

开挖过程对桩基影响的工程实例对比分析

陈明^{1,2}, 李镜培^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用3维快速拉格朗日法(FLAC^{3D})建立了考虑基坑分步开挖对桩基础影响的动态计算模型. 该模型考虑了桩土之间的相对滑移作用, 土体采用摩尔-库伦计算模型. 计算分析了桩身轴力、桩身最大拉力值及其位置随开挖步的变化, 通过与实测值对比验证了模型的准确性, 进而对比分析了开挖前后桩基础承载性能的变化, 并探讨了开挖后桩基承载力的损失机理. 结果表明: 基坑开挖使桩身轴力发生明显的变化, 开挖后使桩基处于受拉状态, 桩身最大拉力值随开挖深度的增加而增大, 且其位置随开挖深度的增加而下移; 开挖使得桩基的承载性状发生了显著的变化, 由于土体卸荷回弹, 桩身上部土体对桩周的约束作用明显减小, 使得桩顶的荷载向下传递量明显增加; 开挖降低了桩基承载力, 其损失主要来自桩侧摩阻力.

关键词: 桩基础; 开挖; 承载性能; 有限差分法

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Metro Project-based Analysis of Excavation Impact on Pile Bearing Capacity

CHEN Ming^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Fast Lagrangian analysis of continua in three-dimension (FLAC^{3D}) was employed to investigate the effect on pile foundation after a staged excavation, which considered the relative slip between pile and soil and also realized the dynamic process of excavation, and the model was verified by the results of axial force changing in pile shaft, the maximum tension force in pile and its location through the comparative analysis between the measurement and calculate after the excavation, and then the impact on the bearing capacity of pile foundation was discussed. Results show that pile foundation is in tension state after excavation, the maximum tension is

increasing and the location is moving downward with the excavation depth; the bearing capacity changes significantly after excavation, the normal stress along pile shaft decreases sharply after excavation, especially on the pile top, which will cause the loss of bearing capacity in pile foundation.

Key words: pile foundation; excavation; bearing capacity; finite difference method

在建筑密集的城区, 由于受到施工场地和地基条件的限制, 高层建筑或地铁车站的桩基础往往先于基坑工程而施工. 在基坑开挖过程中, 坑内土体的开挖卸荷会使工程桩产生竖向位移, 并在桩身内出现拉力. 如在设计中未充分考虑开挖卸荷过程对桩基础的影响, 可能会导致桩基础出现较大的拉应力^[1-2], 甚至桩身断裂等质量缺陷^[3], 进而影响桩基础的承载性能. 因此, 合理确定开挖条件下桩基础的承载力已成为岩土工程中的热点问题之一.

现场足尺试桩试验能够较真实地反映桩基础的受荷状态及工作性能, 是了解开挖条件下桩基承载性能最直接可靠的依据. 但是, 由于受到施工场地和条件的限制, 原位试桩一般都在基坑开挖前进行, 通过在开挖段设置套管扣除开挖深度范围内桩侧摩阻力来获得桩基的承载力. 由于忽略了开挖卸荷对桩基础的影响, 采用常规设计及测试方法得到的桩基承载力与开挖完成后在开挖面处测桩得到的承载力存在差异; 因此, 对开挖条件下桩基础的承载力进行理论研究显得尤为重要.

有限单元法或有限差分法是分析开挖条件下桩基础承载性能和沉降特性的有效方法, 能考虑复杂的因素如桩基础-土体-支撑结构之间的相互作用、群桩效应、土体的分层特性^[4-7], 并可实现基坑分步开挖施工过程对桩基的影响等.

收稿日期: 2013-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(41272288); 上海市科技攻关计划(10231200500)

第一作者: 陈明(1979—), 男, 工学博士, 主要研究方向为地基处理、桩基础和基坑工程. E-mail: andychen79@126.com

通讯作者: 李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土的工程性质、桩基础与深基础.

E-mail: lijip2773@tongji.edu.cn

本文采用快速拉格朗日方法(FLAC^{3D})建立了考虑桩土相互滑移以及模拟基坑开挖动态施工过程的 3 维分析模型,从桩身轴力变化、桩身最大拉力及其位置进行了分析探讨,通过与实测结果对比,验证了分析模型的准确性。然后对开挖后的桩基加载至设计荷载值,对比分析了实测结果与理论计算结果的差异,并探讨了开挖卸荷对桩基承载性能影响的机理。最后,针对开挖条件下的钻孔灌注桩基础,给出了相应的设计建议。

1 数值分析方法

FLAC^{3D}是基于快速拉格朗日方法的显示有限差分程序,可较好地解决诸多其他数值方法难以模拟的复杂工程问题,如分步开挖、大变形大应变、非线性以及桩土之间的共同作用等^[8]。

1.1 计算模型及边界条件

参照文献[9]地铁车站桩基础工程项目,建立了本文的数值分析模型。该项目开挖区域长 270 m,宽 10 m,开挖总深度 9.5 m。基础工程由 324 根摩擦桩组成,开挖后桩基的有效长度为 15 m,桩径为 1 m,桩间距为 8 m。基础工程的主要施工步骤如下:

- (1)对开挖区域进行降水;
- (2)对地下结构的上部土体注浆加固;
- (3)开挖工作巷道(3.50 m×3.65 m);
- (4)施工桩基础,桩顶标高位于-22.75 m;
- (5)拓宽工作巷道,施工地下连续墙(钻孔灌注桩,桩径 $d=600$ mm,桩长 $l=12$ m);
- (6)地铁线区域的开挖,开挖至-22.75 m处。

现场剖面如图 1 所示。

根据文献[10]的研究结论,对于本工程采用 8 m 的桩间距时,可以忽略群桩效应的影响。因此,考虑到土体开挖及地铁线路的对称性,取轴线宽度的一半建立模型,并选取一个桩间距断面进行分析,则开挖区域为 8.0 m×5.0 m×9.5 m,其中桩身轴线距中轴线的距离为 3.4 m,如图 2 所示。

开挖区域外围土体尺寸的确定根据文献[11-12]中建议的方法,在 x, y 方向取 4 倍的开挖深度, z 方向取开挖面下 3 倍的桩长,则分析模型的总尺寸为 8.0 m×43.0 m×54.5 m,如图 2 所示。整个 3 维模型单元数为 10 056 个,总节点数为 11 859 个。模型外边界采用侧向约束,对称轴采用对称边界,模型底部全约束。计算分析中开挖分为两步,第 1 步开挖深度为 3.65 m,第 2 步开挖深度为 5.85 m。

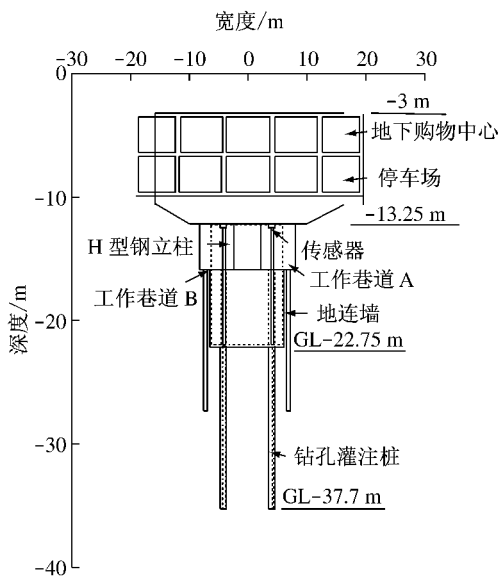


图 1 工程项目剖面示意图^[9]

Fig.1 Sectional view^[9]

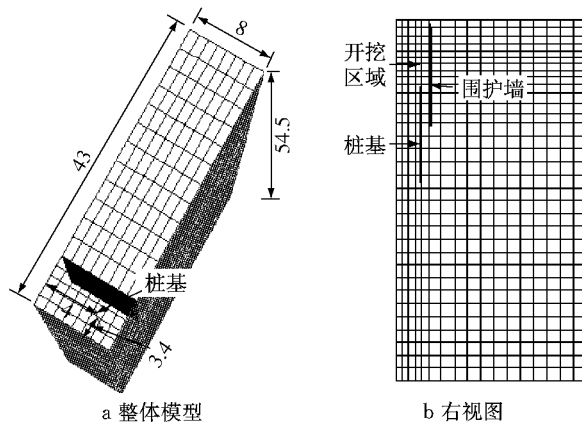


图 2 计算模型(单位:m)

Fig.2 Numerical model(unit:m)

1.2 本构模型及材料参数

模型分析中,土体由六面体单元模拟,采用摩尔-库伦本构计算模型分析,桩基础采用桩结构单元模拟,由于桩基础为钻孔灌注桩,视为弹性材料,采用线弹性本构计算模型,考虑桩土之间的滑移作用,通过设置 Slide on 命令实现。围护墙采用衬砌单元模拟,采用线弹性本构计算模型,考虑围护结构与土体的相互作用,其接触面算法的实现采用文献[13]中的方法。由于篇幅限制,在此不赘述。

计算中不考虑基坑降水的影响,采用总应力法计算。土体、围护结构及桩基础的计算参数参考文献[9],如表 1 所示,接触面计算参数如表 2 所示。根据文献[14]的研究,桩土界面摩擦角取 $\delta=0.75\varphi'$ 。

1.3 模型验证

文献[9]中,作者详细报道了监测桩(MP1)的桩身轴力随开挖施工进度变化的动态过程。本节根据

表 1 材料物理力学参数及本构计算模型

Tab.1 Parameters of materials and calculation model

材料名称	本构模型	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν'	黏聚力 c'/kPa	摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	剪胀角 $\Psi/ (^{\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
砂土	摩尔-库仑	40	0.30	0	31	0	17.5
黏土	摩尔-库仑	25	0.35	20	30		17.5
桩基	弹性	24 000	0.20				25.0
地连墙	弹性	21 000	0.20				25.0

注:表中土体计算参数由文献[9]的作者 Iwasaki Y. 建议.

表 2 接触面计算参数表

Tab.2 Parameters of interface

材料	黏聚力/ kPa	切向刚度 $k_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	法向刚度 $k_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	剪胀角/ $(^{\circ})$	抗拉强度/ kPa	内摩擦角/ $(^{\circ})$
砂土	0	4.0	4.0	0	0	23.0
黏土	20	2.5	2.5	0	0	22.5

该项目的实际施工过程,分析计算了桩身轴力、桩身最大拉力值及其位置随开挖深度的变化,并与实测值进行对比,用以验证模型的准确性.

根据实际工程的建设过程,本节数值分析步骤如图 3 所示.分析中不考虑地下水的作用,实际开挖

过程中,先开挖工作巷道至 -16.9 m ,然后拓宽工作巷道,开挖至 -21.0 m ,最后开挖至 -22.75 m .在分析中对开挖步进行了简化,由拓宽工作巷道直接开挖至 -22.75 m .

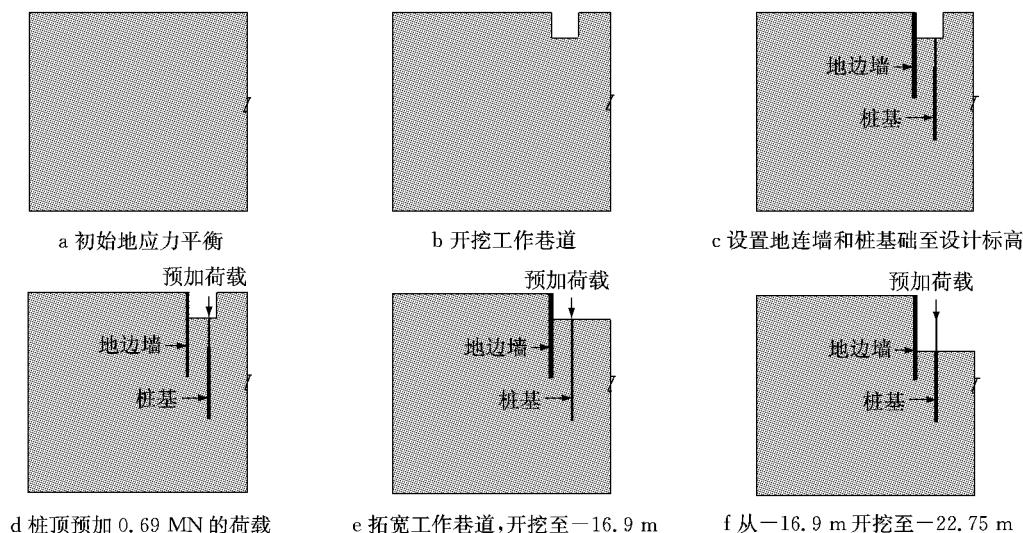


图 3 数值分析步骤

Fig.3 The steps of numerical analysis

现场剖面、土层分布及各土层的 SPT 值 (standard penetration test, 标准贯入值) 详见文献 [9].

图 4 为实测值和计算值的对比.可以看出,计算值与实测值的变化规律一致.开挖前在桩顶施加了 0.69 MN 的荷载,此时桩基处于受压状态.随着开挖深度的增加,桩身轴力发生了明显的变化,桩身上部轴力随开挖深度的增加而增大,而桩身下部轴力逐渐减小,并由受压状态变为受拉状态.同时也可以看出,桩身拉力随开挖深度的增加而增大,且最大拉力位置随开挖深度的增加而下移,其分析结果与文献 [15] 中的结论相一致.当开挖完成时,实测桩身最大

拉力值为 0.8 MN ,位于桩身 $0.83L_p$ (L_p 为桩基在基坑内的有效插入深度) 处,计算桩身最大拉力值为 0.37 MN ,位于桩身 $0.67L_p$ 处.从图 4 可以看出,计算值小于实测值,究其原因,是由于实际项目的开挖是从地表下 -13.25 m 开始,而数值分析从地表开挖,两种工况下挖深虽然相同,但是土体的应力状态却有差异,在实际项目中,土体埋深大,当进行开挖时,土体回弹的影响深度也更大;另一方面,降水会使桩基产生负摩阻力,会对桩身轴力有影响,而在数值分析中未考虑降水的作用.

表 3 为 MP1 桩顶在各个施工步时的最大荷载值以及桩身最大拉力及其位置.可以看出,随着开挖

的进行,土体卸荷对桩基的影响增大,导致了桩顶轴力在增大.但是计算值要小于实测值,这是由于模拟分析中未考虑上部结构对桩顶的约束作用.同时表中还对比了桩顶回弹量的实测值和计算值,由于实际工程中对开挖区域的土体进行了注浆加固,而在模拟分析中未考虑注浆加固效应,因此,计算值小于实测值.虽然计算值与实测值有一定的偏差,但是计算结果较好地反映了开挖阶段对桩基的影响规律,这也验证了数值模型的准确性和计算方法的可靠性.

表 3 施工过程中桩顶最大轴力变化及开挖完后桩身拉力值对比

Tab. 3 Comparison of the calculated values and the measured values of the maximum tension force in pile foundation during the construction

结果对比	桩顶最大荷载/MN			桩身拉力/MN	桩顶回弹量/mm
	预加 0.69 MN 荷载	拓宽工作巷道	最终开挖		
实测值	0.50	1.00	1.71	0.80	25
计算值	0.57	0.72	1.42	0.34	34

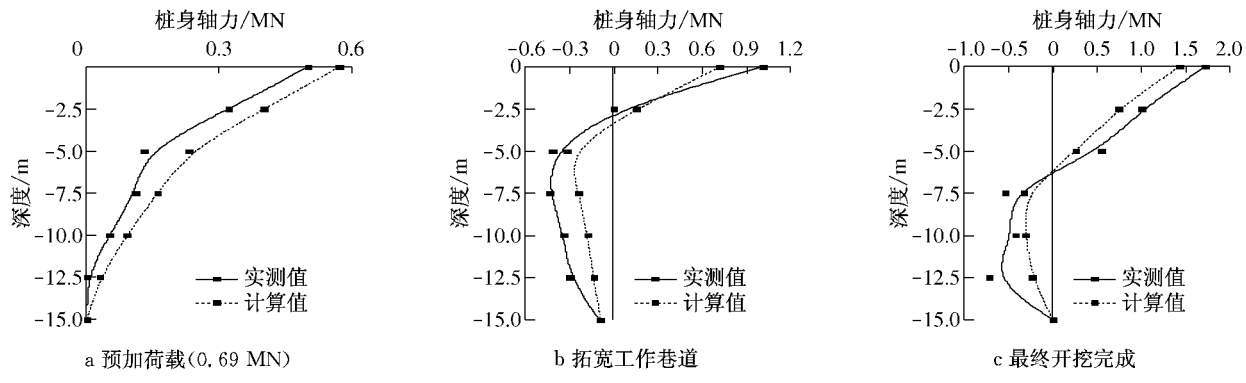


图 4 各开挖步骤桩身轴力实测值与计算值对比

Fig. 4 The comparison between the measured and the calculated values of pile axial force

2 桩基承载力变化分析

目前,开挖条件下的桩基测试基本采用地面套管试桩法,因此,本节数值分析采用两种试桩方法对比开挖前后桩基承载力的变化,分别为 TU 试桩法 (tested the pile un-considering the excavation) 和 TC 试桩法 (tested the pile considering the excavation). TU 测试用以模拟地面套管试桩法,TC 测试用以模拟开挖终面处试桩法,如图 5 所示.模型分析中,对 TU 法开挖深度范围内的桩单元只赋予几何和材料属性,而不赋予耦合弹簧计算参数,由此可以模拟套管的作用.

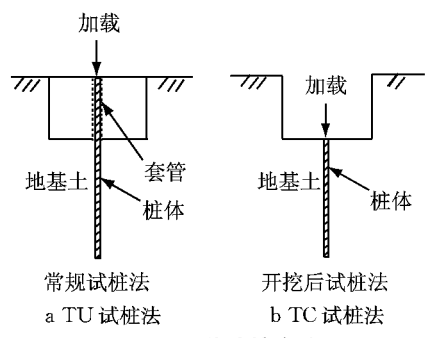


图 5 两种试桩方法

Fig. 5 The methods of test pile

2.1 分析模型的实施步骤

2.1.1 TU 试桩

文献中对 MP1 的监测报导是在工作巷道开挖后及桩基、地连墙施工完成后开始的,此时的监测可以认为是未受开挖影响的结果.根据实际工程项目的施工步骤,其分析过程如下:① 初始土地应力平衡;② 开挖工作巷道,并设置桩基和地连墙至设计标高;③ 在-16.9 m 处分级施加荷载至设计荷载 1 760 kN,每级荷载增量为 350 kN.

2.1.2 TC 试桩

分析过程包括:① 初始土地应力平衡;② 开挖工作巷道,并设置桩基和地连墙至设计标高;③ 拓宽工作巷道,开挖至-16.9 m 处;④ 从-16.90 m 处开挖至-22.75 m;⑤ 在桩顶标高处-22.75 m 分级施加荷载至 1 760 kN,每级荷载增量为 350 kN.

2.2 开挖前后桩基础荷载-沉降曲线对比

图 6 为开挖前后桩基的沉降-位移实测值和计算值的对比.可以看出,未开挖条件下计算值与实测值吻合性较好,但略小于实测值.这是由于实际工程试桩是位于地表下-13.25 m,而 TU 试桩是位于地表,实际工程中土体的强度大于计算模型中的强度;另外,实际工程中对-13.25 m 至-16.90 m 的土体进行了注浆加固,而在数值分析中未考虑此因素.同时,由图可以看出,开挖影响了桩基础的承载性能,

开挖后降低了桩基础的承载力,相同荷载水平作用下,开挖后桩基的沉降要大于开挖前的沉降值. 本案例分析中,在设计荷载作用下,由于开挖造成的承载力损失约为 13.6%,而文献[9]估算的承载力损失范围为 10%~20%,说明分析模型较好地预测了开挖后桩基承载力的损失.

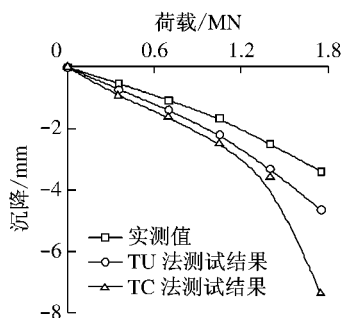


图6 开挖前后桩基荷载-沉降曲线对比

Fig.6 The comparison between TC and TU of pile foundation $p-s$ curves

2.3 桩顶荷载沿桩身传递规律

图7为分级加载时,桩顶荷载沿桩身传递的实测值与计算值对比.

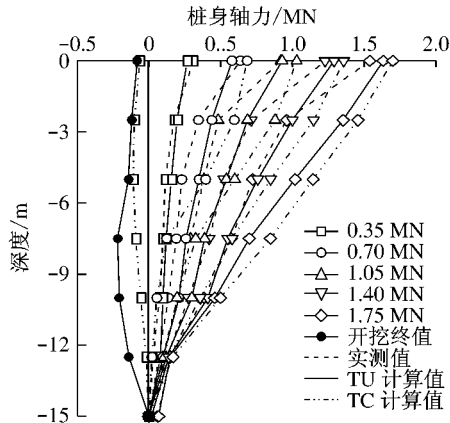


图7 开挖前后桩基桩身轴力对比

Fig.7 The comparison between TC and TU of pile axial force

由图7可以看出,未开挖时,计算值与实测值有一致的变化规律,但略大于实测值. 开挖后,使得桩基处于受拉状态,最大拉力值位于 $0.67L_p$ 的桩身处,随着桩顶荷载的增加,桩身由受拉状态转为受压状态.《建筑地基基础设计规范(GB 50007—2011)》^[16]对钻孔灌注桩的构造配筋长度要求不小于 $2/3$ 桩长,当桩基施工在基坑开挖前完成时,其钢筋长度不宜小于基坑开挖深度的 1.5 倍. 该地铁项目的桩基为摩擦型钻孔灌注桩,桩长为 15 m,开挖深度为 9.5 m,且桩基先于基坑开挖而施工,则按照地

基基础设计规范的要求配筋长度不宜小于 14.25 m,实测桩身最大拉力值位于 12.5 m 处,计算桩身最大拉力位置位于 10 m 处,计算值略小于实测值,引起偏差的缘由见 1.3 节. 因此,对于本工程而言,按照规范要求的配筋长度,桩基不会出现拉裂破坏.

同时由图7可以看出,开挖使得桩基的承载性状发生了明显的变化,由于土体卸荷回弹,桩身上部土体对桩周的约束作用减小,使得桩顶的荷载向下传递量增加. 因此,在桩身上部,开挖后的桩身轴力大于未开挖时的桩身轴力,而对于桩身下部,由于开挖引起负摩阻力的影响,开挖后桩基的桩身轴力小于未开挖时的桩身轴力.

2.4 开挖后桩基承载力损失机理探讨

为进一步探讨开挖对桩基承载力的影响,图8给出了两种试桩方法下,桩周法向应力沿深度方向的变化值. 可以看出,本工程中,开挖卸荷对桩身上部 0.4 L_p 深度范围内的土体造成了显著影响,桩周土体的法向应力减小幅度较大,使该深度范围内的桩侧摩阻力损失较大,而随着深度的增加,桩周土体的法向应力损失幅度明显减小,说明开挖造成的桩基承载力损失主要来自于桩侧摩阻力,这与文献[17]的研究结论相一致. 文献[18]通过室内 K_0 固结试验得出基坑开挖的强回弹区为 0.25~0.50 倍的开挖深度,本工程中的开挖深度约为 9.5 m,则最大强回弹区深度为 4.75 m,而计算结果约为 6 m ($0.4L_p$),这也进一步验证了本文分析结论的准确性.

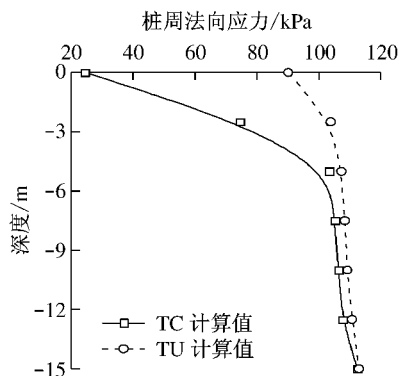


图8 开挖前后桩周法向应力对比

Fig.8 The comparison between TC and TU of normal force along pile shaft

3 结论

采用 3 维快速拉格朗日法 FLAC^{3D}建立了考虑桩土相互作用的计算模型,通过对比计算值与实测结果,验证了模型的准确性,并进一步探讨了开挖对

桩基础承载性能的影响,得到的主要结论有:

(1)开挖使桩身产生了拉力,桩身最大拉力值随着开挖深度的增大而增大,其位置随开挖深度的增加而下移;对于桩基先于基坑开挖施工的钻孔灌注桩,为防止桩身拉裂,应严格按照地基基础规范的要求进行配筋。

(2)开挖使得桩基的承载性状发生了显著变化,由于土体卸荷回弹,桩身上部土体对桩周的约束作用明显减小,使得桩顶荷载向下的传递量增加。

(3)开挖造成的桩基承载力损失主要来自于桩侧摩阻力,这与已有的研究结论相一致。因此,建议对开挖条件下的钻孔灌注桩采用桩侧后注浆工艺。

参考文献:

- [1] Katzenbach R, Moormann C. Design of axially loaded piles and pile groups-German practice [C]//Design of Axially Loaded Piles-European Practice. Brussels: [s. n.], 1997, 177-201.
- [2] Sommer H. Development of locked stresses and negative shaft resistance at the piled raft foundation—Messeturm Frankfurt/Main [C]//Deep Foundation on Bored and Auger Piles. Ghent: [s. n.], 1993, 347-350.
- [3] 朱火根, 孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2004, 8(3): 43.
ZHU Huogen, SUN Jiaping. Effect of pit bottom soil heave after deep excavation in Shanghai soft area [J]. Geotechnical Engineering, 2004, 8(3): 43.
- [4] Finno R J, Lawence S A, Allawh N F. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(6): 934.
- [5] Leung C F, Chow Y K, Shen R F. Behavior of pile subject to excavation induced soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(11): 947.
- [6] Leung C F, Lim J K, Shen R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(1): 58.
- [7] Lee C J, Chiang K H. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1224.
- [8] Itasca Consulting Group Inc. Fast language analysis of continua in 3 dimensions user manuals, Version 3.0 [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
- [9] Iwasaki Y, Watanabe H, Fukuda M, et al. Construction control for underpinning piles and their behavior during excavation [J]. Geotechnique, 1994, 44(4): 681.
- [10] 陈明. 深开挖条件下坑底抗压桩承载变形特性与计算方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.
CHEN Ming. Studies and calculating methods on bearing capacity and settlement characteristic of compression pile foundations beneath the pit after deep excavation [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [11] Ou C Y. Deep excavation theory and practice [M]. London: Taylor & Francis, 2006.
- [12] Liang F Y, Chen L Z, Shi X G. Numerical analysis of composite piles raft with cushion subjected to vertical load [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 443.
- [13] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护三维数值分析 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 976.
DING Yongchun, WANG Jianhua, XU Bin. Three dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC3D [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(6): 976.
- [14] Fioravante V. On the shaft friction modeling of nondisplacement piles in sand [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(2): 23.
- [15] Lee C J, Tabbaa A A, Bolton M D. Development of tensile force in piles in swelling ground [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Soft Soil Engineering. Hongkong: [s. n.], 2001: 345-350.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50007—2011 Code for Design of Building Foundation [S]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2012.
- [17] Zheng G, Peng SY, Diao Y, et al. In-flight investigation of excavation effects on smooth single piles [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Zurich: [s. n.], 2010: 847-852.
- [18] 邓指军, 贾坚. 地铁车站深开挖卸荷回弹影响深度的试验 [J]. 城市轨道交通研究, 2008(3): 52.
DENG Zhijun, JIA Jian. On unloading resilience depth in deep station foundation pit [J]. Study on the City Rail Transit, 2008 (3): 52.