

# 饱和淤泥爆炸后渗流规律探讨\*

## The seepage pattern of saturated marine ooze after explosion

张加华 王峰 金缪  
(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

文 摘 针对淤泥中爆炸排水固结实验研究中出现的一些现象和实测资料,探讨了饱和淤泥爆炸后的渗流规律。在波动压力梯度下,土层中渗流是非线性规律,土层表面滞后排水,滞后出水临界时间为  $t^*$ 。计算结果表明,爆炸后初始时刻淤泥表面沉降量很小,这与实验研究结果基本吻合。

关键词 饱和淤泥,爆炸,渗流规律

中图法分类号 TU 411

作者简介 张加华,男,1965 年生,硕士,现任中国科学院力学研究所爆炸力学与技术研究室副研究员,主要从事爆炸法处理软基技术及冲击岩土动力学研究。

Zhang Jiahua Wang Feng Jin Liu  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract In this paper the seepage pattern of saturated marine ooze is presented through the explosion experiments. It is non-linear under the wave pressure gradient. The draining time is delayed and the critical draining time is  $t^*$ . The calculated results indicate that the initial settlement of soil after blasting is small, which is approximately accordant to the experimental results.

Key words saturated muck, seepage law, explosion

### 1 前 言

土中渗流规律研究是软土地基加固技术研究中的一个重要课题。静载作用下,采用现有的渗流规律理论,一般均能得到较好的计算结果<sup>[1,2]</sup>;而在动载作用下,土层排水固结渗流规律如何,还是目前正在研究的问题。杨振声等<sup>[3]</sup>对淤泥中爆炸排水固结进行了现场实验研究,主要观察到,淤泥中爆炸后,爆坑附近数分钟后出现若干“通道”集中排水的现象,水如泉涌,排水时间持续数十分钟或数小时。淤泥中爆炸冲击波引起的震动范围可以达数十米,加速度测量结果,在距爆源 20 m 处,加速度值仍有 10 g 数量级<sup>[4]</sup>;爆炸后的超孔隙水压力测量结果表明,淤泥中的超孔隙水压力变化是很复杂的,土中出现负孔压的现象,超孔隙水压力随时间呈波动变化,变化幅值达数十千帕,离爆源 10 多米处的超孔隙水压力值仍有变化。

对爆炸后淤泥中孔隙水压力场的测量结果进行整理分析,可以得到爆炸后土中压力梯度分布的典型规律(见图 1),压力梯度变化呈现出波动形式;在爆源附近,压力梯度变化较大,集中在爆源 5 m 左右的范围;远区压力梯度变化较小,变化规律近似。

爆炸后淤泥中超孔隙压力梯度呈波动变化,在波动压力梯度作用下,土中渗流规律如何?为什么集中排水是滞后数分钟或数十分钟后出现?本文试图从理论上加以解释。

### 2 爆炸后土中渗流速度

#### 2.1 土中水流运动方程

对于多孔介质,土体中任一点水的运动方程为

$$\frac{1}{n} \frac{dV}{dt} = f - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p + p_0) + \frac{1}{n} \nabla^2 V \quad (1)$$

式中  $\rho$ ,  $p_0$  为水流的密度、超孔隙水压力和静水压力;  $f$  为任一点水的体力和水的运动粘性系数;  $V$  为水流速度;  $n$  为孔隙率。

忽略迁移加速度小量,则得

$$\frac{1}{n} \frac{\partial V}{\partial t} = f - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p + p_0) + \frac{1}{n} \nabla^2 V \quad (2)$$

对于一定厚度的淤泥土层,在超孔隙水压力  $p$  作用下,水平方向静水压力梯度  $\frac{\partial p_0}{\partial x}$  为零,垂直向为  $-g$ ,渗流阻力项以  $-g \frac{V}{k}$  表示( $k$  为渗透系数)。两个方向的水流运动方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \frac{\partial V_x}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \frac{V_x}{k_x} \\ \frac{1}{n} \frac{\partial V_z}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \frac{V_z}{k_z} \end{cases} \quad (3)$$

\*国家自然科学基金资助项目(No. 19672067)

到稿日期:1998-12-14

在土力学渗流计算中,以  $v$  和  $p$  为未知量,加上水流连续性方程,就可以进行不稳定渗流求解<sup>[2]</sup>。

### 2.2 渗流速度与压力梯度的关系

土中渗流速度的大小及土中进、排水的状态是与压力梯度密切相关的。在方程组(3)中,若压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  已知,方程组(3)为一阶线性方程组,可直接求解渗流速度与压力梯度的关系。

(1) 压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  不随时间  $t$  变化(稳定压力梯度)

方程组(3)的通解为

$$\begin{cases} V_x = C_1 e^{-\frac{ng}{k_x}t} - \frac{k_x}{g} \frac{\partial p}{\partial x} \\ V_z = C_2 e^{-\frac{ng}{k_z}t} - \frac{k_z}{g} \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases}$$

由  $t = 0$  时  $V_x = 0, V_z = 0$ , 则解为

$$\begin{cases} V_x = -\frac{k_x}{g} \frac{\partial p}{\partial x} (1 - e^{-\frac{ng}{k_x}t}) \\ V_z = -\frac{k_z}{g} \frac{\partial p}{\partial z} (1 - e^{-\frac{ng}{k_z}t}) \end{cases} \quad (4)$$

上述解表明,土层中的渗流速度与压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  的关系,在初始时刻与时间有关,成非线性关系。当时间  $t$  时,渗流速度与压力梯度近似满足 Darcy 定律,系数  $\frac{ng}{k_x}$  为达到稳定渗流时的控制参数,决定了土层内不稳定渗流时间的长短。

工程应用中常采用堆载预压法加固软土地基。在静载下,一般认为土层内部相同深度(水平方向)处的孔隙水压力  $p$  是相等的,即  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ , 土层中的渗流排水主要是垂直方向,其渗流速度为

$$V_z = -\frac{k_z}{g} \frac{\partial p}{\partial z} (1 - e^{-\frac{ng}{k_z}t}) \quad (5)$$

当  $\frac{\partial p}{\partial z} < 0$  时,土层处于排水状态,而  $\frac{\partial p}{\partial z} > 0$  时,土层内为进水状态。

对淤泥和软粘土,渗透系数很小,约在  $10^{-8}$  m/s,  $\frac{ng}{k} \gg 1$ , 土中渗流近似为稳定渗流,排水速度为  $V_z = -\frac{k_z}{g} \frac{\partial p}{\partial z}$ , 这与 Darcy 定律表达的渗流规律是一致的。

对于有插塑料板的堆载预压土层,水平向渗流路径大大缩短,此时水平向的  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ , 土中两个方向的渗流规律由方程组(4)确定。

(2) 压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  随时间  $t$  变化

此时方程组(3)的通解为

$$\begin{cases} V_x = C_3 e^{-\frac{ng}{k_x}t} + e^{-\frac{ng}{k_x}t} \left[ -\frac{n}{g} \frac{\partial p}{\partial x}(t) \right] e^{\frac{ng}{k_x}t} dt \\ V_z = C_4 e^{-\frac{ng}{k_z}t} + e^{-\frac{ng}{k_z}t} \left[ -\frac{n}{g} \frac{\partial p}{\partial z}(t) \right] e^{\frac{ng}{k_z}t} dt \end{cases} \quad (6)$$

给定了压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  随时间  $t$  变化的具体表达式,式(6)即可进行积分,得到通解的一般形式。

### 2.3 爆炸后淤泥中的渗流速度

土层经爆炸振动作用后,淤泥中的孔隙水压力分布规律是很复杂的,根据现场实测的孔隙水压力分布规律结果整理无量纲的压力梯度  $i$  随时间  $t$  的关系基本为一波动形式<sup>[5]</sup>, 实测结果整理后如图 1。

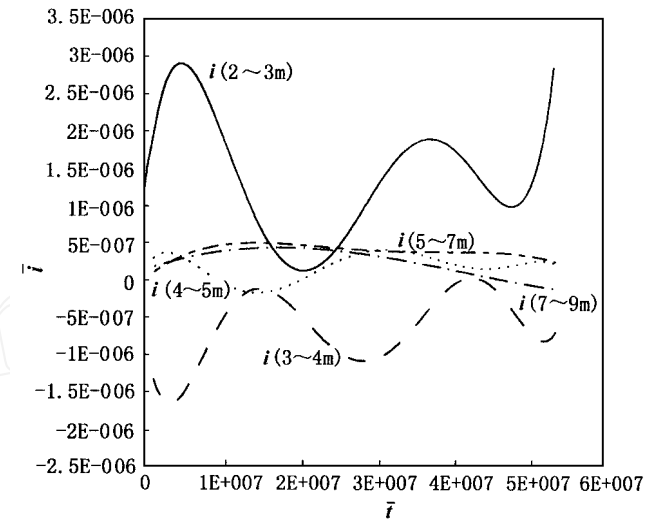


图 1 爆炸后淤泥中压力梯度与时间

Fig. 1 Relation between pressure gradient and time

可近似地将土中任一点的压力梯度随时间的关系表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = -A_1(x) e^{-t} \sin \omega_1 t \\ \frac{\partial p}{\partial z} = -A_2(z) e^{-t} \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (7)$$

式中  $A_1(x), A_2(z)$  为水平和垂直方向压力梯度的幅值,  $\omega_1, \omega_2$  为幅值衰减系数,  $\omega_1, \omega_2$  为振动的圆频率。将式(7)代入式(6),得到式(3)在此情况下的通解表达式:

$$\begin{cases} V_x = C_3 e^{-\frac{ng}{k_x}t} + \frac{A_1(x) n}{g} \frac{k_x e^{-t}}{\sqrt{\frac{1}{2} k_x^2 + (ng - k_x)^2}} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ V_z = C_4 e^{-\frac{ng}{k_z}t} + \frac{A_2(z) n}{g} \frac{k_z e^{-t}}{\sqrt{\frac{1}{2} k_z^2 + (ng - k_z)^2}} \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{cases}$$

当  $t = 0$  时,  $V_x = 0, V_z = 0$ , 确定出式(8)中的  $C_3, C_4$  值。解为

$$\begin{cases} V_x = - \frac{A_1(x) n}{\sqrt{\frac{1}{2} k_x^2 + (ng - k_x)^2}} \cdot \\ \left[ e^{-\frac{ng}{k_x} t} \sin \dot{\omega}_1 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_1 t + \dot{\omega}_1) \right] \\ V_z = - \frac{A_2(z) n}{\sqrt{\frac{1}{2} k_z^2 + (ng - k_z)^2}} \cdot \\ \left[ e^{-\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\tan \dot{\omega}_1 = - \frac{1 k_x}{ng - k_x}, \tan \dot{\omega}_2 = - \frac{2 k_z}{ng - k_z} \quad (10)$$

式(9)为爆炸后土层中的渗流速度与孔隙水压力梯度的关系,渗流速度的变化与压力梯度及土层的参数有关。

软土层表面出水,是土层两个方向上压力梯度相互作用的结果。对土中任一控制体 S(见图 2),要使土层总是处于排水状态,有两种情况:

$$\left. \begin{aligned} (1) & V_z > 0 \text{ 及 } V_x < 0; \\ (2) & V_z > 0 \text{ 及 } V_x > 0 \text{ 且 } V_z - V_x > 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



图 2 土中两个方向排水示意图

Fig. 2 Two drainage directions in soil

第(1)种情况是水平方向向控制体 S 进水,增大了垂直向渗流速度,要求任一时刻满足下列条件:

$$\begin{cases} e^{-\frac{ng}{k_x} t} \sin \dot{\omega}_1 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_1 t + \dot{\omega}_1) > 0 \\ e^{-\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

第(2)种情况是水平方向向控制体 S 外排水,减少了垂直方向渗流速度,要求任一时刻满足下列条件:

$$\begin{cases} e^{-\frac{ng}{k_x} t} \sin \dot{\omega}_1 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_1 t + \dot{\omega}_1) < 0 \\ e^{-\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) < 0 \\ \frac{A_2(z) n}{\sqrt{\frac{1}{2} k_z^2 + (ng - k_z)^2}} \cdot \\ \left[ e^{-\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) \right] < \\ \frac{A_1(x) n}{\sqrt{\frac{1}{2} k_x^2 + (ng - k_x)^2}} \cdot \\ \left[ e^{-\frac{ng}{k_x} t} \sin \dot{\omega}_1 - e^{-t} \sin(\dot{\omega}_1 t + \dot{\omega}_1) \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中  $\tan \dot{\omega}_1 = - \frac{1 k_x}{ng - k_x}, \tan \dot{\omega}_2 = - \frac{2 k_z}{ng - k_z} .$

### 3 爆炸后土层表面滞后出水现象分析

#### 3.1 爆炸后淤泥层表面滞后排水现象分析

实验中观察到爆炸后淤泥层表面出水,而且是爆炸后一段时间  $t^*$  后开始出水,这一现象可以通过下列分析得到解释。

由公式(9)对时间进行积分,可得任一控制体进、出水量为

$$\begin{cases} Q_x = \frac{A_1(x) n k_x}{\sqrt{\frac{1}{2} k_x^2 + (ng - k_x)^2}} \cdot \\ \left[ \frac{k_x}{ng} e^{\frac{ng}{k_x} t} \sin \dot{\omega}_1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}} e^{-t} \sin(\dot{\omega}_1 t + \dot{\omega}_1) \right] \\ Q_z = \frac{A_2(z) n k_z}{\sqrt{\frac{1}{2} k_z^2 + (ng - k_z)^2}} \cdot \\ \left[ \frac{k_z}{ng} e^{\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}} e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) \right] \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\tan \dot{\omega}_1 = - \frac{1 k_x}{ng - k_x}; \tan \dot{\omega}_2 = - \frac{2 k_z}{ng - k_z};$

$\tan \dot{\omega}'_1 = -1; \tan \dot{\omega}'_2 = -2 .$

土层内开始排水的临界时间  $t^*$  可以由式(14)和式(11)求出。

在第一种情况下,要求  $V_x > 0$  和  $V_z < 0$ 。对  $V_z > 0$ ,有:

$$\frac{k_z}{ng} e^{-\frac{ng}{k_z} t} \sin \dot{\omega}_2 - \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}} e^{-t} \sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) > 0$$

由于淤泥等粘土的渗透系数  $k$  值较小,且压力梯度衰减系数和振动圆频率 较小,  $e^{-t} \approx 0$ ,上述条件主要由第二项确定,即  $\sin(\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2) < 0$ 。一个周期

中,排水区间为  $\dot{\omega}_2 t + \dot{\omega}_2 < 2\pi, \frac{2\pi - \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2} < t_z < \frac{2\pi + \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2}$ 。开始排水的临界时间  $t_z^* = \frac{2\pi - \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2}$ ,其中

$\tan \dot{\omega}'_2 = -2 .$

同样,对  $V_x < 0$ ,有  $0 < t_x^* < \frac{2\pi - \dot{\omega}_1}{\dot{\omega}_1}$ ,其中  $\tan \dot{\omega}'_1 = -1$ 。

这样,当  $\frac{2\pi - \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2} < \frac{2\pi - \dot{\omega}_1}{\dot{\omega}_1} < \frac{2\pi + \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2}$  时,若认为土层内每个控制体都相同时,土层表面开始滞后排水时间为  $t^* = \frac{2\pi - \dot{\omega}_2}{\dot{\omega}_2} .$

在第(2)种情况下,同样也可以进行滞后排水现象分析。

由此可见,爆炸后淤泥层表面总是需要一定时间  $t^*$  后才能出水,这与实验中观察到的现象是一致的。滞后出水的时间由压力梯度变化的特征参数决定。

### 3.2 爆炸后淤泥层表面的沉降量

我们用公式(9)来计算爆炸后淤泥层的排水量随时间的关系,这里取  $A_1(x), A_2(z) = 10 \text{ kPa/m}$ , 衰减系数  $\alpha = 8.02 \times 10^{-6}$ , 按在一周期内衰减至一半计算,  $\alpha = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,  $n = 0.67$ ,  $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $k_x, k_z = 1.39 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , 图3为爆炸后土中任一点水流运动的位移曲线。

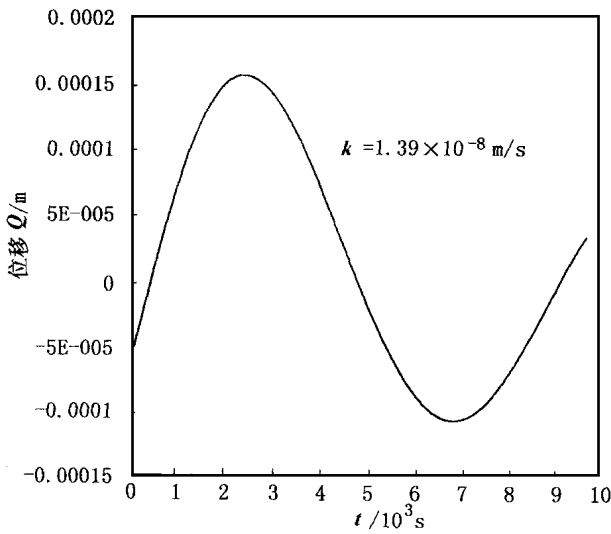


图3 土中水流运动位移曲线

Fig. 3 Displacement curve of water in soil

在没有插塑料板的情况下,一个周期内,淤泥表面出水为  $10^{-4} \text{ m/m}^2$ , 下沉量是很少的。这与实验现象是相吻合的。

## 4 结 论

经过以上分析,可以得出以下几点结论。

(1) 在外载作用下,土中渗流速度和压力梯度的关系一般为非线性关系。

(2) 在稳定压力梯度下,渗流状态由参数  $\frac{\mu g}{k}$  决定,当土层渗透系数  $k$  很小时,不稳定渗流过程是很短的,可以近似用 Darcy 定律来代替土中渗流规律。

(3) 在非稳定波动压力梯度作用下,土层内的渗流速度随压力梯度的变化是很复杂的,速度变化与梯度变化有一相位。

(4) 爆炸引起的波动孔隙压力梯度,使得土层内产生滞后排水现象。

(5) 爆炸后土层表面的沉降量在第一个周期内是很小的,淤泥固结是一个长时间的过程,需要其它方法配合加速其固结。

## 参 考 文 献

- 1 毛永旭. 地下水渗流及其控制. 北京:水电出版社,1984
- 2 黄文熙. 土的工程性质. 北京:水电出版社,1984
- 3 杨振声. 爆炸排水固结实验研究. 见:工程爆破文集,第六集. 深圳,1997
- 4 杨振声. 淤泥爆炸排水固结实验中加速度的测量. 工程爆破,1998,4(1):20~25
- 5 陶俊. 淤泥爆炸排水固结孔隙水压力场试验研究. 见:工程爆破文集. 深圳,1997