

移动荷载作用下组合式沥青路面结构受力特性分析

林家琛^{1,2}, 吴玉^{1,2*}, 王旭^{1,2}

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:基于 Abaqus 有限元软件进行二次开发,建立了移动荷载作用下组合式沥青路面结构三维有限元模型,分析了不同行车速度下组合式沥青路面结构力学影响规律;结合正交试验,对路面结构层厚度进行了敏感性分析。结果表明:面层层底拉应变、底基层层底拉应力随行车速度的增大而减小,且行车速度越慢,路面结构所经历的力学响应波动循环越多、持续时间越长,对路面结构受力越不利;可采用增加面层厚度的方式提高组合式沥青路面结构抵抗疲劳开裂、永久变形和反射裂缝的能力,并尽量将运行车速控制在 60 km/h 以上;在组合式沥青路面结构设计时,应注意提高面层上部和中部的抗剪性能,同时加强各沥青结构层间的黏结。

关键词:道路工程; 组合式沥青路面; 有限元分析; 动力响应; 正交试验

中国高速公路建设多采用半刚性基层沥青路面结构,这种路面结构强度高,刚度大,但易出现收缩开裂和反射裂缝等病害,道路建设迫切需要探索多元化的沥青路面结构形式。近年来,中国在吸收国外柔性基层理念的基础上,提出了组合式沥青路面结构形式,其力学特性值得探讨。周志刚等^[1]对重载交通条件下组合式沥青路面结构受力特性的影响因素进行了研究;平树江^[2]就组合式沥青路面结构的基层适应性、层间处置技术、沥青混合料疲劳极限等进行分析,提出了适用于当地的耐久性沥青路面结构;郭芳^[3]等基于时间硬化蠕变模型探讨了连续变温条件下组合式沥青路面结构的车辙性能;吴玉等^[4]分析比较了半刚性基层、倒装式、组合式 3 种典型沥青路面结构受轮载作用的力学行为;单景松等^[5]利用广义 Duhamel 积分对移动荷载下弹性层状体系表面弯沉响应进行了求解;斯文彬^[6]通过分析各力学指标在荷载、结构层厚度和结构层模量等因素影响下的规律,建立了各力学指标与影响因素的关系模型;Chen 等^[7]开展现场足尺试验,对重载作用下的组合式沥青路面动力响应进行研究,提出了应力沿路基深度的衰减模型。总的来说,上述组合式沥青路面结构力学行为研究大都基于材料静态参数或定点半正弦波荷载。由于路面结构对荷载时变特点具有敏感性,基于材料静态参数的路面结构动载力

学分析就不尽合理,而定点半正弦波荷载是将移动荷载简化为定点加载,虽能模拟荷载大小的时程变化规律,但却无法体现移动荷载的空间分布效应,使该加载模式下的组合式沥青路面结构受力状态与实际工程差异较大。鉴于此,该文利用 Abaqus 有限元软件,基于移动荷载和路面材料动态参数,分析组合式沥青路面结构在不同行车速度下的受力特性。同时,结合正交试验,进行路面结构层厚度的敏感性分析,进而为组合式沥青路面结构设计提供参考。

1 三维有限元分析模型

1.1 路面结构和材料参数

组合式沥青路面结构和材料动态参数见表 1。

表 1 组合式沥青路面结构和材料动态参数

结构层	厚度/ cm	动态模 量/MPa	泊松比	密度/ (kg · m ⁻³)
沥青混凝土面层	18	9 000	0.30	2 300
沥青稳定碎石基层	20	8 000	0.30	2 300
水泥稳定碎石底基层	30	10 000	0.25	2 300
路基	600	50	0.40	1 850

收稿日期:2021-02-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51868042);兰州交通大学青年科学基金资助项目(编号:2018013)

作者简介:林家琛,男,硕士研究生. E-mail:ljc225@126.com

* 通信作者:吴玉,女,博士,讲师. E-mail:814103383@qq.com

1.2 移动荷载参数

荷载采用中国现行沥青路面结构设计所用标准轴载,即单轴双轮组 100 kN,荷载参数如表 2 所示。为降低有限元网格划分难度,将轮胎与路面接触面积简化为矩形,荷载等效示意图如图 1 所示,简化后矩形面积为 0.184 m×0.192 m^[8]。为实现荷载在路面结构上的移动,首先根据轮胎的作用轨迹沿车辆行驶方向设置长 6.144 m 的荷载作用带^[9],然后调用 Fortran 语言编写的用户子程序 DLOAD 实现车辆荷载的移动。荷载作用带沿荷载移动方向被均分为 96 个单元,每个单元长 0.064 m。各速度下的荷载均从荷载作用带的起点移动到终点,行车速度越快,荷载在轮迹带上移动时间越短。

表 2 荷载参数

标准轴载/kN	单轮荷载/kN	轮胎接地压强/MPa	单轮传压当量圆直径/cm	两轮中心距/cm
100	25	0.70	21.30	31.95

1.3 模型参数

建立如图 2 所示分析模型,其中 X、Y、Z 方向分

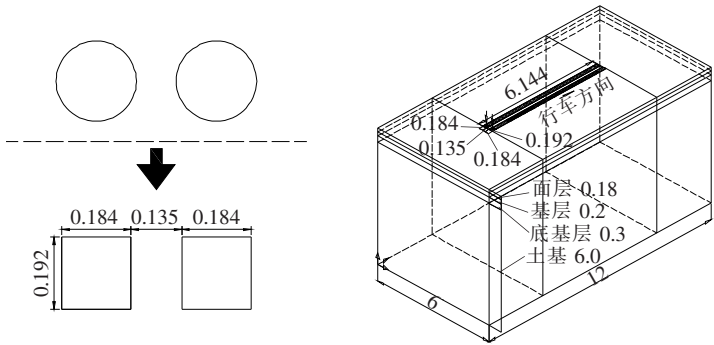


图 1 荷载等效示意图(单位:m) 图 2 路面结构分析模型(单位:m)

从图 3 可以看出:沥青面层层底在行车荷载驶近和驶离分析点时出现了先受压后受拉再受压的突变情况,这种短时间内的应变拉压变化会加速沥青面层的疲劳开裂破坏。而后,随着行车荷载驶离分析点,应变逐渐波动向零趋近,且行车速度越慢,沥青面层经历的应变波动循环越多,应变恢复的滞后效应越明显。取分析点所在道路横断面的沥青面层层底应变进行具体比较。如图 4 所示,各行车速度下的沥青面层层底应变都沿着道路横向以轮隙中心向两侧呈“M”形对称分布。其中,拉应变主要分布在荷载作用区域,其峰值出现在轮印中心处,且峰值随着荷载移动速度的

别代表道路横断面、道路深度和行车方向。模型平面尺寸为 12.0 m×6.0 m,路基深度取 6.0 m。各结构层采用 8 节点六面体完全积分单元 C3D8 模拟,层间视为完全连续。边界条件采用侧面(X 方向、Z 方向)施加水平约束,路基底面(Y 方向)施加固定约束^[10-11]。

2 路面结构力学响应分析

以上述模型为基础,设置 20、40、60、80、100、120 km/h 共 6 个车速水平,讨论不同行车速度下组合式沥青路面结构的受力情况。其中,面层层底拉应变和基层顶面压应力随时间变化、剪应力随道路深度变化的数据分析点为轮印中心轨迹线上的峰值出现点,底基层层底拉应力随时间变化的数据分析点为轮隙中心轨迹线上的峰值出现点,且同时提取面层层底拉应变、底基层层底拉应力沿行车和道路横断面两个方向的计算结果,以二者中较大者为分析对象。

2.1 面层层底拉应变

图 3 为不同行车速度下沥青面层层底应变随时间的变化。其中应变正值为拉,负值为压,下文同。

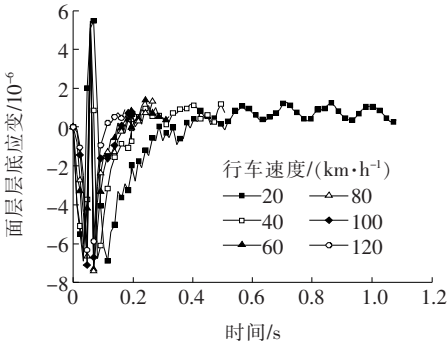


图 3 面层层底应变随时间的变化

增大而减小,速度为 120 km/h 的面层层底拉应变峰值比速度为 20 km/h 的面层层底拉应变峰值减小 12%。

2.2 基层顶面压应力

图 5 为不同行车速度下沥青稳定碎石基层顶面压应力随时间的变化情况。

从图 5 可以看出:行车荷载途径分析点前后,基层顶面压应力先增大至峰值后减小为零。行车速度越慢,压应力在基层顶面分析点位置持续时间越长,沥青稳定碎石基层产生永久变形的可能性越大。为控制沥青稳定碎石基层永久变形的产生和发展,应减少低速

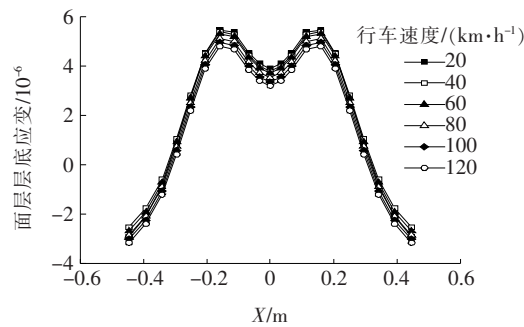


图4 面层层底拉应变对比

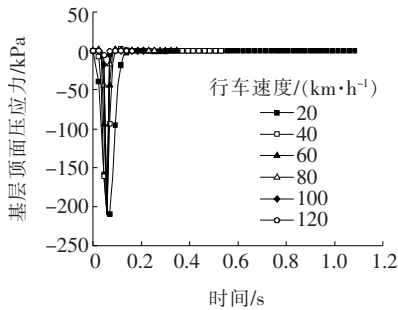


图5 基层顶面压应力随时间的变化

车辆在组合式沥青路面上的行驶。

取分析点所在道路横断面的基层顶面压应力进行具体比较。如图6所示,基层顶面压应力分布形状相同,即沿着道路横向呈“W”形对称分布,应力峰值出现在轮印中心点处,且不同行车速度下压应力峰值十分接近,说明行车速度对沥青稳定碎石基层顶面压应力峰值影响较小。

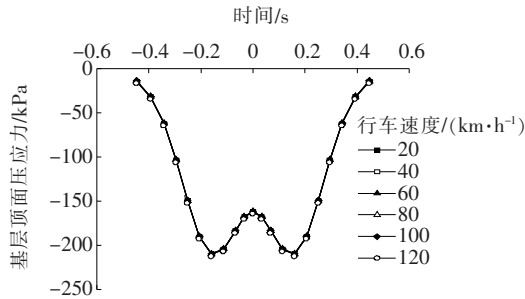


图6 基层顶面压应力对比

2.3 底基层层底拉应力

图7为不同行车速度下水泥稳定碎石底基层层底应力随时间的变化情况。从图7可以看出:随着行车荷载驶近和驶离分析点,底基层层底拉应力迅速增大又逐渐减小,峰值出现在荷载通过分析点正上方时。行车速度越慢,底基层层底拉应力持续时间越长,越容易发生疲劳开裂。在荷载通过分析点0.10~0.35 s后,底基层层底转变为受压状态,且呈波动循环趋向于零。

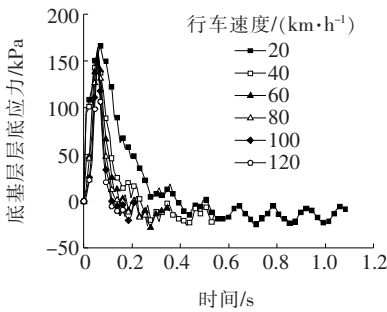


图7 底基层层底应力随时间的变化

取分析点所在道路横断面的底基层层底应力进行具体比较。如图8所示,底基层层底拉应力沿着道路横向呈倒“V”形对称分布,最大值出现在轮隙中心点。随着行车速度逐渐降低,拉应力逐渐增大,尤其是当行车速度从80 km/h降到60 km/h时,底基层层底拉应力增幅较明显,该增幅为行车速度从120 km/h降到100 km/h底基层层底拉应力增幅的2.5倍。为减少水泥稳定碎石底基层疲劳开裂,可将行车速度控制在60 km/h以上。

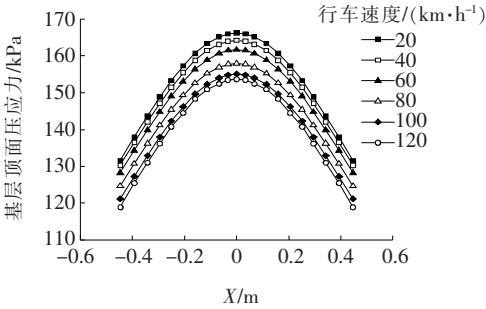


图8 底基层层底拉应力对比

2.4 剪应力

不同行车速度下的水平剪应力(S_{13})和竖向剪应力(S_{32})如图9、10所示。

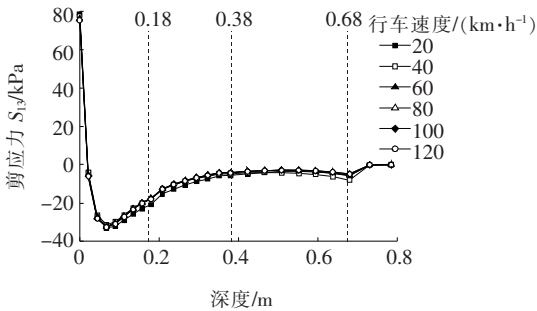


图9 水平剪应力随深度变化

从图9、10可以看出:各速度下的水平剪应力和竖向剪应力沿深度变化的趋势基本一致,说明行车速度对剪应力的大小和分布影响不大。此外,水平剪应力

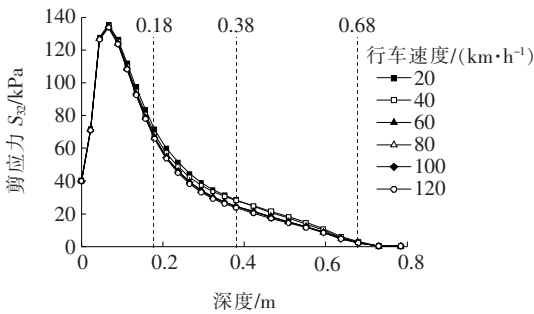


图 10 竖向剪应力随深度变化

在路表最大,随道路深度迅速减小至零后($Y=1.5\text{ cm}$ 处)又反向增大至峰值($Y=6.0\text{ cm}$ 处),而后逐渐减小,在沥青稳定碎石基层底部趋近于零。竖向剪应力随着深度的增加先增大后减小,峰值出现在面层中部($Y=6.0\text{ cm}$ 处)。从道路深度方向来看,剪应力峰值及其突变主要集中在面层的上部和中部,在此深度范围内沥青路面结构容易出现拥包、车辙等破坏现象,因此在组合式沥青路面结构设计中应尽可能提高面层上部和中部的抗剪性能,且由于沥青面层和沥青稳定碎

石基层所受剪应力值都偏大,故须特别注意各沥青层间的黏结,防止出现结构层的层间剪切破坏。

3 结构参数敏感性分析

采用数值分析结合正交试验的方法,对组合式沥青路面结构动力响应进行参数敏感性分析。行车速度设定为 80 km/h ,考察指标包括面层层底拉应变、基层顶面压应力、底基层层底拉应力和竖向剪应力。试验因素和水平如表 3 所示,正交试验设计和计算结果如表 4 所示,方差分析如表 5 所示。

表 3 试验因素和水平

水平	因素		
	面层厚度/cm	基层厚度/cm	底基层厚度/cm
1	12	20	20
2	15	25	25
3	18	30	30

表 4 正交试验组合与计算结果

试验	考察因素			计算结果			
	面层厚度/cm	基层厚度/cm	底基层厚度/cm	面层层底拉应变/ 10^{-6}	基层顶面压应力/kPa	底基层层底拉应力/kPa	竖向剪应力/kPa
1	12	20	20	5.80	317.06	248.66	136.66
2	12	25	25	5.85	323.09	190.00	134.38
3	12	30	30	6.81	323.14	147.96	133.39
4	15	20	25	5.27	255.35	199.23	136.47
5	15	25	30	5.90	259.80	154.98	135.45
6	15	30	20	5.58	255.28	178.05	136.19
7	18	20	30	5.13	209.83	162.41	134.32
8	18	25	20	5.00	206.60	186.65	135.10
9	18	30	25	5.37	209.58	145.01	134.15

从表 5 可以看出:在显著性水平 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 下,面层厚度对面层层底拉应变、基层顶面压应力和底基层层底拉应力均有显著影响,其中面层厚度对基层顶面压应力的影响极显著。另外,基层厚度对底基层层底拉应力有显著影响,底基层厚度对于基层顶面压应力、底基层层底拉应力有显著影响。由此可见:优化基层和底基层厚度组合有利于减缓组合式沥青路面结构发生永久变形和反射裂缝,增加面层厚度则可综合改善组合式沥青路面结构抵抗疲劳开裂、永久变形和反射裂缝的能力。

4 结论

- (1) 随着行车荷载的驶近和驶离,面层层底拉应变、基层顶面压应力、底基层层底拉应力都在短时间内迅速变化至峰值,而后逐渐向零衰减,且行车速度越慢,路面结构所经历力学响应持续时间越长、波动循环越多,对路面结构受力越不利。
- (2) 行车速度对基层顶面压应力和剪应力的大小及分布影响不大,但面层层底拉应变和底基层层底拉

表 5 方差分析结果

评价指标	来源	离差平方和	自由度	均方离差	F 值	F 临界值 ($\alpha=0.05$)	F 临界值 ($\alpha=0.01$)	显著性
面层层底拉应变	面层厚度	1.47	2	0.74	24.97	19.00	99.00	*
	基层厚度	0.42	2	0.21	7.08	19.00	99.00	
	底基层厚度	0.44	2	0.22	7.47	19.00	99.00	
	误差	0.06	2	0.03				
	总和	2.39	8					
基层顶面压应力	面层厚度	19 089.99	2	9 545.00	11 774.09	19.00	99.00	* *
	基层厚度	9.77	2	4.89	6.03	19.00	99.00	
	底基层厚度	32.92	2	16.46	20.30	19.00	99.00	*
	误差	1.62	2	0.81				
	总和	19 134.30	8					
底基层层底拉应力	面层厚度	1 442.11	2	721.05	23.11	19.00	99.00	*
	基层厚度	3 251.27	2	1 625.64	52.10	19.00	99.00	*
	底基层厚度	3 656.97	2	1 828.49	58.60	19.00	99.00	*
	误差	62.40	2	31.20				
	总和	8 412.76	8					
竖向剪应力	面层厚度	3.87	2	1.94	9.59	19.00	99.00	
	基层厚度	2.41	2	1.20	5.97	19.00	99.00	
	底基层厚度	3.88	2	1.94	9.61	19.00	99.00	
	误差	0.40	2	0.20				
	总和	10.56	8					

注:表中“*”表示影响显著,“* *”表示影响极显著。

应力都随车速度的增大而减小,为延缓组合式沥青路面结构疲劳开裂和反射裂缝的产生和发展,可将行车速度控制在 60 km/h 以上。

(3) 剪应力最不利层位为面层上部和中部,为避免路面结构剪切破坏,在组合式沥青路面结构设计时应尽可能提高面层上部和面层中部的抗剪性能,且加强各沥青结构层间的黏结。

(4) 优化基层和底基层厚度组合有利于减缓组合式沥青路面结构永久变形和反射裂缝的产生和发展,增加面层厚度则可综合改善组合式沥青路面结构抵抗疲劳开裂、永久变形和反射裂缝的能力。

参考文献:

[1] 周志刚,叶永迪,刘兴.重载交通条件下组合式基层沥青路面结构数值计算分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2011,8(1):1—6.

[2] 平树江.基于复合式基层的耐久性沥青路面结构研究[D].长安大学博士学位论文,2009.

[3] 郭芳.基于时间硬化蠕变模型的组合式基层沥青路面结构车辙分析[J].公路工程,2015,40(6):214—217.

[4] 吴玉,蒋鑫,梁雪娇,等.轮载作用下典型沥青路面结构力学行为分析[J].西南交通大学学报,2017,52(3):563—570.

[5] 单景松,黄晓明.移动荷载下路表弯沉响应分析[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(1):107—112.

[6] 斯文彬.基于有限元的组合式基层沥青路面结构分析[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.

[7] Xiaobin Chen, Jiasheng Zhang, Xuan Wang. Full—Scale Field Testing on a Highway Composite Pavement Dynamic Responses[J]. Transportation Geotechnics, 2015 (4):13—27.

[8] 严明星,王金昌.ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016.

[9] 艾长发,张逸琳,等.BRT 公交车制动状态下沥青路面铺面受力特征[J].西南交通大学学报,2017,52(4):685—693.

[10] 李凌林,黄晓明.水平移动荷载作用下沥青路面的永久变形[J].华南理工大学学报(自然科学版),2011,39 (3):125—129.

[11] Ogoubi Cyriaque Assogba, Yi qiu Tan, Xing ye Zhou, et al. Numerical Investigation of the Mechanical Response of Semi—Rigid Base Asphalt Pavement under Traffic Load and Nonlinear Temperature Gradient Effect[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235:117 406.