

# 土的抗剪强度影响因素的研究

杨昕杭 吴坤阳 邢文铎 李硕杰 张彤\*  
辽宁科技大学 辽宁鞍山 114051

**摘要:** 采用三轴试验,分析了火山石粉对粘土剪切强度变化的规律。将粘土与不同比例的火山石粉末相混合,研究表明,随着火山石粉掺入量的稳步增加,粘土的剪切强度明显增强。特别是在10%–15%的掺杂比下,剪切强度显著上升。火山石粉的引入有效优化了粘土的微观结构,增强了颗粒间的相互粘结对聚集效果。研究揭示了土壤改良的新路径,火山石粉作为一种绿色环保、成本亲民的建材,成为土壤力学性能优化的常见手段,并有助于强化施工过程中的地基稳固性。

**关键词:** 土壤抗剪强度; 三轴试验; 粘土; 火山石粉; 土壤改良

## 引言

土壤的抗剪强度是判断其稳定性和承载性能的核心依据,决定土木工程基础设计与施工质量的关键因素。随着基础设施的持续进步与升级,传统的土壤改良手段逐渐暴露出成本高昂、成效有限的弊端。火山石粉末作为一种环保经济的土壤改良优选途径,因其卓越的物理化学性能,已成为学术界关注的焦点。火山石粉末能够增强土壤颗粒的粘结力及结构稳定性,有效提升土壤的抗剪强度水平。分析火山石粉在土壤中的应用潜力,对于促进土壤改良技术的进步具有重要意义。该方案为工程项目中的土壤处理提供了实际有效的解决路径。

## 一、土壤抗剪强度的影响因素

### (一) 土壤类型

土壤类型对抗剪强度的影响主要体现在土壤的颗粒组成、颗粒形态、孔隙结构以及水分含量等方面。土壤的颗粒组成直接决定了其力学性质。常见的土壤类型如粘土、沙土和粉土在抗剪强度方面有显著差异。

粘土颗粒细腻,比表面积增大,这种特性使得其吸水性能显著提升,展现出较强的塑形能力。处于潮湿气候中时,水分的融入使得粘土颗粒间的润滑作用明显,进而降低了颗粒间的粘附力,剪切强度显著下降,尤其在水分充足的情况下,粘土的塑化指数较高,导致其在抗剪测试中未能达标。粘土在滑坡等地质灾害中往往扮演着关键角色。

与粘土不同,沙土颗粒间的摩擦阻力较大,剪切力较

强。然而,沙土的抗剪强度受水分含量波动的影响较大,尤其在高含水量下,摩擦力减弱,剪切力也随之下降。

粉土作为粘土与沙土的过渡层,颗粒细微。与粘土不同,粉土的吸水能力不强,但其抗剪强度稳定性较好,依然受到水分及压实度的双重制约。

土壤类型对抗剪强度的影响呈现多因素复合效应,土壤的颗粒组成、结构特性及水分状况对抗剪强度具有显著相关性。因此,了解并把握这些特性对工程设计优化至关重要,能够有效强化土体基础。

### (二) 土壤水分含量

土壤抗剪强度的高低与水分含量密切相关,特别是在粘性强的土壤中尤为明显。粘土的水分吸附能力极强,即使水分含量较低,仍能展现较高的粘结力。然而,随着水分含量的增加,土壤颗粒间的水分逐步形成润滑作用,颗粒间的结合力减弱,土体结构的稳定性下降。

当粘土的水分达到饱和状态时,土壤的塑性指数显著上升,颗粒之间的结合力逐步降低,抗剪强度显著削弱。此时,外力施加的剪切力易引发土壤颗粒滑动及结构破坏,导致土壤剪切强度大幅降低。在湿润环境中,粘土的抗剪性能表现较差,尤其在水源丰富的场所,其剪切强度常常受到显著波动。

与湿润土壤相比,水分蒸发的土壤中,颗粒间的结合力恢复,剪切强度普遍较高,摩擦阻力增强,从而在低水分环境中保持较为稳定的抗剪强度。而极度干燥的土壤容易出现裂痕或崩裂,导致土壤脆弱性增加,从而削弱其剪切承载能力。

土壤的抗剪强度与水分含量紧密相扣,不当的水分比例会影响抗剪性能的稳定性。因此,维持适当的水分比例对于确保土壤在不同压力下保持抗剪强度至关重要。

**资金来源:** 辽宁科技大学2025年大学生创新创业训练计划项目

合理的水分管理可显著提高土壤的力学性能，保障施工过程中土壤的稳定性与安全性。

### （三）土壤密实度

土壤密实度是土壤抗剪强度形成的关键因素。经过压实的土壤结构，颗粒间的结合力进一步增强，颗粒之间的贴合度更高，紧密排列的颗粒使得摩擦力显著增加，从而大大提高土壤的剪切抵抗力。

实施压实工序后，土壤的间隙比减少，水分渗透效果减弱，土壤内部结构更加稳固，土壤对外部剪切力的抵抗能力得到显著提升。这一过程强化了土壤在工程领域中的力学稳定性。适当的土壤密实度是提高抗剪强度的有效手段，施工质量直接影响土壤的长期稳定性。

相较之下，结构松散的土壤，如沙质松散土、粉质细土及湿润粘土，颗粒间接触点分散，空隙率较高，土壤中存在较大的孔隙，颗粒之间的缝隙较宽，紧密贴合不易，导致其剪切能力较弱。这类土壤易受到水分侵蚀，孔隙中的水分积聚会显著削弱剪切韧性。

在土木建设中，为提升土壤的承载性能与剪切强度，必须采用恰当的压实技术来增强土壤的紧密程度。保持适当的土壤密实度，有效强化其剪切承载能力，有助于防止土壤不均匀沉降、裂缝扩展及结构失稳，从而保障工程的长期安全与稳定。

### （四）外加改良剂的作用

在土壤优化过程中，土壤加固剂在提升土壤剪切强度方面得到了广泛认可。建筑行业常用的改良材料包括石灰、水泥及火山灰等，这些材料通过化学和物理手段，优化土壤的力学特性。石灰和水泥与土壤中的矿物质反应，生成稳定的水合产物，从而增强土壤结构的强度。尤其在湿润气候区域，石灰改良可显著提升粘土的抗剪强度，防止其膨胀与收缩超出限度。

火山灰基土壤改良材料因其独特的物理化学性质，近年来成为科研的热点。火山石粉末的多孔结构能够填充土壤中的空隙，增强土壤的密实性。其轻质颗粒对土壤结构有积极作用，能有效提高土壤的抗剪强度。火山石粉末的矿物成分与土壤水分发生化学反应，进一步增强土壤的稳定性和剪切抵抗力。

通过科学配比火山石粉的掺量，可以显著改善土壤的工程特性，尤其在粘土改良领域取得了显著成效，为土壤改良提供了新的技术路径。

## 二、三轴试验及数据分析

### （一）三轴试验原理与方法

三轴试验是研究土壤力学性质的重要实验方法，广泛用于测定土壤的抗剪强度、变形特性以及土壤在不同应

力状态下的行为。该实验通过对土样施加轴向应力和侧向应力，模拟土壤在实际工程中的受力情况，评估其抗剪强度和力学性能。三轴试验的基本原理是将土样置于一个可进行压力控制的三轴试验设备中，通过逐步施加轴向应力和不同水平的围压，观测土样的变形和剪切破坏情况。

实验配置通常包含若干围压等级（如：0、50、100、200kPa等），通过调节轴向应力与围压，实现在不同应力状态下的多样化模拟。在应力情境的不同条件下，土样在受力后会表现出不同级别的压缩与剪切形变。通过监测应力与形变之间的关系，可以获取土壤的剪切强度、应力应变关系及其关联参数。三轴测试能够有效揭示土壤在复杂环境中的应力反馈机制，是土壤力学研究中的基础性技术支撑。

### （二）实验材料与样本制备

本次实验所用的粘土样本取自周边土壤，经过筛选与净化处理。根据适当的粒径要求，对粘土进行三轴试验，旨在分析火山石粉对土壤剪切强度影响的内在规律。采用不同掺量（如0%、5%、10%、15%等）的火山石粉末与粘土材料混合，选用源自天然、颗粒适宜的火山岩石粉，具备优越的物理化学属性与稳定性。

在样本制备阶段，首先根据实验规程调整粘土与火山石粉的含水量，通过不同水分比例的调节，控制土壤的塑形特性。为了保证实验的准确性，调匀后的样本需按既定压实标准注入试样模具，确保各样本的密度和水分比恒定不变，从而实现实验数据精确性的基本要求。压实度的控制是核心工作，制备过程中要求土样均匀分布，且不得含有气泡，以减少实验误差，确保数据的可靠性。

### （三）实验结果与数据比较

通过三轴试验对不同掺合比例的火山石粉粘土样本进行测试，得到一系列的抗剪强度数据。如表1所示。

表1 实验结果

掺合比例	正常粘土抗剪强度 (kPa)	火山石粉掺合后抗剪强度 (kPa)
0%	150	150
5%	150	160
10%	150	170
15%	150	180

通过表可以观察到随着火山石粉掺入比例的增加，土壤的抗剪强度表现出逐渐上升的趋势。在低围压条件下，火山石粉掺合比例为10%时，土壤的抗剪强度已有显著提升，进一步增高比例（15%）时，抗剪强度继续增大。

### （四）数据分析

实验结果表明，火山石粉对粘土的抗剪强度具有明

显的提升作用。随着火山石粉掺合比例的增加，粘土的抗剪强度逐渐提高，尤其在10%和15%的掺合比例下，抗剪强度的提升效果更加明显。这一现象可以通过火山石粉的物理化学特性解释。火山石粉的多孔性和颗粒结构有助于改善土壤的整体密实度，减少水分的过度吸附，从而增强土壤颗粒之间的粘结力。此外，火山石粉的矿物成分可能与粘土中的成分发生反应，进一步提升土壤的力学性质。

不同掺合比例下的抗剪强度差异表明，火山石粉的最佳掺合比例应为10%~15%。在这一范围内，火山石粉能够充分发挥其改良作用，但过高的掺合比例可能导致土壤的粘结性过强，从而影响土壤的变形能力。因此，在实际应用中，应根据土壤的特性和工程需求合理选择火山石粉的掺合比例，以达到最佳的改良效果。

### 三、火山石粉的改良机理

#### (一) 火山石粉的物理化学特性

火山岩磨碎粉末作为一种天然矿物质，展现出非凡的理化属性。凭借其独特特性，火山岩石粉末成为土壤改良的优质添加剂。其矿物成分主要由二氧化硅、铝土矿和铁矿物组成，展现卓越的化学稳定性和抗腐蚀特性。火山石粉的颗粒形态各异，表面呈现密集的微小孔隙，显著扩大了其表面积，能够与土壤中的水分及矿物质进行多层次的化学反应。

火山石粉末的多孔结构尤为显著，是其最为突出的特性之一。该结构赋予其优异的孔隙特性和吸附能力。当与粘土混合时，火山石粉末能够强化土壤颗粒间的紧密贴合，增强土壤的密实性。水分与粘土粒子的结合增强了土壤的分散性，而火山石粉的微观结构有助于减少这种分散效应的发生，进一步提升土壤结构的稳定性。火山石粉末的多孔结构显著扩大了其表面积，为土壤颗粒之间的粘聚和结合提供了更丰富的接触界面，从而构筑了增强抗剪切性能的框架。

#### (二) 增强土壤抗剪强度的机理

火山石粉末对土壤抗剪强度有着积极影响，明显增强了土壤颗粒间的凝聚力和粘合力。土壤的抗剪强度与土壤颗粒间的相互作用力，特别是颗粒间的粘合力密切相关。火山石粉末的添加有效填充了土壤颗粒间的空隙，增宽了颗粒接触面积，进而提高了颗粒之间的摩擦力和粘结效能。随着粘结力的提升，土壤在外力剪切作用下的稳定性得到增强，从而能够更好地抵抗变形压力，进一步提升了剪切稳定性。

火山石粉末显著改善了土壤的微观结构排列，火山石粉颗粒表面含有众多化学活性反应中心，这些反应位

点可以与粘土颗粒中的矿物质产生化学和物理吸附作用，改善土壤的晶体排列。粘土中的蒙脱石等天然矿物质与火山石粉末中的铝硅矿物发生化学反应，形成更为坚固的复合体，进一步优化土壤的力学特性。火山石粉末的引入显著提高了土壤的宏观剪切稳定性，并在微观层面内增强了土壤的整体稳定性。

此外，火山石粉末提升了土壤的水分保持能力，减少了水分过剩对土壤膨胀与收缩的影响。这一机制对提升粘土土壤的抗剪强度具有显著意义，尤其在湿润气候条件下，水分过多会削弱粘土的抗剪强度。通过优化火山石粉末的水分含量管理，可以保持土壤适宜的湿度水平，从而提升其剪切稳定性。

火山石粉末对土壤物理结构的优化，显著提高了土壤的抗剪强度。通过深入解析晶体结构变化和矿物反应机制，土壤的力学性能得到了显著强化。根据土壤的需求，火山石粉末可作为替代材料使用，最大限度地发挥其改进潜力。

#### 结语

本研究探讨了火山石粉对粘土剪切强度的影响。实验结果表明，火山石粉的掺入显著提高了粘土的剪切强度，特别是在混合比例为10%和15%时，抗剪性能表现出明显的提升。火山石粉末的多孔性及其独特的矿物成分，增强了土壤颗粒的结构，使得土壤颗粒间的凝聚力和摩擦系数得到了提升，从而增强了土壤的抗剪强度。实验数据分析显示，火山石粉在粘土的优化作用方面表现突出，尤其在宏观抗剪强度方面的增强效果明显。同时，火山石粉对土壤微观结构的改造，进一步优化了土壤的力学特性。适宜的火山石粉掺量能够大幅提高土壤的工程品质，为土壤改良及建设工程提供了切实可行的技术实施策略。未来的研究可以进一步挖掘火山石粉与其他土壤改良剂的潜在协同作用，以为土壤改良提供更加全面的解决方案。

#### 参考文献

- [1] 郝忠, 张英姿, 周峰, 李池龙. 石灰改良土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 路基工程, 2018(05): 94-99. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2018.05.19.
- [2] 宋治, 简文星, 张树坡, 蒋天娇. 赣南花岗岩残积土的抗剪强度及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 222-227.
- [3] 宫云鹏, 高翔, 任大勇, 张沛. 基于灰色关联分析的土抗剪强度影响因素分析[J]. 煤炭技术, 2020, 39(11): 35-37. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2020.11.010.