

新装备新工艺

# 潜孔冲击高压旋喷桩技术（DJP工法）及其在复杂地层中的应用

郇盼, 张有祥, 刘宏运, 王沙沙, 唐恒森, 李林洋  
(北京荣创岩土工程股份有限公司, 北京 100085)

**摘 要:** 常规施工方法在深厚块石填土地层、岩溶等复杂地层中施工存在施工速度慢、质量差、造价高等不足。DJP工法将潜孔冲击与高压旋喷组合在一起, 通过潜孔锤实现在块石地层、卵石地层、岩层中成孔, 同时喷射高压水泥浆进行护壁、扩径, 可有效的解决复杂地层中的旋喷桩和复合管桩施工难题, 且具有速度快、质量好、造价低等优点。

**关键字:** 潜孔锤; 旋喷桩; 复合管桩; 复杂地层

**中图分类号:** TU47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096 - 7195(2020)01 - 0071 - 07

**作者简介:** 郇盼(1988 - ), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 893235086@qq.com。

## Down-the-hole percussion high pressure jet grouting pile technique (DJP technique) and it's application in complex layers

HUAN Pan, ZHANG You-xiang, LIU hong-yun, WANG sha-sha, TANG heng-sen, LI lin-yang  
(Beijing Rongchuang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** In complex layers such as deep rock-filled land and karst, conventional construction method has the disadvantages of slow construction speed, poor quality and high cost. The DJP technique combines down-the-hole percussion technology with jet grouting technology, and down-the-hole hammer forms the hole in the layers containing blocks of rock, the pebble bed and the rock. Meanwhile, the high-pressure cement grout is sprayed to protect the wall of hole and expand the diameter. It solves the construction problems of jet grouting pile and composite pipe pile in complex layers effectively, and also, it has the advantages of high speed, good quality and low cost.

**Key words:** down-the-hole hammer; high pressure jet grouting pile; composite pipe pile; complex layers

## 0 前 言

随着我国城市化建设快速发展, 土地资源日益匮乏, 很多城市扩建、大型厂区、机场、住宅社区的建设用地开始向近海、山地和岩溶地区拓展, 由此所形成的高厚块石填土地层、岩溶地层等复杂场地给工程建设提出了新的难题, 如浙江海岛某项目, 填海造地工程围淤后地表普遍吹填厚约 0.80~5.50 m 的粉细砂, 再回填约 15 m 的开山区碎石、块石, 形成现状场地; 湖北某项目原始地貌为丘陵沟谷相间分布, 四周山体、中部夹沟谷, 后经开山切坡、高挖低填的方式逐步整平形成, 填方最深处达 50 余米, 且场地未进行分层碾压<sup>[1]</sup>; 再如广东某项目, 场地区域为溶洞强发育区, 大部分溶洞为串珠状溶洞, 且部分溶洞为空洞, 最大洞高 16.30 m。

在深厚块石填土地层中进行地基处理加固, 常

用的施工方法有强夯法或强夯+高压旋喷桩工艺等。其中强夯法是一种处理填土的有效手段, 但对于深厚填土地层的场地处理深度不够。常规高压旋喷桩工艺在大空隙、大颗粒块石填土等复杂地层中进行地基处理时, 需采用其他设备引孔, 然后再喷射高压浆, 因增加引孔工序将导致施工效率降低, 且引孔设备提出孔外时孔壁极易坍塌, 再下入注浆管难度大; 在无地下水的大空隙深厚填土地层中喷浆, 注入地层中的水泥浆液极易沿空隙流失; 在具有动水环境的深厚填土地层中喷浆, 注入地层的浆液易被地下水冲蚀, 均无法有效控制注浆范围, 成桩质量均不可靠<sup>[2]</sup>。

在深厚块石填土地层、岩溶地层中采用桩基础方案, 常用的施工方法为钻(冲)孔灌注桩。钻(冲)

孔灌注桩施工工艺在深厚块石填土地层中施工难度大,成孔过程中易塌孔,形成的混凝土灌注桩易产生夹泥、断桩、扩径、缩颈、沉渣过厚等质量问题。

潜孔冲击高压旋喷技术(DJP工法)将潜孔冲击工艺与高压旋喷工艺进行有机组合,可在深厚块石填土地层、岩溶地层中顺利成孔并喷射高压浆液,可解决在深厚块石填土地层、岩溶地层中施工旋喷桩、复合预制桩的难题。DJP工法成桩质量好,施工工效高,造价低。

## 1 技术原理及工艺流程

### 1.1 技术原理

DJP工法是利用位于钻杆下方的潜孔锤冲击器在钻进过程中产生的高频振动冲击作用,结合冲击器底部喷出的高压空气对土体结构进行破坏,同时冲击器上部高压水射流切割土体;在高压水、高压气、高频振动的联动作用下,钻杆周围土体迅速崩解,处于流塑或悬浮状态;此时喷嘴喷射高压水泥浆对钻杆四周的土体进行二次切割和搅拌,加上垂直高压气流的微气爆作用,使已成悬浮状态的土体颗粒与高压水泥浆充分混合,形成直径较大、混合均匀、强度较高的水泥石桩。水泥石桩完成后,在水泥石桩内同心植入预制芯桩,形成DJP复合预制桩<sup>[3]</sup>。

#### (1) 成孔机理

在钻机就位后,开动大功率动力头旋动钻杆,向钻杆底部的冲击器提供高压空气(空气压力不低于2.0 MPa),潜孔锤在高压空气驱动下开始产生冲击效能;同时,由高压泵向喷嘴提供高压水,冲击器上部四周的喷嘴在 $\geq 25$  MPa的压力下水平喷射高压水流。如地层为粉土、黏土,喷射的高压水流可切割软化四周的土体;如地层为砂土,高压水流和高压空气可使四周砂土悬浮;如遇到碎石、卵石或块体时,则可直接冲击破碎。此外,潜孔锤的高频振动冲击和高压空气的联合作用也会在锤底空间内产生“微气爆”效果,进一步加强对黏土、粉土和砂土的冲击切割能力,对卵石、块石地层通过振动、气爆调整块石位置,打开通道,利于后续水泥浆进入被加固区域。

#### (2) 成桩机理

成孔完成后提钻开始注浆。此时,将高压水切换为高压水泥浆,同时提升喷射压力至25~40 MPa,由喷射器侧壁的喷嘴向周围土体进行高压喷射注浆;此时,已成流塑或液化状态的土体被喷

射器四周喷射的高压浆充分搅拌、混合,同时,锤底喷射的高压气可加大搅拌混合力度,并将浆液往四周挤压,沿着气爆打开的孔隙和通道注入被加固的土体,从而形成均匀的水泥土混合物。这种喷射注浆方式要比普通的旋喷注浆产生的压力更大,效果更好,可形成的桩径也更大。水泥石桩完成后,在水泥石桩内同心植入预制芯桩,形成DJP复合预制桩<sup>[4]</sup>。

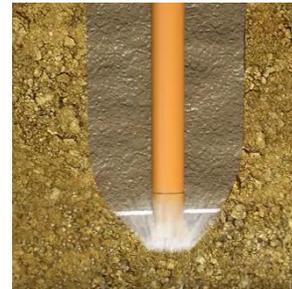


图1 DJP成孔示意图

Figure 1 Schematic diagram of DJP pore-forming



图2 DJP喷浆示意图

Figure 2 Schematic diagram of DJP jet grouting

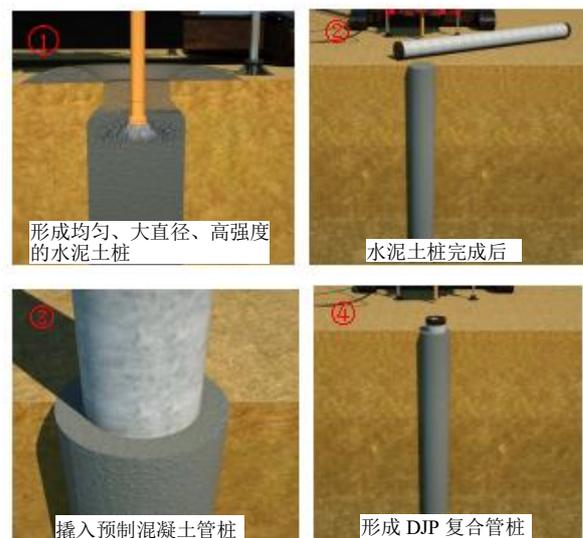


图3 DJP复合预制桩成桩示意图

Figure 3 Schematic diagram of pile-forming of DJP composite precast pile

### 1.2 施工工艺流程及工艺参数

DJP工法施工工艺流程如图4所示,DJP水泥石桩施工工艺参数见表1所示。

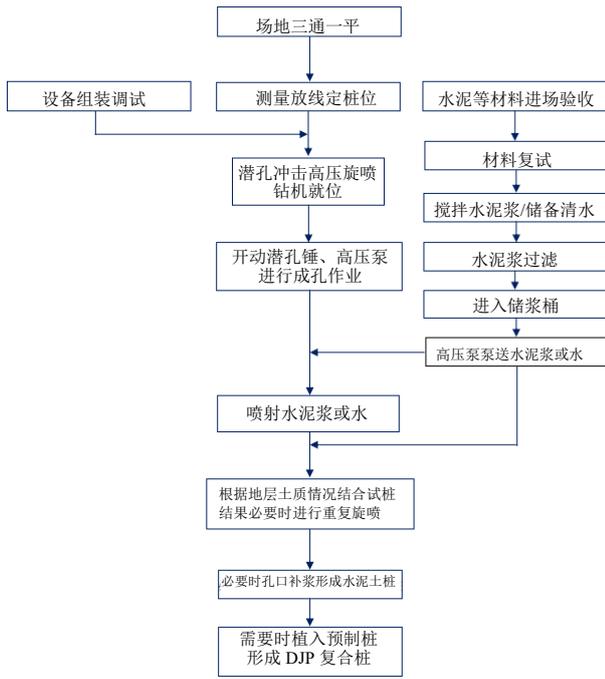


图 4 DJP 工法施工工艺流程图

Figure 4 Process flow diagram of DJP construction method

表 1 DJP 水泥土桩施工工艺参数

Table 1 Construction parameters of DJP soil-cement pile

介质	参数	取值
水	压力/MPa	5~40
	喷嘴数量/个	1~2
	喷嘴直径/mm	1.5~4.5
气	压力/MPa	0.7~2.3
	流量/(m <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> )	1.4~1.7

## 2 工程案例

### 2.1 岩溶地层桩基础应用案例

#### (1) 工程概况

广东某项目建筑面积 16 万 m<sup>2</sup>, 拟建建筑物为地上 32 层, 地下一层车库。场地地层自上而下为: 素填土①、粉质粘土②<sub>1</sub>、淤泥质土②<sub>2</sub>、粉质粘土②<sub>3</sub>、淤泥质土②<sub>4</sub>、粉砂②<sub>5</sub>、粗砂②<sub>6</sub>、卵石②<sub>7</sub>、含砾粉质粘土②<sub>8</sub>、含砾粉质粘土②<sub>9</sub>、微风化石灰岩③。地层剖面图见图 5。

场地不良地质作用为岩溶, 最大溶洞洞高 16.30 m, 部分溶洞为串珠状溶洞, 最多的为 4~5

个溶洞形成串珠状。溶洞内大部分呈全充填状态, 充填物为粉质粘土, 个别为砂卵石, 部分溶洞为空洞。场地内地下水类型主要有上层滞水、孔隙水、基岩裂隙水及岩溶水, 稳定水位埋深 0.50~2.10 m, 标高 3.73~4.88 m, 地下水水量相对丰富。

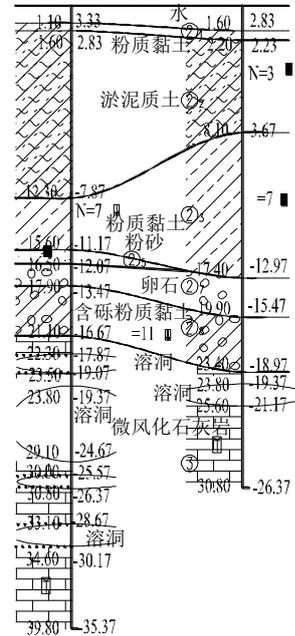


图 5 典型地层剖面图

Figure 5 Typical geologic section

#### (2) 设计方案及施工参数

##### a) 设计方案

采用 DJP 工法植桩工艺, 设计单桩承载力为 4900 kN, 桩基沉降变形允许值为 50 mm。DJP 水泥土外桩直径 700 mm; 芯桩为 UHC 600-II-130-C105 超高强混凝土管桩, 桩径为 600 mm; 桩端持力层为 ③层微风化石灰岩, 桩端进入持力层不小于 1.2 m (2d, d 为管桩外径), 桩长约 23.0~41.0 m。

##### b) 施工工艺及施工参数

采用 DJP 工法引孔, 引孔至设计桩端标高后喷浆 1 min, 再边上提钻杆边旋喷浆液, 喷至桩顶标高后再植入管桩。

##### (3) 单桩竖向抗压承载力检测

对 73 号桩进行单桩竖向抗压承载力检测, Q-S 曲线见图 6。Q-S 曲线几乎为线性关系, 未出现明显的破坏荷载; 单桩竖向抗压极限承载力为 9800 kN, 对应的沉降小于 40 mm, 回弹量为 23.8 mm, 占总沉降的 60%, 表明基桩效果好, 满足设计要求。

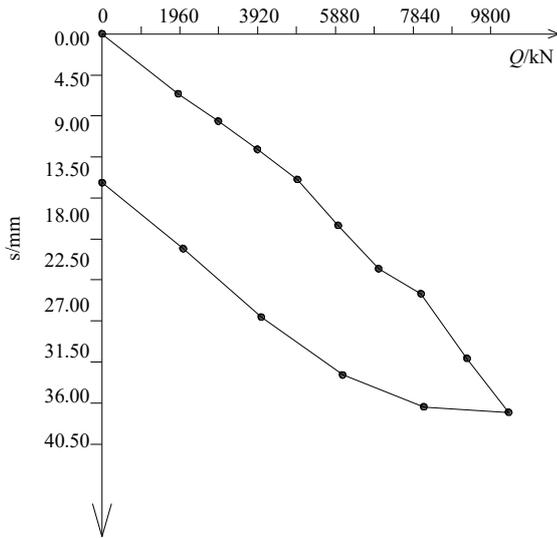
图6 单桩竖向抗压静载试验  $Q-S$  曲线Figure 6  $Q-S$  curve of single pile axial load test

表2 施工参数表

Table 2 Construction parameters

项目	参数	项目	参数
水灰比	0.7	混凝土抗压强度	$\geq 1.2$ MPa
水泥浆液比重	1.65	注浆压力	$\geq 10$ MPa
喷水压力	$\leq 5$ MPa	提升速度	$\leq 0.40$ m/min
水泥标号	PO 42.5	转速	21 转/min
水泥掺量	$\geq 20\%$		

## 2.2 抛填石地层复合地基应用案例

### (1) 工程概况

浙江某项目场地地层自上而下为:①<sub>1</sub>冲填土、①<sub>4</sub>人工填土、②<sub>2</sub>淤泥质粉质粘土、②<sub>7</sub>碎石、③<sub>1</sub>粉质粘土、③<sub>2</sub>粉质粘土、③<sub>3</sub>含砾粉质粘土、④<sub>1</sub>粉质粘土、④<sub>2</sub>含砾粉质粘土、⑤<sub>1</sub>全风化凝灰岩、⑤<sub>2</sub>强风化凝灰岩、⑤<sub>3</sub>中等风化熔结凝灰岩。场地地下水为孔隙潜水,地下稳定水位埋深 0.50~6.40 m,水位高程 -0.72~4.37 m。地层剖面如图 7 所示。

### (2) 设计方案及施工参数

#### a) 设计方案

设计方案为 DJP 复合管桩,混凝土桩径为 1000 mm,管桩型号为 PHC 500 AB 125,桩径为 500 mm,管桩桩端持力层为⑤<sub>3</sub>层中风化凝灰岩,桩长 19.0 m,设计复合地基承载力特征值为 580 kPa,单桩承载力特征值 2700 kN,沉降变形允许值为 50 mm。

#### b) 施工参数

该项目 DJP 混凝土桩的施工参数见表 3 所示。

表3 施工参数表

Table 3 Construction parameters

项目	参数	项目	参数
水灰比	0.7	混凝土抗压强度	$\geq 1.2$ MPa
水泥浆液比重	1.65	注浆压力	$\geq 20$ MPa
喷水压力	$\leq 5$ MPa	提升速度	$\leq 0.30$ m/min
水泥标号	PO 42.5	转速	21 转/min
水泥掺量	$\geq 20\%$	喷嘴直径	3.2 mm

### (3) 单桩及复合地基检测及成桩效果

单桩和复合地基静载荷试验曲线分别见图 8、9 所示。单桩竖向抗压极限承载力为 5400 kN,对应的沉降为 16.57 mm,回弹量为 7.07 mm,占总沉降的 43%。复合地基静载荷试验承压板面积 4.84 m<sup>2</sup>,最大加载值为 1160 kPa,对应的沉降为 16.08 mm,表明单桩和复合地基施工效果好,满足设计要求。成桩效果见图 10 所示。

## 2.3 抛填石地层旋喷桩应用案例

### (1) 工程概况

湖北某项目原始地貌为丘陵沟谷相间分布,四周山体,中部夹沟谷,沟谷呈树枝状,宽度 30~85 m 不等,两岸山体坡度 25~40°。后经开山切坡,高挖低填的方式逐步整平形成。基础形式为柱下独立基础。

场地地层自上而下为:①素填土( $Q_4^{ml}$ )、②粉质粘土( $Q_4^{al+pl}$ )、③<sub>1</sub>强风化片岩( $Pt_2$ )、③<sub>2</sub>中风化片岩( $Pt_2$ )。本场地无稳定地下水位,在填土层底部局部含有少量地下水,属上层滞水,没有统一地下水位。地层剖面图见图 11。

### (2) 设计方案及施工参数

#### a) 设计方案

采用分级强夯+DJP 桩复合地基方案,场地先进行强夯,后施工 DJP 桩进行加固。设计 DJP 混凝土桩直径为 1000 mm,桩长 10.0~42.5 m, DJP 混凝土桩桩体强度  $\geq 1.2$  MPa,复合地基承载力为 200 kPa,沉降允许值不大于 80 mm。由于注入地层的水泥净浆流失非常严重,因此采用在水泥粉煤灰浆液中掺入自主研发的 RCYT-1 添加剂,以增加浆液稠度,改善浆液流动性。

#### b) 施工参数

施工参数见表 4 所示。

#### c) DJP 混凝土桩检测

DJP 混凝土桩成桩直径检测见图 12,取芯效果见图 13,单桩和复合地基静载试验曲线见图 14 和 15。设计桩径为 1000 mm 的 DJP 混凝土桩,实际开挖直径  $\geq 1000$  mm,满足设计桩径要求。通过对水

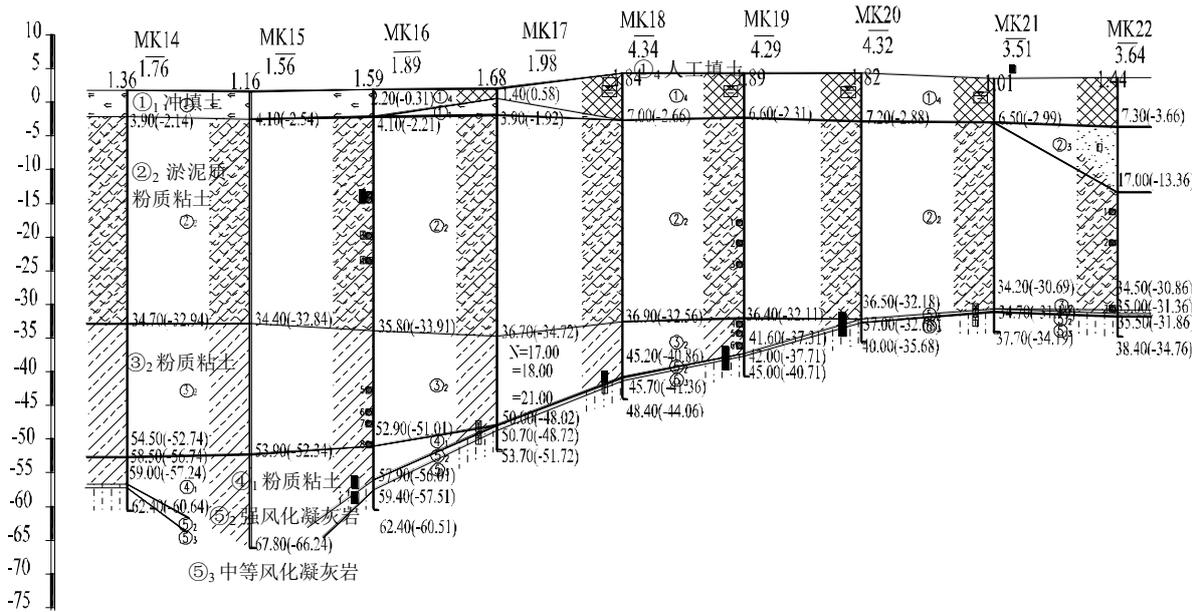


图 7 典型地层剖面图

Figure 7 Typical geologic section

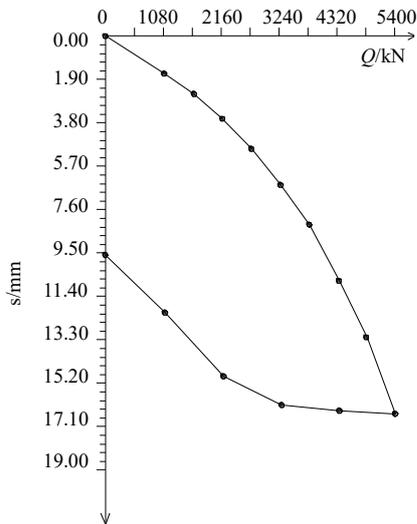


图 8 单桩竖向抗压静载荷试验 Q-S 曲线

Figure 8 Q-S curve of single pile axial load test

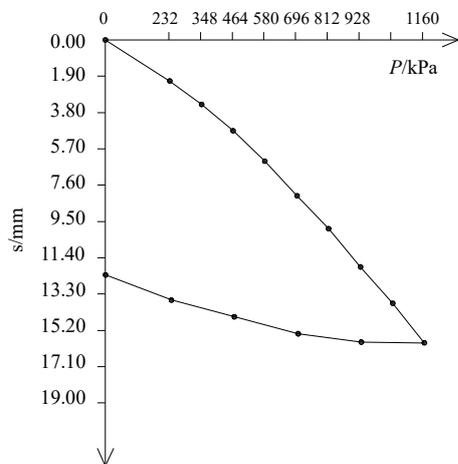


图 9 复合地基静载荷试验 P-S 曲线

Figure 9 P-S curve of static load test of composite foundation



图 10 DJP 复合管桩成桩效果

Figure 10 Pile-forming effect of DJP composite precast pile

表 4 施工参数表

Table 4 Construction parameters

项目	参数	项目	参数
水胶比	0.7	水泥掺量	≥20%
水泥粉煤灰浆液比重	1.65	水泥土抗压强度	≥1.2 MPa
喷水压力	≤5 MPa	注浆压力	15~30 MPa
水泥标号	P.O 42.5	提升速度	25~35 cm/min
粉煤灰等级	二级	转速	16~21 转/min

泥土桩取芯, 实测水泥土强度值  $\geq 6.8$  MPa, 满足水泥土桩强度  $\geq 1.2$  MPa 的设计要求。对 DJP 水泥土桩进行单桩和复合地基静载荷试验, 单桩静载荷试验 Q-S 曲线较平缓, 最大加载值为 2000 kN, 对应的沉降为 31.73 mm, 回弹量为 5.13 mm, 占总沉降量的 16%。复合地基静载荷试验最大加载值为 400 kPa, 对应的沉降为 6.8 mm, 表明单桩及复合地基质量好, 满足设计要求。

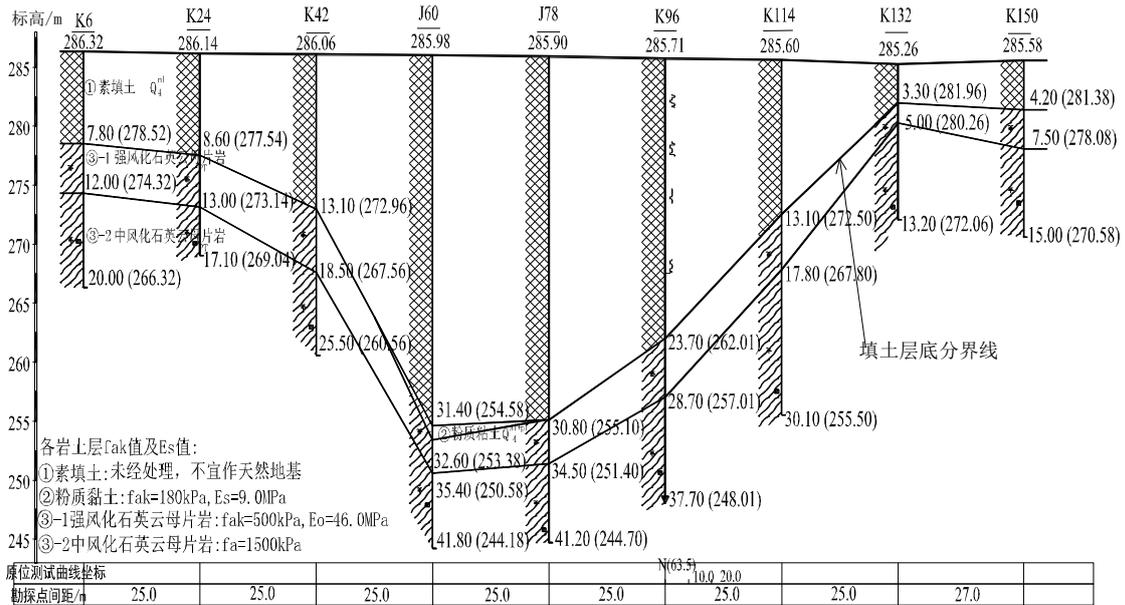


图 11 典型地层剖面图

Figure 11 Typical geologic section



图 12 水泥土桩成桩效果

Figure 12 Pile-forming effect of DJP soil-cement pile



图 13 DJP 水泥土桩取芯效果图

Figure 13 Coring effect picture of DJP soil-cement pile

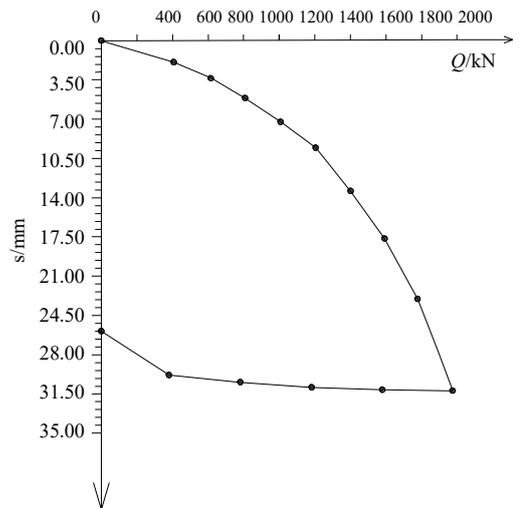


图 14 单桩竖向抗压静载荷试验  $Q-S$  曲线

Figure 14  $Q-S$  curve of single pile axial load test

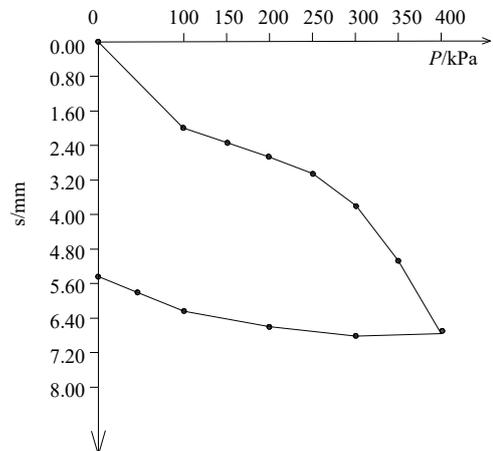


图 15 复合地基静载荷试验  $P-S$  曲线

Figure 15  $P-S$  curve of static load test of composite foundation

### 3 结 语

工程实践表明, DJP 工法可在深厚块石填土地层、岩溶地层及基岩等复杂地层中顺利成孔, 桩身垂直度偏差小, 成桩质量好, 承载力高, 沉降量小。DJP 工法可实现钻进喷浆一体化, 施工工效高, 造价低, 返浆量少, 对周边环境的影响小, 绿色环保, 具有良好的发展前景。

#### 参考文献:

[1] 郇盼, 左祥闯, 刘宏运, 等. 潜喷注浆桩在大孔隙、松散

地层中的研究与应用[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S1): 27-33.

[2] 孟素萍. 谈旋喷桩施工工艺及常见质量问题与防治措施[J]. 山西建筑, 2009, 35(10): 87-88.

[3] 张亮, 朱允伟, 李楷兵, 等. 潜孔冲击高压旋喷桩工法原理及特性研究[J]. 施工技术, 2017, 46(19): 59-62.

[4] 朱允伟, 张亮, 张微, 等. 潜孔冲击旋喷复合管桩及其在超厚砂层中的试验[J]. 工业建筑, 2018, 48(4): 89-92+88.



### 关于开展 2020 年第七届“浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖”项目推荐工作的通知

各学会、各有关单位、各位理事和会员:

经浙江省科学技术厅批准, 我学会设立“浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖”, 为做好 2020 年度“浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖”的申报, 以及“中国岩石力学与工程学会科学技术奖”的推荐工作, 现开展第七届“浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖”申报、评选工作。请各单位积极做好宣传工作, 并通知岩土力学与工程行业的有关单位和全体会员, 做好申报准备工作, 申报日期为 2020 年 2 月 1 日至 2020 年 4 月 15 日。有关事项通知如下:

#### 一、申报奖项类别

1. 科技进步奖;
2. 技术发明奖;
3. 自然科学奖。

#### 二、推荐材料要求

请登陆学会网站 [www.zjsrme.com](http://www.zjsrme.com) 下载推荐要求和表格, 按照“浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖”推荐表样式和填写要求, 认真准备填报推荐书所需有关材料。要求重点突出项目的重要科学发现、主要技术发明或科技创新内容。所提交的推荐书电子版和书面版应保持一致。推荐材料要客观、准确。

#### 三、具体申报过程和时间安排

(1) 2020.02.01~2020.04.15 相关单位和个人申报;

(2) 2020.04.16~2020.05.15 评审工作和“中国岩石力学与工程学会科学技术奖”推荐工作。

#### 四、申报材料报送要求

请各单位按附件规定要求组织填写浙江省岩土力学与工程学会科学技术奖申报材料并加盖本单位公章, 邮至浙江省岩土力学与工程学会秘书处, 材料报送截止时间: 2020 年 4 月 15 日, 逾期不予受理。

#### 五、联系方式

浙江省岩土力学与工程学会  
地址: 浙江省绍兴市环城西路 508 号浙江省岩石力学与地质灾害实验中心 705 室

联系人: 黄 曼 (13615752267、0575-88341067)  
袁夏炜 (13065557758、0575-88341135)  
张晓云 (13157566106、0575-88341078)

传 真: 0575-88341135 邮政编码: 312000

电子邮箱: [zjsrme@126.com](mailto:zjsrme@126.com)

学会网址: [www.zjsrme.com](http://www.zjsrme.com)