

文章编号:1671-8879(2019)01-0001-08

混凝土桥桥面铺装层间结构剪切行为

万晨光,申爱琴,郭寅川,李 鹏

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对混凝土桥桥面铺装层间结构病害多发问题,将理论计算与室内试验相结合,找出层间结构最不利剪切位置,根据最不利剪切位置节点受到的层间剪应力与压应力所呈现的特殊线性关系,给出铺装结构层间剪切评价指标,同时进行层间剪切状态关键影响因素敏感性分析,并与存在垂直压力条件的组合结构层间抗剪强度回归方程建立联系,进行桥面铺装层间结构剪切行为分析。研究表明:双矩形均布荷载作用下,层间结构最不利剪切位置是荷载作用区域沿行车方向的前端边界线;层间结构剪切状态会随荷载水平力系数的增加而迅速恶化,对于层间结构一,水平力系数 0.5 时的拟合方程斜率为 0.693,较水平力系数为 0 时的拟合方程斜率 0.342 增加了 103%,增幅十分显著;不考虑材料本身剪切破坏情况下,增加层间结构上部沥青层厚度可在一定程度上改善其剪切状态;接地压强大于 1.2 MPa 的车辆紧急刹车时,采用乳化沥青黏层的层间结构一有可能发生一次性剪切破坏;采用抛丸界面的层间结构二不会出现由于车辆超载而导致的一次性剪切破坏,而对于采用原状界面的层间结构二,接地压强为 0.85 MPa 时车辆紧急刹车即可使其处于临界破坏状态。对于重载交通下的桥面铺装,建议层间结构采用 SBS 改性沥青黏层和抛丸调平层表面处治措施。

关键词:道路工程;桥面铺装;层间结构;力学分析;抗剪强度;层间剪切行为

中图分类号:U416.01;U443.33

文献标志码:A

Interlaminar shear behavior of bridge deck pavement interlayer structure

WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, LI Peng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the problems associated with concrete bridge deck pavement structures, the most unfavorable shear position of the interlayer structure was determined, by combining theoretical calculations and laboratory testing methods. Based on the special linear relationship between the interlaminar shear stress and the compressive stress of nodes of the most unfavorable position, an interlayer shear evaluation index was proposed. A sensitivity analysis of the key influencing factors of most unfavorable shear position of the interlayer was also conducted. The relationship between the shear strength regression equation of the composite structure with vertical pressure condition was established, and the shear behavior of the bridge deck pavement was analyzed. The results show that the most unfavorable shear position of the interlayer structures is the front boundary line of the loading area, which along the traveling direction under

收稿日期:2018-09-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821165004)

作者简介:万晨光(1988-),男,河南开封人,讲师,工学博士,E-mail:610510686@qq.com。

通讯作者:申爱琴(1957-),女,陕西宝鸡人,教授、博士研究生导师,E-mail:672121381@qq.com。

the action of uniformly distributed rectangular and double loads. The shear state of the interlayer structure rapidly deteriorates with an increase in the load lateral force coefficient. For interlayer structure 1, the slope of the fitted equation is 0.693 when the horizontal force coefficient is 0.5, is an increase of 103%, as compare to when the horizontal force coefficient is 0.342, this is a very significant increase. When the pressure of a braking vehicle is more than 1.2 MPa, the interlayer structure with emulsified asphalt as an adhesive layer may be subjected to one-time shear failure. The blasting interface structure does not appear in one-time shear failure due to overloading, whereas for interlayer structure 2 with the original interface, the critical failure state occurs when the pressure is 0.85 MPa. For a bridge deck pavement under heavy traffic, the surface treatment measures of using an SBS-modified asphalt adhesive layer and a shot blasting leveling layer should be adopted. 5 tabs, 7 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; bridge deck pavement; interlayer structure; mechanical analysis; shear strength; interlaminar shear behavior

0 引言

桥面铺装的分层施工特性,使得两层沥青层之间的层间结构,以及由于材料性质存在差异的混凝土调平层与沥青铺装层之间的层间结构,成为桥面铺装结构的薄弱区域和病害多发区^[1-5]。在车辆水平荷载的反复作用下,设计、施工不合理的层间结构会提前失效,进而成为铺装结构推移、拥包等常见剪切病害的直接诱因^[6-10],层间结构寿命已成为影响桥面铺装整体结构寿命的关键制约因素^[11-14]。现阶段,中国尚未形成完善的桥面铺装结构设计理论和设计方法,对于层间结构设计,只依靠经验来选择黏层材料、调平层表面处治措施和防水黏结层材料^[2,15-16],无法通过理论计算来验证层间结构能否满足特定交通条件要求。对于铺装结构层间剪切特性,现阶段多集中于单纯的室内试验研究或基于有限元方法的力学分析研究。贾锦绣基于直剪试验分析了温度、正压力和混合料类型对铺装结构层间抗剪稳定性的影响^[10]。罗作芬等建立了双层梁层间部分连续力学模型,对不同条件下两层沥青面层层间黏结状况进行了测试^[11]。Pokorski 等将室内试验与力学分析结果相结合,对铺装结构层间剪切特性进行了分析,但其研究也仅限于将力学分析中层间最大剪应力与层间极限抗剪强度进行了简单对比^[17-19]:一方面,该方法仅分析了层间一点的剪切状态,至于该点是否为铺装结构层间最有代表性的一点,目前缺乏足够依据;另一方面,如何将层间极限抗剪强度的测试条件与力学分析中保持一致也是目前面临的难题。综合国内外研究现状,现阶段在桥面铺装层间剪切特性方面的研究普遍存在室内试

验与力学分析脱节的问题,使得研究结果与实际状况存在一定偏差。

为此,本文采用理论计算与室内试验相结合的方法,应用 ANSYS 有限元分析软件,找出桥面铺装层间结构最不利受剪位置,根据最不利剪切位置水平向剪应力和法向压应力存在的特殊线性关系,提出层间剪切状态评价指标,进行车辆荷载、结构层厚度等关键影响因素的敏感性分析,并与室内试验中不同组合结构层间抗剪强度与垂直荷载的线性关系建立联系。该研究成果可为特定交通条件下桥面铺装层间结构的设计提供理论依据,同时也可为桥面铺装结构设计理论的完善提供参考。

1 层间结构最不利剪切位置

1.1 计算参数与计算模型

以铜黄(铜川—黄陵)高速公路沮河大桥为研究对象,选取中跨跨中 13 m 梁段建立模型^[16,20],模型高度为 3.50~3.54 m,模型各部位尺寸如图 1 所示,在模型两端施加对称约束的简化边界条件^[13]。模型网格划分通过反复试算确定,梁体结构划分较粗,铺装结构划分较细,同时对铺装结构荷载作用区域进行局部网格加密。采用 18.8 cm×18.8 cm 的正方形均布荷载加载,荷载中心距 32 cm,荷载值取《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60—2015)规定的公路一级荷载 140 kN;通过比利时轮压与轴载经验公式^[21]确定接地压强为 0.85 MPa,荷载作用在横向最不利受力位置^[22],沿纵桥向施加在模型的中间部位。

铜黄高速公路的典型桥面铺装结构为:4 cm SMA-13 沥青混凝土+6 cm AC-20C 沥青混凝土+

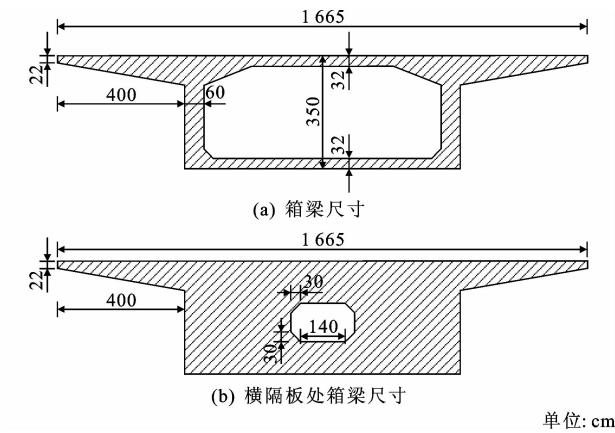


图 1 模型各部位尺寸

Fig. 1 Dimension of each part of the model

10 cm C40 钢筋混凝土,主梁梁体为 C50 预应力混凝土。模型各部材料参数和所用单元如表 1 所示,其中沥青类材料参数是在 25 ℃ 条件下测得^[22]。

表 1 模型各部位材料参数取值及单元

Tab. 1 Elements and parameters of different structural materials			
结构材料	模量/MPa	泊松比	单元类型
沥青上面层	957	0.350 0	Solid185
沥青下面层	1 068	0.350 0	Solid185
混凝土调平层	32 500	0.166 7	Solid65
主梁	34 500	0.166 7	Solid65

1.2 层间结构最不利剪切位置

为考虑最不利条件下层间结构受力,荷载水平力系数取紧急制动下的 0.5^[21],由于桥面铺装结构层间抗剪强度与垂直荷载成线性正相关关系^[23-24],因此,层间结构受剪状态不仅与该位置受到的水平向剪应力有关,还与竖向压应力有关,即层间结构最不利剪切位置并不是所受层间剪应力最大位置,还与其受到的压应力有关^[25]。为此,提取桥面铺装 2 个层间结构所有节点受到的合成水平剪应力 τ_s 和压应力 σ_y ,如图 2 所示。其中层间结构一为两层沥青的层间结构,层间结构二为沥青层与混凝土调平层的层间结构。为清晰表示散点位置分布规律,图中给出了散点群的外轮廓线。

由图 2 可知,层间结构一、结构二散点具有相似 的分布规律,散点群外轮廓线均由近似通过点(0,0) 的直线和近似圆弧线组成,且直线外轮廓线有很高 的线性拟合度。在一定范围内,桥面铺装结构受到 的垂直荷载越大,对应的层间抗剪强度就越大。因 此,对于受压应力相同的层间节点,其受到的剪应力 越大,发生剪切破坏的可能性就越大,对应位置的受 剪状态就越不利。所以,直线外轮廓线附近的节点 是层间结构所有受剪最不利节点的集合。为找到受

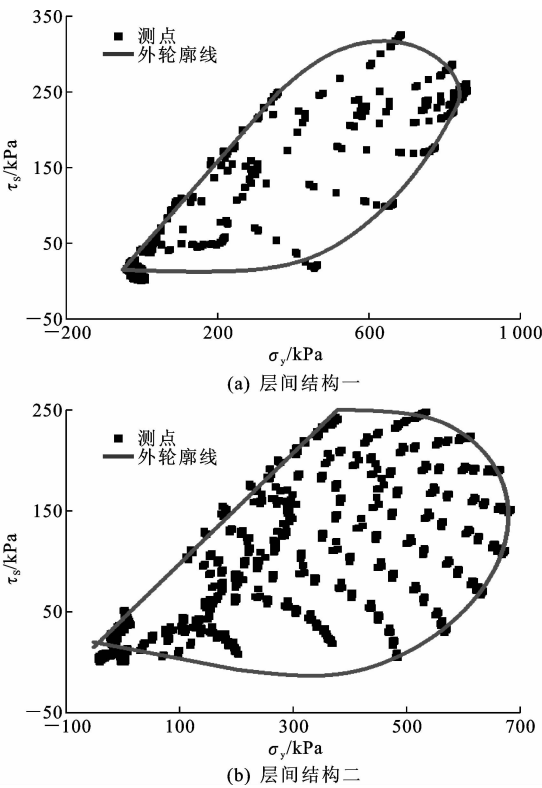


图 2 节点合成水平剪应力与压应力关系

Fig. 2 Relationships between synthetic horizontal shear stress and compressive stress

剪最不利节点在层间结构所处位置,在均布荷载内 部及其周围取 10 条路径,各路径位置如图 3 所示。

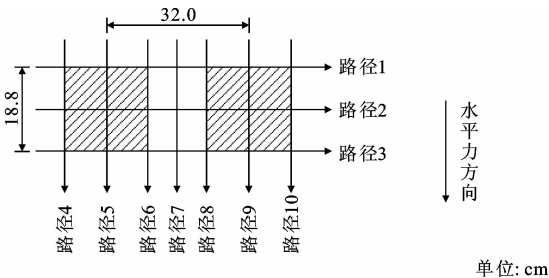


图 3 路径位置分布

Fig. 3 Paths distributions

分别提取、计算各路径上节点受到的水平向剪 应力和压应力,绘制 τ_s - σ_y 散点分布图并拟合,见图 4,并与图 2 中的直线外轮廓线进行对比,发现路径 5、路径 9 沿水平方向前半部分的节点拟合曲线与直 线外轮廓线基本吻合。因此,可以认为该区域节点 层间结构所有节点为首先发生剪切破坏的节点集 合,即该位置是层间结构最不利剪切位置。

由于拟合曲线截距数值较小,对层间结构剪切 状态的影响有限,故层间结构的剪切状态主要通过 拟合曲线的斜率来表征;拟合曲线斜率越大、越接近 层间结构抗剪强度拟合曲线斜率,层间剪切状态越

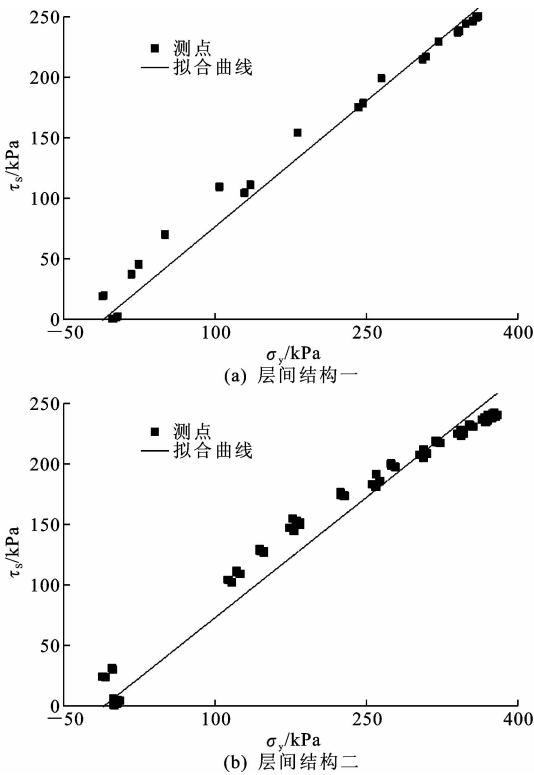


图 4 节点合成水平剪应力与压应力拟合曲线
Fig. 4 Fitting lines of synthetic horizontal shear stress and compressive stress

不利,层间结构发生剪切破坏的可能性就越大。

2 层间结构剪切状态敏感性分析

2.1 接地压强的影响

从接地压强(0.7~1.2 MPa)中选取 6 个等级进行层间结构剪切状态分析,荷载水平力系数取 0.5。设层间结构最不利剪切位置节点受到的合成剪应力与压应力拟合曲线方程 $y=a+bx$,其中 a 为截距, b 为斜率, x 为法向压应力, y 为不同法向压应力对应的层间合成剪应力, R^2 为判定系数。表 2 为不同接地压强下拟合曲线方程的特征参数。

由表 2 可知:在水平力系数不变条件下,不同接地压强等级下层间结构一的拟合曲线斜率 b 基本保持不变;虽然拟合方程参数变化不大,但层间结构最不利剪切位置的最大压应力 x_{\max} 是随接地压强的增加而增加,因此其对应的最大剪应力 y_{\max} 也是不断增加的,如接地压强 1.2 MPa 比 0.7 MPa 下的最大剪应力 y_{\max} 增加了 71%。

与层间结构一类似,层间结构二的剪切状态也具有相似的变化规律,但层间结构二拟合方程斜率小于层间结构一,说明在相同压应力条件下,层间结构一会受到更大的水平剪应力;同时,在相同接地压

强下,层间结构二会受到更大压应力,其原因是刚性水泥混凝土材料可为层间结构二提供更好的支承作用。

表 2 不同接地压强的拟合方程特征参数
Tab. 2 Characteristic parameters of fitting equation under different load conditions

层间结构	特征参数	不同接地压强(MPa)下的特征参数值					
		0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
结构一	a	5.412	6.184	6.957	7.730	8.503	9.275
	b	0.693	0.693	0.693	0.693	0.693	0.693
	R^2	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987
	x_{\max}/kPa	298.0	340.6	383.1	425.6	468.2	510.7
	y_{\max}/kPa	212.2	242.2	272.5	302.7	333.0	363.3
结构二	a	5.134	5.758	6.471	7.303	7.934	8.645
	b	0.661	0.661	0.661	0.660	0.660	0.660
	R^2	0.986	0.986	0.984	0.986	0.987	0.985
	x_{\max}/kPa	312.7	356.9	401.4	446.4	490.8	535.8
	y_{\max}/kPa	211.8	241.7	271.8	301.9	331.9	362.3

2.2 水平力系数的影响

为模拟车辆在不同行驶状态下对铺装结构的作用,在保持 0.85 MPa 接地压强条件下,分别取 6 个水平力系数等级对层间结构的剪切状态进行分析。表 3 为不同水平力系数下拟合曲线方程的特征参数。

表 3 不同水平力系数的拟合方程特征参数
Tab. 3 Characteristic parameters of fitting equation under different transverse force coefficients conditions

层间结构	特征参数	不同水平力系数下的特征参数					
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
结构一	a	2.784	3.282	4.050	4.882	5.728	6.571
	b	0.342	0.425	0.501	0.570	0.634	0.693
	R^2	0.980	0.985	0.987	0.987	0.987	0.987
	x_{\max}/kPa	290.9	305.1	319.3	333.5	347.6	361.8
	y_{\max}/kPa	102.2	133.0	163.9	195.0	226.2	257.3
结构二	a	4.116	4.548	4.969	5.370	5.754	6.117
	b	0.451	0.505	0.550	0.592	0.628	0.661
	R^2	0.977	0.976	0.982	0.984	0.985	0.985
	x_{\max}/kPa	291.5	309.2	326.7	344.5	361.8	379.3
	y_{\max}/kPa	135.6	160.7	184.7	209.3	233.0	256.8

由表 3 可知:随着水平力系数的增加,层间结构一最不利剪切位置拟合曲线斜率呈增加趋势,水平力系数为 0.5 时拟合曲线的斜率为 0.693,较水平力系数为 0 时的斜率 0.342 增加了 103%,说明当车辆加减速或紧急刹车时,层间结构一剪切状态会迅速恶化。同时,随着水平力系数的增加,层间结构一最不利剪切位置受到的最大压应力和最大剪应力也不断增加,水平力系数为 0.5 时最大压应力和剪

应力分别为 361.8 kPa 和 257.3 kPa,较水平力系数为 0 时的 290.9 kPa 和 102.2 kPa 分别增加了 24% 和 152%,剪应力增幅远大于压应力增幅。

层间结构二剪切状态随水平力系数增加的变化规律与层间结构一相似,水平力系数为 0.5 时拟合方程斜率为 0.661,较水平力系数为 0 时的斜率 0.451 增加了 47%,增幅远小于层间结构一的增幅(103%)。同时,最不利剪切位置受到的最大压应力和最大剪应力也随着水平力系数的增加而增加,水平力系数为 0.5 时最大压应力和剪应力分别为 379.3 kPa 和 256.8 kPa,较水平力系数为 0 时的 291.5 kPa 和 135.6 kPa 分别增加了 30% 和 89%。层间结构二压应力增幅略大于层间结构一,而剪应力增幅则远小于层间结构一,其原因为层间结构二的拟合方程斜率增幅远小于层间结构一。由此可知,层间结构一剪切状态对车辆加减速和紧急刹车等行驶状态的敏感性更强。

2.3 沥青铺装层厚度的影响

为确定沥青铺装层厚度对层间结构剪切状态的影响,首先保持沥青铺装下层厚度 H_x 为 6 cm,上层厚度 H_s 分别取 4、5、6 cm 三个等级;之后,保持沥青铺装上层厚度 H_s 为 4 cm,下层厚度 H_x 依次取 4、5、6、7、8 cm 五个等级进行分析。表 4 为各厚度层拟合方程的特征参数。

表 4 不同厚度的拟合方程特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of fitting lines equation under different thickness conditions									
层间结构	特征参数	不同 H_s (cm)的影响			不同 H_x (cm)的影响				
		4	5	6	4	5	6	7	8
结构一	a	6.571	6.970	6.824	7.231	6.806	6.571	6.190	5.920
	b	0.693	0.667	0.631	0.699	0.690	0.693	0.695	0.701
	R^2	0.987	0.984	0.981	0.985	0.986	0.987	0.988	0.989
	x_{\max}/kPa	361.8	374.6	381.3	363.0	362.1	361.8	360.5	359.2
	y_{\max}/kPa	257.3	256.7	247.6	261.0	256.7	257.3	256.9	257.6
结构二	a	6.117	5.711	5.253	6.571	6.438	6.117	5.714	5.255
	b	0.661	0.636	0.612	0.724	0.697	0.661	0.637	0.606
	R^2	0.985	0.988	0.984	0.986	0.987	0.985	0.984	0.983
	x_{\max}/kPa	379.3	372.0	362.6	383.9	383.5	379.3	371.6	362.8
	y_{\max}/kPa	256.8	242.3	227.2	284.5	273.7	256.8	242.4	225.1

由表 4 可知:保持 H_x 为 6 cm 时,随着 H_s 的增加,层间结构一最不利剪切位置拟合曲线斜率呈降低趋势;当 H_s 为 6 cm 时,拟合曲线斜率为 0.631,较 H_s 为 4 cm 时的斜率 0.693 降低了 9%,说明增加沥青铺装上层厚度可以改善层间结构一的剪切状态;同时,保持 $H_s=4$ cm 时, H_x 对层间结构

一剪切状态的影响很小。

H_s 对层间结构二剪切状态的影响与对层间结构一的影响类似;与层间结构一相比, H_x 对层间结构二具有完全不同的影响规律,随 H_x 的增加,层间结构二最不利剪切位置拟合曲线斜率呈降低趋势;由此可知,增加两层沥青铺装层厚度均可在一定程度上改善层间结构二的剪切状态。

3 基于室内试验的桥面铺装层间结构剪切状态分析

3.1 桥面铺装组合结构层间剪切试验

成型 AC-20 沥青混合料+C40 混凝土和 SMA-13 沥青混合料+AC-20 沥青混合料双层车辙板。图 5 为几种混凝土表面处治措施的效果。抛丸和拉毛构造深度分别控制在 1.0、0.7 mm,选用 SBS 改性沥青同步碎石封层作为防水黏结层;后者黏层材料分别选用乳化沥青和 SBS 改性沥青。待双层车辙板养护完成后,钻芯得到高度、直径均为 10 cm 的圆柱体试件,用以测试层间抗剪强度。

试验在 25℃ 条件下进行,垂直荷载分别取 0、0.2、0.4、0.6、0.8 MPa 五个等级,剪切速率为 5 mm/min,剪切破坏位置均位于结构层层间。根据摩尔-库伦理论对试验结果进行拟合。表 5 为组合结构最大抗剪强度 τ_{\max} 回归方程。

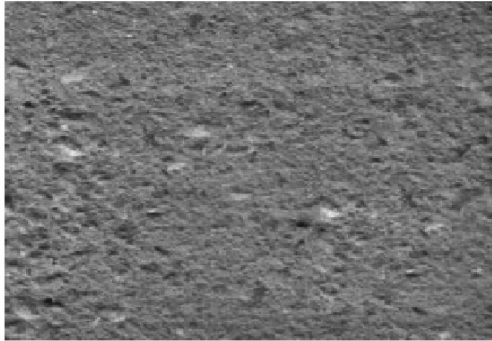
表 5 抗剪强度回归方程

Tab. 5 Regression equations of shear strength		
组合结构	层间处治措施	回归方程
SMA-13 沥青混合料+ AC-20 沥青混合料	乳化沥青黏层	$\tau_{\max} = \tan(19.0^\circ)\sigma_y + 197.1, R^2 = 0.932$
	SBS 改性沥青黏层	$\tau_{\max} = \tan(25.1^\circ)\sigma_y + 295.8, R^2 = 0.976$
AC-20 沥青混合料+ C40 混凝土	原状界面	$\tau_{\max} = \tan(10.7^\circ)\sigma_y + 185.8, R^2 = 0.927$
	拉毛界面	$\tau_{\max} = \tan(22.6^\circ)\sigma_y + 210.4, R^2 = 0.985$
	抛丸界面	$\tau_{\max} = \tan(33.4^\circ)\sigma_y + 259.8, R^2 = 0.982$

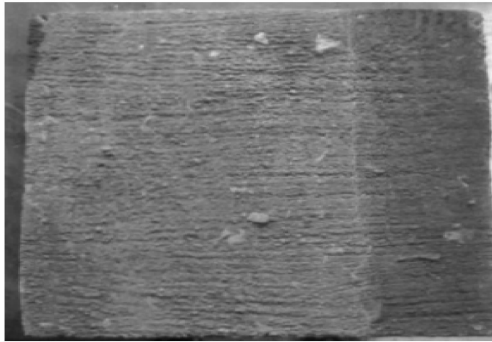
由表 5 可知:对于 AC-20 沥青混凝土+C40 混凝土组合结构,抛丸界面的黏聚力为 259.8 kPa、内摩擦角为 33.4°,在 3 种界面中均为最大,说明采用抛丸界面处治措施的组合结构具有更好的层间抗剪切性能,这与其混凝土表面构造深度大且均匀有关;对于双沥青层组合结构,采用 SBS 改性沥青黏层的组合结构,层间黏结状态更佳,黏聚力和内摩擦角分别为 295.8 kPa 和 25.1°。



(a) 原状界面



(b) 抛丸界面



(c) 拉毛界面

图 5 混凝土表面处治措施

Fig. 5 Surface treatments of concrete slab

3.2 桥面铺装层间结构剪切状态分析

图 6 为层间结构一最不利剪切位置的水平剪应力-压应力拟合曲线与双沥青层组合结构抗剪强度拟合曲线的对比。图 7 为层间结构二最不利剪切位置拟合曲线与 C40 混凝土+沥青混合料组合结构抗剪强度拟合曲线的对比。其中,力学分析时桥面铺装采用上节提到的典型结构,接地压强取 0.85 MPa,水平力系数取 0.5。

由图 6 可知:层间结构一的最不利剪切位置剪应力与压应力拟合曲线斜率为 0.693,较乳化沥青黏层组合结构抗剪强度拟合曲线斜率 0.344 和 SBS 改性沥青黏层组合结构的斜率 0.468,分别增大了 101%和 48%;在 0.85 MPa 接地压强下,层间结构一最不利剪切位置受到的最大压应力为 361.8 kPa,此时采用 2 种沥青黏层的铺装结构均处于剪

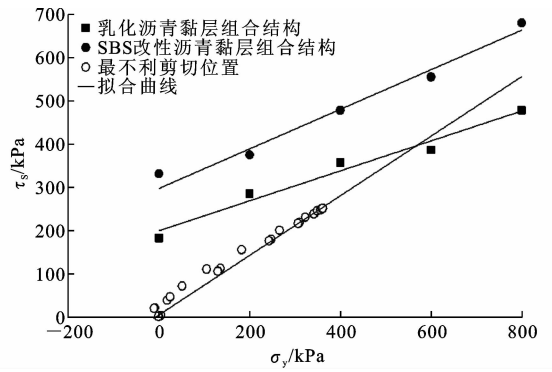


图 6 层间结构一最不利剪切位置与组合结构抗剪强度拟合曲线对比

Fig. 6 Comparisons of fitting curves of the most unfavorable position of interlayer structure one and shear strength

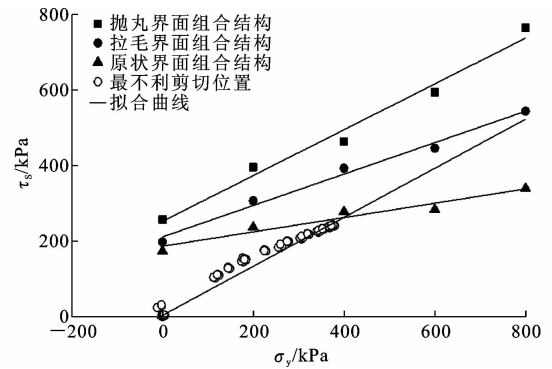


图 7 层间结构二最不利剪切位置与组合结构抗剪强度拟合曲线对比

Fig. 7 Comparisons of fitting curves of the most unfavorable position of interlayer structure two and shear strength

切安全状态;随着接地压强的增加,在不考虑材料本身剪切破坏的情况下,SBS 改性沥青黏层组合结构和最不利剪切位置的拟合曲线会迅速靠近,乳化沥青黏层的层间结构一的剪切状态会迅速恶化,当层间结构一最不利剪切位置的最大压应力约 550 kPa 时,SBS 改性沥青黏层组合结构和最不利剪切位置的拟合曲线交叉,表明乳化沥青黏层的层间结构一处于临界剪切破坏状态,此时对应的接地压强为 1.2~1.4 MPa;对 SBS 改性沥青黏层铺装结构,层间结构一发生超载车辆一次性紧急刹车导致剪切破坏的可能性很小。

由图 7 可知:对层间结构二,最不利剪切位置剪应力-压应力拟合曲线斜率远大于原状界面组合结构抗剪强度拟合曲线斜率,较拉毛界面组合结构抗剪强度拟合曲线斜率大 59%,略大于抛丸界面组合结构抗剪强度拟合曲线斜率;在 0.85 MPa 接地压强下,层间结构二最不利剪切位置受到的最大压应力为 379.3 kPa,此时采用原状界面的层间结构已

处于临界剪切破坏状态,而采用拉毛和抛丸界面的层间结构则处于剪切安全状态;随着接地压强的增加,在不考虑材料本身剪切破坏的情况下,最不利位置剪应力-压应力拟合曲线与拉毛界面抗剪强度拟合曲线不断靠近,表明拉毛界面层间结构的剪切状态不断恶化,但由于层间结构二受到的压应力很难大于 800 kPa,所以由车辆一次性紧急刹车导致的剪切破坏可能性很小;采用抛丸界面的层间结构始终处于剪切安全状态。

4 结 语

(1)在车辆垂直荷载和水平荷载共同作用下,桥面铺装层间结构最易发生剪切破坏的节点是各法向压应力水平下所受剪应力最大节点的集合。

(2)车辆水平荷载对桥面铺装层间结构剪切状态影响很大,随着水平荷载的增加,桥面铺装层间结构剪切状态变化呈急剧恶化趋势。

(3)增加沥青铺装上层厚度,有助于改善层间结构一、结构二的剪切状态,增加沥青铺装下层厚度,有助于改善层间结构二的剪切状态,但对层间结构一的剪切状态影响很小。

(4)与层间结构二相比,两沥青铺装层层间结构一的剪切状态同样不容忽视,在本文选用的黏结材料范围内,建议两沥青铺装层间采用 SBS 改性沥青黏层,调平层表面采用铣刨处治措施。本文进行有限元分析时假设各铺装层间完全连续,这与真实情况有些出入。对于层间部分连续条件下的应力响应情况,将在后续工作中进一步的深入研究。

参考文献:

References:

- [1] KRUNTCEVA M R, COLLOP A C, THOM N H. Effect of bond condition on flexible pavement performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(11): 2311-2321.
- [2] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 1-10.
HUANG Xiao-ming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 1-10.
- [3] 万晨光, 申爱琴, 薛翠真, 等. 层间接触状态对桥面铺装结构力学响应的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(9): 57-63.
WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, XUE Cui-zhen,

et al. Effect of interlayer contact state on mechanical response of bridge deck pavement structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2016, 43(9): 57-63.

- [4] 张争奇, 陶 晶, 张思桐. 桥面铺装环氧沥青防水粘结层性能试验与评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(4): 1-6.
ZHANG Zheng-qi, TAO Jing, ZHANG Si-tong. Experiment and evaluation on performance of epoxy asphalt waterproof cohesive layer on bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 1-6.
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Edition Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96.
- [6] TASHMAN L, NAM K, PAPAGIANNAKIS T, et al. Evaluation of construction practices that influence the bond strength at the interface between pavement layers [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008, 22(3): 154-161.
- [7] 张肖宁, 容洪流, 黄文柯, 等. 大型 MA 类钢桥面铺装高温性能加速加载试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 21-26.
ZHANG Xiao-ning, RONG Hong-liu, HUANG Wen-ke, et al. Accelerated load testing of high-temperature performance of long-span MA steel bridge deck pavement[J]. Journal of South of China University of Technology: Natural Sciences, 2014, 42(12): 21-26.
- [8] 李云良, 纪 伦, 刑 超, 等. 水泥混凝土桥面铺装力学行为数值分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(10): 58-62.
LI Yun-liang, JI Lun, XING Chao, et al. Numerical analysis about mechanical behavior of concrete bridge deck pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(10): 58-62.
- [9] 王光谱. 混凝土箱梁桥面铺装力学行为与结构优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2016.
WANG Guang-pu. Mechanical behavior and structural optimization design of concrete box girder bridge deck pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [10] 贾锦绣. 沥青路面与桥面铺装抗剪特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
JIA Jin-xiu. Research on shearing resistance of asphalt pavement and bridge deck pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

- [11] 罗作芬,郑传超,史泽恒. 部分结合式双层梁层间结合系数的求解[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(1):30-34.
LUO Zuo-fen, ZHENG Chuan-chao, SHI Ze-heng. Approach of interfacial bond factor of semi-contacted bilayer asphalt mixture beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 30-34.
- [12] 钱振东,王江洋,王亚奇. 水泥混凝土桥梁长寿命桥面铺装层复合结构疲劳特性[J]. 中国公路学报,2012,25(5):67-73.
QIAN Zhen-dong, WANG Jiang-yang, WANG Ya-qi. Fatigue performance of composite structure for perpetual pavement on cement concrete bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 67-73.
- [13] LIU X, ZHOU C, FENG D, et al. Experimental study on interlayer shear properties of ERS pavement system for long-span steel bridges[J]. Construction & Building Materials, 2017, 143: 198-209.
- [14] DOYLE K P, O'BRIEN E P, WARD T C. Adhesion between epoxy and glass measured by the shaft loaded blister test[R]. Ohio: Ohio University, 2000.
- [15] 刘云,于新,戴忧花,等. 混凝土箱梁桥铺装防水黏结层力学性能[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(1):57-62.
LIU Yun, YU Xin, DAI You-hua, et al. Mechanical properties of waterproof adhesive layer on concrete box girder bridge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(1): 57-62.
- [16] 王虎,韩飞. 大跨径连续刚构桥桥面铺装层技术研究现状综述[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2016,35(1):16-21.
WANG Hu, HAN Fei. Literature review of research status of deck pavement technology of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(1): 16-21.
- [17] POKORSKI P, RADZISZEWSKI P, SARNOWSKI M. Fatigue life of asphalt pavements on bridge decks[J]. Procedia Engineering, 2016, 153: 556-562.
- [18] KIM T W, BAEK J, LEE H J, et al. Effect of pavement design parameters on the behaviour of orthotropic steel bridge deck pavements under traffic loading[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(5): 471-482.
- [19] RAAB C, ARRAIGADA M, PARTL M N, et al. Cracking and interlayer bonding performance of reinforced asphalt pavements[J]. European Journal of Environmental & Civil Engineering, 2017(5): 1-13.
- [20] 刘黎萍,胡晓,孙立军,等. 基于抗剪性能的混凝土桥沥青铺装设计方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(1):89-94.
LIU Li-ping, HU Xiao, SUN Li-jun, et al. Design approach of shear properties-based asphalt pavement structure of concrete bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(1): 89-94.
- [21] 邓学钧,黄晓明. 路面设计原理与方法[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Principles and design methods of pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [22] 万晨光. 基于重载交通的连续刚构桥桥面铺装结构优化研究[R]. 西安:长安大学,2016.
WAN Chen-guang. Optimization of bridge deck pavement structure of continuous rigid frame bridge deck based on heavy traffic[R]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [23] 贾晓阳,李立寒. 混凝土桥面沥青铺装粘结层抗剪设计方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(3): 402-407.
JIA Xiao-yang, LI Li-han. A design guide to shear resistance of bonding layer in concrete bridge deck asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(3): 402-407.
- [24] 徐鸥明,韩森,于静涛. 层间界面对混凝土桥面铺装结构性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(5):17-20.
XU Ou-ming, HAN Sen, YU Jing-tao. Effect of interlayer interface on structural performance of concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5): 17-20.
- [25] 万晨光,申爱琴,郭寅川. 桥面铺装调平层与沥青面层间剪切行为[J]. 浙江大学学报:工学版,2017,51(7):1355-1360.
WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan. Shear behavior of leveling layer and asphalt pavement of bridge deck pavement[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(7): 1355-1360.