

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.008

装配式空心板斜交桥梁横向预应力的 抗裂性能研究

李增锋¹, 庄一舟¹, 程俊峰¹, 李娜¹, 郑钦²

(1.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2.福建省计量科学研究所, 福建 福州 350108)

摘要:与普通直桥相比,装配式空心板斜交桥梁的特殊之处在于其带有一定角度的端部。在斜桥两直边施加横向预应力时,端部达不到预压的效果。针对这一问题,提出了斜交桥梁横向预应力施加的方案,并利用 ABAQUS 有限元软件建立装配式空心板桥梁实体模型,计算并分析了斜交桥梁横向预应力的抗裂性能。结果表明:当车辆荷载和负梯度温度场共同作用时,极易导致桥面板开裂;忽略端部影响仅在直线部位施加预应力时,其在端部区域各铰缝均未取得较好的预压效果;在斜边各 1/3 处施加一道横向预应力可使得绝大部分的铰缝处于受压状态,大大提高铰缝的抗裂性能。研究所得结论能为装配式空心板斜交桥梁施加横向预应力的设计提供参考和借鉴。

关键词: 装配式;空心板;斜桥;铰缝;横向预应力;抗裂性能

中图分类号: U445.7+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0044-07

Cracking Resistance Performance of Precast Hollow Slab Skew Bridge under Transverse Prestressing

LI Zengfeng¹, ZHUANG Yizhou¹, CHENG Junfeng¹, LI Na¹, ZHENG Qin²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Metrology Institute, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In comparison with ordinary straight bridge, the precast hollow slab skew bridge is special for its end with a certain angle. The preloading of the end may not be as effective as expected when the transverse prestressing is applied to the two straight edges of the skew bridge. Focusing on this issue, the scheme about applying transverse prestressing into the skew bridge is presented. Also, the solid model of precast hollow slab bridge is developed by ABAQUS finite element software and the crack resistance of skew bridge with transverse prestressing is calculated and analyzed. The results show that it is easy to result in crack when the vehicle load and negative gradient temperature field work together. Second, ignoring the influence of the end area, when the prestressing force is only applied to the straight edge, no better preloading effect is achieved in the hinge joints of the end area. Last but not the least, a transverse prestressing force is applied at each 1/3 position of the bevel edge, so that most of the hinge joints are in pressured state and the crack resistance of the joints is greatly improved. The research conclusion can provide references for the design in applying the transverse prestressing of the precast hollow slab skew bridge.

Keywords: precast; hollow slab; skew bridge; hinge joint; transverse prestressing; crack resistance

近年来,随着我国现代化建设的快速发展,交通运输事业蓬勃兴起,高速公路、城市立交和高架桥日益增多,这也促使了大量斜交桥的出现^[1]。据统计,高速公路上斜桥的数量,可达到整条线路桥梁的

40%~50%^[2]。目前,最为常见的两种斜交桥是多梁式斜桥和斜交板桥。斜交板桥一般分为整体现浇板桥及装配式板桥,截面有实心板及空心板两种形式。其中,装配式空心板斜交桥有较大的抗扭刚度,

收稿日期:2017-05-09

修稿日期:2017-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278126,51578161);福建省自然科学基金资助项目(2013J01187)

作者简介:李增锋(1992—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为无缝桥工程。E-mail:1165281413@qq.com

通讯作者:庄一舟(1964—),男,浙江奉化人,博士,教授,硕导,主要从事无缝桥的研究及教学工作。E-mail:478372092@qq.com

且结构轻巧、施工简便,所以成为人们首选的斜交桥桥型。装配式空心板斜交桥不但能改善道路的线形及适应城市街道的条件,使整条路线流畅,而且由于装配式空心板斜交桥的修建使得路线和桥长缩短,从而节省用地、材料和投资,提高经济效益。因此,随着高等级公路和城市立体交通的迅速发展,装配式空心板斜交桥被广泛的应用于高等级公路和城市立体工程中。

但在实际使用过程中,装配式空心板斜交桥和其他的装配式空心板桥一样,铰缝病害问题突出^[3-4]。为解决铰缝病害问题,研究者通过改造铰缝构造^[5]、灌浆材料^[6]及加固带病害桥梁^[7]等方法处理铰缝病害问题,为此进行了大量的研究和工程实践,但刘耀刚等^[8]对多种能改善铰缝病害问题的方法汇总后发现,上述方法总体上取得的效果不佳。目前所采用的众多加固改进措施如桥面补强层加固、横向粘贴钢板加固、去梁增肋加固、化学灌浆加固等方法均属于被动方法,无法从根本上控制裂缝的出现。而比较有效的措施就是在桥梁的某些部位横向布置和张拉预应力筋,使空心板在铰缝处产生预压应力,消除各种效应可能产生的拉应力,提高桥梁的抗裂性能,从而避免铰缝病害的产生与发展^[9-10]。

斜交桥梁由于其端部具有一定的斜度,在两直边对称施加横向预应力时,其端部可能达不到施加预应力的效果。而在目前国内的研究应用中,研究者们普遍忽略端部的影响,只在跨中直线部位施加横向预应力。张云娜^[11]和 Attanayake U B^[12]均忽略斜交桥梁端部的影响,只在跨中直线部位施加横向预应力。目前,对装配式空心板斜交桥端部直接施加体外横向预应力的相关文献还未见报道^[13]。针对这一问题,本文分析比较了端部施加预应力与否对斜交桥抗裂性能的影响,以及斜交桥梁端部施加横向预应力的方案设计,此研究对今后装配式空心板斜交桥施加横向预应力具有重要的指导意义。

1 有限元模型

1.1 有限元计算模型的建立

利用 ABAQUS 有限元软件,建立装配式空心板桥梁实体模型,为考虑桥梁模型的规范性和普遍性,桥梁原型参考最新交通部 20 m 装配式空心板梁标准图^[14]。在本模型中由于边板的突出部分对横向预应力的研究影响很小,故进行简化。横截面图见图 1。其中梁长 20 m,梁高 0.95 m,计算跨径为 19.4

m,横向共 6 块板,每板宽 1.25 m;桥面现浇混凝土铺装层厚度为 100 mm,混凝土采用 C40;各板间横向由漏斗状的混凝土铰缝进行连接。

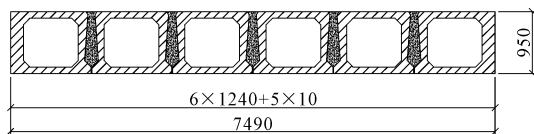


图 1 装配式空心板桥梁横截面(单位:mm)

在使用荷载和横向预应力的共同作用下,认为桥梁的结构构件均处于弹性工作状态,由于本文主要研究铰缝的抗裂性能,而不涉及钢筋与混凝土的相互作用,且空心板内钢筋布置复杂,故本文钢筋混凝土模型采用整体式模型。假定钢筋混凝土为一种新型均质材料,该材料的弹性模量 E_r ,通过钢筋混凝土参数折算而来,具体折算公式如下:

$$E_r = E_c \left(1 + \mu \frac{E_s - E_c}{E_c} \right) \quad (1)$$

式中: E_r 为钢筋混凝土折算弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量; E_s 为钢筋弹性模量; μ 为配筋率。

钢筋混凝土空心板梁的模拟,通过考虑钢筋对混凝土的加强作用,将钢筋弥散于整个混凝土中,认为钢筋和混凝土包含在一个新的单元中,并视单元为均匀连续材料,采用八节点三维线性六面体单元(C3D8)模拟,划分后共有 8 640 个单元。

铰缝与空心板梁一致,采用八节点三维线性六面体单元(C3D8)模拟,划分后共有 3 312 个单元。在实际工程中,铰缝由于设计、施工等其他原因,其强度弱于空心板梁。本文中由于新近规范中铰缝普遍设置抗剪钢筋等加强措施,故假设铰缝与空心板梁具有相同的强度。

桥面铺装层也采用八节点三维线性六面体单元(C3D8)模拟桥面铺装层混凝土,划分后共有 41 400 个单元。在划分网格时,其底面的节点布置和空心板、铰缝顶面的节点布置相同。在实际的施工过程中,由于桥面铺装层和铰缝是同时浇筑成型的,故在 ABAQUS 建模过程中的各个模拟参数与铰缝相同。

在模型中,垫块采用实体单元(C3D8)建立。预应力筋采用桁架单元(T3D2)建立,将预应力钢筋和混凝土分别划分成足够小的单元,考虑到钢筋与混凝土间的粘结滑移效应,在两种单元重合结点间引入非线性 Spring2 弹簧单元连接;预应力的施加采用降温法来进行,设钢筋的膨胀系数为 1.2×10^{-5} ,为准确模拟预应力筋的作用,首先对预应力筋的参数进行设置,然后通过公式 $\Delta T = \sigma / E\alpha$ 可计算得到施

加一定荷载时需降低的温度,通过改变温度以实现预应力的施加;式中: σ 为预应力值; E 为预应力筋的弹性模量; α 为预应力筋线性膨胀系数;本文中施加的预应力大小为 100 kN,横向预应力筋采用

15-7 Φ 5 钢绞线,计算可得施加的降温值为 -22.5°C (负号表示降温)。

综上所述,根据相关规范的要求和模型的具体情况,计算可得各构件的材料参数见表 1。

表 1 材料参数

构件名称	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
空心板梁	34.500	0.167	1.0×10^{-5}	1.740	2500
铰缝	34.500	0.167	1.0×10^{-5}	1.740	2500
桥面铺装	34.500	0.167	1.0×10^{-5}	1.740	2500
支座	0.211	0.167	—	—	—
垫块	210.000	0.300	—	—	—
预应力筋	210.000	0.300	1.2×10^{-5}	—	—

模型的 x 方向为横桥向, y 方向为沿板高度方向, z 方向为纵桥向。为更加真实的模拟桥梁的实际受力状况,防止直接对板梁施加约束,造成局部应力改变,本文根据文献[15]所拟定支座具体情况,进行有限元实体支座的模拟,并将约束施加在支座上,其中支座长宽均为 20 cm,高 8 cm^[16]。根据实际桥梁支座建立有限元支座模型,将边界约束施加于支座上。有限元模型见图 2,模型边界条件处理如下:板桥模型 $z=0$ m 一端约束横桥向、纵桥向以及沿板高度方向的位移, $z=20$ m 一端约束横桥向及纵桥向位移。由于施加横向预应力,认为空心板与桥面铺装层、铰缝的界面处未出现粘结面破坏的现象,且铰缝与桥面铺装层是同时浇筑成型,三者是共同受力的,故空心板顶面与桥面铺装层底面之间、铰缝顶面与桥面铺装层底面之间、铰缝和空心板接触面之间均采用 Tie 约束。

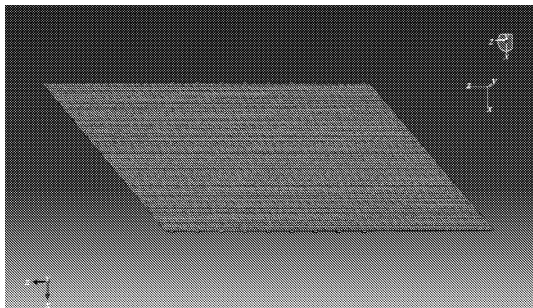


图 2 斜桥有限元模型

1.2 有限元计算模型的验证

装配式空心板桥的跨中两侧对称施加横向预应力,预应力通过板截面向两端传播。采用有限元建模分析验证计算是否与理论计算相符合。1970 年 Timoshenko S P 等^[17]提出了长度为 l ,深度为 $2b$ 的有限矩形板(如图 3 所示),在中跨 $x=l/2$ 受等值反

向集中力 P 作用时 $y=0$ 处所产生应力的通解如下:

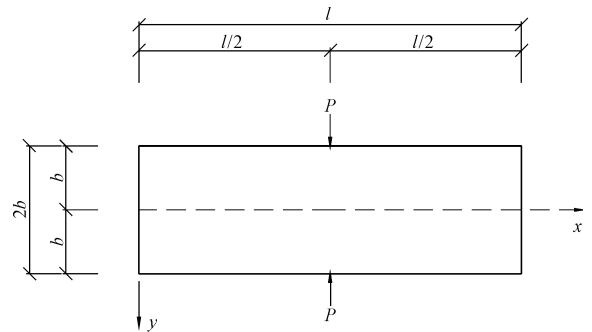


图 3 有限矩形板

应力函数方程为

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2)$$

其中函数 ϕ 可表达为

$$\phi = \sin \frac{m\pi x}{l} f(y) \quad (3)$$

其中 m 为整数, $f(y)$ 为 y 的函数。把式(2)代入式(1)中,且令 $m\pi/l = \alpha$,可得,

$$\alpha^4 f(y) - 2\alpha^2 f''(y) + f^{(4)}(y) = 0 \quad (4)$$

考虑到集中力 P ;垫板宽度 d ;矩形板长度 l ,深度 b 等因素的影响,应力分量可由下式计算:

$$\sigma_x = \frac{4P}{lt} \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\alpha \frac{l}{2}\right) \left(\frac{\sin\left(\alpha \frac{d}{2}\right)}{\alpha \frac{d}{2}} \right) \quad (5)$$

$$\left[\frac{(ab \cosh ab - \sinh ab) \cosh ay - a y \sinh a y \sinh ab}{\sinh 2ab + 2ab} \right] \sin \alpha x$$

$$\sigma_y = -\frac{4P}{lt} \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\alpha \frac{l}{2}\right) \left(\frac{\sin\left(\alpha \frac{d}{2}\right)}{\alpha \frac{d}{2}} \right) \quad (6)$$

$$\left[\frac{(ab \cosh ab + \sinh ab) \cosh ay - a y \sinh a y \sinh ab}{\sinh 2ab + 2ab} \right] \sin \alpha x$$

$$\tau_{xy} = -\frac{4P}{lt} \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\alpha \frac{l}{2}\right) \left(\frac{\sin\left(\alpha \frac{d}{2}\right)}{\alpha \frac{d}{2}} \right) \quad (7)$$

$$\left[\frac{ab \cosh ab \sinh \alpha y - \alpha y \cosh \alpha y \sinh ab}{\sinh 2ab + 2ab} \right] \cos \alpha x$$

采用 1.1 节中所述的模型参数及建模方法建立装配式空心板斜桥模型,模型计算分析所得的应力值与上述的理论值进行比较。为便于比较,将两者绘于同一张图中。图 4 为单束 100 kN(即 $P_1 = 100$ kN)横向预应力作用下桥梁中间铰缝横向预压力分布情况对比图。

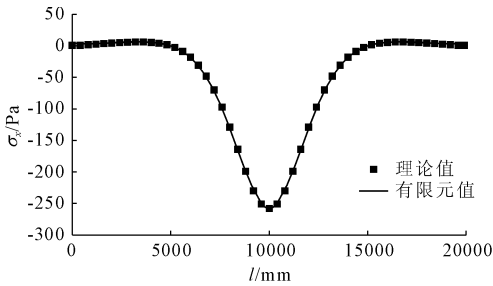


图 4 有限元与理论计算对比图

由图 4 可得:在误差的允许范围,有限元模拟所得的应力值与弹性理论计算的应力值近似相等。考虑到两者的诸多假定和近似,说明有限元建模能有效地模拟横向预应力在空心板桥梁中作用,得到正确的铰缝预应力分布。

2 影响斜交桥梁铰缝破坏的不利荷载作用

车辆荷载和梯度温度作用是影响铰缝破坏的主要因素^[18-19]。为了解上述荷载在装配式斜交空心板梁桥中的不利作用,建立了装配式斜交空心板梁桥有限元模型,并对桥梁模型施加车辆荷载和梯度温度场作用。模型计算得到的铰缝截面最不利位置的横向应力分布如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知,对斜交空心板桥梁施加车辆荷载及梯度温度作用,结果表明:(1) 车辆荷载作用下,斜交桥梁铰缝截面底部产生拉应力,最大拉应力值为 0.227 MPa,对铰缝影响较小;(2) 正梯度温度作用下,桥面板底部与空心板、铰缝交接界面产生最大为 1.171 MPa 的拉应力,考虑到界面的粘结力较弱,可能引起铰缝开裂;(3) 负梯度温度作用下,桥面板顶部产生大于混凝土抗拉强度的拉应力,最大值为 2.857 MPa,极可能导致桥面板开裂。

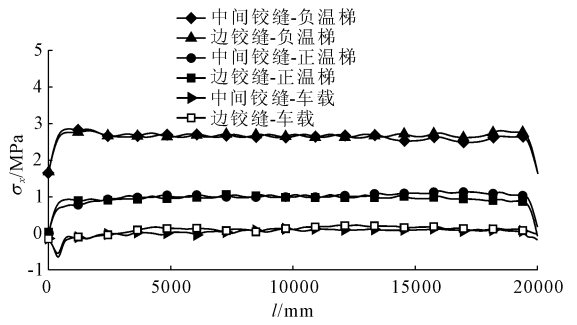


图 5 单因素荷载作用下,铰缝截面最不利位置的横向应力分布

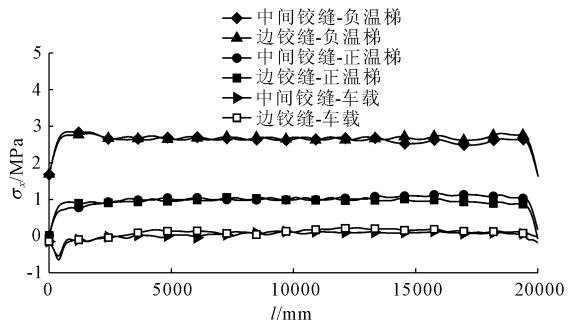


图 6 车辆荷载与梯度温度共同作用下,铰缝截面最不利位置的横向应力分布

考虑到车辆荷载和梯度温度场的共同作用,对荷载进行不利组合。结果表明:(1) 车辆荷载和负梯度温度场共同作用,铰缝截面顶部桥面板产生了 3.647 MPa 的拉应力,较负梯度温度单独作用下更为不利;(2) 车辆荷载和正梯度温度场共同作用,在交接界面产生 1.285 MPa 的拉应力,可能导致铰缝开裂。因此,有必要对装配式斜交桥施加横向预应力。

3 斜交桥梁施加横向预应力的特殊性分析及方案设计

3.1 斜交桥梁特殊性分析

为研究斜交桥梁端部的特殊性,了解施加横向预应力后端部的预压力分布情况,对模型斜交桥梁施加横向预应力,具体情况如图 7 所示,其中预应力大小: $P = 100$ kN;横向预应力施加间距 t 可参考文献[10]的方法确定:当施加间距为 $1/3S$ (其中,受压范围 $S = 5.369$ m)时,横向预应力在各铰缝上取得较为均匀且相近的压应力;有限元模型中桥面现浇混凝土铺装层厚度为 100 mm,考虑到桥面板厚度的影响,此时受压范围为 $0.83S$,因此施加间距应为 $1/3 \times 0.83 \times 5.369 \approx 1485$ mm,取 $t = 1400$ mm;施加范围为直线部位。

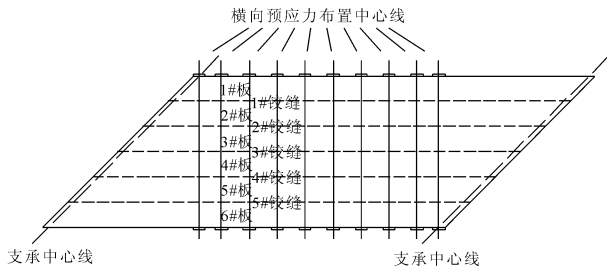


图 7 斜交桥预应力施加示意图

影响斜交桥梁端部特殊性的主要参数为斜交角度。若只在直线部位施加横向预应力,斜交角度越大,说明其端部距离横向预应力的施加截面越远,受横向预应力的影响越小。为研究斜交角度对横向预应力施加效果的影响,该文在 1.1 节有限元模型的基础上建立了三种斜交桥梁有限元模型,分别为:斜交角为 15°、30°和 45°。模型计算结果如图 8~图 10 所示。由图 8~图 10 可知,仅对桥梁直线部位施加横向预应力,端部区域各铰缝均未取得较好的预压效果。在预应力的布置区域各铰缝上取得约 0.2 MPa 的预压应力,但在进入斜端部后,预压应力值不断减少,在端点处预压值为 0 MPa;桥梁斜交角度越大,端部越远离预应力施加截面,其得到的预压值越小。

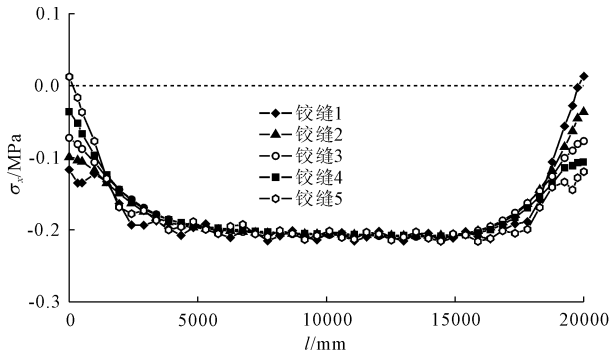


图 8 斜交角 $\theta = 15^\circ$ 时,施加横向预应力后各铰缝预压力分布状况

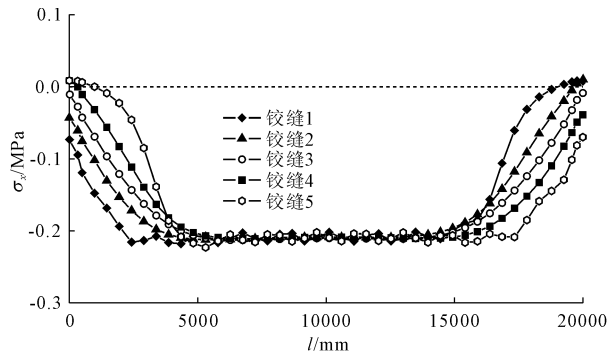


图 9 斜交角 $\theta = 30^\circ$ 时,施加横向预应力后各铰缝预压力分布状况

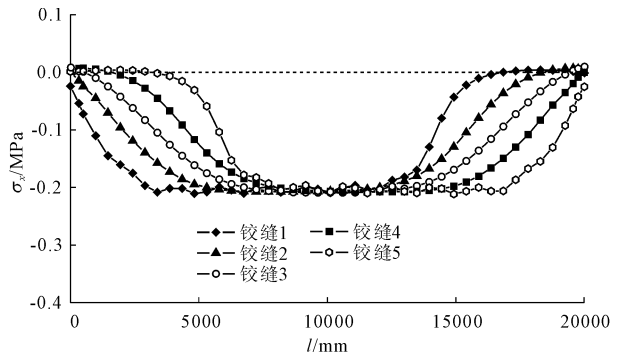


图 10 斜交角 $\theta = 45^\circ$ 时,施加横向预应力后各铰缝预压力分布状况

3.2 斜交桥梁施加方案设计

从上一节中可以看出,仅在斜交桥梁直线部位施加横向预应力,并不能使全桥铰缝均处于预压状态。为使斜端铰缝如直线部位取得相应的预压,就必须对斜端部进行预应力设计。

由前述可知,当斜交角为 45°时,若只在直线部位施加横向预应力,各铰缝处产生大范围的缺预压部位,较斜交角为 15°和 30°范围最广。以 45°斜交桥梁为例,由图 11 可知,仅在斜边端部位置设一道预应力,左边端部 4、5 铰缝和右边端部 1、2 铰缝处都在横向预应力的作用范围之外。为使全桥铰缝都处于预压状态,在斜边中部位置增加一道预应力,其横向预应力的作用范围如图 12 所示,可见增加一道预应力后,2、4 铰缝端部处于预压范围内,但 1、5 铰缝仍有范围外的部位。改变斜边的加载位置,在斜边 1/3 位置各增加一道预应力,如图 13 所示。由图 13 可知施加设计可以使斜边端部处于横向预应力的作用范围内。

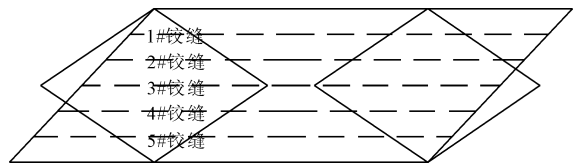


图 11 仅在斜边端部位置设一道预应力

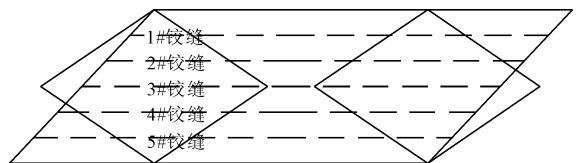


图 12 在斜边中部位置增加一道预应力

为验证简化图中的想法,对 45°斜交装配式空心板桥梁有限元模型进行分析,其中 $P_1 = 100 \text{ kN}$, $t = 1400 \text{ mm}$,施加范围为直线部位;在斜端部的斜边

1/3位置各增加一道预应力;考虑端部约束的减弱作用,由文献[10]可知,在斜边上的三处预应力的大小 P_2 应为中间部位的两倍,即 $P_2 = 200$ kN。计算所得各铰缝处的应力情况,如图 14 所示。

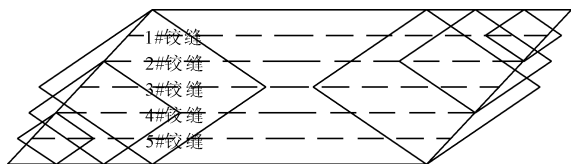


图 13 在斜边 1/3 位置各增加一道预应力

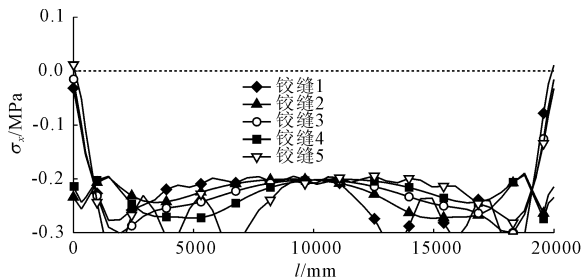


图 14 在斜边 1/3 位置各设一道预应力,各铰缝的横向应力分布

由图 14 可知,在斜端部增设横向预应力后,除 1、3、5 铰缝端部的少许位置外,全桥铰缝都处于 0.2 MPa 的预压作用下。与图 10 中仅在直线部位设置横向预应力对比,大大增加了斜端部处于横向预应力的作用范围。故在端部增设预应力施加位置是必要的。

4 不利荷载组合作用下斜交桥梁横向预应力抗裂性研究

从第 2 节中的分析可以看出,在梯度温度和车辆荷载的共同作用下,较单因素作用下对桥梁更为不利。根据规范^[20]的要求对荷载进行不利组合,研究斜交空心板桥梁横向预应力在不利荷载组合作用下的抗裂性能。建立有限元模型对斜交空心板桥梁施加不利荷载组合作用,分析荷载组合对铰缝的影响,并对桥梁施加横向预应力,分析桥梁的抗裂性能。因此,针对以下 6 种工况展开研究:

工况 1:1.2 恒载 + 1.4 车辆荷载 + 0.8 × 1.4 负温度梯度;

工况 2:在工况 1 的基础上,仅在桥梁的直线部位施加横向预应力;

工况 3:在工况 1 的基础上,根据第 3.2 节中的设计在桥梁的直线部位和斜端部 1/3 位置处均施加横向预应力。

工况 4:1.2 恒载 + 1.4 车辆恒载 + 0.8 × 1.4 正

温度梯度;

工况 5:在工况 4 的基础上,仅在桥梁的直线部位施加横向预应力;

工况 6:在工况 4 的基础上,根据第 3.2 节中的设计在桥梁的直线部位和斜端部 1/3 位置处均施加横向预应力。

由图 15~图 17 可知,负梯度温度和车辆荷载在桥梁的铰缝顶部桥面产生高达 3.5 MPa 的拉应力,超过了桥面混凝土的抗拉强度,将会造成桥面开裂的现象。施加横向预应力能在铰缝处产生压应力,有效的抵消负梯度温度和车辆荷载共同作用所产生的拉应力,避免铰缝开裂。

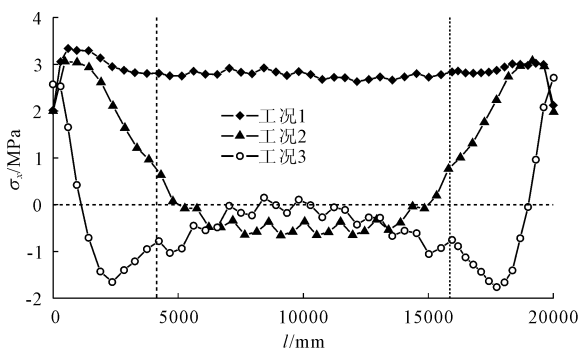


图 15 预应力前后,中间铰缝(3 铰缝)顶部桥面横向应力分布

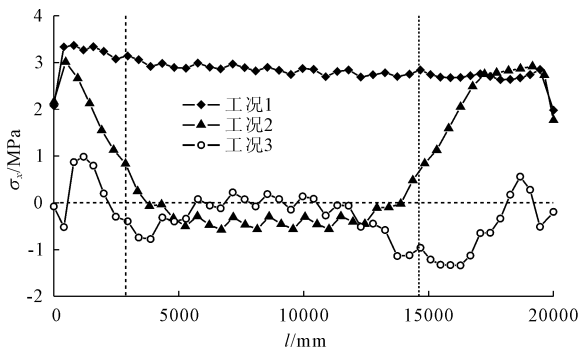


图 16 预应力前后,次边铰缝(2、4 铰缝)顶部桥面横向应力分布

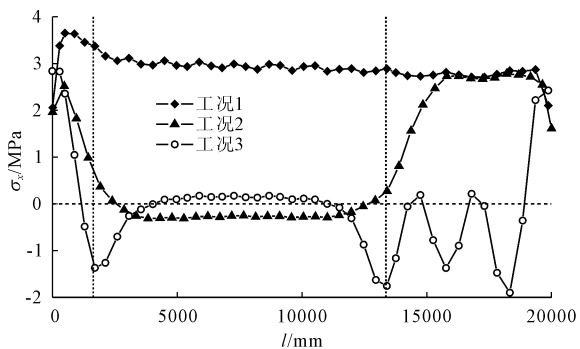


图 17 预应力前后,边铰缝(1、5 铰缝)顶部桥面横向应力分布

对比工况 1 和工况 2 可知,仅在桥梁的直线部位施加横向预应力,产生的预压力大大抵消预应力范围内各铰缝由荷载组合作用所产生的拉应力。从图中可看出各铰缝直线部位由平均 3 MPa 的拉应力减少至均小于 1 MPa,但对于预应力范围外的斜端部,随着端部远离施加截面,横向预应力的效果逐渐减弱,其中图 16 中右端拉应力值反而提高,造成更加不利的状态。

由工况 3 的计算结果可知,除边端的少许部位,施加横向预应力抵消了荷载组合作用所产生的拉应力,使铰缝绝大部分处于受压状态,大大提高铰缝的抗裂性能。

结果表明:(1)斜交桥梁施加横向预应力需考虑端部的特殊性,可在斜端部 1/3 处各增加一道预应力;(2)斜交桥梁施加横向预应力抵消了车辆荷载和负梯度温度共同作用所产生的拉应力,提高铰缝的抗裂性能。

由图 18~图 20 可知,正梯度温度和车辆荷载在桥梁的桥面板与空心板、铰缝交接界面产生平均约 1 MPa 的拉应力,其大小虽未超过桥面混凝土的抗拉强度,但由于拉应力出现于新旧混凝土交接界面,很可能产生开裂现象。

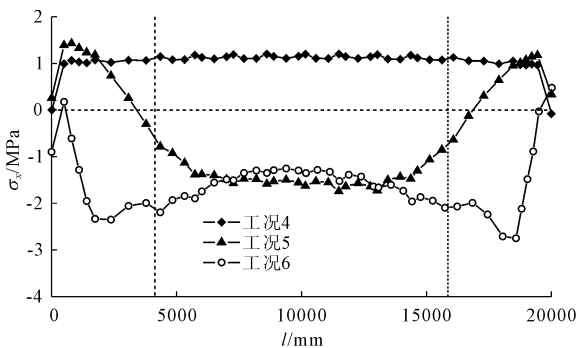


图 18 预应力前后,中间铰缝(3 铰缝)桥面板与铰缝、空心板界面横向应力分布

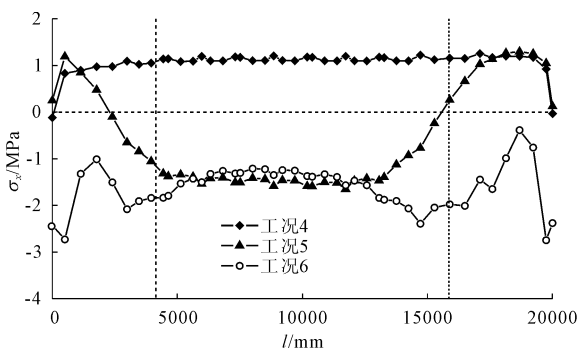


图 19 预应力前后,次边铰缝(2、4 铰缝)桥面板与铰缝、空心板界面横向应力分布

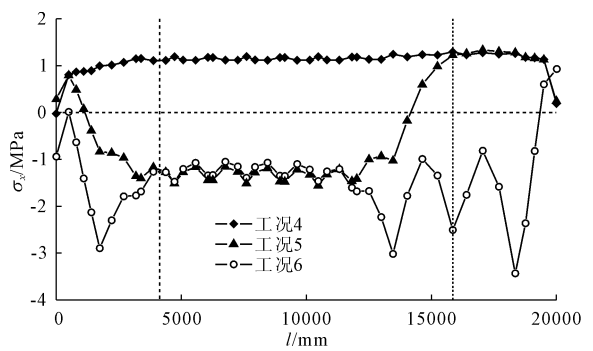


图 20 预应力前后,边铰缝(1、5 铰缝)桥面板与铰缝、空心板界面横向应力分布

对比工况 4 和工况 5 可知,需在斜端部施加横向预应力,以减少端部的拉应力状况;对比工况 4 和工况 6 可知,施加横向预应力后斜交桥梁的拉应力现象得到良好的改善,铰缝截面由正梯度温度和车辆荷载组合作用所产生的拉应力得到较大的消减,铰缝处于受压状态,桥梁抗裂性能较好。

结果表明:斜交桥梁施加横向预应力抵消了车辆荷载和正梯度温度共同作用所产生的拉应力,使铰缝处于受压状态,提高铰缝的抗裂性能。

5 结 论

通过建立有限元模型,分析斜交装配式空心板梁桥施加横向预应力的特殊性,并通过其特殊性进行预应力的设计研究。最后,对比不利荷载组合作用下,施加横向预应力前后斜交桥梁铰缝的受力状态,分析斜交桥梁中横向预应力的抗裂性能。研究所得结论能为装配式空心板斜交桥梁施加横向预应力的设计提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 李光华,卓秋林,生墨海.斜交桥抗震设计研究现状综述[J].公路交通科技(应用技术版),2007(10):100-102.
- [2] 夏 淦,邵容光.斜梁结构分析[M].南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [3] 王铁成,徐 辉,赵少伟.桥梁板结构优化试验研究[J].公路工程,2006,31(3):45-48.
- [4] 乔学礼.空心板铰缝破坏机理及防治措施研究[D].西安:长安大学,2008.
- [5] 史建方.桥梁单板受力成因分析和防治对策[J].公路,2004(10):71-73.
- [6] 房 涛.化学灌浆在简支板梁桥铰缝加固中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007(9):94-97.

(上接第 50 页)

- [7] 李松辉,赵国藩,王松根.CFRP 加固钢筋混凝土整体式板桥的受力性能研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):207-211.
- [8] 刘耀刚,张开金.加固装配式空心板铰缝的方法综述[J].城市建设理论研究(电子版),2013(7).龙源期刊网 <http://www.qikan.com.cn>
- [9] 张 鹏,李耀军,王常松,等.装配式连续梁桥的设计与施工[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3):70-73.
- [10] 李增锋,庄一舟,程俊峰,等.横向预应力对装配整体式空心板桥纵向抗裂性能的影响[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):127-133.
- [11] 张云娜.施加横向体外预应力加固装配式空心板桥的研究[D].郑州:郑州大学,2007.
- [12] Attanayake U B. Macromechanical modeling of precast orthotropic bridge superstructure systems[C]// Transportation Research Board 86th Annual Meeting. 2007.
- [13] 张云娜,陈 淮.装配式斜交空心板桥体外横向预应力加固研究[J].铁道建筑,2011(7):4-6.
- [14] 中华人民共和国交通部.公路桥涵通用图[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [15] 尹江南.装配式钢筋混凝土空心板桥支座与铰缝损伤的数值仿真分析[D].天津:天津大学,2009.
- [16] 杜红静.装配式空心板桥横向加固结构分析方法研究[D].西安:长安大学,2012.
- [17] Timoshenko S P, Goodier J N. Theory of Elasticity[M]. New York:McGraw - Hill,1970.
- [18] 唐先习,尹月酉,国 伟,等.铰接板桥铰缝疲劳性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):6-10.
- [19] 赵素锋.装配式空心板梁桥铰缝病害机理分析与防治措施[J].中国港湾建设,2010(4):15-17.
- [20] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.