

AC-13 改性沥青混合料劈裂强度的影响因素及其与马歇尔性能指标的相关性

陆学元^{1,2}, 孙立军²

(1. 安徽省高速公路控股集团有限公司, 合肥 230051; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:应用正交试验设计和统计分析方法研究了 AC-13 改性沥青混合料在 15 °C 时的劈裂强度的影响因素和排序, 以及与马歇尔性能指标的相关性。结果表明, 细集料级配对劈裂强度影响显著, 其筛孔通过率的排序为 2.36 mm 筛孔 > 4.75 mm 筛孔 > 0.075 mm 筛孔 > 油石比 > 9.5 mm 筛孔。其中, 2.36 mm 筛孔通过率对劈裂强度影响接近高度显著, 而油石比和 9.5 mm 筛孔通过率对劈裂强度影响不显著; 劈裂强度与马歇尔性能指标之间存在较为明显的线性相关性, 绝对相关系数均大于 68%, 随空隙率的逐渐增大, 劈裂强度衰减近 30%。

关键词: 道路工程; AC-13 改性沥青混合料; 劈裂强度; 影响因素; 马歇尔性能指标
中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2010)03-0676-07

Factors affecting splitting strength for AC-13 modified asphalt mixture and Marshall performance standard correlation

LU Xue-yuan^{1,2}, SUN Li-jun¹

(1. Anhui Expressway Holding Group Limited, Hefei 230051, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The affecting factors of the 15 °C splitting strength of AC-13 modified asphalt mixture, their significantly order and their correlation with the Marshall performance index were investigated by means of the orthogonal test design and the statistical analysis method. The results showed that the fine aggregate gradation affects significantly the 15 °C splitting strength, the significance order of the factors is: 2.36 mm passing rate > 4.75 mm passing rate > 0.075 mm passing rate > OAC > 9.5 mm passing rate. The 2.36 mm passing rate shows highly significant effect on the splitting strength, while the OAC and the 9.5 mm passing rate have no significant effect. The splitting strength is obviously linearly correlated with the Marshall performance index with an absolute correlation coefficient of more than 68%. Along with the gradual increase of VV, the splitting strength of the asphalt mixture decays nearly by 30%.

Key words: road engineering; AC-13 modified asphalt mixture; splitting strength; affecting factor; Marshall performance standard

收稿日期: 2008-06-02.

基金项目: 安徽省 2005 年交通科技进步计划项目(发改交运[2005]1247 号).

作者简介: 陆学元(1969-), 男, 高级工程师, 工学博士. 研究方向: 道路与桥梁工程.

E-mail: luxueyuan1208@163.com

我国高速公路沥青路面实际服务年限低于设计使用年限的现象仍普遍存在,突出表现为沥青路面在设计使用年限内出现车辙、坑槽、纵横向裂缝等病害。其中,由于沥青混合料自身强度不足以抵抗外界因素而产生的变形是造成路面出现早期损坏的重要因素。有研究表明^[1-4],由于气候日温差或季节的热冷变化或因突然的寒流袭击,沥青层底拉应力较大,在拉应力和剪应力的共同作用下,行车带轮迹边缘附近容易产生拉裂,导致路面开裂。对沥青路面钻孔可知,裂缝呈现上宽下窄特征,表明裂缝是从上向下发展,有的贯穿沥青层,也有很多裂缝是半刚性从下向上裂缝反射的结果。文献[5-6]研究了 AC-16 型沥青混合料的劈裂强度影响因素;文献[7]对超薄沥青混凝土面层配比混合进行了正交试验分析;文献[8]用沥青砂浆配比正交试验研究了沥青胶浆对劈裂强度的影响。这些研究中,级配数量较少,难以模拟沥青混合料在施工过程中发生的级配和油石比变异而导致的对劈裂强度的影响,基本为 AC-16 型级配,对 AC-13 级配研究较少。因此,本文研究 AC-13 沥青混合料劈裂强度的影响因素及其与马歇尔性能指标的内在联系,以揭示路面关键力学

指标的影响因素,为指导混合料组成设计与施工质量控制提供依据。

1 试验设计与结果

粗集料($d > 2.36$ mm)为玄武岩,细集料($d < 2.36$ mm)为石灰岩机制砂,填料为氢氧化钙粉剂(消石灰)和矿粉;结合料采用 SBSI-D 级改性沥青。技术指标均符合文献[9-10]要求。本文采用正交试验设计^[11-12]方法考察 5 因素(分别以 A、B、C、D、E 表示 5 种尺寸筛孔的通过率)和 5 水平对力学性能的影响,因素水平选取见表 1。每组级配通过率符合正交表 $L_{25}(5)^5$,见表 2,级配结果见图 1。

表 1 正交设计 5 因素 5 水平表

Table 1 Five factors and 5 levels table about orthogonal experimental design

水平	因素				
	9.5 mm A/%	4.75 mm B/%	2.36 mm C/%	0.075 mm D/%	油石比 E/%
1	85	68	38	8	5.9
2	80	61	34	7	5.4
3	76	54	30	6	4.9
4	72	47	28	5	4.4
5	68	38	24	4	3.9

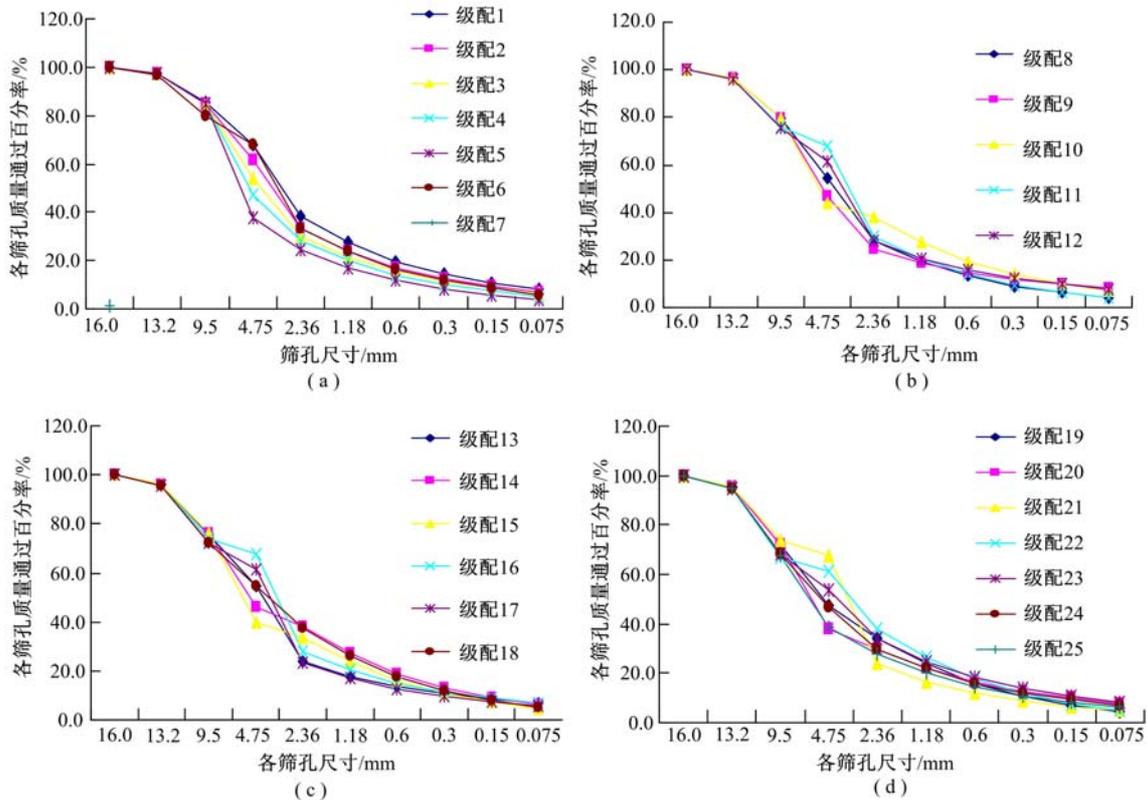


图 1 AC-13 正交级配组成曲线

Fig. 1 AC-13 orthogonal gradation composition curve

以马歇尔成型为技术手段,成型温度为(163±2.5)℃,采用真空法测定松散沥青混合料理论最大相对密度。每组有效试件12个,其中6个试件用于马歇尔性能指标试验,另外6个试件用于15℃劈裂试验,以探讨劈裂强度与中国沥青混合

料标准设计方法间的线性相关性。劈裂试验仪器为LDR-2型沥青混合料冻融劈裂仪,技术参数为:最大荷载50kN,荷载范围5~35kN,加载速率(50±5)mm/min。按照规程^[13-14]方法试验,结果见表2。

表2 正交设计与AC-13改性沥青混合料试验结果

Table 2 Orthogonal design and test results for AC-13 modified asphalt mixture

试验号	筛孔通过百分率与油石比/%					空隙率/%	15℃劈裂强度 /MPa
	A/%	B/%	C/%	D/%	E/%		
1	1(85)	1(68)	1(38)	1(8)	1(5.9)	2.6	2.86
2	1(85)	2(61)	2(34)	2(7)	2(5.4)	4.2	2.80
3	1(85)	3(54)	3(30)	3(6)	3(4.9)	6.0	2.74
4	1(85)	4(47)	4(28)	4(5)	4(4.4)	7.4	2.29
5	1(85)	5(38)	5(24)	5(4)	5(3.9)	10.1	2.04
6	2(80)	1(68)	2(34)	3(6)	4(4.4)	6.4	2.58
7	2(80)	2(61)	3(30)	4(5)	5(3.9)	8.9	2.53
8	2(80)	3(54)	4(28)	5(4)	1(5.9)	4.8	2.54
9	2(80)	4(47)	5(24)	1(8)	2(5.4)	3.9	2.43
10	2(80)	5(38)	1(38)	2(7)	3(4.9)	3.1	3.03
11	3(76)	1(68)	3(30)	5(4)	2(5.4)	6.8	1.97
12	3(76)	2(61)	4(28)	1(8)	3(4.9)	5.6	2.79
13	3(76)	3(54)	5(24)	2(7)	4(4.4)	7.5	2.40
14	3(76)	4(47)	1(38)	3(6)	5(3.9)	6.9	2.95
15	3(76)	5(38)	2(34)	4(5)	1(5.9)	2.9	2.86
16	4(72)	1(68)	4(28)	2(7)	5(3.9)	8.4	1.88
17	4(72)	2(61)	5(24)	3(6)	1(5.9)	5.2	2.73
18	4(72)	3(54)	1(38)	4(5)	2(5.4)	3.6	2.81
19	4(72)	4(47)	2(34)	5(4)	3(4.9)	6.9	2.22
20	4(72)	5(38)	3(30)	1(8)	4(4.4)	3.7	2.88
21	5(68)	1(68)	5(24)	4(5)	3(4.9)	8.5	2.31
22	5(68)	2(61)	1(38)	5(4)	4(4.4)	5.9	3.01
23	5(68)	3(54)	2(34)	1(8)	5(3.9)	6.9	2.69
24	5(68)	4(47)	3(30)	2(7)	1(5.9)	2.3	2.63
25	5(68)	5(38)	4(28)	3(6)	2(5.4)	3.4	2.86

2 试验结果分析

2.1 正交试验方差分析原理

极差分析只是直观地进行分析(见表3),不

表3 15℃劈裂抗拉强度极差分析结果

Table 3 Poor analysis result about 15℃ the Split Tension Strength

项目	A/%	B/%	C/%	D/%	E/%
K ₁	2.546	2.32	2.932	2.73	2.724
K ₂	2.622	2.772	2.63	2.548	2.574
K ₃	2.594	2.636	2.55	2.772	2.618
K ₄	2.504	2.504	2.472	2.56	2.632
K ₅	2.700	2.734	2.382	2.356	2.418
R	0.196	0.452	0.55	0.416	0.306

注: K₁ ~ K₅ 分别是因素A、B、C、D、E的第1~5水平所在的试验对应的各考核技术指标平均值;R为每列的极差,此值越大说明影响因素也越大。

能估计试验误差和因素水平的变化所引起的差异,方差分析可以对各因素的显著性水平给出一个定量分析,基本过程如下:

检验各因素水平的变化是否对劈裂强度有显著影响,是检验(1)的假设。

$$H_0: \beta_1 = \dots = \beta_s = 0 \quad (1)$$

式中: β_1, \dots, β_s 不全为零。

对检验式(1)进行方差分析,从数据的总变差中区分出试验误差和条件变差(试验结果间的差异),并赋予它们数量表示,即分解为各因素响应值之和、响应值均值和响应值的平方和(式(2)),各因素对应水平响应值的平方和均值(式(3)),各因素引起的离差平方和和总离差平方和(式(4)),试验误差(式(5)),以进行统计检验。

$$K = \sum_{i=1}^{25} Y_i; P = \frac{1}{25} K^2; W = \sum_{i=1}^{25} Y_i^2 \quad (2)$$

$$U_A = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (K_i^A)^2; \dots; U_E = \sum_{i=1}^5 (K_i^E)^2 \quad (3)$$

$$Q_A = U_A - P; \dots; Q_E = U_E - P; Q_T = W - P \quad (4)$$

$$Q_E = Q_T - Q_A - Q_B - Q_C - Q_D - Q_E \quad (5)$$

为消除数据个数的多少给平方和带来的影响,引入了自由度的概念,把项数加以修正。总平方和自由度为 $n-1=24$,每个因子引起的离差平方和的自由度为 4,而误差自由度为 $n-1-r_1(s-1)=25-5(5-1)=5$,其中($r_1 \leq r$)。用各因素离差平方和除以相应自由度所得的商称为均方离差。若式(1)的假设成立,均方离差的期望值相同,则有 $F_A = (Q_{A/4})/(Q_{E/4})$,等等。由此式来检验式(1)。即当式(1)假设成立时,F 应服从 $F(s-1, n-1-r_1(s-1))$ 分布,从而小概率事件取在 F 值大的一侧较为合理。

2.2 正交试验方差分析举例

以空隙率影响因素 E 作为方差分析为例说

表 4 空隙率方差分析结果
Table 4 Variance analysis result

考核指标	来源	离差 Q	自由度	均方离差 S=Q/4	$F_{值} = S/S_E$	$F_{0.05}(4,4)/F_{0.01}(4,4)$	显著性
空隙率/%	A	1.862	4	0.465	2.483	6.39/15.98	
	B	9.730	4	2.432	12.980		**
	C	17.814	4	4.453	23.764		***
	D	17.354	4	4.338	23.150		***
	E	65.518	4	16.379	87.403		***
	误差 Q_P	0.750	4	0.187			
误差 Q_T	113.026	24					

表 5 15 °C 劈裂抗拉强度方差分析结果

Table 5 Variance analysis result about 15 °C the split tension strength

项目	A	B	C	D	E
K_1	12.73	11.6	14.66	13.65	13.62
K_2	13.11	13.86	13.15	12.74	12.87
K_3	12.97	13.18	12.75	13.86	13.09
K_4	12.52	12.52	12.36	12.8	13.16
K_5	13.5	13.67	11.91	11.78	12.09
K_1^2	162.053	134.560	214.916	186.323	185.504
K_2^2	171.872	192.100	172.923	162.308	165.637
K_3^2	168.221	173.712	162.563	192.100	171.348
K_4^2	156.750	156.750	152.770	163.840	173.186
K_5^2	182.250	186.869	141.848	138.768	146.168
U	168.229	168.798	169.004	168.668	168.369
Q	0.112	0.681	0.887	0.550	0.251
来源	A	B	C	D	E
离差	0.1121	0.6811	0.8865	0.5505	0.2515
自由度	4	4	4	4	4
均方离差 S=Q/4	0.0280	0.1703	0.2216	0.1376	0.0629
总和 Q_T			2.5525		
误差 Q_E /自由度			0.0709/4		
F 值 = S/S _E	1.581	9.606	12.503	7.764	3.547
$F_{0.05}(4,4)/F_{0.01}(4,4)$			6.39/15.98		
显著性		**	**	**	

注:若 $F > F_{0.01}(f_{因}, f_E)$,称该因素是高度显著的,用 3 个星号表示;若 $F < F_{0.01}(f_{因}, f_E)$,但 $F > F_{0.05}(f_{因}, f_E)$,则称该因素的影响是显著的,用 1 或 2 个星号表示;若 $F < F_{0.05}(f_{因}, f_E)$,称该因素的影响是不显著的,不用星号表示。

明。 $K = (2.6 + 4.2 + \dots + 2.3 + 3.4) = 141.9$,
 $W = (2.62 + 4.22 + \dots + 2.32 + 3.42) = 918.45$,
 $K_1 = (2.6 + 4.8 + 2.9 + 5.2 + 2.3) = 17.80$,
 $K_2 = (4.2 + 3.9 + 6.8 + 3.6 + 3.4) = 21.9$,
 $K_3 = (6.0 + 3.1 + 5.6 + 6.9 + 8.5) = 30.1$,
 $K_4 = (7.4 + 6.4 + 7.5 + 3.7 + 5.9) = 30.9$,
 $K_5 = (10.1 + 8.9 + 6.9 + 8.4 + 6.9) = 41.2$,
 $K_1^2 = 316.84$,
 $K_2^2 = 479.61$,
 $K_3^2 = 906.01$,
 $K_4^2 = 954.81$,
 $K_5^2 = 1697.44$;
 $U_E = (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 + K_4^2 + K_5^2)/5 = 870.942$;
 $P = K^2/25 = 805.4244$,
 $Q_E = U_E - P = 65.5176$;
 $Q_T = W - P = 113.03$ 。
 $Q_P = Q_T - Q_A - Q_B - Q_C - Q_D - Q_E = 113.03 - (1.8616 + 9.7296 + 17.8136 + 17.3536 + 65.5176) = 0.7496$ 。
 从而均方离差 $S_E = Q_E/4 = 16.3794$,
 误差均方离差 $S_P = Q_P/4 = 0.1874$,
 F 分布值 = $S/Q_E = 87.4034$ 。
 给定显著性水平 α 为 0.05 和 0.01,则 F_0 为 6.39 和 15.98。分析结果见表 4。进而劈裂强度方差分析结果见表 5。

从表 3 的极差分析结果可知,影响 15 °C 劈裂强度的因素排序为 $C > B > D > E > A$, 即筛孔尺寸为 2.36 mm、4.75 mm 和 0.075 mm 的通过率是劈裂强度的主要影响因素。其中,第 5 列极差最大,说明因子 C 变动时,对 15 °C 劈裂强度值影响最大,15 °C 劈裂强度随尺寸为 2.36 mm 筛孔通过率的增大而逐渐增大。各因素所在列的差异实际上只反映该因子由于水平变动引起指标的波动。

从表 5 的方差分析结果可知,影响 15 °C 劈裂强度的因素排序也为 $C > B > D > E > A$ 。综上所述,两种数理统计分析结果是一致的,说明极差分析对因子(因素)作用的判断并不是由于试验误差引起的,而是因素本身对实验指标有显著影响。劈裂强度的关键影响因素是细集料级配变异,而油石比变异对其影响较小。分析认为,影响沥青混合料劈裂抗拉强度的主要因素是细集料级配组成和空隙率大小。

3 15 °C 劈裂强度相关性分析

15 °C 劈裂强度与马歇尔性能技术指标试验结果见表 2,将 25 组和前 5 组的劈裂强度与马歇尔技术指标的线性相关性绘制成曲线,如图 2~图 13 所示。

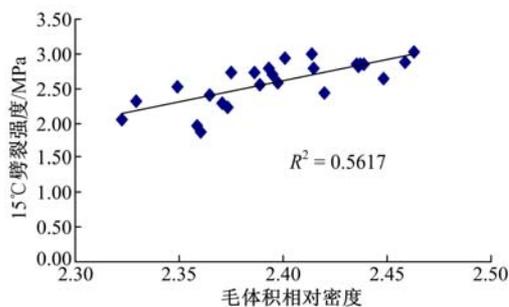


图 2 25 组劈裂强度与毛体积相对密度的关系

Fig.2 Curve of 25 groups splitting strength and rf

(1) 正交试验设计的 25 组沥青混合料较前 5 组沥青混合料 15 °C 劈裂强度与马歇尔性能指标的线性相关性差,绝对相关系数依次大于 68% 和 95%。分析认为,影响劈裂强度与马歇尔性能指标因素大小的 F 分布值不同是造成前者较后者相关性差的主要原因。比如,影响毛体积相对密度因子 9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、0.075 mm 和油石比的 F 分布值依次为: 2.56、12.34、24.28、15.5、17.66,其中筛孔尺寸为 2.36 mm 的通过率和油石比是毛体积相对密度的高度显著影

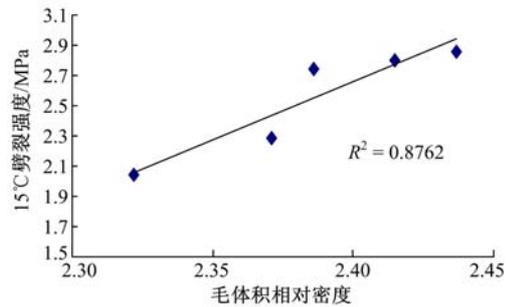


图 3 前 5 组劈裂强度与毛体积相对密度关系

Fig.3 Curve of 5 groups splitting strength and rf

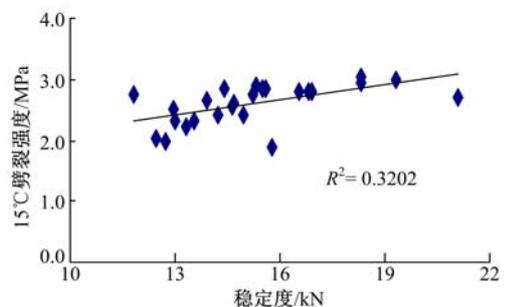


图 4 25 组劈裂强度与稳定度关系

Fig.4 Curve of 25 groups splitting strength and MS

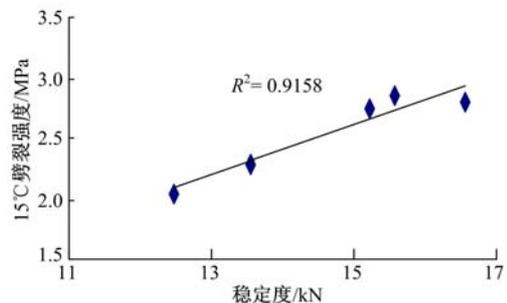


图 5 前 5 组劈裂强度与稳定度关系

Fig.5 Curve of 5 groups splitting strength and MS

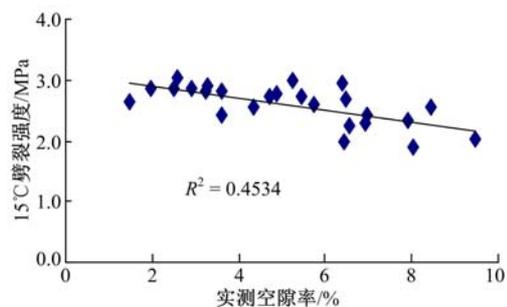


图 6 25 组劈裂强度与空隙率关系

Fig.6 Curve of 25 groups splitting strength and VV

响因子,而油石比对劈裂强度值影响不显著,表明毛体积相对密度与劈裂强度的影响因素存在差异。可见,提高混合料组成设计水平可显著提高

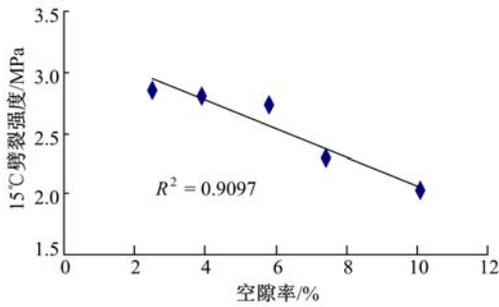


图 7 前 5 组劈裂强度与空隙率关系
Fig. 7 Curve of 5 groups splitting strength and VV

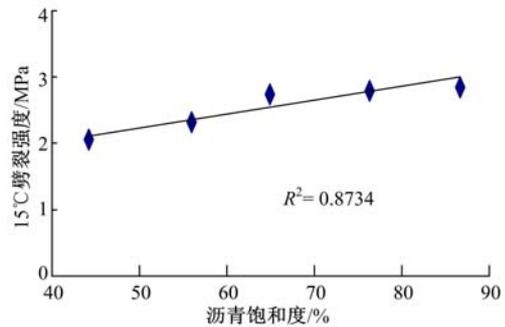


图 11 前 5 组劈裂强度与沥青饱和度关系
Fig. 11 Curve of 5 groups splitting strength and VFA

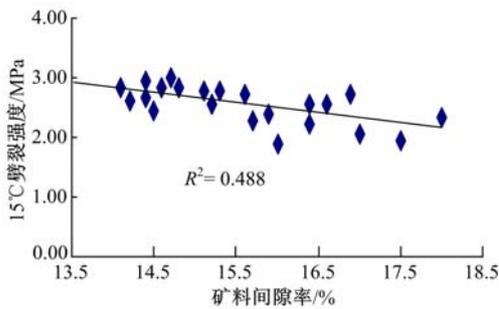


图 8 25 组劈裂强度与矿料间隙率关系
Fig. 8 Curve of 25 groups splitting strength and VMA

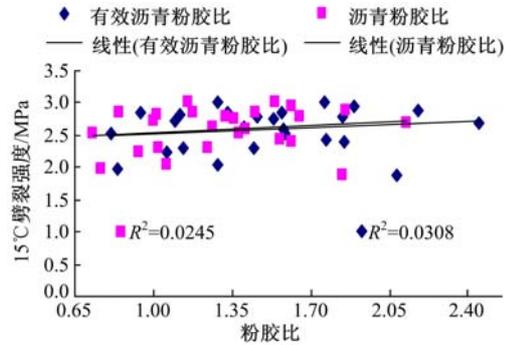


图 12 25 组劈裂强度与粉油比关系
Fig. 12 Curve of 25 groups splitting strength and Fb

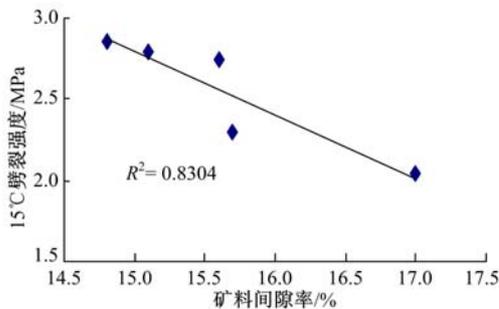


图 9 前 5 组劈裂强度与矿料间隙率关系
Fig. 9 Curve of 5 groups splitting strength and VMA

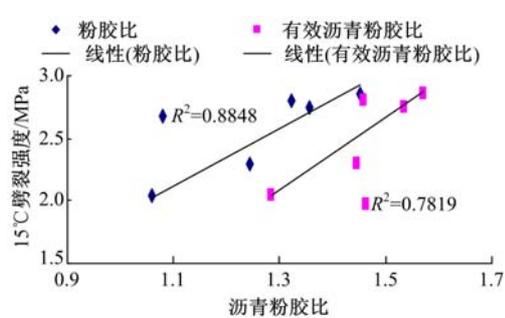


图 13 前 5 组劈裂强度与粉油比关系

Fig. 13 Curve of 5 groups splitting strength and Fb

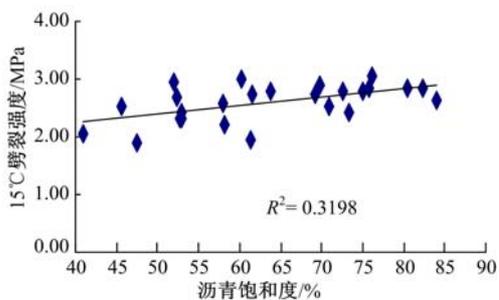


图 10 25 组劈裂强度与沥青饱和度关系
Fig. 10 Curve of 25 groups splitting strength and VFA
沥青混合料的劈裂抗拉强度,建议应优先考虑调整级配,减小施工细集料变异性,以提高沥青路面的力学性能。

(2)正交试验前 5 组级配呈现由细变粗和油石比逐渐降低的特征,沥青混合料逐渐过渡到骨架空隙结构,劈裂强度随着空隙率的增大而增大,致使在材料内部孔隙处首先出现断裂或损伤,马歇尔性能指标也逐渐衰减,当空隙率从 2.6%→10.1%,劈裂强度则由 2.86 MPa→2.04 MPa,衰减幅度为 29%。

4 结 论

(1)研究分析了 AC-13 改性沥青混合料 15 °C 劈裂强度的影响因素,方差分析和极差分析所得试验结果具有一致性,影响因素大小排序为 C > B > D > E > A,即细集料级配对劈裂强度起

主导作用,而油石比和筛孔尺寸为 9.5 mm 的通过率的影响并不显著。试验研究结果说明优化混合料组成设计有利于提高路面材料力学强度。

(2)在模拟实际施工过程中级配和油石比存在同时变异的情况下,对比分析了正交试验设计的 25 组沥青混合料和前 5 组沥青混合料 15 °C 劈裂强度与马歇尔性能指标之间存在较为明显的线性相关性,绝对相关系数均分别大于 68% 和 95%,说明降低细集料级配变异性和控制细集料质量可显著提高劈裂抗拉强度。

参考文献:

- [1] 魏建国,查旭东,郑健龙,等.大粒径沥青混合料基层结构抗裂机理分析[J].公路,2008(4):1-5.
Wei Jian-guo, Zha Xu-dong, Zheng Jian-long, et al. Cracks resisting mechanism analysis of large stone asphalt mixture base structure[J]. Highway, 2008(4):1-5.
- [2] 皮育晖,张久鹏,黄晓明,等.沥青混合料劈裂试验数值模拟[J].公路交通科技,2007,24(8):1-6.
Pi Yu-hui, Zhang Jiu-peng, Huang Xiao-ming, et al. Numerical simulation of indirect tensile tests of asphalt mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8): 1-6.
- [3] 陈锋锋,黄晓明.重载下刚性基层沥青路面的力学响应分析[J].公路交通科技,2007,24(6):48-53.
Chen Feng-feng, Huang Xiao-ming. Analysis of the mechanical response of rigid base asphalt pavement under heavy load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6): 48-53.
- [4] 乔英娟,陈静云,王哲人,等.低温下沥青混凝土的拉伸变形特别性[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(5):1049-1053.
Qiao Ying-juan, Chen Jing-yun, Wang Zhe-ren, et al. Tensile deformation of asphalt mixtures under low temperature[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(5):1049-1053.
- [5] 彭勇,孙立军,石永久,等.沥青混合料劈裂强度的影响因素[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(6):1304-1307.
Peng Yong, Sun Li-jun, Shi Yong-jiu, et al. Factors affecting splitting strength of asphalt mixture[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(6):1304-1307.
- [6] 李立寒,曹林涛,罗芳艳,等.沥青混合料劈裂抗拉强度影响因素的研究[J].建筑材料学报,2004,7(1):41-45.
Li Li-han, Cao Lin-tao, Luo Fang-yan, et al. Research on the factors affecting on the split tension strength of asphalt mixes[J]. Journal of Building Material, 2004, 7(1):41-45.
- [7] 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.
Zi Jian-min, Deng Hai-long, He Li, et al. Combined orthogonal experimental research on mixing ratio design of ultra thin asphalt concrete [J]. Highway, 2007(1):8-13.
- [8] 黄宝涛,田伟平.具有长期施工性能的沥青砂浆配合比设计方法[J].公路,2008(4):148-151.
Huang Bao-tao, Tian Wei-ping. Construction of a long-term performance of asphalt mortar mix design methods[J]. Highway, 2008(4):148-151.
- [9] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [10] JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 汪荣鑫.数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,1998:148-158.
- [12] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001:35-55.
- [13] JTG E42-2005,公路工程集料试验规程[S].
- [14] JTJ052-2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].