

# 水泥乳化沥青稳定再生集料干缩性能研究

孙志强

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**针对水泥稳定再生集料抗干缩性能差的问题,将乳化沥青掺入到水泥稳定再生集料中,增加其柔性。通过干缩试验,研究了乳化沥青掺量和水泥剂量对水泥乳化沥青稳定再生集料干缩特性的影响规律。研究表明:乳化沥青的加入可以显著提高水泥稳定再生集料的抗干缩性能;水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变和干缩系数随着乳化沥青掺量的增加而减小;随着水泥剂量的增加,水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率、干缩应变和干缩系数均呈逐渐增大的变化趋势。

**关键词:**基层; 乳化沥青; 再生集料; 干缩特性

再生集料是由建筑垃圾经过分类、破碎、筛分等一系列工艺处理后得到的粒径为40 mm以下的集料。相比于天然集料,再生集料具有吸水率大、压碎值大等特点,但其主要性能指标仍能满足路面基层材料的要求,可以作为基层材料使用。纪小平等对水泥稳定再生集料力学特性的研究表明,水泥稳定再生集料的力学强度可以满足高等级公路基层的使用要求;顾善东等对水泥稳定再生集料的收缩特性进行研究,发现水泥稳定再生集料的抗干缩性能要比水泥稳定天然集料差。而水泥稳定碎石基层材料本身就存在抗裂性差、易出现收缩裂缝的问题,因此若要使水泥稳定再生集料得到大规模应用,需要采取措施改善其抗裂性。

针对水泥稳定碎石基层材料抗裂性差的问题,贾克聪等将乳化沥青掺入到水泥稳定碎石中增加混合料的柔性,研究表明乳化沥青的掺入可以有效提高水泥稳定碎石的抗裂性能。综上所述,目前国内外对水泥稳定再生集料的性能研究和将乳化沥青掺入到水泥稳定碎石中的相关研究较多,而对乳化沥青掺入到水泥稳定再生集料中的研究还很少。因此,该文采用水泥和乳化沥青复合稳定再生集料,研究乳化沥青的掺入对水泥稳定再生集料的干缩性能的影响规律,从而为水泥乳化沥青稳定再生集料的应用提供理论基础。

## 1 原材料

试验中采用的水泥为P.O. 42.5级普通硅酸盐水泥,选用的乳化沥青为阳离子慢裂型乳化沥青,其主要

技术指标如表1所示。

表1 乳化沥青的主要技术性能

项目	单位	指标要求	检测结果
破乳速度		慢裂	慢裂
筛上剩余量	%	<0.1	0
蒸发残留物含量	%	58~63	59.7
溶解度	%	>97	99.4
针入度(25℃)	0.1 mm	60~120	82.3
延度(15℃)	cm	≥50	68.8

试验所用的再生集料是由某公路水泥混凝土面层破碎后得到的,通过观察再生集料的表面特征可以发现再生集料表面粗糙且大多裹附有旧水泥砂浆,集料内部存在较多的微裂缝。经过破碎分级制得集料粒径规格为20~30、10~20、5~10和0~5 mm的再生集料,根据JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中的相关方法,对再生集料的技术性能进行测试,结果如表2、3所示。

根据JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中推荐的水泥稳定碎石级配范围,结合再生集料的筛分结果,通过规划求解计算各档集料间的比例,得到混合料合成级配如表4所示。

## 2 试验方法

### 2.1 最佳含水率和最大干密度

根据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定

收稿日期:2019-07-29(修改稿)

作者简介:孙志强,男,硕士研究生, E-mail: szq\_0604@163.com

表 2 再生粗集料技术性能

压碎值/ %	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )			吸水率/%		
	20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm
26.9	2.625	2.648	2.663	4.7	5.5	6.2

表 3 再生细集料技术性能

表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	砂当量/%	坚固性/%
2.496	8.9	89.7	6.4

表 4 再生集料的合成级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配	100	75.8	48.1	27.3	17.4	9.3	2.2
级配上限	100	86.0	58.0	32.0	28.0	15.0	3.0
级配下限	100	68.0	38.0	22.0	16.0	8.0	0

材料试验规程》中的相关试验方法,采用重型击实试验确定水泥乳化沥青稳定再生集料的最佳含水率和最大干密度,试验结果如表 5 所示。

表 5 最佳含水率和最大干密度

乳化沥青 掺量/%	水泥剂量/ %	最佳含水 率/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
0	4	6.1	2.295
2.0	4	5.8	2.238
2.5	4	5.5	2.210
3.0	4	5.0	2.183
2.5	3	4.8	2.195
2.5	5	6.1	2.236

从表 5 可以看出:在相同水泥剂量下,水泥乳化沥青稳定再生集料的最佳含水率和最大干密度随着乳化沥青掺量的增加而减小。相比于未掺加乳化沥青的水泥稳定再生集料,乳化沥青掺量为 2.0%、2.5%、3.0%的水泥乳化沥青稳定再生集料的最佳含水率分别降低了 0.3%、0.6%、1.1%,而最大干密度分别减小了 2.5%、3.7%、4.9%。这是由于乳化沥青在混合料中起到了润滑作用,减小了集料颗粒间的摩阻力,从而使混合料的最佳含水率减小;同时由于沥青的密度小,使得乳化沥青掺量越大,混合料的最大干密度就越小。

而在相同乳化沥青掺量下,随着水泥剂量的增加,水泥乳化沥青稳定再生集料的最佳含水率和最大干密度逐渐增加。分析其中的原因,水泥的比表面积大,吸附的水分较多,造成混合料的含水率增大;而水泥浆填充集料间的空隙也使得混合料的密度增大。

2.2 试件成型与养生

按照重型击实试验得到的最佳含水率和最大干密

度,计算成型规格尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 中梁试件时所需用到的各档再生集料、水泥、乳化沥青及水的质量。拌和时先将水泥与再生集料拌和均匀,再加入乳化沥青拌和均匀,混合料拌制结束后,将其均匀地装填到试模中,采用静压法成型试件。试件成型后,将脱模后的试件用塑料薄膜包裹起来,放入到标准养生室中养生 7 d,并在最后一天时将其放入到恒温水箱中饱水 24 h。

2.3 干缩试验

养生结束后,将试件表面擦干,然后将其放置在收缩仪上,并在试件两端架设千分表,通过千分表读数的变化来测定试件的干缩变形量。试验从试件移入干缩室后开始计时,第一个星期内每天读一次数,并称取质量;7 d 之后每两天读一次数,直至第 30 d 为止。试验结束后,将试件放入烘箱内烘干至恒重,称取其质量。每种配合比的混合料成型 6 个试件,其中 3 个试件用于测定材料的收缩变形,另外 3 个用于测定材料的失水率。

3 试验结果与分析

3.1 乳化沥青用量对干缩性能的影响

为了分析乳化沥青掺量对水泥稳定再生集料和水泥乳化沥青稳定再生集料干缩特性的影响,设计了 4 种不同配合比的混合料,其中水泥剂量(该文中涉及的用量均为质量分数)为 4%,乳化沥青用量分别为 0%、2.0%、2.5%、3.0%(分别标记为 CERA0—4.0、CERA2.0—4.0、CERA2.5—4.0、CERA3.0—4.0)。按照相应的试验方法成型试件,并测定各乳化沥青掺量的试件随时间变化的失水率、干缩应变和干缩系数,结果如图 1~3 所示。

由图 1 可知:乳化沥青的加入可以明显地减小水泥稳定再生集料的累计失水率,并且水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率随着乳化沥青掺量的增加而逐渐减小。在相同水泥剂量下,相比于没有掺加乳化沥青的水泥稳定再生集料,乳化沥青掺量为 2.0%、2.5%、3.0%的水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率分别减少了 11%、18%和 25%。这是因为乳化沥青在破乳后沥青裹附在再生集料表面,阻断了再生集

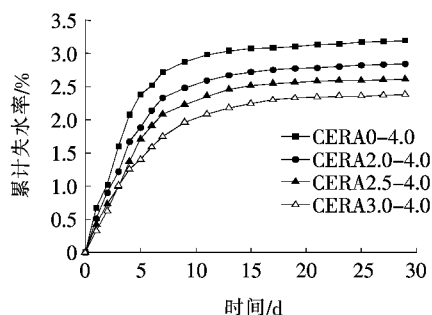


图1 不同乳化沥青掺量下累计失水率随时间的变化

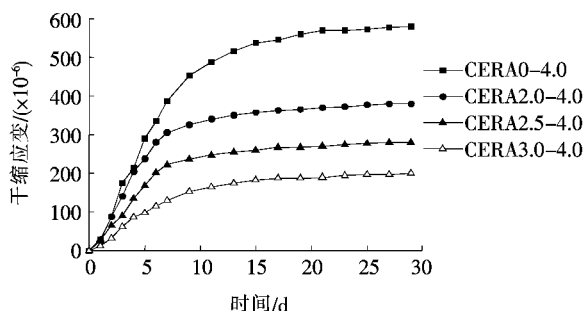


图2 不同乳化沥青掺量下干缩应变随时间的变化

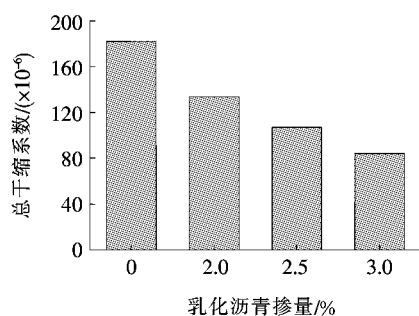


图3 不同乳化沥青掺量下试件的总干缩系数

料中水分的蒸发;并且乳化沥青的增加,使得混合料内部的毛细空隙进一步减少,甚至一部分变成闭口空隙,从而使得混合料的失水率降低。同时,水泥稳定再生集料和水泥乳化沥青再生集料的累计失水率都随着时间的增长而增大,且两者的失水率与时间之间的变化趋势大体一致,均在最初的7 d内失水较快,约在第15 d后失水速率逐渐趋于稳定。

由图2可知:水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变随着乳化沥青掺量的增加而减小,相比于没有掺加乳化沥青的水泥稳定再生集料,乳化沥青掺量为2.0%、2.5%、3.0%的水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变分别减少了34%、52%和66%,说明乳化沥青的加入可以明显地减少水泥稳定再生集料的干缩应变。这是由于沥青是一种柔性材料,乳化沥青破乳后沥青裹附在再生集料表面,在混合料失水后发生体积收缩时,这层沥青起到应力缓冲效果,减小了混合料的

干缩应变。同时,水泥稳定再生集料和水泥乳化沥青稳定再生集料在初期的干缩应变增长较快,而在后期干缩应变的增长速率逐渐趋于稳定。这是因为混合料在初期失水较快,而在后期时混合料的失水速率逐渐趋于平缓。

由图3可知:在水泥剂量为4%时,乳化沥青掺量为0、2.0%、2.5%、3.0%的水泥稳定再生集料和水泥乳化沥青稳定再生集料的总干缩系数分别为 $181.8 \times 10^{-6}$ 、 $133.8 \times 10^{-6}$ 、 $107.3 \times 10^{-6}$ 、 $84.0 \times 10^{-6}$ ,水泥稳定再生集料的总干缩系数随着乳化沥青掺量的增加呈逐渐减小的趋势;相比于未掺加乳化沥青的水泥稳定再生集料,乳化沥青掺量为2.0%、2.5%、3.0%的水泥乳化沥青稳定再生集料的总干缩系数分别减少了26%、41%和54%,可见乳化沥青的加入可以明显地减小水泥稳定再生集料的干缩系数,提高水泥稳定再生集料的抗干缩性能。此外,相关研究发现,当乳化沥青掺量超过某一限度时,继续增加乳化沥青用量会对水泥稳定再生集料的力学强度造成负面影响,因此确定最佳乳化沥青掺量时,需综合考虑水泥乳化沥青稳定再生集料的力学性能和干缩性能。

### 3.2 水泥用量对干缩特性的影响

水泥作为水泥乳化沥青稳定再生集料中的主要胶结料,其用量对材料的干缩特性有重要影响。因此为了分析水泥剂量对水泥稳定再生集料和水泥乳化沥青稳定再生集料干缩特性的影响,采用乳化沥青掺量固定为2.5%,水泥剂量为3%、4%、5% (分别标记为CERA2.5-3.0、CERA2.5-4.0、CERA2.5-5.0) 3种配合比材料,通过室内干缩试验,测定不同水泥剂量下水泥乳化沥青稳定再生集料的失水率、干缩应变及干缩系数,试验结果如图4~6所示。

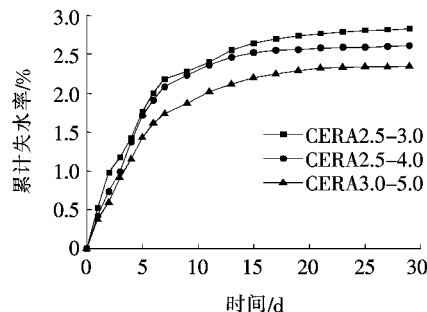


图4 不同水泥剂量下累计失水率随时间的变化

从图4可以看出:水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率随着时间的增长而逐渐增大,且在初期失水快,而在后期失水速率逐渐趋于稳定。同时,水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率随着水泥剂量的增加而增大,相比水泥剂量为3%的水泥乳化沥青稳定

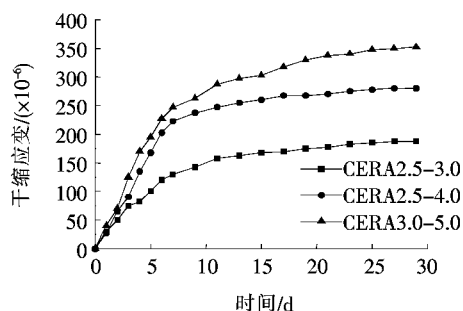


图 5 不同水泥剂量下干缩应变随时间的变化

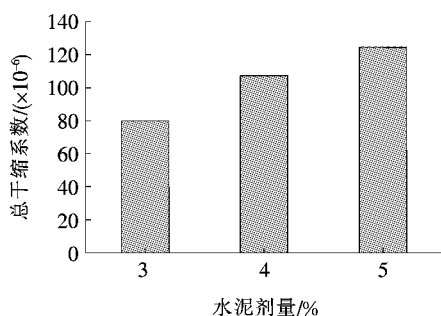


图 6 不同水泥剂量下试件的总干缩系数

再生集料,水泥剂量为 4% 和 5% 的水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率分别增加了 11% 和 20%。这是由于水泥剂量的增加和水化产物的增多,使得混合料层间吸附水量增大,而这些吸附水的蒸发将会导致水泥乳化沥青稳定再生集料的失水率也随之增大。

从图 5 可以看出:水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变随着时间的增长而逐渐增大,且在前 7 d 干缩应变增长速率较大,而在第 15 d 之后逐渐趋于稳定。同时,水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变随着水泥用量的增加而增大,相比水泥剂量为 3% 的水泥乳化沥青稳定再生集料,水泥剂量为 4% 和 5% 的水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变分别增加了 49% 和 88%,可见水泥剂量的增加可以显著增大水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩应变,从而增加了基层出现干缩裂缝的可能性。这是因为水泥剂量的增加使得水泥乳化沥青稳定再生集料的强度和刚度也随之增大,累计失水率也随之增大,当混合料中的水分蒸发损失后,混合料发生体积收缩,混合料失水越多,体积收缩变化越大,产生的干缩应变也越大。

由图 6 可知:在相同乳化沥青掺量下,水泥乳化沥青稳定再生集料的总干缩系数随着水泥剂量的增加而增大,相比于水泥剂量为 3% 时的水泥乳化沥青稳定再生集料,水泥剂量为 4% 和 5% 的水泥乳化沥青稳定再生集料的总干缩系数分别增加了 34% 和 56%,可见水泥剂量越大,水泥乳化沥青稳定再生集料的总干缩

系数就越大。但基层材料的干缩系数越大,其出现干缩开裂的可能性就越大,因此选择水泥剂量时,在保证材料强度的同时,还需合理降低水泥剂量,减小基层干缩开裂的可能性。

## 4 结论

通过室内试验对不同乳化沥青掺量和水泥剂量下的水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩特性进行研究,得出以下结论:

(1) 水泥乳化沥青稳定再生集料的最佳含水率和最大干密度随着乳化沥青掺量的增加而逐渐减小,而随着水泥剂量的增加而逐渐增大。

(2) 水泥乳化沥青稳定再生集料和水泥稳定再生集料的累计失水率、干缩应变随时间变化的趋势大体一致,均在前 7 d 内增长速率较快,而在后期逐渐趋于稳定。

(3) 在水泥稳定再生集料中加入乳化沥青,可以有效降低其干燥收缩,试件的累计失水率、干缩应变及总干缩系数均随着乳化沥青掺量的增加而减小。

(4) 水泥剂量对水泥乳化沥青稳定再生集料的干缩特性有重要影响,随着水泥剂量的增加,水泥乳化沥青稳定再生集料的累计失水率、干缩应变和总干缩系数均随之增大。

## 参考文献:

- [1] 杨俊,黎新春,陈峻松,等. 废旧混凝土用作水泥稳定基层的实验研究[J]. 环境工程学报, 2014(5).
- [2] 胡忠辉,贾致荣,张文刚,等. 水泥稳定再生集料基层性能试验研究与工程应用[J]. 施工技术, 2016(7).
- [3] 纪小平,曹海利,刘陵庆. 水泥稳定再生集料的性能及其影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2016(2).
- [4] 顾善东,钱海涛. 水泥稳定再生集料基层的收缩性能试验研究[J]. 中外公路, 2016(2).
- [5] 谭洪河,蔡旭,段跃华,等. 水泥稳定再生集料碎石收缩特性研究[J]. 中外公路, 2017(S1).
- [6] 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).
- [7] 黄琴龙,杨壮,李敏. 乳化沥青水泥稳定碎石的干缩性能[J]. 华东交通大学学报, 2017(1).
- [8] 符佳,谈至明,杨吴礼,等. 乳化沥青水泥稳定碎石的力学强度试验研究[J]. 公路, 2014(7).
- [9] 曾梦澜,田振,肖杰,等. 含建筑垃圾水稳碎石路面基层材料的使用性能[J]. 武汉理工大学学报, 2016(1).
- [10] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].