

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.10.001

乳胶水泥砂浆灌入式沥青混合料性能试验研究

钟科¹, 刘国强², 魏小皓³, 徐立²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 重庆建工集团股份有限公司, 重庆 400000;
3. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要:为实现超刚柔并济的半柔性路面的设计与应用,对乳胶水泥砂浆的性能与乳胶水泥砂浆灌入复合式试件进行全面试验评价。首先选用等级42.5的硅酸盐水泥,采用流动度、抗折强度与抗压强度试验,对乳胶水泥砂浆的配比进行了试验研究,确定乳胶水泥砂浆质量配比为 $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{细砂}):m(\text{矿粉}):m(\text{乳胶粉})=720:1\,000:497:249:30$ 。同时选用SBS改性沥青与相应级配的石灰岩集料,以肯特堡飞散、马歇尔试验对大孔隙沥青混合料的配比组成进行了研究,得出了乳胶水泥砂浆和沥青混合料的最佳配合比;而后采用马歇尔试验、车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂性能、渗透性试验和摆式摩擦系数试验,对未灌浆的大孔隙沥青混合料、灌浆养生7 d和28 d的乳胶水泥砂浆灌入式沥青混合料的性能进行试验评价。试验结果显示,乳胶水泥砂浆的灌入可以有效提升沥青混合料的强度、高温抗车辙、水稳定性、摩擦性能,并且随着养生时间的增长,灌入式试件的强度会提升。同时,乳胶改性剂的添加能够较好地改善水泥砂浆的灌入对混合料低温变形能力的影响。

关键词:道路工程; 乳胶; 灌入; 水泥砂浆; 沥青混合料; 性能

中图分类号: U414.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)10-0001-05

Experimental Study on Asphalt Mixture with Latex Modified Cement Mortar

ZHONG Ke¹, LIU Guo-qiang², WEI Xiao-hao³, XU Li²

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
2. Chongqing Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400000, China;
3. ITS Research Center, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to realize the design and application of semi-flexible pavement with super softness and hardness, the performance of latex cement mortar and composite specimens grouted with latex cement mortar is evaluated by test. First, grade 42.5 Portland cement is selected, and the fluidity test, bending test and compression test are conducted on the mixing proportion of latex modified cement mortar, and the mixing proportion of latex modified cement mortar is water : cement : fine sand : mineral powder : latex = 720 : 1 000 : 497 : 249 : 30. Meanwhile, SBS modified asphalt and corresponding graded limestone aggregate are selected. The Cantabro test and Marshall test are carried on to study the mix proportion of open graded asphalt mixture, and the optimal mix proportion of latex cement mortar and asphalt mixture is obtained. The Marshall test, rutting test, low-temperature bending test, freeze-thaw indirect tension test, permeability test and pendulum friction coefficient test are conducted to experimental evaluate the performance of open-graded asphalt mixture and asphalt mixture with latex modified cement mortar after 7 d and 28 d curing. The test result shows that (1) the pouring of latex cement mortar can effectively improve the strength, rutting, anti-moisture and friction performance of asphalt mixture, the strength of asphalt mixture specimen with latex modified cement

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408280); 中国博士后科学基金项目(2017M610846)

作者简介: 钟科(1982-), 男, 江西景德镇人, 博士, 副研究员。(41228007@qq.com)

mortar increases with the increase of curing time; (2) adding the latex can improve the low-temperature performance of asphalt mixture with latex modified cement mortar better.

Key words: road engineering; latex; pouring; cement mortar; asphalt mixture; performance

0 引言

沥青路面在重载车辆和高温气候的双重作用下,容易出现高温永久变形和车辙病害。尽管水泥混凝土路面可以有效解决道路车辙问题,但是其本身也存在诸多难以克服的缺点,比如接缝设置复杂、养生时间长无法短期开放交通等^[1-6]。

乳胶水泥砂浆灌入式高性能沥青罩面是一项引进于美国陆军工程航运研究所(US Army Engineer Waterways Experiment Station)的研究成果,它是一种新型的罩面技术^[7-9]:首先铺筑空隙率在 20%~35%的级配沥青路面,而后在其表面撒布一定量的乳胶水泥砂浆,砂浆通过级配沥青路面的大孔隙渗透至内部,形成类似于水泥混凝土路面的结构。乳胶水泥砂浆灌入式高性能沥青罩面层具有以下特点^[10-13]:

(1) 具有水泥混凝土路面的高强度与抗高温变形的特性,可以解决沥青路面常见的高温变形病害;同时沥青混凝土和乳胶水泥砂浆均具有很好的抗裂特性,所以此罩面结构具有良好的抗开裂性能。

(2) 相比于水泥混凝土路面,具有更低造价与施工便利的优势。

(3) 由于水泥砂浆是直接灌入级配沥青路面之中,此类罩面形式具有沥青路面连续行车的优势,无水泥混凝土路面中的伸缩缝以及传力杆等复杂结构。

乳胶水泥砂浆灌入式高性能沥青罩面兼具沥青路面连续、抗开裂的特性以及水泥混凝土路面抗车辙的优势,加之其造价成本低、施工便利、可以快速开放交通,在美国的机场停机坪、坦克行车带以及公交停靠站等重载交通密集地带得以应用,效果良好^[14-18]。在此背景下,结合水泥混凝土高强特点以及沥青混凝土柔变、行车平顺特性,研究乳胶水泥砂浆灌入式沥青路面技术具有显著意义。

文中采用流动度、抗弯折与抗压强度试验对乳胶水泥砂浆性能进行测试,同时,对级配沥青混合料的路用性能进行评价,而后采用马歇尔试验、车辙试验以及小梁弯曲试验对乳胶水泥砂浆灌入复合式试件进行全面试验评价。

1 原材料

1.1 水泥

选用等级 42.5 的硅酸盐水泥,参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTJ E30—2005)中的有关方法进行检验,水泥强度试验结果如表 1 所示。

表 1 等级 42.5 的硅酸盐水泥水泥强度
Tab.1 Strength of grade 42.5 portland cement

水泥强度	3 d 抗压强度/MPa	3 d 抗折强度/MPa
测试结果	18.7	3.7
技术要求	≥17.0	≥3.5

1.2 乳胶水泥砂浆

水泥砂浆配制过程中,选用了等级 42.5 的硅酸盐水泥作为黏结剂,并采用石灰岩矿粉以及筛孔小于 1.18 mm 的特细砂进行混合,为了增加水泥砂浆的抗折性能,特别掺加了 LDM7300 型乳胶粉,研究过程中对乳胶水泥砂浆的流动度、抗折强度与抗压强度进行了性能评价,不同配比条件下乳胶水泥砂浆的各项性能测试指标及技术要求如表 2 所示。

表 2 不同质量配合比下乳胶水泥砂浆的性能测试结果
Tab.2 Test result of performance of latex modified cement mortar with different mass mixing ratios

质量配合比 (水:水泥:细砂:矿粉:乳胶粉)	流动度/ s	7 d 抗折 强度/MPa	7 d 抗压 强度/MPa
720:1 000:497:249:30	12.1	1.65	23.5
720:1 000:497:249:60	27.2	1.95	21.6
630:1 000:466:233:60	34.5	2.65	23.5
性能目标值	10~14	≥1.5	15~25

从表 2 可以看出,能综合满足流动度、抗折与抗压强度的乳胶水泥砂浆质量配比为 $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{细砂}):m(\text{矿粉}):m(\text{乳胶粉})=720:1\,000:497:249:30$ 。

1.3 沥青

试验选用 SBS 改性沥青,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行检验,沥青各项技术指标测试结果与技术要求见表 3。

表 3 SBS 沥青技术要求及检测结果
Tab. 3 Technical requirement and test result of
SBS modified asphalt

技术指标	SBS 沥青		试验方法
	检测结果	技术要求	
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s, 0.1 mm)	55	40 ~ 60	T0604
延度 (5 ℃, 5 cm/min) /cm	32	≥30	T0605
软化点 (环球法)/℃	65	≥55	T0606
弹性恢复 (25 ℃)/%	71	≥65	T0662
溶解度/%	99.3	≥99	T0607
闪点/℃	265	≥230	T0611
贮存稳定性/℃	1.5	≤2.5	T0661
RTFOT 薄膜 质量变化率/%	0.21	-1.0 ~ +1.0	T0610
加热试验 针入度比 (25 ℃)/%	67.3	≥60	T0604
残留物 残留延度 (5 ℃)/cm	24.3	≥20	T0605

1.4 集料及级配

试验集料选用轧碎的坚硬、粗糙有棱角的石灰岩碎石, 以充分发挥集料的嵌挤作用, 其粒径规格和质量要求均应符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 的规定。级配如表 4 所示。

表 4 级配设计组成
Tab. 4 Designed gradation

级配类型 (用料比)	通过筛孔 (mm) 质量百分率/%						
	19	13.2	4.75	2.36	0.6	0.3	0.075
规范上限	100	100	35	22	15	12	6
规范下限	100	95	10	5	4	3	1
规范中值	100	97.5	22.5	13.5	9.5	7.5	3.5
合成级配	100	97.5	22.5	16.9	9.7	7.2	3.7

1.5 最佳油石比

研究中采用析漏试验和肯特堡飞散试验对大孔隙沥青混合料的油石比进行研究, 确定出沥青混合料的最佳油石比为 3.2%, 其中试件空隙率为 29.3%, 析漏率为 0.03%, 飞散率为 11.38%, 马歇尔稳定度为

6.41 kN, 流值为 3.01 mm, 各项指标均满足排水沥青混合料技术要求。

2 乳胶水泥砂浆灌入式沥青混合料性能试验评价

2.1 马歇尔试验

为了评价乳胶水泥砂浆灌入式沥青混合料的强度性能, 采用马歇尔试验对灌浆前后的试件进行性能测试, 灌入后试件及其剖面图如图 1 所示。试验过程为: 将标准的马歇尔试件放入 60 ℃ 恒温水槽中浸泡 30 ~ 40 min, 而后采用马歇尔稳定仪对试件进行测试。试验结果如表 5 所示。

表 5 灌浆前后的马歇尔稳定度测试结果
Tab. 5 Marshall stability test result of asphalt mixture with and without latex modified cement mortar

试件类型	马歇尔稳定度/kN	流值/mm
灌浆前试件	6.41	3.01
灌浆后试件	标准养生 7 d	23.29
	标准养生 28 d	45.62

从图 1 可以看出, 乳胶水泥砂浆已完全灌入至大孔隙沥青混合料空隙之中, 形成密实的试件。表 5 试验结果显示, 采用乳胶水泥砂浆进行灌浆后的试件马歇尔强度要远大于未灌浆的大孔隙沥青混合料试件, 且强度要远大于 SBS 改性的 SMA 试件强度, 所以采用乳胶水泥砂浆进行灌浆的沥青混合料具有很高的强度性能。同时从试验数据可以看出, 随着养生时间的增加, 灌浆后试件的马歇尔稳定度会增加, 标准养生 28 d 后的马歇尔稳定度几乎为标准养生 7 d 的 2 倍, 这主要是因为灌浆试件中的水泥砂浆对试件强度的贡献。

2.2 车辙试验

为了评价混合料的高温稳定性能, 采用车辙试验进行评价, 试验规程按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052—2000) 进行, 试验结果如图 2 所示。

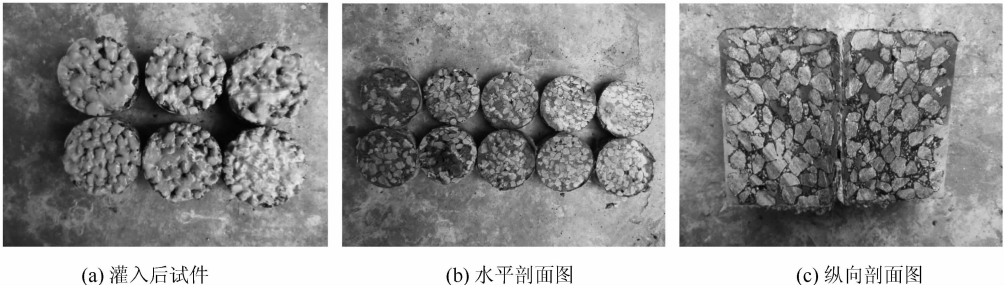


图 1 乳胶水泥砂浆灌入式试件表面及切面图片
Fig. 1 Surface and sectional photos of asphalt mixture with latex modified cement mortar

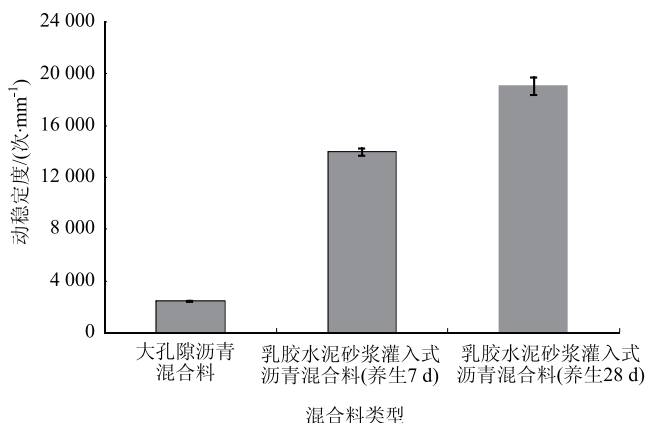


图2 不同混合料类型的车辙试验结果

Fig. 2 Rutting test result of different mixtures

从图2可以看出,灌浆后的试件比未灌浆的大孔隙沥青混合料的抗高温性能有很大提升,同时随着养生时间的增加,其动稳定度有一定程度的增加,说明水泥砂浆的灌入对沥青混合料的高温稳定性有很大帮助。

2.3 低温弯曲试验

本研究采用低温弯曲试验评价混合料的低温弯曲性能,试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052—2000)进行,试验温度为 -10°C ,加载速率为 50 mm/min ,试验结果如图3所示。

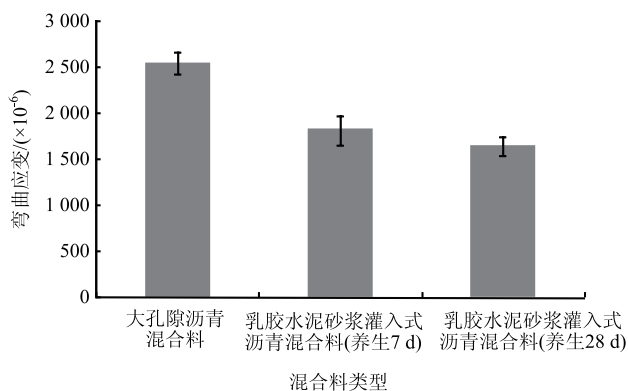


图3 不同类型混合料的低温弯曲试验结果

Fig. 3 Low temperature bending test result of different mixtures

从图3可以看出,灌浆后试件的低温弯曲应变比未灌浆试件的要小,表明水泥砂浆的灌入会影响路面的低温变形能力,主要是因为灌入的水泥砂浆抗压强度高而抗拉强度弱造成的。从其他文献可以看出,未掺入乳胶改性剂的水泥砂浆灌入式沥青混合料 -10°C 的弯曲应变为 $979\text{ }\mu\text{e}$,而本研究中掺入乳胶改性剂的时间弯曲应变为 $1\,653\text{ }\mu\text{e}$,说明乳胶改性剂的掺入在一定程度上较好地改善了水泥砂浆

灌入式试件的低温抗裂性能。

2.4 抗水损害能力

本研究结合 AASHTO T 283 与 ASTM D 7064 试验规程,进行冻融劈裂试验,采用残留强度比的指标对大孔隙混合料抗水损害性能进行评价。试验采用标准马歇尔试件,试件分为两组:一组在 23°C 水浴保温 2 h 后测定试件的间接拉伸强度;另一组试件,首先在 87.8 kPa 压力容器中抽真空 10 min ,而后浸泡水中放置 -18°C 冰箱 16 h ,再采用塑料套膜套住试件放入 60°C 水浴 24 h ,塑料套膜的作用是避免大孔隙混合料在高温下发生混合料松散、剥落等情况,最后将试件放到 23°C 水中浸泡 2 h 后测试其间接拉伸强度,进行比值计算。本次试验只进行1次冻融循环,而没有按照 ASTM D 7064 所规定的进行5次冻融循环,主要是因为 Watson 的研究成果显示1次、3次或5次冻融循环对大孔隙混合料的间接拉伸强度并无影响。本次冻融循环状态下的残留强度比试验结果如图4所示。

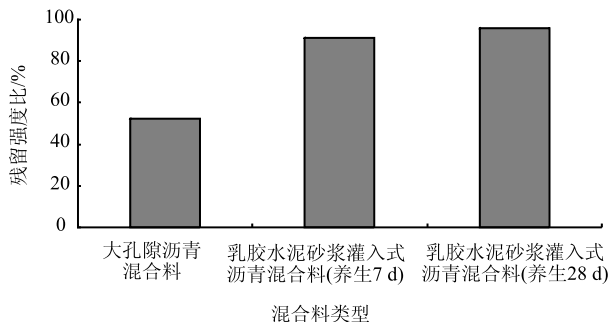


图4 不同类型混合料的间接拉伸试验结果

Fig. 4 Indirect tensile test result of different mixtures

从图4可以看出,乳胶水泥砂浆的灌入对于大孔隙混合料的残留强度比有较好的贡献,可以改善混合料的抗水损能力,灌浆后的残留强度比接近灌浆前的2倍,有效提升大试件的水稳定性能。

2.5 渗水性能

本研究采用柔性壁渗透仪(Flexible Wall Permeameter)对环氧沥青混合料进行了变水头渗透试验(Falling Head Permeability Test),试验严格按照 ASTM PS 129 的规定进行。试验采用直径 100 mm ,高 80 mm 的圆柱型试件,用旋转压实方式成型取芯得到。试验前,将试件放入高于表面 25 mm 以上的水中,在 70 kPa 的压力下抽真空 5 min ,使试件处于饱和状态。而后,将试件放入柔性壁渗透仪中进行试验,分别记录试验开始时刻 t_1 和结束时刻 t_2 的水压头刻度 h_1 和 h_2 。试件的渗透系数利用达西定律计

算得出,如式(1)所示。

$$k = \frac{al}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right), \quad (1)$$

式中, k 为渗透系数; a 为水压头立管的内截面面积; l 为试件的厚度; A 为试件的面积; Δt 为时间差 ($t_2 - t_1$)。

试验结果显示: 大孔隙沥青混合料的渗水系数均为 0.17 cm/s, 具有很好的渗水性能。而采用乳胶水泥砂浆进行灌入的试件, 其渗水系数几乎接近为 0, 说明水泥砂浆很好地渗透到混合料的空隙中, 保证了试件的密实。

2.6 摆式摩擦系数试验

采用英式摆式摩擦仪测试环氧沥青混合料的摩擦系数, 试验参照 ASTM E 303-93 规程进行, 试件为钢轮碾成型的 502 mm × 167 mm × 76 mm 板状试件, 试验结果如图 5 所示。

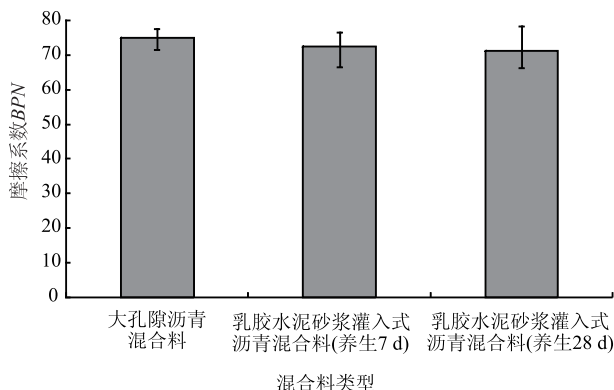


图5 不同类型混合料的摆式摩擦系数试验结果

Fig.5 Test result of pendulum friction coefficients of different mixtures

试验结果显示: 灌浆前后试件的摩擦系数接近, 表明乳胶水泥砂浆的灌入并不会影响路面的抗滑性能。

3 结论

(1) 在大孔隙沥青混合料中灌入乳胶水泥砂浆, 可以有效提升混合料的强度、高温稳定性以及水稳定性能, 低温抗裂性方面有所降低。

(2) 乳胶水泥砂浆的有效灌入使得试件密实, 几乎不渗水, 并且表面抗滑性能与大孔隙沥青混合料性能相近。

(3) 乳胶水泥砂浆的灌入, 对于提高混合料的强度、高温稳定性与抗水损害等路用性能有很大帮助。

参考文献:

References:

- [1] RASMUSSEN R O, BERNHARD R J, SANDBERG U, et al. The Little Book of Quieter Pavements [M]. Austin: Federal Highway Administration and the Transtec Group, 2007.
- [2] LU Qing, KOHLER E, HARVEY J, et al. Investigation of Noise and Durability Performance Trends for Asphaltic Pavement Surface Types: Three-year Results, UCPRC-RR-2009-01 [R]. Richmond: University of California Pavement Research Center, 2009.
- [3] HASSAN H F, AL-ORAIMI S, TAHA R. Evaluation of Open-graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers and Styrene Butadiene Rubber Polymer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17 (4): 416-422.
- [4] LUO Sang, QIAN Zhen-dong, XUE Yong-chao. Performance Evaluation of Open-graded Epoxy Asphalt Concrete with Two Nominal Maximum Aggregate Sizes [J]. Journal of Central South University, 2015, 22 (11): 4483-4489.
- [5] LUO Sang, LU Qing, QIAN Zhen-dong. Performance Evaluation of Epoxy Modified Open-graded Porous Asphalt Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 97-102.
- [6] 唐国奇, 刘清泉, 曹东伟. 排水性沥青混合料对比研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 9-11, 19. TANG Guo-qi, LIU Qing-quan, CAO Dong-wei. Research on Appropriate Filler for Drainage Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 9-11, 19.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, 23 (2): 1-6. HAO Pei-wen, CHENG Lei, LIN Li. Pavement Performance of Semi-flexible Pavement in Laboratory [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23 (2): 1-6.

(下转第50页)

- 2005 ACM Workshop on Formal Methods in Security Engineering. New York: ACM, 2008: 33–41.
- [12] BARACALDO N, JOSHI J. A Trust-and-risk Aware RBAC Framework: Tackling Insider Threat [C] // Proceedings of the 17th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. New York: ACM, 2012: 167–176.
- [13] CHARI S, LOBO J, MOLLOY I. Practical Risk Aggregation in RBAC Models [C] // Proceedings of the 17th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. New York: ACM, 2012: 117–118.
- [14] 王建军, 李建平, 杜仕甫. 基于模糊聚类的无权值风险综合评判算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (8): 2137–2143.
- WANG Jian-jun, LI Jian-ping, DU Shi-fu. Fuzzy-clustering-based Unweighted Risk Overall Evaluation Algorithm [J]. Systems Engineering – Theory & Practice, 2015, 35 (8): 2137–2143.
- [15] 李士勇. 工程模糊数学及应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- LI Shi-yong. Engineering Fuzzy Mathematics with Applications [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [16] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Engineering Quality Supervision Bureau of Ministry of Transport. Safety Risk Assessment System and Guide for Construction of Highway Bridge and Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [17] 阮欣, 尹志逸, 陈艾荣. 风险矩阵评估方法研究与工程应用综述 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41 (3): 381–385.
- RUAN Xin, YIN Zhi-yi, CHEN Ai-rong. A Review on Risk Matrix Method and Its Engineering Application [J]. Journal of Tongji University: Nature Science Edition, 2013, 41 (3): 381–385.
- [18] JTJ 076—95, 公路工程施工安全技术规程 [S].
- JTJ 076—95, Safety Technology Rules for Highway Engineering Construction [S].
-
- (上接第 5 页)
- [10] YETGIN S, ÇAVDAR A. Abrasion Resistance of Cement Mortar with Different Pozzolan Compositions and Matrices [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23 (2): 138–145.
- [11] YUAN Qiang. Characterization of Cement Asphalt Mortar for Slab Track by Dynamic Mechanical Thermoanalysis [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (3): 251–256.
- [12] 马志华, 葛浩. 灌入式复合路面路用性能研究 [J]. 公路与汽运, 2017 (1): 101–103.
- MA Zhi-hua, GE Hao. Study on Pavement Performance of Poured Composite Pavement [J]. Highway and Transportation, 2017 (1): 101–103.
- [13] 严佳. 灌入式复合路面的配合比设计及路用性能 [J]. 科技与企业, 2015 (23): 148–149.
- YAN Jia. Mix Proportion Design and Road Performance of Poured Compound Pavement [J]. Technology and Enterprise, 2015 (23): 148–149.
- [14] 徐业庄. 灌入式复合路面应用技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- XU Ye-zhuang. Research on Application Technology of Poured Compound Pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [15] 王鹏, 李华. 灌入式复合路面在交叉口路段养护工程中的应用 [J]. 交通世界, 2015, 31 (11): 34–35, 55.
- WANG Peng, LI Hua. Application of Poured Composite Pavement in the Maintenance of Intersection Section [J]. Transpo World, 2015, 31 (11): 34–35, 55.
- [16] THYAGARAJAN S, MUHUNTHAN B, SIVANESWARAN N. Efficient Simulation Techniques for Reliability Analysis of Flexible Pavements Using the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137 (11): 796–804.
- [17] 苗英豪, 曹东伟, 刘清泉. 沥青路面表面宏观构造与抗滑性能间的关系 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37 (4): 547–553.
- MIAO Ying-hao, CAO Dong-wei, LIU Qing-quan. Relationship between Surface Macrotecture and Skid Resistance of Asphalt Pavement [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37 (4): 547–553.
- [18] 吴浩, 张久鹏, 王秉纲. 多孔沥青混合料空隙特征与路用性能关系 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10 (1): 1–5.
- WU Hao, ZHANG Jiu-peng, WANG Bing-gang. A Relationship between Characteristic of Void and Road Performance of Porous Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10 (1): 1–5.