文以某波形钢腹板组合箱梁桥为分析对象,通过建立有限元三维模型,按照中、美规范中日照竖向温度梯度分布模式进行计算,分析波形钢腹板在不同温度梯度分布模式下的内部应力分布情况。

1 中、美规范中温度梯度分布模型及取值

1.1 中国规范 JTG D60—2015 温度梯度分布模型

目前,国内关于波形钢腹板梁桥温度梯度取值的主要依据是 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》,其中竖向温度梯度分布模型见图 1,关键部

位的温度取值以基准温度为主,采用线性内插法求得(见表 1)。该规范规定砼结构的竖向负温度梯度为竖向正温度梯度的 -0.5 倍。对于砼结构,梁高 H 低于 400 mm 时,计算温度梯度时 $A = (H - 100)\text{ mm}$; H 不低于 400 mm 时, $A = 300\text{ mm}$ 。对于砼与钢组合结构, $A = 300\text{ mm}$ 。

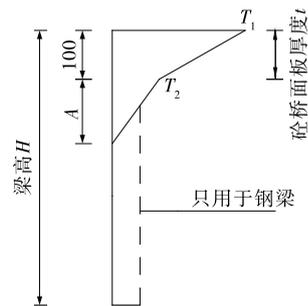


图 1 JTG D60—2015 规范中竖向温度梯度模式(单位: mm)

表 1 JTG D60—2015 规范中竖向温度梯度参数取值 $^{\circ}\text{C}$

结构类型	T_1	T_2
砼铺装	25	6.7
50 mm 沥青砼铺装层	20	6.7
100 mm 沥青砼铺装层	14	5.5

1.2 美国 AASHTO 规范温度梯度模型

美国 AASHTO 规范对于竖向温度梯度参数的取值主要是根据美国的地理特征,其将国土分为 4 个区域,不同区域的温度梯度取值不同,对钢—混组合结构的竖向温度梯度参数的取值并没有明确规

定。对于砼上部结构,梁高 A 不低于 400 mm 时, $A = 300$ mm; A 低于 400 mm 时, $A = (H - 100)$ mm。计算负温差时,桥面铺装层为砼时,参数取值是相应区域正温差的 -0.3 倍;桥面铺装层为沥青砼时,参数取值是相应区域正温差的 -0.2 倍, $T_3 = 0$,但不能超过 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 。其竖向温度梯度分布模式见图 2,竖向温度梯度参数取值见表 2。

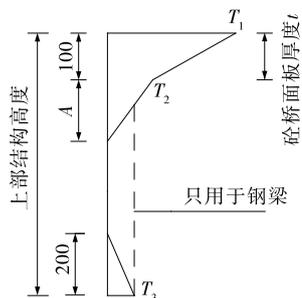


图 2 美国 AASHTO 规范温度梯度模式(单位: mm)

表 2 美国 AASHTO 规范竖向温度梯度参数取值 $^\circ\text{C}$

区域编码	T_1	T_2	区域编码	T_1	T_2
1	30	7.8	3	23	6
2	25	6.7	4	21	5

2 温度梯度效应分析

2.1 工程背景

某波形钢腹板 PC 连续梁桥的跨径组合为 $(20 + 30 + 20)$ m,主梁结构为单箱单室截面,梁高 4.5 m,箱梁顶板宽 12.0 m,底板宽 5.9 m,底板厚 0.3~0.6 m,顶板厚 0.2~0.6 m。波形钢腹板材料为 Q355NHC,波长 1.6 m,波高 0.22 m,钢板厚 14 mm,水平子板宽 43 cm,斜板宽 37 cm,平板与斜板夹角为 30.7° ,且该连接处采用内径为 $15t$ (t 为波形钢腹板厚度)的圆弧段过渡(见图 3)。主梁采用 C50 砼,纵向预应力钢束为 $\phi_s 15.2$ 高强度低松弛钢绞线。

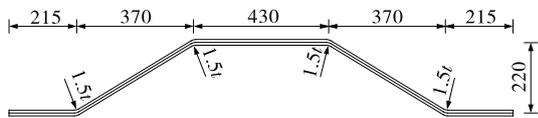


图 3 波形钢腹板单位波长构造图(单位: mm)

2.2 有限元分析模型

为对比不同规范关于波形钢腹板梁桥竖向温度梯度效应的差异,采用土木工程非线性仿真分析软件 MIDAS/FEA3.70 建立三维有限元精细化模型,

结合相关规范中的温度参数取值,对结构在不同温度场中产生的效应进行分析。主梁顶板和底板采用热传导三维实体单元模拟,波形钢腹板采用热传导三维板单元模拟,顶板和底板与波形钢腹板之间的连接采用 MIDAS/FEA3.70 中特有的印刻功能模拟,温度荷载根据规范中竖向温度梯度分布模型定义温度梯度函数进行施加。整个模型共 51 490 个节点、34 560 个单元(见图 4)。

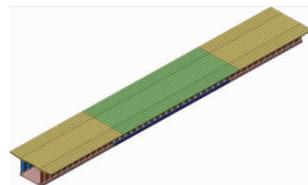


图 4 三维有限元模型

3 计算结果分析

3.1 JTG D60—2015 规范计算结果分析

根据图 1 和表 1,正温度梯度时, $T_1 = 14\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 5.5\text{ }^\circ\text{C}$;负温度梯度时对应竖向温度参数取值为正温度梯度的 -0.5 倍。基于 JTG D60—2015 中竖向温度梯度分布模型,在正温差及负温差作用下,波形钢腹板梁桥砼和波形钢腹板的竖向温度梯度效应应力见图 5、图 6,不同部位的应力极值对比见图 7。

由图 5~7 可知:JTG D60—2015 规范中正温度梯度对应的最大应力部位为波形钢腹板,最大拉

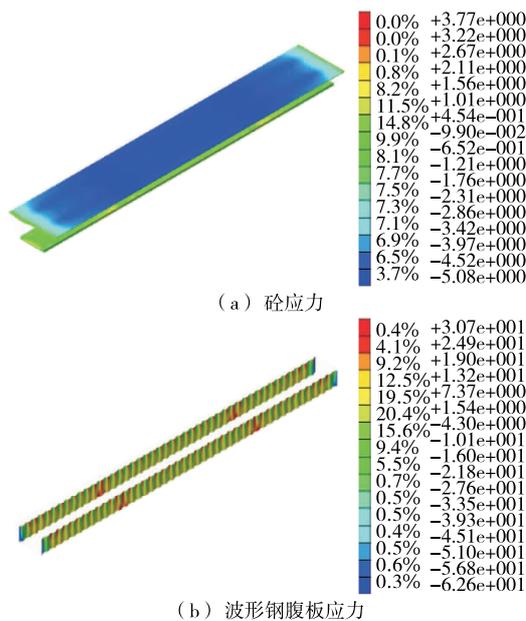


图 5 JTG D60—2015 规范正温度梯度效应应力云图(单位: MPa)

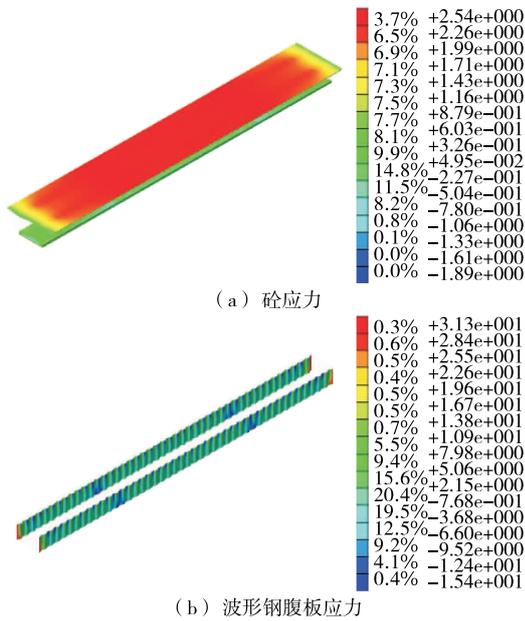


图6 JTG D60—2015 规范负温度梯度效应
应力云图(单位:MPa)

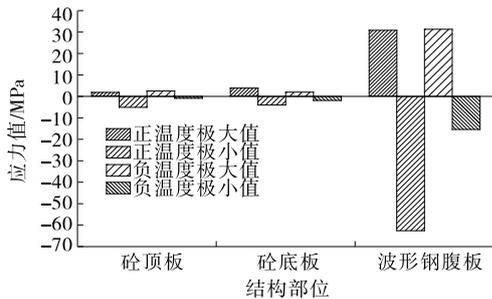


图7 JTG D60—2015 规范应力极值比较

应力为 30.7 MPa,最大压应力为 62.6 MPa; 砼顶板的最大拉应力为 1.75 MPa、最大压应力为 5.08 MPa, 砼底板的最大拉应力为 3.77 MPa、最大压应力为 3.98 MPa, 砼顶板处的拉、压应力基本在 C50 砼设计强度范围内, 砼底板处的拉应力超出 C50 砼抗拉强度设计允许值, 砼底板可能出现裂缝。负温度梯度对应的最大应力部位为波形钢腹板, 最大拉应力为 31.3 MPa, 最大压应力为 15.4 MPa; 砼顶板的最大拉应力为 2.54 MPa、最大压应力为 -0.88 MPa, 砼底板的最大拉应力为 1.99 MPa、最大压应力为 -1.89 MPa, 砼压应力基本在 C50 砼设计抗压强度范围内, 砼最大拉应力超过 C50 砼抗拉设计允许值, 砼结构可能出现裂缝。

3.2 AASHTO 规范计算结果分析

根据图 2 和表 2, 以 4 区的参数为计算依据, 正温度梯度时, $T_1=21\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=5\text{ }^\circ\text{C}$; 负温度梯度时的

竖向温度参数取值为正温度梯度的 -0.2 倍。基于 AASHTO 规范中竖向温度梯度分布模型, 在正温差及负温差作用下, 波形钢腹板梁桥砼和波形钢腹板的竖向温度梯度效应应力见图 8、图 9, 不同部位的应力极值对比见图 10。

由图 8~10 可知: AASHTO 规范中正温度梯度对应的最大应力部位为波形钢腹板, 最大拉应力为 43.2 MPa, 最大压应力为 93.2 MPa; 砼顶板的最大拉应力为 2.59 MPa、最大压应力为 7.93 MPa, 砼底板的最大拉应力为 5.00 MPa、最大压应力为 5.11 MPa,

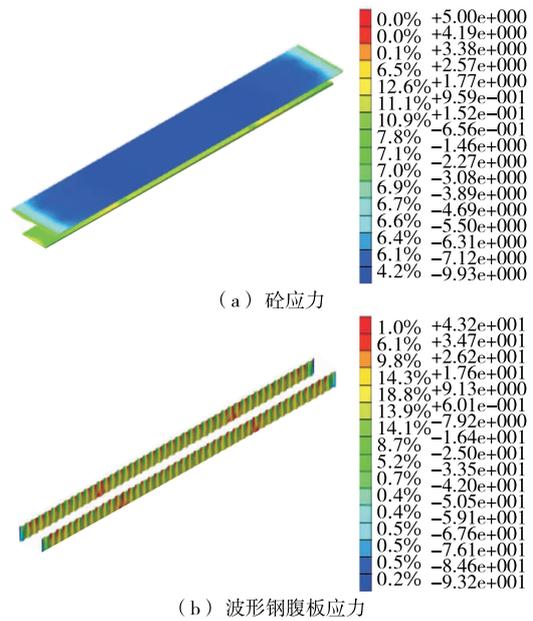


图8 AASHTO 规范正温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

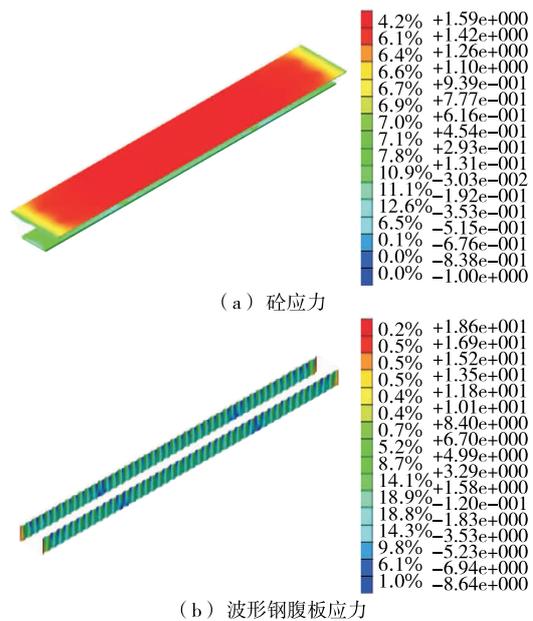


图9 AASHTO 规范负温度梯度效应应力云图(单位:MPa)

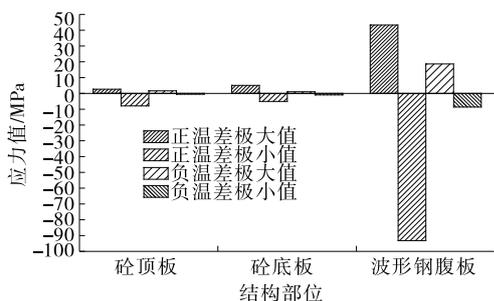


图 10 AASHTO 规范极值应力比较

砼压应力基本在 C50 砼设计抗压强度范围内, 砼最

大拉应力超过 C50 砼抗拉设计允许值, 砼结构可能出现裂缝。负温度梯度对应的最大应力部位为波形钢腹板, 最大拉应力为 18.6 MPa, 最大压应力为 8.64 MPa; 砼顶板的最大拉应力为 1.59 MPa、最大压应力为 0.52 MPa, 砼底板的最大拉应力为 1.02 MPa、最大压应力为 1.00 MPa, 砼拉、压应力基本在 C50 砼设计抗拉、抗压强度范围内。

3.3 各规范中温度效应对比分析

波形钢腹板梁桥在中、美规范中竖向温度梯度模式作用下的温度效应计算结果见表 3。

表 3 不同竖向温度梯度模式下的温度效应计算结果

MPa

结构部位	应力极值	正温度梯度		负温度梯度	
		JTG D60—2015	AASHTO	JTG D60—2015	AASHTO
砼顶板	极大值	1.75	2.59	2.54	1.59
	极小值	-5.08	-7.93	-0.88	0.52
波形钢腹板	极大值	30.70	43.20	31.30	18.60
	极小值	-62.60	-93.20	-15.40	-8.64
砼底板	极大值	3.77	5.00	1.99	1.02
	极小值	-3.98	-5.11	-1.89	-1.00

注: 负为压应力, 正为拉应力。

由表 3 可知: 在 JTG D60—2015、AASHTO 规范中竖向温度梯度荷载作用下, 桥梁结构纵向温度应力具有一定的相似性, 且产生最不利效应的位置大致相同; 无论是中国规范还是美国规范, 波形钢腹板的应力极值最大, 主要产生在砼与波形钢腹板结合处, 砼顶板次之, 砼底板最小。竖向正温差作用下, 结构产生的最大拉、压应力主要在波形钢腹板处, 砼顶板上缘主要承受拉应力、下缘主要承受压应力, 砼底板上缘主要承受拉应力、下缘主要承受压应力。竖向负温差作用下, 结构产生的最大拉、压应力主要在波形钢腹板处, 砼顶板上缘主要承受压应力、下缘主要承受拉应力, 砼底板上缘主要承受压应力、下缘主要承受拉应力。在不同规范温度梯度模式作用下, 局部温度效应差异较大, 正温度梯度作用下, AASHTO 规范的温度应力最大, 在波形钢腹板产生的最大拉应力为 43.2 MPa、最大压应力为 93.2 MPa; 负温度梯度作用下, JTG D60—2015 规范的温度应力在波形钢腹板产生的最大拉应力为 31.3 MPa、最大压应力为 15.4 MPa。波形钢腹板桥梁在不同温度梯度作用下温度效应差异显著, 合理选择温度梯度分布模式至关重要。

4 结论

(1) 波形钢腹板梁桥在竖向温差作用下, 由于材料的差异性, 温度效应显著, 在进行设计时应考虑现场环境对规范中温度梯度模型和取值进行优化, 以更好地分析结构的温度效应。

(2) 在温度梯度作用下, 波形钢腹板受到的最大拉、压应力主要产生在波形钢腹板与砼顶板下缘和砼底板上缘的连接部位。

(3) 关于正温度梯度效应的计算, 在 AASHTO 规范正温度梯度分布模式作用下, 可获得砼最大拉、压应力; 关于负温度梯度效应的计算, 在 JTG D60—2015 规范负温度梯度分布模式作用下, 可获得砼最大拉、压应力。

(4) 波形钢腹板连续梁桥温度效应计算中应综合考虑影响温度效应的因素, 以确保结构安全。

参考文献:

- [1] 刘玉擎. 波折腹板组合箱梁桥结构体系分析[J]. 桥梁建设, 2005(1).

(下转第 117 页)

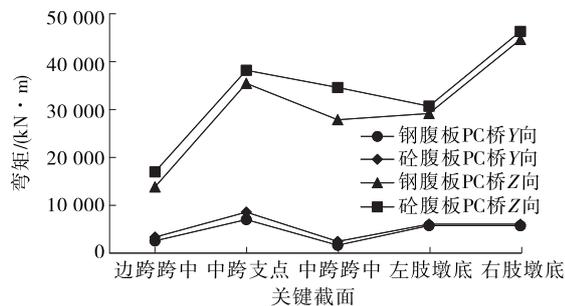


图 8 关键截面弯矩变化曲线

墩底, 砼腹板 PC 连续梁桥所受轴力比波形钢腹板 PC 连续梁桥大 87 kN。2) 地震反应谱作用下, 由于作用效应中横向地震占主要部分, 全桥所受横向剪力大于竖向剪力; 由于中跨跨度较大, 且中跨位移大于边跨位移, 右肢墩底剪力大于左肢墩底; 波形钢腹板 PC 连续梁桥所受剪力整体稍小于砼腹板 PC 连续梁桥, 最大差值出现在中跨支点处, 砼腹板 PC 连续梁桥所受横向剪力比波形钢腹板 PC 连续梁桥大 140 kN。3) 地震反应谱作用下, 由于桥梁上下部结构位移不对称, 中跨支点处承受的扭矩最大; 墩底固结约束, 且墩底位移较小, 所受扭矩较小; 波形钢腹板 PC 连续梁桥所受扭矩整体小于砼腹板 PC 连续梁桥, 最大差值出现在边跨跨中, 砼腹板 PC 连续梁桥所受扭矩比钢腹板 PC 连续梁桥大 1 170 kN·m。4) 地震反应谱作用下, 由于作用效应中横向地震占主要部分, 全桥所受横向弯矩(绕 Z 轴弯矩)大于竖向弯矩(绕 Y 轴弯矩); 弯矩整体变化趋势与剪力相同, 右肢墩底所受横向弯矩大于左肢墩底; 波形钢腹板 PC 连续梁桥所受弯矩整体稍小于砼腹板 PC 连续梁桥, 最大差值出现中跨跨中, 砼腹板 PC 连续梁桥所受横向弯矩比波形钢腹板 PC 连续梁桥大 797 kN·m。

4 结论

相比同跨径传统砼腹板 PC 连续梁桥, 波形钢腹板 PC 连续梁桥上部结构自重减轻 10%, 但两者自振振型相同, 周期和频率相近, 在地震 E1 反应谱作用下, 波形钢腹板 PC 连续梁桥的承载力及位移满足抗震要求, 且地震作用下结构响应相较于传统砼腹板 PC 连续梁桥在大部分截面上存在些许优势, 表现在部分位移相对较小、所受内力相对较小。但在部分截面如中跨跨中, 两桥的各项响应均存在差异, 大跨度波形钢腹板 PC 连续梁桥需重点关注中跨的结构设计。波形钢腹板 PC 连续梁桥上部结构较轻, 下部结构所受内力较小, 下部结构所受内力也与砼腹板 PC 连续梁桥不同, 可根据实际情况适当地改变波形钢腹板 PC 连续梁桥的下部结构设计, 以节约工程造价。

参考文献:

- [1] 陈水生, 刘律, 桂水荣. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥在我国的研究进展及应用[J]. 公路工程, 2015, 40(3).
- [2] 李东毅. 波纹钢腹板变截面组合连续箱梁桥动力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [3] 张长青, 安永日, 安里鹏. 波形钢腹板连续刚构桥的地震响应分析[J]. 桥梁建设, 2011(3).
- [4] 张元文, 张建东. 基于 Midas 的波形钢腹板曲线梁桥地震反应分析方法[J]. 科技致富向导, 2015(9).
- [5] 李俊, 周俊威, 史鹏飞, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁地震反应谱分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2014(7).

收稿日期: 2018-07-09

(上接第 113 页)

- [2] 徐强, 万水. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥设计与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [3] 万水, 李淑琴, 马磊. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2).
- [4] 缪长青, 史长华. 大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(10).
- [5] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [6] Elbadry M, Ghali A. Thermal stresses and cracking of concrete bridges[J]. Journal of the America Concrete Institute, 1986, 83(6).

- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 陈彦将, 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).
- [10] US Department of Transportation. AASHTO, Load and resistance factor design, bridge design specifications[S].

收稿日期: 2018-06-23