

文章编号: 1000-7598 (2013) 07-2104-07

基于 SPH-FEM 耦合法的土体爆炸效应数值研究

王维国^{1,2}, 陈育民^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}, 张智超^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘 要: 岩土体爆炸破坏问题是岩土工程领域的研究热点, 为开展小当量集团装药在不同埋置深度时的土中爆炸效应分析研究, 在 LS-DYNA 框架内建立基于光滑粒子流体动力学-有限元耦合方法 (SPH-FEM) 的砂土地基爆炸效应分析模型。计算结果表明: 浅埋装药时最大爆坑深度到达时刻远在最大爆坑直径之前, 地基层砂土体剪切流场对爆坑直径的发展具有决定性作用; 随着药包埋置深度的增加存在一个临界爆坑直径, 爆坑直径近似认为只与药包当量和埋置深度相关, 经简化与经验假定之后得到的爆坑直径与埋药深度之比与比例距离近似呈直线关系; 砂土中爆炸波在近区表现为强间断的冲击波形式, 压缩作用是造成近区砂土大变形流动的主要因素, 而在爆炸远区则转变为连续的应力波形式; 土中爆炸波峰值压力随比例爆距的衰减规律与经验曲线基本一致。研究结果可以为地基工程的抗爆设计及加固提供参考。

关键词: SPH-FEM 耦合法; 爆炸效应; 埋置深度; 临界爆坑直径; 峰值压力

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Numerical simulation of explosion in soil based on a coupled SPH-FEM algorithm

WANG Wei-guo^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, ZHANG Zhi-chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Blast-induced destruction in rock and soil is a research focus in geotechnical engineering. Based on a coupled smooth particle hydrodynamics-finite element method (SPH-FEM) algorithm in the frame of LS-DYNA, a numerical model of analyzing explosion in sand foundation is established to study the explosion effects of small equivalent group charges at different depths of burial (DOB). The crater depth reaching to maximum is prior to the crater diameter reaching its maximum value. The shearing flow of surface layer sand plays significant effect on the evolution of crater diameter. With the increase of DOB, a critical crater diameter can be obtained. Since it can be considered the crater diameter is only related to explosive equivalent and DOB, therefore a basically linear relationship is proposed between crater diameter relative to DOB and scaled distance. Compression waves appearing the similar features of strong discontinuous shock, dominate in the close-in region of explosion. Large deformation of sand is mainly induced by compression. At far field, the blast waves change to the continuous shear waves with reduced amplitude. Attenuation law of peak pressure has a good coincidence with the empirical predictions. The analysis results can provide reference for design and reinforcing of foundation structures to resist blast load.

Key words: coupled SPH-FEM algorithm; explosion effects; depth of burial; critical crater diameter; peak pressure

1 引言

在过去的几十年中, 全球由于突发事件或恐怖袭击活动引起的地基土爆炸问题对隧道、防空洞等地下埋置结构及地面房屋构筑物形成了致命性破坏, 造成了严重的经济损失; 另一方面, 军事和国民经济领域不断应用土中爆破技术进行地下空间快速开挖、军事防护工程建造等活动, 因此地基土中

的爆炸成坑和地冲击传播问题逐渐成为岩土体爆炸领域的热点研究问题^[1-2]。土体在爆炸荷载作用下的应变率往往在 $10^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之间, 在极短的时间内土体参数发生明显改变, 同时涉及到材料非线性和三相土介质的相互作用问题, 因此, 地基土中的爆炸动力响应问题十分复杂, 直接进行理论解析难度很大。然而为了解决特殊爆炸应用问题, 经过一系列的简化假定而形成的经验方法被工程实际广泛

收稿日期: 2012-07-13

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 50825901, No. 50909040); 江苏省青蓝工程创新团队资助项目 (No. 2016-B01011)。

第一作者简介: 王维国, 男, 1986 年生, 博士研究生, 研究方向为岩土体动力响应。E-mail: 2008hmily@163.com

接受, 并沿用至今^[3]。目前国内外对于爆炸问题的理论研究仍严重落后于工程实践。试验是描述土中爆炸成坑效应最有效直接的方法^[4], 但往往受限于试验周期、资金及操作可重复性等问题。随着计算机仿真技术的快速发展, 借助合理的数值手段不仅可以再现土体爆炸全过程, 还可以通过改变数值条件经济有效地分析评价工程模型, 因此, 近些年通过数值手段研究地基土中爆炸成坑和地冲击传播问题的方法得到空前的发展。Luccioni 等^[3]在地下爆炸试验的基础上利用 AUTODYN 有限元软件进行了数值验证, 并分析了爆炸荷载形状及土体弹性参数对爆坑直径的影响; 加拿大防护研究中心^[5]采用 ALE 和 SPH 方法分别研究了土中爆炸及空中爆炸对地面结构的损毁效应; Lu 等^[6]基于 SPH-FEM 耦合方法分析了地下结构在遭受爆炸荷载作用时的响应问题, 同时比较了二维和三维数值模型的差异性, 但未对土中爆炸成坑行为及动力响应进行深入研究。

砂土地基中的爆炸问题涉及材料和几何非线性、塑性大变形破坏、运动物质交界面等特征, 依赖于网格的传统有限元法在处理爆炸近区大变形问题时受到限制。为克服甚至消除这些缺陷, 从 20 世纪 70 年代开始出现了一种新的数值方法——无网格法, 其中光滑粒子法最早被提出且比较适合用于求解爆炸冲击问题^[7-8]。现有研究表明, 利用光滑粒子法解决岩土爆炸问题, 特别是爆炸成坑及地冲击传播问题仍处于起步阶段, 本文在 LS-DYNA 框架内, 采用有限元网格与光滑粒子相耦合的方法, 重点研究了小当量集团装药在不同埋置深度爆炸时的爆坑尺寸与比例距离的关系, 以及土中爆炸波随比例爆距的衰减规律, 为 SPH 技术在岩土体爆炸领域的应用推广提供依据和借鉴。

2 SPH-FEM 耦合算法

传统有限单元法以网格单元的变形描述物质的运动界面, 其优点是计算速度快, 但在处理爆炸大变形问题时极易发生网格畸变, 很容易因时间步长过小而使计算终止或因误差过大使计算失真^[8]; 欧拉算法将网格和物质结构相互独立, 用物质的输运和流动描述材料变形, 在一定程度上避免了网格畸变, 但固定于空间的欧拉网格不能对粒子的时间历程进行追踪, 同时还存在运动界面模糊的缺陷; 多物质 ALE 算法吸收了拉氏法和欧拉法的优势, 能有效处理大变形问题, 但该算法存在边界不光滑的缺点, 同时会因两种网格不协调而导致欧拉物质的非物理穿透。基于此, 近些年以光滑粒子流体动力学

法为代表的无网格技术, 由于其明显的优势逐渐被应用于大变形问题的研究。

光滑粒子流体动力学法 (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH), 是惟一的无空间网格的连续介质动力学计算方法, 该算法集合了无网格技术、拉格朗日法及颗粒流法的优势, 以负载有力学量的物质点代替网格单元, 计算时跟踪流动的粒子, 能精确捕获流动粒子的属性^[9-10]。SPH 粒子之间由于不存在网格关系, 避免了大变形时网格扭曲造成的精度破坏问题, 同时能光滑连续地处理物质交界面。SPH 方法发展至今, 可以简单而精确地实现复杂的本构行为, 能够模拟爆炸冲击导致的成坑、震塌及物质飞散等破坏现象, 在拉格朗日框架内有处理大变形和材料空洞的能力^[8]。但由于算法差异, SPH 法相对于传统有限元法计算效率较低, 且在解决边界条件时尚存在困难。而 SPH-FEM 耦合法能充分利用两者的优势, 在爆炸近区大变形和飞溅区域使用 SPH, 而在远离爆源的小变形区域采用有限元建模^[10], 耦合界面处的 SPH 粒子和有限单元通过固连接触传递同一材料之间的力学信息, 以点-面胶结方式保证两者间的位移协调。模型外边界可以充分利用有限单元边界约束方法, 在大大提高计算效率的同时又能精确地分析土中爆炸这类特殊问题。

3 本构模型

3.1 土体材料模型

土体爆炸问题模拟的关键在于合理选取土介质的模型及参数, LS-DYNA 提供了多个土体本构模型, 如 SOIL_AND_FOAM(_FAILURE)(mat5/14)和 FHWA_SOIL(mat147)等, 作为最早支持 SPH 算法的材料模型之一的 mat5/14, 通过对无限土介质和近地表土介质中的爆炸数值验证, 比较适合用于模拟砂土介质中的爆炸强动态问题^[11-12]。

mat5/14 采用如图 1 所示的压力-体积应变压实模型来描述砂土在爆炸荷载下的受力变形关系, 体积应变以相对体积的自然对数表示, 通常用 10 对数据对土体压缩状态方程进行多段线性逼近。计算中采用 Wang^[11]推荐的压缩状态方程参数描述湿砂, 如表 1 所示。该模型的理想塑性屈服函数为

$$\phi = \frac{s_{ij}s_{ij}}{2} - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (1)$$

式中: a_0 、 a_1 和 a_2 为用户自定义常数; s_{ij} 为偏应力分量; p 为压力。采用的主要计算参数值: 密度为 1.8 g/cm^3 , 剪切模量为 63.8 MPa , 体积卸载模量为 1.26 GPa , 拉伸截止值 $P_C = -6.9 \text{ kPa}$, 剪切屈服面参数 $a_0 = 3.4 \times 10^7 \text{ Pa}^2$, $a_1 = 6.387 \text{ kPa}$, $a_2 = 0.3$ 。

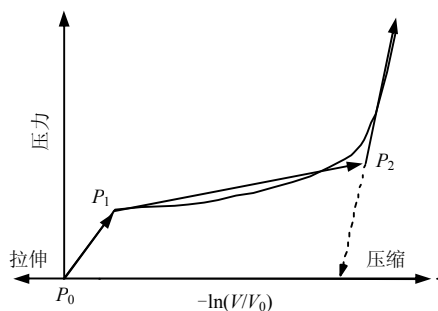


图1 土体材料的体积应变-压力曲线

Fig.1 Curve of pressure vs. volumetric strain for soil

表1 湿砂状态方程参数^[11]Table 1 Parameters of state equation of sand^[11]

编号	$\ln(V/V_0)$	压力/MPa	编号	$\ln(V/V_0)$	压力/MPa
1	0.000	0	6	-0.246	200
2	-0.104	20	7	-0.271	400
3	-0.161	40	8	-0.283	600
4	-0.192	60	9	-0.290	800
5	-0.224	120	10	-0.400	4 100

3.2 高能炸药材料模型

采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程来描述 C-4 炸药。JWL 状态方程能够精确描述爆炸过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性，其关系式^[12]为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_r} \right) e^{-R_1 V_r} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_r} \right) e^{-R_2 V_r} + \frac{\omega E_0}{V_r} \quad (2)$$

式中： A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料输入参数； E_0 为爆轰产物单位体积的内能； V_r 为相对体积，即单位体积装药产生的爆轰产物的体积； P 为爆轰产物的压力。

炸药材料参数取值如下：密度为 1.601 g/cm³，爆速为 8 193 m/s，C-J 压力为 28 GPa， $A=609.8$ GPa， $B=12.95$ GPa， $R_1=4.5$ ， $R_2=1.4$ ， $\omega=0.25$ ， $E_0=9.0$ GJ/m³，初始相对体积 $V_{r0}=1.0$ 。

4 数值模型的建立

数值模型由集中药包和半无限土体组成，问题具有轴对称特点，故为节省计算资源只建立 1/4 模型，图 2 为药包埋置深度 (DOB 为药包中心到地表的距离) 为 0.17 m 时的 SPH-FEM 三维耦合网格模型。方形集中药包边长为 0.04 m，装药质量为 0.1 kg，此埋置深度时模型共划分为 371 200 个有限单元和 64 000 个 SPH 粒子，其中炸药 SPH 粒子 128 个，有限单元网格采用渐变模式从 SPH-FEM 耦合界面向边界逐渐增大。几何模型随着药包埋置深度的增加而相应扩大，SPH 粒子数量明显增加，当埋置深度达到 0.62 m 时，SPH 粒子数量将达到 275 000 个。

数值模型上表面为土体与空气接触的自由面，

将模型中的 SPH 粒子作为从节点，有限单元面为主面，按非滑移的固连约束定义两者间的接触，并施加 SPH 对称边界及全局的边界约束面。同时在模型四周及底面定义无反射边界以描述半无限土体空间。常规武器防护设计手册 TM5-855-1^[13]是由美国军事部门根据大量爆炸试验数据编制而成的，能进行包括爆坑在内的常规武器爆炸效应的计算。根据手册爆坑经验数据估算不同埋置深度下的爆坑尺寸以调整数值模型大小，保证足够的计算范围。

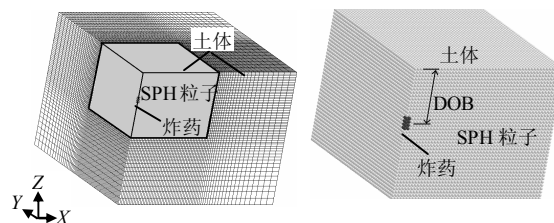


图2 SPH-FEM 三维耦合模型

Fig.2 Three-dimensional SPH-FEM model

土体重力的存在往往会影响爆坑的形态，通常对于小当量或浅埋深的地下爆炸情况，可以忽略重力影响；而随着埋深的增加，更多上覆土体的爆炸扩散需要炸药提供更大的能量，因此，对于埋深较大时则需考虑重力对爆坑尺寸的影响。对于本文中 0.1 kg C-4 炸药的土中爆炸问题，其重力影响基本可以忽略。

5 数值模拟结果分析

5.1 触地爆炸的数值模型验证

在利用 SPH-FEM 耦合分析法分析地基土中爆炸效应之前，首先开展了触地爆炸的数值模拟以验证 SPH-FEM 耦合法在岩土体爆炸问题中的适用性。图 3 为 0.1 kg C-4 炸药触地爆炸时最终的三维爆坑。

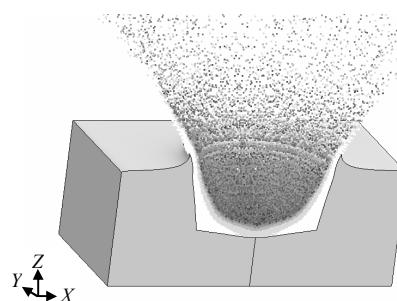


图3 触地爆炸最终三维爆坑

Fig.3 Final crater formation under flush-buried explosion

如图所示，爆炸近区 SPH 粒子的运动，能直观描述药包周围土体的破裂及飞散行为，且在爆炸大变形情况下仍能保证计算的正常进行，所形成的爆坑边界也较为光滑。将计算得到的最终爆坑尺寸与

TM5-855-1 经验数据进行比较, 见表 2, 两者符合较好; 同时数值模型显示, SPH-FEM 耦合界面处的有限单元和 SPH 粒子的位移和土中压力波等力学量具有很好的协调一致性, 从而验证了 SPH-FEM 耦合分析法在进行土体爆炸效应分析中的正确性。

表 2 数值模拟结果与 TM5-855-1 经验值对比
Table 2 Comparison between simulated results and empirical values suggested by TM5-855-1

	药量/kg	爆坑直径 D /m	爆坑深度 H /m
数值模拟	0.1	0.510	0.182
TM5-855-1	0.1	0.575	0.188
相对误差		-11.3%	-3.2%

注: 负号表示本文模拟值比经验值小。

5.2 触地爆炸时的速度流场分析

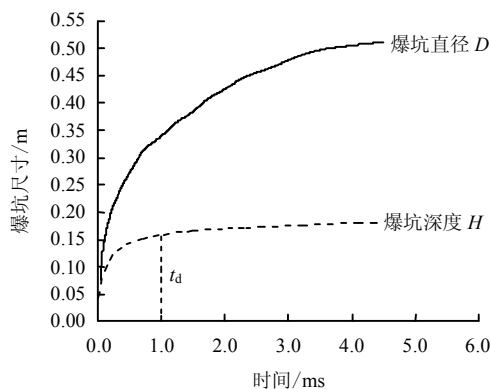
图 4 为触地爆炸时爆坑形成过程中 3 个典型时刻的速度流场。 t_d 为最大爆坑深度到达时间, 如图 4(a)所示。图 4(b)为 $t=t_d/3$ 时刻的速度矢量场, 由于爆炸初期土体具有原始松散结构, 因此, 该时刻之前土颗粒基本以球形向周围扩散。图 4(c)为爆后 t_d 时刻, 爆坑底部土体的运动已接近停止, 即最大爆坑深度远在最大爆坑直径之前到达, 与图 4(a)中爆坑直径与深度随时间的变化曲线相对应。当 $t > t_d$ 时, 爆坑直径持续发展, 而此时自由面附近的土体进入了剪切流场 (shearing flow^[14]), 土中剪切破坏作用超过了爆炸波的压缩作用, 在剪切流场作用下该区域土体发生缓慢横向扩展, 直到达到最大爆坑直径, 如图 4(d)所示。

5.3 炸药不同埋置深度对爆坑形态的影响分析

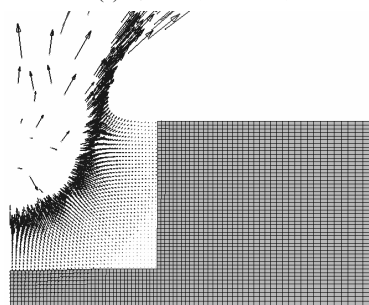
为研究装药在不同埋深条件下的爆坑形态, 分别计算埋置深度为 0.02~0.62 m 时的爆破问题。图 5 为 0.1 kg C-4 炸药在不同埋深时土中爆破形成的爆坑形态, 图中 λ 为药包埋置深度 d 与 TNT 当量的比例系数, 用于衡量爆坑形态, 其表达式如式 (3)。由图 5 可知, 随着药包埋深的增加, 土中爆炸逐渐由爆坑向爆腔形态发展, 爆坑周围形成一定厚度的高度压密的壳带。在 0.42 m 的埋深时, 可见爆坑已基本不能形成, 但爆腔体的形态仍受自由面的影响而呈现“倒梨形”; 而当埋深达到 0.62 m 时, 自由面的存在对爆腔形态的影响已经可以忽略, 此时可近似认为无限土中爆炸问题。

图 6 为爆坑直径随着药包埋深的变化曲线, 当埋深较小时, 大部分炸药能量直接向自由面扩散, 小部分冲散药包上方土体及用于挤密药包周围土介质形成爆坑; 随着埋深增大, 虽然上覆土层厚度有所增加, 但向自由面扩散的爆炸能的减少更加明显, 因此, 爆坑最大直径随着埋深增加; 当药包埋深继续增加, 向自由面扩散的爆炸能量减少量已不足以

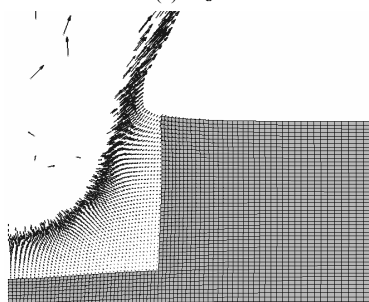
抵消上覆土层冲散作用所需的能量, 因此, 随埋深增大最终爆坑直径将逐渐减小。分析比较爆坑直径计算值与 TM5-855-1 经验值, 在药包埋置深度为 0.32 m 时爆坑直径计算值达到最大值 0.834 m。当埋深较小时, 两者吻合较好, 但当埋深增大时, 计算值与经验值的最大偏差达到 12%, 同时, 达到临界爆坑直径的埋深也稍有区别, 计算为 0.32 m, 区别于经验曲线的 0.36 m。造成偏差的影响因素可能有: 湿砂压缩状态方程、土体塑性屈服函数、SPH 粒子密度以及后处理直径测量误差等。



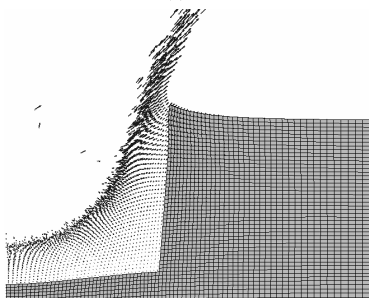
(a) 爆坑尺寸发展曲线



(b) $t=t_d/3$



(c) $t=t_d$



(d) $t=2t_d$

图 4 爆坑形成过程中 3 个典型时刻的速度矢量场
Fig.4 Vector velocity fields at three typical times

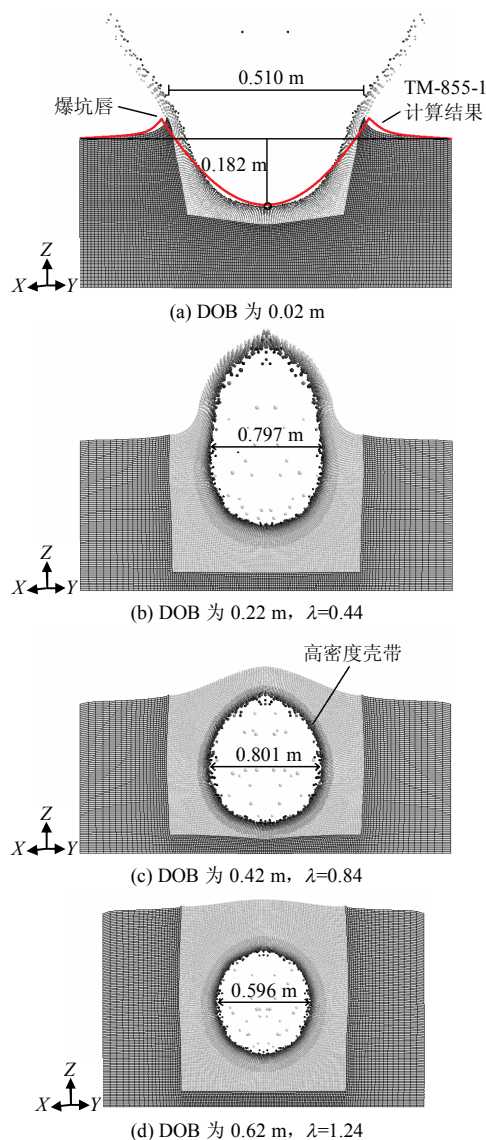


图5 不同药包埋置深度下的爆坑形态

Fig.5 Shape of craters under different buried depths

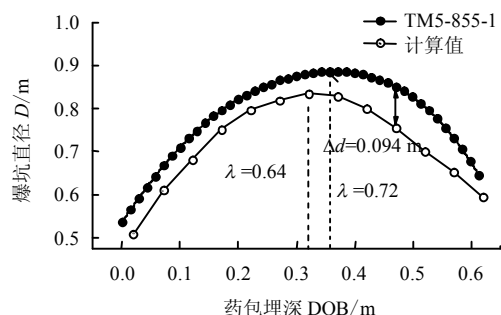


图6 爆坑直径与药包埋置深度的关系曲线

Fig.6 Curves of crater diameter versus buried depth

决定爆坑尺寸和形状的最主要的参数为 TNT 炸药当量 W 和药包埋置深度 DOB, 将药包埋深用 d 表示, 即采用 $d/W^{1/3}$ 的数值作为衡量爆坑形态的指标之一^[3], 即比例系数为

$$\lambda = d/W^{1/3} \quad (3)$$

将 C-4 炸药计算等效的 TNT 当量。分析图 5、

6, 小当量爆炸条件下, 通常当 $\lambda < 0.84$ 时, 将形成可见的常规爆坑; 而当 $\lambda \geq 1.24$ 时, 爆坑形态将成为完全封闭的腔体形态, 如图 5(d) 所示。图 6 显示小当量土中爆炸模拟中临界爆坑直径一般在 $0.6 < \lambda < 0.8$ 时达到。

Baker 等^[15]通过量纲分析和经验假定相结合的方法, 给出了爆坑直径的函数关系式为

$$\frac{D}{2d} = f_1 \left[\frac{(QW)^{1/4}}{\sigma^{1/6} K^{1/8} d} \right] = f_2 \left[\frac{(QW)^{1/4}}{\rho^{1/4} c^{1/3} g^{1/8} d} \right] \quad (4)$$

式中: QW 为 TNT 能量; d 为药包埋置深度; D 为爆坑直径; σ 为与土体强度有关的应力参数; K 为考虑重力影响的参量, 可以导出 K 与 ρg 相关, 而 σ 可以用 ρc^2 衡量, ρ 为土体密度, c 为土中地震波速; g 为重力加速度。

通过数值模拟及 Ambrosini^[16]的分析, 土体弹性参数对爆坑尺寸的影响一般在 10% 以内。因此, 工程应用中可以进一步假定 $D/2d$ 是关于比例距离 $W^{1/4}/d$ 的函数, 即对于不同土质, 爆坑直径可以近似认为只与药包当量和埋置深度相关。图 7 给出了本次数值模拟计算与其他试验或数值计算的 $D/2d$ 与 $W^{1/4}/d$ 之间的关系对比曲线。从图中可以看出, 数值计算得到的 $D/2d$ 与 $W^{1/4}/d$ 关系与之前的研究表现出相同的趋势。当 $W^{1/4}/d < 0.3$ 时, 爆坑直径对参数将变得非常敏感, 因而此处不做考虑; 当 $W^{1/4}/d > 0.3$ 时, $D/2d$ 与 $W^{1/4}/d$ 的关系可以近似用直线方程描述, 如图 8 所示。

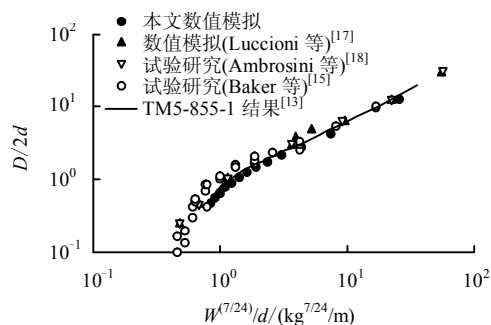


图7 爆坑直径与比例距离的变化曲线

Fig.7 Variation of crater diameter with scaled distance

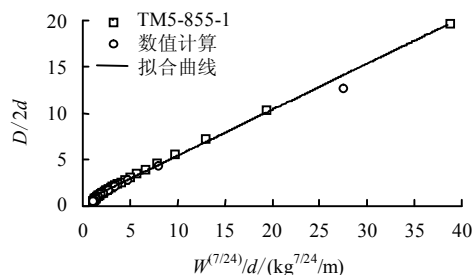


图8 爆坑直径与比例距离的拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of crater diameter with scaled distance

5.4 土中爆炸地冲击传播规律分析

集中药包在土中爆炸后, 爆炸能量主要以爆炸波的形式向四周土体扩散。爆炸近区的土体由于距离爆源较近, 因此, 在爆炸波到达一瞬间土体颗粒将会受到剧烈震动, 主要表现为单峰高幅值且持续时间短的冲击波形式, 以压缩引起土体破坏; 而在爆炸远区, 由于扩散及衰减作用使得该区域的土体颗粒获得的爆炸波能量急剧减小, 爆炸波表现为震荡的地震波形式, 动力剪切作用占据主要地位。沿着与地平线 45° 的径向线选取离爆距分别为 0.053、0.102 5、0.152、0.201 5 m 的 4 个 SPH 粒子 A、B、C 和 D, 获得其土中爆炸波压力及合成速度时程曲线, 如图 9 所示。

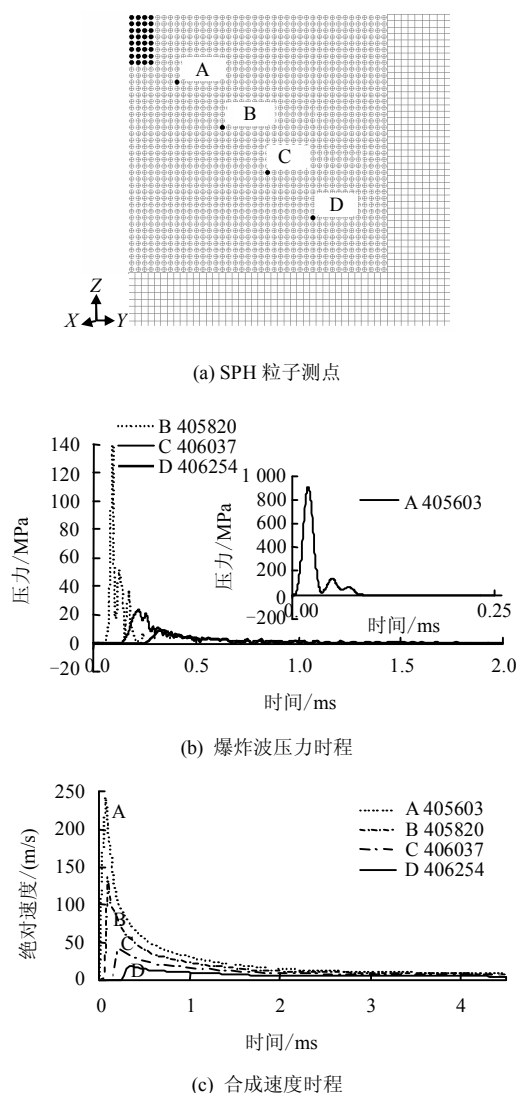


图 9 土中爆炸波压力及合成速度时程曲线

Fig.9 Pressure and resultant velocity histories for soil

分析图 9 可知, 土体速度时程与压力时程曲线形式具有较好的一致性, 随着爆距的增加, 土体爆

炸波压力和振动速度快速衰减。图 10 为土中爆炸波峰值压力与比例爆距之间的关系曲线, 比例爆距定义为爆距 r 与药量系数 $W^{1/3}$ 之比。分析图 10 可知, 数值计算得到的土中爆炸波峰值压力衰减规律和 TM5-855-1 经验曲线基本一致。

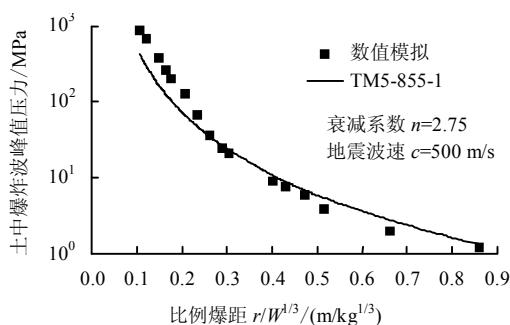


图 10 土中爆炸波的衰减曲线
Fig.10 Attenuation of peak pressure with scaled distance

6 结 论

(1) 通过 SPH-FEM 耦合方法计算得到不同埋置深度时的爆坑形态和尺寸与 TM5-855-1 经验数据较为吻合, 小当量爆炸时临界爆坑直径一般在 $0.6 < \lambda < 0.8$ 时达到。

(2) 经简化及经验假定之后获得的爆坑直径与埋药深度之比与比例距离近似成直线关系, 可以作为实际应用的参考计算方法。

(3) 最大爆坑深度远在最大爆坑直径之前到达, 浅埋装药时爆坑深度的发展主要由爆炸冲击压缩引起, 而爆坑直径的发展是压缩和表层土体剪切流场共同作用的结果。

(4) 砂土中爆炸波在近区表现为强间断的冲击波, 压缩作用是造成砂土大变形流动的主要因素, 而在爆炸远区则转变为连续的应力波形式, 土中爆炸波峰值压力随比例爆距的衰减规律与经验曲线基本一致。

参 考 文 献

- [1] 何翔, 吴祥云, 李永池, 等. 石灰岩中爆炸成坑和地冲击传播规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 725—729.
- HE Xiang, WU Xiang-yun, LI Yong-chi, et al. Testing study of crater formed by explosion and propagation laws of ground shock in limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 725—

- 729.
- [2] FIŠEROVÁ D. Numerical analyses of buried mine explosions with emphasis on effect of soil properties on loading[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2006.
- [3] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D. Effect of buried explosions[J]. **Mecánica Computacional**, 2007, XXVI: 2656—2673.
- [4] 王海亮, 叶朝良. 爆炸成腔后土体物理力学性能的变化规律[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2617—2622.
- WANG Hai-liang, YE Chao-liang. Variation pattern of soil physico-mechanical performance by explosive enlargement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2617—2622.
- [5] TOUSSAINT G, BOUAMOUL A. Comparison of ALE and SPH methods for simulating mine blast effects on structures[R]. Valcartier, Canada: Defence Research and Development Canada, 2010.
- [6] LU Y, WANG Z Q, CHONG K. A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2005, 6(25): 275—288.
- [7] 黄雨, 郝亮, 野々山人. SPH 方法在岩土工程中的研究应用进展[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 256—262.
- HUANG Yu, HAO Liang, NONOYAMA Hideto. The state of the art of SPH method applied in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(2): 256—262.
- [8] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [9] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [10] 张志春, 强洪夫, 高巍然. 一种新型 SPH-FEM 耦合算法及其在冲击动力学问题中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 243—249.
- ZHANG Zhi-chun, QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. A new coupled SPH-FEM algorithm and its application to impact dynamics[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2011, 31(3): 243—249.
- [11] WANG J. Benchmark work of simulation of explosion in soil and air[R]. Victoria, Australia: Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [12] Livermore Software Technology Corporation, Inc. LS-DYNA Keyword User's Manual Volume II (Material Models, Version 971/Rev5)[M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, Inc., 2010.
- [13] Department of the Army. Fundamental of protective design for conventional weapons[M]. TM5-855-1, Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1984.
- [14] ORPHAL D L. Explosions and impacts[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2006, 33 (1—12): 496—545.
- [15] BAKER W E, WESTINE P S, DODGE F T. Similarity methods in engineering dynamics[M]. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- [16] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M, DANCSI R F. Influence of the soil properties on craters produced by explosions on the soil surface[J]. **Mecánica Computacional**, 2004, XXIII: 571—590.
- [17] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D, NURICK G. Craters produced by underground explosions[J]. **Computers and Structures**, 2009, 87(21): 1366—1377.
- [18] AMBROSINI R D, LUCCIONI B M, DANCSI R F. Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface[J]. **Shock Waves**, 2002, 12(1): 69—78.