

爆炸波作用下三相饱和土本构研究^{*}

赵跃堂 钱七虎 王明洋

(南京工程兵工程学院 南京 210007)

摘要 基于对爆炸荷载作用下三相饱和土宏观试验现象的综述,并结合以往对饱和土中气体运动规律的分析,对一维爆炸波作用下三相饱和土本构关系进行了描述。

关键词 爆炸波 三相饱和土 本构关系

中图法分类号 O 359 O 382 2

1 引言

三相饱和土是由固体颗粒、水和少量封闭气体组成的多相多组分介质,固体颗粒相互接触形成骨架,水和少量的气体充满整个骨架空隙。由于三相饱和土组成的特殊性,使得其在爆炸冲击荷载作用下的动力特性与其它介质,如非饱和土、岩石等地质材料有着明显的不同。

最早对饱和土动力模型的研究是 Biot^[1-4]完成的。后来人们逐渐发现该模型对地震等低频荷载有良好的适应性,但对爆炸荷载的作用则有些牵强,这主要是由于 Biot 理论没有考虑饱和土中气体的存在对饱和土本身变形的重大影响。60年代,前苏联学者 Г.М.Ляхов 对三相饱和土在爆炸荷载作用下的动力性态无论是在试验上还是在理论上都作了充分的研究^[5-6],并首次提出了三相饱和土介质的流体动力学模型,该模型对三相饱和土的适用性已为爆炸波量测和土的可压缩性试验结果所证实。然而该模型也存在一定的局限性,这主要表现在以下几个方面:第一,该模型无法考虑骨架的作用,其实在一定的荷载范围内,骨架的影响是很大的;第二,该模型对饱和土粘性效应的考虑非常粗糙^[7]。文献[8]对饱和土介质进行了大量的试验研究,得出许多爆炸冲击荷载作用下饱和土动力响应的第一手资料。但在理论分析时没有将气体作为一相进行单独考虑。由于在冲击爆炸荷载作用下,饱和土中气体含量对应力波在其中的传播、衰减以及突跃形成和消失等现象起着极为重要的作用,因此非常有必要将气相作为一单独相来考虑。文献[9]对三相饱和土的动力模型进行了分段描述,但其中有一些描述还不够完善,尤其是当荷载大于临界应力时的描述不够精确,只是沿用了文献[6]的结论。此外,文中只是独立地对各段进行了描述,还缺乏两段之间衔接关系的描述。

2 三相饱和土的变形机理及宏观试验现象补充

2.1 爆炸荷载作用下三相饱和土的变形机理简述

三相饱和土的总变形取决于各个单相的变形,由于各个单相的压缩性和变形特征有所不同,故在加载过程的不同阶段,不同相的变形可能占据主导地位。当荷载比较小时,有少量与外

^{*} 国家自然科学基金资助(批准号 5979017)。

赵跃堂:男,1967年生,博士,讲师。

1996-09-11日收到原稿,1997-03-10收到修改稿。

界连通的气体溢出土体, 与外界不连通的气体以气泡形式存在并被压缩。由于气体的含量不大, 气体对压缩的反抗比较小, 液相因发生流动产生的体积应变也很小, 因此骨架对压缩的抗力将占据主要地位, 经典土力学认为饱和土骨架的变形与有效应力有着密切的关系; 随着荷载逐渐增大, 气体已完全处于封闭状态, 由于气泡所受压力逐渐增大及其所占据的体积逐渐减少, 液相开始被压缩并产生体积变形, (这不同于 Biot 理论中的流体不可压缩假设, 在爆炸荷载作用下, 荷载比较大时一般要考虑液体和固体颗粒的体积变形), 此时饱和土中的每一相都参与对压缩的反抗; 随着荷载的进一步增大, 构成骨架的矿物颗粒的压缩变形开始明显。在几个 MPa 大小的荷载作用下, 该压缩变形机理已被试验所证实^[6-10]。

2.2 爆炸荷载作用下三相饱和土宏观试验现象补充

文献 [9] 已对爆炸波作用下三相饱和土的宏观试验现象进行过总结, 这里作一些补充。

2.2.1 文献 [6] 通过试验证明, 在实际条件能够遇到的范围内, 饱和土中粒径组成与孔隙度的改变对波传播参数的影响不大, 而起决定作用的是饱和土中封闭气体的含量。

2.2.2 爆炸荷载作用下饱和土应力应变关系曲线在某一应力处会发生从递减硬化形式向递增硬化过渡, 如图 1* 中的 p_A 点, 我们暂且用分界应力来定义 p_A 。图 1 是文献 [6] 中的一组饱和土应力应变关系实测曲线。爆炸波传播试验表明分界应力的大小与饱和土中初始气体含量有最直接的关系, 文献 [8] 根据试验结果给出了上海地区淤泥质饱和土的分界应力的近似计算公式如下

$$p_A = 25250T_{i0} - 175000T_{i0}^2 \quad (1)$$

其中: p_A 为分界应力, 单位 kPa; T_{i0} 为初始气相含量。

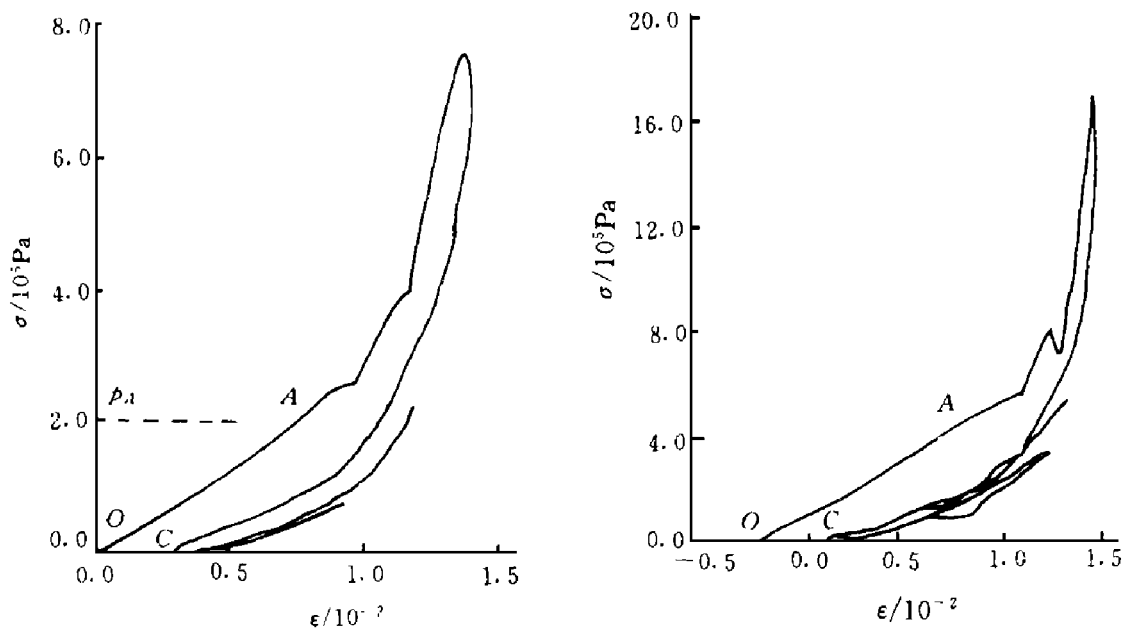


图 1 三相饱和土总应力应变关系试验曲线 (文献 [8])

Fig. 1 Measured total stress-strain relation for three-phase saturated soil (Ref 8)

* 图 1 中的应力应变关系是在采用软硬环组合管体结构的平面波加载器中完成的, 目的是为了在荷载作用过程中尽可能地消除管体边壁摩擦对试验的影响。初始状态时图 1 中 a 图的气体体积含量分别约为 0.01, b 图的气体含量不详, 其它详细的情况可参见文献 [8]

关于饱和土的分界应力的近似计算,文献[5]也给出了近似的描述。

2 2 3 在三相饱和土介质中,当气相含量接近于零时,会出现应力波时程曲线逐渐变陡,最终形成激波的现象;而随着气相含量的增加,在一定的距离上便可能出现突跃消失的现象,即冲击波转变为连续的应力波。关于这一现象解释,要从饱和土的各相的变形特征谈起。首先,饱和土中气、液和固体的压缩性相差很大,尤其是气相的压缩性比其它两相大几万倍,这样在应力波传播过程中,必然引起各相间局部的相互作用,这种局部运动是产生突跃消失现象的主要原因。如果我们认为饱和土中的气体是以相互不连通的小气泡形式存在的,那么这些小气泡在液、固两相混合物中的局部膨胀与压缩运动可以近似认为是一个简单的有阻尼效应的单自由度振荡系统,因为在宏观上这种局部运动的作用与粘性的作用相似,因此文献[6]将其称为气体的粘性。气体含量小,这种现象就不明显,在完全饱和土中的应力波传播问题与液体中相似;气体含量大,这种现象就不可忽略。文献[11-12]在试验中观测到突跃消失现象发生开始时的荷载比应力应变曲线曲率符号改变时的荷载要大,这证明饱和土在应力应变关系的递增硬化段必须考虑介质的粘性效应。

2 2 4 在三相饱和土中,孔隙内充满水和微量的空气。在爆炸波作用时,由于加载速率比较大,波的作用时间很短(几 ms 到几百 ms),在波的作用过程中孔隙内的水来不及从孔隙中排出,这体现了荷载作用瞬时性所带来的重要影响。

2 2 5 在三相饱和土中,爆炸波通过后有余应变发生^[8-13],但比非饱和土要小得多,而且当荷载大于分界应力后再加、卸载时,残余应变几乎不再增加^[8],见图 1 残余应变发生意味着荷载作用过程中必须发生不可恢复的体积变形,因为这是在不排水条件下的残余应变。我们知道,即使在相当大的荷载作用下,固体颗粒和液体产生的不可恢复的体积变形也非常小,因此只有气相来承担。文献[8]在试验中观察到爆炸波作用过后,饱和土试样的饱和度将提高就证明了这一点。荷载大于分界应力后必须根据气体含量的变化调整各组分的含量,本构关系也必须以此含量进行描述,气体含量的变化可以通过试验根据残余变形的大小近似确定。

2 3 本构关系描述的简化假设

描述三相饱和土本构关系,为了不过于复杂,在不影响精确性的情况下,我们特做如下假设:

- (1)三相饱和土是一种细散的各相同性的连续介质;
- (2)相间不发生化学反应,不考虑相间的热交换现象和熵的变化;
- (3)爆炸波作用时,边界条件考虑为不排水边界条件;
- (4)荷载大于分界应力后,对波传播起主要作用不再是骨架的作用,此时气体、液体和颗粒本身的体积变形将控制波的传播规律;
- (5)荷载大于分界应力后残余应变不再增加,且气体都以球形气泡形式存在;
- (6)考虑固相和液相间的相对运动非常小^[9],将用总应力法来描述饱和土的变形关系。

3 三相饱和土本构关系的描述

综上所述,对三相饱和土本构关系的描述我们可以分段进行,以分界应力 p_A 为界。在压力小于分界应力时采用粘弹塑性模型^[9-14];当压力大于分界应力时,则采用非线性粘弹性模型。

3 1 当压力小于分界应力时

在该荷载段进行本构描述时,认为三相饱和土中存在着两条临界的非线性的压缩曲线,它

们分别对应于动力加载 ($\dot{X} \rightarrow \infty$) 和静力加载 ($\dot{X} \rightarrow 0$)^{*}, 在这两条曲线之间是变形速度 $\dot{X}$ 为中间值的曲线, 见图 2 粘塑性介质的描述采用图 3 所示的三参数模型, 其中的弹簧可以是非线性弹簧, 动力曲线相应于第一个弹簧 1 的变形, 静力曲线相应于两个弹簧的总变形, 第一个弹簧的压缩是在动力 (冲击) 荷载施加的瞬间开始发生的, 这时第二个弹簧的压缩还没有发生, 由于存在阻尼器, 第二个弹簧的压缩是在有限的时间过程中发生的。

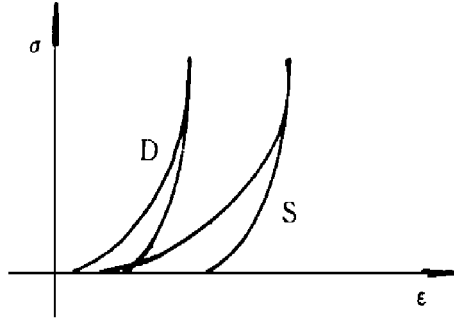


图 2 加载与卸载关系 (D- 动力; S- 静力)

Fig. 2 Loading and unloading relationship
(D- dynamic S- static)

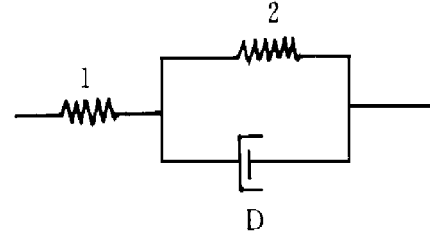


图 3 粘塑性模型示意图

Fig. 3 Viscoplastic model

图 3 所示模型可以用以下的微分方程组进行描述

$$\dot{X} = \dot{X}_1 + \dot{X}_2 \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_1 = \epsilon_2 + \epsilon_D \quad (3)$$

$$\dot{X}_1 = \dot{X}_D \quad (4)$$

$$\epsilon_D = \int \dot{X}_D dt \quad (5)$$

式中: 下标 t 1 2 和 D 分别指总体、弹簧 1、弹簧 2 和粘滞阻尼器元件; “·” 代表对时间的导数; Z 代表粘滞阻尼器的动力粘性系数。

令弹簧 1 和弹簧 2 的压缩方程式分别为

$$\epsilon_1 = f_1(X_1, X_{m \max}, k_1) \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = f_2(X_2, X_{m \max}, k_2) \quad (7)$$

相应地

$$\dot{X}_1 = F_1(\epsilon_1, X_{m \max}, k_1) \quad (8)$$

$$\dot{X}_2 = F_2(\epsilon_2, X_{m \max}, k_2) \quad (9)$$

上式中: k_1, k_2 分别为弹簧 1 和 2 加卸载的指示变量; $X_{m \max}, X_{m \max}$ 为该时刻所在的加卸载循环中弹簧 1 和 2 所达到的最大应变。

当 $|\dot{\epsilon}_1| \rightarrow \infty$ 时, 直接取弹簧 1 的压缩方程式作为模型的状态方程

$$\epsilon_1 = f_1(X_1, X_{m \max}, k_1) \quad (10)$$

当 $|\dot{\epsilon}_1|$ 为有限值时, 由式 (2)~ (5) 我们可以得到如下关系式

* 当研究与粘性有关的波动过程时, 需要考虑动力压缩与静力压缩曲线, 此时, 我们必须假定介质的组分 (按质量计的各组分含量) 在压缩过程中不发生变化。在冲击荷载下, 这个条件总是成立的。在常规的土力学实验中, 通常都是在把水和空气从试件中排出的条件下来确定静力压缩曲线的, 类似的曲线不适宜用来描述与解波动问题时所考虑的静力压缩相应的介质的极限状态, 因为试件组分不变时所确定的介质的可压缩性与水和空气可能从自由孔隙中排出的条件下所得到的可压缩性有很大的不同。

$$\dot{X} = e_i \cdot \left[\frac{df_1}{dX} \right]^{-1} + \frac{e_i}{Z} - \frac{f_2(X - X_i, X_{max}, k_2)}{Z} \quad (11)$$

$$\dot{X} = F_1(e_i, X_{max}, k_1) \quad (12)$$

(10)、(11)、(12)三式的组合便构成了图 3 所示模型的状态方程

3.2 当应力大于分界应力时

我们用类似ЛЯХОВ 的流体动力学理论来描述饱和土在该段的变形特征。由于气泡与周围介质的相互运动,因此我们可以认为饱和土中每一相所受的压力可以是不相等的。爆炸波在饱和土中传播时,对于固相和液相,认为符合泰特 (Tait) 方程,气相对压缩的反抗可以用普阿松绝热方程所确定的非线性弹簧和粘滞阻尼器并联来描述^[7]。

假设图 1 中 C 点处气相、液相和固相的体积含量为 T_{lc} 、 T_x 和 T_{sc} , C 点处的总压力等于大气压 p_0 , 各组分材料参数与大气压条件下相同, 密度分别为 d_{l0} 、 d_{20} 和 d_{30} , 声速分别为 c_{l0} 、 c_{20} 和 c_{30} , 当前状态下固相、液相的压力与密度的关系可以分别表述为

$$p_2 - p_0 = \frac{d_{20}c_{20}^2}{V_2} \left| \left[\frac{d_2}{d_{20}} \right]^{V_2} - 1 \right| \quad (13)$$

$$p_3 - p_0 = \frac{d_{30}c_{30}^2}{V_3} \left| \left[\frac{d_3}{d_{30}} \right]^{V_3} - 1 \right| \quad (14)$$

式中: V_2 和 V_3 分别代表液相和固相变形特征的常数; p_2 和 p_3 分别代表液相和固相当前状态下所受到的压力。

从文献 [14] 可以知道, 在气相含量不大的情况下, 固相和液相所受到的压力可以认为与总压力 p_1 是相等的, 即

$$p_2 = p_3 = p_1 \quad (15)$$

气相所受到的压力 p_1 和总压力 p_1 的关系可以用下式描述^[14]

$$p_1 = p_0 \left[\frac{d_1}{d_{l0}} \right]^{V_1} + \frac{4}{3} Z d_1 \dot{d}_1 \quad (16)$$

式中: Z 为气泡周围介质的动力粘性系数。

式 (16) 与文献 [6] 的描述形式非常相似, 但两者物理意义上有着很大的区别, 详细讨论见文献 [7]。

饱和土总的变形量为三相变形量之和

$$\frac{d_0}{d} = T_{lc} \frac{d_{l0}}{d_1} + T_x \frac{d_{20}}{d_2} + T_{sc} \frac{d_{30}}{d_3} \quad (17)$$

通过联立式 (13)、(14)、(15)、(16) 和 (17), 即可完成对三相饱和土该荷载段本构关系的描述。

3.3 分界应力处本构方程的衔接

在应力小于分界应力 p_A 以前, 固体颗粒和液体总的变形量与总变形量相比可以忽略不计, 因此我们假设在该荷载段, 固体颗粒和液体不可压缩, 在 A 点饱和土总的压力为分界压力 p_A , 总密度及其时间变化率为 d_1 和 $\dot{d}_1$, 根据图 1 中 O、A 和 C 三点间的关系可以近似写出 A 点气体的密度及其时间的变化率 d_{1A} 和 $\dot{d}_{1A}$ 。设 C 点的应变为 X , 相应地各相的体积含量为

$$T_{lc} = \frac{T_{l0} - X}{1 - X}; \quad T_x = \frac{T_{20}}{1 - X}; \quad T_{sc} = \frac{T_{30}}{1 - X} \quad (18)$$

在 A 点气体的密度为

$$d_{11} = \frac{d_1}{A d_1 + B} \quad (19)$$

$$\text{式中} \quad A = \frac{T_{1c} - 1}{T_{1c} d_{10}}; \quad B = \frac{d_0}{(1 - X) T_{1c} d_{10}}; \quad X = X \quad (20)$$

时间变化率 d_{11} 可以由式 (16) 求出。

3.4 模型中元件参数的确定

3.4.1 弹簧元件 1 参数的确定

从图 3 可知, 在无升压和降压过程的突加冲击荷载作用下 ($|\dot{\epsilon}_1| \rightarrow \infty$), 弹簧元件 2 由于粘滞阻尼器的作用而不产生变形, 此时所得到的总的应力应变关系曲线就是弹簧 1 的应力应变关系曲线, 即

$$\epsilon_1 |(\dot{\sigma}_1 \rightarrow \infty) = f_1(X, X_{m, \max}, k_1) \quad (21)$$

关于无升压过程的突加冲击荷载的实验设计, 可以参考文献 [6]

3.4.2 弹簧元件 2 参数的确定

在静力荷载作用下 ($X \rightarrow 0$), 图 3 可简化为弹簧 1 和弹簧 2 的串联, 由于弹簧 1 的应力应变关系已知, 我们便可以方便地得到弹簧 2 的应力应变关系。

设静力荷载作用下得到的模型的总的应力应变关系为

$$\epsilon_1 |(\dot{\sigma}_1 \rightarrow 0) = f_s(X, X_{m, \max}, k_1) \quad (22)$$

上式中: $X_{m, \max}, k_1$ 的意义同前, 下标“s”表示为静力荷载。

在弹簧 1 压缩方程式 (对应于图 2 中的动力曲线) 已知的前提下, 对同一土样进行静力试验, 静力试验时要求最大应力峰值 (要小于分界应力) 与动力试验 ($X \rightarrow \infty$) 相同, 加、卸载规律也相同, 这时在加、卸载的不同阶段同样大小的应力与相对应的静、动力试验的应变之差的一一对应关系便是弹簧 2 的压缩变形关系。

3.4.3 阻尼元件 D 参数的确定

我们假设加卸载过程中, 土的粘性系数是相等的, 并认为弹簧 1 和弹簧 2 的变形关系已经知道。做一组有升压时间的荷载作用时的饱和土的波传播实验, 通过试验我们可以近似得到同一点处关于 ($\epsilon_1, \epsilon_2, X, X$) 的四条时程曲线, 我们选取某一时刻同一点处的一组 ($\epsilon_1, \epsilon_2, X$ 和 X) 来研究粘滞系数 Z 的确定方法。

由于弹簧 1 的应力值大小与总应力相等, 我们首先可确定出 X 的数值, 总应变 X 减去 X 便得到了 X 的值, 由 X 可以确定出弹簧 2 上的应力 ϵ_2 , 总应力 ϵ_1 减去 ϵ_2 得到阻尼器上的应力 ϵ_0 , 这样可得出粘性系数的表达式为

$$Z = \frac{\epsilon_1 - f_2(X - X, X_{m, \max}, k_2)}{X - \epsilon_1 \left| \frac{df_1}{dX} \right|^{-1}} \quad (23)$$

根据多组 ($\epsilon_1, \epsilon_2, X, X$) 值, 可以求出多个 Z 值, 我们可以求出一个平均的 Z 值作为所求。文献 [6] 在确定 Z 时, 假设 $d\epsilon_1/dX$ 和 $d\epsilon_2/dX$ 皆为常数, 而且要求 X 也为常数, 这在试验中很难满足。

4 结论和建议

(1) 基于对试验资料的分析, 对横跨整个荷载段的三相饱和土介质的本构模型进行了描

述, 其中对气相进行了单独的考虑, 使其可用于分析气体对波传播特性的重要影响。

(2) 虽然没有将固相骨架的影响单独进行考虑, 但对本构关系进行分段描述则是考虑了骨架的影响, 因为在分界应力以前液体和固体的体积变形可以忽略不计, 文献 [6] 所给出的本构关系根本没有考虑固相骨架的作用。

(3) 考虑到爆炸荷载作用时间很短, 本模型对三相饱和土介质中的每一单相的运动与变形没有详细考虑, 但对于分析三相饱和土介质中的波传播现象以及确定三相饱和土介质结构上的荷载是完全可以胜任的。

(4) 本模型对三相饱和土介质在爆炸冲击荷载作用下可能出现的液化现象没有考虑, 这有待于以后进一步的深入研究。

参 考 文 献

- 1 Biot M. A. J Appl Phys 1941, 12 155~ 164
- 2 Biot M. A. J Acoust Soc Am, 1956 28 168~ 178
- 3 Biot M. A. J Acoust Soc Am, 1956 28 179~ 191
- 4 Biot M. A. J Appl Phys 1962 33 1482~ 1498
- 5 Ляхов ГМ. Основы Динамики Взрыва В Грунтах И Жидких Средах. Москва 1964
- 6 Ляхов ГМ. Основы Динамики Взрывных Волн В Грунтах И Горных Породах. Москва 1974
- 7 赵跃堂, 钱七虎, 王明洋. 爆炸荷载作用下三相饱和土中气体运动的几个因素分析. 爆炸与冲击 (待发表)
- 8 工程兵科研三所. 饱和土力学性质试验研究. 防护工程科研报告. 1993 7
- 9 王明洋, 钱七虎. 岩土工程学报, 1995 117(6): 103~ 110
- 10 Prakash S. Soil Dynamics New York McGraw Hill Book Co 1981
- 11 Иванова Л. А., Кондратьева Т. Г., Шерстюк Н. Н. Физика Земли, 1969 (1): 21~ 37
- 12 Иванова Л. А., Кондратьева Т. Г., Шерстюк Н. Н. Физика Земли, 1970 (2): 21~ 29
- 13 骆文海. 土中应力波及其量测. 北京: 中国铁道出版社, 1985
- 14 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

STUDY ON CONSTITUTIVE RELATION FOR THREE-PHASE SATURATED SOIL UNDER EXPLOSION WAVE

Zhao Yuetang Qian Qihu Wang Mingyang

(Nanjing Engineering Institute, Nanjing, 210007)

ABSTRACT Based on review for the macroscopic experiments of three-phase saturated soil under explosive wave, added the investigation for the rules of gas motion, the constitutive relation of three-phase saturated soil is described.

KEY WORDS explosion wave, three-phase saturated soil, constitutive relation