

【工程应用】

# 南美某电厂灌注桩正反循环清孔对比分析

马晓武, 孙杰飞, 郑建国

(机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 桩基础是应用最为可靠且广泛的深基础形式, 灌注桩是其中的一种重要形式, 应用十分广泛。水下旋挖成孔灌注桩在进行混凝土灌注前, 孔底沉渣的深度控制情况, 对最终单桩承载力的影响较大。本文通过对两种不同二次清孔后的承载力效果进行比较, 表明泵吸反循环法对孔底沉渣的清理较为有效, 同时也探讨了在施工过程中, 可对孔底沉渣产生影响的几道工序如何控制。本文相关内容和结论可为灌注桩施工中二次清孔方法的选择提供借鉴。

**关键词:** 桩基础; 灌注桩; 二次清孔; 反循环

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0329-06

## Comparative analysis of positive and reverse circulation hole cleaning of cast-in-place pile in a power plant of South America

MA Xiao-wu, SUN Jie-fei, ZHENG Jian-guo

(China Jikan Research Institute of Engineering investigations and design, Co., Ltd., Xi'an, Shanxi 710043, China)

**Abstract:** Pile foundation is the most reliable and widely used deep foundation type, and cast-in-place pile is one of the important forms, which is widely used. Before the concrete pouring, the depth control of the sediment at the bottom of the hole has a great influence on the ultimate bearing capacity of the single pile. By comparing the bearing capacity effect of two different kinds of secondary hole cleaning methods, this paper shows that the pump suction reverse circulation method is more effective in clearing the sediment at the bottom of the hole. How to control several processes that can affect the sediment at the bottom of the hole during the construction process is also discussed. The relevant contents and conclusions of this paper can provide reference for the selection of secondary hole cleaning methods in the construction of cast-in-place pile.

**Key words:** pile construction; cast-in-place pile; secondary hole cleaning; reverse circulation

## 0 引言

旋挖成孔灌注桩, 目前在国际工程项目的地基与基础中应用十分广泛, 尤其是对荷载要求较高或有着动荷载的基础, 普遍采用旋挖成孔灌注桩。该工艺优点明显: 性价比高、施工周期较短、工艺成熟、单桩承载力较高<sup>[1]</sup>等等。但由于钻孔灌注桩施工工艺的特殊性, 其承载力受施工中的因素影响较大, 特别是孔底沉渣严重影响桩承载力的发挥<sup>[2]</sup>。因此, 施工过程中加强孔底沉渣厚度的控制与检测, 是保证钻孔灌注桩施工质量和桩基承载力的关键措施, 而大部分桩基工程中, 孔底沉渣二次清孔

的环节会被忽视, 未能引起足够的重视。本文结合某海外项目实例对海边复杂地层使用灌注桩工艺时孔底沉渣的二次清孔方法效果及保证措施进行探讨和建议。

## 1 项目背景

南美某电厂拟在原机组南侧扩建一台高功率机组, 厂址地貌属于河湾与三冲河冲积平原相接地带, 南部与山脉相连, 北邻加勒比海, 距离海边的直线距离不足 300 m。

根据勘察报告揭露所示, 地基岩土层由上而下

的简要分述为下:

①杂填土: 主要成分为建筑垃圾, 结构较为松散,  $N$  平均值为 9, 抗压离散性较大, 一般层厚为 0.60~0.95 m。

②珊瑚礁: 灰白色, 溶蚀现象明显, 溶孔少量发育, 呈中等风化状, 一般层厚为 0.50~6.80 m。

③粉砂: 根据该层密实度差异, 分三个亚层, 其中③<sub>1</sub>层饱和、松散-稍密, 一般层厚 1.00~14.10 m; ③<sub>2</sub>层连续性较差, 饱和、中密, 一般层厚 0.90~9.10 m; ③<sub>3</sub>层连续性也较差, 饱和、密实, 一般层厚 1.30~6.80 m。

④黏土: 深灰、灰黑色, 含多量朽木碎屑, 具浓烈的腥臭味, 可塑状态,  $N$  平均值为 9, 抗压离散性略大, 一般层厚为 0.40~8.40 m。

⑤粉土: 根据该层密实度差异, 分两个亚层, 其中⑤<sub>1</sub>层饱和、稍密, 一般层厚 2.00~3.70 m; ⑤<sub>2</sub>层饱和、中密, 一般层厚 1.00~13.90 m。

⑥中粗砂: 灰白、褐黄色为主, 饱和、密实,  $N$  平均值为 65, 较硬, 一般层厚为 0.70~15.60 m。

⑦粉细砂: 黄褐色为主, 饱和、密实, 分布连续性差, 一般层厚为 1.30~8.80 m。

⑧粉质黏土: 褐黄、黄褐色, 偶见铁质结核, 局部呈半成岩状态, 土体中裂隙较发育, 坚硬状态, 一般层厚为 0.50~11.30 m。

⑨砾岩: 灰白色为主, 岩性较坚硬, 中等风化, 一般层厚为 0.60~1.20 m。

⑩泥质砂岩: 该层岩性十分复杂, 有砂岩、泥岩、砂质泥岩和泥质砂岩, 空间分布连续性很差, 鉴于上述几种岩石物理力学性质相差不大, 统一定义为泥质砂岩。根据风化程度, 划分为两个亚层, 其中⑩<sub>1</sub>层为强风化泥质砂岩, 岩石风化强烈, 程度不均, 局部呈砂状、土状, 节理裂隙十分发育, 节理裂隙面光滑; ⑩<sub>2</sub>层为中风化泥质砂岩, 岩性相对完整, 节理裂隙少量发育。 $N$  平均值为 123, 最大可达 214, 变异系数 0.34。

为了确定该项目工程地质条件下灌注桩工艺的可行性, 明确施工过程中质量控制范围的重点, 为持力层选择提供一定的依据, 对该工艺应当进行试桩。

## 2 试桩设计

灌注桩的常规试验一般对单桩竖向抗压、水平和桩身完整性进行验证, 孔底沉渣主要影响的是竖向抗压极限承载力, 在此只考虑该种承载力的方案

设计。

孔底沉渣厚度控制的关键在于二次清孔方法的选择, 由于项目地点位于国外, 当地资源不及国内丰富, 结合项目地层情况和当地现有资源, 拟采用循环灌浆法和泵吸反循环法进行比较。

项目设计了四组试桩(800 mm 桩径和 600 mm 桩径各两组, 有效桩长约为 25~33 m, 具体如表 1 所示), 持力层均为强风化泥质砂岩。四组试桩成桩过程中的主要区别就在于桩径和二次清孔的方法不同。下面对两种清孔方法进行简单的介绍。

表 1 试桩清孔方法及部分参数

Table 1 Test pile hole cleaning methods and some parameters

序号	桩径/mm	二次清孔方法	有效桩长/m
1	800	循环灌浆法	25~33
2	800	泵吸反循环法	25~33
3	600	循环灌浆法	25~33
4	600	泵吸反循环法	25~33

### 2.1 循环灌浆法清孔

循环灌浆清孔的目的是使沉渣从导管外部流出。外接动力(例如空气)通过导管注入新制泥浆, 泥浆密度根据不同地层进行配置, 大约控制在 1.15~1.25 之间, 避免太大或太小而影响清洗效果, 带压泥浆携带沉渣通过导管与孔壁形成的环闭空间上返, 排出孔口以外, 以达到沉渣清理。这种方法对于桩长较短的灌注桩来说, 是比较经济合理的, 在该项目的试桩中也达到了相应的效果。

### 2.2 反循环清孔

泵吸反循环清孔的目的是使沉渣从导管内部被抽出。利用离心泵的抽吸力量, 在导管口处形成负压, 孔口的泥浆在大气压的作用下, 经导管携带沉渣经导管中空而上升, 通过胶管从泵中排至沉淀池中。经沉淀后的泥浆, 以自流的方式自井口流至井底, 形成循环。常用的泵为砂石泵, 它要求能排出沉渣而又要有较大的真空度<sup>[3]</sup>。

## 3 试验过程及结果简要分析

### 3.1 试验过程

施工完毕 28 d 后, 待桩身混凝土抗压强度均达到 100%, 对四组试桩均进行单桩竖向抗压静载试验来验证承载力效果。根据设计要求, 预估 800 mm 直径和 600 mm 直径单桩竖向承载力设计值分别为 3 000 kN 和 1 800 kN。

该项目因地处南美, 应业主要求, 需共同参照

国内 JGJ 106 和美标 ASTM-D 1143 中的规定进行试验, 依据美标中的循环荷载测试 (8.1.8) [4]: “对于首次施加的试验荷载增量, 在施加相当于单桩试验桩设计荷载的 50%、100%和 150%的荷载”, 制定了具体的循环加载数值如表 2 所示。

表 2 不同桩径分次循环加载峰值  
Table 2 Cyclic loading peak values for different pile diameters

桩径	800 mm	600 mm
第一次加载峰值	3 000 kN	1 800 kN
第二次加载峰值	6 000 kN	3 600 kN
第三次加载峰值	9 000 kN	5 400 kN

每一次根据加载峰值来进行试验, 试验程序上国标与美标差异不大, 都可以通过观测单桩的沉降量来判断极限承载力。在经过现场沟通并结合实际情况后, 大部分的试验程序以美标为准:

- (1) 以 25%的设计荷载增量施加各级荷载。
- (2) 维持每级荷载, 直到变形速度小于 0.25 mm/h, 维持时间不超过 2 h。
- (3) 总变形应小于桩直径的 15%。
- (4) 在完成最后的荷载增量后, 以最大测试荷载 25%的减量进行卸载, 每级荷载之间间隔 1 h[4]。

循环灌浆法清孔的 800 mm 试桩极限承载力不均匀, 有两根试桩在第二次和第三次加载中出现了较大沉降量, 并通过较长时间达到稳定 (每小时沉降量低于 0.25 mm), 分别在 6 750 kN 和 8 250 kN (见图 1) 终止了加载。

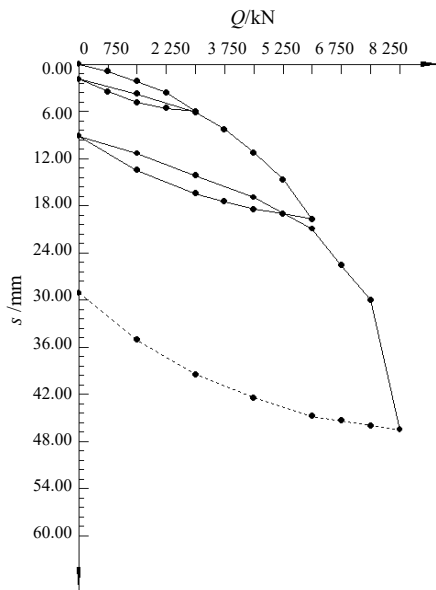


图 1 第一组试桩 Q-s 曲线  
Fig. 1 Q-s Curve of test piles in group 1

循环灌浆法清孔的 600 mm 试桩, 在经过了三

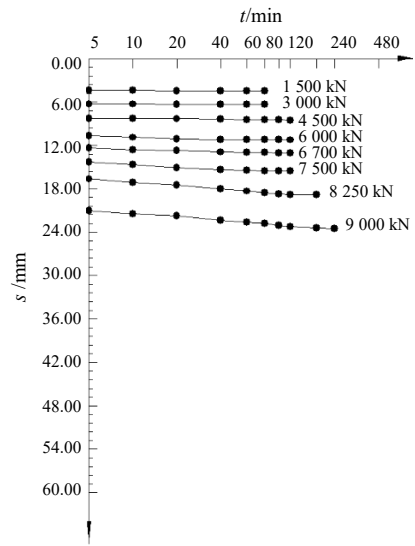
次循环分级加载后, 沉降量均符合要求。

反观泵吸反循环法清孔的 800 mm 试桩和 600 mm 试桩, 在第三个循环中, 800 mm 和 600 mm 的试桩在峰值荷载的作用力下位移较小, 总沉降量分别为 22.49 mm 和 10.53 mm (图 2)。

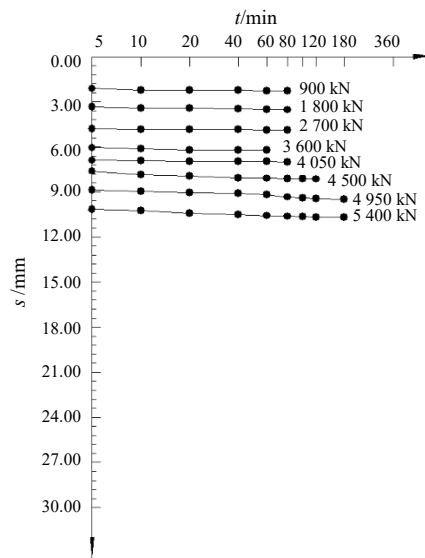
卸载后的塑性变形量分别介于 2.92~4.73 mm 之间, 可以认为两组试桩尚未出现极限状态 (图 3)。

### 3.2 试验结果简要分析

由于在试验过程中, 循环灌浆法下的 800 mm 桩径试桩出现了不止一次沉降量较大的情况, 且达到稳定所需时间较长, 参照一般 Q-s 和 s-lgt 曲线的承载力, 并经过现场施工情况综合考虑[5], 四组试桩的推荐承载力值如表 3 所示。



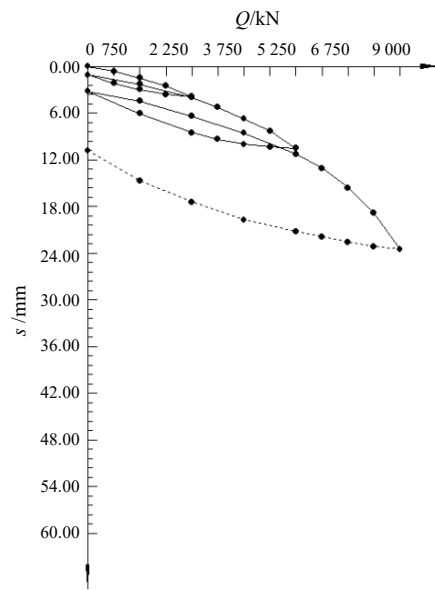
(a) 第二组



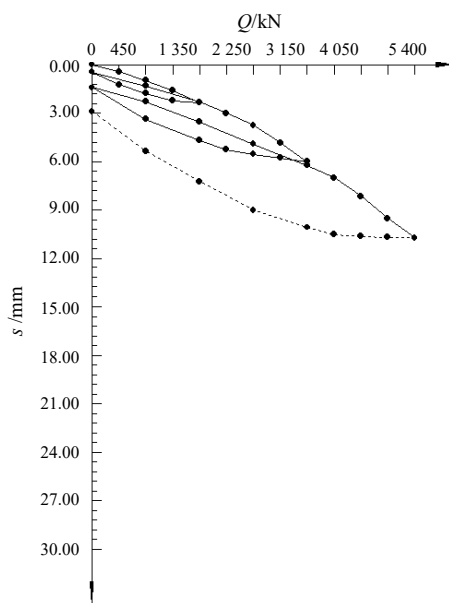
(b) 第四组

图 2 第二组和第四组试桩 S-lgt 曲线

Fig. 2 S-lgt curve of test piles in group 2 and 4



(a) 第二组



(b) 第四组

图3 第二组和第四组试桩 Q-s 曲线

Fig. 3 Q-s curve of test piles in group 2 and 4

表3 承载力取值

Table 3 Bearing capacity values

桩径	二次清孔方法	承载力取值
800 mm	循环灌浆法	6 000 kN
800 mm	泵吸反循环法	9 000 kN
600 mm	循环灌浆法	5 400 kN
600 mm	泵吸反循环法	5 400 kN

当使用泵吸反循环法进行二次清孔的试桩,两种桩径的试桩在沉降量上都表现良好,根据上述同样方法,可推荐 800 mm 桩径和 600 mm 桩径单桩的极限承载力分别取 9 000 kN 和 5 400 kN。

根据以上检测出现的不同情况,并结合现场施工情况来看,分析原因主要有三点:

(1) 针对循环灌浆法不同桩径的检测结果,600 mm 桩径的桩施工时充盈系数较大,换算等效桩径接近 700 mm,因此,600 mm 桩径的桩承载力相对较高。

(2) 采用循环灌浆法清孔时,当桩径较小时,导管外壁与孔壁之间的泥浆断面相对较小,在一定的注入流量下,小直径的桩必然比大直径的桩拥有更高的上返流速和冲击力,相对提高了清除孔底沉渣的效果。

(3) 针对两种不同清孔方法的检测结果不同,可以判断,泵吸反循环无论是 800 mm 或是 600 mm 均能取得预想的效果,而不受桩径大小的影响,在同一个项目中,如果同时存在桩径不同的桩,相比循环灌浆法,泵吸反循环法更经济合理,值得推广。

整个厂区共施工了 1 913 根灌注桩,采用高应变变动力检测对 29 个部位的 105 根灌注桩进行了实验,具体数据如表 4 所示。

由表 4 可知,共 105 根检测桩的单桩承载力均能满足设计要求。

表4 工程桩检测结果

Table 4 Test results of engineering piles

序号	桩长/m	检测数量/根	设计极限承载力/kN	检测极限承载力/kN		
				最小值	最大值	平均值
1	19.5~29.7	105	6 000	6 014.4	8 489.5	6 878.3

## 4 孔底沉渣厚度控制的质量保证措施

根据上文中试桩的试验结果,可以正面反映出混凝土灌注前孔底沉渣的厚度对于单桩承载力的影响。通过对施工流程的观察,该工艺根据机械和

材料的使用大致可分为三个流程,分别是成孔、钢筋笼制作及安装、混凝土灌注,这些流程都会对孔底沉渣厚度有一定的影响,简单列举如下,并提出一些防治措施供参考<sup>[6]</sup>。

### 4.1 成孔

该项目邻近海边,场地地下水较浅,需进行泥

浆护壁湿作业成孔。项目地处南美加勒比海地区,考虑运输成本因素,采用了化学泥浆作为护壁剂。

护壁液比重是关键指标,如果比重较小,孔内泥浆中颗粒难以悬浮,会较快沉淀至孔底,而钻头底部存在较大空隙,每次钻进取土时都会残留部分渣土难以捞起;另外,钻头在提升过程中容易将孔底部空间形成真空,且当钻头下放和提升时,均不时刮擦孔壁,增加了泥浆中的颗粒悬浮比例,最终造成沉渣量的增加。

针对以上可能出现的现象,首先,在施工前通过试验确定泥浆和水的配比,必要时也可进行试桩成孔对比沉渣厚度;施工过程中,现场技术人员应当对每根桩成孔前泥浆池内的泥浆比重和黏度进行实验,确保实验结果与前期试验结果相符。其次,在钻进取土过程中,钻头应当慢下,不打满钻,最大程度的减小与孔壁的接触,提离孔口时,对孔内需要有一个较大量的泥浆补充,避免水压不够而导致塌孔。终孔后,应当使用捞砂钻头对孔底进行一次清孔,以保证成孔深度满足设计要求。

除此之外,配套设备的调整也是关键。因该项目地层中包含泥质砂岩,深度较深,钻机在钻进至此层时,钻杆扭矩逐渐变小,钻头斗齿与钻头底部平面的角度会直接影响钻进效率,故需根据钻进工效随时调整角度。

#### 4.2 钢筋笼制作及安装

钢筋笼制作过程一般不会对沉渣有所影响,但是在钢筋笼尾部的钢筋分布上需要注意,避免在运输过程中导致尾部钢筋外翻;在钢筋笼安装部分,图纸中都会对钢筋笼中下放有明确要求,主要目的是发挥钢筋笼在桩体中的抗剪能力,同时为了避免在安放钢筋笼过程中发生刮擦孔壁现象。

钢筋笼的安装应当选择标准起重机械,垂直下放,并沿钢筋笼体布置垫块,帮助其居中,达到减小刮擦孔壁次数的效果。

#### 4.3 二次清孔及混凝土灌注

对于泵吸反循环法二次清孔,为了使沉渣能顺利通过,泵体内的自由通道应与导管内径接近。砂石泵的叶片间隙要大,而且要求泵体和叶片有较好的耐磨性。砂石泵的流量根据导管内径而定,一般为120~240 m<sup>3</sup>/h,最大可达500 m<sup>3</sup>/h。因流量较大,在作业前,应当在孔口围成较大的蓄水圈,以便泵开启时,能够及时给孔内补足泥浆,避免塌孔现象。

二次清孔处理沉渣后进行混凝土灌注。泥浆中的颗粒悬浮物会随着时间的流逝,慢慢聚集在孔

底,并有一定的黏结能力,从而在孔底形成较为顽固的沉渣,因此,导管安装的工效也会对沉渣厚度有所影响。二次清孔以后,在混凝土灌注的大漏斗中设置同等标号混凝土隔水球,保证混凝土的初灌量,通过初灌混凝土的重力作用,在冲出导管底部的一瞬间,将孔底沉渣冲至于混凝土上部,随后连续正常灌注,最终成桩。混凝土初灌量可以通过计算得出<sup>[7]</sup>:

$$V \geq \frac{\pi D^2}{4} h_2 k + \frac{\pi d^2}{4} h_1 \quad (1)$$

式中:  $V$  为初灌混凝土所需数量, m<sup>3</sup>;  $D$  为桩径, m;  $h_2$  为初灌后导管埋深, 取值不小于 0.8 m;  $d$  为导管内径;  $k$  为混凝土充盈系数, 不小于 1, 一般取 1.1~1.2, 根据地层和经验可扩大;  $h_1$  为孔内混凝土达到埋管高度时, 导管内混凝土与导管外水柱压力平衡所需的高度, m, 即:

$$h_1 = (h - h_2) \frac{\gamma_w}{\gamma_c} \quad (2)$$

式中:  $h$  为孔内泥浆高度;  $\gamma_w$  为泥浆密度, kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma_c$  为混凝土密度, kN/m<sup>3</sup>。

混凝土灌注前的导管安装属于二次清孔前的最后一道步骤,应当增加熟练程度,缩短安装时间,为后序作业做好铺垫。

## 5 结 论

(1) 旋挖成孔灌注桩工艺是地基处理的重要方法,尤其在提高工业厂房柱下基础的承载力上发挥着重要作用。

(2) 混凝土灌注前的孔底沉渣厚度对灌注桩单桩承载力的发挥有着至关重要的影响。

(3) 能适应多种桩径的泵吸反循环法二次清孔在对单桩承载力要求较高的项目中值得推广。

(4) 文中的孔底沉渣厚度控制措施是以该项目为基础提出,根据不同项目的特征应优化调整。

## 参考文献

- [1] 宋思奇. 旋挖钻孔灌注桩在软土地基处理中的应用[J]. 科技, 2020(15): 76-77.  
SONG Si-qi. Application of revolving digging cast-in-place bored pile in soft soil foundation treatment[J]. Technology, 2020(15): 76-77.
- [2] 袁亚军, 蒋明丹, 王久斌, 等. 岩土工程中地基与桩基

- 础处理技术分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(17): 163-164.
- YUAN Ya-jun, JIANG Ming-dan, WANG Jiu-bin, et al. Analysis of foundation and pile foundation treatment technology in geotechnical engineering[J]. Foundation and Basement, 2020, 47(17): 163-164.
- [3] 雷斌, 叶坤, 李榛, 等. 旋挖钻孔桩沉渣产生原因及清孔工艺优化选择[J]. 施工技术, 2014, 43(19): 48-53.
- LEI Bin, YE Kun, LI Zhen, et al. Causes of sediment at the bottom of rotating drilling pile and optimal selection of hole cleaning method[J]. Construction Technology, 2014, 43(19): 48-53.
- [4] ASTM D1143M-07. Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load[S]. ASTM International, 2013.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [6] 胡晓飞. 钻孔灌注桩孔底沉渣厚度分析及控制措施[J]. 建筑, 2014(11): 69-70.
- HU Xiao-fei. Analysis and control measures of sediment thickness at hole bottom of cast-in-place pile[J]. Construction and Architecture, 2014(11): 69-70.
- [7] 樊仲勋, 汤宝仁. 钻孔灌注桩灌注方法之探讨及灌注过程典型事故的紧急处理措施[J]. 工程质量, 2004(10): 31-32, 35.
- FAN Zhong-xun, TANG Bao-ren. Grouting methods and accidents disposal in construction of cast-in-situ bored piles[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2004(10): 31-32, 35.

## 【简 讯】

### 第十五届全国桩基工程学术会议（一号通知）

第十五届全国桩基工程学术会议拟于 2021 年 11 月在浙江杭州召开, 会议以桩基技术创新发展为主题, 届时将邀请桩基工程领域的知名专家学者作特邀报告、大会报告、专题报告, 展现新时代桩基工程领域的最新研究成果与工程应用技术。组委会热忱邀请本领域的专家、学者、工程技术人员、在校研究生积极参与, 共同探讨与交流桩基工程领域最新成果和技术!

#### 会议主题:

- (1) 桩基基本理论与试验研究
- (2) 桩基工程设计与实践
- (3) 桩基工程施工新方法及装备
- (4) 桩基动力响应与防震、减振技术
- (5) 桩基工程新材料与制作新工艺
- (6) 桩基工程检测与监测
- (7) 桩基工程典型案例与事故处理
- (8) 海洋工程中的桩基技术

(9) 桩基工程技术标准有关问题

(10) 其他与桩基有关的工程技术问题

#### 会议展览:

会议期间将举办桩基产品、岩土仪器设备展示及新产品专题报告, 欢迎有关厂商、公司报名参加赞助, 具体细节请联系会议秘书处。

#### 组委会联系方式:

联系人: 丁元新

联系电话: 13626711239

投稿邮箱: dyx@zju.edu.cn

联系地址: 杭州市浙江大学紫金港校区安中大楼

邮政编码: 310058

#### 会议展览展示:

《基础工程》杂志社

王菲: 18612335955

周梅: 15910323004

李荣霞: 15300268669