

饱和软基爆炸排水机理的初步研究^{*}

张加华

杨振声

金

(中国科学院力学研究所 北京 100080) (连云港建港指挥部 江苏省连云港市 222042)

摘 要 本文在现场实验研究的基础上,提出了饱和两相介质在爆炸动载下排水固结机理的一维简化模型。数值计算结果表明在强动载作用下,土层中两相介质由于运动惯性不同,两者会出现分离运动,土体的排水速度与两相介质的运动有关。动载作用后两相介质仍具有较大的惯性,继续排水,这与静载下是不同的。土中孔隙压力的变化与两相介质运动有关,计算值与实测值在量级上有可比性。

关键词 爆炸 饱和两相介质 排水

中图法分类号 TU 472

1 前 言

软土地基处理是基础工程中经常遇到的一个重要问题。这类基础主要以软粘土、轻亚粘土、淤泥质砂土、松散砂、粉细砂及淤泥等材料为主,其特点是各类土层颗粒结构复杂,承载力低、压缩量大。主要出现在江、河、湖、海附近的建筑物的基础,公路路基、港口陆域堆场和库区,水工构筑物基础及坝、闸基础等工程中。软土地基如果未经处理或处理不当,将会造成构筑物的破坏,如倾斜、倒塌、断裂及沉陷等工程事故,造成重大经济损失。所以软土地基处理技术一直为各国研究学者所关注。

针对软土地基的特点,工程界已经研究了几种常规的处理方法:(1)置换法,这是最原始的方法,将软土全部挖掉,置换块石或砂,使之强度达到工程设计要求。(2)堆载预压法,将软土材料充分利用,就地加固,即在软土层中布置袋装砂井或塑料排水纸板,软土层表面堆载(预压土或块石),从而使软土层固结,提高承载力。(3)真空预压法,在堆载预压法的基础上,用真空泵在土层中抽真空,从而取代预压堆载料。(4)其它方法,主要指一些化学灌浆加固地基的方法,如硅化法、旋喷法、深层石灰处理法。工程实践证明,以上这些方法已能够在 3~4 个月内使土层平均固结度达到 80% 的工程要求。但是堆载类的方法,由于堆载材料费用的计入,其造价高;真空预压尽管造价降低,但受真空度的限制,加固承载力只能达到 0.08MPa,对承载力要求超过 0.08MPa 的工程,还需辅以堆载预压;而且真空设备的限制,每次加固的面积在 5000m² 以下,施工周期过长;化学类的方法,成本高,只能在特殊情况下

* 本文获国家自然科学基金资助。作者十分感谢郑哲敏院士、周镜院士对“饱和软基爆炸排水固结研究课题的关心和指教。

张加华 男 32 岁 工程师 硕士 杨振声 男(已故)研究员 博导 金 男 57 岁 教授级高工

使用。所以,必须寻求软基处理的新方法,以降低工程造价,缩短软土加固的施工工期。

本文基于动力(爆炸或强夯等)固结软土技术有研究,从理论上建立描述水土两相介质运动的力学模型,用两相流的理论,分析动力排水过程中,土层内孔隙水压力的变化和两相介质的运动规律,从而说明动力排水固结的机理。

2 力学模型与数学表述

2.1 基本假定

根据实验分析和土力学理论,我们提出以下几点基本假设:

(1)认为土层孔隙率 n ,无论是从体积或面积上的。 n 值是一样的,即:

$$\rho = n\rho_w + (1 - n)\rho_s \tag{1}$$

式(1)中 ρ 是土层总密度, kg/m^3 ; ρ_w 是孔隙水的密度, kg/m^3 ; ρ_s 是土颗粒的密度, kg/m^3 ,而土层中任一点的总压力:

$$\sigma = np + (1 - n)\sigma_s \tag{2}$$

式(2)中, p 是总孔隙水的压力, Pa; σ_s 是颗粒的接触应力, Pa。

(2)认为水和土颗粒都是不可压缩的介质,即 ρ_w 和 ρ_s 为常数。混合土体的变形用土颗粒骨架的变形来反映,即孔隙率 n 是一个变量。

(3)由于 σ - n 动态曲线很难从实验中得到,这里只能用有效应力 σ 与 n 的关系来代替,而有效应力试验通常只有静态压缩状态的数据,我们用来做为动态和拉伸状态下使用,这可能有差别,饮和砂土在冲击荷载下的动本构关系目前的实验测定是比较麻烦的,这里的本构关系这样处理是很粗的近似。

(4)土体中颗粒的吸附水和孔隙中的自由水之间没有质量交换。

(5)土层平面上各向同性,而且整个土层在爆炸前后无温度的变化。

根据以上几点假设,一维问题的模型为:

具有一定厚度 H_0 ,且平面上无界的土层中爆炸,不考虑水和土颗粒的水平的运动及其对垂直向的影响,可以沿深度方向简化成一维问题处理,在土层下边界建立坐标系,如图 1。由于冲击波作用时间很短,不考虑冲击波的作用过程,仅考虑爆炸引起的振动过程。爆炸引起的振动对土体作用简化在土层下边界给定一衰减振动外力,以加速度的形式来反映。

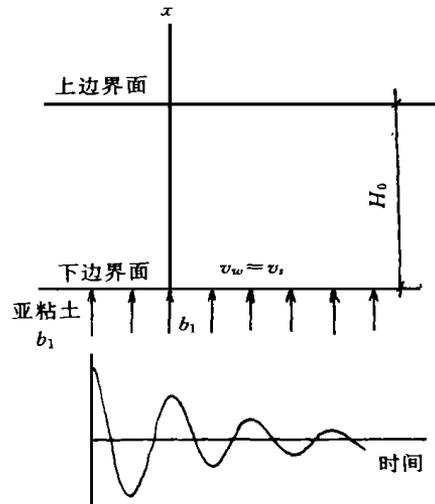


图 1 一维模型

2.2 基本方程

一维两相流的基本方程组为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv_w)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial[(1-n)v_s]}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$n\rho_w \left(\frac{\partial v_w}{\partial t} + v_w \frac{\partial v_w}{\partial x} \right) + n \frac{\partial \sigma}{\partial x} = -n\rho_w g - H_i \quad (5)$$

$$\rho_s(1-n) \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + \frac{\partial v_s}{\partial x} \right) + p \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial[(1-n)\sigma]}{\partial x} = (1-n)\rho_s g + H_j \quad (6)$$

$$\sigma = np + (1-n)\sigma_s = \sigma_e + p \quad (7)$$

$$\sigma_e = \sigma_e(n) \quad (8)$$

上述方程中, n 、 ρ_w 、 ρ_s 、 p 同前;

v_w 、 v_s ——分别为孔隙水和土颗粒的运动速度, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

H_i ——为两相间的相互作用力, N。

方程(3)、(4)为两相质量守恒方程; (5)、(6)为两相运动方程; (7)为土中任一点的应力平衡方程; (8)为土体本构方程, 共有五个未知数: n 、 v_w 、 v_s 、 p 及 σ_e (或 σ_s), 有五个独立的方程。可以证明, 上述方程组是椭圆双曲线型的方程组, 有两组特征线, 还有两组类似第一积分的方程。

2.3 定解条件

2.3.1 初始条件($t=0$)

不考虑冲击波对土体的作用, 认为初始时刻土颗粒和水两相介质处于静止状态, 即 $v_w|_{t=0}$ 和 $v_s|_{t=0}$; 下边界初始时刻速度为零, 而加速度为最大值 $b_i = A_0 \omega \bar{\omega}$; 由于重力及大气压力的作用, 土层内部有静压力场分布, 以外界大气压力为零点, 土层总应力 $\sigma_0 = \rho_g(H_0 - x)$, ρ 为混合体的密度 kg/m³; 有效应力 $\sigma_0 = \rho_g(H_0 - x) - p_0$, p 为静孔隙水压力, $p_0 = \rho_g(H_0 - x)$ 。初始时刻孔隙率 n 有一个初始分布 $n_0(x)$ 。

2.3.2 边界条件

A. 上边界面($x = H_0$); 上边界面为与大气压接触点, 是一自由边界, 边界点上 $\sigma_e = 0$, n 值在上边界为间断点。

B. 下边界面($x = 0$); 由于淤泥层下一般是质密的亚粘土层, 为了简便起见, 将该层认为是不透水层, 即渗流速度 $v_w = v_s = 0$, 两相速度相等 $v_w = v_s$, 孔隙水压力 p 是连续的, 下边界面下层为亚粘土(或其它土层), n 值是不连续的。在下边界上施加一个循环有阻尼的振动力, $\rho b_i = n\rho_w b_w + (1-n)\rho_s b_s$, b_w , b_s 分别为水和土颗粒的分加速度, 由下边界条件 $v_w = v_s$, 则在下边界面 $b_w = b_s = b_0$ 。这样, 基本求解方程组(3)~(8), 加上上述初始边值条件, 可以进行求解, 方程组是封闭的。

3 计算方法

方程组(3)~(8)的求解, 必须要给出土体本构关系是 $\sigma_e = \sigma_e(n)$ 和相间作用力 H_i 有具体表示形式, 这里我们采用如下的形式:

本构关系, 最简单的形式为:

$$e = A \log \sigma_e + B \tag{9}$$

式中 e ——土颗粒的孔隙比, $e = \frac{n}{1-n}$

相间作用力, 采用二阶形式为:

$$H_i = \frac{2C_f \rho_w}{d} (v_w - v_s) |v_w - v_s| \frac{1-n}{n} \tag{10}$$

式中 C_f ——土颗粒运动的阻力系数; d ——表征土颗粒的特征尺度。

采用差分方法来求解上述基本方程组。

3.1 方程组的离散化及求解方法

用预测-校正两步差分格式计算, 时间离散采用分步向前差分, 空间离散采用中心差分, 无量纲后的离散方程为:

前半步时间步长 ($t \sim t + 0.5\Delta t$):

$$n_j^{t+\frac{1}{2}} = n_j^t + \frac{1}{4} \lambda [(1 - n_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) v_{s_{j+\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}} - (1 - n_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) v_{s_{j-\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}}] \tag{11}$$

$$n_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} v_{w_{j+\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}} - n_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} v_{w_{j-\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}} = (1 - n_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) v_{s_{j+\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}} - (1 - n_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) v_{s_{j-\frac{1}{2}}}^{t+\frac{1}{2}} \tag{12}$$

$$v_{s_j}^{t+\frac{1}{2}} = v_{s_j}^t - \frac{1}{4} \lambda v_{s_j}^t (v_{s_{j+1}}^t - v_{s_{j-1}}^t) - \frac{1}{4} \lambda \frac{\sigma_{e_{j+1}}^t - \sigma_{e_{j-1}}^t}{\rho_s (1 - n_j^t)} - \frac{1}{4 \rho_s} \lambda \times (p_{j+1}^t - p_{j-1}^t) - \frac{1}{2} \Delta t g + \frac{1}{2} \Delta t \frac{H_{i_j}^t}{\rho_s (1 - n_j^t)} \tag{13}$$

$$v_{w_j}^{t+\frac{1}{2}} = v_{w_j}^t - \frac{1}{4} \lambda v_{w_j}^{t+\frac{1}{2}} (v_{w_{j+1}}^{t+\frac{1}{2}} - v_{w_{j-1}}^{t+\frac{1}{2}}) - \frac{1}{4} \lambda (p_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - p_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) - \frac{1}{2} \Delta t g - \frac{1}{2} \Delta t \frac{H_{ij}^{t+\frac{1}{2}}}{n_j^{t+\frac{1}{2}}} \tag{14}$$

后半步时间长 ($t + 0.5 \times \Delta t \sim t + \Delta t$):

$$n_j^{t+1} = n_j^t + \frac{1}{4} \lambda [(1 - n_{j+1}^{t+1}) v_{s_{j+1}}^{t+1} - (1 - n_{j-1}^{t+1}) v_{s_{j-1}}^{t+1}] \tag{15}$$

$$n_{j+1}^{t+1} v_{w_{j+1}}^{t+1} - n_{j-1}^{t+1} v_{w_{j-1}}^{t+1} = (1 - n_{j+1}^{t+1}) v_{s_{j+1}}^{t+1} - (1 - n_{j-1}^{t+1}) v_{s_{j-1}}^{t+1} \tag{16}$$

$$v_{s_j}^{t+1} = v_{s_j}^t - \frac{1}{4} \lambda v_{s_j}^{t+\frac{1}{2}} (v_{s_{j+1}}^{t+\frac{1}{2}} - v_{s_{j-1}}^{t+\frac{1}{2}}) - \frac{1}{4} \lambda \frac{\sigma_{e_{j+1}}^{t+\frac{1}{2}} - \sigma_{e_{j-1}}^{t+\frac{1}{2}}}{\rho_s (1 - n_j^{t+\frac{1}{2}})} - \frac{1}{4} \lambda (p_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - p_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) - \frac{1}{2} \Delta t g + \frac{1}{2} \Delta t \frac{H_{i_j}^{t+\frac{1}{2}}}{\rho_s (1 - n_j^{t+\frac{1}{2}})} \tag{17}$$

$$v_{w_j}^{t+1} = v_{w_j}^t - \frac{1}{4} \lambda v_{w_j}^{t+1} (v_{w_{j+1}}^{t+1} - v_{w_{j-1}}^{t+1}) - \frac{1}{4} \lambda (p_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} - p_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}}) - \frac{1}{2} \Delta t g - \frac{1}{2} \Delta t \frac{H_{ij}^{t+1}}{n_j^{t+1}} \tag{18}$$

式中:

$$\sigma_e = 10^{\frac{(1+B)n_i^t - B}{A(1-n_i^t)}} \tag{19}$$

$$H_{ij}^t = \frac{2C_f}{d} \frac{(1-n_i^t)}{n_j^t} (v_{w_j}^t - v_{s_j}^t) |v_{w_j}^t - v_{s_j}^t| \frac{1-n_i^t}{n_j^t} \tag{20}$$

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{21}$$

上述两个差分方程组中,土颗粒的运动方程采用显式格式,其它方程用隐式格式。其稳定性条件为 $0 < \lambda < 1$ 。这样可以逐步求解出 $v_{s_j}^{t+1}$ 、 n_j^{t+1} 、 $v_{w_j}^{t+1}$ 和 p_j^{t+1} 。

3.2 边界条件的处理

上边界孔隙压力为零,差分计算中的虚拟点采用反对称点。而孔隙率 n 值在上边界为奇异点,先计算内点的值,边界点上的值采用外插值:土颗粒的速度 v_s 和孔隙水的速度 v_w 为自由参量,也采用外插形式,但三者之间须满足质量守恒要求。上边界点初始时刻为混相与空气的接触点,只要有水排出,则边界点即为水相所占据,此时 $n = 1$,会出现计算的不稳定性,所以,上边界处理为活动界面。

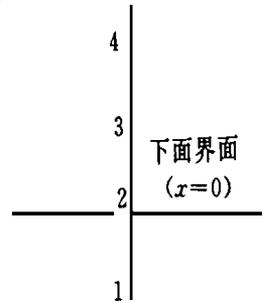
下边界面在给定外力条件下,边界点上土颗粒的速度为:

$$v_s = v_w = v = A e^{-Q} \sin \omega t \tag{22}$$

上式进行离散差分后可求得 $t + \Delta t$ 时刻的速度,即:

$$v_{s_j}^{t+1} = A e^{Q(t+\Delta t)} \sin [\omega(t + \Delta t)]$$

如何保证下边界面上 $v_w = v_s$, 经过分析,如图2,在 $v_{s_1} - v_{s_3}$ 和 $v_{w_1} - 2v_{s_3} - v_{w_3}$ 同时满足,可保证 $v_{w_2} - v_{s_2}$ 这一边界不渗透条件。其它参量由质量守恒来确定。



4 计算结果与分析

计算中所选参数分别为: $\rho_w = 10 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 本构无量纲常数 $A = 0.537, B = -0.976$, 土层厚度 $H_0 = 6.0\text{m}$, 空间步长 $\Delta x = 0.2\text{m}$, 动态过程中时间步长 $\Delta t = 0.1\text{ms}$, 相间作用力阻力系数 C_f

图2 边界点处理

一级近似取 $C_f = 10.0$, 土颗粒的特征尺度 d 取为 $10^{-4} \sim 10^{-5}\text{m}$, 给定初始加速度幅值 $A_0 \omega = 35\text{m/s}^2$, 频率 $f = 200\text{Hz}$, 衰减系数 $Q = 0.11926$, 即当 $\omega = 8\pi$ 时加速度衰减为 $0.05b_0$, 通过程序计算了高频大幅值情况下饱和土体中两相介质的运动情况和孔隙水压力的变化规律。

4.1 两相介质动态运动规律

图3为典型的两相介质动态运动曲线。计算表明,两相介质由于质量不同,在动态过程中的运动速度不等,出现水相和固体颗粒相相互分离且出现相位差,造成土体中出现进、排水两种状态;所以,在动态过程中土体中存在进、排水两种状态,通常意义上的土体渗流速度取决于土体内进、排水的速度率。

图4为土体中两相介质运动加速度的变化曲线,运动初期,外力由最大值开始卸载,加速度为正值,两相介质获得正值加速度,都向正方向运动,并开始分离,继续运动后,两相加速度发展成不同方向的变化规律。动态作用后期,随作用外力的衰减,两者的变化规律又会趋于一致。图4中实线为两相混合体的总加速度,总加速度与给定速度(实验实测)的变化规律基本一致。

4.2 外力、孔隙压力和排水间的关系

在外力作用下,土层内孔隙水压力初始时刻迅速上升到最大值,孔压的最大值

$p_{max} = 6.1 \times 10^5 \text{Pa}$ ($H = 5.8\text{m}$ 处); 随后孔隙压力随外力的减小而下降。在循环外力作用下, 孔隙压力的变化规律与外力的变化是一致的, 两者之间没有相位差。在拉伸状态时, 土层中孔隙水压力出现负压。

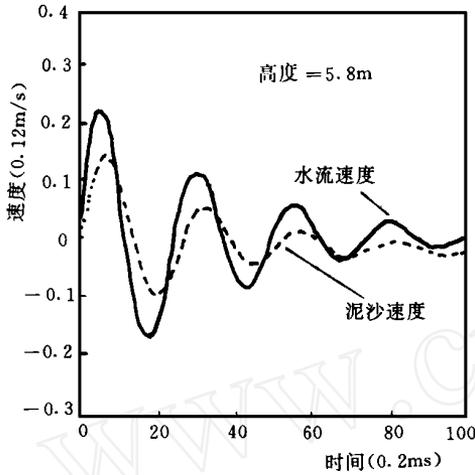


图3 两相介质动态运动规律

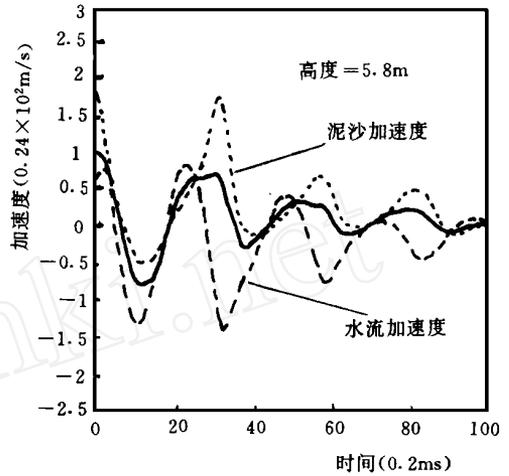


图4 两相介质运动加速度的变化曲线

图5为土层中不同位置处, 孔隙水压力随时间变化的曲线, 土层中由上而下孔隙水压力逐渐增大, 见图6。

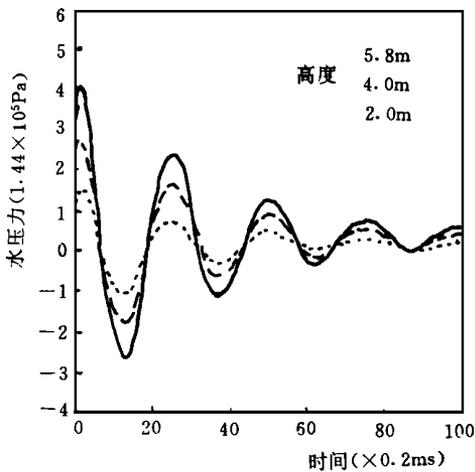


图5 孔隙水压力随时间变化曲线

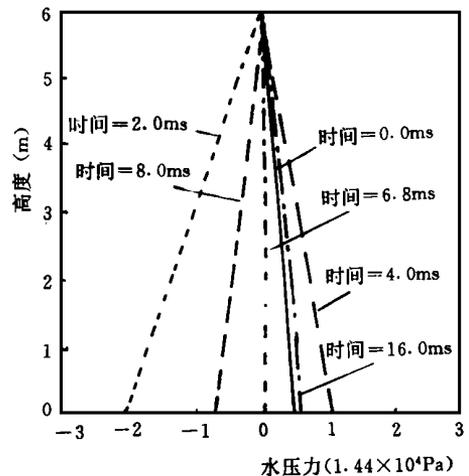


图6 土层中孔隙水压力分布

4.3 动态过程中孔隙率和表面沉降的变化

计算结果表明, 孔隙率 n 在动态过程中的变化过程中是很小的, 表面沉降值也很小, 这可能与土的本构模型的选取有关。如何选取适当的本构模型, 更好地表达土层的孔隙率的变化, 需要通过实验来解决。

5 结论

通过一维力学模型的计算和分析, 可以较好地描述饱和两相介质的运动和土层排水过程, 作为排水机理的初步探讨, 有以下几点结论:

1. 振动引起土层中两相介质的分离运动, 动态过程中两相速度是不等的, 造成土体中有进、排水的状态, 在运动初期, 两相速度交替变化; 动载后期, 两相速度出现完全分离, 土层处于完全排水状态。动载作用后, 排水速度达到几毫米/米, 比静载大几个数量级。

2. 动态过程中, 两相的加速度是不同的, 而且两者的变化规律是不一样的, 上层混合体的加速度与实验测量值比较一致。

3. 动载过后, 两相介质具有较大的惯性, 土层在惯性作用下排水固结, 这与静载下是不一样的。

4. 本文力学模型所计算的动态孔隙水压力与以往饱和砂中测量的结果有可比较性, 两者最大幅值均在 10^5Pa 量级。动孔隙水变化规律定性上与土层中两相介质的运动状态有关, 土层中进、排水的状态与孔隙水的变化是一致的。

如何更好地描述饱和土体排水机理, 还需要做进一步的工作。

参考文献

- 1 Zheng Zhem in, Yang Zhengshen and Jin L iu, Underwater Explosion Treatment of Marine Soft Foundation China Ocean Engineering 1990, Vol 5, No. 2, PP213~ 234
- 2 许连坡, 在爆炸载荷作用下连云港海淤的特征, 《爆炸与冲击》, 1990, 第10卷第4期, PP297~ 301.
- 3 黄文熙, 《土的工程性质》, 水电科学出版社(1984).
- 4 钱家欢等, 动力固结的理论与实践, 《岩土工程学报》, Vol 8, No. 6, 1986 11, PP1~ 17.
- 5 谈庆明, 郑哲敏等, 受压固、气两相介质一维膨胀运动, 《动力学报》, Vol 16, No. 4, 1984 7, PP340~ 350
- 6 李锡夔, 张洪武, 饱和土壤动力渗流的非线性分析, 《大连理工大学学报》, Vol. 30, No. 3, 1990 5, PP225 ~ 262
- 7 俞善炳, 恒稳推进的煤与瓦斯突出, 《力学学报》, Vol 20, No. 2, 1988 3
- 8 刘大有, 《两相流体动力学》, 高等教育出版社, 1993. 9.
- 9 O. C. Zienkiewicz, Dynamic Behaviour of Saturated Porous Media; The Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 1984, Vol 8, PP71~ 96

RESEARCH OF DYNAMIC DRAINING IN SATURATED SOFT SOIL BY BLASTING

Zhang Jiahua Yang Zhensheng

(*Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080*)

Jin Liu

(*Headquarters of Lianyungang Port Construction, Lianyungang 222042*)

Abstract In this paper the mechanism of drainage of saturated soil by blasting has been elementally. Based on analyzing the experiment results, a one-dimension computing model to simulate the movement of water and grain in saturated soft soil under vibration has been presented. Through numeral simulation, it is understood that the movement of water and grain cause draining water from soil or water into soil. The pore water pressure is changed at the same time. The moving inertia of two phase flow can last a long time after loading which is not same as that under static load.

Key Words Explosive saturated soft soil drainage