

复杂环境下超深 TRD 在地铁深基坑止水帷幕中的应用

朱宝林

上海申通地铁集团有限公司 上海 201103

摘要:上海市轨道交通 21 号线张江站主体基坑开挖深度达到 31.6m~33.4m, 且与机场联络线共墙, 临近 DN4000 污水合流管、小区建筑物、市政管线等, 周边环境复杂, 保护等级较高。基于 Visual Modflow 软件模拟分析采用悬挂式降承压水对基坑周边环境的影响, 结果表明, 降水引起的地面沉降已超过或临近周边建(构)筑物报警值。为减小基坑降水对周边建(构)物的影响, 采用超深 TRD (71m~73m) 作为基坑止水帷幕隔断深层承压水。应用结果表明, 超深 TRD 可有效隔断基坑内外承压水的联系, 增加基坑工程施工的安全性, 且可节省大量建设费用, 为今后类似深基坑止水帷幕的设计与施工提供借鉴和参考。

关键词:深基坑; 数值模拟; 止水帷幕; 超深 TRD

随着城市建设的不断推进, 国内各个城市的土地资源日渐减少, 且开发成本高速增加, 使得人们越来越关注于地下空间。在地下空间的开发利用施工中, 基坑围护及止水帷幕起到了重要作用。随着基坑开挖越来越深, 地质情况和周边环境越来越复杂, 对基坑止水帷幕的要求也越来越高。

王卫东等^{[1][2]}介绍了 TRD 作为止水帷幕在上海及天津、江苏等国内基坑工程中的实际应用。孙聪聪等^[3]介绍了 TRD 在立体车库基坑中的应用, 并结合实际工程总结了 TRD 施工工艺、施工要点及质量控制措施等。秦志龙^[4]结合上海基坑工程, 总结了 TRD 对周边建(构)物、地面沉降等的影响均在规范要求范围内。吴国明等^[5]通过现场试验, 证明在超厚砂质地层中 50m 深 TRD 的可行性。黄天明等^[6]、刘涛^[7]、孙杰^[8]通过杭州、上海等临近轨道交通基坑工程中 TRD 的成功应用, 给 TRD 在运营轨道交通周边基坑中的实施提供了一定的参考依据。虽然 TRD 作为止水帷幕在国内有了一定的应用, 但深度超过 70m 的 TRD 在实际工程中的应用仍极少。

随着地铁建设数量的急速增加, 换乘车站也越来越频繁的出现公众视野中。由于原有地铁站的影响, 一般换乘站建设为地下三层站, 车站基坑开挖深度达到 25m 以上, 基坑开挖时极易受承压水的影响。为减小基坑降承压水对周边建(构)筑物的影响, 减小工程造价, 结合上海市 21 号线一期工程张江站止水帷幕施工工况, 探讨短地下墙+超深 TRD 止水帷幕在基坑工程中的应用。

1 工程概述

1.1 工程概况

上海地铁 21 号线张江站位于浦东慈桥路北端的康桥生态园内, 与机场联络线、规划 27 号线三线换乘, 其中与机场联络线 T 型节点换乘。张江站为地下三层岛式车站, 机场联络线为地下二层侧式车站, 结构形式均为钢筋混凝土框架结构。站台中心处顶板覆土约 4.0m, 底板埋深约 31.3m。

车站主体 C 区基坑开挖深度为 33.4m, 为本线最深基坑, 围护结构采用 1200mm 厚地下连续墙, 墙深 60m; 基坑南侧与机场联络线共墙, 墙厚 1200mm, 墙深 74.5m; 北侧 2 根 DN4000 污水合流管距基坑最近约 22.6m, 管道埋深 12.8m, 处于 1 倍基坑开挖深度范围内, 车站平面如图 1 所示。

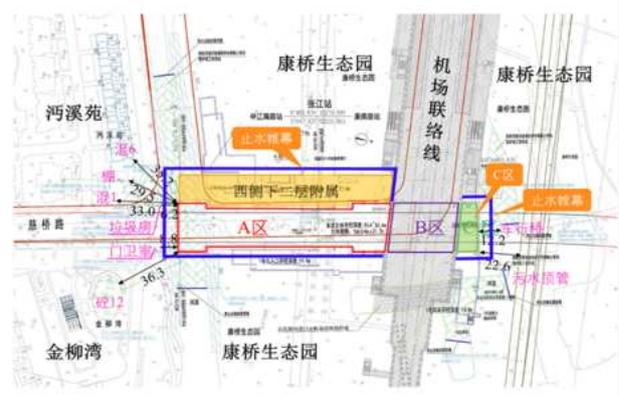


图 1 张江站总平面图

1.2 场地地质及水文条件

(1) 场地地质

张江站场地内各地基土从上而下依次为：① 1 层人工填土、② 1 层褐黄~灰黄色粉质黏土、③ 层灰色淤泥质粉质黏土、③j 层灰色砂质粉土、④ 层灰色淤泥质黏土、⑤ 1 层灰色黏土、⑤ 3-1 层灰色粉质黏土夹砂质粉土、⑤ 3-2 层灰色砂质粉土与粉质黏土互层、⑤ 4 层灰绿色粉质黏土、⑦ 2 层草黄~灰色粉砂、⑧ 1 层灰色粉质黏土夹砂质粉土、⑧ 2 层灰色砂质粉土、⑨ 层灰色粉砂。地质剖面如图 2-2 所示，场地土层及主要物理力学参数见表 1。

表 1 主要场地土层物理力学参数

土层名称	重度 (kN/m ³)	固快 (Cq)		渗透系数 KV (cm/s)
		粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (度)	
② 1 粉质黏土	18.4	18	19.5	1.41 e-07
③ 淤泥质粉质黏土	17.5	13	17.5	5.02 e-07
③j 砂质粉土	18.7	6	31.0	1.62 e-04
④ 淤泥质黏土	16.8	11	11.5	9.10 e-08
⑤ 1 黏土	17.4	13	13.5	1.02 e-07
⑤ 3-1 粉质黏土夹砂质粉土	17.8	17	20.0	4.53 e-07
⑤ 3-2 砂质粉土与粉质黏土互层	18.3	6	31.0	1.26 e-04
⑤ 3-3 粉质黏土	18.0	20	20.0	4.29 e-07
⑤ 4 粉质黏土	19.2	32	19.0	8.89 e-08
⑦ 2 粉砂	18.8	3	33.5	9.88 e-04
⑧ 1 粉质黏土夹砂质粉土	19.0	29	19.0	3.46 e-07
⑧ 2 砂质粉土	18.7	4	33.0	1.66 e-04

(2) 水文条件

本场地地下水类型主要为赋存于浅部土层中的潜水、赋存于⑤ 3-2 层中的微承压水和赋存于第⑦ 2、⑧ 2 层和⑨ 层中的承压水，由于⑧ 2 层与⑨ 层相接，故⑧ 2 层承压水与⑨ 层承压水互通。第⑤ 3-2 层微承压水水位稳定埋深为 4.20m 和 4.76m；第⑦ 2 层承压水水位稳定埋深为 5.95m 和 6.64m。

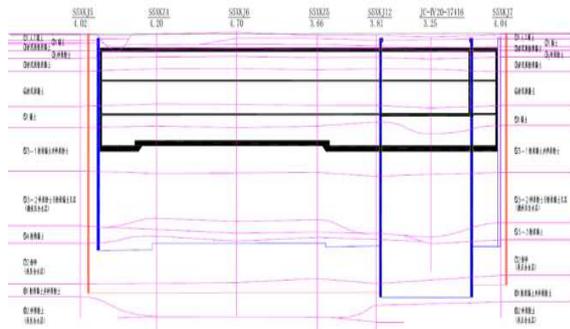


图 2 张江站 C 区地质剖面

2 基坑减压降水三维数值模拟计算

2.1 计算模型及参数设置

1) 数学模型

本文采用 Visual Modflow 软件模拟计算基坑内降水对周边环境的影响。计算时采用如下水渗流三维数学模型：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0(x, y, z) \dots\dots\dots (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) \dots\dots\dots (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ k_{xx} \frac{\partial h}{\partial n_x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial n_y} + k_{zz} \frac{\partial h}{\partial n_z} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \dots\dots\dots (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases}$$

式中

$$E = \begin{cases} S \text{ 承压含水层} \\ S_y \text{ 潜水含水层} \end{cases} \quad E = \begin{cases} S \text{ 承压含水层} \\ S_y \text{ 潜水含水层} \end{cases} ;$$

$$T = \begin{cases} M \text{ 承压含水层} \\ B \text{ 潜水含水层} \end{cases} \quad T = \begin{cases} M \text{ 承压含水层} \\ B \text{ 潜水含水层} \end{cases} ; \quad S_s = \frac{S}{M}$$

$$S_s = \frac{S}{M} ;$$

S 为储水系数；S_y 为给水度；M 为承压含水层厚度 (m)；B 为潜水含水层厚度 (m)；

k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} 分别为各相异性主方向渗透系数 (m/d)；h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值 (m)；

W 为源汇项 (1/d)；h₀ 为计算域初始水头值 (m)；

h₁ 为第一类边界的水头值 (m)；S_s 为储水率 (1/m)；t 为时间 (d)；Ω 为计算域；Γ₁ 为第一类边界；Γ₂ 为第二类边界；n_x, n_y, n_z 分别为边界 Γ₂ 的外法线沿 x、y、z 轴方向单位矢量；

q 为 Γ₂ 上单位面积的侧向补给量 (m³/d)。

q 为 Γ₂ 上单位面积的侧向补给量 (m³/d)。

2) 三维数值模型

本文采用 Visual Modflow 软件建立的三维数值模型长宽高分别为：3000m×3000m×100m，分析地下墙长度为 68m 时，采用悬挂式降⑦ 2 层承压水对抗外水位及地面沉降的影响，网格划分如图 3 和 4 所示。

模拟区概化为非均质水平向各向同性的三维非稳定地下水渗流系统。模拟区水文地质渗流系统通过概化、单元剖分，形成三维非稳定地下水渗流模型。

数值模拟的模拟期和相应计算周期视试验不同而设定不同值，在每个计算周期中，所有外部源汇项的强度保持



图8 68~70m 深度处坑外⑦2层水位降深等值线 (m) (抽水60天)

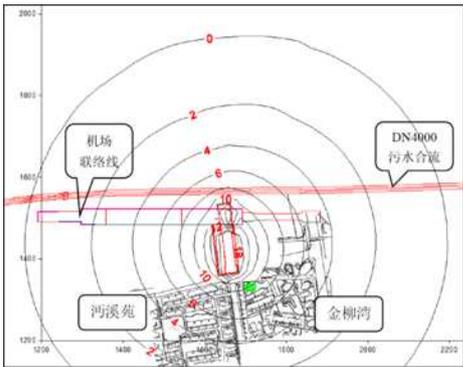


图9 降⑦2层承压水引起的地面附加沉降等值线图 (mm)

表2 基坑周边建(构)筑物处水位最大降深及地面沉降表

建(构)筑物	机场联络线	DN4000 污水管	沔溪苑小区	金柳湾小区
水位最大降深	3.6m	2.6m	3.0m	3.0m
地面预估沉降	12mm	9mm	10mm	10mm

根据计算因承压水减压降水引起的地面沉降值如图8所示,降水引起的地面沉降已超过或临近周边建筑物报警值(10mm)。因此,为减小周边建(构)筑物的变形,保护周边建(构)筑物安全,应采用封闭式止水帷幕,隔断⑦2承压含水层。

3 围护结构设计方案

3.1 围护方案比选

张江站车站主体基坑标准段开挖深度为31.6m,南端头井开挖深度为33m,北端基坑开挖深度达到33.4m,且与机场联络线共墙、邻近2DN4000污水合流管(22.6m),基坑南端小区建筑物(砖混6层和砼12层)距基坑较近(35.2m和36.3m),接近一倍基坑开挖深度范围。为保护机场联络线和周边建筑物,主体基坑围护采用1200mm厚地下连续墙。

C区基坑按初始水头埋深为地下3m计算,临界开挖深度约为28.5m,开挖至坑底时承压水需降低约11m。为减小降水对周边建(构)物的影响,采用隔断⑦2承压含水层的围护形式,具体方案如下:

(1) 方案1: 地下墙(短墙)+超深TRD(71m~73m)

车站主体地下墙(十字钢板接头)深60m、长度334m,主体及西侧地下二层附属TRD深73m、长度385m。方案1造价约10530万。

(2) 方案2: 地下墙(深墙,接缝加MJS)

车站主体地下墙(套铣接头)深73m、长度334m,地墙接缝设2根MJS工法桩,方案2造价约13560万。此外西侧地下二层附属原地下墙围护需加深14m以隔断微承压水,约增加380万。

(3) 方案对比

经对比,采用方案1比采用方案2,围护结构节省约3410万。相比地下墙加深,采用短地下墙+超深TRD止水帷幕具有显著经济性。同时TRD也可作为地下墙外第二道止水帷幕措施,增强围护止水性能。此外,TRD外包住西侧附属基坑,隔断了该基坑微承压含水层,无需增加附属地下墙长度,也降低了工程造价。

3.2 基坑支护及止水帷幕

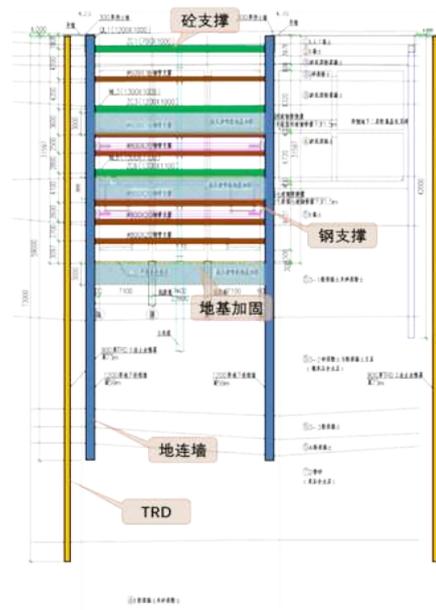


图10 张江站围护剖面

本工程基坑为明挖顺作,沿基坑竖向设置9道支撑,第一、三、六道为混凝土支撑,其余为钢管支撑。第三、六

道混凝土支撑及坑底下 3 米采用高压旋喷桩加固。为减小降水承压水对机场联络线及周边建（构）筑物的影响，基坑围护设计采用短地下墙 + 超深 TRD 止水帷幕的方案，围护剖面如图 10 所示。

4 止水帷幕

张江站 A 区基坑止水帷幕采用 73m 深 900mm 厚 TRD，C 区基坑采用 71m~73m 深 900mm 厚 TRD，总长度约 325 延长米；TRD 进入第⑧ 1 层约 2.5m。

4.1 设备选型

综合考虑地层特性、开挖深度、水泥土搅拌墙厚度和强度、施工条件、机械设备性能等因素，张江站 TRD 成墙采用 TRD-80E 工法机，如图 11 所示。



图 11 张江站 TRD 施工现场

4.2 施工工艺

- 1) 横向前行时注入切割液切割，切割达到一定距离后停止；
- 2) 主机反方向回切，回切过程中链式刀具保持旋转，以使得切割土体更进一步混合搅拌，此过程可根据土层的性质确定是否需再次注入切割液；
- 3) 主机正向回位，在箱式刀具底端注入固化液，使切割土体与固化液混合搅拌。

4.3 技术要点

- 1) 根据坐标，确定墙体轴线及高程；
- 2) 根据地勘及物探资料，提前对不良地质、障碍物和市政管线做好处理工作，保证 TRD 施工质量；
- 3) 为保证 TRD 垂直度，除做好导槽外，在 TRD 设备安装、调试时，确保其底盘水平和导杆垂直度满足要求，且在施工过程中实时对垂直度进行监测；

- 4) 保证相邻两幅 TRD 搭接长度满足规范要求；
- 5) 施工完成后，注意切割箱拔出速度，防止土体沉降。

5 降水实验

5.1 降水方案设计

本车站 C 区基坑开挖深度约 33.4m，⑦ 2 层承压水层顶埋深约 58m，层底埋深约 68m，地下连续墙深度为 60m。在基坑外侧设置 71m~73m 深 TRD，与机场联络线地下墙形成封闭止水帷幕，接缝处采用 $\varnothing 2200$ N-JET 工法桩止水。按初始水头埋深为地下 3m 计算，临界开挖深度约为 28.5m，开挖至坑底时承压水需降低约 11m。

降水试验首先开启降压井 YG7-a 进行单井降水，降水 24 小时后继续开启备用井 Y7-2，降低水位至设计要求。C 区降承压井及观测井如图 12 所示。

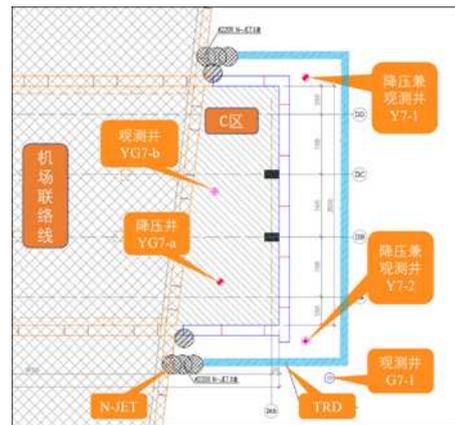


图 12 基坑（C 区）降压井及观测井平面布置图

5.2 降水方案结果

通过表 3 及图 13 试验结果可知，单井降水阶段，止水帷幕内水位降至埋深 7.22m~7.84m，降深 2.14m~3.10m，止水帷幕外水位降至埋深 4.77m，降深 0.19m。双井降水阶段，止水帷幕内水位降至埋深 16.61m~17.59m，降深 11.46m~12.87m，止水帷幕外水位降至埋深 4.90m，降深 0.32m。

根据试验结果可知，坑内水位降至设计要求后，止水帷幕外水位仅下降 0.32m，对止水帷幕外建（构）物影响极小。

C 区基坑降水试验为 A 区基坑超深 TRD 止水帷幕的实施提供了实际的参考意义。C 区基坑地下墙表面干燥，表明止水帷幕及降水效果可靠。

表 3 各井初始水位及水位降深表

试验阶段	井号	G7-1	YG7-b	Y7-1	Y7-2
试验前	初始水位 m	4.58	5.15	4.72	4.74
单井抽水	阶段水位 m	4.77	7.29	7.22	7.84
两井抽水	最终水位 m	4.90	16.61	17.59	/

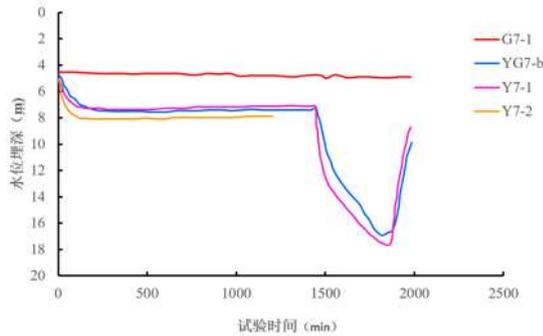


图 13 试验期间水位埋深曲线

6 结论与展望

根据张江站主体 C 区基坑降水及开挖工况, TRD 作为止水帷幕可有效隔断基坑内、外承压水联系, 降低基坑开挖对周边环境的影响。此外, TRD 施工时对临近土体的扰动很小, 周边地面基本无沉降发生。与长地下墙相比, 采用短地下墙 + 超深 TRD 止水帷幕的基坑围护方案, 更具有经济优势。C 区降水试验的结果表明止水帷幕的设计是成功的, 可为后续超过 70m 深的超深 TRD 工程提供借鉴意义

参考文献:

- [1] 王卫东, 邸国恩. TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙技术与工程实践 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 628-633.
 - [2] 王卫东, 陈永才, 吴国明. TRD 水泥土搅拌墙施工环境影响分析及微变形控制措施 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 1-5.
 - [3] 孙聪聪, 白文化. TRD 工法在井筒式超深地下立体停车库深基坑中的应用 [J]. 施工技术, 2019, 48(01): 46-49.
 - [4] 秦志龙. 超深 TRD 工法下基坑逆作法施工对周边环境的影响分析 [J]. 施工技术, 2021, 50(07): 35-39.
 - [5] 吴国明, 章兆熊, 谢兆良. TRD 工法在上海国际金融中心 56.73m 非原位成墙试验中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 814-818.
 - [6] 黄天明, 叶翔, 顾晓卫, 等. TRD 临近运营隧道微扰动施工方法研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 2327-2331.
 - [7] 刘涛. 邻近地铁某基坑的关键技术措施 [J]. 建筑工, 2024, 46(05): 745-748+769.
 - [8] 孙杰. 上海老城厢紧邻地铁 10 号线豫园站深基坑施工技术研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(09): 1477-1480.
- 作者简介: 通讯作者: 朱宝林 (1988—), 男, 汉族, 研究生学历, 研究方向为地下工程。