

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.04.029

# 城市有轨电车双线 U 型梁的应用与分析

刘瑜

[上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065]

**摘要:**以某一城市有轨电车工程为背景,采用双线预应力混凝土 U 梁和双线钢-混凝土组合 U 梁 2 种方案进行结构设计,并对 2 种结构形式进行有限元建模分析。在此基础上,探讨双线 U 梁在有轨电车高架桥中的适用性。所得结论可为类似工程提供一定的指导作用。

**关键词:**有轨电车高架桥;预应力混凝土 U 梁;钢-混凝土组合 U 梁;有限元分析

中图分类号:U443.35

文献标志码:A

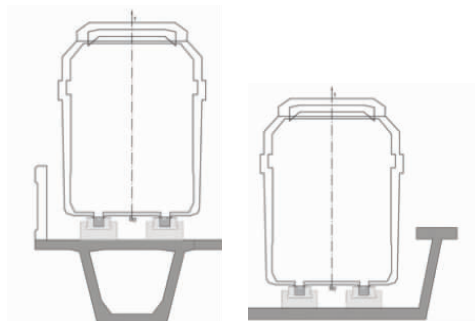
文章编号:1009-7716(2023)04-0106-05

## 0 引言

近年来随着轨道交通发展日益成熟,其在城市高架中的应用也越发普及。常规城市高架桥梁的结构形式主要有箱梁、T 梁、板梁等,此类结构均为传统上承式主梁。相对于常规城市高架桥,轨道交通桥梁的竖向刚度、整体景观和环保要求更高。轨道交通高架桥采用传统上承式主梁时,将导致整体建筑标高较大,给人较强的压迫感;其次对周边环境也会产生较大的噪音污染。针对这些问题,国外于 20 世纪初开始对轨道交通桥梁的适用结构形式进行研究,最初由法国索菲图公司提出槽型梁,并首次应用于英国罗什尔汉桥,此后在国外开始推广应用。

我国于 20 世纪 70 年代末开始研究槽型梁(U 梁)结构,随着城市轨道的发展,现已对 U 梁结构作了大量研究<sup>[1-3]</sup>。黄侨等<sup>[4]</sup>总结了在传统厚底板 U 梁的基础上发展改进的预应力混凝土 U 梁截面,以降低道床底板的厚度,减小自重,优化底板纵横向预应力的设计和布置,降低施工难度。聂建国等<sup>[5]</sup>提出在轨道交通桥梁中采用钢-混凝土组合 U 梁结构,以简化预应力设计和施工;吴丽丽等<sup>[6]</sup>通过钢-混凝土组合 U 梁的缩尺比例试验,进一步论证了钢-混凝土组合 U 梁的可行性。U 梁结构相对常规上承式主梁结构(见图 1)具有显著的优势:(1)半穿式结构可大大降低轨面标高,缩短桥梁总长,减小视觉压迫感;(2)U 梁两侧腹板不仅作为结构受力的重要组成部分,还起到防撞和降噪功能;(3)U 梁腹板内侧空

间易于布置各类轨道交通电力设备,截面空间利用率高。基于这些优点可知,U 梁结构是非常适用于城市轨道交通高架的一种结构形式。



(a)U 型梁结构 (b)传统上承式主梁

图 1 U 梁与传统上承式主梁结构形式对比

根据已有研究可知,不同于常规上承式主梁等结构,U 梁底板直接承受荷载作用,在底板横向宽度较大时,底板同时发生纵向弯曲和横向弯曲,受力较为不利,因此底板也是结构分析的关键部位,应对其受力进行重点分析。本文基于某一有轨电车改造工程项目,探讨双线 U 梁结构在城市轨道交通高架桥中的应用。

## 1 工程概况

本次有轨电车改造工程贯穿城市中心区域。由于部分路段上的有轨电车与现状地面交通交织范围较大,为使得有轨电车与地面交通分离,提高有轨电车的运行速度,充分发挥有轨电车交通的优越性,在部分地段新建有轨电车高架桥梁。结合城市高架桥梁的设计和工程建设经验,桥梁标准跨径采用简支 30 m 跨径。本工程中有轨电车采用上下行双线布置,直线段标准线距为 3.8 m,标准轨距为 1 435 mm。

收稿日期:2022-08-31

作者简介:刘瑜(1987—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

## 2 总体布置方案

根据轨道总体设计,本次有轨电车为上下行双线布置,桥梁结构可采用分离式单线U梁和整体式双线U梁。

### 2.1 单线U型梁

分离式单线U梁即为单线单梁的结构形式(见图2)。由于单片梁的横向宽度较小,桥梁底部可不设置横向预应力体系,仅为纵向预应力布置形式。这种方案对结构受力性能和现场施工均较为适宜,故在城市轨道桥梁中应用较为普遍,如广州地铁2号线、上海8号线、南京地铁2号线东延、重庆地铁1号线等均有应用。

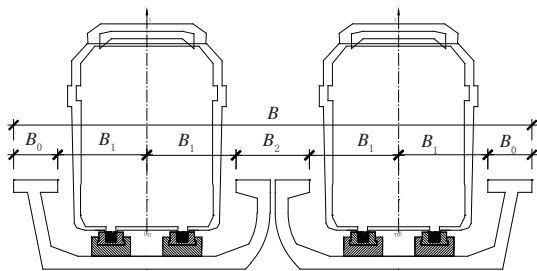


图2 分离式单线U梁

### 2.2 双线U型梁

整体式双线U梁即为双线单梁的结构形式(见图3)。由于底板横向宽度较大,结构受力方向除纵向外,横向也产生显著的应力,因此在纵向和横向均需设置预应力。本文采用改进后的U型截面,即在道床板下每隔一定间距设置横梁,从而减小U梁底板厚度。双线简支U梁在结构设计和施工上均较为复杂,其应用案例较单线U梁少。刘建萍<sup>[7]</sup>在上海地铁6号线工程的设计中采用双线U梁结构,文志云等<sup>[8]</sup>基于同一工程对双线U梁结构的应力和位移进行试验研究,验证了双线U梁结构在实际工程中的可行性和合理性。

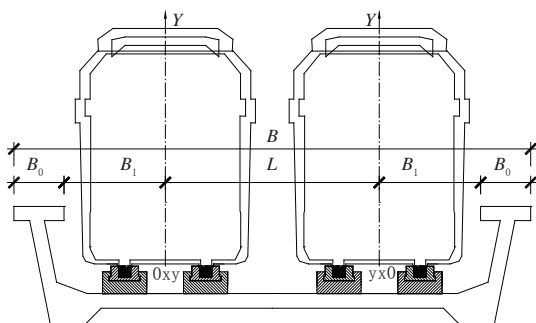


图3 整体式双线U梁

### 2.3 总体方案比选

本工程为基于城市中心现状道路的有轨电车改造工程,有轨电车高架桥应尽量减小占地宽度。根据

轨道总体设计要求,上下行标准线距 $L$ 为3.8 m。为满足有轨电车运行安全,线路中心线距离结构边 $B_1$ 不小于1.7 m,如采用分离式单线U梁结构,中间两侧上翼缘总宽 $B_2 \leq L - 2B_1 = 0.4$  m。结合已有研究<sup>[9-10]</sup>,单线方案的中间两侧翼缘总宽 $B_2$ 取值基本在1.6 m左右,故单线U梁不适用本次总体设计要求。本次桥梁总体方案采用整体式双线U梁设计。

## 3 双线U梁设计

双线U梁不及单线U梁的应用范围广,现有研究和案例较少,本次结构形式可采用优化后的预应力混凝土梁和钢-混凝土组合梁2种双线U梁结构进行设计和有限元分析。

### 3.1 预应力混凝土U梁

预应力混凝土U梁(见图4)的底板总宽 $B_0 = 8\ 300$  mm,厚度 $t_b = 250$  mm;上翼缘宽度 $b_f = 1\ 200$  mm,厚度 $t_f = 400$  mm;腹板斜率为6:1,高度 $h_w = 1\ 300$  mm,厚度 $t_w = 400$  mm。底板和腹板之间的加腋尺寸 $l_h = 867$  mm, $l_v = 200$  mm。两侧混凝土纵肋 $1\ 000$  mm ×  $550$  mm,纵肋间设置标准间距3.6 m的混凝土横梁,端横梁宽1.3 m,中横梁宽0.6 m,横梁与纵肋等高。

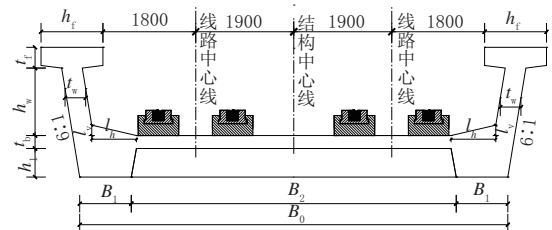


图4 预应力混凝土U梁(单位:mm)

双线预应力混凝土U梁采用纵横向预应力体系,道床底板钢束采用 $5\phi 15.24$ ,纵梁钢束采用 $12\phi 15.24$ ,横梁钢束采用 $7\phi 15.24$ 。

### 3.2 钢-混凝土组合U梁

钢-混凝土组合U梁(见图5)的底板总宽 $B_0 = 8\ 000$  mm,厚度 $t_b = 200$  mm;上翼缘宽度 $b_f = 1\ 200$  mm,厚度 $t_f = 250$  mm;腹板斜率为6:1,高度 $h_w = 1\ 750$  mm,厚度 $t_w = 200$  mm。底板和腹板之间的加腋尺寸 $l_h = 733$  mm, $l_v = 300$  mm。两侧混凝土纵肋 $600$  mm ×  $300$  mm。

双线钢-混凝土组合U梁采用 $\phi 15.24$ 纵向预应力钢束,纵向钢束均匀满布于混凝土底板上,在纵肋位置局部增加。

钢-混凝土组合U梁不同于常规组合梁,钢结构采用槽型截面,除钢翼缘板与其上部混凝土组合外,钢腹板和钢底板外包内侧混凝土,通过抗剪连接

件形成整体。钢结构顶板厚 30 mm,腹板厚 16 mm,底板厚 20 mm。钢底板下每隔 3 m 设置 1 道钢横梁,采用 U 形截面,与混凝土纵肋等高。钢横梁腹板厚 16 mm,底板宽 400 mm,厚度 20 mm。

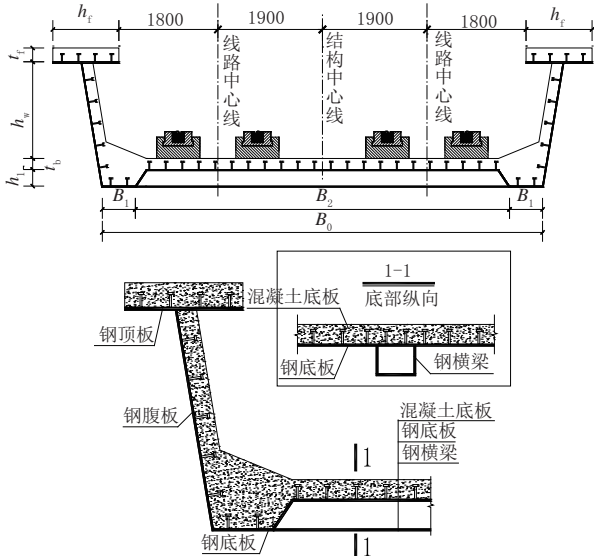


图 5 钢 - 混凝土组合 U 梁(单位:mm)

## 4 有限元分析

本次有限元模拟采用 Ansys 软件进行计算。模型中钢板采用壳单元 shell63 模拟,混凝土采用实体单元 Solid45。预应力钢筋采用线单元 link8 进行模拟,预应力通过初应变施加。本次分析中预应力筋与混凝土采用约束方程法将两者连接为整体,钢梁与混凝土之间采用共节点,不考虑接触面间的相对滑移。

### 4.1 荷载类型

模型中主要荷载有:结构自重、二期荷载、预应力荷载以及列车荷载。

(1)结构自重:混凝土、钢结构自重。

(2)二期荷载:主要包括承轨台、电力管沟以及铺装等荷载,共计 68 kN/m。

(3)预应力荷载:预应力钢束直径  $\phi 15.24$  mm,有效施加应力为 1 095 MPa。

(4)列车荷载:轴重  $P=125$  kN,荷载布置示意图如图 6 所示。

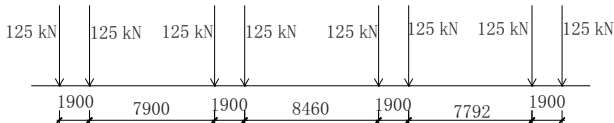
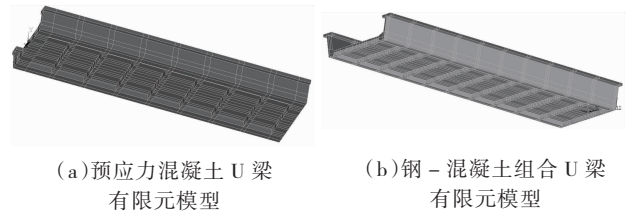


图 6 有轨电车荷载示意图(单位:mm)

### 4.2 有限元模型

有限元分析中 U 梁总长为 32.4 m,计算跨度为 30 m。预应力混凝土 U 梁和钢 - 混凝土组合 U 梁的有限元计算模型见图 7。通过计算最不利工况下的结

构受力性能进行方案的分析计算。



(a)预应力混凝土 U 梁有限元模型 (b)钢 - 混凝土组合 U 梁有限元模型

图 7 U 梁有限元计算模型

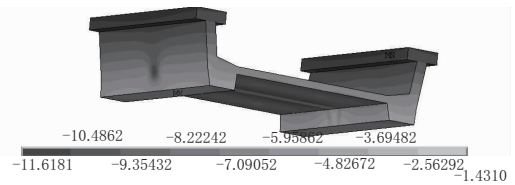
## 4.3 计算结果及分析

### 4.3.1 竖向刚度对比

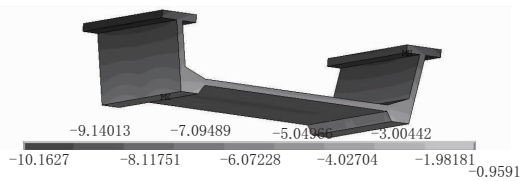
根据《城市轨道交通桥梁设计规范》(GB/T 51234—2017)的要求,桥梁跨度  $L \leq 30$  m 时,竖向挠度应不超过  $L/2 000$ 。根据有限元计算可知,在列车静活载作用下,预应力混凝土 U 梁的竖向挠度为 7.7 mm,钢 - 混凝土组合 U 梁的竖向挠度为 11.6 mm,均满足上述规范要求。

### 4.3.2 纵向受力对比分析

在竖向荷载作用下,主梁整体发生纵向弯曲,上翼缘和腹板以受压为主,底板以受拉为主。端部位置由于受到支座集中力的影响,局部出现最大应力。按照圣维南原理,忽略支座附近的应力时,在最不利荷载组合下,2 种方案的纵向在跨中顶板上翼缘出现最大压应力,跨中纵肋下缘出现最小压应力(见图 8)。



(a)预应力混凝土 U 梁纵向应力



(b)钢 - 混凝土组合 U 梁纵向应力

图 8 U 型梁纵向应力图(单位:MPa)

通过纵向预应力的设置,预应力混凝土 U 梁和钢 - 混凝土组合 U 梁的纵向均受压。由图 8 可见:预应力混凝土 U 梁的最大压应力为 11.6 MPa,最小压应力为 1.43 MPa;钢 - 混凝土组合 U 梁的最大压应力为 10.2 MPa,最小压应力为 0.96 MPa。2 种方案的纵向受力均满足设计要求。

### 4.3.3 竖向受力对比分析

U 梁结构不同于一般箱梁截面,传统箱梁截面通过腹板将顶底板连接起来,整体截面共同承担竖向荷载。而 U 型梁中竖向荷载直接作用在结构底板上,



通过腹板和底板的连接位置再传递给腹板。在最不利荷载组合下,2种方案的竖向应力见图9。由图9可见:混凝土竖向拉应力均在2MPa左右,且随着腹板高度的增加,应力逐渐减小。

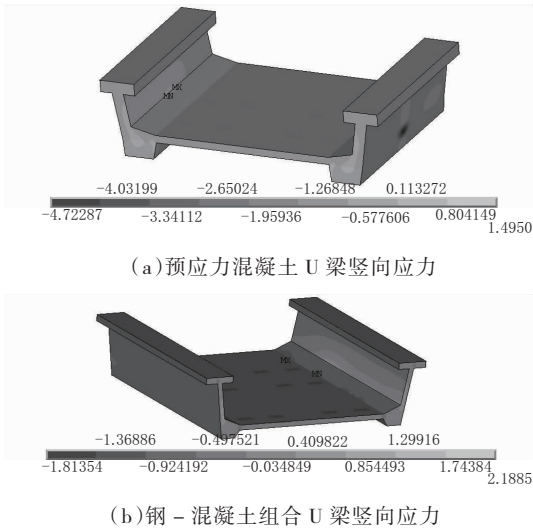


图9 U型梁竖向应力图(单位:MPa)

U梁腹板在竖向力作用下,同时承受弯剪扭组合作用,尤其腹板与底板连接处的结构处于多向应力状态,此处的主拉应力不容忽视。腹板主拉应力见图10。

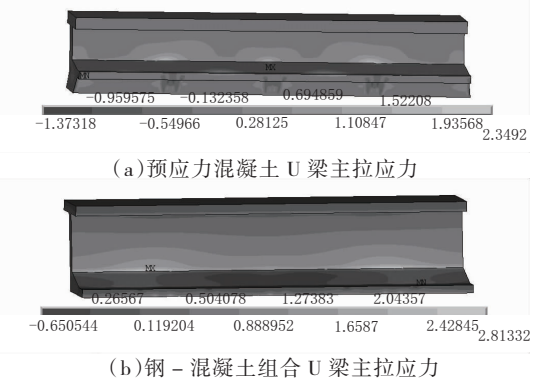


图10 U型梁主拉应力图(单位:MPa)

根据计算结果可知,2种方案中的最大主拉应力为2.3~2.8MPa,比各自竖向应力增大0.7~0.8MPa。在实际工程设计中可通过加强底板和腹板交接处配筋来满足设计要求。

#### 4.3.4 横向受力对比分析

U梁为较为典型的开口截面梁,竖向荷载直接作用在底板上,底板除了截面整体纵向抗弯外,还会发生横向弯曲,从而在底板产生横向拉应力。在最不利荷载组合下,2种方案的横向应力见图11。

通过横向预应力的设置,预应力混凝土U梁除横向钢束张拉锚固位置,其余均处于受压状态。由于整体模型中预应力作用于锚固点,出现效应集中现象,拉应力达到2.36MPa。实际工程中端部张拉力可

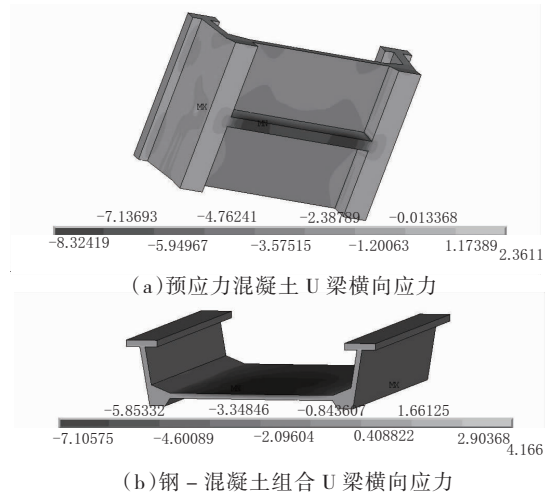
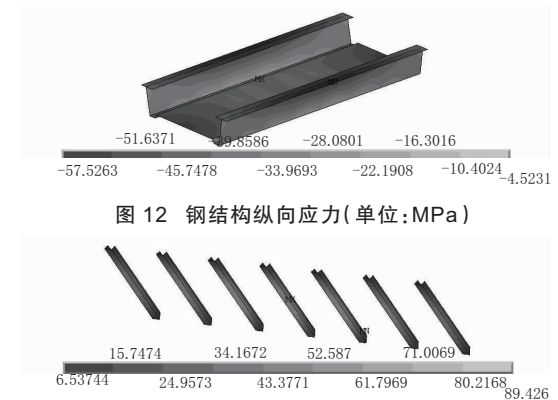


图11 U型梁横向应力图(单位:MPa)

通过锚垫板和锚下构造措施分散,故U梁总体横向受力满足设计要求。

通过钢横梁结构的设置,钢-混凝土组合U梁的底板底部,除横梁处外,其横向拉应力降低至2.5MPa左右,可通过设置合理的横向普通钢筋,控制裂缝宽度来满足设计要求。钢横梁处底板位置由于未考虑钢与混凝土的实际连接,局部出现较大拉应力4.2MPa。组合梁中均布的栓钉等柔性连接件可减小整体模型中的应力集中现象,故在组合U梁中混凝土横向总体受力满足要求。

钢-混凝土组合U梁中钢结构最大压应力位于顶板上缘,最大纵向压应力为57.5MPa,如图12所示。钢结构最大拉应力位于钢横梁底部,最大横向拉应力为89.4MPa,如图13所示。



## 5 结论

(1)与传统上承式箱梁、T梁等结构相比,U梁为半穿式结构,能大大降低轨面标高,减小建筑的整体高度;同时集防撞、降噪于一体,尤其在轨面标高受限时优势更为明显,具有较好的经济效益和社会效益。

(2) 双线轨道交通高架桥 U 梁的荷载直接作用在底板上, 底板除出现纵向弯曲外, 还出现较为显著的横向弯曲, 底板为 U 梁结构设计的关键部位。设计中除纵向布置预应力束外, 横向可设置预应力横梁或钢横梁, 以确保 U 梁强度和刚度均满足要求。

(3) 双线预应力混凝土 U 梁通过合理设置纵横向预应力钢束, 混凝土纵向全截面受压; 除张拉锚固处存在应力集中, 其余位置混凝土横向均处于受压状态; 底板与腹板交界位置受力较为复杂, 在设计中应加强此处的钢筋配置。

(4) 双线钢 - 混凝土组合 U 梁通过合理设置纵向预应力和钢横梁, 混凝土纵向全截面受压; 混凝土底板无横向预应力筋, 上缘受压、下缘受拉, 可设置横向普通钢筋来控制混凝土裂缝宽度, 同时外包钢结构底板可避免裂缝暴露和开展, 也便于后期维护等。

(5) 根据有限元分析可知, 双线预应力混凝土 U 梁和双线钢 - 混凝土组合 U 梁 2 种方案受力均满足设计要求, 均适用于双线城市有轨电车高架桥。在工程设计中, 除受力性能外, 可结合工程造价、施工工

艺和施工周期等方面进行综合比选, 选择适宜的双线 U 梁结构。

#### 参考文献:

- [1] 胡匡璋. 槽形梁[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [2] 贺恩怀. 槽形梁在城市轨道交通工程中的应用[J]. 铁道工程学报, 2003, 78(2):13-16.
- [3] 赵建军, 李伟. 上海城市轨道交通高架区间 U 形梁设计与施工[J]. 城市道桥与防洪, 2009(5):113-116.
- [4] 黄侨, 陈卓异, 杨明. 槽型梁桥力学性能的研究现状与展望[J]. 中外公路, 2013, 33(6):131-135.
- [5] 聂建国, 吴丽丽, 樊健生, 等. 槽形钢 - 混凝土组合梁及其应用前景初探[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11):78-85.
- [6] 吴丽丽, 聂建国, 吕坚锋, 等. 简支槽形钢 - 混凝土组合梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3):39-48.
- [7] 刘建萍. 上海轨道交通 6 号线槽形梁设计[J]. 铁道标准设计, 2009(12):55-57.
- [8] 王志云, 艾列奇, 刘祖华. 上海轨道交通 6 号线槽形梁试验研究[J]. 中国市政工程, 2006(1):32-34.
- [9] 张博. 城市轨道交通 U 型梁受力机理的有限元分析及试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [10] 李美帅. 城市轨道交通 U 型梁空间受力机理及实用设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.

## 《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)