

混凝土箱梁桥铺装防水粘结层力学性能

刘云¹, 于新¹, 戴忱华², 吴建涛¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了探讨混凝土箱梁桥防水粘结层的实际受力状态, 以沪杭高速公路拓宽改建工程箱梁段高架桥为研究实例, 采用有限元方法和室内实验相结合的手段研究防水粘结层的层间粘结性能。建立节段整桥铺装复合结构模型, 考虑刹车、超载、随机动荷载等因素对沥青混合料铺装层防水粘结层力学响应的综合影响。最后通过室内实验测得了几种典型的水泥混凝土桥防水粘结层与水泥桥面之间的层间粘结性能, 并与理论分析结果进行了对比。分析结果表明, 刹车超载对防水粘结层力学响应的影响大于由桥面不平度引起的随机动荷载对防水粘结层的影响。拉应力峰值出现在移动荷载接近于墩顶上方对应铺装表面, 剪应力在移动荷载处于跨中时达到最大值。结合理论与试验分析结果, SBS(styrene butadiene styrene)改性沥青和橡胶沥青的防水粘结层主要粘结性能均满足理论分析结果的要求, 可推荐为混凝土箱梁桥防水粘结层材料的首选。

关键词: 混凝土箱梁桥; 防水粘结层; 超载; 桥面不平度; 有限元方法

中图分类号: U443.33

文献标识码: A

Mechanical Properties of Waterproof Adhesive Layer on Concrete Box Girder Bridge

LIU Yun¹, YU Xin¹, DAI Youhua², WU Jiantao¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to investigate the actual stress state of waterproof adhesive layer of SMA pavement on concrete box girder bridge, the finite element method and laboratory test method were both used to analyze the interlayer bonding properties. The composite structure model of two spans of the whole bridge was established, and the influence of braking, overloading, random dynamic loading on the mechanical response of waterproof adhesive layer was analyzed. The lab shear strength and drawing strength between adhesive layer and bridge deck were carried out. Research results show that

the influence of braking and overloading on mechanical response of adhesive layer is larger than that of random dynamic loading caused by bridge deck roughness. The max tensile stress appears when the load move on the pavement surface above the pier, and the max shear stress appears when the load move on the pavement surface at the center of a span. Compared the calculated results with test results, laboratory test results can meet the theoretical requirements, and the SBS modified asphalt and rubber asphalt can be considered as the material of waterproof adhesive layer.

Key words: concrete box girder bridge; waterproof adhesive layer; over load; bridge deck roughness; finite element method

由于沥青混凝土铺装能大幅度缓和行车对混凝土桥面板的冲击, 较易达到行车平稳舒适的要求, 因此, 沥青混凝土铺装经常用在混凝土桥面。防水粘结层作为中间夹层设置在桥面板与铺装层之间用来防止水渗透和加强界面粘结强度。当铺装层底部防水粘结层的剪切应力和拉应力超过界面剪切强度和拉拔强度时, 就会发生脱层破坏, 影响桥面的使用耐久性。

国外对水泥混凝土桥面防水粘结层的研究多集中在材料选取和试验研究方面, 相关的理论研究较少^[1-3]。国内目前仍没有统一的桥面防水粘结层设计、试验和施工规范。另外, 防水粘结层的层间粘结性能很容易受现场条件的未知因素影响, 包括施工条件、材料特性、车辆荷载和桥梁结构。因此, 在设计性能更佳的材料和结构时, 需要进行关键因素的影响分析。

本文基于沪杭高速公路拓宽改建工程入城段箱梁段高架桥, 通过有限元方法和现场试验相结合的手段探讨了防水粘结层的关键路用性能及影响

因素.

1 混凝土箱梁桥铺装体系仿真模型

1.1 结构模型

以沪杭高速公路拓宽改建工程入城段的高架箱梁段桥为工程背景,上部结构采用简支预应力混凝土预制小箱梁,标准跨径基本为 30 m,横断面由 9 片箱体组成,预制段梁宽度中梁为 2.400 m,边梁 2.450 m,相邻梁中心距为 3.025 m,腹板厚度 0.180~0.250 m. 1.6 m 梁高梁纵向在跨中和两端各设 1 道横隔板,共 3 道横隔板,采用双层 SMA13 沥青混合料进行桥面铺装.

横向选取 2 个小箱梁,纵向选取两跨简支梁,建立一个足尺的三维有限元模型来分析混凝土箱梁桥的受力状态,如图 1 所示. 采用 8 节点实体单元(3-D solid)模拟 SMA(stone matrix asphalt)沥青混合料铺装层、C40 钢筋混凝土铺装层及小箱梁. 采用四节点薄膜单元(shell)模拟防水粘结层. 通过灵敏度分析确定有限元网格划分密度,直到应力值稳定(重新划分网格后计算结果误差在 5% 以内). 轮载作用区域及其他受力关键区域划分较密,其他位置划分较粗.

对各结构层作如下假定^[4]:①各结构层为均匀、连续、各向同性的体系;②各层层间竖向、水平位移均连续;③箱梁底部支座进行约束;④不计结构的自重影响.

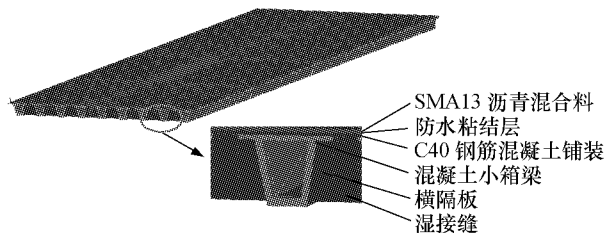


图1 混凝土箱梁桥铺装体系有限元模型

Fig.1 FE model of pavement system on concrete girder bridge

1.2 计算参数

混凝土是一个脆性材料,在低应力水平时不会达到强度极限,保持弹性变形. C40 钢筋混凝土铺装层、小箱梁均假定为线弹性材料. 参考桥面铺装及沥青混合料路面的已有研究成果^[4-5]在不考虑沥青混合料随温度场变化的力学特性且仅考虑铺装在某温度条件下的力学响应时,将 SMA13 沥青混合料铺装层和防水粘结层在有限元模型中假定为线弹性材

料,具体材料参数见表 1,常温条件(20℃)铺装层模量为 1 200 MPa,高温条件(60℃)铺装层模量为 500 MPa.

表1 铺装体系计算参数^[6-7]

Tab.1 Calculating parameters of pavement system^[6-7]

结构层	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
SMA 沥青混合料铺装层	10	1 200/500	0.3
防水粘结层	0.3	150	0.3
C40 钢筋混凝土	8	32 500	0.2
C50 小箱梁		34 500	0.2

1.3 车辆荷载及作用荷位

根据我国现行《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2006),采用公路 I 级荷载,考虑 30% 冲击系数,轮载接地压力为 0.91 MPa. 为分析计算考虑,取轮胎着地的形式为矩形,计算模型采用双轮矩形均布荷载,如图 2 所示. 轮胎与铺装摩擦系数在车辆加速或刹车时取 0.5^[8]. 为了考虑轮胎摩擦力,假设车辆突然刹车,这样就产生一个附加的正切力施加在沥青混合料铺装层表面.

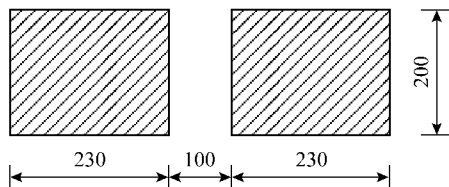


图2 双轮均布荷载(单位:mm)

Fig.2 Uniform loading area(unit:mm)

根据轮载沿横桥向分布设置 4 种荷位,荷位 1 为车载中心位于相邻两小箱梁中间湿接缝的正上方,荷位 2 为车载中心位于湿接缝一端的正上方,荷位 3 为车载中心位于一箱室一端正上方,荷位 4 为车载中心位于一箱室正上方,如图 3 所示. 对于每个横向荷位工况,沿桥纵向在跨中(荷位 a)、1/4 跨(荷位 b)及墩顶(荷位 c)布置 3 种荷载位置(图 4).

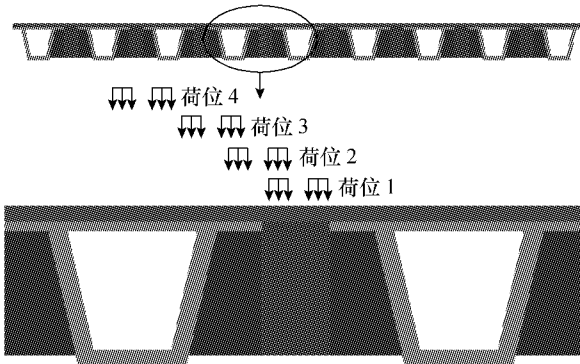


图3 横桥向荷位布置

Fig.3 Transversal loading position

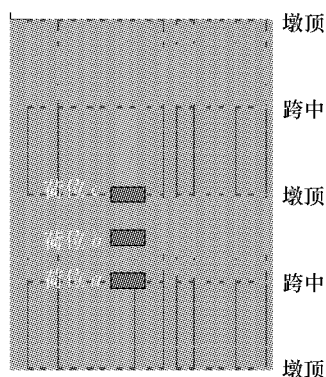


图4 纵桥向荷位布置

Fig.4 Longitudinal loading position

2 防水粘结层力学响应

根据上述荷位布置,分别计算常温和高温条件下铺装体系防水粘结层的最大拉应力及最大剪应力,得到常温条件下的不同荷位计算结果如图5。由于高温条件下防水粘结层力学响应分布规律与常温条件下相似,只是峰值有所区别,所以在控制荷位以及后续的超载和动载对防水粘结层力学响应影响分析时,限于篇幅就不再列出高温条件下的计算结果,只是在有限元分析的最后列出常温和高温条件下防水粘结层力学响应峰值,作为室内试验的理论参考依据。由图5可见,不同横向荷位作用条件下的防水粘结层各项力学响应指标变化规律也不尽相同,防水粘结层拉应力峰值的计算控制荷位为横向荷位3

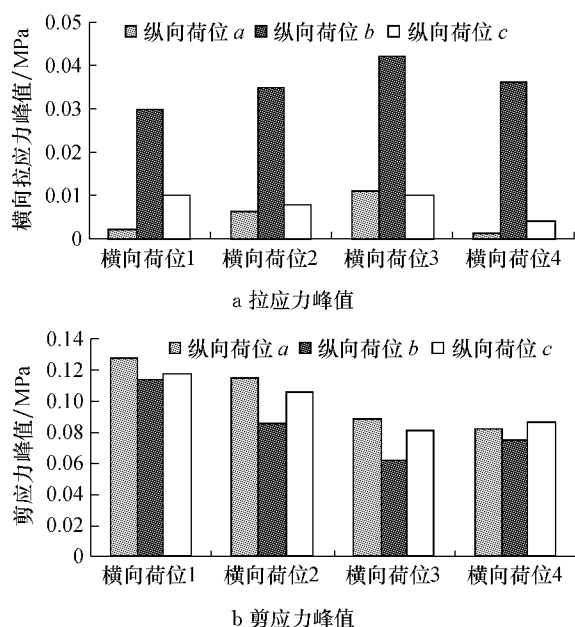
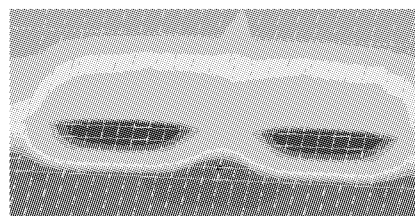


图5 不同荷位处的力学响应峰值

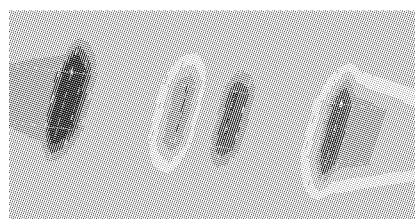
Fig.5 The peak value of mechanical response under different loading positions

的墩顶位置处的1/4跨处(3b,其中数字为横向荷位代号,字母为纵向荷位代号,下同),剪应力峰值的计算控制荷位为横向荷位1条件下的跨中处(1a)。

各控制荷位的力学响应峰值分布如图6所示。从图6a可见,在荷载作用面积区域内,防水粘结层主要表现为压应力,荷载作用之间出现拉应力峰值;从图6b可见,剪应力分布在荷载作用面积区域边缘,沿荷载作用中心呈横向反对称分布。



a 拉应力



b 剪应力

图6 小箱梁桥最不利荷位的防水粘结层应力云图

Fig.6 Distribution of stress of waterproof adhesive layer

3 荷载影响因素分析

3.1 刹车及超载因素的影响

高架线路地处繁重交通位置,重载、超载现象较为普遍,分别考虑常载、常载刹车、超载以及超载刹车条件下的防水粘结层力学响应。选取公路I级荷载,考虑超载比例为50%,考虑刹车时的水平荷载系数为0.5^[9]。计算结果如图7。可见,超载条件下的防水粘结层拉应力峰值是常载条件下的1.5倍左右,而目前重要交通线路的超载现象也相当普遍,因此,在防水粘结层设计中应该考虑超载的影响。刹车对防水粘结层剪应力的影响不大,但对拉应力峰值影响较大,在常载和超载条件下,考虑刹车因素的拉应力峰值与不考虑刹车相比增幅为68%。综合考虑刹车和超载因素的拉应力峰值是常载条件下的2.5倍,剪应力峰值是常载条件下的1.5倍。可见,在桥面设计和施工中刹车和超载都应该是重要考虑因素。

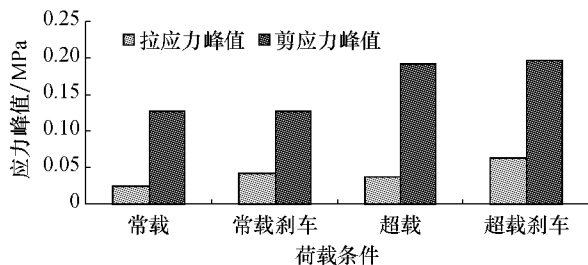


图7 刹车和超载对防水粘结层力学响应的影响

Fig.7 Influence of braking and overloading on the stress of waterproof adhesive layer

3.2 动载的影响

在沥青混凝土桥面设计中车辆荷载的动力作用通常考虑在荷载冲击系数中,而在车桥实际相互作用的过程中,桥面不平度的存在会造成车辆与桥面之间的耦合振动,产生随机动荷载作用于铺装层表面.因此,动荷载对防水粘结层的影响应该考虑桥面不平度.

3.2.1 桥面不平度

采用模拟路面不平度的功率谱密度函数(PSD)来表征水泥混凝土桥面的不平度.通过三角级数法模拟时域范围内的桥面不平度^[4],得到桥面平整度较差情况下的相对高程变化如图8所示.将平整度高程作为外部激励输入车桥振动方程便可得到车辆作用于桥面的随机动荷载,作为防水粘结层力学响应的外载输入.

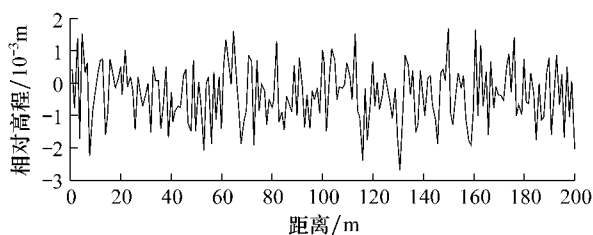


图8 桥面不平度沿纵向高程

Fig.8 Bridge deck roughness

3.2.2 移动荷载

计算模型选取静力分析时的有限元模型,移动荷载分析时不考虑刹车水平制动力的作用,但考虑超载作用.通过时间函数和时间步控制荷载的大小、作用位置以及荷载发生作用的时刻,以模拟车辆荷载在铺装层表面沿桥纵向匀速移动时的情况,根据设计资料,设计车速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,荷载移动的最小长度为 0.2 m ,荷载步总数为 68 步,移动荷载从跨中移动到一跨墩顶处,即从图4中的荷位a移动到

荷位c.

3.2.3 动响应

图9a为移动荷载作用下的防水粘结层不考虑平整度和考虑平整度的动响应计算结果.由图9a可见,当车载从跨中向墩顶移动时,拉应力峰值开始几乎没有明显的变化,当车载接近墩顶上方时,拉应力峰值有明显的增加,且最大峰值出现在荷载作用区域内.由图9b可见,随着行车荷载从一跨跨中向一跨墩顶移动,剪应力峰值在行车荷载处于跨中时达到最大值,在向墩顶移动过程中,剪应力没有明显变化,而靠近墩顶铺装层表面时,峰值又明显增加.

不考虑桥面不平度和考虑桥面不平度的力学响应峰值变化规律基本一致.考虑动载影响的拉应力峰值为 0.09 MPa ,是考虑刹车荷载作用静载计算结果的 1.4 倍;而剪应力峰值增幅达 20%.可见,考虑不平度的防水粘结层力学响应比静载作用下的计算结果有明显的增幅,在防水粘结层的设计与施工中对动载的影响也是应该加以考虑的.

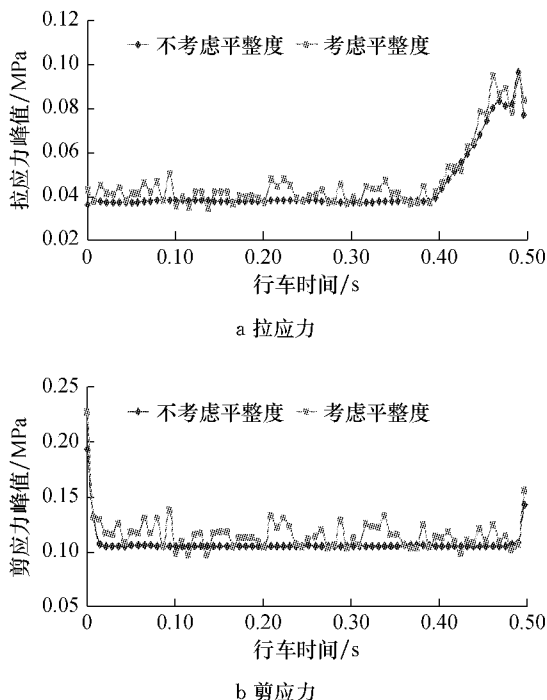


图9 防水粘结层拉应力与剪应力峰值

Fig.9 Max tensile stress and shear stress of waterproof of adhesive layer

常温和高温条件下考虑刹车超载和动载因素的防水粘结层有限元分析结果(表2)可见高温条件下防水粘结层拉应力峰值和剪应力峰值均大于常温条件下的计算结果,但在本文的依托工程中误差较小.

4 试验验证

针对桥面防水粘结层力学响应分析结果以及主要路用性能要求,对橡胶沥青、SBS (styrene butadiene styrene)改性沥青、SBS 改性乳化沥青、涂膜类防水粘结层材料等几种水泥混凝土桥面防水粘结层材料进行了常温和高温条件下的层间粘结性能试验,包括层间拉拔和剪切试验.

表 2 不同温度条件下的防水粘结层力学响应峰值
Tab.2 Peak value of mechanical response of waterproof adhesive layer under different temperatures

温度/℃	拉应力峰值/MPa	剪应力峰值/MPa
20	0.098	0.230
60	0.108	0.256

4.1 试验方案

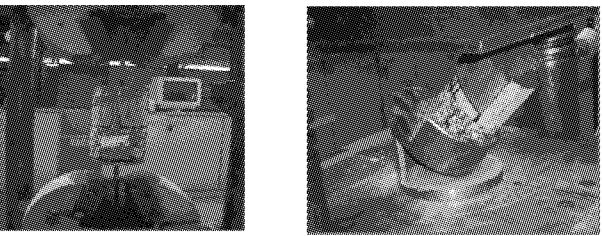
4.1.1 剪切试验

进行室内剪切试验的目的是为了确定防水粘结层抵抗剪切的能力,评价沥青混凝土与防水粘结层、水泥混凝土面板与防水粘结层之间的粘结力. 根据水泥混凝土桥面铺装的实际使用条件进行粘结层剪切强度试验. 预制厚 8 cm 的水泥混凝土试件,按表面处理、涂刷防水粘结层、碾压沥青混凝土铺装的顺序成型试件,试件受力面与加载方向取 45°夹角,试验加载速度为 10 mm · min⁻¹,实验示意图如图 10a.

4.1.2 拉拔试验

粘结性试验评价防水粘结层与桥面板的粘结能力,与剪切试验同,利用车辙板预制厚 8 cm、直径为 10 cm 的水泥混凝土试件,然后按表面处理、涂刷防

水粘结层、碾压沥青混凝土铺装的顺序成型试件. 该试验采用沥青混合料与水泥混凝土的复合试件,与实际桥面情况更为相符,实验示意图如图 10b.



a 拉拔试验 b 剪切试验

图 10 拉拔与剪切试验示意

Fig.10 Drawing test and shear test

4.2 试验结果分析

常温及高温条件下的复合结构防水粘结层剪切强度和拉拔强度试验结果(几次试验结果的平均值)如表 3 所示. 前 3 种防水粘结层材料的剪切强度均达到理论分析结果的指标要求,在考虑刹车超载和动载等因素下常温条件的橡胶沥青试验值相对力学分析峰值结果的安全系数达到 2.39,而高温条件的橡胶沥青试验值安全系数仅为 1.36,可见,高温条件下防水粘结层材料容易出现剪切破坏. 各种防水粘结层材料的拉拔强度均满足理论分析结果的指标要求,在考虑刹车超载和动载等因素下,常温条件的橡胶沥青试验值相对力学分析结果的安全系数达到 11.9,而高温条件的橡胶沥青试验值安全系数仅为 8.5,可见,无论是高温还是低温条件层间拉拔强度基本能满足力学性能要求. 从剪切及拉拔试验结果可见,SBS 改性沥青和橡胶沥青是防水粘结层材料的首选,具体应用效果还需通过试验段的实施来评价.

表 3 不同防水层材料剪切强度和拉拔强度

Tab.3 Shear strength and drawing strength of different materials					MPa
温度/℃	SBS 改性沥青	橡胶沥青	柔性防水涂料	SBS 改性乳化沥青	有限元计算结果
20	0.49,1.15	0.55,1.17	0.41,1.10	0.14,0.86	0.230,0.098
60	0.29,0.80	0.35,0.92	0.27,0.65	0.08,0.58	0.256,0.108

注:逗号前后分别表示剪切强度和拉拔强度.

5 结语

(1)防水粘结层拉应力峰值的计算控制荷位为横向荷位 1 的墩顶位置处的 1/4 跨处,剪应力的计算控制荷位为横向荷位 1 条件下的跨中处. 因此,当荷载作用位置位于湿接缝上方对应的铺装表面位置

时,防水粘结层较易出现拉拔和剪切破坏.

(2)刹车对防水粘结层剪应力的影响不大,但对拉应力峰值影响较大,在常载和超载条件下,常温条件考虑刹车因素的拉应力峰值与不考虑刹车相比增幅为 68%. 综合考虑刹车和超载因素的拉应力峰值是常载条件下的 2.5 倍,剪应力峰值是常载条件下

(下转第 67 页)