

地聚物固化渣土室内水 - 力性质试验研究

Experimental Study on Hydraulic - Mechanical Properties of Geopolymer - Solidified Soil

沃留杰¹, 陈磊杰², 朴松浩², 夏亚宁³

(1. 宁波市建设工程安全质量管理服务总站, 宁波 315899; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 宁波 315101; 3. 浙江科技大学, 杭州 310023)

摘要: 我国沿海地区城市化建设过程中产生了大量的工程渣土, 其堆积占地且污染环境, 成为当地政府亟需解决的难题。地聚物作为一种新型绿色胶凝材料, 在渣土再生利用进行固化方面具备一定的潜能。以粉煤灰与矿渣两种工业废渣以及碱激发溶液按照一定比例来制备地聚物, 开展地聚物固化工程渣土的室内水 - 力性质试验研究。结果表明: 在一定的养护龄期下, 地聚物固化土无侧限抗压强度随着地聚物掺量的增加而提高; 当固化剂掺量相同时, 地聚物固化土无侧限抗压强度随着龄期的增加而不断增长; 当添加少量的石灰或水泥后, 改性地聚物 (地聚物 + 水泥或石灰) 固化渣土水稳性得到显著提升。研究可为地聚物在渣土固化工程中推广应用提供技术支撑。

关键词: 地聚物; 粉煤灰; 矿渣; 工程渣土; 水稳性试验; 无侧限抗压强度

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0049-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.009

WO Liujie¹, CHEN Leijie², PIAO Songhao², XIA Ya'ning³

(1. Ningbo Construction Engineering Safety and Quality Management Service Terminal, Ningbo 315899, China;
2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd. Construction Branch, Ningbo 315101, China;
3. Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The urbanization process in coastal areas of our country has generated a large amount of construction waste, occupying land and polluting the environment, becoming a pressing issue for local governments to address. Geopolymer, as a new type of green cementitious material, has the potential for solidifying waste and achieving recycling. Prepares geopolymers with fly ash, slag and alkali-activated solution as raw materials in certain proportions. Indoor water- and strength- property tests of geopolymer-solidified construction waste are conducted, and the results are compared with those of traditional cement and lime solidified waste. The results show that under a specific curing period, the unconfined compressive strength (UCS) of geopolymer-solidified dredged soil increases with higher geopolymer content. When the dosage of the solidifying agent remains constant, the UCS exhibits continuous growth with prolonged curing age. The addition of a small amount of lime or cement significantly enhances the water stability of modified geopolymer (geopolymer + cement/lime) - solidified dredged soil. This study provides technical support for the application and promotion of modified geopolymers in dredged soil stabilization projects.

Key words: geopolymer; fly ash; slag; construction waste; water stability test; unconfined compressive strength

材料科学

0 引言

在沿海地区建设开发过程中存在着大量工程渣土无法被直接开发利用,因其具有含水率高、承载力低、孔隙比大、压缩性强等特点,所以在处理工程渣土时,需要对其加固处理之后才能再利用^[1-2]。

已经有学者利用粉煤灰、矿渣等工业废料合成地聚物加固渣土,提高土体强度,改善土体力学性能,同时降低水泥的使用^[3-4]。易耀林等^[5]和刘诚斌等^[6]采用矿渣固化土体时,均发现矿渣能够显著提升土体的力学性能;俞家人等^[7]对矿渣地聚物固化土体的力学性能开展研究,提出28 d龄期固化土强度经验公式;Cristelo等^[8]和Liu等^[9]利用碱激发粉煤灰来固化土体时,发现碱激发下的粉煤灰能有效地提高土体的力学强度和改善土体内部的微观结构;王东星等^[10]研究得出水玻璃溶液对粉煤灰地聚物固化土体强度的提升显著,并对粉煤灰地聚物改良土体强度的这个过程进行建模分析;王永宝等^[11]采用粉煤灰与矿渣废弃料合成地聚物材料,通过室内试验研究地聚物固化土体的强度、收缩性等宏观特性;刘扬等^[12]采用粉煤灰、矿渣、电石渣与氢氧化钠-水玻璃混合激发剂混合制备地聚物,并通过无侧限抗压强度(Unconfined Compression Strength,简称“UCS”)、压汞和SEM等试验来对该材料性能进行研究;何蓓等^[13]通过UCS试验来探究粉煤灰地聚物宏观力学强度的影响,并结合SEM、X射线衍射等从微观角度揭示粉煤灰地聚物的内在机理。另外,在工程建设中,有时会遭遇恶劣的环境条件。而在现有对地聚物的研究中,发现地聚物在阴暗潮湿环境下固化效果不稳定,其固化强度稍差于水泥固化强度^[14],甚至遇水容易崩解^[15],因此,亟需提高地聚物固化渣土耐水性能。

基于此,采用一定比例的粉煤灰、矿渣在碱激发环境($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$)下合成的地聚物对工程渣土进行固化,通过对固化渣土的UCS试验和水稳定性(Water Stability,简称WS)试验,研究地聚物固化渣土的水-力性能,为今后的地聚物固化渣土技术提供理论指导。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验土样取自宁波地铁7号线工程废弃渣土,其基本物理力学性质指标见表1,渣土的级配曲线如图1所示,土样中值粒径(D_{50})约为0.01 mm (<0.075 mm),属于细粒土。地聚物材料由氢氧化钠、硅酸钠、粉煤灰、矿渣、水泥、石灰组成。粉煤灰为II级粉煤灰,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等;矿渣主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 和 CaO 等氧化物;水泥为42.5级普通硅酸盐水泥;石灰为工业级生石灰;水为去离子水和自来水。

表1 试验土样基本物理力学指标

Table 1 Basic physical properties of soil samples

$\rho/$ (g/cm^3)	$w/$ %	$w_L/$ %	$w_P/$ %	G_s	$E_s/$ MPa	$C_c/$ kPa	$\varphi_c/$ ($^\circ$)
1.67	50.2	41.6	23.1	2.74	2.4	14.1	8.1

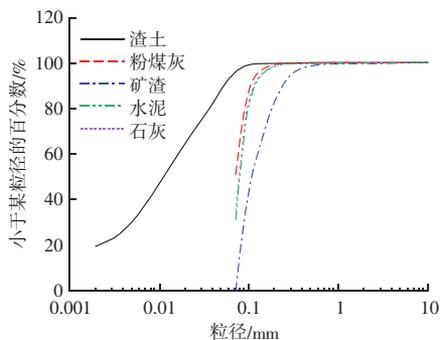


图1 试验材料颗粒级配曲线图

Fig. 1 Particle grading curve of test material

1.2 试验方案

制备地聚物固化渣土试件(直径39.1 mm,高度80 mm)并通过开展UCS试验研究地聚物掺量、养护龄期以及浸水对渣土力学性能的影响规律,在制备试件时均按天然密度 $\rho = 1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 与天然含水率 $w = 50.2\%$ 进行制样。其试验方案见表2。

1.2.1 地聚物制备

称取40 g的氢氧化钠颗粒和1 000 mL的去离子水,制备浓度为10 mol/L的氢氧化钠溶液并进行密封保存。称取指定质量的氢氧化钠溶液,将硅酸钠粉末以3:7的质量比例溶于氢氧化钠溶液之中,制备碱性激发溶液。在地聚物制备时,先将粉煤灰和矿渣按照1:4的质量比例进行混合均匀,再将配制好的碱激发溶液加入搅拌,粉煤灰与矿渣质量之和

与碱激发溶液质量比例为 1:1。具体地聚物各材料组成及配比见表 2。

表 2 试验方案
Table 2 Test program

试验方法	固化剂种类	掺量/%	养护时间/d	养护方式	备注
UCS 试验	地聚物	0.5、1.0、1.5、2.0	14	自然环境养护	不浸水
		0.5	3、7、14、28		
	水泥 石灰	1.5	7		
		地聚物 水泥 石灰	地聚物 1.5+水 泥或石 灰 0.5	7、28	
水稳性 试验	水泥			3 d (12 d)	浸水
	地聚物+水泥			自然环境养护	
	石灰			+4 d (16 d)	
	地聚物+石灰			养护箱养护	
	地聚物				

1.2.2 试件制备

将试验土样放进 105 °C 的烘箱中进行 24 h 烘干, 烘干后用粉碎机将土样进行粉碎并过 2 mm 的筛去除杂质。按照设定的含水率称取一定量的水与土样并将两者搅拌均匀形成工程废弃渣土; 再称取配置计算好的固化材料, 加入到已搅拌均匀的渣土中, 将固化材料与渣土进行混合搅拌均匀。最后利用制样仪器(三瓣模)进行试件的制备。

试件制备后, 对固化土试件进行养护, 其中在无侧限抗压强度试验与水稳性试验的地聚物固化土试验中, 试件的养护方式均采用自然环境养护(将试件放置在自然条件下)。而在水稳性试验的改性地聚物固化土试验中, 试件的养护方式采用自然环境养护和养护箱养护(将试件用保鲜膜包裹并放置在(20±2)°C、相对湿度≥95%的恒温恒湿箱中), 7 d 养护采用为 3 d 自然环境养护+4 d 养护箱养护, 28 d 养护采用为 12 d 自然环境养护+16 d 养护箱养护。

2 试验结果与分析

2.1 UCS 试验

2.1.1 地聚物掺量的影响

制备 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 不同地聚物掺量试件, 在自然环境养护 14 d 后, 对其进行 UCS 试验, 结果如图 2 所示。

地聚物固化土 14 d 无侧限抗压强度随着地聚物掺量的增加而增加, 在地聚物掺量为 2.0% 时, 其

14 d 无侧限抗压强度最高, 达到了 1 024 kPa, 其固化效果最好。这表明地聚物掺量越高, 地聚物固化土无侧限抗压强度越高, 地聚物与土体的反应效果越好, 使土颗粒之间填充得更加紧密, 从而降低土体的孔隙率, 提高土体的强度。

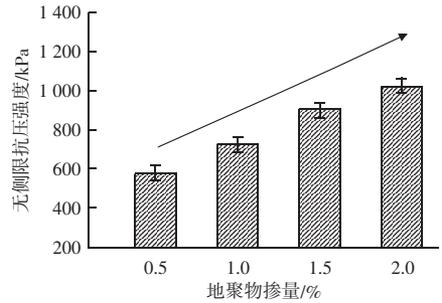


图 2 无侧限抗压强度-掺量关系

Fig. 2 Relationship between unconfined compressive strength and admixture

2.1.2 龄期的影响

固定地聚物掺量为 0.5% 时, 分别在自然环境下养护不同的龄期(3、7、14、28 d)后, 对试件进行 UCS 试验, 结果如图 3 所示。

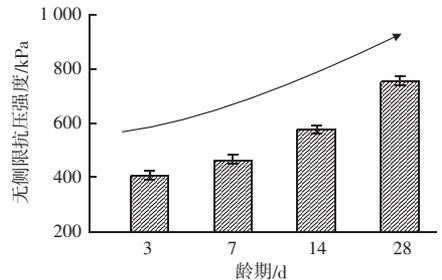


图 3 无侧限抗压强度-龄期关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and age

在 3、7、14 和 28 d 的龄期养护下, 地聚物固化土无侧限抗压强度分别为 405、463、576 和 752 kPa, 与 3 d 相比, 后三种的无侧限抗压强度增长率分别为 14.32%、42.22% 和 85.68%。因此, 较短养护龄期阶段(3、7 d)地聚物固化土无侧限抗压强度增长缓慢, 而长龄期阶段(14、28 d), 地聚物固化土无侧限抗压强度显著提高。

随着龄期的不断增长, 地聚物固化土无侧限抗压强度不断提高, 表明在固化土内部地聚反应不断发展, 新生成的聚合物逐渐填充土体的内部孔隙, 使地聚物固化土逐渐密实, 无侧限抗压强度显著提高。

材料科学

2.2 水稳定性试验

2.2.1 地聚物固化土

为进一步探究地聚物对固化土水稳定性的影响,分别掺入 1.5% 的地聚物、水泥、石灰对渣土进行固化处理,自然环境养护 7 d 后浸水 2 h,进行浸水前后固化效果试验,如图 4 所示。

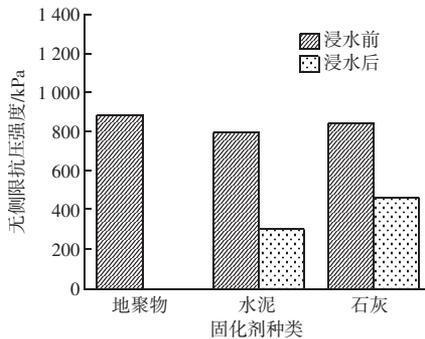


图 4 浸水前后 7 d 固化土的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength of single-mixed cured soil before and after water immersion

浸水前,地聚物固化土 7 d 无侧限抗压强度最高,石灰固化土次之,水泥固化土最低;浸水后,地聚物固化土试件直接在水中发生崩解,其试件形态不成形,无法进行 UCS 试验;在浸水 2 h 后,单掺水泥或石灰的固化土 7 d 无侧限抗压强度有一定程度的下降,但均能保持完整形态,其中水泥固化土 7 d 无侧限抗压强度为 301 kPa,石灰固化土 7 d 无侧限抗压强度为 465 kPa,因此,二者均有一定的耐水性。

2.2.2 改性地聚物固化土

以水泥或石灰为外加剂,制备地聚物+水泥和地聚物+石灰对渣土进行固化,并养护一定龄期(7 或 28 d)后进行 UCS 试验。由于自然环境养护下试件的耐水性不佳,所以在试验中将养护方式改为 3 d (12 d) 自然环境养护+4 d (16 d) 养护箱养护,开展浸水前后固化土的 UCS 试验,并与单掺水泥、单掺石灰或单掺地聚物结果进行对比。其中固化剂掺量统一设定为 2.0%,改性地聚物掺量由地聚物与水泥或石灰组成(地聚物的掺量为 1.5%,水泥或石灰的掺量为 0.5%),且所有掺量均相对于湿土重量而设计。养护 7 d 的改性地聚物固化土浸水 2 h 前后的无侧限抗压强度如图 5 所示。

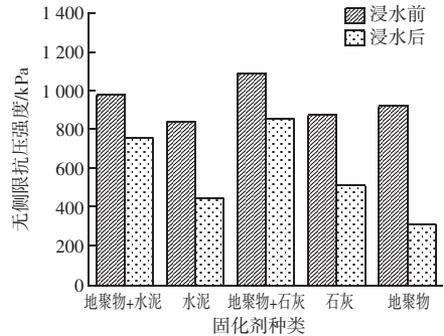


图 5 浸水前后 7 d 固化土的无侧限抗压强度

Fig. 5 Unconfined compressive strength of 7 d cured soil before and after flooding

在浸水前,掺入地聚物+水泥或石灰的固化土 7 d 强度均高于单掺水泥、单掺石灰以及单掺地聚物固化土,这说明相较于其他三种单掺固化剂固化土,改性地聚物可提高固化土 7 d 无侧限抗压强度。当固化剂掺量为 2.0% 时,浸水前,水泥固化土、石灰固化土、地聚物固化土、地聚物+水泥固化土及地聚物+石灰固化土试件的 7 d 无侧限抗压强度分别为 850、881、930、984 及 1 095 kPa;浸水后,五种固化土试件都能保证其完整形态,但 7 d 无侧限抗压强度分别降为 443、512、264、738 及 869 kPa,降幅分别达到了 47.88%、41.88%、71.61%、25.0% 及 20.64%。可知,地聚物+石灰固化土的降幅最小,仅为 20.63%,耐水性能最佳;地聚物+水泥固化土次之,其降幅为 25%,该两种固化土的耐水性均高于其他三种单掺固化剂固化土。另外,单掺地聚物的耐水效果最差,其降幅高达 71.61%。

由图 6 可知,改性地聚物(地聚物+水泥或石灰)的固化土在浸水后 28 d 无侧限抗压强度要高于单掺水泥、石灰或地聚物 28 d 无侧限抗压强度,其中当掺量为 2.0%,掺地聚物+水泥固化土在浸水后的 28 d 无侧限抗压强度为 964 kPa,掺地聚物+石灰固化土在浸水后的 28 d 无侧限抗压强度为 1 140 kPa,这两种固化土浸水后的 28 d 无侧限抗压强度均达到浸水前无侧限抗压强度的 80% 以上(尤其是地聚物+石灰固化土更是高达 85% 以上),且基本能在水中保持稳定。另外,通过与 7 d 龄期下固化土无侧限抗压强度对比,无论是浸水前还是浸水后,固化土 28 d 无侧限抗压强度都得到了一定的增长。

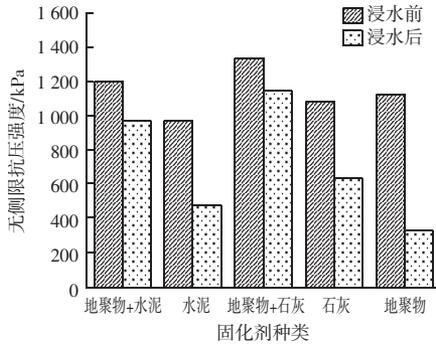


图6 浸水前后 28 d 固化土无侧限抗压强度
Fig. 6 Unconfined compressive strength of 28 d cured soil before and after flooding

3 结论

通过 UCS 试验和水稳定性试验来研究地聚物固化渣土的水 - 力性能, 得到以下主要结论:

(1) 地聚物固化土无侧限抗压强度随着地聚物掺量的增加而增大, 地聚物掺量越大, 其强度就越高。

(2) 随着养护龄期的增加, 地聚物固化土无侧限抗压强度逐渐提高, 且在 3、7 d 这个阶段的养护龄期下无侧限抗压强度增长最慢, 在 14、28 d 这个阶段强度增长最快。

(3) 在 7 d 自然环境养护下, 相较于单掺水泥或石灰, 在浸水前单掺地聚物的无侧限抗压强度最强, 但浸水后单掺地聚物固化土发生崩解, 没有固化强度, 单掺地聚物的耐水性较差。

(4) 不管是浸水前还是浸水后, 改性地聚物的强度均优于单掺水泥、石灰或地聚物。改性地聚物浸水后的 28 d 无侧限抗压强度均达到了浸水前的 80% 以上 (1.5% 地聚物 + 0.5% 石灰固化土更是高达 85% 以上)。

参 考 文 献

- [1] ZHU J F, WANG Z Q, TAO Y L, et al. Macro - micro investigation on stabilization sludge as subgrade filler by the ternary blending of steel slag and fly ash and calcium carbide residue [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 447: 14196.
- [2] 朱剑锋, 汪正清, 陶燕丽, 等. 电石渣 - 草木灰复合固化剂固化废弃软土微观特性研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (10): 180 - 189.
- [3] 丁彩红. 粉煤灰 - 矿渣基地聚物混凝土抗盐冻性能实验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 75 - 80.
- [4] 管柏伦, 郭荣鑫, 齐荣庆, 等. 偏高岭土 - 粉煤灰基地聚物砂浆力学性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (4): 1250 - 1257.
- [5] 易耀林, 卿学文, 庄焱, 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (增刊 2): 829 - 833.
- [6] 刘诚斌, 纪洪广, 刘娟红, 等. 矿渣复合胶凝材料固化滨海盐渍土的试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18 (1): 82 - 87.
- [7] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (2): 364 - 371.
- [8] 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.
- [9] LIU Z, CAI C S, LIU F, et al. Feasibility study of loess stabilization with fly ash - based geopolymer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (5): 04016003.
- [10] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (增刊 1): 3197 - 3205.
- [11] 王永宝, 张脩, 史晨曦, 等. 材料组分对矿渣、粉煤灰和赤泥基地聚物收缩影响试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2022, 53 (5): 955 - 962.
- [12] 刘扬, 陈湘, 王柏文, 等. 碱激发粉煤灰 - 矿渣 - 电石渣基地聚物的制备及强度机理 [J]. 硅酸盐报, 2023, 42 (4): 1353 - 1362.
- [13] 何蓓, 张吾渝, 童国庆, 等. 粉煤灰地聚物的抗压强度及微观结构 [J]. 中国粉体技术, 2023, 29 (2): 38 - 46.
- [14] 李福德. 碱激发地聚物胶凝材料对黄土固化耐久性试验 [J]. 粘接, 2024, 51 (6): 88 - 91.
- [15] 岳子建, 徐金花. 地聚物混凝土的力学性能研究综述 [J]. 四川建材, 2023, 49 (2): 10 - 11.