

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.062

基于多目标加权的水泥混凝土桥面防水材料优选

易祥军

(海南省交通规划勘察设计研究院, 海南 海口 570206)

摘要:为了优选出水泥混凝土桥面铺装防水黏结层最佳路用性能与经济性能相结合的防水材料,以海南某高速公路水泥混凝土桥面为例,对4种防水黏结层材料进行层间剪切、拉拔、渗水、耐老化性能试验,初步获得了4种防水材料的路用性能指标,并结合经济指标,采用灰色系统理论中的多目标加权决策模型,优选出符合实际工程要求的最佳防水材料。结果表明:试验温度的升高,防水黏结层材料层间力学性能逐步降低;随着水压力的增大,防水性能越差;老化对防水黏结层材料的层间强度有显著影响,环氧沥青的耐老化性能最优。通过多目标加权灰靶决策模型,分析得出环氧沥青的综合性能最优,可推荐作为依托工程水泥混凝土桥面防水黏结层材料。

关键词:桥面防水层;路用性能;经济指标;多目标;材料优选

桥面铺装层属于桥梁的上部结构,对桥梁结构和整体安全起到关键性的作用。防水黏结层作为沥青铺装层和水泥铺装层的中间过渡层,是桥面铺装的重要组成部分。其设置主要作用为:其一作为铺装层的过渡层,将铺装层黏结成一个整体,提高桥面的承载能力;其二可以防止雨水下渗导致桥梁损坏。目前,黏结层黏结力不足是导致铺装层早期病害发生的主要原因,而黏结力不足与防水材料自身的黏结力、防水层厚度、施工工艺有关。桥面铺装的水损坏会降低沥青混凝土桥面的性能从而影响高速公路行车功能导致交通事故的发生。防水黏结层失效将会导致混凝土铺装层与沥青面层脱落,破坏桥面铺装结构,进一步影响桥梁主体结构。因此,选择具有良好防水、黏结、耐久和稳定性能的防水黏结层材料对控制桥面铺装层的质量至关重要。

目前国内外关于水泥混凝土桥面防水黏结层材料的研究较多,大多数集中研究某单一防水材料的开发与性能,但是关于防水黏结层材料的比选缺少相应的指标和标准,防水黏结层材料仅依靠经验进行选取。该文从防水黏结层材料路用性能角度出发,针对目前工程上常用的防水材料(环氧沥青、SBS改性沥青、SBR改性乳化沥青、新型丙烯酸酯基防水材料),对其进行路用性能测试,并结合材料的经济指标,通过多目标加权决策模型,优选出综合性能最佳的桥面黏结层防水材料。

1 原材料的选择和试件制备

1.1 原材料

环氧沥青是在沥青中加入环氧树脂基等改性剂改性而成,具有高黏结性、稳定性、抗裂性等特点;SBS改性沥青为SBS含量4%的I-D型改性沥青;SBR改性乳化沥青由70#基质沥青和SBR自行合成,SBR掺量为3%;新型丙烯酸酯基防水材料是在一定比例的新型丙烯酸酯中加入水和乳化剂,乳化后形成的乳白色液体,喷洒在混凝土上形成一层柔韧、耐用、黏结性好的膜层,能渗透进水泥混凝土表面的微小裂纹里,具有一定的渗透性,是一种无毒、中性、环保乳液。新型丙烯酸酯基防水材料的技术参数如表1所示。

表1 新型丙烯酸酯基防水材料技术参数

项目	单位	检测结果	技术要求
pH		7.6	7~8
固含量	%	49.8	45~55
储存温度	℃		10
颜色		乳白色	

1.2 试件制作

1.2.1 试件配合比设计

水泥混凝土试件:水泥为普通P. O. 42.5级水

收稿日期:2019-12-20

作者简介:易祥军,男,硕士,高级工程师。E-mail:13691434@qq.com

泥,集料采用石灰岩碎石,所用水泥混凝土配合比为:水泥:砂子:碎石:水=468:750:978:183,成型圆柱体或立方体试件。

沥青混凝土试件:沥青为 SBS 改性沥青,集料为玄武岩碎石,矿粉为石灰岩,通过旋转压实/车辙试验成型 AC-20 沥青混合料,其最佳油石比为 4.5%。

1.2.2 试件制作

(1) 制备水泥混凝土试件,尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,养生 28 d 后,干燥环境下放置 1 d,待其表干后使用。

(2) 将防水黏结层材料涂刷在表干后的水泥混凝土试件上,待防水材料固化后,方可进行下一步工序。

(3) 将防水材料固化后的水泥混凝土试件放入旋转压实模具中,将 AC-20 沥青混合料装入模具中,压实成型。

(4) 根据车辙试验模具,同理可成型方形试件。

2 防水黏结层材料性能测试

2.1 防水材料最佳用量确定

先通过抗剪强度指标确定防水材料的最佳用量,剪切试验原理如图 1 所示。

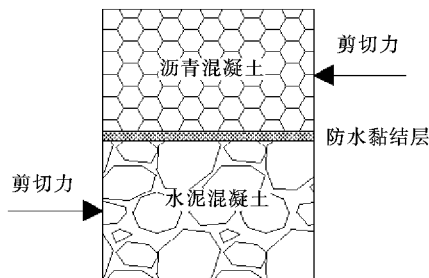


图 1 剪切示意图

剪切强度计算公式如下:

$$\tau = \frac{\sigma}{S} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切强度(MPa); σ 为剪应力(N); S 为受力面积(mm^2)。

试验在 20 °C 环境下进行,剪切速率 10 mm/min,其材料用量选用 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 kg/m^2 。设置平行试验 3 次,取平均值作为试验结果。不同防水材料和不同用量下的层间剪切强度试验结果见图 2。

由图 2 可知:随着防水材料用量的增加,层间抗剪强度呈现出先增大后减少的趋势。当防水材料用量较小时,防水材料提供的黏结强度较小,即层间剪切强度

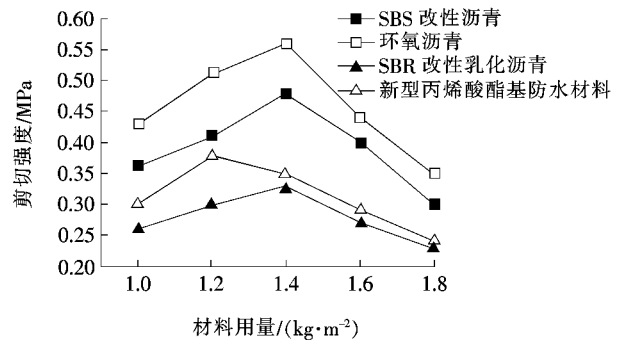


图 2 不同用量下的各防水材料剪切强度变化趋势

较小;当防水材料用量最佳时,防水材料提供的黏结强度最大,层间的摩阻力最大,所以层间剪切强度最大;当防水材料用量较大时,层间摩阻力相对较小,所以层间的剪切强度也较小。通过层间抗剪强度试验结果可得,SBS 改性沥青、环氧沥青和 SBR 改性乳化沥青用量均为 1.4 kg/m^2 时剪切强度最大,新型丙烯酸酯基防水材料用量为 1.2 kg/m^2 时剪切强度最大。

2.2 路用性能测试

2.2.1 层间剪切与拉拔试验

按最佳用量下的防水材料成型测试试件,进行层间剪切和拉拔试验。剪切试验加载速率 10 mm/min,拉拔试验拉伸速率 10 mm/min,试验温度设置为:0、20、40、60 °C 共 4 个温度。拉拔试验工作原理如图 3 所示。

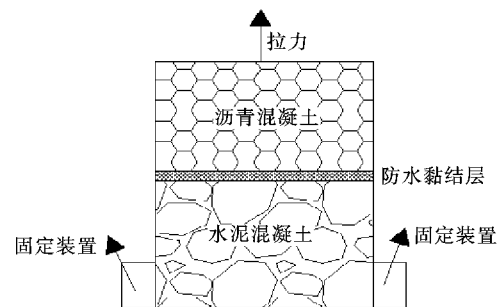


图 3 拉拔试验示意图

拉应力采用下式计算:

$$T = \frac{F}{S} \quad (2)$$

式中: T 为拉拔强度(MPa); F 为拉拔试验中的拉力(N); S 为受力面积(mm^2)。

设置平行试验 3 次,取其平均值作为试验结果。剪切和拉拔试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知:4 种材料的防水黏结层抗剪强度和拉拔强度随着温度的升高均显著下降,均在 60 °C 时达到最低。例如环氧沥青在 60 °C 的剪切强度为 0.19

表 2 不同温度下抗剪强度和拉拔强度试验结果

材料类型	0 °C		20 °C		40 °C		60 °C	
	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa
SBS 改性沥青	2.51	2.36	0.48	0.81	0.36	0.31	0.15	0.11
环氧沥青	2.96	2.54	0.56	0.91	0.42	0.42	0.19	0.13
SBR 改性乳化沥青	1.86	1.50	0.33	0.68	0.29	0.22	0.08	0.08
新型丙烯酸酯基防水材料	2.23	1.87	0.38	0.76	0.31	0.26	0.11	0.09

MPa,比 0 °C 时的 2.96 MPa 降低了 94%;环氧沥青在 60 °C 的拉拔强度为 0.13 MPa,比 0 °C 时的 2.54 MPa 降低了 95%,说明温度是影响材料黏结强度的主要因素。在 20 °C 时,环氧沥青的剪切强度为 0.56 MPa,略高于 SBS 改性沥青,相比 SBR 改性乳化沥青的剪切强度 0.33 MPa 和新型丙烯酸酯基防水材料的剪切强度 0.38 MPa 分别高出 41%和 32%;环氧沥青在 20 °C 时拉拔强度为 0.91 MPa,相比 SBS 改性沥青拉拔强度 0.81 MPa、SBR 改性乳化沥青的拉拔强度 0.68 MPa 和新型丙烯酸酯基防水材料的拉拔强度 0.76 MPa 分别高出 11%、25%和 16%,说明环氧沥青的抗剪切和拉拔性能最优。同一温度下的抗剪强度、拉拔性能排序均为:环氧沥青>SBS 改性沥青>新型丙烯酸酯基防水材料>SBR 改性乳化沥青。

2.2.2 渗水试验

分别将 SBS 改性沥青、环氧沥青、SBR 改性乳化沥青、新型丙烯酸酯基防水材料的最佳用量分两次均匀涂刷在试件上,待防水材料干燥成膜后,放置于压力渗水仪的密封筒内,在加水压力为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa 下记录开始渗水时间。以 30 min 为一个观察周期,观察试件渗水情况,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知:当动水压力为 0.2 MPa 时,4 种材料均表现出较好的防水性能;当动水压力达到 0.3 MPa 时,新型丙烯酸酯基防水材料在 25.5 min 时出现了渗

表 3 渗水试验结果

动水压力值/MPa	不同材料渗水时间/min			
	环氧沥青	SBS 改性沥青	SBR 改性乳化沥青	新型丙烯酸酯基防水材料
0.2	30.0	30.0	30.0	30.0
0.3	30.0	30.0	30.0	25.5
0.4	30.0	30.0	19.7	—
0.5	30.0	22.8	—	—
0.6	18.5	—	—	—

水情况,环氧沥青、SBS 改性沥青、SBR 改性乳化沥青仍保持较好的防水能力;在 0.4 MPa 时,SBR 改性乳化沥青在 19.7 min 时出现了渗水情况;在 0.5 MPa 动水压力下时,SBS 改性沥青在 22.8 min 时出现渗水;环氧沥青在 0.6 MPa 的动水压力下,在 18.5 min 时出现渗水。试验结果表明:在动水压力下,各防水材料防水性能排序为:环氧沥青>SBS 改性沥青>SBR 改性乳化沥青>新型丙烯酸酯基防水材料。

2.2.3 抗老化试验

先将防水材料放置于温度为 163 °C 的薄膜烘箱中进行热处理,经过 5 h 的热老化后,将防水材料成型试件,在 20 °C 的环境下,进行材料层间剪切强度和拉拔强度测试。试验结果如表 4 所示。

表 4 防水材料老化前后层间力学性能试验结果

项目	SBS 改性沥青		环氧沥青		SBR 改性乳化沥青		新型丙烯酸酯基防水材料	
	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa	τ /MPa	T /MPa
未老化	0.48	0.81	0.56	0.91	0.33	0.68	0.38	0.76
老化后	0.36	0.64	0.45	0.75	0.22	0.59	0.23	0.56

由表 4 可知:对比热老化前后的抗剪切性能,SBS 改性沥青下降了 25%,环氧沥青下降了 20%,SBR 改性乳化沥青下降了 33%,新型丙烯酸酯基防水材料下降了 39%,老化后抗剪性能衰减最快的是新型丙烯酸

酯基防水材料,最慢的是环氧沥青。热老化前后的拉拔性能变化规律为:SBS 改性沥青、环氧沥青、SBR 改性乳化沥青、新型丙烯酸酯基防水材料的拉拔强度分别降低了 0.17、0.16、0.09、0.2 MPa,老化后环氧沥青

的拉拔强度最大(0.75 MPa),新型丙烯酸酯基防水材料最小(0.56 MPa)。综合热老化前后剪切性能和拉拔性能衰变规律可知,环氧沥青的耐老化性能最优。

3 基于多目标加权的防水材料优选模型

基于防水黏结层材料的抗剪性能、拉拔性能、防水性能、耐老化性能和经济指标,采用灰色系统理论中的多目标加权决策模型,优选出最佳的桥面防水黏结层

材料。通过市场调研,获取防水材料的经济性指标。以 20 °C 试验温度下路用性能指标结果为例,4 种防水材料的剪切强度、拉拔强度、渗水压力、老化后的剪切、拉拔强度和材料单价的参数如表 5 所示。

多目标加权决策模型以灰色系统理论为基础,通过对方案的多个目标进行科学合理的分析和处理,得出各个方案的综合效用函数,用来帮助做出最合理的决策。多目标加权决策模型已被广泛应用于工程项目的决策选择问题。该文通过多目标加权决策模型,优选出综合性能最佳的桥面防水黏结层材料。

表 5 各防水材料的性能指标参数

材料类型	剪切强度/MPa	拉拔强度/MPa	渗水压 力/MPa	老化后		单价/ (元·m ⁻²)
				剪切强度/MPa	拉拔强度/MPa	
SBS 改性沥青	0.48	0.81	0.5	0.36	0.64	16
环氧沥青	0.56	0.91	0.6	0.45	0.75	22
SBR 改性乳化沥青	0.33	0.68	0.4	0.22	0.59	11
新型丙烯酸酯基防水材料	0.38	0.76	0.3	0.23	0.56	13

第 1 步:建立事件集、对策集及决策方案集。选择哪种防水材料作为事件 a_1 ,则事件集 $A = \{a_i\} = \{a_1\}$;选择 SBS 改性沥青、环氧沥青、SBR 改性乳化沥青、新型丙烯酸酯基防水材料分别作为对策 b_1, b_2, b_3, b_4 ,则对策集 $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$;由事件集和对策集构成决策集:

$$S = \{S_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B, i = 1, j = 1, 2, 3, 4\} = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}\}$$

第 2 步:确定决策目标。将材料的剪切强度、拉拔强度、渗水性能、老化后的剪切强度、老化后的拉拔强度、经济指标共 6 个指标作为决策目标。

第 3 步:确定决策目标的决策权重。文中均衡考虑 6 个决策目标的重要性,认为 6 个决策目标的重要性相同,权重均设置为 0.166。

第 4 步:求决策目标效果样本矩阵。根据表 5 数据得出目标效果样本矩阵如下:

$$U^k = u_{ij}^k = \begin{bmatrix} u_{11}^{(1)} & u_{12}^{(1)} & u_{13}^{(1)} & u_{14}^{(1)} \\ u_{21}^{(2)} & u_{22}^{(2)} & u_{23}^{(2)} & u_{24}^{(2)} \\ u_{31}^{(3)} & u_{32}^{(3)} & u_{33}^{(3)} & u_{34}^{(3)} \\ u_{41}^{(4)} & u_{42}^{(4)} & u_{43}^{(4)} & u_{44}^{(4)} \\ u_{51}^{(5)} & u_{52}^{(5)} & u_{53}^{(5)} & u_{54}^{(5)} \\ u_{61}^{(6)} & u_{62}^{(6)} & u_{63}^{(6)} & u_{64}^{(6)} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.56 & 0.33 & 0.38 \\ 0.81 & 0.91 & 0.68 & 0.76 \\ 0.50 & 0.60 & 0.40 & 0.30 \\ 0.36 & 0.45 & 0.22 & 0.23 \\ 0.64 & 0.75 & 0.59 & 0.46 \\ 16 & 22 & 11 & 13 \end{bmatrix}$$

第 5 步:设定目标效果临界值。临界值的设置主要是为目标效果样本矩阵的去量纲化作准备。其中,剪切强度、拉拔强度、渗水压力、老化后的剪切强度、老化后的拉拔强度均为效益型目标,效益型目标越大越好,临界值分别设置为: $u_{i_0j_0}^{(1)} = 0.3; u_{i_0j_0}^{(2)} = 0.6; u_{i_0j_0}^{(3)} = 0.3; u_{i_0j_0}^{(4)} = 0.2; u_{i_0j_0}^{(5)} = 0.4$,材料经济为成本型目标,成本型目标越小越好,临界值设置为 $u_{i_0j_0}^{(6)} = 22$ 。

第 6 步:求效果测度矩阵。测度矩阵是决策目标效果样本矩阵经过量纲化处理后的矩阵,根据效益型目标

效果函数测度函数公式: $r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{ij}^{(k)} - u_{i_0j_0}^{(k)}}{\max_i \max_j \{u_{ij}^{(k)}\} - u_{i_0j_0}^{(k)}}$,

成本型目标效果函数测度函数公式: $r_{ij}^{(k)} = \frac{u_{i_0j_0}^{(k)} - u_{ij}^{(k)}}{u_{i_0j_0}^{(k)} - \min_i \min_j \{u_{ij}^{(k)}\}}$,并结合步骤 5 设定的目标效果

临界值,对效果样本矩阵 U^k 进行效果测度矩阵计算。测度效果矩阵如下:

$$R^k = r_{ij}^k = \begin{bmatrix} r_{11}^{(1)} & r_{12}^{(1)} & r_{13}^{(1)} & r_{14}^{(1)} \\ r_{21}^{(2)} & r_{22}^{(2)} & r_{23}^{(2)} & r_{24}^{(2)} \\ r_{31}^{(3)} & r_{32}^{(3)} & r_{33}^{(3)} & r_{34}^{(3)} \\ r_{41}^{(4)} & r_{42}^{(4)} & r_{43}^{(4)} & r_{44}^{(4)} \\ r_{51}^{(5)} & r_{52}^{(5)} & r_{53}^{(5)} & r_{54}^{(5)} \\ r_{61}^{(6)} & r_{62}^{(6)} & r_{63}^{(6)} & r_{64}^{(6)} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.692 & 1 & 0.115 & 0.308 \\ 0.677 & 1 & 0.258 & 0.516 \\ 0.667 & 1 & 0.333 & 0 \\ 0.640 & 1 & 0.080 & 0.120 \\ 0.686 & 1 & 0.543 & 0.171 \\ 0.545 & 1 & 0.818 & \end{bmatrix}$$

第 7 步:计算综合效果测度矩阵。根据公式 $r_{ij} =$

$$\sum_{k=1}^4 \eta_k \cdot r_{ij}^{(k)}, \text{计算综合效果测度矩阵。}$$

$$R = [r_{11} \quad r_{12} \quad r_{13} \quad r_{14}] = [0.648 \ 6 \quad 0.830 \ 0 \quad 0.386 \ 6 \quad 0.320 \ 9]$$

第 8 步:决策。由第 7 步的计算结果,得到各防水材料的靶心距离,如表 6 所示。

表 6 各防水材料的靶心距离

SBS 改性 沥青	环氧沥青	SBR 改性 乳化沥青	新型丙烯酸酯 基防水材料
0.648 6	0.830 0	0.386 6	0.320 9

由表 6 可知:4 种防水黏结层材料中,环氧沥青的综合性能最优,SBS 改性沥青次之,SBR 改性乳化沥青和新型丙烯酸酯基防水材料的综合性能相当,均劣于环氧沥青和 SBS 改性沥青。将优选出的最佳防水材料应用于海南某高速公路水泥混凝土桥面防水黏结层,2016 年通车至今路用性能良好,层间未出现因防水层失效而引起的剪切、推移等破坏。

4 结论

(1) 剪切强度和拉拔强度反映了桥面防水层层间力学性能;随着试验温度的升高,防水黏结层材料层间力学性能逐步降低,桥面防水黏结层对温度的依赖性较大。随着水压值的增大,各防水材料的防水性能逐步降低,环氧沥青的防水性能最优,新型丙烯酸酯基防水材料的防水性能最差。老化对防水黏结层材料的层间强度有显著影响,环氧沥青的耐老化性能最优。

(2) 水泥混凝土桥面防水黏结层材料设计时,应着重考虑外界环境温度和水分对防水黏结层材料层间力学性能和防水性能的影响。

(3) 通过多目标加权灰靶决策模型,得出环氧沥青的综合性能最优,可推荐作为依托工程混凝土桥面防水黏结层材料。将多目标加权决策模型应用于桥面防水材料的优选,能有效解决实际工程中防水材料在性能指标了解不全面的情况下材料的选择问题,使选择结果更科学、合理。

参考文献:

- [1] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014(1).
- [2] 黎超尘, 曾国东, 黄红明. 奇龙大桥钢桥面铺装质量控制与防水抗滑层的应用研究[J]. 中外公路, 2019(1).
- [3] 鲍传富, 袁明园, 虞将苗, 等. 基于层间剪切试验的桥面防水黏结层性能评价研究[J]. 公路, 2016(11).
- [4] 赵彬强, 李俊. 植石混凝土桥面沥青铺装层间抗剪特性[J]. 中外公路, 2018(4).
- [5] 李成成. 高寒地区桥面铺装混凝土裂缝原因分析与解决措施[J]. 施工技术, 2018(S4).
- [6] 孙建邦, 陈辉强, 方源仁, 等. 移动荷载下桥面防水黏结层剪应力有限元分析[J]. 中外公路, 2019(1).
- [7] 李湘锋, 姚丁, 姚佳良, 等. 水性渗透型防水剂在桥面防水工程中应用研究[J]. 公路工程, 2015(4).
- [8] 张争奇, 陶晶, 张思桐. 桥面铺装环氧沥青防水黏结层性能试验与评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011(4).
- [9] 马融, 陈飞. ERS 钢桥面铺装病害调研及原因分析[J]. 中外公路, 2019(3).
- [10] 汪展翅, 燕平, 易卫锋, 等. 新型水泥混凝土桥面防水层性能试验研究[J]. 公路, 2018(11).
- [11] 万晨光, 申爱琴, 赵学颖, 等. 基于综合性能的桥面铺装防水黏结层灰靶决策[J]. 建筑材料学报, 2017(3).
- [12] 魏柱, 周志刚, 邓长清, 等. 不同水泥混凝土桥面沥青铺装防水黏结层性能分析[J]. 公路, 2018(9).
- [13] 赵桢远, 陈馥利, 刘国鹏. 钢桥面铺装防水黏结层的材料选择与分析[J]. 公路, 2017(3).
- [14] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004(2).
- [15] 刘思峰, 袁文峰, 盛克勤. 一种新型多目标智能加权灰靶决策模型[J]. 控制与决策, 2010(8).
- [16] 高彩云, 崔希民. 基于多因素加权灰靶决策模型的滑坡灾害危险性评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016(2).