

水稳基层水泥路面层间剪切刚度的实测与修正

张艳聪^{1,2,3}, 高玲玲⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术
交通行业重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,
湖南 长沙 410014; 4. 山西水利职业技术学院 道路与桥梁工程系, 山西 运城 044004)

摘 要:为准确表征水泥混凝土路面基-面层层间接触参数, 研发了可反映层间法向压应力差异的水平剪切试验仪, 分 2 个阶段测定了层间经乳化沥青、土工布和沥青混凝土夹层等 3 种措施处置的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面的层间粘结-滑移曲线; 通过回归分析建立了层间平均剪切刚度和法向压应力的关系模型; 采用试算法确定了当量单圆荷载下层间剪切面的大小, 并基于简单迭代法对层间平均剪切刚度进行了压应力修正, 最终推荐了 3 种层间处置措施下的层间当量剪切刚度。研究表明: I 阶段的剪切试验中, 层间使用乳化沥青处置的试件克服层间粘结所需的剪力最大、土工布次之、沥青混凝土夹层最小, 基-面层粘结状态与层间处置措施显著相关, 并直接影响着路面的结构行为, 层间处置措施选择时需要在降低面层荷载应力和温度应力之间寻求平衡; 与 I 阶段的剪切结果相比, II 阶段的剪切试验中, 3 种试件的抗剪能力均显著减弱, 平均剪切刚度大幅下降, 不同使用阶段的路面结构层间剪切刚度差异巨大, 路面结构分析时层间抗剪参数的选择须与使用状态相适应。

关键词:道路工程; 水泥混凝土路面; 层间当量剪切刚度; 粘结-滑移曲线; 层间处置措施

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

Interface shear stiffness test and correction for cement concrete pavement with cement stabilized crushed stone base

ZHANG Yan-cong^{1,2,3}, GAO Ling-ling⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region of Ministry of Transport, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, Hunan, China; 4. Department of Road and Bridge Engineering, Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng 044004, Shanxi, China)

Abstract: In order to accurately characterize the interface contact parameter between cement concrete slabs and base, the horizontal shear tester was invented which can simulate the vertical stress. The bond stress-slip curve of cement stabilized crushed stone base concrete pavement specimen in which the interface treated with emulsified asphalt, geotextile and asphalt concrete interlayer was determined in two stages. Then the relationship model between average shear

收稿日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308329); 山西省青年科技研究基金项目(2015021115); 长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金项目(kfj140305)

作者简介: 张艳聪(1985-), 男, 河南鲁山人, 山西省交通科学研究院工程师, 长安大学工学博士研究生, E-mail: zuoyouan103@163.com。

stiffness and vertical compressive stress was established by regression analysis. The size of the interface shear area under the equivalent of a single round load was determined by trial algorithm. Compress stress correction was made for average shear stiffness based on simple iterative method. Equivalent shear stiffness of the three interlayer disposal measures was recommended. The results show that in the first stage of shear test, specimen interface treated with emulsified asphalt requires the maximum shear stress, geotextiles requires little and asphalt concrete is minimum. The interface contact state between slab and base is significantly related to the interface treatment measures, and it has a significant effect on the structural behavior of pavement. So, the interface treatment measure selection needs to find a balance between flexural stress and thermal stress of slab. Compared with the test results of stage one, in the second stage, shear capacity of the three kinds of specimens are significantly weakened and the average shear stiffness decline dramatically. The difference between interface shear stiffness of pavement structure is tremendous in different using stages, so the interface shear parameter selection must adopt the using state of pavement in structural analysis. 7 tabs, 8 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; interface equivalent shear stiffness; bond stress-slip curve; interface treatment measure

0 引言

水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面在使用过程中基-面层逐渐分离,层间粘结状态不断变化,因此层间参数的取值是影响其结构分析与性能评价的重要因素^[1-6]。影响水泥混凝土路面结构行为的层间参数主要体现在抗剪能力表征上。关昌余等提出了将直接剪切仪用于测试沥青面层间的抗剪特性^[7]; Woods 等研发了 TCED 和 LBISD 用于测试层间的粘结效应^[8];除此之外,Collop 等分别采用不同的剪切设备对路面结构层间的剪切效应进行了测试^[9-14]。关于层间粘结状态的模拟,一般通过在接触面间设置弹簧来实现,用弹簧的两向刚度系数或层间剪切刚度来表征层间接触状况^[15-18]。以上研究虽得到了许多有益成果,但小型试件的尺寸效应、层间剪切面大小和位置的不确定性、剪切面上法向应力变化造成的剪应力差异无法模拟等问题都对层间参数的测定和模拟提出了更高的挑战。基于此,为准确表征水泥混凝土路面基-面层层间接触参数,本文在研发可反映层间法向压应力差异的水平剪切试验仪的基础上,分 2 个阶段测定了层间经 3 种措施处置的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面的层间粘结-滑移曲线;进而通过回归分析建立了层间平均剪切刚度和法向压应力的关系模型;并基于简单迭代法对层间平均剪切刚度进行了压应力修正,最终推荐了 3 种层间处置措施下的层间当量剪切刚度,为水泥混凝土路面结构分析提供了参数取值依据。

1 层间剪切刚度与剪切试验仪

1.1 层间剪切刚度

层间抗剪能力由摩阻力系数 μ 表示为

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

式中: F 为水平推力; N 为混凝土板的重力。

对于水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面而言,基-面层层间抗剪能力的测定与摩阻力系数的测定类似。首先通过顶推试验获得基-面层层间粘结-滑移曲线;然后对粘结-滑移曲线的上特征值进行处理,得到层间剪切刚度。按照路面的使用阶段,可分为层间粘结、分离 2 种状态,分别获得路面的层间粘结-滑移曲线。层间粘结时可模拟新浇筑的水泥混凝土路面,层间分离用以模拟使用一定时间后层间逐渐分离的路面,二者可分别视为摩擦学中的静摩擦和滑动摩擦^[19]。

层间结合时,用水平剪切刚度 T 来表征该阶段的层间抗剪能力

$$T = \frac{\tau}{\xi} \quad (2)$$

式中: τ 、 ξ 分别为层间结合时粘结-滑移曲线上的最大剪应力和位移。

层间分离后,用水平剪切刚度 T_m 来表征其层间抗剪能力

$$T_m = \frac{\tau_m}{\xi_m} \quad (3)$$

式中: τ_m 、 ξ_m 分别为层间分离时粘结-滑移曲线上的最大剪应力和位移。

1.2 层间剪切试验仪

为了克服小型试件的尺寸效应,以及直剪、斜剪试验不能模拟层间剪切面上法向应力变化等问题,研发了一种可模拟竖向荷载的层间水平剪切试验仪,如图 1 所示。

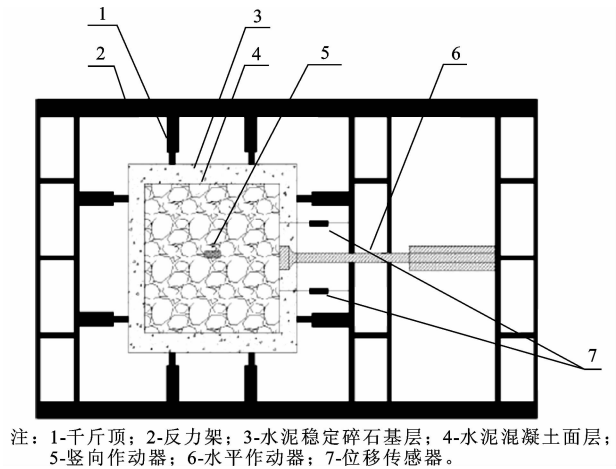


图 1 层间水平剪切试验仪
Fig. 1 Interlayer horizontal shear tester

试验仪以双通道 MTS 为基础,将竖向作动器的末端夹具改进为轮胎加载的方式,使其在施加竖向荷载的同时不影响试件的水平剪切;水平作动器作用于面层的侧面进行层间剪切,由此实现竖向可变荷载作用下抗剪能力的测定。

2 水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面层间剪切试验

为了准确测定层间结合、分离 2 个使用阶段的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面的基-面层层间剪切刚度,剪切试验相应地分为 2 个阶段进行。Ⅰ阶段为层间结合试件的剪切,剪切过程中,试件的面层和基层由有粘结逐渐变为分离;Ⅱ阶段为层间分离后的试件在竖向荷载作用下的重复剪切,主要用以模拟层间分离的路面结构。

2.1 试验方法

利用层间水平剪切试验仪,通过顶推试验测定层间结合、分离 2 个阶段的水泥稳定碎石水泥混凝土路面的基-面层粘结-滑移曲线,然后分别计算这 2 个阶段的层间水平剪切刚度。试件采用 3 种层间处置方式,分别为乳化沥青、土工布和 3 种厚度的沥青混凝土夹层,共 5 组,每组试件 3 块,如表 1 所示。

试件的成型如图 2 所示,水泥稳定碎石基层的三维几何尺寸为 80 cm×80 cm×20 cm,水泥混凝土

表 1 层间处置措施方式
Tab. 1 Interlayer dispose ways

组序号	层间处置方式	厚度/cm
1	乳化沥青	0.1
2	土工布	0.5
3	沥青混凝土夹层	2.0
4		4.0
5		8.0



(a) 层间处置



(b) 面层混凝土浇筑

图 2 水泥稳定碎石基层、水泥混凝土路面试件
Fig. 2 Specimens of concrete pavement with CTB

土面层的三维几何尺寸为 70 cm×70 cm×26 cm,配合比如表 2 所示。

表 2 配合比
Tab. 2 Mix proportion

水泥/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg
370	155	693	1 231

试件养生完成后,整体置于水平剪切试验仪中,基层通过千斤顶与试验槽四周固定。参考文献[20]的研究成果,水平作动器作用于面层的侧面,以 0.06 mm/min 的速率加载,并记录粘结-滑移曲线。

Ⅰ阶段的剪切采用新试件进行,模拟层间结合的路面结构;Ⅱ阶段的试验先将Ⅰ阶段剪切结束的试件复位,再进行竖向荷载作用下的重复剪切,模拟层间分离的路面结构。经实测:当竖向压力为 3 kN 时,接地面积约为 41 cm²,接地压力约为 0.73 MPa。为使试验轮产生的竖向压力接近标准轴载产生的接地压力 0.7 MPa,同时考虑重载车辆高轮压的影响,试验测定竖向压力分别为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、5.0 kN 时的粘结-滑移曲线。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 层间结合时的试验结果与分析

采用 2.1 节的试验方法,对 5 组新试件进行剪切试验,结果取每组的平均值,如表 3 所示。3 种层间处置措施中,乳化沥青的层间摩阻力最大,沥青混凝土夹层最小,且夹层厚度越大,克服层间粘结所需的剪力越小,层间抗剪能力越弱。

表 3 5 组试件的水平剪切试验结果

Tab. 3 Shear test results of 5 groups specimens

层间处置措施	不同厚度沥青混凝土 夹层/cm			土工 布	乳化 沥青
	2	4	8		
最大剪应力/kPa	55.5	45.7	31.8	137.1	160.2
最大剪应力对应的位 移/mm	1.95	2.54	2.86	1.84	6.80
层间平均剪切刚度/ (kPa·mm ⁻¹)	28.5	18.0	11.1	74.5	23.6

理论上,当基-面层粘结时,基层分担了面层的荷载应力,面层底部的荷载弯拉应力有效降低;当基-面层分离时,面层的温度翘曲不受基层粘结的约束,其温度应力明显降低。由于粘结状态与层间处置措施显著相关,并直接影响着水泥混凝土路面的结构行为,因此,层间处置措施的选择需要在降低面层荷载应力和温度应力之间寻求平衡。

2.2.2 层间分离时的试验结果与分析

层间分离后,由于沥青混凝土夹层的厚度对粘结-滑移曲线的影响不明显,故只列出层间经乳化沥青、土工布和 4 cm 沥青混凝土夹层处置的试件的粘结-滑移曲线,结果取同组试件的平均值,如图 3~图 5 所示,图中曲线分别为不同竖向压应力作用下的测试结果。当法向应力相同时,层间经土工布处置的试件抗剪能力最高,乳化沥青处置的最低。法向应力不同时,3 种措施处置的试件层间抗剪能力均随法向应力的增加而提高,沥青混凝土夹层的增幅最大,可达 114.6%。

与 I 阶段的剪切结果相比,层间分离后试件的抗剪能力大幅下降,层间经乳化沥青处置的降幅最大,达 96.2%,沥青混凝土夹层和土工布处置的分别降低 94.4%和 89.9%。因此,不同使用阶段的路面结构,其层间剪切刚度差异巨大,路面结构分析时层间抗剪参数的选择须与使用状态相适应。

2.3 层间平均剪切刚度的确定

结合 2 个阶段的剪切试验,层间经乳化沥青、土工布和沥青混凝土夹层处置的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面结构在层间结合、分离这 2 种状态下

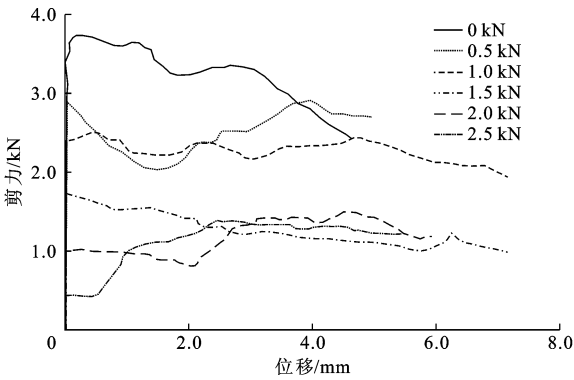


图 3 剪力-位移曲线(乳化沥青)

Fig. 3 Shear-displacement curves (emulsified asphalt)

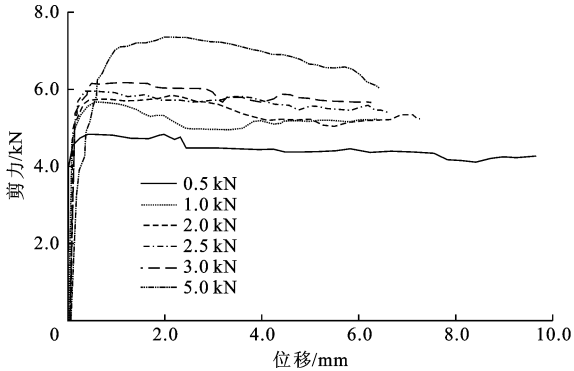


图 4 剪力-位移曲线(土工布)

Fig. 4 Shear-displacement curves (geotextile)

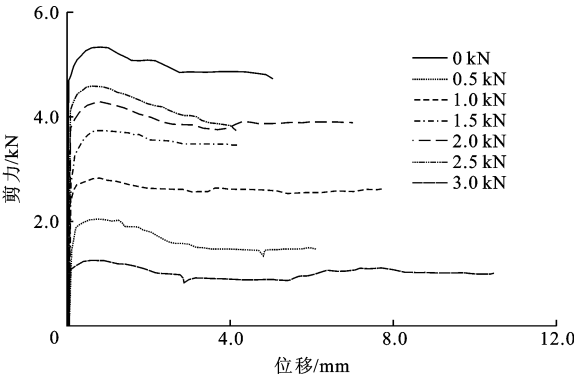


图 5 剪力-位移曲线(4 cm 沥青混凝土夹层)

Fig. 5 Shear-displacement curves (4 cm asphalt concrete layer)

的层间平均剪切刚度如表 4 所示。

表 4 不同界面类型下的平均剪切刚度

Tab. 4 Average shear stiffness under different interface-types

层间粘结 状态	平均剪切刚度/(kPa·mm ⁻¹)		
	沥青混凝土夹层	土工布	乳化沥青
层间结合	10.0~30.0	60.0~80.0	25.0~35.0
层间分离	2.0~8.0	3.0~5.5	0.5~1.0

3 基于简单迭代法的层间平均剪切刚度的修正

水平剪切试验反映的是路面结构的平均抗剪能

力,由剪力-位移曲线确定的层间剪切刚度也是试件的平均值,无法全面反映剪切面上竖向压应力的差异,也不能反映真实剪切面的大小,因此将该剪切刚度直接应用于路面结构分析,势必会引起较大的误差。针对该问题,首先探讨层间平均剪切刚度与竖向压应力的关系模型,然后借助于有限元,对平均剪切刚度进行竖向压应力修正。

3.1 考虑竖向压应力影响的平均剪切刚度的预估

3 种层间处置方式下,层间平均剪切刚度随竖向压应力的变化规律如图 6 所示。

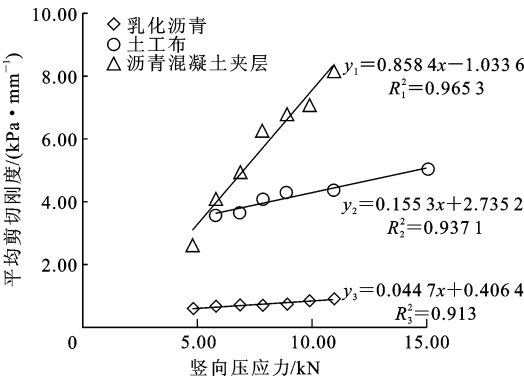


图 6 平均剪切刚度和竖向压应力的关系曲线
Fig. 6 Relationship curves between average shear stiffness and vertical compress stress

结合剪切试验结果,通过回归分析建立竖向压应力与层间平均剪切刚度的映射关系为

$$T = k_1\sigma + k_2 \tag{4}$$

式中: σ 为竖向压应力,与面层参数、竖向荷载有关; k_1 、 k_2 分别为回归系数,与基层参数和层间粘结状态等有关。

对于层间经乳化沥青处置的试件,层间平均剪切刚度的预估模型为

$$T = 0.04\sigma + 0.43 \tag{5}$$

同理,可得到考虑竖向压应力时层间剪切刚度预估公式的系数,如表 5 所示。

表 5 层间平均剪切刚度预估模型系数			
系数	不同界面类型下平均剪切刚度的预估模型系数		
	沥青混凝土夹层	土工布	乳化沥青
k_1	0.86	0.16	0.04
k_2	-1.03	2.74	0.43

3.2 基于简单迭代法的层间当量剪切刚度的推荐

由图 6 可知,层间平均剪切刚度随竖向压应力的增加而增大。由于竖向应力在层间界面上的分布并不均匀,荷载正下方最大,向周围逐渐减小,因此,不能忽略因竖向压应力不同引起的层间剪切刚度在

层间界面上的分布差异问题,需要对单一竖向压应力作用下的层间平均剪切刚度式(4)进行修正,以确定可以代表竖向荷载实际作用效果的当量剪切刚度,进行路面结构分析。

3.2.1 求解层间当量剪切刚度的简单迭代法

车辆荷载产生的竖向压应力沿荷载中心向周边逐渐减小,因此计算层间界面上的当量剪切刚度时,需选取合适的区域来保证层间剪切刚度均值的合理性。如图 7 所示,单圆荷载作用于面层表面,假设层间接触面上荷载中心位置的竖向压应力为 σ_{\max} ,则沿中心往周边 σ 逐渐减小。以当量圆圆心为中心,沿道路纵向和横向划分网格,并假设每一网格内区域承受的竖向压应力相等。则可以通过以下步骤求得该工况下的层间界面当量剪切刚度:

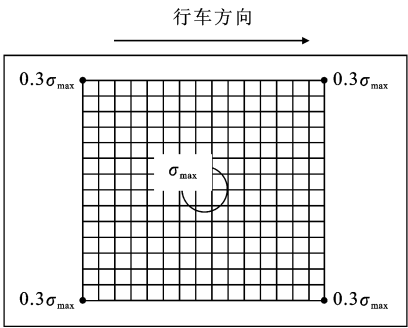


图 7 单圆荷载作用下的层间接触面
Fig. 7 Interface under single circular load

- ①采用有限元法,以表 4 中实测的层间平均剪切刚度为 T_0 ,计算各网格 4 个角点的竖向压应力;
- ②根据式(4),计算 4 个角点处的层间剪切刚度;
- ③平均 4 个角点的剪切刚度值,得到该网格的平均剪切刚度;
- ④同理,依次计算该区域内其他网格的平均剪切刚度;
- ⑤再以网格为基础,进一步平均,得到该区域的平均剪切刚度 T_1 ;
- ⑥以得到的 T_1 为基础,再进行步骤④~⑤,可得到 T_2 ;
- ⑦如此简单迭代,直至 $T_{n+1} \approx T_n$ 时,即可认为 T_n 为可代表该层间粘结状态的剪切刚度。

如此以来,单圆荷载的影响范围(实际剪切面的大小)便成了影响迭代收敛性的关键因素,范围取值过大,则影响收敛速度,取值过小则精度较低。经反复试算,0.3 σ_{\max} 是影响区域取舍的关键指标,以 σ_{\max} 为中心,0.3 σ_{\max} 为角点的矩形区域内,竖向压应力对竖向荷载的敏感性较高,因此选定以 0.3 σ_{\max} 为角点的矩形区域作为当量单圆荷载的影响范围,对路面

结构层间剪切刚度做当量处理。

3.2.2 层间当量剪切刚度的推荐

首先,建立 Winkler 地基上的三维路面结构模型,如图 8 所示, h_1 、 E_1 、 μ_1 分别为面层的厚度、弹性模量、泊松比; h_2 、 E_2 、 μ_2 分别为基层的厚度、弹性模量、泊松比; k 为地基反应模量; P 为轴重,100 kN 的单轴双轮组荷载作用于纵缝边缘中部。

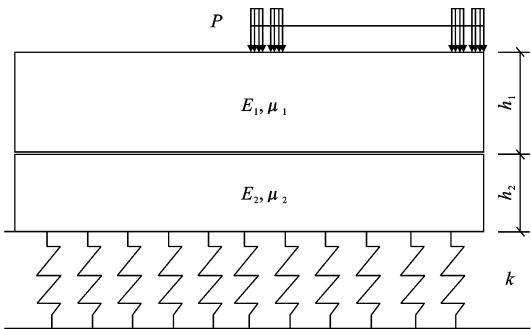


图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation model

以层间采用乳化沥青处置的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面为例,层间平均剪切刚度依据表 4 选取,竖向支撑刚度取 3 000 MPa/m。一般参数的选取如表 6 所示。

表 6 一般参数取值
Tab. 6 General parameter values

面层尺寸/cm	450×400×26	基层尺寸/cm	450×400×15
弹性模量 E_1 /GPa	30	弹性模量 E_2 /MPa	3 000
泊松比 μ_1	0.15	泊松比 μ_2	0.25
线膨胀系数 α /℃ ⁻¹	10 ⁻⁵	密度 ρ_2 /(kg·m ⁻³)	2 350
密度 ρ_1 /(kg·m ⁻³)	2 400	面层温度梯度/(℃·m ⁻¹)	80
地基的反应模量 k /(MPa·m ⁻¹)	30		

经计算,迭代 11 次后的计算层间平均剪切刚度 T_{11} 为 1.823 kPa/mm,近似等于 T_{10} 。即:标准轴载作用下,层间采用乳化沥青处置的水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面的层间当量剪切刚度为 1.8 kPa/mm;同理,层间经土工布、沥青混凝土夹层处置的路面结构的层间当量剪切刚度如表 7 所示,均略大于试验实测结果。

表 7 层间当量剪切刚度

Tab. 7 Equivalent interlayer shear stiffnesses

不同界面类型的层间当量剪切刚度/(kPa·mm ⁻¹)		
沥青混凝土夹层	土工布	乳化沥青
9.6	5.0	1.8

4 结 语

(1)针对常规剪切试验不能反映竖向压应力影

响的问题,研发了可模拟竖向荷载的层间水平剪切设备,测定了水泥稳定碎石基层水泥混凝土路面基层层间剪力-位移曲线,并建立了层间平均剪切刚度的预估模型。

(2)在平均剪切刚度的基础上,为反映剪切面上竖向压应力的差异,基于简单迭代建立了当量剪切刚度的确定方法,并推荐了标准轴载作用临界荷位时,3 种层间处置措施下路面结构的层间当量剪切刚度。

(3)层间粘结状态与层间处置措施显著相关,并直接影响着路面的结构行为,层间处置措施的选择需要在降低面层荷载应力和温度应力之间寻求平衡。层间分离后,层间抗剪刚度大幅降低,路面结构分析时层间抗剪参数的选择须与使用状态相适应。

(4)由于层间处置措施的多样化及其路用性能衰减的必然性,为了提高层间当量剪切刚度取值在整个使用基准期内的可靠性,下一步应进行层间处置措施长期性能的评价。

参考文献:

References:

[1] SAWANT V. Dynamic analysis of rigid pavement with vehicle-pavement interaction[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 10(1): 63-72.

[2] ROSYIDI S A, ABBISS C P, NAYAN K A, et al. Study of the relationship between stiffness parameters for base materials[J]. Transport, 2012, 165(3): 159-165.

[3] 张艳聪,赵队家,刘少文,等.考虑层间接触时基层参数对水泥路面力学特性的影响[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2014,33(2):49-52,67.
ZHANG Yan-cong, ZHAO Dui-jia, LIU Shao-wen, et al. Impacts of base parameters on mechanical properties of cement pavement considering interlayer contact[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2014, 33(2): 49-52, 67. (in Chinese)

[4] 周玉民,谈至明,李立寒.混凝土路面接缝填缝料振动特性分析[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(4):564-568.
ZHOU Yu-min, TAN Zhi-ming, LI Li-han. Vibrating characteristics of joint sealant on concrete pavement [J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2012, 40(4): 564-568. (in Chinese)

[5] 张 娟,雷 甲,马庆伟.连续配筋混凝土路面收缩应力特征研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,32

- (8):46-50.
- ZHANG Juan, LEI Jia, MA Qing-wei. Study on shrinkage stress of continuously reinforced concrete pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2015, 32(8):46-50. (in Chinese)
- [6] 段云岭, 刘华北. 材料非线性接缝模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(8):98-101.
- DUAN Yun-ling, LIU Hua-bei. Material nonlinear joint model[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(8):98-101. (in Chinese)
- [7] 关昌余, 王哲人, 郭大智. 路面结构层间结合状态的研究[J]. 中国公路学报, 1989, 2(1):70-80.
- GUAN Chang-yu, WANG Zhe-ren, GUO Da-zhi. A study of contact conditions of interfaces in pavement layers[J]. China Journal of Highway and Transport, 1989, 2(1):70-80. (in Chinese)
- [8] WOODS M E. Laboratory evaluation of tensile and shear strengths of asphalt tack coats[D]. Starkville: Mississippi State University, 2004.
- [9] SANGIORGI C, THOM N H, COLLOP A C. Assessment of bond condition using the leutner shear test[J]. Transport, 2003, 156(4):211-217.
- [10] WEST R C, ZHANG J N, MOORE J R. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [11] 王亚玲, 周玉利, 姚爱玲, 等. 沥青混凝土桥面铺装结构层间剪切与拉拔试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6):15-18.
- WANG Ya-ling, ZHOU Yu-li, YAO Ai-ling, et al. Test of shear and pull-off between asphalt and concrete on bridge deck pavement structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6):15-18. (in Chinese)
- [12] 李 盛, 刘朝晖, 李宇峙, 等. 刚柔复合式路面层间界面剪切疲劳试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7):151-156.
- LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi, et al. Experimental study on interlaminar shear fatigue of rigid-flexible composite pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7):151-156. (in Chinese)
- [13] 张俊峰, 王协群, 邹维列, 等. 土-格栅界面强度参数和剪切刚度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3):77-83.
- ZHANG Jun-feng, WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie, et al. Experimental study on shear strength parameters and shear stiffness behavior of soil-geogrid interface[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(3):77-83. (in Chinese)
- [14] 陈建胜, 陈从新, 鲁祖德, 等. 强风化角岩力学-变形特性的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9):2869-2874.
- CHEN Jian-sheng, CHEN Cong-xin, LU Zu-de, et al. Direct shear test for strength and deformation characteristics of highly decomposed hornfels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2869-2874. (in Chinese)
- [15] 张 强. 层间接触状况对刚性路面结构受力影响分析[J]. 山西交通科技, 2009(3):51-53, 56.
- ZHANG Qiang. The analysis of the interlayer contact conditions influencing rigid pavement structure stress[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2009(3):51-53, 56. (in Chinese)
- [16] 刘 丽, 郝培文, 徐金枝. 粘层状况对沥青路面层间剪切疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10):11-15.
- LIU Li, HAO Pei-wen, XU Jin-zhi. Influence of tack coat condition on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(10):11-15. (in Chinese)
- [17] ARULRAJAH A, RAHMAN M A, PIRATHEEPAN J, et al. Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(5):974-982.
- [18] 邓文琴, 张建东, 刘 朵, 等. 角钢连接件剪切刚度计算方法及试验研究[J]. 现代交通技术, 2016, 13(1):35-38, 44.
- DENG Wen-qin, ZHANG Jian-dong, LIU Duo, et al. Study of calculation and experiment for shear stiffness of angle steel connector[J]. Modern Transportation Technology, 2016, 13(1):35-38, 44. (in Chinese)
- [19] 张艳聪, 高玲玲, 申俊敏. 水泥混凝土路面层间剪切刚度试验研究[J]. 公路, 2015(9):10-13.
- ZHANG Yan-cong, GAO Ling-ling, SHEN Jun-min. Test and study of interlayer shear stiffness for cement concrete pavement[J]. Highway, 2015(9):10-13. (in Chinese)
- [20] LI S L, TIAN B, NIU K M, et al. Characteristics of base friction for concrete pavement structure in China: experimental study [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013(2367):107-112.