

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.010

根键布置方式对根式基础竖向承载性能的影响

纪厚强¹, 于炎成², 任伟新³, 殷永高²

(1. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518061)

摘要:文章通过现场试验和数值分析探讨根键布置方式对根式基础承载性能的影响;建立池州长江公路大桥根式基础的数值计算模型,与现场堆载试验得到的荷载-位移曲线进行对比,验证数值模型的正确性;通过分析桩顶荷载-位移曲线、桩身轴力和桩侧摩阻力,探讨根键水平布置方式、根键布置位置和相邻根键层间距对根式基础竖向承载性能的影响。结果表明:相比于传统桩基础,根键梅花形布置和等角度布置时,桩的承载力分别提高 65.28%、46.71%,根键能够增大桩侧摩阻力和减小桩端阻力;根键梅花形布置能够减弱应力重叠,充分发挥根键承载潜力;根键布置在下部时,相对于布置在上部和中部,桩的承载力分别提高 34.51%、14.69%,同时根键布置在下部能够减小桩端阻力;根键层间距较小时,根键端部形成环形剪切面,此时根键无法发挥作用,随着层间距增大,根键间相互影响逐渐减弱,根键趋近于独立承载。

关键词:根式基础;竖向承载性能;根键布置方式;现场试验;数值分析

中图分类号:U443.159

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)02-0204-08

Influence of roots arrangement on vertical bearing capacity of root piles

JI Houqiang¹, YU Yancheng², REN Weixin³, YIN Yonggao²

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China)

Abstract: This paper discusses the influence of roots arrangement on the vertical bearing capacity of root piles through field tests and numerical analysis. The numerical model of root piles for Chizhou Yangtze River Highway Bridge was established. Such a model was then verified by the load-displacement curves obtained from the field stacked load test. The effects of roots horizontal layout, roots position, and root layers spacing on the vertical bearing capacity of root piles were discussed with the verified numerical model by analyzing the load-displacement curves, axial force and shaft friction. The results show that the bearing capacities of roots staggered arrangement and non-staggered arrangement are improved by 65.28% and 46.71% compared with that of the traditional pile. Moreover, the roots can increase the shaft friction and reduce the end resistance of root piles. The bearing capacity of roots can be fully mobilized because roots staggered arrangement can reduce the overlap of stress. The bearing capacity of roots arranged at the lower section is improved by 34.51% and 14.69% compared with those of roots arranged at the upper and middle sections. Meanwhile, the end resistance can be reduced obviously when roots are arranged at the lower section. As the root layers spacing is small, the bearing capacity of roots cannot be mobilized because a cylindrical shear failure surface is formed at

收稿日期:2021-08-25;修回日期:2022-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778204);深圳市科技创新委员会资助项目(KQTD20180412181337494;ZDSYS20201020162400001)

作者简介:纪厚强(1985—),男,安徽金寨人,安徽省交通控股集团有限公司高级工程师;

任伟新(1960—),男,湖南长沙人,博士,深圳大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:renwx@szu.edu.cn;

殷永高(1960—),男,安徽枞阳人,合肥工业大学教授,博士生导师。

the end of roots. The interaction among roots decreases with the increase of root layers spacing, the roots tend to share the load independently.

Key words: root piles; vertical bearing capacity; roots arrangement; field test; numerical analysis

随着大跨度桥梁的发展,传统的桩基础在承载能力、工程量及应用范围等方面的局限性逐渐显现。国内外研究者先后提出挤扩支盘桩^[1-2]、扩底桩^[3-4]、竹节桩^[5-6]等异形桩基础。在前人的研究基础上,文献^[7-8]提出一种新型桩基础——根式基础,该基础根据仿生学原理,通过在传统桩基础侧壁设置根键,能够更好地调动周围土体参与承载,提高承载能力。有关根式基础的研究内容主要分为理论研究、试验研究及数值分析。文献^[9]基于双曲线函数提出土-根键的荷载传递模型,并推导建立一种多层土中根桩的非线性沉降简化计算方法,计算结果与现场试桩结果吻合良好;文献^[10]通过自平衡法对 2 个根式基础的承载性能进行测试,结果表明,相比于传统沉井基础,根式基础的竖向承载力提高 85%~115%;文献^[11]对根式基础进行室内试验研究,结果表明,布置 1 层根键和 5 层根键的极限承载力分别比无根键提高 13.54%、73.14%。从以上研究成果可以看出,与普通沉井基础相比,根式基础承载能力大大提高。而根键作为提高承载力的关键因素,如何合理布置根键成为研究的重点之一。文献^[12]采用数值分析的手段,研究根键角度对根式沉井基础水平承载性能的影响,结果表明,根键角度分布在 10°~30°时,根式基础水平承载性能最佳;文献^[13]通过数值分析研究根键分布深度对根式基础在水平荷载作用下承载性能的影响,结果显示,根键分布位置太浅或太深都不利于根式

基础水平承载性能的发挥,合理的根键位置才能发挥出根式基础的最大水平承载能力。

已有相关研究主要集中于根键布置方式对水平承载力的影响,关于根键布置方式对竖向承载能力的影响,详细系统的研究很少。本文首先对池州长江公路大桥现场试桩进行数值分析,通过对比荷载-位移曲线来验证数值模型的可靠性,然后分析根键水平布置方式、根键布置位置及根键层间距对根式基础竖向承载性能的影响,以期在实际工程中根键的合理布置提供依据和参考。

1 现场静载试验与数值分析验证

1.1 现场试验概况

现场根式基础堆载法试验位于池州长江公路大桥南岸引桥段,现场堆载试验图片如图 1 所示。根据现场钻孔勘探试验和室内土工试验,岩土体物理力学性能参数取值见表 1 所列。详细试验过程见荷载试验报告^[14]。



图 1 现场堆载试验图片

表 1 堆载现场岩土体物理力学性能参数取值

岩土体名称	厚度/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比	变形模量/ MPa	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa
粉质黏土	4.25	1 860	13.2	5.9	0.33	5.03	4.93	1.89
淤泥质粉质黏土	5.60	1 980	13.8	6.7	0.35	5.22	5.80	1.93
粉细砂	30.00	2 000	7.0	30.0	0.30	71.40	59.50	27.46
中粗砂	3.40	2 150	5.0	33.0	0.28	79.60	60.30	31.09
卵石土	4.30	2 250	1.0	36.0	0.27	106.00	76.81	41.73
圆砾土	7.50	2 300	1.0	38.0	0.25	128.00	85.33	51.20
中风化泥质粉砂岩	52.14	2 450	50.0	25.0	0.25	510.00	340.00	204.00

试桩为外径 1.5 m 的钻孔灌注根式桩,桩顶标高为+11.2 m,桩长为 45.5 m,沿桩身从上至下布置 20 层根键,第 1 层根键距离桩顶 10 m,每

层 4 根,相邻层根键中心间距为 1.3 m,呈梅花型布置,根键采用矩形断面,尺寸为 16 cm×16 cm×50 cm(根键顶入土中 35 cm),试桩及根键示意图

如图 2 所示(单位为 cm)。

根式基础的密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.20,变形模量为 30.00 GPa,体积模量为 16.67 GPa,剪切模量为 12.50 GPa。

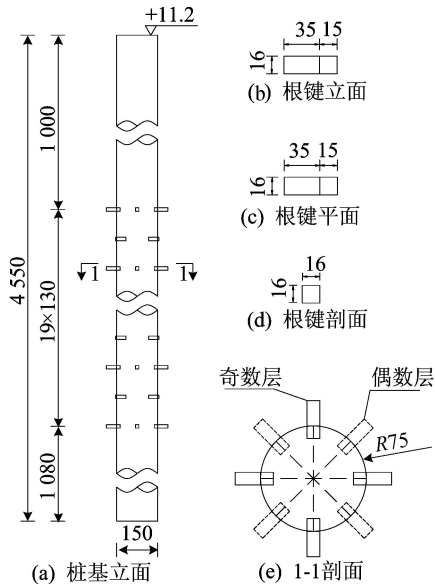


图 2 试桩根键示意图

1.2 数值分析

1.2.1 数值模型的建立与边界条件

数值分析采用 FLAC 3D 有限差分软件。根据相关研究^[15]和圣维南原理,在距离桩轴 $20R$ (R 为桩的半径)处和桩底的土体中,桩传递至土体中的荷载所引起的土体剪应变可以忽略不计,计算土体尺寸取 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 91\text{ m}$ 。模型桩尺寸与现场试桩保持一致。对桩体和附近土体网格进行加密,共 168 932 个节点和 165 024 个单元,数值模型如图 3 所示(单位为 m)。

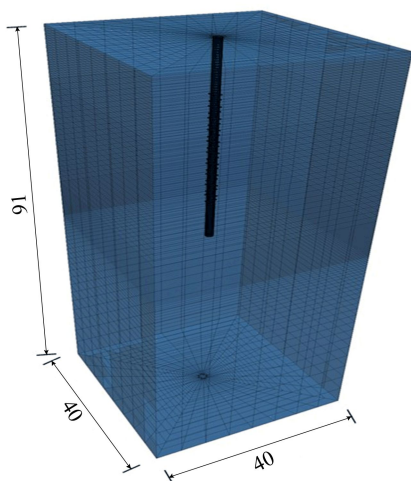


图 3 试桩数值模型示意图

根据实际情况,固定模型四周和底面法向位移,土体表面设置为自由面,允许沉降产生。

1.2.2 本构模型选取与初始地应力

混凝土强度远远大于土体强度,试桩达到破坏往往是土体破坏引起的,故数值分析将土体假设为理想弹塑性,采用 Mohr-Coulomb 模型^[16];桩身与根键假设为弹性,采用 Elastic 模型。

初始地应力场通过 2 步获得,首先将模型全部设置为土体的相关参数和本构模型,平衡后将桩体和根键赋值为混凝土的材料参数和本构模型,求解获得施工完成后的地应力场。

1.2.3 计算参数选取

岩土体参数由现场勘探和室内土工试验测得,表 1 中给出了参数具体取值,其中岩土体的体积模量和剪切模量由变形模量计算得到,计算公式为:

$$K = E_0 / [3(1 - 2\nu)] \quad (1)$$

$$G = E_0 / [2(1 + \nu)] \quad (2)$$

其中: G 为剪切模量; K 为体积模量; E_0 为变形模量; ν 为泊松比。

桩土之间的摩擦性质通过在桩体之间设置的接触面来实现。在桩底与土、桩侧与土及根键与土之间设置 3 种独立的接触面,这种建立方式更接近于桩的实际受力。接触面参数取值见表 2 所列。黏聚力和内摩擦角取相邻土层的 0.6 倍,法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 计算公式^[15]为:

$$K_n = K_s = 10 \max [(K + 4G/3) / \Delta Z_{\min}] \quad (3)$$

其中, ΔZ_{\min} 为周边单元体法向最小宽度。

表 2 接触面参数取值

土层名称	厚度/ m	法向刚度/ GPa	切向刚度/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
粉质黏土	4.25	0.37	0.37	3.54	7.92
淤泥质	5.60	0.42	0.42	4.02	8.28
粉质黏土					
粉细砂	30.00	4.81	4.81	18.00	4.20
中粗砂	3.40	5.09	5.09	19.80	3.00
卵石土	4.30	6.62	6.62	21.60	0.60

1.3 结果对比

按照堆载实际工况在模型桩顶施加均布荷载,监测桩顶竖向位移,待沉降稳定基本维持不变后再施加下一级荷载。现场堆载和数值分析得到的桩顶竖向荷载-位移曲线对比如图 4 所示。从图 4 可以看出:现场试桩荷载为 20 MN 时竖向沉降为 19.92 mm,试桩具有足够的承载力;2 条曲线变化趋势基本一致,表明采用的数值分析方法

是合理和可靠的,可以用来分析根键布置方式对根式基础竖向承载性能的影响。

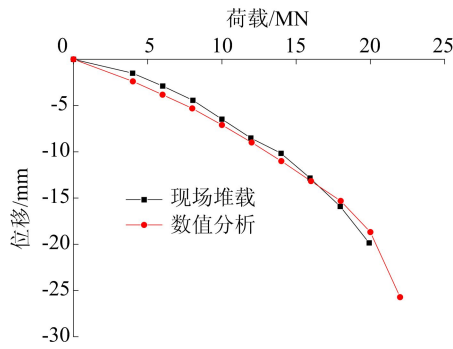


图 4 桩顶荷载-位移曲线试验与数值分析对比

2 根键布置方案设计

在根式基础的设计过程中,需要考虑很多因素,如何布置根键使其竖向承载性能得到充分发挥是重点和难点。本文主要探讨根键水平布置方式、根键布置位置和根键层间距对根式基础竖向承载性能的影响。数值分析中基础尺寸基本参数如下:基础桩身长度 $H=36$ m(桩顶标高为 0 m,桩底标高为 -36 m),桩身直径 $D=2.5$ m,根键外露桩体部分长度为 1 m,根键截面形状为正方形,边长 $h=0.5$ m,根键层数 $n=10$,每层根键数 $m=4$ 。根键布置方案如图 5 所示。

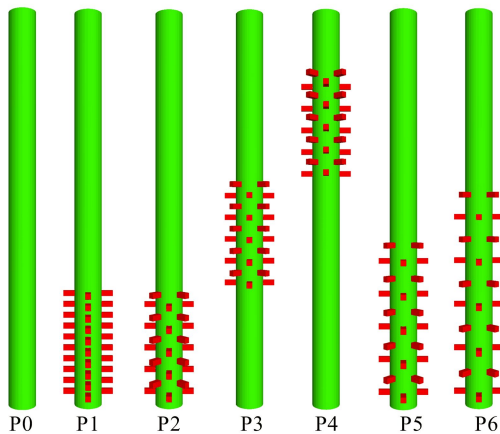


图 5 根键布置方案

(1) 根键水平布置方式设为 P1(非梅花型)、P2(梅花型)2 种,最底层根键距桩底 1 m,根键层间距为 1 m。

(2) 根键布置位置设为 P2(根键在下部)、P3(根键在中部)、P4(根键在上部)3 种,根键层间距为 1 m。

(3) 根键层间距设为 P2 ($2h$)、P5 ($3h$)、P6($4h$)3 种,最底层根键距桩底 1 m。

同时设置 P0 无根键基础进行对比分析。

为避免土层过多,无法准确分析根键布置方式对竖向承载性能的影响,分析中采用控制变量法对土层进行简化,采用长江流域分布最广的粉砂来探讨根键水平布置方式、根键布置位置和根键层间距对承载性能的影响,粉砂物理力学性能参数取值见表 3 所列。

表 3 粉砂物理力学性能参数取值

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	泊松比	变形模量/ MPa
取值	1 960	6.0	32.0	0.30	42.00

3 计算结果与分析

3.1 根键水平布置方式的影响

为了研究根键的作用和根键水平布置方式对根式基础竖向承载性能的影响,分别对 P0、P1 和 P2 3 种方案进行计算分析,三者的荷载-位移曲线对比如图 6 所示。

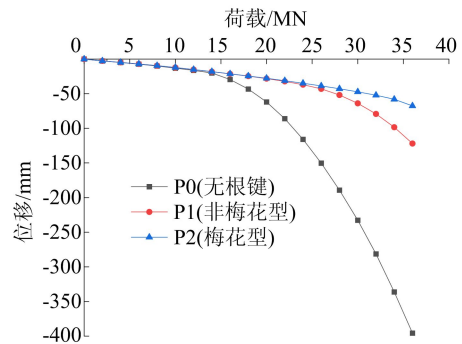


图 6 根键不同水平布置方式下桩顶荷载-位移曲线对比

从图 6 可以看出,3 种方案的荷载-位移曲线均为缓变型,未出现明显拐点。当竖向荷载较小时,三者的荷载-位移曲线基本重合。当荷载超过 14 MN 时,根式基础由于根键的存在,在相同竖向荷载作用下,竖向位移明显小于无根键桩基础。对应于基础顶部竖向位移为 50 mm 时,P0 承载力为 18.836 MN,P1、P2 承载力分别为 27.635、31.133 MN,相比于 P0 分别提高 46.71%、65.28%。由此可以看出,由于根键的存在,根式基础竖向承载力显著提高;相比于根键等角度非梅花型水平布置,相邻层根键呈 45° 梅花型布置有助于根式基础竖向承载力的提高,且随着竖向荷载的增大,这种提高的效果愈加明显。

桩顶位移 50 mm 时 P1、P2 的根键最大主应力云图如图 7 所示。

从图 7 可以看出:非梅花型布置时只有最底层根键与桩身连接处应力较大,从而分担了较大的荷载,而上面几层根键由于重叠作用无法发挥其承载潜力;梅花型布置时,根键与桩身连接处应力均较大,根键下土体中应力重叠范围较小,使得根键能够充分与土相互作用,承担上部传下的荷载。

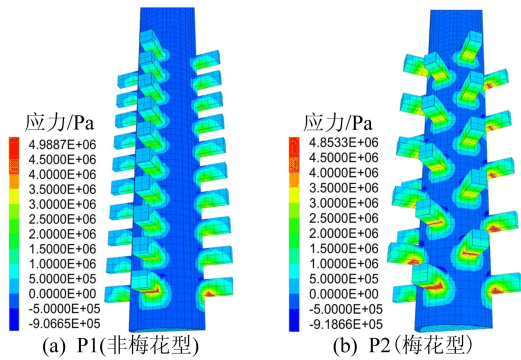


图 7 桩顶位移 50 mm 时 P1、P2 根键最大主应力云图

3.2 根键布置位置的影响

由 3.1 节分析可知,相邻层根键呈 45°梅花型布置与等角度布置相比,有利于竖向承载力的提高,故在以后的模型中根键均采用梅花型布置。为了研究根键布置位置对根式基础竖向承载性能的影响,在 3.1 节模拟的基础上,对 P3、P4 2 种方案进行计算,并与 P2 进行对比分析。

3.2.1 桩顶荷载-位移曲线

根键不同布置位置下桩顶荷载-位移曲线对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出,P2、P3 和 P4 的曲线均为缓变型,竖向承载力较 P0 均有显著提高。对应于基础顶部竖向位移为 50 mm, P0 的承载力为 18.836 MN; P4、P3 和 P2 的承载力分别为 23.146、27.145、31.133 MN,相比于 P0 分别提高 22.89%、44.11%、65.28%,P2 相对 P4、P3 分别提高 34.51%、14.69%。由此可见,P2 的竖向承载力最大,即根键布置在桩身下部位置时,竖向承载力最大,这是由于随着深度加大,土体承载能力和抗剪强度提高,根键发挥作用愈加明显。

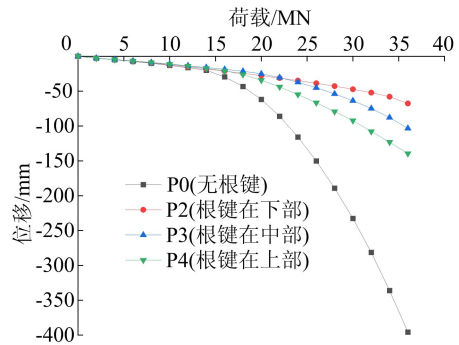


图 8 根键不同布置位置下桩顶荷载-位移曲线对比

3.2.2 桩身轴力

3 种根键布置位置下桩身轴力变化曲线如图 9 所示。

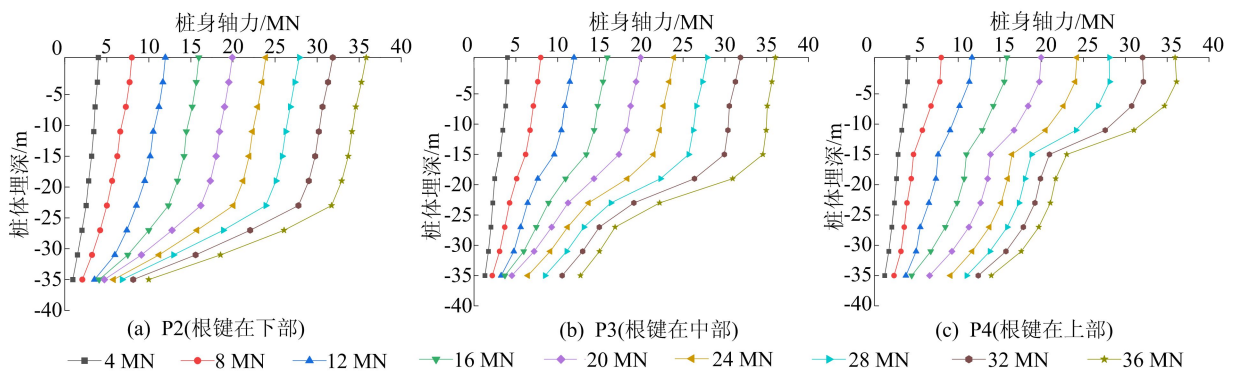


图 9 3 种根键布置位置下桩身轴力变化曲线

从图 9 可以看出,随着荷载增大,桩身轴力逐渐增大,根式基础桩身轴力传递情况与根键的分布位置有关,轴力传递曲线在根键分布区域发生急剧变化,曲线斜率明显变化,轴力降低速率显著增加,其损耗部分的轴力由根键承担,并由根键传递到周围土体中,从而使得根式基础的端阻力明

显降低,桩顶荷载越大,根键作用效果越明显,且随着根键布置深度增加,相同荷载下桩端阻力变小,这是根式基础的承载特性,也是根式基础提高承载力的原因所在。

3.2.3 桩侧摩阻力

桩侧摩阻力将竖向荷载以剪应力的形式传递

给周围土体。桩侧摩阻力分布情况可以通过桩身轴力传递曲线得到。以每 4 m 作为 1 段计算各桩段的桩侧摩阻力,计算公式为:

$$f_{si} = \Delta Q / (u \Delta l) \quad (4)$$

其中: f_{si} 为第 i 段桩侧摩阻力(含根键段桩身按传统桩基础计算); ΔQ 为某桩段上、下截面的轴力差值; u 为桩截面周长; Δl 为每段桩长。

3 种根键布置位置下根式基础的桩侧摩阻力分布如图 10 所示。需要注意的是,对于根式基础,其根键分布区的侧摩阻力是从广义上而言的,即包括桩身侧摩阻力、根键的侧摩阻力及根键的端阻

力。从图 10 可以看出,由于根键的作用,根式基础在根键分布区域的桩侧摩阻力显著增加,最大可达 251 kPa,此时根键承担较大的竖向荷载,布置根键段桩身轴力下降较快。根键布置在下部时摩阻力发挥最充分,由于下部土体压实度较高,土体力学性能更好,根键的承载效果更好,对桩侧摩阻力的提高更加显著,从而使得根式基础整体的承载性能得到提高。在竖向荷载较小时,根键尚未完全发挥作用,根键分布区域的桩侧摩阻力增加不明显,随着竖向荷载增加,根键的作用逐渐得到发挥,根键分布区域桩侧摩阻力的增加更加显著。

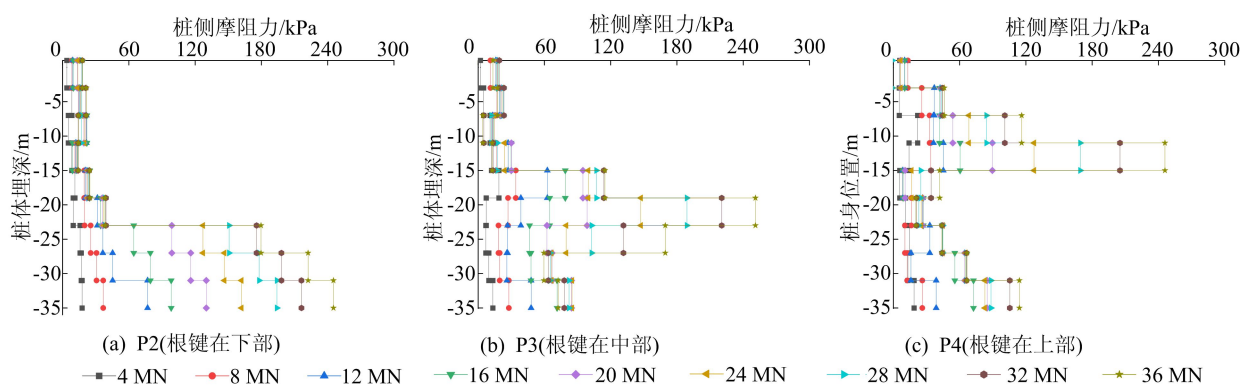


图 10 3 种根键布置位置下桩侧摩阻力变化曲线

3.3 根键层间距的影响

根据前述分析,在根键层间距不变的情况下,根键以梅花型布置方式布置在桩身下部时,根式基础的竖向承载力最大。为了进一步研究根键层间距对根式基础竖向承载性能的影响,对 P5 与 P6 2 种方案进行计算,并与 P2、P0 进行对比分析。

3.3.1 桩顶荷载-位移曲线与桩身轴力

不同根键层间距下荷载-位移曲线对比如图 11 所示。

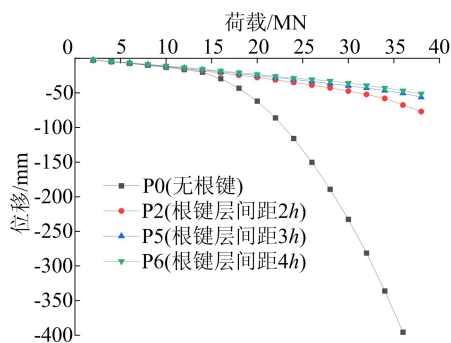


图 11 不同根键层间距下桩顶荷载-位移曲线对比

从图 11 可以看出,P2、P5 和 P6 的荷载-位移曲线均为缓变型,且较 P0 均有显著提升。对应于基础顶部竖向位移 50 mm, P0 的承载力为

18.836 MN; P2、P5 和 P6 的承载力分别为 31.133、35.743、37.442 MN,相比于 P0 分别提高 65.28%、89.76%、98.78%。由此可知,随着根键层间距增加,根式基础的承载力提高。根键层间距由 $2h$ 增加到 $3h$,根式基础的承载力提高 14.81%,提升幅度较大;而从 $3h$ 增加到 $4h$,承载力仅提升 4.75%,增幅较小,因此根键层间距并不是越大越好,存在一个最优值。

3 种根键层间距下桩身轴力变化曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出,随着荷载增大,桩身轴力逐渐增大,根键层间距的改变对桩身轴力传递有一定的影响。根键层间距为 $3h$ 时,相对于根键层间距 $2h$,其端阻力明显减小,桩身轴力在根键分布区域的下降速度较快;根键层间距为 $4h$ 时,相较于根键层间距 $3h$,根键分布区域的桩身轴力下降速度变化不明显。由此可见,在根键层间距较小时,增大根键层间距可以更好发挥根键的承载作用,从而提高根式基础的竖向承载能力;在层间距较大时,继续增加层间距,承载力提升效果不大,且地基上部土体力学性能一般较差,层间距过大会使较大一部分根键分布在上部土体中,这也会造成根式基础的竖向承载能力降低。

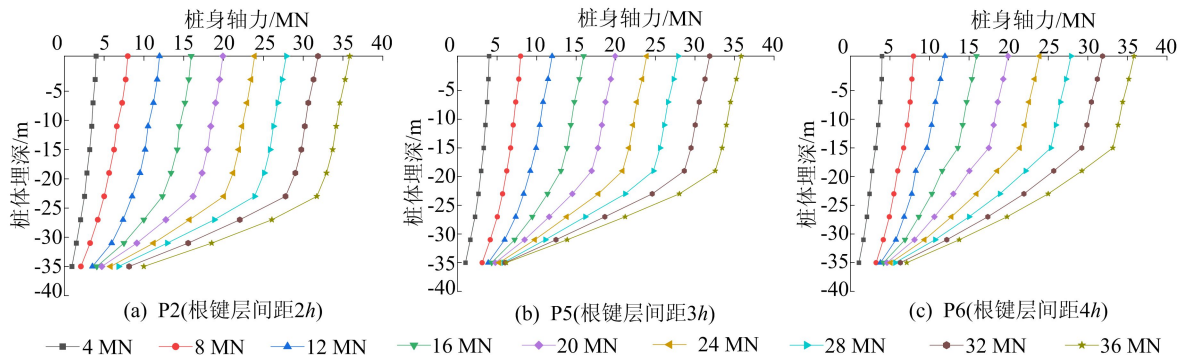


图 12 3 种根键层间距下桩身轴力变化曲线

3.3.2 桩侧摩阻力

3 种根键层间距下桩侧摩擦阻力变化曲线如图 13 所示。

从图 13 可以看出,根键层间距的改变,对桩身侧摩阻力的分布影响较大。

随着根键层间距的增大,根键分布区的桩侧摩阻力之和增加,层间距为 2h 时,侧摩阻力在桩身 23~35 m 范围内较大,而层间距为 4h 时,侧摩阻力在桩身 15~35 m 范围内均较大,布置根键段侧摩阻力得到充分发挥。

对于根式基础,其根键分布区域的侧摩阻力包括桩侧摩阻力、根键侧摩阻力及根键端承力。

在根键层间距较小时,相邻层根键之间的应力叠加效应较大,根键之间的土体由于受到附加压应力的作用,会产生较大附加沉降,对于压缩性较高的土层,会造成局部根键周围土体产生拉裂隙,削弱根键与土体的摩阻力作用。这时,可以近似将根键及根键之间的土体视为整体,此时桩顶竖向荷载主要由与根键外径相同的外包圆柱面产生的摩阻力、最下层根键的端阻力及基础端承力共同承担,不利于根键作用的发挥。

而在根键层间距较大时,根键的应力叠加效应减弱,每层根键都能充分发挥作用,有利于根式基础承载力的提高。

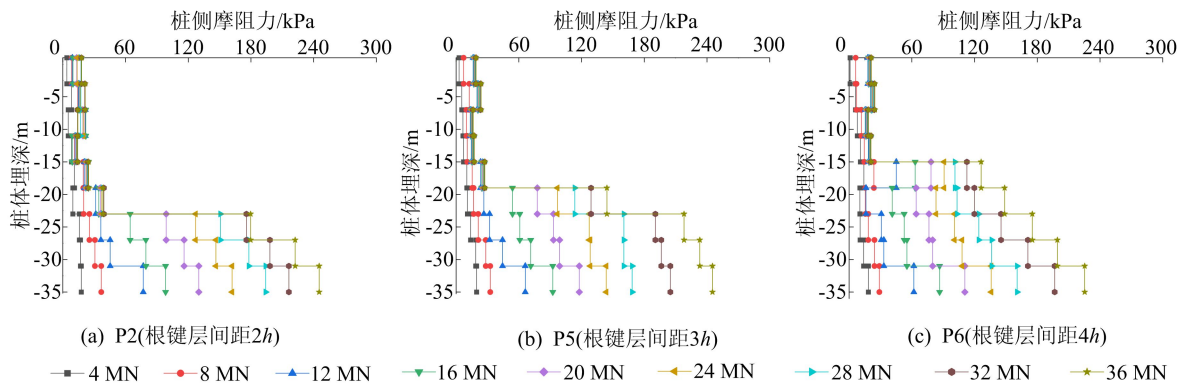


图 13 3 种根键层间距下桩侧摩阻力变化曲线

桩顶位移为 50 mm 时,根键层间距分别为 2h、3h、4h 下根式基础与土体位移云图如图 14 所示。

从图 14 可以看出,当根键层间距为 2h 时,根键间土体位移与根键位移基本一致,根键间的土体随根键整体下沉,布置根键段的侧摩阻力来自根键端部形成的环形剪切面上的剪切力,此时根键无法与周围土体产生相对位移,根键的承载能力无法发挥。

从图 14 还可以看出,随着根键层间距增大到

3h,土体中应力重叠逐渐减弱,根键与周围土体的咬合作用逐渐增强,但根键之间仍然存在相互影响,致使根键的承载能力不能完全发挥;当根键层间距为 4h 时,从位移云图可以看出,根键位移与周围土体位移存在明显差异,根键逐渐趋近于独立承担荷载,根键间相互影响几乎可以忽略。

结合荷载-位移曲线、桩身轴力和桩侧摩阻力分析结果,建议在实际工程中,为了使根键的承载能力能够充分发挥,根键层间距不应小于 4 倍根键高度。

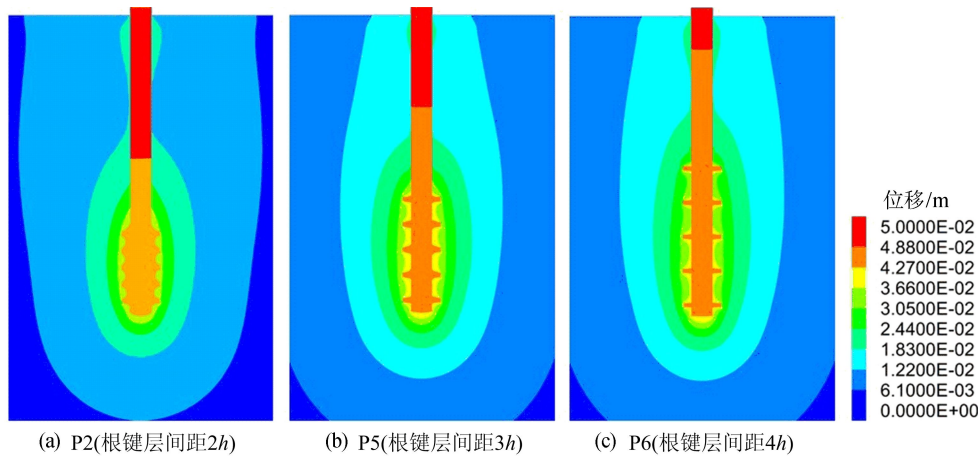


图 14 桩顶位移 50 mm 时 3 种根键层间距下根式基础与土体位移云图

4 结 论

(1) 现场静载试验结果表明,荷载为 20 MN 时,桩顶竖向沉降为 19.92 mm,试桩具有足够的承载能力;堆载和数值分析得到的桩顶荷载-位移曲线吻合较好,表明数值分析方法是合理和可靠的。

(2) 桩顶竖向沉降 50 mm 时,根键梅花型布置和等角度布置的承载力相对于无根键桩基础分别提高 65.28%、46.71%,可见根键作用明显。根键最大主应力云图显示,梅花型布置减弱了应力重叠,能够更好发挥根键的承载潜力。

(3) 根键布置在桩体下部时的承载力相对于布置在上部和中部分别提高 34.51%、14.69%,这是由于下部土体抗剪强度较高,根键和土体的咬合力更高;同时根键布置在下部时能明显减小桩底轴力,允许情况下根键应尽量向下布置。

(4) 根键层间距由 2h 增大到 3h,承载力提高 14.81%,由 3h 增大到 4h 时仅提高 4.75%;层间距较小时,根键间土与根键形成整体,由根键端部形成的环形剪切面受力,随着层间距增大,根键间相互影响逐渐减弱,根键逐渐趋近于独立承载。

[参 考 文 献]

[1] ZHANG M X, XU P, CUI W J, et al. Bearing behavior and failure mechanism of squeezed branch piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 935-946.

[2] MA H W, WU Y Y, TONG Y, et al. Research on bearing theory of squeezed branch pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 6637261.

[3] TAFRESHI S N M, JAVADI S, DAWSON A R. Influence of geocell reinforcement on uplift response of belled piles [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(3): 513-528.

[4] BHARATHI M, DUBEY R N. Dynamic lateral response of

under-reamed vertical and batter piles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 910-920.

- [5] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Shaft capacity of the pre-bored grouted planted pile in dense sand [J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(5): 1227-1239.
- [6] YU J L, ZHOU J J, GONG X N, et al. Centrifuge study on behavior of rigid pile composite foundation under embankment in soft soil [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(6): 1909-1921.
- [7] 殷永高, 孙敦华, 龚维明. 根式基础承载特性的试验与数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 162-169.
- [8] 殷永高. 根式基础及根式锚碇方案构思[J]. 公路, 2007(2): 46-49.
- [9] LUO X G, REN W X, YIN Y G, et al. A modified hyperbolicity-based load transfer model for nonlinear settlement analysis of root piles in multilayered soils[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(1): 303-317.
- [10] 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.
- [11] 孙砚, 葛楠, 侯超群, 等. 根式基础竖向承载力模型试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(9): 1251-1257.
- [12] 付守印, 黄挺. 根键角度对根式沉井水平承载力影响的数值分析[J]. 江苏建筑, 2015(2): 51-53.
- [13] 木林隆, 黄茂松, 龚维明. 水平荷载作用下根式基础受力特性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 287-292.
- [14] 池州长江公路大桥科研试桩工程[R]. 南京: 南京东大自平衡桩基检测有限公司, 2015.
- [15] 张明远, 黎生南, 彭文韬, 等. 基于 FLAC^{3D} 的超长直径钢管桩竖向承载特性模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2856-2860.
- [16] ZHOU J J, GONG X N, WANG K H, et al. Testing and modeling the behavior of pre-bored grouting planted piles under compression and tension [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(5): 1061-1075.

(责任编辑 张淑艳)