

液化土层中桶形基础承载力弱化的数值模拟*

鲁晓兵¹ 李 驰² 王淑云¹

(1. 中国科学院力学研究所; 2. 内蒙古工业大学)

摘 要 对动冰载作用下饱和砂土层液化过程中桶形基础承载力的弱化规律进行了数值模拟。建立液化土层的简化计算模型,采用 FLAC 3D 软件分析了等效动冰载作用下土层不同位置的液化度及其主要影响因素;进而将具有一定液化度土层的抗力作用等效为沿桶壁的不同刚度的非线性弹簧作用,在给定的位移破坏标准下确定不同液化度土层中桶形基础的承载力,分析液化土层中桶形基础承载力的弱化特征。在文中荷载条件和计算模型下,当土层顶面液化度为 0.60、底面液化度为 0.06 时,土层中桶形基础的承载力降低 12%。

关键词 液化土层 桶形基础 等效动冰载 液化度 弱化规律 数值模拟

桶形基础是一种新型的海洋平台基础,在近海边际油田开发中有着很好的应用前景。长期处于海洋环境中的桶形基础承载力的确定是海洋工程领域的研究热点。挪威土工研究所针对 Drammen 粘土研究了固结不排水条件下桶形基础的循环承载力^[1-3];王建华等针对海洋饱和软粘土在循环三轴试验基础上提出了土单元循环强度的确定方法,并对软土地基桶形基础循环承载力进行了理论和试验研究^[4-6];文献[7-9]利用土工离心机试验对水平动载作用下桶形基础周围土体的液化或软化特征进行了研究,并对饱和砂土地基液化区的扩展进行了数值模拟。以上研究成果证实了桶形基础的承载力会随着土层液化度的增加而产生一定程度的弱化,但对于桶形基础承载力的弱化度与土层液化度之间的关系尚未明确。

我国渤海地区海洋工程结构设计中的控制载荷为动冰载,本文通过数值模拟研究等效动冰载作用下具有一定液化度土层中桶形基础承载力的弱化规律,分析土层液化度与桶形基础承载力弱化度之间的联系,以为近海工程中桶形基础的设计和使用提供参考。

1 液化土层的简化计算模型

1.1 计算模型的简化

以往在关于桶形基础静、动承载力数值模拟的

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^[4-6]。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加载和反向加载的情况,在接触界面上库仑摩擦单元有可能是失效的。根据桶形基础室内模型试验和土工离心机试验结果^[9,10],将桶壁与桶内土塞结合可组成一整体式基础,且该整体式基础与周围土体相比可假定为刚体。因此,将计算模型进行了如下简化:假设地基土为深度有限、水平方向长度半无限的饱和砂土层,底面不透水。土层顶面为自由边界,土层底面施加有垂直约束,按照平面应变计算模型,研究饱和砂土层在 $x-z$ 平面内的应力及变形,计算模型见图 1。

为了减小桶形基础高度 h 对计算结果的影响,计算中用土层相对深度 (z/h) 和土层相对宽度 (x/h) 来反映动力响应沿土层深度和土层宽度的分

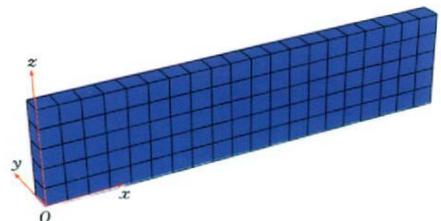


图 1 饱和砂土层应力、变形计算模型示意

* 中国科学院、中国海洋石油总公司联合重大项目“海洋石油开发若干重大科学技术问题研究”(KJ951-A1-01)资助的部分研究成果。

第一作者简介:鲁晓兵,男,副研究员,主要从事海洋平台基础承载力、天然气水合物开发研究。地址:北京市海淀区北四环西路 15 号(邮编:100190)。电话:010-82544190。E-mail: xblu@imech.ac.cn。

布情况。

首先考虑在侧限状态下土层初始地应力逐渐达到平衡;然后在土层左侧边界处施加等效动冰载(土层底面仍然设置垂直约束,右侧面为无反射边界)。将动冰载等效为一定频率、一定振幅下的正弦波载荷,直接施加于饱和砂土层左侧边界处,振幅沿土层深度按给定的位移函数分布。位移函数简化为 $x = A \sin(\omega t)$ 的形式,其中动冰载的频率 ω 为 1.0 Hz,目的是便于将数值计算结果与土工离心机试验结果作比较^[9];动冰载的振幅 A 自土层顶面到土层底面逐渐减小,最大振幅(16 cm)作用于土层顶面位置处,最小振幅(0 cm)作用于土层底面位置处。

1.2 计算参数的确定

饱和砂土层为水和土骨架的两相介质,考虑动力计算耦合流体运动条件,即饱和砂土层顶面初始水头为零,底面为不透水层,孔隙水压力呈线性变化,土颗粒不可压。土骨架采用 Finn 模型(M-C 模型),孔隙水微可压。按照参考文献[9],将模型中饱和砂土的弹性模量取为 2.6×10^8 Pa,泊松比为 0.3,内摩擦角为 36.5° ,饱和砂土密度为 1600 kg/m^3 ,孔隙率为 0.4,砂土干密度为 1728 kg/m^3 ,比奥系数取为 1.0,渗透系数为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$;取水的体积模量为 2×10^9 Pa,水的密度为 1000 kg/m^3 ,孔隙比为 0.40。

按照 Finn 模型,利用 Byrne 方程计算孔隙水压力的应变增量模式,见公式(1)。依据饱和砂土不排水动三轴试验结果^[8],按照公式(2)、(3)确定 Finn 模型中的计算参数,其中砂土相对密度为 0.54。

$$\frac{\Delta \epsilon_{vd}}{\gamma} = c_1 \exp \left[-c_2 \left(\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma} \right) \right] \quad (1)$$

$$c_1 = 7600 (d_r)^{-2.5} \quad (2)$$

$$c_2 = 0.4/c_1 \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\Delta \epsilon_{vd}$ 为体积增量; γ 为循环剪应变幅值; c_1 、 c_2 为计算参数,不变量; d_r 为砂土相对密度。

1.3 计算模型的验证

定义液化度 FL 为超孔隙水压力(u)与上覆初始有效应力(σ)的比值,即 $FL = u/\sigma$ 。

按照本文建立的计算模型,确定在等效动冰载作用下饱和砂土层中孔隙水压力的累积变化情况。液化度 FL 随土层深度方向的计算结果与文献[9]离心机试验结果的对比见图2,可以看出,本文模型计算结果与文献[9]中桶形基础离心机试验结果的

变化趋势和大小接近,表明本文建立的数学模型能在一定程度上反映动冰载下桶形基础周围土体的动载响应规律。

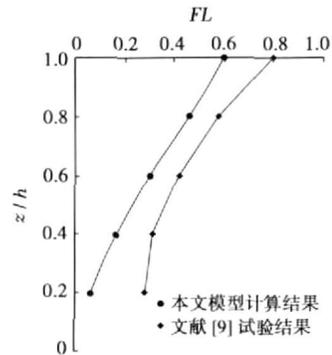


图2 液化度沿土层分布本文模型计算结果与文献[9]试验结果的比较

2 液化度的影响因素及液化域的扩展

2.1 动载频率与振幅对土层液化度的影响

当作用于桶形基础上的动载的频率和振幅不同时,由此引起的饱和砂土层强度降低的幅度是不同的,即砂土层的液化度会随着动载频率和动载振幅的变化而变化。图3a所示为不同动载频率 f 下(土层顶面振幅为16 cm,土层底面振幅为0 cm),土层左侧边界处液化度沿土层深度的分布情况。由图3a可以看到,当动载频率一定时,液化度自土层顶面到底面沿土层深度方向逐渐减小。当动载频率小于1.0 Hz时,随着动载频率的增加,土层中孔隙水来不及排出,孔隙水压力会在短时间内得到累积,土层容易液化,且液化度在土层顶面附近有较大幅度的增加。当动载频率大于1.0 Hz时,在土层顶面处液化度接近于1.0,但过大的动载频率却使得孔隙水压力的累积只出现在土层顶面附近,并且随土层相对深度(z/h)的增加孔隙水压力很快减小,到达土层底面时液化度接近于零。这是因为动载频率大时,惯性更多地集中在土层上部,上部液化后,下部土层排水能力增强,更不易液化;在高频和小载荷幅值情况下,下部土层土颗粒与土中水两相间作用减小,土体减缩趋势减小,液化度就减小。图3b所示为不同动载振幅 A 下(动载频率为1.0 Hz)土层左侧边界处(载荷作用侧)液化度沿土层相对深度(z/h)的分布情况。由图3b可知,液化度自土层顶面到底面逐渐减小,土层顶面附近的液化度较大;且

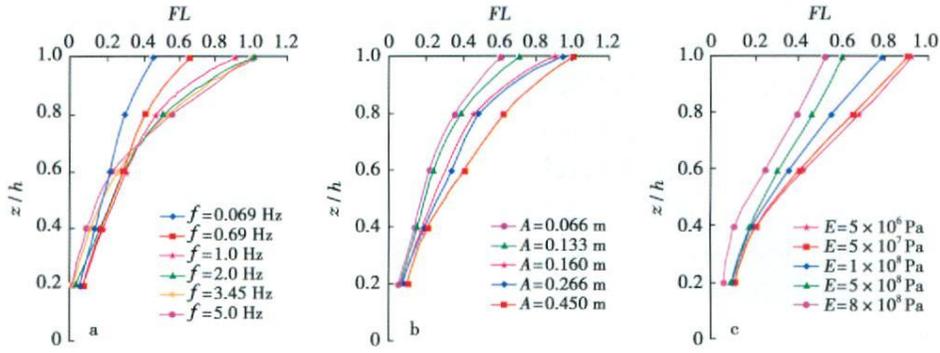


图 3 动载作用边界处液化度沿土层深度方向的分布及其影响因素

随着动载振幅的增加, 液化度增大, 在土层顶面附近 ($0.6h \leq z \leq 1.0h$ 范围内) 增加的幅度较大。

2.2 土层弹性模量对液化度的影响

当动载频率和动载振幅一定时, 土骨架弹性模量 E 对土层液化度的影响见图 3c。由图 3c 可以看出, 当土骨架的弹性模量由 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 减小到 $5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 时, 土层顶面处的液化度由 0.6 迅速增加到 0.9。这表明, 随着土骨架弹性模量的降低, 孔隙水压力增大的速度加快, 土骨架有效应力迅速减小。

2.3 土层中液化域的扩展

当等效动冰载作用于饱和砂土层左侧边界时, 以距土层左侧边界不同距离且垂直于 x 轴的断面为代表性截面, 各截面处液化度随土层相对深度和宽度方向的变化状况如图 4 所示。由图 4 可知, 自土层顶面到底面液化度逐渐减小。当频率为 1.0 Hz 的动载作用于桶形基础时, 沿着土层的左侧边界, 土层顶面位置处 ($x = 0, z = h$) 液化度达到最大 (为 0.9), 土层底面位置处 ($x = 0, z = 0.2h$) 液化度最小 (为 0.06)。在相对深度 $0.6h \leq z \leq 1.0h$ 的范围内土层液化度较大, 在土层左侧边界随宽度的增加, 在深度 $x > 0.85h$ 后液化度迅速减小。在距桶

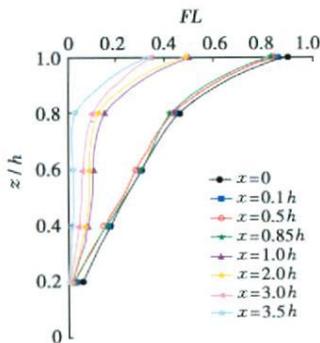


图 4 液化度随土层深度和宽度的变化状况

形基础左侧 1 倍桶高位置处 ($x = h$), 土层顶面位置处 ($x = h, z = h$) 液化度为 0.5, 土层底面位置处 ($x = h, z = 0.2h$) 液化度仅为 0.01。因此, 当频率为 1.0 Hz 的动载作用于桶形基础时, 由于动载的作用在桶形基础周围饱和砂土层中可能引起液化的区域是 $0 \leq x \leq 0.85h$ 及 $0.60h \leq z \leq 1.0h$ 范围。

3 桶形基础承载力弱化的数值模拟

3.1 桶形基础的简化计算模型

由前面的分析可知, 当等效动冰载作用于土层左侧边界时, 随着深度的增加, 土层中液化度自土层顶面到底面逐渐减小。本文中的桶形基础承载力计算, 是将具有一定液化度土层的抗力作用等效为沿桶形基础右侧一系列具有不同刚度的非线性弹簧作用^[11], 进而通过 $p-y$ 曲线来描述桶形基础沿水平向的破坏和极限承载力, 其简化计算模型如图 5 所示。

为描述具有一定液化度土层中桶形基础承载力的弱化, 将土层没有液化时的弹簧刚度系数取为土层单位面积上的弹性模量 $E_0^{[11]}$, 按照一定的破坏标准确定桶形基础的水平极限承载力。由于土层左侧边界处自土层顶面到底面液化度逐渐减小, 即沿

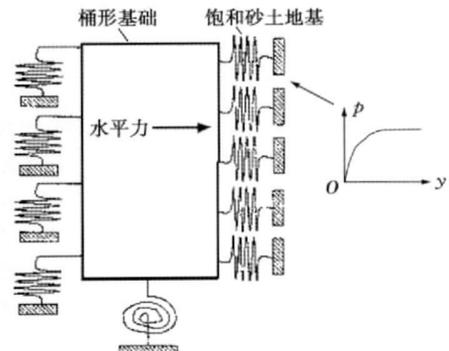


图 5 桶形基础承载力弱化的简化计算模型

着桶形基础右侧自桶顶到桶底土层的抗力作用在逐渐增大,因此将沿着桶形基础右侧不同深度处土层的抗力作用用不同的弹簧刚度系数来等效,将不同深度处的弹簧刚度系数取为 $(1-FL)E_0$,按照统一的位移破坏标准确定一定液化度土层中桶形基础的水平承载力。这里定义弱化度为一定液化度土层中桶形基础的承载力相对于未液化土层中桶形基础承载力减弱的程度,以确定土层液化度与桶形基础承载力弱化度之间的关系。

3.2 桶形基础承载力弱化的数值模拟计算

模拟计算中取桶直径为 0.5 m,桶高为 0.5 m,桶壁厚为 0.008 m。采用线弹性关系模拟桶体材料,将其弹性模量取为 2.1×10^{11} Pa,泊松比取 0.25。在桶右侧边界设置 5 个水平向弹簧约束(图 5),用于模拟桶侧不同深度土层的水平抗力作用。将沿桶侧不同深度处弹簧的刚度系数取为土层单位面积上弹性模量的 $(1-FL)$ 倍。参照文献[12]中关于桶形基础水平承载力的破坏标准,按照桶形基础顶部边缘处最大水平位移量达到 $0.05D$ (D 为桶径)时对应的水平荷载,确定桶形基础水平承载力为 4.4 kN。已知,土层单位面积上弹性模量 E_0 为 2.6×10^7 Pa,自土层顶面到底面土层液化度分别为 0.60、0.46、0.30、0.17、0.06,按照文中建议的桶形基础承载力弱化弹簧模型,考虑土层液化,计算得到土层液化度为 0.60 时桶形基础的极限承载力为 3.8 kN。

计算结果表明,当土层顶面位置处最大液化度为 0.60 时,在等效动冰载作用下桶形基础的承载力较土层未液化时降低 12%。

4 结论

在文中荷载条件和计算模型下,当频率为 1.0 Hz 的动载作用于桶形基础时,在桶形基础周围饱和砂土层中可能由动载作用引起液化的区域是 $0 \leq x \leq 0.85h$, $0.60h \leq z \leq 1.0h$;当土层顶面液化度为 0.60、底面液化度为 0.06 时,土层中桶形基础的承载力降低 12%。

参 考 文 献

[1] ANDERSEN K H. Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading: proceedings International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, BOSS' 76[C]. Trondheim,

Norway, 1976, 1: 392-403.

- [2] ANDERSEN K H, POOL J H, BROWN S F, et al. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay[J]. J of ASCE, 1980, 106(GT5): 499-529.
- [3] ANDERSEN K H, LAURITZSEN R. Bearing capacity for foundations with cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(5): 540-555.
- [4] WANG Jianhua, LI Chi, MORAN K. Cyclic undrained behavior of soft clays and cyclic bearing capacity of a single bucket foundation: proceeding of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. 2005, 2: 392-399.
- [5] 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.
- [6] LI Chi, WANG Jianhua. Experimental study on mechanics characteristic of saturated soft clay strata[J]. Transactions of Tianjin University, 2006, 12(2): 137-141.
- [7] 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.
- [8] 张金来, 鲁晓兵, 王淑云. 水平动载下饱和砂土地基液化区扩展[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 8-10.
- [9] 张建红, 孙国亮, 严冬, 等. 海洋平台吸力式基础的土工离心模拟与分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 90-97.
- [10] 刘振纹. 软土地基上桶形基础的稳定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [11] ANDERSEN K H, RANDOLPH M F, MURPHY J D. Deepwater anchor design practice phase II report to API/Deepstar, The Norwegian Geotechnical Institute and The Centre for Offshore Foundation Systems and The Offshore Technology Research Center[R]. 2003, 12.
- [12] HESAR M. Geotechnical design of the Barracuda and Caratirga suction anchors[C]. OTC 15137, 2003.

收稿日期: 2009-04-14 改回日期: 2009-08-28

(编辑: 张金棣)

Numerical simulation on the capacity degradation of bucket foundation in liquefied sand deposit

Lu Xiaobing¹ Li Chi² Wang Shuyun¹

(1. Institute of mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080; 2. Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, 010051)

Abstract: The capacity degradation of bucket foundation during the liquefaction of sand deposit is simulated under dynamic ice-induced loads. The simplified numerical model has been built and the

(下转第 72 页)

BZ34-3 与 BZ34-5 油气田分别于 2006 年 11 月和 2007 年 3 月顺利投产, 目前运行情况良好。

4 结束语

油气田流动保障技术在 BZ34-3/5 边际油气田开发中的成功应用, 对其它类似边际油气田的开发具有借鉴作用, 也为深水油气田开发流动保障问题研究奠定了基础。建议今后在边际油气田和深水油气田的开发中应加大流动保障技术的应用力度, 在初步设计阶段就应充分考虑流动保障问题, 这样将会进一步提高油气田有效开发的可行性, 对安全生产也具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] BAI Yong, BAI Qiang. Subsea Pipelines and Risers [M]. London: Elsevier Science Ltd., 2005.
- [2] 侯磊, 张劲军. 基于流动保障的海底油气管道安全策略与技术[J]. 中国海上油气, 2004, 16(4): 285-288.
- [3] 刘菊娥, 孙国民, 郑向荣, 等. 渤中 34-3/5 边际油气田有效开发工程关键技术及其应用[J]. 中国海上油气, 2008, 20(6): 411-415.

收稿日期: 2009-06-30 改回日期: 2009-12-30

(编辑: 崔护社)

Application of flow assurance technology in BZ34-3/5 field development

Liu Ju'e Ni Hao

(Off shore Oil Engineering Co. Ltd., CNOOC, Tianjin, 300451)

Abstract: BZ34-3/5 field is marginal field. The multiphase subsea pipeline of the field is difficult to perform initial startup due to the low temperature environment and high oil solidification point, and the risk of the crude oil solidification and subsea pipeline blockage appear easily during shutdown period in winter. In order to solve the problem, the flow assurance technology has been applied in BZ34-3/5 field to simulate the subsea pipeline startup preheating, displacement, temperature drop after shutdown and other working conditions, and determine the flow assurance plan that well completion liquid is used for initial startup preheating of subsea pipeline and the bundled pipeline is adopted to displace the pipeline for restart after shutdown. Hence, it helps to avoid the risk of subsea pipeline blockage effectively and provides the technical support. In addition, it can reduce the costs in field development and operation. The successful application of flow assurance technology in BZ34-3/5 has offered a good reference for other similar marginal fields and laid the foundation for the study of flow assurance technology for development of deep water fields.

Key words: marginal field development; subsea pipeline; flow assurance; startup preheating; restart after shutdown

(上接第 68 页)

software FLAC3D has been used to analyze the liquefaction degree in different position of the deposit and its main impact under equivalent dynamic ice-induced loads. The resistance of liquefied sand layer is modeled by uncoupled nonlinear springs, so as to determine the bearing capacity of bucket foundation in sand layer with different liquefaction degree for some given failure criterions and analyze the capacity degradation of bucket foundations in

liquefied sand deposit. For an example, it is shown that when the liquefaction degree is 0.6 on the top of sand deposit and 0.06 at the bottom of sand deposit, the bearing capacity of bucket foundation degrades 12%.

Key words: liquefied sand deposit; bucket foundation; equivalent dynamic ice-induced loads; liquefaction degree; degradation law; numerical simulation