

废旧轮胎橡胶颗粒改良膨胀土的干缩裂缝抑制机理

张 金

蓝创工程设计有限公司 四川成都

【摘要】膨胀土因其特殊性质，在失水过程中易产生干缩裂缝，影响工程稳定性。本研究聚焦于废旧轮胎橡胶颗粒改良膨胀土的干缩裂缝抑制机理。通过一系列实验与分析，揭示了橡胶颗粒在改善膨胀土特性方面的作用。研究发现，橡胶颗粒可有效改变膨胀土的微观结构，降低其收缩性。具体而言，橡胶颗粒的掺入减小了土颗粒间的相互作用力，抑制了干缩裂缝的产生与发展。橡胶颗粒良好的弹性与变形协调性，增强了改良土的韧性。结果表明，合理掺量的橡胶颗粒能显著提高膨胀土抵抗干缩裂缝的能力，为膨胀土工程问题的解决提供了新的有效途径，也为废旧轮胎的资源化利用开拓了方向。

【关键词】废旧轮胎橡胶颗粒；膨胀土；干缩裂缝；抑制机理；微观结构

【收稿日期】2025 年 6 月 14 日

【出刊日期】2025 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250103

Mechanism of retarding dry shrinkage cracks in expanding soil modified with waste tire rubber particles

Jin Zhang

Lanchuang Engineering Design Co., Ltd. Chengdu, Sichuan

【Abstract】 Expanding soil exhibits inherent dry shrinkage cracks during dehydration due to its unique properties, which significantly compromise engineering stability. This study investigates the mechanism of crack inhibition in expanding soil modified with waste tire rubber particles. Through comprehensive experiments and analysis, the effects of rubber particles on soil characteristics were elucidated. The research demonstrates that rubber particles effectively alter the microstructure of expanding soil, thereby reducing its shrinkage tendency. Specifically, their incorporation decreases inter-particle interactions, inhibiting crack formation and propagation. The particles' excellent elastic deformation coordination enhances soil resilience. Results indicate that appropriate rubber particle dosage significantly improves expanding soil's resistance to dry shrinkage cracks, providing a novel solution for engineering challenges in expanding soil applications while opening new avenues for waste tire recycling.

【Keywords】 Waste tire rubber particles; Expanding soil; Dry shrinkage cracks; Inhibition mechanism; Microstructure

引言

膨胀土在土木工程中广泛分布，其干缩湿胀特性常引发诸多工程病害，干缩裂缝便是其中突出问题。这些裂缝不仅破坏土体完整性，还降低土体强度与稳定性，增加工程维护成本。随着环保意识增强与资源回收需求，利用废旧轮胎橡胶颗粒改良膨胀土成为研究热点。此研究旨在深入探究橡胶颗粒抑制膨胀土干缩裂缝的机理，为膨胀土地区工程建设提供科学依据与技术支持。

1 膨胀土特性及干缩裂缝形成原因

膨胀土作为一类特殊的细粒土，其独特的工程

性质源于矿物成分与颗粒组成的共同作用。蒙脱石、伊利石等黏土矿物构成了膨胀土的核心物质基础，这些矿物晶体结构中存在大量可交换的阳离子，使得颗粒表面具有显著的亲水性。水分子能够轻易进入矿物晶层之间，通过静电引力与晶格中的阳离子结合，引发晶层间距的扩张，导致土体宏观体积膨胀。这种遇水膨胀特性在多雨季节尤为明显，可使土体体积增加 10% 至 30%，对地基基础和土工结构产生巨大的膨胀力。

在水分迁移的另一个方向，膨胀土的失水过程同样伴随着显著的物理力学变化。由于黏粒含量通

常超过 30%，土体比表面积可达 $50\text{-}80\text{m}^2/\text{g}$ ，这种高度分散的颗粒体系使得水分蒸发路径极为复杂。随着环境湿度降低，土颗粒表面的弱结合水开始向外界散失，土颗粒间的水膜厚度逐渐减小^[1]。在水分子表面张力作用下，相邻颗粒间产生收缩力，该力通过孔隙水传递形成的吸力可高达数百千帕。当这种收缩力超过土体的抗拉强度时，土体内部平衡被打破，干缩裂缝随即产生。

干缩裂缝的扩展过程本质上是一个自加速的恶性循环。初始裂缝的出现打破了土体的连续性，为水分迁移提供了更为高效的通道。相较于完整土体，裂缝中的水分蒸发速率可提升数倍，导致裂缝周边区域的含水率进一步降低，收缩力持续增大。这种局部应力集中效应促使裂缝向纵深方向发展，同时诱导次生裂缝的产生^[2]。随着裂缝网络的不断发育，土体的整体性被严重破坏，其承载能力、抗渗性等工程性能急剧下降，给道路、堤坝等基础设施带来长期的安全隐患。

2 废旧轮胎橡胶颗粒对膨胀土物理性质的影响

废旧轮胎橡胶颗粒的掺入，从根本上改变了膨胀土的三相结构。这些粒径通常在 2-5 毫米范围内的弹性颗粒，凭借其独特的物理特性，与土颗粒形成了一个复合体系。在颗粒级配层面，橡胶颗粒能够有效地填充膨胀土中的粗大孔隙，使得原本松散的土颗粒排列更加紧密。这种孔隙结构的优化不仅减少了土体与外界水分交换的通道，还改变了水分迁移的路径。原本连续的孔隙通道被橡胶颗粒分割成众多细小的分支，迫使水分子在更曲折的路径中扩散，显著降低了水分迁移速率。

具体来说，橡胶颗粒的加入使得膨胀土的孔隙率降低，从而提高了土体的整体密实度。这种密实度的提高，不仅增强了土体的抗剪强度，还提高了其抗渗性能。橡胶颗粒的弹性特性使得它们在土体中起到了类似于“弹簧”的作用，能够吸收和分散部分应力，从而减少了土体在受力时的变形。橡胶颗粒的加入还提高了土体的抗冻融能力，因为它们能够有效地缓解冻融过程中产生的体积变化。在工程应用中，这种掺入橡胶颗粒的膨胀土复合体系具有广泛的应用前景。在道路建设中，它可以作为路基材料，提高道路的稳定性和耐久性。橡胶颗粒的低密度特性对膨胀土的密度分布产生了显著影响^[3]。当橡胶颗粒替代部分土颗粒后，改良土的干密度呈

现规律性降低。这是由于橡胶颗粒密度仅为土颗粒的 $1/3$ 至 $1/2$ ，相同体积下质量更小。与此最优含水率却呈现上升趋势，这是因为橡胶颗粒表面的疏水性限制了其与水分子的直接作用，使得更多水分被保留在土颗粒表面。

从热力学的角度来看，橡胶颗粒的加入显著地改变了土体的能量平衡状态。具体来说，在水分蒸发的过程中，橡胶颗粒的弹性变形特性能够吸收一部分由于水分散失所引起的土体收缩能量，从而减少了土体内部能量的积累。橡胶颗粒与土颗粒之间的界面相互作用，为能量的耗散提供了一种新的途径^[4]。当土体出现收缩的趋势时，颗粒之间的相对位移需要克服橡胶颗粒的弹性阻力以及界面摩擦力，这种能量的消耗有效地削弱了干缩驱动力。改良后的土体在干燥过程中表现出更加优越的稳定性，从而提高了整体的工程性能。

3 橡胶颗粒抑制干缩裂缝的微观作用机制

在微观尺度的层面上，橡胶颗粒与土颗粒之间的相互作用构成了抑制干缩裂缝的核心机制。具体来说，橡胶颗粒表面的粗糙纹理形成了独特的机械咬合结构，这种微观级别的互锁效应使得橡胶颗粒与土颗粒紧密结合，形成了类似钢筋混凝土的增强体系。在土体收缩过程中，橡胶颗粒凭借其高弹性模量，能够有效地分散土颗粒间的收缩应力，从而避免了应力集中现象的产生。大量的研究表明，橡胶颗粒的弹性变形可以使得局部应力降低 30%-50%，这显著地延缓了裂缝的萌生。这种机制的存在，使得橡胶颗粒在土体工程中的应用具有重要的实际意义，能够显著提高土体的稳定性和耐久性。

橡胶颗粒的掺入对土颗粒表面的电化学性质产生了显著的影响。在自然界中，土颗粒表面通常带有负电荷，在水溶液中形成双电层结构，而橡胶颗粒表面则呈现出电中性的状态。当橡胶颗粒与土颗粒混合在一起时，这种电荷差异显著地改变了颗粒间的静电作用模式。一方面，橡胶颗粒的存在削弱了土颗粒间的静电斥力，使得颗粒之间的排列更加紧密，从而增强了它们之间的相互作用力；另一方面，橡胶颗粒对水分子的排斥作用导致水化膜的厚度减小，进而降低了因水化膜变化引起的体积变形^[5]。这种电化学环境的改变使得土颗粒间的相互作用力更加稳定，有效抑制了土体的过度收缩，从而提高了土体的整体稳定性。

三维网络结构的形成是橡胶颗粒抑制干缩裂缝的关键宏观表现。随着橡胶颗粒掺量的增加,这些弹性颗粒在土中相互搭接,形成连续的空间网络。这种网络结构如同一张弹性约束网,限制了土颗粒的自由位移,增强了土体的整体性。在干燥过程中,网络结构通过弹性变形吸收收缩能量,将土体的收缩变形均匀分散到整个体系中,避免局部变形过大导致裂缝产生^[6]。网络结构对水分迁移的阻隔作用,进一步延缓了土体的干燥速率,从多个层面实现对干缩裂缝的有效抑制。

4 不同掺量橡胶颗粒对干缩裂缝抑制效果的对比

橡胶颗粒的掺入量在很大程度上决定了其对膨胀土干缩裂缝的抑制效果,这种关系呈现出一种典型的非线性特征。具体来说,在掺量较低的阶段(通常情况下小于5%),橡胶颗粒在土体中的分布状态是相对离散的。尽管每个橡胶颗粒能够在一定程度上发挥应力缓冲的作用,但由于颗粒之间缺乏有效的连接,很难形成一个整体的约束体系。在这种情况下,改良后的土体在干缩过程中形成的裂缝形态与未改良的原状土相比,并没有显著的变化。尽管裂缝的数量和宽度有所降低,但这种降低的幅度相对较小,因此抑制效果并不理想。

随着橡胶颗粒掺量的逐步增加,当其比例达到5%至15%的区间时,这些橡胶颗粒开始逐渐形成一个相互连通的网络结构。在这个特定的阶段,橡胶颗粒之间的协同效应逐渐显现出来。它们通过物理接触和力学传递的方式,将原本分散的土颗粒紧密地连接成为一个整体^[7]。根据相关研究显示,当橡胶颗粒的掺量达到10%时,改良土的干缩应变可以显著降低超过50%,同时裂缝的数量也会减少多达60%,并且裂缝的宽度也会显著变窄。这种显著的抑制效果主要源于橡胶颗粒网络对土颗粒的有效约束作用,以及其对水分迁移的阻碍作用。正是因为这种作用,使得土体在干燥过程中能够保持更好的完整性,从而显著提高了土体的稳定性和耐久性。

当橡胶颗粒的掺量超过15%之后,整个体系的性能会发生一个显著的转折点。过多的橡胶颗粒会占据土颗粒之间的有效接触空间,从而削弱了土颗粒之间的粘结力。由于橡胶颗粒本身缺乏胶结能力,过量的掺入会导致土体的结构性下降,进而使得其抗压强度和抗剪强度开始逐渐降低。在这种情况下,尽管干缩裂缝的发展在一定程度上仍然受到抑制,但抑制效果

的提升速率明显放缓,甚至在某些极端情况下,抑制效果会出现下降的趋势^[8]。这表明存在一个最佳的橡胶颗粒掺量范围,通常这个范围在8%-12%之间。在这个最佳掺量范围内,橡胶颗粒能够在保证土体强度的前提下,实现对干缩裂缝的最优抑制效果,从而为实际工程应用提供了重要的参数依据。

5 结语

废旧轮胎橡胶颗粒改良膨胀土在抑制干缩裂缝方面成效显著。通过改变膨胀土物理性质,从微观层面作用于土颗粒,不同掺量下呈现出各异的抑制效果。未来研究可进一步探索橡胶颗粒与其他改良剂复合使用的协同效应,优化改良工艺,扩大在实际工程中的应用范围。深入研究长期环境作用下改良土性能的演变规律,为工程的长期稳定性提供更坚实保障。

参考文献

- [1] 蔺照兰,郭圣文,王诚.橡胶轮胎颗粒在废旧轮胎厂污水处理中吸附性能的实验研究[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(04):48-50.
- [2] 常建梅,田世龙,李翔,等.不同形状废旧轮胎橡胶颗粒改良道砟动剪切性能及细观作用研究[J].岩土力学,2025,46(03):721-728.
- [3] 李涛,李越,舒佳军,等.橡胶颗粒混合土加筋路堤稳定性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2025,53(02):124-135.
- [4] 陈建民,刘东海,王锦余,等.掺废旧轮胎橡胶颗粒碎石封层黏结性研究[J].中外公路,2024,44(04):127-137.
- [5] 周锐,王保田,王斯杰,等.不同粒径组废旧轮胎橡胶颗粒改良膨胀土性能试验研究[J].长江科学院院报,2023,40(10):115-122.
- [6] 王富奎.粉煤灰+石灰+废旧轮胎橡胶颗粒对湿陷性黄土地基改良试验研究[J].合成材料老化与应用,2022,51(04):86-89.
- [7] 邹一强.考虑干缩裂缝的非饱和土边坡稳定性分析[J].西部交通科技,2022,(07):87-90+143.
- [8] 陈晓斌,喻昭晟,周雨晴,等.红层泥质胶结物干缩裂缝深度与间距预测模型[J].岩土力学,2022,43(04):868-878.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS