

# 振动载荷下饱和砂土中液化区的演化特性\*

鲁晓兵 崔鹏

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 考察了振动载荷下饱和砂土液化区演化的特性。结果表明,砂土骨架强度越低,结构越松,外载强度越大,渗透性越小,液化区发展越快,且范围越大,土内部各处的响应存在相位差。

**关键词** 饱和砂土,振动荷载,液化区

## ON THE EVOLUTION OF LIQUEFACTION REGION OF SATURATED SOIL UNDER VIBRATION LOADING

Lu Xiaobing Cui Peng

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

**Abstract** The characteristics of the evolution of liquefaction region of saturated soil under vibration is investigated. It is shown that the smaller the strength of soil, the stronger the loading, the smaller the permeability, the faster the development of the liquefaction region, and there are phase differences of the responses in the soil.

**Key words** Saturated Soil, Vibration Loading, Liquefaction Region

### 1 引言

在振动载荷下,饱和砂土常常发生液化,导致滑坡、泥石流等灾害<sup>[1]</sup>。液化范围与灾害影响范围密切相关,因此讨论液化区的演化特性是一个既有理论意义,又有实际价值的问题。

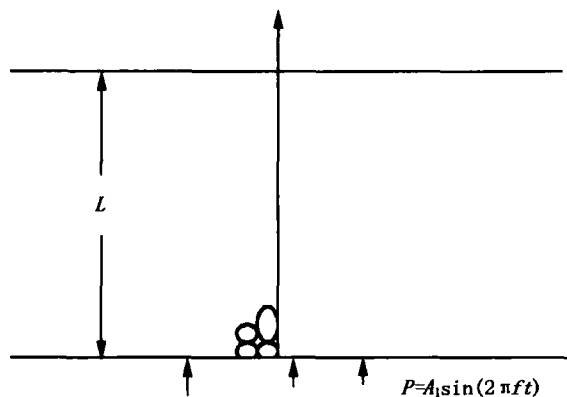


图1 问题的示意

有鉴于此,本文将考察如下问题(图1):对象是水平向无限扩展而垂向有限的砂土体;砂土性质只在垂向发生变化,孔隙水和颗粒不可压;垂向振动荷载均匀作用于砂层底端,底端面为刚性底板,顶面为自由面;将考察荷载及砂土参数对饱和砂土液化区演化的影响。

### 2 基本方程及定解条件

本文中采用饱和砂土的一维应变模型<sup>[2]</sup>。模型考虑了孔隙率的变化及其对渗透率的影响,将骨架当做塑性材料,忽略颗粒和孔隙水的压缩性,采用侧限往复荷载下本构关系<sup>[3]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial v_w}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial n}{\partial t} - (1-n) \cdot \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0 \\ n \rho_w \frac{\partial v_w}{\partial t} + n \frac{\partial p}{\partial x} = -H - n \rho_w g \\ (1-n) \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial v_s}{\partial t} + (1-n) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} = H - (1-n) \rho_s g \end{cases} \quad (1)$$

其中前两式为水和砂的守恒方程,后两式为水和砂的动量守

\* 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(40025103)。

恒方程,因为假设为小变形,忽略了其中的迁移加速度项, $n$ 为孔隙率; $v_w, v_s$ 分别为水和颗粒的速度; $\rho_w, \rho_s$ 分别为水和颗粒的密度; $p$ 为孔隙压力; $\sigma_e$ 为有效应力; $g$ 为重力加速度; $H$ 为相间作用力。

初始条件为

$$\begin{aligned} t=0 \quad n &= f_1(x), p = \rho_w g \cdot x, \sigma_e \\ &= (1 - n_0)(\rho_s - \rho_w) g \cdot x, v_w = v_s = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $f_1(x)$  为孔隙率沿砂土深度的初始分布函数。

边界条件为

$$\text{砂层顶部 } x=0 \quad p=0, \sigma_e=0 \quad (3)$$

$$\text{砂层底面 } x=L \quad p=A_1 \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

其中  $A_1, f$  分别为外载的幅值和频率;  $L$  为砂层的厚度。

### 3 液化区随时间的发展过程

结果表明,在振动作用下,液化区从振动作用端向远处扩展并逐渐停止。液化区随时间的扩展速度随着初始渗透率的减小(图2)、骨架强度的降低(图3~图5)和外载强度的增加(图6~图7)而增加;同时,随着液化区厚度的增加,液化区随时间的扩展速度越来越慢。这是因为在液化区内固相颗粒与水之间仍然有相间作用,使振动沿深度逐渐衰减<sup>[4]</sup>,随着液化区厚度的增加,液化区的扩展速度逐渐减小,直到停止扩展。砂土骨架的强度越低,在外载作用下越容易遭到破坏,砂土的渗透性越小,孔压上升就越快,外载的强度越大,骨架受到的扰动也越强,液化区的发展就越快。

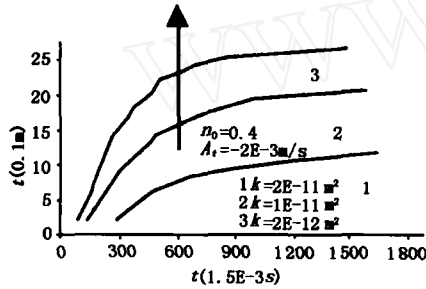


图2 渗透率对液化区发展的影响

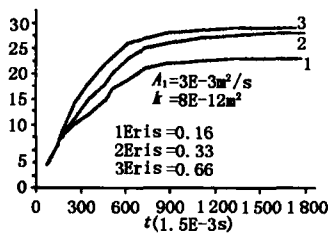


图3 初始极限应变对液化区发展的影响

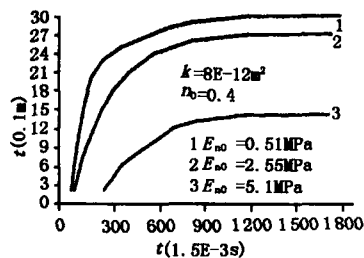


图4 初始切线模量对液化区发展的影响

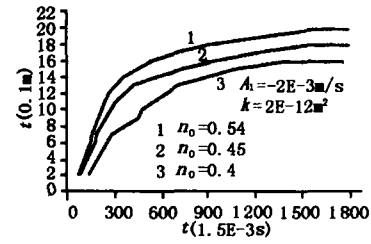


图5 初始孔隙率对液化区发展的影响

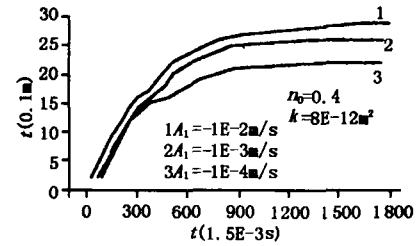


图6 振动幅值对液化区发展的影响

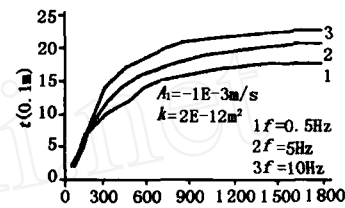


图7 振动频率对液化区发展的影响

砂土响应沿空间的变化。

为了考察砂土响应沿空间的变化的大小及相位变化,下面给出饱和砂土中总应力和两相速度等沿砂土深度变化的结果。

图8给出了砂土中不同位置处的总应力增量( $t$ 时刻的总应力与 $t=0$ 时刻的总应力之差,即 $\sigma_e|_z + p|_z - \sigma_e|_0 + p|_0$ )与砂土底端面上(外力作用端)的总应力增量的差随时间的变化。可以看出,砂土中的总应力增量沿深度有明显的幅值变化,而且存在着相位差。

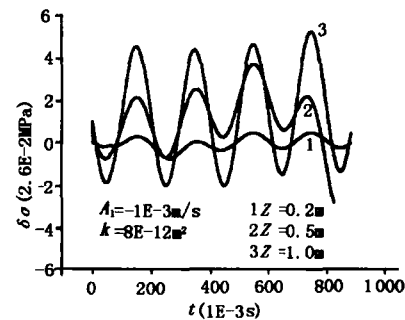


图8 总应力沿深度的衰减

从图9看出,砂土的孔隙率在离外力作用端越近,变化越大,到一定的深度处,孔隙率就保持初始孔隙率不变。

图10、图11给出了饱和砂土中水的速度 $v_w$ 和固相的速度 $v_s$ 沿砂土深度的变化。结果表明,在同一时刻,在外载作

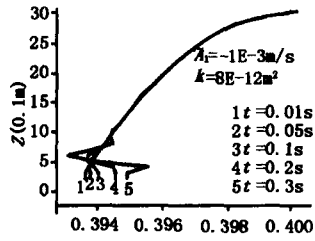


图9 孔隙率沿深度的变化

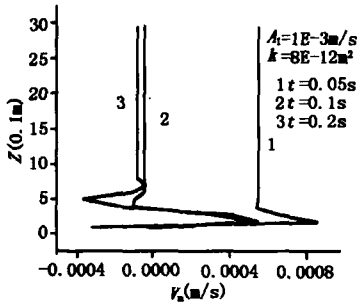


图10 水的速度  $v_w$  沿深度的变化

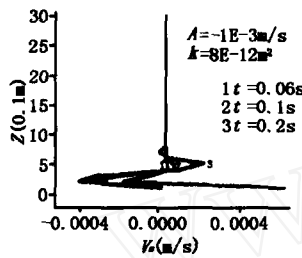


图11 固相的速度  $v_s$  沿深度的变化

用的底端面附近,两相的速度均沿深度呈明显的波动变化;随着离外载作用端的距离的增加,速度的波动逐渐减弱,直到速度不随砂土深度而发生变化。

当振动载荷作用于砂土底端面时,砂土中的扰动逐渐向远处传播,但是由于阻尼的作用,扰动在饱和砂土中传播时将沿深度不断衰减,而且由于阻尼滞后的作用,使得总应力等沿砂土深度有相移。因此,一般情况下,砂土中总应力沿砂土深度既有幅值衰减,又有相位移动。

#### 4 结 语

主要参数对液化区演化的影响有以下特点:随着渗透性减小,砂土强度降低,外部振动强度增加,液化区的扩展速度增加,但随着液化区的不断增长而逐渐变慢,直到停止。砂土中总应力沿砂土深度既有幅值衰减,又有相位移动。

作者简介 鲁晓兵,1968年生。现在中国科学院力学所从事岩土力学方面的工作。

#### 参 考 文 献

- 1 Finn W D L. Liquefaction Potential: Developments Since 1976, Proc. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1981, 2: 655 ~ 681
- 2 鲁晓兵. 垂向荷载作用下饱和砂土的液化分析. 力学学报, 2001, 33(5): 612 ~ 620
- 3 鲁晓兵, 谈庆明, 余善柄, 郑哲敏. 往复荷载下有侧限的饱和砂土应力应变关系实验研究. 岩石力学与工程学报, 2001, 6: 859 ~ 863
- 4 李学宁, 刘惠珊, 等. 液化层减震机理研究. 地震工程与工程振动, 1992, 12(3): 84 ~ 91