

工程泥浆制备流态回填材料技术研究与 综合效益分析

薛云

(上海闵行城市建设投资开发有限公司, 上海市 201100)

摘要: 针对钻孔灌注施工产生的废弃工程泥浆含水率高、处置难, 而传统泥浆脱水干化处置技术成本高、碳排放量大和泥饼难利用等问题, 研究提出工程泥浆制备流态回填材料用于工程回填利用技术方案, 依托上海某高速公路交通功能完善项目完成工程应用, 并对技术经济性和碳减排效益进行分析。结果表明, 工程泥浆制备流态回填材料的7 d和28 d强度达0.65 MPa和1.12 MPa, 坍落扩展度达760 mm, 现场单点浇筑后流态回填材料可在承台侧壁四周自密实回填, 回填效果良好。与工程泥浆脱水干化处置技术相比, 该技术单方工程泥浆处置成本可减少约17.50%, 碳减排约45.59%。

关键词: 工程泥浆; 流态回填材料; 资源化利用; 碳减排; 无废工地

中图分类号: TU528.09

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0037-05

Technical Research and Comprehensive Benefit Analysis of Flowable Backfill Materials Prepared from Engineering Slurry

XUE Yun

(Shanghai Minhang Urban Construction Investment Development Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: In response to the issues of high water content and difficult disposal of waste engineering slurry generated during bored pile construction, as well as the high costs, high carbon emissions, and difficulty in utilizing mud cakes in traditional slurry dewatering and drying disposal technologies, this study proposes a technical solution for preparing flowable backfill materials from engineering slurry for use in engineering backfilling. The technology was applied in a traffic function improvement project of a Shanghai expressway, and an analysis of its technical-economic feasibility and carbon reduction benefits was conducted. The results show that the 7 d and 28 d compressive strengths of the flowable backfill materials prepared from engineering slurry are 0.65 MPa and 1.12 MPa, respectively, with a slump flow of 760 mm. After single-point pouring on site, the flowable backfill material can self-compact around the sidewalls of the foundation cap, achieving good backfilling results. Compared to traditional engineering slurry dewatering and drying disposal technologies, the cost of disposing of engineering slurry per cubic meter with this technology can be reduced by about 17.50%, with a carbon reduction of about 45.59%.

Keywords: engineering slurry; flowable backfill material; resource utilization; carbon reduction; zero-waste construction site

0 引言

在城镇化建设过程中, 钻孔灌注施工是常用的桩基施工技术, 在施工过程中会产生大量废弃工程泥浆, 由于工程泥浆含水率大、黏粒含量高且强度极低等不良特性, 其处理难度较大, 通常采用槽罐车外运后倾倒自然干化等消极处置方式, 存在占用土地、

污染环境和安全隐患等问题^[1-3]。为贯彻落实“无废城市”建设和“碳达峰碳中和”战略要求, 上海市印发《上海市人民政府办公厅关于全面加强建筑垃圾管理的实施意见》(沪府办[2024]56号)中提出工程泥浆原则上按照“源头干化”实现脱水减量。施工工地也多采用移动式板框压滤机对工程泥浆进行现场脱水干化, 虽实现工程泥浆的减量化, 但产生的泥饼仍需作为土方外运处置, 且存在脱水效率低、成本高和碳排放量大等不足^[4-7]。

现有研究表明^[8-12], 工程泥浆作为一种泥水混合物具有良好的黏土资源属性, 按一定比例将工程泥

收稿日期: 2025-09-29

基金项目: 上海市建委科研项目(沪建科 2025-002-046)

作者简介: 薛云(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 从事建设项目管理工作。

浆、固化剂和水等物料混合均匀后,可制备具有自密实填充性能的流态回填材料,经养护后固化形成具有一定强度、良好水稳定性和低渗透性的填充体,可替代传统二灰土、中粗砂等填料用于市政工程、基坑肥槽和管道沟槽等回填工程,实现工程泥浆的资源化利用,并解决泥浆处置难和天然回填材料紧缺等问题。

本文以上海市某高速交通功能完善工程为依托,结合“无废工地”理念,利用项目内钻孔灌注施工产生的废弃泥浆原位固化制备流态回填材料,并用于桩基承台侧壁回填,替代原方案的中粗砂回填。基于现场试验和工程应用,对工程泥浆制备流态回填材料及其应用技术的可行性、经济性和碳减排效益进行综合分析,以期技术成果为本工程及类似工程的泥浆资源化利用提供参考。

1 工程泥浆处理处置方式

目前,工程泥浆的处理处置方式主要包括如下几种。

(1) 槽罐车外运后倾倒填埋

利用大型槽罐车将高含水率工程泥浆运至郊外或专门处置场所后直接倾倒,经自然干化。该方式存在运输成本高、过程易滴漏、倾倒填埋占用土地和环境不利影响大等问题,目前已逐步禁止。

(2) 压滤脱水干化技术

采用压滤机作为脱水设备,添加生石灰等作为泥浆调理剂,再对工程泥浆进行压滤脱水,可显著减少泥浆体积并方便运输,是目前泥浆处理的主要方式。但该方式也存在过程能耗大、处理成本高和泥饼难利用等问题^[13-15]。

(3) 泥浆制备流态回填材料技术

通过搅拌设备,将工程泥浆、固化剂和水等物料按一定比例混合均匀,制备流态回填材料,用于回填工程,实现工程泥浆循环利用,且减少外运处置带来的系列危害,是目前工程泥浆处理处置技术发展的重要方向^[16]。

2 工程概况

本研究依托的某高速公路交通功能完善工程全长约3.64 km,双向6车道,项目现状如图1所示。在项目施工过程中,一方面,桩基钻孔灌注施工产生大量废弃工程泥浆亟待处置,另一方面,项目承台侧壁区域回填施工需外购中粗砂等天然回填材料,项目

建设面临“废弃泥浆处置难”和“天然回填材料紧缺”难题。



图1 某高速公路交通功能完善工程原状

基于“无废工地”建设理念,本项目拟将工程泥浆和固化剂按一定比例混合均匀,制备流态回填材料,替代中粗砂等天然资源,用于本项目的承台侧壁等狭窄空间回填。

图2所示为本项目承台侧壁回填区域回填前状态,其回填断面呈下窄上宽的直角梯形,下底面约0.6 m宽,上顶面宽不足2.0 m,碾压作业面狭窄,若采用传统中粗砂进行碾压回填,则面临压路机难以进入作业区的问题,导致工程回填质量难保障。



图2 承台侧壁待回填区域

针对本项目承台侧壁回填区域截面最小宽度仅0.6 m,且回填后无需立即承受较大荷载的需求。根据现行上海市地方标准《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB31/T 1483—2024)中相关规定,设计废弃泥浆制备流态回填材料的流动度为H级(坍落扩展度 >700 mm,适用于回填断面宽度不大于1.0 m的狭窄空间或存在碾压死角的填筑工程),强度等级为普通型(简称“NS”,即7d强度 ≥ 0.5 MPa,28 d强度 ≥ 1.0 MPa)。

3 现场试验和工程应用效果分析

3.1 试验方案

3.1.1 流态回填材料制备

本项目所用废弃工程泥浆的湿密度约 1.40 g/cm^3 ,含水率高(约75%~80%),基于现有研究成果^[16-17]和前期室内试验,可向工程泥浆中直接掺加固化剂并

拌合以制备流态回填材料,固化剂掺量取工程泥浆质量的6%、8%和10%,试验结果见表1。

表 1 试验参数及测试结果				
泥浆密度/ (g·cm ⁻³)	固化剂掺量/ %	坍落扩展度/ mm	抗压强度/MPa	
			7 d	28 d
1.40	6.0	810	0.39	0.61
	8.0	760	0.65	1.12
	10.0	685	0.87	1.53

工程应用时,首先将工程泥浆输送至特制搅拌容器中,再使用搅拌设备(功率10 kW)将工程泥浆和固化剂混合5 min并获得均匀浆体,即流态回填材料,最后使用滑槽施工浇筑至回填位置,工程泥浆制备流态回填材料工艺路线如图3所示。

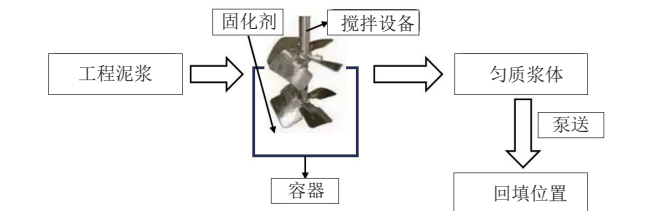


图3 工程泥浆制备流态回填材料工艺路线图

3.1.2 抗压强度和坍落扩展度

参照《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB31/T 1483—2024)^[18]中相关规定对试验制备的流态回填材料进行抗压强度和坍落扩展度测试,试验相关参数和测试结果如表1所示。

由表1可知,固化剂掺量为6%时,所得流态回填材料坍落扩展度满足H级,但7 d和28 d龄期强度均不满足NS级要求。当固化剂掺量为8%时,所得流态回填材料的坍落扩展度达760 mm,7 d和28 d抗压强度分别为0.65 MPa和1.12 MPa,达到《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB31/T 1483—2024)中普通型(NS)回填材料强度等级,流动度达H级,满足设计要求且具有一定的富裕。而当固化剂掺量提高至10%时,其坍落扩展度为685 mm,略低于H级,7 d和28 d强度均满足要求,该配比下虽可通过添加用水量改善工作性,但强度富余较多,经济性较差。

综上,本项目确定后续工程应用的流态回填材料试验配合比为 $m_{(泥浆)}:m_{(固化剂)}=100:8$ 。

3.2 工程应用

本项目利用现场工程泥浆按上述试验配合比制备流态回填材料,采用滑槽法将流态回填材料单点浇筑至待回填的承台侧壁区域,回填效果如图4所示。



图4 流态回填材料浇筑回填承台侧壁效果

由图4可知,流态回填材料浇筑至承台侧壁回填区域后,在自身重力作用下流态回填材料可在异形空间内自流平填充50 m以上,承台侧壁四周被完全填充密实。且经现场留样测试抗压强度结果得知,其7 d和28 d抗压强度达0.57 MPa和1.05 MPa,表明工程泥浆制备流态回填材料用于承台侧壁回填效果良好。

4 综合效益分析

基于前期现场试验和施工应用结果可知,工程泥浆制备流态回填材料用于承台侧壁回填不仅可以实现工程泥浆就地利用,还可替代天然砂石骨料作为填充材料。本研究综合对比分析工程泥浆(以1 m³为例)压滤脱水处置技术和流态回填利用技术的经济效益和碳减排效益,以期工程泥浆的资源化利用技术提供数据支撑和案例参考。

4.1 经济效益

4.1.1 压滤脱水技术

本研究以文献[5]中应用厢式压滤机处置桩基工程泥浆的参数为例,1 m³工程泥浆需添加6 kg生石灰作为调理剂混合预处理,再经板框压滤得到约0.33 m³泥饼。板框压滤设备功率为15 kW,1 h可完成22.5 m³工程泥浆脱水,即1 m³工程泥浆脱水约耗电0.67 kW·h。按生石灰价格750 元/t,电费1 元/(kW·h),则工程泥浆压滤脱水消耗生石灰成本为4.5 元/m³,电费0.67 元/m³。此外,脱水设备折旧、人工和场地租赁等成本约70 元/m³。

根据上海市土方运输费用调研,工程泥浆脱水后按土方外运处置,按20 km运输距离考虑,土方外运费约89.55 元/m³,处置费为160 元/m³。考虑1 m³工程泥浆脱水后产生0.33 m³泥饼,则工程泥浆的外运处置费合计为(89.55+160)×0.33=82.35 元/m³。

综上所述,使用压滤脱水技术处置1 m³工程泥

浆的成本为157.52元/m³。

4.1.2 流态回填利用技术

工程泥浆制备流态回填材料利用技术的成本支出主要为电费、固化剂、设备与人工费等。本项目采用自制搅拌设备进行流态回填材料制备,设备容积为25 m³,首先采用30 kW泥浆泵将泥浆池中工程泥浆泵送至设备容器中,按每次搅拌20 m³工程泥浆考虑,泵送时间约10 min。随后通过螺旋输送设备向设备中添加固化剂,设备输送功率为11 kW,加料时间约6 min。最后,通过搅拌设备拌和5 min完成流态回填材料制备,设备功率为10 kW。综上得知,1 m³工程泥浆制备流态回填材料需耗电0.35 kW·h,电费成本为0.35元。

工程泥浆密度为1400 kg/m³,固化剂掺量为泥浆质量的8%,则1 m³工程泥浆消耗固化剂112 kg,固化剂采购成本通常为600~1 000元/t,1 m³工程泥浆制备流态回填材料的固化剂成本暂按89.6元/m³考虑。

另考虑设备折旧、人工和场地租赁等成本约40元/m³。

综上所述,使用流态回填利用技术处置1 m³工程泥浆的成本约129.95元。

将两种技术方案的成本进行对比分析,结果如表2所示。

表2 工程泥浆不同处置方式成本对比 单位:元/m ³	
处置方式	处置成本
压滤脱水技术	157.52
流态回填利用技术	129.95

注:未考虑泥浆特性变化影响,以及实施过程中窝工、税率、利润和其他措施费等成本。

由表2可知,工程泥浆制备流态回填材料利用技术较传统压滤脱水技术可实现单方工程泥浆处置成本减少17.50%。若考虑流态回填材料节约了中粗砂采购成本和提高回填效率,则经济效益更加显著。

4.2 碳排放

4.2.1 压滤脱水技术

根据国家发展改革委员会公布的《二氧化碳排放核算方法及数据调查表》,上海市电网平均CO₂排放因子为0.624 kg CO₂e/kW·h,则1 m³工程泥浆压滤脱水的电力碳排放为0.42 kg CO₂e。

参照《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)中“附录D 建材碳排放因子”, F_{Ca0} 取1190 kg CO₂e/t,故石灰的碳排放为7.14 kg CO₂e。

参照《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)

中“附录E 建材运输碳排放因子”, $F_{重}$ 取0.078 kg CO₂e/t·km,本研究的运输距离拟设定为20 km,泥饼密度按1.70 t/m³考虑,则运输的碳排放为0.88 kg CO₂e。

查阅文献^[19]得知,填埋处置1 m³工程渣土产生的碳排放为89.42kg CO₂e,则1 m³工程泥浆压滤脱水后泥饼填埋处置的碳排放为29.51 kg CO₂e。

综上得知,使用压滤脱水技术处置1 m³工程泥浆的碳排放为37.95 kg CO₂e。

4.2.2 流态回填利用技术

同上,流态回填利用技术处置1 m³工程泥浆的电力碳排放为0.22 kg CO₂e。

参照《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)中“附录D 建材碳排放因子”, F_{Cement} 取735 kg CO₂e/t。本研究所用固化剂是以矿渣粉、粉煤灰等工业副产物为主要原材料制备的市售低碳高效固化剂^[17],其碳排放因子约为水泥的30%,故处理1 m³工程泥浆的固化剂碳排放为24.70 kg CO₂e。

此外,按中粗砂密实回填时密度为1.7 t/m³考虑,其碳排放因子为2.51 kg CO₂e/t,则1 m³工程泥浆制备流态回填材料替代中粗砂回填可实现碳补偿约4.27 kg CO₂e。

综上得知,采用流态回填利用技术处置1 m³工程泥浆的碳排放为20.65 kg CO₂e。

由表3得知,单方工程泥浆制备流态回填材料利用技术较传统压滤脱水技术可实现碳减排约45.59%,碳减排效益显著。

表3 工程泥浆不同处置方式的碳排放对比 单位:kg CO ₂ e /m ³	
处置方式	碳排放估算
压滤脱水技术	37.95
流态回填利用技术	20.65

4.3 环境效益评估

本项目符合“无废工地”和可持续发展的理念,通过利用新技术和新工艺解决了工程泥浆非法倾倒和资源化利用不足等问题,提升了公众对绿色施工技术的认知和接受度。同时,通过使用流态回填利用技术处置工程泥浆,不仅提升了施工效率,还具有回填质量好和综合成本低等优点,实现了工程泥浆的内循环,具有积极的环境效益。此外,该项目的实施还可作为其他类似工程的参考,推广高效环保的工程泥浆资源化利用技术,促进整个基础建筑行业的绿色低碳转型。

5 结 语

本研究通过对工程泥浆回填利用技术在高速公路交通功能完善工程的应用案例分析,探讨了工程泥浆资源化处置技术在工程实施中的可行性,并对泥浆回填利用技术的经济效益和碳减排效益进行综合分析,主要结论如下。

(1)对工程泥浆制备的流态回填材料抗压强度和坍落扩展度进行测试,其 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 0.65 MPa 和 1.12 MPa,坍落度扩展度达 760 mm,具有良好的工作性和较高的强度,满足现行地方标准相关要求。

(2)利用项目现场工程泥浆制备的流态回填材料浇筑承台侧壁,流态回填材料可单点浇筑后自流平填充 50 m 以上,将承台侧壁四周完全填充密实,且 28 d 强度达 1.05 MPa,回填密实性好且强度高。

(3)工程泥浆制备流态回填材料利用技术不仅可解决“工程泥浆处置难”和“回填材料紧缺”等难题,且响应“无废工地”建设要求。相比传统泥浆脱水技术,单方工程泥浆处置成本可减少 17.50%,碳减排约 45.59%。

参考文献:

[1] 侯智源,李泽,温永刚,等.城市建筑工程中废弃泥浆资源化处理技术研究与应用[J].施工技术(中英文),2024,53(16):81-85.
 [2] 朱伟,钱勇进,王璐,等.盾构隧道渣土与泥浆的分类与处理利用技术及主要问题[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊2):1-13.
 [3] 汪永兴.泥水盾构废弃泥浆环保处理的技术研究[J].城市道桥与防洪,2020(4):196-198.
 [4] 严竣,李兴华,盛雅楠.废泥浆压滤固化再利用处理技术[J].城市道桥与防洪,2023(3):183-185;189.

[5] 周莉,闫相明,周星中.应用厢式压滤机进行桩基废弃泥浆固化处理[J].绿色施工,2021,43(4):668-670.
 [6] 唐亚军.泥水盾构废弃泥浆处理工艺研究[J].铁道建筑技术,2024(4):19-22.
 [7] 王迎春,赵天宇,王骑虎,等.废弃泥浆脱水固化与资源化利用技术研究进展[J].路基工程,2025(5):7-13.
 [8] 刘金海.高含水量泥浆制备自密实流态固化土试验研究[D].武汉:华中科技大学,2024.
 [9] 叶会峰,王明,钱海磊,等.钻孔灌注桩泥浆固化填料化利用技术研究[J].建筑科技,2021,5(4):25-27.
 [10] 瞿建勋.基于填仓法开仓的泥水盾构泥浆流态固化试验研究[J].城市道桥与防洪,2025(6):265-268.
 [11] 唐宁.淤泥原位固化技术在公路新建工程中的应用[J].建筑科技,2023,7(3):107-109;113.
 [12] 丁飞鹏.钻孔灌注桩泥浆的固化处理及其在路基填筑中的工程应用[J].城市道桥与防洪,2018(5):75-79.
 [13] 孙阳.桩基阶段泥浆分离技术在工程中的运用[J].建设监理,2019(11):69-71.
 [14] 李海龙.桥梁钻孔弃浆压滤固化处理再利用技术[J].交通科技与管理,2024,5(5):102-104.
 [15] 王雅,杨飞.钻孔灌注桩废泥浆资源化利用研究综述[J].四川建材,2025,51(7):10-12.
 [16] 水亮亮,郑晓光,谭学军,等.流态固化土标准化进展与抗压强度尺寸效应研究[J].城市道桥与防洪,2025(7):1-5.
 [17] 水亮亮,郑晓光,戴腾,等.流态固化土流动性和强度的影响因素及机理研究[J/OL].建筑材料学报,2025:1-11(2025-06-25)[2026-01-10].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=FCWB7knoBeTjnS02wHx8ni4W-sA19RnFwGiQgMsxb-cc_xxd4tjoPepTwaRkgfxTRC1aKG0w1fMFreq16bdJE9rUIdpP-azh8yRQDOdi9cLX_qdDhmWYr1yTYZFRyLBKLDWvu86v3c72TetnK4kYCE73y7lUdCZpCdEPRTfQi4Z9XOANi1z6w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
 [18] DB31/T 1483—2024 建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程[S].
 [19] 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.