

基于不同预留灌浆深度的半柔性路面性能研究

严守靖, 王洋洋, 谢林林, 王晓阳

(浙江省交通运输科学研究院 道路工程研究所, 浙江 杭州 311305)

摘要: 预留不同灌浆深度的半柔性路面,其路用性能有较大的差异。为了解不同灌浆深度下路用性能的衰减规律,室内拟采用马歇尔稳定度、高温车辙、低温弯曲、水稳定性和抗滑性能来评价路用性能。试验发现:随着预留灌浆深度的增加,半柔性路面材料的马歇尔稳定度、低温性能和水稳定性性能发生了不同程度的衰变,分别衰减了14.44%、20.19%和12.12%,并且三者均在0~2.64 mm预留灌浆深度范围的衰减速率最大,在超过7.92~10.56 mm预留灌浆深度范围后趋向于稳定。此外,动稳定度和车辙深度的转折点出现在7.93 mm的预留灌浆深度,在此预留深度下的动稳定度最高,车辙深度最小。结果表明:SFAC-13半柔性路面材料的路用性能在预留灌浆深度为7.92~10.56 mm时最佳。

关键词: 半柔性路面; 预留灌浆深度; 路用性能

1 引言

半柔性路面是由多相材料组成的一种刚柔并济的复合路面,其中,固相材料来自于沥青混合料,液相材料来源于水泥胶浆。研究表明:半柔性路面不仅具有较好的抵抗荷载作用的能力,而且高温稳定性能、抗水损害性能也优于普通沥青混凝土路面,同时具有耐油、耐酸和易着色等特性。因此,近年来受到各个国家的广泛推广和使用。

众所周知,半柔性路面具有大空隙(20%~28%),从而使其具有极好的排水和降噪性能。能有效缓解雨水对于路面的冲刷,减少城市道路在雨天的交通事故率,降低车辆的噪声污染,因此,在南方城市道路得到广泛的使用。其次,半柔性路面的高温性能和抗滑性能远远高于普通的沥青混凝土路面,因此,在城市道路的十字路口和停车场,以及飞机场广泛地使用半柔性路面。此外,半柔性路面还具有很好的耐腐蚀性,近年来,在加油站附近和机场路亦得到大规模的使用。

目前,半柔性路面的研究主要集中在半柔性路面的结构设计、新型灌浆材料、半柔性路面的力学特性和路用性能,而对于半柔性路面实际施工中灌浆深度的控制,以及不同灌浆深度的路用性能衰变特性研究鲜有报道。该文采用沥青混合料CAVF设计法对半柔

性路面材料进行级配设计,对预留不同灌浆深度的标准马歇尔试件进行灌浆试验,经过标准的养护期后,对其路用性能进行测试。得到预留不同灌浆深度半柔性路面的路用性能衰变规律,找到最佳的预留灌浆深度,为半柔性路面预留灌浆深度和路用性能预估提供参考。

2 母体混合料设计

2.1 沥青

沥青选用SBS(I-D)改性沥青,沥青性能依据JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行试验检测,结果见表1。

表1 SBS(I-D)改性沥青性能测试结果

检测指标	单位	检测结果
针入度(100 g, 5 s, 25 ℃)	0.1 mm	50.5
延度(5 ℃)	cm	32.0
软化点	℃	75.6
弹性恢复(25 ℃)	cm	77.0
质量损失	%	0.01
RTFOT后 针入度比(25 ℃)	%	96.5
延度(5 ℃)	cm	18.2

收稿日期:2018-10-09

基金项目:浙江省科技厅项目(编号:2018F10045)

作者简介:严守靖,男,硕士.E-mail:1270964558@qq.com

2.2 集料

集料包括粗集料、细集料和矿粉,其中粗细集料为玄武岩,集料性能指标依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》进行试验检测,结果见表 2。

表 2 集料性能

集料	检测指标	单位	检测值
粗集料	粗集料(9.5~13.2) mm 压碎值	%	13.5
	洛杉矶磨耗值	%	11.6
	表观相对密度		2.9
	吸水率	%	0.3
细集料	表观相对密度		2.7
	亚甲蓝值	g/kg	0.7
	砂当量	%	75.0
	棱角性	s	35.0
矿粉	表观相对密度		2.6
	含水量	%	0.2
	亲水系数		0.6
	外观		无聚团

2.3 水泥胶浆

水泥胶浆对半柔性路面的影响较大,因此,水泥胶浆不仅要具有较高的流动度,而且能提供足够高的承载力。该文试验使用普通硅酸盐 42.5 级水泥,水泥胶浆的性能指标检测按照《半柔性路面应用技术指南》中要求进行检测,结果见表 3。

表 3 水泥胶浆性能

检测指标	单位	检测结果	技术要求
7 d 抗压强度	MPa	28.5	10~30
7 d 抗折强度	MPa	7.8	>2
水泥胶浆流动度	s	11.9	10~14

2.4 母体混合料级配设计

采用 CAVF 设计法对半柔性路面材料进行级配设计,级配采用 SFAC—13,母体混合料各档矿料通过率如表 4 所示。

表 4 沥青混合料各档矿料通过率

筛孔径/ mm	通过率/ %	筛孔径/ mm	通过率/ %
26.5	100	2.36	13.5
19	100	0.6	9.5

续表 4

筛孔径/ mm	通过率/ %	筛孔径/ mm	通过率/ %
16	100	0.3	7.5
13.2	95.0	0.15	5.5
4.75	20.0	0.075	3.5

2.5 母体混合料技术性能

母体混合料的最佳沥青用量采用谢伦堡析漏和肯塔堡飞散试验确定,其技术性能包括空隙率、表观相对密度、流值和稳定度,结果见表 5。

表 5 母体混合料技术性能

试件编号	最佳沥 青用 量/%	空隙 率/ %	表观相 对密度	流值/ (0.1 mm)	稳定 度/ kN
SFAC—13—1	3.4	23.9	2.1	36.6	9.9
SFAC—13—2	3.4	24.3	2.1	37.2	10.0
SFAC—13—3	3.4	24.0	2.0	35.4	9.6

3 不同预留灌浆深度的半柔性路面性能

3.1 预留不同的灌浆深度

半柔性路面灌浆预期的预留深度,该文以 SFAC—13 级配的最大公称粒径(13.2 mm)为最大预留深度,以 20%的预留深度梯度递减,6 组预留深度变化如表 6 所示,每一组预留深度值制备 2 个标准马歇尔试件。

表 6 预留灌浆深度

预留比例/%	预留深度/mm	灌浆率/%
0	0	130.0
20	2.6	118.3
40	5.3	103.6
60	7.9	98.5
80	10.6	98.2
100	13.2	95.8

考虑到每个标准马歇尔试件的高度不同,为使每一组试件的高度差按照表 6 的预留深度进行,因此,该文以 63.5 mm 高度为基准,用切割机切出预留深度,如图 1 所示。



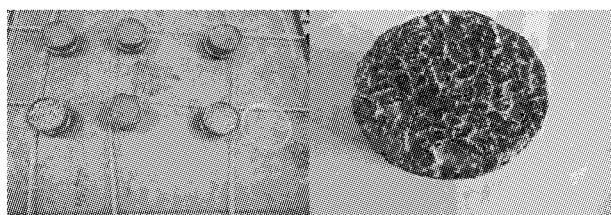
(a) 切割设备

(b) 预留灌浆深度

图1 标准马歇尔试件预留灌浆深度

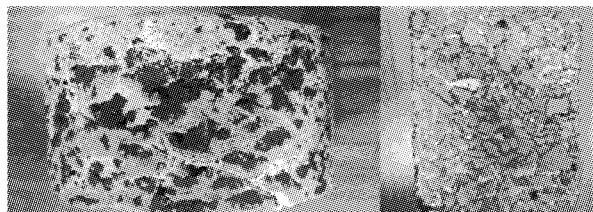
3.2 试件灌浆试验

灌浆试验前将切割好的标准马歇尔试件固定在水泥振动台上,拌制水泥胶浆,在 90 s 内边灌浆边振动,使水泥胶浆充分灌入试件的连通空隙。灌注完成后,用橡胶耙将试件表面多余的水泥浆体擦除,直至露出粗骨料,经过 7 d 的标准养护后,对试件进行切割观察,可以明显看出试件的连通空隙已经被水泥胶浆全部灌满,试件灌浆试验和灌浆效果如图 2 所示。



(a) 试件灌浆

(b) 试件脱模



(c) 灌浆效果

(d) 内部灌浆效果

图2 试件灌入水泥胶浆

3.3 马歇尔稳定度

马歇尔稳定度是反映路面材料抵抗变形的能力,母体混合料在灌注水泥胶浆以后,其稳定度得到了大幅度的提升,但在不同的预留灌浆深度下,其稳定度衰变趋势如图 3 所示。

研究表明:未灌浆的母体混合料路面材料的稳定度大约为 8 kN,而经过灌浆以后的半柔性路面材料的稳定度不低于 25 kN,是未灌浆的母体混合料的 3 倍。由图 3 可知:不同预留灌浆深度的半柔性路面材料,其稳定度随着预留深度的增加而减少,最后在预留深度达到 10.56 mm 以后趋于稳定。整体的稳定度减少了 4.216 kN,整体衰变程度为 14.44%,其中衰变率最大

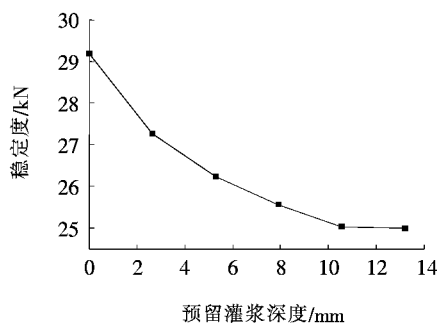
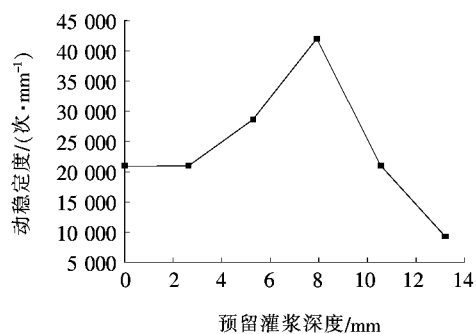


图3 不同预留灌浆深度下的稳定度

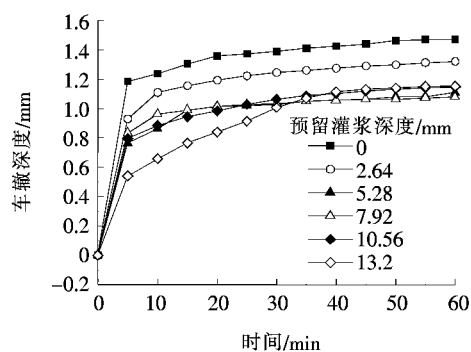
值出现在 0~2.64 mm 的预留深度段,衰变率为 6.59%。

3.4 高温稳定性

半柔性路面的高温稳定性通常采用动稳定度来表征,反映高温抗车辙的能力,不同预留灌浆深度的 SFAC-13 半柔性路面材料,经过 7 d 的标准养护后,其动稳定度和车辙深度变化如图 4 所示。



(a) 动稳定度



(b) 车辙深度

图4 车辙试验曲线

由图 4 可知:半柔性路面材料的动稳定度并不是随着预留灌浆深度的增加而减少。试验发现,预留灌浆深度为 0~7.92 mm 时,动稳定度逐渐增加,并且在 7.92 mm 时达到峰值 42 000 次/mm;预留灌浆深度超过 7.92 mm 后,动稳定度急剧下降,并且当预留灌浆深度达到 13.2 mm 时,其动稳定度仅为 9 333 次/mm,不

满足《半柔性路面应用技术指南》中对于半柔性路面材料动稳定度的规定($>1\,000$ 次/mm)。此外,由图 4(b)可以发现:预留灌浆深度的增加,初始的车辙深度增长越快,但最终的车辙深度却不是呈现线性增长,在 7.92 mm 时车辙深度最小。表明半柔性路面材料的高温稳定性能不是水泥胶浆灌入越多越好,而是预留灌浆深度为 7.92 mm,灌浆率为 98.495% 时的高温稳定性能最好。

3.5 低温性能

针对半柔性路面材料的低温性能评价,目前没有统一的评价方法,常用低温弯曲试验、低温劈裂试验和低温蠕变试验。该文采用低温弯曲试验,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,不同灌浆深度下的低温抗拉强度衰变趋势如图 5 所示。

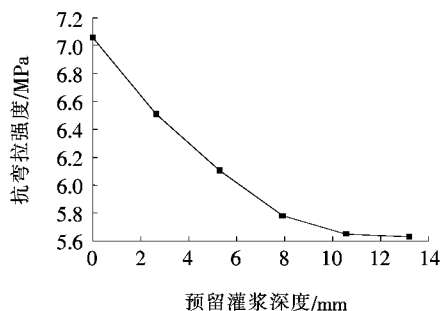


图 5 低温抗弯拉强度

由图 5 可知:半柔性路面材料的低温抗弯强度随着预留灌浆深度的增加而逐渐减少,并在预留灌浆深度达到 10.56 mm 以后趋向于稳定。整体的抗弯拉强度减少了 1.425 MPa,整体衰变程度为 20.19%,其中衰变率最大值出现在 0~2.64 mm 的预留深度段,衰变率为 6.16%。

3.6 水稳定性性能

半柔性路面材料的水稳定性性能通常采用冻融循环劈裂试验进行评价。有研究表明,半柔性路面材料具有很好的水稳定性。由冻融循环劈裂试验结果(图 6)可以看出:随着预留灌浆深度的增加,冻融前后试件的劈裂强度逐渐降低,在预留灌浆深度为 0~7.92 mm 阶段,劈裂强度衰减较快,在 7.92 mm 以后衰减的速率减小并趋向于平缓。

由冻融劈裂强度比(TSR)曲线的变化可以发现,在预留灌浆深度为 0~2.64 mm 阶段劈裂强度衰减速率最快,达到 6.52%。但整体强度衰变为 12.12%,相对于马歇尔稳定性和低温性能,半柔性路面材料的水稳定性衰减程度最小,表明其抗水损害的能力很好。

3.7 抗滑性能

众所周知,半柔性路面材料空隙很大(20%~28%),从而具有很好的排水降噪性能。此外,有研究表明,半柔性路面材料表层的纹理构造较深,使其具有很好的抗滑性能,抗滑系数和构造深度大约是普通 AC-13 密级配路面材料的 1.3~1.5 倍。但半柔性路面材料预留不同灌浆深度时,其抗滑系数和构造深度产生了不同的变化。试验结果见图 7。

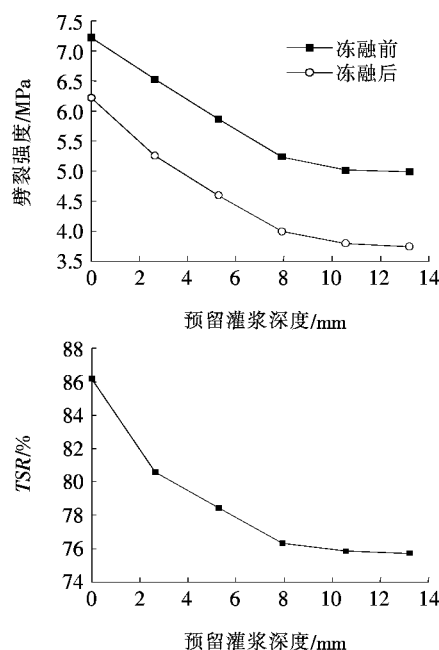


图 6 冻融劈裂试验结果

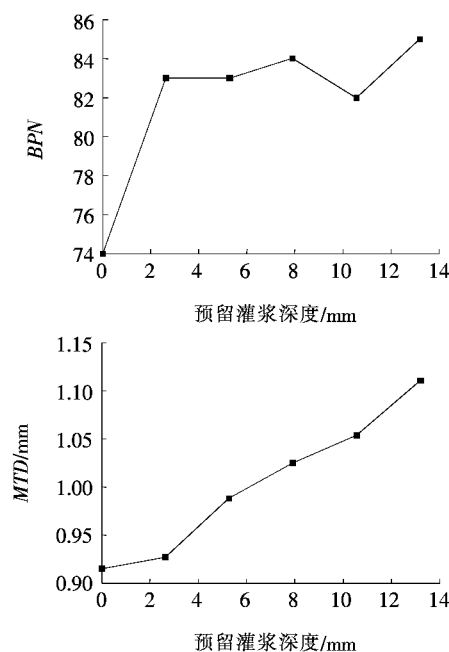


图 7 抗滑性能试验结果

由图7可知:由于满灌时水泥胶浆填充了表面的开口空隙,因此抗滑系数(*BPN*)较低,相对于未满灌时的*BPN*衰减了10.84%,而不同预留灌浆深度下的抗滑系数基本保持为82~85。此外,不同预留灌浆深度下的构造深度(*MTD*)却呈线性增长。考虑到车辆的高速运动和减速行驶时,其摩擦力主要由表面抗滑系数*BPN*决定,而未满灌的半柔性路面材料的*BPN*保持在80以上,具有很好的抗滑性能。

4 结论

(1) 随着预留灌浆深度的增加,半柔性路面材料的马歇尔稳定度、低温性能和水稳定性性能发生了不同程度的衰变,其中马歇尔稳定度衰减了14.44%,低温性能衰减了20.19%,水稳定性性能衰减了12.12%。

(2) 半柔性路面材料的马歇尔稳定度、低温性能和水稳定性性能三者均在0~2.64 mm预留灌浆深度阶段的衰减率最大,在超过7.92~10.56 mm预留灌浆深度后趋向于稳定。此外,动稳定度和车辙深度的转折点也出现在7.93 mm的预留灌浆深度,在此预留深度下的动稳定度最高,车辙深度最小。

(3) 半柔性路面材料的抗滑性能,除了满灌状态时的*BPN*较小,其余不同预留灌浆深度下的路面抗滑系数均保持在80以上。

(4) 从不同预留灌浆深度半柔性路面材料的马歇尔稳定度、低温性能和水稳定性性能的衰变规律,高温性能和抗滑性能的变化趋势角度综合考虑,SFAC-13半柔性路面材料的路用性能在预留灌浆深度为7.92~10.56 mm(灌浆率在98%~98.5%)时最佳。

参考文献:

- [1] 曹彩芹.路面体系分析的多相层合弹性半空间理论[D].西安建筑科技大学博士学位论文,2011.
- [2] 王伟明,高丹,吴旷怀.半柔性路面材料性能研究[J].公路工程,2014(1).
- [3] ZHANG Jiu-peng, CAI Jun, PEI Jian-zhong, et al. Formulation and Performance Comparison of Grouting Materials for Semi-Flexible Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2016(115): 582-592.
- [4] WU Dong-qing, Daud, ZHANG Yan-li. The Semi-Rigid Pavement with Higher Performances for Roads and Parking Aprons[J]. Sustainable Urbanization, 2011(29): 27-34.
- [5] 石磊,黄冲,李天祥,等.浆体灌入率对半柔性路面材料性能影响研究[J].现代交通技术,2016(4).
- [6] PEI Jian-zhong, CAI Jun, ZOU Dao-guang, et al. Design and Performance Validation of High-Performance Cement Paste as a Grouting Material for Semi-Flexible Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2016(126): 206-217.
- [7] CAI Jun, PEI Jian-zhong, LUO Qing-hu, et al. Comprehensive Service Properties Evaluation of Composite Grouting Materials with High-Performance Cement Paste for Semi-Flexible Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2017, (153): 544-556.
- [8] 张肖宁,王绍怀,吴旷怀.沥青混合料组成设计的CAVF法[J].公路,2001(12).
- [9] JTGE20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [10] JTGE42-2005 公路工程集料试验规程[S].
- [11] 重庆交通大学.半柔性路面应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [12] 郝培文,程磊,林立.半柔性路面混合料路用性能[J].长安大学学报:自然科学版,2003(2).
- [13] 凌天清,郑晓卫,凌濛,等.保水降温半柔性路面材料性能研究[J].中国公路学报,2010(2).
- [14] 张大可,成长庆,吴国雄,等.半柔性路面水稳定性及低温抗裂性能分析[J].重庆交通学院学报,2007(3).
- [15] 王盛邦.沥青混合料基半柔性路面复合材料力学性能及水稳定性研究[D].广西科技大学硕士学位论文,2013.
- [16] 董昭.加速磨耗试验与沥青路面材料抗滑性能衰变规律研究[D].长安大学硕士学位论文,2011.
- [17] 曹平.表面形貌与污染物对沥青路面抗滑性能影响的研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2009.
- [18] 钟科,陈波,蒋恩贵,等.灌注式半柔性路面材料研究与应用综述[J].中外公路,2017(2).
- [19] 谢若奇,吴旷怀,蔡旭,等.专用砂浆半柔性路面材料及其工程应用研究[J].中外公路,2017(3).