

高钙粉煤灰加固软土地基性能研究

Study on the Performance of High Calcium Fly Ash Reinforcement for Promoting Sedimentation of Soft Soil Foundation

吴 强^{1,2}

(1. 河南工业大学, 郑州 450001; 2. 河南工大设计研究院有限公司, 郑州 450001)

摘 要: 为优化软土地基性能, 探究不同高钙粉煤灰掺量对软土地基性能的影响。以高钙粉煤灰、水泥、软土等为原材料, 依据设定配比制备不同高钙粉煤灰掺量的试件。通过扫描显微镜观察试件表观结构, 利用压力试验机等开展强度、变形及渗透性试验, 探究高钙粉煤灰掺量对试件性能的影响。结果表明: 在既定地质条件试验下, 当高钙粉煤灰掺量为 40 % 时, 土体结构最为紧密, 此时抗压强度达峰值 42.33 MPa, 抗剪强度最优为 105.45 MPa, 压缩模量最大, 压缩变形量与压缩系数最低, 40 cm 水头差下渗透系数最低至 0.25×10^{-6} cm/s。因此, 在实际软土地基加固工程中, 可将高钙粉煤灰掺量设定为 40% 作为参考, 以达到较好的加固效果。

关键词: 软土地基; 高钙粉煤灰; 地基加固; 抗压强度; 抗剪强度; 渗透性

中图分类号: TU472.36

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0080-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.015

WU Qiang^{1,2}

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Institute of Industrial Design, Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To optimize the performance of soft soil foundation, explore the influence of different high calcium fly ash content on the performance of soft soil foundation. Using high calcium fly ash, cement, soft soil and other raw materials, prepare samples with different amounts of high calcium fly ash according to the set ratio. By observing the apparent structure of the sample through a scanning microscope and conducting strength, deformation, and permeability tests using a pressure testing machine, the influence of high calcium fly ash content on the performance of the sample is explored. The results show that under established geological conditions, when the content of high calcium fly ash is 40 %, the soil structure is most compact, with a peak compressive strength of 42.33 MPa and an optimal shear strength of 105.45 MPa. The compressive modulus is the highest, the compression deformation and compression coefficient are the lowest, and the permeability coefficient is the lowest at a water head difference of 40 cm, reaching 0.25×10^{-6} cm/s. Therefore, in actual soft soil foundation reinforcement projects, the high calcium fly ash content can be set at 40% as a reference to achieve better reinforcement effects.

Key words: soft soil foundation; high calcium fly ash; foundation reinforcement; compressive strength; shear strength; permeability

0 引言

软土含水量高、孔隙比大等特性, 使地基在上部荷载下易产生过大不均匀沉降, 影响建筑物稳定、安全及正常使用, 甚至引发事故, 威胁生命财产安全^[1-2]。有效加固软土地基、提升其承载与稳定性是

作者简介: 吴 强 (1970—) 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 结构工程。

收稿日期: 2025-03-26

土木工程关键问题。现有加固技术多样且有一定效果，但均有局限，如换填法施工难、成本高，排水固结法周期长，强夯法影响环境且处理饱和软土效果差，水泥搅拌桩法成本高、搅拌可能不均。因此，探索经济、高效、环保、适应性强的新加固技术意义重大。

为确保软土地基稳定，众多学者展开研究。古文博等^[3]介绍电化学注浆联合 CO₂ 碳化加固技术，该方法大幅提升土体强度；赵兴涛^[4]研究沿海滩涂软土固化剂，复合型 GS-2 加固效果最佳；邱近哲等^[5]发现智能化双向搅拌粉喷桩在连宿高速应用中强度高、质量佳；詹斌等^[6]采用有限元模拟发现某湖区公路软土地基加固后沉降不均等；卢兰萍等^[7]采用有限元模拟发现水泥粉煤灰碎石桩复合地基加固软基有效及模拟可靠；陈颖辉等^[8]用木质素纤维与粉煤灰复合改良膨胀土，发现能显著提升土体强度和水稳性，其中 20% 粉煤灰加 1.0% 木质素纤维的改良效果最优；黄煌煌等^[9]对高钙粉煤灰作 CO₂ 矿化改性，发现改性后其固碳量上升、游离氧化钙减少，还能改善水泥砂浆力学性能与孔隙结构；张扬等^[10]研究发现高掺量高钙粉煤灰构件力学性能良好；王志伟^[11]研究了纳米 SiO₂ 对粉煤灰陶粒混凝土力学与耐久性能的影响，发现适量掺入纳米 SiO₂ 可显著提升其抗压、抗拉及抗折强度；陈永亮等^[12]以水玻璃碱激发高钙粉煤灰并发泡制得多孔地质聚合物，该材料表观密度低、抗压强度高，N（C）-A-S-H 凝胶对其强度贡献显著；王协群等^[13]研究发现复合改性固化淤泥可以提升路用性能；刘庆等^[14]发现生物炭掺量可优化微生物加固软土压缩特性；邱斌等^[15]优化水泥土桩布桩形式减少沉降变形，并降低工程成本。

现有研究对软土地基稳定已进行多方探索，但在软土地基中，不同加固方法和技术在不同地质条件、工程需求下的长期稳定性、适用性以及综合经济效益等方面，仍需进一步深入研究与验证。为此，基于高钙粉煤灰性能与软土特性设定试件配比方案制备地基加固试件，并测试试件强度、变形、渗透性，以此选择最优的高钙粉煤灰掺量，实现软土地基性能优化。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

高钙粉煤灰、水泥及软土性能参数见表 1、表 2；外加剂选用硅酸钠，密度为 1.5 g/cm³，模数为 2.8；生石灰有效钙含量≥85%，细度为 0.074 mm；矿渣微粉为 S95 级，密度为 2.85 g/cm³，比表面积为 420 m²/kg，28 d 活性指数达 102%，拌合水为自来水。

表 1 高钙粉煤灰和水泥的性能参数

Table 1 Performance parameters of high-calcium fly ash and cement					
材料	密度 /(kg/m ³)	细度 /μm	需水量 比/%	含水量 /%	7 d 活性 指数/%
高钙粉煤灰	1 000	45.0	96.0	0.25	77.6
水泥	1 300	30.2	45.2	0.25	65.4

表 2 软土的性能参数

Table 2 Performance parameters of promoting soft soil						
含水量 /%	密度 /(g/cm ³)	塑性指 数/%	孔隙比	压缩 系数	抗剪强 度/MPa	渗透 系数
32	1.6	18.2	1.2	1.4	300	0.56

1.2 试件制备

根据软土的性质，确定试件的高钙粉煤灰掺量。配比方案见表 3。按照配比得到粉煤灰混合材料，将粉煤灰混合材料与软土按 1:1 比例称量后倒入搅拌机，充分搅拌至混合均匀，期间边搅拌边加入质量为粉煤灰混合材料 10% 的水，持续搅拌 5 min，使材料呈均匀浆状。接着将浆料倒入 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 模具，等待 20 min 后脱模，放入密封养护箱养护，设定温度（20 ± 2）℃、湿度 85%~95%，通过喷水保持湿润，养护 28 d 进行试验。

表 3 试件配比方案

Table 3 Sample matching scheme						
试件 编号	各成分用量占比/%					
	粉煤灰	水泥	水	外加剂	固化剂	激发剂
G01		98	0.50	0.50	0.50	0.50
G02	10	88	0.50	0.50	0.50	0.50
G03	20	78	0.50	0.50	0.50	0.50
G04	30	68	0.50	0.50	0.50	0.50
G05	40	58	0.50	0.50	0.50	0.50
G06	50	48	0.50	0.50	0.50	0.50

1.3 试验方法

（1）表征分析试验方法 利用扫描显微镜，在不同高钙粉煤灰掺量条件下，对制备好的不同试件进行扫描，获取各试件的表现结构图像。

岩土力学

(2) 强度试验方法 采用压力试验机等设备, 在标准试验条件下对各试件进行抗压强度和抗剪强度测试。

(3) 变形分析试验方法 在相同的加载设备和加载速率条件下, 对各试件施加压力进行压缩试验, 记录试件的初始高度和最终高度, 根据记录数据计算各试件的压缩变形量、压缩系数和压缩模量, 分析高钙粉煤灰掺量对试件变形性能的影响。

(4) 渗透性分析试验方法 将试件置于渗透试验装置中, 在不同水头差的条件下, 测量通过试件的水量, 根据达西定律计算不同水头差下各试件的渗透系数, 分析水头差和高钙粉煤灰掺量对试件渗透性能的影响。

2 结果与分析

2.1 表征分析

利用扫描显微镜对试件进行扫描, 得到不同试件的表观结构, 如图 1 所示。

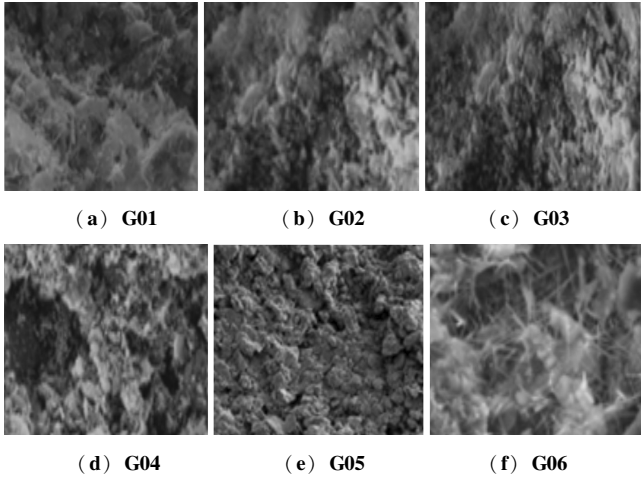


图 1 不同高钙粉煤灰掺量下的试件表观特征分析
Fig. 1 Apparent characteristics of samples under different high calcium fly ash dosage

随着高钙粉煤灰掺量的逐步增加, 粉煤灰中大量细小且均匀的颗粒逐渐渗入土体内部, 对土体中原本存在的大孔隙进行填充。从各试件的对比情况来看, G01 试件因未掺入高钙粉煤灰, 土体孔隙较大且分布较为松散, 颗粒间接触不够紧密; 而随着粉煤灰掺量从 10% 逐渐增至 40%, 试件孔隙率呈现出逐渐降低的趋势, 颗粒间的接触也愈发紧密, 试件整体结构逐渐变得密实, 且 G04 相较于 G02、G03,

孔隙进一步减少, 结构密实程度更高, 表明随着粉煤灰掺量增加, 对土体结构的改善效果愈发明显。此外, 在高钙粉煤灰掺量达到 40% 时, G05 试件粉煤灰颗粒充分填充孔隙, 且在胶结作用的显著影响下, 其内部颗粒连接紧密程度远超其他试件, 结构更为稳定, 相较于孔隙相对较大、结构相对松散的 G01 ~ G04 试件, 展现出更为优良的性能。而掺入 50% 高钙粉煤灰的 G06 试件, 相较于 G05, 其结构密实程度有所下降, 孔隙率有所增加, 说明过量的粉煤灰掺入可能破坏了原有的良好结构, 导致性能出现一定程度的劣化。

2.2 强度

不同掺量的高钙粉煤灰对加固软土地基性能的影响如图 2 所示。高钙粉煤灰的掺入与混合体系中的水分和矿物质发生化学反应, 生成相对稳定的化合物, 进而增强试件的结构黏性。从 G01 到 G05, 试件的抗压强度持续上升, 其中 G01 抗压强度最低, 随着粉煤灰掺量增加, 试件抗压强度逐步提升, G05 达到最大值, 为 42.33 MPa; G06 试件反而低于 G05, 这说明掺入过量的高钙粉煤灰无法进一步优化试件的性能。这是因为过量的粉煤灰无法继续与混合体系中的物质充分反应, 反而使粉煤灰之间存在孔隙, 导致抗压强度下降。G05 试件的抗剪强度高于其他试件, 为 105.45 MPa, 这是因为高钙粉煤灰适量地掺入能够改变试件的颗粒级, 使得试件内部结构的颗粒之间更为紧密, 增强其抗剪强度; 从 G04 到 G06, 随着粉煤灰掺量的增大, 抗剪强度呈现出 G04 优于 G06 的情况, 凸显了适量参加的重要性。

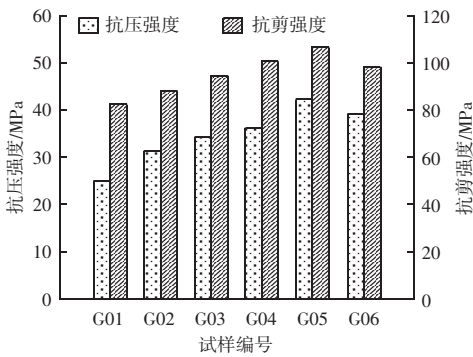


图 2 不同掺量高钙粉煤灰试件的抗压强度和抗剪强度
Fig. 2 Compressive strength and shear strength of different samples of high calcium fly ash

2.3 变形分析

变形性能测试结果见表4。随着高钙粉煤灰掺量的逐渐增加，其压缩变形量和压缩系数均在逐渐减小，且不同试件间呈现出明显的差异。G01试件压缩变形量最大为5.1 mm，压缩系数为0.50，在各试件中处于较高水平，说明未掺或少量掺加高钙粉煤灰时，试件抗压缩性能较差。随着粉煤灰掺量从G02的10%逐步增加，相较于G01，G02~G05试件的压缩变形量和压缩系数均有明显降低，最小值为G05试件，压缩变形量为0.9 mm，压缩系数为0.28。这是因为粉煤灰掺量的增加，改变了试件的结构密度，使其密实度增强，从而提高了抗压缩性能。同时，G05试件的压缩模量数值最大，为32.5 MPa，相较于G01~G04，G05的压缩模量优势显著；G06试件虽然粉煤灰掺量更高，但压缩变形量为1.7 mm，压缩系数为0.31，压缩模量为29.6 MPa，相较于G05，其抗压缩性能有所下降，说明过量掺加高钙粉煤灰可能对试件结构产生不利影响，导致抗压缩性能无法持续提升。

表4 不同掺量高钙粉煤灰试件的变形性能分析
Table 4 Deformation performance analysis of different high calcium fly ash samples

试件编号	初始高度/mm	最终高度/mm	压缩变形量/mm	压缩系数	压缩模量/MPa
G01	70.7	65.6	5.1	0.50	20.2
G02	70.7	66.2	4.5	0.40	24.5
G03	70.7	67.3	3.4	0.33	26.7
G04	70.7	68.5	2.2	0.32	28.3
G05	70.7	69.8	0.9	0.28	32.5
G06	70.7	69.0	1.7	0.31	29.6

2.4 渗透性分析

计算不同水头差下试件的渗透系数，分析水头差对试件渗透系数的影响，进而分析试件的渗透性能。如图3所示。水头差的变化对试件渗透系数影响不大，仅略微减小其渗透系数，从各试件在不同水头差下的渗透系数变化曲线可以看出，各曲线走势相对平缓，说明水头差这一因素对渗透系数的影响幅度较小且，较为稳定。而高钙粉煤灰掺量的不断增长，使渗透系数发生较大变化。对比各试件，G01试件由于未掺入高钙粉煤灰，其渗透系数相对较大，在不同水头差下均高于其他掺加了粉煤灰的试件，说明未掺粉煤灰时试件抗渗性较差。随着粉

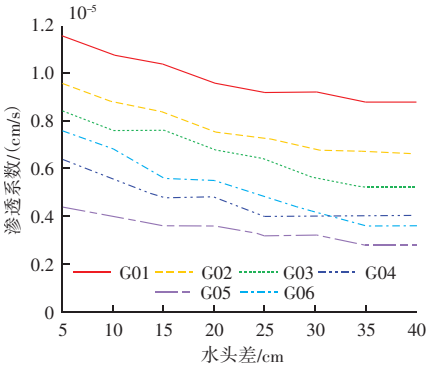


图3 不同掺量高钙粉煤灰试件的渗透性能分析
Fig. 3 Permeic performance analysis of different samples with high calcium fly ash

煤灰掺量增加，G02~G05试件渗透系数逐渐减小，其中G05试件在40 cm的水头差下渗透系数最小，为 0.25×10^{-6} cm/s，相较于G01~G04试件，其抗渗性显著提升，这是因为适量粉煤灰的增加，能够减少试件内部的孔隙，增强结构密实度，从而提高抗渗性。然而，G06试件相较于G05，渗透系数有所增大，这是因为过度的高钙粉煤灰加入会增加试件的孔隙比，破坏了结构的密实性，进而降低其抗渗性。

3 结束语

通过试验深入探究了高钙粉煤灰掺量对软土地基性能的影响。在既定地质条件与试验参数下，高钙粉煤灰的掺入对改善软土结构与性能作用显著。当高钙粉煤灰掺量为40%时，试件展现出最优综合性能，土体内部结构最为密实，抗压强度峰值42.33 MPa，抗剪强度大幅提升至105.45 MPa；变形性能上压缩变形量降至最低值0.9 mm，压缩模量增至最大值32.5 MPa；渗透性能方面，在40 cm水头差下渗透系数最小，抗渗性能明显优于其他试件。但当掺量超过40%，试件的力学性能和抗渗性呈现劣化趋势。因此，在实际软土地基加固工程中，建议将高钙粉煤灰掺量控制在40%左右，可达到最佳加固效果与工程稳定性。

参 考 文 献

[1] 张盼, 朱桂花, 吕硕, 等. Al-Si合金/高钙粉煤灰基高温相变蓄热球的制备及应用性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(9): 30-40. (下转第122页)

道桥技术

(3) 采用 NaOH 溶液可激发固化粉煤灰、高炉矿渣粉、铸造废砂混合料, 28 d 龄期混合料的抗压强度约为最终强度的 85%, 用于路面基层时养护时间不宜小于 28 d。

(4) 高炉矿渣粉、粉煤灰经过 NaOH 激发后生成了大量凝胶, 减小混合料颗粒间的孔隙, 提高结构微观致密程度; 土工聚合反应可生成沸石晶体, 进一步提高混合料强度。

参 考 文 献

- [1] 刘金城. 铸造砂回收利用的新方向 [J]. 铸造, 2024, 73 (11): 1625–1626.
- [2] 徐梦晏. 铸造废砂再生及其环境影响评价分析 [J]. 能源与节能, 2022 (2): 203–204.
- [3] 芋艳梅, 李江华. 改性铸造废砂对混凝土力学及耐磨性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (9): 110–113.
- [4] 卢泽洲. 基于铸造废砂的超高性能混凝土制备与性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [5] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58–66.
- [6] 唐力军, 刘卫东, 陈凯伦. 超细活性粉煤灰对碱激发矿渣体系

的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 92–97.

- [7] 徐先杰, 朱志敬, 王孟, 等. 固体 NaOH/Na₂SiO₃ 激发矿粉/粉煤灰-炉渣基注浆材料性能研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 628–637.
- [8] 孙开强, 刘琳, 郑蕻陈. 碱激发矿渣-粉煤灰胶凝材料力学性能影响因素分析 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (9): 3313–3319.
- [9] 孙晓刚, 赵英良, 邢军, 等. 碱激发高炉矿渣-粉煤灰制备充填胶凝材料 [J]. 金属矿山, 2016 (11): 189–192.
- [10] 李松波. 粉煤灰矿渣基地聚物对软土加固效果的影响研究 [J]. 化学工程师, 2023, 37 (11): 98–102.
- [11] 李龙梓, 李酉成, 田寅. 可再分散乳胶粉改性碱激发粉煤灰矿渣材料的性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (4): 36–41.
- [12] 王敏, 吴勇生, 李如燕, 等. 碱激发剂对铸造粉尘-粉煤灰基地质聚合物抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32 (6): 1037–1042.
- [13] 冀欣, 王振军, 赵昕, 等. 碱激发固废道路补强材料的制备与性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (3): 99–111.
- [14] 荀小伟, 肖亚雄, 张佰发, 等. 碱激发地聚物的反应机理、性能与应用的研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2023 (6): 83–90.
- [15] 赵银飞, 邓凯, 邹争光, 等. 室温碱激发粉煤灰基胶凝材料制备及其性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (7): 60–64.

(上接第 83 页)

- [2] 文安飞, 张政, 霍志强, 等. 级配再生细骨料及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 17–21.
- [3] 古文博, 童立元, 闫鑫, 等. 电化学注浆-碳化联合加固软土地基试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (7): 1464–1473.
- [4] 赵兴涛. 适用于软土地基快速固化的土壤固化剂研究 [J]. 化学工程师, 2023, 37 (10): 94–9788.
- [5] 邱近哲, 杜广印, 王传乐, 等. 智能化双向搅拌粉喷桩加固海相软土地基的力学性能及承载力评价方法研究 [J]. 工程地质学报, 2025, 33 (1): 377–386.
- [6] 詹斌, 沈立, 单生辉, 等. 不均匀软土地基加固后沉降特性及参数分析 [J]. 工程与建设, 2024, 38 (5): 1068–1072.
- [7] 卢兰萍, 张泽浩, 张宇超. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基对于软基的加固效果研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (20): 8877–8883.
- [8] 陈颖辉, 蔡伟, 欧明喜. 木质素纤维-高钙粉煤灰复合改良膨胀土试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (3): 978–985.
- [9] 黄煌煌, 陈铁锋, 高小建. CO₂ 矿化改性高钙粉煤灰对水泥砂浆

力学性能和微结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (5): 1889–1896.

- [10] 张扬, 李四平. 高掺量高钙粉煤灰单轴对称矩形钢管混凝土受弯构件力学性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (10): 28–33.
- [11] 王志伟. 纳米 SiO₂ 对粉煤灰陶粒混凝土的力学与耐久性能的影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 32–35, 116.
- [12] 陈永亮, 张轶轲, 陈铁军, 等. 碱激发高钙粉煤灰发泡地聚合物的制备及机理 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2787–2798.
- [13] 王协群, 桂忆宁, 刘宁, 等. 镁质水泥基多相胶凝材料改性固化淤泥路用性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (1): 85–93.
- [14] 刘庆, 林军, 谢佳旻, 等. MICP 复合材料固化软土-维固结试验及机理研究 [J]. 高校地质学报, 2023, 29 (3): 487–496.
- [15] 邱斌, 许晨成, 张文昌, 等. 基于拓扑优化的水泥土桩加固高速公路软土地基变形特性分析 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (6): 968–976.