

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.014

# 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

唐亮<sup>1,2</sup>, 李双喜<sup>1\*</sup>, 姚康<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 西南交通大学 土木工程学院)

**摘要:**基于弹性层状体系,使用 Bisar 3.0 路面分析专业软件引入剪切弹簧柔量 AK 模拟面层层间结合状况,研究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,考虑 4 种面层层间结合状况,即面层层间均完全连续、上一中面层层间完全滑动、中一下面层层间完全滑动、面层层间均完全滑动,对沥青混合料层层底沿行车方向水平拉应变、无机结合料稳定层层底沿行车方向水平拉应力、沥青混合料层竖向压应力和路基顶面竖向压应变等力学指标的影响。研究表明:在不同面层层间结合状况下,沥青混合料层水平应变的分布形态、规律发生重大变化相对最危险的区域为沥青稳定碎石基层,而并非始终为沥青混合料下面层层底;沥青混合料层层底拉应变、无机结合料层层底拉应力、路基顶面竖向压应变,受面层层间结合状况影响的排序为面层层间均完全滑动>中一下面层层间完全滑动>上一中面层层间完全滑动>面层层间均完全连续,沥青混合料层竖向压应力受面层层间均完全滑动影响最大,在上一中面层层间完全滑动的工况对其影响超过中一上面层层间完全滑动的工况;倒装式沥青路面与半刚性基层沥青路面结构在中一下面层层间完全滑动的工况更易出现车辙、疲劳开裂破坏。

**关键词:**弹性层状体系; 倒装式沥青路面; 面层层间结合; 力学响应

## 1 前言

现行沥青路面以弹性层状体系理论进行设计,此理论假设各结构层连续成整体,为实现这一理论可采用在各结构层之间铺洒黏层油、双层连续摊铺技术等手段,但在施工过程中分层铺筑、分层压实易受自然或人为因素影响导致层间界面受到污染或碾压不密实,并且黏层油剂量、温度也会影响黏结质量。因此在实际工程中难以达到各结构层完全连续的设计初衷。

同时在行车荷载反复作用下,加快了层间界面的破坏,引发的病害也不容小觑。在日本,经常报道因制动和转向使机场路面层间失去黏结,造成机场路面出现故障;在法国,因层间结合问题影响了 5% 的公路网。对于层间结合研究多采用试验手段与数值模拟方式。冯德成通过直剪试验,得到基一面层层间洒布透

层油后可提高 65%~78% 的黏性;赵艳玲等利用试验及有限元软件 Abaqus,研究半刚性路面基一面层结合状况对沥青路面结构的影响;罗要飞等运用 Bisar3.0 研究面层层间结合状况和基一面层层间结合对半刚性基层沥青路面力学性能及疲劳寿命的影响。以上试验研究多开展直剪、斜剪探讨层间结合问题,无法直接与沥青路面设计指标、力学性能相呼应;在数值模拟方面多考虑基一面层层间结合问题,对沥青面层层间结合问题研究甚少,并且采用的力学指标、计算点位分析过少并不能完全描述层间结合对沥青路面结构的影响。

鉴于此,该文尝试使用 Bisar3.0,考虑 3 层式沥青面层层间均完全连续(工况 1)、沥青面层层间均完全滑动(工况 2)、上一中面层层间完全滑动(工况 3)与中一下面层层间完全滑动(工况 4)共 4 种工况,分析模拟面层层间结合状态对倒装式沥青路面结构力学响应的影响。

收稿日期:2020-05-24(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0406702)

作者简介:唐亮,男,硕士研究生。E-mail:614601741@qq.com

\* 通信作者:李双喜,男,硕士,副教授。E-mail:xjlsx123@126.com

## 2 分析模型建立

轮载采用单轴双轮垂直均布荷载,即双轮组单轴载 100 kN,轮胎接地压强  $p=0.70$  MPa,单轮传压面当量圆直径  $d=21.30$  cm,两轮中心距为 31.95 cm。以路表双轮轮隙中心为坐标原点,建立笛卡尔坐标体系,其中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向分别为行车方向、道路横断面方向和道路深度方向。计算点位选择方面,为提高计算精度,便于利用第三方软件对计算结果予以更精细全面的可视化描述,以规范 4 个计算点位为基础,在轮隙与

轮载作用区域处以  $0.125d$  为间距,进一步增密计算点位至 200 个点,具体见图 1,其中  $A_i, B_i, \dots, T_i$  为各结构层计算点位。

该文背景工程为四川省成德南高速公路铺设的倒装式沥青路面结构 K170+018 ~ K170+918 试验段之一参考文献[12],其结构为沥青稳定碎石与骨架密实级配碎石为基层、水泥稳定碎石为底基层,沥青面层由 SMA-13、AC-20C 和 AC-25C 共 3 层组成。受 Bisar3.0 软件材料模型所限,视各结构层均为理想线弹性体,其动态压缩模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  和厚度分别见图 1(b)中所列。

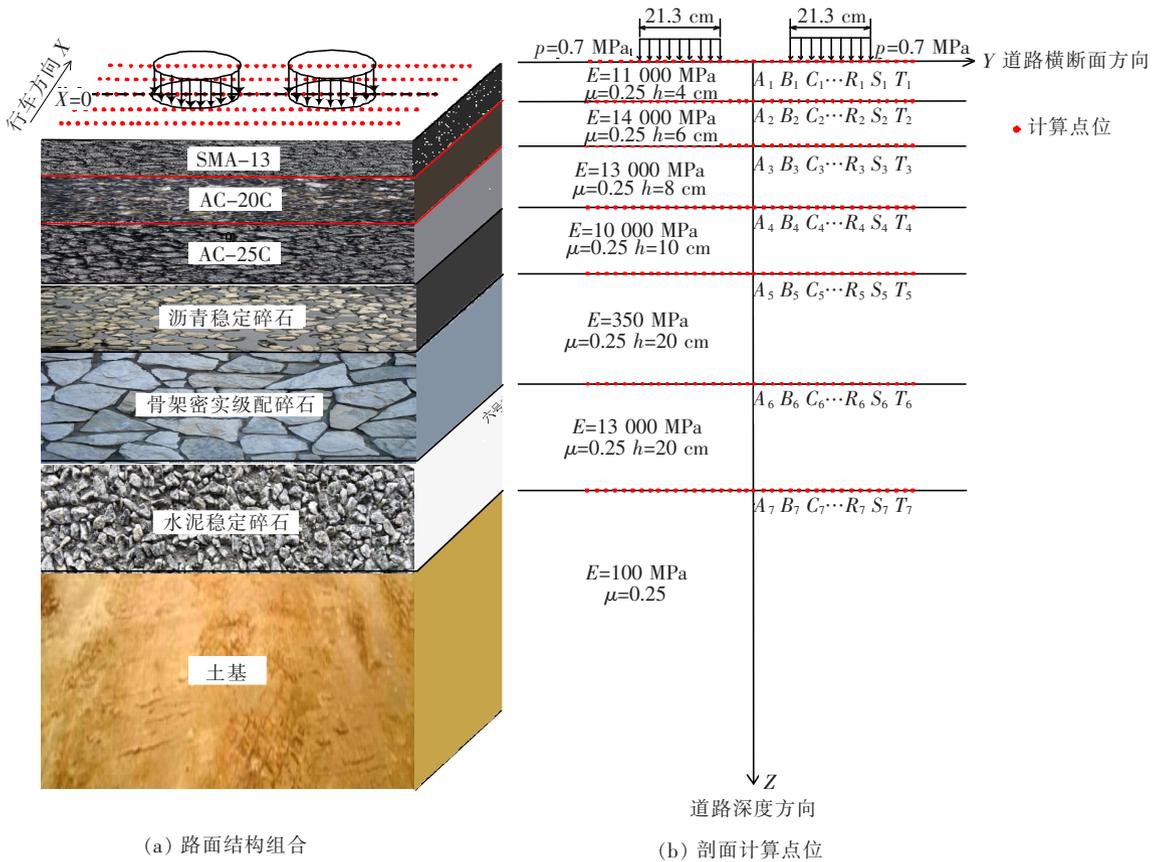


图 1 分析模型

在 Bisar 程序中,可设定标准剪切弹簧柔量  $AK$  或缩减剪切弹簧柔量  $ALK$  不同数值来描述层间结合状况,其中标准剪切弹簧柔量被定义为上下两层之间的相对水平位移与作用于界面上的应力之比(单位:  $m^3/N$ ),它与摩擦系数(无量纲) $\alpha$  有如下关系:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\mu}{E} \cdot a} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为摩擦系数(无量纲), $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $AK$  为剪切弹

簧柔量; $a$  为荷载半径; $\mu$  为该层的泊松比。

层间摩擦系数  $\alpha$  与加载半径和材料参数相关,与经典摩擦系数有本质的区别。当  $\alpha=0$  时表示完全连续, $\alpha=1$  时表示完全光滑。该文分别取摩擦系数  $\alpha=0, 0.99$  来表征层间结合状态完全连续、完全光滑。根据式(1),当上一中面层层间完全连续、完全滑动时剪切弹簧柔量  $AK$  分别为  $0, 1.198 \times 10^{-9} m^3/N$ ,当中一下面层层间完全连续、完全滑动时剪切弹簧柔量  $AK$  分别为  $0, 9.414 \times 10^{-9} m^3/N$ 。同时假设基层一面层、

路基—基层层间均为完全连续,仅考虑 3 层式沥青面层的层间接触状况处于完全连续或完全滑动,分析工况包括 4 种:各结构层层间均完全连续;上一中面层层间完全滑动,其他结构层层间完全连续;中一下面层层间完全滑动,其他结构层层间完全连续;上一中一下面层层间均完全滑动,其他结构层层间完全连续。

因研究对象为倒装式沥青路面结构,该种路面结构基层为沥青稳定碎石与骨架密实级配碎石、底基层为水泥稳定碎石,按照中国现行公路沥青路面设计规范,需同时对沥青混合料层底沿行车方向水平拉应变、无机结合料稳定层层底沿行车方向水平拉应力、沥青混合料层永久变形量、路基顶面竖向压应变进行分析,下面分别就 4 种工况对各力学指标的影响予以详细阐述。

### 3 沥青混合料层底拉应变

图 2 为  $x=0$  处倒装式沥青路面在不同面层层间结合条件下,沥青混合料层横向剖面图。从图 2 可以看出:沥青混合料层层底应变均以轮隙中心处为轴呈对称状分布,当各面层层间均完全连续时,沥青混合料

层沿行车方向水平应变呈开口状波浪式分布,而只要沥青面层层间存在一个界面或两个界面完全滑动,则表现为封闭泡状分布。在面层层间均完全连续的工况下,拉应变集中于下面层和基层,最大值出现于基层,大小约为  $34.46 \times 10^{-6}$ 。在上一中面层层间完全滑动工况下,拉应变集中分布于上面层和基层,最大值出现在基层,大小约为  $41.29 \times 10^{-6}$ ,在中一下面层层间完全滑动的工况下,拉应变集中分布于中面层与基层,最大值出现在基层,大小约为  $49.37 \times 10^{-6}$ 。当面层层间均完全滑动工况下,拉应变集中于上面层、中面层与基层,同时“封闭泡状”并非是 2、3 工况的简单叠加,水平拉应变主要集中于上、中面层,但最大值出现在基层,大小约为  $55.82 \times 10^{-6}$ ,相对于面层层间均完全连续的工况下,工况 2、3、4 沥青混合料层底最大拉应变分别增大约 19.8%、43.27%、61.98%。以上分析表明:随着沥青面层层间结合状态的改变,在面层层间均完全滑动的工况下拉应变增长最快;沥青混合料层沿行车方向水平应变的分布形态、规律发生重大变化,对于倒装式沥青路面结构相对最危险的区域为沥青稳定碎石基层,而并非简单地始终为沥青下面层层底,因此需在不同面层结合状况下对沥青混合料层疲劳开裂进行验算。

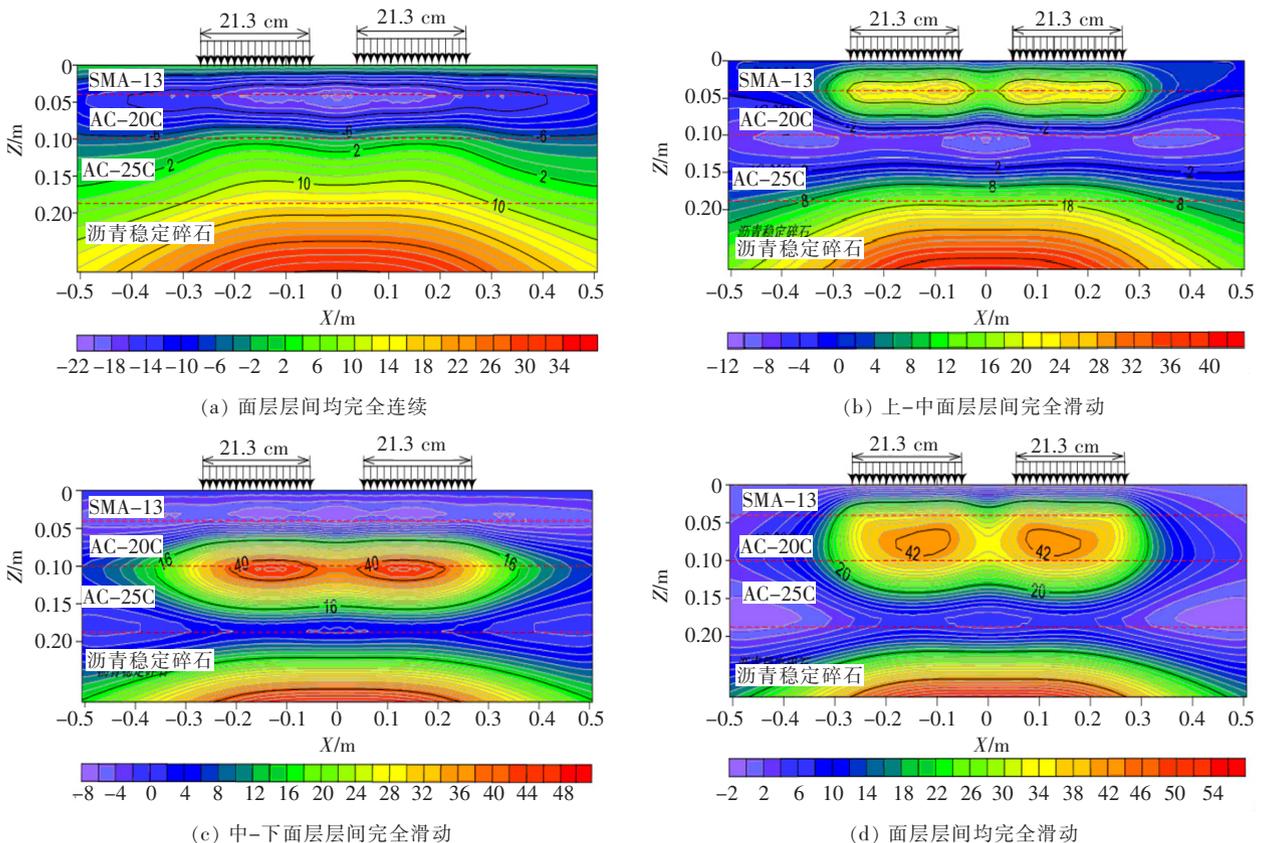


图 2 沥青混合料层沿行车方向水平应变分布(单位:  $\times 10^{-6}$ )

## 4 无机结合料层底拉应力

因倒装式沥青路面结构基层为无机结合料,不同面层层间结合条件下无机结合料层底沿行车方向水平应力的空间分布云图如图3所示,从总体来看四

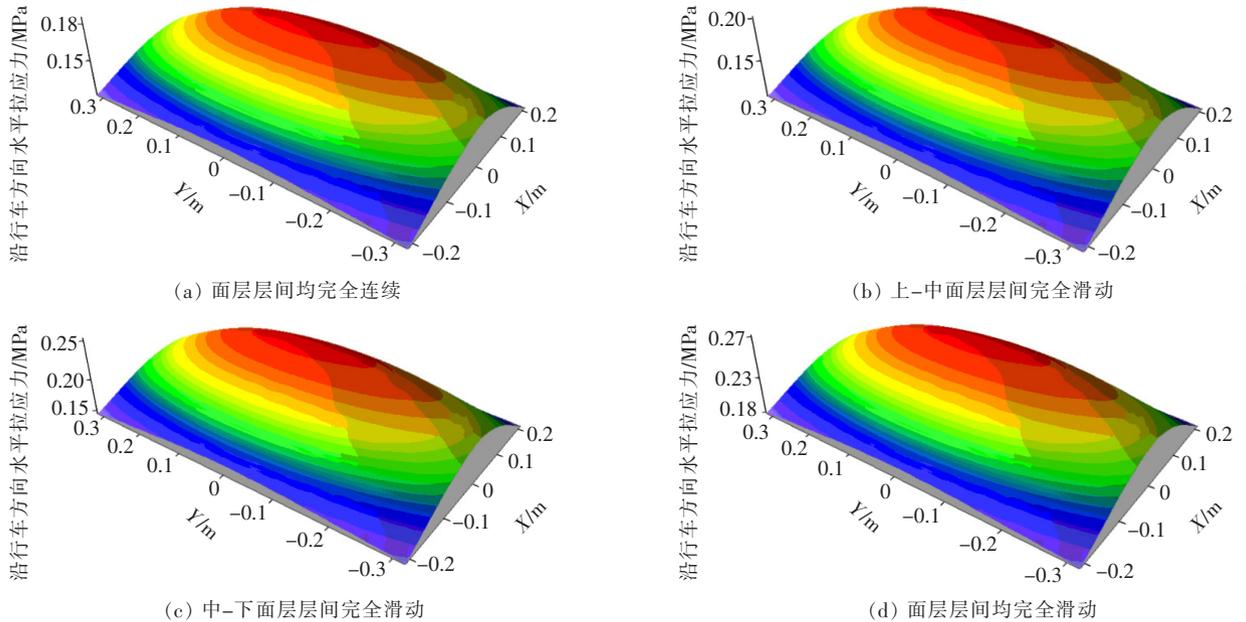


图3 无机结合料层底沿行车方向水平拉应力的空间分布

为进一步分析不同面层层间结合状态对无机结合料层底拉应力的影响,选取无机结合料层底沿横断面 $X=0$ 处进行具体分析,如图4所示。

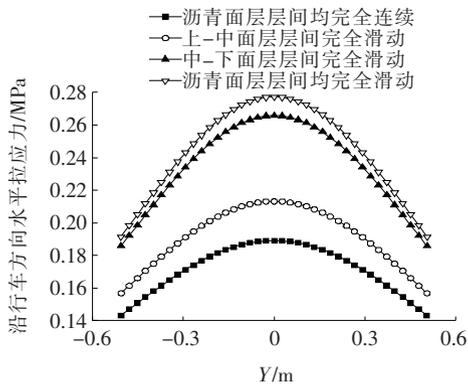


图4  $X=0$ 处无机结合料层底沿行车方向水平拉应力分布

从图4可以看出:在不同面层层间结合状况下,由于轮载的叠加效应,致使最大拉应力都出现在双轮轮隙中心处并呈“上凸状”分布形态。随着面层层间结合状态的改变无机结合料层底应力也发生变化,无机结合料层底在不同工况下拉应力值由小到大的排序为:面层层间均完全连续<上-中面层层间完全滑动

者空间形态相似,呈对称分布,均呈“单峰型”,存在唯一极值都位于双轮轮隙中心处,4种面层层间结合状态下的无机结合料层底均以拉应力为主。不同的面层层间结合条件对无机结合料沿行车方向水平拉应力的空间分布形态影响甚小。

<中-下面层层间完全滑动<面层层间均完全滑动,对应的最大拉应力分别为:0.189 1、0.213 2、0.265 7、0.277 1 MPa,相对于面层层间完全连续工况,后三者分别增大约 12.7%、40.51%、46.54%。以上分析表明:对于倒装式沥青路面结构在面层层间出现滑动时应力在不断增大,且在中一面层层间完全滑动与面层层间完全滑动的工况应力增长最快,因此相对于其他两种工况,中一面层层间完全滑动与面层层间完全滑动更容易出现疲劳开裂破坏。

## 5 沥青混合料层竖向压应力

沥青混合料层的永久变形量通过沥青混合料各分层顶面的竖向压应力予以表征。依据规范将上、中面层更精细以20 mm为一层,下面层以40 mm为一层,沥青碎石基层为最后一层,绘制在不同面层层间结合条件下 $X=0$ 处横向剖面图各分层顶面的竖向压应力分布,结果如图5所示。

由图5可知:4种层间结合状况下空间分布形态较为相似,都以双轮轮隙为中心呈对称分布,因轮载作

用下应力发生了扩散,轮载中心分布着极值且压应力集中分布于轮载中心处并按深度方向逐渐减少,相反由于扩散作用导致双轮轮隙中心处由拉应力变成压应力并沿深度方向逐步增加。

面层层间不同结合状态对沥青混合料层竖向压应力的影响在单轮荷载中心处变化范围尤为明显,现选取道路横断面单轮荷载中心处(即 $Y=0.1598\text{ m}$ 处),绘制4种面层层间结合条件下沥青混合料层各分层顶面竖向压应力的分布情况,如图6所示,尽管4条曲线

略有交叉,只要沥青面层层间存在滑动都会增大沥青混合料竖向压应力,但从整体上看,竖向压应力的分布由高到低依次为沥青面层层间均完全滑动、上一中面层层间完全滑动、中一下面层层间完全滑动、沥青面层层间均完全连续。说明面层层间结合不良时,倒装式沥青路面结构沥青混合料层抵抗永久变形能力降低,面层完全连续工况下沥青混合料层抵抗永久变形能力优于面层层间不良结合工况,由此在面层层间结合不良的工况下车辙等永久变形病害相对更为严重。

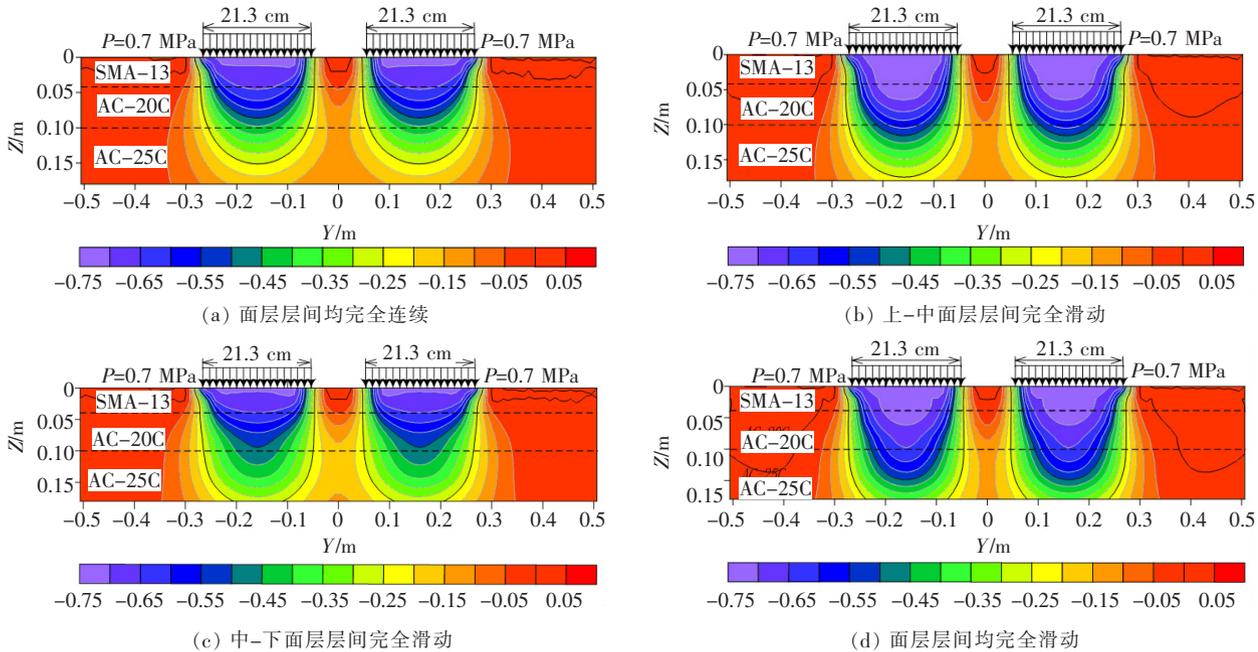


图5  $X=0$ 处沥青混合料层竖向压应力的分布(单位:MPa)

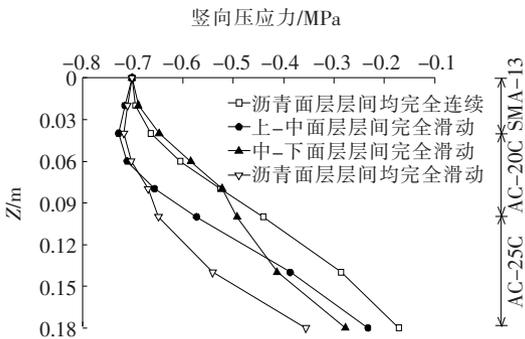


图6  $Y=0.1598\text{ m}$ 处沥青混合料层竖向压应力沿道路深度分布

## 6 路基顶面竖向压应变

图7为不同面层层间结合条件下,倒装式沥青路面结构路基顶面竖向压应变的空间分布云图。由图7

可见: 4者总体上较为相似,都呈“盆状”分布且沿道路深度方向向下凹陷,整个路基顶面都呈现竖向压应变,且唯一顶点位于双轮轮隙中心处,不同面层层间结合条件对路基顶面竖向压应变空间分布形态影响较小。

为进一步分析不同面层层间结合状态对路基顶面竖向压应变的影响,绘制路基顶面竖向压应变沿行车方向 $X=0$ 处分布情况如图8所示。由图8可见: 虽然面层层间结合状况对路基顶面竖向压应变有影响,但由于荷载传递到路基的应力发生了扩散,在4种工况下路基顶面压应变在荷载作用区域和轮隙区域并无突变,路基顶面竖向压应变都呈现下凹“单峰状”,最大值都分布在双轮轮隙中心,且从双轮轮隙中心处向两侧应变值逐渐减少。对于面层层间均完全连续、上一中面层层间完全滑动、中一下面层层间完全滑动与面层层间均完全滑动的工况,路基顶面竖向压应变最大值分别为 $-53.61 \times 10^{-6}$ 、 $-58.9 \times 10^{-6}$ 、 $-70.65 \times$

$10^{-6}$ 、 $-73.02 \times 10^{-6}$ ,相较于沥青面层层间均完全连续,上一中面层层间完全滑动、中一下面层完全滑动和面层层间均完全滑动,路基顶面竖向最大压应变分别增大了9.86%、31.8%、36.2%,面层层间完全滑动时更容易出现因路基永久变形而引起的车辙病害,其后依次为中一下面层层间完全滑动、上一中面层层间完全滑动。当沥青面层层间两个界面均完全滑动时,路

基顶面竖向压应变并非上一中面层层间完全滑动与中一下面层层间完全滑动两者简单的等权重线性叠加,中一下面层层间结合状态所造成的不利影响超过上一中面层层间结合状态,工程实践中从控制因路基顶面竖向压应变过大而诱发的车辙病害角度出发,不仅需要考虑面层层间完全滑动情况,还需重视沥青中一下面层界面结合状态的改善与提高。

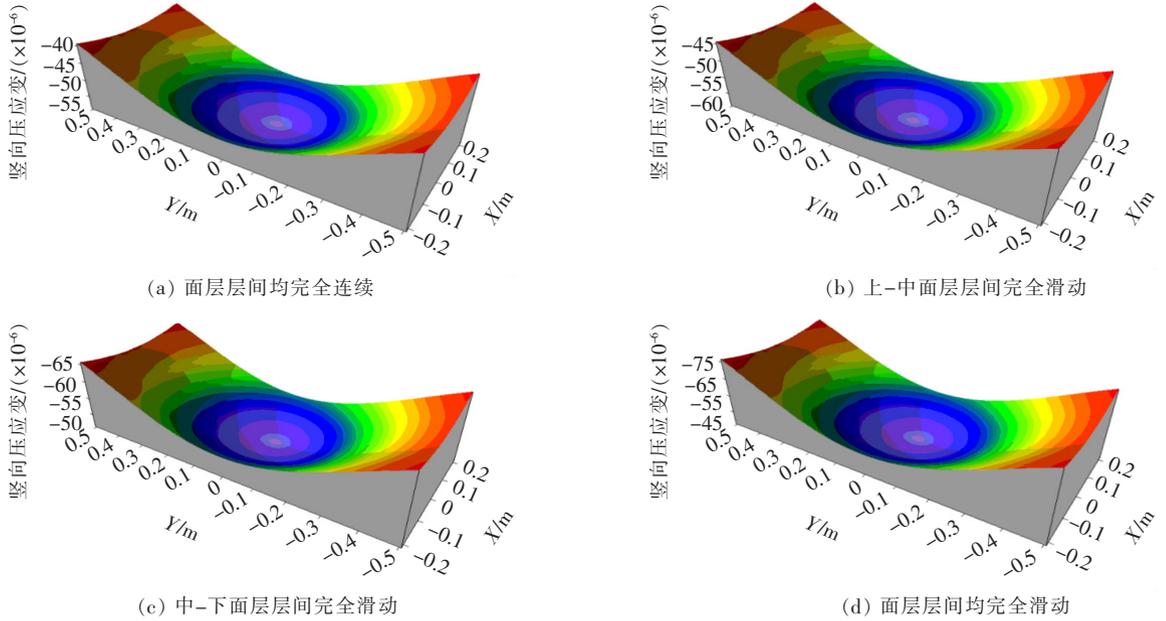


图7 路基顶面竖向压应变的空间分布

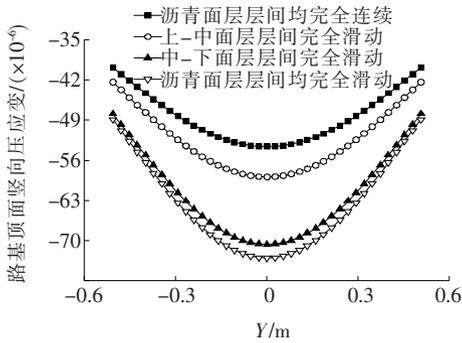


图8 X=0处路基顶面竖向压应变的分布

## 7 与半刚性基层沥青路面结构对比分析

前文已详细描述了倒装式沥青路面结构在不同面层层间结合条件下沥青混合料层底拉应变、无机结合料层底拉应力分布规律,现结合文献[9]、[13]研究成果与传统半刚性基层沥青路面进行比较,分析不同面层层间结合条件对两种路面结构力学响应的影响,结果如表1、2所示。

表1 不同面层层间结合条件下各路面结构最大拉应变及其位置

路面结构	最大拉应变/( $\times 10^{-6}$ )		
	面层层间均完全连续(位置)	上一中面层层间完全滑动(位置)	中一下面层层间完全滑动(位置)
半刚性基层沥青路面结构 <sup>[9]</sup>	60.60(中面层)	172.40(上层)	230.90(中面层)
半刚性基层沥青路面结构 <sup>[13]</sup>	53.71(中面层)	177.90(上层)	192.10(中面层)
倒装式沥青路面结构	34.46(基层)	41.29(基层)	49.37(基层)

表 2 不同面层层间结合条件下各路面结构  
无机结合料底基层最大拉应力

路面结构	最大拉应力/MPa		
	面层层间 均完全 连续	上—中面 层层间完 全滑动	中—下面 层层间完 全滑动
	半刚性基层沥青路面结构 <sup>[9]</sup>	0.131 3	0.145 5
半刚性基层沥青路面结构 <sup>[13]</sup>	0.143 2	0.153 9	0.174 8
倒装式沥青路面结构	0.189 1	0.213 2	0.265 7

由表 1 可见:对于传统的半刚性基层沥青路面结构在面层层间均完全连续、上—中面层层间完全滑动、中—下面层层间完全滑动的工况,沥青混合料层层底最大拉应变分别出现在中面层、上面层、中面层,然而倒装式沥青路面结构,无论何种面层层间结合状态下相对最危险的区域为沥青稳定碎石基层,这是由于该结构基层部分为级配碎石,整体刚度低于半刚性基层沥青路面结构;由表 2 可见:半刚性基层沥青路面结构当面层层间均完全连续、上—中面层层间完全滑动、中—下面层层间完全滑动的工况,无机结合料底基层最大拉应力都出现在双轮轮隙中心,其分布规律与倒装式沥青路面在不同面层层间结合状况下无机结合料层层底拉应力类似,随着面层层间出现滑动无机结合料底基层拉应力不断增大;综合表 1、2 可见:倒装式沥青路面结构与半刚性基层沥青路面结构在中—下面层层间完全滑动工况时,沥青混合料层底拉应变、无机结合料层底拉应力最大,更易导致路面出现破坏,因此对于这两种路面结构均需注意中—下面层层间黏结的增强措施。

## 8 结论

考虑 4 种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并与半刚性基层沥青路面结构对比,得到如下结论:

(1) 沥青混合料层水平拉应变最大值均出现在沥青稳定碎石基层层底,而并非始终为沥青下面层层底,面层层间均完全滑动的工况并非上—中面层层间完全滑动与中—下面层完全滑动工况简单线性叠加。

(2) 沥青混合料层底拉应变、无机结合料层层底

拉应力、路基顶面竖向压应变,受面层层间滑动的影响排序为面层层间均完全滑动>中—下面层层间完全滑动>上—中面层层间完全滑动;沥青混合料层竖向压应力,受面层层间均完全滑动的影响最大,上—中面层层间滑动的影响超过中—下面层层间滑动的影响。

(3) 倒装式沥青路面与半刚性基层沥青路面结构在中—下面层层间完全滑动的工况,沥青混合料层底拉应变、无机结合料层底拉应力最大,在此工况更易出现车辙、疲劳开裂破坏。

## 参考文献:

- [1] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [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(4).
- [3] 乔志,王选仓,张志芳,等. 半刚性基层双层连续摊铺层间结合状态[J]. 交通运输工程学报,2016(3).
- [4] 宁志峰. 沥青路面层间结合状况的分析与评价[D]. 湖南大学硕士学位论文,2012.
- [5] Hachiya T, Sato K. Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface between Asphalt Concrete Layers[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements. Seattle: Washington, 1997: 1 349—1 362.
- [6] Lepert P, Poilane J P, Bats-villard M. Evaluation of Various Field Measurement Techniques for the Assessment of Pavement Interface Condition[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. United Kingdom: Nottingham, 1992: 3 224—3 237.
- [7] 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(4).
- [8] 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(5).
- [9] 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(5).
- [10] Bitumen Business Group. BISAR 3. 0 User Manual [M]. Bitumen Business Group,1998.
- [11] 黄兵,邱延峻. 成德南高速公路沥青路面结构动力行为研究[R],2015.
- [12] 肖川. 典型沥青路面动力行为及其结构组合优化研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2014.
- [13] 张争奇,张奇,罗要飞. 层间接触位置和状态对沥青路面力学指标的影响[J]. 公路工程,2015(5).