

文章编号: 1000-4882(2003)S-00475-05

# 振动载荷下饱和砂土地基液化区域扩展分析

张金来<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>1</sup>, 王淑云<sup>1</sup>, 时钟民<sup>2</sup>, 张建红<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 2. 中海石油研究中心开发设计院 3. 清华大学水利水电系)

## 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, 砂土地基液化有载荷端由近到远逐渐发展; 随载荷强度和频率的增加, 液化发展逐渐加快。

**关键词:** 饱和砂土, 液化区, 振动载荷

## (一) 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, 还有很多问题需要解决<sup>[1]</sup>, 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。海洋油田很多都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, 饱和砂土基础液化的液化发展进行分析。

## (二) 基本方程及定解条件

### 1. 守恒方程

为了研究波浪、冰载等动载荷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(图1), 桶基作为刚体, 饱和砂土作为两相介质, 采用如下的饱和砂土的二维模型<sup>[2][3][4]</sup>:

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

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

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

其中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,  $\rho_w$ ,  $\rho_s$  分别为水和颗粒的密度,  $p$  为孔隙压力,  $\sigma_{ex}$ ,  $\sigma_{ey}$  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。

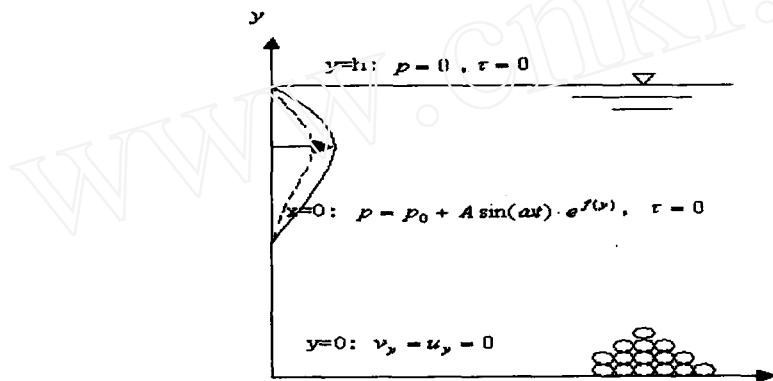


图1 模型示意

## 2. 几何方程

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

式中  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$  分别为土骨架在  $x$  向,  $y$  向的正应变以及剪应变。

## 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。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ex} - \sigma_{ex0} &= \frac{E_L}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot ((1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \\ \sigma_{ey} - \sigma_{ey0} &= \frac{E_L}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot ((1-\nu)\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

$$\tau = \frac{E_L}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}$$

其中  $E = E_0 \cdot \left( \frac{(\sigma_{ex} \cdot \sigma_{ey} - \tau^2)^{0.5}}{(\sigma_{ex0} \cdot \sigma_{ey0} - \tau_0^2)^{0.5}} + 0.001 \right)$ ,  $E_L$  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,  $\nu$  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。

#### 4. 定解条件

初始条件为:

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

其中  $k_c = 0.5$  为侧压系数。

边界条件为:

$$\text{砂层顶面 } y=h: p=0, \tau=0, \sigma_e=0$$

$$\text{砂层底面 } y=0: u_{wy}=u_{sy}=u_{sx}=0$$

$$\text{砂层左侧 } x=0: \sigma = \sigma + A \sin(\omega t) \cdot e^{f(y)}, \tau = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

砂层右侧为无限远条件。

其中  $A$ ,  $\omega$  分别为外载的幅值和频率,  $h$  为砂层的厚度,  $\sigma$  为总应力。

### (三) 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2~6)。载荷幅值的增加和骨架模量的变化对液化区域发展影响大, 载荷频率的影响相对小一些。

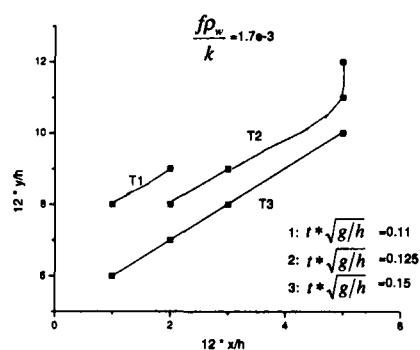


图2 定频率下砂土液化发展变化

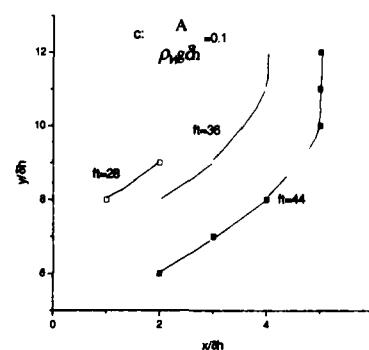


图3 定载荷幅值下砂土液化发展

( $h$  为土层深度,  $s$  为土体表面位移)

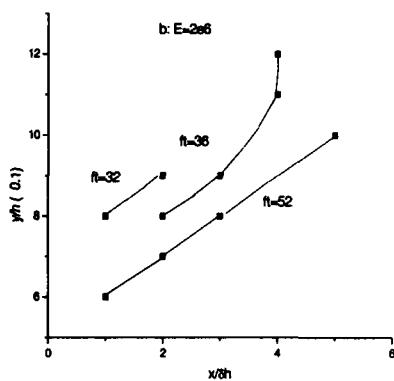


图4 定骨架模量下砂土液化发展

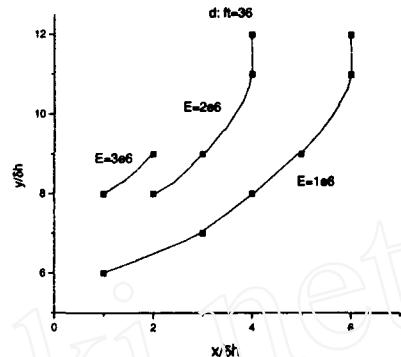


图5 砂土液化区域随参数的变化

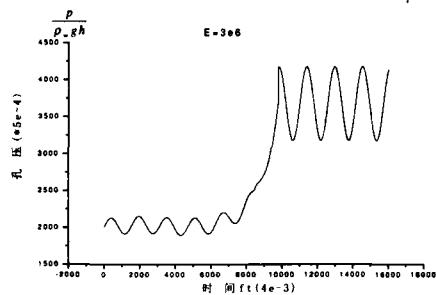


图6 典型孔压发展

#### (四) 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，载荷强度、频率和骨架模量对饱和砂土地基的液化区域扩展有显著影响。液化区域随时间逐渐扩展到最大区域而停止。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] 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. 东水力学报, 1981, 9 (4): 1~16.
- [3] 鲁晓兵, 谈庆明, 俞善炳, 郑哲敏. 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): 27~40.
- [4] Biot.M.A.Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid.I: Low frequency range.J Acoust Soc Am,1956,28~40.

## Analysis on the Liquefaction of Saturated Sand Foundation Caused by Vibration

ZHANG Jinlai<sup>1</sup>, LU Xiaobing<sup>1</sup>, WANG Shuyun<sup>1</sup>, SHI Zhongmin<sup>2</sup>, ZHANG Jianhong<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 2. Research Center, Chinese Ocean Oil Co.,3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University)

### Abstract

In the present paper, we analyze the liquefaction 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 faraway. The liquefaction development of the saturated sand increases with the increase of loading amplitude and loading frequency.

**KeyWords:** Saturated sand, liquefaction zone, vibration loading

### 作者简介

张金来 男, 26岁, 硕士, 从事岩土工程研究和建筑设计。

鲁晓兵 男, 35岁, 副研, 从事岩土工程研究。

王淑云 女, 38岁, 高级实验师, 从事岩土工程研究。

时忠民 男, 41岁, 高工, 从事海洋工程。

张建红 女, 36岁, 副教授, 从事岩土工程研究。