

深厚软土覆盖层桥梁基础加固工艺优选与参数研究

权宝安,何思元

(中交路桥华东工程有限公司,上海市 200210)

摘要:针对桥梁工程首次使用全断面深层地基加固作为锚碇地连墙基础持力层和隔水层,为了保证超高压旋喷桩深层地基加固的质量达到设计图纸要求,依托锚碇施工现场工艺试验研究,选择3~4种先进的超高压旋喷工艺,通过试验比选出适合深厚软土覆盖层和高承压水地质特点的桥梁基础全断面加固优选工艺和参数,将试验确定的优选工艺与对应的优化施工参数用于指导后续大面积施工,以保证整体加固质量。

关键词:全断面;超高压旋喷桩;工艺优选;参数;工艺试验;高承压水

中图分类号: U445.55

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0136-05

0 引言

自超高压旋喷技术引入我国,国内已逐渐将该技术应用于基坑水平封底^[1]。曹成勇等^[2]从深厚强透水地层基坑水平封底隔渗帷幕的破坏模式入手,结合工程开展工程试验桩,得出大面积基坑高压旋喷桩封底的可行性;龚彪等^[3]以某交通枢纽超深超大基坑为研究对象,指出实现封堵“天窗”的常用工法有三重管搅拌桩法、高压旋喷桩法(RJP、N-JET、MJS等)等;周铮等^[4]在上海某基坑施工中,通过RJP工法封底加固替代抽降承压水的新思路及工艺方法,使RJP满堂加固与工程桩紧密咬合形成整体,以解决承压水突涌问题,避免抽降承压水。以上工程试验研究的加固体强度均不大于1.9 MPa,且复合基础不作为主要的受力结构,与调研成果^[5-6]和《超高压喷射注浆技术标准》(DG/TJ 08-2286—2019)中水泥掺量为40%左右的超高压旋喷桩加固经验强度值1.5 MPa相符。

1 工程背景与加固要求

张靖皋长江大桥北航道桥南锚碇位于冲积江心岛,工程场区基岩埋深超过130 m,软弱覆盖层厚度超过50 m,以粉质黏土为主,强度和地基摩擦系数低,塑性差,不存在满足传统地连墙要求的持力层;

⑦₅及以下砂层均为承压含水层,水头高,基底不存在天然隔水层,施工期基坑底涌水风险高。基于项目特点,设计首创采用超高压旋喷桩工法,在锚碇地连墙基础底部形成大面积全断面深层地基加固水平封底的方案,可借鉴经验少,极具挑战性。深层地基加固面积5 944.7 m²,共计2 497根同心变径桩,最大加固深度52.8 m,沿深度方向依次分为格栅加固区和满堂加固区。上层格栅加固区桩径1.7 m,桩长18 m;下层满堂加固区桩径2.4 m,咬合搭接0.7 m,桩长5 m。其目的在于通过深层地基加固,形成90 d强度平均值不小于2.7 MPa,且单桩取芯90 d无侧限抗压强度不小于1.8 MPa的点不少于90%,摩擦系数不小于0.35,渗透系数不大于 0.5×10^{-6} cm/s的人工隔水层和持力层。

因此,针对本项目特点,开展现场试验,探索、研究、比选适合本项目的工法,并进一步优化施工参数,从而保证在超厚软弱粉质黏土覆盖层及高承压水地层中加固复合地基的成桩直径、加固质量和封水效果。

2 工艺优选与参数研究方案

根据本项目的工艺特点、现场条件、进度需求、工艺试验施工组织等因素,本次工艺试验主要分为两个阶段。

(1)第一阶段试验:工艺选型

在锚碇红线范围内寻找合适地层进行4种工艺加固试验,通过试验结果选择最适合本项目的加固工艺,若现有工艺不适合,则提出改进现有工艺。

(2)第二阶段试验:工艺参数优选与固化

收稿日期:2023-03-11

基金项目:中交路桥建设有限公司科技研发项目(RP2023018895)

作者简介:权宝安(1984—),男,本科,工程师,从事桥梁工程试验检测工作。

根据第一阶段确定的工艺,采用不同的施工参数进行加固桩试验,验证优选的加固工艺和确定的各项参数能否满足设计和施工要求,为后续大面积开展施工提供基础数据和经验。

3 第一阶段工艺优选

3.1 常规工艺原理

RJP 工法和 MJS 工法为现行的常规工法^[7];智能感知超级旋喷工法(SJT 工法)是在 RJP 的基础上经过优化、改良的新工法,重点解决在砂土及卵石层等硬土层中的旋喷成桩难题,在软土地区亦有更显著的成桩效果。SJT 工法的原理是采用超高压水泥浆和空气两种介质喷射、切割土体,并与土体进行置换、混合形成桩体,在超高压、大流量浆液及其外部环绕气流的共同作用下,破坏土体的能量显著增大,在土中形成较大的固结体。

3.2 工艺初步试验及结果

对于初步选定的 RJP 工法、MJS 工法、SJT 工法,选用常规施工参数(见表 1)。浅层单层桩试验可以开挖验证加固桩径和加固体强度。

表 1 工艺选型施工参数

序号	项目	RJP	SJT	MJS
1	水灰比	1.0	1.0	1.0
2	水泥浆压力 / MPa	40 ± 2	40 ± 2	40 ± 2
3	水泥浆流量 /(L·min ⁻¹)	≥175	≥300	≥120
4	辅浆气压力 / MPa	≥1.05	≥1.3	≥1.05
5	辅浆空气 /(Nm ³ ·min ⁻¹)	≥5.0	≥6	≥1.2
6	高压水压力 / MPa	≥35	—	20
7	高压水流量 /(L·min ⁻¹)	80~110	—	70
8	辅水气压力 / MPa	≥1.05	—	≥1.05
9	辅水气流量 /(Nm ³ · min ⁻¹)	≥2.0	—	≥0.2
10	提升速度 /(min·m ⁻¹)	15	12	15
11	步距行程 /mm	33	25	25
12	加固范围 /m	-6~-2	-6~-2	-6~-2

试验完成达到龄期后,对各工艺成桩进行开挖验证,验证桩径大小以及加固体强度。

(1)RJP 工艺

RJP 开挖龄期 10 d,桩头一个方向直径 3.5 m,另一个方向桩径 3 m(见图 1)。取芯芯样龄期 14 d,地面以下 2~3.5 m 成桩质量较好,3.5~6 m 含泥量偏高,整体强度偏低,易碎(见图 2)。

(2)SJT 工艺

SJT 开挖龄期 12 d,桩头两个方向均 2.9 m(见图 3)。取芯龄期 13 d。桩头 20 cm 以外成桩质量较好;



图 1 RJP 开挖桩头直径



图 2 RJP 工艺取芯芯样

地面以下 3~4 m 易碎,强度偏低。地面以下 4~5.5 m 成桩质量较好;地面以下 5.5~6 m 局部夹泥(见图 4)。



图 3 SJT 开挖桩头直径



图 4 SJT 工艺取芯芯样

(3)MJS 工艺

MJS 开挖龄期 12 d,桩头一个方向 3.2 m,另一个方向 3 m(见图 5)。取芯龄期 14 d,取芯率约为 85%,芯样水泥含量较低,且分布不均匀,少部分芯样完整性较高,但大部分芯样破碎,芯样强度较低(见图 6)。



图 5 MJS 开挖桩头直径



图6 MJS工艺取芯芯样

(4)小结

针对以上选用的工艺,根据工程经验,加固深度在30 m范围内,桩径不小于2.8 m,超过30 m,每深10 m,桩径对应减少0.2 m。本项目最大加固深度52 m,加固桩径不小于2.4 m。从开挖桩径判断,现有工艺成桩直径在2.9~3.5 m,根据桩径随深度衰减经验,基本满足桩径要求。但是,3种工艺取芯芯样表明,取芯芯样离散性大,芯样水泥含量低,大部分芯样破碎,芯样强度不足,无法制作无侧限抗压强度试样。现有工艺成桩完全不满足设计对强度的要求。

针对现有工艺加固芯样强度不足的问题,需要进一步改良工艺,提高芯样水泥含量,从而保证芯样强度。

3.3 工艺改进

项目团队在原RJP工艺基础上进行改良,新研制D-RJP工法(见图7),增大上段切削水、气的流量和压力,喷射复合流体一次性切削土体成孔达到桩径要求,形成大直径原状土混合液,下段取消浆液辅浆高压空气,并喷射高压浆二次搅拌。增大上段“气辅水”喷嘴与下段浆喷嘴距离至1.5 m,降低上段切削土体时“气辅水”对下段浆液混合体的扰动,提高水泥浆液置换率。

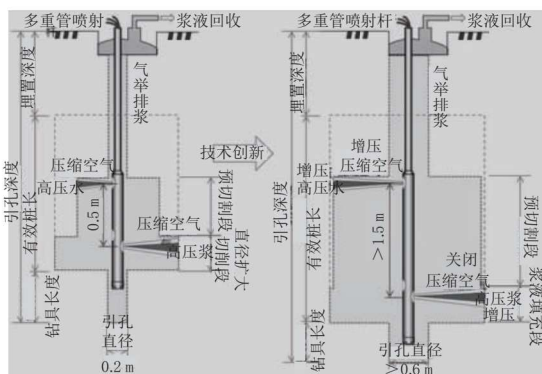


图7 D-RJP工艺改进图

采用改进后工艺,再进行工艺选型验证,结果表明:D-RJP开挖龄期8 d,桩头一个方向3.1 m,另一个方向3.0 m(见图8)。取芯龄期12 d,取芯率约为95%,-2~-3 m芯样水泥含量较低,且分布不均匀,大部分芯样破碎,芯样强度较低;-3~-6 m芯样水泥含量较高,芯样强度较高(见图9)。



图8 D-RJP开挖桩头直径



图9 D-RJP工艺取芯芯样

3.4 工艺选型结论

根据浅层单桩桩头开挖结果,RJP、MJS、SJT、D-RJP工法单桩桩头满足最初设计桩径,除SJT工法桩径偏小以外,其余工法浅层桩径均超过3.0 m。根据芯样试验结果,成桩强度、芯样完整性呈现D-RJP>SJT>MJS>RJP。在成桩直径、强度、均匀性、取芯完整率等方面,改进后的D-RJP工法在浅层实验中的综合效果均好于其他几种方法,因此第二阶段选用D-RJP改良工法进行施工参数固化验证。

4 第二阶段施工参数固化

4.1 试验施工参数

工艺试验现场采用以下施工参数(见表2),进行8根试验桩施工,事后进行取芯验证,开展强度、渗透性、摩擦性等试验。

4.2 试验结果

(1)强度试验结果

达龄期后,对采取参数一施工的3根桩在桩体、两桩咬合处、3桩咬合处进行了取芯,室内无侧限抗压强度结果显示(见图10):粉质黏土层中桩体强度最大值5.4 MPa,最小值3.9 MPa,平均值为4.45 MPa,桩体强度变异系数小,加固桩体质量稳定;粉砂层中桩体强度最大值27.3 MPa,最小值5.1 MPa,平均值为16.0 MPa,样本变异数大,加固桩体质量不稳定。同时,黏土层加固体强度普遍低于砂层,但强度均远远大设计要求的2.7 MPa。因此,需要进一步优化水泥掺量,降低砂层中过大的强度,避免不必要的投入。

表 2 工艺施工参数固化验证表

阶段	内容	足尺单桩试验桩			足尺咬合桩试验桩				
		ZD-RJP1	ZD-RJP2	ZD-RJP3	ZD-RJP6	ZD-RJP4	ZD-RJP7	ZD-RJP5	ZD-RJP8
引孔	引孔直径 /mm	650							
喷浆 (复喷)	加固深度及桩径 /m	深度 46 ~ 51,满堂区桩径 2.4 m;深度 43 ~ 46,格栅区桩径 1.7			深度 46 ~ 51,满堂区桩径 2.4;深度 22 ~ 46,格栅区桩径 1.7				
	施工角度 /(°)	360							
	水灰比	1.0			0.8	1.0	0.8	1.0	0.8
	水泥浆压力 / MPa	40 ± 2			≥40				
	水泥浆流量 /(L·min ⁻¹)	120			90~100				
	高压水压力 /MPa	35			≥38(0)				
	高压水流量 /(L·min ⁻¹)	200			≥200(0)				
	辅水空气压力 /MPa	1.05			≥1.05(0)				
	辅水空气流量 /(Nm ³ ·min ⁻¹)	2			≥5.0(0)				
	提升速度 /(min·m ⁻¹)	25			咬合区:25(10),格栅区:20(10)				
	步距行程 /mm	25			25		33		
	转速 /(r·step ⁻¹)				4(2)				

注:括号内数据代表格栅区域复喷工艺施工参数。

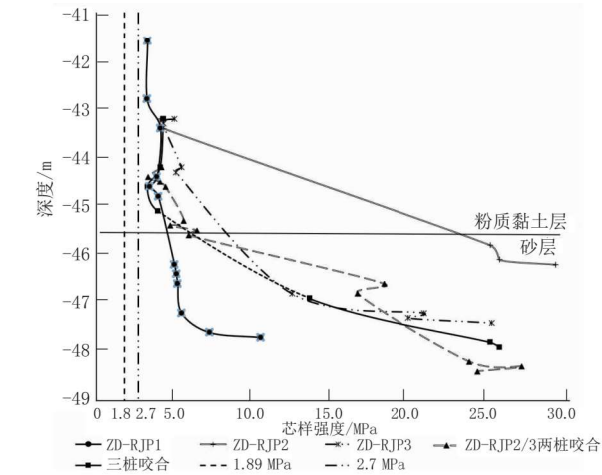


图 10 采用参数一施工,芯样 90 d 强度图

达龄期后,对参数二施工的 5 根桩在桩体、两桩咬合处、3 桩咬合处进行了取芯,室内无侧限抗压强度结果显示(见图 11)。粉质黏土层中桩体强度最大值 13.4 MPa,最小值 2.1 MPa,平均值为 6.52 MPa;粉砂层中桩体强度最大值 15.3 MPa,最小值 2.1 MPa,平均值为 5.3 MPa。对 273 个芯样进行统计分析后发现:高于 1.8 MPa 的点 268 个,占比 98.2%;高于 2.7 MPa 的点 227 个,占比 83.2%

进一步分析可得:采用参数一施工得出结论,黏土层加固体强度普遍低于砂层。从图 11 可以看出,在 -30~-44 m 进行二次复喷后,使得桩体中水泥含量提高,桩体质量在该范围内得到极大改善。

从每延米加固土水泥用量比较,采用参数一施工时水泥浆流量为 120 L/min,采用参数二施工时水

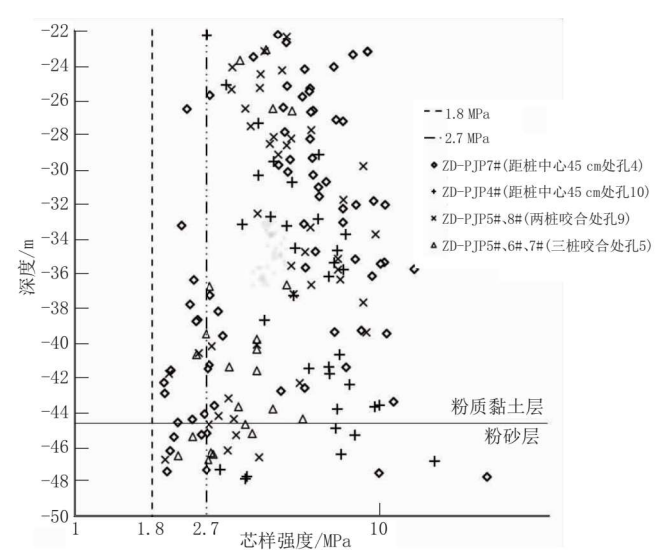


图 11 采用参数二施工,芯样 90 d 强度图

泥浆流量为 90~100 L/min,但桩体平均强度表现为采用参数二施工时较高,说明工艺改进极大地提高了水泥的置换效果,提高了水泥利用率。

(2)摩擦系数试验结果

针对取芯芯样,对采用参数二施工的加固桩桩头 5 m 范围内试样进行室内直剪试验,桩体、两桩咬合处、三桩咬合处的摩擦系数均满足不小于 0.37 的要求。桩体处摩擦系数的平均值为 0.47,两桩咬合处的摩擦系数的平均值为 0.46,三桩咬合处的摩擦系数的平均值为 0.44(见表 3)。

(3)渗透系数试验结果

对采用参数二的加固桩试样进行室内验,无桩

表3 采用参数二施工芯样摩擦系数结果一览表

位置	深度/m	竖向应力/kPa			摩擦系数
		500	1000	1500	
距桩心 45 cm	26.4	275.6	548.2	794.5	0.52
	26.9	256.4	489.7	728.9	0.47
	27.9	247.6	478.6	700.2	0.45
	28.3	214.8	445.2	645.1	0.43
两桩咬合处	26.2	242.6	499.6	706.4	0.46
	27.3	256.4	489.7	728.9	0.47
	27.8	242.6	499.6	706.4	0.46
	28.3	232.0	487.6	721.5	0.49
	29.5	248.7	469.7	714.9	0.46
三桩咬合处	25.2	264.3	438.4	704.1	0.44
	26.1	269.4	458.7	716.3	0.45
	26.3	259.8	467.3	720.4	0.46
	26.9	214.8	445.2	645.1	0.43

体及两桩咬合处、三桩咬合处,粉质黏土层及砂土层,其渗透系数均满足 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ cm/s的要求(见图12)。进一步分析可见,采用改进后工艺进行旋喷施工,其渗透系数差异性较小,能够保证实现全断面防水设计意图。

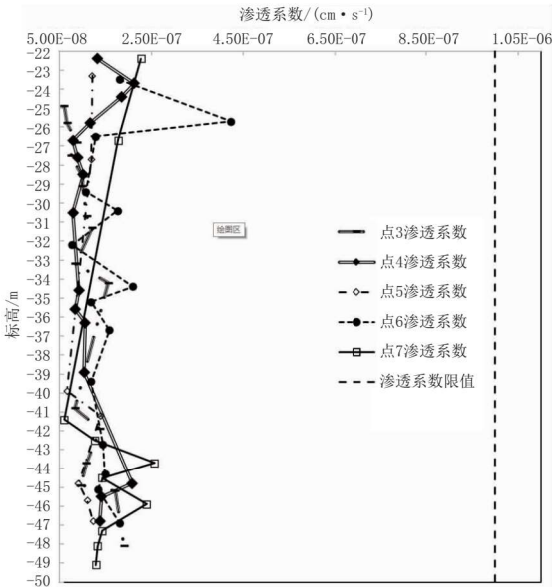


图12 采用参数二施工,芯样渗透系数图(单位:cm/s)

5 结 语

通过对工艺选型阶段 RJP、MJS 和 SJT 工艺的对比分析,并最终进行工艺改进,确定了 D-RJP 工艺为适合本项目的加固工艺,并通过确定满足设计要求的水泥掺量、浆液水灰比、喷浆压力、流量、转速、提速等施工参数,进行了参数选优和验证试验,验证了改良版 D-RJP 工艺超高压旋喷桩在张靖皋长江大桥北航道桥南锚碇深层地基加固的适用性。

针对试验本身而言,由于试验时间不足,暂未对参数一施工芯样进行渗透性、摩擦性试验,导致无法对因水泥掺量变化而引起的渗透性、摩擦性性能的改变作进一步分析。

通过试验数据分析:改进后的施工工艺不仅提高了粉质黏土层中芯样的强度,还在确保桩体质量的前提下,降低了水泥的使用量,创造了良好的经济价值。相关试验结果可为主体工程大面积施工、固化施工参数、解决施工中的重难点提供依据。

参考文献:

[1] 赵亚军,苏东黎,刘伟,等.高水头软弱富水地层悬挂式基坑水平封底缺陷[J].建筑施工,2022,44(5):899-901.
[2] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.深厚强透水地层基坑深层水平封底隔渗帷幕设计方法及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(4):1012-1021.
[3] 龚彪,方伽月,孔庆珑,等.深厚密实砂层超深超高压封底技术的应用及质量控制[J].建筑技术,2022,53(6):666-668.
[4] 周铮.深基坑工程采用 RJP 工法封底加固以取代抽降承压水的方法及工程应用[J].建筑结构,2016,46(S1):742-745.
[5] 陈志恒.MJS 及 RJP 高压旋喷注浆法加固地层技术试验[J].低温建筑技术,2018,40(5):140-144.
[6] 张羽.超深土体加固工艺在软土地区深基坑工程中的试验研究[J].江西建材,2018(1):74-75.
[7] 郭海军.RJP 工法在超大深基坑施工中的应用[J].建筑施工,2015,37(9):1030-1032.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com