

基于正交试验的乳化沥青冷再生混合料养生条件研究

杨继¹, 张鹏^{2,3}, 陈楚鹏^{2,3}

(1. 广东省高速公路有限公司, 广东 广州, 510100; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州, 510420;
3. 广东交科技术研发有限公司, 广东 广州, 510550)

摘要: 为探究养生时间、温度、湿度等条件对乳化沥青冷再生混合料的敏感性, 优化乳化沥青冷再生混合料养生方案, 设计了 $L_9(3^4)$ 正交试验, 以马歇尔稳定性和劈裂强度为评价指标, 分析了养生时间、养生温度、养生湿度等因素对乳化沥青冷再生混合料力学性能的影响。研究结果表明, 各因素对乳化沥青冷再生混合料马歇尔稳定度的影响程度从高到低为养生湿度、养生时间、养生温度, 对劈裂强度的影响程度从高到低为养生温度、养生湿度、养生时间; 最佳养护条件为养护温度为 60°C 、养护湿度 30% RH、养护时间 3d 以上。研究结论经开阳高速公路工程验证, 可为乳化沥青冷再生技术的推广应用提供参考。

关键词: 道路工程; 乳化沥青冷再生混合料; 养生条件; 正交试验

中图分类号: U414

文献标识码: A

The Study on Curing Conditions of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture Based on Orthogonal Test

YANG Ji¹, ZHANG Peng^{2,3}, CHEN Chupeng^{2,3}

(1. Guangdong Provincial Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510100, Guangdong, China;
2. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China;
3. Guangdong Jiaoke Technology R&D Co., Ltd., Guangzhou 510550, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the sensitivity of curing time, temperature, humidity and other conditions to emulsified asphalt cold recycled mixture, and optimize the emulsified asphalt cold recycled mixture curing scheme, in this paper, the orthogonal test is designed, and the Marshall stability and splitting strength are used as the evaluation indexes. The effects of curing time, curing temperature, curing humidity and other factors on the mechanical properties of emulsified asphalt cold recycled mixture are analyzed. The results show that the order of influence of various factors on Marshall stability of emulsified asphalt cold recycled mixture is curing humidity > curing time > curing temperature, and the order of influence on splitting strength is curing temperature > curing humidity > curing time. The optimum curing conditions are curing temperature of 60°C , curing humidity of 30 % RH and curing time of more than 3 days. The research conclusion is verified by Kaiyang Expressway project, which provides reference for the popularization and application of emulsified asphalt cold recycling technology.

Key words: road engineering; emulsified asphalt cold recycled mixture; curing conditions; orthogonal test

乳化沥青冷再生混合料是由 RAP 料 (reclaimed asphalt pavement, 再生沥青混合料)、乳化沥青、新集料、水泥以及水等组成的混合料, 具有工艺

简便、再生混合料性能良好、能耗低、污染小等特点, 通常用于高等级公路的中、下面层或基层建设过程中^[1]。然而, 由于乳化沥青冷再生混合

收稿日期: 2024-02-23

作者简介: 杨继, 工程师, 硕士, 研究方向为高速公路建设与管理

基金项目: 广东省省级科技计划项目 (编号: 2021B1111610002)

料的组分较为复杂，成型养生工艺尚不统一，导致其存在早期强度不足，路用性能差等问题，严重影响冷再生路面的使用寿命与应用效果^[2]。

有学者对此展开了研究，廖晨曦等研究了养生时间对乳化沥青冷再生混合料性能的影响，认为混合料的合理养护时间应该在 3 d 以上^[3-4]。沈安琪模拟了不同的降雨量对冷再生混合料的路用性能影响，发现降雨量与混合料劈裂强度成反比，建议在应用实施冷再生的过程中注意气候环境，尽量选择旱季施工^[5]。徐世法研究了不同养生条件下改性乳化沥青混合料劈裂强度随养生时间的变化规律，发现养生条件的改变仅影响混合料的强度增长速率和养生时间，但对其强度增长趋势及最终力学强度基本无影响^[6]。目前，相关研究多集中于单一养生条件下的乳化沥青冷再生混合料性能分析，对多因素耦合作用下乳化沥青冷再生混合料养生条件的交互作用研究较少。

本文为探究最佳的乳化沥青冷再生混合料养生条件，设计了 $L_9(3^4)$ 的正交试验方案。通过马歇尔稳定度试验与劈裂强度试验，分析养生温度、养生湿度、养生时间等因素对混合料强度性能的交互影响作用，比选得出最佳养护条件组合，研究成果可为乳化沥青冷再生的养生方式及上部结构铺筑时机提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

RAP 料来自广东某高速公路改扩建项目，规格分成 0 ~ 5 mm、5 ~ 10 mm 和 10 ~ 30 mm 三档，主要技术指标见表 1。新集料选择石灰岩碎石，粒径范围 10 ~ 20 mm，RAP 及天然集料的检测结果均能满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019) 的要求。乳化沥青主要技术指标见表 2，水泥材料选择 PO 42.5 级普通硅酸盐水泥，主要技术指标见表 3。

表 1 RAP 料主要技术指标

材料	检测项目	试验结果
RAP 中旧沥青	25 ℃ 针入度/(0.1 mm)	21.2
	软化点/℃	62.5
	15 ℃ 延度/cm	5.6
RAP 中旧集料	0 ~ 4.75 mm 油石比/%	4.9
	4.75 ~ 9.5 mm 油石比/%	3.2
	9.5 ~ 26.5 mm 油石比/%	2.5

表 2 乳化沥青主要技术指标

检测项目	检测结果	技术要求
破乳速度	慢裂	慢裂
粒子电荷	阳离子	阳离子
恩格拉黏度	6.76	2 ~ 30
筛上剩余量 (1.18 mm 筛)/%	62.8	≥62
与粗集料的黏附性，裹附面积占比	≥2/3	≥2/3
与粗、细集料拌合试验	均匀	均匀
溶解度/%	≥98.8	≥97.5
储存稳定性	1 d	0.6% ≤1%
	5 d	0.9% ≤5%

表 3 水泥主要技术指标

检测项目	检测结果	技术要求
细度 (80 μm) /%	3.3	≤10
比表面积/(m ² · kg ⁻¹)	390	300 ~ 450
初凝试件/min	180	≥45
终凝试件/min	260	≤600
3d 抗折强度/MPa	4.8	≥4.0
3d 抗压强度/MPa	26.7	≥22.0

1.2 试件制备

以 3.8% (质量分数，下同) 乳化沥青用量，1.8% 水泥掺量，按照如表 4 所示级配配料。先常温击实 50 次，在不同的养护温度 (20 ℃、40 ℃、60 ℃) 和养护湿度 (30% RH、60% RH、90% RH) 条件下养护 1 d、3 d、5 d 后，再次击实 25 次，并在常温冷却 12 h 后脱模成型马歇尔试件。

表 4 冷再生沥青混合料合成级配

筛孔尺寸	掺配比例/%	筛孔尺寸/mm							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
10 ~ 20 mm 碎石	12.0	100.0	100.0	93.8	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1
10 ~ 30 mm RAP 料	30.2	100.0	100.0	81.5	1.6	0.7	0.3	0.2	0.1
5 ~ 10 mm RAP 料	11.0	100.0	100.0	100.0	96.5	5.4	0.6	0.4	0.2
0 ~ 5 mm RAP 料	45.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.1	57.3	12.6	2.6
水泥	1.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.1
级配上限	—	—	100	100	70	55	40	16	8
级配下限	—	—	100	80	50	25	20	3	2
合成级配/%	—	100.0	100.0	93.4	58.1	46.7	27.8	7.6	3.0

1.3 混合料路用性能试验

在道路工程中,通常将马歇尔稳定度作为研究混合料强度变化规律的指标。而劈裂强度更能表征道路铺装层抵抗车辆荷载破坏的水平,常用于研究乳化沥青冷再生混合料强度变化规律^[7]。因此,为从室内试验角度探究养生条件对乳化沥青冷再生混合料早期强度发展规律的影响,采用混合料的马歇尔稳定度与劈裂强度作为评价指标,研究养生时间、养生温度、养生湿度等条件对乳化沥青冷再生混合料性能的影响。

2 正交试验设计与分析方法

2.1 正交试验设计

选取养生时间、养生温度、养生湿度3个因素,每个因素设置3个影响水平,影响因素及影响水平见表5。以马歇尔试验和劈裂试验作为评价指标,正交试验方案 $L_9(3^4)$ 见表6。

表5 正交试验表

因素	养生时间/d	养生温度/℃	空列	养生湿度/% RH
水平1	1	20	2	30
水平2	3	40	4	60
水平3	5	60	6	90

表6 $L_9(3^4)$ 试验方案

试验号	养生时间/d	养生温度/℃	空列	养生湿度/% RH
1	1	20	2	30
2	1	40	4	60
3	1	60	6	90
4	3	20	4	90
5	3	40	6	30
6	3	60	2	60
7	5	20	6	60
8	5	40	2	90
9	5	60	4	30

2.2 极差分析法

对于每个因素水平的试验结果 x_i ,计算试验指标和 T :

$$T_i = \sum x_i \quad (1)$$

通过比较 T 的大小来判断每个因素的优水平。若试验指标越大越好,则最大值 T 对应的水平 i 为优水平;若试验指标越小越好,则最小值 T 对应的水平 i 为优水平。计算每个因素水平的试验指标最大值与最小值之差,即极差 R 。

$$R = \max(T_i) - \min(T_i) \quad (2)$$

极差越大说明该因素对指标的影响程度越大,从而可确定影响因素的主次。

2.3 方差分析法

针对本文的 $L_9(3^4)$ 正交表,采用方差分析法时,先计算总偏差平方和SST与总自由度 f_T :

$$SST = \sum_{i=1}^9 \sum_{t=1}^2 x_i^2 - \frac{T^2}{N_s}, T = \sum_{i=1}^9 \sum_{t=1}^2 x_i, f_T = 8 \quad (3)$$

计算各列偏差平方和 SS_i 与自由度 f_i :

$$SS_j = 3 \sum_{i=1}^3 \left(\frac{T_i}{3} - \bar{x} \right)^2 (j = 1, 2, 3, 4), f_i = 2 \quad (4)$$

计算误差平方和SSE与自由度 f_e :

$$SSE = SST - \sum_{j=1}^4 SS_j, f_e = f_T - \sum_{j=1}^4 f_j \quad (5)$$

计算方差与 F 值,并进行显著性检验。

$$V_j = \frac{S_j}{f_j}, F_j = \frac{V_j}{V_e} \quad (6)$$

通常,对于显著水平 α ,取 $\alpha = 0.05$,若 $F_j > F_{0.05}(f_j, f_e)$,则认为因素对试验结果的影响是“显著”的;取 $\alpha = 0.01$,若 $F_j > F_{0.01}(f_j, f_e)$,则认为因素对试验结果的影响“高度显著”。

3 结果与讨论

3.1 马歇尔稳定度

按照表6试验方案进行9组马歇尔稳定度试验,马歇尔稳定度试验结果与极差、方差分析分别见表7、表8;马歇尔稳定度随各因素的变化趋势见图1。由表7及图1可知,马歇尔稳定度的 R_i 由大到小排序为 $R_C > R_A > R_B$, R_i 越大表明该因素对马歇尔稳定度的影响越大,因此养生湿度对混合料马歇尔稳定度的影响最大,养生时间的影响略小,养生温度的影响最低。同时,可知乳化沥青冷再生混合料养生时,混合料的马歇尔稳定度随养生时间的增加而增大,在1~3d内快速增加,而在3~5d时增速有所减缓;随养生温度的增加近似于线性增长;随养生湿度的增加而降低,在30%~60%RH范围内快速降低,在60%~90%RH时,稳定度缓慢减少。各影响因素的最优水平为 $C_1A_3B_3$ 或 $C_1A_2B_3$,即为养生湿度30%RH,养生时间为3d以上,养生温度为60℃。

表7中 R_C 最大,说明养生湿度是乳化沥青冷再生混合料养生时影响其性能的关键因素。这主要因为当混合料内部含水量增多时,将抑制乳化沥青的破乳和水泥水分反应的进行,导致冷再生

表 7 马歇尔稳定度试验结果与极差分析

试验号	养生时间 A/d	养生温度 B/℃	空列	养生湿度 C/% RH	马歇尔稳定度/kN
1	1	20	2	30	10.8
2	1	40	4	60	8.9
3	1	60	6	90	9.6
4	3	20	4	90	9.8
5	3	40	6	30	13.1
6	3	60	2	60	11.5
7	5	20	6	60	10.8
8	5	40	2	90	11.2
9	5	60	4	30	14.4
K1	29.3	31.4	33.5	38.3	
K2	34.4	33.2	33.1	31.2	
K3	36.4	35.5	33.5	30.6	
k1	9.8	10.5	11.2	12.8	
k2	11.6	11.1	11.0	10.4	
k3	12.1	11.8	11.2	10.2	
R	2.4	1.4	0.1	2.6	

因素主次 $C > A > B$

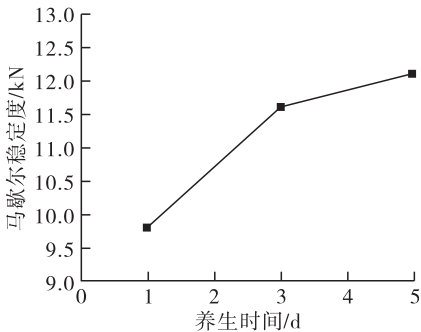
优方案 $C_1A_3B_3$ 或 $C_1A_2B_3$

表 8 马歇尔稳定度试验结果方差分析

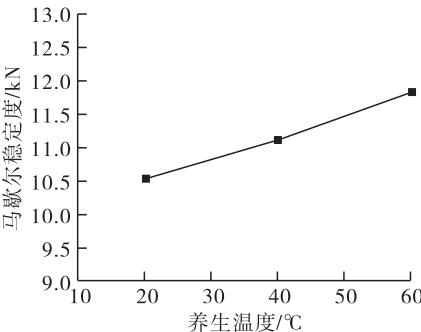
方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	F_{α}	显著性
养生时间 A/d	8.94	2	4.47	251.31		高度显著
养生温度 B/℃	2.82	2	1.41	79.19	$F_{0.05}(2,2) = 19.00$	显著
空列	0.04	2	0.02	1.00	$F_{0.01}(2,2) = 99.00$	—
养生湿度 C/% RH	12.23	2	6.11	343.94		高度显著

混合料内部不能形成系统的空间网状结构和良好的整体性能，从而降低了混合料性能。

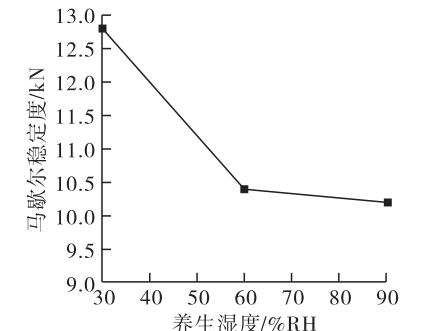
乳化沥青冷再生混合料不同养生条件下的马歇尔稳定度试验结果方差分析如表 8 所示。 F 值表征因素对正交试验结果影响的显著性， F 值越大，影响越显著。表 8 中 F 值大小排序为 $F_C < F_A < F_B$ ，表明各养生因素对混合料马歇尔稳定度的影响程度排序为养生湿度 > 养生时间 > 养生温度。同时， $F_A > F_{0.01}(2,2)$ ， $F_C < F_{0.01}(2,2)$ ，表示养生时间和养生湿度对于乳化沥青冷再生混合料马歇尔稳定度指标的影响程度为高度显著； $F_{0.05}(2,2) < F_B < F_{0.01}(2,2)$ ，养生温度对混合料马歇尔稳定度的影响程度为显著。



(a) 养生时间的影响



(b) 养生温度的影响



(c) 养生湿度的影响

图 1 马歇尔稳定度随因素变化趋势

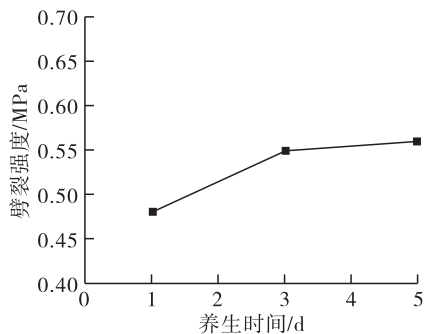
3.2 劈裂强度

按照表 6 试验方案进行 9 组劈裂强度试验，劈裂强度试验结果与极差、方差分析分别见表 9、表 10；劈裂强度随各因素变化趋势见图 2。由表 9 可知，劈裂强度的 R_i 由大到小排序为 $R_B > R_C > R_A$ ，因此养生温度对混合料劈裂强度的影响最大，养生湿度对混合料劈裂强度的影响次之，养生时间对混合料劈裂强度的影响最低。各影响因素的最优水平为 $B_3C_1A_3$ 或 $B_3C_1A_2$ ，即养生温度为 60℃，养生湿度 30% RH，养生时间大于 3 d。同时，由图 2 可知，养生温度与劈裂强度呈正相关，养生湿度与劈裂强度呈负相关，而劈裂强度随养生时间的增加先快速增长，在 3 d 后趋于稳定。

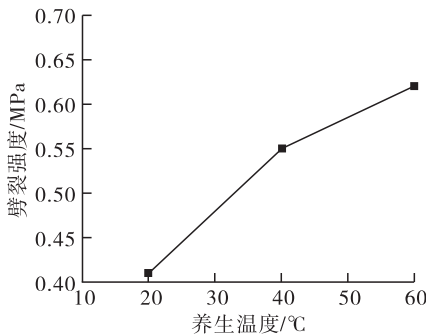
表 9 中 R_B 最大，说明养生温度是乳化沥青冷

表 9 劈裂强度试验结果与极差分析					
试验号	养生时间 A/d	养生温度 B/℃	空列	养生湿度 C/% RH	劈裂 强度/MPa
1	1	20	2	30	0.42
2	1	40	4	60	0.52
3	1	60	6	90	0.51
4	3	20	4	90	0.32
5	3	40	6	30	0.67
6	3	60	2	60	0.65
7	5	20	6	60	0.49
8	5	40	2	90	0.47
9	5	60	4	30	0.71
K1	1.45	1.23	1.54	1.8	
K2	1.64	1.66	1.55	1.66	
K3	1.67	1.87	1.67	1.30	
k1	0.48	0.41	0.51	0.60	
k2	0.55	0.55	0.52	0.55	
k3	0.56	0.62	0.56	0.43	
R	0.07	0.21	0.04	0.17	
因素主次			B>C>A		
优方案			B ₃ C ₁ A ₃ 或 B ₃ C ₁ A ₂		

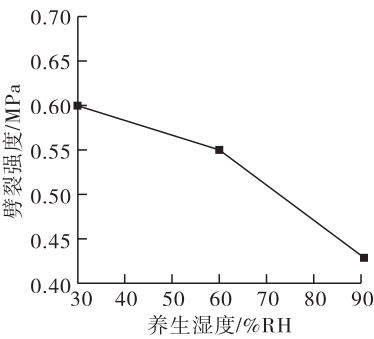
再生混合料养生时,影响其劈裂强度的关键因素。这主要因为在相对低温养生环境下,冷再生混合料内部水分蒸发含量较低,乳化沥青破乳速率和水泥水化反应速率均较低,造成混合料内部沥青胶浆和水泥沥青黏结料数量较低,不足以固结再生骨料,在荷载作用下,再生骨料易于发生“相对滑移”,造成冷再生混合料力学性能不佳。



(a) 养生时间的影响



(b) 养生温度的影响



(c) 养生湿度的影响

图 2 劈裂强度随因素变化趋势

表 10 劈裂强度试验结果方差分析						
方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	F_{α}	显著性
养生时间 A/h	0.009 5	2	0.004 7	2.72		不显著
养生温度 B/℃	0.071 0	2	0.035 5	20.34	$F_{0.05}(2,2) = 19.00$	显著
空列	0.003 5	2	0.001 7	1.00	$F_{0.01}(2,2) = 99.00$	—
养生湿度 C/% RH	0.044 4	2	0.022 2	12.71		不显著

乳化沥青冷再生混合料不同养生条件下的劈裂强度试验结果方差分析如表 10 所示。 F 值大小排序为 $F_B < F_C < F_A$, 表明各养生因素对混合料劈裂强度的影响程度从高到低排序为养生温度>养生湿度>养生时间。 $F_B > F_{0.05}(2,2)$, 养生温度对混合料劈裂强度的影响程度为显著; $F_C < F_{0.05}(2,2)$, $F_A < F_{0.05}(2,2)$, 养生湿度与养生时间对混合料劈裂强度的影响程度为不显著。

因此,基于以上研究,对于乳化沥青冷再生混合料而言,其最佳养护条件为养护温度为 60℃、养护湿度 30% RH、3 d 以上的养护时间。

4 性能验证

4.1 室内试验验证

按照本文所述的试件制备方法进行制件,并按照养护温度为 60℃、养护湿度 30% RH、养护时间 3 d 的养生条件进行养生。复测最佳养护条件下乳化沥青冷再生混合料的马歇尔稳定度与劈裂强度,试验结果如表 11 所示。

表 11 混合料试验结果			
试验项目	正交试验结果	复测试验结果	技术要求
空隙率/%	—	8.45	6~12
马歇尔稳定度/kN	14.4	14.1	≥6
劈裂强度/MPa	0.71	0.74	0.7

由表 11 可知,复测结果与正交试验结果接近,实验的误差较小。试验结果表明,在最佳养护条件下,乳化沥青冷再生混合料的马歇尔稳定度与劈裂强度指标均满足技术要求。

4.2 工程验证

依托沈阳至海口国家高速公路广东开平至阳江段(开阳高速)改扩建项目进行现场工程验证,开阳高速旧路铣刨的废旧沥青混合料经处理后,加入乳化沥青、新集料形成冷再生乳化沥青混合料铺筑柔性基层,路面结构如图 3 所示。

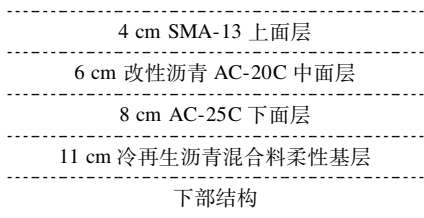
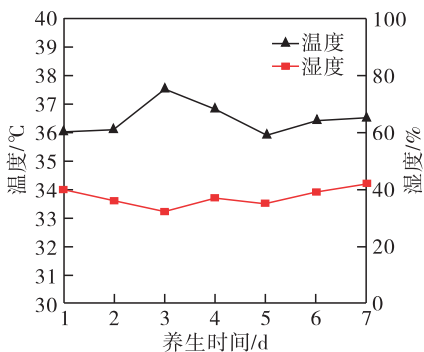
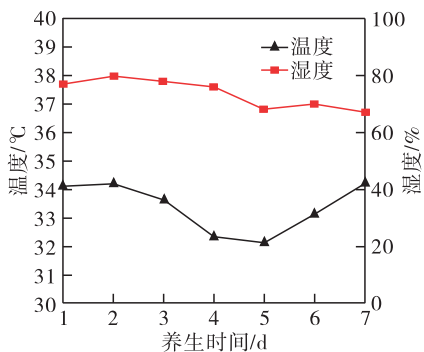


图 3 开阳高速路面结构示意图

在开阳高速公路 K3184 + 420 ~ K3184 + 510 (试验段 a)、K3184 + 510 ~ K3184 + 580 (试验段 b) 两段的左幅路段铺筑试验段,再在铺筑后的 2 ~ 7 d 分别取芯,并检测芯样的劈裂强度。在 K3184 + 510 ~ K3184 + 580 试验段养生期内有降雨,监测养生期内环境情况见图 4,芯样性能检测结果见表 12。



(a) K3184 + 420 ~ K3184 + 510 试验段 a



(b) K3184 + 510 ~ K3184 + 580 试验段 b

图 4 养生期内环境情况

表 12 试验段芯样检测结果

取芯 时间/d	试验段 a		试验段 b	
	试验段	劈裂强度/MPa	试验段	劈裂强度/MPa
2	K3184 + 420 距边 6 m	0.56	K3184 + 520 距边 3 m	—
3	K3184 + 430 距边 3 m	0.70	K3184 + 530 距边 6 m	0.51
4	K3184 + 440 距边 4 m	0.75	K3184 + 540 距边 4 m	0.71
5	K3184 + 460 距边 5 m	0.79	K3184 + 550 距边 4 m	0.74
6	K3184 + 480 距边 3 m	0.81	K3184 + 560 距边 3 m	0.78
7	K3184 + 500 距边 6 m	0.80	K3184 + 570 距边 6 m	0.78
劈裂强度设计要求/MPa			≥0.7	

由图 4 可知,试验段 a 的环境温度约为 36℃,湿度在 40% RH 左右;而试验段 b 在养护期内有降雨,环境温度在 32 ~ 35℃之间,湿度大概稳定在 80% RH。通过表 12 中芯样的劈裂强度检测结果可知,随着养护时间的增加,芯样的劈裂强度均先快速增长后缓慢增长并趋于稳定。在试验段 a 中,养生时间大于 3 d 时,劈裂强度达到设计要求;在试验段 b 中,2 d 未能取出芯样,4 d 的劈裂强度才达到设计要求。检测结果表明,在养生温度相似的情况下,养生湿度会对冷拌料的强度增长速度和养生完成时间造成影响。考虑到广东省多雨气候,在应用实施冷再生混合料的过程中应注意气候环境,尽量选择旱季施工。

5 结论

(1) 各因素对乳化沥青冷再生混合料马歇尔稳定度的影响程度从高到低为养生湿度、养生时间、养生温度;对劈裂强度的影响程度从高到低为养生温度、养生湿度、养生时间。

(2) 乳化沥青冷再生混合料的马歇尔稳定度与劈裂强度随因素的变化趋势相似,均与养生温度呈正相关,与养生湿度呈负相关,随养生时间的增加而先快速增长,后缓慢上升。

(3) 综合马歇尔稳定度与劈裂强度指标,比选出的室内试验最佳养护条件为养护温度 60℃、养护湿度 30% RH、养护时间 3 d 以上。

(4) 经工程验证,在湿热地区的养生时间通常在 3 d 以上;养生温度相近时,养生湿度会对冷拌料的强度增速和养生完成时间产生一定影响。

(下转第 75 页)

3.2 过程评价结果

通过使用加权平均方法,可以将高速公路机电化系统养护评估的最终结果处理为0到100的分数。为了表示必要程度,选择了“非常差”“差”“中等”“良好”和“非常好”5个等级,并将其作为备选集合 V 。因此,最终结果可以通过以下公式进行处理。

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = (20, 40, 60, 80, 100) \quad (13)$$

$$v = (\sum_{j=1}^5 b_j \cdot v_j) / (\sum_{j=1}^5 b_j) \quad (14)$$

例如,若最终结果 $v=95$,那么机电化系统的运行状态接近于非常好;若 $v=65$,则接近于中等,表示需要对某些方面进行中等程度的检查。

4 结论

本研究采用模糊层次分析法为高速公路机电系统养护评估提供了一种创新方案,克服了传统层次分析法在应对复杂、多准则问题时的局限性,有效应对了评估过程中存在的复杂性与模糊性挑战。通过Delphi法收集并量化专家意见,结合实际养护数据,建立了具有实用价值的综合评估模型;以广东省某高速公路为案例,较好地解决了传统评估方法中容易出现的模糊判断与矛盾问题。

该方法的多准则评估特性使其在其他领域具有潜在应用价值,如城市交通系统中的流量管理和设施维护,工业自动化中的设备维护和故障预

测,能源管理中的设备监控与优化决策,以及医疗决策支持中的诊断与资源分配,展现出广泛的推广前景。

参考文献:

- [1]王鑫涛.高速公路机电系统分析[J].黑龙江科学,2022,13(6):88-90.
- [2]魏会峰.高速公路机电养护管理信息系统设计与实现[J].科技创新与应用,2024,14(22):116-119.
- [3]门昌灏.高速公路机电系统设备管理问题及优化方法分析[J].中国高新科技,2023(6):62-64.
- [4]张智超.高速公路机电系统运维养护管理[J].交通世界,2022(Z1):223-224.
- [5]王振祥,邵宗翰.基于无线射频的高速公路机电设备运行故障智能识别方法[J].自动化与仪器仪表,2019(11):52-55.
- [6]胡明晖.基于物联感知技术的高速公路机电设施设备精细化管理系统[J].海峡科技与产业,2019(12):51-53.
- [7]刘诗瀚.高速公路机电工程质量控制要点[J].广东公路交通,2020,46(4):36-38.
- [8]段国钦,孙穗.高速公路机电系统运行与维护手册[M].北京:人民交通出版社,2006:68-70.
- [9]孙洋,俞俊平,戴红涛,等.基于模糊层次分析法的公路隧道病害危害程度评价[J].南昌工程学院学报,2022,41(6):23-28.
- [10]朱杰.高速公路隧道机电设施养护检测技术[J].住宅与房地产,2019(34):195.
- [11]周晓旭,王玉强,白磊.高速公路机电设施运营期养护质量评价方法研究[J].山西交通科技,2019(5):92-95.

(上接第6页)

参考文献:

- [1]杨普新.养生条件对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响[J].中外公路,2023,43(4):250-255.
- [2]王梦浩,王朝辉,高璇,等.公路路面乳化沥青冷再生技术综述[J].材料导报,2023,37(7):50-60.
- [3]廖晨曦,苏敏,陈楚鹏.养生时间对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J].广东交通职业技术学院学报,2022,21(3):1-4,16.
- [4]刘秘强,韦万峰.养生时间对冷再生混合料路用性能的影响研究[J].西部交通科技,2023(6):53-55.
- [5]沈安琪.广东地区高速公路改扩建工程乳化沥青厂拌冷再生技术应用研究[J].广东交通职业技术学院学报,2021,20(1):29-32,50.
- [6]徐世法,房聪,张绍源,等.养生条件对冷拌冷铺改性乳化沥青混合料强度增长规律的影响研究[J].北京建筑大学学报,2022,38(4):24-31.
- [7]何伟南.乳化沥青冷再生混合料劈裂强度影响因素分析[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(8):73-76.