

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0875-06

爆炸波在高饱和度饱和土中传播规律的研究

穆朝民^{1,2,4}, 任辉启⁴, 李永池³, 辛凯⁴

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院, 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 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, 洛阳 471023)

摘 要: 通过在 $\phi 2.5 \times 5$ m 模拟爆炸装置中进行饱和土爆炸试验, 得到了变埋深条件下饱和土中的压力实测波形, 实测到了冲击波和弹性波, 二者之间具有较明显的分界, 爆炸近区和远区荷载形式具有较大的区别。通过综合分析给出了饱和土中波的传播规律, 揭示饱和土中爆炸冲击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, 确定了由冲击波向弹性波转换的分界压力。

关 键 词: 爆炸力学; 饱和土; 爆炸冲击波; 本构关系

中图分类号: 0382⁺.2

文献标识码: A

Propagation laws of blast wave in saturated soils with high saturation degree

MU Chao-min^{1,2,4}, REN Hui-qi³, LI Yong-chi¹, XIN Kai³

(1. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Lab of Mining Coal Safety and Efficient Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Huainan 232001, China; 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. The Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of CPLA, Luoyang 470123, China)

Abstract: An experiment of the explosion wave propagation in saturated soils is accomplished in the $\phi 2.5 \times 5$ m pothole. Measured pressure waveforms in different burial depths are gained in the saturated soils. The loads of the shock wave and the elastic wave are measured in the experiment. The boundary is obviously different between the shock wave and the elastic wave. A comprehensive analysis shows that the saturated soil has the nature of liquid-dynamic area appearing and the shock wave forming when the blast wave spreads in saturated soils. The bilinear progressively increasing-hardening constitutive relation in saturated soils is established. Dividing pressure is determined when the shock wave changes into the elastic wave.

Key words: mechanics of explosion; saturated soil; blast shock wave; constitutive relation

1 引 言

饱和土是自然界分布非常广泛的岩土介质, 特别是在东南沿海长期高水位浸泡的地区尤为常见。由于人防工程的需要, 这些地区重要的工程必须考虑地面和地下爆炸冲击波荷载的作用。与其他岩土介质不同, 饱和土中的爆炸波传播规律有着鲜明的特点。它是一种由空气、水和土骨架三相介质组成的一种介质, 而其形成后的介质表现出的介质性质不同于任何一种成份。饱和土的含气量极少, 气泡呈封闭状态, 当爆炸波在土中传播时, 波速高、压力衰减小、应力波的高频部分很容易传播, 在爆炸近区和中区, 可以保持应力波阵面的陡峻特征, 因

而导致了饱和土中结构极易被破坏并可能产生强烈的震动。因此, 对饱和土的研究具有重大的意义^[1-4]。

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。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

收稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 10632080); 国家自然科学基金(No. 50874005)。

第一作者简介: 穆朝民, 男, 1977 年生, 博士, 主要从事爆炸力学在岩土中应用的研究。E-mail: chmmu@mail.ustc.edu.cn

进行了探讨,取得一定的研究成果^[5-15]。

一般将土中气泡呈封闭状态的土称为饱和土,当饱和度较低时称为弱饱和土,当饱和度接近 100% 时称为高饱和度饱和土。由于饱和土的特殊性和复杂性,获得较高饱和度的饱和土难度较大,而且爆炸对土体的扰动较大,因此国际上系统开展饱和土爆炸荷载试验研究的较少。基于此,本文利用改进的 $\phi 2.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的模拟爆炸装置,对高饱和度的饱和土样一系列的自由场试验。得出了爆炸波在饱和土介质中传播的规律。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的原因,建立了饱和土双线性递增硬化本构关系,确定了在爆炸荷载作用下,高饱和度饱和土中由爆炸冲击波向弹性波转化的分界压力为 2 MPa。

2 在爆炸载荷下饱和的性质

要搞清楚土体的变形性质,首先要对土体各相介质在受力后的变化有所了解。固相骨架所占的空间(包括骨架内部所有孔隙)就是土的整个体积。当饱和土受到外力作用后,外力中有一部分将通过颗粒按照一定方向,相互传递。这部分由土骨架承受的力,称为有效应力,以 σ 表示。外力中另一部分主要由孔隙中的水来承受,称为孔隙压力,以 u 来表示,因为密闭液体可把压力以相同的大小向不同方向传递,因此,固相颗粒及分散在孔隙水中的密闭气泡也同样受到孔隙水压力的作用。因此,有效应力作用于土的骨架,而孔隙水压力则作用于固相颗粒,液相和气相。有:

$$T = \sigma + u \quad (1)$$

式中: T 为土所承受的总应力。

在受到爆炸荷载作用时,由于土颗粒在高压瞬态作用下来不及排水,形成类似于液化的现象。假定土颗粒是一些均匀的圆球,若荷载作用前处于松散状态,当受到水平方向的荷载作用时,颗粒要挤密,最终形成紧密的排列。在由松变密的过程中,如果土是饱和的,孔隙内充满水,且孔隙水在荷载的短促作用期间内排不出去,就将出现从松到密的过渡阶段。这时颗粒离开原来位置,而又未落到新的稳定位置上,与四周颗粒脱离接触,处于悬浮状态。这种情况下颗粒的自重,连同作用在颗粒上的荷载将全部由水承担。根据有效应力原理,土的抗剪强度为

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi \quad (2)$$

显然,孔隙水压力增加,抗剪强度随之减小。如果荷载强烈,孔隙水压力增长很快,则可能发展至 $u = \sigma$, 导致 $\tau_f = 0$ 。这时,土颗粒完全悬浮于水

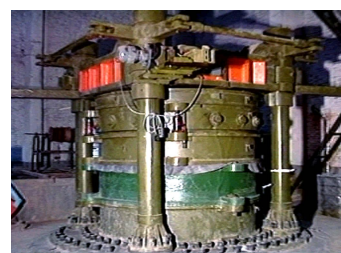
中,成为黏滞流体,抗剪强度 τ_f 和抗剪刚度 G 几乎都等于 0,土体处于流动状态,这就是液化现象。

3 饱和土的试验研究方法

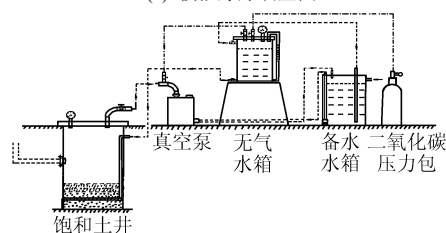
3.1 实验设备及饱和土样的制取

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,因此国际上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 $\phi 2.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 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)所示)。本试验采用真空反压制作饱和土样,该方法是利用真空泵进行真空抽气,使土体中气体含量减小而达到饱和目的,具体为:

(1) 饱和土样试验设备全系统密封;(2) 设置高真空度的真空泵($6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$);(3) 制作含水率 15% 土样,分层夯实并在预定深度上埋置结构或传感器,为使土样密度均匀,每层填土使用格栅器进行控制,(格栅器将 $\phi 2.5 \text{ m}$ 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);(4) 土样保持长时间抽气,以控制土样真空度,抽气时间大于 7 d;(5) 制作无气水,并往真空土样内充水,充水速度控制在 $2 \text{ m}^3/24 \text{ h}$ 以下;(6) 真空状态静止置放,时间大于 15 d;(7) 土样爆炸试验后回填弹坑,再次真空抽气,充无气水并静放固结。



(a) 模拟爆炸装置图



(b) 饱和土制作系统图

图 1 试验装置

Fig.1 Facility of tests

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, 所以要求每次放炮后, 土样必须重新回填抽气, 试验后的土样用烘干法测量饱和度在 97.5% 以上。

3.2 饱和土现场试验

试验中在饱和土体内埋设了 5 层土压力传感器, 每层 3 个, 对取得的数据进行平均处理。为减少相邻 2 层传感器相互影响, 相邻上、下 2 层传感器不在同一方位角上(见图 2(b))。采用逐层开挖法进行试验。保持爆心距为 1.10 m, 药量为 50、100、200 g, 装药埋深分别为 0.24、0.46、0.73、1.13 m。埋深至 1.33 m 时, 为完全密封爆炸(见图 2(a))。

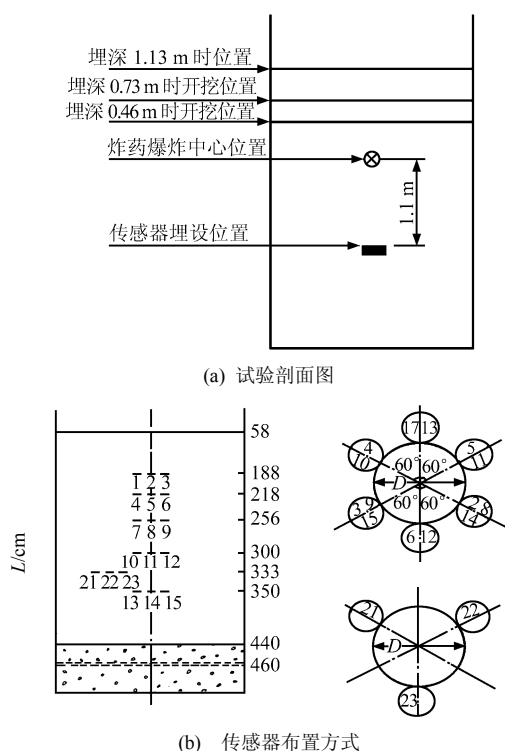


图 2 饱和土实验测点布置图

Fig.2 Layout of test points in saturated soil

4 爆炸数据分析

对饱和土进行 TNT 装药爆炸, 测得压力曲线见图 3、4, 图 3 从上到下为 5 层土压力传感器所测波形。

由图 3 可以看出, 爆炸波在饱和土中传播过程中, 有一个明显的从冲击波向弹性波转化的过程, 在此过程中, 饱和土中出现了一个压力分界, 在分界两侧波的形态明显不同, 具有明显的界限。可以用一个压力函数来对其定义, 由试验数据可知, 分界压力约为 2 MPa(如图 4 所示)。

波形呈现出两种截然不同的性质。在上升时间和作用时间上: 冲击波上升时间快, 作用时间短,

但压力峰值高; 弹性波上升时间较慢, 作用时间较长, 但压力峰值较低。对两波进行积分得出冲量, 两波冲量值却相差不大。

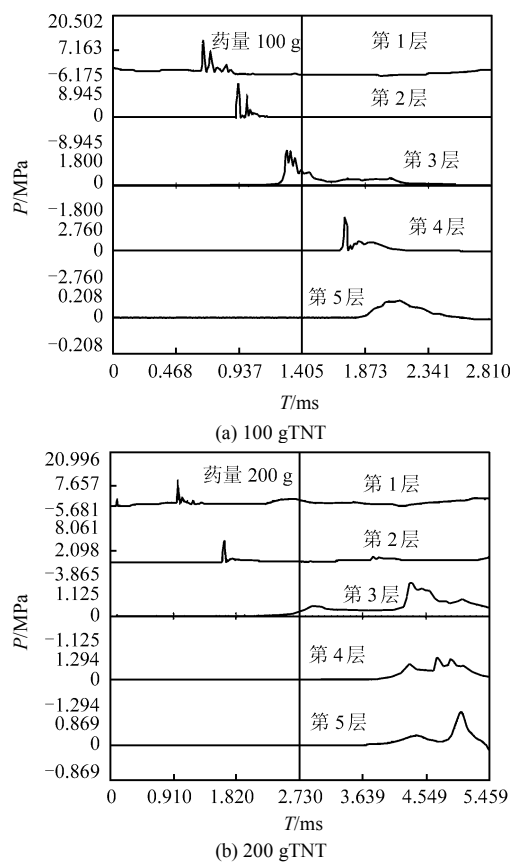


图 3 爆炸波在饱和土中传播图

Fig.3 Blast wave propagation in saturated soil

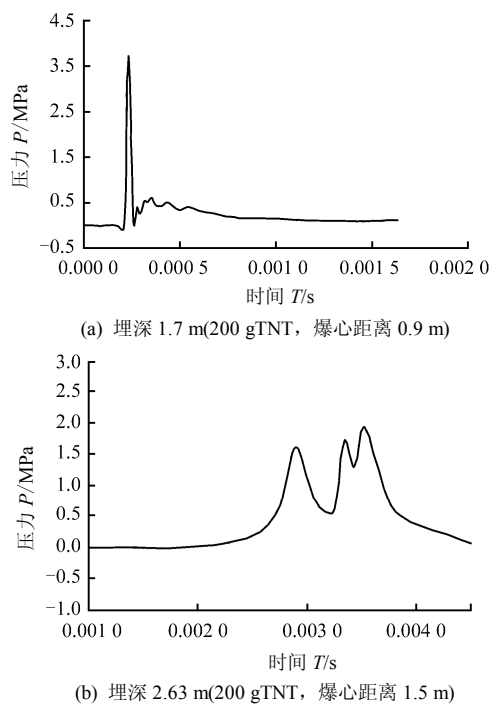


图 4 变埋深条件下压力实测波形

Fig.4 Measured pressure waveforms with different burial depths

出现上述现象的主要原因是由于饱和土特殊的本构关系所决定的。由于爆炸条件下对饱和土的快速加载,造成饱和土的骨架作用快速消失,而有效应力在总应力占有的比例快速降低,这时的总应力主要由孔隙水压力所承担。因此,可以说饱和土产生冲击波是孔隙水压力和骨架的有效应力地位的快速转变所造成的。而此时,土介质表现出来的是类似液体的性质,剪切模量和剪切应力消失,偏应力为 0。饱和土的本构模型是递增硬化关系,如图 5 所示。

在固体剪切强度可以忽略的高压下,固体可当作无黏可压缩流体来处理。绝大多数固体材料,在高压下一般都表现为随体积压缩而变得愈来愈难压缩,即体积模量随压力的增加而增大,这意味着,在加载过程中,高幅值扰动的传播速度大于其前方低幅值扰动的传播速度。于是这些扰动在传播过程中其波剖面前缘变得愈来愈陡,最终形成冲击波。当冲击波传播到一定距离后,随着压力衰减剪切强度不能忽略,此时冲击波逐渐转化成弹性波。由于在不同爆心距离上布置了传感器,这样可以估算出波传播速度,本次爆炸试验测得土中波传播速度为 500~1 600 m/s。

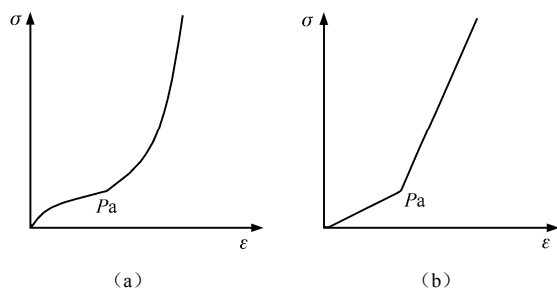


图 5 本构关系图
Fig.5 Curves of constitutive relation

5 数值计算

由图 5 可知,双线性递增硬化本构关系由于其硬化段的模量大于初始模量,这就给编程带来了较大难度,能量的突变给数值积分带来不收敛。同时,由试验分析可知,这是产生冲击波的直接原因,是不可能回避的问题。

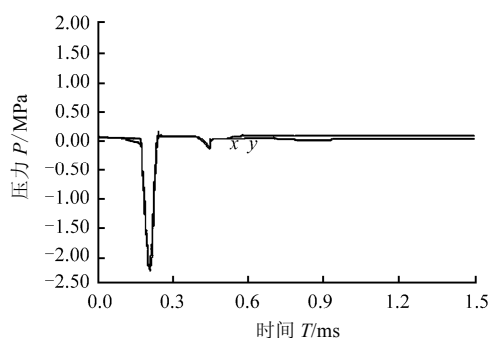
递增硬化本构关系分为 2 段,有一个分界压力的 P_a ,在程序内部添加一单元积分点应力判断。在应力小于 P_a 时,表现出的材料性质可以用 D-P 模型表示较为合理;当应力大于 P_a 时,介质表现出另外一种流体的性质,模量提高,剪切力和剪切模量消失,这种情况下程序应进行弹性模量、剪切模量、泊松比和密度的重新赋值,该值由程序开始卡

片输入,由此材料的分界点和两段模量都已经进行了改变。

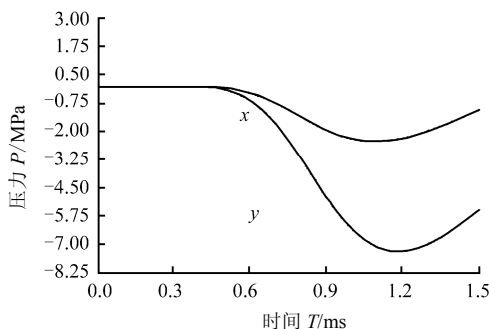
对于本构积分间断的程序进行了处理。有限元单元总刚度矩阵只是在程序开始时形成一次,计算过程中如单元性质发生改变,程序处理是在总刚度矩阵的内部做一个标志,刚阵并没有重新形成,这样处理的优点是节约计算时间。由于 RSEAP 程序是一个二维的非线性有限元程序,计算时间要求完全可以在微机上得到满足。所以程序处理本构积分间断是采用每一时间步均进行总刚度矩阵的形成,当积分应力大于分界压力 P_a 时,程序在下一步的总刚阵形成时对这个单元的材料参数进行改变,没有达到 P_a 的单元不进行改变。这种方法相当于每个时间步的应力状态是下一步的初始值,而每次计算只计算一个荷载步,本构积分间断的问题就不会出现,最后由这 n 个计算步形成整个计算过程。

对程序的这种处理方法所产生的计算结果,在许多微小方面都与试验现象吻合相当好,也很好解释了试验中无法理解的现象,说明程序处理是成功的。

计算中在爆心近区出现冲击波,远区出现弹性波。当出现冲击波时,两个方向的应力在时间和峰值上已完全相同,表现出流体的性质(如图 6(a)。未出现冲击波时,表现的是固体的性质,剪切力存在(如图 6(b)),这与试验所得的结论比较一致。



(a) 爆心距离 1.0 m(100 gTNT)



(b) 爆心距离 1.0 m(300 gTNT)

图 6 计算结果
Fig.6 Calculating results

6 爆炸波在饱和土中传播规律

由试验数据和数值计算结果得到了饱和土中压力衰减规律(如图7所示), 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, 代入耦合系数 $f=0.47$ 得到衰减规律为

$$P = 4.67 \times 10^{-8} \times f \rho c^2 (R/W^{1/3})^{-2.56}$$

式中: P 为压力峰值; f 为耦合系数; ρ 为密度; c 为弹性波波速; R 为爆心距; W 为 TNT 药量。

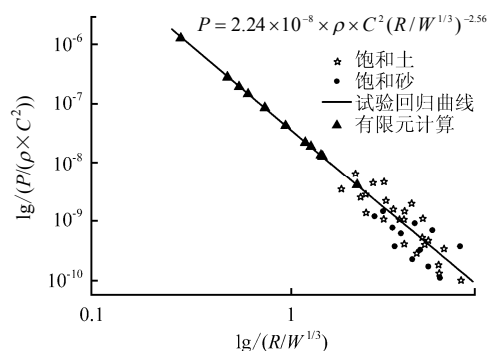


图7 回归曲线
Fig.7 Regression curve

7 结 论

(1) 研究出炸药在高饱和度饱和土中可重复性直接爆炸的试验方法。通过大量的试验数据分析, 确定了爆炸条件下, 波在高饱和度饱和土中传播的性质。饱和土在爆炸动荷载作用下会出现类似液体的现象, 形成冲击波。通过试验数据分析, 确定了高饱和度饱和土中由爆炸冲击波向弹性波转化的分界压力为 2 MPa。

(2) 通过试验和理论分析, 确定了双线性饱和土的应力-应变关系, 应用编制的程序进行计算的结果与试验数据吻合较好。

(3) 通过试验数据及量纲分析的方法, 得出爆炸波在饱和土中传播规律的公式。

参 考 文 献

[1] 赵跃堂, 郑守军, 郑大亮, 等. 爆炸波在饱和土介质中传播时压力变化规律的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 61—64.
ZHAO Yue-tang, ZHENG Shou-jun, ZHENG Da-liang, et al. Experimental investigation on pressure variation during explosion wave propagation in saturated soils[J].

Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 61—64.

- [2] 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.
- [3] PUEBLA H, BYRME P M, PHILIPS R. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: Prototype and centrifuge models[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(5): 641—657.
- [4] BYRNE P M, CHEUNG H, YAN L. Soil parameters for deformation analysis of sand masses[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1987, 24(3): 366—376.
- [5] 国胜兵, 高培正, 潘越峰, 等. 爆炸波在准饱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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 刘建新, 宋华, 赵跃堂, 等. 准饱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 Hua, ZHAO Yue-tang, et al. Propagation of plane compressive-wave in quasi-saturated sandy soil[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2004, 24(1): 86—92.
- [9] 赵跃堂, 郑大亮, 王明洋, 等. 饱和土介质中爆炸波传播的时间特征试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 162—167.
ZHAO Yue-tang, ZHENG Da-liang, WANG Ming-yang,

- et al. Experimental investigation on time characteristics of explosive wave propagation[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2004, 24(2): 162—167.
- [10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low frequency range[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1956, 28(2): 168—178.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 施鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究[J]. **爆炸与冲击**, 2006, 26(3): 240—244.
- SHI Peng, DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min, et al. Study on ground shock energy distribution of explosion in soil[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2006, 26(3): 240—244.
- [16] 施鹏, 辛凯, 杨秀敏, 等. 土中装药不同埋深爆炸实验研究[J]. **工程力学**, 2006, 23(12): 171—174.
- SHI Peng, XIN Kai, YANG Xiu-min, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 23(12): 171—174.

2010 年城市地质环境与可持续发展论坛（一号通知）

2010 年 8 月 23～8 月 26 日，上海

2010 年世界博览会（Expo2010）将于 5～10 月在中国上海市举办，也是历来首次由中国举办的世界博览会，本次博览会的主题是：“城市，让生活更美好”（Better City, Better Life）。利用这次世博会召开之际，拟定于 2010 年 8 月 23～26 日联合召开城市地质环境与可持续发展论坛，以便交流这方面的相关成果。

为了做到城市让人们的生活更美好，必须要有优良的城市地质环境，针对自然的演化规律，寻求不同地质环境的有效保护与发展的途径，使城市能针对不同的地质环境更合理的开发，有效地防治和减轻灾害，这是地质科技人员的重要职责，也是这次论坛的主旨，以求取得科学的认识，为今后城市的发展起到促进作用，真正做到城市让人们的生活更美好，城市能够可持续的发展。

会议议题：城市水资源的合理开发与安全；城市水资源的信息化管理系统；城市供水应急水源的保障；城市环境地质的主要研究内容与质量评估；城市地质灾害的评价与预警系统建设；城市地质灾害的防灾与减灾措施研究；城市发展规划地质环境综合效应；地下空间利用及岩土工程与地质环境问题；城市发展与旅游资源的保护与开发。

会议地点：同济大学（上海）

会议时间：2010 年 8 月 23～26 日，其中：2010 年 8 月 23 日全天报到注册；

会议主办单位：教育部城市环境与可持续发展联合研究中心（同济大学、上海交通大学、南京大学、河海大学、北京交通大学、中国地质大学（北京）、中国地质大学（武汉）、成都理工大学、重庆大学、吉林大学长安大学）

会务联系人：1. 同济大学 地址：上海市杨浦区四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系 邮编：200092

联系人：刘 琦，石振明；电话：021-65985200 65983545；传真：021-65985210；手机：13917983456，13901642982；

E-mail: liuqi_tongji@163.com

2. 贵州师范大学 地址：贵州省贵阳市宝山北路 116 号贵州师范大学中国南方喀斯特研究院 邮编：550001

联系人：周忠发；电话：0851-6690199；手机：13985026897；E-mail: fa6897@163.com

会议论文征集论文题目由论文撰写者根据大会议题自由选定。会议论文应为未经发表过的最新成果，学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查，精选一定数量的优秀论文在《岩土力学》增刊（EI 检索）上正式发表。论文格式请严格按照《岩土力学》的编排格式排版（登录网站：<http://ytlx.whrsm.ac.cn>）。

论文全文截止时间：2010 年 5 月 1 日。