

文章编号:1671-6833(2010)04-0027-04

长寿命沥青路面结构层参数的敏感性分析

孙红燕, 郑传超

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 通过长寿命路面结构层参数的敏感性分析, 为路面结构设计提供理论依据. 结构层参数敏感性分析采用正交试验法, 借助 Bisar3.0 程序计算沥青层底面拉应变 ε_1 、路基顶面压应变 ε_c 和半刚性基层底面拉应力 σ_1 . 计算结果表明: 显著水平 $\alpha=5\%$ 时, 只有沥青混凝土厚度、碎石层模量和沥青混凝土模量对沥青层底面拉应变有显著影响. 其中沥青混凝土厚度对3个指标的影响最大. 依据计算结果为陕蒙高速长寿命路面试验路推荐了两种典型结构.

关键词: 长寿命沥青路面; 结构层参数; 敏感性分析; 正交试验

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

0 引言

随着高速公路建设里程的增加, 交通量以及荷载都迅速增长, 加上环境因素的作用导致路面早期破坏非常严重, 部分路面建成1~2 a就出现大量的车辙和疲劳开裂^[1]. 早期破坏不仅严重降低了路面使用寿命, 还增加了高额的养护维修费用, 给国家经济带来了巨大损失. 为了解决这个困境, Newcomb 等人提出了长寿命路面的概念^[2]. 国外长寿命路面的研究基础是全厚式路面, 而对于我国来说则是一个新课题. 以往我国针对半刚性基层沥青路面, 所做的大量研究均基于路面材料进行^[3-5], 而忽略了路面结构组合设计. 基于以上考虑, 笔者选取了两类沥青路面结构(半刚性底基层和柔性底基层)进行了敏感性分析, 为长寿命沥青路面设计提供一定的理论依据.

1 力学指标和计算模型

我国以往沥青路面结构设计指标是路表弯沉和层底拉应力^[6]. 国外长寿命路面设计采用沥青层底面拉应变 ε_1 和路基顶面压应变 ε_c 作为设计指标^[7], 只需定期更换表面层即可实现沥青路面的长寿命, 已有不少成功例子^[8]. 笔者综合国内外经验选取沥青层底面拉应变 ε_1 、路基顶面压应变 ε_c 和半刚性层底面拉应力 σ_1 作为控制指标.

半刚性底基层类路面进行正交分析时采用的典型结构如图1所示. ε_1 、 σ_1 和 ε_c 3个指标值的计算点分别为图1中所示的A、B和C点.

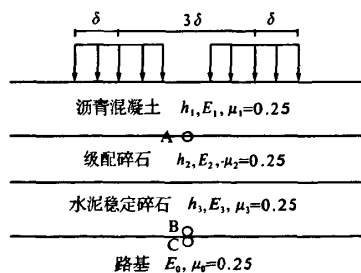


图1 半刚性底基层路面典型结构
Fig.1 Typical pavement structure

2 正交试验设计及计算结果分析

2.1 半刚性底基层类路面

2.1.1 试验因素与水平

分析路面应力、应变敏感性时, 为简化计算, 不考虑各个因素之间的交互作用. 选取沥青层厚度 h_1 和模量 E_1 , 级配碎石厚度 h_2 和模量 E_2 , 水泥稳定碎石层厚度 h_3 和模量 E_3 , 以及土基模量 E_0 . 这7个因素, 每个因素选3个水平.

2.1.2 试验安排

因选用的影响因素有7个, 每个因素有3个水平, 所以试验安排根据正交表 $L_{27}(3^7)$ 进行^[9].

收稿日期:2010-04-06; 修订日期:2010-05-20

基金项目: 陕西省交通建设科技资助项目(0505k)

作者简介: 孙红燕(1982-), 女, 浙江永康人, 长安大学博士研究生, 研究方向为路面工程, E-mail: hongyansun1982@163.com.

试验最后确定 ε_1 、 ε_e 和 σ_1 3 个指标值. 具体试验 方案及计算结果见表 1.

表 1 半刚性底基层路面试验安排及计算结果
Tab. 1 Experiment scheme and calculation results

h_1/cm	E_1/MPa	h_2/cm	E_2/MPa	h_3/cm	E_3/MPa	E_0/MPa	$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	σ_1/kPa	$\varepsilon_e/\mu\varepsilon$
1(20)	1(1 000)	1(20)	1(350)	1(20)	1(800)	1(30)	161.10	143.90	-405.50
1	1	1	1	2(30)	2(1 200)	2(50)	156.20	117.00	-224.80
1	1	1	1	3(40)	3(1 500)	3(80)	158.20	88.64	-135.60
1	2(1 200)	2(30)	2(400)	1	1	1	142.40	107.20	-299.80
1	2	2	2	2	2	2	140.90	90.07	-173.10
1	2	2	2	3	3	3	142.70	70.28	-108.20
1	3(1 500)	3(40)	3(500)	1	1	1	114.10	80.36	-220.50
1	3	3	3	2	2	2	114.20	69.58	-131.80
1	3	3	3	3	3	3	115.80	55.64	-85.00
2(30)	1	2	3	1	1 200	3	83.65	75.80	-145.20
2	1	2	3	2	3	1	75.85	91.68	-148.40
2	1	2	3	3	1	2	82.48	46.28	-126.30
2	2	3	1	1	2	3	107.60	60.50	-121.10
2	2	3	1	2	3	1	103.70	76.70	-127.70
2	2	3	1	3	1	2	106.10	39.19	-109.20
2	3	1	2	1	2	3	90.50	87.58	-167.40
2	3	1	2	2	3	1	84.54	105.40	-168.40
2	3	1	2	3	1	2	88.27	52.63	-142.50
3(40)	1	3	2	1	3	2	68.80	67.68	-111.30
3	1	3	2	2	1	3	69.89	32.24	-90.88
3	1	3	2	3	2	1	66.68	48.11	-95.21
3	2	1	3	1	3	2	55.56	94.54	-148.20
3	2	1	3	2	1	3	57.01	43.92	-119.40
3	2	1	3	3	2	1	51.89	62.79	-120.20
3	3	2	1	1	3	2	67.23	73.57	-120.40
3	3	2	1	2	1	3	67.32	34.87	97.99
3	3	2	1	3	2	1	64.01	52.04	-101.80

2.1.3 半刚性底基层路面试验结果极差分析

根据各个因素对试验指标值的影响不同,可以区分出主次. 通常用极差 R 来区分因素的主次. 其因素的极差越大,说明这个因素对试验指标的影响越大,它就是主要因素;反之,则是次要因素. 根据极差分析结果,可以得到对于半刚性底基层类路面影响 ε_1 的因素从主要到次要关系如下:

$$h_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_1 \rightarrow h_2 \rightarrow E_0 \rightarrow h_3 \rightarrow E_3$$

对于 σ_1 和 ε_e 也可得出类似的结论如下:

$$\text{对于 } \sigma_1, h_1 \rightarrow h_3 \rightarrow h_2 \rightarrow E_0 \rightarrow E_3 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2$$

$$\text{对于 } \varepsilon_e, h_1 \rightarrow E_0 \rightarrow h_3 \rightarrow h_2 \rightarrow E_1 \rightarrow E_3 \rightarrow E_2$$

通过比较发现,对于半刚性底基层类路面, h_1 对 3 个指标都为最主要影响因素.

2.1.4 趋势图的直观分析

半刚性底基层类路面分析趋势图见图 2. 从图中可以看出,增加各结构层厚度和提高路基强

度均可有效减小路基顶面压应变 ε_e ; 只有增加沥青层厚度 h_1 和提高级配碎石模量 E_2 才能比较有效地减小沥青层底面拉应变 ε_1 . 然而级配碎石的模量变化范围非常小,一般在 270 ~ 500 MPa. 因此通过提高级配碎石模量 E_2 来减小 ε_1 这一途径很难实现. 另外,提高半刚性层模量会导致 σ_1 增加,可能引起反射裂缝.

2.1.5 方差分析

方差分析如表 2 所示,若显著水平 $\alpha = 5\%$, 只有 h_1 、 E_2 和 E_1 对 ε_1 的影响比较显著. 若显著水平 $\alpha = 10\%$, 除 h_1 、 E_2 和 E_1 之外, h_1 、 h_3 和 h_2 对 σ_1 也有显著影响. 各结构层参数变化对 ε_e 的影响均不显著. ε_e 的极限水平比 ε_1 更容易满足. ($F_{0.05}(2, 2) = 19, F_{0.1}(2, 2) = 9$)^[9].

2.2 柔性底基层类路面的正交试验分析

选取因素沥青层厚度 h_1 和模量 E_1 , 级配碎

石层厚度 h_2 和模量 E_2 , 天然砂砾厚度 h_3 和模量 E_3 以及土基模量 E_0 , 每个因素取 3 个水平, 因素水平见表 3。试验安排按正交表 $L_{27}(3^{13})$ 进行, 试验最后确定 ε_i 和 ε_e 。

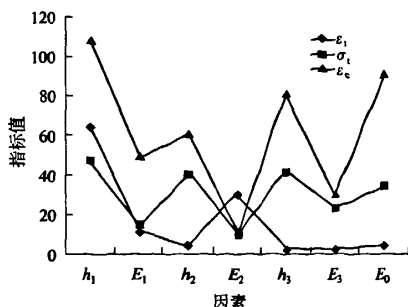


图2 趋势图

Fig.2 Tendency chart

表2 方差分析

Tab.2 Analysis of variance

来源	F 值		
	ε_i	σ_i	ε_e
h_1/cm	1 682.29	14.49	2.42
E_1/MPa	58.14	1.50	0.51
h_2/cm	6.41	10.46	0.93
E_2/MPa	211.29	0.64	0.04
h_3/cm	1.72	11.11	1.60
E_3/MPa	1.07	3.04	0.18
E_0/MPa	2.91	7.00	1.68

表3 柔性底基层类路面因素水平表

Tab.3 Levels of factors

水	h_1	E_1	h_2	E_2	h_3	E_3	E_0
平	/cm	/MPa	/cm	/MPa	/cm	/MPa	/MP
1	20	1 000	20	350	20	200	30
2	30	1 200	30	400	30	300	50
3	40	1 500	40	500	40	350	80

通过极差分析, 可得到路面各结构层参数对 ε_i 和 ε_e 影响从主要到次要顺序如下:

对于 ε_i , $h_1 \rightarrow E_2 \rightarrow h_2 \rightarrow E_1 \rightarrow E_3 \rightarrow h_3 \rightarrow E_0$

对于 ε_e , $h_1 \rightarrow E_0 \rightarrow h_3 \rightarrow h_2 \rightarrow E_3 \rightarrow E_1 \rightarrow E_2$

柔性底基层路面正交设计的方差分析如表 4, 当显著水平 $\alpha = 5\%$ 时, 只有 h_1 和 E_2 对 ε_i 的影响比较显著。若显著水平 $\alpha = 10\%$, 则除 h_1 和 E_2 之外, E_1 和 h_2 对 ε_i 也有显著影响。而各结构层参数变化对 ε_e 的影响均不显著。

3 各结构层参数增量与沥青层底拉应变变量 $\Delta \varepsilon_i$ 之间的对应关系

鉴于 3 个指标中的沥青层底面拉应变指标最

难满足, 通过大量计算建立了各参数与沥青层底拉应变变量 $\Delta \varepsilon_i$ 的对应关系, 采用的路面结构如图 3 所示。对于半刚性底基层类路面结构: h_1 每增加 5 cm, ε_i 平均减少 18.662 $\mu\varepsilon$; E_2 每增加 50 MPa, ε_i 平均减少 17.14 $\mu\varepsilon$ 。对于柔性底基层类路面: h_1 每增加 5 cm, ε_i 平均减少 29.4 $\mu\varepsilon$; E_2 每增加 50 MPa, ε_i 平均减少 22.78 $\mu\varepsilon$; h_2 每增加 5 cm, ε_i 平均减少 12.28 $\mu\varepsilon$ 。

表4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

来源	F 值	
	ε_i	ε_e
h_1/cm	313.45	7.31
E_1/MPa	12.43	0.80
h_2/cm	13.88	3.53
E_2/MPa	45.33	0.52
h_3/cm	0.65	4.16
E_3/MPa	0.81	1.40
E_0/MPa	0.07	5.59

4 两种典型的长寿命路面结构

综合以上分析结果, 笔者为陕蒙高速公路长寿命路面试验段推荐了两种结构形式, 如图 3 所示。

沥青混凝土
$h_1 = 28 \text{ cm}, E_1 = 1\ 200 \text{ MPa}, \mu_1 = 0.25$
级配碎石
$h_2 = 20 \text{ cm}, E_2 = 500 \text{ MPa}, \mu_2 = 0.25$
水泥稳定碎石
$h_3 = 20 \text{ cm}, E_3 = 1\ 400 \text{ MPa}, \mu_3 = 0.25$
天然砂砾
$h_4 = 20 \text{ cm}, E_4 = 80 \text{ MPa}, \mu_4 = 0.35$
路基
$E_0 = 80 \text{ MPa}, \mu_0 = 0.35$
(a) 半刚性底基层长寿命路面
沥青混凝土
$h_1 = 38 \text{ cm}, E_1 = 1\ 200 \text{ MPa}, \mu_1 = 0.25$
级配碎石
$h_2 = 20 \text{ cm}, E_2 = 270 \text{ MPa}, \mu_2 = 0.25$
天然砂砾
$h_3 = 20 \text{ cm}, E_3 = 150 \text{ MPa}, \mu_3 = 0.25$
天然砂砾
$h_4 = 20 \text{ cm}, E_4 = 150 \text{ MPa}, \mu_4 = 0.25$
路基
$E_0 = 80 \text{ MPa}, \mu_0 = 0.35$
(b) 柔性底基层长寿命路面

图3 两种长寿命沥青路面结构

Fig.3 Two types of long-life pavement

5 结论

(1) 通过正交试验的极差分析和方差分析均发现,不管是沥青层底面拉应变还是路基顶面压应变,沥青层厚度影响最显著。

(2) 虽然沥青层厚度增加能使沥青层底拉应变和路基顶面压应变减小,但沥青层厚度不能无限增加,要考虑工程实际和经济性。可通过采取其它措施如采用改性沥青来提高沥青层的极限拉应变,强化土基或铺垫层来减小路基顶面压应变,从而使路面结构整体强度满足要求。

(3) 除沥青层厚度之外,级配碎石模量和沥青层模量,对半刚性底基层路面和柔性底基层路面的沥青层底面拉应变也有比较显著的影响。

(4) 土基模量和底基层的厚度对路基顶面压应变的影响也比较大,尤其是土基模量。对于软弱地基就需要进行加固处理。

(5) 各个参数对每个力学指标的影响都不尽相同,路面结构不应只决定于其中某个指标,而应平衡3个指标关系以得到最佳结构。综合考虑各指标的有利影响,笔者认为结构设计时,应该主要从提高沥青层厚度和模量、级配碎石层厚度以及路基强度入手。

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005:219-235.
- [2] NEW-COMB D E, BUNCHE M, HUDDLESTON I J. Concepts of perpetual pavements[J]. Transportation Research Circular 503. 2001:4-11.
- [3] 赵昕,黄琪,李清富. 超载对沥青路面水损坏影响的试验分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(3):87-89.
- [4] 平树江,申爱琴,李鹏. 长寿命路面沥青混合料疲劳极限研究[J]. 中国公路学报,2009,22(1):34-38.
- [5] 谭炯. 重载交通长寿命沥青路面结构及材料设计研究[D]. 长沙:长沙理工大学公路工程学院,2007:47-64.
- [6] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [7] NUNN M, FERNE B W. Design and assessment of long-life flexible pavements[J]. TRL Report503, Transport Research Laboratory,2001:33-50.
- [8] MAHONEY J P. Study of long-lasting pavements in Washington State[J]. Transportation Research Circular 503. 2001:88-95.
- [9] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986:122-168.

Sensitivity Analysis of Strains and Stresses for Long-life Asphalt Pavement

SUN Hong-yan, ZHENG Chuan-chao

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The objective of this study is to provide foundations for selecting pavement structure by sensitivity analysis of pavement structure factors including thickness and modulus of each layer. Sensitivity analysis is based on orthogonal experiment method. Tensile strain at the bottom of asphalt concrete ε_1 , compressive strain on top of the subgrade ε_2 and tensile stress σ_1 at the bottom of semi-rigid cement stabilized gravel were evaluated using Bisar 3.0 program. Results demonstrate that when conspicuous level α is equal to 5%, only asphalt concrete thickness h_1 , graded crushed stone modulus E_2 and asphalt concrete modulus E_1 have obvious effect on tensile strain at the bottom of asphalt concrete ε_1 . h_1 has the most efficient on all pavement responses. Two types of long-life pavement have been recommended for Shaanxi and Inner Mongolia expressway according to the calculation results.

Key words: long-life asphalt pavement; pavement structure factor; sensitivity analysis; orthogonal experiment