

基于综合性能的 OGFC 沥青混合料 配合比设计优化研究

安少科^{1,2}, 张家康^{1,2}, 黄杨权^{1,2}, 艾长发^{1,2}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要 目的 研究集料级配、沥青用量、纤维掺量对排水式沥青混合料性能的影响, 对排水式沥青混合料进行配合比设计, 推广应用排水式沥青混合料。方法 选取动稳定度、低温弯曲应变、渗水系数、疲劳寿命及冻融劈裂强度比作为性能评价指标, 分析不同级配类型、沥青用量、纤维掺量对排水式沥青混合料性能的影响规律。再利用正交试验方法, 并结合综合评分法, 开展排水式沥青混合料配合比优化试验研究。结果 排水式沥青混合料综合性能最佳的配合比方案: 级配中值、沥青质量分数 4.3%、纤维掺量 0.2%, 可有效提高排水式沥青混合料路用性能。结论 试验得到了排水式沥青混合料的最佳配合比, 可以为排水式沥青混合料配合比设计提供工程技术指导。

关键词 OGFC; 正交试验; 配合比设计; 路用性能; 综合评分

中图分类号 U416.217

文献标志码 A

Optimization of Mixture Proportion Design of OGFC Asphalt Mixture Based on Comprehensive Performance

AN Shaoke^{1,2}, ZHANG Jiakang^{1,2}, HUANG Yangquan^{1,2}, AI Changfa^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, China, 610031)

Abstract: In order to study the influence of aggregate grading, oil-stone ratio and fiber content on the performance of OGFC asphalt mixture, in this paper, the mixture proportion design of OGFC asphalt mixture is carried out to promote the application of OGFC asphalt mixture. Five performance measures, dynamic stability, low temperature bending strain, water permeability coefficient, fatigue life and freeze-thaw splitting strength ratio, were evaluated. The influence of aggregate grading, oil-stone ratio and fiber content on the road performance of OGFC asphalt mixture were analyzed. Optimization of mixture proportion design of OGFC asphalt mixture was studied by using the orthogonal test method and comprehensive scoring method. The results indicate that the optimum mix proportion scheme for comprehensive performance of OGFC asphalt mixture is as follows, grading median, 4.3% oil-stone ratio and 0.2% fiber content. The optimum mix scheme of

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878574)

作者简介: 安少科(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事路面结构与材料等方面研究。

OGFC asphalt mixture can effectively improve the pavement performance. The optimum mix scheme of OGFC asphalt mixture is obtained from the test, which could provide certain engineering technical guidance for the mixture proportion of OGFC asphalt mixture.

Key words: OGFC; orthogonal test; mix ratio design; road performance; comprehensive scoring method

随着我国高等级公路的迅猛发展,沥青路面得到广泛应用^[1-2],为提高沥青路面的舒适性、安全性,国内外学者作了大量的研究工作^[3-5].排水式沥青路面具有抗滑性能高、行驶噪声低、抑制雨天行车水雾、减轻夜晚行车眩光等优势,已成为我国路面结构的重要型式^[6-8].排水式沥青路面结构受温度荷载、水及车辆轮载共同作用的影响,极易出现车辙、开裂、坑槽、松散等病害,国内外学者对此展开了大量的研究^[9-12].文献[13-15]分析了集料级配组成对沥青混合料性能的影响,结果表明不同的级配组成对沥青混合料的路用性能有显著影响;文献[16-17]研究了纤维对排水式沥青混合料的影响,做了系统的试验,研究表明纤维可有效增加沥青膜厚,提高混合料的耐久性.国内外学者针对沥青混合料配合比设计做了大量的研究,取得了显著成果,然而其研究主要针对单一设计因素

或单一评价指标.考虑排水式沥青混合料的不同试验影响因素,实现不同指标的综合评价已成为排水式沥青混合料配合比设计的关键.基于此,笔者以不同配合比排水式沥青混合料为研究对象,将动稳定度、低温弯拉应变、渗水系数、疲劳寿命及冻融劈裂强度比作为评价指标,开展排水式沥青混合料配合比室内试验研究,通过正交试验并结合综合评分法对 OGFC-13 沥青混合料的不同配合比进行优选,为排水式沥青混合料配合比设计提供工程技术指导.

1 试验原材料及方案

1.1 高黏弹改性沥青

试验采用自主研制的高黏弹改性沥青^[18],按照文献[19-20]中相关的试验方法,测试该新型高黏弹改性沥青胶结料的相关性能指标,试验结果见表1.

表1 高黏弹改性沥青胶结料性能指标

Table 1 Performance indexes of modified asphalt

25℃针入度/0.1 mm	15℃延度/cm	软化点/℃	闪点/℃	-20℃弯曲抗拉韧度/kPa	-20℃弯曲抗拉模量/MPa	RTFOT		
						质量变化/%	针入度比/%	15℃延度/cm
42.8	68	113.4	265	427.5	96.2	0.02	83.1	48

1.2 集料

试验粗集料采用石质坚硬、清洁、不含风化颗粒、近立方体颗粒的玄武岩轧制碎石,细集料为洁净、干燥、无风化、无杂质和有适当的颗粒级配的玄武岩机制砂;填料为强基性石灰岩研磨而成的矿粉.以上矿料性质均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的质量技术要求^[21].试验所用三种 OGFC-13 的级配组成如图1所示,集料

及填料的相关力学性能指标见表2、表3、表4.

1.3 纤维

试验所用木质素纤维具有沥青吸附能力强、施工分散性好、单位质量的纤维根数多等特点,主要技术指标见表5.

1.4 沥青用量范围

研究采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中谢伦堡沥青

析漏试验和肯塔堡飞散试验方法确定 OGFC - 13 沥青混合料的沥青用量范围,谢伦堡析漏试验可确定沥青混合料有无多余的自由沥青,肯塔堡飞散试验确定沥青用量或黏结性不足导致集料脱离、掉粒、飞散的程度.通过析漏试验和飞散试验可确定 OGFC - 13 沥青混合料的沥青用量(即沥青质量与沥青混合料总质量的比例)范围为 4.0% ~ 4.3% (粗)、4.2% ~ 4.5% (中)、4.4% ~ 4.6% (细).

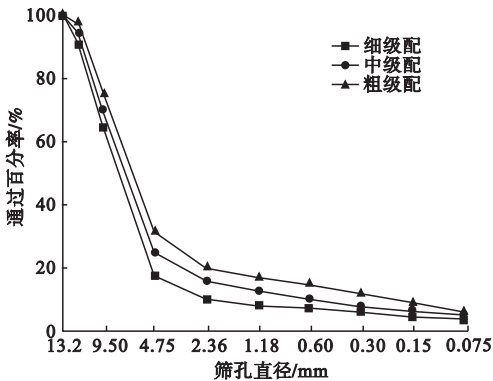


图1 级配曲线
Fig.1 Grading curves

表2 粗集料性能

Table 2 Performance indexes of coarse aggregate								
粒径/mm	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/%	坚固性/%	压碎值/%	洛杉矶磨 耗值/%	软弱颗粒 掺量/%	针片状颗粒掺量/%	
							>9.5 mm	<9.5 mm
2.36 ~ 4.75	2.870	—	3.14	9.3	4.1	—	—	—
4.75 ~ 9.5	2.877	1.858	1.52	9.3	4.1	1.13	—	7.07
9.5 ~ 16	2.890	1.467	1.91	9.3	4.1	1.80	5.58	—

表3 细集料性能

Table 3 Performance indexes of fine aggregate			
表观密度/(g·cm ⁻³)	含泥量/%	砂当量/%	棱角性/s
2.926	0.62	90.61	38.9

表4 填料性能

Table 4 Performance indexes of filler					
表观密度/ (g·cm ⁻³)	含水 率/%	颗粒范围/%			外观
		<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm	
2.663	0.52	212	493	20.75	无团粒 结块

表5 木质素纤维技术指标

Table 5 Performance indexes of wood fibre				
纤维长 度/mm	灰粉掺 量/%	pH 值	吸油率	含水 率/%
4.2	16	7.3	纤维质量的 7.5 倍	1.3

2 室内试验方案

OGFC 沥青混合料具有抗滑性能高、噪声低、抑制水雾、防止水漂、减轻眩光等优势,但其空隙率高、渗透性好等特点,在温度荷载、雨水及轮载等共同作用下,极易出现早期病害.

研究按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对 OGFC - 13 混合料的动稳定度、渗水系数、冻融劈裂强度比、低温弯拉应变及四点弯曲疲劳寿命进行试验测试,并以其为评价指标,综合评价沥青混合料的路用性能.其中低温弯曲试验,小梁尺寸为 250 mm × 50 mm × 50 mm,试验温度为 - 10 ℃,荷载加载速率为 50 mm/min;四点弯曲疲劳试验,小梁试件尺寸为 380 mm × 50 mm × 50 mm,加载形式为偏正弦重复荷载,加载频率为 10 Hz,测试温度为 15 ℃.

3 OGFC - 13 配合比优化

沥青混合料路用性能是矿料级配、沥青用量、纤维含量等多因素综合影响作用下的力学指标.为考察不同因素对 OGFC - 13 沥青混合料路用性能的影响程度,笔者选取矿料级配、沥青用量以及纤维掺量作为正交试验影响因素.其中,矿料级配选取前文给出的细级配、中级配、粗级配三个水平;沥青用量基于谢伦堡析漏试验和肯塔堡飞散试验方法确定的沥青用量范围,并选取 4.0%、4.3%

和 4.6% 三个沥青用量的质量分数水平;纤维能有效增加沥青胶浆的黏聚力及稠度,对沥青混合料具有加筋作用,研究取 0%、0.2% 和 0.4% 三个纤维掺量水平. 因此,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行三因素 3 水平的正交试验设计,各因素水平值见表 6. 以动稳定度、渗水系数、冻融劈裂强度比、低温弯曲应变及疲劳寿命作为 OGFC-13 混合料的基本评价指标,正交试验方案及试验评价指

标测试结果如表 7 所示.

表 6 正交试验因素及水平取值

Table 6 Factors and levels of the orthogonal test			
水平	试验因素		
	A: 级配类型	B: 沥青质量 分数/%	C: 纤维 掺量/%
1	细级配	4.0	0
2	中级配	4.3	0.2
3	粗级配	4.6	0.4

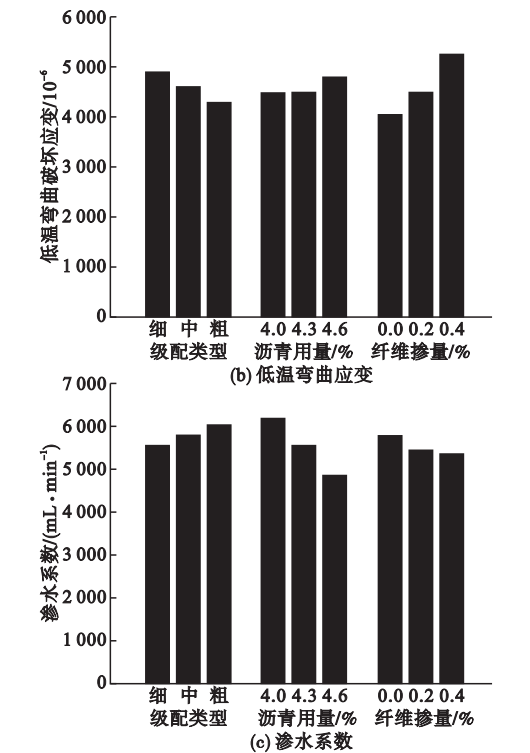
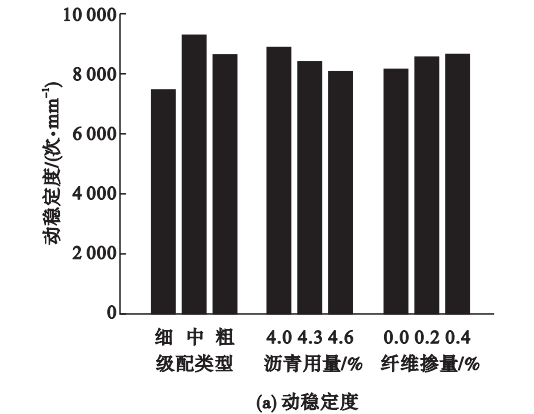
表 7 正交试验方案及测试结果

Table 7 Test scheme and results of orthogonal test

试验方案	试验因素			正交试验测试结果				
	A	B	C	动稳定度/ (次·min ⁻¹)	低温弯拉 应变/10 ⁻⁶	渗水系数/ (mL·min ⁻¹)	疲劳寿 命/次	冻融劈裂 强度比/%
1	1(细)	1(4.0)	1(0)	7 716	4 152	6 421.4	62 386	83.3
2	1(细)	2(4.3)	2(0.2)	7 432	4 855	5 187.7	67 046	86.8
3	1(细)	3(4.6)	3(0.4)	7 289	5 658	5 020.3	85 862	93.2
4	2(中)	1(4.0)	2(0.2)	9 835	4 270	5 879.8	71 994	76.6
5	2(中)	2(4.3)	3(0.4)	9 570	5 144	4 819.5	91 416	88.5
6	2(中)	3(4.6)	1(0)	8 533	4 425	4 285.6	85 285	81.8
7	3(粗)	1(4.0)	3(0.4)	9 160	4 982	6 214.4	72 624	84.9
8	3(粗)	2(4.3)	1(0)	8 286	3 511	6 623.8	65 639	72.2
9	3(粗)	3(4.6)	2(0.2)	8 489	4 324	5 227.2	81 516	74.7

3.1 OGFC-13 性能直观分析

沥青混合料性能受级配类型、沥青用量、纤维掺量等多种因素综合作用影响. 而各试验因素水平对 OGFC-13 沥青混合料的不同性能评价指标的影响显著性存在明显差异. 根据表 7 试验测试结果,OGFC-13 沥青混合料各性能指标随因素水平变化如图 2 所示.



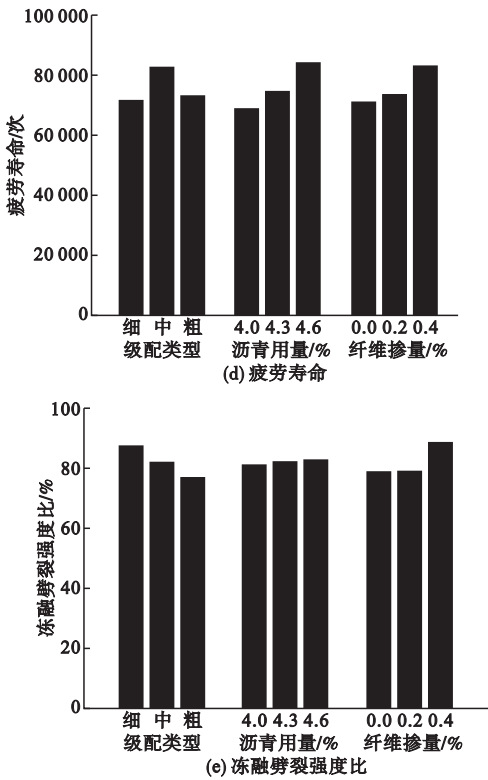


图2 各因素水平变化下 OGFC-13 的路用性能

Fig. 2 Road performance of OGFC-13 under variable levels of factors

分析图 2 可知:

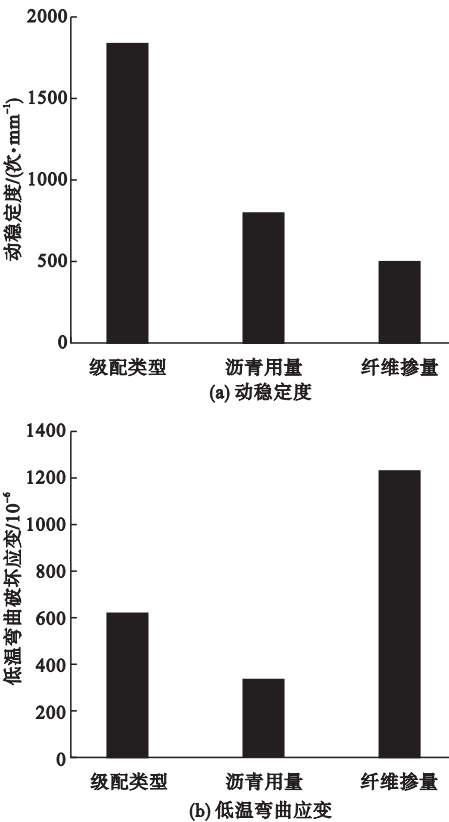
(1)OGFC-13 高黏弹改性沥青混合料高温稳定度性从低到高依次为细级配、粗级配、中级配,疲劳性能从低到高依次为细级配、粗级配、中级配,均在中级配沥青混合料取得最佳.分析原因是沥青混合的强度取决于沥青与集料的黏结力及集料间的相互嵌挤作用而产生的内摩擦角,细级配沥青混合料中细集料含量较多,内摩擦角较小,因此动稳定度和疲劳寿命下降;粗级配沥青混合料矿粉含量增加导致其黏结力下降,因而其动稳定度降低.同时,其低温弯曲破坏应变降低和冻融劈裂强度比随着矿料级配由细到粗逐渐下降,渗水系数增大,主要原因是随着沥青混合料级配变粗,其空隙率变大,混合料连续相程度降低,密实度下降.

(2)比较不同沥青用量条件下 OGFC-13 沥青混合料路用性能发现,随着沥青用量

增加,沥青胶浆的胶粉质量比降低,空隙率降低,沥青胶浆黏稠度降低,渗水系数下降和动稳定度下降.同时,随着沥青含量的增加,空隙率下降,沥青混合料抗水损性能增强,冻融劈裂强度比增大,且 OGFC-13 沥青混合料柔韧性增强,沥青胶浆脆性降低,因此 OGFC-13 沥青混合料的低温弯拉应变和疲劳寿命均呈增大趋势.

(3)随着纤维掺量增加,沥青胶浆黏稠度、沥青混合料抗剪强度和沥青与集料间的黏结力均显著增大,因此 OGFC-13 沥青混合料动稳定度、低温弯拉应变、疲劳寿命、冻融劈裂强度均随着纤维掺量的增大而增大.然而,随着纤维掺量的增加,OGFC-13 沥青混合料空隙率降低,导致其渗水能力减弱,因此渗水系数随纤维掺量的增加而降低.

基于图 2 不同性能指标随因素水平变化的结果,计算不同性能指标下,各试验因素的极差值 R 如图 3 所示.



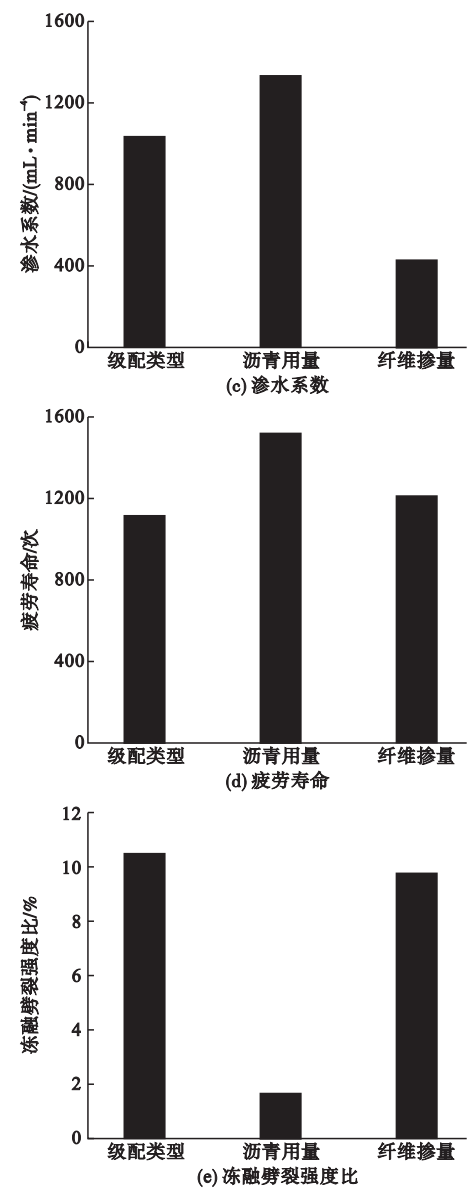


图3 OGFC-13 沥青混合料的路用性能极差 R

Fig.3 Extreme difference of pavement performance of OGFC-13 asphalt mixture

极差 R 的大小可表征相应因素作用的大小,试验因素极差值越大,则该因素的不同水平对其相关性能评价指标的影响越大;试验因素极差值小,则表示该因素的不同水平对其相关性能评价指标的影响较小.由图3可知,各试验因素对 OGFC-13 混合料性能的显著性随评价指标不同而异,以动稳定度为例,极差值 R 从大到小依次为级配类型、沥青用量、纤维掺量,因此该因素影响主次关

系依次为级配类型、沥青用量、纤维掺量,即在3个试验因素中矿料级配类型对动稳定度的影响最大;各因素对低温弯曲应变的显著性由大到小为纤维掺量、级配类型、沥青用量;对渗水系数的显著性由大到小依次为沥青用量、级配类型、纤维掺量;以疲劳寿命为评价指标,各因素的显著性由大到小依次为沥青用量、纤维掺量、级配类型;对冻融劈裂强度比的影响显著性由大到小依次为级配类型、纤维掺量、沥青用量.

3.2 OGFC-13 性能显著性分析

通过正交试验的方差分析计算不同因素对 OGFC-13 沥青混合料性能评价指标影响的显著性,方差分析结果 F 值如图4所示,各因素显著性评价结果见表8.

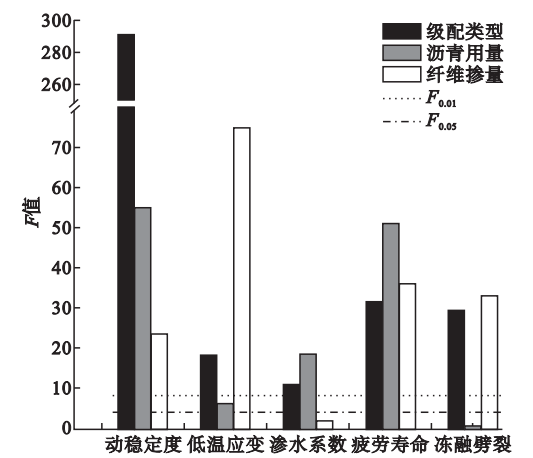


图4 沥青混合料性能显著性分析

Fig.4 Significance analysis of asphalt mixture performance

表8 基于方差分析的因素显著性

Table 8 Factor significance based on variance

评价指标	影响程度		
	级配	沥青用量	纤维掺量
动稳定度	* *	* *	* *
低温应变	* *	*	* *
渗水系数	* *	* *	—
疲劳寿命	* *	* *	* *
冻融劈裂	* *	—	* *

注:若 $F > F_{0.01}$, 则该因素的影响作用高度显著,以双星号表示;若 $F_{0.05} < F < F_{0.01}$, 该因素的影响作用显著,以一个星号表示;若 $F < F_{0.05}$, 该因素的影响作用不显著,其中, $F_{0.01}$ 和 $F_{0.05}$ 分别表示检验的可靠程度为 99% 和 95%.

方差分析结果表明,各试验因素对 OGFC-13 混合料性能的显著性随评价指标不同而异,以动稳定度为例,各因素的显著性由大到小依次为级配、沥青用量、纤维掺量;各因素对低温弯曲应变的显著性由小到大依次为沥青用量、级配、纤维掺量。

由表 8 可知,级配类型对 OGFC-13 沥青混合料路用性能的影响作用非常显著,沥青用量对低温弯曲应变影响显著,但其对冻融劈裂影响不显著。纤维含量对渗水系数影响不显著,而对其他路用性能的影响作用非常显著。

3.3 OGFC-13 性能综合评价

基于各试验方案的测试结果,运用综合评分法对 OGFC-13 沥青混合料方案进行综合评价,结果如图 5 所示。

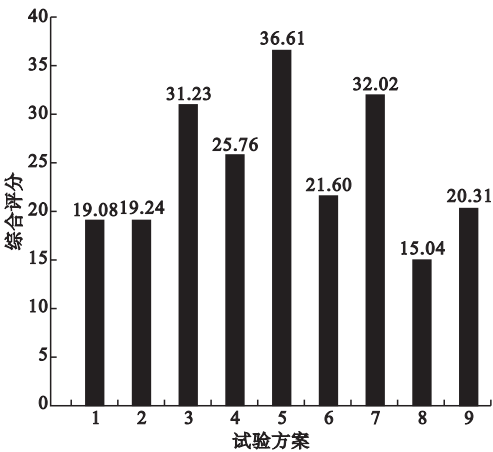


图 5 OGFC-13 混合料综合评分

Fig. 5 OGFC-13 mixture comprehensive score

综合考虑排水式沥青混合料的路用性能,不同配合比的综合评价结果不同。以综合评分值判别其最佳配合比方案为试验方案 5,即级配中值、沥青质量分数为 4.3%、纤维掺量为 0.2%。

4 结 论

(1)通过直观分析法可知,矿料级配、沥青用量和纤维掺量对 OGFC-13 沥青混合料路用性能均有显著影响,不同试验因素对

排水式沥青混合料性能影响程度不同。以动稳定度为例,高黏弹改性沥青混合料不同级配从低到高依次为细级配、粗级配、中级配;随着沥青用量的增加,高黏弹改性沥青混合料动稳定度呈降低趋势;同时其动稳定度随着纤维掺量的增加而增大。

(2)就不同性能评价指标大小而言,排水沥青混合料性能优劣排序不同。以动稳定度为评价指标,各级配的性能从低到高排序为细级配、粗级配、中级配;以低温弯拉应变为评价指标,从低到高排序为粗级配、中级配、细级配;以渗水系数为评价指标,从低到高依次为细级配、中级配、粗级配;以疲劳寿命为评价指标,从低到高依次排序为粗级配、细级配、中级配;以冻融劈裂强度比为评价指标,则其从低到高排序为粗级配、中级配、细级配。

(3)通过 $L_9(3^4)$ 正交试验及各影响因素的显著性分析表明,级配类型对 OGFC-13 路用性能的影响作用非常显著;沥青用量对低温弯曲应变的影响作用显著,对冻融劈裂的影响作用不显著;纤维含量对渗水系数的影响作用不显著。

(4)基于综合评分法,考虑排水式沥青混合料不同配合比的动稳定度、低温弯曲应变、渗水系数、疲劳寿命及冻融劈裂强度比,排水式沥青混合料的最佳配合比方案为:级配中值、沥青质量分数 4.3%、纤维掺量为 0.2%。

参考文献

[1] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
(YAO Zukang. Asphalt pavement structural design [M]. Beijing: People's Transportation Press,2011.)

[2] 张金升. 沥青混合料及其设计与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.
(ZHANG Jinsheng. Asphalt mixture and its design and application [M]. Harbin: Harbin University of Technology Press,2013.)

[3] XIAO F, HERNDON D A, AMIRKHANIAN S, et al. Aggregate gradations on moisture and

- rutting resistances of open graded friction course mixtures [J]. Construction & building materials, 2015, 85: 127 – 135.
- [4] 程成, 马翔, 刘松玉. 排水性沥青混合料路用性能改善措施 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16 (1): 164 – 169.
(CHENG Cheng, MA Xiang, LIU Songyu. Improvement measures for road performance of drainage asphalt mixture [J]. Journal of building materials, 2013, 16 (1): 164 – 169.)
- [5] WANG Y, LENG Z, WANG G. Structural contribution of open-graded friction course mixes in mechanistic – empirical pavement design [J]. International journal of pavement engineering, 2014, 15 (8): 731 – 741.
- [6] 徐斌. 排水性沥青路面的理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(XU Bin. Theory and practice of drainage asphalt pavement [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2011.)
- [7] 矫芳芳. 排水沥青混合料性能影响因素研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
(JIAO Fangfang. Study on factors affecting the performance of drainage asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)
- [8] CHEN J, YIN X, WANG H, et al. Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement [J]. Journal of cleaner production, 2018, 188: 12 – 19.
- [9] QURESHI N A, KHURSHID M B, WATSON D. Evaluation of premature failures of open-graded friction course pavements in Alabama [J]. Canadian journal of civil engineering, 2015, 42 (12): 1104 – 1113.
- [10] SURESHA S N, GEORGE V, SHANKAR A U R. Effect of aggregate gradations on properties of porous friction course mixes [J]. Materials & structures, 2010, 43 (6): 789 – 801.
- [11] CHEN X, ZHU H, DONG Q, et al. Case study: performance effectiveness and cost-benefit analyses of open-graded friction course pavements in Tennessee [J]. International journal of pavement engineering, 2016, 18 (11): 957 – 970.
- [12] SHEN W, SHAN L, ZHANG T, et al. Investigation on polymer – rubber aggregate modified porous concrete [J]. Construction & building materials, 2013, 38: 667 – 674.
- [13] 王慧, 刘黎萍, 高晓飞, 等. 温拌 OGFC 混合料性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15 (3): 427 – 429.
(WANG Hui, LIU Liping, GAO Xiaofei, et al. Study on properties of warm-mixed OGFC mixture [J]. Journal of building materials, 2012, 15 (3): 427 – 429.)
- [14] HERNDON D A, XIAO F, AMIRKHANIAN S, et al. Investigation of los angeles value and alternate aggregate gradations in OGFC mixtures [J]. Construction & building materials, 2016, 110: 278 – 285.
- [15] 吴浩, 张久鹏, 王秉纲. 多孔沥青混合料空隙特征与路用性能关系 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10 (1): 1 – 5.
(WU Hao, ZHANG Jiupeng, WANG Binggang. The relationship between porous asphalt mixture void characteristics and road performance [J]. Journal of transportation engineering, 2010, 10 (1): 1 – 5.)
- [16] 张卫华. 不同纤维沥青混合料性能研究与应用 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
(ZHANG Weihua. Research and application of asphalt mixtures with different fibers [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.)
- [17] KLINSKY L M G, KALOUSH K E, FARIA V C, et al. Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt [J]. Construction and building materials, 2018, 176: 747 – 752.
- [18] AI C, RAHMAN A, WANG F, et al. Experimental study of a new modified waterproof asphalt concrete and its performance on bridge deck [J]. Road materials and pavement design, 2017, 18: 270 – 280.
- [19] 交通部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.)
- [20] 上海市建筑科学研究院. 佐东奥排水性沥青路面技术规范: DBJ CT065—2009 [S]. 上海: 上海市建筑科学研究院, 2009.
(Shanghai Academy of Architectural Sciences. Technical specification for Zuo dongao drainage asphalt pavement: DBJ CT065—2009 [S]. Shanghai: Shanghai Academy of Architectural Sciences, 2009.)
- [21] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
(Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)