

稻壳灰改良膨胀土的临界掺量与性能演化机制

岳霖烽

西南石油大学地球科学与技术学院，成都

摘要 | 为探究稻壳灰改良膨胀土的作用机理与最优掺量，通过室内宏观试验与微观表征相结合，对稻壳灰进行系统的研究。结果表明：稻壳灰掺量存在25%的临界值，据此划分为有效改良区（ $\leq 25\%$ ）与性能衰减区（ $> 25\%$ ）。在有效的改良区范围内，火山灰反应形成C-S-H凝胶、物理填充作用、离子交换作用以及矿物转变等多种作用机理相互叠加的结果导致其随着掺量增大改良效果逐渐提高：自由膨胀率下降幅度最大为79%，抗剪强度不断提高，在25%的掺量下抗变形性能最好，并从微观上验证了这种化学胶结和物理填充共同存在的现象。当掺量 $> 25\%$ 后，物理填充转为负面的“骨架置换效应”，而且过量的惰性材料稀释了反应体系，使得膨胀指标回升、强度增长边际效益骤降，综合性能进入衰减区。研究明确了25%为最佳经济掺量，为膨胀土工程改良提供了理论依据。

关键词 | 改良膨胀土；稻壳灰；环保材料；膨胀性能；力学性质

Copyright © 2026 by authorx (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

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



膨胀土是具有强塑性的黏土，其最显著的特征为吸水膨胀、失水收缩，这一特征使得膨胀土地区在全球范围内成为困扰基础设施建设的一大难题。据不完全统计，膨胀土引起的各类工程事故年均发生数百起，如路基塌陷、挡土墙坍塌破坏、隧道洞身开裂等现象屡见不鲜，对公路、铁路、房屋建筑等设施安全造成极大的危害。其造成的经济损失也是巨大的^[1-4]。例如我国西南地区的成都黏土因其较高的蒙脱石含量具有高达原体积10%~15%的吸水膨胀率，并在失水收缩后形成裂隙网，极易发生渐进式滑坡。

正因为膨胀土问题突出，寻找更环保的改良方法成了研究热点。近年来，把农业废弃物用到土体改良中，逐渐受到关注。比如稻壳灰，它里面含有大量无定形二氧化硅（占比85%到95%），具备火山灰活性，可以和

土中的铝、铁氧化物发生反应，生成C-S-H凝胶这类胶凝物质^[5-7]，既能填充土体孔隙，又能增强颗粒之间的黏结力^[8]。再加上稻壳灰本身轻质多孔，还能调节土体内部的水分迁移，对抑制膨胀变形也有帮助^[9-10]。目前来看，关于稻壳灰的研究大多集中在其与其他材料的协同作用上，比如与高炉矿渣^[11]，电石渣^[12]，矿粉^[13-14]，污泥^[15]，水泥^[16]或者石灰^[17-18]等共同作用来固化，改良特殊土。但单独用稻壳灰来改性膨胀土的研究，目前还比较少。

本文以成都龙泉驿区某施工场地的膨胀土为研究对象，以稻壳灰作为改良剂对成都膨胀土进行稻壳灰改良情况下的自由膨胀率、无荷膨胀率、膨胀力等膨胀性试验以及直剪试验与蠕变试验，分析稻壳灰对成都地区膨胀土的改良情况。

基金项目：中铁二十三局科研项目（CR2301-GL-CMCB7B-2021-KY-01）。

作者简介：岳霖烽，西南石油大学地球科学与技术学院硕士研究生，研究方向：地质学。

文章引用：岳霖烽. 稻壳灰改良膨胀土的临界掺量与性能演化机制 [J]. 环境与资源, 2026, 8(2): 166-175.

<https://doi.org/10.35534/er.0802022>

1 材料与试验

1.1 膨胀土

本文试验所用膨胀土取自成都市龙泉驿区某施工工地，取样深度 1.5m 以下，取土时土样含有大量的水，黏性及可塑性强，自然风干后质地坚硬。此地膨胀土为末次冰期的风成堆积物，表面颜色呈黄褐色，中间夹杂

少量灰白色黏土^[19]。原始土样基本物理力学性质如表1所示。

1.2 稻壳灰

本文试验所用的稻壳灰来自河南某生物质发电厂，经600~700℃燃烧后的稻壳灰呈黑色，表示其中的碳没有完全燃烧。通过X射线荧光光谱(XRF)分析其化学成分，结果如表2所示。

表 1 膨胀土基本物理力学性质表

Table 1 Table of basic physical and mechanical properties of expansive soil

最优含水率 WOP (%)	最大干密度 ρ_d (g·cm ⁻³)	塑限 WP (%)	液限 WL (%)	自由膨胀率 δ_{ef} (%)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)
16.9	1.82	24.5	62.1	58	30.57	8.69

表 2 稻壳灰主要化学成分表

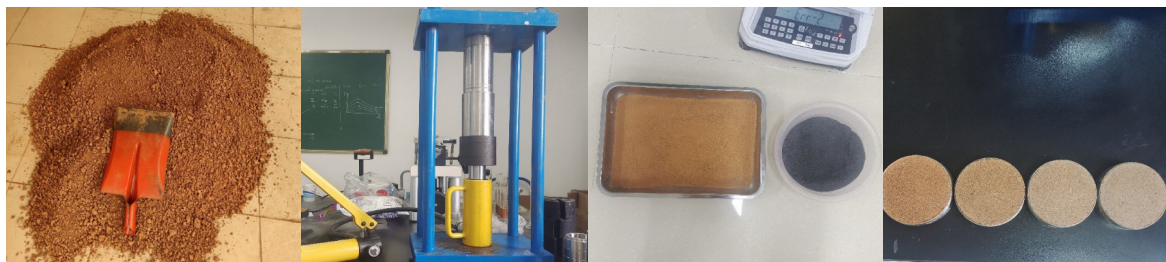
Table 2 Table of main chemical components of rice husk ash

成分	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
质量分数 (%)	90.3%	1.0%	0.6%	1.5%	0.5%	3.2%

1.3 制备与方法

试样制备按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-

2019),《公路土工试验规程》(JTG E40-2020)等规范要求执行,制备步骤如下:



a膨胀土原土

b环刀试样压样设

c烘干后的膨胀土与稻壳灰

d成型后的标准环刀试样

图 1 试验材料、设备与试样示意图

Figure 1 Test materials, equipment and sample schematic diagram

(1) 将膨胀土自然风干后敲碎,置于105℃的烘箱内进行烘干处理,待土样完全干燥后取出,晾至恒温后放入密封袋中密封,防止土与空气中的水接触。取烘干后的土过0.5mm筛,用来测定膨胀土的界限含水率和自由膨胀率指标。

(2) 称取不同掺量下所需要稻壳灰质量,将它们掺入到过0.5mm筛的膨胀土中,加水至17%含水率,搅拌均匀后放入保鲜膜中密封养护8天,待其充分与土接触发生反应后放入60℃的烘箱中烘24小时,土样完全干燥后取出,晾至恒温后敲碎过0.5mm筛进行改良后的自由膨胀率试验。

(3) 取烘干后的土磨细过1mm筛,接着称取不同掺量下稻壳灰质量,将它们掺入到过1mm筛的膨胀土中,加水至17%含水率,搅拌均匀后静置一天,使土与

水充分结合后,将土放入标准环刀压样器中,利用千斤顶将土样压实成型,标准环刀样尺寸为 $\varphi=61.8\text{mm}$, $h=20\text{mm}$ 。试样制作好后用保鲜膜包裹后养8天。

最后以5%为一个单位对稻壳灰掺量为0%~40%的膨胀土进行一系列试验,包括自由膨胀率,无荷膨胀率,膨胀力等膨胀性能试验以及直剪试验,蠕变试验等力学性能试验。

2 稻壳灰改良膨胀土试验研究

2.1 稻壳灰对膨胀性能的改良作用

为了分析稻壳灰掺入后,其不同掺量对膨胀土膨胀性能的影响情况,本文采用稻壳灰的不同掺量(5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%)进行室

内试验，得到相应的土样在不同掺量下的自由膨胀率值、无荷膨胀率值以及膨胀力值，并将其绘制出相应的关系曲线，如图2所示。由图可以看出：随着稻壳灰

掺量的不断增多，以上三个膨胀指标都呈不断降低的趋势。说明稻壳灰的加入可以有效地改善膨胀土的胀缩性。

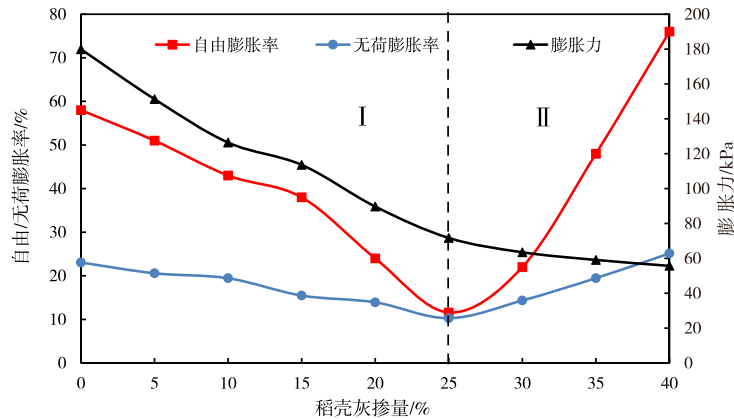


图2 改良膨胀土膨胀性能变化曲线

Figure 2 Expansive performance change curve of improved expansive soil

根据试验结果，以25%掺量为界，可将稻壳灰对膨胀土的改良过程划分为两个特征阶段。

(1) I区(有效改良区)

本区间稻壳灰抑制显著，自由膨胀率及无荷膨胀率随着掺入量增大而不断减小，在25%掺量时达到最小(12%，10.28%)；总体上膨胀力呈减小趋势，但在0%~10%的掺量范围内减小速率最大，每提高5%掺量减小15.9~16.5 kPa左右，表明低掺量条件下稻壳灰就能起到较好的改善效果。

(2) II区(性能衰减区)

掺量超过25%以后，改良作用减小甚至出现局部反弹；自由膨胀率和无荷膨胀率比最低值有所恢复，分别

为20%和15.05%；膨胀力虽仍有下降的趋势，但是降低幅度明显减缓了，即随着掺量的进一步增长(5%)，膨胀力的降低幅度从之前的8.2kPa缩小到3.4kPa，说明在25%之后再提高稻壳灰的掺入比例，其边际改良效应已经明显减弱。

2.2 稻壳灰对力学特性的改良作用

2.2.1 抗剪强度改良分析

土的抗剪强度参数—黏聚力c和内摩擦角φ是判断膨胀土边坡以及地基是否稳定的重要依据，为了了解稻壳灰掺入后对其c、φ的影响，进行了不同掺量下的直剪实验，并绘出抗剪强度与法向应力关系曲线如图3所示，从强度包线可以看出c、φ值随掺量变化的情况。

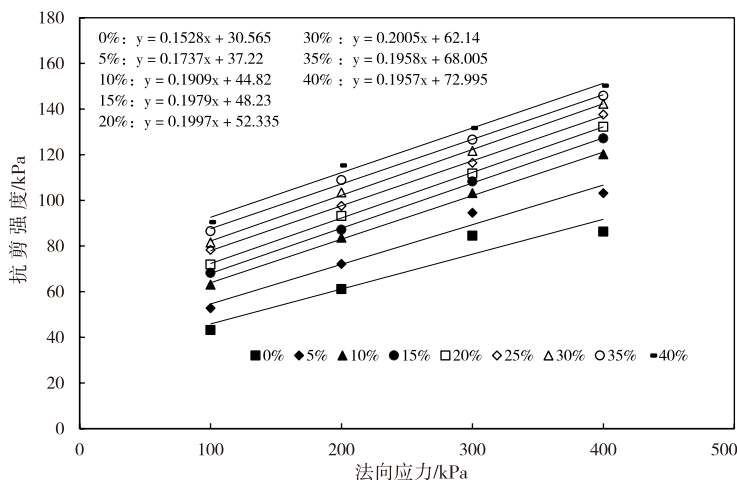


图3 改良膨胀土抗剪强度与法向应力关系图

Figure 3 The relationship diagram between shear strength and normal stress of improved expansive soil

由图4可知,在同一掺量范围内,随着法向应力增大,改良膨胀土抗剪强度随之升高,并满足线性关系,即服从库仑强度准则;在相同法向应力条件下,改良膨胀土的抗剪强度随着稻壳灰掺入比例的增大而逐渐提升,即整体上起到了良好的改良作用。但单纯依据绝对

强度变化情况难以准确确定改良率以及最佳掺量区间。因此,定义抗剪强度增长百分数这一概念并绘出其随掺量的变化关系图(图4),以此来考察不同掺量范围内强度的增长“价值”以及边际效益。

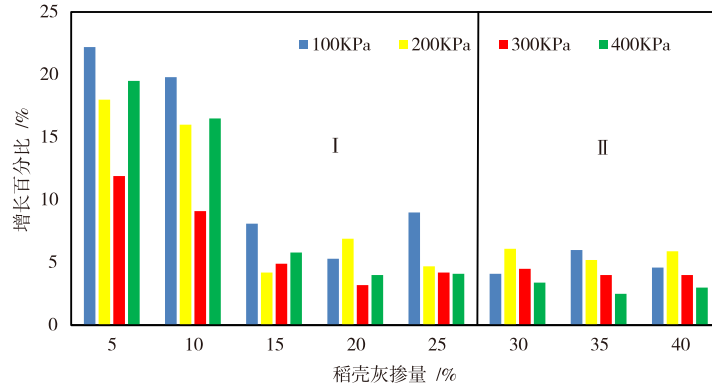


图4 稻壳灰掺量对抗剪强度增长百分比的影响规律图

Figure 4 The influence of rice husk ash content on the percentage increase of shear strength

从试验结果来看,在整个掺量范围(0~40%)内,改良土体的抗剪强度总值总体保持增长。但在掺量超过25%后,强度的增长速度出现明显放缓。也就是说,单位稻壳灰掺量所产生的强度增益开始下降,改良的边际效益逐步降低。抗剪强度增长速率的下降,揭示了稻壳灰改良作用随掺量变化的不同主导机制。

(1) I阶段低-中掺量区间(0%~25%,显著增强期)物理填充效应与化学胶结作用共同主导,效果显

著。(2) II阶段:高掺量区间(25%~40%,增益递减期)当掺量超过最优区间后,抗剪强度虽继续增长,但增速明显放缓,性价比下降。

2.2.2 黏聚力与内摩擦角改良分析

根据直剪试验结果,采用库仑强度公式进行线性回归,得到了不同稻壳灰掺量下改良土的黏聚力 c 与内摩擦角 ϕ 。参数随掺量的变化规律如图5所示,该结果为下文分析稻壳灰对抗剪强度的影响机理提供了基础。

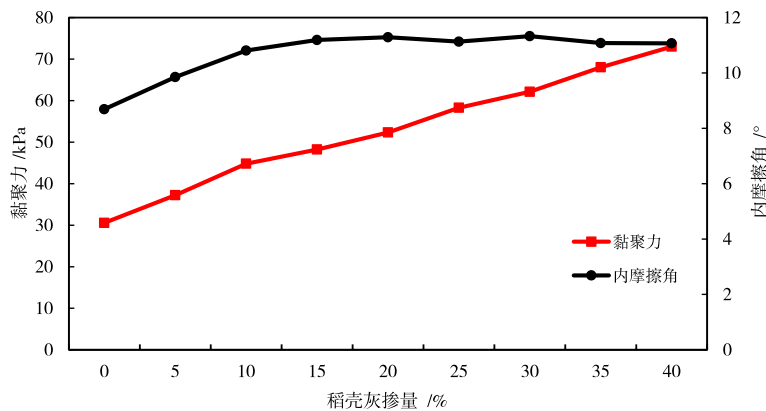


图5 改良膨胀土黏聚力与内摩擦角变化曲线

Figure 5 The variation curve of cohesion and internal friction angle of improved expansive soil

为进一步比较黏聚力及内摩擦角受稻壳灰影响的程度及其最适宜的掺入率,分别计算了二者相对于初始值的增长情况,得到随着稻壳灰掺量不断增大,二者的增

长速率;同时根据两者在相同梯度(如相差5%)间的增量之差来确定单位梯度下稻壳灰对土体抗剪强度提升的效果如图6所示。

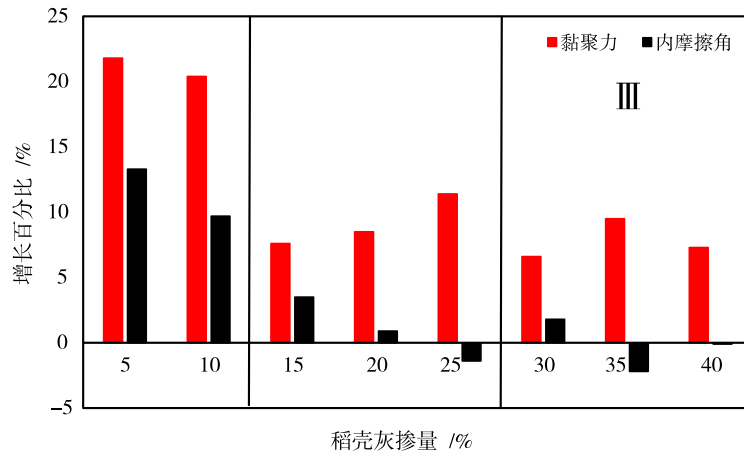


图6 稻壳灰掺量对黏聚力与内摩擦角增长百分比的影响规律图

Figure 6 The influence of rice husk ash content on the percentage increase of cohesion and internal friction angle is illustrated

通过分析其变化趋势与内在机理，可将整个过程划分为三个主要阶段，具体如下。

(1) I阶段协同增效期(掺量0%~10%)

这一阶段，黏聚力与内摩擦角均呈现同步提升趋势，改良效率达到最高。其中，黏聚力相对增长率在初期达到峰值，0%→5%和5%→10%两个掺量区间分别增长21.8%和20.4%；与此同时，内摩擦角也在此阶段出现主要增幅，对应区间分别为+13.3%和+9.7%。

(2) II阶段：胶结主导期(掺量10%~25%)

当掺入稻壳灰质量分数达到一定值后，抗剪强度增长趋势出现差异化发展，其主导因素由协同效应转变为胶结效应。此时，黏聚力增长速率虽然比峰值降低，但仍然维持在6.6%~11.4%，说明胶结效应仍发挥作用；而内摩擦角增长速率显著减小，由表中可知，在10%~15%掺量区间增幅仅为3.5%，20%→25%区间甚至是负增长(-1.4%)，即其提升的空间已经接近上限，改良的效果

已经趋于饱和状态。

(3) III阶段：增益衰减期(掺量25%~40%)

此阶段黏聚力及内摩擦角的改善程度都大幅降低，黏聚力增长幅度继续降低，25%~30%之间只有6.6%的增长率，并小于10%，而内摩擦角基本不再增长，30%~35%间变为负增长(-2.2%)，呈波动递减趋势，说明稻壳灰再提高其掺量对抗剪强度指标的改进已经非常有限了。

2.3 蠕变试验

为进一步分析稻壳灰处理后膨胀土的长期变形稳定性，本文还进行原状土以及掺加25%的改良土的室内蠕变试验，在固定荷载下测定两种土样应变随时间变化的关系，并得到应变-时间曲线和应变增量-时间曲线(见图7)。比较两组土样在蠕变速率及时效性变形方面所表现出的特点，可以得出稻壳灰对膨胀土时效性变形的影响机理。

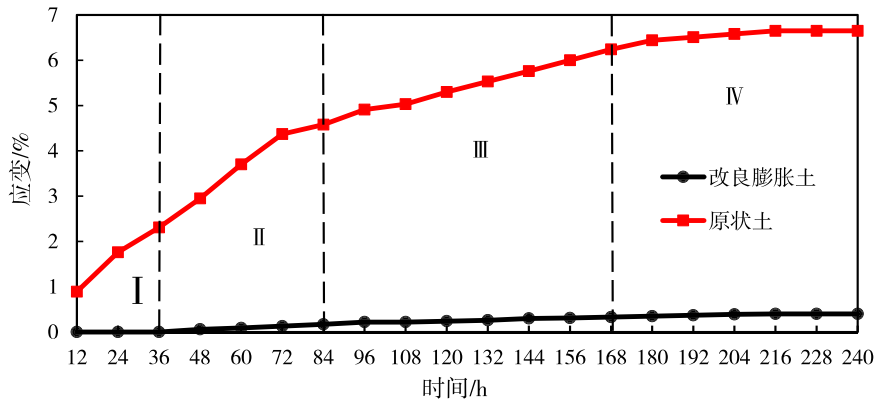


图7 改良膨胀土和原状土蠕变随时间变化曲线

Figure 7 The creep curves of improved expansive soil and undisturbed soil with time change

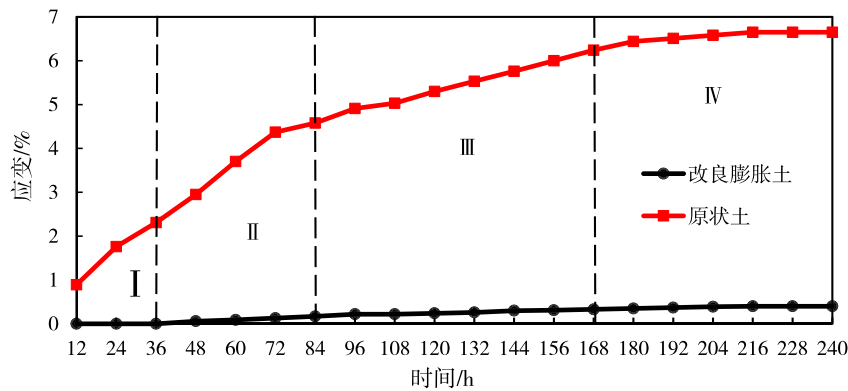


图8 原状土与改良膨胀土应变增幅随时间变化图

Figure 8 The strain increase of undisturbed soil and improved expansive soil varies with time

通过分析其变化趋势与内在机理，可将整个过程划分为四个主要阶段，具体如下。

(1) I 阶段：初始荷载作用期

加载初期，原状土结构发生明显调整，蠕变量由0.89%增至2.31%，增幅为1.42%。改良土在该阶段蠕变基本为零，表明稻壳灰的掺入有效抑制了初始变形。

(2) II 阶段：结构调整加速期

原状土蠕变仍在持续增大，增幅约1.5%，变形速率虽然减缓但仍有增大；改良土蠕变缓慢增长至0.33%后，变形量较小且稳定，具有良好的长期性

(3) III 阶段：蠕变稳定过渡期

原状土蠕变增幅进一步收窄至1.5%，变形渐趋平缓。改良土蠕变趋于稳定，变形量维持在0.33%左右，未出现明显增长。

(4) IV 阶段：长期荷载平衡期

原状土处于稳定期，仅增加0.34%的蠕变，结构基本稳定；改良土也处于稳定期，最终蠕变量为0.4%，说明稻壳灰可以长时间地维持土体结构稳定。

由两组试验结果可见，当稻壳灰掺量为25%时，土样的蠕变速率明显下降，在不同时间段内产生的蠕变位移也明显减少，并且在较短时间内趋于稳定状态；表明

加入稻壳灰可提高膨胀土的耐久性及其抗蠕变能力。

3 稻壳灰改良膨胀土性能演化分析

为了揭示稻壳灰能从根本上改善膨胀土的工程性质这一现象的原因，我们需要将目光聚焦于微观层面去探索其中奥秘。因此，在本文中利用 X 射线荧光光谱 (XRF)、X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 微观测试方法分别对改良前后的土体进行物质成分、矿物种类以及微观结构形态的分析描述，以期找到微观与宏观之间的一种内在关系。

XRF 试验选用 SHIMADZU (岛津) 公司生产的 EDX-7000 型 X 射线荧光光谱分析仪，XRD 在 25℃、50% 相对湿度的恒温恒湿环境下进行，以排除温湿。

度波动的影响。采用日本理学 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪，工作电压 40kV，电流 40mA，扫描范围 5° ~ 70°，步宽 0.02°，扫描速度 2° /min。SEM 试验选用日本日立 (Hitachi) 公司生产的 SU3800 型扫描电子显微镜，该仪器分辨率放大倍数区间为 5 倍 ~ 300000 倍，试验过程中加速电压设定为 15kV ~ 20kV，可满足不同尺度下膨胀土微观结构的观测需求。试验得到相关图像与数据如图 8、图 9、表 3 所示。

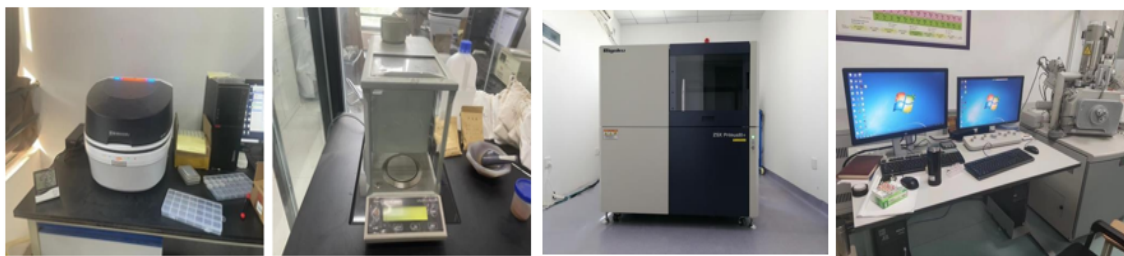


图9 X射线荧光光谱分析仪，X射线衍射分析仪与扫描电镜仪器图

Figure 9 X-ray fluorescence spectrometer, X-ray diffraction analyzer and scanning electron microscope instrument diagram

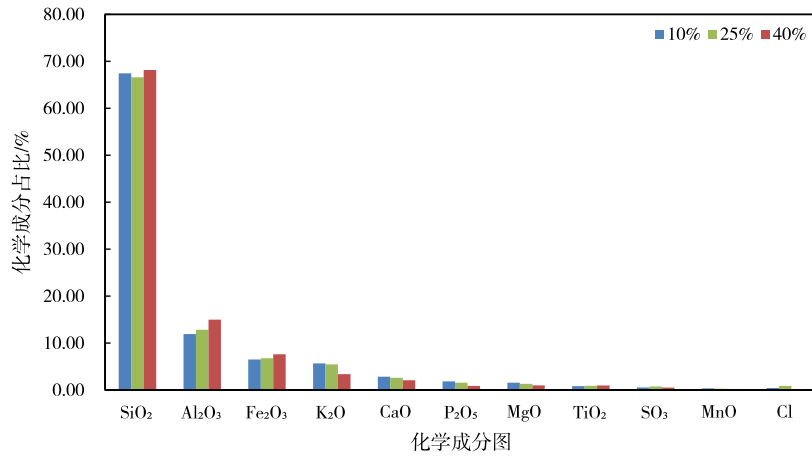


图 10 XRF试验结果图

Figure 10 XRF test results diagram

表 3 XRD试验结果数据

Table 3 XRD test results data

粘土矿物组分	稻壳灰掺量 (%)		
	10	25	40
伊 / 蒙混层	29.8	28.2	30.0
伊利石	31.4	27.9	30.2
高岭石	7.8	13.2	9.4
绿泥石	7.6	8.4	6.1
埃洛石	23.4	22.4	24.3
混层比 (SI/S)	20	20	20

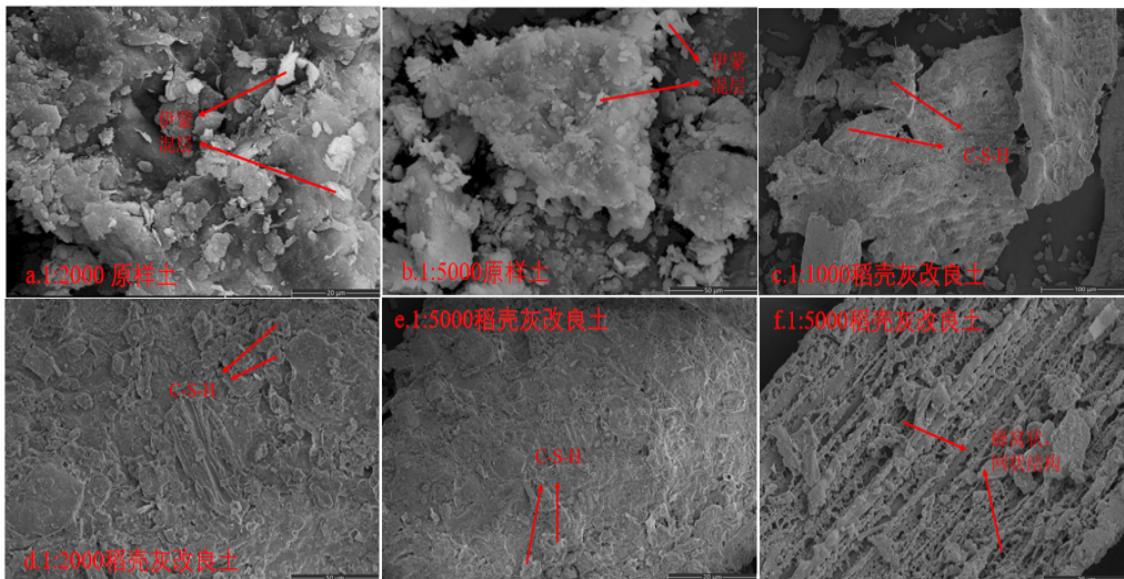


图 11 原状土与稻壳灰改良膨胀土SEM图

Figure 11 Undisturbed soil and rice husk ash improved expansive soil SEM diagram

根据宏观试验与微观试验结合,可以法向稻壳灰对膨胀土的改良是一个物理-化学协同作用的复杂过程,可以从以下机制得到合理解释,且各机理的作用强度与掺量区间密切相关。

(1) 火山灰反应

从 XRF 图谱结果可以看出,在不同稻壳灰掺比下,土体中的 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的质量分数有一定程度上的升高(例如: Al_2O_3 质量分数从11.91%增长到14.98%),这说明稻壳灰发生了火山灰反应,并形成了 C-S-H、C-A-H 等胶凝物质;同时 K_2O 及 CaO 的质量分数也出现了一定程度上的降低,这是由于稻壳灰中 K_2O 及 CaO 充当了激发剂并被不断消耗所致。这些凝胶物包被粘土颗粒在粒间形成“胶结桥”,使得原本离散不连续的土体变得连续和致密。从微观上看,凝胶把稻壳灰和土粒粘合在一起形成一个整体,大大提高了土体强度及抵抗变形的能力。在 I 区(0%~25%)内,反应物对空隙进行填充并增大了粒子间的联系,膨胀力大幅降低的同时,黏聚力逐渐升高;而在掺量高于25%之后,由于灰含量过高,反应体系受到稀释作用而失去其活性,使得黏聚力增加速率变缓。

(2) 物理填充

I 区内稻壳灰颗粒可以直接填满原状土的空隙及微裂隙,减少水进入路径及膨胀空隙;由 SEM 图片可以看出,稻壳灰具有较多的孔隙,在较大孔隙内可以起到分割作用,将大孔隙分割成独立小孔隙,进而阻碍水分子迁移。但是当掺量大于 25% 后,过多的灰粒开始对原状土骨架进行置换。因为稻壳灰自身不具有膨胀性以及粒径之间黏聚力较小的特点,导致土体内部变得更为松散,其内微小孔隙增多,在宏观表现形式上就出现了自由膨胀率一定程度上的反弹。

(3) 离子交换

孔隙液中的 K^+ 、 Ca^{2+} 等高价阳离子可置换黏土矿物表面的低价阳离子,压缩双电层厚度,减少颗粒间斥力,促使黏土颗粒相互靠拢。这一机制使内摩擦角(φ)在掺量20%附近由8.69°增至约11.3°后趋于稳定,粒间摩擦与机械咬合作用得到增强,是膨胀性下降和强度提升的重要辅助因素。

(4) 矿物转化的迹象

从 XRD 分析结果可见,当掺量为25%时,高岭石的相对含量最高(13.2%),远超其他掺量,说明在碱性和火山灰作用的双重影响下,一些膨胀性矿物(伊/蒙混层)部分发生局部蚀变为较稳定的非膨胀性矿物——高岭石;并且 C-S-H 凝胶微观上均匀包覆在膨胀性矿物周围,既能充填空隙又能隔离矿物与水的直接接触,进而阻止晶层吸水膨胀作用,使得土体结构的整体性趋向致密化。

(5) 总结

从作用机制来看,25%掺量之所以成为全局最优改

良点,是四项效应在该掺量下达到最佳协同的结果:火山灰反应的效率和胶结网络发育程度在此达到峰值,提供了最强的结构联结力;物理填充在此时实现最优密实效果,同时未破坏原有土骨架的连续性;离子交换过程已基本完成,有效改善了颗粒间的表面作用;矿物转化的迹象也在该掺量附近最为明显,从内部降低了土体的膨胀潜能。

当掺量超过25%后,物理填充逐渐转为负面的“骨架置换效应”,过量的惰性灰分稀释了反应体系,打破了原有的协同平衡,土体因此进入性能衰减区(II区),表现为自由膨胀率等指标出现回升。这说明,稻壳灰对膨胀土的改良并非单一机制主导,而是以火山灰反应为核心、多种物理化学作用有序协同的过程,且存在明确的优化配比。

4 结论

(1) 在最优掺量(25%)下,自由膨胀率由58%降至12%(降幅79.3%),无荷膨胀率由23.05%降至10.28%(降幅55.4%)。5%~25%掺量范围内可有效抑制膨胀;超过25%后,过量灰分的吸水效应易导致指标反弹。

(2) 稻壳灰对抗剪强度参数的改良表现出不同规律。黏聚力从30.57 kPa持续上升至73.00 kPa(+139%),火山灰反应贡献显著;内摩擦角在20%掺量处增至峰值11.29°(+30%)后趋于稳定,表明物理填充机制的提升空间相对有限

(3) 蠕变特性明显改善。改良后总蠕变量仅为原土的6.4%,变形速率降低90%以上,表明稻壳灰能大幅抑制蠕变发展、缩短稳定周期,显著增强长期抗变形能力。

(4) 综合各项指标,25%掺量被确定为稻壳灰改良膨胀土的最优配比。在此掺量下,以火山灰反应为主导,多种物理化学机制达到了最佳的协同状态,从而使膨胀抑制与强度提升效果最大化。一旦掺量超出此阈值,过量的灰分反而会打破原有的体系平衡,导致改良性能出现明显衰减。

参考文献

- [1] 李生林,薄遵昭,秦素娟,等.我国膨胀土科学研究中的几个问题:全国首届工程地质学术会议[C].中国江苏苏州,1979.
- [2] 刘特洪.工程建设中的膨胀土问题[M].北京:中国建筑工业出版社,1997:268.
- [3] 陈孚华.膨胀土上的基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [4] 李生林,施斌,杜延军.中国膨胀土工程地质研究[J].自然杂志,1997,2(6).
- [5] Hossein Moayed, Babak Aghel, Mu'azu Mohammed

- Abdullahi, et al. Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117851.
- [6] Bassam A. Tayeh, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, Abdulaziz Alaskar, Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127734.
- [7] Sustainable utilization of biomass waste—rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review *Construction and Building Materials* [J]. *Construction and Building Materials*. 2021, 292: 123219
- [8] 江训利. 稻壳灰无机复合固化土微观机理及非线性力学性能研究 [D]. 浙江大学, 2022.
- [9] Ng C, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. *Geotechnique*, 2003, 53 (2): 143–157.
- [10] Abhishek A, Kurwa E, Uppala J S, GuhaRay A. Microstructural Characterization of Expansive Soil Stabilized with Agricultural Waste Materials [M] //In Jose B T, Sahoo D K, Puppala A J, et al. (eds) *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 3. IGC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 478. Springer, Singapore, 2024.
- [11] 李丽华, 李孜健, 肖衡林, 等. 稻壳灰-高炉矿渣固化膨胀土工程特性及机理 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2023, 57 (9): 1736–1745.
- [12] 郭铄. 稻壳灰和电石渣改性膨胀土力学性能及作用机理研究 [J]. *公路工程*, 2020.
- [13] 王超. 矿粉-稻壳灰固化氯盐渍土的路用性能试验研究 [D]. 塔里木大学, 2024.
- [14] 徐凤旺. 复掺稻壳灰与矿粉的水泥固化土强度特性及耐久性研究 [D]. 安徽理工大学, 2021.
- [15] Zhang H. Experimental studies on manufacturing cementitious materials with sludge and rice husk ash [J]. *Hydro Science and Engineering*, 2015 (4): 75–80.
- [16] Hossain K. Stabilized soils incorporating combinations of rice husk ash and cement kiln dust [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23 (9): 1320–1327.
- [17] Liu Y, Su Y, Namdar A, et al. Utilization of cementitious material from residual rice husk ash and lime in stabilization of expansive soil [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019 (1): 5205276.
- [18] Jiang X L Huang Z Y Ma F O, et al. Analysis of strength development and soil-water characteristics of rice husk ash-lime stabilized soft soil [J]. *Materials*, 2019, 12 (23): 3873.
- [19] 梁斌, 朱兵, 梁斌, 等. 成都平原第四纪地质与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 125.
- [20] 吴宜峰. 成都地区非饱和膨胀土边坡稳定性的有限元分析 [D]. 西南石油大学, 2015.

The Critical Dosage and Performance Evolution Mechanism of Expansive Soil Improved by Rice Husk Ash

Yue Linfeng

Southwest Petroleum University, School of Earth Science and Technology, Chengdu

Abstract: In order to explore the mechanism and optimal dosage of rice husk ash to improve expansive soil, a systematic study on rice husk ash was carried out through the combination of indoor macroscopic test and microscopic characterization. The results show that there is a critical value of 25 % for rice husk ash content, which is divided into effective improvement area ($\leq 25\%$) and performance attenuation area ($> 25\%$). In the effective improvement area, the results of the superposition of various mechanisms such as C-S-H gel formed by volcanic ash reaction, physical filling, ion exchange and mineral transformation lead to the gradual improvement of the improvement effect with the increase of dosage: the maximum decrease of free expansion rate is 79 %, the shear strength is continuously improved, and the anti-deformation performance is the best at the dosage of 25 %. The phenomenon of chemical cementation and physical filling is verified from the microscopic point of view. When the content is more than 25 %, the physical filling turns into a negative 'skeleton replacement effect', and the excessive inert material dilutes the reaction system, so that the expansion index rebounds, the marginal benefit of strength growth plummets, and the comprehensive performance enters the attenuation zone. The study clarifies that 25 % is the best economic dosage, which provides a theoretical basis for the improvement of expansive soil engineering.

Key words: Improved expansive soil; Rice husk ash; Eco-friendly materials; Expansion performance; Mechanical properties