

橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石性能研究

李 添

(黑龙江中医药大学附属第二医院, 哈尔滨 150000)

摘 要: 针对传统水泥稳定碎石抗裂性不足, 以及单掺橡胶粉改性材料力学强度偏低的问题, 提出混掺橡胶粉和硅灰的改性方案, 研究了单掺橡胶粉、单掺硅灰及复掺橡胶粉和硅灰水泥稳定碎石混合料的力学性能与抗裂性能。结果表明: 掺加适量橡胶粉可改善水泥稳定碎石混合料的抗变形特性和延长疲劳寿命, 但会降低混合料的力学性能; 掺加硅灰显著增强了橡胶粉水泥稳定碎石的力学性能, 改善其温缩变形特性与抗疲劳性能, 但掺加硅灰对水泥稳定碎石混合料的早期干缩抗裂性能有负面影响; 复掺硅灰和橡胶粉显著提升了水泥稳定碎石的力学强度、抗温缩开裂性能与抗疲劳耐久性能, 推荐适宜的硅灰和橡胶粉掺量分别为 1.5% 和 1.0%~2.0%。研究成果为橡胶粉、硅灰工业固废的资源化高效利用提供新思路, 也为水泥稳定碎石抗裂改性技术的工程应用提供借鉴。

关键词: 水泥稳定碎石; 橡胶粉; 硅灰; 力学性能; 抗裂性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 04-0072-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.011

Study on Rubber Powder-Silica Fume Modified Cement-Stabilized Crushed Stone

LI Tian

(Second Affiliated Hospital of Heilongjiang University of Traditional Chinese Medicine,
Harbin 150000, China)

Abstract: Traditional cement-stabilized macadam suffers from insufficient crack resistance, and single incorporation of rubber powder will lead to low mechanical strength of modified mixtures. To solve the above problems, a composite modification method incorporating rubber powder and silica fume was proposed in this study. The mechanical properties and crack resistance of cement-stabilized macadam mixtures with single rubber powder, single silica fume, and combined admixtures were experimentally investigated. The results show that appropriate rubber powder dosage can improve the deformation resistance and fatigue life of the mixture but reduce its mechanical strength. The addition of silica fume can significantly enhance the mechanical properties, temperature shrinkage characteristics and fatigue resistance of rubber powder-modified cement-stabilized macadam, whereas it has an adverse effect on the early drying shrinkage crack resistance of the mixture. The combined addition of silica fume and rubber powder exerts a synergistic modification effect, which remarkably improves the mechanical strength, temperature shrinkage crack resistance and fatigue durability of cement-stabilized macadam. Based on comprehensive performance evaluation, the optimal dosages of silica fume and rubber powder are recommended as 1.5% and 1.0% - 2.0%, respectively. This study provides a new insight for the efficient resource utilization of industrial solid wastes including rubber powder and silica fume, and offers a reference for the engineering application of crack-resistance modification technology for cement-stabilized macadam.

Key words: cement-stabilized macadam; rubber powder; silica fume; mechanical properties; crack resistance

作者简介: 李 添 (1989—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

收稿日期: 2026-01-30

0 引言

以水泥稳定粒料材料为代表的半刚性材料具有材料来源广泛、力学强度高、承载力高、抗冲刷性能强、综合单价低等优势。但半刚性材料的变形能力、柔韧性和自愈性能差，易产生因温度梯度、干湿循环变化导致的温缩、干缩裂缝，由水泥稳定碎石开裂衍生的次生病害严重缩短了结构层的使用寿命^[1-3]，增加了养护成本。

掺入橡胶粉能改善半刚性材料的抗裂性能、增强柔韧性、显著增大破坏应变，橡胶粉等体积置换同粒径的集料，可降低水泥稳定碎石的刚度，实现模量可调节的功能。王可良等^[4]研究了不同橡胶粉体积掺量（10、20、30 kg/m³）条件下，橡胶粉水泥稳定碎石的疲劳性能与抗温缩变形特性，发现橡胶粉对疲劳破坏能量有较高的吸收能力，随着橡胶粉掺量增大，水泥稳定碎石疲劳寿命延长、温缩系数减小；吕松涛等^[5]研究了橡胶粉等体积替代2.36~4.75 mm碎石后水泥稳定碎石力学性能、极限拉应变和弯曲强度变化趋势，发现掺加橡胶粉降低了水泥稳定碎石的力学强度，掺入适量橡胶粉可达到水泥稳定碎石模量可调节可设计的功能；何占军等^[6]研究了橡胶粉表面氢氧化钠处理对水泥稳定碎石抗压强度、温缩和干缩性能的影响，发现掺入表面改性橡胶粉的水泥稳定碎石抗温缩和干缩性能增强；韩洪宇等^[7]研究了硅烷偶联剂KH-550活化改性前后橡胶粉水泥稳定碎石的抗裂性能，发现改性橡胶粉对水泥稳定碎石断裂能、断裂韧性等抗裂性能的提升更显著；尹万杰^[8]、王军龙^[9]、田建军等^[10]发现橡胶粉水泥稳定碎石的力学性能随橡胶粉掺量增大呈线性关系减小，抗裂性能和疲劳寿命随橡胶粉掺量增大呈先增大后减小趋势变化。季节等^[11]研究发现掺入改性胶粉后水泥胶砂中凝胶孔和大孔的体积减小。胡勇勇等^[12]、周志刚等^[13]发现增大橡胶粉掺量使水泥稳定碎石的力学性能下降，

通过掺加纤维能弥补橡胶粉造成的强度损失。

综上可知，掺加橡胶粉能增强水泥稳定碎石的抗裂性能，但由于惰性橡胶粉与水泥石之间的黏附性较差，导致掺入橡胶粉后水泥稳定碎石的力学强度降低，已有研究成果提出通过增大水泥剂量、掺加纤维或对橡胶粉改性等措施来改善橡胶粉水泥稳定碎石的力学性能和抗裂性能。将硅灰部分替代水泥（替代量5%~15%）后用于混凝土结构，能提高混凝土密实度、增强抗冻和抗渗等耐久性能^[14-16]，而有关橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石的研究很少。鉴于此，为了改善水泥稳定碎石的抗裂性能，增强橡胶粉水泥稳定碎石的力学性能，提出复掺橡胶粉和硅灰方案，研究成果对增强水泥稳定碎石材料力学性能和抗裂性能具有重要意义。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

试验所用橡胶粉主要技术指标见表1。采用SF90硅灰，颗粒粒径20 nm、二氧化硅含量96.5%，主要性能指标见表2。采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥。按照5档备料，G3（20~25 mm）、G5（15~20 mm）G9（10~15 mm）、G11（5~10 mm）规格粗集料采用花岗片麻岩。XG3（0~5 mm）规格细集料采用石灰岩机制砂，采用工程应用中目标配合比设计的C-B-1型水泥稳定级配碎石级配，见表3。

表 1 橡胶粉技术指标					
Table 1 Indicators of waste tire rubber powder					
技术指标	表观密度 / (g/cm ³)	含水率 /%	丙酮提取 物/%	橡胶烯烃 /%	天然橡胶 含量/%
试验结果	1.17	<0.5	7.3	56.4	44.5
技术要求	1.10~1.30	<1	≤16	≥42	<10

表 2 硅灰主要性能指标					
Table 2 Main performance indicators of silica fume					
指标	比表面积 / (m ² /kg)	密度 / (g/cm ³)	需水量比 /%	烧失量 /%	活性 指数
试验结果	21 000	2.17	107	2.2	118
技术要求	≥15 000	≥2.1	≤125	≤3.0	≥105

表 3 C-B-1 型级配											
Table 3 C-B-1 type gradation											
筛孔/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.075
通过率/%	100	84.1	76.2	68.3	60.7	39.2	27.8	16.8	11.4	8.8	2.2

材料科学

1.2 试验方案

固定水泥掺量为 4.0%，变化橡胶粉掺量（0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%）和硅灰掺量为（0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%）（文中所有掺量均为质量比），研究橡胶粉、硅灰掺量对水泥稳定碎石力学性能的影响规律，通过力学性能测试优选出最佳橡胶粉和硅灰掺量范围。在此基础上，开展胶粉-硅灰水泥稳定碎石的变形特性及抗疲劳耐久性能研究。

1.3 试验方法

依据 JTG 3441—2024《无机结合料稳定材料试验规程》（以下统一简称“试验规程”）开展力学性能、变形特性及疲劳性能的相关测试。

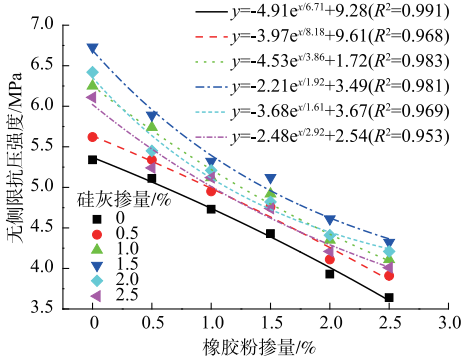
2 结果与分析

2.1 力学性能

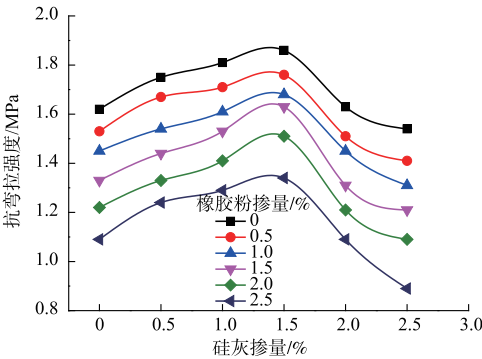
2.1.1 无侧限抗压强度

由图 1（a）可知，当硅灰掺量依次为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 时，橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度随橡胶粉掺量的增加呈现显著的指数衰减规律。材料性能差异与微观界面缺陷是主要影响因素，在荷载作用下，橡胶颗粒会产生更大的形变，材料间变形适配性较差，极易在两相接触界面形成应力集中，促使微裂缝快速发育、扩展，造成结构提前受损。结合 28 d 龄期试件的 SEM 扫描图像由图 2 可知，橡胶粉呈化学惰性且具备憎水特性，无法参与水泥水化，因此其与 C-S-H 凝胶、钙矾石等水化产物无法形成紧密结合界面，界面处分布有大量微孔与微裂隙，橡胶颗粒周边胶凝体系结构松散。该类界面缺陷大幅弱化了基体内部的黏结咬合作用，破坏了结构整体性，最终造成改性水泥稳定碎石的力学性能随橡胶粉掺量增加持续降低。

由图 1（b）可知，固定橡胶粉掺量条件下，橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度随硅灰掺量增加呈现先增后减的变化规律，当硅灰掺量为 1.5% 时，混合料的抗压强度达到峰值，且橡胶粉的掺入并不会改变硅灰的最佳掺量。分析以为，硅灰能够与水泥水化产生的氢氧化钙发生火山灰反应，生成大量高强水化硅酸钙凝胶，有效提高体系胶凝产物含量。由图 3 可知，掺入硅灰后，水化硅酸钙、



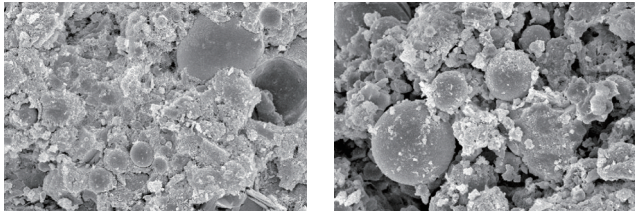
(a) 不同 CR 掺量无侧限抗压强度



(b) 不同 SF 掺量无侧限抗压强度

图 1 无侧限抗压强度试验结果

Fig. 1 Test results of unconfined compressive strength

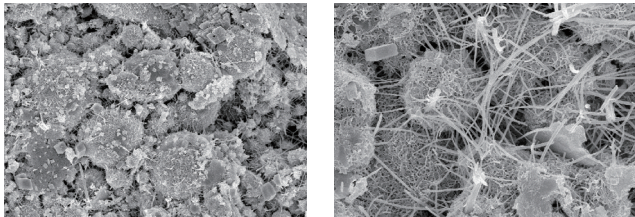


(a) 3 000 倍

(b) 5 000 倍

图 2 养生 28 d 橡胶粉水泥稳定碎石的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of 28-day cured rubber powder cement stabilized crushed stone



(a) 5 000 倍

(b) 10 000 倍

图 3 养生 28 d 橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石的 SEM 图像

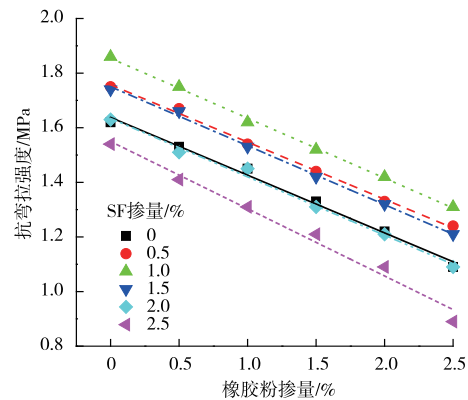
Fig. 3 SEM image of 28-day cured rubber powder-silica fume cement stabilized crushed stone

钙矾石等水化产物可充分包覆橡胶粉颗粒,有效填补界面过渡区的裂隙与孔洞。相较于单一橡胶粉改性试件,复掺试件界面结构更加均匀致密,显著改善了橡胶粉与水泥基体间界面疏松缺陷,有效强化了界面过渡区力学性能。此外,硅灰颗粒粒径微小、比表面积较大,具备优异的微集料填充效应。在混合料硬化成型过程中,硅灰水化生成的凝胶产物可填充基体内部因水分蒸发形成的原始孔隙,修复胶凝体系的界面缺陷,增强胶凝材料与集料的界面黏结效果。该作用能够有效优化混合料内部孔隙分布,减少有害及少害孔隙占比,消除结构薄弱部位,显著优化混合料微观形貌,提升整体密实度与结构完整性,最终改善水泥稳定碎石混合料的宏观力学性能。

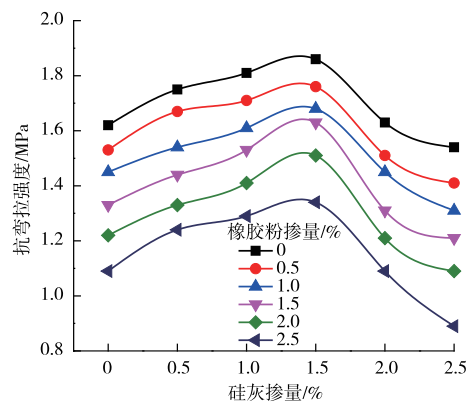
综上可知,硅灰掺量并非越高越好,能够参与水泥水化和火山灰反应的硅灰是有限的,多余未反应的硅灰仅起到填充作用,导致混合料填料含量过高,弱化集料间的嵌挤作用。同时,硅灰掺量过大时难以均匀分散,容易发生团聚堆积,在砂浆内部以及骨料与胶凝材料之间形成薄弱界面,因此超出最佳掺量后,继续增加硅灰掺量会使混合料抗压强度下降。因此,在保证混合料 7 d 无侧限抗压强度达到 4.0~6.0 MPa 的前提下,硅灰掺量为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 时,对应的橡胶粉最大掺量分别为 1.5%、2.0%、2.5%、2.5%、2.5%、2.0%,在满足无侧限抗压强度要求的基础上,掺入硅灰可以有效提升橡胶粉的掺量。

2.1.2 抗弯拉强度

由图 4 (a) 可知,相同硅灰掺量条件下,橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石混合料抗弯拉强度随橡胶粉掺量增大而减小,表明掺加橡胶粉劣化了水泥稳定碎石混合料的抗弯拉强度。由图 4 (b) 可知,在保持橡胶粉掺量不变条件下,橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石混合料的抗弯拉强度随硅灰掺量的增大呈先增大后减小的变化趋势,在硅灰掺量为 1.5% 时抗弯拉强度出现峰值,表明掺加适量硅灰可以弥补橡胶粉对水泥稳定碎石混合料抗弯拉强度的不利影响。在最佳硅灰掺量为 1.5% 时,橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石混合料的最大橡胶粉掺量不宜超过 2.0%。



(a) 不同 CR 掺量抗弯拉强度



(b) 不同 SF 掺量抗弯拉强度

图 4 弯拉强度试验结果

Fig. 4 Results of the flexural tensile strength test

2.2 抗裂性能

在最佳硅灰掺量 1.5% 和最大橡胶粉掺量 2.0% 条件下开展温缩变形、干缩变形和疲劳性能试验。对照组采用单掺 1.5% 硅灰、单掺 2.0% 橡胶粉和普通水泥稳定碎石 (不掺硅灰或橡胶粉)。

2.2.1 温缩变形试验

由图 5 可知,在 -20~50 °C 温度区间内,随着温度升高,4 种水泥稳定碎石混合料的干缩系数呈先减小后增大的两阶段减、增趋势,在极端高温和极端低温条件下温缩系数均较大,这是受水泥稳定材料高温热胀和低温冷缩变形对温度变化极为敏感性所致。

-20~50 °C 温度区间内普通水泥稳定碎石、2.0% 橡胶粉水泥稳定碎石、1.5% 硅灰水泥稳定碎石、复掺 2.0% 橡胶粉和 1.5% 硅灰水泥稳定碎石的平均温缩系数分别为 21.8、16.1、18.5、13.24 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$,单掺 2.0% 橡胶粉、单掺 1.5% 硅灰后水泥稳定碎石混合料的平均温缩系数分别比普通水泥稳定碎石降低了

材料科学

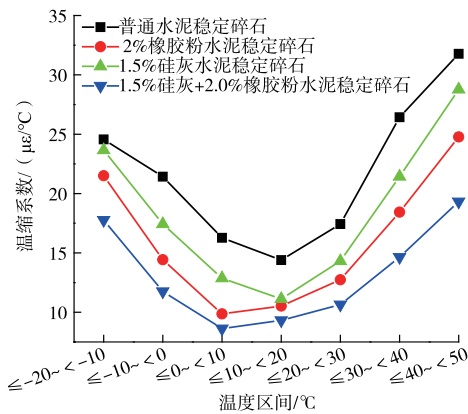


图5 温缩试验结果

Fig. 5 Results of the temperature shrinkage test

26.1%、15.1%、2.0%橡胶粉-1.5%硅灰水泥稳定碎石的平均温缩系数比1.5%硅灰水泥稳定碎石、2.0%橡胶粉水泥稳定碎石、普通水泥稳定碎石分别降低了18.6%、18.0%、39.4%。可见,掺加橡胶粉和硅灰均有利于增强水泥稳定碎石混合料的抗温缩变形性能,橡胶粉水泥稳定碎石的抗温缩变形特性优于硅灰水泥稳定碎石,复掺橡胶粉和硅灰后水泥稳定碎石的抗温缩性能进一步增强。这主要是,橡胶粉颗粒的温缩系数、刚度均远小于集料和水泥胶浆,且橡胶粉富有回弹性,能吸收、缓冲和释放温度应力,从而使温度温缩系数显著降低;掺加硅灰后,硅灰参与水泥水化反应及其微集料填充效应,形成了稳定、结构密实的胶凝体系,弥补了橡胶粉-水泥稳定碎石的界面黏结和黏附缺陷。

2.2.2 干缩变形试验

由图6可知,随龄期的延长,4种无机结合料稳定材料的干缩系数均呈先快速增大、后减小、最终趋于平缓的变化趋势,2d干缩系数达到峰值,7d干缩系数趋于平稳。2d前期干缩系数增长较快,这是因为,早期水泥水化需水量大、水分挥发速率快,但水泥稳定碎石早期强度低,强度增长不足以克服水分损失产生的干缩应变;随着总龄期的延长,水泥水化胶凝材料数量逐渐增多,水泥稳定碎石内部初始缺陷逐渐被胶凝材料填充,界面黏结强度逐渐增大,同时水泥稳定碎石混合料的失水率随养生时间延长而逐渐减小,因此养生后期干缩应变逐渐减小并最终趋于平稳。工程应用中应加强水泥稳定材料的早期保湿养生控制。

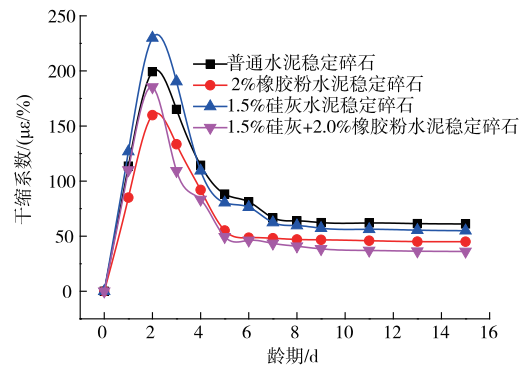


图6 干缩变形试验结果

Fig. 6 Results of dry shrinkage deformation test

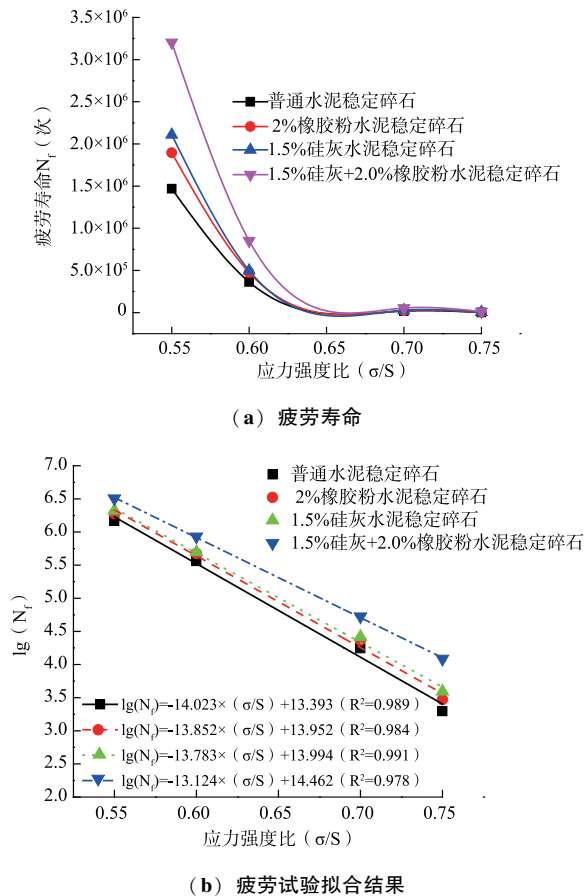
总体上,单掺硅灰增大了水泥稳定碎石的早期干缩应变,掺加橡胶粉可使水泥稳定碎石干缩应变始终处于较低水平。7~15d后4种水泥稳定碎石混合料的干缩系数从大到小排序为:复掺2.0%橡胶粉和1.5%硅灰水泥稳定碎石、2.0%橡胶粉水泥稳定碎石、普通水泥稳定碎石。相较于普通水泥稳定碎石,掺加2.0%橡胶粉、1.5%硅灰、2.0%橡胶粉+1.5%硅灰后,水泥稳定碎石混合料7~15d后的平均干缩系数分别降低了26.3%、2.6%、40.6%,可见单掺2.0%橡胶粉或复掺2.0%橡胶粉均有利于增强水泥稳定碎石混合料的抗干缩变形特性。

2.2.3 疲劳性能试验

由图7(a)可知,单掺2.0%橡胶粉、单掺1.5%硅灰或复掺橡胶粉与硅灰均能显著增强水泥稳定碎石混合料的抗疲劳性能,其中复掺橡胶粉和硅灰对水泥稳定碎石抗疲劳性能的改善效果最好,1.5%硅灰、2.0%橡胶粉次之。

由图7(b)可知,4种无机结合料稳定级配碎石混合料疲劳寿命的对数值($\lg N$)与应力强度比(σ/S)之间的一元线性相关系数 R^2 约为0.99。普通水泥稳定碎石、2.0%橡胶粉水泥稳定碎石、1.5%硅灰稳定碎石、复掺2.0%橡胶粉+1.5%硅灰水泥稳定碎石疲劳方程斜率 b 分别为-14.023、-13.852、-13.783、-13.124,疲劳方程截距 a 分别为13.393、13.952、13.994、14.462。相较于普通水泥稳定碎石,掺加2%橡胶粉、1.5%硅灰及复掺2%橡胶粉和1.5%硅灰后,水泥稳定碎石的疲劳方程斜率 b 绝对值分别降低了1.2%、1.7%、6.4%,疲劳方程截距 a 分别增大了约4.2%、4.5%、8.0%。疲劳方程斜率减小且疲劳方程的截距增大,表明掺入2%橡胶粉、1.5%

硅灰及复掺 2.0% 橡胶粉+1.5% 硅灰后水泥稳定碎石疲劳寿命显著提升, 疲劳寿命对应力变化的敏感性降低。



3 结论

研究了橡胶粉和硅灰掺量对水泥稳定碎石力学性能的影响规律, 在优化出最佳橡胶粉和硅灰掺量基础上开展橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石抗裂性能与抗疲劳性能研究, 得到如下结论:

(1) 橡胶粉掺量越高, 橡胶粉-硅灰水泥稳定碎石的力学强度越小, 复掺硅灰能弥补橡胶粉对水泥稳定碎石力学强度的负面影响。以峰值无侧限抗压强度和抗弯拉强度确定最佳的硅灰掺量为 1.5%。工程实践中, 可在 1.5% 硅灰掺量下, 以满足 7 d 龄期无侧限抗压强度下限标准, 确定最大橡胶粉掺量。

(2) 掺加橡胶粉、硅灰均有利于增强水泥稳定碎石混合料的抗温缩变形性能, 复掺橡胶粉和硅灰后水泥稳定碎石的抗温缩性能进一步增强。掺加硅

灰对水泥稳定碎石混合料的早期抗干缩变形性能有不利影响。

(3) 掺入 2% 橡胶粉、1.5% 硅灰及复掺 2.0% 橡胶粉+1.5% 硅灰后水泥稳定碎石疲劳寿命延长, 疲劳寿命对应力变化的敏感性降低, 抗疲劳性能显著提升。

参 考 文 献

- [1] 王宏, 李刚. 盐冻循环作用下水泥稳定碎石混合料的宏观性能 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (10): 90-102.
- [2] 王宏, 李刚, 王崇涛. 寒区低温环境下泡沫沥青冷再生混合料性能研究 [J]. 冰川冻土, 2024, 46 (5): 1652-1665.
- [3] 揣宏磊. 冻融循环作用下水泥稳定碎石混合料宏观性能与微观孔隙结构研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2025, 49 (4): 890-896.
- [4] 王可良, 李淑媛, 范圣伟, 等. 废弃橡胶粉对水泥稳定碎石抗疲劳性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (1): 84-89, 98.
- [5] 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.
- [6] 何占军, 郭津, 刘晓龙, 等. 橡胶颗粒表面处理对水泥稳定碎石的性能影响研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2025, 44 (2): 61-67, 117.
- [7] 韩洪宇, 李少秋, 魏武巍, 等. 改性橡胶粉水泥稳定碎石抗裂性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (11): 4254-4260.
- [8] 尹万杰. 橡胶粉对水泥稳定级配碎石力学性能与变形特性的影响 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2021, 45 (6): 1163-1168.
- [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.
- [10] 田建军, 张涛, 郭纪飞, 等. 橡胶粉对水泥稳定级配碎石力学性能与变形特性的影响 [J]. 混凝土, 2022 (5): 162-166, 172.
- [11] 季节, 王颖翔, 王琴, 等. 改性废旧橡胶粉对水泥胶砂性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 679-686.
- [12] 胡勇勇, 陶正文, 周志刚, 等. 胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石路用性能研究 [J]. 公路, 2024, 69 (4): 36-42.
- [13] 周志刚, 李振威, 陶正文, 等. 胶粉纤维改性水泥稳定碎石抗裂性能研究 [J]. 交通科学与工程, 2024, 40 (2): 28-37.
- [14] 景宏君, 郭美蓉, 单俊伟, 等. 硅灰改性全煤矸石粗骨料混凝土力学性能和微观结构研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2018-2027.
- [15] 夏冬桃, 吴晨, 崔凯, 等. 粉煤灰和硅灰取代率对碱矿渣混凝土力学性能影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59 (5): 1113-1122.
- [16] 苏捷, 朱君, 史才军, 等. 硅灰强化再生混凝土抗压强度尺寸效应 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (5): 174-180.