

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.013

# 温拌沥青混合料薄层罩面路用性能研究

魏婷婷<sup>1</sup>, 郭志坚<sup>2</sup>, 李文凯<sup>3</sup>

(1.河南中州路桥建设有限公司, 河南 周口 466000; 2.中国河南国际合作集团有限公司, 河南 郑州 450004;

3.河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 选用 Sasobit、Evotherm 温拌剂及 SMA-10 混合料进行温拌沥青混合料薄层罩面研究, 通过 Sasobit、Evotherm 温拌剂性能研究, 确定 Sasobit、Evotherm 温拌剂在 SBS I-D 改性沥青中的推荐掺量分别为 3%、0.7%; 对 SMA-10+SBS、SMA-10+SBS+3% Sasobit、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm 混合料进行配合比设计, 确定其最佳油石比, 并进行高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害及疲劳性能研究。结果表明, SMA-10+3% Sasobit 混合料的高温抗车辙及抗水损害性能最优; SMA-10+0.7% Evotherm 混合料的抗疲劳性能最优; Sasobit、Evotherm 温拌剂的掺入会降低混合料的低温抗开裂能力, 但降幅不大。

**关键词:** 公路; 温拌沥青混合料; 薄层罩面; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0051-05

预防性养护技术主要包括表面封层及罩面两大类, 其中薄层罩面技术符合中国可持续发展战略要求, 具有很好的社会效益。但工程应用中发现薄层罩面因结构层厚度较薄、热拌混合料摊铺中内部热量散失太快, 碾压不密实, 严重影响工程质量。温拌技术能降低沥青路面的施工温度, 将温拌剂掺入混合料中能降低沥青黏度, 有效解决薄层罩面技术温度散失快的问题, 同时减少能源消耗。左锋等分析了温拌、热拌混合料的性能及工程应用效果差异, 指出温拌技术的优点及不足。秦永春等对温拌沥青路面施工中的环境效益进行研究, 得出温拌剂的使用能大幅度减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等有毒有害气体排放, 与传统工艺相比节约能耗 20%~30%。郭平等对不同配合比设计方法进行研究, 发现温拌混合料宜选用旋转压实法, 马歇尔试件毛体积相对密度峰值时的击实温度为最佳碾压温度。王朝辉等研究发现 Sasobit、Aspha-min、Evotherm、EC120 4 种温拌混合料的施工温度均能降低 30℃。该文选用 Sasobit、Evotherm、SMA-10 温拌剂进行温拌薄层罩面技术研究, 对采用温拌剂推荐掺量的 3 种混合料进行路用性能研究, 为温拌沥青混合料薄层罩面技术应用提供理论基础。

## 1 原材料

### 1.1 温拌剂

选用德国 Sasd WAX 公司生产的 Sasobit、美国

Mead-Westvaco 公司生产的 Evotherm 温拌剂, 其外观见图 1, 基础指标试验结果见表 1、表 2。



(a) Sasobit 温拌剂

(b) Evotherm 温拌剂

图 1 2 种温拌剂的外观

表 1 Sasobit 温拌剂的基础指标试验结果

检测项目	试验结果
溶解度(20℃)	不溶解
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.937
闪点/℃	292
pH 值(25℃)	7.1

表 2 Evotherm 温拌剂基础指标试验结果

检测项目	试验结果
胺值	568
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.958
黏度(30℃)/(mPa·s)	475
pH 值(25℃)	11.6

### 1.2 沥青

沥青种类及质量对沥青路面使用性能起着决定性作用。选用 SBS I-D 聚合物改性沥青, 其主要

技术指标见表3。

表3 SBS I—D 聚合物改性沥青的主要技术指标

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃,100g,5s)/(0.1mm)	40~60	51
软化点/℃	≥60	68.5
延度(5cm/min,5℃)/cm	≥20	29
闪点/℃	≥230	246
弹性恢复(25℃)/%	≥75	84
135℃运动黏度/(Pa·s)	≤3	2.18
溶解度/%	≥99	99.2
RTFOT后	质量变化/%	±1.0
残留物	针入度比(25℃)/%	≥65
	残留延度(5℃)/cm	≥15
		-0.14
		73
		24

## 2 温拌沥青试验

### 2.1 温拌沥青制备

将 SBS I—D 聚合物改性沥青加热到 160℃ 至完全融化,然后将不同掺量的温拌剂加入沥青中,选用适宜的搅拌器进行搅拌,制得温拌改性沥青。2 种温拌剂的状态存在差异,在制作温拌沥青的工艺上也有所不同。Sasobit 为固体颗粒状,需分批加入并低速搅拌,无明显白色固体漂浮颗粒时以 1 400 r/min 的转速搅拌 20 min;Evotherm 为液体且有一定的水分,高温加入时会产生气泡,SBS 沥青表面无明显气泡时再将转速提高到 700 r/min 搅拌 15 min。根据厂家建议,Sasobit 的掺量(占沥青质量)宜为 0、1%、2%、3%、4%,Evotherm 的掺量(占沥青质量)宜为 0、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%。

### 2.2 针入度

采用针入度表征沥青黏度,一定温度条件下针入度越大,沥青黏度越大,反之越小。不同 Sasobit、Evotherm 掺量时 SBS 沥青的 25℃ 针入度试验结果见表 4。

表4 不同温拌剂掺量时 SBS 沥青的 25℃ 针入度

温拌剂	掺量/ %	针入度/ (0.1 mm)	温拌剂	掺量/ %	针入度/ (0.1 mm)
	0.0	54		0.0	54
	1.0	50		0.3	51
Sasobit	2.0	46	Evotherm	0.5	50
	3.0	45		0.7	49
	4.0	43		0.9	47

由表 4 可知:随着 Sasobit、Evotherm 掺量的增

加,SBS 沥青的针入度降低,其中 Sasobit 温拌沥青的降幅较大,但均满足不低于 4 mm 的要求。

### 2.3 软化点

沥青软化点能间接评价沥青路面的高温抗车辙能力,软化点越高,沥青路面高温环境下抵抗车辆轴载塑性变形的能力越强,对应的高温性能越好,反之越差。不同 Sasobit、Evotherm 掺量时 SBS 沥青的软化点试验结果见表 5。

表5 不同温拌剂掺量时 SBS 沥青的软化点

温拌剂	掺量/ %	软化点/ ℃	温拌剂	掺量/ %	软化点/ ℃
	0.0	68.5		0.0	68.5
	1.0	71.5		0.3	70.0
Sasobit	2.0	74.0	Evotherm	0.5	72.0
	3.0	76.5		0.7	73.5
	4.0	78.0		0.9	74.5

由表 5 可知:随着 Sasobit、Evotherm 掺量的增加,SBS 沥青的软化点升高,但增幅逐渐降低,表明 2 种温拌剂的掺入能改性 SBS 沥青的高温稳定性;在厂家建议掺量范围内,Sasobit 对沥青软化点的改善效果优于 Evotherm。

### 2.4 延度

裂缝是沥青路面常见病害。温度降低,结构层内部容许拉应力小于温缩应力时,结构层就会出现开裂。沥青低温延度决定沥青路面的低温抗开裂能力,低温延度越小,沥青路面抵抗塑性变形的能力越小,反之越大。不同 Sasobit、Evotherm 掺量时 SBS 沥青的 5℃ 延度试验结果见表 6。

表6 不同温拌剂掺量时 SBS 沥青的 5℃ 延度

温拌剂	掺量/ %	延度/ cm	温拌剂	掺量/ %	延度/ cm
	0.0	32		0.0	32
	1.0	29		0.3	31
Sasobit	2.0	26	Evotherm	0.5	29
	3.0	23		0.7	28
	4.0	18		0.9	26

由表 6 可知:随着 Sasobit、Evotherm 掺量的增加,SBS 沥青的 5℃ 延度降低,表明 2 种温拌剂的掺入对 SBS 沥青的低温性能产生了不利影响;在厂家建议掺量范围内,掺入 Sasobit 时沥青延度的降幅高于掺加 Evotherm,且 Sasobit 掺量为 4% 时,SBS 沥青的延度低于 20 cm,不满足规范要求。

## 2.5 黏度

黏度能表征沥青混合料的黏结性能,反映沥青路面抵抗车辆塑性变形的能力。相同温度下,黏度越大,沥青与骨料之间的黏结强度越高,沥青路面耐久性越好。通过沥青旋转黏度试验对不同 Sasobit、Evotherm 掺量时 SBS 沥青的 135 °C、175 °C 黏度进行分析,结果见表 7。

表 7 不同温拌剂掺量时 SBS 沥青的黏度

温拌剂	掺量/%	黏度/(Pa·s)	
		135 °C	175 °C
Sasobit	0.0	2.18	0.25
	1.0	1.92	0.21
	2.0	1.67	0.18
	3.0	1.48	0.17
	4.0	1.44	0.16
Evotherm	0.0	2.18	0.25
	0.3	1.83	0.22
	0.5	1.62	0.19
	0.7	1.47	0.17
	0.9	1.44	0.16

由表 7 可知:相同 Sasobit、Evotherm 掺量时,SBS 沥青的黏度随着试验温度的升高显著降低;相同试验温度下,随着 Sasobit、Evotherm 掺量的增加,SBS 沥青的黏度降低,但降幅逐渐减小,且 Sasobit、Evotherm 掺量分别超过 3%、0.7% 时,黏度已无明显下降趋势。

在沥青混合料配合比设计中,道路石油沥青以黏度为(0.17±0.02) Pa·s 时的温度作为拌合温度,

以黏度为(0.28±0.03) Pa·s 时的温度作为压实成型温度。SBS I-D 聚合物改性沥青的拌合及压实成型温度均显著大于道路石油沥青,根据黏度-温度曲线关系,推荐 SMA-10+SBS、SMA-10+3% Sasobit、SMA-10+0.7% Evotherm 混合料采用表 8 所示施工温度。

表 8 沥青混合料的施工温度

混合料类型	拌合温度/°C	击实温度/°C
SMA-10+SBS	185~195	170~180
SMA-10+SBS+3% Sasobit	165~174	155~162
SMA-10+SBS+0.7% Evotherm	167~175	158~165

## 3 路用性能

### 3.1 配合比设计

沥青路面薄层罩面结构主要包括连续级配、开级配及间断级配 3 种,选用 SMA-10 间断级配类型开展温拌混合料薄层罩面技术研究。粗骨料采用 5~10 mm、3~5 mm 玄武岩碎石,细骨料采用 0~3 mm 玄武岩机制砂,填料为石灰岩磨细的矿粉,其主要技术指标均满足 JTG F40—2017《公路沥青路面施工技术规范》的要求。木质素纤维掺量为 0.4% (占混合料质量)。由于 9.5 mm、4.75 mm 筛孔之间间隔较大,增加 7.5 mm 筛孔。矿料级配设计结果见表 9。SMA-10+SBS、SMA-10+SBS+3% Sasobit、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm 混合料的马歇尔及最佳油石比试验结果见表 10。

表 9 矿料级配设计结果

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	13.2	9.5	7.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100.0	80.0	60.0	32.0	26.0	22.0	18	16.0	13.0
下限	100	90.0	44.0	28.0	20.0	14.0	12.0	10	9.0	8.0
目标级配	100	95.3	63.7	46.2	25.1	18.6	16.2	13	11.4	9.8

表 10 沥青混合料马歇尔及最佳油石比试验结果

混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	有效沥青饱和度/%	马歇尔稳定度/kN	流值/mm
SMA-10+SBS	6.4	2.442	3.5	18.9	80.6	8.64	4.2
SMA-10+SBS+3% Sasobit	6.3	2.446	3.7	18.5	79.8	9.21	3.8
SMA-10+SBS+0.7% Evotherm	6.3	2.449	3.6	18.3	79.6	8.97	3.9

### 3.2 高温稳定性

沥青路面是一种柔性结构层,对温度较敏感。

夏季高温天气,沥青路面内部温度往往高于 60 °C 甚至超过 70 °C,在车辆轴载尤其是重轴载作用下,沥

青路面会因塑性变形增强、弹性变形降低而出现车辙、拥包等病害。车辙、拥包等病害的出现是沥青路面高温抗车辙能力差的主要表现。分别在 60℃、70℃ 温度下对 SMA-10+SBS、SMA-10+SBS+3% Sasobit (简称 Sa, 下同)、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm (简称 Ev, 下同) 混合料进行车辙试验, 评价其高温抗车辙能力, 试验结果见图 2。

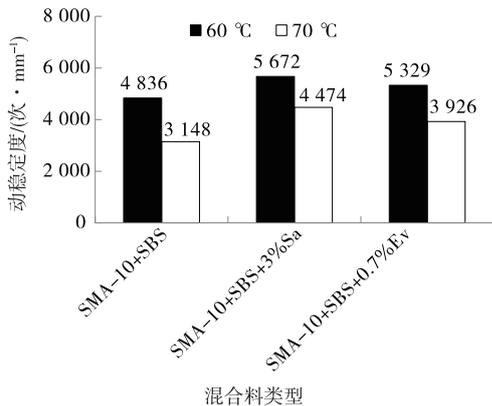


图 2 沥青混合料车辙试验结果

由图 2 可知: 试验温度为 60℃、70℃ 时, 3 种混合料的动稳定度均满足 1—3 区改性沥青混合料动稳定度不低于 2800 次/mm 的要求; 相同试验温度时, SMA-10+3% Sasobit 混合料的动稳定度最大, SMA-10+SBS 混合料的动稳定度最小; 随着温度的升高, 3 种混合料的动稳定度均降低, SMA-10+SBS、SMA-10+SBS+3% Sasobit、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm 混合料的降低幅度分别为 34.9%、21.1%、26.3%。3 种混合料均具有良好的高温抗车辙能力, 其中 SMA-10+SBS+3% Sasobit 混合料的高温性能最优。

### 3.3 水稳定性

随着沥青路面使用年限的增加, 在车辆轴载、温缩应力、雨水冲刷及紫外线等综合因素作用下, 沥青逐渐老化, 沥青与骨料之间的黏附性逐渐降低, 沥青胶浆极易在外力作用下从骨料之间剥落, 产生松散、坑槽等病害。松散、坑槽等病害的出现是沥青路面水稳定性差的主要表现。通过浸水马歇尔及冻融劈裂试验评价 3 种混合料的抗水损害能力, 试验结果见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可知: 3 种混合料的浸水马歇尔残留稳定度满足 1—3 区改性沥青混合料浸水马歇尔残留稳定度不低于 85% 的要求, 冻融劈裂残留强度比满足 1—3 区改性沥青混合料冻融劈裂残留强度

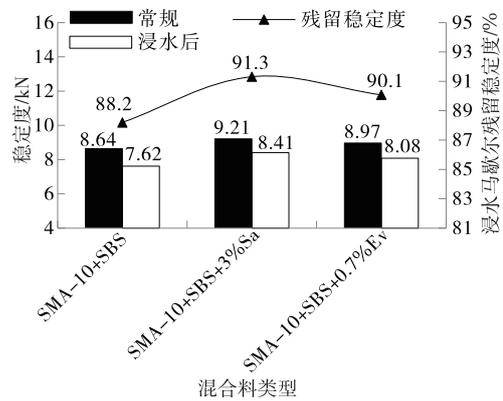


图 3 沥青混合料浸水马歇尔试验结果

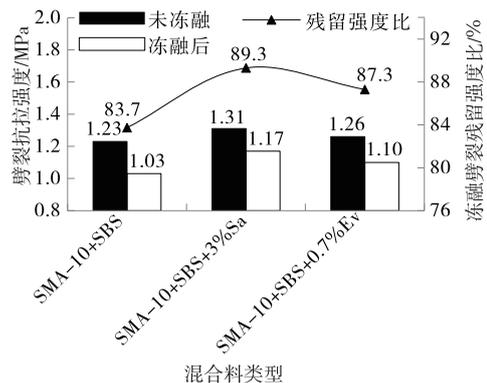


图 4 沥青混合料冻融劈裂试验结果

比不低于 80% 的要求; 与 SMA-10+SBS 相比, SMA-10+SBS+3% Sasobit、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm 的浸水马歇尔残留稳定度分别提高 3.5%、2.1%, 冻融劈裂残留强度比分别提高 6.7%、4.3%。表明 Sasobi、Evotherm 温拌剂的掺入均能改善混合料的水稳定性, 其中 SMA-10+SBS+3% Sasobit 混合料的水稳定性最优。

### 3.4 低温抗裂性

低温环境下, 沥青变得硬而脆, 沥青路面极易在温缩应力作用下产生轻微开裂, 这些裂缝如不加以处治就会恶化成块状裂缝甚至龟裂等严重病害。通过 -10℃ 低温小梁弯曲试验评价 3 种混合料的低温抗开裂能力, 试验结果见图 5。

由图 5 可知: 3 种混合料的最大弯拉应变均满足 1—3 区改性沥青混合料最大弯拉应变不低于 2500 με 的要求; SMA-10+SBS 的最大弯拉应变最大, SMA-10+SBS+3% Sasobit 的最大弯拉应变最小, 与 SBS、SBS+3% Sasobit、SBS+0.7% Evotherm 沥青 5℃ 低温延度试验结果相吻合。表明 Sasobit、Evotherm 温拌剂的掺入会降低混合料的低温抗开裂能力, 但降幅不大。

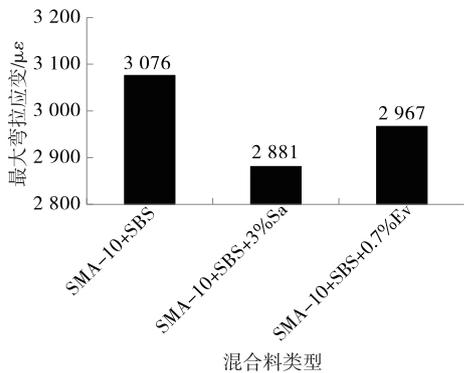


图5 沥青混合料小梁弯曲试验结果

### 3.5 疲劳性能

沥青路面在运营期间会长期受到车辆轴载的作用,结构层内部长期处在应力、应变变化环境中,当车辆轴载过大或作用次数过多时,沥青路面会因疲劳破坏而产生裂缝。采用UTM-25疲劳试验机分析混合料的抗疲劳性能。制作长380 mm×高50 mm×宽63 mm小梁试件,在不同应力比时对3种混合料进行疲劳试验,结果见图6。

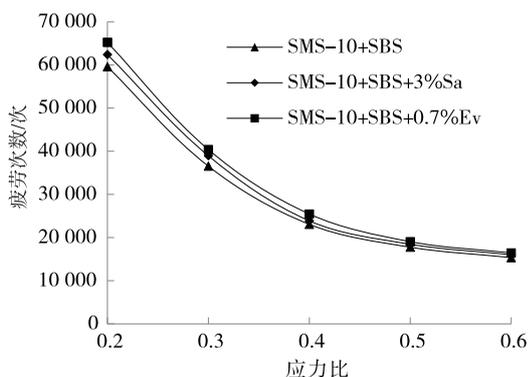


图6 沥青混合料疲劳试验结果

由图9可知:随着应力比的增大,SMA-10+SBS、SMA-10+SBS+3% Sasobit、SMA-10+SBS+0.7% Evotherm混合料的疲劳次数均降低,但降幅逐渐减小;相同应力比时,SMA-10+SBS+0.7% Evotherm混合料的疲劳次数最大,SMA-10+SBS混合料的疲劳次数最小。表明 Sasobit、Evotherm温拌剂的掺入会显著改善混合料的抗疲劳性能,其中SMA-10+SBS+0.7% Evotherm混合料的抗疲劳性能最好。

## 4 结论

(1) 通过温拌SBS改性沥青针入度、软化点、低温延度及黏度试验,确定Sasobit、Evotherm温拌剂的推荐掺量分别为3%、0.7%。

(2) 在Sasobit、Evotherm温拌剂推荐掺量下,SMA-10+SBS混合料均表现出较好的高温抗车辙及抗水损害能力;温拌剂的掺入使SMA-10+SBS混合料的高温及水稳定性得到显著改善,其中SMA-10+SBS+3% Sasobit混合料的改善效果最优。

(3) 在Sasobit、Evotherm温拌剂推荐掺量下,SMA-10+SBS混合料的抗疲劳性能得到改善,其中SMA-10+SBS+0.7% Evotherm混合料的改善效果最优;Sasobit、Evotherm温拌剂的掺入会降低SMA-10+SBS混合料的低温抗开裂能力,但降幅不大。

### 参考文献:

- [1] 彭明振. 沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J]. 四川水泥, 2021(7): 264-265.
- [2] 蒋明举. 公路养护中的沥青路面预防性养护技术研究[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(5): 205-206.
- [3] 许菲菲, 刘黎萍, 唐海威, 等. 温拌沥青混合料与热拌沥青混合料性能对比[J]. 公路工程, 2009, 34(3): 73-75+82.
- [4] 吕玉超, 张美玉, 张玉贞. 温拌沥青混合料发展现状[J]. 石油沥青, 2013, 27(5): 1-6.
- [5] 刘至飞, 吴少鹏, 陈美祝, 等. 温拌沥青混合料现状及存在问题[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4): 170-173.
- [6] 李新阳, 黄刚, 王俐栋. 温拌沥青混合料技术综述[J]. 石油沥青, 2013, 27(1): 66-71.
- [7] 左锋, 叶奋. 国外温拌沥青混合料技术与性能评价[J]. 中外公路, 2007, 27(6): 164-168.
- [8] 秦永春, 黄颂昌, 徐健, 等. 温拌沥青混合料节能减排效果的测试与分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(8): 33-37.
- [9] 郭平, 祁峰, 弥海晨. 温拌沥青混合料的路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 10-13.
- [10] 王朝辉, 陈姣, 侯明业. 道路常用温拌改性剂现状与路用性能评价[J]. 材料导报, 2016, 30(4): 102-108.
- [11] 李志刚, 李文凯. DXG-1抗车辙剂沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学, 2020, 38(8): 1264-1269.
- [12] 陈安京. 温拌高模量沥青混合料性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 33-38.
- [13] 吴革森, 冯冬林. 温拌薄层罩面在景鹰高速公路养护工程中的应用与实践[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(1): 113-116.
- [14] 黄维蓉, 杨玉柱, 杨东来, 等. 降黏型与表面改性型温拌剂对沥青混合料性能的影响[J]. 公路与汽运, 2020

(下转第59页)

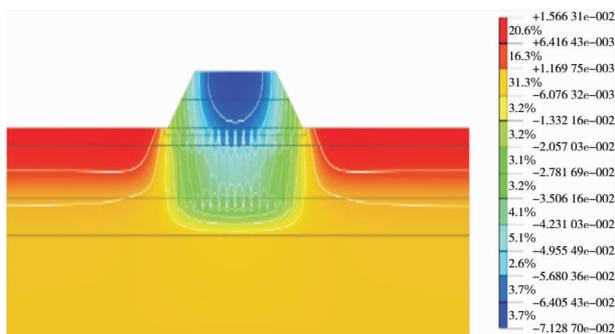


图 9 桩加固路基的最终沉降云图(单位:m)

路基中央软弱地基地表位置的位移随时间的变化见图 10、图 11。从图 10、图 11 可看出:1) 由于不考虑桩基施工期间的沉降影响,0~31 d 内竖向沉降为零;随着填方路基的施工,观测点的竖向沉降逐渐增大,并且在第一次回填和第二次回填时存在较明显的转折点。这是因为第二次回填施工后,上部土体的重力增大。2) 2 种桩型加固软弱路基的沉降规律基本一致。桩的总沉降比挤密砂桩小,这是因为桩的刚度远大于挤密砂桩,承担了更多上部荷载,更多的是起到“桩基托底”的作用。2 种方案的沉降都满足规范要求。挤密砂桩的最终沉降

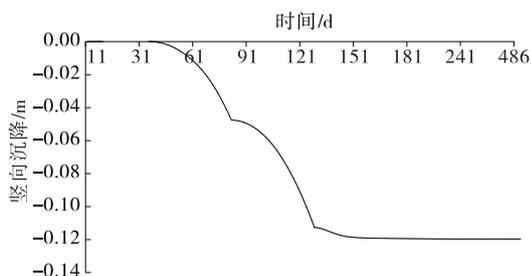


图 10 挤密砂桩加固路基的时间—沉降曲线

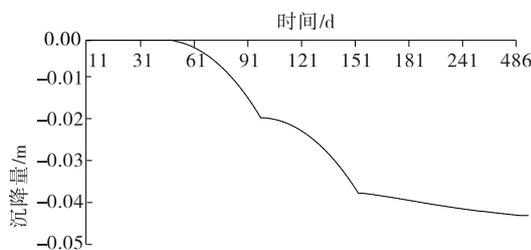


图 11 桩加固路基的时间—沉降曲线

为 12 cm 左右,基本完成了软土的固结沉降,后期沉降不大,能满足通车运行要求。桩虽然总体沉降小,但沉降变化趋势较大,也存在一定的超孔隙水压力,通车后可能产生不均匀工后沉降,影响行车。

### 4 结论

- (1) 采用挤密砂桩加固软弱路基能形成排水通道,超孔隙水压力的增大和减小速率都比桩加固软弱路基大。
- (2) 采用挤密砂桩加固的软弱路基静置 1 年后,超孔隙水压力基本消散,完成了路基土的排水固结。采用桩加固的软弱路基仍存在一定超孔隙水压力。
- (3) 挤密砂桩加固软弱路基的总沉降比桩加固软弱路基大,这与桩体刚度和软弱路基的排水固结沉降有关。
- (4) 加固完成静置 1 年后,挤密砂桩加固软弱路基的沉降已基本稳定,而桩加固软弱路基在通车运营中还可能产生固结沉降,会对行车造成一定影响。

### 参考文献:

- [1] 徐永福,陈冠军.高速公路路基软土的特性及其处理方法比较[J].山西交通科技,1998(4):25—30.
- [2] 冯忠居,曹文海.软弱地基上高填方路堤沉降观测及数值分析[J].兰州理工大学学报,2013,39(2):126—129.
- [3] 唐建中,阎明礼,杨军,等.水泥粉煤灰碎石桩复合地基的工程特性[J].建筑科学,1991(1):28—30.
- [4] 徐毅,洪宝宁,符新军,等.CFG 桩复合地基加固高速公路软基的现场试验研究[J].防灾减灾工程学报,2006,26(3):305—309.
- [5] 谭新昱.水下挤密砂桩软基处理现场监测与沉降预测[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [6] 栾光日,王连俊,李懿,等.高速铁路站场宽路堤复合地基沉降特性分析[J].铁道学报,2014,36(10):95—101.

收稿日期:2021—08—23

(上接第 55 页)

- (6):57—60.
- [15] 马勇,刘攀.不同降粘剂对沥青及其混合料性能的影响[J].广州化工,2020,48(18):55—57.
- [16] 孔令坤,李文凯.不同纤维沥青混合料性能研究[J].河南科学,2020,38(5):791—796.

- [17] 郑新,郑炳锋,高壮元,等.泡沫沥青黏温特性与混合料疲劳性能研究[J].江苏建筑职业技术学院学报(自然科学版),2021,21(1):29—32.
- [18] 周彦鑫.PR.P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究[J].中外公路,2017,37(6):292—295.

收稿日期:2021—08—13