

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0041

混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究*

高 鑫^{1,2}, 孔祥振¹, 方 秦¹, 王 银¹, 杨 亚¹

(1. 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;

2. 内蒙古财经大学, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: 基于 Kong-Fang 混凝土材料模型和 LS-DYNA 的多物质 ALE 算法, 开展混凝土中爆炸波衰减规律的数值模拟研究。首先, 基于已有实验数据对材料模型参数和数值算法的可靠性进行了验证, 在此基础上分析球形装药在混凝土自由场中爆炸波衰减规律, 利用量纲分析和数值模拟拟合了球形装药在混凝土自由场中近区爆炸波峰值应力计算公式并明确其适用范围; 然后, 分析装药埋深对混凝土中装药正下方不同距离处爆炸波峰值应力分布的影响, 建立了耦合系数与装药埋深和测点距离之间的定量关系。结果表明: Kong-Fang 混凝土材料模型可实现对混凝土中爆炸波传播衰减规律的高精度数值模拟; 定义混凝土中装药质量系数和耦合常数, 可定量描述装药埋深和测点距离对峰值应力耦合系数的影响; 建立的混凝土中近区爆炸波峰值应力计算公式可较准确地快速预测不同装药埋深、不同测点距离和不同混凝土强度时爆炸波峰值应力。研究结果可为混凝土结构抗爆设计和爆炸毁伤评估提供参考。

关键词: 峰值应力; Kong-Fang 模型; 混凝土; 爆炸波; 装药埋深

中图分类号: O382

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion

GAO Chu^{1,2}, KONG Xiangzhen¹, FANG Qin¹, WANG Yin¹, YANG Ya¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the Kong-Fang concrete material model and the multi-material arbitrary Lagrangian Eulerian (MMALE) algorithm available in LS-DYNA, the attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion was numerically studied. On the basis of comparative analysis of different material models, numerical algorithms and selection of appropriate mesh size, the proposed numerical algorithm and material models along with the corresponding parameters were firstly validated by comparing the numerically simulated spherical charge detonated in a concrete target with the corresponding test data in terms of peak stress and stress-time history. Then the attenuation of stress wave subjected to spherical charge detonated in concrete was numerically investigated, in which the radial and circumferential stress-time histories at different scaled distances were analyzed in detail to reveal the mechanism of stress wave attenuation. The numerical results were fitted to develop an empirical formula for the peak stress of the free-field compression wave in concrete at the close zone with the aid of dimensional analysis. Besides, the applicability of the developed empirical formula was also discussed. The influence of charge buried depth on peak stress in concrete at different distances was also numerically studied to develop a quantitative relationship between charge buried depth, distance and the so-called coupling factor. Numerical results demonstrate that the Kong-Fang concrete material model can be used to simulate the attenuation of explosion stress wave in concrete with good accuracy. The

* 收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(52178515)

第一作者: 高 鑫(1988—), 男, 博士研究生, 讲师, gaochu0617@163.com

通信作者: 孔祥振(1988—), 男, 博士, 副教授, ouckxz@163.com

influence of the charge buried depth and the distance from charge the center on the coupling factor of peak stress can be quantified by defining the mass coefficient and coupling constant. The empirical formula for peak stress of compression wave in concrete at the close zone is appropriate for varied charge buried depth, distance and concrete strength. The present numerical results are useful for blast-resistant design and can provide a reliable reference for estimating the damage degree of concrete caused by explosion.

Keywords: peak stress; Kong-Fang model; concrete; explosion wave; charge buried depth

混凝土广泛用于军民防护结构中,在抗爆设计和毁伤评估时,重点关注在武器弹药爆炸等强动载作用下混凝土的应力波传播。在炸药爆炸近区,混凝土荷载具高幅值和短持时,呈现与静载作用下显著不同的强非线性、高应变率效应和高静水压力,这使分析混凝土中爆炸应力波(以下简称为爆炸波)衰减规律面临巨大的困难和挑战^[1]。

爆炸实验成本高、周期长,且混凝土中传感器埋设和高幅值应力波测试较难,现有混凝土爆炸波衰减规律的实验相对较少。Gran 等^[2]测定了球形装药在 WES5000 混凝土(设计抗压强度为 34.5 MPa^[3])靶体中爆炸时不同距离的爆炸波曲线,并对比不同类型传感器测试结果,验证了实验数据的可靠性。Mu 等^[4]对不同装药埋深时混凝土中爆炸波峰值衰减规律进行了实验研究,并结合量纲分析给出了 C30 混凝土爆炸波峰值的预测公式。黄家蓉等^[5]测得了柱形装药在 C20 砂浆中的爆炸波,并利用 AUTODYN 对实验进行了数值模拟,模拟结果与实验吻合较好。然而,混凝土中爆炸波的传播衰减涉及炸药能量释放、混凝土材料与爆轰产物的相互作用、强冲击波在介质中的传播等,理论研究难以全面反映这些过程。宗国庆^[6]对混凝土介质的爆炸破坏效应(如开坑破坏)进行了较系统的分析并建立了相关公式。Tu 等^[7]建立了柱形装药接触爆炸时混凝土中爆炸波预测的理论模型,但模型仅基于混凝土损伤破坏实验(如震塌破坏)进行验证,有待进一步验证可靠性。

数值计算方法的发展和计算效率的提升,使数值模拟逐渐成为研究混凝土中爆炸波的重要手段^[8]。董永香等^[9]利用 LS-DYNA,模拟了平面爆炸波在半无限混凝土介质中的传播过程,认为应力波幅值衰减和材料损伤演化存在内在联系。赵凯等^[10]模拟了集团装药产生的爆炸波在混凝土介质中的传播,阐明了装药形状对近区混凝土扩孔效应、应力波传播和混凝土损伤演化的影响。但是,因缺乏可靠的实验数据和高精度的数值模拟结果,尚未建立可靠的混凝土中爆炸波衰减规律的实用计算公式。

混凝土中爆炸波数值模拟的精度取决于许多因素,其中完善的混凝土材料模型、合理的数值算法和合适的网格尺寸是关键。在爆炸荷载作用近区,受高压和高应变率作用混凝土材料呈现近似流体特性,经典损伤塑性模型难以较好描述其时混凝土的力学行为。因此,普遍采用流体弹塑性模型,即分别采用强度面和状态方程,描述在冲击爆炸荷载下混凝土的偏量和球量行为。近年来,又开发了 Kong-Fang 混凝土材料流体弹塑性模型(以下简称为 Kong-Fang 模型)^[11-15]。Kong 等^[11]依据混凝土压力-体积应变和三轴压缩的实验数据,对比分析了常用的 HJC 模型、RHT 模型、K&C 模型和 Kong-Fang 模型等流体弹塑性模型对状态方程和最大强度面的预测效果,发现 Kong-Fang 模型整体上优于其他 3 种模型。Kong-Fang 模型具有良好的预测效果,其原因为:首先,以往模型高围压实验数据较少,Kong-Fang 模型在参数标定时补充了高围压下的相关实验数据;其次,Kong-Fang 模型通过关联流动法则考虑球量对偏量的影响,更符合高围压下的混凝土材料的响应状态。

混凝土中爆炸波传播的数值模拟过程涉及爆轰产物的膨胀飞散和混凝土的损伤破坏等,合理的数值算法需同时描述爆轰产物飞散以及混凝土材料的大变形。在描述混凝土靶体大变形时,Lagrange 算法需通过侵蚀算法解决网格畸变问题,导致爆轰能量发生较大耗散,无法有效地模拟爆轰产物和混凝土间的相互作用。Euler 算法可避免网格畸变问题而能模拟爆轰产物的大变形流动,但在界面运动追踪方面有些困难^[8]。而 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)算法不仅可以避免网格畸变问题,也能较好地追踪多种物质的界面^[16],可较好地描述混凝土中爆炸波的传播衰减。

值得注意,武器弹药命中目标时的埋深常介于接触爆炸和完全内爆(自由场爆炸),变埋深条件下装药爆炸能量与混凝土介质的耦合形式和比例尚未有定论^[16-17]。在美军技术手册 TM5-855-1《常规武器防

护设计基础》中,引入耦合系数(装药部分埋设爆炸与完全内爆在相同介质中产生的爆炸效应比),并给出混凝土中耦合系数与装药比例埋深的关系曲线。在计算爆炸波峰值、冲量和介质加速度等爆炸效应参数时,该手册均使用相同的耦合系数^[18],而冲量型耦合系数与应力型耦合系数是有区别的^[19]。Mandal 等^[16]和 Leong 等^[20]指出,耦合系数与装药形状、介质强度和密度等均相关,因此,对不同爆炸效应参数采用相同耦合系数,有待商榷。

本文中,基于 WES5000 混凝土中球形装药内爆实验^[2],利用近年开发的 Kong-Fang 混凝土材料模型^[13-14]和 LS-DYNA 中的多物质 ALE 算法,研究混凝土中爆炸应力波的传播衰减规律,并采用量纲分析方法建立混凝土自由场中近区爆炸波峰值的计算公式。在此基础上,分析装药埋深对混凝土中爆炸波峰值分布和耦合系数的影响,建立变埋深时混凝土中近区爆炸波峰值应力的计算公式。

1 数值模型及验证

基于 Kong-Fang 混凝土材料模型,先标定 WES5000 和 C100 混凝土的参数,再采用 LS-DYNA 的多物质 ALE 算法分析网格尺寸的收敛性,然后利用 Gran 等^[2]的实验数据验证数值模型结果。

1.1 材料模型及参数标定

Kong-Fang 模型参数主要包括强度面参数、状态方程参数和损伤参数^[13-14],为确保爆炸波模拟的准确性,先根据已有混凝土静动态力学性能实验,重新标定 WES5000 和 C100 高强混凝土的状态方程和强度面参数。

Schmidt 等^[3]、Gran 等^[21]和 Gebbeken 等^[22]进行了 WES5000 混凝土基本力学性能实验。利用静水压缩和平板撞击实验标定状态方程参数,利用三轴压缩实验标定强度面参数,如图 1~2 所示。

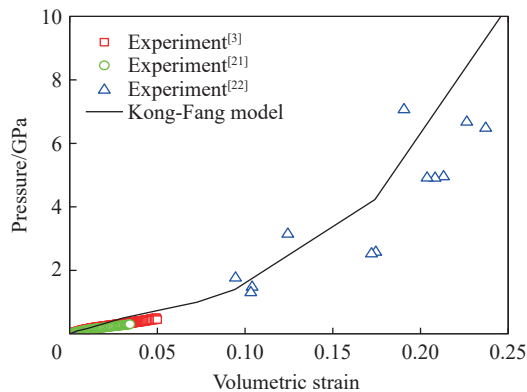


图 1 WES5000 混凝土的状态方程

Fig. 1 Equation of state for WES5000 concrete

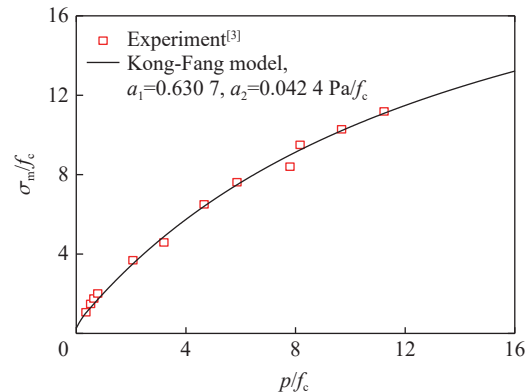


图 2 WES5000 混凝土的强度面参数

Fig. 2 Failure surface parameters for WES5000 concrete

对于 C100 高强混凝土,采用 Yang 等^[15]对 Kong-Fang 模型标定的超高性能混凝土状态方程(见图 3);基于 Williams 等^[25]和 Ren 等^[26]的三轴压缩实验数据,标定了强度面参数(见图 4)。

WES5000 和 C100 混凝土的其他参数,采用 Kong-Fang 模型自动生成算法获得^[12,14]。

采用 Jones-Wilkins-Lee 状态方程描述 B 炸药和 TNT 炸药:

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

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为材料参数,具体数值见文献 [27]。

采用多项式状态方程描述空气:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (2)$$

式中: $C_0=C_1=C_2=C_3=0$, $C_4=C_5=0.4$, $C_6=0$, $E_0=2.5 \text{ kJ/kg}$ ^[14]。

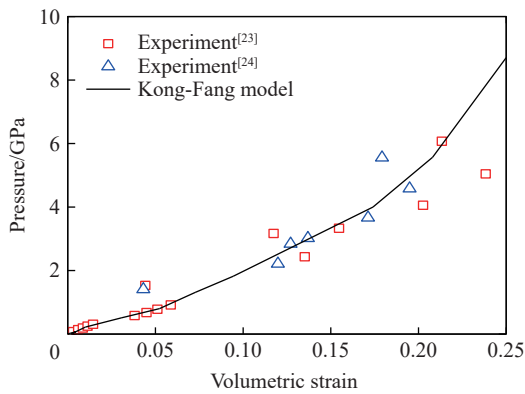


图 3 C100 混凝土的状态方程^[15]

Fig. 3 Equation of state for C100 concrete^[15]

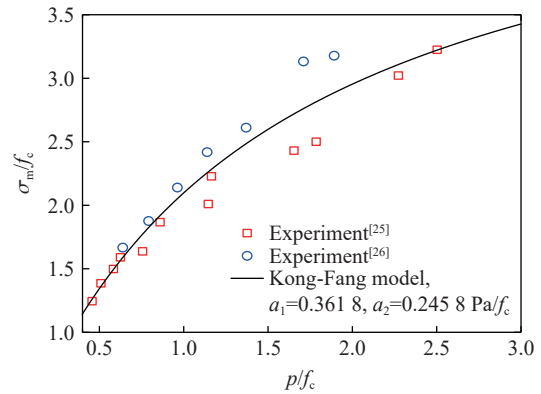


图 4 C100 混凝土的强度面参数

Fig. 4 Failure surface parameters for C100 concrete

1.2 数值计算策略及网格收敛性分析

Gran 等^[2]开展了 0.454 kg 球形 B 炸药在 WES5000 混凝土中爆炸波传播的实验研究,得到了不同位置处的爆炸波时程曲线。图 5 为实验靶体及传感器布置示意图,装药位于靶体中心位置,圆柱形靶体直径和厚度均为 1.83 m,周向设有钢箍,采用不同类型的压力传感器(Yb、PVDF 和 Carbon)并设置平行实验,确保实验数据的可靠性。

采用 LS-DYNA 中的多物质 ALE 算法对实验进行模拟,其中炸药和混凝土均采用 ALE 网格,钢箍采用 Lagrange 网格,利用流固耦合建立流体 ALE 域和 Lagrange 域的相互作用。因几何轴对称性,可采用二维轴对称方式建模,如图 6 所示。

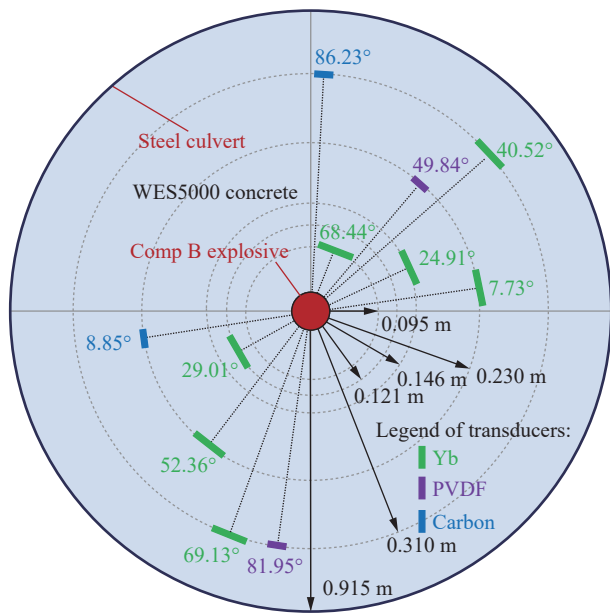


图 5 实验示意图^[2]

Fig. 5 Schematic diagram of the experiment^[2]

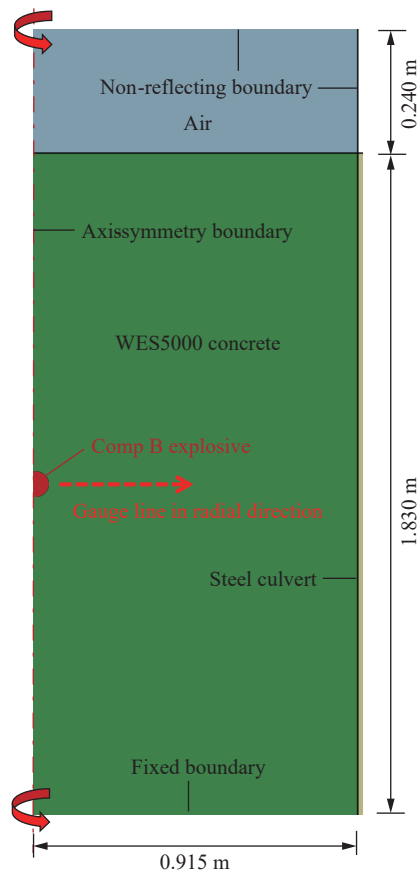


图 6 实验的有限元模型

Fig. 6 The finite element model for the experiment

选择合适的网格尺寸, 可有效提高计算精度和效率, 利用上述有限元模型对网格收敛性进行分析。图 7 为不同网格尺寸时距装药中心 0.15、0.30 和 0.5 m 处混凝土中的压力曲线。当网格尺寸小于 6 mm 时, 压力曲线均收敛, 所以, 后续数值模拟中网格尺寸均选为 6 mm。

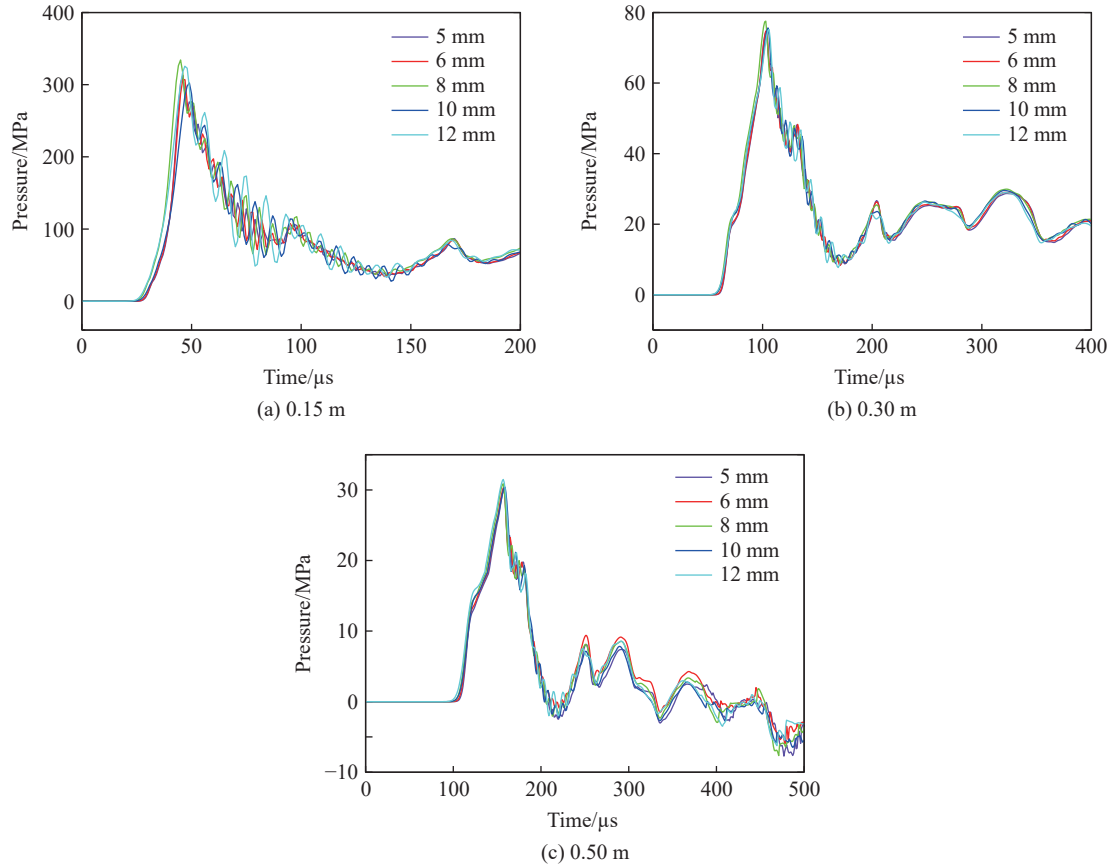


图 7 不同网格尺寸的压力曲线

Fig. 7 Pressure curves under different mesh sizes

1.3 数值模拟结果验证

现在, 利用 Gran 等^[2] 的实验数据验证数值模型结果。

图 8 为爆炸波峰值应力随距离的变化, 可见数值模拟结果与实验数据良好吻合。进一步, 图 9 为 5 个距离处的应力曲线, 可见数值模拟的爆炸波峰值应力、升压时间和正压持续时间均与实验数据较好吻合。这验证了 Kong-Fang 混凝土材料模型和多物质 ALE 算法的可靠性。

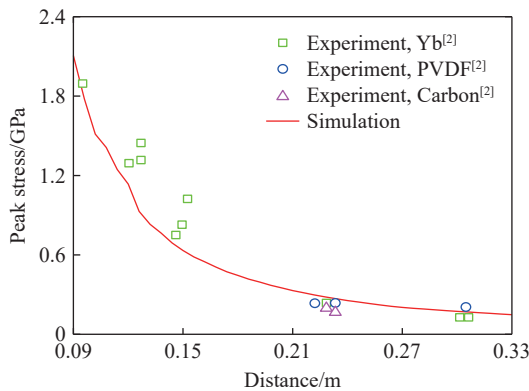


图 8 爆炸波峰值应力随距离的变化

Fig. 8 Variation of explosion wave peak stress with distances

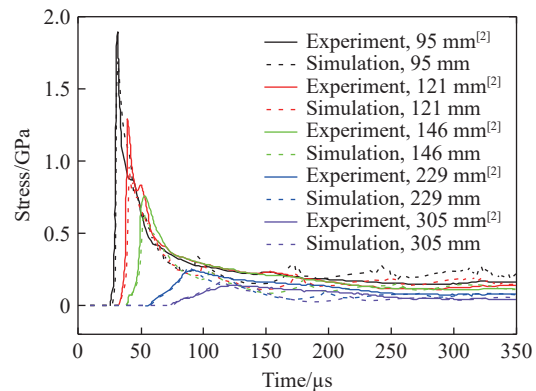


图 9 不同距离处的应力曲线

Fig. 9 Stress curves at different distances

2 球形装药在混凝土自由场中爆炸波衰减规律

基于上述验证的数值模型,开展球形装药在混凝土自由场中爆炸波衰减规律的数值模拟研究。为便于分析,装药采用 1 kg TNT,靶体仍采用 WES5000 混凝土,同时为模拟自由场爆炸条件,靶体外边界采用透射边界,有限元模型与图 6 相似。

2.1 爆炸波衰减机理

图 10 为比例距离 $0.06 \sim 0.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 混凝土中的径向应力和环向应力曲线。在传播过程中爆炸波迅速衰减,比例距离较小时峰值应力近似呈线性衰减,随着比例距离的增大,衰减速率逐渐变缓,总体呈指数衰减趋势。比例距离小于 $0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,为强间断冲击波,上升沿短、脉宽窄,随着传播距离的增加,上升沿逐渐拉长,脉宽逐渐增大,强间断渐变为弱间断。这主要由球面爆炸波自身的扩散效应和混凝土介质对爆炸波的耗散作用共同导致。比例距离为 $0.06 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,径向应力和环向应力曲线基本一致,这是因爆炸近区材料剪切强度相对静水压力较小,其力学行为与流体相似;随着比例距离的增大和爆炸波的迅速衰减,混凝土的强度效应逐渐呈现,径向应力和环向应力的差异逐渐显著。依据 van Amelsfort 等^[28]和 TU 等^[7]的实验结果和理论预测模型,WES5000 混凝土的压碎强度范围为 $0.6 \sim 1.5 \text{ GPa}$,峰值应力在此范围时混凝土被完全压碎而形成压碎区,强度大于 1.5 GPa 时混凝土为近似流体区。利用数值模拟计算的压缩损伤如图 11 所示,近似流体区和压碎区的比例半径范围分别为 $0.08 \sim 0.12$ 和 $0.12 \sim 0.20 \text{ m/kg}^{1/3}$,爆炸空腔的比例半径小于 $0.08 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

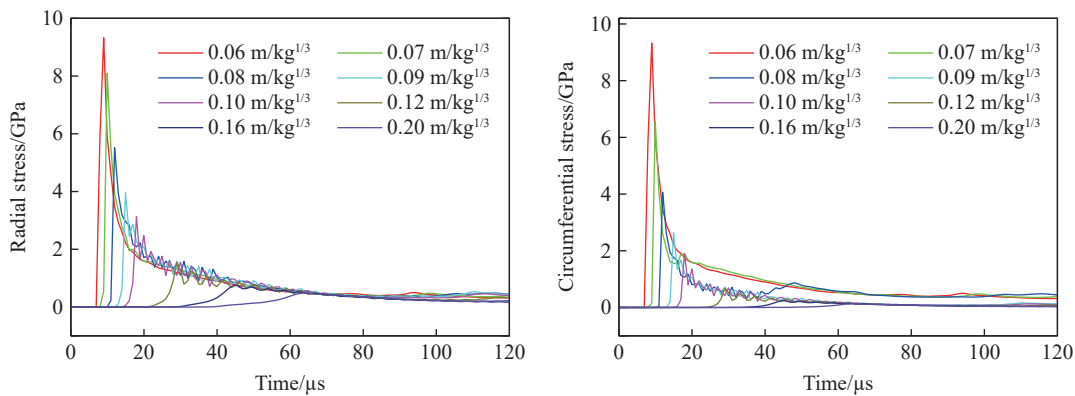


图 10 比例距离 $0.06 \sim 0.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时的应力曲线

Fig. 10 Stress curves at the scaled distances $0.06 \sim 0.20 \text{ m/kg}^{1/3}$

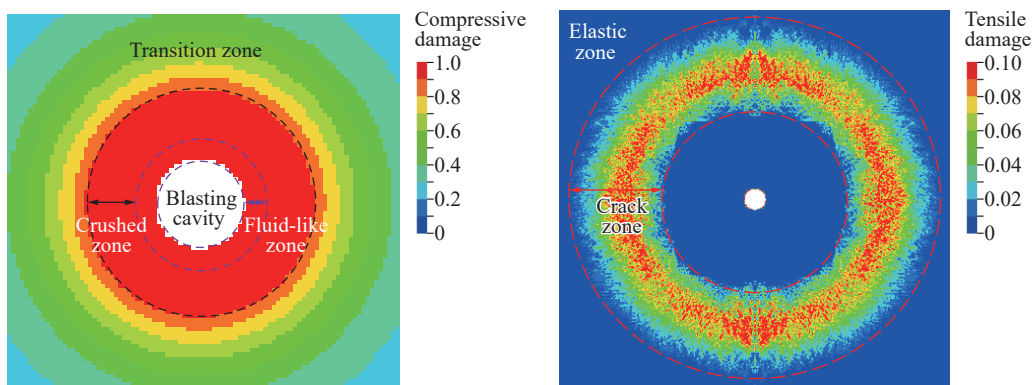


图 11 WES5000 混凝土靶体损伤的数值模拟结果

Fig. 11 Simulation results for WES5000 concrete target damage

比例距离为 $0.25 \sim 0.60 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,在混凝土中传播的爆炸波球面除幅值衰减和耗散,还呈现了其他典型特征,如图 12 所示。一方面,在塑性峰值应力到达前可观测到明显的弹性前驱波,因弹性前驱波波

速高于后续的塑性波波速, 随传播距离的增加其波阵面趋于平缓; 区别于一维弹性波, 因球面波自身的扩散效应, 弹性前驱波的峰值应力随传播距离增加而逐渐减小(见图 12 中的黑色虚线)。另一方面, 各应力曲线出现振荡, 峰值后应力不再单调递减, 而类似于脉动应力。该现象是因为, 爆轰波在混凝土中产生强冲击波的同时, 在爆轰产物中形成反向压缩波向爆心传播, 压缩波受到产物后方稀疏波的迎面稀疏作用强度不断下降, 直至中心汇聚后才重新加载^[29-30]。因此, 在爆炸过程结束前, 爆轰产物内始终存在压缩波及稀疏波的传播及其相互作用, 而引起混凝土中爆炸波形的振荡。需要指出, 在相关实验^[2,4-5]中的应力曲线并未体现波形振荡现象, 这可能是因为, 波形振荡和传感器噪声引起的振荡无法有效区分, 在滤波时被一并滤掉。

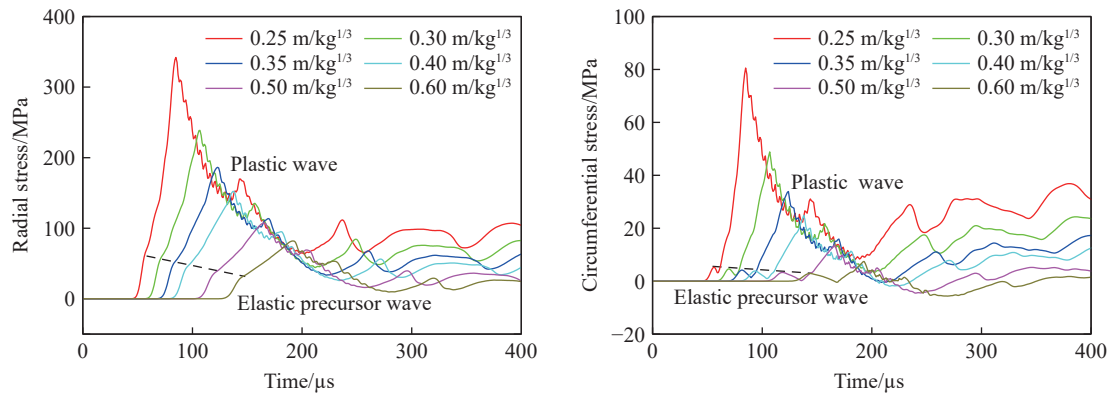


图 12 比例距离 0.25~0.60 m/kg^{1/3} 时的应力曲线

Fig. 12 Stress curves at the scaled distances 0.25–0.60 m/kg^{1/3}

如图 13 所示, 比例距离继续增加, 当比例距离大于 1.00 m/kg^{1/3} 时, 径向峰值应力已低于混凝土的静态抗压强度(41.4 MPa)。同时, 到达一定比例距离时, 混凝土环向拉伸应力开始主导, 这是因混凝土介质在球面压缩波的作用下径向运动时, 其环向受到拉应力的作用, 且当环向拉应力超过混凝土动态拉伸强度时产生径向裂缝。由于混凝土的抗拉强度远小于抗压强度, 因此在压碎区外出现以产生裂缝为主的破裂区^[16], 且由于裂缝端部的应力集中效应, 裂缝可扩大延伸到较远处。采用数值模拟得到拉伸损伤的破裂区如图 11(b) 所示, 其破裂区比例半径为 0.7~1.4 m/kg^{1/3}, 远大于压碎区的; 介于压碎区和破裂区的区域称为过渡区^[16], 其区域比例半径为 0.2~0.7 m/kg^{1/3}。而当混凝土的抗拉强度大于环向拉应力时, 不再形成裂缝, 混凝土只发生弹性变形, 对应的区域称为弹性区。

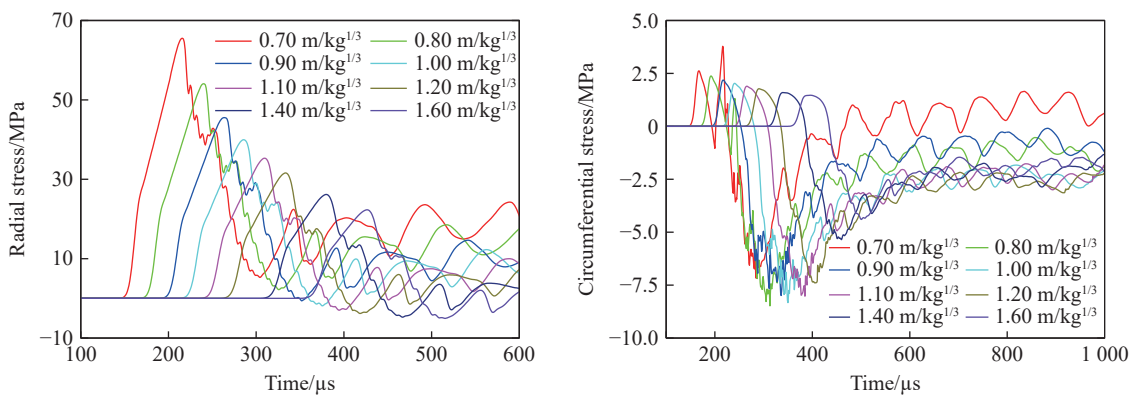


图 13 比例距离 0.70~1.60 m/kg^{1/3} 时的应力曲线

Fig. 13 Stress curves at the scaled distances 0.70–1.60 m/kg^{1/3}

郑哲敏等^[31]的流体弹塑性模型中,将爆炸作用下介质的流体、固体特性及运动规律用统一的方程表述。依据该模型并结合上述分析,可将爆炸空腔周围混凝土介质的变形划分为近似流体区、压碎区、过渡区、破裂区和弹性区等 5 个区域,如图 14 所示。

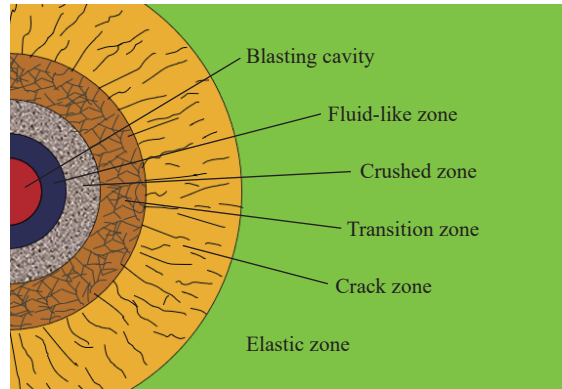


图 14 爆炸空腔周围混凝土介质的变形区域

Fig. 14 Deformation zones of concrete around the blasting cavity

2.2 量纲分析

爆炸波是混凝土防护结构的主要荷载,对爆炸波峰值等荷载参数的准确预测是确保结构抗爆设计可靠性的前提。借助量纲分析得到混凝土中爆炸效应参数的一般变化规律^[32],再结合实验数据和数值模拟,建立混凝土中爆炸波峰值的预测模型。

如忽略混凝土靶体的尺寸效应和爆炸波的耗散,爆炸波峰值等爆炸效应参数 X 是爆炸能量 E 、测点与装药中心的距离 S 、混凝土密度 ρ 和混凝土波速 c 的函数^[4,20]。即:

$$X = f(E, S, \rho, c) \quad (3)$$

令无量纲量 $\pi_1 = S(\rho c^2/E)^{1/3}$, 则式 (3) 可变为无量纲函数形式:

$$\pi = f(\pi_1) \quad (4)$$

本文中,关注的是峰值应力 σ , 令无量纲量 $\pi = \sigma/(\rho c^2)$, 则式 (4) 变为:

$$\sigma/(\rho c^2) = f[S(\rho c^2/E)^{1/3}] \quad (5)$$

炸药能量 E 与质量 Q 成正比,为简化且体现 Hopkinson-Cranz 相似律^[20,33],用 Q 替代 E , 则:

$$\sigma/(\rho c^2) = f[S(\rho c^2/Q)^{1/3}] \quad (6)$$

需要指出, $S(\rho c^2/Q)^{1/3}$ 并非无量纲量。因此,分别定义无量纲峰值应力 σ^* 和距离 S^* :

$$\sigma^* = \sigma/(\rho c^2) \quad (7)$$

$$S^* = S(\rho c^2/Q)^{1/3} \quad (8)$$

2.3 峰值应力计算公式

由 2.1 节,当比例距离大于 $1.00 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,爆炸波已衰减为球面弹性波,本文中重点关注比例距离 $0.09 \sim 1.00 \text{ m/kg}^{1/3}$ 混凝土中的爆炸波峰值应力分布。在此比例距离,爆炸波为塑性波, c 应取塑性波速。

WES5000 混凝土的密度 $\rho=2180 \text{ kg/m}^3$, 可通过图 10、12 中爆炸波峰值应力达到时间和距离得到塑性波速 $c=3200 \text{ m/s}$ 。由此,可建立无量纲峰值应力 σ^* 与距离 S^* 的关系,如图 15 所示。可见, σ^* 与 S^* 呈指数关系:

$$\sigma^* = aS^{*-b} \quad (9)$$

式中: a 为待定常数, b 为衰减系数。 S^* 的单位为 $\text{m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 。

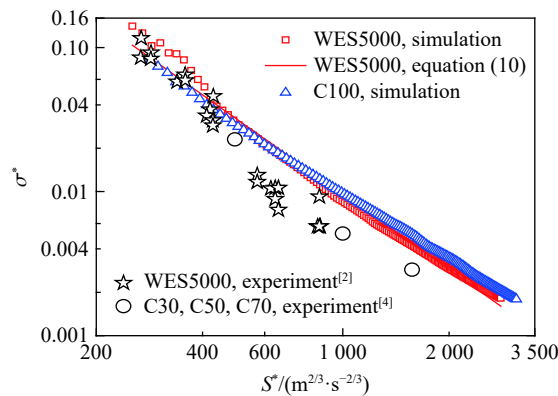


图 15 爆炸波峰值应力随距离的变化

Fig. 15 Variations of explosion wave peak stress with distance

基于 2.1 节数值模拟的混凝土自由场中爆炸波峰值应力数据, 可拟合得到 $a=1\ 525$, $b=1.734$, 相关系数 $R^2=0.977$ 。由此, 可建立 WES5000 混凝土自由场中爆炸波峰值应力的计算公式:

$$\sigma^* = 1\ 525 S^{*-1.734} \quad (10)$$

由量纲分析结果, 爆炸波峰值应力与混凝土密度和波速(波阻抗)密切相关。为验证式(10)在其他强度混凝土中的适用性, 建立 1 kg 球形 TNT 装药在 C100 混凝土自由场中爆炸的数值模型, 并根据实验数据和数值模拟结果, 得到 C100 混凝土密度 $\rho=2\ 570\ \text{kg/m}^3$ 、塑性波波速 $c=3\ 434\ \text{m/s}$ 。图 15 为式(10)与数值模拟结果的比较, 可见式(10)可较好地预测数值模拟的 σ^* 和 S^* 的关系。

为进一步验证式(10)的可靠性和适用性, 与 Gran 等^[2]和 Mu 等^[4]不同强度混凝土中的爆炸波峰值应力实验数据比较, 在整体上式(10)较好吻合。Mu 等^[4]根据实验数据, 确定了不同强度混凝土的衰减系数 $b=1.67\sim 1.84$, 而式(10)中衰减系数 $b=1.734$, 与之吻合。

上述分析验证了建立的混凝土自由场中近区爆炸波峰值应力计算公式的可靠性和适用性。该公式在已知混凝土密度 ρ 、塑性波速 c 和等效 TNT 装药量 Q 时, 能快速预测混凝土中爆炸波峰值应力, 适用范围为 $250\ \text{m}^{2/3}/\text{s}^{2/3} \leq S^* \leq 2\ 700\ \text{m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 。

3 装药埋深对峰值应力分布的影响

式(10)中仅适用于装药在混凝土完全内爆(自由场)情况, 事实上, 武器弹药命中目标时的埋深常介于接触爆炸和完全内爆之间, 本节中将分析装药埋深对混凝土中爆炸波峰值应力分布的影响。

3.1 不同装药埋深下爆炸波峰值应力

图 16 为 1 kg 球形 TNT 装药在 WES5000 混凝土中不同埋深时, 装药正下方无量纲峰值应力 σ^* 与距离 S^* 的关系, 其中比例埋深 h^* 为装药中心到靶体上表面的比例距离。可以看出, 接触爆炸 ($h^*=-0.053\ \text{m/kg}^{1/3}$) 与自由场爆炸在相同距离 S^* 处的 σ^* 有明显差异, 且随着装药埋深的增加差异逐渐减小, 当比例埋深大于 $0.1\ \text{m/kg}^{1/3}$ 时与自由场爆炸几乎无差异。

3.2 混凝土爆炸波峰值应力耦合系数

目前, 变埋深条件下装药爆炸能量和混凝土介质的耦合形式和比例尚无定论^[16-17]。在手册 TM5-855-1 中, 定义耦合系数 f 为部分埋设或

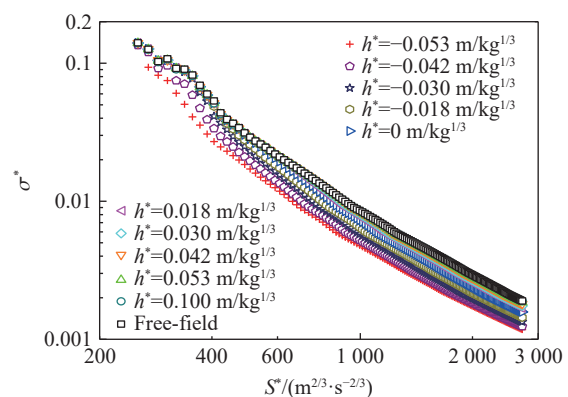


图 16 不同埋深时 WES5000 混凝土的爆炸波峰值应力随距离的变化

Fig. 16 Variations of explosion wave peak stress for WES5000 concrete with distance at different burial depths

浅埋爆炸与完全埋设爆炸(自由场爆炸)在相同介质中所产生爆炸效应的比^[18]。本文中,重点关注装药正下方爆炸波峰值应力随装药埋深的变化,则定义爆炸波峰值应力耦合系数:

$$f = \sigma_h^* / \sigma_0^* \quad (11)$$

式中: σ_h^* 为装药比例埋深 h^* 时、距离 S^* 下的无量纲峰值应力, σ_0^* 为自由场爆炸相应的无量纲峰值应力。

由 3.1 节不同埋深装药爆炸下的数值模拟结果,结合式 (11) 可得峰值应力耦合系数 f 随距离 S^* 的变化,如图 17 所示。可见,耦合系数 f 不仅与装药比例埋深 h^* 有关,还与距离 S^* 有关:当 $S^* < 250 \text{ m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 时,峰值应力受爆轰波直接作用几乎不受埋深影响,可认为耦合系数 $f=1$;当 $250 \text{ m}^{2/3}/\text{s}^{2/3} \leq S^* < 1\,250 \text{ m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 时,不同装药埋深的耦合系数 f 整体上均呈递减的趋势;当 $S^* \geq 1\,250 \text{ m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 时,耦合系数 f 基本保持恒定。基于上述分析,可将耦合系数 f 随距离 S^* 的变化规律划分为 3 个阶段,如图 18 所示。

第 1 阶段: 爆轰波直接作用, $f=1$ 。

第 2 阶段: 爆轰波与混凝土耦合作用,随着装药埋深的减小,更多的爆炸能量逸散到空气中。即装药埋深越小耦合系数 f 越小,耦合系数 f 可简化为随 S^* 增大而线性降低:

$$f = f_0 + [(1\,250 - S^*) / 1\,000] (1 - f_0) \quad (12)$$

式中: f_0 为第 3 阶段的耦合系数。 S^* 的单位为 $\text{m}^{2/3}/\text{s}^{2/3}$ 。

第 3 阶段: 冲击波衰减为稳定的弹塑性波,耦合系数几乎不变化,为常数 f_0 。

注意,式 (12) 中第 3 阶段稳定耦合系数 f_0 与比例埋深 h^* 密切相关(见图 17),下面建立 f_0 的经验公式。先引入装药在混凝土中的无量纲质量系数 μ^* , 其定义及与装药比例埋深 h^* 的对应关系为:

$$\mu^* = Q_h / Q = 3h^{*2}(R^* - h^*/3) / (4R^{*3}) \quad \mu^* \leq 1 \quad (13)$$

式中: Q_h 为装药在混凝土中的质量, Q 为装药总质量, $R^* = R/Q^{1/3}$ 为球形装药比例半径。由图 17 可知,当 $h^* \geq R^*$ 即 $\mu^* = 1$ 时,耦合系数 f 基本保持为 1,则式 (13) 可表示为:

$$\mu^* = \begin{cases} 3h^{*2}(R^* - h^*/3) / (4R^{*3}) & 0 \leq h^* < R^* \\ 1 & h^* \geq R^* \end{cases} \quad (14)$$

由图 17 可得不同比例埋深 h^* 下的耦合常数 f_0 , 由此得到 μ^* 与 f_0 的关系,如图 19 所示。拟合后可得:

$$f_0 = 0.64 + 0.47 \ln(1 + \mu^*) \quad (15)$$

由以上,可建立爆炸波峰值应力耦合系数 f 与无量纲装药质量系数 μ^* 、距离 S^* 的关系:

$$f = \begin{cases} 0.64 + 0.47 \ln(1 + \mu^*) + [(1\,250 - S^*) / 1\,000] [0.36 - 0.47 \ln(1 + \mu^*)] & 250 \leq S^* < 1\,250 \\ 0.64 + 0.47 \ln(1 + \mu^*) & S^* \geq 1\,250 \end{cases} \quad (16)$$

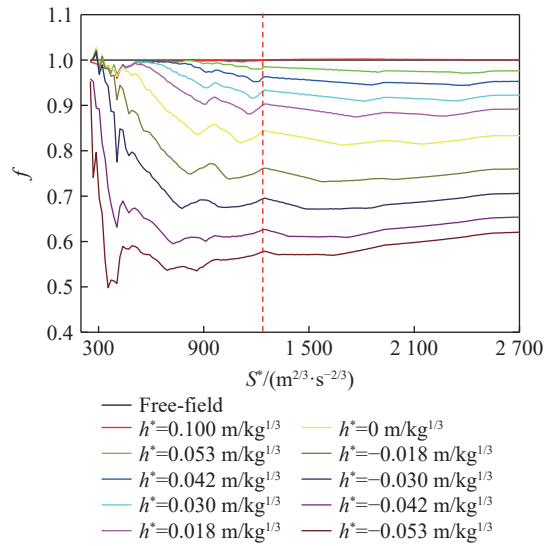


图 17 不同埋深时 WES5000 混凝土峰值应力耦合系数随距离的变化

Fig. 17 Variations of peak stress coupling coefficient for WES5000 concrete with distance at different burial depths

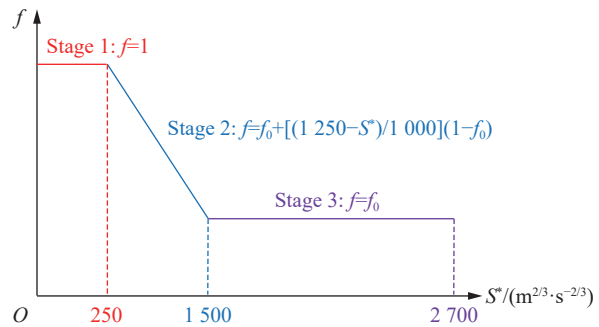


图 18 峰值应力耦合系数随距离的变化规律

Fig. 18 Variety rule of peak stress coupling coefficient with distance

Mu 等^[4]的实验表明, 混凝土的爆炸效应耦合系数不仅受装药埋深的影响, 还与混凝土材料的强度等指标高度相关。为验证建立的爆炸压缩波峰值应力耦合系数计算公式对其他强度混凝土的适用性, 通过数值模拟计算 C100 混凝土在接触爆炸($\mu^*=0$)和半埋爆炸($\mu^*=0.5$)时的峰值应力耦合系数(见图 20), 可见其值与 WES5000 混凝土差别不大。由此说明, 建立的峰值应力耦合系数计算公式具有广泛的适用性, 在已知装药埋深(质量系数 μ^*)时, 能快速确定离装药中心特定距离 S^* 处混凝土的峰值应力耦合系数。

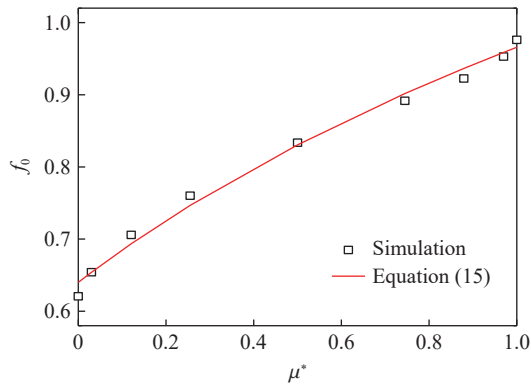


图 19 稳定峰值应力耦合系数随质量系数的变化

Fig. 19 Variation of stable peak stress coupling coefficient with mass coefficient

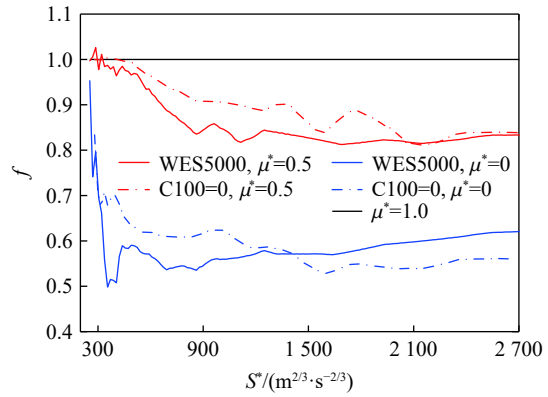


图 20 WES5000 和 C100 混凝土的峰值应力耦合系数随距离的变化

Fig. 20 Variations of peak stress coupling coefficients for WES5000 and C100 concretes with distance

3.3 变埋深条件下爆炸波峰值应力计算公式

由式 (16) 结合式 (10), 可得任意装药埋深和测点距离下球形装药正下方混凝土中爆炸波峰值应力的计算公式:

$$\sigma^* = 1\,525 f S^{*-1.734} \quad (17)$$

式 (17) 中, 爆炸波无量纲峰值应力 σ^* 由式 (7) 确定, 离装药中心的距离 S^* 由式 (8) 确定, 离装药中心距离为 S^* 处的混凝土爆炸峰值应力耦合系数 f 由式 (16) 确定。

综上所述, 利用式 (17), 在已知混凝土密度、塑性波速、球形装药量和装药埋深下, 能快速预测特定距离下混凝土中爆炸波峰值应力。式 (17) 可适用于普通和高强混凝土, 适用距离范围为 $250 \text{ m}^{2/3}/s^{2/3} \leq S^* \leq 2\,700 \text{ m}^{2/3}/s^{2/3}$ 。

4 结 论

基于 Kong-Fang 混凝土材料模型, 利用 LS-DYNA 中的多物质 ALE 算法, 开展球形装药在混凝土中爆炸波衰减规律的数值模拟。通过模拟已有实验验证了数值模型的可靠性, 在此基础上分析了混凝土自由场中爆炸波衰减规律, 并探讨了装药埋深对混凝土中近区爆炸波峰值应力分布的影响。主要结论如下。

(1) Kong-Fang 混凝土材料模型在模拟混凝土中爆炸波传播规律时具有较高精度, 可有效预测混凝土中爆炸应力波传播的衰减规律。

(2) 借助量纲分析, 利用数值模拟结果建立的球形装药在混凝土中近区爆炸波峰值应力的计算公式具有良好的可靠性和适用性, 在已知混凝土密度、塑性波波速和装药量下, 能快速预测特定距离下混凝土中爆炸波峰值应力。

(3) 耦合系数不仅与装药埋深有关, 还与测点与装药中心的距离有关; 建立了爆炸波峰值应力耦合系数与装药在混凝土中的质量系数、与装药中心距离的定量关系, 可较准确地计算任意埋深条件下球形装药正下方混凝土中特定距离处的爆炸波峰值应力。

参考文献:

- [1] 方秦, 陈小伟. 冲击爆炸效应与工程防护专辑·编者按 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(2): 024601. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0404.
FANG Q, CHEN X W. Special topic of impact and explosion effect and engineering protection [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(2): 024601. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0404.
- [2] GRAN J K, EHRGOTT J Q, CARGILE J D. Cavity expansion experiments with spherical explosive charges in concrete [R]. Vicksburg, USA: Army Engineer Research and Development Center, 2009.
- [3] SCHMIDT M J. High pressure and high strain rate behavior of cementitious materials: experiments and elastic/viscoplastic modeling [D]. Florida, USA: University of Florida, 2003: 4–56.
- [4] MU C M, ZHOU H, MA H F. Prediction method for ground shock parameters of explosion in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123372. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123372.
- [5] 黄家蓉, 刘光昆, 吴飏, 等. 爆炸冲击作用下混凝土中动态应力波测试与仿真 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.04.003.
HUANG J R, LIU G K, WU B, et al. Testing and simulation of dynamic stress wave in concrete under explosion and impact [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.04.003.
- [6] 宗国庆. 混凝土介质爆破效应研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 1994: 74–76.
ZONG G Q. Research on blasting effects under concrete medium [D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 1994: 74–76.
- [7] TU H, FUNG T C, TAN K H, et al. An analytical model to predict the compressive damage of concrete plates under contact detonation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103344. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103344.
- [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 G, HU D A, HAN X. Comparison study of numerical methods in simulation of explosion in concretes [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, 28(4): 423–426.
- [9] 董永香, 夏昌敬, 段祝平. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析 [J]. *工程力学*, 2006, 23(2): 60–65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.02.011.
DONG Y X, XIA C J, DUAN Z P. Numerical analysis of plane explosive wave propagation with its attenuation behavior in semi-infinite medium [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(2): 60–65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.02.011.
- [10] 赵凯, 王肖钧, 卞梁, 等. 混凝土介质中不同药形装药爆炸波传播特性的数值模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(7): 711–716. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.004.
ZHAO K, WANG X J, BIAN L, et al. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasting wave with differently shaped explosives in concrete [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(7): 711–716. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.004.
- [11] KONG X Z, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 60–78. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.006.
- [12] ZHANG S B, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical prediction of dynamic failure in concrete targets subjected to projectile impact by a modified Kong-Fang material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103633. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103633.
- [13] WANG Y, KONG X Z, FANG Q, et al. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150: 103815. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103815.
- [14] 王银, 孔祥振, 方秦, 等. 弹体对混凝土材料先侵彻后爆炸损伤破坏效应的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(1): 013301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0132.
WANG Y, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical investigation on damage and failure of concrete targets subjected to projectile penetration followed by explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(1): 013301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0132.
- [15] YANG S B, KONG X Z, WU H, et al. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153: 103860. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103860.
- [16] MANDAL J, GOEL M D, AGARWAL A K. Surface and buried explosions: an explorative review with recent advances [J].

- Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(7): 4815–4835. DOI: 10.1007/s11831-021-09553-2.
- [17] 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.07.021.
- LI Z Q, MU C M, SHI B M. Investigate on shock stress propagation in concrete at different depths under blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6): 140–145. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.07.021.
- [18] DRAKE J L, LITTLE C D. Ground shock from penetrating conventional weapons [R]. 1983: 1–6.
- [19] 施鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(3): 240–244. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0240-05.
- SHI P, DENG G Q, YANG X M, et al. Study on ground shock energy distribution of explosion in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(3): 240–244. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0240-05.
- [20] LEONG E C, ANAND S, CHEONG H K, et al. Re-examination of peak stress and scaled distance due to ground shock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(9): 1487–1499. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.10.009.
- [21] GRAN J K, FREW D J. In-target radial stress measurements from penetration experiments into concrete by ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(8): 715–726. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00008-0.
- [22] GEBBEKEN N, GREULICH S, PIETZSCH A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 2017–2031. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.08.003.
- [23] ERZAR B, PONTIROLI C, BUZAUD E. Shock characterization of an ultra-high strength concrete [J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2016, 225(2): 355–361. DOI: 10.1140/epjst/e2016-02637-4.
- [24] PONTIROLI C, ERZAR B. Impact response of UHPC and UHPFRC: experimental study and numerical simulation [C] // Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Quebec, Canada, 2019.
- [25] WILLIAMS E M, GRAHAM S S, AKERS S A, et al. Mechanical properties of a baseline UHPC with and without steel fibers [J]. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2009, 64(12): 93–104. DOI: 10.2495/MC090091.
- [26] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Triaxial compressive behavior of UHPCC and applications in the projectile impact analyses [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 1–14. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.227.
- [27] TARVER C M, MCGUIRE E M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials [R]. 2002.
- [28] VAN AMELSFORT R, WEERHEIJM J. The failure mode of concrete slabs due to contact charges [R]. Netherlands: Prins Maurits Laboratorium, 1988.
- [29] FORBES J W. Shock wave compression of condensed matter: a primer [M]. Berlin, Germany: Springer, 2012.
- [30] 赵凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 74–75.
- ZHAO K. The attenuation and dispersion effects on explosive wave of layered protective engineering [D]. Hefei, Anhui, China: University of Science and Technology of China, 2007: 74–75.
- [31] 郑哲敏, 解伯民, 谈庆明, 等. 流体弹塑性模型及其在核爆与穿甲方面的应用 [R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1982.
- [32] 谈庆明. 量纲分析 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005: 1–3.
- TAN Q M. Dimensional analysis [M]. Hefei, Anhui, China: China University of Science and Technology Press, 2005: 1–3.
- [33] WESTINE P S, FRIESENHAHN G J. Free-field ground shock pressures from buried detonations in saturated and unsaturated soils [R]. 1983: 12–16.

(责任编辑 丁峰)