

# 饱和砂土的断裂现象研究\*

鲁晓兵<sup>1</sup> 王淑云<sup>1</sup> 崔鹏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院力学研究所 北京 100080) (<sup>2</sup>中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

**摘要** 当饱和砂土层液化后,可能发生不均匀渗流,导致砂土中断层的形成,从而为滑坡提供了滑动面。对饱和砂土中的断裂(或称作水层)现象进行了分析,结果表明,只有当砂土层中某处被堵塞不能渗流且该状态一直保持时,才有稳定的断层,否则断层会逐渐消失。同时,对分析结果与试验结果进行了对照。

**关键词** 土力学,饱和砂土,断裂,渗流,液化

**分类号** TU 441<sup>+.4</sup>

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)增1-4388-04

## DEVELOPMENTS OF RUPTURES OR SO-CALLED WATER FILMS IN SATURATED SAND

Lu Xiaobing<sup>1</sup>, Wang Shuyun<sup>2</sup>, Cui Peng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

(<sup>2</sup>Institute of Mountain Hazards and Environment, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China)

**Abstract** The mechanism of rupture or so-called water films in saturated sand is analyzed. It is shown that there will be no stable water films in the saturated sand if there exists no effective stress. Only when the seepage velocity always equals to zero, do there exist stable water films. The evolution of water films is compared with some experimental results.

**Key words** soil mechanics, saturated sand, rupture, seepage, liquefaction

## 1 引言

在地震或其他动载荷作用后,坡地上的砂土层常常发生侧向变形甚至滑坡。如果砂土层是多层的,则可能在其液化后产生断裂(或称作水层)<sup>[1,2]</sup>,断裂产生的断层为液化后的坡地失效提供了滑动面。文[3]为了解释地震后的滑坡现象,最早提出了包含1层不透水地层的砂土中可能产生水层的观点。后来,文[4]用离心机试验研究了这种断裂现象的产生。文[1]用含4 mm厚粉土的砂柱的圆管振动试验对该现象进行了研究。文[5]也用圆管试验对该现象进行了分析。

前述研究者的工作表明,液化是断裂起始和发展的必须条件,只有当砂土颗粒级配分布广时,断层才产生。文[6,7]通过理论研究发现断裂发生在粉砂夹层下。

在前述研究工作基础上,本文将探讨孔隙连续分布的砂土层中断裂形成的机理,分析砂土断裂起始条件和发展过程。

## 2 问题的描述

在本文中,考虑水平分布的饱和砂土层,孔隙只沿垂向变化,而 $x$ 轴垂直向上。假设砂土的运动

2004年4月10日收到初稿,2004年6月2日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金杰出青年基金(40025103)和国家自然科学基金(10202024)资助项目。

作者 鲁晓兵 简介:男,1968年生,1999年于中国科学院力学研究所获工程力学专业博士学位,主要从事岩土力学方面的研究工作。

是一维的，壁面摩擦忽略不计。粉细砂可以被水从骨架中冲出而成为孔隙流体的一部分而使砂土层颗粒分布不均匀。冲刷关系设为<sup>[7]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho_s} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) &= \frac{\lambda}{T} \left( \frac{u - u_s}{u^*} - q \right), \\ -\varepsilon(x, 0) \frac{Q}{\rho_s} &= \frac{Q_c(x)}{\rho_s} \\ \frac{1}{\rho_s} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) &= 0, \text{ 其他情况} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $Q$  为水砂混合物单位体积内被冲刷的粉细砂质量； $\rho_s$  为颗粒密度； $u, u_s$  分别为孔隙水和颗粒的速度； $q$  为孔隙水中含的粉细砂的体积分数； $T$  和  $u^*$  均为物性参数； $\lambda$  为无量纲小参数； $\varepsilon(x, t)$  为孔隙率； $Q_c(x)$  为在任一  $x$  处  $Q$  的最大值。

考虑粉细砂颗粒的冲刷，采用如下的两相模型<sup>[8]</sup>：

质量守恒方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon - q)\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon - q)\rho u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial q \rho_s u}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(1 - \varepsilon)\rho_s}{\partial t} + \frac{\partial(1 - \varepsilon)\rho_s u_s}{\partial x} = -\frac{\partial Q}{\partial t} - u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (4)$$

式中： $\rho$  为水的密度。由式(2)~(4)得

$$\varepsilon u + (1 - \varepsilon)u_s = U(t) \quad (5)$$

式中： $U(t)$  为任一断面上的混合物流量。

骨架的动量平衡方程为

$$\begin{aligned} [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s] \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) &= -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} - \\ \frac{\varepsilon^2(u - u_s)}{k(\varepsilon, q)} &= [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s]g \end{aligned} \quad (6)$$

总动量平衡方程为

$$\begin{aligned} [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s] \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) &+ \\ (1 - \varepsilon)\rho_s \left( \frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} - \\ [(\varepsilon - q)\rho + q\rho_s]g &- (1 - \varepsilon)\rho_s g - \\ \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + u_s \frac{\partial Q}{\partial x} \right) (u - u_s) & \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $p$  为孔隙水压力， $k$  为渗透率， $\sigma_e$  为有效应力。这里  $k$  假设为  $\varepsilon$  和  $q$  的函数，即

$$k(\varepsilon, q) = k_0 f(q, \varepsilon) = k_0(-\alpha q + \beta \varepsilon) \quad (8)$$

式中： $\alpha, \beta$  均为参数且  $1 < \beta \ll \alpha$ 。设  $\alpha$  比  $\beta$  大得多，以考虑  $q$  的影响较  $\varepsilon$  的影响大得多。

### 3 数值模拟

基于前面提出的模型，分析断裂的产生。假设砂层足够长可以忽略边界的影响，即  $u$  和  $u_s$  在  $x = 0$  处都等于零，则式(5)变为

$$\varepsilon u + (1 - \varepsilon)u_s = U(t) = 0 \quad (9)$$

利用式(1), (8), (9), 式(3), (4), (7), (8)可以简化为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} = \frac{1}{T} \left( \frac{u}{u^*(1 - \varepsilon)} - q \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial u q}{\partial x} = \frac{1}{T} \left( \frac{u}{u^*(1 - \varepsilon)} - q \right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \left( (\varepsilon - q) \frac{\rho}{\rho_s} + q \right) \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) &+ \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial t} - u \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{u}{1 - \varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - u \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) &= -\frac{\varepsilon u}{1 - \varepsilon} \frac{1}{k_0 \rho_s f(q, \varepsilon)} - \end{aligned}$$

$$\frac{u}{\varepsilon(1 - \varepsilon)} \left( \frac{u}{T u^*(1 - \varepsilon)} - q \right) + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} (\varepsilon - q) \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) g \quad (12)$$

考虑到冲刷和重沉积是控制因素，可将式(10)~(12)中的  $T$  作为特征时间，设  $u_t$  为特征速度， $L$  为特征长度。这样，式(10)~(12)可无量纲化，设

$$\bar{u} = \frac{u}{u_t}, \tau = \frac{t}{T}, \xi = \frac{x}{L} \quad (13)$$

式(10), (11)变为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{T u_t}{L} \frac{\partial \varepsilon \bar{u}}{\partial \xi} = \bar{u} \frac{u_t}{u^*(1 - \varepsilon)} - q \quad (14)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} + \frac{T u_t}{L} \frac{\partial q \bar{u}}{\partial \xi} = \bar{u} \frac{u_t}{u^*(1 - \varepsilon)} - q \quad (15)$$

式(14), (15)可以被进一步简化，因为试验表明断裂的形成是一个慢过程，惯性很小，即对于  $Tg/u_t \gg 1$  的情况下，惯性项可以忽略，则由式(12)

得

$$\bar{u} = \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon - q) f(q, \varepsilon) \frac{k_0 \rho_s g (1 - \rho / \rho_s)}{u_t} = \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon - q) f(q, \varepsilon) \quad (16)$$

其中，

$$u_t = k_0 \rho_s g (1 - \rho / \rho_s) \quad (17)$$

于是，该问题简化为寻求式(14)，(15)的解  $\varepsilon(\xi, \tau)$  和  $q(\xi, \tau)$ 。初始条件为

$$\varepsilon(\xi, 0) = \varepsilon_0(\xi), q(\xi, 0) = 0 \quad (18)$$

为了将断裂与从底部开始的固结波效应解耦，假设砂土层足够厚使得断裂在固结波到达之前产生。初始孔隙率  $\varepsilon_0$  假设为如下不均匀分布形式：

$$\varepsilon_0(\xi) = \varepsilon_0 \left(1 - a \tan \frac{bx}{L}\right) \quad (19)$$

其中， $L$  为砂土层厚度。

为了便于计算，将式(18)重写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{u} \varepsilon}{\partial \zeta} &= \bar{u} \frac{u_t}{u^* (1 - \varepsilon)} - q \\ \frac{\partial q}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{u} q}{\partial \zeta} &= \bar{u} \frac{u_t}{u^* (1 - \varepsilon)} - q \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

### 4 结果与讨论

在本节中，将用有限差分方法<sup>[8]</sup>求解式(20)，分析稳定断层出现的条件。

计算中采用的参数为： $\Delta\tau = 9 \times 10^{-4}$ ， $\Delta\zeta = 5 \times 10^{-3}$ ， $\alpha = 47 \sim 56$ ， $k = 50.0$ ， $a = 0.08$ ， $\rho_s = 2400 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $u^* = 0.04$ ， $k_0 = 4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ， $\beta = 1$ 。

初边值条件分别为：

(1) 初始孔隙率按下式逐渐变化： $\varepsilon_0(x) = \bar{\varepsilon}_0 \{1 - a \tanh[(x - 0.5L)/2]k\}$ ，其中  $\bar{\varepsilon}_0 = 0.4$ ， $L = 1$ ， $0 \leq x \leq 1$ 。假设一旦砂层中某处  $u$  降为 0，就一直保持为 0，即一旦堵塞，就不会被冲开。如果  $\varepsilon = 1$ ，则  $v = 0$ ， $q = 0$ ，即当只有水时，流速和粉细颗粒为零。

(2) 孔隙率分布同条件(1)，但是没有条件(1)中的假设条件。

结果表明(图 1)：如果假设一旦砂层中某处  $u$  降为 0，就一直保持为 0，即一旦堵塞，就不会被冲开，则堵塞处以上的砂将被限制下沉，孔隙率越来

越小。堵塞处以下的砂将逐渐沉降使断裂逐渐扩大。如果不采用上述假设，断裂将扩展到逐渐消失(图 2)。计算结果与文[2]的试验结果对比见图 3。上述结果表明，产生稳定断层的原因有：(1) 上部砂层的孔隙率较下部的小。(2) 砂层中的堵塞处一直保持堵塞状态，或者有侧边摩擦存在。

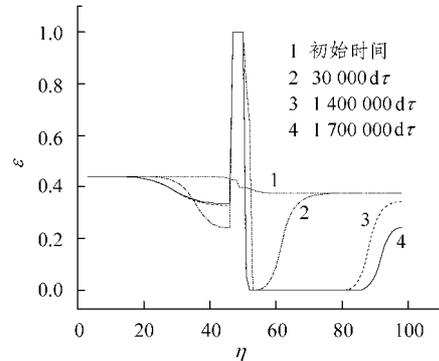


图 1 条件(1)下的断裂发展

Fig.1 Evolution of reptime under the initial and boundary conditions (1)

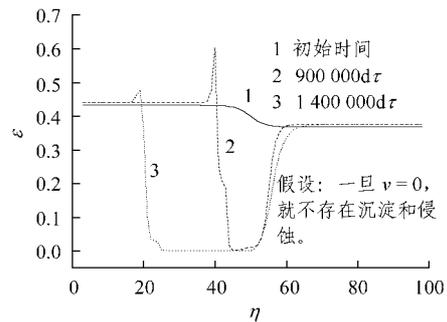


图 2 条件(2)下的断裂发展

Fig.2 Evolution of reptime under the initial and boundary conditions (2)

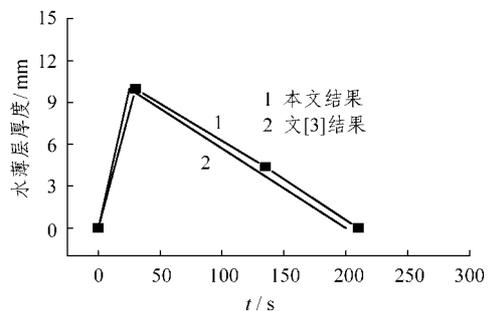


图 3 与文[2]的试验结果的对比

Fig.3 Comparison of results of this paper and Ref. [2]

### 5 结 语

本文首先建立了两相介质的考虑骨架中细颗粒

冲刷的模型, 然后进行了数值模拟。分析结果表明, 饱和砂层液化导致砂土中断层的形成, 产生稳定断层的原因: (1) 上部砂层的孔隙率较下部的小。(2) 砂层中的堵塞处一直保持堵塞状态。

### 参 考 文 献

- 1 Kokusho T. Water film in liquefield sand and its effect on lateral spread[J]. J. Geotech. Geoenviron. Engrg. , ASCE , 1999 , 125(10) : 817 ~ 826
- 2 Kokusho T , Kojima T. Mechanism for postliquefaction water film generation in layered sand[J]. J. Geotech. Geoenviron. Engrg. , ASCE , 2002 , 128(2) : 129 ~ 137
- 3 Seed H B. Design problems in sand liquefaction[J]. J. Geotech. Engrg. , ASCE , 1987 , 113(8) : 827 ~ 845
- 4 Fiegel G L , Kutter B L. Liquefaction mechanism for layered sands[J]. J. Geotech. Engrg. , ASCE , 1994 , 120(4) : 737 ~ 755
- 5 张均锋, 孟祥跃, 俞善炳等. 冲击荷载下饱和砂土渗流与沉降的试验研究[J]. 力学学报, 1999, 31(2) : 230 ~ 237
- 6 Peng F J , Tan Q M , Cheng C M. Laboratory study on cracks in saturated sands[J]. Acta Mechanica Sinica( English Serials) , 2000 , 16(1) : 48 ~ 54
- 7 Cheng C M , Tan Q M , Peng F J. 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
- 8 张涵信. 无振荡、无自由参数的耗散差分格式[J]. 中国空气动力学报, 1988, 6(2) : 143 ~ 164