

橡胶改良水泥稳定碎石基层工程力学性能研究

刘智泉

山东大学基建部、龙山校区(创新港)建设办公室, 山东 济南

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月11日; 发布日期: 2025年1月23日

摘要

为了探究橡胶颗粒对水泥稳定碎石的无侧限抗压强度以及韧性等性能的影响, 本文将水泥稳定碎石中的一部分集料替换成橡胶颗粒, 设置成橡胶颗粒掺量分别为0%, 2%, 3%, 4%, 5%的试验组, 并展开无侧限抗压试验, 剥裂破坏试验和四点弯曲试验。试验结果证明, 橡胶颗粒会显著降低水泥的抗压强度, 降低速度随掺量增加而下降, 同时橡胶颗粒的掺入会增强水泥稳定碎石的韧性, 增强其抵抗剥裂及弯曲破坏的能力。研究成果为我国公路路基改良工程提供了一定借鉴作用。

关键词

橡胶颗粒, 水泥稳定碎石, 抗压强度, 破坏应变

Research on Engineering Mechanical Properties of Rubber Cement Stabilized Crushed Stone Base Course

Zhiquan Liu

Longshan Campus (Innovation Port) Construction Office, Infrastructure Department, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 11th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

In order to investigate the influence of rubber particles on the unconfined compressive strength and toughness of cement stabilized macadam, this paper replaces some aggregates of cement stabilized macadam with rubber particles and sets up the experimental group with rubber particles with the content of 0%, 2%, 3%, 4%, 5%, respectively. The unconfined compression test, split failure test and four point bending test are developed. The results show that rubber particles can significantly

reduce the compressive strength of cement, and the decrease speed decreases with the increase in the amount of cement. Meanwhile, the rubber particles will enhance the toughness of cement stabilized macadam and enhance its ability to resist splitting and bending failure. The research results provide some references for improving highway subgrades in China.

Keywords

Rubber Granules, Cement Stabilized Macadam, Compressive Strength, Failure Strain

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代生活水平的提高离不开交通系统的迅速提升，我国在公路方面的发展在不断提速，并以半刚性基层路面作为主要施工思路。水泥稳定碎石作为半刚性路面常用的一种材料，以优秀的整体刚度，高强度，稳定性好等优点被广泛接受，但较差的耐久性、收缩性也导致了地面开裂等问题的发生。

经过各界学者专家的研究，发现掺有橡胶粉的混凝土能显著增强冻融性能，韧性和稳定性等物理性质。王可良等[1]研究表明，加入橡胶粉可以提高水泥稳定碎石基层的抗疲劳性能和失稳韧性；覃峰等[2]发现掺橡胶粉水泥稳定碎石基层材料的抗冲刷性能会有所提高；王云鹏[3]等通过击实试验无侧限抗压强度试验等验证了掺胶粉水泥稳定碎石力学性能较差的结论；张家俊[4]对掺橡胶的水泥稳定碎石进行劈裂抗拉试验论证了其力学性能与掺量呈负相关的现象；张海波等[5]检测了5目和100目橡胶颗粒对混凝土抗压强度的影响，发现取代量在50%以下时，100目橡胶混凝土抗压强度更高，50%以上时，两者相差不明显；李小慧[6]研究了不同橡胶粒径对纤维橡胶混凝土的影响，确定了掺加80目粒径橡胶粒的混凝土抗冻及抗渗性能最强；杨洪生等[7]配置了不同再生骨料与橡胶粉掺量的混凝土，确定了提升抗冻性能的最佳配比；张海波等[8]通过对橡胶砂浆进行热处理改性并用NaOH溶液预处理橡胶颗粒，提升了水泥的抗折、抗压强度；王龙等[9]比较了掺橡胶水泥混凝土与基质混凝土的抗折强度，阻尼比，弯拉模量等性能。

本文研究了不同橡胶颗粒掺量下混凝土性能变化，为类似工程与研究提供了可靠的科学参考。

2. 试验准备与试验过程

本试验中原材料采用硅酸盐水泥，集料的指标符合《公路工程集料试验规程》(JTGF20-2015)规定，集料级配的具体情况如表1所示。

Table 1. Aggregate grading test results
表1. 集料级配检测结果

级配	各尺寸筛孔通过率											
	25.4	18.5	16.8	13.5	9.4	4.65	2.41	1.09	0.65	0.34	0.16	0.075
最大值	100.0	100.0	93.0	85.0	70.0	45.0	35.0	25.0	16.0	12.0	10.0	6.0
最小值	100.0	90.0	83.0	68.0	55.0	27.0	18.0	12.0	8.0	5.0	2.0	0.0
设计值	100.0	93.0	85.5	75.0	63.5	35.4	21.3	17.5	12.2	8.4	5.2	3.6

本次试验中所选用的橡胶颗粒粒径为4~8目, 橡胶颗粒的基本参数如表2所示, 将橡胶颗粒通过4.65与2.41的筛孔, 并等体积替换同样级配的集料, 替换的比例为37%, 58%, 74%, 96%, 替换后橡胶颗粒所占集料总质量的比例分别为0%, 2%, 3%, 4%, 5%。集料替换完成后进行击实试验, 振动频率为30Hz, 击实力为7.5kN, 击实时间100s, 其中橡胶颗粒所占比例为0%的对照组水泥占总质量的5%, 最大干密度为 $2.395\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 最优含水量为6.5%, 击实试验的结果如表3所示。

Table 2. Basic parameters of rubber particles
表2. 橡胶颗粒的基本参数

参数	含量
水分/%	0.96
丙酮提取物/%	12.8
密度/(g·cm ⁻³)	0.94
抗拉强度/MPa	7.0
断裂伸长率/%	890

Table 3. Parameters of rubber-cement stabilized crushed stone
表3. 橡胶-水泥稳定碎石参数

橡胶颗粒含量/%	最优含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
0	6.5	2.395
2	6.3	2.368
3	6.0	2.315
4	5.8	2.270
5	5.6	2.217

根据以上试验结果, 将试样按照规范制作成圆柱形, 高度为150mm, 直径为100mm, 试样放入养护室在标准条件(温度 $20\pm2^\circ\text{C}$, 湿度 $\geq95\%$)下分别养护7天与28天后进行试验。

3. 试验结果分析

3.1. 无侧限抗压试验结果分析

Table 4. Results of unconfined compression test
表4. 无侧限抗压试验结果

含量/%	S_c/MPa	\bar{S}_c/MPa	抗压强度相对下降率/%
0	6.35, 6.24, 6.37, 6.40, 6.42, 6.28, 6.34, 6.54	6.37	
2	5.04, 4.96, 5.14, 4.86, 5.06, 5.01, 4.89, 5.12	5.01	21.4
3	4.54, 4.33, 4.59, 4.65, 4.50, 4.47, 4.39, 4.46	4.49	29.5
4	3.75, 3.77, 3.95, 4.01, 3.84, 3.49, 3.97, 3.86	3.83	39.9
5	3.77, 3.75, 3.69, 3.83, 3.91, 3.64, 3.85, 3.90	3.79	40.5

注: S_c , \bar{S}_c 分别代表无侧限抗压强度以及平均值。

将养护好的试样取出，按照规范进行无侧限抗压试验，以 5 mm/min 的速度进行加载，采用千分位移尺测量试样的变形量，得到的试验结果如表4所示。根据试验结果绘制橡胶颗粒掺量与无侧限抗压强度的拟合曲线，拟合曲线的公式为：

$$S_c = 0.0446x^2 - 0.6741x + 6.3231 \quad (1)$$

式中： S_c 为无侧限抗压强度， x 为橡胶颗粒掺量，具体结果如图1所示。

根据表4和图1中可以看出，随着橡胶颗粒的占比增大，水泥稳定碎石的无侧限抗压强度显著下降，但随着占比的逐渐增加，水泥强度下降的趋势也在减缓，当橡胶颗粒掺量达到5%时，强度增加趋势已趋于平缓。

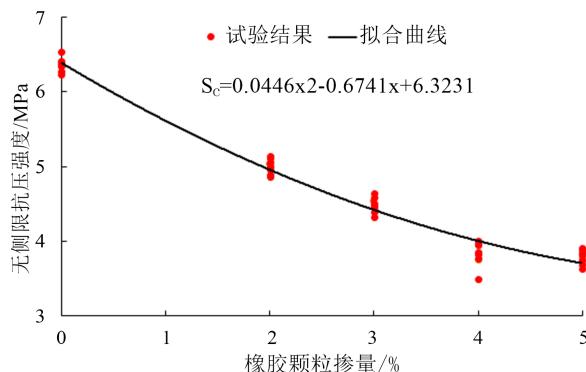


Figure 1. Relationship between rubber particle content and unconfined compressive strength
图1. 橡胶颗粒掺量与无侧限抗压强度关系曲线

3.2. 劈裂强度试验与弯曲强度试验分析

韧性是指材料在受到冲击荷载产生形变后抵抗破坏的能力，衡量韧性的物理量包括冲击吸收功，能量吸收值，抗弯曲强度等。传统水泥稳定碎石韧性较差，体现在其抗裂抗弯性能不足，在长期温度变化，湿度变化以及长期荷载的外界环境下，易产生收缩缝和疲劳损伤，橡胶颗粒会降低水泥稳定碎石的整体强度，但是却对水泥的韧性有所加强，为了研究橡胶颗粒掺量对水泥稳定碎石的具体影响，采用MTS系统进行了劈裂试验和四点弯曲试验，利用引伸计和应变片测量其形变量，具体结果如图2，图3所示。

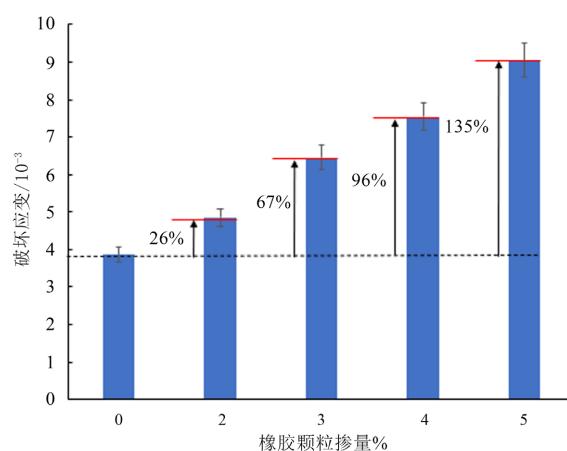
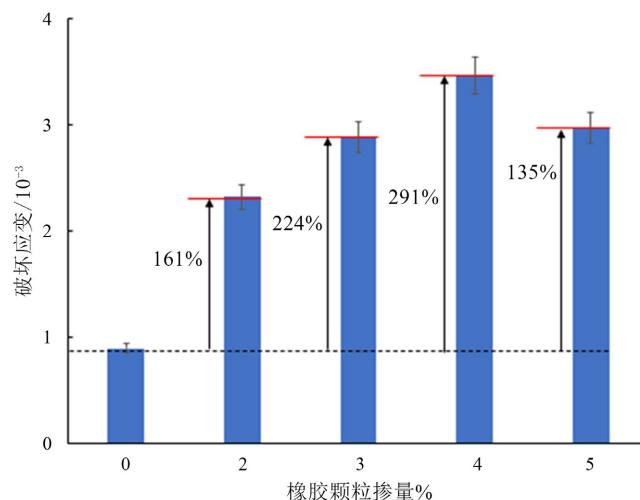


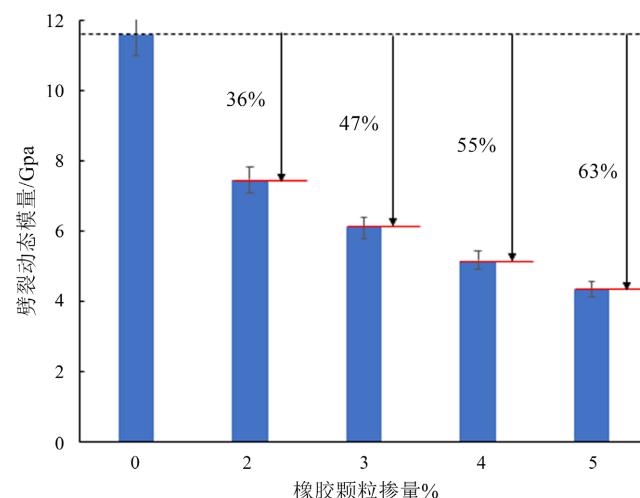
Figure 2. Relation curve of rubber particle content and fracture strain
图2. 橡胶颗粒掺量与劈裂破坏应变关系曲线

**Figure 3.** Relation curve of rubber particle content and bending failure strain**图 3.** 橡胶颗粒掺量与弯曲破坏应变关系曲线

随着橡胶颗粒掺量的上升，水泥稳定碎石的劈裂破坏应变在逐步增大，当橡胶掺量达到 4%以上时，破坏应变可达到橡胶颗粒掺量 0% 对照组的 2 倍左右，当掺量为 5% 时，劈裂破坏应变达到本次试验的最大值，为对照组的 235%，并且破坏应变随着掺量增加其增长速率也在逐渐加大。对于四点弯曲试验，水泥稳定碎石的破坏应变呈现出先上升后下降的趋势，弯曲破坏应变在橡胶颗粒掺量达到 4% 时出现最大值，该值为对照组的 4 倍左右，当橡胶颗粒掺量达到 5% 时，弯曲破坏应变较上一组下降了 146%，说明增强水泥稳定碎石弯曲破坏应变最优橡胶掺量在 4%~5% 之间，具体数值有待进一步研究。由上述两种试验结果可知，橡胶颗粒增强了水泥稳定碎石的韧性，对劈裂破坏和弯曲破坏都有缓和的作用。

3.3. 劈裂动态模量试验分析

为了获取水泥稳定碎石的模量随橡胶掺量变化的规律，进行了劈裂动态模量试验，采用养护 28 天的试样，分级加载压力，每级压力数值相等，最大压力值为试样强度的 70%，各级压力加载频率均为 10 Hz，循环 180 次，试验结果如图 4 所示。

**Figure 4.** Relation curve between rubber particle content and dynamic modulus of splitting**图 4.** 橡胶颗粒掺量与劈裂动态模量关系曲线

当橡胶颗粒掺量逐渐增加后，水泥稳定碎石的动态模量随之下降，在橡胶掺量为2%时，下降幅度最大，达到了36%，之后橡胶颗粒掺量持续上升，模量下降的速率开始减缓，趋于稳定。通过上述实验，证明可以通过调控橡胶颗粒的掺量来控制水泥稳定碎石的模量以达到工程需要。

3.4. 橡胶颗粒对水泥稳定碎石影响机理分析

水泥稳定碎石具有强度高，稳定性优秀，耐久性差的特点，在加入橡胶颗粒后，由于橡胶整体刚度弱于水泥，所以导致制成的水泥强度下降。同时因为水泥内部集料中有一部分被橡胶颗粒替代，而橡胶的弹性模量低于水泥砂浆，所以在荷载的作用下，两者发生的变形量不同，因此在二者的交界面会产生缝隙，而这些缝隙不断累积、汇聚就会导致宏观裂纹的出现，除此之外，由于橡胶的亲水性较差，导致集料与水泥砂浆的胶结程度下降[10]，内部疏松的结构进一步降低了水泥承受荷载的能力，这正是掺橡胶水泥稳定碎石抗压、抗折强度下降的原因。

虽然橡胶较差的亲水性不利于水泥的整体强度，然而正是因为这一点，橡胶颗粒也阻挡了水和气体在水泥内部的流通，防止了水泥湿度下降过快。水泥湿度主要控制水泥内部毛细孔的饱和程度，湿度的下降会导致毛细孔内部出现负压的情况，在负压的作用下水泥向内部收缩[11]，以致出现收缩缝等状况。在橡胶颗粒的阻挡作用下，水泥内部湿度保持相对稳定，收缩速率下降，因此大大减缓了收缩缝出现的概率。同时，由于橡胶颗粒的韧性和抗冲击能力较强，在遭遇重载和冲击荷载时，因橡胶颗粒的收缩在水泥内部产生了多余的空间，水泥内的应力重分布效应增强，应力集中的现象有所改善，因此提高了橡胶水泥稳定碎石的韧性。

4. 结论

橡胶颗粒会对水泥稳定碎石的性能造成显著的影响，本文研究了橡胶颗粒掺量对水泥整体强度和韧性的影响。

- (1) 橡胶颗粒掺量的增加会降低水泥稳定碎石的无侧限抗压强度，在掺量较小的情况下，强度下降较快，随着掺量的加大，下降的趋势会减缓。
- (2) 橡胶颗粒会增强水泥稳定碎石的韧性，劈裂破坏应变最大可达到原本的2倍水平，弯曲破坏应变可以达到原本的3倍水平，但是当掺量增加到4%以上时，弯曲破坏应变反而会下降，但水泥稳定碎石的韧性仍高于原本的水准。
- (3) 水泥稳定碎石的劈裂动态模量会随着橡胶颗粒掺量的增加而下降，并且下降速率在掺量增大时会逐步减缓，直至趋于平稳。

参考文献

- [1] 王可良, 李淑媛, 范圣伟, 黄建政. 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.
- [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] 王云鹏, 杨文平, 张明堂. 掺加胶粉的水泥稳定碎石无侧限抗压强度性能研究[J]. 安徽建筑, 2020, 27(10): 164-165.
- [4] 张家俊. 掺加橡胶粉的水泥稳定碎石劈裂抗拉强度性能研究[J]. 价值工程, 2020, 39(7): 151-152.
- [5] 张海波, 管学茂, 勾密峰, 刘小星. 废旧橡胶粒径对水泥砂浆和混凝土强度影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(4): 931-934+938.
- [6] 李小慧. 纤维橡胶混凝土基本力学及耐久性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(7): 118-122+137.
- [7] 杨洪生, 王帅, 赵庆新. 橡胶粉改性再生骨料混凝土抗冻性研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(S1): 130-134.

- [8] 张海波, 丁雪晨, 徐自立, 王军军, 张仪华, 秦文轩, 管学茂. 真空热处理对橡胶砂浆强度影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5): 1637-1641.
- [9] 王龙, 范璐璐. 橡胶颗粒水泥混凝土与基质混凝土路用性能对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 77-81.
- [10] 胡希. 橡胶聚乙烯醇纤维复合改性水泥稳定碎石性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [11] 吕松涛, 王双双, 王盘盘, 刘超超, 赵钿达. 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.