

水平荷载对支盘桩受压承载力的影响分析

王红^{1,2} 彭社琴^{1,2} 郑卫锋³ 孙珍茂⁴

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

4. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610059)

摘要: 针对单独竖向受压荷载作用和受压+水平组合荷载作用两种情况, 采用数值分析, 对支盘桩的沉降特征、桩身轴力分布、支盘阻力、竖向承载力等承载性能进行系统地分析, 进一步确定了支盘桩受压承载力的大小。研究表明: 桩身轴力随深度增加而减小, 在支盘上下处明显降低; 在支盘荷载量级较小时, 相比于单独受压荷载作用下, 受压+水平组合荷载作用下的桩顶沉降较大。水平荷载的存在会对支盘桩的受压承载力产生一定程度的影响, 会使受压承载力略有增加, 但总体上影响不太大。

关键词: 支盘桩; 竖向受压承载力; 水平荷载; 数值模拟

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0067-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.013

Analysis on Influence of Horizontal Load on Bearing Capacity of Branch Pile

Wang Hong^{1,2}, Peng Sheqin^{1,2}, Zheng Weifeng³, Sun Zhenmao⁴

(1. State Key Laboratory of GeoHazard Prevention and GeoEnvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: For the two cases, that is, individual vertical compressive load and combined horizontal compressive load, the numerical analysis method is adopted to systematically study the bearing behaviors of branch pile, including settlement, distribution of shaft axial force and branches' friction etc. The magnitude of vertical bearing capacity of branch pile is further obtained. The research shows that the axial force of pile decreases with the increase of depth, and decreases obviously at the upper and lower sides of the branches. Compared with individual compressive load, when the load is less, the settlement is greater at the top of the pile which is borne combined load. The existence of horizontal load has an effect on bearing capacity of branch pile, which makes bearing capacity of branch pile increase slightly, but not too large.

Key words: branch pile; vertical bearing capacity; horizontal loading; numerical analysis

0 引言

支盘桩作为一种新型桩,具有承载力高、变形沉降小等优点,因而具有良好的经济效益。国内外学者对支盘桩承载力性状在近年来做了较多的研究,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272333)

但目前大部分研究主要是针对单独荷载作用下支盘桩的受压承载力,支盘桩一般主要设计用来承担竖向(受压)荷载,如文献[1-4]通过静载试验对支盘桩的受力性状进行了研究。文献[5]还结合有限元模拟分析法(finite element method, FEM)系统地分析了支盘桩的承载机理和荷载传递性状,探索了支盘桩高承载力和低沉降量的内涵。文献[6-17]均对竖向

受压荷载作用下支盘桩的承载性能进行了研究。

然而,由于工程结构在其施工和使用过程中受荷的情况复杂多变,支盘桩在其受竖向受压荷载作用为主的情况下,水平力也可能同时存在。为探讨水平荷载对支盘桩承载力的影响,分别讨论了在单独竖向受压荷载作用下和在受压+水平组合荷载作用下支盘桩的受压承载力的大小,分析可能出现的水平荷载对支盘桩受压承载力的影响。

1 计算方案

以数值模拟作为计算方法,在数值模拟结果的基础上,先对竖向受压荷载作用下支盘桩的承载性能进行研究分析;再对受压+水平组合荷载作用下支盘桩的承载性能进行研究分析。对选取的桩型通过分级加载(竖向受压、竖向受压+水平联合作用)模拟支盘桩的静荷载试验过程,通过获取荷载-沉降关系($Q-s$)曲线用以确定单桩承载力。进一步对比单独竖向受压荷载作用下与竖向受压+水平荷载作用下受压承载力的异同,分析得出水平荷载的存在对支盘桩受压承载力的具体影响。

1.1 数值模拟计算模型

计算模型主要包括桩体和桩周土体两大部分。

1) 支盘桩

在广泛收集已有挤扩支盘桩常用尺寸参数的基础上,拟定本次数值计算桩的参数见表1,其示意图见图1、图2。

表1 支盘桩参数

桩径 /m	桩长 /m	支盘直径 /m	支盘数 /个	支盘角度 /(°)
0.7	20	1.4	3	45

注:上盘中心位于距桩顶5倍桩径处,下支盘中心位于距桩底1倍桩径处,3个支盘等间距布置。

支盘桩桩身材料为C30混凝土,计算中考虑桩基为弹性材料,计算参数见表2。

表2 桩计算参数

Γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	C /kPa	φ /(°)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ
25	1000	50	3×10^4	0.25



图1 桩模型

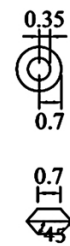


图2 支盘平面(上:平面;下:立面)

2) 桩周土

对于桩周及桩端土体考虑为均质土,土体的承载力特征值为160~180 kPa左右。这类土体强度中等,具有该特征的土在四川、湖南、浙江、安徽等地区均有分布。据此,所研究成果的推广和应用具有一定的广泛性。桩周土的物理力学指标参数取值见表3。

表3 桩周土物理力学参数取值表

粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ
30	12	18	0.4

1.2 加载情况

数值分析过程中采用逐级加载的形式模拟外荷载的施加过程,每级荷载达到相对稳定后,施加下一级荷载。

1.3 边界条件及模型离散化

根据实际受力情况,底部边界设水平和竖向约束,侧向边界设水平约束,考虑自重应力产生的侧向应力作用;顶部边界为自由边界。桩、土采用实体单元,桩土间设置接触面单元。模型底部边界取距桩底10倍桩径高度,桩基前后左右边界长度取10倍桩径,其中取桩径为0.7m。模型单元划分根据研究重点,靠近桩基单元剖分较细,建好的三维实体模型见图3。

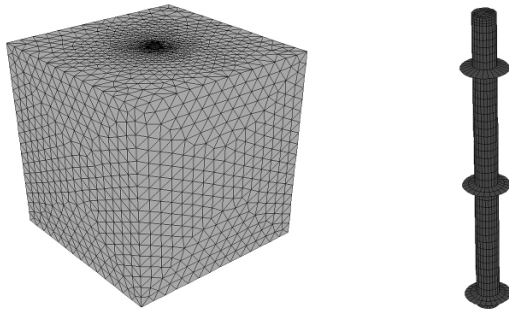


图3 数值分析模型

2 受压荷载作用下支盘桩承载性能

2.1 桩顶荷载 - 沉降特征

竖向下压荷载加载等级为 100 kN、500 kN、1000 kN、2000 kN、3000 kN、4000 kN、5000 kN 直到加载至停止加载标准。试桩达到停载标准为：某级荷载作用下，桩的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的 5 倍。

图 4 为支盘桩竖向荷载分级加载下的桩顶 Q - s 曲线。从图 4 可以看出，随着荷载增加，沉降加速增大，当桩顶荷载小于 3000 kN 时，沉降较小，竖向荷载每增加 500 kN，桩顶下沉约 0.005 m，荷载在 3000 ~ 4000 kN 时，竖向荷载每增加 500 kN，桩顶下沉 0.01 m。

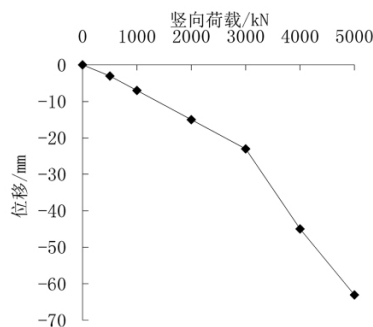


图4 桩顶竖向位移 - 荷载曲线

曲线总体呈缓变型，无明显的比例极限和极限荷载，但在 3000 ~ 4000 kN 荷载下，沉降速率明显加大。由此可推断该桩的承载力应该在 3000 ~ 4000 kN。桩顶沉降为 40 mm 时，对应的荷载约为 3800 kN，此值可作为该支盘桩的承载力。

2.2 荷载传递特征

荷载传递特征是研究支盘桩承载机理的基础。以下通过不同荷载量级作用下桩身轴力的变化，对支盘桩的荷载传递特征进行深入分析。

1) 桩身轴力分布特征

支盘桩的桩身轴力随深度变化曲线见图 5。在荷载量级较小时 (< 1000 kN)，桩身轴力随深度增加而略有减小，曲线在支盘部位变化不明显，即支盘部位曲线的台阶状变化特征不明显。

在 2000 kN 荷载量级下，支盘作用已有所显现，桩身轴力在支盘处有较明显转折。随荷载的进一步增大，曲线在支盘部位的台阶状减小越显著。

支盘桩的荷载传递曲线有其独特的形态：轴力分布曲线在支盘上下发生台阶状降低，轴力的突变量无疑由支盘作用引起。从上至下经过支盘后轴力的减小量应是由支盘承担该部分荷载并将其转移到支盘底部的土层上，从而使支盘底部桩身轴力迅速降低，最终使传递到桩端的荷载明显减小。单桩承载力大幅度提高。

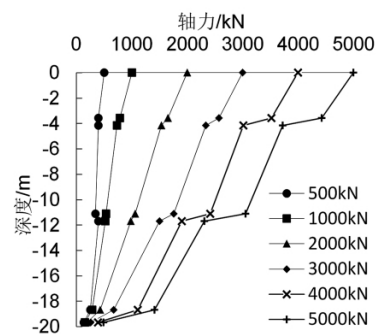


图5 桩身轴力

2) 支盘阻力

如图 5 所示，桩身轴力在支盘上下的台阶减小量实质上就是支盘阻力。通过计算不同荷载量级下不同位置的支盘阻力，获得各级荷载下不同位置支盘作用力，各个支盘承担荷载百分比的变化情况见图 6。

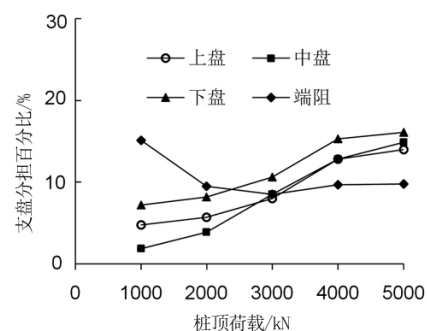


图6 支盘荷载分担比

在荷载量级相对较小时，各支盘作用从大到小排序为下支盘、上支盘、中支盘。在荷载超过 3000 kN

时,上、中支盘作用基本达到一致,下支盘作用始终更为明显。支盘的总体作用也进一步增大,在达到桩的极限承载力时,3个支盘的总承载量约为40%。上中下支盘承担荷载的比例约为0.8:0.8:1.0。

2.3 支盘桩的受压承载力

根据Q-s曲线确定:在挤扩支盘桩数值模拟中获得了不同加载量级下的桩顶沉降位移,即Q-s曲线(参见图4)。

从前述可知,Q-s曲线总体呈缓变型,无明显的比例极限和极限荷载点,但可以看出在3000~4000 kN荷载下,沉降速率明显加大。可推断该桩的承载力应该在3000~4000 kN之间。参照《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106-2014),对于缓变型的Q-s曲线,承载力由位移控制,取s=40 mm所对应的荷载值,即3800 kN为挤扩支盘桩极限承载力。

3 竖向(受压)+水平组合荷载作用下支盘桩承载性能分析

3.1 桩顶荷载-沉降特征

竖向受压+水平组合荷载下桩顶沉降曲线(上)和桩顶水平位移曲线(下)如图7、图8所示。

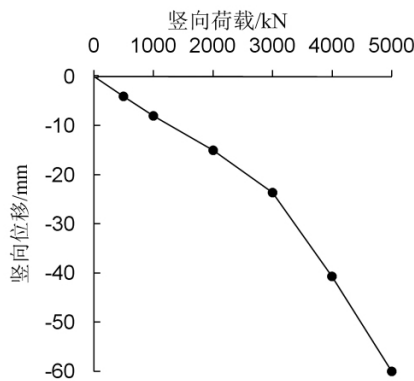


图7 受压+水平组合荷载-桩顶竖向位移

从图中可以看出:在受压和水平组合荷载作用下,当竖向荷载从0~3000 kN(对应水平荷载从0~450 kN,即水平荷载取竖向荷载的15%施加),桩顶竖向位移随荷载量级增加而增大;当受压荷载达到3000 kN时,位移量约为23.6 mm;受压荷载超过3000 kN(对应水平荷载450 kN)时桩顶沉降速率增大;受压荷载到4000 kN(对应水平荷载600 kN)时,位移量已达到40.7 mm,超过规范规定的破坏极限

沉降量40 mm;在竖向位移为40 mm时,对应的竖向荷载约为3959 kN。

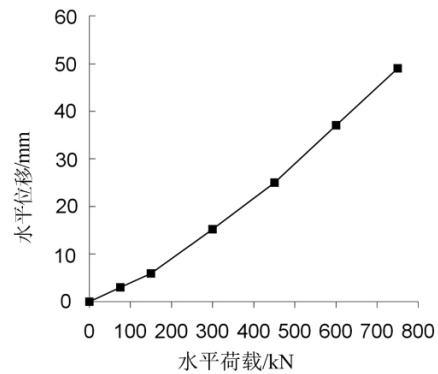


图8 受压+水平组合荷载-桩顶水平位移

水平位移亦随水平荷载增加,在水平位移达到10 mm时,桩顶的水平荷载值约为229 kN(对应竖向荷载约为1526 kN)。可见,在竖向受压和水平荷载共同作用时,水平荷载率先达到限值。

当受竖向荷载控制时,考虑竖向位移达到40 mm时的组合荷载值结果为受压荷载3959 kN+水平荷载597 kN,比单纯受竖向荷载时达到40 mm的受压荷载量(3800 kN)稍大,说明在有水平荷载作用的情况下,由位移控制的支盘桩的竖向承载力并未降低。

3.2 荷载传递特征

1) 桩身轴力分布特征

受压+水平荷载下桩身轴力随深度变化曲线如图9所示。轴力总体上随深度减小,且桩身轴力在支盘上下发生台阶状降低,支盘承担该部分荷载并将其转移到支盘底部的土层上,从而迅速降低支盘底部桩身轴力。

此外桩顶荷载量级越大,支盘对轴力的减小作用越明显,支盘的承载能力越大。

2) 支盘阻力

支盘桩受到荷载时,主要承载的部分是支盘、桩侧摩阻力和桩端阻力。绘制各组合荷载下各支盘分担荷载占比曲线如图10。

支盘作用从上支盘开始显现,在荷载量级相对较小时,各支盘作用为下支盘>上支盘≈中支盘。在荷载超过3000 kN时,上中下三支盘作用基本达到一致。在整个加载过程中,上盘承担的荷载比例随着荷载的增大而增大,但承担的荷载所占总荷载的百分比变化不大,从0增加到约17%;中盘承担

的荷载比例也随着荷载的增大而增大,从0增加到约19%;下盘所承担的荷载比例随着荷载的增大从7%增长至20%;从总体上看,在竖向荷载超过1000 kN后,支盘分担荷载不断增加,到后期达到了55.1%。

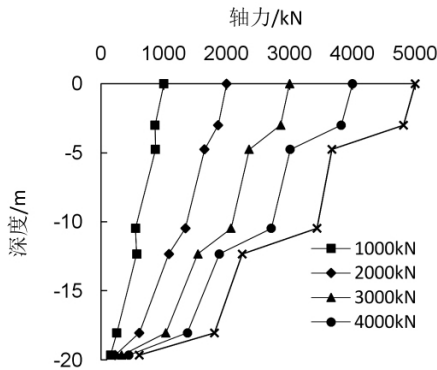


图9 桩身轴力

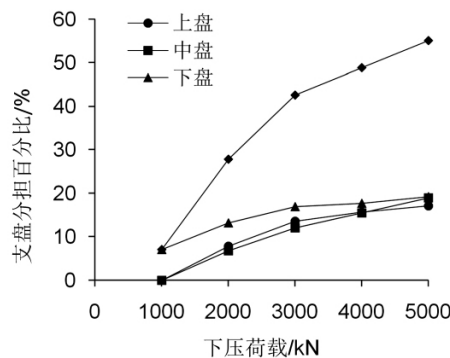


图10 支盘荷载分担比

3.3 挤扩支盘桩承载力

因规范中暂缺竖向受压+水平荷载下桩承载力的计算公式,故由《建筑基桩检测技术规范》中所规定的竖直方向极限位移40 mm,水平方向极限位移10 mm来进行推算。

竖向受压+水平荷载下,水平位移先达到《建筑基桩检测技术规范》所规定的极限位移10 mm,竖向受压+水平荷载下的承载力则由水平位移控制,据图8组合荷载-桩顶水平位移图,取 $s=10$ mm时的荷载值,即水平承载力229 kN为此时桩的极限承载力。由水平力控制的桩其水平承载力受竖向受压荷载的影响不大;由竖向力控制的桩的承载力受水平荷载的影响也不大。

4 水平荷载对竖向承载力的影响

根据图4、图7可知,竖向受压+水平组合荷载

的 $Q-s$ 曲线的总体规律与单独的竖向(受压)荷载作用下 $Q-s$ 曲线类似。竖直沉降量都随着竖向荷载的增加而增加,随着桩径的增加而减小。但具体量值可能存在差异,为此可得组合荷载作用下的沉降量与单独竖向荷载作用下沉降量的差异对比,见表4。

表4 支盘桩两种荷载类型沉降量对比

荷载类型	荷载值/kN	沉降量/mm
竖直	1000	6.3
竖直(水平)	1000(150)	7.1
竖直	4000	42.4
竖直(水平)	4000(600)	40.7

从表4可以看出,在荷载较小时(如1000 kN),组合荷载和单独竖向荷载沉降量均较小,而组合荷载下的位移量整体上较单独竖向荷载下的位移量稍大。当荷载较大时(如4000 kN,超过极限承载力),组合荷载下的竖向位移量较单独竖向荷载下的位移量稍小。

因此,水平荷载的存在会使桩顶沉降有所增加,在此称之为“附加沉降量”。“附加沉降量”总体不大,并且随荷载量级增大(达到极限承载力)时,这一附加沉降量可能由正变为负的。

竖向受压+水平组合荷载下的受压承载力与单独竖向受压荷载下的受压承载力对比见表5。

表5 支盘桩两种荷载类型受压承载力对比

竖向受压荷载/kN	受压+水平荷载/kN	差值/kN	相差比率/%
3800	3830	+30	+0.8

如表5所示,水平荷载的存在可能会对竖向受压承载力产生一定的影响:会使竖向承载力略有增加。但总体上影响不太大,增减变动范围在 $\pm 1\%$ 左右。

5 结语

1) 分析了竖向(受压)荷载下桩顶荷载的传递规律,发现竖向荷载随着桩身传递降低,在支盘处轴力出现“台阶式”急剧下降,这种变化随桩顶荷载的增大而越发明显。支盘的存在使得原本由摩阻力承担的桩顶竖向荷载转而成为由类似桩端的端承力承担了桩顶荷载,由此支盘桩承载力相对直桩能大幅提高。

(下转第91页)

参考文献

[1] 陈汉雄. 四川电力发展对新能源建设规模影响分析[J]. 四川电力技术 2018 41(2): 50-54.

[2] 吕伟业, 吴云, 曾德文. 中通道“西电东送”规划研究概论[J]. 电力建设 2002 23(11): 37-50.

[3] 杨荷娟. 输变电设备状态评价及可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学 2012.

[4] 邹嘉嘉. 电网设备状态检修策略的研究[D]. 广州: 华南理工大学 2012.

[5] 盛鹏飞. 变电设备状态检修系统设计[D]. 北京: 华北电力大学 2016.

[6] 张永祥. 电力设备综合评价指标分析[J]. 青海电力, 2013 32(1): 1-3.

[7] 杨贤, 饶章权, 柯春俊, 等. 广东电网输变电设备带电检测技术应用现状及提升策略[J]. 南方电网技术, 2015 9(3): 68-74.

[8] 付兆远, 孙英涛, 王宁, 等. 基于带电检测和在线监测的变电设备状态评价管理[J]. 山东电力技术, 2015, 42(7): 6-9.

作者简介:

汪 鑫(1987), 硕士, 工程师, 中级工, 研究方向为高电压与技术监督。

(收稿日期: 2019-06-09)

(上接第 71 页)

2) 探讨了水平 + 受压组合荷载的桩顶荷载 - 沉降的总体规律。与单独竖向(受压)荷载类似, 呈现出桩顶竖向位移随荷载增加而增加的特征, 水平荷载的存在会使桩顶沉降有所增加。但其增加值总体不大, 并且随荷载量级增大(达到极限承载力)时, 这一附加沉降量可能由正变负。

3) 探讨了水平荷载对支盘桩竖向受压承载力的影响。水平荷载的存在会使竖向承载力略有增加, 但总体上影响不太大。

参考文献

[1] 王东坡, 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及研究现状[J]. 岩石力学与工程学报 2004, 23(s1): 4645-4648.

[2] 巨玉文, 梁仁旺, 赵明伟. 挤扩支盘桩的荷载传递法及数值模拟[J]. 建筑技术 2004, 35(3): 204-205.

[3] 肖琦, 王德宏, 徐晶. 输电线路挤扩支盘桩受力特性的试验研究[J]. 实验力学 2015, 30(1): 124-130.

[4] 王有凯, 丰晓灿, 张敏霞. 挤扩支盘灌注桩承载性状的试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 799-803.

[5] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报 2002, 24(3): 371-375.

[6] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 实验力学 2015, 30(s2): 159-162.

[7] 高笑娟, 朱向荣. 支盘桩理论研究及工程应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2010.

[8] 巨玉文, 梁仁旺, 赵明伟, 等. 竖向荷载作用下挤扩支

盘桩的试验研究及设计分析[J]. 岩土力学 2004, 25(2): 308-311.

[9] 卢成原, 王志军, 孟凡丽. 不同土质中模型支盘桩在重复荷载作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2007, 26(s1): 3141-3147.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106-2014[S]. 北京: 中国标准出版社 2014.

[11] 苏晴晴, 夏红兵. 新型扩挤支盘桩竖向承载特征 FLAC^{3D} 数值分析[J]. 水利与建筑工程学报(自然科学版) 2017 37(6): 71-75.

[12] 王成武, 龚成中. 支盘桩竖向承载性状模型试验研究及数值模拟[J]. 建筑科学 2015 31(7): 80-83.

[13] 王成武, 龚成中. 支盘桩桩周土位移场试验研究[J]. 建筑科学 2015 46(6): 511-513.

[14] 苏晴晴, 夏红兵. 支盘间距、数量、直径对新型支盘桩承载力的影响[J]. 安徽建筑大学学报 2018 26(4): 18-21.

[15] 蔡雨阳, 于东波. 挤扩支盘桩单桩竖向极限承载力分析方法研究[J]. 山西建筑 2017 43(24): 75-76.

[16] 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.

[17] Shi D, Xiao J, Yang C, et al. Research on the Plate Cavity Geometry of the Squeezed Branch Pile[J]. Procedia Engineering, 2014(73): 29-34.

作者简介:

王 红(1993) 硕士研究生 研究方向为岩土工程。

(收稿日期: 2019-04-08)