

【工程应用】

潜喷注浆桩在复杂地层截水帷幕中的设计与应用

曹巍¹, 白永明², 罗曦¹, 吕军¹, 张非凡¹, 张勋¹

(1. 北京荣创岩土工程股份有限公司, 北京 100085; 2. 北京中铁十二局集团有限公司, 北京 100085)

摘要: 随着城市化建设的快速发展, 水资源日益匮乏, 各类工程项目开始广泛采用截水帷幕这种地下水控制方法。但在填海抛石层、泥卵石入灰岩地层、砂卵石层、巨厚砂层等复杂地层中, 地下连续墙、咬合桩、深层搅拌桩、高压旋喷桩、高压注浆等截水帷幕施工工艺, 要么造价较高, 要么施工困难或者截水效果较差。本文通过一系列工程案例, 介绍一种新的截水帷幕工艺——潜孔冲击高压喷射注浆桩工艺在各种复杂地层中截水的成功应用, 并对其工艺的机理进行研究和分析。通过工程实践, 证明其可行性及实用性, 对今后类似工程具有较好的借鉴作用。

关键词: 潜孔冲击高压喷射注浆桩技术; 截水; 复杂地层; 截水帷幕

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)02-0156-09

Design and application of down-the-hole jet grouting piles in water-cutoff of complex formation

CAO Wei¹, BAI Yong-ming², LUO Xi¹, LV Jun¹, ZHANG Fei-fan¹, ZHANG Xun¹

(1. Beijing Rongchuang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. Beijing China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization and the shortage of water resources, waterproof curtain which is one of the groundwater control methods, is being widely used in various engineering projects. However, in complex strata such as reclaimed riprap layer, mud-pebble embedded into limestone layer, sand pebble layer and huge thick sand layer, construction techniques of waterproof curtain such as underground diaphragm wall, secant pile wall, deep mixing method, high-pressure rotary jet grouting and high-pressure grouting method have many challenges of high construction cost and unsatisfied water proof effect. Through a series of engineering cases, this paper introduces the mechanism and application of a new waterproof curtain technique, the down-the-hole (DTH) impact high-pressure jet grouting pile method in various complex situations. Through application, this construction technique is proved to be feasible and practicable, which can be used as a reference for similar projects.

Key words: down-the-hole impact high pressure jet grouting pile technique (DJP); groundwater cut off; complex strata; water cutoff system

0 引言

地下空间技术不断发展, 基坑工程日益加深, 地下水控制问题已经成为制约其质量与安全的决定性因素。传统降水方案对地下水资源造成极大的浪费, 且因水位下降引发的地面沉降等次生灾害, 影响和破坏是深远的。随着各地区地下水控制政策的出台, 截水帷幕的地下水控制方法兴起并在基坑工程中广泛应用。大量的工程实践证明, 截水帷幕

是一种可行又不浪费和污染地下水资源的优选方法。常见的截水帷幕可分为墙式和桩式, 分别以地下连续墙和高压旋喷桩为典型代表。前者整体截水效果好, 但施工难度大、造价高; 后者多采用高压旋喷桩技术, 与钻孔灌注桩咬合搭接形成的“截水+支护”联合体, 相对经济和高效。

深层搅拌桩(水泥土墙)截水效果尚可, 但一般适用于软土地层, 在巨厚砂层、卵砾石等复杂地层无法施工; 高压注浆目前作为防渗堵漏手段较为

常见,但在截水帷幕中应用较少。

传统的高压旋喷桩工法应用较广的有单管法、双管法及三重管法,此类工法优点是设备和工艺都比较简单、造价较低、使用范围较广;不足之处是其在复杂地层中成孔困难,需采用其他设备引孔后再进行旋喷注浆,施工效率低,成孔垂直度偏差较大,引孔后孔壁易坍塌,且有注浆盲区,从而导致截水效果较差^[1]。

潜孔冲击高压喷射注浆桩技术是将潜孔冲击工艺与高压喷射工艺进行有机组合,可在深厚砂层、卵砾石层、碎石层、抛石层等地层中顺利成孔并一次性喷射高压浆液,可解决在复杂地层中施工截水帷幕的难题。该工艺成桩质量好、施工效率高、截水效果好、节能环保、造价较低^[2]。

1 技术原理及工艺流程

1.1 技术原理

潜孔冲击高压喷射注浆桩技术(简称 DJP)是利用潜孔锤高频振动作用和高压水、气动能共同冲击破坏土体,然后通过钻杆带动喷射口旋转、提升,将高压喷射的水泥浆液与土体充分混合形成水泥土固结体的技术。由该工法形成的水泥土桩体称为潜孔冲击高压喷射注浆桩^[3](简称潜喷注浆桩),见图 1、图 2。

潜孔冲击高压喷射注浆工艺的原理是多种机理共同作用。首先冲击钻头冲击下沉过程中冲击器头部喷出大量高压空气,在地层深处频繁产生气爆,同时钻头产生高频振动冲击。气爆作用可以有效的破坏土体结构,加大旋喷桩的旋扩直径,从而加大旋喷桩的截水范围;高频振动可以将土体和水分结合并液化,形成流塑状态,高压水泥浆注入后,高频振动起到振捣作用,使水泥浆和流塑状态土体结合更均匀,形成良好的水泥土截水结构;冲击器上部高压水射流可进一步切割土体,保证土体与水泥浆充分的结合。高压水、高压气、高频振动产生联动机理,使周围土体迅速软化,处于一种流塑状态,在高压泵转化为喷射高压水泥浆后,这种流塑状态的土和水泥浆充分混合,形成直径较大、水泥土均匀的截水帷幕桩^[4]。

由潜孔冲击高压喷射注浆体桩相互咬合或与支护桩相互咬合,形成的具有阻止地下水从侧向或底面进入基坑的连续阻水体,称为潜孔冲击高压喷射注浆体桩截水^[3]。



图 1 DJP 成孔示意图

Fig. 1 DJP hole drilling



图 2 DJP 喷浆示意图

Fig. 2 DJP jet grouting

1.2 施工工艺流程及工艺参数

DJP 工法施工工艺流程如图 3 所示, DJP 水泥土桩施工工艺参数见表 1 所示。

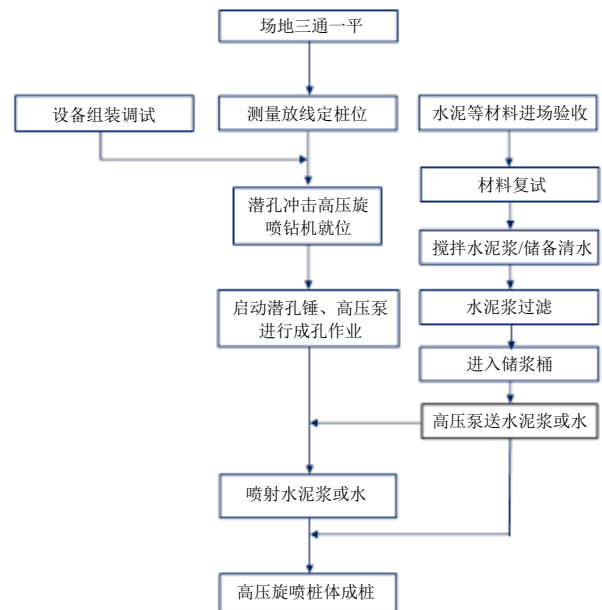


图 3 DJP 工法施工工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of DJP construction process

表 1 DJP 水泥土桩施工工艺参数

Table 1 Construction parameters of DJP cement soil pile

介质	参数	取值
水	压力/MPa	1~20
	喷嘴数量/个	1~3
	喷嘴直径/mm	1.5~4.5
气	压力/MPa	0.7~2.3
	流量/(m ³ /min)	6~30
	喷气方式	水平及锤底竖向喷气
浆	压力/MPa	5~40
	流量/(L/min)	80~300
	密度/(g/cm ³)	1.4~1.7

2 工程应用案例

2.1 抛填石复杂地层截水帷幕应用案例

(1) 工程概况

大连恒力维多利亚公馆项目，位于大连市东港商务区，包括 4 栋超高层建筑及其裙楼，总占地面积约为 71 400 m²，地上为公寓 68 层，裙楼 4 层，地下 3 层停车场，总建筑面积 332 425 m²。距离海边仅 800 m，基坑最大开挖深度 13.60 m。

该场地为新近填海区，开挖范围内：①素填土回填时间 1 年以上，主要由粉土及碎石组成，碎石成分多为石英岩、板岩，含量 40%左右，粒径 15~50 cm，大者可达 100~150 cm，呈棱角状，均匀性差，可压缩性强；⑦中风化板岩岩体基本质量等级为 IV 级，场地内均有分布。地下水位标高为 1.10~5.20 m，因地下水与海水相连，水位受海水潮汐影响较大。典型地层剖面如图 4 所示。

原设计采用素混凝土桩加旋喷桩（三重管工艺）形成联合截水体系。因地层障碍物影响，旋喷桩桩位偏差较大，垂直度、桩长、桩径等重要参数均无法保证，截水效果较差。后虽采用多种补救方式均不能有效降低水位，造成工程停滞近 1 年，给建设方带来近亿元损失。原截水体系如图 5 所示。

考虑到截水效果，补强帷幕桩设置于支护桩与原截水体系素混凝土桩之间最为经济有效，但由于地层原因，已施工两种桩的垂直度偏差较大，桩体扩径情况较为严重，成桩及其垂直度、桩径问题成为制约本设计的主要瓶颈。结合潜孔冲击高压喷射注浆工艺的特点及优势，经过多次专家论证及现场试验，最终确定该项目截水帷幕采用 DJP 工艺进行

施工，可以解决施工难题，满足设要求。

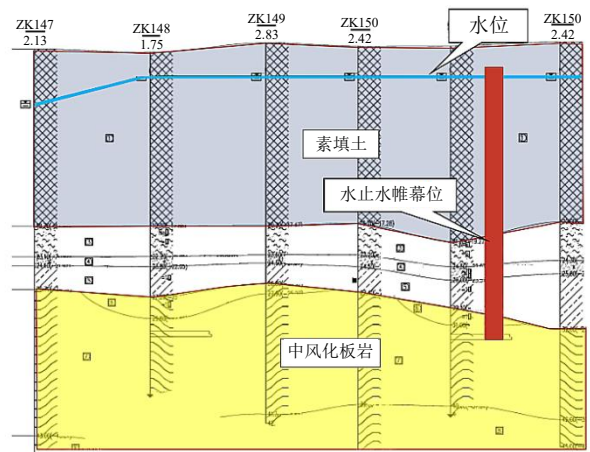


图 4 典型地层剖面图

Fig. 4 Typical stratigraphic profile

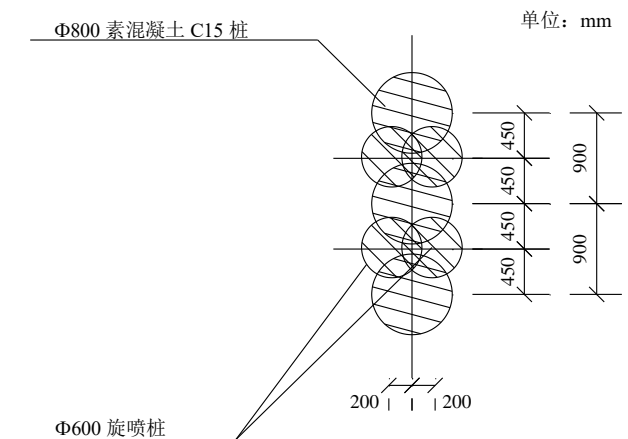


图 5 原截水体系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of original water cutoff system

(2) 设计方案及施工参数

a) 设计方案

DJP 工法截水帷幕桩设计桩长 25.5 m，桩径不小于 700 mm，桩端进入中风化板岩。见图 6 所示。

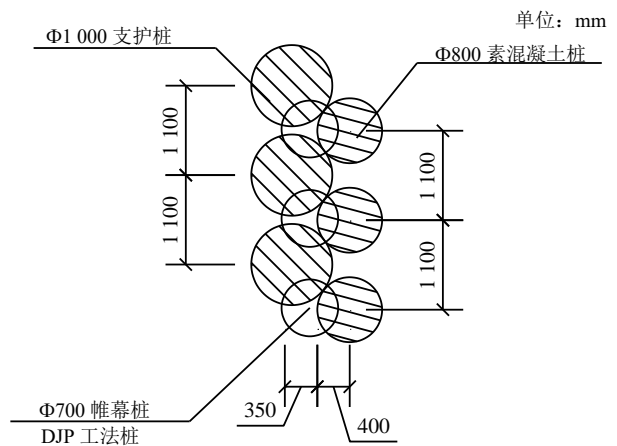


图 6 截水帷幕桩平面布置图

Fig. 6 Layout of water cutoff pile

b) 施工参数详见表 2 所示。

表 2 施工参数表
Table 2 Construction parameters

项目	参数	项目	取值
水灰比	1 : 0.85	桩垂直度	0.3%
水泥浆液比重	1.65	注浆压力	30 MPa
喷水压力	≤5 MPa	气压	≥0.7 MPa
水泥标号	P.O 42.5	提升速度	0.3 m/min
水泥掺量	30%	转速	18~21 转/min
水泥土抗压强度	≥1.0 MPa	流量	90~100 L/min

c) 现场施工效果对比

原截水体系施工后, 截水效果不佳, 基坑无法下挖。如图 7 所示。

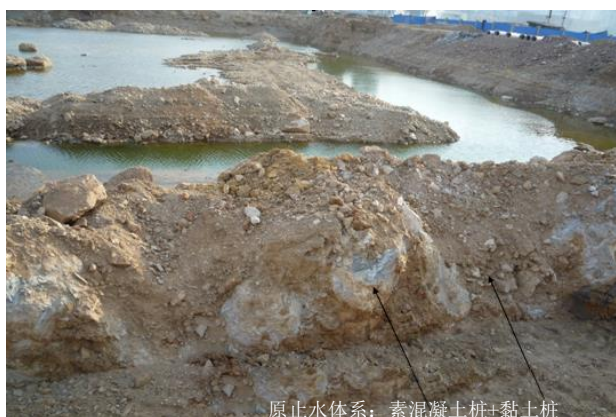


图 7 原截水体系施工后基坑无法开挖现场照片

Fig. 7 Foundation pit can't be excavated after using original water cutoff system

采用 DJP 技术施工的截水帷幕桩, 截水效果较好, 基坑开挖至坑底后达到了基坑内干槽作业的目的。如图 8 所示。

d) 检测结果

经检验, 水泥土桩桩身渗透系数为 $2.26 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 渗透性低, 满足设计截水要求。

2.2 泥卵入灰岩复杂地层桩间截水帷幕应用案例

(1) 工程概况

济南地铁 R3 号线孟家庄站项目位于山东省济南市锦屏家园小区以西, 为地下双层岛式车站。车站底板埋深约 17.69 m, 顶板覆土约 2.63~3.93 m, 采用明挖法施工。本基坑围护结构采用围护桩+内支撑体系。截水结构采用桩间旋喷桩截水+坑内排水的方案。

本工程基坑范围内的土体主要为素填土、黄土



图 8 DJP 截水帷幕桩施工后开挖至基底现场照片

Fig. 8 Excavated to the basement after DJP water cutoff was constructed

状粉质黏土、粉质黏土、碎石土, 局部为全风化闪长岩、强风化闪长岩、中风化闪长岩及中风化灰岩。车站钻探深度范围内揭露地下水为上层滞水, 无稳定地下水位, 雨水下渗补给, 下部岩石层相对隔水; 局部地区岩溶裂隙发育, 且彼此连通, 导水性强。典型地层剖面图如图 9 所示。

拟建项目地层差异性较大, 帷幕桩桩身大部分位于碎石及强风化~中风化岩层中, 且受地下水影响。传统旋喷工艺(多重管)无法直接成孔, 即使采用引孔后再喷浆, 由于其喷浆压力低($\leq 25 \text{ MPa}$)、成桩机理简单, 在该复杂地质情况下成桩直径也无法保障, 对桩周风化岩层孔隙无法起到渗透加固的作用。此外, 项目最大施工桩长约 30.0 m, 引孔钻进过程钻杆偏斜较大, 垂直度无法保证, 影响帷幕桩体咬合。经过技术比对及现场试验, 最终确定本工程的截水帷幕采用潜孔冲击高压喷射注浆工艺。

(2) 设计方案及施工参数

a) 设计方案

为防止施工降水对锦屏家园小区产生沉降等不良影响, 设计在基坑支护结构及降水井外侧采用截水帷幕, 截水帷幕形式为落底式截水帷幕, 以有效切断基坑内外的地下水联系, 截水帷幕采用单排潜喷注浆桩。根据地勘报告, 基坑底中风化石灰岩为隔水层, 标准段截水采用 $\Phi 800 @ 1\ 300$ 旋喷桩, 盾构井段采用 $\Phi 800 @ 1\ 200$ 旋喷桩, 旋喷桩桩长 16.0~30.0 m, 桩底与围护桩桩底同标高(要求进入不透水层不小于 1 m), 截水帷幕高出施工期间抗浮水位 1 m。

b) 施工参数详见表 3 所示。

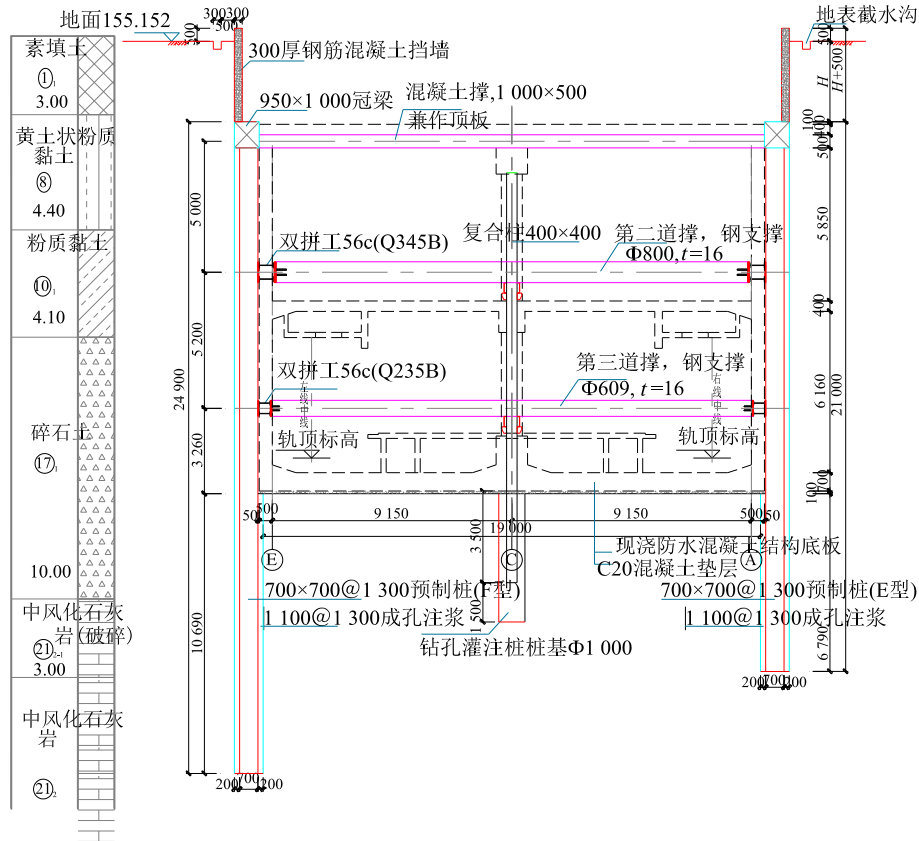


图9 典型地层剖面图

Fig. 9 Typical stratigraphic profile

表3 施工参数表

Table 3 Construction parameters

项目	参数	项目	取值
水灰比	1 : 1	桩垂直度	≤0.5%
水泥浆液比重	1.65	喷浆压力	≥30 MPa
喷水压力	20 MPa	气压	1.0 MPa
水泥标号	P.O 42.5	提升速度	0.35 m/min
水泥掺量	25%	转速	21 转/min

(3) 现场施工效果

施工完成后进行了基槽的开挖, 现场随机开挖 3 根旋喷桩检测成桩质量。经对帷幕桩进行剥露检查, 显示旋喷桩与护坡桩咬合紧密, 有效搭接防止了外侧水的进入。开挖后桩径均≥1 000 mm, 经现场取芯试验, 桩身强度为 3 MPa, 符合设计要求; 抗渗强度满足水泥土桩桩身渗透系数小于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的设计要求。现场成桩效果检测情况如图 10 所示。

本项目采用 DJP 工法施工截水帷幕, 基坑开挖至槽底, 侧壁无渗漏, 截水效果良好, DJP 工法在

泥卵砾石及强风化~中风化岩层等复杂地层条件下施工截水帷幕的优势以及较高的施工质量得到体现。现场土方开挖后桩间咬合情况如图 11 所示 (红色图框内为潜喷注浆桩)。



图10 DJP工法成桩效果开挖检测

Fig. 10 Excavation inspection of pile by using DJP construction method



图 11 截水帷幕施工后开挖桩间咬合情况

Fig. 11 Occlusion between excavation piles after using water cutoff system

2.3 巨厚砂层桩间截水帷幕应用案例

(1) 工程概况

北京城市副中心 C5 机关配送中心项目, 建筑面积约 12 000 m², 南侧邻近综合管廊, C5 工程基坑与综合管廊基坑合槽开挖, C5 基坑开挖深度为 20.2 m, 为一级基坑。本项目基坑北侧为堡辛新村回迁住宅楼 6 号、7 号住宅楼, 地上 20 层地下 2 层, 采用天然地基, 基底标高为 14.67 m。北侧支护边界距离 6 号住宅楼约 8.0 m, 距离 7 号住宅楼约 25.0 m, 距西北侧混砖楼约 30 m。基坑开挖上口线距离北侧小区围墙最小距离不足 1.0 m。

由于该工程北侧紧邻高层住宅, 地层主要为巨厚细砂-中砂层, 地下水含量丰富, 分布较为复杂, 该区域对于基坑开挖后截水阻砂的要求非常高。传统工艺在该地层桩间进行截水帷幕施工可靠性不高, 经过专家论证及现场试验, 最终确定该项目桩间截水帷幕采用潜孔冲击高压喷射注浆工艺。典型地层剖面图如图 12 所示。

(2) 设计方案及施工参数

a) 设计方案

基坑采用封底式截水帷幕设计, 基坑北侧采用支护桩与旋喷桩联合截水帷幕, 设计桩长 30 m, 桩径 1 200 mm, 与支护桩搭接 400 mm; 西侧采用旋喷桩自咬合截水帷幕, 设计桩长 30 m, 桩径 1 000 mm, 搭接 350 mm, 桩端位于⑥₂粉质黏土隔水层。详见图 13。

b) 施工参数详见表 4 所示。

c) 现场施工效果

开工前进行试桩, 开挖后帷幕桩直径达 1 300 mm。详见图 14 所示。

本项目周边环境复杂, 采用 DJP 工法施工截水帷幕桩, 周边邻近建筑物未受帷幕桩施工影响。截水帷幕施工完成后进行基坑开挖, 挖深 20.2 m, 经

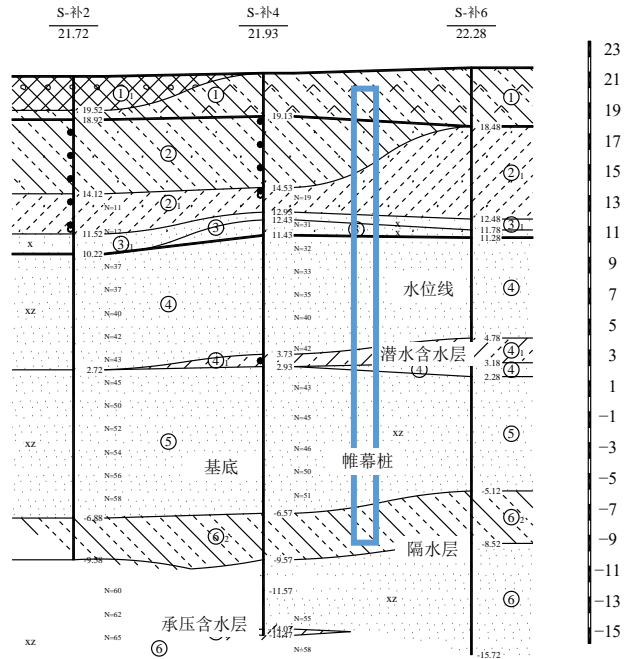


图 12 典型地层剖面图

Fig. 12 Typical stratigraphic profile

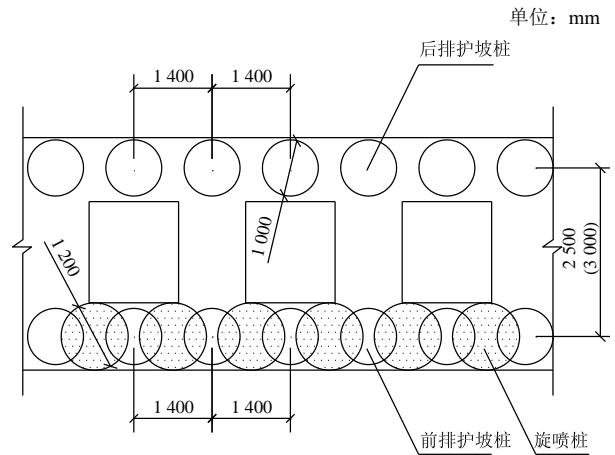


图 13 北侧截水帷幕桩平面布置图

Fig. 13 Layout plan of water cutoff piles on north side

过对帷幕桩剥露检查, 水泥土桩与支护桩咬合紧密, 有效阻止了外侧地下水的进入, 基坑侧壁无渗漏, 截水效果良好。基坑开挖后桩间咬合情况如图 15 所示。

现场随机对帷幕桩进行取芯, 取芯效果良好, 芯体完整连续, 水泥土均匀度高。帷幕截水桩抽芯情况如图 16 所示。

芯样检测结果显示, 无侧限抗压强度不低于 1.4 MPa, 符合桩身水泥土强度不小于 0.8 MPa 的设计要求; 水泥土抗渗强度最大值为 2.14×10^{-8} cm/s, 满足水泥土桩桩身渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s 的设计要求。

表4 施工参数表
Table 4 Construction parameters

项目	参数	项目	参数
水灰比	1:1	桩垂直度	0.5%
水泥浆液比重	1.6	喷浆压力	30 MPa
喷水压力	≤5 MPa	气压	≥0.7 MPa
水泥标号	P.O 42.5	提升速度	0.33 m/min
水泥掺量	≥25% (≥400 kg/m)	水玻璃	模数为 2.4~3.4, 浓度为 30~45 波美度, 水泥用量的 2%
转速	23 转/min	流量	90~100 L/min
水泥土 28 d 抗压强度	≥0.8 MPa	水泥土渗透参数	<10 ⁻⁷ cm/s



图 14 试桩开挖效果

Fig. 14 Pile examination after excavation



图 16 帷幕桩抽芯情况

Fig. 16 Core examination of water cutoff piles



图 15 截水帷幕现场照片

Fig. 15 Photograph of water cutoff system

2.4 大粒径密实卵石层桩间截水帷幕应用案例

(1) 工程概况

东城区第一人民医院异地迁建项目位于北京市东城区永外定安里, 东临定安里 11 号、13 号住

宅楼, 南临北京益华食品厂, 西临规划定安里中路, 北临刘家窑路。拟建医院由一栋综合楼组成, 地上 6~7 层, 裙楼地上 3~4 层, 建筑高度不超过 40 m, 配套设施地上 1~2 层, 均设 4 层地下室, 基础埋深-23.3 m, 本基坑围护结构采用围护桩+锚杆体系。

本工程基坑范围内的土体主要为杂填土、细砂、粉质黏土、卵石层。初见水位埋深 22.00~22.60 m, 绝对标高 18.28~18.45 m, 稳定水位埋深 21.00~22.10 m, 绝对标高 18.95~19.30 m, 主要赋存于⑤卵石层中, 水量较大。典型地层剖面如图 17 所示。

本工程截水帷幕桩成桩地层为卵石层, 一般粒径 2~6 cm, 最大粒径将近 50 cm, 中粗砂充填, 局部为圆砾, 该层厚度为 10.50~16.80 m。传统高压旋喷设备在该地层中无法直接成孔, 需采用套管跟

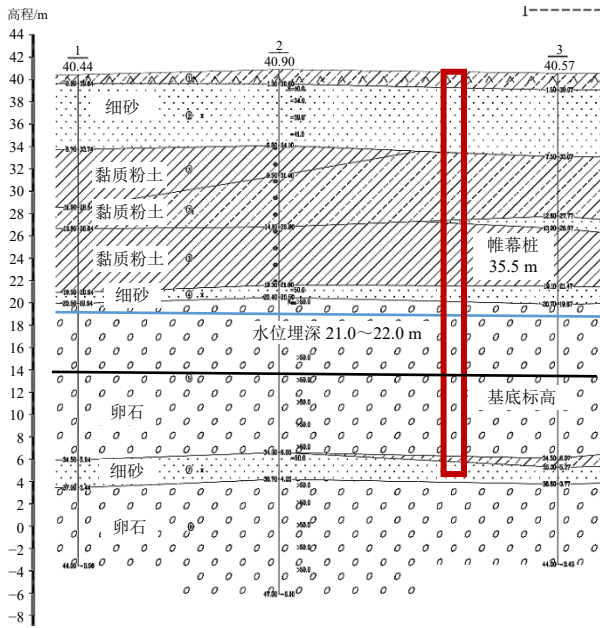


图 17 典型地层剖面图

Fig. 17 Typical stratigraphic profile

进引孔作业后, 再进行管内喷浆。引孔施工垂直度偏差较大, 套管跟进作业难度较高, 且工效低, 由于套管内喷浆, 桩径无法保证。针对该地质条件, 本工程采用 DJP 工法, 利用潜孔锤在高压空气驱动下产生的冲击效能来进行冲击破碎, 同时, 由高压泵向喷嘴提供高压水来进行切割土体, 达到钻进作业目的, 成孔后一体化高压注浆, 在确保桩径和垂直度的情况下完成成桩作业。经过现场工法试验及抽芯取样检测, 最终确定该项目的桩间截水帷幕采用潜孔冲击高压喷射注浆工艺。

(2) 设计方案及施工参数

a) 设计方案

本工程截水结构采用桩间旋喷桩截水(悬挂式截水帷幕)加坑内排水的方案。

帷幕桩桩长 35.5 m, 桩径为 1.2 m, 上部 20.0 m 为空孔部分, 下部 15.5 m 为实桩部分。

b) 施工参数详见表 5 所示。

(3) 现场施工效果

开挖至卵石地层, 护坡桩桩间截水帷幕桩暴露清晰, 桩径均匀, 尺寸达到设计要求。

本项目截水帷幕施工完成后, 基坑开挖至槽底, 侧壁无渗漏, 截水效果良好, DJP 工法在富水密实卵石地层条件下施工截水帷幕的优势以及较高的施工质量得到体现。现场开挖情况见图 18 所示(红色图框内为潜喷注浆桩)。

芯样检测结果显示, 无侧限抗压强度不低于 8.2 MPa, 符合桩身水泥石强度不小于 0.8 MPa 的设计要求; 水泥石抗渗强度最大值为 2.7×10^{-8} cm/s, 满足水泥石桩桩身渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s 的设计要求。



图 18 桩间 DJP 截水帷幕桩开挖效果图

Fig. 18 Photograph of DJP water cutoff piles

表 5 施工参数表
Table 5 Construction parameters

项目	参数	项目	参数
水灰比	1.0	桩垂直度	≤0.5%
水泥浆液比重	1.5	喷浆压力	≥40 MPa
喷水压力	≥25 MPa	气压	1.0 MPa
水泥标号	P.O 42.5	提升速度	0.2~0.25 m/min
水泥掺量	≥20% (≥450 kg/m)	转速	20~22 转/min
水泥土 28 d 抗压强度	≥0.8 MPa	水泥石渗透参数	<10 ⁻⁷ cm/s
水玻璃 17Be' (40Be'水玻璃与水 1:1 稀释)	水泥质量的 10%	—	—

3 结 语

工程实践表明：DJP 工法可实现钻进喷浆一体化，桩身垂直度偏差小、桩体直径有保证、桩身均匀、截水效果良好。同时施工效率高、造价合理、返浆量少、对周边环境的影响小、绿色环保。潜孔冲击高压喷射注浆体桩工艺用作截水帷幕，在抛填石、泥卵入灰岩、巨厚砂、大粒径密实卵石等各种复杂地层中截水帷幕的成功应用，证明其广阔的发展前景，值得大力推广应用。

参考文献

- [1] 张亮, 朱允伟, 李楷兵, 等. 潜孔冲击高压喷射注浆桩工法原理及特性研究[J]. 施工技术, 2017, 46(19): 59-62.
- ZHANG Liang, ZHU Yun-wei, LI Kai-bing, et al. Research on the principle and character of DTH impacting jet grouting pile with high pressure method[J]. Construction Technology, 2017, 46(19): 59-62.
- [2] 郇盼, 张有祥, 刘宏运, 等. 潜孔冲击高压喷射注浆桩技术 (DJP 工法)及其在复杂地层中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 71-77.
- HUAN Pan, ZHANG You-xiang, LIU Hong-yun, et al. Down-the-hole percussion high pressure jet grouting pile technique (DJP technique) and it's application in complex layers[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 71-77.
- [3] 潜孔冲击高压喷射注浆体桩技术规程: 建标协字[2017] 014 号 (批准文件)。
- [4] 毛宗原, 张亮, 刘宏运. 人工填海复杂地层止水帷幕新工艺研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(z1): 223-226.
- MAO Zong-yuan, ZHANG Liang, LIU Hong-yun, et al. Research on a new method of water stop curtain for aartificial sea-fill complex stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(z1): 223-226.
- [5] 刘宏运, 张微. 潜孔冲击高压喷射注浆桩 (DJP 工法) 止水+封底帷幕在高水位砂层中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(1): 29-30, 35.
- LIU Hong-yun, ZHANG Wei. Application of down hole jet grouting pile (DJP Method) waterproof wall and bottom-sealing curtain in sand layer of high water level[J]. Construction Technology, 2019, 48(1): 29-30, 35.