

基于最优混合设计法的长寿命沥青 路面设计指标效应分析

马士宾,贺苗

(河北工业大学 土木与交通学院,天津市 300401)

摘要:该文采用 311-A 最优混合设计方法,运用 Kenpave 软件计算不同材料设计参数组合下的各设计指标值,研究设计参数对各设计指标的影响,并运用统计分析软件进行回归分析,建立多项式回归模型,最后经过计算机模拟,综合分析得出当沥青路面寿命达到最优时的组合方案为:4 cm(9 750 MPa)磨耗层 SMA-13+8 cm(13 000 MPa)连接层 AC-20+18 cm(7 000 MPa)上基层 ATB-25+17 cm(190 MPa)级配碎石层+20 cm(11 500 MPa)水泥稳定碎石底基层+(55 MPa)土基。

关键词:沥青路面;长寿命;组合式基层;最优混合设计

中图分类号: U416.224

文献标志码: A

半刚性基层沥青路面是中国高速公路最主要的路面结构,但随着交通量的急剧增加,这种传统且单一的结构在使用初期就出现了频繁损坏,平均寿命为 7~8 年,然而国外普遍采用柔性基层和组合式基层沥青路面,路面平均寿命可达到中国的两倍^[1]。针对中国实际情况,许多学者借鉴国外沥青路面设计^[2],提出适用于中国的组合式基层沥青路面结构形式,并且通过材料参数的优化,使之达到长寿命路面的使用要求^[3-5]。但大多数相关研究结果是依据 2006 版 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》所得出,所以当前基于 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[6],采用材料动态模量进行组合式基层路面设计指标的影响因素分析以及研究此结构在参数组合下的使用寿命是十分必要的。

为了得到符合长寿命路面要求的材料参数组合方式,通常采用正交试验,但是这种方案只能限定在已给定的水平上,而不是一定范围内的最优方案,而最优混合设计方法^[7]可以在给定参数范围内来寻求最佳方案,不仅试验次数少,而且通过最优混合设计所建立的回归方程的拟合值具有很高的精确度,对选择最佳组合方案具有很强的适用性。基于此方法的优点,该文首先选取影响各设计指标的主要因素,建立以各设计指标为目标的回归方程,运用统计分析软件研究各因素对目标值的影响,最后通过计算机模拟得到此设计结构的最佳方案。

1 长寿命路面结构和材料参数

采用改性沥青 SMA-13 沥青混合料作为路面磨耗层,AC 型沥青混合料作为路面连接层,在设置组合式基层时,以沥青稳定碎石为上基层,水泥稳定碎石为底基层,中间以级配碎石作为过渡层。根据规范,选取沥青路面在重交通下的结构参数^[6]如表 1 所示。

表 1 结构厚度及材料模量

层位	厚度/cm	模量/MPa
磨耗层(SMA-13)	4	7 500~12 000
连接层(AC-20)	6~8	8 500~13 000
上基层(ATB-25)	12~18	7 000~11 000
级配碎石层	15~20	190~440
水泥稳定碎石底基层	20~40	9 000~14 000
土基	—	50~60

2 长寿命路面设计指标

根据路面结构组合,中国现行规范选取沥青混合料层层底拉应变,无机结合料稳定层层底拉应力和沥青混合料层永久变形量为设计指标。

Nunn 等^[8]认为沥青层层底存在着一个弯拉应变

临界点,当实际应变小于该值时,就不会产生疲劳损伤,AI设计法给出的沥青层的疲劳极限值为 $70\text{ }\mu\epsilon$,伊利诺伊州则认为疲劳极限值应小于 $60\text{ }\mu\epsilon$,对此,该文选取 $65\text{ }\mu\epsilon$ 为沥青层底的疲劳极限值。

对于无机结合料层底的疲劳极限,沙庆林在文献[9]中提出:如果半刚性材料应力强度比小于35%,无机结合料层层底则不会产生微小裂缝。根据JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,水泥稳定底基层的弯拉强度为 $1.5\sim 2.0\text{ MPa}$,取弯拉强度为劈裂强度的1.4倍^[4],则材料的劈裂强度为 $1.07\sim 1.43\text{ MPa}$,此时半刚性材料的疲劳极限值为 $0.37\sim 0.5\text{ MPa}$,取最小值 0.37 MPa 作为无机结合材料的疲劳极限值。

在分析材料参数对组合式基层沥青路面车辙变形影响时,多采用沥青层剪应力或竖向压应力进行验算分析,基于JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,该文将沥青混合料层永久变形量 $\leq 10\text{ mm}$ 用于表面功能层验算。

3 最优混合设计方法

3.1 沥青混合料层层底拉应变

该文参考一些学者对沥青混合料层层底拉应变指标影响因素^[3,10]的研究,选取:①连接层厚度 Z_1 ;②上基层厚度 Z_2 ;③级配碎石模量 Z_3 为沥青混合料层层底拉应变的主要影响因素,除主要影响因素外,其他结构层的厚度和模量取规范中值。

为了进行最优混合设计,首先需要对各因素的水平进行编码。其中因素 Z_j 的变化区间为 (Z_{1j}, Z_{2j}) ,零水平 Z_{0j} 及变化间距 Δ_j 按式(1)和式(2)计算。计算结果如表2所示。

$$Z_{0j}=\frac{Z_{1j}+Z_{2j}}{2}$$

(1)

$$\Delta_j=\frac{Z_{2j}-Z_{0j}}{\gamma}$$

(2)

式中: Z_{1j} 、 Z_{2j} 为因素 Z_j 的下水平和上水平; γ 为星号臂(星号点与中心点的距离依选定的设计方案而定)。

表2 主要影响因素上下水平、零水平及变化间距

项目	Z_1/cm	Z_2/cm	Z_3/MPa
Z_{2j}	8.0	18.0	440.0
Z_{0j}	7.0	15.0	315.0
Z_{1j}	6.0	12.0	190.0
Δ_j	0.5	1.5	62.5

根据“311—A”最优混合设计表所列的 X_1 (连接层厚度)、 X_2 (上基层厚度)、 X_3 (级配碎石模量)的水平编码值,由式(3)计算 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的真实值,并使用Kenpave软件计算因子在各水平值所对应的沥青混合料层层底拉应变,其编码表和处理组合结果见表3、4。

$$Z_{aj}=Z_{0j}+\Delta_j X_{aj}$$

(3)

表3 主要影响因素水平编码表

X	Z_1/cm	Z_2/cm	Z_3/MPa
−2.000	6.000	12.000	190.000
−1.414	6.293	12.879	226.625
−1.000	6.500	13.500	252.500
0	7.000	15.000	315.000
1.000	7.500	16.500	377.500
1.414	7.707	17.121	403.375
2.000	8.000	18.000	440.000

注:表中数据仅用于计算分析,实际应用中取整,下同。

表4 处理组合结果(沥青混合料层层底拉应变)

处理号	X_1	X_2	X_3	沥青混合料层层底拉应变/ $\mu\epsilon$
1	0	0	2	39.68
2	0	0	−2	39.88
3	−1.414	−1.414	1	45.05
4	1.414	−1.414	1	42.24
5	−1.414	1.414	1	37.40
6	1.414	1.414	1	36.31
7	2.000	0	−1	38.16
8	−2.000	0	−1	41.75
9	0	2.000	−1	35.13
10	0	−2.000	−1	45.64
11	0	0	0	39.90

以沥青混合料层层底拉应变(Y_1)为目标函数,以编码值 X_1 (连接层厚度)、 X_2 (上基层厚度)、 X_3 (级配碎石模量)为决策变量,运用SPSS统计分析软件建立三元二次回归方程,回归模型为:

$$Y_1=39.9-0.794X_1-2.514X_2-0.005X_3+0.215X_1X_2+0.104X_1X_3+0.113X_2X_3+0.031X_1^2+0.139X_2^2-0.003X_3^2$$

(4)

经方差分析,回归总模型的 p 值为 $0.039<0.05$,说明此模型达到了显著水平,可用于实际情况分析。在回归模型各项系数的显著性检验中,从一次项来看, X_1 的 p 值为0.036, X_2 的 p 值为0.011,均小于

0.05, X_3 的 p 值为 0.930 远大于 0.05,说明上基层厚度是影响沥青混合料层层底拉应变的主要因素,而级配碎石模量对沥青混合料层层底拉应变的影响则不显著。从单因子二次项和交互项来看, p 值均大于 0.05,说明单因子二次项对目标值的影响不明显,且因子之间没有交互作用,即连接层厚度、上基层厚度和级配碎石模量这三个因素相互独立。下面仅进行单因素对目标函数的效应分析。

对回归方程采用降维,令其他三个自变量为零,可得出子模型如下所示:

$$Y_{11}=39.9-0.794X_1+0.031X_1^2$$
$$Y_{12}=39.9-2.514X_2+0.139X_2^2$$
$$Y_{13}=39.9-0.005X_3-0.03X_3^2$$

(5)

X_i 分别取 -2、-1、0、1、2,计算出相应的沥青层底拉应变值,并绘制单效应图如图 1 所示。

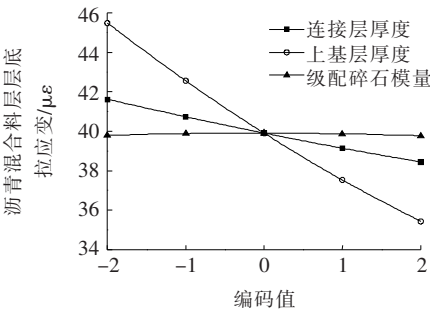


图 1 沥青混合料层层底拉应变的单效应图

从图 1 可以看出:对目标值影响最大的因子是上基层厚度,其次是连接层厚度,级配碎石模量对目标值几乎没影响,但是当材料参数取静态模量时,对沥青层底拉应变影响最大的是级配碎石模量,出现这种结果,可能是因为材料动态模量与级配碎石模量比值太大,使级配碎石模量对沥青层拉应变不产生影响。对于此结构的设计,可以通过增加上基层厚度来提高路面的使用寿命。

3.2 无机结合料稳定层层底拉应力

针对无机结合料稳定层层底拉应力,选取:① 上基层厚度 Z_1 ;② 水泥稳定碎石底基层厚度 Z_2 ;③ 水泥稳定碎石底基层模量 Z_3 为主要影响因素。此处及以下部分对因素水平编码计算过程不再赘述。其编码表和计算处理结果见表 5、6。

建立的回归模型为:

$$Y_2=0.199-0.011X_1-0.023X_2+0.011X_3+0.003X_1X_2-0.001X_1X_3-0.002X_2X_3+0.001X_2^2$$

(6)

表 5 主要影响因素水平编码表

X	Z_1/cm	Z_2/cm	Z_3/MPa
-2.000	12.000	20.00	9 000.0
-1.414	12.879	22.93	9 732.5
-1.000	13.500	25.00	10 250.0
0	15.000	30.00	11 500.0
1.000	16.500	35.00	12 750.0
1.414	17.121	37.07	13 267.5
2.000	18.000	40.00	14 000.0

表 6 处理组合结果(无机结合料稳定层层底拉应力)

处理号	X_1	X_2	X_3	无机结合料稳定层层底拉应力/MPa
1	0	0	2	0.218
2	0	0	-2	0.177
3	-1.414	-1.414	1	0.269
4	1.414	-1.414	1	0.226
5	-1.414	1.414	1	0.186
6	1.414	1.414	1	0.165
7	2.000	0	-1	0.169
8	-2.000	0	-1	0.210
9	0	2.000	-1	0.149
10	0	-2.000	-1	0.232
11	0	0	0	0.199

经方差分析,回归总模型的 p 值为 $0.021<0.05$,说明回归方程总模型达到显著水平。在回归模型各项系数的显著性检验中,从一次项来看, X_1 的 p 值为 0.015, X_2 的 p 值为 0.007, X_3 的 p 值为 0.015,均小于 0.05,说明上基层厚度,水泥稳定碎石底基层厚度和水泥稳定碎石底基层模量分别对无机结合料稳定层层底拉应力有着显著的影响。除 X_1X_2 和 X_2X_3 的 p 值略大于 0.05,未达到显著水平但接近显著水平外,单因子二次项和交互项 X_1X_3 的 p 值均远大于 0.05,说明因子之间的交互作用对目标函数的影响不大,可忽略因子之间的交互效应,仅考虑单因子对无机结合料稳定层层底拉应力的影响。

对回归方程采用降维,令其他三个自变量为零,可得出子模型如下所示:

$$Y_{21}=0.199-0.011X_1$$
$$Y_{22}=0.199-0.023X_2+0.001X_2^2$$
$$Y_{23}=0.199+0.011X_3$$

(7)

X_i 分别取-2、-1、0、1、2,计算出相应的无机结合料稳定层层底拉应力,并绘制单效应图如图2所示。

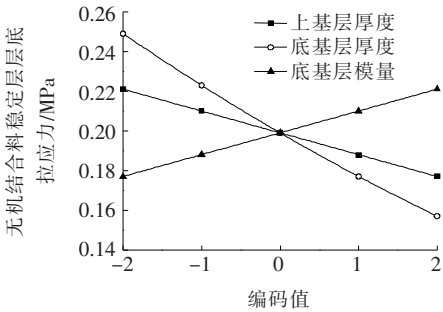


图2 无机结合料层层底拉应力单效应图

从图2可看出:无机结合料稳定层层底拉应力随水泥稳定层厚度和上基层厚度的增大而减小,但水泥稳定层厚度对指标影响更大,所以增大水泥稳定层厚度相比于增大上基层厚度更有利于减小无机结合料层疲劳开裂的几率;而随着水泥稳定层模量的增大,无机结合料稳定层层底拉应力也增大,所以模量越大的水泥稳定层更容易使层底发生疲劳开裂,故应严格限制水泥稳定层的模量。

3.3 沥青混合料层永久变形量

国外对沥青层超过20 cm的路面车辙^[8]进行分析发现:厚沥青层路面车辙仅限于距表面10 cm以内。该文首先以连接层厚度、磨耗层模量和连接层模量为主要影响因素分析其对目标值的影响,经过试算,发现三者并不对目标值有显著影响。主要原因是根据沥青路面结构层的受力情况,车辙主要发生在沥青路面的中下面层,并且当沥青层厚度超过某一个值时,车辙发生率会趋于稳定。在此基础上,文中选择:① 连接层模量 Z_1 ;② 上基层模量 Z_2 ;③ 水泥稳定碎石底基层厚度 Z_3 来研究其对目标值的影响^[11]。主要影响因素水平编码如表7所示。利用分层总和法^[12]计算得各组合下的沥青混合料永久变形量如表8所示。

表7 主要影响因素水平编码表

X	Z_1/MPa	Z_2/MPa	Z_3/cm
-2	8 500.00	7 000	20.00
-1.414	9 159.25	7 586	22.93
-1	9 625.00	8 000	25.00
0	10 750.00	9 000	30.00
1	11 875.00	10 000	35.00
1.414	12 340.75	10 414	37.07
2	13 000.00	11 000	40.00

表8 处理组合结果(沥青混合料层永久变形量)

处理号	X_1	X_2	X_3	沥青混合料层永久变形量/mm
1	0	0	2	9.22
2	0	0	-2	9.17
3	-1.414	-1.414	1	9.11
4	1.414	-1.414	1	8.96
5	-1.414	1.414	1	9.44
6	1.414	1.414	1	9.29
7	2	0	-1	9.10
8	-2	0	-1	9.29
9	0	2	-1	9.39
10	0	-2	-1	8.91
11	0	0	0	9.20

建立的回归模型为:

$$Y_3=9.2-0.05X_1+0.118X_2+0.013X_3-0.003X_1X_3-0.002X_2X_3+0.002X_1^2-0.009X_2^2-0.001X_3^2$$
 (8)

经方差分析,回归总模型的 p 值为 $0.011<0.05$,说明回归方程总模型达到了显著水平,能反映实际情况。在回归模型各项系数的显著性检验中,从一次项来看, X_1 的 p 值为0.008, X_2 的 p 值为0.003, X_3 的 p 值为0.03,均小于0.05,所以三个因子各自对目标值都具有显著的影响;从交互项来看, p 值均大于0.05,说明单因子二次项对目标值的影响不明显,且因子之间没有交互作用,从单因子二次项来看,仅有 X_2^2 的 p 值小于0.5。下面仅进行单因素对目标函数的效应分析。

对回归方程采用降维,令其他三个自变量为零,可得出子模型如下所示:

$$\begin{aligned} Y_{31} &= 9.2 - 0.05X_1 + 0.002X_1^2 \\ Y_{32} &= 9.2 + 0.118X_2 - 0.009X_2^2 \\ Y_{33} &= 9.2 + 0.013X_3 - 0.001X_3^2 \end{aligned}$$
 (9)

X_i 分别取-2、-1、0、1、2,计算出相应的沥青混合料层永久变形量,并绘制单效应图如图3所示。

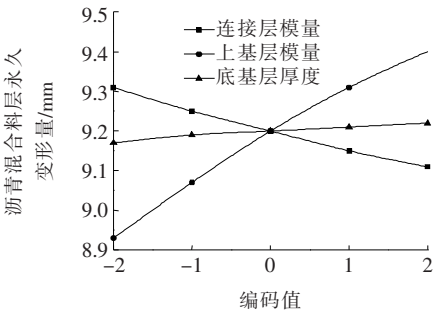


图3 沥青混合料层永久变形量单效应图

从图 3 可以看出:上基层模量对目标值的影响最大,且随着上基层模量的增大,永久变形量增加,因为永久变形量主要通过竖向压应力的影响来实现,上基层模量的增大,会使面层内压应力增加,所以永久变形量就会增加。要降低沥青层的永久变形量,可以通过减小上基层的模量,适当增加连接层的模量来实现。

4 长寿命路面材料设计参数最佳组合

为了寻求结构参数的最佳组合方式,需要对各参数组合情况下的指标值进行模拟分析^[13]。各设计指标的影响因素 X_1 、 X_2 、 X_3 的编码值范围为-2~2,分别取步长为 1,经计算机模拟,各设计指标共有 125 个组合,其沥青混合料层层底拉应变的范围为 33.95~48.92 $\mu\epsilon$;无机结合料层层底拉应力的范围为 0.137~0.317 MPa;沥青混合料层永久变形量的范围为 8.81~9.53 mm。由此可见,对于组合式基层沥青路面,在规范给出的结构参数范围内,能够满足长寿命路面的要求。在此基础上,在不考虑沥青路面初期建设费用的情况下,当路面寿命达到最优时,对材料参数进行合理匹配,得到如表 9 所示的最佳组合方式。

表 9 最佳组合方式(寿命最优)

层位	编码值	厚度/cm	编码值	模量/MPa
磨耗层(SMA-13)	—	4	—	9 750
连接层(AC-20)	2	8	2	13 000
上基层(ATB-25)	2	18	-2	7 000
级配碎石层	—	17	-2	190
水泥稳定碎石底基层	-2	20	—	11 500
土基	—	—	—	55

5 结论

(1) 根据最优混合设计方法,通过对建立的回归方程进行模拟分析可知,依据现行规范设计的重交通组合式基层沥青路面结构能够达到长寿命路面的结构功能要求,并且能够满足规范对面层的使用功能要求。

(2) 通过对回归模型的交互项进行分析,发现影响各指标的因子相互独立,所以在选取设计参数时只需满足该层材料的性能要求即可。

(3) 对沥青混合料层层底拉应变,无机结合料稳

定层层底拉应力和沥青混合料层永久变形量影响最显著的因素分别为上基层厚度,水泥稳定底基层厚度和上基层模量。为提高沥青路面的使用寿命,在给定的材料参数范围内,可以通过增加上基层的厚度,增大水泥稳定层厚度和减小上基层的模量来实现。

(4) 对组合式基层沥青路面的材料设计参数进行综合分析,得到基于寿命最优的组合方案为:4 cm,(9 750 MPa)的磨耗层 SMA-13+8 cm(13 000 MPa)的连接层 AC-20+18 cm(7 000 MPa)的上基层 ATB-25+17 cm(190 MPa)的级配碎石层+20 cm(11 500 MPa)的水泥稳定碎石底基层+(55 MPa)的土基。

参考文献:

[1] 崔鹏,孙立军.高等级公路长寿命路面研究综述[J].公路交通科技,2006,23(10):10-14.

[2] 蒋松利,丁淑魏.基于法国标准的复合式基层沥青路面结构设计案例分析[J].中外公路,2018,38(5):69-72.

[3] 宋若原,钱振东.组合式基层长寿命路面结构优化[J].交通运输工程与信息学报,2011,9(1):102-106.

[4] 陈千.一种基于组合式基层的长寿命路面结构设计[J].北方交通,2012(5):1-4.

[5] 贺治增.基于组合式基层的重载交通沥青路面结构优化研究[J].交通科技,2014(3):74-77.

[6] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[7] 白厚义,刘强,袁玲,等.回归设计及多元分析[M].南宁:广西科学技术出版社,2008.

[8] NUNN M. Long-Life Flexible Roads Proceeding[R]. 8th International Conference on Asphalt Pavements,1997.

[9] 沙庆林.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1998.

[10] 周志刚,叶勇迪,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),2011,8(1):1-6.

[11] 偶昌宝.无机结合料类稳定类基层沥青路面永久变形影响因素分析[J].城市道桥与防洪,2019(8):36-37,9.

[12] 储磊.基于分层总和法的级配碎石柔性路面永久变形量计算[J].中国市政工程,2019(6):80-82,88,107-108.

[13] 韦翔华,李华兴,陆申年.应用最优混合设计研究氮磷钾不同配比对甘蔗产量和产糖量的效应[J].土壤肥料,2005(4):6-10.