

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0167

地下强爆炸诱发地表塌陷的试验模拟与应用*

徐小辉^{1,2}, 李 杰^{1,2}, 王明洋^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 地下核爆炸后会在地表产生下陷弹坑、塌陷带等不可逆变形爆炸后效应, 利用地表形变信息对地下核试验进行有效监控和评估具有十分重要的意义。基于考虑重力影响的地下强爆炸塌陷成坑相似理论, 利用陆军工程大学自主研发的地下爆炸效应真空室模拟试验装置, 对 2017 年 9 月 3 日朝鲜地下核试验诱发的地表不可逆变形进行了模型试验。试验结果表明, 地表塌陷带半径为 257 m, 下陷弹坑的半径为 154 m, 与美国、前苏联等国家已有的地下核试验经验公式的数据结果基本相当, 并且符合天基雷达 TS-InSar 卫星监测数据的估算结果, 验证了地下爆炸真空室模型试验在地下强爆炸诱发地表不可逆变形区域模拟和评估的可行性, 成为有效补充地震波和卫星监测地下强爆炸的一种研究手段。

关键词: 朝鲜核试验; 相似模型试验; 真空室爆炸模拟; 塌陷成坑

中图分类号: O382.2; TP91 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

自 2003 年朝鲜退出《不扩散核武器条约》以来, 朝鲜已于 2006、2009、2013、2016 年 1 月和 9 月, 先后进行了 5 次地下核试验^[1-9]。中国地震台网测定, 2017 年 9 月 3 日 11 时 30 分在朝鲜境内(41.35° N, 129.11° E)处发生 6.3 级地震, 震源深度 0 km, 事发 1 h 后, 朝鲜政府宣布这是该国在可装载洲际导弹上成功进行的一次氢弹试验。这是朝鲜进行的第 6 次核试验, 其爆炸威力远超之前的 5 次核试验。事件发生后, 科学界利用地震波和卫星成像的方法对此次核试验的位置、震源机制、埋深和爆炸当量等进行了研究报道。中国科学技术大学地震与地球内部物理重点实验室温联星教授课题组^[10]通过分析地震记录, 确定朝鲜地下核试验的当量为(108.3±48.1) kt, 是历次核试验中最大的一次, 并对此次核试验后一个月先后发生的 4 次轻度地震的震源属性特征进行了研究, 证实了核爆 8.5 min 后出现的 4.1 级地震为万塔山自核爆中心西北方向 440 m 处的垂直塌陷所致。赵连锋等^[11]利用区域地震数据中纵波和横波的振幅谱比值同样确认此次强地震是一次爆炸事件, 而 8 min 后在同一位置附近发生的余震是由爆炸腔体坍塌引起的陷落地震事件, 并采用体波震级-埋深-当量的经验关系式, 推测该试验的埋藏方式为平硐加竖井, 挖掘深度可能达到 1 000~2 400 m, 核试验当量为 100~200 kt。

当前, 关于地下核试验监控的研究报道大部分采用地震波分析方法^[1-9], 由地下核试验诱发的表面位移的研究报道很少。合成孔径雷达(SAR)遥感成像技术是监测地球表面变形的有效工具^[12-13], 利用 SAR 影像获取地表形变信息已成为新兴的测地学手段。2018 年, 由南洋理工大学、德国地球科学研究中心、加州大学伯克利分校和中国科学研究院^[14]利用地震学和影像测地学两种相互独立的观测, 通过地震波波形和德国航天局 TerraSAR-X 卫星获取的核爆前后影像分析, 得到了核爆区域的地表三维变形场, 解决了地震波无法精确确定震源绝对位置和深度的问题。研究表明, 此次地下核试验起爆点位于丰溪里试验场万塔山顶(Mt.Mantap)下方 400~600 m 深度坑道内, 爆炸造成万塔山顶部 0.5 m 的塌陷, 同时将较为陡峭的西坡和南坡向外推了 3~4 m, 结合深度、能量和核爆当量之间的经验公式, 此次核试验等

* 收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51409257)

第一作者: 徐小辉(1983—), 男, 硕士, 讲师, xuxiaohui168@126.com;

通信作者: 李 杰(1981—), 男, 博士, 副教授, lijierf@163.com。

效 TNT 当量为 120~300 kt。当前利用卫星拍摄获取地下核试验引起的地表下陷弹坑尺寸大小的精度越来越高,根据对美国内华达州核试验场拍摄的卫星图像来看,其下陷弹坑远远多于媒体和官方宣布过的地下核试验的数量^[15]。利用卫星侦察获取地下核试验地表形变信息,从而有效评估地下强爆炸的当量和埋深,成为有效监控地下核试验的一种手段。

地下强爆炸物理过程复杂,爆炸作用受到当量、爆炸源能量密度、围岩特性、岩块地质构造等因素的影响,采用理论、数值、现场实地试验等研究方法存在诸多困难。采用相似物理模拟的方法可以准确地模拟地下爆炸过程中各种影响因素对爆炸成坑作用的影响,通过对地下爆炸引起的塌陷弹坑进行实验室相似模拟,进而有效地对地下强爆炸诱发的地表塌陷范围进行评估。当前关于地下爆炸成坑效应的实验室模拟方面主要采用土工爆炸离心机和真空室爆炸模拟装置,土工爆炸离心机由于受到离心机加载加速度和模拟装药量的限制,模拟比尺有限,只适用于一定规模的地下爆炸效应研究,而真空室爆炸模拟试验参数调节范围广、模拟比尺大,可应用于地下强爆炸引起的抛掷弹坑、塌陷弹坑等爆炸后效应的实验室模拟^[16]。真空室爆炸模拟装置最早由前苏联地球物理研究所的 Adushkin 等^[15]报道,他们利用该装置开展了一系列地下核爆炸的实验室模拟研究,并最早对地下强爆炸引起的下陷弹坑形成机制进行了试验研究^[17];陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室自主研制了一套包含容器罐体、爆源系统、抽真空系统和光测系统的大当量地下爆炸成坑作用的缩比模拟实验装置^[18],并成功开展了美国原型地下核试验 Neptun 的真空室爆炸模拟研究。当前,关于地下强爆炸诱发地表塌陷的实验室模拟研究尚未见报道,本文中基于大当量地下爆炸成坑的相似理论^[15],以 2017 年 9 月 3 日朝鲜核试验为例,采用文献 [14] 中的爆炸当量和埋深,开展地下强爆炸引起的地表塌陷真空室爆炸模拟研究,并与已有的美国、前苏联地下核爆炸下陷弹坑的经验公式进行对比验证,以期对朝鲜地下核试验诱发的地表塌陷范围进行评估。

1 地下强爆炸成坑作用物理过程及相似模拟理论

在非常短的时间内(约 1 μs),巨大的能量集聚释放是核爆炸的一个特点。当核装置在地下爆炸时,爆室内会产生非常高的温度(大约 10^7 K)和压力(大约 10^9 kPa),由于辐射和强冲击波作用,爆室周围的岩石介质汽化产生了气状生成物,形成一个高压空腔,并产生强冲击波以球面波的形式向外传播,随着传播距离越来越远,冲击波峰值应力不断衰减,爆室围岩介质依次出现近似球面的汽化区、液化区、粉碎压实区、剪切破裂区及径向破裂区^[19]。在地下封闭爆炸情况下,各类岩石汽化、液化区半径分别近似为 $R_v=2Q^{1/3}$, $R_l=4Q^{1/3}$ (Q 为爆炸当量)。粉碎区内岩石压力约为 $1\times 10^9\sim 7\times 10^{10}\text{ Pa}$,粉碎区半径近似为 $R_b=11.1Q^{1/3}$ 。剪切破裂区岩石大约受到几百兆帕的压力作用,岩石中出现剪切破坏,除了产生径向裂缝外,还会产生横向裂缝,岩石出现宏观错动、断裂和位移,该区半径近似为 $R_s=32.8Q^{1/3}$ 。径向破裂区内的岩石受到几百兆帕以下的压力作用,该区半径近似为 $R_r=62.1Q^{1/3}$ 。在破裂区以外,应力波的峰值应力衰减到几十兆帕以下,岩石不再发生破坏,只能发生弹性变形。文献 [15] 中以化学爆炸实验中建立起的抛掷岩石爆炸能量转移机制为基础,对地下强爆炸过程进行了图式化,把地下爆炸成坑过程划分为冲击波和气体加速两个主要阶段。在冲击波作用阶段,即从爆炸时刻到压缩波到达自由面,岩石在基坑腔体不断扩张与压缩波和拉伸波作用下碎裂,爆炸生成物的一少部分能量用于岩石破坏、塑性变形和岩石加热,岩石在冲击波阶段产生的一部分动能也用于岩石的运动。爆炸生成物的能量主要用于推动破碎岩石向自由面方向加速运动,形成了典型的岩石拱顶,在气体加速阶段,爆炸生成物主要反作用力是克服破碎岩石的质量,同时一部分能量消耗在抛掷岩石与周围岩块的摩擦力和内聚力的上,随着拱顶的升高,其厚度不断减小,拱顶开始坍塌,破碎岩石在气体加速作用下在重力场中惯性抛掷形成飞散弹坑。当等效深度增大形成强封闭爆炸时,气体加速阶段表现不明显,当稳定空腔形成后,空腔内压力逐渐下降至岩体静压时,在重力作用下,空腔顶部岩石相继开始塌落,直至形成稳定的拱顶,塌落停止,并形成柱状烟囱,在地表形成陷落弹坑。爆炸放射性气体在较高压力驱动下,沿着孔隙、裂缝、人工通道等不断向

外渗透, 直至泄漏到大气中, 造成近区不同程度的污染。

在地下爆炸效应真空室模拟方法中, 地下强爆炸成坑过程看作是爆炸空腔高压气体推动破裂岩石运动的结果, 主要模拟与弹坑形成和岩石移动相关的过程。在此模型中, 爆源初始参数为地下强爆炸空腔完成时空腔的大小和气体生成物的能量信息, 采用充有一定体积的高压气体模拟爆炸空腔, 采用散体材料如石英砂模拟破碎的介质, 而模型的自由面为一定真空度的大气压力。描述地表下陷弹坑的主要参数包括: 弹坑半径 R 、深度 H 、体积 V 、破碎岩石介质的密度 ρ 、岩块间内摩擦因数 k_T 、破碎岩块间的内聚力 c 、爆源空腔半径 r_n 、空腔气体压力 P 、装药埋深 h 、绝热线参数 χ 、以及重力加速度 g 和自由面大气压 P_a 。根据相似理论量纲分析法, Adushkin 等^[15] 最早给出了描述弹坑形成与发展过程的相似律:

$$\frac{R}{h} = f\left(\frac{P}{\rho gh}, \frac{P}{P_a}, \frac{P}{c}, \frac{h}{r_n}, k_T, \chi\right) \quad (1)$$

根据相似准数恒定的要求, 各物理量相似常数之间的关系为:

$$\frac{\alpha_P}{\alpha_\rho \alpha_g \alpha_h} = 1, \quad \frac{\alpha_P}{\alpha_{P_a}} = 1, \quad \frac{\alpha_P}{\alpha_c} = 1, \quad \frac{\alpha_h}{\alpha_{r_n}} = 1, \quad \alpha_{k_T} = 1, \quad \alpha_\chi = 1 \quad (2)$$

对于地下强爆炸, 由于爆炸当量巨大, 在研究下陷弹坑形成时必须考虑重力加速度的影响。设线性几何比尺 $\alpha_h = \alpha_{r_n} = 1/N$, 采用与原型密度相等的模拟材料, 如果试验在惯性力场中进行, 即 $\alpha_\rho = 1, \alpha_g = N$, 由关系式 (2) 得:

$$\alpha_{P_a} = 1, \quad \alpha_c = 1, \quad \alpha_P = 1, \quad \alpha_{k_T} = 1, \quad \alpha_\chi = 1 \quad (3)$$

如果试验在自然重力场中进行, 即 $\alpha_\rho = 1, \alpha_g = 1$, 由关系式 (2) 得:

$$\alpha_{P_a} = \frac{1}{N}, \quad \alpha_c = \frac{1}{N}, \quad \alpha_P = \frac{1}{N}, \quad \alpha_{k_T} = 1, \quad \alpha_\chi = 1 \quad (4)$$

由关系式 (3) 可知, 在惯性力场中, 模型中大气压力、模拟材料内聚力、内摩擦因数、爆炸空腔压力 (装药类型) 均与原型材料相同, 能量比尺是线性比尺的 3 次方, 即模型试验中无需改变相应的参量, 通过离心机使试验场中的惯性加速度增加到重力加速度的 N 倍, 从而实现模型和实物中各量纲的对等关系。当前, 国内最大的爆炸离心机为中国水利水电科学研究院的 LXJ-4-450 型土工离心机, 最大有效负载质量为 1.5 t, 爆炸模拟允许的最大离心加速度为 200 g, 如果以朝鲜地下核爆炸为模拟对象, 爆炸当量采用文献 [14] 中的 191 kt, 埋深为 450 m, 采用最大模拟比尺 1/200, 则模型试验的装药量为 23.875 kg, 埋深为 2.25 m, 显然, 对于有限尺寸的模型试验箱来说是不现实的, 模型装药量远远超过了离心机爆炸模拟的最大许可装药量。因此, 采用离心机爆炸模型试验方法无法对地下强爆炸成坑作用进行模拟研究。

而由关系式 (4) 可知, 内摩擦因数 k_T 和爆腔气体绝热线参数 χ 基本保持不变, 而模型中自由面压力为大气压力的 $1/N$, 内聚力 c 为原型材料的 $1/N$, 模型爆源压力为原型的 $1/N$, 即能量比尺是线性比尺的 4 次方。徐小辉等^[20] 通过对大当量地下浅埋爆炸真空室模拟相似材料的研究发现, 通过抽真空和使用相似材料石英砂, 建立了考虑重力效应的各作用力参数相似所必须满足的关系式:

$$\frac{P}{\rho gh} \sim 10, \quad \frac{P}{P_a} \sim 10^2, \quad \frac{P}{c} \sim 10^3 \quad (5)$$

在真空室爆炸模拟方法中, 采用空腔高压气体 P 膨胀到自由面气体压力 P_a 时的势能 A 来表征气体移动碎裂岩石的能量^[15], 其与空腔气体能量 E 、压力 P 、空腔体积 V_n 和气体绝热指数 χ 之间关系为:

$$\frac{A}{E} = 1 - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{(\chi-1)/\chi}, \quad E = \frac{PV_n}{\chi-1} \quad (6)$$

不同岩石中地下爆炸空腔气体势能 A 与围岩的强度和弹性特性相关, 计算表达式^[18] 见表 1, 其中 η_w 为岩石的含水量, η_{CO_2} 为岩石的含气量, η_e 为岩石的混合含气量。

大量的地下强爆炸现场调查资料表明, 不同类型岩石中, 爆炸空腔大小与爆炸能量之间满足几何相似律: $r_n = \bar{r}_n q^{1/3}$, 比例系数 \bar{r}_n 为围岩的强度和弹性参数的函数。根据已有的地下强爆炸腔体大小的经验

公式^[15]有,凝灰岩: $\bar{r}_n = 16.2$,冲积层: $\bar{r}_n = 15$,白云岩: $\bar{r}_n = 9.2$,内华达花岗岩: $\bar{r}_n = 11.1$,撒哈拉花岗岩: $\bar{r}_n = 7.3$,超过 100 kt 当量的凝灰岩和冲积层: $\bar{r}_n = 70/(\rho gh)^{1/4}$;当爆炸发生在硬岩中且无腔体大小记录时: $\bar{r}_n = 354.6/(\rho c_p^2 \sigma_w^2)^{1/9}$,其中 c_p 为纵波速度, σ_w 为抗压强度。

表 1 地下爆炸空腔气体势能计算表达式^[18]Table 1 Formula for gaseous energy in cavity^[18]

岩石特性	空腔气体势能 A
不含气体岩石	$A = 0.49q/\bar{r}_n^{0.84}$
仅含自由水的硅酸盐类岩石(花岗岩、凝灰岩、冲积层等)	$A = \frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1 + 5.8\eta_w^{0.7})$
仅含碳酸气的碳酸盐类岩石(硬石膏、方解石、石灰岩等)	$A = \frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1 + 1.96\eta_{CO_2}^{0.7})$
混合含气岩石	$A = \frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1 + 5.8\eta_e^{0.7}), \eta_e = \eta_w + \eta_{CO_2}/4.7$

朝鲜地下核试验中心起爆点位于丰溪里试验场万塔山顶(Mt.Mantap)下方 400~600 m 深度坑道内,该埋深满足不发生核泄露的安全埋深经验公式: $h = 110 q^{1/3.4}$ ^[21],该公式适用于爆炸当量量级为 100 kt、岩石含气量小于 6% 的地下核爆炸安全埋深的估算。该处岩石类型为花岗闪长岩^[22],密度为 2.664 g/cm³,纵波速度为 5 879 m/s,抗压强度为 200 MPa,据此估算出爆炸空腔的大小: $r_n = \bar{r}_n q^{1/3} = 82$ m, $\bar{r}_n = 354.6/(\rho c_p^2 \sigma_w^2)^{1/9} = 14.24$ 。花岗岩属于硅酸盐类岩石,其湿度不高,一般为 0~5%,本文中选用含气量为 $\eta_w = 1\%$ ^[14],由表 1 计算得到爆炸空腔气体势能: $A = 5.23 \times 10^{13}$ J,由能量比尺关系式可得模型中气体势能为: $(A)_m = A/N^4 = 2.96$ J,依据关系式(6)计算得到模型中空腔气体压力为: $P = 5.92$ kPa。当采用直径为 $r = 8$ cm 的球壳体模拟空腔时,模型试验参数为:模拟比尺 $N = r_n/r = 2\ 050$,爆源埋深 $h = 22$ cm,真空室气体压力 $P_a = 49$ Pa。显然,无论是自由面的真空度,还是球壳体中的气体压力,在实验室中均可以实现,采用真空室爆炸模拟试验方法可以对地下强爆炸成坑作用进行模拟研究。

2 真空室爆炸模拟试验系统

基于真空室爆炸相似理论,陆军工程大学自主设计研制了考虑重力影响的模拟大当量地下爆炸引起的抛掷、隆起和塌陷等破坏效应的缩比模拟实验装置,主要由承压罐体、真空泵组、爆源系统和光电测控系统组成。整套系统的爆源尺寸、压力以及真空室真空度调节范围广,适用于大当量地下爆炸成坑现象的物理模拟。

2.1 承压罐体

承压罐体主要由容器罐体、快开门密闭机构、模型试验箱和辅助设备等组成(见图 1)。容器罐体主体结构采用卧式设计,尺寸为 $\varnothing 3.0$ m \times 3.93 m,容积约 30 m³,罐体的承压指标为:绝对气压 0.2 MPa,绝对水压 0.3 MPa。快开门密闭机构主要实现容器罐体的快速开启和密闭,由法兰盘、移动小车、旋转卡箍、伸缩气缸和空压机等组成。模型试验箱放置于罐体内部,法兰盘直径为 1.5 m,其中心有直径为 20 cm 的观察窗口,用于试验样品的进出和高速摄影的观测。辅助设备包括轨道、护栏和各类标准法兰接管,用于测控线缆、起爆线缆的进出。

2.2 真空泵组

真空泵组由旋片泵、罗茨泵、连接管道和截止阀组成,其技术性能为:极限压力 0.05 Pa、抽速 1 200 L/s、总功率 33.5 kW,可在 0.5 h 内使容器罐体内部的真空度达到 100 Pa。



图 1 真空室爆炸模拟系统承压罐体

Fig. 1 Vacuum chamber of explosive simulation apparatus

2.3 爆源系统

自主设计研制了一种柔爆索中心起爆爆源系统, 主要由玻璃球壳、柔性导爆索、电雷管、起爆器、充压装置以及密封连接构件组成(见图 2)。采用薄壁玻璃球壳模拟爆炸空腔, 将一定长度的柔性导爆索一端拧成螺旋状置于玻璃球壳中心处, 另一端与电雷管的锥形端相接, 利用导爆索爆轰产生的冲击波击碎玻璃球壳, 达到释放高压气体的目的。玻璃球壳的穿入端利用不锈钢管对柔爆索进行了密封处理, 避免导爆索爆生气体对玻璃球壳内部气体能量的影响。柔性导爆索中心螺旋段长度为 10 cm, 其爆生气体对爆炸成坑的影响微乎其微^[18]。

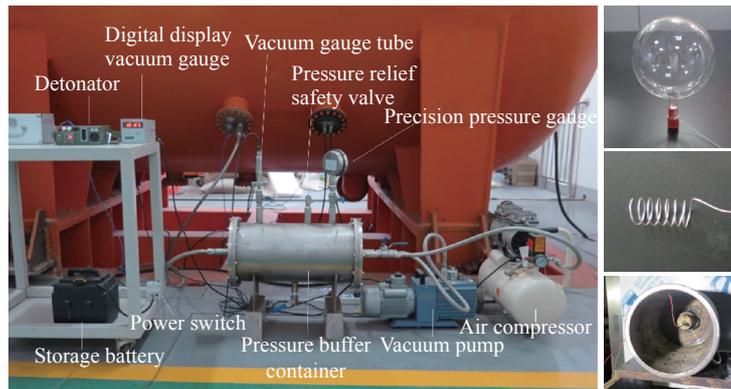


图 2 爆源装置系统

Fig. 2 Experimental devices for simulation of explosion cavity

2.4 光电测控系统

光电控制系统主要包括相似材料物理性能参数测量、模拟介质的动态变形追踪和整套装置的联动控制。相似模拟材料的内聚力值和内摩擦因数采用 FT4 多功能粉末流动性测试仪的剪切盒测试模块测得(见图 3)。介质变形的动能参数主要通过高速摄影机、LED 投光灯、数据采集设备及分析软件测得。操控平台实现快开门密闭机构、光源、真空泵组、高速摄像机和爆源装置的联动控制。

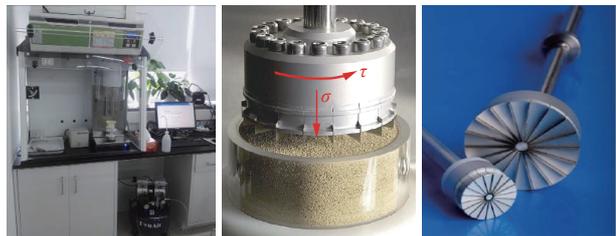


图 3 FT4 多功能粉末流动性测试仪及旋转剪切盒

Fig. 3 FT4 Multifunctional powder flow tester and rotation shear cell

3 朝鲜核试验监测结果及塌陷弹坑模拟试验

以朝鲜地下核试验为例, 利用天基雷达 TerraSAR-X 卫星监测数据结果, 开展地下强爆炸引起的地表不可逆变形如塌陷带、下陷弹坑的真空室爆炸模型试验, 对地下核试验诱发的地表塌陷区域范围进行评估, 进一步验证朝鲜地下核试验爆炸当量和埋深的预测结果。

3.1 模拟材料参数

模型试验中, 采用石英砂和微量的丙三醇(甘油)混合物作为相似模拟材料^[20], 以便更好地制作复杂地形模型(朝鲜地下核试验中心起爆点处山顶南侧为陡坡地形), 丙三醇不易挥发, 在真空环境中可以长时间保持模拟地形的构型。试验中石英砂的平均粒径为 0.3 mm, 湿沙的湿度为 0.25%, 压实密度为 $\rho=1.43 \text{ g/cm}^3$, 样品预固结的最大正压力为 3 kPa, 其剪切强度测试时程曲线如图 4 所示。

相似材料的屈服点趋势线为(见图 5): $\tau=0.264+0.78\sigma$, 相似材料的黏聚力为 $c=264 \text{ Pa}$, 内摩擦因数 $k_1=0.78$, 内摩擦角为 38.0° 。试验中各参数作用力之间的关系为: $P/\rho gh \approx 1.9$, $P/P_a=120.8$, $P/c=22.4$, 由此可知, 在石英砂中加入少量的甘油后, 模型中大气压力和黏聚力与模拟材料的重力相比小 1~2 个数量级,

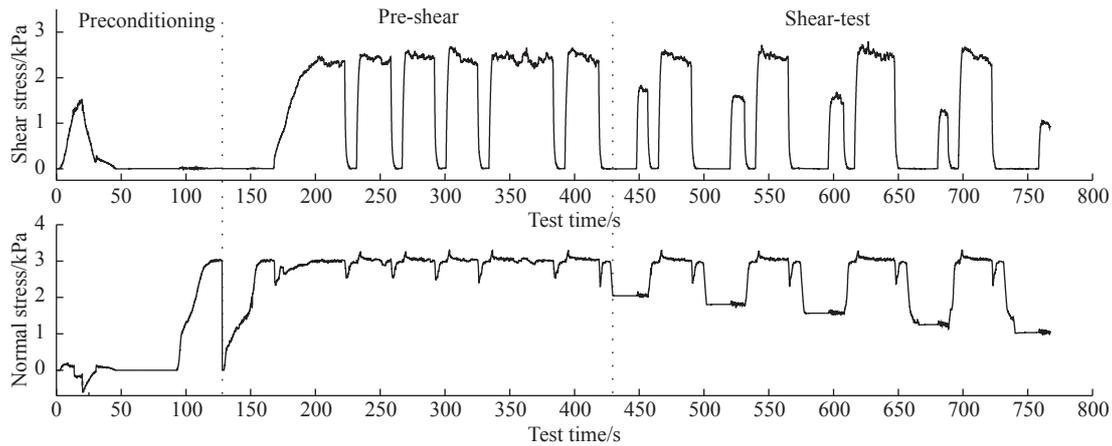


图 4 模拟材料剪切强度性能测试时程曲线

Fig. 4 Shear strength performance of model material vs. time

根据相似关系(1),无量纲参数 P/P_a 和 P/c 的影响很小,唯一的支配参数为 $P/\rho gh$,满足了考虑重力影响的地下爆炸塌陷成坑的相似条件。由此可知,爆源气体的能量主要用于克服重力作用,地下爆炸引起地表塌陷弹坑的破坏范围主要受重力的影响。

3.2 试验布置

为了更好地模拟丰溪里试验场中心起爆点处山顶地表塌陷运动情况,利用爆炸区域地表三维地形^[14],根据相似比尺关系,制作了万塔山顶南北方向的地下爆炸模拟地形(见图 6)。模型试验采用半对称结构(见图 7),对称面采用透明亚克力板,将敞口半玻璃球壳用透明硅胶粘贴在亚克力板上,柔性导爆索一端拧成螺旋状,另一端通过不锈钢管由密封橡胶塞穿出,与电雷管的锥形端相接,高速摄影镜头通过真空室的观测窗口对准模型对称面拍摄,记录空腔爆炸及地表塌陷演化过程。模型中爆源埋深为 22 cm,自由面向下每隔 5 cm 铺置一层薄薄的黑色彩砂,共铺 3 层,用于示踪地层运动情况。

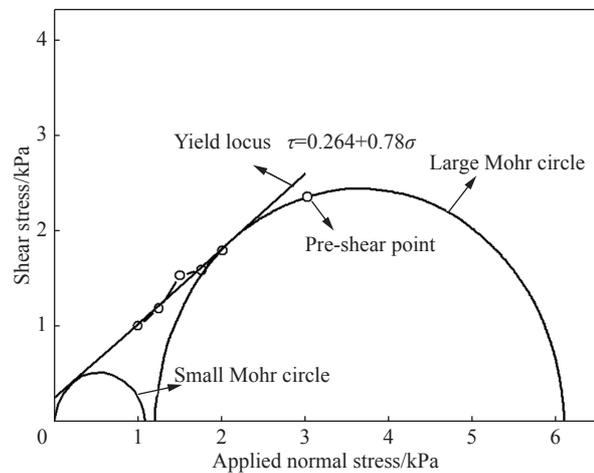


图 5 模拟材料屈服迹线图

Fig. 5 Yield locus of model material

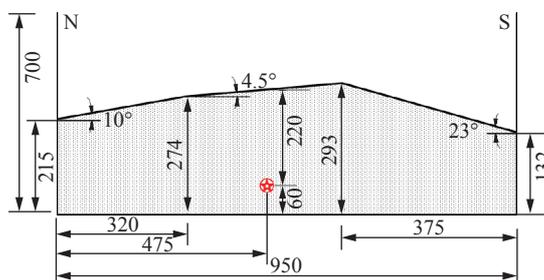
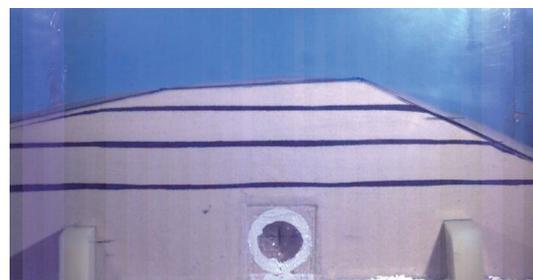


图 6 试验布置图(单位: mm)

Fig. 6 Layout of experiment (unit: mm)



3.3 试验过程及结果分析

试验布置完成后,密闭真空室,将高速摄影装置调试到位,启动真空泵组,当真空室压力达到 49 Pa 时,爆源中充入为压力 5.92 kPa 气体,同时启动起爆器和高速摄影机,对爆炸过程进行记录,高速摄影机拍摄速度为 500 s^{-1} ,分辨率为 896×448 。地表塌陷弹坑及塌陷带的最终破坏形态见图 8,经过数字图像处

理可知, 地表塌陷主要发生在从爆心沿最小抵抗线方向向外对应的自由面处, 山顶南侧上翼的塌陷较为明显, 塌陷带的宽度为 251 mm, 塌陷弹坑的半径为 74.9 mm, 深度为 4.5 mm。

由天基雷达 TerraSAR-X 卫星监测数据^[14]表明(见 图 9), 朝鲜地下核试验地表塌陷范围约为 428 m×

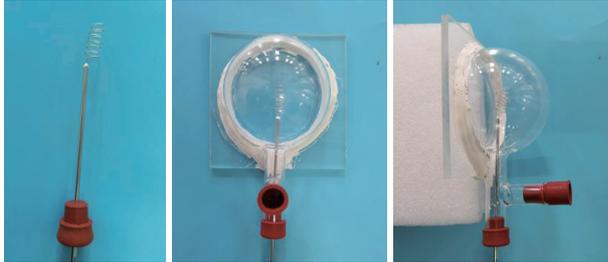


图 7 半对称爆源结构

Fig. 7 Semi-symmetric structure for simulation of explosion cavity

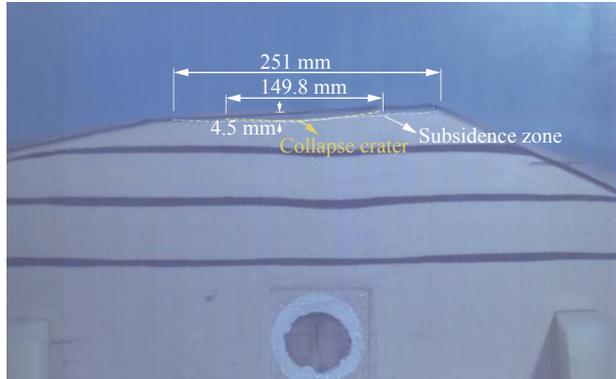


图 8 模型中地表塌陷最终形态

Fig. 8 Skeleton map of ground subsidence induced by the underground explosion

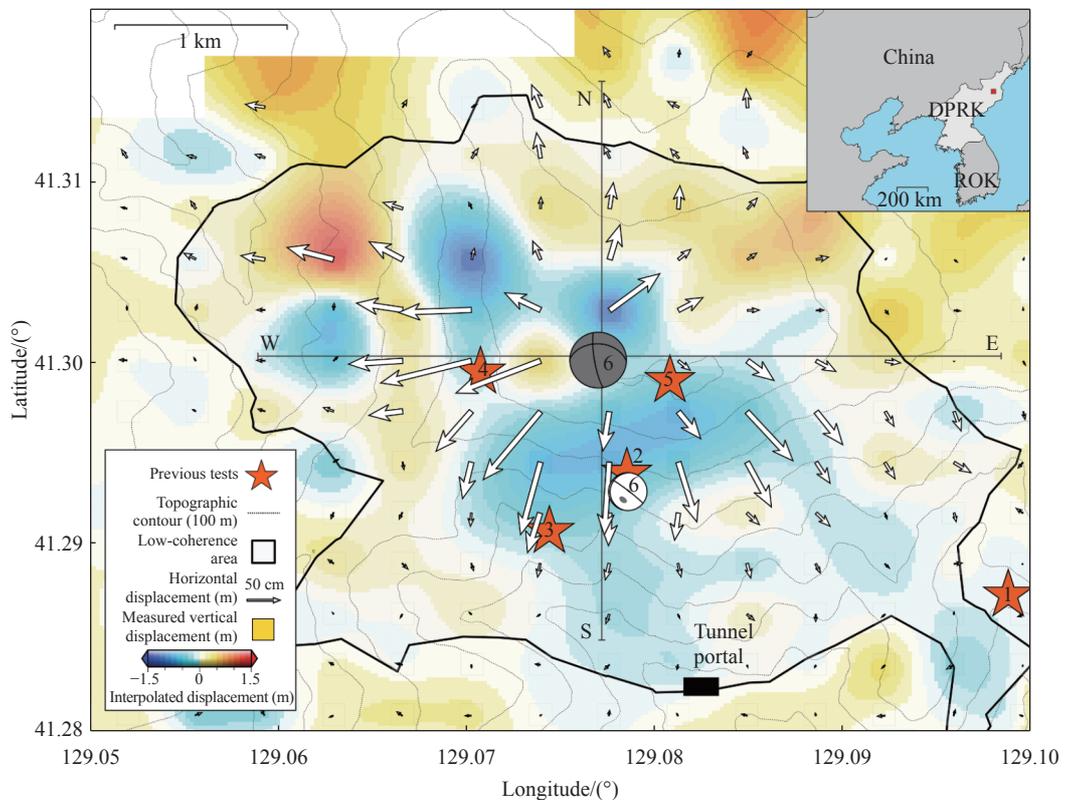
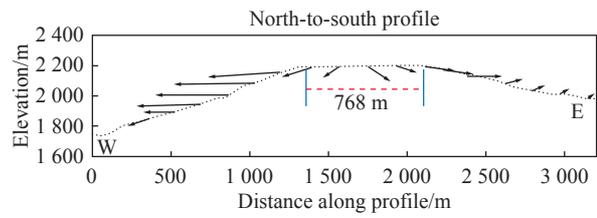
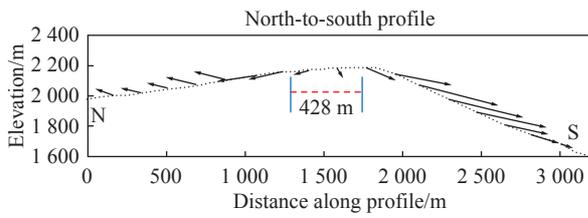


图 9 2017 年 9 月 3 日朝鲜核爆炸诱发地表塌陷的天基雷达 TerraSAR-X 监测结果^[14]

Fig. 9 Subsidence derived from the TerraSAR-X images associated with the September 2017 North Korean Nuclear Test^[14]

768 m, 等效半径为 287 m, 最大深度 1.5 m 左右。真空室爆炸模型试验的结果: 塌陷带的宽度为 257.5 m, 其相对误差为 10.3%; 塌陷弹坑的深度为 9.1 m, 与监测结果量级相当, 相对误差较大。采用真空室爆炸模型试验可以对地下强爆炸诱发的地表不可逆变形如塌陷带范围进行有效评估, 在坚硬岩石中地下核试验引起的下陷弹坑各参数中, 塌陷区域范围与爆炸的能量和埋深有较为稳定的关系; 而下陷弹坑的深度与雷达监测结果误差较大, 一方面说明下陷弹坑的形成还与破碎岩石的松散程度有关, 当爆炸深度增大的情况下, 岩石倒塌在腔体内并形成下陷弹坑成为主要的物理过程; 另一方面在地下强爆炸成坑作用的真空室模拟理论中, 空腔周围的岩石已破坏, 采用沙土型介质模拟岩石倒塌到基坑腔体的过程是比较困难的, 因此下陷弹坑深度的模拟结果误差较大。可见, 下陷弹坑的形成过程不仅取决于爆炸当量和埋深, 岩石的松散程度也对下陷弹坑的深度有一定的影响。

4 与下陷弹坑经验公式的对比分析

根据已有的地下强爆炸下陷弹坑的统计结果, 对朝鲜地下核试验诱发地表塌陷的模拟结果与经验公式^[15]进行对比验证, 以期对朝鲜地下核试验的爆炸类型、爆炸当量和埋深做进一步分析评估。

4.1 爆炸类型

不同的地下爆炸类型主要取决于等效爆炸当量和埋深, 地下核爆炸为了试验安全一般都是封闭式的, 在地下封闭爆炸作用下, 坚硬岩石在运动中变得松散, 破坏岩石向爆炸腔体内塌陷, 将发生形成下陷弹坑的过程。在无量纲能量参数 \bar{A} 和埋深参数 h/r 变化平面上(见图 10), 抛掷爆炸、疏松爆炸和封闭爆炸的边界位置分别对应于经验公式^[15]: $\bar{A}^* = 4.34(r/h)^{0.6}$ 和 $\bar{A}_k = 1.16(r/h)$, 对疏松爆炸区域内拟合有以下关系式: $\bar{A}_p = 2.6(r/h)$, 该关系式符合爆炸空腔以上地基质量和空腔气体压力的平衡条件, 当 $\bar{A} > \bar{A}_p$ 时, 自由面的初始运动是向上的, 当 $\bar{A} < \bar{A}_p$ 时, 自由面的初始运动是向下的。对地下封闭爆炸区域内拟合得到以下关系式: $\bar{A}_{ko} = 0.56(r/h)^{1.1}$, 在地下封闭爆炸区域内, 没有气体喷向大气层的过程, 塌陷柱减小, 地基向下移动至腔体, 形成下陷弹坑, 当 $\bar{A} < \bar{A}_{ko}$ 时, 基坑腔体的浮现将停止。

将模拟试验参数放在无量纲参数 \bar{A} 和 h/r 变化平面上, 由图 10 可知, 此次爆炸位于地下封闭爆炸区域内, 爆炸能量和埋设深度位于临界值 \bar{A}_{ko} 的附近。根据以往大量的地下强爆炸现象统计数据推测, 此次朝鲜核试验形成爆炸空腔时, 并未有高压腔体的浮现, 只有山顶表面塌陷形成下陷弹坑的过程, 并在下陷弹坑附近的变形带扩大, 试验场中心起爆点处空腔围岩有松动现象发生, 而由地震波和卫星雷达监测的研究结果也表明, 在中心起爆点起爆 8 min 后, 发生在同一位置附近处的余震是由爆炸腔体的坍塌所引起的^[10-11]。后续应该加强对朝鲜丰溪里核试验场附近可能发生的放射效应进行评估。

4.2 塌陷弹坑的大小

朝鲜地下核试验的比例埋深为 $h/\sqrt{q} = 78.1$, 位于坚硬岩石中地下强爆炸形成塌陷弹坑的比例埋深范围内: $60 \leq h/\sqrt{q} \leq 130$ 。在地下封闭爆炸范围内($\bar{A} < \bar{A}_k$), 塌陷弹坑位于广阔的塌陷带内, 根据已有的经验公式^[15], 塌陷带半径满足以下关系式:

$$\frac{R_{\text{sub}}}{h} = \frac{5.9}{h/r + 3.48} \quad (7)$$

下陷弹坑半径与爆炸能量和埋深之间满足以下关系式:

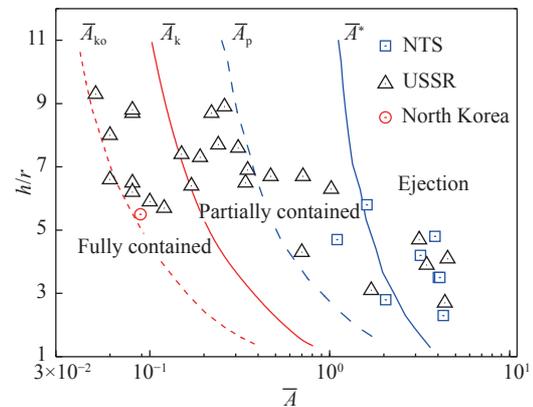


图 10 不同地下爆炸类型的划分区域

Fig. 10 Different regimes for underground explosion in the parameter plane h/r and \bar{A}

$$\frac{R}{h} = \frac{0.58}{\sqrt{h/r} - 0.77} \quad (8)$$

下陷弹坑的深度满足以下关系式:

$$\frac{H}{h} = \frac{1.1}{h/r} - 0.069 \quad (9)$$

将模型试验得到的塌陷弹坑的大小与经验关系式进行对比,由图 11 可知,朝鲜地下核试验的爆炸点位于关系式附近,模型试验结果与根据关系式(7)~(8)计算出的塌陷带和下陷弹坑半径大小的误差分别为 13.2%、7.6%。由图 12 可知,塌陷弹坑的深度同半数美国、前苏联已进行过的地下强爆炸统计结果一样,位于下陷弹坑深度和爆炸能量、埋深的关系式较低的区域,这说明弹坑深度不仅与爆炸能量、埋深有关系,还有可能与破碎岩石向腔体内塌陷的松散程度有关。由此可知,地下强爆炸诱发地表不可逆变形如塌陷带、下陷弹坑的大小与装药当量和埋深相关,采用真空室爆炸模型试验可对其塌陷范围进行评估,而下陷弹坑的深度还与破坏岩石的松散过程相关,模拟结果误差较大,需要进一步对模拟理论进行优化改进。

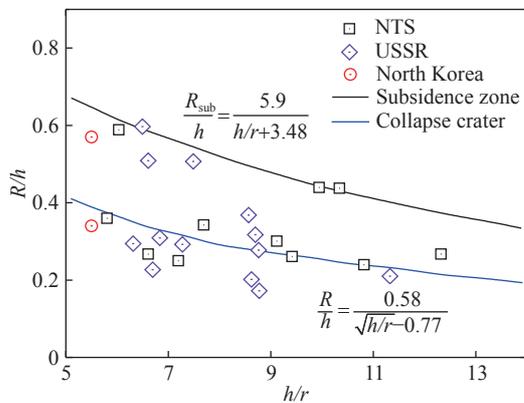


图 11 坚硬岩石中下陷弹坑的半径与模型数据对比
Fig. 11 Comparison of crater dimensions for explosions in hard rock with model for crater radius

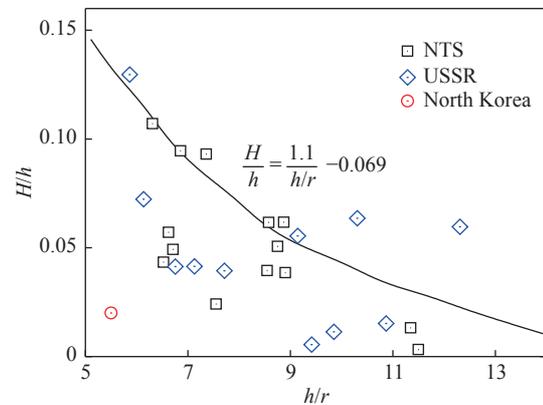


图 12 坚硬岩石中下陷弹坑深度与模型数据对比
Fig. 12 Comparison of crater dimensions for explosions in hard rock with model for crater depth

5 结 语

利用自主设计研制的地下爆炸效应真空室模拟试验装置,对地下强爆炸成坑作用模拟相似理论、模拟试验系统进行了介绍,重点开展了朝鲜地下核试验诱发地表塌陷的模拟试验,并与天基雷达 TS-InSar 卫星监测数据结果、塌陷弹坑大小经验公式进行了对比验证。试验结果验证了地下爆炸真空室模型试验在地下强爆炸诱发地表塌陷区域范围模拟和评估方面的可行性,为地下强爆炸的有效评估提供了一种新的研究手段。

参考文献:

- [1] ZHAO L F, XIE X B, WANG W M, et al. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(6): 2571–2589. DOI: 10.1785/0120080128.
- [2] WEN L X, LONG H. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test [J]. *Seismological Research Letters*, 2010, 81(1): 26–29. DOI: 10.1785/gssrl.81.1.26.
- [3] ZHAO L F, XIE X B, WANG W M, et al. Yield estimation of the 25 May 2009 North Korean nuclear explosion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102: 467–478. DOI: 10.1785/0120110163.
- [4] FORD S, DREGER D, WALTER W. Source analysis of the Memorial Day explosion, Kimchaek, North Korea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L21304. DOI: 10.1029/2009GL040003.

- [5] CHUN K Y, WU Y, HENDERSON G. Magnitude estimation and source discrimination: a close look at the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear explosions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101: 1315–1329. DOI: 10.1785/0120100202.
- [6] ZHANG M, WEN L. Seismological evidence for a low-yield nuclear test on 12 May 2010 in North Korea [J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 86(1): 138–145. DOI: 10.1785/02201401170.
- [7] ZHANG M, WEN L. High-precision location and yield of North Korea's 2013 nuclear test [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 2941–2946. DOI: 10.1002/grl.50607.
- [8] ZHAO L F, XIE X B, WANG W M, et al. The 12 February 2013 North Korean underground nuclear test [J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 85(1): 130–134. DOI: 10.1785/0220130103.
- [9] ZHAO L F, XIE X B, WANG W M, et al. Seismological investigation of the 2016 January 6 North Korean underground nuclear test [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(3): 1487–1491. DOI: 10.1093/gji/ggw239.
- [10] TIAN D D, YAO J Y, WEN L X. Collapse and earthquake swarm after North Korea's 3 September 2017 nuclear test [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 3976–3983. DOI: 10.1029/2018GL077649.
- [11] 赵连锋, 谢小碧, 何熹, 等. 2017年9月3日朝鲜地下核试验的震学鉴别和当量估计 [J]. *科学通报*, 2017, 62: 4163–4168. DOI: 10.1360/N972017-00979.
ZHAO Lianfeng, XIE Xiaobi, HE Xi, et al. Seismological discrimination and yield estimation of the 3 September 2017 Democratic People's Republic of Korea (DPRK) underground nuclear test [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62: 4163–4168. DOI: 10.1360/N972017-00979.
- [12] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review [J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 133: 1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
- [13] ELLIOTT J R, WALTERS R J, WRIGHT T J. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13844. DOI: 10.1038/ncomms13844.
- [14] WANG T, SHI Q, NIKKHOO M. The rise, collapse, and compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017 North Korean nuclear test [J]. *Science*, 2018, 361(6398): 166–170. DOI: 10.1126/science.aar7230.
- [15] ADUSHKIN V V, SPIVAK A. Underground explosions: WGC-2015-03 [R]. 2015.
- [16] 岳松林, 邱艳宇, 王德荣, 等. 岩石中爆炸成坑效应的模型试验方法及对比分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1925–1932. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.024.
YUE Songlin, QIU Yanyu, WANG Derong, et al. Modeling experiment methods for cratering effects of explosions in rocks and comparative analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1925–1932. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.024.
- [17] ADUSHKIN V V, PERNIK L M. Characteristics of the formation of subsidence craters [J]. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1972, 8(4): 541–552. DOI: 10.1007/BF00741202.
- [18] 徐小辉, 邱艳宇, 王明洋, 等. 大当量浅埋地下爆炸抛掷成坑效应的缩比模拟试验装置研制 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 156–166. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0144.
XU Xiaohui, QIU Yanyu, WANG Mingyang, et al. Development of the testing apparatus for modeling large-scale underground cratering explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 156–166. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0144.
- [19] ОПЛЕХКО Л П. 爆炸物理学 (上册) [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 677–688.
- [20] 徐小辉, 邱艳宇, 王明洋, 等. 大当量地下浅埋爆炸真空室模拟相似材料研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1): 3550–3556. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1539.
XU Xiaohui, QIU Yanyu, WANG Mingyang, et al. Similar materials for vacuum chamber model test under large scale throw blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1): 3550–3556. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1539.
- [21] ADUSHKIN V V, LEITH W. The containment of Soviet underground nuclear explosions: USGS Open File Report 01-312[R]. USA: US Department of the Interior Geological Survey, 2001.
- [22] ROUGIER E, PATTON H J, Knight E E, et al. Constraints on burial depth and yield of the 25 May 2009 North Korean test from hydrodynamic simulations in a granite medium [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(6): L16316. DOI: 10.1029/2011GL048269.

Simulation and analysis of surface subsidence associated with the underground strong explosion

XU Xiaohui^{1,2}, LI Jie^{1,2}, WANG Mingyang^{1,2}

- (1. *College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*
2. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: It is very important to monitor and evaluate the clandestine nuclear tests using the surface displacements such as subsidence craters induced by the underground nuclear explosion. Based on the similarity theory of the process of subsidence crater formation considering the influence of gravity, we conducted an explosive model test in a vacuum chamber, using our own independently developed explosive simulation apparatus and determined the subsidence zones of the surface displacements associated with the 3 September 2017 North Korean's largest underground nuclear test. The results show that the radius of the surface subsidence zone is about 257 m, and the radius of collapse crater is about 154 m, which is equivalent to the estimated results according to the empirical formula and the monitored data of remote sensing with Synthetic Aperture Radar (SAR) by the TS-InSAR satellite. Our results demonstrate that the explosive model test in a vacuum chamber can help characterize the irreversible zone of the surface displacements associated with the underground nuclear explosion, which has become an effective supplement of the seismological and satellite imagery methods to monitor the underground nuclear test.

Keywords: North Korean nuclear test; similarity model test; vacuum explosive model; subsidence craters

(责任编辑 曾月蓉)