

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.006

徐保照, 李飒, 夏玲晓, 等. 不同安装法对管桩桩周土影响的有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 38-43. (XU Bao-zhao, LI Sa, XIA Ling-xiao, et al. Numerical simulation analysis of driving methods affecting soil around pipe pile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 38-43.)

不同安装法对管桩桩周土影响的有限元分析

徐保照¹, 李 飒¹, 夏玲晓², 戴 旭¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津中房建设有限公司, 天津 300000)

摘要: 利用有限元方法模拟钢管桩的贯入过程, 研究贯入过程中桩周不同深度土体的应力变化过程。管桩贯入土体这一过程为高度非线性问题, 通用的接触和网格划分方法难以解决大变形问题, 通过采用 ALE 网格划分技术以及“zipper-type”方法解决了管桩贯入过程中的大变形和接触问题, 运用 ABAQUS 模拟了直径 2.134 m 的钢管桩采用静压和锤击两种方法的安装过程。根据贯入过程中桩壁内外土体应力变化可知, 静压贯入过程中管内土水平应力明显高于管外土体的水平应力, 更容易形成土塞, 挤土效应也比较明显。通过对桩周土体中某点在安装过程中应力变化历程的分析, 可以看到锤击安装方式在桩周土中造成应力增加的数值较大, 对周围土体影响范围也较大, 在评估桩基承载力时, 应适当考虑这种影响。

关 键 词: 有限元法; 大变形; 开口管桩; 静压; 锤击; 贯入过程; 应力变化

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)02-0038-06

近几十年来, 海洋油气资源的开发成为现在能源开发的热点, 海洋油气的开发促进了越来越多海洋平台的建造逐步向深海发展。海上固定平台多采用开口钢管桩, 与闭口桩相比, 开口桩更易打入到设计的深度, 并且沉桩后由于土塞的作用, 开口管桩在静荷载作用下的表现同闭口桩类似, 可以满足承载力要求, 所以在海洋固定平台中应用非常广泛。随着技术发展和工程需要, 桩基础作为海洋固定采油平台的主要基础形式出现了大直径、超长、深贯入等新的特点, 这必然会带来新的工程问题, 比如其承载力预测分析, 如果分析失误, 可能会导致施工中发生溜桩、拒锤、停锤等现象, 造成海上工程进度受阻, 严重时可能发生工程事故, 造成经济损失。

目前沉桩方法有多种, 包括静压法、锤击法、振动法以及辅助沉桩法等, 国内外不少学者对沉桩过程进行了相关研究。在国内, 盛岱超等^[1]采用 ABAQUS 中大滑动摩擦接触分析了实心桩贯入土体过程中位移与应力的关系。寇海磊等^[2]运用 ABAQUS 模拟桩在层状地基中的贯入, 总结分析了软硬交互层状土中静压桩沉桩阻力的变化规律。侯胜男等^[3]通过 ABAQUS 有限元软件, 探讨了不同型号预应力管桩水平承载特性。李飒等^[4]采用有限元动力分析方法对连续打桩过程中砂土中的孔压和有效应力变化进行了研究, 对停锤所造成的后续打桩困难的机理进行探讨。高文乐等^[5]运用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立了桩-土-结构相互作用体系的三维有限元模型, 模拟了桩土在爆炸冲击波下相互作用。以上研究主要围绕实心桩的贯入过程展开, 对管桩的研究只是分析管桩在土体某一深度时的承载力特性。在国外, 对沉桩过程进行了相关的模拟与研究, M. E. Mabsout 等^[6-7]采用非线性有限元模型模拟实心桩打入过程, 研究了桩周土体应力与变形以及孔压间的关系; 使用有限元方法, 用轴对称模型模拟桩打入硬的黏土层, 不过他们是先把桩放置到土

收稿日期: 2014-09-19

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2014CB046800); 国家重大专项资助项目(2011ZX05056-002-01); 上海交通大学国家重点实验室开放课题资助项目(1201)

作者简介: 徐保照(1987-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 主要从事海洋工程结构物与土相互作用的研究。

E-mail: xubaozhao@126.com

体中 18 m 处,并且只有最后一锤是用有限元模拟的,并没有模拟整个贯入过程;他们采用一种特别的方法,即在桩端连接 1 个直径很小的刚性小管,其直径为桩径的 1%,使桩贯入到土体里^[7];用轴对称模型模拟 CPT 圆锥的贯入。A. Niemunis 等^[8]在此方法的基础上进行了拓展。K. P. MAHUTKA 等^[9]用此方法比较静力压桩,振动打桩以及锤击打桩对桩周土体的主要影响,其中动态安装过程都是采用动态显示求解。D. S. Liyanapathirana 等^[10]利用有限元模拟开口桩的打入,土体采用理想弹塑性模型,屈服面采用米塞斯模型,但是仅仅模拟一次锤击过程,得出桩的半径、冲击荷载、桩土间的侧摩阻是影响土塞现象的主要因素,后来他们在此模型的基础上,采用欧拉法实现了多次锤击贯入^[11]。S. Henke 等^[12]采用 ALE 网格划分技术,研究了不同安装方法对管桩土塞的影响。

管桩的贯入过程较实心桩复杂,此过程涉及到管内外土体大变形问题以及桩与土的接触问题。本文在前人研究的基础上,通过采用 ALE 网格划分技术以及“zipper-type”方法解决大变形和接触问题,分析了管桩在采用不同安装方法情况下桩周土体应力随深度变化关系,总结了静压与锤击这两种安装方法的特点。

1 钢管桩连续贯入过程的实现

有限元方法被广泛用于研究桩基安装过程,对实心桩的贯入技术,费康等^[13]作了详细的阐述;对于管桩的贯入,主要难点是桩土接触的建立以及土体网格大变形问题。本文采用“zipper-type”方法,即在桩端上连接 1 个直径很小的刚性小管,小管在贯入的过程中,桩壁沿着小管下沉,实现桩和土的接触。土体会出现大变形的区域采用 ALE 进行网格划分,运用 ABAQUS 软件模拟不同安装方法(静压法和锤击法)管桩的贯入,并对管桩桩周土体的应力进行研究。

1.1 沉桩的建模技术

因为整个桩土体系是轴对称的,钢管桩的打入可采用轴对称模型模拟,为了节约计算成本,现取桩土模型的一半进行模拟计算(见图 1)。本文研究的钢管桩半径 $R = 1.067$ m,壁厚 $t = 0.05$ m。桩用离散刚体模拟,本构模型为弹性模型,划分网格时,采用 RAX2 单元;土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型。为解决土体大变形问题,桩周一定范围内的土体(见图中灰色区域)选用 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 网格划分技术。打桩过程涉及到桩周土体大变形问题,解决大变形问题需要特定的有限元技术,即 van den Berg 所用的“zipper-type”方法^[14]。这种方法可以解决管桩贯入土体引起的大变形问题。采用 1 mm 厚度的刚性小管连接在桩端上(如图 1),在贯入过程中,小管与土无摩擦接触,下沉过程中,桩随小管贯入,小管将土体分开,桩也就和周围土体接触上了。

1.2 建模与安装过程

桩在打入过程中,桩周的土体会被桩挤压,造成桩周土体网格大变形。解决网格大变形问题,需要采用自适应网格划分技术,即 ALE 网格划分技术,在计算过程中,网格会随时间更新,以防止网格畸变(见图 2)。

本文主要研究管桩在黏土中的沉桩过程,土的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型。土体相关参数根据南海地勘结果确定,其不排水强度随深度的变化近似为 $S_u = 1.5Z + 2$ (kPa)。为了更清楚地描述桩-土相互作用,选择了均质土计算(80 m 内土体的平均强度),其参数分别为内摩擦角 $\psi = 0$,弹模 $E = 30$ MPa,天然重度 $\gamma = 19$ kN/m³,黏聚力 $c = 60$ kPa,泊松比 $\mu = 0.49$ 。需要注意的是,Mohr-Coulomb 模型需和线弹性模型联合使用,黏聚力必须大于 0^[15]。

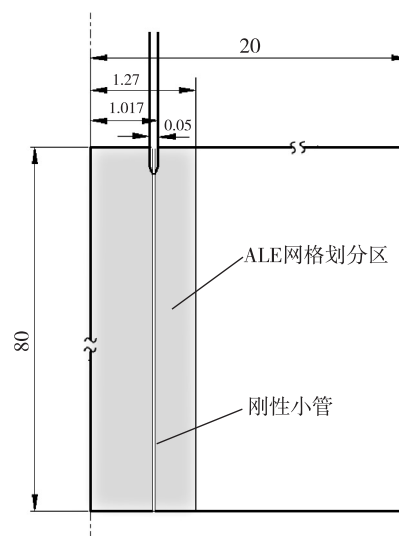


图 1 轴对称有限元模型(单位:m)

Fig. 1 An axisymmetric finite element model(unit: m)

为了解决桩打入过程中土体大变形问题,桩土接触需采用动态滑动接触算法,这一算法基于 ABAQUS 中的主-从接触算法。桩与土的摩擦系数取 0.5。本文主要研究静力压桩和锤击打桩两种不同的安装方法对管桩承载力影响,其中静力压桩采用位移控制的动态求解过程,锤击打桩采用动态显式求解。对于锤击打桩,锤击荷载与时间关系见图 3,锤击频率为 1 Hz, $F_{\max} = 3\,000\text{ kN}$ ^[13]。为了对比研究桩在锤击贯入和静压贯入两种不同安装方式的特点,使两种贯入的条件尽量相同,进而研究他们的不同点,在静压安装过程中,采用位移控制,静压位移速率是参照锤击贯入速率,与实际工程有所不同。

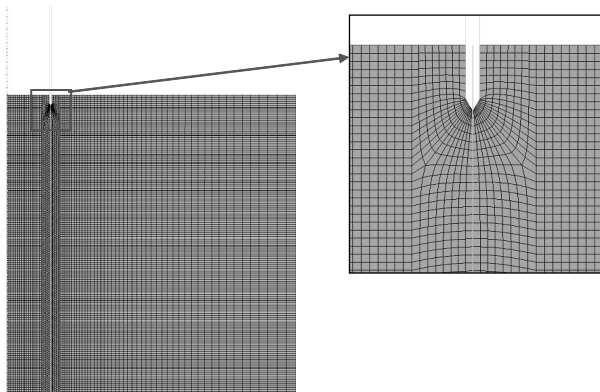


图 2 自适应网格划分
Fig. 2 Adaptive meshing

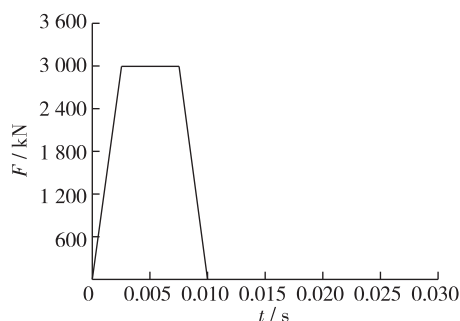


图 3 一锤的荷载曲线
Fig. 3 Load curve from a single hammer blow

2 计算结果分析

在上述计算条件下,桩分别在静压和锤击下沉 9.876 m 时,距内外桩壁 0.017 m 土体水平应力随深度变化见图 4。

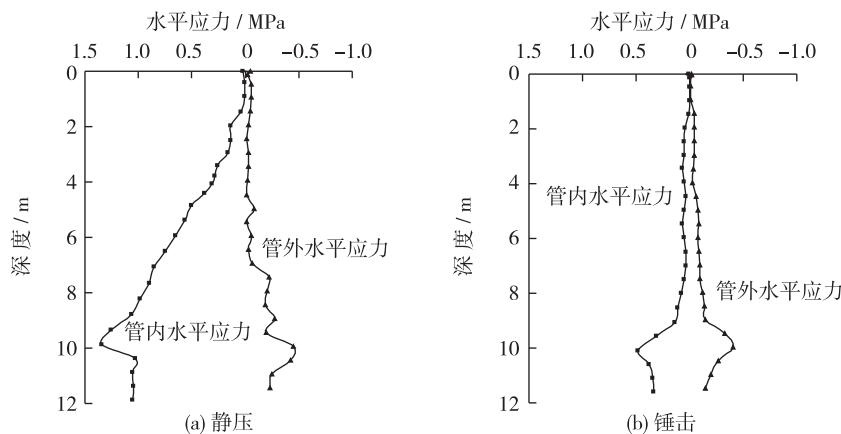


图 4 桩下沉 9.876 m 时桩周土体水平应力随深度变化
Fig. 4 Changes in level stress of soil around pile at a penetration depth of 9.876 m

从图 4 可见,贯入过程中,桩端以上土层的水平应力较小,桩端位置土体水平应力明显增大,静压过程中管内土体正压力明显大于管外土压力,因此更容易形成土塞。应力云图(见图 5)也可以很好地说明这一点,图 5(a)中,管内土体的高度明显低于管外土体。对于锤击,管内外水平应力相差较小,在桩端位置周围土体的水平应力也有明显增大。总体来看,静压过程中,桩周土体水平应力较锤击的贯入大,挤土更明显。从贯

入原理上来说,静力压桩是桩端土在静力作用下经过压密、局部剪切破坏最终发生刺入破坏,使桩体压入某一深度;而锤击沉桩,是桩在锤的冲击作用下,导致桩侧及桩端土体抗剪强度急剧减小,当桩侧阻力不足以抵抗桩顶冲击作用时,桩侧土体破坏,桩身下沉,从而使桩体贯入某一深度。

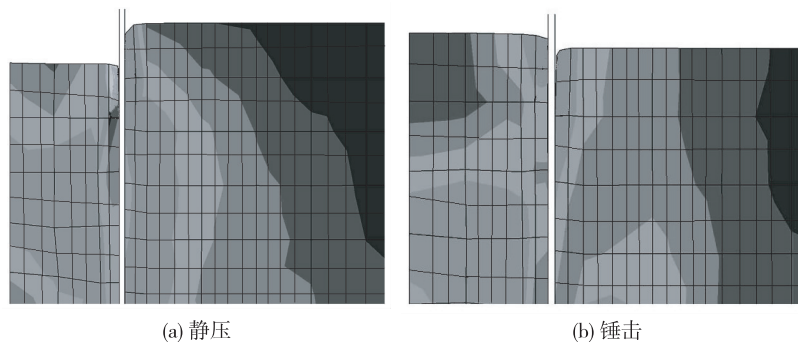


图5 局部应力云图

Fig. 5 Contours of a local model

为研究管桩贯入过程中应力变化,选取 1, 5 和 9 m 深度距离外管壁 0.092 m 处 6 个点(按深度由小到大分别编号为 A, A', B, B', C, C' 点,如静压深度 1 m 处的点记作 A, 锤击则记作 A') 的 Mises 应力和水平应力随时间的变化,结果见图 6 和 7。

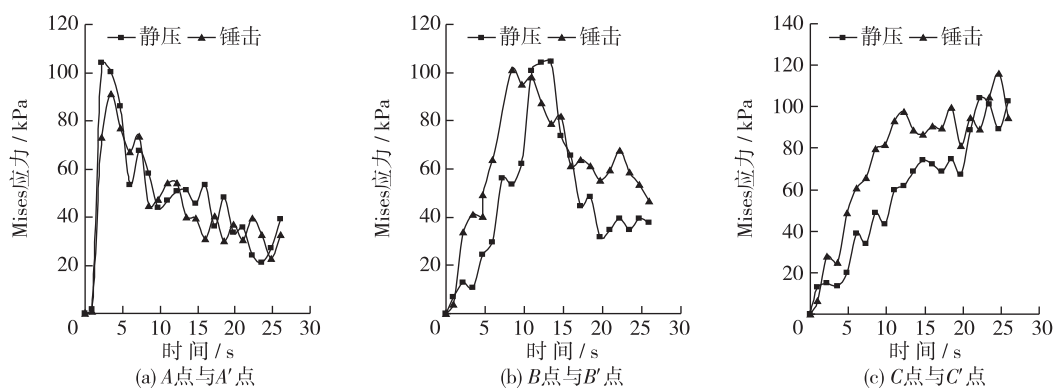


图6 管外不同深度某点土体 Mises 应力随时间变化

Fig. 6 Changes in Mises stress of soil outside the pile with time at different points

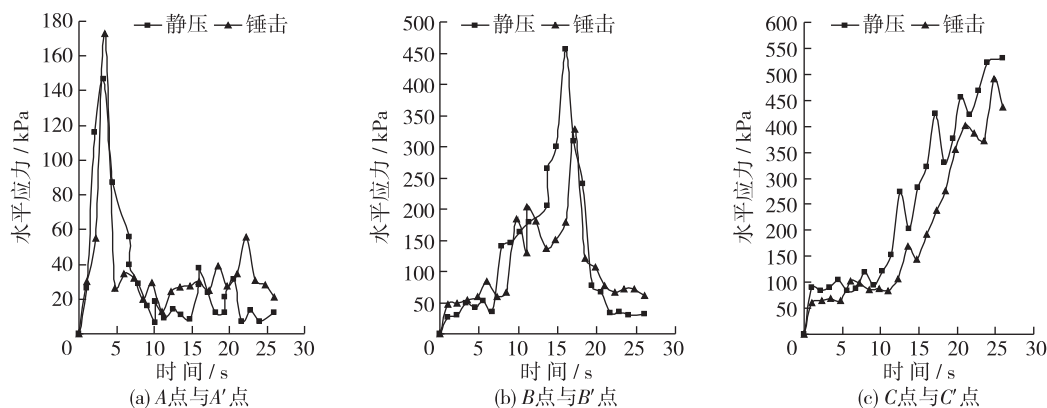


图7 管外不同深度某点土体水平应力随时间变化

Fig. 7 Changes in horizontal stress of soil outside the pile with time at different points

从图 6 可见,对于静压,2.5 s 桩端入土 1 m, A 点的 Mises 应力也达到了最大值,随着桩的继续贯入, A 点应力开始下降。对于锤击安装过程中的 A' 点也存在着类似过程,2.5 s 时,在锤击力作用下桩端入泥深度约为 1 m,此时 A' 点应力达到峰值,随后下降,但其峰值较静压的峰值略小。当桩入泥达到 5 m 左右时,对于静压安装过程中的 B 点和锤击的 B' 点,其 Mises 应力变化趋势与桩入泥为 1 m 时的情况基本相同,峰值点均为桩端通过该点附近开始增加,经过后应力逐渐降低,不同的是,对于静压,其 5 m 以上及以下的应力均小于锤击安装相应点的数值,说明锤击安装对周围土体的影响更为明显。对于入泥深度为 9 m 的情况这一特点表现得更加突出, C 点应力显示,在入泥深度未达 9 m 时,应力增长并不明显,随着桩端的接近, C 点应力水平开始逐渐提高;而对于 C' 点,锤击安装,在 10 s 左右即桩基入泥达到 7 m 时, C' 点应力已经达到了较高的数值。

从图 7 可见管桩周土体某一深度点的水平应力随打桩的变化过程,变化趋势和图 6 类似,当桩端入泥深度接近该点时,该点应力逐渐增加,通过这一深度后,该点应力逐渐降低。总体来讲,当桩贯入一定深度后,桩外侧土体的水平应力静压明显高于锤击安装,这从另外一方面说明静压形成土塞后,挤土效应很明显。

从整体看来,锤击贯入过程桩端下沉对周围土体影响范围较大,而静压影响范围相对较小,不同的安装过程导致的土周围应力场的差异比较明显,这也解释了为什么锤击安装的桩基更易发生溜桩等工程现象;图 6 和 7 都表明,桩端到达某一深度土层时,桩周外土体的应力达到最大值,也就是扰动最大,桩端也会对其一定深度的土体造成扰动,不过桩经过后,土体应力值会减小,但高于贯入以前的应力值,并会稳定在某一范围内,桩继续贯入对该深度土体产生影响很小,在实际工程中需要考虑这种影响。

3 结 语

利用有限元中自适应网格划分技术对管桩在黏土中不同安装方法进行模拟,通过分析沉桩过程中桩周土体的水平力随深度的变化,可以看出静压贯入过程管内土体应力明显较管外大,容易形成土塞;与锤击贯入相比,静压过程中桩周土体水平应力较大,挤土更明显。不过,锤击安装方式对周围土体的影响较静压方式更为明显,影响范围也有所扩大,在评估桩基承载力时,应当考虑这种影响。从打桩过程中来看,桩端会在一定范围内对桩周外土体造成影响,进入某一深度时,对该深度桩周外土体影响最大,超过这一深度后,桩对该土体产生影响很小,在实际工程中,应考虑这样的影响。

参 考 文 献:

- [1] SHENG D, EIGENBROD K D, WRIGGERS P. Finite element analysis of pile installation using large-slip frictional contact[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(1): 17-26.
- [2] 寇海磊, 张明义, 张吉坤. 层状粘性土及砂土地基中静力压桩连续贯入的数值模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 175-181. (KOU Hai-lei, ZHANG Ming-yi, ZHANG Ji-kun. Numerical simulation of the successive penetration of jacked pile in layered cohesive soil and sand[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 175-181. (in Chinese))
- [3] 侯胜男, 刘陕南, 蔡忠祥, 等. 预应力管桩单桩水平承载力的试验判定标准探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 1): 378-382. (HOU Sheng-nan, LIU Shan-nan, CAI Zhong-xiang, et al. Test standards for lateral capacity of single PHC pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl1): 378-382. (in Chinese))
- [4] 李飒, 黄建川, 周扬锐, 等. 大直径钢管桩非连续打桩过程中拒锤原因的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 2): 3648-3656. (LI Sa, HUANG Jian-chuan, ZHOU Yang-rui, et al. A study of premature refusal of large diameter pipe pile caused by pile driving suspending[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl2): 3648-3656. (in Chinese))
- [5] 高文乐, 黄博, 王晨, 等. 爆破地震作用下桩-土-结构相互作用的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 463-467. (GAO Wen-le, HUANG Bo, WANG Chen, et al. Numerical simulation of pile-soil-structure interaction under blasting vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 463-467. (in Chinese))
- [6] MABSOUT M E, SADEK S M, SMAYRA T E. Pile driving by numerical cavity expansion[J]. International Journal for Numerical

- and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(11): 1121-1140.
- [7] MABSOUT M E, TASSOULAS J L. A finite element model for the simulation of pile driving[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37(2): 257-278.
- [8] NIEMUNIS A, HERLE I. A hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range[J]. Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 1997, 2(4): 279-299.
- [9] MAHUTKA K P, KÖNIG F, GRABE J. Numerical modelling of pile jacking, driving and vibratory driving[M]// Numerical Modelling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment. London: Taylor & Francis, 2006: 235-246.
- [10] LIYANAPATHIRANA D S, DEEKS A J, RANDOLPH M F. Numerical analysis of soil plug behaviour inside open-ended piles during driving[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22(4): 303-322.
- [11] LIYANAPATHIRANA D S, DEEKS A J, RANDOLPH M F. Numerical modelling of large deformations associated with driving of open-ended piles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(14): 1079-1101.
- [12] HENKE S, GRABE J. Numerical investigation of soil plugging inside open-ended piles with respect to the installation method[J]. Acta Geotechnica, 2008, 3(3): 215-223.
- [13] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. ABAQUS application in geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
- [14] VAN DEN BERG P. Analysis of soil penetration[D]. Delft: Delft University Press, 1994.

Numerical simulation analysis of driving methods affecting soil around pipe pile

XU Bao-zhao¹, LI Sa¹, XIA Ling-xiao², DAI Xu¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Housing Construction Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The finite element method (FEM) is used to simulate the penetration process of a pipe pile and the stress of the soil mass around the pile changing with depth is simulated and analysed. Pile driving is a highly nonlinear process and large deformation problems can hardly be solved by a common method by contacting and meshing. Those problems can be solved by ALE meshing technology and a “zipper-type” method. In this paper, the penetration process of an open-ended pipe pile with diameter of 2.134 m into clay soil is investigated by ABAQUS. And the following installation methods are considered: pile jacking and impact driving. The horizontal stress of the soil mass inside the pipe pile is higher than that of the soil mass outside according to the soil stress inside and outside the pile changing with the depth in the pile penetration process. So, soil plugging appears in the pile jacking more easily than that in the impact driving and squeezing effect is relatively obvious. By analyzing the stress changing with time at some points in the soil mass around the pipe pile during the driving, the increase of the stress of the soil mass around the impact pile is larger than that in the pile jacking, and so is the sphere of influence in the soil mass around the pipe pile. Therefore, this effect should be taken into consideration to evaluate the bearing capacity of the pipe pile.

Key words: finite element method; large deformation; open-ended piles; pile jacking; impact driving; penetration process; changes in stress