

黏土流态固化土配合比试验研究

周昌文¹, 吴兴民², 严俊¹, 刘明亮¹, 魏伟², 汪嫦红², 闫革^{2,3}

(1. 武汉博宏建设集团有限公司, 武汉 430050; 2. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 武汉 430050;
3. 武汉钟鑫建设集团有限公司, 武汉 430050)

摘 要: 为实现工程渣土就地再利用, 以武汉某工程基坑开挖黏土为原料土, 采用水泥、粉煤灰作为固化剂配置流态固化土, 对流态固化土的流动性与无侧限抗压强度进行试验研究, 研究不同水固比、固化剂掺量对黏土制备流态固化土工作性能与力学性能的影响, 并通过 SEM 电镜扫描分析其微观结构。结果表明: 固化土流动度值受水固比影响较大, 受固化剂掺量影响较小; 固化土抗压强度随固化剂掺量增大大致呈线性增长趋势, 水固比增大导致强度大幅下降; 水化反应过程中生成大量的 C-S-H、AFt 是提高固化土强度的主要因素; 固化剂掺量 8%、水固比 ≤ 0.68 时, 流态固化土 28 d 强度 ≥ 0.50 MPa, 微观结构致密, 推荐使用该配合比作为施工最佳配合比; 本研究成果可为武汉地区黏土的资源化处理与工程应用提供理论依据和技术参数。

关键词: 流态固化土; 配合比设计; 流动值; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU44 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0032-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.006

Research on Mixing Ratio Test and Engineering Application of Fluid Solidified Soil based on Clay

ZHOU Changwen¹, WU Xingmin², YAN Jun¹, LIU Mingliang¹, WEI Wei², WANG Changhong², YAN Ge^{2,3}

(1. Wuhan Bohong Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China

2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

3. Wuhan Zhongxin Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: To achieve in-situ reuse of engineering sediment, fluidized solidified soil was prepared using excavated clay from a foundation pit in Wuhan as raw material, with cement and fly ash as solidifiers. Experimental studies were conducted on the fluidity and unconfined compressive strength of the flowable solidified soil. The effects of different water-to-solid ratios and solidifier contents on the workability and mechanical properties of the flowable solidified soil prepared from clay were investigated, and its microstructure was analyzed by SEM scanning. The results show that the fluidity of the solidified soil is significantly influenced by the water-to-solid ratio but less affected by the solidifier content. The compressive strength of the solidified soil increases approximately linearly with the increase of solidifier content, while a higher water-to-solid ratio leads to a significant decrease in strength. When the solidifier content is 8% and the water-to-solid ratio is ≤ 0.68 , the 28-day strength of the flowable solidified soil reaches ≥ 0.50 MPa, and the microstructure is very dense, which is recommended as the optimal

项目来源: 武汉市城建局科技计划项目 (202042)。

作者简介: 周昌文 (1990—), 男, 学士, 工程师, 研究方向: 市政施工技术研究。

通信作者: 吴兴民 (1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 固废资源化利用研究。

收稿日期: 2025-01-20。

mix proportion for construction. The research provides theoretical basis and technical parameters for the resource utilization and engineering application of clay in the Wuhan region.

Key words: fluidized solidified soil; mix ratio; flow value; compressive strength; microstructure

0 引言

随着城镇化进程的不断推进，我国在公路、城市建设等各类建设工程中，每年产生的渣土、淤泥达数十亿立方米^[1]。然而这些弃土绝大部分并未得到有效回收和利用，占用大量土地，在外运、填埋过程中易对周围环境造成严重影响^[2]。工程渣土资源化再生利用成了解决工程弃土消纳问题的研究重点，其中使用土壤固化剂对工程渣土改良后形成的预拌流态固化土，可满足复杂的施工要求，具有良好应用前景。

近年来，国内针对预拌流态固化土性能及其工程应用的相关研究日益增多。周永祥等^[3-5]介绍了固化土及预拌固化土原理，并对预拌固化土的抗压强度、收缩等基本性能进行总结；林泓民等^[6-7]分析了水灰比、灰土比对流态固化土流动度和无侧限抗压强度的影响，并基于砂质土和尾泥给出现场最佳配比；冯忠民^[8]开展大连湾海底疏浚淤泥固化试验研究，结果表明，采用水泥和粉煤灰作为复合固化剂，当固化剂掺量不低于 10% 时，淤泥固化后的强度满足基坑回填等工程应用的技术要求；余海燕等^[9]对生土的改性开展试验研究，结果表明，在生土中掺入水泥、矿渣、粉煤灰等材料可以显著提高生土材料的力学性能及耐久性；赵明等^[10]通过分析用水量、水泥浆体量对混凝土流动性的调节规律，结合流变学揭示混凝土流动性调控主要参数，认为砂浆流动度与混凝土坍落度两者之间紧密相关；吴跃东等^[11]以废渣渣土为原料，掺入水泥-粉煤灰复合固化剂后制备流态固化土，并通过动三轴试验验证了渣土改良流态固化土满足路用动力性能要求；刘丽娜等^[12]通过试验和理论分析研究了固化土的强度特征和固化机制，并建立了考虑不同掺入比的强度发展预测模型；张会丽等^[13]开展了不同配合比的预拌流态固化土抗压性能试验研究，结果表明，羧磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠可明显提高固化粉体抗压强度；周海成等^[14]采用雄安新区综合管廊开挖

土为原材料，通过配合比试验得到流态水泥固化土最优配合比，并将该配合比成功应用于现场管廊回填；朱龙飞等^[15]通过试验研究了粉煤灰替代水泥对流态固化土强度的影响，结果表明，当粉煤灰与水泥质量比为 2 : 8，即粉煤灰替代水泥量为 20% 时，流态固化土的强度最高。

虽然国内对预拌流态固化土的性能和工程应用开展了广泛研究，鉴于各地土质特征差异较大，针对武汉地区黏性土的流态固化土现场应用研究尚不充分。为此，按照武汉某工程基坑土方内转特点和地下室回填需求，就地制备流态固化土进行地下室底板高度差的回填。根据流动性和无侧限抗压强度，提出流态固化土施工推荐最佳配合比，并验证现场流态固化土施工工艺可行性。

1 试验方案

1.1 原材料性能

试验渣土为武汉某项目基坑渣土，以黏土为主，主要物理性质见表 1。

表 1 渣土主要物理性能指标				
Table 1 Main physical technical indexes of muck				
液限 /%	塑限 /%	最优含水率 /%	最大干密度 / (g/cm ³)	烧失量 /%
29.20	16.80	18.89	1.76	6.2

固化剂主要原材料为水泥、粉煤灰。采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥，其主要物理性能指标见表 2；采用 II 级粉煤灰。水泥、粉煤灰的具体成分见表 3。

表 2 水泥主要物理性能指标						
Table 2 Main physical technical indexes of cement						
细度/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
10	193	262	34.0	54.4	6.1	9.0
合格						

表 3 固化剂主要矿物成分及含量							
Table 3 Main mineral composition of curing agent							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	其他
水泥	58.01	23.26	10.52	2.80	3.11	1.55	0.75
粉煤灰	10.06	42.43	28.96	9.70	1.22	1.79	5.84

1.2 配合比设计

流态固化土配合比设计满足 T/BGEA 001—2019

材料科学

《预拌流态固化土填筑工程技术标准》，流态固化土流动性良好，流动值 160~200 mm。此外，流态固化土固化后应满足工程设计抗压强度要求，28 d 抗压强度设计值取 0.40 MPa。

根据黏土的性质和工程要求设计配合比，固化剂中粉煤灰与水泥质量比为 2:8，水固比分别为 0.60、0.64、0.68、0.72，固化剂掺量分别为 4%、6%、8%、10%、12%。

1.3 试验方法

制备试样：搅拌设备采用行星式搅拌机。制备试样时，将土料与固化剂混合均匀，倒入行星式搅拌机中，然后将水多次加入搅拌机中进行搅拌，搅拌 3 min 至浆液呈均匀状。将浆液倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试模中，每组试验共制作 6 个试样。

试验方法：流动值以流态固化土拌合物在高 80 mm，内径 80 mm 模具内，在自重作用下扩展的直径表征。无侧限抗压强度测试参照 JGJ/T 233《水泥土配合比设计规程》分别养护 7、28 d 后，采用电子万能试验机测试。采用扫描电镜仪观察样品微观结构，样品在扫描前需对待观测断面喷金，以避免影响图象质量。

2 试验结果分析

2.1 流动性能分析

由图 1 可知，水固比对流态固化土的流动性影响较大，保持固化剂掺量不变，试样的流动值随水固比增大而大幅提升；固化剂掺量对流态固化土的流动性影响较小，当固化剂掺量从 4% 增加至 6% 时，

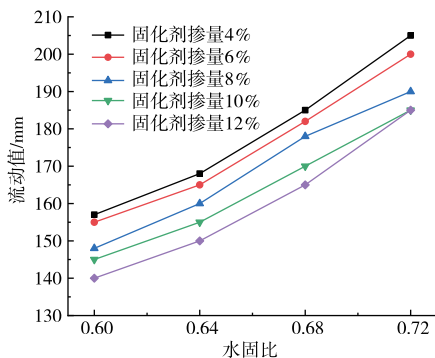


图 1 水固比和固化剂掺量对流态固化土流动性的影响
Fig.1 Effect of water-solid ratio and curing agent content on fluidity of convection-solidified soil

固化剂掺量增加对试样流动值无明显影响，固化剂掺量增加至 8%、10%、12% 时，其流动值在一定范围内出现降低情况。

2.2 力学性能分析

由图 2 可知，水固比越小、固化剂掺量越大，试样的 7、28d 抗压强度越大。当水固比一定时，随固化剂掺量的增加，试样抗压强度大致呈线性增长趋势。其中水固比为 0.64 时，固化剂掺量从 4% 提高至 12%，7 d 强度从 0.18 MPa 提高至 0.68 MPa，28 d 强度从 0.22 MPa 提高至 1.02 MPa，说明胶凝材料的占比对流态固化土的强度具有较大影响，流态固化土的强度与固化剂掺量成正相关关系。

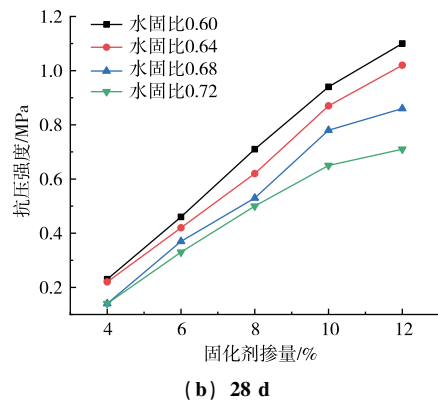
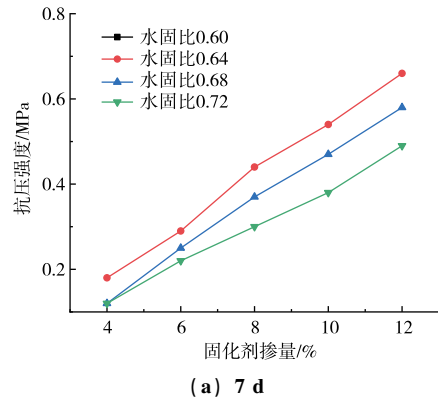


图 2 水固比和固化剂掺量对流态固化强度的影响
Fig.2 Effect of water solid ratio and curing agent content on convective curing strength

固化剂掺量为 4% 时，各组流态固化土试样的 7、28 d 强度均较低。当固化剂掺量为 6%~12% 时，流态固化土试样 7 d 抗压强度范围为 0.23~0.76 MPa，28 d 强度范围为 0.33~1.10 MPa，各试样的 7 d 抗压强度基本可达到 28 d 的 70%；当固化剂掺量 ≥ 8% 时，不同流动值对应的流态固化土的 28 d 强度均大

于规范 0.40 MPa 回填要求, 其中水固比 0.68、固化剂掺量 8% 的试件 28 d 抗压强度为 0.53 MPa, 推荐该配合比作为肥槽、基坑、孔洞等部位回填施工最优配合比, 当回填工程对强度要求较高时, 建议适当降低水固比或将固化剂掺量提高至 10%。

2.3 SEM 微观结构分析

由图 3 (a)、(b) 可知, 未经固化的纯生土内部结构疏松, 土粒松散, 颗粒之间存在较多孔隙和不规则杂质; 由图 3 (c)、(d)、图 3 (e)、(f) 可知, 掺入固化剂后, 土体颗粒已基本粘结成一个整体, 且在固化土表面可以看见明显针棒钙凡石 (AFt)、水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶物质发生黏连搭

接, 这些水化产物填充土体骨架间的孔隙并胶结成致密的空间网状结构, 是固化土强度提升的主要原因。

此外, 对比不同掺量组的 SEM 图可以发现, 固化剂掺量为 12% 的试件图 3 (e)、(f) 表面土体结构更加密实, 土体颗粒表面的针状钙凡石和一些絮凝状物质明显多于固化剂掺量为 8% 的试件图 3 (c)、(d), 内部土壤颗粒被充分黏结。上述分析表明, 随着固化剂掺量提高, 流态固化土养护期间的水化反应越充分, 流态固化土微观结构越致密, 力学强度显著提高。

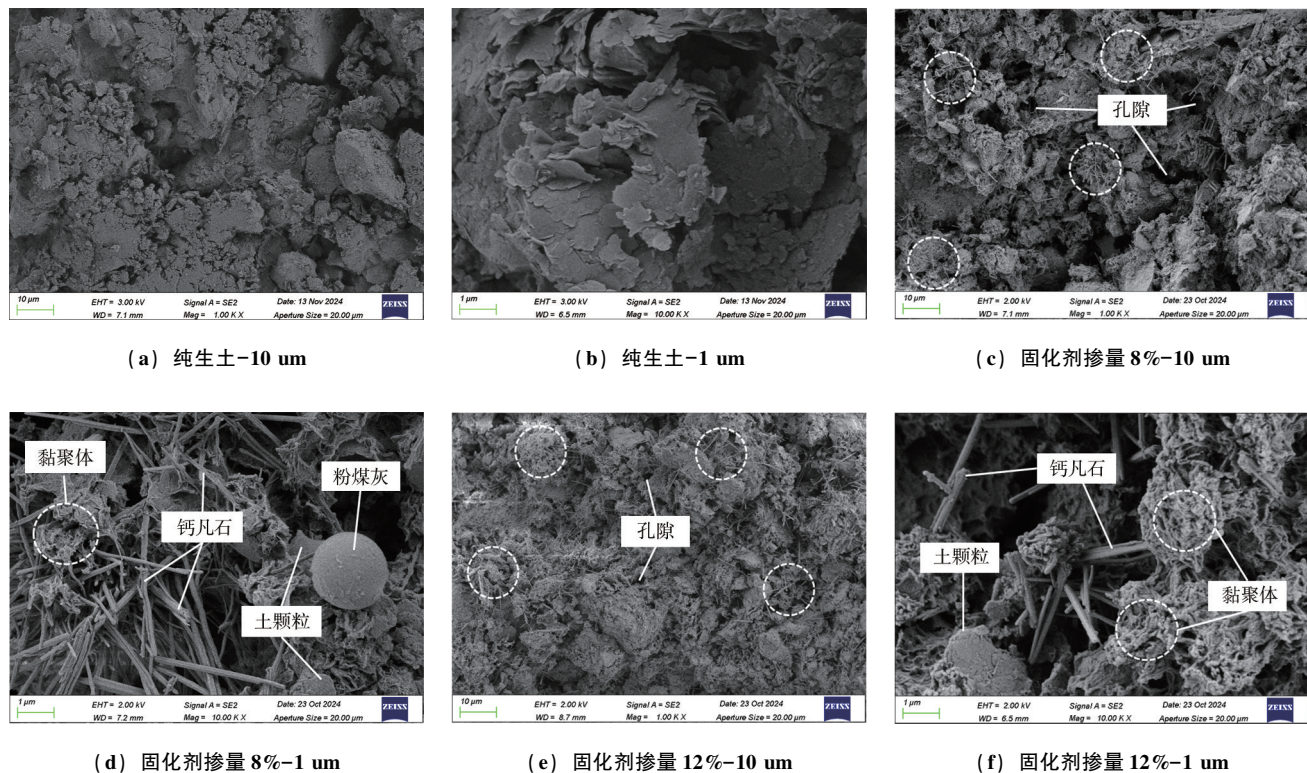


图 3 流态固化土试样 28 d 龄期 SEM 图

Fig. 3 SEM image of 28 d age of fluid-cured soil sample

3 工程应用

根据室内试验结果和实际项目需求, 采用固化剂掺量 8%、水固比 0.68 作为流态固化土配合比, 在某文体活动中心及配套停车设施项目地下室进行回填。地下室底板回填固化土的无侧限抗压强度设计值为 28 d 无侧限抗压强度 ≥ 0.4 MPa。

施工过程中随机取样, 测定流动值为 190 mm; 制作试块进行同条件养护, 经检测 28 d 抗压强度分别为 0.52 MPa, 满足设计施工要求。

4 结论

通过开展水固比、固化剂掺量对武汉地区基坑黏土制备的流态固化土性能影响的研究, 得到以下

材料科学

结论:

(1) 预拌流态固化土的流动性受水固比和固化剂掺量共同影响。其中水固比对流态固化土的流动性影响较大,通过调整水固比可以较好的控制流态固化土的流动性能。

(2) 水泥-粉煤灰型固化剂能够有效提高预拌流态固化土抗压强度,随固化剂掺量增大,流态固化土的各龄期强度大致呈线性增长趋势。

(3) 采用水泥-粉煤灰型固化剂的流态固化土,水化反应过程中生成大量的 C-S-H、AFt 是提高固化土强度的主要因素,填充土体骨架间的孔隙并胶结成致密的空间网状结构,共同改善土体的工程性能。

(4) 当固化剂掺量 $\geq 8\%$ 时、水固比 ≤ 0.68 时,流态固化土的 28 d 抗压强度大于 0.50 MPa,满足规范 0.40 MPa 设计要求,可根据工程实际需求在此基础上调整施工最优配合比。

参 考 文 献

- [1] 宋勤奋,朱子杰,王佳鑫,等. 城市工程渣土资源化利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39 (8): 90-92.
- [2] 李伟,陈刚,曹太波,等. 地铁盾构渣土资源化碳排放强度与减碳潜力研究[J]. 环境工程, 2023, 41 (7): 53-60.
- [3] 周永祥,王继忠. 预拌固化土的原理及工程应用前景[J]. 新型建筑材料, 2019, 46 (10): 117-120.
- [4] 苏悦,闫楠,白晓宇,等. 预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J]. 材料导报, 2024, 38 (9): 66-72.
- [5] 金茂祥,黄志坚. 工程废弃泥浆固化土路用性能研究[J]. 地基处理, 2025, 7 (1): 83-89.
- [6] 林泓民,曹天赐,彭劼. 流态固化开挖砂质土回填基坑侧壁的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 14-19.
- [7] 吉俊豪,宋少民,李劭,等. 利用湿法生产机制砂尾泥制备流态固化土试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 18-24.
- [8] 冯忠民. 大连湾海底淤泥流动固化土室内试验研究[D]. 保定: 河北大学, 2020.
- [9] 余海燕,程海平,石峻尧,等. 改性材料对生土物理力学性能的影响及作用机理[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (5): 1443-1449.
- [10] 赵明,李仰根,张晓乐. 混凝土流动性调控关键参数研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2015 (5): 11-14.
- [11] 吴跃东,张瑞星,刘坚,等. 渣土改良流态固化土路用动力特性研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 100-104.
- [12] 刘丽娜,高文生,徐彤,等. 预拌流态固化土强度特征及其模型研究[J]. 建筑科学, 2023, 39 (9): 98-103.
- [13] 张会丽,霍光. 改性流态固化土抗压性能试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 89-93.
- [14] 周海成,单宏伟,冯良平,等. 基于粉质黏土的流态水泥固化土配合比试验及应用研究[J]. 公路, 2022, 67 (10): 374-378.
- [15] 朱龙飞,徐云飞,王国宇. 建筑垃圾渣土制备流态固化土及其性能研究[J]. 市政技术, 2023, 41 (5): 246-250.