

钢渣粉煤灰混合料联合改良膨胀土强度特性试验研究

李伟 徐刚

沈阳建筑大学

DOI:10.12238/bd.v9i2.4351

[摘要] 本研究通过钢渣和粉煤灰混合料对膨胀土进行联合改良试验,研究其对膨胀土强度和膨胀特性的影响。试验结果表明,钢渣和粉煤灰的掺入显著提升了膨胀土的无侧限抗压强度和抗膨胀能力,二者联合使用具有协同作用,优于单一改良材料。基于试验数据建立了强度预测模型,并确定了最优掺量组合。本研究为膨胀土改良提供了理论依据和实践指导。

[关键词] 钢渣; 粉煤灰; 膨胀土; 强度特性; 联合改良

中图分类号: TQ442.32 **文献标识码:** A

Experimental Study on the Strength Characteristics of Expanded Soil Modified by Steel Slag Fly Ash Mixture

Wei Li Gang Xu

Shenyang Jianzhu University

[Abstract] This study conducted a joint improvement experiment on expansive soil using a mixture of steel slag and fly ash, and investigated its influence on the strength and expansion characteristics of expansive soil. The experimental results show that the addition of steel slag and fly ash significantly improves the unconfined compressive strength and anti expansion ability of expansive soil. The combination of the two has a synergistic effect and is superior to a single improved material. A strength prediction model was established based on experimental data, and the optimal dosage combination was determined. This study provides theoretical basis and practical guidance for the improvement of expansive soil.

[Key words] steel slag; Fly ash; Expansive soil; Strength characteristics; Joint improvement

膨胀土作为一种特殊土类,因其显著的胀缩特性给工程建设带来诸多问题。长期以来,研究者们致力于寻找经济、有效的膨胀土改良方法。钢渣和粉煤灰作为工业废弃物,具有来源广泛、成本低廉的优势,将其用于膨胀土改良,既能解决环境污染问题,又能提高膨胀土的工程性能。本文通过钢渣粉煤灰混合料联合改良膨胀土的试验研究,分析了改机理,探讨了强度特性,以期对膨胀土地区工程建设提供技术支持。

1 膨胀土特性与改良需求

1.1 膨胀土的定义与特性

膨胀土富含蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,具有致密结构和网状裂隙。天然状态下干密度和强度较高,但遇水膨胀率可达1%~15%,膨胀力可达 $(0.5\sim 3.0)\times 10^5$ 帕,力学性能显著下降^[1]。在干湿交替或冻融作用下,其体积变化大,易产生裂缝,工程性能降低。胀缩性与矿物成分和含水量密切相关,按胀缩率分为强膨胀土(>4%)、中膨胀土(2%~4%)和弱膨胀土(<2%)。

1.2 膨胀土改良方法概述

膨胀土的改良方法包括物理法(如铺设砂垫层、砂砾垫层或

沥青砂浆层等防水隔离层)、化学法(添加石灰、水泥、粉煤灰等改良剂)和生物法(利用微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固土体)^[2]。其中,石灰和水泥可提高膨胀土强度但成本高且环境影响较大;粉煤灰成本低、资源丰富,通过火山灰反应和孔隙填充作用改善土体性能;钢渣硬度高、力学性能好,通过离子交换和颗粒填充作用降低膨胀性。钢渣与粉煤灰联合使用可发挥协同作用,兼具低成本和环境友好性,符合可持续发展要求,其改机理包括物理填充、化学反应和离子交换。

2 钢渣与粉煤灰的特性分析

2.1 钢渣的物理与化学特性

钢渣是炼钢废渣,主要含硅酸二钙(C_2S)、硅酸三钙(C_3S)、硅酸三钙与铁酸钙的复合矿物($C_3S\cdot C_3A\cdot C_4AF$),以及少量游离氧化钙($f-CaO$)和镁(MgO)。钢渣的化学成分因炼钢工艺和原材料的不同而有所差异,但通常含有较高的 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 。其颗粒级配较粗,粒径0.075 mm至数毫米,堆积密度 $2.5\sim 3.0 g/cm^3$,颗粒形状不规则且表面粗糙^[3]。钢渣中的 CaO 和 MgO 可置换膨胀土表面的低价阳离子,降低膨胀性;同时, $f-CaO$

水化生成氢氧化钙(Ca(OH)₂)，填充孔隙，提高土体密实度。

2.2 粉煤灰的特性

粉煤灰是燃煤电厂副产品，主要由二氧化硅(SiO₂)、氧化铝(Al₂O₃)和氧化钙(CaO)组成。颗粒多为球形玻璃体，粒径0.001~0.1mm，比表面积300~600 m²/kg，填充性能良好。其火山灰活性是改良膨胀土的关键，粉煤灰中的SiO₂和Al₂O₃可与Ca(OH)₂反应火山灰反应，生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和水化铝酸钙(C-A-H)凝胶，填充孔隙，减少水分吸附，抑制膨胀性。

2.3 钢渣与粉煤灰的协同作用原理

钢渣与粉煤灰联合改良膨胀土，通过钢渣的物理填充和粉煤灰的火山灰反应发挥协同作用，显著提升膨胀土的强度和耐久性。钢渣颗粒填充膨胀土的大孔隙，减少水分渗透；粉煤灰则填充微小孔隙，形成致密结构。化学上，钢渣的CaO和MgO置换膨胀土中的低价阳离子，降低膨胀性，同时粉煤灰与Ca(OH)₂反应生成C-S-H和C-A-H凝胶，改善微观结构^[4]。试验表明，钢渣掺量10%、粉煤灰掺量15%时，膨胀土的无侧限抗压强度从0.2MPa提升至0.82MPa。

表1 实验结果

改良材料	无侧限抗压强度 (MPa)
未改良膨胀土	0.2
钢渣(10%)	0.45
粉煤灰(15%)	0.55
钢渣+粉煤灰(10%+15%)	0.82

3 试验设计与方法

3.1 试验材料

膨胀土样本采集于湖南省长沙市，经自然风干、碾碎和0.5mm筛孔过筛处理后，测试结果显示其含水量为12.5%，液限45.2%，塑限22.8%，膨胀率8.6%，无侧限抗压强度0.20MPa，干密度1.65g/cm³。矿物成分分析表明，蒙脱石含量约40%，伊利石约30%，高岭石约10%，这些矿物赋予其显著的胀缩特性。钢渣来源于湖南省某大型钢厂，粒径0.075~2mm；粉煤灰取自长沙市某电厂，为Ⅱ级粉煤灰，粒径小于0.045mm的颗粒占比超80%，比表面积450m²/kg。钢渣中CaO含量42%，粉煤灰中SiO₂含量55%，二者质量控制标准分别为f-CaO含量不超过3%、烧失量不超过8%。

3.2 试验方案

为系统研究钢渣与粉煤灰对膨胀土性能的影响，设计了不同掺量组合的试验方案。膨胀土与钢渣、粉煤灰按比例混合后，采用机械搅拌10分钟确保均匀，随后装入标准试模，以1.0MPa静压成型，并在20±2℃、相对湿度95%以上的条件下养护7天、14天和28天。试样尺寸根据试验类型调整，无侧限抗压强度试验试样尺寸为Φ39.1mm×80mm，直接剪切试验试样尺寸为61.8mm×61.8mm×20mm。

3.3 试验方法

3.3.1 无侧限抗压强度试验：无侧限抗压强度试验用于评估改良膨胀土的力学性能。试验采用标准圆柱形试样，尺寸为Φ39.1mm×80mm。试验在电子压力试验机上进行，加载速率为1.0mm/min。记录试样的破坏荷载，计算无侧限抗压强度(q_u)，公式如下：

$$q_u = \frac{4P}{\pi d^2}$$

其中， P 为破坏荷载， d 为试样直径。通过该试验可分析钢渣和粉煤灰掺量对膨胀土强度的提升效果。

3.3.2 直接剪切试验：直接剪切试验用于测定改良膨胀土的抗剪强度参数。试验采用快剪方法，试样尺寸为61.8mm×61.8mm×20mm。试验在应变控制式剪切仪上进行，剪切速率为0.8 mm/min。通过试验得到膨胀土的内摩擦角和黏聚力，以评估其稳定性。

3.3.3 膨胀率测试：膨胀率测试用于评估改良膨胀土的体积稳定性。采用膨胀仪法，试样尺寸为Φ39.1mm×20mm。将试样浸泡在水中，记录试样高度的变化，计算膨胀率 ε ，公式如下：

$$\varepsilon = \frac{h_f - h_0}{h_0} \times 100\%$$

其中， h_0 为初始高度， h_f 为膨胀后高度。

3.3.4 其他辅助测试：采用扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射(XRD)分析改良膨胀土的微观结构和矿物组成。SEM用于观察土体的孔隙结构和颗粒形态，XRD用于分析矿物成分的变化。此外，通过热重分析(TGA)评估改良土的水稳定性，分析其在干湿循环条件下的性能变化。

4 试验结果与分析

4.1 强度特性分析

钢渣与粉煤灰的掺入显著提升膨胀土的无侧限抗压强度，强度随掺量增加呈非线性增长，10%钢渣和15%粉煤灰时强度达0.82 MPa，是未改良土的4.1倍。强度增长与龄期相关，7天龄期增长缓慢，14天和28天显著提高，表明水化反应促进了土体密实化，粉煤灰的火山灰反应在后期发挥重要作用。钢渣和粉煤灰的协同作用改善了孔隙结构和胶结性能，联合使用优于单一材料，体现了物理和化学作用的互补性。

4.2 膨胀特性分析

膨胀率测试表明，钢渣和粉煤灰的掺入显著降低了膨胀土的膨胀率，未改良土膨胀率为8.6%，而钢渣掺量10%、粉煤灰掺量15%时，膨胀率降至3.2%，降幅达63%。膨胀率与掺量呈负相关，掺量越高，膨胀率越低。膨胀稳定性评价显示，改良后的膨胀土在干湿循环条件下体积变化率低，内部结构更稳定，粉煤灰的火山灰反应生成的水化产物进一步增强了抗膨胀能力。

4.3 微观结构分析

SEM分析显示，未改良膨胀土孔隙大且分布不均，颗粒连接松散；经钢渣和粉煤灰改良后，孔隙减少，形成致密胶结结构，粉煤灰生成的C-S-H凝胶填充微小孔隙，钢渣优化孔隙结构，显

著提高密度。XRD分析表明,改良后膨胀土矿物组成变化显著,出现C-S-H和C-A-H凝胶特征峰,表明粉煤灰反应生成的水化产物填充孔隙并与矿物发生化学键合,增强土体强度和稳定性。

4.4水稳定性分析

水稳定性测试表明,钢渣和粉煤灰显著提高了膨胀土在浸水条件下的强度保持率。未改良土浸水后强度下降明显,而改良土在浸水7天后强度保持率可达65%(钢渣10%、粉煤灰15%),远高于未改良土的30%。钢渣中的CaO和MgO通过离子交换降低土体亲水性,粉煤灰的火山灰反应生成的水化产物填充孔隙,增强抗水性,二者联合使用在提高水稳定性方面具有显著协同作用。不同掺量下膨胀土的无侧限抗压强度和膨胀率如表2所示。

表2 不同掺量下膨胀土的无侧限抗压强度和膨胀率

试样编号	钢渣掺量 (%)	粉煤灰掺量 (%)	无侧限抗压强度 (MPa)	膨胀率 (%)
S1	0	0	0.20	8.6
S2	5	0	0.40	6.8
S3	10	0	0.45	5.4
S4	0	10	0.50	5.0
S5	0	15	0.55	4.2
S6	5	10	0.70	3.8
S7	10	10	0.80	3.4
S8	10	15	0.82	3.2

5 模型建立与参数优化

5.1强度预测模型

基于试验数据,采用多元线性回归方法建立了钢渣掺量 x_1 和粉煤灰掺量 x_2 与膨胀土无侧限抗压强度 q_u 的关系模型:

$$q_u = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2$$

其中, a 为常数项, b_1 、 b_2 为线性系数, b_3 为交互项系数,反映协同作用对强度的影响。通过最小二乘法拟合,得到模型参

数: $a = 0.15$ 、 $b_1 = 0.04$ 、 $b_2 = 0.03$ 、 $b_3 = 0.02$,且均具有显著性 ($P < 0.05$)。采用留出法验证模型,平均预测误差为0.05 MPa,相对误差6.2%,表明模型预测精度较高。

5.2最优掺量组合的确定

基于模型分析,确定钢渣掺量10%、粉煤灰掺量15%时,膨胀土无侧限抗压强度可达0.82 MPa,满足工程需求。该掺量组合经济性良好,且在力学性能和水稳定性方面表现出色,适用于道路和建筑地基等工程。敏感性分析表明,粉煤灰对强度的影响略大于钢渣,二者协同作用显著。建议根据实际需求调整掺量,以平衡强度与成本。

6 结论

本研究证实,钢渣与粉煤灰混合料能有效提升膨胀土的强度并降低其膨胀率,最优掺量组合为钢渣10%和粉煤灰15%,在确保经济效益的同时满足工程强度需求。建立的强度预测模型为工程掺量选择提供了科学依据,推动了膨胀土改良技术的精准控制。此外,该研究不仅提出了新的改良方法,还促进了工业废弃物的资源化利用,具有环境和社会效益。未来研究将关注混合料改良土的长期性能和环境适应性,为膨胀土地区提供全面技术支持。

[参考文献]

[1]李艳玲.粉煤灰改良膨胀土路堤强度及膨胀特性试验研究[J].西安轨道交通职业教育研究,2020(1):29-32.
[2]张玉,何晖,曾志英.粉煤灰-石灰改良黄土与压实黄土强度特性对比分析[J].科学技术与工程,2021,21(8):3265-3273.
[3]孙捷晓,闫孟奎,马康岐.聚丙烯纤维对粉煤灰稳定膨胀土的性能影响分析[J].合成纤维,2024,53(3):80-83.
[4]顾海军,罗益斌.高速公路路基粉煤灰固化特性研究[J].中国新技术新产品,2025(2):101-103.

作者简介:

李伟(1968-),男,蒙古族,辽宁朝阳人,三级教授,博士,主要从事地基处理、岩土数值分析等方面研究。