

## 水基聚合物稳定碎石路用性能研究

查睿<sup>1</sup>, 赵延庆<sup>1\*</sup>, 付国志<sup>2</sup>, 董冠一<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 交通运输学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 土木工程学院)

**摘要:**为研究水基聚合物(SRX)稳定碎石的性能,采用静压法成型 SRX 稳定碎石试件,对其无侧限抗压强度、加州承载比(CBR)、收缩性能、高温稳定性能以及抗水损害性能进行了测试。结果显示:SRX 稳定碎石强度增长与 SRX 掺量和龄期有关,当 SRX 掺量由 0.5% 增加到 1.5% 时,抗压强度增大,但将 SRX 掺量提高到 1.5% 时, CBR 出现了下降的情况。随着龄期增加,抗压强度和加州承载比(CBR)均不断增大;SRX 稳定碎石的收缩性能优于水泥稳定碎石,可有效减少反射裂缝的发生;SRX 稳定碎石的动稳定度远高于规范要求值,高温稳定性能良好,其高温抗车辙能力较强;在室内试验条件下,SRX 稳定碎石的残留劈裂强度比(TSR)高于规范要求,抗水损害性良好,适宜在季冻地区使用。

**关键词:**SRX 稳定碎石; 路用性能; 收缩特性; 高温稳定性; 抗水损害性

水基聚合物材料 SRX(Solifix romix 以下简称 SRX)是以多种压力敏感性树脂、高强抗老化树脂聚合而成的特殊聚合物溶液,是水泥和沥青之外另一种重要的道路胶结材料。SRX 材料可溶于水并以水为传导媒介均匀分散到稳定材料表面,经有效压实和水分挥发过程,在固体材料颗粒表面形成有机黏膜,利用颗粒间的嵌挤作用形成胶结整体。SRX 稳定碎石材料主要用于沥青面层的下承层,属于柔性基层。SRX 稳定碎石基层对上层传递来的荷载分散,保证其结构不

受破坏,相比于半刚性基层,避免了频繁的路基路面维修,大大降低了养护成本。

目前国内外专家对 SRX 稳定材料进行了一定的研究。蒋应军等采用垂直振动法成型试件,并研究了 SRX 稳定碎石含水率的变化规律与含水率对稳定碎石干化抗压强度的影响;张敏江等在分析 SRX 稳定基层材料力学性能的基础上,研究了 SRX 柔性基层沥青路面结构力学响应的规律,并验证 SRX 稳定材料作为路面基层的可行性;袁素平等结合 SRX 稳定材料在实

- \*\*\*\*\*
- [8] 向源,赵新美,闫东波,等. 浇注式沥青混凝土高温稳定性影响因素分析[J]. 中外公路,2009(5).
- [9] 周丽丽. 浇注式沥青混凝土热稳定性研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2012.
- [10] 潘友强,张志祥,徐肖龙. 复合浇注式钢桥面沥青铺装的路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化,2019(4).
- [11] 王伟民,潘友强,李娣,等. 公铁两用钢桁梁悬索桥钢桥面浇注式铺装材料设计及性能研究[J]. 石油沥青,2019(5).
- [12] 樊叶华,黄卫,王敬民,等. 钢桥面浇注式沥青混合料铺装路用性能分析[J]. 公路交通科技,2007(4).
- [13] 许延祜. 拌和工艺对浇注式沥青混合料性能的影响研究[J]. 北方交通,2013(10).

- [14] 王民. 基于摩尔库伦理论的浇注式沥青混合材料强度分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015(6).
- [15] 张毅,李璐,刘攀. 沌口长江公路大桥试验段铺装结构的路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化,2019(7).
- [16] 侯月琴,张红兵,纪小平. 基于灰色关联评价的桥面铺装结构优选[J]. 广西大学学报(自然科学版),2013(4).
- [17] 侍冬前,李国芬,王宏畅,等. 复合浇注式沥青混凝土高温性能分析[J]. 公路工程,2014(5).
- [18] 伍朝晖,郝增恒. 铺装温度差异规律的研究[J]. 中外公路,2008(5).
- [19] 朱沅峰,钟梦武,戴勇,等. 胶轮与双钢轮压路机组合碾压 SMA 路面新施工工艺控制[J]. 公路,2015(1).

收稿日期:2020-06-19(修改稿)

基金项目:乌鲁木齐市建设科技项目(编号:JSKJ201806)

作者简介:查睿,男,硕士研究生. E-mail:15754041140@163.com

\* 通信作者:赵延庆,男,教授,博士生导师. E-mail: yanqing\_zhao@dlut.edu.cn

际工程中的应用,对 SRX 稳定材料的施工工艺和造价进行了研究;Iyengar 等研究了 SRX 稳定碎石基层的物理、化学及机械碾压特性,并通过实际工程状况对 SRX 稳定基层进行了可行性分析;Tandon 等研究了 SRX 材料的技术特性并在沙漠地区进行了应用。由于 SRX 稳定碎石在道路工程中还未得到广泛应用,其路用性能还未得到研究人员的充分认识。鉴于此,该文对不同掺量的 SRX 稳定碎石的力学性能以及 0.5%SRX 掺量下 SRX 稳定碎石的收缩特性、高温稳定性和抗水损害性能进行研究,为 SRX 稳定碎石在道路工程的应用推广提供参考。

1 试验材料

试验用 SRX 溶液为 Soilfix VR4,相关技术指标及检测结果见表 1。集料选用灰岩,粗集料压碎值为 13.4%,粗、细集料及矿粉的相对密度见表 2。

表 1 SRX 溶液检测结果

项目	pH 值	固体含量/ %	黏稠度/ cp	沸点/ ℃	水溶性
技术指标	8~9	28.5~31.5	50~100	100	完全可溶
检测值	9	31.5	89	100	完全可溶

依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》确定 SRX 级配碎石的颗粒组成范围,SRX 稳定碎石的级配曲线如图 1 所示。依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》击实试验方法,击实曲线如图 2 所示,由图 2 可以确定 SRX 稳定碎石的最佳含水量为 4.1%,最大干密度为 2.318 g/cm<sup>3</sup>。

表 2 各档集料相对密度

集料粒径/ mm	表观相对 密度	表干相对 密度	毛体积相对 密度
矿粉	2.562	—	—
0~2.36	2.644	2.562	2.511
2.36~5	2.708	2.663	2.637
5~10	2.704	2.672	2.653
10~20	2.684	2.664	2.652
20~30	2.697	2.684	2.675
30~40	2.761	2.739	2.732

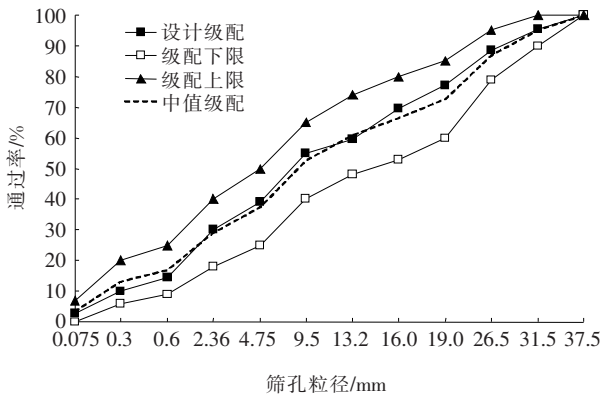


图 1 SRX 稳定碎石级配

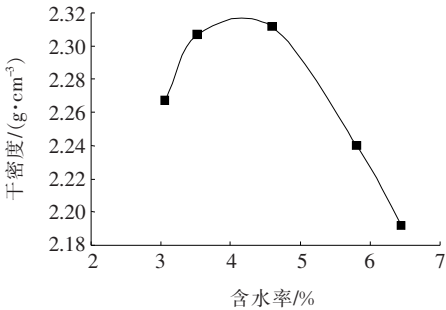


图 2 击实试验结果

2 SRX 稳定碎石的路用性能

2.1 SRX 稳定碎石的力学性能

无侧限抗压强度(UCS)和加州承载比(CBR)是道路材料的基本力学性能指标,其中,CBR 是柔性基层沥青路面设计最重要的设计和验收指标。为了研究 SRX 稳定碎石的力学性能,采用静压法制备不同 SRX 掺量的试件,SRX 掺量分别为 0.5%、1.0%和 1.5%(质量比),分别在龄期为 7、28、90 和 180 d 下进行 UCS 试验和 CBR 试验。

2.1.1 无侧限抗压强度试验

UCS 试验根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行,试件尺寸为  $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ ,压实度为 100%,试件制备完成后放入养生室养生,养生温度为 30℃。养生结束后,在常温水中浸泡 24 h,然后进行抗压强度试验。

不同掺量的 SRX 稳定碎石的 UCS 与龄期的相关方程和相关系数如图 3 所示。

由图 3 可以看出:SRX 稳定碎石 USC 与养生龄期具有较好的相关性,UCS 与养生龄期呈对数关系。在同一 SRX 掺量下,UCS 随龄期的增加而逐渐增长,

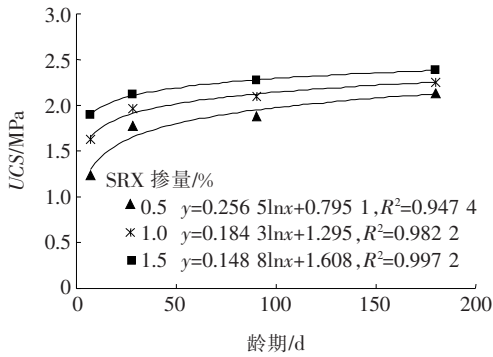


图 3 UCS 与龄期的关系曲线

在 0~28 d 内强度增长较快,而后随着试件内水分的蒸发,含水率的降低,强度趋于平稳,增幅变小。在 7~28 d 养生龄期内,当 SRX 掺量为 0.5%~1.5%(以 0.5%步长增长)时,SRX 稳定碎石的 UCS 分别增长了 42.74%、20.24%、12.16%,说明在 7~28 d 养生龄期内,随 SRX 掺量的增加,养生龄期对 SRX 稳定碎石 UCS 影响逐渐减少。

SRX 稳定碎石的 UCS 与 SRX 掺量的相关方程和相关系数如图 4 所示。

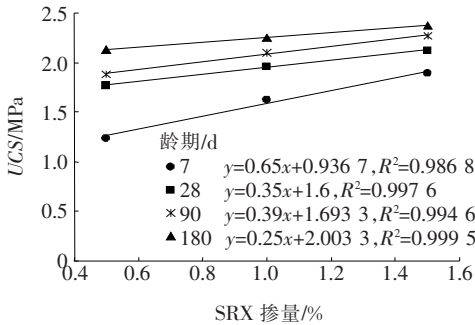


图 4 UCS 与 SRX 掺量的关系曲线

由图 4 可以看出:UCS 随 SRX 掺量的增加近似线性增加,其中当养生龄期为 7 d 时,UCS 与 SRX 掺量的相关方程斜率最大,即 UCS 随 SRX 掺量的增加幅度最大,表明在养生初期,SRX 掺量对 UCS 的影响较大。

2.1.2 CBR 试验

CBR 试验根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》进行。试件尺寸为  $\phi 150\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ ,压实度为 100%,试件制备完成后放入养生室养生,养生温度为 50℃,养生结束后,在常温水中浸泡 96 h,然后进行 CBR 试验,试验结果如表 3 所示。JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中规定,对于极重、特重交通下的高速公路,级配碎石基层的 CBR 值大于 200%。由表 3 可知:不同 SRX 掺量的稳定碎石 CBR 值均大

于 250%。由此可见,SRX 稳定碎石可以满足各交通等级下的 CBR 值要求。

表 3 CBR 试验结果

SRX 掺量/%	不同龄期(d)时的 CBR 值/%			
	7	28	90	180
0.5	327.2	374.4	385.9	404.9
1.0	343.0	402.6	417.8	447.9
1.5	253.1	303.5	323.4	362.1

图 5 为 SRX 稳定碎石的 CBR 值与养生龄期的相关曲线。

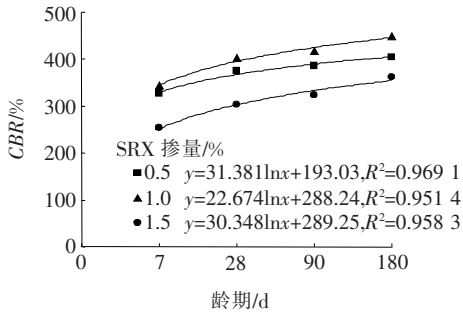


图 5 CBR 值与龄期的关系曲线

由图 5 可见:与 UCS 相同,CBR 值与养生龄期也呈对数关系,在同一 SRX 掺量下,SRX 稳定碎石的 CBR 值随养生龄期的增加而逐渐增加。在 0~28 d, CBR 值增长速率最快,28 d 后 CBR 值逐渐趋于稳定。在 7~28 d 养生龄期内,当 SRX 掺量为 0.5%~1.5%(以 0.5%步长增长)时,SRX 稳定碎石的 CBR 值分别增加了 14.39%、17.37%、19.9%,说明在 7~28 d 养生龄期内,随着 SRX 掺量的增加,SRX 稳定碎石 CBR 值越来越受到龄期的影响。

图 6 为 SRX 稳定碎石的 CBR 值与 SRX 掺量的相关曲线。

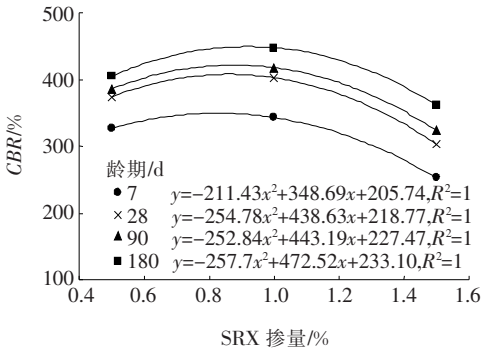


图 6 CBR 值与掺量的关系曲线

由图 6 可知:与 UCS 不同,CBR 值并不随 SRX 掺量的增加而增加,在同一养生龄期下,CBR 值随 SRX 掺量的增加呈现出先增后减的趋势,当 SRX 掺量大于 1%时,CBR 值随 SRX 掺量的增加而降低。由此可以看出,SRX 稳定碎石的掺量并非越高强度越大,在实际工程中应该结合不同施工路段的情况确定最佳掺入量。

2.2 SRX 稳定碎石收缩特性

试验从干缩和温缩两个方面研究 SRX 稳定碎石的收缩特性。试验试件采用静压法成型,压实度为 100%,试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,SRX 原液的推荐添加量为 0.5%(质量比),试件制备完成后放入养生室,养生温度为 30℃,养生期为 7 d,养生结束后在常温下浸泡 24 h,然后进行试验。

2.2.1 干缩试验

干缩试验依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行,试验结果如图 7 和表 4 所示。

增加均呈上升趋势,在初始 6 d 内,失水率、干缩量及干缩应变均急剧上升,在 6~17 d 龄期内均开始趋于平稳,30 d 后失水率、干缩量以及干缩应变基本不变。干缩系数随龄期增加而减小,在初始 6 d 内由最大值 114.594 5( $\times 10^{-6}$ )降至 55.485 6( $\times 10^{-6}$ ),7~30 d 龄期内干缩系数下降速率减缓,逐渐开始保持稳定,30 d 之后干缩系数基本不变。

沙庆林指出,水泥稳定类半刚性材料的干缩系数一般为  $19.1 \times 10^{-5} \sim 64.9 \times 10^{-5}$ ,而 SRX 材料的干缩系数为  $5.05 \times 10^{-5} \sim 11.4 \times 10^{-5}$ ,干缩系数远小于水泥稳定类半刚性材料,说明 SRX 稳定碎石的抗失水收缩性能较强。SRX 稳定碎石在 6 d 左右干缩变化逐渐稳定,并且在 7~30 d 内的干缩应变上升幅度较小,说明 SRX 基层在养生期之后相当长的时间内收缩变形不大。

2.2.2 温缩试验

温缩试验依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行,试验结果如表 5 所示。

表 5 SRX 稳定级配碎石混合料温缩

试验结果(试件长:401 mm)

温度区间/℃	温度应变/( $\times 10^{-5}$ )	温缩系数/( $\times 10^{-6}$ )
30~20	2.993 2	2.993 2
20~10	2.495 7	2.495 7
10~0	3.243 8	3.243 8
0~-10	3.742 8	3.742 8
-10~-20	4.739 1	4.739 1

由表 5 可以看出:在-20~20℃,收缩变形随温度降低而逐渐增大,且在-10~-20℃区间收缩变形最大。沙庆林指出水泥类半刚性材料的温缩系数为  $8 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$ ,而 SRX 稳定碎石材料则为  $2.99 \times 10^{-6} \sim 4.73 \times 10^{-6}$ ,在相同温度下,SRX 稳定材料的温缩系数远低于水泥稳定半刚性稳定材料。由此可见,SRX 稳定碎石材料具备良好的抗低温收缩开裂性能。

2.3 SRX 稳定级配碎石高温稳定性

采用车辙试验对 SRX 稳定碎石的高温稳定性进行评价。车辙试验依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行。SRX 原液的推荐添加量为 0.5%(质量比),采用轮碾法成型 300 mm×300 mm×100 mm 的板块状试件。试验结果如表 6 所示。

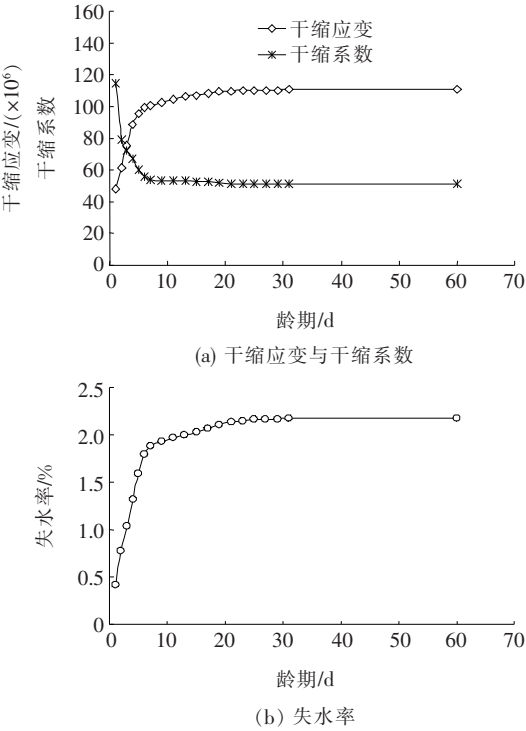


图 7 SRX 稳定碎石干缩试验结果

表 4 SRX 稳定碎石干缩试验最大值

材料	最大干缩/ ( $\times 10^{-6}$ )	最大失 水率/%	平均干缩系 数/( $\times 10^{-6}$ )	最大干缩系 数/( $\times 10^{-6}$ )
SRX	112.094 7	2.189 1	57.511 6	114.594 5

由图 7 所示:失水率、干缩量和干缩应变随龄期的



表 6 SRX 稳定碎石车辙试验动稳定度值

轮压/ MPa	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )			
	1	2	3	平均值
0.7	35 220	37 432	34 335	35 883
1.4	14 000	17 000	12 000	14 333

由表 6 可知:当轮压为 0.7 MPa 时,SRX 稳定碎石的动稳定度为 35 000 次/mm 以上,当轮压增加到 1.4 MPa 时,SRX 稳定碎石的动稳定度为 14 000 次/mm 以上,均大于 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中对各类沥青混合料动稳定度的要求值。由此可知,采用 SRX 稳定碎石具有良好的高温稳定性,可有效减少和控制路面车辙的产生。

## 2.4 SRX 稳定级配碎石抗水损害性能

道路材料的抗水损害性能评价常采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,然而浸水马歇尔试验有时会出现强度残留度达到 100% 以上的情况,故该文采用冻融劈裂试验评价 SRX 稳定碎石的抗水损害性能。冻融劈裂试验依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行。采用静压法成型  $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的圆柱体试件,压实度为 100%,依据相关规范,SRX 原液的推荐添加量为 0.5% (质量比),养生 28 d,采用 5 次冻融循环方式。结果显示:0.5% 掺量的 SRX 稳定碎石的残留强度比 (TSR) 达到了 88%,对比 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中对各类沥青混合料 TSR 要求,SRX 稳定碎石具有良好的抗水损害性能。

## 3 结论

(1) SRX 稳定碎石的 UCS 与养生龄期呈对数关系。在同一 SRX 掺量下,UCS 随龄期的增加而逐渐增长,在 0~28 d 龄期内强度增长较快,而后强度趋于平稳,增幅变小;UCS 随 SRX 掺量的增加近似线性增加。

(2) 不同 SRX 掺量的稳定碎石的 CBR 值均大于 250%,SRX 稳定碎石可以满足各交通等级下的 CBR 值要求。CBR 值与养生龄期呈对数关系。在同一养生龄期下,CBR 值随 SRX 掺量的增加出现先增后降的情况,当 SRX 掺量大于 1% 时,CBR 值随 SRX 掺量

的增加而降低。SRX 稳定碎石的掺量并非越高强度越大,在实际工程中应该结合不同施工路段的情况确定最佳掺入量。

(3) 在养生 6 d 后,SRX 稳定碎石的干缩变化趋于稳定,在 30 d 后,干缩应变基本不变;SRX 稳定碎石的干缩系数和温缩系数均远小于水泥稳定类半刚性材料,具有良好的抗收缩性能。

(4) 轮压为 0.7 MPa 和 1.4 MPa 时,SRX 稳定碎石的动稳定度均大于规范对各类沥青混合料动稳定度的要求值,表明其具有良好的抗车辙能力;SRX 稳定碎石的残留强度比 (TSR) 达到 88%,具有良好的抗水损害性能。

## 参考文献:

- [1] 杜洪新,张新天. Soilfix 聚合物稳定砂砾基层的试验研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2011(3).
- [2] 蒋应军,杨晨光,陈浙江,等. 路用水基聚合物稳定碎石养生及测试条件研究[J]. 西安科技大学学报, 2016(7).
- [3] 张敏江,赵云龙,于保阳,等. 路用水基聚合物稳定基层材料力学性能及路面结构分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2012(11).
- [4] 袁素平,李旭颖,王金良. SRX 水基一聚合物稳定道路基层的施工应用[J]. 公路交通科技, 2012(2).
- [5] IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K. et al. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2012, 25(4).
- [6] TANDON J L, MEHTA H S. Stabilization of Desert Sand with Chemicals (Synthetic Resins) for Emergent Road Construction in Rajasthan[J]. Indian Highways, 1976, 4(10).
- [7] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [8] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [9] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [10] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [12] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [13] 赵伟,蒋应军,陈浙江,等. 水基聚合物 SRX 稳定碎石路用性能[J]. 建筑材料学报, 2017(8).