

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.04.008

圆柱形装药在土壤-混凝土复合介质靶中的爆炸开坑规律^{*}

李贺楠 祖旭东

南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

[摘要] 为了探究炸药在土壤-混凝土复合防护工事的表层土壤的爆炸开坑情况及最佳爆破深度,在土壤-混凝土复合介质与单土壤介质两种条件下,对 JH-2 圆柱形装药在不同埋药深度中的爆炸进行了数值模拟。研究了药柱爆炸后爆坑的形成和发展规律。在 8 种不同埋药深度及有、无混凝土层的情况下,对比分析了爆坑的形状及尺寸。通过理论计算,得到 80 g JH-2 药柱在土中抛掷爆破时爆坑的最大半径及相应的埋药深度。对比研究了相同药量、不同埋药深度时土壤与土壤-混凝土两种工况下的爆坑形状与尺寸大小。结果表明:混凝土层反射的冲击波可以对土壤层表面进行二次破坏,使得爆坑的崩落区明显变大。通过试验验证发现,在埋药深度为 350 mm 时,80 g JH-2 圆柱形装药可以在土壤-混凝土复合介质靶中形成一个大量且稳定的爆坑,爆坑的形状、尺寸与仿真和理论计算结果吻合。

[关键词] 圆柱形装药;土壤-混凝土;爆炸;冲击波;埋药深度

[分类号] TQ560.7; O383⁺.2

The Law of Explosion Pit Opening of Cylindrical Charge in Soil-Concrete Composite Medium Targets

LI He'nan, ZU Xudong

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to investigate the explosive excavation situation and optimal blasting depth in the surface soil of the soil-concrete composite protective fortifications, numerical simulations were conducted on the explosion of JH-2 cylindrical charges at different burial depths under two conditions: soil-concrete composite medium and soil medium. The formation and development laws of explosive pits after the explosion of explosive column were studied. Shapes and sizes of the explosion pits were compared and analyzed under eight different burial depths and with or without concrete layers. By theoretical calculation, the maximum radius of the explosion pit and corresponding burial depth during cast blasting of 80 g JH-2 charge in soil were obtained. A comparative study was conducted on the shape and size of blast pits in soil and soil-concrete under two working conditions, with the same amount of explosives and different burial depths. The results indicate that the shock waves reflected by the concrete layer can cause secondary damage to the surface of the soil layer, making the collapse area of the blasting pit significantly larger. Through experimental verification, it was found that at a burial depth of 350 mm, the 80 g JH-2 cylindrical charge can form a large and stable explosion pit in the soil-concrete composite medium target. The shape and size of the explosion pit are consistent with simulation and theoretical calculation results.

[KEYWORDS] cylindrical charge; soil-concrete; explosion; shock wave; burial depth

0 引言

自二战以来,反工事弹为实现军事目的乃至战

争的胜利发挥了巨大的作用。但是在现代战争中,一些重要军事设施的表面覆盖着坚实的夯土层,土壤中的固体物质、液体物质以及气体物质相互联系、相互制约,构成了一个矛盾的统一体。由于内部组

* 收稿日期:2022-10-14

基金项目:国家自然科学基金(11872214)

第一作者:李贺楠(1997-),男,硕士,主要从事高效毁伤和防护研究。E-mail:2945055885@qq.com

通信作者:祖旭东(1983-),男,副教授,主要从事高效毁伤和防护研究。E-mail:zuxudong9902@mail.njust.edu.cn

成结构复杂且疏松,土壤是一种良好的吸能材料,会影响动能弹丸的侵彻能力,降低射流穿深,从而影响到目标防护工事的破坏效果。目前的反工事武器很难对这种土壤-混凝土复合工事施行有效的摧毁。因此,在现阶段,开展对防御工事表面土壤目标的爆破抛掷研究具有重要的现实意义,为我军打赢未来高技术条件下的局部战争提供重要保障。

土中的爆炸问题向来比较复杂,影响土壤材料特性的因素较多,如骨料配比、含水量等。在试验研究中,临空面、装药形状和天然裂隙等都可能对爆炸开坑产生影响^[1]。对于复合介质,爆炸波引发的结构变形会反过来改变爆炸波参数和结构表面的压力^[2]。爆炸波与结构的相互作用,使得求解土中爆炸问题的难度又大大增加。

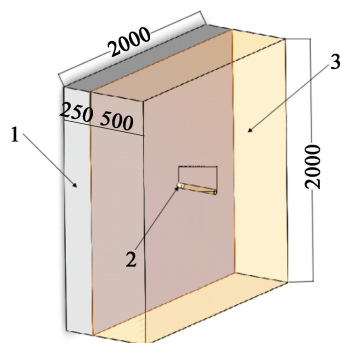
在理论方面,国外学者提出了空腔膨胀理论,并对球形空腔膨胀作用的材料及模型进行了分析改进,将球形空腔膨胀理论应用扩展到了高速撞击侵彻问题。随后,学者们研究了球形、柱形空腔膨胀理论在高强度塑性材料中的侵彻应用^[3-4]。国内学者中,穆朝民等^[5]通过改变 TNT 的比例埋深,将试验与仿真相结合,得到了压实弹坑尺寸与比例埋深的关系。周向阳^[6]、江水德等^[7]和刘伟等^[8]都通过仿真对不同工况下的土壤爆炸进行了相应的理论分析,但是均缺乏试验验证,且并没有对混凝土反射爆炸冲击波的情况进行分析。徐学勇等^[9]分析了爆炸载荷作用下土壤的变化特性,并推导了爆炸应力波在均质且饱和土壤中传播的有效应力运动方程,但是同样缺乏试验验证。赵均海等^[10]、柳锦春等^[11]分别分析了炸药在土中爆炸时和地面接触爆炸时土介质的动力响应、冲击的传播规律,并建立了计算公式。

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对质量 80 g 的 JH-2 圆柱形装药的土中爆炸作用进行了数值模拟,研究比较了有、无混凝土两种工况下不同埋药深度对土壤爆炸坑的影响,将仿真结果与试验结果进行了对比和分析,进而验证了该计算模型的准确性。

1 土壤中爆炸的计算模型及计算参数

1.1 土壤-混凝土复合介质靶与土壤靶计算模型

土壤-混凝土复合模型如图1所示。计算模型主要包括土壤、炸药、混凝土、空气4种材料。土壤中的炸药采用JH-2烈性炸药,压装药80 g,起爆点位于药柱顶端。药柱为直径40 mm、高40 mm的圆



1 - 混凝土层;2 - 药柱;3 - 土壤层。

图1 土壤-混凝土复合模型剖面图(单位:mm)

Fig. 1 Cross-sectional view of the soil-concrete composite model (Unit: mm)

柱体。土壤层尺寸为 2 000 mm × 2 000 mm × 500 mm。混凝土层为 2 000 mm × 2 000 mm × 250 mm 的立方体。空气域的尺寸为 2 100 mm × 2 100 mm × 1 110 mm。

采用 Solid164 八节点单元模型。炸药和空气单元采用 ALE 算法;土壤和混凝土采用 Lagrange 算法。药柱爆炸时从顶端起爆,网格划分采用映射网格;计算模型对称面采用位移约束界面条件,底部采用固定边界条件,其他面采用非反射边界条件。由于该系统高度对称,只取实际模型的 1/4 进行仿真计算。土壤-混凝土计算模型如图 2(a) 所示,土壤计算模型如图 2(b) 所示。土壤模型的尺寸为土壤-混凝土复合模型的土壤层与混凝土层的整体尺寸,其余条件与复合模型完全相同。

1.2 相关材料计算参数

1.2.1 炸药

JH-2 炸药采用 High_Explosive_Bure 材料模型和 JWL 状态方程进行数值模拟。JWL 状态方程为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}. \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料参数; p 为炸药压力; V 为相对体积; E_0 为初始内能。

JH-2 炸药的材料参数^[12]见表 1。

1.2.2 土壤

土壤采用 Mat_Soil_and_Foam 材料模型,参数见表 2^[10]。

表 2 中: ρ_0 为土壤密度; G 为土壤的切变模量; A_0 、 A_1 、 A_2 为塑性屈服作用常数。

表 3 为土壤模型的应力、应变关系^[10]。 $V_1 \sim V_{10}$ 为土壤的体积应变; $p_1 \sim p_{10}$ 为对应的相对应力。

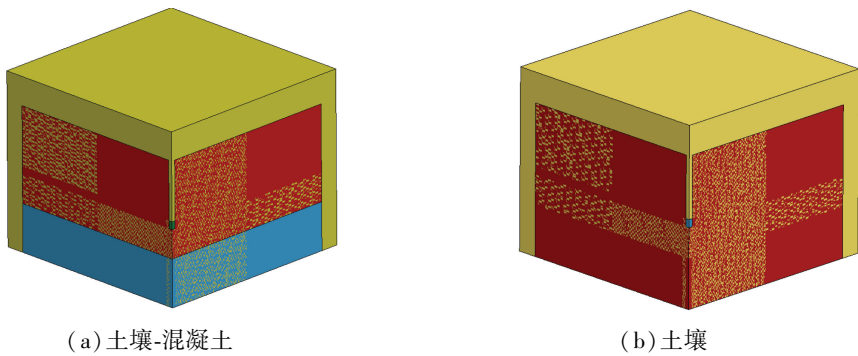


图 2 圆柱形装药爆炸仿真模型

Fig. 2 Explosion simulation models of the cylindrical charge

表 1 JH-2 炸药的材料参数

Tab. 1 Material parameters of JH-2

$A/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-1})$	$B/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-2})$	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-2})$	V
8.54	0.204	4.6	1.35	0.25	0.085	1.0

表 2 土壤的材料参数

Tab. 2 Material parameters of soil

$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G_0/GPa	A_0	A_1	A_2
1.80	6.38×10^{-4}	3.4×10^{-13}	7.03×10^{-7}	0.3

表 3 土壤模型的应力、应变关系

Tab. 3 Stress-strain relationships for the soil model

体积应变	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
数值	0	0.104	0.161	0.192	0.224	0.254	0.271	0.283	0.290	0.400
相对应力/N	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}
数值	0	2.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}	1.2×10^{-3}	2.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	4.1×10^{-2}

1.2.3 空气

空气采用 LS-DYNA 中的 Null 材料模型和 Eos_Linear_Polyomial 状态方程。

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E'.$$

(2)

式中: p 为压力; $\mu = \rho/\rho'_0 - 1$; ρ'_0 为参数密度; ρ 为当前物质密度; E' 为单位体积内能; $C_0 \sim C_6$ 为常数。

1.2.4 混凝土

混凝土采用 Mat_Plastic_Kinema-tic随动硬化模型。主要参数见表 4。表 4 中: ρ_1 为混凝土的密度; E_1 为弹性模量; G_1 为切变模量; μ 为泊松比; ξ 为混凝土的变形模量; β 为混凝土的硬度系数。

2 爆坑计算与仿真结果分析

2.1 浅土埋深中爆炸成腔尺寸计算

炸药浅埋在土中爆炸时,爆炸冲击波到达土壤

表 4 混凝土模型的主要材料参数

Tab. 4 Main material parameters of the concrete model

$\rho_1/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E_1/GPa	G_1/GPa	μ	ξ	β
2.6	0.4	1.0	0.3	4.0	0.5

表面会反射回来,形成拉伸稀疏波。由于稀疏波、压力波和爆炸产物的作用,炸药上方的土体获得向上的速度,进而鼓起,形成隆起鼓包。

随着爆炸的进行,土壤上方的隆起不断增高,在地表产生拉伸波和剪切波,使得地表介质产生振动和飞溅。部分破坏的土壤将以较大的速度被抛掷,至最大高度后回落,形成抛射型爆炸漏斗坑,简称为爆坑。

为便于研究装药土中爆炸开坑问题,作如下假设:

- 1) 介质是均匀的,且不可被压缩;
- 2) 不考虑介质变形和破坏的能量;
- 3) 炸药瞬时爆炸。

根据土壤爆炸膨胀理论,土壤中炸药爆炸后的膨胀区最大半径

$$r_{\max}=r_0\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{JH-2}}Q}{\rho_0\varepsilon_k}}。$$
 (3)

式中: r_{\max} 为膨胀区最大半径; r_0 为药柱半径; $\rho_{\text{JH-2}}$ 为 JH-2 药柱密度; ρ_0 为土壤密度,约为 1.80 g/cm^3 ; Q 为单位爆轰能量; ε_k 为土壤明显变形终止时的极限能量密度。

$$\varepsilon_k=\frac{3p_{\text{cr}}}{\rho_0}\left(\sqrt{\frac{\rho_0^*}{\rho_0}}-1\right)。$$
 (4)

式中: p_{cr} 为爆炸压力; ρ_0^* 为受到爆炸压力作用后的土壤密度。

$\rho_{\text{JH-2}}=1.69\text{ g/cm}^3$, $\rho_0=1.80\text{ g/cm}^3$, $Q=4.6\text{ kJ/g}$ 。一般假设 $\rho_0^*/\rho_0=2$, 当 $p_{\text{cr}}=2\text{ MPa}$ 时, 计算可得 $\varepsilon_k=1\text{ J/g}$ 。

药柱半径 $r_0=0.02\text{ m}$, 由式(3)可求得土中爆炸膨胀区最大半径 $r_{\max}=0.32\text{ m}$ 。

炸药质量 w 与爆坑深度 h 经验公式为

$$\begin{cases} w=K_1f(n)h^3; \\ f(n)=\frac{2(3n^2+4)^2}{n+97}。 \end{cases}$$
 (5)

式中: K_1 为装药性质决定的系数,一般取 $0.7\sim1.0$; n 为爆坑的径深比, $n=r_{\max}/h$ 。

将炸药质量 $w=80\text{ g}$ 、爆坑半径 $r_{\max}=0.32\text{ m}$ 、 $K_1=0.7$ 带入式(5), 计算得到理论的爆坑最大深度 h 约为 0.368 m 。

上述公式主要用于无限边界条件下的最大爆炸成坑计算。对于有限边界的埋药爆炸以及土壤-混凝土复合条件下的爆炸成坑可以提供一个参考数据。由于混凝土层的存在, 当炸药起爆后, 爆炸冲击波传播到土壤与混凝土交界面时, 混凝土反射的冲击波可能会对土壤结构产生影响, 进而影响爆炸开坑效果。

炸药在土壤中爆炸后, 当混凝土层未出现断裂、破碎现象时, 可被视为刚壁。根据波动力学理论, 当爆轰波传播到刚壁界面时, 近似反射波的 Hugoniot 方程^[13]为

$$p=\frac{1}{2}(\gamma+1)\rho_0(U-2U_{\text{CJ}})^2+\rho_0Q_0(\gamma-1)。$$
 (6)

由于波传播到刚壁界面时, 有 $U=0$, 则

$$p_1=2(\gamma+1)\rho_0U_{\text{CJ}}^2+\rho_0Q_0(\gamma-1)。$$
 (7)

另外,

$$p_{\text{CJ}}=\frac{1}{2}(\gamma+1)\rho_0-2U_{\text{CJ}}^2+\rho_0Q_0(\gamma-1);$$
 (8)

$$p_{\text{CJ}}=2\rho_0Q_0(\gamma-1)。$$
 (9)

则有

$$p_1=\frac{3}{2}(\gamma+1)\rho_0U_{\text{CJ}}^2+p_{\text{CJ}}=\frac{5}{2}p_{\text{CJ}}。$$
 (10)

即爆轰波在刚壁界面反射后的强度为入射强度的 2.5 倍。

2.2 两种模型仿真结果分析

为了探究混凝土层对圆柱形装药在土壤中爆炸开坑的影响, 分别对 100、150、200、250、300、350、400、450 mm 8 种不同埋药深度情况下的有、无混凝土两种模型进行了数值仿真, 结果如图 3。

图3中: 上面的为俯视图; 下面的为剖面图, 左

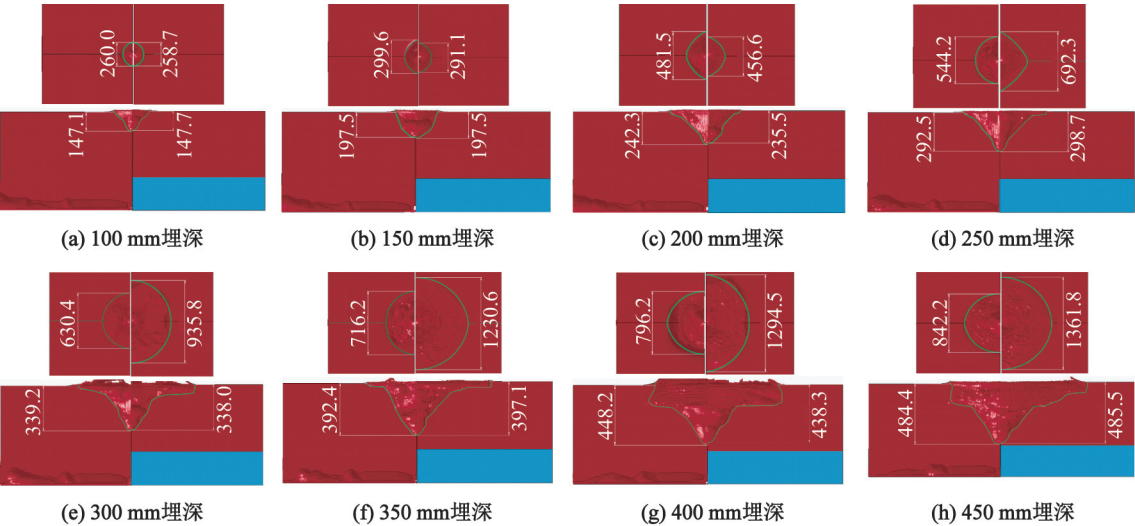


图 3 不同埋药深度时的爆炸成坑对比(单位:mm)

Fig. 3 Comparison of explosion cratering at different burial depths (unit: mm)

侧的为土壤模型;右侧的为土壤-混凝土模型;绿色实线为爆坑边界线。由图 3 可以清楚地看到,随着炸药埋深的增加,在两种模型内形成的漏斗状爆坑越来越大,并且形状相似度极高。爆炸结束后,土壤-混凝土模型中的混凝土层未发生变形和破坏;土壤模型的背面由于受爆炸冲击波影响,出现了变形和崩落。

测量装药在不同埋药深度起爆后对应的爆坑尺寸,得到图4和图5。对照可以发现:当埋药深度为 100~200 mm时,两种模型的爆坑形状尺寸几乎相同;随着埋药深度的增加,爆坑的最大直径明显增

大,并且土壤-混凝土复合介质模型表面的崩落区域明显大于土壤介质模型的崩落区域。在埋药深度为 250、300、350、400、450 mm 时,复合模型的崩落区半径相较于土壤模型分别增大 26.90%、48.44%、71.80%、62.57%、61.70%。当土壤-混凝土模型的埋药深度大于 350 mm 时,爆坑最大直径的增长明显变缓。两种模型在相同条件下的爆坑深度高度一致,且受埋药深度影响较小,80 g JH-2 炸药在爆炸作用下,炸药正下方土壤型变量约为 46.6 mm。

对比两种模型的爆坑形状。当埋药深度达到 250 mm 时,可以看到土壤-混凝土模型率先出现明显的土壤表面崩落现象;随着埋药深度的增大,两种模型的崩落区尺寸差距愈发明显。但是,二者的土壤膨胀区的形状尺寸差别极小,故可以推断混凝土层反射的爆炸冲击波可以对土壤进行二次破坏,并主要作用于土壤表面的崩落区域。

2.3 350 mm 埋深下的爆坑形成过程

JH-2 圆柱形药柱爆炸后,爆炸产生的高温、高压气体和强烈的爆炸冲击波冲击药柱周围的土壤。在高温、高压气体和冲击波的联合作用下,药柱周围的土壤发生剧烈的塑性变形,形成空腔破坏。随着冲击波波阵面与药柱距离的增加,当冲击波传播进一步衰减成弹塑性或弹性应力波后,波阵面的超压低于土壤的强度极限时,对土壤层的破坏停止。

土壤-混凝土复合模型在埋药深度 350 mm 时爆坑的形状变化如图 6 所示。

图 6 中可以看到,土中爆坑近似于一个漏斗形状。药柱四周及下方区域是爆炸时产生的冲击波和土壤相互作用而形成的压密空腔。在药柱上方,当爆炸产生的冲击波传播到土壤层表面后,反射产生了拉伸稀疏波,使药柱上方土壤的密度降低,由于地面没有阻力,且土壤颗粒具有更大的向上运动速度,从而产生大的开坑抛掷现象,进而形成爆坑。测量得到爆坑的最大半径为 615.3 mm、爆坑深度为 397.1 mm、爆炸膨胀区半径为 282.6 mm。

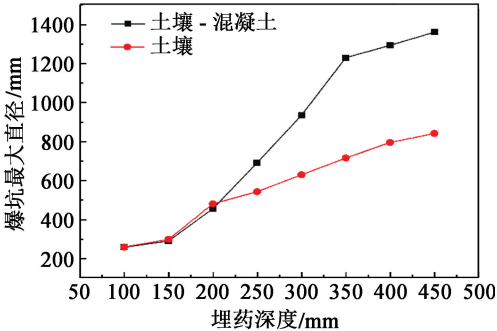


图 4 不同埋药深度时的爆坑最大直径
Fig. 4 Maximum diameter of blasting pit at different burial depths

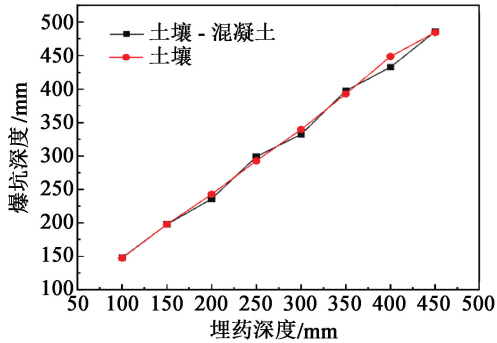


图 5 不同埋药深度时的爆坑深度
Fig. 5 Depth of blasting pit at different burial depths

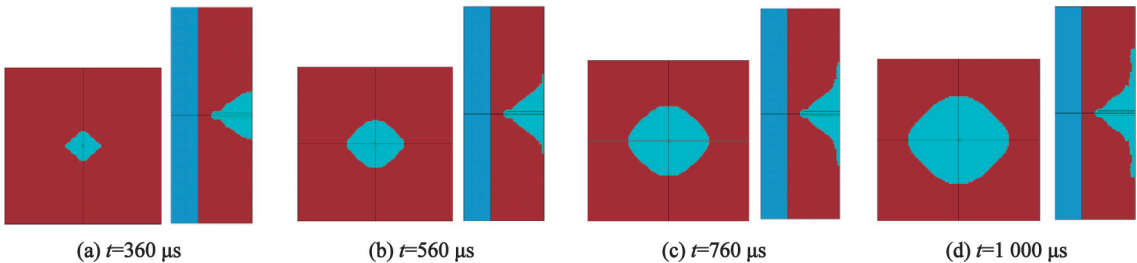


图 6 土壤-混凝土复合模型炸药起爆后不同时刻的爆坑形状
Fig. 6 Shapes of blasting pits in the soil-concrete composite model at different times after detonation of explosives

3 试验验证

3.1 场地布置

为检验计算模型的有效性,开展了土壤-混凝土复合靶浅埋炸药静态爆炸试验。最佳爆破深度的经验公式为

$$H=K_2\sqrt[3]{w}。$$
 (12)

式中: K_2 取 0.80~0.95; w 为装药质量。

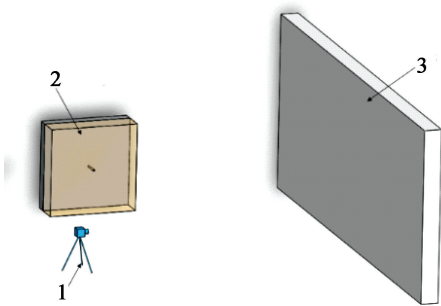
经计算,理论最佳埋药深度约为 344.6~408.5 mm。根据 2.2 的仿真结果,最终将埋药深度定为 350 mm。

图 7 为试验所用药柱。试验场地布置情况如图 8 所示。



图 7 试验用药柱

Fig.7 Explosive column used in the test



1 - 高速摄像机;2 - 土壤-混凝土靶;3 - 掩体。

图 8 试验场地布置

Fig.8 Layout of test site

所用裸装药药量为 80 g,药柱直径为 40 mm。土壤层的尺寸为 2 000 mm×2 000 mm×500 mm。在土壤层预留一个直径为 40 mm、深度为 350 mm 的孔道,将 JH-2 药柱放置在该孔道深处,通过 8# 雷管控制起爆。

3.2 试验结果

试验结果如图 9 所示。药柱在土壤层 350 mm 深度处起爆,形成球形爆坑,且造成表面土壤较大面积的崩落。崩落的土壤堆积在爆炸坑较近的距离内,未致崩落土壤远距离飞散。爆炸形成的漏斗形

爆坑直径为 580 mm,爆坑与土壤层表面的最远距离为 400 mm,表面土壤崩落区域的最大尺寸为 1 260 mm。



图 9 土壤崩落直径

Fig.9 Collapse diameter of soil

将试验结果与 2.1 中的理论计算结果和 2.3 中 350 mm 埋药深度下的仿真结果相对比,整理得到图 10。通过图 10 可以直观地看到,试验与仿真得到的爆坑形状尺寸几乎相同,且尺寸误差在 3% 以内。试验测得爆坑与土壤层表面的最远距离为 400 mm,即药柱正下方的土壤形变量为 50 mm。对比图 4 和图 5 的仿真结果可知,仿真得到的数据可靠。

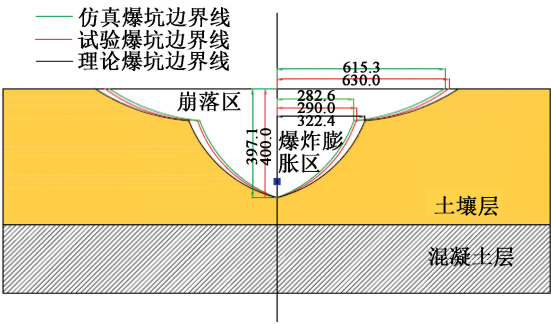


图 10 仿真、试验及理论计算对应的爆坑形状(单位:mm)

Fig.10 Crater shapes obtained from simulation, test and theoretical calculation (unit: mm)

4 结论

计算了有、无混凝土两种工况下不同埋药深度的 JH-2 药柱的爆炸过程以及土壤的开坑抛掷情况,并与试验结果进行比对,得到:

- 1)当埋药深度不超过 450 mm 时,引爆 80 g 的 JH-2 炸药,埋药深度与爆坑尺寸正相关;通过理论计算,得到可以形成最大爆炸膨胀区的埋药深度约为 368 mm。
- 2)混凝土层反射的冲击波可对土壤层进行二

次破坏,且主要作用在土壤表面,进而形成表面崩落区。当埋药深度达到 350 mm 时,复合模型崩落区尺寸相对于土壤模型的尺寸增长长度达到峰值。

3)在相同炸药埋深下,对土壤-混凝土与土壤两种工况中起爆形成的爆坑进行对比发现,爆坑深度受埋药深度影响较小。

参 考 文 献

[1] 张伟,刘杰,韩旭,等. 土中爆炸成腔问题中确定炸点状态的一种计算反求方法[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 231-237.
ZHANG W, LIU J, HAN X, et al. A computational inverse technique for determination of detonator status in underground explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3): 231-237.

[2] 王羽,高康华. 土中爆炸波与地下结构相互作用计算方法研究综述[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 703-710.
WANG Y, GAO K H. Review on calculation methods for interaction between explosion waves in soil and underground structures [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(5): 703-710.

[3] LANGEPE D B, FORRESTAL M J. Penetration of targets described by a Mohr-Coulomb failure criterion with a tension cutoff [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(2): 327-333.

[4] FORRESTAL M J. Penetration into dry porous rock [J]. International Journal of Solids and Structures, 1986, 22(12): 1485-1500.

[5] 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, 11(2): 112-116.
MU C M, REN H Q, XIN K, et al. Effects of crater formed by explosion in soils [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 112-116.

[6] 周向阳. 炸药在土壤内部爆炸作用的数值分析[J]. 爆破器材, 2011, 40(6): 12-14, 18.
ZHOU X Y. Numerical analysis on explosion of explosive in soil [J]. Explosive Materials, 2011, 40(6): 12-14,

18.
[7] 江水德,江婕瑞. 常规爆炸作用下土中浅埋高强混凝土结构试验[J]. 防护工程, 2018, 40(3): 1-4.
JIANG S D, JIANG J R. Test of shallow-buried high-strength concrete structure under blast loading [J]. Protective Engineering, 2018, 40(3): 1-4.

[8] 刘伟,郑毅,程先有. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的土中爆炸数值模拟[G]//刘代志. 国家安全地球物理丛书(七): 地球物理与核探测. 西安: 西安地图出版社, 2011: 306-310.
LIU W, ZHENG Y, CHENG X Y. Numerical simulation of explosion in soil using ANSYS/LS-DYNA [G]//LIU D Z. National Security Geophysics Series (VII): Geophysics and Nuclear Exploration. Xi'an: Xi'an Map Press, 2011: 306-310.

[9] 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, 30(1): 54-57.
XU X Y, WU J G, LI W, et al. Study on characteristics of explosion stress wave propagation in saturated soil [J]. Blasting, 2013, 30(1): 54-57.

[10] 赵均海,冯红波,田宏伟,等. 土中爆炸作用的数值分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 96-99, 117.
ZHAO J H, FENG H B, TIAN H W, et al. Numerical analysis of explosion process in soil [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 96-99, 117.

[11] 柳锦春,方秦,还毅,等. 炸药地面接触爆炸下土中感生地冲击的实用计算方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 121-124.
LIU J C, FANG Q, HUAN Y, et al. Practicable calculating method of indirect ground shock in soil at surface contact explosion [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 121-124.

[12] 陈建军. 某单兵末修火箭破甲弹及其引信相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[13] 高光发. 波动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
GAO G F. Foundations of waves mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2019.