

基于响应面法的长寿命沥青路面结构优化

马士宾,袁文瑞,王清洲,张彩利

河北工业大学土木工程学院,天津 300401

摘要 考虑到长寿命沥青路面结构设计参数多、取值范围大等特点,利用力学分析软件研究了各结构层厚度、模量等因素对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响,通过响应面法分析了影响沥青层底拉应变和路基顶压应变的显著因素,并建立了相应的预测模型。结果表明,沥青中间层、基层和底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变影响最为显著,沥青中间层、基层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变有一定影响,且沥青中间层 16 cm、模量 1800 MPa,基层 6 cm、模量 1200 MPa,底基层 40 cm 时,沥青层底拉应变和路基顶压应变综合结果最优。研究结果为长寿命路面结构组合优化提供了一定借鉴和参考。

关键词 道路工程;长寿命路面;响应面分析法;沥青层底拉应变;路基顶压应变

中图分类号 U416.02

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.25.013

Structure Optimization for Long-life Pavement Based on Response Surface Methodology

MA Shibin, YUAN Wenrui, WANG Qingzhou, ZHANG Caili

School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract Considering the large variety of design parameters and wide range of values of long-life asphalt pavement structure, this paper analyzes the influence of the modulus and thickness of each layer on the tensile strain at the bottom of asphalt concrete layer (ε_1) and the compressive strain at the top of the subgrade (ε_2) using the KENPAVE software. The significant influencing factors of ε_1 and ε_2 were further studied by the response surface methodology (RSM), and a correlation model was presented. The analysis results show that intermediate layer thickness, base layer thickness, subbase layer thickness exerted significant influence on ε_1 and ε_2 , intermediate layer modulus and base layer modulus exerted moderate influence, and ε_1 and ε_2 were optimized when 16 cm of intermediate layer, 1800 MPa of modulus, 6 cm of base layer thickness, 1200 MPa of modulus, 40 cm of subbase layer thickness were chosen. The test results may provide a reference for future studies of structure optimization of long-life pavement.

Keywords road engineering; long-life pavement; response surface methodology; tensile strain at the bottom of asphalt concrete layer; compressive strain at the top of the subgrade

近年来,随着交通量和车辆荷载的激增,沥青混凝土路面往往在建成通车后 1~2 年甚至更短的时间内就产生疲劳开裂、车辙等病害。这些病害往往与路面结构性能有关,病害的发生不仅降低了道路使用性能,而且增加了路面寿命周期成本,给道路建设和养护造成巨大的经济损失。

为解决这个困境,Nunn 等^[1,2]、Park 等^[3]引入了长寿命路面结构设计理念。国内提出的长寿命路面理念基于水泥混凝土和沥青混凝土组合结构^[4-6],国外长寿命路面的研究基础是全厚式路面,全厚式长寿命路面对于中国来说则是一个新课题。在此之前,中国针对半刚性基层沥青路面所做的大量研

收稿日期:2014-04-14;修回日期:2014-06-19

作者简介:马士宾,副教授,研究方向为路基路面工程,电子邮箱:286563105@qq.com

引用格式:马士宾,袁文瑞,王清洲,等.基于响应面法的长寿命沥青路面结构优化[J].科技导报,2014,32(25):75-80.

究均是基于路面材料进行的^[7,8],忽略了路面结构组合优化设计。基于以上考虑,本研究以沥青路面各设计参数为考虑因素,以国外沥青路面采用较多的沥青层底拉应变和路基顶压应变为设计指标,采用响应面法对长寿命路面结构进行研究优化。

响应面法是一种从多因素系统中找出最优条件的数学统计方法,是数学方法和统计方法结合的产物。响应面法(response surface methodology, RSM)可以在小区域内采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,在实验和生产中成为解决多变量多因素问题的一种很有效的统计方法。本文首先通过单因素实验研究沥青中间层厚度、模量,基层厚度、模量,底基层厚度等因素变化对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律;然后以沥青层底拉应变和路基顶压应变为响应因子,在单因素实验的基础上对影响沥青层底拉应变和路基顶压应变的各主要因素采用响应面法进行优化,以期对长寿命路面结构设计提供一定的借鉴和参考。

1 研究思路

采用Kenpave路面计算程序进行沥青层底拉应变和路基顶压应变的计算。路面各结构层参数参考国内外长寿命路面结构参数以及JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》,并综合考虑施工可行性后选取,表1为计算时采用的各结构层参数,轴载为标准轴载BZZ-100。

表1 路面结构参数
Table 1 Pavement structure parameters

层位	厚度/cm	15℃模量 E/MPa	泊松比
磨耗层(SMA)	5	1800	0.25
中间层(AC-16)	6~20	1600~2000	0.25
基层(AC-25)	6~12	1000~1400	0.25
底基层(级配碎石)	20~40	400	0.35
路基	—	30	0.40

注:SMA为沥青玛蹄脂碎石混合物;AC-16为石料最大粒径为16mm的沥青混凝土混合物;AC-25为石料最大粒径为25mm的沥青混凝土混合物。

首先采用单因素分析的方法,研究沥青中间层厚度、模量,基层厚度、模量,底基层厚度等因素对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律。然后根据中心组合实验设计原理,结合单因素影响实验结果,选取沥青中间层厚度、基层厚度、底基层厚度为考察对象,以沥青层底拉应变和路基顶压应变为响应值,采用Design-Expert 8.0统计分析软件^[9-12]的响应面法设计实验,将计算结果进行回归拟合,分析出主效应和交互效应,求取最佳组合值。

2 结果与分析

2.1 单因素分析

2.1.1 沥青中间层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响

参考国内外长寿命沥青路面的结构设计原则,沥青中间层厚度 H_2 分别取6、8、10、12、14、16、18、20 cm,以沥青层底拉应变 ϵ_1 和路基顶压应变 ϵ_2 为评价指标,研究沥青中间层厚度 H_2 对沥青混凝土路面结构寿命的影响规律。计算中,沥青磨耗层厚度 H_1 为5 cm,模量 E_1 为1800 MPa,中间层模量 E_2 为1800 MPa,基层厚度 H_3 为10 cm,基层模量 E_3 为1200 MPa,底基层厚度 H_4 为30 cm恒定不变,沥青层底拉应变和路基顶压应变计算结果见表2。

表2 不同沥青中间层厚度下沥青层底拉应变和路基顶压应变
Table 2 ϵ_1 and ϵ_2 under different intermediate layer thickness

H_2 /cm	$\epsilon_1/10^{-4}$	$\epsilon_2/10^{-4}$
6	1.70	2.27
8	1.55	2.10
10	1.43	1.94
12	1.32	1.80
14	1.22	1.68
16	1.13	1.56
18	1.05	1.46
20	0.96	1.36

由表2可以看出,沥青中间层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变均有较大影响,且近似成线性关系。当中间层厚度从6 cm增加到20 cm时,沥青层底拉应变和路基顶压应变随之减小,降幅分别达到42.49%和40.04%。

2.1.2 沥青中间层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响

在沥青磨耗层厚度为5 cm,模量为1800 MPa,中间层厚度为12 cm,基层厚度为10 cm,基层模量为1200 MPa,底基层厚度为30 cm恒定不变的情况下,沥青中间层模量取1600、1700、1800、1900、2000 MPa,研究不同沥青中间层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律,结果见表3。

表3 不同沥青中间层模量下沥青层底拉应变和路基顶压应变
Table 3 ϵ_1 and ϵ_2 under different intermediate layer modulus

E_2 /MPa	$\epsilon_1/10^{-4}$	$\epsilon_2/10^{-4}$
1600	1.32	1.82
1700	1.32	1.81
1800	1.32	1.80
1900	1.31	1.79
2000	1.31	1.79

由表3可以看出,沥青中间层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响很小,基本可以忽略不计。当模量由1600 MPa增加到2000 MPa时,沥青层底拉应变和路基顶压应变仅分别减小了0.91%和1.87%。

2.1.3 基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响

在沥青磨耗层厚度为5 cm、模量为1800 MPa,中间层厚度为12 cm、模量为1800 MPa,基层模量为1200 MPa,底基层厚度为30 cm恒定不变的情况下,基层厚度取6、8、10、12 cm,研究不同基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律,结果见表4。

表4 不同基层厚度下沥青层底拉应变和路基顶压应变
Table 4 ϵ_x and ϵ_z under different base layer thickness

H_3/cm	$\epsilon_x/10^{-4}$	$\epsilon_z/10^{-4}$
6	1.55	2.08
8	1.43	1.93
10	1.32	1.80
12	1.22	1.68

由表4可以看出,基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响均较大,且基本成线性关系。当厚度由6 cm增加到12 cm时,沥青层底拉应变和路基顶压应变分别降低了21.15%和18.88%。

2.1.4 基层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响

在沥青磨耗层厚度为5 cm、模量为1800 MPa,中间层厚度为12 cm、模量为1800 MPa,基层厚度为10 cm,底基层厚度为30 cm恒定不变的情况下,基层模量取1000、1100、1200、1300、1400 MPa,研究不同基层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律,结果见表5。

表5 不同基层模量下沥青层底拉应变和路基顶压应变
Table 5 ϵ_x and ϵ_z under different base layer modulus

E_3/MPa	$\epsilon_x/10^{-4}$	$\epsilon_z/10^{-4}$
1000	1.34	1.83
1100	1.33	1.82
1200	1.32	1.80
1300	1.30	1.79
1400	1.29	1.78

由表5可以看出,基层模量对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响较小。当模量由1000 MPa增加到1400 MPa时,沥青层底拉应变和路基顶压应变分别减小了4.03%和2.90%。

2.1.5 底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响

在沥青磨耗层厚度为5 cm、模量为1800 MPa,中间层厚度为12 cm、模量为1800 MPa,基层厚度为10 cm,模量为1200 MPa恒定不变的情况下,底基层厚度取20、24、28、32、

36、40 cm,研究不同底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响规律,结果见表6。

表6 不同底基层厚度下沥青层底拉应变和路基顶压应变
Table 6 ϵ_x and ϵ_z under different subbase layer thickness

H_4/cm	$\epsilon_x/10^{-4}$	$\epsilon_z/10^{-4}$
20	1.54	2.32
24	1.43	2.09
28	1.35	1.89
32	1.29	1.72
36	1.24	1.57
40	1.20	1.43

由表6可以看出,底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响均较大。当底基层厚度由20 cm增加到40 cm时,沥青层底拉应变和路基顶压应变分别减小了22.00%和38.14%。

2.2 响应面分析

2.2.1 响应面实验设计

根据Box-Behnken中心组合实验设计原理,结合单因素实验结果,应用Design-Expert 8.0统计分析软件对沥青中间层厚度、基层厚度和底基层厚度3个因素进行响应面实验设计(沥青中间层模量取1800 MPa,基层模量取1200 MPa)。响应面实验设计方案及各方案计算结果见表7,其中实验1~12为析因实验,13~17为中心实验。17个实验点分为析因点和零点,其中析因点为自变量取值在 H_2 、 H_3 、 H_4 所构成的三维顶点,零点为区域的中心点。

表7 响应面法实验设计方案及计算结果
Table 7 RSM experiment design and results

编号	H_2/cm	H_3/cm	H_4/cm	$\epsilon_x/10^{-4}$	$\epsilon_z/10^{-4}$
1	6	6	30	2.03	2.67
2	20	6	30	1.12	1.54
3	6	12	30	1.56	2.11
4	20	12	30	0.91	1.29
5	6	9	20	2.07	3.17
6	20	9	20	1.17	1.75
7	6	9	40	1.64	1.82
8	20	9	40	0.91	1.15
9	13	6	20	1.73	2.60
10	13	12	20	1.37	2.06
11	13	6	40	1.36	1.57
12	13	12	40	1.07	1.31
13	13	9	30	1.32	1.80
14	13	9	30	1.32	1.80
15	13	9	30	1.32	1.80
16	13	9	30	1.32	1.80
17	13	9	30	1.32	1.80

2.2.2 响应面分析结果及优化

对表7中 ε_1 、 ε_2 及3个因素 H_2 、 H_3 、 H_4 的数值,应用Design-Expert 8.0软件进行多元回归分析,得到 ε_1 的回归方程(1)和 ε_2 的回归方程(2)及方差分析表(表8、表9)。由 F 检验, $P < 0.05$ 即可认为该指标显著,小于0.01即极显著。

表8 ε_1 回归方程的方差分析

Table 8 Analysis of variance of the ε_1 regression equation

来源	平方和	自由度	均方差	F	$P > F$
模型	1.775×10^{-8}	9	1.972×10^{-9}	2030.92	<0.0001
H_2	1.255×10^{-8}	1	1.255×10^{-8}	12927.89	<0.0001
H_3	2.176×10^{-9}	1	2.176×10^{-9}	2241.03	<0.0001
H_4	2.331×10^{-9}	1	2.331×10^{-9}	2400.71	<0.0001
H_2H_3	1.762×10^{-10}	1	1.762×10^{-10}	181.46	<0.0001
H_2H_4	7.508×10^{-11}	1	7.508×10^{-11}	77.31	<0.0001
H_3H_4	1.122×10^{-11}	1	1.122×10^{-11}	11.56	0.0115
H_2^2	2.544×10^{-10}	1	2.544×10^{-10}	261.92	<0.0001
H_3^2	4.338×10^{-12}	1	4.338×10^{-12}	4.47	0.0724
H_4^2	1.373×10^{-10}	1	1.373×10^{-10}	141.36	<0.0001
残差	6.798×10^{-12}	7	9.711×10^{-13}		
失拟项	6.798×10^{-12}	3	2.266×10^{-12}		
绝对误差	0	4	0		
总离差	1.776×10^{-8}	16			

注: $R^2=0.9996$, $R_{adj}^2=0.9991$, $CV=0.71\%$ 。

表9 ε_2 回归方程的方差分析

Table 9 Analysis of variance of the ε_2 regression equation

来源	平方和	自由度	均方差	F	$P > F$
模型	4.375×10^{-8}	9	4.861×10^{-9}	527.46	<0.0001
H_2	2.051×10^{-8}	1	2.051×10^{-8}	2225.99	<0.0001
H_3	3.276×10^{-9}	1	3.276×10^{-9}	355.54	<0.0001
H_4	1.745×10^{-8}	1	1.745×10^{-8}	1893.27	<0.0001
H_2H_3	2.250×10^{-10}	1	2.250×10^{-10}	24.42	0.0017
H_2H_4	1.395×10^{-9}	1	1.395×10^{-9}	151.38	<0.0001
H_3H_4	1.863×10^{-10}	1	1.863×10^{-10}	20.22	0.0028
H_2^2	3.800×10^{-10}	1	3.800×10^{-10}	41.24	0.0004
H_3^2	2.695×10^{-12}	1	2.695×10^{-12}	0.29	0.6054
H_4^2	2.745×10^{-10}	1	2.745×10^{-10}	29.79	0.0009
残差	6.451×10^{-11}	7	9.215×10^{-12}		
失拟项	6.451×10^{-11}	3	2.150×10^{-11}		
绝对误差	0.000	4	0.000		
总离差	4.381×10^{-8}	16			

注: $R^2=0.9985$, $R_{adj}^2=0.9966$, $CV=1.61\%$ 。

$$\varepsilon_1 = 4.693 \times 10^{-4} - 1.448 \times 10^{-5} \times H_2 - 1.331 \times 10^{-5} \times H_3 - 6.440 \times 10^{-6} \times H_4 + 3.161 \times 10^{-7} \times H_2H_3 + 6.189 \times 10^{-8} \times H_2H_4 + 5.583 \times 10^{-8} \times H_3H_4 + 1.586 \times 10^{-7} \times H_2^2 + 1.128 \times 10^{-7} \times H_3^2 + 5.710 \times 10^{-8} \times H_4^2 \quad (1)$$

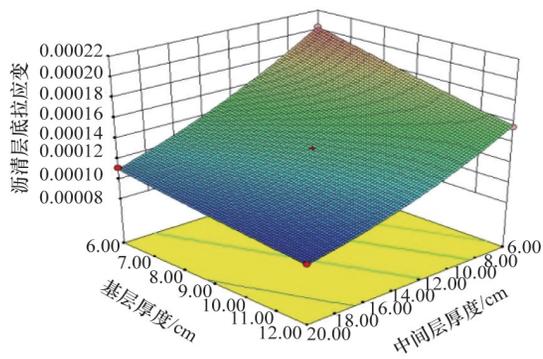
$$\varepsilon_2 = 7.945 \times 10^{-4} - 2.349 \times 10^{-5} \times H_2 - 1.981 \times 10^{-5} \times H_3 - 1.503 \times 10^{-5} \times H_4 + 3.571 \times 10^{-7} \times H_2H_3 + 2.668 \times 10^{-7} \times H_2H_4 + 2.275 \times 10^{-7} \times H_3H_4 + 1.939 \times 10^{-7} \times H_2^2 + 8.889 \times 10^{-8} \times H_3^2 + 8.075 \times 10^{-8} \times H_4^2 \quad (2)$$

由表8可知, ε_1 的回归方程中, F 回归=2030.92 $> F_{0.99}(9, 7)=6.72$,大于 F 值的概率 $P < 0.0001$,表明此回归模型预测效果较好;模型复相关系数 $R^2=0.9996$,说明此模型与实际使用拟合较好;方程的矫正决定系数 $R_{adj}^2=0.9991$,说明该方程能解释99.91%的响应值变化,仅有总变异的0.09%不能用此模型解释; $CV(\varepsilon_1)$ 的变异系数)表示实验的精确度, CV 值越高,实验的可靠性越低,本实验中 CV 值0.71%较低,说明实验操作可信,因此可以用该回归方程代替实验真实点对实验结果进行分析。由表8还可知,一次项 H_2 、 H_3 、 H_4 均极显著;交互项 H_2H_3 、 H_2H_4 极显著, H_3H_4 显著;二次项 H_2^2 、 H_4^2 极其显著, H_3^2 不显著。说明各影响因素对沥青层底拉应变的影响不是简单的线性关系。

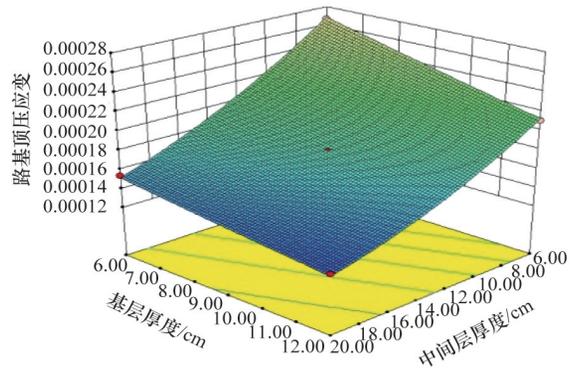
由表9可知, ε_2 的回归方程中, F 回归=527.46 $> F_{0.99}(9, 7)=6.72$,大于 F 值的概率 $P < 0.0001$,表明此回归模型预测效果非常好;模型复相关系数 $R^2=0.9985$,说明此模型与实际使用拟合较好;方程的矫正决定系数 $R_{adj}^2=0.9966$,说明该方程能解释99.66%的响应值变化,仅有总变异的0.34%不能用此模型解释;本实验中 CV 值1.61%较低,说明实验操作可信,因此可以用该回归方程代替实验真实点对实验结果进行分析。由表9还可知,一次项 H_2 、 H_3 、 H_4 均极显著;交互项 H_2H_3 、 H_2H_4 、 H_3H_4 极显著;二次项 H_2^2 、 H_4^2 极显著, H_3^2 不显著。说明各影响因素对路基顶压应变的影响也不是简单的线性关系。

响应面图形是响应值对各实验因子 H_2 、 H_3 、 H_4 所构成的三维空间曲面图,从响应面分析图上可以形象地看出各因素对响应值的影响(图1、图2)。

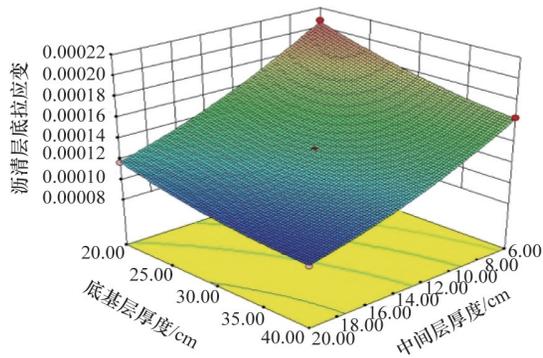
由图1、图2响应面可以看出,沥青中间层、基层、底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的响应面是一个倾斜面,厚度越大,沥青层底拉应变和路基顶压应变均越小,说明3个厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响呈反比关系,可以通过提高路面结构设计厚度的方法来降低沥青层底拉应变和路基顶压应变。但是,一味地追求最小沥青层底拉应变和路基顶压应变可能会造成经济上的极大浪费,应该在满足设计要求的前提下尽量节省资金。因此,需要根据具体的路面结构设计方案来选择合适的优化目标。文献[13]研究了适合中国长寿命路面结构设计的控制指标,即沥青层底拉应变 $\leq 1.20 \times 10^{-4}$,路基顶压应变 $\leq 2.80 \times 10^{-4}$ 。



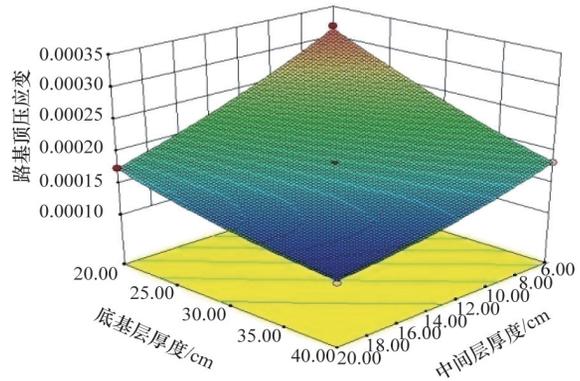
(a) 中间层和基层厚度对响应值影响



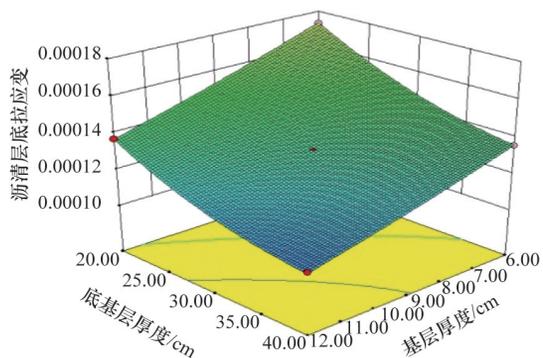
(a) 中间层和基层厚度对响应值影响



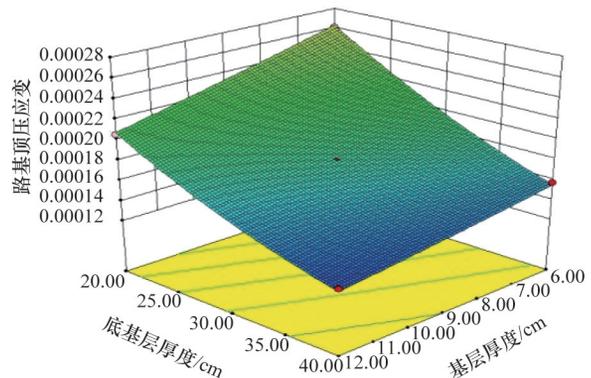
(b) 中间层和底基层厚度对响应值影响



(b) 中间层和底基层厚度对响应值影响



(c) 基层和底基层厚度对响应值影响



(c) 基层和底基层厚度对响应值影响

图1 沥青中间层、基层、底基层厚度之间的相互作用对沥青层底拉应变影响的响应面图

Fig. 1 RSM diagram of ϵ_1 influenced by interactions among thickness of intermediate layer, base layer and subbase layer

图2 沥青中间层、基层、底基层厚度之间的相互作用对路基顶压应变影响的响应面图

Fig. 2 RSM diagram of ϵ_2 influenced by interactions among thickness of intermediate layer, base layer and subbase layer

由表7可知,所有实验方案中沥青层底拉应变分布在 1.20×10^{-4} 附近;除方案5外,所有方案的路基顶压应变均 $< 2.80 \times 10^{-4}$ 。因此,选择沥青层底拉应变的优化目标为趋于 1.20×10^{-4} ,路基顶压应变的优化目标为取其最小值。最后,通过RSM预测最优值,经优化得到的最优解为 $H_2=15.89$ cm, $H_3=6$ cm, $H_4=40$ cm,期望值为0.934。在此条件下,经回归方程计算得到的沥青层底拉应变为 1.20×10^{-4} ,路基顶压应变为

1.41×10^{-4} 。

2.2.3 计算验证响应面分析结果

以响应面拟合的最优结果为计算参数,即沥青中间层厚度16 cm、模量1800 MPa,基层厚度6 cm、模量1200 MPa,底基层厚度40 cm,通过Kenpave计算得到的沥青层底拉应变为 1.194×10^{-4} ,路基顶压应变为 1.421×10^{-4} ,其值与预测值非常接近,证明了响应面优化法的可靠性。

3 结论

在单因素实验的基础上,对影响沥青层底拉应变和路基顶压应变较大的沥青中间层厚度、基层厚度、底基层厚度3个因素运用响应面分析法进行优化,得到如下结论:

1) 根据单因素实验计算结果,发现沥青中间层厚度、基层厚度、底基层厚度对沥青层底拉应变和路基顶压应变的影响较大,沥青中间层模量与基层模量的影响非常小,可以忽略不计;

2) 结合单因素实验结果,选取沥青中间层、基层、底基层厚度3个因素进行中心组合实验设计,使用Design-Expert 8.0软件进行数据拟合,建立了相关预测模型,回归分析表明,模型的稳定性非常好;

3) 利用由响应面法得到的模型对长寿命沥青路面结构进行优化,得到基于沥青层底拉应变和路基顶压应变设计指标的长寿命沥青路面的路面结构参数。验证计算表明,沥青层底拉应变为 1.194×10^{-4} ,路基顶压应变为 1.421×10^{-4} ,与理论值非常接近,证明了响应面优化分析的可靠性。

参考文献(References)

- [1] Nunn M E. Structural design of long-life flexible roads for heavy traffic [C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineering. UK: Institution of Civil Engineering, 1998, 129(3): 126-133.
- [2] Nunn M E, Feme B W. design and assessment of long-life flexible pavements[J]. Transportation Research Circular, 2001(503): 32-49.
- [3] Park H, Kim J, Kim Y, et al. Determination of the layer thickness for long-life asphalt pavement[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, 5: 791-802.
- [4] 王选仓, 侯荣国. 长寿命路面结构设计[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 46-49.
Wang Xuancang, Hou Rongguo. Structure design of long-life pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 46-49.
- [5] 赵晓晴, 王选仓, 侯荣国. 长寿命路面结构水泥混凝土板表面裸化技术研究[J]. 公路, 2008(4): 11-14.
Zhao Xiaqing, Wang Xuancang, Hou Rongguo. Research of cement concrete slab naked technique for long-life pavement structure[J]. High Way, 2008(4): 11-14.

- [6] 赵晓晴, 王选仓, 屈娜. 长寿命路面结构研究[J]. 森林工程, 2008, 24(1): 71-74.
Zhao Xiaqing, Wang Xuancang, Qu Na. Research on long-life pavement structure[J]. Forest Engineering, 2008, 24(1): 71-74.
- [7] 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.
Zhao Xin, Huang Qi, Li Qingfu. Test analysis of the influence of overloading on the water-damage of asphalt pavement[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2009, 30(3): 87-89.
- [8] 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.
Ping Shujiang, Shen Aiqin, Li Peng. Study of fatigue limit of asphalt mixture for perpetual pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 34-38.
- [9] 齐西珍, 王利强, 孟鹏. 利用响应面法优化 α -糖苷酶抑制剂发酵培养基[J]. 微生物学通报, 2012, 39(2): 203-210.
Qi Xizhen, Wang Liqiang, Meng Peng. Medium optimization of α -glucosidase inhibitors production by response surface analysis[J]. Microbiology China, 2012, 39(2): 203-210.
- [10] 陶有俊, Daniel Tao, 赵跃民, 等. 采用Design-Expert设计进行优化 Falcon分选试验[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 343-348.
Tao Youjun, Daniel Tao, Zhao Yuejin, et al. Design and optimization of Falcon separation test using Design-Expert software[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(3): 343-348.
- [11] 黄贤德, 丁华柱, 戚勇军, 等. 用Design-Expert软件研究掺合料对轻集料混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2012(3): 1-9.
Huang Xiande, Ding Huazhu, Qi Yongjun, et al. Efferts of some mineral admixtures on the performances of lightweight concrete by using Design-Expert software[J]. Coal Ash, 2012(3): 1-9.
- [12] 徐仁崇, 刘君秀, 曾冲盛, 等. 采用Design-Expert软件优化透水混凝土配合比设计[J]. 新型建筑材料, 2010(7): 17-20.
Xu Renchong, Liu Junxiu, Zeng Chongsheng, et al. Optimal design of pervious concrete proportion using Design-Expert software[J]. New Building Materials, 2010(7): 17-20.
- [13] 崔鹏, 邵敏华, 孙立军. 长寿命沥青路面设计指标研究[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 37-42.
Cui Peng, Shao Minhua, Sun Lijun. Research on design indices of perpetual pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 37-42.

(责任编辑 王媛媛)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。