

TRD工法在南京扬子江智慧中心项目中的应用

李宇淮

南京国资投资置业有限公司

摘要：等厚度水泥土地下连续墙工法（Trench-Cutting&Re-mixing Deep Wall Method, 简称TRD工法）是一种适用地层广、成墙质量好、连续性强的新型止水帷幕工法，近年来在地下工程施工中广泛采用。本文以南京市扬子江智慧中心项目为实例，现场试验研究了TRD工法在长江漫滩地质深基坑中的适用性和可靠性，并因地制宜进行了实践性调整，为同类地质条件下的工程作业提供参考。

关键词：TRD工法；深基坑支护；止水帷幕

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.22.090

引言

城市功能日趋完善，不同类型的基础设施在地下纵横交错，地下工程因空间限制变得异常复杂。如何在满足功能需求的同时确保地下空间的利用安全，成为项目施工成败的关键。

基坑工程须确保地下结构施工期间地面向下开挖所形成的地下空间的安全稳定，施工可能会影响周围地下水位和应力场，特别是在基坑开挖周边存在重要管线和需要保护的构筑物时，设置有效的止水帷幕是至关重要的环节。

目前市场上常见的止水帷幕形式分别是三轴深层搅拌桩水泥墙、TRD等厚度水泥搅拌墙和地下连续墙。这些技术在基坑工程中起到关键作用，能够有效阻止地下水渗透，保障工程质量和周边环境的完整性。针对不同的地质条件和工程要求，选择适当的止水帷幕形式有助于实现基坑工程的安全高效施工。

一、工程背景

（一）工程概况及周边环境

南京扬子江智慧中心项目位于南京市江北新区顶山街道，浦镇大街以北、浦滨路以东，用地面积 3.8万平方米，总建筑面积约27.55万平方米，其中地下建筑面积7.94万平方米。

项目基坑安全等级为一级，开挖面积3.15万平方米，周长710米，开挖深度11.65-16.85米。基坑北侧地下室外墙距离用地红线约5.15米，红线外为空地，施工期间北侧修建临时施工通道，东北角为消防站楼（3F，灌注桩基础），地下室外墙距离消防站楼24.8米，基坑东侧在建地铁，地铁隧道顶埋深18.9米，基坑地下室外墙距离须与地铁特保线保持1.3米，与地铁结构外边线保持16.3米。基坑距离北十字河44.5米，北十字河常水位3.08米，历史最高水位4.08米。见图1.1

（二）工程地质条件

根据地勘报告，本项目的岩土层划分为4个工程地质层，细化为13个工程地质亚层（见表1.2），孔隙潜水主要赋存于①-2层素填土、②-1粉质黏土及②-2层淤泥质粉质黏土中，潜水水位变化受大气降水影响明显，

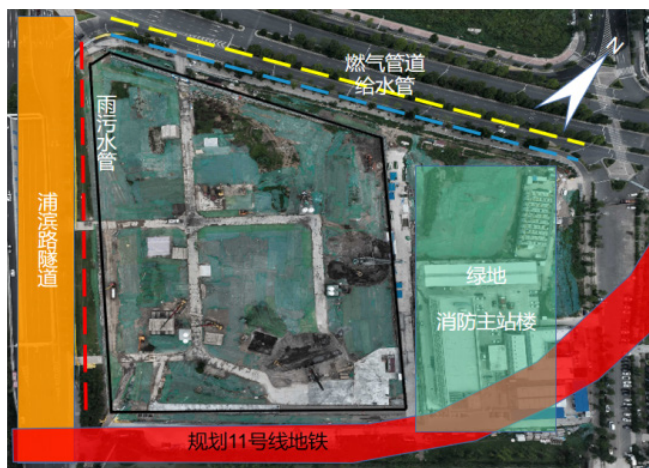


图1.1 项目周边环境

主要接受大气降水入渗、地下水侧向径流等方式补给，以地下水侧向径流及蒸发为主要排泄方式。承压水主要赋存于②-4层粉砂、②-5层粉细砂、④-1层含砾中粗砂、④-2层中粗砂混卵砾石及强风化岩层中，上部②-2层淤泥质粉质黏土与下部基岩为隔水层，含水性较好，以上部潜水垂向越流补给、长江等地表水系的侧向径流补给为主要来源，以侧向径流形式为主要排泄方式。

从地质分层表中可以看出承压含水层平均厚度约有40米（图1.3），渗透性好，基坑开挖突涌风险大，为确保基坑稳定，阻断外界地下水进入基坑内，减少基坑开挖过程中降水对周边环境的影响，止水帷幕深度应满足抗渗验算的要求。

表1.2 地质地层分布表

层号	岩土层名称	土层平均厚度 (m)	土质均匀性	工程性质评价
①-1	杂填土	2.63	不均匀	主要由建筑垃圾组成，填龄1~3年，强度低，压缩性较高，透水性中等，工程性质差。
①-2	素填土	2.43	不均匀	主要由黏性土组成，填龄6~9年，强度低，压缩性较高，弱透水性，工程性质差。
②-1	粉质黏土	2.22	较均匀	强度一般，压缩性中等，微透水性，工程性质一般。
②-2	淤泥质粉质黏土	10.38	不均匀	开挖自稳性差，强度低，压缩性高，弱-微透水性，工程性质差。
②-3	粉质黏土夹粉砂	9.64	不均匀	开挖自稳性差，强度较低，高压压缩性，弱透水性，工程性质较差。
②-4	粉砂	5.79	较均匀	强度一般，中等压缩性，透水性中等，工程性质一般。
②-4A	粉质黏土	5.71	不均匀	开挖自稳性差，强度较低，中高压缩性，弱透水性，工程性质较差。
②-5	粉细砂	11.74	较均匀	强度较高，中等偏低压缩性，透水性中等，工程性质较好。
③-1	含砾中粗砂	3.36	不均匀	强度较高，低压缩性，透水性中等，工程性质较好。
③-2	中粗砂混卵砾石	14.81	不均匀	强度较高，低压缩性，透水性中等，工程性质较好。
④-1	强风化泥岩	1.86	极软岩	强度一般，为极软岩，遇水极易软化，弱-微透水性，工程性质一般。
④-2A	中等风化泥岩	3.08	极软岩	强度较高，为极软岩，遇水极易软化，微透水性，工程性质良好。
④-2	中等风化泥质粉砂岩	10.81	极软岩、局部软岩	强度较高，为极软岩、局部软岩，遇水易软化，微透水性，工程性质良好。

二、止水帷幕方案的选择

本项目承压含水层厚度较大，基坑位于在建地铁150米控制保护区范围内，项目四周围道路隧道的市政管线较多，对周边环境变形控制敏感，对基坑变形控制要

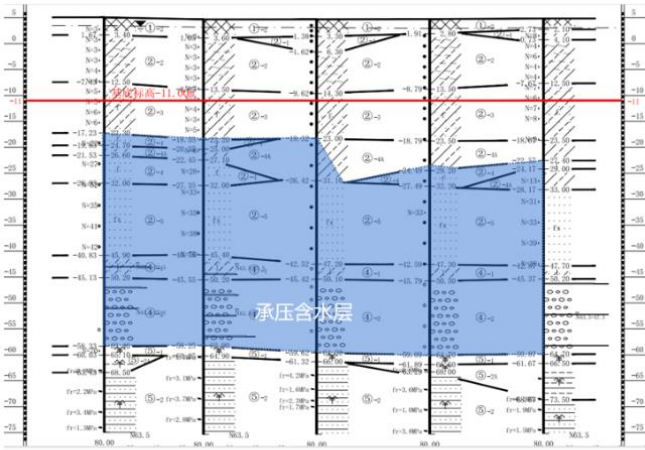


图1.3 某剖面承压含水层示意图

求极高。

市场上常见的三种止水帷幕形式分别是三轴深层搅拌桩水泥墙、TRD等厚度水泥搅拌墙、地下连续墙。三轴搅拌桩水泥墙是采用三轴搅拌桩机械在土层深部就地 将水泥和土强制搅拌（两轴同向旋转喷浆与土拌合，中轴逆向高压喷气在孔内与水泥土充分翻搅拌合），从而起到加固止水作用。TRD水泥搅拌墙是利用链锯式刀具箱 垂直打入地层中，然后作水平横向运动，同时由链条 带动刀具作上下的回转运动，搅拌混合原土并灌入水泥 浆，形成一定强度等厚度的止水墙。地下连续墙是在地 下挖一条槽沟，然后用钢筋混凝土浇筑成一道连续长的 墙壁，用它作为截水、防渗、承重、挡水的结构。

从节约成本角度和工期看，三轴搅拌桩水泥墙具有 工艺成熟、成墙灵活、造价低廉的优势，但对于超深桩 连续性控制较差，且成墙深度无法满足相关要求；从成 墙质量看，地下连续墙为钢筋混凝土构造，止水性和自 身强度都属于最优，但地下连续墙考虑两墙合一，墙体 入岩，成本造价高昂，且施工工期较长；而TRD工法水 泥墙挖掘深度深，成墙质量高，经济性上则优于地下连 续墙。见表2.1

表2.1 方案各项分析对比表

止水帷幕形式	成本造价 (万元)	工期比较 (延米/天)	成墙质量比较	单方造价 (元/m ³)
三轴搅拌桩	1120	13—14	★	600
TRD水泥墙	2660	10—12	★★★	913
地下连续墙+三轴	3880	3—4	★★★★	2500

项目四周市政管线较多，对周边环境变形控制敏 感，对基坑变形控制要求极高。结合场地水文性质及三 层地下室区域基坑底标高，需要采取加深止水帷幕深 度，增加渗流路径，以减少基坑降水对周边环境的不利 影响，结合上述方案对比，考虑地铁盾构行进时间晚于 本项目地下结构工期，施工工期较为充裕，因此，止水 帷幕方案最终调整为TRD工法水泥墙。

(一) TRD工法的工艺

TRD工法桩施工又称渠式切割等厚度水泥土搅拌 墙，其基本原理是通过动力箱液压马达驱动链锯式切割 箱，分段连接钻至指定深度，水平横向挖掘推进，同时

在切割箱底部注入固化液，使其与原位土体强制混合搅 拌，从而形成等厚度水泥土搅拌墙（见图2.2）。

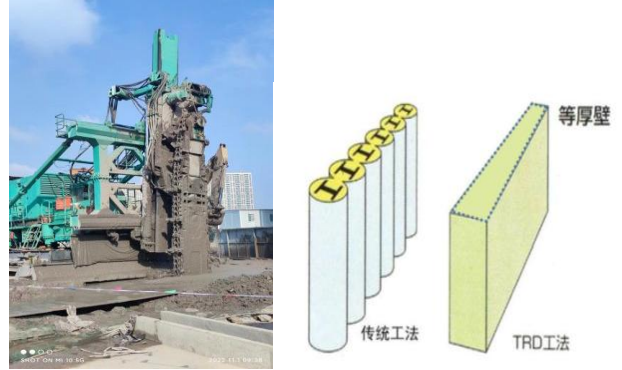


图2.2 TRD机械及成墙示意图

TRD止水帷幕施工工序主要包括切割箱自钻开挖工 艺、水泥土搅拌墙施工工艺、切割箱提取与分解工艺三 部分。施工工艺具体如图2.3：第一步横向前行时注入 切割液切割，一定距离后切割终止；第二步主机反向回 切，即向相反方向移动，移动过程中链式刀具旋转，使 切割土进一步混合搅拌；第三步主机正向回位，箱式刀 具底端注入固化液，使切割土与固化液混合搅拌。

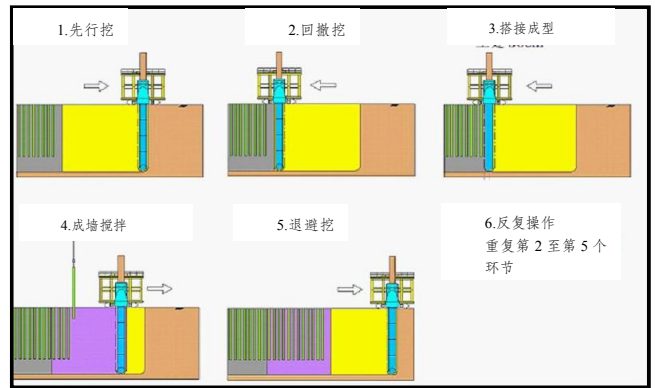


图2.3 TRD三步施工法示意图

(二) TRD工法的优势和缺陷

TRD工法有着明显的优势：

- 1) 稳定性高。主机高约10米，重心低，稳定性 好，施工过程中切割箱一直插在地下，不会发生倾倒。
- 2) 成墙质量好。连续性刀锯向垂直方向一次性的 挖掘到设计深度，然后进行混合搅拌及横向水平推进， 在复杂地层也可以保证成墙品质均一，可连续性施工， 离散型小、无缝隙，确保墙体高连续性和高止水性。
- 3) 施工精度高。施工过程中设备各类参数可实时 监控，实现了施工全过程对墙体垂直精度的控制，这是 目前其他工法无法做到的。通过施工管理系统，实时监 测切削箱体各深度X、Y方向数据，实时操纵调节，确保 成墙精度。

4) 墙体等厚。在墙体深度方向上，水泥土搅拌均 匀，水泥土的强度离散性小，强度提高。

同时TRD工法也存在一定缺陷：

- 1) 辅助设备多。在进行沟槽挖掘、预埋箱吊运、

残土处理等工序时需要挖机、履带吊等机械随时配合。

2) 不规则基坑适用性差。由于TRD整体由单个切割箱铰接而成,切割箱成墙切割路径规则,每次转向都需切割线提取分解,因此在对转角较多的基坑或弧形段则很难施工。

(三) TRD工法的应用难点

根据本项目的水文地质情况及基坑特点,采用TRD工法施工止水帷幕时需解决以下几个问题。

1) 需要进一步核定TRD工法施工中的各类技术参数,以满足对成墙质量、止水性能更高的要求。

2) 对规则基坑,尤其是弧形段,需要结合现场实际及施工经验给出解决方案。TRD的优势在于等厚成墙,但缺点也在于成槽箱是规则长方体,适合直线段,对于弧形段的转向成型存在先天不足。

3) 需做好施工范围内障碍物处理。本项目地下有沉井、地下连廊、污水管道等障碍物,在TRD施工行进中如何有效处理地下障碍物需要提前考量。

三、TRD工法在项目上的适用性调整

为了更好的解决现场遇到的应用性问题,结合现场施工情况及专家论证,TRD工法在该项目做了一系列试验和适用性调整。

(一) TRD止水帷幕钻芯试验

为确保墙身质量和止水性能最佳,现场进行非原位试成墙(位置如图3.1),试验段共计长10米,在6米处设置一个拐点,为弧形段转向施工提供技术参数。水泥掺量参数选取25%,最后根据试成墙过程中的施工及取样情况,确定水泥掺量比、膨润土添加量、机械行进速度等最优参数。

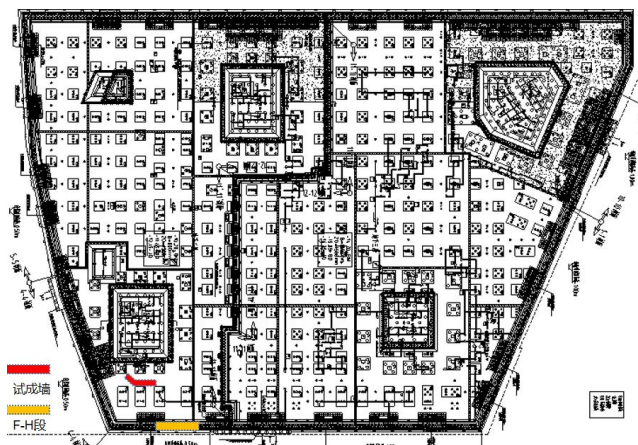


图3.1 试成墙与F-H段水泥墙位置示意图

1. TRD试成墙及切割箱原位角度调整

切割箱安装后经过10小时的搅拌成墙施工,TRD机械在设备不停机状态下进行转位试验;完成转角后的4.0m TRD等厚水泥土搅拌墙切割工作,未作喷浆。此次TRD试成墙切割过程中发现:

1) 切割液中的膨润土掺量偏少,后续TRD的正式施工时应增加切割液中膨润土掺量,同时严格控制各类材料的使用数量。

2) 返浆量明显偏少,水泥土浆液固化后出现泛白

现象。初步判断TRD成墙段下部的深厚粉砂层可能存在地下水流动,对水泥浆液的保持有较大影响,后续成墙施工过程应调整水泥掺量及膨润土添加量。

2. 止水帷幕钻芯试验

在试成墙水泥土龄期满足28天后,现场对试成墙进行了钻芯试验,对取芯样品进行无侧限抗压强度检测,经计算,试成墙(25%水泥掺量)芯样强度平均值为 $0.467\text{MPa} < 0.8\text{MPa}$,不满足深厚砂层承压水的隔水要求。

为进一步确认水泥掺量的最优参数,现在重新按照30%水泥掺量施工F-H段水泥墙,其他参数与试成墙一致。水泥墙龄期满足28天后,对F-H段(30%水泥掺量)水泥土墙进行了钻芯试验,对取芯样品进行无侧限抗压强度检测。

现场取芯观察F-H段水泥掺量提高后返浆量与泥浆颜色明显好转,芯样自上而下均较为完整,连续性好,破碎较小,芯样呈水泥土颜色,并且自上而下颜色较为均匀,墙身均匀性较好。

根据检测报告计算出F-H段(30%水泥掺量)芯样强度平均值 $1.087\text{MPa} > 0.8\text{MPa}$,满足深厚砂层承压水的隔水要求(图3.2)。



图3.2 试成墙(25%水泥掺量)、F-H段(30%水泥掺量)芯样照片

3. TRD正式成墙的施工参数调整

综合现场施工情况、试成墙和对比段取芯试验结果,确定TRD止水帷幕水泥掺量由25%提升至30%,施工中每立方被搅拌土掺入膨润土用量 $15\text{kg}/\text{m}^3$,控制机身行进速度约为 $1.7\text{m}/\text{h}$,同时不考虑增加TRD水泥墙深度,在后续施工中按照上述参数精准管控,以确保墙身强度和止水性。

(二) 基坑弧形段分段转向施工

本项目临地铁侧为基坑弧形段(图3.3),止水帷幕深度为45.0m深,弧形段长166.6m,曲率半径约383.3m,不符合TRD工艺的传统适用条件,若按主体地下室结构(支护桩)轮廓走向(弧形)推进TRD,势必对TRD转向精确控制要求极高。同时,在TRD转向时,因TRD主机高度及切割箱深度限制,下部切割箱转向角度难以控制,从而对止水帷幕的整体垂直度不能保证。对此项目结合理论和现场实际操作经验,给出了2种转向方案。

方案一:采用分段施工法,如图所示,对弧形段进行5段划分后,每施工一段直线段后切割箱进行提取安装,优点是能保证每段成墙质量,缺点则是基坑形状发生改变,支护桩和支撑梁工程量变大,增加成本。

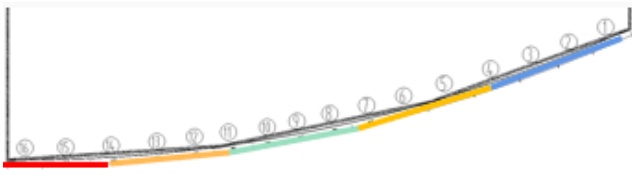


图3.3 分段施工示意图

方案二：采用原地转向施工，将弧形段分解为16个直线施工段（折线，按TRD与支护桩最大净间距200mm控制）共计176m，如图3.4所示。该方案是在每段施工完成后机械进行小角度调整，在行进中将成墙路径调整至下一段，在试成墙的4m段已进行初步试验原位转向切割。TRD工法的一大显著优势在于能实时检测设备在施工过程中的各类参数，进行监控。因此在实际施工中我们能实时监测切削箱体各深度X、Y方向数据，实时操纵调节，在每一段的行进中完成从顶部切割箱至底部箱体的转向。若无法调整到位的则整体拔出后，重新开挖预埋穴下放切割箱，同时加大回撤搭接的长度至800~1000mm。

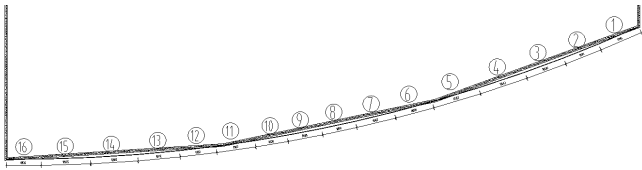


图3.4 小角度转向施工示意图

综合对比两种方案，认为方案一存在改变基坑形状、造价增加、工期延长的风险，方案二的小角度转向施工可实施监测墙身垂直度，能够确认顶底箱体转向是否同步，且在试成墙阶段已进行原位转向切割，试验成功，具有实操性，因此确定采用方案二处理基坑弧形段。

（三）TRD止水帷幕施工中的质量管控

为更好的控制止水帷幕的成墙质量，在成墙过程中对以下四个方面进行精细管控。

1) 采用比规范^[3]更高的验收标准（表3.5）组织参

表3.5 TRD工法水泥土搅拌墙控制标准

项	序	检查项目	允许值或允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	墙体强度	不小于设计值		28d试块强度或钻芯法
	2	水泥用量	不小于设计值		查看流量表
	3	墙体长度	不小于设计值		测切割链长度
	4	垂直度	≤1/250		用测斜仪量
	5	墙厚	mm	-20	用钢尺量
一般项目	1	水胶比	设计值		实际用水量与水泥等胶凝材料的重量比
	2	中心线定位	mm	±20	用钢尺量
	3	墙顶标高	mm	≥-10	水准测量

建各方交底培训，将要求贯穿到施工班组，同时项目管理方组织全过程的原材验收、成墙举牌验收、成墙检测等工作。

2) 控制止水帷幕标高和墙身垂直度偏差。施工前利用水准仪实测场地标高，利用挖掘机进行场地平整，随后采用测量仪器进行轴线引测，使TRD工法桩机正确就位，并校验桩机立柱导向架垂直度偏差小于1/250，施工过程中通过安装在切割箱体内部的测斜仪，可进行墙体的垂直精度管理，墙体的垂直度不大于1/250。

3) 控制切割液和固化液注入量。切割箱自行打入时，在确保垂直精度的同时，将切割液的注入量控制到最小，使混合泥浆处于高浓度、高黏度状态，以便应对急剧的地层变化。切割液采用钠基膨润土拌制，每立方被搅土掺入约 15kg/m³ 的膨润土，切割液混合泥浆流动度宜控制在150mm~240mm。固化液拌制采用P.0 42.5级普通硅酸盐水泥，水泥掺量不小于30%，水灰比1.2，固化液混合泥浆流动度宜控制在150mm~280mm。

4) 协调施工行进速度与搭接施工进度。根据富水砂层的地质情况、设计水泥参量及抗渗要求指标，成槽搅拌时要确保横向较快速度推进，泵的压力和浆液流量要匹配供应，以防止由于推进速度缓慢而导致切割箱体水泥浆附着层不断增厚，造成切削箱推进阻力不断增大，最后导致“抱死”的事故。按照试成墙试验确定参数，施工横向行进速度保持1.7m/h，搭接区域应严格控制挖掘速度，使固化液与混合泥浆充分混合、搅拌，搭接施工中须放慢搅拌速度，保证搭接质量。

结语

南京市近3/4的地域位于长江、秦淮河及滁河古河道漫滩区，地下水丰富，地层软弱，工程地质条件复杂。长江漫滩地貌地层的突出的特点是上部黏性土层中夹有粉细砂层透镜体，下部砂层的厚度较大^[1]。在设计基坑支护结构时，通常采用悬挂式止水帷幕，而止水帷幕深度要求超过35m时，传统的三轴搅拌水泥墙无法满足成墙质量要求。通过本项目的实践，TRD等厚度水泥搅拌墙施工深度达45m时，成墙质量可控，验证了TRD设备在南京地区的施工能力，且所采取的参数亦满足本工程所处长江漫滩地质条件的施工要求，对在南京市同类地质条件施工TRD水泥墙止水帷幕具有借鉴意义。

参考文献

[1] 李方明, 陈国兴. 江漫滩悬挂式止水帷幕基坑地表沉降变形研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1).

[2] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 5.6m深TRD法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3247-3252.

[3] JGJ/T303-201, 渠式切割水泥土连续墙技术规范[S].

[4] 丁士昭. 市政公用工程管理与实务: 中国建筑工业出版社, 2013: 66-67.