

爆炸荷载作用下三相饱和土中气体运动的几个影响因素分析*

赵跃堂 钱七虎 王明洋

(南京工程兵工程学院 南京 210007)

摘要 三相饱和土中的气体含量是决定爆炸波在其中传播的最重要因素,但目前理论上对其气体运动的描述还不够准确。对影响三相饱和土应力应变关系递增硬化段气体运动的几个因素,包括表面张力、气泡周围介质的粘性和压缩性等进行了描述,并通过数值分析确定这些因素的影响程度。计算结果表明气泡表面张力和气泡周围介质的压缩性对气体运动的影响可以忽略不计,而气体本身的压缩特性和气泡周围介质的粘性是影响气体运动的主要因素。

关键词 三相饱和土 爆炸波 气体运动

中图法分类号 O 382 2

1 引言

爆炸荷载作用下三相饱和土表现出许多独特的宏观试验现象,其中饱和土应力应变关系曲线由递减硬化向递增硬化过渡以及爆炸波传播过程中形成冲击波和冲击波被“抹平”是两个最为重要的特征,这些在文献 [1~ 3]中已经被试验所证实,并且作了简要的数学描述。

理论和试验都证实饱和土中气体含量是控制爆炸波在其中传播最重要的因素。Г.М. ЛЯХОВ^[1]首次通过试验确定了气体含量对饱和土中质点运动速度、波阵面传播速度、压力和冲量的影响程度,并在数学上进行了定量的分析。文献 [2]对爆炸荷载作用下饱和土的变形特征进行了详细的实验研究,并粗略地分析了饱和土中气体含量对饱和土运动规律的影响,分析结果与试验结果有较好的一致性。文献 [3]从宏观上考虑了饱和土中爆炸波的传播规律,但没有单独考虑气体含量对波传播的影响,只是将气体含量作为一修正系数进行考虑,没有多大的普遍意义。

作者通过分析以往爆炸荷载作用下饱和土应力应变关系递增硬化段气体运动的研究成果,根据宏观试验现象,借助微结构力学分析手段对饱和土中气体运动规律进行较为详细的分析,通过数值分析方法确定出影响气体运动的主要因素,为饱和土本构关系的描述提供参考。

2 饱和土中气体对其中爆炸波传播的影响

在显微镜下观察可以发现^[1]饱和土中气体主要是以气泡的形式存在的,饱和土中气泡的半径分布一般在 0.001~ 0.05cm之间,平均半径约为 0.01cm,在气体体积含量为几个百分点

* 国家自然科学基金资助项目,资助合同号 59579017

赵跃堂:男,1967年3月生,博士,讲师。

1997-03-10收到原稿,1997-10-06收到修改稿。

时,每立方厘米饱和土中气泡的数量有万个左右,因此饱和土可以认为是一种均匀细散的介质。

气泡被周围介质包裹着,有爆炸波通过时,气泡与周围介质之间会产生相互作用。首先,气泡半径非常小,可能会使得气泡表面张力的作用变得明显;再者,气泡内气体与周围介质压缩性的巨大差异必然会引起气泡局部的径向压缩与膨胀运动,相应地周围介质产生压缩与拉伸波,此时气泡及其附近区域可以近似为一个有阻尼效应的单自由度体系,考虑到气泡的空间尺寸非常小,气泡运动的自振频率非常高,这样气泡总的运动就相当于在气泡的整体运动过程中叠加了一个高频运动,高频运动与气泡的空间尺寸关系有关;此外,液固两相运动的粘滞作用也会对气泡的局部运动产生影响,粘性系数越大,气泡的局部运动就越小。

考虑到饱和土在应力应变关系的递增硬化段表现出类似流体的特征^[1,2],文献[1]ЯХОВ借用流体动力学的研究方法对爆炸荷载作用下饱和土中气泡的运动作过简单的描述。根据液体和固体颗粒压缩性比气体小得多这一规律将液体和固体颗粒作为一种液体来考虑,气体以球形气泡的形式被它们包裹着。用符号 T 、 d 、 V 和 c 分别表示体积含量、密度、比容和声速,下标 1、2、3 和 23 分别代表气体、液体、固体和液体固体混合相,下标 0 代表初始状态,本文也指大气压力状态, k 代表气体的等熵指数,以下同。

假设气体运动的粘滞阻尼力与气体的变形速率成正比,这样气泡的运动方程可以写为

$$p = p_0 \left(\frac{d_1}{d_{10}} \right)^{-k} + Z d_{10} d_1^2 \dot{d}_1 \quad (1)$$

其中: $p_0 = d_{10} c_{10}^2 / k$, Z 为气体运动的综合粘性系数,关于 Z 的确定,文献[1]进行了近似的描述。首先,考虑到液体和固体压缩性的不同以及变形要协调一致,可以求出液体和固体混合相的压缩关系式

$$p = -A^2 V_{23} + B \quad (2)$$

其中

$$A = (T_{20} d_{20} + T_{30} d_{30})^{1/2} \left[\frac{T_{20}}{d_{20} c_{20}^2} + \frac{T_{30}}{d_{30} c_{30}^2} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$B = p_0 - (T_{20} + T_{30}) \left[\frac{T_{20}}{d_{20} c_{20}^2} + \frac{T_{30}}{d_{30} c_{30}^2} \right]^{-1}$$

假设气泡的局部径向运动符合一维平面流动条件,可以得到 Z 的关系式

$$Z = \frac{A}{3} R_0^3 R^{-2} \quad (4)$$

上式中 R_0 为气泡初始半径。

从上面可以看出,气体运动的粘性系数与气泡的半径、各单相的含量以及各单相的材料特性有关。关于详细的推导过程,见文献[1]。

文献[1]关于饱和土递增硬化段气体运动规律的描述存在几点值得商榷的地方:第一,在气体运动的粘性系数确定过程中,采用了一维平面流动假设,也就是认为气泡的半径为无穷大,这个假设对于模拟饱和土中气泡的径向运动来说是非常粗糙的;第二,文献中没有考虑气泡表面张力和液体固体混合相的粘性对气体运动的影响;第三,文献[1]中气体运动的粘性系数 Z 是根据单个气泡的运动规律确定的,在推导过程中认为气体的粘性由气泡周围介质的阻

* 文献[1]中物理量 A 相应的表达式有误,现已经改正。

抗和气泡初始半径所控制。这个结论有些牵强，因为不可压缩流体中的气泡也是可以变形的，而在文献中若气泡周围流体不可压缩，气体运动的粘性系数 Z 为无穷大，气泡在动荷载作用下将不变形，这与理论和试验结果都不符合。

3 饱和土中气泡运动的合理描述

3.1 气泡运动方程描述

理论和试验结果^[4-7]都表明可压缩流体中气泡的运动与流体的可压缩性、气泡表面张力和可压缩流体的动力粘性系数有密切的关系。不考虑气泡中气体的波传播过程，对于无限域流体介质中单个气泡的运动规律可以用以下偏微分方程组来描述

$$\begin{cases} \frac{\partial d_{23}}{\partial t} + U \frac{\partial d_{23}}{\partial r} + d_{23} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{2d_{23}U}{r} = 0 \\ d_{23} \left[\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} \right] + \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 U 代表径向运动速度。而气泡壁 $r = R(t)$ 处的连续条件和初、边值条件为

$$U(r = R(t), t) = \dot{R} \quad (6)$$

$$p(r \rightarrow \infty, t) = p(r \geq R, 0) = \text{const} \quad (7)$$

考虑到气泡壁运动速度与液体固体混合相中波传播速度相比很小，可以近似求出以下的关系式(详细推导过程见文献[5~7,9])

$$\left(1 - \frac{R}{c_{23}}\right)R\dot{R} + \frac{3}{2}\left(1 - \frac{R}{3c_{23}}\right)\dot{R}^2 = \frac{1}{d_{23}}\left(1 + \frac{R}{c_{23}} + \frac{R}{c_{23}}\frac{d}{dt}\right)[p_B - p] \quad (8)$$

其中： p 为气泡周围液、固混合相中的压力， $c_{23}^2 = dp_{23}/d_{23}$ 为混合相中的声速的平方。考虑表面张力的作用以及液、固混合相粘性的影响， p_B 可以表示为

$$p_B = p_1 - \frac{2\epsilon}{R} - \frac{4}{R}d_{23}\dot{R} \quad (9)$$

上式表示气泡壁处径向应力的连续条件，其中 ϵ 、 d_{23} 分别为气泡表面张力系数和液、固混合相的动力粘性系数， p_1 为气泡内气体的压力，它与初始压力 p_0 和气泡半径的关系为

$$p_1 = p_0 \left[\frac{R}{R_0} \right]^{-3k} \quad (10)$$

式(8-9-10)联立，根据外荷载 p 便可以确定气泡的运动规律。

3.2 气泡半径无穷大时极限情况讨论

在气泡尺寸为无穷大时，式(8)相应地简化为

$$\left(1 - \frac{R}{c_{23}}\right)\dot{R} = \frac{1}{d_{23}c_{23}} \frac{d(p_B - p)}{dt} \quad (11)$$

不考虑气泡表面张力的作用以及液、固混合相运动的粘性，在 $R/c_{23} \rightarrow 0$ 条件下，上式进一步简化为

$$\dot{R} = \frac{1}{d_{23}c_{23}} \frac{d(p_1 - p)}{dt} \quad (12)$$

假设 $d_{23}c_{23}$ 为常数，上式对时间积分一次，便可以得到

$$\dot{R} = \frac{p_1 - p}{d_{23}c_{23}} + \text{const} \quad (13)$$

上式即为文献 [1] 确定气体粘性系数 Z 的前提。

4 气体运动影响因素定量分析

方程 (8) 的自变量为气泡半径 R , 其数值非常小, 用数值求解 R 的时间变化关系比较麻烦, 为了求解方便, 我们用气体的密度来描述气泡的运动方程 (8), 考虑到式 (9) 以及下式

$$R = R_0 \left(\frac{d_1}{d_{10}} \right)^{-1/3} \quad (14)$$

则式 (8) 可以整理为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3} R_0^2 d_{10}^{2/3} c_{23} d_1^{5/3} \dot{d}_1 + \frac{1}{9} c_{23}^{-1} R_0^3 d_{10} c_{23} d_1^3 \dot{d}_1 \dot{d}_1 + 4 c_{23}^{-1} R_0 d_{10}^{1/3} c_{23} d_1^{4/3} \dot{d}_1^{3/4} \dot{d}_1 \\ & - \frac{1}{6} c_{23}^{-1} R_0^3 d_{10} c_{23} d_1^4 \dot{d}_1 - \frac{11}{18} R_0^2 d_{10}^{2/3} c_{23} d_1^{8/3} \dot{d}_1 + p_{10} d_{10}^k d_1 - 2 R_0^{-1} d_{10}^{1/3} d_1^{1/3} \\ & + \frac{4}{3} c_{23}^{-1} d_1 \dot{d}_1 + \left(k - \frac{1}{3} \right) p_{10} R_0 d_{10}^{1/3-k} c_{23}^{-1} d_1^{-4/3} \dot{d}_1 - R_0 d_{10}^{1/3} c_{23}^{-1} d_1^{7/3} \dot{p} \\ & - \frac{16}{9} c_{23}^{-1} R_0 d_{10}^{1/3} c_{23}^{-1} d_1^{7/3} \dot{d}_1 + \frac{1}{3} R_0 d_{10}^{1/3} c_{23}^{-1} d_1^{7/3} \dot{d}_1 p - p = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

上式中第六项为气泡内气体的压力, 含 e 的项为表面张力项, 含 c_{23} 的项为气泡周围介质的粘性效应项, 含 p 和 \dot{p} 的项为外荷载项, 其余的为气泡局部运动的惯性项。

与式 (15) 相对应的初始条件为

$$d_1|_{t=0} = d_{10} \left(\frac{p_{10}}{p_0} \right)^{1/k} \quad (16)$$

$$p_1|_{t=0} = p_{10} = \frac{2e}{R_0} + p_0 \quad (17)$$

根据给定的 $p(t)$ 关系式, 式 (15) 可以应用 Runge-Kutta 法进行数值求解。为了模拟爆炸荷载, 本文中取 $p(t)$ 为常见的有升压时间的三角形荷载进行分析, 其中峰值压力为 1 MPa , 升压时间为 5 ms , 正压作用时间为 100 ms 。

取气体、液体和固体初始状态下的体积含量分别为 0.02 、 0.30 和 0.68 , 密度分别为 1.29 、 1000 、 2650 kg/m^3 , 声速分别为 340 、 1500 、 4500 m/s 。在液体和固体变形不太大的情况下可以近似求出 $c_{23} = (T_{20} c_{20} + T_{30} c_{30}) / (T_{20} + T_{30}) = 2145 \text{ kg/m}^3$; 考虑式 (3) 可以近似求出: $c_{23} = A / c_{23} = 1769 \text{ m/s}$ 。以下若不作强调, 各相的材料性质以及外荷载参数取值不变。

4.1 气体运动方程 (15) 的简化

我们考察式 (15) 中惯性项、表面张力项、粘性效应项和气泡内气体应力项对整个式子的贡献。考虑到气泡半径不相同, 气泡的初始密度不相同, 我们用气体的变形来进行比较, 气体的变形可以表示为

$$X = 1 - \frac{d_{10}}{d_1} \quad (18)$$

气泡初始半径分别取 0.00002 、 0.0001 、 0.0005 m (与平均气泡半径 0.0001 m 分别相差 5 倍), 表面张力系数取水与空气的表面张力系数 $e = 0.075 \text{ N/m}$, 参考文献 [1], 气泡周围介质的粘性系数取 $Z_{23} = 200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。图 1 为初始半径分别取 0.00002 、 0.0001 m 计算结果, 图中纵坐标代

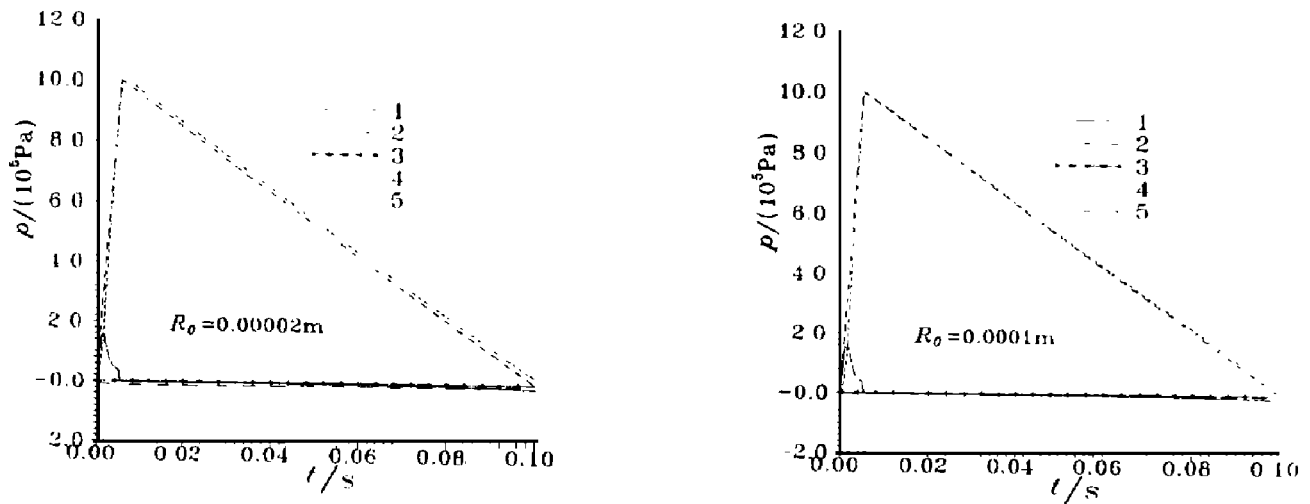


图 1 方程 (15) 的简化

Fig 1 The simplification of Eq 15

表应力, 图中曲线 1 2 3 4 5 分别代表粘性效应项、表面张力项、惯性项、气泡内气体应力项和外荷载项。从图中可以看出周围介质运动的惯性项和表面张力项非常小, 而粘性项和气泡内气体应力项的数值却要大得多。这种现象随着气泡初始半径的增大而越发明显, 比如初始半径取 0.0005m 时, 惯性项和表面张力项的大小分别仅为外荷载项的 0.01% 左右。图 2 为不同初始气泡半径时气体应变的时程曲线, 由图中可以看出在我们所关心的气泡半径范围内气泡半径的影响也很小, 气泡半径相差 25 倍而气体应变的相对误差在 4% 以内。图 3 为初始半径取 0.0001m 情况下, 取不同大小的表面张力系数时, 气体应变的相对误差时程曲线 (与表面张力系数 0.075N/m 相比), 图中 e 表示相对误差。从图中可以看出改变表面张力系数对气体应变的影响也很小。改变外荷载特征 (荷载峰值、正压作用时间以及升压时间), 也可以得出相同的结论。这说明可以忽略惯性项和表面张力项的影响, 而且可以不考虑饱和土内气泡初始半径的影响。

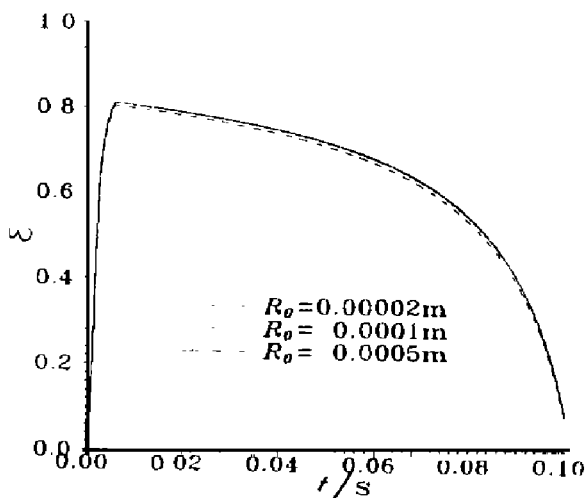


图 2 气泡半径变化对气体应变的影响

Fig 2 The influence to gas strain by the bubble radius

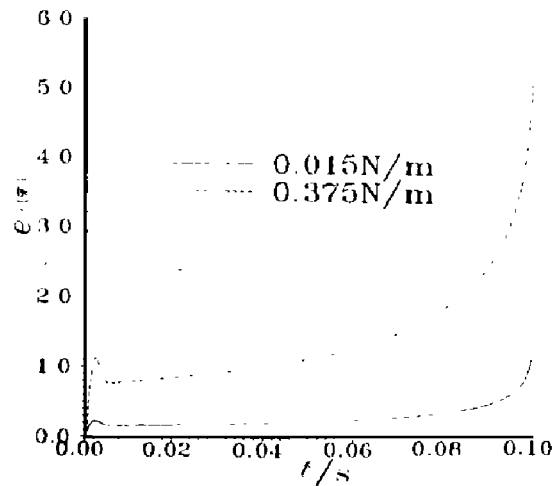


图 3 气泡表面张力对气体应变的影响

Fig 3 The influence to gas strain by surface tension of the bubble

上面结论使得我们以后的分析过程可以大大简化,尤其是在试验上,因为显微观察确定出的气泡半径是很粗糙的,它只能是一个范围,而且分布规律也不清楚。

4.2 气泡周围介质压缩性对气体运动的影响

在式(15)中,为了模拟气泡周围介质不可压缩,我们假设 $c_{23} \rightarrow \infty$, 这样式(15)中含 c_{23} 的项全部为零,然后与取接近真实值的结果进行比较。

图4是初始气泡半径为 $0.0001 \sim 0.0005\text{m}$ 时的一组计算结果的时程曲线,其中纵坐标 e 代表不可压缩条件下的气体变形与可压缩条件下的气体变形相对误差的绝对值。从图中可以看出,两种气泡半径条件下的误差的最大值都小于 1% ,而且发生于荷载的作用初期,可见气泡周围介质的压缩性对气体运动的影响也可以忽略。此外还计算了其它初始气泡半径和荷载形式的情况,计算结果表明在所关心的气泡半径范围内,气泡周围介质压缩性的影响可以不考虑。不考虑周围介质压缩性的影响可以使得式(15)进一步简化。值得注意的是在确定饱和土总的应力应变关系时由于气体体积含量很小,我们还是要考虑液体和固体压缩性带来的变形。

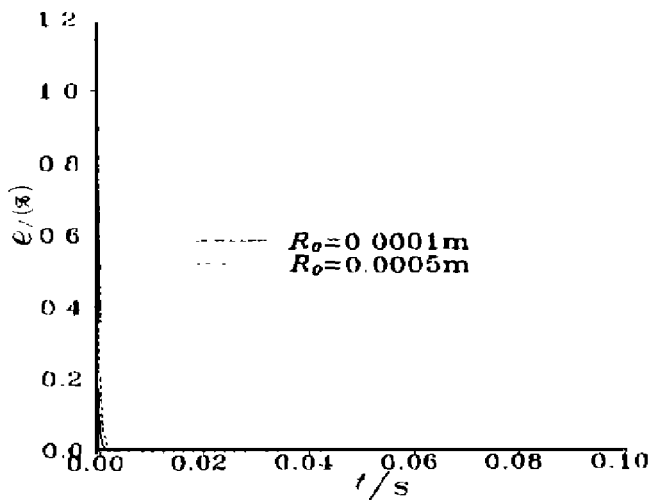


图4 气泡周围介质压缩性的影响

Fig. 4 The influence of the compressibility of the media around the bubble

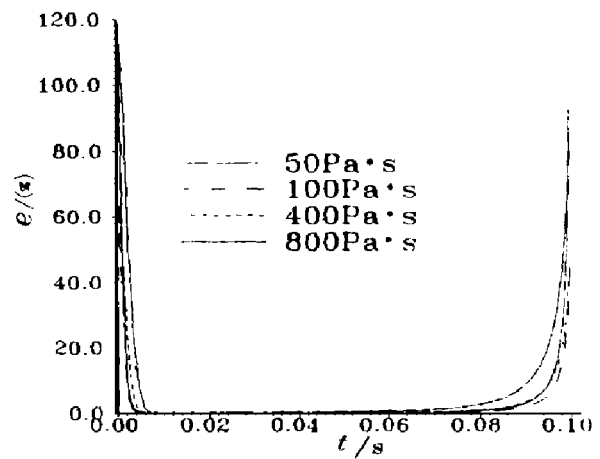


图5 粘性系数的影响

Fig. 5 The influence of the viscosity

4.3 气泡周围介质的粘性系数对气体运动的影响

假设气泡周围介质的粘性系数分别为 $50, 100, 200, 400, 800 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 其它参数不变,图5为考虑周围介质压缩性情况下取不同粘性系数时气体应变的时程曲线与取 $200 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 时的计算结果的相对误差。从图5中可以看出,气体周围介质粘性系数的变化对气体的运动有很大的影响,改变其它参量时也可以得出相同的结论。

5 结论

通过以上分析,我们可以得出如下的结论:

1 爆炸荷载作用下,饱和土介质中气体的运动主要是由气泡周围介质的粘性和气体本身的压缩规律所控制,气泡的表面张力、气泡周围介质的压缩性和气泡局部膨胀压缩过程中的惯性对气体的运动影响很小,可以忽略不计,这样可以将式(15)简化为

$$p = p_0 \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^{\gamma_1} + \frac{4}{3} \frac{\eta}{d_1} \dot{d}_1 \quad (19)$$

式 (19) 与式 (1) 有相似的结构, 但对气泡运动粘性效应的描述上物理意义却不尽相同, 式 (1) 的粘性系数由气泡周围介质的压缩性来控制, 这与本文中的数值分析结果相悖, 本文的数值分析表明气泡运动的粘性效应由气泡周围介质的粘性效应来控制。

2 本文计算结果表明在饱和土这种特定的介质中, 气泡初始半径的变化对气体的运动规律影响很小, 这使得我们的试验和理论研究变得更加简单, 另一方面也纠正了文献 [1] 中气体运动的粘性与气泡初始半径的线性关系。

3 本文中只是考虑单个气泡的运动规律, 没有涉及到多个气泡运动时的相互作用问题, 在初始气体含量不大的情况下, 考虑到气泡和周围介质压缩性的巨大差异, 可以忽略气泡间的相互作用^[9]。

参 考 文 献

- 1 Ляхов Г.М. Основы Динамики Взрывных Волн в Грунтах и Горных Породах. Москва: Недра, 1974. 100~ 110
- 2 中国人民解放军 89002 部队. 中国防护工程科研报告. 饱和土力学性质试验研究. 1993
- 3 大连理工大学力学所及上海地下建筑设计院. 土壤与结构相互作用动力有限元分析及 DIASS 程序系统. 1990
- 4 Watanabe M, Prosperetti A. Shock Waves in Dilute Bubbly Liquids. *J Fluid Mech*, 1994. 274. 349~ 381
- 5 Prosperetti A, Crum L A. Comander; Nonlinear Bubble Dynamics. *J Acoust Soc Am*, 1988. 83. 502~ 515
- 6 Keller J B, Kolodner I I. Damping of Underwater Explosion Bubble Oscillations. *J Appl Phys*, 1956. 27. 1152~ 1161
- 7 赵跃堂. 爆炸荷载作用下三相饱和土中波传播及其与结构的相互作用问题研究: [博士学位论文] 南京: 南京工程兵工程学院, 1996
- 8 Ляхов Г.М. Волны в Грунтах и Пористых Многокомпонентных Средах. Москва: Наука, 1982. 51~ 68
- 9 Tam M J, Bankoff S G. Propagation of Pressure Waves in Bubbly Mixtures. *Phys Fluids*, 1984. 27. 1362~ 1369

ANALYSIS ON SOME INFLUENCE FACTORS TO GAS MOTION UNDER EXPLOSIVE LOADING IN THREE-PHASE SATURATED SOIL

Zhao Yuetang, Qian Qihu, Wang Mingyang

(Nanjing Engineering Institute, Nanjing 210007)

ABSTRACT The gas content is the most important influence factor for explosive wave propagation in three-phase saturated soil; however, up to now it is inadequate to describe the gas motion theoretically in this media. In the paper, some influence factors to gas motion, including the surface tension, the viscosity and compressibility of the media around the bubble etc., are investigated for the increasing hardening part on the stress-strain relation of the three-phase saturated soil; the influence degree of these factors is studied by numerical method. The numerical results show that the influence of the surface tension and the compressibility of the media around the bubble can be neglected, and the compressibility of gas and the viscosity of the media around the bubble are the main influence sources.

KEY WORDS three-phase saturated soil; explosive wave; gas motion