

艾长发,刘一鸣,任东亚. 基于压-直剪试验方法的沥青路面层间污染特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(5):21-29.

AI Chang-fa, LIU Yi-ming, REN Dong-ya. Interlayer pollution characteristics of asphalt pavement based on compression-direct shear test method[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(5): 21-29.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.003

基于压-直剪试验方法的沥青路面层间污染特性

艾长发^{1,2}, 刘一鸣^{1,2}, 任东亚^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为探究在行车荷载下,路面层间有污染情况时的层间强度特性,在已有直剪试验夹具的基础上将其改进为压-直剪装置,对复合马歇尔试件层间进行压-直剪切试验。采用 3 种污染进行层间环境处理(土污染、水污染、油污染),在不同土污染量下(0、0.3、0.6、0.9 kg/m²);不同水污染量下(0、0.3、0.6、0.9 kg/m²);不同油污染量下(0、0.3、0.6、0.9 kg/m²);及不同水平应力条件下(0、0.1、0.3、0.5 MPa)进行压-直剪切试验,研究上述因素对复合马歇尔试件层间剪切强度的影响规律。研究表明:在纯直剪和压-直剪下,3 种污染都不同程度减弱了层间的黏结性能。在同一土污染量下,剪切强度均随着水平压应力的增大而增加。在同一水平压应力下,随土污染量的增加,剪切强度的降幅逐渐减小,且在 0.5 MPa 的压应力下,破坏界面土污染的覆盖面积增大,但其对层间剪切强度几乎无影响。在纯直剪下,水污染显著影响剪切强度,随着水污染的增加剪切强度最大变化为 0.2 MPa,而在压-直剪下则最大不超过 0.1 MPa。在同一水平压应力下油污染用量的增加使得剪切强度分别下降了 79.24%、80%和 79.4%,在油污染量为 0.9 kg/m² 下,水平压应力的增加已不能抑制油污染对层间剪切强度的削弱。通过建立对 3 种污物和污染量在无压应力和有压应力下与剪切强度的拟合模型,分析得出各污染对层间强度的影响程度从大到小依次为油污染、土污染、水污染。与纯直剪相比,压-直剪下的不同梯度水污染和土污染对层间剪切强度无明显作用,但在油污染影响下的层间剪切强度有明显的降幅。

关键词:道路工程;层间污染;复合马歇尔试件;黏结性能;压-直剪切试验;压应力;剪切强度

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)05-0021-09

Interlayer pollution characteristics of asphalt pavement based on compression-direct shear test method

AI Chang-fa^{1,2}, LIU Yi-ming^{1,2}, REN Dong-ya^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Road Engineering, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The interlayer strength characteristics of pavement layers under pollution conditions were investigated by conducting pressure-direct shear tests on composite Marshall specimens, and the direct shear test fixture had been improved into a pressure-direct shear device based on

收稿日期:2023-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52278462);四川省科技计划项目(2021JDTD0023)

作者简介:艾长发(1975-),男,江西南城人,教授,博士研究生导师,E-mail:cfai@home.swjtu.edu.cn.

通讯作者:任东亚(1985-),男,安徽濉溪人,副教授,工学博士,E-mail:dongyaren@swjtu.edu.cn.

existing equipment. Three types of pollution (soil pollution, water pollution, and oil pollution) were used to simulate interlayer environmental conditions, with different levels of pollution, soil pollution (0, 0.3, 0.6, 0.9 kg/m²), water pollution (0, 0.3, 0.6, 0.9 kg/m²), and oil pollution (0, 0.3, 0.6, 0.9 kg/m²). Additionally, different horizontal stress conditions were applied (0, 0.1, 0.3, 0.5 MPa) during the pressure-direct shear tests, the impact of these factors on the interlayer shear strength of the composite Marshall specimens were studied. The results show that under both pure direct shear and pressure-direct shear, all three types of pollution weaken the interlayer bonding performance to varying degrees. Under the same soil pollution level, shear strength increases with an increase in horizontal stress. As the soil pollution level increases under the same horizontal stress, the reduction in shear strength gradually decreases, and at 0.5 MPa of pressure, the coverage area of the interface soil pollution increases, but it has almost no effect on the interlayer shear strength. Under pure direct shear, water pollution significantly influences the shear strength, with a maximum variation of 0.2 MPa, while under pressure-direct shear, it does not exceed 0.1 MPa. Increasing the amount of oil pollution under the same horizontal stress results in shear strength reductions of 79.24%, 80% and 79.4%, respectively. At an oil pollution level of 0.9 kg/m², an increase in horizontal stress can no longer restrain the weakening effect of oil pollution on the interlayer shear strength. By establishing fitting models for the three types of pollution and pollution levels with shear strength under both no stress and with stress conditions, the analysis reveals the following order of influence on interlayer strength, oil pollution, soil pollution, water pollution. When compared to pure direct shear, pressure-direct shear shows no significant effects of different gradients of water pollution and soil pollution on interlayer shear strength. However, under the influence of oil pollution, pressure-direct shear exhibits a notable reduction in interlayer shear strength. 2 tabs, 12 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; interlayer contamination; composite Marshall specimen; bonding performance; pressure-direct shear test; compressive stress; shear strength

0 引言

随着重载交通和交通量的发展,行驶的车辆对路面层间的黏结有了更高的要求^[1-4]。通常情况下,沥青路面上面层为 4 cm,与路面表面十分接近,受到来自车辆的剪切应力较大,极易容易发生路面层间的偏移破坏。刘富强等用 ABAQUS 模拟了路面层间最大剪应力位置随水平力系数 f 的变化关系,随着 f 的增大,最大剪应力也随之增大,且 f 由 0.25 增至 0.5 的过程中,最大剪应力出现的位置为路面上中面层^[5]。颜可珍等以 3D-Move Analysis 模拟了动荷载和静荷载下路面层间受力情况的不同,路表在静荷载下受到最大的剪应力,而在动荷载下最大剪应力分布于上中面层位置,因此上面层与中面层的黏结是路面结构中的关键环节^[6]。层间较差的黏结会引发路面常见的各种病害,如车辙、推移等。Ge 等采用了 4 种不同黏层油,发现了层间黏结

不良时下层结构会更易诱发疲劳开裂^[7]。Mohammad 等认为只有紧密黏结的层间,才能使路面具有良好的承载性能和抵抗病害的能力^[8]。但层间的黏结在通常情况下并不理想,在层间的实际施工过程中有许多不可控制的因素会对层间黏结造成影响,最明显的便是污染物在层间表面的滞留。其与洒布的沥青混合后不仅影响了沥青本身的性质,还阻碍了路面结构上下层之间的接触,黏层油也难以渗透到下一层使得上下层沥青混合料的整体性变差。沥青路面在施工时,层间容易受到风带来的沙土污染和施工机械的机油污染。同时,在进行路面大规模摊铺时,因为工期进度的需要,在降雨后路面层间还未完全干时,部分区域还存在明显的滞留水,就进行了另一层混合料的摊铺。这些污染都不同程度的影响了路面层间的黏结性能。为了了解污染物对层间的作用机理和影响程度,众多学者进行了研究和探讨^[9]。

罗志刚等采用直剪试验,对水污染下基层与面层之间的黏结进行探讨得出,保持层间界面的洁净能够提高层间黏结^[10]。杜健欢等通过疲劳试验验证得出,层间洒水量的增加加速了复合小梁层间疲劳寿命的衰减速度^[11]。田荣燕等同时使用斜剪和拉拔试验进行层间试验,发现随着土污染量的增大,层间强度的降幅越大,保持层间界面的洁净有助于保持路面的整体性^[12]。上述学者均是通过直剪、斜剪和拉拔试验检测层间的黏结性能,这些是测定层间强度的常见方法。但是在路面使用时,沥青路面主要是在车辆荷载作用下发生破坏,使得面层结构发生剪切破坏。为模拟路面实际情况,在受到垂直于层间界面的压应力条件下,研究污染物对路面结构的影响十分有必要。

Hakimzadeh 等采用自制的夹具对层间不同沥青洒布量的复合试件进行了拉拔试验,基于试验数据分析出沥青最佳的洒布量,并以拉拔试验作为评价层间黏结性能的方法^[13]。王亚玲等使用拉拔仪测试了不同黏层油用量的复合沥青混凝土板层间黏结强度^[14]。层间强度的测试不仅有拉拔试验,剪切试验也是常用的层间强度测试方法,通常有直剪和斜剪 2 种。刘丽等通过自制的剪切装置测试了在不同种类黏层油环境下复合马歇尔试件的直剪强度^[15]。Tang 等使用斜剪装置试验,发现复合马歇尔试件在层间破坏过程中产生了体积膨胀,并依据膨胀速度评价了层间剪切疲劳强度^[16]。综上,国内外对于层间性能研究方法尚未统一^[17-18]。关于层间强度的测试和评价方法众多,不同的研究都有关于层间测试的独立研发装置。但是在这些已有的装置中,纯直剪装置没有考虑车辆带来的竖向压应力;拉拔装置则是忽略了路面破坏的实际情况,路面破坏主要为剪切破坏而非受拉破坏,拉拔试验数据对于研究路面层间破坏的参考价值相对较低^[19-21]。而斜剪装置大都基于 45° 进行剪切,层间界面同时受到相等的压应力与剪应力,因此难以对压应力进行控制,不能达到模拟路面行车荷载的效果^[22-23]。基于此,本研究在已有的纯直剪装置基础上,将其改进成了能施加竖向剪切应力的同时又能提供垂直于层间界面压应力的测试装置:压-直剪层间强度测试装置^[24-25]。本文利用该装置对不同层间污染环境(土污染、水污染、油污染)下的层间剪切强度性能进行研究,分析了 3 种污染因素影响的主次关系,及其对层间强度作用影响。以期对沥青路面层间污染防治提供理论上的参考依据。

1 试验仪器和方法

综上所述,已有的竖向剪切试验和斜剪试验不能模拟实际路面层间结构的强度特性,因此在竖向剪切装置的基础上进行改进,使层间在受剪的同时也能受到水平方向的压应力,并能通过辅助设备控制水平方向压应力的大小。

1.1 试验设备

为了满足所需试验装置的要求,在已有的竖向剪切试验装置上进行了改良,在竖向剪切装置前端安装了一个施加水平应力的辅助设备,竖向应力由 UTM-100 万能试验机施加,由此构成了压-直剪装置。压-直剪试验装置模型见图 1。

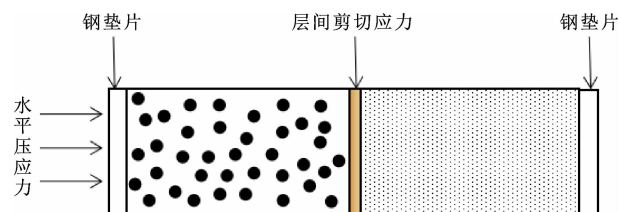


图1 压-直剪试验装置示意

Fig.1 Compression-direct shear test apparatus schematic

1.2 试验方法

改良后的压-直剪设备如图 2 所示,并按照如下步骤进行层间的强度测试。

(1)先将已经进行层间污染处理好的复合马歇尔试件放入恒温箱中, 25°C 保温至少 4 h。

(2)将水平应力施加装置放置在直剪装置底座前方,并用螺母固定住。再将力传感装置安装在直剪装置底座后方,同样用螺母将其固定住。接着将安装好的压直剪装置放入 UTM-100 万能试验机中。

(3)将养护完毕的复合马歇尔试件装入夹具中,上层朝外,下层朝内夹住,试件前后与辅助装置间的空隙用加工的钢垫片卡紧。利用液压千斤顶施加压力,根据试验要求所需的水平应力对复合试件前端施加压应力,再通过试件后方力传感器连接的显示器对水平压应力进行实时控制。

(4)利用 UTM-100 万能试验机进行压-直剪切试验。采用速度控制进行试验,剪切速率为 50 mm/min 。

2 试验材料与方案

2.1 试验材料

双层马歇尔试件采用 SMA-13 与 AC-20 的组合, SMA-13/AC-20 的合成级配见表 1。成型双层



图2 压-直剪操作试验

Fig. 2 Operational of compression-direct shear test

复合马歇尔试件时,先正反面各击实 75 次成型半径为 75 mm 的下层试件,将其室内养护 24 h 后分别按照不同洒布量进行土污染、油污染的层间环境,紧接着进行黏层油的洒布,最后将上层的沥青混合料装入模具中正面击实 150 次后得到复合试件。水污染的处理是在下层试件养护完毕后先进行黏层油的洒布,然后将水倒入层间,接着立马装入上层沥青混合料,通过击实得到下层厚 4 cm、上层厚 4 cm、直径为 150 mm 的复合马歇尔试件。层间污染处理过程见图 3,试件的具体制作过程见图 4。

表 1 双层马歇尔混合料合成级配

Tab. 1 Gradations of double-layer Marshall mix asphalt aggregate

混合料 类型	各筛孔尺寸(mm)下的通过率												%
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
SMA-13	100.0	100.0	100.0	95.0	76.5	53.0	37.0	26.5	19.0	13.5	10.0	6.0	
AC-20	100.0	95.0	85.0	71.0	61.0	41.0	30.0	22.5	16.0	11.0	8.5	4.0	

制作复合马歇尔试件所采用的层间黏层油均来自依托项目使用的橡胶改性沥青,橡胶沥青按照

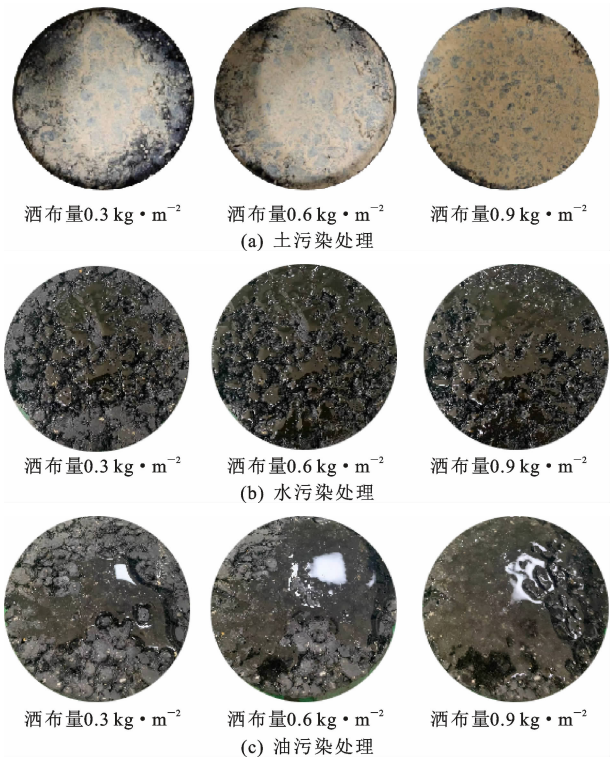


图3 试件层间污染处理

Fig. 3 Representation of interlayer contamination treatment in specimens

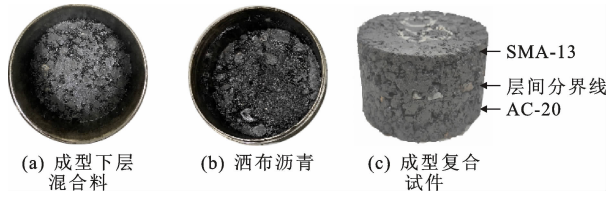


图4 复合马歇尔试件的制作

Fig. 4 Fabrication process of composite Marshall specimens

$1.8\text{ kg}/\text{m}^2$ 进行层间黏结洒布,并按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测试了橡胶改性沥青,得到了技术指标见表 2。

表 2 橡胶改性沥青技术指标

Tab. 2 Technical specifications of rubber-modified asphalt

测试指标	试验结果
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	112.3
延度($15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$)/cm	69
针入度($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 s , 100 g)/0.1 mm	43.2
黏韧性($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)/(N \cdot m)	22.3
韧性($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)/(N \cdot m)	7.9
粗集料黏附等级	5
脆点/ $^{\circ}\text{C}$	-21
旋转薄膜加热质量损失率/%	-0.02
旋转薄膜加热残留物针入度/%	83.2
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	265

2.2 试验方案

2.2.1 层间污染物用量

在路面摊铺过程中,周围的环境和施工器械带来的泥土污染和油污染是主要的层间污染,同时由于降雨造成层间的水污染,也给路面黏层带来不利的影响。采用干燥的黄土块研磨成粉末模拟泥土污染,土污染量为 0、0.3、0.6、0.9 kg/m²;用废机油模拟器械带来的油污染,油污染量为 0、0.3、0.6、0.9 kg/m²。水采用自来水代替雨水,模拟层间水损状态,水污染量为 0、0.3、0.6、0.9 kg/m²。

2.2.2 水平应力及剪应力

在路面车辆快速通过的过程中,路面层间受到车辆带来的层间方向的剪切应力,试验中竖向剪切应力由 UTM-100 万能试验机的竖向荷载提供。水平应力由压-直剪的液压辅助装置提供,模拟车辆行驶过程中的竖向荷载。按照标准轴载,轮胎施加给路面的压应力为 0.7 MPa,但复合马歇尔试件的层间表面积为 0.018 m²,为了消除与路面实际接触情况带来的差异,水平压应力采用 0.1~0.5 MPa。在进行剪切试验之前,需将复合试件放入烘箱中,25℃控温至少 4 h 后再进行试验。

3 试验结果与分析

3.1 土污染对层间强度的影响

依据试验方案制备层间土污染量为 0、0.3、0.6、0.9 kg/m² 的复合马歇尔试件,分别于不同水平应力条件(0、0.1、0.3、0.5 MPa)下测定其剪切强度,试验结果如图 5 所示。

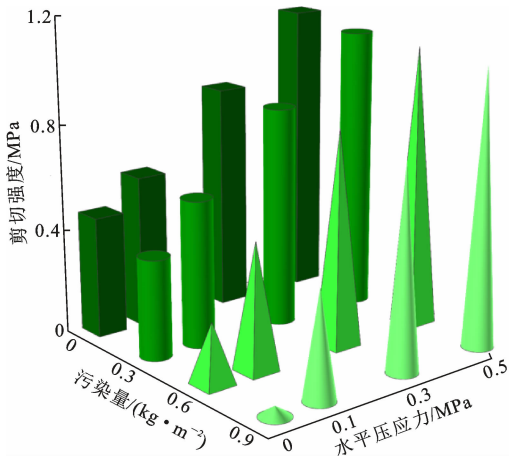


图 5 土污染对层间剪切强度的影响

Fig. 5 Influence of soil contamination on interlayer shear strength

从图 5 可以看出:在相同的层间土污染状态下,层间剪切强度随着水平压应力的增大而增加;以 0.3 kg/m² 层间土污染为例,在水平压应力由无增

至 0.1、0.3、0.5 MPa 时,其层间剪切强度增幅分别为 51.42%、140.53%、188.57%。在相同水平压应力的情况下,层间剪切强度随着土污染量的增加而减小。在同一水平压应力下,随着污染量从无压增加到 0.5 MPa 压应力下剪切强度的降幅分别为 91.3%、29.31%、9.3%和 5.3%,可见从无压到有压应力这个变化过程中层间的剪切强度出现断崖式的增长,而不同水平压应力下的剪切强度增幅则逐渐趋于平缓,也说明了压应力可以不同程度的抵御层间土污染的影响。以无压应力为例,研究在最不利情况(0.9 kg/m² 土污染)下的试件破坏。将层间污染面的土与沥青表面分割得到的处理图像如图 6 所示。以 0.5 MPa 压应力为例,土污染用量从 0.3~0.9 kg/m² 破坏后层间界面的二值化图像处理如图 7 所示。

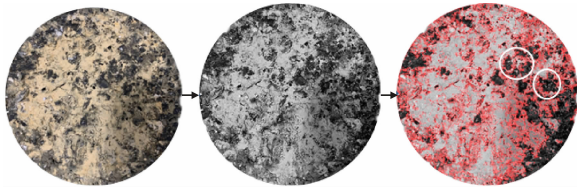


图 6 土污染破坏界面层间图像分割处理

Fig. 6 Images segmentation of interlayer interface damage under soil contamination

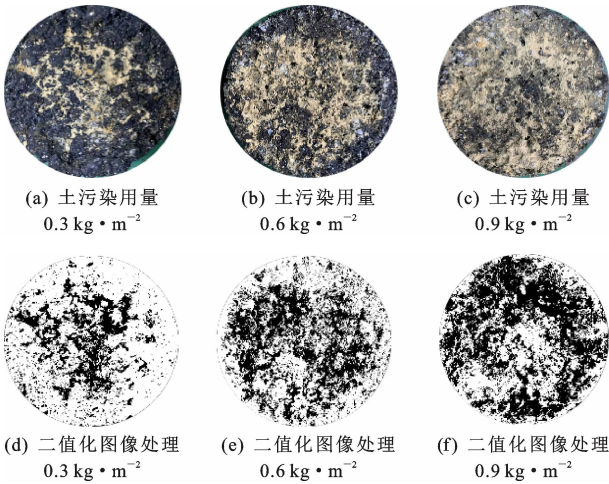


图 7 0.5 MPa 压应力不同梯度土污染下层间破坏界面图像处理

Fig. 7 Image processing of interlayer interface damage under different gradients of soil contamination at 0.5 MPa pressure stress

由图 6 可知,经过处理后的图像中黑色表示沥青混合料,白色表示层间土污染,红色是土污染与沥青混合料的分割线。可见红色轮廓包裹的白色区域占据了试件层间的大部分面积,严重影响了上下面层的层间接触。白色圆圈中的凹坑是层间破坏时发生了上下层沥青混合料的剥落。由于压-直剪的水

平压应力和层间土污染的作用,使得复合试件都依靠水平压应力带来上下层混合料的嵌挤和摩擦而紧紧黏结。因此在嵌挤和摩擦下,层间剪切破坏时会出现部分沥青混合料的剥落破坏。图 7(d)~图 7(f)中白色部分为破坏界面处未被土污染覆盖的区域,黑色部分为土污染覆盖区域。可以明显看出,随着污染量从 $0.3 \sim 0.9 \text{ kg/m}^2$ 这一个增加的过程中,图像处理中的黑色部分也随之不同程度的增加。经图像识别分析后得出,图中土污染覆盖的区域分别占总面积的 42%、54% 和 63%,土污染所覆盖的面积分别增长了 12% 和 11%,而此条件下的压-直剪切强度分别为 1.08、1.07、1.06 MPa,变化不到 1%,说明在 0.5 MPa 条件下,土污染量的变化对压-直剪强度的影响可以忽略不计。综上,针对室内试验,压-直剪切对提高层间强度是有利的,实际情况下的路面层间黏结影响因素众多,不仅限于层间污染,对于路面标准荷载 0.7 MPa 甚至更重荷载下,层间的土污染是影响层间黏结强度的不显著因素。

3.2 水污染对层间强度的影响

为研究水对层间强度的影响,对层间水处理后的复合马歇尔试件进行试验研究。水处理量为 0、0.3、0.6、0.9 kg/m^2 ,分别于不同水平应力条件(0、0.1、0.3、0.5 MPa)下测定其剪切强度,试验结果如图 8 所示。

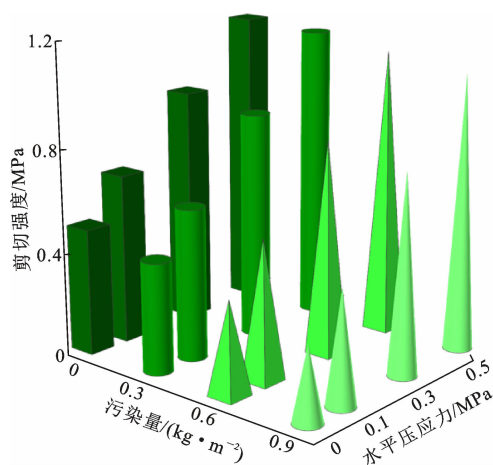


图 8 水污染对层间剪切强度的影响

Fig. 8 Influence of water contamination on interlayer shear strength

由图 8 可知,随着水污染量的增加,在 4 个水平压应力的情况下,层间剪切强度有不同程度的下降趋势。在无压力水平下,当水污染量从 0 增加至 0.9 kg/m^2 ,层间剪切强度下降了 0.2 MPa。在有水平压力的情况下,以 0.3 MPa 水平应力为例,当水污染量从 0 增加至 0.9 kg/m^2 ,层间剪切强度下降了 0.08 MPa。在无压力的情况下,水污染是影响

层间剪切强度的显著因素。而在有压的情况下,水污染对层间的影响就被削弱了。当水平压力为 0.5 MPa 时,水污染量的变化对层间强度的影响几乎可忽略不计。将水污染前后的复合马歇尔试件层间进行激光扫描后的层间界面 CT 扫描见图 9。

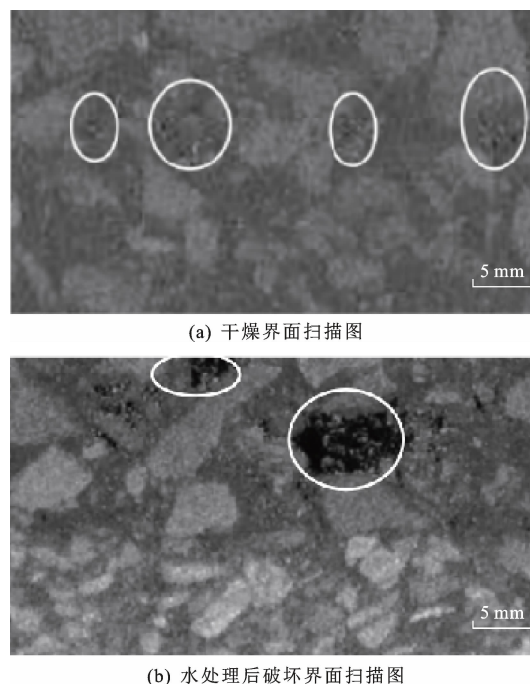


图 9 复合马歇尔试件界面 CT 扫描

Fig. 9 CT scan images of interface in composite Marshall specimens

由图 9 可知,水污染前层间界面是完整的,只有少许不明显的孔洞。在水污染后,层间界面上原本细小的孔洞演化成了一个区域范围的凹槽,出现了沥青混合料的缺失,同时也造成了层间结构完整性的缺失。这种完整性的缺失减弱了复合试件上下层的黏结,从而使得复合试件层间剪切强度降低。但在进行压-直剪试验时,上下层的沥青混合料在水平压力作用下,上下层紧紧的咬合弥补了层间整体性缺失带来的不利影响。在 0.1、0.3、0.5 MPa 压应力下,压-直剪强度的变化分别为 0.18、0.08、0.03 MPa。可见,在适宜的压应力下,水对层间强度的影响很小,可以忽略不计。针对室内试验,同样可以得出对于路面标准荷载 0.7 MPa 甚至更重荷载下的情况时,层间的水污染是影响层间黏结强度的不显著因素。

3.3 油污染对层间强度的影响

为研究油污染对层间强度的影响,分别采用油污污染量 0、0.3、0.6、0.9 kg/m^2 ,在不同水平应力条件(0、0.1、0.3、0.5 MPa)下测定其剪切强度,试验结果如图 10 所示。

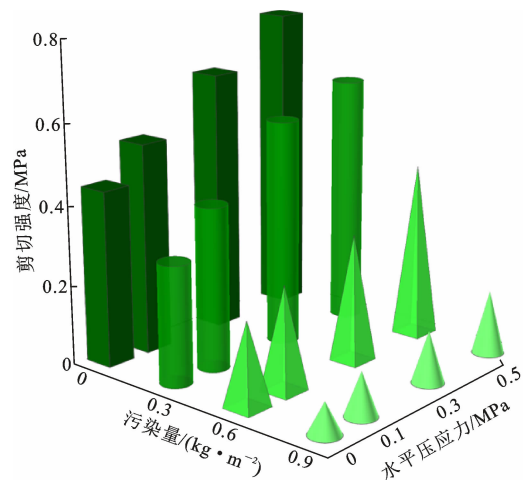


图 10 油污染对层间剪切强度的影响

Fig. 10 Influence of oil contamination on interlayer shear strength

由图 10 可知,随着油污染量的逐渐增加,层间剪切强度在各个水平压应力下都呈现出下降的趋势。在无压力的情况下,油污染下的层间强度减少了 0.4 MPa。水污染和油污染不同,在有压的情况下层间剪切强度随着油污染量的增加仍然有大幅度的变化,在 0.1、0.3 和 0.5 MPa 压应力下层间剪切强度分别下降了 79.24%、80% 和 79.4%,可见随着压应力的增加,剪切强度 f_n 变化幅度仍然为一个较高的水平。这是由于油污覆盖于层间时既减少了界面的摩擦因数,又阻碍上下层黏结。正压力 F_n 增大的同时摩擦因数 u 也在减小,即

$$f_n = uF_n$$

因此,在有压应力的情况下,仍然以油污染为主导削弱了层间剪切强度。在压-直剪下,油污染仍然是影响层间黏结强度的显著因素。因此,在实际路面施工时,要防范施工器械发动机磨损产生的废机油对层间表面的污染,及时保养和更换发动机。

3.4 三种污染下的试验结果比较

为了更好比较 3 种污染对层间强度的影响程度,选取无压应力和 0.5 MPa 压应力条件下试验为例,分析 3 种污染对层间强度影响的规律,见图 11 和图 12。

图 11 和图 12 借鉴文献中对层间寿命的拟合方法,针对 3 种不同污染,在有压应力和无压应力条件下的层间强度曲线进行拟合^[24-25]。结果表明,3 种不同污染源,其污染量都与层间剪切强度之间有着较强相关性(拟合判定系数 $R^2 \geq 0.97$)。在无压力的情况下,土污染、水污染和油污染量从 0 增至 0.9 kg/m² 的过程中,层间直剪强度呈下降的规律。污染量相同的情况下,不同污染物的影响程度从大到

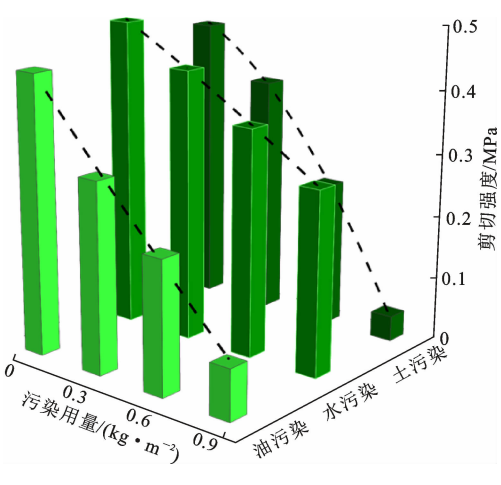


图 11 无水平压应力下不同污染层间剪切强度

Fig. 11 Interlayer shear strength under different contaminations without horizontal pressure stress

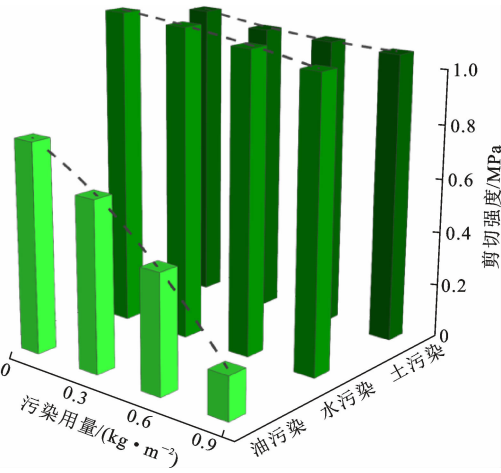


图 12 0.5 MPa 压应力不同污染下层间剪切强度

Fig. 12 Interlayer shear strength under different contaminations at 0.5 MPa pressure stress

小依次为油污染、土污染、水污染。在 0.5 MPa 水平压应力下,各污染物的影响相同,但不同污染量下,土污染和水污染的拟合曲线几乎水平,但对于油污染,在有无压应力的情况下拟合曲线并无明显变化。

4 结 语

(1)层间处理为土污染时,在同一水平压应力下,层间剪切强度随着土污染量的增加逐渐减小;且随着压应力的增加,土污染对层间剪切强度的降幅也随之减弱。压应力下土污染对层间强度的削弱不明显。

(2)在同一水平应力下随着水污染量的升高,层间强度降幅都不明显。而在同一污染量时,层间强度随着水平压应力的增加有显著的增幅。在纯直剪

下,最大水污染量 0.9 kg/m^2 下的剪切强度相较于无水污染时仅下降了 40.8% ,水对层间强度的影响不显著。

(3)在纯直剪和压-直剪下,层间强度随着油污量的增加而急剧下降,油污染洒布量在 $0 \sim 0.6 \text{ kg/m}^2$ 时,水平压应力能明显提高层间剪切强度,在油污染洒布量为 0.9 kg/m^2 时,过量油污染起到的润滑和隔绝作用使得压-直剪与纯直剪下的剪切强度都处于一个较低的水平。

(4)层间剪切强度对不同类型的污染物有着不同的敏感性,伴随着污染量的增加,在纯直剪和压-直剪下层间强度都呈下降的规律,在无压和有压下,剪切强度与污染物量存在较强的二次曲线关系。各污染物的影响程度从大到小依次为油污染、土污染、水污染。压-直剪下的水污染和土污染对层间剪切强度无明显作用,但在油污染影响下的层间剪切强度有明显的降幅。

(5)鉴于工作量和时间成本,本文未考虑在土污染、水污染和油污染 3 种污染耦合作用下的层间剪切强度研究,且仅采用污染物量和压应力大小作为分析变量不够全面,后续仍需通过增加试验变量来准确全面地分析污染对层间黏性性能的影响。

参考文献:

References:

- [1] 陈超. 沥青路面层间剪切强度研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2008.
CHEN Chao. Research on shear strength between asphalt pavement layers for highway[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2008.
- [2] 朱洪洲,朱真景. 沥青路面层间结合状态对路面受力状态的影响综述[J]. 中外公路,2018,38(4):69-75.
ZHU Hong-zhou, ZHU Zhen-jing. Review of influence of interlayer combination state on pavement stress state of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2018,38(4):69-75.
- [3] 孙立军. 沥青路面结构行为学[M]. 上海:同济大学出版社,2013.
SUN Li-jun. Behavior of asphalt pavement structure[M]. Shanghai: Tongji University Press,2013.
- [4] 李俊,陆海珠,李明亮. 温度 and 水分对多孔沥青路面层间粘结性能的影响[J]. 公路工程,2021,46(5):144-148,155.
LI Jun, LU Hai-zhu, LI Ming-liang. Effect of temperature and moisture on interlayer bonding performance of porous asphalt pavement[J]. Highway Engineering,2021,46(5):144-148,155.
- [5] 刘富强,滕旭秋. 沥青路面层间接触状态对面层畸变能的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(6):1192-1198.
LIU Fu-qiang, TENG Xu-qiu. Influence of contacting state between base and surface layers of asphalt pavement on its distortion energy[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2017,14(6):1192-1198.
- [6] 颜可珍,赵晓文,石挺巍,等. 荷载接触形式对路面结构力学指标的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(4):24-30.
YAN Ke-zhen, ZHAO Xiao-wen, SHI Ting-wei, et al. Influence of contact form of load on mechanical index of pavement structure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(4):24-30.
- [7] GE Z S, WANG H, ZHANG Q S, et al. Glass fiber reinforced asphalt membrane for interlayer bonding between asphalt overlay and concrete pavement[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:918-925.
- [8] MOHAMMAD L N, RAQIB M, HUANG B S. Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength[J]. Transportation Research Record, 2002(1789):56-65.
- [9] 黄余阳阳. 沥青路面层间粘结性能影响因素研究[D]. 西安:长安大学,2013.
HUANG Yu-yangyang. Influence factors of bonding properties between asphalt pavement layers[D]. Xi'an: Chang'an University,2013.
- [10] 罗志刚,曾俊,王随原. 界面污染对半刚性基层与沥青混凝土面层层间黏结性能影响的试验研究[J]. 公路,2011,56(1):109-113.
LUO Zhi-gang, ZENG Jun, WANG Sui-yuan. Experiment and study on influence of interface pollution on interlaminar bonding performance between semi-rigid base and asphalt concrete course[J]. Highway,2011,56(1):109-113.
- [11] 杜健欢,艾长发,黄超,等. 界面水对沥青复合小梁疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技,2019,36(3):49-54.
DU Jian-huan, AI Chang-fa, HUANG Chao, et al. Influence of interfacial water on fatigue performance of composite asphalt beam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3):49-54.
- [12] 田荣燕,李莉斯,王文奇,等. 泥土污染对复合式路面界面层性能影响的试验研究[J]. 公路交通技术,

- 2015,31(4):6-8,17.
- TIAN Rong-yan, LI Li-si, WANG Wen-qi, et al. Experimental research on influences of soil pollution on performance of interface layer of compound pavement [J]. Technology of Highway and Transport, 2015, 31(4):6-8, 17.
- [13] HAKIMZADEH S, KEBEDE N A, BUTTLAR W G, et al. Development of fracture-energy based interface bond test for asphalt concrete [J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(S1):76-87.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] TANG T, ZHA X D, XIAO Q M, et al. Laboratory characterization and field validation of road mesh-reinforced asphalt pavement in China [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(3):299-313.
- [17] 聂汉鼎. 沥青路面层间粘结试验方法比较 [J]. 中国公路, 2019(2):112-113.
- NIE Han-ding. Comparison of test methods for inter-layer adhesion of asphalt pavement [J]. China Highway, 2019(2):112-113.
- [18] 鲍传富, 袁明园, 虞将苗, 等. 基于层间剪切试验的桥面防水黏结层性能评价研究 [J]. 公路, 2016, 61(11):212-217.
- BAO Chuan-fu, YUAN Ming-yuan, YU Jiang-miao, et al. Study on performance evaluation of waterproof adhesive layer on bridge deck based on interlayer shear test [J]. Highway, 2016, 61(11):212-217.
- [19] 黄恒伟, RAHMAN A, 黄杨权, 等. 基于压-直剪试验的沥青路面层间剪切疲劳特性 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(3):19-26.
- HUANG Heng-wei, RAHMAN A, HUANG Yang-quan, et al. Characterization of interface shear fatigue in asphalt pavement based on direct shear test with vertical loading [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(3):19-26.
- [20] 何宏智, 孟会林, 刘一鸣, 等. 沥青路面增强型基-面层间黏结强度特性分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(2):22-31.
- HE Hong-zhi, MENG Hui-lin, LIU Yi-ming, et al. Analysis of bonding strength characteristics between reinforced base and surface layer of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(2):22-31.
- [21] SONG W M, SHU X, HUANG B S, et al. Factors affecting shear strength between open-graded friction course and underlying layer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:527-535.
- [22] 杜健欢. 单、双层式沥青混合料小梁疲劳试验研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- DU Jian-huan. Experimental study on fatigue of single and double deck asphalt mixtures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [23] 汪水银. 半刚性基层与沥青面层粘结性能影响因素 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2):12-19.
- WANG Shui-yin. Influence factors of bond performance between asphalt surface layer and semi-rigid base [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2):12-19.
- [24] DIAKHATE M, PHELIPOT A, MILLIEN A, et al. Shear fatigue behaviour of tack coats in pavements [J]. Road Materials and Pavement Design, 2006, 7(2):201-222.
- [25] 艾长发, 黄杨权, 罗柳芬, 等. 基于 ISS & SSDR 的沥青路面层间疲劳寿命外因素综合影响预估 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(5):58-66, 74.
- AI Chang-fa, HUANG Yang-quan, LUO Liu-fen, et al. Estimation of comprehensive impact of external factors on interlayer fatigue life of asphalt pavement based on ISS & SSDR [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(5):58-66, 74.