

道桥施工中粉煤灰在软基加固中的技术及性能分析

姜龙飞, 高晓俊

(云南建设基础设施投资股份有限公司, 昆明 650000)

摘要: 为确定粉煤灰—水泥复合改良软土的适宜配比, 设置不同水泥掺量和不同粉煤灰掺量, 构建 3×4 双因素配比试验, 并设置未改良土、单掺水泥和单掺粉煤灰对照组。通过无侧限抗压、压缩、CBR、抗渗和干湿循环试验, 结合双因素方差分析、SEM/XRD 测试及现场沉降监测, 评价改良土的力学性能、耐久性和变形控制效果。结果表明: 水泥掺量、粉煤灰掺量及二者交互作用均显著影响改良土性能; 粉煤灰掺量由 10% 增至 20% 时, 各项性能持续改善, 增至 25% 后有所下降。5% 水泥与 20% 粉煤灰组合的 28 d 无侧限抗压强度为 1.31 MPa, 压缩模量为 8.15 MPa, 2.5 mm 贯入量下 CBR 值为 17.4%, 7 次干湿循环后强度保持率为 86.8%。现场一般改良段 120 d 累计沉降量较未改良段降低 53.9%。综合性能和材料用量, 5% 水泥与 20% 粉煤灰为较适宜配比。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 粉煤灰; 道桥施工; 软基加固; 无侧限抗压强度; 沉降控制

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0034-09

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.006

Technical and Performance Analysis of Fly Ash in Soft Soil Reinforcement during Road and Bridge Construction

JIANG Longfei, GAO Xiaojun

(Yunnan Infrastructure Investment Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: To determine the appropriate ratio of fly ash-mixed cement for improving soft soil, three cement contents of 4%, 5%, and 6% and four fly ash contents of 10%, 15%, 20%, and 25% were set. A 3×4 two-factor ratio test was constructed, and control groups without improvement, single cement addition, and single fly ash addition were also set. Through unconfined compressive strength, compression, CBR, impermeability, and dry-wet cycle tests, combined with two-factor variance analysis, SEM/XRD tests, and on-site settlement monitoring, the mechanical properties, durability, and deformation control effects of the improved soil were evaluated. The results showed that the cement content, fly ash content, and their interaction all significantly affected the performance of the improved soil; when the fly ash content increased from 10% to 20%, all performance indicators continued to improve, and decreased after increasing to 25%. The 28-day unconfined compressive strength of the 5% cement and 20% fly ash combination was 1.31 MPa, the compression modulus was 8.15 MPa, the CBR value at a 2.5 mm penetration was 17.4%, and the strength retention rate after 7 dry-wet cycles was 86.8%. The cumulative settlement of the improved section in the field was 53.9% lower than that of the unimproved section. Considering the comprehensive performance and material usage, a 5% cement and 20% fly ash combination was found to be the more suitable ratio. The findings may serve as a reference for related engineering practices.

Key words: fly ash; road and bridge construction; soft soil reinforcement; unconfined compressive strength; settlement control

作者简介: 姜龙飞 (1988—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理、高速公路。

收稿日期: 2026-07-09

0 引言

软土地基含水率高、孔隙比大、压缩性强，受路基填筑和车辆荷载作用后容易产生持续沉降，进而引起路面开裂、桥头跳车及结构稳定性下降。粉煤灰具有颗粒细、填充性好和潜在活性较高等特点，与水泥复合后可改善土体结构并减少传统胶凝材料用量，在软基加固和工业固废资源化利用方面具有较高应用价值^[1-2]。

已有研究主要围绕粉煤灰复合固化土的力学性能、耐久性能、微观结构和工程应用展开。陈忠清等^[3]发现碱渣—粉煤灰基地聚合物能够提高软黏土强度并降低渗透性；赵永红等^[4]结合深厚吹填粉煤灰地基工程，分析了降水与强夯置换联合处理的适用条件；柴寿喜等^[5]、杨克政等^[6]分别从水稳定性、微观结构及静动力特性方面证实了石灰—粉煤灰体系对土体结构和承载性能的改善作用；胡志明等^[7]通过现场试验验证了粉煤灰与水泥原位固化软土的可行性，刘智华等^[8]和李小超等^[9]进一步分析了粉煤灰掺入对水泥搅拌桩强度形成及承载机理的影响。针对长期服役性能，顾士周等^[10]研究了季节冻土区粉煤灰路基填料的力学与抗冻性能，张东等^[11]讨论了粉煤灰筑路的中长期环境影响。近年来，固废复合胶凝材料研究逐渐向多组分协同和微观机制分析拓展，胡建林等^[12]、赫明胜等^[13]分别研究了激发剂和减水剂对粉煤灰复合固化土性能的影响；加瑞等^[14]总结了地质聚合物加固软土的发展现状；骆展鹏等^[15]和孔纲强等^[16]则从多源固废复合及新型固化剂角度验证了工业固废替代部分传统胶凝材料的可行性。

现有研究已证实粉煤灰复合固化材料能够改善软土强度、抗渗性和水稳定性，但多数研究侧重单项室内指标或特定固化材料，对水泥与粉煤灰掺量的交互作用、力学与耐久性能之间的对应关系，以及室内配比结果能否用于现场沉降控制，仍缺少较完整的验证。为此，依托某市政道路桥头段软基处理工程，设置不同水泥与粉煤灰掺量组合，通过无侧限抗压、压缩、CBR、抗渗和干湿循环试验，结合双因素方差分析及 SEM/XRD 测试，分析复合改良土的性能变化及微观机制；在此基础上选取适宜配比开展现场试验段施工和 120 d 沉降监测，验证其对一般路段和桥头过渡段软基变形的控制效果。

1 工程概况

1.1 项目概况与地质条件

依托某市政道路桥头段软基处理工程，工程路线全长约 1.26 km，路基标准宽度为 24 m，设计行车速度为 40 km/h。沿线设置一座中小桥及两处箱涵，软基处理段位于 K0+320~K1+080 范围内，其中桥头过渡段位于 K0+820~K0+940，两侧过渡段总长约 120 m。该段地势较低，场地周边以农田、沟渠和既有道路为主，地表排水条件一般，地下水位埋深约 1.2~2.0 m，雨季施工期间受降雨和地表汇水影响较明显。

根据现场钻探资料，工程区浅部土层主要由素填土、淤泥质粉质黏土、软塑状粉质黏土及粉砂层组成。其中，软土层主要分布于路基填筑影响深度范围内，厚度为 3.8~7.2 m，平均厚度约 5.6 m。软土呈灰褐色至灰黑色，局部夹少量粉砂薄层，天然状态下含水率较高，结构性较弱，压缩性较明显。工程区软土基本物理、力学及化学性质指标见表 1。

表 1 软土基本物理、力学及化学性质指标
Table 1 Basic physical, mechanical and chemical properties of soft soil

项目	软土层 厚度/m	天然含 水率/%	天然密度 /(g/cm ³)	土粒 比重	孔隙 比	饱和 度/%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	有机质 含量/%	pH 值	可溶盐 总量/%	天然渗透系 数/(cm/s)	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	地基承载力 特征值/kPa
指标值	3.8~7.2	42.6	1.76	2.69	1.18	97.1	45.8	25.1	20.7	2.14	6.9	0.16	4.62×10 ⁻⁷	0.62	3.84	16.5	8.7	75

工程区软土天然含水率为 42.6%，孔隙比为 1.18，压缩系数为 0.62 MPa⁻¹，压缩模量为 3.84 MPa，地基承载力特征值仅为 75 kPa，具有含水率较高、压缩性较强和承载能力不足等特征，需要通过复合改良提高其强度和变形稳定性。

1.2 试验材料及基本性能

试验所用粉煤灰取自当地燃煤电厂，为Ⅱ级粉煤灰，外观呈灰色粉末状，颗粒较细且含水率较低，其主要性能指标见表 2。

表 2 粉煤灰主要性能指标
Table 2 Main performance indicators of fly ash

项目	粉煤灰等级	表观密度 /(g/cm ³)	细度 /%	烧失量 /%	需水量比 /%	含水率 /%	SiO ₂ 含量/%	Al ₂ O ₃ 含量/%	Fe ₂ O ₃ 含量/%	CaO 含量/%	SO ₃ 含量/%
指标值	Ⅱ级	2.24	18.6	4.2	96	0.8	51.3	27.6	6.4	5.8	1.2

试验采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，初凝时间为 168 min，终凝时间为 246 min，安定性合格，3、28 d 抗压强度分别为 22.6、48.7 MPa。粉煤灰与水泥的基本性能均能够满足软土配比试验和现场验证要求。

2 软土加固配比设计和试验结果分析

2.1 加固配比与试验方案

结合工程区软土层厚度、路基填筑高度及桥头过渡段沉降控制要求，软基加固采用“粉煤灰+水泥”复合改良方案。粉煤灰作为主要改良材料，用于改善软土颗粒组成和压实性能；水泥作为辅助固化材料，用于提供早期胶结强度，并为粉煤灰后期活性反应提供碱性环境。水泥和粉煤灰掺量均按软土干质量百分比确定。水泥掺量设置 4%、5% 和 6% 三个水平，粉煤灰掺量设置 10%、15%、20% 和 25% 四个水平，同时设置不掺水泥和粉煤灰对照水平，以分析两种材料的主效应及交互作用。各组配合比见表 3。

表 3 水泥—粉煤灰改良软土双因素配合比设计
Table 3 Double-factor mix proportion design of cement-fly ash modified soft soil

水泥掺量	不掺加粉煤灰	粉煤灰掺量			
		10%	15%	20%	25%
	S0	F10	F15	F20	F25
4/%	C4	C4F10	C4F15	C4F20	C4F25
5/%	C5	C5F10	C5F15	C5F20	C5F25
6/%	C6	C6F10	C6F15	C6F20	C6F25

S0 为未改良软土组，F10~F25 为单掺粉煤灰组，C4、C5 和 C6 为单掺水泥组，其余为水泥—粉煤灰复合改良组。各试验组均设置 3 个平行试样，试验结果取平均值。不掺加水泥条件下的试验组用于评价粉煤灰的单独改良作用，不掺加粉煤灰条件下的试验组用于评价水泥的固化作用，复合改良组用于分析水泥掺量、粉煤灰掺量及二者交互作用对改良土性能的影响。

无侧限抗压强度试验选取 S0、F20、C5 以及 C4F10~C6F25 复合改良组，养护龄期设置为 7、14、

28 和 60 d，用于分析材料掺量和养护龄期对改良土强度发展的影响。

压缩和 CBR 试验纳入 C4F10~C6F25 共 12 个复合改良组的 28 d 试样，每组设置 3 个平行试样，并以 S0 组作为未改良对照。以水泥掺量和粉煤灰掺量为影响因素，采用各平行试样的原始测值，对 28 d 无侧限抗压强度、压缩模量及 2.5 mm 贯入量下的 CBR 值进行双因素方差分析，显著性水平取 0.05。为便于比较粉煤灰掺量的影响，压缩和 CBR 结果图仅列示 S0 及 5% 水泥条件下 C5F10、C5F15、C5F20 和 C5F25 组的代表性结果。

抗渗和干湿循环试验选取 S0、C5、F20、C4F20、C5F20 和 C6F20 组的 28 d 试样，用于评价不同改良方式及水泥掺量对渗透性能和水稳定性的影响。SEM 和 XRD 测试选取 S0、C5、C5F20 和 C5F25 组的 28 d 试样，用于分析水泥单掺、适量粉煤灰复合及粉煤灰掺量过高条件下的微观结构和胶凝产物变化。

2.2 无侧限抗压强度分析

不同水泥—粉煤灰配比下无侧限抗压强度试验结果见表 4，28 d 无侧限抗压强度变化如图 1 所示。

表 4 不同水泥—粉煤灰配比下无侧限抗压强度
Table 4 Unconfined compressive strength under different cement-fly ash mix proportions

试验组	水泥掺量 /%	粉煤灰掺 量/%	无侧限抗压强度/MPa			
			7 d	14 d	28 d	60 d
S0			0.08	0.09	0.10	0.11
F20		20	0.11	0.14	0.18	0.23
C5	5		0.30	0.47	0.68	0.79
C4F10	4	10	0.27	0.43	0.67	0.82
C4F15	4	15	0.34	0.55	0.86	1.05
C4F20	4	20	0.42	0.69	1.06	1.32
C4F25	4	25	0.38	0.62	0.96	1.19
C5F10	5	10	0.34	0.56	0.82	0.98
C5F15	5	15	0.43	0.70	1.08	1.31
C5F20	5	20	0.54	0.86	1.31	1.63
C5F25	5	25	0.48	0.78	1.18	1.45
C6F10	6	10	0.40	0.65	0.96	1.16
C6F15	6	15	0.50	0.80	1.23	1.50
C6F20	6	20	0.62	0.98	1.47	1.82
C6F25	6	25	0.56	0.89	1.34	1.65

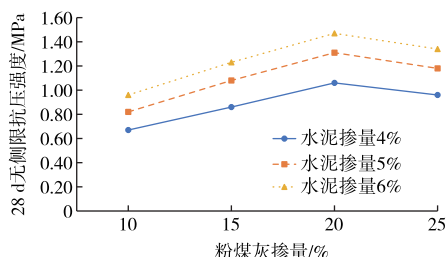


图1 不同水泥及粉煤灰掺量下 28 d 无侧限抗压强度变化
Fig.1 Variation in 28-day unconfined compressive strength under different cement and fly ash contents

S0 组在 7~60 d 内的无侧限抗压强度仅由 0.08 MPa 提高至 0.11 MPa, 天然软土自身强度增长幅度较小。F20 组在不掺水泥条件下, 28、60 d 强度分别为 0.18、0.23 MPa, 虽高于 S0 组, 但提升幅度有限, 说明粉煤灰单独掺入主要发挥颗粒填充和含水状态调节作用, 其活性组分在缺少碱性激发条件时难以充分反应。C5 纯水泥组 28、60 d 强度分别为 0.68、0.79 MPa, 明显高于 S0 组和 F20 组, 表明水泥水化形成的胶结结构是改良土早期强度发展的主要来源。

在水泥掺量保持不变的条件下, 不同龄期改良土强度均随粉煤灰掺量增加呈先升高后降低趋势。当粉煤灰掺量由 10% 增加至 20% 时, 4%、5% 和 6% 水泥掺量时 28 d 强度分别由 0.67、0.82、0.96 MPa 提高至 1.06、1.31、1.47 MPa, 60 d 强度分别提高至 1.32、1.63、1.82 MPa。粉煤灰掺量增加至 25% 后, 各水泥掺量下强度均有所下降, 其中 28 d 强度较 20% 粉煤灰组分别降低 9.4%、9.9% 和 8.8%。这说明适量粉煤灰能够填充软土孔隙, 并在水泥水化形成的碱性环境中参与后期反应; 粉煤灰掺量过高时, 水泥水化产生的碱性组分及胶凝产物不足以激发全部粉煤灰, 未反应颗粒增多, 导致胶结结构连续性减弱。

在粉煤灰掺量相同的条件下, 提高水泥掺量能够进一步促进强度增长。以 20% 粉煤灰组为例, 水泥掺量由 4% 增加至 5% 时, 28、60 d 强度分别提高 23.6%、23.5%; 水泥掺量继续由 5% 增加至 6% 时, 强度增幅分别降低至 12.2%、11.7%。C6F20 组强度最高, 28、60 d 强度分别达到 1.47、1.82 MPa, 但水泥掺量由 5% 增加至 6% 后, 强度增量开始减小,

表明继续提高水泥用量存在边际效应。

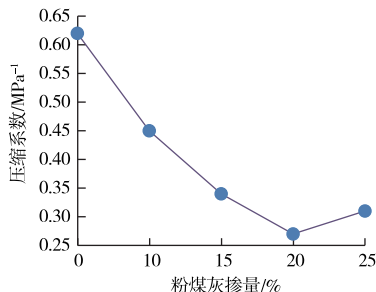
从单掺与复合组比较看, C5F20 组 28、60 d 强度分别较 C5 纯水泥组提高 92.6% 和 106.3%, 同时明显高于 F20 纯粉煤灰组, 说明水泥水化与粉煤灰颗粒填充、后期活性反应共同促进了改良土强度发展, 二者复合使用具有明显的协同增益。

从龄期变化看, 各复合改良组均表现出持续的强度增长。以 C5F20 组为例, 7、14、28、60 d 强度分别为 0.54、0.86、1.31、1.63 MPa。早期强度主要来源于水泥水化形成的初始胶结骨架, 随着养护龄期延长, 粉煤灰活性组分逐步参与反应, 水化产物持续填充孔隙并增强颗粒间连接, 使改良土结构进一步致密。综合强度水平、水泥用量和后期增长幅度, C5F20 组在减少水泥用量的同时保持了较高强度, 可作为后续压缩性能、CBR、耐久性及现场试验分析的重点配比。

2.3 压缩变形与 CBR 性能分析

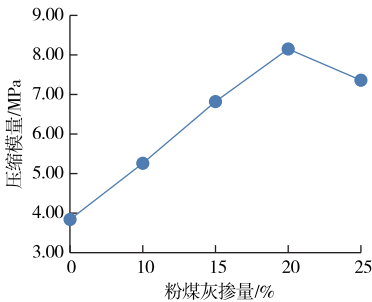
2.3.1 压缩变形性能

由图 2 可知, S0 组压缩系数为 0.62 MPa^{-1} , 压缩模量为 3.84 MPa, 累计压缩变形量为 8.6 mm。粉煤灰掺量由 10% 增至 20% 时, C5F10、C5F15 和 C5F20 组的压缩系数分别降至 0.45、0.34 和 0.27 MPa^{-1} , 压缩模量分别提高至 5.26、6.82 和 8.15 MPa, 累计压缩变形量分别降至 6.4、5.1 和 4.2 mm。其中, C5F20 组较 S0 组压缩系数降低 56.5%, 压缩模量提高 112.2%, 累计压缩变形量降低 51.2%, 表明其抗压缩变形能力明显增强。粉煤灰掺量增至 25% 后, C5F25 组压缩系数回升至 0.31 MPa^{-1} , 压缩模量降至 7.36 MPa, 累计压缩变形量增至 4.8 mm, 说明粉煤灰掺量过高会削弱其变形控制效果。

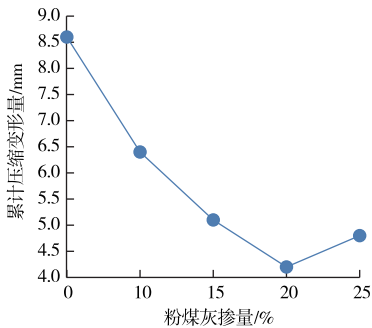


(a) 5%水泥条件下不同粉煤灰掺量试样的压缩系数

材料科学



(b) 5%水泥条件下不同粉煤灰掺量试样的压缩模量



(c) 5%水泥条件下不同粉煤灰掺量试样的累计压缩变形量

图2 不同水泥—粉煤灰配比试样的压缩试验结果
Fig. 2 Compression Test Results of Specimens with Different Cement-Fly Ash Proportions

2.3.2 CBR 承载性能

由图3可知, S0组在2.5、5.0 mm贯入量下的CBR值分别为3.8%和3.2%, 承载性能较低。C5F10、C5F15、C5F20和C5F25组在2.5 mm贯入量下的CBR值分别为8.6%、12.9%、17.4%和15.6%, 在5.0 mm贯入量下分别为7.4%、11.3%、15.8%和14.1%。随着粉煤灰掺量由10%增加至20%, 两种贯入量下的CBR值均持续提高; 掺量增加至25%后略有下降。C5F20组的CBR值最高, 其

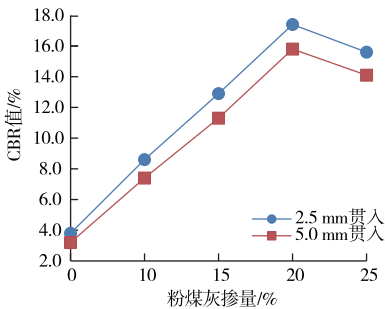


图3 5%水泥条件下不同粉煤灰掺量试样的CBR值
Fig. 3 CBR values for tests with varied fly-ash contents at 5% cement content

中2.5 mm贯入量下较S0组提高357.9%, 说明该配比能够显著增强改良软土抵抗局部贯入变形的能力。

综合压缩变形与CBR试验结果, 5%水泥与20%粉煤灰组合在降低压缩系数、提高压缩模量、控制累计变形及增强CBR承载性能方面表现较好, 与无侧限抗压强度试验结果一致。

2.4 配比交互作用与耐久性能分析

2.4.1 水泥与粉煤灰交互作用分析

以水泥掺量和粉煤灰掺量为影响因素, 对28 d无侧限抗压强度、压缩模量及2.5 mm贯入量下的CBR值进行双因素方差分析, 结果见表5。

表5 水泥—粉煤灰比对改良软土性能的双因素方差分析
Table 5 Two-factor analysis of variance for the performance of modified soft soil by cement-fly ash ratio

指标	水泥掺量 P值	粉煤灰掺 量P值	交互项 P值	显著性 判断
28 d 无侧限 抗压强度	<0.001	<0.001	0.023	主效应极显著, 交互 效应显著
压缩模量	<0.001	<0.001	0.012	主效应极显著, 交互 效应显著
CBR值	<0.001	<0.001	0.008	主效应及交互效应均 极显著

注: $P<0.05$ 表示影响显著, $P<0.01$ 表示影响极显著; CBR值采用2.5 mm贯入量下的试验结果。

水泥掺量和粉煤灰掺量对三项性能指标的影响均达到极显著水平, 说明两种材料的用量变化均会显著影响改良软土的强度、抗压缩能力和承载性能。随着水泥掺量由4%增加至6%, 各项指标总体提高, 但由5%增加至6%时的性能增幅有所减小, 表明继续增加水泥用量后边际改善效果下降。

粉煤灰掺量的主效应表现为先增强后减弱, 在相同水泥掺量下, 粉煤灰由10%增加至20%时, 改良土各项性能持续改善; 掺量达到25%后, 强度、压缩模量和CBR值均出现不同程度下降。水泥与粉煤灰交互项对三项指标均产生显著影响, 表明粉煤灰的改良效果受到水泥掺量及其形成的反应条件影响。

纯粉煤灰组的性能提升幅度较小, 纯水泥组能够明显改善软土早期强度, 而复合组在强度、变形控制和CBR承载性能方面均优于单掺组。

2.4.2 抗渗与干湿循环耐久性能分析

采用变水头法和干湿循环试验评价代表性配比改良土的抗渗性与水稳定性。试样养护28 d后采用变水头法测定渗透系数; 浸水软化系数按饱水24 h后的无

侧限抗压强度与同龄期标准养护强度之比计算。干湿循环以“浸水 24 h—40 ℃烘干 24 h”为 1 次循环，分别在 3、5 和 7 次循环后测定强度保持率，并统计 7 次循环后的质量损失率，结果见表 6。

表 6 代表性配比试样的抗渗与干湿循环耐久性能
Table 6 Impermeability and dry-wet cycling durability performance of representative comparative samples

试验组	渗透系数 / (cm/s)	浸水软化 系数	3 次循环强度 保持率/%	5 次循环强度 保持率/%	7 次循环强度 保持率/%	7 次循环质量 损失率/%
S0	4.62×10^{-7}	0.52	72.4	58.7	46.8	8.7
C5	1.84×10^{-7}	0.72	88.6	82.1	75.4	3.8
F20	3.28×10^{-7}	0.61	80.2	71.6	63.9	5.6
C4F20	1.26×10^{-7}	0.81	92.1	87.4	82.0	2.7
C5F20	8.74×10^{-8}	0.87	94.3	90.5	86.8	1.9
C6F20	7.92×10^{-8}	0.89	95.1	92.2	89.4	1.6

S0 组渗透系数为 4.62×10^{-7} cm/s，浸水软化系数为 0.52，7 次循环后强度保持率仅为 46.8%，质量损失率达到 8.7%。单掺粉煤灰和单掺水泥均能改善软土的抗渗性与水稳定性，但提升幅度低于复合改良组。

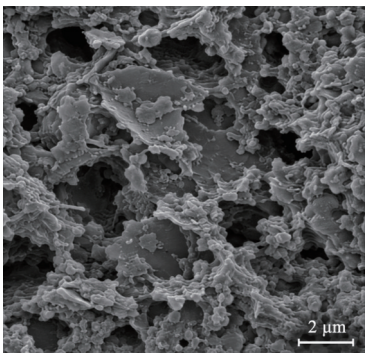
C4F20、C5F20 和 C6F20 组的渗透系数分别降至 1.26×10^{-7} 、 8.74×10^{-8} 和 7.92×10^{-8} cm/s，浸水软化系数分别提高至 0.81、0.87 和 0.89。随着水泥掺量增加，各循环阶段的强度保持率逐步提高，7 次循环后的质量损失率由 2.7% 降至 1.6%。其中，C6F20 组耐久性指标最高，但较 C5F20 组的提升幅度较小；C5F20 组 7 次循环后的强度保持率达到 86.8%，质量损失率仅为 1.9%，已具有较好的抗渗性和干湿循环耐久性。

综合无侧限抗压强度、压缩变形、CBR 及耐久性能，5%水泥与 20%粉煤灰组合在性能提升与材料用量之间具有较好的协调性，可作为后续微观结构分析和现场试验验证的重点配比。

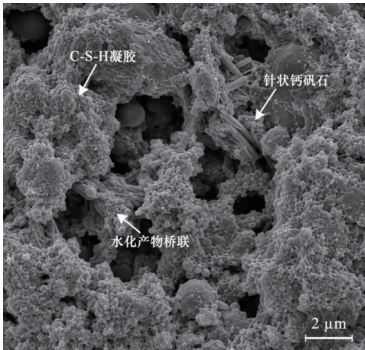
2.5 微观结构与复合改良机制

为解释不同配比改良土宏观性能变化的微观原因，对代表性配比的 28 d 试样进行 SEM 和 XRD 测试，结果如图 4 所示。

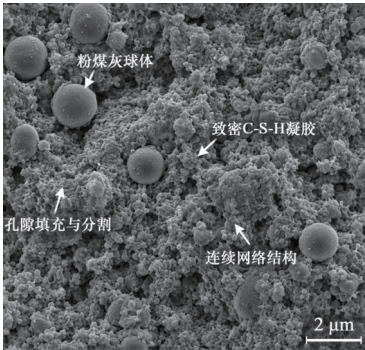
由图 4 (a) 可见，天然软土以片状颗粒为主，颗粒排列较为松散，内部存在较多连通孔隙，整体结构完整性较弱。C5 组中出现絮状 C—S—H 凝胶及少量针束状钙矾石，水化产物包裹、桥联土颗粒，形成初步胶结骨架，但局部仍保留较大孔隙，如图 4 (b) 所示。



(a) 天然软土 SEM

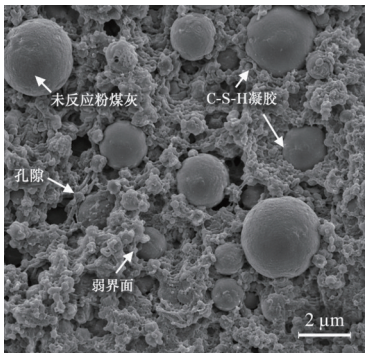


(b) C5 组 SEM

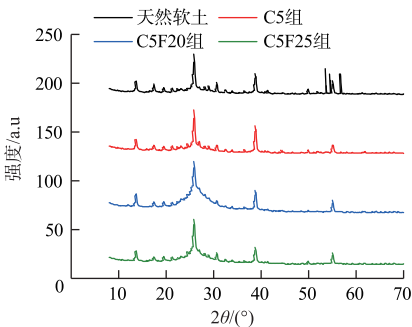


(c) C5F20 组 SEM

材料科学



(d) C5F25 组 SEM



(e) 各组 XRD 谱图

图 4 不同配比改良软土的 SEM 形貌与 XRD 谱图
Fig. 4 SEM morphology and XRD patterns of improved soft soil with different mix proportions

C5F20 组微观结构最为致密，如图 4 (c) 所示。粉煤灰球形颗粒分布于土颗粒和水化产物之间，可填充并分割较大孔隙；水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形成碱性反应环境，促进粉煤灰中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 发生二次反应，生成 C—S—H 和 C—A—H 等胶凝产物，使颗粒间形成连续胶结网络。由图 4 (e) 可见，与 C5 组相比，C5F20 组 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 特征峰减弱，

$20^\circ \sim 35^\circ$ 范围内弥散峰更加明显，表明部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被二次反应消耗，无定形胶凝产物含量增加。

粉煤灰掺量增至 25% 后，C5F25 组中未反应球形颗粒数量增加，部分粉煤灰颗粒与周围胶凝基体之间形成弱界面，局部孔隙重新出现，如图 4 (d) 所示。其原因在于水泥掺量保持不变时，水化产物及碱性反应条件不足以充分激发过量粉煤灰，导致胶结结构连续性降低。由此可见，粉煤灰颗粒填充、水泥水化胶结和粉煤灰二次反应共同改善软土内部结构；C5F20 组具有较为连续、致密的胶结网络，与其较高的无侧限抗压强度、压缩模量、CBR 值及耐久性能相互印证。

3 现场验证改良土性能

3.1 现场试验段布置与施工控制

根据试验结果，选取 5% 水泥与 20% 粉煤灰组合用于现场验证。在工程软基处理区域设置长度为 100 m 的复合改良试验段，试验段按路基全幅布置，处理层位于路基填筑底部。根据软土分布、填筑荷载影响范围及桥头过渡段沉降控制要求，一般路段处理深度取 1.5 m，桥头过渡段处理深度取 2.0 m。现场采用分层改良方式，每层松铺厚度控制为 25 ~ 30 cm，压实后单层厚度控制为 20 ~ 25 cm，使粉煤灰、水泥与软土在处理深度范围内形成连续改良层。现场施工按照“施工准备—清表排水—材料计量—掺料拌合—分层摊铺—碾压成型—养护检测”的流程实施，如图 5 所示。



图 5 粉煤灰-水泥复合改良软基施工流程
Fig. 5 Construction process of soft foundation improved with fly ash and cement

施工前对处理范围进行清表、排水和翻松，并根据软土天然含水状态进行翻晒或洒水调节，将混合料含水率控制在最佳含水率 $\pm 2\%$ 范围内。水泥和粉煤灰分别按软土干质量的 5% 和 20% 进行分区、分幅计量撒布，材料单项掺量偏差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。

撒布完成后采用路拌设备进行多遍拌合，并通过开挖检查拌合深度、色泽均匀性及土团破碎情况，避免出现软土夹层、粉煤灰集中和水泥团聚。

混合料拌合均匀后及时分层摊铺和碾压，一般路段压实度控制在 93% 以上，桥头过渡段压实度控

制在 95% 以上。碾压成型后进行保湿养护,并对材料掺量、混合料含水率、分层厚度、拌合均匀性和压实度进行现场检查,为后续沉降监测与改良效果验证提供统一的施工条件。

3.2 现场沉降监测方案

为评价粉煤灰—水泥复合改良软基在现场填筑荷载作用下的变形控制效果,在试验区域设置未改良对照段、一般改良段和桥头过渡段三类沉降观测区。未改良对照段用于提供天然软基沉降基准,一般改良段用于验证复合改良措施对常规路段沉降的控制效果,桥头过渡段用于评价填筑高度较大及结构物与路基刚度存在差异条件下的改良效果。

以路基填筑完成时作为监测起点,对 0~120 d 内的累计沉降变化进行连续观测,重点记录 28、60、90 和 120 d 的累计沉降量。监测指标包括累计沉降量、相邻观测阶段的沉降增量和沉降速率,并以未改良对照段为基准,比较一般改良段与桥头过渡段的沉降降幅及后期稳定趋势。

通过比较三类观测区不同阶段的累计沉降量和沉降速率,验证粉煤灰—水泥复合改良层对软基压缩变形和桥头差异沉降的控制效果。

3.3 现场沉降结果与改良效果分析

由图 6 可知,三类监测区的累计沉降量均随时间延长逐渐增加,但不同处理段的沉降幅度存在明显差异。未改良对照段沉降发展较快,120 d 累计沉降量达到 102.3 mm;一般改良段 120 d 累计沉降量为 47.2 mm,较未改良对照段降低 53.9%;桥头过渡段累计沉降量为 64.5 mm,较未改良对照段降低 36.9%。由此表明,粉煤灰—水泥复合改良能够有效减小路基填筑荷载作用下的软基压缩变形。

填筑完成后 0~28 d 为沉降快速发展阶段。未改良对照段 28 d 累计沉降量为 58.4 mm,占 120 d 总沉降量的 57.1%;一般改良段和桥头过渡段分别为 29.5、39.4 mm,占各自 120 d 总沉降量的 62.5% 和 61.1%。该阶段填筑荷载集中施加,软土孔隙水压力逐步消散,三类监测区沉降增长较快,但两个改良段的沉降绝对值均明显低于未改良对照段。

填筑完成后 60~120 d,各监测区沉降增长速度逐渐减小。一般改良段 60~90 d 和 90~120 d 的沉降增量分别为 3.8、1.6 mm,桥头过渡段相应阶段的沉

降增量分别为 5.5、2.7 mm,说明两个改良段的后期沉降均逐步趋于稳定。桥头过渡段沉降量高于一般改良段,主要与该区域填筑高度较大以及结构物与路基之间存在刚度差异有关,但其 120 d 沉降曲线已经趋于平缓,表明复合改良层能够减轻桥头区域的差异沉降。

现场监测结果与室内试验规律基本一致。C5F20 试样具有较高的压缩模量、较低的渗透系数和较高的干湿循环强度保持率,现场一般改良段和桥头过渡段则表现出累计沉降量降低、后期沉降增量减小的特征。室内压缩、抗渗和耐久性能的改善能够反映现场软基在填筑荷载与水环境共同作用下的变形控制效果,验证了室内配比筛选结果在本工程现场条件下的适用性。

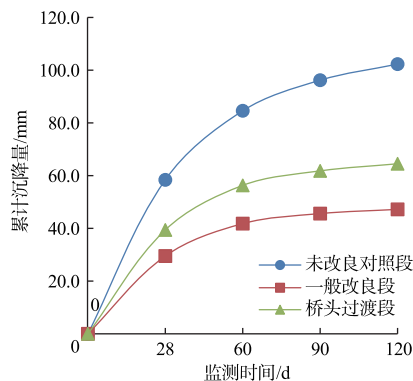


图 6 粉煤灰—水泥复合改良软基现场沉降变化曲线
Fig. 6 Field settlement curves of soft foundation improved with fly ash and cement

4 结论

围绕道桥施工中软土地基承载能力不足和沉降控制需求,以粉煤灰—水泥复合材料改良软土为研究对象,开展不同水泥与粉煤灰掺量条件下的配比试验及性能评价。通过无侧限抗压强度、压缩、CBR、抗渗和干湿循环试验,结合双因素方差分析、SEM/XRD 微观测试及现场 120 d 沉降监测,系统分析复合改良材料对软土力学性能、耐久性能和变形控制效果的影响规律。在此基础上,确定适宜材料配比并验证其工程应用效果,主要结论如下:

(1) 水泥和粉煤灰掺量都会影响改良土的强度、压缩性能和 CBR 值,二者之间还存在明显的交互作用。水泥掺量由 4% 提高至 6% 后,改良土性能总体

材料科学

增强,但由 5%增至 6%时,性能增幅已经减小。粉煤灰掺量由 10%增至 20%时,各项指标持续改善;增至 25%后,强度、压缩模量和 CBR 值均有所下降。

(2) 综合力学性能、耐久性和材料用量,5%水泥与 20%粉煤灰组合较为合理。该组 28、60 d 无侧限抗压强度分别为 1.31、1.63 MPa,压缩模量为 8.15 MPa,2.5 mm 贯入量下 CBR 值为 17.4%,渗透系数为 8.74×10^{-8} cm/s。经过 7 次干湿循环后,强度保持率为 86.8%,质量损失率为 1.9%。

(3) 粉煤灰-水泥复合改良效果主要来自颗粒填充、水泥水化胶结和粉煤灰二次反应。水泥水化形成初始胶结骨架,粉煤灰填充土体孔隙,并在碱性环境中生成新的胶凝产物,使土体结构逐渐致密。粉煤灰掺量达到 25%后,未充分反应的颗粒增多,局部弱界面形成,导致改良效果下降。

(4) 现场监测结果与室内试验结论基本一致。监测 120 d 后,一般改良段累计沉降量为 47.2 mm,较未改良段降低 53.9%;桥头过渡段累计沉降量为 64.5 mm,降低 36.9%。两个改良段的后期沉降增量均逐渐减小,说明 5%水泥与 20%粉煤灰组合能够较好地控制软基压缩变形,并减轻桥头过渡段的差异沉降。

参 考 文 献

- [1] 吴强. 高钙粉煤灰加固软土地基性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 80-83, 122.
- [2] 陈广升. 碱激发粉煤灰-高炉矿渣粉固化铸造废砂用作路基填料研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 117-122.
- [3] 陈忠清, 高彦斌, 吕越, 等. 碱渣-粉煤灰基地质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.
- [4] 赵永红, 胡耀广, 韩政, 等. 降水联合强夯置换在深厚吹填粉煤灰地基加固中的应用 [J]. 地基处理, 2024, 6 (4): 396-403.
- [5] 柴寿喜, 田萌萌, 魏丽, 等. 石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土的水稳定性与微观结构特征 [J]. 工程地质学报, 2024, 32 (2): 430-439.
- [6] 杨克政, 李亚东, 王一兆. 石灰和粉煤灰固化软土静动力力学特性研究 [J]. 广州建筑, 2024, 52 (7): 44-48.
- [7] 胡志明, 王子帅, 张艳林, 等. 粉煤灰联合水泥原位固化软土现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2024, 44 (5): 40-47, 72.
- [8] 刘智华, 刘华森, 段金帅, 等. 固废粉煤灰对水泥搅拌桩力学性能的影响研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56 (增刊 2): 701-708.
- [9] 李小超, 郭威, 李晓轩, 等. 粉煤灰-黏土二元地层水泥搅拌桩承载机理研究 [J]. 电力勘测设计, 2025 (10): 81-86.
- [10] 顾士周, 惠迎新, 袁化强, 等. 西北季节冻土区粉煤灰路基填料力学性能及抗冻性能研究 [J]. 冰川冻土, 2025, 47 (5): 1358-1375.
- [11] 张东, 白铭悦, 王健, 等. 粉煤灰筑路对环境的中长期累积影响 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (12): 96-104.
- [12] 胡建林, 李智林, 周永祥, 等. 生石灰激发高炉矿渣-粉煤灰地质聚合物固化土力学特性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (8): 2912-2923.
- [13] 赫明胜, 秦庆金, 高慧, 等. 减水剂对镁渣-粉煤灰基流态固化土流变性及强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (7): 2710-2719.
- [14] 加瑞, 楚振兴. 地质聚合物加固软土的研究现状与进展 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 490-500.
- [15] 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.
- [16] 孔纲强, 姜洪亮, 陈庚, 等. 基于固废的新型固化剂及其固化土无侧限抗压强度试验 [J]. 工程地质学报, 2025, 33 (3): 919-928.