

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.006

# 基于压力胶片技术的沥青面层层间应力分布研究

陈莉, 蔡旭, 张睿达

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**为研究沥青面层的层间应力传递,采用压力胶片测量技术测量堆叠 AC-13 沥青混合料马歇尔试件静载压力试验下的受力情况,并分析接触面积、压力分布和应力集中状态。结果表明:压力胶片技术能够很好地反映在竖向荷载下两堆叠马歇尔试件间的相对接触状态;采用 LLW 胶片时最佳负荷为 100 N,试件间传递荷载接触面积约为横截面积的 2.13%,接触面平均压强为 0.62 MPa,压力的折减系数为 0.973;采用 LW 胶片时,最佳负荷为 250 N,接触面积约为横截面积的 1.32%,接触面平均压强为 2.40 MPa,压力折减系数为 0.989。压力胶片的量程决定试验的最佳荷载,在最佳荷载的条件下,所测得应力的折减系数与受力面积比相似,并存在显著的应力集中现象。拟合结果表明:沥青面层接触面的应力分布服从正态分布,层间界面处于复杂的应力集中与分布状态。

**关键词:**压力胶片;沥青路面;界面强度;受压面积

现有沥青路面结构设计理论基于多层弹性体系理论,假定路面层间完全连续或者完全光滑。然而,沥青路面采用分层铺筑、分层碾压的施工方式,且由于材料表面构造、骨料表面纹理以及沥青膜的影响,层间的应力传递必然存在某种分布形式,因此不能简单地将沥青路面整体及各结构层当做完全连续或者完全光滑的结构。

目前,沥青路面层间接触的研究主要基于室内试验和数值计算等方法,其中压力胶片技术能较精确地反映出接触界面的应力状态,压力胶片利用受压显色功能测量两物体间受压接触面,以颜色的深浅表征压力的大小,结合数字图像处理技术计算得到受力面积和压力分布等。许多学者采用该技术研究基层一面层之间的界面接触状态和轮胎一路面间的接触情况,如任赞等研究了路面结构不同层间接触状态;杨丰华等利用压力胶片分析轮胎与路面之间的应力状态。但这些研究均是将沥青路面中面层之间的应力假设为均布荷载,实际上由于沥青混合料的散粒体特性,层间应力主要通过上下层混合料颗粒的接触部位进行传递,采用均布荷载将导致路面受力分析结果的误差。

该文基于压力胶片研究层间应力传递与分布特性,为实现沥青路面结构数字化、精细化设计提供技术支撑。

## 1 试验过程

### 1.1 试件准备

试验所采用的沥青混合料为 AC-13 混合料,所用集料为花岗岩,沥青为 70# 道路石油沥青,沥青含量为 4.6%,矿粉含量为 5.5%,原材料的相关指标与级配如表 1、2 所示。

表 1 原材料的技术指标

材料	指标	单位	试验结果
粗集料	吸水率	%	0.9
	毛体积相对密度		2.57
	表观相对密度		2.66
细集料	表观相对密度		2.64
	砂当量	%	65
	针入度	0.1 mm	65
沥青	软化点	℃	48
	15℃延度	cm	>100
	密度 15℃	g/cm <sup>3</sup>	1.023
矿粉	表观相对密度		2.57

根据表 2 所选的级配制备马歇尔试件,其标准尺

收稿日期:2019-07-31

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51878193);国家自然科学基金资助项目(编号:51708144)

作者简介:陈莉,女,硕士研究生. E-mail:707864007@qq.com

寸为  $\phi 101.6\text{ mm}\times(63.5\pm 1.3)\text{ mm}$ 。马歇尔试件相 关指标如表 3 所示。

表 2 混合料设计级配

混合料	通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	91.9	75.6	51.3	35.0	24.5	17.3	11.9	8.2	5.50

表 3 马歇尔试件指标

试件 编号	高度/ mm	质量/ g	空隙率/ %	毛体积相对 密度	VMA/ %	VFA/ %	稳定度/ %	流值/ (0.1 mm)
1	62.8	1 139.7	3.05	2.410	11	71	9.61	3.39
2	63.8	1 145.3	2.41	2.426	10	76	6.66	2.75
3	62.3	1 128.1	3.90	2.389	11	66	5.87	3.27
4	62.3	1 141.3	2.37	2.427	10	76	7.04	3.24
5	62.2	1 136.7	3.76	2.392	11	67	8.60	3.51
6	62.2	1 137.3	3.44	2.400	11	69	7.22	2.09

由表 3 可知:马歇尔试件的质量存在差异,试验过程中将根据其质量调整砝码质量,保证荷载一致。

1.2 压力胶片

研究采用双片型胶片,胶片精度为测点面积  $0.016\text{ mm}^2$ ,胶片结构如图 1 所示。采用的胶片规格为 LLW 和 LW,量程分别为  $0.25\sim 2.5\text{ MPa}$  和  $1.0\sim 10\text{ MPa}$ 。

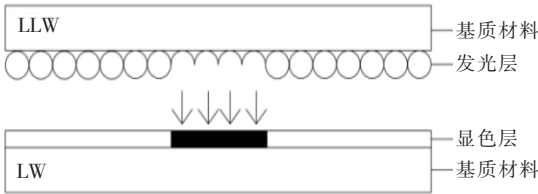


图 1 胶片结构

由于压力胶片的特性,剪切过程中需要两个试件进行相对位移产生剪切力,因此该文先对两堆叠的马歇尔试件进行竖向荷载下其接触面之间的应力分布进行分析,再在其得出的结论下进行剪切试验。

- 压力胶片试验的具体步骤如下:
- (1) 记录试验场地的温度、湿度。
  - (2) 将压力胶片置于马歇尔试件接触面位置,采用“沥青混合料颗粒剪切分析系统”辅助定位。
  - (3) 采用“沥青混合料颗粒剪切分析系统”控制加载,根据马歇尔试件的质量设置砝码质量。
  - (4) 加载时间为  $2\text{ min}$ ,加载结束后取出试件与胶片。
  - (5) 采用扫描仪获取应力图片,利用数字图像处理技术计算应力大小与分布。

2 试验结果及数据分析

2.1 压力胶片量程影响分析

采用  $100、150、200、250$  和  $300\text{ N}$  的荷载进行加载试验,每个荷载进行 2 次平行试验,得到 LLW 和 LW 两种规格压力胶片的显色状态,采用分析软件进行应力分布分析,分析结果如表 4 所示。

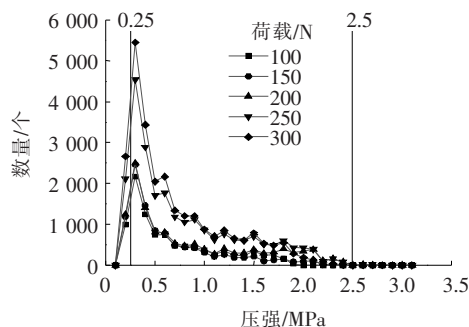
表 4 压力胶片加载试验结果

胶片 规格	荷载/ N	受压面 积/ $\text{mm}^2$	平均压 强/ $\text{MPa}$	所测压 力/N	压力折 减系数	受力面 积比/%
LLW	100	173	0.62	108	0.973	2.134
	150	159	0.59	94	0.583	1.961
	200	200	0.80	161	0.763	2.467
	250	371	0.73	272	1.042	4.576
	300	421	0.66	278	0.894	5.193
LW	100	25	2.15	54	0.486	0.308
	150	44	2.35	104	0.646	0.543
	200	62	2.30	144	0.683	0.765
	250	107	2.40	258	0.989	1.320
	300	116	2.50	292	0.939	1.430

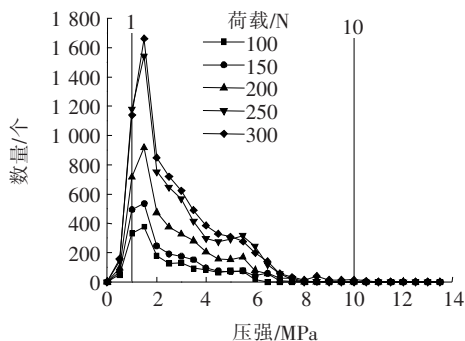
由表 4 可知:随着荷载的增大,接触面的受压面积、总压力和受力面积比逐渐增大。所测得的平均压强则没有显著的变化规律。这是由于超出胶片量程的压力面积越多,所得数据的误差越大,因此应根据胶片

量程确定荷载大小。

图 2 为接触面各测点的压强—数量分布图。



(a) LLW 胶片



(b) LW 胶片

图 2 胶片压强大小分布

由图 2 可知:对 LLW 压力胶片而言,随着荷载的增大,压强中小于 0.25 MPa 的测点数量增多,存在误差的测点数量比例上升,因此 LLW 压力胶片所适宜的荷载为 100 N;同理可得 LW 胶片所适宜的测量荷载为 250 N。

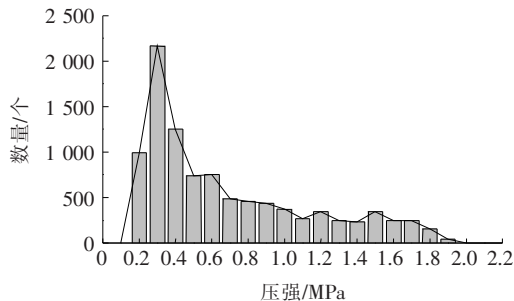
将实际施加的压力与压力胶片测得的总压力之比称作压力折减系数。由表 4 可知:压力胶片的折减系数随着荷载的增加有所浮动,其中 LLW 胶片在荷载为 100 N 时压力折减系数为 0.973;与实际荷载基本一致。从总压力测量结果看,100 N 为 LLW 胶片的最佳负荷。LW 胶片的折减系数随着荷载的增大不断增大,直到其负荷极限才有所减小。其中 250 N 所对应的压力折减系数为峰值 0.989,因此 250 N 荷载为 LW 胶片的最佳负荷。

受力面积比为接触面实际面积占试件横截面面积的比值。由表 4 可知:在最佳荷载的情况下,LLW 胶片与 LW 胶片所测得的受力面积比分别为 2.1% 和 1.3%。该结果表明:沥青路面的层间接触并非理想的面接触,且承担荷载床底的接触面积仅占横截面积的 1.2%~2.2%,层间界面处于复杂的应力集中与分布状态。

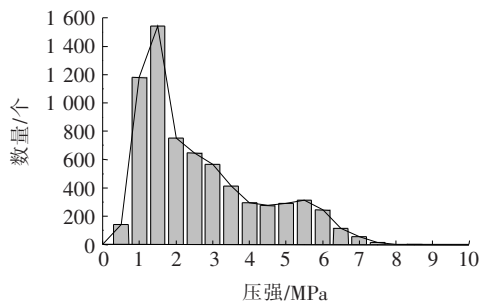
## 2.2 压力胶片应力集中分析

### 2.2.1 应力大小的分布情况

选择最佳荷载下 LLW 和 LW 的试验数据,分析其压力分布特征。测定点面积为 0.016 mm<sup>2</sup>,压力分布情况如图 3 所示。



(a) LLW 胶片 (荷载为 100 N)



(b) LW 胶片 (荷载为 250 N)

图 3 各胶片的应力分布图

由图 3 可知:两种胶片应力大小的分布趋势基本相同,随着压强的增大,试件所受到的压强中落到该压强区间的点数也随之增多,并且分别在 0.3~0.4 MPa 及 1.0~1.5 MPa 区域达到最大值,即压强较多地集中在 0.3~0.4 MPa 和 1.0~1.5 MPa,且试件所受到的压强在其范围内的概率分别为 23% 和 22%;达到峰值后,所受压强的点数随着压强的增大反而减少,最后均趋近于零。

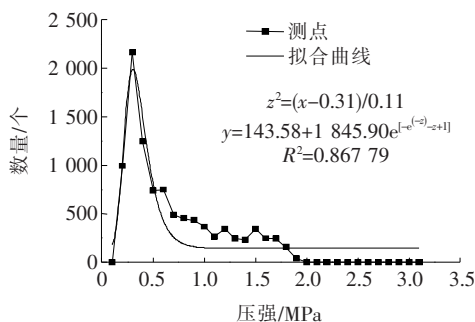
尝试使用 Origin 中单峰分布中的 Extreme 对此分布密度函数进行拟合。结果如图 4 所示。

两者所拟合的曲线均收敛且相关性高,表明层间接触面的应力服从单峰分布。

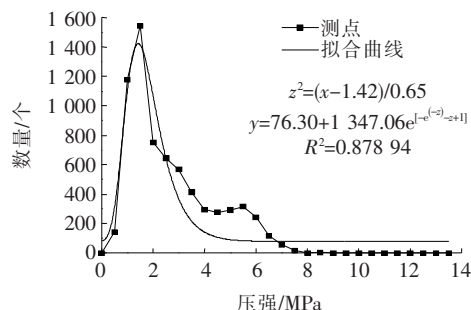
### 2.2.2 应力空间分布分析

对扫描压力胶片得出的应力分布图进行三维重构,能明显地看出各应力的分布情况,如图 5 所示。

由图 5 可以看出:应力集中在试件边缘与试件中心。与轮胎—路面接触面相比,层间的接触在刚度较大的材料间产生,所测压强分散且峰值较大,不存在轮胎—路面接触的成片应力集中现象。

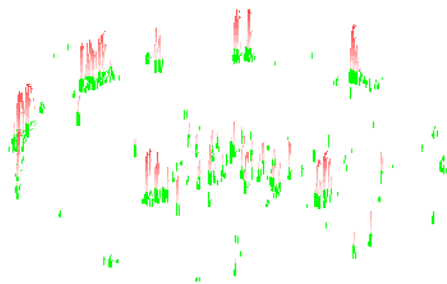


(a) LLW 胶片 (荷载为 100 N)

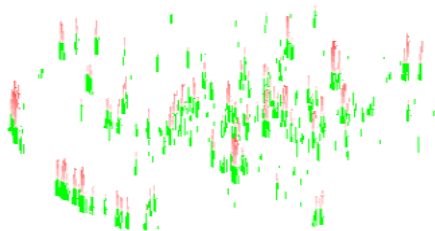


(b) LW 胶片 (荷载为 250 N)

图 4 Extreme 拟合曲线



(a) LLW 胶片 (荷载为 100 N)



(b) LW 胶片 (荷载为 250 N)

图 5 各胶片的应力集中三维分布图

### 3 结论

(1) 采用压力胶片技术可以有效评价在受到一定荷载情况下,路面内部面层之间接触区域的面积、压力

分布和应力集中分布。

(2) 对于 LLW 型胶片,100 N 为最佳荷载,其荷载折算系数为 0.973,平均压强为 0.62 MPa,其受压面积比为 2.1%;对于 LW 型胶片,250 N 为最佳荷载,其荷载折算系数为 0.989,平均压强为 2.4 MPa,其受压面积比为 1.3%。

(3) 在最佳荷载条件下,胶片测定的应力服从正态分布。

(4) 沥青路面的层间接触为典型的点接触,应力分布集中于试件边缘与试件圆心周围,表明沥青面层的层间界面处于复杂的应力集中与分布状态。

### 参考文献:

- [1] 曾同. 考虑竖向荷载的沥青路面层间界面模型研究[D]. 武汉工程大学硕士学位论文,2017.
- [2] 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.
- [3] 任赞,张磊,时伟. 层间接触条件对半刚性基层沥青路面寿命影响分析[J]. 交通标准化,2009(11).
- [4] 孙敬福,马士宾,陈奕,等. 层间接触状态对半刚性基层沥青路面使用寿命的影响分析[J]. 路基工程,2016(3).
- [5] 王吉昌. 半刚性基层与沥青面层间界面特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2013.
- [6] 高国华. 半刚性基层与沥青面层层间界面力学特性研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2008.
- [7] 高峰. 半刚性基层沥青路面基层层间非光滑表面处治试验研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2017.
- [8] 王晓东,何兆益. 考虑制动荷载及横观各向同性的沥青路面动力响应研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [9] 邵申申. 基于轮胎与路面接触的沥青混合料抗滑性能评价研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文,2016.
- [10] CIRELLO A, MARANNANOG, VIRZI MARIOTTIG. Experimental Analysis of the Contact Pressure Distribution in an Off-Road Tyre[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering, 2009, 44: 287-295.
- [11] 张淑文. 基于界面接触特性的多尺度沥青路面抗滑性能评价及应用研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文,2015.
- [12] 李伟雄,李智. 基于接触应力集中的沥青路面抗滑性能评价[J]. 科学技术与工程,2018(16).
- [13] 高晓伟,颜薇,宋琿. 温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J]. 中外公路,2019(1).
- [14] 杜镇宇,梁乃兴,赵毅,等. 数字图像技术分析沥青路面均匀性的方法[J]. 中外公路,2017(5).
- [15] 高明. 高模量沥青混凝土对沥青路面结构的高温受力影响分析[J]. 中外公路,2018(1).