

DOI: 10.11779/CJGE2021S1009

根键桩拔桩过程桩-土作用机理及根键特性研究

张吉禄¹, 黄雪峰^{*1,2}, 周俊鹏³, 韦林辉¹, 袁俊⁴, 王学明⁴

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 3. 陆军勤务学院军事设施工程系, 重庆 401311; 4. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为明确根键桩抗拔受力模型以及桩土作用规律, 对等截面桩、扩底桩以及根键桩竖向荷载及联合荷载下的抗拔性能进行测试, 并结合有限元模拟对不同根键密度下承载力变化规律以及结构强度进行探究。结果表明: ①根键桩更适用于复杂荷载工况以及对位移有严格要求的建筑基础, 且根键桩多层变截面使材料承载力发挥更充分, 也更经济; ②试验条件下, 桩周土体裂隙率与荷载的关系符合指数分布, 同荷载下裂隙率越高则承载能力越低, 极限荷载下裂隙率越高则对土体承载能力发挥越充分; ③提高根键密度有利于降低根键周围土压力, 防止基础过早发生塑性破坏, 一般而言, 根键与相同直径圆环截面积比值 α 应为 0.1~0.3。

关键词: 根键桩; 抗拔承载特性; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0047-06

作者简介: 张吉禄(1993—), 男, 硕士, 主要从事非饱和土理论、黄土等特殊土的工程性质及地基处理等方面的设计与研究工作。E-mail: 540726390@qq.com。

Pile-soil interaction mechanism and bearing characteristics of roots in uplift process of piles

ZHANG Ji-lu¹, HUANG Xue-feng^{1,2}, ZHOU Jun-peng³, WEI Lin-hui¹, YUAN Jun⁴, WANG Xue-ming⁴

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Department of Military Installations Engineering, Army Logistical University of PLA, Chongqing 401311, China; 4. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to clarify the load transfer model for root piles and the action law of pile-soil, the uplift bearing capacities of equal section pile, belled pile and root pile are tested. Meantime, the change rules of the bearing capacity under different densities of root are explored through numerical stimulation. The result shows that: (1) The root pile is more suitable under the conditions of complex load and strict requirements for displacement. Moreover, the multi-layer variable cross-section setting of the root pile makes the bearing capacity of material, play a further role and achieves the goal of economic saving. (2) In the test condition, the relationship between the crack rate of soil around piles and the load is exponential distribution. Under the same load, the higher the fissure rate, the lower the bearing capacity. Under the ultimate load, the higher the fissure rate, the more fully the bearing capacity of soil will be exerted. (3) Increasing the density of roots (cross-section area) is beneficial to reducing the earth pressure around the roots and preventing the plastic failure from happening in the original period of the foundation. In generally, the ratio of the roots to the branch cross-section area with the same diameter should be set from 0.1 to 0.3.

Key words: root pile; uplift bearing characteristic; field test; numerical simulation

0 引言

近年来, 随着“西电东送”、“北电南送”输电工程的实施, 特高压电网在西部地区得到迅猛发展, 而特高压杆塔因导线截面、间隙、对地距离的增大导致上部荷载大幅增加, 受荷方式也更为复杂, 同时, 复杂的工程地质条件也对基础承载能力效果提出更高的要求。传统基础^[1]只能通过增加埋深或桩径来满足承载力需求, 但受地形、环境以及经济因素限制颇多。因此, 如

何创新性地改变基础形式, 以较少材料用量达到更高土体承载能力已成为电塔基础设计与施工的关键。

根键桩作为一种新型截面异形基础, 利用仿生学原理, 通过挤入土中的根键^[2-3]大幅提高了基础的承载能力, 其承载特性明显区别于以侧摩阻力为主的摩擦

基金项目: 重庆市研究生创新基金项目(CYB18126)

收稿日期: 2020-12-16

* 通信作者(E-mail: hxfen60@163.com)

桩,且根键与桩身通过钢筋紧密连接,保证了变截面承载能力发挥的刚度要求,性能优于素混凝土填充的支盘桩^[4]。目前已在部分地区得到良好应用^[5],但理论基础的滞后在一定程度上限制了根键桩的进一步推广,仅少数学者对其承载能力进行了探究,如龚维明等^[6]对根键桩的受力机理进行分析,探讨了根键的挤土效应及抗拔特性对提高基础抗压承载力的作用;张立奎等^[7]对根键桩进行了水平承载力试验,结果表明根键桩与普通沉井基础相比承载力大幅提高,且基础中上部受土抗力较大,对基础承担水平荷载起主要作用;葛楠等^[8]基于模型试验展开砂土中根键桩抗拔承载特性的试验,对桩身上拔量,桩身轴力以及侧阻力的分布进行了分析,但是针对根式基础的足尺抗拔试验的研究仍处于空白阶段,且传统理论方法^[9]尚无法对根式基础承载力进行准确预估,因此,目前研究成果无法对西北地区工程建设提供系统的指导依据。

本文基于等截面桩、扩底桩以及根键桩的竖向抗拔试验以及水平与竖向荷载联合作用下的抗拔试验基础的承载能力、桩土作用规律进行分析,并结合数值模拟对不同根键密度下桩土承载特性变化规律及优化设计进行初步探讨,以期为根键桩在输电杆塔建设的应用与推广中提供理论指导与设计参考。

1 试验概况

1.1 地层概况

试验位于兰州某大厚度黄土地区,现场地层主要为粉土与粉质黏土,地下水位较深,可不考虑地下水对桩基础的影响,具体土层物理力学参数如表1所示。

表1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

| 层号 | 名称 | 厚度 h_i/m | 密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$ | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
|----|------|---------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| ① | 粉土 | 2 | 1.35 | 23 | 19.6 |
| ② | 粉质黏土 | 1 | 1.53 | 25 | 18.3 |
| ③ | 粉土 | 2 | 1.48 | 23 | 19.4 |
| ④ | 粉质黏土 | 1 | 1.61 | 21 | 20.4 |
| ⑤ | 粉土 | 1 | 1.55 | 20 | 21.2 |
| ⑥ | 粉质黏土 | 1 | 1.65 | 24 | 18.8 |
| ⑦ | 粉土 | 1 | 1.52 | 23 | 19.3 |
| ⑧ | 粉质黏土 | 1 | 1.62 | 24 | 18.8 |

1.2 试验方案

试验分别对等截面桩、扩底桩以及根键桩进行竖向抗拔以及水平与竖向联合荷载下的抗拔试验,试桩均通过人工挖孔与现场浇筑成桩,其中根键桩成桩方式略有不同,根键为预制构件,当试桩开挖至根键设计深度后沿水平方向在根键位置处掏出一定深度导洞,之后分组

将对称方向根键推入导洞中并通过千斤顶将两根键顶至预定深度完成根键的安装,图1为根键安装流程图。

试桩全长10.4 m,桩顶位于地面以上0.4 m,桩体埋深10 m,桩身直径为1.2 m,其中扩底桩扩大头处直径为1.8 m,根键桩沿深度方向布置4层根键,每层均匀布置6根,根键纵向高0.3 m,宽0.15 m,总长度为0.9 m,外伸长度0.6 m。试桩布置如图2。

试验采用慢速维持荷载法进行加载,竖向荷载每级加载量为30 t;水平荷载每级加载量为5 t。终止加载标准按照桩基规范^[10]进行,其中进行联合荷载抗拔试验时,无论竖向或水平任意一方达到破坏标准即停止加载。

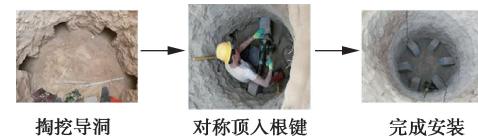


图1 根键安装流程图

Fig. 1 Installation of root

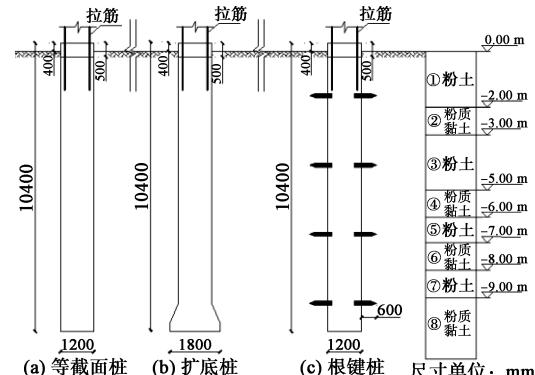


图2 试桩布置及参数

Fig. 2 Layout and parameters of piles

1.3 试验装置

竖向加载系统由反力桩、反力梁、千斤顶以及锚板组成,为了达到减小反力桩沉降以及节省材料的目的,试验中反力桩均为扩底桩,其桩长5 m,桩径1.2 m,扩大头直径2 m;水平加载系统依次由反力桩、钢垫块以及千斤顶组成,其最大承载力为100 t,竖向与水平加载系统具体布置方式如图3所示。

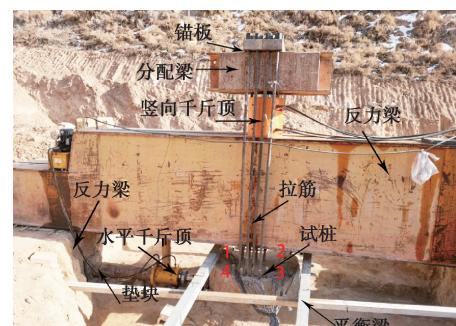


图3 试验装置

Fig. 3 Test devices

桩周共布置 4 支位移计, 分别固定于临空架设平衡梁上, 图 3 试桩上部红色编号为位移计安装位置。

2 结果与分析

2.1 Q-S 曲线分析

图 4 为等截面桩、扩底桩以及根键桩的荷载-位移曲线(D1, K1, G1 依次为 3 桩竖向抗拔试验, D2, K2, G2 为联合抗拔试验)。对于竖向抗拔试验, 等截面桩符合“突变型”的位移模式, 而扩底桩与根键桩则为“缓变型”。变截面的引入明显改变了试桩的受力模式, 扩底桩与根键桩具有端承桩的承载特性, 且扩底桩与根键桩的拉拔位移在试验荷载一定范围内基本呈线性变化, 并很接近。因此, 变截面的设置达到了抑制基础位移的明显效果。

对于联合加载试验而言, 当荷载较小时, 联合上拔曲线与竖向上拔荷载-位移曲线非常接近, 随着荷载的增加, 联合加载模式下位移曲线逐渐高于竖向上拔时的位移曲线, 但总体而言其变化量并不大。故在试验条件下水平荷载的加入虽然对基础承载能力有一定削弱, 但削弱量较小, 扩底桩与根键桩的承载力削弱量更小。超高杆塔基础等设施对位移敏感, 位移要求高, 其极限荷载下的控制位移多为 25~30 mm, 从试验结果看也能满足要求。因此, 在水平荷载与竖向荷载之比小于 1/6 的情况下, 即使是对位移有严格控制的基础, 其承载力仍可近似按竖向上拔的工况进行考虑。

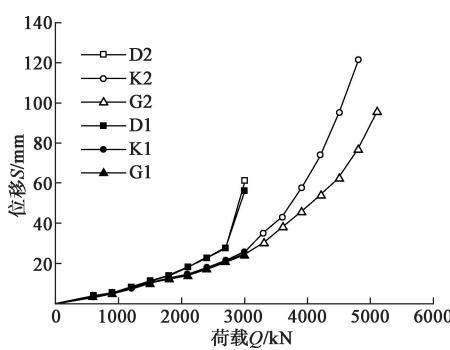


图 4 现场试验荷载-位移曲线

Fig. 4 Q-S curves of field tests

针对普通建筑, 规范^[10]规定上拔位移 100 mm 作为极限承载力判别标准之一。但黄土多具有湿陷性问题, 地基承载力不确定性大, 因此本文取位移 0.05D (D 为桩体直径), 即 60 mm 所对应的荷载作为试桩极限承载力。

由于扩底桩与根键桩竖向上拔试验所用试桩另有其他规划, 仅加载至与等截面桩相同荷载等级, 远未达到规定破坏位移标准, 因此通过指数函数与双曲函数对试桩承载力进行预测, 函数模型表达式如下:

$$\text{指数函数: } S = a + be^{\frac{Q}{c}}, \quad (1)$$

$$\text{双曲线函数: } S = \frac{Q}{a + bQ} \quad (2)$$

式(1), (2)中, a, b, c 均为拟合参数, 预测结果见表 2。

表 2 预测模型计算结果

Table 2 Calculated results by different predicting models

| 桩号 | 函数类型 | 参数 | 拟合精度 | Q_{ult} /kN |
|----|------|--|-------|---------------|
| K1 | 指数 | $a = -2.952, b = 4.383, c = 1583.642$ | 0.986 | 4200 |
| | 双曲 | $a = 210.035, b = -3.064 \times 10^{-2}$ | 0.993 | 4500 |
| K2 | 指数 | $a = -0.080, b = 2.157, c = 1191.457$ | 0.999 | 3900 |
| | 双曲 | $a = 206.615, b = -3.450 \times 10^{-2}$ | 0.996 | 3900 |
| G1 | 指数 | $a = -6.870, b = 7.737, c = 2170.223$ | 0.992 | 4700 |
| | 双曲 | $a = 195.958, b = -2.335 \times 10^{-2}$ | 0.998 | 4900 |
| G2 | 指数 | $a = -2.782, b = 4.671, c = 1685.335$ | 0.998 | 4500 |
| | 双曲 | $a = 213.382, b = -3.317 \times 10^{-2}$ | 0.999 | 4500 |

由表 2 可知, 两种函数下的荷载位移曲线均具有较高拟合度, 其中指数函数反算得到的极限承载力要稍小于双曲线函数, 对两种函数所得极限承载力取平均值, 并一同将等截面桩实测极限值记录于表 3 进行比较。

表 3 试桩承载能力与材料用量

Table 3 Bearing capacities and material consumption of piles

| 桩号 | 荷载 Q_{max} /kN | 材料用量 M/m^3 | $\frac{Q}{M}$ /($kN \cdot m^{-3}$) |
|----|------------------|--------------|--------------------------------------|
| D1 | 2700 | 11.3 | 239 |
| D2 | 2700 | 11.3 | 239 |
| K1 | 4350 | 12.19 | 357 |
| K2 | 3900 | 12.19 | 320 |
| G1 | 4800 | 11.8 | 407 |
| G2 | 4500 | 11.8 | 381 |

由表 3 可知: 三桩型极限承载力大小关系为根键桩 > 扩底桩 > 等截面桩, 扩底桩与根键桩竖向抗拔极限承载力均略大于联合荷载下极限抗拔承载力; 在材料利用率方面, 根键桩与扩底桩单位体积所承担荷载约为等截面桩的 1.64 与 1.42 倍。可以看出, 变截面的设置显著地提高了材料利用率, 根键桩多层变截面的设置更合理, 以更少的材料用量实现了更高的拉拔承载力。

2.2 土体裂隙发展分析

以最先出现肉眼可见裂隙对应的荷载为裂隙发展的初始荷载。如图 5 所示(图中粗线代表宽度大于 1 mm 裂隙, b_{max} 为裂隙最大宽度), 在竖向荷载作用下等截面桩 1200 kN 时最先出现裂隙, 而扩底桩与根键桩在 1800 kN 才出现裂隙, 且随荷载的增加无论裂隙长度还是密度, 等截面桩均大于同荷载下扩底桩与根键桩, 3000 kN 下裂隙最大长度依次为 2r, 1.2r, 1.5r

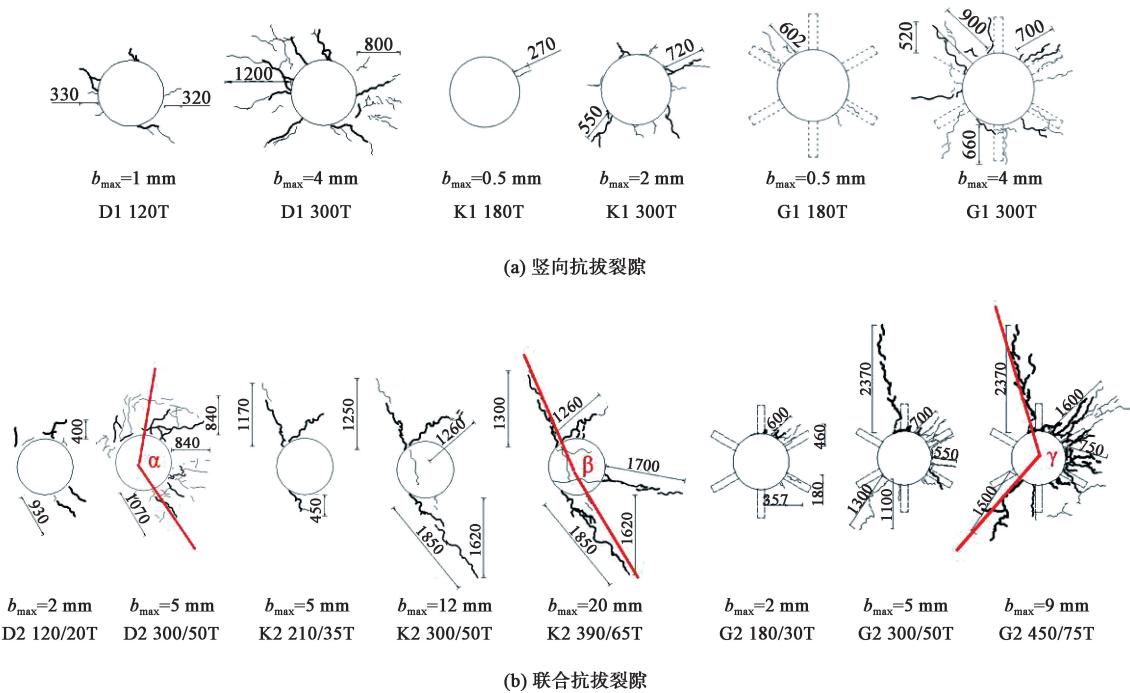


图 5 试桩裂隙发展图

Fig. 5 Development of cracks in pile tests

(r 为试桩半径)。三桩加载过程中裂隙均沿径向均匀发展,其中根键桩裂隙多集中于根键位置。说明变截面的设置不仅提高土体承载能力还抑制了裂隙发展,且竖向荷载下等截面桩与扩底桩土体受力较为均匀,而根键桩土中应力在根键位置处有一定集中现象。联合荷载作用下,等截面桩在 1200/200 kN 最先出现裂隙,而扩底桩与根键桩分别为 2100/350 kN, 1800/300 kN。同荷载下,等截面桩裂隙密度仍高于其他两桩,但最大裂隙长度等截面桩最小,三桩依次为 $1.8r$, $3.1r$, $3.9r$;裂隙发展规律方面,三试桩周围土体裂隙均沿运动侧径向形成扇形裂隙区域,夹角依次为 145° , 170° , 235° ,其中根键桩裂隙夹角处于根键埋置位置附近。说明水平荷载的引入使土体破坏范围明显增大,且不同截面形式联合荷载下裂隙影响区域差异明显,根键桩裂隙区域最大并受根键位置影响明显,其对水平荷载的抵抗能力最好。

进一步对不同荷载下裂隙面积进行计算,通过定义裂隙率 η 对裂隙发展进行定量描述, η 的表达式为

$$\eta = \frac{a}{(R^2 - r^2)\pi}, \quad (3)$$

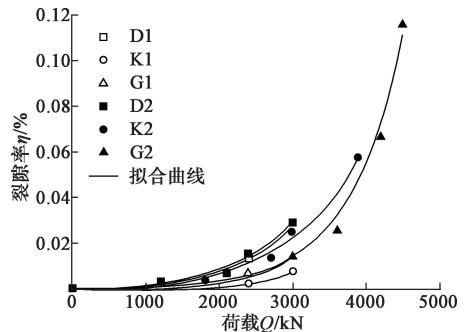
式中, a 为裂隙面积, R 为所取土体半径, 本文取 $R = 4r$, r 为桩体半径。

通过对 η 与 Q 的关系进行拟合发现, 不同桩型土体裂隙随荷载的发展拟合曲线如图 6 所示, 均表现为指数函数形式, 即

$$\eta = Ae^{\frac{Q}{B}} + C, \quad (4)$$

式中, A, B, C 为根据试验数据得到的拟合参数。

由图 6 可知, 桩周土体裂隙率均随荷载的增加而增加。竖向荷载作用下, 裂隙率大小关系为等截面桩 > 根键桩 > 扩底桩; 而联合荷载时, 裂隙率大小关系为等截面桩 > 扩底桩 > 根键桩。等截面桩与根键桩两种加载模式联合加载裂隙仅略高于竖向荷载, 而扩底桩在两种加载模式下有明显差异。其原因主要是竖向荷载作用时扩底桩由于天气较冷表层形成冻土抗剪强度大幅增加, 裂隙发展受到抑制, 细小裂隙无法形成; 而当水平荷载引入后, 土体受剪的同时还受拉力作用, 由于冻土破坏具有流变性以及脆性特点, 受拉裂隙的宽度和长度显然会大于正常状态下的黄土, 由此导致裂隙率差异巨大。这点从图 6 裂隙宽度的变化中也可以得到佐证, 且三桩极限状态下裂隙率分别为 0.029%, 0.057%, 0.115%, 变截面桩相较于等截面桩裂隙率大幅提高, 其中根键桩提高效果尤为明显。

图 6 Q - η 拟合曲线Fig. 6 Fitting curves of Q - η

综上所述, 裂隙率的发展与承载能力密切相关, 同荷载下裂隙率越大则承载能力越小, 极限荷载下裂隙

率越大则对土体承载能力利用越充分, 且相同试验条件下, 水平荷载的引入虽明显改变了裂隙发展形式, 但裂隙率大小并未有明显改变, 这与上文承载能力的变化情况相对应。

3 优化设计分析

3.1 有限元模型

模型试桩采用弹性模型, 土体为 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型; 桩土接触面的设置中, 切向接触为“罚”接触, 设置摩擦系数为 0.49, 弹性最大滑移根据现有研究资料^[1]取 0~2 m 为 5 mm, 2~5 m 为 4 mm, 5~10 m 为 3 mm; 法向为硬接触; 模型网格划分采用六面体网格; 通过位移控制的方法对模型加载。

模型桩桩长、直径、根键尺寸等基本信息均与现场试验相同, 三维模型如图 7 所示; 土体模型半径为 20 m, 厚度为 20 m, 土层共分为两层, 第一层厚度为 2 m, 第二层为 18 m。具体物理力学参数如表 4 所示, 模拟参数均通过对现场试验所得承载力进行反算得到验证, 承载力误差在 10%~15%, 因篇幅所限不再赘述。

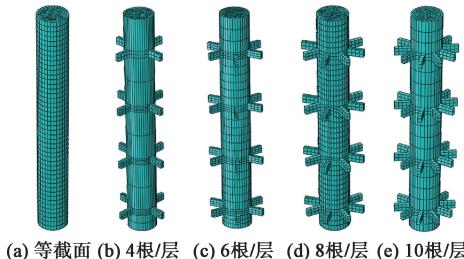


图 7 根键桩计算模型

Fig. 7 Models for root piles

表 4 桩体与土体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of piles and soil

| 材料 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ | 密度 $\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
|-----|------------------------|--------------|--|-----------------------|----------------------------|
| 桩 | 3×10^4 | 0.15 | 2.45 | — | — |
| 土 1 | 6 | 0.30 | 1.40 | 23 | 20 |
| 土 2 | 15 | 0.30 | 1.60 | 23 | 20 |

3.2 根键密度对承载力的影响

图 8 为试桩桩顶位移达到 60 mm 时桩周土体竖向应力云图(其中等截面桩在位移达到 27 mm 时已进入破坏状态), 根键的植入使桩周土体承载力得到了显著的发挥, 并且随着根键密度的增加, 根键对桩周土体应力场的影响范围也显著扩大, 但根键附近最大应力随着根键密度的增加总体呈降低趋势。

进一步以第二层根键为例加以说明, 图 8(b)~(e) 变截面处最大应力依次为: 544.1, 475, 388.3, 356.6 kPa; 6, 8, 10 根/层试桩最大应力分别为 4 根/层的 87.3%, 71.4%, 65.5%。可见根键截面积的增加

对桩周土体应力分散以及弱化应力集中具有显著效果, 但是这种效果并非随着密度的增加而持续线性增长, 因此尚需对桩基经济效益与承载能力的优化设计进行探讨。

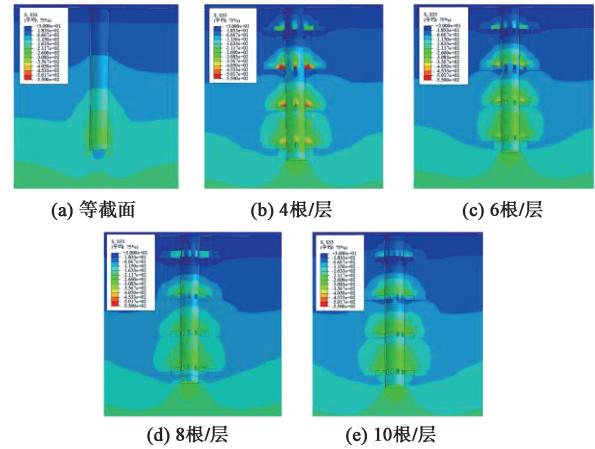


图 8 桩周土体竖向应力云图

Fig. 8 Stress contours of soil

表 5 为模型桩在位移达到 60 mm 时的极限承载力。通过式(5), (6) 将不同密度根键桩承载力提升效果绘制于图 9。由图 9 可知: 当 $\alpha < 0.3$ 时, 根键承载力随截面积的增加而快速增长; 而当 $\alpha > 0.3$ 后, 承载力随截面积的增长稍有回落。说明过密的根键布置使土体整体性遭到破坏, 对基础承载力提升具有反作用, 工程价值被严重削弱。而根据现有研究数据^[2-3] 表明, 根键截面积比 α 绝大多数处于 0.1~0.3 范围内, 虽然在 $\alpha < 0.1$ 时, 根键也具有一定承载潜力, 但是根键密度过小, 并不具备工程意义。综上所述, 对于有较高承载力需求或土质较差地区基础, 可将 α 设置在 0.3 左右, 以达到经济合理的设计目的, 而对于一般基础, α 可设置在 0.1~0.3 之间, 但不宜低于 0.1。

表 5 模型桩极限承载力

Table 5 Ultimate bearing capacities of model piles (kN)

| 等截面 | 4 根/层 | 6 根/层 | 8 根/层 | 10 根/层 |
|------|-------|-------|-------|--------|
| 2800 | 4280 | 4700 | 5290 | 5050 |

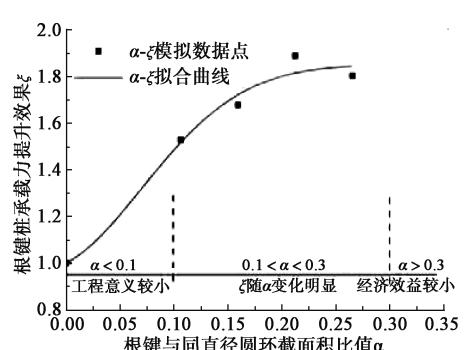


图 9 根键桩承载力随根键截面积的变化曲线

Fig. 9 Curves of bearing capacity of root piles with sectional area ratio of root key to pile

$$\xi = \frac{Q}{Q_D} \quad , \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{nbl}{(l^2 - r^2)\pi} \quad , \quad (6)$$

式中, Q_D 为等截面桩极限承载力, n 为根键数, b, l 分别为根键厚度与长度, r 为桩身半径。

4 结 论

(1) 相同尺寸条件下, 根键桩承载能力最高, 可充分满足掏挖基础工程建设需求, 同时多层根键的植入提高了基础稳定性, 抑制了基础位移, 更适用于复杂荷载工况以及对位移有严格要求的建筑物基础, 且根键桩单位体积材料承载能力更高, 分别为扩底桩与等截面桩的 1.15 与 1.64 倍, 根键桩使材料承载力进一步发挥的同时又达到了经济节约的目的。

(2) 试验条件下, 桩周土体的裂隙率随荷载的发展规律不受加载方式与桩型的影响, 均服从指数分布, 相同荷载下, 裂隙率越高则承载能力越低, 极限荷载下, 裂隙率越高则对土体承载能力发挥越充分。

(3) 在合理范围内提高根键密度(截面积)有利于降低根键周围土压力, 防止基础过早发生塑性破坏, 根据本文研究成果并结合实际工程经验, 对于有较高承载力需求(位移控制严格)或土质较差地区基础, 可将 α (根键与相同直径圆环截面积比值)设置在 0.3 左右, 以达到经济合理的设计目的, 而对于一般基础, α 可设置在 0.1~0.3 之间, 但不宜低于 0.1。

参考文献:

- [1] 刘建平. 等截面抗拔单桩承载性状研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. (LIU Jian-ping. Study on Capacity Behavior of Single Uplift Piles[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006. (in Chinese))
- [2] 殷永高. 根式基础及根式锚碇方案构思[J]. 公路, 2007, 52(2): 46~49. (YIN Yong-gao. Scheme conception of root foundation and anchor block[J]. High Way, 2007, 52(2): 46~49. (in Chinese))
- [3] 龚维明, 有智慧, 殷永高, 等. 根式沉井基础群井效率系数现场水平试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 89~95. (GONG Wei-ming, YOU Zhi-hui, YIN Yong-gao, et al. Field test of lateral group efficiency of root caisson foundations[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 89~95. (in Chinese))

- [4] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 517~520. (QIAN De-ling. A study of compression and extraction resistance behavior of squeezed supporting disk piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 517~520. (in Chinese))
- [5] 龚维明, 王磊, 殷永高. 厚覆盖土层地区根式基础应用与试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 69~74. (GONG Wei-ming, WANG Lei, YIN Yong-gao. Applied and experimental study on the root foundation in the thick covering stratum region[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 69~74. (in Chinese))
- [6] 龚维明, 胡丰, 童小东, 等. 根式基础竖向承载性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1789~1795. (GONG Wei-ming, HU Feng, TONG Xiao-dong, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of root foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1789~1795. (in Chinese))
- [7] 张立奎, 章征, 殷永高. 根式沉井基础水平向荷载试验研究[J]. 桥梁建设, 2009, 39(3): 33~36. (ZHANG Li-kui, ZHANG Zheng, YIN Yong-gao. Horizontal load test study of root type caisson foundation [J]. Bridge Construction, 2009, 39(3): 33~36. (in Chinese))
- [8] 葛楠, 孙砚, 侯超群, 等. 砂土中根式抗拔桩模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 146~152. (GE Nan, SUN Yan, HOU Chao-qun, et al. Model experimental research on root uplift pile in sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 2019, 36(8): 146~152. (in Chinese))
- [9] 唐孟雄, 陈达. 基岩内抗拔桩极限承载力的计算方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 633~638. (TANG Meng-xiong, CHEN Da. A computational method of ultimate capacity of uplift piles in basement rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 633~638. (in Chinese))
- [10] 建筑桩基检测技术规范: DB37/T 5044—2015 [S]. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: DB37/T 5044-2015[S]. (in Chinese))
- [11] LEE C J, BOLTON M D, AL-TABBA A. Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations[J]. Géotechnique, 2002, 52(5): 325~335.

(编校: 明经平)