

废弃土资源化利用：流态固化土在承台基坑回填中的关键工艺探索

陈自然 邱福祥 孙芳刚 黄玺 范富泰 何田甜
中铁二十四局集团有限公司, 上海 200000

[摘要]针对深基坑承台间空间狭小、传统回填工艺密实度难以保障、施工效率低下等技术难题,本文依托上海轨道交通工程实例,提出利用施工现场废弃土开发流态固化土进行回填。通过对流态固化土自流平、自密实特性的实验分析,结合复杂工况需求,系统探讨了从材料配合比优化、现场制备到泵送浇筑的关键施工工艺。研究表明,制备的流态固化土流动度达320mm,7d无侧限抗压强度可达311kPa,能有效填充承台间隙,在显著提升施工效率的同时,实现了工程废弃土的减量化与资源化利用,具有显著的技术经济效益与环境效益。

[关键词]废弃土;资源化利用;流态固化土;承台回填;施工工艺

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18842

中图分类号: X524

文献标识码: A

Resource Utilization of Excavated Waste Soil: Exploration on Key Construction Technology for Fluidized Solidified Soil in Backfilling Pile Cap Foundation Pits

CHEN Ziran, QIU Fuxiang, SUN Fanggang, HUANG Xi, FAN Futai, HE Tiantian
China Railway 24th Bureau Group Corporation Limited, Shanghai, 200000, China

Abstract: To address technical challenges such as the narrow spaces between pile caps in deep foundation pits, the difficulty in ensuring compaction density in traditional backfilling processes, and low construction efficiency, this paper, based on a case study of a Shanghai rail transit project, proposes using on-site excavated waste soil to develop fluidized solidified soil (FSS) for backfilling. Through experimental analysis of the self-leveling and self-compacting properties of FSS in conjunction with the requirements of complex working conditions, key construction techniques are systematically investigated, ranging from material mix optimization and on-site preparation to pumping and casting. The research results indicate that the prepared FSS achieves a fluidity of 320 mm and a 7-day unconfined compressive strength of up to 311 kPa. It can effectively fill the gaps between pile caps, significantly improving construction efficiency while achieving the waste reduction and resource utilization of engineering waste soil. This technology offers significant techno-economic and environmental benefits.

Keywords: waste soil; resource utilization; fluidized solidified soil; pile cap backfilling; construction technology

引言

为改善城市内部的交通,提高城市内部通行效率,发展轨道交通是减少城市拥堵的优选,特别是上海地铁预计到2025年的总里程数超过1000公里,大大缓解了城市拥堵和提高了生活质量。在城市地铁开发过程中,深基坑工程产生的废弃土方量逐年递增。传统堆弃的处理方式不仅占用宝贵的土地资源,且环境污染问题日益凸显^[1],这种传统堆弃的处理方式愈发不可持续,如何对这些废弃土方在建设领域进行资源化利用是亟待解决的问题。流态固化土是一种将废弃土转化为高性能填料的技术,不仅解决了废弃土的处置难题,更为建设工程提供了优质的回填材料,得到建设领域越来越多的关注^[2]。在大型深基坑施工中,受限于基坑内支撑体系的布置,底板承台区域的工况较为复杂,承台间空隙的回填呈分散的特点。由于机械设备难以进入深基坑底部的狭窄区域进行分层压实,回填质量难以控制^[3],传统的填砂或级配砂石回填工艺在应用中存在显著弊端。

流态固化土是由废弃土、胶凝材料、水等材料经专用

设备拌合形成的浆体材料,具有自流平性与自密实性能,无需振捣即可依靠自重对复杂狭小空间区域进行回填^[4,5],强度可根据工程应用场景进行调控^[6],固化后的整体性优于传统回填填料^[7]。在深基坑承台区域回填中采用该技术可实现挖方弃土的原地资源化利用,并可提高回填质量。本文主要基于上海澄江路地铁站房项目,针对废弃土制备流态固化土在承台区域回填的应用开展系统研究。重点围绕以下方面展开探讨:针对现场废弃土性质,优化固化土配合比;探索深基坑工程中制备、浇筑工艺;通过与传统回填方案的经济对比,验证该工艺在缩短工期、降低综合成本方面的实际效果。

1 流态固化土室内试验

1.1 土料

流态固化土的土源来自现场基坑的出土,土的主要物理指标根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[8]测定,土的塑限、液限分别为13.2%、46.1%,如图1所示,根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[9]属于低液限黏土(CL)。

1.2 流态固化土配合比

采用无锡坤鼎建材生产的专用固化剂用于制备流态固化土，为确定流态固化土的施工配比，根据《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB31/T 1483—2024)^[9]的要求，以工程废弃土方制备的流态固化土，表观密度和28d无侧限抗压强度不低于1350kg/m³和300kPa。先在室内进行3组流态固化土的试配试验，在土样中加入适量的水制备泥浆使其密度达到1350kg/m³，再加入固化剂搅拌制备流态固化土，固化剂掺量分别为90kg/m³、120kg/m³、150kg/m³，将制备得到的流态固化土倒入边长为70.7mm的立方试模，标准养护7d后测定其无侧限抗压强度，试验结果如图2所示。由试验结果可知，当固化剂掺量达到120kg/m³时，试样的7d无侧限抗压强度为311kPa，已满足28d的强度要求，综合考虑采用120kg/m³作为固化剂施工配比。

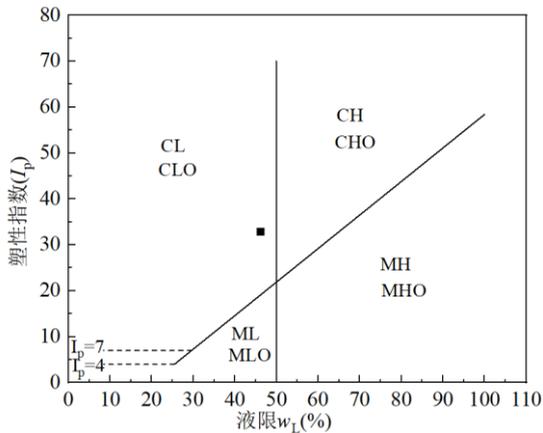


图1 土的分类

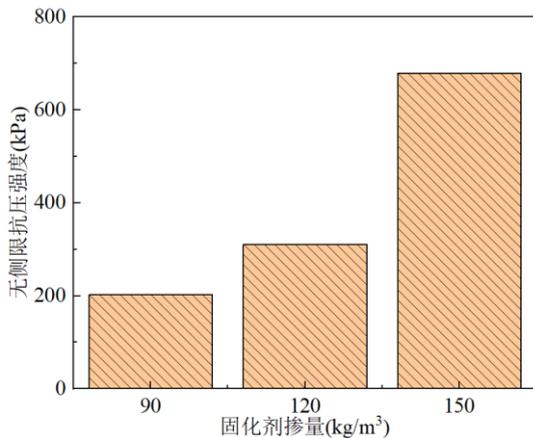


图2 流态固化土的强度

2 承台基坑回填关键施工工艺

2.1 施工工艺流程

流态固化土的回填按照“集中拌合、泵送输送、分层浇筑、动态监测”的施工原则，其主要的工艺流程为：施工准备，基底清理，泵送管路布设，流态固化土制备，泵

送浇筑，表面平整与养护，质量检测与验收。

2.2 机械安装与调试

由于项目现场场地有限，出土地点又主要在基底，为方便流态固化土的制备和浇筑施工，故选取基底区域作为本项目集中制备流态固化土的场所(图3)。使用到的主要机械设备为：卧式料仓、流态土拌合设备、浆池、泥浆泵和挖机。在设备进场前，应先对放置机械设备的区域整平清理，防止机械设备倾塌。设备安装完成后进行调试(图4)，确保设备的计量、搅拌系统可正常工作，初次调试机械设备应先选用清水调试，待系统各部件运行正常后，可采用现场弃土进行下一步的设备调试工作。



图3 机械设备进场



图4 设备调试

2.3 施工准备

在正式开展回填作业前，待机械设备调试并确认运行状态良好后，由于现场弃土的含水率及颗粒级配具有一定的离散性，应首先利用现场弃土按照实验室确定的设计配合比进行流态固化土的现场试配验证，现场试配应重点检测浆体的流动度。若现场实测流动度未达到设计要求，应在保持水胶比不变的前提下，通过调节外加剂掺量进行校正。针对本项目试配的流态固化土的流动度达到320mm(图5)，满足设计的要求。

在正式施工开始前应先对浇筑区域的建筑垃圾进行清理。若浇筑区域存在严重积水的情况应先抽水，设置临时集水井并及时抽排，防止浆体局部水胶比过大，从而引发固

化后强度不足或分层离析。对于过度干燥或具有强吸水性的基底土层，在浇筑前应进行适度洒水湿润，使基底达到饱和而干状态，以防止基底吸收浆体水分导致流动性骤降。



图5 现场制备流态固化土流动性检测

2.4 流态固化土的制备与输送

泥浆固化拌合具体施工步骤如下：弃土预处理→目标比重泥浆制备→加入指定数量固化剂→流态固化土制备。在开始正式制备流态固化土时，先在机器中加入所需质量的水，再加入弃土拌合制浆，制备所需密度的泥浆。为防止弃土中含有石块、钢筋、垃圾等杂物损坏机器，在弃土进入拌合设备前先通过一层钢制筛网，去除石块、钢筋、垃圾等杂物，再加入所需质量的固化剂，采用专用连续式搅拌设备，确保弃土粉碎充分且与胶凝材料混合均匀，制备流态固化土。

对制备得到的流态固化土采用大功率泥浆泵或者挤压泵泵送，由于现场内支撑纵横交错，泵送管路利用支撑梁顶面进行固定，并在转角处设置可靠锚固，防止泵送压力脉动导致管路位移或损伤。在施工过程中应保持泵送的连续性，若由于不可抗力因素导致停泵，单次停泵的时间严禁超过45min，防止浆体在管内产生离析或初凝堵管。

2.5 浇筑及养护

现场待浇筑的区域如图6所示，浇筑场地被各承台分隔，由于承台对流态土形成阻隔效应，为保证浇筑后的整体的平整性，施工时将流态固化土泵送至多点对承台基坑区域进行浇筑（图7）。在浇筑时，奉行先深后浅的原则，先对较深的区域浇筑流态固化土。首层浇筑厚度宜为300~500mm，在首层浇筑完成后，应当适当洒水养护，待浇筑至设计标高且表面初凝后，覆盖薄膜或洒水养护，养护时间不少于7d。

3 质量控制

为确保流态固化土回填的施工质量，防止因材料劣化或施工不当引发风险，本工程从材料准入、输送保障及浇筑工序三个方面实施全过程质量管理。

3.1 材料控制

工程弃土中的有机质降解是导致固化体后期强度衰减的主要因素。制备前须对弃土进行组分分析，确保其有

机质含量不大于5%。若检测值超标，须采用技术手段对其处理，待有机质含量降至合格范围后方可用于制备流态固化土。在制备流态固化土时，执行开盘鉴定制度。通过现场试配验证其关键性能指标，各项指标满足设计要求后，方可进行规模化生产流态固化土。

3.2 输送系统设置

泵与泥浆输送管道的连接处应采用双层密封圈管卡，防止管道脱开。施工期间应定期开展气密性检查，防止漏浆。现场泵送管路布置遵循“距离最短、弯头最少”的布置原则，管路宜采用硬管或专用泥浆管输送，防止内压力过高导致爆管，管路应尽量避免弯折，若输送管路需要过弯，弯管的半径应不小于500mm，以减小脉动压力。

3.3 现场浇筑工序

在浇筑前，应先对基底和侧壁洒水湿润，在有渗漏的位置处应铺设在固化区域基底及侧壁铺设具有防渗漏功能的薄膜，防止流态固化土浆体流失。在浇筑过程中严格执行分层浇筑制度，首层浇筑厚度均应控制在0.3m~0.5m。相邻区域的浇筑高度差不得超过1m，采用对称浇筑方式，以平衡回填体产生的侧向压力，流态固化土必须在初凝前完成浇筑。



图6 未浇筑前的场地情况



图7 流态固化土浇筑

4 效益分析

本文从经济、环保及社会三个维度对流体固化土在基坑承台回填应用中的效益进行分析。

4.1 经济效益

本工程通过工程弃土用于流体固化土进行资源化利用,实现了施工效率与综合成本的优化。相比于传统回填及地基处理工艺,流体固化土具有卓越的自密实性,免去了分层夯实工序,解决了狭小空间难以回填密实的问题,大大提高了施工效率。目前上海地区土方外运的处置成本约为 150 元/方(不含运费)左右,而本项目中流体固化土的成本总成本为 125 元/方,已低于土方外运的成本,具有极高的经济效益。

4.2 环保效益

流体固化技术的应用高度契合建筑业绿色循环发展的核心导向。该技术将弃土就地转化为高性能充填材料,实现了工程弃土的资源化再利用,在满足设计强度的前提下,大幅减少了天然砂石资源的消耗,同时,由于减少了高碳排水泥产品(如高等级混凝土)的使用量及弃土长途运输过程中的尾气排放,显著降低了工程建设阶段的碳排放。

4.3 社会效益

流体固化土回填技术的推广,对提升地下空间开发标准化水平具有重要意义。该技术成功破解了素土夯实承载力低、混凝土垫层成本高及弃土外运扰民等行业痛点,为大型基础设施的高效建设提供了示范。施工过程的高度机械化与泵送作业减少了施工机械在现场的往复运作,显著降低了噪声污染与扬尘排放,缓解了施工扰民问题。该技术的应用为回填工程提供了可复制、可推广的可持续解决方案,推动了行业向低碳、智能施工方向转型。

5 结论

本文依托上海澄江路地铁站房项目,针对深基坑承台间狭小空间回填难题,系统开展了流体固化土资源化利用的关键工艺探索研究,得出以下主要结论:

采用现场基坑挖出的低液限粘土,配以专用固化剂,制备出的流体固化土 7d 无侧限抗压强度可达 311kPa,满足规范要求。现场实测试配流动度达到 320mm,具有卓越的自流平、自密实特性,解决了传统级配砂石在狭小区

域充填不密实的难题。形成了集中拌合、压力泵送、分层浇筑的工艺体系。

该技术实现了废弃土方的原位资源化利用,不仅显著降低了碳排放,且在经济性上优势明显。同时,大大缩短了施工周期,极大地提升了地下空间开发的标准化与高效化水平。综上所述,流体固化土回填工艺在城市轨道交通及深基坑领域具有极强的实用性与推广价值,为解决城市建筑垃圾处置难题及推动绿色建筑施工提供了可行路径。

[参考文献]

- [1]肖建庄,沈剑羽,段珍华,等.工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径[J].科学通报,2023,68(21):2722-2736.
 - [2]姜宝景,刘明玮,刘建刚.用于填筑狭小地下空间的流态水泥土材料室内试验研究[J].岩土工程技术,2023,37(2):226-231.
 - [3]欧子文,郝帅,王宗琴.天府站基坑肥槽回填技术研究及应用[J].地基处理,2025,7(2):185-192.
 - [4]郝文茹,唐亮,吴瑞东,等.全固废低碳胶凝材料流态固化土性能优化研究与应用[J].材料导报,2025,39(2):499-504.
 - [5]姚斌,黄宁,吴文伶,等.流态固化土技术研究与应用进展[J].建设科技,2025(17):82-86.
 - [6]中国工程建设标准化协会.预拌流态固化土工程应用技术规程:T/CECS 1037-2022 [S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
 - [7] Cui X, Meng H, Liu Z, et al. Development, Performance, and Mechanism of Fluidized Solidified Soil Treated with Multi-Source Industrial Solid Waste Cementitious Materials[J].Buildings,2025,15(6):864.
 - [8]中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T50123-2019 [S].北京:中国计划出版社,2019.
 - [9]中华人民共和国住房和城乡建设部.土的工程分类标准:GB/T 50145-2007 [S].北京:中国计划出版社,2007.
 - [10]上海市市场监督管理局.建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程:DB31/T 1483-2024[S].上海.
- 作者简介:陈自然(1985—),男,汉族,四川宜宾人,本科,总工,研究方向:城市轨道交通。