

有轨电车线路扣件埋入式轨道衔接 路面受力仿真分析*

雷震宇 赵 阳 李 莉 耿传智

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 副教授)

摘 要 目前在已经开通运营的有轨电车扣件埋入式轨道线路道口段, 轨旁沥青路面经过车辆反复碾压破坏较为严重。通过有限元软件 ABAQUS 构建轨道-路面衔接部分的有限元模型, 研究社会车辆荷载作用下轨旁沥青路面响应特性, 并对扣件罩和轨腰护块进行设计优化。根据仿真计算结果可知: 最不利工况下, 沥青层最大变形出现在沥青上面层, 为 0.423 4 mm, 最大应力出现在下面层, 为 0.971 6 MPa。随着扣件罩或轨腰护块弹性模量的提高, 沥青路面的应力和变形呈现线性减小的趋势, 其中下面层沥青的应力和变形下降幅度比上面层大; 提高到约原弹性模量的 2.5 倍时, 沥青层竖向变形最大降幅分别为 3.34%、8.27%, 最大应力降幅分别为 2.41%、7.55%; 扣件罩和轨腰护块最大应力增幅较大, 分别达到 45.69%、140.61%。故在提高部件弹性模量来改善轨旁沥青路面响应性能的同时还应该考虑在高应力状态下部件的工作性能。

关键词 有轨电车; 平交道口; 扣件埋入式轨道; 沥青路面; 有限元分析

中图分类号 U213; U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.006

Stress Simulation Analysis of the Pavement-Track Joint with Embedded Fasteners of Tram Line

LEI Zhenyu, ZHAO Yang, LI Li, GENG Chuanzhi

Abstract At present, for the track sections with embedded fasteners of operating trams, the asphalt pavement along the rail is seriously damaged after being repeatedly rolled over by vehicles. Through finite element software ABAQUS, the finite element model of rail-pavement joint section is constructed, to study the response characteristics of trackside asphalt pavement under social vehicle load and to optimize design of fastener covers and rail side protection blocks. According to the calculation results, under the most unfavorable working condition, the maximum deformation occurs in the top layer of asphalt,

which is 0.423 4 mm, and the maximum stress occurs in bottom layer, which is 0.971 6 MPa. With the increase of elastic modulus of fastener covers or rail side protection blocks, the stress and deformation of asphalt pavement shows tendency of linear decrease, of which the decrease range of stress and deformation of bottom asphalt layer is larger than that of the top layer. When the elastic modulus is increased to about 2.5 times of the original one, the maximum vertical deformation reduction of asphalt layer is 3.34% and 8.27% respectively, and the maximum stress reduction range is 2.41% and 7.55% respectively. The maximum stress of fastener covers and rail side protection blocks has increased greatly, reaching 45.69% and 140.61% respectively. Therefore, while the response performance of trackside asphalt pavement is improved by increasing the elastic modulus of components, the performance of components under high stress should also be considered.

Key words tram; level crossing; track with embedded fastener; asphalt pavement; finite element analysis

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

有轨电车线路在城市内部穿行, 与城市道路交汇形成大量的平交道口。为实现道路交通与轨道交通的协同运行, 道口段常选用埋入式轨道^[1]进行建设。道口段车辆往来频繁, 车轮的反复碾压会导致轨旁沥青路面出现不均匀沉降^[2]、开裂、破损(见图1), 长此以往将会严重影响轨道的使用寿命和稳定性, 为有轨电车的安全运行埋下隐患。所以, 对于轨旁沥青路面受力特性的研究是解决一系列病害问题的起点, 也是关键。

文献[3]通过建立有轨电车嵌入式轨道耦合系统模型, 以钢轨稳定性为指标对结构部件进行优化分析。文献[4]针对无扣件埋入式轨道结构进行计

* 国家自然科学基金项目(11772230); 上海市科委面上项目(20IR1460700)

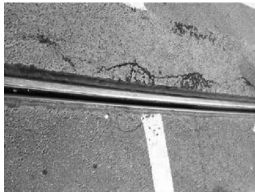


图1 有轨电车平交道口路面损伤

Fig.1 Pavement damage at tram level crossing

算分析,以钢轨稳定性、道床板变形等作为优化指标,对轨道结构进行优化设置。文献[5]指出,无扣件埋入式轨道填充材料弹性模量宜取 14 ~ 16 MPa。文献[6]研究了不同支撑条件下重载汽车对钢轨的损伤,指出连续横向支撑可以有效改善钢轨在重载车辆作用下的受力性能。文献[7]通过现场调研,指出轨道两侧沥青压实度不达标是造成沥青开裂的主要原因。文献[8]认为,温度、车辆频繁刹车是造成平交道口路面损伤的重要因素。

不难看出,目前对于平交道口路段轨道-路面结构的研究大多是针对无扣件嵌入式轨道结构,而对于有扣件轨道结构的研究较少,且对于扣件罩的受力特性研究^[9-10]主要通过室内静力试验的方式探究,缺乏系统模型下的结构分析过程。为此,本文通过建立复杂的系统性模型,对轨旁沥青路面在车辆荷载作用下的响应特性进行研究和分析,为平交道口段轨道-路面结构的设计和优化提供理论参考。

1 模型构建及参数设置

1.1 模型及材料参数

本文利用 ABAQUS 有限元软件构建平交道口埋入式轨道-路面结构模型。该模型长为 6.25 m,宽为 4.2 m,上面层为厚 40 mm 的 AC-13C 沥青混凝土,下面层为厚 80 mm 的 AC-20C 沥青混凝土,基层为厚 55 mm 的 C40 混凝土,道床为厚 0.345 m 的 C40 混凝土道床,扣件罩间距为 0.625 m,钢轨采用 60R2 槽型钢轨,轨腰护块为天然橡胶,密封垫为聚乙烯。各部件之间通过绑定接触建立连接。模型布置及有限元模型见图 2。

沥青层采用 Drucker-Prager 本构模型^[11],其中流应力比 K 取 1.0,膨胀角取 0,绝对塑性应变取 0。其余部件设为弹性体。部件材料参数见表 1 和表 2。

1.2 边界条件及荷载取值

边界条件的设定:有限元模型的底面、平行于

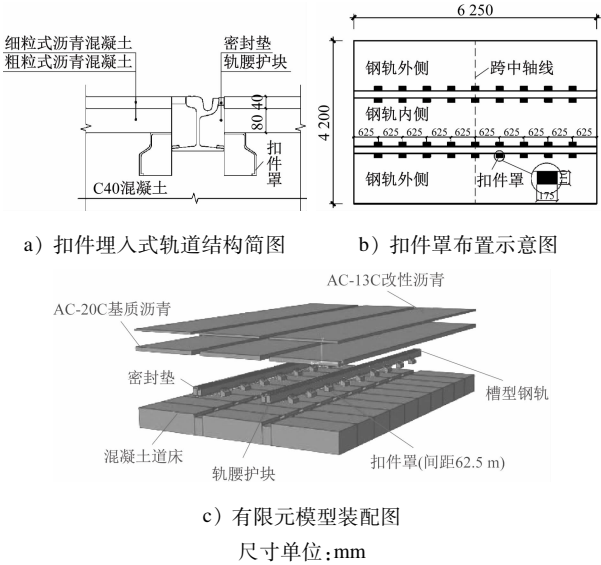


图2 扣件埋入式轨道结构简图

Fig.2 Structural diagram of track with embedded fastener

表1 Drucker-Prager 模型材料参数

Tab.1 Material parameters of Drucker-Prager model

部件	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (g/cm ³)	屈服强度/ MPa	摩擦角/ (°)
上面层	580	0.35	2.35	1.110 6	43.12
下面层	610	0.30	2.35	0.969 6	43.00

表2 弹性体部件材料参数

Tab.2 Material parameters of elastomer components

部件	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g/cm ³)
钢轨	206 000	0.30	7.85
轨腰护块	8	0.50	1.00
扣件罩	8 300	0.28	1.20
道床	32 500	0.20	2.36
密封垫	1	0.35	1.15

钢轨的两端面采用固结约束,垂直于钢轨的两端面采用对称约束。

荷载取值:参考 JTG D 60—2018《公路桥涵设计通用规范》,公路-I 级汽车荷载最大轴重为 140 kN,本文取该轴单侧轮载进行研究,即汽车荷载竖向力为 70 kN;沥青路面附着系数取 0.6^[12],故水平力为 42 kN;汽车荷载采用单圆均布荷载进行模拟,胎压取 0.56 MPa,荷载作用面积为 0.04 π m²。

1.3 工况设置

针对平交道口段社会车辆的频繁作用,本文设置 4 种工况来模拟车辆通过路面-轨道衔接部位的情况。由于沥青路面的破坏多集中在扣件罩上方

位置,故本文所有荷载均布置在扣件罩上方。具体工况见表3。

表3 工况布置

Tab.3 Arrangement of working conditions			
工况	荷载作用位置	水平力方向	模拟车辆情景
工况1	钢轨外侧	指向钢轨	驶离钢轨外侧
工况2	钢轨外侧	背离钢轨	驶向钢轨外侧
工况3	钢轨内侧	背离钢轨	驶向钢轨内侧
工况4	钢轨内侧	指向钢轨	驶离钢轨内侧

2 车辆荷载作用下沥青路面响应

通过有限元计算,各工况下沥青路面的最大应力和最大变形计算结果汇总于表4。

表4 各工况下沥青层 Mises 应力及变形计算结果

Tab.4 Summary of Mises stress and deformation calculation results of asphalt layer under each working condition			
工况	沥青层	最大 Mises 应力/MPa	最大变形/mm
工况1	上面层	0.842 7	0.423 4
	下面层	0.971 6	0.290 7
工况2	上面层	0.663 8	0.269 9
	下面层	0.611 0	0.114 2
工况3	上面层	0.656 7	0.233 4
	下面层	0.608 6	0.109 0
工况4	上面层	0.831 0	0.415 4
	下面层	0.918 4	0.286 2

分别对比表4中工况1和工况2、工况3和工况4的计算结果可知,荷载作用位置相同时,水平力指向钢轨对沥青路面更不利。分别对比工况1和工况4、工况2和工况3的计算结果可知,水平力方向一致时,荷载作用在钢轨外侧更不利。工况1下,沥青路面的最大应力和变形最大,即工况1为最不利工况。最不利工况下的沥青层应力及变形云图如图3所示。

由图3 a)可知:扣件罩顶两侧立面顶部与基层沥青层接触位置出现应力集中,同时面层沥青在扣件罩正上方对应区域也出现应力集中现象。初步分析认为这是由于扣件罩与周围混凝土层的刚度不均造成的。由图3 b)可以看出,沥青层变形较大区域集中在沥青层与轨腰护块接触界面附近,也是扣件罩顶对应的正上方区域。

在工况1下,扣件罩和轨腰护块的变形分布如

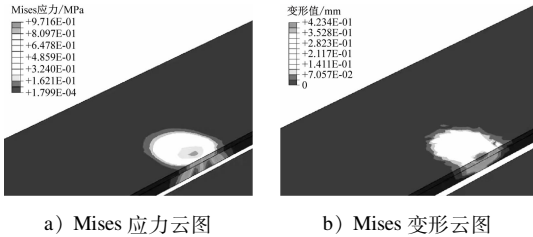


图3 沥青层 Mises 应力及变形云图

Fig.3 Nephogram of asphalt layer Mises stress and deformation

图4所示。图4 a)中圈出区域的扣件罩变形最大,最大变形值为0.147 7 mm;图4 b)中圈出区域的轨腰护块变形最大,最大变形值为0.497 5 mm。两部件最大变形均位于其与沥青层接触界面处,且对应区域的沥青层变形最大。可见,扣件罩及轨腰护块同路面结构衔接部位是轨道-路面衔接结构的薄弱环节。

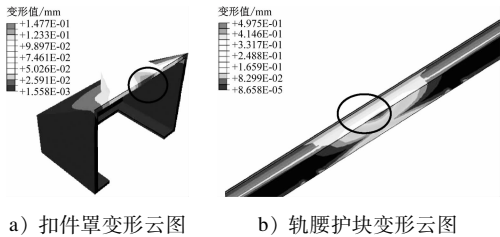


图4 在工况1下的部件变形云图

Fig.4 Component deformation nephogram under working condition 1

进一步分析可知,沥青层出现图3所示的变形分布特征是由于扣件罩及轨腰护块变形过大而导致其对沥青竖向和横向变形的约束不足造成的。此外,扣件罩及混凝土同沥青基层接触界面的刚度不均也是造成沥青层出现应力集中的重要因素。

3 部件优化

埋入式轨道与路面衔接部位的薄弱环节集中在轨道结构部件与路面结构的接触部位。本节通过研究扣件罩和轨腰护块的弹性模量及扣件罩形状对沥青路面的受力和变形的影响,为部件选型和选材提供参考。

3.1 扣件罩优化

3.1.1 弹性模量优化

扣件罩弹性模量在8 300 ~ 20 300 MPa 范围内共取7组不同值,分别在最不利工况下进行仿真计算,得到沥青层及扣件罩应力及变形计算结果见图5及图6。

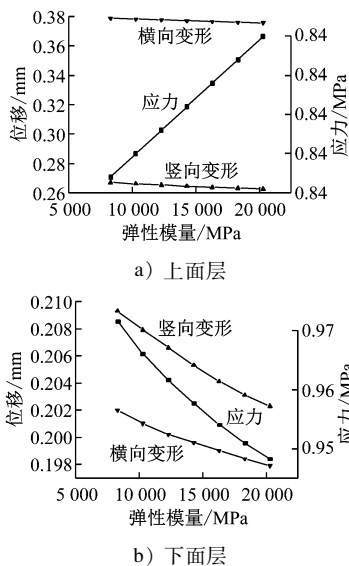


图5 沥青层 Mises 应力、变形与扣件罩弹性模量关系曲线
Fig. 5 Curves of relation between asphalt layer Mises stress, deformation and fastener cover elastic modulus

通过图 5 a) 可知,随着扣件罩弹性模量的增加,沥青上面层应力线性增大,变形呈现线性减小的趋势。显然,增大扣件罩的弹性模量对于面层沥青的竖向变形控制效果较对横向更为明显,其中 AC-13C 沥青层的横向最大变形减小了 0.84%,竖向最大变形减小了 1.61%。而上面层沥青最大应力虽有所增大但是增幅较小,仅增长 0.21%。

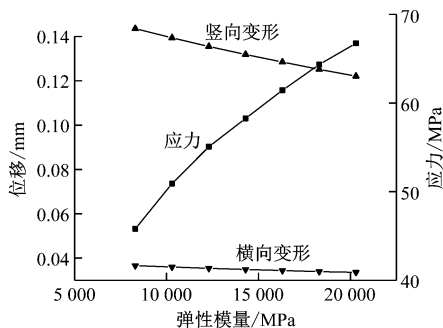


图6 扣件罩应力、变形与弹性模量关系曲线
Fig. 6 Curves of relation between fastener cover stress, deformation and elastic modulus

通过图 5 b) 可知,随着扣件罩弹性模量的增加,沥青下面层的变形和应力呈现线性减小的趋势。增大扣件罩的弹性模量对于下面层沥青竖向变形控制效果较对横向更显著,其中沥青下面层的横向最大变形减小了 2.03%,竖向最大变形减小了 3.34%。同时下面层沥青最大应力减小了 2.41%,这是由于扣件罩弹性模量的提高改善了其与混凝土

土基层接触界面的刚度不均现象。对比图 5 a) 和图 5 b) 可知,扣件罩弹性模量增大的优化方案对于下面层沥青的应力变形控制效果较上面层沥青更优越。

通过图 6 可知,随着扣件罩弹性模量的提升,扣件罩的变形大致呈现线性减小的趋势。扣件罩弹性模量提高了约 245%,其横向最大变形减小了 8.19%,竖向最大变形减小了 14.97%。相较而言,其应力虽随着弹性模量的提高大幅增长 (45.69%),但仍远低于材料的许用应力。

3.1.2 形状优化

选用扣件罩 A 和扣件罩 B (见图 7) 进行对比分析。除形状外,两扣件罩的材料、厚度及高宽等参数均一致。

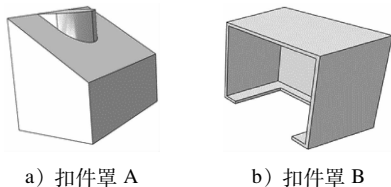


图7 扣件罩示意图
Fig. 7 Schematic diagram of fastener cover

在工况 1 下,采用不同扣件罩的结构仿真结果汇总于表 5。

表5 不同扣件罩在工况 1 下的沥青层 Mises 应力及变形计算结果汇总表			
Tab. 5 Calculation result summary of Mises stress and deformation of asphalt layer under working condition 1			
方案	位置	最大 Mises 应力/MPa	最大变形/mm
扣件罩 A	上面层	0.842 7	0.423 4
	下面层	0.971 6	0.290 7
扣件罩 B	上面层	0.675 1	0.472 6
	下面层	0.908 2	0.336 7

由表 5 可知,与扣件罩 B 相比,采用扣件罩 A 时,沥青路面应力更小,对于沥青路面的稳定性控制能力更强,且其路面变形量仅低 14%。虽然沥青层过大的应力集中会降低路面的使用寿命,但是过大的变形量更容易导致轨道-路面界面处约束能力及结构承载能力的下降。在超重或冲击荷载的作用下,路面结构可能会因为过大的变形量导致开裂破坏。对道口段结构的变形控制效果是扣件罩选型的重要指标,故顶面接触面积更小的扣件罩 A 对路面稳定性的影响更小,是种更优的选择。

3.2 轨腰护块优化

轨腰护块弹性模量在 7.9 ~ 21.9 MPa 间取 8 组不同值,分别在工况 1 下进行仿真计算,结果见图 8 及图 9。

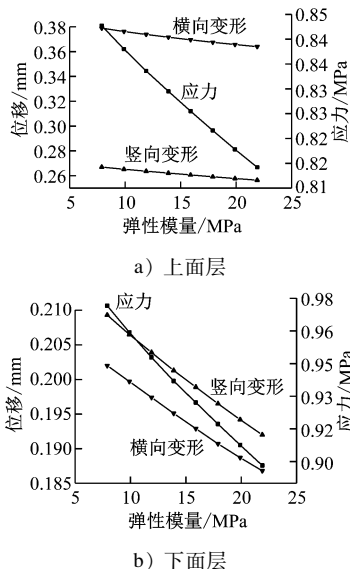


图 8 沥青层 Mises 应力、变形与轨腰弹性模量关系曲线
Fig. 8 Curves of relation between asphalt layer Mises stress, deformation and rail side elastic modulus

由图 8 a) 可知,随着轨腰护块弹性模量的增加上面层沥青的变形及应力呈现线性减小的趋势。轨腰护块弹性模量提高了约 277%, AC-13C 沥青层的竖向和横向变形得到减小,降幅为 3.93%;同时,沥青层应力也有所下降,最大应力下降了 3.38%。

对于 AC-20C 沥青层(见图 8 b)),其变形及应力也随护块弹性模量的增加呈现线性减小的趋势。相同增幅下,其横向最大变形减小了 7.52%,竖向最大变形减小了 8.27%,最大应力同时下降了 7.55%。总体来看,提升轨腰护块的弹性模量对于

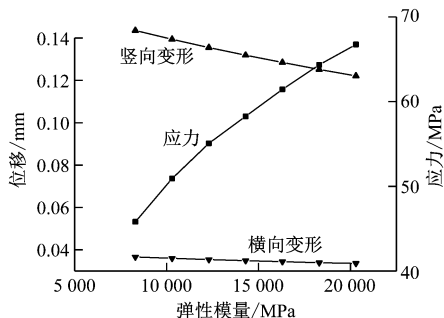


图 9 轨腰护块 Mises 应力、变形与弹性模量关系曲线
Fig. 9 Curves of relation between rail side protection blocks Mises stress, deformation and elastic modulus

下面层沥青应力及变形的控制较上面层沥青更好。

通过图 9 可知,随着轨腰护块弹性模量的增加,轨腰护块的竖向及横向变形大致呈现线性减小的趋势。随着轨腰护块弹性模量的提升其变形逐渐减小,但其应力大幅提高,横向最大变形减小了 6.43%,竖向最大变形减小了 7.03%,轨腰护块应力提高了 140.61%。

4 结语

通过对轨道-路面有限元模型的仿真分析,得到了车辆荷载作用下轨旁沥青路面的响应特性,并分析了部件参数对于沥青路面响应的影响。得到以下结论:

1) 对于轨旁沥青路面,车辆荷载水平力方向一致时,荷载作用在钢轨外侧更为不利;荷载作用位置一致时,水平力指向钢轨更为不利。

2) 扣件罩弹性模量和轨腰护块弹性模量在提高相同倍数的情况下,后者对沥青层应力和变形的控制效果更好,沥青层竖向变形降幅最大,为 8.27%,应力降幅为 7.55%。

3) 沥青下面层响应对于部件弹性模量变化更敏感,两种优化方案,沥青下面层变形及应力降幅约为上面层降幅的 2 倍。

4) 减小扣件罩顶面与路面的接触面积能有效控制路面的变形。

5) 扣件罩、轨腰护块随着自身弹性模量的提高,自身应力急剧上升。在通过提升部件弹性模量来改善沥青路面受荷响应的同时应考虑部件材料的强度及其在高应力状态下的工作性能。

参考文献

- [1] 胥燕军,林红松,王健,等.现代有轨电车轨道结构综述[J].铁道标准设计,2014(7):58.
XU Yanjun, LIN Hongsong, WANG Jian, et al. Overview on track structure for modern tramway[J]. Railway Standard Design, 2014(7): 58.
- [2] 黄大维,冯青松,罗信伟,等.有轨电车轨道病害现场调研与分析[J].华东交通大学学报,2019(1):12.
HUANG Dawei, FENG Qingsong, LUO Xinwei, et al. Site investigation and analysis of the tramway disease[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019(1): 12.
- [3] 邓永权.有轨电车列车—嵌入式轨道动态相互作用研究[D].成都:西南交通大学,2014.