

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2011.05.016

# 同步碎石封层桥面防水黏结层温度敏感性研究

李志栋<sup>1,2</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 陈广秀<sup>3</sup>, 陈小雪<sup>2</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 河南省高远公路养护技术有限公司, 河南 新乡 453000;

3. 辽宁省朝阳市统计局, 辽宁 朝阳 122000)

**摘要:** 为使水泥混凝土桥面碎石封层防水黏结层在不同温度下的黏结强度和抗剪强度有可比性, 首先采用温度模型对气温、桥面及防水黏结层温度差异性进行对比; 其次, 对该防水黏结层强度最大化配比设计及其黏结、抗剪强度对不同温度条件敏感性进行分析。研究表明: 1.2 kg/m<sup>2</sup> SBS 改性沥青与 8 kg/m<sup>2</sup> 7~9.5 mm 碎石时防水黏结层强度最大; 黏结层、桥面温度分别平均高出气温 10℃、17℃, 层间强度对温度极为敏感, 同一气温对应的黏结层温度以及桥面温度下检测的强度下降 38%~80%, 应采用防水黏结层温度作为检测温度。最后, 回归防水黏结层黏结、直剪、扭转剪切强度的理论模型, 提出  $K_i$  强度修正系数, 并通过建立  $P_{25}$  强度修正模型将不同温度下强度换算成 25℃ 标准强度值。

**关键词:** 水泥混凝土桥面; 同步碎石封层; 防水黏结层; 黏结强度; 抗剪强度; 修正模型; 温度敏感性

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2011)05-0957-08

## On Modified Temperature Model for Synchronous Chip Seal Waterproof Binder Course on the Concrete Bridge

LI Zhi-dong<sup>1,2</sup>, HUANG Xiao-ming<sup>1</sup>, CHEN Guang-xiu<sup>3</sup>, CHEN Xiao-xue<sup>2</sup>

(1. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Henan Gaoyuan Maintenance Technology of Highway Co., Ltd., Xin xiang 453000, Henan, China;

3. Statistic Bureau of Chaoyang City Liaoning Province, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

**Abstract:** To make bonding and shear resistance strength of synchronous chip seal waterproof binder course under different temperature comparable, the difference of air temperature, deck and waterproof binder course temperature, the design of waterproof binder course and the sensitivity of the strength to the different temperature was studied. It showed that the strength was maximal when asphalt and chip is 1.2 kg/m<sup>2</sup> and 8 kg/m<sup>2</sup>; the strength between courses was sensitive to the temperature and the detected strength under the binder temperature and deck temperature corresponding to the same reduced by 38% to 80%, therefore the strength should be detected under the waterproof binder course temperature. Finally, the correlation coefficient  $R^2$  of calculation model of the binder, direct, torsion strength established was above 0.94; After re-gressing theoretical model of binding, direct shear, and torsion shear intensity of waterproof binder course, modified coefficient  $K_i$  was proposed; the strength under different temperature could be converted to the standard strength below 25℃ by the establishing of  $P_{25}$  modified model of the temperature.

**Key words:** concrete bridge deck; synchronous chip seal; waterproof binder course; bonding strength; shear resistance strength; modified model; temperature sensitivity

截至 2010 年底, 全国公路桥梁达 65.81 万座、3 048.31 万 m, 其中 2 051 座特大桥梁及 49 489 座大桥<sup>[1]</sup>中铺筑沥青铺装层的水泥混凝土桥梁占相当比例。但不论水泥混凝土桥梁, 还是钢桥梁, 其桥面铺装往往都不能令人满意, 其中水损坏成为了早期损坏的通病, 其原因除了因桥面水泥混凝土层施

工质量不够、桥面板平整度不好、水泥混凝土潮湿引起水汽鼓包以及融雪剂腐蚀等原因之外, 最根本的是桥面板和铺装层之间的防水性和黏结性不够。

因此, 随着 SBS 同步碎石封层防水黏结层越来越广泛的应用, 很有必要对其作用及检测评价标准进行分析和探讨, 以便对设计、施工、检测进行规范、统一。

收稿日期: 2011-06-01; 修订日期: 2011-07-05

基金项目: 河南省重大科技攻关计划(国际科技合作)项目(084300510016)

作者简介: 李志栋(1973-), 男, 辽宁朝阳人, 工程师, 博士研究生, 主要从事交通运输工程研究。E-mail: gy\_lizhidong@163.com。

# 1 桥面防水层黏结层应用现状

## 1.1 防水黏结层及其强度标准

防水黏结层系指为了防止雨水、雪水以及其他用水渗入桥面并保证桥面与铺装层的整体性而在桥面与铺装层之间铺筑的起到防水与黏结作用的材料层,其剖面图如图1。这个概念真正出现在《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[2]</sup>中,体现了黏结与防水作用并举。



图1 水泥混凝土桥面铺装层结构层组合(结构层+功能层)

Fig.1 Structure composites of cement concrete bridges deck surfacing

我国在交通、建材行业方面制定了一系列标准,热融沥青碎石、玛蹄脂、卷材、稀浆封层等不同种类防水黏结层的强度在检测标准中提到如表1。

表1 相关标准的防水(黏结)层技术要求

Tab.1 Technology request of waterproof (binder) course in the correlative specification

标准	定义	强度或要求	
		黏结强度/MPa	抗剪强度/MPa
JC/T 974—2005 <sup>[3]</sup>	道桥用改性沥青防水卷材	50℃时, ≥0.12	50℃时, ≥0.12
JC/T 975—2005 <sup>[4]</sup>	道桥用防水涂料	50℃时 ≥0.05	50℃时 ≥0.15
JT/T 535—2004 <sup>[5]</sup>	路桥用水性沥青基防水涂料	20℃ <sup>[13]</sup> 时 ≥0.40 <sup>①</sup>	60℃时 ≥0.16
JT/T 536—2004 <sup>[6]</sup>	路桥用塑性体(APP)沥青防水卷材	—	60℃时: ≥2.0(I型) ≥2.5(II型)
JTG F 40—2004 <sup>[2]</sup>	防水黏结层	严禁潮湿洒布,洒布完立刻洒布3~5mm石屑	
JTG D 50—2004 <sup>[7]</sup>	防水层	卷材: >0.4 <sup>②</sup>	卷材: >2.5 <sup>②</sup> 其他: >0.4 <sup>②</sup>
JTG D 60—2004 <sup>[8]</sup>	防水层	黏结密实牢固	
JTG F 80/1—2004 <sup>[9]</sup>	防水层	≥设计要求且 0.3 <sup>③</sup> , ≥0.2 <sup>④</sup>	≥设计要求且 ≥0.4 <sup>③</sup> , ≥0.3 <sup>④</sup>
CJJ11—93 <sup>[10]</sup>	柔性防水层	产生负弯矩桥面顶部	
CJJ2—2008 <sup>[11]</sup>	防水卷材、涂料	应符合现行标准和设计要求	

注:①JC/408—2005水乳型沥青防水涂料已代替JC/408—1991,并将20℃温度改为标准温度条件(23±2)℃;②只对特大桥、重要大桥提出强度要求;③常温条件下;④气温≥35℃条件下。

## 1.2 防水黏结层优劣性能对比

防水黏结层分为柔性防水黏结层和刚性防水黏结层,而常用于水泥混凝土桥面的柔性防水黏结层主要有聚合物改性沥青、聚氨酯、聚合物水泥、沥青砂、玛蹄脂、稀浆封层、热融沥青碎石等柔性类,不同防水黏结层与不同类型下面层组合成的防水体系的使用效果<sup>[7]</sup>如表2。

表2 不同桥面防水体系的抗剪、黏结能力对比

Tab.2 Contrast on of the ability of shear resistance and binder of the different bridges deck' waterproof system

下面层	防水体系优劣			
	最好	其次	次之	最后
AC	AC + SMA ≈ AC + CS	AC + ES	AC + JC	
SMA	SMA + ES	SMA + SMA ≈ SMA + CS	SMA + JC	
GAC	SMA	CS ≈ JC	—	

防水层代号: ES—稀浆封层; CS—热融沥青碎石; JC—卷材; SMA—沥青玛蹄脂; GAC—浇注式沥青混凝土。

## 1.3 对比分析

对表1、表2所列标准进行分析可知:

1) 交通、建材及城镇建设3个行业标准对同样或类似材料的定义、技术要求、试验条件差异较大,比如交通标准的卷材类抗剪强度是建材标准要求的17倍。尤其不同行业对同一强度检测却提出常温、标准温度50℃、60℃等不同气温条件。

这都将使得检测强度没有可比性,因为沥青在不同温度下呈现黏弹特性不同,其劲度模量是温度和时间函数的函数<sup>[12]</sup>,其黏结强度与抗剪强度的大小将对温度条件最为敏感。

2) 同属交通行业标准,但设计(桥涵、沥青路面)、施工、验收规范的技术要求相互矛盾。

3) 从定义沿革看,防水黏结层经历从无到有和由单纯防水到防水、黏结二者兼顾的发展过程。

4) 公路桥涵设计通用规范仅规定铺装层最小厚度,却未提及防水黏结层设计及检测标准。

5) SBS改性沥青同步碎石封层是一种热融型碎石封层,与其他防水层相比,具有施工方便、性能优越等特点,具有如下作用:

①足够洒布量SBS改性沥青密不透水,能够防止水分下渗桥面板、腐蚀钢筋、威胁主梁安全。

②SBS改性沥青黏结性能良好,能够使沥青混凝土铺装层与桥面板成为一个受力整体,不在铺装层与桥面板之间出现滑动面。

③碎石封层一个由SBS改性沥青和碎石共同构成的弹性胶状板体,具有良好的协调变形能力。

当桥面板在温度变化或行车荷载作用下发生水平剪切变形和竖向位移时,防水黏结层可以吸收部分剪应力且减少相对位移,从而起到应力吸收作用。

## 2 不同条件防水黏结层温度差异性

### 2.1 铺装层不同深度处温度计算模型对比

桥面的温度场是随着环境温度变化而变化的,高温季节,桥面高出气温 15~17℃(且高出路表 5~7℃,所以在表 3 中对路面模型 I、路面模型 II 计算的温度进行 +6℃修正),低温季节,桥面最低温度高出气温 3~4℃<sup>[13]</sup>。因桥面底部、侧面都与环境直接接触,对升温、降温都很敏感,其最高温度将高于路面最高温度,其最低温度低于路面最低温度。但是,对于水泥混凝土桥面铺装层,其黏结强度、抗剪强度对夏季高温最为敏感。

下面将分别采用式(1)、式(2)的沥青路面不同深度温度计算模型以及式(3)的桥面温度计算模型对上海地区的桥面温度进行计算对比,结果见表 3,计算参数见表 4。

表 3 不同计算模型计算桥面顶面和 90 mm 铺装层底温度

Tab. 3 Temperature of deck surfacing and 90 mm depth below the overlay by the different model

计算模型	路面模型 I	路面模型 II	桥面模型 III
桥面温度/℃	44.6	45.6	51.2
+6℃修正后	50.6	51.6	—
90 mm 深度温度/℃	37.7	38.8	—
+6℃修正后	43.7	44.8	—

表 4 上海市 2010 年 7 月 1 日 14 时桥面温度计算参数

Tab. 4 Calculation parameter of bridge deck temperature at 14:00 on July 1st in 2010

H/mm	$T_{a \max} = T_a / ^\circ\text{C}$	$L_{at} / (^\circ)$	5 h 前平均气温/℃	$T_m / ^\circ\text{C}$
90	35	31.2	31.5	15.7

注:铺装层厚度 70 mm;历年月均气温为 1951—2009 年。

#### 1) 简化预估模型( I )<sup>[14]</sup>:

$$T_h = b_1 + b_2 T_{a5} + b_3 T_a h + (b_4 h + b_5 h^2 + b_6 h^3) + b_7 T_m \quad (1)$$

式中:  $T_h$  为沥青路面  $h$  深度处的温度,℃;  $T_a$  为当前气温,℃;  $T_{a5}$  为此前 5 h 平均气温,℃;  $h$  为距离路表深度,cm;  $T_m$  为地区修正系数,即历年月平均气温,℃;  $b_1 \sim b_7$  为回归系数: -0.425, 1.239, -0.023, -1.357, 0.172, -0.006, 0.408。

#### 2) 日最高温度预估模型( II )<sup>[15]</sup>:

$$T_{P \max} = m_1 + m_2 T_{a \max} + m_3 T_{a \max} h + (m_4 h + m_5 h^2 + m_6 h^3) + m_7 T_m \quad (2)$$

式中:  $T_{P \max}$  为沥青路面某一深度  $h$  处的日最高温度,℃;  $T_{a \max}$  为日最高气温,℃;  $h$  为距离路表深度,

cm;  $T_m$  为地区修正系数,即历年月平均气温,℃;  $m_1 \sim m_7$  为回归系数: 3.040, 0.994, -0.007, -1.676, 0.201, -0.008, 0.498。

#### 3) 桥面最高温度模型( III )<sup>[13]</sup>:

$$T_{q \max} = -0.005 1 T_{a \max}^3 + 0.528 2 T_{a \max}^2 - 17.165 T_{a \max} + 224.26 \quad (3)$$

式中:  $T_{q \max}$  为水泥混凝土桥面沥青铺装层最高温度,℃;  $T_{a \max}$  为日最高气温,℃。

3 个模型计算的桥面最高温度为 51.6℃, 90 mm 深度处最高温度为 44.8℃。另外,桥面模型 III 计算的温度和路面模型 I、路面模型 II 计算的温度很接近,并且不需要修正,所以模型 III 更适合桥面温度的计算,而路面模型 I、路面模型 II 更适合桥面 90 mm 深度温度计算。

### 2.2 检测层间强度的温度条件不合理性分析

如前所述,不同标准的黏结强度要求温度最大相差 30℃,抗剪强度最大相差 40℃。当气温为 35℃时(恰好为评定标准<sup>[9]</sup>中强度合格与否的分界气温),由不同模型计算得到的桥面最低温度也有 50.6℃,而防水黏结层处的最低温度为 43.7℃。桥面温度至少高出气温 15.6℃,高出防水黏结层处温度 6.9℃,而防水黏结层处温度至少高出气温 8.7℃。由此说明:

1) 标准规定室内检测黏结强度和抗剪强度时采用环境温度代替防水黏结层的温度基本合理。但是,当现场检测桥面层间强度时,由于传导、对流、辐射等综合作用,将导致防水黏结层温度和气温相差较大,所以,检测温度的条件建议采用防水黏结层处的温度。

2) 因不同黏结料的黏弹特性是不同的,所以《验收标准》<sup>[9]</sup>中规定的不同防水黏结材料均在 35℃或常温条件满足同一标准是不合理的。

3) 由于同一种沥青类材料在不同温度条件下黏弹特性是不同的,所以《验收标准》<sup>[9]</sup>不能规定 35℃以上均采用同一强度标准。

4) 与室内温度环境不同,现场检测温度条件是不可控的,所以为了使现场不同温度条件下检测的黏结、抗剪强度有可比性,需通过 SBS 改性沥青同步碎石封层防水黏结层在不同温度下的强度与常温条件下的强度关系建立相应的强度修正模型。

## 3 碎石封层防水黏结层配比设计

对于 SBS 改性沥青同步碎石防水黏结层,要想保证良好的防水和黏结性能,不但需要符合设计要求的黏结材料和碎石材料以及正确的施工工艺,更重要的是要有合理的沥青、碎石(洒)撒布量。

通过成型 100 mm 厚水泥混凝土板 + 同步碎石

封层防水黏结层+50 mm AC-16 如图2的试件,对其黏结强度和抗剪强度进行检测,综合确定最佳沥青、碎石洒(撒)布量。

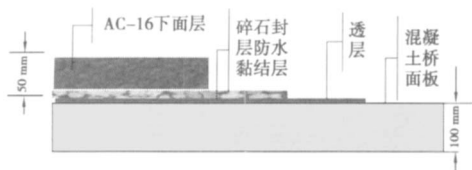


图2 桥面铺装层横剖面

Fig. 2 Transverse profiles of overlay on concrete bridge pavement

### 3.1 选择原材料及成型强度检测试件

#### 3.1.1 原材料选择

- 1) SBS 改性沥青满足《规范》<sup>[2]</sup> 要求;
- 2) 7~9.5 mm 玄武岩满足《规范》<sup>[2]</sup> 要求;
- 3) 沥青混凝土铺装层: AC-16;
- 4) 水泥混凝土桥面板: C30。

#### 3.1.2 成型拉拔试验及剪切试验试件

1) 制备强度为 C30、100 mm 厚、300 mm × 300 mm 的水泥混凝土试件,标准条件下养生 21 d 备用,粗糙度为  $(0.5 \pm 0.1)$  mm。

2) 制备煤油: 沥青 = 4:6 的透层油,并以  $0.2 \text{ kg/m}^2$  洒布于水泥混凝土板表面,室温养生 48 h。

3) 洒(撒)布设计量的 SBS 改性沥青以及碎石,成型拉拔、剪切试件,并常温养生 24 h。

4) 加铺 50 mm 厚的 AC-16。

### 3.2 最佳碎石洒布量确定

根据施工经验,初步以  $1.2, 1.4, 1.6, 1.8 \text{ kg/m}^2$  沥青以及  $7, 8, 9, 10 \text{ kg/m}^2$  碎石成型 32 块试件,分别进行拉拔试验和剪切(直剪)试验。

#### 3.2.1 拉拔试验

将试件在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  环境中养生 4 h 后进行拉拔试验,如图3检测黏结强度,计算模型见式(4):

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为黏结强度, MPa;  $F$  为拉伸力, N;  $S$  为黏结面积,  $\text{mm}^2$ 。

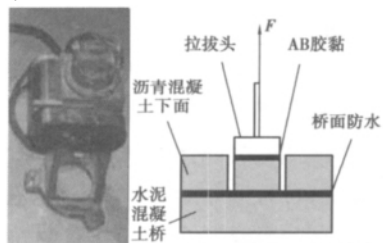


图3 拉拔试验

Fig. 3 Pull-out test

图4显示,同一碎石洒布量,黏结强度起初随沥青增多而增加,增加到  $1.6 \text{ kg/m}^2$  时开始下降。对每一沥青洒布量,黏结强度随碎石增加而先增加后下降,但均在  $8 \text{ kg/m}^2$  处出现峰值。

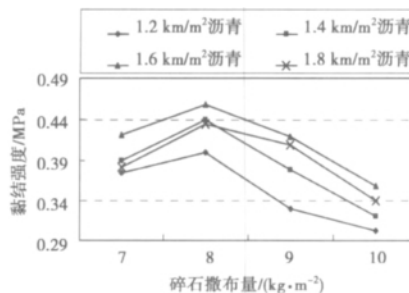


图4 不同沥青、碎石洒布量下水防黏结层黏结强度

Fig. 4 Bonding strength of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt and aggregate

#### 3.2.2 剪切试验

将试件在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  环境养生 4 h 后进行剪切试验,如图5检测抗剪强度,计算模型见式(5):

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (5)$$

式中:  $\tau$  为沿水平剪切强度, MPa;  $F$  为沿水平向剪切头施加荷载, N;  $S$  为剪切面积, 混凝土柱体底面积,  $\text{mm}^2$ 。

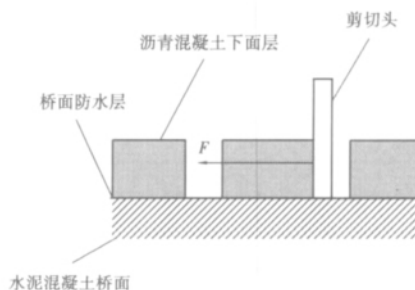


图5 剪切试验

Fig. 5 Direct shear test

图6曲线显示,当沥青增加  $1.6 \text{ kg/m}^2$  时,抗剪强度达到最大。对不同沥青洒布量,抗剪强度的峰值均出现在  $8 \text{ kg/m}^2$  处。

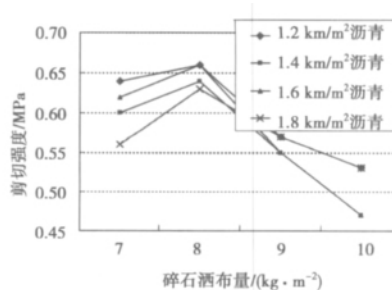


图6 不同沥青、碎石洒布量下水防黏结层抗剪强度

Fig. 6 Shear resistance strength of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt and aggregate

假设平均粒径为 8 mm,每平方米撒满碎石质量为  $1 \times 0.008 \text{ m}^3 \times 1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 12.8 \text{ kg}$ ,那么最佳撒布量为  $8.0 \text{ kg/m}^2$  时,碎石覆盖率为  $8/12.8 = 62.5\%$ 。这与施工要求的 60%~70% 基本吻合,所以确定碎石的最佳撒布量应为  $8 \text{ kg/m}^2$ 。

### 3.3 最佳沥青洒布量确定

以  $8 \text{ kg/m}^2$  为最佳碎石洒布量,分别选取 0.6, 0.9, 1.3, 1.7, 2  $\text{kg/m}^2$  沥青洒布量成型试件并进行相关试验,确定最佳沥青撒布量。

#### 3.3.1 黏结强度与沥青洒布量关系

采用与图 3 相同的拉拔试验对黏结强度进行检测。

由图 7 可知,黏结强度曲线峰值对应的沥青洒布量为  $1.449 7 \text{ kg/m}^2$ 。

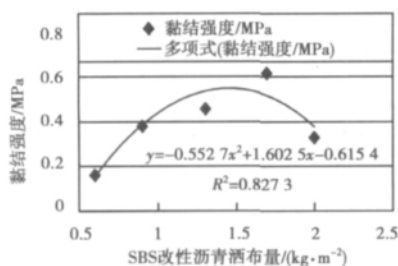


图7 不同沥青洒布量对应的防水黏结层黏结强度

Fig.7 Bonding strength of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt

#### 3.3.2 抗剪强度与沥青洒布量关系

1) 直剪试验:采用与图 5 相同的直剪试验对剪强度进行检测。

图 8 表明,直剪强度曲线峰值对应沥青洒布量为  $1.252 7 \text{ kg/m}^2$ 。

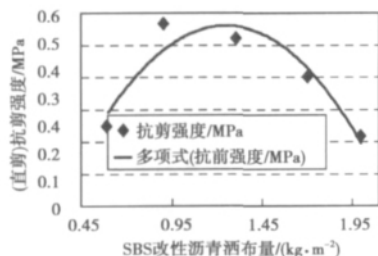


图8 不同沥青洒布量对应的防水黏结层直剪抗剪强度

Fig.8 Direct shear resistance strength of Waterproof binder course At the different spread quantities of asphalt

2) 扭转剪切试验:将试件在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  环境中养生后进行如图 9 所示扭转剪切试验,通过检测扭转产生扭距大小衡量其抗扭转剪切能力大小。

图 10 显示,扭转剪切强度曲线峰值对应沥青洒布量为  $1.194 4 \text{ kg/m}^2$ 。

3) 斜剪试验:对于有纵坡的水泥混凝土桥梁,汽车在桥面刹车制动、突然加速时,其轮胎都将对路

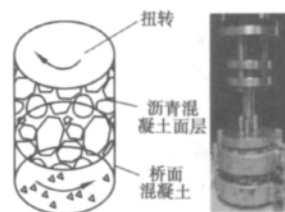


图9 扭转剪切试验

Fig.9 Torsion shear test

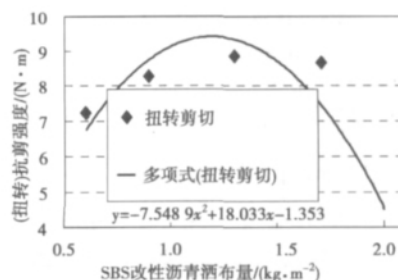


图10 不同沥青洒布量对应的防水黏结层扭转剪切强度

Fig.10 Torsion shear strength of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt

面的接触处产生较大的剪切作用,产生较大的剪应力,当剪应力超过桥面铺装层层间抗剪强度时就将发生剪切破坏。

检测汽车制动力时要求汽车制动力总和与整车重量的比例在空载时要求大于 60%,在满载时要求大于 50%<sup>[16]</sup>,所以  $\alpha$  角必须小于  $30^\circ \sim 36.8^\circ$ ,所以试验中确定为  $30^\circ$ ,如图 11。

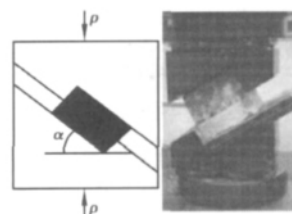


图11 斜剪试验

Fig.11 Inclined shear test

当对试件施加荷载  $F$  时,剪切面积为  $S$ ,坡度为  $\alpha$  时,试件受剪应力如式(6):

$$\tau = \frac{F}{S} \times \sin \alpha \quad (6)$$

式中: $\tau$  为沿斜面剪切强度,MPa; $F$  为荷载沿斜面的分力,即  $F \cdot \sin \alpha$ ,N; $\alpha$  为斜面夹角( $^\circ$ ); $S$  为剪切面积,  $\text{mm}^2$ 。

由图 12 可知,斜剪强度曲线峰值对应的沥青洒布量为  $1.243 7 \text{ kg/m}^2$ 。

#### 3.3.3 最佳沥青用量确定

图 13 表明,对同一沥青量,黏结强度与抗剪强度大小是不同的,但所有强度曲线峰值都出现在

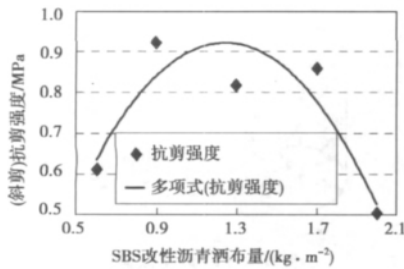


图12 不同沥青洒布量对应的防水黏结层斜剪强度  
Fig.12 Inclined shear strength of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt

1.2 kg/m<sup>2</sup>左右,所以,综合确定最佳沥青洒布量为1.2 kg/m<sup>2</sup>。

因此,同步碎石封层防水黏结层的最佳沥青、碎石洒(撒)布量分别为1.2,8.0 kg/m<sup>2</sup>,覆盖率为62.5%,并以此最优配比试验进行强度的温度敏感性分析。

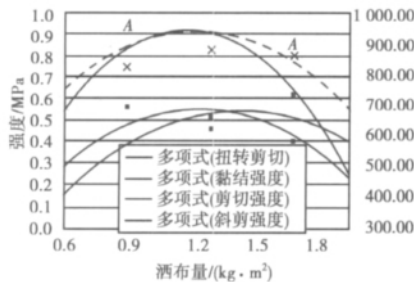


图13 不同沥青洒布量对应的不同强度曲线  
Fig.13 Different strength curve of waterproof binder course at the different spread quantities of asphalt

## 4 防水黏结层强度温度敏感性分析

### 4.1 防水黏结层层间强度实验检测

以最优配比成型试件,分别进行20,25,30,40,50,60℃的强度试验,试验结果如表5。

表5 六个不同温度下桥面防水黏结层的强度

Tab.5 Measured strength values of waterproof binder course under the six different temperature of sample surfacing

温度/ ℃	黏结强度/ MPa	剪切强度/ MPa	扭转剪切强度/ (100 N·m)
20	0.43	0.53	1.13
25	0.41	0.47	1.02
30	0.4	0.41	0.89
40	0.15	0.21	0.28
50	0.08	0.07	0.24
60	0.02	0.05	0.21

由表5可知,在常温25℃情况下剪切、黏结强度分别为0.47,0.41 MPa,但随着温度升高,强度急剧下降,而60℃时强度不到0.1 MPa。因此,同步

碎石防水黏结层的温度敏感性很强,随着温度的升高,抗剪切、黏结能力均显著降低,再次证明《验收标准》<sup>[9]</sup>中要求的气温高于35℃时均采用同一强度标准是不合理的。

### 4.2 防水黏结层层间强度的回归计算

#### 4.2.1 强度值回归模型

采用表5中间隔10℃的实测数据进行回归,得到如式(7)~式(9)不同试件表面温度下的黏结、直剪、扭转剪切强度回归计算模型。

##### 1) 黏结强度-黏结层温度回归模型

$$y = 0.00009x^2 - 0.0187x + 0.8073, r^2 = 0.9406 \quad (7)$$

式中:  $x$  为黏结层温度,℃;  $y$  为黏结强度,MPa。

##### 2) 直剪强度-黏结层温度回归模型

$$y = 0.0002x^2 - 0.0282x + 1.046, r^2 = 0.9803 \quad (8)$$

式中:  $x$  为黏结层温度,℃;  $y$  为直剪强度,MPa。

##### 3) 扭转剪切强度-黏结层温度回归模型

$$y = 0.0717x^2 - 8.8086x + 259.39, r^2 = 0.9447 \quad (9)$$

式中:  $x$  为黏结层温度,℃;  $y$  为扭转剪切强度,N·m。

#### 4.2.2 由强度回归模型计算5℃间隔的强度值

由式(7)~式(9)模型计算不同温度下的强度值,结果见表6。

表6 不同温度下防水黏结层强度的计算值

Tab.6 Calculation strength value of Waterproof binder course under the six different temperature of sample surfacing

试件表面 温度/℃	黏结强度/ MPa	直剪强度/ MPa	扭转剪切强度/ (100 N·m)
15	0.55	0.67	1.43
20	0.47	0.56	1.12
25	0.40	0.47	0.84
30	0.33	0.38	0.60
35	0.26	0.30	0.39
40	0.20	0.24	0.22
45	0.15	0.18	0.11
50	0.10	0.14	0.08
55	0.05	0.10	0.02

### 4.3 回归计算模型验证

为了验证回归模型的合理性,在室内进行了15,35,45,55℃的桥面防水层层间强度试验,并将试验检测结果与回归模型计算结果在表7进行对比。

表7 不同温度下强度实测值与理论值的比较

Tab. 7 Contrast on measured and theoretical strength value of waterproof binder course under the different temperature of sample surfacing

试件表面温度/℃	黏结强度/ MPa		剪切强度/ MPa		扭转剪切强度/ (100N·m)	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算
15	0.56	0.55	0.64	0.67	1.44	1.43
25	0.41	0.40	0.45	0.47	0.90	0.84
35	0.24	0.26	0.29	0.30	0.41	0.39
45	0.13	0.15	0.17	0.18	0.10	0.11
55	0.04	0.05	0.10	0.10	0.03	0.02

由表7可知,除55℃扭转剪切强度差较大,其余强度值偏差均小于5%,因此可知该回归计算公式是合理的。如果气温为35℃时,桥面温度近55℃,防水黏结层处温度为45℃,桥面和黏结层处的黏结强度分别下降38%、80%,直剪强度分别降低52%、66%,扭转剪切强度分别降低71%、69%。

## 5 建立强度修正系数表及修正模型

### 5.1 强度修正系数

将试件表面25℃下层间强度作为标准强度,通过强度修正系数,将其它任意现场温度下的强度值均可修正为标准强度值,修正系数计算如式(10)~式(12),计算结果见表8。

表8 不同温度的强度修正系数K

Tab. 8 Modified coefficients K of the strength under the different temperature of sample surfacing

温度/℃	20	25	30	35	40	45	50	55
$K_1$	0.85	1.00	1.21	1.54	2.00	2.67	4.00	8.00
$K_2$	0.84	1.00	1.24	1.57	1.96	2.61	3.36	4.70
$K_3$	0.79	1.00	1.28	1.71	2.29	7.64	10.50	42.00

$$K_1 = \frac{\sigma_{黏计}^T}{\sigma_{黏标}^{25℃}} \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{\tau_{直计}^T}{\tau_{直标}^{25℃}} \quad (11)$$

$$K_3 = \frac{\tau_{扭计}^T}{\tau_{扭标}^{25℃}} \quad (12)$$

式中: $K_i$ 为不同强度修正系数, $i=1$ 时为黏结强度系数, $i=2$ 时为直剪强度系数, $i=3$ 时为扭转剪切强度系数;分母为25℃下的不同强度标准值,MPa;分子为不同检测温度下的强度计算值,MPa。

### 5.2 强度修正模型

由此可建立强度修正模型,即可通过如式(13)所示模型将任意防水黏结层温度下的层间强度修正为25℃下的标准强度值,使得设计、施工的检测有

真正的可比性。

$$P_{25} = K_i \times P_T \quad (13)$$

式中: $P_{25}$ 为换算成常温25℃条件下的标准强度值,MPa; $P_T$ 为防水黏结层温度为 $T$ ℃时实测的层间强度,MPa; $K_i$ 为不同强度的温度修正值系数,当 $T$ ℃在2个温度之间时,系数采用内插法计算值。

## 6 结论

1) 水泥混凝土桥面桥面温度比气温高15~17℃,防水黏结层处温度比气温高8~10℃,不应该采用气温作强度检测温度条件,而采用防水黏结层处温度比较合理。

2) 同步碎石封层防水黏结层最优配比为SBS改性沥青最佳洒布量为1.2 kg/m<sup>2</sup>,7~9.5 mm碎石最佳撒布量为8 kg/m<sup>2</sup>;其黏结强度、直剪强度、扭转剪切强度与沥青洒布量及碎石洒布量均满足 $y = -ax^2 + bx - c$ 关系。

3) 建立了由不同温度计算黏结强度、直剪强度、扭转剪切强度的回归计算模型,且 $R^2$ 均大于0.94。

4) 提出了不同温度条件下检测强度值与25℃时标准强度值的修正系数 $K_i$ ,并建立了20~60℃范围内的强度修正系数表。

5) 建立了将不同温度条件下的检测强度修正为25℃条件下的强度修正模型,使得在不同温度下检测的强度值都有可比性。

### 参考文献(References):

- [1] 交通运输部综合规划司. 2010年公路水路交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2011-04-28) [2011-05-10]. [http://www.moc.gov.cn/zhuozhan/tongjigongbao/fenxigongbao/hangyegongbao/201104/t20110428\\_937558.html](http://www.moc.gov.cn/zhuozhan/tongjigongbao/fenxigongbao/hangyegongbao/201104/t20110428_937558.html).
- [2] JTG F 40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [3] JC/T 974—2005 道桥用改性沥青防水卷材[S]. 北京:中国建材工业出版社,2005.
- [4] JC/T 975—2005 道桥用防水涂料[S]. 北京:中国建材工业出版社,2005.
- [5] JT/T 535—2004 路桥用水性沥青基防水涂料[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [6] JT/T 536—2004 路桥用塑性体沥青防水卷材[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] JTG D 50—2004 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [8] JTG F 80/1—2004 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [9] CJJ 11—2011 城市桥梁设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [10] CJJ 2—2008 城市桥梁工程施工与质量验收规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

- [11] JC 408—1991 水性沥青基防水涂料[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 1991.
- [12] JTG D 60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [13] 侯江波. 果子沟地区路面与桥面铺装温度场研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [14] Gerald A H. Weather Database for the SUPERPAVE TM Mix Design System [R]. Washington DC: Strategic Highway Research Program, SHARP - A - 648A, National Research Council, 1994: 56 - 65.
- [15] 孙立军. 沥青路面力学行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 55 - 85.
- [16] 王涓. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装防水粘结层的性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- (上接第956页)
- [3] ASTM C441. Standard test method for effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali aggregate reaction[S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2001.
- [4] Stark D. Osmotic cell test to identify potential for alkali-aggregate reactivity[C]// Idorn G M, Rostam S. Proc. 6th Int. Conf. on Alkalies in Concrete. Copenhagen: Danish Concrete Association Publication, 1983: 351 - 357.
- [5] Barneyback R S. Alkali-silica reaction in portland cement concrete [D]. West Lafayette, Indiana, USA: Purdue University, 1983.
- [6] Struble L, Brockman M. Standard aggregate materials for alkali-silica reaction studies[C]// 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto Japan [S. N. ], 1989: 433 - 437.
- [7] Lane D S. Comparison of results from C441 and C1293 with implications for establishing criteria for ASR-resistant concrete[J]. Cement, Concrete and Aggregates, 1999, 21: 149 - 156.
- [8] ASTM C 1260—05. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates: Mortar - bar method[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: Annual Book of ASTM Standards V. 04. 02 (Concrete and Aggregates), American Society for Testing and Materials, 2005.
- [9] Davies G, Oberholster R E. Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in preventing the alkali-silica reaction [J]. Cement Concrete Research, 1987 17(1): 97 - 107.
- [10] Berube M A, Duchesne J, Chouinard D. Why the accelerated mortar bar method ASTM C1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials on suppressing expansion due to alkali-silica reactivity[J]. Cement Concrete Research, 1995, 17(1): 26 - 34.
- [11] Thomas M D A, Innis F A. Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficacy of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction [J]. Cement, Concrete, and Aggregates, 1999, 21: 157 - 164.
- [12] ASTM C1567-04. Standard test method for determining the potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate: Accelerated mortar-bar method[S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [13] 卢都友, 许仲梓, 吕忆农, 等. 快速砂浆棒法检测集料碱活性的岩石和地域局限性及改进措施[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 98 - 104.
- LU Du-you, XU Zhong-zhi, LV Yi-nong, et al. Limitations and improvements for alkali-aggregate reactivity measurement with accelerated mortar bar test [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science, 2008, 30(2): 98 - 104.
- [14] ASTM C 1293—05. Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction[S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [15] Grattan-Bellew P E, Cybanski G, Fournier B, et al. Proposed universal accelerated test for alkali-aggregate reaction: the concrete microbar test[J]. Cement, Concrete and Aggregates, 2004, 25: 29 - 34.
- [16] Touma W E, Fowler D W, Carrasquillo R L, et al. Characterizing alkali-silica reactivity of aggregates using ASTM C1293, ASTM C1260, and their modifications[J]. Transportation Research Record, 2001, 1757: 157 - 165.
- [17] Tang M S, Han S F. Rapid method for determining the preventive effect of mineral admixtures on alkali-silica reaction. [C]// Idorn G M, Rostam S. Proc. 6th Int. Conf. on Alkalies in Concrete. Copenhagen: Danish Concrete Association Publication, 1983: 383 - 386.
- [18] Criaud A, Vernet C, Defoss C. Evaluation of the effectiveness of mineral admixtures: a quick mortar bar test at 150°C [C]// Poole A B. Proc. of the 9th Int. Conf. On Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. London: Concrete Society Publication, 1992: 192 - 200.
- [19] ASTM C289—94. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregate( chemical method) [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 1995.
- [20] Mielenz R C, Greene K T, Benton E J, et al. Chemical test for alkali reactivity of pozzolans [J]. Proc. American Concrete Institute, 1952, 52: 1129 - 1144.
- [21] LIU Yan. Preventive effects of mineral admixtures on alkali-silica reaction[D]. HK: The University of Hong Kong, 2003.
- [22] 卢都友, 吕忆农, 莫祥银, 等. 国外预防碱集料反应的规范及评估方法评述[J]. 混凝土, 1999(5): 10 - 14.
- LU Du-you, LV Yi-nong, MO Xiang-yin, et al. Standards and evaluation methods for preventing AAR internationally [J]. Concrete, 1999(5): 10 - 14.