

新型复合固化剂固化软土力学性能试验研究^{*}

Experimental Study on Mechanical Properties of Soft Soil Cured by a New Compound Curing Agent

曾 晖¹, 刘通飞², 汤嘉艺¹, 姜祥龙¹

(1. 五邑大学 土木建筑学院, 广东 江门 529020; 2. 庄严建设(广州)有限公司, 广东 广州 511400)

摘 要: 沿海地区软土含量过多时, 无法支撑地面建设, 研究固化剂对软土力学性能的改善效果对其现场应用具有重要意义。采用水玻璃与氢氧化钠作为激发剂, 矿渣和粉煤灰作为固化剂, 研究不同材料掺量对广东沿海地区砂性软土抗压强度的影响。结果表明: 当矿渣掺量超过 30% 后, 矿渣对固化效果的影响变大, 固化土抗压强度大幅度升高; 随着激发剂掺量、水玻璃模数、水胶比和软土含砂率的增加, 固化土抗压强度均先升高后降低, 存在最佳掺量; 固化土抗压强度峰值所对应的各物料掺量: 激发剂掺量为 30%, 水玻璃模数为 1.0, 水胶比为 0.25, 含砂率为 20%。

关键词: 固化剂; 复合作用; 软土; 力学性能

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0059-04

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.011

ZENG Hui¹, LIU Tongfei², TANG Jiayi¹, JIANG Xianglong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. Zhuangyan Construction (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: Coastal areas are unable to support ground construction when there is too much soft soil content, and it is important to study the effect of curing agents on improving the mechanical properties of soft soil for its field application. Using water glass and sodium hydroxide as the exciter and slag and fly ash as the curing agent, the effects of different material admixtures on the compressive strength of sandy soft soils in coastal areas of Guangdong were investigated. The results showed that when the slag doping amount exceeded 30%, the influence of slag on the curing effect became larger and the compressive strength of cured soil increased substantially. With the increase of exciter dosage, water-glass modulus, water-cement ratio and soft soil sand content, the compressive strength of the cured soil all increased firstly and then decreased, and the optimum dosage existed. The peak compressive strength of cured soil corresponds to the dosing of each material: 30% of exciter, 1.0 of water glass modulus, 0.25 of water cement ratio and 20% of sand content.

Keywords: curing agent; compound effect; soft soil; mechanical property

^{*} 基金项目: 广东省教育厅 2021 年度广东高校科研平台和科研项目特色创新项目(自然科学)(2021KTSCX139); 2022 年度江门市基础与应用基础研究重点项目(JZ202214)。

作者简介: 曾 晖(1969—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 建设工程管理、隧道及地下工程。

通信作者: 刘通飞(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 城市交通及基础设施。

收稿日期: 2024-07-03

0 引言

随着沿海地区经济的高速发展，道路工程、风电工程的基础建设越来越多，但沿海土壤多为强度很低、处于流动状态的软土，无法形成稳定的工作平台，难以支撑地面工程建设^[1-2]。为提高软土的承载能力，通常使用固化剂对软土进行固化处理，改善其力学性能^[3-5]。研究人员分析了不同物质对软土的固化效果，邵艳等^[6]采用 Na₂SiO₃ 和 MgO 作为激发剂，研究了粒化高炉矿渣微粉对合肥滨湖新区软土的固化效果，通过组合试验确定了 Na₂SiO₃、MgO 和粒化高炉矿渣微粉的最佳配比为 6.73%、3.90% 和 12.46%；朱剑锋等^[7]采用扫描电镜研究了硫氧镁水泥复合固化剂掺量对沿海风电场滩涂软土抗压强度的影响，发现随着固化剂掺量的增加，滩涂软土的平均接触面积率增大，强度和刚度随之增大；杨望星等^[8]采用粉煤灰基地聚合物作为水泥的替代物加固软土，当粉煤灰基地聚合物替代水泥比例为 40% 时，28 d 抗压强度为 7.5 MPa，满足强度要求，固化剂成本下降为原来的 87%。目前的研究主要集中在固化剂对普通软土力学性能的改善作用，对砂性软土的影响规律研究较少^[9-10]。基于此，以广东沿海地区砂性软土为研究对象，采用水玻璃与

氢氧化钠作为激发剂，结合矿渣和粉煤灰共同构成复合固化剂体系，研究了复合固化剂对软土力学性能的影响，进一步揭示固化剂与软土之间的相互作用机制，丰富和完善土力学的相关理论，为工程建设提供可靠的技术支持和指导。

1 软土力学试验

1.1 材料性能

试验用砂性软土取自广东江门沿海地区，水为自来水，粉煤灰等级为 I，细度为 0.025 mm，比表面积和密度分别为 450 m²/kg 和 2.25 g/cm³，主要成分见表 1；粒化高炉矿渣采用 S95 等级矿渣粉，主要成分见表 1；水玻璃又称泡花碱，SP50 型液体硅酸钠模数为 2.3；固态氢氧化钠纯度大于 99%。固化剂掺量不变，改变矿渣掺入比例由 10% 升高至 80%，变化步长为 10%；水玻璃与氢氧化钠作为激发剂，激发剂掺量按照激发剂质量与固化剂干料质量的比值设置，变化范围为 10%~60%，变化步长为 10%；激发剂掺量不变，改变氢氧化钠掺量配制不同模数的水玻璃，变化范围为 0.4~1.8，变化步长为 0.2；水胶比变化范围为 0.2~0.4，变化步长为 0.05；含砂率变化范围为 10%~30%，变化步长为 5%。

表 1 粉煤灰及矿渣组成成分
Table 1 Fly ash and slag composition

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃	/%
粉煤灰	42.58	43.81	4.02	4.35	2.04	0.65	0.91	0.83	0.38	0.43	
矿渣	46.89	21.46	5.87	8.46	0.68	2.76	1.73	6.31	1.18	1.13	

1.2 试验

按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》规定制备试件，将软土回收烘干后放入粉碎机粉碎，采用孔径为 2 mm 的筛网对软土进行筛选，砂子只进行回收烘干，不再粉碎过筛。粉煤灰和矿渣混合作为固化剂，通常固化剂掺量在 10% 至 30%，此处固化剂掺量取 20%，将软土、砂子、粉煤灰和粒化高炉矿渣按照试验比例放入搅拌器内充分搅拌，固态氢氧化钠和水玻璃按试验比例混合作为激发剂，混合后的激发剂和一定量的水一并放入搅拌器再次搅拌。配制完成的混合物分三次填充进尺寸为 707 mm × 707 mm × 707 mm 的模具中，手动振动消除混合物内部气泡后放入养护室内养护 24 h 后脱模，在养护箱内继续养护至 28 d。试验仪器为电液微机伺服万能

试验机，对养护完成的固化土试件进行无侧限抗压强度试验。试验中，初始软土含砂率为 20%，初始矿渣掺量为 50%，初始激发剂掺量为 40%，初始水玻璃模数为 0.8，初始水胶比为 0.3，控制某物质在复合固化剂中的掺量，得到复合固化剂对软土性能的影响。

2 复合固化剂对软土力学特性的影响

2.1 矿渣掺量对软土无侧限抗压强度的影响

改变矿渣掺量得到软土无侧限抗压强度变化，如图 1 所示。当固化剂总量一定时，矿渣掺量占比越高，固化土抗压强度越大。当矿渣掺量低于 30% 时，固化土抗压强度较低；当矿渣掺量超过 30% 后，矿渣对固化效果的影响变大，固化土抗压强度大幅度

升高；当矿渣掺入比例为 80% 时，固化土抗压强度达到 9.32 MPa。矿渣和软土中的砂子在水玻璃和氢氧化钠的激发下解离生成大量钙离子，与粉煤灰解离生成的硅酸根离子结合形成胶状聚合物，将软土相互粘结后固化提高软土的抗压强度。球状粉煤灰作为固体润滑剂可降低矿渣与软土之间的摩擦力，提高体系的流动性能，促使矿渣分布更均匀，受力更加稳定。矿渣在固化过程中起主要作用，粉煤灰作为润滑剂起辅助作用。因此，固化剂中应加大矿渣掺入比例，控制粉煤灰占比水平有利于提高复合固化剂对软土的固化性能。

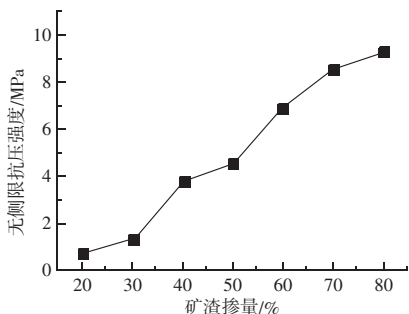


图1 矿渣掺量对软土无侧限抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of slag admixture on the unconfined compressive strength of soft soils

2.2 激发剂掺量对软土无侧限抗压强度的影响

改变激发剂掺量得到软土无侧限抗压强度变化，如图2所示。随着激发剂掺量的增加，固化土抗压强度先升高后降低，激发剂掺量为30%时，固化土抗压强度达到峰值。激发剂的主要作用是激发固化剂生成胶状聚物质，胶状聚物质与软土混合凝结后达到固化效果。激发剂掺量较低时，激发部分矿渣和粉煤灰中的钙离子、硅酸根离子和铝酸根离子，而剩余部分的矿渣和粉煤灰未发生水化反应形成残留，胶状聚合物含量较少对软土的固化效果较弱，固化土抗压强度较低。随着激发剂掺量的增加，残留固化剂进一步解离生成钙离子和硅酸根离子，水化反应产生更多的胶状聚物质提高了固化土的抗压强度。当激发剂掺量进一步增加时，浓度过高的碱性环境大大增强了固化剂的解离与水化过程，导致凝固时间大幅度缩减，固化剂在软土中的分布不够均匀，固化过程中容易产生收缩裂缝，固化土抗压强度降低。因此，激发剂最优掺量为30%。

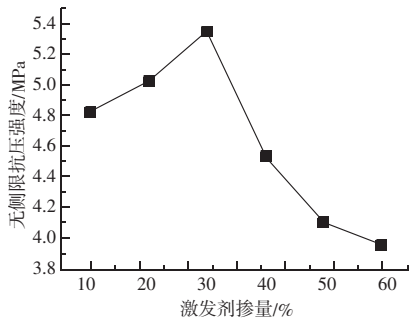


图2 激发剂掺量对软土无侧限抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of exciter dosage on the unconfined compressive strength of soft soils

2.3 水玻璃模数对软土无侧限抗压强度的影响

改变水玻璃模数得到软土无侧限抗压强度变化，如图3所示。随着水玻璃模数的增加，固化土抗压强度先增加后降低，水玻璃模数为1.0时，固化土抗压强度达到峰值。水玻璃模数与激发剂掺量对固化土抗压强度的影响规律相似，均与碱性环境强弱程度有关。当水玻璃模数较低时，钠离子浓度增大，过高的钠离子浓度不利于水化反应的进行。当水玻璃模数过高时，环境的碱性较弱，矿渣、砂子和粉煤灰溶解速度和溶解程度均下降，胶状聚合物含量降低，固化土的抗压强度降低。因此，水玻璃模数最优为1.0。

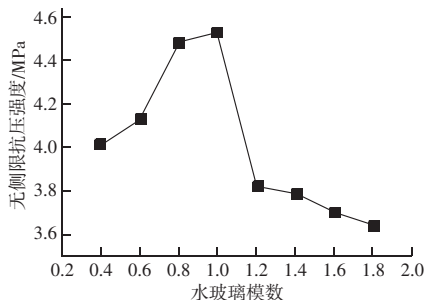


图3 水玻璃模数对软土无侧限抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of water glass modulus on the unconfined compressive strength of soft soils

2.4 水胶比对软土无侧限抗压强度的影响

改变水胶比得到软土无侧限抗压强度变化，如图4所示。固化土抗压强度随着水胶比的增加先升高后降低，当水胶比为0.25时，软土固化后抗压强度最大，固化效果最好。水作为固化剂反应的基本介质，对固化过程具有重要影响。当水胶比过低时，矿渣与粉煤灰溶解后很容易促使水饱和，间接抑制了水化反应的进行，水分过低也不利于胶状聚合物结构的形成，整体流动性也较低，固化剂分布不均

岩土力学

匀，导致固化土抗压强度较低。当水胶比过高时，软土颗粒的间隔较大，水化产生的胶状聚合物无法完全填充其间的间隙，同时水分蒸发过多会产生较多的水空隙，固化土的抗压强度降低。因此，水胶比最优为 0.25。

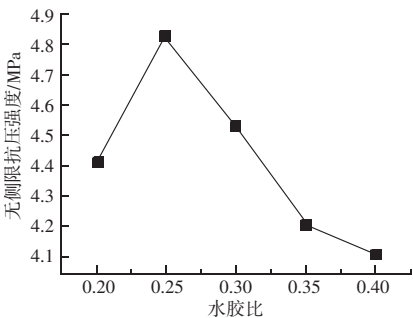


图 4 水胶比对软土无侧限抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of water-cement ratio on the unconfined compressive strength of soft soils

2.5 含砂率对软土无侧限抗压强度的影响

改变含砂率得到软土无侧限抗压强度变化，如图 5 所示。随着软土含砂率的增加，固化土抗压强度先增加后略有降低，含砂率为 20% 时，固化土抗压强度最大。当含砂率较低时，软土含砂量升高可解离出更多的硅酸根离子，有利于胶状聚合物的生成，加强胶状聚合物对软土的胶连作用，提高固化土的抗压强度。当含砂率过高时，固化过程中砂子周围易形成一定的空隙，降低了固化土的抗压强度。同时，过多的砂子降低了体系的流动性，导致固化剂分布不均匀，出现局部抗压强度较弱的情况。

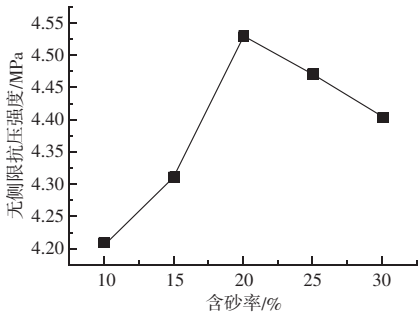


图 5 含砂率对软土无侧限抗压强度的影响
Fig. 5 Effect of sand content on the unconfined compressive strength of soft soils

3 结论

采用水玻璃与氢氧化钠作为激发剂，矿渣和粉

煤灰作为固化剂，研究了不同材料掺量对广东沿海地区砂性软土抗压强度的影响。得到以下结论：

- (1) 固化剂掺量 20% 不变，当矿渣掺量超过 30% 后，矿渣对固化效果的影响变大，固化土抗压强度大幅度升高。
- (2) 激发剂掺量、水玻璃模数、水胶比和软土含砂率对固化土抗压强度的影响规律相似，随着激发剂掺量、水玻璃模数、水胶比和软土含砂率的增加，固化土抗压强度均先升高后降低，存在最大抗压强度。
- (3) 固化土抗压强度峰值所对应的各物料掺量：激发剂掺量为 30%，水玻璃模数为 1.0，水胶比为 0.25，含砂率为 20%。

参 考 文 献

[1] 骆嘉成, 邵吉成. 固结-固化复合技术分层加固淤泥的试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39 (11): 19-24.

[2] 张子龙, 吴大志, 陈柯宇, 等. 脱硫石膏-地聚合物固化软土的抗压强度 [J]. 浙江理工大学学报 (自然科学版), 2023, 49 (1): 140-147.

[3] 沈政, 陈龙, 陈永辉, 等. 滩涂地区软土就地固化技术 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (16): 6815-6822.

[4] 刘振建, 姚达, 邱成春, 等. 水泥-粉煤灰固化海相淤泥质软土力学特性室内试验研究 [J]. 江苏水利, 2024, (11): 34-38.

[5] 徐振红, 杨天风, 江舜根, 等. 水泥-碱渣固化高含水率海相软土力学性质试验研究 [J]. 江苏海洋大学学报 (自然科学版), 2024, 33 (3): 34-42.

[6] 邵艳, 马士雨. 合肥滨湖新区软土固化最优配比的试验研究 [J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30 (3): 18-24.

[7] 朱剑锋, 杨浩, 徐日庆, 等. 硫氧镁水泥固化沿海风电场滩涂软土加固机理及微观特性分析 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (7): 276-283.

[8] 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.

[9] 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): 94-97.

[10] 杨林, 杨建宇, 杨伟军. 新型复合激发剂渣基固化剂加固软土试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (7): 2556-2564.