

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.021

20 m 跨径的横向张拉装配式空心板桥试设计研究

吕思忠¹, 章清涛¹, 王晓然¹, 李广奇², 陈康明³

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014;

2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250101;

3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 针对装配式空心板桥横向联系不足, 易形成单板受力的问题, 提出采用横向张拉预应力提高空心板桥的横向连接。针对一座跨径 20 m 的采用横向预应力的空心板桥开展试设计研究, 探讨横向张拉预应力钢筋和预应力大小的布置, 提出采用横向预应力的空心板桥的设计计算方法。结果表明, 横向预应力钢筋的纵桥向布置: 跨径 $L \leq 13$ m 时在两端支点和跨中处各布置一道, 共 3 道; 跨径 $L > 13$ m 时在两端支点、四分点和跨中各布置一道, 共 5 道。横向预应力钢筋的截面高度方向布置: 对于截面高度较小的空心板, 在截面形心处布置一道横向预应力钢束。对于截面高度较大的空心板, 在空心板截面的顶、底缘对称布置预应力钢束, 且施加的横向预应力大小相同。结合面抗弯、剪承载力验算结果表明, 采用了横向预应力的试设计空心板桥, 结合面抗弯、剪承载力满足要求。

关键词: 装配式空心板桥; 铰缝; 横向预应力; 设计计算

中图分类号: U448.35

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0134—06

Trial-design of 20 m Span Prefabricated Voids Slab Bridge with Transverse Post-tensioning

LV Sizhong¹, ZHANG Qingtao¹, WANG Xiaoran¹, LI Guangqi², CHEN Kangming³

(1. Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan, Shandong 250101, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Focusing on the problem of the lack of transverse connection of the prefabricated voided slab bridge, easy to behave individually, using transverse post-tensioning to improve the transverse connection of the voided slab bridge is proposed. A trail design study on a 20 m-span voided slab bridge with transverse posttensioning was carried out. The layout of pre-stressed tie bars and the value of the transverse posttensioning were discussed. The design calculation method of the transverse posttensioned voided slab bridge is proposed. The results show that the longitudinal layout can be as follows: when the span $L \leq 13$ m, each section is arranged at both ends and the middle of the span, 3 sections in the whole bridge. When the span $L > 13$ m, each section is arranged at both ends, quarter points and the middle of the span, 5 sections in the whole bridge. Transverse tie bars arrangement in the vertical direction arrangement can be as follows: for the section height of the voided slab is smaller, one transverse tie bar is arranged at the centroid of the section. For the section height of the voided slab is bigger, two transverse tie bars are arranged symmetrically at the top and bottom edge of the voided slab section, with the same pre-stress value. The check calculation results show that the trail design bridge with transverse posttensioning meets the requirements of the bending and shearing capacity of the junction surface.

Keywords: prefabricated voided slab bridge; shear key; transverse post-tensioning; design calculation

装配式钢筋混凝土空心板梁桥因其受力明确、施工简单、标准化制造、经济适用等优点,在我国中小跨径桥梁中广泛应用^[1]。近年随着轻质混凝土和钢纤维混凝土等新材料的应用,空心板桥实现跨径的突破^[2-3]。装配式空心板桥在横桥向形成“空心板-铰缝-空心板”的结构形式,空心板与空心板之间依靠铰缝形成整体结构并在横桥向传递弯矩和剪力;因此铰缝是装配式空心板桥横桥向传递荷载的重要构件^[4]。但空心板桥的病害调查结果^[5]表明,铰缝在长期荷载作用下易发生开裂等病害。铰缝开裂会造成桥面铺装对应位置开裂病害的发生,还会导致雨水和腐蚀性物质的渗透,进一步造成桥梁横桥向结构退化甚至是传力失效和单板受力^[6]。

装配式空心板桥受力的薄弱环节是铰缝结合面,在荷载作用下铰缝结合面先于空心板开裂^[7-8]。为了提高装配式空心板桥的受力性能,采取各种改进措施提高铰缝结合面的受力性能是相关研究的热点问题。在中国,最早的空心板桥在铰缝处采用了剪力筋和纵向受力钢筋。但是相关研究结果^[9]表明,由于未配置结合面钢筋,此类空心板桥会在荷载作用下形成竖向和纵桥向的通缝,并最终产生“单板受力”现象。因此,2007年出版的空心板桥标准图在铰缝结合面底部增设了门式钢筋。相应的有限元计算^[8]和试验结果^[7]表明,在结合面底部设置门式钢筋不能明显提高结合面的开裂荷载,但是可以提高铰缝结合面开裂后继续承载的能力。

为了进一步提高铰缝结合面的受力性能,吴庆雄等^[10]提出了一种在空心板与铰缝结合面底部设置开孔钢板的铰缝构造,试验和有限元计算结果表明,这种构造可以明显提高铰缝结合面的开裂荷载和极限荷载。同时张培旭^[11]提出了一种改变空心板和铰缝形状的倒T形空心板结构,研究结果表明,倒T形空心板的铰缝结合面开裂发生在空心板开裂之后,因此解决了传统空心板桥受力的“短板”。

针对装配式空心板桥横向联系不足,易形成单板受力的问题,本文提出采用横向张拉预应力提高空心板桥的横向连接。并从装配式空心板桥的新标准图出发,针对一座跨径20 m的采用横向预应力的空心板桥开展试设计研究。利用有限元计算空心板桥的横向最不利荷载的大小,探讨横向张拉预应力空心板桥的预应力钢筋和预应力大小的设置,提出采用横向预应力的空心板桥的设计计算方法。

1 横向预应力空心板桥提出

在美国、日本等发达国家,空心板桥应用极为广泛^[5]。但是,与国内普遍采用深铰缝不同,美国73%的空心板桥采用了浅铰缝的结构形式^[12]。为了提高这些空心板桥的横桥向受力性能,研究人员采取布置横向拉杆、铰缝填充UHPC、横向张拉预应力等方式对结构受力加以改进^[13-15]。其中,张拉横向预应力是一种重要的改进措施:据统计,美国大约75%的空心板桥采用横向预应力加强空心板桥的横向连接,在日本21 m跨径以下的桥梁中采用横向预应力的桥梁高达97%^[5-6]。美国、日本等国家采用横向预应力的装配式空心板桥相关研究表明,采用横向预应力的装配式空心板桥在实际应用中很少出现铰缝结合面裂缝和桥面铺装纵向裂缝,采用横向预应力的空心板桥桥梁整体性良好,不会出现单板受力现象^[5]。

日本采用横向预应力的装配式空心板桥^[5]的常用跨径为5 m~24 m。典型的横断面布置如图1所示,主要包括以下构造:预制主梁、桥面铺装层、横隔梁、深宽构造的铰缝和横向预应力钢束。日本对横向预应力的施工较多采用后张法,预制主梁,将主梁安装就位后,根据预留的横向预应力孔道布置横向预应力钢束,浇筑铰缝混凝土,待铰缝混凝土达到设计强度后,进行横向预应力的张拉,最后浇筑桥面铺装层。

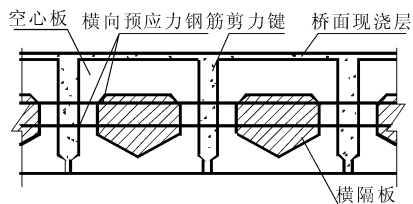


图1 日本空心板桥典型横断面

美国装配式空心板桥^[15]的典型构造包括:预制预应力混凝土空心板、铰缝、横向预应力、钢筋混凝土铺装层。其典型截面如图2所示。从图2可见美国横向预应力的设计与日本空心板桥较为相似,均在横隔梁处布置横向预应力,使桥梁结构的横向刚度增大,横向联系大大加强。

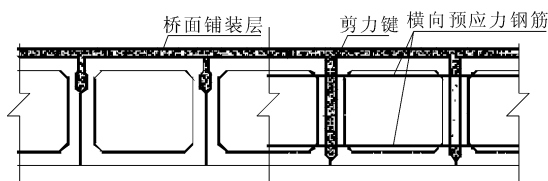


图2 美国空心板桥典型横断面

在中国,横向预应力并不是一项新技术,但相关研究目前主要集中于旧桥加固,且由于在腹板上开孔困难,因此,更多的是采用在底板张拉横向预应力的方式。关于采用横向预应力的新建装配式空心板桥设计计算方法的研究相对较少^[16-17]。事实上,车辆荷载在横桥向布置位置不同时,铰缝结合面既可能受横向正弯矩的作用也可能受横向负弯矩的作用,因此只在底板张拉横向预应力,可能使得铰缝顶缘处于受拉的不利状态,甚至会导致铰缝结合面和桥面铺装开裂。

采用横向预应力是增强空心板桥横向联系、提高整体性的一种有效方法。通过布置横向预应力,使空心板和铰缝的结合面在横桥向上下缘受压,平衡车辆荷载产生的横向弯矩对桥梁结构横向受力的不利影响,可大大提高空心板的横向整体性,使荷载在各主梁之间的分配更加均匀,增强横向联系,提高桥梁的整体性。

2 横向预应力空心板桥试设计

2.1 空心板试设计

试设计的横向张拉装配式空心板桥跨径为 20 m,计算跨径 $L = 19.26$ m。横桥向由 10 片预制空心板组成,包括 2 片边板和 8 片中板,主梁纵桥向为等截面。桥梁的横截面布置为 10.24 m(车行道) + 2 × 0.5 m(防撞护栏) = 11.24 m。预制主梁采用 C50 混凝土,铰缝和桥面现浇层亦采用 C50 混凝土。空心板横截面布置如图 3 所示。

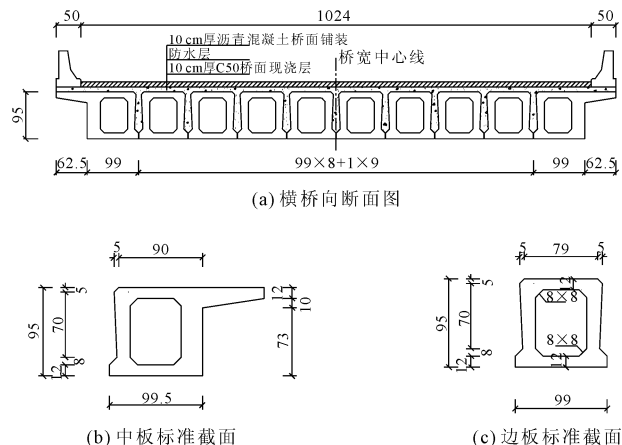


图 3 空心板布置(单位:cm)

2.2 横向预应力钢筋布置

横向预应力的设计需要确定三个参数:横向预应力钢筋的纵桥向布置、截面高度方向上的布置和横向预应力的大小。

通过对国外现行空心板桥横向预应力在纵桥向和截面高度方向上的布置进行统计,结果见表 1 所示。发现国外空心板桥横向预应力的纵桥向布置和跨径相关:小跨径时在两端和跨中各布置一个截面;中等跨径时则按等间距的形式布置 5~8 个截面。因此,对于空心板桥横向预应力钢筋的纵桥向布置方式:跨径 $L \leq 13$ m 时在两端支点和跨中处各布置一道,共 3 道;跨径 $L > 13$ m 时在两端支点、四分点和跨中各布置一道共 5 道。

从表 1 可以看出,横向预应力在截面高度方向上的布置多采用顶底缘各布置 1 束的形式。因此,对于我国空心板桥横向预应力筋在截面高度方向的布置,对于截面高度较小的空心板(即小跨径的空心板),在截面形心处布置一道横向预应力钢束。对于截面高度较大的空心板(即中跨径的空心板),在空心板截面的顶、底缘对称布置预应力钢束,且施加的横向预应力大小相同。

因此,试设计的 20 m 跨径空心板桥横向预应力的纵、横向布置如图 4 所示。在两端支点、跨中、四分点处各设一道厚 0.2 m 的横隔梁,在横隔梁处布置横向预应力钢筋,全桥共五道横隔梁。一道横隔梁截面布置顶、底缘两束横向预应力钢筋。

表 1 各国横向预应力布置形式

国家或地区	纵桥向布置形式	截面高度方向布置形式
日本	$L = 5$ m, 3 道等间距;	$L = 5$ m ~ 11 m, 一道横隔梁中间高度处布置 1 束; $L = 12$ m ~ 24 m, 一道横隔梁布置 2~6 束, 顶底缘对称布置
	$L = 6$ m ~ 10 m, 4 道等间距;	
	$L = 11$ m ~ 18 m, 5 道等间距;	
	$L = 19$ m ~ 24 m, 6 道等间距	
美国 纽约州	$L \leq 15.2$ m, 3 道等间距;	一道横隔梁布置 2 束, 顶底缘各布置 1 束
	$L > 15.2$ m, 5 道等间距	
美国密 歇根州	$L < 15.2$ m, 3 道等间距;	一道横隔梁布置 2 束, 顶底缘各布置 1 束
	$L = 15.2$ m ~ 18.9 m, 3 道等间距	
美国 南卡罗 来纳州	$L = 18.9$ m ~ 30.5 m, 4 道等间距;	一道横隔梁布置 2 束, 顶底缘各布置 1 束
	$L > 30.5$ m, 6 道等间距	
韩国	$L = 9.1$ m ~ 15.2 m, 3 道等间距;	一道横隔梁布置 2 束, 顶底缘各布置 1 束
	$L = 18.3$ m, 3 道等间距	

3 横向预应力大小试设计

3.1 横向预应力大小的影响

装配式空心板桥通过现浇铰缝将各片空心板连成整体,保证车辆荷载在各主梁之间的传递。空心板间的荷载既包括横桥向弯矩也包括剪力,铰缝在车辆荷载作用下既承受弯矩,又承受剪力^[8]。因

此,确定横向预应力值要同时考虑受弯和受剪时的受力状态。横向预应力的施加可以平衡横桥向弯矩和剪力产生的法向、切向应力,避免铰缝结合面这一薄弱环节由于过大的法向或切向应力而发生开裂。同时也不可因为横向预应力的施加导致铰缝或空心板混凝土的破坏。

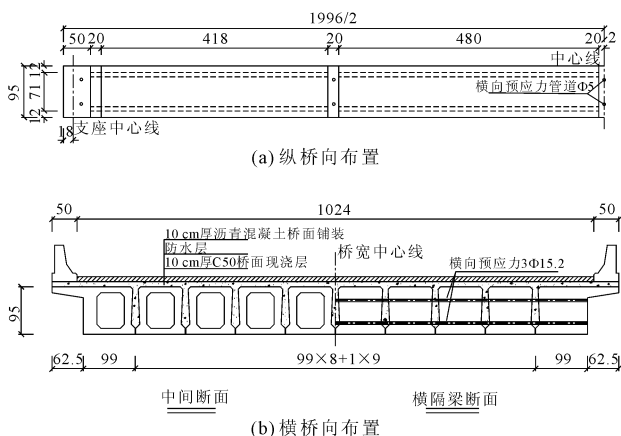


图4 横向预应力的纵、横向布置(单位:cm)

根据摩擦抗剪的原理^[18],铰缝结合面通过空心板与铰缝混凝土之间的摩擦力抵抗由于设计荷载产生的横桥向剪力的作用。因此,铰缝结合面的切向剪力 V_{\max} 应满足:

$$\gamma_0 V_{\max} \leq n\mu P \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,对应于设计安全等级一级、二级和三级分别取为 1.1、1.0 和 0.9; V_{\max} 为铰缝结合面承受的最大设计剪力值,kN,计算时考虑冲击系数; n 为横向预应力道数; μ 为结合面摩擦系数; P 为横向预应力的大小,kN。

对于横桥向弯矩的影响,由于当车辆荷载作用于横桥向的外缘时会产生横桥向负弯矩,使得部分铰缝结合面的上缘承受法向拉应力;当车辆荷载作用于桥宽中心线附近时会产生横桥向正弯矩,使得部分铰缝结合面的下缘承受法向拉应力。横向预应力的作用应使铰缝结合面全截面受压。因此,弯矩控制下的横向预应力设计计算应考虑设计荷载作用下铰缝结合面承受的最不利横桥向弯矩值。为了确保横向预应力的可靠作用,在横向预应力和设计荷载作用下,应控制以下两点:(1)铰缝结合面不致出现受拉现象;(2)铰缝或空心板混凝土不至于被压碎。

在横向正弯矩作用下,横梁截面上部受压,下部受拉。在横向预应力作用下,全截面受压。横向预应力和横向正弯矩的合力作用下,截面顶缘压应力最大,截面底缘压应力最小,如图5所示。为使铰缝

结合面边缘在设计荷载作用下不出现受拉开裂现象,最理想全截面处于受压状态并留有一定的安全系数。本文安全系数取 0.4 倍弱侧混凝土(铰缝与空心板相对较弱的混凝土)轴心抗拉强度标准值($0.4f_{tk}$)。即横向预应力的大小应满足公式(2)的要求。同时,为保证截面顶缘混凝土不被压碎,本文安全系数取 0.6 倍弱侧混凝土轴心抗压强度标准值($0.6f_{ck}$),横向预应力的大小应满足公式(3)的要求。

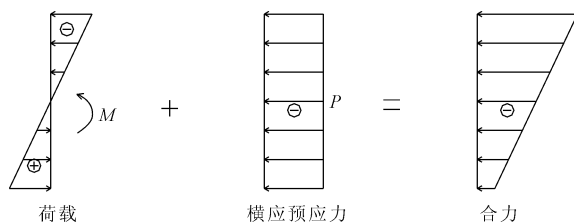


图5 横向正弯矩与横向预应力的作用

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{P}{A} + \frac{My_{\text{top}}}{I} \leq 0.6f_{ck} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{bot}} = \frac{P}{A} - \frac{My_{\text{bot}}}{I} \geq 0.4f_{tk} \quad (3)$$

式中: M 为横桥向弯矩值,kN·m; y_{bot} 、 y_{top} 分别为中性轴到截面底缘和顶缘的距离,m; I 为横隔梁抗弯惯性矩,m⁴; P 为横向预应力,kN; A 为横隔梁面积,m²; f_{tk} 为铰缝混凝土轴心抗拉强度标准值,MPa; f_{ck} 为铰缝混凝土轴心抗压强度标准值,MPa。

同理,在横向负弯矩作用下,横梁截面上部受拉,下部受压。在横向预应力作用下,全截面受压。横向预应力和横向负弯矩的合力作用下,截面底缘压应力最大,截面顶缘压应力最小,如图6所示。与正弯矩作用下的受力分析一致,横向预应力的大小应同时满足式(4)和式(5)的要求。其中符号意义与式(2)和式(3)相同。

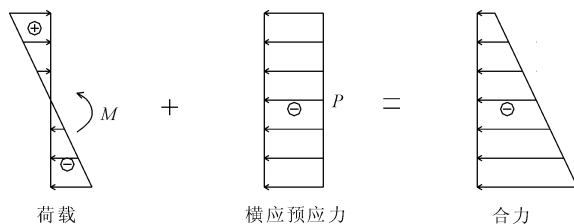


图6 横向负弯矩与横向预应力的作用

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{P}{A} + \frac{My_{\text{top}}}{I} \geq 0.4f_{tk} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{bot}} = \frac{P}{A} - \frac{My_{\text{bot}}}{I} \leq 0.6f_{ck} \quad (5)$$

3.2 空心板桥内力计算

横向预应力大小试设计的前提是横向弯矩和剪力的计算。因此,采用杆系有限元计算软件 MI-DAS/Civil 根据空间梁格法建立试设计空心板桥的有限元模型,如图 7 所示。全桥共计 230 个节点,389 个单元。

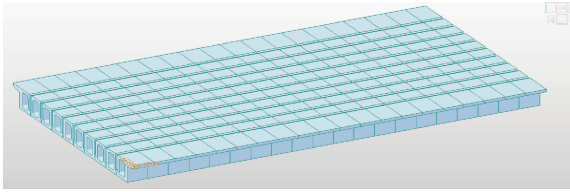


图 7 空心板桥有限元模型

按照《公路桥涵设计通用规范》^[19] (JTG D60—2015) 的要求,采用五轴车辆荷载进行加载,并进行铰缝内力计算。根据纵、横桥向布置形式和车辆数量的不同,建立多个不同的工况,分别考虑剪力和弯矩的荷载效应。计算得到的最不利情况下的铰缝内力结果见表 2。

表 2 跨径 20 m 空心板桥最不利情况下铰缝内力

剪力 /kN	弯矩/(kN·m)		
	恒载弯矩	活载正弯矩	活载负弯矩
25.8	-13.9	42.6	-37.4

3.3 横向预应力设计

跨径为 20 m 的空心板,横隔梁截面为宽度 20 cm × 高度 95 cm 的矩形截面。横向预应力设计时考虑冲击效应,冲击系数 $\mu = 0.26$ 。恒载和活载的荷载组合系数分别按 1.0 和 1.4 考虑,则铰缝最不利横向正负弯矩分别为 61.25 kN·m 和 -79.89 kN·m。横隔梁截面面积 $A = bh = 0.19 \text{ m}^2$,横隔梁截面惯性矩 $I = bh^3/12 = 1.429 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ 。

利用横向正弯矩计算截面底缘应力和顶缘应力,见式(6)和式(7):

$$\sigma_{\text{bot}} = \frac{P}{0.19} - \frac{61.25 \times 0.45}{1.429 \times 10^{-2}} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{P}{0.19} + \frac{61.25 \times 0.45}{1.429 \times 10^{-2}} \quad (7)$$

利用横向负弯矩计算截面底缘应力和顶缘应力,见式(8)和式(9):

$$\sigma_{\text{bot}} = \frac{P}{0.19} + \frac{79.89 \times 0.45}{1.429 \times 10^{-2}} \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{P}{0.19} - \frac{79.89 \times 0.45}{1.429 \times 10^{-2}} \quad (9)$$

对于本例, $f_{\text{tk}} = 2.65 \text{ MPa}$ 。对比式(6)一式(9),

取相对更不利的横向负弯矩顶缘应力控制计算:

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{P}{0.19} - \frac{71.89 \times 0.45}{1.429 \times 10^{-2}} \geq 0.4f_{\text{tk}}$$

$$P \geq 479 \text{ kN}$$

对于跨径 20 m,桥宽 11.24 m 的空心板桥,一道横隔梁处横向预应力可按 480 kN 进行设计,横向预应力钢束可以采用 2 束 3 - $\phi 15.2$ 预应力钢绞线提供,每束横向预应力 240 kN。

3.4 结合面抗弯、剪承载力验算

横隔梁截面在横向正弯矩和负弯矩作用下的应力见表 3。可以看出,采用横向预应力后,外荷载作用下横隔梁全截面受压,且法向应力小于铰缝结合面处弱侧混凝土轴心抗压强度标准值的 0.6 倍, $0.6f_{\text{ck}} = 19.44 \text{ MPa}$ 。故采用横向预应力的结合面抗弯承载力满足要求。

表 3 横隔梁截面应力 单位:MPa

荷载类型	横向正弯矩应力		横向负弯矩应力	
	顶缘	底缘	顶缘	底缘
恒载 + 活载	2.04	-2.04	-2.66	2.66
预应力	3.58	3.58	3.58	3.58
合计	5.62	1.54	0.92	6.24

根据式(1)验算采用横向预应力的铰缝结合面抗剪承载力,其中摩擦系数根据《公路圬工桥涵设计规范》^[20] (JTG D61—2005) 3.3.5 的规定取 0.7。横向预应力钢筋共设置 5 个截面,每个截面横向预应力按 480 kN 进行设计,故横向预应力 P 的大小为 $P = 5 \times 480 = 2400 \text{ kN}$ 。代入式(1)可知采用横向预应力的结合面抗剪承载力满足要求。

4 结 论

(1) 空心板桥横向预应力钢筋的纵桥向布置方式:跨径 $L \leq 13 \text{ m}$ 时在两端支点和跨中处各布置一道,共 3 道;跨径 $L > 13 \text{ m}$ 时在两端支点、四分点和跨中各布置一道共 5 道。

(2) 空心板桥横向预应力钢筋的截面高度方向布置方式:对于截面高度较小的空心板,在截面形心处布置一道横向预应力钢束。对于截面高度较大的空心板,在空心板截面的顶、底缘对称布置预应力钢束,且施加的横向预应力大小相同。

(3) 为了确保横向预应力的可靠作用,在横向预应力和设计荷载作用下,应控制以下两点:铰缝结合面不致出现受拉现象;铰缝或空心板混凝土不至于被压碎。本文取最小压应力不小于 $0.4f_{\text{tk}}$,最大

压应力不大于 $0.6f_{ck}$ 。

(4) 空心板桥横向预应力的的大小可以利用有限元计算桥梁在最不利荷载作用下的横桥向剪力和弯矩值。对于试设计空心板桥,一道横隔梁处横向预应力取 480 kN,由两束预应力钢束提供。结合面抗弯、剪承载力验算结果表明,采用了横向预应力的试设计空心板桥,结合面抗弯、剪承载力满足要求。

参考文献:

- [1] 叶见曙,刘九生,俞博,等. 空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J]. 公路交通科技,2013,30(6):33-39.
- [2] 邓宗才,龚明高. 混杂纤维对纤维网格增强混凝土板双向弯曲性能影响的试验研究[J]. 北京工业大学学报,2022,48(4):367-377.
- [3] 戴竞. 轻骨料混凝土桥的现状与发展[J]. 公路,2002(12):7-11.
- [4] Semendary A A, Walsh K K, Steinberg E P. Early-age behavior of an adjacent prestressed concrete box-beam bridge containing UHPC shear keys with transverse dowels [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(5):1-14.
- [5] Yamane T, Tadros M K, Arumugasamy P. Short to medium span precast prestressed concrete bridges in Japan [J]. PCI Journal, 1994,39(2):74-100.
- [6] 刘发水. 整体化铺装层加固空心板理论最优厚度分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):26-31,53.
- [7] 吴庆雄,陈悦驰,陈康明. 结合面底部带门式钢筋的铰接空心板破坏模式分析[J]. 交通运输工程学报,2015,15(5):15-25.
- [8] 陈康明,吴庆雄,黄宛昆,等. 结合面底部带门式钢筋的铰接空心板桥受力性能参数分析[J]. 公路交通科技,2016,33(8):65-75.
- [9] 王渠,吴庆雄,陈宝春. 装配式空心板桥铰缝破坏模式试验研究[J]. 工程力学,2014,31(S1):115-120.
- [10] 吴庆雄,黄宛昆,陈宝春,等. 结合面底部设开孔钢板的铰接空心板力学性能[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):45-54.
- [11] 张培旭. 新型装配式倒T形空心板桥设计[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):128-133,197.
- [12] Hussein H H, Sargand S M, Khoury I, et al. Environment-induced behavior of transverse tie bars in adjacent prestressed box-girder bridges with partial depth shear keys[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017,31(5):1-13.
- [13] Hanna K, Morcous G, Tadros M K. Adjacent box girders without internal diaphragms or post-tensioned joints [J]. PCI Journal, 2011,56(4):51-64.
- [14] Semendary A A, Steinberg E P, Walsh K K, et al. Live-load moment-distribution factors for an adjacent precast prestressed concrete box beam bridge with reinforced UHPC shear key connections [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(11):1-18.
- [15] El-Remaily A, Tadros M K, Yamane T, et al. Transverse design of adjacent precast prestressed concrete box girder bridges[J]. PCI Journal, 1996,41(4):96-113.
- [16] 项贻强,邢骋,邵林海,等. 横向加固空心板梁桥荷载横向分布计算方法与试验研究[J]. 中国公路学报,2013,26(2):63-68.
- [17] 宋尧,许健. 装配式空心板桥板间铰缝破坏加固方法研究[J]. 中外公路,2016,36(3):216-220.
- [18] 潘钻峰,Chung C F, 吕志涛. 装配式板桥的横向预应力设计[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(6):1264-1270.
- [19] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [20] 公路圬工桥涵设计规范:JTG D61—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.