

沥青路面坑槽修复材料研发及结构力学响应分析

杨彦海¹, 闫羲钛¹, 安中华², 杨 野^{1,3}

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 北京电子科技学院工会, 北京 100070;
3. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要 目的 研发一种新型高性能沥青路面坑槽修复材料, 探究坑槽修补面积、修补厚度对修补后路面结构的影响. 方法 通过挥发速率试验确定稀释剂. 通过马歇尔稳定度试验确定添加剂. 并对混合料进行马歇尔稳定度试验、高温稳定性试验、水稳定性试验等路用性能试验. 利用 ABAQUS 建立沥青路面坑槽修补有限元模型, 分析不同修补面积、不同修补厚度对路面结构修补的影响. 结果 稀释剂 B 与添加剂 c 为最优组合. 当稀释剂 B 掺量为 20%, 添加剂 c 掺量为 10% 时, 其初始强度达到 4.03 kN, 成型强度达到 6.93 kN, 施工和易性好, 水稳定性试验中马歇尔残留稳定度大于 75%, 冻融劈裂强度比大于 70%, 车辙试验中动稳定度 1 487 次/mm. 剪应力的最大值出现于坑槽底部, 拉应力的最大值出现于轮隙中心, 压应力的最大值出现于坑槽表面. 随着修补面积和修补厚度的增加, 最大压应力和拉应力随之增加, 最大剪应力随之减小. 结论 研发的沥青路面坑槽修复材料性能良好, 满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 与工程使用要求. 在坑槽修补的底部、表面应力最大值处, 应保证混合料的密实性与原有路面的黏结性. 以确保不产生二次破坏.

关键词 道路工程; 沥青路面; 修复材料; 路用性能; 结构力学响应

中图分类号 TU528.42 文献标志码 A

Development of Asphalt Pavement Pit Repair Materials and Analysis of Structural Mechanical Response

YANG Yanhai¹, YAN Xitai¹, AN Zhonghua², YANG Ye^{1,3}

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Trade Union, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing, China, 100070; 3. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478276)

作者简介: 杨彦海(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事道路结构与路面材料、道路施工与养护技术、废旧材料循环再利用方面研究.

Abstract: A new type of high-performance asphalt pavement repair material was developed. The influence of pit repair area and repair thickness on the repaired pavement structure was explored. The diluent was determined by volatilization rate test and the additive was determined by Marshall stability test. The Marshall stability test, high temperature stability test, water stability test and other road performance tests are carried out on the mixture. The finite element model of asphalt pavement pit repair is established by ABAQUS, and the effect of different repair areas and different repair thicknesses on the repair of pavement structures is analyzed. Results show that diluent B and additive c are the optimal combination. When the amount of diluent B is 20% and the amount of additive c is 10%, its initial strength reaches 4.03 kN and the molding strength reaches 6.93 kN. The workable performance are good. The Marshall residual stability is greater than 75%, freeze-thaw split strength ratio is greater than 70%, dynamic stability in rutting test is 1487 times/mm. The maximum value of shear stress appears at the bottom of the pit, the maximum value of tensile stress at the center of the wheel gap, and the maximum value of compressive stress on the surface of the pit. With the increase of repair area and repair thickness, the maximum compressive and tensile stresses increase, and the maximum shear stress decreases. Asphalt pavement repair material has good performance, and the performance of the repair material meets the requirements of “ Technical Specifications For Construction Of Highway Asphalt Pavement ” (JTG F40—2004) and engineering requirements. At the bottom and the maximum surface stress of the pit repair, the compactness of the mixture and the adhesion of the original pavement should be guaranteed to avoid secondary damage.

Key words: road engineering; asphalt pavement; repair material; road performance; structural mechanics response

沥青路面具有较好的力学强度,行车平稳舒适,噪声小,便于维修等特点。沥青路面因行车荷载的反复作用及雨水侵蚀,黏结力薄弱区集料极易剥落,最终形成坑槽。坑槽病害虽面积小,但对行车安全及路面使用性能是不利的,因此需要对坑槽病害进行及时修复。传统的热补法受天气环境的影响,冬季和雨季无法施工,且对于地点分散、工程量小的路面维修十分不便,使用沥青路面坑槽修复材料可以弥补热补法的不足,还可以节约资源、保护环境。沥青路面坑槽修复材料是一种能够快速修补路面的混合料,它可以随时修复坑槽病害,受低温、雨雪等天气因素的影响较小,因而得到广泛的应用。目前市场上常用的沥青路面修复材料多是溶剂型的混合料,主要由沥青、稀释剂、添加剂、集料组成,初期强度主要由矿料的嵌挤力来提供,成型强度依靠开放交通后车辆的不断碾压使混合料不断密实及稀释剂挥发后沥青黏度的恢复。目

前国内的冷补料仍存在一些问题,如初始强度低、水稳定性和高温稳定性差,修复后的路面易发生二次破坏等^[1-4]。笔者通过对稀释剂和添加剂进行比选,对混合料的组成进行优化,研发一种新型的高性能沥青路面坑槽修复材料。同时对新型沥青路面坑槽修复材料进行性能试验,根据目前修补路面的形式,基于现有修补坑槽技术,使用 ABAQUS 有限元软件进行仿真模拟分析^[5],对不同修补面积,不同修补厚度的坑槽修补结构进行数值模拟分析,确保路用性能满足使用要求。

1 材料的选择

1.1 集料及级配

试验集料选用石灰岩,根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 中冷补沥青混合料的级配,选择 LB - 13 级配范围来确定,级配如表 1 所示。

表 1 集料级配
Table 1 Aggregate gradation

筛孔尺寸/ mm	通过率/%			
	级配上限	级配下限	级配中值	合成级配
16	100	100	100	100
13.2	100	90	95	98
9.5	95	60	77.5	79.5
4.75	60	30	45	49.5
2.36	40	10	25	23.9
1.18	20	5	12.5	13.3
0.6	15	0	7.5	9.5
0.3	12	0	6	7.4
0.15	8	0	4	6.0
0.075	5	0	2.5	4.6

1.2 沥 青

采用辽河 90 号道路石油基质沥青,进行沥青的三大指标试验.设置 3 组平行试验,试验结果为软化点 89 ℃,25 ℃针入度 47.9 (0.01 mm),15 ℃延度大于 150 cm,符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求.

1.3 稀释剂

稀释剂的主要作用是稀释沥青,使其在常温下呈现流动状态,易于拌和.选用 3 种不同稀释剂,编号为 A、B、C.因修复材料的强度和稀释剂的挥发速度有密切的关系,故对 3 种稀释剂的挥发速率进行比较,稀释剂常温挥发 24 h 试验结果如表 2 所示.

表 2 稀释剂常温挥发 24 h 试验结果

Table 2 Test results of diluent evaporation at room temperature for 24 hours

稀释剂 编号	初始质量/ g	最终质量/ g	挥发质量/ g	挥发率/ %
A	49.8	48.7	1.1	2.21
B	48.8	45.6	3.2	6.56
C	50.1	47.1	3	5.99

由表 2 可知,稀释剂 B 挥发率为 6.56%,挥发效果最好.按照相同掺配比例稀释基质沥青,稀释剂 B 对沥青的稀释效果远

比其他两种好,最终选择稀释剂 B 作为沥青路面坑槽修复材料的稀释剂.

1.4 添加剂

1.4.1 添加剂性质

初选 3 种添加剂,编号为 a、b、c,添加剂 a,具有很强的吸附作用,会率先吸附分子质量较轻的稀释剂,当加入合适比例的添加剂 a 时,能够将稀释沥青中的稀释剂完全吸附,使沥青恢复原有的性质来提升强度.添加剂 a 性质如表 3 所示.添加剂 b、添加剂 c,二者均属于反应型树脂类材料,固化反应后强度很大,能够在稀释剂挥发前增强混合料的强度.添加剂 b 为高黏度透明液体,添加剂 c 为浅黄色透明液体.其性质如表 4、表 5 所示.

表 3 添加剂 a 的性质

Table 3 Properties of Additive a

颜色	耐火度/℃	粒度/μm	颗粒形态
灰色或灰 色粉末	>1 600	<1 的占 80% 以上, 平均粒径 0.1~0.3	圆球颗粒, 表面较光滑

表 4 添加剂 b 的性质

Table 4 Properties of Additive b

软化点/ ℃	黏度/ (Pa·s)	水解氯/ %	无机氯/ ‰	挥发份/ %
12~20	6~10	≤0.5	≤0.05	≤1.0

表 5 添加剂 c 的性质

Table 5 Properties of Additive c

固含量/℃	初固时间/h	终固时间/h	剪切强度/MPa
≥99	4	12	2

1.4.2 添加剂选择

通过对比 3 种添加剂对混合料性能的影响,选择最优的一种.在同等试验条件下,制备不同种类的添加剂与不同掺量的混合料,成型试件,测定其初始强度.设置 3 组平行试验,取其平均值,混合料在不同添加剂、不同掺量下的初始强度如表 6 所示.从表 6 可知,不掺加任何添加剂的混合料强度较低,主要原因是稀释剂未挥发,混合料强度依靠矿料的嵌挤作用提供,而掺入添加剂 a、b、c 都可

表6 混合料在不同添加剂、不同掺量下的初始强度

Table 6 Initial strength of the mixture under different additives and different dosages

添加剂 编号	添加剂 掺量/%	稳定度/kN			平均值
		平行试 验Ⅰ	平行试 验Ⅱ	平行试 验Ⅲ	
未添加	0	3.06	2.85	2.93	2.95
a	10	3.96	3.83	3.77	3.85
	20	4.15	4.54	4.36	4.35
	30	4.85	5.76	5.69	5.43
b	10	4.21	4.35	4.40	4.32
	20	5.10	4.96	5.25	5.10
	30	7.34	6.89	7.10	7.11
c	10	4.25	4.19	4.53	4.32
	20	5.80	6.54	5.97	6.10
	30	9.55	8.95	9.32	9.27

以提高修复材料的强度,且随着掺配比例提高,混合料强度也有所提高.掺配添加剂a的混合料强度提升较小,掺入后易出现花白料,难以拌和均匀.掺配添加剂b的混合料强度提升较高,但是常温下添加剂b较为黏稠,不易拌和且还需要配合固化剂使用,操作复杂.掺配添加剂c对混合料强度提升较大,且添加剂c常温下流动状态较好,易于拌和,操作简便.对比掺入3种材料的拌和过程及混合料成型试件的初始强度,确定选用添加剂c作为新型沥青路面坑槽快速修复材料的组成部分.

2 沥青路面坑槽修复材料性能试验方法及结果分析

2.1 沥青路面坑槽修复材料的制备

将沥青加热至120~140℃,加入稀释剂搅拌均匀,待温度降至室温加入添加剂搅拌均匀,密封保存待用.将矿料拌和均匀后,加入沥青液充分搅拌,形成沥青路面坑槽修复材料^[6].

2.2 沥青路面坑槽修复材料的性能测试

2.2.1 施工和易性试验

施工和易性是沥青路面坑槽修复材料一

个非常重要的性质.修复材料在常温或低温条件下应保持能够拌和的状态才可及时对路面病害进行修复.由于修复材料的施工和易性主要靠观察凭经验判断,为方便评价,对施工和易性进行分级,施工和易性评价等级如表7所示.

表7 施工和易性评价等级

Table 7 Construction workability evaluation level	
状态描述	等级划分
混合料完全固结成一大块	1
混合料结团,存在对角线长度5 cm以上的块状混合料	2
混合料结团,块状混合料的对角线长度在1~5 cm	3
混合料出现少量小块结团,块状混合料对角线在1 cm以下	4
混合料颗粒界面分明,无黏结现象	5

按照稀释剂B用量为0%、10%、20%和30%制备沥青路面坑槽修复材料,分别取混合料2 000 g,平铺于托盘中在-10℃温度下密封保存24 h后,观察其状态^[7-8],施工和易性试验结果如表8所示.

表8 施工和易性试验结果

Table 8 Construction workability test results	
稀释剂掺量/%	施工和易性等级
0	1
10	2
20	4
30	5

由表8可得,随着稀释剂掺量的增加,沥青路面坑槽修复材料的施工和易性越来越好,当稀释剂添加到20%以上,能够达到修复材料对施工和易性的要求.

2.2.2 马歇尔稳定度试验

试验所用试件全部使用旋转压实仪成型.初始马歇尔强度:取一定量的混合料以保证试件高度为(63.5±1.3)mm为准,装入模具中进行旋转压实,取出试件,常温养生24 h后25℃水浴养生30~40 min,随后进行

马歇尔稳定度测试,试验结果如表 9 所示. 由于修复材料使用液体沥青,根据《公路工程

沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)确定水浴温度为 25 ℃.

表 9 沥青路面坑槽修复材料的初始强度
Table 9 Initial strength of asphalt pavement repair materials

添加剂掺量/%	稳定度/kN				流值/mm			
	平行试验 I	平行试验 II	平行试验 III	平均值	平行试验 I	平行试验 II	平行试验 III	平均值
10	4. 18	3. 51	4. 39	4. 03	2. 92	2. 86	2. 81	2. 86
20	5. 71	4. 87	5. 64	5. 41	3. 12	2. 85	2. 71	2. 89
30	7. 95	6. 79	6. 61	7. 11	2. 68	2. 48	2. 96	2. 70

沥青路面坑槽修复材料的强度会随着稀释剂的挥发及行车荷载作用下提升,其初期强度应满足开放交通的要求. 我国现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)未提出初期强度标准,日本提出铺筑开放交通 7d 后稳定度不应小于 3 kN^[10],吕

伟民等^[11]提出其初期强度不小于 2 kN. 由表 9 可以看出,笔者研发的材料初期强度均高于以上指标.

成型马歇尔强度:成型后常温养生 5 d, 25 ℃水浴养生 30 ~ 40 min 进行马歇尔稳定度测试,试验结果如表 10 所示^[9].

表 10 沥青路面坑槽修复材料的成型强度
Table 10 Forming strength of asphalt pavement repair materials

添加剂掺量/%	稳定度/kN				流值/mm			
	平行试验 I	平行试验 II	平行试验 III	平均值	平行试验 I	平行试验 II	平行试验 III	平均值
10	7. 24	6. 53	7. 01	6. 93	2. 45	2. 38	2. 41	2. 41
20	10. 18	10. 66	10. 58	10. 47	2. 68	2. 29	2. 72	2. 56
30	17. 92	15. 26	17. 18	16. 79	2. 13	2. 85	2. 05	2. 34

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中规定冷补沥青混合料的成型马歇尔稳定度不应小于 3 kN. 李峰等^[4]在考虑稀释剂尚未完全挥发的状态下,建议修复材料的成型强度不小于 3 kN.

由表 10 可知,修复材料随着添加剂掺加比例增大,成型强度增长迅速,当添加剂掺量为 10%、20%、30% 时修复材料的成型强度分别为 6. 93 kN、10. 47 kN、16. 79 kN,均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)和相关研究^[4,10-11]的建议指标.

2. 2. 3 水稳定性试验

浸水马歇尔试验是将试件分成两组,第 1 组试件在常温下养生保存待用. 第 2 组试件常温养生 5 d,待其强度成型后,放入 25 ℃的水中浸泡 48h,然后和第 1 组试件一起

25 ℃水浴 2 h,取出两组试件后立即进行马歇尔稳定度测试,然后计算马歇尔残留稳定度,试验结果如表 11 所示.

表 11 浸水马歇尔试验结果
Table 11 Results of water immersion Marshall test

添加剂掺量/%	马歇尔残留稳定度/%				
	平行试验 I	平行试验 II	平行试验 III	平行试验 IV	平均值
10	75. 41	87. 60	87. 40	81. 12	82. 88
20	77. 01	82. 08	90. 82	85. 96	83. 97
30	76. 12	75. 56	79. 05	78. 65	77. 35

从表 11 可以看出,不同添加剂掺量的混合料马歇尔残留稳定度平均值均大于 75%,满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)的要求.

冻融劈裂试验是将试件分成两组,第

1 组试件在常温下养生保存待用;第 2 组试件常温养生 5 d,待其强度成型后,按照标准饱水试验方法真空饱水,抽真空的时间约为 15 min,恢复常压,试件在水中放置 0.5 h,取出试件放入添加 10mL 水的密封袋中密封,将其放入恒温 -18 ℃ 的冰箱中冷冻 16 h,取出试件后立刻去除塑料袋放入 25 ℃ 的恒温水箱融化 24 h,然后与第 1 组试件 25 ℃ 水浴 2 h 后取出进行劈裂试验,试验结果如表 12 所示^[12].

表 12 冻融劈裂试验结果
Table 12 freeze - thaw split test

添加剂 掺量/%	冻融劈裂强度比/%				
	平行试 验 I	平行试 验 II	平行试 验 III	平行试 验 IV	平均值
10	76.16	81.87	88.61	74.46	80.28
20	84.18	84.24	95.51	87.45	87.85
30	76.54	76.69	84.71	78.64	79.15

从表 12 可看出,不同添加剂掺量的混合料冻融劈裂强度比均大于 70%,满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)要求.综合浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果,沥青路面坑槽修复材料水稳定性良好.

2.2.4 高温稳定性试验

采用车辙试验评价沥青路面坑槽修复材料的高温稳定性.车辙试验使用的试件长宽高为 300 mm × 300 mm × 50 mm,将拌和好的混合料放入模具中,人工压实,然后将模具放在车辙成型机上按一个方向碾压 4 次,旋转 90°再碾压 18 次,将试件常温养生 5 d,然后在 60 ℃ 条件下测其动稳定度,车辙试验结果如表 13 所示^[13].

表 13 车辙试验结果
Table 13 Rutting test

添加剂 掺量/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)			
	平行试 验 I	平行试 验 II	平行试 验 III	平均值
10	1 258	1 729	1 473	1 487
20	2 471	3 667	2 973	3 037
30	4 218	3 782	4 683	4 228

从表 13 可知,修复材料的动稳定度在添加

剂掺量为 10% 时,动稳定度达到 1 487 次/mm,超过了《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中对一般热拌沥青混合料的要求,其高温稳定性良好,满足要求.路用性能试验结果表明稀释剂掺量 20% 时,修复材料的施工和易性满足使用要求;添加剂掺量为 10%,修复材料的其他性能均满足要求,考虑成本等因素,确定修复材料的稀释剂用量为 20%,添加剂用量为 10%.

3 修补结构的力学响应分析

3.1 路面结构设计及参数

笔者对不同修补面积,不同修补厚度的坑槽进行数值模拟,图 1 为沥青路面结构,表 14 为各结构层的材料性能指标及厚度.

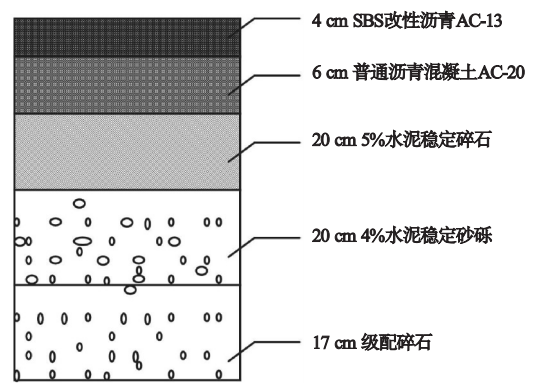


图 1 沥青路面结构

Fig. 1 Asphalt pavement structure

表 14 不同结构层材料参数

Table 14 Material parameters of different structural layers				
结构层	结构层使用材料	厚度/ cm	弹性模量/ MPa	泊松 比
表面层	SBS 改性沥青 AC - 13	4	10 500	0.25
下面层	普通沥青混凝土 AC - 20	6	12 000	0.25
基层	5% 水泥稳定碎石	20	17 000	0.25
底基层	4% 水泥稳定砂砾	20	17 000	0.25
垫层	级配碎石	17	400	0.35
土基	—	—	50	0.40
修补材料	—	—	8 000	0.25

修复材料采用 DTS-30 多功能液压伺服路面材料动态测试系统测定弹性模量为 8 000 MPa.

3.2 模型建立

利用 ABAQUS 有限元软件建立三维有限元模型,模型采用 8 节点六面体二次缩减积分单元,有限元模型如图 2 所示. X 、 Y 方向取 4 m, Z 方向取 5 m. 原点设在车轮轮隙中心点, X 轴平行于行车的方向, Y 轴水平垂直于行车的方向, Z 轴垂直于水平面.

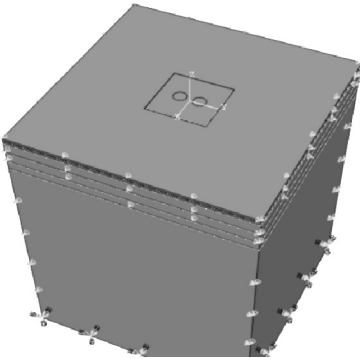


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

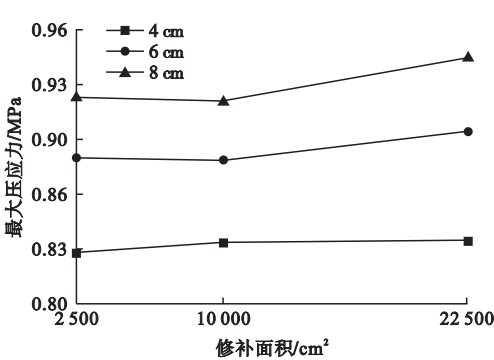
边界条件:底面上 X 、 Y 、 Z 各个方向的位移为 0,行车方向和路面横向方向分别约束 X 、 Y 方向位移,各路面结构层间接触条件以层间完全连续为主.

计算荷载:采用标准双轴荷载 100 kN,轮压 0.7 MPa,轮压半径 10.65 cm,圆心距 31.95 cm^[14-20].

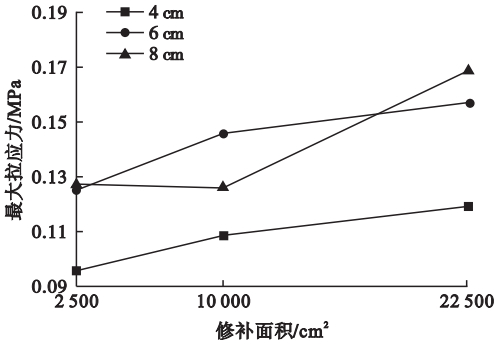
3.3 坑槽修补的影响因素分析

3.3.1 修补面积对修补后路面结构的影响

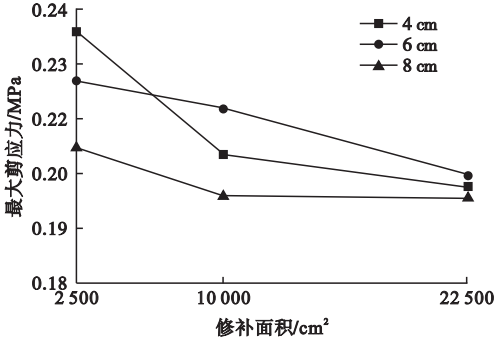
选取长宽分别为 50 cm × 50 cm, 100 cm × 100 cm, 150 cm × 150 cm 的修补坑槽,根据 ABAQUS 有限元模型提取数据位置发现剪应力最大的位置出现于坑槽底面,拉压应力最大的位置出现于坑槽修补结构的表面.在修补坑槽时应注意应力最大值处混合料的密实性与原有路面的黏结性.以确保不产生二次破坏.修补面积对各应力的影响如图 3 所示.



(a)最大压应力



(b)最大拉应力



(c)最大剪应力

图 3 修补面积对各应力的影响

Fig. 3 Effect of repaired area on stress

由图 3 可以看出修补深度相同时,最大压应力和拉应力随着修补面积的增大而增大,修补材料强度没有原路面强度高,修补面积越大受到的应力越大;而最大剪应力随着修补面积的增大而减小,因模型尺寸较小,荷载作用在坑槽缝上,所以剪应力比较大.

3.3.2 修补厚度对修补后路面结构的影响

选用了 4 cm, 6 cm, 8 cm 深度分析坑槽的修补厚度对修补后坑槽结构的受力影响,模拟结果如图 4 所示.

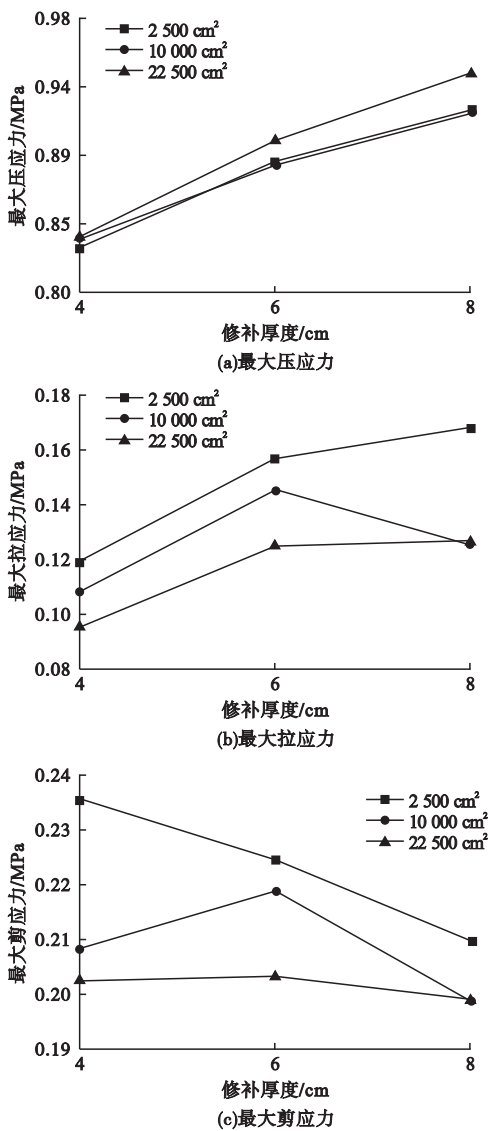


图4 修补厚度对各应力的影响

Fig. 4 Effect of repair thickness on stress

由图4可以看出,最大剪应力随着坑槽修补厚度的增加而减小,在厚度小于6 cm时减小缓慢,在坑槽修补厚度为8 cm时达到最小;而因为修补材料强度较低,随着修补深度增加,整体强度降低,所以压应力随着坑槽修补厚度增加而增大,在坑槽深度4 cm时最小,拉应力变化没有明显规律,多数呈现增大趋势,其最小值出现在4 cm时。

4 结 论

(1) 稀释剂 B 的挥发速率及对沥青的稀

释效果优于稀释剂 A 和稀释剂 C,在稀释剂 B 掺量为 20% 时,施工和易性及混合料性能达到最优。

(2) 通过加入不同类型、不同比例的添加剂后对混合料进行马歇尔稳定度试验,试验结果表明添加剂 c 的初始强度与施工和易性优于添加剂 a 和添加剂 b. 在添加剂 c 的掺量为 10% 时,混合料的路用性能较好. 综合路用性能及成本因素,确定添加剂 c 的掺量为 10% .

(3) 坑槽的剪应力最大值出现于坑槽底部,拉应力出现于车轮的轮隙中心,压应力出现于坑槽修补结构的表面;在修补坑槽时应注意应力最大值处混合料的密实性与原有路面的黏结性. 以确保不产生二次破坏。

参考文献

[1] 曾欣铨. 柴油型冷补沥青混合料成型特性研究[J]. 公路,2014,34(2):185-188.
(ZENG Xinquan. Research on the diesel cold patch asphalt mixture curing evaluation [J]. Highway, 2014,34(2):185-188.)

[2] 李峰,黄颂昌,徐剑,等. 冷补沥青混合料性能评价指标体系[J]. 公路,2010(11):156-162.
(LI Feng, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Performance evaluation index system of cold patching asphalt mixture [J]. Highway, 2010(11):156-162.)

[3] 翟殿钢,赵健,郭昕,等. 一种新型沥青冷补料应用研究[J]. 中外公路,2017(6):280-283.
(ZHAI Diangang, ZHAO Jian, GUO Xin, et al. Study on the application of a new type of asphalt cold filler [J]. Journal of China & foreign highway, 2017(6):280-283.)

[4] 李峰,黄颂昌,徐剑,等. 冷补沥青混合料性能评价及技术要求[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(10):1463-1467.
(LI Feng, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Performance evaluation and technical requirements of cold patch asphalt mixture [J]. Journal of Tongji university (natural science), 2010,38(10):1463-1467.)

[5] 田耀刚,延丽丽,陈长征,等. 材料模量对沥青路面坑槽修补结构力学性能影响分析[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(11):58-62.
(TIAN Yaogang, YAN Lili, CHEN Changzheng, et al. Effects of material modulus on asphalt pavement potholes repaired structure mechanics analysis based on ANSYS [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2013,35(11):58-62.)

[6] 马全红,邢雪婷,许雪松,等. 冷补沥青混合料

- 的制备及其性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 594-598.
(MA Quanhong, XING Xueting, XU Xuesong, et al. Preparation and property analysis of cold patch asphalt mixture[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2016, 46(3): 594-598.)
- [7] 张争奇, 许铨, 成高立, 等. 溶剂型冷补沥青液研制及其沥青混合料路用性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1728-1736.
(ZHANG Zhengqi, XU Cheng, CHENG Gaoli, et al. Development of solvent-based cold patch asphalt liquid and study on pavement performance of its mixture[J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(9): 1728-1736.)
- [8] 张争奇, 许铨, 成高立, 等. 溶剂型冷补沥青液的路用性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 236-242.
(ZHANG Zhengqi, XU Cheng, CHENG Gaoli, et al. Pavement performance of cold patch asphalt liquid[J]. Journal of Jiangsu university (natural science edition), 2017, 38(2): 236-242.)
- [9] 顾成. 冷补沥青混合料的结构特性及试验评价[D]. 南京: 东南大学, 2017.
(GU Cheng. Structural characteristics of cold patch asphalt mixture and experimental evaluation[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [10] 余世敏. 储存式冷铺沥青混合料的设计及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
(YU Shimin. Design and application research of a warm-mixed and cold-paved asphalt mixture[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.)
- [11] 吕伟民, 李立寒, 周海生, 等. 冷铺沥青材料的特性与配制技术[J]. 华东公路, 2002(2): 67-69.
(Lü Weimin, LI Lihan, ZHOU Haisheng, et al. Characteristics and preparation technology of cold laid asphalt materials[J]. East China highway, 2002(2): 67-69.)
- [12] 李延猛. 高性能冷补沥青混合料材料组成与性能评价[D]. 西安: 长安大学, 2013.
(LI Yanmeng. Material composition and performance evaluation of high performance cold patch asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [13] 邢雪婷. 冷补沥青混合料的制备及其性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
(XING Xueting. Preparation and properties of cold patch asphalt mixture[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [14] 延丽丽. 基于 ANSYS 的沥青路面坑槽修补结构仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2012.
(YAN Lili. Simulation analysis about potholes repair structure of asphalt pavement based on ANSYS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [15] 徐清华. 沥青路面坑槽修补技术及其计算机仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
(XU Qinghua. Repair techniques of the asphalt's potholes and simulate analysis of computer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.)
- [16] 刘美彤. 低温型高性能冷补沥青混合料制备与应用技术[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
(LIU Meitong. High property cold patch asphalt mixture preparation and application technology in low temperature[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.)
- [17] 李炜光, 经冠举, 田智仁, 等. 基于不同工艺沥青路面坑槽修补结构受力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(1): 19-21.
(LI Weiguang, JING Guanju, TIAN Zhiren, et al. Based on analysis of repair structure stress of different process of the asphalt pavement potholes[J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2013, 37(1): 19-21.)
- [18] 王旭东, 周兴业. 基于材料非线性的沥青路面结构当量力学分析方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 25-34.
(WANG Xudong, ZHOU Xingye. Equivalent mechanical method for asphalt pavement structure based on material nonlinearity[J]. China journal of highway and transport, 2019, 32(8): 25-34.)
- [19] 王政. 沥青路面力学响应分析与计算效率优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
(WANG Zheng. Mechanical response analysis and calculation efficiency optimization of asphalt pavement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.)
- [20] 周兴业. 基于足尺环道试验的沥青路面结构响应及其非线性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
(ZHOU Xingye. Response and nonlinear analysis of asphalt pavement structure based on full-scale ring road test[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)