

黄土土壤中爆炸成坑作用的力学参数分析

任保祥¹, 陶 钢¹, 徐利娜², 陈化良², 庞春桥¹

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094;

2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 渭南 714200)

摘要: 爆炸是研究土壤动态破坏特性和地下土壤振动波传播规律的重要方法, 因此需要分析土壤爆炸作用的一些力学特征参数。由于土壤介质的复杂性和多样性, 很难有统一的方法预测这些参数。针对我国渭河滩黄土土壤, 通过试验研究爆炸波引起的黄土土壤爆炸坑洞的形成和振动传播规律测量, 结合土中爆炸力学的理论分析结果, 给出黄土土壤爆炸作用的特征参数的估算方法, 为相关分析提供参考。

关键词: 土中振动波; 爆炸坑; 冲击波; 黄土; 状态方程

本文引用格式: 任保祥, 陶钢, 徐利娜, 等. 黄土土壤中爆炸成坑作用的力学参数分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016(10): 164-168.

Citation format: REN Bao-xiang, TAO Gang, XU Li-na, et al. Analysis of Mechanical Parameters of Blast Hole Formation in Loess Soil[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(10): 164-168.

中图分类号: TJ011. +1

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)10-0164-05

Analysis of Mechanical Parameters of Blast Hole Formation in Loess Soil

REN Bao-xiang¹, TAO Gang¹, XU Li-na², CHEN Hua-liang², PANG Chun-qiao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Chinese Ordnance Test Research Institute, Weinan 714200, China)

Abstract: A lot of researches about the underground soil dynamic damage characteristics and the soil vibration wave propagation law are making by using explosion way, so we need to analyze the mechanical characteristic parameters of explosion in soil. Due to the complexity and diversity of the soil medium, it is difficult to have a unified method to predict these parameters. In view of loess soil of Weihe in our country, the method to estimate the relative parameters were given by measuring parameters of vibration wave propagation caused by blast wave through experimental study way, and combined with the analysis results of the explosion mechanics theory in loess soil, to provide reference for correlation analysis.

Key words: vibration wave in soil; explosion hole; shock wave; loess soil; state equation

土壤地下爆炸理论和实验研究具有很大的实际应用价值。土壤的性质变化很大, 通常每一地区的自然地层状态会呈现不同厚度的层状特征。各层的性质取决于各自的固体颗粒、空气和水的组成。迄今爆炸作用下波在土壤中运动的研究仍是一个极难解决的问题, 因为每种自然土壤都必须单独分析^[1]。在求解土壤中波传播的动力学问题中, 研究人员

采用了各种模型^[2-3]。徐学勇等基于应力波传播理论, 推导了爆炸应力波在饱和土介质中传播的运动方程^[4]。穆朝民等进行了饱和土壤中爆炸波传播特性的试验与数值研究, 得到了变埋深条件下应力波在饱和土壤中的传播规律^[5-6]。赵跃堂、赵均海等应用有限元软件对饱和土中爆炸波的传播作了数值研究, 验证了一种土介质本构模型的可行性^[7-8]。

收稿日期: 2016-06-05; 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国防基础(A0920133008)

作者简介: 任保祥(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事钻地弹侵彻土壤的土中弹道与土壤力学研究。

任晓亮等对大半径装药土中爆炸进行了数值模拟研究,对爆炸后的压力变化和能量利用情况进行了分析^[9]。本文针对我国渭河滩黄土土壤,通过试验研究爆炸波引起的黄土土壤爆炸坑形成和振动波传播规律,结合土中爆炸力学理论分析结果,给出黄土土壤中一些爆炸作用特征参数的估算方法。

1 试验及结果

1.1 试验场地状况

试验在渭河河漫滩阶地进行,该土壤属于黄土土壤^[10]。渭河一级阶地土壤(Q₄)由亚砂、亚粘土、砂砾石层等冲积物组成,试验场地土壤均匀。图1为TNT药柱,质量为2.4 kg,装药半径约 $r_0 = 71$ mm。装药放置深度1.26 m。图2为爆炸后形成的炸坑,直径约1.3 m。



图1 试验 TNT 炸药柱

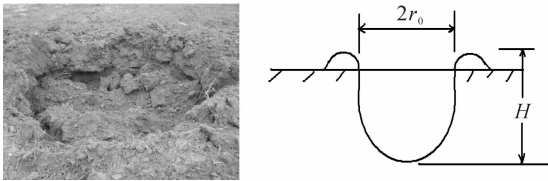


图2 爆炸坑,直径尺寸1.5 m

1.2 试验布设及测试设备

爆炸测试场地布置如图3所示,图4为试验采用的三轴速度传感器,可获得X、Y、Z 3个方向上的土壤振动波数据,传感器量程:0.001 ~ 35.5 cm/s,频率5 ~ 500 Hz,精度 $\pm 5\%$,采样率最大50 kSps。表1为不同爆炸点到各传感器的距离参数。

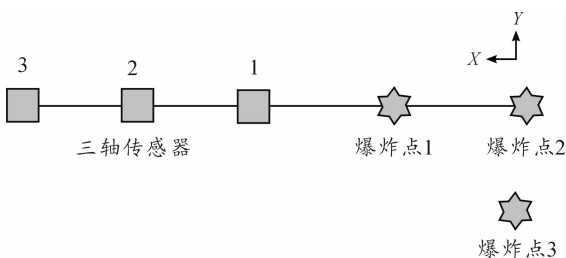


图3 爆炸点和三轴速度传感器布设图



图4 三轴速度传感器

表1 三轴传感器编号及布置参数

序号	传感器编号及距离/m		
	1#	2#	3#
炸点1	2.864 2	5.852 4	8.876 4
炸点2	5.379 4	8.364 7	11.387 9
炸点3	5.250 2	8.033 2	10.971 9

1.3 三轴传感器X方向振动波分析

三轴传感器的X方向正对爆炸源,即沿爆炸波径向传播方向,如图3所示。该方向土壤振动波为纵波。图5为三轴传感器获得的不同爆炸点产生的土壤振动波曲线。由曲线特征可得到,3个传感器离震源距离的由近到远,土壤振动波振幅信号随到震源的距离的增大而减小。图5中横坐标单位为时间(ms),纵坐标为土壤振动波振动速度(m/s)。

表2为不同爆炸点在各传感器处的第一波峰值。

表2 不同爆炸点振动波第一峰值数据

传感器	振动速度/(m·s ⁻¹)		
	爆炸点1	爆炸点2	爆炸点3
1#	0.128 600	-0.002 686	0.009 879
2#	0.012 490	0.003 315	0.003 485
3#	0.002 217	0.000 854	0.000 852 7

3个传感器处的土壤振动波峰值衰减特征符合指数衰减规律式^[11]

$$u = k_c \left(\frac{r}{m^{1/3}} \right)^{-\alpha} \quad (1)$$

其中: u 为粒子速度(m/s); k_c 为系数; r 为传感器到震源的距离(m); m 为TNT当量(kg); α 为衰减指数。结合表1与表2可以分别拟合出不同爆炸点振动波随距离的衰减曲线,如图6所示。

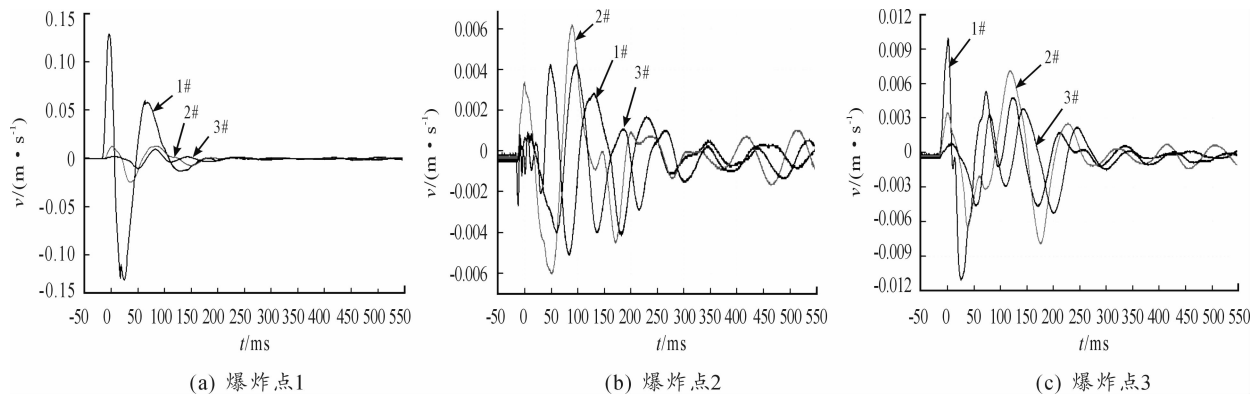


图5 不同爆炸点X方向振动波振幅随距离的变化曲线

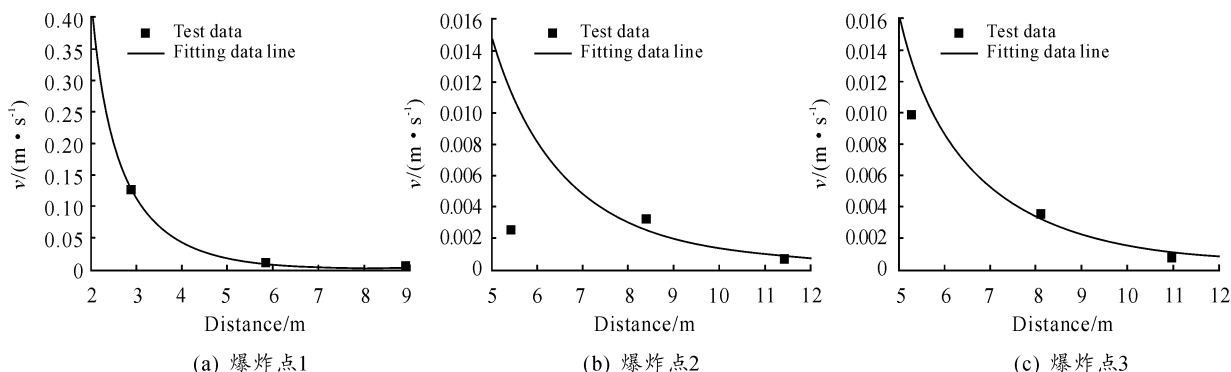


图6 不同爆炸点X方向振动波第一峰值随距离衰减曲线

表3为不同爆炸点X方向振动波第一峰随距离的衰减曲线参数。

表3 不同爆炸点X方向振动波第一峰随距离衰减拟合曲线参数

爆炸点 序号	拟合参数	
	k_c	α
1	4.24	3.31
2	3.11	3.33
3	3.22	3.30

由表3可以得到黄土中爆炸振动波中纵波的衰减指数约为3.31,取3个爆炸点获得的衰减指数平均值3.31。同时可以说明测试获得的土中爆炸振动波数据有效可靠。

由图5(a)可得到,约200 ms以后,土壤的振动波近似为正弦形式,此时的振动波反映了土壤的固有振动特性,如图7所示。

由图7的数据,得到该土壤的固有振动纵波周期为 $T = 94.8$ ms,固有振动频率 $f = 10.5$ Hz。考虑到传感器之间的距

离,可得到固有振动波声速: $c_y = 137.0$ m/s。

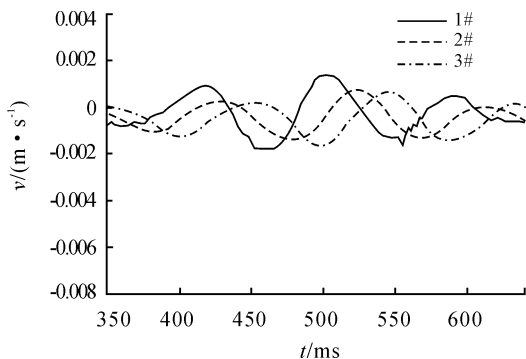


图7 3个传感器记录的X方向的固有振动波

2 黄土壤中的爆炸作用效应的分析

2.1 土壤中膨胀的爆炸空腔模型

根据 Bishop 等人研究的土壤中的空腔膨胀理论^[4],爆炸空腔构成为:

1) 将空腔周围的区域分为3个区:锁变弹性区;锁变塑性区以及无应力区或自由区,如图8所示。

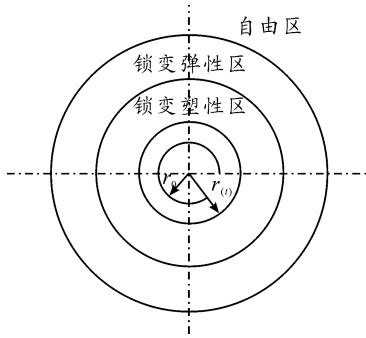


图8 空腔膨胀理论分区

2) 在锁变弹性区内,应力应变符合弹性关系,但是体积的膨胀应变 ε 为一常量 ε_E 。

3) 在锁变塑性区内,应力应变符合理想的强化塑性本构关系,但是体积的膨胀应变 ε 为一常量 ε_p , 有 $|\varepsilon_p| > |\varepsilon_E|$ 。

4) 按动力理论计算,在塑性区和弹性区的密度为常量,分别为 ρ_p 和 ρ_E 且 $\rho_p > \rho_E$ 。

5) 这两个区域都是球对称或轴对称的。

2.2 土壤中爆炸空腔膨胀的力学参数计算

1) 爆炸加载下土壤膨胀运动的平均速度计算

假设忽略耗损于土壤不可逆变形的能量,根据能量守恒定律,得到能量平衡关系式

$$E_0 = M\bar{u}^2/2 \quad (2)$$

式中:运动土壤质量为 $M = 4\pi\rho_0 R^3/3$; R 为压缩波阵面的瞬时运动位置,土壤的初始密度 $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 。土壤运动的平均速度由下式确定^[1]

$$\bar{u} = \left(\frac{2E_0}{(4/3)\pi\rho_0 R^3} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: E_0 为炸药爆炸能量, $E_0 = M_{\text{TNT}} \times Q = 2.4 \text{ kg} \times 4.18 \text{ MJ/kg} = 10 \text{ MJ}$; $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 。计算得到冲击波和土壤运动界面之间的土壤平均速度,如图9所示。

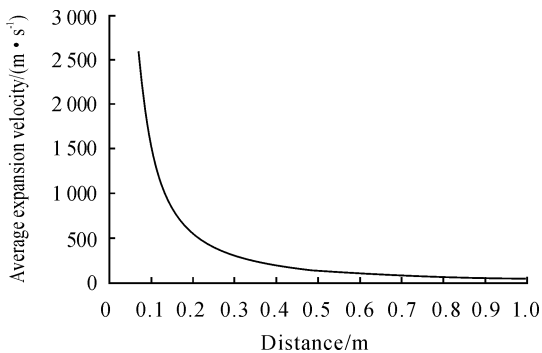


图9 冲击波和土壤运动界面之间的土壤平均速度

2) 土壤的爆炸膨胀区的最大半径

根据土壤的爆炸膨胀理论^[1],其膨胀区的最大半径关系式为:

$$r_{\max} = r_0 \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{TNT}} Q}{\rho_0 \varepsilon_k}} \quad (4)$$

式中: r_{\max} 是膨胀区的最大半径; $\rho_{\text{TNT}} = 1.6 \text{ g/cm}^3$; $\rho_0 = 1.6 \text{ g/cm}^3$; $Q = 4 \text{ kJ/g}$ 。土壤密度从 ρ_0 变为临界密度 ρ_0^* 时,压力 p_{cr} 做的功 W 是土壤明显变形中止时对应的极限能量密度 ε_k

$$W = \varepsilon_k = 4\pi r_1^3 p_{cr} \frac{\Delta r}{r_1} \quad (5)$$

式中 $\Delta r/r_1 = (r_1 - r_2)/r_1 = \sqrt[3]{\rho_0^*/\rho_0} - 1$, r_1 和 r_2 是含有单位质量土壤的单元球体在压缩变形前、后的半径。由于 $4\pi r_1^3 = 3/\rho_0$, 则有

$$\varepsilon_k = \frac{3p_{cr}}{\rho_0} \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_0^*}{\rho_0}} - 1 \right) \quad (6)$$

假设 $\rho_0^*/\rho_0 \approx 2$, 可得 $\varepsilon_k \approx p_{cr}/\rho_0$, 当 $\rho_0 \approx 2 \text{ g/cm}^3$ 时, $\varepsilon_k \approx p_{cr}/2$; 当 $p_{cr} = 2 \text{ MPa}$ 时, $\varepsilon_k = 1 \text{ J/g}$ 。

由式(4),可得爆炸膨胀区的最大半径

$$r_{\max} = 1.12 \text{ m}$$

此处,取装药初始半径 $r_0 = 0.071 \text{ m}$ 。说明距离爆心 1.12 m 以外为土壤非破坏区域。

3) 爆炸洞边界的最大运动速度计算

爆炸的初始阶段,爆洞的土壤膨胀按流体中冲击波阵面方式进行^[1]。冲击波阵面后方的介质不可压缩。在这一运动阶段中,爆轰产物的部分势能转变为土壤的动能。介质的动能可由下式确定

$$E_k = \int_{a_1}^{R_1} 4\pi\rho_1 r^2 \frac{u^2}{2} dr = 2\pi\rho_1 a_1^2 a_1^3 \left(1 - \frac{a_1}{R_1} \right) \quad (7)$$

式中: a 是土壤爆洞的即时半径; R_1 是冲击波的传播距离。该阶段的爆洞边界运动速度为:

$$a_1^2 = \frac{E_{\text{TNT}}}{2\pi a_0^3 \rho_0 Z^3} \left(1 - \frac{1}{Z^{3(k-1)}} \right) \quad (8)$$

式中 $Z = a_1/a_0$, 取爆轰产物绝热膨胀指数 $k = 1.3$, 装药初始半径 $a_0 = 0.071 \text{ m}$, 计算结果如图10所示。

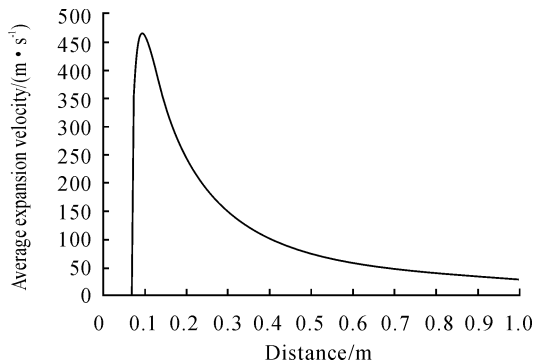


图10 爆洞边界运动速度

由图10可得爆炸空腔的最大运动速度: $\dot{a}_1 = 463.3 \text{ m/s}$, 该时刻位置在 $a_1 = 0.094 \text{ m}$ 。此时土壤的第一膨胀阶段

结束。

4) 爆洞动态膨胀运动的力学参数计算

在地下爆炸作用下,内部爆洞的半径由初始半径 a_0 增大到 a_m 。土壤经爆炸获得能量后,土壤中的爆洞边界速度 $\dot{a} = 0$ 时,达到最大半径 a_m ,有公式^[1]

$$a_m = a_2 \left[1 + \frac{\alpha_2 \rho_0 a_2^2}{\beta_2 \eta \sigma_c} - \frac{\alpha_2 \rho_H}{(\alpha_2 - 3k) \eta \sigma_c} \left(\frac{a_0}{a_2} \right)^{3k} \cdot \left(1 - \left(\frac{a_2}{a_m} \right)^{3k - \alpha_2} \right) \right]^{1/\alpha_2} \quad (9)$$

式中 $\eta = b/a = (E/3\sigma_c)^{1/3}$, $\alpha_2 = 4 - \frac{4}{3\ln\eta} + \frac{4}{3\eta^3 \ln\eta}$, $\beta_2 = \frac{2}{\ln\eta}$,

同时取 $k = 1.25$, $\varepsilon = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \frac{\sigma_s}{\rho c_y}$, $\sigma_b/\sigma_s = 10^1 \sim 10^2$, 得到

$$\sigma_s = \left[45 \left(\frac{\rho c_y^2}{250} \right)^{0.86} \left(\frac{E_B}{(4/3) \pi a_m^3 \rho c_y^2} \right)^{1/0.86} \right]^{1/0.86} = 1.67 \text{ MPa} \quad (10)$$

这里,取试验爆炸坑最大半径 $a_m = 0.65 \text{ m}$,固有振动波声速 $c_y = 137.0 \text{ m/s}$,得到土壤动态屈服强度 $\sigma_s = 1.67 \text{ MPa}$ 。

在土壤破坏区域边界,塑性区分界面 ($r = b_m$) 的最大粒子速度为

$$u_m = 0.55(1 + \nu) \frac{\sigma_s}{E} c_y \quad (11)$$

黄土土壤取弹性模量 $E = 20 \text{ MPa}$ ^[2]、弹性波速 c_y 和 $\nu = 0.33$,得到

$$u_m = 8.36 \text{ m/s}$$

由试验曲线外推得到破坏塑性区分界面半径 $b_m = 0.8 \text{ m}$ 。说明塑性变形区域很小,与最大半径 a_m 相比,只有 0.15 m 宽度。

5) 土壤中压缩度和压缩波转换为弹性波的距离估算

土壤变为弹性运动前,即冲击波阵面与破坏阵面分离,其速度变得等于弹性波速 c_y 的时刻,可以得出冲击波阵面半径、速度、面后粒子速度和爆洞半径、速度、压缩变化量之间的关系^[1],如式:

$$R = \varepsilon^{-1/(n+1)} a \quad (12)$$

$$\dot{R} = \varepsilon^{-1/(n+1)} \dot{a} \quad (13)$$

$$u_{sh} = \varepsilon^{n/(n+1)} \dot{a} \quad (14)$$

其中, R 为冲击波阵面半径; \dot{R} 为冲击波阵面速度; u_{sh} 为冲击波阵面后粒子速度; ε 为冲击波阵面处压缩度变化量。式(12)、(13)、(14)可确定体积变形(体应变)随剪切应力的变化。取 $n = 2$, $\lambda = 0$, ε 值可用下式估算

$$\varepsilon = \sigma_c / \rho_0 c_y^2 \quad (15)$$

冲击波阵面处满足以下条件:

$$u_{sh} = \varepsilon \dot{R} \quad (16)$$

假定破坏阵面与冲击波阵面重合,在该处发生压实,使

土体应变为常值 $\varepsilon = (\rho_1 - \rho_0) / \rho_1$,其中 ε 是冲击波阵面处的压缩度变化量,于是

$$R = \varepsilon^{-1/(n+1)} a = 2.39 \text{ m}$$

试验得到, $u_{sh} = 8.36 \text{ m/s}$, 则 $\dot{R} = 340 \text{ m/s}$, 则压缩度 $\varepsilon = 0.02$, 由于土壤的复杂性,只能给出估算量级。

3 结论

通过土壤中的爆炸试验,结合土壤中爆炸力学的理论分析结果,给出我国渭河滩黄土中爆炸振动波传播的力学特征参数的估算方法。

1) 黄土中爆炸振动波中纵波的衰减指数为 3.31,黄土的固有振动波周期为 94.8 ms,振动频率为 10.5 Hz,振动波声速为 137 m/s;

2) 黄土土壤动态屈服强度 σ_s 为 1.67 MPa;

3) 黄土土壤在爆炸中的塑形变形区域很小;

4) 黄土土壤中冲击波阵面与破坏阵面分离时,冲击波阵面处的压缩度 ε 为 0.02。

参考文献:

- [1] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 3版. 孙承伟,译. 北京: 科学出版社,2011.
- [2] 杨峻,吴世明. 饱和土中弹性波的传播特性[J]. 振动工程学报,1996,9(2):128-137.
- [3] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社,1984.
- [4] 徐学勇,武金贵,李炜,等. 饱和土中爆炸应力波传播特性研究[J]. 爆破,2013(1):54-57.
- [5] 穆朝民,齐娟,辛凯. 高饱和度饱和土中爆炸波的传播特性[J]. 土木建筑与环境工程,2010(1):18-23.
- [6] 穆朝民,任辉启,辛凯,等. 变埋深条件下土中爆炸成坑效应[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2010(2):112-116.
- [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(4):352-357.
- [8] 赵均海,冯红波,田宏伟,魏雪英. 土中爆炸作用的数值分析[J]. 建筑科学与工程学报,2011(1):96-99,117.
- [9] 施鹏,辛凯,杨秀敏,等. 土中装药不同埋深爆炸试验研究[J]. 工程力学,2006(12):171-174.
- [10] 赵丽娅,鞠兴华,刘保健,等. 不同含水率下非饱和黄土K0固结特性试验[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(2):120-123.