

基于集中预制的组合小箱梁结构标准化研究

薛 岭¹, 周 青², 杨 鹏², 赵 浩²

(1. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘 要: 在合理高效利用土地资源进行预制梁厂建设, 进一步实现交通基础设施建设的产业升级, 促进高质量发展的背景下, 传统的小箱梁建造模式正逐步向集中预制、工厂化生产的新型工业化模式转变。为提升小箱梁结构对工业化生产模式的适应性, 推动交通建设高质量发展, 通过广泛的现场调研和大量的数值模拟分析, 深入探讨了小箱梁在标准化生产条件下的受力性能与构造要求, 提出小箱梁结构优化方案, 以更好满足工厂标准化生产需要, 并对优化后结构的工程造价进行对比分析, 为今后集中预制场建设和相关设计优化提供参考。

关键词: 小箱梁; 集中预制; 结构优化; 有限元分析

中图分类号: U445; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0078-06

Research on Standardization of Combined Small Box Girder Structure Based on Centralized Prefabrication

XUE Ling¹, ZHOU Qing², YANG Peng², ZHAO Hao²

(1. Jiangsu Province Traffic Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Against the backdrop of rationally and efficiently utilizing land resources for the construction of prefabricated beam yards, further facilitating the industrial upgrading of transportation infrastructure, and promoting high-quality development, the traditional construction method for small box girders is gradually transitioning toward a novel industrialized model characterized by centralized prefabrication and factory-based production. To enhance the adaptability of small box girder structures to industrialized production modes and to promote high-quality development in transportation construction, through extensive field investigations and extensive numerical simulation analyses, thoroughly investigates the mechanical performance and structural requirements of small box girders under standardized production conditions. An optimized structural scheme for small box girders is proposed to better satisfy the demands of factory-standardized production. A comparative analysis of the construction cost of the optimized structure is also conducted, providing a reference for the future construction of centralized prefabrication yards and related design optimizations.

Keywords: small box girder; centralized prefabrication; structural optimization; finite element analysis

0 引 言

2021年7月2日, 国务院签署《土地管理法实施条例》, 明确临时用地应当尽量不占或者少占耕地。同年11月, 自然资源部印发《关于规范临时用地管理的通知》, 进一步明确临时用地选址要求和使用期限, 提出“制梁场、拌合站等难以恢复原种植条件的不得以临时用地方式占用耕地和永久基本农田”。

收稿日期: 2026-03-04

作者简介: 薛岭(1980—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事公路工程建设管理工作。

通信作者: 杨鹏(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。电子信箱: yangpengsank@126.com

新出台的用地政策对传统工程项目建设模式提出了新的要求, 尤其是高速公路桥梁建设。早期高速公路建设通常采用现场搭设大量支架和模板, 现场绑扎钢筋进行浇筑, 后来逐渐发展为上部预制、下部现浇, 但主要临近项目周边设置临时预制场, 待项目建成后拆除复垦, 这也导致施工能耗高、污染重、效率低、标准化程度低。不仅阻碍土地高效集约利用, 还制约了交通基础设施建设的产业升级。

随着我国现代化发展进程的不断加快, 如何合理利用土地资源进行工程建设, 实现高质量发展成为亟须解决的关键问题。为解决传统建设模式的弊端, 近年来, 桥梁集中预制理念越来越受到桥梁建设

者们的推崇^[1-7],即通过合理的块件划分将桥梁结构化整为零,构件在预制场分段分节预制,再通过现场安装形成整体,具有设计标准化、生产工厂化、施工装配化、管理信息化等特点。同时,构件生产在永久预制场内实施,不占用施工临时用地,土地资源的利用效率显著提高。

小箱梁作为桥梁建设中广泛使用的典型预制结构,想要实现集中预制、工厂化生产,需要对结构尺寸、典型构造进行一定程度的优化,以适应工业化生产模式。同时,结构优化后的经济造价变化也是需要关注的重点。

1 标准化尺寸研究

我国小箱梁通用图最早由原交通部颁布实施^[3],长时间以来随着桥梁建设规模的扩大和标准规范的更新,各省逐渐形成了各自的通用图。近些年来,部版通用图已不再继续更新,但其通用图的参数奠定了现在各省通用图的基础,大部分参数取值也沿用至今。在小箱梁通用图长时间的使用过程中,各省各设计单位根据各自的设计习惯、项目情况、环境类别对一些参数进行了调整。

本节主要收集应用在江苏地区高速公路桥梁上的各类通用图,对小箱梁的标准化尺寸进行研究。小箱梁典型尺寸示意如图 1 所示,典型尺寸数值如表 1 所示。

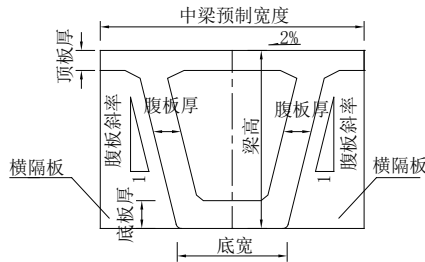


图 1 小箱梁典型尺寸示意

表 1 小箱梁典型尺寸表

单位: cm

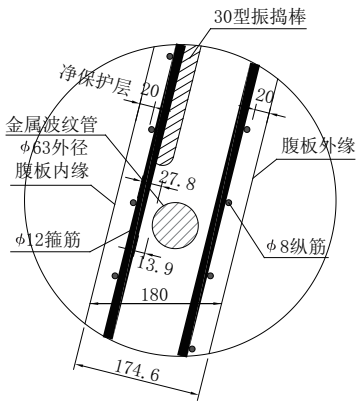
跨径/m	25	30	35	40
梁高	1.4	1.6	1.8	2.0
顶板厚	18			
跨中底板厚	18			
支点底板厚	30/32/34	30/32/34/35	32/35/36	32/34/35/36
跨中腹板厚	18/20			
支点腹板厚	25/28/30	25/30/32	32	32
变厚度段长度	200/250	200/300	350	400
跨中横隔板	无	有/无	有	有

从表中可以看出,各典型参数存在一定的异同。小箱梁梁高、顶板厚度、跨中底板厚度、变厚段长度

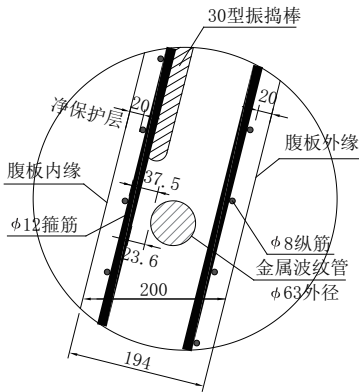
相对固定,各通用图基本不存在差异;跨中腹板厚度、支点腹板厚度、支点处底板厚度以及跨中横隔板设置情况,差异明显。

从便于集中预制和工厂化生产角度,对明显存在差异的参数进行论述。

跨中腹板厚度常见的有 18 cm 和 20 cm 两种取值,后者是在前者的基础上改进得来的。18 cm 增加到 20 cm,可以使腹板内预应力管道与钢筋的净距增加约 1 cm,便于混凝土浇筑时振捣设备伸入和粗骨料通过,浇筑质量更有保证。图 2 所示为常规高速公路小箱梁腹板内振捣作业空间示意,在保持混凝土保护层厚度和钢筋配置形式不变的情况下,腹板厚度增加 2 cm,波纹管与纵筋的净距从 2.78 cm 增加至 3.75 cm,而腹板振捣作业,常的采用 30 型振捣棒端部直径 3 cm,18 cm 的腹板,振捣棒伸入必然与波纹管发生冲突,而 20 cm 的腹板可以避免此问题。



(a) 18 cm 腹板



(b) 20 cm 腹板

图 2 小箱梁腹板振捣作业空间示意(单位:mm)

同时,更厚的腹板也可以提供更大的混凝土保护层厚度,在环境类别较差时具有更好的适用性。另一方面,腹板厚度增加,也可以改善腹板本身的局部受力^[9-13]。从以上角度看,20 cm 的腹板厚度取值要优于 18 cm。

支点腹板厚度应根据根据抗剪受力要求、锚垫

板布置、锚下局部承压等因素确定。根据OVM锚具手册数据表,计算得到不同钢束型号与支点最小腹板厚的关系如图3所示。考虑到目前小箱梁钢束型号多为15-4~15-7,腹板厚度不低于30 cm,即可以满足所有跨径、所有结构体系的小箱梁锚下局部承压要求。同时,支点腹板厚度增加并不会对小箱梁整体混凝土用量产生较大的影响,如表2所示,支点腹板厚度由30 cm增加至32 cm,混凝土用量增幅在0.5%以内。综上,各跨径小箱梁支点处腹板厚度宜按照32 cm统一。

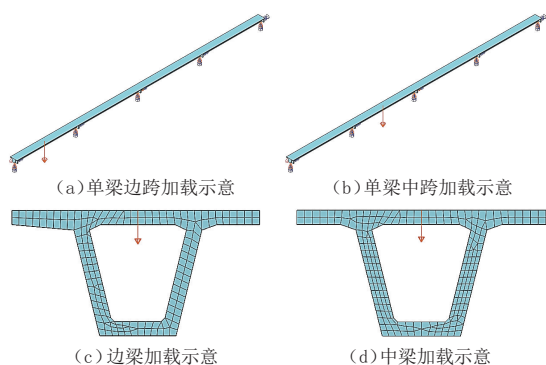


图3 支点腹板厚度取值范围

表2 支点腹板厚度引起的混凝土量变化

类型	单片梁混凝土方量/m ³		增幅
	支点腹板厚度 30 cm	支点腹板厚度 32 cm	
边跨边梁	38.00	38.17	0.45%
边跨中梁	35.50	35.67	0.49%
中跨边梁	37.51	37.68	0.44%
中跨中梁	35.04	35.21	0.47%

支点底板厚度存在差异,这是由于底板厚度受底板钢束线形、底板钢束张拉作业空间、底板预留纵向钢筋等多重因素影响,不同设计单位对此的处理方法并不相同,没有形成相对一致的设计理念,进而体现出参数取值的离散。参考支点腹板厚度的取值,支点底板厚度可以按照32 cm统一。

2 横隔板设置研究

小箱梁跨中横隔板的设置能增强多主梁结构的横向联系,减少单片梁承受的活载效应值,降低主梁之间的相对挠度,限制截面的扭转畸变,起到改善受力的效果^[14]。通常而言,35、40 m跨径的小箱梁活载效应更大,均设置跨中横隔板,25 m跨径的小箱梁活载效应小,不设置跨中横隔板。30 m跨径的小箱梁应用最广,横隔板的设置不仅影响结构受力,对于梁的预制、后期养护都有影响,各设计单位对于其是否设置横隔板也不完全统一,需要进一步研究。

针对双向4车道30 m跨径的小箱梁,通过有限元软件建立结构的实体有限元模型,比较结构取消跨中横隔板前后,小箱梁活载效应的变化情况。

首先分别建立单片边梁和单片中梁的有限元模型,边界条件按四跨连续梁考虑,在边跨和中跨的跨中位置各施加 $P=1$ 的集中荷载,得到各主梁各跨的跨中挠度值 V_1 。

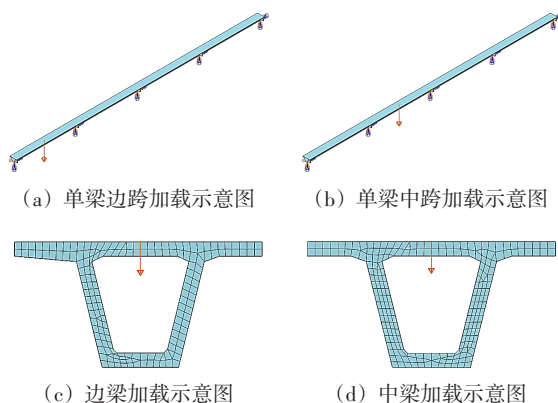


图4 单梁有限元模型计算示意图

建立小箱梁四跨一联有横隔板和无横隔板的全桥有限元模型,分别定义为模型①和模型②,边界条件按实桥模拟。通过《桥梁博士》横向分布系数计算软件可以得到,按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)进行车辆横向布置时,边梁在横向2车道时最不利,中梁在横向3车道时最不利,车道最不利位置均为车辆布置在最外侧。在此基础上,对模型①和模型②的各跨跨中最不利位置施加若干 $P=0.5$ 的集中荷载,得到各主梁各跨跨中挠度值 V_q 。

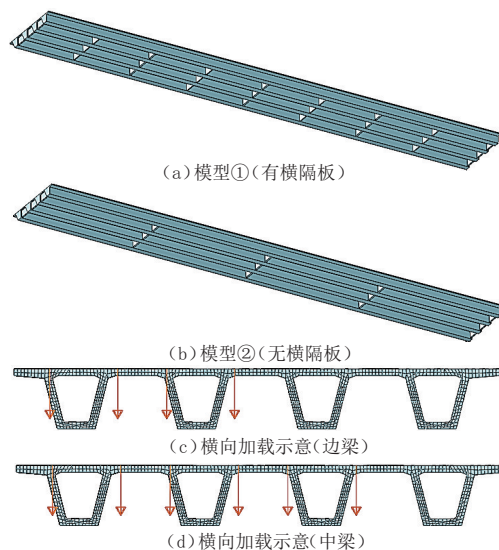


图5 全桥有限元模型计算示意图

根据《桥梁工程》关于荷载横向分布系数的概念^[15],本算例中各跨中截面荷载横向分布系数可表示为: $m=k \times V_q/V_1$,其中 k 为《公路桥涵设计通用规范》

(JTG D60—2015)中的横向车道布载系数。对应边跨边梁、边跨中梁、中跨边梁以及中跨中梁跨中截面的活载横向分布系数计算结果如表 3 所示。同时使用《桥梁博士》横向分布系数计算软件,采用铰接梁法得到相同位置的活载横向分布系数。另外,考虑简支与连续结构抗弯刚度的差异,根据《公路桥梁荷载横向分布计算方法》^[16]中的方法,对横向分布计算结果进行了修正。

表 3 30 m 活载横向分布系数计算结果

位置	活载横向分布系数计算结果			活载效应	总荷载效应 (活载占比 36%)
	模型① (有横隔板)	模型② (无横隔板)	③铰接梁法	②相比 ①增加	②相比 ①增加
边跨边梁	0.683	0.708	0.699	3.5%	1.3%
边跨中梁	0.624	0.652	0.645	4.4%	1.6%
中跨边梁	0.692	0.714	0.732	3.2%	1.2%
中跨中梁	0.629	0.658	0.658	4.6%	1.7%

从表中可以看出,对于 30 m 跨径的小箱梁,取消跨中横隔板的确会对活载效应产生影响,活载效应会增大 3%~5%,总的荷载效应会增大 1%~2%。采用传统横向分布系数的计算软件无法考虑横隔板的影响,铰接梁法的计算得到的活载效应,相比于有横隔板结构,增大 2%~6%,相比于无横隔板结构,小约 1%(中跨边梁除外)。对于取消跨中横隔板的小箱梁,采用铰接梁法计算小箱梁的活载横向分布系数,其精度与实体有限元的计算结果较为接近,可在设计中作为一种高效快速的计算方法。

对于取消跨中横隔板引起的主梁受力性能下降,可以通过增加少量纵向钢束进行弥补。同时,考虑到采用单梁法进行纵梁受力和设计时,铰接梁法无法模拟横隔板对横向分布系数的影响,因此结合上述实体有限元横向分布系数的计算结果,对单梁计算模型的跨中横向分布系数进行修正,考虑取消横隔板后的活载效应增幅。

如表 4 所示,增加钢束后,考虑按实体模型计算出的活载效应增大,30 m 跨径小箱梁单梁的承载能力甚至还略有提高,且少量钢束的成本要低于整道横隔板。纵然考虑取消横隔板引起的活载效应增幅,在实际结构设计采用铰接梁法计算,通过增加钢束适当调整,纵梁的承载能力依然具有保障。同时,30 m 跨径小箱梁用量最广,取消横隔板可以降低预

制阶段模板的复杂程度,更便于工厂化生产。综上所述,30 m 跨径小箱梁具备不设横隔板的条件。

表 4 考虑活载效应修正的单梁计算结果

30 m 跨径	承载力计算结果比较	
横隔板	有	无
边跨钢束	15-5/5/5/5	15-5/5/5/6
最大正弯矩/(kN·m)	10 703	11 028
最大正弯矩-抗力/(kN·m)	12 465	12 970
正弯矩承载能力富余	16.5%	17.6%

3 负弯矩槽口构造研究

负弯矩槽口主要为预应力筋的张拉和锚固提供操作空间,避免因空间不足导致的施工困难。小箱梁负弯矩槽口设置需考虑腹板间距、负弯矩钢束数量、负弯矩张拉作业空间、箱梁内部钢筋等一系列问题的影响。目前小箱梁负弯矩槽口形状矩形居多,而合理设置小箱梁负弯矩槽口,对提升结构性能、简化施工流程有重要意义,有必要对其进行优化研究。

以某省连续小箱梁通用图为例,如图 6 中负弯矩槽口处钢筋示意图所示,由于矩形槽口处箱梁顶板的纵向钢筋和腹板箍筋位于最外侧负弯矩钢束旁,外露在槽口内,容易与最外侧钢束的张拉作业发生冲突。实际施工中,为避免与张拉千斤顶冲突,上缘纵向钢筋通常需要现场折弯,这也增加了施工过程中的步骤。此外,矩形槽口模板通常为梳齿型,开口位置较多,施工过程中容易封堵不到位出现漏浆脱空等现象。部分施工过程中为寻求便利,将槽口侧面模板与腹板边缘对齐,则槽口尺寸空间进一步被压缩,减小了钢束张拉的空间,增大了施工难度。同时腹板箍筋与操作空间的冲突应尽量在设计阶段予以优化,负弯矩钢束间距和槽口宽度不宜过大,尽量增大最外侧钢束与腹板箍筋之间的距离。

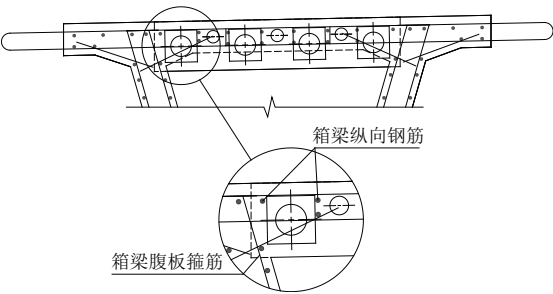


图 6 负弯矩矩形槽口处钢筋示意

负弯矩束数量和间距对于槽口的宽度起决定性因素,以某省小箱梁为例,25、30、35、40 m 小箱梁通用图负弯矩束的数量分别为 5、7、7、9 束,考虑钢束锚垫板间距、普通钢筋间距、张拉作业空间等因素,

钢束的布置间距一般不低于 150 mm,槽口轮廓至最外侧钢束距离为 150 mm,限制了槽口宽度的最小值 $150(n+1)$ mm,其中 n 为钢束数量,小箱梁各跨径槽口理论最小尺寸为 900~1 500 mm。通用图中小箱梁负弯矩钢束间距为 165~200 mm,槽口宽度取 1 100~1 620 mm,存在一定优化空间。

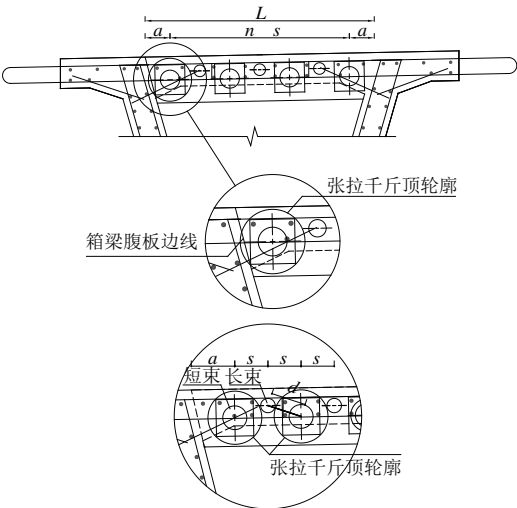


图7 优化后的负弯矩槽口处钢筋示意

基于该思路并结合施工单位反馈,可对负弯矩区短束的槽口尺寸进行调整,如图 7 所示,即槽口上宽不变、下宽收窄至与腹板内模同宽,槽深不变。其中 a 为最外侧钢束中心距槽口上边缘的距离,为满足千斤顶一次张拉的施工空间,即张拉千斤顶轮廓边缘与槽口边缘(箱梁腹板)存在间隙,根据锚具手册数据可知,小箱梁顶板束千斤顶外轮廓直径为 260 mm,若满足间隙要求,结合腹板斜率,则 a 应不小于 170 mm。此外,为满足短束张拉时不影响长束,长束与短束之间的中心间距 d 应不小于 160 mm,则对应的水平间距 s 应大于 153 mm。综合上述分析,各跨径小箱梁负弯矩槽口尺寸可优化如表 5 所示。

表 5 小箱梁短束槽口优化后的尺寸表					单位:cm
跨径	25 m	30 m	35 m	40 m	限值
边距 a	18	21	21	19	≥ 17
钢束间距 s	17	16	18	15.5	> 15.3
槽口宽度 L	138	138	150	162	—

从表 5 中可以看出,优化后的负弯矩区槽口,在满足负弯矩束分布的同时,也便于现场一次张拉和后浇混凝土施工,优化后的小箱梁在预制中也更符合工业化建造需求。

4 结构优化的经济性研究

根据前文第 1、2 节有关小箱梁构造优化的内

容,小箱梁优化后结构的典型尺寸表 6 所示。

表 6 结构优化后的小箱梁尺寸表					单位:cm
跨径	25 m	30 m	35 m	40 m	
梁高	1.4	1.6	1.8	2	
顶板厚			18		
跨中底板厚			18		
支点底板厚			32		
跨中腹板厚			20		
支点腹板厚			32		
变厚度段长度	200	300	350	400	
跨中横隔板	无	无	有	有	

为考量小箱梁结构优化前后引起的经济性变化,选择某省连续小箱梁通用图,以双向 6 车道为例,结合已建成项目实际工程材料用量和工程造价,对四跨一联的 25、30、35、40m 跨径的连续小箱梁开展经济性分析,比较优化前后小箱梁上部结构的综合单价,如图 8 所示。

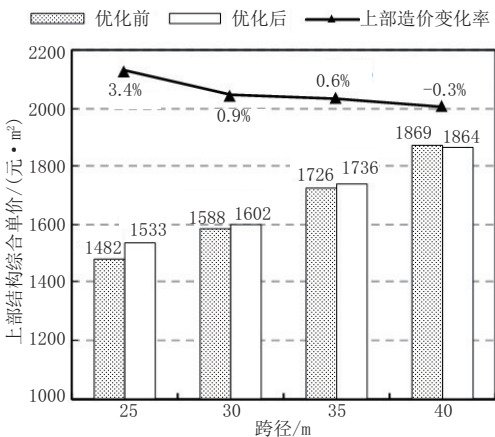


图8 优化前后小箱梁上部结构综合单价

从图中可以看出,25、30 m 上部结构的综合单价分别上升了 3.4% 和 0.9%,其他跨径综合单价增幅都基本与优化前持平。结合既往已建项目造价清单,通常小箱梁上部结构造价占桥梁整体造价比例的 30%~40%,对于用量最多的 30 m 跨径,优化后小箱梁增加的造价也仅在 1% 左右。

从集中预制和产业化发展角度,考虑模板、设备、场地等摊销,小箱梁造价节省幅度将远高于 1%^[17],也进一步表明优化后的小箱梁结构采用集中预制的方案更为集约、可行。

5 结 论

从集中预制、工厂化生产为出发点,采取大量数据调研、数值分析等手段,对小箱梁的结构尺寸、典型构造、经济性能进行了系统研究,得出了以下结论。

(1)为便于统一生产,小箱梁结构尺寸优化的重点为跨中腹板厚度、支点腹板厚度、支点底板厚度。跨中腹板厚度取 20 cm 要优于 18 cm,支点处腹板和底板厚度应考虑局部承压和作业空间的影响,取 32 cm 可以较好地适应可能采用的不同钢束型号。

(2)30 m 跨径小箱梁,跨中不设置横隔板,通过增加少量纵向钢束来补强主梁受力性能,可以减少预制过程的复杂程度,造价更低,可作为一种集中预制和工厂化生产的方案。

(3)小箱梁负弯矩区短束的矩形槽口优化为梯形,控制外侧钢束边距 ≥ 17 cm,钢束间距 > 15.3 cm,可满足负弯矩束一次张拉空间,更便于工厂集中预制及现场施工。

(4)小箱梁尺寸和构造优化后的造价增加幅度在 1% 左右,且增加的成本完全可以被集中预制所节约的成本抵消。采用优化后的小箱梁结构投入集中预制生产是更具性价比的方案。

参考文献:

[1] 张义文.公路梁板集中预制“工厂化”施工综合技术总结[J].四川建筑,2014,34(1):171-173.
[2] 谢道权.浅析小型构件集中预制施工新工艺及管理应用实践[J].黑龙江交通科技,2021,44(12):158-159.
[3] 来猛刚,杨敏,翟敏刚,等.桥梁工业化智能建造[J].公路,2021,66

(7):195-202.
[4] 孙策.城市桥梁预制装配化绿色建造技术应用与发展[J].世界桥梁,2021,49(1):39-44.
[5] 曹妍,王芮文,谢国春,等.集中预制箱梁智能数控装配线施工工法[J].黑龙江交通科技,2023,46(2):92-94.
[6] 梁伟.高速公路集中预制梁场砼智能养护系统设计与应用[J].公路与汽运,2021(4):180-182.
[7] 杨文武,蔡俊懿,柳欣荣,等.预制装配化桥梁技术发展及应用[J].广东公路交通,2019,45(5):67-73.
[8] 王玉,凤懋润,鲍卫刚.公路桥梁结构标准化技术的发展与应用[J].公路,2009(11):1-5.
[9] 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.
[10] 李攀.基于有限元模型的箱梁腹板顺管道裂缝分析[J].城市建筑,2021,18(21):153-156.
[11] 闫杰森,吴荣国.预应力混凝土箱梁桥开裂影响因素分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(5):78-81;86.
[12] 刘义,欧立新,陈柯儿.预制小箱梁腹板分布筋外置对结构安全性的影响研究[J].建筑机械,2025(4):331-336.
[13] 胡红梅,姜铮,邓如意.预制小箱梁施工工艺及质量控制研究[J].工程建设与设计,2023(13):241-243.
[14] 赵巧燕.预制拼装小箱梁结构横隔板设置的影响分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(6):230-232.
[15] 姚玲森.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2008.
[16] 贺栓海,谢仁物.公路桥梁荷载横向分布计算方法[M].北京:人民交通出版社,1996.
[17] 聂海岩,张秀英.山岭重丘区高等级公路空心板梁集中预制利弊分析[J].石家庄铁道学院学报,2005(增刊1):86-88.

(上接第 45 页)

635:131189.
[16] Baek S-S, Choi D-H, Jung J-W, et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling Approach[J]. Water Research, 2015, 86: 122-131.
[17] Martin-Mikle C J, De Beurs K M, Julian J P, et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use Watershed[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 140: 29-41.
[18] Sharma A, Poonia M, Rai A, et al. Impact of land use and rainfall change on runoff and flood resilience of an urban environment: A case study of Chennai City, India[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2024, 17(7).
[19] Cheng X, Wang H, Chen B, et al. Comparative Analysis of Flood Prevention and Control at LID Facilities with Runoff and Flooding as Control Objectives Based on InfoWorks ICM[J]. Water, 2024, 16(3): 374.
[20] Shikaf Ali S M, Rehana S, et al. Application of SWMM for Urban Storm Water Management: A Case Study of Hyderabad City[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Advancements in

Engineering Education, 2024.
[21] Hongyuan H. Progress in Research and Development of Storm Water Management Model: Applications from China and Abroad[J]. Advances in Research, 2025, 26(4): 503-511.
[22] Qin F, Huang L, Qi X, et al. Optimal LID Designs Based on SWMM Simulations Regarding the Sustainable Efficacy of Stormwater Management in Port Areas[J]. Sustainability, 2025, 17(6): 2544.
[23] Pan Y, Li X. Optimization Study of Drainage Network Systems Based on the SWMM for the Wujin District, Changzhou City, Jiangsu Province, China[J]. Applied Sciences, 2025, 15(3): 1276.
[24] Wang Y. Comparative Analysis of Sponge City Drainage System Schemes Based on SWMM[J]. Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection, 2024, 1(9).
[25] 李欢,杜成银,梁梅,等.基于全生命周期的市政道路 LID 设施低碳布置研究[J].中国给水排水,2024,40(21):121-128.
[26] 何旻,程麒麟,苏义鸿,等.基于参数全局敏感性分析的 LID 设施空间布局优化研究[J].水资源保护,2025,41(3):194-203.
[27] 刘大为,李红艳,张峰,等.基于多目标算法的 LID 设施布局优选[J].水电能源科学,2025,43(1):1-5;14.