

文章编号:1671-8879(2006)04-0030-05

## 混凝土桥面防水层直剪试验

王笑风<sup>1</sup>, 胡仁东<sup>2</sup>, 张占军<sup>3</sup>, 裴建中<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 河南省交通工程定额站, 河南 郑州 450052; 3. 北京路桥中咨科技有限公司, 北京 100101)

**摘 要:**选取 3 种常见防水卷材, 利用 LLM 测试系统进行混凝土桥面防水层直剪试验。研究了水泥混凝土表面特性、环境温度等因素对 3 种桥面防水层抗剪强度的影响规律。试验表明:增加水泥混凝土表面粗糙度, 有利于提高防水层与桥面的抗剪能力, 但在底涂料用量一定的情况下, 混凝土表面过于粗糙并不利于提高层间抗剪强度; 不同防水卷材的抗剪强度对温度的敏感度不同, APP (无规聚丙烯)防水卷材敏感性最大。通过改变垂直荷载和剪切速率, 建立了 APP 防水卷材抗剪强度变化方程。最后综合考虑温度、垂直荷载、剪切速率等影响因素, 计算出了在标准轴载、不同车速作用下 60 ℃时 APP 防水卷材层间抗剪强度。

**关键词:**道路工程; 混凝土桥面; 防水层; 防水卷材; 抗剪强度; 直剪试验

**中图分类号:**U443.33

**文献标识码:**A

## Shear test on concrete bridge decks with waterproofing layer

WANG Xiao-feng<sup>1</sup>, HU Ren-dong<sup>2</sup>, ZHANG Zhan-jun<sup>3</sup>, PEI Jian-zhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Quota Station for Communications Projects, Zhengzhou 450052,

Henan, China; 3. Beijing Zhongzi Science Technology Company for Road and Bridge. Beijing 100101, China)

**Abstract:** Using LLM test system, this paper makes shear tests on the concrete bridge decks with waterproofing layer, gets shear strength change rules of three waterproofing rolls under different surface conditions of concrete samples and different test temperatures. The results show that it is benefit to the shear strength of waterproofing layer through improving the surface roughness of bridge deck, but it needs some conditions; the shear strengths of different waterproofing rolls are sensitive to the test temperatures, especially APP modified asphalt waterproof roll. By means of changing vertical pressure and shearing rate, two regression equations of APP modified asphalt waterproof roll are got. Taking into account impacts of test temperature, vertical pressure, shearing rate and standard axle load, this paper gives the shear strengths of APP modified asphalt waterproof roll under the conditions of the standard axis load, different vehicle speeds. 7 tabs, 12 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; concrete bridge deck; waterproofing layer; waterproofing roll; shear strength; shear test

收稿日期:2005-04-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231800030)

作者简介:王笑风(1974-),男,河南新乡人,博士研究生。



0 引言

中国从 20 世纪 80 年代初开始认识到桥面防水的重要性,并于 20 世纪 80 年代末在北京、天津等地采用桥面防水层设计。但是设置防水层的桥面铺装也产生了一些新的问题,大量的现场调查发现混凝土桥面铺装面层容易产生剥落、松散、拥包等病害。究其原因,多是由于桥面铺装各层之间的抗剪强度不足所引起的。所以桥面防水层不仅要具有防水功能,而且与沥青混凝土铺装层、桥面板间应具有可靠的抗剪性能<sup>[1-2]</sup>。目前桥面防水材料主要有卷材类和涂膜类,两种防水材料各有优缺点<sup>[3-5]</sup>。本文选取 3 种卷材,在室内进行模拟试验,以确定铺装结构中不同防水层的层间抗剪强度及外界环境条件对材料剪切性能的影响规律;并根据试验数据计算在标准轴载作用下,对应于不同车速度的 APP(无规聚丙烯)改性沥青防水卷材 60℃层间抗剪强度。

1 试验系统与方案

1.1 试验仪器与试件制备

试验设备采用长安大学研制的 LLM 测试系统,该系统由机械部分、数据采集仪、环境系统组成。机械部分保证对试件施加荷载,上面还装有 2 个拉压力传感器和一个水平位移传感器。拉压力传感器用于测量垂直与水平荷载,水平位移传感器用于测量剪切位移。3 个传感器与数据采集仪连接。数据采集仪担负试验数据的采集、存贮、分析处理等工作。环境系统用来确保试验要求的温度,由环境制动系统、环境箱和温度传感器组成。

层间剪切试件的尺寸如图 1 所示,下层为 C30 水泥混凝土试件,中间为防水层,上层为 AC-16 型

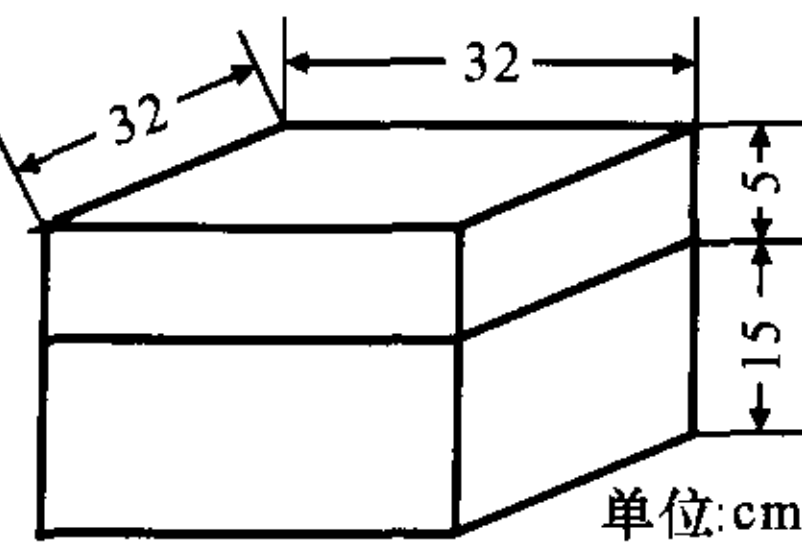


图 1 剪切试件尺寸图

沥青混凝土。防水层选用热熔型 APP 改性沥青卷材(简称 APP 卷材)、Bituthene5300(自粘,美国产)卷材(简称 B5300 自粘卷材)、Servidek/Servipak(含保护板)涂膜系统(简称 Sd/Sp 系统)3 种卷材。室内制备水泥混凝土试件时,尽量模拟实际施工状态。先将拌和好的混合料倒入试模,分层插捣均匀,然后通过机械振动台密实成型,表面刷毛后养生 7 d 方可拆模。制备剪切试件时,首先根据试验方案选取防水材料,铺筑在水泥混凝土试块表面作防水层,然后将 130℃沥青混合料倒入试模内,手动碾压成型,

成型温度控制在 110℃以上。

1.2 试验方案

1.2.1 混凝土表面特性对层间抗剪强度的影响

(1)在不考虑垂直压力和剪切速率的情况下,试验温度为 25℃,对 3 种防水卷材进行直剪试验。研究试件不同表面特性下的防水材料剪变特性,分析水泥混凝土试件表面特性对防水层抗剪强度的影响。制作 3 种类型表面特性的水泥混凝土试件见表 1。表 1 中,光滑面是指试件表面用水磨石人工磨制而成;原状指试件成型后表面不做任何处理;粗糙面是指试件强度形成后,在表面用电锯切割成宽 2 mm,深 2 mm,间距 1 cm 的沟槽。

表 1 水泥混凝土试件表面特性

项目	表面特性		
状况	光滑	原状	粗糙
摩擦系数摆值/BPN	47	56	62

(2)选取厚度分别为 3 mm 和 4 mm 的 APP 卷材进行直剪试验,试验温度为 25℃;全部试件表面进行统一处理,扩大表面摩擦系数分布范围,分析水泥混凝土试件表面特性对防水层抗剪强度的影响。

1.2.2 温度对层间抗剪强度的影响

在 0℃、25℃、60℃的温度下,研究 3 种防水卷材的剪变特性,分析温度变化对防水层层间抗剪强度的影响。

1.2.3 垂直荷载、剪切速率对层间抗剪强度的影响

(1)选用 APP 卷材作防水层,剪切速率为 3.5 mm/min,试验温度为 25℃,变动垂直压力,寻求层间抗剪强度与垂直荷载的关系。

(2)选用 APP 卷材作防水层,试验温度为 25℃,垂直荷载为 0.2 MPa,改变剪切速率,寻求层间抗剪强度与剪切速率的关系。

2 试验结果及分析

2.1 混凝土试件表面特性对层间抗剪强度的影响

2.1.1 试件表面对层间抗剪强度的影响

试验采用的试件,其表面按表 1 规定进行处理。3 种防水材料的剪变特性和抗剪强度试验结果见图 2~图 5。

(1)由图 2~图 5 可知,3 种不同材料适应于不同的表面特性,具有不同的抗剪强度。3 种材料在粗糙状态时比其他两种状态的抗剪强度大,依照摩尔-库仑强度理论,抗剪强度主要取决于粘结力  $c$  和内摩阻角  $\varphi$ 。粗糙的试件表面能够提高层间粘聚力



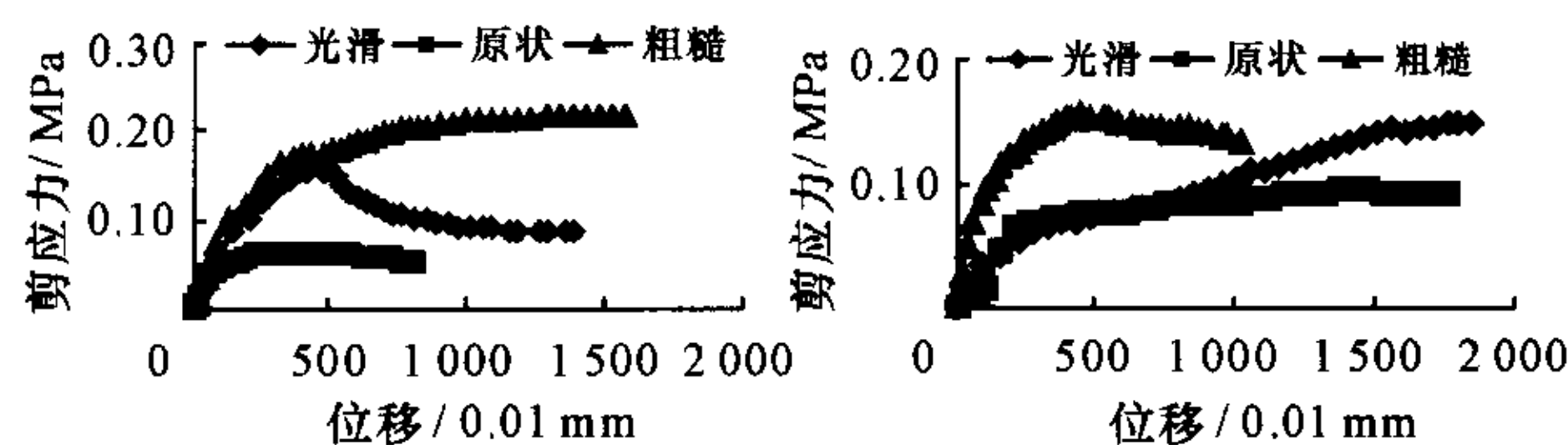


图2 APP卷材不同  
表面特性剪变特性

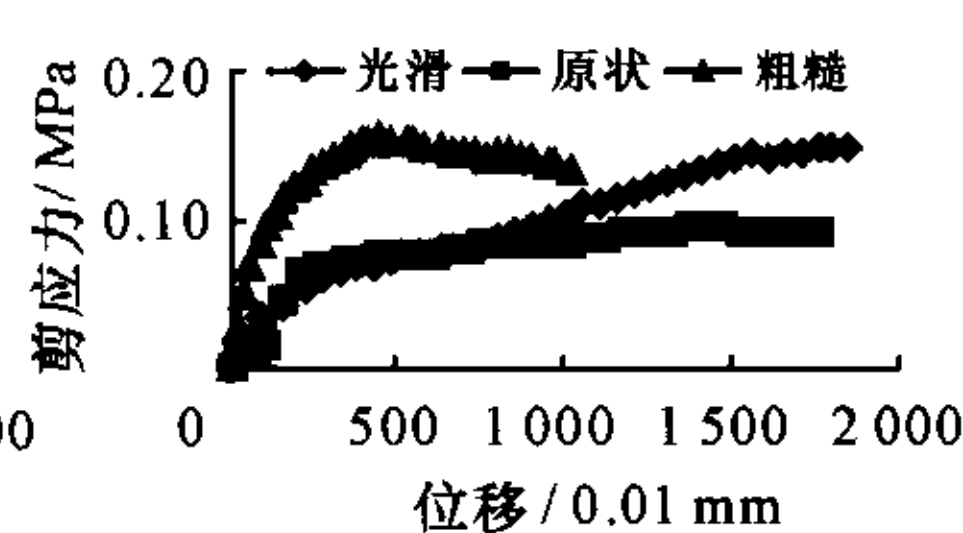


图3 B5300自粘卷材不同  
表面特性剪变特性

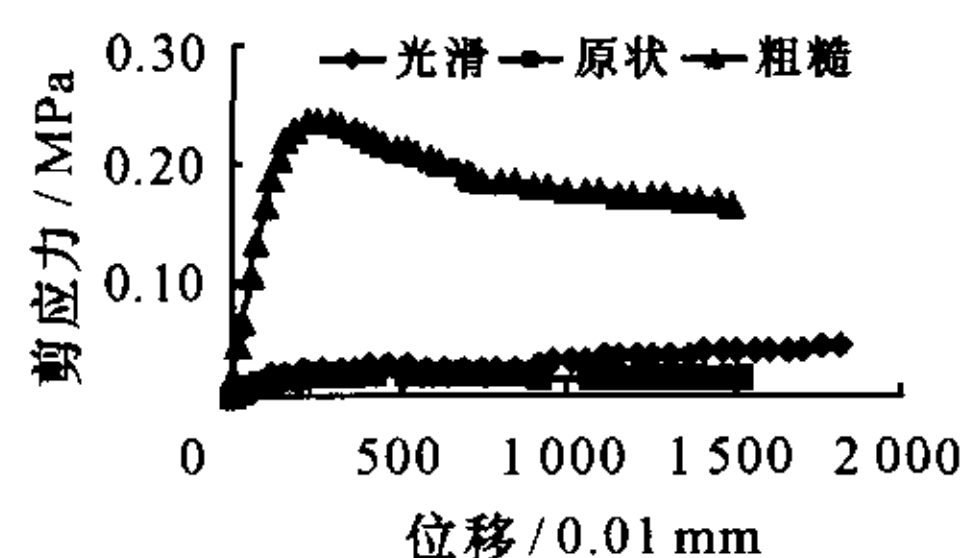


图4 Sd/Sp系统不同  
表面特性剪变特性

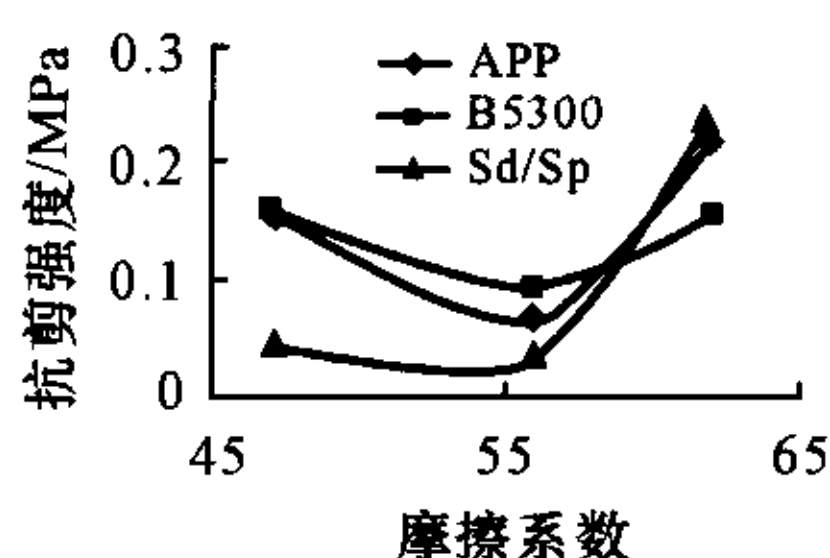


图5 3种材料抗剪强度随  
表面特性变化曲线

和骨料嵌锁进防水层表面内产生的摩阻力;当试件表面处于光滑状态时,上下层间接触面积大,相应的粘聚力大,而内摩阻力的作用较弱。

(2)按以上理论,却无法解释表面处于原状时材料表现出的剪变特性。当试件表面为原状时,其摩擦系数摆值(BPN)介于光滑状态和粗糙状态之间,但是抗剪强度值却最小。究其原因:由于水泥混凝土表面未经过处理,有粘结力较低的浮浆,在水平力作用下被剪断破坏;或者,表面有未清洁干净的灰尘致使层间粘结力降低。因此,从提高抗剪强度的角度出发,对水泥混凝土表面进行预处理十分重要。

(3)利用模量  $K_s$  分析试验结果。层间剪应力与位移之间的对应关系可用 Goodman 假设条件解释,即剪应力  $\tau = K_s \Delta U$ ;  $K_s$  为界面剪切系数,可以按照割线模量的方法确定。割线模量是连接原点至某一点应力  $\tau_0$  (一般情况  $\tau_0 = 0.5\tau_{\max}$ ) 处割线的正切值。即  $K_s = \tau_0 / \Delta U_0 = \tan \phi$ , 由此可以计算出  $K_s$ , 见图 6。结果表明,随着混凝土表面粗糙度增加,3 种材料的界面剪切系数急剧增大,说明防水层与混凝土间的抗剪能力随着混凝土表面的粗糙程度增加而增强。

#### 2.1.2 试件表面对不同厚度 APP 卷材的影响

全部试件表面进行统一处理。针对两种厚度的 APP 卷材进行直剪试验,图 7 为 3 mm 厚卷材试验结果,图 8 为 4 mm 厚卷材试验结果。从图 7、图 8 可知:

(1)随着表面摩擦系数增大,材料抗剪特性呈现先上升后下降的趋势。因为随着粗糙度的进一步

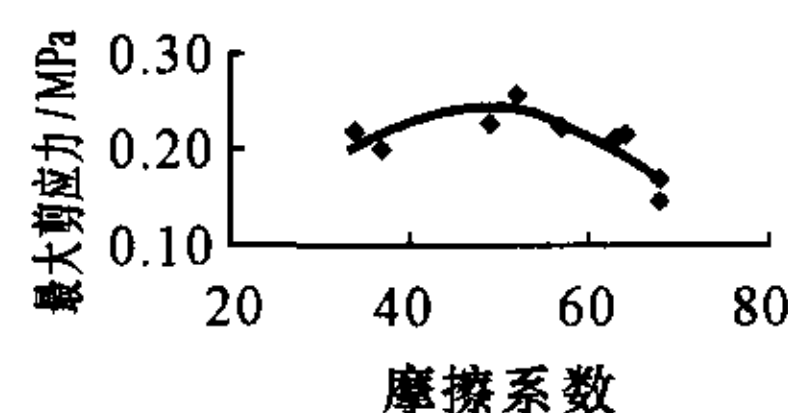


图7 3 mm APP 卷材剪切  
强度与摩擦系数关系

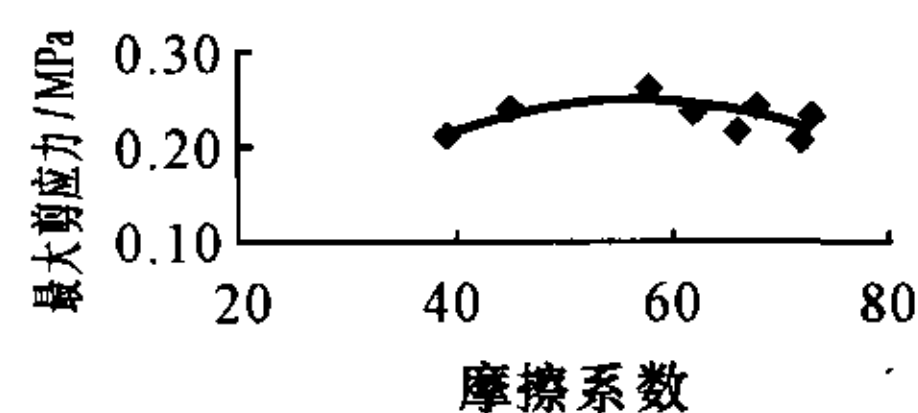


图8 4 mm APP 卷材剪切  
强度与摩擦系数关系

增加,混凝土表面纹理加深,有些底涂材料堆积在表面的纹理缝隙内,在底涂料用量相等的情况下,形成连续薄膜的面积相应减小,使得粘结力下降,从而导致抗剪性能降低。对于两种厚度规格的卷材,剪切强度的最大值出现在摩擦系数摆值(BPN)为 45~60 的区间内。由此可见,在底涂料用量相等的情况下,混凝土表面太光滑或过于粗糙都不利于提高层间抗剪强度。

(2)图 8 的曲线比图 7 的曲线趋势变化平稳。由此推断,混凝土表面粗糙度对较厚的材料影响较小,对较薄的材料影响较大。此现象可以解释为,在剪切过程中,较薄的材料主要是靠底涂料与基层之间的相对错动来响应变形,而较厚的材料则有更多材料分子之间的相对错动参与作用,故较厚材料抗剪强度趋势变化较为缓和。

#### 2.2 温度对层间抗剪强度的影响

在 0℃、25℃、60℃ 的温度下,3 种材料试验结果见图 9~图 12。试验结果表明:不同材料对温度变化的敏感性不同。APP 卷材敏感性最大,60℃ 时的抗剪强度约为 25℃ 和 0℃ 时抗剪强度值的 1/2 和 1/10;Sd/Sp 系统的温度敏感性较小,60℃ 时的抗剪强度约为 25℃ 和 0℃ 时抗剪强度值的 1/2 和 2/3;B5300 自粘卷材对温度变化的敏感性介于二者之间,60℃ 时的抗剪强度基本与 25℃ 时的抗剪强度相等,但是与 0℃ 时抗剪强度值相差较大,约为 0℃ 时的 1/2。根据实际路况要求,防水层既要有小的温度敏感性,又要具备大的抗剪强度,总体评价 B5300 自粘卷材性能相对较好。

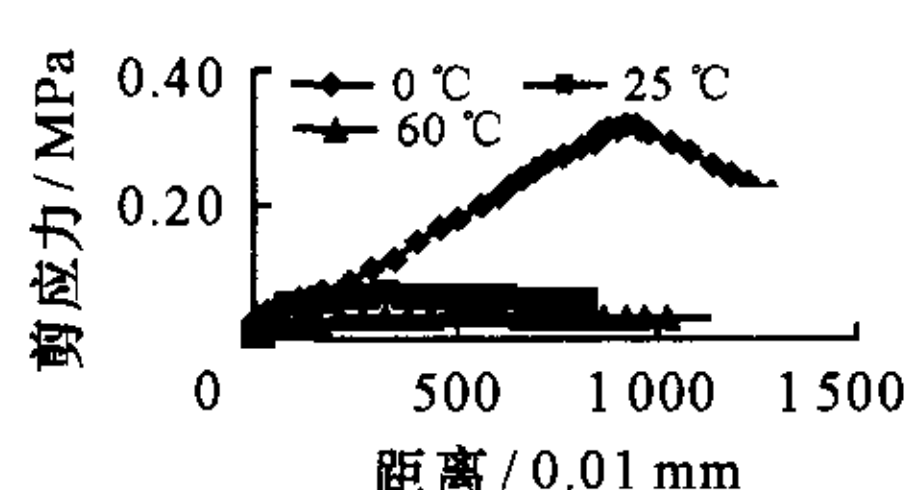


图9 APP材料不同  
温度剪变特性

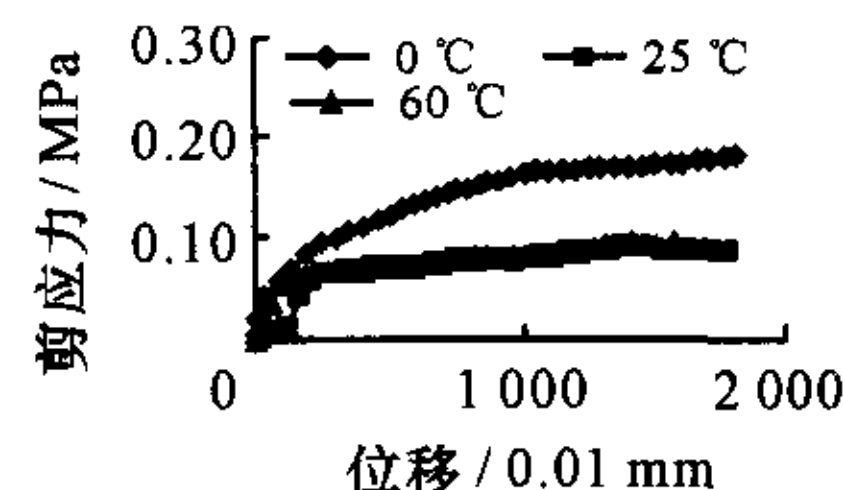


图10 B5300自粘卷材不同  
温度剪变特性

#### 2.3 垂直压力对层间抗剪强度的影响

针对 APP 卷材,改变垂直压力  $\sigma_z$  进行直剪试验,试验结果见表 2,数据回归方程见式(1)。

$$\tau_{\max} = 0.0371 + 0.0327\sigma_z \quad (R^2 = 0.97) \quad (1)$$

试验结果表明,随着  $\sigma_z$  的增大,抗剪强度近似



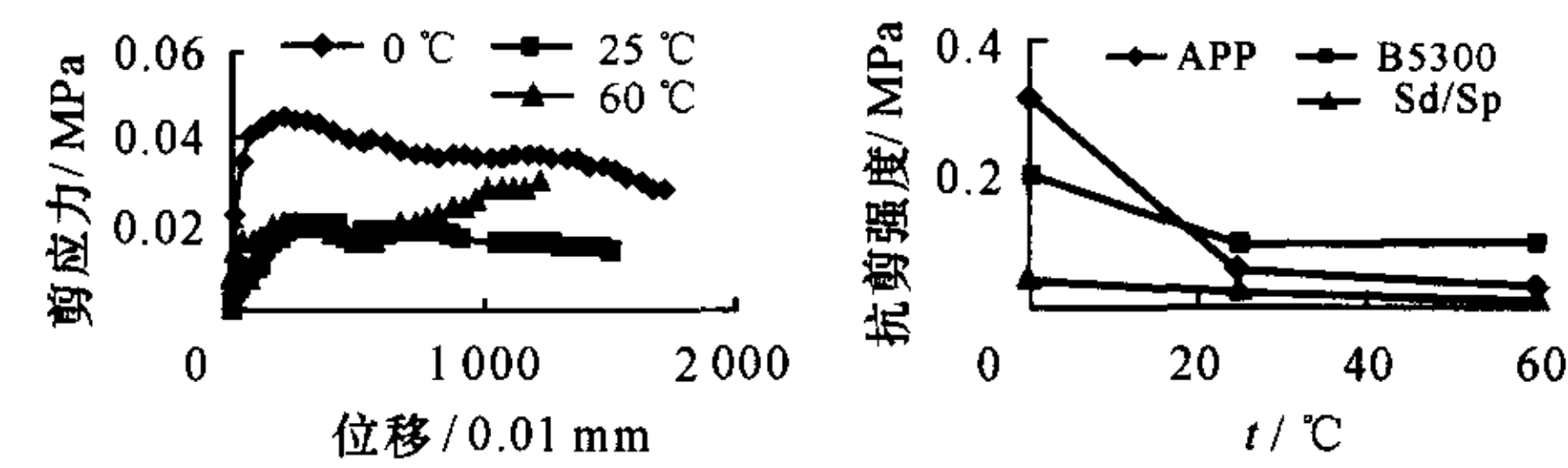


图 11 Sd/Sp 系统不同温度  
剪变特性

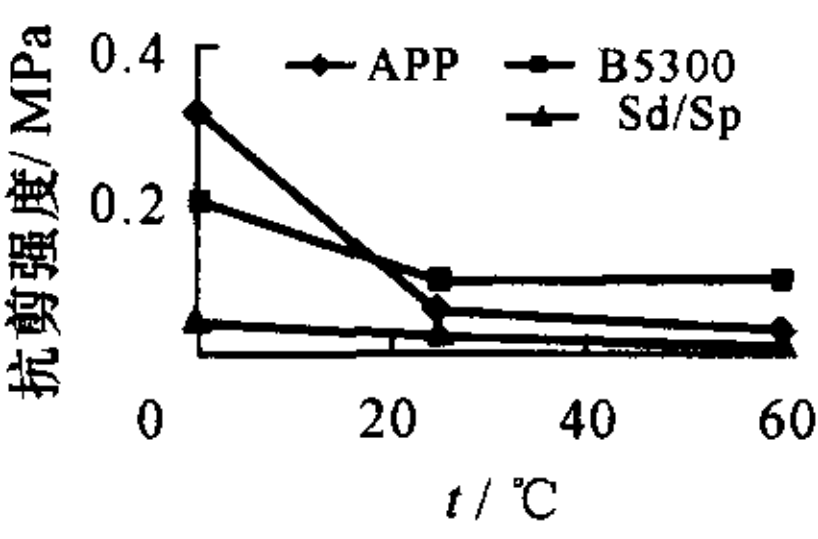


图 12 3 种卷材抗剪强度  
随温度变化曲线

表 2 APP 卷材不同垂直压力下的层间抗剪强度

垂直压力 $\sigma_z$ /MPa	0.05	0.10	0.20	0.30
抗剪强度 $\tau_{\max}$ /MPa	0.038 0	0.040 9	0.044 2	0.046 4

线性增长。假设桥面铺装层间接触面上的材料近似颗粒性材料,根据摩尔-库仑强度理论,其层间抗剪强度构成主要来自两个方面,防水层与面层、桥面之间粘聚力和由于骨料嵌锁进防水层表面所引起的内摩阻力( $\sigma_z \tan \varphi$ )。因此,层间抗剪强度可表示为

$$\tau_{\max} = f(c, \varphi) = c + \sigma_z \tan \varphi \quad (2)$$

其中, $c$ 为粘聚力(MPa),与剪切速率有关; $\varphi$ 为内摩擦阻角( $^\circ$ ),与层间接触状况有关。当剪应力  $\tau \leq c + \sigma_z \tan \varphi$  时,认为层间不发生剪切破坏。由式(1)可知

$$c_{\text{APP}} = 0.037\ 1, \varphi_{\text{APP}} = \arctan 0.032\ 7 = 1.87^\circ$$

2.4 剪切速率对层间抗剪强度的影响

针对 APP 卷材改变剪切速率进行直剪试验,试验结果见表 3,数据回归方程见式(3)。

表 3 APP 卷材不同剪切速率下的层间抗剪强度

剪切速率 $V$ / (mm · min <sup>-1</sup> )	3.5	7.0	10.0	20.0	28.0	50.0
抗剪强度 $\tau_{\max}$ /MPa	0.044 2	0.052 8	0.082	0.159 7	0.171 5	0.259 8

$$\tau_{\max} = 0.016 V^{0.72} \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

由式(3)知,随着剪切速率  $V$  的增大,层间抗剪强度  $\tau_{\max}$  呈幂函数变化规律。

3 标准轴载下 APP 卷材抗剪强度

当水泥混凝土桥面的沥青混凝土铺装层厚度为 5 cm 时,根据文献[6],将行车速度换算成剪切速率,见表 4。

表 4 不同行车速度对应的剪切速率

车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	120	100	80	70	60	50	40	30
$V$ / (mm · min <sup>-1</sup> ) (取整)	433 (400)	354 (350)	278 (300)	243 (250)	205 (200)	169 (150)	139 (150)	102 (100)

在式(2)中,只有  $c$  值与剪切速率有关,故可认为随着剪切速率的增加, $\tau_{\max}$  增大仅由  $c$  引起,APP

卷材  $c$  值的变化见表 5。

表 5 APP 卷材不同剪切速率下的粘聚力值

剪切速率 $V$ / (mm · min <sup>-1</sup> )	3.5	7.0	10.0	20.0	30.0	50.0
粘聚力 $c$ /MPa	0.032 9	0.058 5	0.077 5	0.131 8	0.169 7	0.261 0

根据表 5 数据建立回归方程

$$c = 0.012\ 7V^{0.78} \quad (R^2 = 1.0) \quad (4)$$

引进剪切速率修正系数  $K_v$ ,定义为任意剪切速率下层间粘聚力  $c_v$  与剪切速率为 3.5 mm/min 时层间粘聚力  $c_{3.5}$  之比<sup>[7-8]</sup>,即

$$K_v = c_v / c_{3.5}$$

根据式(4)及表 4,计算不同行车速度下  $c$  的修正系数  $K_v$  值,见表 6。

表 6 APP 卷材不同行车速度的  $K_v$  取值

车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	120	100	80	70	60	50	40	30
修正系数 $K_v$	40.29	36.31	32.19	27.92	23.46	18.74	18.74	13.66

由直剪试验结果知,APP 卷材 60 °C 时的抗剪强度接近 25 °C 抗剪强度的 1/2。考虑夏季高温最不利状况,应以 60 °C 抗剪强度确定层间抗剪强度。综合考虑温度、垂直荷载、剪切速率等影响因素,可用式(5)表示路面实际行车荷载作用下的层间抗剪强度  $\tau_{\max}$

$$\tau_{\max} = K_t(K_v c + \sigma_z \tan \varphi) \quad (5)$$

式中: $K_t$  为试验温度修正系数,取 0.29; $K_v$  取值见表 6; $\sigma_z$  一般取 0.7 MPa。

利用式(5)计算出在 BZZ-100 标准轴载作用下,对应于不同行车速度 APP 防水层的层间抗剪强度值,结果见表 7。

表 7 不同车速下 APP 防水卷材层间抗剪强度

车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	抗剪强度 $\tau_{\max}$ /MPa	车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	抗剪强度 $\tau_{\max}$ /MPa
120	0.440 1	60	0.259 0
100	0.397 3	50	0.208 3
80	0.353 0	40	0.208 3
70	0.307 1	30	0.153 6

4 结 语

(1) 试验中试件破坏特征显示,剪切破坏发生在防水层与水泥混凝土试件之间,防水层与沥青混凝土面层之间粘结性能良好。因此,进行剪应力验算时,对卷材类材料应选择防水层与桥面板之间的抗



剪强度作为验算指标。

(2)水泥混凝土表面特性对防水材料层间抗剪强度影响较大,表面粗糙度增大,有利于提高防水层与桥面的抗剪能力。但是在底涂料用量相等的情况下,APP 卷材混凝土表面太光滑或过于粗糙都不利于提高层间抗剪强度,因此实际工程中对桥面的预处理工作相当关键。另外,水泥混凝土表面特性对较厚的 APP 卷材影响较小,对较薄的 APP 卷材影响较大。

(3)3 种防水卷材对温度变化的敏感性不同。随着温度的升高,材料与混凝土表面间的抗剪能力逐渐降低。考虑到夏季高温最不利状况,建议以 60℃抗剪强度作为验算指标。

(4)利用试验数据,综合考虑温度、垂直荷载、剪切速率等影响因素,计算出在标准轴载、不同车速作用下 60℃时 APP 防水材料层间抗剪强度,可以用来指导混凝土桥面的设计与施工。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张占军,胡长顺,王秉纲.水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构设计方法研究[J].中国公路学报,2001,14(1):56-59.  
ZHANG Zhan-jun, HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Research on the design method of asphalt concrete pavement for concrete bridge deck structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 56-59.
- [2] 张占军,周庆华,胡长顺,等.桥面防水层 90°剥离仪的开发及实验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):35-39.  
ZHANG Zhan-jun, ZHOU Qing-hua, HU Chang-shun, et al. Testing and developing of 90°peel apparatus for concrete bridge deck waterproofing layer[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 35-39.
- [3] 裴建中.桥面柔性防水材料技术性能研究[D].西安:长安大学,2001.  
PEI Jian-zhong. Study on performance of flexible waterproofing material for concrete bridge deck[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.
- [4] 陈拴发,王秉纲.高性能混凝土应力腐蚀评价指标[J].交通运输工程学报,2005,5(1):6-10.  
CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang. Stress-corrosion-evaluation indices of high-property-concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 6-10.
- [5] 裴建中,胡长顺,王祥鲁.建筑防水材料用作桥面防水的可行性分析[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(6):29-32.  
PEI Jian-zhong, HU Chang-shun, WANG Xiang-lu. Application of waterproofing materials for building to concrete bridge decks[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(6): 29-32.
- [6] 张占军.混凝土桥桥面防水系统性能及设计方法研究[D].西安:长安大学,2004.  
ZHANG Zhan-jun. Research on performance and design method of waterproofing system on concrete bridge decks[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [7] 马 磊,莫石秀,王秉纲.基于剪切性能的级配碎石关键筛孔合理范围确定[J].交通运输工程学报,2005,5(4):27-31.  
MA Biao, MO Shi-xiu, WANG Bing-gang. Rational range determination of key sieve pores for graded crushed stone based on shear performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 27-31.
- [8] 朱贤明,雷俊卿.路桥用 APP 防水卷材的防水机理分析与应用[J].公路交通技术,2004,(6):46-50.  
ZHU Xian-ming, LEI Jun-qing. Mechanism analysis and application of atactic polypropylene (APP) asphalt waterproof rolls for highways and bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2004, (6): 46-50.