

文章编号: 1000-4750(2010)10-0167-06

动载作用下桶形基础周围土体变形的数值模拟

*李 驰¹, 鲁晓兵², 王淑云²

(1. 内蒙古工业大学土木工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100084)

摘 要: 针对动冰载作用下桶形基础周围土体的液化变形进行了数值模拟。建立饱和砂层中桶形基础的简化计算模型, 研究动载作用下砂层竖向和水平向的液化变形。首先与桶形基础动载离心机试验比较, 验证了计算模型的可靠性。分析了砂层竖向和水平向液化变形特征, 以及砂层变形随动载特性和土性参数变化的规律。研究结果表明: 砂层变形随着动载频率减小、振幅加大、砂层弹性模量降低而增大。在该文计算模型和荷载条件下, 砂层竖向最大变形发生在距荷载作用边界 0.25 倍桶高位置处, 水平最大变形发生在荷载作用边界处。当动载激振时间超过 5h 后, 土顶面竖向变形约为土底面竖向变形的 3 倍, 距荷载作用边界 2.0 倍桶高位置处的水平变形仅为荷载作用边界处水平变形的 3.3%。

关键词: 土力学; 液化变形; 数值模拟; 桶形基础; 等效动冰载

中图分类号: TU471.8 **文献标识码:** A

NUMERICAL SIMULATION ON SAND STRATA DEFORMATION AROUND BUCKET FOUNDATION UNDER DYNAMIC LOADINGS

*LI Chi¹, LU Xiao-bing², WANG Shu-yun²

(1. Civil Engineering Institute, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China)

Abstract: The liquefaction deformation of sand strata around bucket foundation is simulated under equivalent dynamic ice-induced loadings. A simplified numerical model has been presented for bucket foundation in saturated sand strata. The vertical and horizontal liquefaction deformations under dynamic loading are studied. Firstly, the numerical model and results are verified through a comparison with the centrifuge test results. Secondly, the development characteristics of liquefaction deformation are analyzed. The following results are obtained from numerical simulations: the liquefaction deformation of sand strata increases with the increase of the dynamic loading amplitude, but decreases with the increase of the frequency and elastic modulus. The maximum vertical deformation occurs at the surface which is 0.25 times of bucket's height apart from the loading boundary. The maximum horizontal deformation occurs at the loading boundary. When the dynamic loadings lasts for more than 5 hours, the vertical deformation at the top surface is 3 times of that at the bottom, and the horizontal deformation at the surface which is 2.0 times of bucket's height apart from the loading boundary is 3.3% of that at the loading boundary.

Key words: soil mechanics; liquefaction deformation; numerical simulation; bucket foundation; equivalent dynamic ice-induced loadings

海洋油气资源开发已经有了很大的发展, 越来越多的海洋石油平台将要修建。桶形基础就是近年

来石油部门十分关注的一种基础形式。迄今为止, 对桶形基础的承载特性, 尤其是动载下的承载特性

收稿日期: 2009-04-14; 修改日期: 2010-01-04

基金项目: 中科院、中海油联合重大项目“海洋石油开发若干重大科学技术问题研究”(KJ CX2-SW-L03-01)

作者简介: *李 驰(1973—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博士, 主要从事岩土动力学方面的教学和科研工作(E-mail: tjdxlc2003@126.com);
鲁晓兵(1968—), 男, 北京人, 副研究员, 博士, 从事与岩土力学有关的研究工作, 包括海洋平台基础承载力等(E-mail: xblu@imech.ac.cn);
王淑云(1965—), 女, 天津人, 高级实验师, 硕士, 从事与岩土力学有关的试验研究(E-mail: shuywang@imech.ac.cn).

和稳定性还缺乏了解,而海洋平台的稳定性是直接关系到安全生产的重要环节^[1-5]。因此,迫切需要开展这方面的研究。海洋平台基础很多都坐落在饱和砂土地基上或含有饱和砂土夹层的地基中,波浪、冰载等动载直接作用于平台上部结构,然后通过平台基础传递到周围土体,引起土体的动态响应。在动载作用下,饱和砂土中的孔隙水压可能逐渐积累,有效应力逐渐减小,甚至发生液化。随着土体强度降低和孔隙水的排出,桶及土体逐渐发生沉降和侧向永久变形。以往的研究中,多针对液化过程中孔隙水压和有效应力随时间的发展进行分析,即材料液化的发展过程,对软化或液化后的变形研究较少^[6-10]。文献[13-14]针对动冰载作用下砂层中桶形基础的液化特性进行了模型试验和动载离心机试验。研究表明,土体在动载作用下的大变形是导致平台失稳的一种重要模式。

在我国渤海,控制载荷为冰载,海冰运动引起平台结构振动,该振动通过基础传递到周围的土体中,引起土体的动力响应。这种土体-桶形基础-冰的相互作用是典型的冰与流体、结构物、土体三者间耦合动态响应问题。鉴于此,本文将通过数值模拟,重点探讨桶形基础在动冰载作用下的液化变形及变形发展的影响因素。

1 饱和砂层中桶形基础简化计算模型

1.1 计算模型的简化

以往,在桶形基础的静动承载力数值模拟研究中,主要是建立桶、土三维或二维结构耦合模型,通过接触面库仑摩擦单元来模拟桶土之间的相互作用^[11]。这种建模方法可以真实地反映模型情况,在静力计算中结果是比较可靠的,但在动力计算中由于动载输入存在正向和反向加载的情况,接触界面上库仑摩擦单元有可能是失效的^[12]。根据桶形基础的室内模型试验和土工离心机试验结果,水平荷载作用下桶壁与桶内土塞始终紧密接触,且桶壁结合桶内土塞组成一整体式基础,该整体式基础与周围饱和砂土层相比,刚度无限大可假定为刚体^[13-14]。因此,文中计算模型进行了如下简化:取桶形基础右侧土体作为研究对象,该土体为竖直方向有限深、水平方向半无限的饱和砂层,顶面设置为自由边界,底面施加垂直约束且不透水,水平荷载通过刚性的桶形基础直接作用于土左侧边界,视土左侧为刚性边界,忽略桶-土之间的相互作用,土

右侧设置粘弹性约束且为无反射边界。按照平面应变计算模型,着重研究水平荷载作用下饱和砂层在 $x-z$ 平面内的应力及变形,简化的计算模型见图 1。

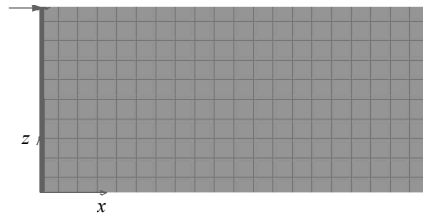


图 1 简化的数值计算模型

Fig.1 Simply numerical model

计算步骤如下: 1) 首先考虑土体在侧限状态下,初始地应力逐渐达到平衡; 2) 然后,放开左侧约束,视土左侧为刚性边界,底面仍然设置垂直约束且不透水,土右侧设置粘弹性约束且为无反射边界; 3) 在土层左侧边界处直接施加等效动冰载。参照文献[15]动冰载频率取为 1.0Hz,振幅自土顶到土底逐渐减小,最大振幅 16cm 作用于土顶位置处,最小振幅为零作用于土底位置处。沿土层左侧边界,土顶、土中和土底处水平速度时程变化见图 2。

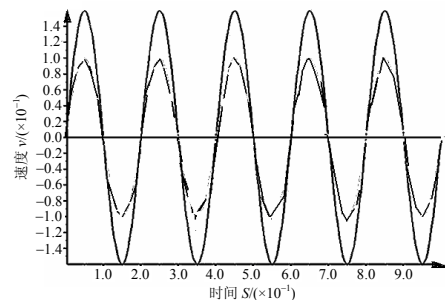


图 2 动载输入速度时程变化

Fig.2 The time series of dynamic loadings

文中饱和砂层中桶形基础的简化计算模型,将动载直接施加于饱和砂土层的左边界处,作用效果用给定的位移函数来等效,而不直接用地基与基础耦合来实现。考虑到 FLAC 软件在模拟非线性和大应变问题上具有的明显优势,文中通过 FLAC 软件着重研究动载作用下,饱和砂土地基的液化破坏以及液化变形特征。

1.2 计算参数的确定

计算中土骨架采用 Mohr-Columb 模型,孔隙水采用各向同性弹性模型。按照文献[13]中饱和砂土的动三轴试验结果,砂层的弹性模量为 $2.6 \times 10^8 \text{Pa}$,泊松比为 0.3,内摩擦角为 36.5° ,砂土密度为 1600kg/m^3 。

1.3 计算模型的验证

当动载激振 20h 后,距荷载作用边界不同位置

处土顶竖向位移的试验结果与数值结果比较见表 1。可以看出,在同样条件下,土顶竖向位移在数值计算和动载离心机试验中的变化规律是接近的,验证了文中的计算模型的可靠性。

表 1 距荷载作用边界不同位置处土顶竖向位移(h 为桶高)
Table 1 Vertical displacement at different distances from load boundary (h is the height of bucket)

距荷载作用边界距离	该位置处土顶竖向位移/ 荷载作用边界处土顶竖向位移	
	试验结果 ^[14]	计算结果
$x=0$	1.0	1.0
$x=1.3h$	0.49	0.43
$x=3.0h$	0	0

2 动载作用下砂层竖向位移

2.1 砂层顶(底)面附近竖向位移沿水平方向的分布

当动载作用于砂层左侧边界时,不同激振时间时砂层竖向位移沿水平方向的分布情况见图 3。图 3(a)、图 3(b)分别为在等效动冰载激振 1h、3h、5.5h、10h 和 15h 时,离荷载作用边界不同距离的砂层顶(底)面附近的竖向位移。为减小桶高 h 对计算结果的影响,统一使用相对竖向位移 S_z/h 来表示。由图 3(a)可以看出,砂层顶面($z=1.0h$)竖向位移在离荷载作用边界 $0.25h-0.5h$ 处达到最大,之后在距荷载作用边界 $0.5h-1.0h$ 范围内,位移量逐渐减小。当离荷载作用边界距离 $x \geq h$ 后,位移量基本上保持一定值。因此,在砂层顶面附近,距荷载作用边界 $x \leq h$ 范围内,形成一类似“锅形”的沉陷区域。并且,随着动载激振时间的增加,“锅形”的沉陷区域越来越明显,砂层顶面处最大位移量逐渐增加。由图 3(b)可知,在距荷载作用边界距离 $x \leq h$ 范围内砂层底面($z=0.2h$)附近竖向位移较明显,且

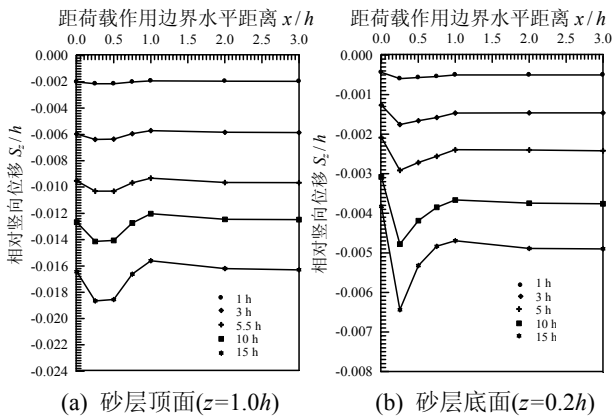


图 3 不同激振时间下砂层顶(底)面竖向位移的水平分布
Fig.3 Distribution of vertical displacement along the width at different time

当 $x > h$ 后,竖向位移趋于稳定,这与离心机试验结果相同^[14]。随激振时间的增加,竖向位移逐渐加大。与土顶面附近的竖向位移相比,“锅形”沉陷区域沿深度方向延伸趋向于倒三角形沉陷区域,三角形顶点位于 $x=0.25h$,说明该位置处竖向位移量最大。

2.2 砂层顶(底)面最大竖向位移与激振时间的关系

当离荷载作用边界距离为 $0.25h$ 时,砂层顶面和底面附近竖向位移与激振时间之间的关系见图 4。可以看出,随激振时间的增加初期竖向位移增大较快,之后竖向位移增长的速率减缓并逐渐趋于稳定。当激振时间超过 5h,砂层顶面竖向位移约为砂层底面附近竖向位移的 3 倍。

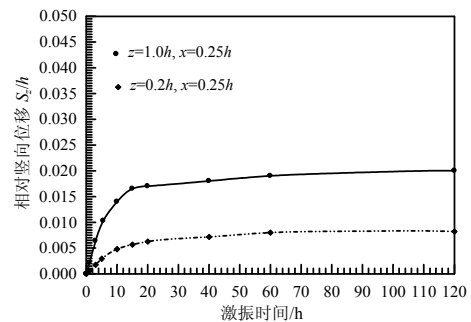
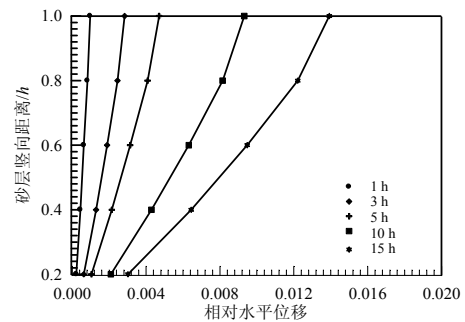


图 4 砂层顶(底)面附近竖向位移与激振时间的关系
Fig.4 Development of vertical displacement of sand strata at the bottom and the top surface

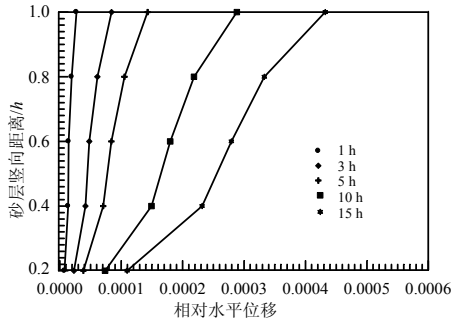
3 动载作用下砂层水平位移

3.1 砂层水平位移沿垂直方向的扩散

在动载作用下,砂层水平位移沿水平方向向远处逐渐减小,在离荷载作用边界距离大于等于 2.0 倍桶高时($x \geq 2h$),水平位移变化很小。因此,可以认为水平位移最大值发生在砂层左侧边界($x=0$),水平位移最小值发生在距砂层左侧边界 2.0 倍桶高处($x=2.0h$)。图 5(a)为等效动冰载作用 1h、3h、5h、10h 和 15h 时,在砂层左侧边界处水平位移沿砂层垂直方向的发展情况。图 5(b)为距荷载作用边界 2.0 倍桶高位置处,砂层水平位移沿砂层垂直方向的分



(a) 荷载作用边界($x=0$)



(b) 距荷载作用边界 2.0 倍桶高位置处($x=2.0h$)

图 5 不同激振时间作用下砂层水平位移的竖向分布

Fig.5 Distribution of horizontal displacement along vertical direction at different time

布情况。同样,为减小桶高 h 对计算结果的影响,统一使用相对水平位移 S_x/h 来表示。可以看出,在动载作用下,砂层水平位移自顶面到底面沿砂层垂直方向逐渐减小,在砂层顶面($z=1.0h$)位置处水平位移最大,在砂层底面($z=0.2h$)位置处水平位移最小。

3.2 砂层水平位移与激振时间的关系

砂层水平位移随激振时间变化见图 6。可以看出,水平位移随激振时间的增加逐渐增大并最终趋于稳定。

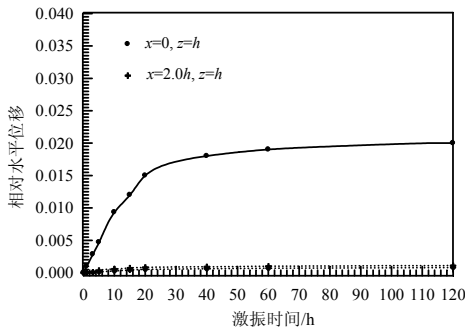


图 6 相对水平位移与激振时间的关系

Fig.6 Development of relative horizontal displacement at different distances from the load boundary

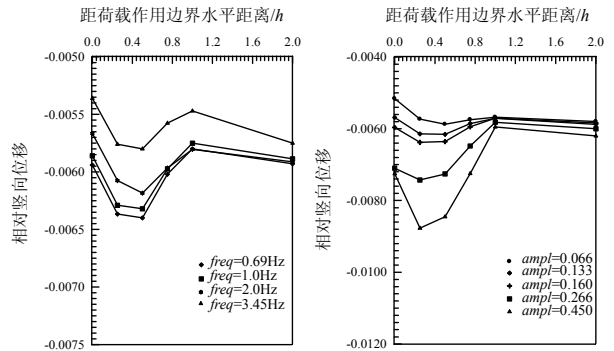
在相同的动载作用下激振时间超过 5h 后,距荷载作用边界 2.0 倍桶高位置处,砂层水平位移仅为荷载作用边界处最大水平位移的 1/30。

4 动载特性对砂层位移的影响

4.1 动载特性对砂层竖向位移的影响

随着动载频率和振幅的变化,砂层顶面竖向位移沿水平方向的分布随之变化,如图 7 所示。以动载作用激振 5h 为例,动载特性对砂层顶面($x=0.25h, z=h$)最大位移的影响见图 8。从图 8(a)中可以看出,随动载频率的增加,砂层排水速率减小,使得砂层顶面处的竖向位移减小;图 8(b)显示,随

动载振幅的增加,土体动力响应幅度加大,使砂层顶面处竖向位移增大。

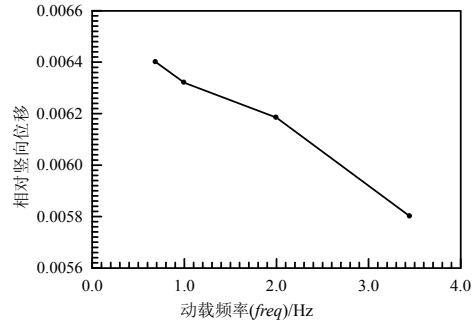


(a) 动载频率($freq$)对相对竖向位移水平分布的影响

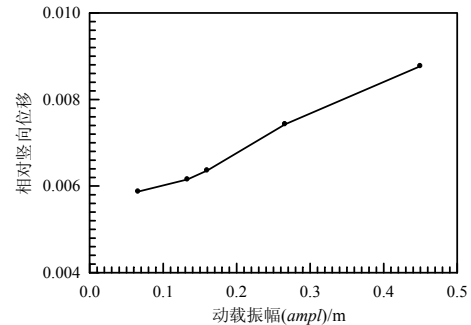
(b) 动载振幅($ampl$)对相对竖向位移水平分布的影响

图 7 动载特性对砂层顶面竖向位移的影响

Fig.7 Effects of dynamic loadings characteristics on the vertical displacement



(a) 动载频率($freq$)与相对竖向位移关系



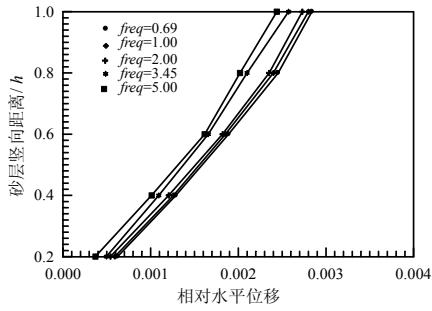
(b) 动载振幅($ampl$)与相对竖向位移关系

图 8 砂层顶面最大竖向位移与动载特性之间的关系

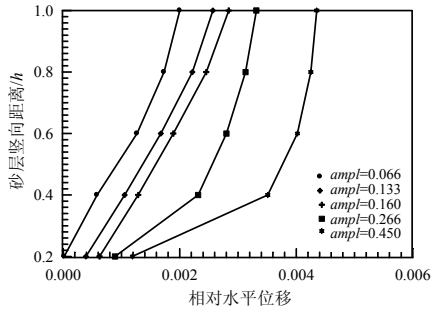
Fig.8 The maximum vertical displacement versus load frequency and amplitude

4.2 动载特性对砂层水平位移的影响

相同激振时间下,随着动载频率和振幅的变化,荷载作用边界处水平位移沿砂层垂直方向的发展见图 9。当等效动冰载激振 5h,动载特性对荷载作用边界处($x=0, z=h$)最大水平位移的影响见图 10。从图 10 可以看出,砂层最大水平位移随动载频率的减小和动载振幅的增加而增大。



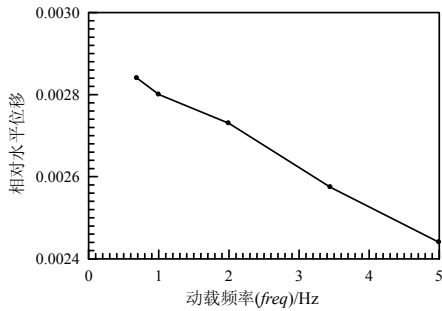
(a) 动载频率(*freq*)对相对水平位移竖向分布的影响



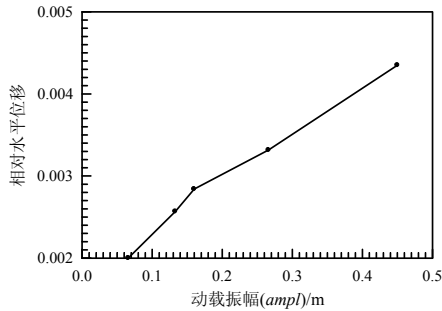
(b) 动载振幅(*ampl*)对相对水平位移竖向分布的影响

图9 动载特性对砂层水平位移的影响

Fig.9 Effects of dynamic loadings characteristics on the horizontal displacement



(a) 动载频率(*freq*)与相对水平位移关系



(b) 动载振幅(*ampl*)与相对水平位移关系

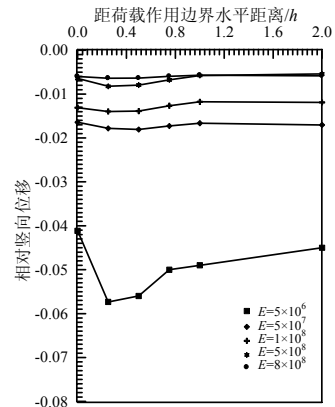
图10 砂层最大水平位移与动载特性之间的关系

Fig.10 The maximum horizontal displacement versus load frequency and amplitude

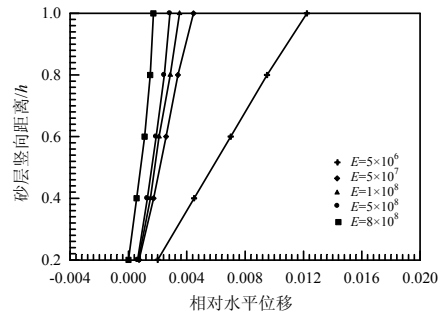
5 土性参数对砂层位移的影响

当砂层弹性模量不同时,砂层中位移的发展也是不同的。图11为等效动冰载作用过程中,砂层弹性模量对砂层最大竖向和水平位移的影响。砂层最大位移与其弹性模量的关系见图12。可以看出,

随着砂层弹性模量的增加,砂层竖向位移和水平位移均减小,且砂层弹性模量对砂层位移的影响很明显,当砂层弹性模量增大10倍,砂层竖向位移和水平位移减小将近1/3。



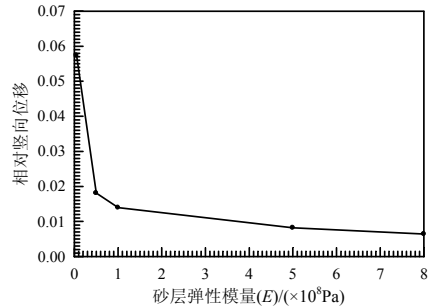
(a) 砂层弹性模量(*E*)对相对竖向位移水平分布的影响



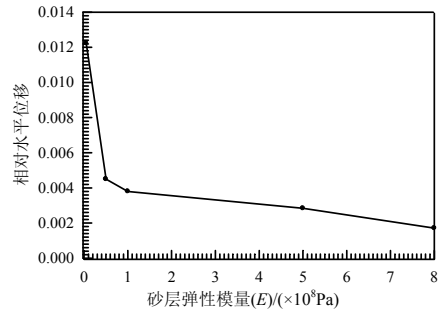
(b) 砂层弹性模量(*E*)对相对水平位移竖向分布的影响

图11 砂层位移随砂层弹性模量的变化

Fig.11 Development of displacement with its elastic modulus



(a) 砂层弹性模量(*E*)与相对竖向位移关系



(b) 砂层弹性模量(*E*)与相对水平位移关系

图12 砂层最大位移与其弹性模量的关系

Fig.12 The maximum displacement of sand strata versus elastic modulus

6 结论

建立饱和砂层中桶形基础的简化计算模型。以等效动冰载为例,分析了桶形基础周围砂层中竖向和水平向液化变形。通过与动载离心机试验的比较,验证了计算模型的可靠性,分析了砂层液化变形的主要影响因素。研究发现,砂层中的液化变形随着动载频率的降低、动载振幅的加大、砂层弹性模量的减小而增大。其中,动载振幅对砂层液化变形的影响较动载频率的影响更为明显。砂层弹性模量对土层位移的影响较大,当砂层弹性模量增大10倍,砂层位移减小将近1/3。文中着重分析了动载特性和砂层弹性模量对液化变形的影响,其他的影响因素还需要作进一步研究。

参考文献:

- [1] 鲁晓兵, 郑哲敏, 张金来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 27—40.
Lu Xiaobing, Zheng Zheming, Zhang Jinlai. Progress in the study on the bucket foundations of offshore platform [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(1): 27—40. (in Chinese)
- [2] Dyme W, Houlsby G T. Drained behavior of suction caisson foundations on very dense sand [C]. Houston: OTC10994, 1998: 765—782.
- [3] Aas P M, Andersen K H. Skirted foundation for offshore structure [C]. 9th Offshore South East Asia Conf., Singapore: World Trade Center Singapore, 1992: 1—7.
- [4] Senpere D, Auvergne G A. Suction anchor piles—A proven alternative to driving or drilling [C]. Houston: OTC4206, 1982: 483—493.
- [5] Tjelta T L, Hermstad J, Andenaes E. The skirt piled gullfaks C platform installation [C]. Houston: OTC6473, 1990: 453—462.
- [6] Bye A, Erbrich C, Earl K, Wright. Geotechnical design of bucket foundation [C]. Houston: OTC7793, 1995: 869—883.
- [7] 刘振纹, 王建华, 秦崇仁. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 691—695.
Liu Zhenwen, Wang Jianhua, Qin Chongren. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 691—695. (in Chinese)
- [8] Lu Xiaobing, Cui Peng. The liquefaction and displacement of highly saturated sand under water pressure oscillation [J]. Ocean Engineering, 2004, 31(7): 795—811.
- [9] George B, Whitman R V, Marr W A. Permanent displacement of sand with cyclic loading [J]. Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(11): 1606—1623.
- [10] Allersma H G B, Brinkgreve R B J, Simon T. Centrifuge and numerical modelling of horizontally loaded suction piles [J]. International Journal Offshore and Polar Engineering, 2000, 10(3): 223—235.
- [11] 李驰, 王建华, 刘振纹. 软土地基单桶基础循环承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1040—1044.
Li Chi, Wang Jianhua, Liu Zhenwen. Cyclic bearing capacity of single bucket foundation on soft clay strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1040—1044. (in Chinese)
- [12] Peter Cundau. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 Dimensions [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [13] 鲁晓兵, 张建红, 王淑云. 水平动载作用下桶形基础周围土体软化的离心机模拟[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(6): 7—11.
Lu Xiaobing, Zhang Jianhong, Wang Shuyun. The responses of the bucket foundation under equivalent dynamic ice-induced offshore platform [J]. China Offshore Platform, 2004, 19(6): 7—11. (in Chinese)
- [14] 张建红, 孙国亮, 严冬, 鲁晓兵. 海洋平台吸力式基础的土工离心模拟研究与分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 90—97.
Zhang Jianhong, Sun Guoliang, Yan Dong, Lu Xiaobing. Geotechnical centrifuge modeling on suction caissons in offshore engineering [J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(2): 90—97. (in Chinese)