

# 纤维稳定土基层参数对路面力学响应的影响分析

杨林, 刘雨彤

(东北林业大学土木工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:**为了分析聚丙烯纤维加筋水泥石灰土基层材料对路面结构设计及重载交通的影响,以聚丙烯纤维加筋水泥石灰土为对象,借助正交分析法,选取基层厚度、基层模量(聚丙烯纤维掺量)和底基层厚度作为主要影响因素,对聚丙烯纤维水泥石灰土基层沥青路面结构设计参数进行计算;同时分析了不同超载作用下纤维水泥石灰土基层沥青路面结构的弯沉及应力情况。结果表明:提高基层厚度有利于路面结构受力,同时使用聚丙烯纤维掺量为0.2%的水泥石灰土作基层材料,对于优化重载作用下的路面结构设计更为显著。为聚丙烯纤维加筋水泥石灰土在石料匮乏地区的应用提供了依据。

**关键词:**路面基层;聚丙烯纤维;水泥石灰土;有限元数值分析法;重载

**中图分类号:**U416.212

**文献标志码:**A

## 引言

我国平原地区面积约占总国土面积的12%,该地区砂石材料较匮乏,石料的远距离运输又会大幅增加材料造价,平原地区地下黏土分布极为广泛,且取用方便。为节约筑路材料成本可选用水泥、石灰及粉煤灰等无机结合料稳定土修筑路面基层。但水泥石灰综合稳定土抗压回弹模量不高<sup>[1]</sup>,聚丙烯纤维具有模量高、收缩变形小、对温度变化不敏感及价格低廉等优点,已有研究表明<sup>[2-4]</sup>,聚丙烯纤维已经广泛应用于混凝土工程、水稳碎石基层、沥青路面等土木工程领域,本文采用聚丙烯纤维加筋的方法提高综合稳定土的模量。目前针对水泥石灰综合稳定土材料的室内试验研究已经很广泛了<sup>[5]</sup>,但是有关水泥石灰土基层对路面结构影响的研究

几乎空白。鉴于我国经济的蓬勃发展和车辆大型化,大部分地区超载现象严重<sup>[6-8]</sup>,需进一步探讨聚丙烯纤维增强水泥石灰土作为基层材料能否满足越来越繁重的交通需求。本研究针对聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层的设计参数对路面结构的影响,借助有限元软件ABAQUS及正交分析法,进行路面结构设计指标的计算与分析。

## 1 路面结构设计参数计算分析

### 1.1 正交分析法方案设计

在路面结构设计过程中,经济耐久性道路设计的重要指标,应找出其关键影响因素并选择其最佳组合值。方案的比选是多方面的,不易采用单一指标判断。在多方案中选择最优方案时,可通过正交分析法综合考虑各关键因素<sup>[9-11]</sup>,在综合分析的基础上做出最佳选择。

收稿日期:2017-10-09

基金项目:黑龙江省交通运输厅科技项目(20101018)

作者简介:杨林(1970-),男,吉林长岭人,副教授,博士,主要从事道路工程及材料方面的研究,(E-mail)mryanglin@163.com

刘雨彤(1993-),女,黑龙江大庆人,硕士生,主要从事道路与铁道工程方面的研究,(E-mail)liuyutongoffice@163.com

### 1.1.1 选择影响因素

基层作为路面结构的主要承重层,其承受由面层传递的车辆荷载并进行荷载分散。基层的厚度和刚度对整个路面的性能和使用寿命具有重大的影响<sup>[12-13]</sup>,另外基层下底基层的厚度也起到一定制约路面使用性能的作用<sup>[14-15]</sup>。因此选取基层厚度、基层模量和底基层厚度作为影响因素进行路面结构设计。

### 1.1.2 确定基层材料的抗压回弹模量

根据《公路路面基层施工技术细则》(JTC/T F20-2015)中规定综合稳定细粒材料水泥剂量最小值为4%,以节约成本和环保为原则选择最低水泥剂量4%,同时推荐水泥和石灰的比例宜取60:40、50:50或40:60,为简化实验操作只研究聚丙烯纤维掺量对综合稳定土抗压回弹模量的影响,试验采用水泥和石灰的比例为50:50,即4%水泥+4%石灰综合稳定土。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)中给定的抗压回弹模量测定方法,选用顶面法对不同聚丙烯纤维掺量的水泥石灰土进行测试,试验采用圆柱形试件,规格为 $\Phi 10\text{ cm} \times h 10\text{ cm}$ ,成型压实度为96%,养生90 d,试验结果如图1所示。

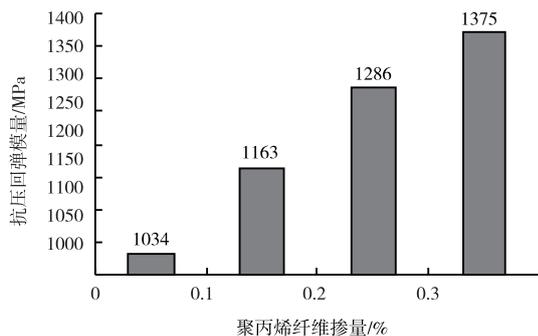


图1 聚丙烯纤维的掺量对水泥石灰土抗压回弹模量的影响

由图1试验结果可知,随着聚丙烯纤维掺量的增加,试件的抗压回弹模量逐步提高,纤维掺量为0.1%的水泥石灰土较普通水泥石灰土抗压回弹模量提高了12.48%,纤维掺量由0.1%增加到0.2%时,模量提高了10.58%,当纤维掺量达到0.3%时,相比掺量为0.2%的水泥石灰土模量仅提高了6.92%。这是由于纤维掺量的增加,混合料中的纤维网逐步密集,模量的提高效果越明显,当掺加过多纤维时,不仅影响纤维在土体中的分散性而且由于土体中没有足够的水化物粘结纤维与

土颗粒,导致纤维水泥石灰土抗压回弹模量增长率出现下降的趋势,继续增大聚丙烯纤维掺量还会导致水泥石灰土抗压回弹模量的降低。

### 1.1.3 确定因素水平

选用“沥青面层+半刚性基层+半刚性底基层”典型路面结构进行力学响应分析,路面结构和材料参数见表1。

表1 聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层  
沥青路面结构与材料参数

结构层	厚度/cm	20℃回弹模量/MPa	15℃回弹模量/MPa	泊松比
沥青混凝土上面层	4	1410	2175	0.25
沥青混凝土下面层	6	950	1310	0.25
聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层	2×10 2×15 2×20 2×25	纤维掺量分别为0%、0.1%、0.2%、0.3%的水泥石灰土实测值		0.25
石灰土(4%石灰含量)底基层	2×15 2×20 2×25 2×30	680		0.25
土基	—	40		0.35

### 1.1.4 选择考核指标

由于选用了半刚性基层材料,沥青混凝土面层底部受压应力作用不需考虑其拉应力值,因此选取路表弯沉、基层及底基层层底拉应力作为考核指标。

## 1.2 力学计算及结果分析

### 1.2.1 ABAQUS与HPDS计算结果对比

借助有限元软件ABAQUS简化计算三维路面结构力学问题,选择8结点双向二次平面应变四边形减缩积分单元,路面结构尺寸为6 m×3 m,模型左右两侧无水平方向位移,底部无竖向位移,假设各结构层间完全连续,施加标准荷载0.707 MPa。选用HPDS计算软件中弯沉值和层底拉应力计算子程序(HMPC)进行对比。由于表1含三个考察因素每种因素具有四个水平,选取 $L_{16}(4^3)$ 作为正交分析表(表2),两种软件计算结果如图2所示。

由图2可知,HPDS程序计算出的路表弯沉值略小于ABAQUS程序计算值,但弯沉变化趋势基本一致。由ABAQUS软件计算出的基层层底拉应力略小于HPDS程序,但变化规律相同,两种软件计算出的底基层层底拉应力值基本一致且变化趋势相同。综上所述,可认为ABAQUS建立的模型正确。

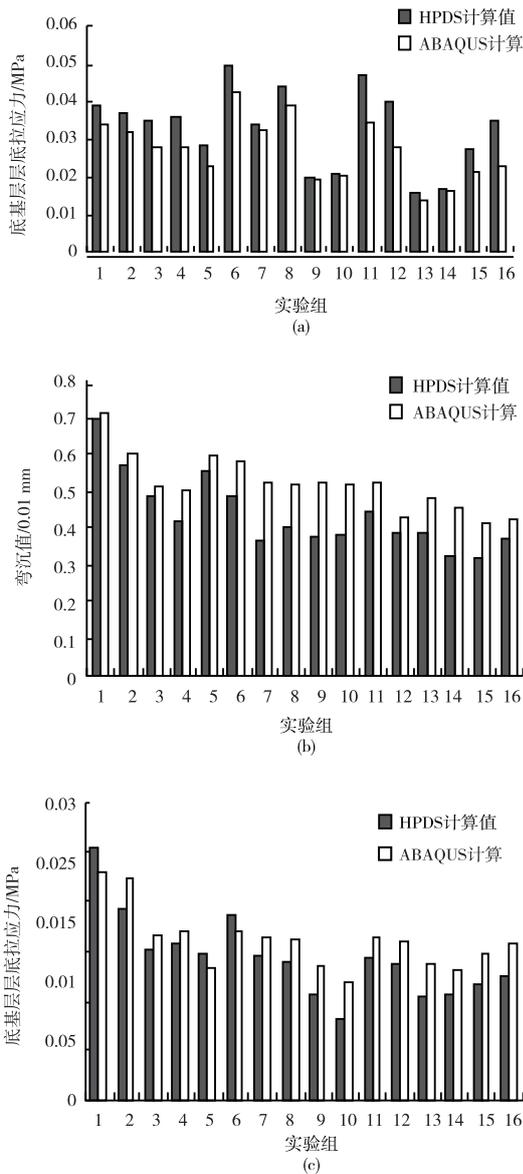


图2 ABAQUS与HPDS计算路表弯沉值、基层及底基层层底拉应力对比图

表2 正交试验设计

试验号	考核因素		
	A 基层厚度/cm	B 基层模量/MPa	C 底基层厚度/cm
1	20	1034	30
2	20	1163	40
3	20	1286	50
4	20	1375	60
5	30	1034	40
6	30	1163	30
7	30	1286	60
8	30	1375	50
9	40	1034	50
10	40	1163	60
11	40	1286	30
12	40	1375	40
13	50	1034	60
14	50	1163	50
15	50	1286	40
16	50	1375	30

1.2.2 直观分析

直观分析结果见表3,比较不同因素间的极差关系,如图3所示。基层模量与底基层厚度的极差变化值均为与基层厚度的相对极差。对比基层厚度A、基层模量B、底基层厚度C三因素对路表弯沉和基层、底基层层底拉应力的影响。

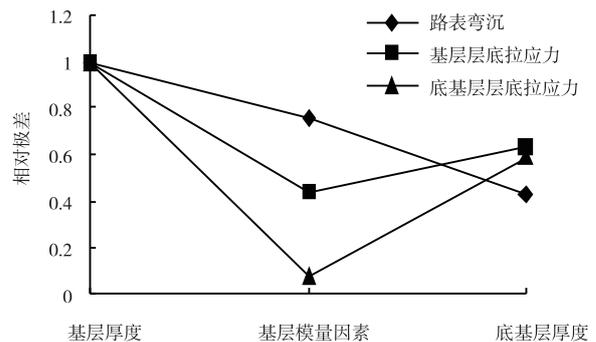


图3 不同因素的相对极差

表3 直观分析结果

考核指标	因素	K1	K2	K3	K4	R	最优值
路表弯沉/mm	A	132.55	121.2	98.5	76.92	55.63	A4
	B	129.96	115.4	96.4	87.43	42.52	B4
	C	123.52	103.5	99.96	102.2	23.56	C3
基层层底拉应力/MPa	A	0.1213	0.137	0.102	0.075	0.062	A4
	B	0.0908	0.112	0.116	0.118	0.027	B1
	C	0.1341	0.104	0.103	0.095	0.039	C4
底基层层底拉应力/MPa	A	0.0789	0.063	0.058	0.057	0.022	A4
	B	0.0633	0.0642	0.0645	0.065	0.002	B1
	C	0.072	0.0661	0.0597	0.059	0.012	C4

(1)路表弯沉

路表弯沉的影响:基层厚度 > 基层模量 > 底基层厚度,由此可知,减小路表弯沉的最有效途径是增大基层厚度。当基层材料造价过高不宜增加厚度时,可掺加聚丙烯纤维提高水泥石灰土基层模量以降低路表弯沉。

(2)基层层底拉应力

基层层底拉应力的影响:基层厚度 > 底基层厚度 > 基层模量,基层厚度的极值是其两因素的 2 倍,因此减小基层层底拉应力的最好方法是增加基层厚度,当基层厚度变化不大时,可提高底基层厚度以降低基层层底拉应力。由直观分析表(表 3)可知,基层大厚度低模量受力性更佳,基层模量为 1034 MPa,基层、底基层厚度分别为 50 cm、40 cm 时组合较好。

(3)底基层层底拉应力

底基层层底拉应力的影响:基层厚度 > 底基层厚度 > 基层模量,基层厚度的影响程度是基层模量的 13.25 倍,基层模量对底基层层底拉应力的影响很小。若要降低底基层层底拉应力,应提高基层、底基层厚度。结合直观分析表(表 3)得出,大厚度的基层受力效果最好,底基层厚度宜在 50 cm 左右。

1.2.3 因素变化对各指标的影响

根据表 3 绘制关系图,如图 4~图 6 所示,为基层厚度、基层模量、底基层厚度变化对路表弯沉、基层层底拉应力及底基层层底拉应力的影响关系图。

(1)路表弯沉

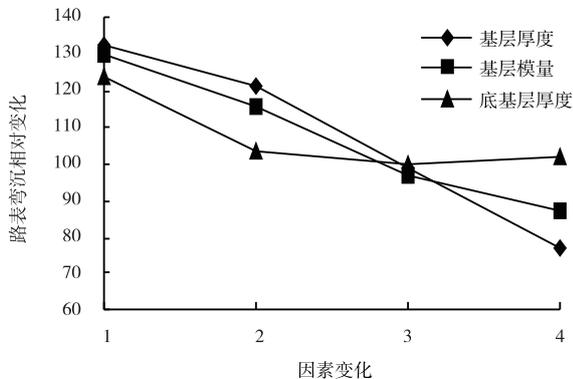


图 4 因素变化与路表弯沉变化关系图

由图 4 可知,各因素水平的增长使得路表弯沉均呈降低趋势。底基层厚度变化的影响线相对缓和,基层模量的影响较底基层厚度明显,基层厚度影响最为显著,当基层厚度由 20 cm 增加到 40 cm、50 cm 时,路表弯沉

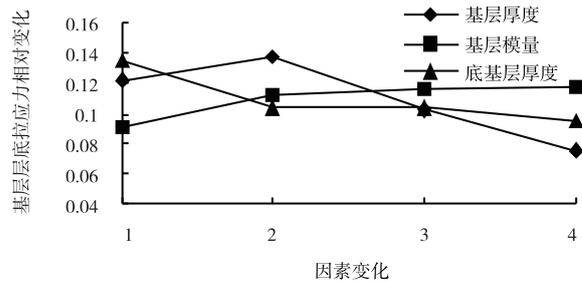


图 5 因素变化与基层层底拉应力变化关系图

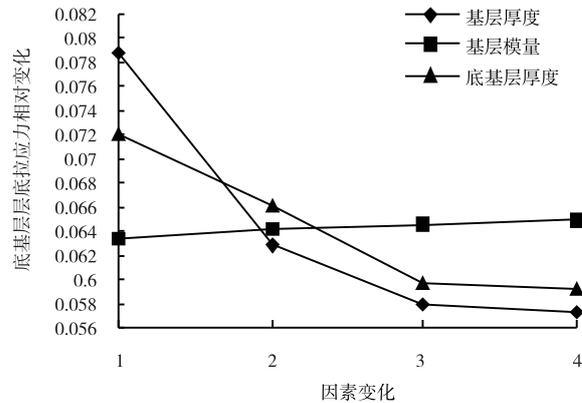


图 6 因素变化与底基层层底拉应力变化关系图

分别降低了 25.674%、41.972%,纤维掺量为 0.2% 的水泥石灰土基层材料较普通水泥石灰土基层材料模量提高了 25.798%,当纤维掺量增加到 0.3% 时,模量提高了 32.72%,基层模量后期变化率小于前中期,所以提高基层模量要适度,采用纤维掺量为 0.2% 的水泥石灰土基层材料,在相同路表弯沉条件下可适当减薄基层厚度。

(2)基层层底拉应力

如图 5 所示,随着基层厚度的增加,基层层底拉应力呈先增大后大幅减小的趋势,50 cm 厚基层较 20 cm 厚基层层底拉应力降低了 38.054%,因此应尽量增大基层厚度。底基层厚度在 30 cm~40 cm 范围内能够大幅降低基层层底拉应力,而继续增加底基层厚度,应力变化不大。聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层材料纤维掺量在 0.1% 范围内,基层层底拉应力增幅较大,0.1%~0.3% 掺量范围内,应力增幅较平缓。

(3)底基层层底拉应力

如图 6 所示,基层厚度的变化对层底拉应力的影响较大,基层厚度由 20 cm 增加到 30 cm 时,对层底拉应力降低作用效果最显著,而在试验范围内基层厚度由 20 cm 增加到 50 cm,底基层层底拉应力共下降了

27.425%。底基层厚度在 30 cm ~ 50 cm 厚度范围内对应力降低效果明显,继续增加底基层厚度,应力几乎无变化。基层模量影响线变化幅度不大,说明基层模量的变化对层底拉应力基本无影响,若要控制底基层层底拉应力应适当增大基层、底基层厚度。

## 2 重载作用分析

车辆荷载反复作用下,路面易出现纵向裂缝从而形成网裂、龟裂破坏。路表弯沉反应路面整体结构状态,其中包含路面结构层应力与抗力的失衡关系;同时半刚性基层、底基层层底拉应力对路面疲劳开裂起控制作用<sup>[16-18]</sup>。由于我国大部分地区超载现象越来越严重,还需对超载路面结构设计考核指标进行计算,最终确定合理的基层厚度、模量及底基层厚度。在标准轴载下(图4~图6),三因素对路表弯沉、基层及底基层层底拉应力计算分析可知,基层厚度越大,对各指标越有利,从而确定基层厚度为 50 cm;随着底基层厚度的增大,其影响线趋于平缓,底基层厚度宜为 40 cm。而基层材料的选择对路表弯沉及层底拉应力有不同程度的影响,分别计算不同纤维掺量下的水泥石灰土基层结构在重载情况下的路表弯沉与层底拉应力。

### 2.1 荷载参数及形式

在单轴双轮组标准轴载 100 kN 的基础上,分析轴载分别为 125 kN、150 kN、200 kN,即超载率分别为 25%、50%、100% 三种重载情况不同纤维掺量下水泥石灰土基层结构对路表弯沉和层底拉应力的影响。相关资料表明,只有在标准轴载作用下车轮荷载可转化为当量圆均匀荷载,若超过标准轴载,轮胎接地形状更近似于矩形<sup>[19]</sup>,矩形面积计算公式:

$$S = 0.8712L \times 0.6L$$

其中,  $L$  为轮胎接地长度(cm)。

计算重载车胎接地面积可采用比利时轴载—接地面积统计关系式<sup>[20]</sup>:

$$A = 0.008P + 152$$

其中,  $P$  为作用于车轮上的荷载(N)。路面结构荷载参数见表4。

### 2.2 计算及结果分析

通过 ABAQUS 软件计算出在不同重载情况下,含不

表4 路面结构荷载参数

轴载 /kN	轮载 /kN	接地面积/cm <sup>2</sup>	接地压力/MPa	矩形边长/cm		两轮中心距/cm
				长 0.8712L	宽 0.6L	
100	25	352	0.71	22.61	15.57	31.95
125	31.25	402	0.78	24.16	16.64	
150	37.5	452	0.83	25.62	17.64	
200	50	552	0.91	28.314	19.50	

同掺量聚丙烯纤维的水泥石灰土基层路面结构的路表弯沉与层底拉应力,计算结果如图7~图9所示。其中设计弯沉值、基层和底基层容许拉应力值为中等交通等级下( $1.2 \times 10^7$ 次/车道)的计算值。

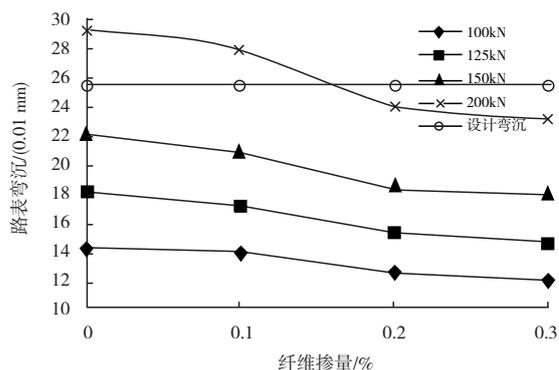


图7 路表弯沉计算值

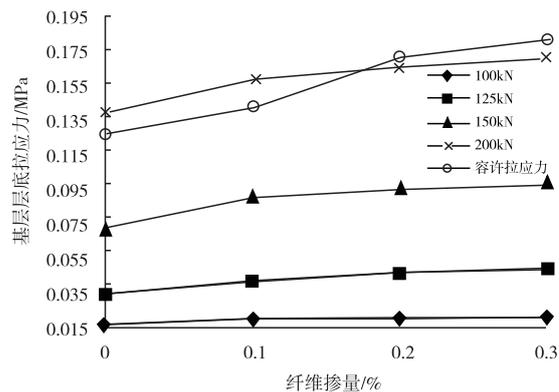


图8 基层层底拉应力计算值

由图7~图9可知,随着轴载的增大,路表弯沉、基层及底基层层底拉应力均增加。如图7所示,当轴载增加到 125 kN 时,普通水泥石灰土基层路面结构的路表弯沉较标准轴载 100 kN 增加了 3.808,而参加 0.2% 聚丙烯纤维后,路表弯沉仅增加了 2.761;轴载增加到 150 kN 时,普通基层路面结构的路表弯沉增大了 7.757,而添加 0.2% 聚丙烯纤维后,路表弯沉仅增大了 5.853;当轴载达到 200 kN,普通基层路面结构的路表弯沉增大

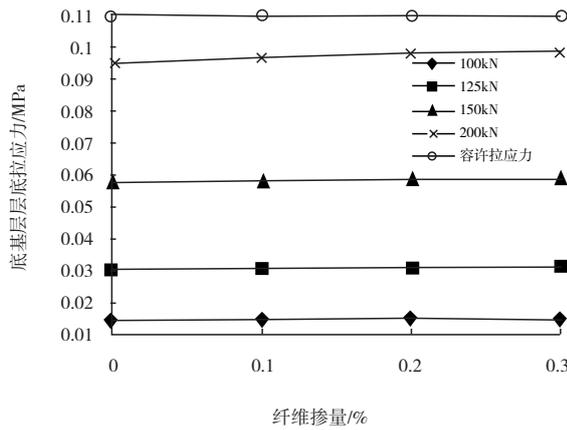


图9 底基层层底拉应力计算值

了14.891,而添加0.2%聚丙烯纤维后,路表弯沉仅增大了11.555。超载率为100%时,普通水泥石灰土基层、纤维掺量为0.1%的水泥石灰土基层路面结构的路表弯沉已超过设计弯沉值,不满足规范要求,但随着纤维掺量的提高,可满足设计要求,说明聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层材料能够缓解超载地区路表弯沉增大的现象。聚丙烯纤维掺量在0.1%~0.2%区间内弯沉具有显著的下降趋势,纤维掺量宜为0.2%。

由图8可知,在标准轴载100kN条件下,掺加0.2%聚丙烯纤维的水泥石灰土基层层底拉应力较普通水泥石灰土增大了0.004612MPa;轴载增加到125kN时,掺加0.2%聚丙烯纤维的水泥石灰土基层层底拉应力较普通水泥石灰土增大了0.011769MPa;同理,轴载达到150kN,层底拉应力增大了0.023174MPa。可知,聚丙烯纤维的添加不仅增加了基层层底拉应力,而且随着轴载的增大层底拉应力增幅越大。虽然基层层底拉应力小于容许拉应力,但应尽量避免重载超载现象。

当超载100%时,普通水泥石灰土基层、聚丙烯纤维掺量为0.1%的水泥石灰土基层层底拉应力均超过其容许拉应力,说明超载达到100%时,基层先发生拉伸开裂,裂缝向上扩展形成反射裂缝,这是常见的路面破坏形式。当纤维掺量达到0.2%或0.3%时,基层层底拉应力小于其容许拉应力,满足极限强度验算指标。由图9可知,聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层材料对底基层层底拉应力稍有影响但不大,聚丙烯纤维掺量不超过0.3%时,超载率不大于100%各结构底基层层底拉应力均小于容许拉应力,满足设计要求。

### 3 结论

(1)通过正交设计分析出路面结构设计中关键因素对指标的影响。其中对路表弯沉的影响:基层厚度>基层模量>底基层厚度;对基层层底拉应力的影响:基层厚度>底基层厚度>基层模量;对底基层层底拉应力的影响:基层厚度>底基层厚度>基层模量。水泥石灰土基层厚度由20cm增加到50cm时,路表弯沉、基层层底拉应力、底基层层底拉应力分别降低了41.972%、38.054%、27.425%。

(2)选用聚丙烯纤维掺量为0.2%的水泥石灰土基层材料,聚丙烯纤维水泥石灰土基层较同厚度普通水泥石灰土基层沥青路面结构路表弯沉降低了25.798%。而在相同路表弯沉条件下,应用聚丙烯纤维水泥石灰土作基层材料,可适当减薄基层厚度,满足经济合理成本最低化要求。

(3)在重载条件下,选用聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层路面结构,可显著降低路表弯沉,聚丙烯纤维水泥石灰土基层材料在重载作用下具有良好的路用性能;已知路面结构其他条件,比选出路面结构参数:聚丙烯纤维增强水泥石灰土基层厚度宜为50cm,聚丙烯纤维掺量宜为0.2%,石灰土底基层厚度宜为40cm。

### 参考文献:

- [1] OJUN O O, ADAVI A A, OLUWATUYI O E. Geotechnical and environmental evaluation of lime-cement stabilized soil-mine tailing mixtures for highway construction[J]. Transportation Geotechnics, 2017, 10: 1-12.
- [2] 严武建, 牛富俊, 吴志坚, 等. 冻融循环作用下聚丙烯纤维混凝土的力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(4): 37-44.
- [3] 周启伟, 叶伟, 杨波, 等. 水泥稳定碎石低温强度与干缩特性分析[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3): 948-952.
- [4] 姚晓光, 张争奇, 罗要飞, 等. 间断级配纤维微表处性能及指标研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(9): 3264-3272.
- [5] 杨林, 张秉夏. TG-2型土壤固化剂水泥石灰土的强度和稳定性试验[J]. 公路交通科技, 2013, 30(9): 27-32.

- [6] 刘均利,张晋豪.2007-2015年超载导致桥梁垮塌案例的统计分析[J].公路,2017,4(4):79-83.
- [7] 朱厚江,杨三强,沈宁,等.基于加速加载工况下试槽工程面层变形分析[J].公路工程,2017,42(2):81-84.
- [8] 辛勤,孙吉书,任晓军,等.重载作用对混凝土路面板的弯沉及应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2016,35(6):30-33.
- [9] YA L Y, CHUAN Y Z, JIE Y, et al. Orthogonal Analysis on Responses Indexes of Asphalt Pavement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013:2547(361).
- [10] 何本贵,刘芳,常为华,等.超长混凝土结构温度作用正交分析与研究[J].工业建筑,2011,41(S1):714-717.
- [11] 资建民,邓海龙,何丽,等.超薄沥青混凝土面层配合比设计混合正交分析[J].公路,2007(1):8-13.
- [12] 刘小文,谢瑞琼,时雨,等.车辆和温度影响下大堤沥青路面开裂数值模拟[J].公路工程,2016(6):1-5, 15.
- [13] 马士宾,刘俊琴,王丽洁,等.基层铺筑时施工车辆对石灰土底基层的力学影响分析[J].河北工业大学学报,2012,41(3):92-96.
- [14] 秦莉,何晓东,马士宾.施工车辆对二灰冷再生底基层的影响研究[J].河北工业大学学报,2013,42(4):76-80.
- [15] 刘俊芳,李永,苏跃宏.底基层特性对路面结构力学性能的影响性分析[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2015,36(6):113-119.
- [16] 钟勇强,黄晓明,马涛.基于室内结构试验的半刚性基层开裂数值仿真[J].北京工业大学学报,2013,39(5):690-695.
- [17] 彭杰,洪岭岭,曹强.水泥稳定碎石基层的层底拉应力影响因素分析[J].中外公路,2017,37(2):46-50.
- [18] 袁宏伟,贾侃,周浩.不同类型基层设计参数计算分析研究[J].岩土工程学报,2010,32(8):1274-1278.
- [19] 庄继德.汽车轮胎学[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [20] 何锐.基于实测轴载谱的沥青路面轴载换算与设计参数研究[D].西安:长安大学,2010.

## Analysis of Influence of Fiber Stabilized Soil Base Parameters on Mechanical Response of Pavement

YANG Lin, LIU Yutong

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of polypropylene fiber reinforced cement lime soil base material on pavement structure design and heavy load traffic. In this study, taking polypropylene fiber reinforced cement lime soil as the research object, by means of orthogonal analysis, the thickness of the base layer, the base layer modulus (polypropylene fiber content) and the subbase layer thickness are selected as the main factors, and the design parameters of asphalt pavement structure of fiber cement lime soil base are calculated. At the same time, the deflection and stress of asphalt pavement structure of fiber cement lime soil under different overload conditions are analyzed. The results show that increasing the thickness of the basement is beneficial to the stress of the pavement structure, simultaneously, using polypropylene fiber content of 0.2% of the cement lime soil as the base material, is more significant for the optimization of heavy load under the pavement structure design.

**Key words:** pavement base; polypropylene fiber; cement lime stabilized soil; finite element numerical analysis method; heavy load