

有轨电车线路土质路基段单元式无砟轨道结构设计

崔逸鹏

(上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 200135, 上海//工程师)

摘要 参考铁路客运专线无砟轨道计算方法, 对有轨电车线路土质路基段轨道承受的荷载作用进行了分类和组合。建立了无砟轨道的“梁-板”有限元模型, 采用极限状态法对车辆荷载下的道床结构进行了设计, 并基于容许应力进行了安全性复核。复核结果显示, 道床正截面受弯承载能力、正常使用极限状态下的道床裂缝、道床强度等均满足规范要求。

关键词 有轨电车线路; 轨道结构; 单元式无砟轨道

中图分类号 U213.2⁺44; U482.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.01.022

Structural Design of Ballastless Track with Single Slab for the Soil Subgrade Section on Tram Line

CUI Yipeng

Abstract Referring to the calculation methodology of the ballastless track on passenger dedicated railway line, the affordable load for tram soil subgrade section built on ballastless track with single slab structure design is categorized and re-grouped. A "beam-shell" finite element model for ballastless track is constructed, and the limit state method is adopted to design the track structure under vehicle load, and the security based on allowable stress is reviewed. The result shows that the bending capacity of the front section of the track structure, the cracks under extreme state of normal use, and the track structure intensity are all up to the regulatory demands.

Key words tram line; track structure; ballastless track with single slab

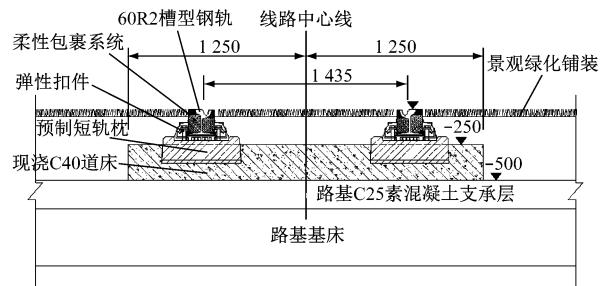
Author's address Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., 200135, Shanghai, China

现代有轨电车线路以地面线为主, 为与城市景观相协调, 需进行覆土绿化种植及沥青铺装硬化。由于无砟轨道养护维修工作量大、刚度均匀性好、几何形位保持能力强、耐久性好、美观整洁, 便于绿化铺装和硬化铺装, 因此, 国内外轨道结构均以无

砟轨道为主。本文参照客运专线无砟轨道理论计算方法, 并结合有轨电车工程实际工况, 探讨有轨电水土质路基段无砟轨道结构计算和设计。

1 轨道结构形式

目前, 国内有轨电水土质路基段单元式无砟轨道结构主要有现浇单板式结构、现浇纵向承轨台式结构及预制轨道板等形式。这几种结构形式的主要设计思路类似, 均考虑车辆荷载作用、温度作用及基础变形作用等因素。本文选用某有轨电车工程区间土质路基段现浇单板式结构进行探讨。该无砟轨道结构从上至下为 60R2 槽型钢轨、柔性包裹材料、弹性扣件、预制短轨枕、250 mm 厚道床板等。其中, 扣件间距为 0.625 m, 道床板每隔 12.5 m 设置 1 条 20 mm 宽的伸缩缝。路基表层为 200 mm 素混凝土支承层, 支承层下为基床, 道床面进行景观绿化铺装。具体轨道结构构造见图 1。



尺寸单位: mm

图 1 某土质路基段无砟轨道结构构造图

2 荷载作用及组合

2.1 荷载作用分类

土质路基段无砟轨道结构承受的荷载作用可以分为永久作用、可变作用和偶然作用(见表 1)。

2.1.1 轨道结构自重

由于无砟轨道结构为连续支承的带状结构物, 其自重不会在承载层内产生弯矩或轴力作用; 只有

表 1 土质路基段无砟轨道结构承受的荷载作用

荷载作用	内容
永久作用	轨道结构自重
	道床混凝土收缩和徐变
可变作用	车辆荷载
	道床混凝土结构整体温度作用
	道床混凝土结构温度梯度作用
偶然作用	路基不均匀沉降

在无车辆荷载条件下,计算温度梯度或基础不均匀沉降引起支承不均匀或附加弯矩时考虑自重。因此自重在各种检算项目中的作用不明显,各种荷载组合中基本没有考虑^[1]。

2.1.2 道床混凝土收缩和徐变

混凝土收缩和徐变一般按降低温度的方法计算,本文无砟轨道结构采用分段单元结构,其道床混凝土收缩和徐变影响有限,故将混凝土收缩和徐变作用纳入道床混凝土结构整体温度作用中考虑。

2.1.3 车辆荷载

车辆荷载是无砟轨道结构承受的最基本的可变作用之一,本文中车辆荷载通过单轴集中荷载形式作用于轨道结构。有轨电车车辆最大静轴重取为 12.5 t,考虑到实际线路运行中轮轨力的增大效应,单轴集中荷载在基本荷载组合中取 2 倍静轮载,在偶然荷载组合中取 1.5 倍静轮载(静轮载为静轴重的一半)。

2.1.4 道床混凝土结构整体温度作用

本文无砟轨道结构采用分段单元结构,道床整体温度作用统筹考虑了混凝土收缩和徐变及道床承受的温度力作用,可按式(1)计算^[2]。

$$P = \frac{F_k N_k}{2} + \frac{W_g L}{2} f_w \tag{1}$$

式中:

- P ——分段道床结构整体温度力;
- F_k ——每组扣件纵向阻力,取 11 kN;
- N_k ——分段道床板对应的扣件组数,取 40 组;
- W_g ——单位长度的轨道重量(含铺装);
- L ——分段道床板长度,取 12.5 m;
- f_w ——道床与下部基础的摩擦系数,取 1.5。

2.1.5 道床混凝土结构温度梯度作用

由于轨道结构表面覆盖有 250 mm 厚的绿化草皮和绿化填土,故道床板面与板底温差较小。经某工程现场实测,最大温差仅为 2℃,其影响可忽略不

计。

2.1.6 路基不均匀沉降

无砟轨道承载层刚度较大。一旦发生不均匀沉降,无砟轨道的受力将会受到较大影响,沉降严重时会引起轨道结构的损坏。参照客运专线铁路无砟轨道相关规范,只考虑沿线路纵向的不均匀沉降,每 20 m 长路基的不均匀沉降限值为 20 mm。路基不均匀沉降的形状取下凹正弦型半波曲线。按刚性基础计算基础变形产生的附加弯矩按式(2)计算^[1]。

$$M = EI \frac{\pi^2 f_0}{l_s^2} \tag{2}$$

式中:

- M ——路基不均匀沉降产生的附加弯矩;
- E ——无砟轨道道床板的弹性模量;
- I ——无砟轨道道床板的截面惯性矩;
- f_0 ——路基的不均匀沉降控制值,取 0.02 m;
- l_s ——路基的不均匀沉降控制长度,取 20 m。

2.2 作用组合

基本组合为可变作用:车辆荷载 + 道床混凝土结构整体温度作用。

偶然组合为可变作用 + 偶然作用:车辆荷载 + 道床混凝土结构整体温度作用 + 路基不均匀沉降。

3 车辆荷载下的道床受力计算

3.1 模型建立

无砟轨道道床板的厚度小于其长度和宽度,且荷载作用下的挠度远小于其厚度,符合弹性薄板的结构特点^[1]。本文采用 ANSYS 有限元软件建立“梁-板”有限元模型,计算车辆荷载作用下的道床受力状态。有限元模型如图 2 所示。

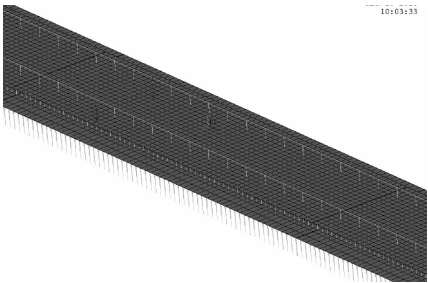


图 2 土质路基无砟轨道有限元计算模型

1) 单元选择:钢轨采用梁单元,扣件采用线性弹簧单元,道床板采用板壳单元,路基支承层采用板壳单元,路基支承层以下基床简化为线性弹簧。

2) 边界条件:模型选用 3 块道床板,并将中间道床板作为计算板段;钢轨两端进行全约束,地基弹簧末端进行全约束。

3) 加载条件:在距计算板板端第 4 个扣件位置进行单轴加载。

3.2 计算参数

无砟轨道主要计算参数如表 2 所示。

表 2 土质路基段单元式无砟轨道主要计算参数		
部位	参数	取值
钢轨	弹性模量/(N/m ²)	2.06 × 10 ¹¹
	泊松比	0.3
扣件	垂向刚度/(N/m)	6.0 × 10 ⁷
道床板	弹性模量/(N/m ²)	3.25 × 10 ¹⁰
	泊松比	0.2
支承层	弹性模量/(N/m ²)	1.4 × 10 ¹⁰
	泊松比	0.2
路基	地基系数 K ₃₀ /(MPa/m)	190

3.3 计算结果

经有限元分析计算,在 2 倍静轮载作用下,道床板纵向最大正弯矩为 39.3 kN·m,纵向最大负弯矩为 10.7 kN·m,横向最大正弯矩为 7.1 kN·m(枕跨为 0.625 m),横向最大负弯矩为 0.3 kN·m(枕跨为 0.625 m)。

4 温度作用下和路基不均匀沉降下的道床受力

1) 由式(1)计算可得,分段道床结构整体承受的溫度力为 512.5 kN。由截面溫度力/截面面积可得截面应力,再根据应力 = 弯矩 × 应力位置/截面惯性距,即可得到道床纵向正负弯矩为 21.4 kN·m。

2) 由式(2)计算可得,在路基不均匀沉降作用下,分段道床的承受纵向正负弯矩为 52.2 kN·m。

5 道床配筋设计及结构验算

我国铁路无砟轨道结构设计一般基于容许应力法。参考 Q/CR 9130—2015《铁路轨道极限状态法设计暂行规范》,本文按极限状态法进行道床结构设计,并采用容许应力法进行安全性复核。由于有轨电车速度低、轴重轻,故无砟轨道结构重要性系数取 1.0。

5.1 承载能力极限状态受弯计算

受弯承载能力极限状态作用组合分为基本组

合和偶然组合,取两种组合中的道床弯矩最大值作为道床设计弯矩。相对于铁路车辆,有轨电车车辆的轴重轻、速度低、轮轨作用力较小。因此,在承载力计算时,车辆荷载的动载系数在偶然组合中取 1.5,在基本组合中取 2.0。即基本组合为 2 倍静轮载 + 整体温度作用,偶然组合为 1.5 倍静轮载 + 整体温度作用 + 路基不均匀沉降。道床板横向弯矩计算宽度为 0.625 m(1 个枕跨)。计算可得,在受弯承载能力极限状态下,道床板所受纵向正弯矩为 103.1 kN·m,纵向负弯矩为 81.6 kN·m,横向正弯矩为 7.1 kN·m,横向负弯矩为 0.3 kN·m。

根据《混凝土结构设计规范》,取混凝土保护层厚度为 40 mm,道床底部纵向配置 16 根 $\phi 14$ mm 的 HRB400 钢筋,顶部纵向配置 10 根 $\phi 14$ mm 的 HRB400 钢筋,道床底部横向按 1 个枕跨配置 4 根 $\phi 12$ mm 的 HRB400 钢筋,道床顶部横向按 1 个枕跨配置 4 根 $\phi 12$ mm 的 HRB400 钢筋。钢筋布置图见图 3。道床正截面受弯承载能力验算如表 4 所示。由表 4 可见,道床正截面承载弯矩、配筋率(最小配筋率计算值为 0.214%)及相对受压区高度(相对界限受压区高度计算为 0.518)均满足规范要求。

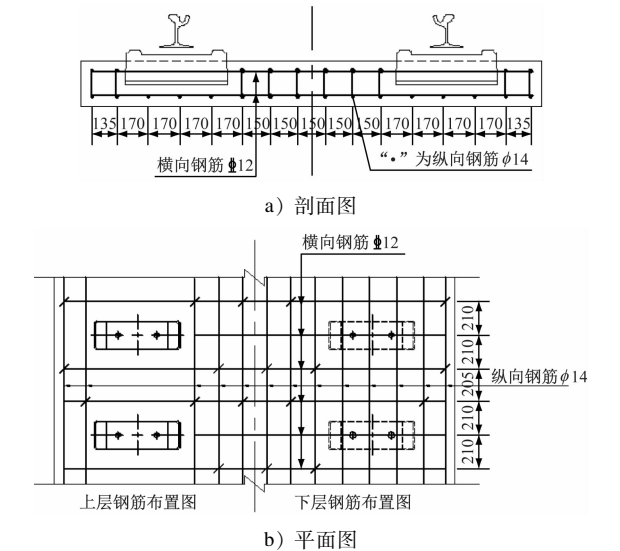


图 3 道床钢筋布置图

5.2 正常使用极限状态裂缝验算

正常使用极限状态下,按 2 倍静轮载 + 整体温度作用组合计算道床弯矩,道床板横向弯矩计算宽度为 0.625 m(1 个枕跨),得到计算结果(见表 5)。

根据《铁路轨道极限状态法设计暂行规范》的裂缝宽度计算方法,得到道床裂缝宽度如表 6 所示。裂缝宽度按 0.2 mm 控制,则道床裂缝宽度满足规

范要求。

表 4 道床正截面受弯承载力验算表

部位	承载弯矩/ (kN·m)	配筋率/%	相对受压 区高度
纵向底部	164	0.39	0.095
纵向顶部	104	0.25	0.059
横向底部	28	0.29	0.075
横向顶部	28	0.29	0.075

表 5 正常使用极限状态道床板弯矩 kN·m

纵向正弯矩	纵向负弯矩	横向正弯矩	横向负弯矩
60.7	32.1	7.1	0.3

表 6 道床裂缝宽度验算表 mm

项目	纵向底部	纵向顶部	横向底部	横向顶部
裂缝宽度	0.190	0.180	0.125	0.005

5.3 容许应力强度验算

根据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》进行道床结构容许应力强度验算。道床纵向作用组合为 1.5 倍静轮载 + 整体温度作用 + 路基不均匀沉降,纵向钢筋容许应力值为 315 MPa,混凝土纵向受压容许应力值为 20.25 MPa。道床横向作用组合按照 2 倍静轮载,横向钢筋容许应力值为 210 MPa,混凝土横向受压容许应力值为 13.5 MPa。计算结果如表 7 所示。由表 7 可知,道床强度验算结果满足规范要求。

表 7 道床强度验算表 MPa

部位	钢筋拉应力	混凝土压应力
纵向底部	236	8.78
纵向顶部	293	8.35
横向底部	93	3.02
横向顶部	3.71	0.12

6 结语

有轨电车土质路基段无砟轨道由于采用绿化铺装,道床板上下表面温差较小,不影响道床受力。关于无砟轨道可靠度缺乏统计数据,本文参照《铁路轨道极限状态法设计暂行规范》并结合有轨电车特点对各分项系数进行了适当的调整,并基于容许应力法进行了安全性复核,满足规范要求。本文对有轨电车土质路基段单元式无砟轨道结构设计等方面的阐述,希望能够为今后其他有轨电车无砟轨道设计提供参考。

参考文献

[1] 刘学毅,赵坪锐,杨荣山,等. 客运专线无砟轨道设计理论与方法[M]. 成都:西南交通大学出版社,2010.

[2] 中国铁路总公司. 铁路轨道极限状态法设计暂行规范: Q/CR 9130—2015[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范(2015 版): GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[4] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.

(收稿日期:2018-04-10)

(上接第 91 页)

[7] 李国欣,吴培林. 钢轨电位与杂散电流综合抑制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(12):56.

[8] 刘建华,刘旭. 地铁钢轨电位限制装置与排流柜配合研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(21):120.

[9] 周大林,庞开阳. 地铁直流牵引供电系统钢轨运行电位安全分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(6):46.

[10] 李鲲鹏,刘炜. 直流牵引回流系统钢轨电位的理论分析[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(5):91.

[11] 刘建华,沈松伟. 单向导通装置对杂散电流的影响分析[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(4):116.

[12] 刘建华,李艳. 框架保护与钢轨电位限制装置保护的研究

[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10):53.

[13] 中华人民共和国建设部. 地铁杂散电流腐蚀防护技术规程: CJJ 49—1992[S]. 北京:中国计划出版社,1993.

[14] 刘炜. 城市轨道交通供电系统仿真[D]. 成都:西南交通大学,2006.

[15] 刘炜. 城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[16] 唐靖坤,刘炜. 一种车辆段、停车场与正线之间的钢轨回流装置[C]//中国铁道学会电气化委员会 2017 年年会及新技术研讨会论文集. 保定:中国铁道学会电气化委员会,2017.

(收稿日期:2018-03-05)