

文章编号: 1000-7598 (2014) 09-2602-07

开挖卸荷对既有群桩竖向承载性状的影响分析

伍程杰^{1,2}, 俞 峰³, 龚晓南^{1,2}, 林存刚^{1,2}, 梁荣柱^{1,2}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058;

3. 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 既有建筑下增层开挖对已有桩基础的影响不同于基坑开挖对坑内桩基的影响。基于工程实例验证的有限元参数, 用硬化土弹塑性模型模拟土体, 用接触面单元模拟桩土相互作用, 建立了桩筏基础-地基-增层开挖三维有限元模型, 对增层开挖后群桩基础的竖向承载性状进行研究。分析了桩顶刚度、桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻比以及土体回弹的变化规律, 并研究了不同桩端土体刚度和增层开挖深度对这些参数的影响。结果表明, 增层开挖后群桩中不同基桩表现出不同的承载性状, 增大桩端土体刚度可明显提高单桩承载力和端阻比临界值; 随着增层开挖深度的增加, 侧阻和端阻的发挥程度也随之提高。研究结果有望为地下室增层开挖施工中的结构托换变形控制和补桩设计提供依据。

关 键 词: 既有建筑; 开挖; 群桩基础; 三维有限元法

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Influence of excavation unloading on vertical bearing behavior of existing pile groups

WU Cheng-jie^{1,2}, YU Feng³, GONG Xiao-nan^{1,2}, LIN Cun-gang^{1,2}, LIANG Rong-zhu^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The effect of further downward excavation beneath an existing building on the pile foundation is different from the one encountered in a newly-created excavation case. Based on the finite-element parameters derived from a case history, a hardening-soil model and a contact-surface model are adopted to simulate the characteristics of soil and the pile-soil interaction, respectively. The three-dimensional finite element framework takes into account the interaction of piled raft foundation, ground and excavation, and is able to investigate the vertical bearing behavior of the existing pile groups after the excavation. The investigation accounts for the effects of end-bearing soil stiffness and excavation depth on the variation trends of pile-head rigidity, pile force, pile shaft resistance, ratio of pile base resistance and soil rebound. The results show that individual piles in an existing pile group subjected to further excavation behaved differently. Increasing the stiffness of the end-bearing soil is crucial to enhancing pile capacity and the critical ratio of pile base resistance. The excavation depth is a key factor that positively influences the mobilization degree of the shaft and base resistances of existing piles. The present results are possible to assist the deformation control of structure underpinning and the design of supplemented pile for further excavation under existing basement.

Key words: existing building; excavation; group-pile foundation; three-dimensional finite element method

1 引 言

随着城乡建设的发展和人民生活水平的提高, 人们对地下交通网络、地下商场、地下停车场、地下物流仓储等的需求越来越高。然而城市用地紧张, 价格昂贵, 在既有建筑下修建地下空间几乎成了最优方案。因此, 在不影响既有建筑正常使用的情

况下, 在原有基础下增层开挖地下室, 实现地下空间的二次开发利用, 成了工程师们面临的重大难题。

既有高层建筑增设地下空间涉及到桩基托换技术, 其关键在于保证上部结构正常使用, 不产生次生应力和差异沉降, 这方面已有一定的研究成果。Iwasaki 等^[1]基于一个工程实例, 通过施工前试桩、成桩后现场试验、施工期间群桩承载性状监测等一

收稿日期: 2013-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41102179); 浙江省科技厅公益技术研究项目 (No. 2012C23029)。

第一作者简介: 伍程杰, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事桩基工程及土工计算机分析等方面的研究工作。E-mail: tjwucj@163.com

通讯作者: 俞峰, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 主要从事桩与深基础工程的教学和研究工作。E-mail: pokfulam@163.com

系列手段,并对不满足载荷试验的摩擦桩在桩侧注浆,最终得到在整个开挖期间上部结构的沉降为2~4 mm;贾强等^[2-3]通过理论研究、数值分析等手段,探讨了锚杆静压桩在桩基托换技术中的应用,认为桩基托换完成后会引起柱脚的沉降差,在上部结构中产生附加内力,提出在黏性土和砂性土中采用不同的压桩和挖土方案能很好地控制建筑物二次沉降。上述研究显示,合理的桩基托换技术须能正确评估既有群桩基础在结构工作荷载作用下、在增层开挖施工后的竖向承载性状。

对于待建建筑桩基在基坑开挖后的承载性状已有一定的研究成果,郦建俊^[4-5]、胡琦^[6]、郑刚^[7-8]、王成华^[9]等先后通过理论分析、模型试验、数值模拟以及实测数据相结合的方法对其进行研究。实质上,土体开挖对既有建筑物下桩基和待建建筑物下桩基的影响是不同的。既有建筑物下桩基在长期的服役过程中桩和桩周土体已充分固结密实,其承载力依然有所增长;既有建筑物桩基开挖之前桩周土体受到原基础底板压力的作用,土体中竖向有效应力较无超载作用时大,两种情况的应力路径不同,因而土体在开挖过程中回弹变形性能也不同^[10];既有建筑物桩基在开挖过程中一直受到上部结构荷载的作用,开挖过程中桩身下部不会产生负摩阻力,桩身也不会受到拉力的作用;既有建筑物桩基在开挖过程中不但受到开挖扰动的影响,还要受到施工过程中补桩的影响,这是对桩周土体的二次扰动;既有建筑物桩基一旦破坏,其后果是灾难性的,导致上部结构不能正常使用甚至坍塌,造成巨大生命财产损失。

本文采用三维有限元分析软件,基于工程实测参数,建立桩筏基础-地基-增层开挖有限元模型,力图反映既有高层建筑增设地下空间后群桩基础的真实承载性状,研究增层开挖对桩顶刚度、桩身轴力、桩侧摩阻力、端阻比以及土体回弹的影响。在此基础上,以中心桩为例,讨论不同桩端土体刚度和增层开挖深度情况下桩顶刚度、桩侧摩阻力以及端阻比的变化规律。

2 有限元模型及参数

2.1 工程概况

杭州某高层建筑为12层,框剪结构,附楼为4层,整体设一层地下室,面积约为2 600 m²。基础为桩筏基础,工程桩均采用钻孔灌注桩,桩径从600~900 mm^[11]不等,桩长约34~40 m左右。场地位于杭州西湖与钱塘江之间,属典型杭州软土地区,场地内地下水丰富,地下水位大约在地表下0.5 m。

现为了在上部建筑正常使用的条件下,实现地下空间的二次开发利用,故决定实施地下扩建工程,在既有地下室的基础上进一步拓宽、拓深。既有地下室埋深为3.6~5.1 m,按照前期规划方案,地下增层开挖宽度为18.5~44.2 m不等,增层开挖深度为4.5~10.0 m不等。

2.2 模型建立

采用三维有限元软件 PLAXIS 进行数值分析,基坑设为方形,边长取为44 m,采用地下连续墙围护,三道内支撑。建立13根桩的群桩模型,桩径取为0.9 m,桩长统一取为34 m。按照 Randolph 等^[12]理论单桩影响半径为 $2.5 \times 34 \times (1 - 0.33) = 57.0$ m,考虑计算能力和需要,取模型边长为140 m,高为50 m。

模型中土体、桩体和围护墙均采用实体单元,筏板采用板单元,内支撑采用梁单元。各层土体水平分层、均质、连续、各向同性,桩体、筏板、围护墙和内支撑均为线弹性材料,土体为弹塑性材料,服从硬化土(hardenening-soil)屈服准则。考虑基桩和围护墙与土体之间存在相对滑移,在桩-土和围护墙-土接触面上设置接触面单元,引入强度折减因子来反映桩-土接触面摩擦角取相应土层摩擦角的折减。增层开挖完成后1/4模型剖面图如图1所示,图2给出了筏板和桩位的平面布置图。

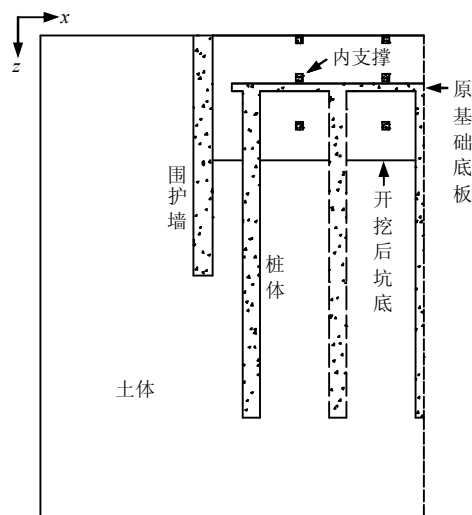


图1 增层开挖后1/4模型剖面图

Fig.1 Profile of 1/4 model after adding layer excavation

2.3 计算参数

根据文献[13]中的勘探指标获得模型中基本参数取值,文献中不能获得的模型参数值,根据既有桩基成桩后的验证性静载试验结果,建立有限元单桩模型并施加桩顶荷载,将其与试验结果相对比,从而逐步调整得到其余模型参数,最终用于本文计算的土体参数,如表1所示。

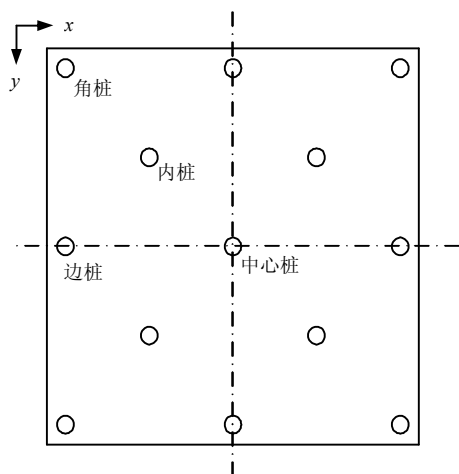


图2 筏板、桩位平面布置
Fig.2 Layout of piles and piled raft

桩体、筏板、围护墙和内支撑的弹性模量 $E_c = 30 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.15$ 。围护墙厚度为 1 m , 插入深度为 25 m 。内支撑为方形钢筋混凝土对撑, 边长为 0.4 m , 并排间距为 9 m 。原基础底板厚 0.4 m , 埋深为 5.1 m , 增层开挖深度为 8.0 m , 即新建地下空间埋深 13.1 m 。设 13 根圆形实体桩, 桩长为 34 m , 桩径为 0.9 m , 桩间距为 9 m , 桩端进入⑧₂层埋深为 1.1 m 。

考虑既有上部结构荷载作用, 取每根基桩的桩顶荷载为桩基承载力特征值, 约 $4\,330 \text{ kN}$ ^[11], 将其等价均布荷载, 作用在基础筏板顶面上; 同时考虑承台效应的桩土共同承载作用, 根据文献[14], 取原基础底板下土体超载为 11 kPa , 作用在增层开挖前底板下土体表面上。

表1 土层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

层号	名称	层厚	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	渗透系数 $k / (\text{m/d})$	三轴加载模量 $E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	固结仪加载模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	三轴卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	有效黏聚力 c / kPa	有效内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
① ₂	素填土	5.1	17.7	5.3×10^{-4}	20.0	20.0	60.0	9.0	12.0
③ ₂	淤泥质粉质黏土	11.5	17.9	2.2×10^{-4}	17.5	17.5	87.5	11.2	19.5
③ ₃	淤泥质黏土	6.0	17.1	1.3×10^{-4}	15.0	42.2	75.0	19.6	10.0
④ ₃	黏土	5.0	19.0	3.0×10^{-4}	36.5	35.0	109.5	37.0	14.5
⑤	粉质黏土	5.0	18.9	3.9×10^{-4}	35.0	35.0	105.0	35.0	16.0
⑥ ₁	黏土	5.4	18.0	3.0×10^{-4}	22.5	38.5	90.0	52.5	9.0
⑧ ₂	强风化安山岩	12.0	22.0	7.8×10^{-2}	75.0	74.4	225.0	450.0	53.0

2.4 模拟步骤

通过定义计算工序来完成建筑物从建设完成到服役使用、再到增设地下空间完成整个过程模拟, 首先分析增层开挖深度为 8.0 m 的工况, 计算时分以下 5 步进行:

(1) 运用程序自带的 K_0 过程施加土体自重, 建立初始地应力场;

(2) 忽略初始位移场, 模拟既有地下室建设完成, 激活筏板、群桩, 施加桩顶荷载和基础底板下土体超载;

(3) 进行固结计算, 其固结分析时间设定为 15 a , 模拟既有建筑服役使用期间桩-土体系长时间的共同作用和超孔隙水压消散;

(4) 关闭原基础底板下土体超载, 激活围护墙, 开挖底板下 8.0 m 深范围内土体, 并激活相应内支撑。由于本文主要关注开挖完成后群桩基础承载性状, 故增层开挖一步完成;

(5) 模拟桩基加载的过程, 增层开挖完成后在筏板上施加均布荷载, 按照文献[15]的规定, 逐级增加桩顶竖向荷载, 直至达到 2 倍原桩基承载力特

征值。

3 计算结果分析

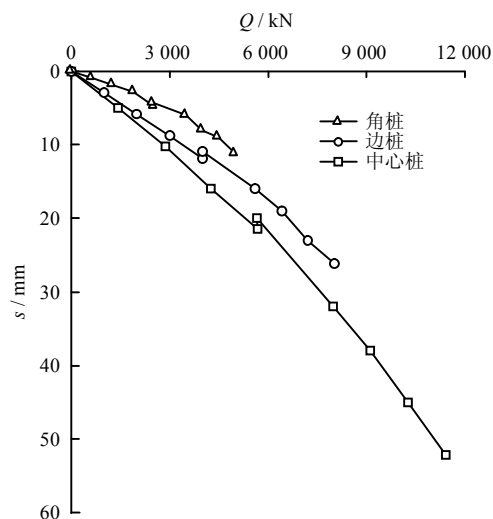
3.1 荷载-沉降曲线

图 3 是群桩中不同位置基桩在整个计算过程中的桩顶荷载-沉降曲线, 即桩顶 $Q-s$ 曲线, 反映了不同位置基桩在增层开挖前后的竖向承载特性, 从图中可以发现:

(1) 在同一加载时刻, 中心桩承担的荷载最大, 边桩承担的荷载其次, 而角桩承担的荷载最小, 这是因为中心桩承担相应底板荷载面积最大, 而边桩和角桩分担的面积依次减小。

(2) 在同等大小的桩顶荷载作用下, 中心桩的沉降最大, 边桩的沉降其次, 角桩的沉降最小, 这说明桩基承载表现出了群桩效应, 呈现锅底型沉降位移, 并且在最终加载水平时, 沉降从大到小依次为中心桩 > 边桩 > 角桩, 最大沉降达到 52 mm 。

(3) 在既有地下室建成后, 桩基沉降逐渐增大, 但在增层开挖阶段, 各基桩均表现出了一定回弹, 并且中心桩的回弹位移最大, 约 1.4 mm , 其次为边

图3 基桩 $Q-s$ 曲线Fig.3 $Q-s$ curves of foundation piles

桩, 最小为角桩, 这说明越靠近基坑中心, 桩基的回弹效应越明显。

3.2 桩身轴力

图4是群桩中各基桩在增层开挖完成后的桩身轴力曲线, 反映了不同基桩的桩身轴力传递特性。从图中可以看出:

(1) 桩身轴力大小有: 中心桩>边桩>角桩, 并且在桩端处三者的差值有所减小, 说明中心桩的侧摩阻力发挥值最大, 边桩其次, 角桩最小。

(2) 桩身上部8.0 m深度范围内, 由于土体已开挖, 所以轴力数值上只有重力增加值。而后随着深度增加, 轴力值衰减斜率越来越快, 说明侧摩阻力越来越大, 但在接近桩端处轴力衰减幅度较小。

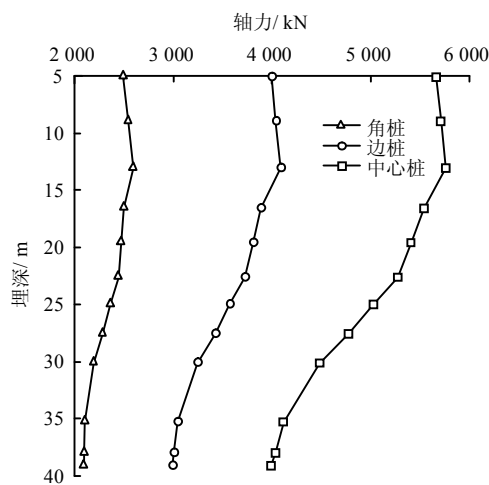


图4 基桩轴力

Fig.4 Axial forces of foundation piles

3.3 桩侧阻力

图5是群桩中各基桩在增层开挖完成后的桩侧

摩阻力曲线, 反映了不同土层对基桩竖向受力抗力值的大小。从图中可以看出:

(1) 由于桩身上部埋深5.1~13.1 m段土体已开挖, 因此, 这段并无桩侧摩阻力。在各土层中, 桩侧摩阻力大小均有中心桩>边桩>角桩。

(2) 各层土体的桩侧摩阻力发挥值大小不一, 但总体来说, 呈现两头小中间大的规律, 除了土体刚度本身的因素外, 由于桩身上部土体卸荷较大, 因此发挥值较小; 而下部土体由于桩身轴力已较小, 桩与桩周土相对位移较小, 因此, 桩身下部土体桩侧摩阻力发挥不充分, 而在桩端处土体刚度突然增大, 桩侧摩阻力也有突然变大趋势。

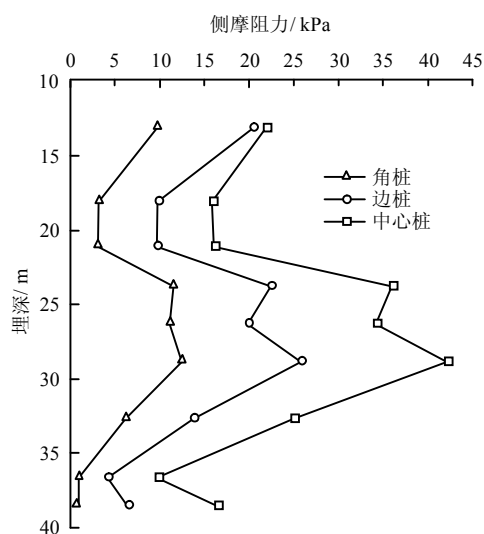


图5 基桩侧摩阻力

Fig.5 Shaft resistances of foundation piles

3.4 端阻比

定义端阻比为桩端阻力值与桩顶轴力值之比, 加载进度为加载过程的完成进度, 令加载开始时加载进度为0, 加载终止时加载进度为1。图6是群桩中各基桩在增层开挖后加载阶段的端阻比变化曲线, 反映了不同基桩在开挖后继续增加竖向荷载的桩端承载性状。从图6可以看出:

(1) 加载进度为0, 即增层开挖完成时, 端阻比大小有: 中心桩<边桩<角桩, 这是由于在开挖后中心桩与桩周土体的相对位移较大(见图7), 因而中心桩的桩侧摩阻力发挥值较大(见图5), 以至传到桩端的轴力值较小, 故端阻比较小, 而边桩、角桩的端阻比依次增大。

(2) 随着加载的进行, 加载进度增大, 中心桩的端阻比逐渐增大, 并且开始时增大较快, 而后越来越慢并趋于稳定; 边桩的端阻比在整个加载过程中几乎不变; 角桩的端阻比逐渐减小, 开始时减小

速度较快而后变慢,并且在加载进度为 1 时,中心桩的端阻比超过角桩。这说明不管对于中心桩还是边角桩,其端阻比均存在某个临界值。

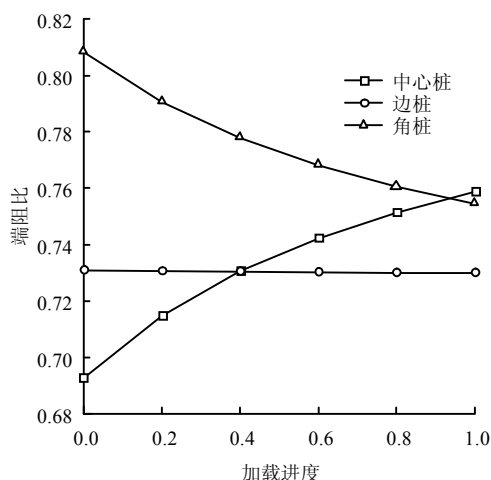


图 6 基桩端阻比

Fig.6 Tip resistance ratios of foundation piles

3.5 土体回弹

定义距离比 δ 为某点与基坑中心点距离和基坑角点与中心点距离之比,图 7 是增层开挖后坑底回弹量随距离比 δ 的变化曲线,反映了坑底回弹规律,从图中可以看出:

(1) 坑底回弹量在桩位处达到最小值,如在本案中距离比 δ 分别为 0、0.41、0.82 等处依次为中心桩、内桩、角桩,其回弹量实质上为桩顶回弹量,中心桩最大,内桩其次,角桩最小。

(2) 而在非桩位处,坑底回弹量大致上呈基坑中心至基坑角点逐渐减小,在中心区域处最大值为 9.8 mm,而在基坑角点处为 1.5 mm,这说明基坑开挖导致基坑中心的卸荷作用最明显,而基坑角点受开挖影响较小,因此,中心区域回弹量大,角点回弹量小。

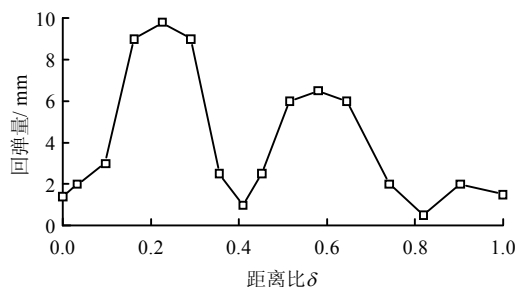


图 7 回弹量随距离比变化曲线

Fig.7 Variation of resilient deformation with distance ratio

4 参数分析

为了进一步分析土体和施工参数变化对桩基竖

向承载性状的影响,下面以中心桩为例,分析桩端土体刚度和增层开挖深度变化时桩顶刚度变化情况,并分析桩侧和桩端承载性状。

4.1 桩端土体刚度

在实际工程施工过程中,经常遇到桩的打入或钻进不到位的情况,本文基于这一工程常见事实,考虑桩端落在③₂土层(情况 1)和⑥₁土层(情况 2)两种状况,对比分析中心桩在这两种桩端条件下的桩顶荷载-沉降曲线和端阻比变化情况。

4.1.1 荷载-沉降曲线

图 8 是整个模拟计算过程中心桩的桩顶荷载-沉降关系在两种桩端条件下的变化曲线,从图中可以发现:

(1) 两种情况下的桩顶 $Q-s$ 曲线表现出不同的形状,情况 1 为直线缓变型,表现出典型的端承桩性状;情况 2 为曲线突变型,表现出典型的摩擦桩性状。

(2) 情况 1 在增层开挖过程中桩顶出现微小回弹,而情况 2 在增层开挖过程中桩顶没有出现回弹,反而继续下沉,究其原因情况 1 在开挖之前的承载还远没有达到极限值,而情况 2 在开挖之前的承载已超过极限值。

(3) 在同样大小的桩顶荷载作用下,情况 1 的沉降值小于情况 2,情况 1 的桩顶刚度明显较情况 2 大,若按文献[15]估算单桩承载力极限值,则情况 1 时为 10 253 kN,情况 2 时为 5 284 kN,两者相差一倍左右。

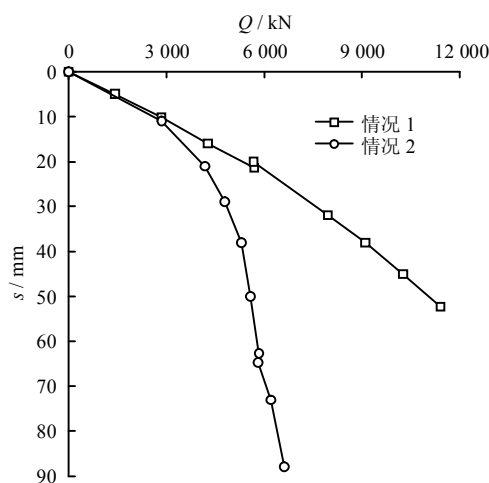


图 8 不同桩端土体刚度时中心桩 $Q-s$ 曲线

Fig.8 $Q-s$ curves of central pile for different end-bearing soil stiffnesses

4.1.2 端阻比

图 9 是开挖完成后加载阶段时两种情况下的中心桩端阻比变化曲线,可以看出:

(1) 增层开挖完成后, 即加载进度为 0 时, 情况 1 的端阻比值明显大于情况 2, 这说明桩端刚度越大, 则其端阻比值越大。

(2) 随着加载的进行, 加载进度逐渐增大, 情况 1 端阻比值逐渐增大, 且开始时增大速度较大; 而情况 2 端阻比值随加载进度变大而只有微小增大, 说明其端阻比值已接近于临界值, 桩端刚度较大时对提高端阻比临界值有明显作用。

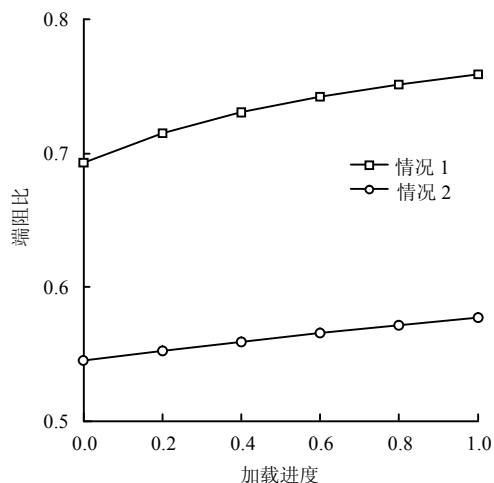


图 9 不同桩端土体刚度时中心桩端阻比
Fig.9 Tip resistance ratios of central pile for different end-bearing soil stiffnesses

4.2 增层开挖深度

按照工程前期规划, 增层开挖深度为 4.5~10.0 m 不等。下面就这一情况, 分析不同增层开挖深度时中心桩的桩侧摩阻力和端阻比变化曲线。

4.2.1 桩侧阻力

图 10 是中心桩在增层开挖之前和增层开挖完成时的桩侧摩阻力沿桩身分布曲线。从图中可以看出:

(1) 不管是在增层开挖前还是增层开挖后, 桩侧摩阻力沿桩身分布均按相应土层刚度发挥出不同大小值, 但总体来说, 有中间大两头小的趋势。

(2) 桩侧摩阻力沿桩身分布大小均有: 增层开挖之前<增层开挖 6.0 m<增层开挖 8.0 m<增层开挖 10.0 m, 这说明随着增层开挖深度增大, 桩侧摩阻力发挥值越来越大。当开挖到某一深度时, 桩侧摩阻力达到极限值, 同时说明施工过程中开挖越接近坑底, 桩侧摩阻力越大。

4.2.2 端阻比

图 11 是不同增层开挖深度时中心桩端阻比在加载过程中的变化曲线, 从图中可以看出:

(1) 随着加载的进行, 加载进度值增大, 端阻比值越来越大, 在开始时增大较快, 而后越来越慢, 直至达到某个临界值, 这与图 5 的结论一致。

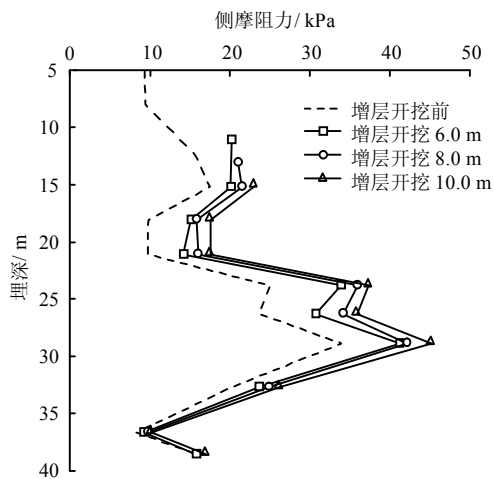


图 10 不同开挖深度时中心桩侧摩阻力
Fig.10 Shaft resistance of central pile for different excavation depths

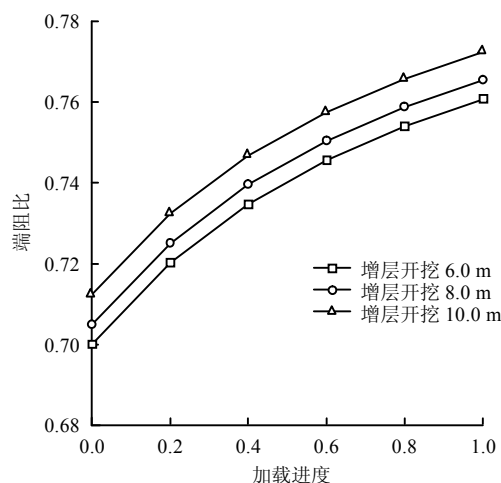


图 11 不同开挖深度时中心桩端阻比
Fig.11 Tip resistance ratios of central pile for different excavation depths

(2) 随开挖深度增大, 端阻比逐渐增大, 这说明增层开挖深度越大, 桩端阻力的发挥值越大; 施工过程中开挖越接近坑底, 桩端阻力越大。说明适当增大开挖深度有助于端阻的充分发挥。

5 结 论

(1) 在同等的桩顶荷载作用下, 中心桩的沉降值最大, 边桩和角桩依次减小; 在增层开挖过程中, 桩顶均出现一定回弹; 桩端刚度较小时, $Q-s$ 曲线由直线缓变型变为曲线突变型, 单桩极限承载力急剧下降。

(2) 中心桩的桩身轴力最大, 边角桩的轴力值依次减小; 在开挖段的桩身轴力只有重力增加值, 而在未开挖段土体下部, 轴力衰减较快。

(3) 桩侧摩阻力值中心桩最大, 边角桩较小, 呈两头大中间小趋势; 开挖前较小, 开挖后增大;

开挖深度越大, 桩侧摩阻力发挥值越大, 开挖越接近坑底, 其值越大。

(4) 随着加载的进行, 端阻比逐渐增大, 开始增大较快而后变缓并趋于某临界值; 桩端刚度较大时可以明显提高端阻比临界值; 开挖深度越大, 开挖越接近于坑底, 端阻比值越大, 适当增加开挖深度有助于桩端阻力发挥。

(5) 桩顶回弹量中心桩最大, 内角桩依次减小; 基坑中心区域土体回弹量大, 角点回弹量小, 开挖导致基坑中心卸荷作用明显。

参考文献

- [1] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behavior during excavation[J]. **Geotechnique**, 1994, 44(4): 681—689.
- [2] 贾强, 应惠清, 张鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2053—2057.
JIA Qiang, YING Hui-qing, ZHANG Xin. Construction of basement in existing buildings by static bolt-pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2053—2057.
- [3] 贾强, 张鑫, 应惠清. 桩基础托换开发地下空间不均匀沉降的数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3500—3505.
JIA Qiang, ZHANG Xin, YING Hui-qing. Numerical analysis of settlement difference for pile foundation underpinning for constructing underground space[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3500—3505.
- [4] 酆建俊, 黄茂松, 木林隆, 等. 分层地基中扩底桩抗拔承载力的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1997—2004.
LI Jian-jun, HUANG Mao-song, MU Lin-long, et al. Research on computation methods of uplift capacity of enlarged base pile in layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1997—2004.
- [5] 酆建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 软土地基中扩底抗拔中长桩的极限承载力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2643—2651.
LI Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, et al. Analysis of uplift capacity of long enlarged-base pile in soft soil ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2643—2651.
- [6] 胡琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1965—1970.
HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1965—1970.
- [7] 郑刚, 张立明, 刁钰. 开挖条件下坑底工程桩工作性状及沉降计算分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3089—3096.
ZHENG Gang, ZHANG Li-ming, DIAO Yu. Analysis of working performance of piles beneath excavation bottom and settlement calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3089—3096.
- [8] ZHENG GANG, PENG SIYUAN, CHARLES W W NG, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2012, 49(12): 1347—1356.
- [9] 王成华, 刘庆晨. 考虑基坑开挖影响的群桩基础竖向承载性状数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1851—1856.
WANG Cheng-hua, LIU Qing-chen. Numerical analysis of vertical bearing behavior of pile group foundation considering pit excavation effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1851—1856.
- [10] 李德宁, 楼晓明, 杨敏. 上海地区基坑开挖卸荷土体回弹变形试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 244—249.
LI De-ning, LOU Xiao-ming, YANG Min. Experimental researches on unloading resilient deformation properties during excavations in Shanghai area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 244—249.
- [11] 浙江城建建筑设计院. 浙江饭店翻扩建工程施工图[R]. 杭州: 浙江城建建筑设计院, 1996.
- [12] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1978, 104(12): 1465—1488.
- [13] 杭州市勘察测绘院. 浙江饭店翻扩建工程地质勘察报告[R]. 杭州: 杭州市勘察测绘院, 1996.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.