

# 橡胶粉对水泥稳定碎石性能的影响研究

苏忠纯<sup>1</sup>, 王世硕<sup>2</sup>, 赵卫民<sup>1</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司; 2. 中交(深圳)工程局有限公司)

**摘 要:**以不同剂量水泥,不同目数和掺量的橡胶粉为变量对水泥稳定碎石的力学性能、干燥收缩和抗冻性能进行对比分析。结果表明水泥稳定碎石中掺入橡胶粉后可提高水泥稳定碎石的抗冻性指标,降低因失水而引起的干缩应变和干缩系数,但因其内部形成的软弱交结面和“气泡”作用,使无侧限抗压强度、抗压回弹模量和间接抗拉强度指标降低,因此,橡胶粉在水泥稳定碎石基层中的应用还需进一步研究,达到延长路面基层使用寿命的目的。

**关键词:** 橡胶粉; 水泥稳定碎石; 力学性能; 干缩性能; 抗冻性能

## 0 引言

水泥稳定碎石基层是一种典型的半刚性结构层,具有强度高、稳定性好、刚度大、水稳性和抗冻性能好等优点,因其造价相对较低、组成材料简单且来源广泛,在我国的各等级公路基层和底基层结构中大量使用。我国已建成的高速公路大约 95% 以上路面的基层或底基层采用半刚性结构,而且结构强度越来越高,这对路面的整体稳定性和承载能力有利。但在温度和湿度变化时,水泥稳定碎石结构层易产生干缩裂缝,进而导致沥青面层产生反射裂缝,严重影响沥青路面的耐久性能和使用寿命<sup>[1-6]</sup>。橡胶粉是一种弹性材料,具有一定韧性,能在一定程度上减小基层因温湿度的变化引起的收缩变形。张翔飞等<sup>[7]</sup>用橡胶粉代替部分细集料掺入水泥稳定碎石中,发现掺入橡胶粉能使水泥稳定碎石的干缩系数减小 30%,同时掺入聚合物可增加水泥稳定碎石的最大位移形变。何勇等<sup>[8]</sup>用橡胶粉替代等质量的 0~2.36 mm 规格的细集料,发现水泥稳定碎石的混合料强度、静压回弹模量都有一定程度的降低。王军龙等<sup>[9]</sup>将橡胶粉以内掺的方式等量替代机制砂进行试验,

掺加橡胶粉后水泥稳定碎石的温缩系数显著减小,可改善疲劳开裂性能。因此,从水泥稳定碎石基层材料本身出发,开展橡胶粉的路用性能研究,以改善水泥稳定碎石材料的稳定性(干缩、温缩),提高耐久性能,从根本上缓解高速公路反射裂缝问题,延长公路使用寿命,这不仅可以缓解我国高速公路运营早期反射裂缝严重的问题,而且为废弃橡胶的再生利用提供了新思路,增加了废弃橡胶的综合利用率,保护了生态环境,符合我国倡导的绿色公路建设需求。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

1) 水泥：华润水泥有限公司 P.O42.5 普通硅酸盐水泥。

2) 集料: 廖保石场 0~31.5 mm 级配碎石, 由 19.5~31.5 mm、9.5~19 mm、4.75~9.5 mm 和 0~4.75 mm 四种规格碎石按 10:35:25:30 的比例混合而成, 其级配见表 1。

3) 橡胶粉: 某公司 30 目和 40 目的橡胶粉, 其性能指标见表 2。

4) 水：地下水。

表 1 碎石级配

项目	筛孔尺寸/mm								
	31.5	26.5	19.0	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配通过率/%	100.0	96.1	74.8	58.3	50.5	27.9	19.4	11.0	2.3

表 2 橡胶粉性能指标

橡胶颗粒粒径	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	橡胶烃/%	天然橡胶/%	灰分/%	化学纤维/%	炭黑/%	丙酮苯/%
30 目	0.760	37.7	58	44.14	7	0.00	29	6
40 目	0.627	83.2						

## 1.2 试验设计

水泥是稳定碎石强度最主要的来源,本次试验设计水泥剂量为集料总重的 6.0%和 7.0%,橡胶粉选取 30 目和 40 目两种规格,其掺量取 0.5%和 1.0%。由于橡胶粉颗粒约为 0.6 mm 和 0.425 mm,粒径相对较小,且在细集料的级配范围内,本试验将橡胶粉按重量等量替代 0~4.75 mm 的细集料进行试验研究。橡胶粉在稳定碎石中的用量按式(1)计算,水泥稳定碎石配合比见表 3。

$$\text{橡胶粉用量} = \text{细集料质量} \times \text{橡胶粉掺量} \times 100\% \quad (1)$$

表 3 水泥稳定碎石配合比

编号	橡胶颗粒粒径/目	橡胶颗粒掺量/%	水泥掺量/%
A1	30	0.5	6.0
A2	30	1.0	
A3	40	0.5	
A4	40	1.0	
G1	—	—	7.0
B1	30	0.5	
B2	30	1.0	
B3	40	0.5	
B4	40	1.0	
G2	—	—	

## 1.3 试验过程

水泥稳定碎石无侧限抗压强度、间接抗拉强度(劈裂试验)、抗压回弹模量(顶面法)、冻融和干缩试验分别按照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行。以设定的水泥、集料和橡胶粉比例采用重型击实试验确定最大干密度、最优含水率后进行各种性能试件的成型。无侧限抗压强度采用静压法成型  $\phi 100$  mm,高 100 mm 的圆柱形试件,标准养护条件为温度  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度  $\geq 95\%$ ,到达试验规定的养护期前一天将试件取出,浸泡在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  水中 24 h,以 1 mm/min 的速度进行各龄期无侧限抗压强度试验;间接抗拉强度试件尺寸、成型方法、养护方法和加载速率与无侧限抗压强度试验相同,在 90 d 龄期时将试件上下各放一压条后横置于压力机压板上进行间接抗拉强度试验;抗压回弹模量试件试验龄期为 90 d,试件经补平顶面静置 8 h 后浸水 24 h,试验前在顶面撒少量的 0.25~0.5 mm 砂以增加试件顶面与顶板的接触面积,施加荷载为 90 d 无侧限抗压强度的 60%,分 5 级加载,记录

每级加载后 1 min 和卸载后 0.5 min 的千分表读数;干缩试验采用 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  400 mm 的中梁试件,试件成型后在标准养护条件下养护至 7 d 龄期测定初长,将试件安装在收缩仪上置于温度  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度  $(60 \pm 5)\%$  的干缩室,每天测一次长度;冻融试验采用  $\phi 150$  mm,高 150 mm 的圆柱形试件,经过标准养护和浸水处理后放入温度为  $-18^\circ\text{C}$  低温箱冻结 16 h,然后取出放入温度为  $20^\circ\text{C}$  水槽融化 8 h,每个循环结束测量称重,5 次冻融循环后进行抗压强度试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 无侧限抗压强度

图 1~图 4 分别是水泥剂量为 6%、7%时橡胶粉掺量与无侧限抗压强度关系,可以看出随着橡胶粉掺量的增加水泥稳定碎石无侧限抗压强度降低明显,与基准试件相比,掺入 30 目和 40 目橡胶粉的水泥稳定碎石无侧限抗压强度损失率分别为 38%~51%和 33%~46%。等质量的橡胶粉替代细集料后,由于橡胶粉的表观密度约为细集料的 1/4,其加入到水泥稳定碎石的体积远大于替代的细集料体积,比表面积增大,导致包裹在集料骨架上的水泥浆变薄,黏结强度也相对较小,同时随着橡胶粉掺量的增大,搅拌不均更易形成胶粉团聚堆集,与粗集料形成软弱的黏结面,造成强度降低。橡胶粉是一种弹性材料,自身易变形、刚度小、强度低,难以与集料紧密结合,在外部荷载作用下,荷载完全由集料骨架支撑,橡胶粉完全没有承载能力,相当于试件内部的“气泡”,降低内部的密实程度,也就是承受荷载的有效面积降低,使强度下降。由于胶粉团聚形成“气泡”的不规则形状,在受载情况下更容易形成集中应力,产生裂纹,导致强度降低。

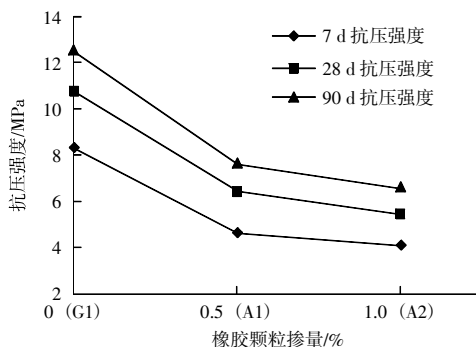


图 1 水泥剂量 6.0%时 30 目橡胶粉掺量与抗压强度的关系

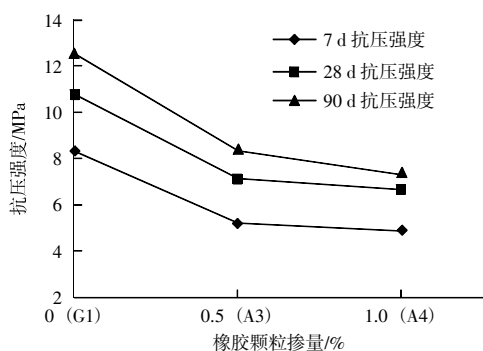


图2 水泥剂量6.0%时40目橡胶粉掺量与抗压强度的关系

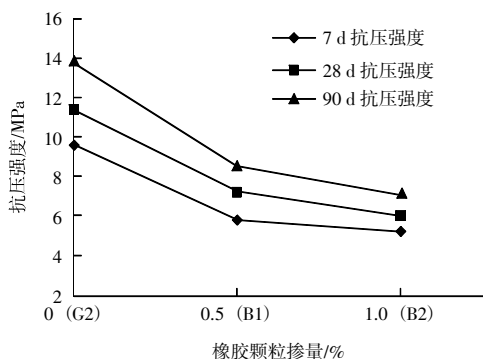


图3 水泥剂量7.0%时30目橡胶粉掺量与抗压强度的关系

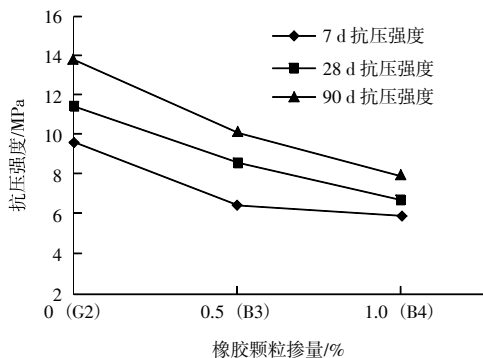
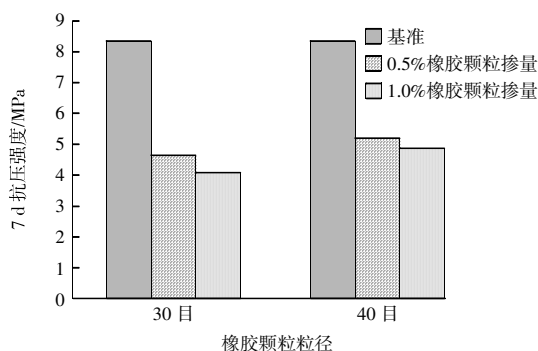
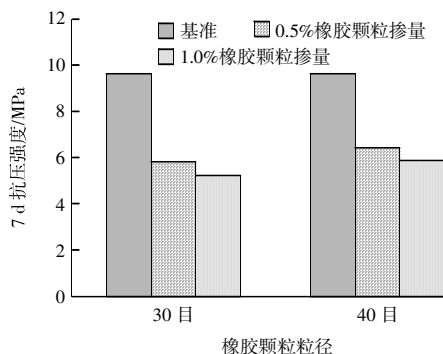


图4 水泥剂量7.0%时40目橡胶粉掺量与抗压强度的关系

图5是水泥剂量分别为6%和7%时橡胶粉颗粒粒径与7d无侧限抗压强度的直方图(7d、28d和90d关系基本相同)。可以看出掺入橡胶粉后7d无侧限抗压强度明显下降,当水泥剂量和橡胶粉掺量相同时,掺40目橡胶粉水泥稳定碎石的无侧限抗压强度损失率更小,其原因在于橡胶粉颗粒粒径越大,在试件内部形成的不规则“气泡”越大,受载时应力集中现象也越明显,越易在应力集中点产生破坏,同时随着橡胶粉粒径的增大,受载时试件变形也越大,实际受载有效面积相对减小,强度损失也越大。



(a) 6%水泥剂量

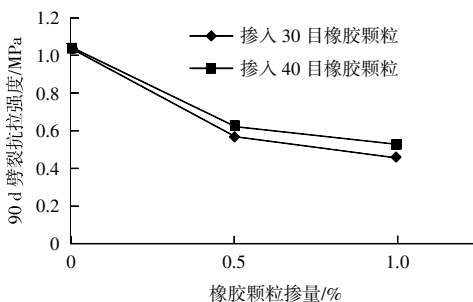


(b) 7%水泥剂量

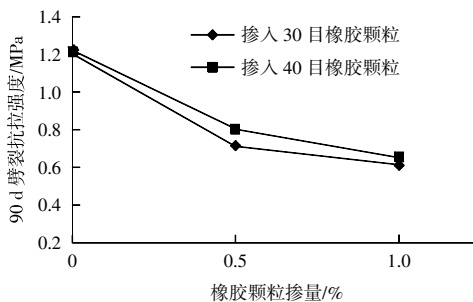
图5 不同水泥剂量下橡胶颗粒粒径与7d无侧限抗压强度之间的关系

## 2.2 劈裂抗拉强度

图6为不同水泥剂量下橡胶粉与间接抗拉强度的关系,可以看出随着橡胶粉掺量的增加和其粒径的增大,间接抗拉强度呈降低趋势。



(a) 6%水泥剂量



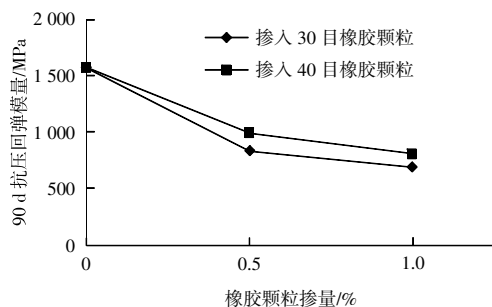
(b) 7%水泥剂量

图6 不同水泥剂量下橡胶粉掺量与90d劈裂抗拉强度的关系

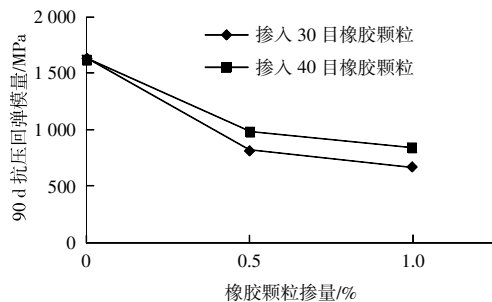
水泥稳定碎石掺入橡胶粉后,与水泥一起包裹在集料周围,由于其特殊的物理性质不能与水泥和集料紧密结合,形成薄弱的结合面,内部黏结强度降低,试件受载后很容易在薄弱面破坏,致使间接抗拉强度降低。橡胶粉颗粒的粒径大小与间接抗拉强度的损失率相关,掺入 30 目和 40 目橡胶粉的水泥稳定碎石间接抗拉强度损失率分别为 36%~54% 和 28%~45%,橡胶粉的颗粒粒径越大,其间接抗拉强度损失率越大。橡胶粉颗粒越大,内部形成的“气泡”越大,越不密实,与水泥黏结性越差,容易形成大的黏结薄弱面,受载时越容易破坏,降低间接抗拉强度。掺入橡胶粉后间接抗拉强度与抗压强度损失率基本一致,虽然其受力方式不同,但都与掺入橡胶粉形成的孔隙和弱黏结面相关。

### 2.3 抗压弹性模量

图 7 为不同水泥剂量下橡胶粉掺量与抗压回弹模量的关系,可以看出随着橡胶粉掺量和粒径的增大抗压回弹模量呈降低趋势,其下降幅度大约为 40%~60%。橡胶颗粒为弹性材料,受载后压缩变形较大,掺量越大弹性变形越大,粒径越大内部孔隙越大,抗压回弹模量下降幅度越大,与无侧限抗压强度降低原因基本一致。



(a) 6%水泥剂量



(b) 7%水泥剂量

图 7 不同水泥剂量下橡胶粉掺量与 90 d 抗压回弹模量关系

### 2.4 干缩性能

图 8~图 9 为水泥稳定碎石混合料干缩应变、干缩系数与时间变化的曲线,可以看出干缩应变和干缩系数均随着龄期的增长而增大,且早期增长迅速,后期增长速度缓慢并逐渐趋于稳定;对于同一水泥剂量的稳定碎石,掺入橡胶粉后各龄期的干缩应变和干缩系数小于基准,且橡胶粉颗粒越细,干缩变化越小。水泥稳定碎石的干缩主要是内部失水引起的体积变化,先期水泥水化速度快,后期水化速度相对缓慢,导致干缩应变和干缩系数随龄期而增长趋于稳定;掺入橡胶粉后,由于橡胶粉吸水性大,相当于在内部为水泥水化提供水源,水泥水化过程中先与周边吸附水发生化学反应,然后由橡胶粉持续提供的水分继续进行水化,减缓干缩速率,另一方面水泥水化因失水导致毛细孔内外压力失衡,橡胶粉具有较大的弹性,可以削减毛细管压力失衡而引发的分子间力的作用,减小干缩,二者共同作用导致掺入橡胶粉水泥稳定碎石干缩率小于基准数水泥稳定碎石。橡胶颗粒越细,其比表面积越大,吸水性越强,在相同掺量下,干缩越小。

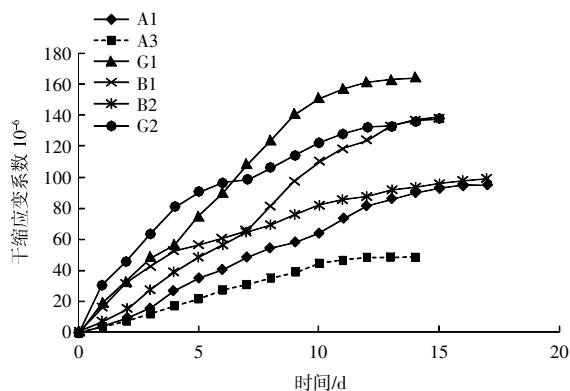


图 8 干缩应变随时间变化规律

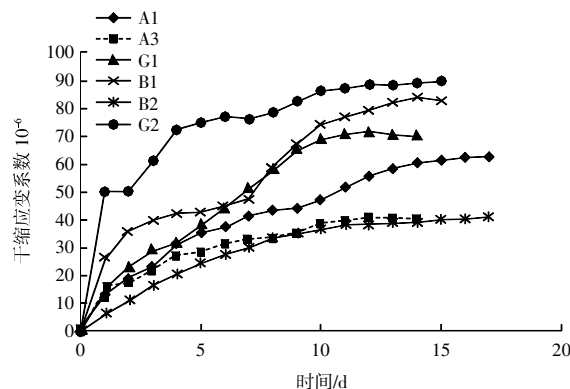


图 9 平均干缩系数随时间变化规律

2.5 抗冻性

表4为橡胶粉水泥稳定碎石抗冻性能试验结果，相较基准水泥稳定碎石，掺入橡胶粉的水泥稳定碎石抗冻性指标有所提高。橡胶粉颗粒比大部分细集料小的多，密度也小，等质量替代细集料后大量的橡胶粉挤嵌在集料间的空隙，降低水泥稳定碎石的空隙率，减小孔隙水进入的通道，加大孔隙水进入的难度，延长孔隙水进入的时间，致使抗冻性能提高。橡胶颗粒是弹性体，挤嵌在集料间，当发生冻胀时，橡胶颗粒在膨胀应力作用下受到挤压变小，释放了部分膨胀应力，缓解冻胀对内部结构的损伤破坏，当融化时，橡胶颗粒恢复形变，继续充满内部空隙，阻碍水分的进入，周而复始的重复作用使抗冻性提高。水泥剂量为6%时橡胶粉越细抗冻性指标越大，较细的橡胶粉能更好的填充集料间的空隙，堵塞孔隙水通道，导致掺入的橡胶粉越细抗冻性越好。水泥剂量为7%时抗冻性指标基本一致，可能是水泥剂量超过一定范围后起主导作用，比橡胶粉细度的作用更大，导致抗冻性差别不大。

表4 抗冻性能试验结果

编号	90 d 抗压强度/MPa	抗冻性指标/%
A1 (30 目)	7.65	86
A3 (40 目)	8.34	94
G1 (基准)	12.58	83
B1 (30 目)	8.50	89
B3 (40 目)	10.13	88
G2 (基准)	13.80	84

3 结语

水泥稳定碎石掺入橡胶粉后，其力学性能显著降低，耐久性性能得到改善，具体表现为：

1) 无侧限抗压强度、抗压回弹模量和间接抗

拉强度等力学性能指标随着橡胶粉掺量的增大有较大幅度降低，橡胶粉粒径的大小也对力学性能有一定的影响，粒径越粗降低幅度越大。

2) 掺入橡胶粉后水泥稳定碎石的干缩应变和干缩系数明显减小，抗冻性指标增大，有利于延缓基层开裂，延长其使用寿命。

水泥稳定碎石中掺入橡胶粉可在一定程度上改善其耐久性，但对力学性能的影响相对较大，改善橡胶粉和水泥水化产物之间的黏结能力，解决橡胶粉水泥稳定碎石力学性能的劣化，是下一步室内试验需要解决的问题。本试验研究还不够全面，应进一步对橡胶粉稳定碎石的抗冲刷性能、抗疲劳性能进行研究，积累试验数据，为橡胶粉在水泥稳定碎石中的应用提供试验依据。

参考文献：

[1] 吕松涛,王双双,王盘盘,等. 橡胶-水泥稳定碎石持强增韧特性研究[J]. 中国公路学报,2020,33(11):139-147.

[2] 覃峰,杨胜坚,陆宏新. 橡胶粉水泥稳定碎石基层水稳定性试验研究[J]. 铁道标准设计,2010(5):25-29.

[3] 覃峰. 橡胶粉水泥稳定碎石基层收缩性能试验研究[J]. 新型建筑材料,2009(12):32-35.

[4] 孙鹏飞,季节,杨松,等. 水泥剂量、橡胶粉粒径及掺量对水泥稳定碎石强度的影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2015,11(5):49-52.

[5] 杨松,季节,孙鹏飞,等. 橡胶粉改性水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 现代交通技术,2015(4):1-4.

[6] 路鑫,梁武星. 橡胶粉改性水泥稳定碎石性能研究[J]. 黑龙江交通科技,2015,38(10):3-4.

[7] 张翔飞,钱振东,杨若冲. 橡胶粉水泥稳定碎石收缩性能研究[J]. 现代交通技术,2016,13(1):13-16.

[8] 何勇,王元纲,蔡晓飞. 掺废橡胶颗粒的水泥稳定碎石力学性能的研究[J]. 北方交通,2014,(6):76-78.

[9] 王军龙. 掺橡胶粉的水泥稳定碎石混合料技术性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,33(2):46-51.