

# 橡胶颗粒改良红黏土路基性能研究

Study on the Performance of Red Clay Subgrade Improved by Waste Tire Particles

陶云峰

(山西交控太旧高速公路改扩建项目有限公司, 太原 030006)

**摘要:** 为研究橡胶颗粒在改良路基红黏土中的应用性能, 开展了不同橡胶颗粒粒径和掺量条件下的改良路基红黏土击实特性、抗剪强度、压缩系数以及渗透系数试验。结果表明: 掺入 4 种不同粒径橡胶颗粒后, 随着橡胶粉掺量增大, 最优含水率呈现出先增大后减小的变化趋势, 抗剪强度整体呈现出先增大后减小的变化趋势; 随着橡胶粉颗粒粒径增大, 抗剪强度整体先减小后增大; 各组橡胶颗粒改良红黏土均属于中压缩性土, 且土的压缩性随材料掺量增大而增大, 渗透性能整体也呈现出逐渐增大的趋势; 此外, 随着橡胶颗粒粒径的逐渐增大, 改良红黏土的压缩系数和渗透系数均逐渐减小。研究成果为我国路基红黏土的改良和资源的回收提供了借鉴作用。

**关键词:** 橡胶颗粒; 粒径; 掺量; 路基红黏土; 渗透性

中图分类号: TU045 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0129-04

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.024

TAO Yunfeng

(Shanxi Jiaokong Taijiu Expressway Reconstruction and Expansion Project Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** To study the application performance of rubber particles in improving roadbed red clay, tests were conducted on the compaction characteristics, shear strength, compression coefficient, and permeability coefficient of improved roadbed red clay under different rubber particle size and dosage conditions. The results showed that after adding four different particle sizes of rubber particles, the optimal moisture content showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of rubber powder content; As the amount of rubber powder increases, the overall shear strength shows a trend of first increasing and then decreasing; As the particle size of rubber powder increases, the overall shear strength first decreases and then increases; Each group of rubber particle modified red clay belongs to medium compressibility soil, and the compressibility of the soil increases with the increase of material content, and the overall permeability also shows a gradually increasing trend; In addition, as the particle size of rubber particles gradually increases, the compression coefficient and permeability coefficient of the improved red clay gradually decrease. The research results provide reference for the improvement and resource recovery of red clay for road embankments in China.

**Key words:** rubber granules; particle size; dosage; roadbed red clay; permeability

## 0 引言

红黏土是我国常见的路基土, 具有良好的工程性能和广泛的应用价值<sup>[1-2]</sup>。然而, 红黏土具有易变形、强度低、遇水易松散等性质, 在公路建设中有一定的安全隐患<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何有效改良红黏土、

作者简介: 陶云峰 (1975—), 男, 本科, 工程师。研究方向: 公路工程施工管理。

收稿日期: 2023-03-28

## 道桥技术

提高其工程性能,是目前道路工程建设领域的重点研究方向之一<sup>[5-6]</sup>。

目前,国内外红黏土改良的方法主要有物理改良、化学改良和添加剂改良等多种途径<sup>[7-8]</sup>。其中,添加剂改良是近年来的研究热点之一,添加剂主要包括水泥、石灰、粉煤灰、聚合物等材料<sup>[9-10]</sup>。研究表明,添加合适比例的水泥能够增强红黏土的承载能力以及稳定性<sup>[11-12]</sup>。但水泥添加量过多会导致红黏土硬化和脆化,降低其可塑性和渗透性<sup>[13]</sup>。周波等<sup>[14-15]</sup>研究了利用石灰对红黏土进行改良的方法,并指出石灰可使红黏土颗粒形态发生改变,增强土壤的结构和稳定性,同时提高土壤的抗压强度、抗剪强度和耐久性。但是,石灰改良红黏土的效果在不同土壤中存在差异,需要根据具体情况选择适合的改良方法。黄娟等<sup>[16-17]</sup>提出利用粉煤灰改良黏土的加固方法,并发现粉煤灰的添加可以增加红黏土的孔隙率和渗透性,提高其稳定性和可塑性。此外,粉煤灰还可以促进土壤中有机的分解和养分的释放,改善土壤的肥力<sup>[18]</sup>。闫集斐等<sup>[19-20]</sup>研究了基于聚合物改良地基黏土的可行性,并发现聚合物添加剂可以形成一种稳定的胶凝体,增加红黏土的黏结力和稳定性,同时提高土壤的抗拉强度和韧性,还具有无毒、无害、环保等优点。

目前对于红黏土改良技术的研究仍存在很大的空间,且利用橡胶颗粒改良红黏土的研究鲜少。为研究橡胶颗粒在改良路基红黏土中的应用性能,开展了不同橡胶颗粒粒径和掺量条件下的改良路基红黏土击实特性、抗剪强度、压缩系数以及渗透系数试验。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验所用红黏土试样取自广西某高速公路施工现场路基,红黏土呈红褐色,较松散。红黏土试样颗粒级配曲线如图1所示,土体的天然含水率为8.52%,干密度为 $1.86\text{ g/cm}^3$ ,液限为44.9%,塑限为22.8%,塑性指数为22.1,比重为2.68。试验所用橡胶颗粒为废弃回收轮胎经机械加工破碎而成,粒径跨度较大,橡胶颗粒比重为1.18,吸水率为1.55%。

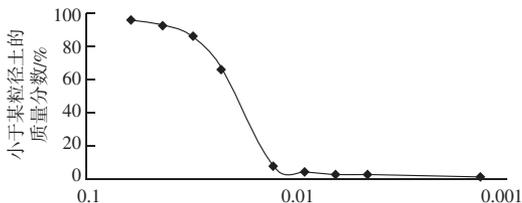


图1 红黏土试样颗粒集配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of red clay sample

### 1.2 试验设计

将橡胶粉与膨胀土、水混合,搅拌均匀,制得胶粉-膨胀土料,喷洒水分使其充分浸润,待表面干燥后进行第二次喷洒水分,喷洒水分和干燥共重复进行2~3次。根据试验要求,选取4组颗粒粒径分别为4.75、2.0、0.5和0.25 mm。此外,还设计了空白对照组和3组不同橡胶粉条件下土的综合性能试验,橡胶粉分别3%、6%以及9%。

## 2 试验结果分析

### 2.1 击实特性

土击实特性是反映地基土长期稳定性的重要参数,橡胶颗粒改良土的最优含水率试验结果见表1。在不掺橡胶粉颗粒条件下,最优含水率为26.9%;当向路基土试样中掺入3种不同粒径的橡胶颗粒后,橡胶粉粒径对改良土的最优含水率产生了一定的影响。当橡胶粉粒径一定时,随着橡胶粉的掺入,最优含水率呈现出先增大后减小的变化趋势。以橡胶粉粒径为0.25 mm试验组为例,随着橡胶粉的增大,改良土的最优含水率分别为26.9%、27.2%、26.5%以及25.2%。当橡胶粉粒径不同时,掺量为3%的最优含水率最大,不同试验组分别为27.2%、28.0%、28.5%以及27.4%。而在相同的橡胶粉条件下,粒径对于改良红黏土击实特性的影响也很复杂。且当橡胶粉粒径为2.0 mm、掺量3%时,改良红黏土的最优含水率取得最大值,此时最优含水率为28.5%。分析认为,到3%阶段,由于改良土中橡胶颗粒数量增多,需要更多水分润滑才能克服橡胶颗粒和土颗粒之间的阻力,因此改良土的最优含水率有所增大;当颗粒掺量超过一定界限后,橡胶颗粒自身吸水性差且在击实功作用下易于排出水分,导致橡胶颗粒红黏土的最优含水率降低。

表 1 不同改良土样最优含水率

Table 1 Optimal moisture content of different improved soil samples

橡胶粉粒径 /mm	橡胶粉掺量 /%	最优含水率 /%
0.25	0	26.9
	3	27.2
	6	26.5
	9	25.2
0.5	0	26.9
	3	28.0
	6	27.7
	9	26.2
2.0	0	26.9
	3	28.5
	6	28.0
	9	26.9
4.75	0	26.9
	3	27.4
	6	26.8
	9	26.6

## 2.2 抗剪强度

橡胶粉改良路基红黏土的抗剪强度试验结果如图 2 所示。掺入适量的橡胶颗粒后，改良红黏土抗剪强度一定程度的增大，这表明掺入橡胶颗粒能够有效改善红黏土的力学性质。进一步分析橡胶颗粒直径对红黏土力学性质的影响，随着橡胶粉粒径增大，抗剪强度整体呈现出先增大后减小的变化趋势。以橡胶粒径为 0.50 mm 试验组为例，不掺橡胶粉条件下抗剪强度为 70.52 kPa；掺入橡胶粉颗粒后，不同掺量下改良红黏土的抗剪强度分别为 85.66、80.52、72.80 kPa，较空白组分别增大 21.47%、14.18%、3.23%。随着橡胶粉粒径增大，抗剪强度整体先减小后增大。当橡胶粉掺量为 3% 时，不同橡胶粉颗粒

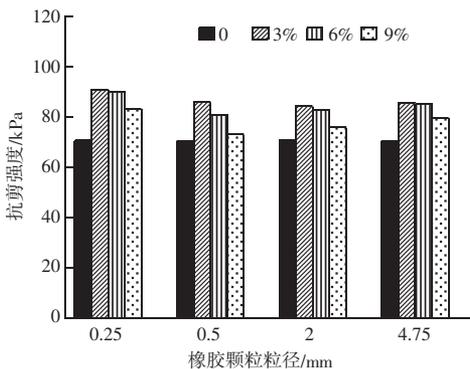


图 2 不同条件下改良红黏土抗剪强度

Fig. 2 Shear strength of modified red clay under different conditions

粒径条件下，抗剪强度分别为 90.84、85.66、84.1 和 85.84 kPa。且当橡胶粉颗粒粒径为 0.25 mm、掺量 3% 时，抗剪强度最大，达到 90.84 kPa，较未掺橡胶粉试样提高 28.81%。

## 2.3 压缩特性与渗透性

根据固结试验结果计算得到改良红黏土的压缩系数见表 2，随着橡胶颗粒掺量的增大，橡胶颗粒红黏土的压缩系数逐渐增大，土的压缩性逐渐增强。此外，粒径对土的压缩系数也有着明显的影响，随着颗粒粒径增大，土的压缩系数不断减小。其中，0.5 和 2 mm 粒径橡胶颗粒红黏土改良组的压缩系数相似，但均小于 0.25 mm 且大于 4.75 mm 粒径橡胶颗粒红黏土压缩系数。橡胶颗粒改良红黏土的渗透系数试验结果见表 3，橡胶颗粒的粒径和掺量均对红黏土的渗透性有显著影响，主要特征为：随着橡胶颗粒掺量增大，改良红黏土渗透系数逐渐增大；而随着橡胶颗粒粒径逐渐增大，改良红黏土渗透系数逐渐减小。这是由于在土中掺入较多大颗粒橡胶时，橡胶本身压缩性差且抗渗能力强，在大颗粒橡胶粉的影响下，土中渗透通道会被堵塞，因此压缩系数小，渗透性较差；而随着掺入的橡胶颗粒粒径较小且掺量较大，而粒径小的橡胶颗粒会分散于红黏土中，进而形成能够相互贯通的渗透通道，橡胶颗粒红黏土孔隙中水分能够有效排出，因此土的压缩性大，渗透率大。

表 2 不同条件下改良红黏土压缩系数

Table 2 Compression coefficient of modified red clay under different conditions

橡胶粉 掺量/%	压缩系数			
	0.25 mm	0.50 mm	2 mm	4.75 mm
0	0.12	0.12	0.12	0.12
3	0.16	0.17	0.18	0.13
6	0.21	0.22	0.24	0.14
9	0.33	0.34	0.38	0.18

表 3 橡胶颗粒改良红黏土的渗透系数

Table 3 Permeability coefficient of rubber particle modified red clay

橡胶粉 掺量/%	渗透系数/( $\times 10^{-6}$ cm/s)			
	0.25 mm	0.50 mm	2 mm	4.75 mm
0	0.08	0.08	0.08	0.08
3	0.95	0.52	0.45	0.12
6	1.53	1.26	1.15	0.98
9	4.35	2.65	2.71	1.55

## 道桥技术

## 3 结论

(1) 橡胶颗粒对路基红黏土的击实特性影响显著,随着橡胶粉掺量的增大,改良红黏土的最优含水率呈现出先增大后减小的变化趋势。当橡胶颗粒粒径为 0.25 mm 时,改良红黏土的最优含水率分别为 26.9%、27.2%、26.5% 以及 25.2%。

(2) 橡胶粉的掺量和粒径能够改变红黏土的力学性质。随着橡胶粉掺量增大,改良红黏土抗剪强度先增大后减小;随着橡胶粉颗粒粒径增大,改良红黏土抗剪强度先减小后增大。以橡胶粒径 0.50 mm 组为例,不掺橡胶粉红黏土的抗剪强度为 70.52 kPa;当掺入橡胶粉颗粒后,改良红黏土抗剪强度分别为 85.66、80.52 和 72.80 kPa,较对照组试样分别增大 21.47%、14.18% 和 3.23%。

(3) 土的压缩性能随材料掺量增大而增强,渗透性能整体也呈现出逐渐增强趋势;此外,随着橡胶颗粒粒径逐渐增大,改良红黏土压缩系数和渗透系数均逐渐减小。0.5 和 2 mm 粒径橡胶颗粒红黏土试验组压缩系数相近,但均小于 0.25 mm 且大于 4.75 mm 粒径橡胶颗粒红黏土的压缩系数。

## 参 考 文 献

- [1] 刘杰. 高速公路施工中红黏土路基施工技术 [J]. 交通世界, 2022 (10): 52-53.
- [2] 刘维正, 万家乐, 徐阳, 等. 反复湿化和动载作用下路基红黏土累积变形特性研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (8): 129-139.
- [3] 李森, 王艳博, 李延周. 热带气候高液限红黏土直接填筑路基的可行性探讨 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16 (5): 126-128.
- [4] 席丹妮. “废弃黏土砖-红黏土”路基填料工程特性研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- [5] 张冲冲, 毛吉成, 许广飞. 降雨条件下非均质红黏土路基的稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2019, 25 (6): 11-14.
- [6] 高晓. 红黏土工程性质及在路基中的应用 [J]. 粘接, 2020, 44 (10): 168-172.
- [7] 雷鑫. 不同改良方案下路基红黏土的水稳性对比研究 [J]. 湖南交通科技, 2020, 46 (4): 41-44.
- [8] 李兴春. 红黏土路基压实施工技术在高速公路建设中的运用 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44 (7): 46, 48.
- [9] 马兵林. 高速铁路软土路基红黏土改良试验研究 [J]. 建筑施工, 2020, 42 (1): 27-29.
- [10] 王磊. 磷石膏稳定土路基动力特性研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [11] 龚锦林, 卓斌. 水泥改良高液限红黏土力学性能及微观机制研究 [J]. 湖南交通科技, 2022, 48 (3): 17-22.
- [12] 张坤. 磷石膏水泥稳定红黏土路用性能及微观结构研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [13] 靳一军. 石灰水泥改良红黏土试验研究 [J]. 居舍, 2021 (33): 35-36, 90.
- [14] 周波. 石灰磷石膏稳定红黏土路用性能及微观结构研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [15] 何逢春. 二灰改良红黏土力学特性试验研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [16] 黄娟. 基于粉煤灰改良红黏土路用试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (2): 75-78.
- [17] 谭景和, 孙健森, 刘会强. 砂与粉煤灰对桂林红黏土性质的影响研究 [J]. 土工基础, 2018, 32 (5): 524-527.
- [18] 朱寿增, 刘会强, 梁埔源. 砂与粉煤灰改良桂林红黏土水土特性研究 [J]. 土工基础, 2018, 32 (1): 78-80.
- [19] 闫集斐. 自燃煤矸石地聚物的制备、性能及其固化  $Pb^{2+}$  试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [20] 郭建文. 地聚合物桩加固高速公路红黏土路基方法的研究 [J]. 湖南交通科技, 2020, 46 (3): 48-50, 59.