

基于 MMLS3 的沥青路面结构模型的尺寸研究

李淑明¹, 吴小虎¹, 苏志翔^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司)

摘要: 通过在室内试槽中铺筑并振动碾压成型路面结构模型, 然后使用小型加速加载试验设备 1/3 行车荷载模拟系统(MMLS3)进行加载, 采集结构内多点的应变并加以分析, 据此判定结构模型的合理尺寸。目前主要对水泥稳定碎石基层沥青面层结构模型进行了测试。初期试验结果表明: 在荷载影响区内, 沥青层底的任一点上的横向拉应变远大于纵向的应变; 随着荷载的移动, 纵向应变发生压-拉-压的变化, 横向应变始终为拉应变; 根据面层底的应变分布情况, 考虑到 MMLS3 轮载的特点, 建议结构模型的纵向尺寸不少于 100~120 cm, 横向尺寸不少于 50~60 cm。

关键词: 路面结构模型; 1/3 行车荷载模拟系统(MMLS3); 力学响应; 沥青路面

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Size of Pavement Structure Model with One-third Scaled Model Mobile Load Simulator

LI Shuming¹, WU Xiaohu¹, SU Zhixiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The pavement model constructed in a small test pit and compacted by a vibratory roller was loaded by a one-third scaled accelerated instrument, Model Mobile Load Simulator 3 (MMLS3). The strains of different positions in the structure were collected and analyzed to explore the effective size of small-scaled structure model. At present, the asphalt pavement model with cement-treated aggregates base was tested. The preliminary analysis of data showed that in the zone under loading affection, the transverse strain at the bottom of the asphalt layers was tension strain and much more than the longitudinal strain. The state of longitudinal strain varied from compression to tension with the loading's approaching and returned to the compression state with the loading leaving. The lateral strain is always tension strain.

Based on the strain distribution with the distance, the effective size of the model can be determined as 100~120 cm in longitudinal direction and 50~60 cm in transverse direction.

Key words: pavement structure model; model mobile load simulator 3 (MMLS3); mechanical response; asphalt pavement

现行的沥青路面设计方法大多采用静态的荷载和弹性多层体系进行力学分析, 不能真实反映实际的交通荷载作用下的路面结构行为。路面加速加载设备的出现, 使得我们可以在室内建造路面结构模型进行较快速的长期加载测试, 然后根据试验结果修正沥青路面结构的设计参数, 改善沥青路面设计的可靠性。加速加载设备主要可分为两类: 足尺和小型(比例)加速加载设备。比例加速加载设备 MMLS3 的尺寸小, 克服了足尺设备耗时、成本高、环境控制困难等缺点, 在沥青混合料和沥青路面结构的研究中发挥着越来越重要的作用。

MMLS3 加速加载设备主要由南非茨瓦尼理工大学 Hugo^[1] 院士于 1993 年研制开发, 设备尺寸为 2 400 mm×600 mm×1 150 mm, 总重约为 800 kg, 其加载轮胎宽 80 mm, 最大胎压为 0.8 MPa, 可施加 1.9~2.7 kN 的荷载, 最大加载速度可达每小时 7 200 次^[1-4]。MMLS3 具有两个特点: ① 采用单向加载的方式, 加载速度快; ② 配套设备包括环境箱、热冷空调、碾压系统等, 可以在室内模拟压路机, 成型路面结构模型, 并可控制测试时的环境条件。

在十九世纪末和二十世纪初, 多位研究者对比了 MMLS3 和足尺设备 TxMLS 的测试结果。在国外, Hugo^[2-3] 最早将 MMLS3 用于现场路面测试, 并和 TxMLS 的足尺加载设备进行了对比, 认为

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(20113151)

第一作者: 李淑明(1975—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路工程材料。E-mail: lilyism@163.com

通讯作者: 吴小虎(1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为道路工程材料。E-mail: xhwu_huge@163.com

MMLS3 加速加载设备能够用来预测沥青路面的疲劳性能和永久变形. 同期研究者们都进行了类似的现场路面加速加载试验研究, 例如 Lee 和 Kim 尝试建立模型路面疲劳测试方法, 并研究了沥青混合料的愈合性能^[4-5]. Bhattacharjee 利用 MMLS3 研究了热拌沥青混合料的高温疲劳性能, 建立了一套应用 MMLS3 设备研究沥青混合料疲劳性能的测试方法和指标, 提出了动态应变频域分析处理的方法^[6-8]. 在国内, MMLS3 的应用研究主要集中于沥青混合料的性能方面.

MMLS3 加速加载系统开发出来之后, 较为广泛地应用在了沥青混合料和沥青路面各方面的研究上. 其突出的特点是它可用于沥青路面的结构性能研究, 特别是室内模型结构的研究. 现场路面结构通常宽度较大, 可视为无限体, 但模型结构的尺寸有限, 尤其是长度和宽度. 室内模型结构应采取多大的长度和宽度, 既能保证测试结果的准确性, 又便于室内制造, 在正式实验前均需要明确. 如能形成标准的测试方法, 则更利于该设备的推广使用. 因此, 本文拟借助 MMLS3 配套的碾压系统在室内铺筑成型路面结构模型, 在模型的面层和基层底埋设应变片, 用应变采集仪采集 MMLS3 加载时的动态应变, 首先探索模型路面结构的合理尺寸.

1 试验方法

1.1 沥青路面结构模型设计

MMLS3 加速加载设备作为缩尺模型的加载设备, 轮载的缩放比尺为 1/9, 弹性测试结构的长度缩放比尺为 1/3^[9]. 缩放过程中为便于试验成型, 将多个薄沥青面层简化为单层结构进行考虑^[10].

缩尺模型路面结构所依托的原型路面结构^[11], 从上到下依次为: 4 cm 的沥青玛蹄脂碎石混合料 (SMA-13), 8 cm 的沥青混凝土中面层 (AC-20C), 8 cm 的沥青混凝土下面层 (AC-25C), 36 cm 的水泥稳定碎石, 18 cm 的低剂量水泥稳定碎石. 路基材料为长江口细砂. 模型路面结构的面层采用 SMA-13 沥青混合料, 集料选用玄武岩, 级配如表 1 所示, 沥青选用壳牌 SBS 改性沥青, 其各项性能指标都符合我国规范中 I 型 SBS 改性沥青的要求. 根据规范要求, 进行级配设计并通过马歇尔试验确定最佳油石比为 6.0%, 目标空隙率为 3.5%.

模型结构中面层板的尺寸为 1 100 mm×800 mm×70 mm, 按照规范方法拌和好混合料后, 均匀

表 1 SMA-13 级配组成

Tab.1 Gradation of SMA-13

筛孔尺寸/mm	累计通过百分率				合成级配 累计通过 率/%	规范值/ %
	0~3	5~10	10~15	矿粉		
16	100.00	100.00	100.00	100	100.00	100
13.2	100.00	100.00	88.56	100	94.85	90~100
9.5	100.00	97.59	21.16	100	63.82	50~75
4.75	99.54	11.43	0.19	100	29.33	20~34
2.36	86.86	0.20	0.14	100	24.02	15~26
1.18	63.67	0.19	0.14	100	20.31	14~24
0.6	44.41	0.19	0.14	100	17.22	12~20
0.3	27.00	0.19	0.14	100	14.44	10~16
0.15	18.77	0.19	0.14	99.20	13.04	9~15
0.075	10.94	0.19	0.14	97.10	11.58	8~12

倒入试槽内, 振动碾压成型面层板. 基层材料选用水泥稳定碎石, 级配如图 1 所示, 水泥用量为 4.2%, 用水量为 5%. 水泥稳定碎石基层的尺寸为 1 300 mm×890 mm×120 mm. 土基为厚度为 300 mm 的压实细砂, 土基的宽度为 1 000 mm. 基层板和细砂均在试槽内振动碾压成型.

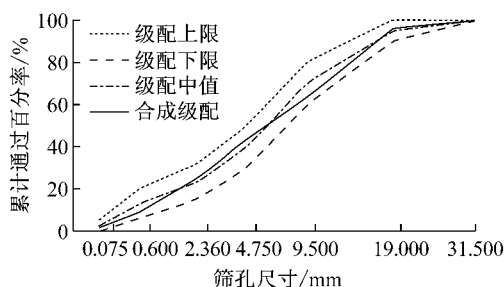


图 1 水泥稳定碎石基层级配曲线

Fig.1 Gradation of cement-treated aggregates base

基层和面层板成型好后, 依次安装在试槽内. 试槽和水泥稳定碎石基层板之间用水泥砂浆填充, 待水泥砂浆形成强度后即对基层板产生约束. 沥青面层和水泥稳定碎石基层之间用冷拌料作为粘结层. 冷拌料为 0~3 mm 粒径的矿料与液体煤油沥青 (12% 的油石比) 的拌合混合料. 这样的约束, 能消除结构的振动对测试结果的影响. 模型路面结构如图 2 所示. 应变测试时室温为 17 °C.

1.2 应变片选型与布置

通过采集应变片的数值获得沥青面层底部某点的动态应变值. 通过对比选型, 最终选择了性能良好的箔式电阻应变片. 此外, 为了在试验过程中能够同时获得一个测点在各个方向的应变值, 选用三向应变花进行应变采集. 应变花的型号为 BX120-5CA. 结构中还粘贴了长度 10 mm 和 5 mm 的两种单向应变片. 三种应变片的电阻值都为 120±0.1 Ω, 灵敏系

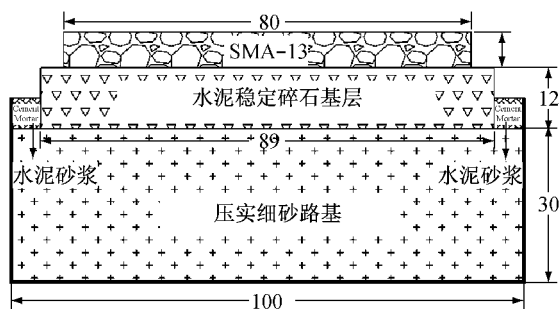


图 2 模型路面结构示意图(单位:cm)

Fig.2 Layout of pavement structure model(unit: cm)

数为 $2.08 \pm 1\%$ 。沥青混合料面层底部一个横断面上的应变花粘贴方案如图 2 所示。图 2 中布设了 A, B, C 三个断面: A 断面 A-1#~A-7# 为三向应变花, A1~A3 为 10 mm 长的单向应变片, A4~A6 为 5 mm 长的单向应变片; B 断面 B-1#~B-7# 为三向应变花; C 断面 C-1#~C-7# 为三向应变花, C1~C6 为 10 mm 长的单向应变片。应变片之间的间隔为 10~20 cm, 详情如图 3 所示。

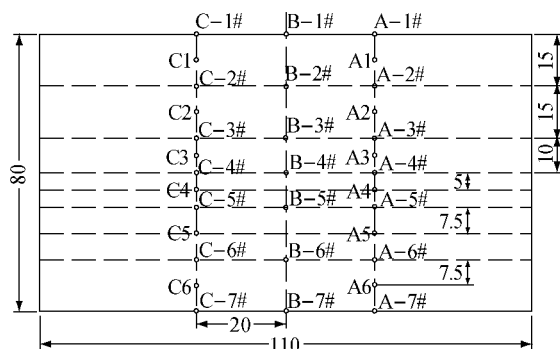


图 3 面层底面应变片布置图(单位:cm)

Fig.3 Layout of strain gauges at the bottom of one layer(unit: cm)

粘贴应变片时,先用打磨机对层底进行打磨磨平,然后涂抹一层环氧树脂使粘贴面平整光滑,最后在固定的位置粘贴应变片并焊接引线。应变片表面通常还需再涂抹一层环氧树脂加以保护。

1.3 加载及采集方案

MMLS3 最大胎压为 0.8 MPa,可施加 1.9~2.7 kN 的荷载。试验前检查轮胎的充气情况。用轮胎充气泵对四个轮胎进行充气,严格控制胎压表的示数为 0.7 MPa,确保试验时的胎压为 0.7 MPa。加载轮之间的间距为 1.2 m。试验前实测轮胎印迹如图 4 所示,轮胎印迹近似矩形,其横向宽度约为 8 cm,纵向长度约为 9.5 cm。图中黑色的小正方形,边长约 1.5 cm,其总面积为实际的接地面积。从图 4 中可数得这种黑色方块约为 17 个,则实际胎压面积为

38.25 cm^2 ,经过计算可知实际的轮载约为 2.68 kN。

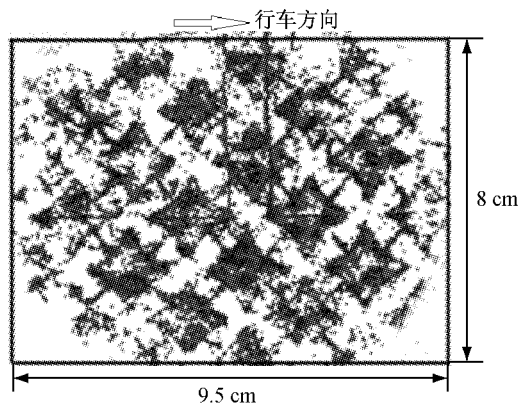


图 4 轮胎印迹

Fig.4 Measured tire contact area

设定 MMLS3 的加载速度为 $2.0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,加载次数 20 次。加载时用 DH3820 应变采集仪采集沥青面层层底各位置的动态应变值,设定采集频率为 100 Hz。选取 20 个加载周期的中间 5 个周期的动态应变进行数据分析处理。

本文的半刚性沥青路面结构,基层底部的应变值很小,动态变化也轻微,对模型结构的尺寸几乎没有影响。因此,本文仅描述沥青面层底部的应变情况。

2 试验结果分析

2.1 纵向应变分析

三个断面中, A 断面的成活率约为 70%, B 断面和 C 断面的成活率约为 60%,这是因为安装面层板时过度的拉拽及摩擦使得应变片磨损或连线脱落。以后测试时需考虑增加保护层以提高应变片的成活率。

路面结构模型面层底部的纵向动态应变根据距离轮迹线的远近不同呈现两种不同的形态。第一类型的应变曲线如图 5 和图 6 所示(以 A-4# 为例),主要集中在靠近轮载中线两侧的位置。A-2#, A-4#, A-5#, A3, A4 和 A5 的应变曲线均为第一类。从图 5 可知,各个阶段的应变实测值均为负值,意味着此时的材料处于受压状态,这是由于所截取用来分析得数据并不是试验开始时的数据,在此之前所进行的试验使得结构层底产生了累积应变。考虑外荷载为零时,结构内力为零,需要对原始应变曲线进行零点修正。修正方法如下:以图中 A 点作为零点,以相邻两个周期的 A 点的连线 AA' 作为零线,对本周期的应变曲线进行整体修正,修正后的应变

曲线如图 6 所示。

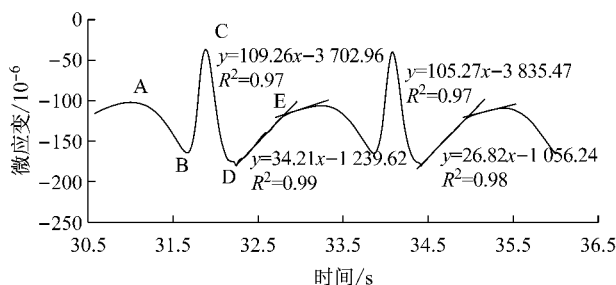


图 5 原始纵向应变曲线

Fig.5 Original variation of longitudinal strain with time

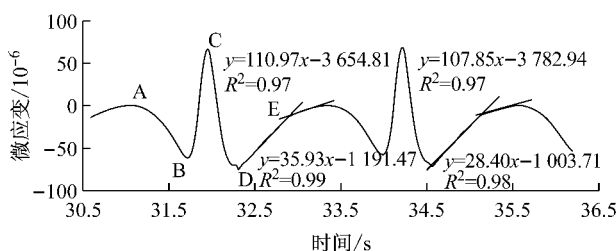


图 6 修正后的纵向应变曲线

Fig.6 The modified variation of longitudinal strain with time

如图 6 所示,整个加载周期内的动态应变可依次分为 5 个阶段:轮载靠近阶段(受压,AB)、加载阶段(压-拉,BC)、卸载阶段(拉-压,CD)、轮载远离阶段(受压,DE)和无影响阶段(EA).将上一周期的无影响阶段和本周期的靠近阶段之间的峰值点作为轮载靠近阶段的起点(即图中 A 点),随后的 3 个峰值点依次为 B, C, D 点,分别代表轮载靠近阶段的结束,加载阶段的结束和卸载阶段的结束.轮载远离阶段和无影响阶段的线性拟合曲线的交点 E(拐点),

表 2 5 个周期内纵向应变节点(A—E)值及出现时间

Tab.2 Longitudinal strain and relative time of strain points (A—E) in five cycles

周期	A		B		C		D		E	
	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$
1	31.05	0	31.68	-62.12	31.90	66.28	32.25	-75.58	32.82	-12.35
2	33.22	0	33.87	-59.08	34.09	68.34	34.42	-72.46	34.98	-10.16
3	35.40	0	36.01	-56.64	36.24	71.56	36.57	-71.26	37.15	-7.85
4	37.53	0	38.19	-58.08	38.41	70.37	38.74	-73.61	39.36	-8.05
5	39.77	0	40.38	-57.28	40.60	73.69	40.94	-70.52	41.56	-7.54

表 3 5 个周期内各阶段纵向应变值及持续时间

Tab.3 Strain variation and during time in five cycles

周期	AB		BC		CD		DE		EA'		T/s
	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	
1	0.63	-62.12	0.22	128.02	0.35	-142.46	0.57	62.26	0.40	12.25	2.17
2	0.65	-89.08	0.22	127.07	0.33	-141.32	0.56	61.41	0.42	10.16	2.18
3	0.61	-56.64	0.23	127.96	0.33	-143.16	0.58	62.80	0.38	7.85	2.13
4	0.66	-58.08	0.22	128.14	0.33	-144.45	0.62	64.67	0.41	8.05	2.24
5	0.61	-57.28	0.22	130.79	0.34	-144.49	0.62	62.46	0.37	7.54	2.16
均值	0.63	-58.64	0.22	128.40	0.34	-143.18	0.59	62.72	0.40	8.66	2.18

是这两个阶段的分界点.随着轮载的靠近和远离,临近荷载区的材料的纵向应变将出现“压-拉-压”的变化。

第 2 种类型的应变曲线主要集中在远离轮载中心两侧的位置,即距离轮载中心约 25 cm 以外的区域. A-1#, A-7# 和 A1 的应变曲线均为此类.典型的第 2 类应变曲线如图 7 所示.第 2 类的应变曲线形状与第 1 类的主要差别在于:应变曲线不能表现出完整的动态加载过程;应变幅值较小,约 $5\mu\epsilon$;应变曲线不光滑,有较多的锯齿形,表现出明显的噪声干扰。

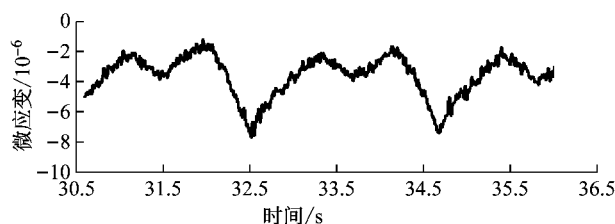


图 7 第 2 类纵向应变曲线形态

Fig.7 The second kind of variation trend of longitudinal strain with time

对两类应变曲线采取不同的方法处理.对第 1 类应变曲线,分别读取 5 个周期内各个作用点 A—E 的应变及对应的时间并汇总在表 2 中.表 2 以 A-4# 应变花纵向应变为例.然后根据表 3 的数值计算求得每个周期内各阶段的应变变化值及持续时间,计算结果如表 3 所示.表 3 的最后一列为 5 个阶段的总作用时间(T),最后一行列出 5 个周期的数据平均值.对第 2 类的应变曲线,只统计每次轮载作用周期内的应变幅值。

按照上述方法分析整理每个应变片测得的纵向应变在每个阶段的平均变化值和平均持续时间(表 3 中最后一行的数据),并据此绘制出沥青层底面的纵向应变的横向分布曲线,如图 8 所示.图 8 以模型的中心为坐标原点.

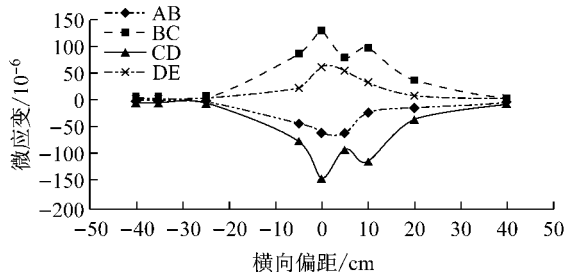


图 8 A 断面各阶段纵向应变与横向偏距的关系曲线

Fig.8 Transverse distribution of longitudinal strain in Section A

由图 8 可知,在沥青层底部,各阶段的纵向应变都随着横向坐标的增加而减小,越远处的纵向应变值越小.中线两侧 20~25 cm 范围内应变的减少较为明显,25 cm 范围之外的应变变化趋于平缓.据此,可以认为轮载在面层的横向影响范围为轮载中心两侧 20~25 cm.在轮载中心两侧 25 cm 外的范围,压应变和拉应变都递减到 $5\mu\epsilon$ 以下,并基本保持恒定,因此可以认为在轮载中心两侧约 25 cm 以外不再受到加载的影响.

应变曲线上的 C 点可视为轮载中心恰好运动到应变片所在处,此时面层受到的拉应变最大.以 C 点为基准点,根据每个阶段的作用时间和 $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加载速度,即可推算出每个阶段的长度,从而能够确定出应变变化至 A~E 点时轮载在面层板上的位置.各个阶段的轮载作用位置计算结果见图 9.图 9 以面层板的纵向中心线为坐标横轴,以 C 点所在的断面为坐标纵轴建立平面直角坐标系.

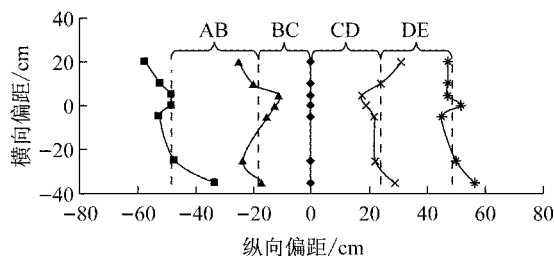


图 9 A~E 点相对作用位置

Fig.9 The relative load position of point A to point E

由图 9 可知,当轮载运动到距离应变片后方约 48 cm 处,应变片开始受到轮载压应变的作用;当轮载继续靠近应变片,距离其约 18 cm 处时,应变片开

始受到轮载拉应变的作用;当轮载驶过应变片至其前方约 25 cm 处时,应变片进入完全卸载后的恢复阶段;轮载运动到应变片前方约 49 cm 处时,应变片不再受到荷载的影响.据此推断,对于沥青层底部某点的纵向应变,轮载的纵向影响范围约 $\pm 50 \text{ cm}$.加载(BC)和卸载(CD)阶段的受拉情况可持续约 45 cm.按照 $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加载速度和 9.5 cm 的轮印长度,可以推断出拉应变的持续时间约为 4.7 个轮印的行驶时间.

按照上述方法,对 B 断面和 C 断面的纵向应变曲线图进行类似的处理分析. B 断面和 C 断面各阶段纵向应变曲线与横向偏移距离的关系曲线如图 10 和图 11.从图中可以看出 B 断面和 C 断面纵向应变与 A 断面有相似的结论:轮载在面层的横向影响范围约 $\pm 25 \text{ cm}$.由于 B 断面和 C 断面应变片成活率偏低,无法分析轮载的纵向影响范围.

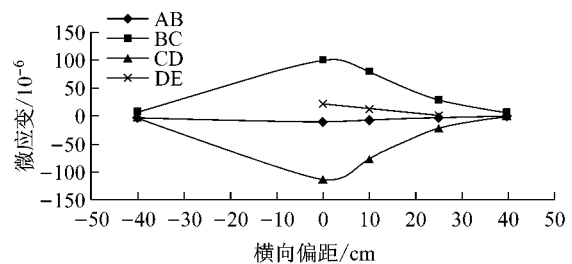


图 10 B 断面各阶段纵向应变与横向偏距的关系曲线

Fig.10 Transverse distribution of longitudinal strain in section B

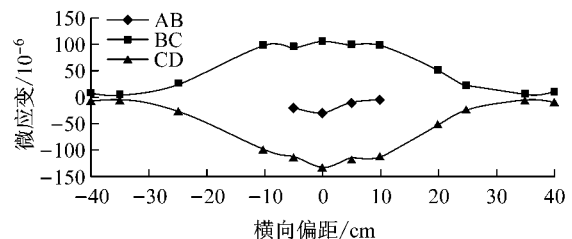


图 11 C 断面各阶段纵向应变与横向偏距的关系曲线

Fig.11 Transverse distribution of longitudinal strain in Section C

综上所述,轮载在面层的横向影响范围约 $\pm 25 \text{ cm}$, 25 cm 以外的点几乎不受轮载的影响.如果该推论正确,则结构模型的横向尺寸可缩短为 50 cm;轮载的纵向影响范围约 $\pm 50 \text{ cm}$,则结构模型的纵向尺寸可缩短为 100 cm;随着轮载的运动,一个点处的纵向应变出现“压-拉-压”的变化,拉应变的持续时间约为 4.7 个轮印的行驶时间.

2.2 横向应变分析

A,B,C 三个断面的横向应变曲线类型相似,但

由于 B、C 断面横向应变成活率较低,因此只对 A 断面的横向应变进行分析. 横向应变曲线类型如图 12 所示.

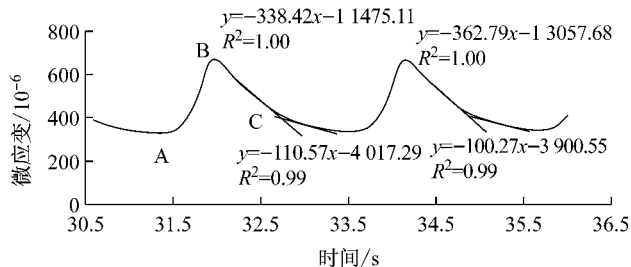


图 12 原始横向应变曲线(A-4#应变花)

Fig. 12 Original variation of transverse strain with time (strain No: A-4 #)

由图 12 可以看出,面层底部的横向应变为拉应变,在一个加载周期内的变化有 3 个阶段:加载阶段(AB)、线弹性卸载阶段(BC)、恢复阶段(CA'). 图 11 中 A 点为上一周期的极小值点, B 点为本周期的极大值点,点 C(拐点)是卸载段和恢复段的线性拟合曲线的交点. 轮载运动到应变片所在点时,该点的横向应变出现极大值,即应变曲线上的 B 点. 由于累积应变的存在,横向应变曲线也存在单向的偏移情况,修正方法同样是以 AA'连线为零线进行修正.

与纵向应变数据的处理方法类似,分别读取 5 个周期内各个作用点 A—C 的应变及对应的时间,以 A-4#应变花的横向应变为例,统计在表 4 中. 利用表 4 数据可计算得到每个周期内各阶段的应变及出现时间,如表 5 所示. 表 5 最后一行为 5 个周期获

表 4 5 个周期内横向应变节点(A—C)值及出现时间

Tab. 4 Strain and relative time of strain points (A—C) in five cycles

周期	A		B		C		A'	
	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$
1	31.28	0	31.98	340.35	32.73	66.86	33.49	0
2	33.49	0	34.16	329.19	34.88	62.68	35.7	0
3	35.7	0	36.31	332.02	37.04	60.71	37.76	0
4	37.76	0	38.48	335.96	39.23	62.00	40.02	0
5	40.02	0	40.67	340.80	41.4	66.09	42.16	0

表 5 5 个周期内各阶段横向应变值及持续时间

Tab. 5 Transverse strain variation and during time in five cycles

周期	AB		BC		CA'		T/s
	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	t/s	$\epsilon/\epsilon/10^{-6}$	
1	0.70	343.35	0.75	-270.12	0.76	-66.86	2.21
2	0.67	329.19	0.72	-263.64	0.82	-62.68	2.21
3	0.61	332.02	0.73	-269.63	0.72	-60.71	2.06
4	0.72	335.96	0.75	-272.50	0.79	-62.00	2.26
5	0.65	340.80	0.73	-272.61	0.76	-66.09	2.14
均值	0.67	335.66	0.74	-269.70	0.77	-63.67	2.18

得的数据平均值. A-1#, A-2#, A-5# 以及 A-6# 的横向应变曲线与 A-4# 相似, A-7# 横向应变曲线波形周期性不明显,只统计其波峰波谷的峰值差值.

根据 A 断面各应变片的阶段横向应变值及作用时间汇总,可绘制出各阶段的应变与横向偏移距离的关系曲线,如图 13 所示,便于观察轮载的横向影响范围.

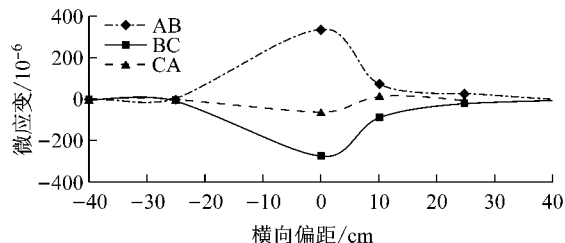


图 13 A 断面各阶段横向应变与横向偏距的关系曲线

Fig. 13 Transverse distribution of transverse strain in section A

由图 13 可知,各阶段的横向应变随着横向偏移距离的增大都存在递减的趋势,尤其在轮载中心两侧 10~25 cm 范围内. 轮载中心两侧 25 cm 范围之外的横向应变的变化趋于平缓,且各阶段应变都递减到 $5\mu\epsilon$ 以下,因此可以认为轮载对轮迹两侧 25 cm 范围内的面层材料影响较大,25 cm 之外的材料则几乎不再受到加载的影响.

与纵向应变的分析类似,应变曲线中 B 点可认为是轮载中心恰好运动到应变片所在的横断面,此时面层受到横向的拉应变最大. 以 B 点为基准点,根据每个阶段的作用时间和 $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加载速度,即可推算出每个阶段的长度,从而能够确定出应变变化至 A—C 点时轮载在面层板上的位置. 各个阶段的轮载作用位置计算结果见图 14. 图 14 以面层板的纵向中心线为坐标横轴,以 B 点所在的断面为坐标纵轴建立平面直角坐标系.

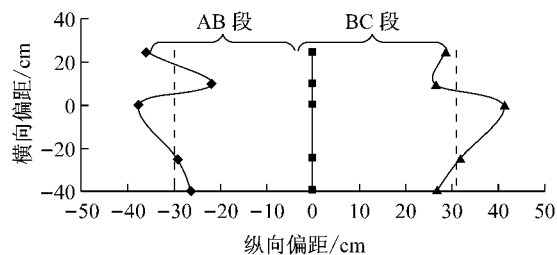


图 14 A—C 点相对作用位置

Fig. 14 The relative load position of point A to point C

由图 14 可知,当轮载在应变片后方约 30 cm 处(即图中 A 点)时,应变片开始受到轮载加载的影响;

当轮载运动至应变片前方约 30 cm 处时,卸载过程完成. 据此推断,轮载对横向应变的有效作用范围为后方约 30 cm 及前方 30 cm,即对于沥青面层底部某点的横向应变而言,轮载的纵向影响范围为 ± 30 cm. 加载(AB 段)和卸载(BC 段)阶段约持续 1.41 s. 按照 $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加载速度和 9.5 cm 的轮印长度,可以推断出拉应变的持续时间约为 6.3 个轮印的行驶时间.

综上所述,对于沥青层底部的横向应变,轮载的横向影响范围为 ± 25 cm;轮载的纵向影响范围为 ± 30 cm;在轮载影响范围内,拉应变的持续时间约 6.3 个轮印的行驶时间.

2.3 纵横向应变对比分析

通过上文对纵向应变和横向应变的分析可知,沥青层底的纵向应变会发生从压到拉再到压的变化,而横向应变都是拉应变. 对纵横向应变片同时存活的应变花 A-1#, A-2#, A-4#, A-5#, A-7# 的纵横向应变进行对比分析,选择纵向的拉应变与压应变以及横向的拉应变进行对比,汇总如表 6. 由表 6 可知,对于沥青面层底的任一点,在轮载作用下,横向应变大于纵向应变.

表 6 A 断面纵横向应变对比

Tab.6 Comparison of longitudinal and transverse strain

编号	纵向		横向
	AB/ $\epsilon/10^{-6}$	BC/ $\epsilon/10^{-6}$	AB/ $\epsilon/10^{-6}$
A-1	4.00	4.00	5.14
A-2	4.31	4.13	9.17
A-4	59.48	128.40	337.76
A-5	23.27	96.90	72.66
A-7	6.00	6.00	4.00

3 结论

通过本文的试验研究,可以得出如下结论:

(1) 在室内铺筑模型路面结构,应用 MMLS3 进行加速加载试验是可行的,并且存在一个合理的有效尺寸.

(2) 在 MMLS3 加载下,沥青层底部的纵向应变可分为 5 个阶段:轮载靠近阶段、加载阶段、卸载阶段、轮载远离阶段和恢复阶段,横向应变为拉应变,可分为 3 个阶段:加载阶段、线弹性卸载阶段和恢复阶段.

(3) 面层底部,横向仅受到拉应变作用,纵向受到拉压应变,并且沥青层底部的横向应变大于纵向应变. 这一结论与文献[7-8]一致.

(4) MMLS3 的动态加载对模型路面结构面层板底部应变的影响范围为:纵向应变的影响范围为横向约 ± 25 cm,纵向约 ± 50 cm,横向应变的影响范围为横向约 ± 25 cm,纵向约 ± 30 cm. 考虑到 MMLS3 轮载的特点,最后建议结构模型的纵向尺寸不少于 120 cm,横向尺寸不少于 50 cm.

参考文献:

- [1] Kim S M, Hugo F, Roesset J M. Small-scale accelerated pavement testing[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(2): 117.
- [2] Hugo F, Smit A F, Epps A. A case study of model APT in the field[C]// Proceedings of 1999 International Conference on Accelerated Pavement Testing. Reno: University of Nevada. 1999: 34-35.
- [3] Hugo F, Fults K, Chen D H, et al. An overview of the TxMLS program and lessons learned[C]// Proceedings of the International Conference on Accelerated Pavement Testing. Reno: University of Nevada, 1999: 18-20.
- [4] Lee S J, Kim Y R. Development of fatigue cracking test protocol and life prediction methodology using the third scale model mobile loading simulator[C]// 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements-Mitigation, Risk Assessment and Prevention. Rome: RILEM. 2004: 29-36.
- [5] Lee J S, Lee S, Kim Y R. Evaluation of healing effect by rest periods on asphalt concrete slab using MMLS3 and NDE techniques[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15(3): 553.
- [6] Bhattacharjee S. Use of accelerated loading equipment for fatigue characterization of hot mix asphalt in the laboratory [D]. [S.l.]: Worcester Polytechnic Institute, 2005.
- [7] Bhattacharjee S, Mallick R B, Daniel J S. Effect of loading and temperature on dynamic modulus of hot mix asphalt tested under MMLS3[C]// Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavement Supporting Transportation's Future. Bellevue: Airfield and Highway Pavement Conference, 2008: 267-278.
- [8] Bhattacharjee S, Mallick R B. Determination of damage development in asphalt concrete using small-scale accelerated pavement testing via frequency domain analysis approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 138(6): 723.
- [9] Kim S M, Hugo F, Roesset J M, et al. Dimensional analysis of the model mobile load simulator action on pavement [R]. Austin: Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas, 1995.
- [10] 苏志翔,李淑明,吴小虎. MMLS3 加速加载试验模型路面结构相似性设计[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2014(1): 16.
- [11] SU Zhixiang, LI Shuming, WU Xiaohu. Design of model pavement structure under the MMLS3 load by similarity theory [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2014(1): 16.
- [12] WU J, YE F, LING J, et al. Rutting resistance of asphalt pavements with fine sand subgrade under full-scale trafficking at high and ambient air temperature[C]// 4th International Conference on Accelerated Pavement Testing. Davies: [s. n.], 2012: 265-276.