



基于SPH方法对强动载下混凝土结构损伤破坏的数值模拟研究

孔祥振, 方秦*

陆军工程大学国防工程学院, 南京 210007

*联系人, E-mail: fangqinjs@139.com

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-18; 网络出版日期: 2019-11-20

国家自然科学基金(编号: 51427807, 51808550)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB058001)资助项目

摘要 混凝土结构在冲击爆炸等强动载作用下常常发生开坑和震塌等典型的损伤破坏现象, 对损伤破坏的精细化数值模拟依赖于准确的材料模型和合适的数值算法, 是当前研究的热点问题。本文首先探讨了基于有限元方法和常用单元删除算法模拟混凝土损伤破坏的内在缺陷和不足, 然后基于光滑粒子流体动力学方法(SPH)与作者近期提出的混凝土动态损伤材料模型(Kong-Fang模型)相结合, 对强动载下混凝土结构损伤破坏进行数值模拟, 得到了实验的较好验证。SPH方法结合Kong-Fang材料模型不需要引入常用单元删除算法中的经验参数, 提供了具有较好应用前景的混凝土结构动态损伤破坏的数值模拟方法。

关键词 侵彻, 爆炸, 损伤破坏, 混凝土材料模型, 无网格方法

PACS: 47.11.Fg, 43.28.Mw, 79.20.Ap, 45.40.Gj

1 引言

混凝土材料广泛应用于承受冲击、爆炸等强动载作用的军用与民用防护工程中。与静载、地震和风荷载等不同, 强动载作用下混凝土材料受高静水压力、高应变率作用并产生大变形、开坑、震塌等损伤破坏现象。开坑破坏是由初始强烈的压缩波和压缩波在结构自由表面反射产生的拉伸波共同作用下形成的^[1,2]; 而背面震塌现象则是由压缩波在结构自由表面反射产生拉伸波引起的。由于理论分析的局限性和实验手段的受限, 近年来强动载作用下混凝土结构损伤破坏的

数值模拟成为当前研究的热点问题。前期研究表明, 高精度数值模拟取决于合理的材料模型和合适的数值算法^[1-5]。

混凝土的损伤破坏通常涉及大变形, 当采用有限元方法模拟时, 大变形可能引起网格畸变甚至导致计算终止, 因此必须引入合理的单元删除算法来描述混凝土材料的压碎(压缩破坏)和断裂(拉伸破坏)。普遍认为混凝土的压缩破坏可由等效塑性应变^[1,2]或最大主应变^[6,7]描述, 而对于拉伸破坏则经常使用拉伸断裂应变^[8,9]来描述。已有研究发现, 当拉伸断裂应变经验性地取为0.01^[8,9]时, 数值模拟得到的破坏现象与实验吻合。

引用格式: 孔祥振, 方秦. 基于SPH方法对强动载下混凝土结构损伤破坏的数值模拟研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024605
Kong X Z, Fang Q. Numerical predictions of failures in concrete structures subjected to intense dynamic loadings using the Smooth Particle Hydrodynamics method (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024605, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0186](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0186)

合较好, 然而Kong等人^[1]研究表明, 该拉伸断裂应变取值对于破坏现象的计算结果非常敏感, 因此其应用受到限制. 最近Kong等人^[2,3]提出了基于损伤的拉伸破坏准则, 较好地解决了上述经验和敏感问题. 当上述用于压缩和拉伸破坏准则中的变量达到其相应的临界值时, 认为该单元失效并删除. 该方法广泛应用于强动载下混凝土结构破坏的数值模拟中^[1,2,6-9], 当采用精确的材料模型时可得到理想的损伤破坏预测结果. 然而该方法仍存在如下三个问题: (1) 由于删除单元带走了部分质量和能量, 因此系统质量和能量不守恒; (2) 侵蚀准则临界值取决于单元尺寸和混凝土材料模型等, 并且通常经过试算方法确定, 缺乏预测能力; (3) 尽管删除单元的残余应力很小, 但是单元的删除会降低结构的刚度, 不可避免地低估了结构的抗力.

对强动载下混凝土破坏模拟的另一种方法为无网格方法(如SPH方法), 无网格法不需要进行单元删除, 并成功用于模拟爆炸荷载^[10]和冲击荷载^[11]下的结构响应问题. 基于SPH方法和修正的RHT模型, Leppänen^[5]对破片冲击混凝土结构的开坑破坏进行了数值模拟, 得到了较好的预测结果. 为更好描述混凝土的动态破坏和裂缝发展, Rabczuk等人^[12,13]提出了粒子断裂模型, 该模型中裂缝由一组裂开的粒子表征, 该模型预测的爆炸和冲击荷载下混凝土板的损伤破坏与实验吻合较好.

Kong等人^[3]近期提出了强动载作用下混凝土动态损伤材料模型(Kong-Fang模型), 并借助于单元删除算法模拟混凝土结构在强动载下的损伤破坏, 预测结果优于已有的HJC模型^[14]、RHT模型^[15]和K&C^[16]等模型. 本文首先通过数值算例指出常用单元删除算法的不足, 进一步考虑到无网格法在模拟大变形问题的优势, 通过结合Kong-Fang材料模型和SPH方法预测强动载作用下混凝土结构的损伤破坏.

2 单元删除算法的局限性

本节首先简要介绍作者提出的Kong-Fang混凝土材料模型, 然后基于单元删除阈值的敏感性分析, 给出单元删除算法的局限性原因. 需要指出的是, 参数敏感性分析目的是讨论单元删除阈值对损伤破坏预测结果的影响, 并非对比实验结果.

2.1 Kong-Fang混凝土材料模型^[3]

该模型采用三个应力不变量相关的屈服面, 屈服面由考虑三个应力不变量的最大强度面和残余强度面通过当前损伤插值得到. 为考虑冲击爆炸荷载下混凝土材料延性和脆性破坏, 模型同时引入了压缩损伤和拉伸损伤, 压缩损伤基于修正的等效塑性应变, 而拉伸损伤基于断裂应变并考虑了断裂能随应变率增大而增大的规律^[17]. 此外, 分别引入拉伸动态强度增强因子和压缩动态强度增强因子描述混凝土拉压不同的应变率效应, 并通过径向放大屈服面的方法实现. 为描述混凝土在低围压下的剪胀效应, 模型采用部分关联流动法则. 同时基于大量实验数据, 给出了该模型参数的建议值和确定方法, 便于工程应用.

Kong-Fang模型保留了已有材料模型(如HJC模型、RHT模型和K&C模型)的优点, 并且较好解决了已有模型存在的缺陷, 对于强动载下混凝土结构的整体响应以及局部损伤破坏预测结果优于已有模型. 值得指出的是, 该模型基于单元删除算法对损伤破坏进行预测.

单元删除算法可分为两种: 一种是基于应变的删除算法, 即当最大主应变大于给定阈值时单元删除, 该算法可通过LS-DYNA中的MAT_ADD_EROSION实现并广泛应用于混凝土破坏的数值模拟中^[6-9]; 另一种是Kong等人^[2,3]提出的基于损伤的删除算法, 当与损伤相关的特定变量达到一阈值时单元删除, 应该指出, LS-DYNA中没有提供基于损伤的单元删除算法, 必须通过材料模型二次开发得到.

特殊的, 对于Kong-Fang模型, 基于应变的单元删除算法定义为当最大主应变 ε_1 大于临界值 $\varepsilon_{1,critical}$ 时, 单元删除; 而基于损伤的单元删除算法通过修正的等效塑性应变 λ 实现, 其定义为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_c, P > 0, \\ \lambda_t, P \leq 0, \end{cases} = \sum \begin{cases} \frac{\Delta\bar{\varepsilon}_p}{d_1(T/f_c + P/f_c)^{d_2}}, P > 0, \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{11}, P \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\Delta\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{(2/3)\Delta\varepsilon_{ij}^p\Delta\varepsilon_{ij}^p}$ 是在一个时步内的等效塑性应变增量, $\Delta\varepsilon_{ij}^p$ 为等效塑性应变张量增量, $\Delta\bar{\varepsilon}_{11}$ 是对应的单轴拉伸中的塑性应变增量, d_1 和 d_2 是损伤参数. f_c , T 和 P 分别是混凝土单轴压缩强度、拉伸强度和静

水压力. 由式(1)可见, 基于损伤的单元删除准则可对于拉伸和压缩分别运用, 即当 λ_t (代表拉伸损伤)或 λ_c (代表压缩损伤)大于其阈值 $\lambda_{critical}$ 时删除该单元. 以下通过数值算例探讨单元删除阈值 $\varepsilon_{1,critical}$ 和 $\lambda_{critical}$ 对数值模拟预测损伤破坏结果的敏感性.

2.2 单元删除阈值的敏感性分析

为探讨单元删除准则对损伤破坏预测结果的影响, 本节基于两组实验对单元删除阈值进行单参数敏感性分析, 通过对单元删除阈值变化 $\pm 25\%$ 和 $\pm 50\%$ 实现(保持其他参数不变). 除非特殊说明, 本节数值计算中采用Kong-Fang模型自动生成的参数^[3].

第一组实验为课题组开展的混凝土板接触爆炸实验^[18], 该实验中, 混凝土在一个厚0.005 m、直径1 m、高度0.4 m的圆形钢管中浇筑, 混凝土的单轴抗压和抗拉强度分别为103和5.31 MPa. 2.0 kg立方体TNT装药放置在混凝土板中心引爆, 实验后混凝土板表面开坑直径, 开坑深度和背面剥落的直径分别为0.54, 0.12和0.73 m.

第二组实验为Wu等人^[19]进行的弹体贯穿钢筋混凝土板的实验(实验编号2-3), 该实验中弹体长度为152 mm, 直径25.3 mm, 质量0.428 kg, 曲径比为3, 初速度为544 m/s; 钢筋混凝土板厚度为200 mm, 强度为41 MPa. 上述两组的有限元模型与文献[3]中一致, 不再赘述.

2.2.1 基于应变的单元删除准则

图1给出了第一组实验中, $\varepsilon_{1,critical}$ 对数值模拟预测开坑和震塌破坏的敏感性, 可以看出, 数值预测的开坑和震塌破坏对 $\varepsilon_{1,critical}$ 值非常敏感. 数值预测的开坑破坏大小随着 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而减小, 而震塌破坏尺寸随 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大不具有规律性, 这是由删除单元对应力波传播影响造成的: 一方面, 当 $\varepsilon_{1,critical}$ 很小时(如0.01), 靶体正面开坑区删除的单元可能残余应力还很大, 导致在背面反射拉伸波减小, 进而震塌破坏尺寸随 $\varepsilon_{1,critical}$ 的减小而减小; 另一方面, 当 $\varepsilon_{1,critical}$ 很大时(如0.03), 靶体正面开坑区删除的单元残余应力较小, 不会对反射拉伸波造成很大影响, 因此, 震塌破坏尺寸随 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而减小. 因此精准地预测损伤破坏情况需要对 $\varepsilon_{1,critical}$ 反复调试, 计算成本高, 且预测能力受限.

为进一步验证上述结论的正确性, 对第二组实验

进行参数敏感性模拟和分析. 图2(a)给出了 $\varepsilon_{1,critical}$ 对数值模拟预测开坑和震塌破坏的敏感性. 同样可以看出, 数值预测的开坑和震塌破坏对 $\varepsilon_{1,critical}$ 非常敏感. 开坑和震塌尺寸随着 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而增大, 主要是由于 $\varepsilon_{1,critical}$ 对应力波传播的影响. 注意到该算例中由于已删除单元没有达到完全损伤($D < 1$), 已删除单元的残余应力较大不能忽略, 因此反射拉伸波随着 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而增大, 进而预测的开坑和震塌尺寸随着 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而增大. 另外, 数值预测的开坑和震塌呈现延性破坏(类似于金属), 与实验观测的脆性破坏现象不符.

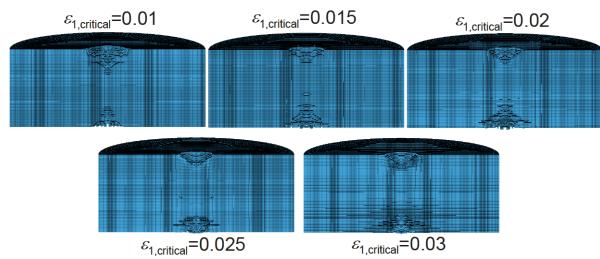


图1 (网络版彩图) $\varepsilon_{1,critical}$ 对开坑和震塌破坏的敏感性

Figure 1 (Color online) Influence of the critical erosion value $\varepsilon_{1,critical}$ on the cracks and failures in concrete slabs subjected to contact explosion.

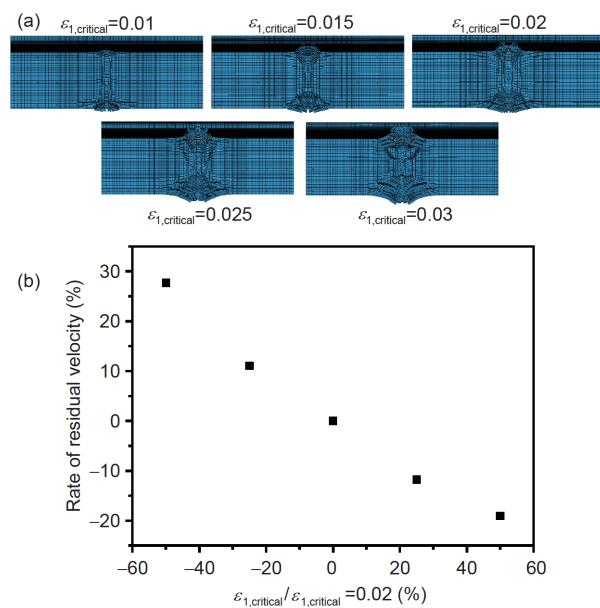


图2 (网络版彩图) $\varepsilon_{1,critical}$ 对开坑和震塌破坏(a)以及弹体残余速度(b)的敏感性

Figure 2 (Color online) Influence of the critical erosion value $\varepsilon_{1,critical}$ on the cratering and scabbing failures in concrete slabs (a) and residual velocities of projectile (b).

图2(b)给出了数值预测残余速度随 $\varepsilon_{1,critical}$ 的变化情况,可以看出残余速度随 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而减小,即结构抗力随着 $\varepsilon_{1,critical}$ 的增大而增大,因此 $\varepsilon_{1,critical}$ 必须经过反复调试来精确预测结构的抗力.

2.2.2 基于损伤的单元删除准则

图3给出了第一组实验中, $\lambda_{critical}$ 对数值模拟预测开坑和震塌破坏的敏感性,可以看出,在一定范围($\pm 50\%$)内数值模拟预测的开坑和震塌破坏对 $\lambda_{critical}$ 不敏感,这是由于基于损伤的单元删除可识别单元的拉伸和压缩状态(分别通过 λ_c 和 λ_t 判别),而基于应变的单元删除准则无法识别单元的应力状态.另外,当 $\lambda_{critical} \geq 0.01$ 混凝土材料达到完全损伤状态($D=1$),因此基于损伤的单元删除算法中删除单元的残余应力很小,对应力波传播不会造成很大影响.事实上,大量数值模拟发现, $\lambda_{critical}$ 在 10^{-2} 量级时,对损伤破坏的数值模拟结果影响较小.

采用基于损伤的单元删除准则,进一步对第二组实验进行了数值模拟.图4(a)和(b)分别给出了数值预测的开坑和震塌破坏以及弹体残余速度随 $\lambda_{critical}$ 的变化,可以看出损伤破坏以及弹体残余速度对 $\lambda_{critical}$ 不敏感.

上述敏感性分析结果表明,基于应变的单元删除准则对损伤破坏以及结构抗力影响很大,应谨慎使用;而基于损伤的单元删除算法在一定范围内对损伤破坏和结构抗力预测结果影响不大.虽然基于损伤的单元删除准则可较好解决基于应变单元删除算法阈值敏感性问题,但当 $\lambda_{critical}$ 设为不合理值时仍可能对预测的损伤破坏有较大影响,如 $\lambda_{critical}$ 取为很大值时,不能预测开坑和震塌等破坏现象.

3 基于SPH方法对损伤破坏的模拟

考虑到采用有限元分析中单元删除算法的内在缺陷,以及无网格法在模拟大变形问题的优势,本节采用无网格的SPH方法对混凝土损伤破坏进行模拟.

3.1 SPH方法

SPH方法的主要优点是在计算空间导数时不需要网格,可避免有限单元法中模拟损伤破坏等大变形情况的网格畸变问题.在SPH方法中,材料及其运动由固

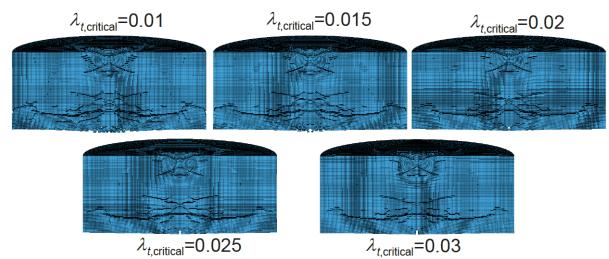


图3 (网络版彩图) $\lambda_{t,critical}$ 对开坑和震塌破坏的敏感性

Figure 3 (Color online) Influence of the critical erosion value $\lambda_{t,critical}$ on the cracks and failures in concrete slabs subjected to contact blast loading.

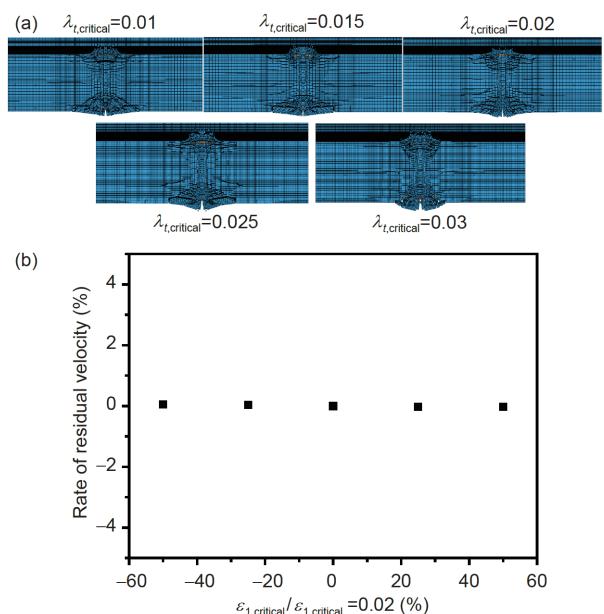


图4 (网络版彩图) $\lambda_{t,critical}$ 对开坑和震塌破坏(a)以及弹体残余速度(b)的敏感性

Figure 4 (Color online) Influence of the critical erosion value $\lambda_{t,critical}$ on the cratering and scabbing failures in concrete slabs (a) and residual velocities of projectile (b).

定质量的拉格朗日粒子描述,粒子之间相互作用通过核函数和特征长度(光滑长度)描述,如图5所示.粒子的相关物理量通过权函数加权光滑域的各粒子物理量得到.

3.2 裂缝和破坏的描述

在有限元方法中,混凝土结构和材料的裂缝以及损伤破坏可通过被删除的单元表示,而在SPH方法中通常用单标量损伤因子表示破坏^[10-13],无法区分压缩破坏和拉伸破坏.由于Kong-Fang模型中压缩损伤和

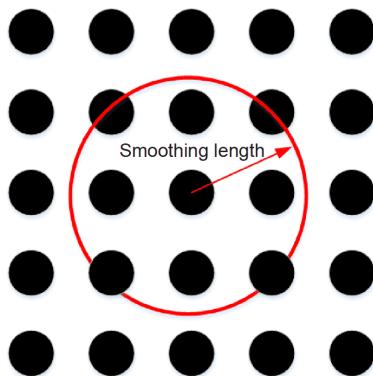


图 5 (网络版彩图) SPH方法示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of the SPH method.

拉伸损伤分开处理, 因此可较好区分压缩破坏和拉伸破坏。当损伤达到1时, 可认为材料发生破坏, 因此裂缝和损伤破坏情况可由总的损伤表示。

为验证上述裂缝和破坏描述方法, 对Wu等人^[20]进行的Φ74×500 mm 39 MPa混凝土试件层裂实验进行模拟。该实验中, 混凝土试件一端由霍普金森压杆加载, 另一端自由, 在试件自由端压缩波反射为拉伸波, 与压缩波叠加引起试件层裂破坏。为了测量试件上的应变时程, 应变片布置在距入射端的150, 200和250 mm处。共采用25000个SPH粒子离散, 并将入射压缩波作为边界条件施加于试件表面。

图6给出了试件破坏位置的数值模拟结果和实验结果的对比情况, 为更好地显示破坏位置, 损伤云图范围定义为0.999–1.0, 可以看出, 数值预测的试件破坏位置与实验对比较好。

图7给出了试件应变时程数值模拟结果和实验数据(距入射端150 mm处)的对比, 可以看出数值预测结果与实验吻合较好, 该算例验证了Kong-Fang模型结合SPH例子预测混凝土动态断裂的准确性, 以及上述裂缝和破坏描述方法的合理性。

3.3 实验验证

为进一步验证SPH方法模拟混凝土损伤破坏的合理性, 本节采用SPH方法结合Kong-Fang混凝土材料模型对2.2节中的两组实验进行数值预测, 并同时给出SPH方法结合K&C模型的预测结果作为比较。除非特殊说明, Kong-Fang模型和K&C模型分别采用文献[3,21]中提供的参数。

图 6 (网络版彩图) 数值模拟预测的试件破坏位置与实验结果^[20]对比

Figure 6 (Color online) Comparison of fracture location of the specimen between numerical prediction and experimental observation [20].

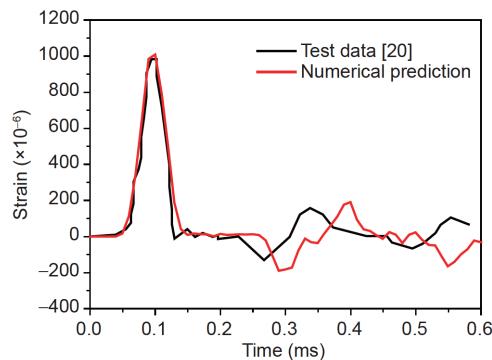


图 7 (网络版彩图) 应变时程数值预测结果和实验数据的对比

Figure 7 (Color online) Comparison of time-strain history curves between numerical simulation and test data.

3.3.1 混凝土板接触爆炸

采用SPH方法对2.2节中的第一组实验进行数值预测, 其中TNT和混凝土靶板的SPH粒子间距为5 mm, TNT采用Jones-Wilkins-Lee (JWL)状态方程描述^[22], 该模型中压力定义为

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

其中 V 为体积、 E 为内能, $A=374$ GPa, $B=3.23$ GPa, $R_1=4.15$, $R_2=0.95$ 且 $\omega=0.3$ 为材料常数。

图8给出了Kong-Fang模型结合SPH方法的预测结果, 可以看出, 数值模拟得到的开坑直径、开坑深度和震塌直径分别为0.41, 0.11和0.73 m, 与实验结果非常接近, 且不需要引入经验性的单元删除算法, 具有数值预测能力。

图9给出了K&C模型结合SPH方法的预测结果, 可以看出, 数值模拟得到的开坑直径、开坑深度和震塌直径明显小于实验结果, 主要由于K&C模型对拉伸损

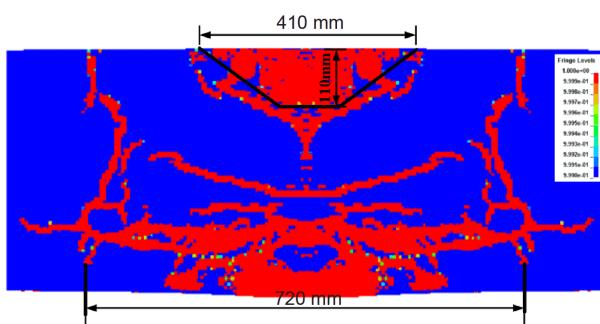


图 8 (网络版彩图) Kong-Fang 模型结合SPH方法预测的开坑和震塌破坏结果

Figure 8 (Color online) Numerical predicted cracks and failures in concrete slab by the SPH method and the Kong-Fang model.

伤描述不足^[2]. 该结果与课题组前期基于有限元的损伤破坏预测结果相同^[3], 表明准确的材料模型对于混凝土损伤破坏的预测至关重要.

3.3.2 弹体冲击混凝土板

采用SPH方法对2.2节中的第二组弹体贯穿混凝土靶体实验(文献[19]中的2-3工况)进行数值预测. 由于实验后弹体变形较小, 因此数值模拟中视为刚体并用有限元描述, 混凝土靶采用SPH粒子, 粒子间距为5 mm, 分别采用Kong-Fang材料模型和K&C材料模型. 钢筋采用梁单元, 并采用理想弹塑性模型描述(弹性模量为210 GPa, 屈服强度为400 MPa). 弹体有限元和混凝土靶粒子之间采用点面接触, 并不考虑摩擦.

图10给出了数值预测的靶板正面和背面的损伤情况以及开坑和震塌破坏情况, 可以看出数值预测结果与实验吻合较好, 并且数值预测的弹体残余速度为327 m/s, 与实验值323 m/s非常接近.

进一步对文献[19]中的1-1工况进行了数值模拟,

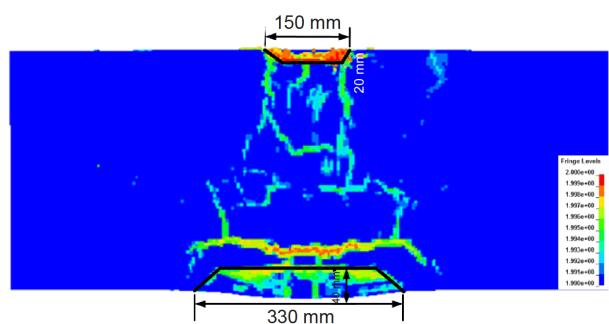


图 9 (网络版彩图) K&C 模型结合SPH方法预测的开坑和震塌破坏结果

Figure 9 (Color online) Numerical predicted cracks and failures in concrete slab by the SPH method and the K&C model.

图11给出了数值预测的损伤破坏情况与实验的对比, 可以看出, 靶体正面和背面的损伤情况以及开坑和震塌破坏与实验数据吻合较好.

图12给出了编号1-1实验测得的弹体过载、速度与位移时程曲线与数值模拟结果的对比, 其中速度和位移时程曲线通过对过载积分得到, 由图可见, Kong-Fang模型结合SPH方法预测结果与实验数据吻合较好.

图13进一步给出了K&C模型结合SPH方法预测的2-3工况和1-1工况靶体的开坑和震塌破坏情况, 可以看出数值预测得到的开坑和震塌破坏尺寸远小于图11和12中的实验数据. 此外, 数值预测的弹体残余速度分别为282和323 m/s, 与实验数据差别较大, 主要是K&C模型对断裂能的高估造成的^[2].

4 结论

基于有限元方法和常用单元删除方法模拟混凝土

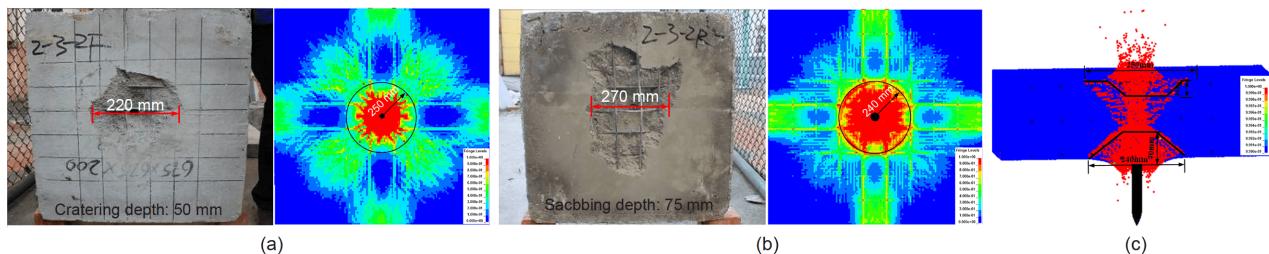


图 10 (网络版彩图) Kong-Fang 模型结合SPH方法预测的损伤和破坏情况(工况2-3). (a) 靶体正面损伤; (b) 靶体背面损伤; (c) 开坑和震塌破坏

Figure 10 (Color online) Numerical predicted damages and failures of Shot No. 2-3 by the Kong-Fang material model combined with SPH method. (a) Damage in frontal surface; (b) damage in distal surface; (c) cratering and scabbing failures.

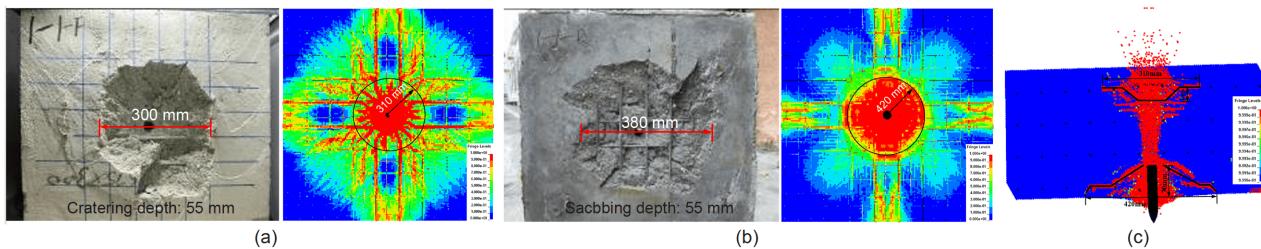


图 11 (网络版彩图) Kong-Fang 模型结合SPH方法预测的损伤和破坏情况(工况1-1). (a) 靶体正面损伤; (b) 靶体背面损伤; (c) 开坑和震塌破坏

Figure 11 (Color online) Numerical predicted damages and failures of shot No. 1-1 by the Kong-Fang material model combined with SPH method. (a) Damage in frontal surface; (b) damage in distal surface; (c) cratering and scabbing failures.

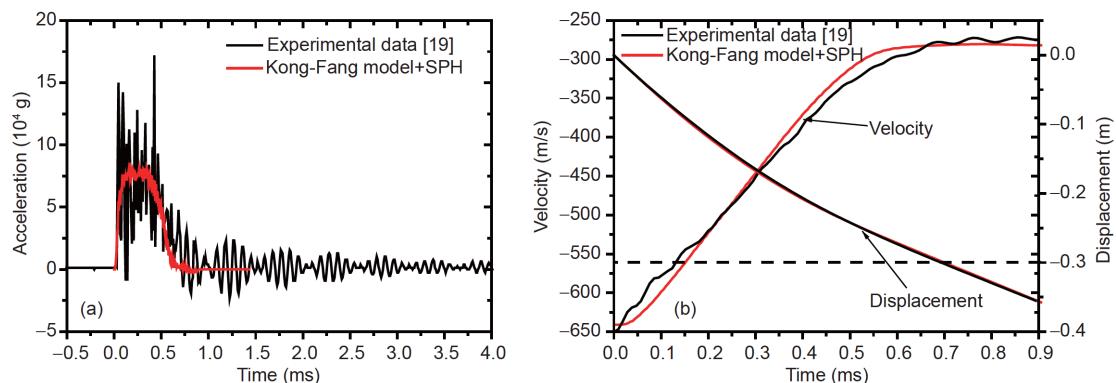


图 12 (网络版彩图) Kong-Fang 模型结合SPH方法预测的弹体过载(a), 速度与位移时程曲线(b)与实验数据的对比

Figure 12 (Color online) Comparisons of experimental data with simulation results predicted by the Kong-Fang material model combined with SPH method. Acceleration of projectile (a); velocity and displacement of projectile (b).

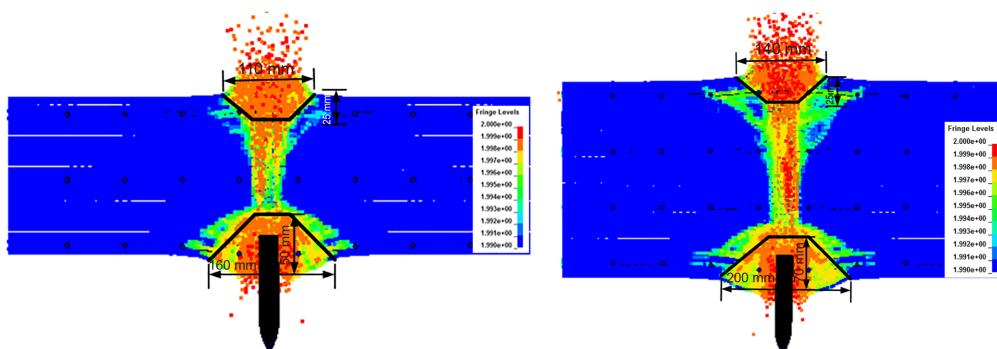


图 13 (网络版彩图) K&C模型结合SPH方法预测的开坑和震塌破坏情况. (a) 2-3工况; (b) 1-1工况

Figure 13 (Color online) Numerical predicted failures by the K&C material model combined with SPH method. (a) Shot No. 2-3; (b) shot No. 1-1.

损伤破坏的内在缺陷和不足, 以及SPH方法不需要引入经验性的删除准则, 特别是适用于混凝土动态损伤破坏等大变形情况, 本文通过SPH方法结合作者近期提出的Kong-Fang混凝土材料模型模拟强动载下混凝土结构的损伤破坏, 并得到了混凝土靶受接触爆炸和弹体侵彻实验的较好验证. 主要结论如下.

(1) 基于应变的单元删除算法对混凝土结构损伤破坏、应力波传播和结构抗力的预测结果影响非常大, 应谨慎使用; 基于损伤的单元删除算法在一定范围内($\pm 50\%$ 内)对损伤破坏和结构抗力预测结果影响不大, 但当超出该范围, 该算法仍不能较好预测混凝土结构的损伤破坏.

(2) 由于SPH方法不需要引入经验性的删除准则, 提供了具有较好应用前景的强动载下混凝土结构损伤破坏的预测方法.

(3) 无论是采用有限元方法结合单元删除算法以及SPH方法, 合理的材料模型仍是准确预测混凝土结构损伤破坏的关键.

参考文献

- 1 Kong X, Fang Q, Wu H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model. *Int J Impact Eng*, 2016, 95: 61–71
- 2 Kong X, Fang Q, Li Q M, et al. Modified K&C model for cratering and scabbing of concrete slabs under projectile impact. *Int J Impact Eng*, 2017, 108: 217–228
- 3 Kong X, Fang Q, Chen L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings. *Int J Impact Eng*, 2018, 120: 60–78
- 4 Kong X, Fang Q, Chen L, et al. Nonlocal formulation of the modified K&C model to resolve mesh-size dependency of concrete structures subjected to intense dynamic loadings. *Int J Impact Eng*, 2018, 122: 318–332
- 5 Leppänen J. Concrete subjected to projectile and fragment impacts: Modelling of crack softening and strain rate dependency in tension. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 1828–1841
- 6 Polanco-Loria M, Hopperstad O S, Børvik T, et al. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 290–303
- 7 Islam M J, Swaddiwudhipong S, Liu Z S. Penetration of concrete targets using a modified Holmquist-Johnson-Cook material model. *Int J Comp Meth*, 2012, 9: 1–19
- 8 Xu K, Lu Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading. *Comput Struct*, 2006, 84: 431–438
- 9 Li J, Hao H. Numerical study of concrete spall damage to blast loads. *Int J Impact Eng*, 2014, 68: 41–55
- 10 Lu Y, Wang Z, Chong K. A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2005, 25: 275–288
- 11 Meuric O F J, Sheridan J, O'Carroll C, et al. Numerical prediction of penetration into reinforced concrete using a combined grid based and meshless lagrangian approach. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Interaction Effects of Munitions with Structures. San Diego, 2001
- 12 Rabczuk T, Belytschko T. A three-dimensional large deformation meshfree method for arbitrary evolving cracks. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2007, 196: 2777–2799
- 13 Rabczuk T, Zi G, Bordas S, et al. A simple and robust three-dimensional cracking-particle method without enrichment. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2010, 199: 2437–2455
- 14 Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, 1993. 591–600
- 15 AUTODYN Theory Manual (Revision 4.3). Houston: Century Dynamics, Inc., 2003
- 16 Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D. *Int J Impact Eng*, 1997, 19: 847–873
- 17 Weerheim J, Van Doormaal J C A M. Tensile failure of concrete at high loading rates: New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests. *Int J Impact Eng*, 2007, 34: 609–626
- 18 Hong J, Fang Q, Chen L, et al. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model. *Constr Build Mater*, 2017, 155: 1013–1024
- 19 Wu H, Fang Q, Peng Y, et al. Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner. *Int J Impact Eng*, 2015, 76: 232–250
- 20 Wu H, Zhang Q, Huang F, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete. *Int J Impact Eng*, 2005, 32: 605–617
- 21 Malvar L J, Crawford J E, Morrill K B. K&C Concrete Material Model Release III-Automated Generation of Material Model Input. Karagozian and Case Structural Engineers Technical Report TR-99-24.3. 2000
- 22 Livermore Software Technology Corporation (LSCT). LS-DYNA Keyword User's Manual. California, 2012

Numerical predictions of failures in concrete structures subjected to intense dynamic loadings using the Smooth Particle Hydrodynamics method

KONG XiangZhen & FANG Qin*

College of Engineering Defense, the Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China

Typical failures such as cratering and spalling are frequently observed on the frontal and distal surfaces of concrete structures when subjected to blast and impact loadings. Numerical predictions of these failures call for an accurate material model and an appropriate algorithm, which is a topic of current research. In this paper, the inherent limitations of the frequently-used finite element method to predict dynamic failures in concrete with the aid of element erosion technique are firstly discussed. Motivated by the natural advantages of the meshfree method to describe the high deformation and large strain situations, the Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) method is then combined with our recent KFCW material model to numerically predict dynamic failures in concrete structures. By comparing the numerical predicted failures with the post-test observations of two field tests, it is demonstrated that the SPH method combined with the new material model provides a promising way to predict the dynamic failures without introducing empirical and artificial parameters.

penetration, blast, damage and failure, concrete material model, mesh-free method

PACS: 47.11.Fg, 43.28.Mw, 79.20.Ap, 45.40.Gj

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0186](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0186)