

文章编号:1671-8879(2012)02-0034-05

基于摩尔-库伦理论的沥青路面层间抗剪强度

马培建^{1,2}, 王佳蓉¹, 王选仓¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要:以半刚性基层沥青路面下封层为例,研究了沥青路面层间抗剪强度影响因素。通过对 5 种下封层材料双层试件的直剪试验,以摩尔-库伦理论为基础评价了沥青材料和集料粒径对下封层抗剪强度的影响,拟合得到了层间 τ - σ 曲线和摩尔-库伦表达式,并采用灰色关联模型对沥青材料、集料粒径与层间抗剪强度进行关联性分析。结果表明:胶粉改性沥青和粒径 5~10 mm 碎石是较好的下封层材料;沥青材料较碎石粒径对层间抗剪强度的影响更大。

关键词:道路工程;摩尔-库伦理论;层间抗剪强度;灰色关联性分析

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Shear strength between interlayers of asphalt pavement based on Mohr-Coulomb theory

MA Pei-jian^{1,2}, WANG Jia-rong¹, WANG Xuan-cang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: The influence factors of shear strength between layers were studied based on the lower seal coats for the semi-rigid base asphalt pavement. According to the Mohr-Coulomb theory, 5 kinds of compound specimens were selected for shearing test to evaluate the influence of asphalt material and aggregate size to shear strength. Based on τ - σ lines and Mohr-Coulomb expressions, the grey correlation model was used to analyze the relationships of asphalt, aggregate and shear strength. The results show that the rubber power modified asphalt and aggregate particles from 5 mm to 10 mm diameters are better seal coat materials; the asphalt material has greater influence on the interlayers shear strength than the aggregate particles. 7 tabs, 2 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; Mohr-Coulomb theory; shear strength between interlayers; grey correlation analysis

0 引 言

半刚性基层沥青路面因其整体强度、抗永久变形能力较强,能适应重载交通,是中国目前高等级公路路面结构的主要形式。根据现行沥青路面设计规范,假设路面结构是多层弹性体系,各层之间是连续

的一个整体,即层间接触条件为完全连续^[1-2]。但在国内外大量公路工程中,由于路面各结构层的材料及施工质量等因素的不同,路面各结构层之间的联接状况不会是假设的理想状态,介于完全连续和完全滑动之间,使得路面各结构层间的粘结力大大减小,成为路面结构中的薄弱环节^[3-4]。沥青路面设计

理论的不足及重载、超载现象的日益严重,使得中国公路在使用不久后出现不同程度地路面滑移病害,甚至因严重滑移、破坏而挖掉重铺^[5]。在中国沥青路面快速发展的今天,增强沥青面层和半刚性基层之间的有效粘结,在沥青路面技术研究中已经越来越显得重要。

因此,本文以半刚性基层沥青路面为例,分析基于摩尔-库伦定律的下封层强度形成机理,通过竖向荷载作用下的直剪试验,研究下封层沥青粘结材料和集料对下封层抗剪强度的影响,通过灰色关联性分析确定其影响程度的大小,以便于选择合适的下封层材料。

1 竖向荷载作用下直剪试验

本文在比较了几种层间剪切试验仪后,尝试采用能够添加竖向荷载的路面层间剪切强度试验仪,该仪器能最大程度地模拟路面在行车荷载作用下的实际受力状况^[6]。

1.1 试验材料

下封层沥青粘结料采用胶粉改性沥青、SBS 改性沥青和 70# 基质沥青,其各项技术指标见表 1;集料采用玄武岩,按粒径分为 5~10 mm 和 10~15 mm。

表 1 试验用各种沥青技术指标

指 标	试验结果		
	胶粉改性沥青	SBS 改性沥青	70# 基质沥青
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/0.1 mm	58.0	64.8	67.5
延度(5 cm/min, 5 ℃)/cm	31.7	37.1	10.6
软化点/℃	68.5	68.0	45.5
弹性恢复(25 ℃)/%	83	83	15

1.2 试件制备及试验仪器

(1)模拟路面结构为上基层 5 cm 水泥稳定碎石,下面层 5 cm 的 AC-25,下封层采用基质沥青+5~10 mm 碎石、SBS 改性沥青+5~10 mm 碎石、胶粉改性沥青+5~10 mm 碎石、胶粉改性沥青和胶粉改性沥青+10~15 mm 碎石 5 种形式。为贴近实际,采用双层车辙板成型后钻取直径为 100 mm、高度 H 为 100 mm 的圆柱体试件。

(2)试验仪器采用沥青混凝土路面层间剪切试验仪。

1.3 试验方法

每次试验,先在试件的上方加竖向荷载 P ,然后在水平方向逐渐施加水平推力 T ,直至达到最大推

力 T_{\max} 发生破坏。直剪试验如图 1 所示。

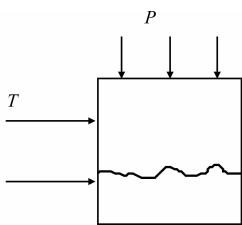


图 1 加载直剪试验

剪切面的正压应力 σ 和剪应力 τ 计算公式为

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{T}{A} \tag{2}$$

式中: A 为试件层间接触面积。

2 试验结果分析

2.1 试验结果

竖向荷载分别采用 0.15、0.25、0.35、0.5、0.7 MPa,下封层集料为 5~10 mm 碎石,沥青材料分别采用基质沥青、SBS 改性沥青、胶粉改性沥青时,直剪试验结果见下页表 2;下封层沥青材料采用胶粉改性沥青、不撒集料、集料采用 5~10 mm 碎石和 10~15 mm 碎石时,直剪试验结果见下页表 3。

2.2 试验结果分析

下封层材料由沥青裹附集料组成,因此可以看做是沥青混合料。根据沥青混合料的颗粒性特征,沥青混合料的强度构成来源于 2 个方面:沥青的存在而产生的粘结力;集料的存在而产生的内摩阻力^[7-8]。因此,可以采用摩尔-库伦理论分析下封层的强度,并引进 2 个强度参数——粘结力 c 和内摩阻角 φ ,表达式为

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi) \tag{3}$$

(1) 分别将不同竖向荷载作用下、不同下封层沥青材料试验结果进行汇总分析,并通过拟合下封层材料的 τ - σ 曲线,得到下封层的摩尔-库伦表达式,分析结果如下页图 2 所示。图 2 中, x 、 y 分别表示 σ 、 τ , R^2 为判定系数。

根据图 2 的 τ - σ 拟合曲线,得到层间不同沥青材料的摩尔-库伦表达式为

基质沥青剪应力 $\tau_1 = 0.29\sigma + 0.455\ 6$

基质沥青的粘结力 $c_1 = 0.455\ 6\ \text{MPa}$

SBS 改性沥青粘结力 $c_{\text{SBS}} = 0.526\ 9\ \text{MPa}$

胶粉改性沥青粘结力 $c_3 = 0.540\ 5\ \text{MPa}$

对比可知,胶粉改性沥青的粘结力最大,其次是

表 2 竖向荷载作用下不同沥青种类直剪试验结果

竖向荷载/ MPa	沥青种类	试验结果	试件编号			均值
			1	2	3	
0.15	基质沥青	剪切力/kN	8.79	8.43	9.22	8.81
		剪切强度/MPa	0.50	0.48	0.52	0.50
	SBS 改性沥青	剪切力/kN	10.06	9.28	9.52	9.62
		剪切强度/MPa	0.57	0.53	0.54	0.54
	胶粉改性沥青	剪切力/kN	10.17	10.67	10.24	10.36
		剪切强度/MPa	0.58	0.60	0.58	0.59
0.25	基质沥青	剪切力/kN	8.96	9.17	9.14	9.09
		剪切强度/MPa	0.51	0.52	0.52	0.51
	SBS 改性沥青	剪切力/kN	10.81	10.76	10.34	10.64
		剪切强度/MPa	0.61	0.61	0.59	0.60
	胶粉改性沥青	剪切力/kN	10.36	10.57	10.74	10.56
		剪切强度/MPa	0.59	0.60	0.61	0.60
0.35	基质沥青	剪切力/kN	9.72	10.03	10.35	10.03
		剪切强度/MPa	0.55	0.57	0.59	0.57
	SBS 改性沥青	剪切力/kN	11.61	10.72	10.95	11.09
		剪切强度/MPa	0.66	0.61	0.62	0.63
	胶粉改性沥青	剪切力/kN	10.62	10.95	10.83	10.80
		剪切强度/MPa	0.60	0.62	0.61	0.61
0.50	基质沥青	剪切力/kN	11.03	10.97	10.64	10.88
		剪切强度/MPa	0.62	0.62	0.60	0.62
	SBS 改性沥青	剪切力/kN	11.93	11.89	11.84	11.89
		剪切强度/MPa	0.68	0.67	0.67	0.67
	胶粉改性沥青	剪切力/kN	12.1	11.97	12.26	12.11
		剪切强度/MPa	0.69	0.68	0.69	0.69
0.70	基质沥青	剪切力/kN	11.49	11.05	11.62	11.39
		剪切强度/MPa	0.65	0.63	0.66	0.64
	SBS 改性沥青	剪切力/kN	12.49	12.05	12.12	12.22
		剪切强度/MPa	0.71	0.68	0.69	0.69
	胶粉改性沥青	剪切力/kN	12.89	12.25	13.12	12.75
		剪切强度/MPa	0.73	0.69	0.74	0.72

表 3 竖向荷载作用下不同集料直剪试验结果

竖向荷载/ MPa	碎石粒径/ mm	试验结果	试件编号			均值
			1	2	3	
0.15	不撒	剪切力/kN	9.43	9.12	9.24	9.26
		剪切强度/MPa	0.53	0.52	0.52	0.52
	5~10	剪切力/kN	9.97	10.27	10.14	10.13
		剪切强度/MPa	0.56	0.58	0.57	0.59
	10~15	剪切力/kN	10.29	10.18	9.82	10.10
		剪切强度/MPa	0.58	0.58	0.56	0.57
0.25	不撒	剪切力/kN	9.26	9.46	9.09	9.27
		剪切强度/MPa	0.52	0.54	0.51	0.52
	5~10	剪切力/kN	10.36	10.57	10.74	10.56
		剪切强度/MPa	0.59	0.60	0.61	0.60
	10~15	剪切力/kN	10.25	10.17	10.44	10.29
		剪切强度/MPa	0.58	0.58	0.59	0.58
0.35	不撒	剪切力/kN	9.61	9.26	9.42	9.43
		剪切强度/MPa	0.54	0.52	0.53	0.53
	5~10	剪切力/kN	10.92	10.95	11.63	11.17
		剪切强度/MPa	0.62	0.62	0.66	0.61
	10~15	剪切力/kN	10.71	11.03	10.25	10.66
		剪切强度/MPa	0.61	0.62	0.58	0.60
0.50	不撒	剪切力/kN	9.63	9.27	9.14	9.35
		剪切强度/MPa	0.55	0.52	0.52	0.53
	5~10	剪切力/kN	12.1	11.87	12.26	12.08
		剪切强度/MPa	0.69	0.67	0.69	0.69
	10~15	剪切力/kN	11.73	11.57	12.04	11.78
		剪切强度/MPa	0.66	0.66	0.68	0.67
0.70	不撒	剪切力/kN	9.28	9.65	9.62	9.52
		剪切强度/MPa	0.53	0.55	0.54	0.54
	5~10	剪切力/kN	12.89	12.25	13.12	12.75
		剪切强度/MPa	0.73	0.69	0.74	0.72
	10~15	剪切力/kN	12.28	12.25	12.16	12.23
		剪切强度/MPa	0.70	0.69	0.69	0.69

SBS 改性沥青,最小的是 70# 基质沥青。因此,在其他条件相同时,不同下封层抗剪强度从大到小排序为:胶粉改性沥青封层,SBS 改性沥青封层,基质沥青封层。

(2)分别将不同竖向荷载作用下、不同下封层集料试验结果进行汇总分析,并通过拟合下封层材料的 σ - τ 曲线,得到下封层的摩尔-库伦表达式,分析结果如下页图 3 所示。

根据图 3 拟合的摩尔-库伦表达式,可以得出:不撒集料(内摩阻角为 φ_1)时 $\tan(\varphi_1)=0.036\ 9$,采用 5~10 mm 碎石(内摩阻角为 φ_2)时 $\tan(\varphi_2)=0.262\ 9$,采用 10~15 mm 碎石(内摩阻角为 φ_3)时, $\tan(\varphi_3)=0.246\ 1$,经反三角函数计算, $\varphi_1=2.111\ 33^\circ$, $\varphi_2=14.729\ 7^\circ$, $\varphi_3=13.825\ 7^\circ$ 。对比可知,

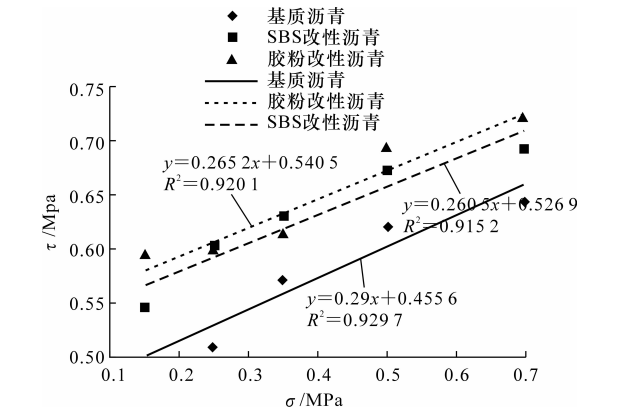


图 2 不同沥青材料下封层 τ - σ 曲线

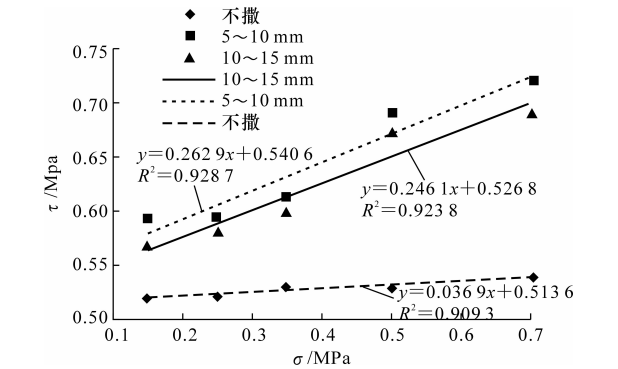


图 3 不同集料下封层 τ - σ 曲线

撒布碎石粒径为 5~10 mm 时内摩阻角最大。因此,考虑抗剪强度时,下封层集料撒布 5~10 mm 碎石最

表 4 0.15 MPa 竖向荷载作用下不同下封层直剪试验数据及摩尔-库伦系数

下封层	基质沥青+ 5~10 mm 碎石	SBS 改性沥青+ 5~10 mm 碎石	胶粉改性沥青+ 5~10 mm 碎石	胶粉改性沥青	胶粉改性沥青+ 10~15 mm
剪切强度/MPa	0.50	0.54	0.59	0.52	0.57
沥青粘聚力/MPa	0.455 6	0.526 9	0.540 5	0.513 6	0.526 8
碎石内摩擦角/(°)	16.172 2	14.601 1	14.852 9	2.113 3	13.825 74

表 5 初值像计算值

X_1'	1	1.080 0	1.180 0	1.040 0	1.140 0
X_2'	1	1.156 5	1.186 3	1.127 3	1.156 3
X_3'	1	0.902 9	0.918 4	0.130 7	0.854 9

(2) 求出沥青和碎石粒径的差序列 Δ_2 和 Δ_3 ,结果见表 6。

表 6 差序列计算值

Δ_2	0	0.076 5	0.006 3	0.087 3	0.016 3
Δ_3	0	0.177 1	0.261 6	0.909 3	0.285 1

(3) 根据式(4),求两极最大差 M 与最小差 m 。
 $M = \max_i \max_k (\Delta_i(k)), m = \min_i \min_k (\Delta_i(k))$
 $i = 2, 3; k = 2, 3$ (4)

所以, $M = 0.909 3, m = 0$ 。

(4) 根据式(5),求沥青与抗剪强度、碎石粒径与抗剪强度的关联系数 γ_{12} 和 γ_{13} ,取 $\xi = 0.5$,结果见表 7。

$$\gamma_{1i}(k) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}, \xi \in (0, 1)$$
$$k = 2, 3; i = 2, 3 \quad (5)$$

表 7 关联系数计算值

关联系数	1	2	3	4	5	平均值
γ_{12}	1	0.855 977 8	0.986 230 6	0.838 907 8	1.037 132	0.943 650
γ_{13}	1	0.719 612 7	0.634 783 7	0.333 327 2	0.614 606	0.660 466

分析表 7,对比沥青与抗剪强度、碎石粒径与抗剪强度的关联系数的均值可知: $\gamma_{12} > \gamma_{13}$ 。由此可以看出,沥青材料对下封层抗剪强度的关系系数比集料粒径要大 42.9%。这说明,沥青材料是影响下封

好,10~15 mm 次之,不撒碎石最差。

2.3 影响因素灰色关联性分析

灰色理论(grey theory,简称灰理论或者灰论)是著名学者邓聚龙教授 1982 年创立的一门新兴横断学科。灰色理论中灰色关联度,是分析系统中各因素关联程度的方法,即关联程度量化的方法^[9-10]。运用灰色关联度,计算沥青和集料粒径与下封层抗剪强度的关系系数,并进行排序。

汇总 $\sigma = 0.15$ MPa 作用下不同封层直剪试验数据及摩尔-库伦系数,见表 4。

(1) 求出剪切强度、沥青和碎石粒径的初值像 X_1' 、 X_2' 和 X_3' ,结果见表 5。

层材料抗剪强度的第一因素,在选用下封层材料时,应该优先考虑粘结力较强的沥青材料,如胶粉改性沥青等。

3 结 语

(1) 根据摩尔-库伦理论,选用不同的沥青材料,进行下封层粘结料的室内直剪试验,得到了沥青材料粘结力从大到小的排序为:胶粉改性沥青、SBS 改性沥青、基质沥青。

(2) 根据摩尔-库伦理论,选用不同的粒径碎石,进行下封层集料的室内直剪试验,得到了不同粒径碎石内摩阻角从大到小的排序为:5~10 mm 碎石、10~15 mm 碎石、不撒碎石。

(3) 根据灰色理论,对沥青和集料粒径与下封层抗剪强度的关系进行灰色关联性分析,计算得到沥青材料对下封层抗剪强度的关系系数比集料粒径要大 42.9%,因此,沥青材料是影响下封层材料抗剪强度最重要的因素。

(4) 在沥青路面设计及施工过程中,可以优先考虑沥青材料,利用沥青材料对下封层抗剪强度的影响来增强沥青面层和半刚性基层之间的粘结作用。

参考文献:
References:

[1] 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.
[2] 翟根旺,乔朝增. 高速公路沥青路面层间处理技术

[J]. 公路,2002(2):39-43.

DI Gen-wang,QIAO Chao-zeng. Research of expressway asphalt pavement interlayer processing technology[J]. Highway,2002(2):39-43.

[3] 赵桂娟. 半刚性基层沥青路面基层粘结材料抗剪性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(5):90-94.

ZHAO Gui-juan. Test analysis on shear performance for interlayer bond of base and surface in semi-rigid base pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(5):90-94.

[4] West R C,Zhang J N,Moore J. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. Auburn: Auburn University,2005.

[5] 苏 凯,武建民,姚红云,等. 沥青路面层间滑移破坏分析[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(3):35-38.

SU Kai,WU Jian-min,YAO Hong-yun,et al. Analysis of cutting-slippage in asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2005,24(3):35-38.

[6] 胡卫国. 沥青路面基层层间抗剪研究[D]. 长沙:长沙

(上接第 33 页)

参考文献:

References:

[1] 杨 帆. 云南某露天矿采场边坡岩体力学参数确定及稳定性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2009.

[2] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[3] 石林珂,孙文怀,郝小红. 岩土工程原位测试[M]. 郑州:郑州大学出版社,2003.

[4] Hoek E,Brown T. Underground excavation in rock [M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

[5] 谭文辉,周汝弟,王 鹏. 岩体宏观力学参数取值的 GSI 和广义 Hoek-Brown 法[J]. 有色金属,2002,54(4):16-18.

TAN Wen-hui,ZHOU Ru-di,WANG Peng. Taken value of the macroscopic of mechanical parameters of rock mass by the methods of GSI and Hoek-Brown [J]. Nonferrous Metals,2002,54(4):16-18.

[6] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown 经验强度准则的修正及

理工大学;2007.

[7] 高金岐,罗晓辉,徐世法,等. 沥青粘结层抗剪强度试验分析[J]. 北京建筑工程学院学报,2003,21(2):32-34.

GAO Jin-qi,LUO Xiao-hui,XU Shi-fa,et al. Test and analysis of shearing strength of bituminous membrane [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2003,21(2):32-34.

[8] 杨大田,夏文军. 动态剪切蠕变试验评价沥青路面层间稳定性[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(2):46-48.

YANG Da-tian,XIA Wen-jun. Evaluation of interlayer stability of asphalt pavement by dynamic shearing creep test[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2011,28(2):46-48.

[9] 刘思峰,党辉国,方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2004.

应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2008,41(1):63-66.

SUN Jin-shan,LU Wen-bo. Modification of Hoek-Brown criterion and its application [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(1):63-66.

[7] 侯克鹏. 矿山地压控制理论与实践[M]. 昆明:云南科学技术出版社,2004.

[8] 廖秋林,李 晓,张年学,等. E. Hoek 法在节理化岩体力学参数评价中的应用[J]. 岩土力学,2005,26(10):1641-1644.

LIAO Qiu-lin,LI Xiao,ZHANG Nian-xue,et al. Application of E. Hoek method to evaluating mechanical parameters of closely jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(10):1641-1644.

[9] 王成虎,何满朝. Hoek-Brown 岩体强度估算新方法及其工程运用[J]. 西安科技大学学报,2006,26(4):456-459.

WANG Cheng-hu,HE Man-chao. Latest Hoek-Brown rock mass strength estimation method and its application[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2006,26(4):456-459.