

高饱和度饱和土中爆炸波的传播特性

穆朝民^{1,2,3,4}, 齐娟¹, 辛凯⁴

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001;

2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001;

3. 中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230026; 4. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要:利用 $\varphi 2.5 \times 5$ m 爆炸模拟装置进行饱和土接触爆炸模拟试验, 在获得爆炸波在饱和土自由场中传播的试验数据的基础上, 拟合出压力、动量、上升时间随比例距离变化的公式, 通过综合分析给出了饱和土中波传播的规律。理论分析揭示了饱和土中应力波传播时出现流体动力区和冲击波形成等性质, 建立了饱和土双线性递增硬化本构关系; 在饱和土试验中, 存在由冲击波向弹性波转化的分界压力, 这个分界压力是与介质性质有关的参数, 在不同的土中产生冲击波的条件不相同。高饱和度的饱和土中应力波在点爆炸条件下的三维弥散空间中也容易产生冲击波, 因此, 在同样的爆炸条件下, 饱和土中结构具有更大的破坏可能性。

关键词:爆炸力学; 饱和土; 自由场实验; 爆炸波

中图分类号: TU751.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0018-06

Characteristics of Blast Wave Propagation in Saturated Soil with High Degree of Saturation

MU Chao-min^{1,2,3,4}, Qi Juan¹, XIN Kai⁴

(1. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 23001, Anhui, China;

2. Key Lab of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Huainan 232001, Anhui, China;

3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

4. Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang 470123, Henan, China)

Abstract: The test simulating contact explosion in saturated soil was completed in the $\varphi 2.5 \times 5$ m pothole. Through the experiment, the data of the free-field in the saturated soil was obtained. The formulas of pressure, momentum and rise time with distance were fitted out based on a large number of test data. According to analysis of the test data, the spreading law of the wave in free-field of saturated soil was obtained. Theoretical analysis showed that saturated soil had the nature of liquid-dynamic area appearing and shock wave forming when the stress wave spread in the saturated soil. The bilinear progressively increasing-hardening constitutive relation in saturated soil was established. Dividing pressure was determined and that was the value from shock wave to elastic wave. Moreover, the diving pressure related to media character was different in various soils. Because shock wave was formed easily, the structures in saturated soils had much higher risk of failure under the same explosive conditions.

Key words: explosion mechanics; saturated soils; free-field experiment; blast wave

高饱和度饱和土基本上是一种由水和土骨架 2 相介质组成的一种介质, 其表现出的介质性质不同

收稿日期: 2009-06-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10632080); 国家自然科学基金(10402041, 10572134)

作者简介: 穆朝民(1977-), 男, 博士后, 主要从事工程安全与防护技术研究, (E-mail)chmmu@mail.ustc.edu.cn。

于土和水这2种介质性质的任何一种。高饱和度饱和土的含气量极少并且气泡呈封闭状态,当爆炸波在土中传播时,饱和土中的爆炸波传播规律有着鲜明的特点:由于波速高和压力衰减造成应力波的高频部分很容易传播,可以在爆炸近区和中区保持应力波阵面的陡峭特征。因而导致了高饱和度饱和土中结构极易产生强烈的震动并可能被破坏。因此对高饱和度饱和土中爆炸波传播特性的研究具有十分重要的意义。

20世纪70年代以来,美国、前苏联都加强了对常规武器的防护研究。Ляхов通过现场试验首次明确提出饱和土中的爆炸波传播与饱和土中的气体含量有最直接的关系^[1-3]。1971年美国空军武器试验室编写的“Protection from Nonnuclear Weapons”,1986年美国编写“Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons—TMS—855—1”,1980年Baker等人编写出的“A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures”,这些文献都对饱和土中工事抗常规武器爆炸效应的设计方法进行了探讨,取得一定的研究成果^[4-6]。中国学者赵越堂^[7]、王明洋^[8]、国胜兵^[9]、孙美凤^[10]、杨海杰^[11]、刘建新^[12]等对爆炸载荷作用下饱和土/砂的动力学问题进行了研究,尤红兵^[13]、陆建飞^[14]、夏唐代^[15]、李立云^[16]、蔡袁强^[17]、徐平^[18]等对饱和土的波动问题进行了研究。以上研究均取得了较大的成果,促进了饱和土波动力学的发展。其中赵跃堂,王明洋等利用 $\Phi 900$ 平面波加载器进行了饱和土实验并对所反映的波速变化规律进行了深入的分析。此实验对了解饱和土中波的传播规律和确定地下结构上的荷载也有很大的帮助。总参工程兵三所黄能法研究员进行了淤泥质饱和土中应力波传播的试验研究,摸索出大量有益的实验方法。但关于高饱和度饱和土动力学方面的研究尚不多见。

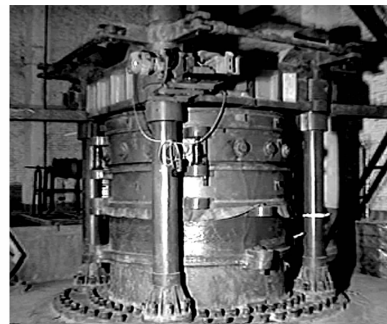
由于爆炸动荷载对土体的扰动较大和饱和土本身的特殊性和复杂性,因此国际上系统开展高饱和度饱和土中爆炸波的传播特性研究的较少。该文介绍了制作高饱和度饱和土的方法和步骤,在通过改进的 $\varphi 2.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的模拟爆炸装置内,采用逐层开挖法进行一系列高饱和度的饱和土样的自由场实验,得出了饱和土介质中爆炸波传播的规律和特征。理论分析揭示应力波在饱和土中传播时出现流体动力区、形成冲击波等性质,确立双线性递增硬化为饱和土的本构关系,根据实验测得的数据,拟合出压力、动量、上升时间随比例距离变化的公式。得到了

爆炸波在饱和土中的衰减规律。

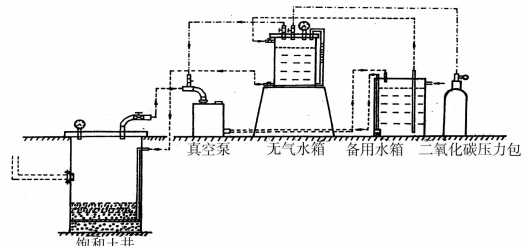
1 饱和土的试验研究方法

1.1 实验设备及饱和土样的制取

获得较高饱和度的饱和土难度较大,而且爆炸荷载对土体的扰动较大,因此系统开展饱和土爆炸荷载试验研究的较少,为保证饱和土的高饱和度和试验的可重复性,试验设备采用 $\varphi 2.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的模拟爆炸装置(如图1(a)),该设备直径2.5 m,地下部分深5 m,地上部分高4.0 m,设备使用厚1 m的钢筋混凝土浇筑成圆筒状,顶部设有反力架。经核算,该设备具有抗井内0.2 kg TNT炸药直接爆炸的能力,部分满足了饱和土试验的要求,为了完成饱和土试验,对设备进行了必要的改进(如图1(b))。实验采用真空反压制作饱和土样,利用真空泵真空抽气,使土体中气体含量减小而达到饱和目的。



(a) 模拟爆炸装置图



(b) 饱和土制作系统图

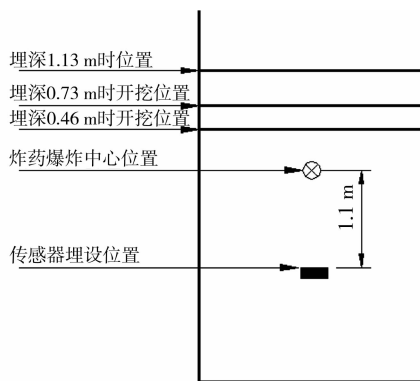
图1 试验装置

全系统密封饱和土样试验设备并设置高真空度的真空泵($6\times 10^{-2}\text{ Pa}$);制作含水量15%土样,在预定深度上埋置结构或传感器并分层夯实,每层填土使用格栅器进行控制土样密度均匀,(格栅器将 $\varphi 2.5\text{ m}$ 直径的圆分成12个等面积的格子,每个格子中填土重量相等);保持长时间对土样抽气以控制土样真空度,抽气时间不小于7 d;往真空土样内充制作好的无气水,充水速度不大于 $2\text{ m}^3/24\text{ h}$;真空状态静止置放时间大于15 d;回填土样爆炸试验形成的弹坑后再次真空抽气,充无气水并静放固结。

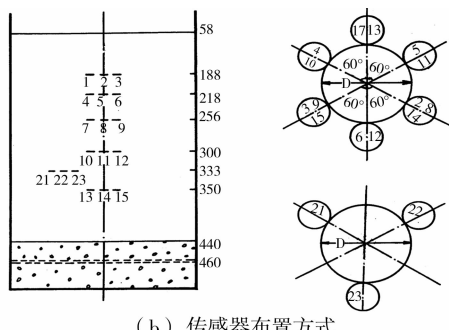
由于试验是 TNT 炸药直接作用于饱和土体,每次试验对饱和土体的扰动较大,所以要求每次爆炸后,土样必须重新回填抽气,试验中的土样经过烘干法测量饱和度在 97.5% 以上。

1.2 饱和土自由场试验

高饱和度饱和土(简称为饱和土)的自由场试验对研究饱和土在爆炸荷载作用下的饱和土介质性质、波传播规律、认识饱和土在高压作用下的动本构关系及其饱和土中结构荷载规律等都具有较大的指导意义。在高饱和度饱和土体内上下共埋设 5 层土压力传感器,同一层使用 3 个传感器,提高了数据成功率和精度。相邻上、下 2 层传感器不在同一方位角上(见图 2(b))以减少相邻 2 层传感器相互影响。保持爆心距为 1.10 m 时,采用逐层开挖法进行试验。药量为 50 g、100 g、200 g,装药埋深分别为 0.24 m、0.46 m、0.73 m、1.13 m。埋深至 1.33 m 时,为完全封密爆炸(见图 2(a))。



(a) 试验剖面图



(b) 传感器布置方式

图 2 饱和土实验测点布置图

TNT 炸药为块状,试验中使用自然长方形近似球形装药。药心埋设保持相同的比例埋深为 $h/\omega^{1/3} = 0.28$,取耦合系数为 0.47,试验数据见表 1。对测量压力时域波进行时间积分,得到压力的冲量值见表 1。

表 1 饱和土平均数据表

药量/ g	爆心距/ m	平均 压力/ MPa	平均上升 时间/ μs	到达 时间/ ms	平均 波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均 冲量/ ($\text{MPa}\cdot\mu\text{s}$)
50	1.10	11.13	20.8	0.672	1 637	192.4
50	1.37	6.22	22.0	0.903	1 517	150.0
50	1.73	1.51	105.1	1.217	1 422	146.2
50	2.15	1.25	181.9	1.532	1 403	121.9
50	2.63	0.44	286.4	1.750	1 503	41.4
100	1.10	11.81	10.4	0.738	1 491	486.5
100	1.36	16.67	23.2	0.980	1 388	317.2
100	1.71	3.36	36.8	1.315	1 300	168.9
100	2.11	3.09	60.0	1.725	1 223	123.2
100	2.57	0.61	1 720.0	1.900	1 353	80.9
200	1.05	10.20	14.4	0.843	1 246	198.3
200	1.31	3.82	21.2	1.458	898	187.3
200	1.66	0.30	258.4	2.464	674	83.4
200	2.05	0.576	330.3	3.824	536	49.2
200	2.50	0.23	452.4	3.824	654	41.35
100	1.10	4.67	26.9	0.824	1 335	89.1
100	1.36	2.22	26.4	1.308	1 040	67.2
100	1.71	0.47	255.0	2.181	784	0
100	2.11	0.51	379.0	2.940	718	0
100	2.57	0.20	602.0	2.844	904	0
150	1.12	7.14	47.2	1.452	771	1 219.0
150	1.38	4.90	18.0	1.807	764	72.6
150	1.73	1.31	151.5	2.612	662	210.5
150	2.14	1.57	211.7	3.304	648	230.0
150	2.60	0.45	399.0	3.652	712	134.0

2 实验结果和分析

从图 3 可以看出,随深度的增加,压力峰值衰减,但作用时间和上升时间却随深度增加而增加。波形在一定的压力范围内表现出来的性质与另外一段压力范围截然不同,即是否出现冲击波。3(a)图中前 4 层波形表现的形式为典型的冲击波,第 4 层压力在 2.5 MPa。上升时间和下降时间基本相同,峰值明显升高,第 5 层波形以下波形表现出来的性质为土中压缩波,第 5 层波形上升时间已经开始由冲击波的形式向压缩波形式过渡。图 3(b)中在第 3 层就出现了压缩波,压力在 1 MPa,第 2 层的冲击波压力为 2.5 MPa。可见,出现冲击波的宏观标志是一个压力峰值,在表 1 中也可以得出,该压力值为 1.0~2.0 MPa 之间。

从图 4 可以看出,饱和粘土在同一层的实测波形在性质完全一致,在幅值有些差别,数据分析时,取平均处理。

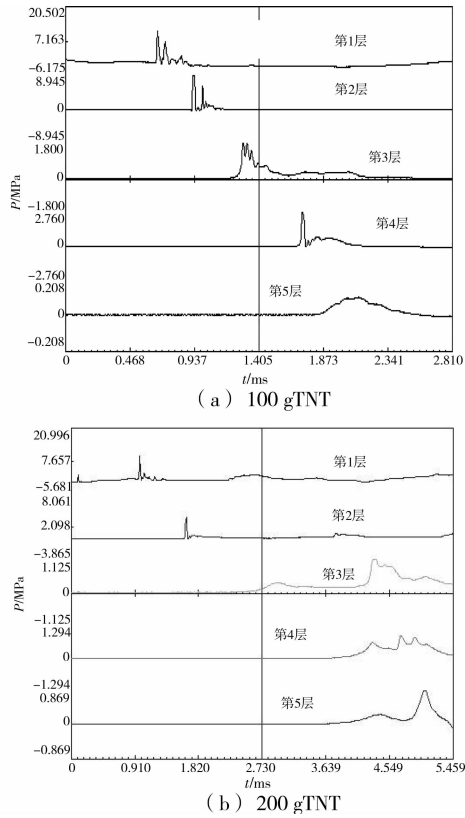


图 3 爆炸波在饱和土中传播图

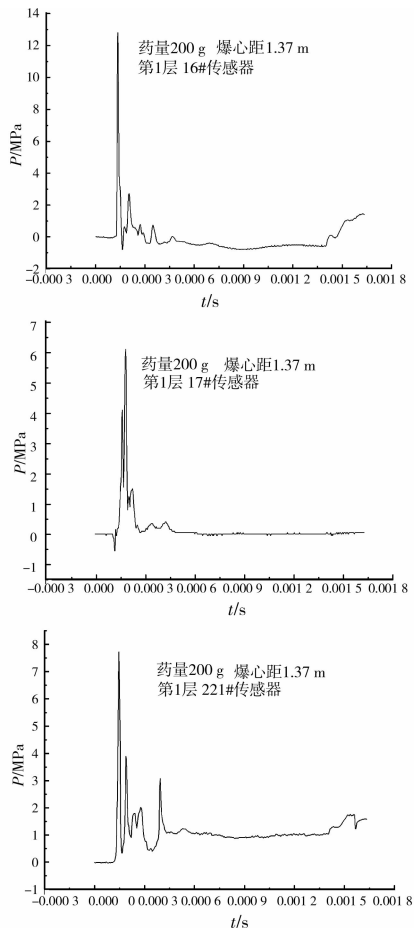


图 4 饱和土中 200 g 爆炸时第 1 层传感器的实测波形

从图 5(a), (b) 可以看出 2 个波形性质上的差别, 图 5(a) 波形形式为冲击波形态(爆心距离为 1.37 m), 压力为 3.7 MPa, 图 5(b) (爆心距为 2.63 m) 波形形式为弹性波, 图 5 可以比较在同一次爆炸试验的不同位置, 波形的呈现出 2 种截然不同的性质。在上升时间和作用时间上: 爆心距小的位置出现冲击波, 上升时间快, 作用时间短, 但峰值高; 爆心距大的位置不出现冲击波, 上升时间较慢, 作用时间较长, 但峰值较低, 对 2 点的积分冲量值相差不大。

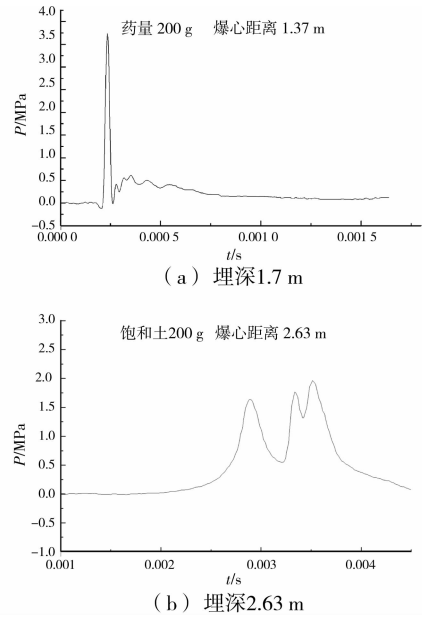


图 5 变埋深条件下压力实测波形

出现上述现象的原因主要是由于饱和土的特殊的本构关系所决定的。由于爆炸波对饱和土快速加载的作用, 导致饱和土骨架有效应力在总应力中占有的份额快速降低, 这时的总应力主要是由孔隙水的孔隙应力所承担而饱和土骨架的作用基本消失。因此, 可以说饱和土产生冲击波是骨架的有效应力和孔隙水压力地位的快速转变而形成的。而此时土介质的剪切模量和剪切应力消失, 偏应力为 0, 表现出来的类似液体的性质。基于以上分析得出, 饱和土的本构模型是递增硬化关系(如图 6 所示)。

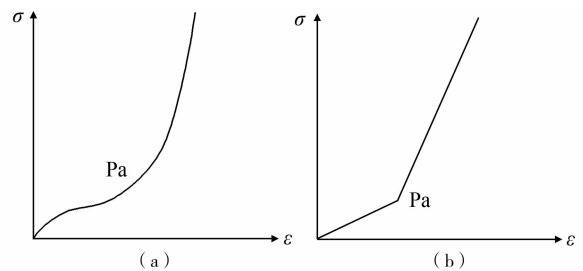


图 6 本构关系图

图 6(a) 当荷载小于某一分界应力点时, 曲线凸

向应力轴,此时具有 $\frac{d\sigma}{de} < 0$, 这是因为当荷载较小时,变形很小,骨架没有完全破坏,饱和土的压缩性由骨架的压缩性来决定,在此荷载范围内,骨架表现为弹塑性,卸载后有残余变形,此时介质的变形包括介质压缩时由于固体颗粒和液体质点重新排列而产生的孔隙变形以及液体和固体材料颗粒变形,而前者是主要的。随着荷载的增大,曲线逐渐凸向应变轴,当荷载大于分界应力时,饱和土中应力与方向无关。此时,骨架对压缩产生的反作用力可以忽略。图 6(b)为图 6(a)的简化处理,可以看出,该模型为双线性递增硬化流体弹塑性本构关系。该模型具有一个分界压力值;2 段不同的线性模量,且第 2 段的弹性模量大于第 1 段的弹性模量;在第 1 段为粘塑性特点;在第 2 段为流体特性,剪应力和剪切应变为 0。

由图 7 的拟合规律,得到了爆炸波在饱和土中的衰减规律,这是本次试验的主要目的之一。由于每次试验都保持了相同的耦合系数,代入 $f=0.47$ 得到衰减规律为式(1)。

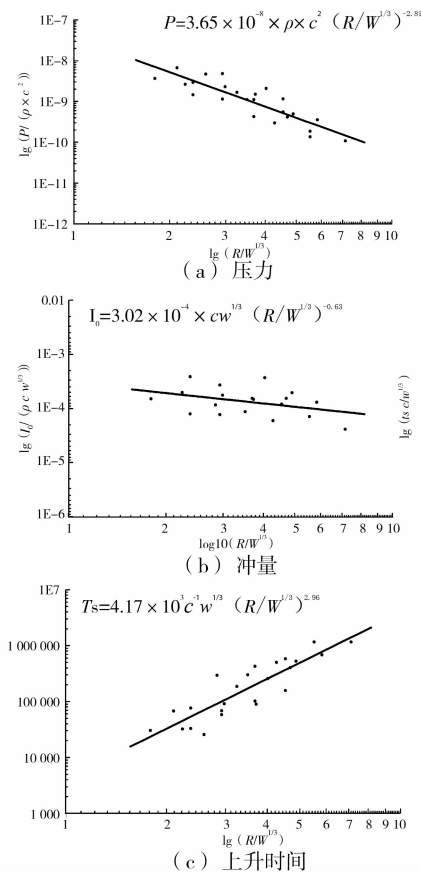


图 7 爆炸波参数在饱和土自由场中变化规律

$$\begin{aligned} P &= 7.77 \times 10^{-8} \times f \rho c^2 (R/W^{1/3})^{-2.81} \\ I_0 &= 6.43 \times 10^{-4} f \rho c W^{1/3} (R/W^{1/3})^{-0.63} \\ T_s &= 8.87 \times 10^3 f c^{-1} W^{1/3} (R/W^{1/3})^{2.96} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: P 为压力峰值,MPa; I_0 为冲量,MPa $\cdot\mu\text{s}$; T_s 为上升时间,s; f 为耦合系数, ρ 为密度,kg/m 3 ; c 为压缩波速,m/s; R 为爆心距,m; W 为 TNT 药量,kg。(注:文中所得的土的本构关系和爆炸波在饱和土中的衰减规律公式是在比例距离 $h/w^{1/3}$ 大于 0.28,饱和土的饱和度大于 97.5%的基础上得到的)

3 结 论

1)在饱和土试验中,存在由冲击波向弹性波转化的分界压力,这个分界压力是一个与介质性质有关的参数,在不同的土中产生冲击波的条件不相同。高饱和度的饱和土中应力波在点爆炸条件下的三维弥散空间中也较容易产生冲击波,因此,在同样的爆炸条件下,饱和土中结构具有更大的破坏可能性。

2)根据实验测得的数据,拟合出压力、动量、上升时间随比例距离变化的公式,得到了爆炸波在饱和土中的衰减规律。

3)根据实验测得的数据分析出饱和土的特殊本构关系,该本构模型为双线性递增硬化流体弹塑性本构关系模型,其具有 1 个分界压力值;2 段不同的线性模量,且第 2 段的弹性模量大于第 1 段的弹性模量;在第 1 段为粘塑性特点;在第 2 段为流体特性,剪应力和剪切应变为零。

参考文献:

- [1] LIANG JIAN-WEN, YOU HONG-BING. Dynamic stiffness matrix of a poroelastic multi-layered site and its Green's functions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 3(2): 273-282.
- [2] LIANG JIAN-WEN, YOU HONG-BING. Green's functions for uniformly distributed loads acting on an inclined line in a poroelastic layered site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 4(2): 233-241.
- [3] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid[J]. Journal of Acoust, 1956,28(2):168-191.
- [4] DONTSOV V E, NAKORYAKOV V E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001,27(11):2023-2041.
- [5] WANG ZHONG-QI, HAO HONG, LU YONG. A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004,28(1):33-56.
- [6] PRAPAHARAN S, CHAMEAU J L, HOLTZ R D.

- Effect of strain rate on undrained strength derived from pressure meter tests [J]. *Geotechnique*, 1989, 39(4): 615-624.
- [7] 赵跃堂,梁晖,范斌. 饱和土中爆炸波传播问题的数值模拟[J], *爆炸与冲击*, 2007, 27(4): 352-357.
ZHAO YUE-TANG, LIANG HUI, FAN BIN. Numerical simulation of explosion wave propagation in the saturated soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(4): 352-357.
- [8] 王明洋,赵跃堂,钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(6): 723-729.
WANG MING-YANG, ZHAO YUE-TANG, QIAN QI-HU. Study of dynamic behaviour and numerical method for saturated sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 732-729.
- [9] 国胜兵,高培正,潘越峰,等. 爆炸波在准饱和和砂土中的传播规律[J]. *岩土力学*, 2004, 25(12): 1897-1902.
GUO SHENG-BING, GAO PEI-ZHENG, PAN YUE-FENG, et al. Explosive wave propagation in quasi-saturated sandy soil [J], *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1897-1902.
- [10] 孙美凤. 爆炸荷载作用下饱和土中地下建筑结构的动力响应[J]. *华北水利水电学院学报*, 2004, 25(2): 18-21.
SUN MEI-FENG. The structure dynamical response in saturated soil to blasting loads [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2004, 25(2): 18-21.
- [11] 杨海杰,钱七虎,赵跃堂,等. 三相饱和土爆炸液化机理模型研究[J]. *解放军理工大学学报*. 2001, 2(1): 70-73.
YANG HAI-JIE, QIAN QI-HU, ZHAO YUE-TANG, et al. Study on blast induced liquefaction model for 3 phase saturated soil [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2001, 2(1): 70-73.
- [12] 刘建新,宋华,赵跃堂,等. 准饱和和砂土中平面压缩波传播[J]. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24(1): 86-92.
LIU JIAN-XIN, SONG HUN, ZHAO YUE-TAN, et al. Propagation of plane compress wave in quasic saturated sandy soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2004, 24(1): 86-92.
- [13] 尤红兵,梁建文,赵凤新. 含饱和土的层状场地的动力响应[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 679-684.
YOU HONG-BING, LIANG JIAN-WEN, ZHAO FENG-XIN. Dynamic responses of a multilayered site with saturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 679-684.
- [14] 陆建飞,聂卫东. 饱和土中单桩在瑞利波作用下的动力响应[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(2): 225-232.
LU JIAN-FEI, NIE WEI-DONG. Dynamic response of single pile embedded in half-space saturated soils subjected to rayleigh waves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(2): 225-232.
- [15] 夏唐代,薛威,颜可珍. 准饱和土中的瑞利波弥散特性[J]. *江南大学学报: 自然科学版*, 2007, 6(1): 76-80.
XIA TANG-DAI, XUE WEI, YAN KE-ZHEN. Dispersion of rayleigh wave in a nearly saturated soil [J]. *Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition*, 2007, 6(1): 76-80.
- [16] 李立云,杜修力. 动载作用下饱和土壤液化的研究述评[J]. *世界地震工程*, 2006, 22(2): 39-49.
LI LI-YUN, DU XIU-LI. Review on the liquefaction research of saturated soils under dynamic load [J]. *World Earthquake Engineering*, 2006, 22(2): 39-49.
- [17] 蔡袁强,李保忠. 饱和度变化对弹性波在非饱和砂岩表面反射和透射的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 520-521.
CAI YUAN-QIANG, LI BAO-ZHONG. Effect of water saturation on reflection and transmission of elastic waves at interface of partially saturated sandstone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 520-521.
- [18] 徐平,夏唐代. 饱和度对准饱和土体中瑞利波传播特性的影响[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(4): 10-13.
XU PING, XIA TANG-DAI. Influence of saturation degree on propagation characteristics of rayleigh waves in nearly saturated soils [J]. *Journal of vibration and shock*, 2008, 27(4): 10-13.

(编辑 胡英奎)