文章编号:1674-2869(2025)05-0578-07

预应力筋偏差对悬浇施工波形钢腹板箱梁桥力学性能的影响

安渊博,黄民水,顾箭峰*
武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

摘 要:为研究悬浇施工波形钢腹板箱梁桥力学性能受预应力筋偏差的影响,以一座(60+110+60) m波形钢腹板连续箱梁桥为例,采用MIDAS仿真模拟其悬浇施工过程,分析体内、体外预应力筋竖向偏位及张拉力误差对桥梁结构挠度及应力的影响,并利用敏感性分析对比4种偏差对最大悬臂、边跨合龙、中跨合龙及成桥阶段主梁结构挠度的影响。结果表明:体内、体外预应力筋偏位和张拉力误差对悬浇施工波形钢腹板箱梁桥的主梁挠度影响较大,而对结构应力影响较小。悬臂束和体外束竖向偏位对主梁挠度的影响较大,当其偏位±15 cm时,主梁挠度的最大变化量为1.87和1.47 mm。悬臂束张拉力误差对主梁挠度的影响较大,边跨合龙束、中跨合龙束及体外束对主梁挠度的影响较小,当张拉力误差±15%时,主梁挠度最大变化量依次为2.58、1.04、0.75、0.97 mm。中跨合龙束施工偏差的敏感度系数最大,悬臂束和体外束次之,边跨合龙束最小。

关键词:预应力筋偏差;波形钢腹板箱梁桥;悬浇施工;力学性能
中图分类号:U448.213 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202312011

Influence of prestressed tendon deviation on mechanical performance of box-girder bridge with corrugated steel web plate in cantilever casting construction

*AN Yuanbo, HUANG Minshui, GU Jianfeng**
School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to explore the influence of the prestressed tendon deviation on the mechanical performance of continuous box-girder bridges with corrugated steel web plate in cantilever casting construction, MIDAS was used to simulate the cantilever casting construction process of a (60+110+60) m continuous box-girder bridge with corrugated steel web plate, and the influence of vertical deflection and tension deviation of internal and external prestressed tendons on the deflection and stress of bridge structure was analyzed. In addition, sensitivity analysis was conducted to compare the influence sensitivity of four types of deviations on the deflection of the maximum cantilever, side span closure, mid-span closure and the main beam structure at the bridge completion stage. The results showed that the deflection of the internal and external prestressed tendons and the tension deviation have a great influence on the main girder deflection of the box-girder bridge with corrugated steel web plate in cantilever casting construction, but have little influence on the structural stress. The vertical deflection of cantilever tendons and external tendons has a significant impact on the main

收稿日期:2023-12-08
基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(2020-2-2-6)
作者简介:安渊博,硕士研究生。Email:1329469532@qq.com
***通信作者**:顾箭峰,博士,副教授。Email:gjfcqucdu@wit.edu.cn
引文格式:安渊博,黄民水,顾箭峰. 预应力筋偏差对悬浇施工波形钢腹板箱梁桥力学性能的影响[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(5):578-584.

beam deflection, with a maximum deflection change of 1.87 mm and 1.47 mm when deviated by ±15 cm. The tension deviation of cantilever tendons has a significant impact on the main beam deflection, while the end span closure bundle, mid-span closure bundle, and external bundle have a smaller impact. When the tension deviation is ±15%, the maximum deflection of the main girder is 2.58, 1.04, 0.75 and 0.97 mm, respectively. The sensitivity coefficient of construction deviation of middle span closure bundle is the largest, followed by cantilever bundle and external bundle, with side span closure bundle being the smallest.

Keywords: prestressed tendon deviation; box-girder bridge with corrugated steel webs; cantilever casting construction; mechanical performance

波形钢腹板箱梁桥用8~30 mm厚的褶皱波形钢板代替传统混凝土腹板，可有效降低结构自重、避免腹板开裂、提高预应力效率以及提升桥梁美观度，具有广阔的应用前景[1-3]。由于我国钢材产量的不断增长，导致钢铁产能过剩，这为我国大力发展钢及钢-混组合结构奠定了良好的物质基础[4]。波形钢腹板箱梁桥是一种较理想的新型桥梁结构，它能够将钢和混凝土有效结合，在大跨径桥梁中具有其独特的竞争优势[5]。采用悬臂浇筑法进行施工时，波形钢腹板梁桥的应力和线形会不断发生变化，许多因素如施工工艺、施工方法和施工技术等均可能导致施工偏差，而施工偏差会使波形钢腹板箱梁桥的线形和应力难以达到设计状态[6]。并且，上述因素会导致预应力筋的空间位置及张拉力出现偏差，从而对桥梁结构的力学性能产生影响，易造成顶、底板混凝土纵向裂缝及主梁跨中过大、下挠等病害。

为研究预应力施工偏差对桥梁受力性能的影响，国内外许多学者利用有限元仿真及试验等方法展开了大量研究。王全勇等[7]利用有限元软件分析预应力筋局部定位偏差对小箱梁腹板局部应力的影响，并提出优化方案。杨吉新等[8]采用有限元法，通过力筋耦合建模手段，研究腹板预应力筋横向偏位对曲线梁桥支反力、竖向位移、支点横向位移以及中跨跨中截面腹板应力分布的影响。杨欧峰等[9]对某预应力混凝土连续梁桥进行现场试验，从桥梁线形和梁截面应力两个方面对预应力管道摩阻参数进行敏感性分析。田振中[10]建立精细化空间杆系有限元模型，研究预应力张拉误差对梁拱组合结构应力及线形的影响。王川[11]通过改变体外预应力筋的张拉力大小模拟预应力张拉失控，计算发现体外预应力筋的张拉力合理增大，有利于优化结构受力和减小跨中挠度。Lee等[12]通过试验研究体外预应力筋张拉工艺对波纹形腹板预应力组合梁桥性能的影响。张兴志[13]利用有限元软件建立了某座变截面单箱单室波形钢腹板预应力混凝土（prestressed concrete，PC）箱梁桥的实体模型，研究体外预应力施工偏差对波形钢腹板PC组合连续梁力学性能的影响。贾文坤等[14]利用MIDAS分析体内预应力筋竖向偏位和张拉误差对最大悬臂阶段及成桥阶段桥梁结构变形、应力及稳定性影响规律。然而，施工偏差研究大多以预应力混凝土箱梁桥为研究对象，而对波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥的相关研究甚少。因此，为研究预应力筋施工偏差对波形钢腹板箱梁桥力学性能影响，本文以一座跨径组合为（60+110+60）m的波形钢腹板箱梁桥为对象，仿真模拟该桥悬臂施工过程，分析预应力施工偏差对结构受力的影响，以期为同类型桥梁施工提供借鉴与参考。

1　工程背景

某波形钢腹板连续箱梁桥跨径组合为（60+110+60）m，采用单箱单室截面，顶板宽12.75 m，翼缘3 m，箱室宽6.75 m，箱室顶板厚28 cm，箱室底板跨中至中墩处厚度由32 cm变至90 cm。全桥总体布置图如图1所示。

主桥箱梁采用C55混凝土；波形钢腹板采用16、20、22 mm厚度的Q345q耐候钢；体内、体外预应力筋均采用公称直径为15.2 mm的预应力钢绞线。材料的力学性能参数参照《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650—2020）[15]。

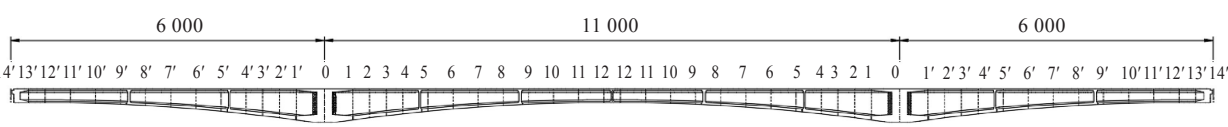

图1　主桥的跨径布置（单位：cm）

Fig. 1　Span layout of the main bridge (unit: cm)

2 悬浇施工仿真模拟

采用MIDAS建立了如图2所示的波形钢腹板连续箱梁桥实体有限元模型，并仿真模拟了悬臂施工过程。其中混凝土顶底板、波形钢腹板及体内和体外预应力筋分别采用3D实体梁单元、2D壳单元、1D杆单元和桁架单元模拟。

利用MIDAS分别建立了波形钢腹板箱梁桥最大悬臂阶段、边跨合龙阶段、中跨合龙阶段及成桥阶段[16]的数值模型，如图3所示。模拟主梁各施工阶段的荷载和约束条件，分析波形钢腹板箱梁桥的结构变形和应力变化。波形钢腹板箱梁桥关键施工阶段划分、预应力及边界条件见表1。

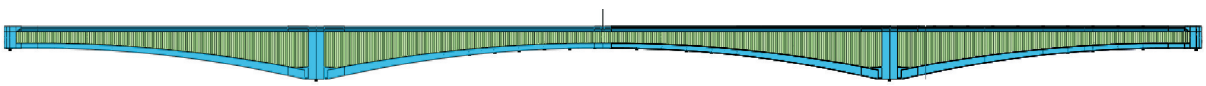

图2 全桥仿真模型

Fig. 2 Full-bridge simulation model

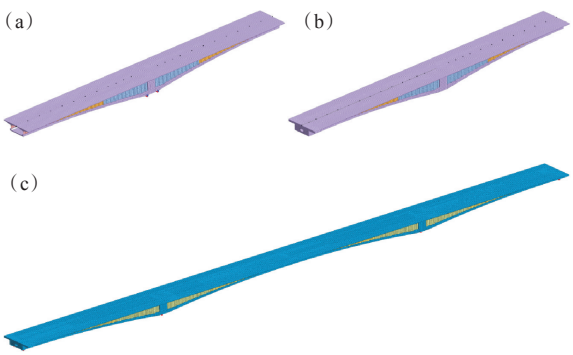

图3 主要施工阶段的数值仿真模型：(a)最大悬臂阶段，(b)边跨合龙阶段，(c)中跨合龙阶段及成桥阶段

Fig. 3 Numerical simulation model of the main construction stage: (a) maximum cantilever stage, (b) side span closure stage, (c) mid-span closure stage and finished stage of bridge

表1 施工阶段模拟

Table 1 Construction stage analysis

关键施工阶段	预应力工况		边界条件
	张拉力/MPa	张拉方式	
最大悬臂阶段	1 395	两端张拉	0#块支座临时固结
边跨合龙阶段	1 395	两端张拉	边跨现浇段设置临时支座，约束其纵向位移
中跨合龙阶段	1 395	两端张拉	0#墩为固定铰支座，端部为活动支座
成桥阶段	1 116	/	拆除临时约束，设置永久支座

3 预应力偏差对波形钢腹板箱梁桥力学性能的影响

基于波形钢腹板箱梁桥数值模型，利用“偏移”功能，以5 cm为步长，模拟偏心距最大的悬臂束、边跨合龙束、中跨合龙束以及体外束偏位±5、±10和±15 cm，对比主梁未发生预应力束偏位的挠度和应力，分析4种预应力筋偏位对主梁挠度和应力的影响；选择偏心距最大的悬臂束、边跨合龙束、中跨合龙束以及体外束，改变张拉力±5%、±10%和±15%，模拟4种预应力筋的张拉力误差对主梁挠度和应力的影响。

3.1 悬臂束偏差对主梁力学性能的影响

3.1.1 *悬臂束偏位* 悬臂束各偏位时，波形钢腹板箱梁桥最大悬臂阶段主梁挠度和应力见图4。

由图4(a)可知，主梁最大悬臂阶段的挠度对称分布在0#墩两侧。当悬臂束上偏时，主梁的挠度增大，且随着偏位距离的增大，主梁悬臂梁段的挠度变化增大，最大变化量在左侧悬臂段12′#截面，为1.88 mm；当悬臂束下偏15 cm时，主梁两侧悬臂段12#截面的挠度分别降低了0.96和0.95 mm。由图4(b)可知，悬臂束上偏会使波形钢腹板箱梁桥的顶板压应力增大，下偏会使其减小，但悬臂束偏位对主梁应力的影响较小，主梁应力最大变化量在跨中2′#截面，为0.13 MPa。

3.1.2 *悬臂束张拉力误差* 悬臂束各张拉力误差时，波形钢腹板箱梁桥悬臂阶段主梁挠度和应力见图5。

由图5(a)可知，主梁挠度随悬臂束张拉力增大而增大，最大变化量在左侧悬臂段12′#截面，为2.58 mm；当悬臂束的张拉力减小，主梁的挠度随之降低，挠度最大变化量在左侧悬臂段12′#截面，为1.67 mm。由图5(b)可知，主梁压应力随悬臂束张拉力增大而增大，最大变化量在跨中2′#截面，为0.22 MPa；主梁的压应力随悬臂束张拉力减小而降低，降低最大量在跨中6#截面，为0.17 MPa。

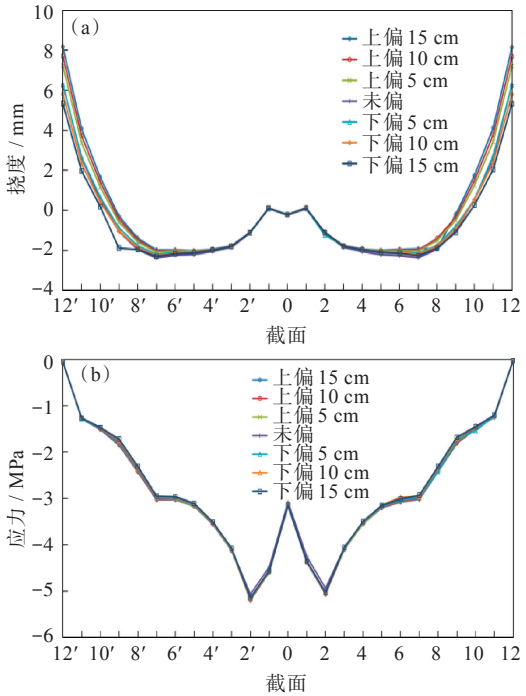

图4　悬臂束偏位对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 4　Influence of deflection of cantilever tendons on main girder: (a)deflection, (b)stress

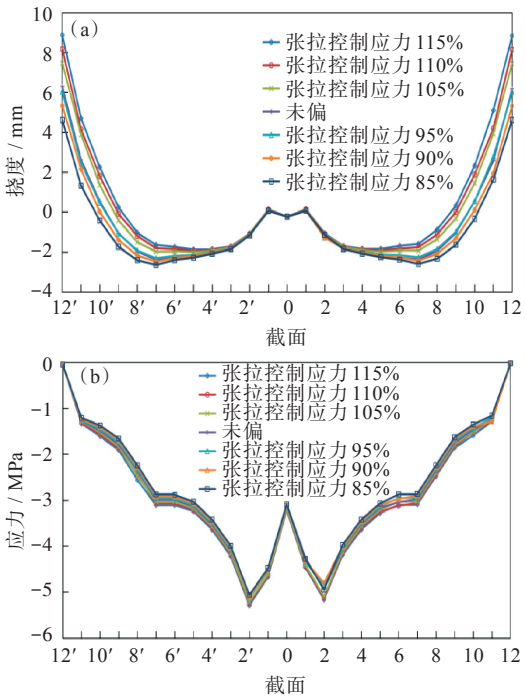

图5　悬臂束张拉力误差对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 5　Influence of tension deviation of cantilever tendons on main girder: (a)deflection, (b)stress

3.2　边跨合龙束偏差对主梁力学性能的影响

3.2.1　*边跨合龙束偏位*　边跨合龙束各偏位时，波形钢腹板箱梁桥边跨合龙阶段主梁挠度和应力见图6。

由图6(a)可知，边跨合龙束上偏，主梁边跨合龙梁段挠度增大，悬臂梁段挠度降低，主梁挠度最大变化量在右侧悬臂段11#截面，为0.47 mm；边跨合龙束下偏，主梁边跨合龙梁段挠度降低，悬臂段挠度增大，挠度最大变化量在右侧悬臂段8′#截面，为0.51 mm。由图6(b)可知，边跨合龙束竖向偏位对主梁边跨合龙梁段的应力影响较大，而对悬臂梁段的应力影响较小，最大变化量在跨中2#截面，为0.18 MPa。

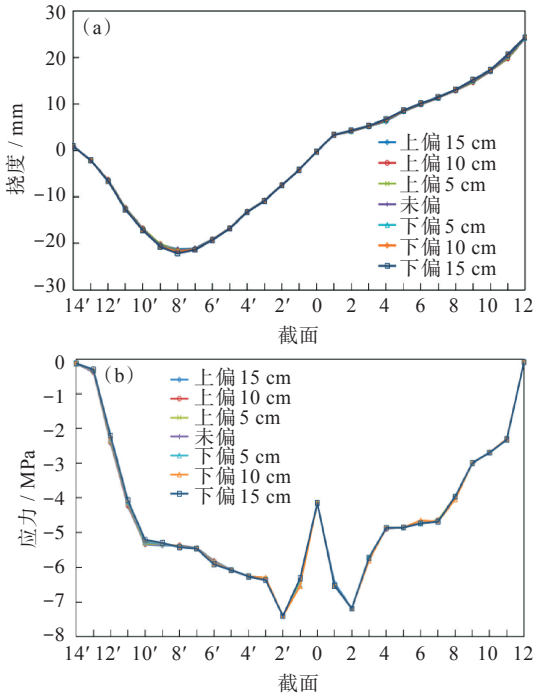

图6　边跨合龙束偏位对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 6　Influence of deflection of side span closing tendons on main girder: (a)deflection, (b)stress

3.2.2　*边跨合龙束张拉力误差*　边跨合龙束各张拉力误差时，波形钢腹板箱梁桥边跨合龙阶段主梁挠度和应力见图7。

由图7(a)可知，当边跨合龙束的张拉力增大时，主梁边跨合龙段的挠度最大变化量在右侧梁段8′#截面，为0.34 mm，而悬臂段在右侧梁段8#截面的变化量为1.04 mm；当边跨合龙束张拉力减小时，主梁边跨合龙段的挠度最大变化量在左侧梁段8′#截面，为0.22 mm，而悬臂段在9#截面的变化量为0.61 mm。由图7(b)可知，边跨合龙束张拉力误差对主梁应力的影响较小，跨中1#截面主梁应力的变化较为明显，当边跨合龙束的张拉力误差±15%时，主梁应力最大变化量在跨中1′#截面，变化量分别为0.24和0.18 MPa。

3.3　中跨合龙束偏差对主梁力学性能的影响

3.3.1　*中跨合龙束偏位*　中跨合龙束各偏位时，波形钢腹板箱梁桥中跨合龙阶段主梁挠度和应力见图8。

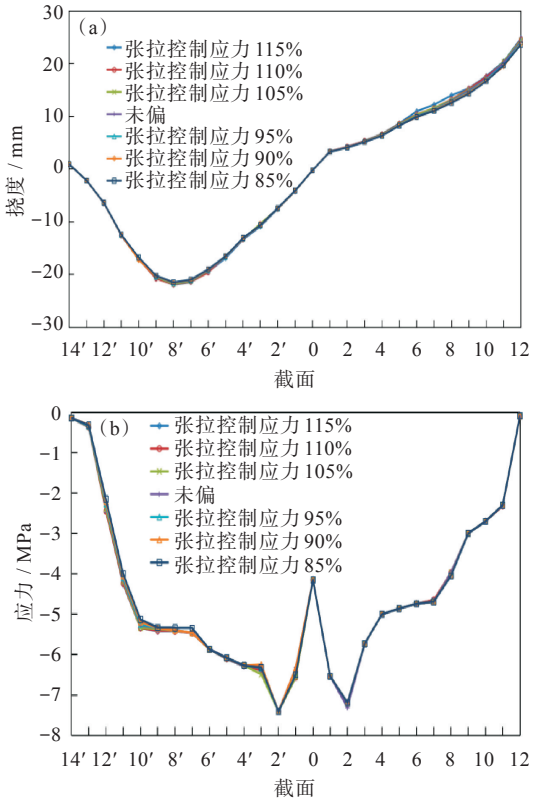

图7 边跨合龙束张拉力误差对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 7 Influence of tension deviation of side span closing tendons on main girder: (a) deflection, (b) stress

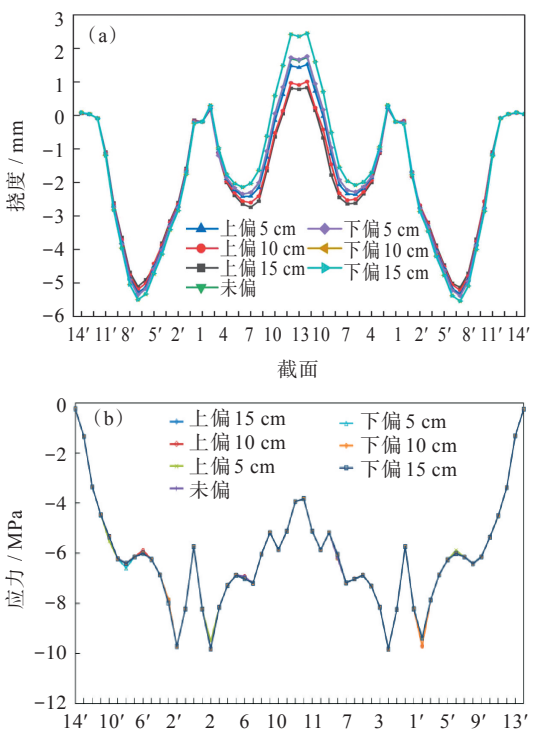

图8 中跨合龙束偏位对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 8 Influence of deflection of mid-span closing tendons on main girder: (a) deflection, (b) stress

由图8(a)可知，中跨合龙束上偏，主梁边跨挠度增大，中跨挠度降低，中跨合龙梁段的挠度最大变化量在中跨跨中12#、13#截面，为1.24 mm；中跨合龙束下偏，主梁边跨挠度增大，中跨挠度增大，主梁中跨合龙梁段挠度最大变化量在中跨跨中12#、13#截面，为0.93 mm。由图8(b)可知，中跨合龙束偏位对主梁应力的影响整体较小，当中跨合龙束上偏时，主梁应力的最大变化量在中跨梁段2#截面，为0.27 MPa；中跨合龙束下偏时，主梁应力的最大变化量在中跨梁段2#截面，为0.35 MPa。

3.3.2 *中跨合龙束张拉力误差* 中跨合龙束各张拉力误差时，波形钢腹板箱梁桥中跨合龙阶段主梁挠度和应力见图9。

由图9(a)可知，中跨合龙束张拉力增大时，主梁中跨合龙段挠度最大增加了0.44 mm，边跨合龙段挠度最大变化量为0.19 mm；当张拉力降低时，主梁中跨合龙段挠度下降了0.75 mm，边跨合龙段挠度最大变化量为0.24 mm。由图9(b)可知，中跨合龙束张拉力误差对主梁边跨段的应力影响较小，对中跨合龙段压应力的影响较大，中跨合龙段压应力随张拉力的增大而增大，最大变化量为0.2 MPa；主梁中跨合龙段的压应力随张拉力减小而减小，应力最大变化量为0.1 MPa。

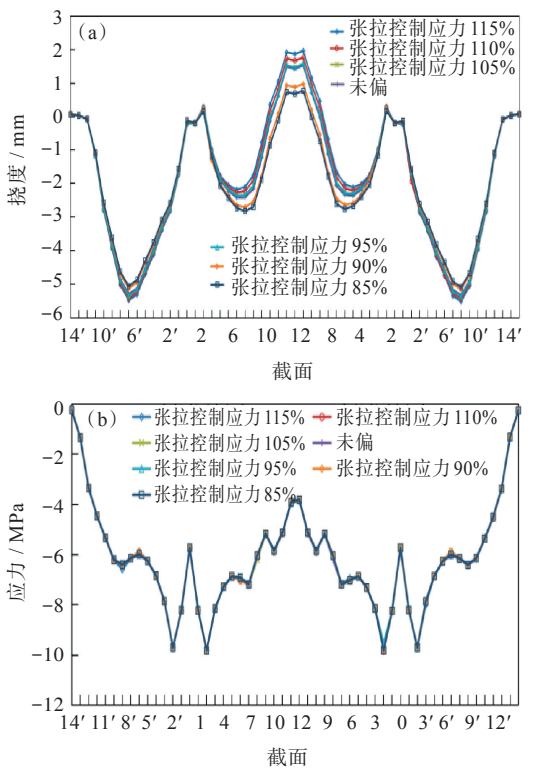

图9 中跨合龙束张拉力误差对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 9 Influence of tension deviation of mid-span closing tendons on main girder: (a) deflection, (b) stress

3.4　体外束偏差对主梁力学性能的影响

3.4.1　体外束偏位　体外束各偏位时，波形钢腹板箱梁桥成桥阶段主梁挠度和应力见图10。

由图10(a)可知，体外束上偏时，主梁边跨梁段挠度降低，中跨挠度增大，其中主梁挠度的最大变化量在中跨左侧8#截面，为1.47 mm；当体外束下偏时，主梁边跨挠度增大，中跨挠度下降，主梁挠度的最大变化量在中跨左侧8#截面，为0.85 mm。由图10(b)可知，当体外束上偏时，主梁边跨梁段应力增大，中跨梁段应力减小，且应力最大变化量在左边跨梁段12′#截面及右边跨梁段11′#截面，为0.2 MPa；当体外束下偏时，主梁边跨梁段应力降低，中跨梁段应力增大，应力最大变化量在左边跨梁段12′#截面及右边跨梁段11′#截面，为0.2 MPa。

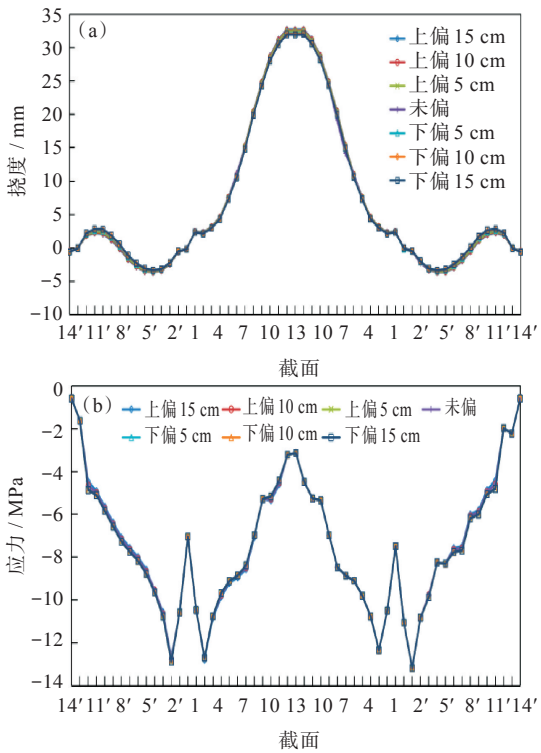

图10　体外束偏位对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 10　Influence of deflection of external prestressed tendons offset on main girder: (a)deflection, (b)stress

3.4.2　体外束张拉力误差　体外束各张拉力误差时，波形钢腹板箱梁桥成桥阶段主梁挠度和应力见图11。

由图11(a)可知，体外束张拉力增大，主梁挠度增大；体外束张拉力减小，主梁挠度降低。体外束张拉力增大15%时，主梁中跨合龙段左侧12#截面挠度由32.20 mm增至33.17 mm；体外束的张拉力减小15%时，中跨合龙段右侧12#截面挠度降低了0.96 mm。当体外束的张拉力在设定误差范围

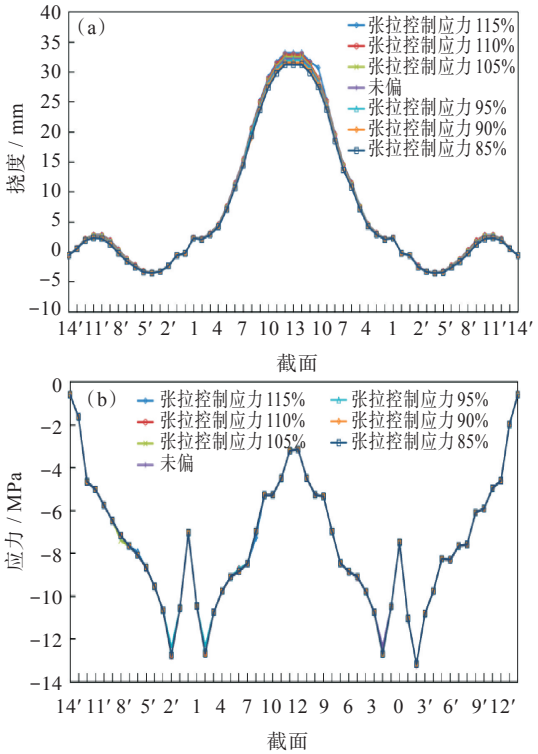

图11　体外束张拉力误差对主梁的影响：(a)挠度，(b)应力

Fig. 11　Influence of tension deviation of external prestressed tendons on main girder: (a)deflection, (b)stress

内时，主梁挠度最大变化量在中跨合龙段左侧12#截面，为0.97 mm。由图11(b)可知，体外束的张拉力误差对中跨合龙段压应力影响较大，最大变化量为0.25 MPa，而对主梁边跨的应力影响较小。

4　敏感性分析

为进一步研究预应力施工偏差对波形钢腹板箱梁桥挠度和应力的影响，基于敏感性分析法，选取预应力束偏位和张拉力误差为不确定因素，设定其变化范围为±15 cm和±15%。

因预应力偏差对主梁挠度影响较大，而对应力影响较小，故选取主梁挠度为评价指标，采用式(1)计算出预应力筋偏位和张拉力误差的敏感度系数E。

$$E=\left|\frac{\Delta A}{F}\right| \tag{1}$$

式(1)中：ΔA为主梁挠度在预应力筋偏位/张拉后的变化量；F为主梁原挠度。

利用敏感性分析法，计算主梁最大悬臂阶段、边跨合龙阶段、中跨合龙阶段及成桥阶段的预应力束偏位及张拉力误差对主梁挠度的敏感度系数，结果如表2所示。

由表2可知，中跨合龙束偏位对主梁挠度的影响最大，敏感度系数为0.870，悬臂束和体外束次

表2 预应力筋偏位及张拉力误差的敏感度系数

Table 2 Sensitivity coefficient of prestressed tendon deviation and tension deviation

施工阶段	预应力筋	敏感度系数	
		偏位	张拉力误差
最大悬臂阶段	悬臂束	0.300	0.410
边跨合龙阶段	边跨合龙束	0.017	0.016
中跨合龙阶段	中跨合龙束	0.870	0.520
成桥阶段	体外束	0.020	0.030

之,敏感度系数分别为0.300和0.020,边跨合龙束偏位对主梁挠度的影响最小,敏感度系数为0.017。悬臂束和中跨合龙束的张拉力误差对主梁挠度的影响最大,敏感度系数为0.520和0.410,体外束张拉力误差的影响次之,敏感度系数为0.030,边跨合龙束张拉力误差的影响最小,敏感度系数为0.016。

5 结 论

本文以某三跨波形钢腹板连续箱梁桥为例,利用MIDAS对全桥悬臂施工过程进行仿真模拟,研究预应力偏位和张拉力误差对主梁挠度和应力的影响,并利用敏感性分析对比了预应力施工偏差对主梁力学性能的影响程度。主要结论如下:

(1)波形钢腹板箱梁桥悬臂施工中,体内、体外预应力筋偏位和张拉力误差对主梁挠度影响较大,对主梁应力影响较小。

(2)悬臂束和体外束偏位对主梁挠度的影响较大,当其偏位±15 cm时,主梁挠度的最大变化量分别为1.87和1.47 mm;而边跨合龙束和中跨合龙束偏位±15 cm时,导致主梁挠度分别产生0.51和1.24 mm的变化量。

(3)悬臂束张拉力误差对主梁力学性能的影响较大,边跨合龙束、中跨合龙束及体外束对主梁力学性能的影响较小。当悬臂束的张拉力误差±15%时,主梁挠度的最大变化量为2.58 mm;边跨合龙束、中跨合龙束和体外束的张拉力误差±15%时,主梁挠度的最大变化量分别为1.04、0.75和0.97 mm。

(4)通过敏感性分析可知,中跨合龙束施工偏差对主梁力学性能的影响最大,悬臂束和体外束次之,边跨合龙束最小。

参考文献

[1] 陆士平,畅永福.波形钢腹板预应力混凝土箱梁施工技术[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(3):186-190.

[2] ZHOU C,LI L F,WANG J Q. Modified bar simulation method for shear lag analysis of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs [J]. Thin-Walled Structures,2020,155:106957.

[3] 贺君,刘玉擎,吕展,等.波形钢腹板内衬混凝土组合梁弯、剪性能试验[J].中国公路学报,2017,30(7):94-100,143.

[4] 朱诗勇.中小跨径波形钢腹板PC箱梁桥与T梁桥的对比研究[D].武汉:华中科技大学,2015.

[5] 范智皓,张开银.波形钢腹板几何参数对主梁静力性能的影响[J].工程与建设,2020,34(5):785-786,799.

[6] 王敏.从预应力损失角度对混凝土桥梁病害成因的研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.

[7] 王全勇,郑凯,陈有,等.基于ANSYS的小箱梁腹板局部受力分析及结构优化[J].公路,2023,68(6):268-271.

[8] 杨吉新,刘畅,黎建华.曲线梁桥预应力筋定位偏差对结构受力影响[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(4):662-666.

[9] 杨欧峰,端茂军,魏洋,等.预应力混凝土连续梁桥管道摩阻试验研究及参数分析[J].中外公路,2016,36(4):149-153.

[10] 田振中.梁拱组合桥力学性能敏感性分析[J].公路,2021,66(5):171-175.

[11] 王川.波纹钢腹板PC组合箱梁桥施工过程仿真和腹板稳定性分析[D].重庆:重庆大学,2016.

[12] 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.

[13] 张兴志.波形钢腹板PC组合连续箱梁桥施工过程与预应力参数分析[D].成都:西南交通大学,2009.

[14] 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.

[15] 中交一公局集团有限公司.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.

[16] 赵晓伟.波形钢腹板PC组合箱梁桥施工控制关键问题研究[D].广州:华南理工大学,2020.

本文编辑:苗 变