

水泥路面碎石化加铺设计研究

黎纯

(湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 针对水泥路面碎石化加铺沥青层改造,以 ABAQUS 有限元软件构建本构模型及边界条件,研究 SMA-13 厚度、SMA-13 模量、碎石化下承层模量及碎石化层与沥青层层间接触状态对路面结构力学响应的影响,并依托工程实例进行分析。结果表明,随着 SMA-13 厚度、SMA-13 模量、碎石化下承层模量值的增加及碎石化层与沥青层层间接触状态的改善,路面结构层底拉应变、路表弯沉呈减小趋势;各因素对层底拉应变与路表弯沉的影响程度为下承层模量>SMA-13 厚度>SMA-13 模量>层间接触状态;为满足结构验算要求,依托工程碎石化下承层模量应 ≥ 239 MPa。

关键词: 公路;水泥路面;碎石化;加铺设计

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0090-03

在早期公路建设中,水泥路面以其高强度、高耐久性、长使用寿命及原材料易得、造价低等优点而广泛应用于各级公路建设。随着人们对道路通行质量要求的提高,高等级公路建设中沥青路面正逐渐取代水泥砼路面。当水泥砼路面出现损坏且需要变更为沥青路面时,碎石化技术以其可有效减缓反射裂缝的产生、避免水泥板与沥青层高模量差、符合建材循环使用原则、经济性良好等优势,正逐渐受到广泛关注。水泥砼路面“白改黑”关键技术有两项,一是碎石化,主要有共振碎石化、多锤头碎石化等,对此的研究较多;另一项为加铺层结构设计,由于其与传统新建路面成熟的结构体系存在较大差异,其结构设计尚未形成广泛使用的理论基础。该文针对水泥路面碎石化加铺沥青层改造项目,以 ABAQUS 有限元软件构建本构模型及边界条件,对 SMA-13 厚度、SMA-13 模量、碎石化下承层模量及碎石化层与沥青层层间接触状态对路面结构力学响应的影响进行分析,为水泥路面碎石化加铺结构设计提供指导。

1 加铺结构 ABAQUS 有限元分析

1.1 模型构建及参数选取

某省省道公路改扩建工程原路面为水泥砼路面,采用多锤头碎石化或共振碎石化处理后,将破碎的水泥砼作为基层进行沥青面层加铺。由于原道路水泥砼路面之下各结构层结构参数在不同运营路段差异较大且检测确定较困难,为简化计算模型,将碎石化以下各结构层作为下承层统一考量。采取目前

常用的高等级路面结构组合形式进行加铺设计,中面层采用 6 cm SUP-20,上面层采用 4 cm SMA-13。碎石化前后路基路面结构形式见表 1。

表 1 碎石化前后路基路面结构形式

层位	碎石化前结构形式	碎石化后结构形式
上面层	水泥砼面层	SMA-13 上面层
中面层	半刚性基层	SUP-20 下面层
基层	土基	下承层

为保证上面层 SMA-13 模拟参数的准确性,其模量采用试验方法确定。参照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中单轴压缩动态模量测试方法,在 5、25、30、50 °C 试验温度下进行试验,测试结果见图 1。由图 1 可知:20 °C、10 Hz 时 SMA-13 的动态模量为 8 000 MPa。采用全自动落锤式弯沉仪对碎石化后水泥路面进行当量回弹模量测试,结果显示碎石化层模量为 200~500 MPa,均值为 300 MPa 左右。其余结构层参照 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》取值(见表 2)。

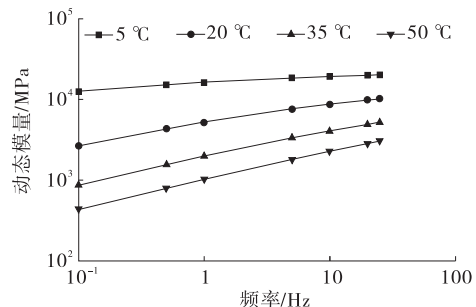


图 1 SMA-13 动态模量测试结果

表2 各结构层参数

结构层	厚度/mm	模量/MPa	泊松比
SMA-13	40	8 000	0.25
SUP-20	60	10 000	0.25
下承层	—	300	0.35

1.2 加载及边界条件

采用标准轴载 BZZ-100 kN 进行加载模拟,即采用 100 kN 单轴双轮组轴载,当量圆接地压强为 0.7 MPa。为方便加载分析,采用 ABAQUS 进行分析时,将双圆均布荷载转换为矩形荷载进行模拟。有限元三维模拟中, X、Y、Z 轴分别表示道路横断面、厚度方向及纵断面方向,模型尺寸为 6 m×6 m,利用八节点减缩积分立方体单元(C3D8R)进行分析。模型边界条件为:底部根据实际情况采用零自由度约束, X、Y 方向采用对称边界条件;由于上、下面层均为柔性同质材料,而下承层为散体颗粒柔性材料,将上、下面层层间设置为完全连续,下面层与下承层之间设置为非完全连续。法向加载产生的切向应力采用库伦摩擦计算,系数取 0.6。

2 路面结构力学响应分析

根据《公路沥青路面设计规范》,水泥路面碎石化后加铺沥青面层时,应对沥青混合料疲劳开裂、沥青层永久变形进行验算。鉴于 SMA 类面层具有较好的高温稳定性,能有效抵抗车辙形成,仅对道路纵向面层层底拉应变进行分析,并结合交工验收最大允许弯沉进行对比。分析各单因素对面层力学响应参数的影响时,基准参数值按表 2 选取。

2.1 SMA-13 厚度的影响

考虑上面层 SMA-13 的可施工性,根据施工技术规范,其加铺层最小厚度应不小于混合料公称最大粒径的 2.5~3 倍,即不小于 3.25~3.9 cm。考虑施工时压实度质量保证率及经济性,厚度不宜超过 8 cm。综合选取 4~8 cm 厚度进行模拟分析,计算结果见表 3。

表3 路面结构力学响应随 SMA-13 厚度的变化

SMA-13 厚度/cm	层底拉应变		路表弯沉	
	应变值/ $\mu\epsilon$	变化幅 度/%	弯沉值/ (0.01 mm)	变化幅 度/%
4	101.9	—	20.9	—
6	92.6	-9.1	18.7	-10.5
8	88.2	-13.4	17.1	-18.2

注:变化幅度为力学响应参数相对于基准值的变化程度,下同。

由表 3 可知:随着上面层厚度的增大,层底拉应变、路表弯沉均减小,厚度由 4 cm 增加至 8 cm 时,两参数分别减小 13.4%、18.2%。表明增加上面层加铺厚度可改善面层结构力学响应,延长路面使用寿命。

2.2 SMA-13 模量的影响

SMA-13 混合料动态模量受混合料级配、沥青胶结料质量的影响,随着原材料、级配设计等的改变,动态模量值也可能发生变化。以 8 000 MPa 为基准,模拟上面层模量在 6 000~10 000 MPa 变化时面层的力学响应,结果见表 4。

表4 路面结构力学响应随 SMA-13 模量的变化

SMA-13 模量/MPa	层底拉应变		路表弯沉	
	应变值/ $\mu\epsilon$	变化幅 度/%	弯沉值/ (0.01 mm)	变化幅 度/%
6 000	103.7	1.8	21.9	4.8
7 000	102.6	0.7	21.3	1.9
8 000	101.9	—	20.9	—
9 000	101.9	-0.9	20.6	-1.4
10 000	100.3	-1.6	20.4	-2.4

由表 4 可知:随着上面层模量的变化,层底拉应变及路表弯沉变化幅度均较小,其中层底拉应变最大变化幅度为 1.8%;模量减小至 6 000 MPa 时,路表弯沉增加幅度最大,为 4.8%。整体而言,在上面层结构类型确定后,在其模量可变范围内,模量变化对路面力学响应的影响较小。

2.3 下承层模量的影响

前期检测及相关文献研究结果表明,水泥砼路面碎石化后模量值差异较大,受原水泥路面板状态、碎石化工艺等因素影响。下承层模量作为上述影响因素的综合反映,有必要对其影响进行分析。以 300 MPa 为基准,在 100~600 MPa 内取值,有限元模拟分析结果见表 5。

表5 路面结构力学响应随下承层模量的变化

下承层模 量/MPa	层底拉应变		路表弯沉	
	应变值/ $\mu\epsilon$	变化幅 度/%	弯沉值/ (0.01 mm)	变化幅 度/%
100	143.2	40.5	45.2	116.3
200	116.1	13.9	27.8	33.0
300	101.9	—	20.9	—
400	92.5	-9.2	16.9	-19.1
500	84.9	-16.7	14.8	-29.2
600	78.9	-22.6	13.2	-36.8

由表 5 可知:整体而言,随着下承层模量的增

大,层底拉应变和路表弯沉均呈现显著减小趋势,其变化幅度比上述各因素的变化幅度大;下承层模量减小对路面结构层力学响应的影响大于下承层模量增大的影响,模量减小 200 MPa 时,层底拉应变和路表弯沉增大幅度分别达 40.5%、116.3%;相较于层底拉应变,下承层模量对路表弯沉的影响更大。

2.4 层间接触状态的影响

鉴于面层为柔性同质材料,下承层为散体颗粒柔性材料,有必要设置功能黏结层对其黏结状态进行处理,而施工工艺及处理质量直接影响下承层与沥青面层的层间接触状态。为此,以摩擦系数 0.6 为基准,对比下承层与沥青面层层间接触状态由完全光滑(摩擦系数为零)至完全连续(摩擦系数为 1)对路面结构力学响应的影响,分析结果见表 6。

表 6 路面结构力学响应随层间接触状态的变化

摩擦系数	层底拉应变		路表弯沉	
	应变值/ $\mu\epsilon$	变化幅 度/%	弯沉值/ (0.01 mm)	变化幅 度/%
0.0	103.1	1.2	21.2	1.4
0.2	102.6	0.7	21.1	1.0
0.4	102.2	0.3	21.1	1.0
0.6	101.9	—	20.9	—
0.8	101.4	-0.5	20.8	-0.5
1.0	101.0	-0.9	20.7	-1.0

由表 6 可知:层间由光滑状态变为非完全连续状态时,层底拉应变、路表弯沉均呈线性变化,但变化幅度较小;层间由部分连续状态转变为完全连续状态时,两参数的变化幅度较大。表明改善层间黏结状态对提高路面疲劳寿命具有积极作用。

2.5 单因素影响灰关联分析

为综合分析并比较各因素对路面结构力学响应的影响大小,采用灰关联分析法对上述因素进行相关系数分析,结果见表 7。

表 7 单因素影响灰关联分析结果

影响因素	相关系数	
	层底拉应变	路表弯沉
SMA-13 厚度	0.851	0.862
SMA-13 模量	0.806	0.821
下承层模量	0.872	0.883
层间接触状态	0.763	0.784

由表 7 可知:1) 总体而言,各因素对层底拉应变和路表弯沉的影响程度均为下承层模量 > SMA-13 厚度 > SMA-13 模量 > 层间接触状态。在“白改黑”改扩建中,应首先关注碎石化层模量,通过

合理工艺提高其当量顶面模量,如合理控制施工工艺保证碎石场级配良好、掺补碎石层断档粒径碎石、合理控制碎石化后碾压工艺等。同时注重碎石化层模量数据的快速有效检测,如通过全自动落锤式弯沉仪进行数据采集,实时反馈并指导碎石化施工。2) SMA-13 厚度对力学参数有较大影响,条件允许的情况下可适当提高该结构层厚度。但考虑到 SMA-13 层厚度过大不利于改扩建道路全寿命周期成本控制,且厚度过大会导致碾压控制难度增大,存在施工质量隐患,对该因素应慎重考虑。

3 工程实例应用

某省省道公路改扩建工程全长 35.2 km,公路等级为一级,设计速度 60 km/h,路基宽度 22.5 m。原路面结构为 18 cm 水泥稳定碎石基层、18 cm 素水泥砼路面。经过 5 年运营,水泥砼面层已出现不同程度破损,主要表现为纵横向裂缝、断板及角隅破损等。设计采用多锤头碎石化进行水泥路面处治,碎石化后将破碎板体作为基层在其上加铺 6 cm SUP-20 及 4 cm SMA-13。

根据交通量调查结果,结合历史交通量数据,该项目交通量为 2 132 辆/d,年交通量增长系数为 4.5%,取 0.7 作为车道系数,方向系数取 0.50。按设计年限为 10 年进行计算,累计当量轴载作用次数为 1.145×10^7 次。根据项目所在地前期气象资料,该项目季节性地区调整系数为 1.00,路面结构温度调整系数为 1.4。根据上述分析结论,影响沥青路面板面层层底拉应变的最重要因素为下承层模量,根据不同下承层模量值计算对应沥青路面疲劳寿命次数,计算结果见图 2。通过线性拟合分析,拟合方程为 $y=0.00782x+0.73344$ ($R^2=0.974$),推算出当下承层模量 ≥ 239 MPa 时,沥青层疲劳寿命大于设计累计当量轴载作用次数 1.145×10^7 次,符合疲劳

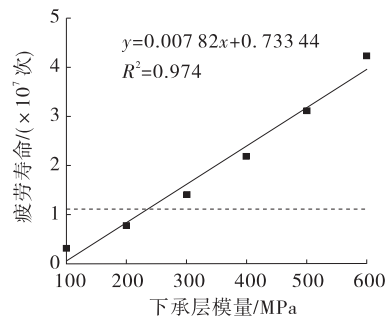


图 2 沥青层疲劳寿命随下承层模量的变化

(下转第 96 页)

效的要求。

(2) 激光对路面湿度极为敏感,裂缝识别准确率与路面湿度成反相关关系。湿度在 30%左右时,路面水膜明显,采集的数据噪点较多,识别准确率极低;随着湿度的降低,识别准确率不断提升,在路面湿度降至 7.6%时准确率达到 92.0%。三维激光路面病害识别技术在路面湿度低于 8%时基本能保证准确率在 90%以上。

(3) 裂缝识别准确率随照度降低明显增强, F_1 值敏感性次之,召回率基本不随照度改变而改变。准确率受光照强度影响较大主要是因为照度越大,光噪点越多,误判比例越高。而漏判基本不受影响。为保证识别准确率,应尽量在照度不大于 100 000 lx 的条件下进行数据采集。

参考文献:

[1] 孙晓明.基于结构光的公路路面裂缝检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[2] 黄建平.基于二维图像和深度信息的路面裂缝检测关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[3] ZHANG A,WANG K C P. The fast prefix coding algorithm (FPCA) for 3D pavement surface data compression[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2017,32(3):173-190.

[4] ZHANG A,WANG K C P,AI C.3D shadow modeling for detection of descended patterns on 3D pavement

surface[J].Journal of Computing in Civil Engineering,2017,31(4):04017019.1-04017019.13.

[5] ZHANG A,WANG K C P,JI R, et al.Efficient system of cracking-detection algorithms with 1mm 3D-surface models and performance measures[J].Journal of Computing in Civil Engineering,2016,30(6),04016020.1-04016020.16.

[6] ZHANG A,WANG K C P,LI B,et al.Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network[J].Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2017,32(10):805-819.

[7] ZHANG A,WANG K C P,FEI Y, et al.Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces with a recurrent neural network[J].Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2019,34(3):213-229.

[8] FEI Y,WANG K C P,ZHANG A, et al.Pixel-level cracking detection on 3D asphalt pavement images through deep-learning based crackNet-V[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2019,21(1):1-12.

[9] 彭博.基于路面高精三维图像的裂缝自动识别与分类算法[D].成都:西南交通大学,2014.

[10] 庞楠楠.高速相机记录系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.

收稿日期:2020-03-31

(上接第 92 页)

开裂验算标准。

4 结论

(1) 随着 SMA-13 厚度和模量、碎石化下承层模量的增加及碎石化层与沥青层层间接触状态的改善,路面结构层底拉应变、路表弯沉减小。

(2) 各参数对层底拉应变与路表弯沉的影响程度均为下承层模量>SMA-13 厚度>SMA-13 模量>层间接触状态。

(3) “白改黑”改扩建项目建设中,应首先关注碎石化层模量,通过合理工艺提高其当量顶面模量,同时注重碎石化层模量数据的快速有效检测,实时反馈并指导碎石化施工。

(4) 为满足结构验算要求,某省省道公路改扩建工程碎石化下承层模量应 ≥ 239 MPa。

参考文献:

[1] 姜献东.旧水泥路面共振碎石化技术的应用[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(8):98-101.

[2] 李萍,念腾飞,张雅莉,等.MHB 碎石化动力响应及其对邻近建筑和居民的振动影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):89-99.

[3] 张洪刚,黄慧,岳爱军,等.旧水泥路面碎石化加铺级配碎石与沥青罩面结构组合设计参数研究[J].公路工程,2012,37(1):19-22.

[4] 赵全满,张洪亮,许晔.多锤头破碎机作用下旧水泥路面的力学响应[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(5):620-623.

[5] 何超,石健,杨建明,等.旧路面碎石化加铺方式对水泥加铺层的影响研究[J].中外公路,2014,34(2):109-112.

收稿日期:2020-03-13