

临江深厚粉砂层中 TRD 等厚帷幕隔水效果研究

沈 恺¹, 蔡浩明², 杨建辉¹

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; 2. 中铁十六局集团 北京轨道交通工程建设有限公司, 北京 100018)

摘 要: 杭州地铁 8 号线一期工程 SG8-2 标段下穿钱塘江, 采用大直径泥水平衡盾构施工。由于该工程的富水软弱地层土体稳定性差, 盾构始发时易发生涌砂涌水等险情。为了防止险情发生, 在设计方案中采取了对盾构始发端头区进行搅拌桩加固, 以及在加固区周边利用水泥加固土地下连续墙(trench cutting re-mixing deep wall, TRD)形成隔水帷幕的技术措施。在临江粉砂层中地连墙施工易塌孔, 成墙存在困难, 工艺要求高, 对此论述了 TRD 工法施工工艺、施工参数, 开展了 TRD 等厚帷幕水泥土取芯和无侧限抗压强度试验, 以及加固区内降水试验, 观测了降水井抽水过程中加固区内外水位变化情况。试验结果表明, TRD 等厚帷幕在粉砂层中成墙效果良好, 其强度大于设计值 1.0 MPa, 满足设计要求; TRD 等厚帷幕能较好地隔断盾构始发加固区内外水力联系, 隔水效果良好。

关键词: 地铁; 隔水效果; 抽水试验; TRD 等厚帷幕; 粉砂层; 盾构

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2020)03-0232-06

Study on water-proof effect of TRD equal thickness curtain in deep silty sand layer of riverside

SHEN Kai¹, CAI Haoming², YANG Jianhui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., China railway 16th Bureau Group, Beijing 100018, China)

Abstract: The Hangzhou Metro Line SG8-2 uses the large-diameter slurry shield down through the Qiantang river. Because of instability of soil in water-rich weak layer, the risk of sand outburst and water gushing occurs easily when the shield machine launches. In order to prevent the dangerous situation, the technical measures is to use mixing pile reinforcement at the area of shield launching and water-proof curtain with trench cutting re-mixing deep wall (TRD) mixing wall in the design scheme. However, the TRD mixing wall in silty sand layer of riverside is prone to collapse, so it is difficult to form the wall by TRD method, with demanding technological requirements. The paper first introduced construction technology and parameters of TRD, and then carried out. The coring test and the unconfined compressive strength test of cement of TRD equal thickness curtain and the pumping test in

收稿日期: 2019-10-02

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY14E080012)

通信作者: 杨建辉(1965—), 男, 河北省安国人, 教授, 博士, 主要从事隧道工程研究。E-mail: yjh0571@163.com。

the reinforcement area. The variation of water level was observed inside and outside the reinforcement area during the pumping process of the well. The test results show that TRD equal thickness curtain is well formed in silty sand layer, with its strength greater than 1.0 MPa, which meets the design requirements. TRD curtain can better isolate the hydraulic connection inside and outside of the shield launching reinforcement area, achieving the sound water-proof effect.

Keywords: metro; water-proof effect; pumping test; TRD equal thickness curtain; silty sand layer; shield machine

近年来随着地铁施工中基坑不断向大、深方向发展,水泥加固土地下连续墙(trench cutting re-mixing deep wall, TRD)工法^[1]在隧道施工中用于深层地下水隔断的情况越来越多,相关研究也不断出现。TRD 工法起源于日本,中国于 2005 年引入此项技术,相比较于传统加劲水泥土搅拌墙(soil mixing wall, SMW)工法,它具有造价低、污染小、止水性能良好等优点^[2-3]。目前国内对 TRD 工法的研究主要集中在对大、深基坑或特殊地质条件下,TRD 等厚帷幕的应用。对大、深基坑情况,李星等^[4]通过分析工程案例总结了 TRD 等厚帷幕施工控制要点,张世轩等^[5-7]通过施工方案对比等方法确定了 TRD 等厚帷幕的施工参数;对特殊地质条件下的施工,魏祥等^[8-10]通过强度检测、渗透性检测,评估了在软土、砂层条件下 TRD 等厚帷幕的可靠性。在 TRD 等厚帷幕的理论研究方面,王卫东等^[11-13]通过有限元软件分析、施工监测等方法,研究了 TRD 等厚帷幕变形规律、力学性质,评估了 TRD 等厚帷幕施工中对周边环境的影响;陈晨等^[14]通过室内三轴试验,评估了不同水泥土掺量对 TRD 等厚帷幕渗透系数的影响;宋兵等^[15]根据渗流理论及相关规范,总结了用局部抽水试验方法评价帷幕止水效果的方法。总体而言,目前对 TRD 等厚帷幕在粉砂层中成墙工艺及其隔水效果的研究尚不多见。

基于上述情况,本文以杭州地铁 8 号线一期工程 SG8-2 标段为例,在现场对 TRD 等厚帷幕隔水效果进行试验研究。采用取芯和抽水等方法对 TRD 等厚帷幕施工及隔水效果进行分析,提出了在粉砂层条件下 TRD 等厚帷幕施工参数及评估其隔水效果的方法。

1 工程概况

本工程位于杭州钱塘新区,属杭州地铁 8 号线一期工程,为单洞双线盾构隧道,隧道全长 3 466.149 m,其中过钱塘江段约 2.1 km。隧道周边环境复杂,东侧为钱塘江及其江堤,南北两侧为浙江工商大学教学楼和生活区,周边建筑物多,需严格控制地表沉降,施工难度大。

1.1 地质概况

拟建场地下部地层主要为第四系中黏性土层,自上而下为杂填土层(0.40~2.30 m)、素填土层(0.20~3.20 m)、砂质粉土层(1.10~3.70 m)、砂质粉土夹粉砂层(1.20~9.50 m)、粉砂层(1.10~8.70 m)、砂质粉土层(0.80~9.00 m)、淤泥质粉质黏土夹粉土层(0.90~16.80 m)、砂质粉土夹淤泥质粉质黏土层(0.80~17.30 m)、淤泥质粉质黏土夹粉土层(1.20~12.00 m)、粉质黏土层(0.70~13.70 m)。本工程 TRD 等厚帷幕多位于砂质粉土层、粉砂层及各种含粉砂层中,通过钻孔取样试验可得文桥区间粉砂层颗粒级配及含水率:实测含水率 $\omega=24.0\%$,界限粒径 $d_{60}=0.157$ mm,中间粒径 $d_{30}=0.026$ mm,有效粒径 $d_{10}=0.008$ mm,不均匀系数 $C_u=21.315$,曲率系数 $C_c=1.216$,为级配良好的细粒粉砂。对工程影响较大的地下水主要位于浅(中)部填土层与砂质土层中的潜水;地表水为钱塘江,江面宽约 2.1 km,江面水位受潮汐的影响,且地表水与地下水存在一定的联系。

1.2 地层加固与地连墙结构参数

在工程中为了避免地下水涌出和开挖面坍塌,控制地表沉降,确保盾构机能从始发井安全进入盾构隧道,在始发井前端设置端头加固区,采用三重管法施工。靠风井内侧围挡采用三重旋喷桩加固,直径 0.8 m,间距(桩中心距)0.6 m;内部采用搅拌桩设置加固区,直径 0.85 m,间距(桩中心距)0.6 m;外侧围

挡使用 0.85 m 厚 TRD 等厚帷幕。加固范围为隧顶以上 5 m 至隧底以下 5 m, 宽 25 m。TRD 等厚帷幕深度为 36.658 m, 到达隧道底部以下 10 m, 并进入粉质黏土层, 以确保其止水效果。地层分布、加固区及 TRD 等厚帷幕结构如图 1 所示。

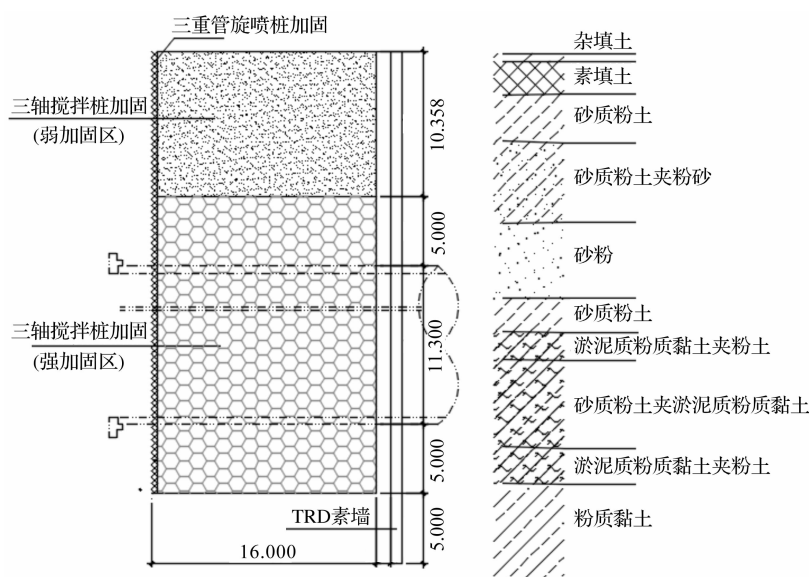


图1 TRD等厚帷幕、地层柱状图与加固区剖面图(单位:m)

Fig. 1 Section of TRD equal thickness curtain, stratum histogram and reinforcement zone(unit: m)

2 TRD 施工步骤及施工参数

TRD 工法的切削机位于地面以下,整机重心低,并且利用导轨前进,由计算机进行控制,稳定性强,精确度高。该工法适用地层广,在砂砾、硬土、砂质土及黏性土中,均能实现快速掘进。在施工过程中设备连续行进时,可以在适当位置设置 H 型钢,所成墙体没有接缝,止水性良好且墙体厚度均匀。

本工程施工所处地层主要为粉砂层,粉土层中易塌孔,淤泥质土层中易出现缩径现象。TRD 等厚帷幕处于临江富水软弱粉砂层中,由于不同含砂土层的黏土含量、含水量不同,黏土胶结作用和地下水冲刷作用会影响 TRD 等厚帷幕成墙质量,导致墙体自上而下强度不均匀。此外,浇筑混凝土过程中形成露筋、夹泥、鼓包、接缝不严密等问题,墙槽稳定性和垂直度不易控制,施工质量控制难度大。因此,TRD 工法施工时切割箱沿侧墙横向移动,采用“先行挖掘,回撤挖掘,成墙搅拌”三步成墙工艺,具体施工流程如图 2 所示。三步成墙过程中均应注入水泥浆液,并根据切割箱移动速度匹配相应的注浆速度和泥浆泵流量,注浆参数见表 1。

```
graph TD; A[空气压缩机] --> B[高压空气]; B --> C[先行挖掘]; D[TRD工法设备就位] --> C; E[制配切割液] --> F[泵送切割液]; F --> C; C --> G[回撤挖掘]; H[制配固化液] --> I[泵送固化液]; I --> J[成墙搅拌]; G --> J; J --> K[移机, 进行下一墙段施工];
```

图 2 施工工艺流程

Fig. 2 Construction procedures

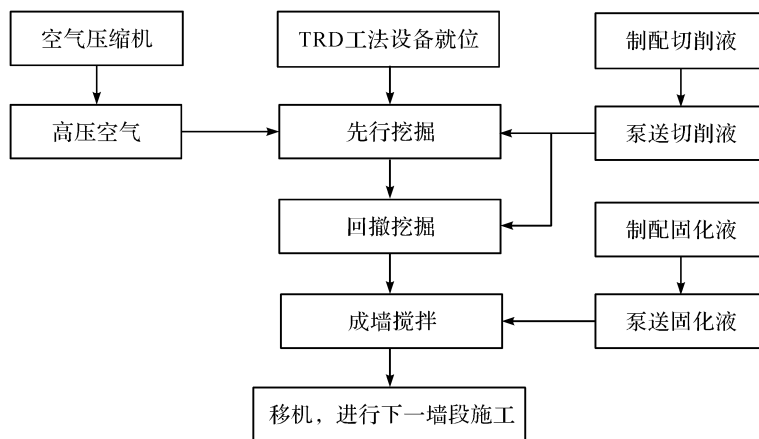


图 2 施工工艺流程

Fig. 2 Construction procedures

表 1 注浆参数表

Table 1 Grouting parameters

成墙工艺	切割箱移动速度/(m·h ⁻¹)	注浆速度/(m ³ ·min ⁻¹)	泥浆泵流量/(L·min ⁻¹)
先行挖掘	1.63	0.46	195
回撤挖掘	3.46	0.48	415
成墙搅拌	2.31	0.32	280

本工程通过施工参数的控制来保证 TRD 等厚帷幕的强度及隔水效果。墙体采用 42.5 级的普通硅酸盐水泥,水泥掺量 25%,水灰质量比为 1:1.5,泥浆相对密度 1.4~1.5。切割箱到达设计深度之后,使用斜测仪以确保垂直度偏差 $\leq 0.3\%$ 。

3 TRD 应用效果检测

TRD 等厚帷幕成墙后,在现场通过 xy-100 型岩芯液压钻机钻取水泥土芯,在室内加工成标准试件,然后采用无侧限抗压强度试验,测出试件破裂时的极限强度,判定 TRD 的强度是否符合设计要求。通过抽水试验评估 TRD 等厚帷幕的隔水效果。首先在工作井的坑内和坑外布置降水井,然后对坑内降水井进行 3 次抽水试验,每次抽水后待水位恢复到稳定位置,再观察坑内外降水井水位变化,以评估 TRD 等厚帷幕的隔水效果。最后通过水平探孔试验验证抽水试验结论的可靠性:经过 28 d 待加固区完全成形后,根据洞门点位布置进行探孔试验,观察钻探后点位是否有水渗出。

3.1 强度检测

取芯检测深度为 33.96 m,现场抽取芯样完整率大于 80%,各地层芯样均连续、完整、呈柱状,土芯如图 3 所示。观察土芯可见土体均匀,表明 TRD 法施工地连墙水泥与地层拌和均匀。无侧限抗压强度试验结果见表 2。由表 2 可知,地连墙上段平均强度为 1.14 MPa,中段为 1.10 MPa,下段为 1.17 MPa,根据土芯完整程度和强度均值,选取强度代表值为 1.10 MPa,大于设计要求的 1.0 MPa。可见地下连续搅拌的土体均匀性良好,满足强度要求。



图 3 取出的土芯
Fig. 3 Soil core

表 2 无侧限抗压强度试验结果
Table 2 Test results of unconfined compressive strength

取样部位深度/m	试件编号	芯样直径/mm	芯样高度/mm	抗压强度/MPa	强度均值/MPa
上段 4.31~4.91	1	89.5	91	1.18	1.14
	2	90.0	91	1.05	
	3	89.5	91	1.19	
中段 14.73~15.33	1	90.5	91	1.07	1.10
	2	90.0	91	1.18	
	3	90.0	90	1.04	
下段 29.86~30.46	1	90.5	90	1.22	1.17
	2	90.5	90	1.15	
	3	90.0	91	1.13	

3.2 降水试验

TRD 等厚帷幕内侧布置 2 口降水井,记为 N1、N2,帷幕外侧设 4 口水位观测井,记为 W1、W2、W3、W4,如图 4 所示。降水井外径 700 mm,内径 300 mm,深度 30.5 m。采用 3 次降水试验法,水泵放入深度 29 m,在抽取过程中测定水位,以确定 TRD 等厚帷幕内外侧的水力联系。

N1 降水井抽水情况见图 5,第一阶段抽水后井管内水位降至地面下 28 m,随后进入第一个水位恢复阶段,恢复后水位为 16.2 m。第二阶段抽水 2 h,水位降为 28.2 m,随后进入第二个水位恢复阶段,恢复后水位为 24.5 m。第三阶段抽水约 2 h,抽至水位基本上稳定,为 27.9 m,6 h 后水位恢复到 27.4 m,水位基本上达到稳定状态。N2 降水井结果如图 6 所示,情况与图 5

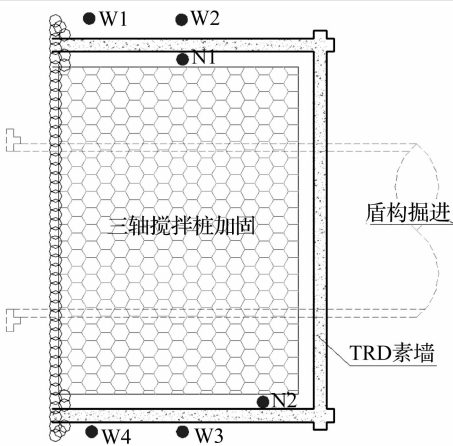


图 4 管井布置平面图
Fig. 4 Layout of tube well

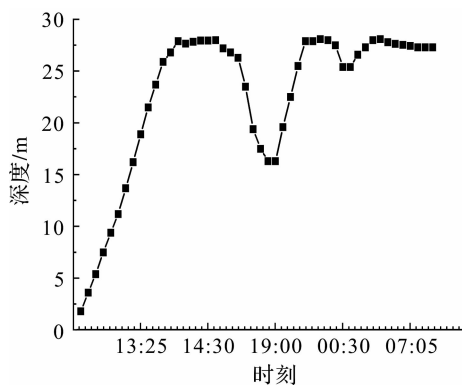


图 5 N1 管井水位变化情况

Fig. 5 Variation of water table in N1 tube well

一致,稳定水位为 27.3 m。这说明降水井 N1 与 N2 位于同一性质土层中,地下水存在流通性,两口井的试验数据相互印证,试验结果可靠。

对 TRD 等厚帷幕外侧 4 口水位观测井 W1、W2、W3、W4 的 24 h 水位变化监测结果表明,在帷幕内侧抽水井 3 次抽水期间,水位基本上稳定,为 0.95 m 左右,水位最大波动为 0.03 m,如图 7 所示。比较图 5~7 可知,在帷幕内侧降水井排水时,内侧水井水位变化显著,外侧水井水位基本上没有变化,这表明 TRD 等厚帷幕切断其内外的水力联系,止水效果良好。

3.3 水平探孔试验

在洞门位置取 9 个点位,设置 9 个直径为 60 mm 的水平探孔,深度为 6 m,点位布置如图 8 所示。经过 3 d 的观测,探孔均未发现有水流出(图 9),这表明 TRD 等厚帷幕止水效果良好,抗渗性较强。

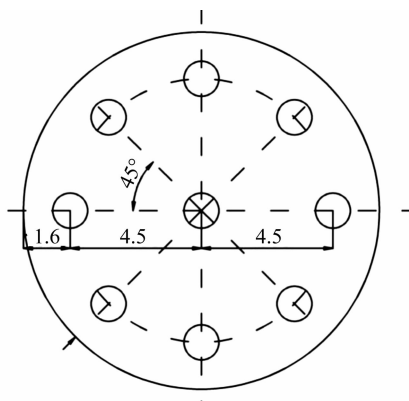


图 8 点位布置图(单位:m)

Fig. 8 Point layout(unit: m)

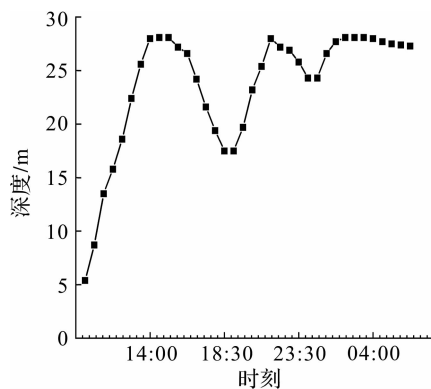


图 6 N2 管井水位变化情况

Fig. 6 Variation of water table in N2 tube well

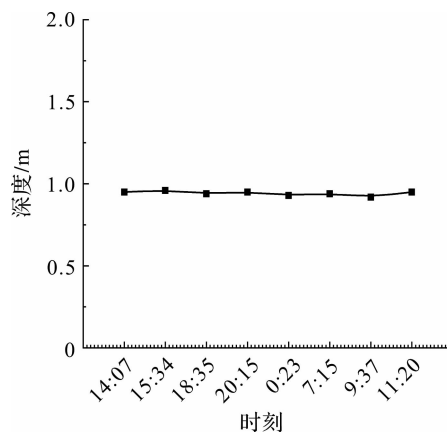


图 7 W1 管井水位变化情况

Fig. 7 Variation of water table in W1 tube well

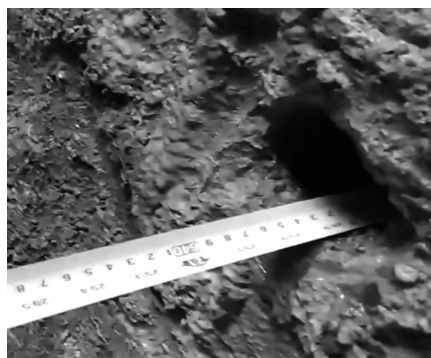


图 9 探孔情况

Fig. 9 Prospecting of hole

4 结 论

通过强度检测和降水试验对 TRD 等厚帷幕应用效果进行评估,我们得出如下结论:

1)TRD 等厚帷幕成墙后取芯完整度较高、坚硬、均匀,在粉砂层中成墙情况良好,强度在 1.10~1.17 MPa,大于设计值 1.0 MPa,满足设计要求。

2)盾构始发加固区域内每口井水位稳定在 27.3 m 左右,始终低于洞门 1 m 以下。外侧观测井水位稳定在 0.95 m 左右,水位基本上无变化,帷幕内外水位差约为 26 m。这说明 TRD 等厚帷幕较好地隔断盾构始发加固区内外的水力联系,隔水效果良好。

3)设置的水平探孔 3 d 后无水流出,说明 TRD 等厚帷幕止水效果良好,抗渗性较强,抽水试验结果可靠。

4)水灰质量比为 1:1.5,水泥掺量 25%的材料配比,以及相关施工工艺可以在临江深厚粉砂层中形成隔水效果良好的 TRD 等厚帷幕,保证了始发过程中盾构施工的安全。

参考文献:

- [1] 安国明,宋松霞. 横向连续切削式地下连续墙工法:TRD 工法[J]. 施工技术,2005(增刊 1):284.
- [2] 王凡. 雨润广场深基坑止水帷幕 TRD 工法应用及效果评价[D]. 济南:山东大学,2013.
- [3] 孙超,郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(3):104.
- [4] 李星,谢兆良,李进军,等. TRD 工法及其在深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(5):945.
- [5] 张世轩,严学宁,王翠英. TRD 水泥土搅拌墙在基坑工程中的应用[J]. 湖北工业大学学报,2019,34(1):38.
- [6] 王卫东,翁其平,陈永才. 56 m 深 TRD 工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(增刊 1):3247.
- [7] 高丽丽,温伟光. TRD 工法在深基坑工程中的应用[J]. 水利水电技术,2019,50(增刊 1):92.
- [8] 魏祥,梁志荣,李博,等. TRD 水泥土搅拌墙在武汉地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(增刊 2):222.
- [9] 桂大壮,张庆松,刘人太,等. TRD 工法在砂层中的关键工艺参数优化研究与应用[J]. 施工技术,2018,47(23):86.
- [10] 黄炳德,王卫东,邸国恩. 上海软土地层中 TRD 水泥土搅拌墙强度检测与分析[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊 2):108.
- [11] 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(增刊 1):1.
- [12] 王刚. TRD 围护结构深基坑施工变形规律研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2013.
- [13] 谭轲,王卫东,邸国恩. TRD 工法型钢水泥土搅拌墙的承载变形性状分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(增刊 2):191.
- [14] 陈晨,赵文,庞宇斌. TRD 工法水泥土墙现场取芯的三轴渗透试验[J]. 沈阳工业大学学报,2015,37(1):116.
- [15] 宋兵,徐明江. 局部抽水试验在止水帷幕止水效果评价中的应用[J]. 资源环境与工程,2019,33(1):93.