

碱渣-粉煤灰基地聚合物固化软黏土的 强度及渗透性研究

陈忠清¹, 高彦斌^{2*}, 吕越¹, 吴早生³, 魏威⁴

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312099; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 华汇工程设计集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312000; 4. 北京中岩大地科技股份有限公司, 北京 100041)

摘要: “双碳”背景下寻找低碳环保的固化剂替代水泥等传统固化剂进行软土地基加固受到越来越多的关注。利用碱渣 (SR) 和粉煤灰 (FA) 制备碱渣-粉煤灰基地聚合物 (SR-FAG), 通过无侧限抗压强度试验 (UCST) 和渗透试验 (PT), 以及扫描电镜 (SEM) 试验、X 射线衍射 (XRD) 分析与傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试开展了 SR-FAG 固化含水率超液限软黏土的试验研究, 分析了 SR 掺量、FA 掺量及养护龄期对 SR-FAG 固化土无侧限抗压强度及渗透性的影响, 并探讨了固化机理。研究表明: SR 掺量对 SR-FAG 固化土的早期强度增长作用较明显, 7 d 的强度可达到 28 d 的 56%~89%, 而后期强度增长主要受 FA 掺量影响。当 SR 掺量为 30%且 FA 掺量达到 25%时, SR-FAG 固化土 28 d 的强度可达到 1.6 MPa, 并随龄期持续增长。SR-FAG 固化土 90 d 龄期的渗透系数比固化前降低近一个数量级, 达到 1.344×10^{-8} cm/s。C-S-H 凝胶充填固化土中土颗粒 (团) 粒的大孔隙, 并发挥胶结作用, 导致 SR-FAG 固化土的早期强度增长与渗透性降低, 而后期强度增长则与硅铝酸盐凝胶的胶结作用密切相关。

关键词: 软黏土; 粉煤灰基地聚合物; 碱渣; 固化; 无侧限抗压强度; 渗透性

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0134-12

Study on strength and permeability of soft clay stabilized by fly ash based geopolymer with soda residue

CHEN Zhong-qing¹, GAO Yan-bin^{2*}, LV Yue¹, WU Zao-sheng³, WEI Wei⁴

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312099, Zhejiang, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Huahui Engineering Design Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

4. Zhongyan Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The increasing emphasis on developing environmentally friendly cementitious binders with low carbon footprints to replace traditional binders such as ordinary Portland cement for stabilizing soft soil is particularly significant under the background of “double carbon”. In this study, a geopolymer known as fly ash (FA) based geopolymer with soda residue (SR-FAG) was formulated to stabilize soft clay with water content exceeding the liquid limit. Various tests, including unconfined compression strength test (UCST), permeability test (PT), scanning electron microscope test (SEM), X-ray diffraction (XRD) analysis, and Fourier transform infrared reflection spectrum (FTIR) analysis, were conducted. These tests aimed to examine the influence of SR content, FA content, and curing time on the unconfined compression strength (UCS) and permeability of SR-FAG stabilized soil, while also discussing the underlying improvement mechanism. The results indicate that the SR content significantly affects the early strength development of SR-FAG stabilized soil. At 7 days of curing, the UCS can reach 56% to 89% of the UCS at 28 days of curing, with late

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY22D020001); 中国博士后科学基金 (2021M702372); 国家自然科学基金 (41972273)。

作者简介: 陈忠清 (1984—), 男, 浙江永康人, 博士, 副教授, 主要从事地基处理及固体废弃物资源化研究工作。E-mail: q_chen_yk@163.com。

*通信作者: 高彦斌 (1973—), 男, 山西阳泉人, 博士, 副教授, 主要研究方向为软土力学特性与软土工程。E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn。

strength development primarily influenced by the content of fly ash (FA). Specifically, at an SR content of 30% and an FA content of 25%, the UCS of SR-FAG stabilized soil at 28 days of curing can reach 1.6 MPa, with a continuous increase observed with curing time. Additionally, the permeability coefficient decreases by nearly an order of magnitude after 90 days of curing, reducing to 1.344×10^{-8} cm/s from its initial value before stabilization. The mechanism underlying these improvements involves C-S-H gels filling the macropores and cementing the soil particles (aggregates), promoting early strength development and reducing permeability in SR-FAG stabilized soil. Late-stage strength growth is closely associated with the cementation of aluminosilicate gels.

Key words: soft clay; fly ash based geopolymer; soda residue; stabilization; unconfined compression strength; permeability

0 引言

碱渣和粉煤灰是两种常见的大宗工业固废, 其中碱渣是氨碱法制碱过程中排放的碱性残渣, 而粉煤灰是火力发电厂燃煤产生的飞灰。我国每年碱渣排放量近 780×10^4 t, 且利用率较低^[1], 而粉煤灰的年产量达到 6×10^9 t 左右, 其中 30% 未得到综合利用^[2]。研究表明碱渣的主要化学组分及质量分数为 CaCO_3 (40%~65%)、 CaCl_2 (4%~13%)、 NaCl (4%~11%)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (4%~11%)、 CaSO_4 (2%~15%) 等, 呈碱性 (pH 值一般为 10~12), 且孔隙发达, 可用于复合胶凝材料制备以及环保 (如烟气脱硫) 和农业领域 (如酸性土壤改良)^[1]; 粉煤灰富含活性硅铝酸盐, 主要化学组分为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 二者总含量可达 60%~90%^[2]。碱渣和粉煤灰的联合利用, 一直受到工程领域学者的关注。比如将碱渣和粉煤灰按一定比例混合, 制备碱渣土, 作为一种填垫材料^[3-4]; 将碱渣、粉煤灰及硅酸钠溶液按一定比例混合, 制备新型注浆材料, 用于采空区填充^[5-6]; 以及制备粉煤灰基地聚合物时掺入碱渣进行改性处理^[7-8]。但是, 目前将碱渣+粉煤灰经碱激发后用于固化高含水率 (即含水率 \geq 液限) 软土的应用研究, 尚未见相关报道。

近些年, 通过碱激发粉煤灰来固化高含水率软土的研究越来越多, 主要为室内配比试验及固化作用机制研究。PHETCHUAY 等^[9] 研究了低钙粉煤灰+电石渣地聚合物固化海相软黏土在含水率为 1.0~2.0 倍液限 (65%) 下的强度增长规律。ARULRAJAH 等^[10] 研究了低钙粉煤灰+矿渣地聚合物固化海相软黏土在含水率为 0.75~1.25 倍液限 (50.4%) 下的强度增长规律, 并与同掺量的水泥、石灰的固化效果比较, 得出 5% 粉煤灰+15% 矿渣地聚合物的加固效果最优。吴俊等^[11] 进行了低钙粉煤灰+矿渣地聚合物固化淤泥质软黏土的试验研究,

含水率为 1.15 倍液限 (43.3%), 得出 2% 粉煤灰+18% 矿渣地聚合物的加固效果较好。孙秀丽等^[12] 利用低钙粉煤灰+矿渣+水玻璃固化含水率为 1.10 倍液限 (62.4%) 的疏浚淤泥, 试验发现仅掺入 40% 粉煤灰时强度最低 (28 d 强度为 0.30 MPa), 水玻璃的激发作用不明显, 随着矿渣掺量增加, 固化土强度显著增大。将碱渣应用于软土固化的研究报道相对较少。何俊等^[13] 进行了碱渣+矿渣经水玻璃激发固化疏浚淤泥的试验研究, 试样含水率为 2.0 倍液限 (55.0%), 发现 30% 掺量的碱渣可以有效降低土中含水率, 并对 3 d 龄期的固化土强度影响显著。何俊等^[14] 直接利用 30% 碱渣+矿渣固化含水率为 1.37 倍液限 (58.6%) 的软土, 发现掺入 30% 的碱渣虽然可以明显降低土中含水率, 但固化土中水化产物较少, 在无矿渣条件下呈现塑性破坏特征且强度低。

上述研究表明, 碱激发低钙粉煤灰胶凝材料可用于高含水率软土地基加固, 且往往与矿渣、电石渣等高钙工业固废配合使用, 以获得较高的短期强度; 碱渣对于降低土中含水率具有显著效果, 但单独使用时固化效果较弱。同时还可以看到, 现有的研究多集中在地聚合物固化土强度及变形特征等方面的研究, 但对于基坑止水帷幕等工程中所关注的固化土抗渗性能的探讨很少。与传统水泥、石灰等软土固化剂相比, 基于工业固废的胶凝材料显然具有节省成本且低碳环保的优势。MCLELLAN 等^[15] 研究表明地聚合物生产过程中的温室气体排放量与水泥相比可以减少 44%~64%; PHETCHUAY 等^[9] 研究也表明当固化土强度达到 800 kPa 时, 采用粉煤灰基地聚合物的碳排放量可以比水泥降低 43%。此外, 研究还表明与水泥土相比, 低钙粉煤灰基地聚合物固化土强度具有明显随时间长期增长的特征^[16]。因此, 在“双碳”背景下充分利用碱渣和粉煤灰的各自优势, 实现二者在沿海地区软土

地基加固领域的资源化利用, 具有积极意义。

本文尝试以碱渣 (SR) 和低钙粉煤灰 (FA) 为主要原料, 采用氢氧化钠和硅酸钠溶液复合碱激发制备碱渣-粉煤灰基聚合物 (SR-FAG) 胶凝材料, 开展 SR 与 FA 联合加固高含水率软黏土的试验研究。通过无侧限抗压强度试验和渗透试验, 研究 FA 与 SR 掺量及养护龄期对固化土抗压强度及渗透性的影响, 并采用扫描电镜 (SEM) 试验、X 射线衍射 (XRD) 分析及傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试分别对固化土的微观形貌、物相成分及官能团和元素成键进行分析, 探讨 SR-FAG 固化高含水率软黏土的微观机制。研究将为碱渣及粉煤灰在软基处理中资源化利用提供一定的理论依据。

表 1 试验用土、FA 及 SR 的主要化学成分组成
Table 1 Chemical composition of test soil, FA and SR

原材料	化学组成及含量/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	Cl	LOI
软黏土	63.40	18.12	7.80	2.30	3.10	2.38	1.12	0.67	0.31	—	—
FA	45.45	39.26	3.56	4.38	0.69	0.37	1.37	1.71	—	—	2.71
SR	10.75	3.99	3.56	47.44	—	13.57	—	6.45	0.68	11.46	—

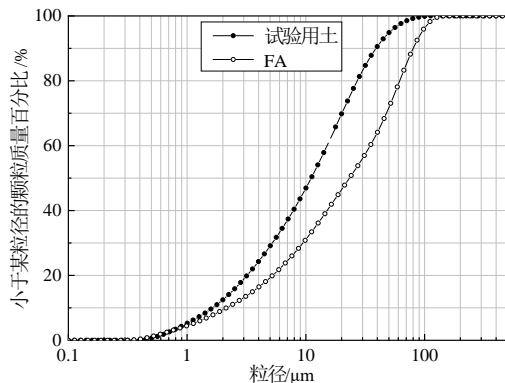


图 1 试验用土及 FA 的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of test soil and FA

(2) 粉煤灰 (FA)

采用浙江绍兴滨海热电公司生产的 II 级粉煤灰, 通过日立 F-7000 型 X 射线荧光光谱仪分析其化学成分, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 粉煤灰中 CaO 含量 < 10%, 而 SiO₂+Al₂O₃ 含量接近 85%, 属于低钙粉煤灰, 即 F 级粉煤灰^[18]。采用马尔文激光粒度仪对粉煤灰进行粒径分析, 得到平均粒径为 11.93 μm, 稍大于土颗粒的粒径, FA 的颗粒级配曲线如图 1 所示。XRD 测试结果显示 2θ 在 16°~27° 范围内存在具有活性的玻璃相, 晶体矿物主要为石英 (Q) 和莫来石 (M), 如图 2 (a) 所示。SEM 分析结果显示 FA 由大量结构致密的球形玻璃体微珠和空心微珠构成, 表面光滑, 如图 3 (a) 所示。

1 试验材料及仪器设备

1.1 试验材料

(1) 试验用土

试验所用的土取自浙江某建筑工地, 取样深度为 5 m 左右, 平均天然含水率 w 为 43%, 液限 ω_L 、塑限 ω_p 分别为 45% 和 23%, 为低液限黏土^[17]。试验用土、FA 及 SR 的主要化学成分组成如表 1 所示, 可见土中富含 Si、Al 元素, 分别占 63.40% 和 18.11%, 但天然土体的 Si、Al 矿物活性通常较低。试验用土及 FA 的颗粒级配曲线如图 1 所示。

(3) 碱渣 (SR)

试验用的 SR 由连云港某碱厂提供, 其主要化学成分如表 1 所示, XRD 与 SEM 测试结果分别如图 2 (b) 和图 3 (b) 所示。可以看出, SR 中 Ca 含量高达 47.44%, 而 Si、Al 含量较低, 主要晶体矿物为碳酸钙 (C)、二水硫酸钙 (G) 和半水硫酸钙 (H); SR 颗粒表面粗糙, 以团粒、粉粒为主, 结构松散。

(4) 碱激发剂

试验采用的碱激发剂 (AA) 由市售工业水玻璃 (NaSiO₃) 溶液和氢氧化钠 (NaOH) 配制而成。NaSiO₃ 溶液由浙江省嘉兴市嘉善县优瑞耐火材料有限公司生产, 比重为 1.5, 模数 (即 SiO₂ 与 Na₂O 的摩尔比) 为 2.3, 其中 SiO₂ 质量百分含量为 29.84%, Na₂O 质量百分含量为 13.36%。NaOH 为上海郡马科技有限公司生产的粒碱, 纯度为 96%, 常温下呈白色半透明均匀粒状或片状固体。

1.2 仪器设备

UCST 采用 UTM5000 型 60 t 电子伺服万能材料试验机; SEM 试验采用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜; XRD 分析采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪; FTIR 测试采用 NEXUS 型傅里叶变换红外光谱仪。渗透试验采用由固结渗透仪改造而成的 IZZYJ-1 型三轴仪 (参见图 4), 通过在钢环侧壁

注入水, 保证钢环和橡皮膜之间的空腔内水压力大于渗透试验采用的流体压力, 以避免发生侧壁渗漏。

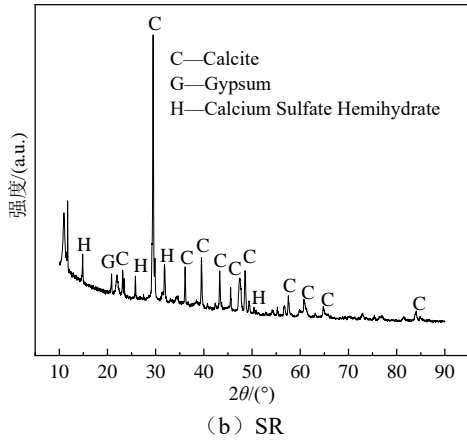
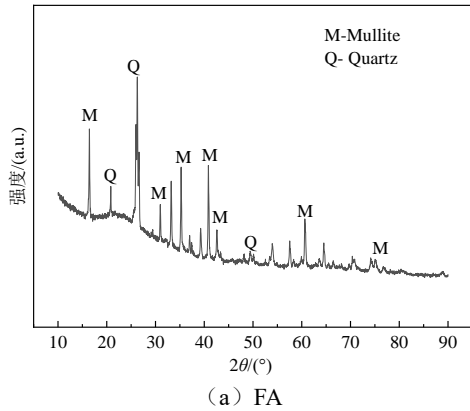


图 2 FA 和 SR 的 XRD 图
Fig. 2 XRD patterns of FA and SR

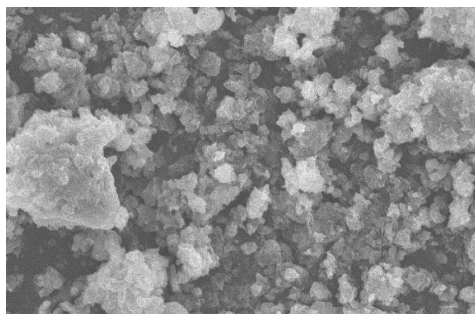
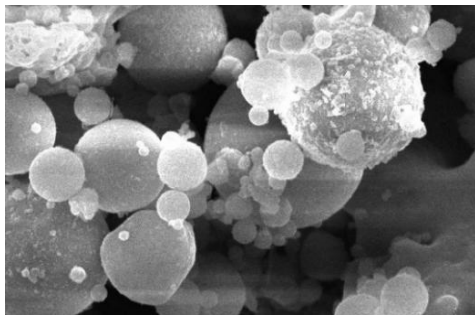


图 3 FA 和 SR 的 SEM 图
Fig. 3 SEM images of FA and SR

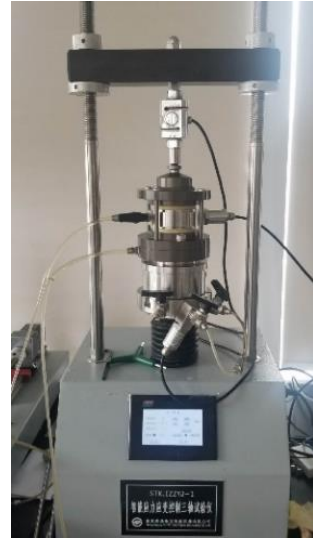


图 4 室内渗透试验装置

Fig. 4 Apparatus for measuring permeability of the soil

2 试验设计及过程

2.1 配合比设计

为研究不同 SR 及 FA 掺量情况下碱渣-粉煤灰基地聚合物 (SR-FAG) 固化土的强度与渗透性能, 共进行 15 组试验, 试验分组及配合比设计如表 2 所示。SR 掺量表示碱渣与被加固湿土的质量比, FA 掺量表示粉煤灰与 (碱渣+湿土) 的质量比, AA/FA 表示碱激发剂与粉煤灰的质量比。

表 2 试验分组及配合比设计

Table 2 Test grouping and mix proportion design

试验 编号	SR 掺量/ %	FA 掺量/ %	AA/FA	试验类型
No.1	10	12	0.5	UCST、PT、SEM
No.2	10	16	0.5	UCST
No.3	10	20	0.5	UCST
No.4	10	25	0.5	UCST
No.5	10	30	0.5	UCST、PT、FTIR、SEM
No.6	20	12	0.5	UCST、PT、SEM
No.7	20	16	0.5	UCST
No.8	20	20	0.5	UCST
No.9	20	25	0.5	UCST
No.10	20	30	0.5	UCST、PT、FTIR、SEM
No.11	30	12	0.5	UCST、PT、SEM
No.12	30	16	0.5	UCST
No.13	30	20	0.5	UCST
No.14	30	25	0.5	UCST
No.15	30	30	0.5	UCST、PT、XRD、 FTIR、SEM

2.2 碱激发剂制备

碱激发剂由 NaSiO_3 溶液和 NaOH 溶液混合而成。结合现有研究^[19-20] 及经济成本考虑, NaSiO_3 溶液与 NaOH 溶液的质量比取为 2, NaOH 溶液摩尔浓度为 7 mol/L (即 7 M)。具体制备过程为:

(1) 先将称量好的水与固体 NaOH 在烧杯中搅拌均匀, 配制浓度为 7 M 的 NaOH 溶液;

(2) 按照 $\text{NaSiO}_3/\text{NaOH}$ 为 2, 将 NaSiO_3 溶液和 NaOH 溶液在烧杯中混合, 并用磁力搅拌器持续搅拌一定时间, 直至混合溶液由浑浊逐渐变得清澈;

(3) 最后用保鲜膜密封烧杯口, 将配制好的碱激发剂静置 24 h 。

2.3 固化土试样制备

固化土试样制备过程如下:

(1) 将试验用土经风干、碾散, 并通过 5 mm 筛, 结合现场软土地基含水率的变化, 配制含水率为 65% (即 $1.4 \omega_L$) 的高含水率湿土;

(2) 将碱渣放入 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 18 h , 并碾散;

(3) 根据试验设计, 分别称取所需要的湿土、碱渣、粉煤灰和碱激发剂用量, 并将碱渣与粉煤灰按一定掺量拌和均匀, 加入到湿土中, 搅拌均匀;

(4) 将碱激发剂加入混合物中, 搅拌 5 min 后, 将其底部混合物进行翻转, 继续搅拌 5 min ;

(5) 将一部分固化土分 3 次装入到 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的立方体试模中, 一部分固化土装入直径 61.8 mm 、高 20 mm 的环刀中, 边装边在振动台上振动, 使其密实, 然后在试样表面封上保鲜膜, 防止水分的散发;

(6) 常温养护 2 d 后, 进行固化土试样脱模, 并转移到标准养护室[湿度 $\geq 90\%$, 温度 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$], 继续养护至规定龄期。

3 固化土的力学性能分析

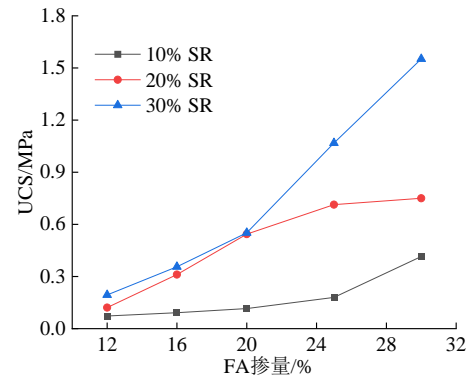
3.1 无侧限抗压强度 (UCS)

(1) FA 及 SR 掺量对 UCS 的影响

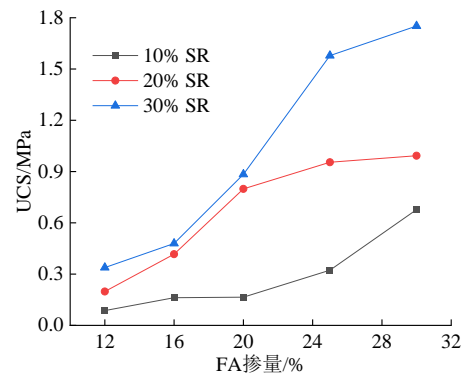
不同 SR 掺量及龄期条件下, SR-FAG 固化土的 UCS 随 SR 及 FA 掺量的变化曲线如图 5 所示。分析图 5 可以得出:

a) 相同 FA 掺量条件下, 总体上 SR 掺量越高时, SR-FAG 固化土的 UCS 值越大, 其中 20% 和 30% SR 掺量对应的 UCS 值明显大于 10% SR 掺量的 UCS 值, 且二者在 FA 掺量低于 20% 时较为接近;

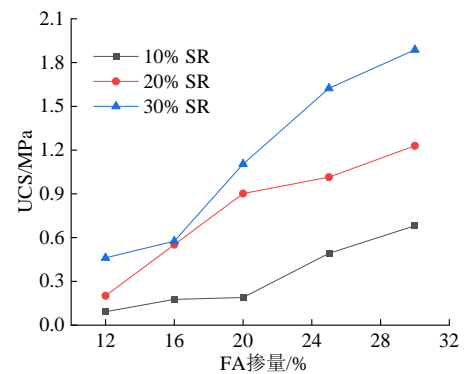
相同 SR 掺量条件下, SR-FAG 固化土的 UCS 值均随着 FA 掺量的增加出现不同程度的增长。可见, SR 掺量和 FA 掺量都对 SR-FAG 固化土的强度增长有明显影响, 且表现为正相关。



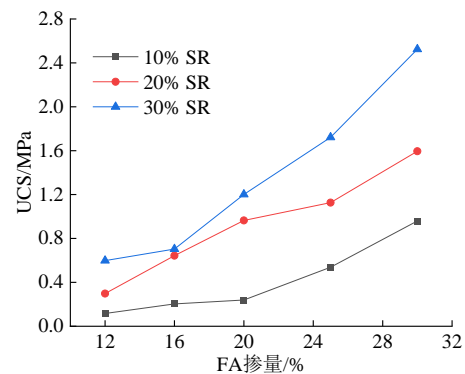
(a) 7 d 龄期



(b) 28 d 龄期



(c) 60 d 龄期



(d) 90 d 龄期

图 5 UCS 随 SR 及 FA 掺量的变化曲线

Fig. 5 Variation of UCS with different SR and FA contents

b) 比较不同龄期下 30%SR 和 10%SR 掺量时 UCS 值随 FA 掺量增加的增长趋势,发现前者 7 d 龄期的 UCS 值增长速率明显大于后者,28 d 的 UCS 值增长速率则表现为前者稍大于后者,而二者 60 d 与 90 d 龄期的 UCS 值增长速率几乎一致。可见,SR 掺量对 SR-FAG 固化土的早期强度增长有较明显的作用,而后期强度增长主要与 FA 掺量有关。文献[21]也指出碱渣与硅酸钠溶液体系反应非常迅速,7 d 龄期的 UCS 值可达到 28 d 的 76%,而粉煤灰对碱渣-粉煤灰-硅酸钠溶液体系的后期强度起关键作用。

c) 进一步比较不同龄期下 30%SR 和 10%SR 掺量时 SR-FAG 固化土 UCS 值随 FA 掺量增加的增长变化过程,发现 UCS 值的增长过程在 FA 掺量为 16%~20%范围内存在一个拐点,总体上当 FA 掺量高于 20%时,UCS 值随 FA 掺量增加而增长速率加快。此外,在 30%SR 掺量条件下,当 FA 掺量为 25%~30%时,SR-FAG 固化土的 28 d 龄期 UCS 值超过 1 MPa (达到 1.6~1.8 MPa)。

(2) 养护龄期对 UCS 的影响

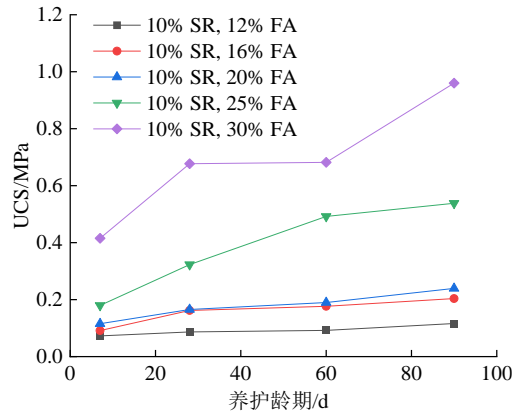
不同 SR 及 FA 掺量条件下,SR-FAG 固化土的 UCS 随养护龄期的变化曲线如图 6 所示。分析图 6 可以得出:

当 SR 掺量为 10%时,7 d 龄期的 UCS 值达到 28 d 的 55.6%~83.9%,90 d 龄期的 UCS 值为 28 d 的 1.26~1.67 倍;当 SR 掺量为 20%时,7 d 龄期的 UCS 值达到 28 d 的 61.1%~75.6%,90 d 龄期的 UCS 值为 28 d 的 1.18~1.61 倍;当 SR 掺量为 30%时,7 d 龄期的 UCS 值达到 28 d 的 57.4%~88.6%,90 d 龄期的 UCS 值为 28 d 的 1.10~1.77 倍。《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012) [22] 给出水泥土 7 d 的 UCS 值为 28 d 的 0.47~0.63 倍,90 d 的 UCS 值为 28 d 的 1.43~1.80 倍。可见,与水泥土相比,不同 SR 及 FA 掺量条件下,SR-FAG 固化土在 90 d 龄期范围内的强度增长规律相似,总体上早期强度增长稍快,而后期强度增长稍慢。

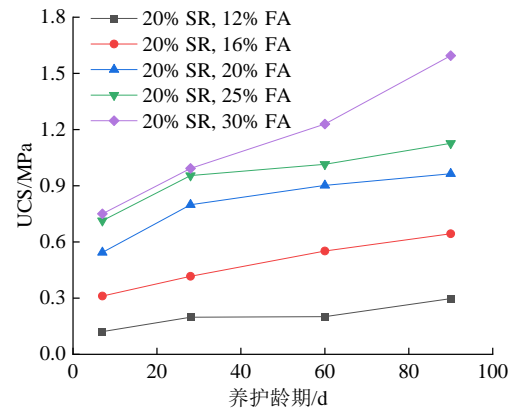
同时可以注意到,当 FA 掺量为 30%时,60~90 d 的 UCS 值都表现出较快的增长趋势。可见,当 FA 掺量达到 30%时,SR-FAG 固化土将获得大幅增长的后期强度,表现出强度随时间持续增大的变化特征。

3.2 渗透性

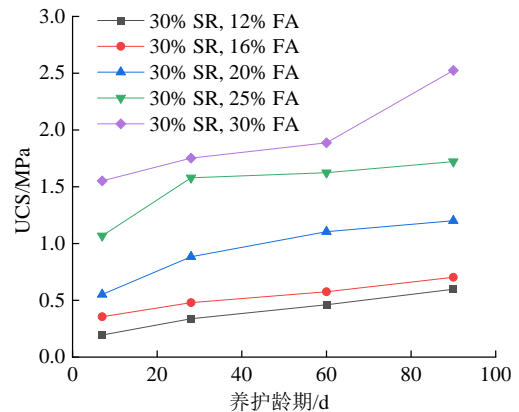
不同 SR 掺量条件下,28 d 和 90 d 龄期 SR-FAG 固化土的渗透系数 k 值随 FA 掺量的变化曲线如图 7



(a) 10% SR



(b) 20% SR



(c) 30% SR

图 6 UCS 随养护龄期的变化曲线

Fig. 6 Variation of UCS with curing time

所示,不同 SR 及 FA 掺量条件下,渗透系数 k 值随养护龄期的变化曲线如图 8 所示。

从图 7 中可以看到,与固化前相比,SR-FAG 固化土的渗透系数降低了近一个数量级,其中 28 d 龄期的 k 值为 $1.852 \times 10^{-8} \sim 2.889 \times 10^{-8}$ cm/s,90 d 龄期的 k 值为 $1.344 \times 10^{-8} \sim 2.415 \times 10^{-8}$ cm/s。在不同 SR 掺量条件下,随着 FA 掺量在 12%~30%范围内逐渐增加,SR-FAG 固化土的 k 值呈现出降低趋势,但变化幅度较小,最大降幅为 35.2%。

从图 8 中可以看到, SR-FAG 固化土的渗透系数主要在 28 d 龄期范围内发生显著降低, 超过 28 d 后 k 值随龄期增加而减小的趋势明显变缓。在不同 SR 掺量下, k 值在 28~90 d 范围内随龄期的降幅为 1.3%~43.3%。这与文献[23-25]中的相关试验结果基本一致。

由此可见, 高含水率软黏土经 SR-FAG 固化处理后, 渗透性可以得到较明显改善。固化土的抗渗性能提高主要在 28 d 龄期内完成, 超过 28 d 后, 养护龄期、SR 掺量及 FA 掺量对于 SR-FAG 固化软黏土渗透性的影响不明显。

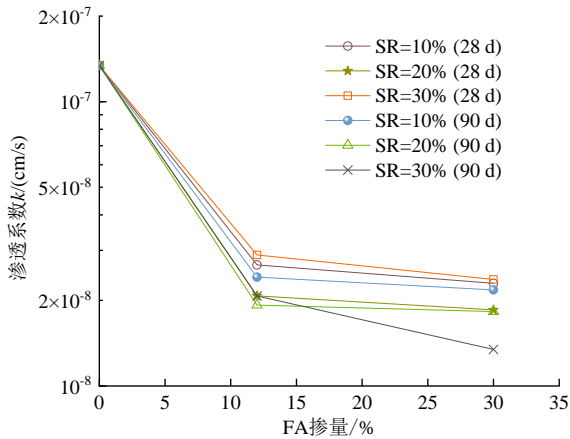


图 7 渗透系数随 FA 掺量的变化曲线

Fig. 7 Variation of permeability coefficient with FA contents

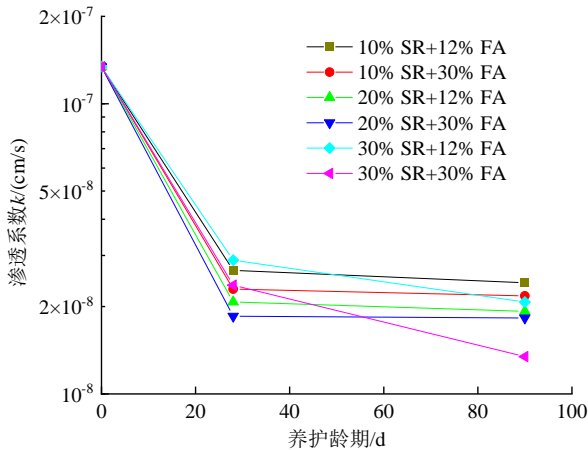


图 8 渗透系数随养护龄期的变化曲线

Fig. 8 Variation of permeability coefficient with curing time

4 固化机理分析

4.1 XRD 分析

利用 X 射线在晶体物质中的衍射效应, XRD 测试可以实现对反应前后固化土中矿物晶体的变化情况。当 SR 及 FA 掺量均为 30% 时, 28 d 龄期的 SR-FAG 固化土与未固化土的 XRD 图谱如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 与未固化土、SR 及 FA 等原材料的矿物晶体相比, 半水硫酸钙 (H) 峰在 SR-FAG 固化土中消失, 而其他矿物峰在 SR-FAG 固化土中仍然存在。可见, SR-FAG 固化土中并未生成新的矿物晶体, 固化土强度的提高和渗透性的降低主要与反应生成的凝胶有关。由于半水硫酸钙吸收土中的水分后变为二水硫酸钙, 导致 SR-FAG 固化土中 H 峰消失, 而固化土中仍存在碳酸钙 (C) 峰、二水硫酸钙 (G) 峰及莫来石 (M2) 峰, 说明 SR 中的碳酸钙和部分硫酸钙未参与反应, 以及部分 FA 颗粒未被完全溶解。

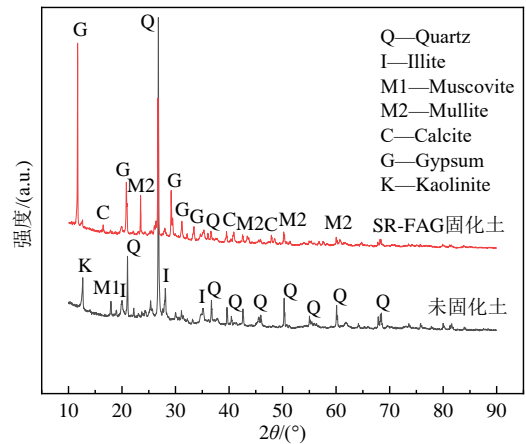


图 9 SR-FAG 固化土与未固化土的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of SR-FAG stabilized soil and unstabilized soil

4.2 FTIR 分析

利用红外射线被物质分子吸收后形成的特定红外吸收光谱, FTIR 测试可以实现对固化土中原材料与反应生成的凝胶物质的定性分析。不同 SR 及 FA 掺量条件下, 28 d 龄期的 SR-FAG 固化土与未固化土的 FTIR 测试结果如图 10 所示。

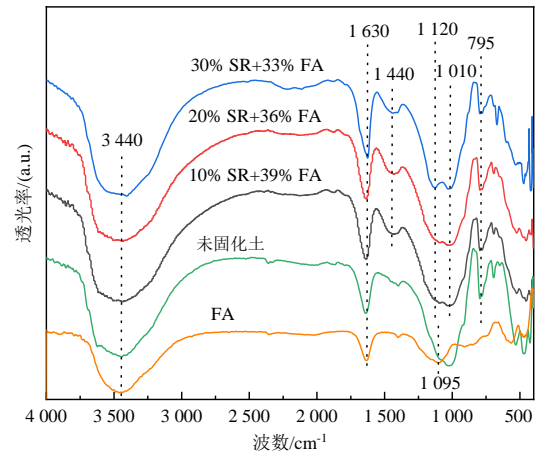


图 10 SR-FAG 固化土与未固化土的 FTIR 测试结果

Fig. 10 FTIR results of SR-FAG stabilized soils and unstabilized soil

结合现有的研究,对图 10 进行分析可得:

(1) SR-FAG 固化土与未固化土在 $3\ 400\sim 3\ 440\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 附近存在明显的吸收峰,为水分子 (H_2O) 的 H-O-H 键的伸缩振动峰^[26-27];

(2) 不同 SR 及 FA 掺量的 SR-FAG 固化土均在 $1\ 440\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现一个吸收峰,为 C-O 键的伸缩振动峰,表征 SR-FAG 固化土中碳酸钙的存在^[26-28];

(3) SR-FAG 固化土在 $1\ 120\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现一个吸收峰,推测为固化土中水化产物 C-A-S-H 凝胶 Si-O-Si 键、Al 键的伸缩振动峰^[28],这与文献[8]指出碱渣中的 Ca^{2+} 参与聚合反应生成含钙类沸石相地质聚合物相对应;

(4) FA 在 $1\ 095\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现吸收峰,经碱激发后向低波数方向移动到 $1\ 010\ \text{cm}^{-1}$ 附近,表明 FA 发生聚合反应形成无定形的 N-A-S-H 凝胶^[27];

(5) SR-FAG 固化土与未固化土均在 $795\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 030\ \text{cm}^{-1}$ 附近存在明显的吸收峰,分别为土中黏土矿物的 Al-O-Si 键不对称伸缩振动和 Si-O-Si 键伸缩振动^[29-30]。

由此可得,SR-FAG 固化土中的 SR 与 FA 在碱激发作用下分别发生了水化反应和聚合反应,生成 C-A-S-H 凝胶与 N-A-S-H 凝胶。固化土中水和黏土矿物的存在来源于土体,碳酸钙则源自 SR,与 XRD 的分析结果相符。

4.3 SEM 分析

利用电子束在试样表面作光栅状扫描及相互作用信号检测,SEM 测试可以实现对固化土中凝胶物质、原材料颗粒及孔隙的微观形态分析。不同 SR 及 FA 掺量条件下,28 d 龄期的 SR-FAG 固化土的 SEM 测试结果如图 11 所示。

从图 11 中可以看到:

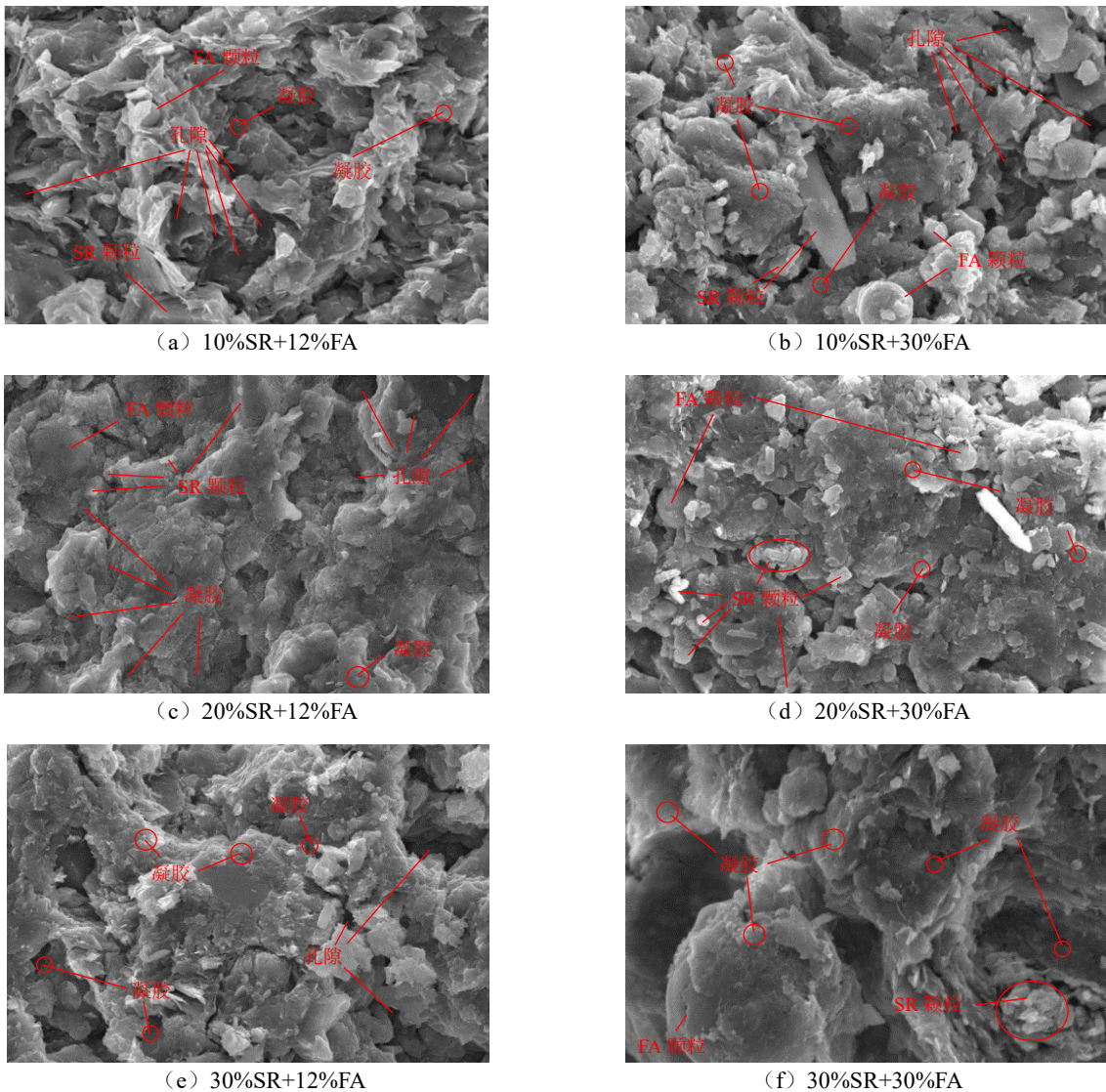


图 11 不同 SR 及 FA 掺量下 SR-FAG 固化土的 SEM 图

Fig. 11 SEM images of SR-FAG stabilized clay with different SR and FA contents

(1) 当 SR 掺量为 10% 情况下, SR-FAG 固化土中的凝胶数量明显较少, 随着 FA 掺量增加, 生成的凝胶有所增加, 将土颗粒包裹, 但不同 FA 掺量下 SR-FAG 固化土中都有较多孔隙分布;

(2) 当 SR 掺量为 20% 情况下, SR-FAG 固化土中有较多凝胶充填, 同时高 FA 掺量 (30%) 下未参与反应的 FA 及 SR 颗粒也相对较多;

(3) 当 SR 掺量为 30% 情况下, SR-FAG 固化土中的凝胶数量明显较多, 但低 FA 掺量 (12%) 时固化土中仍有较多孔隙分布, 而高 FA 掺量 (30%) 时 SR-FAG 固化土中虽然仍存在一些未参与反应的 FA 及 SR 颗粒, 但生成的凝胶更多, 整体结构明显更为致密。

由此可得, SR-FAG 固化土中均生成了一定数量的凝胶物质, 并存在部分未参与反应的 SR 及 FA 颗粒, 与 XRD、FTIR 的分析结果相符; 随着 SR 及 FA 的掺量增加, 总体上 SR-FAG 固化土中生成的凝胶增多, 孔隙分布减少, 凝胶充填土中大孔隙, 导致固化土的强度提高与渗透性降低; 同时固化土中仍然存在相当数量的土团粒内部小孔隙, 无法被凝胶物质充填, 导致渗透性降低幅度趋缓。

4.4 讨论

当 SR 与 FA 颗粒与 65% 含水率的软黏土搅拌混合后, SR 与 FA 颗粒分散在土体中, 主要附着在土颗 (团) 粒表面。SR 中的碳酸钙及半水硫酸钙成分开始吸收土中的水分, 导致混合物中软黏土的含水率有所降低^[14]。

加入 NaSiO₃ 与 NaOH 复合碱激发剂后, NaSiO₃ 溶液与 SR 中的含钙组分迅速发生水化反应, 生成 C-S-H 凝胶^[21], 并充填固化土中的大孔隙, 增强土颗 (团) 粒间的胶结作用, 构成 SR-FAG 固化土的早期强度, 并使其渗透性降低。同时, 水化反应进一步降低了混合物中的自由水含量。随着养护时间的增加, FA 颗粒中的玻璃相 (即无定形的硅铝相) 在 NaOH 溶液激发下逐渐发生溶解, 形成离子态的硅铝单体, 一方面经过聚合反应形成 N-A-S-H 凝胶, 另一方面在 SR 中钙组分的作用下形成一定的 C-A-S-H 凝胶^[31], 进一步充填固化土中的大孔隙, 促使 SR-FAG 固化土的后期强度增长。

另外, 研究表明碱激发剂对粉煤灰基地聚合物的反应过程有较大影响, 采用 NaSiO₃ 溶液与碱溶液复合碱激发可以促进聚合反应^[32-34]。由于 SR 中的含钙组分在水化反应中消耗了部分 NaSiO₃ 溶液, 必然导致 FA 的碱激发效果受到影响, 其影响程度

及影响规律有待进一步研究。与此同时, SR 中的含钙组分与 FA 中的硅铝相在固化软黏土过程中如何相互作用, 也有待进一步探讨。

5 结论

(1) SR 掺量和 FA 掺量均对 SR-FAG 固化土的强度增长有明显的正相关影响, 其中 SR 掺量对 SR-FAG 固化土的早期强度增长作用较明显, 而后期强度增长则主要与 FA 掺量有关。当 FA 掺量超过 20% 时, 增加 FA 掺量可明显提高 SR-FAG 固化土的强度, 其中 25%FA 及 30%SR 掺量条件下, SR-FAG 固化土 28 d 强度可达到 1.6 MPa, 并表现出持续增长的后期强度。

(2) 不同 SR 及 FA 掺量下, SR-FAG 固化土 7 d 的 UCS 值可达到 28 d 的 56%~89%, 而 90 d 的 UCS 值可为 28 d 的 1.10~1.77 倍。与水泥土相比, SR-FAG 固化土的早期强度增长较快, 而后期强度增长相对较慢。

(3) 采用 SR-FAG 固化高含水率软黏土, 渗透系数可降低一个数量级, 最小达到 1.344×10^{-8} cm/s。SR 掺量及 FA 掺量的增加对 SR-FAG 固化土的渗透性影响不显著, 且养护 28 d 后固化土的抗渗性能随时间提高的幅度较小。

(4) SR-FAG 固化高含水率软黏土与 SR 降低土中含水率、改善固化土的颗粒级配相关, 但固化土强度的提升与渗透性的降低主要与 SR 水化反应生成 C-S-H 凝胶、以及 FA 在碱激发后形成硅铝酸盐凝胶有关。C-S-H 凝胶充填固化土中土颗 (团) 粒的大孔隙, 并发挥胶结作用, 导致 SR-FAG 固化土的早期强度增长与渗透性降低, 而后期强度的增长主要来源于硅铝酸盐凝胶产生的进一步胶结作用。

参考文献

- [1] 吴蓬, 张涛, 耿玉倩, 等. 碱渣的理化性质及应用研究进展[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(1): 35-42.
WU Peng, ZHANG Tao, GENG Yu-qian, et al. Physicochemical properties and application research progress of soda residue[J]. China Powder Science and Technology, 2022, 28(1): 35-42.
- [2] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 31-39.
JIANG Long. Comprehensive utilization situation of fly

- ash in coal-fired power plants and its development suggestions[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(4): 31-39.
- [3] 马加骁, 闫楠, 白晓宇, 等. 不同物态配比碱渣-粉煤灰混合料强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(5): 893-900.
MA Jia-xiao, YAN Nan, BAI Xiao-yu, et al. Strength characteristics of soda residue-fly ash mixture with different proportions and phases[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5): 893-900.
- [4] 刘春原, 胡磊, 朱琴, 等. 粉煤灰增强碱渣填垫性能的试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(5): 87-93.
LIU Chun-yuan, HU Lei, ZHU Qin, et al. Experimental study on performance of fly ash reinforced soda residue padding pad[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(5): 87-93.
- [5] 庞云泽, 刘春原, 左丽明, 等. 新型采空区填充注浆材料的研制与性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(7): 2268-2274.
PANG Yun-ze, LIU Chun-yuan, ZUO Li-ming, et al. Experimental study on preparation and properties of new grouting material for goaf filling[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(7): 2268-2274.
- [6] 赵献辉, 刘春原, 左丽明, 等. 碱渣-粉煤灰基新型注浆材料耐久性试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(3): 31-36.
ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, ZUO Li-ming, et al. Experimental research on durability of new grouting materials with soda residue and fly ash matrix[J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(3): 31-36.
- [7] 刘春原, 赵献辉, 朱楠, 等. 粉煤灰基地质聚合物力学性能及碱渣改性机理[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(2): 679-685, 691.
LIU Chun-yuan, ZHAO Xian-hui, ZHU Nan, et al. Mechanical properties of fly ash-based geopolymers and modification mechanism of soda residue[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(2): 679-685, 691.
- [8] 赵献辉, 刘春原, 左丽明, 等. 碱渣改性粉煤灰基地质聚合物材料早期性能和结构研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(4): 113-117.
ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, ZUO Li-ming, et al. Early performance and microstructure of fly-ash-based geopolymeric materials modified by soda residue[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(4): 113-117.
- [9] PHETCHUAY C, HORPIBULSUK S, ARULRAJAH A, et al. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 127-128: 134-142.
- [10] ARULRAJAH A, YAGHOUBI M, DISFANI M M, et al. Evaluation of fly ash- and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(6): 1358-1370.
- [11] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰基地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 647-655.
WU Jun, ZHENG Xi-yao, YANG Ai-wu, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 647-655.
- [12] 孙秀丽, 童琦, 刘文化, 等. 碱激发粉煤灰和矿粉改性疏浚淤泥力学特性及显微结构研究[J]. *大连理工大学学报*, 2017, 57(6): 622-628.
SUN Xiu-li, TONG Qi, LIU Wen-hua, et al. Study of microstructure and mechanical properties of dredged silt solidified using fly ash and slag stimulated by alkali[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(6): 622-628.
- [13] 何俊, 石小康, 栗志翔. 水玻璃-碱渣-矿渣固化高含水率淤泥的强度性质[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 729-736.
HE Jun, SHI Xiao-kang, LI Zhi-xiang. Strength properties of dredged silt at high water content treated with sodium silicate, soda residue and ground granulated blastfurnace slag[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 729-736.
- [14] 何俊, 王小琦, 石小康, 等. 碱渣-矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度与微观特征[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 376-386.
HE Jun, WANG Xiao-qi, SHI Xiao-kang, et al. Unconfined compressive strength and microscopic characteristics of soft soil solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 376-386.
- [15] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs

- and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(9-10): 1080-1090.
- [16] CRISTELO N, GLENDINNING S, TEIXEIRA PINTO A. Deep soft soil improvement by alkaline activation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2011, 164(2): 73-82.
- [17] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [18] American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete: C618—12[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [19] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation[J]. *Acta Geotechnica*, 2013: 395-405.
- [20] 魏威, 高彦斌, 陈忠清, 等. 室温碱激发低钙粉煤灰地质聚合物配比试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(12): 3889-3896.
- WEI Wei, GAO Yan-bin, CHEN Zhong-qing, et al. Experimental study on proportion of room temperature alkali-activated low-calcium fly ash geopolymer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(12): 3889-3896.
- [21] 赵献辉, 刘春原, 刘宇飞, 等. 碱渣-粉煤灰基新型注浆材料固化机理试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(4): 1417-1423.
- ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, LIU Yu-fei, et al. Experimental research on solidified mechanism of new soda residue-fly ash-based grouting materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(4): 1417-1423.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [23] CHEN R, ZHU Y, LAI H P, et al. Stabilization of soft soil using low-carbon alkali-activated binder[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020: 1-13.
- [24] 焦德才, 杨俊杰, 董猛荣, 等. 水泥土的长期渗透特性研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(2): 112-118.
- JIAO De-cai, YANG Jun-jie, DONG Meng-rong, et al. Long-term permeability characteristics of cement soil[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(2): 112-118.
- [25] 侯永峰, 龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000, 34(2): 189.
- HOU Yong-feng, GONG Xiao-nan. The permeability of cement-treated soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2000, 34(2): 189.
- [26] TCHAKOUTE H K, RÜSCHER C H, DJOBO J N Y, et al. Influence of gibbsite and quartz in Kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 107: 188-194.
- [27] GARCÍA-LODEIRO I, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, BLANCO M T, et al. FTIR study of the sol-gel synthesis of cementitious gels: C-S-H and N-A-S-H[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2008, 45: 63-72.
- [28] NWONU D C. Exploring soil geopolymer technology in soft ground improvement: a brief excursion[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 460.
- [29] 吕擎峰, 何俊峰, 王子帅, 等. 黏土矿物与碱激发地聚物的相互作用机理[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1205-1212.
- LV Qing-feng, HE Jun-feng, WANG Zi-shuai, et al. Study on interaction mechanism between clay minerals and alkali activated geopolymers[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1205-1212.
- [30] 郝青丽, 陆路德, 王瑛, 等. 研磨影响粘土结构的红外光谱研究[J]. *光谱实验室*, 1999, 16(5): 540-544.
- HAO Qing-li, LU Lu-de, WANG Ying, et al. FT IR study of the influence of grinding on clay structure[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 1999, 16(5): 540-544.
- [31] 施惠生, 夏明, 郭晓潞. 粉煤灰基地聚合物反应机理及

- 各组分作用的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 972-980.
- SHI Hui-sheng, XIA Ming, GUO Xiao-lu. Research development on mechanism of fly ash-based geopolymer and effect of each component[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(7): 972-980.
- [32] PALOMO A, GRUTZECK M W, BLANCO M T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1323-1329.
- [33] 侯云芬, 王栋民, 李俏, 等. 水玻璃性能对粉煤灰基矿物聚合物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(1): 61-64, 68.
- HOU Yun-fen, WANG Dong-min, LI Qiao, et al. Effect of water glass performance on fly ash-based geopolymers[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(1): 61-64, 68.
- [34] REES C A, PROVIS J L, LUKEY G C, et al. In situ ATR-FTIR study of the early stages of fly ash geopolymer gel formation[J]. Langmuir, 2007, 23(17): 9076-9082.

【简 讯】

岩土工程西湖论坛（2024）：交通岩土工程新进展（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2024）拟定于 2024 年 10 月 18—20 日在杭州花家山庄召开。近年来，我国交通工程快速发展，许多岩土工程新理论、新技术和新材料在我国交通工程建设中得到应用和发展，同时也有诸多技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进交通岩土工程领域技术的进一步发展和提高，更好地为我国交通工程建设服务，岩土工程西湖论坛（2024）的主题定为“交通岩土工程新进展”。本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第 8 册《交通岩土工程

新进展》，并由中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与！

会议时间：2024 年 10 月 18—20 日（18 日报到）

会议地点：杭州花家山庄

会议主题：交通岩土工程新进展

联系方式：宋秀英

（0571-88208775, xysong2020@163.com）

www.geo-forum.cn