

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.019

地下组合结构反力装置的大直径桩基测试技术

殷永高^{1,2}, 郑诗文³, 李梦晨¹, 郑鑫¹, 奚邦禄¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 3. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:文章利用自平衡原理,结合静载检测技术提出一种新的桩基检测技术。利用有限差分软件 FLAC3D 对反力装置进行数值模拟,通过数值模拟探讨反力装置的承载特性,分析根式沉井抗拔承载特性。研究结果表明:地下组合结构反力装置以静载试验的方式实现了大直径桩的承载力检测,提高并有效确保大直径桩承载力检测的准确性。堆载集中地表区域,具有更高的安全性和便捷性。增加根键布置对于提升沉井抗拔承载力具有显著效果,利用根式沉井作为反力装置提供承载力具有优越性。处在受压状态下的根式沉井的极限抗拔承载力大于非受压状态下根式沉井极限承载力与所施加的荷载之和,其装置起到良好的效果,极大发挥了周围土体的作用。

关键词:桩基检测;自平衡;数值分析;极限承载力计算

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)04-0549-06

Test technology of large-diameter pile foundation of reaction device of underground composite structure

YIN Yonggao^{1,2}, ZHENG Shiwen³, LI Mengchen¹, ZHENG Xin¹, XI Banglu¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China; 3. Anhui Expressway Engineering Test and Research Center Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: A new pile foundation detection technology is proposed based on the principle of self-balancing combined with the static load detection technology. The finite difference software FLAC3D was used to simulate the reaction device in order to analyze the bearing characteristics of the reaction device and the uplift bearing characteristics of root-caisson. The results show that the reaction device of the underground composite structure realizes the bearing capacity detection of large-diameter piles by static load test, which improves and effectively ensures the accuracy of large-diameter pile bearing capacity detection. Stacking concentrated surface areas have greater safety and convenience. Increasing the root bond arrangement has a significant effect on improving the uplift bearing capacity of the caisson, and the use of root-caisson as a reaction device to provide bearing capacity is superior. The ultimate uplift bearing capacity of root-caisson in the pressurized state is greater than the sum of the ultimate bearing capacity of the root-caisson and the applied load in the non-pressurized state, which has a good effect and greatly plays the role of the surrounding soil.

Key words: pile foundation detection; self-balancing; numerical analysis; ultimate bearing capacity calculation

随着高速铁路、大跨度桥梁等大型工程的建设,对基础的要求越来越高,而桩基作为运用最广

泛的基础,其设计也向大直径、长桩长、高承载力的方向发展。但相较于其在工程中的使用,大直

收稿日期:2023-04-07;修回日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52209127);安徽省交通控股集团有限公司科技资助项目(JKKJ-2020-31)

作者简介:殷永高(1960—),男,安徽枞阳人,合肥工业大学教授,博士生导师。

径桩的测试技术及理论研究稍显滞后。目前桩基承载力检测主要分为静力检测和动力检测。文献[1]介绍静载试验检测是目前检测单桩极限承载力最为准确可靠的检测方法,同时是评定某种检测方法是否成熟可行的依据,主要是以静载试验检测成果来对比误差的大小来评定的。目前桩基的竖向静载试验的加载方法主要有堆载法、锚桩法及自平衡法。文献[2]在广东番禺市高层建筑工程中,采用常规竖向静载试验通过在一根直径 1.4 m、长 40 m 的大直径桩顶堆加大量混凝土块堆载用以提供反力,试验时混凝土块高达 11 m,单桩极限承载力高达 2 106 kN;文献[3]介绍了广东省珠海机场改扩建项目所采用的钢结构静载试验平台,静载检测突破 5 000 t,但并未从本质上改变传统静载的安全性,依然是搭设平台进行堆载,同时还需对周边土体进行压实;文献[4]采用一种新型反力横梁加载装置,该装置是对传统的反力装置的一种改进和优化,运用 2 根横梁,可适用于大吨位的抗拔锚桩,同时巧妙解决了加载过程中中心点不好控制的问题,但锚桩钢筋的连接方式为焊接,拆卸时要对钢筋进行切割,耗费时间;文献[5]采用自平衡法对南京新三汊河大桥中桩基承载力进行检测,描述了该方法在桥梁工程桩基础的应用前景;文献[6]开展软土地区根键桩与普通桩在软土地区的现场试验,对比荷载沉降曲线与桩身轴力,发现根键存在使桩的竖向承载力提高 33.33%,相同荷载下能有效减小桩身沉降,同时在根键范围内带根键的桩的轴力衰减大于普通桩;文献[7]对比普通沉井、顶入根键、压浆后根式沉井 3 种工况下承载力分担比的变化情况,发现布置根键能够提高侧摩阻力占总承载力的比例,根键顶入后侧摩阻力占总承载力的比例提高 28.7%,压浆后侧摩阻力再提升 4%,井壁后注浆能够进一步提高变形性能与承载能力。

对于大吨位基桩的承载力试验,采用传统的堆重静载荷试验对场地要求很高,如基地面的尺寸和堆重物的要求都比较大,现场条件一般很难满足。锚桩法在试验装置安装过程中不好控制荷载的中心点,容易引起受力发生偏心,使钢筋的受力不均匀,引发钢筋的断裂使试验失败。自平衡法在实际检测过程中,较难找到荷载箱平衡点。同时自平衡试验过程中桩侧阻力的修正系数对自平衡法的极限承载力试验影响较大,实际的工程地质条件非常复杂,不同地域桩侧向上摩阻力的修正系数的取值还需通过大量实验数据的积累,

且整个加载的模拟受力机理与桩基的实际受力机理不同,得到的检测结果还需进行等效换算。

基于上述现有技术的不足,针对大直径且伴随有大吨位的基桩,本研究提出了一种基于地下组合结构反力装置的大直径桩基测试技术。本技术拟充分利用工程自然场地的特点,在基桩顶部土层中预制混凝土沉井,为基桩静载试验提供反力。测试方法的受力机理与传统的静载试验相一致,试验结果可清晰反映基桩承载能力。

1 大直径桩基测试技术原理

1.1 桩基检测原理

基于地下组合结构反力装置的大直径桩原位承载力测试技术充分利用工程自然场地的特点,在基桩顶部土层中预制向下沉设的筒状结构,其外侧为土体,其上由上至下布设各向其外侧延伸顶进土体内的根键层,构成根式沉井。沉井内部共轴设有试桩,千斤顶设于沉井内部的沉井顶部与试桩的顶端之间。利用沉井自重、井壁侧摩阻力、根键带动周边大范围土体的重力和地表堆载的重物提供的竖向承载力为基桩静载试验提供反力,进而对桩基实现加载,如图 1 所示。

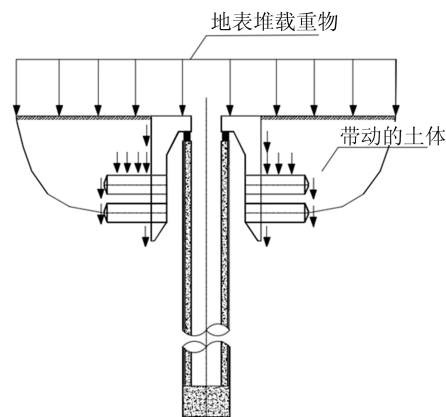


图 1 反力装置受力示意图

基桩上竖置有位移靶标,位移靶标的上端穿过沉井预留孔洞延伸于地面上,位移靶标的下端固定于基桩上,采用基于亚像素技术的远距离位移检测仪进行位移测量以及埋入应变计进行结构内力检测。该测试方法可清晰反映基桩承载能力,同时节省工程时间和加载成本,避免安全隐患。

1.2 桩基检测设备

1.2.1 加载装置

本次依托工程将 6 台相同规格型号的 800 t 油压千斤顶置于大直径空心管桩顶部,并联进行

加载,如图2所示。油泵、油管均置于基桩顶面,静力荷载仪放在堆载场地外围,用数据线连接。油泵通过定做的油路器同时向6台800 t千斤顶提供相同的油压,通过千斤顶的作用为抗压静载试验提供反力。千斤顶位置如图3所示。



图2 千斤顶示意图

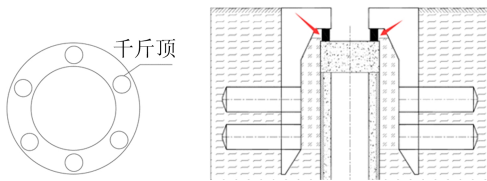


图3 千斤顶位置示意图

1.2.2 基于亚像素技术的远距离位移检测仪

亚像素视觉图像测量算法的位移监测传感器如图4所示,可实现非接触式高精度二维实时动态位移监测。



图4 位移监测传感器示意图

采用亚像素视觉图像算法检测分辨率更高,非接触远距离实时动态监控,利用红外配合靶标,单台设备可实现多目标点。同时测量仪器和检测人员可位于检测现场安全稳定的位置,实现远距离非接触测量,安全可靠,提高现场检测的安全系数,大大提高荷载试验检测效率。

地下组合结构反力装置的大直径桩基测试技术位移的量测,采用基于亚像素技术的远距离位移检测仪进行测量。分别在桩身及沉井顶部设置2个位移靶标。基桩内部的位移杆穿过堆载中间预留孔伸出地面,超出堆载高度。沉井口位移杆寻找堆载空隙插入沉井顶部边缘位置如图5所示。

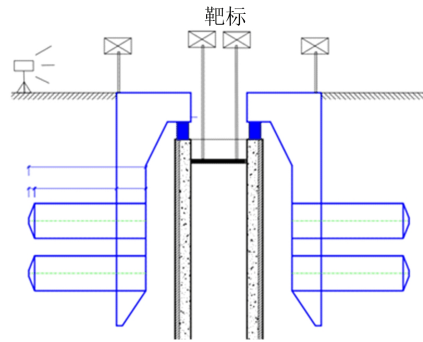


图5 位移靶标位置示意图

1.3 桩基检测过程

本反力装置可采取“地下组合结构+地面堆载”的组合堆载配重形式。地面堆载采用在沉井口堆载+根键范围土体堆载。

进行大直径桩的承载力检测时,根式沉井作为检测结构的地下组合结构反力装置。千斤顶的顶部和底部分别顶紧沉井顶部和试桩的顶端,其作用于沉井顶部,通过动力输送线链接加载控制装置油泵,利用油泵对千斤顶输送压力油,使地下组合结构反力装置产生向上的运动趋势的上顶力与作用于试桩顶端使试桩产生向下的运动趋势的下压力为一对使千斤顶保持静止状态的平衡力,此时千斤顶自重较小可略去,可视为该力始终保持大小相等;地下组合结构反力装置产生向上的运动趋势后,由根式沉井的自重、土体作用于根式沉井的侧阻力、根键带动的大范围土体的重力及作用于各根键的侧阻力构成抗拔力,抗拔力和堆载物提供的堆载荷载共同构成上部荷载。上部荷载向下作用于地下组合结构反力装置,其大小与上顶力相等,使地下组合结构反力装置保持静止状态,与上顶力为平衡力的下压力以与上部荷载相等的大小及静载的形式向下作用于试桩顶端,用以对试桩的承载力进行检测。

2 地下反力装置承载特性数值分析

2.1 模型参数选取与建立

通过FLAC3D有限差分软件对根式沉井进行数值模拟,土体选用摩尔库伦模型,考虑桩土间的相互作用,沉井单元选用弹性单元^[8]。沉井-土之间存在接触问题,采用FLAC3D中内置的无厚度接触面单元模拟,接触面本构模型为库伦剪切模型^[9]。在模型的四周对法向方向进行约束,在模型的底面对3个方向进行约束,作为模拟的边界条件。该反力装置入土深度为8 m,直径为7 m,取

周围土体范围 $105\text{ m} \times 105\text{ m} \times 20\text{ m}$, 数值网格模型可以满足计算精度的要求。有限元计算模型如图 6 所示。

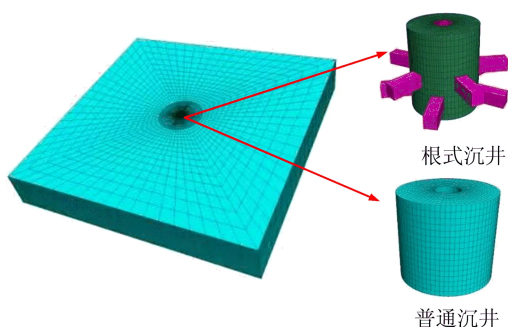


图 6 网格模型示意图

2.2 岩土参数的确定

采用 FLAC3D 进行数值模拟时涉及到的岩土体参数有体积模量 K 、剪切模量 G 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等。因此, 依据青山河特大桥工程现场地勘报告 YZK-8 号钻孔的地质参数, 结合文献 [10] 得到数值模拟需要的土体压缩模量等力学参数, 再将压缩模量 E_s 转化为变形模量 E_0 , 公式为:

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\mu}{1-\mu}\right) E_s \quad (1)$$

将岩土体的变形模量转化为体积模量和剪切模, 相关计算公式为:

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

$$G = E_0 / [2(1 + \mu)] \quad (3)$$

其中, μ 为泊松比。根据现场地勘报告结果, 岩土体参数见表 1 所列。

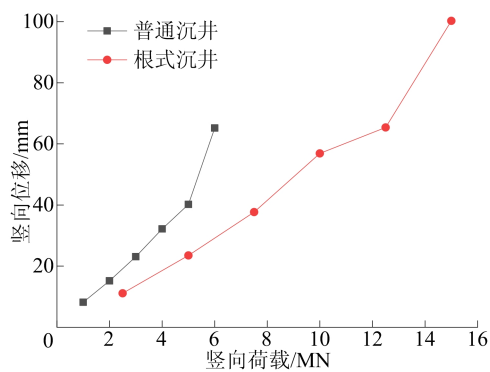
表 1 岩土体参数

土层名称	μ	E_0 / MPa	K / MPa	G / MPa	φ / ($^\circ$)	c / kPa
软土	0.35	8	8.89	2.97	22	8.0
粉质黏土	0.25	16	10.67	6.40	27	15.0
碎石土	0.15	106	50.48	46.09	30	0.1

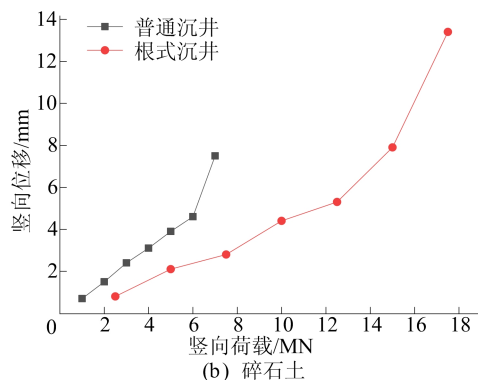
2.3 单土层中荷载-位移分析

为研究根式沉井在不同地质条件下的荷载响应, 分别在软土和碎石土中研究根式沉井在竖向荷载下沉降响应, 曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出: 在不同土层中, 根式沉井的竖向承载能力比普通沉井的要高出约 200%; 在相同荷载作用下, 根式沉井的位移要明显低于普通沉井的位移, 根式沉井在多种地质条件下均可运用。



(a) 软土



(b) 碎石土

图 7 单层土中沉井荷载-位移曲线

2.4 组合土层中荷载-位移分析

该反力装置只作为检测设备用以桩基检测, 试验结束后可回收利用, 因此可以允许出现大位移, 本文数值仿真模拟均以荷载-位移曲线陡降明显突变点的荷载值作为沉井极限抗拔承载力。通过 FLAC3D 程序中的命令流进行分级竖向加载, 得到在不同竖向荷载作用下沉井荷载-位移曲线如图 8 所示。由图 8a 可知: 普通沉井的极限抗拔承载力为 6 MN, 竖向位移为 5.15 cm; 而在非受压状态下, 同尺寸横向嫁接根键的根式沉井的极限抗拔承载力为 12.5 MN, 竖向位移为 5.69 cm。可看出根式沉井的极限抗拔承载力较普通沉井提升 2 倍多, 取荷载 5 MN 时对比, 根式沉井较普通沉井的位移量减少了 36.72%。说明增加根键布置对于提升沉井抗拔承载力具有显著效果, 根式沉井作为反力装置提供承载力具有优越性。

荷载低于 6 MN 时, 普通沉井和根式沉井竖向位移随着荷载变化的趋势基本相同, 而当荷载在 6 MN 以后, 无根键沉井位移随着荷载的大幅增加, 此时根式沉井仍保持平缓曲线。但继续进行加载至 7.5 MN 后, 根式沉井的位移曲线斜率发生改变, 位移曲线的走势更为平缓, 可知此时由于根式沉井不断向上移动, 使得土体不断被挤压从而起到了夯实土体的作用, 等效于土体的

强度增加,让根式沉井的承载力也得到提升。故在分级荷载的作用下,沉井位移的增量发生递减。

仅依靠根式沉井作为反力装置来进行大直径桩基检测是不够的,故还需要在根式沉井顶部即地表处进行堆载,给其施加一个与运动趋势相反的竖向荷载,使根式沉井保持受压状态,从而提高整个反力装置的承载力。从图 8b 可以看出,在 10 MN 压力作用下的根式沉井的极限抗拔承载力为 25 MN,竖向位移为 13.92 cm,相较于非受压状态下的根式沉井极限抗拔承载力提升了 1 倍,承载效能提升了 20%。

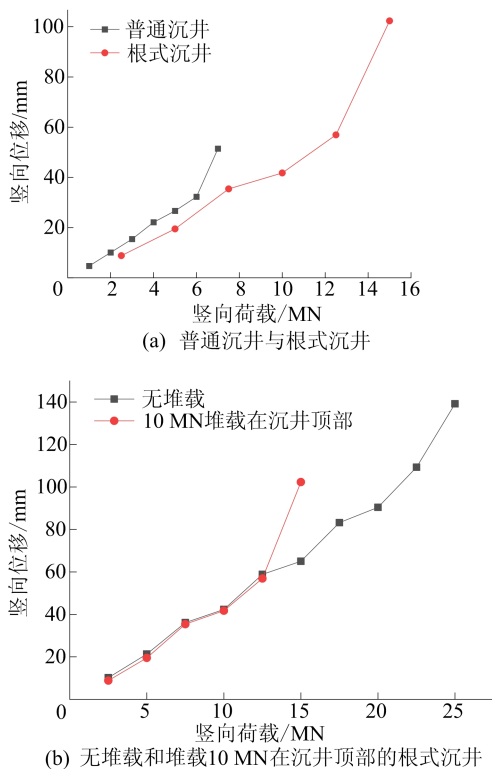


图 8 组合土层中沉井荷载-位移曲线

荷载低于 12.5 MN 时,非受压状态下的根式沉井和受压状态下的根式沉井的荷载-位移曲线基本重合,而当荷载在 12.5 MN 以后,受压状态下的根式沉井的荷载-位移曲线再次发生转折,说明此时根式沉井的承载力得到提升。而继续加载至 17.5 MN 时,其荷载-位移曲线发生转折,根式沉井的承载力又得到提升。说明在沉井顶部施加的压力对根式沉井的极限抗拔承载力的提高具有积极作用,同时其极限抗拔承载力大于非受压状态下根式沉井极限承载力与堆载荷载之和,起到了“1+1>2”效果,极大发挥了周围土体的作用,更加说明此反力装置对于加载成本的降低具有优越性。

2.5 反力装置模拟受力分析

为分析根式沉井作为反力装置的受力机理,本节通过普通沉井和非受压状态下根式沉井的轴力曲线和井侧摩阻力曲线进行分析,轴力曲线如图 9 所示。轴力能较好地显示沉井荷载的传递过程规律。

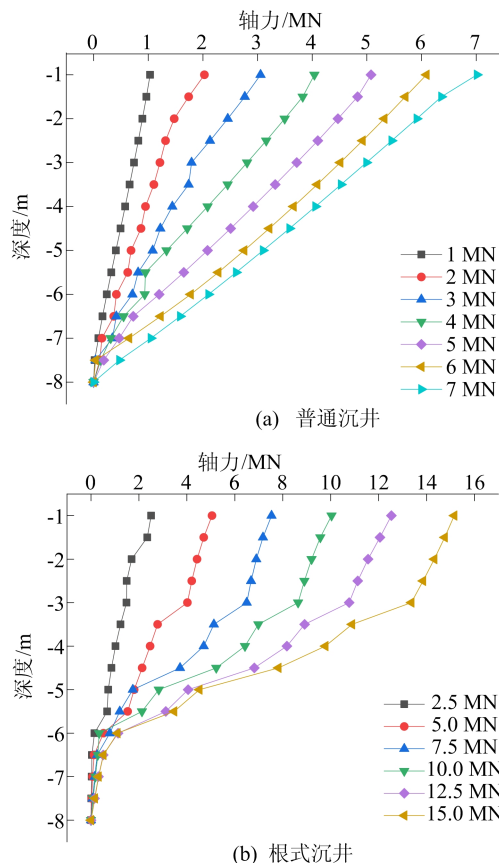


图 9 沉井轴力曲线

在各级荷载作用下的普通沉井和根式沉井在同级荷载作用下,轴力均随着深度的增加呈现递减趋势,并且沉井顶部的轴力也都随着荷载的增大而增大。由图 9a 可知,普通沉井随着荷载的增加轴力变化规律基本保持不变,均为较顺直的直线,轴力与深度呈线性关系,且随着荷载的增加,该线的斜率也随之增大。由图 9b 可知,根式沉井虽在各级荷载作用下的轴力变化趋势不变,但较普通沉井,根式沉井在荷载增大后轴力开始出现陡降段,并且随着荷载的增大其陡降的幅度更为明显,这说明根键在根式沉井的荷载传递过程中承担了部分轴力。且随着荷载的增大,根键分担的轴力比例也呈递增趋势。轴向荷载通过根键传递到周围土层中,产生应力扩散,大大提高沉井的承载力。此外在同级荷载作用下,根式沉井的轴力曲线出现两次转折陡降,并且第 1 次突变幅度

与第 2 次突变幅度相比较高,这说明根式沉井在上拔过程中,上层根键比下层根键承担更多的轴力,上层根键的土体挤密效果更为明显,使得其范围内的轴力衰减的速度更大。

通过分级加载绘制普通沉井和根式沉井侧摩阻力曲线如图 10 所示。

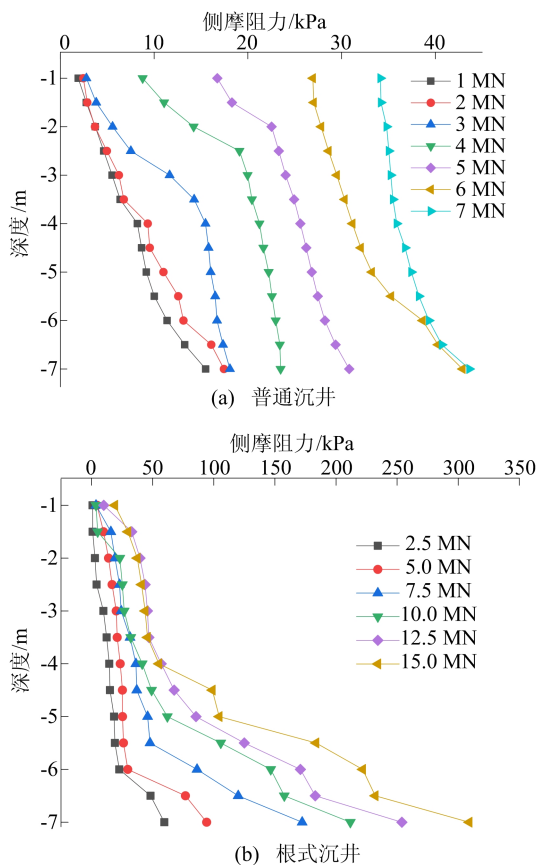


图 10 沉井侧摩阻力

在各级荷载作用下的普通沉井和根式沉井在同级荷载作用下,侧摩阻力均随着深度的增加呈递增趋势,且靠近沉井底部的侧摩阻力也都随荷载的增大而逐渐向下。根式沉井在不含根键段的侧摩阻力变化趋势基本保持不变,在根键附近位置发生转折突变,说明不含根键段的侧摩阻力充分发挥,而含根键段等效侧摩阻力继续增大。因其侧摩阻力为井身摩阻力与根键摩阻力之和,说明由于根键的作用,根式基础在同级荷载作用下的侧摩阻力大于普通沉井的侧摩阻力。

3 结 论

1) 地下组合结构反力装置的抗拔力和堆载

物提供的堆载荷载共同实现大直径桩承载力检测中的下压力加载,降低了大直径桩承载力检测中的堆载难度及堆载对现场环境条件的要求,以静载试验的方式实现了大直径桩的承载力检测,有效确保了大直径桩承载力检测的准确性。

2) 对比传统大直径桩基的检测方法,地下组合结构反力装置的大直径桩基测试技术的堆载集中地表区域,相较于向高处叠加堆载重物的加载方式,具有更高的安全性和便捷性,在工程应用中具有优越性。

3) 增加根键布置对于提升沉井抗拔承载力具有显著效果,因此利用根式沉井作为反力装置提供承载力具有优越性。

4) 处在受压状态下的根式沉井的极限抗拔承载力大于非受压状态下根式沉井极限承载力与所施加荷载之和,起到了“1+1>2”效果,极大发挥了周围土体的作用,承载效能提升了 20%,说明该反力装置对加载成本的减少具有优越性。

[参 考 文 献]

- [1] 徐攸在. 桩基检验手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 蔡长庚. 广东静载试桩堆载达 2106 吨[J]. 矿产勘查,2000(3):7.
- [3] 桓忠雄,纪来有,汤亮,等. 采用钢结构试验平台的 5 000 t 级桩基静载快速检测技术[J]. 建筑技术开发,2022,49(8):63-67.
- [4] 倪金华,王文渊,罗浩,等. 新型反力横梁加载装置在锚桩法中的应用[J]. 施工技术,2017,46(21):106-110.
- [5] 戴国亮,程伟刚,龚维明. 新三汊河大桥桩基静载试验研究[J]. 桥梁设计,2001,15(4):19-21.
- [6] 林友当,夏理巧,李凌志,等. 深厚软土区根键桩竖向承载特性的现场试验[J]. 公路,2020,65(11):143-148.
- [7] 何春林,龚成中,潘鹏超,等. 沉井基础设置根键及压浆后处理原位试验分析[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(5):1338-1344,1370.
- [8] 董梅,张大长,朱振海,等. 输电线路微型桩基下压承载力特性的模型试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(1):127-132.
- [9] 周俊鹏,黄雪峰,刘自龙,等. 微型抗拔桩基础受力特性研究[J]. 工程勘察,2017,45(2):19-24.
- [10] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海:同济大学出版社,1997.

(责任编辑 吴 亮)