

文章编号:1671-6833(2014)04-0019-05

石质路基路面结构应力分析

袁玉卿¹, 郭 涛¹, 王笑风², 许海铭¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052)

摘 要: 为研究石质路基路面的内力分布, 采用 4 cm 厚 AC-13 + 6 cm 厚 AC-20 沥青面层, 水泥混凝土、级配碎石、级配碎石调平层, 水泥混凝土、ATB-25 为基层, 建立模型, 研究路基模量、荷载对拉应力和剪应力的影响. 结果表明: 路基模量变化对路面结构应力影响不大; 路面结构层内一般只有压应力, 随着深度增加逐渐产生拉应力, 到达一定深度后逐渐趋于 0; 荷载圆中心更容易产生拉应力, 但是拉应力较小; 荷载圆边缘更容易产生压应力, 某深度后产生拉应力, 此拉应力较大; 剪应力随荷载的增大而增大, 在一定深度时剪应力突降, 之后逐渐变小并趋于稳定.

关键词: 道路工程; 路面结构; 石质路基; 应力; 超载交通

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.005

0 引言

目前高速公路承担的交通量越来越大, 重载车辆逐渐增多, 特别是车辆的超载, 对路面的结构提出了更高的要求. 对于山区公路而言, 石质路基现在已经成为较普遍的路基形式. 近年来, 随着山区公路的大规模建设, 石质路基的路面结构研究逐渐成为研究热点之一. 尚念宝^[1]研究了石质路基路面结构在普通荷载作用下的应力分布. 周志刚等^[2]采用三维有限元方法, 对重载交通条件下组合式基层沥青路面结构进行了模拟计算. 伍祥松^[3]选取不同的沥青路面结构与材料参数, 采用 BISAR3.0 路面力学计算程序计算分析不同基层类型对沥青混凝土路面结构内部应力状态的影响. 王瑞山^[4]采用 BISAR 软件计算了结构层厚度和路基处治对道路综合性能的影响. 张锋等^[5]以三轴重载汽车为例, 建立季节冻土区春融期重载车辆-路面-路基体系垂向动力学物理模型. 邵玉兰等^[6]认为对重载交通下山区高速公路车辙病害的影响, 提出相应的车辙预防措施与对策. 杨永顺等^[7]随着轴载的增加、路面温度的升高导致沥青层底最大拉应变增大. 但是至目前为止, 对超载交通下石质路基路面结构的理论研究尚处于探索阶段.

1 计算模型

以河南某山区公路初步设计方案为基础, 利用 GAMES (General Analysis of Multilayered Elastic Systems) 弹性层状理论计算程序, 计算分析石质路基路面结构在超重载交通条件下的应力, 为选择合理的路面结构提供相关依据^[8]. 行车荷载采用标准轴载 BZZ-100, 轮胎内压 0.7 MPa, 荷载圆半径为 10.65 cm, 双轮间距为 31.95 cm. x 方向为道路纵向, y 方向为道路横向. O_1, O_2 分别为荷载圆中心, A, B 为计算点位平面布置, 详见图 1.

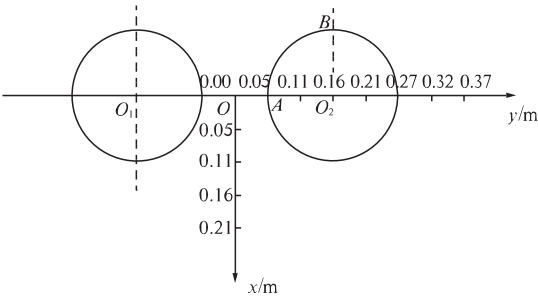


图 1 路面应力计算点布置

Fig. 1 Pavement stress calculation point layout

1.1 路面结构

根据设计, 沥青面层自上而下均为 4 cm 厚 AC-13 + 6 cm 厚 AC-20. 基层分别为 20 cm 厚 C40

收稿日期: 2014-03-15; 修订日期: 2014-05-12

基金项目: 河南省自然科学研究计划资助项目 (2011A580001); 河南省交通运输厅科技项目 (2010PII10)

作者简介: 袁玉卿 (1972-), 男, 河南洛阳人, 河南大学副教授, 博士, 主要从事道路工程的教学与科研工作, E-mail: yroad@126.com.

水泥砼 + 10 cm 厚 C20 素砼调平层(方案 I), 12 cm 厚 ATB-25 + 12 cm 厚级配碎石 + 10 cm 厚级配碎石调平层(方案 II), 20 cm 厚 C40 水泥砼 + 17 cm 厚 5% 水泥稳定碎石 + 10 cm 厚 5% 水泥稳定碎石调平层(方案 III), 20 cm 厚 C40 水泥砼 + 17 cm 厚 5% 水泥稳定碎石 + 10 cm 厚级配碎石调平层(方案 IV). 基层之下为石质路基.

1.2 材料模量

根据 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》, 各方案所用材料计算参数取值见表 1.

表 1 材料参数选择

Tab. 1 Selection of material parameters

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	厚度/cm
AC-13	1 500	0.25	4
AC-20	1 300	0.25	6
ATB-25	1 400	0.25	12
级配碎石	300	0.15	12
级配碎石调平层	300	0.15	10
C40 水泥混凝土	32 500	0.15	20
C20 水泥混凝土	25 500	0.15	10
5% 水稳碎石	1 700	0.15	17
石质路基	3 000	0.35	半空间无限大

1.3 施加荷载

超重载^[9]已成为我国公路路面结构破坏的主要因素之一, 故对每种方案计算超载时路面结构的剪应力和拉应力. 经初步计算分析, 找出每个方案受力最不利点进行. 剪应力分析时, 方案 I 选 B 点, 其它 3 个方案均选取 A 点; 拉应力计算时, 方案 I 选取 O₂ 点, 其它 3 个方案均选取 A 点进行计算. 施加荷载取值分别为 0.7 ~ 1.5 MPa, 对应的轴载为 100 ~ 213.8 kN.

2 拉应力分析

2.1 路基模量对拉应力的影响

根据石质路基的模量范围, 取 200 ~ 30 000 MPa 进行对比计算, 采用方案 I, 运用 GAMES 程序计算路面结构 O₂ 点处分层的拉应力, 结果见图 2.

由图 2 可知, 路表压应力最大, 随深度增加压应力逐渐减小; 深度 10 cm 处开始产生拉应力, 然后随着深度增加拉应力增大, 深度 22 cm 处拉应力达到最大值, 并在此位置, 即 ATB25 结构层层底突降. 其后, 拉应力趋于 0. 不同模量的曲线几乎重叠到了一起, 这说明石质路基模量高到一定程度时, 对路基路面结构的内力影响已不显著.

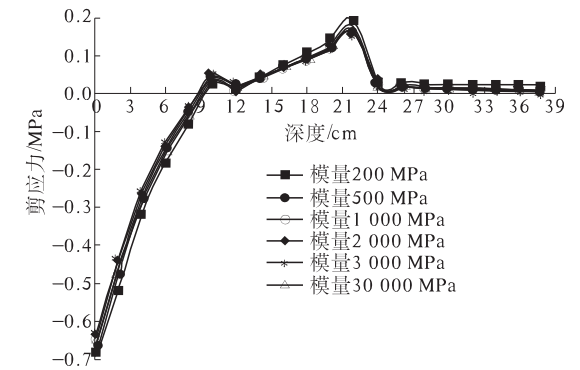


图 2 O₂ 点在不同路基模量下的拉应力分布
Fig. 2 Tensile stress distribution of point O₂ under different subgrade modulus

2.2 荷载对拉应力的影响

根据河南西部山区的地质情况, 多为中酸性岩石, 故取石质路基模量 $E = 3\,000\text{ MPa}$. 计算路面结构相应点处的剪应力和拉应力, 结果分别见表 2 ~ 5.

表 2 方案 I 之 O₂ 点在不同荷载下的拉应力
Tab. 2 Tensile stress of point O₂ in scheme I under different loads

深度/cm	荷载/MPa		
	0.7	1.1	1.5
4	-0.262 04	-0.410 88	-0.560 24
10	0.047 20	0.074 00	0.100 90
18	0.089 65	0.140 57	0.191 67
22	0.159 98	0.250 85	0.342 04
26	0.015 35	0.024 07	0.032 82
30	0.009 93	0.015 57	0.021 23
34	0.004 77	0.007 47	0.010 21

根据表 2, 针对方案 I 中的超载情况进行分析, 随加载增大, 最大拉应力和最大压应力都相应增大. 按通常规则, 正值为拉应力, 负值为压应力. 10 cm 深度以内, 即 AC-13 和 AC-20 都只产生压应力, 之后开始产生拉应力. 深度 22 cm 处拉应力达到最大, 加载 0.7 MPa 时最大拉应力为 0.16 MPa, 加载 1.5 MPa 时最大拉应力为 0.34 MPa. 深度大于 22 cm 之后应力突降, 趋于一致, 并趋于 0 MPa.

根据表 3, 针对方案 II 中的超载情况进行分析, 在 22 cm 深度以内只产生压应力, 且在 12 cm 深度处出现最大压应力; 22 cm 深度之后开始产生拉应力, 随加载增大拉应力增大的幅度越来越大. 到 38 cm 深度, 即 C20 水泥砼层, 加载 0.7 MPa 时最大拉应力为 0.16 MPa, 加载 1.5 MPa 时最大拉应力为 0.35 MPa.

表 3 方案 II 之 A 点在不同荷载下的拉应力

Tab.3 Tensile stress of point A in scheme II under different loads

深度/cm	荷载/MPa		
	0.7	1.1	1.5
4	-0.057 83	-0.094 75	-0.129 20
10	-0.062 25	-0.099 64	-0.135 85
12	-0.157 42	-0.243 10	-0.331 47
20	-0.037 47	-0.055 62	-0.075 84
22	-0.009 10	-0.011 94	-0.016 29
24	0.017 56	0.029 16	0.039 76
34	0.112 02	0.174 86	0.238 43
38	0.162 50	0.253 13	0.345 15

表 4 方案 III 之 A 点在不同荷载下的拉应力

Tab.4 Tensile stress of point A in scheme III under different loads

深度/cm	荷载/MPa		
	0.7	1.1	1.5
4	-0.070 39	-0.110 37	-0.150 50
10	-0.069 62	-0.109 16	-0.148 84
12	-0.205 09	-0.321 58	-0.438 49
18	-0.063 39	-0.100 33	-0.136 80
20	0.009 29	0.014 57	0.019 87
28	0.321 48	0.504 08	0.687 32
30	0.420 92	0.660 00	0.899 92
34	0.030 07	0.047 16	0.064 30
38	0.033 39	0.052 35	0.071 38

根据表 4,针对方案 III 之 A 点,路面深度 20 cm 之内只产生压应力,且在深度 12 cm 附近产生最大压应力.深度 20 cm 开始产生拉应力,随加载增大拉应力增大幅度越来越大,30 cm 处达到最大,加载 0.7,1.1,1.5 MPa 时拉应力分别为0.42,0.66,0.90 MPa.深度 30 cm 之后发生突降,拉应力逐渐趋于 0 MPa.

表 5 方案 IV 之 A 点在不同荷载下的拉应力

Tab.5 Tensile stress of point A in scheme IV under different loads

深度/cm	荷载/MPa		
	0.7	1.1	1.5
4	-0.110 43	-0.157 26	-0.214 42
10	-0.121 37	-0.188 55	-0.257 09
16	-0.030 11	-0.034 65	-0.047 25
18	0.013 33	0.028 94	0.039 46
20	0.051 00	0.083 11	0.113 33
26	0.195 63	0.307 58	0.419 39
30	0.354 35	0.558 15	0.761 05
34	0.025 39	0.010 44	0.014 23
38	0.028 48	0.008 72	0.011 88

根据表 5,针对方案 IV 之 A 点,路面深度 18 cm 之内只产生压应力,随着深度增加压应力减小.达到 18 cm 深度时开始产生拉应力,随加载增大拉应力增大幅度越来越大.深度 30 cm 处拉应力均达到最大值,此处加载 0.7,1.1,1.5 MPa 时最大拉应力分别为 0.35,0.56,0.76 MPa 之后,拉应力陡降,拉应力趋于 0 MPa.

综合以上分析,所选方案路面结构在一定深度之内,只产生压应力,某深度之后,只产生拉应力,持续到一定深度后急剧下降至 0 MPa 附近.荷载圆中心更容易产生拉应力,但是拉应力较小.荷载圆边缘更容易产生压应力,某深度后产生拉应力,此拉应力较大.

3 剪应力分析

3.1 路基弹性模量的影响

根据石质路基的模量范围,选取 120 ~ 30 000 MPa,选取方案 I,运用 GAMES 程序计算路面结构 O₂ 点处分层的剪应力,结果见图 3.

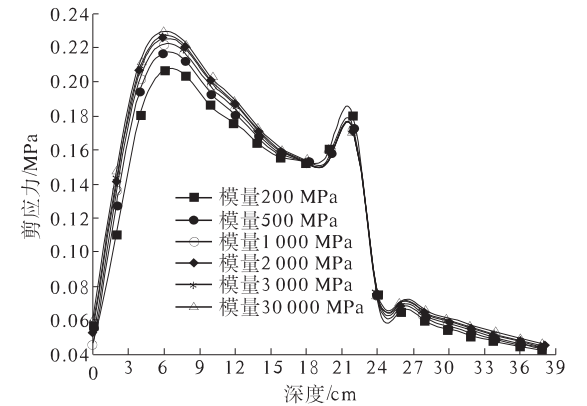


图 3 O₂ 点在不同路基模量时的剪应力分布
Fig.3 Shearing strength distribution of point O₂ under different subgrade modulus

由图 3 可知,路基模量对剪应力的影响较小.随着深度的增加,剪应力先增大,在 7.5 cm 深度处达到最大值,之后逐渐减小,深度 20 cm 达到极小值,深度 22.5 cm 处达到极大值,之后陡然降低.

3.2 荷载对剪应力的影响

由图 4 可以看出最大剪应力发生在路面表层,即 AC-13 层表面,随着加载的增大剪应力相应增大.当加载为 0.7,1.1,1.5 MPa 时面层剪应力分别为 0.25,0.39,0.53 MPa.各种加载作用下,随深度增加剪应力明显减小,在 15 ~ 22 cm 深度段趋于平缓.剪应力在 22 cm 处陡降,之后逐渐

趋于一致,差异逐渐减小.深度 38 cm 处加载 0.7 MPa 时剪应力值为 0.04 MPa,加载 1.5 MPa 时剪应力值为 0.08 MPa,相差只有 0.04 MPa,深度的影响越来越小.

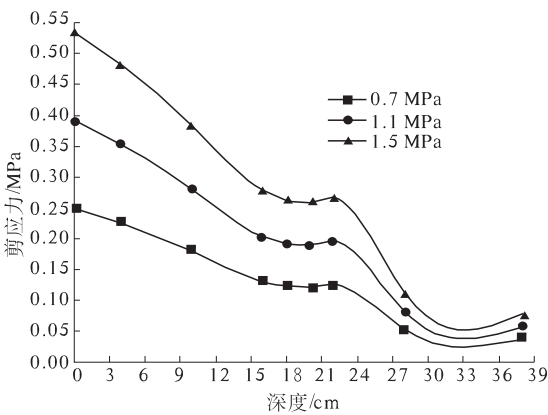


图 4 方案 I 之 B 点在不同荷载下的剪应力
Fig.4 Shearing strength of point B in scheme I under different loads

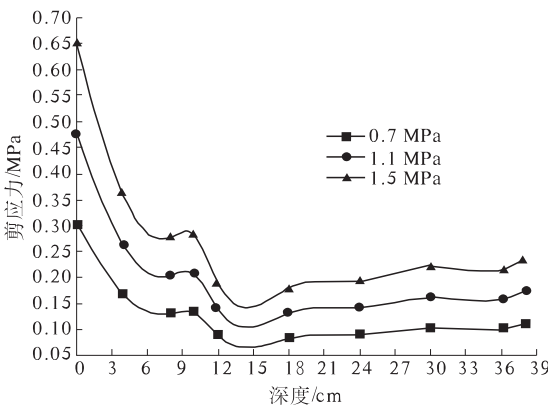


图 5 方案 II 之 A 点在不同荷载下的剪应力
Fig.5 Shearing strength of point A in scheme II under different loads

根据图 5,针对方案 II 之 A 点,最大剪应力发生在路面表层,即 AC-13 层表面.随着加载的增大剪应力相应增大,加载为 0.7,1.5 MPa 时表层剪应力分别为 0.31,0.65 MPa,两者相差 0.34 MPa.深度 8~10 cm 时剪应力基本保持恒定,之后剪应力陡降.深度 38 cm 处,加载 0.7,1.5 MPa 时剪应力分别为 0.11,0.24 MPa,两者相差 0.13 MPa.

根据图 6,针对方案 III 之 A 点进行分析,最大剪应力发生在路表面和深度 30 cm 处,即 AC-13 层表面和 C40 层底,在 16 cm 深处剪应力最小.其中,加载 0.7 MPa 时,面层剪应力为 0.30 MPa,深度 30 cm 处剪应力为 0.29 MPa.加载 1.5 MPa 时,面层剪应力为 0.63 MPa,深度 30 cm 处

剪应力为 0.61 MPa.深度 30 cm 处时剪应力突降,可能是相邻两层模量相差较大引起的.之后,剪应力快速减小,各种荷载作用时相差越来越小.

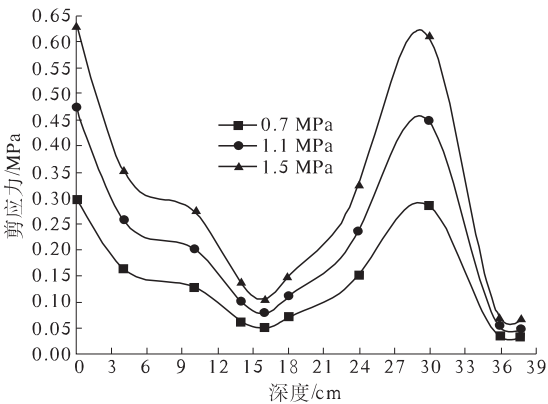


图 6 方案 III 之 A 点在不同荷载下的剪应力
Fig.6 Shearing strength of point A in scheme III under different loads

表 6 方案 IV 之 A 点在不同荷载下的剪应力
Tab.6 Shearing strength of point A in scheme IV under different loads

深度/cm	荷载/MPa		
	0.7	1.1	1.5
0	0.302 61	0.474 50	0.646 98
4	0.166 25	0.260 67	0.355 43
10	0.130 36	0.204 40	0.278 71
14	0.066 29	0.103 94	0.141 72
16	0.061 47	0.096 38	0.131 42
22	0.117 47	0.184 19	0.251 15
28	0.205 28	0.321 87	0.438 88
30	0.251 99	0.365 12	0.538 75
32	0.039 99	0.062 71	0.085 50
36	0.035 61	0.055 84	0.076 41
38	0.033 69	0.052 82	0.072 03

根据表 6,针对方案 IV 之 A 点进行分析.在 16 cm 深度处出现剪应力极小值,最大剪应力出现在路表面和 30 cm 深度处,即 AC-13 层表面和 C40 层底.加载 0.7 MPa 时,面层剪应力为 0.30 MPa,深度 30 cm 处剪应力为 0.25 MPa.加载 1.5 MPa 时面层剪应力为 0.65 MPa,深度 30 cm 处剪应力为 0.54 MPa.深度 30 cm 后剪应力突降,逐渐趋于稳定.

综上所述,剪应力随荷载的增大而增大.在一定深度时剪应力突降,之后不同加载时剪应力逐渐变小并趋于稳定.

4 结论

(1)石质路基模量超过 200 MPa,模量再增加

时对路面结构拉应力和剪应力的影响不大. 随着深度增加,压应力逐渐转变为0,之后产生拉应力,拉应力达到最大值,随后拉应力逐渐趋于0.

(2)路面结构在一定深度之内,只产生压应力,达到一定深度之后,只产生拉应力,然后急剧下降至0 MPa附近.

(3)路基模量对剪应力的影响较小. 随着深度的增加,剪应力先增大后减小,深度20 cm达到极小值,深度22.5 cm处达到极大值,之后陡然降低.

(4)剪应力随荷载的增大而增大. 在一定深度时剪应力突降,之后不同加载时剪应力逐渐变小并趋于稳定.

参考文献:

- [1] 尚念宝. 石质路基条件下沥青路面结构力学特性分析及ATB-30组成设计研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2010.
- [2] 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,2011,24(3):1-6.

- [3] 伍祥松. 重载交通下不同基层类型沥青路面结构应力分析[J]. 公路交通技术,2012,28(1):19-22.
- [4] 王瑞山. 干线公路重载交通沥青路面结构的强度及耐久性研究[D]. 郑州:郑州大学水利与环境学院,2012.
- [5] 张锋,冯德成,凌贤长,等. 春融期重载车辆-路面-路基垂向动力分析模型[J]. 中国公路学报,2011,24(4):7-14.
- [6] 邵玉兰,赵队家,韩萍,等. 重载交通下山区高速公路车辙病害原因分析及对策[J]. 公路,2011,56(1):114-118.
- [7] 杨永顺,王林,韦金城,等. 重载作用下典型路面结构动态响应数据采集与分析[J]. 公路交通科技,2010,27(5):11-16.
- [8] 郭红兵,王宁,吕光印. 轮胎-沥青路面接触效应数值分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2011,32(1):34-37.
- [9] 袁玉卿,高丹盈,王选仓. APP油毡用于旧水泥路面沥青加铺层间防裂[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(4):48-51.

Stress Analysis of Pavement Structure Based on Rock Subgrade

YUAN Yu-qing¹, GUO Tao¹, WANG Xiao-feng², XU Hai-ming¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Henan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute CO., LTD., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To explore the distribution of internal force in pavement structures on stone roadbed, the model was built. The structure is made up of 4 cm AC-13 + 6 cm AC-20 asphalt surface course, cement concrete, graded gravel, graded broken stone leveling layer, basement layer of cement concrete and ATB-25. Based on the model, the effects of subgrade modulus on tensile stress and shear stress were studied. Results show that changes of subgrade modulus have little effect on pavement structure stress. Commonly, compressive stress only exists inside the pavement structure layer. Tensile stress increases gradually with depth, and tends to zero finally. The tensile stress easier appears in the circle center of load, but it is less. The compressive stress is more prone to generation at the edge of load round; then, the tensile stress appears in some depth with a bigger value. Shear stress increases with the loads, and suddenly drops in certain depth; then, gradually it decreases and tends to be stable.

Key words: road engineering; pavement structure; stress; rock subgrade; overload traffic