

高压脉冲放电在大直径扩底灌注桩中的应用技术研究

马宁¹, 邓岳^{1*}, 凌雪², 杨麟睿², 钱阳¹, 刘毅³, 黄仕杰³

(1. 北京三一智造科技有限公司, 北京 102200; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100037;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文主要研究了金属丝电爆炸产生的压力冲击波作用在土层孔壁上, 在桩底部挤压土体形成扩底桩。建立了金属丝爆炸能量与冲击波压力之间的关系函数与仿真模型, 分析了放电参数与冲击波强度的关系; 建立了冲击波压力与土体变形之间的关系, 计算出粘性土体变形量所需要的压力大小; 制作扩底桩、直桩模型, 验证金属丝电爆炸荷载作用下土体受力变形特性, 并对两种桩型承载力及抗拔力性能进行对比分析。利用高压脉冲扩底技术模型试验中的电学参数及工艺参数, 构建国内首根直径 0.8 m 的高压脉冲扩底桩, 完成“灌-扩”一体高压脉冲扩底工法的开发。

关键词: 脉冲放电; 冲击波; 扩底灌注桩; “灌-扩”一体工法

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0152-08

Research on application technology of high voltage pulse discharge for large diameter cast-in-place belled piles

MA Ning¹, DENG Yue^{1*}, LING Xue², YANG Linrui², QIAN Yang¹, LIU Yi³, HUANG Shijie³

(1. Beijing SANY Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100037 China;

3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: This paper focuses on the pressure shock wave generated by the electric explosion of the wire acts on the hole wall of the soil layer and form the belled piles caused by squeezing the soil at the bottom of the pile. The relationship function and simulation model between the explosive energy of the wire and the shock wave pressure are established, and the relationship between the discharge parameters and the shock wave intensity is analyzed. The relationship between shock wave pressure and soil deformation is established, and the pressure required for the deformation of clay soil is calculated. The models of belled pile and equal diameter pile were made to verify the deformation characteristics of soil under the electric explosion of the wire, and the bearing capacity and pullout resistance of the two piles were compared and analyzed. Based on the electrical and technological parameters of the high-voltage pulse bottom expanding technology model test, the first high-voltage pulse belled pile with a diameter of 0.8m was constructed in China, and the “irrigation-expansion” integrated construction method was developed.

Key words: pulse discharge; shock wave; cast-in-place belled pile; “irrigation-expansion” integrated construction method

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-04-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.019

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金科研项目“类火星土层钻-测一体化土层反演方法研究”(编号: 2652023004)

第一作者: 马宁, 男, 汉族, 1982年生, 机械工程专业, 主要从事岩石破碎理论和桩基础施工工法研究工作, 江苏省昆山市开发区澄湖路 318 号 (215300), 22235450@qq.com。

通信作者: 邓岳, 男, 汉族, 1996年生, 地质工程专业, 主要从事桩基础施工工法及脉冲放电工程应用研究工作, 江苏省昆山市开发区澄湖路 318 号 (215300), 1979758439@qq.com。

引用格式: 马宁, 邓岳, 凌雪, 等. 高压脉冲放电在大直径扩底灌注桩中的应用技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 152-159.

MA Ning, DENG Yue, LING Xue, et al. Research on application technology of high voltage pulse discharge for large diameter cast-in-place belled piles[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 152-159.

0 引言

为了降低施工难度,减少施工成本,提升桩基础承载力,工程人员发明了各种类型的异形桩,包括夯扩桩、人工挖孔扩底桩、挤压支盘桩、机械扩底桩、复合载体夯扩桩、压力注浆等^[1-3]。这些异形桩节约建筑材料同时,减少了碳排放,符合可持续发展的要求。其中常用的机械式扩底或静压式扩底法“扩底-清渣-灌注”的传统工艺比较复杂,钻孔有坍塌风险,钻具易损坏,导致卡钻,且机械切削成孔对孔壁无挤密压实作用,承载力提升不显著。在液态混凝土中利用高压脉冲放电形成的冲击波对土体具有挤密压实作用,可增加钻孔的径向尺寸,符合扩底施工的特点。

早在1950年代,高压脉冲放电技术就已经被苏联科学家发现并研究^[4]。在随后的几十年里,该技术逐渐应用于工程中,1980年代初,苏联科学家研究出应用高压脉冲放电技术成桩工艺的基本原理,随后该设备样机下线^[5]。截止至2003年,俄罗斯采用高压脉冲放电成桩的建筑物基础已有300多个,桩基使用量超过10000根^[6]。这些项目的应用,表明该技术是一种效果佳、经济性优良的成桩方法。随着脉冲放电成桩技术在俄罗斯工程行业应用越来越多,参考RITA公司在莫斯科高层建筑设计中制造RIT-桩的经验,2006年莫斯科市发布了关于使用脉冲放电技术对高层建筑(RIT-桩)进行桩基设计和安装技术建议(TR 50-180-06),见表1。

国内对于高压脉冲放电技术成桩的应用研究相对较少,2011年,陈晨等^[7]对高压脉冲放电技术在岩石破碎以及土体挤密方面进行了应用研究,在通

过土体挤密实现扩大桩径的试验过程中,测得在高压脉冲放电的作用下直径150 mm钻孔会扩大至原来桩径的2倍左右,由此证实了该技术应用于提高桩的承载能力的可行性。2017年,王茂森等^[8]通过高压脉冲放电技术将直径150 mm的钻孔桩多个部位扩大至280 mm形成竹节桩。2019年,Wang等^[9]为促进高压脉冲放电技术的应用,具体的探讨了该技术在岩石破碎、混凝土破碎、石油开采、油井疏通和基础工程等方面的应用。近年,孔二伟等^[10]、梁丽等^[11]、马宁等^[12]相继开展了高压脉冲放电的仿真试验研究等工作。

综上,国内外应用高压脉冲放电技术成桩的钻孔直径多<450 mm,对于大直径工程桩缺少应用研究,且由于桩径较小,很少考虑冲击波的衰减效应。成桩后,对于高压脉冲扩底桩的成桩效果,尤其是承载力及抗拔力研究较少。鉴于此,本文首先在调研总结高压脉冲放电与钻孔孔径变化关系的基础上,分析了放电能量-冲击波衰减压力-土体变形三者之间的关系。然后通过仿真模拟以及室内模型试验等手段,确定了高压脉冲放电扩底所需的电学参数及工艺参数,并检测桩基承载力及抗拔力。最后,开展室外半工程试验,验证了该技术工程应用的合理性。

1 高压脉冲放电装置

由北京三一智造科技有限公司联合华中科技大学共同开发的高压脉冲放电装置,最大电压7 kV,最大储能232 kJ。装置主要包括高压升压变压器、高压整流硅堆、充电保护电阻、主电容、续流二极管、调波电感、晶闸管触发开关等。设备电气原理见图1,负载端放电电极采用铜棒电极,结构见图2,装置额定电压为0~7 kV,电容为9.47 mF,充电电流为4 A,充电机功率为20 kW 储能为0~232 kJ。

2 高压脉冲放电扩桩理论分析

2.1 土层压缩性分析

高压脉冲扩桩过程中孔径的变化是一个复杂的动态过程,它与放电次数、放电能量及土的变形模量等性质参数有关。根据弹性力学公式,可确定土体的变形模量为^[13]:

$$E_0 = \omega \frac{bP(1 - \mu^2)}{s} \quad (1)$$

表1 俄罗斯建筑规范中关于RIT桩施工建议

Table 1 Recommendations for RIT pile construction in the Russian Building Code

钻孔直径/mm	80~450
桩长/m	一般<20
脉冲电流发生器电压/kV	<10
单桩承载力建议值/kV	>1500
放电终止标准	混凝土液面降低至设计高度且连续放电5次液面降低高度<1 cm
放点步长/m	砂质土0.3~0.5,粘性土0.75~1 (3~3.5倍桩径)
静载荷试验桩数量/个	≤3

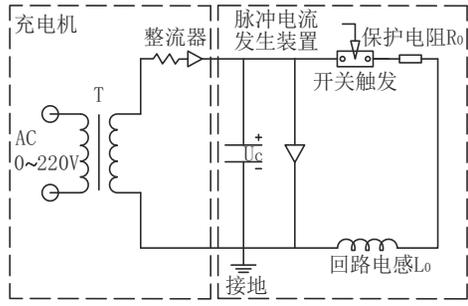


图1 高压脉冲放电装置电气原理

Fig.1 Electrical schematic diagram of high voltage pulse discharge device

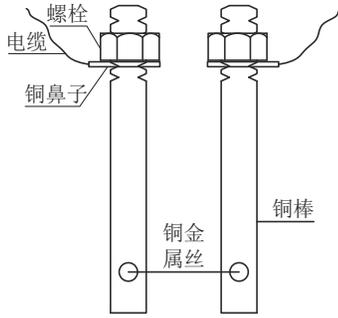


图2 负载端放电电极

Fig.2 Load-side discharge electrode

式中： E_0 ——土体变形模量； μ ——桩周土体的泊松比； ω ——无量纲沉降影响系数； b ——压膜直径； P ——压力荷载； s ——土体的沉降量。

当冲击波载荷挤密土体时，可将土体的沉降量近似为钻孔空腔直径的扩大，将上式中的压膜直径定义为电弧通道的直径。由土体变形模量可推导高压脉冲放电冲击波作用下单次钻孔空腔扩径计算公式，获得单次放电参数与钻孔空腔扩径的关系^[14]：

$$\Delta R_i \approx \omega \frac{br_0 P'_m (1 - \mu^2)}{E_0^*} \quad (2)$$

式中： ΔR_i ——冲击压力下孔径变化值； P'_m ——衰减后的冲击波压力； E_0^* ——土体变形模量变化。

高压脉冲可实现重复放电，每次放电均会使孔径增大，可采用累加法计算最终获得冲击波压力-土层变形特性的钻孔孔径累积扩张分析方法。

$$\Delta R = \sum_1^n \Delta R_i \approx \sum_1^n \omega \frac{br_0 P'_m (1 - \mu^2)}{E_0^* N_i} \quad (3)$$

式中： N_i ——脉冲编号； n ——脉冲次数。

冲击波载荷作用下，土的状态会发生改变，土的变形模量也会随之变化，该参数需要根据土力学试验及放电参数评估，反复迭代获取高压放电土体

变形模量修正结果。本文为便于计算，将 E_0^* 看成常数，取土体初始变形模量 E_0 。

2.2 冲击波压力衰减分析

爆炸冲击波的最大压力与液体密度、脉冲总能量、持续时间均有关系，可按照式(4)进行估算^[15-16]，能够比较准确的描述冲击波的传播规律：

$$P_m = \beta \sqrt{\frac{\rho_0 W}{\tau T}} \quad (4)$$

式中： P_m ——冲击波产生时的最大峰值压力； β ——复杂积分函数，水介质取0.75； W ——放电通道单位长度上的能量； T ——脉冲持续时间； ρ_0 ——介质密度； τ ——波前时间。

冲击波在传递过程中，其强度近似呈指数衰减。距离放电中心 r 处的冲击波压力为^[17-18]：

$$p = P_m e^{-\frac{kr}{v_0}} \quad (5)$$

式中： v_0 ——冲击波的波速。

LS-Dyna软件在爆炸冲击领域应用广泛，该软件程序中包含许多关键字，用户可通过修改关键字，定义所需材料，具有很强的自适应功能^[19-20]。现阶段，金属丝电爆炸产生的冲击波多采用使用该软件模拟。波源材料定义为TNT，TNT炸药采用Mat_High_Explosive_Burn材料模型和JWL状态方程，该方程的关系如下：

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-RV} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

式中： V ——相对体积； E_0 ——初始内能密度； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω ——试验确定的常数。

对于装药密度1.2 g/cm³的TNT炸药，各相关参数分别取值为： $A = 741$ GPa， $B = 18$ GPa， $\omega = 0.35$ ， $R_1 = 5.56$ ， $R_2 = 1.65$ ， $E_0 = 3.6 \times 10^9$ J/m³。

此外，炸药的爆速 $D = 5500$ m/s，爆压 $P_{CJ} = 1.0 \times 10^{10}$ Pa。

由于流态混凝土介质密度高，本文采用粘土介质代替流态混凝土，模拟爆炸冲击波的衰减规律，见图3、图4。

通过仿真曲线得到的冲击波传播规律与经验公式具有一致性。由于设备最大储能232 kJ，代入公式(4)中， β 取0.75， τ 取2 us， T 取500 us^[21-22]，峰值压力为361 MPa。根据炸药爆炸仿真拟合到的距离不同爆炸中心处，冲击波峰值压力衰减公式，得到

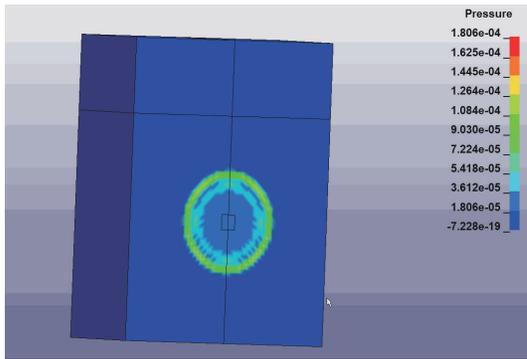


图 3 爆炸冲击波在土中的传播规律

Fig.3 Propagation law of explosion shock wave in soil

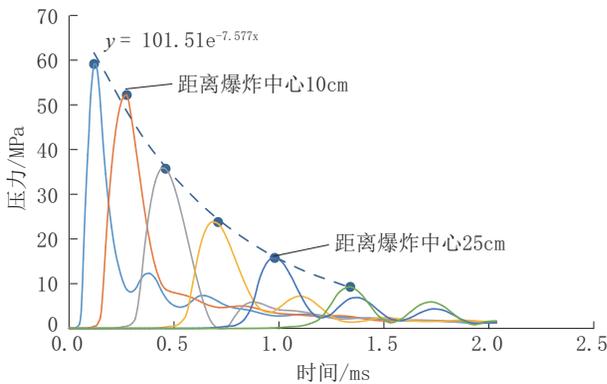


图 4 距离爆炸中心不同距离处冲击波波形

Fig.4 Wave forms at different distances from the explosion center

冲击波衰减系数为-7.6,距离爆炸中心 20 cm 处,代入公式(5),衰减后的压力 79 MPa,仅为峰值压力的 22%。土层变形模量初始值取 2.0 MPa,钻孔单次孔径变化值仅 2.8 cm,扩孔效率低。因此,对于直径 400 mm 以下钻孔,可以采用中心放电扩孔工艺(图 5a),而直径 400 mm 及以上钻孔,中心放电工艺已不适用,需要减小爆炸中心与孔壁间的距离,提升冲击波作用在钻孔孔壁上的荷载,可采用圆周方向放电工艺(图 5b)。

3 试验验证

3.1 模型试验

实验室内,将粘土装入直径 1.0 m 固定容器内,由土工实验室测定的粘土物理力学指标详见表 2,设置 100、300、400 mm 直径的钻孔,钻孔内浇筑 M10 水泥砂浆。改变放电能量及放电次数,得到不同扩大端直径的扩底桩。通过测量扩底桩扩大端最大直径,验证理论及仿真结果的准确性。

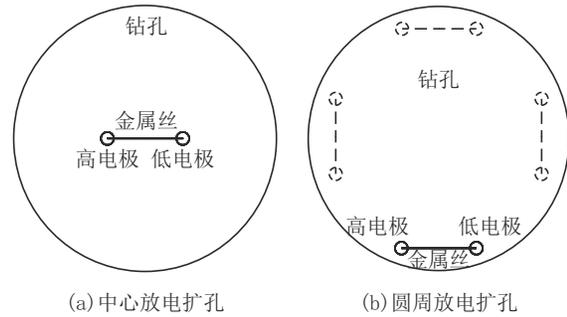


图 5 不同放电扩孔方式

Fig.5 Different types of discharge reaming

表 2 试验土体物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of tested soil

土层名称	淤泥质粉质粘土
密度 $G_s/(g \cdot cm^{-3})$	2.73
含水率 $w/\%$	23
重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	19
孔隙比	0.77
无侧限抗压强度 q_u'/kPa	36.2
侧壁阻力 f_s/kPa	16
压缩模量 E_s/MPa	2.6
变形模量 E_0/MPa	2.0

直径 100 mm 钻孔,水泥砂浆介质中,使用高压脉冲放电装置,电极置于钻孔中心,放电能量 4.2 kJ,放电部位分别位于孔底以上 200、400 mm 处,放电 4 次,每一次放电时,金属丝相对钻孔方位不变。成桩后挖出,扩大端不均匀,一侧扩大明显,另一侧变化小(见图 6)。高压脉冲扩孔过程中,为保证扩大端均匀,每一次放电结束,需调整电极在钻孔中相对位置,保证扩孔均匀,电极布置见图 7。



图 6 100mm 竹节桩

Fig.6 The front of 100mm nodular pile

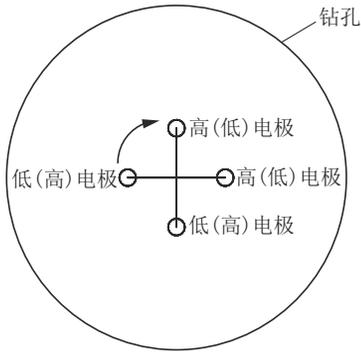


图7 电极布置

Fig.7 Electrode arrangement

直径300、400 mm 钻孔,水泥砂浆介质中,使用高压脉冲装置,电极按照上述方位布置,放电能量43 kJ。成桩后,扩大端最大直径分别为45 cm(1.5倍)、52 cm(1.3倍),扩大端高度分别为28、30 cm,扩大端呈椭球状。通过统计桩径扩大理论值与试验值(见表3、表4),可以看出,理论值与试验值整体上能较好的符合,但仍具有一定偏差。其原因在于土体非弹性体,受冲击荷载后会产生塑性变形,且每次土体变形后,变形模量均会发生改变。

表3 放电次数与土体变形统计

Table 3 Statistical table of discharge times and soil deformation

钻孔直径/mm	放电能量/kJ	冲击波峰值压力/MPa	冲击波衰减后压力/MPa	脉冲放电次数 n	桩径扩大理论值/cm	桩径扩大实测值/cm
100	4.7	51.6	35.3	4	3.8	3.5
	4.7	51.6	45.9	4	3.8	2.5
300	42.6	154.8	49.7	5	6.0	7.5
400	42.6	154.8	34.0	10	5.2	6

表4 放电能量与土体变形统计

Table 4 Statistical table of discharge energy and soil deformation

钻孔直径/mm	放电能量/kJ	冲击波峰值压力/MPa	冲击波衰减后压力/MPa	脉冲放电次数 n	水泥浆液面下降高度/cm	扩大端体积/cm ³
100	4.7	51.6	16.6	1	0.5	353
	18.9	103.2	33.1	1	2	1413
300	42.6	154.8	49.7	1	9	6358
	4.7	51.6	11.3	1	0	0
400	18.9	103.2	22.7	1	1	1256
	42.6	154.8	34.0	1	6	7536

随着放电次数的增加,扩大端桩径的变化值呈逐渐递小规律(图8),原因在于冲击波每次作用后,桩周土都会被挤密,土体变形模量不断增大,且随着扩大端直径不断增大,冲击波衰减效应越强。提升放电能量,对于土体变形效果显著(图9)。

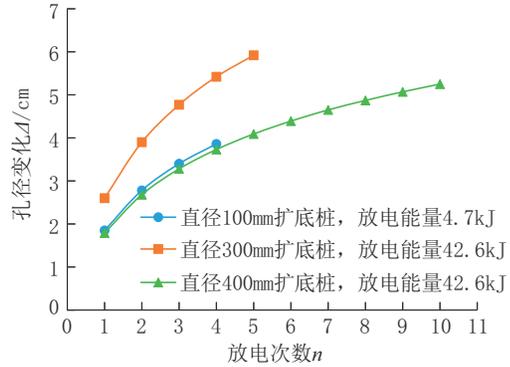


图8 放电次数与孔径变化关系

Fig.8 Relation between discharge frequency and aperture change

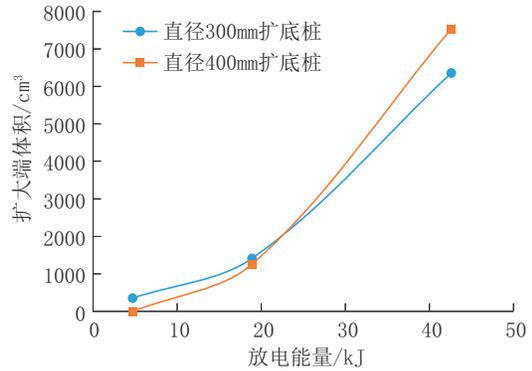


图9 放电能量与土体变形关系

Fig.9 Relation between discharge energy and soil deformation

3.2 承载力及抗拔力测试

扩底桩的承载力及抗拔力大小为衡量扩底桩效果的重要指标,参考《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)中关于桩基承载力及抗拔力检测方法,采用单桩竖向抗压静载荷试验、单桩竖向抗拔静载荷试验(图10),测试高压脉冲扩底桩的极限承载力及抗拔力的大小^[23],确定成桩效果。试验过程中设置相同条件的不扩底对照试验,确定承载力及抗拔力提升值。其中,300、400 mm 高压脉冲扩底桩与不扩底桩荷载-位移曲线详见图11。

单桩极限承载力及抗拔力大小的确定,取荷



(a) 单桩承载力静载荷试验



(b) 单桩抗拔力静载荷试验

图10 承载力及抗拔力试验

Fig.10 Bearing capacity and pullout resistance tests

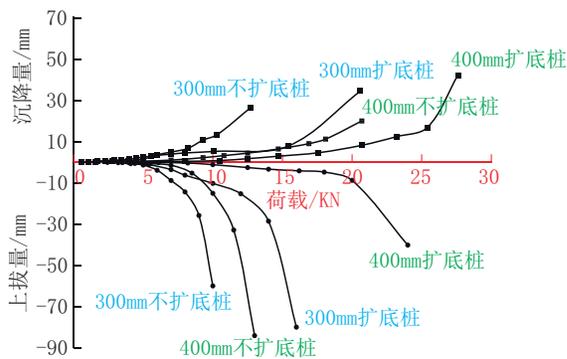


图11 直径300/400mm扩底桩承载力及抗拔力试验

Fig.11 Bearing capacity test and pullout resistance test of 300/400mm diameter pile

载-位移曲线明显向下弯曲的前一级荷载值。通过荷载-位移曲线可以看出,高压脉冲扩底桩荷载-位移曲线变化更缓,相同荷载下,桩基位移量更小。300、400mm扩底桩与不扩底桩承载力及抗拔力大小见表5。高压脉冲形成的扩底桩效果见图12。

对比同等直径扩底桩与非扩底桩成桩后承载力及抗拔力大小,试验效果显著,高压脉冲扩底桩承载力及抗拔力大小提升>40%。

表5 直径300/400mm扩底桩与等直径不扩底桩承载力及抗拔力

Table 5 Bearing capacity and pulling strength of 300/400mm belled pile and pile with equal diameter

桩径/mm	桩类别	承载力/kN	抗拔力/kN
300	扩底桩	15	14
	不扩底桩	10	8
	提升率	+50%	+75%
400	扩底桩	25	20
	不扩底桩	18	12
	提升率	+39%	+67%



(a) 直径300mm

(b) 直径400mm

图12 高压脉冲扩底桩

Fig.12 High voltage pulse belled pile with diameter

3.3 工程应用

根据室内实验结果,开展室外半工程桩扩底试验,钻孔直径800mm,孔深2.0m,粘土地层,放电部位孔底以上0.3m。本次试验扩大端最大直径需达到等直径端的1.5倍。基于此目标,优选放电参数及扩孔工艺,详见表6所示。其中, X_1 、 Y_1 分别表示圆周方向、竖直方向上,相邻两爆炸中心冲击波在孔壁相遇处距离爆炸中心最短距离。

表6 Ø800mm半工程桩放电参数及扩孔工艺

Table 6 Discharge parameters and reaming process of Ø800mm pile

电极距孔壁距离/mm	200
圆周方向/对	4
竖直方向/对	1
X_1 /mm	294
Y_1 /mm	282
最少放电次数	4×3
最低放电能量/kJ	170
观测指标	混凝土液面下降高度>40cm

在混凝土介质中,使用高压脉冲装置扩孔施工,最终实测扩大端最大直径1.15 m,扩大1.5倍,扩大端高度0.4 m(图13),达到预设目标。同时,桩挖出后发现,扩大端局部扩大不均,不足1.15 m,该部位主要位于两相邻布置电极之间,冲击波传播距离远,衰减后对孔壁作用效果弱。通过在圆周方向增加电极布置数量可解决扩大不均的情形。



图13 $\text{O}800\text{ mm}$ 扩底桩成桩效果

Fig.13 Pile formation effect of $\text{O}800\text{ mm}$ diameter belled pile

根据 $\text{O}800\text{ mm}$ 半工程桩试验,开发“灌-扩”一体施工工法(图14、图15),区别于传统的扩底灌注桩先钻进成孔,再扩底施工,最后浇筑混凝土的施工工艺,该工法是在钻孔施工完成后,将电极连同钢筋笼一起下放至孔中,灌注混凝土的同时,进行放电扩孔。为高压脉冲技术在大直径扩底灌注桩中的工程应用提供一种可行方案。

4 结论

本文基于理论计算和仿真模拟,并开展试验,分析了高压脉冲放电技术在粘土层中大直径扩底桩所需的电学参数及工艺参数,成功做出了国内首根 $\text{O}800\text{ mm}$ 大直径扩底桩,并对高压脉冲扩底桩的承载力及抗拔力进行了试验计算,确定了高压脉冲扩底桩的工程性指标。实验表明,脉冲放电形成的冲击波对土体具有挤密压实作用,可密实桩侧土体,且可以扩大钻孔任意部位,形成多个扩大端的竹节桩,显著提升单桩承载力及抗拔力,而目前国内尚无该技术的扩底桩工法应用,具备较好的开发应用前景。

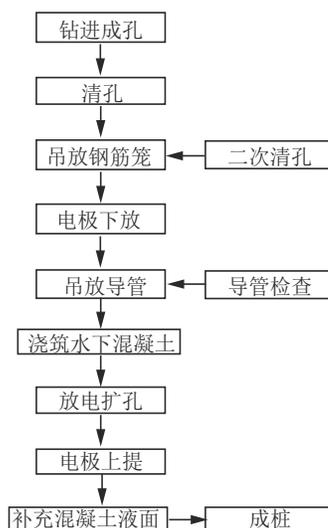


图14 “灌-扩”一体施工工艺

Fig.14 “irrigation-expansion” integrated construction method

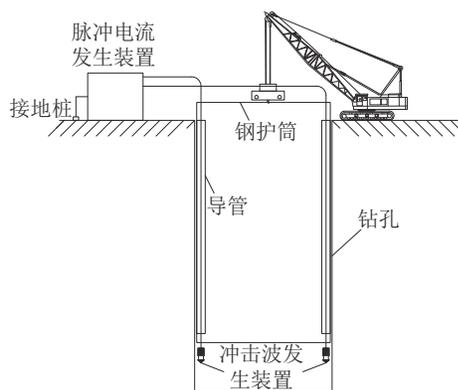


图15 高压脉冲扩底桩现场布置

Fig.15 Field layout of high-voltage pulse belled pile

参考文献 (References):

- [1] 林天健,熊厚金,王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
LIN Tianjian, XIONG Houjin, WANG Liqun. Pile Foundation Design Guide [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [2] 龚晓南. 桩基工程手册(第2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GONG Xiaonan. Pile Foundation Engineering Manual (2nd Edition) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [3] 王志宽. 大直径人工挖孔扩底桩承载力试验研究与工程应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
WANG Zhikuan. Test of bearing capacity and engineering application on large-diameter artificial excavated belled pile [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [4] Ломизе Г. М. дри. Уплотнение песчаных грунтов электрическими разрядами[J]. Геотехническое строительство,

- 1963,7:9-13.
- [5] Юшков А. Ю. Исследование формирования набивных свай импульсными разрядами[D]. дисс... канд.Техн.наук .Томск, 2004.
- [6] Тер-Мартirosян З. Г., Буданов А. А., Еремин-В. Я. О повышении несущей способности свай, изготавливаемых по разрядно-импульсной технологии[J]. Строительные материалы оборудование, технологии 21 века, 2003(60): 60-62.
- [7] 陈晨,冯雪威,李冬霜,等.高压脉冲放电技术在基础工程中的应用[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会第十一次全国学术技术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2011:581-586. CHEN Chen, FENG Xuewei, LI Dongshuang, et al. Application of high voltage pulse discharge technology in foundation engineering[C]//Proceedings of the 11th National Academic Technology Seminar of Foundation and Foundation Engineering Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2011:581-586.
- [8] 王茂森,博坤.高压脉冲放电技术对桩径影响的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):68-71. WANG Maosen, BO Kun. Study on the effect of high voltage pulse discharge technology on pile diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(5): 68-71.
- [9] Wang X D, Jing Z. Research and applications of high-voltage pulse discharge crushing[J]. European Journal of Electrical Engineering, 2019,2(21):157-163.
- [10] 孔二伟,李傲,曾石友,等.基于Selfrag高压电脉冲放电破岩试验的仿真模拟[J].钻探工程,2021,48(8):40-46. KONG Erwei, LI Ao, ZENG Shiyu, et al. Simulation of rock breaking test by high voltage electric pulse discharge based on Selfrag[J]. Drilling Engineering, 2021,48(8):40-46.
- [11] 梁丽,肖一标,李大鹏,等.高压电脉冲破岩试验装置的研制[J].钻探工程,2021,48(11):77-83. LIANG Li, XIAO Yibiao, LI Dapeng, et al. Development of a high voltage electric pulse rock breaking experiment device [J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):77-83.
- [12] 马宁,金博,周鹏,等.基于COMSOL的高压放电破碎岩石仿真研究[J].钻探工程,2022,49(6):62-70. MA Ning, JIN Bo, ZHOU Peng, et al. Simulation study on high voltage discharge rock breaking based on COMSOL [J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):62-70.
- [13] Основания и фундаменты. Под редакцией Н. А. Цытовича[M]. Высшая школа, 1970: 384.
- [14] 李冬霜.高压脉冲放电扩桩机理及试验研究[D].长春:吉林大学,2011. LI Dongshuang. Experimental research on the mechanism of high-voltage pulse discharge pile[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [15] 卢红奇.高压电脉冲对煤体致裂作用实验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015. LU Hongqi. Experimental research on fracturing coal with high voltage electrical pulse[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [16] 鲍先凯.高压电脉冲水液压裂煤体机理及实验研究[D].太原:太原理工大学,2018. BAO Xiankai. The study on mechanism and experiment of hydraulic fracturing coal in high voltage electric pulse[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [17] 张雷,邓琦林,周锦进.液电效应除垢机理分析与试验研究[J].大连理工大学学报,1998(2):87-91. ZHANG Lei, DENG Qilin, ZHOU Jinjin. Experimental study of shock wave effect of electrical discharge under water in filth cleaning[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998(2): 87-91.
- [18] 李强.高压脉冲放电破碎混凝土梁试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022. LI Qiang. Experimental study on crushing concrete beams by high-voltage pulse discharge[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [19] 曹亮.水中脉冲放电及其气泡运动过程研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010. CAO Liang. Research on the the pulsed discharge processes of underwater source and its related bubble dynamics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [20] 蔡德钧.爆炸荷载作用下软土地基的变形特性研究[D].北京:铁道部科学研究院,2004. CAI Degou. Investigation of deformation behavior in the soft soil ground under explosive loading[D]. Beijing: Scientific Research Institute of Ministry of Railways, 2004.
- [21] 贾少华,赵金昌,尹志强,等.基于高压电脉冲煤体增透的水激波波前时间变化规律研究[J].太原理工大学学报,2015,46(6):680-684,690. JIA Shaohua, ZHAO Jinchang, YIN Zhiqiang, et al. Research on change laws of front time in water shock-wave based on pulsed high-voltage discharge in permeability enhancement in coal seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015,46(6):680-684,690.
- [22] 吴敏干,刘毅,林福昌,等.液电脉冲激波特性分析[J].强激光与粒子束,2020,32(4):120-126. WU Mingan, LIU Yi, LIN Fuchang, et al. Characteristics analysis of electrohydraulic shockwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020,32(4):120-126.
- [23] 胡庆红.大直径扩底桩试验研究与数值分析[D].杭州:浙江大学,2007. HU Qinghong. Numerical analysis and experimental study on the large diameter belled pile[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

(编辑 王文)