

文章编号:1674-2974(2016)09-0113-07

层间接触状态对桥面铺装结构力学响应的影响^{*}

万晨光,申爱琴[†],薛翠真,赵学颖
(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为解决混凝土桥桥面铺装结构设计时对调平层与沥青铺装层层间真实接触状态考虑不足的问题,采用理论推导和室内试验相结合的方法,应用层间接触系数来评价不同层间处治措施下的层间接触状态,同时采用 ANSYS 软件对不同接触条件下的力学响应进行分析.结果表明,植石措施下的层间接触系数值最大,为 0.607,这与其表面构造深度大有关;部分连续层间接触状态下沥青铺装结构的受力状态明显较完全连续接触条件恶化,以拉毛措施下的沥青铺装层剪应力为例,XY 向、YZ 向剪应力最大值分别为 0.412 MPa 和 0.421 MPa,较完全连续条件下的 0.195 MPa 和 0.222 MPa 分别增加了 111%和 91%,说明以完全连续层间接触条件进行铺装结构设计是不合理的;四种混凝土表面处治措施下,各铺装层所受最大应力变化不大,但与完全连续状态相比,沥青铺装层的受力状况明显恶化,说明在铺筑实体工程时要尽可能增强调平层与沥青铺装层的层间接触状态.

关键词:公路建设;桥面铺装;部分连续式双层梁;层间接触系数;力学响应
中图分类号:U443.33 **文献标识码:**A

Effect of Interlayer Contact State on Mechanical Response of Bridge Deck Pavement Structure

WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin[†], XUE Cui-zhen, ZHAO Xue-ying
(Highway School, Chang'an Univ, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient consideration of interlayer contact state between leveling course and asphalt pavement, a new interlayer contact factor was adopted in this paper. Based on the semi-contacted bi-layer beam mechanical model, a calculation formula was derived, and the bending test on a bi-layer beam was designed to determine the interlayer contact factors under different concrete surface treatments and spraying volume of modified asphalt condition. Meanwhile, the mechanical responses were analyzed by using the analysis software ANSYS under different interlayer contact states. The results show that the interlayer contact state under artificial chiseling treatment is the best, and the maximum value of the interlayer contact factor is 0.607. The stress state of the asphalt pavement structure in the continuous layer contact state is obviously worse than that of the complete continuous contact condition. Taking the shear stress of asphalt pavement under cutting groove measure as an example, the maximum stresses in XY and YZ directions are 0.412 MPa and 0.421 MPa, while the stresses are 0.195MPa and 0.222 MPa under

^{*} 收稿日期:2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278059), National Natural Science Foundation of China(51278059)

作者简介:万晨光(1988-),男,河南开封人,长安大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: saq6305@163.com

the complete continuous contact condition, and the former are larger than the latter by 111% and 91%, respectively. It shows that the complete continuous contact condition is not reasonable in the design of deck pavement structure. Compared with the fully continuous state, the stress state of asphalt pavement is obviously deteriorated, which indicates that the layer of the pavement layer and the layer of the asphalt overlay can be enhanced when the pavement is laid.

Key words: road construction; bridge deck pavement; semi-contacted bi-layer beam; interlayer contact factor; mechanical response

水泥混凝土桥桥面铺装典型结构由水泥混凝土调平层、防水粘结层和沥青铺装层组成^[1]. 其中防水粘结层是设在调平层和沥青铺装层层间,起粘结、防水作用的一层结构层. 由于上下层材料性质的巨大差异和施工缺陷的存在,使得防水粘结层常出现粘结不足的问题,成为桥面铺装的病害多发区^[2-3],桥面铺装层间寿命已成为影响铺装结构整体寿命的重要制约因素^[4].

目前,我国在进行桥面铺装结构设计时,并没有考虑层间的真实粘结状态,而是假设各结构层层间为完全连续^[5-6],这往往导致计算出的应力应变值偏小,使铺装结构处于受力不利状态,进而使得桥面铺装真实寿命远远小于设计寿命^[7]. 为此,本文针对桥面铺装水泥混凝土调平层和沥青铺装层层间受力特点,采用理论推导和室内试验相结合的方法,应用层间接触系数来评价不同层间处理措施下的层间接触状态,同时运用 ANSYS 有限元软件对不同接触状态进行模拟,并对其受力情况进行对比分析. 本文的研究成果可以为桥面铺装层间处理措施和防水粘结层材料的选择提供依据,同时为混凝土桥桥面铺装设计方法的提出提供参考.

1 层间接触系数理论与试验研究

1.1 层间接触系数力学模型

层间接触系数在此定义为混凝土桥桥面铺装调平层与沥青铺装层层间粘结状态的评价指标,其值反映了铺装结构的协同受力能力. 层间接触系数的推导采用与加铺新层的水泥混凝土路面相似的力学分析方法,即新旧层中性面相对位置对路面结构受力有很大影响^[8],用沥青混凝土+水泥混凝土双层梁中性轴的相对位置来反映其层间接触状况. 完全分离式双层梁和完全连续式双层梁的中性轴位置是容易确定的^[9],然而部分连续式双层梁则不然,上下层中性轴的位置随层间粘结状态的好坏而改变,层间粘结状态越好,两个中性轴就越接近,层间完全连续时,中性轴就会重合^[10]. 据此,采用如下部分连

续式双层梁力学模型^[10],X轴为层间完全连续时中性轴的位置,Y轴为梁跨中位置.

图1中: L 为梁跨径; E_1, E_2 和 h_1, h_2 分别为上下梁的弹性模量和高度; h_0 为梁顶面与X轴间距;设 α 为部分连续式双层梁中性轴对X轴的偏离系数,则上、下层梁中性轴与X轴的距离分别为 $(h_0 - \frac{h_1}{2})\alpha, (h_1 + \frac{h_2}{2} - h_0)\alpha$. 取层间接触系数 $\beta = 1 - \alpha$,由建立的模型可知,该系数与双层梁层间接触状态有很好的关联性: $\beta = 1$ 时,上下梁中性轴与X轴重合,此时双层梁为完全连续状态; $\beta = 0$ 时,双层梁为完全分离状态; $0 < \beta < 1$ 时,双层梁为部分连续接触状态.

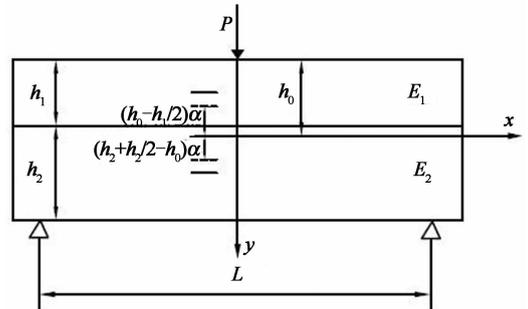


图1 部分连续双层梁力学模型
Fig. 1 The mechanical model of semi-contacted bi-layer beam

1.2 层间接触系数理论推导

设 $(EI)_u$ 和 $(EI)_d$ 分别为部分结合式双层梁中上下梁的抗弯刚度,则双层梁抗弯刚度 $(EI)_p$ 为:

$$(EI)_p = (EI)_u + (EI)_d = E_1 I_1 + E_2 I_2 = E_1 b \int_{y_1}^{y_2} y^2 dy + E_2 b \int_{y_3}^{y_4} y^2 dy. \quad (1)$$

式中: b 为梁宽; I_1 和 I_2 分别为双层梁中上下梁对各自中性轴惯性矩; y_1, y_2, y_3 和 y_4 值分别如下

$$y_1 = - \left[\frac{h_1}{2} + \left(h_0 - \frac{h_1}{2} \right) (1 - \alpha) \right] = - \left[\frac{h_1}{2} + \left(h_0 - \frac{h_1}{2} \right) \beta \right],$$

$$y_2 = \frac{h_1}{2} - (h_0 - \frac{h_1}{2})(1 - \alpha) =$$

$$(1 + \beta) \frac{h_1}{2} - h_0\beta,$$

$$y_3 = - \left[\frac{h_2}{2} - (h_1 + \frac{h_2}{2} - h_0)(1 - \alpha) \right]$$

$$= - h_0\beta + h_1\beta - (1 - \beta) \frac{h_2}{2},$$

$$y_4 = \frac{h_2}{2} + (h_1 + \frac{h_2}{2} - h_0)(1 - \alpha) =$$

$$- h_0\beta + h_1\beta + (1 + \beta) \frac{h_2}{2}.$$

对式(1)求解可得:

$$\beta = \sqrt{\frac{4(E_1 h_1 + E_2 h_2) \left[(EI)_p - \frac{b(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)}{12} \right]}{bE_1 E_2 h_1 h_2 (h_1 + h_2)^2}} \quad (2)$$

式中除部分连续式双层梁抗弯刚度 $(EI)_p$ 外,其余参数均可通过理论计算或常规试验求得.

1.3 部分连续式双层梁抗弯刚度试验设计

借鉴弯曲破坏试验^[11]试验方法,采用三点弯曲试验来进行部分连续双层梁抗弯刚度以及上下梁弹性模量的测试.

对于部分连续双层梁抗弯刚度 $(EI)_p$,则用下式来确定:

$$(EI)_p = \frac{P_i L^3}{48 d_i} \quad (3)$$

式中: P_i 为加载荷载值, N; d_i 为 P_i 荷载作用下试件回弹变形, mm. P_i 与测试水泥混凝土弹性模量时取为一致.

各参数确定以后,通过式(2)即可求得部分连续双层梁层间接触系数.

1.4 层间接触系数试验研究

1.4.1 试件成型

采用标准车辙板试模成型水泥混凝土板,为模拟真实施工现场,分别在混凝土表面进行拉毛、刻槽、铣刨和植石处理(如图2所示),其表面构造深度分别为 0.8 mm, 0.6 mm, 1.2 mm 和 1.4 mm;然后在标准条件下养护 7 d;在处理过的混凝土板表面喷洒防水粘结层,本文选用 SBS 改性沥青同步碎石封层作为防水粘结层,改性沥青洒布量分别取 1.2 kg/m², 1.6 kg/m² 和 2.0 kg/m²,除植石措施不撒布碎石外,其余处治措施碎石撒布量统一取为 5.5 kg/m²;之后将混凝土板放入 10 cm 厚车辙板试模,加铺沥青混凝土并碾压成型,在室温下冷却;最后,将双层板切割成 5 cm 宽的双层小梁.

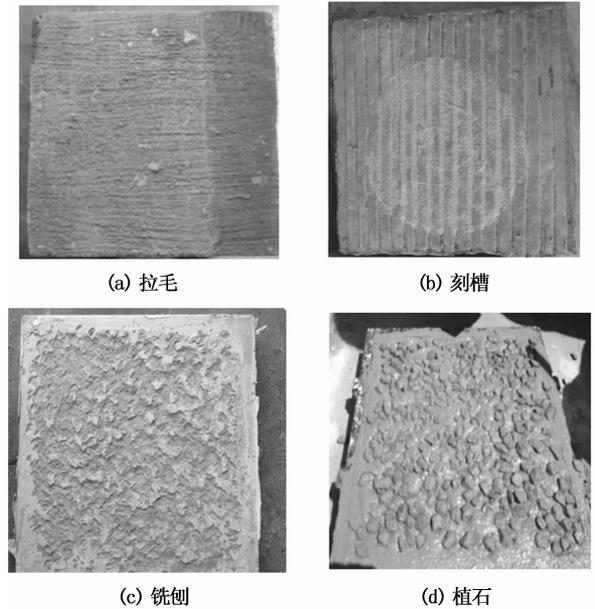


图2 混凝土表面处理措施
Fig. 2 Surface treatments of concrete slab

植石处理措施是近年来兴起的一种新型复合路面层间处治措施,在与拉毛、刻槽等层间处治路段的对比中取得了非常好的效果,由于桥面铺装结构与复合路面结构及受力特点十分相似,因此考虑可将植石方法应用于桥面铺装层间处治措施,以期获得良好效果.具体处治方法是在水泥混凝土板初凝之前及时、均匀的撒布一层单颗粒径(4.75~9.5 mm)的集料,覆盖率为 75% 左右,然后施加一定的荷载将集料压入混凝土,使集料的埋入深度达到粒径的 2/3,以使混凝土表面形成粗糙构造.

测试沥青混凝土和水泥混凝土弹性模量时,还需分别制作单层小梁,在此不再赘述.

1.4.2 层间接触系数测试

试验在 25 °C 条件下进行,由小梁加载曲线可知,沥青混凝土小梁和水泥混凝土小梁均在 0.5 倍破坏荷载之前近似处于弹性状态,因此在进行弹性模量测试时,加载荷载均取为小梁试件的 0.5 倍破坏荷载,弹性模量测试结果如表 1 所示.

在进行部分连续双层梁抗弯刚度测试时,加载荷载取为 0.5 倍水泥混凝土小梁破坏荷载,然后分别对不同混凝土表面处理措施及不同改性沥青洒布量的双层梁试件进行抗弯刚度测试,并将测试结果代入式(2)进行层间接触系数计算,由于在试验时不可避免地会存在由试件制作不均匀等问题而导致的数据离散性较大的现象,本研究每组试件数量取为 12 个,通过增加平行试验数量,舍弃与平均值偏离

较大的数据,作为试验最终结果,在此,仅列出最终结果如表2所示。

表1 沥青混凝土和水泥混凝土小梁
弯拉弹性模量测定

Tab.1 The determination of elastic modulus
of asphalt concrete and cement concrete

材料类型	试件编号	模量值 /MPa	平均值 /MPa
沥青混凝土	1	576.303	553.004
	2	543.312	
	3	556.227	
	4	536.174	
水泥混凝土	1	27 396.214	27 311.693
	2	25 648.579	
	3	29 748.664	
	4	26 453.314	

表2 部分连续式双层梁抗弯刚度
及层间接触系数测定

Tab.2 The measured values of flexural rigidity
and interlayer contact factors

处理措施	沥青洒布量 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	部分连续式双层 梁抗弯刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	层间接触 系数
拉毛	1.2	15 103.2	0.341
	1.6	15 446.1	0.426
	2.0	15 117.5	0.311
刻槽	1.2	15 437.6	0.419
	1.6	15 411.3	0.407
	2.0	15 206.9	0.346
铣刨	1.2	15 379.2	0.392
	1.6	15 563.0	0.534
	2.0	15 517.9	0.445
植石	1.2	15 231.2	0.379
	1.6	15 641.2	0.607
	2.0	15 536.3	0.527

由试验结果可知,拉毛、铣刨和植石三种措施下均在 1.6 kg/m^2 沥青洒布量时层间接触系数取得最大值,而刻槽措施则在 1.2 kg/m^2 下取得最大值,四种措施层间接触系数大小排序为:植石>铣刨>拉毛>刻槽,这与铣刨、植石措施下混凝土表面构造深度大、上下层能更好的进行齿合交互作用,而同时拉毛、刻槽措施下混凝土表面构造深度小有关。

对于刻槽措施,其最佳沥青洒布量位于 $1.0 \sim 1.4 \text{ kg/m}^2$ 之间;对于拉毛措施,沥青洒布量为 1.2 kg/m^2 时层间接触系数明显大于 2.0 kg/m^2 时的接触系数,说明拉毛处治措施下最佳沥青洒布量位于 $1.2 \sim 1.6 \text{ kg/m}^2$ 之间;对于铣刨和植石措施,沥青洒布量为 2.0 kg/m^2 时层间接触系数则明显大于 1.2 kg/m^2 时的接触系数,这说明该处理措施下最佳

沥青洒布量位于 $1.6 \sim 2.0 \text{ kg/m}^2$ 之间,这与铣刨和植石措施下混凝土表面构造深度大有关。

2 层间接触状态对铺装结构受力的影响

2.1 桥面铺装有限元模型的建立

选取铜黄高速(铜川-黄陵)沮河特大连续刚构桥为研究对象,对于桥面铺装结构,连续刚构桥中跨跨中为关键截面^[1],因此选取中跨跨中附近 13 m 长的梁段作为本文的研究对象,进行桥面铺装结构受力分析.该梁段高度在 $3.5 \sim 3.54 \text{ m}$ 之间,由圣维南原理可知,桥面铺装结构仅在距模型两端部一定范围内受边界条件的影响,因此模型中间部位的结果是可以反映铺装结构的真实受力情况。

所建桥面铺装模型结构、材料属性均与室内试验中复合梁保持一致,温度与模量测试试验温度保持一致,模型各部采用的材料单元及参数见表3。

表3 模型不同结构材料所用单元及参数取值

Tab.3 The elements and parameters
of different structural materials

结构 部位	材料 名称	模量 /MPa	泊松比	单元 类型
铺装结构	沥青铺装层	553	0.3	Solid185
	调平层	27 312	0.166 7	Solid185
梁体结构	水泥混凝土	34 500	0.166 7	Solid185
轮胎	轮胎橡胶	1 500	0.499	Solid186
	胎冠帘布	172.2E3	0.3	SURF154
	轮辋	2E5	0.2	SHELL181
	胎侧帘布	9.87E3	0.3	SURF154
接触对	目标面	—	—	TARGE170
	接触面	—	—	CONTA174

本文所建轮胎模型以米其林 315/80R22.5 子午线重型车用轮胎为原型,该模型可以在不同的轴重、胎压条件下对桥面铺装结构进行加载.鉴于铜黄高速重载车辆众多,在进行计算时后轴轮组轴重取为 140 kN ,轮胎胎压取为 0.8 MPa 。

由于各部分所需计算精度不同,因此在进行网格划分时尺寸设置也不尽相同:梁体网格尺寸为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,铺装结构网格尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,轮胎模型网格尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$.后轴双轮组轮胎模型尺寸和轮胎内部结构分别如图3~4所示,建好的整体模型和轮胎模型如图5所示。

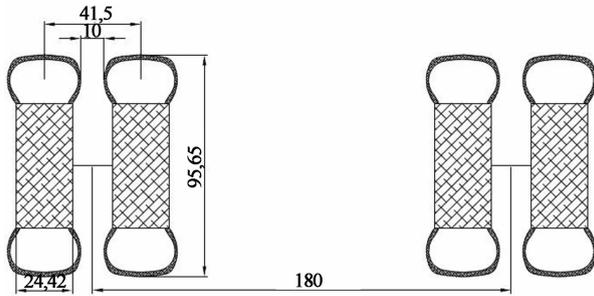


图 3 后轴轮组截面尺寸示意图

Fig. 3 The schematic diagram of rear axle wheel groups section size

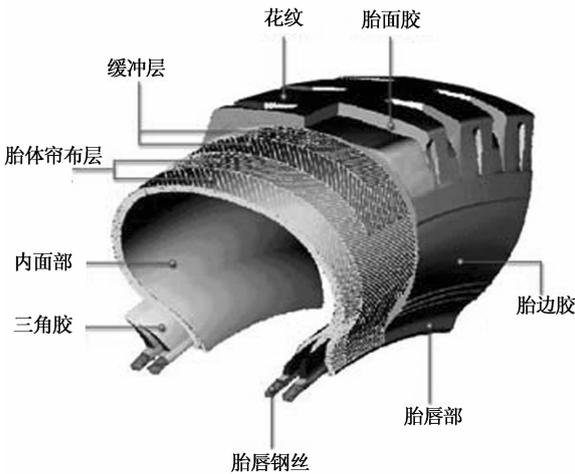
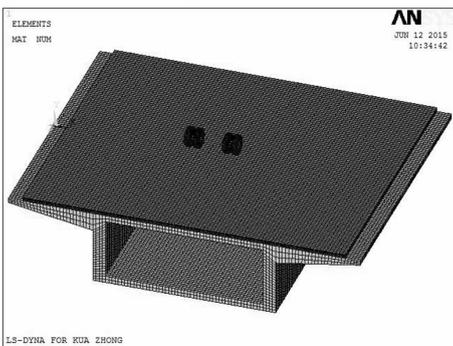
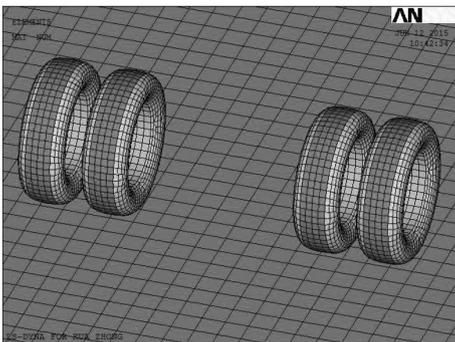


图 4 子午线轮胎内部结构

Fig. 4 The internal structure of radial tire



(a) 整体模型



(b) 轮胎模型

图 5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

模型的边界条件设置为:模型两端均进行 Y 向约束,即模型两端沿桥梁竖向位移为零,X 方向(横桥向)和 Z 方向(纵桥向)不进行约束。

2.2 铺装结构受力分析

为了分析混凝土调平层与沥青铺装层层间接触状态对桥面铺装结构受力的影响,在前述层间接触系数试验的基础上,将调平层与沥青铺装层的层间接触状态分别设置为光滑(层间接触系数无限趋近于零)、拉毛、刻槽、铣刨和植石所分别对应的层间接触系数(其余各层间设为完全连续接触状态),计算各结构层的受力情况.对于层间接触系数与 ANSYS 中摩擦系数的转化,借鉴了董开亮等^[12]的研究成果,由试算结果可知,该转化方式是合理且可行的。

同时,为了对层间接触系数的合理性进行验证,还计算了层间接触系数为 1(层间完全连续)时铺装结构受力情况,并与完全粘结状态下的受力情况进行对比分析.计算时假设车辆处于 80 km/h 的匀速行驶状态,通过线速度和轮胎模型半径来确定轮胎模型围绕圆心的角速度值,同时在轮胎与铺装结构表面间设置摩擦对,摩擦系数统一设定为 0.05^[13]。

不同层间接触状态下,模型跨中附近桥面铺装各结构层最大拉应力对比情况分别见图 6 和图 7。

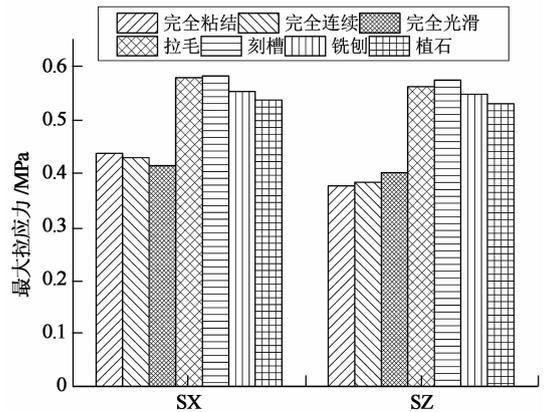


图 6 不同接触条件下沥青铺装层最大拉应力
Fig. 6 The maximum tensile stress of asphalt layer under different contact condition

由图 6 和图 7 可得出如下结论:

1) 当层间接触系数为 1,即调平层与沥青铺装层层间完全连续时,各铺装层所受最大横、纵向拉应力与完全粘结条件下的各力基本相同,最大误差不超过 3%。这说明层间接触系数的定义、公式推导以及以层间接触系数来评价层间接触状态是合理的。

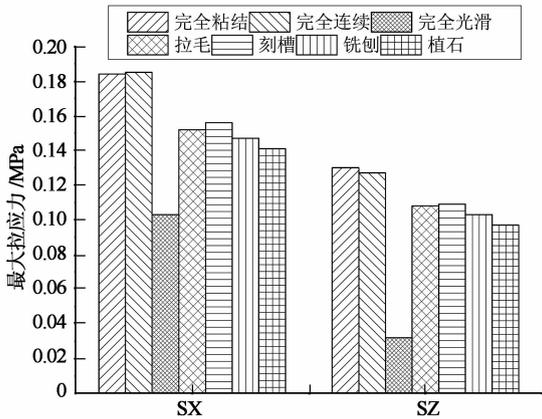


图 7 不同接触条件下调平层最大拉应力
Fig. 7 The maximum tensile stress of leveling course under different contact condition

2)对于完全连续与完全光滑两种层间接触状态,沥青铺装层所受横、纵向拉应力最大值差别不大.而对于混凝土调平层,完全连续接触状态下的横、纵向拉应力值分别为 0.185 MPa 和 0.127 MPa,较完全光滑接触状态下的 0.103 MPa 和 0.032 MPa分别增加了 79%和 297%.究其原因,在于完全光滑接触状态下,沥青铺装层与混凝土调平层间应力传递作用受到很大的影响,仅能传递压应力,进而使得调平层所受拉应力大大减小.

3)对于四种不同层间处治措施,各铺装层所受横、纵向拉应力最大值差别不大,且大致表现出随着层间接触系数的增大,横、纵向拉应力值呈小幅降低趋势变化.

4)与理想结合状态下的应力响应情况相比,四种层间处理措施下沥青铺装层所受最大拉应力明显增大.以拉毛处治措施为例,沥青铺装层横、纵向拉应力最大值分别为 0.579 MPa 和 0.562 MPa,分别较理想结合状态下的 0.429 MPa 和 0.383 MPa 增加了 35%和 47%.这表明材料性质存在巨大差异的沥青铺装层与混凝土调平层层间粘结状况对沥青铺装层所受拉应力影响显著,当层间粘结不足时,沥青铺装层拉应力受力状况明显恶化.另外,对于混凝土调平层,由于层间力的传递作用受到影响,四种层间处治措施下调平层所受横、纵向拉应力均较理想接触状态下有所减小.

图 8 和图 9 分别为各种层间接触条件下,跨中部分各铺装结构所受最大 XY 向、YZ 向剪应力的对比情况.

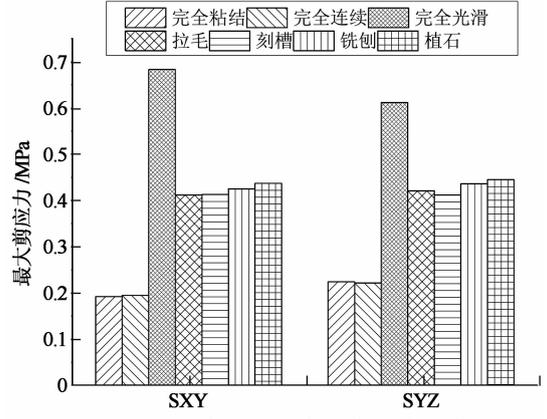


图 8 不同接触条件下沥青铺装层最大剪应力
Fig. 8 The maximum shear stress of asphalt layer under different contact condition

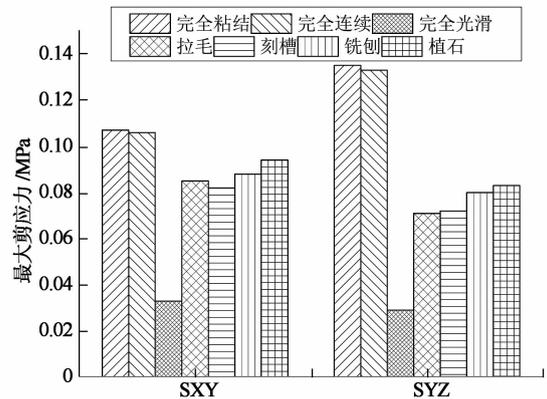


图 9 不同接触条件下调平层最大剪应力
Fig. 9 The maximum shear stress of leveling course under different contact condition

由图 8 和图 9 可得出如下结论:1)当层间接触系数为 1,即调平层与沥青铺装层间完全连续时,各铺装层所受最大 XY,YZ 向剪应力与完全粘结条件下的各力基本相同,最大误差不超过 5%.这再次说明层间接触系数的定义、公式推导以及以层间接触系数来评价层间接触状态是合理的.

2)对于完全连续与完全光滑两种层间接触状态,完全光滑条件下沥青铺装层所受 XY 向、YZ 向剪应力均较完全连续条件有大幅增加.完全光滑条件下 XY 向、YZ 向剪应力最大值分别为 0.683 MPa 和 0.612 MPa,分别较完全连续条件下的 0.195 MPa 和 0.222 MPa 增加了 251%和 176%.而对于混凝土调平层,情况则恰好相反,完全光滑条件下 XY 向、YZ 向剪应力为 0.033 MPa 和 0.029 MPa,分别较完全连续条件下的 0.106 MPa 和 0.133 MPa 降低了 69%和 78%.

3)对于四种不同的层间处治措施,各铺装层所受 XY 向、YZ 向剪应力最大值差别不大,但却与拉

应力变化情况表现出相反的变化规律,即随着层间接触系数的增大,剪应力值大致呈小幅增加趋势变化。

4)四种层间处理措施下沥青铺装层XY向、YZ向剪应力均较完全连续条件下剪应力有大幅提高。以拉毛措施下的沥青铺装层为例,XY向、YZ向剪应力最大值分别为0.412 MPa和0.421 MPa,较完全连续条件下的0.195 MPa和0.222 MPa分别增加了111%和91%。说明层间粘结条件不足时,沥青铺装层所受XY向和YZ向剪应力均有大幅增加,这就大大增加了沥青铺装层出现车辙、推移及拥包病害的可能性。

3 结 语

1)通过室内试验和理论计算表明,采用层间接触系数作为混凝土调平层与沥青铺装层层间接触状态评价指标是合理的。

2)四种混凝土表面处治措施下,植石措施的层间接触系数最大,说明该措施下的层间接触状态最好,这与其混凝土表面构造深度大有关,其次是铣刨处治措施。

3)在进行桥面铺装结构设计时,将调平层与沥青铺装层层间假设为完全连续的层间接触状态是不合理的。

4)四种混凝土表面处治措施下,各铺装层所受最大应力变化不大,但与完全连续状态相比,沥青铺装层的受力状况明显恶化,说明在铺筑实体工程时要尽可能增强调平层与沥青铺装层的层间接触状态。

参考文献

[1] 彭勃,冯李,黄燎. 桥面防滑薄层弹性环氧胶凝剂的研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(4):66-71.
PENG Bo, FENG Li, HUANG Liao. Study of elastic epoxy resin adhesive for bridge deck antiskid overlay[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 66-71. (In Chinese)

[2] 陈仕周,邓学钧,陈辉强. 上海卢浦大桥钢桥面铺装防水体系的研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2004,34(3):393-397.
CHEN Shi-zhou, DENG Xue-jun, CHEN Hui-qiang. Study on waterproof system of Shanghai Lupu steel bridge pavement[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2004, 34(3): 393-397. (In Chinese)

[3] 钱振东,金磊,郑彧. 浇注式沥青混合料抗剪强度及标准研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2015,2(5):107-112.

QIAN Zhen-dong, JIN Lei, ZHENG Yu. Research on the Shear Strength and Standard of Gussasphalt[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 2(5): 107-112. (In Chinese)

[4] 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. (In Chinese)

[5] LIU Yun, QIAN Zhen-dong. Dynamic analysis of pavement on long span steel bridge decks[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2008, 24(2): 212-215.

[6] 丁建明,杜昕,钱振东,等. 润扬大桥南汉悬索桥桥面铺装层在竖向荷载静力作用下的力学分析[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(4):601-604.
DING Jian-ming, DU Xin, QIAN Zhen-dong, et al. Mechanical analysis of deck surfacing on Runyang suspension bridge by finite element method[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2006, 36(4): 601-604. (In Chinese)

[7] 李志宏,黄宝涛. 沥青路面层间接触面积临界值的计算方法[J]. 建筑材料学报,2008,11(3):311-317.
LI Zhi-hong, HUNANG Bao-tao. Calculation method for critical value of interlayer contact area of asphalt pavement[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3): 311-317. (In Chinese)

[8] ZHENG Chuan-chao, SUN Hong-yan, WANG Zhi-gang. Bending stress distribution in bi-layer cement concrete pavement[J]. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2013, 9: 278-284.

[9] 蔚旭灿,郑传超. 温克勒地基上结合式双层板中性面分析[J]. 工程力学,2007,24(9):65-71.
YU X C, ZHENG C C. Neutral plane analysis of bonded two-layered slab on Winkler foundation[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 65-71. (In Chinese)

[10] 万晨光,申爱琴,郭寅川,等. 桥面铺装混凝土调平层与沥青面层接触状态研究[J]. 建筑材料学报,2016,19(2):262-267.
WAN Chen-guang, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuang, et al. Interlayer contact state between concrete leveling course and asphalt surface on bridge deck pavement[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 262-267. (In Chinese)

[11] JTG E20-2011 公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S]. JTGE20-2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. (In Chinese)

[12] 董开亮,杨斌. 路面双层混凝土板层间结合系数的一种确定方法[J]. 公路工程,2009,34(6):16-22.
DONG Kai-liang, YANG Bin. A method on determining coupling coefficient in pavement double-layer concrete slabs[J]. Highway Engineering, 2009, 34(6): 16-22. (In Chinese)

[13] 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,2007:29-30.
Deng Xue-jun, Huang Xiao-ming. Principles and design methods of pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 29-30. (In Chinese)