DOI: 10.11883/bzycj-2017-0209
文章编号: 1001-1455(2018)06-1419-10

混凝土爆破损伤的 SPH-FEM 耦合法数值模拟*

王志亮,毕程程,李鸿儒
(合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 为了提高计算效率以及更好展现爆炸荷载下混凝土破坏过程,采用 SPH-FEM 耦合法对混凝土爆破成坑进行模拟。首先结合前人给出的 C30 混凝土 Holmquist-Johnson-Cook(HJC)部分本构参数,通过理论推导等方法确定出剩余的参数;然后代入模型中计算,将数值解与实测数据进行对比;最后以峰值压力和峰值加速度作为考察对象,对 HJC 模型中 21 个参数敏感性进行分析。结果表明:SPH-FEM 耦合法能直观地模拟爆炸荷载作用下爆坑的发展全过程,且能够较好地处理 SPH 边界问题;基于所给出的 C30 混凝土 HJC 本构参数,采用 SPH-FEM 耦合法对混凝土爆破破坏进行模拟,计算结果与实测数据吻合度高,表明 HJC 本构参数的确定具有合理性。此外,还发现 HJC 本构参数对爆破问题结果的敏感度各不相同,指出对峰值压力和峰值加速度均有较大影响的参数在确定的时候需引起足够的重视。

关键词: 混凝土;爆破损伤;SPH-FEM 耦合法;HJC 本构;参数敏感度
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆炸过程涉及炸药爆炸能量的高速释放、冲击波在介质中的快速传播、混凝土的损伤破裂乃至飞溅等方面的问题,目前的理论研究水平在准确描述爆炸过程方面尚存在不足。实验研究由于成本高、实施周期长以及很难全面地测定相关参量,最终往往只能得到混凝土在爆炸破坏作用下的终态响应结果以及获取部分监测点的时程信息,而数值模拟可以很好地再现爆炸响应的中间过程,并且能有效地描述混凝土在爆炸作用下的真实动态响应情况。相比于传统的 FEM 数值算法,如 Lagrange、Euler 以及 ALE 算法,光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法[1]集合了无网格法、拉格朗日法和粒子流法的优势,能够避免 Lagrange 算法中的网格畸变问题、Euler 算法中的重分和输运计算问题以及 ALE 算法兼具双重网格属性带来的计算耗时较长等问题。SPH 法所具有的无网格属性可以避免网格扭曲变形造成的精度损失,拉格朗日属性可以得到较为准确的模拟结果,粒子属性能够较好地展现爆炸冲击所产生的成坑、物质飞溅等破坏现象。但是由于算法差异,SPH 法相对于传统的 FEM 数值算法计算效率较低,且在边界处理上也存在着一定的问题。

针对 SPH 法存在的问题,诸多学者提出了 SPH-FEM 耦合法,即建模时将爆炸近区大变形区域采用 SPH 建模,而在爆炸远区的小变形区域采用 FEM 建模。这样既能避免大变形区域内的网格畸变,又可以减少 SPH 的计算域,从而大大提高计算效率。胡英国等[2]采用 SPH-FEM 耦合法对深孔梯段爆破的动力效应进行了数值模拟,模型在爆破近区采用 SPH 粒子,远区采用有限单元,得出该耦合算法能够较为准确地模拟爆破近区的岩体运动和损伤特征;王维国等[3]模拟了炸药在砂土地基中的触地爆炸,分别比较了纯 SPH 模型和 SPH-FEM 耦合模型对计算结果的影响,得出纯 SPH 模型计算耗费的时间约是 SPH-FEM 耦合模型的 3 倍,而计算精度基本保持一致,模拟得到的爆炸成坑效果与经验值相一致;崔溦等[4]采用 SPH-FEM 耦合数值法,研究了土中钢筋混凝土箱涵的爆炸动力响应问题,其将 SPH 法用于模拟爆破近域土体,而 FEM 法用于模拟远场土体和钢筋混凝土箱涵;Lu 等[5]研究地下结构在浅埋炸药爆炸作用下的动态响应时,分别针对二维和三维的 SPH-FEM 模型进行数值比较,得出二维模型计算的结果更为精确且波形稳定;Koneshwaran 等[6]在分析地表炸药爆炸对地下隧道的破坏效应

* **收稿日期**: 2017-06-16; **修回日期**: 2017-09-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51579062,51379147)
第一作者: 王志亮(1969—),男,博士,教授,cvewzL@hfut.edu.cn。

时,对炸药及其附近的土体采用 SPH 粒子,并讨论了常见的几种 SPH-FEM 耦合方法;VUYST 等[7]结合平板对撞的例子,讨论了 SPH 法、FEM 法以及 SPH-FEM 耦合算法在计算效率和精度上的差异,得出 SPH-FEM 耦合算法效果最佳,并在刚形体跌落入水以及子弹击穿靶板例子上得到良好验证;杨刚等[8]模拟炸药在混凝中爆炸时,分别采用纯 Euler 算法、纯 SPH 算法、Euler-Lagrange 耦合算法以及 SPH-Lagrange 耦合算法,指出用纯 Euler 算法或纯 SPH 算法描述混凝土时,计算得到的压力时程曲线在衰减段会有较大的数值波动。相比较而言,Euler-Lagrange 耦合算法以及 SPH-Lagrange 耦合算法模拟效果较好。

Holmquist-Johnson-Cook(HJC)本构模型[9]是针对混凝土材料提出的一种率相关的损伤本构模型,能有效地计算混凝土在高应变率下的大变形问题。由于该模型能够较好地描述混凝土在高速碰撞、侵彻以及爆炸作用下的力学行为,适用于拉格朗日和欧拉算法,现已被 LS-DYNA 程序引入,并被广泛运用[10-15],纪冲等[16]、梁超[17]还将 SPH-FEM 耦合法结合 HJC 本构模型运用到弹体侵彻混凝土上,而目前基于 SPH-FEM 耦合法模拟混凝土爆破的公开发表的成果很少,结合爆破问题对 HJC 本构中各参数敏感度进行分析的研究更少。本文中针对 C30 混凝土中的爆破成坑等问题,开展较深入的研究,力图得出一些具有参考价值的结论。

1 算 法

1.1 SPH 基本原理

SPH 方程可表述[1]如下。

第一步:使用积分表达式对函数进行近似,任一函数 $f(x)$的积分近似表达式为:

$$f(x)=\int f(x')W(x-x',h)\mathrm{d}x' \tag{1}$$

式中:积分域为整个问题域空间,$W(x-x',h)$为光滑核函数,h 为光滑长度。

第二步:粒子近似法,即用粒子函数对式(1)的积分表达式离散化,通过对离散化的粒子插值得到函数值,也就是使用光滑核函数 W 影响范围内的临近粒子 j 的运动信息求和平均代替参考粒子 i 的运动状态,则粒子 i 处的函数近似式为:

$$f(x_i)=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}f(x_j)W(x_i-x_j,h) \tag{2}$$

式中:m_j、ρ_j分别为粒子 j 的质量和密度($j=1,2,\cdots,N$),N 为在粒子 i 的支持域内粒子数的总量。

对粒子 i 的求解可通过使用光滑核函数 W 支持域内的粒子 j 求和得到(见图 1)。图中 h 为光滑长度,W 为光滑核函数,κ 是与 x 处光滑函数相关的常数,Ω 表示支持域,S 为粒子作用边界。

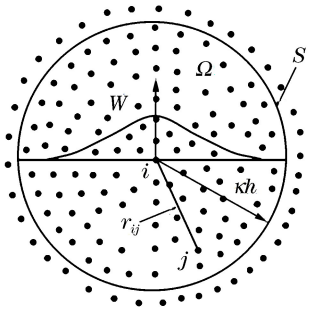


图 1 粒子近似法

Fig. 1 Particle approximation method

1.2 SPH-FEM 耦合方式

SPH-FEM 耦合法的关键是在最靠近有限元网格的一排 SPH 粒子如何顺利地将各物理力学信息传递给有限单元。目前比较常见的有三种方法[6]:第一种是将靠近 SPH 粒子的有限单元上的节点赋予粒子属性,SPH 粒子将各信息传递给有限单元上的节点,再通过节点传递给单元;第二种是在 SPH 粒子与有限单元之间建立混合区,该区域粒子与单元相互重合,将粒子携带的信息过渡到单元上;第三种是通过定义节点与面之间的接触来传递信息(见图 2),常见的包括滑动接触和固连接触[3]。

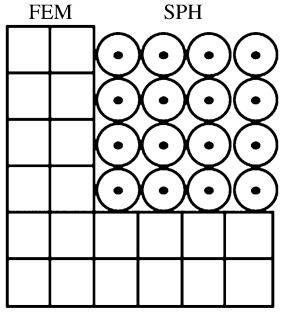


图 2 节点与面之间接触

Fig. 2 Contact between nodes and surfaces

本文中采用固连接触的方式将 SPH 粒子与有限单元联系起

来，最靠近有限元网格的 SPH 粒子将从其他粒子传递过来的能量、动量以及运动方程等物理力学信息传递给有限单元，同时以点-面固结的方式保证两者间位移与变形的协调。接触通过在 LS-DYNA 中建立模型后生成的 k 文件中添加关键字 CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE 来定义[18]，并通过关键字 CONTROL_CONTACT 调节接触刚度等参量。

2　本构模型

2.1　混凝土材料模型

HJC 损伤本构模型考虑了高静水压力、高应变率和材料的损伤效应，主要包括三个部分：强度模型、状态方程和损伤模型[9,18]。

强度模型是以特征化等效应力进行描述，可表示为：

$$\sigma^* = [A(1-D)+BP^{*N}][1+C\ln(\dot{\varepsilon}^*)] \tag{3}$$

式中：$\sigma^*=\sigma/f_c$ 为特征化等效应力；σ 为实际等效应力；f_c 为静态单轴抗压强度；S_{max} 为最大特征化等效应力，且满足 $\sigma^* \leqslant S_{max}$；$D$ 为损伤变量；$P^*=P/f_c$ 为特征化压力，其中 P 为静水压力；$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为特征化应变率，$\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率，$\dot{\varepsilon}_0=1.0\ \mathrm{s}^{-1}$ 为参考应变率；C 为应变率影响参数；A 为特征化黏性强度系数；B 为特征化压力硬化系数；N 为压力硬化指数；A、B、N 和 S_{max} 统称为极限面参数。

状态方程如图 3 所示，用于描述静水压力和体积应变之间的关系，整个过程可分为弹性阶段、塑性阶段和密实阶段[10]。图 3 中 P 为静水压力；μ 为体积应变；μ_{crush} 为达到材料弹性极限时的体积应变；P_{crush} 为材料达到弹性极限时的静水压力；μ_{plock} 为与压实静水压力 P_{lock} 对应的体积变形；μ_{lock} 为达到压实极限时的体积应变；$\bar{\mu}=(\mu-\mu_{lock})/(1+\mu_{lock})$ 为修正后的体积应变；K_1、K_2 和 K_3 为压力常数。

损伤模型如图 4 所示，由等效塑性应变和体积应变累积而成，其演化方程为：

$$D=\sum \frac{\Delta\varepsilon_p+\Delta\mu_p}{\varepsilon_p^f+\mu_p^f} \tag{4}$$

$$D_1(P^*+T^*)^{D_2} \geqslant EF_{min} \tag{5}$$

式中：$\Delta\varepsilon_p$、$\Delta\mu_p$ 为等效塑性应变增量和塑性体积应变增量；$\varepsilon_p^f+\mu_p^f$ 表示当前积分步下的塑性应变；$T^*=T/f_c$ 为特征化拉力，T 为材料拉伸强度；D_1、D_2 为损伤常数；EF_{min} 为材料断裂时的最小塑性应变。

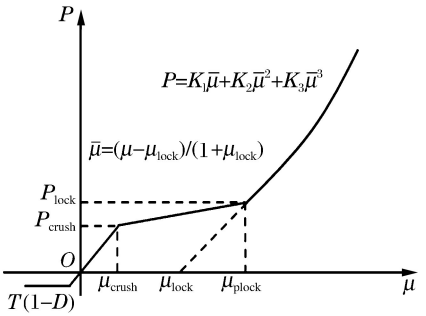


图 3　状态方程

Fig. 3　Eequation of state

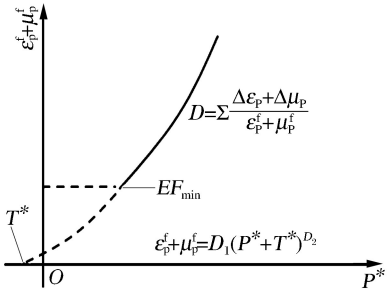


图 4　损伤模型

Fig. 4　Damage model

本文中涉及到的 C30 混凝土[19-20] 基本力学参数为：密度 $\rho_0=2\ 400\ \mathrm{kg/m^3}$，抗压强度 $f_c=39.2$ MPa，抗拉强度 $T=3.162$ MPa，弹性模量 $E=33.4$ GPa，泊松比 $\nu=0.202$。混凝土剪切模量 G 和体积模量 K 根据下式确定：

$$G=E/[2(1+\nu)] \tag{6}$$

$$K=E/[3(1-2\nu)] \tag{7}$$

求得 $G=13.89$ GPa，$K=18.68$ GPa。

混凝土达到弹性极限时的静水压力 P_{crush} 和体积应变 μ_{crush} 可由下式确定：

$$P_{crush}=f_c/3 \tag{8}$$

$$\mu_{\text{crush}} = P_{\text{crush}}/K \tag{9}$$

求得 $P_{\text{crush}}=13.07$ MPa，$\mu_{\text{crush}}=0.000\ 7$。

损伤参数 D_1 可按照公式 $D_1=0.01/(1/6+T^*)$ 确定，其中 $T^*=T/f_c$，求得 $D_1=0.04$。参数 D_2 和 $S_{\max}$ 对模拟结果的影响很小[10,14]，因此 D_2 按文献[9]取为 1，$S_{\max}$ 取为 7。

文献[19]针对 C30 混凝土在考虑率型微损伤演化的条件下改进了 Johnson-Cook 模型，并基于相关实验给出了极限面参数 A、B、N 及应变率影响参数 C 的值，所提出的模型在混凝土动态实验中得到了良好的应用。本文中基本力学参数大多取自文献[19]，考虑到 HJC 各参数之间耦合紧密，故参数 A、B、N 和 C 仍取自文献[19]。状态方程参数 P_{lock}、μ_{lock}、K_1、K_2 和 K_3 在缺乏实验数据的情况下，大多取自文献[9]。根据文献[11]对 FS 的假设，认为混凝土达到极限密度 $\rho_{\max}$ 时，体积应变达到最大值 $\mu_{\max}$，即：

$$FS = f(P)_{\max} = D_1(P^*_{\max}+T^*)^{D_2} \tag{10}$$

式中：FS 是在混凝土单元在最大静水压力 $P_{\max}$ 作用下发生断裂的塑性应变；D_1，D_2 为损伤常数；$T^*=T/f_c$ 为材料所能承受的最大特征化拉力；$P^*_{\max}=P_{\max}/f_c$ 为材料最大特征化静水压力。本次研究的混凝土性质与文献[11]差别不大，故 FS 参照取 1.34，则最终确定的 C30 混凝土 HJC 参数如表 1 所示。

表 1 C30 混凝土 HJC 参数

Table 1 HJC parameters of C30 concrete

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_c/MPa	A	B	C	$S_{\max}$	G/GPa	T/MPa	D_1	D_2
2 400	39.2	1.05	1.65	0.007	7	13.89	3.162	0.04	1

P_{crush}/MPa	μ_{crush}	P_{lock}/GPa	μ_{lock}	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	$EF_{\min}$	N	FS
13.07	0.000 7	0.8	0.1	85	−171	208	0.01	0.76	1.34

2.2 炸药材料模型

炸药按均匀连续介质考虑，采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程精确描述爆炸过程中爆炸产物的体积、压力以及能量特性，表达式为[18]：

$$P = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{11}$$

式中：P 为爆轰压力，V 为相对体积，E_0 表示初始体积内能，A、B、R_1、R_2 和 ω 为炸药常数。

炸药各参数取值分别为[21]：$\rho=1\ 630$ kg/m^3，$D_v=6\ 930$ m/s，$P_{\text{cj}}=27.0$ GPa，$A=374$ GPa，$B=7.33$ GPa，$R_1=4.15$，$R_2=0.95$，$\omega=0.3$，$E_0=7.0$ GJ/m^3，$V_0=1.0$。

2.3 土体材料模型

土体采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型，其理想塑性屈服函数为[18]：

$$\phi = J_2 - (a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2) \tag{12}$$

式中：$J_2=\sigma_{ij}\sigma_{ij}/2$，$\sigma_{ij}$ 为偏应力分量；σ 为平均应力；常数 α_0、α_1 和 α_2 为无量纲曲线 J_2-σ 二次拟合曲线常数项。

土体主要计算参数为[22]：密度为 1.80 g/cm^3，剪切模量为 16.01 MPa，体积卸载模量为 1.26 GPa，剪切屈服面参数 $\alpha_0=2.4\times10^6$ Pa^2，$\alpha_1=1.360\times10^4$ Pa 和 $\alpha_2=0.123\ 2$。

3 模拟分析

3.1 模型建立

穆朝民等[20]、李重情等[23]为研究变埋深条件下混凝土中爆炸压力和加速度的传播规律，进行了多组实验。实验设计在室外空旷地区，在地上开挖一个边长为 3 m 的立方体爆坑，沿深度方向布设 6 个测点，用于安装压力传感器和加速度传感器，然后现场浇筑混凝土直至填满实验坑，并在浇筑时预留装药孔，填装1 kg TNT，最后进行爆炸实验。本文以此实验为基础，对其进行数值模拟。文献[20,23]给出了炸药在不同埋深条件下包括装药比例距离为 −0.25 m/kg$^{1/3}$ 的空爆（炸药悬置空中距混凝土表面

0.25 m)、−0.053 m/kg$^{1/3}$的触地爆(炸药置于混凝土表面)、0 m/kg$^{1/3}$的半埋爆(炸药半埋于混凝土中，且炸药中心处于混凝土顶面中心处)以及 0.8 m/kg$^{1/3}$的全埋爆(炸药全部埋于混凝土内且距混凝土表面 0.8 m)等爆炸实验结果，而其中只给出了装药比例埋深为 0 和 0.8 m/kg$^{1/3}$时相应的压力和加速度时程数据。因此，为方便将模拟结果与实验结果进行对比，同时更好地展现爆炸破坏的效果，本文中选择模拟装药比例埋深为 0 m/kg$^{1/3}$的半埋爆情况。

物理模型如图 5 所示，立方体混凝土边长为 300 cm，炸药选用 1 kg TNT，按照等体积原则将炸药简化成尺寸为 8.5 cm×8.5 cm×8.5 cm 的立方体。混凝土的四周及底部与土体接触，土体厚度均取 10 cm。测点 1～6 距炸药中心的距离依次为 25.5、51.5、81.0、125.6、187.9 和 250.4 cm。

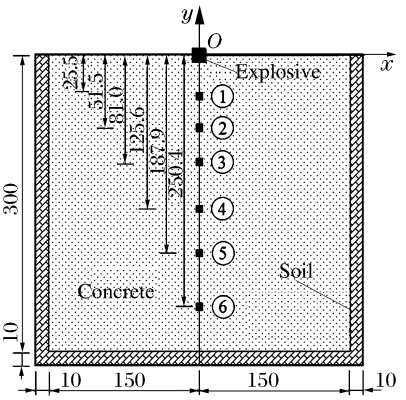


图 5 物理模型(单位：cm)

Fig. 5 Physical model (unit: cm)

计算模型如图 6 所示，由于模型具有对称性，为节省计算时间只建了 1/4 模型。考虑到混凝土采用的是 HJC 本构模型，该模型无法模拟混凝土在爆炸荷载作用下的裂纹扩展、破碎等过程，因此通常情况下需要添加单元失效准则 MAT_ADD_EROSION，使处于破坏区的单元失效以形成破坏效果。然而，单元失效准则对粒子并不起作用，粒子只会产生运动而不会凭空消失，此时如果混凝土粒子区域选择得过小，爆炸荷载传递到混凝土近区的有限单元上导致该处的单元删除，则粒子与单元之间的接触算法会失效，影响压力波的传播和单元与粒子之间位移变形的协调性。如果不添加单元失效准则，爆炸近区混凝土有限单元会发生变形，形成“杯口状”的凸起，跟实际的爆破形态并不一致；若将粒子区域取得过大，这样不仅会造成计算时间的增加，对应的存储空间也会急剧增加，一般的计算机很难满足要求。经过多次尝试，最终将该部分混凝土(近区)的尺寸设定为 30 cm×30 cm×30 cm。由于粒子能够很好地展现混凝土破碎与抛掷等过程，因此本模型中无需添加单元失效准则。

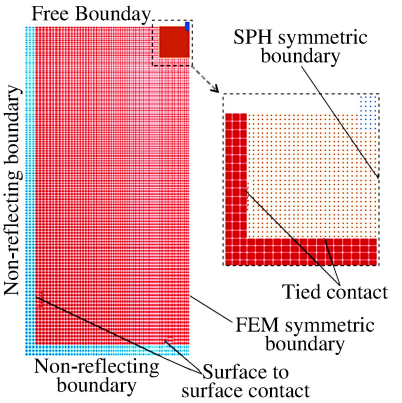


图 6 计算模型

Fig. 6 Calculation model

模型主要在 LS-DYNA 软件中建立，结合关键字的添加与修改，大体可分为三步：(1) 在 LS-DYNA 中建立 FEM 模型；(2)采用 solid center 建立 SPH 模型；(3)在 LS-DYNA 中求解，用 LS-PREPOST 处理计算结果，详见图 7。在边界处理上，土体外侧及底面设定透射边界，用来模拟该方向的无限区域；土体内侧与混凝

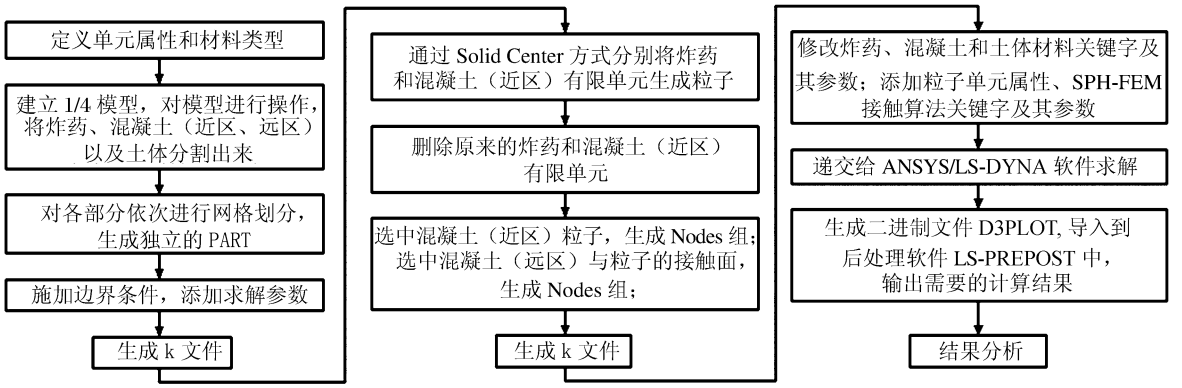


图 7 建模过程

Fig. 7 Modeling process

土相接触的部分定义面面接触,并考虑摩擦力的影响;对称面处设置 SPH 对称边界和 FEM 对称边界,用以约束单元和粒子在对称面处的法向运动;混凝土(近区)粒子与混凝土(远区)有限单元之间采用固连接触的方式定义耦合算法,即通过添加关键字 CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE 来定义。

3.2 结果分析

图 8 展示了 1 kg TNT 炸药半埋爆炸时爆坑的形成过程。在爆炸初期,随炸药能量的释放,由于冲击波压力远大于混凝土的动态抗压强度,炸药爆炸产生的高压气体迅速破碎了炮孔周围的混凝土。同时,应力波在混凝土中引起了径向和环向拉应力,导致大量裂隙出现,并向自由面方向扩展。自由面处的混凝土在反射拉应力作用下被拉裂、发生片落,并在爆生气体的作用下产生抛掷。随着爆生气体膨胀和楔入,径向和环向裂隙进一步扩大,抛掷现象加剧,爆破漏斗逐步形成。最后,炸药能量耗散殆尽,其中一部分通过自由面直接扩散到空气中,另一部分能量则被用于破碎、抛掷混凝土以及形成爆炸震动波,爆破漏斗形态渐趋稳定。

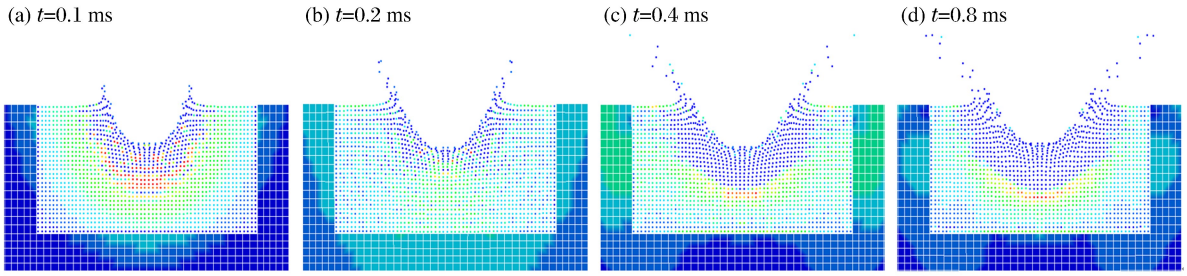


图 8 爆坑形成过程

Fig. 8 Process of blast crater formation

为研究爆炸波在混凝土中的传播特性,同时与实测数据作对比,采用 1 kg TNT 炸药,则测点 1～6 距炸药中心的比例距离 Z 依次为 0.255、0.515、0.810、1.256、1.879 和 2.504 m/kg$^{1/3}$。考虑到各测点曲线峰值相差较大,图 9～10 仅显示了中间 4 个测点相关的压力时程曲线和加速度时程曲线。

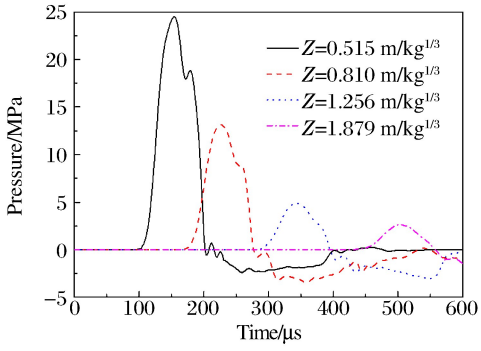


图 9 各测点压力时程曲线

Fig. 9 Pressure-time curves at different measuring points

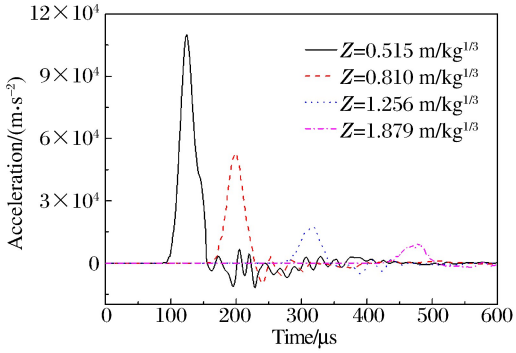


图 10 各测点加速度时程曲线

Fig. 10 Acceleration-time curves at different measuring points

由图 9～10 可以看出,炸药起爆后应力波迅速传播,当达到测点后,压力和加速度在很短的时间内迅速达到峰值,然后逐渐衰减,最后趋近于零。不同测点处的压力和加速度有所差异,即随着测点与药包比例距离的增加,测点处的峰值压力和峰值加速度逐渐减小,正压作用时间有所延长。图 9 中各测点的压力在经历过正压段后出现持续时间较长且峰值较小的负压段,这可能是由于混凝土试样较小,爆炸波传播到四周边界后经多次反射作用造成的[24];图 10 中各测点加速度呈现单峰且峰后出现连续的小幅度数值振荡,这也与实际结果较为吻合[20]。

表 2 为不同测点处实测数据[20,23]与计算结果的对比,可以看出计算得到的峰值压力与对应的实测数据吻合度较高,误差基本在±12%以内,而峰值加速度相对而言误差偏大,但大多也都在±20%以内。

表 2 不同测点处计算结果与实测结果对比

Table 2 Comparison between calculated results and measured results at different test points

测点	比例距离 $Z/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{kg}^{-1/3})$	峰值压力 P_m/MPa			峰值加速度 $a_m/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2})$		
		实测	计算	误差/%	实测	计算	误差/%
1	0.255	95.29	93.81	−1.55	63.85×10^4	59.13×10^4	−7.39
2	0.515	26.81	24.43	−8.88	12.20×10^4	11.04×10^4	−9.51
3	0.810	11.77	13.16	11.81	4.01×10^4	5.32×10^4	32.83
4	1.256	4.82	4.90	1.66	1.53×10^4	1.75×10^4	14.49
5	1.879	2.56	2.58	0.78	0.74×10^4	0.84×10^4	13.82
6	2.504	1.59	1.63	2.52	0.32×10^4	0.38×10^4	17.83

3.3 HJC 参数敏感度分析

模型参数的敏感度分析是指研究一个或多个不确定性参数的变化对计算结果产生的影响，即模型对某个参数或某组参数变化反应的敏感程度。通过敏感度分析，既可以识别对模型计算结果起决定性作用的参数，又可较好地评价参数偏差对计算结果产生的影响，这在本构参数确定与反演等方面有着广泛的应用。

考虑到混凝土采用的 HJC 本构参数涉及到 21 个之多，加上状态方程参数大多沿用文献[9]，因此想要进一步提高模拟的精度，还需对各参数的敏感度进一步分析。依照每次分析所涉及到的参数个数，可将敏感度分析分为全局敏感度分析和局部敏感度分析，全局敏感度分析需要检验多个参数的变化对计算结果总的影响，同时评价每个参数及各参数之间对计算结果的影响；局部敏感度分析只需每次检验单个参数对计算结果的影响。考虑到 HJC 本构模型各参数之间耦合紧密，若采用全局敏感度分析，一方面难以确定参数变化所遵循的标准和范围，另一方面要考虑到每个参数及各参数之间对计算结果的影响，计算量太大。因此，本文中采用局部敏感度分析法[10,13-14]，即研究 HJC 模型中单个参数变化对计算结果的影响。

以 0.515 $\mathrm{m/kg^{1/3}}$ 处的测点作为研究对象，采用控制变量法，将 21 个参数在表 1 的基础上分别单独作±40%和±20%的变化，将每次计算的结果（包括峰值压力和峰值加速度）与表 1 中初始参数计算结果的比值作为研究参数敏感度的指标[10,13]。通过大量的数值计算，得到 C30 混凝土 HJC 模型不同参数变化率下引起的峰值压力和峰值加速度的变化率，如图 11～12 所示。

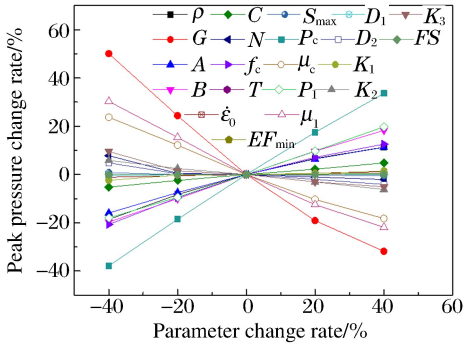


图 11 峰值压力对 HJC 参数敏感性分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of peak pressure for HJC parameters

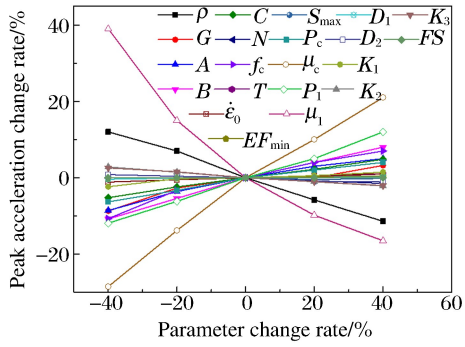


图 12 峰值加速度对 HJC 参数敏感性分析

Fig. 12 Sensitivity analysis of peak acceleration for HJC parameters

可以看出，对峰值压力（P_m）影响比较大的参数有 9 个：ρ、f_c、A、B、G、P_{crush}、μ_{crush}、P_{lock} 和 μ_{lock}；对峰值加速度（a_m）影响比较大的参数有 7 个：ρ、f_c、A、B、μ_{crush}、P_{lock} 和 μ_{lock}。他们在参数变化区间内峰值变化率绝对值均≥10%，最高可达 50%，而其他参数对结果的影响较小（≤5%）。

为定量评价各参数对计算结果稳定性影响的敏感度，以 0.515 $\mathrm{m/kg^{1/3}}$ 处的测点峰值的变化率

$M(x)$作为目标函数,在某个参数变化率 $x=x_i(i=1,2,3,4,5$,对应的 $x_i=-0.4,-0.2,0,0.2,0.4)$处,目标函数 $M(x)$对该参数变化率 x_i的敏感度 S_i可表示为[13]:

$$S_i=\partial M(x)/\partial x_i \tag{13}$$

式中:敏感度 S_i表示 $M(x)$在 $x=x_i$处的导数值,S_i的绝对值越大,表示 $M(x)$对 x_i越敏感。

图 11~12 中各曲线大多呈线性或者抛物线变化,因此目标函数 $M(x)$可按照多项式进行拟合,则不同参数的目标函数 $M(x)$与参数变化率 x 的关系可表示为:

$$M(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n \tag{14}$$

将式(14)代入式(13),可得:

$$S_i=\frac{\partial M(x)}{\partial x_i}=a_1+2a_2x_i+\cdots+na_nx_i^{n-1} \tag{15}$$

参数变化率 x 区间内包含 5 个参数,即 $x=-0.4,-0.2,0,0.2,0.4$,可取式(15)中绝对值的最大值来表示该参数的敏感度 S:

$$S=|S_i|_{\max} \tag{16}$$

式中:S_i为不同参数变化率 x_i处的敏感度,$i=1,2,3,4,5$。

根据式(14)~(16),将图 11~12 中各曲线数据利用 Matlab 软件按照多项式进行拟合,拟合精度设在 95%以上,之后求导并代入参数变化率 x_i,最终得到本模型各参数的敏感度 S,见表 3。

表 3 参数敏感度

Table 3 Parameter sensitivity

敏感度	ρ	f_c	A	B	C	$S_{\max}$	G	T	D_1	D_2
对 P_m 的敏感度 S	0.558 0	0.612 0	0.462 4	0.499 3	0.161 8	0.049 2	1.298 8	0.006 2	0.006 2	0.314 4
对 a_m 的敏感度 S	0.344 2	0.633 7	0.263 3	0.293 3	0.132 2	0.085 8	0.354 6	0.035 8	0.005 9	0.209 5
敏感度	P_{crush}	μ_{crush}	P_{lock}	μ_{lock}	K_1	K_2	K_3	$EF_{\min}$	N	FS
对 P_m 的敏感度 S	1.000 1	0.623 4	0.521 5	0.799 7	0.209 5	0.236 0	0.218 4	0.010 3	0.765 5	0.000 0
对 a_m 的敏感度 S	0.182 9	0.768 8	0.514 6	1.459 0	0.194 3	0.075 6	0.067 5	0.012 1	0.050 4	0.000 0

表 3 定量给出了本模型对计算结果(峰值压力 P_m和峰值加速度 a_m)的敏感度,可见在 HJC 本构所有参数中,敏感度 S>0.4 的参数有:ρ、f_c、A、B、G、P_{crush}、μ_{crush}、P_{lock}、μ_{lock}和 N,这同图 11~12 中峰值变化率大于或等于 10%所对应的参数基本上能保持一致。

相比于侵彻类与碰撞类问题的模拟[10, 12-14],对爆炸类模拟结果影响较大的 HJC 参数有很多,且对于不同的研究对象影响的程度也不同,其中除了极限面参数 A 和 B 之外,还涉及到状态方程中的三个参数 μ_{crush}、P_{lock}和 μ_{lock},为此在模拟爆破类问题时,这些敏感度较大的参数需要结合实验结果来确定,而对于敏感度较小的参数可采用本文中所给的值,以减少重复实验确定参数的繁琐过程。

4 结 论

(1)采用 SPH-FEM 耦合法模拟炸药在混凝土中爆炸,能直观地展示了混凝土爆坑形态发展的全过程,固连接触的方式很好地解决了 SPH 法在处理边界问题上的缺陷,同时 SPH-FEM 耦合法计算的效率也较高。(2)给出了 C30 混凝土 HJC 模型各参数的确定过程,并基于确定的参数使用 SPH-FEM 耦合法对混凝土爆破成坑现象进行了模拟,计算结果与实测数据比较吻合,故所提出的 HJC 本构参数比较合理。(3)HJC 本构参数对峰值压力和峰值加速度均有较大影响的参数主要有 ρ、f_c、A、B、μ_{crush}、P_{lock}和 μ_{lock},故在模拟爆破类问题时,这些敏感度较大的参数需要结合专门实验加以确定,而对于敏感度较小的参数可采用本文建议值。

参考文献:

[1] 韩旭,杨刚,强洪夫. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法[M]. 长沙:湖南大学出版社,2005.

[2] 胡英国,卢文波,陈明,等. SPH-FEM 耦合爆破损伤分析方法的实现与验证[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增

刊 1)：2740-2748.
HU Yingguo, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Implementation and verification of SPH-FEM coupling blasting damage analytical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(suppl 1):2740-2748.

[3] 王维国，陈育民，刘汉龙，等. 基于 SPH-FEM 耦合法的土体爆炸效应数值研究[J]. 岩土力学，2013，34(7)：2104-2110.
WANG Weiguo, CHEN Yumin, LIU Hanlong, et al. Numerical simulation of explosion in soil based on a coupled SPH-FEM algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(7):2104-2110.

[4] 崔微，宋慧芳，张社荣. 土中爆炸作用下箱涵动力响应的 SPH-FE 耦合分析[J]. 爆炸与冲击，2012，32(5)：551-556.
CUI Wei, SONG Huifang, ZHANG Sherong. Coupled SPH-FE analysis for dynamic response of box culvert subjected to subsurface blast[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(5):551-556.

[5] 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, 2005,25(4):275-288.

[6] KONESHWARAN S, THAMBIRATNAM D P, Gallage C. Blast response of segmented bored tunnel using coupled SPH-FE method[J]. Structures, 2015,2:58-71.

[7] VUYST T D, VIGNJEVIC R, Campbell J C. Coupling between meshless and finite element methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(8):1054-1064.

[8] 杨刚，胡德安，韩旭. 混凝土中爆炸模拟的数值方法比较[J]. 应用力学学报，2011，28(4)：423-426.
YANG Gang, HU Dean, HAN Xu. Comparison study of numerical methods in simulation of explosion in concretes [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011,28(4):423-426.

[9] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]// 14th International Symposium on Ballistic, Quebec City, Canada, 1993:593-600.

[10] 方秦，孔祥振，吴昊，等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学，2014，31(3)：197-204.
FANG Qin, KONG Xiangzhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(3):197-204.

[11] 孙其然，李芮宇，赵亚运，等. HJC 模型模拟钢筋混凝土侵彻实验的参数研究[J]. 工程力学，2016，33(8)：248-256.
SUN Qiran, LI Ruiyu, ZHAO Yayun, et al. Investigation on parameters of HJC model applied to simulate perforation experiments of reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2016,33(8):248-256.

[12] 陈睿，刘杰，韩旭，等. 混凝土材料动态本构参数的分阶段计算反求技术[J]. 爆炸与冲击，2014，34(3)：315-321.
CHEN Rui, LIU Jie, HAN Xu, et al. A multi-stage computational inverse technique for identification of the dynamic constitutive parameters of concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(3):315-321.

[13] 熊益波，陈剑杰，胡永乐. 混凝土 Johnson-Holmquist 本构模型灵敏参数的初步确认[J]. 兵工学报，2009，30(增刊 2)：145-148.
XIONG Yibo, CHEN Jianjie, HU Yongle. Preliminary identification of sensitive parameters in Johnson-Holmquist concrete constitutive model[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(suppl 2):145-148.

[14] 闻磊，李夕兵，吴秋红，等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究[J]. 计算力学学报，2016，33(5)：725-731.
WEN Lei, LI Xibing, WU Qiuhong, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016,33(5):725-731.

[15] 巫绪涛，孙善飞，李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：137-142.
WU Xutao, SUN Shanfei, LI Heping. Numerical simulation of SHPB tests for concrete by HJC model[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):137-142.

[16] 纪冲，龙源，方向. 基于 FEM-SPH 耦合法的弹丸侵彻钢纤维混凝土数值模拟[J]. 振动与冲击，2010，29(7)：69-74.
JI Chong, LONG Yuan, FANG Xiang. Numerical simulation for projectile penetrating steel fiber reinforced concrete with FEM-SPH coupling algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(7):69-74.

[17] 梁超. 三维 FE-SPH 自适应耦合方法在混凝土侵彻问题中的应用[D]. 长沙：湖南大学，2013.

[18] LS-DYNA keyword user' manual[Z]. Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[19] 施绍裘,王永忠,王礼立. 国产 C30 混凝土考虑率型微损伤演化的改进 Johnson-Cook 强度模型[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增刊 1):3250-3257.
SHI Shaoqiu, WANG Yongzhong, WANG Lili. Improved Johnson-Cook's strength model taking account of rate-dependent micro-damage evolution for domestic C30 concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(suppl 1):3250-3257.

[20] 穆朝民,任辉启,石必明. 变埋深条件下混凝土中爆炸加速度的传播规律[J]. 振动与冲击,2016,35(3):1-6.
MU Chaomin, REN Huiqi, SHI Biming. Investigation on the shock acceleration of concrete at different depths of burst[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(3):1-6.

[21] 高轩能,吴彦捷. TNT 爆炸的数值计算及其影响因素[J]. 火炸药学报,2015,38(3):32-39.
GAO Xuanneng, WU Yanjie. Numerical calculation and influence parameters for TNT explosion[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2015,38(3):32-39.

[22] WANG J. Simulation of landmine explosion using LS-dyna3d software: Benchmark work of simulation of explosion in soil and air[R]. Australia: Weapons Systems Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.

[23] 李重情,穆朝民,石必明. 变埋深条件下混凝土中爆炸应力传播规律的研究[J]. 振动与冲击,2017,36(6):140-145.
LI Zhongqing, MU Chaomin, SHI Biming. Investigation on the shock stress propagation in concrete at different depths under blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(6):140-145.

[24] 王志亮,王建国,李永池. 单临空面岩体中爆破诱发损伤的数值分析[J]. 岩土力学,2006,27(2):219-223.
WANG Zhiliang, WANG Jianguo, LI Yongchi. Numerical analysis of blast-induced damage in rock mass with single free-face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(2):219-223.

Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm

WANG Zhiliang, BI Chengcheng, LI Hongru

(*School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei* 230009, *Anhui*, *China*)

Abstract: To improve the calculation efficiency and describe the failure process of concrete under blast loading, a coupled SPH-FEM algorithm was used to simulate blast crater of concrete in this study. First, based on the partial Holmquist-Johnson-Cook(HJC) constitutive parameters of C30 concrete, and the remaining parameters determined via theoretical derivation, the numerical calculation was performed and the results were then compared with the measured data by taking the parameters into the numerical model. The sensitivities of 21 parameters for the HJC model were finally analyzed with peak pressure and peak acceleration. The results show that the coupled SPH-FEM algorithm can simulate the whole process of blast crater under the blast loading, and it may accurately deal with the SPH boundary problem. Based on the parameters of C30 concrete HJC model, the calculated results of the coupled algorithm agree well with the experimental ones, which demonstrates the rationality of the determining method for HJC constitutive parameters. In addition, the parameters have different sensitivities to the results of blast problem, and these parameters significantly influencing the peak pressure and peak acceleration should be paid enough attention in the process of its determination.

Keywords: concrete; blasting damage; coupled SPH-FEM algorithm; HJC constitutive model; parameter sensitivity

(责任编辑 曾月蓉)