

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.05.009

【工程应用】

基于可控低强度材料的型钢灌注桩 技术及应用

余巍^{1,2}, 王超¹, 王宁宁², 杨波¹, 王雪婷¹

(1. 南京东大岩土工程勘察设计研究院有限公司, 江苏 南京 210018;

2. 南京市城市复杂地下工程技术研究中心, 江苏 南京 210018)

摘要: 城市建设过程中会产生大量的工程渣土、废弃泥浆、建筑垃圾等建筑固体废弃物。为扩展这些建筑固废资源化利用的途径, 本文提出了一种基于建筑固废制备的可控低强度材料的型钢灌注桩技术, 并应用于基坑工程中。该技术将建筑固废加工成具有流动性、自密实可控低强度材料, 灌入机械挖掘形成的桩孔中, 经养护凝固后形成具有一定强度与抗渗性能的灌注桩, 通过在桩内插入型钢提升抗弯性能, 可用于替代基坑工程中常用的钢筋混凝土支护桩。通过工程实践总结了该技术的技术原理与施工流程, 并应用于多个工程案例中, 结果表明: 建筑固废制备的可控低强度材料具有良好的力学性能和抗渗性能, 与型钢组合形成的支护结构可满足基坑工程的挡土、止水与变形控制需求; 通过调整可控低强度材料的物理力学性质与成孔工艺, 可应用于不同的地层条件。与SMW工法桩等依赖原位搅拌工艺的支护桩相比, 基于可控低强度材料的型钢灌注桩在硬黏土层、卵砾石层、风化岩层等硬质地层中具有更高的施工效率和成桩质量; 而工程经济性对比结果表明, 与钢筋混凝土灌注桩相比, 可降低约25%的工程造价, 且能够消纳利用建筑固废, 兼顾经济性与环境友好。

关键词: 基坑工程; 可控低强度材料; 型钢; 施工工艺; 低碳环保; 生态工法桩

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0488-09

Technology and application of shaped steel cast-in-place pile based on controlled low strength material

YU Wei^{1,2}, WANG Chao¹, WANG Ningning², YANG Bo¹, WANG Xueting¹

(1. Nanjing SEU Geotechnical Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210018, Jiangsu, China;

2. Municipal Underground Engineering Technology Research Center of Nanjing, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: In the process of urban construction, a large amount of construction solid waste such as engineering waste soil, waste mud and construction waste are produced. In order to expand the way of resource utilization of these construction solid waste, a technology was proposed based on using controlled low strength material (CLSM) prepared from construction solid waste to fabricate shaped steel cast-in-place piles for excavation engineering. In this technology, the construction solid waste is prepared into a controlled low strength material with fluidity and self-compacting, which is injected into the pile hole formed by mechanical excavation. After maintenance, the cast-in-place pile with adequate strength and impermeability is formed. By inserting steel in the pile to improve the bending performance, it can be used to replace the traditional reinforced concrete support pile in foundation pit engineering. The technical principles and construction process of this technology were summarized through engineering practice in several project cases. The results show that the controlled low strength material prepared from construction solid waste exhibits good mechanical properties and impermeability, and the combined support structure with steel meets the requirements of retaining soil, sealing water and deformation control of foundation pit engineering. By adjusting the physical and mechanical properties of controlled low strength material and the pore-forming process, it can be adapted to different geological conditions. Compared with support piles such as SMW method piles that rely on in-situ mixing technology, shaped steel cast-in-place piles based on controlled low strength material have higher construction efficiency and pile quality in hard strata such as hard clay layers, gravel layers, and weathered rock layers.

收稿日期: 2024-02-22

作者简介: 余巍 (1986—), 男, 江苏沭阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地下工程的研究工作。E-mail: 410629439@qq.com。

The comparison of engineering economy shows that compared with reinforced concrete cast-in-place piles, it can reduce the engineering cost by about 25%, and can also utilize construction solid waste, balancing economy and environmental friendliness.

Key words: foundation pit engineering; controlled low strength material (CLSM); shaped steel; construction technology; low carbon environmental protection; ecological construction method pile

0 引言

随着城市化进程的加速, 建筑行业迅猛发展, 同时也产生了大量的建筑固体废弃物(以下简称“建筑固废”), 对这些建筑固废的处置是城市发展与生态环境建设过程中亟待解决的问题^[1-4]。传统的填埋处置虽然操作简单、处置数量大, 但实施过程中不仅占用了大量土地, 还可能对环境造成二次污染。如何实现建筑固废的资源化利用成为了当前研究的热点^[5-6]。

在基坑工程建设中, 支护结构类型与桩身材料的选择对于工程安全性和经济性有着重要影响^[7-8]。传统的桩身材料(如混凝土), 虽然具有强度高、抗渗性能好等优势, 但制备过程中需要消耗大量的水泥、砂石等材料, 且施工工艺复杂、周期长, 导致工程成本高昂^[9]。和混凝土相比, 利用建筑固废制备桩身材料具有环保、经济等多方面的优势。

基于上述背景, 本文提出了一种基于建筑固废制备可控低强度材料的型钢灌注桩技术。该技术通过合理的材料配比和工艺控制, 利用工程渣土等建筑固废制备具有良好力学性能和经济性的桩身材料, 实现了建筑固废的高效利用。同时, 通过植入可回收的型钢改善桩体受力性能, 能够满足基坑竖向围护结构的要求, 为基坑支护提供了一种兼顾经济性和环境友好性的支护桩。

与SMW工法等依赖原位搅拌技术形成桩体再植入型钢的支护桩相比, 采用钻孔灌注的成桩工艺能在硬黏土层、卵砾石层、风化岩层等原位搅拌成桩效果较差的地层中经济高效地成桩, 且桩身完整性与均匀性更易控制; 而与钢筋混凝土灌注桩相比, 采用建筑固废制备的可控低强度材料与可回收的型钢形成复合桩, 建造成本和碳排放量降低明显, 具有更好的经济效益和环境效益。

1 技术原理及工艺流程

1.1 技术原理

(1) 可控低强度材料原理

可控低强度材料(Controlled Low Strength Material, CLSM) 是一种以土或工矿废弃物的细颗

粒为主料, 加入胶凝材料、水和必要的外加剂后, 经充分搅拌加工而成的填料, 具有流动性、自密实、28 d 抗压强度不超过 8.3 MPa、抗渗性能好、长期稳定的特点^[10-11]。

可控低强度材料的制备原料来源广泛, 已有研究表明, 工程渣土、盾构渣土、建筑垃圾等各类建筑固废均可作为主料用于制备可控低强度材料^[12-15]。固化剂则以硅酸盐水泥为主, 并可根据需要掺入粉煤灰、矿渣等工业固废以及减水剂、缓凝剂等外加剂来改善性能。受材料数量、产品性能等因素影响, 目前工程中实际应用的可控低强度材料主要以各类工程渣土为主料制备, 每立方米可控低强度材料质量配比如表 1 所示。拆除的混凝土、砖块等建筑固废经破碎筛分后, 剔除其中粒径大于 20 mm 的颗粒, 可用于替代一部分干土, 但需要通过试验确定固化剂配比。

表 1 每立方米可控低强度材料质量配比
Table 1 Mass ratio of CLSM per cubic meter

材料	质量/kg
干土	900~1 200
水泥	100~150
粉煤灰	130~180
水	270~320

通过改变材料配比, 可以灵活调整可控低强度材料的各项性能参数, 如强度、流动性、抗渗性能等, 从而满足不同的工程需求。利用可控低强度材料流动性、自密实的特点, 可在狭小空间内形成连续完整的结构体。材料固化后具有一定的强度, 当应用于基坑支护桩时, 要求 7 d 无侧限抗压强度不低于 0.8 MPa、28 d 无侧限抗压强度不低于 1.2 MPa, 但一般不高于 2.5 MPa。其强度低于混凝土、水泥砂浆等材料, 但高于原位搅拌的水泥土, 可满足工程挡土与抗渗需求。

(2) 型钢灌注桩成桩原理

使用机械在地层中挖掘形成桩孔后, 将可控低强度材料灌入桩孔中, 在材料初凝前依据需求插入型钢等加筋体, 经养护固化后成桩, 且工后加筋体可回收。采用这种工艺制成的竖向围护结构即为型

钢可控低强度材料灌注桩，又简称为生态工法桩。

型钢可控低强度材料灌注桩的应用形式灵活，其布置形式如图 1 所示，既可插入型钢，形成可承载土压力的实桩，也可仅采用可控低强度材料灌注形成素桩，进行挡土与隔渗；既可以采用单桩进行柱列式布置，也可以各桩之间进行咬合搭接，形成具有挡土隔渗能力的连续式桩墙。当无地下水止水需求时，宜采用柱列式实桩进行基坑支护。

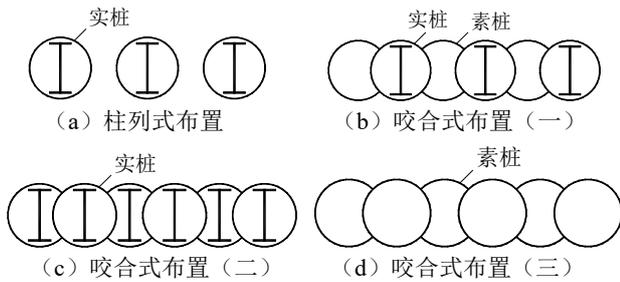


图 1 型钢可控低强度材料灌注桩布置形式

Fig. 1 Arrangement forms of shaped steel cast-in-place piles based on CLSM

1.2 工艺流程

(1) 可控低强度材料生产工艺

可控低强度材料的生产可根据需求采用工厂集中加工或现场设备加工工艺。主料应采用满足要求的工程渣土、建筑垃圾等建筑固废，并经充分破碎，筛除其中粒径大于 20 mm 的颗粒。制备前需根据主料的性质和目标材料性能进行配比试验，确定合适的固化剂配方。可控低强度材料的生产流程为：检验主料→材料配比初试→确定固化剂的配方→检验固化剂→材料生产配比试验→批量生产→运输。应用于基坑支护桩时，可控低强度材料质量控制指标如表 2 所示。

表 2 可控低强度材料质量控制指标

Table 2 Quality control indicators for CLSM

控制项目	桩体材料控制指标
湿密度/(kg/m ³)	≥1 500
流动性/mm	≥120
强度/MPa	>0.8 (7 d); >1.2 (28 d)
渗透系数/(cm/s)	≤10 ⁻⁶
泌水率/%	<3

(2) 型钢灌注桩成桩工艺

型钢灌注桩的施工工艺包括成孔、材料灌注、型钢植入、养护、型钢回收等步骤。

a) 成孔：应根据工程需求和场地地质条件合理选用成孔工艺。在岩质地区、卵砾石或硬土地层宜选用旋挖或长螺旋钻进工艺成孔。在软土、易坍塌地层

等特殊地区成孔时，需采取泥浆护壁、埋设护筒等措施。在成孔过程中，应保持连续施工，并确保成孔完成至灌注低强度材料的间隔时间不超过 12 h。

b) 材料灌注：在进行可控低强度材料灌注前应检查桩孔的孔位、孔径、垂直度、孔深、沉渣厚度等项目，确认合格后应立即开始灌注。可控低强度材料从拌合完成至灌注时间不应超过 3 h，若间隔时间超过 3 h，应添加缓凝剂。灌注可采用溜槽、溜管、泵送管道等形式，并尽量避免直接冲击桩孔侧壁。当进行水下灌注时应采用导管，其管口底部位置应控制在灌注面以上 1.0 m 以内。

c) 型钢植入：型钢的植入应在可控低强度材料灌注施工结束后 30 min 内进行。型钢插入过程中应采用牢固的定位导向架并采取措施保证型钢的垂直度。型钢插入到位后，应用悬挂构件控制型钢顶标高，并与已插好的型钢牢固连接。

d) 养护：型钢可控低强度材料灌注桩施工完成后应立即进行养护。采用严实覆盖土工布或塑料膜养护，并采取适当的措施保持桩体湿润。养护时间应不少于 7 d，期间应避免桩体受到过大的外力作用，以免造成桩体损坏。

e) 型钢回收：对有回收要求的型钢，在植入前应进行表面除锈清洁，并在表面涂刷减阻材料。型钢的回收应在支护桩与主体结构外墙之间的空隙回填密实后，根据设计要求和工程实际情况进行。型钢采用机械设备进行拔出，在拔出过程中，应采取措施保证拔出的顺利进行，并避免对周围土层造成过大扰动。拔出后留下的空隙应及时注浆填充。

型钢可控低强度材料灌注桩施工工艺流程如图 2 所示。

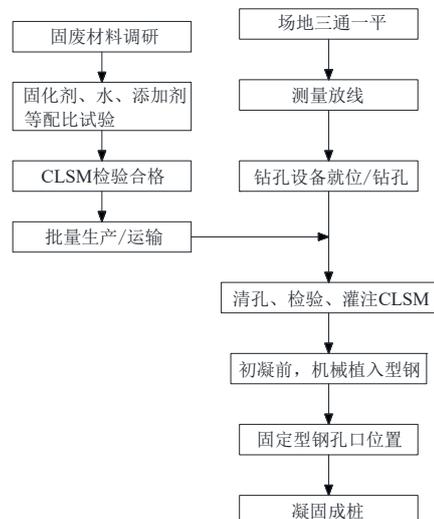


图 2 型钢可控低强度材料灌注桩施工工艺流程

Fig. 2 Construction process of shaped steel cast-in-place pile based on CLSM

2 工程应用

2.1 基坑支护选型

型钢可控低强度材料灌注桩可应用于软土、硬质土、土岩结合的复杂地层等各类地层中, 只要能够使用机械形成稳定的桩孔即可采用。同时, 可根据基坑开挖深度、周边环境等灵活选用桩型, 以及结合使用支撑、锚索等措施。表 3 给出了依据工程经验的支护体系选型参考, 具体设计需根据计算确定。

表 3 型钢可控低强度材料灌注桩选型参考

Table 3 Selection criteria for shaped steel cast-in-place pile based on CLSM

开挖深度/m	土层条件	支护结构类型
<6	差	桩+1 道支锚
	中-好	悬臂桩
6~10	差	桩+1~2 道支锚
	中	桩+1 道支锚
	好	双排桩、桩+1 道支锚

2.2 应用案例一

(1) 工程概况

南京汇通路片区某小学基坑工程, 位于南京市栖霞区汇通路以西, 奔马路以南。基坑开挖面积约为 14 800 m², 周长约为 520 m, 基坑挖深为 6.25~8.30 m。地层主要为填土、粉质黏土、全-强风化闪长岩, 典型地层剖面见图 3。场地四周有市政道路、地下管线等限制, 须采用垂直支护。

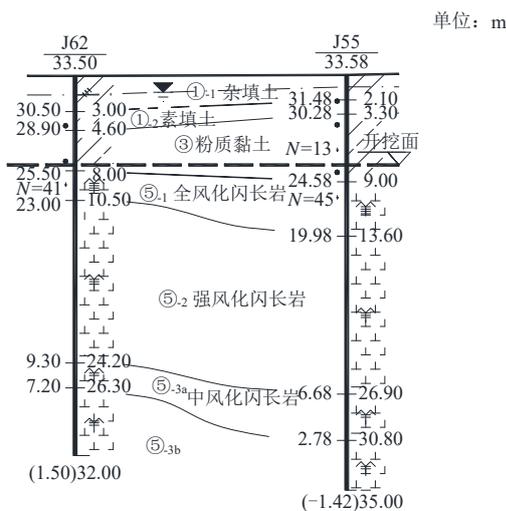


图 3 典型地层剖面图 (案例一)

Fig. 3 Typical strata profile (Case 1)

(2) 设计方案

采用双排直径为 850 mm 的型钢可控低强度材料灌注桩, 排间距为 2.60 m, 桩长为 12.0 m, 桩端

进入 ⑤-2 强风化闪长岩层, 内插型钢的型号为 HN700×300II, 型钢底部高于灌注桩底 500 mm。前排桩采用图 1 (b) 所示咬合式布置 (一) 方式, 实桩与素桩间隔咬合搭接, 搭接长度为 200 mm; 后排桩采用柱列式布置方式, 实桩中心距为 1 300 mm。前后排桩采用冠梁与整板连接一体, 典型支护结构剖面图如图 4 所示。

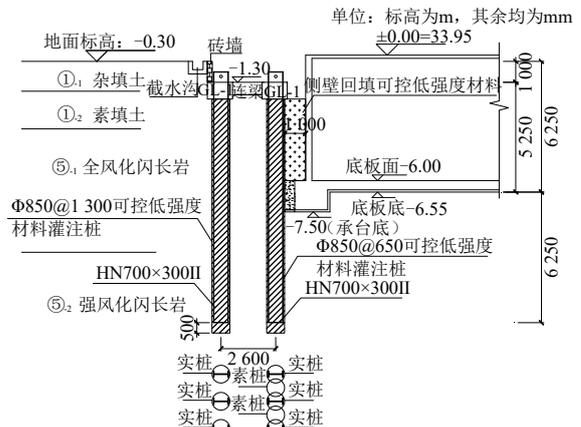


图 4 典型支护结构剖面图 (案例一)

Fig. 4 Typical support profile (Case 1)

(3) 施工工艺与材料要求

采用干作业旋挖成孔方式, 可控低强度材料采用导管灌注, 施工控制参数如表 4 所示。

表 4 施工控制参数 (案例一)

Table 4 Construction control parameters (Case 1)

项目	控制项目	控制指标
成孔控制	成孔直径	850 mm
	作业类型	干作业旋挖成孔
	垂直度	不应大于 1/100
	直径误差	±10.0 mm
材料控制	沉渣厚度	<200 mm
	湿密度	≥1 550 kg/m ³
	塌落度	120~160 mm
	强度	28 d 无侧限抗压强度不小于 1.2 MPa
	渗透性	28 d 抗渗性能检测优于 1×10 ⁻⁶ cm/s

(4) 成桩质量与基坑变形

可控低强度材料灌注桩按设计要求养护 28 d 后采用取芯法检测。取芯抽检数量不少于总桩数的 2%, 且不少于 3 根。每根桩在全桩长范围内连续钻取芯样并观察完整性与均匀性, 随后选取沿桩长不同深度处的 5 组芯样进行后续试验, 每组芯样应能保证至少制取 3 件试块。如图 5 所示, 芯样连续完整, 以柱状为主, 少部分呈块状, 材料分布均匀, 表面光滑, 断口吻合。



图5 型钢可控低强度材料灌注桩钻芯取样

Fig. 5 Core sampling of shaped steel cast-in-place piles based on CLSM

钻取的芯样参照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[16]中的相关要求截取与加工,并进行室内无侧限抗压强度试验,实测芯样强度为1.57~2.32 MPa,满足设计要求。

从支护结构施工至基坑回填完成,在整个基坑的使用周期中,基坑支护结构变形、周边环境变形监测数据最大值如表5所示,均未超过预警值。

表5 基坑监测最大值汇总表(案例一)

Table 5 Summary of maximum values for pit monitoring (Case 1)

监测项目	累计最大值/mm	预警值/mm
周边道路沉降	7.53	20
周边管线沉降	2.83	15
桩(坡)顶水平位移	21.40	25
桩(坡)顶垂直位移	8.20	25
坑外水位	990.00	1 000
深层水平位移	18.20	30

2.3 应用案例二

(1) 工程概况

南京某研发中心项目基坑工程,位于南京市雨花台区铁心桥街道。基坑开挖面积为4 250 m²,周长约271 m,开挖深度为9.6 m。地层主要为素填土、粉质黏土和全-强风化安山岩,典型地层剖面如图6所示。基坑北侧距用地红线5.4~9.6 m,红线外为现状4层办公楼,基础形式为桩基础;基坑南侧距用地红线6.66~6.71 m,红线外为单层混凝土结构厂房,基础形式为浅基础;基坑西侧距用地红线6.31~6.83 m,红线外为1~4层办公楼,基础形式为浅基础。基坑距周边建筑距离较近,须采用垂直支护。

(2) 设计方案

采用单排直径为900 mm的型钢可控低强度材料灌注桩,水平设置1层钢筋混凝土支撑结构。灌注桩长桩采用图1(b)所示咬合式布置(一)方式,实桩与素桩间隔咬合搭接,搭接长度为200 mm,桩长为17.0 m,桩端进入③全风化安山岩层,内插型钢的型号为HN700×300II,型钢底部高于灌注桩底

500 mm,典型支护结构剖面如图7所示。

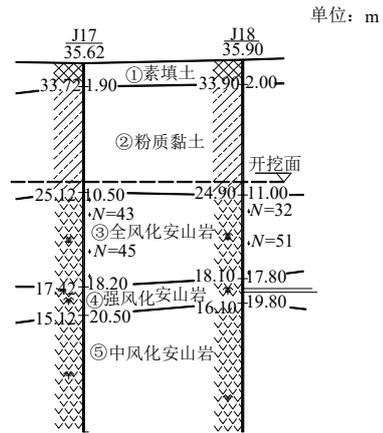


图6 典型地层剖面图(案例二)

Fig. 6 Typical strata profile (Case 2)

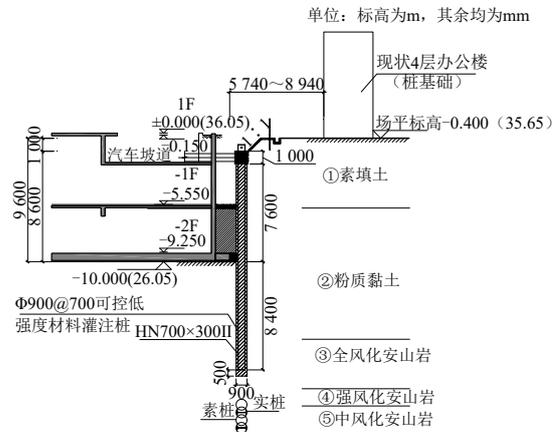


图7 典型支护结构剖面图(案例二)

Fig. 7 Typical support profile (Case 2)

(3) 施工工艺与材料要求

采用干作业旋挖成孔方式,对于局部填土厚度大于1.5 m存在塌孔风险处,采用钢护筒辅助。可控低强度材料采用导管灌注,施工控制参数见表6。

表6 施工控制参数(案例二)

Table 6 Construction control parameters (Case 2)

项目	控制项目	控制指标
成孔控制	成孔直径	900 mm
	作业类型	干作业旋挖成孔, 填土厚区域设置护筒
	垂直度	不应大于 1/100
	直径误差	±15.0 mm
	沉渣厚度	<200 mm
材料控制	湿密度	≥1 600 kg/m ³
	塌落度	140~160 mm
	强度	7 d 无侧限抗压强度不小于 0.8 MPa
	渗透性	7 d 抗渗性能检测优于 1×10 ⁻⁶ cm/s

(4) 成桩质量与基坑变形

可控低强度材料采用导管灌注如图8(a)所示,因工期紧张,养护7 d后即开挖,揭露的桩体质量

如图 8 (b) 所示, 桩体完整性良好, 止水质量可靠, 基坑开挖后效果如图 8 (c) 所示。

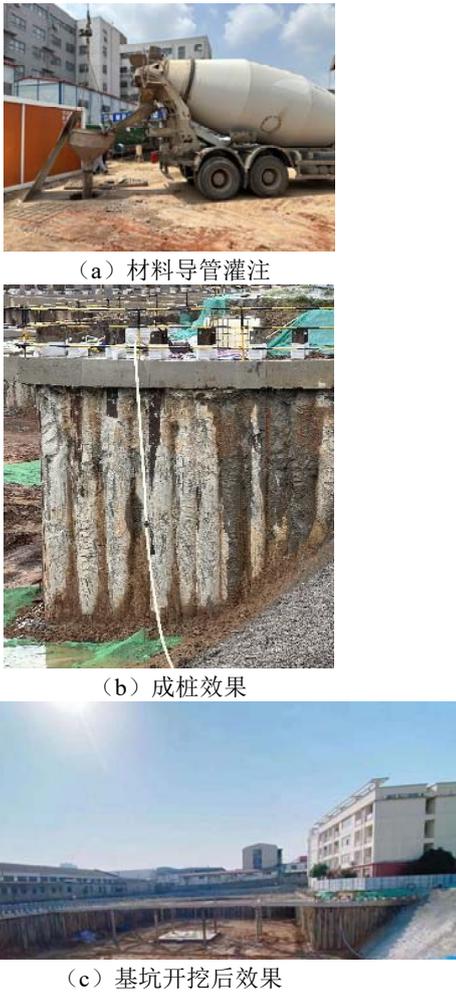


图 8 型钢可控低强度材料灌注桩施工与应用

Fig. 8 Construction and application of shaped steel cast-in-place piles based on CLSM

材料养护 7 d 后, 采用取芯法检测。芯样无侧限抗压强度为 0.85~1.22 MPa, 满足设计要求。

从支护结构开始施工至基坑回填完成, 在整个基坑的使用周期中, 基坑支护结构变形、周边建筑物变形监测数据最大值如表 7 所示, 均未超过预警值。

表 7 基坑监测最大值汇总表 (案例二)

Table 7 Summary of maximum values for pit monitoring (Case 2)

监测项目	累计最大值/mm	预警值/mm
周边道路沉降	3.92	30
周边管线沉降	3.93	30
周边房屋沉降	3.75	30
桩(坡)顶水平位移	26.60	40
桩(坡)顶垂直位移	10.55	40
坑外水位	671.00	1 000
深层水平位移	29.40	30

2.4 应用案例三

(1) 工程概况

南京市某数码科技研发中心项目基坑工程, 位于南京市江宁区莱茵达路以东, 彤天路以北。基坑周长约为 350 m, 面积约 5 200 m², 挖深 7.30~8.20 m。基坑北侧为现状 1~3 层生产厂房, 基础形式为管桩基础, 建筑外缘距基坑最近处约 16.1 m; 基坑南侧为现状 6 层办公楼, 基础形式为浅基础, 建筑外缘距基坑最近处约 14.9 m; 基坑西侧为现状市政道路, 边缘距基坑最近处约 33.0 m。

典型地层剖面如图 9 所示, 主要为素填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土和强-中风化泥质粉砂岩。场地内孔隙潜水水位埋藏浅, 填土层透水性较强, 雨季水量较丰富, 淤泥质粉质黏土层为流塑态, 钻孔过程中易发生塌孔等。

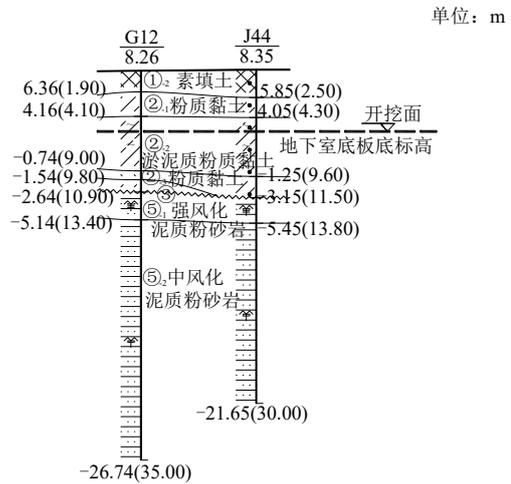


图 9 典型地层剖面图 (案例三)

Fig. 9 Typical strata profile (Case 3)

(2) 设计方案

一般段采用双排直径为 850 mm 的型钢可控低强度材料灌注桩, 排间距为 2.60 m, 桩长为 12.0 m。前排桩采用图 1 (c) 所示咬合式布置 (二) 方式, 实桩咬合搭接, 搭接长度为 200 mm; 后排桩采用柱列式布置方式, 实桩中心距为 1 300 mm。前后排桩采用冠梁与整板连接一体, 前后排灌注桩长均为 15.5 m, 内插型钢采用 HN700×300II, 型钢底部高于灌注桩底 500 mm。

转角区域采用单排直径为 850 mm 的型钢可控低强度材料灌注桩, 水平设置 1 层钢筋混凝土支撑结构。桩采用图 1 (b) 所示咬合式布置 (一) 方式, 实桩与素桩间隔咬合搭接, 搭接长度为 200 mm, 桩长为 15.5 m, 内插型钢采用 HN700×300II, 型钢底部高于灌注桩底 500 mm。典型支护结构剖面见图 10。

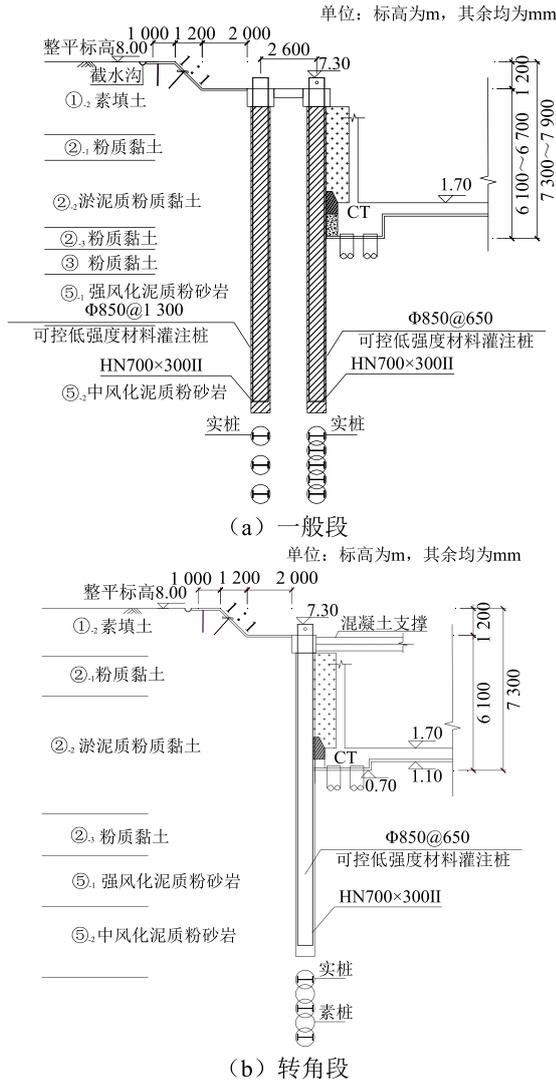


图 10 典型支护结构剖面图 (案例三)
Fig. 10 Typical support profile (Case 3)

(3) 施工工艺与控制参数

为防止在桩孔开挖过程中发生塌孔，本工程采用湿作业旋挖成孔，并调整可控低强度材料物理参数，可控低强度材料水下导管灌注施工，施工控制参数见表 8。

表 8 施工控制参数 (案例三)

Table 8 Construction control parameters (Case 3)

项目	控制项目	控制指标
成孔控制	成孔直径	800 mm
	作业类型	湿作业旋挖成孔，填土厚区域设置护筒
	垂直度	不应大于 1/100
	直径误差	±10.0 mm
	沉渣厚度	<200 mm
材料控制	湿密度	≥1 630 kg/m ³
	塌落度	150~160 mm
	强度	14 d 无侧限抗压强度不小于 0.8 MPa
	渗透性	14 d 抗渗性能检测优于 1×10 ⁻⁶ cm/s

(4) 成桩质量与监测变形

因工期紧张，桩基施工完成后养护 14 d 即进行取芯检测，型钢可控低强度材料灌注桩钻芯取样如图 11 所示。芯样基本连续完整，材料分布均匀，以柱状为主，部分呈块状，表面光滑，断口吻合。所取芯样无侧限抗压强度为 0.89~1.38 MPa，满足设计要求。基坑开挖后效果如图 12 所示。

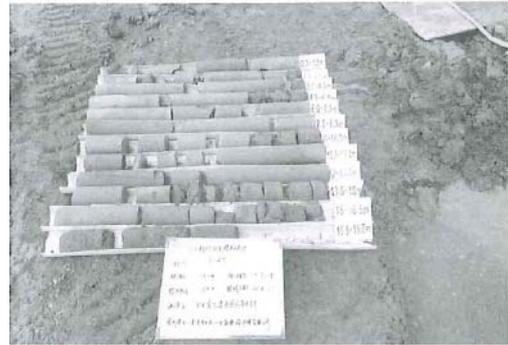


图 11 型钢可控低强度材料灌注桩钻芯取样
Fig. 11 Core sampling of shaped steel cast-in-place pile based on CLSM



图 12 基坑开挖后效果
Fig. 12 Effect after foundation pit excavation

从支护结构施工至基坑回填完成，在整个基坑使用周期中，基坑支护结构变形、周边建筑物变形监测数据最大值如表 9 所示，均未超过预警值。

表 9 基坑监测最大值汇总表 (案例三)

Table 9 Summary of maximum values for pit monitoring (Case 3)

监测项目	累计最大值/mm	预警值/mm
周边道路沉降	2.15	25
周边管线沉降	3.55	40
周边建筑沉降	2.86	15
桩(坡)顶水平位移	9.50	30
桩(坡)顶垂直位移	1.25	30
坑外水位	870.00	1 000
深层水平位移	15.98	35

3 经济性对比

与传统钢筋混凝土灌注桩施工技术相比，型钢

可控低强度材料灌注桩在地层中成孔作业的机械基本一致, 可以应对不同地层选择干、湿作业方式以及选用旋挖、长螺旋、循环钻和冲击成孔等成孔工艺; 不同的是, 型钢可控低强度材料灌注桩采用刚度大且可回收的型钢替代原有的钢筋笼, 以各类建筑固废制备的可控低强度材料替代混凝土作为桩身材料, 不仅缩减了钢筋的复杂加工工序, 提高

了施工效率与机械化程度, 也为建筑固废的资源化利用提供路径, 更具低碳环保的优势, 并且不遗留地下障碍物。

型钢可控低强度材料灌注桩可在基坑工程中替代钢筋混凝土灌注桩, 从而实现降低工程经济成本、减少建设过程中碳排放的目的。与钢筋混凝土灌注桩的经济性对比见表 10。

表 10 经济性对比
Table 10 Economy comparison

案例	部位	原方案		优化后		节省比例
		支护方案	造价/万元	支护方案	造价/万元	
一	支挡结构	钢筋混凝土灌注桩	1 030	实桩	639	23%
	止水帷幕	高压旋喷桩	201	与素桩搭接	315	
二	支挡结构	钢筋混凝土灌注桩	711	实桩	441	25%
	止水帷幕	高压旋喷桩	149	与素桩搭接	206	
三	支挡结构	钢筋混凝土灌注桩	615	实桩	382	26%
	止水帷幕	高压旋喷桩	150	与素桩搭接	188	

注: 表中实桩与素桩代表型钢可控低强度材料灌注桩的实桩与素桩; 高压旋喷桩为三重管或双重管高压旋喷桩。

4 结 论

基于可控低强度材料的型钢灌注桩技术可应用于各类地层的基坑工程中, 尤其适用于原位搅拌技术无法有效实施的硬质地层, 通过使用建筑固废制备的可控低强度材料与可回收的型钢组成基坑支护桩, 替代传统的钢筋混凝土灌注桩, 实现降低工程经济成本、减少碳排放的目的。

已有的应用案例表明该技术可满足基坑工程挡土、止水与变形控制的需求, 且施工机械与成孔工艺成熟灵活, 材料成本较低, 同时可有效消纳利用建筑固废, 推广应用可以获得良好的经济和环境效益。

尽管型钢可控低强度材料灌注桩在基坑支护工程中已成功实践应用并展现出显著的优势, 但仍有一些理论问题不明确, 有待后续进一步研究, 例如: 进一步优化桩身材料配比, 提高材料性能, 降低成本; 在不同的地层条件下, 桩基承载力、抗渗性能等指标的变化规律; 基坑支锚结构与可控低强度材料灌注桩之间的相互作用机理等。

参考文献

[1] 赵军, 刘秋霞, 林立清, 等. 大城市建筑垃圾产生特征演变及比较[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,

44(3): 1297-1304.
ZHAO Jun, LIU Qiuxia, LIN Liqing, et al. Evolution and comparison of construction waste of large cities in China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1297-1304.
[2] 冷发光, 何更新, 张仁瑜, 等. 国内外建筑垃圾资源化现状及发展趋势[J]. 环境卫生工程, 2009, 17(1): 33-35.
LENG Faguang, HE Gengxin, ZHANG Renyu, et al. Status and development trend of construction waste resource at home and abroad[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2009, 17(1): 33-35.
[3] 魏英烁, 姬国强, 胡力群. 建筑垃圾回收再利用研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2842-2846.
WEI Yingshuo, JI Guoqiang, HU Liqun. Research summary on recycling of construction waste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9): 2842-2846.
[4] 李治宏. 上海市建筑垃圾资源化利用现状及发展前景[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(3): 49-54.
LI Zhihong. Current situation and development prospect of resource utilization of construction and demolition debris in Shanghai[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(3): 49-54.
[5] 高青松, 雷琼嫦, 何花. 我国建筑垃圾循环利用产业发展迟缓的原因及对策研究[J]. 生态经济, 2012(12): 128-131, 135.
GAO Qingsong, LEI Qiongchang, HE Hua. A study on the

- reasons and strategies for slow industry development of construction waste recycling in China[J]. *Ecological Economy*, 2012(12): 128-131, 135.
- [6] 肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(4): 1-13.
XIAO Jianzhuang, SHEN Jianyu, GAO Qi, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(4): 1-13.
- [7] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(9): 99-102, 108.
GONG Xiaonan. Consideration on foundation pit engineering[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(9): 99-102, 108.
- [8] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
XU Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Guobin, WANG Weidong. *Excavation Engineering Manual*[M]. Second Edition. China Architecture & Building Press, 2009.
- [10] TREJO D, FOLLIARD K J, DU L. Sustainable development using controlled low-strength material[C]//*Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. 2004: 231-250.
- [11] ADASKA W S. Controlled low-strength materials (CLSM): USA, EP20020251146[P]. 2012-12-12.
- [12] 刘萌. 建筑渣土制备可控低强材料及性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
LIU Meng. Preparation and properties of controlled low-strength materials produced by construction waste[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [13] 汪伟. 低品质再生砂粉与盾构泥浆制备可控低强充填材料及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
WANG Wei. Mixture design and fundamental properties of controlled low strength materials with low quality recycled fines and shield slurry[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [14] 刘飞. 建筑垃圾粉料的利用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
LIU Fei. Study on the utilization of the construction waste powder[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [15] 郝彤, 王帅, 冷发光. 利用地铁盾构渣土制备高流态充填材料[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(5): 1525-1532.
HAO Tong, WANG Shuai, LENG Faguang. Preparation of high fluid filling materials by using subway shield muck[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(5): 1525-1532.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.