

基于 FLAC3D 对大连某工程桩基承载力 数值模拟研究

张颖^{1,2}, 陈晨^{1,2}, 王彧佼³, 靳成才^{1,2}, 张晗^{1,2}, 潘栋彬^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116021)

摘要:利用 FLAC3D 软件针对大连某工程桩基的承载力进行数值模拟,对比分析了普通桩和扩底桩的承载力。研究表明:利用 FLAC3D 软件模拟普通桩 $Q-s$ 变化,在相同荷载下,模拟与实测的 $Q-s$ 曲线吻合,说明建立的 FLAC3D 模型比较适用于本工程问题研究。利用建立的 FLAC3D 模型对在 6000 kN 荷载、桩身直径相同的条件下的扩底桩和普通桩进行受力分析,桩顶应力一样的条件下,桩端应力减少 50%,改善了桩端受力条件。在桩长不变的条件,研究了缩小桩径的扩底桩的承载力,其用料占普通桩的 61.2%,模拟结果表明,缩小直径扩底桩能够达到工程荷载要求,并且降低了成本。建议对原有的设计进行修正并为类似工程提供理论依据。

关键词:FLAC3D 软件;桩基础;单桩荷载值;桩顶位移量;桩体破坏;扩底桩;桩身直径

中图分类号:TU473.1⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)05-0065-07

FLAC3D based numerical simulation of bearing capacity of pile foundation in Dalian

ZHANG Ying^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}, WANG Yujiao³, JIN Chengcai^{1,2},
ZHANG Han^{1,2}, PAN Dongbin^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of
Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China;

3. China Northeast Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Dalian Liaoning 116021, China)

Abstract: The bearing capacity of large diameter piles in Dalian is simulated with FLAC3D software, and the bearing capacity of conventional piles and bell-out piles are compared and analyzed. The results show that the FLAC3D software simulated changes in $Q-s$ curves fit the actual measured ones for conventional piles under the same load, indicating that the established FLAC3D model is suitable for study of those piles. The FLAC3D model is used to analyze stress of bell-out piles and conventional piles under the condition of 6000kN load and the same pile diameter. Under the condition of the same stress at the top of pile, the stress at the end of pile is reduced by 50%, and the stress condition at the end of pile is improved. Under the condition of the same pile length, the bearing capacity of the bell-out pile with reduced diameter is studied. The material used is 61.2% of the conventional pile. The simulation results show that the bell-out pile with reduced diameter can meet the engineering load requirements and reduce the cost. It is suggested that the original design should be revised to provide a theoretical basis for similar projects.

Key words: FLAC3D software; pile foundation; single pile load value; top displacement; pile failure; bell-out pile; pile diameter

收稿日期:2019-01-24; 修回日期:2019-03-29 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.05.012

作者简介:张颖,男,汉族,1993 年生,硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为新能源钻采技术,吉林省长春市西民主大街 938 号,1070190395@qq.com。

通信作者:陈晨,男,汉族,1965 年生,教授,博士生导师,主要从事非常规能源开发技术、极地钻探施工技术、岩土工程施工技术的研究及教学工作,吉林省长春市西民主大街 938 号,chenchen@jlu.edu.cn。

引用格式:张颖,陈晨,王彧佼,等.基于 FLAC3D 对大连某工程桩基承载力数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):65-71,85.
ZHANG Ying, CHEN Chen, WANG Yujiao, et al. FLAC3D based numerical simulation of bearing capacity of pile foundation in Dalian[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):65-71,85.

0 引言

由于大直径钻孔灌注桩具有单桩承载力高、对周边环境影响小,可以在钻孔过程中查实地层情况,根据地层构造选用适当直径等优点,被广泛使用^[1-5]。保障建筑物的安全稳定是保证施工人员及住户安全的重要措施。根据资料显示,近几年地基失稳现象层出不穷,其原因是桩基础属于地下工程,周围环境十分复杂,其施工质量检测十分困难,而且易产生误差,同时后期的监测及管理难度大,所以存在数据精确性不高等问题^[6-9]。

数值模拟手段在岩土工程方面已经广泛应用。相比现场与室内试验而言,数值模拟具有很大的优势,一方面,成本低,可以多次重复试验,而且开展不同条件下的模拟,找出最合理的参数;另一方面,可以得到任意时刻的位移与变形,可以进行深层次的研究^[10-11]。孔汇川^[12]利用 FLAC3D 软件对深基坑施工过程进行数值模拟并对深基坑稳定性进行分析,秦浩等^[13]利用 FLAC3D 软件对受降雨入渗后边坡的稳定性进行分析,李一凡等^[14]采用 FLAC3D 软件对煤矿开采沉陷预计过程进行研究,朱安龙等^[15]基于 FLAC3D 软件对让压锚索边坡的加固机理进行数值模拟研究。所以 FLAC3D 软件在模拟计算深基坑和边坡稳定性、煤矿开采的沉陷、压锚索边坡加固机理等方面有着广泛的应用。关于利用 FLAC3D 软件计算基础桩承载力的课题,目前研究的较少。李坛等^[16]利用 FLAC3D 软件对夯扩 CFG 桩复合地基承载性能进行了研究。在桩顶荷载值分析计算过程中,FLAC3D 软件采用显式“拉格朗日算法”和“混合-离散分区技术”等来进行迭代计算,模拟结果相对于其他的软件更加合理与精准,因此本文用 FLAC3D 软件对大直径钻孔灌注桩桩基础进行模拟^[17-20]。

以往的数据及资料显示,扩底桩具有提高桩基础的承载力,增加桩体与土体之间侧摩阻力等优点,被广泛应用^[21-22]。本文基于大连市西岗区某工程的实际资料采用的普通桩,利用 FLAC3D 软件对普通桩与相同直径扩底桩、缩小直径扩底桩桩基础进行模拟,对比分析桩顶承载力与位移量曲线,对扩底桩进行优化设计,进而得出即可以提高承载力又可以节约材料的桩体设计方案;并通过模拟分析,为类似工程的设计提供理论依据,在施工方案上提供经验上的指导。

1 模拟原理

FLAG3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)是由 ITASCA 公司研发,运用三维有限差分程序的方法,对岩石、土体等介质上的三维受力点进行模拟计算的软件。FLAG3D 在分析受力情况时,必须建立有限差分网格,得到材料特性与本构关系式及边界条件等参数^[9-12]。

在分析受力过程中,FLAG3D 使用了混合离散的方法。简单来说,把众多常应变六面体看作角点常应变四面体的集合,四面体单元结构如图 1 所示。我们只需要计算四面体单元应力、应变等变量,然后用四面体的加权平均值计算六面体单元的变量值。

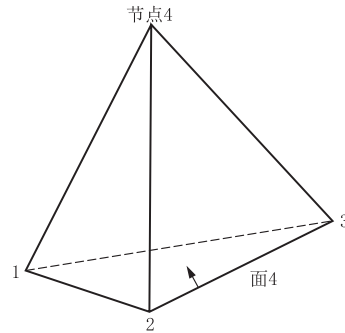


图 1 四面体单元

Fig.1 Tetrahedron element

假设在四面体单元内的速率分量为 V_j ,由高斯定理可知:

$$\int_V V_{ij} dV = \int_s V_i n_j ds \quad (1)$$

式中: V ——体积; s ——表面积; n_j ——外表面单位法向量的分量,由于线性分布, n_j 为常量。

$$V_{i,j} = -\frac{1}{3}V \sum_{i=1}^4 V_i^1 n_j^{(1)} S^{(1)} \quad (2)$$

式中:1——点上应变;(1)——面上应变。

节点运动方程为:

$$\partial v_i^1 / \partial t = F_i^1(t) / m^1 \quad (3)$$

式中: $F_i^1(t)$ ——在 t 时刻,1 节点 i 方向的不平衡力分量; m^1 ——1 节点的集中质量。

根据中心差分方法近似可得:

$$V_i^1(t + \Delta t/2) = V_i^1(t - \Delta t/2) + F_i^1(t) m^1 \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta e_{ij} = 1/2(V_{i,j} + V_{j,i}) \Delta t \quad (5)$$

通过式(5),可以得出应变增量,进而计算出应力,根据求解的循环语句得到模拟结果图及数据^[9]。

2 模型的建立

2.1 边界条件

本文将土体设置为 Mohr-Coulomb 模型,桩体设置为 Elastic 模型,对桩体与土体共同作用的位移场和应变进行模拟^[19]。由于模型与桩体范围差别较大,模型采用周边侧向约束的边界条件,即模型底部及周侧约束,模型顶部($z=24$ 的平面)为不受约束的自由面^[13-17]。通过应变增量函数求出总应力,进而得出下一时步节点的不平衡力大小,并开始先一步计算。使振动可以逐渐衰减到零的平衡状态,此次模拟引入非粘性阻尼,并采用 0.8 的阻尼系数。

本文选取大连某工程中桩基资料和数据,桩端持力层为中风化板岩、强风化板岩,根据钻探资料,场区第四系覆盖层厚度 5~20 m^[9]。桩的混凝土强度等级 C40,单桩竖向抗压承载力极限值为 11000 kN。工程采用的混凝土灌注桩桩径为 0.8 m,桩长 16 m,土体与桩体的物理力学参数如表 1 和表 2 所示。体积模量 K 和剪切模量 G 通过勘察报告中土体的变形模量 E 和泊松比 ν 来确定,转换关系如下:

$$K = E / [3(1 - 2\nu)] \quad (6)$$

$$G = E / (1 + 2\nu) \quad (7)$$

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层类型	标高/ m	c / kPa	φ / (°)	弹性模量 E /MPa	泊松 比 ν	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
杂填土	17~24	0	9	100	0.42	1860
粉质粘土	12~17	31.08	9.33	180	0.40	1900
全风化板岩	9~12	22	20	289	0.39	2000
强风化板岩	4~9	40	30	2372	0.36	2100
中风化板岩	0~4	70	40	13662	0.30	2500

表 2 桩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of piles

桩长/ m	桩径/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松 比 ν	弹性模量 E /Pa	剪切模量 G /Pa	体积模量 K /Pa
16	0.8	2400	0.2	3.25×10^{10}	1.354×10^{10}	1.81×10^{10}

2.2 桩基础模型

根据实际资料,本文建立了土体与桩体都存在的模型,其中土体直径为 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 24 \text{ m}$,土体类型为杂填土、粉质粘土、全风化板岩、强风化板岩、中风化板岩。内嵌的圆柱桩体类型选取普通桩、相同直径扩底桩、缩小直径的扩底桩 3 种模型进行模拟,

其尺寸如表 3 所示。

表 3 桩体的尺寸

Table 3 Dimensions of piles

桩的类型	直身部分		扩底部分			总长/ m
	直径/ m	长度/ m	上部直 径/m	下部直 径/m	长度/ m	
普通桩	0.8	16				16
相同直径的扩底桩	0.8	16	0.8	1.6	2	18
缩小直径的扩底桩	0.6	16	0.6	1.2	2	18

根据表 3 中的桩体尺寸,本文建立了 3 种桩基础的模型:其中普通桩初始模型以坐标 (4, 4, 12) 为中心,坐标 (1, 1, 0) 为法向量的截面,如图 2 所示;相同直径扩底桩初始模型以坐标 (5.4, 5.4, 12) 为中心,坐标 (1, 1, 0) 为法向量的截面,如图 3 所示;为了区分相同直径扩底桩模型图,本文给出相同直径扩底桩与缩小直径的扩底桩桩体的对比图,如图 4 所示。

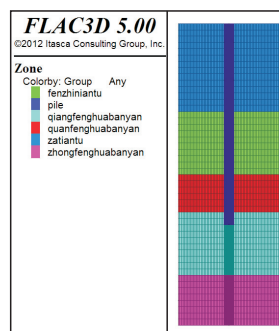


图 2 普通桩基础的基本模型
Fig.2 Basic model of conventional pile foundation

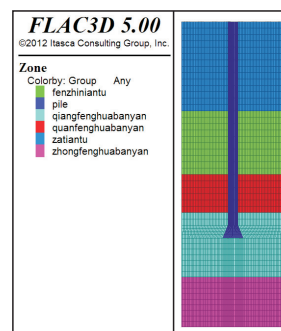


图 3 相同直径扩底桩基本模型
Fig.3 Basic model of bell-out pile with the same diameter

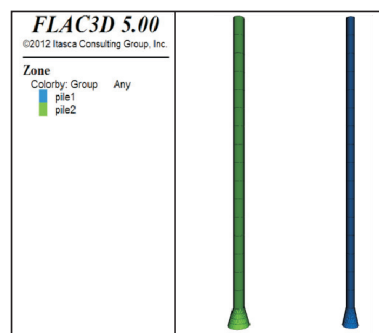


图 4 相同直径扩底桩与减小桩径扩底桩模型对比

Fig.4 Model comparison of the same diameter bell-out pile and the reduced diameter bell-out pile

3 模拟结果对比分析

3.1 自重应力条件下的结果对比分析

自重应力下普通桩模型最大不平衡力经过约

450000 时步缩小至 0.000001, 最终模型整体基本达到平衡状态, 得到图 5 所示的云图。而根据已经建立的相同直径扩底桩模型, 当重力加速度为 9.80 m/s^2 时, 经过大约 744000 时步运算, 此模型达到平衡, 得到图 6 所示的云图。进而本文对初始的应力场与位移场进行分析。

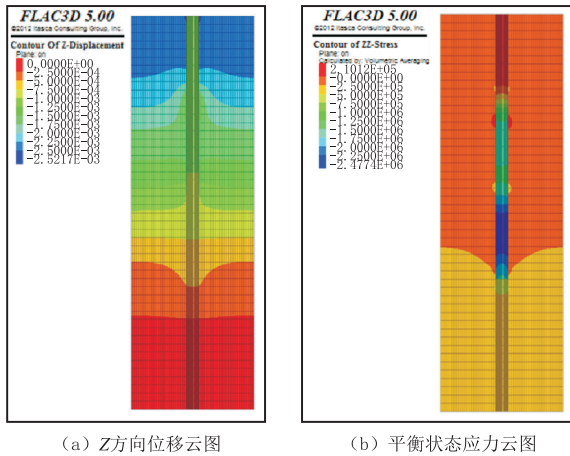


图 5 普通桩在自重应力条件下的云图

Fig.5 Cloud diagram of conventional pile under gravity stress condition

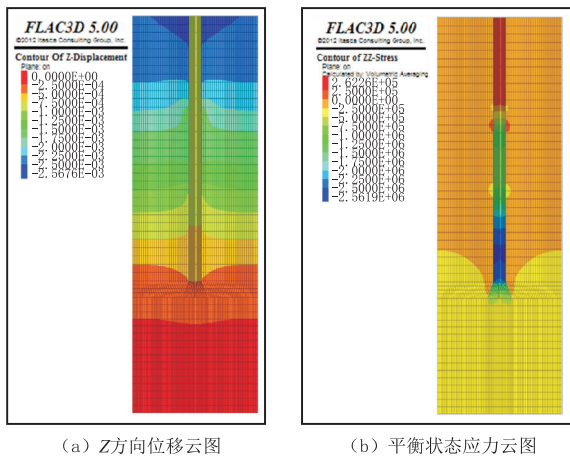


图 6 扩底桩在自重应力条件下的云图

Fig.6 Cloud diagram of bell-out pile under gravity stress condition

图 5(a) 为在自重应力条件下普通桩桩基础模型 Z 方向位移云图。由图可知, 在自重应力下模型达到平衡时, 沉降量约为 2.5 mm。由于桩周边存在摩擦力, 桩身和桩周围土体自上而下位移量逐渐减小; 加之底部持力层为风化板岩, 属于基岩, 所以 Z 方向的位移量极小。所以可以认为桩体上部位移量约为 1.35 mm, 下部约为 1.15 mm。

图 5(b) 为在自重应力条件下普通桩桩基础模型平衡状态应力云图。由图可知, 桩身应力从上到

下先变大后变小, 表明桩周存在的侧摩阻力是支撑其稳定性的主要因素; 由于在下部侧摩阻力没有完全发挥, 导致其应力逐渐减小。

图 6(a) 为在自重应力条件下相同直径扩底桩桩基础模型 Z 方向位移云图, 在自重应力作用的条件下, 扩底桩本身位移量约为 1 mm, 桩周土体的位移量由上到下逐渐减小, 且在扩底部分没有产生位移突变, 说明相同直径扩底桩桩体与土体有很好的结合作用, 同时证明了模型在自重应力条件下处于稳定状态。

图 6(b) 为在自重应力条件下相同直径扩底桩桩基础模型平衡状态应力云图。桩身 Z 方向应力从上到下呈现先增大后减小的现象, 桩底的应力较小, 大约为 750 kPa, 桩体应力最大的地方位于标高为 14~15 m 之间, 应力约为 2562 kPa, 说明扩底桩桩身的侧摩阻力没有发挥到极限。因此在实际制桩的过程中, 我们需要重点注意标高在 14~15 m 范围内的桩身质量, 保证桩身安全。

通过对比图 5(b) 与图 6(b) 可知, 在自重应力条件下, 普通桩和相同直径扩底桩的侧摩阻力均未达到极限值, 这与实际情况相吻合。说明我们建立的模型可以用于此次工程。而且在应力曲线中均有最大值, 这就为我们检测桩的好坏位置选取提供依据。通过对比图 5(a) 与图 6(a) 可知, 在自重应力条件下, 普通桩桩身整体位移略大于扩底桩桩身的整体位移。说明在大连此工程处的地层下, 相同直径扩底桩相对于普通桩具有较大承载力。两者的位移量相近, 所以建立的普通桩与相同直径扩底桩模型与实际工况相近, 建立的模型较为准确, 模拟结果准确可靠。

3.2 加载结果对比分析

为了使得到的加载结果准确, 本文利用循环代码程序实现加载过程。以 2000 kN 作为加载单位逐渐在桩顶施加荷载, 共施加 12 级荷载, 生成的图像如图 7 所示。图 7 中纵坐标代表桩顶的位移量, 横坐标代表桩顶受到的应力。桩顶横截面积为 0.5013 m^2 , 我们将面积近似认为是 0.5 m^2 。为了得到实际桩顶荷载值, 我们用横坐标的数值乘以面积, 便可得到普通桩模拟桩顶的荷载—位移曲线。实测资料显示, 以 2200 kN 为初始值, 以 1100 kN 为梯度值, 对普通桩桩基础的承载力进行试验, 得到不同荷载值所对应的位移值, 如表 4 所示。为了方

便对比分析试验与模拟结果,得到模拟值与实测值的荷载—位移曲线,如图 8 所示。为了发现桩体的破坏,本文认为当位移迅速增大时,说明桩结构发生了破坏,此时桩顶施加的荷载定义为极限荷载。

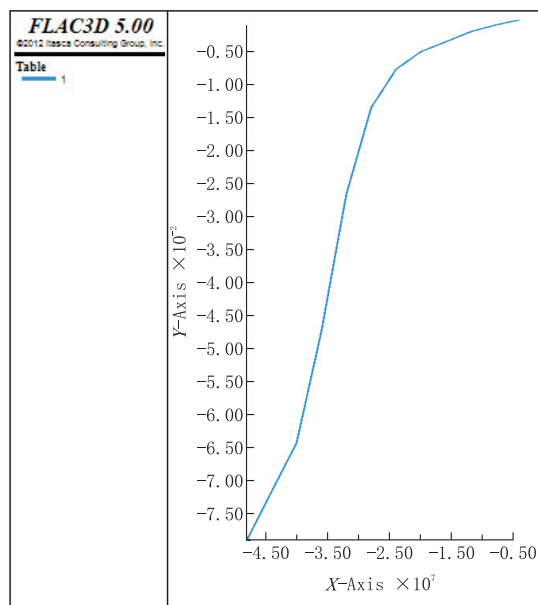


图 7 普通桩荷载作用下桩顶位移曲线

Fig.7 Displacement curve of pile top under loading for conventional pile

表 4 普通桩在不同荷载条件下对应的位移量实测值
Table 4 Measured displacements of conventional piles under different load conditions

荷载/kN	位移量/mm	荷载/kN	位移量/mm
2200	0.0012	7700	3.2420
3300	0.5663	8800	4.2015
4400	1.0222	9900	5.1450
5500	2.1141	11000	6.1460
6600	2.2821		

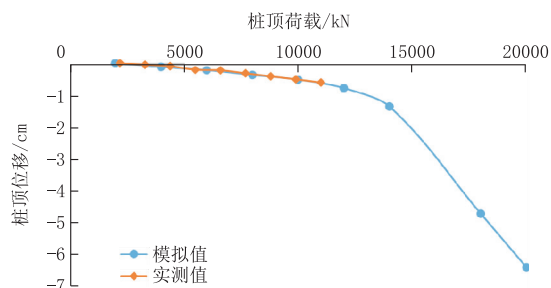


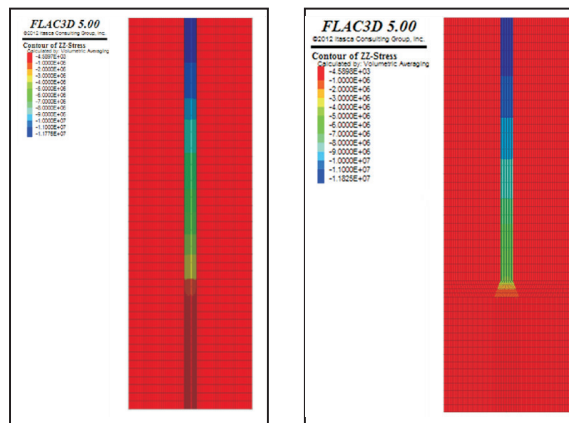
图 8 普通桩模拟值与试验值 $Q-s$ 曲线对比

Fig.8 Simulated vs test $Q-s$ Curves for conventional piles

由图 8 的 $Q-s$ 曲线可知,模拟值与试验值都随着横坐标值增加纵坐标值也在不断增大,说明位移量的大小与桩顶荷载呈正相关。根据模拟曲线可

以得出桩顶荷载值在 14000 kN 内时, $Q-s$ 曲线的斜率基本不变,说明桩与土体在相互作用时,前期随着桩顶荷载的增加,位移量在均匀增加;当荷载值由 6000 kN 变为 8000 kN 时,位移量由 22.3 mm 变为 37.6 mm,斜率值大约为 7.6×10^{-5} 。当 $Q-s$ 曲线的斜率值突然产生突变,说明桩正在由稳定转化为失稳状态,为了方便描述及记录桩达到的荷载值,笔者将 $Q-s$ 曲线中横坐标值突变点作为桩的极限承载力;当桩顶荷载为 14000 kN 时,其位移值为 13.69 mm;而桩顶荷载为 16000 kN 时,桩顶位移值为 26.81 mm;其斜率值大约为 6.56×10^{-4} 。在此过程中桩顶处突然增加了约 13 mm 的位移量,即桩沉降量约 13 mm。说明在 14000 kN 以后,其斜率值相对前期增加了一个数量级。我们不难发现,此阶段的位移量对上部建筑物的稳定性产生较大影响,因此把 14000 kN 作为模拟本工程使用的桩最大承载力。根据试验值的曲线,我们可以发现荷载值在 11000 kN 之内时,曲线呈直线上升趋势,斜率值基本不变,说明在荷载值增加的过程中,位移量均匀增加,桩没有发生破坏。通过载荷试验得出试验值曲线与模拟值曲线,两条曲线拟合的程度很高,说明 FLAC3D 软件此次模拟桩基础的单桩荷载值较为精确。

实际工程资料显示,在此项目中设计桩体受到的荷载值最低为 6000 kN。因此本文得出 6000 kN 荷载下的模型,进一步分析其受力状态,并得到普通桩和相同直径扩底桩的应力云图,见图 9。



(a) 普通桩 (b) 相同直径扩底桩

图 9 6000 kN 荷载下的应力云图

Fig.9 Stress nephogram under 6000kN load

由图 9(a) 6000 kN 荷载下普通桩的应力云图可知,桩顶应力为 11776 kPa,桩端应力约为 4000

kPa;由图 9(b) 6000 kN 荷载下扩底桩的应力云图可知,桩顶应力为 11825 kPa,桩端荷载 2000 kPa。两个图均出现桩身的 Z 方向应力从上到下逐渐减小的现象。这是由于当荷载为 6000 kN 时,由于土体与桩体相互作用的影响,桩身的侧摩阻力已经完全发挥作用且达到极限,桩端阻力开始承担一部分荷载。当在自重条件下荷载时,发现桩身的侧摩阻力还没有达到极限,桩端没有承担应力。因此本文得出随着荷载值的增加,桩身的侧摩阻力是逐渐增大,荷载值大于 6000 kN 时,桩身的侧摩阻力达到极限。

实际的桩设计资料显示,此次的大直径桩的类型属于端承摩擦桩,其目的是增加岩体与土体的摩擦力,减少桩本身承受的荷载值。当在单桩的顶部逐渐加荷载时,桩身会产生压缩,桩的侧面就会产生摩擦阻力,而且摩擦阻力随着荷载压力增加而增大。当侧摩阻力达到最大时,如果荷载继续增加,桩端阻力就会增加,所以会产生上述现象。本次施工选用端承摩擦桩不仅可以减少桩体的应力,而且可以使桩承受更大的荷载,保证施工的安全。

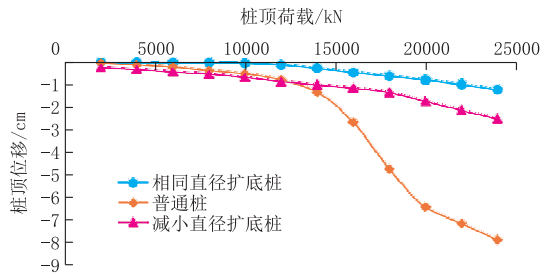


图 10 普通桩、相同直径扩底桩、缩小直径扩底桩的 $Q-s$ 曲线对比

Fig.10 $Q-s$ curves of common piles, bell-out piles with the same diameter and bell-out piles with reduced diameter

根据模拟得出的普通桩、相同直径扩底桩及减小直径的扩底桩的 $Q-s$ 曲线,绘制出如图 10 所示的 $Q-s$ 曲线对比图。由图可知,当桩顶荷载达到为 6000 kN 时,其位移值大约为 2.23、0.129、4.42 mm,位移值较小;而且此处的斜率基本不变,说明模型处于稳定状态。由此我们可以确定桩处于正常状态下,混凝土灌注桩能够满足实际使用过程中的承载要求。

根据实际情况,本文通过对比 6000 kN 荷载下的相同直径扩底桩和普通桩,我们可以发现普通桩桩端应力明显大于相同直径扩底桩;这是由于相同直径扩底桩底部面积相对较大,致使其在相同承载

力的情况下,应力就相对减小。根据图 10 可知,普通桩在 6000 kN 荷载条件下桩顶位移量为 2.23 mm,而相同直径扩底桩的位移量为 0.129 mm,位移量大约是 20 倍。通过分析可知,相同直径扩底桩的桩底部位有明显的扩大,这就使桩与持力层的接触面积增大,可以使桩端应力分布更加均匀;同时随着表面积的增加,桩周土侧摩阻力极限值增大,土体与桩体更加充分结合,这就导致相同直径扩底桩的桩底在相同承载力的情况下位移量相对较小。

通过对比分析相同直径的扩底桩和缩小直径的扩底桩曲线可知,桩顶的荷载由 2000 kN 增加到 24000 kN 的过程中,相同直径扩底桩桩顶位移量从 0 增大到 12.2 mm,斜率基本没有变化;缩小直径的扩底桩的桩顶位移量由 2.51 mm 增加到 25.15 mm,曲线没有发生突变。说明在过程中没有发生桩体的破坏。当荷载增加到此次模拟的极值时,两条曲线位移量都很小,上部建筑物不会发生失稳现象。因此本文认为相同直径的扩底桩和缩小直径的扩底桩的极限荷载在 24000 kN 之上。但由于相同直径扩底桩消耗的材料更多,所以缩小直径的扩底桩更优。

通过对比分析普通桩与缩小直径的扩底桩的 $Q-s$ 曲线可知,承载力 11000 kN 时,缩小直径的扩底桩的位移量高于普通桩的位移量,这是由于直径及高度的减小,导致桩周与土体接触面积减小,桩体与土体之间的侧摩阻力减小。根据两种类型桩在 6000 kN 承载力情况下的应力云图得知,此时侧摩阻力刚刚达到极限,随着承载力的增加,桩端阻力作用明显。由于缩小直径的扩底桩的桩底面积大,桩端阻力相对大,所以位移量小,当承载力为 11000 kN 时,致使位移量近似相等,符合实际情况。缩小直径的扩底桩的 $Q-s$ 曲线的斜率没有发生变化,而普通桩在 14000 kN 时发生突变。所以缩小直径的扩底桩的承载力明显好于普通桩。通过公式计算,缩径后扩底桩的体积约为 19.7 m^3 ,而普通桩的体积约为 32.2 m^3 ,每根桩相对减少 12.5 m^3 的混凝土,其用料占普通桩的 61.2%,在很大程度上降低成本。通过与柱基础设计规范对比,缩小直径的扩底桩在尺寸等方面均符合要求。

为了保证以后施工工程的安全、桩基础稳定、节约成本等,根据模拟结果显示,本文建议采用圆柱部分直径为 0.6 m、高为 12 m,扩底部分上直径为 0.6

m、下直径为 1.2 m、高为 2 m 的缩小直径的扩底桩。对原有的设计进行修正并为以后的类似工程提供理论依据。

4 结论

(1)利用 FLAC3D 软件模拟了普通桩 $Q-s$ 曲线变化,在相同荷载下,通过工程实测的位移值绘出 $Q-s$ 曲线与模拟曲线基本吻合,说明建立的 FLAC3D 模型比较适用于本工程问题研究。

(2)利用建立的 FLAC3D 模型对在 6000 kN 荷载、直径相同的条件下的扩底桩(桩的直身部分直径)和普通桩进行受力分析,普通桩桩顶应力为 11776 kPa,桩端应力约为 4000 kPa;扩底桩桩顶应力为 11825 kPa,桩端应力 2000 kPa;在 6000 kN 荷载下,桩端应力减少 50%,改善了桩端受力条件。

(3)在桩长不变的条件下,研究了缩小桩径的扩底桩的承载力,其用料占普通桩的 61.2%,模拟结果表明能够达到工程荷载要求,并且降低了成本。建议对原有的设计进行修正并为类似工程提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 陈晨.大直径扩底灌注桩现状及其发展方向[J].探矿工程,1991,(6):42-43.
CHEN Chen. Present situation and development trend of large diameter bell-out cast-in-situ piles[J]. Exploration Engineering, 1991,(6):42-43.
- [2] 刘雨岚.基于综合法的大直径基桩质量检测与评价[D].甘肃兰州:兰州理工大学,2016.
LIU Yulan. The quality testing and evaluation of large diameter piles based on a synthetic method[D]. Lanzhou Gansu: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [3] 裴迅,芮大虎,吴庆红,等.大直径深层钻孔灌注桩拔除工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):68-71.
PEI Xun, RUI Dahu, WU Qinghong, et al. Research on pulling-out technology for long bored pile with large diameter[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(1):68-71.
- [4] 张宏,鲍树峰,马晔.大直径超长桩桩身缺陷的超声透射法检测研究[J].公路,2007,(3):69-72.
ZHANG Hong, BAO Shufeng, MA Ye. Detection of defects in large diameter and super long piles by ultra-sonic transmission method[J]. Highway, 2007,(3):69-72.
- [5] 冯雪威.长春市中心医院基坑支护工程槽式地下连续墙数值模拟研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
FENG Xuewei. Research on trough type diaphragm wall applied in Center Hospital foundation pit engineering in Changchun[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2012.

- [6] 张振翻.大连金州新区万科城桩基工程及其质量控制[D].吉林长春:吉林大学,2015.
ZHANG Zhenhe. The pile engineering and the construction quality management of Dalian Jinzhou District Vanke City[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2015.
- [7] 孙其超.大直径深长钻孔灌注桩单桩竖向承载性能研究[D].上海:同济大学,2008.
SUN Qichao. Study on the vertical bearing capacity of large-diameter bored cast-in-situ long pile[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [8] 俞剑龙.钻孔灌注扩底桩抗拔承载力及耐久性研究[D].浙江杭州:浙江大学,2013.
YU Jianlong. Research of uplift mechanism and durability of bored pile with enlarged bottom[D]. Hangzhou Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
- [9] 王彧俊.大连西岗区某工程大直径桩基检测及承载力数值模拟分析[D].吉林长春:吉林大学,2018.
WANG Yujiao. Detection technology and bearing capacity numerical simulation analysis of large diameter pile foundations in a project in Xigang District in Dalian[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2018.
- [10] 任伟明,彭丽云,刘军.邻近地铁车站的基坑开挖基于 FLAC3D 数值模拟[J].岩土工程学报,2013,35(S2):276-280.
REN Weiming, PENG Liyun, LIU Jun. Numerical simulation of excavation of deep foundation pit adjacent to metro station based on FLAC3D[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(S2):276-280.
- [11] 高文华,刘正,张志敏.基于 FLAC3D 的粉砂岩压缩蠕变试验数值模拟研究[J].土木工程学报,2015,48(3):96-102.
GAO Wenhua, LIU Zheng, ZHANG Zhimin. Numerical simulation study on compression creep experiment of siltstone based on FLAC3D[J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(3):96-102.
- [12] 孔汇川.基于 FLAC3D 的深基坑施工过程数值模拟及稳定性分析[D].辽宁大连:大连海事大学,2016.
KONG Huichuan. Numerical simulation and stability analysis of deep excavation construction based on the FLAC3D [D]. Dalian Liaoning: Dalian Maritime University, 2016.
- [13] 秦浩,余洁.基于 FLAC3D 的公路边坡稳定性及降雨入渗的影响[J/OL].山东农业大学学报(自然科学版),2019,(2):1-2[2018-11-26].
QIN Hao, YU Jie. The stability of highway slope based on FLAC3D and the influence of rainfall infiltration on it[J/OL]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019,(2):1-2[2018-11-26].
- [14] 李一凡,刘成洲,崔腾飞,等.煤矿开采沉陷预计过程的 FLAC3D 数值模拟研究[J].北京测绘,2018,32(10):1156-1160.
LI Yifan, LIU Chengzhou, CUI Tengfei, et al. FLAC3D numerical simulation of coal mining subsidence prediction process[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018,32(10):1156-1160.

(下转第 85 页)