

文章编号: 1000-4882(2002)S-00345-04

饱和砂土液化引起的变形研究

鲁晓兵

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘 要

为了考察饱和砂土液化后的大变形及对海工结构物的影响, 着重讨论了振动载荷作用下, 荷幅值和频率以及土体渗透性对土体的变形的影响。为进一步分析土体变形和结构物的相互作用打下基础。

关键词: 饱和砂土; 液化; 变形

(一) 引 言

在静动载作用下, 饱和砂土会发生液化和变形。对液化发生的过程和条件, 人们开展了较多的研究^[1], 但对于液化引起的变形研究还较少。液化导致的破坏几乎都是由大变形引起的, 因此, 研究液化引起的变形具有非常现实的意义^[2]。鉴于此, 本文考察如下问题(图1): 考察水平向无限扩展而垂向有限的砂土体, 地下水位与地面平齐, 砂土性质只在垂向发生变化, 垂向振动荷载均匀作用于砂层底端面, 振动由下往上传播, 砂土视为固液两相孔隙介质, 加载前砂土体为重力作用下的静止状态。通过该问题考察荷载强度和砂土参数对变形的影响, 为进一步考察变形与基础上结构物的相互作用打下基础。在第二节给出本问题的基本方程, 在第三节给出分析结果, 第四节为总结。

(二) 基本方程

下面首先给出砂土的基本方程, 包括本构关系、守恒方程及定解条件。

1. 骨架应力应变关系

在本文中采用侧限往复条件下的应力应变关系。应力应变关系的具体表达形式^[3]如下:

$$\text{加载曲线: } \sigma_e - \sigma_{ers} = \frac{E_{rs}(\varepsilon - \varepsilon_{rs})}{1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{rs}}{\varepsilon_{rs}}} \quad (1)$$

$$\text{卸载曲线: } \sigma_e - \sigma_{fs} = \frac{E_{fs}(\varepsilon - \varepsilon_{fs})}{1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{fs}}} \quad (2)$$

其中 σ_e, ε 分别为砂土在侧限条件下的有效应力和应变, $\sigma_{rs}, \varepsilon_{rs}$ 分别表示砂土第 s 条加载曲线对应的起始点的有效应力和应变, $\sigma_{fs}, \varepsilon_{fs}$ 分别表示砂土上第 s 条卸载曲线对应的起始点的有效应力和应变, E_{rs}, ε_{rs} 为第 s 条加载线的参数, E_{fs}, ε_{fs} 为第 s 条卸载线中的参数, 具体的变化关系将下面给出。

加载线中弹性常数 E_{rs} 和极限应变 ε_{rs} 变化的表达

$$E_{rs} = E_{r0} \left(1 + \frac{\varepsilon_{rs}}{a_1 + a_2 \varepsilon_{rs}} \right) \left(1 + \frac{\sigma_{ers}}{\sigma_{ec}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sr} = \varepsilon_{rl0} \left(1 - \frac{\varepsilon_r}{a_3 + a_4 \varepsilon_r} \right) \left(1 + \frac{\sigma_{er}}{\sigma_{ec}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_{rs}, \varepsilon_{rls}$ 为以 $\varepsilon_{rs}, \sigma_{ers}$ 为起始点对应的加载线的弹性常数和极限应变, $E_{r0}, \varepsilon_{rl0}$ 分别为砂土初始加载线的加载弹性常数和初始极限应变, $a_1 \sim a_4$ 为实验常数, $\varepsilon_{rs}, \sigma_{ers}$ 分别为第 s 条再加载曲线起始点处的应变和有效应力, σ_{ec} 为砂土前期固结压力, 取为 1.0KPa。

卸载线中弹性常数 E_{fs} 和极限应变 ε_{rls} 变化的表达式

$$E_{fs} = E_{rl0} \left(1 + \frac{\varepsilon_{fs}}{b_1 + b_2 \varepsilon_{fs}} \right) \left(1 + \frac{\sigma_{efs}}{\sigma_{ec}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{rls} = \varepsilon_{rl0} \left(1 - \frac{\varepsilon_{fs}}{b_3 + b_4 \varepsilon_{fs}} \right) \left(1 + \frac{\sigma_{efs}}{\sigma_{ec}} \right)^{0.5} \quad (6)$$

其中 E_{fs}, ε_{fs} 分别为以 $\varepsilon_{fs}, \sigma_{efs}$ 为起始点的卸载线的弹性常数和极限应变, $b_1 \sim b_4$ 为实验常数, 其他参数的意义同前。

2. 守恒方程及定解条件

本文中将建立如下的一维应变模型^[4, 5]: 假设水和颗粒均不可压, 骨架可变形, 水和固相不发生质量交换。

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial v_w}{\partial x} + v_w \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial n}{\partial t} - (1-n) \cdot \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \cdot \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \\ n \rho_w \left(\frac{\partial v_w}{\partial t} + v_w \frac{\partial v_w}{\partial x} \right) + n \frac{\partial p}{\partial x} = -H - n \rho_w g \\ (1-n) \cdot \rho_s \cdot \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial x} \right) + (1-n) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} = H - (1-n) \rho_s g \end{cases} \quad (7)$$

其中 n 为孔隙率, β 为水的体积压缩系数, p 为孔隙压力, v_w, v_s 分别为水和颗粒的速度, ρ_w, ρ_s 分别为水和颗粒的密度, σ_e 为有效应力,

$$H = Kn^2(v_w - v_s) \quad (8)$$

其中 $K = k/\mu$, k, μ 分别为骨架的渗透率和水的粘性系数

v_s 和 $\dot{\epsilon}$ 的关系和 K 与 n 之间的关系分别为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial v_s}{\partial x} \quad (9)$$

$$K = \left(\frac{n}{n_0} \right)^5 \left(\frac{1-n_0}{1-n} \right)^2 K_0 \quad (10)$$

其中 K_0 为初始相间作用力系数, 即孔隙率为 n_0 时的相间作用力系数。

初始条件为

$$t = 0, n = f_1(x), p = \rho_w g \cdot x, \sigma_e = (1-n_0)(\rho_s - \rho_w)g \cdot x, v_w = v_s = 0 \quad (11)$$

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

$$\begin{cases} x=0, p=0, \sigma_e=0 \\ x=L, v_s=v_s = A_1 \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (12)$$

其中 A_1, f 分别为边界上扰动速度的幅值和频率, L 为砂层的厚度。

由式(7)及本构方程(1)、(2)构成本问题的基本方程。结合初边值条件, 就可以求解本问题了。本文中采用一阶隐式差分格式进行分析。

(三) 各因素对砂土沉陷的影响

在下面给出的结果中, 沉陷量是取的加载时间段内的且扣除了砂土自重作用引起的那一部分。本文中主要考察外载特性、土的渗透性和循环次数的影响。可以看到, 饱和砂土的沉陷量将随着外载作用时间逐渐达到一个最大值; 边界上速度幅值越大(图1), 外载频率越大(图2), 砂土的渗透率越大(图3), 沉陷量随时间的变化越快, 最终的沉陷量也越大。这是因为砂土的渗透性越大, 排水越容易, 这种条件下, 砂土的沉降也就越快。在其他条件相同的情况下, 外载的强度越大, 即外载的幅值和频率越大, 孔压上升越快, 排水量也越多, 沉陷量就越大。图4给出了循环次数影响的结果, 结果表明, 在初始阶段, 随着循环次数的增加, 沉陷量很快增加; 但是到一定的循环次数后, 沉陷量增加缓慢, 这说明, 对应一定的载荷, 砂土存在极限沉陷量, 当达到该值时, 仅增加作用时间或循环次数不会引起土体变形。针对这个特点, 如果将结构物的周围土体, 根据可能承受的载荷, 预先进行密实, 则可以防止结构物建成后的大变形引起的灾害。

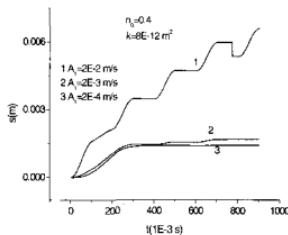


图1 载荷幅值对沉陷的影响

Fig. 1 The influence of loading Amplitude on the settlement

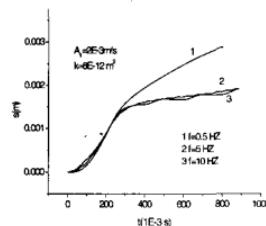


图2 载荷频率对沉陷的影响

Fig. 2 The influence of loading frequency on the settlement

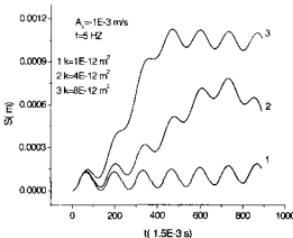


图3 渗透率对沉陷的影响

Fig. 3 The influence of permeability on the settlement

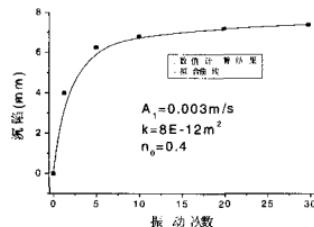


图4 循环次数对最终沉陷量的影响

Fig. 4 The influence of cyclic sum on the settlement

下面我们从另一角度进行考察：

从图5可以看出，砂土中液化区（有效压力为零的区域）是由外载作用力端逐渐向远处扩展的。随着外载作用时间越来越长，砂土液化区的厚度也越来越大，但扩展速率越来越小，当外载作用到一定的时间后，有效应力沿深度的变化曲线基本重合，即液化区不再向深处扩展。土体液化后的沉陷主要在液化区内产生，因此也具有上述同样的特点。这从另一个角度说明了前面的结论。

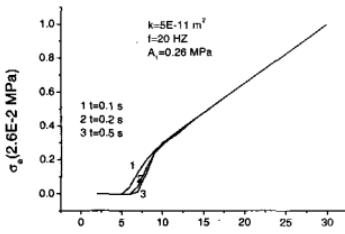


图 5 液化区沿深度的扩展

Fig. 5 The development of Liquefaction zone along depth

(四) 结语

本文主要做了以下的工作：

基于两相连续介质，建立了饱和砂土在一维侧限条件下的数学表述。在此基础上，分析了外载强度和土的渗透性对饱和砂土变形的影响。结果表明，随着渗透性的增大，或载荷强度的增加，砂土的变形速度和变形量均增加；随着循环次数的增加，沉陷由快速增加到最终停止，表明对应一定强度的载荷，土体存在极限沉陷量，这说明对地基预先固结是很现实意义的。本文没有分析地基上有建筑物，变形的影响结果，也没有考虑建筑物与地基的相互作用。这些是准备近期将开展的工作。

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, Vol.2, pp.655-681, 1981.
- [2] 刘汉龙, 余湘娟, 土动力学与岩土地震工程研究进展, 河海大学学报, Vol. 27, No. 1, pp. 6-15, 1999.
- [3] 鲁晓兵, 谈庆明, 余善炳, 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, 6 (2001), 859-863。
- [4] 俞善炳, 恒稳推进的煤与瓦斯突出, 力学学报, Vol. 20, No. 2, 1988, pp. 97-106。
- [5] 鲁晓兵, 谈庆明, 余善炳, 郑哲敏, 垂向载荷作用下饱和砂土的液化分析. 力学学报, 5 (2001), 612-620。

The Displacement of Saturated Sand Induced by Liquefaction

LU Xiao-bing

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

Abstract

In order to investigate the displacement of saturated sand induced by liquefaction, The influences of loading characteristics and permeability are on the displacement are analyzed under vibration loading. These analyses are useful to investigate the interaction of the soil displacement and the structure.

Key words: saturated sand, liquefaction, soil displacement