

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.007

高速铁路沥青混凝土防水结构界面安全性分析*

张新冈¹, 蔡德钧^{2,3}, 张千里^{2,3}, 闫宏业^{2,3}, 李泰澧^{2,3}, 董涛⁴

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速轨道技术国家重点实验室, 北京 100081;
4. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了研究高速铁路无砟轨道底座板混凝土与全断面沥青混凝土封闭结构层之间抗滑移能力能否满足高速铁路行车安全, 通过现场试验以及大型通用有限元分析软件ABAQUS对该界面进行对比分析。试验结果表明: 现场试验最大剪切荷载为 35 kPa, 仿真计算结果最大剪切荷载为 37 kPa, 两者数值基本相同, 且现场试验与仿真模拟的剪应力—位移曲线整体趋势一致。得到了满足高速铁路行车安全的结论, 且为高速铁路全断面沥青混凝土防水结构设计提供了理论依据。

关键词: 高速铁路; 全断面防水结构; 沥青混凝土; 界面稳定; 剪切荷载

中图分类号: TU582.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0051-05

Interface Safety Analysis of Asphalt Concrete Waterproof Structure in High Speed Railway

ZHANG Xingang¹, CAI Degou^{2,3}, ZHANG Qianli^{2,3}, YAN Hongye^{2,3},
LI Taifeng^{2,3}, DONG Tao⁴

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;
2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited,
Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory for Track Technology of High Speed Railway,
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study whether the anti-slip ability between the concrete of ballastless track base plate and the closed structure layer of full-section asphalt concrete can satisfy the running safety of high-speed railway. The full-scale field testing and the finite element analysis software ABAQUS were used to analyze the interface. The test results show that the maximum shear stress of full-scale test is 35 kPa, and the maximum shear stress of simulation calculation is 37 kPa. The two values are basically the same, and the overall trend of full-scale test and the shear stress-displacement curve of the simulation are consistent. The conclusion satisfied the safety of high-speed railway operation and provided the theoretical basis for the design of the whole section asphalt concrete waterproof structure of high-speed railway.

* 收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 中国铁路总公司科技研究发展计划课题(2017G008-B)资助

作者简介: 张新冈(1986-), 男, 博士研究生。主要从事高速铁路路基病害等方面研究。Email: 1477873152@qq.com

Keywords: high speed railway; full section waterproof structure; asphalt concrete; interface stability; shear load

引言

高速铁路对线路平顺性要求极高^[1],随着高速铁路的运营,路基相继出现了上拱和沉降病害^[2-7],主要由雨水入渗路基本体引起和防水措施不到位有关。严重影响高铁安全性及行驶速度,部分区段实行了限速。

全断面沥青混凝土较传统防水封闭结构的优点在于消除了设缝工作,避免了嵌缝材料脱落引起的雨水入渗,从根本上消除了雨水引起的路基病害。由于单元底座板直接铺设在沥青混凝土层上,运营初期轨道结构层间粘结良好,底座板与沥青混凝土层共同承受外部荷载作用,但沥青混凝土作为承重结构层,与上表面混凝土及下表面级配碎石层材料特性、力学性能存在明显的差异,层间相互作用关系复杂,其是否能达到轨下基础结构界面粘结安全性的设计要求,是全断面沥青混凝土需要解决的关键技术问题。

本文通过现场试验及数值模拟对比分析,就全断面沥青混凝土层与支撑层混凝土界面安全性进行研究。

1 现场试验

1.1 试验概况

在全断面沥青混凝土层上按照无砟轨道实际结构和尺寸浇筑尺寸为 $19.2\text{ m}\times 3.4\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)底座板^[8],为探究沥青混凝土层铺设土工布的界面安全性,在底座板结构缝处铺设土工布及板中心处直接浇筑在沥青混凝土层上进行对比试验。由于沥青混凝土受底座板板缝处温度应力影响较大,为减小沥青混凝土应力,增加使用寿命,在图1左侧板伸缩缝左右 1.2 m 处沥青混凝土上面层设置土工膜。试验过程中采用千斤顶对混凝土板施加横向水平荷载,位移计同时记录位移,试验设备主要由底座板、沥青混凝土层、反力墩、液压千斤顶、压力传感器、位移计及棱镜等组成,反力墩装置作用在边坡上,与防水封闭结构层在同一平面。千斤顶位于沥青混凝土与反力墩间,千斤顶在

单元板上的布置个数为10,按设计点位放入千斤顶,如图1所示。

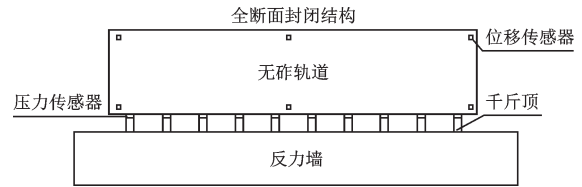


图1 现场布置

Fig.1 Site layout

测力计选用压力传感器,如图2所示,其通过质量信号转化为可测量的电信号输出,主要用于测固体间的拉力和压力,此传感器采用合金钢材质,胶密封防护处理,安装容易,使用方便。



图2 压力传感器

Fig.2 Pressure sensor

测力系统布置在每个千斤顶对应位置,用于控制每个千斤顶位施加同一水平荷载,从而避免出现混凝土底座板受力不均情况。设计加载装置及安装时应保证加载力的作用压力传感器受力轴线重合,使倾斜负荷和偏心负荷的影响减至最小。在水平调整方面,如果使用的是压力传感器的话,其底座的安装平面要使用水平仪调整直到水平;如果是多个传感器同时测量,那么底座的安装面要尽量保持在一个水平面上,保证每个传感器所承受的荷载基本一致。

位移测量采用传感器和全站同时测量,位移传感器沿底座板轨道纵向两侧布置,底座板每侧各布置三个拉线传感器;棱镜布置在底座板近轨道中心一侧,共布置10个监测点,每个监测点间隔 2 m 。

为便于数据管理及过程数据分析,试验前对横



图3 埋设监控点及拉线传感器布置

Fig.3 Embedded monitoring points and cable sensor layout

向偏移监控点的初始横向坐标进行测量,作为中线控制的基础数据。

(1) 线路初始横向坐标测量。测量时,先将棱镜插入预埋监控点的插孔内,将全站仪架设在之前选定的架站处,采用自由设站的方式设站。设站完成后,在正倒镜不少于两次的情况下对测量监控点进行测量,并取平均值作为线路横向坐标初始值。以测得的线路初始横向坐标作为线路横线位移测量的基准值,以此计算试验过程中线路的横向位移量,将数字化智能横向位移计进行初始化设置;同时将拉线传感器进行初始化设置。

(2) 加载方式采用逐级加载法。初始阶段每次加载等级为0.5 t,待位移传感器示数稳定后记录压力和位移传感器的数值;千斤顶加载到5 t后,加载等级设置为0.2 t,对底座板进行位横向位移计进行测量监控各千斤顶工作情况,包括受力及位移状态,其数据同时反馈到实时监控显示平台,以指导各千斤顶的下一级加载。底座板发生位移后,记录压力计及位移传感器示数,同时维持千斤顶的状态,试验完成后绘制压力与位移传感器随时间的变化关系。

1.2 试验结果分析

现场试验压力与位移传感器的数值如图4所示。板中和板缝处抗滑力基本相同,即100 t左右开始滑动,比目前高铁底座板直接作用在级配碎石上滑动力^[8]还要大。界面出现滑动后,土工布的设置明显降低了单元底座板与沥青混凝土层间的相互作用,不仅降低了沥青混凝土层制约底座板应力释放的负面作用,也降低了底座板伸缩对沥青混凝土层的附加应力。

防水结构上、下层位移如图5所示,当侧向荷载施加到100 t时,底座板开始发生位移;随着荷载的增大,底座板在侧向力作用下的位移包括两部分,底座板自身位移和沥青层位移。当侧向力小于180 t时,沥青层无位移产生,此时总位移即底座板

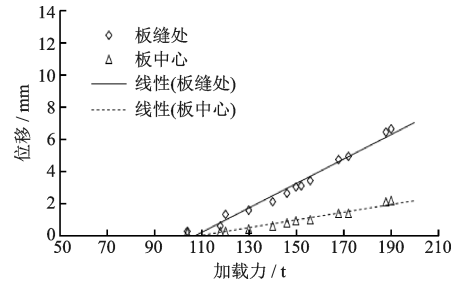


图4 现场位移与加载力变化关系

Fig.4 Field displacement and loading force variation diagram

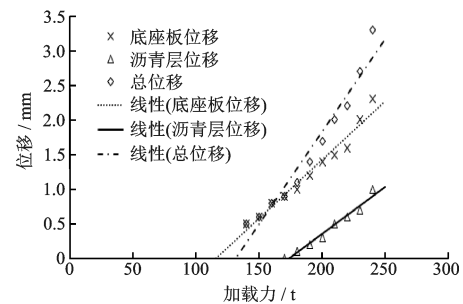


图5 底座板中心处位移关系

Fig.5 The displacement relation at the center of the base plate

位移,当侧向力施加大于180 t时,此时底座板总位移包括自身位移及沥青层的附加位移。

层间破坏主要是由黏聚力和摩擦角决定的,考虑材料的内聚破坏和界面黏结破坏,测试沥青混凝土材料的抗剪强度及黏结变形行为,剪切力与位移关系如图6所示。结果如下:初始阶段侧向力荷载施加小于35 kPa时,剪切力随着相对位移的增大而线性增大,表现为线弹性属性,此时层间应力较小;当侧向力荷载达到临界值35 kPa时,界面损伤开始产生,界面刚度随着相对位移的增加而减小,损伤逐渐恶化。当相对位移达到最大值5.5 mm左右(界面断裂能达到临界值)时,底座板与沥青混凝土界面之间黏结作用消失,转化为接触摩擦关系。

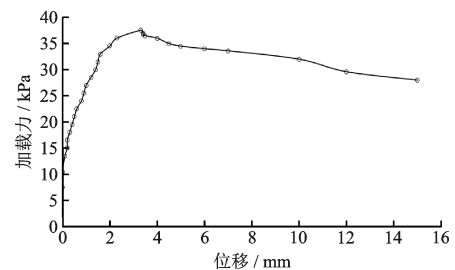


图6 底座板中心处推板加载力与位移关系

Fig.6 Diagram of loading force and displacement of pushing plate at the center of base plate

2 数值模拟

使用大型通用有限元分析ABAQUS软件对界面抗滑力进行数值模拟,模型由路堤、基床底层、基床表层、沥青混凝土层和底座板组成,在底座板与基床表层间设置沥青混凝土基床表层,该沥青混凝土层既作为路基系统的防水封闭层,也作为轨道结构的承重层,研究的沥青混凝土轨下基础结构形式如图7所示。

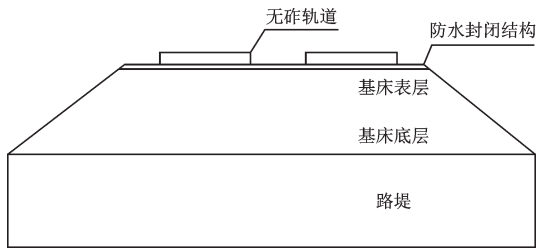


图7 沥青混凝土轨下基础结构形式

Fig.7 Asphalt concrete rail under the form of infrastructure

2.1 模型建立

模型计算参数如下:

(1)模型纵向长度:不考虑板间离缝的影响,以连续结构考虑纵向长度,同时为消除边界带来的影响,模型纵向取3块底座板的长度,共计 $(19.2 \times 3 + 0.02 \times 2) \text{ m} = 57.64 \text{ m}$;

(2)底座板:底座板的宽度取3.4 m,厚度取0.4 m,混凝土强度等级取为C40;

(3)沥青混凝土轨下基础:沥青混凝土层宽度为13.4 m,厚度为0.1 m;

(4)基床表层:厚度为0.4 m,宽度为13.6 m;

(5)基床底层:厚度为2.3 m,宽度为14.8 m;

(6)路基:厚度为5 m,宽度为21.7 m。

在本文计算中,底座板、沥青混凝土轨下基础、基床表层、基床底层、路堤均视为各向同性的线弹性材料,各部件具体材料参数见表1。

表1 板式无砟轨道结构有限元模型材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model of plate ballastless track structure

材料类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
底座板	2 300	28 000	0.2
沥青混凝土	2 400	4 568	0.3
基床表层	2 200	160	0.25
基床底层	1 900	100	0.25
路堤	1 850	60	0.25

采用内聚力模型来模拟沥青混凝土-水泥混凝土层间界面损伤的产生及扩展,在沥青混凝土-水泥混凝土层间加入内聚力层。为此,先通过ABAQUS的部件功能建立起包括底座板、沥青混凝土轨下基础、基床表层、基床底层、路基在内的实体单元,无限元边界,再建立cohesive层,该内聚力层的尺寸为 $57.64 \text{ m} \times 3.4 \text{ m} \times 0.02 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。为使各部件单元的应力和位移相互协调,在相互作用模块中,将各部件用“tie”约束绑定在一起。

在ABAQUS中,对cohesive属性进行定义,采用牵引分离模型作为材料失效法则。选定材料失效基本假设后,选取双线性本构作为模型界面的力学本构模型,它完整地描绘了沥青混凝土-水泥混凝土界面在剪切强度极限尚未达到的情况下的线弹性阶段,以及剪切破坏后材料刚度开始呈现为线性下降的软化阶段。

根据现场试验结果,对内聚力单元的参数设置如下:弹性类型选取面作用力,弹性模量与剪切模量分别为 $E=4\ 000 \text{ MPa}$, $G1=30 \text{ MPa}$, $G2=30 \text{ MPa}$ 。密度为 $2\ 350 \text{ kg/m}^3$ 。本文所建模型采用的是Quads损伤准则,也就是二次名义应力准则。然后,将损伤演化类型设置为能量,其中断裂能为 40 J/m^2 。

由于本文主要研究层间剪切强度,且由试验可知,剪切时所加荷载大致为 10 kPa ,故在第三块底座板侧边施加压强,时间历程为 0.2 s ,压强单位为Pa。荷载施加完成后的模型如图8所示。

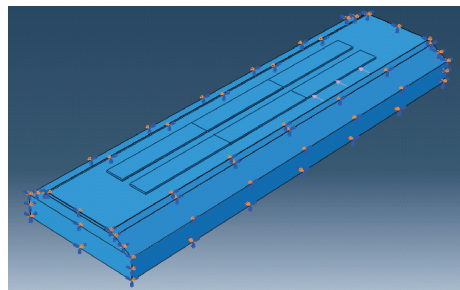


图8 有限元模型施加荷载

Fig.8 The finite element model imposes a load

2.2 结果分析

研究基床表层沥青混凝土与混凝土底座板间层间界面特性,选取沥青层与底座板层间剪切应力和底座板位移两项指标进行分析。将荷载施加于第三块底座板,故选取第三块底座板荷载中心处作为分析点。在计算响应周期结束后,得到简化结构沥青混凝土层与底座板层间位移分布云图,如图9所示。

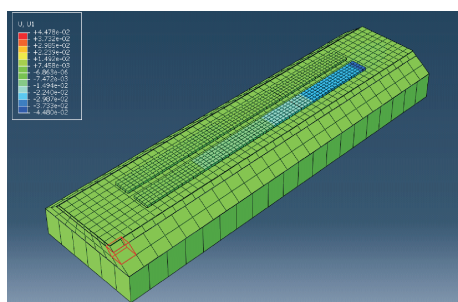


图9 层间剪应力分布云图

Fig.9 Cloud chart of interlaminar shear stress distribution

利用ABAQUS的XY数据输出功能,获得荷载中部底座板单元的水平位移、剪应力随时间变化的具体数据,输出结果如图10所示。

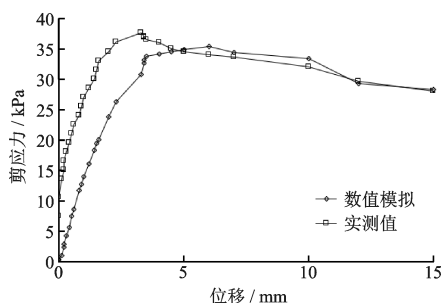


图10 剪应力—水平位移曲线

Fig.10 Shear stress—horizontal displacement curve

由图10可知,试验得到最大剪切荷载约为35 kPa,仿真计算结果最大剪切荷载约为33 kPa;试验结果在5 mm之前大于数值模拟结果是由于现场试验施工时沥青混凝土面不平,增强了界面剪切强度;试验结果在5 mm后小于数值模拟结果是由于滑动后剪切强度减小,现场试验与仿真模拟结果的剪应力-位移曲线整体趋势基本一致。

3 结论

根据基床表层沥青混凝土与混凝土底座板间层间界面现场试验与数值模拟结果及对沥青层与底座板层间剪切应力和底座板位移两项指标进行分析,所得结论如下:

(1)板中和板缝处抗滑力基本相同,设置土工对界面稳定无影响,结构安全可靠。

(2)当侧向力小于180 t时,沥青下面层无位移产生,此时总位移即底座板位移,当侧向力施加大于180 t时,此时底座板总位移包括自身位移及沥青层的附加位移。

(3)推板试验得到最大剪切荷载约为35 kPa,仿

真计算结果最大剪切荷载约为33 kPa,现场试验与数值模拟的剪应力一位移曲线整体趋势上保持较好的一致性,结果可靠。

参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京:中国铁道出版社,2006:1-70.
Zhao G T. Ballastless track structure of high-speed railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006:1-70.(in Chinese)
- [2] 张振刚,张鸿儒,郭小红,等. 高速铁路机床病害研究[J]. 中国安全科学学报,2002,20(6):18-20.
Zhang Zh G, Zhang H R, Guo X H, et al. Research on machine tool diseases of high speed railway[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2002,20(6):18-20. (in Chinese)
- [3] 刘亭,苏谦,赵文辉,等. 板式无砟轨道路基翻浆整治效果研究[J]. 铁道学报,2015,17(12):14-18.
Liu T, Su Q, Zhao W H, et al. Study on the improvement effect of slab ballastless track subgrade mortar [J]. Journal of Railway, 2015,17(12):14-18. (in Chinese)
- [4] 黄淑森. 铁路路基基床病害与整治[M]. 北京:中国铁道出版社,2005:1-20.
Huang Sh S. Disease and treatment of railway subgrade bed [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005:1-20.(in Chinese)
- [5] 胡水玲. 膨胀土地区铁路基床病害分析与整治技[D]. 西安:长安大学,2011.
Hu Sh L. Disease analysis and treatment technology of railway foundation bed in expansive soil area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [6] 张文超,苏谦,刘亭,等. 基床翻浆条件下无砟轨道路基振动特性研究[J]. 岩土力学,2014,35(12):3556-3563.
Zhang W Ch, Su Q, Liu T, et al. Study on vibration characteristics of ballastless track subgrade under the condition of base bed molting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(12):3556-3563.(in Chinese)
- [7] 石刚强. 严寒地区高速铁路路基冻胀和工程对策研究[D]. 兰州:兰州大学,2014.
Shi G Q. Study on frost heave and engineering countermeasures of high-speed railway subgrade in cold region [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese)
- [8] 铁路路基设计规范:TB10001—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
Code for design of railway subgrade: TB10001—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)