

CSM水泥石土搅拌墙在北京某深基坑地下水控制的应用

张利超¹ 刘武军² 丁光耀¹ 刘峰²

1. 北京建工一建工程建设有限责任公司 北京 100054

2. 北京新创展基础工程有限公司 北京 101300

摘要:北京某深基坑为多圆砾地层,且南侧邻近河道,地下水丰富补给充分,整体止水难度较大。为确保止水效果,经综合考虑采用CSM水泥石土搅拌墙代替三轴搅拌桩作为基坑的止水帷幕。针对密实圆砾层采用旋挖钻机引孔+双轮搅钻机复合成孔方式,大幅提高成孔效率,确保工期和止水效果,为北京类似工程提供经验和借鉴。

关键词:深基坑;CSM工法;止水帷幕;圆砾层;引孔;质量控制;止水

引言:随着北京城区不断建设和发展,为应对土地资源的稀缺,城市地下空间开发力度和规模加大,基坑深度越来越深^[1];同时为保护地下水资源和减少降水对周边环境的影响,北京等地区限制降水,得益于南水北调和生态补水等措施,地下水位稳步回升,深基坑开挖受地下水影响越来越大,为防止渗漏和坍塌等事故的发生,对止水帷幕施工要求越来越高。CSM工法作为一种新型、高效、环保的等厚度水泥石土搅拌墙施工技术,随着工法不断完善和施工设备逐渐成熟,CSM水泥石土搅拌墙以其适用性强、止水效果好等特点将广泛应用于城市深基坑防渗领域。

1 工法介绍

CSM工法(Cutter Soil Mixing)也叫双轮搅拌工法,是一种非取土搅拌成墙设备,即通过双轮铣头铣削土壤进齿,在铣轮破碎土壤的同时,泵通过导杆输送高压水泥浆及空气至铣削头,与掘松的原状物充分搅拌,从而形成防渗墙、挡土墙或对地层进行改良,是一种高效施工的新技术。

CSM工法结合了液压铣槽机的设备特点和深层搅拌技术,可用于地基加固/地下连续墙/防渗墙施工;该工法设备不仅能在淤泥、沙土、较软地层中施工,而且可满

足卵石层、密实砂层、风化岩石层等复杂地质条件下施工;CSM工法根据不同需要,还可插入工字钢作深基坑围护或止水之用。

2 工程概况

2.1 基坑及周边环境情况

场地位于北京市海淀区东升镇北部地区,东至清河毛纺厂中路,南至规划用地(现状空地),西至规划清河镇西路,北至规划清河镇南一路。

拟挖基坑深度14.02m~13.77m,东西长170m×南北宽132m,基坑周长518m,基坑面积18472m²。

2.2 工程地质及水文地质条件

拟建场地在地貌单元上位于清河故道(靠近北侧边缘),钻探深度55.0m范围内的地层表层为人工填土层,其下为新近沉积成因的粘性土、砂和圆砾地层,再下为一般第四系冲洪积成因的黏性土、粉土、砂、圆砾和卵石地层。

拟建场地南侧为清河,场地潜水稳定水位绝对标高37.27~40.10m,地下水位标高与清河水位标高基本一致,地表水与地下水之间存在水利联系。勘察期间观测到四层对工程有影响的地下水,地下水具体水位观测情况详见“地下水位观测情况一览表”。

表1 地下水位观测情况一览表

地下水类型及层号	初见水位埋深(m)	初见水位绝对标高(m)	稳定水位埋深(m)	稳定水位绝对标高(m)
潜水(第一层)	2.70~3.90	36.64~37.27	2.50~3.70	37.04~37.55
承压水一(第二层)	13.60~17.40	22.76~26.56	6.30~10.50	29.98~33.76
承压水二(第三层)	27.70~30.70	10.28~12.54	13.20~15.70	24.70~27.07
承压水三(第四层)	40.30~41.00	-0.74~0.31	17.80~18.40	21.66~23.11

2.3 基坑止水帷幕设计概况

采用CSM水泥石土搅拌墙封闭止水,墙厚600mm,间距2500mm,搭接300mm,搅拌墙与护坡桩净距

500mm,考虑地下水的年变化幅度,搅拌墙有效顶标高设置在-2.90m,有效桩长25.0m,汽车坡道部位有效桩长10.0m,CSM水泥石土搅拌墙采用P.O42.5普通硅酸盐

水泥，水泥浆液流量宜控制在250L/min~400L/min，水灰比1.0~2.0，水泥掺量不少于20%，墙身强度不小于0.8MPa。墙顶至地面为土体回填（水泥掺量5%）。

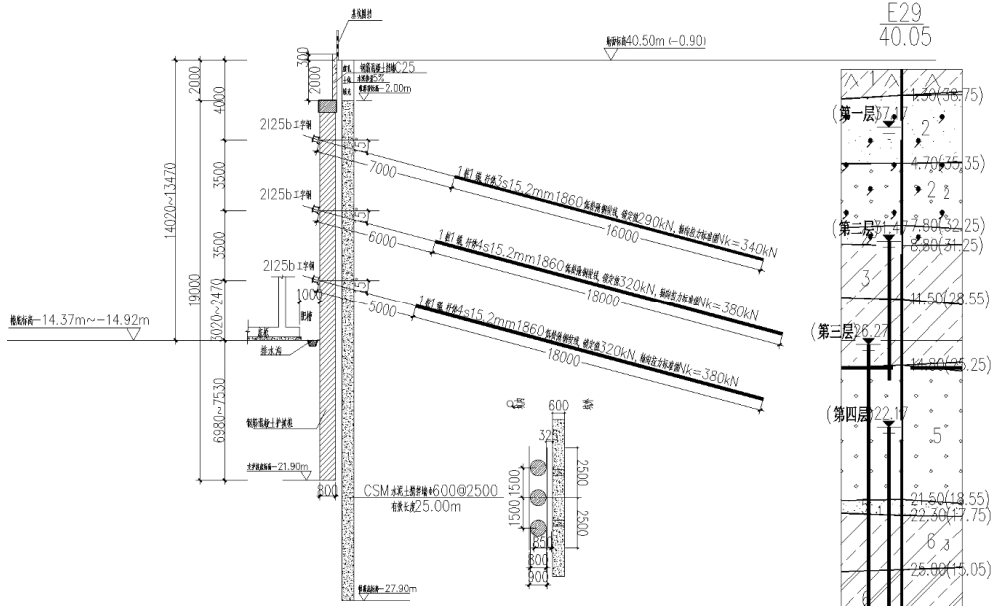


图1 设计概况及地质、水文情况

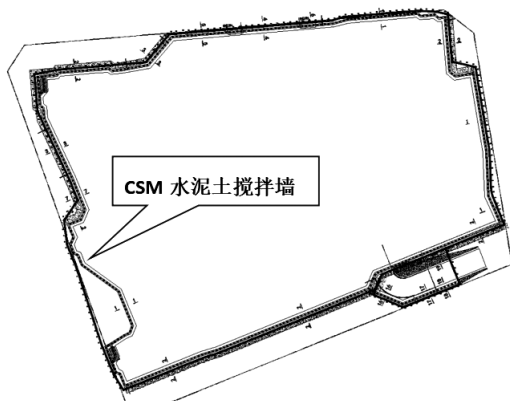


图2 CSM水泥土搅拌墙平面布置图

3 钻机构造及施工方法

3.1 双轮铣钻机构造

双轮铣钻机施工时分两块区域，由后台和前台组成。

后台：主要负责水泥浆液的配制、储存、输送及参数监控，是确保成桩质量的关键环节。主要设备包括：

表2 后台主要系统构成表

子系统	功能	关键设备
浆液搅拌系统	按配比混合水泥、水及外加剂，制备均匀浆液	高速搅拌机、储浆罐、螺旋输送机（用于水泥输送）
注浆泵送系统	将浆液加压输送至双轮铣钻头，确保注浆量稳定	高压柱塞泵（压力1.0~2.0MPa）、流量计、压力传感器

续表：

子系统	功能	关键设备
自动控制系统	实时监控水灰比、注浆量、压力等参数，调整施工工艺	PLC控制柜、人机交互界面（HMI）、数据记录仪
外加剂添加系统	根据需要注入膨润土、速凝剂（如水玻璃）等改善浆液性能	外加剂储罐、计量泵
废浆处理系统	回收或处理多余浆液，避免环境污染	废浆池、沉淀罐

前台：CSM前台系统是直接与地层交互的施工终端，主要由以下模块构成：

表3 前台主要模块构成表

模块	功能	关键设备
双轮铣削主机	液压驱动铣轮切削土层，集成注浆/注气系统	宝峨BC40、三一SCC8000等（扭矩30-80kN·m）
铣轮装置	定制化刀具组合，适应不同地层	镶齿滚刀（卵石层）、刮刀（软土）、合金刀头（岩层）
实时监测系统	采集铣头姿态、深度、扭矩等参数	倾角传感器（±0.1°精度）、GPS定位、压力传感器
注浆/注气系统	通过铣轮中空管道注入浆液或压缩空气	高压旋转接头（耐压2MPa）、气幕稳定装置
步履式行走机构	实现设备精确定位与快速转移	液压支腿（承载力≥200t）、履带底盘

3.2 施工工艺流程

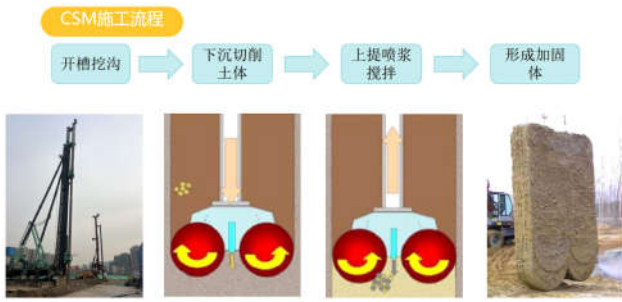


图3 CSM水泥土搅拌墙施工工艺流程图

3.3 CSM工法接头工艺

铣削搅拌墙工艺中，采用跳挖方式进行施工，先行铣削搅拌的称为一期槽，在两个已搅拌完成的一期槽中设置二期槽，二期槽铣削搅拌过程中，会对两侧已完成的一期槽墙体进行200~400mm的铣削，破碎下来的墙体与二期槽一同搅拌混合，即实现两者之间的搭接，起到连续接头的作用。

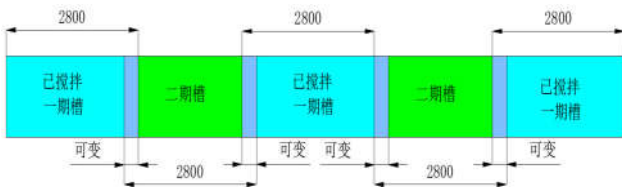


图4 CSM工法接头工艺图

3.4 CSM注浆模式

采用双液注浆模式。

施工方式：下沉切削搅拌，喷射高压水（地层差可加入适量膨润土）；上升均匀搅拌，喷射100%水泥浆。

特点：减少铣轮的磨损；减少弃土费用（泥浆可重复利用，剩余干土可轻易移除）；适用于困难地层、深墙及防渗墙。

3.5 施工技术参数

表4 CSM水泥土搅拌墙技术参数

项目		技术参数
压缩空气	气压 (MPa)	0.5 ~ 0.8
	气量 (m ³ /min)	0.8 ~ 1.5
水泥浆	压力 (MPa)	1 ~ 2
	流量 (L/min)	250 ~ 400
水灰比		1.0
水泥掺量		不小于20%
钻进速度 (cm/min)		≤ 60
提升速度 (cm/min)		40 ~ 60

4 施工技术质量控制

4.1 设备卡钻

CSM水泥土搅拌墙施工场区邻近河道，地层为多圆砾地层（总厚度9~11m），圆砾粒径较大且坚硬密实，导致双轮搅铣进速度较缓且极易卡钻，刀头磨损严重，单幅成墙时间需4~4.5小时。



图5 刀头磨损图

控制措施:(1)为提高成墙效率，采用旋挖钻机在墙正中引1个800mm孔至设计墙底标高再进行铣削搅拌成墙作业，每幅成墙时间可缩短至3~3.5小时。(2)铣进下沉过程中圆砾层加入2%掺量膨润土作业，润滑地层减少铣轮的磨损。(3)安排专人负责双轮搅设备维护和管理，每天定时检查铣轮搅头的磨损情况，安排专业焊工对搅头补焊耐磨合金贴片。

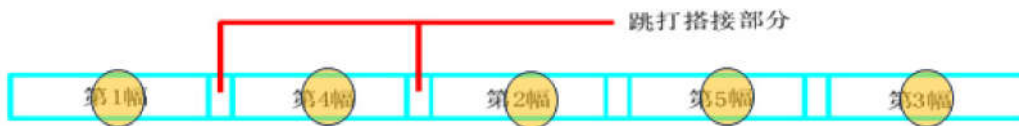


图6 旋挖墙中引1孔示意图

4.2 进尺困难

CSM水泥土搅拌墙采用旋挖钻机先在墙中引1孔，在场地东侧引孔过程中钻出胶凝状类似混凝土大硬块，推测为在地下水长期作用下砂砾土层中的钙质沉淀析出将颗粒胶结成“钙质砂岩”状的硬层，强度较高超出CSM刀具极限，引孔后多次尝试最深钻进至17.5m后已无法进尺。



图7 胶凝状混凝土硬块图

控制措施：为保证CSM水泥土搅拌墙止水帷幕顺利成墙，采用旋挖钻机在每幅墙引2个800mm孔钻至设计墙

底标高，将硬块完全抓出并用旋挖钻斗清渣再进行铣削搅拌成墙作业。

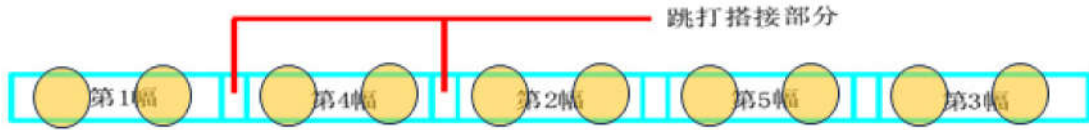


图8 旋挖墙中引2孔示意图

4.3 桩体强度不足

下部圆砾层（厚度5~7m）渗透系数大，水泥浆液在高压注入和铣削搅拌过程中，极易向周边地层漏失、流失，导致桩体强度偏低；端部为致密、高塑性的黏土粘性强，水泥浆难以渗入团块内部，容易形成“夹心”结构，导致搅拌不均，下部桩体强度较低。

控制措施：(1)针对圆砾层在水泥浆中加入抗分散剂（水泥+膨润土+高分子聚合物等）^[2]，显著提高浆液粘度、触变性和保水性，形成“凝胶网络”，有效封堵砾石孔隙，减少流失。(2)圆砾层段适当提高注浆压力（比常规提高10~20%）和注浆流量，采用“多喷点、大流量、快速通过”的策略，用足量浆液快速充填孔隙；黏土层段降低铣轮转速和提升速度，适当降低注浆压力保证注浆总量，增加在同一深度的搅拌时间，并对端部5m范围进行复搅复喷，确保黏土被充分切削、破碎、搅拌。



图9 CSM抗分散剂图

4.4 桩体垂直度偏差

圆砾层强度高、不均质，遇到大粒径卵石会导致铣轮瞬间受力不均，横向冲击力使设备向软弱侧偏斜；密实高塑性黏土层强度虽低于圆砾层，但其粘滞阻力大、塑性高，当设备从圆砾层快速进入黏土层时，若施工参数不当，造成两侧铣轮阻力差异极易发生跑偏现象。

控制措施：(1)施工前使用两台经纬仪或高精度全站仪，从两个垂直方向校准主机与导向架的垂直度，检查并确保主机在刚性导轨上运行平稳。(2)在钻杆处固定横杆，两侧挂线坠用于确定桩位，防止接头错位；在钻机前侧设置控制线，人工定时测钻机到控制线距离，控制好

桩位顺直。(3)钻机通过上部圆砾层时应低速、稳进、防冲击，穿越地层界面时必须提前预警、显著降速、平稳过渡，在下部密实高塑性黏土层中应采用匀速、控扭、防吸附。(4)配备电子可视化监测系统，机载高精度X/Y双轴倾角仪，铣轮头部内置测斜传感器，能实时、超前地反映切削头位置的真实偏斜情况，当随钻测斜显示偏斜率超过0.2%（允许值为0.4%）时，操作液压纠偏装置向偏斜反方向进行小幅度、连续的动态微调纠偏。



图10 电子可视化监测系统图

5 CSM工法优点及研究趋势

5.1 CSM工法优点

本工程采用CSM水泥土搅拌墙，具体优点如下：

(1)施工可控性强:地层较复杂，下部圆砾层施工难度大。CSM双轮搅设备配备电子可视化系统，可实时监测成孔深度、垂直度与厚度，便于及时纠偏，施工控制更为精准。

(2)成孔精度高:双轮搅采用刚性凯式方杆钻杆，强度高、贴合紧密，在硬质地层中不易变形，可有效保证成孔垂直度，确保墙身位置准确、相邻幅之间咬合严密，减少渗漏风险。

(3)搅拌性能优越:在富水圆砾层中，传统工艺难以形成均匀的水泥土体。双轮搅通过铣削成槽、自下而上喷浆搅拌，实现土体与水泥浆充分融合，并可对重点部位复搅，形成完整均匀的搅拌墙。

(4)接缝少、防渗好:单幅墙体长2.8m，幅间重叠0.3m，有效长度2.5m。相比传统三轴搅拌桩，接缝数量减少3/4，显著降低渗漏可能。

(5)无缝衔接:双轮铣头切割能力强,即使已施工墙体具有一定强度,仍可被有效切割并与新墙体紧密结合,避免形成施工冷缝,保证止水帷幕连续完整^[3]。

(6)布置灵活、环保性好:设备可采用电动或柴油动力,履带行走,现场布置灵活。具备低噪音、低振动特点,配备泥浆处理系统,可实现泥浆回收利用,减少废弃物排放,环境友好。

(7)经济效益略优:采用600mm@2500mm厚CSM水泥搅拌墙代替Φ850@600的三轴搅拌桩,在施工成本大致相同情况下CSM工法止水效果更好,综合经济效应略优。

5.2 CSM研究趋势

(1)智能、高耐久、低损耗施工装备研发:采用聚晶金刚石复合片、新型硬质合金等超耐磨材料的切削齿,以应对高磨蚀性的卵石层和软岩;构建“设备-地层”交互的数字孪生模型,在施工前模拟不同方案下的钻头受力与磨损情况,从而优化施工方案和钻头选型。

(2)复合改性材料:探索纳米材料、高性能外加剂、纤维等对水泥土性能的改良机理,旨在提升墙体的早期强度、韧性、抗渗性和耐腐蚀性,解决墙体脆性、收缩裂缝等问题。

(3)复合结构协同工作机理:研究CSM墙与型钢、预应力锚索等组合时的荷载传递、变形协调机制,优化“刚性支护+柔性止水”复合结构设计。

(4)全过程智能监控与反馈控制:基于物联网,实时采集铣削深度、扭矩、提升速度、浆液流量与压力等参数,通过机器学习模型实时判断地层变化并自动优化施工参数,确保墙体连续均匀。

(5)隐蔽墙体质量无损检测与评估:发展并融合跨孔

超声波/CT、分布式光纤、高密度电阻率法等先进检测技术,实现墙体完整性、均匀性、连续性的无损、可视化、量化评价,建立质量大数据。

6 结语

针对本工程密实圆砾层的特点,CSM水泥土搅拌墙采用旋挖钻机引孔+双轮搅钻机复合成孔方式,极大提高成墙效率,在项目全体施工人员精心施工和严格控制质量情况下,确保止水帷幕工期和止水效果。CSM水泥土搅拌墙成墙28d后,按设计要求对现场3组墙体进行现场取芯试验,芯样连续完整,墙身由上至下水泥土拌合较均匀,经检测成墙28d无侧限抗压强度满足设计要求,基坑开挖后桩间无渗漏水。

CSM水泥土搅拌墙工艺先进,质量可靠,噪声较小,节能环保,止水效果好,在北京地区相比其它止水帷幕方案是目前较优选的一种止水方案,在深基坑防渗领域运用将越来越广泛^[4]。

参考文献

- [1] 邱红臣, 闫志刚, 苏 陈. CSM工法在上海地区超深搅拌墙工程中的应用[J].建筑机械, 2023(3): 65-68.
- [2] 郭宏斌. 膨润土浆液配比对软土地层CSM水泥土搅拌墙成墙质量影响[J].建筑施工, 2024, 46(3): 317-321.
- [3] 黄建军. CSM工法施工的水泥土搅拌墙在基坑加固止水工程中的应用及效果研究[J].企业科技与发展, 2024(2): 109-113.
- [4] 王绪余, 陈良平. CSM水泥土搅拌墙在临江某深基坑止水的效果分析[J].山西建筑, 2024, 50(12): 62-64.