DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0799-08

低含水率砂土和饱和砂土场地爆炸成坑特性实验*

贾永胜[1],王维国[2],谢先启[1,3],杨 贵[3],姚颖康[1,3]
(1.武汉市市政建设集团,湖北 武汉 430023;
2.宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司,浙江 宁波 315124;
3.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:爆坑是土中爆炸荷载作用下的主要响应形式,基于大型爆炸实验场地,开展了一系列低含水率砂土和饱和砂土中的爆炸成坑现场实验,研究了药量、埋深及含水率等因素对土中爆坑效应的影响。研究结果显示:根据药包的比例埋深,低含水率砂土场地的最终爆坑形态可以分为隐爆、塌陷型漏斗坑和抛掷型爆坑 3 类,发生封闭爆炸的临界比例埋深为 2.3 m/kg$^{1/3}$;形成抛掷型爆坑的条件为比例埋深小于 1.5 m/kg$^{1/3}$;当比例埋深为 1.5~2.3 m/kg$^{1/3}$时,形成塌陷型漏斗坑。土中孔隙水压力的增大导致坑壁周围土体发生了液化流动、坍塌,最终造成爆坑横向尺寸的扩大。相同爆源条件下,饱和砂土场地形成的坑面直径比低含水率砂土场地提高了 25%~35%,饱和砂土场地发生封闭爆炸的极限比例埋深可达 2.5 m/kg$^{1/3}$。

关键词:低含水率砂土;饱和砂土;现场实验;爆坑形态;爆坑尺寸;比例埋深
中图分类号:O383.1;TU 437 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

爆坑是土中爆炸荷载作用下的主要响应形式,也是土体爆炸领域的新兴研究热点之一。地雷爆炸及其对周围构筑物的损毁评价,掩体、坑道工事快速开挖等具有军事目的的行为,是促进早期土中爆炸研究的重要因素。

近几十年来,在高含水率软弱地基处理、地下空间快速开挖等工程中,控制爆破技术也得到了飞速的发展和应用[1-2]。土中爆炸成坑机制复杂,爆炸作用下成坑规律的理论研究多用于定性的分析,而定量分析仍依赖对实验成果的统计。已有研究成果表明,土体含水率对爆炸成坑特征具有不可忽视的影响,穆朝明等[3-4]、施鹏等[5]根据一系列爆坑实验,确定了干(饱和)砂及黄土中发生封闭爆炸的临界比例埋深。P. T. Simpson 等[6]针对干性和含水砂土填筑的堤坝,开展了坝顶接触爆炸条件下的离心机爆坑实验,分析了含水率对爆坑尺寸的影响。

含水甚至饱和的岩土材料分布非常广泛,某些特殊部位的土体发生爆坑破坏后,将造成致命的灾害。本文中,基于大型爆炸实验场地,开展一系列低含水率砂土和饱和砂土场地中的爆坑实验,以研究药量、埋深及含水率等因素对爆坑形态和尺寸的影响。实验结果对岩土工程的抗爆炸设计、防护和加固具有参考意义,也可为爆炸成坑数值计算提供验证资料。

1 土中爆炸成坑特征

爆坑最终形态往往与土体性质、爆炸荷载以及重力密切相关。对于小药量或者小埋深爆炸,用于克服土粒间黏聚力的爆炸能量远大于克服抛掷土体重力部分的能量,因此通常可以不考虑重力作用的影响,此时爆坑尺寸与药量成正比,且符合立方根几何相似原则。而对于药包埋深较大的土中爆炸,用于克服抛掷土体重力部分的爆炸能量占比影响已经不能忽略,此时仅考虑几何相似的立方根爆坑尺寸预测公式已不完全适用。大量的土中爆炸成坑实验结果显示[7-8],重力的存在对爆坑尺寸和形态有明显的影响,考虑重力影响的抛掷爆坑尺寸公式与实验结果符合较好。

* **收稿日期**:2016-01-04;**修回日期**:2016-06-07
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51379067);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1125)
第一作者:贾永胜(1970—),男,博士,高级工程师;**通信作者**:王维国,2008hmily@163.com。

根据相似理论,炸药质量和埋置深度是决定土中爆炸成坑效应的最主要因素。衡量任何形式的爆炸源在相同条件下产生的爆炸破坏效应,通常可采用比例埋深描述土中埋药量和药包埋置深度的综合影响。对于集中药包,比例埋深定义为药包埋深 d 与等效 TNT 当量$(W_{\mathrm{TNT}})^{\alpha}$ 之比,其中 α 是与重力相关的系数。根据爆坑实验及量纲分析,对于小药量或小埋深爆坑,$\alpha=1/3$,比例埋深用 λ 表示;对于考虑重力影响的比例埋深 η,$\alpha=7/24$[8-10]。

2 实 验

2.1 场地

实验场地的上下圆截面直径分别为 19 和 16 m,实验坑的开挖深度为 3 m。原场地开挖区土质为高强度的低透水性黏土,坑内回填长江灰细砂,如图 1 所示。实验回填江砂的天然含水率为 6.6%,土粒平均粒径为 0.18 mm,不均匀系数为 2.11,相对于 4 ℃水的密度比为 2.633。低含水率回填砂土的密度为 1 440 kg/m^3,土层初始相对密实度为 27%~30%;饱和砂土密度为 1 835 kg/m^3,土层初始相对密实度为 30%~35%。



图 1 爆炸实验坑

Fig. 1 Pit for blasting experiments

2.2 设计

根据药包质量和埋深分别在低含水率砂土和饱和砂土场地设计 8 组和 6 组成坑实验,每组实验的实际药量及埋深如表 1 所示,药包布置位置如图 2 所示。采用抗水性能优异的 2 号岩石乳化炸药,炸药密度为 0.95~1.10 g/cm^3。根据爆轰实验结果,该炸药在低含水率砂土和饱和砂土中的等效 TNT 当量系数分别为 0.7 和 0.8[11]。

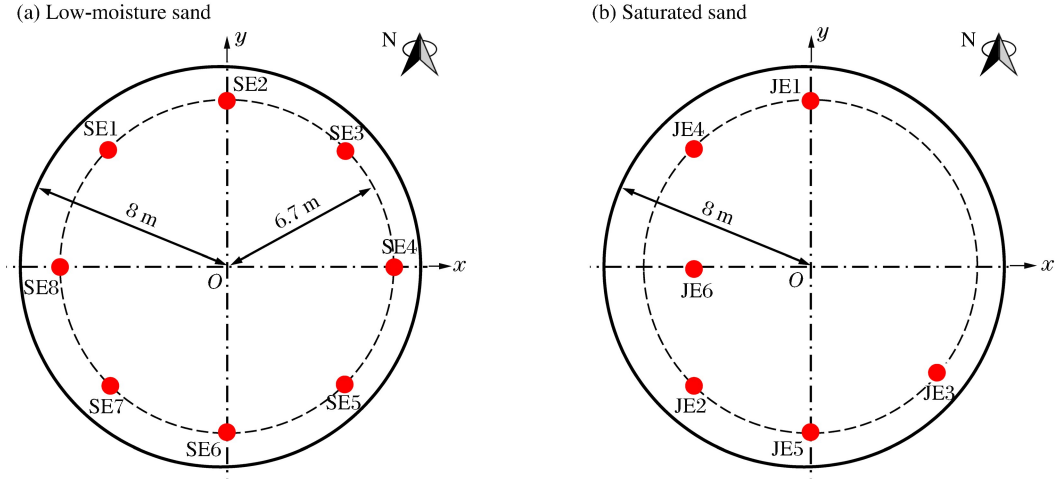

图 2 爆炸成坑实验药包布置

Fig. 2 Layout of explosive charges for blasting experiments

表 1 药孔的药量和埋深

Table 1 Charge mass and burial depth for each blasting experiment

编号	药量/kg	埋深/m	编号	药量/kg	埋深/m
低含水率砂土			饱和砂土		
SE1	0.2	1.0	JE1	0.3	1.13
SE2	0.4	1.0	JE2	0.4	0.83
SE3	0.8	1.0	JE3	0.3	0.93
SE4	0.2	1.5	JE4	0.4	1.35
SE5	0.4	1.5	JE5	0.4	0.93
SE6	0.8	1.5	JE6	0.2	1.35
SE7	0.2	0.5			
SE8	0.4	0.5			

3　结果与分析

3.1　低含水率砂土场地爆坑

每组实验完成后，观测爆坑形状轮廓并测量其直径和深度，各组实验爆坑的特征描述如表 2 所示。图 3 为低含水率砂土场地中爆点 SE1～SE8 爆后地表鼓包隆起特征随药包立方根比例埋深的变化，根据爆炸过程中地表鼓包运动特征或喷射物形状，可以将低含水率砂土场地中的爆坑行为分为 3 类：(1)当药包比例埋深 $\lambda \geqslant 2.3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 时，地表几乎观测不到隆起、破裂等特征，此时可认为发生隐爆或完全封闭爆炸，如爆点 SE4；(2)当 $1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}} \leqslant \lambda < 2.3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 时，地表面仅形成隆起的土穹顶而不发生抛掷现象，鼓包土体在自重作用下回落，同时内部空腔发生不稳定坍塌而下沉，最终形成塌陷型爆坑，如爆点 SE2(见图 4)；(3)当 $\lambda < 1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 时，爆轰气体具有足够的能量克服药包上覆土体的自重及土粒间的黏结力，使得药周土体以喷射物形式向外抛掷，药包底部和侧翼的土体在压缩波和稀疏波共同作用下被不断侵蚀和压密，最终形成抛掷型可见爆坑，如爆点 SE8(见图 5)。

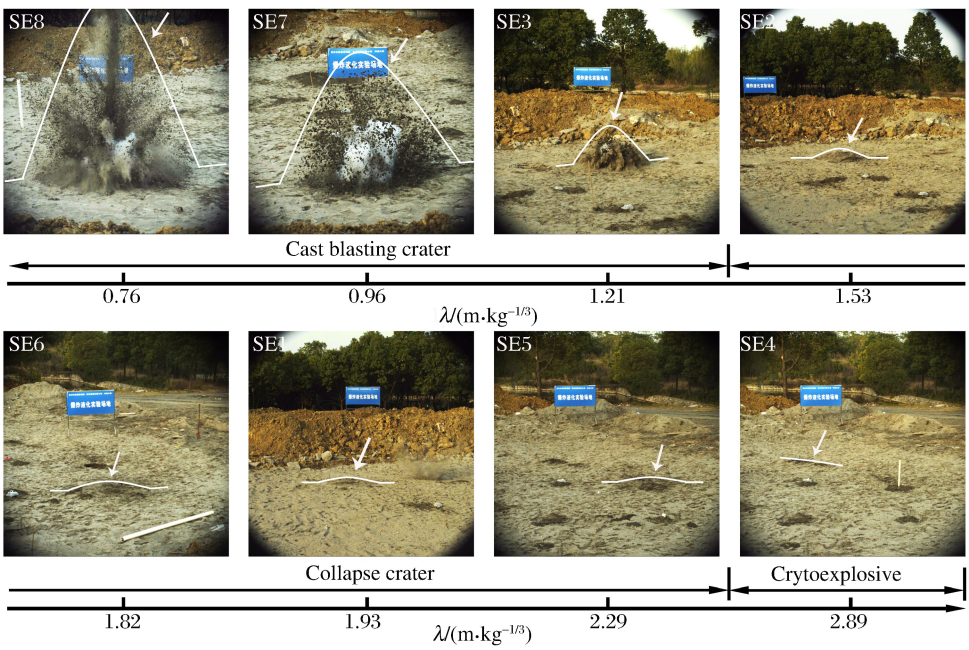

图 3 低含水率砂土场地爆后地表运动与药包比例埋深的关系

Fig. 3 Relationship between ejecta shape and scaled burial depth of charge in low-moisture sand

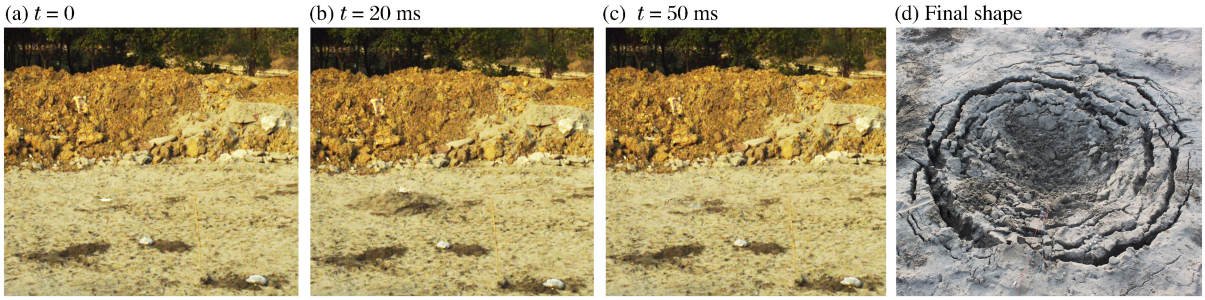

图 4 典型塌陷型爆坑的形成过程(SE2)

Fig. 4 Formation of collapse crater (SE2)

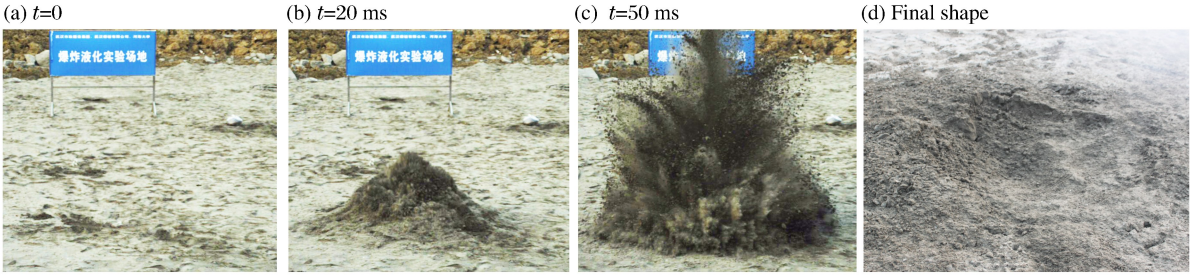

图 5 典型抛掷型爆坑的形成过程(SE8)

Fig. 5 Formation of a cast blasting crater (SE8)

表 2 低含水率砂土场地爆坑形态

Table 2 Blast-induced crater formation in low-moisture sand

编号	药包比例埋深		爆坑尺寸		爆坑形态特征描述
	λ/(m·kg$^{-1/3}$)	η/(m·kg$^{-7/24}$)	D/m	h/m	
SE1	1.93	1.77	0.50[1)]	0.40[1)]	无抛掷,地表隆起后下陷成塌陷型爆坑,爆坑周围有数圈不规则裂纹
SE2	1.53	1.45	1.30[1)]	0.30[1)]	鼓包明显但无抛掷,内陷形成塌陷型爆坑,爆坑周围有数圈不规则裂纹
SE3	1.21	1.18	1.20	0.32	发生明显抛掷,形成漏斗状可见爆坑
SE4	2.89	2.66	—	—	隐爆,地面未鼓包
SE5	2.29	2.17	0.74[1)]	0.30[1)]	无抛掷,地表特征不明显,爆后形成小型塌陷型爆坑,周边有明显裂纹
SE6	1.82	1.77	1.20[1)]	0.38[1)]	无抛掷,地表隆起后下陷成塌陷型爆坑,爆坑周围有数圈不规则裂纹
SE7	0.96	0.89	1.05	0.25	抛掷明显且抛掷距离较远,形成抛掷型可见爆坑
SE8	0.76	0.72	1.25	0.28	抛掷明显且抛掷距离远,形成抛掷型可见爆坑

1)塌陷型爆坑

图 6 为实验实测的抛掷型和塌陷型爆坑直径与药包埋深的关系,同时根据 ConWep 程序[12]给出了低含水率砂土中 0.2、0.4 和 0.8 kg 乳化炸药对应的爆坑直径与药包埋深的关系。爆点 SE3、SE7 和 SE8 的抛掷型爆坑直径实测值比 ConWep 程序的经验计算结果分别高 12.0%、17.6%和 8.2%。爆坑边缘的松散含水细砂,在爆后持续流向爆坑底部造成爆坑横向扩展,是引起偏差的主要原因。

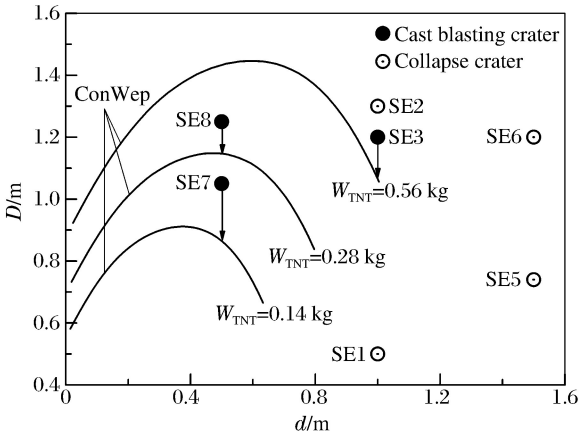

图 6　爆坑直径实验与 ConWep 计算的对比

Fig. 6　Comparison of crater diameter between experimental data and results suggested by ConWep

3.2　饱和砂土场地爆坑

饱和砂土中发生爆炸时，爆轰气体会携带上层土体以喷射物的形式透过自由面喷出，同时高温高压的气态爆轰产物渗入到土体孔隙中，而使得气室周围形成干土区，短时内仍会形成爆坑现象。饱和砂土场地中爆点 JE1～JE5 爆炸后短时内，均可在地表观测到爆坑现象，爆坑尺寸及形态特征见表 3。其中爆点 JE1 和 JE4 爆后形成的爆坑较小，短时内即被爆炸振动液化引发的流砂覆盖。爆点 JE6 的比例埋深 $\lambda=2.49\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$，爆后地表并未发生隆起或抛掷现象，即可认为在该比例埋深条件下，饱和砂土中已基本达到完全封闭爆炸的状态。

表 3　饱和砂土场地爆坑形态

Table 3　Blast-induced crater formation in saturated sand

编号	药包比例埋深		爆坑尺寸		爆坑形态特征描述
	λ/（m·kg$^{-1/3}$）	η/（m·kg$^{-7/24}$）	D/m	h/m	
JE1	1.82	1.71	—	—	能观测到地表土体破裂，形成的爆坑瞬间被液化引发的流砂及水覆盖
JE2	1.21	1.16	1.40	0.32	抛掷明显，但爆后能观测到坑壁有流动的砂土
JE3	1.50	1.41	1.20	0.32	抛掷明显，但爆后能观测到坑壁有流动的砂土
JE4	1.97	1.88	—	—	能观测到地表土体破裂，形成的爆坑瞬间被液化引发的流砂及水覆盖
JE5	1.36	1.30	1.25	0.36	抛掷明显，但爆后能观测到坑壁有流动的砂土
JE6	2.49	2.30	—	—	地表几乎观测不到隆起和抛掷现象

图 7 为饱和砂土场地的浅埋爆点 JE2、JE3 和 JE5 爆后 3 min 内拍摄的爆坑轮廓。由图可知，各爆点爆后抛掷物抛撒均匀，爆坑呈典型的火山坑形状。然而，爆后短时内在爆坑边壁附近可以观测到砂土颗粒的流动，这是由于饱和砂土在爆炸振动作用下抗剪强度严重削弱、爆坑周围饱和土颗粒发生了液化流动现象，从而可能导致爆坑横向尺寸的扩大。

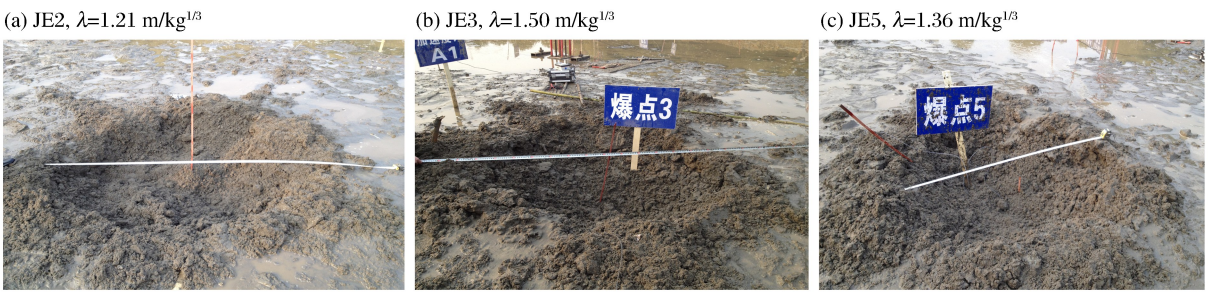

图 7　饱和砂土中典型的爆坑轮廓

Fig. 7　Contour of blast-induced craters in saturated sand

3.3 低含水率砂土和饱和砂土场地爆坑尺寸对比

选取乳化炸药药量 W 为 0.4 kg 的爆坑实验组进行对比分析，如表 4 所示。

表 4 低含水率砂土和饱和砂土场地爆坑直径对比

Table 4 Comparison of crater diameters in low-moisture and saturated sand

砂土	编号	W/kg	W_{TNT}/kg	d/m	D/m
低含水率	SE2	0.4	0.28	1.0	1.3[1)]
低含水率	SE8	0.4	0.28	0.5	1.25
饱和	JE2	0.4	0.32	0.83	1.4
饱和	JE5	0.4	0.32	0.93	1.25

注：塌陷型爆坑

图 8 给出了各对比实验组爆后实测的爆坑直径及 ConWep 程序的经验计算结果。相比较低含水率砂土场地，饱和砂土中的爆炸作用使爆坑周围局部土体有产生液化流动的趋势，将形成更大的爆坑面。即相同药量及埋深时，饱和砂土中的爆坑直径比低含水率砂土中更大。当低含水率砂土（w=6.6%）场地中埋置深度为 1 m 的 0.4 kg 乳化炸药爆炸时，药包上部土体在爆轰气体推动作用下发生鼓包，但并不能形成抛掷，最终形成塌陷型爆坑。通过低含水率砂土和饱和砂土中的爆炸成坑实验，在相同爆源条件下，饱和砂土中的爆坑直径及可能发生爆炸抛掷的比例埋深均比低含水率砂土中的大。

图 9 为低含水率砂土和饱和砂土场地的比例爆坑直径的对比情况，由于爆炸引起的饱和砂土液化流动，使在相同比例埋深条件下，饱和砂土中的爆坑横向扩展更剧烈。根据低含水率砂土和饱和砂土场地爆炸成坑实验结果，可以得到低含水率砂土和饱和砂土的爆坑直径经验拟合公式分别为：

$$\begin{aligned} D/(2d) &= 1.22(1/\eta) - 0.40 \\ D/(2d) &= 1.32(1/\eta) - 0.31 \end{aligned} \tag{1}$$

式中：D 为爆坑直径，m；d 为药包埋深，m；η 为药包比例埋深，m/kg$^{7/24}$。

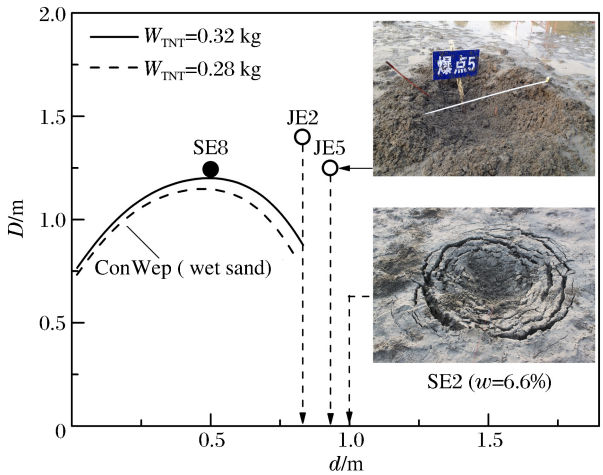

图 8 低含水率砂土和饱和砂土场地爆坑尺寸对比

Fig. 8 Comparison of blast-induced craters in low-moisture and saturated sand

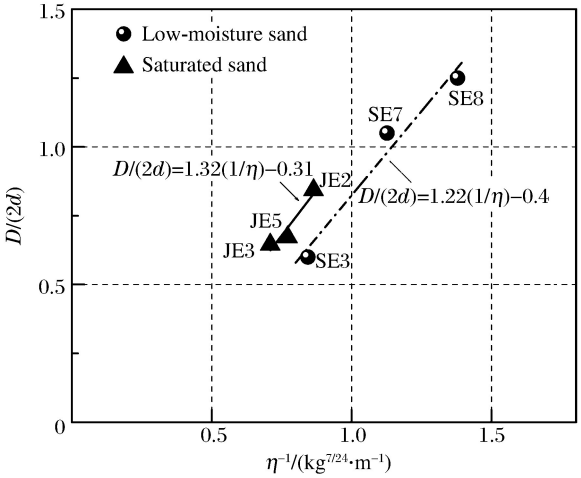

图 9 比例爆坑直径随比例埋深的变化

Fig. 9 Scaled crater diameter versus scaled burial depth

然而，爆坑直径经验拟合公式并未考虑土体的性质变化对爆坑尺寸的影响，同时仅针对某一特定土体含水率条件。根据图 9，相同药包比例埋深条件下，饱和砂土场地的爆坑直径相比低含水率砂土场地，可以提高 25%～35%。直接利用基于低含水率砂土场地条件的爆坑直径经验公式进行预测时会发生较大偏差，这是因为饱和砂土场地爆坑变形性质已发生了明显的变化，液化流动作用已成为爆坑后期变形的重要因素。

4 结 论

基于低含水率砂土和饱和砂土场地单药包爆炸成坑的现场实验，分析了药量、埋深及土体含水率等因素对土中爆坑效应的影响，并利用 ConWep 经验计算结果对爆坑试验进行对比，得到以下结论。

(1)地表面的运动特征或爆坑喷射物形状与药量和药包埋深密切相关，根据药包的比例埋深，低含水率砂土场地的最终爆坑形态可以分为隐爆、塌陷型漏斗坑和抛掷型爆坑 3 类。其中发生封闭爆炸的临界比例埋深 $\lambda=2.3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$；形成抛掷型爆坑需满足的条件为 $\lambda<1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$；当 $1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\lambda<2.3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 时，则形成塌陷型漏斗坑。

(2)低含水率砂土场地抛掷型爆坑 SE3、SE7 和 SE8 的直径实测值比 ConWep 预测结果分别高 12.0%、17.6%和 8.2%，爆坑边缘的松散含水细砂在爆后持续流向爆坑底部造成爆坑横向扩展是引起偏差的主要原因。

(3)当不考虑土体性质变化时，低含水率砂土和饱和砂土场地的比例爆坑直径 $D/(2d)$ 随 $1/\eta$ 的变化关系均可近似以直线描述。

(4)根据饱和砂土场地爆坑实验结果，土中孔隙水压力的增大导致坑壁周围局部土体发生了液化，从而使得土体发生流动、坍塌等现象，造成爆坑横向尺寸的扩大。在相同爆源条件下，饱和砂土场地形成的爆坑面直径相比较低含水率砂土环境可以提高 25%～35%，饱和砂土场地发生封闭爆炸的极限比例埋深可达 $2.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$。

参考文献：

[1] 连峰，龚晓南，徐杰，等. 爆夯动力固结法加固软基试验研究[J]. 岩土力学，2009，30(3)：859-864.
Lian Feng, Gong Xiaonan, Xu Jie, et al. Experimental research on soft foundation treatment by blasting ramming dynamic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 859-864.

[2] Gohl W B, Martin T, Elliott R J. Explosive compaction of granular soils and in situ liquefaction testing using sequential detonation of explosives[C]// Proceedings of the 1st International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories. Singapore, 2010: 199-207.

[3] 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 Chaomin, Ren Huiqi, Xin Kai, 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.

[4] 穆朝民，任辉启，李永池，等. 变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究[J]. 岩土力学，2010，31(5)：1574-1578.
Mu Chaomin, Ren Huiqi, Li Yongchi, et al. Experiment study of explosion energy coupling coefficient with different burial depths in saturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1574-1578.

[5] 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，2006，23(12)：171-174.
Shi Peng, Xin Kai, Yang Xiumin, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12): 171-174.

[6] Simpson P T, Zimmie T F, Abdoun T B. Explosion tests on embankment models in the geotechnical centrifuge[C]// Proceedings of International Conference on New Developments in Geoenvironmental and Geotechnical Engineering. Incheon, Korea: Korean Institute of Construction Technology Education, 2006: 1-8.

[7] 钱七虎，王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

[8] 钱七虎. 大型抛掷爆破中的重力影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2010，11(2)：103-105.
Qian Qihu. Influence of gravity in large-scale throw blasting[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 103-105.

[9] Ambrosini R D, Luccioni B M, Danesi R F. Influence of the soil properties on craters produced by explosions on the soil surface[J]. Mecánica Computacional, 2004, 73(3): 1-20.

[10] Luccioni B M, Ambrosini R D, Nurick G N, et al. Craters produced by underground explosions[J]. Computers and Structures, 2009,87(21/22):1366-1373.

[11] Wang P, Xei X A, He W D. Preparation and performance of a novel water gel explosive containing expired propellant grains[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2013,10(4):495-507.

[12] Hyde D W. Microcomputer programs of TM5-855-1: ConWep[Z]. Army Engineers Waterways Experimentation Station, US Army, 1988.

Characterization of blast-induced craters in low-moisture and saturated sand from field experiments

Jia Yongsheng[1], Wang Weiguo[2], Xie Xianqi[1,3], Yang Gui[3], Yao Yingkang[1,3]

(1. *Wuhan Municipal Construction Group*, *Wuhan* 430023, *Hubei*, *China*;
2. *Ningbo Communication Construction Engineering Testing Center Co. Ltd*, *Ningbo* 315124, *Zhejiang*, *China*;
3. *College of Civil and Transportation Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Craters are the main response-induced form of underground explosion loadings. A series of field experiments were conducted in low-moisture and saturated sand in a large-scale experiment pit to study crater formation induced by underground explosions. The influence of charge mass, burial depth and moisture content on the crater diameter were analyzed. The results showed that, for a crater in sand with a low-moisture content, the eventual form may fall into one of the three types, formed respectively by enclosed explosion, cast blasting and soil collapse. The critical scaled burial depth for a crater from the enclosed explosion is about 2.3 m/kg$^{1/3}$, that for crater from cast blasting is 1.5 m/kg$^{1/3}$ or less, and that for a crater from soil collapse is 1.5～2.3 m/kg$^{1/3}$. For a crater in saturated sand, the soil particles close to the crater were liquefied due to porewater pressure rise under explosion loadings. Thus, the lateral dimension of a crater was enlarged due to the flow and the collapse of the soil particles. The diameter of the crater in saturated sand can extend up to 1.25～1.35 times that of the crater in low-moisture sand under the same explosion loading. The greatest scaled burial depth of an enclosed explosion in saturated sand may reach 2.5 m/kg$^{1/3}$ based on the experiments.

Keywords: low-moisture sand; saturated sand; filed experiment; crater formation; dimension of crater; burial depth

(责任编辑 丁 峰)