临江深厚砂卵石地层止水帷幕改良试验研究

杨 峰

(中铁隧道局集团有限公司市政工程公司, 杭州 310030)

摘要:为了使止水帷幕发挥更好的效果,首先采用室内试验确定合理水泥掺入量,其次对传统高压旋喷桩设备进行改良,并将室内试验的研究成果应用到现场试验,形成一种强力搅拌旋喷桩。研究结果表明,为了保证止水帷幕的防水质量以及经济性,可在实际工程中采用 11%的水泥掺入量。此外,采用全新设备形成的强力搅拌旋喷桩,提高止水帷幕成桩质量合格率,节约了施工成本,加快了施工进度,为今后类似工程的开展提供了借鉴。

关键词:基坑工程;砂卵石;止水帷幕;水泥掺入量;强力搅拌旋喷桩

中图分类号:TU473 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-1807(2023)22-0268-07

伴随着经济的飞速发展,工程建设越来越多,进而产生了大量的深基坑工程[1-3]。深基坑在开挖过程中通常采取降水措施,由此会带来一定的地表沉降,其可能导致周边构筑物倾斜甚至是倒塌[4-5]。因此,通常会采用一定的措施来控制降水带来的一系列影响,布置止水帷幕则是其中一种有效的方法[6-7]。止水帷幕是工程主体外围止水系列的总称,主要用来减少或阻止基坑侧壁和基坑底部地下水流入基坑。常用的止水帷幕施工方法有旋喷桩、地连墙、深孔注浆、咬合桩、SMW(soil-mixing wall)工法桩、深层搅拌桩等。对于砂卵石地层,通常会采用旋喷桩止水帷幕[8-9]。

然而,本项目隧道基坑止水帷幕高压旋喷桩施工过程中,需穿越下部深厚砂卵石地层进入风化岩,以隔断外部水力联系。由于圆砾、卵石层级配不均匀且颗粒粒径较大,传统高压旋喷桩设备施工时不易钻进,成桩极为困难;本工程圆砾、卵石层属强透水层,注浆过程中,水泥浆液极易流失;圆砾、卵石层颗粒粒径较大,流体不能进行有效切削,水泥浆液与圆砾、卵石不能充分搅拌混合,难以形成连续的固结体,旋喷桩体易破碎,成桩质量差,止水效果差;此外,本工程止水帷幕体量大,传统高压旋喷桩设备施工钻进困难、施工效率低,无法满足项目施工进度需求;对周边类似项目进行调研发现,衢州圆砾、卵石富水地层中传统高压旋喷桩设备施工效果普遍较差,未发现有较成功的施工案例。

基于上述问题,本文对临江深厚砂卵石地层止水帷幕进行了改良试验研究。首先采用室内试验研究了试验土在不同水泥掺入量下的无侧限抗压强度和渗透系数,确定了现场试验中所需的合理水泥掺入量。其次对传统高压旋喷桩设备进行了改良,并将室内试验的研究成果应用到了现场试验,形成了一种强力搅拌旋喷桩,以期为今后类似工程的开展提供借鉴。

1 工程概况

九华大道隧道(二期)及紫薇路隧道工程位于衢州市西区半岛综合体,半岛区块现阶段处于建设高峰,多个大型项目同时在建,工程毗邻多个在建项目基坑,周边环境复杂,如图 1 所示。文化创业园项目 3 处地下车库基坑(A 区、B 区、C 区)紧邻九华大道隧道(二期),九华大道隧道(二期)与创业园项目地下车库基坑毗邻段基坑开挖深度为 15 m,采用“钻孔灌注桩+高压旋喷止水”围护结构形式。其中,创业园项目 A 区地下车库基坑深度约为 4 m,与九华大道隧道(二期)平均净距为 13.5 m、最小净距为 11.79 m,采用放坡开挖;B 区地下车库基坑深度约为 6.3 m,与九华大道隧道(二期)平均净距为 12 m、最小净距为 4.7 m,采用“钻孔灌注桩+高压旋喷止水”围护结构形式;C 区地下车库基坑深度约为 6.7 m,与九华大道隧道(二期)平均净距为21 m、最小净距为 12.9 m,采用“钻孔灌注桩+高压旋喷

收稿日期:2023-04-27

基金项目:中铁隧道局集团科技创新计划科研课题(隧研合 2022-22)。

作者简介:杨峰(1990—),男,湖南岳阳人,中铁隧道局集团有限公司市政工程公司,工程师,硕士,研究方向为地下工程、隧道工程。

止水”围护结构形式。试验场地土的物理力学指标如表 1 所示。

选取项目典型地质区段作为试验段,采用传统高压旋喷桩设备进行施工,对传统高压旋喷桩成桩效率、成桩质量合格率进行摸底,如图 2 所示。

试验段传统设备施工止水帷幕期间,对其成桩效率进行统计,统计显示传统设备成桩平均效率为 2.5 h/根(平均桩长为 20 m,且需要换杆施工,不能一次成型)。工期估算:本工程高压旋喷止水桩合计 11 179 根,传统设备成桩平均效率为 2.5 h/根(平均桩长为 20 m),现场配置 10 台高压旋喷设备,安排 2 班人员进行全天作业(效率折算后按 0.8 计算),总需天数:11 179 根/(24×0.8/2.5)/10 台=146 d>计划工期 90 d。根本无法满足现场工期需求。

图 1　现场示意图

表 1　试验场地土的物理力学指标

层号	地层名称	厚度/m	重度/(kN·m^{-3})	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	素填土	1.7	18.10	3.0	4.0	6.0
2	粉质黏土	4.7	18.62	5.9	18.9	15.4
3	圆砾	1.6	19.84	28.4	0	32.0
4	卵石	7.0	20.03	28.5	0	35.0
5	泥质粉砂岩	—	20.50	—	50.0	35.0

图 2　试验段传统高压旋喷桩施工

事后对试验段传统设备施工止水帷幕进行现场取芯检测,如图 3 和图 4 所示。共计取芯检测 30 组,水泥加固体松散 15 组、未取到水泥加固体 6 组,合格率仅为 30%。

这说明采用传统高压旋喷设备施工,对于本工程特殊深厚富水圆砾、卵石地层,止水帷幕施工质量和效率均不满足现场施工需求。

针对传统高压旋喷桩设备在圆砾、卵石层特殊地层时,采用旋挖钻进行预成孔,对止水帷幕孔位区域圆砾、卵石层进行取土置换。预成孔完成后采用场内优质黏土回填密实,孔位回填完成后,传统高压旋喷桩设备就位进行止水帷幕桩体施工。通过此方法改进,取芯验证质量均合格,如图 5 所示。缺点是每根处于卵石圆砾层高压旋喷桩施工时间进一步加长,平均每根成桩效率为 3.5 h/根。工期估算:本工程高压旋喷止水桩合计 11 179 根,本文方法成桩平均效率为 3.5 h/根(平均桩长为 20 m),现场配置10台高压旋喷设备,2台旋挖钻引孔,安

图 3　咬合点取芯芯样

图 4　中心点取芯芯样

图 5　中心点取芯芯样

排 2 班人员进行全天作业(效率折算后按 0.8 计算),总需天数:11 179 根/(24×0.8/3.5)/10 台=204 d>计划工期 90 d。

这说明此方法施工效率进一步降低,更满足不了总工期需求。且采用旋挖机配套施工,额外增加施工成本,不利于施工效率和施工成本控制。

综上所述,针对本工程特殊卵石圆砾富水地层,采用传统高压旋喷桩设备进行施工,止水效果、施工效率低下,不满足现场施工需求,因此迫切需要对临江深厚砂卵石地层止水帷幕进行改良试验,在保证止水帷幕施工质量前提条件下,实现工序组织的合理运行,提高施工效率,缩短施工周期。

2　室内试验

2.1　试验材料

制备水泥土试块的土样采用衢州现场土,土物理力学性质如表 1 所示。具体配比如表 2 所示。本试验一共选择 5 种水泥掺入量,分别为 6%、11%、16%、21%和 26%,如图 6所示。

表 2　试块配比

试验组数	材料配比(水泥:水:土)/kg	水泥掺量[水泥/(水+土)]/%	泥浆含水率/%	水泥土含水率[水/(水泥+土)]
1	1.0:7.130:9.530	6	70	67.7
2	1.0:4.010:5.070	11	70	66.1
3	1.0: 2.844:3.406	16	70	64.5
4	1.0:2.231:2.530	21	70	63.2
5	1.0:1.853:1.990	26	70	62.0

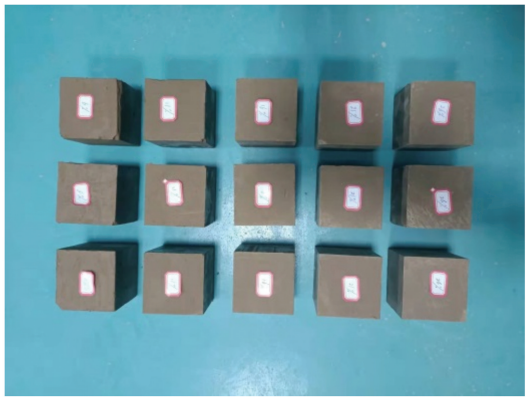

图 6　室内试验试块

2.2　试验方法

水泥土试块养护完成后在 100 kN 量程的万能试验机上进行无侧限抗压强度试验,采用位移控制法进行加载,加载速率为 0.5 mm/min。水泥土试块尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,试验过程种水泥土试块应力应变曲线可由万能试验机上的传感器直接测得,试验结果如表 3～表 5 所示,通过试验得到的加载力可以求得试块的无侧限抗压强度。采用南 55 型变水头渗透试验仪对 28d 龄期的水泥土进行渗透试验。

2.3　试验结果分析

由表 3～表 5 可知,同一龄期下,试块的加载力平均值随着水泥掺入量的增多而增大。7 d 龄期下,当水泥掺入量由 6%变为 26%时,加载力平均值由 0.89 kN 变为 14.35 kN;14 d 龄期下,当水泥掺入量由 6%变为 26%时,加载力平均值由 1.18 kN 变为 17.64 kN;28 d 龄期下,当水泥掺入量由 6%变为 26%时,加载力平均值由 1.67 kN 变为 22.24 kN。

表 3　7 d 龄期试块

水泥掺入量/%	加载力/kN			平均值/kN	无侧限抗压强度/MPa
26	14.59	13.85	14.62	14.35	2.87
21	8.07	9.56	9.57	9.07	1.81
16	5.07	4.60	5.27	4.98	1.00
11	2.46	2.23	2.39	2.36	0.47
6	0.92	0.85	0.89	0.89	0.18

表 4　14 d 龄期试块

水泥掺入量/%	加载力/kN			平均值/kN	无侧限抗压强度/MPa
26	18.45	16.57	17.90	17.64	3.53
21	12.46	11.50	11.92	11.96	2.39
16	7.07	7.13	7.00	7.07	1.41
11	3.24	3.18	3.11	3.18	0.64
6	1.19	1.21	1.13	1.18	0.24

表 5　28 d 龄期试块

水泥掺入量/%	加载力/kN			平均值/kN	无侧限抗压强度/MPa
26	21.61	21.88	23.22	22.24	4.45
21	15.10	15.11	15.34	15.18	3.03
16	8.73	8.83	9.04	8.87	1.77
11	4.07	4.14	4.31	4.17	0.83
6	1.65	1.66	1.69	1.67	0.33

由图 7 可知,水泥掺入量不变的情况下,试块无侧限抗压强度随着龄期的增加而增大,并且水泥掺入量越大,其无侧限抗压强度越大。7 d 龄期下,当水泥掺入量由 6%变为 26%时,无侧限抗压强度由 0.18 MPa 变为 2.87 MPa;14 d 龄期下,当水泥掺入量由 6% 变为 26% 时,无侧限抗压强度由 0.24 MPa变为 3.53 MPa;28 d 龄期下,当水泥掺入量由 6%变为 26%时,无侧限抗压强度由 0.33 MPa 变为 4.45 MPa。

此外不同配比试块强度都会随着龄期的增长而增加,水泥掺入量越大,不同龄期试块的无侧限抗压强度增量越大。

由图 8 可知,28 d 龄期的水泥土在 6%、11%、16%、21%、26%水泥掺入量下的渗透系数逐渐减小。当水泥掺入量达到 11%时,渗透系数随水泥掺入量的变化逐渐趋于平缓,为了保证止水帷幕的防水质量以及经济性,可在实际工程中采用 11%的水泥掺入量。

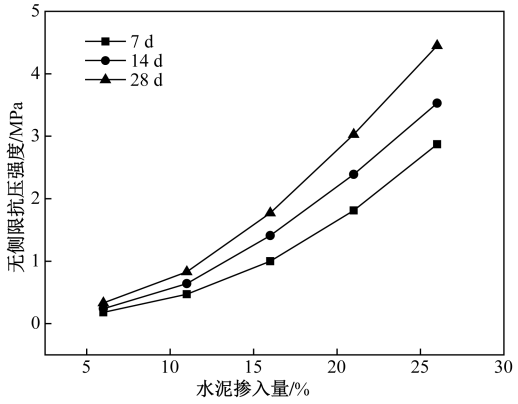

图 7　无侧限抗压强度与水泥掺入量关系曲线

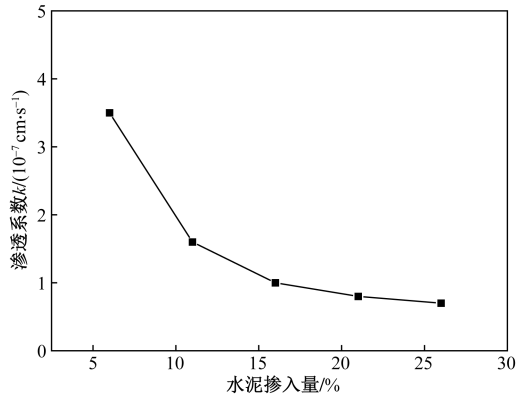

图 8　渗透系数与水泥掺入量关系曲线

3　工程应用

为“加快进度”“节约成本”“克服砂卵石地层扭矩大的困难”,对传统高压旋喷桩设备进行了改良。

3.1　三轴搅拌桩动力头

单轴搅拌桩动力头功率通常不到 100 kW,动力头的功率较小,在深厚富水圆砾、卵石地层成孔效率较低,间接增加了施工成本。故在设备改造车间改造成了三轴搅拌桩动力头(图 9),匹配的三轴使得其能够在施工中提供更大的动力,动力头功率达到 225 kW,可有效提高其在深厚富水圆砾、卵石地层的成孔效率。

3.2　工法桩机架

常规高压旋喷桩施工机架高度为 7～9 m,机架不稳固,施工止水帷幕无法一次成桩,施工过程中需间接性加长钻孔,施工效率低下。

通过比对,采用工法桩机架(图 10),工法桩机架高度可达到 25 m,且移位方便,机架稳固,止水帷幕可一次性成桩,无须加接钻杆,成桩施工效率高。

3.3　合金螺旋叶片杆

普通高压旋喷钻杆直径普遍采用 50 钻杆,钻杆直径相对较小,抗扭性能较弱。故在设备改造车间改造成单轴钻杆(图 11),直径采用 219 钻杆,且在四周增加了合金螺旋叶片,提升了其抗扭性能,使其能够克服该地层扭矩大的困难。

图 9　三轴搅拌桩动力头改装

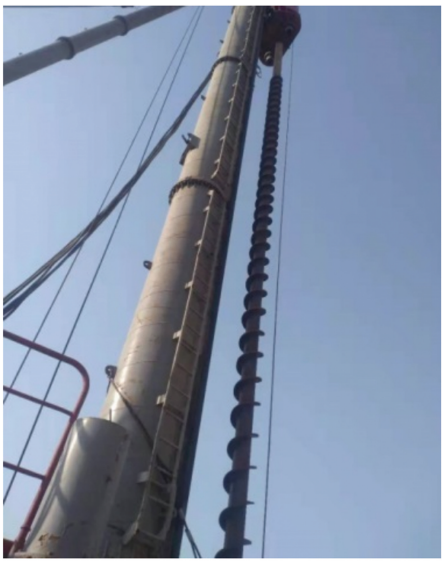

图 10　工法桩支架

图 11　单轴搅拌桩钻杆改进

3.4　杆件形式

多杆为双杆或者三杆形式，经现场试验，针对本工程卵石圆砾层地质结构，采用多杆钻进较为困难，无法成桩，因此采用单杆形式（图 12）。

3.5　齿型合金钻头

为确保设备正常钻进，钻杆配备齿型合金钻头（图 13），加大岩层面接触和粉碎能力，为卵石圆砾地层顺利钻进打下坚持基础。

3.6　高压旋喷机后台

现场采用注浆压力更大的高压旋喷设备后台（图 14），注浆压力可达到 25 MPa，提高了在卵石圆砾层注浆压力，实现了土体的充分切削，满足钻进后搅喷注浆压力使用需要。

图 12　单杆形式

图 13　单轴搅拌桩钻杆组成和钻头配置

图 14　高压旋喷机后台配套

3.7　兼容性调试

为了使得改造的三轴搅拌桩动力头和改进的单桩钻杆能够组合使用，在施工现场对旋喷后台进行现场兼容性调试（图 15），发现后台注浆系统（旋喷后台）能够与改造的三轴搅拌桩动力头和改进的

图 15　旋喷桩后台现场试钻和兼容性调试

单桩钻杆兼容，提升了注浆压力，实现了土体的充分切削。

通过深厚富水圆砾、卵石地层止水帷幕施工新法实施后，本工程通过强有力高功率动力头、优化改进钻杆质量、使用效果更好的旋喷后台。在种种效能叠加情况下，目前平均效率达到 1.35 h/根，总用时：11 179 根/(24×0.8/1.35)/10 台＝79 d，小于计划工期 90 d，超前完成了止水帷幕施工。

同时对试验段传统设备施工止水帷幕和本方法施工的止水帷幕进行现场取芯检测对比(图 16)，各取芯检测 30 组，试验段传统设备现场取芯检测的合格率为 30%，采用改进设备后现场取芯检测的合格率为 100%，合格率大幅提升。

图 16　高压旋喷桩取芯

本方法采用一种全新的工艺设备进行施工，形成一种强力搅拌旋喷桩，提高了深厚富水圆砾、卵石地层止水帷幕成桩质量合格率，节约了施工成本，加快了施工进度，为今后同类型施工提供了可借鉴的方法和经验。

4　结论

采用传统高压旋喷设备施工，对于深厚砂卵石地层，止水帷幕施工质量和效率均不满足现场施工需求。采用旋挖机配套施工，额外增加施工成本，不利于施工效率和施工成本控制。因此，需要对止水帷幕进行改良试验。

不同配比试块强度都会随着龄期的增长而增加，水泥掺入量越大，不同龄期试块的无侧限抗压强度增量越大。当水泥掺入量达到 11%时，渗透系数随水泥掺入量的变化逐渐趋于平缓。为了保证止水帷幕的防水质量以及经济性，可在实际工程中采用 11%的水泥掺入量。

本文采用一种全新的工艺设备进行施工，形成一种强力搅拌旋喷桩，提高了深厚富水圆砾、卵石地层止水帷幕成桩质量合格率，节约了施工成本，加快了施工进度。

参考文献

[1] 陶志刚，秦可，米蒙，等. 基坑开挖扰动变形特征及控制效果模拟分析[J]. 科学技术与工程，2023，23(9)：3820-3830.

[2] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报，2022，44(1)：1-36.

[3] 张冬冬，王腾，李芳，等. 深基坑工程近接施工对既有地铁的影响——以济南某邻近地铁基坑开挖工程为例[J]. 科技和产业，2022，22(2)：312-319.

[4] 朱大鹏，谢昌建，杨阳. 深基坑开挖及降水诱发邻近建筑物变形破坏机理及影响因素[J]. 科学技术与工程，2022，22(3)：1166-1172.

[5] 曾超峰，孙海昱，薛秀丽，等. 多含水层体系基坑抽水诱发邻近建筑桩基受力变形特性[J]. 土木工程学报，2022(10)：1-12.

[6] 李瑛，陈东，刘兴旺，等. 悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J]. 岩土力学，2021，42(3)：826-832.

[7] 丁建文，郭晨，王涛，等. 南京长江漫滩粉土地层止水帷幕改良室内试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2022，52(4)：753-761.

[8] 王申侠. 邻洋河基坑降水及特长地铁站温度应力研究[J]. 铁道工程学报，2020，37(4)：85-90.

[9] 杨汝贤，靳高明，张荣海，等. 富水圆砾地层局部止水帷幕作用下基坑开挖变形数值分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(7)：2848-2855.

Experimental Study on Improvement of Water Stop Curtain in Thick Sandy Cobble Stratum near the River

YANG Feng

(China Railway Tunnel Bureau Group Co. Ltd. ,Municipal Engineering Company,Hangzhou 310030,China)

Abstract: In order to make the water-stop curtain play a better effect,the indoor test was firstly used to determine the reasonable cement mixing amount, and then the traditional high-pressure jet grouting pile equipment was improved, and the research results of the indoor test to the field test were applied to form a the utility model relating to a powerful stirring rotary spraying pile. The research results are as follows. In order to ensure the waterproof quality and economy of the water-stop curtain, 11% cement can be added in the actual project. In addition, the powerful agitation and rotary grouting piles formed by the use of new equipment have improved the qualified rate of water-stop curtain pile quality, saved construction costs, accelerated construction progress, and provided a reference for the development of similar projects in the future.

Keywords: foundation pit engineering; sandy cobble; water stop curtain; cement content; strong mixing jet grouting pile