

文章编号:1006-2106(2013)12-0033-03

委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路有砟道床厚度研究*

杨吉忠** 韩义涛 潘自立

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:研究目的:过薄的道床厚度不能满足轨道结构承载能力的要求,而过高的道床厚度将增加建设成本,如何选择一个合理的道床厚度设计值在海外 EPC 工程中显得尤为重要,本文根据委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路设计运营条件,以道床的累积残余变形速率作为轨道几何状态恶化及养护维修工作量的评估指标,不仅从路基基床表面承载能力和轨道整体刚度方面,而且还从后期养护维修的方面,研究比较四种不同道床厚度的优劣,从而选择一个最佳的道床厚度设计值。

研究结论:(1)轨道整体刚度是随着道床厚度的增加而增加,但增加幅度很小,道床厚度对轨道减振和弹性没有大的影响;(2)随着道床厚度增大,路基表面应力减小,道砟厚度为 350 mm 时,路基面应力只有 0.12 MPa,安全系数已达到 1.5;(3)随着道床厚度的增大,道床振动加速度减小,道床累积变形速率随之减小,在其他条件不变的情况下,道床厚度从 250 mm 增加到 350 mm,道床累积变形速率减小 66.12%,这将极大地减少轨道养护维修工作量,延长道床使用寿命;(4)建议委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路道床厚度为 350 mm;(5)本文研究方法及其结论可供类似工程参考。

关键词:道床厚度;轨道整体刚度;道床累积变形速率;养护维修

中图分类号:U213.7 **文献标识码:**A

Research on the Ballast Depth in Tinaco - Anaco Railway Line

YANG Ji - zhong, HAN Yi - tao, PAN Zi - li

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: **Research purposes:** The thinner ballast depth can not meet the requirements of track structure's bearing capacity, while the thicker ballast depth will increase construction costs, It is very important to choose a reasonable ballast depth in overseas EPC projects. According to the operation terms in Tinaco - Anaco Railway line in Venezuela, the rate of residual track deformation is regarded as the value to evaluate deterioration of the track geometrical state and maintenance work in this paper. In order to define a best track depth from four kinds of ballast depth, the track quality is studied with respect to not only the bearing capacity of subgrade and track stiffness, but also the track maintenance.

Research conclusions: (1) The track stiffness increases with the increasement of the ballast depth, but the increasement is small. The ballast depth has little influence on the track elasticity. (2) With the increase of the ballast depth, the stress on the subgrade surface is reducing, when the ballast depth reaches 350 mm, the stress on the subgrade surface is 0.12 MPa, the safety coefficient has already been up to 1.5. (3) With the increase of the ballast depth, the acceleration of ballast is reducing, so it is the same with the rate of residual track deformation. With other conditions no changing, When the ballast depth rises from 250 mm to 350 mm, the rate of residual track deformation reduces by 66.12%, which will reduce the maintenance work greatly, and prolong the service life of track bed. (4) It is suggested that the ballast depth adopts 350 mm in the Tinaco - Anaco Railway line. (5) The research method and conclusion can be applied to similar projects.

Key words: ballast depth; track stiffness; rate of residual track deformation; maintenance

* 收稿日期:2013-03-27

** 作者简介:杨吉忠,1980 年出生,男,工程师。

委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路为客货共线干线铁路,全长 471.5 km,客车设计速度 220 km/h,最大设计轴重 17 t,货车最高行车速度 120 km/h,最大设计轴重 25 t。该线迄今为止是委内瑞拉历史上最重要的一个铁路项目,也是我国在委的第一个铁路 EPC 工程。在 EPC、BOT、PPP 等高端业务模式越来越多地牵涉到技术标准的应用问题,采用哪个国家的技术标准成为业主与承包商争议的焦点。在海外工程中迫切需要中国铁路设计标准“走出去”,而中国规范在“走出去”的时候也并非一帆风顺,由于中委两国轨道设计标准关于道床断面尺寸的规定不一,加上委方对中国规范的不熟悉,无法总以“经验”来解释设计的缘由,因此,根据 Tinaco - Anaco 铁路的运营条件,针对道床厚度进行了深入的研究,从而获得委方对我国轨道设计标准的认可。

道床厚度是指直线地段或曲线地段内轨枕底与路基面之间的道砟层厚度。过去道床厚度主要是根据道床及路基表面承载能力来确定,很少与后期养护维修量联系起来,本文根据委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路设计运营条件,从路基基床表面承载能力、轨道整体刚度及后期养护维修等方面,研究 250 mm、300 mm、350 mm 和 400 mm 四种道床厚度的优劣,从而选择一个最佳的道床厚度值。

1 道床厚度对路基基床表面应力的影响

1.1 路基基床表面应力计算

根据本线路基设计标准,路基基床由表层和底层构成,表层为 0.6 m 厚的级配碎石,其容许承载力为 0.18 MPa;底层厚 1.9 m,其承载力要求不小于 0.15 MPa。参考《铁路工程设计技术手册—线路》,假定道床顶部压应力在道床内按 φ 角向下扩散到路基基床表面,路基顶面最大压应力按下式计算:

$$\sigma_{ld} = \frac{R_d}{2hl_e \text{tg}\varphi} \tag{1}$$

式中 σ_{ld} ——路基基床表面应力(MPa);
 h ——道床厚度(mm);
 l_e ——单股钢轨下的轨枕有效支承长度,取 1 300 mm;
 φ ——压力扩散角,取 35°。
 R_d ——枕上压力(N)。

$$R_d = (1 + \alpha + \beta) R_0 \tag{2}$$

式中 α 、 β ——速度、曲线偏载影响因子,分别为 0.54 和 0.157;
 R_0 ——静止车轮系作用下的枕上压力。
$$R_0 = \frac{ka}{2} \sum P_{0i} \eta_i \tag{3}$$

式中 k ——钢轨基础弹性模量与钢轨弯曲刚度的相对比值(mm^{-1});
 a ——轨枕间距(mm),取 600 mm;
 P_{0i} ——作用于钢轨上的各机车车轮静重(N),为 250 000 N;
 η_i ——影响线系数, $\eta_i = e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$ 。
$$k = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \tag{4}$$

式中 E ——钢轨弹性模量,取 2.10×10^5 MPa;
 I ——钢轨断面水平惯性矩,取 3.06×10^7 mm⁴;
 u ——钢轨基础弹性模量(MPa), $u = D/a$;
 D ——轨道支座刚度,取 30 000 N/mm。

不同的道床厚度下,轨道对路基基床表面产生的压应力计算结果如表 1 所示。

表 1 不同道床厚度下路基基床表面压应力

计算参数	计 算 值			
道床厚度 h_b /mm	250	300	350	400
枕上压力 R_d /N	7.83×10^4			
压力扩散角 φ /°	35			
路基基床表面应力 σ_{ld} /MPa	0.17	0.14	0.12	0.11

1.2 不同道床厚度对路基面的应力分析

(1)表 1 显示了不同道砟厚度下,从轨道上传至路基面的应力计算结果,道砟厚度为 250 mm 时,路基面应力为 0.17 MPa,接近路基承载能力容许限值;道砟厚度为 300 mm 及以上时,路基面应力为 0.14 MPa 及以下,均小于 0.18 MPa,满足设计要求。

(2)道砟厚度为 250 mm,安全系数较低,路基表面应力接近容许限值。道砟厚度为 300 mm,安全系数达 1.28,基本能满足路基面受力均匀和路基承载力的要求。但在列车高轴重和高速度的线路上,为使轨道更加的稳定耐用,一般适当的提高道砟厚度,以减小路基面应力,并使其受力更加均匀。

(3)表 1 中计算结果显示:路基基床表面的应力随道床厚度的增加而减小,而应力减小的幅度从道床厚度达到 350 mm 以后就逐渐缩小,因此,采用 350 mm 的道床厚度是最为经济的。此时,路基基床表面的应力为 0.12 MPa,安全系数为 1.5,满足设计要求。

2 道床厚度对轨道刚度的影响

轨道刚度 K_t 定义为使钢轨产生单位下沉所需的竖向荷载。其表达式如下:

$$K_t = \frac{2D}{ka} \tag{5}$$

式中各参数意义同前。
不同道床厚度对轨道刚度的影响结果如表 2

所示。

表 2 不同道床厚度下轨道刚度

计算参数	数 值			
道床厚度 h_b/mm	250	300	350	400
道床刚度 $K_b/(\text{kN/mm})$	314	282	259	242
路基刚度 $K_r/(\text{kN/mm})$	106	123	140	158
轨道刚度 $K_t/(\text{kN/mm})$	99	102	104	106

由表 2 中可以看出,道床的刚度随着道床厚度的增加而降低,道床厚度从 250 mm 增加到 400 mm,道床刚度从 314 kN/mm 降低至 242 kN/mm,降低幅度为 22.9%。虽然道床刚度的降低是有利于轨道的减振和保持弹性的,但是因受路基刚度的影响,轨道刚度并没有同时降低,而是随着道床厚度的增加而增加的。道床厚度从 250 mm 增加到 400 mm 时,轨道刚度从 99 kN/mm 增加到 106 kN/mm,增加幅度为 7.1%,增加的幅度较小。由此可见,道床厚度对轨道刚度的影响很小。

对于保持轨道弹性和减振效果来说,道床刚度和轨道刚度都不宜太大。当道床厚度从 300 mm 增加至 350 mm 时,道床的刚度从 282 kN/mm 降低至 259 kN/mm,降低幅度为 8.1%;而轨道刚度仅从 102 kN/mm 增加至 104 kN/mm,增加幅度为 3.9%,故对保持轨道弹性和减振效果来说,有必要适当增加道床厚度,采用道床厚度 350 mm 是一个合理的选择。

3 道床厚度对养护维修工作量的影响

中国既有线的养路经验一再表明,60% ~ 80% 的养护维修工作量都用于道床作业,主要是整治轨道几何状态的恶化,而轨道几何状态的恶化又与轨道结构的累积残余变形速率密切相关。国内外的运营观测资料表明,轨道的累积残余变形速率越大,所导致的轨道几何尺寸的变化也愈大,在轨道残余变形速率与轨道几何尺寸的变化之间存在近似的线性关系。因此,轨道的累积残余变形速率可以作为轨道几何状态恶化及养护维修工作量的评估指标。有砟道床累积残余变形速率的大小,表征轨道结构的稳定耐用性。

根据国内外重复荷载作用下道床累积变形的试验结果,西南交通大学王其昌教授提出了道床顶面残余变形速率 α 与道床顶面应力 σ_b 和道床振动加速度 a_b 平方的乘积之间呈近似的线性关系,为分析简便又不失一般意义,可表示为:

$$\alpha \propto \sigma_b \cdot a_b^2 \tag{6}$$

$$a_b \propto R_d/m_b \tag{7}$$

式中 R_d ——枕上压力;

σ_b ——道床顶面应力;
 a_b ——道床振动加速度;
 m_b ——道床参振质量。

需要注意的是,上式中使用的是正比符号“ \propto ”,而非等号“ $=$ ”,只是说明公式左侧与右侧呈线性正比关系。

3.1 道床顶面应力 σ_b

道床顶面应力按下式计算:

$$\sigma_b = \frac{R_d}{b \cdot l_e} \tag{8}$$

式中 b ——轨枕底面宽度,混凝土枕取平均宽度,取 300 mm。

3.2 道床参振质量 m_b

道床振动按扩散角 $\varphi = 35^\circ$ 传递,轨下支承体参振质量 m_b 为:

$$m_b = \rho h_b \left[l_e b + (l_e + b) h_b \text{tg} \varphi + \frac{4}{3} h_b^2 \text{tg}^2 \varphi \right] \tag{9}$$

式中 ρ ——道床密度(kg/m^3),取 1 800 kg/m^3 。

3.3 道床振动加速度 a_b

道床振动加速度 a_b 与枕上压力和参振质量呈一定的近似关系,本文按振动加速度比值来评价道床厚度对振动加速度的影响。表 3 中 a_b 代表不同道床厚度的振动加速度与道床厚度为 250 mm 时的振动加速度的比值。 α 代表不同道床厚度的累积残余变形速率与道床厚度为 250 mm 时的累积残余变形速率的比值。

表 3 不同道床厚度下道床累积残余变形速率

计算参数	计 算 值			
道床厚度 h_b/mm	250	300	350	400
道床顶面应力 σ_b/MPa	0.20			
道床参振质量 m_b/kg	159.96	211.93	271.59	339.38
道床振动加速度比值 $a_b/\%$	100.00	76.17	58.44	48.24
道床累积残余变形速率比值 $\alpha/\%$	100.00	58.54	33.88	23.82

从表 3 中看出,道床厚度从 250 mm 增加到 300 mm 时,道床累积残余变形速率降低 41.5%,道床厚度从 300 mm 增加到 350 mm 时,道床累积残余变形速率降低 42.1%,故将道床厚度增加至 350 mm,对保持道床几何形态和延长道床使用寿命的作用明显的。

若进一步增加道床厚度,将道床厚度从 350 mm 增加至 400 mm,道床累积残余变形速率降低 29.7%,降低的幅度逐渐缩小,对改善道床已没有实质性的效果,道床厚度太厚,不经济,故道床厚度采用 350 mm 是一个比较经济合理的选择。

(下转第 68 页)

Railway First Survey & Design Institute Group Ltd, 2011.

[3] 曹峰. 兰州第三系砂岩水稳性特征隧道施工研究[J]. 铁道工程学报, 2012(12): 21 - 23.

Cao Feng. Special Research on Water - stability Characteristics of Tertiary System Sandstone in Lanzhou Area During Tunnel Construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(12): 21 - 23.

[4] 刘丹, 关宝树. 铁路隧道涌(突)水基本特征及地质环境效应[C]. 第八届铁路隧道及地下工程科技动态论文集, 1995: 212 - 219.

Liu Dan, Guan Baoshu. Railway Tunnel Water Characteristics and Geological Environmental Effect [C]. The Eighth Railway Tunnel and Underground Engineering Technology Dynamic Papers, 1995: 212 - 219.

[5] TB 10049—2004, 铁路工程水文地质勘察规程[S].
TB 10049—2004, Code for Hydrogeological Investigation of Railway Engineering[S].

[6] 徐军, 郑颖人. 隧道围岩弹塑性随机有限元分析及可靠度计算[J]. 岩土力学, 2003(1): 70 - 74.

Xu Jun, Zhen Yingren. Tunnel Surrounding Rock Elastic Plastic Calculation of Stochastic Finite Element Analysis and Reliability [J]. Rock - soil Mechanics, 2003(1): 70 - 74.

[7] 李德海, 王东攀, 高保彬. 围岩粘弹性模型有限元模拟分析[J]. 矿冶工程, 2005(1): 1 - 8.

Li Dehai, Wang Dongpan, Gao Baobin. Model of Finite Element Analysis of Surrounding Rock Visoelastic [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005(1): 1 - 8.

(编辑 吕 洁)

(上接第 35 页)

4 结 论

(1) 轨道整体刚度是随着道床厚度的增加而增加的, 但增加幅度很小, 对轨道减振和弹性没有大的影响。

(2) 随着道床厚度增大, 路基表面应力减小。道床厚度为 250 mm 时, 路基表面应力为 0.17 MPa, 接近路基面承载能力不应小于 0.18 MPa 的要求, 当道砟厚度为 350 mm 时, 路基面应力只有 0.12 MPa, 安全系数已达到 1.5。

(3) 随着道床厚度的增大, 振动加速度减小, 道床累积变形速率随之减小, 在其他条件不变的情况下, 道床厚度从 250 mm 增加到 350 mm, 道床累积变形速率减小 66.12%, 这将极大地减少轨道养护维修工作量, 延长道床使用寿命。

(4) 委内瑞拉 Tinaco - Anaco 铁路至少需要采用 300 mm 的道床厚度, 采用 350 mm 的道床厚度可以很大程度上提高道床和路基的受力状态, 减少养护维修工作量, 延长轨道的使用寿命, 但继续增加道床厚度至 400 mm 已没有实际意义。考虑到该线为最大行车速度 220 km/h 的客货混运铁路, 综合世界发达国家高速铁路的运营经验, 为确保铁路的安全、可靠、少维修, 建议采用道床厚度 350 mm。

参考文献:

[1] 肖宏, 高亮, 侯博文. 铁路道床振动特性的三维离散元分析[J]. 铁道工程学报, 2009(9): 14 - 17.

Xiao Hong, Gao Liang, Hou Bowen. Analysis of Ballast

Dynamic Behavior with Three - dimensional Discrete Element Method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(9): 14 - 17.

[2] 张红平. 中国与法国高速铁路有砟轨道设计标准对比分析[J]. 铁道工程学报, 2011(2): 61 - 64.

Zhang Hongping. Comparative Analysis of the Ballast Track Design Standards of High - speed Railway between China and France [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(2): 61 - 64.

[3] TB 10082—2005, 铁路轨道设计规范[S].
TB 10082—2005, Code for Design on Track of Railway [S].

[4] 铁建设函[2005]285 号, 新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定[S].

Railway Construction Letter [2005] No. 285, Interim Design Provisions for a New 200 km/h Mixed Passenger and Freight Railway[S].

[5] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册—线路[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.

China Railway First Survey and Design Institute. Railway Engineering Technical Manual - Route [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.

[6] Coenraad Esveld. Modern Railway Track (2nd Edition) [M]. The Netherlands: MRT - Productions, 2001.

[7] 佐藤吉彦. 新轨道力学 [M]. 徐涌, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2001.


Sato Yoshihiko. New Track Mechanics [M]. Xu Yong, Translate. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.

(编辑 赵立兰)

委内瑞拉Tinaco-Anaco铁路有砟道床厚度研究

作者：[杨吉忠](#)，[韩义涛](#)，[潘自立](#)，[YANG Ji-zhong](#)，[HAN Yi-tao](#)，[PAN Zi-li](#)

作者单位：[中铁二院工程集团有限责任公司](#)，[成都](#)，[610031](#)

刊名：[铁道工程学报](#) 

英文刊名：[Journal of Railway Engineering Society](#)

年，卷(期)：[2013](#)(12)

参考文献(7条)

1. [肖宏](#); [高亮](#); [侯博文](#) [铁路道床振动特性的三维离散元分析](#)[期刊论文]- [\(H\)铁道工程学报](#) 2009(09)
2. [张红平](#) [中国与法国高速铁路有砟轨道设计标准对比分析](#)[期刊论文]- [\(H\)铁道工程学报](#) 2011(02)
3. [铁路轨道设计规范](#)
4. [新建时速200公里客货共线铁路设计暂行规定](#)
5. [铁道部第一勘测设计院](#) [铁路工程设计技术手册-线路](#) 1994
6. [Coenraad Esveld](#) [Modern Railway Track\(2nd Edition\)](#) 2001
7. [佐藤吉彦](#); [徐涌](#) [新轨道力学](#) 2001

引用本文格式：[杨吉忠](#). [韩义涛](#). [潘自立](#). [YANG Ji-zhong](#). [HAN Yi-tao](#). [PAN Zi-li](#) [委内瑞拉Tinaco-Anaco铁路有砟道床厚度研究](#)[期刊论文]- [铁道工程学报](#) 2013(12)