

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0055

ZHANG Liqun, ZHANG Xuefeng, CUI Honghuan. Mechanical and temperature shrinkage properties of recycled aggregate cement stabilized macadam subgrade in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):506-514. [张立群, 张学峰, 崔宏环. 寒区再生集料水泥稳定碎石路基的力学和温缩性能[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):506-514.]

# 寒区再生集料水泥稳定碎石路基的力学和温缩性能

张立群<sup>1,2</sup>, 张学峰<sup>2</sup>, 崔宏环<sup>1,2</sup>

(1. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 2. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000)

**摘要:**为解决废旧沥青混合料(RAP)和铁尾矿砂(ITS)固废处理问题,将两者充当砂石料掺加到水泥稳定碎石中,通过无侧限抗压试验、弯拉试验和温缩试验对水泥稳定碎石进行路用性能研究,分析了RAP和ITS掺量对水泥稳定碎石的影响。结果表明:RAP掺量一定时(25%),ITS掺量增加有利于提高水泥稳定碎石的抗压强度和弯拉强度,但会增大材料的温缩应变和温缩系数,降低温缩性能,其中ITS45(ITS掺量为45%)有较好的温缩性能;ITS掺量一定时(60%),RAP掺量增加不利于水泥稳定碎石的抗压强度,但可以提高水泥稳定碎石的弯拉强度,降低温缩应变和温缩系数,其中RAP70(RAP掺量为70%)温缩性能达到最优;与ITS45相比,RAP70有更宽泛的施工温度区间。

**关键词:** 水泥稳定碎石; 无侧限抗压强度; 弯拉强度; 温缩性能; RAP; ITS

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0506-09

## 0 引言

水泥稳定碎石材料铺建的道路基层有强度高、刚度大、耐久性好的优点,但易受环境因素的影响,产生结构上的损坏。尤其在寒冷地区,昼夜温差、年温差较大,极易受到温缩变形影响,进而发展为反射裂缝,影响道路运行。所以,亟须改善道路因温度收缩变形造成的破坏。

废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)和铁尾矿砂(iron tailing sand, ITS)均为固体废物,其中RAP是道路修缮、改建过程中产生的废弃物,ITS是选矿后的产物。RAP方面,中国每年修缮约12%的路面,产生大量沥青混合料<sup>[1]</sup>;ITS方面,每年产生尾矿5亿吨以上<sup>[2]</sup>。这些废弃物通常采用露天堆放和填埋的方式处理,在占用大量土地的同时,又污染了自然环境。因此,这两种废弃物资源化利用问题亟待解决,国内外许多学者为此做了大量的研究工作。RAP通常处理方法是破碎、筛分成不同粒径的再生集料,应用于道路面层<sup>[3-6]</sup>或道路基层<sup>[7-9]</sup>。张东省等<sup>[10]</sup>将RAP的细颗粒添加到水泥稳

定碎石中后,材料的强度和抗裂性能均有所提高;冯德成等<sup>[11]</sup>对水泥稳定RAP的劈裂性能研究发现,材料的劈裂强度、峰值应变随RAP掺量的增加先增大后减小;薛勇刚等<sup>[12]</sup>发现,向水泥稳定碎石中掺入大比例的废旧沥青混合料仍能够满足道路基层的强度要求,并且具有良好的水稳定性和抗冻性;王学武<sup>[13]</sup>发现,由于沥青的黏弹性和应力松弛作用,RAP含量的增加有利于干缩性能。而ITS本身颗粒大多处于2 mm以下,可以直接代替混凝土中的细砂,并且优于普通混凝土的强度<sup>[14-16]</sup>。有研究指出,直接固化ITS掺量5.5%的水泥也可满足道路基层的强度要求<sup>[17]</sup>。

综合以上进展发现,对ITS和RAP的研究主要集中在力学方面,对温度收缩的研究以及在混合料中同时添加二者的研究较少。本试验场地处于寒冷地区,选取不同比例的RAP和ITS掺加到水泥稳定碎石中,进行无侧限抗压试验、弯拉试验和温缩试验,分析RAP和ITS的掺入比对水泥稳定碎石强度和温缩性能的影响规律,为以后的工程应用提供

收稿日期: 2021-08-17; 修订日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878242); 张家口市应用基础研究专项(1911032A)资助

作者简介: 张立群, 教授, 主要从事寒区交通设施运营与维护及桥梁耐久性研究. E-mail: zhanliqun5133@163.com

通信作者: 张学峰, 硕士研究生, 主要从事道路基层收缩性能研究. E-mail: 958551781@qq.com

参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

天然集料为玄武岩, RAP由张家口市公路破碎得到, ITS在张家口矿山上直接取得, 其物理指标见表1~2。

### 1.2 配合比设计

按一定质量比例的再生集料代替天然集料进行水泥稳定碎石级配设计, RAP掺量为0、25%、40%、55%、70%、100%, ITS掺量为0、30%、45%、

60%、90%。为了研究ITS和RAP掺量变化对水泥稳定碎石路用性能的影响, 顾万等<sup>[18]</sup>、黄孙科<sup>[19]</sup>指出RAP掺量在20%~30%时, 水泥稳定碎石有较好的路用性能, 因此在ITS掺量变化时, RAP掺量固定在25%。崔孝炜等<sup>[20]</sup>发现ITS掺量在50%~75%时, 混凝土有较好的路用性能, 所以RAP掺量变化时, ITS掺量固定在60%。根据规范<sup>[21]</sup>推荐的级配范围进行组成设计, 设计结果见表3。通过重型击实试验确定不同类型混合料的最大干密度和最佳含水量, 如表4所示。对于不同类型混合料统一采用5%的水泥掺量。

表1 粗集料的物理指标

Table 1 Physical indexes of coarse aggregate

材料类型	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	压碎指标/%	针片状颗粒含量/%
天然集料	2.671	2.626	2.540	1.75	16.53	4.15
RAP	2.492	2.439	2.414	1.60	7.21	3.22

表2 细集料的物理指标

Table 2 Physical indexes of fine aggregate

材料类型	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	堆积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	含水率/%
细砂	2.571	1.589	1.78	0.45
ITS	2.869	1.602	2.48	0.37

表3 再生集料的设计级配

Table 3 Design gradation of recycled aggregate

粒径/mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限/%	100.0	93.0	86.0	72.0	45.0	31.0	22.0	15.0	10.0	7.0	5.0
级配下限/%	100.0	88.0	76.0	59.0	35.0	22.0	13.0	8.0	5.0	3.0	2.0
设计级配/%	100.0	89.6	79.2	64.2	41.2	26.3	16.9	11.0	7.0	4.5	2.9

注: 表身数据为通过率, 即小于表头中某粒径的质量占试样总质量的百分比。

表4 击实试验结果

Table 4 Compaction test results

试验编号	RAP掺量/%	ITS掺量/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
ITS0	25	0	5.16	2.310
ITS30	25	30	4.91	2.318
ITS45	25	45	4.87	2.326
ITS60/RAP25	25	60	4.84	2.342
ITS90	25	90	4.90	2.320
RAP40	40	60	4.62	2.314
RAP55	55	60	4.52	2.309
RAP70	70	60	4.56	2.301
RAP100	100	60	4.54	2.271

### 1.3 试验方法

试验采用7 d无侧限抗压强度试验、90 d弯拉试

验和温缩试验来评价水泥稳定碎石的力学性能和温缩性能。依据规范<sup>[21]</sup>中高速公路基层压实标准,

试件采用 98% 的压实度。将养护完成后的试件进行力学试验和温缩试验,其中 7 d 无侧限抗压试验试件为 150 mm×150 mm 圆柱形试件,弯拉试验和温缩试验试件为 100 mm×100 mm×400 mm 中梁试件。无侧限抗压试验和弯拉试验加载速率分别为 1 mm·min<sup>-1</sup> 和 50 mm·min<sup>-1</sup>;温缩试验采用应变片法,温度区间为 -20~40 ℃,设定 6 个级别,每个级别温度差为 10 ℃,降温速率 0.5 ℃·min<sup>-1</sup>,恒温 3 h。由文献

[22]可知,在经历 3 次温度循环后,温缩特性变化规律已趋于稳定。因此,本文设计进行 5 次温度循环,温缩应变等试验数据由计算机自动采集,试验过程如图 1 所示。温缩试验中温缩系数按下式计算。

$$\alpha_t = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + \beta_s \quad (1)$$

式中: $\alpha_t$ 为温缩系数; $t_i, t_{i-1}$ 为 2 个相邻恒温段的温度值; $\varepsilon_i, \varepsilon_{i-1}$ 分别为温度  $t_i, t_{i-1}$  对应的温缩应变; $\beta_s$ 为温度补偿标准件的线膨胀系数。

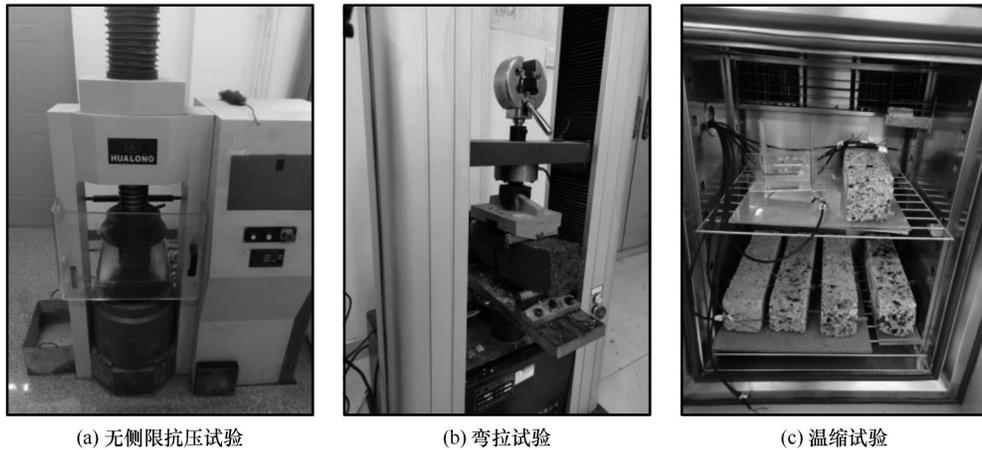


图 1 试验过程

Fig. 1 Test process: unconfined compressive test (a), flexural-tensile test (b) and temperature shrinkage test (c)

## 2 强度试验结果

### 2.1 ITS 掺量对强度的影响

由图 2 可知,无侧限抗压强度随着 ITS 掺量的增加先增大后减小,掺量在 60% 时达到最大值,比未掺 ITS 的水泥稳定碎石强度高 0.87 MPa,且均大于 5 MPa,满足高速公路道路基层的规定;弯拉强度随 ITS 掺量增加也呈现相似的现象,在掺量 45%

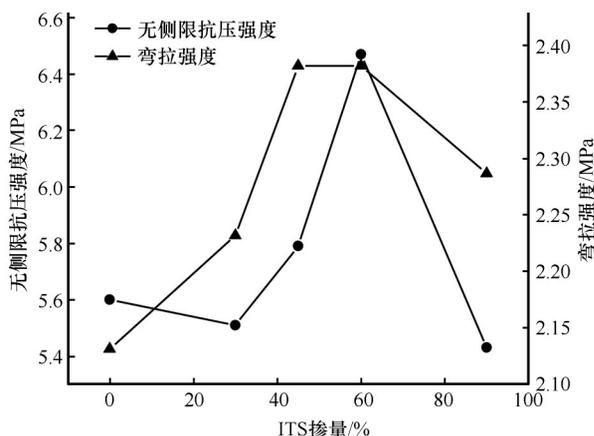


图 2 ITS 掺量对强度的影响

Fig. 2 Effect of ITS content on strength

时得到最大值。即说明 ITS 替代水泥稳定碎石中细砂后,不仅提高了材料的强度,也进一步提高了材料的抗裂性能。因为水泥发生了水解和水化反应,生成水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙和水化硫铝酸钙晶体,致使孔隙水 pH 值上升,自由  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  增加<sup>[23]</sup>。铁尾矿中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  成分比例在 60% 以上<sup>[24]</sup>,较高的 pH 值和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浓度会使铁尾矿中的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  溶解,并使它们与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙和钙矾石等水化产物,进一步增大了水泥稳定碎石整体性。

### 2.2 RAP 掺量对强度的影响

由图 3 可知,水泥稳定碎石抗压强度随着 RAP 掺量的增加逐渐降低,但也均大于 5 MPa,满足高速公路路基强度要求。而水泥稳定碎石的弯拉强度随 RAP 掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,在掺量 70% 达到最大值,比掺量 25% 的水泥稳定碎石强度增加了 0.26 MPa。废旧沥青混合料集料表面被沥青膜包裹,故形成矿料与水泥石间的过渡层,使得水泥石的胶结强度降低,致使导致抗压强度降

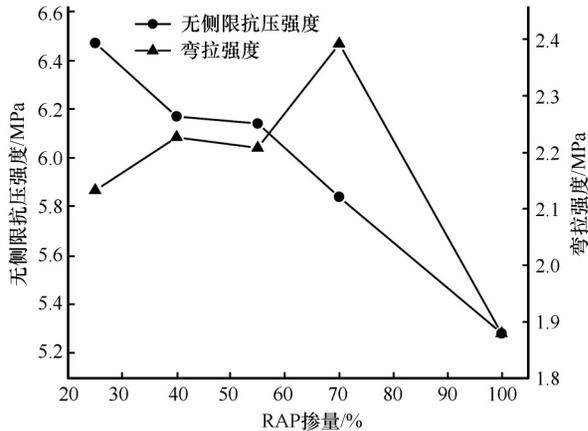


图3 RAP掺量对强度的影响

Fig. 3 Effect of RAP content on strength

低。沥青作为一种黏弹性材料,包裹住集料后,使集料与集料之间有了一定的抗拉性能,因此RAP的增加会增大材料的弯拉强度。

### 3 温缩试验结果

#### 3.1 ITS掺量对温缩性能的影响

##### 3.1.1 温缩应变随温度的变化

为了研究水泥稳定碎石的温缩性能,本试验进行了5次温度循环,以模拟季节冻土区温度的往复变化。如图4所示,掺ITS的水泥稳定碎石温缩应变随着时间的增加呈现震荡型变化规律,即温缩应变随着时间的增加相应地往复变化,并且图像的尖点即温缩应变的最大值和最小值随着时间的增长逐渐增大。当试验进行到第3次温度循环后,温缩数据呈现出明显规律,其后发展与此次类似,因此选取第3次温度循环下的降温阶段进行研究。如图5所示,掺ITS的水泥稳定碎石随着温度降低温缩应变逐渐增大,其中ITS掺量60%和90%的水泥稳定碎石温缩应变增长速度比较显著,在温度降到10℃后,温缩应变明显大于其他掺量水泥稳定碎石。水泥稳定碎石的温缩应变随着ITS掺量的增加逐渐增大,其中只有ITS30的温缩应变小于ITS0。铁尾矿中的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等成分可以继续与水泥发生水化反应,进一步增加了水泥稳定碎石的胶凝物质<sup>[16,25]</sup>,且刘章<sup>[26]</sup>指出水泥稳定材料中胶凝材料的温度收缩性大约是固相颗粒的2~3倍,因此随着ITS掺量增加水泥稳定碎石温缩应变会逐渐增大。

##### 3.1.2 温缩应变随温度循环次数的变化

如图6所示,掺ITS的水泥稳定碎石在升温 and 降温阶段累计温缩应变随循环次数变化趋势基本

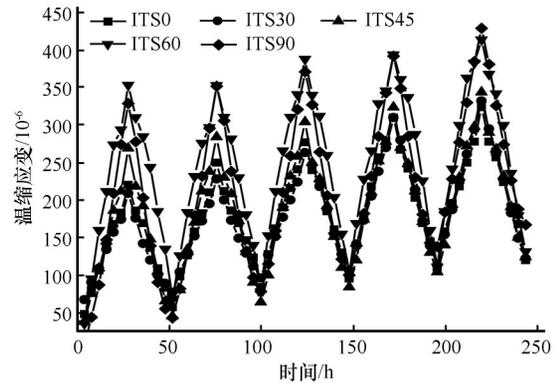


图4 掺ITS的水泥稳定碎石(RAP=25%)温缩应变随着时间的变化

Fig. 4 Variation of temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with ITS (RAP=25%) with time

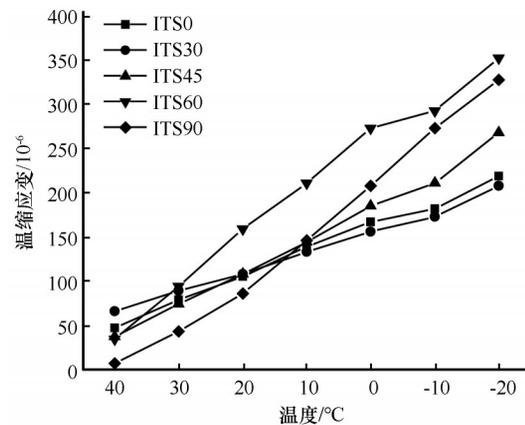


图5 掺ITS的水泥稳定碎石(RAP=25%)温缩应变随温度的变化

Fig. 5 Variation of temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with ITS (RAP=25%) with temperature

一致,ITS0和ITS30累计温缩应变随着温度循环次数的增加而增加,并且逐渐趋近ITS45,在最后一次温度循环时,ITS0和ITS30累计温缩应变为ITS45的89.2%和91.3%,ITS60和ITS90累计温缩应变随着温度循环次数的增加逐渐减小并稳定在某一数值,并且远大于ITS45累计温缩应变。再者ITS45累计温缩应变随着循环次数的增加基本不变,所以ITS45有较好的温缩性能。

##### 3.1.3 温缩系数随温度的变化

温缩系数可以反映出材料对温度变化的敏感性,图7为第3次温度循环下变化趋势图,掺ITS水泥稳定碎石的温缩系数随温度区间变化规律呈“V”字形分布,在温度区间-10~40℃温缩系数逐渐减小,在温度区间-20~-10℃温缩系数逐渐增大。即在温度区间-20~-10℃、30~40℃材料对温度变化

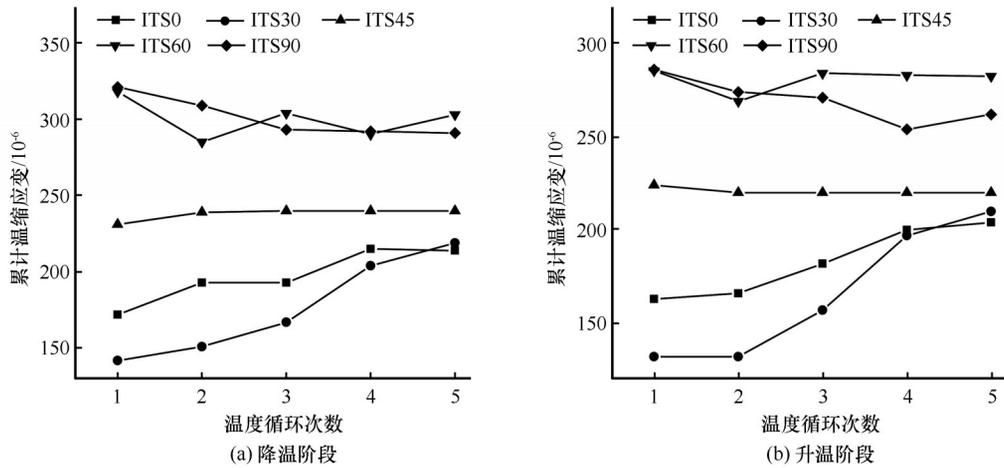


图6 掺ITS的水泥稳定碎石(RAP=25%)累计温缩应变随温度循环次数的变化

Fig. 6 Variation of cumulative temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with ITS (RAP=25%) with number of temperature cycles: cooling stage (a) and heating stage (b)

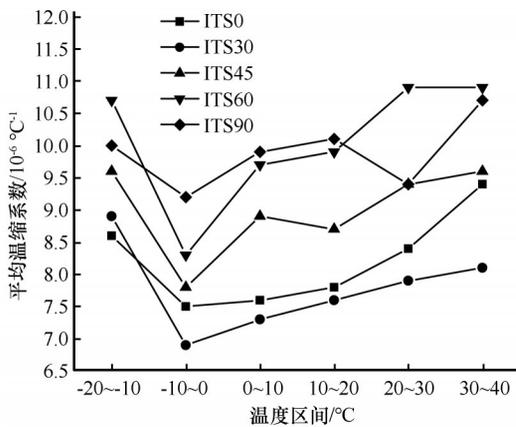


图7 掺ITS的水泥稳定碎石(RAP=25%)温缩系数随温度区间的变化

Fig. 7 Variation of temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam mixed with ITS (RAP=25%) with temperature range

的敏感性较大,在温度区间 $-10\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 敏感性最小,由图6得知ITS掺量45%时水泥稳定碎石温缩性能较好,结合图7发现,ITS45在 $-10\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内温缩系数较小,且如今施工技术可以在负温下施工<sup>[27]</sup>,所以施工温度在 $-10\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 较为适宜。

以上结果产生的原因,温度降低后水泥稳定碎石孔隙水的分子热运动减弱,液体分子之间距离减小,相互吸引力增大,表面张力也相应增大,在表面张力的作用下,液体表面积减小,进而使毛细管内径减小,从而试件体积收缩<sup>[28-29]</sup>。初始降温时,表面张力较大,此时温缩变形和温缩系数较大,随着温度降低表面张力比初始降温时有所减小,温缩系数也逐渐减小;当温度下降到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,水分子开始

转化为冰晶态,水分子热运动快速减小,表面张力随之快速增大,但在 $-10\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 时孔隙中大部分自由水和弱结合水开始结冰膨胀,抵消了部分收缩变形,所以此时温缩系数继续减小,当温度 $-20\sim -10\text{ }^\circ\text{C}$ 时仅有部分弱结合水开始结冰膨胀,此时产生的膨胀变形远远小于表面张力引起的收缩变形,所以此时温缩系数开始迅速增长。

#### 3.1.4 温缩系数随温度循环次数的变化

为了更好地说明温缩性能随温度循环变化的问题,这里引入平均温缩系数概念,平均温缩系数是求出每个温度区段内的温缩系数,然后再取其平均值。如图8所示,不同ITS掺量的水泥稳定碎石的平均温缩系数随着循环次数的增加呈现不同的规律,ITS0和ITS30的平均温缩系数随着循环次数的增加逐渐增大,即随着循环次数的增加对温度变化的敏感性越强,在第5次循环时平均温缩系数分别比第1次的大 $0.70\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $1.28\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,ITS60和ITS90的平均温缩系数随着循环次数的增加逐渐减小,但仍远远大于ITS0、ITS30和ITS45的平均温缩系数。其中ITS45的温缩系数基本不受温度循环的影响,稳定在 $9.0\times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 左右。

### 3.2 RAP掺量对温缩性能的影响

#### 3.2.1 温缩应变随温度的变化

掺RAP的水泥稳定碎石温缩试验也进行了5次温度循环,温缩应变随时间的变化规律与掺ITS水泥稳定碎石一致,如图9所示,图像中的尖点均随着时间的增加逐渐增加。为了便于比较,也取第3次温度循环下降温过程中温缩应变。如图10所示,掺RAP的水泥稳定碎石温缩应变均随温度的降低逐

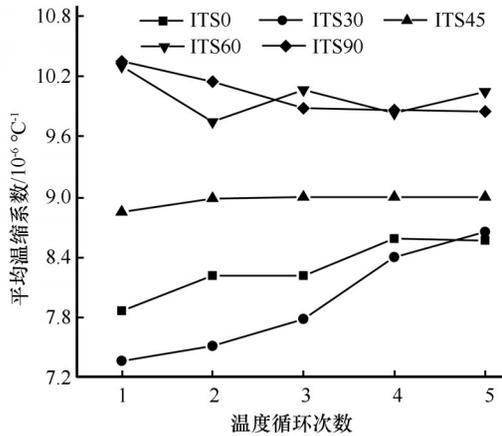


图8 掺ITS的水泥稳定碎石(RAP=25%)温缩系数随温度循环次数的变化

Fig. 8 Variation of temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam mixed with ITS (RAP=25%) with number of temperature cycles

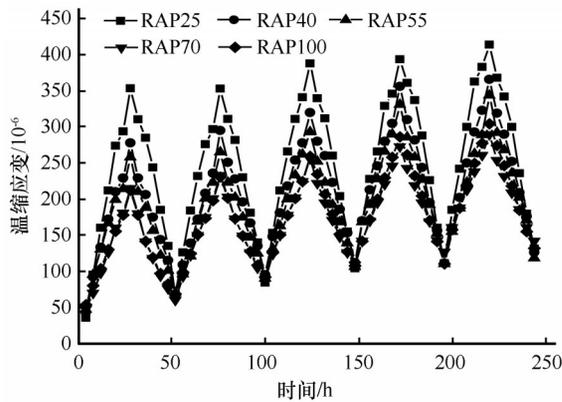


图9 掺RAP的水泥稳定碎石(ITS=60%)温缩应变随时间的变化

Fig. 9 Variation of temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with RAP (ITS=60%) with time

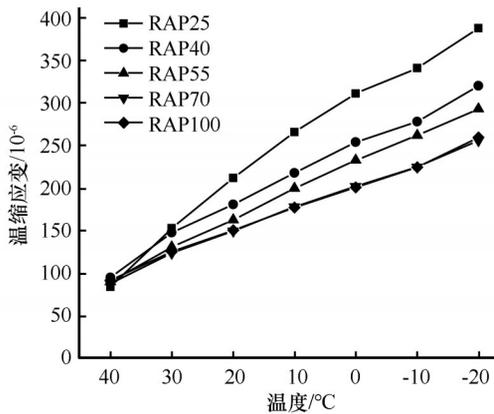


图10 掺RAP的水泥稳定碎石(ITS=60%)温缩应变随温度的变化

Fig. 10 Variation of temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with RAP (ITS=60%) with temperature

渐增大,增长速度随掺量的增加有所不同,RAP25温缩应变随温度降低增长较快,而RAP70和RAP100温缩应变随温度降低增长较慢,当在-20℃时RAP70和RAP100温缩应变仅为RAP25温缩应变的66.0%和66.9%。RAP是一种黏弹性材料,抵抗变形能力较强,并且RAP因为破碎和老化的过程中产生较多的孔隙,材料中空隙率越高,热传导率也就越大,混合料受温度影响也就越小<sup>[30]</sup>,所以掺RAP的水泥稳定碎石温缩应变随RAP掺量增加而减小。

### 3.2.2 温缩应变随温度循环次数的变化

如图11所示,掺RAP的水泥稳定碎石的累计温缩应变在升温阶段和降温阶段随着循环次数的增加有相同的变化趋势,RAP掺量在25%、40%、55%、100%时,掺RAP的水泥稳定碎石累计温缩应变随着循环次数的增加而增大,RAP掺量在70%时,则呈现相反的变化趋势;升温阶段累计温缩应变的变化速率明显大于降温阶段时的变化速率,其中第3~4次温度循环时体现得最为明显,在RAP掺量25%、40%、55%、70%、100%时升温阶段累计温缩应变分别大于降温阶段的4%、9%、7%、2%、9%。在升温和降温阶段,掺RAP的水泥稳定碎石的累计温缩应变均随着RAP掺量的增加逐渐减小,降温阶段时RAP70和RAP90的累计温缩应变仅为RAP25累计温缩应变的53.8%和64.2%。并且RAP70累计温缩应变随循环次数增加而减小,因此RAP掺量为70%时,表现出良好的温缩性能。

### 3.2.3 温缩系数随温度的变化

图12为第3次温度循环下温缩系数随温度的变化趋势图,RAP掺量为25%的水泥稳定碎石温缩系数随温度降低呈现“V”字形变化,而其他RAP掺量的水泥稳定碎石温缩系数随温度变化呈现山谷型,即两端温度区间温缩系数变化显著,中间温度区间温缩系数无明显变化。由图11得知,RAP掺量为70%时有较好的温缩性能,且RAP70温缩系数在-10~30℃温度范围内较小,因此RAP70适宜的温度范围是-10~30℃,比ITS45有更广的施工温度。掺RAP的水泥稳定碎石温缩系数随温度变化规律的原因与掺ITS的水泥稳定碎石的结果类似,表面张力随着温度降低逐渐减小,温缩系数也随之减小,降到0℃以下后由于结冰后的膨胀,试件温缩系数继续减小,在-20~-10℃时,试件里的自由水大大减少,此时产生的膨胀变形远远小于表面张力引起

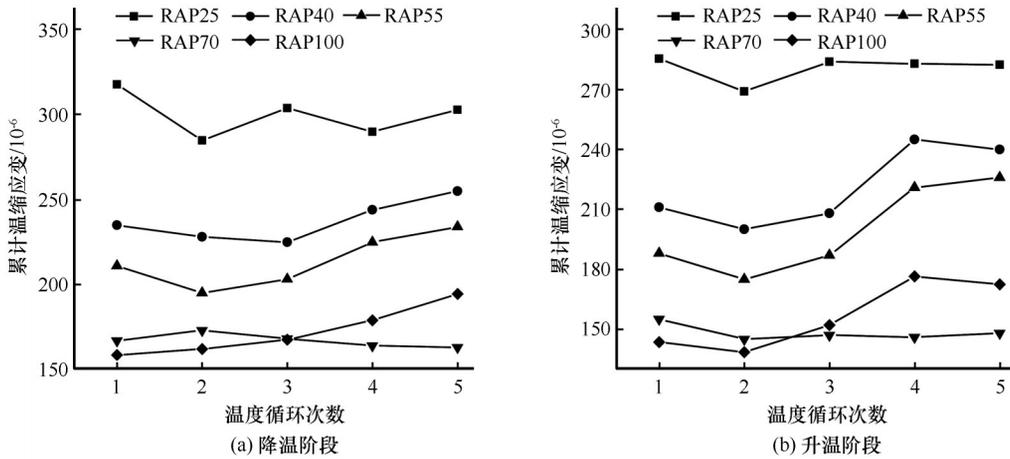


图 11 掺RAP的水泥稳定碎石(ITS=60%)累计温缩应变随温度循环次数的变化

Fig. 11 Variation of cumulative temperature shrinkage strain of cement stabilized macadam mixed with RAP (ITS=60%) with number of temperature cycles: cooling stage (a) and heating stage (b)

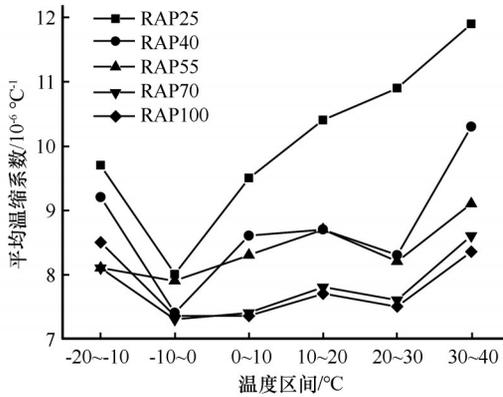


图 12 掺RAP的水泥稳定碎石(ITS=60%)温缩系数随温度区间的变化

Fig. 12 Variation of temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam mixed with RAP (ITS=60%) with temperature range

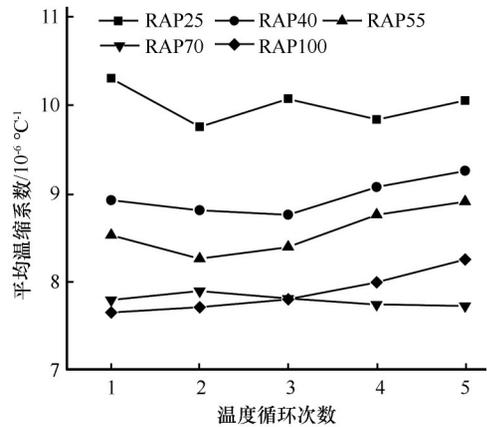


图 13 掺RAP的水泥稳定碎石(ITS=60%)温缩系数随温度循环次数的变化

Fig. 13 Variation of temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam mixed with RAP (ITS=60%) with number of temperature cycles

的收缩变形,所以此时温缩系数开始迅速增长。

### 3.2.4 温缩系数随温度循环次数的变化

如图 13 所示,水泥稳定碎石的平均温缩系数随着 RAP 掺量增加逐渐减小,其中 RAP70 和 RAP100 平均温缩系数在第 5 次温度循环时仅为 RAP25 的 76.8% 和 89.1%。RAP70 的平均温缩系数随着循环次数的增加逐渐减小,在第 5 次温度循环时平均温缩应变比初始时小  $0.06 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,且明显小于其他掺量的水泥稳定碎石。而 RAP25、RAP40、RAP55、RAP100 平均温缩系数随着循环次数的增加先减小后增大,在第 2 次温度循环时平均温缩系数最小,在最后 1 次温度循环时平均温缩系数比第 2 次温度循环平均温缩系数分别增长了  $0.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $0.45 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $0.65 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $0.54 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

## 4 结论

通过对掺加 RAP 和 ITS 的水泥稳定碎石的无侧限抗压试验、弯拉试验和温缩试验研究发现:

(1) 掺加 ITS 有利于提高对水泥稳定碎石的抗压强度和弯拉强度,ITS 在掺量 60% 时无侧限抗压强度达到最大值,在掺量 45% 时弯拉强度达到最大值。而 RAP 的掺加减小了水泥稳定碎石的抗压强度,但增加了水泥稳定碎石的弯拉强度,并在掺量 70% 时取得最大值。

(2) 从单一降温过程中可知,ITS 掺量的增加会逐渐加大水泥稳定碎石的温缩应变,但在温度循环过程中,ITS 掺量 45% 的水泥稳定碎石的温缩应变和温缩系数基本稳定在某一个值,受温度循环的影

响已较小,在此掺量下-10~20℃温度区间均可进行施工。

(3) 由于RAP材料自身的性质和多孔性等特点,所以掺加RAP有利于稳定水泥稳定碎石的温缩性能。掺量70%时水泥稳定碎石的温缩应变和温缩系数达到最小值,并且随着温度的循环变化,温缩应变不同于其他掺量的水泥稳定碎石,呈现逐渐减小的变化规律。

### 参考文献(References):

- [1] Luo Daisong, Tian Chunlin, Guo Meng, et al. Mix design and performance verification of modified recycled asphalt mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(12): 7-13. [罗代松, 田春林, 郭猛, 等. 改性再生沥青混合料配合比设计及性能验证[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(12): 7-13.]
- [2] Lü Shaowei, Jiang Ping, Qian Biao, et al. Research progress on mechanical properties and recycling of iron tailings sand[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(2): 466-470. [吕绍伟, 姜屏, 钱彪, 等. 铁尾矿砂力学性能及再生利用研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(2): 466-470.]
- [3] Ning Shikai. Influence of RAP content on pavement performance of asphalt concrete [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2020, 40(3): 542-545. [宁世凯. RAP掺量对沥青混凝土路面性能影响试验[J]. *桂林理工大学学报*, 2020, 40(3): 542-545.]
- [4] Chen Long, Chen Hongbin, Li Peng, et al. Quantitative evaluation on interfacial diffusion behavior of asphalt with high percentage of RAP [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 811-819. [陈龙, 陈宏斌, 李朋, 等. 高掺RAP沥青界面融合行为的量化评价[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4): 811-819.]
- [5] Fan Shangzhi, Zhang Yajie. Study on properties of micro-surfacing mixtures with RAP [J]. *New Building Materials*, 2019, 46(9): 19-23. [樊尚志, 张雅杰. 掺加RAP的微表处混合料性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(9): 19-23.]
- [6] Fan Pengyun, Liu Bingjian, Lu Zaihong, et al. Impact of penetrant on the performance of recycled asphalt mixture [J]. *Highway*, 2019, 64(3): 43-46. [范鹏云, 刘冰剑, 路再红, 等. 渗透剂对再生沥青混合料性能的影响[J]. *公路*, 2019, 64(3): 43-46.]
- [7] Zhang Peng. Long-term performance of cement-stabilized reclaimed asphalt pavement (RAP) base [D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2019. [张鹏. 水泥稳定旧沥青混合料基层长期性能研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2019.]
- [8] Luo Kun. Study on road performance about cement stabilization crushed-stones mixed with reclaimed asphalt pavement [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017. [罗坤. 掺废旧沥青混合料水泥稳定碎石路用性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.]
- [9] Zhou Aizhao, Zhang Jingyu, Yin Jie, et al. Shear strength characteristics of recycled asphalt pavement material [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(6): 733-738. [周爱兆, 张静玉, 殷杰, 等. 废旧回收沥青路面材料的强度特性[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 733-738.]
- [10] Zhang Dongsheng, Wang Haipeng. Study on crack resistance of cement stabilized macadam mixed with fine particles of waste asphalt mixture [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2011, 31(5): 221-225. [张东省, 王海朋. 掺废旧沥青混合料细颗粒的水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. *中外公路*, 2011, 31(5): 221-225.]
- [11] Feng Decheng, Zhao Yin, Chen Jian. Splitting stress-strain properties of cement stabilized reclaimed asphalt pavement [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(4): 74-78. [冯德成, 赵银, 陈剑. 水泥稳定RAP材料劈裂应力-应变特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(4): 74-78.]
- [12] Xue Yonggang, Song Yunxiang, Han Zhibin. Study on road performance of cement stabilized base with large amount of waste asphalt mixture [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2014, 34(5): 298-301. [薛勇刚, 宋云祥, 韩志斌. 大掺量废旧沥青混合料水泥稳定基层路用性能研究[J]. *中外公路*, 2014, 34(5): 298-301.]
- [13] Wang Xuewu. Influence of RAP on cement stabilized full-depth reclamation material properties [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(10): 57-63. [王学武. RAP对全厚式水泥稳定再生材料性能的影响[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(10): 57-63.]
- [14] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 72-79.
- [15] Melorie A K, Kaushal D R. Experimental investigations of the effect of chemical additives on the rheological properties of highly concentrated iron ore slurries [J]. *KONA Powder and Particle Journal*, 2018, 35: 186-199.
- [16] Li Meng, Meng Xiangyin, Li Tao, et al. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete with iron tailings [J]. *Concrete*, 2020(3): 101-104. [李萌, 孟祥荫, 李涛, 等. 铁尾矿砂再生骨料混凝土力学性能研究[J]. *混凝土*, 2020(3): 101-104.]
- [17] Sun Jishu, Dou Yuanming, Chen Zhaoxia, et al. Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing gravel in highway application [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 97/98: 425-428.
- [18] Gu Wan, Xiao Peng, Liu An'an, et al. Application of full cycle regeneration of milling materials in urban road reconstruction and expansion project [J]. *New Building Materials*, 2019, 46(7): 8-12. [顾万, 肖鹏, 刘安安, 等. 城市道路改扩建工程中铣刨料全循环再生应用[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(7): 8-12.]
- [19] Huang Sunke. Experimental study on road performance of foam recycled asphalt mixture [J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2020(1): 39-42. [黄孙科. 泡沫再生沥青混合料路用性能试验研究[J]. *西部交通科技*, 2020(1): 39-42.]
- [20] Cui Xiaowei, Deng Wanxin, Zhao Yuxi, et al. Basic research on the preparation of mineral admixtures with iron ore tailings [J]. *Non-Metallic Mines*, 2020, 43(4): 88-91. [崔孝炜, 邓惋心, 赵雨曦, 等. 利用铁尾矿作为混凝土掺和料的基础研究[J]. *非金属矿*, 2020, 43(4): 88-91.]
- [21] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. [中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.]
- [22] Cui Honghuan, Liu Weitao, Zhang Liqun. Study on temperature shrinkage property of cement modified subgrade soil in sea-

- sonally frozen soil region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 204-213. [崔宏环, 刘卫涛, 张立群. 季节冻土区水泥改良路基土的温缩性能研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 204-213.]
- [23] Wu Zhengguang, Xu Jian, Kang Aihong, et al. A study on the strength mechanism of cement stabilized recycled asphalt mixture[J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2014, 17(1): 71-74. [吴正光, 徐剑, 康爱红, 等. 水泥稳定废旧沥青混合料的强度试验[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2014, 17(1): 71-74.]
- [24] Li Riwen, Cai Haili, Ning Xun'an, et al. Separation of lead, copper, cadmium in iron tailings by  $\text{CaCl}_2$  chlorination roasting method[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3): 1083-1091. [李日文, 蔡海立, 宁寻安, 等.  $\text{CaCl}_2$ 氯化焙烧分离铁尾矿中的重金属铅铜镉[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 1083-1091.]
- [25] Tong Xiao, Wang Sheliang. Mechanical properties and microstructure analysis of recycled aggregate concrete with iron tailings[J]. *Concrete*, 2021(1): 91-93. [全宵, 王社良. 铁尾矿砂再生骨料混凝土力学性能及微观结构分析[J]. *混凝土*, 2021(1): 91-93.]
- [26] Liu Zhang. Study on the initial durability of semi-rigid base material[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. [刘章. 半刚性基层材料的初期耐久性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.]
- [27] Hou Xiaohong. Research on shrinkage performance of cement emulsified asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. [侯小红. 水泥乳化沥青混合料收缩性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.]
- [28] Zou Xiaojun. Problems needing attention in highway subgrade construction in winter[J]. *Technology Innovation and Application*, 2014(24): 224. [邹小军. 冬季公路路基施工中需要注意的问题[J]. *科技创新与应用*, 2014(24): 224.]
- [29] Gan Xinli, Zheng Nanxiang, Cong Zhuohong. Analysis of adhesion between asphalt and aggregate based on the infiltration parameters and surface energy theory[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(9): 1388-1395. [甘新立, 郑南翔, 丛卓红. 基于浸润参数和表面能理论的沥青与集料黏附性分析[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(9): 1388-1395.]
- [30] Zhao Li, Yu Jianying, Xu Song, et al. Influence of organic warm-mixed agent on properties of SBS modified bitumen and its mixture[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(11): 21-24. [赵丽, 余剑英, 徐松, 等. 有机温拌剂对 SBS 改性沥青及其混合料性能的影响研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(11): 21-24.]

## Mechanical and temperature shrinkage properties of recycled aggregate cement stabilized macadam subgrade in cold regions

ZHANG Liquan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>2</sup>, CUI Honghuan<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

**Abstract:** To study the problem of reclaimed asphalt pavement (RAP) and iron tailing sand (ITS), they are added to cement stabilized macadam as gravel and sand. The road performance of cement stabilized macadam is studied through unconfined compressive test, flexural-tensile test and temperature shrinkage test, and the effects of RAP and ITS content on cement stabilized macadam is analyzed. The results show that: When RAP content is fixed (25%), the increase of ITS content is beneficial to improve compressive strength and flexural-tensile strength of cement stabilized macadam, but it will increase temperature shrinkage strain and temperature shrinkage coefficient of the material, and reduce temperature shrinkage property. Among them, ITS45 (ITS content is 45%) has better temperature shrinkage performance. When ITS content is fixed (60%), the increase of RAP content will not be conducive to compressive strength of cement stabilized macadam, but it can increase flexural-tensile strength, and reduce temperature shrinkage strain and temperature shrinkage coefficient. Among them, RAP70 (RAP content is 70%) has the best temperature shrinkage performance. Compared with ITS45, RAP70 has a wider construction temperature range.

**Key words:** cement stabilized macadam; unconfined compressive strength; flexural-tensile strength; temperature shrinkage property; RAP; ITS

(责任编辑: 王天亮)