

不同结构组合在加速加载试验条件下的动力响应

张军, 张同昌

(无锡市明大交通科技咨询有限公司, 江苏 无锡 214131)

摘要: 应用 ABAQUS 有限元软件模拟 MMLS3 加速加载试验条件下 4 种路面结构组合不同结构层层底拉应变的变化, 结合试验采集的应变、应力数据分析各种结构组合的动力响应。结果表明有限元动载计算结果与试验数据相近但有所区别, 结构层的动力响应在移动荷载和静力荷载条件下随着深度的变化而变化, 层底最大拉应变随着荷载次数的增加而不断增加, 设计的原始路面结构在力学特性方面优于其他 3 种路面结构。

关键词: 公路; 路面结构组合; 加速加载试验; 移动荷载; 层底拉应变; 顶面压应力

中图分类号: U416.224

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)02-0096-05

运用路面加速加载设备进行试验能真实模拟汽车轮胎在路面的运动情况, 不仅可在短时间内反映路面结构使用性能的变化规律, 而且能对路面结构进行长时间性能研究。该文运用南非小型加速加载设备(MMLS3)对 4 种路面结构组合在室内试槽内进行试验, 采集结构层层底拉应变及顶面压应力并运用有限元软件分析路面在移动荷载及静力荷载条件下的力学响应。

1 试验方案

设计 4 种路面结构组合, 分别为原设计结构、柔性结构、刚性结构和半刚性结构(见图 1)。由于加速加载试验的试件成型模具深度只有 30 cm, 为了能较准确地模拟, 将基层及地基换算成当量模量, 然后选用合适的替换材料。考虑实验室水泥砼地面及土基的影响, 估算替换基层材料的回弹模量, 使地面、土基及替换材料的综合模量与计算的当量回弹模量相近, 再选用合适的替换材料。铺设试验路面时用 PFWD 测得基层、室内地板及土基的综合模量, 每铺完一层用手持式试验仪测量每层材料的回弹模量, 试槽内路面组合纵断面见图 1, 同时在各结构 AC20 层底及原始结构组合 AC13、ATB30 结构层层底放置应变计和压力盒, 分别放置在 MMLS3 设备运行时的轮迹正下方。

2 有限元分析

2.1 MMLS3 荷载作用模式及计算模型

根据 MMLS3 的参数, 试验加载力为 2.8 kN, 胎压为 0.7 MPa, 根据车轮行驶过的轮迹确定车轮

荷载为 0.09 m×0.045 m 的矩形, 车轮行驶速度为 6.75 km/h, 转速为 5 400 次/h。

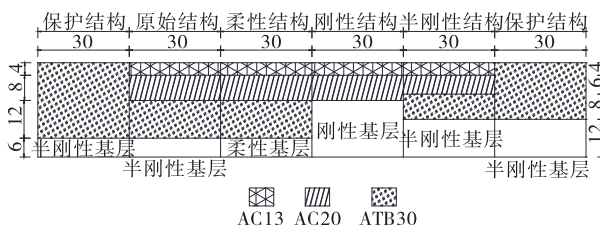


图 1 试槽内各路面结构纵断面(单位: cm)

有限元模拟计算时分 2 种加载方式, 分别为静力荷载和 6 次循环移动荷载。静力荷载分析时将轮载加到轮迹在每个结构的中心处; 循环移动荷载分析时采用 ABAQUS 中的 VDLOAD 子程序反映荷载随时间和空间坐标的变化, 设定好起始位置的空间坐标, 通过子程序中的 Steptime 与 MMLS3 设定速度 v 的乘积反映轮子的移动情况, 使用循环命令语句实现轮载的多次循环作用, 使有限元模拟的荷载运动状况和 MMLS3 运行情况一致。

由于试验底面层考虑了室内地面、土基及基层材料的综合体, 有限元分析时将其作为一个结构层进行分析。根据图 1 建立图 2 所示有限元模型, 模型大小为 0.9 m×1.8 m×2 m。由于试槽的影响, 模型的纵向边界无纵向位移, 横向边界无横向位移, 底层底面边界进行全约束。材料参数按实测值设定, 采用八节点三维实体单元 C3D8R。由于三维实体单元划分越密, 计算数值越精确, 但计算时间越长, 为平衡两者关系, 采取以下措施: 扩大非重点观察部位(如左右两端的保护结构)的三维实体单元;

由于应力由上向下逐渐衰减,且观察的数据主要在面层,三维实体单元从上至下由密渐疏。

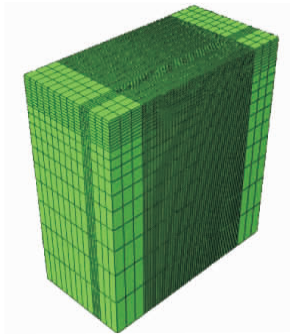


图 2 有限元计算模型

2.2 有限元计算结果分析

有限元分析分为两部分:第一部分为静力荷载

分析,采用 Standard 模块模拟静力荷载下单一结构组合的应力应变情况;第二部分为循环移动加载,采用 Explicit 模块模拟 MMLS3 车轮移动情况下各结构组合的路面动力响应。静力荷载分析描述的是 MMLS3 车轮静止地压在单个结构组合路面上时组合内结构的应力应变情况,循环移动加载则描述 MMLS3 起动后车轮在循环移动情况下各组合内结构的动力响应。由于结构破坏最主要的表现形式是层底拉应变过大,有限元分析时主要分析沥青面层层底拉应变及结构层顶面竖向应力。

循环移动加载下第一个循环内和静力荷载情况下沥青面层各层层底最大拉应变见表 1,循环加载下第一个循环内及静力荷载条件下材料层顶面竖向压应力见表 2。

表 1 各材料层层底最大拉应变 $\mu\epsilon$

结构类型	AC13 层底拉应变		AC20 层底拉应变		ATB30 拉应变	
	动载	静载	动载	静载	动载	静载
原始结构	165	169	32.8	37.6	20.9	16.9
柔性结构	163	167	35.0	36.6	21.6	20.3
刚性结构	168	171	33.7	33.3	—	—
半刚性结构	167	168	56.7	53.0	25.4	25.3

表 2 各材料层顶面竖向最大应力 kPa

结构类型	AC20 顶面竖向应力		ATB30 顶面竖向应力		基层顶面竖向应力	
	动载	静载	动载	静载	动载	静载
原始结构	—270	—278	—554	—537	—162	—143
柔性结构	—256	—278	—512	—507	—121	—109
刚性结构	—272	—280	—	—	—583	—572
半刚性结构	—255	—274	—717	—716	—286	—249

从表 1 可看出:动载和静载条件下,各结构层层底最大拉应变的差异性一致,都是由材料属性及结构组合方式所决定。上面层 4 种结构的层底最大拉应变相差不大,由于半刚性结构中面层厚度比其他结构的小,其层底最大拉应变最大。由于基层材料不同,下面层层底拉应变产生了较大差异,其中半刚性结构组合的下面层最大拉应变最大,原始设计组合的下面层最大拉应变最小。

从表 2 可看出:刚性结构中基层为承重层,柔性结构和半刚性结构中下面层为承重层,刚性结构的基层顶面承受的竖向压力比其他结构大得多,柔性结构基层顶面承受的竖向应力最小。

根据上述有限元计算结果,车轮移动(动载)和

车轮静止(静载)情况下面层结构的响应不同。动载时上面层和中面层层底最大拉应变小于静载时;下面层由于与基层接触,动载时层底最大拉应力大于静载时。动载情况下中面层和下面层顶面竖向压应力比静载时的小,基层顶面竖向压应力则相反。其原因主要是由于移动荷载产生的动应力。如图 3 所示,轮载靠近 A 点时竖向应力和水平方向应力逐渐增大,剪应力先增加到最大然后减小;轮载在 A 点时竖向应力和水平方向应力达到最大值,而剪应力为零;轮载离开 A 点时,竖向应力和水平方向应力逐渐减小,剪应力则先反向增加到最大值然后减小。由于轮载通过 A 点正上方后剪应力反向,从而引起主应力轴旋转。

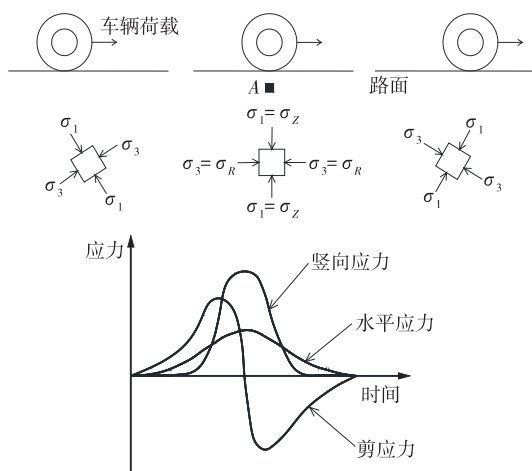


图3 移动轮载下某点的应力水平变化

3 加速加载试验结果分析

3.1 起始阶段试验结果分析

3.1.1 层底拉应变

在常温条件下将加速加载设备放置于有应变计一侧的试验路面运行,以每天10 h、54 000次轴载运行设备,共运行56 d、302万次。起始阶段原始结构内AC20层底拉应变见图4,多次轴载作用下原始结构内AC20层底最大拉应变见图5。

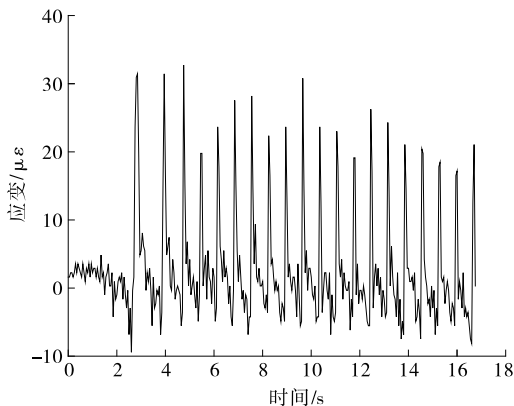


图4 加载试验起始阶段原始结构内AC20层底拉应变

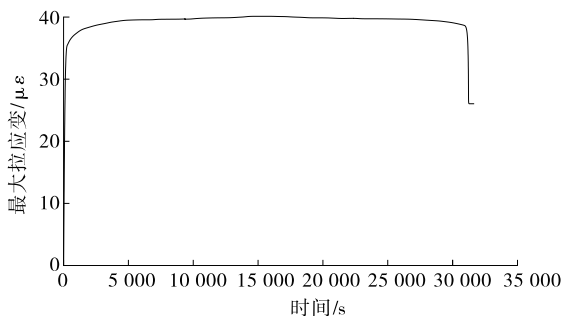


图5 多次轮载作用下原始结构内AC20层底最大拉应变

对比图4与图6,起始阶段试验所采集的最大层底拉应变在小范围内波动,在连续几组循环内最大拉应变比较稳定;试验数据比有限元计算结果略小,主要原因是有限元计算采用理想的弹性结构模型,而实际情况较复杂。

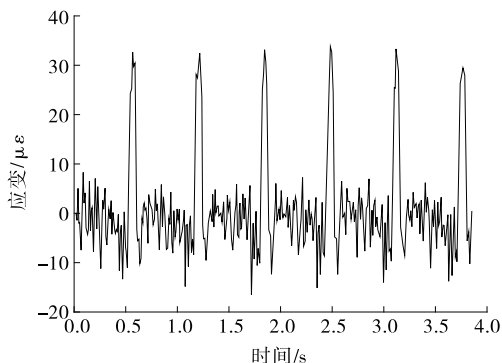


图6 原始结构内AC20层底拉应变有限元计算结果

从图5可见:随着荷载次数的增加,层底最大拉应变逐渐增大,到达一定阶段后趋于稳定,设备停止时应变值并不趋于零,这是由于经过循环加载后结构层内产生了残余侧向应力。

3.1.2 基层顶面压应变

将加速加载设备放置于有压力盒一侧的试验路面,前一个星期每天施加2万次轴载,然后以每天4万次运行设备,最终运行70万次。压力盒采集数据的应力、应变数值关系为应力=应变 \times 1 000 Pa。图7、图8分别为第一天采集的原始结构内基层顶面最大压应变及起始时的压应变。

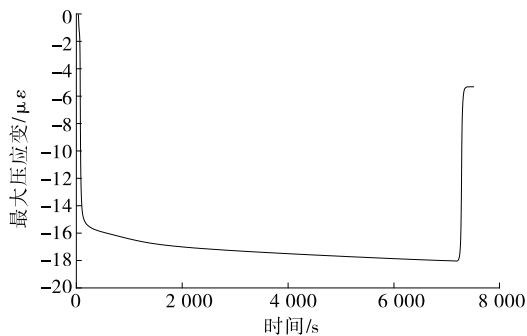


图7 加载试验第一天原始结构基层顶面最大压应变

由图7、图8可知:随着轴载次数的增加,最大压应力不断增加并趋于稳定,同时每个周期内最小压应变小于零,且设备停止后压应变值无法恢复至零。这是由于路面材料是弹塑性材料,混合料在荷载反复作用下产生回弹应变和永久应变,随着荷载增加,回弹应变和永久应变累积趋于稳定,最终未恢

复的那部分应变即为永久应变,永久应变的最主要表现形式是路表产生车辙。而有限元计算时把材料当作弹性材料考虑,无法形成永久变形(见图9)。

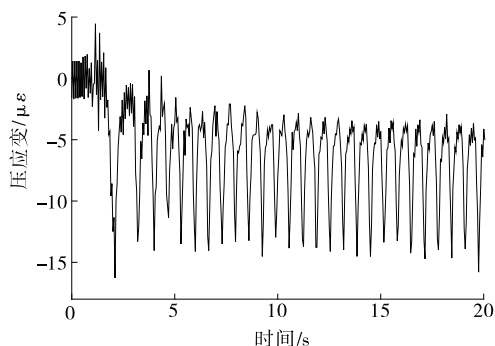


图8 加载试验起始阶段原始结构基层顶面压应变

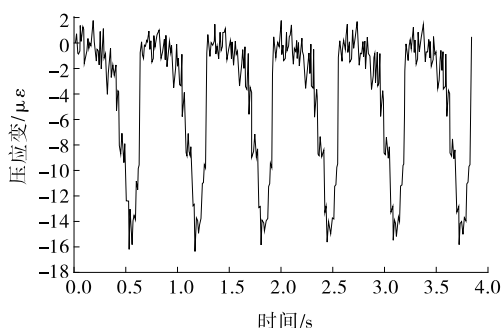


图9 原始结构基层顶面压应变有限元计算结果

3.2 整个试验阶段试验结果分析

分别记录每一天传感器稳定后层底拉应变和顶面压应力的平均最大值并进行整理、分析,得到原始结构组合内不同结构层轮载作用次数与层底最大拉应变的关系(见图10)、不同结构组合内轮载作用次数与AC20层底最大拉应变的关系(见图11)、原始结构组合内轮载作用次数与各层顶面最大压应力的关系(见图12)、不同结构组合内轮载作用次数与各层顶面最大压应力的关系(见图13)。

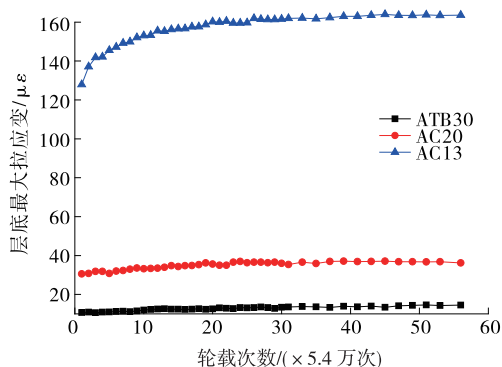


图10 原始结构组合内不同结构层轮载次数与层底最大拉应变的关系

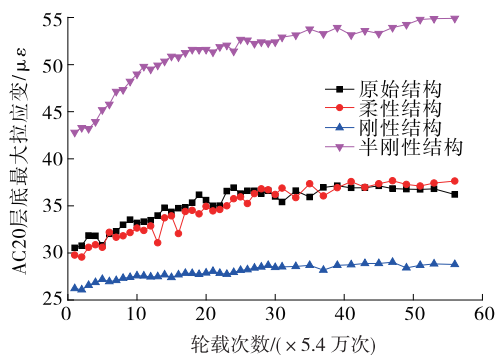


图11 不同结构组合内轮载次数与AC20层底最大拉应变的关系

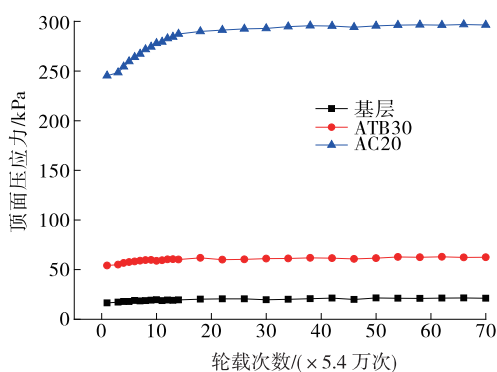


图12 原始结构组合内轮载次数与各层顶面最大压应力的关系

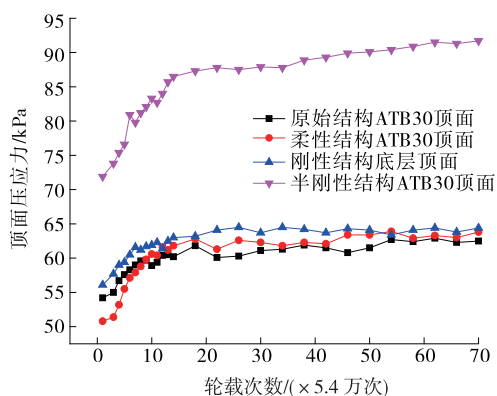


图13 不同结构组合内轮载次数与各层顶面最大压应力的关系

由图10可知:上面层层底拉应变最大,随着深度增加拉应变越来越小;随着荷载次数的增加,上面层层底拉应变增长最快,下面层增长最缓慢;随着荷载次数的增加,结构层材料内永久应变逐渐累加,产生的路面车辙降低了各层层底到路表的距离,使车轮对各结构层层底的影响产生变化,对上面层层底的影响最大,对下面层的影响很小,基本上可忽略。

由图11可知:1) 前期最大拉应变大小排序为半刚性结构>柔性结构>原始结构>刚性结构,原

始结构和柔性结构的最大拉应变相近。2) 从增长趋势看,半刚性结构>柔性结构>原始结构>刚性结构,在加载 150 万次之前结构最大拉应变变化相对较快,后期变化缓慢。3) 后期最大拉应变变化很小,基本上处于稳定状态,最终半刚性结构最大拉应变最大,柔性结构次之,刚性结构最小。

由图 12 和图 13 可知:1) 随着结构层深度的增加,原始结构 AC20、ATB30 和基层顶面竖向最大应力减少,结构层中上面层和中面层承受主要压应力,基层承受的压应力很小;随着荷载次数的增加,深度越深,最大压应力越小,压应力变化量越小。2) 图 1 所示原始结构、柔性结构、刚性结构组合内传感器的深度相同,半刚性结构组合内传感器距表面的深度比它们小 2 cm。对比 4 个传感器最大平均竖向压应力,半刚性结构 ATB30 顶面与表面的距离最小,其最大压应力最大,变化速率最快。开始阶段半刚性结构 ATB30 顶面竖向最大压应力最大,柔性结构 ATB30 顶面竖向最大压应力最小,原始结构居于两者之间;随着加载次数的增加,柔性结构 ATB30 顶面最大压应力超过原始结构,最终两者相差不大。原始结构、柔性结构、刚性结构中,柔性结构 ATB30 顶面最大压应力增长最快,刚性结构与原始结构增长速度相近、刚性结构比原始结构略小。

综合比较,原始设计方案沥青层层底拉应变较小,在动载条件下结构更稳定,其综合性能优于其他结构方案。

4 结论

(1) 无论是动载还是静载,结构层层底最大拉

应变的差异性一致,都由材料属性及结构组合方式所决定。车轮移动和车轮静止情况下,面层的结构动力响应都不同,主要原因是移动荷载造成结构内主应力轴旋转。

(2) 随着荷载次数的增加,层底最大拉应变逐渐增大,到达一定阶段后趋于稳定,设备停止后应变值并不趋于零,说明经过循环加载后产生了残余侧向应力。残余层底拉应变的不断累积最终导致路面结构破坏。

(3) 混合料在荷载反复作用下产生回弹应变和永久应变,随荷载增加,回弹应变和永久应变累积趋于稳定,最终没有恢复的那部分应变就是永久应变。永久应变的最主要表现形式是路表产生车辙。

(4) 原始设计方案沥青层层底拉应变较小,在动载条件下结构更稳定,其综合性能优于其他结构方案。

参考文献:

- [1] 廖云云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].南京:东南大学出版社,2008.
- [2] ABAQUS/standard explicit user's manual; Version 6.4 [M].Karlskon & Sorensen Inc,2004.
- [3] Allen J J, Thompson M R. Resilient response of granular materials subjected to time dependent lateral stresses[R]. Transportation Research Record, 1974.
- [4] James M Duncan, Raymond B Seed. Compaction-induced earth pressures under K_0 conditions[J]. Journal of Transportation Engineering, 1986, 112(1).

收稿日期:2016-07-15

(上接第 95 页)

抗压强度和劈裂强度综合增加效果最佳;大掺量的膨胀剂会对强度性能造成损失。

(2) 随着膨胀剂掺量的增加,水泥稳定碎石抵抗干缩、温缩的能力逐渐增强。水泥稳定碎石中掺入适量膨胀剂,与水泥发生水化反应产生钙矾石,该物质能补偿混合料中一部分收缩量,进而改善水泥稳定碎石的干缩、温缩性能。

参考文献:

- [1] JTGE51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [2] 朱华,刘华钧.膨胀剂对水泥稳定碎石基层的抗裂性能

影响[J].福建建材,2007(4).

- [3] 乔艳妮,徐晓刚,王淑萍.几种外加剂对水泥稳定碎石力学性能的影响[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2006,8(增刊).
- [4] 杨红辉,郝培文,戴经梁.掺膨胀剂水泥稳定碎石路用性能[J].交通运输工程学报,2006,6(1).
- [5] 李艳春,李侠,张攀.膨胀剂及纤维对水泥稳定碎石干缩性能的影响[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013,37(2).
- [6] 霍铁珍,黄晓明.微膨胀水泥稳定碎石在高等级公路基层中的应用技术研究[J].内蒙古农业大学学报,2009,30(1).

收稿日期:2016-09-08