文章编号:1674-2869(2025)04-0467-06

腹板拼装偏差对波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥力学性能的影响

廖万云[1,2],张玉珂[3],邓 丽[*1,2],顾箭峰[1,2],骆 豪[1,2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430074;
3. 山东省交通规划设计院集团有限公司,山东 济南 250101

摘 要:为研究腹板拼装偏差对波形钢腹板箱梁桥力学性能的影响,以一座三跨波形钢腹板预应力混凝土(PC)组合连续箱梁桥为例,仿真模拟悬臂浇筑施工过程及成桥状态,分析波形钢腹板搭接角度偏差、内外侧腹板间距及高度偏差对结构变形、应力及稳定性的影响规律。研究结果表明:内外侧腹板间距偏差相较于其他两种拼装偏差,对波形钢腹板受力性能影响更加明显。在最大悬臂阶段,主梁变形对内外侧腹板间距偏差最为敏感,内外侧腹板间距偏差-15 mm时,主梁变形最大变化量为0.89 mm;其次为腹板搭接角度,对腹板高度的敏感性很小,内外侧腹板高度偏差-15 mm时,主梁变形最大变化量仅为0.20 mm。在成桥阶段,主梁变形对内外侧腹板间距偏差最敏感,搭接角度次之,对内外侧高度偏差的敏感性最小。内外侧腹板间距偏差对腹板剪应力的影响比较显著,腹板搭接角度偏差和内外侧腹板高度偏差的影响相对较小。3种拼装偏差对主梁顶底板应力和桥梁结构的稳定性的影响均较小。

关键词:波形钢腹板箱梁桥;腹板拼装偏差;力学性能;敏感性;稳定性
中图分类号:U448.213 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202401005

Impact of web assembly deviation on mechanical properties of corrugated steel web prestressed concrete composite box girder bridges

LIAO Wanyun[1,2], *ZHANG Yuke*[3], *DENG Li*[*1,2], *GU Jianfeng*[1,2], *LUO Hao*[1,2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan, 430074, China;
3. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd, Jinan 250101, China

Abstract: To investigate the impact of web assembly deviation on the mechanical properties of corrugated steel web prestressed concrete (PC) composite box girder bridges, a three-span PC composite continuous box girder bridge with corrugated steel webs was studied. Simulation included cantilever casting construction processes and bridge states, analyzing the effects of web lap angle deviation, inner and outer web spacing, and height deviations on structural deformation, stress, and stability. Results indicated that inner and outer web spacing deviation has a more pronounced effect on the mechanical performance of corrugated steel webs than other assembly deviations. During the maximum cantilever stage, main girder deformation is most sensitive to inner and outer web spacing deviation, with a maximum variation of 0.89 mm at −15 mm deviation. Web lap angle follows in sensitivity, while sensitivity to web height is minimal with a maximum

收稿日期:2024-01-06
基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(鄂交发[2020]2号)
作者简介:廖万云,硕士研究生。Email:2480433162@qq.com
***通信作者**:邓 丽,硕士,实验师。Email:879619616@qq.com
引文格式:廖万云,张玉珂,邓丽,等. 腹板拼装偏差对波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥力学性能的影响[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(4):467-472.

variation of 0.20 mm at −15 mm deviation. In the completion stage, main beam deformation is most sensitive to inner and outer web spacing deviation, followed by lap angle, and least sensitive to inner and outer web height deviation. Notably, spacing deviation between inner and outer webs significantly affects web shear stress, while the influence of web overlap angle and height deviations is relatively minor. Overall, the three assembly deviations have a minimal impact on the top and bottom plate stresses of the main girder and the stability of the bridge structure.

Keywords: corrugated steel web box girder bridge; web assembly deviation; mechanical property; sensitivity; stability

波形钢腹板预应力混凝土(prestressed concrete, PC)组合箱梁作为一种新型桥梁结构,可克服传统混凝土箱梁的腹板易开裂、预应力效率低等缺点,具有受力性能优、耐久性好、经济美观等优点[1-2],已成为现代PC梁桥发展的重要方向。随着波形钢腹板箱梁桥在国内的快速应用和发展,悬臂施工技术日益广泛应用于该类桥梁的建设中,充分发挥了无支架施工速度快、质量优良、节能环保等特点[3]。但在施工过程中,钢腹板的制作精度、施工工序的合理性、施工人员的技能水平以及施工环境等因素,均会引起波形钢腹板拼装施工偏差,进而影响桥梁结构受力性能和施工质量,甚至威胁结构安全。

为研究施工偏差对波形钢腹板桥梁力学性能的影响,国内外众多学者利用数值模拟及试验开展了大量研究。Liu等[4]利用有限元模型分析一座波形钢腹板PC组合连续箱梁桥,研究了梁段质量、温度梯度和预应力等参数变化对主梁变形和应力的影响;Jiang等[5]通过建立波形钢腹板预应力箱梁桥的线形调整优化模型,计算了混凝土密度、混凝土弹性模量及预应力对不同施工阶段主梁线形、底板应力和腹板变形的敏感系数;Lee等[6]通过模型试验,研究了体外预应力筋张拉控制及施工偏差对波形钢腹板梁桥结构性能的影响;李鑫奎等[7]以某波形钢腹板PC连续箱梁桥为研究对象,通过参数敏感性分析了箱梁自重对主梁变形和应力的影响;贾文坤等[8]通过有限元模型研究了预应力偏差对波形钢腹板箱梁桥的受力影响;陈海波[9]和张健[10]通过有限元模型和试验研究,分析了波形钢腹板倾角变化对桥梁结构动力性能的影响;张生虎[11]对波形钢腹板组合箱梁的约束扭转进行分析,揭示了波形钢腹板倾角对截面扭转几何特性的影响;康炼[12]通过有限元软件建立局部模型,分析了腹板倾角变化对波形钢腹板连续刚构桥的影响规律;马磊等[13]通过静载试验,探讨了腹板倾角及材质变化对单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁桥荷载横向分布的影响。上述研究揭示了施工偏差对波形钢腹板箱梁桥的影响规律,为波形钢腹板PC组合桥梁的施工控制提供参考依据,但多以预应力偏差及腹板倾角变化为研究对象,而缺少对施工阶段腹板拼装偏差的研究。因此,本文以一座波形钢腹板PC组合连续箱梁桥为例,用Midas FEA NX软件建立数值模型,模拟钢腹板搭接角度、内外侧腹板高度及间距等3种拼装偏差,分析他们对最大悬臂状态和成桥状态主梁结构变形、应力和稳定性的影响规律。

1 工程概况

某波形钢腹板PC组合箱梁桥跨径组合为(40+70+40) m(图1),采用单箱单室箱形截面,梁高按2次抛物线变化。箱梁顶板宽12.75 m,厚度0.70 m;底板宽6.75 m,厚度从跨中0.30 m变化到中墩0.60 m;波形钢腹板采用1600型,波高0.22 m,厚度采用16、20和22 mm 3种型号,主梁根部截面及跨中截面如图2所示。顶底板和钢腹板分别采用C55混凝土和Q345钢材,体内外预应力筋均采用公称直径为15.2 mm的低松弛钢绞线,且体外预应力筋为环氧涂层成品索。

该桥梁采用对称悬臂浇筑施工,其中T型结构的两侧各划分6个施工阶段。其中,0#块长12.4 m,1#块长为3.2 m,2#~6#块长均为4.8 m,合龙段长均为3.2 m。0#块采用支架现浇施工,悬臂梁段采用挂篮施工,边跨现浇梁段采用满堂支架现浇施工。桥梁采用先边跨后中跨的合龙顺序,边跨、中跨合龙段采用吊架施工,全桥共划分为12个施工阶段。主桥上部结构总体施工阶段划分见表1。

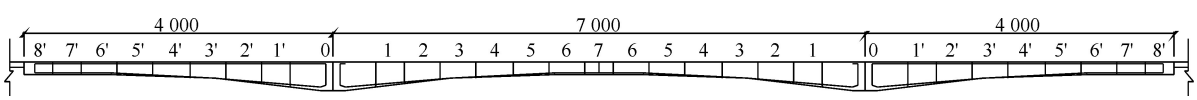

图1 波形钢腹板PC组合箱梁桥桥型布置(单位:cm)

Fig. 1 Bridge layout of corrugated steel web PC composite box girder bridge (unit: cm)

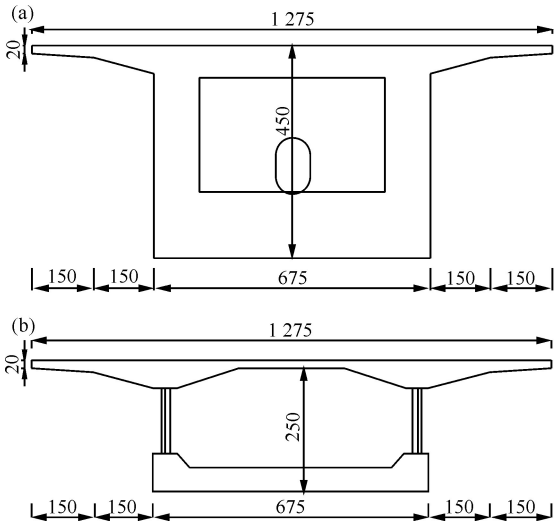

图2　波形钢腹板箱梁典型截面：(a)根部截面，(b)跨中截面(单位：cm)

Fig. 2　Typical section of box girder with corrugated steel web: (a) root section, (b) mid-span section (unit: cm)

表1　施工阶段划分表

Table 1　Construction stages

施工阶段	施工内容
1	0#波形钢腹板安装，浇筑0#梁段，张拉体内预应力顶板束T0，安装挂篮
2	1#块波形钢腹板安装，浇筑1#、1′#梁段，张拉体内预应力顶板束T1，挂篮前移
3	2#块波形钢腹板安装，浇筑2#、2′#梁段，张拉体内预应力顶板束T2，挂篮前移
4	3#块波形钢腹板安装，浇筑3#、3′#梁段，张拉体内预应力顶板束T3，挂篮前移
5	4#块波形钢腹板安装，浇筑4#、4′#梁段，张拉体内预应力顶板束T4，挂篮前移
6	5#块波形钢腹板安装，浇筑5#、5′#梁段，张拉体内预应力顶板束T5，挂篮前移
7	6#块波形钢腹板安装，浇筑6#、6′#梁段，张拉体内预应力顶板束T6，挂篮前移
8	边跨现浇段施工
9	浇筑边跨合龙段混凝土，张拉边跨合龙束
10	浇筑中跨合龙段混凝土，张拉中跨合龙束
11	对称张拉体外预应力束
12	施工防撞护栏、桥梁铺装等，完成全桥施工

2　数值模型

用Midas FEA NX建立该桥的数值模型，如图3所示。混凝土顶底板、波形钢腹板、体内预应力和体外预应力分别用实体单元、板单元、线单元和桁架单元模拟，具体如图3所示。其中，忽略腹板和顶底板之间的剪切滑移，利用软件的印刻功能，将波形钢腹板的波折曲线完全印刻在混凝土顶底板上，使腹板和混凝土顶底板共节点，最后进行网格划分，全桥模型如图4所示。

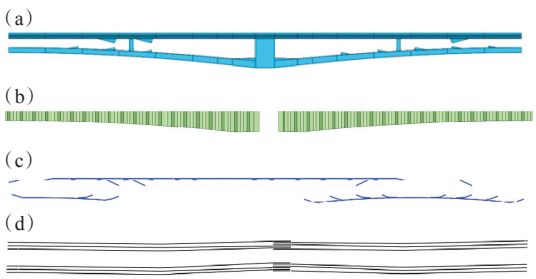

图3　各构件几何模型：(a)混凝土顶底板，(b)波形钢腹板，(c)体内预应力筋，(d)体外预应力筋

Fig. 3　Geometric model of each component: (a) concrete top and bottom slab, (b) corrugated steel web, (c) internal prestressing tendons, (d) external prestressing tendons

为模拟悬臂施工，挂篮以集中力的形式对称施加在悬臂两端截面处，施加的体内预应力大小为1 395 MPa，体外束添加的轴力为2 947.4 kN，二期铺装荷载为2.4 kN/m^2，挂篮荷载为700 kN。合龙前用固定铰支座模拟临时固结，在中跨合龙后采用活动铰支座模拟桥梁支座，构成连续梁桥的结构体系[14]。

3　腹板拼装偏差的敏感性分析

利用有限元模型模拟搭接角度、内外侧腹板高度及间距偏差3种钢腹板拼装偏差，分析有、无偏差状态下波形钢腹板PC连续箱梁桥在最大悬臂阶段和成桥阶段的结构力学性能，对比桥梁结构变形、应力和稳定性对钢腹板拼装偏差的敏感性。

波形钢腹板PC连续箱梁桥悬臂施工过程中，1#节段既是0#节段浇筑的端模，又是后续悬臂节段的基准，其定位精度控制十分关键。为此，假设1#节段钢腹板与0#节段搭接角度为±0.1°、0.2°和

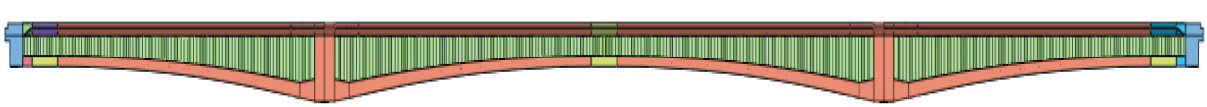

图4　全桥有限元模型

Fig. 4　Full bridge finite element model

±0.3°进行悬臂施工过程模拟，分析最大悬臂阶段和成桥阶段主梁结构受力变化。其中，搭接角度以顺时针旋转为正，逆时针旋转为负。由于各阶段施工中处于开口截面状态，易受到临时横向支撑、风荷载等因素的影响，导致内外两侧腹板间距及高度出现偏差，影响质量和结构安全。因此，假设内外侧腹板高度偏及间距偏均为±5、±10和±15 mm来模拟悬臂施工过程，其中，以顺桥向内侧腹板高程为参考依据，外侧腹板高程比内侧腹板高，其高度偏差为正，反之，其高度偏差为负；以横桥向两侧腹板设计间距为基准，两侧腹板间距比设计间距大，其间距偏差为正，反之，其间距偏差为负，研究波形钢腹板PC组合箱梁桥悬臂浇筑施工过程中内外侧腹板高度偏差及间距偏差对桥梁结构变形、应力和稳定性的影响。

3.1 主梁变形受腹板拼装偏差影响敏感性

为研究腹板拼装偏差对波形钢腹板PC组合箱梁桥主梁变形的影响，取每种偏差幅值最大的情况，分析最大悬臂阶段和成桥阶段主梁变形在不同拼装偏差状态下的规律，主梁变形如图5所示。

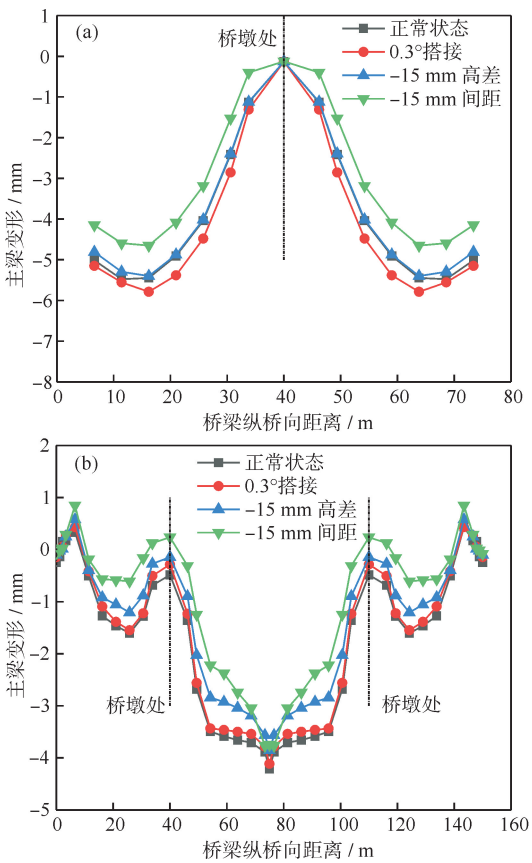

图5 腹板不同拼装偏差下的主梁变形：(a)最大悬臂阶段，(b)成桥阶段

Fig. 5 The deformation of the main girder under different assembly deviations of the web plate: (a) maximum cantilever state, (b) structure completion state

由图5(a)可知，在最大悬臂阶段，内外侧腹板间距偏差−15 mm对主梁变形的影响最大，最大变化量为0.89 mm；腹板搭接角度偏差0.3°对主梁变形的影响次之，最大变化量为0.70 mm；内外侧腹板高度偏差−15 mm对主梁变形的影响最小，最大变化量仅为0.20 mm。由图5(b)可知，桥梁结构在成桥阶段，内外侧腹板间距偏差对主梁变形的影响最大，最大变化量为1.33 mm；内外侧腹板高度偏差对主梁变形的影响相对较小，最大变化量为0.76 mm；而腹板搭接角度对主梁变形的影响最小，最大变化量仅为0.16 mm。

3.2 主梁应力受腹板拼装偏差影响敏感性

桥梁结构在最大悬臂阶段，随着悬臂长度的增加，主梁顶板的拉应力迅速增大，而在成桥阶段，主梁底板压应力显著增加，故在最大悬臂阶段分析顶板拉应力，在成桥阶段分析底板压应力。在不同腹板拼装偏差状态下主梁顶板/底板应力如图6所示。

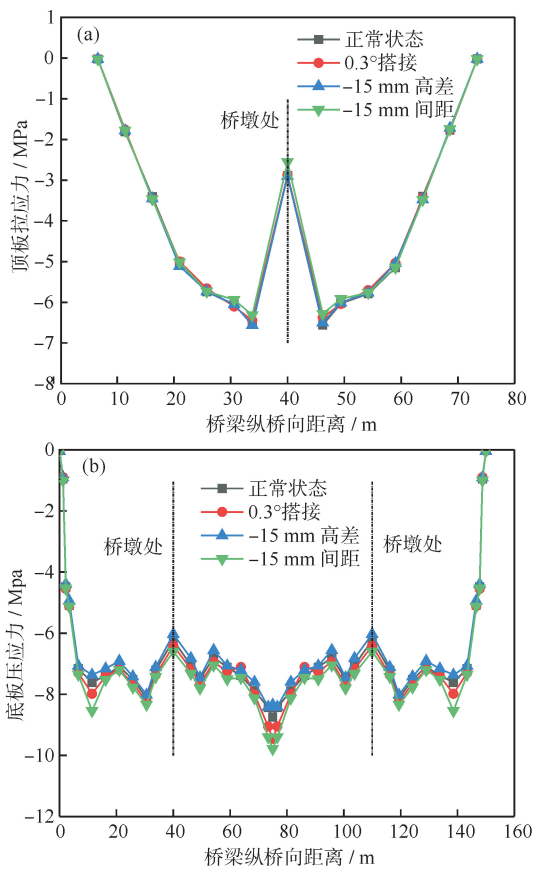

图6 腹板不同拼装偏差下的主梁应力：(a)最大悬臂阶段，(b)成桥阶段

Fig. 6 The stress of the main girder under different assembly deviations of the web plate: (a) maximum cantilever state, (b) structure completion state

由图6(a)可知，在最大悬臂阶段，腹板拼装出现偏差时，主梁顶板拉应力基本无变化，3种腹板拼装偏差均对主梁顶板拉应力的影响很小。由图6(b)可知，在成桥阶段，腹板拼装偏差对合龙段主梁底板压应力影响比较明显，其中，内外侧腹板间距偏差对主梁底板压应力的影响最大，最大变化量为1.04 MPa，腹板搭接角度偏差和内外侧腹板高度偏差对主梁底板压应力的影响较小，最大变化量均不超过0.50 MPa。综上所述，3种腹板拼装偏差对主梁顶板/底板应力的影响都不大。

3.3　主梁腹板剪应力受腹板拼装偏差影响敏感性

为研究腹板拼装偏差对腹板剪应力的影响规律，分析了3种拼装偏差幅值最大时，在最大悬臂阶段和成桥阶段的钢腹板剪应力变化情况，结果如图7所示。

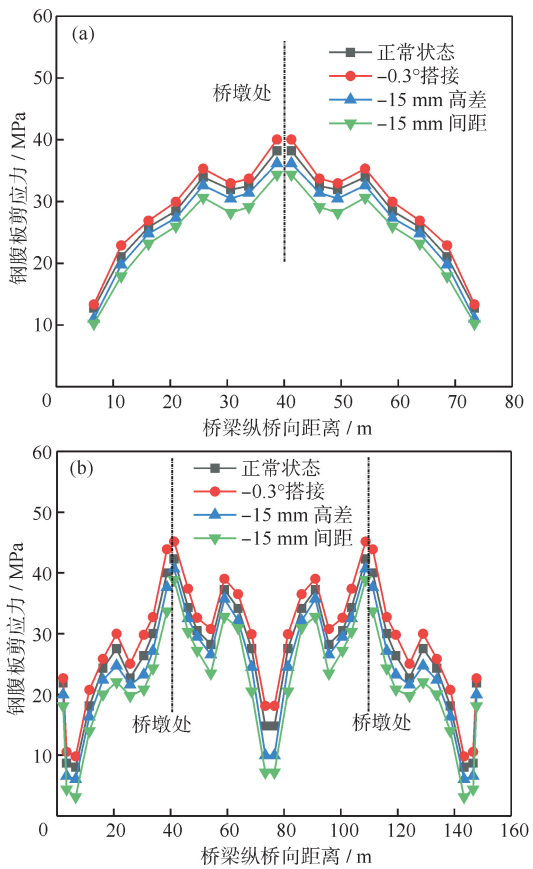

图7　腹板不同拼装偏差下的钢腹板剪应力：(a)最大悬臂阶段，(b)成桥阶段

Fig. 7　Shear stress of steel web under different assembly deviation of web: (a) maximum cantilever state, (b) structure completion state

由图7(a)可知，在最大悬臂阶段，内外侧腹板间距偏差对钢腹板剪应力影响最大，在桥墩处剪应力变化最大，最大变化量为3.85 MPa；腹板搭接角度和内外侧腹板高度偏差对腹板剪应力的影响相对较小，最大变化量分别为2.05和1.82 MPa，均位于桥墩处。由图7(b)可知，在成桥阶段，3种腹板拼装偏差对边跨合龙段及中跨合龙段腹板剪应力的影响比较明显，而中跨合龙段剪应力变化量比边跨合龙段剪应力变化量更大。其中，内外侧腹板间距偏差对腹板剪应力的影响最大，在中跨合龙段最大变化量为7.63 MPa；腹板搭接角度偏差和内外侧腹板高度偏差对腹板剪应力的影响相对较小，在中跨合龙段最大变化量分别为4.84和3.31 MPa，剪应力最大增加了1.8 MPa。最大悬臂阶段和成桥阶段剪应力最大值均小于文献[15]规定的容许剪应力。

3.4　结构稳定性受腹板拼装偏差影响敏感性

利用Midas的线性屈曲分析功能分析不同类型腹板拼装偏差下波形钢腹板PC组合箱梁桥的稳定性，得到桥梁结构最大悬臂阶段和成桥阶段的结构稳定安全系数计算结果，见表2。

表2　不同腹板拼装偏差时结构稳定安全系数

Table 2　The safety factor of structural stability under different web assembly deviations

偏差类型	偏差大小	结构稳定安全系数	
		最大悬臂阶段	成桥阶段
腹板搭接角度偏差	0.0°	7.78	6.74
	−0.3°	7.73	6.43
	−0.2°	7.76	6.45
	−0.1°	7.78	6.46
	0.1°	7.77	6.46
	0.2°	7.76	6.44
	0.3°	7.74	6.42
内外侧腹板高度偏差	0 mm	7.78	6.47
	−15 mm	7.75	6.42
	−10 mm	7.76	6.44
	−5 mm	7.78	6.46
	+5 mm	7.78	6.46
	+10 mm	7.77	6.45
	+15 mm	7.75	6.43
内外侧腹板间距偏差	0 mm	7.78	6.47
	−15 mm	7.74	6.43
	−10 mm	7.76	6.45
	−5 mm	7.78	6.47
	+5 mm	7.78	6.47
	+10 mm	7.77	6.46
	+15 mm	7.75	6.44

由表2可知，随着腹板拼装偏差的增大，在最大悬臂阶段和成桥阶段，波形钢腹板箱梁桥的结构稳定安全系数均呈现逐渐降低的趋势，但降低

幅度均较小。由此可知,3种腹板拼装偏差对桥梁结构稳定性的影响较小,此外,在腹板拼装出现偏差时,结构稳定安全系数均大于4,满足文献[16]的要求。

4 结 论

本文以有限元软件Midas FEA NX为工具,仿真模拟一座三跨波形钢腹板PC组合连续箱梁桥悬臂浇筑施工,研究了波形钢腹板PC组合箱梁桥在悬浇施工过程及成桥状态下,腹板搭接角度偏差、内外侧腹板高度偏差和间距偏差对波形钢腹板PC组合箱梁桥变形、应力和稳定性的影响。结果表明:

(1)波形钢腹板预应力组合箱梁桥变形、应力及稳定性对腹板搭接角度偏差、内外侧腹板高度偏差及间距偏差的敏感性不一致,在最大悬臂阶段,主梁变形对内外侧腹板间距最为敏感,内外侧腹板间距偏差-15 mm时,主梁变形最大变化量为0.89 mm,其次为腹板搭接角度,对腹板高度的敏感性很小,内外侧腹板高度偏差-15 mm时,主梁变形最大变化量仅为0.20 mm;在成桥阶段,内外侧腹板间距偏差对主梁变形影响最大,最大变化量为1.33 mm,搭接角度次之,内外侧高度偏差影响最小,主梁变形最大变化量仅为0.16 mm。内外侧腹板间距偏差对腹板剪应力的影响比较显著,腹板搭接角度和内外侧腹板高度偏差的影响相对较小。3种拼装偏差对主梁顶底板应力和桥梁结构的稳定性的影响均较小。

(2)相较于其他两种拼装偏差,内外侧腹板间距偏差对波形钢腹板箱梁桥力学性能影响更加明显。因此,在桥梁施工过程中,对波形钢腹板的施工精度进行严格监控是至关重要的。

参考文献

[1] 陈宝春,黄卿维.波形钢腹板PC箱梁桥应用综述[J].公路,2005(7):45-53.

[2] 秦明星.波形钢腹板PC梁施工期位移分析与控制[J].中外公路,2017,37(3):138-140.

[3] 赵品,荣学亮,邵旭东,等.节段预制拼装波形钢腹板单箱双室箱梁抗弯性能试验研究[J].铁道学报,2022,44(12):142-149.

[4] LIU D Y, QI T D. Analysis of parameter sensitivity of construction control of multi span PC continuous beam bridge with corrugated steel webs [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510: 052094.

[5] JIANG K B, DING Y, LIU Y W, et al. Sensitivity analysis for design parameters of cantilever casting PC box-girder with corrugated steel webs [J]. Advanced Materials Research, 2012, 430/431/432: 1546-1550.

[6] LEE D H, OH J Y, KANG H, et al. Structural performance of prestressed composite girders with corrugated steel plate webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 9-21.

[7] 李鑫奎,况中华,伍小平.大跨波形钢腹板预应力混凝土连续箱梁桥施工控制研究[J].世界桥梁,2017,45(2):50-54.

[8] 贾文坤,安渊博,张宇峰,等.预应力筋偏差对波形钢腹板箱梁桥的受力影响[J].武汉工程大学学报,2023,45(2):220-226.

[9] 陈海波.波纹钢腹板混凝土箱梁动力特性研究[D].北京:北京交通大学,2006.

[10] 张健.腹板角度对波纹钢腹板箱梁桥动力特性的影响[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2012,14(6):5-8.

[11] 张生虎.波形钢腹板组合箱梁的扭转和畸变效应分析[D].兰州:兰州交通大学,2017.

[12] 康炼.大跨波形钢腹板连续刚构桥设计参数和连接件研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.

[13] 马磊,章勇,万水,等.单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁荷载横向分布[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(1):85-92.

[14] 李伟鹏,石明强.连续梁桥悬臂浇筑施工体系转化模拟分析[J].武汉工程大学学报,2012,34(6):30-33.

[15] 全国钢标准化技术委员会.低合金高强度结构钢:GB/T 1591—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[16] 中交一公局集团人限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.

本文编辑:苗 变