

小半径节段拼装箱梁预应力效应研究

杜 霄

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 依托深圳新城立交工程,以跨径 3×32.5 m、宽9 m的匝道桥节段梁为例,建立了空间杆系及实体有限元模型,对小半径节段箱梁的预应力效应进行了研究。分析了在小半径节段箱梁中,钢束对主梁的有效内力和次内力随曲线半径的变化规律、不同钢束类型和钢束位置对主梁次内力的影响及体外束对主梁顶底板、转向块和限位块局部应力的影响,并结合分析结果提出了关于小半径节段箱梁钢束合理布置的方案建议。

关键词: 小半径节段拼装箱梁;曲线半径;预应力效应;次内力;横向应力

中图分类号: U441+.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0156-05

Research on Prestressing Effect of Small-radius Segmental Assembled Box Girder

DU Xiao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Relying on the Shenzhen Xincheng Interchange Project, taking its ramp bridge segmental beam with 3×32.5 m span and 9 m width as an example, the spatial rod system and solid finite element model is established to study the prestressing effect of small-radius segmental box girder. In the small-radius segmented box girder, the variation laws of the effective internal force and secondary internal force of the steel bundle on the girder with the radius of the curve, the influence of different types and positions of the steel bundle on the secondary internal force of the girder, and the influence of the external bundle on the local stress of the top and bottom plates, the steering block and the limit block of the girder are analyzed. And combined with the analysis result, the suggestions on the reasonable layout scheme of steel bundles for small-radius segmental box girders are put forward.

Keywords: small-radius segmental assembled box girder; curve radius; prestressing effect; secondary internal force; transverse stress

0 引言

全预制拼装桥梁具有绿色环保、对环境和交通的影响小、运输方便、施工快速等诸多优点,因而在城市桥梁建设中的运用得到了迅速发展^[1]。目前,全预制拼装桥梁主要运用于等宽、直线段或大半径段的主线桥梁,而在立交桥梁尤其是小半径匝道桥中运用较少。新城立交作为深圳市首座大规模采用预制装配技术的立交桥梁,在小半径曲线匝道桥上应用了混凝土节段梁,其最小平曲线半径为150 m,并研制了专用节段梁架桥机进行架设,是节段梁在设计 and 施工技术上的重大突破,扩展了节段梁的应用范围。

与直线桥相比,小半径节段箱梁的受力特点是具有明显的弯扭耦合效应^[2],而除了恒载和活载的影响外,预应力作用的弯扭耦合效应也十分明显。但目前针对小半径节段箱梁预应力效应的相关研究较少,且通常参照直线桥设计,只考虑了预应力体系对主梁产生的竖向弯矩作用,忽略了其扭矩和横向弯矩的作用。

有鉴于此,本文依托新城立交工程,对小半径节段箱梁的预应力效应进行了全面研究,以主梁曲线半径、钢束类型和钢束位置为参数,分析小半径节段箱梁中主梁的预应力效应。

1 小半径节段箱梁受力特点

曲线半径和圆心角是影响小半径节段梁结构受力的主要因素,为了明确小半径节段梁预应力效应与曲线半径的关系,对不同曲线半径的节段梁受力

收稿日期: 2024-04-23

作者简介: 杜霄(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

进行受力分析。

以新城立交跨径3×32.5 m、宽9 m的匝道桥节段梁为例,建立曲线半径50~500 m的单梁有限元模型。在结构跨径、构造尺寸和钢束配置均相同的情况下,不同曲线半径节段梁在钢束作用下主梁各项内力的最大值如图1、图2所示。

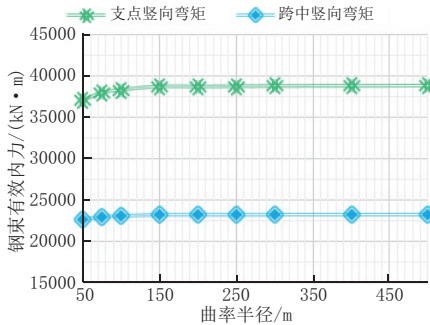


图1 不同曲线半径节段梁钢束有效内力图

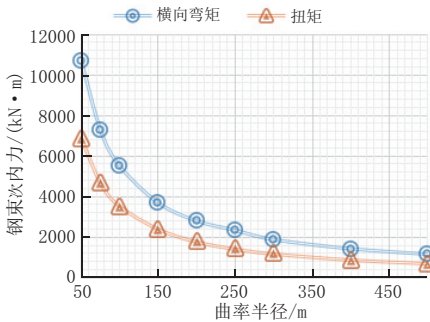


图2 不同曲线半径节段梁钢束次内力图

由图1、图2可知:(1)在钢束作用下,主梁除了会产生竖向弯矩外,还会产生横向弯矩和扭矩等次内力;(2)主梁的横向弯矩和扭矩随着曲线半径减小均呈增大趋势,增速与曲线半径成非线性关系,曲线半径越小增速越快;(3)当曲线半径从50 m增大到250 m以上时,横向弯矩和扭矩数值减少约80%;(4)竖向弯矩受曲线半径的影响较小,当半径小于100 m时,才有小幅减少。

综上所述,节段梁的曲线半径越小,钢束产生的横向弯矩和扭矩等次内力效应越明显。当曲线半径小于250 m时,在受力分析中应考虑此效应的影响;当曲线半径大于250 m时可忽略此效应,按直线节段梁设计考虑。此外,当曲线半径小于100 m时,还需考虑对钢束产生的竖向弯矩等有效内力会进行一定程度的折减。

2 预应力钢束对节段梁内力影响

2.1 概述

预制节段拼装桥梁的纵向预应力有全体内束、体内体外混合配束和全体外束三种配置方式。体内

预应力与体外预应力在实际工程中均有应用,它们在主梁内的布置形式不同,对主梁的预应力效应也有所差异。为研究钢束类型和钢束位置对主梁内力的影响,对于顺桥向的各关键截面,我们用单位体积后张束产生的作用效应来反映钢束次内力的大小,定义如式(1)所示。

$$Q_T = T/V, Q_M = M/V \tag{1}$$

式中: T 为截面扭矩,kN·m; M 为截面横向弯矩,kN·m; V 为钢束体积,m³。

在上述评价指标中,参数 Q_T 或 Q_M 越低,表示该类型的钢束对主梁产生的次内力越小,更适合作为小半径节段箱梁的后张拉钢束。

本节以新城立交桥宽10 m、跨径为3×32.5 m的匝道桥节段梁为例,建立曲线半径 $R=100$ m的弯梁模型进行分析。

2.2 钢束类型影响分析

为了研究钢束类型对主梁受力的影响,保持钢束横向位置不变,分别研究顶板体内束、底板体内束和体外束对主梁产生的次内力效应。

体内束采用 $\phi^{15.2-15}$ 规格,张拉应力为1 395 MPa。顶板体内束在墩顶负弯矩区布置,T1为墩顶局部顶板短束,T2为通过两个墩顶的通长顶板束;底板体内束在跨中正弯矩区布置,D1为跨中局部底板短束,D2为通过两个墩顶的通长底板束。

体外束采用 $\phi^{15.2-27}$ 规格,张拉应力为1 209 MPa,W1均按照单跨体外束布置。

各钢束的纵向布置如图3所示。

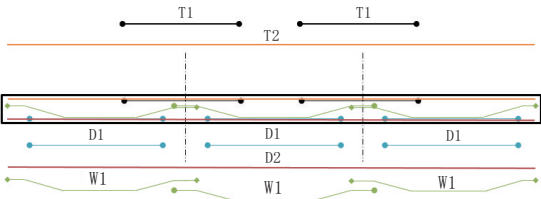


图3 各类型钢束布置示意图

各类型钢束对主梁产生的扭矩和横向弯矩对比如图4、图5所示。

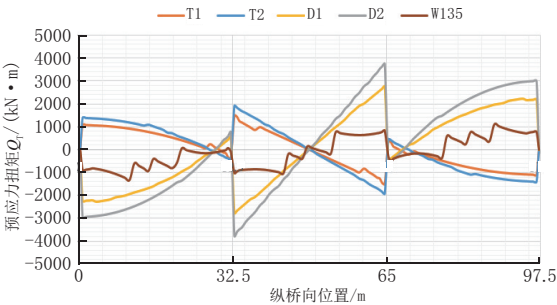


图4 单位体积钢束对主梁扭矩分布图

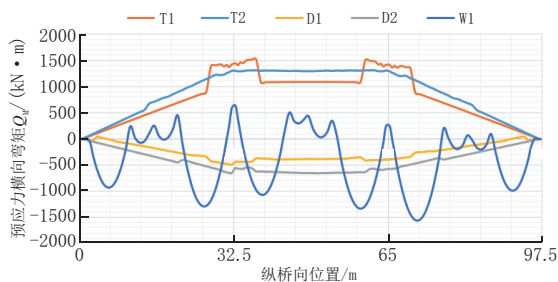


图5 单位体积钢束对主梁横向弯矩分布图

由图4可知:(1)底板束D1、D2和体外束W1使主梁产生的扭矩方向相同,顶板束T1、T2使主梁产生的扭矩方向与之相反;(2)单位体积钢束引起的扭矩值, $Q_T(\text{底板束}) \approx 2 Q_T(\text{顶板束}) > Q_T(\text{体外束})$;(3)对顶底板束, $Q_T(D2) > Q_T(D1)$, $Q_T(T2) > Q_T(T1)$,即通长束产生的扭矩大于短束;(4)扭矩沿纵桥向的分布规律为——顶底板束产生的扭矩,在边跨上的最大值位于边支点附近,并朝中支点方向递减,中跨上的扭矩最大值均位于中支点附近,跨中扭矩近乎为零;体外束产生的扭矩,在边跨和中跨上的最大值均位于支点和转向块附近。

综上所述,通长布置的体内束导致主梁支点附近产生的扭矩最大,顶底板束产生的扭矩方向相反,单位体积中底板束产生的扭矩约为顶板束的2倍。因此,在主梁所需配束数量一定的情况下,为尽可能减小主梁的扭矩,宜优先采用体内短束或体外束,且顶板束和底板束的数量宜按照2:1的比例设置。

由图5可知:(1)底板束D1、D2和顶板束T1、T2使主梁产生的横向弯矩方向相反,体外束W1使主梁产生的横向弯矩方向在钢束转向处不断交替;(2)单位体积钢束引起的横向弯矩值, $Q_M(\text{顶板束}) \approx Q_M(\text{体外束}) \approx 2 Q_M(\text{底板束})$;(3)对顶底板束, $Q_M(D2) > Q_M(D1)$,中墩附近 $Q_M(T1) > Q_M(T2)$,其余位置 $Q_M(T1) < Q_M(T2)$;(4)横向弯矩沿纵桥向分布规律为——顶底板束产生的横向弯矩,最大值位于中支点及中跨跨中位置,并朝边跨递减至零;体外束产生的横向弯矩,沿着纵桥向不断波动,最大正弯矩在跨中和中支点附近,最大负弯矩在转向块附近。

综上所述,顶板束和体外束导致主梁支点附近和中跨产生的横向弯矩最大,顶底板束产生的横向弯矩方向相反,单位体积顶板束和体外束产生的横向弯矩约为底板束的2倍。因此,在主梁所需配束数量一定的情况下,为尽可能减小主梁的横向弯矩,宜优先采用底板束,且顶板束和底板束的数量宜按照1:2的比例设置。

2.3 钢束位置影响分析

不同类型钢束在主梁内的布置形式和位置有所区别。体内束布置在节段梁顶底板中,通过的主梁节段较多,其位置对大部分节段品种划分均有影响。同一工程中直线桥和弯桥宜共用节段,尽量减少节段品种,因此体内束在横断面的位置通常采用对称布置。体外束布置在梁内空腔中,其位置只对横梁、转向块、限位块等少数节段品种划分有影响。因此体外束在横断面的位置可按需采用对称或非对称布置。

2.3.1 体内束的横向位置影响

为了研究体内束位置对主梁受力的影响,保持两侧钢束横向对称布置,以钢束距离结构中心线横向距离 D 为变量进行参数分析,分别研究顶板体内束、底板体内束对主梁产生的次内力效应,如图6所示。

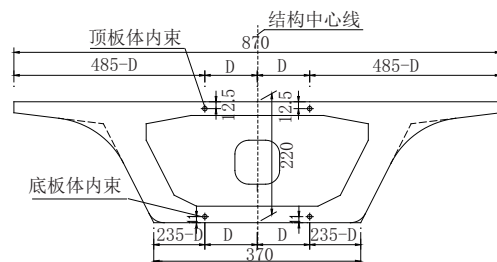


图6 体内束横向布置图(单位:cm)

不同横向位置的顶底板钢束对主梁产生的扭矩和横向弯矩对比图如图7、图8所示。

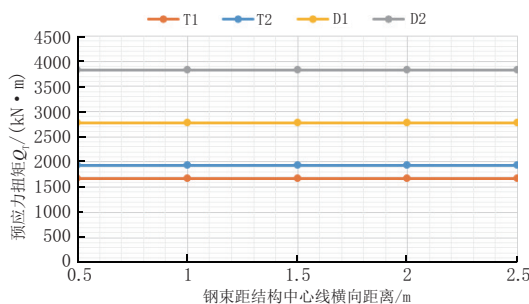


图7 不同体内束位置主梁扭矩最大值

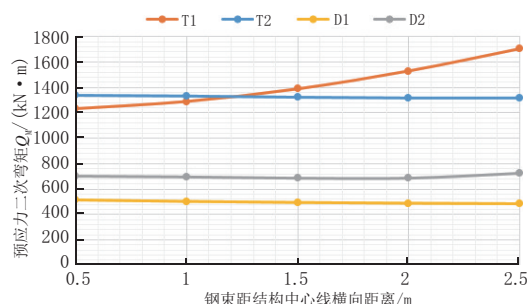


图8 不同体内束位置主梁横向弯矩最大值

由图7可知,顶底板钢束距结构中心线横向距离从0.5 m变化至2.5 m,主梁扭矩 Q_T 最大值基本不变

化,说明在体内束对称布置时,其横向位置对于主梁扭矩分布影响较小。

由图 8 可知,除顶板墩顶短束 $Q_M(T1)$ 会随钢束横向位置变化外,其他钢束的横向位置对 Q_M 基本无影响。顶板束 T1 距结构中心线的横向距离从 0.5 m 变化至 2.5 m,主梁横向弯矩最大值 Q_M 增加了 38.2%。

综上所述,为优化主梁受力,减小钢束次内力,顶板短束宜尽量靠近结构中心线布置,其余体内束横向位置对主梁次内力的影响较小,可在有效分布宽度内按需布置。

2.3.2 体外束的竖向位置影响

钢束横向不对称布置时对主梁扭矩影响较小,但会显著增加横向弯矩^[3],此处主要分析主梁体外束竖弯程度不同的主梁受力。保持主梁两侧体外束横向对称布置,减小曲线外侧体外束在跨中的竖弯程度,以外侧钢束相对内侧钢束竖弯上升的距离 D 为变量进行参数分析,研究体外束的竖向位置对主梁产生的次内力效应,如图 9 所示。

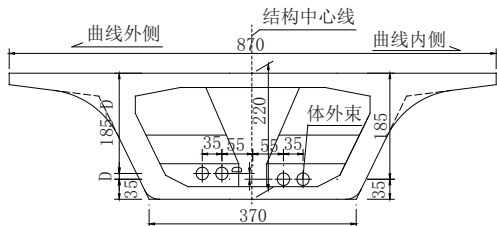


图 9 体外束竖向布置图(单位:cm)

不同竖向位置的体外束对主梁产生的竖向弯矩、扭矩、横向弯矩对比如图 10 所示。

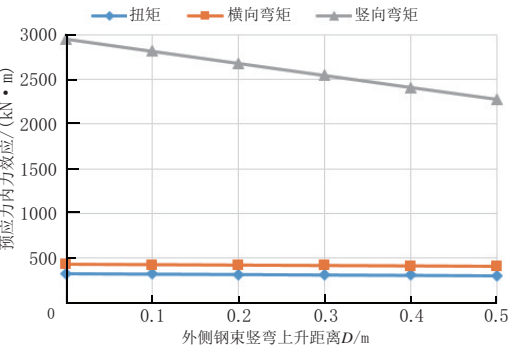


图 10 不同体外束位置主梁内力最大值

从图 10 可知,曲线外侧体外束的竖弯上升距离从 0 m 变化至 0.5 m,主梁扭矩和横向弯矩最大值基本无变化,而竖向弯矩减小了 23% 左右。说明体外束竖弯非对称布置对主梁扭矩和横向弯矩等次内力影响较小,但会使有效内力显著减少。

综上所述,体外束的横向位置和竖向位置对主梁次内力影响较小,在满足锚固和转向空间需求的

情况下宜对称布置。

3 预应力钢束对节段梁应力影响

3.1 模型概述

由上文分析可知,小半径节段梁中体外束会使主梁产生扭矩和横向弯矩等次内力,而转向块、限位块是主梁上除锚固横梁外与体外束唯一有联系的构件,钢束在跨中位置对主梁的各种作用力均通过转向块和限位块进行传递,其上的应力分布较为集中。

为了精确模拟小半径节段梁中体外束对主梁应力影响,对曲线半径 $R=100\text{ m}$ 的节段梁采用 MIDAS FEA 有限元软件建立全桥实体模型,主梁采用六面体单元模拟,沿着主梁轴线的法线和切线方向施加约束,同时建立相同构造的直线桥模型进行对比,如图 11 所示。

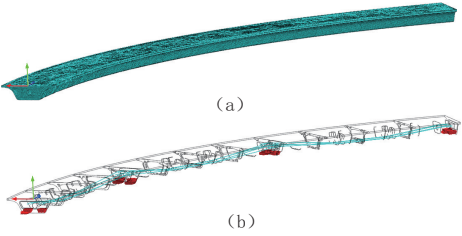


图 11 $R=100\text{ m}$ 节段梁实体单元模型

3.2 顶底板应力

体外束对主梁顶底板产生的横向应力如图 12 至图 15 所示,图中应力尺为 0~2.0 MPa。

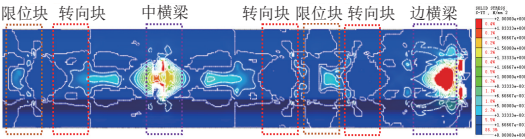


图 12 直线桥 1/2 底板横向应力图(单位:MPa)

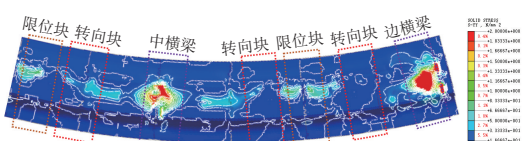


图 13 小半径曲线桥 1/2 底板横向应力图(单位:MPa)

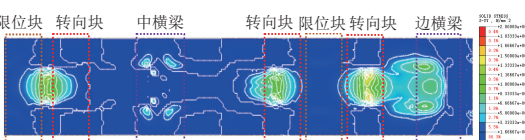


图 14 直线桥 1/2 顶板横向应力图(单位:MPa)

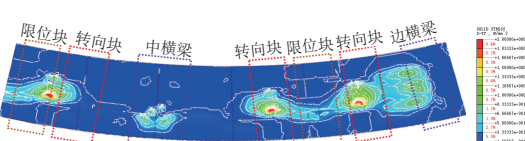


图 15 小半径曲线桥 1/2 顶板横向应力图(单位:MPa)

由图 12 至图 15 可知,体外束对主梁顶底板产生的横向拉应力主要集中在横梁锚固区、转向块和限

位块等区域。在直线桥中,横向应力相对结构中心线呈对称分布,限位块处底板产生约0.4 MPa拉应力,转向块处顶板产生约1.5 MPa拉应力。在小半径曲线桥中,横向应力相对结构中心线呈非对称分布,应力相比直线桥整体呈增大趋势:限位块靠近曲线内侧处底板拉应力加大为0.9 MPa,转向块靠近曲线外侧处顶板拉应力加大为2.2 MPa。

综上所述,相比直线桥,小半径曲线梁中的体外束会使转向块、限位块等位置的顶底板横向拉应力加大约0.5~0.7 MPa,应加强这些区域的局部配筋,以防止开裂。

3.3 转向块、限位块应力

体外束对主梁转向块和限位块产生的横向应力如图16所示,图中应力标尺为0~2.0 MPa。

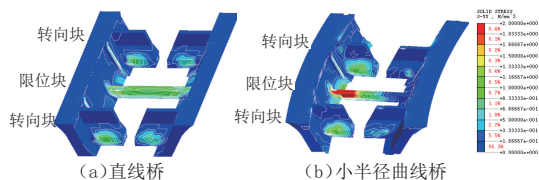


图16 转向块、限位块横向应力图(单位:MPa)

由图16可知,体外束对主梁转向块和限位块产生的横向拉应力主要集中在体外束转向器附近区域。在直线桥中,横向应力相对结构中心线呈对称分布,限位块产生约0.8 MPa拉应力,转向块产生约1.0 MPa拉应力。在小半径曲线桥中,靠近曲线外侧的横向应力相对曲线内侧更大,应力相比于直线桥整体呈增大趋势:限位块靠近曲线外侧处的拉应力增大为2.8 MPa,转向块靠近曲线外侧处的拉应力增大为1.5 MPa。

综上所述,相比直线桥,小半径曲线梁中的体外

束会使转向块、限位块局部横向拉应力增大约0.5~2.0 MPa,应加强这些区域的局部配筋,以防止开裂。

4 结 语

本文依托深圳新城立交项目,以跨径3×32.5 m、宽9 m的匝道桥节段梁为例,对小半径节段箱梁的预应力效应进行了一系列分析研究。主要研究成果如下所列。

(1)钢束预应力会使主梁产生扭矩和横向弯矩等次内力,且曲线半径越小次内力越大。

(2)通长布置的体内束导致主梁支点附近产生的扭矩最大,顶板束和体外束导致主梁支点附近和中跨产生的横向弯矩最大;顶底板束产生的次内力方向相反互相抵消,配置体内束时应优先配置短束,且应均衡配置顶底板束以减少次内力。

(3)顶板短束宜靠近结构中心线布置,以减小横向弯矩,其余体内束横向位置对主梁的次内力影响较小。

(4)体外束位置对主梁次内力的影响较小,在满足锚固和转向空间需求的情况下,宜对称布置。

(5)体外束会使转向块、限位块处的横向拉应力加大,应加强这些区域的局部配筋防止开裂。

参考文献:

- [1] 周良,闫兴非,李雪峰.桥梁全预制拼装技术的探索与实践[J].预应力技术,2014(6):15-17.
- [2] 闫兴非,李群峰,周良,等.曲线梁桥预应力作用效应分析[J].结构工程师,2021,37(3):1-10.
- [3] 滕小竹.小半径PC曲线梁桥预应力效应研究[J].上海公路,2023(1):49-58;181.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

