

# 海洋动载作用下砂层液化特性的数值模拟

李 驰<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>2</sup>, 王淑云<sup>2</sup>

(1.内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2.中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 对海洋动载作用下饱和砂层中液化度的变化和液化后的残余强度进行数值模拟, 总结动载特性和土性参数对砂层中液化度的影响。进而, 研究动载作用下砂层中孔压的累积和轴向应变的变化, 考察动载频率和动载振幅对孔压和轴向应变时程的影响。以等效动冰载为例, 总结砂层在不同轴向应变破坏标准下的液化强度曲线, 确定砂层不出现液化的临界动载振幅为 0.08 m, 液化出现的应变门阈值为 2.0%。通过与饱和砂层动三轴试验结果比较, 验证了文中计算结果的可靠性。

**关键词:** 海洋工程; 液化特性; 临界动荷载; 应变门阈; 等效动冰载

动载作用下饱和砂层的液化问题是一个既古老又年轻的课题。随着海洋资源的开发利用和近海重力式采油平台的迅速发展, 研究砂层液化特性以及循环荷载作用下台底地基的动力稳定性, 是海洋土层动力反应分析中的一项重要内容, 对海洋平台的设计有着重要的意义。

文献[1]指出液化出现的关键在于孔隙水压是否能够在短时间内得到累积, 使得土颗粒间有效应力降低甚至丧失。早期的液化研究目标主要是为了得到液化产生的条件、液化机理以及液化判定等。随着研究的深入, 人们越来越关注于液化程度的预测和液化后危害性的评价<sup>[2,3]</sup>。文献[4]中引入液化度的概念来评价土层液化后强度降低的程度, 将液化度定义为超孔隙水压力与上覆有效应力的比值。已有的研究成果表明, 海洋动载作用下土层的液化或软化, 只出现在一定区域内并不是整个区域, 且液化程度较地震荷载的液化影响较弱<sup>[5,6]</sup>。同时, 海洋动载作用下土层液化度的发展变化与动载特性和土性参数有着密切的关系。

文中对海洋环境下饱和砂层的液化度及其影响因素进行了数值模拟。确定一定动载作用下砂层的液化度和液化后残余强度。确定不同轴向应变破坏标准时液化强度曲线, 以等效动冰载为例, 确定不使砂层出现液化时的临界动载幅值。分析动载作用下砂层轴向应变的变化, 指出液化出现时应变门阈的大小。与饱和砂层动三轴试验结果比较, 发现就文中计算模型和荷载条件下, 在砂层液化特性方面, 计算结果与试验结果非常一致, 从而验证了文中计算结果的可靠性, 同时, 为评价海洋动载下砂层的液化和液化后的危害性提供了重要的理论依据。

## 1 砂层数值计算模型

### 1.1 计算模型的建立

设地基土为有限深、水平方向半无限的饱和砂层。砂层为水和土骨架两相介质, 考虑动力计算耦合流体运动条件, 即饱和砂层顶面初始水头为零, 底面为不透水层, 孔隙水压呈线性变化, 且加载过程中, 假设颗粒和水均不可压。

参考海洋动载特性以及海洋结构物的动力反应分析<sup>[7,8]</sup>, 建立饱和砂层的平面应变计算模型。即, 饱和砂层顶面自由, 土底面施加垂直约束, 将给定频率、振幅呈线性变化的正弦式动载, 直接施加于饱和砂层左侧边界处, 作用效果用给定的位移函数来等效, 用于模拟海洋动载作用下结构物与砂层的相互作用。计算中, 首先考虑土体在侧限状态下, 初始应力逐渐达到平衡。然后, 放开左侧约束(底面仍然设置垂直约束, 右侧面为无反射边界), 在砂层左侧边界处输入动载时程, 按照平面应变计算模型, 研究砂层在  $x-z$  平面内的应力及变形。

### 1.2 计算参数的确定

计算中, 土骨架采用 Finn 模型(M-C 模型), 孔隙水按照各向同性弹性模型考虑。参考文献[7]砂层的弹性模量  $2.6 \times 10^8 \text{ Pa}$ , 泊松比 0.3, 内摩擦角为  $36.5^\circ$ , 砂层密度  $1600 \text{ kg/m}^3$ 。孔隙率为 0.4, 干密度  $1728 \text{ kg/m}^3$ , 比奥系数默认为 1.0, 渗透系数  $1.0 \times 10^{-6}$ , 水的体积模量  $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 水的密度  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 孔隙比  $e=0.40$ 。

按照 Finn 模型, 利用 Byrne 方程计算孔压的应变增量模式, 见公式(1)。依据饱和砂层不排水动三轴试验结果<sup>[6,7]</sup>, 砂土相对密度为 0.54。按照公式(2)、(3)确定 Finn 模型中的计算参数。其中, 剪应力门阈取值取为零, 最小时间步取为 50。

**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”(KJCX2-SW-L03-01)

**联系方式:** tjdxlch2003@126.com

$$\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma} = c_1 \exp\left(-c_2 \left(\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}\right)\right) \tag{1}$$

$$c_1 = 7600 \times (D_r)^{-2.5} \tag{2}$$

$$c_2 = \frac{0.4}{c_1} \tag{3}$$

式中： $\epsilon_{vd}$ 为体积增量； $\gamma$ 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。

## 2 液化度及其影响因素

### 2.1 砂层中液化域的扩展

图1为等效动冰载的速度时程，已知动载频率1.0 Hz，动载振幅自土顶到土底逐渐减小，土顶振幅16 cm，土底振幅为零。当等效动冰载作用于饱和砂层左侧边界时，确定土层中液化度的变化以及液化域的扩展。总结不同断面处液化度随计算深度和计算宽度的变化见图2。由图2可知，当计算宽度一定时，自土顶面到土底面液化度逐渐减小，当频率为1.0 Hz的动载作用于土层的左侧边界时，土顶面位置处( $x=0 z=h$ )液化度达到最大为0.70，土底面位置处( $x=0 z=0.2h$ )液化度达到最小为0.06，当计算深度在 $0.6h \leq z \leq h$ 范围内液化度较大；当计算深度一定时，自土层左侧边界随计算宽度的增加，液化度逐渐减小，在 $x > 0.85h$ 后，孔隙水压逐渐消散，液化度迅速减小。在距土层左侧边界一倍桶高位置处，土顶面处( $x=h z=h$ )液化度为0.2，土底面处( $x=0 z=0.2h$ )液化度仅为0.01。在 $x > 3.0h$ 后，孔压消散基本完成，动载作用的影响可以忽略不计。所以，当等效动冰载作用于土层左侧边界时，由于动载的作用在砂层中可能引起液化的区域是 $0 \leq x \leq 0.85h$ ， $0.6h \leq z \leq h$ 。液化度最大的位置出现在土层左侧边界土顶位置处，此时液化度为0.70，此时砂层中孔隙水压力为上覆有效应力的70%，砂层中尚余的有效应力为上覆有效应力的30%，即，液化后砂层中残余强度为30%。

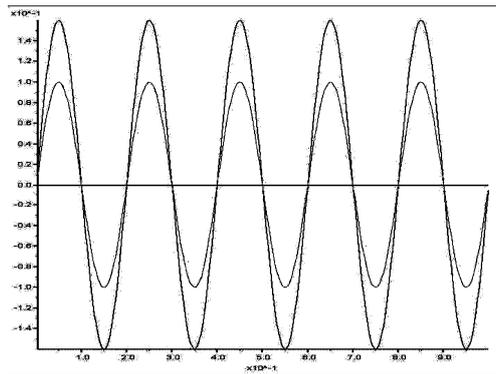


图1 动载输入速度时程变化

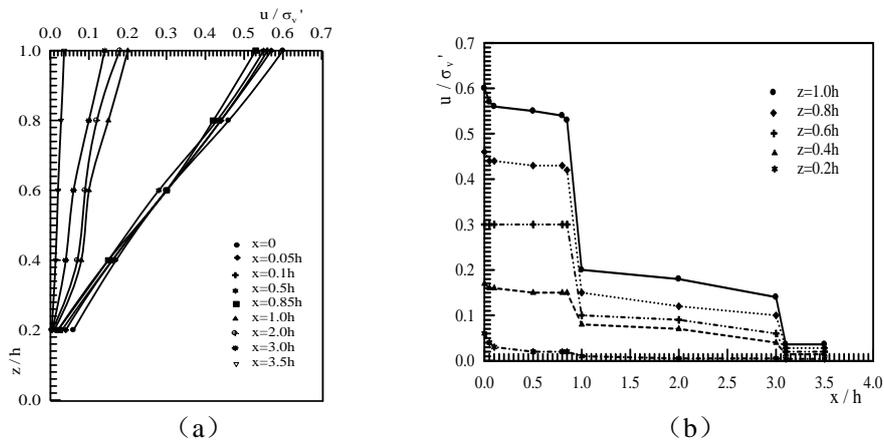


图2 液化度随计算深度和计算宽度的变化

### 2.2 动载频率与振幅对土层液化度的影响

当不同动载频率和不同动载振幅作用时，引起饱和砂层强度降低的幅度是不同的，即液化度会随着动

载频率和动载振幅的变化而变化。图 3 (a) 为不同动载频率作用时（土顶面振幅 16 cm，土底面振幅为零），土左侧边界处液化度沿土层深度的分布情况。分析可知，当动载频率一定时，液化度自土顶到土底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，土中孔隙水来不及排出，孔隙水压力能够在短时间内得到累积，土体越容易液化，且液化度在土顶面附近有较大幅度的增加。但当动载频率大于 1.0 Hz 时（如图中虚线），在土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顶面附近，随土层深度的增加孔隙水压得不到累积，到达土底面时液化度接近于零。图 3 (b) 为不同动载振幅作用时（动载频率 1.0 Hz），土左侧边界处液化度沿土层深度的分布情况。由图可知，液化度自土顶到土底逐渐减小，土顶面附近的液化度较大。且随着动载振幅的增加，液化度增大，在土顶附近（ $0.6h \leq z \leq 1.0h$ ）增加的幅度较大。

### 2.3 土性参数对土层液化度的影响

以不同的弹性模量值代表不同的土骨架强度。分析当动载频率和振幅一定时，土骨架强度对土层液化度的影响。由图 3 (c) 可以看出，土骨架强度越低，孔压增长的速度越快，使得土骨架强度（有效应力）衰减的越快，越容易达到液化，且液化的程度也越剧烈。如图中所示，当土骨架的弹性模量由  $5e^8 \text{pa}$  衰减到  $5e^7 \text{pa}$  时，土顶面处的液化度会由 0.7 迅速增加到 0.9。

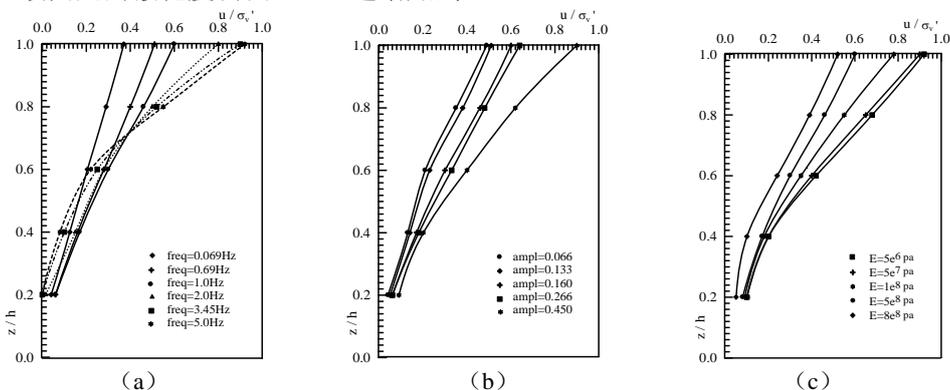


图 3 荷载作用边界处液化度沿土层深度方向的分布及其影响因素

## 3 饱和砂层液化强度的数值模拟

### 3.1 动三轴试验简介

对饱和砂土进行室内动三轴试验。试验中采用两种加载方式：一种是应力控制方式，即施加等应力，测量孔压和应变。以轴向应变达到 1%、3%、5%、8%、10% 时对应的循环次数，求得液化的临界动应力为 17%，液化出现轴向应变的门槛值为 2.5%；另一种是应变控制方式，即施加等应变，测得孔压随时间的变化，求得土体液化后的残余应力。具体的试验步骤和试验结果详见文献[9]。

### 3.2 孔压时程的数值模拟

计算不同动载幅值和不同动载频率下砂层中孔隙水压力的时程变化见图 4。图 4 (a) 中可以看出，动载振幅越大，砂层中孔隙水压力上升越快；图 4 (b) 中可以看出过大的动载频率或过小的动载频率作用下，砂层中孔隙水压力都不会出现明显的累积效应，砂层中很难有超孔隙水压力的出现。就文中的计算模型和荷载条件下，只有当动载频率在一定范围内，孔隙水压力在短时间内得不到消散，使得土中形成超孔隙水压力。孔隙水压力上升，土中有效应力减小，砂层中出现不同程度的液化现象。

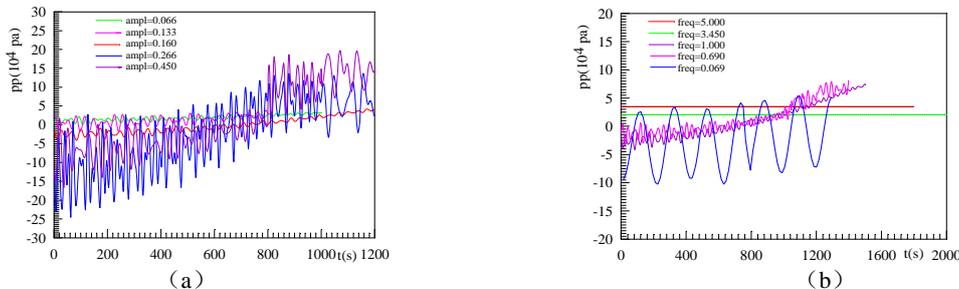


图 4 不同动载振幅和动载频率下孔隙水压力时程

相同动载作用下，孔压时程变化的计算结果与动三轴试验结果比较，见图 5。图 5 (a) 是饱和砂土动三轴试验结果，图 5 (b) 是数值计算结果。从图中可以看出，饱和砂土在相同的动载作用下，孔压时程

变化的试验结果和数值计算结果是一致的。即，加荷初期孔压急剧上升，当孔压接近围压或等于围压时，土体出现液化。图中显示，动三轴试验中围压 150 kPa，砂层最大液化度为 0.80，液化后残余强度为 15%（应变控制三轴试验结果）；数值计算中砂层顶部最大液化度为 0.70，液化后残余强度为 30%。其误差在岩土工程允许范围内。分析图 5 中孔压的变化，发现动三轴试验中孔压发展快一些，大约在加载 1000s 后初始液化；而数值计算结果在加载 1 500 s 后出现初始液化。

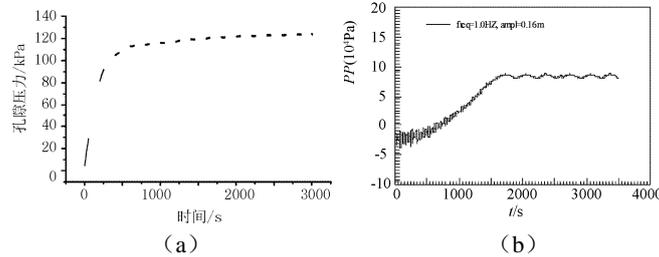


图 5 孔压时程的动三轴试验结果与数值计算结果

### 3.3 轴向应变时程的数值模拟

计算不同动载振幅和不同动载频率下砂层中轴向应变的时程变化见图 6。从图中可以看出，当动载频率一定时，动载振幅越大，土体轴向应变随时间延长增加幅度越大；当动载频率小于 1.0 Hz 时，轴向应变的时程变化很接近。但过大的动载频率作用下，土体轴向应变在初期发展缓慢。

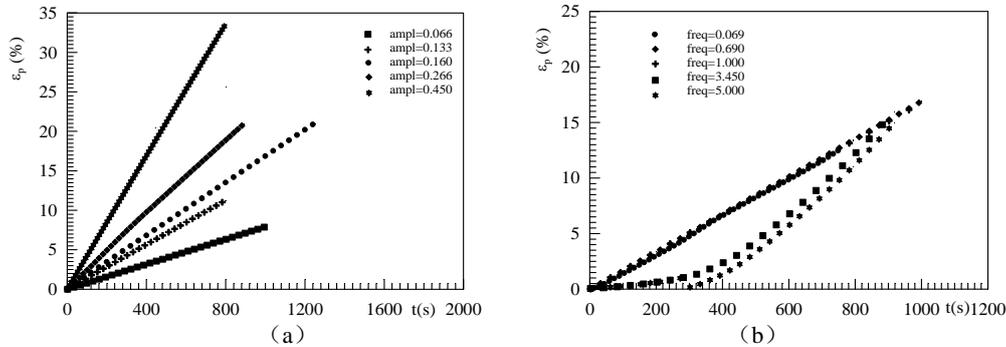


图 6 不同动载振幅和动载频率下轴向应变时程

总结孔隙水压与轴向应变的关系见图 7。图中显示，孔隙水压力和轴向应变之间存在一些关系，即，当轴向应变小于 2.0% 时，随着轴向应变的增加，孔压迅速增长；当轴向应变大于 2.0% 后，随着轴向应变的增加，孔压基本保持不变。这说明前后轴向应变引起的体应变不同，前一阶段土体发生剪缩，剪切产生体积压缩，使得孔隙水压力排不出去而导致孔压上升，并且，动载振幅越大、频率越小，孔压在初期上升越快；当轴向应变大于 2.0% 时，土体出现液化，孔压不再发展，随后，土体液化后由于强度降低，可以出现较大的应变，但孔压不再上升。因此，2.0% 为液化出现的应变门槛值，动三轴试验中应变门槛值为 2.5%，二者非常接近。

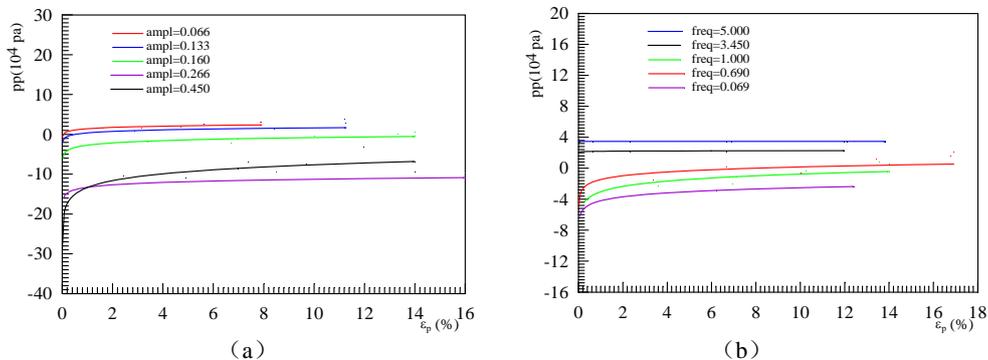


图 7 不同动载振幅和动载频率下孔隙水压力与轴向应变的关系

### 3.4 土层液化强度曲线的确定

确定不同动载振幅和不同动载频率下饱和土体达到破坏时的循环破坏振次，即砂层的液化强度曲线。当轴向应变达到 1%、3%、5%、8%、10% 时，总结动载振幅和动载频率对循环破坏振次的关系，见图 8。从图中可以看出，当动载频率一定时，随动载振幅的加大，要达到确定的破坏标准，所需的循环破坏振次

越小;当动载振幅一定时,随动载频率的减小,要达到确定的应变破坏标准,所需的循环破坏振次越小。以动载频率为 1.0 Hz 的等效动冰载为例,饱和砂层发生液化的临界动载振幅 0.08 m。

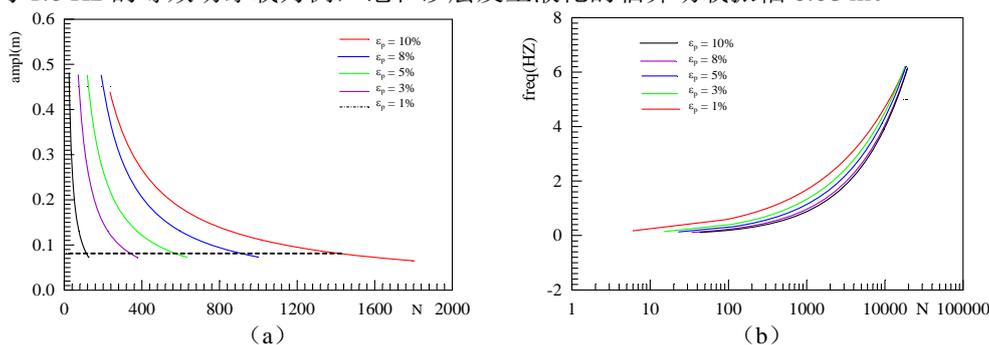


图 8 不同轴向应变下动载振幅和动载频率与循环振次的关系

## 4 结 语

1) 饱和砂层液化的出现,取决于砂层中是否发生超孔隙水压力的累积效应。当动载振幅越大、动载频率越大(频率范围不大于 1.0 Hz)、土骨架强度越弱时,砂层中孔隙水压力上升越快,土体容易液化,液化度越大。

2) 当动载频率 1.0 Hz、振幅 0.16 m 作用于砂层左侧边界时,动三轴试验确定土层液化度约为 0.80,液化后残余强度约为 15%;数值计算中确定土层液化度约为 0.70,液化后残余强度约为 30%。其误差满足岩土工程要求。

3) 当动载振幅增加、频率减小时,达到破坏时所需的循环破坏振次越少。

以等效动冰载作用于砂层左侧边界为例,砂层液化出现的临界动载幅值为 0.08 m,应变门槛值为 2.0%,相同动载作用下动三轴试验确定应变门槛值 2.5%,二者非常接近。

文中结论还需要通过进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 谢定义.饱和砂土体液化的若干问题.岩土工程学报,1992,14(3): 92-98.
- [2] 刘汉龙, Iai S.国际岩土工程抗震设计新标准概述.第七届全国土动力学学术会议论文集.北京:清华大学出版社,2006:14-25.
- [3] 陈育民.砂土液化后流动大变形试验与计算方法研究.中国南京:河海大学,2007.
- [4] Yasuda S, H. N, Kiku H, Uchida Y. The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 149-160.
- [5] 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.中国海洋平台,2004,19(6): 7-11.
- [6] 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.岩土工程技术,2004,18(1):8-10.
- [7] 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.海洋工程,2004,22(2):90-97.
- [8] 谢定义,张建民.饱和砂土瞬态动力学特性与机理分析.西安:陕西科学技术出版社,1995.
- [9] Wang Y H, Lu X B, Wang S Y. The response of bucket foundation under horizontal dynamic loading. Ocean Engineering, 2006, 33:964-973.