

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.023

轨道交通钢混结合连续梁设计及关键技术研究

程石利

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海市 200040)

摘要: 钢混组合结构因能充分发挥混凝土和钢结构的材料性能优势而被越来越广泛应用。施工过程中大节段钢梁吊装,对路口的交通影响较小等优点使得钢混结合梁在城市建设中占据重要地位。在轨道交通桥梁中,混凝土桥面板能很好的与轨道结构相适应。结合长沙市轨道交通1号线北延一期工程高架区间跨开顺路口的(40+60+40)m钢混结合连续梁,分析钢混结合连续梁的结构受力特性。研究了采用不同措施如桥面板分段浇筑、正弯矩区压重、支点顶升落架、支点双结合、使用抗拔不抗剪连接件等对改善负弯矩区桥面板受力的优劣势。研究表明,钢混结合连续梁在城市轨道交通中的应用良好;采用支点顶升落架、支点双结合两个措施对改善桥面板受力效果最优。

关键词: 轨道交通桥梁;钢混结合连续梁;负弯矩区;桥面板;结构分析

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)04-0082-04

1 概述

钢混结合梁能充分发挥混凝土桥面板和钢梁各自的材料性能优势,且自身具有受施工条件影响小、施工工期短、跨越能力优于混凝土梁、造价低于钢梁等特点,在中小跨度桥梁中具有较强的竞争力。钢混结合梁在公路市政桥梁中应用较为广泛,在轨道交通桥梁应用的案例相对较少。本文结合长沙市轨道交通1号线北延一期工程高架区间跨开顺路口的(40+60+40)m钢混结合连续梁设计,研究该类型桥梁在轨道交通桥梁中的应用,供同类桥梁设计参考。

2 主要技术标准

列车类型: B型列车、6节编组,轴重 ≤ 140 kN。

设计行车速度: 80 km/h。

正线数目: 双线,标准线间距为 4.4 m。

轨道结构: 长枕整体道床。

环境类别及作用等级: 环境类别为碳化环境,作用等级为 T2。

3 结构设计

全桥采用单箱单室等高连续梁,梁高 3.0 m,其中桥面板高 0.45 m,钢梁高 2.55 m。梁部典型横断面构造如图 1 所示。

钢梁在正弯矩区采用单箱单室开口截面,箱室

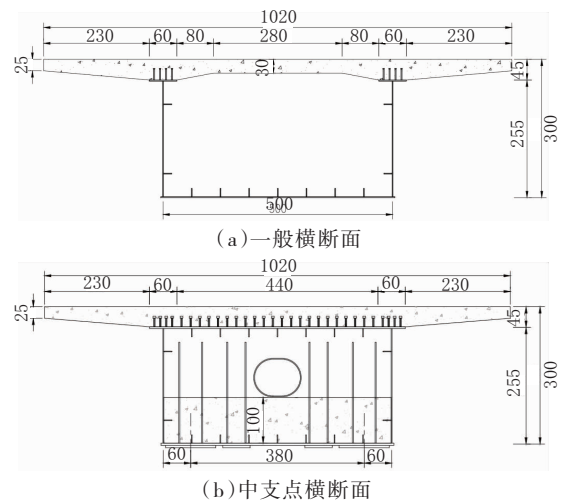


图1 主梁典型断面(单位:cm)

宽 5.0 m,每道腹板上方设置 0.6 m 宽翼缘板。钢梁在负弯矩区即中支点两侧各 12.3 m 范围采用闭口截面,钢梁顶宽 5.6 m,底宽 5.0 m。中支点两侧各 12 m 范围内钢梁底板铺设 0.5 m 厚混凝土形成双结合形式,支点处加厚至 1.0 m。

混凝土桥面板全宽 10.2 m,在开口箱范围,中部厚度 30 cm,悬臂端部厚度 25 cm,承托处厚度 45 cm。闭口箱范围中部厚度均为 45 cm。

中支点两侧各 10.5 m 范围内采用抗拔不抗剪连接件^[1],其余位置采用普通抗剪栓钉。

4 负弯矩区桥面板受力研究

4.1 改善桥面板受力措施类型

中支点的负弯矩区桥面板的受力,是钢混结合连续梁设计的一个主要控制因素。简要介绍以下改善负弯

收稿日期: 2022-03-28

作者简介: 程石利(1991—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计研究工作。

矩区桥面板的措施。

(1)桥面板分段浇筑:先浇正弯矩区混凝土,结
强后,再浇负弯矩区混凝土。

(2)正弯矩区压重:正弯矩区临时压重后,浇筑
桥面板混凝土,释放压重。

(3)顶升落梁措施:中支点顶升,浇筑桥面板混
凝土,结强后落梁。

(4)采用预制桥面板:桥面板预制后放置6个月,
现场吊装就位,浇接湿接缝。

(5)施加预应力:负弯矩区范围内张拉预应力,
本工点分批张拉8束15-Φ^{15.2} 钢绞线。

(6)使用抗拔不抗剪连接件:负弯矩区设置抗拔

不抗剪连接件。

(7)底板浇筑混凝土:负弯矩区钢梁底板浇筑混
凝土,形成双结合形式。

(8)组合措施:将以上若干个措施组合。

4.2 各项措施比较分析

比较单项措施及组合措施对桥面板在施工阶
段和运营阶段受力的影响(恒载作用考虑10a收
缩徐变),结果如表1及图2所示,表1为不同措施
在不同工况下中支点桥面板最大名义拉应力与无
措施情况下的差值,图2为各措施下中支点桥面
板最大名义拉应力在施工运营全过程中的发展情
况曲线。

表1 支点处桥面板名义拉应力

单位:MPa

序号	采用的单项措施	恒载作用		活载作用		主力组合		改善效果评价
		该项措施	差值	该项措施	差值	该项措施	差值	
1	无措施	6.7	—	4.1	—	10.8	—	—
2	①桥面板分段浇筑	6.3	-0.4	4.1	0.0	10.4	-0.4	较差
3	②正弯矩区压重(60 kN/m)	5.0	-1.7	4.1	0.0	9.1	-1.7	较好
4	②'正弯矩区压重(120 kN/m)	3.5	-3.2	4.1	0.0	7.6	-3.2	效果好,但钢梁累积应力较大
5	③顶梁落梁措施	4.2	-2.5	4.1	0.0	8.3	-2.5	施工阶段效果最好
6	④采用预制桥面板	7.1	0.4	4.1	0.0	11.2	0.4	差
7	⑤施加预应力	4.8	-1.9	4.1	0.0	8.9	-1.9	效果较好,施工、受力复杂
8	⑥抗拔不抗剪连接件	5.7	-1.0	3.6	-0.5	9.2	-1.6	尚可
9	⑦浇筑支点底板混凝土	5.2	-1.5	2.2	-1.9	7.5	-3.3	综合效果最好
10	组合:②+③+④+⑦+⑧	2.0	-4.7	2.1	-2.0	4.1	-6.7	组合措施工序较复杂

注:表中应力受拉为正。

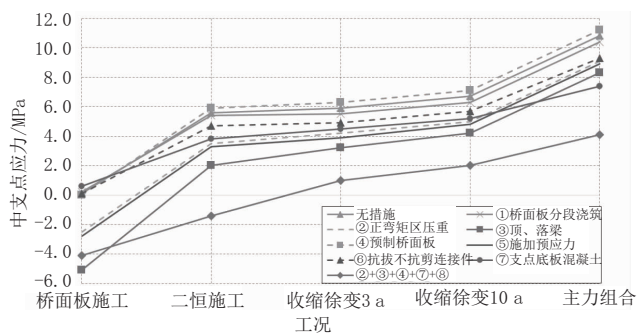


图2 中支点桥面板名义累计应力(单位:MPa)

比较表1的第1至7行结果可知,措施①至⑤
仅改善施工阶段(含收缩徐变)对桥面板应力的影
响,而不能改变由运营荷载产生的应力结果;比较表
1的第1、8、9行结果可知,措施⑥、⑦可同时改善施
工阶段、运营阶段荷载的桥面板应力。是因为相较于
无措施的情况,措施①至⑤仅在施工过程中影响桥
面板应力的分布情况,并没有改变成桥后全桥结构的
刚度分布情况,当仅受运营荷载作用时,全桥的受
力不会发生变化;而措施⑥、⑦改变了成桥后结构的
刚度,引起运营荷载作用下的应力重分布,达到改善

桥面板受力的效果。

比较分析图2中应力发展趋势可以看出:

(1)仅对桥面板分段浇筑效果较差,可与正弯矩
区压重措施配合使用。

(2)正弯矩压重措施改善桥面板影响效果较好,
且施工简便;增加压重虽效果更优,但会增加钢梁累
积应力。

(3)支点顶升落梁在施工阶段产生的预压力效果
最佳,是结合连续梁经常采用的施工措施。

(4)采用预制板对负弯矩区桥面板应力改善并不
理想。图3为各施工阶段中支点桥面板在恒荷载、收
缩、徐变各单项作用下的应力图,可以看出,虽然各
阶段预制板收缩、徐变单项应力均较现浇板小,但收
缩产生拉应力效应,徐变产生压应力效应,两者相互
抵消,使得预制板与现浇板应力无明显差异,对改善
负弯矩区桥面板恒载效应作用并不大。且预制板对
施工精度要求较高,不推荐采用。

(5)负弯矩区施加预应力,不能对桥面板产生显
著效果,是因为钢梁分摊走大部分预压力,造成钢梁

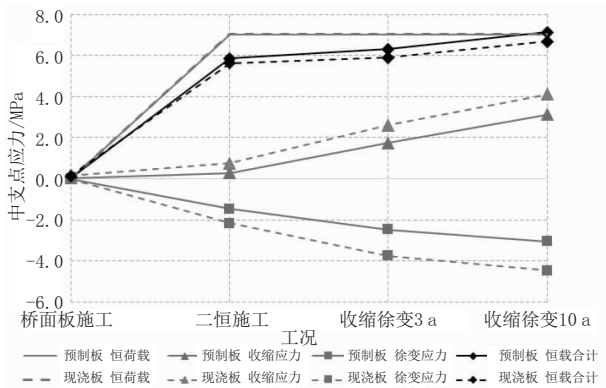


图3 中支点桥面板恒载单项应力(单位:MPa)

顶板应力增大,钢束次内力还会引起正弯矩区桥面板应力增大;同时,采用预应力结构对耐久性要求较高(要求不开裂或对裂缝要求较严格),施工工序较复杂。

(6)使用抗拔不抗剪连接件,钢梁和混凝土可相对滑移,改善应力集中效应,在施工、运营阶段均有改善效果,综合效果尚可。

(7)支点底板加混凝土,在施工、运营阶段改善桥面板应力综合效果最优,同时还改善了钢梁底板应力,施工简便。

5 主要施工方案

根据上述分析,本桥推荐采用组合措施。主要施工步骤如下(括号内为施工时间或间隔):

一是中支点预垫高 15 cm,节段拼装钢梁(10 d,拼装钢梁应考虑预垫高所产生的线形、预拱度以及线路纵断面的影响);

二是浇筑边支点配重混凝土,解除支架,中支点顶升 25 cm(10 d);

三是浇筑正弯矩区桥面板混凝土(8 d);

四是正弯矩区堆载预压 60 kN/m,浇筑负弯矩区桥面板混凝土(10 d);

五是卸载堆载,中支点落架 40 cm(3 d);

六是浇筑中支点底板混凝土(7 d);

七是施工桥面系(90 d);

八是调试运营(考虑 10 a 收缩徐变)。

6 结构静力分析

6.1 全桥计算模型

全桥静力分析采用 MIDAS/CIVIL 空间有限元软件,主梁采用双单元模拟,即桥面板和钢梁分别采用梁单元模拟,两者之间采用弹性连接模拟钢-混连接件,其中抗剪栓钉采用刚臂连接模拟,抗拔不抗剪连接件则释放纵向约束模拟不抗剪效应。全桥共 190 个节点,220 个梁单元。全桥结构计算模型如图 4 所示。模型按照施工顺序设置各阶段边界条件并加载相应荷载。考虑荷载包括施工临时荷载、恒载、混凝土收缩徐变、列车活载、整体升降温、梯度温差、列车制动力、基础沉降等。

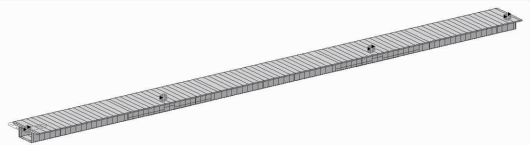


图4 钢混组合梁计算模型

钢梁及桥面板分别依据现行铁路及轨道交通规范^[2-3]考虑其有效宽度的影响。

6.2 主要计算结果

6.2.1 主梁强度计算

(1)钢梁强度结果如表 2 所示。结果表明,施工阶段、主力组合、主+附组合下钢梁正应力、剪应力、换算应力均小于规范限值。

表2 钢梁强度结果

单位:MPa

荷载组合	位置	钢梁正应力			剪应力		换算应力	
		max	min	限值	数值	限值	数值	限值
施工阶段	上缘	148	-141	252	62	144	162	264
	下缘	147	-127	252				
主力	上缘	147	-151	210	86	120	173	220
	下缘	144	-127	210				
主加附	上缘	162	-172	273	86	156	183	286
	下缘	173	-141	273				

(2)桥面板按钢筋混凝土构件设计,采用高配筋控制裂缝设计。提取桥面板主力组合和主加附组合的内力进行配筋计算,如表 3 所示。结果表明,主力组合和主加附组合下,桥面板强度、裂缝满足规范要求。

6.2.2 主梁变形计算

根据现行城市轨道交通桥梁设计规范^[9],变形计算时应考虑剪力键的滑移效应,可简化按刚度折减至 0.85 来考虑。

表3 桥面板控制截面强度计算结果

荷载组合	钢筋应力 / MPa	容许值 / MPa	裂缝宽度 / mm	容许值 / mm	是否
主力	107.6	210	0.125	0.20	满足
主加附	161.2	270	0.183	0.24	满足

考虑刚度折减后的列车静活载竖向挠度、工后徐变结果如表4所示,满足规范要求。静活载梁端转角最大为0.86%*crad*,小于2‰的规范限值。

表4 线形控制验算结果 单位:mm

计算项目	边跨变形	挠跨比	中跨变形	挠跨比
静活载竖向挠度	-11.9	1/3 304	-27.6	1/2 178
容许挠跨比		1/1 500		1/1 500
工后徐变	-7.5		-4.2	
容许值		10		12

注:表中位移向上正。

7 结论

本文对城市轨道交通钢混结合连续梁设计及关

键技术研究,主要得出以下结论:

(1)采取不同措施对改善负弯矩桥面板受力影响不同。顶升落架、支点双结合措施效果最好;正弯矩压重、采用抗拔不抗剪连接件效果次之;桥面板分段浇筑效果较差,可与正弯矩区压重措施配合使用;采用预制桥面板效果并不理想;施加预应力效果较好,但使得桥面板受力复杂,钢束次内力对正弯矩区产生不利影响,不建议作为首选的措施。实际工程设计中可根据需要选用若干种组合措施,以达到理想的控制效果。

(2)(40+60+40)m钢混结合连续梁各项指标均能满足规范要求,在轨道交通高架中采用本类型桥梁合理可行,可供同类桥梁设计参考。

参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等.抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J].土木工程学报,2015(4):9.
- [2] TB 10091—2017,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- [3] GB/T 51234—2017,城市轨道交通桥设计规范[S].

(上接第77页)

由以上分析可知,采用具有纵横桥向不同截面变化率的A形空间扭面桥塔,受力相对于相同截面变化率的桥塔更加合理。纵桥向尺寸从塔顶至塔底逐渐增加可以保证桥塔纵向刚度,抵抗施工和运营过程的不平衡荷载,也可减少施工阶段索鞍顶推的次数;桥塔横向为一框架结构,当下塔柱较矮时温度次内力较大,横向尺寸从上至下变小可以减小框架侧向刚度(本桥位于6度地震区,受地震影响较小),从而大幅减少温度次内力。同时空间变扭面桥塔的景观效果良好,呈现“横看成岭侧成峰,远近高低各不同”的视觉效果,既有巍峨挺拔之雄壮,又具轻盈纤细之秀美,是适合于宽桥面、矮下塔柱的较为理想的城市悬索桥桥塔形式。

4 结语

柳州双拥大桥为世界最大跨度的单主缆悬索桥,位于柳州市区。对该桥适用于单主缆特点的A形非相似等腰三角形截面桥塔构造及其受力进行的分析,可以对类似城市桥梁的设计起到参考和借鉴的作用。

参考文献:

- [1] 刘蕾蕾,余强,邱毅,等.钢箱刚架系杆拱桥拱脚钢混结合段构造设计研究[J].公路交通技术,2021,3(37):78-83.
- [2] 崔冰,孟凡超,冯良平,等.南京长江第三大桥钢塔柱设计与加工[J].中国铁道科学,2005(3):42-47.
- [3] 林智敏,蒋劲松.柳州双拥大桥关键结构设计[J].世界桥梁,2016,4(182):1-5.