

# 沥青路面磨耗层与下卧层组合结构力学行为分析

杨晓华<sup>1</sup>,袁战文<sup>1</sup>,温勇兵<sup>1</sup>,周超<sup>2</sup>,吴昊<sup>2\*</sup>

(1.中国铁建投资集团有限公司,广东 珠海 519000;2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

**摘要:**路面结构的层间状态在服役过程中受到各种因素的影响会发生改变,层间结合状态的改变对路面结构的力学行为会产生很大的影响。该文通过组合结构试验与数值分析,探究不同磨耗层与下卧层组合结构在不同应力和黏结状态下的力学行为。作为对比分析,试验考虑3种目前常用的沥青路面磨耗层(面层)材料:AC-13、OGFC-13和SMA-13。试验结果表明:不同组合结构由于材料特性的差异表现出不同的层间黏结性能与疲劳特性;与AC-13+AC-20组合结构相比,OGFC-13+AC-20和SMA-13+AC-20的抗剪切疲劳性能较强,但是抗弯拉疲劳性能较弱。层间压-剪破坏主要发生在层间界面和界面过渡区,可以观察到材料空隙结构的压缩与黏结界面的嵌挤变形;局部界面会有集料在挤压和剪切过程中破坏,随着界面剪切变形和滑移。弯拉应力作用下组合结构的疲劳破坏行为与压-剪应力作用下明显不同,材料特性的差异对其抗弯拉变形能力有显著影响,且疲劳失效形态受到层间黏结与接触咬合状态的影响;随着材料损伤的开展,裂缝由组合梁试件底部沿着集料周边向上开展,到层间界面时会沿着界面向两侧横向开展造成局部脱黏,随后再向上开展直到组合结构试件失效。

**关键词:**沥青路面;层间界面;组合结构;力学行为

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

## Mechanical Behavior of Composite Structures of Wearing Course and Underlying Layer for Asphalt Pavements

YANG Xiaohua<sup>1</sup>, YUAN Zhanwen<sup>1</sup>, WEN Yongbing<sup>1</sup>, ZHOU Chao<sup>2</sup>, WU Hao<sup>2\*</sup>

(1.China Railway Construction Investment Group Corporation Limited, Zhuhai, Guangdong 519000, China;

2.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** The interlayer bonding state of pavement structures changes due to the influence of various factors under service conditions, and this change exhibits a significant influence on the mechanical behavior of pavement structures. Through the composite structure test and numerical analysis, the mechanical behavior of the composite structure of different wearing courses and underlying layers under different stresses and bonding states was studied. The test used three commonly used wearing course (surface layer) materials of asphalt pavements, namely AC-13, OGFC-13, and SMA-13 for comparative analysis. The test results show that different composite structures exhibit different interlayer bonding properties and fatigue characteristics due to the difference in material properties. Compared with the composite structure of AC-13 + AC-20, OGFC-13 + AC-20 and SMA-13 + AC-20 have stronger shear fatigue resistance but weaker flexural and tensile fatigue resistance. The interlayer compression-shear failure mainly occurs at the interlayer interface and the interfacial transition zone. The compression of the void structure of the material and the interlocking deformation of the bonding interface can be observed. The local interface will have the aggregate destroyed during the extrusion and shear process, accompanied by shear deformation and slippage of the interface. The fatigue failure

收稿日期:2022-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778638);湖南省交通厅科技进步与创新计划项目(编号:202110)

作者简介:杨晓华,男,高级工程师.E-mail:448715874@qq.com

\*通信作者:吴昊,男,博士,教授.E-mail:haoutk@csu.edu.cn

behavior of composite structures under flexural and tensile stress is obviously different from that under compression and shear stress. The difference in material properties has a significant effect on its flexural and tensile deformation resistance, and the fatigue failure mode is affected by interlayer bonding and interlocking. With the development of material damage, the cracks develop upward from the bottom of the composite beam specimen along the periphery of the aggregate. When the cracks reach the interlayer interface, they develop laterally along the interface to cause local deadhesion and then develop upward until the failure of the composite structure specimen.

**Keywords:** asphalt pavement; interlayer interface; composite structure; mechanical behavior

## 0 引言

在进行沥青混凝土路面结构设计时,中国一般采用的理论分析模型为连续的弹性层状体系。弹性层状连续体系模型层间状态的核心要求是“连续”,即假设各结构层间界面完全连续。然而,路面结构的层间状态在服役过程中受到各种因素的影响会发生改变,层间结合状态的改变对路面结构的力学响应产生很大的影响<sup>[1-7]</sup>。路面层间界面处的接触状态十分复杂,施工质量、黏层材料性能和洒布量、施工时下卧层的表面状况都会对其层间的黏结性能和黏结状态造成影响<sup>[8-11]</sup>。另外,层间界面极易成为整个路面结构相对薄弱的环节。在交通荷载、环境介质等因素的共同作用下,路面层间失效会引起道路剪切变形、剪切疲劳破坏,层间界面脱黏还会造成滑移裂缝、推挤拥包和疲劳开裂等病害<sup>[12-14]</sup>。综合来讲,影响路面层间状态的因素很多,从材料性能的角度来看,主要是层间界面在荷载长期作用下的损伤问题;从结构力学特性的角度来看,主要是由于路面不同材料间物理力学性能的差异,它们在承受荷载作用时所表现出来的力学行为有所不同,使得这样的组合结构在荷载作用下出现受力与变形不协调而引起的层间失效问题<sup>[15-18]</sup>。另外,由于面层与下卧层不同的材料特性和所处的不同服役环境,由材料间接触面的黏结失效而引起路面病害问题也屡见不鲜,而且这样的问题往往影响范围大,维修困难,且维修成本高。特别是对于具有诸多优良使用功能的OGFC(开级配磨耗层)路面,其空隙结构特性决定了其路面结构层间病害问题尤为突出,严重影响了其耐久性,制约了其功能的发挥<sup>[19-22]</sup>。鉴于此,本研究针对目前常用的几种不同磨耗层(面层)的路面结构形式,通过试验与理论分析探究层间界面黏结状态对

其结构力学行为和疲劳特性的影响,并对其在不同应力条件下的失效特征进行分析与探讨。研究成果对正确评价路面的层间工作状态和失效行为以及更好地认识路面层间病害问题具有一定的指导意义。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验考虑了3种目前常用的沥青路面磨耗层(面层)材料:密级配的AC-13、开级配的OGFC-13、间断级配的SMA-13;下卧层材料均为密级配的AC-20。4种混合料的主要性能参数见表1。为了便于对比分析,这4种沥青混合料所用的沥青均为SBS改性沥青,所用粗集料和细集料均为玄武岩碎石和机制砂,矿粉为石灰石矿粉。由于未使用高黏沥青和纤维稳定剂,所以OGFC和SMA本身的材料性能会受到一定程度的影响。

表1 试验用的4种沥青混合料主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of four asphalt mixtures used for test

混合料类型	沥青用量/%	空隙率/%	毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
OGFC-13	4.9	19.90	2.506	12.27	3.09
SMA-13	5.8	4.07	2.304	13.50	3.27
AC-13	5.2	3.89	2.457	14.70	2.98
AC-20	4.2	4.42	2.423	10.22	3.19

### 1.2 试验方法

#### (1) 组合结构层间剪切和小梁弯拉试验

本文采用层间剪切试验和小梁弯拉试验分别探讨了磨耗层和下卧层组合结构在压-剪和弯拉荷载作用下的层间黏结性能和疲劳特性。为了更好地模拟实际情况,试验采用轮碾法分层碾压成型组合结构试件。如图1所示,首先利用轮碾仪在300 mm×

300 mm×10 mm 的模具中碾压成型下卧层,再喷洒 SBS 改性沥青黏层材料,洒布量为 0.6 kg/m<sup>2</sup>;然后再在其上碾压成型磨耗层,上、下层的厚度均为 50 mm。依此分别制作 OGFC-13+AC-20、SMA-13+AC-20、AC-13+AC-20 共 3 种组合结构试件,然后再切割成 100 mm×100 mm×100 mm 的试件用于层间剪切试验。为了消除界面尺寸对试验结果的影响,并考虑到切割时的损耗,切割试件时车辙板边缘 20 mm 需舍弃。小梁弯拉试验的试件制作与层间剪切试验相似,先分层碾压成型车辙板,上层的厚度为 20 mm,用于模拟磨耗层;下层的厚度为 30 mm,用于模拟下卧层。成型后将每块车辙板切割成 5 根 250 mm×50 mm×50 mm 的小梁试件用于小梁弯拉试验。成型后的组合结构试件如图 1 所示。组合结构层间剪切与弯拉试验如图 2 所示。

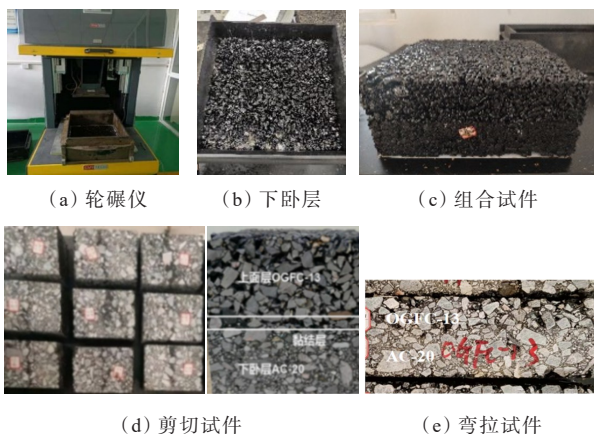


图 1 磨耗层-下卧层组合结构试件

Figure 1 Composite specimen of wearing course and underlying layer

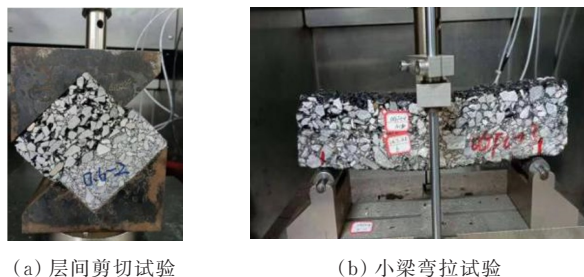


图 2 组合结构层间剪切与弯拉试验

Figure 2 Interlayer shear and flexural and tensile tests for composite structures

组合结构层间黏结强度与弯拉强度试验为单调加载模式。疲劳试验加载波形为半正矢波,加载频率为 10 Hz,其中每一周期加载 0.6 s,间歇 0.4 s;疲劳

荷载的应力比为 0.6。

## (2) 组合结构力学行为分析

本文建立了组合结构路面有限元分析模型(图 3),分析了面层-下卧层组合结构在实际服役状态中的力学行为。其中  $X$  为行车方向,  $Y$  为路面横向方向,  $Z$  为路面深度的方向。采用减缩积分计算模型的三维应力,所有单元为八节点线性六面体单元(C3D8R),并将轮胎与路面的摩擦系数设为 0.7 来模拟水平荷载作用下路面结构的力学响应。

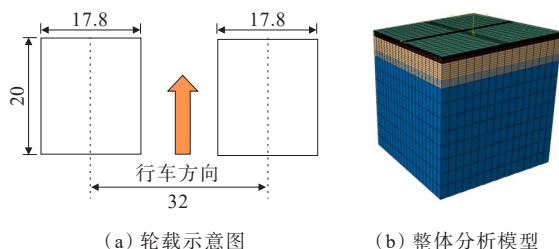


图 3 路面结构整体分析模型(单位:cm)

Figure 3 Analysis model of pavement structure(unit:cm)

参考实际路面结构和试验所获得的部分材料性能指标,数值分析的路面结构及材料参数见表 2。

表 2 路面结构及材料参数

Table 2 Pavement structure and material properties					
位置	厚度/ cm	材料	弹性模 量/MPa	泊松比	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
磨耗层(上层)	4	OGFC-13	821	0.30	2.506
		SMA-13	1 357	0.30	2.304
		AC-13	1 485	0.30	2.457
下卧层(中层)	6	AC-20	1 250	0.30	2.423
下面层	8	AC-25	1 100	0.30	2.400
基层	40	CTB	1 600	0.25	2.400
底基层	20	CTB	1 050	0.25	2.350
路基	300	土基	60	0.40	1.800

## 2 试验结果分析

### 2.1 组合结构界面黏结强度与疲劳性能

组合结构界面黏结强度结果见图 4。试验时的压-剪应力状态能反映路面层间的黏结与集料的嵌挤咬合作用,能较好地模拟实际路面层间受力状态。

由图 4 可知:由密级配 AC-13 和 AC-20 组成的组合试件(AC-13+AC-20)的层间抗剪能力最强,由间断级配 SMA-13 和密级配 AC-20 组成的组合试件(SMA-13+AC-20)的层间抗剪能力最差。这是因为在同样的试件成型方法下,密级配混合料在被碾压



成型的过程中材料排列更加紧密,与下卧层材料的接触面积更大,层间接触咬合与嵌挤更加充分,使组合试件的层间抗剪强度更大。OGFC-13、SMA-13与AC-20的组合结构由于集料级配、空隙结构和界面构造上的差异,较难形成相容性很好的嵌挤咬合作用。与AC-13相比,由于OGFC材料具有较大的空隙率,使得其与下卧层材料的接触咬合作用较弱,并且大空隙结构造成的较大宏观构造深度使得层间黏层材料难以对OGFC材料界面充分黏合,使得界面的有效黏结强度减小。

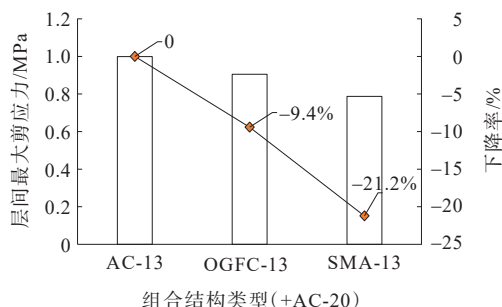


图4 组合结构层间剪切强度试验结果

Figure 4 Test results of interlayer shear strength for composite structures

图5为3种组合结构层间剪切疲劳试验中剪切应变随时间的变化规律。

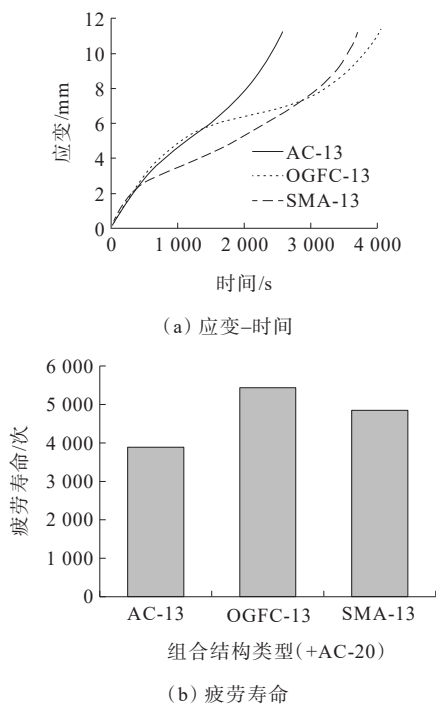


图5 不同组合结构层间界面剪切疲劳性能  
Figure 5 Interlayer shear fatigue life of different composite structures

由图5可知:3种组合结构在初始压-剪阶段的变形特征相似,这是因为试验开始时材料本身被压密和黏结界面存在一定的滑移变形,使得试件的应变增长速度较快;在第二阶段,剪切应变增长速率变缓,在压-剪应力作用下上下层材料相互嵌入,层间咬合作用逐渐形成。此时AC-13组合结构的变形增长速率要明显大于OGFC-13和SMA-13,这说明密级配AC-13+AC-20组合结构在层间剪切滑移过程中抵抗剪切变形的能力较差;第三阶段为加速破坏阶段,随着层间滑移变形的增长,组合结构的咬合作用逐渐失效,界面两侧材料破坏。

试验结果表明:虽然OGFC-13+AC-20组合结构的层间界面抗剪强度要小于AC-13+AC-20,但是其剪切疲劳寿命却更长。这是因为,对于循环压-剪状态下的疲劳试验,组合试件在试验过程中会持续受到竖向压应力的作用,在层间界面和界面过渡区的材料会逐渐被挤密、空隙被压缩、黏结层和下卧层材料会向上层的OGFC材料空隙中嵌入,使得界面的嵌挤咬合作用增强,抵抗剪切变形的能力提升。

## 2.2 组合结构弯拉强度与疲劳特性

3种组合结构的弯拉强度试验结果如图6所示。

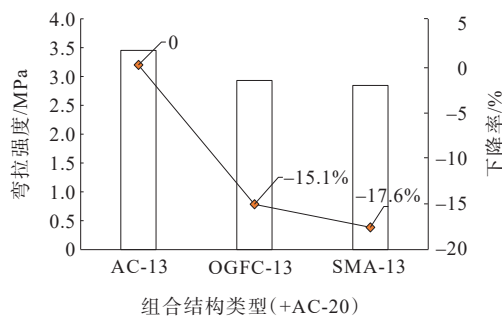


图6 三点梁弯拉强度试验结果

Figure 6 Test results of flexural and tensile strength of three-point beam

由图6可知:密级配AC-13+AC-20组合试件的弯拉强度最大,表明其具有较强的抗弯拉破坏能力,由半开级配SMA-13+AC-20组成的组合试件的弯拉强度最小,其抵抗弯拉破坏能力最弱。这与层间抗剪强度试验结果相似。

图7为3种组合结构的弯拉应力-应变曲线和断裂能计算结果。由图7可以看出:AC-13+AC-20组合结构断裂能最大,说明其具有较强的抗弯拉变形的能力,而SMA-13+AC-20的抗弯拉变形能力最弱。

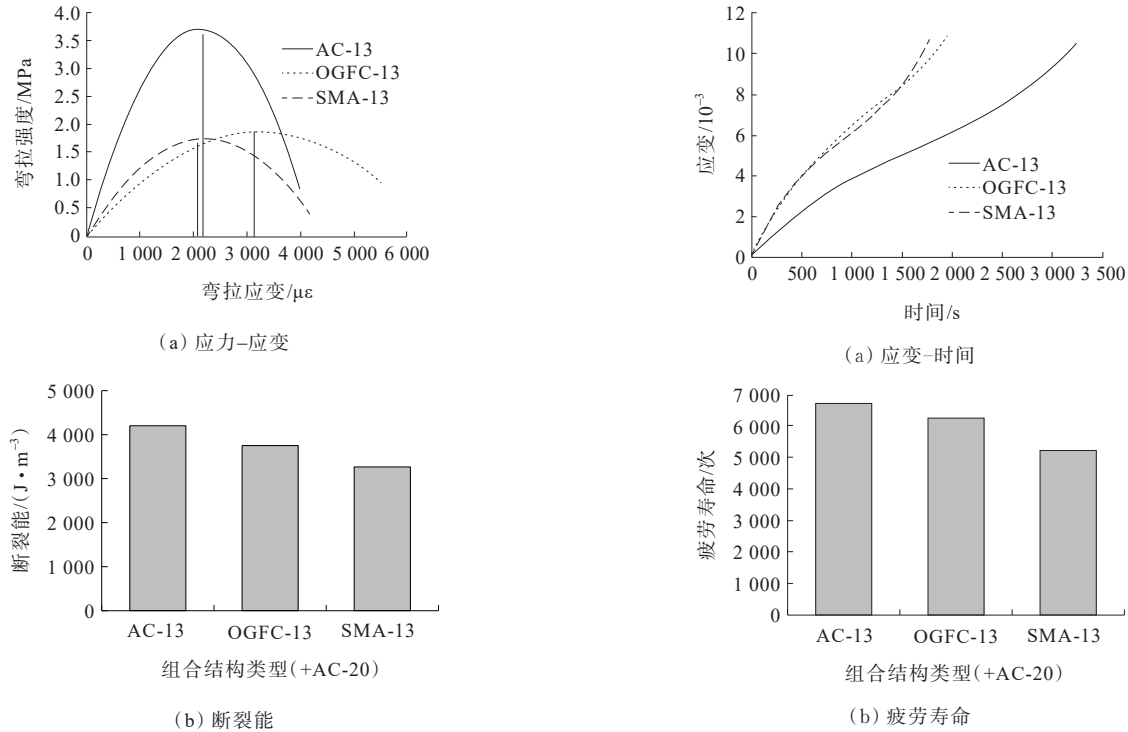


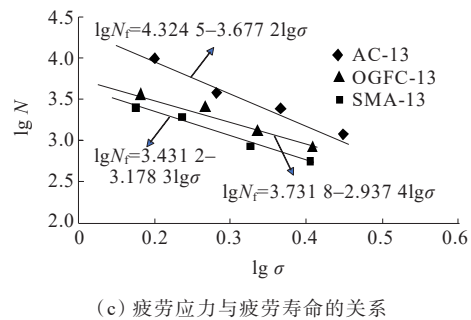
图7 三种组合结构弯拉应力-应变曲线与断裂能

Figure 7 Flexural stress-strain curve and fracture energy of three combined structures

图8为3种组合结构弯拉疲劳试验结果。

由图8可知:3种组合结构层的疲劳应力与疲劳寿命表现出较好的线性关系。与抗剪切疲劳性能不同,OGFC和SMA组合结构的抗弯拉疲劳性能较弱。在相同的荷载作用次数下,AC-13组合结构的应变增长较慢,OGFC-13和SMA-13的结果相近。这是因为相对于AC-13,OGFC-13和SMA-13材料本身的抗弯拉变形能力较弱,与下卧层AC-20的变形协调性较差,且层间黏结性能也相对较弱,所以当受到循环的弯拉应力作用时,组合结构易出现层间脱黏现象,表现出较短的疲劳寿命。

从组合结构的失效特征来看,随着材料损伤的开展,裂缝由组合梁试件底部沿着集料周边向上开展,到层间界面时会沿着界面向两侧横向开展造成局部脱黏,随后再向上开展直到组合结构试件失效。这是因为沥青混合料抵抗弯拉破坏的能力主要是由沥青胶浆性能和沥青胶浆对集料的包裹状态所决定的,OGFC混合料中包裹集料的沥青胶浆体积较小,并且胶浆对集料的黏附作用较差,易于材料损伤的开展。SMA混合料由于沥青胶浆量较多,低温时材料表现出较大的脆性特征,承受弯拉变形的能力也



(c) 疲劳应力与疲劳寿命的关系

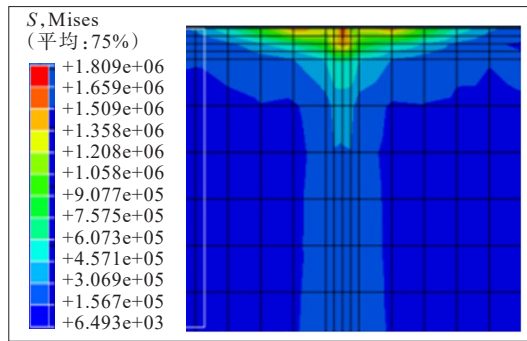
图8 3种组合结构弯曲疲劳曲线与疲劳寿命

Figure 8 Flexural fatigue curve and fatigue life of three combined structures

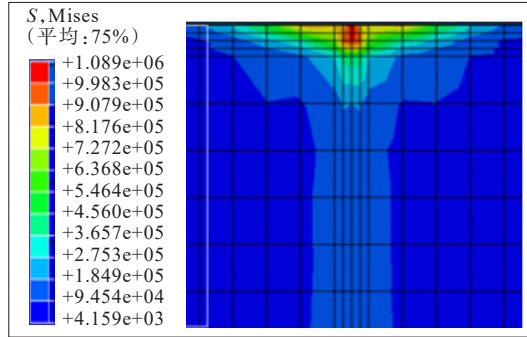
较差。另外,AC-13与AC-20之间良好的界面黏结效果和协同变形能力也为弯拉裂缝从下卧层向面层的开展起到了一定的抑制作用,可以减缓裂缝开展的速度,从而延长组合结构的弯拉疲劳寿命。

在试验研究的基础上,本文还通过有限元法对不同路面结构的力学行为进行分析。为了探讨层间黏结状态对路面结构力学行为的影响,考虑了磨耗层层底与下卧层层顶的接触属性,设置层间黏结系数来考虑不同层间接触状态:完全黏结、允许接触滑移(局部脱黏)、黏结失效。图9为3种路面结构在车辆荷载作用下的力学响应状况。应力均向下卧层及周边扩展,结构内部横切面方向应力大于纵切面方向应力。其中,结构1、结构2和结构3分别代表由AC-13、OGFC-13和SMA-13作为磨耗层/面层的路面结构。

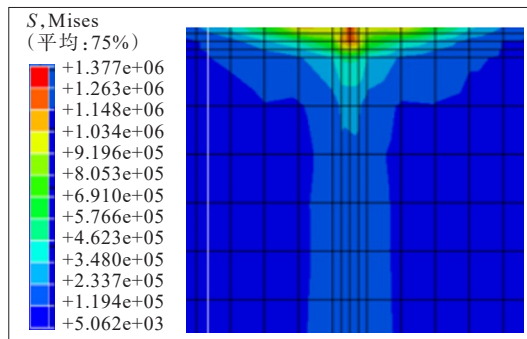
分析组合结构层间剪应力和剪应变(图10)结果表明:随着层间接触状态由完全黏结向脱黏状态变化时,3种结构磨耗层底、下卧层顶的剪应力逐渐减小,剪应变逐渐增大。这是由于层间逐渐失去黏结导致。下卧层顶部剪应力受层间脱黏的影响较小,而磨耗层底剪应力受到层间黏结状态的影响相对较大。由完全黏结向层间脱黏状态变化时,结构1磨耗层底剪应力减小了13.6%,结构2磨耗层底剪应力减小了10.3%,结构3磨耗层底剪应力减小了14.1%。



(a) 结构1



(b) 结构2

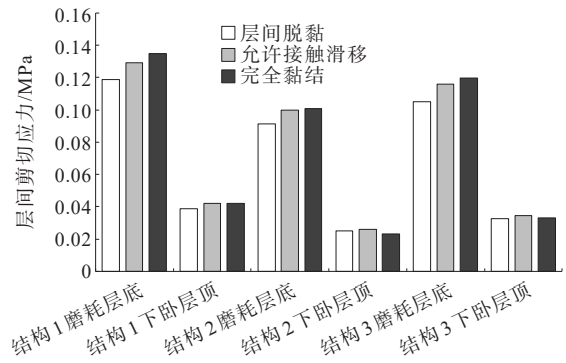


(c) 结构3

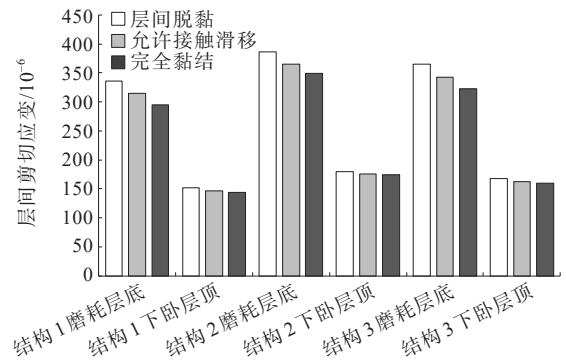
图9 3种面层路面结构等效应力云图(单位:Pa)

Figure 9 Equivalent stress contours for three pavement structures(unit:Pa)

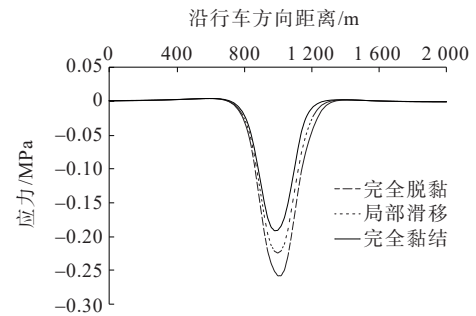
图11为不同黏结条件下OGFC路面结构层间剪



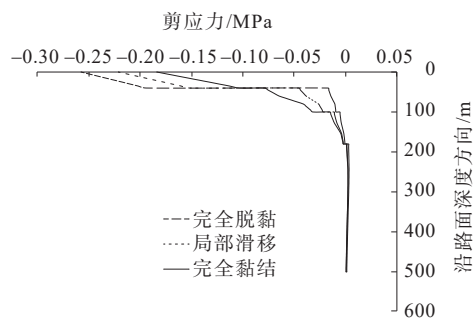
(a) 剪应力



(b) 剪应变

图10 组合结构层间剪应力和剪应变  
Figure 10 Interlayer shear stress and strain of composite structures

(a) 路面纵向方向



(b) 路面深度方向

图11 OGFC路面层间剪应力分布状况

Figure 11 Interlayer shear stress distribution of OGFC pavement

应力在纵向与深度方向上的分布情况。纵向剪应力的最大值出现在上面层(磨耗层)顶面,并随着深度逐渐下降,剪应力的作用区域主要在上中面层。当上中面层层间黏结失效时,纵向剪应力会在上面层底面发生突变降低到零附近,层间抗剪强度越大下降速度越快,而层间连续状态下纵向剪应力缓慢下降直至趋于零。深度方向上层间连续状态下剪应力分布相对集中,应力作用区域面积较小,而其他不同层间状态下的纵向剪应力响应范围在平面上变化很小,纵向剪应力最大值的位置基本一致,都出现在轮载的中心位置。

### 3 结论

(1) 采用压-剪应力状态的层间剪切试验分析了3种磨耗层(面层)与下卧层组合结构的层间黏结性能。结果表明:层间剪切破坏主要发生在界面和界面过渡区,层间界面可以观察到材料空隙结构的压缩变形,局部界面会有集料在挤压和剪切过程中发生破坏,并且随着界面剪切变形和滑移。

(2) 由于密级配混合料在被碾压成型过程中与下卧层材料的接触面积更大,层间接触咬合更加充分,所以 AC-13+AC-20 比 OGFC-13+AC-20 表现出更大的层间抗剪强度。但是,对于压-剪状态下的疲劳试验,试件在试验过程中会持续地受到竖向压应力的作用,在层间界面附近的材料会逐渐被挤密、空隙被压缩、黏结层和下卧层材料会向上层 OGFC 材料空隙中嵌入,使得界面嵌挤咬合作用增强,所以 OGFC-13+AC-20 表现出更好的抗剪切疲劳性能。

(3) 通过组合结构小梁弯拉试验发现,裂缝通常是沿着集料与沥青胶浆的黏结界面及界面周边向上发展的,集料较少出现破碎现象,但集料对裂缝开展方向有一定影响;裂缝开展到层间界面时会沿着界面向两侧横向扩展造成局部脱黏,随后再向上发展直到组合结构失效。由于材料特性的差异,OGFC-13 和 SMA-13 材料本身的抗弯拉变形能力较弱,与下卧层 AC-20 的变形协调性也较差,组合结构易出现层间脱黏现象,抗弯拉疲劳性能相对较弱。

### 参考文献:

### References:

- [1] 冯德成,宋宇.层间结合状态对沥青路面设计指标的影响分析[J].华东公路,2006(3):35-38.  
FENG Decheng, SONG Yu. Analysis of influence of interlayer state on design index of asphalt pavement[J]. East China Highway, 2006(3):35-38.
- [2] 柳浩,谭忆秋,宋宪辉,等.沥青路面基-面层间结合状态对路面应力响应的影响分析[J].公路交通科技,2009,26(3):1-6.  
LIU Hao, TAN Yiqiu, SONG Xianhui, et al. Influence of bonding condition between base and surface courses of asphalt pavement on pavement stress response[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3):1-6.
- [3] 罗要飞,张争奇,杨博,等.层间接触条件对沥青路面结构性能的影响[J].中外公路,2015,35(5):109-114.  
LUO Yaofei, ZHANG Zhengqi, YANG Bo, et al. Influence of interlayer contact conditions on structural performance of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5):109-114.
- [4] 朱晓云.层间接触状态对沥青路面力学响应的影响分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2015.  
ZHU Xiaoyun. Mechanical response of asphalt pavement with different contact state among interlayers[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015.
- [5] 赵艳玲,李庆杰,刘永超.层间结合条件对半刚性基层沥青路面路用性能的影响研究[J].中外公路,2017,37(5):67-72.  
ZHAO Yanling, LI Qingjie, LIU Yongchao. Study on the influence of interlayer bonding conditions on the road performance of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5):67-72.
- [6] 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 Hongzhou, ZHU Zhenjing. 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.
- [7] 唐亮,李双喜,姚康.面层层间结合状况对倒装式沥青路面结构力学响应的影响[J].中外公路,2021,41(6):66-72.  
TANG Liang, LI Shuangxi, YAO Kang. Influence of bonding condition between surface layers on mechanical response of inverted asphalt pavement structure[J]. Journal



- of China & Foreign Highway,2021,41(6):66-72.
- [8] 冯德成,宋宇. 沥青路面层间结合状态试验与评价方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):627-631.
- FENG Decheng, SONG Yu. Study of test and evaluation method on interfacial combining state of asphalt pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 627-631.
- [9] 朱耀庭,雷茂锦,时宁,等. 层间结合状态对沥青路面结构力学和寿命影响分析[J]. 公路工程,2011,36(5):18-21,32.
- ZHU Yaoting, LEI Maojin, SHI Ning, et al. Influence of interface condition on structural performance and life prediction of asphalt pavement[J]. Highway Engineering, 2011, 36(5): 18-21, 32.
- [10] 唐羽. 基、面层间界面形态对沥青路面力学性能影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
- TANG Yu. Study on the influence of interface morphology between base and surface on mechanical properties of asphalt pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [11] 李佳昊. 沥青路面层间不完全连续状态下的抗剪切性能评价分析[D]. 北京:北京建筑大学,2021.
- LI Jiahao. Evaluation and analysis of shear resistance of asphalt pavement under incomplete continuous inter-layer [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [12] 苏凯,武建民,陈忠达,等. 山区公路沥青路面基层滑移破坏研究[J]. 中国公路学报,2005,18(3):22-26.
- SU Kai, WU Jianmin, CHEN Zhongda, et al. Research on cutting-slippage between surface and base about mountain asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 22-26.
- [13] 李花磊. 沥青路面 Top-Down 裂缝开裂机理解析法分析 [D]. 西安:长安大学,2014.
- LI Hualei. The cracking mechanism of Top-Down cracking analytical method in the asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 王鹏. 层间非完全连续沥青路面动力响应研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021.
- WANG Peng. Study on dynamic response of interlayer incomplete continuous asphalt pavement[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [15] HU X D, WALUBITA L F. Effects of layer interfacial bonding conditions on the mechanistic responses in asphalt pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(1): 28-36.
- [16] 张成志. 沥青路面层间抗剪强度影响因素试验研究[J]. 交通科技, 2017(4): 146-148.
- ZHANG Chengzhi. Experimental study on influencing factors of interlayer shear strength of asphalt pavement[J]. Transportation Science & Technology, 2017(4): 146-148.
- [17] 张轩铭. 沥青路面层间抗剪强度影响因素研究[J]. 北方交通, 2020(10): 59-62.
- ZHANG Xuanming. Study on the influence of interlayer shear strength of asphalt pavement[J]. Northern Communications, 2020(10): 59-62.
- [18] 李杨梅. 沥青路面层间黏结性能影响因素研究[J]. 交通世界, 2021(29): 60-61.
- LI Yangmei. Study on influencing factors of interlayer bonding performance of asphalt pavement[J]. TranspoWorld, 2021(29): 60-61.
- [19] CHEN Y, TEBALDI G, ROQUE R, et al. Effects of interface condition characteristics on open-graded friction course top-down cracking performance[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1): 56-75.
- [20] SONG W M, SHU X, HUANG B S, et al. Laboratory investigation of interlayer shear fatigue performance between open-graded friction course and underlying layer [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 381-389.
- [21] SONG W M, SHU X, HUANG B S, et al. Influence of interface characteristics on the shear performance between open-graded friction course and underlying layer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(8): 1-9.
- [22] HU M J, LI L H, PENG F X. Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course[J]. Construction and Building Materials, 2019, 219: 101-110.