DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.009

车辆动荷载下沥青路面的路基应力研究

刘小兰[1]，张献民[1,2]
（1.南京航空航天大学 民航学院，江苏 南京 210016；2.中国民航大学 机场学院）

摘要：鉴于现有的路基动态回弹模量试验中没有充分考虑超载车辆、行车速度、现有路面结构及车轮叠加效应对路基应力的影响，该文结合以上因素，选取3.0 m为路基应力计算深度，分析动静荷载下路基应力的变化规律。结果表明：路基应力在动荷载下的值高于静荷载；随路面结构参数增加，路基总竖向应力和总侧向应力规律相似；随车辆荷载增加，路基总竖向应力显著增加，路基总侧向应力缓慢增加；随行车速度增加，路基总侧向应力增加幅度大于总竖向应力；最终给出了动荷载下路基应力的取值范围，为基于道路寿命的路面结构设计提供参考。

关键词：沥青路面；路基；应力；动荷载

路基回弹模量是路面结构设计的重要参数，具有显著的应力依赖性。但现行规范的承载板法测定路基回弹模量时，没有考虑实际作用在道路结构上的车辆动荷载对路基应力及回弹模量的影响。为此学者们提出了室内动三轴试验来确定路基动态回弹模量，该试验根据路基总竖向应力和总侧向应力确定应力加载序列，而且多数学者进行路基动态回弹模量试验采用的加载应力序列为AASHTO T307－99给出的值，该规范给出的值只是针对80 kN单轴动载下的路基应力，没有充分考虑超载车辆、行车速度、现有路面结构及车轮叠加效应对路基应力的作用，不能可靠全面地反映车辆与道路耦合作用下路基应力的真实水平，影响路基回弹模量试验的准确性，不利于基于道路寿命的路面设计施工及检测维护。

相关文献研究表明路基影响深度不超过3.0 m，因此选取3.0 m为路基总竖向应力和总侧向应力的计算深度，分别探讨动、静荷载下路基总竖向应力和总侧向应力的变化规律，为路基动态回弹模量的确定提供依据，为基于道路寿命的路面设计和检测提供参考。

1 基本理论

自重应力的确定：

$$P_0=h_n\gamma_n+\sum_{i=1}^{n-1}h_i\gamma_i \tag{1}$$

式中：P_0为上覆结构自重引起的竖向应力；$n-1$为计算点所在层（第n层）的上覆结构层层数；h_i和γ_i分别为第i层的层厚和重度（$i=1,2,\cdots,n-1$）；h_n和γ_n分别为计算点距其所在层层顶的距离及其所在层的重度。

总竖向应力确定：

$$\sigma_1=\sigma_z+P_0 \tag{2}$$

式中：σ_1为计算点处的总竖向应力；σ_z为轮载产生的竖向应力。

总侧向应力确定：

$$\sigma_3=\sigma_{x,y}+k_0P_0 \tag{3}$$

式中：σ_3为计算点处的总侧向应力；$\sigma_{x,y}$为轮载产生的x和y方向水平应力的平均值；k_0为侧压系数，参考文献[10]选取0.77。

2 有限元模型

2.1 道路模型及参数

充分考虑车道宽度和影响深度等因素，并参考文献[11]、[12]建立长15 m（x方向）、宽6 m（z方向）、深9 m（y方向）路基模型；采用Solid45单元划分网格，面层、基层和垫层x和z方向网格尺寸均为0.15 m×0.15 m，y方向网格尺寸为结构层厚度，土基网格尺寸为0.3 m×0.3 m×0.3 m；$x=0$ m及$x=15$ m处仅约束x方向位移，$y=0$ m处约束x、y、z方向位移，z

收稿日期：2018－11－28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51178456）；河北省交通厅项目（编号：2012033）
作者简介：刘小兰，女，博士研究生.E－mail:dl066323835@163.com

=0 m 及 z=6 m 处仅约束 z 方向位移。道路结构层参数见表 1，静荷载参数见表 2。动荷载求解依据国际标准协会建议，首先采用功率谱密度函数表征路面平整度，通过三角级数合成法求解功率谱密度函数，利用有限元法生成 B 级平整度路面；然后结合两自由度的 1/4 车辆模型动力学方程，借助有限元软件中的 MPC184 单元模拟车身，Mass21 单元模拟车辆悬架和非悬架质量、以及俯仰和倾斜转动惯量，Combine14 单元模拟车辆的弹簧和阻尼单元，建立基于路面平整度的车辆动荷载模型；最后基于有限元软件中的完全法对路面平整度引起的动荷载进行瞬态求解，获得不同速度(5、10、15、20、25 m/s)下沿面层中线行驶在 B 级平整度路面上的车辆荷载。

表 1 沥青路面结构层参数

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
面层	0.10～0.30 (0.20)	800～2 400 (1 600)	0.25	2 400
基层	0.20～0.40 (0.25)	800～1 600 (1 200)	0.25	2 200
垫层	0.15～0.35 (0.15)	100～900 (500)	0.30	1 900
路基	9	20～60 (40)	0.35	1 850

注：括号内为基准路面结构层参数。

表 2 荷载参数

轴载/kN	胎压/MPa	面积/cm^2	短边/cm	长边/cm	间距/cm
100	0.7	356.3	15.7	22.7	32.0
160	1.0	386.5	16.3	23.7	33.3
270	1.3	513.5	18.8	27.3	38.4

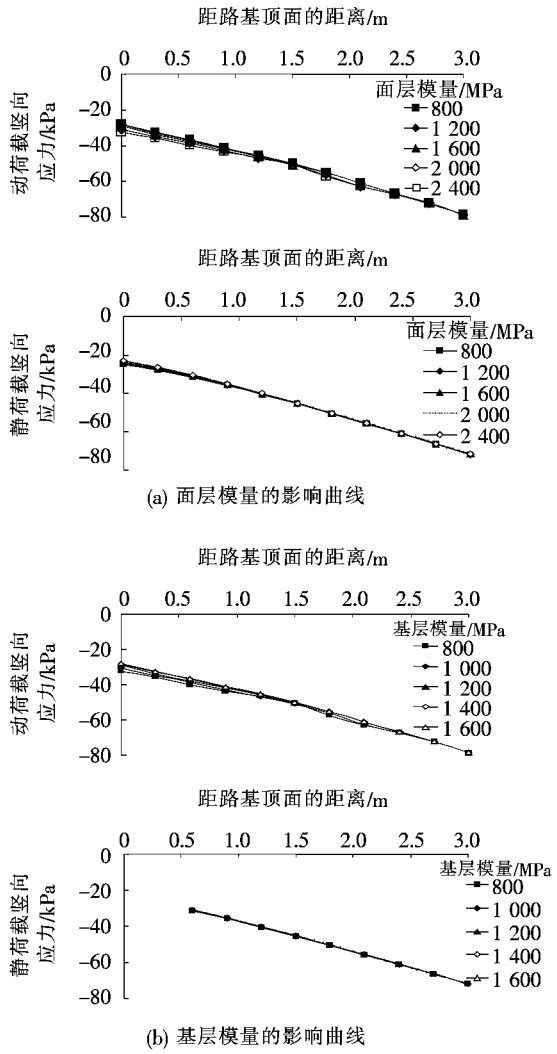
2.2 车辆荷载及参数

研究表明：中国车辆超载严重，多数车辆胎压大于 0.7 MPa，通常为 1.0～1.3 MPa，而且重载车辆的后轴通常为单轴双轮荷载。因此首先依据面积等效原则将单轮的轮印接地面积等效为矩形，然后参考文献[8]、[16]将双轮的轮印接地面积等效为矩形，最后求解不同轴载(单轴双轮)下的胎压，等效接地面积、等效轮印边长和等效单轴双轮间距，见表 2。

3 路基应力水平分析

3.1 结构层模量对总竖向应力和总侧向应力的影响

对 1.0 MPa 胎压的荷载静置或以 15 m/s 速度运行的动荷载作用在道路模型的路基总竖向应力和总侧向应力进行分析。结构层模量对路基竖向应力和总侧向应力的影响规律见图 1～3。



(a) 面层模量的影响曲线

(b) 基层模量的影响曲线

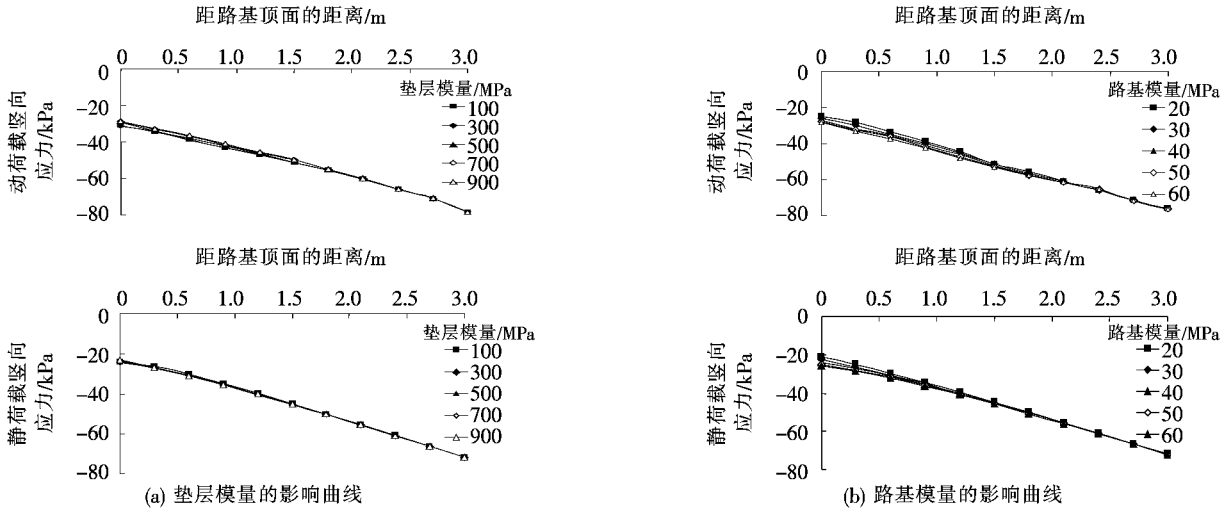
图 1 面层、基层模量对路基总竖向应力的影响

由图 1、2 可知：动荷载下路基总竖向应力大于静荷载。因为动荷载的作用时间较短，道路结构来不及充分变形，即变形较小，而且动荷载在静荷载的基础上增加了相对动荷载，在接地面积一定时产生的应力较大；因此比静荷载下路基总竖向应力大。

由图 3 可知：路基总侧向应力与路基总竖向应力均随结构层模量增加而减小，但没有路基总竖向应力减小显著，而且动荷载下路基总侧向应力依旧大于静荷载。

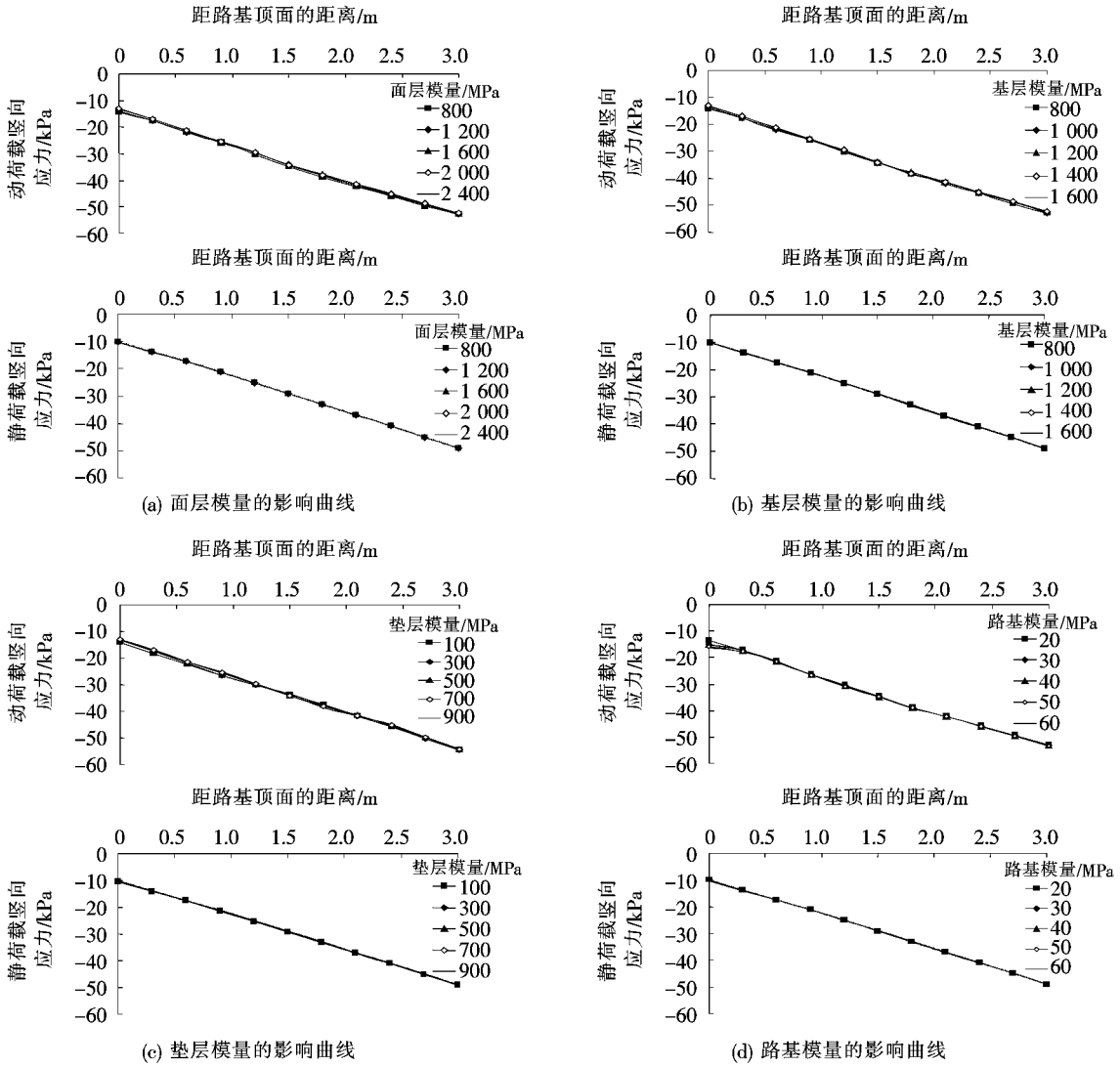
3.2 结构层厚度对总竖向应力和总侧向应力的影响

结构层厚度对路基总竖向应力和主侧向应力的影响规律见图 4、5。



(a) 垫层模量的影响曲线　　(b) 路基模量的影响曲线

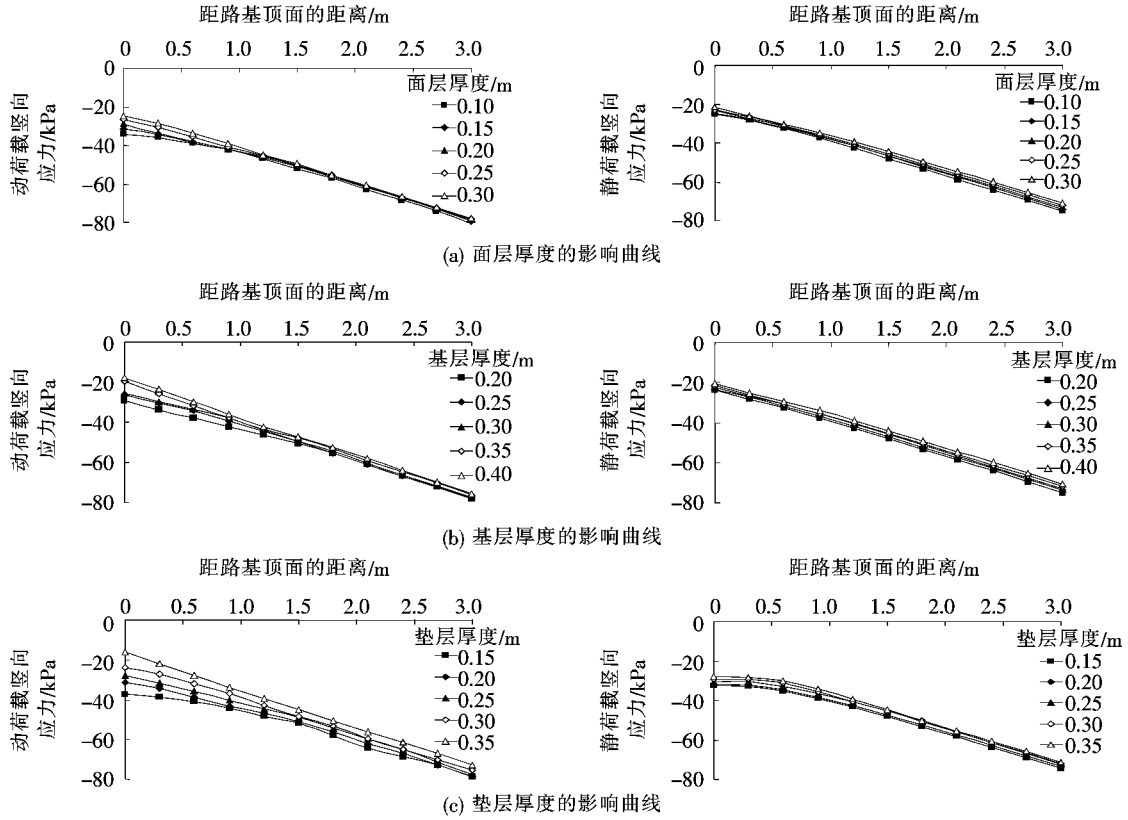
图 2　垫层、路基模量对路基总竖向应力的影响



(a) 面层模量的影响曲线　　(b) 基层模量的影响曲线

(c) 垫层模量的影响曲线　　(d) 路基模量的影响曲线

图 3　结构层模量对路基总侧向应力的影响

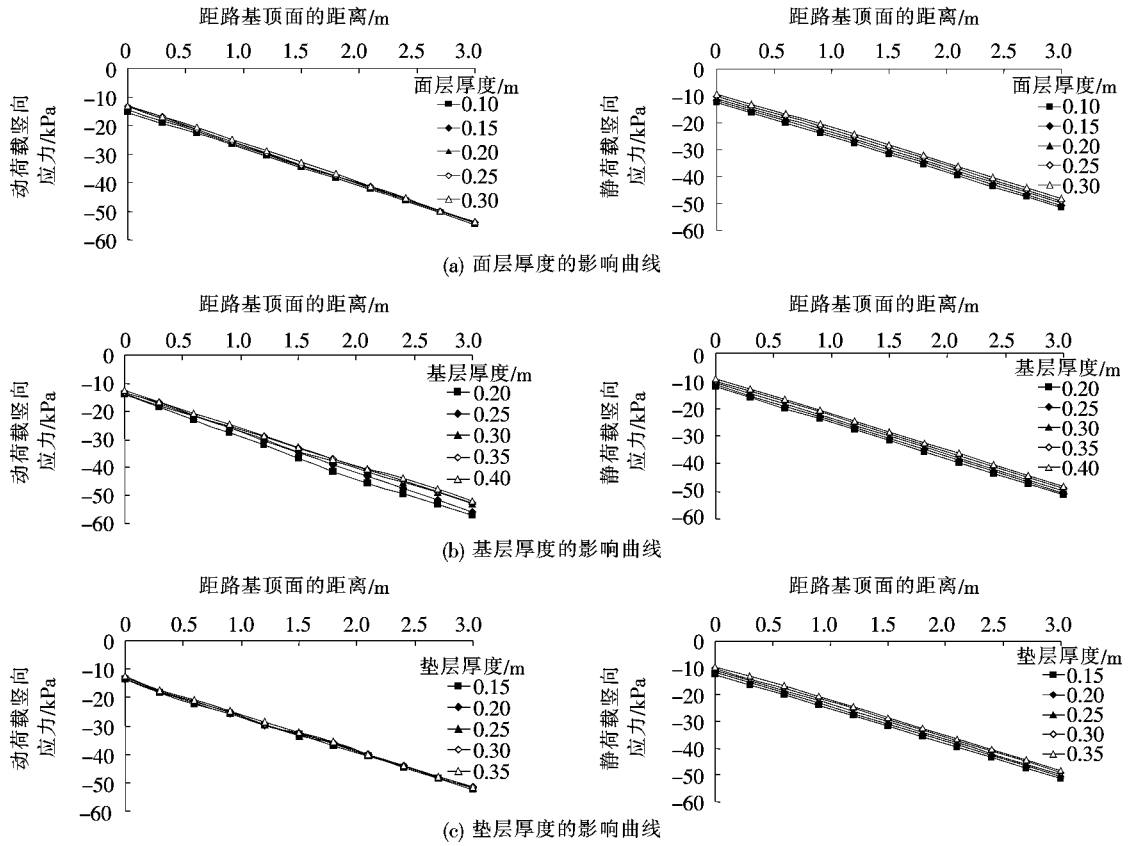


(a) 面层厚度的影响曲线

(b) 基层厚度的影响曲线

(c) 垫层厚度的影响曲线

图 4 结构层厚度对路基总竖向应力的影响



(a) 面层厚度的影响曲线

(b) 基层厚度的影响曲线

(c) 垫层厚度的影响曲线

图 5 结构层厚度对路基总侧向应力的影响

由图 4 可知：路基总竖向应力随路面结构厚度增加而减小，且路基总竖向应力受结构层厚度影响较结构层模量显著。

由图 5 可知：随道路结构层厚度增加，路基总侧向应力与总竖向应力规律相似，但变化幅度较小。

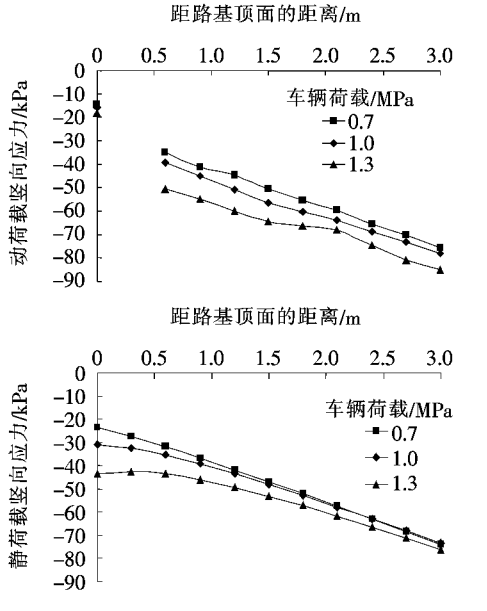
综上所述，静荷载下路基总竖向应力和总侧向应力与文献[7]、[10]相一致，动荷载下路基总竖向应力和总侧向应力变化显著，且大于静荷载下路基应力。路基总竖向应力和总侧向应力均随路基深度的增加而增加，一方面，因为路基总竖向应力由轮载下附加应力和路面结构自重应力组成，随路基深度增加，轮载下附加应力衰减、路面结构自重应力增加，且自重应力增加值大于轮载附加应力衰减值，则路基总竖向应力增加；另一方面，因为路基总侧向应力由轮载产生的平均附加应力和路面结构自重产生的侧向应力组成，随路基深度增加平均附加应力减弱、侧向应力增加，且前者的变化值小于后者，则路基总侧向应力增加。

3.3　车辆荷载和行车速度对总竖向应力和总侧向应力的影响

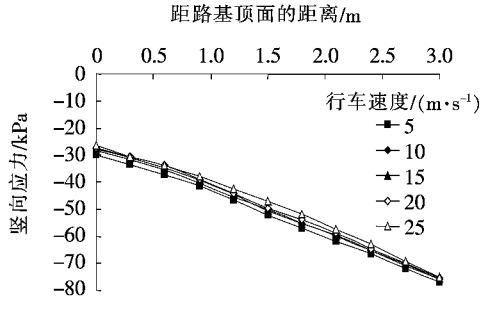
0.7、1.0、1.3 MPa 胎压车辆荷载分别静置或以 15 m/s 作用在道路模型的路基总竖向应力和总侧向应力见图 6(a)和 7(a)；1.0 MPa 胎压车辆荷载以 5、10、15、20、25 m/s 作用在道路模型的路基总竖向应力和总侧向应力见图 6(b)、7(b)。

图 6(a)中路基总竖向应力随胎压增加而增加，且动静荷载下路基总竖向应力分别为 27.8 kPa 到 85.1 kPa、23.7 kPa 到 76.5 kPa。图 6(b)中行车速度由 5 m/s 变化到 25 m/s，路基总竖向应力为 26.5 kPa 到 76.8 kPa。

图 7(a)中胎压对路基总侧向应力的影响没有路基总竖向应力显著，动静荷载下路基总侧向应力分别为 14.3 kPa 到 57.6 kPa 、11.2 kPa 到 50.6 kPa 。图 7

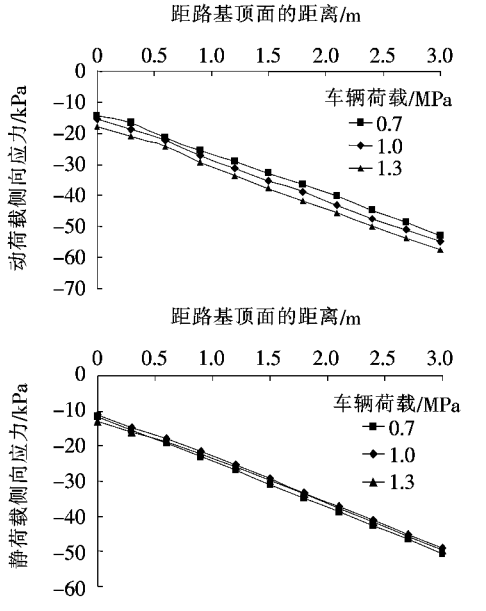


(a) 车辆荷载的影响曲线(v=15 m/s)

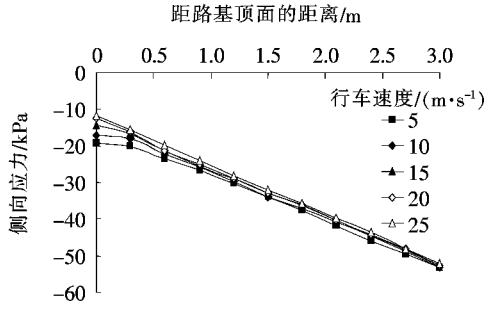


(b) 行车速度的影响曲线(1.0 MPa 胎压车辆)

图 6　总竖向应力受车辆荷载和行车速度的影响



(a) 车辆荷载的影响曲线(v=15 m/s)



(b) 行车速度的影响曲线(1.0 MPa 胎压车辆)

图 7　总侧向应力受车辆荷载和行车速度的影响

(b)中行车速度由 5 m/s 变化到 25 m/s,路基总竖向应力为 11.7 kPa 到 53.3 kPa。

3.4 路基应力水平统计

选取动荷载下路基总竖向应力(σ_1)和总侧向应力(σ_3)结果汇总如表 3 所示。

表 3 路基应力水平

胎压/MPa	σ_1/kPa	不同 σ_3(kPa)时满足要求的组合数					总组合数
		10～20	20～30	30～40	40～50	50～60	
0.7	10～20	3					3
	20～30	30	1				31
	30～40	33	42				75
	40～50		48	23			71
	50～60			50	13		63
	60～70				58		58
	70～80				25	37	62
	总组合数	66	91	73	96	37	363
1.0	10～20	2					2
	20～30	7					7
	30～40	42	15				57
	40～50	12	59	16			87
	50～60		2	74	2		78
	60～70				58		58
	70～80				25	29	54
	80～90					20	20
	总组合数	63	76	90	85	49	363
1.3	10～20	1					1
	20～30	6					6
	30～40	4	4				8
	40～50	12	21	3			36
	50～60	15	57	43	1		116
	60～70	2	5	32	47		86
	70～80		1		43	15	59
	80～90					51	51
	总组合数	40	88	78	91	66	363

表 3 分别为 0.7、1.0 和 1.3 MPa 胎压时在不同道路结构组合下求得的 363 组路基总竖向应力和总侧向应力的统计结果,每行的意义是路基总竖向应力的取值范围一定时,满足相应总侧向应力取值范围的道路结构组合数;每列的意义是路基总侧向应力的取值范围一定时,满足相应总竖向应力取值范围的道路结构组合数。

由表 3 可知:胎压 0.7、1.0、1.3 MPa 时,路基总竖向应力为 10～80、10～90、10～90 kPa,主要分布范围 20～80、30～90、40～90 kPa;路基总侧向应力均为 10～60 kPa。

4 工程实例

为了验证路基应力水平,选取整车 236.10 kN、后轴 158.19 kN、胎压约 1.0 MPa、行车速度 8 m/s 的车辆对某道路 3 种路面结构的路基顶面应力进行测试,结果见表 4、图 8。

由表 4 和图 8 可知:不同路面结构组合下路基竖向应力的取值范围和最大值均不同,说明路面结构组合对路基应力水平存在较为显著的影响。与此同时,在加载车辆一定时,不同路面结构组合下的路基竖向应力均不超过 50 kPa,在表 3 中给出的 1.0 MPa 胎压时路基总竖向应力 10～90 kPa 范围内,说明该文求解的路基应力水平能够满足道路工程的应用要求。

5 结论

(1) 路基总竖向应力和总侧向应力在动荷载下的值均高于静荷载下的值。

(2) 随路面结构参数增加,路基总竖向应力和总侧向应力变化规律相似,但前者的变化幅度较后者大。

(3) 随车辆荷载增加,路基总竖向应力和总侧向应力均增加,但前者较为显著。

表 4 路基应力水平

结构	沥青面层/m			基层/m	底基层/m	最大应力/kPa
	SMA16	AC20	ATB25			
结构 1	0.05	0.07	0.17	级配碎石 0.15	水稳碎石 0.30	11.79
结构 2	0.05	0.07	0.15	级配碎石 0.40	砂砾 0.15	23.43
结构 3	0.05	0.07	0.10	水稳碎石 0.32	水稳碎石 0.16	44.51

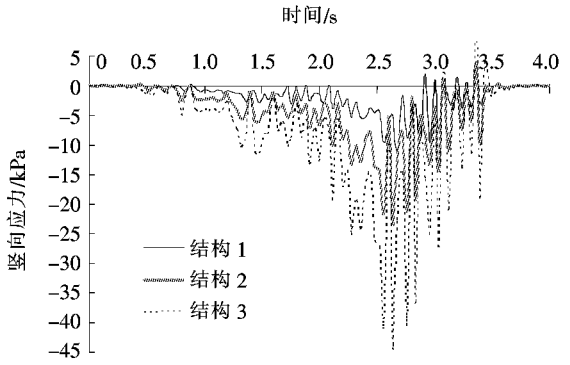


图 8　总竖向应力图

(4) 随行车速度增加，路基总侧向应力的变化幅度大于路基总竖向应力。

(5) 动荷载下，0.7、1.0、1.3 MPa 胎压的路基总竖向应力分别集中在 20～80、30～90 和 40～90 kPa，路基总侧向应力均为 10～60 kPa。

参考文献：

[1] 弋晓明，李术才，王松根，等.非饱和粉土回弹模量的应力依赖性与水敏感性耦合分析[J].山东大学学报：工学版，2013(2).

[2] JTG D50－2006　公路沥青路面设计规范[S].

[3] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Guide for Mechanistic－Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures－Final Report[R]. Champaign: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2004:80－93.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T307－99 Standard Method of Test for Determining the Resilient of Soils and Aggregate Materials[S]. Washington, D.C., 2012.

[5] Guo L, Wang J, Cai Y, et al. Undrained Deformation Behavior of Saturated Soft Clay under Long－Term Cyclic Loading[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2013, 50(7):28－37.

[6] Salour F, Erlingsson S. Resilient Modulus Modelling of Unsaturated Subgrade Soils: Laboratory Investigation of Silty Sand Subgrade[J]. Road Materials & Pavement Design, 2015, 16(3):553－568.

[7] Bao T N, Mohajerani A. Resilient Modulus of Fine－Grained Soil and a Simple Testing and Calculation Method for Determining an Average Resilient Modulus Value for Pavement Design[J]. Transportation Geotechnics, 2016, 7(5):59－70.

[8] 林小平，凌建明，官盛飞，等.水泥混凝土路面路基应力水平分析[J].同济大学学报：自然科学版，2010(4).

[9] 张献民，刘小兰.汽车动载对沥青路面作用深度的影响研究[J].中外公路，2016(2).

[10] 张亚娟.山西省黄土路基回弹模量研究[D].长安大学硕士学位论文，2015.

[11] 卢正，王长柏，付建军，等.交通荷载作用下公路影响深度研究[J].岩土力学，2013(2).

[12] 梁洪涛.移动荷载作用下层状沥青路面结构时程响应分析[D].中南大学硕士学位论文，2013.

[13] 偶昌宝.沥青路面结构动力响应分析[D].浙江大学硕士学位论文，2005.

[14] 吴朝晖.三轴载重车的平顺性分析及振动仿真[D].湖南大学硕士学位论文，2005.

[15] 袁宏伟.沥青路面典型基层材料和结构性能试验与工程对比研究[D].长安大学博士学位论文，2010.

[16] 魏道新，韩海红.路面结构设计参数对路表弯沉的影响分析[J].公路交通科技，2008(9).

[17] 杨毅，刘忠，辛亚兵，等.动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J].中外公路，2017(2).

[18] 高玲玲.连续配筋混凝土复合式沥青路面层间剪应力影响因素分析[J].中外公路，2017(3).

[19] 崔宏环，王志阳.冲积扇粉质黏土路基在交通荷载作用下的沉降变形影响因素分析[J].中外公路，2018(5).