

水平动载下饱和砂土地基液化区扩展

张金来 鲁晓兵 王淑云
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

【摘要】 对一侧受沿深度分布的水平振动载荷时, 半无限饱和砂土地基液化区域的扩展进行了数值分析。结果表明: 在水平振动载荷作用下, 砂土地基液化区域从载荷端由近到远逐渐发展; 随载荷强度和频率的增加, 以及土体模量的减小, 液化发展逐渐加快。在考虑的频率范围内, 随着载荷频率的增加, 土体表面的变形和土中的孔隙压力上升速度增加。

【关键词】 饱和砂土; 液化区; 水平动载荷

【中国分类号】 TU 195.2

Development of the Liquefaction Zone of Saturated Sand Foundation under Horizontal Vibration

Zhang Jinlai Lu Xiaobing Wang Shuyun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

【Abstract】 Through analyzing the liquefaction zone development of the saturated sand caused by horizontal vibration distributing along depth, it is shown that the liquefaction occurs near the loading end and then develops far away. The liquefaction development of the saturated sand increases with the increase of loading amplitude and loading frequency and the decrease of the modulus. In the frequency range considered, the deformation on the surface and the pore pressure increase with the increase of the frequency.

【Keywords】 saturated sand; liquefaction zone; horizontal vibration loading

0 引言

现今的石油天然气资源开发逐渐从陆地向海洋发展, 海洋平台的稳定性成了安全生产的重要环节。桶型基础是一种新型海洋平台基础, 还有很多问题需要解决^[1], 其中的一个重要问题就是动载下砂土地基液化时桶基的安全性。海洋油田很多位于饱和砂土地层或含有饱和砂土的地层下, 如果在该处建油田, 波浪、冰载等动载将通过平台上部结构传递到桶基础, 引起桶与周围土层的动态响应, 这是典型的结构物与土体的耦合作用问题。在动力载荷作用下, 饱和砂土容易液化, 导致平台破坏。所以, 研究这种情况下液化的产生及发展规律对海洋平台的安

全生产具有重要的意义。本文采用数值模拟方法对桶基受到水平载荷作用时(主要针对冰载), 饱和砂土基础的液化发展进行分析。

1 基本方程及定解条件

1.1 守恒方程

为了研究冰载等动载作用于平台基础引起的地基液化后变形, 我们将问题简化为如下情况: 将平台与基础考虑为二维问题(见图 1), 桶基作为刚体, 桶基与土体间的作用力, 参照实验结果, 简化为图 1 所示的形式^[2], 饱和砂土作为两相介质, 采用如下的饱和砂土的二维模型^[3~5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n v_x}{\partial x} + \frac{\partial n v_y}{\partial y} &= 0 \\ -\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(1-n)u_x}{\partial x} + \frac{\partial(1-n)u_y}{\partial y} &= 0 \\ \rho_w \left[\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right] + \frac{\partial p}{\partial x} &= -kn(v_x - u_x) \\ \rho_w \left[\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial p}{\partial y} &= -kn(v_y - u_y) - \rho_w g \end{aligned} \quad (1)$$

$$(1-n)\rho_s \left[\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right] + (1-n) \times \left[\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{ex}}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = kn^2(v_x - u_x) \right] \quad (1)$$

$$(1-n)\rho_s \left[\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] + (1-n) \times \left[\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{ey}}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = kn^2(v_y - u_y) - (1-n)\rho_s g \right]$$

式中: n 为孔隙率; v_x, v_y 分别为水的水平和垂向的速度, u_x, u_y 分别为颗粒的水平和垂向速度, ρ_w, ρ_s 分别为水和颗粒的密度, p 为孔隙压力, σ_{ex}, σ_{ey} 分别为水平和垂向的有效应力, g 为重力加速度, k 为相间作用系数。

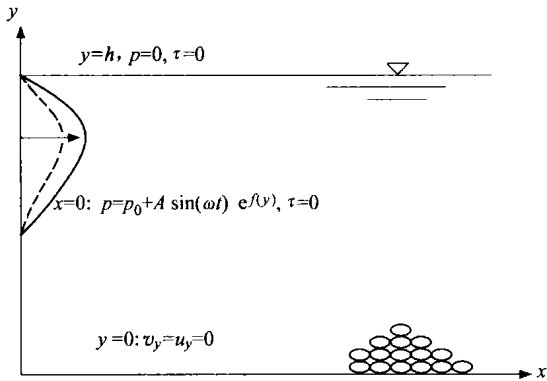


图1 模型示意图

1.2 几何方程

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 分别为土骨架在 x 方向, y 方向的正应变以及剪应变。

1.3 土骨架的本构关系

本文采用如下简单的双线性弹塑性本构关系来描述骨架有效应力应变关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ex} - \sigma_{ex0} &= \frac{E_L}{(1-2\mu)(1+\mu)} \cdot [(1-\mu)\epsilon_x + \mu\epsilon_y] \\ \sigma_{ey} - \sigma_{ey0} &= \frac{E_L}{(1-2\mu)(1+\mu)} \cdot [(1-\mu)\epsilon_y + \mu\epsilon_x] \\ \tau &= \frac{E_L}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $E = E_0 \cdot \left[\frac{\sigma_{ex} \cdot \sigma_{ey} - \tau^2}{(\sigma_{ex0} \cdot \sigma_{ey0} - \tau_0^2)^{0.5}} + 0.001 \right]$, E_L 为土骨架的杨氏模量, 加载和卸载时分别取不同的参数值。 E_{0L} 为初始杨氏模量, μ 为泊松比。加卸载的

判别方法为: 当 $\gamma_{oct2} > \gamma_{oct1}$, 为加载; 当 $\gamma_{oct2} < \gamma_{oct1}$, 为卸载。 $\gamma_{oct2}, \gamma_{oct1}$ 分别为后一时刻与前一时刻的八面体应变。

1.4 定解条件

初始条件为

$$t=0: p = \rho_w \cdot g \cdot (h-y), \sigma_{ey0} = (1-n_0)(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot (h-y), \sigma_{ex0} = k_c \cdot \sigma_{ey0}, n_0 = 0.4, v_x = v_y = u_x = u_y = 0$$

式中: $k_c = 0.5$ 为侧压力系数。

边界条件为:

砂层顶面	$y = h: p = 0, \tau = 0, \sigma_e = 0$
砂层底面	$y = 0: u_{wy} = u_{sy} = u_{sx} = 0$
砂层左侧	$x = 0: \sigma = \sigma + A \sin(\omega t) \cdot e^{f(y)}, \tau = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0$

砂层右侧为无限远条件

其中: A, ω 分别为外载的幅值和频率, h 为砂层的厚度, σ 为总应力, 砂层左侧 $\tau = 0$ 是假设桶壁与土间有水层。

2 液化发展分析结果

在本节中, 用差分方法对上述模型求解, 分析饱和砂土地基的液化情况。结果表明, 土体在左侧循环载荷作用下, 液化从左侧开始, 逐渐向远处扩展, 直到有一个最大的液化区出现(图2~图5图中 y 轴为液化点 y 坐标相对于总深度的值, x 轴为液化点 x 坐标相对于总深度的值)。随载荷频率和幅值的增加, 或者骨架模量的减小, 液化发展速度加快。这是因为载荷频率和幅值增加, 则外部输入的能量增加, 骨架模量减小, 则土体强度减低。液化区会过滤掉部分振动, 从而有减振作用, 当液化区厚度达到一定值, 到达未液化区的扰动已不能引起液化, 因此有最大液化区。在本文考虑的频率范围内(1~10Hz), 随着载荷频率的增加, 土体表面的变形和土中的孔隙压力上升速度增加(见图6图7)。因此, 在工程设计时, 应减小动载荷幅值和频率(本文中为动冰载), 或者加固密实地基, 提高土体强度, 从而防止地基液化、减小土体变形。

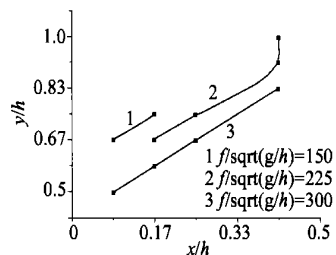


图2 砂土液化发展随频率变化图

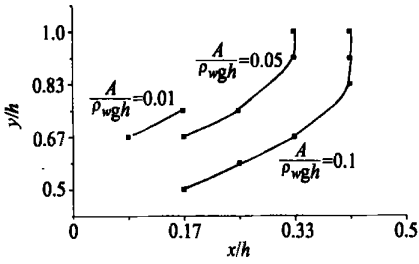


图3 砂土液化发展随载荷幅值变化图

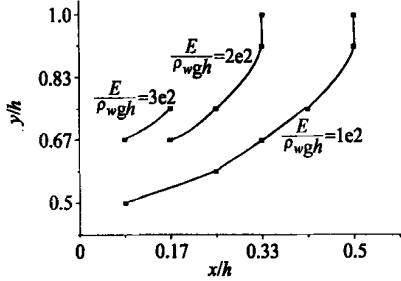


图4 砂土液化发展随骨架模量变化

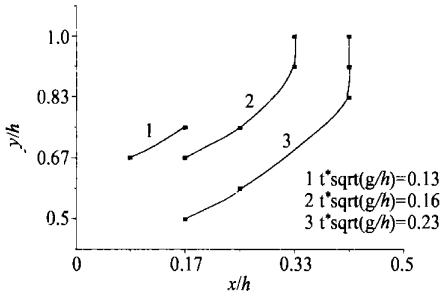


图5 砂土液化区域随时间的变化

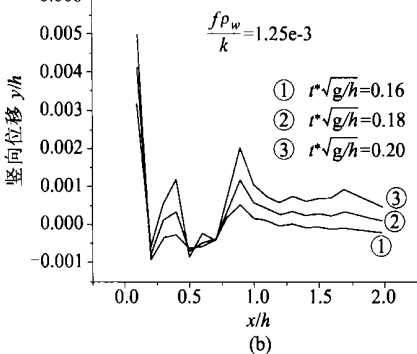
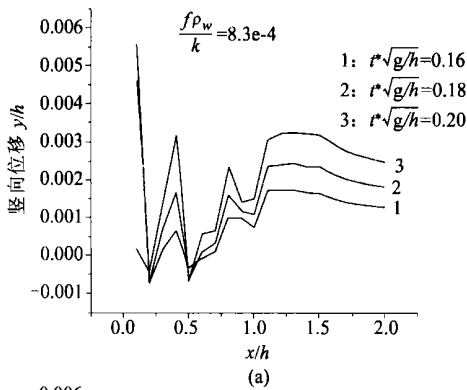


图6 不同频率条件下土体垂向表面变形随时间的变化

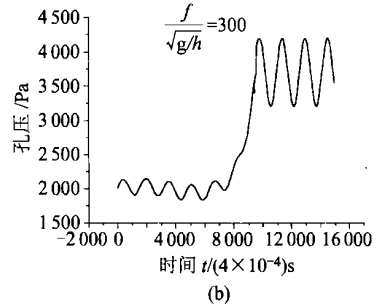
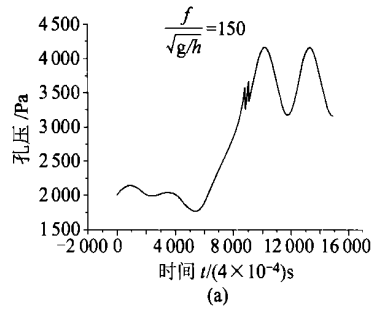


图7 不同频率条件下土体中孔压随时间的变化

注: 上述各图中 h 为土层深度, s 为土体表面位移, $f/\sqrt{g/h}$
 $\sqrt{G/H} = f/\sqrt{g/h}$, $t * \sqrt{G/H} = t * \sqrt{g/h}$

3 结论

本文首先给出了一侧受沿深度分布的水平循环载荷作用下的饱和土数学模型, 然后进行了数值模拟。结果表明, 饱和砂土地基发生液化, 随载荷强度和频率的增加, 或者骨架模量的减小, 液化发展加快。在有关工程问题中, 如桩基础, 桶形基础受到水平动载荷(波浪载荷、冰载等)时, 预防饱和土基础的液化是非常必要的。

参考文献

- 1 鲁晓兵, 郑哲敏, 张京来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展. 力学进展, 2003, 33(1): 27~40.
- 2 刘振纹, 王建华, 秦崇仁等. 负压桶形基水平承载力研究. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 691~695.
- 3 徐志英, 沈珠江. 地震孔隙水压力产生、扩散和消散的有限单元法动力分析. 华东水利学报, 1981, 9(4): 1~12
- 4 鲁晓兵, 谈庆明, 俞善炳等. 垂向载荷下饱和砂土的液化发展的数值模拟. 力学学报, 2001, 33(5): 612~620
- 5 Biot. M. A, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I: Low frequency range, J Acoust Soc Am, 1956(28): 168~191.

收稿日期: 2003-11-17