

高压脉冲放电技术对桩径影响的研究

王茂森, 博 坤

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 高压脉冲放电技术可利用液电效应产生的冲击波, 在钻孔局部产生扩孔段, 通过灌注水泥而形成异径扩底桩。主要介绍了高压脉冲放电技术的扩底成桩机理、成桩过程以及对桩径的影响情况, 并研究了冲击波、蒸汽膨胀压力对桩径的作用。利用新引进的高压脉冲放电装置进行现场试验, 试验结果表明, 理论公式计算结果基本与试验结果符合。

关键词: 钻孔灌注桩; 扩底桩; 高压脉冲放电; 桩径变化; 冲击波

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0068-04

Study on the Effect of High Voltage Pulse Discharge Technology on Pile Diameter/WANG Mao-sen, BO Kun (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Shock wave is generated by the electro-hydraulic effect in high-voltage pulsed discharge technology, and local hole reaming is built in downhole. Finally, pedestal piles with different diameters are formed via cement injection. This paper describes the high-voltage pulse discharge technique about the pile forming mechanism by hole bottom reaming, the pile forming process and the effect on the pile diameter, studies the work of shock wave and vapor expansion pressure on pile diameter. The field experiment is carried out by using a newly introduced high-voltage pulse discharge device, the results show that the theoretical formula results are in good agreement with the experimental results.

Key words: bored grouting pile; pedestal pile; high-voltage pulse discharge; pile diameter change; shock wave

0 引言

桩基础具有承载力高、施工工艺高效和经济效益好等特点, 其中钻孔灌注扩底桩具有单桩承载力高、成孔后出土量小、承台面积小等优点, 在国内外得到广泛应用。扩孔成型工艺除钻挖外, 还有爆扩、夯扩、振扩等, 但这些成桩工艺存在着施工难度大和经济不合理等问题。为了实现高效扩底成桩、降低成本, 俄罗斯正在研究和应用一种新的成桩方法, 即高压脉冲放电成桩技术。该方法通过在钻孔内对液态混凝土进行放电, 利用瞬时放电产生径向机械作用使桩径扩大形成一定的几何形状, 从而达到提高桩承载力的目的。这种成桩技术目前在我国的研究还很少, 吉林大学建设工程学院已从俄罗斯引进该技术及试验设备, 并开展试验研究, 为我国桩基技术的发展提供一条新的思路。

1 高压脉冲放电装置的工作原理

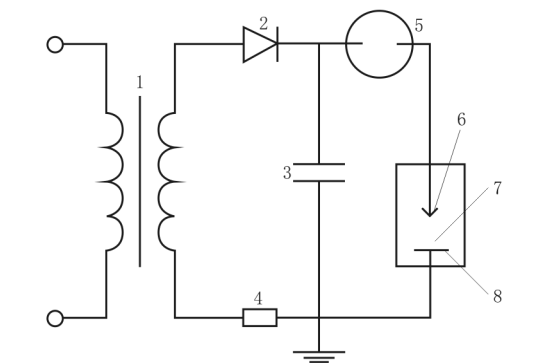
高压脉冲放电技术是以“液电效应”为基础的。液电效应, 是电容器通入高压后置于水中的两电极

间隙会发生脉冲放电, 在放电通道内产生巨大的冲击波和强烈辐射^[1]。图1为高压脉冲放电装置原理图, 主要由脉冲电流发生器和放电设备组成。电网为380 V动力交流电压, 接通高压电源1后, 通过高压硅堆整流器2获得高压直流电, 向电容器3充电, 当电容器3电压上升到一定大小时, 放电开关5会在空气中被击穿, 此时电路接通, 会在瞬间将放电设备两极间隙7也击穿, 即发生脉冲放电。在放电过程中, 电容器会把贮存的高密度能量瞬间释放, 释放的能量可高达 10^3 kJ, 这个过程类似于炸药爆炸的过程。这个过程首先将电能转化为热能, 通道中物质快速升温, 温度高达 $(10 \sim 40) \times 10^3$ K, 通道中的水迅速汽化、形成汽泡, 汽泡内的压力迅速增大, 以至膨胀并引起爆炸, 导致通道内产生的巨大冲击压力作用放电设备周围不可压缩介质, 此压力可高达 10^5 个大气压, 并通过液相不可压缩介质将其压力传给作用对象。当汽泡内的压力等于周围液相介质的压力时膨胀会由于惯性作用继续膨胀, 但汽泡内压力开始减小, 膨胀速度随之减慢并直至停止, 液相

收稿日期: 2016-05-24; 修回日期: 2017-03-06

作者简介: 王茂森, 男, 汉族, 1963年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 研究方向为多工艺冲击回转钻进技术, 吉林省长春市西民主大街938号, wangms@jlu.edu.cn; 博坤, 男, 蒙古族, 1981年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 研究方向为多工艺冲击回转钻进技术, bokun@jlu.edu.cn。

介质开始反向运动使汽泡内压力又急剧增大使汽泡再次膨胀,这个过程将数次重复。在上述过程中,两电极间的高压脉冲放电会伴随有强烈的光和声的辐射。综上所述,高压脉冲放电成桩实质是将电能转化为伴随光和声辐射现象的冲击波能的过程^[2]。



1—高压变压器;2—整流器;3—电容;4—保护电阻;5—隔离间隙(放电开关);6—电势电极;7—放电间隙(充满液体);8—接地电极

图1 高压脉冲放电原理图

2 高压脉冲放电作用对桩径的影响

相比传统成桩技术,高压脉冲放电技术成桩具有桩承载力高、施工成本低、环境污染小、无噪声等特点,是典型的绿色施工。高压脉冲对桩周土的挤密和桩径增大是承载能力提高的主要原因,因而需要对高压脉冲放电作用对桩径的变化进行分析。

2.1 冲击波前沿压力

高压脉冲放电会在液相介质中产生剧烈的冲击波,冲击波的前沿压力 P_1 可根据公式(1)确定^[3-5]。

$$P_1 \approx 0.06 P_m (l_0 / R_i)^2 \exp(-t / \theta) \sigma[T - t] \quad (1)$$

式中: P_m ——第一个半周期内在放电通道内的最大压力值,Pa; l_0 ——工作间隙的长度,cm; R_i ——冲击波冲击方向距离放电通道的半径,cm; t ——冲击波移动到具体点的时间, $t = R_i / a_0$,s; a_0 ——所研究介质中的声速,m/s; $\sigma[T - t]$ ——爆炸函数, $\sigma[T - t]$

$$= \begin{cases} 0; T \leq t \\ 1; T \geq t \end{cases}$$

θ 可根据公式(2)确定:

$$\theta \approx \sqrt[3]{(W_0 - W_n) \eta} \sqrt{LC \left(\ln \frac{2K}{P_m l_0} - 0.5 \right)} \quad (2)$$

式中: W_0 ——脉冲电流发生器中所储存的能量,J; W_n ——放电发展阶段击穿前的能量损失,J; η ——放电电路的声音系数,约等于0.5; K ——公式系数,

取 6.6×10^8 Pa; L ——充电电路的电感,H; C ——充电电路的电容,F。

放电通道中的最大压力值 P_m ,可根据如下经验公式确定,近似等于

$$P_m = 0.26 \sqrt{\rho U_0^2 / (L l_0)} \quad (3)$$

式中: ρ ——液相介质的密度,kg/m³。

联立公式(1)、(2)、(3)可以计算出冲击波的前沿压力 P_1 ,但是这里还会涉及到一个问题就是在混凝土与桩周土分界处会产生冲击波的反射和折射现象,这个过程是不可以忽略的,这里可以通过公式(4)确定其最终冲击波压力的大小^[6-7]:

$$P_1' \approx P_1 \cdot 2\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (4)$$

式中: λ_1 ——混凝土砂浆的声劲度, $\lambda_1 = a_0 \rho_1$; λ_2 ——土的声劲度, $\lambda_2 = a_1 \rho_2$; a_0 ——混凝土砂浆纵波的传播速度,可以近似等于水中的声速,m/s; a_1 ——密实不饱和土中纵波的传播速度,m/s。

2.2 蒸汽泡膨胀压力的确定

膨胀汽泡的动态情况和对周围液相介质的作用的应力场早在前苏联时期就有过很多研究^[8-10]。压力值与作用距离的关系见如下表达式:

$$P_{R_i} = \frac{r}{R_i} \left[P_m \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3\gamma} + \frac{1}{2} P_m \right] - P_0 - P_g \quad (5)$$

式中: P_0 ——大气压力,Pa; P_g ——混凝土砂浆的水静力学压力,Pa; R ——膨胀阶段的蒸汽孔平均半径,mm; P_m ——蒸汽孔初始最大压力,Pa; R_i ——脉冲放电作用时的半径,mm; r_0 ——蒸汽膨胀前放电通道半径,mm; r ——汽泡膨胀阶段的平均半径,mm。

公式整理如下:

$$P_2 = 0.2 / (2R_i) \cdot P_1 - P_0 - P_g \quad (6)$$

2.3 高压脉冲放电作用下孔径的变化

高压脉冲放电过程中孔径的变化是一个复杂的动态过程,它与脉冲放电次数,放电能量,以及土的力学性质,压缩模量等参数有关。

为了评价孔径的增大可以应用土压力模量表达式,这个公式在土试验时应用^[11]:

$$E = (1 - \mu^2) \omega d \Delta P / \Delta h \quad (7)$$

式中: μ ——泊松系数; ω ——无量纲系数,取0.8; d ——压膜直径,m; P ——土的压缩荷载曲线直线段压力增大值,Pa; h ——土的压缩量,m。

选取土的模型为圆柱形,高度等于放电通道长度,半径取放电通道到混凝土和土分界处的距离。

由于冲击荷载随着孔身不断加扩导致半径 R_i 会不断的变化。在土模表面放电间隙施加第 i 个脉冲后, $S_i = 2\pi R_i l_0$, 施加第 $i+1$ 个脉冲后, $S_{i+1} = 2\pi (R_i + \Delta R_i) l_0$, 在这里 ΔR_i 为膨胀汽泡压力作用下孔径增大值, 压力可根据公式(6)确定, r 为放电通道半径。这时表达式可以按以下形式:

$$E = 0.5(1 - \mu^2) \omega \cdot 2\pi R_i l r P_m / (2\pi l R_i \Delta R_i) \\ = (1 - \mu^2) \omega P_m r / \Delta R_i \quad (8)$$

这时, 所有数值系数能够计算, 第 i 个脉冲孔半径的增大:

$$\Delta R_i = (1 - \mu^2) \omega P_m r / E \quad (9)$$

每次连续的脉冲都会使孔径增大, 并且随着土体空隙率的减小, 需增加脉冲作用。施加 n 次脉冲后, 钻孔半径增大值为每个脉冲作用的总和:

$$\sum \Delta R_i = \sum (1 - \mu^2) \omega P_m r / E \quad (10)$$

式中: n ——脉冲总数。

根据这个公式可以估算孔径的变化情况。

3 试验验证

为了验证上述理论的成立, 采用引进的高压脉冲装置做了现场模拟扩底成桩试验, 验证高压脉冲放电技术用于扩底成桩的可行性。

试验采用 M32.5 标号水泥, 砂子采用河沙, 水为自来水, 试验场地为吉林大学建设工程学院桥外实习基地。其试验过程如下。

(1) 首先采用 GJ100 型钻机成孔 3 个, 孔深均为 3 m, 孔径 150 mm。每 2 个孔相隔 1 m, 以保证试验土层具有相似性。经钻孔勘察可知, 孔 K-1、K-2 在孔深 1.0 m 以深为原状土, 可用来放电扩桩试验研究, 孔 K-3 在深 1.5 m 处为砖块, 孔深 2.5 m 处为原状土, 故对孔 K-3 只可在 2.5 m 处做试验。

(2) 配置水泥砂浆, 水灰比为 0.6, 采用普通自来水搅拌。本次试验仅为验证高压脉冲放电对桩径的影响, 故采用一般自来水配置, 使砂浆具有一定流动性即可。

(3) 向已钻好的 150 mm 孔内浇注水泥砂浆, 直至浇满整个孔。

(4) 将放电设备(见图 2)放入孔中, 固定其标高为孔深 1.5 m 处保持不动, 保证放电设备在 1.5 m 处放电, 确保试验结果的准确性。



图 2 俄罗斯专家正在安装放电设备

(5) 将高压脉冲装置接通电源, 首先在孔 K-1 深 1.5 m 处启动放电, 放电参数为: 电压 $U_0 = 7$ kV, $C = 758$, $W = 18.5$ kW, 要求放 2 次电后停止放电, 观看钻孔表面水泥砂浆的下降程度并做好记录, 并提起放电设备, 使其水泥砂浆充满放电处的加扩处, 之后将放电设备再次放入孔深 1.5 m 处, 向孔中浇注水泥砂浆至孔顶。循环操作这个工序, 直至放电后孔中水泥砂浆液面变化不明显停止, 即扩径至极限, 本次试验在孔 K-1 深 1.5 m 处放电 10 次。按照这个工序分别对 3 个孔的不同位置(1.5 m 处和 2.5 m 处)进行放电处理。

(6) 取出放电设备, 将孔用水泥砂浆填满, 48 h 后桩已基本成型, 具有一定强度后挖出桩观察最后扩径情况, 挖出的桩见图 3。



图 3 放电后所成葫芦状桩型

将高压脉冲放电处理后桩径变化试验值与计算值进行对比, 对比结果如图 4 所示^[12]。

测量挖出的桩, 其桩径最大处 280 mm 左右, 可见该次扩径使桩径扩大将近 2 倍, 基本符合理论分析。且符合每次放电测得的扩径情况, 其总和 $\sum \Delta R_i \approx 12.3$ cm, 并从图 4 可知, 桩径变化的试验值与理论值符合程度较好, 但试验值比理论值稍小, 原因是土的实际变形模量与计算取值略有差异, 而且脉冲

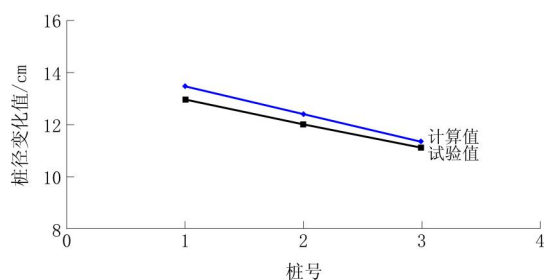


图4 深2.5 m处桩径计算值与试验值比较

放电作用过程中土的变形模量、含水率和土的密实程度也是变化的。从图5可知,孔径变化随着放电次数的增加逐渐变大,且曲线斜率逐渐降低。由于桩周土在每次脉冲作用后都会受到不同程度的挤密,且变形模量是不断的增大,故在桩周土被完全挤密之前桩径的变化与脉冲放电次数成正相关性,但桩径每次的增大量是随着桩周土的密实情况逐渐变小。

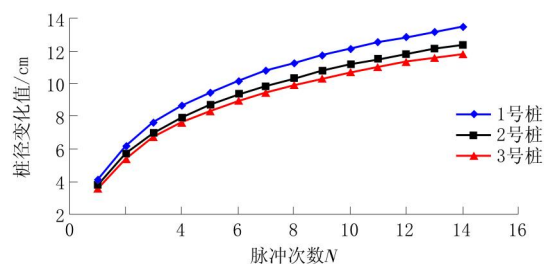


图5 深2.5 m处的放电次数与桩径变化的关系

4 结论

尽管俄罗斯对该技术应用已基本成熟,但是理论分析还有不足之处。与俄罗斯试验相比,有别于俄罗斯采用细沙模拟土层,本次试验地层为原状土层,试验结果更接近真实情况。从试验结果中可得以下结论。

(1) 高压脉冲放电技术成桩可有效增大桩径,密实桩周土壤,大幅度的提高桩基承载能力。

(2) 放电能量参数较高的桩孔径的变化值比较

大。因为在桩周土被完全密实之前,脉冲能量越大,土体的变形越大,即桩径变化越大。这是因为脉冲能量越大,所产生的冲击波压力越大,导致作用在桩周土体的压力也就越大,所以桩周土的塑性变形就大。

(3) 桩周土被完全挤密之前桩径的变化与脉冲放电次数成正相关性,而桩径每次的增大量是随着桩周土的密实情况逐渐变小。

参考文献:

- [1] 黄国良. 高压脉冲放电碎岩的研究[D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] 李冬霜, 王茂森, А. Ю. Юшков. 高压脉冲放电技术成桩法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(4): 78-79.
- [3] Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости[M]. - Киев: Наукова думка, 1980. - 192 с.
- [4] Наугольных К. А., Рой М. А. Электрический разряд в воде[M]. - М.: Наука, 1971. - 155 с.
- [5] Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей[M]. - Томск: Изд-во ТПИ, 1975. - 256 с.
- [6] Семушкина А. А. Экспериментальное обоснование основных параметров технологического процесса импульсного уплотнения водонасыщенных грунтов при строительстве. Дисс... канд. техн. наук[M]. - Москва, 1968. - 151 с.
- [7] Хлюпина Л. П. Физические процессы в песчаных водонасыщенных грунтах при высоковольтных разрядах. Дисс... канд. техн. наук[M]. - Москва, 1967. - 163 с.
- [8] Наугольных К. А., Рой М. А. Электрический разряд в воде[M]. - М.: Наука, 1971. - 155 с.
- [9] Горюнов Г. Г., Ивлиев А. И., Малошевский П. П., Пастухов В. П. Электровзрывные силовые импульсные системы[M]. - Киев: Наукова думка, 1987. - 220 с.
- [10] Теляшов Л. Л., Гулый Г. А., Полевик А. Г., Охитин В. А. Исследования стадии схлопывания парогазовой полости в воде[M]. - Киев: Наукова думка, 1987. - С. 49-55.
- [11] Основания и фундаменты / Под. редакцией Н. А. Цыговича[M]. - М.: Высшая школа, 1970. - 384 с.
- [12] 李冬霜. 高压脉冲放电扩桩机理及试验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2011.