

文章编号: 1673-9469(2017)03-0045-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.010

联合加固技术在盾构接收井富水软弱地层中的应用

冯慧君^{1,2}, 俞然刚¹

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 265580; 2. 中铁投资集团有限公司, 北京 100055)

摘要: 针对传统加固方式难以保证盾构的顺利始发和接收问题, 通过对地质条件进行分析, 对加固区进行计算, 最终确定采用高压旋喷桩和地面袖阀管压密注浆联合加固技术, 加固砂层, 在富水软弱地层起到了很好的止水效果, 从后期取芯验证, 加固效果良好, 确保了土体稳定, 保证了盾构机顺利接收。

关键词: 盾构接收井; 高压旋喷桩; 袖阀管压密注浆; 联合加固

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Application of Combined Reinforcement Technology in the treatment of water rich soft strata in Shield Tunnel

FENG Huijun^{1,2}, YU Rangang¹

(1. College Of Pipeline And Civil Engineering Of China University Of Petroleum Qingdao 265580;
2. China Railway Investment Group Co.Ltd; Beijing; 100055)

Abstract: It is difficult to ensure the smooth start and reception of shields. After the analysis of the geological conditions, compaction grouting combined with reinforcement technology are used to reinforce sand layer. A very good water-stop effect is achieved in the water-rich soft soil layer. From the late core verification, one knows that reinforcement effect is good. It can ensure the stability of the soil and the smooth reception of shield machine.

Key words: Shield receiving well; High pressure jet grouting pile; Sleeve valve pipe grouting; Joint strengthening

天津地区属于软土地层, 基岩埋藏深度大, 上覆堆积物极易导致沉降量大、流泥、涌砂等工程问题^[1]。经地质条件研究分析, 靖江路西侧盾构井洞门前方地层为粘土层和粉砂层, 粉砂层中富含地下水, 具有一定承压性, 这种特殊地层条件导致盾构机在接收时极易出现涌水涌砂现象。盾构机接收过程失稳容易酿成事故, 在很多城市地铁施工中出现过, 尤其是软土地层, 所以本文根据地质条件特点, 对加固区强度进行验算, 从力学方法入手, 对盾构井加固方法和施工工艺进行了选择, 对施工过程进行控制, 保证了加固效果, 并进行了取芯验证, 对同类工程具有一定的借鉴意义。

1 工程及地质概况

1.1 工程概况

天津地铁2号线靖江路站为地下二层岛式站台车站, 采用框架式结构, 车站主体的外包长度为207 m, 并于东西两端各设一个用于盾构区间施工的端头井, 西侧端头井结构尺寸为15.60 m(长) × 22.70 m(宽), 底板埋深18.08 m; 设计为800 mm厚地下连续墙和800 mm厚钢筋砼内衬, 地下连续墙兼做主体围护结构。西侧端头井是红星路~靖江路站区间盾构接收井, 其加固的好坏直接关系到盾构能否顺利接收。

收稿日期: 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51409261)

作者简介: 冯慧君(1974-), 男, 河北高邑人, 博士, 高级工程师, 主要从事地铁项目施工管理工作。

1.2 地质水文概况

靖江路车站西侧端头井位置自地面从上到下地质结构分别为：①₁杂填土(层厚2.7~3.8 m)、③₂粉质粘土(层厚1.0~2.9 m)、④₂粉土(层厚7.0~8.7 m)、⑤₁粉质粘土(层厚1.5~2.9 m)、⑥₁粉砂(层厚4.2~4.9 m)及⑦₁粉质粘土(层厚1.1~1.9 m)，其中⑥₁粉砂层标高为-12.9~-13.1 m，距地面15 m左右，在隧底以上0.8~1.3 m位置。根据地质勘察报告显示：洞体中上部全部为第Ⅰ海相层和第Ⅱ陆相层，以粉质粘土为主，地层较软弱；洞体下部为第Ⅱ陆相层粉质粘土和粉砂层，粉砂为中等透水性，具有中密—密实状态，靖江路车站西端头井地质剖面图见图1。

2 加固区强度验算^[2-3]

加固区验算采用板块强度分析设计理论，将加固土体视为厚度为 h 的周边自由支撑弹性圆板(图2)，在外侧水土压力作用下，板中心处最大弯曲应力，支座处最大剪力，按照弹性力学板块理论求得，强度验算公式为

$$\delta_{\max} = \frac{w \left(\frac{1}{2} D \right)^2}{h^2} \frac{3}{8} (3 + \mu) \leq \frac{\delta_t}{k_1} \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{PD}{4h} \leq \frac{\tau_c}{K_2} \quad (2)$$

式中： D —洞门直径； H —加固土体厚度； δ_t —加

固土体的极限抗拉强度； w —作用于洞口中心处的侧向水土压力； μ —加固后土体的泊松比，一般取 $\mu=0.2$ ； τ_c —加固后土体的极限抗剪强度； K_1 、 K_2 —分别为最大弯曲应力和最大剪应力的计算安全系数。

车站端头井加固区的长度为6.4 m，加固区强度验算过程和各个计算参数取值如下：

隧道洞口中心处的侧向水土压力 $w=228.8 \text{ kN/m}^2$ 。

加固后土体的抗压强度 $q_u \geq 0.8 \text{ MPa}$ ，取抗压强度最小值 0.8 MPa ，极限抗拉强度取抗压强度的15%，则 $\delta_t=0.15 \times 0.8=0.12 \text{ MPa}$ 。

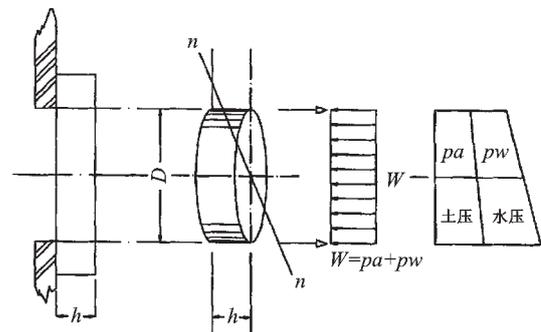


图2 板块的强度分析设计理论示意图
Fig.2 The theoretical sketch of the strength analysis and design of plate

加固土体的抗剪 τ_c 一般取抗压强度的1/6， $\tau_c=0.8/6=0.13 \text{ MPa}$ ；

洞门直径 $D=6.4 \text{ m}$ ，加固土体厚度 $h=6.4 \text{ m}$ ， $K_1=1.5$ ， $K_2=1.5$ ，将取值带入(1)和(2)式：得到，

$$\delta_{\max} = 68.64 \text{ kN} \leq \frac{\delta_t}{k_1} = \frac{120}{1.5} = 80 \text{ kN/m}^2 \text{ 满足要求；}$$

$$\tau_{\max} = 57.2 \text{ kN} \leq \frac{\tau_c}{K_2} = \frac{130}{1.5} = 86.7 \text{ kN/m}^2, \text{ 满足要求。}$$

由验算结果可知采用6.4 m加固区可以满足强度要求。

3 方案选择

3.1 盾构井原有加固方案

靖江路车站西侧盾构端头井的土体加固原设计方案采用高压旋喷桩，但是从2号线已完工盾构井加固效果来看，效果都不太理想，由于粉砂层密实性好，强度高，造成高压旋喷桩成桩效果不好，桩体不能咬合，粉砂层中富含饱和和微承压水，在洞门破除过程中，粉砂层中地下水从桩缝隙中涌入，形成涌水涌砂现象，极易造成洞门塌方，所以只采用高压旋喷桩进行土体加固，难以保证盾构接收井洞门土体加固效果。

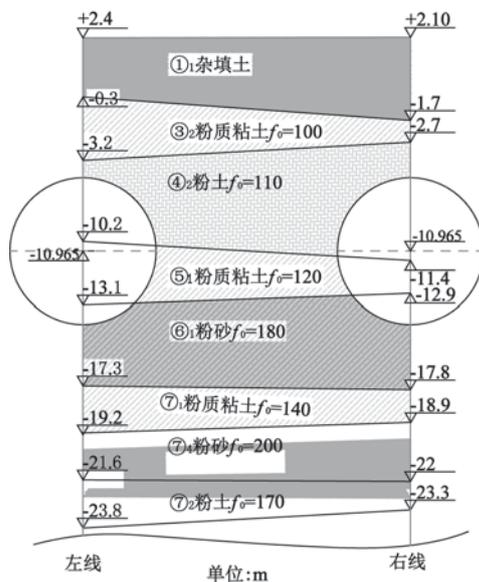


图1 靖江路车站西侧端头井地质剖面图(单位:m)
Fig.1 Geological sectional drawing of Jingjianglu Station

3.2 采用高压旋喷桩和压密注浆对盾构井洞门进行加固^[4]

经研究分析，靖江路西侧盾构井洞门前方地层为粘土层和粉砂层，粉砂层中富含地下水，具有一定承压性，这种特殊地层条件导致盾构机在接收时极易出现涌水涌砂现象。为保证盾构顺利始发，决定采用高压旋喷桩和地面袖阀管压密注浆联合进行加固，固结土体砂层。

高压旋喷桩加固长度为出洞口 6.4 m，宽度为隧道左右线中线两侧各 6.35 m，深度为隧道中心线上、下各 6.35 m，如图 3、图 4 所示。

在高压旋喷桩施工完成后，采用地面袖阀管压密注浆，对洞门前面土体进行二次加固，靠近地连墙侧 200 mm 设第一排注浆管，共设置 6 排，纵向间距 1.2 m，排距 1.0 m，梅花形布置，地面注浆范围 25.7 m × 6 m，见图 5。

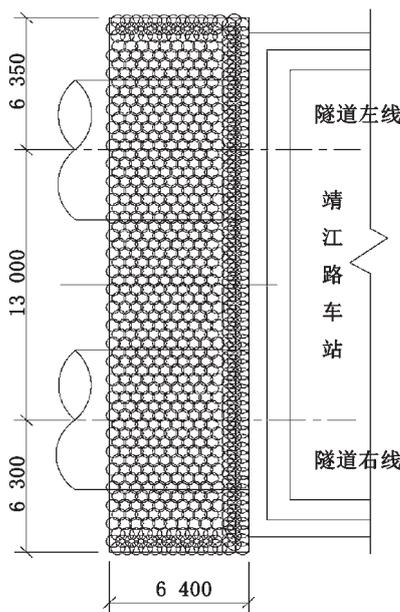


图3 高压旋喷桩平面布置图(单位: mm)
Fig.3 High pressure jet grouting pile layout

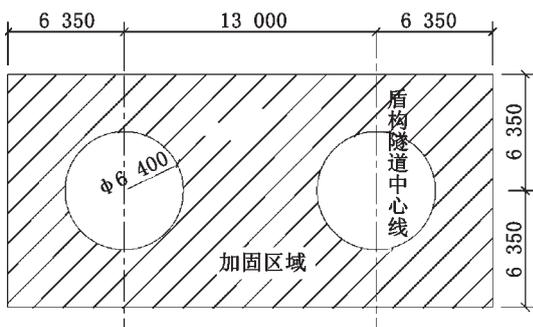


图4 高压旋喷桩加固剖面图(单位: mm)
Fig.4 Reinforcement section of high pressure jet grouting pile

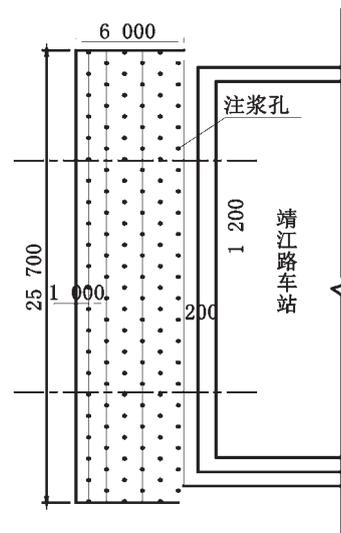


图5 地面袖阀管注浆点位布置图(单位: mm)
Fig.5 Ground sleeve valve pipe grouting point layout

4 盾构井加固施工

4.1 高压旋喷桩施工

高压旋喷桩施工采用改进型的 PH-5D 钻机施工，注浆管使用 120 mm × 120 mm 方钢管钻杆，底部带有特制喷咀，喷咀直径 2.4 mm。输浆管为内径 $\Phi 21$ mm 的橡胶钢丝高压软管，能够承受 45 MPa 以上的压力，主要作用是连接高压泵与旋喷钻机，输送浆液。注浆泵采用 GZB—40A 三活塞高压注浆泵。水泥浆采用 Po.32.5 级普通硅酸盐水泥拌制，桩体直径 $\phi 600$ ，车站围护结构外侧三排桩单孔中心距横向 400 mm，桩体咬合 200 mm，纵向桩中心理论间距 345 mm；以保证施工效果满足设计要求。

旋喷桩参数^[5]：钻进深度 19.8 m，其中 12.7 m 为盾构施工范围。桩径 600 mm，水泥掺量 140 ~ 220 kg/m 桩长，水灰比 1: 0.8 ~ 1: 1.2，水泥浆比重 1.35 ~ 1.65，旋喷桩 28 d 无侧限抗压强度不小于 0.8 MPa。采用双管施工工艺，注浆喷浆压力不小于 30 MPa，空气压力 0.6 ~ 0.7 MPa，提升速度 10 ~ 15 cm/min，转速为 15 转/min。在沙层位置（桩底以上 8 m）进行复喷一次处理。桩位定位准确，误差不得大于 30 mm，确保成桩咬合 200 mm。

4.2 钻孔布置压密注浆施工

4.2.1 现场灌浆试验

在注浆范围外选取两处开孔作为试验点，其中一孔作为注浆孔，一孔作为检查孔。通过试验取得合理的泥浆参数、浆液配比、注浆压力等。

4.2.2 注浆技术参数设计

考虑地质情况、地层土的孔隙比大小，地下水分布和状态以及实际施工情况等，注浆加固技术参数设计为，水泥浆：水玻璃浆(35Be)=1: 1(体积比)；水泥浆水灰比：1: (1 ~ 0.75) (重量比)；浆液凝固时间：30" ~ 50"；注浆压力：0.5 ~ 1 MPa，单峰压力以不超过 1.2 Mpa 为宜；注浆扩散半径：0.4 m ~ 0.5 m；注浆速度：30 ~ 50 L/min；停止注浆标准：孔口冒浆或其他孔出浆；注浆压力增加或超过规定值。

4.2.3 钻进成桩

采用地质钻机成孔，泥浆护壁，防止坍孔。成孔直径 89 mm。成孔标准：钻孔深度达到设计孔深或钻进比较困难，且接近钻孔设计深度时可终孔，终孔时准确记录钻孔深度，并注意对孔口和孔壁的保护。

4.2.4 插入袖阀管^[6]

为了防止注浆管对盾构施工产生影响，注浆管采用塑料袖阀管。在成孔完成后将管下入孔底。袖阀管是浆液进入地层的通道，其主要由花管和橡皮套构成。为保证注浆效果，应保证使袖阀管位于钻孔中心。

袖阀管的制作：袖阀管采用 PVC 管加工而成，依据钻孔需要，袖阀管 2.0 m/ 节，其大样尺寸如图 6 所示。

4.2.5 浇注套壳料

为封闭袖阀管与钻孔壁之间的环状空间，防止灌浆时浆液到处流窜，在橡皮袖阀与止浆塞的配合下，迫使浆液只能在一个灌段范围内压入地层。下好袖阀管后，用套壳料置换孔内泥浆。套壳料为具

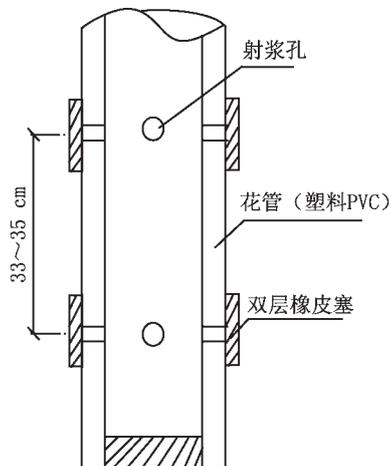


图 6 袖阀管大样

Fig.6 Structure of Sleeve-valve-pipe

有一定级配的粗沙或沙砾石，浇注时应避免套壳料进入袖阀管内。

4.2.6 注浆

在袖阀管内放入带双塞的灌浆管进行灌浆，由于地下水较多，注浆材料采用水泥 - 水玻璃双液浆^[7]。注浆时保证注浆压力稳定及注浆泵正常运转。在每一段注浆时间达到 2 ~ 3 min 时，上提注浆管，上提一段后再注浆。逐段注浆，直至设计高度，从而形成“冰糖葫芦”状加固体。

注浆顺序：为防止浆液流失过多，采取逐渐加密的原则，分两次压密注浆。注浆排序上也采取逐渐加密法，先灌外侧孔，再灌内侧孔，同时各排采用两循环加密注浆。袖阀管注浆加固工艺见图 7。

4.2.7 主要机械设备

机具设备主要包括钻孔设备及注浆设备，具体如下表 1 所示：

5 加固效果分析

盾构井加固完成后进行了现场取芯实验，实验结果达到预期目标。进行洞门凿除，在洞门凿除前进行了 3 处探孔作业，没有出现涌水现象，洞门正面非常干燥，加固效果非常好。

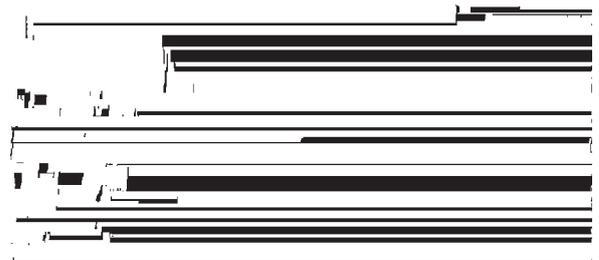


图 7 袖阀管注浆工艺示意图

Fig.7 Scheme of sleeve-valve-pipe grouting

表 1 主要机械设备配套表

Tab.1 Table of main mechanical equipment

序号	机具名称	规格型号	单位	数量
1	注浆泵	KBY-50/70	台	2
2	高压胶管	D25mm-Q16MPa × 10 (5)	m	300
3	搅拌机	0.3m ³ , 20 转 /min	台	3
4	注浆管	φ 30 mm × 5 mm	m	80
5	钻机	XY-IB 型 (150) 回转式	台	2
6	止浆塞		个	40
7	水泵		台	1

6 结论

1) 目前国内盾构端头井加固大都采用高压旋喷桩加固,但是在粉土、粉砂层成桩效果不理想,达不到防水和止水的要求。所以根据工程地质和水文地质综合分析,对加固方法进行了改良。

2) 针对天津地质条件,通过计算分析,天津地铁2号线靖江路车站西侧盾构端头井采用高压旋喷桩和袖阀管注浆联合加固地层,固结地下砂层,提高软土自稳能力,加固效果比较理想,接收井围护结构凿除后有良好的自稳性,阻止了砂土和水涌入,保证了盾构顺利接收。

参考文献:

[1] 崔奕. 天津地铁一号线土建工程关键技术问题研究

[D]. 天津: 天津大学, 2008: 24-45.

[2] 胡新朋, 孙谋, 王俊兰. 软土地区地铁盾构施工端头土体加固要求探讨[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 11-13.

[3] 吴韬. 大型盾构进出洞施工技术及其加固土体受力机理分析[D]. 上海: 同济大学, 2006: 21-26.

[4] 孙振川. 城市地铁盾构法隧道软土地段端头地层加固技术[J]. 西部探矿工程, 2003, 89(10): 81-83.

[5] 杨凤玲. 高压旋喷桩复合地基在高层住宅楼中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2004: 42-48.

[6] 王俊. 旋喷桩与袖阀管注浆在桥梁桩基加固中的应用[J]. 铁道建筑, 2013(9): 24-26.

[7] 白云, 周松. 软土地下工程施工技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2000.

(上接第40页) 掺量时达到最大。

参考文献:

[1] 孙树林, 郑青海, 唐俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608-1612.

[2] 张雁, 康雪成, 郭利勇. 石灰煤矸石改良膨胀土工程特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2720-2724.

[3] 黎新春. 风化砂改良膨胀土特性试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2014.

[4] 查甫生, 郝爱玲, 赵林, 等. 电石渣改良膨胀土试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(5): 65-69.

[5] SHAHBAZI M, ROWSHANZAMIR M, ABTAHI S M, et al. Optimization of carpet waste fibers and steel

slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology[J]. Applied Clay Science, 2017, 142(6): 182-192.

[6] 钱叶琳, 王洁, 吕卫柯, 等. 黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(2): 19-24.

[7] 黄震, 陈铖. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87-93.

[8] 邓友生, 吴鹏, 赵明华, 等. 基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 349-353.

[9] 李金志. 贝壳的综合利用[J]. 淮海工学院学报, 2001, 6(10): 22-23.