

# 现代有轨电车 无砟轨道的路基设计探讨

赵晓华<sup>1</sup> 李超群<sup>2</sup> 杨珂<sup>1</sup> 秦洪雨<sup>1</sup>

(1. 北京城建设计研究总院有限责任公司 北京 100037; 2. 北方工业大学 北京 100041)

**摘要** 现代有轨电车无砟轨道路基与传统的有砟轨道路基、客运专线无砟轨道路基相比,有一定的差别。结合工程设计经验,从路基面、基床厚度及填料要求、沉降要求、排水等方面对现代有轨电车路基设计进行分析与论述,对无砟轨道路基结构进行计算分析,量化基床厚度、基床表层厚度、基床底层厚等技术指标,可为其他新建有轨电车工程设计提供参考。

**关键词** 有轨电车;无砟轨道;路基设计;基床厚度;工后沉降

**中图分类号** U482.1 **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2013)06-0194-03

路基是承受轨道和列车荷载的重要构筑物,应具有足够的强度、稳定性和耐久性,以保证列车的运营安全。现代有轨电车无砟轨道路基设计无现行的国家规范,国内路基设计经验相对较少。有轨电车线路一般位于市政道路路侧或路中,轨顶面与道路路面基本一致,路基面以上轨道两侧一般进行绿化或硬化。笔者依据北京现代有轨电车西郊线、沈阳市浑南新区现代有轨电车等工程的设计经验对有轨电车无砟轨道路基结构设计进行探讨。

## 1 路基面

有轨电车的无砟路基面一般低于轨顶面约 50 cm (轨道结构高度),路基面全部埋入地下,一般为平面。

有轨电车半体宽度一般不大于 1.325 m,考虑管限界、管线埋设等要求,全埋入式无砟轨道的路基面宽度一般为 1.8 m + 线间距 + 1.8 m。路基面以外可根据具

体情况设置 0.5 m 宽的护道。路基面一般不考虑曲线加宽,当轨道结构和其他设备有特殊要求时,需根据具体情况确定。

## 2 基床

### 2.1 基床厚度

路基基床分为基床表层和基床底层,是对列车运营影响比较大的部分。因此,一般将动应力与自重应力之比(0.2 或 0.1)作为确定基床厚度的依据。压实土的动三轴试验表明,当动应力与自重应力之比在 0.2 以下时,加载 10 万次产生的塑性累积变形在 0.2% 以下,而且很快能达到稳定。考虑到有轨电车的轴重一般不大于 12 t,路基基床填料较好,压实度要求高,故采用动应力与自重应力之比 0.2 为确定基床厚度的标准。

应力曲线表明,动应力在线路纵向路基面上的分布如图 1 所示,图中  $\sigma_{\max}$  为车轮正下方路基面的应力最大值。如沿线路纵向距该车轮  $L$  处路基面应力衰减为零,则  $L$  为扩散距离。

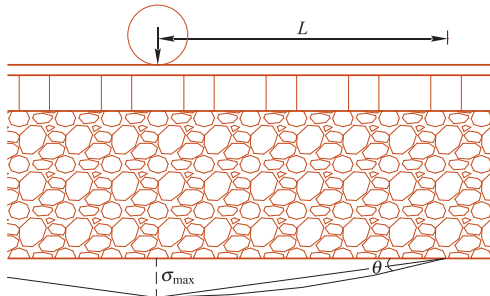


图 1 动应力沿线路纵向在路基面的扩散

车轮正下方路基面动应力最大值与沿线路纵向扩散距离  $L$  的关系式为

$$L = \sigma_{\max} / (82.9 + 6.17\sigma_{\max}) 10^{-1} \quad (1)$$

动应力沿深度的衰减理论计算一般采用布氏 (Boussinesq) 理论,在长方形均布荷载作用下,荷载中

收稿日期: 2013-10-25

作者简介: 赵晓华,男,高级工程师,从事无砟轨道的路基结构设计, zhaoxiaohua@buedri.com

基金项目: 北京市科委科技计划课题 (Z090506006309017)

心下深度为  $z$  处的垂直应力为

$$\sigma = \frac{2P_0}{\pi} \left[ \frac{mn}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \frac{1+m^2+2n^2}{(1+n^2)(m^2+n^2)} + \tan^{-1} \frac{m}{n\sqrt{1+m^2+n^2}} \right] \tag{2}$$

式中： $P_0$  为荷载强度，kPa； $m = a/b$ ； $n = z/b$ ； $a, b$  为长方形荷载的边长之半； $z$  为深度，m，自路基顶面算起。

有轨电车的设计运行最高速度一般大于 70 km/h，动应力沿深度方向的衰减曲线见图 2。从图中可以看出，当深度  $z = 1.1$  m 时，动应力约为 7.2 kPa，此时路基填料的自重应力为 36.5 kPa（含轨道范围内的绿化或硬化荷载）。因此，时速为 70 km/h 的现代有轨电车路基基床厚度采用 1.1 m。

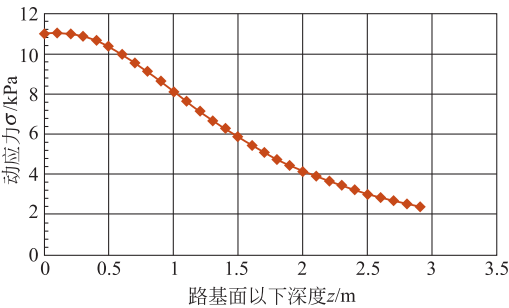


图 2 动应力沿深度方向的衰减曲线

2.2 基床表层

确定基床表层厚度时采用目前国外比较通用的两方面原则。

变形控制：在列车荷载作用下，以路基顶面变形量不大于 3.5 mm 为控制条件。

强度控制：以作用在路基基床底层顶面的动应力不大于基床底层填料的允许动应力为控制条件。

2.2.1 变形控制

变形控制的目的是使列车运行平顺，使基床表层产生的应变不会导致表面铺装开裂或塑性变形过大而降低基床表层寿命。根据布氏 ( Boussinesq ) 理论，对于作用在双层弹性地基上的长方形均布荷载（见图 3），其中心点的沉降为

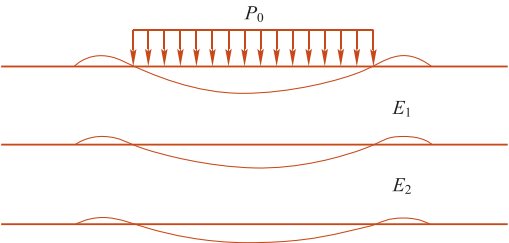


图 3 变形计算图

$$\omega_0 = \frac{2bP_0(1-\mu^2)}{\pi E_2} \left\{ \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{1+m^2+n_1^2q^{\frac{2}{3}}}+m}{\sqrt{1+m^2+n_1^2q^{\frac{2}{3}}}-m} \right) + m \ln \left( \frac{\sqrt{1+m^2+n_1^2q^{\frac{2}{3}}}+1}{\sqrt{1+m^2+n_1^2q^{\frac{2}{3}}}-1} \right) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} n_1q^{\frac{1}{3}} \tan^{-1} \frac{m}{n_1q^{\frac{1}{3}}\sqrt{1+m^2+n_1^2q^{\frac{2}{3}}}} \right] \left( 1 - \frac{1}{q} \right) + \frac{2}{q} \left[ \ln(\sqrt{1+m^2}+m) + m \ln \left( \frac{\sqrt{1+m^2}+1}{m} \right) \right] \right\} \tag{3}$$

式中： $n_1 = h/b$ ； $q = E_1/E_2$ ； $m = a/b$ 。 $E_1$  为基床表层弹性模量，MPa； $E_2$  为基床底层弹性模量，MPa； $P_0$  为荷载强度，kN/m； $h$  为基床表层厚度，m； $m$  为荷载长宽比； $\mu$  为泊松比。

拟定基床表层采用级配碎石，基床表层厚度为 0.4 m，基床表层  $K_{30} \geq 190$  kPa/m，基床底层  $K_{30} \geq 110$  kPa/m，其基床表层变形量为 3.05 mm，满足变形值不大于 3.5 mm 的要求。

2.2.2 强度控制

根据动应力沿深度方向的衰减曲线，当基床表层厚度为 0.4 m 时，其动应力为 10.6 kPa。根据填土动强度与压实度的三轴试验，可确定基床表层压实度达到重型击实标准的 97%，其允许强度不小于 25 kPa。

基床表层是轨道结构的直接基础，需要较大的强度、刚度和稳定性，国内外实践表明，不良基床表层导致的轨道变形是良好基床表层轨道变形的几倍，所以对基床表层材料的种类和压实指标要求相对较高。基床表层推荐采用级配碎石，材料规格应符合《客运专线基床表层级配碎石暂行技术条件》的要求，基粒径的级配范围、压实标准应分别符合表 1、2 的要求。

表 1 级配碎石的粒径级配范围

方孔筛边长/mm	0.075	0.1	0.5	1.7	7.1	16	25	45
过筛质量百分率/%	0~7	0~11	7~32	13~46	41~75	67~91	82~100	100

表 2 基床表层级配碎石的压实指标

填料	压实标准			
级配碎石	地基系数 $K_{30}/(\text{MPa/m})$	变形模量 $E_{vd}/\text{MPa}$	动态变形模量 $E_{v2}/\text{MPa}$	孔隙率 $n/\%$
	$\geq 190$	$\geq 50$	$\geq 120$	$< 18$

2.3 基床底层

根据基床厚度与基床表层厚度的代数差，确定基床底层厚度为 0.7 m。基床底层也是承受轨道列车荷

载的主要部分,对基床底层的填料应推荐采用 A、B 组填料,其压实标准应满足表 3 的要求。

表 3 基床底层的压实指标

压实标准	砂类土及细砾土	碎石类及粗砾土
地基系数 $K_{30}/(\text{MPa}/\text{m})$	$\geq 130$	$\geq 150$
动态变形模量 $E_{vd}/\text{MPa}$	$\geq 35$	$\geq 35$
压实系数 $K$	$\geq 0.95$	—
孔隙率 $n/\%$	—	$\leq 28$

2.4 基床以下填料

客运专线铁路基床以下路堤填料应满足:在列车和路堤自重荷载作用下,路堤能保持长期稳定;路堤本体的压缩沉降能很快完成;其力学特性不会受其他因素(水、温度、地震)影响而发生不利于路堤稳定的变化。

因此,只要土质经过处理后能满足上述要求,就可以用作基床以下路堤填料(A、B、C 组填料及改良土),其压实指标见表 4。

表 4 基床以下的压实指标

压实标准	细料土改良土	砂类土及细砾土	碎石类及粗砾土
地基系数 $K_{30}/(\text{MPa}/\text{m})$	$\geq 90$	$\geq 110$	$\geq 130$
压实系数 $K$	$\geq 0.92$	—	—
孔隙率 $n/\%$	—	$\leq 31$	$\leq 31$

3 工后沉降

无砟轨道对工后沉降的要求相对较高,应综合考虑线路条件、地质资料、建设工期等因素确定地基处理的方式。

路基在无砟轨道铺设完成后的工后沉降,应满足扣件调整和线路竖曲线圆顺的要求,一般不超过扣件允许的沉降调高量 15 mm;对沉降比较均匀、长度大于 20 m 的路段,可适当放宽标准,一般不大于 50 mm,并且轨面调整后的竖曲线半径应满足

$$R_{sh} \geq 0.4v_{sj}^2 \tag{4}$$

式中: $R_{sh}$ 为轨面圆顺的竖曲线半径,m; $v_{sj}$ 为设计最高速度,km/h。

路桥、路隧过交界处的差异沉降不应大于 6 mm,过渡段

沉降造成的路基与桥梁、隧道的不平顺折角不大于 1/1 000。

4 路基排水

全埋入式的路基面一般低于相邻的市政道路,同时,路面以上的轨道两侧要进行绿化,有轨电铁路基设计应注重排水设计。

一般情况下,在绿化区段每隔 50 m 设置一处进入式横截沟,并在两横截沟之间设置雨水收集管,收集管末端伸入横截沟内,通过横截沟将雨水及时排出路基范围之外。在绿化与硬化的分界处应增设横截沟,防止硬化路面的雨水排至绿化区段。

5 结语

为了满足现代有轨电车无砟轨道对路基的要求,路基应具备足够的强度、刚度和稳定性。本文结合工程应用,对现代有轨电车无砟轨道路基结构进行计算分析,量化了基床厚度、基床表层厚度、基床底层厚等技术指标,并对填料做出要求,以期与同行共勉。

参考文献

[1] 屈晓辉,崔俊杰. 客运专线铁路路基设计技术[M]. 北京:中国科技出版社,2008:7-40.

[2] 铁建设函(2005)754 客运专线无砟轨道铁路设计指南[M]. 北京:中国铁道出版社,2005:10-19.

[3] TB 10621—2009 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2009:24-47.

[4] TB 10001—2005 铁路路基设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.

[5] 张淑贤. 对铁路路基设计中几个问题的探讨[J]. 山西建筑,2010,36(27):293-294.

[6] 秦洪雨. 堆载预压对京沪高速铁路济南西客站复合地基沉降的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.

[7] 王连俊,丁桂伶,刘升传,等. CFG 桩复合地基柔性荷载试验研究[J]. 铁道建筑,2009(7):74-75.

[8] 苏谦,王武斌,白皓,等. 非埋式桩板结构路基承载机制[J]. 交通运输学报,2012,12(1):19-24.

(编辑:郝京红)

Discussion on Roadbed Design of Modern Tram Ballastless Track

Zhao Xiaohua<sup>1</sup> Li Chaoqun<sup>2</sup> Yang Ke<sup>1</sup> Qin Hongyu<sup>1</sup>

(1. Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037;  
2. North China University of Technology, Beijing 100041)

**Abstract:** Modern tram ballastless subgrade is different from traditional ballastless tracks and those ballastless tracks of dedicated passenger railways. On the basis of the engineering design experiences, the design of subgrade of modern trams was analyzed and discussed with comprehensive consideration of subgrade surface, the thickness of the subgrade bed, filler requirements, the settlement requires and drainage.

**Key words:** ballastless track; subgrade design; the thickness of subgrade bed; settlement after civil construction