

超早强流态固化土力学性能与施工工艺研究

——以无锡通江大道快速化改造项目为例

过彬¹ 陆朝新¹ 夏涛^{2*}

1. 无锡大诚建设有限公司, 江苏 无锡 214000

2. 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000

[摘要]针对市政快速路箱涵及桥台台背回填工程中对材料自流平、自密实及超早期承载能力的综合要求,依托无锡市通江大道快速化一期工程,开展超早强流态固化土的力学性能与施工工艺研究。以工程渣土和灌注桩泥浆为主要原料,系统研究不同固化剂掺量条件下流态固化土的流动性能及早期与后期无侧限抗压强度发展规律。结果表明,在泥浆含水率约140%的条件下,固化剂掺量对流动度影响较小,材料均能满足自流平与自密实施工要求;当固化剂掺量达到约12%时,流态固化土早期强度发展出现明显跃升,12h内即可形成稳定结构,1d无侧限抗压强度超过150kPa,7d强度可达1.3MPa以上。结合工程实际,提出引入强度富裕系数的配合比设计思路,并确定固化剂合理掺量区间。通过近10000m³的大体积连续浇筑工程应用验证,结果表明该超早强流态固化土具有硬化快、强度稳定、施工效率高等优点,可为类似市政工程回填材料的选型与设计提供工程参考。

[关键词]流态固化土; 超早强; 无侧限抗压强度; 配合比设计; 市政工程回填

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18610 中图分类号: U414 文献标识码: A

Study on the Mechanical Properties and Construction Techniques of Ultra-Early-Strength Flowable Solidified Soil —A Case Study of the Tongjiang Avenue Rapid Upgrade Project in Wuxi

GUO Bin¹, LU Chaoxin¹, XIA Tao^{2*}

1. Wuxi Dacheng Construction Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: In order to meet the increasing demands for self-leveling performance, self-compaction ability, and ultra-early bearing capacity in backfilling works of box culverts and bridge abutments in urban expressway projects, an experimental and engineering study on ultra-early-strength flowable solidified soil was conducted based on the Tongjiang Avenue Rapid Upgrade Project in Wuxi. Engineering spoil soil and bored pile slurry were used as raw materials, and the effects of curing agent dosage on flowability and unconfined compressive strength at early and later ages were systematically investigated. The results indicate that under a slurry water content of approximately 140%, the curing agent dosage has a limited influence on flowability, and all mixtures satisfy the requirements of self-leveling and self-compacting construction. When the curing agent dosage reaches about 12%, a significant improvement in early strength development is observed: a stable structural skeleton forms within 12 h, the 1-day unconfined compressive strength exceeds 150 kPa, and the 7-day strength reaches more than 1.3 MPa. Based on engineering practice, a mix design approach incorporating a strength safety factor is proposed, and an optimal dosage range of the curing agent is determined. Large-scale field application involving nearly 10,000 m³ of continuous casting demonstrates that the proposed ultra-early-strength flowable solidified soil exhibits rapid hardening, stable strength development, and high construction efficiency, providing practical reference for similar municipal backfilling projects.

Keywords: flowable solidified soil; ultra-early-strength; unconfined compressive strength; mix design; municipal engineering

引言

随着城市快速路、立交及地下空间工程的快速发展,箱涵、桥台及管廊等结构物基坑回填对材料性能提出了更高要求。一方面,回填材料需具备良好的自流平与自密实性能,以适应狭窄空间和复杂结构;另一方面,工程普遍工期紧张,对回填材料的早期甚至超早期强度提出了明确要求。

传统回填材料如级配砂石、灰土及轻质泡沫混凝土在施工效率、质量稳定性及环境友好性方面均存在一定局限。近年来,流态固化土因其可泵送、自密实和可利用固废资源等优势,逐渐在市政工程中得到应用^[1,2]。然而,现有研究和工程实践多集中于常温条件下的早期强度发展,对超早强流态固化土在大体积、连续浇筑条件下的力学性能

与施工工艺研究仍相对不足。

基于此,本文依托无锡市通江大道快速化一期工程,针对箱涵肥槽与桥台台背回填的工程需求,研究超早强流态固化土的配合比设计、力学性能及施工工艺,并通过现场大规模应用验证其工程适用性。

1 工程概况与技术要求

1.1 工程概况

通江大道快速化一期工程 TJ12 标项目位于江苏省无锡市锡山区,南起规划天池路,向北上跨 G312 地面道路后落地,止于沪宁高速无锡出入口。项目起讫里程为 K2+252~K3+644.217,地面道路设计长度约 1392m,宽度为 49m~62.25m,采用双向六车道设计,设计时速 80km/h。作为无锡市重点市政工程,且地处城市门户位置,本项目意义重大、关注度高,对文明施工与标准化建设要求极为严格。为确保项目高质量顺利推进,桥台台背及箱涵回填首次采用超早强流态固化土,替代传统轻质泡沫混凝土。这也是该新型材料首次应用于无锡市重点市政主干线路程。本次超早强流态固化土填筑量近 1 万 m³,应用于主线桥台落地挡墙回填及双通道、四通道箱涵基坑回填。项目面临设计强度高、快硬早强要求严、连续浇筑体量大、施工跨度大、工期紧、综合要求高等挑战。

1.2 技术要求

由于回填区域场地狭小、交叉作业频繁且工期紧,材料除满足强度指标外,还需具备“超早强转序”能力(尽快上人、尽快通行设备、尽快覆土进入上部结构施工)。具体技术要求如下:

- (1) 具备良好的自流平、自密实性能,流态固化土初始流动度不低于 180mm。
- (2) 设计 7d 无侧限抗压强度不低于 0.8MPa。
- (3) 浇筑后 6~12h 具备上人及设备通行能力,1d 无侧限抗压强度不低于 150kPa。
- (4) 连续泵送、大体积施工条件下不开裂、少泌水,满足城市核心区绿色施工标准。

2 材料与力学性能测试

2.1 原材料与试验方法

本次项目采用现场工程渣土及灌注桩泥浆作为土源,如图 1 所示。根据设计要求,设定泥浆比重 1.35~1.4,泥浆初始含水率为 140%,固化剂掺量为泥浆湿重的 8%、10%、12%、15%,开展流态固化土配合比试验。参照 T/CECS 1175—2022《自密实固化填筑技术规程》,采用内径和高度均为 80mm 的空心亚克力玻璃圆筒测试流态固化土的流动度,如图 2 所示。参照 T/CECS 1175—2022《自密实固化填筑技术规程》,将搅拌均匀后的流态固化土浇筑至模具中,模具尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm,覆膜后移至标准养护箱中养护至指定龄期开展无侧限抗压强度试验,如图 3 所示。



图 1 项目所用渣土与泥浆



图 2 流态固化土流动性测试与强度试件制备

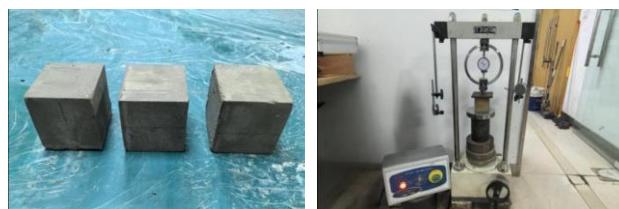


图 3 流态固化土强度测试试件与测试装置

2.2 性能测试结果

本次项目的流态固化土初始流动度测试结果如图 4 所示。可以看到,在泥浆含水率 140% 的条件下,流态固化土初始流动度随固化剂掺量增加呈现缓慢下降趋势。当固化剂掺量由 8% 提高至 15% 时,流动度由 220mm 降低至 195mm,整体下降幅度小于 12%。这一现象表明,在高含水泥浆体系中,浆体自由水含量充足,固化剂的引入并未显著破坏颗粒间润滑结构;固化剂水化初期以离子溶解与晶核生成过程为主,对宏观流动性能影响有限^[3];当流动度稳定在 200mm 左右时,材料仍可依靠自重实现自流平与自密实,满足复杂箱涵肥槽与台背空间的无振捣施工要求。

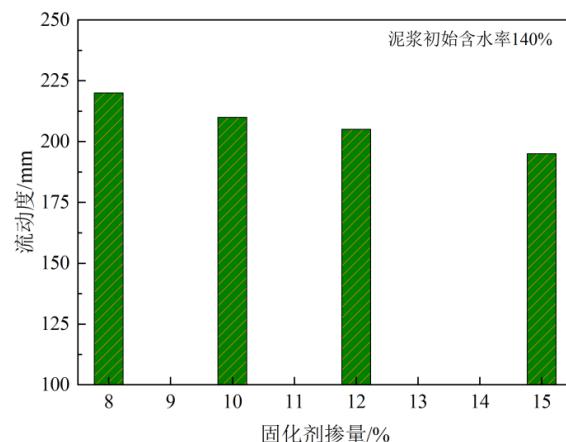


图 4 固化剂掺量对流态固化土流动性的影响

固化剂掺量对流态固化土 1d 和 7d 龄期无侧限强度的影响如图 5 所示。由 1d 无侧限抗压强度测试结果可以看到, 所设计的流态固化土早期强度发展具有明显的临界掺量效应。固化剂掺量 $\leq 10\%$ 时, 1d 内强度增长缓慢, 部分试件出现未完全硬化现象; 当固化剂掺量 $\geq 12\%$ 时, 材料在 12h 内即可形成连续骨架结构, 1 d 无侧限抗压强度达到 150kPa 以上; 固化剂掺量由 12% 提高至 15%, 1d 强度由 150kPa 提升至 310kPa, 增长幅度显著。这表明在该体系中, 12% 为实现超早强转折点的关键掺量区间。当固化剂掺量超过该阈值后, 水化反应速率明显加快, 早期强度进入快速增长阶段^[4]。

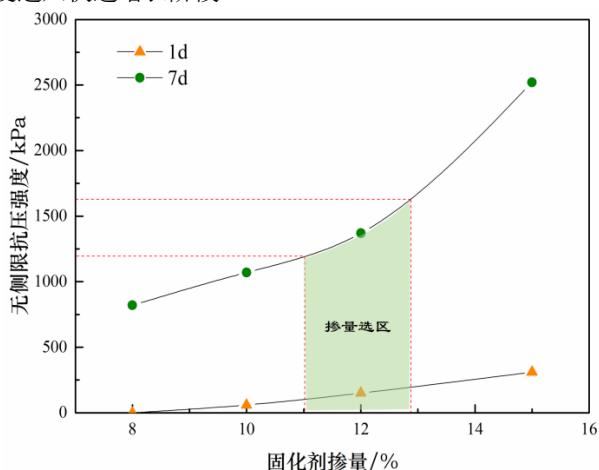


图 5 流态固化土 1d 和 7d 无侧限抗压强度与固化剂掺量的关系

由图 5 同时可以看到, 7d 龄期强度随固化剂掺量呈现近似线性增长关系, 但增长斜率在高掺量区有所增大。当固化剂掺量由 10% 提高为 12% 时, 强度由 1.07MPa 增至 1.37MPa; 而当固化剂掺量由 12% 提升至 15% 时, 强度由 1.37MPa 显著增至 2.52MPa。该结果说明, 在高含水泥浆体系中, 固化剂掺量不仅影响水化产物数量, 还显著影响结构致密程度与孔隙演化路径^[5]。

针对箱涵与台背回填工程对早期通行与长期稳定的双重要求, 本文引入强度富裕系数 $\gamma = \text{实测强度}/\text{设计强度}$ 的设计理念。本工程中取 $\gamma=2.0$, 其合理性体现在: (1) 抵消现场不确定性(泥浆来源复杂、含水率波动、养护条件变化); (2) 保障超早期施工节点, 满足 6h 上人、12 h 通设备的实际需求; (3) 提高结构安全储备, 避免后期沉降与返工风险。该思路可为类似市政工程流态固化土设计提供可复制的工程经验。基于上述分析, 本项目流态固化土固化剂掺量选区定为 11%~13%, 最终工程实施固化剂掺量定为 $12\% \pm 0.5\%$ 。

3 流态固化土施工工艺

3.1 现场准备

通过现场踏勘, 对施工现场的运输路线和卸料方式进行规划, 并完成场地整理等工作, 设置明确的运输通道与作业区域, 避免交叉作业干扰如图 6 所示。



图 6 浇筑场地现场准备

3.2 设备搭建

本项目所采用的流态固化土设备由固化剂料仓、造浆-搅拌一体机、存储池、泵送设备等组成, 设备系统具备自动化计量与实时监控功能, 确保配合比准确性与搅拌均匀性, 设备模块化设计便于转场与重复利用, 如图 7 所示。



图 7 流态固化土设备现场组装

3.3 流态土制备

由挖机将渣土转运至造浆-搅拌一体机, 边加水边搅拌至泥浆比重 1.35, 随后设定固化剂添加量由螺旋输送机完成固化剂投放, 避免扬尘与浪费, 待浆体搅拌均匀后放料, 如图 8 所示。



图 8 流态固化土现场制备

3.4 流态土暂存

由于渣土中含有石子等颗粒, 为防止损坏泵送设备, 在出料口设置浆池暂存流态土浆体, 通过滤网对浆体进行过滤, 将过滤后的流态土浆体进行泵送浇筑, 如图 9 所示。暂存池过滤网孔径 $\leq 10\text{mm}$, 有效隔离石块与杂物; 池体底部略倾斜便于浆体汇集与泵送。



图 9 流态固化土浆体暂存

3.5 泵送浇筑

采用泥浆泵将流态固化土泵送至施工部位, 进行流态固化土浇筑, 浇筑时采用分层方式, 浇筑过程及浇筑后的自流平效果如图 10 所示。



图 10 流态固化土泵送浇筑与浇筑后的自流平效果

3.6 养护

浇筑完成后采用 PE 膜整体覆盖，洒水养护早晚各一次，如图 11 所示。



图 11 流态固化土覆膜与洒水养护

3.7 质量检测

流态固化土浇筑完成 10h 后对表层流态土硬化情况进行了观测，如图 12 所示。可以看到，所浇筑流态固化土表面坚硬、平整、无开裂，表观密实均匀、无泌水、无分层现象，整体表观质量良好。浇筑完成 1d 后，通行渣土车覆土准备上层结构施工，如图 13 所示。



图 12 浇筑 10h 后硬化效果（上人无印记）



图 13 浇筑 24h 后通行设备覆土准备上层结构施工

依据现场施工情况，由业主单位委托江苏中设集团工程检测有限公司对流态固化土的 7d 无侧限抗压强度进行了抽样检测。由抽样检测结果可知，所浇筑的流态固化土

强度数据离散性小，7d 强度达到 1.35MPa，已明显优于设计指标，其强度满足设计要求。

4 结语

(1) 在高含水工程泥浆体系中，超早强流态固化土具有良好的流动性能，固化剂掺量在 8%~15% 范围内对初始流动度影响较小，材料均可依靠自重实现自流平与自密实，满足复杂箱涵及桥台台背空间的无振捣施工要求。

(2) 固化剂掺量对流态固化土早期强度发展具有显著影响，约 12% 为实现超早强性能的关键阈值。当掺量不低于该值时，材料可在 12 h 内形成稳定结构，1 d 无侧限抗压强度达到 150kPa 以上，能够满足快速转序和早期通行的工程需求。

(3) 通过引入强度富裕系数的配合比设计理念，可有效应对现场泥浆来源复杂、含水率波动及养护条件不确定等因素，提高超早期施工安全性与后期结构稳定性。本工程中确定的固化剂合理掺量区间为 11%~13%，具有良好的工程适用性。

(4) 无锡通江大道快速化工程的大体积连续浇筑应用表明，超早强流态固化土在施工效率、质量稳定性及现场适应性方面均表现良好，可作为传统回填材料的有效替代方案，为市政快速路及类似工程提供可推广的技术路径。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 周永祥, 霍孟浩, 侯莉, 等. 低强度流态填筑材料的研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2024, 38(15): 130-138.
- [3] 代恒军, 吴光雄, 李海峰, 等. 水泥协同工业固废固化流态土工作性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(12): 4492-4502.
- [4] 王明, 刘振忠, 薛泽, 等. 流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(4): 941-948.
- [5] 杨易之, 林远志, 葛天歌, 等. 路基用流态固化土的流动性与强度试验研究 [J]. 建材技术与应用, 2025(3): 38-42.

作者简介：过彬（1981—），男，汉族，江苏无锡人，本科，研究方向：新型建造材料与施工技术；^{*}通讯作者：夏涛（1986—），男，汉族，江苏苏州人，本科，副高级工程师，研究方向：固废资源化利用。