

土体侧移作用下轴向受荷单桩承载性状数值分析

姚国圣^{1,2}, 梁发云^{1,2}, 李镜培^{1,2}, 于峰^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 地下工程开挖引起的土体侧移对邻近轴向受荷桩的承载和变形性状可能会产生负面影响, 对于这一问题目前还缺乏充分的研究. 采用有限差分软件 FLAC 3D(fast Lagrangian analysis of continua 3D)进行分析, 讨论轴向受荷桩在土体侧移作用下的承载和变形特性, 重点分析了土体强度、桩身刚度以及桩顶不同约束条件下的单桩性状. 数值分析表明, 在竖向荷载和侧向土体位移耦合作用下, 轴向荷载的增加或者侧向位移的变大, 对桩身变形和弯矩有着明显的影响, 而土体强度、桩身刚度以及桩顶约束条件也会对桩的受力特性产生不同程度的影响, 在工程实践中应予以充分重视.

关键词: 轴向受荷桩; 土体侧移; 耦合作用; 数值分析; 承载性状

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

3D Numerical Analysis for Behavior of Axially Loaded Pile Subjected to Lateral Soil Movement

YAO Guosheng^{1,2}, LIANG Fayun^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}, YU Feng^{1,2}

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

Abstract: The construction of underground works or tunnel excavation will lead to the displacement of the surrounding soil. Lateral soil movements and load mostly have a negative influence on the bearing characteristics of axially loaded piles. The finite difference software FLAC 3D is adopted to analyze the behavior of axially loaded piles subjected to lateral soil movement. The effects of soil strength, pile bending stiffness and pile head constraint on the response of pile are analyzed. The results from the numerical analysis show that the increase of the lateral soil movements and/or the axial load will greatly influence the bending moment and deflection of the axially

loaded pile. The behavior of the axially loaded pile is also affected by different soil strength, pile bending stiffness and pile head constraint. Therefore, the coupling effect of lateral soil movement and axial load can not be ignored in practical pile design.

Key words: axially loaded piles; lateral soil movement; coupled behavior; numerical analysis; bearing capacity

随着城市建设的快速发展, 隧道或基坑开挖引起的土体侧移作用对邻近既有轴向受荷桩作用问题近年来在我国的工程实践中经常遇到, 既有轴向受荷桩在附加土体侧移作用下所引起的工程事故时有发生. 李国豪^[1]曾针对上海宝山钢铁总厂一期工程中出现的钢管桩受基坑开挖或打桩引起的侧向位移影响, 利用弹性地基梁方法对被动桩的反应进行分析. 杨敏等^[2]曾报道了上海宝钢某钢渣处理厂房受长期堆载导致土体和邻近桩基产生较大的侧移和变形累积而引起的坍塌事故. 特别是 2009 年 6 月发生在上海市的某 13 层建筑物整体倒覆事故, 这是一起典型的由于在超高堆土和基坑开挖所产生的土体水平位移联合作用下, 导致桩基失效而引起建筑物倒覆的工程案例.

在实际工程中, 按轴向受荷桩设计的桩基, 由于种种原因, 在使用期间受到了土体侧移作用, 附加的土体侧移在设计阶段一般没有考虑, 土体侧移可能导致桩基产生较大的侧向附加荷载和弯曲变形, 甚至发生折断破坏. 因此, 土体侧向位移对既有轴向受荷桩承载性状的影响不容忽视, 国外一些学者对此进行了研究^[3-4]. 如何对土体侧移作用下既有轴向受荷桩的承载性状进行分析, 已成为岩土工程近期

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(50708078); 上海市教育委员会科研创新项目(10ZZ24); 上海市科技攻关计划(09231200900)

第一作者: 姚国圣(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为桩基础、岩土数值方法. E-mail: ygs7993@163.com

通讯作者: 梁发云(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础、地基处理、基坑工程等. E-mail: fyliang@tongji.edu.cn

研究的热点和难点. 然而目前国内外还缺乏实用有效的分析方法, 对此类问题的分析通常是依靠工程经验估算. 本文采用 FLAC 3D 分析软件, 建立有限差分网格模型, 进行桩侧土体开挖与邻近单桩的受力特性分析, 分析单桩在轴向荷载与土体侧移耦合作用下的桩身变形和弯矩变化规律, 并进行了参数分析, 以为同类工程提供参考.

1 数值分析方法

1.1 数值模型建立

本文在模拟计算过程中, 采用了三维快速拉格朗日差分分析方法 (fast Lagrangian analysis of continua 3D, FLAC 3D). FLAC 3D 是利用显式有限差分法为岩土工程提供精确有效分析的工具, 可较好地解决诸多其他数值方法难以模拟的复杂的工程问题, 如分步开挖、大变形大应变、非线性、隧道-土-结构共同作用等^[5].

参照文献[6]的离心模型试验研究方案, 建立了本文的数值模型, 考虑到土体开挖和桩周围土工环境的对称性, 取宽度的一半建模. 模型尺寸为长 17 m, 宽 10 m, 高度 23.5 m, 全局坐标原点在桩顶位置. 建立三维有限差分模型网格见图 1. 整个三维有限差分网格包含 18 266 个单元和 21 304 个节点. 挡土墙宽 0.16 m, 高 8.0 m; 桩距离挡土墙 3 m, 桩直径为 0.63 m, 桩长为 12.5 m.

1.2 本构模型和材料参数

在数值分析中, 桩体材料为钢筋混凝土, 视作弹性材料处理, 它的本构关系均为线弹性本构关系. 而土体材料则较为复杂, 采用 FLAC 3D 的 Mohr-

Coulomb 模型处理. 强度准则采用摩尔-库仑准则, 采用大应变的变形模式和六面体单元 (Brick) 模拟土体, 采用实体单元模拟桩, Interface 接触面模拟桩与周围土体的相互作用, 可考虑桩土作用的空间效应^[5]. FLAC 3D 中接触面单元由一系列三角形单元构成, 每个四边形区域面用两个三角形接触面单元来定义, 在每个接触面单元顶点上自动生成节点, 接触面单元通过节点和实体单元面 (目标面) 之间建立联系. 接触面法向方向所受到的力由目标面方位决定, 在每个时间步计算中, 首先得到接触面节点和目标面之间的绝对法向刺入量和相对剪切速度, 再利用接触面本构模型计算法向力和切向力的大小.

土体、挡土墙和桩的参数参考文献[6]在离心模型试验分析中所采用的参数, 具体如表 1 所示, 接触面参数如表 2 所示.

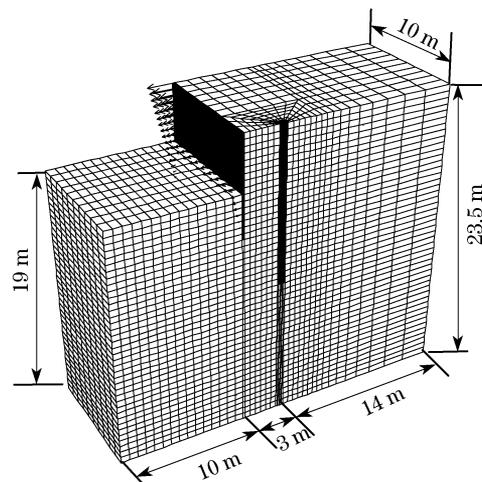


图 1 FLAC 3D 网格示意图

Fig. 1 FLAC 3D model geometry

表 1 材料参数表

Tab. 1 Mechanical parameters of materials

材料	竖向尺寸 h/m	E/MPa	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
砂土	23.5	80	15.8	0.35	20	35
挡土墙	8.0	2 700	18.6	0.25	20	30
桩	12.5	25 000	21.0	0.20		

注: 表中 E , 对于砂土为变形模量 E_0 , 对于桩则为弹性模量 E_p .

表 2 接触面参数表

Tab. 2 Parameters of interface

黏聚力 c/kPa	法向刚度 $k_n/(GPa \cdot m^{-1})$	切向刚度 $k_s/(GPa \cdot m^{-1})$	膨胀角/ (\circ)	抗拉强度/ kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
20	2.69	2.69	0	0	20

2 算例验证

本次分析采用与文献[6]的离心模型一致的条

件, 模型侧面和底面取位移边界条件, 侧面限制水平位移, 底面固定, 限制水平和垂直位移. 模型上表面为地表, 取为自由边界.

在分析时,对于荷载条件,先使模型在土体自重下应力初始平衡,然后将左侧水平位移边界放松,将文献[6]进行的分步开挖(开挖深度4.5 m)转换成施加侧向位移条件,进行模拟分析,桩顶为自由条件,不施加约束。

根据文献[7-8]的分析结果和文献[6]的试验结果,浅基坑开挖对土体产生的是倒三角形位移或者半抛物线型位移模式,本文将基坑开挖简化为在土体边界直接施加倒三角形土体位移,采用如图4所示的土体侧向位移模式,位移大小为 $S_{\max} = 0.450d$ (d 为桩直径),桩中心距离挡土墙右边界 $x = 3$ m,施加土体位移的范围为地面以下8 m(即挡土墙的高度),位移方向水平向左(设为正方向),可以模拟在挡土墙左侧进行的开挖.图中 z 为埋深, L 为桩长。

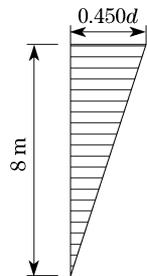


图2 土体侧移模式图

Fig.2 Mode of lateral soil movements

图3和图4表示单桩在无荷载条件下施加图2位移模式后的桩身变形和弯矩变化。

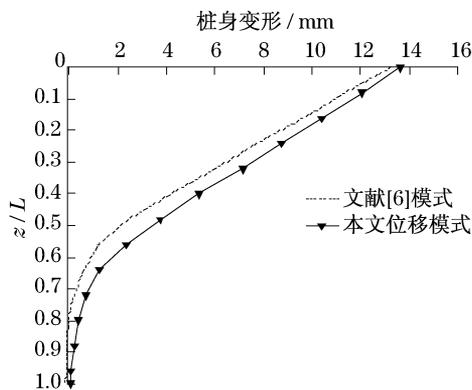


图3 文献[6]算例的桩身侧向变形对比

Fig.3 Comparison of pile deflection in Ref. [6]

由图中比较可知,桩身侧向变形最大值出现在桩顶端,但沿着桩身埋置深度向下,在桩尖处变形值接近于零;桩身弯矩最大值出现在桩高度7.5 m左右,即 $0.6L$ (L 为桩长)处.本文施加倒三角形土体位移所得的结果与文献[6]的结果很相近,桩身侧移和桩身弯矩的变化趋势是一致的,说明本文采用直

接施加土体侧向位移的分析是合理的.因此下文分析选择直接施加土体侧向位移进行。

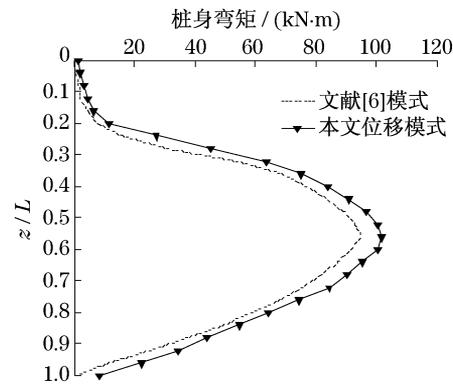


图4 文献[6]算例的桩身弯矩对比

Fig.4 Comparison of pile bending moment in Ref. [6]

3 参数分析

单桩桩身变形和弯矩受到很多因素的影响,如:有无轴向荷载、土体侧移大小、土体强度、桩身刚度、桩与侧向位移的距离以及桩顶约束条件等,本文将分析各参数对桩身变形和弯矩的影响。

3.1 轴向荷载的影响

在本文初始分析条件下(即桩身刚度采用 $E_p I_p$, E_p 和 I_p 分别为桩身弹性模量和截面惯性矩,土体变形模量为 E_0 ,采用图2位移模式,位移大小为 $0.450d$,桩与挡土墙间距3 m,桩顶为自由条件,下同),在桩顶施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u 和极限荷载 P_u ,分析桩身变形和弯矩的变化.模型计算采用的加载顺序为先施加竖向荷载再施加水平位移作用。

图5和图6中对比了施加两级轴向荷载和无轴向荷载情况下单桩的桩身侧向变形和弯矩.随着桩顶施加荷载的增大,桩身侧向变形比无荷载时对应值会变小,桩顶最大位移分别减小约16% ($P_u/2$

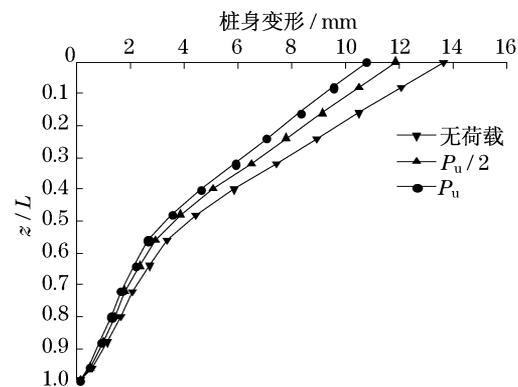


图5 轴向荷载对桩身侧向变形的影响

Fig.5 Effects of axial load on pile deflection

时),26%(P_u 时);桩身弯矩对应值减小不明显,并在桩顶附近 $0.05L\sim 0.25L$ 范围内产生负弯矩,并且弯矩最大值点略有升高,在 $0.54L$ 处.因此施加轴向荷载后,尽管桩身变形和弯矩最大值有所减小,但是桩顶处产生负弯矩,这不利于桩身的承载特性.文献[4]的模型试验也证实了这一特点.需要说明的是,本节分析结论与加载顺序有关,如果先施加水平位移再施加轴向荷载,结论是有所不同的,文献[9]对此进行了较详细的分析.

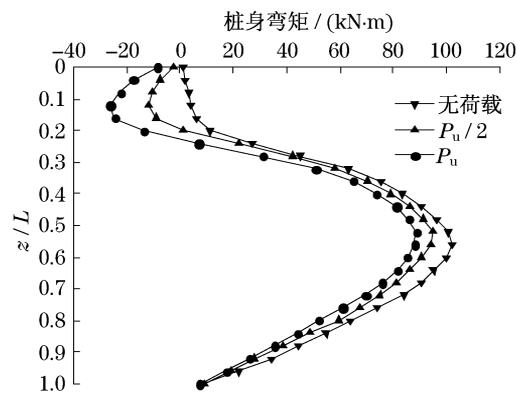


图6 轴向荷载对桩身弯矩的影响

Fig.6 Effects of axial load on pile bending moment

3.2 土体侧移大小的影响

在初始分析条件下,桩顶施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u ,分别施加3种土体侧向位移的大小,对桩身变形和弯矩变化进行分析.

图7和图8中对比了施加不同侧移下单桩的桩身侧向变形和弯矩.随着侧向土体位移的增大,桩身侧向变形对应值会变大,并且在桩身 $0.54L$ 以上部分位移值变化较大,使桩更容易破坏;桩身弯矩对应值变大,弯矩最大值增大约1倍,桩端部负弯矩绝对值也随之增大,这种情况下,桩身更容易发生弯折,导致破坏.

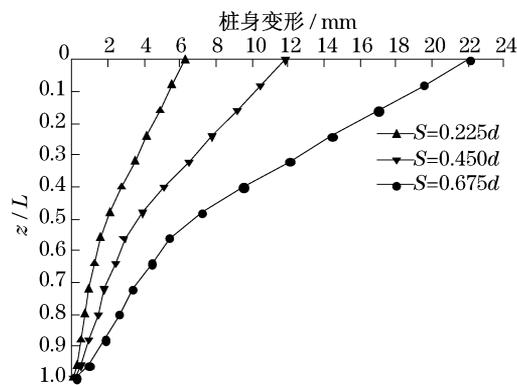


图7 土体侧移对桩身侧向变形的影响

Fig.7 Effects of lateral soil movement on pile deflection

3.3 土体强度的影响

在初始分析条件下,施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u ,变换土体变形模量分别为 $0.1E_0$, E_0 和 $10E_0$,对桩身变形和弯矩的变化进行分析.

图9和图10中对比了不同土体模量下的桩身侧向变形和弯矩.不同的土体变形模量,对桩身侧向变形和桩弯矩影响较大,随着土体变形模量的增大,桩身侧向位移呈减小趋势,但是桩身弯矩呈增大趋势,因此在进行桩基础设计时,应充分考虑土体强度参数的影响.

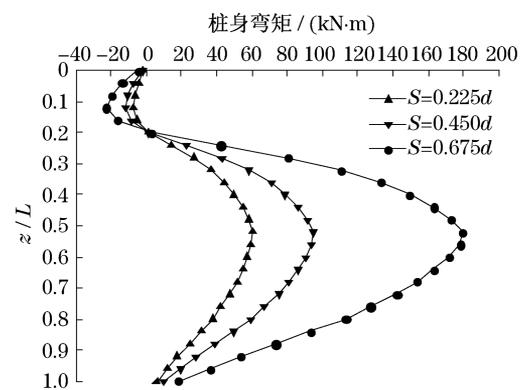


图8 土体侧移对桩身弯矩的影响

Fig.8 Effects of lateral soil movement on pile bending moment

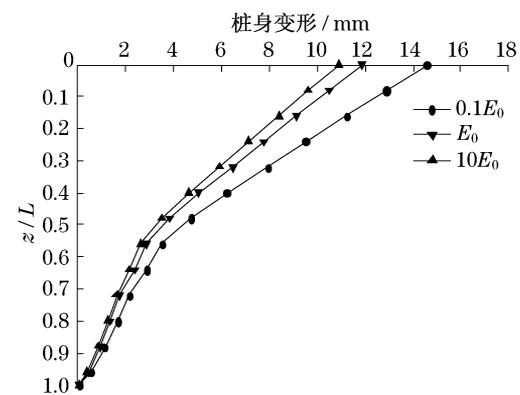


图9 土体强度对桩身侧向变形的影响

Fig.9 Effects of soil strength on pile deflection

3.4 桩身刚度的影响

在初始分析条件下,施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u ,选取3种不同桩身刚度分别为 $0.1E_p I_p$, $E_p I_p$ 和 $10E_p I_p$,对桩身变形和弯矩的变化进行分析.

图11和图12中对比了不同桩身刚度下的桩身侧向变形和弯矩.不同的桩身刚度,对桩身侧向变形和桩弯矩影响较大,随着桩身刚度的增大,桩身侧向位移呈减小趋势,但是桩身弯矩呈增大趋势,因此进行桩基设计时,并不是桩刚度越大,对工程越有利,

应充分考虑桩身刚度对桩弯矩的影响.

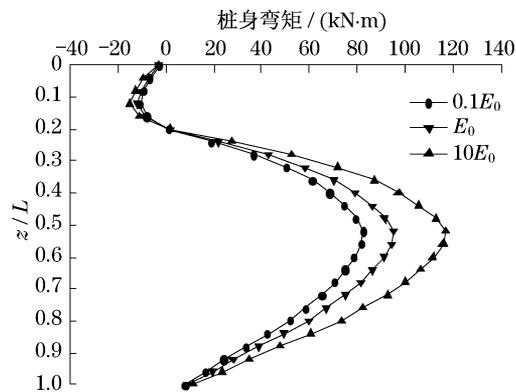


图10 土体强度对桩身弯矩的影响

Fig.10 Effects of soil strength on pile bending moment

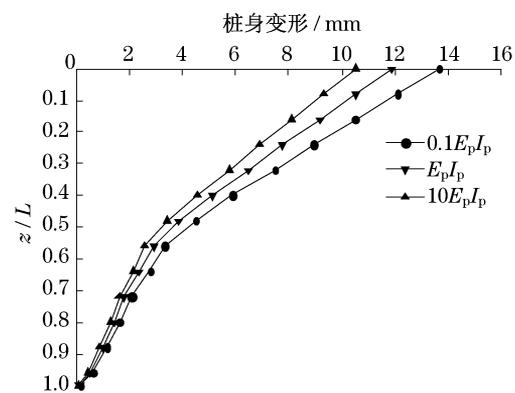


图11 桩身刚度对桩身侧向变形的影响

Fig.11 Effects of pile rigidity on pile deflection

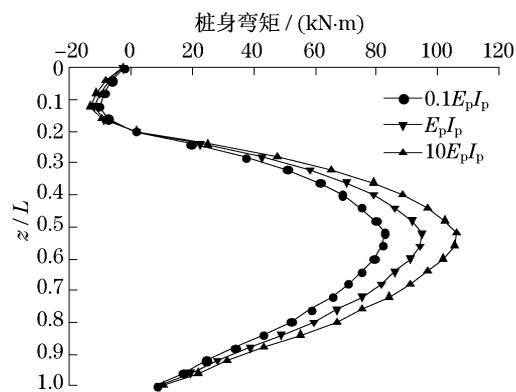


图12 桩身刚度对桩身弯矩的影响

Fig.12 Effects of pile rigidity on pile bending moment

3.5 桩与土体位移边界的距离的影响

在初始分析条件下,施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u ,考虑4种桩与土体侧移作用边界的距离 x 分别为1,3,5,7 m,对桩身变形和弯矩的变化进行分析.

图13和图14中对比了桩与土体位移边界不同

距离下的桩身侧向变形和弯矩.临近桩基所产生的桩身侧移和弯矩与桩基和基坑边缘的距离关系很大,越靠近基坑,所受的影响越大;当桩与基坑边缘的距离大于等于1.5倍的基坑开挖深度时,桩身侧向变形和桩弯矩所受的影响比较小.文献[8]的分析结果也验证了这一结论.

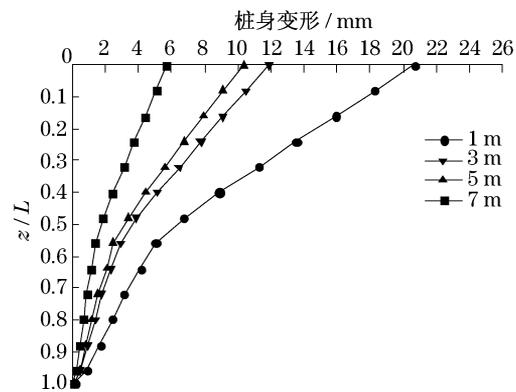


图13 边界距离对桩身侧向变形的影响

Fig.13 Effects of boundary distance on pile deflection

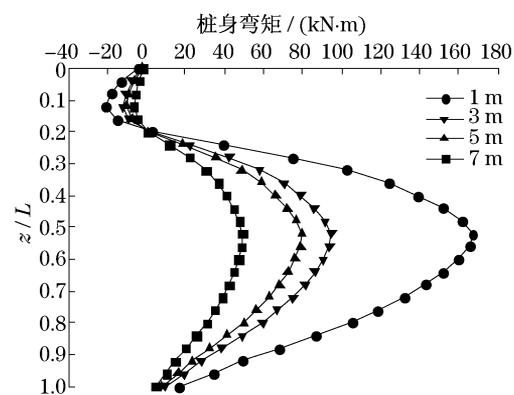


图14 边界距离对桩身弯矩的影响

Fig.14 Effects of boundary distance on pile bending moment

3.6 桩顶约束条件的的影响

在初始分析条件下,施加竖向 $1/2$ 极限荷载 P_u ,选择2种桩顶约束条件,一是桩顶自由,二是限制桩顶转动,但不限制桩顶水平移动,对桩身变形和弯矩的变化进行分析.

图15和图16中对比了不同桩顶约束条件下的桩身侧向变形和弯矩.由土体侧移引起的桩身位移和弯矩与桩顶的约束条件关系很大,限制桩顶转动条件下,桩身的侧向位移会略有减小,但是桩身弯矩却产生很大的变化,会在桩顶 $0.05L \sim 0.35L$ 范围内产生很大的负弯矩,使得桩头部位偏于危险.

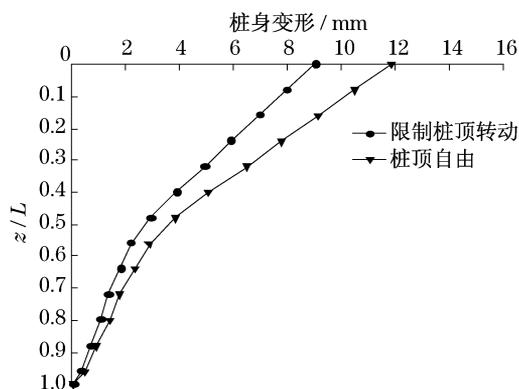


图15 桩顶约束对桩身侧向变形的影响

Fig.15 Effects of pile head constrain on pile deflection

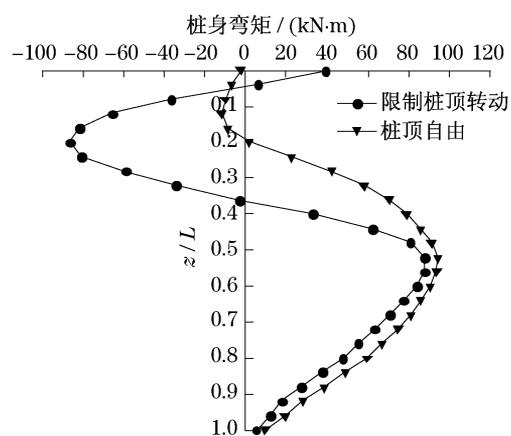


图16 桩顶约束对桩身弯矩的影响

Fig.16 Effects of pile head constrain on pile bending moment

4 结论

本文采用 FLAC 3D 建立的三维数值分析模型,将基坑开挖简化为土体边界施加土体侧向位移进行分析,所得结果与文献[6]的离心模型试验结果对比,桩身侧向位移和桩弯矩变化趋势和大小都很接近,说明本文的方法是合理可行的.在此基础上进行了一系列的参数分析,主要结论为:

(1) 先施加轴向荷载再施加土体侧移时,轴向荷载的增加会使桩身侧向变形和弯矩略有减小,但是在桩顶附近会出现负弯矩,不利于桩基的安全.

(2) 轴向荷载作用下,侧向土体位移增大时,桩身侧向变形对应值会变大,并且桩顶处位移值变化较大;桩身弯矩最大值变化明显,这种情况下,桩身更容易发生弯折,导致破坏.

(3) 在土体侧向位移和轴向荷载耦合作用下,土体强度、桩身刚度增大,桩身侧向变形则减小,但是桩身弯矩是增大的.

(4) 在土体侧向位移和轴向荷载耦合作用下,限制桩顶的转动,桩身的侧向位移会有所减小,但是桩身弯矩却产生很大的变化,会在桩顶附近产生很大的弯矩值,使得桩头部位偏于危险.

综上所述,桩基设计时应该综合考虑各因素,本文所得参数分析结果,可以对桩基设计提供有益的参考.此外,对于其他类型位移模式对桩基性状的影响还需进一步加以研究.

参考文献:

- [1] 李国家.关于桩的水平位移、内力和承载力的分析[J].力学季刊,1981,2(1):1.
LI Guohao. Analysis of horizontal displacement, internal forces and load-carrying capacity of piles [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1982, 2(1): 1.
- [2] 杨敏,朱碧堂,陈福全.堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J].岩土工程学报,2002,24(4):446.
YANG Min, ZHU Bitang, CHEN Fuquan. Pilot study on collapse of an industrial building due to adjacent surcharge loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 446.
- [3] Chen C C, Takahashi A, Kusakabe O. Change in vertical bearing capacity of pile due to horizontal ground movement [M] // Physical Modelling in Geotechnics. Rotterdam: Balkema Publishers, 2002: 459 - 464.
- [4] Guo W D, Ghee E H. Behavior of axially loaded pile groups subjected to lateral soil movement [C] // Proceedings of Sessions of Geo-Shanghai. Shanghai: GSP, 2006, 153: 174 - 181.
- [5] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC 3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC 3D foundation and project example[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008.
- [6] Leung C F, Chow Y K, Shen R F. Behaviour of pile subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(11): 947.
- [7] Poulos H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1973, 99(SM5): 391.
- [8] Poulos H G. Ground movements-a hidden source of loading on deep foundations [J]. Dfi Journal, 2007, 1(1): 37.
- [9] 郑刚,王丽.竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(12):1796.
ZHENG Gang, WANG Li. Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796.