

高炉矿渣和粉煤灰固化贵州山区软土力学性能试验研究

Experimental Study on Mechanical Properties of Soft Soil Solidified by Blast Furnace Slag and Fly Ash in Guizhou Mountainous Area

张圣山¹, 宋国春², 李 兴²

(1. 贵州航空港投资发展有限公司, 贵阳 550001; 2. 民航机场建设工程有限公司, 贵阳 550001)

摘 要: 贵州山区软土分布广泛, 易发生滑坡等地质灾害, 掺加高炉矿渣和粉煤灰可以有效加固软土。基于此, 制备了不同高炉矿渣和粉煤灰掺量的固化软土, 开展了无侧限抗压强度、弹性模量、内聚力、内摩擦角、水稳定性等力学性能测试, 分析了不同高炉矿渣和粉煤灰掺量以及高炉矿渣和粉煤灰掺比对固化软土的影响规律。结果表明: 固化软土抗压强度、弹性模量、内聚力随着粉煤灰与高炉矿渣总掺量的提高而增大, 建议总掺量为 18%~24%; 粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 对软土抗压强度、弹性模量以及抗剪强度的提升效果最佳; 固化软土的水稳定性随总掺量的增大而增大, 建议总掺量为 24%。研究结果可为贵州山区软土地基加固与地质灾害防治提供有效的材料配比依据, 同时也为工业固废在岩土工程中的资源化利用提供了借鉴。

关键词: 高炉矿渣; 粉煤灰; 加固软土; 力学性能

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0072-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.013

ZHANG Shengshan¹, SONG Guochun², LI Xing²

(1. Guizhou Airport Investment and Development Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

2. Civil Aviation Airport Construction Engineering Co., Ltd., Guiyang 550001, China)

Abstract: The soft soil is widely distributed in the mountainous area of Guizhou province, China, and geological disasters such as landslides have occurred. The mixture of blast furnace slag and fly ash can effectively strengthen soft soil. Based on this, solidified soft soil test materials with different contents of blast furnace slag and fly ash were prepared, and mechanical properties such as unconfined compressive strength, elastic modulus, cohesion, internal friction angle and water stability were tested. The influences of different blast - furnace slag and fly ash contents and ratio of blast - furnace slag and fly ash contents on solidified soft soil were analyzed. The results show that: the compressive strength, elastic modulus and cohesion of the solidified soft soil increase with the increase of the total content of fly ash and blast furnace slag, and the recommended total content is 18%~24%. When the ratio of fly ash to blast furnace slag is 3:7, the compressive strength, elastic modulus and shear strength of soft soil are the best. The water stability of the solidified soft soil increases with the increase of the total content, and the recommended total content is 24%. The research results can provide an effective material ratio basis for soft soil foundation reinforcement and geological disaster prevention in Guizhou mountainous area, and also provide a useful reference

for the resource utilization of industrial solid waste in geotechnical engineering.

Key words: blast furnace slag; fly ash; reinforcing soft soil; mechanical property

0 引言

贵州地区地质条件复杂多变，特别是岩溶山区在强降雨和人类活动的共同作用下易发生山体滑坡灾害^[1]。现有研究表明，对山区软土进行加固可以有效降低泥石流灾害的发生^[2]。加固软土的常用材料有水泥、矿渣、粉煤灰等，其中矿渣和粉煤灰属于工业固体废弃物，在加固软土的同时可以有效保护环境，减小固体废弃物堆积引起的耕地资源浪费。

在矿渣和粉煤灰加固软土方面已取得了一些研究成果。李宝建等^[3]针对传统水泥固化软土早期强度不足、水泥生产高污染和高能耗等问题，采用矿渣基聚合物联合水泥加固海相软土，探讨了矿渣和硅酸钠对高含水率软土强度及变形的影响规律，揭示了新型固化配方改善水泥土强度的影响机制。陈忠清等^[4-6]将粉煤灰加入软土中制备了地聚物加固土材料，并进行其力学强度和抗冻特性测试。杨望星等^[7]利用粉煤灰、水玻璃等材料制备了粉煤灰加固软土，分析了粉煤灰掺量对加固软土无侧限抗压强度以及矿物成分的影响规律，给出了最佳粉煤灰掺量。赵庆新等^[8]利用水泥和矿渣加固滨海盐渍土，通过加固土烧失量、固结物含量、X射线衍射等试验研究，找出了最佳矿渣掺量。徐超等^[9-10]利用室内试验方法证明了掺加矿渣和水泥可以有效加固软土，并通过矿物成分分析探讨了其内在机制。柏延平等^[11]研究以粉煤灰为主要前驱体，偏高岭土为铝质校正料，硅酸钠与氢氧化钠复合配制碱激发剂，通过正交试验考察碱激发剂模数、固体掺量及粉煤灰掺量对地聚物抗压强度的影响。吴云根^[12]通过对地聚物粉煤灰及矿渣粉、碱激发剂、水泥、集料等原材料制备地聚物稳定碎石混合料，通过无侧限抗压强度、劈裂强度、干缩性能试验，研究其性能。骆展鹏等^[13-14]制备了矿渣和粉煤灰复合盾构土，利用扫描电子显微镜（SEM）和X射线衍射（XRD）分析固化淤泥土的微观形貌及水化产物，揭示其固化机制。

然而，现有研究多聚焦于矿渣或粉煤灰作为单一

材料或固定配比的加固效果，对两者在复合掺量下的协同作用及系统优化研究仍显不足。基于此，制备了不同高炉矿渣和粉煤灰掺量的加固软土，开展了其力学性能和水稳定性测试，获得矿渣和粉煤灰总掺量的最佳值以及矿渣和粉煤灰参加的最佳比例。研究成果可为贵州山区软土加固提供强有力的理论基础。

1 试验材料

试验材料主要由高炉矿渣、粉煤灰和软土组成，高炉矿渣和粉煤灰的主要化学成分见表1。软土取自贵阳某山区深基坑5~7m处^[15]。高炉矿渣和粉煤灰固化软土中，粉煤灰和高炉矿渣总掺量分别为8%、16%、24%和32%，其中高炉矿渣和粉煤灰的质量比分别为7:3、5:5和3:7，共制备15组。

表1 高炉矿渣和粉煤灰的主要化学成分
Table 1 The main chemical composition of blast furnace slag and fly ash

材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
高炉矿渣	35.8	35.8	16.2	11.2	1.2
粉煤灰	56.8	1.5	23.7	1.5	4.4

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

不同粉煤灰（*f*）与高炉矿渣（*s*）掺比条件下，固化软土的无侧限抗压强度如图1所示。由于粉煤灰加入软土中能够起到良好的填充作用，降低软土的孔隙率并提高密实度；而高炉矿渣加入软土中则能够起到吸水、膨胀、离子交换以及团粒化作用，大大提高土体颗粒间的黏结强度。因此随着粉煤灰与高炉矿渣总掺量的增大，软土的无侧限抗压强度值呈近线性式增大，以*s*:*f*=7:3条件为例，固化软土的无侧限抗压强度值在两者总掺量为8%、12%、24%和32%时分别为0.18、0.27、0.39和0.47 MPa。当粉煤灰和高炉矿渣两者总掺量保持不变的情况下，随着高炉矿渣占比的提高，它们对软土的加固效果也逐渐提高，如两者总掺量为32%时，固化软土的无侧限抗压强度值在*s*:*f*=3:7、*s*:*f*=5:5、*s*:*f*=7:3条件下分别为0.41、0.44和0.47 MPa。但需要说明的是，当高炉矿渣占两者比值达到一定程度后（超

岩土力学

过 80%)，固化软土的无侧限抗压强度将有可能随高炉矿渣占比增大而出现提升不明显甚至下降的现象。原因在于，粉煤灰的活性效应对于高炉矿渣在软土中的水化反应具有一定的促进作用，当粉煤灰占比非常小时，这种促进作用就无法充分发挥。

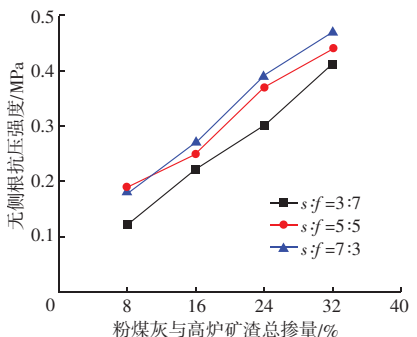


图1 粉煤灰与高炉矿渣固化软土的无侧限抗压强度
Fig.1 Unconfined compressive strength of soft soil solidified by fly ash and blast

2.2 弹性模量

不同粉煤灰 (f) 与高炉矿渣 (s) 掺比条件下，固化软土的弹性模量分布如图2所示。由于粉煤灰与高炉矿渣加入软土中不仅会起到填充作用，而且会与软土中的自由水和矿物成分发生物理和化学反应，导致固化软土变形特性发生重大变化。当 $s:f=3:7$ 时，固化软土在粉煤灰和高炉矿渣总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的弹性模量分别为 10.2、22.5、35.2 和 42.8 MPa。当 $s:f=5:5$ 时，固化软土在粉煤灰和高炉矿渣总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的弹性模量分别为 9.5、20.6、36.1 和 46.9 MPa。当 $s:f=7:3$ 时，固化软土在粉煤灰和高炉矿渣总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的弹性模量分别为 9.8、22.7、37.4 和 49.6 MPa。由此可知，粉煤灰和高炉矿渣总掺量越大，固化软土的

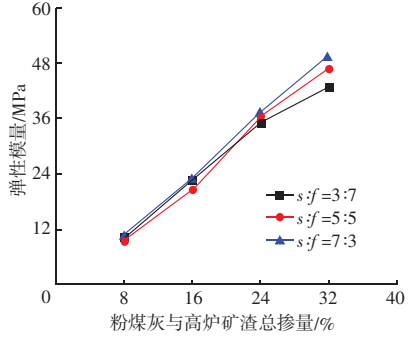


图2 粉煤灰与高炉矿渣固化软土的弹性模量
Fig.2 Elasticity Modulus of soft soil solidified by fly ash and blast

弹性模量也越大并且呈线性增长，但从工程上的经济造价角度考虑，建议粉煤灰和高炉矿渣总掺量不要超过 24%；当粉煤灰和高炉矿渣总掺量保持不变，粉煤灰与高炉矿渣比值为 3:7 时，固化软土弹性模量最大，其在荷载作用下的变形和沉降最小。

2.3 内聚力

不同粉煤灰 (f) 与高炉矿渣 (s) 掺比条件下，固化软土的内聚力变化如图3所示。由于粉煤灰与高炉矿渣的加入会导致软土颗粒间的黏结强度增强，进而其内聚力变大。由图3可见，未掺加粉煤灰与高炉矿渣时，软土的内聚力值为 15.8 kPa。而掺加粉煤灰与高炉矿渣且两者掺比为 7:3 时，固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内聚力分别为 35.6、53.7、77.3 和 90.2 kPa。当粉煤灰与高炉矿渣掺比为 5:5 时，固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内聚力分别为 35.8、55.7、83.5 和 99.4 kPa。当粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 时，固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内聚力分别为 44.9、63.1、87.2 和 108.2 kPa。这说明，随着粉煤灰与高炉矿渣总掺量的提高，固化软土内聚力呈近线性增长；而在粉煤灰与高炉矿渣总掺量保持不变的情况下，粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 对软土内聚力的提升效果最好。从工程安全与经济造价方面综合考虑，建议粉煤灰和高炉矿渣总掺量取 18%~24%。

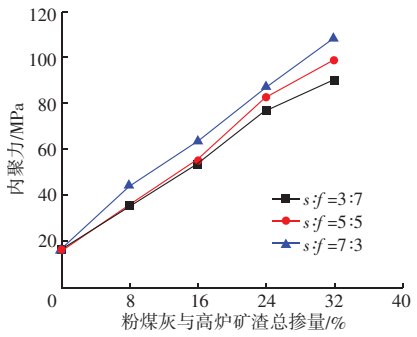


图3 粉煤灰与高炉矿渣固化软土的内聚力
Fig.3 Cohesion of soft soil solidified by fly ash and blast

2.4 内摩擦角

不同粉煤灰 (f) 与高炉矿渣 (s) 掺比条件下，固化软土的内摩擦角变化如图4所示。由于粉煤灰与高炉矿渣的加入会增大软土颗粒间的摩擦作用，导致其内摩擦角变大。未掺加粉煤灰与高炉矿渣时，

软土的内摩擦角为 13.2° 。而掺加粉煤灰与高炉矿渣且两者掺比为 7:3 时, 固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内摩擦角分别为 22.3° 、 27.5° 、 32.7° 和 35.1° 。当粉煤灰与高炉矿渣掺比为 5:5 时, 固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内摩擦角分别为 23.4° 、 29.0° 、 33.8° 和 36.5° 。当粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 时, 固化软土在两者总掺量为 8%、12%、24% 和 32% 条件下的内摩擦角分别为 24.9° 、 30.7° 、 35.2° 和 37.8° 。由此可知, 随着粉煤灰与高炉矿渣总掺量的提高, 固化软土内摩擦角呈指数衰减式增长, 当粉煤灰与高炉矿渣总掺量超过 24% 后, 固化软土的内摩擦角增长变化就不是很明显; 在粉煤灰与高炉矿渣总掺量保持不变的情况下, 粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 对软土内摩擦角的提升效果最好。

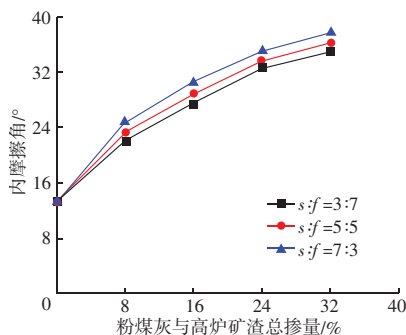


图4 粉煤灰与高炉矿渣固化软土的内摩擦角

Fig. 4 Internal friction angle of soft soil solidified by fly ash and blast

2.5 水稳定性

粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 时, 浸水 3 d 后固化软土无侧限抗压强度随粉煤灰与高炉矿渣总掺量的变化如图 5 所示。浸水 3 d 后固化软土无侧限抗压强度在粉煤灰与高炉矿渣总掺量为 8%、12%、24%

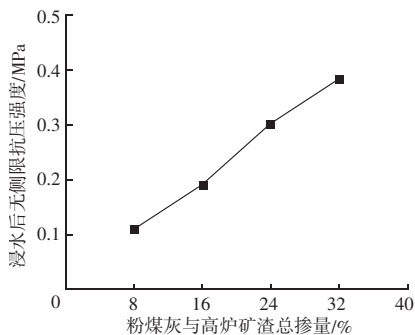


图5 浸水 3 d 后粉煤灰与高炉矿渣固化软土的无侧限抗压强度

Fig. 5 Unconfined compressive strength of soft soil solidified by fly ash and blast furnace slag after 3 d immersion in water

和 32% 条件下分别为 0.11、0.19、0.29 和 0.38 MPa, 是未浸水前 (图 1) 的 61.1%、70.3%、76.9% 和 80.9%。这说明, 粉煤灰与高炉矿渣总掺量越大, 固化软土的水稳定性就越强, 当粉煤灰与高炉矿渣总掺量超过 24% 后, 固化软土的水稳定系数将达到 75% 以上。

3 结论

为提升贵州山区软土的加固效果, 对不同高炉矿渣与粉煤灰掺量下固化软土的无侧限抗压强度、弹性模量、抗剪强度参数及水稳定性进行试验, 得到以下结论:

(1) 随着粉煤灰与高炉矿渣总掺量的提高, 固化软土抗压强度、弹性模量、内聚力呈近线性增大, 而内摩擦角则呈指数衰减式增长; 从工程安全与经济造价方面综合考虑, 建议粉煤灰和高炉矿渣总掺量取 18%~24%。

(2) 在粉煤灰与高炉矿渣总掺量保持不变的情况下, 粉煤灰与高炉矿渣掺比为 3:7 对软土抗压强度、弹性模量以及抗剪强度的提升效果最好。

(3) 粉煤灰与高炉矿渣总掺量越大, 固化软土的水稳定性就越强, 当粉煤灰与高炉矿渣总掺量超过 24% 后, 固化软土的水稳定系数将达到 75% 以上。

参 考 文 献

- [1] 张磊, 周银朋, 庄宇, 等. 贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与隐患点致灾范围预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34 (3): 1-7.
- [2] 高英力, 孟浩, 万红伟, 等. 电石渣碱激发矿渣/粉煤灰胶凝材料性能及微结构 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (5): 1739-1747.
- [3] 李宝建, 傅赛, 段冰, 等. 海相软土固化强度试验及机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (S1): 176-180.
- [4] 陈忠清, 高彦斌, 吕越, 等. 碱渣-粉煤灰基地聚合物固化软黏土的强度及渗透性研究 [J]. 地基处理, 2024, 6 (2): 134-145.
- [5] 陈忠清, 丁佩思, 吕越, 等. 炉渣-粉煤灰地聚合物固化铜污染土 [J]. 有色金属工程, 2023, 13 (9): 161-169.
- [6] 陈忠清, 朱泽威, 吕越. 粉煤灰基地聚合物加固土的强度及抗冻融性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49 (4): 100-108.
- [7] 杨望星, 陈柯宇, 俞烨炜, 等. 粉煤灰基地聚合物替代水泥加固软土的试验研究 [J]. 浙江理工大学学报 (自然科学版), 2022, 47 (3): 433-440.

(下转第 102 页)

道桥技术

版), 2025, 42 (1): 82-89.

- [4] 郭森, 张柳煜, 郭元凯, 等. 基于桩-土作用效应的滚石撞击桥墩动力响应分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (1): 17-21, 112.
- [5] 杨慧. 基于修正摩尔-库伦模型的深基坑开挖数值模拟分析 [J]. 四川水泥, 2022, (12): 63-66.
- [6] 曾佳明, 朱忠义, 吕辉, 等. 考虑土-结构相互作用的大跨度空间结构抗震研究进展 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (1): 69-82.
- [7] 陈晓广. 基于桩土相对位移特征的深厚湿陷性黄土地区桩基承载力计算方法 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (1): 137-142.
- [8] 焦驰宇, 霍鹏翔, 曹跃, 等. 地震输入方向及液化扩展场地的夹角对曲线桥抗震的影响 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (8): 3452-3462.
- [9] 邹作家. 土-结构相互作用对跨走滑断层悬索桥地震响应的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [10] 王楚皓. 考虑桩土相互作用的千米级悬索桥梁轨系统地震响应

研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.

- [11] 占锋, 孙正财. 考虑桩-土效应的钢栈桥地震响应分析 [J]. 公路与汽运, 2025, 41 (5): 94-99, 104.
- [12] 郭歆. 桩土相互作用对桥轨系统近场脉冲地震响应的影响分析 [J]. 结构工程师, 2024, 40 (3): 61-67.
- [13] 张高, 张金, 唐孟. 不同桩-土模型对山区大跨度刚构桥地震易损性的影响分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47 (1): 155-164.
- [14] 张俊鑫. 近断层脉冲型地震作用下考虑桩土作用的斜拉桥地震响应分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [15] 吴鸣, 浦童刚. 考虑桩-土-水-结构相互作用的钢箱梁斜拉桥动力特性分析 [C] //中国公路学会, 中国航海学会, 中国铁道学会, 中国航空学会, 中国汽车工程学会. 2024 世界交通运输大会 (WTC2024) 论文集 (桥梁工程、隧道工程与轨道交通). 汕头大学土木与智慧建设工程系; 云南省公路科学技术研究院, 2024: 17-23.

(上接第 75 页)

- [8] 赵庆新, 才鸿伟, 安赛, 等. 水泥-磨细矿渣固化滨海盐渍土强度及机理 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (3): 625-630.
- [9] 徐超, 彭安琪, 于俊杰, 等. 考虑软土蠕变的大型锚碇基础变形与稳定性分析 [J]. 科技通报, 2025, 41 (5): 24-32.
- [10] 徐超, 郭宏峰, 杨晓明, 等. 普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (9): 2737-2740.
- [11] 柏延平, 夏懿, 马雷, 等. 粉煤灰基地聚物固化黄土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 8-13.
- [12] 吴云根. 粉煤灰-矿渣粉地聚物稳定碎石配合比设计及工程应

用 [J]. 交通世界, 2025 (23): 35-37.

- [13] 骆展鹏, 石超, 熊春林, 等. 土壤固化剂研究进展 [J]. 四川水泥, 2025 (8): 69-71.
- [14] 骆展鹏, 熊春林, 韩泽军, 等. 矿渣-粉煤灰-玻璃粉复合固化盾构土力学性能及固化机制 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1803-1812.
- [15] 董雪妍, 丁坚平, 段先前, 等. 黔中地区岩溶深基坑抗浮水位及涌水量预测 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2017, 34 (1): 119-122.

(上接第 80 页)

- [14] 何春梅, 宁晓骏, 李月富. 人行悬索桥结构参数对舒适度的影响研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (4): 427-432.
- [15] 尹栋佳, 聂科琴, 刘政伟. 人行景观斜拉桥舒适度研究 [J]. 交通科技, 2022 (4): 67-70.
- [16] 河北省工程建设标准. 景区人行玻璃悬索桥与玻璃栈道技术指标: DB13 (J) T 264-2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.

- [17] 中国工程建设标准化协会标准. 景区人行悬索桥工程技术规程: T/CECS 1140-2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [18] 李欢, 何旭辉, 王汉封, 等. π 型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (7): 62-68.
- [19] 刘志文, 肖晗, 王雷, 等. II 型钢-混凝土结合梁断面涡激振动及气动控制措施 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 68-78.