

饱和砂土中水层形成及演化分析*

鲁晓兵 王淑云 张旭辉

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 分析了饱和砂土中水层的形成过程及各相响应量的发展演化过程,结果表明:如果砂层失去骨架的强度,且未被堵塞,则不会存在稳定的水层;如果堵塞延续,则形成的水层会逐渐扩张,否则水层先张开然后逐渐闭合。孔隙水流速、颗粒速度和孔压在堵塞初期有间断,间断会随着堵塞的消失而消失。

关键词 饱和砂土 水层 液化

ANALYSIS OF THE FORMATION AND EVOLUTION OF WATER FILM IN SATURATED SANDS

LU Xiaobing WANG Shuyun ZHANG Xuhui

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The evolution of the water film in saturated sands and the responses of pore water and skeleton are investigated. It is shown that if the sand layer loses its strength and is not choked, there is no stable water film. If the choking state may keep, the water film may expand gradually, otherwise, water film will expand first and then enclose. Pore water's velocity, grain's velocity and pore pressure have discontinues at the first stage of choking. Discontinues will disappear with the disappearing of choking state.

Key words Saturated sands, Water film, Liquefaction

1 引言

地震中或地震后坡地上的砂土堆积常常发生侧向运动甚至滑坡。Seed^[1]为解释地震引起的滑坡而提出砂土中包含一个不透水层时会出现“水层”的概念。该“水层”为滑坡提供滑动面,使滑坡或泥石流可以在非常缓的坡体上形成。当可液化的砂土上覆盖着透水性差的土层时,一旦发生液化,土颗粒将悬浮^[2],并逐渐沉降,在两层土交界处形成只含水的间隙,即“水层”。Feigel 和 Kutter^[3]进行了离心机实验,研究了多层砂土中“水层”的形成。最近,Kokusho^[4,5]进行了分层土中“水层”形成的实验

研究,该实验中砂柱中间含有一层 2~4mm 厚的非塑性粉土,砂柱受到水平振动,实验表明“水层”在粉土层下形成。

张均锋等,彭福骄等在圆管中用饱和砂土对“水层”形成进行了研究^[6,7]。实验表明,砂柱液化后,“水层”在细颗粒聚集的地方产生;只有当砂柱的颗粒级配分布广时,才会出现“水层”。郑哲敏等^[8]提出砂土液化后的两相介质模型,发现“水层”将在细砂层下产生;但对“水层”的发展演化过程没有进行分析。

综上所述,在饱和分层土中,尤其是孔隙沿深度连续分布的土体中“水层”形成的机理还值得进一

* 基金项目:中国科学院三期创新方向性项目(KZCX2-YW-302)、自然科学基金项目(No. 10772182)、中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目资助。

第一作者简介:鲁晓兵,主要从事岩土力学以及水合物开发方面的研究工作, Email: xblu@imech.ac.cn

步的研究。首先,本文在郑哲敏等所提模型的基础上进行数值模拟,分析“水层”演化过程中孔隙水流速度、颗粒速度、孔压等的变化。

2 问题描述

考虑一个水平饱和地层,孔隙率及其他参数只沿垂直方向变化, x 轴朝上。采用郑哲敏等^[8]提出的一维两相介质模型,忽略壁面摩擦和惯性,只考虑最简单形式的水与骨架的相互作用。假设一些细颗粒可以在一定条件下被冲刷掉而成为孔隙渗流的一部分,而且以后可以在某处沉积下来,从而使初始均匀的砂土最后变成不均匀。要考察水层产生及闭合过程中各相介质的响应变化。

2.1 冲刷关系及堵塞条件

孔隙水流与颗粒流速差别大时,细颗粒将从骨架上冲刷下来,假设冲刷量受两个因素的制约,孔隙流体和骨架的相对流速越大,冲刷量越大;孔隙流体中细颗粒含量增大,细颗粒又会重新沉积,即有:

$$\frac{1}{\rho_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = \frac{1}{T} \left(\frac{u - u_s}{u^*} - q \right)$$

$$\text{如果 } -\varepsilon(x,0) \leq \frac{Q}{\rho_s} \leq \frac{Q_c(x)}{\rho_s} \quad (1)$$

其他情况

$$\frac{1}{\rho_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \leq 0 \quad (2)$$

其中, Q 是砂水混合物中每单位体积被冲刷进来的细砂量, ρ_s 是颗粒密度, u 和 u_s 分别是含细砂的孔隙流体速度和骨架砂颗粒的速度, q 是孔隙流体中细颗粒的体积分数, T 和 u^* 是物理参数, $\varepsilon(x,t)$ 是孔隙率, $Q_c(x)$ 是初始沉积在骨架上且能被冲刷掉的 Q 的最大值。

2.2 守恒方程

水、砂和细颗粒的质量守恒方程分别是:

$$\frac{\partial(\varepsilon - q)\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon - q)\rho u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q\rho_s}{\partial t} + \frac{\partial q\rho_s u}{\partial x} = G = \frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(1 - \varepsilon)\rho_s}{\partial t} + \frac{\partial(1 - \varepsilon)\rho_s u_s}{\partial x} = -G = -\frac{\partial Q}{\partial t} - u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (5)$$

其中, ρ 是水的密度, G 是单位时间内从骨架中冲刷掉的细颗粒质量。从方程(3)~(5)可以得到一个

积分方程:

$$\varepsilon u + (1 - \varepsilon)u_s = U(t) \quad (6)$$

其中, $U(t)$ 是砂柱单位截面上的总体积流量。

水和细颗粒、骨架的动量方程分别是:

$$\begin{aligned} & [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s] \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\varepsilon^2(u - u_s)}{k(\varepsilon, q)} - [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s]g \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s] \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + (1 - \varepsilon)\rho_s \left(\frac{\partial u_s}{\partial t} \right. \\ & \left. + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} - [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s]g \\ & - (1 - \varepsilon)\rho_s g - \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) (u - u_s) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, p 是孔隙压力, $k = K/\rho_w g$, ρ_w 为水的密度, K 是Darcy渗透系数, g 是重力加速度, σ_e 是有效应力。

为了模拟砂柱中的堵塞,假设 k 与 ε 成正比,而与 q 成反比。设 k 的具体形式是:

$$k(\varepsilon, q) = k_0 f(q, \varepsilon) = k_0 (-\alpha q + \beta \varepsilon) \quad (9)$$

其中, α, β 是参数且设 $1 < \beta \ll \alpha$,选择 α 比 β 大得多,使要让 q 的影响比 ε 的影响大。在后面的计算中,又有两种假设:(1)一旦某处 k 将降为零,即发生堵塞,则该处一直保持该状态;(2)当某处 k 将降为零后,可以被冲开,即重新流动。

3 方程简化

根据前面提出的模型,将在如下条件下分析饱和土中“水层”的产生。这个条件是:在液化的砂土中($\sigma_e = 0$),颗粒下沉而水流向上。

问题中 u 和 u_s 在 $x = 0$ 处即底面均为零,故单位面积上的总流量为零,即:

$$\varepsilon u + (1 - \varepsilon)u_s = U(t) = 0 \quad (10)$$

因为实验观察到“水层”形成是一个慢的和后期过程,该过程中惯性效应可以忽略。设 T 为合适的特征时间, u_t 为特征速度, L 为特征长度,用这几个特征量,取

$$\bar{u} = \frac{u}{u_t}, \tau = \frac{t}{T}, \xi = \frac{x}{L} \quad (11)$$

利用前面的方程式可以得到^[9]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{T u_t}{L} \frac{\partial \varepsilon \bar{u}}{\partial \xi} = \bar{u} \frac{u_t}{u^* (1 - \varepsilon)} - q$$

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} + \frac{T u_t}{L} \frac{\partial q \bar{u}}{\partial \xi} = \bar{u} \frac{u_t}{u^* (1 - \varepsilon)} - q \quad (12)$$

在 $Tg/u_t \gg 1$ 的条件下,惯性效应可以忽略,

可以得到:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon - q) f(q, \varepsilon) \frac{k_0 \rho_s g (1 - \rho/\rho_s)}{u_t} \\ &= \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon - q) f(q, \varepsilon) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, u_t 取为:

$$u_t = k_0 \rho_s g (1 - \rho/\rho_s) \quad (14)$$

这样,问题转化为找到方程式(12)的解 $\varepsilon(\xi, \tau)$ 和 $q(\xi, \tau)$ 。初始条件为:

$$\varepsilon(\xi, 0) = \varepsilon_0(\xi), q(\xi, 0) = 0 \quad (15)$$

为了将“水层”形成过程与从砂柱底部产生的固结波效应解耦,设砂柱足够长,“水层”在固结波到达前产生和发展。设初始孔隙率 ε_0 具有如下形式

$$\varepsilon_0(\xi) = \varepsilon_0 (1 - a \tanh \frac{b\xi}{L}) \quad (16)$$

其中, L 是初始沿深度非均匀分布孔隙的特征波长。

4 数值模拟

在这一节中,将在两种初始条件下,用差分方法求解方程式(12),研究“水层”演化过程中各响应量

的变化。

采用如下参数:材料参数 $\beta = 47 \sim 56$, $\rho_s = 2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $u^* = 0.04$, $k_0 = 4 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha = 1$;初始条件 $\kappa = 50.0$, $\alpha = 0.08$;计算步长 $\Delta\tau = 9 \times 10^{-4}$;临界孔压 $P_{cr} = 0.25 \text{ MPa}$ 。

4.1 假设 1:某位置一旦堵住,就一直保持这种状态

从图 1a 看到,当某处堵上后,孔隙率逐渐增加,直到为 1,即为充满水的水层。然后水层逐渐扩大。原因可以从图 1b~1d 看出,当砂层中发生堵塞后,孔隙水流速度、颗粒速度和细颗粒冲刷量发生间断,堵塞处的孔隙水流速减小到零,颗粒速度也降为零。堵塞处下方孔隙水流速度开始剧增(快速向上流动),当该处成为水层后又变为零,上方则缓慢变化;颗粒速度则在堵塞处下方从速度剧增(快速向下流动)变为零,随着堵塞处下方孔隙水向上流,颗粒不断下沉,水层则不断扩大。堵塞处的孔压逐渐增加,冲刷量在堵塞处下方少,上方增多,且孔压和冲刷量在堵塞处有一个间断。

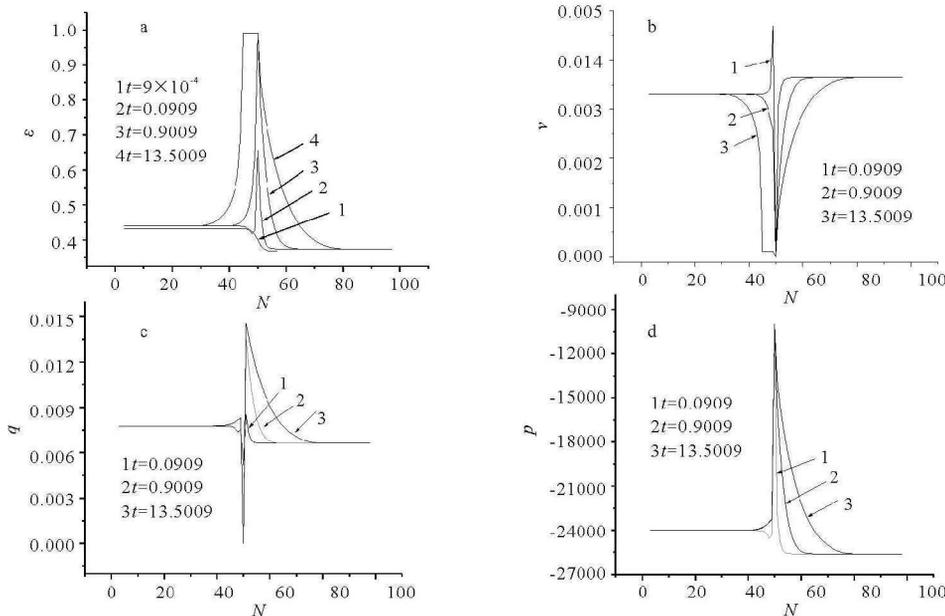


图 1 假设 1

Fig. 1 Assumption 1

a. 孔隙率的发展; b. 孔隙流体速度; c. 冲刷量的发展; d. 孔压的发展

4.2 假设 2:某位置堵住后,一旦孔压超过临界值,堵塞处又被冲开

从图 2a 可以看到,当某处堵上后,孔隙率逐渐

增加发展为水层。然后当孔压超过临界值后,堵塞处被冲开,孔压逐渐下降,孔隙水和颗粒速度逐渐由间断变为平缓,水层消失。原因可以从图 2b~2d 看

出,当砂层中发生堵塞后,孔隙水流速度、颗粒速度和细颗粒冲刷量发生间断,堵塞处的孔隙水流速减小到零,颗粒速度也降为零。堵塞处下方孔隙水流速度开始剧增(快速向上流动),当该处成为水层后又变为零,上方则缓慢变化,颗粒速度则在堵塞处下方从速度剧增(快速向下流动)变为零。随着堵塞

处下方孔隙水向上流,颗粒不断下沉,水层则不断扩大。堵塞处的孔压逐渐增加,充塞量在堵塞处下方少,上方增多。当堵塞处冲开后,水流畅通,上部的颗粒逐渐追上下部颗粒,孔隙水通过原堵塞处进入上部,孔压变得平缓,水层消失。

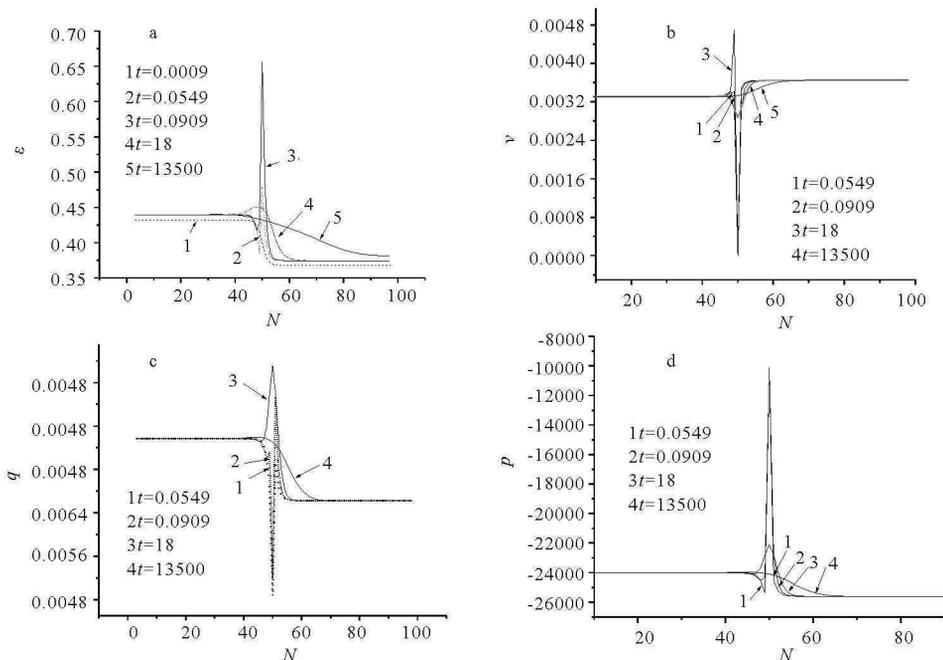


图2 假设2

Fig. 1 Assumption 2

a. 孔隙率的发展;b. 孔隙流体年的发展;c. 冲刷量的发展;d. 孔压的发展

5 结 语

对饱和砂土液化的响应分析表明,如果某处液化后被堵住且堵塞状态能保持,则会形成水层且逐渐扩张,否则水层先张开然后逐渐闭合。通过对孔隙水流速度、骨架颗粒速度和孔压的演化分析表明,在堵塞处颗粒不动,下方的颗粒向下运动,孔隙水向上运动,导致水层产生。堵塞处上方的颗粒向下运动,孔隙水流向上运动导致颗粒淤积于堵塞处。如果堵塞状态一直保持,则这种发展趋势一直发展下去,使得水层逐渐扩大;否则,如果堵塞状态在孔压超过一定值后破坏,孔隙水流重新畅通,水层逐渐闭合。

参 考 文 献

[1] Seed, H. B. Design problems in sand liquefaction[J]. J Geotech

Engrg. ASCE. ,1987, **113**(8):827 ~ 845.

- [2] Scotter R. F. Solidification and consolidation of a liquefied sand column[J]. Soils and Foundations,1986, **26**(4):23 ~ 31.
- [3] Fiegel, G. L. and Kutter, B. L. Liquefaction mechanism for layered sands[J]. J Geotech Engrg. ASCE. ,1994, **120**(4):737 ~ 755.
- [4] Kokusho, T. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread[J]. J Geotech and Geoenviron Engrg.,1999, (10):817 ~ 826.
- [5] Kokusho, T. , Kojima T. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand[J]. J. Geotech. and Geoenviron. ASCE. A,2002, **128**(2):129 ~ 137.
- [6] Zhang Junfeng, Meng Xiangyue , Yu Shanbing, et al. Experimental study on permeability and settlement of saturated sand under impact loading. ACTA. Mechanica Sinica,1999, (2):230 ~ 237.
- [7] Peng Fujiao, Tan Qingming, Cheng Chemin. Laboratory study on cracks in saturated sands[J]. Acta Mechanica Sinica,2001, **16**(1):48 ~ 54.
- [8] Cheng, Chemin, Tan Qingming, et al. . On the mechanism of the formation of horizontal cracks in a vertical column of saturated sand[J]. ACTA Mechanica Sinica (English Serials) ,2001, **17**(1):1 ~ 9.
- [9] Lu Xiaobing , Zheng Zheming, et al. . Formation of water film in saturated sand[J]. ACTA Mech. Sinica, 2006, (22):377 ~ 383.