

文章编号:1005-0523(2017)01-0092-07

乳化沥青水泥稳定碎石的干缩性能

黄琴龙¹, 杨 壮¹, 李 敏²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 山西运城路桥有限责任公司, 山西 运城 044000)

摘要:采用千分表支架法对乳化沥青水泥稳定碎石材料的干缩性能进行了试验研究, 分析了不同水泥和乳化沥青掺量下混合料失水率、干缩应变和干缩系数等参数的变化规律。试验结果表明: 乳化沥青的掺入可有效降低混合料的失水率, 显著减小水泥稳定碎石的干缩应变和干缩系数; 混合料的干缩系数在施工初期变化较大, 建议在乳化沥青水泥稳定碎石基层施工后两周内进行湿法养生。

关键词:路面工程; 水泥稳定碎石; 乳化沥青; 收缩性能

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.015

水泥稳定碎石具有强度高、刚度大、整体性好等优点, 是我国高等级公路常用的半刚性基层材料之一。但水泥稳定类材料的缺点是抗变形能力差, 在养生期内由于水分蒸发和温度变化, 混合料易出现收缩裂缝, 并在开裂处引起应力集中, 使沥青路面在运营初期便出现反射裂缝, 影响路面结构的使用性能与服务水平。研究表明, 在水泥稳定碎石中掺入一定量的乳化沥青能起到增柔改性的作用, 通过形成水泥为连续相、沥青为分散相的复合材料, 有效增强颗粒间的粘聚力, 减小混合料内部结构的收缩应力, 有效改善混合料的早期开裂问题^[1-3]。本文采用千分表支架法进行室内干缩试验^[4], 系统研究了乳化沥青的掺入对水泥稳定碎石材料干缩性能的影响, 为乳化沥青水泥稳定碎石材料在我国的推广应用提供参考借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用的水泥为上海产的海螺牌 P.O. 42.5 普通硅酸盐水泥, 性质满足《通用硅酸盐水泥标准》(GB 175-2007)^[5]的要求, 水泥的技术指标见表 1。

表 1 水泥材料技术指标
Tab.1 Technical indicators of cement

技术指标	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		凝结时间/min		表观密度/(g/cm ³)	安定性
	3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝		
标准值	≥16	≥42.5	≥3.5	≥6.5	≥45	≤600	—	—
检测值	20.7	46.6	4.7	7.9	100	240	3.112	合格

收稿日期: 2016-07-16

基金项目: 山西省交通运输厅科技计划项目(2016-1-1)

作者简介: 黄琴龙(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 研究方向为道路与机场工程。

通讯作者: 杨壮(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为道路与机场工程。

试验采用的乳化沥青为广东产的阳离子慢裂型乳化沥青(PC-2),其技术指标见表 2,各项指标结果满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)^[6]中对道路用乳化沥青的技术要求。

表 2 乳化沥青材料技术指标
Tab.2 Technical indicators of emulsified asphalt

技术指标	粒子电荷	破乳速度	蒸发残留物			标准粘度/s
			沥青含量/%	针入度/25,0.1 mm	软化点	
标准值	—	—	≥50	50~200	—	10~25
检测值	阳离子	慢裂	61.9	66.5	48.5	19

粗集料为浙江产的标准石灰岩集料,共分为 15~25,5~15,3~5 mm 和 0~3 mm 4 档,其性能满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)^[7]的要求,技术指标见表 3。细集料为机制细砂。

表 3 粗集料技术指标
Tab.3 Technical indicators of coarse aggregates

技术指标	压碎值/%	洛杉矶磨耗值/%	坚固性/%	磨光值/%	针片状含量/%	表观密度/(g/cm ³)
标准值	≤30	≤28	≤8	≥40	≤15	≥2.60
检测值	12.9	16.4	3.5	47	8.4	2.87

1.2 试验方案

1.2.1 混合料配合比

试验中设计了 5 个不同水泥和乳化沥青掺量组合 $\lambda_c-\lambda_a(3-2,4-0,4-2,4-4,5-2)$,其中“3-2”表示水泥掺量 λ_c 为 3%,乳化沥青掺量 λ_a 为 2%,水泥和乳化沥青掺量均采用外掺法进行设计。半刚性基层常用的结构类型有骨架密实、悬浮密实和骨架空隙 3 种,其中骨架密实型结构的抗裂性能与路用性能表现最佳^[8]。本试验中的混合料采用骨架密实型结构,集料采用《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)^[7]中推荐的骨架密实型级配范围中值进行设计,具体级配见表 4。

表 4 骨架密实型结构集料级配
Tab.4 Aggregate gradation of skeleton dense structure

级配	通过下列筛孔尺寸(mm)的质量分数/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	90	80	74	68	50	38	30	22	17	12	7
级配下限	100	67	57	51	45	29	18	13	8	5	3	0
合成级配	100	83.8	72.5	65.7	59.4	40.6	23.6	17.3	13.4	7.9	5.1	2.7

1.2.2 最佳掺水量与最大干密度

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)^[9]中的甲类重型击实方法,可确定不同水泥和乳化沥青掺量下混合料的最佳含水量和最大干密度。但由于乳化沥青中含有一定的乳液水,在混合料拌合过程中,乳液水随着乳化沥青的破乳逐渐变为自由水,使得混合料中的实际含水量大于设计含水量;因此,提出了混合料的最佳掺水量指标 ω_{dl} ,掺水量 ω_{dl} 随着乳化沥青掺量和乳液水比例的不同而发生变化,其计算公式如下:

$$\omega_{dl}=\omega_d-\omega_{a1}=\omega_d-\frac{\lambda_a\omega_a}{1+\lambda_c}$$

(1)

式中, ω_d 为混合料的最佳含水量; ω_{al} 为乳液水与混合料干重的质量比; λ_a 为乳化沥青掺量; ω_a 为乳化沥青中乳液水含量; λ_c 为水泥掺量。

表 5 给出了不同工况下混合料的最佳掺水量和最大干密度, 从表中可以看出, 随着水泥掺量的增加, 混合料的最佳掺水量和最大干密度略微呈增大趋势; 而水泥掺量 λ_c 固定为 4% 时, 乳化沥青掺量 λ_a 由 0% 增大为 2%, ω_{dl} 降低了 17.6%, ρ_d 降低了 1.1%; λ_a 增大至 4% 时, ω_{dl} 降低了 39.2%, ρ_d 降低了 1.9%, 可见乳化沥青掺量对混合料的最佳掺水量和最大干密度影响较大。

表 5 最佳掺水量与最大干密度
Tab.5 Optimum water addition and maximum dry density

工况	$\lambda_c - \lambda_a / \%$	$\omega_d / \%$	$\omega_{dl} / \%$	$\rho_d / (g/cm^3)$
1	3-2	4.7	4.0	2.308
2	4-0	5.1	5.1	2.341
3	4-2	4.9	4.2	2.316
4	4-4	4.6	3.1	2.297
5	5-2	4.9	4.2	2.332

2 混合料的干缩试验

2.1 试件成型

根据表 5 中不同工况下混合料的最佳掺水量和最大干密度, 采用室内小型搅拌机均匀拌合乳化沥青水泥稳定碎石混合料, 拌合顺序为先加入水泥拌合均匀, 再加入乳化沥青拌合均匀。将中梁试件(尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm)在 98% 压实度下所需的混合料分 3 次装入试模中, 分层进行捣实, 然后在压力机上采用 400 kN 的压力将上压块压入试模内, 静压 60 s 后卸载, 待水泥初凝后脱模, 用塑料薄膜包裹后放置于标准养生室进行保湿养生 7 d, 并在养生期最后 24 h 放置于恒温水槽中饱水养生。

2.2 干缩试验

试验根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)^[9] 中规定的干缩试验方法进行。每个工况准备 6 个试件, 其中 3 个试件进行干缩平行试验(设为 1 号组), 将不同工况下的试件长轴端磨平并在端面使用 502 胶粘结有机玻璃片, 待 502 胶凝结后将千分表用磁性支座固定在试件上表面, 见图 1。然后将所有试件放置于相同条件下进行自然风干(温度为 25℃ 左右), 定期观测千分表的读数变化。同时, 将另 3 个中梁试件放置于同样的试验环境中, 定期检测试件的失水率(设为 2 号组), 30 d 后试件千分表读数与重量不再变化, 结束试验^[10]。最后将 2 号组的中梁试件完全烘干并称重。



图 1 乳化沥青水泥稳定碎石干缩试验
Fig.1 Dry shrinkage test of emulsified asphalt cement stabilized macadam

3 试验结果与分析

根据上述试验方案, 对不同工况下中梁试件在 30 d 周期内的累积干燥收缩变形与失水率进行监测, 取 3 组平行试验的平均值作为试验结果, 见表 6。

表 6 30 d 干缩试验数据分析
Tab.6 Analysis of 30 d dry shrinkage test results

工况	$\lambda_c - \lambda_a / \%$	失水率 $\omega / \%$	干缩应变 $\varepsilon / \times 10^{-6}$	干缩系数 $\alpha / \times 10^{-6}$
1	3-2	2.9	127.5	43.97
2	4-0	3.8	215.0	56.58
3	4-2	3.4	162.5	47.79
4	4-4	3.3	120.0	36.36
5	5-2	3.7	187.5	50.68

对比表 6 中工况 2,3,4 的试验结果,可知当水泥掺量恒定为 4% 时,随着乳化沥青的掺入,混合料同期失水率、干缩应变和干缩系数均明显降低:混合料中掺入 2% 乳化沥青后,失水率降低了 10.5%,干缩应变降低了 24.4%,干缩系数降低了 15.5%;掺入 4% 乳化沥青后,失水率降低了 13.2%,干缩应变降低了 44.2%,干缩系数降低了 35.7%。从以上结果可以看出,混合料中的乳化沥青具有一定的保水功能,能够有效减小水泥稳定碎石基层的干缩系数,降低水泥稳定碎石基层干缩开裂的可能性。

而对比工况 1,3,5 中的试验结果,可知乳化沥青掺量恒为 2% 时,水泥掺量从 3% 增加为 4%,失水率从 2.9% 增大为 3.4%,而当水泥掺量增大为 5% 时,失水率继续增大为 3.7%,表明混合料的失水情况主要受水泥掺量影响,随着水泥掺量的增加,水泥在混合料中发生水化作用,使混合料在养生期间更容易失水。而随着水泥掺量从 3% 增大为 4% 时,干缩应变由 127.5×10^{-6} 增大为 162.5×10^{-6} ,增长率为 27.5%,干缩系数由 43.97×10^{-6} 变为 47.79×10^{-6} ,增长率为 8.7%;当水泥掺量增大为 5% 时,干缩应变增大为 187.5×10^{-6} ,增长率为 47.1%,干缩系数为 50.68×10^{-6} ,增长率为 15.3%。对比可知,水泥掺量对混合料的干缩性能有很大影响,但随着乳化沥青的掺入,使得水泥稳定碎石半刚性基层具有一定的柔性特点,能有效控制不同水泥掺量下半刚性基层的干缩性能。

以上结果是基于中梁试件 30 d 的累积干缩试验数据分析得到的,而混合料的干缩受环境温度和湿度的影响较大,累积干缩系数无法有效反映混合料的干缩性能^[11];因此,本文对不同观测时间下混合料的干缩情况变化规律进行了动态分析。

3.1 失水率与时间的关系

混合料的失水率随时间变化的关系曲线见图 2。从图中可以看出,试件的失水率在初期变化较大,而在 5 d 后增长速率逐渐趋于平缓,是因为试件浸泡 24 h 后为饱水状态,大量孔隙中的自由水挥发较快,而当表面自由水完全蒸发后,试件内部的水损失相对较缓慢。从图 2(a) 中可以看出,随着乳化沥青的掺入,混合料

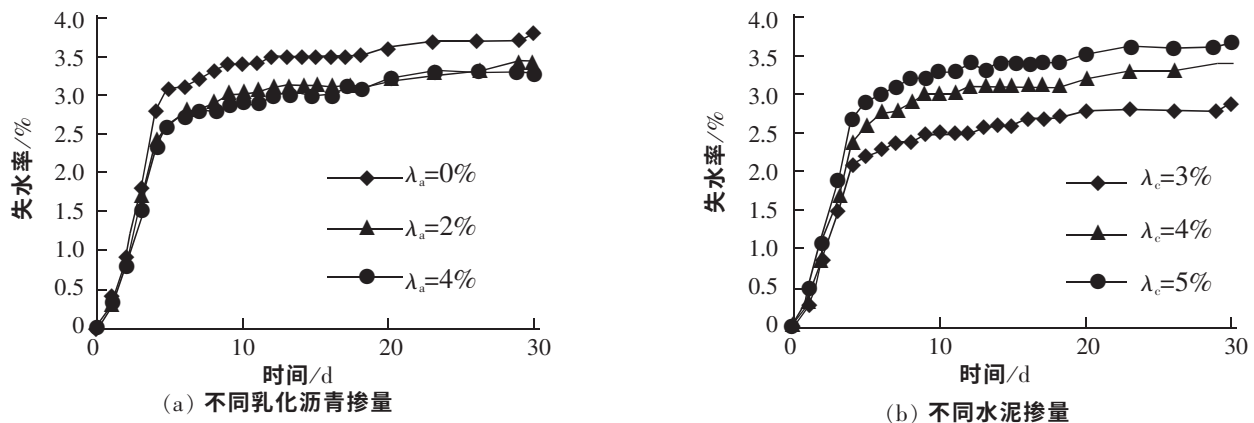


图 2 失水率与时间的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between water loss rate and time

初期自由水损失速率不变,而后失水率明显降低,但乳化沥青掺量为 2% 和 4% 的失水率近似相同,表明乳化沥青掺量能在一定程度上减小混合料的水损失;而从图 2(b) 中可以看出,水泥掺量对试件的失水率有明显影响,随着水泥掺量增大,混合料的失水率明显增大。

3.2 干缩应变与时间的关系

不同工况下试件的干缩应变随时间变化的关系曲线见图 3。从图中可以看出,混合料的干缩应变在 0~15 d 期间增长相对较快,15 d 之后混合料的累积干缩应变逐渐趋于平缓;而图 3(a) 表明乳化沥青的掺入对混合料的干缩应变明显有减小的作用,且随着乳化沥青掺量由 2% 增加至 4%,混合料的干缩应变从 162.3×10^{-6} 减小为 120.0×10^{-6} ,相比不掺乳化沥青时混合料的干缩应变 215.0×10^{-6} ,分别降低了 24.5% 和 44.2%,表明乳化沥青能够明显减小水泥稳定碎石的干缩应变;而从图 3(b) 可以看出,随着乳化沥青的掺入,水泥含量对混合料干缩应变的影响程度相对减小,表明掺入乳化沥青对不同水泥掺量的混合料干缩应变均有明显的改善作用。

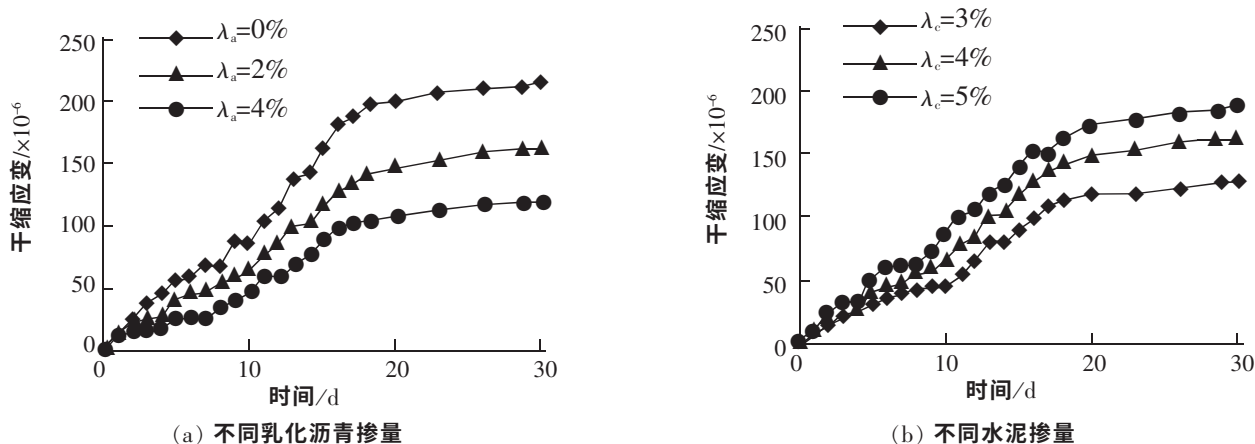


图 3 干缩应变与时间的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between dry shrinkage strain and time

3.3 干缩系数与时间的关系

干缩系数是反映混合料干缩应变和失水率的综合指标,不同工况下试件的干缩系数随时间变化的关系曲线见图 4。从图 4(a) 可以看出,在试验初期 0~5 d,由于试件的失水速度较快,此时干缩系数变化最快且数值较大,在 5~15 d 期间,混合料表面的自由水大部分损失,故随着失水速度的降低,混合料的干缩系数也逐渐增大,且在 15 d 之后逐渐趋于稳定;从图 4(b) 中可以看出,掺入 2% 乳化沥青后,随着水泥掺量的增加,混合料的干缩系数略微增大,表明乳化沥青的掺入可有效减小水泥对混合料干缩性能的影响。

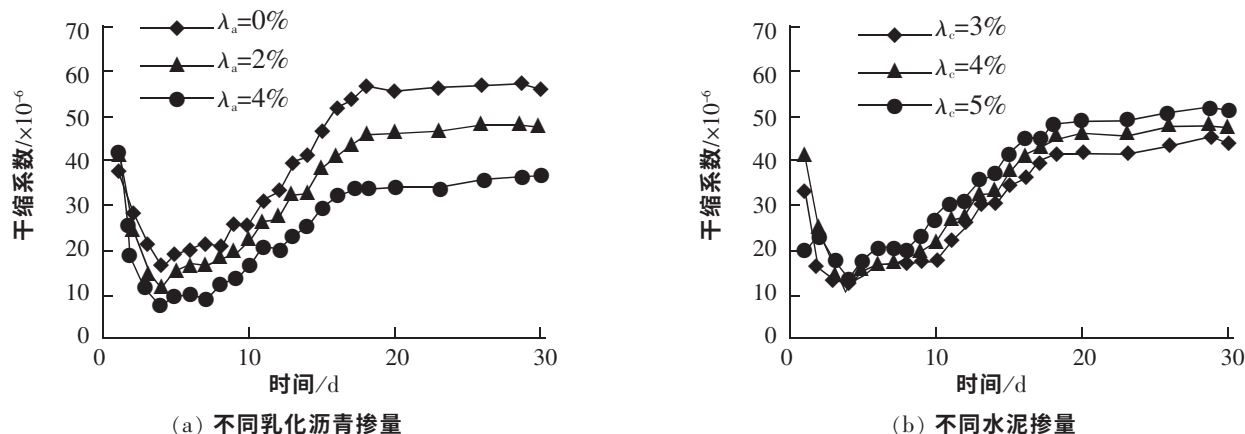


图 4 干缩系数与时间的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between dry shrinkage coefficient and time

3.4 干缩系数与失水率的关系

乳化沥青水泥稳定碎石混合料的干缩系数与失水率存在一定的关系,不同工况下混合料的干缩系数随失水率的变化规律见图 5。从图 5 可以看出,随着混合料的水分损失,干缩系数有一个先减小再增大的变化过程。从图 5(a)可以看出,随着乳化沥青的掺入,混合料的最大失水率减小,且最大干缩系数明显降低;从图 5(b)中可以看出,在相同干缩系数下,高水泥掺量的混合料失水率更大,表明乳化沥青在混合料中起到了一定的保水作用,而水泥则增加水分损耗;因此在施工中应注意及时洒水养生。

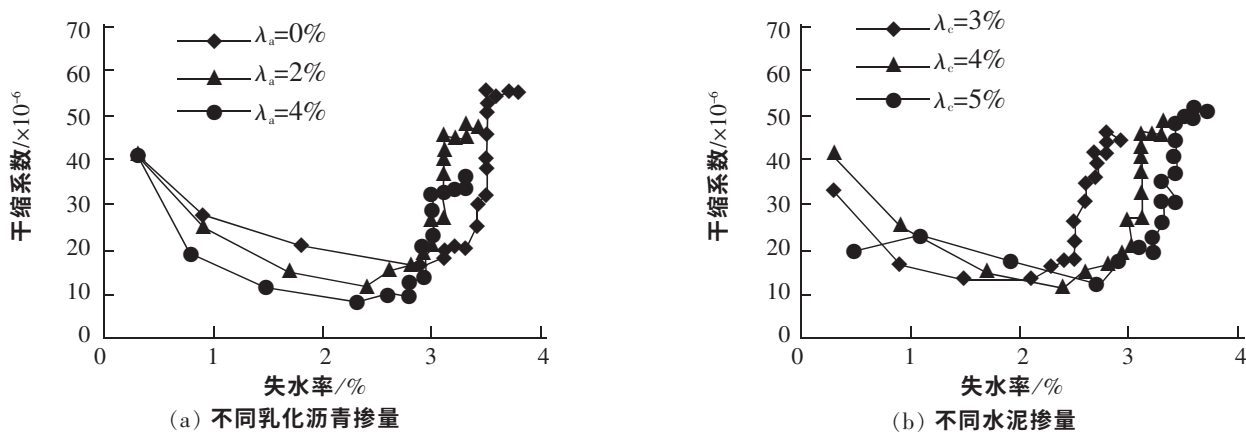


图 5 干缩系数与失水率的关系曲线

Fig.5 Relationship curves between dry shrinkage coefficient and water loss rate

4 结论

通过室内干缩试验研究了不同水泥和乳化沥青掺量下混合料的干缩性能,得到以下结论:

- 1) 掺入乳化沥青能够有效减小水泥稳定碎石材料的干缩系数与失水率,相比普通水泥稳定碎石,掺入 2% 乳化沥青后,混合料的干缩系数降低了 15.5%,失水率降低了 10.5%;掺入 4% 乳化沥青后,混合料的干缩系数降低了 13.2%,失水率降低了 35.7%。
- 2) 混合料中掺入一定的乳化沥青时,随着水泥掺量由 3% 增大为 5%,混合料的干缩系数由 43.97×10^{-6} 增大为 50.68×10^{-6} ,增长了 15.3%,表明水泥对混合料的干缩性能有很大影响。施工中应保证混合料无侧限抗压强度满足规范要求,尽量减小水泥掺量。
- 3) 乳化沥青水泥稳定碎石混合料在施工初期前 15 d 左右的失水率、干缩应变和干缩系数变化较大,养生条件对混合料的干缩性能至关重要,建议在乳化沥青水泥稳定碎石基层施工后两周内进行湿法养生,避免混合料因失水率过大导致干缩应变加剧,施工质量难以得到保证。

参考文献:

- [1] 王一琪,谭忆秋,王开生,等. 水泥乳化沥青稳定碎石温缩特性[J]. 建筑材料学报,2015(4):584-588.
- [2] 符佳,杨吴礼,谈至明,等. 乳化沥青水泥稳定碎石的变形特征试验研究[J]. 公路,2015(6):202-206.
- [3] 贾克聪. 乳化沥青对水泥稳定碎石强度特性及力学性能的影响[J]. 公路工程,2015(3):213-217.
- [4] 常康,李立寒,汪于凯. 水泥稳定三渣基层回收料的收缩性能[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):67-73.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 175-2007 通用硅酸盐水泥标准[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [6] 交通运输部公路科学研究院. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

- [8] 曾梦澜,罗迪,吴超凡,等. 不同级配类型水泥稳定碎石路面基层材料的抗裂性能[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013(10): 1-7.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [10] 丛林,郭忠印,暨育雄,等. 半刚性基层材料性能参数的试验研究[J]. 建筑材料学报,2001(4):385-390.
- [11] 朱云升,郭忠印,陈崇驹,等. 半刚性基层材料干缩和温缩特性试验研究[J]. 公路,2006(2):145-148.

Dry Shrinkage Performance of Emulsified Asphalt Cement Stabilized Macadam

Huang Qinlong¹, Yang Zhuang¹, Li Min²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanxi Yuncheng Road and Bridge Co., Ltd., Yuncheng 044000, China)

Abstract: Based on the test methods with dial gage and bracket, laboratory experiments were done to study the dry shrinkage performance of emulsified asphalt cement stabilized macadam, the water loss rate, dry shrinkage strain and coefficient of mixtures with different cement contents and emulsified asphalt contents were analyzed. The test results show that the incorporation of emulsified asphalt could make water loss rate, dry shrinkage strain and coefficient of cement stabilized macadam decrease significantly. The dry shrinkage coefficient of mixtures has great variation at early stage, so it is suggested that mixtures should have enough water contents in the period of two weeks after the construction of emulsified asphalt cement stabilized macadam base.

Key words: pavement engineering; cement stabilized macadam; emulsified asphalt; shrinkage performance

(责任编辑 刘棉玲)