

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.08.055

# RJP 与三重管高压旋喷工艺在基坑加固工程中 施工工艺对比分析

冯国卫

(上海远方基础工程有限公司, 上海市 200436)

**摘 要:**以福州市滨海新区轨道交通滨海新城站的基坑加固工程为例,通过对坑底加固中的大直径高压旋喷 RJP 和三重管高压旋喷两种加固工艺的应用对比,分析了两种施工工艺在工艺参数设置、成桩直径、桩基完整性和强度等成桩效果,工效和成桩经济型差异。研究结果验证了 RJP 工艺在地基加固中应用较好的技术参数值。

**关键词:**三重管高压旋喷工艺;RJP 旋喷工艺;工艺对比分析

中图分类号: TU472

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0212-03

## 0 引 言

近些年,我国轨道交通建设取得较大成就,特别是粤港澳大湾区与长三角等沿海地区轨道交通车站基坑地基加固高压旋喷工艺得到越来越广泛的应用。三重管高压旋喷施工工艺广泛应用于软土基坑地基加固处理。其利用分别输送水、空气、浆液三种介质的三重注浆管,以喷射高压水和气切削土体形成孔隙,而后利用低压浆液回填,形成加固土体。受地层和工艺影响,成桩直径一般仅为 0.8~1.2 m。超大直径高压旋喷桩(RJP)与三重管高压旋喷工艺原理类似,调整增大了喷射水的压力、喷射水泥浆的压力和流量,改原三重管单独高压水切割为利用高压水和浆液对加固土体双切割以实现较大成桩直径(2.0~2.8 m)和良好成桩质量。

## 1 工程概况

福州滨海新区 F1 线滨海新城站位于规划纵一路与支一路交叉口,地下三层车站。基坑开挖深度约 20 m。基坑围护采用厚 1.0 m 地下连续墙,墙深 48.5 m,工字钢接头,地下连续墙接头区域采用 150°摆喷 2.2 m 大直径高压旋喷 RJP 工法桩用于墙缝止水。拟采用高压旋喷对坑底裙边进行加固,加固深度 3.0 m,加固区域为标段加固区域宽度 3.1 m(约 360 m),端头井加固区域宽度 4.1 m(约 150 m),

坑底纵坡区域加固宽度 7.3 m(约 50 m)。车站平面及剖面见图 1、图 2。

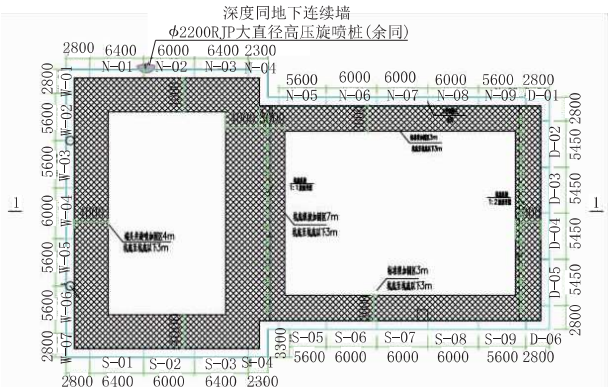


图 1 滨海新城站西端头井平面图(单位:mm)

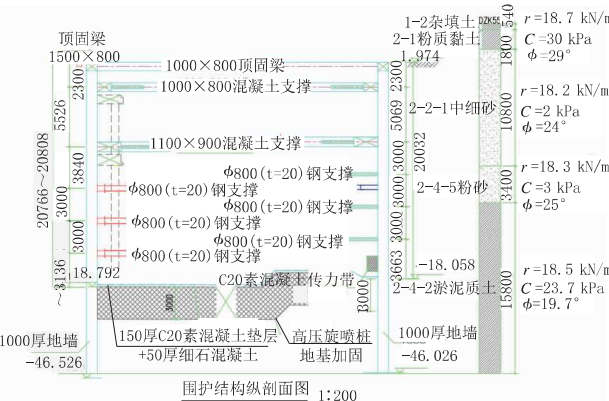


图 2 滨海新城站西端头井剖面图(单位:mm)

### 1.1 工程地质情况

- (1)填土层:杂填土、粉砂、糖泥等层厚 1.8~2.5 m。
- (2)粉质黏土:灰黄,软~可塑,湿~饱和,层厚 3.3~5.5 m。
- (3)(含泥)中细砂:灰黄色,中密~密实,局部稍

收稿日期: 2021-04-29

作者简介:冯国卫(1985—),男,本科,工程师,从事技术、施工管理工作。

密,饱和,以中砂和细砂为主,层厚 9.5~11.2 m。

(4)(泥质)粉砂:深灰色、灰黑色,稍密~中密,局部密实,层厚 10.5~12.0 m。

(5)淤泥质土:深灰色,软塑~可塑,饱和,层厚 5.3~7.2 m。

(6)强风化花岗岩:呈灰黄~灰褐色、为软岩,岩体极破碎,岩体基本质量等级为 V 级,层厚 4.2~5.4 m。

(7)中~微风化花岗岩:灰白色、青灰色,坚硬,岩体较完整,岩体基本质量等级为 II 级,层厚 4.2 m。

## 1.2 工程水文地质情况

(1)上层滞水主要存在于第四系表层的人工填土层中,对工程施工影响不大。

(2)孔隙潜水主要存在于粉质黏土、(含泥)中细砂、(泥质)粉砂层中。以上含水层赋水介质孔隙连通性较好,潜水层分布厚度大,富水性强。

(3)孔隙承压水主要赋存于(泥质)粉砂、淤泥质土层中,赋水介质结构松散,孔隙连通性较好,其透水性中等~强,承压含水层承压水头高,富水性好。

(4)孔隙裂隙承压水赋存于砂土状强风化岩、碎块状强风化岩和中风化岩层内,孔隙、裂隙连通性差,透水性弱,富水性弱。工程地质情况见表 1。

表 1 工程地质及物理力学指标

| 岩土<br>分层    | 岩土<br>名称    | 天然重度 $\gamma$<br>/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 含水量<br>$w/\%$ | 孔隙<br>比 $e$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦<br>角 $\varphi/(\circ)$ |
|-------------|-------------|-----------------------------------------------------|---------------|-------------|-----------------------|----------------------------|
| <1-2>       | 杂填土         | 18*                                                 |               |             | 10                    | 12                         |
| <2-1>       | 粉质<br>黏土    | 18.7                                                | 30.9          | 0.916       | 30                    | 29                         |
| <2-2<br>-1> | (含泥)<br>中细砂 | 18.2*                                               |               |             | 2                     | 24                         |
| <2-4<br>-5> | (含泥)<br>粉砂  | 18.3*                                               |               |             | 3                     | 25                         |
| <2-4<br>-2> | 粉质<br>黏土    | 18.5                                                | 34.2          | 0.979       | 24                    | 19.7                       |
| <3-1<br>-1> | 粉质<br>黏土    | 19.0                                                | 28.9          | 0.861       | 32                    | 29                         |

## 2 可行性施工工艺方案

### 2.1 三重管高压旋喷方案

三重管高压旋喷桩加固考虑成桩直径为 800 mm,布孔间距 500 mm<sup>[1]</sup>;旋喷桩施工采用 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥用量初定 450 kg/m<sup>3</sup>,水灰比 1.0。施工参数暂定如下:空气压力大于 0.7 MPa,浆液压力大于 3 MPa,水压大于 25 MPa<sup>[2]</sup>,水泥浆液流量大于 90 L/min。质量目标拟定:桩体完整,桩体 28 d 无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa,渗透系数小于 10<sup>-6</sup> m/s。

### 2.2 大直径高压旋喷 RJP 方案

RJP 大直径高压旋喷桩加固考虑成桩直径为 2 200 mm,布孔间距 1 800 mm。RJP 高压旋喷桩采用 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥,水泥用量 700 kg/m<sup>3</sup>,水泥浆液水灰比为 1.0。施工参数暂定如下:气压不小于 0.7 MPa,水泥浆液压力不小于 40 MPa<sup>[3]</sup>,水压大于 25 MPa,水泥浆液流量大于 110 L/min。质量目标拟定:桩体完整,桩体 28 d 无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa<sup>[4]</sup>,渗透系数小于 10<sup>-6</sup> m/s。

### 2.3 坑底加固桩位布局

旋喷桩桩位布置充分考虑三重管高压旋喷、RJP 大直径高压旋喷桩于该砂机粉砂层地质和富水水文条件下,成桩直径足够保证的前提下,亦充分考虑桩位最大程度有效搭接和地墙叠合。以端头井加固区 4.1 m×8.6 m 区域为例,三重管高压旋喷工艺方案布桩数量为 136 根,合 3.86 根/m<sup>2</sup>;大直径高压旋喷 RJP 方案布桩数量为 15 根,合 0.42 根/m<sup>2</sup>。三重管高压旋喷旋喷桩与大直径高压旋喷 RJP 桩位布置见图 3、图 4。

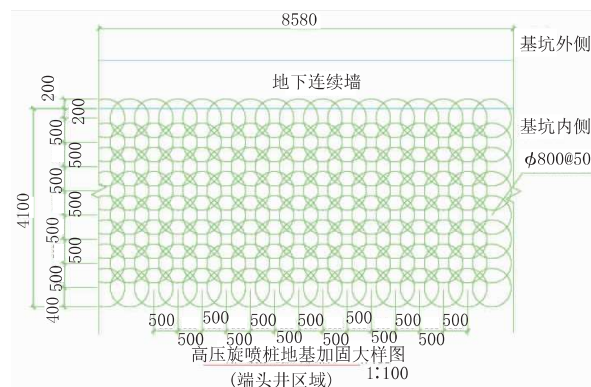


图 3 三重管旋喷桩桩位布置图(单位:mm)

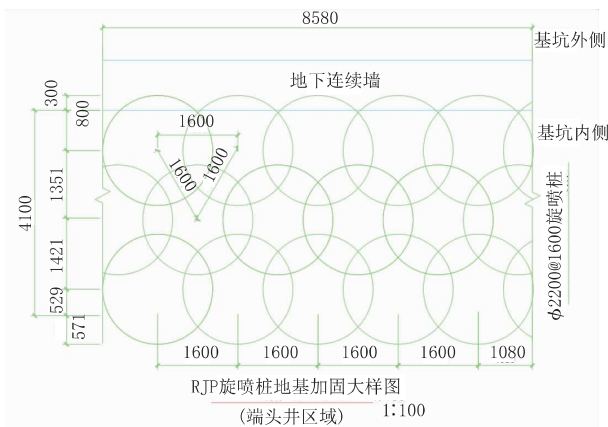


图 4 大直径高压旋喷 RJP 桩位布置图(单位:mm)

## 3 工艺方案经济比选

### 3.1 加固工程数量情况

依据三重管高压旋喷及大直径旋喷桩 RJP 桩位

布置方案,福州滨海新区 F1 线滨海新城站基坑加固设计和初选工艺参数统计计算。本项目采用三重管高压旋喷工艺施工根数为 8 670 根计 199 410 延米(其中空桩 173 400 m、实桩 26 010 m);采用 RJP 大直径高压旋喷工艺施工根数为 945 根计 21 735 延米(其中空桩 18 900 m、实桩 2 835 m)。本项目 2 种方案工程数量统计情况见表 2。

表 2 F1 号线滨海新城站地基加固工程量计算

| 序号 | 面积    | 三重管方案<br>(3.86 根 /m <sup>2</sup> ) |          |          | RJP 方案<br>(0.42 根 /m <sup>2</sup> ) |          |          | 备注 |
|----|-------|------------------------------------|----------|----------|-------------------------------------|----------|----------|----|
|    |       | 根数                                 | 空桩<br>/m | 实桩<br>/m | 根数                                  | 空桩<br>/m | 实桩<br>/m |    |
|    |       |                                    |          |          |                                     |          |          |    |
| 1  | 1 116 | 4 308                              | 86 160   | 12 924   | 469                                 | 9 380    | 1 407    | 标准 |
| 2  | 765   | 2 953                              | 59 060   | 8 859    | 322                                 | 6 440    | 966      | 端头 |
| 3  | 365   | 1 409                              | 28 180   | 4 227    | 154                                 | 3 080    | 462      | 坑底 |
| 4  | 2 246 | 8 670                              | 173 400  | 26 010   | 945                                 | 18 900   | 2 835    | 合计 |

注:空桩指桩体仅引孔施工,未进行旋喷注浆部分。

### 3.2 加固工程造价对比分析

按照福建省 2021 年 2 月水泥市场信息价 480 元/t,折合三重管旋喷桩 108 元/m,RJP 大直径旋喷 1 276 元/m。市场施工费(含设备及辅料)单价三重管旋喷桩施工空桩劳务费约 50 元/m,实桩约 75 元/m;RJP 大直径旋喷桩空桩约 200 元/m,实桩 550 元/m<sup>3</sup>,合 2 000 元/m<sup>3</sup>。两种方案总体费用计算情况为:RJP 大直径高压旋喷方案整体费用为 1 212 万元,较三重管高压旋喷方案 1 369 万元少 157 万元,节约 11%左右。RJP 实桩费用较三重管旋喷高近 430 万元,将近 85%;而 RJP 大直径旋喷空桩费用减少 200%,583.5 万元;形成桩体水泥材料消耗增多约 80 万元,占比 28.7%。

## 4 高压旋喷试桩工艺验证

为验证两种不同工艺的加固效果,并获得与验证两种工艺在本项目地层条件施工有效成桩直径、水泥掺量、水灰比、施工水压、气压、浆液压力、提升效率等参数,场地内同位各施工 3 根试桩进行验证。

经试桩成桩效果验证:3 根三重管高压旋喷均于 80 cm 取得完整芯样(100 cm 芯样完整性差);芯样抗压强度平均值 1.6 MPa。3 根 RJP 高压旋喷桩均于 220 cm 取得完整芯样(260 cm 芯样亦完整);芯样抗压强度平均值 3.2 MPa,三重管高压旋喷及 RJP 方案地基加固旋喷桩取芯试验情况见表 3、表 4

经专家论证,F1 号线地基加固采用大直径旋喷桩

表 3 三重管地基加固取芯情况一览

| 桩号 | 桩径 0.8 m 位置 |          | 桩径 1.0 m 位置 |          | 备注 |
|----|-------------|----------|-------------|----------|----|
|    | 完整性         | 强度值 /MPa | 完整性         | 强度值 /MPa |    |
| N1 | 完整          | 1.4      | 不完整         | —        |    |
| N2 | 完整          | 1.8      | 完整          | 1.2      |    |
| N3 | 完整          | 1.6      | 不完整         | —        |    |

表 4 RJP 地基加固取芯情况一览

| 桩号 | 桩径 2.2 m 位置 |          | 桩径 2.6 m 位置 |          | 备注                    |
|----|-------------|----------|-------------|----------|-----------------------|
|    | 完整性         | 强度值 /MPa | 完整性         | 强度值 /MPa |                       |
| N4 | 完整          | 3.5      | 完整          | 1.6      | 2.8 m 取<br>单根完<br>整性差 |
| N5 | 完整          | 2.7      | 完整          | 1.3      |                       |
| N6 | 完整          | 3.2      | 完整          | 1.8      |                       |

RJP 工艺,成桩直径按照 2.2 mm,布孔间距 1 800 mm;水泥用量 700 kg/m<sup>3</sup>[4],水泥浆液水灰比为 1.0,气压 1.05 MPa,水泥浆液压力不小于 40 MPa,水压大于 25 MPa,水泥浆液流量为 110 L/min,提升速度 30 min/m<sup>[5]</sup>。成桩直径均超过 2.6 m,达到原预计 2.20 m,芯样完整,且强度均满足要求。

## 5 RJP 大直径旋喷加固实施

根据试验确定布孔方式和工艺参数,综合考虑 F1 号线滨海新城站项目地基加固和地下连续墙墙缝止水施工进度要求,本项目于 2021 年 2 月 15 日进场 2 套 RJP-65CV 设备,分别东端头井(含东端头墙缝止水)、西端头井和标准段(含西端头墙缝止水)施工。

大直径高压旋喷严格按照“施工准备→就位引孔→下放套管→旋喷钻机就位→提升喷浆→清洗钻杆→移机下一桩位”工艺流程组织施工,严格控制水泥浆配比、提升速度和各设备压力情况连贯施工。至 2021 年 4 月 15 日,已完成墙缝止水 RJP 摆喷桩 60 根,裙边坑底加固桩 264 根,较三重管高压旋喷工艺工效提高 60%以上,超预期达到业主进度目标要求。

## 6 结 语

F1 号线滨海新城站项目地基加固与地下连续墙墙缝止水综合使用统筹施工最大程度减少不同工序施工影响,进度较快,取得良好经济效益。大直径旋喷桩 RJP 虽成桩设备多为进口设备,价格昂贵,且成桩工艺比普通旋喷桩稍复杂,但其可利用成桩直径大的优点,大量减少普通旋喷成桩设置数量大、空桩费用占比高的缺点,并且较大程度加快工程进度。随

(下转第 238 页)

体稳定要求;

(3)隧道开挖时,诱发的前、后配电塔桩基最大位移为 4.13 mm、2.51 mm,均出现在桩顶,由此产生的倾斜为 0.011%,显著小于 50 m 以下高度规范规定的 1%限值;

(4)隧道运营时,车辆循环荷载引起的土层最大水平、竖向位移分别为 0.41 mm 与 0.66 mm,电塔桩基出现的最大位移为 0.13 mm,对应倾斜度为 0.000 7%,均显著小于规范允许值。通过计算分析可判断,新建隧道施工和运营阶段对电塔的影响很细微,能保证电塔的安全稳定。

尽管隧道建设方案具备可靠性,但考虑到实际实施存在不可预知的其他风险,建议加强隧道建设过程实时监控,并在隧道与电塔间设置 2 排  $\phi 42$  袖阀管跟踪注浆,进一步确保电塔的安全稳定。

#### 参考文献:

- [1] 陈洁金,杨元洪,阳军生,等.大断面隧道下穿高压输电铁塔现场测试与分析[J].中外公路,2015,35(2):185-189.
- [2] 阳军生,杨元洪,晏莉,等.大断面隧道下穿既有高压输电铁塔施

工方案比选及其应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1184-1191.

- [3] 刘诗杰,王永成,枚龙,等.下穿隧道施工过程中上覆高压电塔稳定性研究[J].施工技术,2019,48(17):104-107.
- [4] 谢瑾荣.下穿隧道盾构施工对高压电塔影响的安全性评价[J].土工基础,2020,34(2):89-93.
- [5] 张宁.浅埋大跨隧道下穿 110kV 高压电塔控制沉降技术[J].现代隧道技术,2020,50(6):184-188.
- [6] 陈福全,汪金卫,刘毓胤.基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析[J].岩土力学,2008,29(7):1971-1976.
- [7] C S Yang, H H Mo, J S Chen, etc. Selection of reasonable scheme of entering into a working well in shield construction [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18R:3987-3998.
- [8] 莫海鸿,杨春山,陈俊生,等.盾构隧道先隧后井施工中工作井支护结构优化[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1346-1352.
- [9] DL/T 741—2010,架空输电线路运行规程[S].
- [10] C S Yang, H H Mo, J S Chen, etc. Numerical analysis of influence caused by lining cracks on dynamic response of shield tunnel during metro operation [J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(11):3835-3846.
- [11] 刘鹏.车辆荷载作用下风积沙和砾类土低路堤工程特性研究[D].陕西西安:长安大学,2015.

(上接第 214 页)

着大直径旋喷桩成桩设备国产化,成桩施工单价将持续降低,大直径高压旋喷 RJP 工艺将得到越来越广泛的应用。

#### 参考文献:

- [1] 黄健德.三重管高压旋喷桩在改线工程地基加固中的应用[J].河南科技,2014(6):28-29.
- [2] 夏辉阳.三重管高压旋喷技术在地基加固中的应用[J].工程设计与

建设,2004,36(2):32-34,38.

- [3] 邵晶晶,李操,余立新. MJS 工法和 RJP 工法在临近地铁车站的应用研究[J].施工技术,2016,13:81-84.
- [4] 张雁,田增林,曹海东. MJS 工法在砾石层中的应用及成桩差异性[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):147-151.
- [5] 张子新,李佳宇. MJS 工法地基处理技术综述与应用[J].土木建筑与环境工程,2017,39(6):1-11.