

城市轨道交通连块式轨枕整体道床配筋设计

于 鹏

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安//高级工程师)

摘 要 考虑到长轨枕和短轨枕在城市轨道交通建设和运营中存在不足, 针对城市轨道交通隧道断面狭小、轨道结构高度受限、施工运输不便等特点, 设计了新型连块式轨枕。结合连块式轨枕特点及城市轨道交通相关标准, 对隧道内、路基上及桥上整体道床进行配筋设计; 隧道地段道床板混凝土在荷载组合作用下不会开裂, 则根据构造配置钢筋; 桥梁和路基地段在荷载组合作用下, 道床混凝土会开裂, 则其道床配筋由裂缝限值控制。

关键词 城市轨道交通; 连块式轨枕; 整体道床; 弯矩计算; 配筋设计

中图分类号 U213.2⁺41

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.037

Reinforcement Design of Urban Rail Transit Monolithic Roadbed with Connected-block Sleepers

YU Peng

Abstract Considering the shortage of long and short sleepers in the construction and operation of urban rail transit, a new metro connected-block sleeper is designed based on the characteristics of narrow section of subway tunnel, high limit of track structure, inconvenience of construction and transportation. Then, combined with the characteristics of connected-block sleeper and the relevant metro standards, a reinforcement design of metro monolithic roadbed in the tunnel, on the roadbed and bridge is implemented. The concrete of the monolithic roadbed in tunnel will not crack under the load combination, and the steel is configured according to the structure. While the concrete of the monolithic roadbed on bridge and road will crack under the load combination, so the monolithic roadbed reinforcement is controlled by the limit of the crack.

Key words urban rail transit; connected-block sleeper; monolithic roadbed; bending moment calculation; reinforcement design

Author's address China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

长轨枕和短轨枕在城市轨道交通建设中均有大量应用, 但两者的缺点也比较明显。长轨枕预留钢筋孔, 混凝土浇筑时无法保证预留孔洞的密实性, 易出现空洞; 短轨枕施工时需同时控制两根轨枕的轨底坡和超高等参数, 调整作业量大, 施工精度较差, 轨道结构整体性较弱^[2-4]。

双块式轨枕具有结构简单、施工方便、耐久性好的优势。结合近年来国内外高速铁路双块式无砟轨道建设取得的成功经验, 针对城市轨道交通隧道断面狭小、轨道结构高度受限、施工运输不便、施工精度不断提高的特点^[9-10], 本文设计了新型连块式轨枕, 如图1所示。

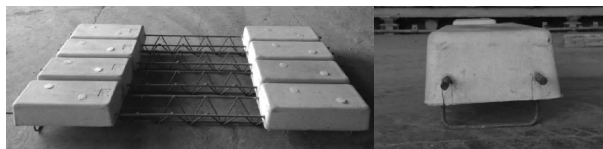
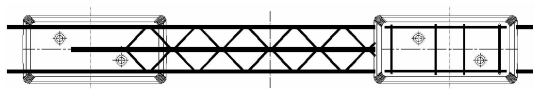
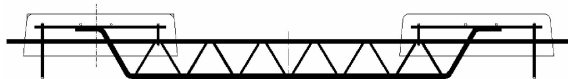


图1 连块式轨枕实体

连块式轨枕的一对支承块通过倒三角桁架钢筋相连(见图2)。桁架钢筋由2根 $\phi 14$ mm钢筋上弦杆和1根 $\phi 18$ mm钢筋下弦杆组成; 这3根主筋通过 $\phi 8$ mm波纹筋焊连(见图3)。轨枕块内设置 $\phi 8$ mm钢筋网片, 与桁架钢筋相连。



a) 平面图



b) 立面图

图2 连块式轨枕

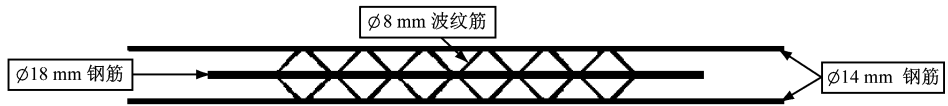


图3 桁架钢筋

连块式轨枕具有如下特点:①可缩短轨枕长度,有效控制道床宽度和高度;②轨枕与道床粘结牢靠;③几何形位保持能力强;④道床表面平整,便于区间内发生事故时人员疏散;⑤结构质量轻。

连块式轨枕具有长、短轨枕结构简单、道床整体性强、施工精度高等优点,同时克服了短轨枕轨距和轨底坡施工调整量大、施工精度差,以及长轨枕易出现空洞等缺点。本文结合连块式轨枕的特点,对隧道内、路基上及桥上的连块式轨枕整体道床进行配筋设计。

1 道床弯矩计算

1.1 计算参数

连块式轨枕不同基础上道床配筋计算时,参数取值如表1所示。

表1 弯矩计算模型参数取值

部件	参数	数值
钢轨	质量/(kg/m)	60
	弹性模量/MPa	206 000
	泊松比	0.3
扣件	动刚度/(kN/mm)	42
	扣件间距/m	0.595
道床板	弹性模量(E_c)/MPa	31 500(隧道), 32 500(路基、桥梁)
	泊松比	0.2
	厚度/m	0.3(隧道、路基),0.28(桥梁)
	宽度/m	2.4(隧道、路基),2.5(桥梁)
	长度/m	12.5(隧道),6(桥梁、路基)
钢筋	板缝/m	0.02
	弹性模量(E_s)/MPa	200 000
路基	基础面刚度/(MPa/m)	76
隧道	基础面刚度/(MPa/m)	1 200
桥梁	基础面刚度/(MPa/m)	1 000
列车荷载	轴重/t	16

1.2 荷载效应计算

1.2.1 荷载组合

不同基础上连块式轨枕道床板配筋计算时,分别采用表2荷载组合。

1.2.2 荷载弯矩计算

1.2.2.1 列车荷载弯矩计算模型

基于有限元软件建立连块式轨枕道床有限元模型,计算列车荷载作用下道床板弯矩。其中隧道

表2 不同荷载组合

线下基础	荷载组合	备注
隧道	设计轮载	3倍列车荷载
桥梁	常用轮载+常用温度梯度+ 桥梁挠曲	常用轮载—1.5倍轮载
路基	常用轮载+常用温度梯度	常用轮载—1.5倍轮载

内及桥上采用梁-板模型,路基上采用梁-板-板模型。钢轨用梁单元模拟,扣件采用弹簧单元模拟,道床板及支承层采用板壳单元模拟;道床板下部基础采用弹簧模拟。该弹簧单元能传递垂向压力,但不能传递拉力。建立3块道床板模型,取中间道床板进行计算分析^[5-7]。模型如图4和图5所示。

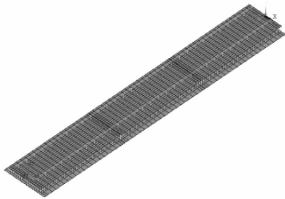


图4 路标段模型



图5 桥梁、隧道地段计算模型

1.2.2.2 温度梯度

道床板温度梯度按下式计算:

$$M = W \frac{\Delta t \alpha_t E_c}{2(1 - \nu)}$$

(1)

式中:

- M ——道床板温度梯度作用弯矩,kN·m;
- W ——弯曲截面参数, m^3 ;
- α_t ——混凝土线膨胀系数;
- ν ——混凝土泊松比;
- Δt ——上、下表面温差, $^{\circ}C$;
- E_c ——轨道板(或道床板)混凝土的弹性模量,MPa。

道床板最大正温度梯度为 $90^{\circ}C/m$,最大负温度梯度为 $45^{\circ}C/m$,常用温度梯度取最大值的一半^[3,7]。

1.2.2.3 桥梁挠曲

桥梁挠曲变形作用效应弯矩计算式为：

$$M_1 = EIK \tag{2}$$

式中：

M_1 ——道床板基础变形作用弯矩；

EI ——道床板抗弯刚度，其中 E 为弹性模量， I 为截面惯性矩；

K ——下部基础变形曲线的曲率。

1.3 计算结果

根据隧道、桥梁及路基上轨道结构不同的荷载组合，道床板弯矩计算结果如表 3 所示。

表 3 荷载组合下隧道、桥梁及路基地段道床板弯矩值					
kN · m/m					
序号	项目	隧道地段	桥梁地段	路基地段	备注
1	纵向正弯矩	12.55	56.80	58.43	用于配底面纵向钢筋
2	纵向负弯矩	4.12	15.16	22.58	用于配顶面纵向钢筋
3	横向正弯矩	13.19	40.64	49.52	用于配底面横向钢筋
4	横向负弯矩	7.24	16.23	17.24	用于配顶面横向钢筋

2 道床配筋设计

根据荷载组合，素混凝土承载层临开裂时的边缘容许拉应力为：

$$[\sigma_{cr}] = \gamma f_t \tag{3}$$

其中

$$\gamma = \left(0.7 + \frac{120}{h}\right) \gamma_m \tag{4}$$

式中：

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值，MPa；

h ——承载层厚度，mm。

γ_m ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数基本值，对于矩形截面取为 1.55。

素混凝土承载层内由于弯矩和轴力引起的混凝土边缘拉应力为：

$$\sigma = \frac{6M_2}{bh^2} + \frac{F}{bh} \tag{5}$$

式中：

M_2 ——列车荷载、温度梯度、基础变形等引起的承载层弯矩，kN · m；

F ——由于温度变化和收缩引起的承载层内温度拉力，MPa；

b ——承载层宽度，m；

h ——承载层厚度，m。

若 $\sigma < [\sigma_{cr}]$ ，则表明在上述荷载组合作用下，承载层不会开裂，仅根据构造配置钢筋，满足最小配筋率。若 $\sigma \geq [\sigma_{cr}]$ ，则表明混凝土承载层将出现开裂，应根据裂缝控制配置钢筋^[3]。

2.1 隧道地段道床配筋

根据表 3，设计轮载下隧道地段道床板纵向正弯矩最大值 $M_{纵} = 12.55 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ 。设抗弯截面模量为 W ，则混凝土应力 $\sigma_c = M_{纵}/W = 0.836 \text{ MPa} < \gamma f_t = 2.65 \text{ MPa}$ ；钢筋应力 $\sigma_s = (E_s/E_c) \sigma_c = 5.14 \text{ MPa} \leq [\sigma_s] = 210 \text{ MPa}$ ，故道床板混凝土未开裂。

通过以上分析可知，隧道地段道床板混凝土在设计荷载作用下不会开裂，可根据构造配置钢筋。连块式轨枕整体道床结构采用双层配筋，并满足最小配筋率要求。道床板配筋如表 4 所示。

表 4 荷载组合为设计轮载时隧道地段道床板配筋				
项目	纵向下层	纵向上层	横向下层	横向上层
d/mm	16	16	14	14
n	10	8	2/轨枕间距	1/轨枕间距
w_{cr}/mm	0	0	0	0

注： d 为钢筋直径， n 为钢筋数量， w_{cr} 为裂缝宽度

2.2 桥梁地段道床配筋

2.2.1 道床纵向配筋

桥梁荷载组合作用下，道床板纵向正弯矩最大值 $M_{纵} = 56.80 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$ ，则混凝土应力 $\sigma_c = M_{纵}/W = 4.34 \text{ MPa} > \gamma f_t = 2.65 \text{ MPa}$ ，故道床板混凝土会开裂，道床配筋由裂缝限值控制。裂缝宽度参照《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》中的计算式进行计算：

$$w_{cr} = K_1 K_2 r' \frac{\sigma_s}{E_s} \left(80 + \frac{8 + 0.4 d_s}{\sqrt{\rho_e}}\right) \tag{6}$$

式中：

K_1 ——钢筋表面形状影响系数，光圆钢筋 $K_1 = 1.0$ ，带肋钢筋 $K_1 = 0.8$ ；

K_2 ——荷载特征影响系数；

r' ——中性轴至受拉边缘的距离与中性轴至受拉钢筋重心的距离之比，对板可取 1.2；

σ_s ——受拉钢筋重心处的钢筋应力，MPa；

d_s ——受拉钢筋直径，mm；

ρ_e ——受拉钢筋的有效配筋率。

裂纹宽度依据保护层厚度 30 mm、裂纹宽度容许 0.2 mm 进行换算。当保护层厚度取 35 mm 时，

则容许裂缝宽度为 0.233 mm。

由计算可知,在荷载组合作用下,道床板纵向下面部分配置 18 根 ϕ 16 mm 钢筋,裂缝的最大宽度为0.231 mm,小于容许裂缝的限值。道床板纵向上层配筋过程与下层相同,经计算,上层配置 8 根 ϕ 16 mm钢筋。

2.2.2 道床横向配筋

根据桥上道床弯矩计算结果,桥上道床板横向正弯矩最大值 $M_{横}=40.64\text{ kN}\cdot\text{m/m}$,则混凝土应力 $\sigma_c=M_{横}/W=3.11\text{ MPa}\geq\gamma f_i=2.65\text{ MPa}$,故下层道床板混凝土会开裂。

通过以上分析可知,在设计荷载作用下,桥上道床板横向下部会开裂。

桥上道床横向配筋计算过程与纵向配筋相同,此处不再赘述。经检算,桥上道床板横向下层每轨枕间配 3 根 ϕ 14 mm 钢筋,上层每轨枕间配 2 根 ϕ 14 mm钢筋。道床板配筋及检算结果如表 5 所示。

表 5 荷载组合为常用轮载 + 常用温度梯度 + 桥梁挠曲时桥上道床板配筋				
项目	纵向 下层	纵向 上层	横向下层	横向上层
d/mm	16	16	14	14
n	18	8	3/轨枕间距	2/轨枕间距
$\rho/\%$	0.61	0.23	0.51	0.32
w_{cr}/mm	0.22	0.21	0.23	0.23
注: ρ 为配筋率				

2.3 路基地段道床配筋

根据荷载组合进行道床板混凝土应力、钢筋应力检算及裂缝宽度检算。道床板配筋计算过程和桥梁地段相同。由计算得,纵向底部配置 17 根 ϕ 16 mm钢筋,纵向顶部配 8 根 ϕ 16 mm 钢筋;横向底部每轨枕间配 3 根 ϕ 14 mm 钢筋,横向顶部每轨枕间配 2 根 ϕ 14 mm 钢筋。钢筋道床板配筋及检算结果如表 6 所示。

3 结语

不同地段连块式轨枕整体道床在荷载组合作

表 6 荷载组合为常用轮载 + 常用温度梯度时 路基上道床板配筋				
项目	纵向 下层	纵向 上层	横向下层	横向上层
d/mm	16	16	14	14
n	17	8	3/轨枕间距	2/轨枕间距
$\rho/\%$	0.55	0.26	0.45	0.32
w_{cr}/mm	0.21	0.22	0.22	0.22

用下,其整体道床配筋数量通过弯矩和裂缝值确定。其中:隧道地段道床板混凝土在荷载组合作用下不会开裂,根据构造配置钢筋;桥梁和路基地段在荷载组合作用下,道床混凝土会开裂,道床配筋由裂缝限值控制。该配筋结果可为城市轨道交通连块式轨枕整体道床的设计提供参考。

参考文献

[1] 徐锡江.城市轨道交通地下线整体道床设计相关问题探讨[J].路基工程,2013(1):81.

[2] 畅德师,付琪璋.一种无砟轨道连块式轨枕:201420797127.6[P].2015-06-03.

[3] 刘学毅,赵坪锐.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,2008.

[4] 张岷.城市轨道交通用新型连块式轨枕设计研究[J].铁道建筑,2017(11):122.

[5] 杨宝峰,于春华.铁路轨枕现状及发展[J].铁道工程学报,2016(12):105.

[6] ESVELD C.现代铁路轨道[M].王平,陈嵘,井国庆,译.北京:中国铁道出版社,2014.

[7] 赵坪锐,章元爱.无砟轨道荷载弯矩计算方法[J].中国铁道科学,2009,30(5):1.

[8] 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.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[9] 朱应娟.合武铁路无砟轨道双块式轨枕设计[J].铁道工程学报,2009(8):60.

[10] 孙立,陈秀方.双块式无砟轨道轨枕的优化设计研究[J].铁道建筑技术,2008(5):1.

(收稿日期:2018-03-16)