

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908001

水平循环荷载下大直径单桩承载变形特性 有限元分析*

周晓洁, 李娜, 卢力强, 程星磊, 刘中宪, 刘举

(天津城建大学土木工程学院, 天津 300384)

摘要: 大直径单桩基础是近海风电产业常用的基础型式, 研究大直径单桩在风、浪、流等水平循环荷载作用下的承载变形特性意义重大。基于ABAQUS软件平台, 通过建立桩土相互作用的三维有限元模型, 对已有的大直径单桩离心模型试验开展数值模拟。数值计算时采用一个循环弹塑性本构模型描述桩侧土体的循环应力应变响应, 通过调用该模型的UMAT子程序, 设置适当的桩土接触条件、分析步及计算参数, 建立了能够追踪水平循环荷载下砂土中大直径单桩位移时程的有限元分析方法。通过与已有离心模型试验结果的对比发现, 建立的有限元方法可以描述砂土中大直径单桩在水平单调及循环荷载下的变形过程, 反映循环荷载位移曲线的非线性、滞回性及位移累积特性, 预测随循环荷载次数增加, 桩身弯矩、位移等的分布特征及演化规律。

关键词: 大直径单桩; 水平荷载; 本构模型; 循环荷载; 有限元分析

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1279-08

Finite Element Analysis on Bearing and Deformation Behaviors for Large-diameter Monopile under Lateral Cyclic loads

ZHOU Xiaojie, LI Na, LU Liqiang, CHENG Xinglei, LIU Zhongxian, LIU Ju

(School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Large-diameter monopile is one of the foundations that are widely used in offshore wind power industry. It is of great significance to study the bearing and deformation behaviors of large-diameter monopile under lateral cyclic loads such as wind, wave and flow. Numerical simulation on the existing centrifugal model tests for large-diameter monopile is carried out by establishing a three-dimensional finite element model of pile-soil interaction based on the ABAQUS software. A cyclic elastic-plastic constitutive model is used to describe the cyclic stress-strain responses of soils around the pile during numerical calculation. The finite element analysis method capable of tracking the displacement-time history of the large-diameter monopile in sands under lateral cyclic loads is established by calling the UMAT subroutine of the model and setting appropriate pile-soil contact conditions, analysis step and calculation parameters. By comparing with the model test results, the established finite element

* 收稿日期:2019-08-01;修回日期:2019-11-22

基金项目:天津市企业科技特派员项目(19JCTPJC49500,21YDTPJC00750)、天津市高等学校基本科研业务费资助项目(2016CJ04, 2016CJ01)资助

作者简介:周晓洁(1972—),女,教授,博士。主要从事地下结构抗震研究。E-mail:zhouxj88888@126.com

通讯作者:卢力强(1982—),男,实验师,硕士。主要从事土动力学与软土工程研究。E-mail:Luliqiang56@126.com

analysis model can describe the deformation process of pile under lateral monotonous and cyclic loads in sands, and reflect the nonlinearity, hysteresis and displacement accumulation characteristics of cyclic load-displacement curves. Besides, the distribution characteristics and variation law for the bending moment and displacement of pile with the increase of the number of cycles can be predicted.

Keywords: large-diameter monopole; lateral loads; constitutive model; cyclic loads; finite element analysis

引言

随着海洋资源的开发利用,海上建(构)筑物建设越来越多,特别是近海风电产业的发展,主要采用海洋大直径单桩作为其基础形式,在海洋环境中承受风、波浪等水平荷载的长期作用^[1-2],因此在基础设计时评价大直径单桩在水平循环荷载下的稳定性,分析其变形失稳过程显得尤为重要。

分析土中单桩水平受荷性能的方法有极限地基反力法、弹性地基反力法、 $p-y$ 曲线法(弹塑性地基反力法)、有限元法等^[3-4]。目前应用最广泛的分析方法是 $p-y$ 曲线法,API曾建议了针对小直径单桩的 $p-y$ 曲线分析法^[5-6],然而对于大直径单桩该方法并不适用^[7]。朱斌等^[8]通过开展离心模型试验,在修正 $p-y$ 曲线初始刚度的基础上,采用双曲线型 $p-y$ 曲线分析了砂性土中大直径单桩分别在水平静力和循环荷载作用下的受力和变形特性。黄茂松等^[9]基于黏土的静力 $p-y$ 曲线,结合Masing准则及不排水抗剪强度衰减关系提出了循环 $p-y$ 曲线,用以模拟黏土中水平受荷桩的循环承载特性。梁发云等^[10]将 $p-y$ 曲线法与拟静力方法相结合,通过建立动力 $p-y$ 骨干曲线,对水平受荷桩进行受力及变形分析。陈仁朋等^[11]通过开展饱和粉土中的单桩、群桩水平循环试验,基于 $p-y$ 曲线法提出了循环效应系数以考虑荷载循环作用对单桩水平受力的影响;F. Rosquoet等^[12]提出了与荷载幅值相关的折减系数,借以考虑荷载对 $p-y$ 曲线的影响。

利用有限元法分析单桩的水平受荷性能,国内外相关学者已开展过一些研究。M. Achmus等^[13]基于土体在循环荷载作用下的刚度衰减特性,提出了依据室内三轴试验结果估算土体单元刚度衰减的刚度折减模型;罗如平等^[14]在其研究基础上,基于商业有限差分程序,通过开发用户子程序实现土

体刚度衰减模型(DSM)的嵌入,进而分析砂土地基中海上风机大直径单桩基础在长期水平循环荷载作用下的累积变形发展规律。胡安峰等^[15]考虑动偏应力及围压对砂土动力特性的影响,采用围压与动偏应力的比值来反映循环应力水平,开发了USDFLD子程序来实现土体刚度衰减,进而分析大直径单桩累积位移。郭玉树等^[16]依据砂性土壤在排水状况下受循环荷载的三轴试验结果提出砂土刚度衰减模型,结合有限元分析得到桩身在循环侧向力下的累积位移。夏华盛等^[17]针对软黏土中水平受荷单桩,通过引入累积塑性应变以考虑循环荷载作用下桩周土体不排水抗剪强度的弱化,用以分析长期循环荷载作用下桩侧水平抗力的衰减规律。

综上所述,分析水平循环荷载下单桩基础承载变形性能的 $p-y$ 曲线法,实际是在考虑荷载水平、循环加载次数以及加载频率等影响因素之上,通过对静载下 $p-y$ 曲线进行修正所得;而利用有限元方法分析水平循环荷载下单桩基础的累计变形响应,大多通过土体弹性模量随循环次数的衰减来描述土体刚度的弱化,进而采用静力的本构关系计算土体因刚度弱化所产生的累积变形。无论是折减的 $p-y$ 曲线法还是基于土体刚度弱化的有限元分析法,均无法描述水平循环荷载作用下土体中单桩基础的循环变形过程。若要追踪土体中单桩基础的变形时程,可行方法是采用可描述土体循环响应的本构模型,采用数值分析手段模拟桩周土体的循环弱化变形过程。

本文基于ABAQUS软件平台,采用X. Cheng等^[18]建议的总应力形式的土的循环弹塑性本构模型,通过建立桩土相互作用的三维有限元模型,对文献中报道的大直径单桩的水平受荷离心模型试验进行数值模拟,建立追踪土体中大直径单桩变形时程的有限元分析方法,并依据有限元分析结果研究循环荷载下桩身弯矩、桩侧位移等的变化规律。

1 桩—土相互作用三维有限元模型

对朱斌等^[8]开展的砂土中大直径单桩的离心模型试验进行数值模拟,试验编号分别为D-2(水平静力加载)、D-3(水平循环加载),按照离心模型桩对应的原型桩尺寸建立有限元模型,相应原型桩的外径为2.5 m,总长度为65 m,壁厚45 mm。试验离心加速度为83g。试验详情参见文献[8]。

(1)几何尺寸及网格划分:考虑到水平荷载作用下单桩基础结构的对称性,为提高计算效率,选取桩及土体的一半建立有限元模型,如图1所示。为消除边界效应的影响,桩侧壁到土体竖向边界的距离为10倍桩径,桩底端距离模型底部边界为10倍桩径,桩体埋深为50 m,桩和土体均采用C3D8三维实体单元。

(2)边界条件:在土体竖向边界施加水平方向的约束,保证土体在侧向边界处无水平位移发生。在对称边界施加垂直于对称面的水平约束,在土体底部边界施加固定约束,土体顶部边界无约束施加。

(3)荷载条件:依据模型试验实际情况,对于试验编号为D-2的有限元模型,施加水平单调荷载;对于试验编号为D-3有限元模型,施加水平循环荷载。参照模型试验施加的循环荷载大小,如图2所示(仅显示前10圈,幅值为2 MN^[19]),由于采用半结构模型开展有限元计算,施加的荷载大小为其一半(幅值为1 MN),试验加载点位置距泥面6.75 m(2.7倍外径),如图1所示。

(4)材料本构:有限元模型中将空心钢管桩依照抗弯刚度等效原则设定为实体桩^[15],等效后桩的弹性模量 E 为29.51 GPa,桩身材料密度等效后为1 641 kg/m³,泊松比为0.33,桩身变形的计算采用线弹性模型。

模型试验土体为干砂,其应力应变行为采用X. Cheng等^[18]建议的土的总应力本构模型描述,该模型基于界面理论建立,模型建立方法及其数值实现详见文献[18,20],其增量应力应变关系为:

$$de_{ij} = \frac{1}{2G} ds_{ij} + \frac{3}{2H'} \frac{\bar{s}_{ij}}{A_0^2} \bar{s}_{kl} ds_{kl} \quad (1)$$

式中, de_{ij} 为总偏应变增量; ds_{ij} 、 ds_{kl} 为偏应力增量; G 为弹性剪切模量; H' 为塑性硬化模量; \bar{s}_{ij} 、 \bar{s}_{kl} 为边界面上偏应力张量; A_0 为界面半径。

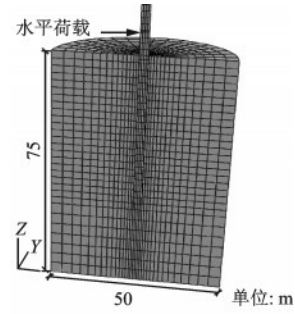


图1 三维有限元模型

Fig.1 Three dimensional finite element model

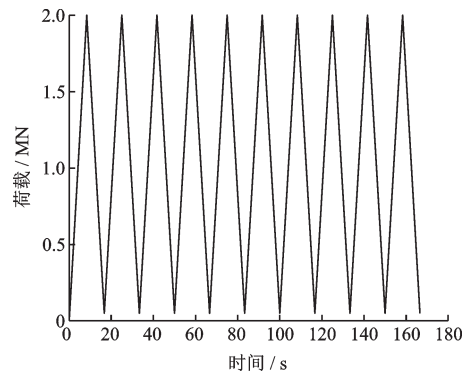


图2 水平循环荷载时程

Fig.2 Time history of lateral cyclic loads

该本构模型共包含3个待定模型参数:界面半径 A_0 、弹性剪切模量 G 以及反映剪应变累积速率和大小的参数 μ 。模型试验所用干砂重度 γ 为15.24 kN/m³,摩擦角 φ 为37.7°,土体本构模型参数的确定方法如下:

桩体埋深为50 m,取桩体中间位置,即泥面下25 m处土层的抗剪强度近似表征整个土层的平均强度。25 m处土层竖向应力 σ_1 与水平应力 σ_3 分别为381 kPa和148 kPa,其中,固结系数 k_0 按经验公式 $1 - \sin\varphi$ 计算为0.388。依据摩尔库伦强度准则,常规三轴压缩试验条件下的临界状态应力比 M 满足:

$$M = \frac{q_f}{p_f} = \frac{3(\sigma_{1f} - \sigma_3)}{\sigma_{1f} + 2\sigma_3} = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} = 1.54 \quad (2)$$

由式(2)可得三轴压缩破坏时的大主应力 σ_{1f} 为607 kPa,本构模型中界面半径 A_0 表征土体的强度,为三轴压缩破坏时的偏应力大小,即: $A_0 = \sigma_{1f} - \sigma_3 = 459$ kPa。

参考文献[21],非线性土体弹性模量 E 采用M. Achmus等^[13]提出的计算公式(3)确定为92 MPa:

$$E = \kappa \sigma_{at} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}} \right)^\lambda \quad (3)$$

式中, σ_{at} 为大气压力; κ 和 λ 为刚度系数, 依文献 [21], 取 $\kappa=560, \lambda=0.6$; σ_m 为平均主应力, 其值为 226 kPa。

按下式计算得到剪切模量 G 为 38 MPa:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中, ν 为泊松比, 为 0.21。

对于循环加载条件, 考虑加载速率对土体强度及剪切模量的影响, 参考文献 [18], 通常经验性的可取静力单调加载条件下土体强度及剪切模量的 1.5~2.0 倍, 本文取 1.6 倍进行计算, 因此考虑加载速率效应后的边界半径 A_0 及弹性剪切模量 G 分别为 734 kPa 和 61 MPa。

参数 μ 是反映剪应变累积速率和大小的参数, 通常取值 0~5^[18], 若要得到参数 μ 的精确值, 应通过针对试验砂土开展静力及动三轴试验确定, 然而由于试验条件的限制, 目前暂时取其平均值 2.5。

至此, 针对单调及循环加载模型实验的土体本构模型参数均已确定完毕, 见表 1。

表 1 土体本构模型参数

Table 1 Parameters of soil constitutive model

试验编号	加载方式	G /MPa	A_0 /kPa	μ
D-2	静力	38	459	2.5
D-3	循环	61	734	2.5

(5) 接触设置: 桩身外壁与周围土体的接触面采用法向可以分离、切向可以滑移的接触条件, 并按摩尔-库伦准则设置切向滑移条件, 摩擦系数 μ 设定为 $0.54(\mu = \tan(0.75\varphi))$ ^[21]。

(6) 分析步设置: 主要包含两个分析步: 第一步为地应力平衡分析步, 该分析步的目的在于给土体施加自重荷载, 使得土体具有初始地应力场的同时, 初始位移场基本为零。第二步为静力加载或循环加载分析步, 对于试验编号为 D-2 的有限元模型, 设置水平静力单调加载分析步; 对于试验编号为 D-3 的有限元模型, 设置水平循环荷载分析步。有限元计算过程中, 通过调用本构模型的 UMAT 子程序, 计算土体在静力荷载及循环荷载下的变形, 进而通过对计算结果的提取得到循环荷载作用下桩在土中的整个变形时程。需要说明的是由于模型试验加载频率较低, 为 0.06 Hz, 因而循环荷载分析步并

未考虑惯性力的影响, 不是真正的动力分析, 只是考虑循环加卸荷路径的拟静力分析。

2 数值模拟与离心模型试验结果对比分析

2.1 水平静力加载试验模拟(D-2 试验)

荷载位移曲线的模拟结果与试验结果对比如图 3 所示。由图 3 可见, 模拟所得荷载位移曲线在初始加载时较为陡直, 反映出土体的初始刚度较大, 随着荷载增加, 曲线有变缓的趋势, 即位移增长加快, 表明桩侧土体的刚度在逐渐减弱。反映出土体在桩身挤压作用下的非线性及塑性变形特性。模拟结果与试验结果基本一致。

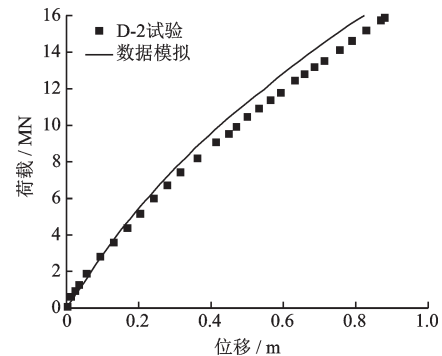


图 3 水平静力加载荷载位移曲线

Fig.3 Load-displacement curves under lateral static loads

图 4 给出了随荷载施加桩身弯矩的变化曲线, 由模拟结果可见, 在特定大小的水平荷载作用下, 桩身弯矩并非单调增加, 而是在某一位置达到峰值, 随着荷载的逐渐增大, 弯矩逐渐增大, 桩身峰值弯矩位置约为泥面下 6.25 m (2.5 倍桩径) 处, 并且随着荷载的增大, 峰值位置有向下发展的趋势, 这与试验现象基本一致, 模拟计算所得弯矩值总体上略小于桩身弯矩实测值, 但总体趋势与试验结果基本一致。

图 5 给出了随荷载施加桩身位移的变化曲线, 由模拟结果可见, 特定的水平荷载作用下, 桩底端以上一定桩长范围内桩身产生与加载方向相反的位移, 但位移值较小, 在距泥面约 15 m 处, 桩身位移为 0, 该位置以上桩身位移发生显著的增长, 并在桩顶达到最大值。随施加荷载的增大, 沿荷载方向桩侧位移也明显增大, 各个荷载水平下模拟计算所得

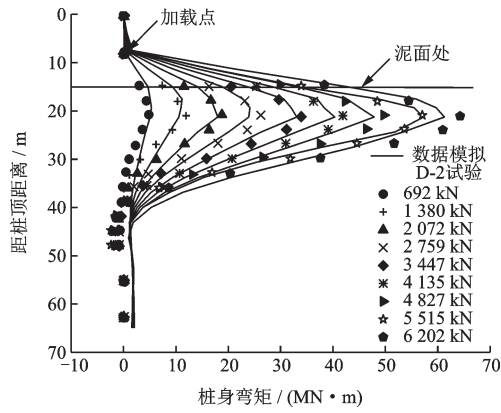


图4 水平静力加载桩身弯矩分布曲线

Fig.4 Bending moment distribution curves of pile under lateral static loads

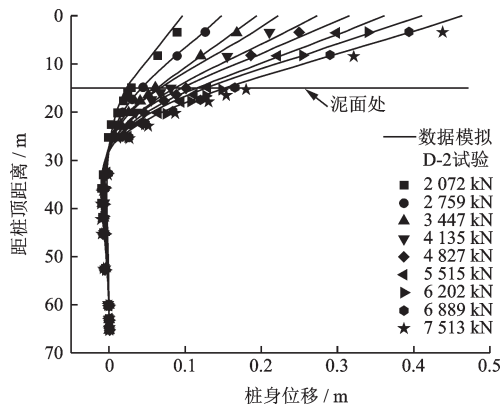


图5 水平静力加载桩身位移曲线

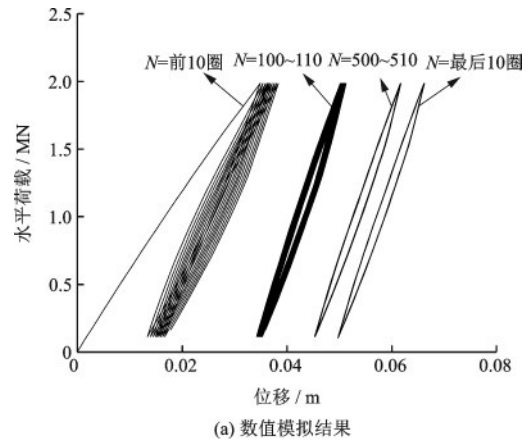
Fig.5 Displacement distribution curves of pile under lateral static loads

位移值微小于桩身位移实测值,但整体趋势与试验结果基本一致。

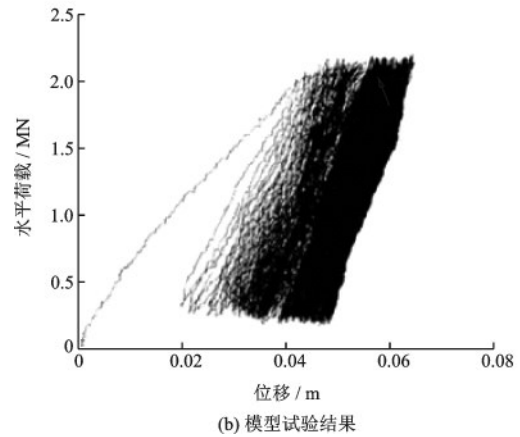
2.2 水平循环加载试验模拟(D-3试验)

图6给出了桩身加载点荷载位移曲线的数值模拟和试验结果,为便于显示,数值模拟图像仅给出其中若干圈的结果。模拟结果表明,循环加载初期,加载点位移累积较快,荷载位移曲线显示出明显的非线性循环滞回特性,随着循环次数增加,滞回特性逐渐减弱,累积位移的发展趋势逐渐变缓并最终趋于稳定,荷载位移曲线的整体变化趋势以及最终累积位移的大小与试验结果均基本一致。这表明采用本文的有限元分析方法可以追踪土体中桩身的循环位移时程,描述水平循环荷载作用下单桩的非线性位移响应。

弯矩随循环加载的变化曲线如图7所示,图中给出了循环加载次数 N 分别为1、500、900、995时的



(a) 数值模拟结果



(b) 模型试验结果

图6 水平循环荷载位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves under lateral cyclic loads

桩身弯矩分布曲线。由模拟结果图7可知,在特定循环次数下,峰值弯矩位置约在泥面下6.25 m(2.5倍桩径)处,这与静力加载试验D-2的峰值弯矩位置基本一致,说明当加荷点位置相同时,施加荷载的模式对弯矩峰值点出现的位置影响不大。另外,随循环荷载的施加,弯矩峰值点位置基本不变,而峰值弯矩逐渐增大, $N=995$ 时峰值弯矩约为 $N=1$ 时峰值弯矩的1.1倍。数值模拟计算所得到的桩身弯矩分布曲线与试验结果基本一致。

图8给出了随循环次数增加桩身位移的分布曲线,图中的离散点为 $N=1$ 及 $N=995$ 时,试验所得桩身两点的位移实测值,其距离桩顶位置分别为8、12 m。由数值模拟结果可知,随循环荷载次数的增大,桩身位移逐渐增大,且循环加载100~500次的位移增大值较1~100次的位移增大值小,类似的,500~900次的位移增大值更小,表明循环加载初期,位移增大较快,但随着荷载次数的逐渐增加,位移增大逐渐趋缓,这与文献[8]中的试验现象基本一致。另外,通过与试验结果对比可知,预测结果与试验结果基本吻合。

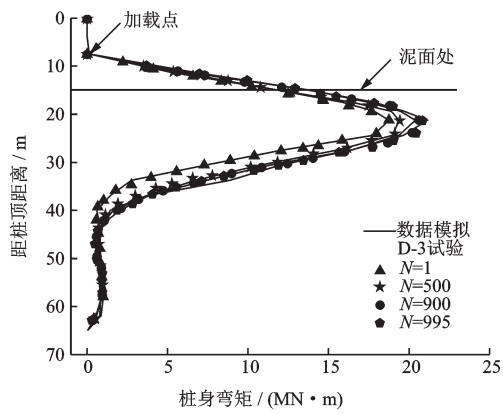


图7 循环加载桩身弯矩分布曲线

Fig.7 Bending moment distribution curves of pile under lateral cyclic loads

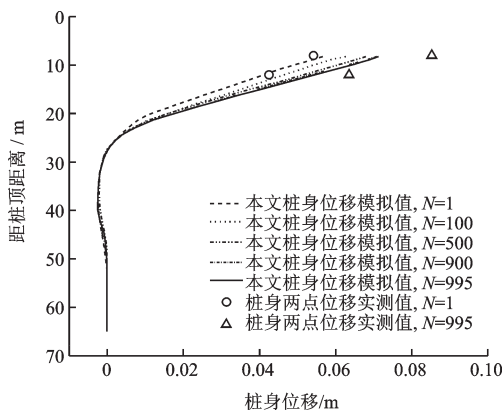


图8 循环加载桩身位移曲线

Fig.8 Displacement distribution curves of pile under lateral cyclic loads

图9给出了荷载次数分别为 $N=1$ 、500、995时的位移矢量图(变形放大系数为50),从图中可以更清楚地看到随循环荷载次数的增加,桩身上半部分桩侧位移沿加载方向增加明显,而桩身下半部分位移变化不显著,仅发生微小的反向位移,这与试验

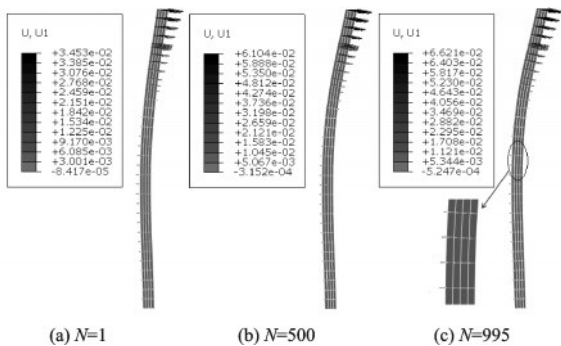


图9 循环加载桩身水平位移矢量图

Fig.9 Displacement vector distribution graph of pile under lateral cyclic loads

结果基本一致。表明利用本文的有限元方法可以描述水平循环荷载下桩身的位移变化。

图10给出了数值模拟所得累积位移与试验结果的对比,由图可见,随着循环次数的增加,累积位移逐渐增大,模拟结果比试验结果略小,但整体趋势基本一致。在图10所示的半对数坐标系中,可以看到无论是模型试验还是数值模拟结果,循环累积位移与循环次数基本成线性关系,朱斌等^[8]基于模型试验结果给出了相应的线性表达式。另外,A. Hettler^[22]、S. S. Lin等^[23]、W. Li等^[24]也曾基于模型试验或数值模拟给出过循环累积位移与循环次数对数的线性关系式。本文参照该思路,通过对数值模拟结果曲线进行最小二乘拟合,也给出了循环累积位移与循环次数对数的线性表达式:

$$y_N = y_1 + c \ln N \quad (5)$$

式中, y_1 取0.032 35; c 取0.004 7。

依据该式可近似估算荷载循环 N 次后桩身加载点的累积位移值($N < 1000$)。然而该式针对循环次数1000次以上单桩累计位移计算的适用性仍有待通过实验数据进行进一步验证。

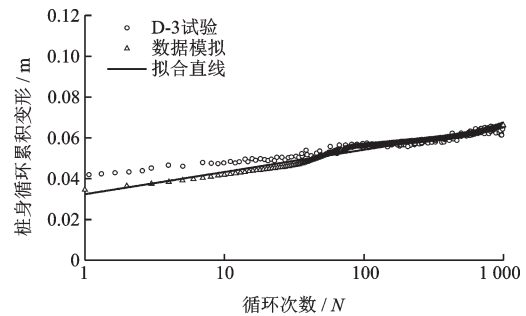


图10 桩身加载点循环累积位移随循环次数的变化关系曲线

Fig.10 Cyclic cumulative displacement at loading point of pile versus the number of cycles

3 结论

基于ABAQUS软件平台,通过建立砂土中大直径单桩的三维有限元模型,对相关离心模型试验开展了数值模拟,研究了水平静力及循环荷载作用下砂土中大直径单桩基础的承载变形特性。研究表明,采用文献[18]建议的土的循环弹塑性界面本构模型,利用本文建立的数值模拟分析方法可以描述大直径单桩在水平单调静力荷载以及循环荷载作用下的荷载位移响应,描述桩土相互作用过程。可以反映水平循环荷载作用下砂土中大直

径单桩荷载位移响应的非线性、滞回性及位移累积特性,可以预测随循环次数增加,桩身弯矩、位移的分布特征及演化规律。依据数值模拟结果,建议了循环累积位移与循环次数对数的线性关系表达式。

需要说明的是,本文采用的循环弹塑性界面本构模型为总应力形式,仅考虑偏应变的累积硬化机制,数学表达相对简单,无法考虑砂土的剪胀及软化特性,故有一定的局限性;然而,由于其数学表达的简易性,相较于目前复杂的有效应力动本构模型,具有较好的数值应用性及较高的计算效率。能够描述桩周土体的刚度弱化及累积变形特性,进而可利用有限元方法在一定程度上描述出土体中大直径单桩的水平循环荷载位移响应。

参考文献:

- [1] 林毅峰,李健英,沈达,等.东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J].上海电力,2007(2):153-157.
Lin Y F, Li J Y, Shen D, et al. Structure characteristics and design technique keys of wind turbine foundation in Shanghai Donghai-bridge offshore wind farm[J]. Shanghai Electric Power, 2007(2): 153-157. (in Chinese)
- [2] 刘润,闫澍旺.海洋大直径钢管桩工程[M].北京:中国水利水电出版社,2016:1-16.
Liu R, Yan Sh W. Marine large-diameter steel-pipe pile engineering[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2016:1-16.(in Chinese)
- [3] 张忠苗.桩基工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:246-283.
Zhang Zh M. Pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 246-283. (in Chinese)
- [4] 贺嘉,陈国兴.基于ABAQUS软件的大直径桩承载力-变形分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):306-310.
He J, Chen G X. Analysis of bearing capacity-deformation of the large diameter pile by the ABAQUS software [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 306-310. (in Chinese)
- [5] Matlock H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay [C]//Proceedings 2nd Offshore Tech Conference. Houston, Texas:[s.n.], 1970: 577-594.
- [6] API. RP-2A-WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed off shore platforms-working stress design [S]. Washington DC: API Publishing Services, 2002.
- [7] Abdel-Rahman K, Achmus M. Finite element modeling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany[C]//Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Perth: Taylor and Francis, 2005: 391-396.
- [8] 朱斌,熊根,刘晋超.砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J].岩土工程学报,2013,35(10):1807-1815.
Zhu B, Xiong G, Liu J Ch. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10):1807-1815. (in Chinese)
- [9] 黄茂松,马昊,李森.软黏土中水平受荷桩的静力和循环 $p-y$ 曲线[J].岩土工程学报,2017,10(增2):9-12.
Huang M S, Ma H, Li S. Static and cyclic $p-y$ curves for laterally loaded piles in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 10(Sup 2): 9-12. (in Chinese)
- [10] 梁发云,秦承瑞,陈思奇.水平循环荷载下桩土动力 $p-y$ 骨干曲线模型试验[J].中国港湾建设,2017,9(9):21-26.
Liang F Y, Qin Ch R, Chen S Q. Model test for dynamic $p-y$ backbone curves of soil-pile interaction under cyclic lateral loading[J]. China Harbour Engineering, 2017, 9(9): 21-26. (in Chinese)
- [11] 陈仁朋,顾明,孔令刚.水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(11):1990-1996.
Chen R P, Gu M, Kong L G. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups under cyclic lateral loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(11): 1990-1996. (in Chinese)
- [12] Rosquoet F, Thorel L, Garnier J, et al. Lateral cyclic loading of sand-installed piles [J]. Soils and Foundations, 2007, 47(5): 821-832.
- [13] Achmus M, Kuo Y S, Abdel-Rahman K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [14] 罗如平,李卫超,杨敏.水平循环荷载下海上大直径单桩累积变形特性[J].岩土力学,2016,37(增2):607-612.
Luo R P, Li W Ch, Yang M. Accumulated response of offshore large-diameter monopile under lateral cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 2): 607-612. (in Chinese)
- [15] 胡安峰,张光建,贾玉帅.刚度衰减模型在大直径桩累积侧向位移分析中的应用[J].浙江大学学报(工学

- 版), 2014, 48(4): 721-726.
- Hu A F, Zhang G J, Jia Y Sh. Application of degradation stiffness model in analysis of cumulative lateral displacement of monopile foundation[J]. Journal of Zhejiang University (Medical Sciences), 2014, 48(4): 721-726. (in Chinese)
- [16] 郭玉樹, 亚克慕斯·马丁, 阿布达雷赫曼·哈里. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1729-1734.
- Guo Y Sh, Achmus M, Abdel-Rahman K. Estimation of lateral deformation of monopile foundations by use of cyclic triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1729-1734. (in Chinese)
- [17] 夏华盛, 张陈蓉, 俞剑, 等. 海上风电桩基水平承载力循环衰减二维简化分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增1): 303-309.
- Xia H Sh, Zhang Ch R, Yu J, et al. 2D simplified analysis of cyclic degradation of lateral bearing capacity for the pile foundation of offshore wind turbine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup 1): 303-309. (in Chinese)
- [18] Cheng X, Wang J. An elastoplastic bounding surface model for the cyclic undrained behaviour of saturated soft clays[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(3): 325-343.
- [19] 熊根. 近海大直径单桩水平受荷离心模型试验和三维数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Xiong G. Centeiguge modelling and 3-D numerical analysis of large diameter single pile under lateral loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [20] Cheng X, Wang J, Wang Z. Incremental elastoplastic FEM for simulating the deformation process of suction caissons subjected to cyclic loads in soft clays[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 274-285.
- [21] 刘晋超, 熊根, 朱斌. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 591-599.
- Liu J Ch, Xiong G, Zhu B. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 591-599. (in Chinese)
- [22] Hettler A. Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand[D]. Karlsruhe: Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, 1981. (in German)
- [23] Lin S S, Liao J C. Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9): 798-802.
- [24] Li W, Igoe D, Gavin K. Field tests to investigate the cyclic response of monopiles in sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2015, 168(5): 407-421.

(本文责编: 苏泽云)