

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.013

车辆荷载作用下城市低填路基结构力学性能分析

杨玲^{1,2}, 张帆³, 杨宾川⁴

(1.郑州市市政工程管理处, 河南 郑州 450000; 2.郑州市市政设施维修建设有限公司, 河南 郑州 450000;
3.河南信息统计职业学院, 河南 郑州 450008; 4.空军第六空防工程处, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 为了揭示车辆荷载作用下城市低填路基结构的受力响应规律, 基于弹性层状计算理论, 采用 BISAR 计算程序对车辆荷载作用下低填路基各结构层的静力响应进行了计算分析, 从而揭示了车辆荷载应力在结构层中的传递规律; 并在此基础上, 通过数值模拟对行驶车辆动荷载引起的各结构层的动力响应进行了分析。结果表明: 路基结构层对车辆荷载应力的削减作用大于 80%, 随着基底换填土层模量和换填厚度的提高, 路床顶位移呈非线性降低变化趋势, 有利于改善上部路面的使用性能; 超载 80%、超速 33% 引起附加竖向应力增大约 77.7% 和 42.9%, 不利于城市低填路基工后沉降的控制。

关键词: 低填路基; 行车荷载; 动力分析; 层状结构; 数值模拟

中图分类号: TU413.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0073-04

Mechanical Properties of Urban Low Embankment Under Traffic Loads

YANG Ling^{1,2}, ZHANG Fan³, YANG Binchuan⁴

(1. Zhengzhou Municipal Engineering Management Office, Zhengzhou, He'nan 450000, China;
2. Zhengzhou Municipal Facilities Maintenance and Construction Co., Ltd, Zhengzhou, He'nan 450000, China;
3. He'nan Vocational College of Information and Statistics, Zhengzhou, He'nan 450008, China;
4. The Sixth Air Defense Agency of Air Force, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical response of urban low embankment under traffic loads, based on elastic layer system theory, the static response of embankment structure layers under traffic loads is analyzed by using BISAR calculation program. The transmission rules of vehicle load in embankment structure layers are revealed. On the basis of which, the dynamic response of embankment structure layers is analyzed by numerical simulation. The results show that more than 80% of vertical stress is weakened by embankment structure layers. With the increase of the modulus and thickness of the replacement under embankment, the displacement of the top of roadbed is nonlinearly decreasing, which is helpful to improve the performance of upper pavement. But overloading of 80% and overspeed of 33% would increase the additional vertical stress by about 77.7% and 42.9%, which is not conducive to the control of post-construction settlement.

Keywords: low embankment; traffic load; dynamic analysis; layered structure; numerical simulation

随着我国城镇化建设的深入推进, 城市道路的铺筑里程成倍延伸。城市道路多采用低填路基或零填路基方案, 这样不仅能满足城区整体标高的要求, 而且降低了路基结构荷载, 有利于路基稳定和沉降控制。近年来, 城际公路建设为节约土地资源和取得较好的社会效益也逐渐推广应用这种低填路基方案^[1]。然而, 路基填筑高度的降低意味着对上

部车辆荷载的扩散效应降低, 不可避免会导致部分下卧地土受车辆荷载的作用增大; 尤其对于软土层, 在这种车辆附加荷载下极易产生较大的工后沉降^[2-3], 进而引起路面结构的开裂、差异变形等病害。工程实践中多采用在低填路基下设置刚度较大的结构层或固化层的方法, 形成“硬壳效应”, 以降低车辆荷载对下卧土层的影响^[4-5]。可见, 车辆荷载

收稿日期: 2017-11-29

修稿日期: 2018-02-03

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(16A560009)

作者简介: 杨玲(1986—), 女, 河北平山人, 硕士, 主要从事市政建设与技术质量管理工作。E-mail: yanglingling8002@163.com

在路基结构中的扩散效应及其引起的地基土附加沉降效应是影响低填路基耐久性和安全运营的关键问题。

目前,针对低填路基的研究较多集中于交通荷载下卧地基土的动力响应和附加沉降预估方面^[6-9],较少关注低填路基结构的力学性能及其对车辆荷载的影响。鉴于此,本文以某沿江城市道路为例,基于弹性层状体系计算理论^[10]和数值仿真分析,分别开展了车辆荷载作用下低填路基结构的静力和动力响应分析,从而为城市道路低填路基结构设计和工程沉降计算提供支撑和依据。

1 低填路基结构静力分析

某沿江城市 I 级主干道,设计车速 60 km/h,路幅宽 60 m。线路区属长江高河漫滩,地形开阔平坦,工程勘察揭示该区域主要地层自上而下分布粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉砂,局部呈现淤泥质粉质黏土与粉砂的交互分布。其中,淤泥质粉质黏土整体层厚 0.8 m~3.2 m,但其埋藏较浅,场地整平后部分路段近乎出露地表。鉴于此,设计采用 60 cm 山坯石作路床基底换填处治,处治后路堤结构层设计如图 1 所示。可见,该路堤结构层相对较薄,而基底原状土基处于过湿状态,在车辆荷载作用下,易产生过量的残余变形,并逐步反应到路面,从而影响路堤结构层的使用寿命和功能。

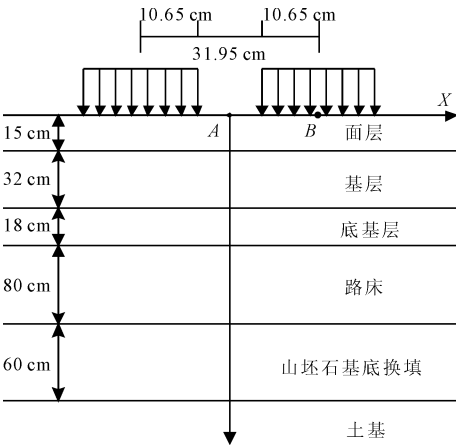


图 1 计算断面示意图

据此,针对该工程的低填路基结构,基于弹性层状体系计算理论^[10],采用 BISAR3.0 计算程序对该路基结构层的受力性能进行分析。考虑车辆荷载作用下基底湿软土基的附加变形主要是由于竖向应力作用所产生的,因此主要对路床和土基中的竖向应力进行分析。计算中,将路面结构层视为线弹性

体,车辆荷载采用规范中规定的标准轴载——双圆均布垂直荷载,胎压 0.707 MPa,荷载圆半径为 10.65 cm。计算图式如图 1 所示,路堤结构层参数如表 1 所示。

表 1 各结构层计算参数

结构类型	厚度 /cm	弹性模量 /MPa	泊松比
细粒式沥青混凝土	4	1400	0.30
中粒式沥青混凝土	11	1200	0.30
水稳基层	32	1500	0.30
二灰土底基层	18	750	0.30
7% 灰土路床	80	150	0.35
山坯石基底换填	60	30	0.35

图 2 为双轮中心(A 点)下和单轮中心(B 点)下不同深度竖向应力计算结果。由图 2 可知,在标准轴载作用下,双轮中心(A 点)下竖向应力在 10 cm~15 cm 的深度处达到最大值(188.0 kPa),但车辆荷载通过路面层的扩散和整体板体效应,到达路床顶处的竖向应力(17.2 kPa)明显降低,且随着深度的增加竖向应力呈非线性降低趋势变化,当距离路床顶 1.4 m 时,竖向应力仅有路床顶应力的 5%;而单轮中心(B 点)下各层竖向应力呈逐渐递减分布,即在路面表面达到最大值 0.7 MPa(标准胎压),随后随着深度的增加竖向应力大幅降低,且在距离路床顶 1.5 m 处,竖向应力为路床顶应力的 5%。说明标准轴载作用下路基土中竖向应力的影响范围约为路床顶面以下 1.4 m~1.5 m。

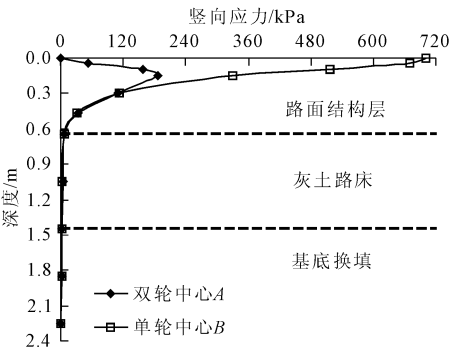


图 2 竖向应力的竖向分布

考虑车辆荷载作用下竖向应力横向分布特征,计算分析路床顶和路床底竖向应力随距离轮组中心(A 点)水平距离的变化规律,如图 3 所示。由图 3 可见,灰土路床对车辆荷载竖向应力具有良好的削减作用,路床底面竖向应力在水平分布上趋于均匀。

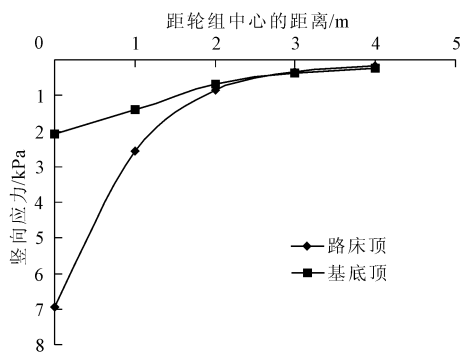


图 3 竖向应力的横向分布

考虑基底地基土换填处治的影响,计算不同换填模量和换填厚度情况下路基顶面(路床顶面)处的竖向位移如图 4 和图 5 所示。由图 4、图 5 可见,路床顶面的竖向位移随基底换填模量和换填厚度的增加皆呈非线性降低的变化趋势,基底换填材料模量越高、换填厚度越大,其路床顶性能越好,从而有利于提高上部路面结构的使用性能。计算工程中,采用 60 cm 基底山坯石换填处治的方法,能够较好的满足路床顶面弯沉控制 120 的技术要求的。

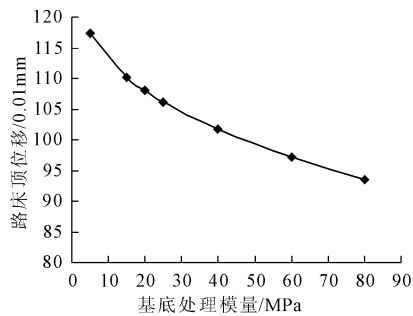


图 4 模量的影响

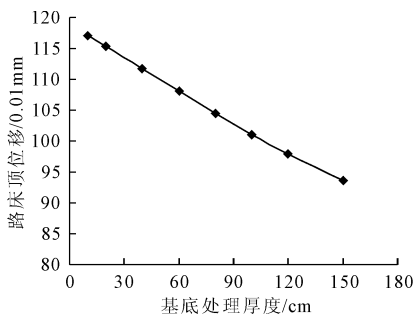


图 5 厚度的影响

2 低填路基结构动力响应分析

车辆荷载实际上是一个时间、空间函数^[11-13],是一个移动荷载。为了反映车辆荷载的这一作用特征,基于移动荷载分析法^[14]采用有限元对车辆荷载作用下低填路基的动力响应进行数值仿真分析。

2.1 模型建立

如图 6 所示,利用 ABAQUS 有限元软件建立三维计算模型,参考前述静力荷载作用下车辆荷载的影响范围,取车辆行驶方向(Z 方向)长 15 m,横向(X 方向)宽 15 m,深度 15 m。网格划分中,为提高计算效率,车轮作用范围采用较密网格,且对于匀速行驶的车轮,不考虑横向和纵向接触应力,只考虑竖向压应力,并将实际轮载转化为单元面的移动荷载来考虑,移动荷载加载采用阶跃荷载模型^[14]模拟;轴距采用标准车轴距 1.8 m。鉴于沥青层、基层和底基层力学性能相对接近,且层间粘结强度较高,为简化计算将其综合考虑为统一的路面结构层,且不考虑路堤结构层、地基土层各层间滑动接触情况,即完全连续。各层计算参数如表 2 所示。

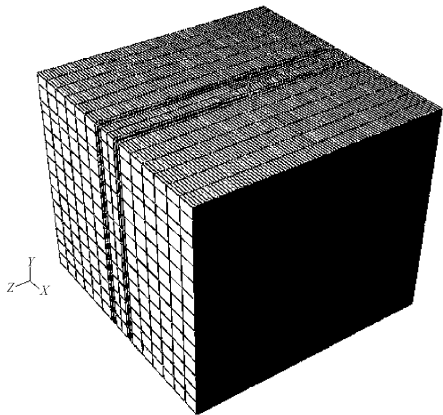


图 6 有限元计算模型

表 2 动力分析参数表

材料类型	H /m	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	E /MPa	μ	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	阻尼
路面层	0.65	2300	1270.00	0.30	—	—	0.9
路床	0.80	1880	50.00	0.35	88.1	18.4	0.4
换填层	0.60	2500	30.00	0.25	50.0	30.0	0.8
淤泥质亚黏土	3.00	1810	3.49	0.35	16.0	4.6	0.4
亚砂土	5.00	1770	3.91	0.35	11.8	19.5	0.4
粉砂	—	1867	10.92	0.35	4.6	32.0	0.4

2.2 计算结果分析

基于依托工程设计时速 60 km/h、标准轴载 100 kN 的基本工况,开展车辆荷载下路堤结构层的动力响应分析。图 7 为模型中心剖面处车轴中心对应路床顶和基底顶(即路床底)的应力、位移时程曲线。由图 7 可以看出,车辆荷载引起的竖向应力随深度的增加呈急剧衰减的变化趋势,从路床顶到基底顶竖向应力降低约 85%,且基底顶应力仅约 2 kPa~4

kPa,但其竖向位移却为路床顶竖向位移的 90.8%,说明在路床顶的竖向位移中有 90% 以上是由下部地基土产生的;且从位移的时程曲线也可以看出,在车辆驶出计算区域时,竖向变形的回弹量不足 50%,考虑到实际道路上车流量较多的情况,可预见各结构层竖向变形会在前一辆车通过后,叠加上一辆车通过产生的新的位移,较深处软土区域叠加效应则更为明显。

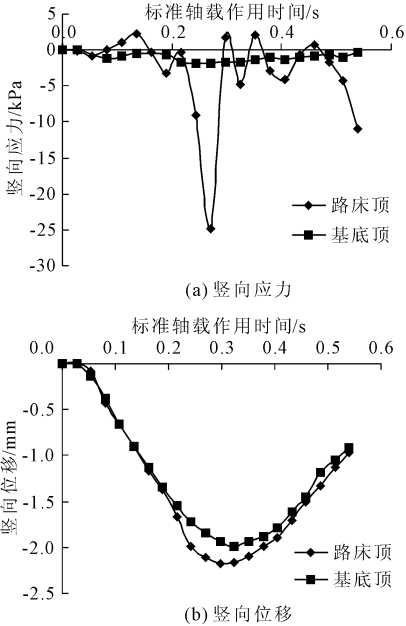


图 7 车轴中心下动力响应时程曲线

考虑车辆超载对结构层动力响应的影响,分别计算了车轴中心下路床顶在标准轴载、超载 20%、超载 40%、超载 80% 时的动态应力和变形,如图 8 所示。由图 8 可以看出,路床顶竖向应力和变形皆随车载的增大而增大,当超载 80% 时,路床顶最大竖向应力和位移分别增加了 77.7% 和 77.1%;但其都表现出一定的滞后现象,即路床顶最大应力出现在车辆经过 0.02 s 时,而竖向位移则出现在车辆经过 0.45 m 后达到最大值。

进一步考虑车速对结构层动力响应的影响,计算车速分别为 40 km/h、60 km/h、80 km/h 时额定荷载下,路床顶处的竖向应力和位移的动态响应,如图 9 所示。由图 9 可以看出,在车辆荷载一定、路面平稳状态下,结构层竖向应力随着车速的增加而增加,竖向位移则随着车速的增加而降低。当车速由 40 km/h 增加到 80 km/h 时,路床顶竖向应力增加了 42.9%,而竖向位移降低了 21.5%,且应力对车速的滞后效应明显小于位移。计算结果与美国各州道路工作协会(AASHTO)关于不同车速下路面结构层的动

力响应试验测试结果的变化规律一致^[15]。

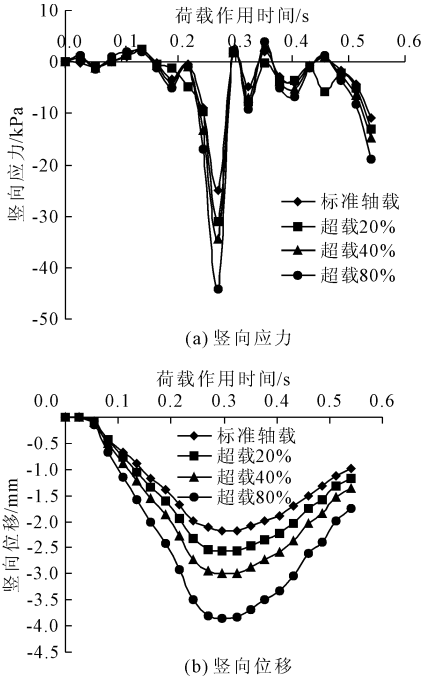


图 8 车辆超载的影响

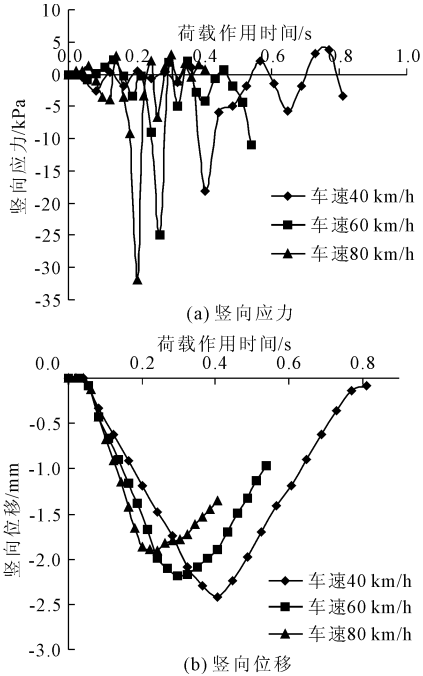


图 9 车辆车速的影响

3 结 论

(1) 城市低填路堤结构的静力和动力分析表明,车辆荷载引起的附加应力随深度呈非线性变化,路堤上部结构层对车辆荷载作用具有显著的扩散和削减作用。

(下转第 85 页)

(上接第 76 页)

(2) 基底换填刚度的提高有利于改善上部路面的使用性能,软基处治可采用模量较高的材料进行换填或通过增加换填厚度的方法改善基底性能。

(3) 车速、车载对路堤结构层以及地基动力响应皆有影响,宜严控车速和超载,以减小两者引起路基较大附加应力导致的工后沉降增加。

参考文献:

- [1] 陈舒阳,徐林荣.增加社会效应总成的低路堤经济效益评价[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1248-1255.
- [2] Tashiro M, Noda T, Inagaki M, et al. Prediction of settlement in natural deposited clay ground with risk of large residual settlement due to embankment loading[J]. Soils and foundations, 2011,51(1):133-149.
- [3] 郑瑞海.交通荷载对低矮路堤工后沉降影响研究[D].天津:河北工业大学,2014:53-64.
- [4] 王 桦,卢 正,姚海林,等.交通荷载作用下低路堤软土地基硬壳层应力扩散作用研究[J].岩土力学,2015,36(S2):164-170.
- [5] 曹海莹,刘云飞,任晓军,等.交通荷载作用下上覆硬壳层软土地基动力响应特征[J].河北工业大学学报,2015,44(3):94-98.
- [6] 牛力强.交通荷载作用下港区道路受力特性研究[J].郑州大学学报:工学版,2014,35(6):95-99.
- [7] 张 浩,杨 玲,郭院成.交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析[J].郑州大学学报(工学版),2017,38(1):11-15.
- [8] 陈泽南,浦少云,饶军应,等.交通荷载作用下土体黏弹性疲劳本构模型[J].铁道标准设计,2018,62(1):68-73.
- [9] Samang L, Miura N, Sakai A. Long-term measurements of traffic load induced settlement of pavement surface in Saga airport highway, Japan[J]. Journal Teknik Sipil, 2005, 12(4):275-286.
- [10] 郭大智,冯德成.层状弹性体系力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [11] 田 飞,褚进晶.交通荷载特性及其模拟方法研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):66-71.
- [12] 张 颖,张 睿,唐道伦.交通荷载引起的高速公路低路堤永久性沉降研究[J].中外公路,2013,33(5):14-18.
- [13] 简文彬,樊秀峰,彭 军,等.交通荷载下岩坡疲劳劣化及其服役寿命研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):1-5.
- [14] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].2 版.南京:东南大学出版社,2014:1-320.
- [15] 沙爱民.路基路面工程[M].北京:高等教育出版社,2011:1-298.