

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0538

接触爆炸作用下混凝土墩体的 易损性研究*

马世鑫¹, 纪杨子燚¹, 钟明寿², 李向东¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 为评估柱形装药接触爆炸对混凝土墩体的破坏能力, 采用试验与数值模拟相结合的方法研究了接触爆炸作用下混凝土墩体的易损性, 提出了用等毁伤曲线和易损面积评估混凝土墩体易损性的方法, 得到了接触爆炸作用下墩体顶面和侧面的毁伤区域特征及装药质量和装药放置位置对墩体毁伤的影响规律。通过建立易损面积的计算模型, 分别得到了顶面和侧面接触爆炸作用下墩体不同级别毁伤的易损面积随装药质量的变化曲线, 在此基础上比较了顶面和侧面接触爆炸时墩体的易损性差异。研究结果表明: 接触爆炸作用下, 墩体顶面的毁伤区域近似为正方形, 其中心与墩体顶面中心重合; 墩体侧面的毁伤区域近似为圆角梯形, 其中心位于侧面几何中心下方约 10 cm 处。装药质量在 0.5~10.79 kg 之间时, 侧面接触爆炸更容易破坏墩体。研究成果可为混凝土障碍的破除、破障弹设计及效能评估提供支持和指导。

关键词: 柱形装药; 混凝土墩体; 接触爆炸; 易损性

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Study on the vulnerability of concrete obstacle under contact explosion

MA Shixin¹, JI Yangziyi¹, ZHONG Mingshou², LI Xiangdong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: Contact explosion experiments were conducted to assess the damage capacity of a cylindrical charge contact explosion on a concrete obstacle. A characterization method for the damage level of a concrete obstacle was proposed based on the experimental results. Subsequently, numerical simulations were performed to study the influence of charge mass and placement location on the residual height of a concrete obstacle. To validate the numerical model and applied material parameters, the results of the numerical simulations were compared with the experimental results. Based on the numerical results, the vulnerability of the concrete obstacle under contact explosions of different charge placements was characterized using the damage iso-curve method. The shape and center position of the damage zone on the top and side of the obstacle were obtained. Considering the randomness of charge placement after deployment in actual use, a model for calculating the vulnerable area was established to investigate the overall vulnerability of the obstacle. The relationship between the charge mass and the vulnerable area of different damage levels of the obstacle when the charge exploded on the top and side was obtained. The research results indicate that the shape of the damage zone on the top of the obstacle is approximately a square, with the center coinciding with the center of the top surface. The shape of the damage zone on the side is approximately a

* 收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-04-17

第一作者: 马世鑫(1999—), 男, 博士研究生, sxin_ma@njust.edu.cn

通信作者: 李向东(1969—), 男, 博士, 教授, lixiangd@njust.edu.cn

rounded trapezoid, with the center located about 10 cm below the geometric center of the side surface. Based on the calculated results of the vulnerable area, the difference in vulnerability between the top and side of the obstacle under contact explosion was compared. When the mass of the cylindrical charge is between 0.5 kg and 10.79 kg, the concrete obstacle is more vulnerable to damage when subjected to a contact explosion on the side. The findings of this research can provide support and guidance for the demolition of concrete obstacles, the design of obstacle-breaking projectiles, and the evaluation of their damage effectiveness.

Keywords: cylindrical charge; concrete obstacle; contact explosion; vulnerability

混凝土墩体常作为基座用于建造阻滞中型或轻型登陆工具的工事, 多分布于敌方阵前岸滩, 是登陆作战中需重点破除的目标之一^[1-2]。由于该类目标强度高且分布密度大, 而使用炸药的接触爆炸作用是在混凝土墩体障碍场中开辟道路的最常用方法, 因此, 研究炸药接触爆炸作用下混凝土墩体的易损性具有重要意义。

对接触爆炸作用下混凝土构件的毁伤已有一些研究^[3]。Li 等^[4]开展了炸药接触爆炸对 π 截面混凝土梁的损伤试验, 结果表明, 炸点位于梁的连接处时, 接触爆炸对梁的损伤远大于炸点位于梁中间位置时。Yang 等^[5]对混凝土板在空气和水下爆炸作用下的损伤进行了试验研究, 结果表明, 药量相同时, 水下爆炸引起混凝土板的动态响应和破坏程度明显大于空爆。空爆时混凝土的压碎和崩落现象较为局部化, 无法观察到混凝土板的整体变形, 但水下爆炸时, 混凝土板会发生整体弯曲和拉伸破坏。Li 等^[6]研究了 C175 超高性能混凝土板和 C30 普通强度混凝土板在接触爆炸下的响应, 试验结果显示, 前者相比后者的迎爆面破坏直径下降了 10.3%, 背爆面破坏直径下降了 46.5%。Remennikov 等^[7]建立了预测混凝土板在接触爆炸作用下开坑直径的工程计算模型。岳松林等^[8]通过理论分析了混凝土板在接触爆炸作用下的震塌问题, 得到了临界震塌厚度和临界贯穿厚度的理论表达式。张强等^[9]基于量纲分析和数值模拟结果, 提出了接触爆炸条件下, 预测钢筋混凝土板正面破坏区、贯穿区和背面震塌区尺寸的工程计算模型。郝礼楷等^[10]研究了集团炸药接触爆炸作用下混凝土墩的损伤特征, 分析了装药长径比对混凝土墩毁伤的影响。刘路等^[11]研究了接触爆炸下混凝土墩柱的破坏, 结果表明, 接触爆炸下, 混凝土墩柱局部受到爆炸载荷的侵蚀和冲剪作用。小药量时, 墩柱局部高频振动, 迎爆面混凝土被压碎破坏, 背爆面受拉产生裂缝; 增大药量时, 墩柱整体产生高频振动并出现弯曲变形, 变形超过一定量时则会形成多条贯穿横向裂缝。Dua 等^[12]通过试验研究了横截面宽度对矩形截面混凝土柱在集团装药接触爆炸作用下响应的规律。

综上所述, 目前的研究多集中于混凝土结构如梁、板、柱之类的建筑物构件, 少量涉及混凝土墩体易损性的研究, 也未考虑装药质量、装药放置位置等因素的影响。为了弥补当前研究工作的不足, 本文中拟开展柱形装药接触爆炸对混凝土墩体毁伤的试验, 结合数值模拟研究装药质量和装药放置位置对混凝土墩体残余高度的影响规律, 分析接触爆炸作用下混凝土墩体的毁伤过程, 在此基础上构建接触爆炸作用下混凝土墩体易损性的评估方法。

1 混凝土墩体毁伤试验

1.1 试验布置

试验中使用的柱形装药为熔铸 B 炸药, 长径比 $H_c : D_c = 1$ 。装药通过电雷管起爆, 并在雷管和主装药之间放置圆柱形黑索金传爆药柱以保证起爆的可靠性, 传爆药柱直径 $d = 4.0$ cm, 高度 $t = 0.5$ cm。试验中使用的混凝土墩体为正四棱台结构, 顶面边长 $a = 60$ cm, 底面边长 $b = 100$ cm, 高度 $h = 80$ cm, 由含骨料的混凝土 (C35) 浇筑而成, 养护时间为 1 个月。柱形装药、传爆药柱和混凝土墩体的结构如图 1 所示。试验时柱形装药的放置位置包括混凝土墩体的顶面中心和侧面几何中心, 试验布置如图 1 所示。

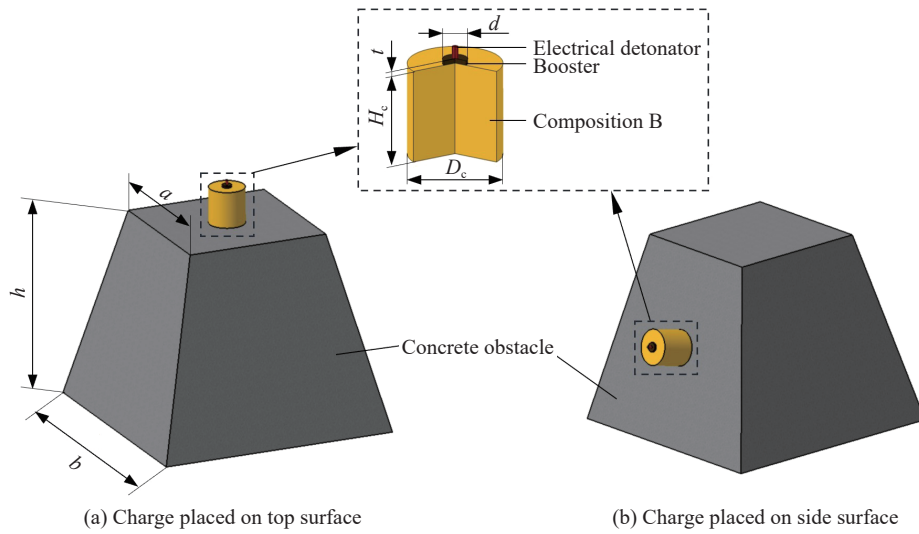


图 1 柱形装药和混凝土墩体结构及试验布置示意图

Fig. 1 Structure of cylindrical charge and concrete obstacle and schematic diagram of the test layout

1.2 试验结果及分析

开展了不同质量(1.0~3.0 kg)柱形装药接触爆炸对混凝土墩体的毁伤试验,具体试验方案如表 1 所示。图 2~7 为不同质量装药置于混凝土墩体顶面中心或侧面几何中心接触爆炸时墩体整体及各侧面的毁伤情况。

试验工况 T-1(见图 2),即 1.0 kg 装药顶面爆炸时,墩体顶面严重破碎,残余墩体的中心位置可观察到明显的凹陷漏斗坑(见图 2(a)),漏斗坑呈中心低、外侧高的形态,墩体侧面各形成 1~2 条贯穿裂纹(见图 2(b)),残余墩体破碎成 4 块,仍保持较完整的形态,并未倾倒或移位。

表 1 试验方案

Table 1 Experiment scheme

试验编号	装药放置位置	装药质量/kg
T-1	顶面中心	1.0
T-2	顶面中心	1.5
T-3	顶面中心	2.0
T-4	顶面中心	2.5
T-5	顶面中心	3.0
T-6	侧面几何中心	3.0

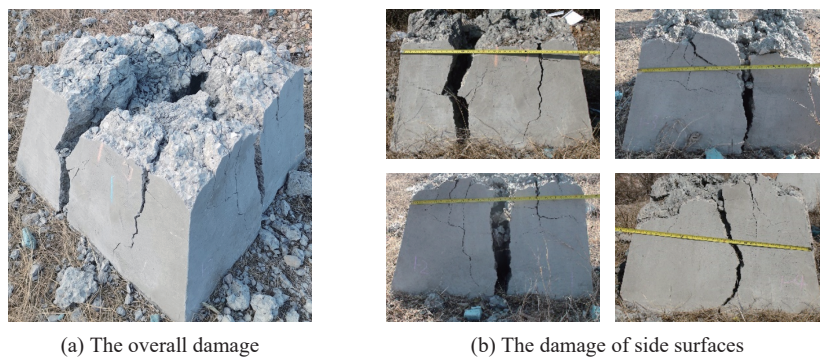


图 2 T-1 试验中混凝土墩体的破坏情况

Fig. 2 The damage of the concrete obstacle in test T-1

试验工况 T-2(见图 3),即 1.5 kg 装药顶面爆炸时,残余墩体的中心无明显的漏斗坑(见图 3(a)),中心位置与外侧高度几乎持平,侧面形成 2~3 条贯穿裂纹(见图 3(b)),残余墩体破碎成 5 块,其中 1 块出现明显的移位。

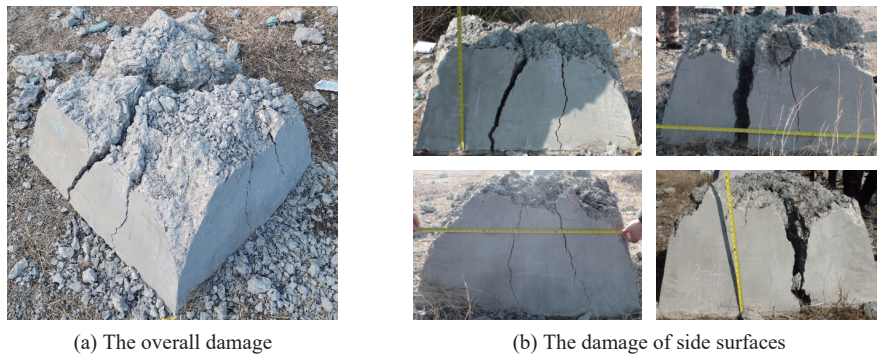


图 3 T-2 试验中混凝土墩体的破坏情况
Fig. 3 The damage of the concrete obstacle in test T-2

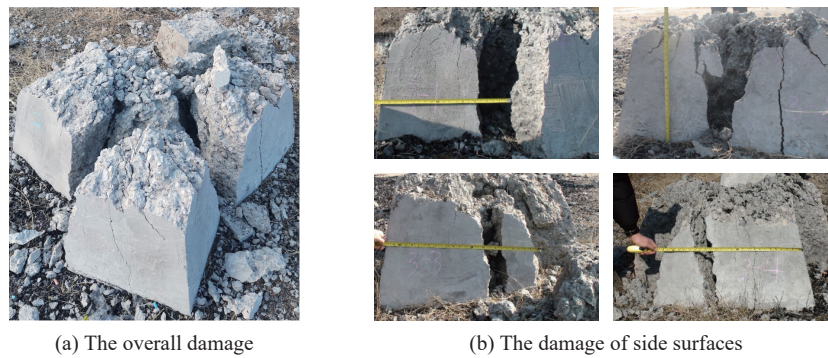


图 4 T-3 试验中混凝土墩体的破坏情况
Fig. 4 The damage of the concrete obstacle in test T-3

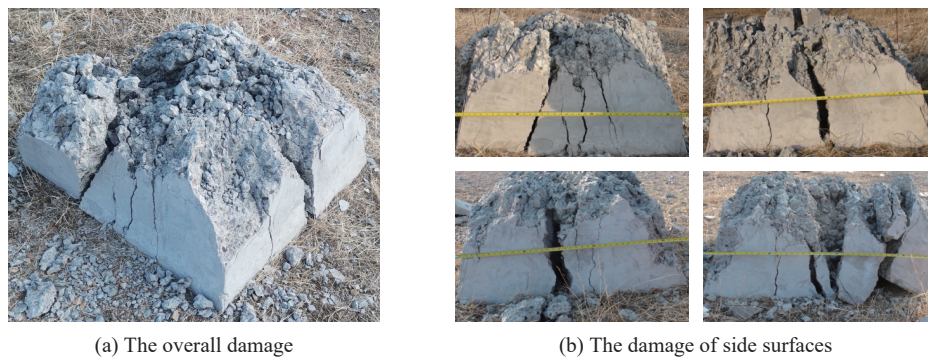


图 5 T-4 试验中混凝土墩体的破坏情况
Fig. 5 The damage of the concrete obstacle in test T-4

试验工况 T-3(见 图 4), 即 2.0 kg 装药顶面爆炸时, 残余墩体中心略高于外侧(见 图 4(a)), 两侧面的贯穿裂纹数增加至 4 条(见 图 4(b)), 残余墩体碎裂成 7 块, 部分碎块在冲击波的作用下出现移位, 其中一棱角处的碎块出现倾斜但并未完全倾倒。

试验工况 T-4(见 图 5), 即 2.5 kg 装药顶面爆炸时, 残余墩体中心明显高于外侧(见 图 5(a)), 各侧面裂纹数量未明显增加(见 图 5(b)), 残余墩体破碎成 10 块, 其中 2 块碎块出现较大移位。

试验工况 T-5(见 图 6), 即 3.0 kg 装药顶面爆炸时, 残余墩体呈现出明显的中心高、外侧低的形态(见 图 6(a)), 贯穿的纵向裂纹数和残余墩体的碎块数量继续增多(见 图 6(b)), 部分碎块出现较大移位并倾倒。

试验工况 T-6(见 图 7), 即 3.0 kg 装药侧面爆炸时, 墩体整体严重破碎(见 图 7(a)), 在冲击波作用下碎块主要向装药放置位置相反的方向飞散(见 图 7(b)), 高度大于 20.0 cm 的碎块约有 14 块。

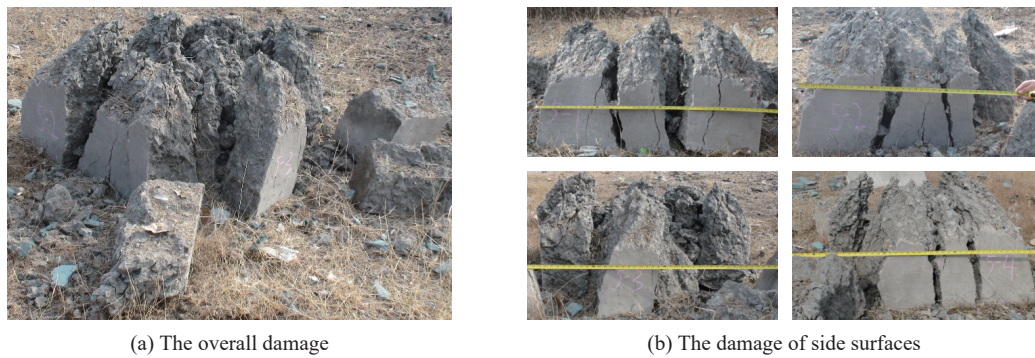


图 6 T-5 试验中混凝土墩体的破坏情况

Fig. 6 The damage of the concrete obstacle in test T-5

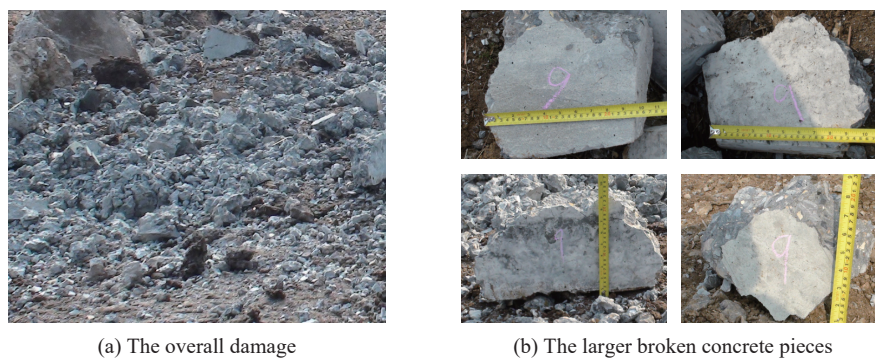


图 7 T-6 试验中混凝土墩体的破坏情况

Fig. 7 The damage of the concrete obstacle in test T-6

总体上, 顶面接触爆炸时, 墩体顶部距炸点较近, 受压缩波影响较大, 破坏形式主要为压缩破坏^[13]。应力波传播至墩体/空气界面或墩体/土介质界面时, 经反射形成拉伸波, 若该拉伸波强度高于墩体的临界抗拉强度, 将使墩体发生崩落^[14]。当装药质量较小时, 压缩波破坏占主导, 墩体中心形成爆坑, 其高度低于外侧; 装药质量较大时, 爆炸传入墩体内部的应力波强度较大, 由拉伸波导致的破坏加剧, 残余墩体的毁伤形态与墩体中心和墩体外侧的拉伸波破坏有关。考虑到应力波在墩体内部传播时的衰减, 墩体中心的破坏受墩体/土介质界面反射的拉伸波影响较大, 而墩体外侧的破坏主要由墩体/空气界面反射的拉伸波导致。与墩体底部的土介质相比, 空气的波阻抗较小, 导致墩体外侧的拉伸波强度相对较高, 随着装药质量的增加, 墩体外侧的崩落加剧, 外侧高度逐渐低于中心高度。

图 8 所示为试验得到的不同工况下装药质量 m 与混凝土墩体残余高度 η 和高度大于 20.0 cm 的碎块数量 N_c 的关系。顶面接触爆炸时(试验 T-1~T-5), 随着装药质量的增加, 混凝土墩体残余高度呈下降趋势, 而碎块数量呈增多趋势。装药质量从 1.0 kg 增加到 3.0 kg 时, 混凝土墩体残余高度减小了约 25%, 碎块数量增加了 2 倍。与顶面接触爆炸相比, 3.0 kg 质量的装药在侧面爆炸时墩体的残余高度更低, 碎块数量更多。

试验结果表明, 混凝土墩体在爆炸载荷冲击下会发生破碎, 其破碎程度受装药质量和装药放置位置的影响, 而毁伤后的混凝土的残余高度是衡量其障碍能力的重要指标之一, 也是军方提出的考核指标。当残余墩体较高时, 易导致登陆装备托底或履带打滑, 严重影响其战斗性能, 相比之下, 毁伤后残余墩体的碎块数量对其障碍能力的影响较小, 因此采用残余高度 η 表征接触爆炸作用下混凝土墩体的毁伤程度。 η 越小, 表示墩体破坏越严重, 残余墩体阻碍通行的能力越差。为了详细表征残余墩体的障碍能力, 将墩体的毁伤分为 3 级: 重度毁伤(S 级), $\eta \leq \beta_2 h$; 中度毁伤(M 级), $\beta_2 h < \eta \leq \beta_1 h$; 轻度毁伤(L 级), $\beta_1 h < \eta \leq \beta_0 h$; 其中, β_0 、 β_1 、 β_2 为表征混凝土墩体被毁伤程度的系数, 分别为 0.875、0.75 和 0.5; h 为混凝土墩体的原始高度。

土墩体高度(80.0 cm)。当 $\beta_2=0.5$ 时,得到判断混凝土墩体是否达到重度毁伤的临界残余高度,记为 $\eta_{(S)}=40.0$ cm;当 $\beta_1=0.75$ 时,得到判断混凝土墩体是否达到中度毁伤的临界残余高度,记为 $\eta_{(M)}=60.0$ cm;如果混凝土墩体的残余高度大于 70.0 cm,认为无毁伤(N级)。

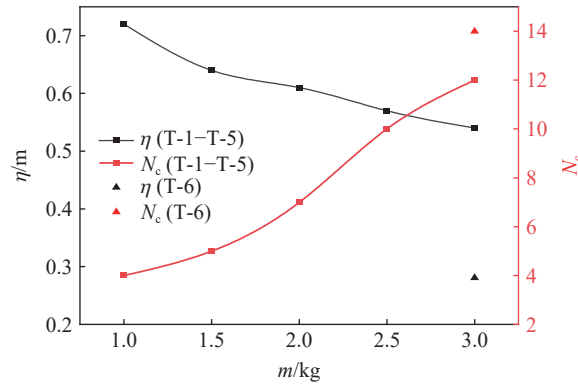


图 8 不同试验工况下装药质量与混凝土墩体的残余高度和碎块数量的关系

Fig. 8 The relationship between the charge mass and the broken residual height of the concrete obstacle and the number of its pieces

2 数值模拟和模型验证

为进一步研究柱形装药接触爆炸对混凝土墩体的破坏能力,在试验基础上,设计了 8 种质量的柱形装药,分别置于混凝土墩体顶面和侧面的不同位置作为数值计算工况。首先对表 1 的试验工况进行数值计算,并与试验结果进行对比,以校验数值计算模型及参数的准确性,然后用已验证的模型分析接触爆炸过程中墩体的响应及毁伤过程。数值计算中装药置于混凝土墩体顶面或侧面的典型位置如图 9 所示,当装药放置于 M、N、P 三点时,装药侧面与墩体顶面边界相切。

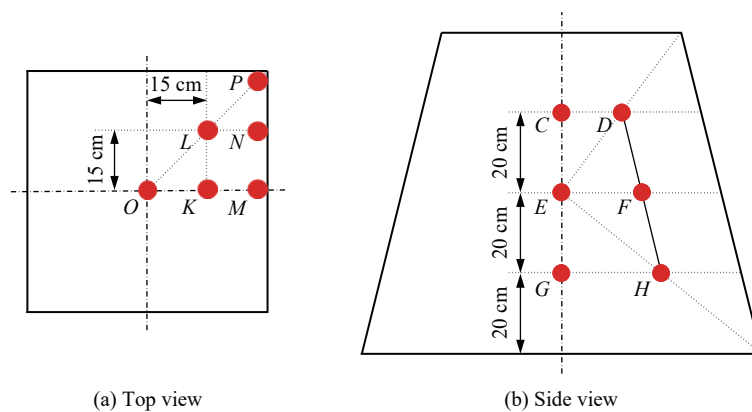


图 9 装药置于混凝土墩体顶面或侧面的典型位置

Fig. 9 The typical charge positions on the top or side surface of the concrete obstacle

2.1 有限元模型

利用 LS-DYNA 软件分别建立了不同质量的柱形装药置于混凝土墩体不同位置的数值模型,并根据具体工况采用对称建模以缩短计算时间。以装药置于墩体顶面中心为例,如图 10 所示,模型主要由柱形装药、空气、混凝土墩体和土介质组成。采用欧拉单元离散空气,采用拉格朗日单元离散土壤。当使用八节点拉格朗日网格描述混凝土材料的破坏过程时,由于网格属性的限制,混凝土材料的裂纹不能向任意方向扩展^[15],为此,本文中采用 SPH 粒子对混凝土墩体进行离散。混凝土墩体的 SPH 粒子密度设置为 1.5 mm,对爆炸区域附近的空气网格进行加密,加密后的空气网格尺寸为 1.0 mm,炸药的网格尺寸也

为 1.0 mm, 底部土介质的网格尺寸为 1.5 mm。对土介质侧面节点设置全约束条件以限制其位移, 在欧拉域边界和土介质底面设置无反射边界条件, 以避免应力波反射造成的计算误差。在对称界面设置对称约束以限制网格节点的旋转和位移。计算时采用 cm-g- μ s 单位制。

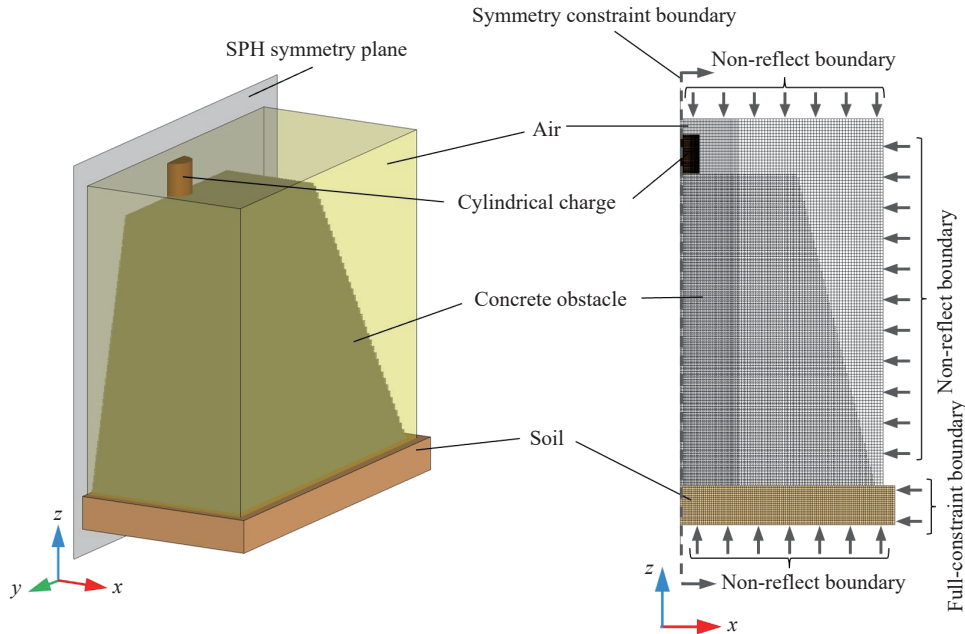


图 10 柱形装药和混凝土墩体接触爆炸过程的有限元模型

Fig. 10 The finite element model of contact explosion of cylindrical charge and concrete obstacle

2.2 材料模型及参数

采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL(Jones-Wilkins-Lee) 状态方程描述 B 炸药爆炸后爆轰产物的等熵膨胀过程。数值模拟中使用的炸药参数如表 2^[16] 所示。

采用 *MAT_NULL 材料模型和 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程描述空气, 数值模拟中使用的空气材料参数见表 3^[17], 其中 E_0 为单位体积的初始内能。

表 2 B 炸药材料参数^[16]

Table 2 The material parameters of composition B^[16]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.717	524	7.67	4.2	1.1	0.34

表 3 空气材料参数^[17]

Table 3 The material parameters of air^[17]

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_4	C_5	$E_0/(\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
1.29	0.4	0.4	2.5

选用 *MAT_RHT 模型模拟混凝土材料, 该方程考虑了动态载荷下混凝土的初始屈服强度、破坏强度和残余强度的变化规律, 能较准确地描述混凝土材料的崩落和断裂。混凝土模型中的状态方程、强度模型和失效模型的相关参数设置来源于文献 [18-19]。采用 *MAT_SOIL_AND_FOAM 泡沫模型描述混凝土底部的土介质, 具体参数设置参考了文献 [20]。

2.3 有限元模型及材料参数的试验验证

在表 1 中的试验工况下对混凝土墩体毁伤情况进行数值模拟, 计算结果如图 11~16 所示, 图中混凝土墩体的损伤值是墩体材料塑性应变的累计^[21], 当墩体材料断裂时, 其值为 1。由于 SPH 算法没有单元删除属性, 墩体破碎后, SPH 粒子因爆炸载荷作用而脱落并向四周抛散, 而脱落的 SPH 粒子不影响残余墩体的高度, 为便于观察残余墩体的毁伤形态并与试验结果进行对比, 对已脱落的 SPH 粒子进行隐藏。残余墩体毁伤形态的计算结果与试验结果的对比如图 11~16 所示。通过对比可知, 所使用的数值

计算模型能准确地模拟和反映混凝土墩体的破碎及裂纹扩展情况。试验和数值模拟得到的混凝土残余高度对比如表 4 所示。数值计算结果与试验结果的最大误差为-8.77%, 表明本文中建立的有限元模型和选取的相关材料模型参数能够准确地模拟柱形装药接触爆炸对混凝土墩体的破坏过程。

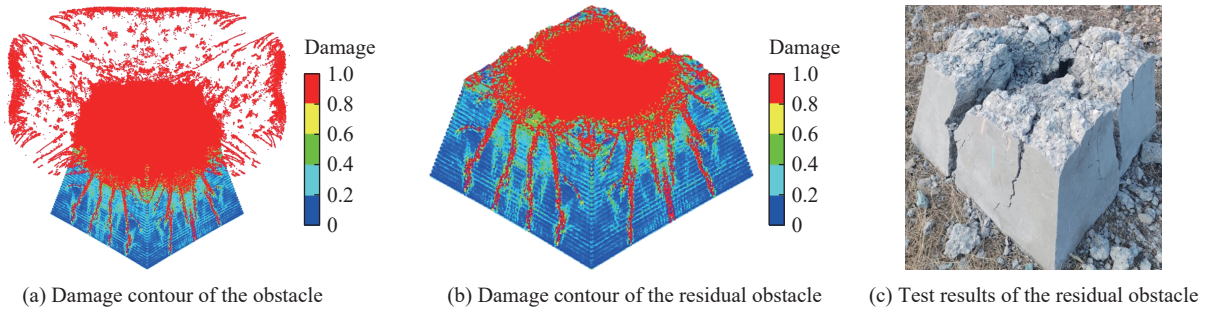


图 11 1.0 kg 装药顶面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of test and numerical results for obstacle under top contact explosion of 1.0 kg charge

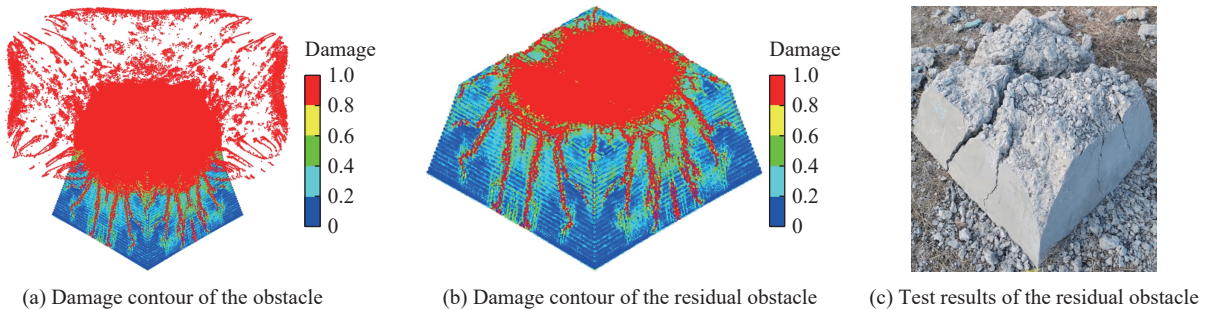


图 12 1.5 kg 装药顶面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 12 Comparison of test and numerical results for obstacle under top contact explosion of 1.5 kg charge

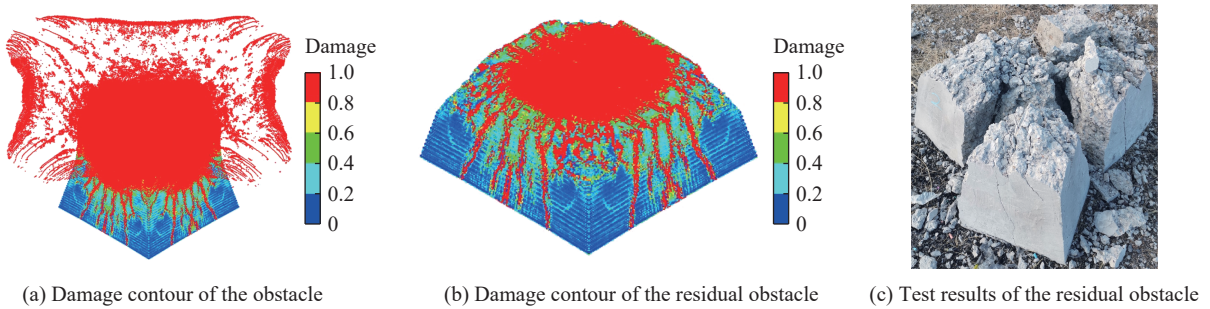


图 13 2.0 kg 装药顶面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of test and numerical results for obstacle under top contact explosion of 2.0 kg charge

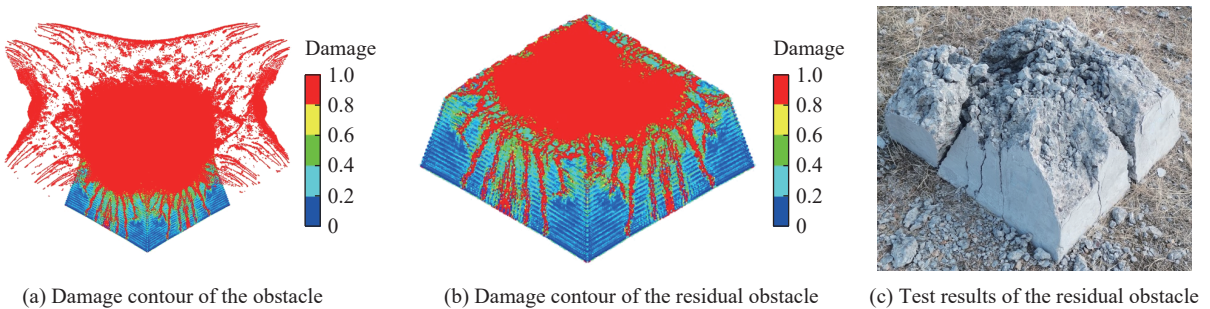


图 14 2.5 kg 装药顶面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of test and numerical results for obstacle under top contact explosion of 2.5 kg charge

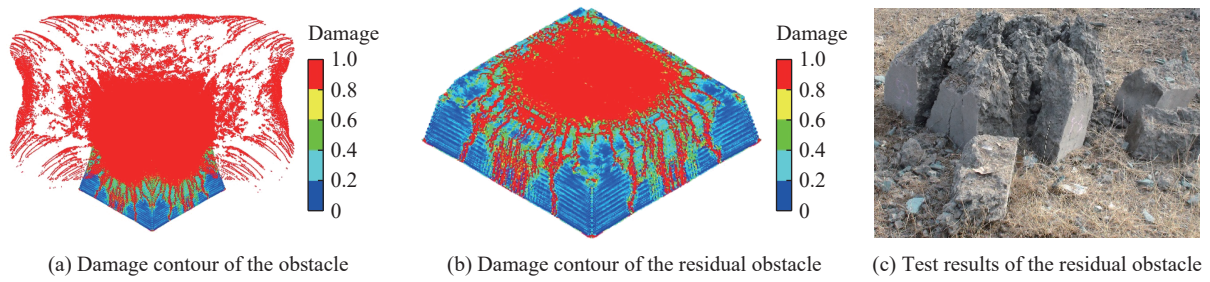


图 15 3.0 kg 装药顶面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 15 Comparison of test and numerical results for obstacle under top contact explosion of 3.0 kg charge

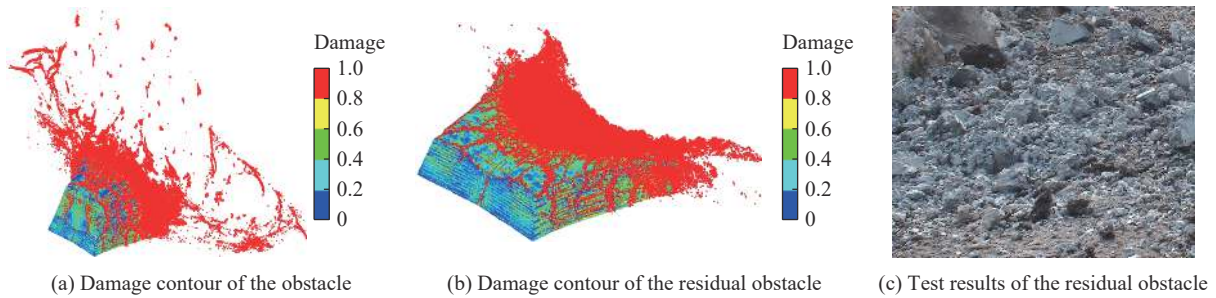


图 16 3.0 kg 装药侧面接触爆炸时试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 16 Comparison of test and numerical results for obstacle under side contact explosion of 3.0 kg charge

表 4 试验和数值模拟得到的混凝土残余高度对比

Table 4 The comparison of the residual height of concrete obstacle between numerical simulation and test

试验编号	残余高度/m		误差/%
	试验结果	模拟结果	
T-1	0.72	0.67	-6.94
T-2	0.64	0.65	1.56
T-3	0.61	0.62	1.64
T-4	0.57	0.52	-8.77
T-5	0.54	0.50	-7.41
T-6	0.27	0.26	-3.70

2.4 数值计算结果及毁伤过程分析

柱形装药在墩体顶面和侧面典型位置接触爆炸时墩体的残余高度及毁伤级别的数值计算结果分别如表 5~6 所示。不同工况下混凝土墩体残余高度的计算结果差异明显: 相较于顶面其他位置, 同质量的柱形装药置于顶面中心(点 O)爆炸时, 对墩体的毁伤程度最高; 而同质量的装药置于墩体侧面爆炸时, 点 G 对应的墩体毁伤最严重。

为揭示混凝土墩体在接触爆炸作用下的响应和毁伤机理, 分析了装药置于墩体顶面中心和侧面几何中心爆炸时, 墩体对称界面处的应力波传播过程和破坏过程, 如图 17~21 所示, 图中应力波的传播过程通过不同时刻的 von Mises 应力云图描述。

在柱形装药引爆后的初始阶段, 爆炸引起的应力波以球面压缩波的形式自墩体顶面中心向四周传播(图 17(a)~(b)), 由于此时的应力波峰值远大于墩体材料的动态抗压强度, 爆炸近区的墩体材料以近似流体的形式沿着应力波传播的方向扩张形成爆坑(图 18(a)~(b))。压缩波在水平方向上首先到达距离爆点较近的墩体侧面上侧, 并以拉伸波的形式发生反射, 由于此时的拉伸波强度大于墩体材料的动态抗拉强度, 诱发墩体侧面附近的材料断裂, 并使爆坑附近的墩体碎块向四周抛散(图 18(c)), 以上是爆炸近区

墩体严重破碎的主要原因。随后, 不断有压缩波到达墩体侧面并发生反射, 墩体侧面裂纹自墩体顶面向墩体底面扩展, 考虑到应力波在混凝土墩体中传播时的衰减, 侧面裂纹的密度也随之下降。在垂直方向上, 压缩波先到达墩体底面中心, 并以拉伸波的形式向上反射与上方的压缩波相互作用(图 17(c)~(d)), 导致部分裂纹向底面进一步扩展(图 18(d))。由于墩体的几何特性, 应力波传播到侧面下侧的时间相对较长, 使墩体下侧的裂纹扩展速度相对较慢。拉伸波经墩体底面和侧面反射后在墩体侧面和底面交界附近汇集, 形成一个拉伸波叠加区域(图 17(e)), 在拉伸波作用下墩体内部裂纹向侧面扩展(图 18(e))。

表 5 顶面典型位置接触爆炸时墩体残余高度数值计算结果

Table 5 Numerical simulation results of obstacle residual height under top contact explosion at typical position

装药质量/kg	残余高度/m					
	Point O	Point K	Point L	Point M	Point N	Point P
1.0	0.67	0.71	0.76	0.75	0.78	0.79
1.5	0.65	0.68	0.70	0.70	0.76	0.78
2.0	0.62	0.65	0.69	0.70	0.75	0.76
2.5	0.52	0.60	0.68	0.65	0.67	0.75
3.0	0.50	0.55	0.59	0.62	0.67	0.73
4.0	0.43	0.47	0.54	0.57	0.60	0.70
5.0	0.40	0.42	0.53	0.55	0.58	0.70
6.0	0.38	0.41	0.48	0.51	0.56	0.67

表 6 侧面典型位置接触爆炸时墩体残余高度数值计算结果

Table 6 Numerical simulation results of obstacle residual height under side contact explosion at typical position

装药质量/kg	残余高度/m					
	Point C	Point D	Point E	Point F	Point G	Point H
1.0	0.48	0.55	0.38	0.44	0.33	0.42
1.5	0.45	0.49	0.34	0.41	0.29	0.38
2.0	0.43	0.46	0.30	0.39	0.26	0.35
2.5	0.41	0.44	0.27	0.36	0.23	0.33
3.0	0.39	0.41	0.26	0.34	0.21	0.31
4.0	0.35	0.37	0.19	0.30	0.17	0.28
5.0	0.32	0.33	0.15	0.26	0.14	0.25
6.0	0.29	0.29	0.12	0.23	0.11	0.22

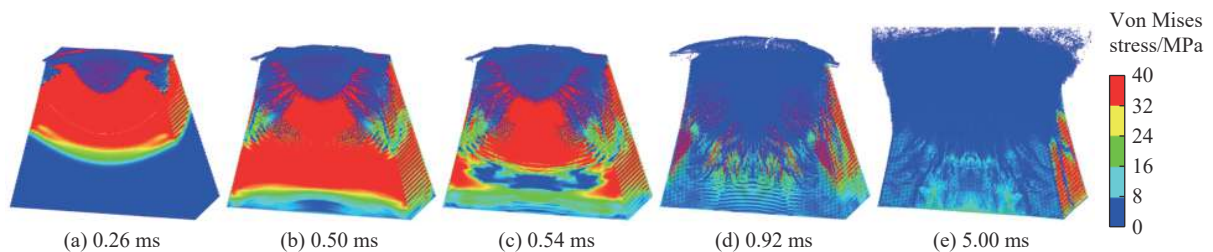


图 17 柱形装药在混凝土墩体顶面中心爆炸时墩体对称界面 von Mises 应力传播过程

Fig. 17 Development of von Mises stress on the concrete obstacle symmetrical interface when the cylindrical charge explodes at the center of the top surface

当装药置于墩体侧面几何中心处爆炸时, 同样在爆点近区形成爆坑(图 20(a)~(b)), 压缩波沿爆坑法线方向向四周传播(图 19(a)~(b))。压缩波传播至墩体顶面后经反射形成拉伸波(图 19(c)), 与顶面下

方的压缩波相互作用,使部分裂纹向上扩展(图 20(c))。当入射压缩波到达爆点对侧侧面时,经反射后由压缩波转变为拉伸波,该拉伸波和继续向左传播的压缩波相互叠加,导致部分裂纹向左扩展(图 20(d))。由于应力波传递至对侧侧面的距离相对较远,在爆炸的初始阶段,压缩波先到达墩体底面,经反射后形成拉伸波与上方的压缩波相互作用导致部分裂纹向下方扩展(图 20(e))。当入射波传播至爆点对侧侧面的下侧时,经反射形成拉伸波并与底面反射的拉伸波相互叠加形成应力叠加区域(图 19(d)~(e)),使该区域的墩体材料发生断裂。

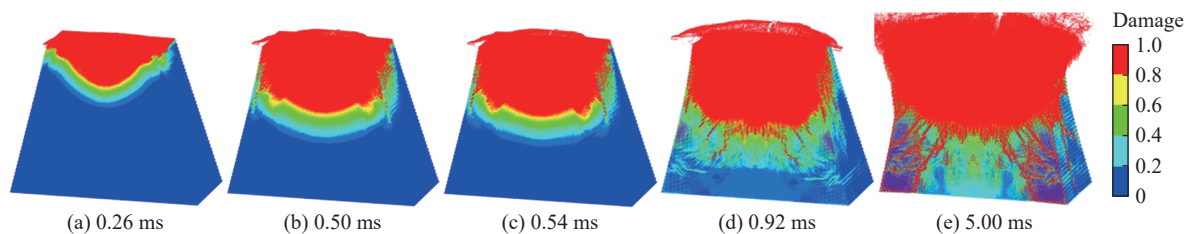


图 18 柱形装药在混凝土墩体顶面中心爆炸时墩体对称界面损伤过程

Fig. 18 Development of damage on the concrete obstacle symmetrical interface when the cylindrical charge explodes at the center of the top surface

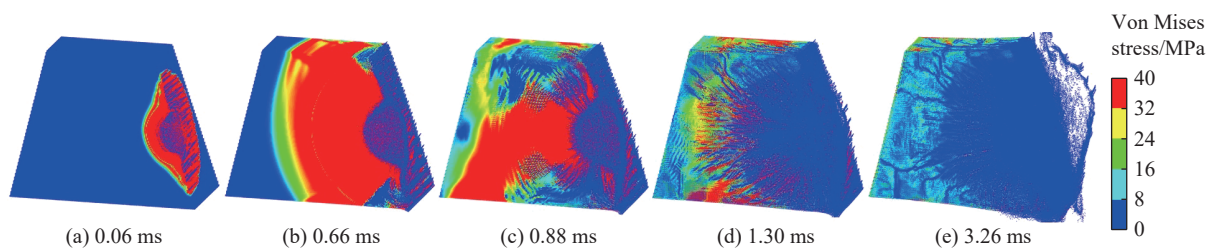


图 19 柱形装药在混凝土墩体侧面几何中心爆炸时墩体对称界面 von Mises 应力传播过程

Fig. 19 Development of von Mises stress on the symmetrical interface of the concrete obstacle when the cylindrical charge explodes at the geometrical center of the side surface

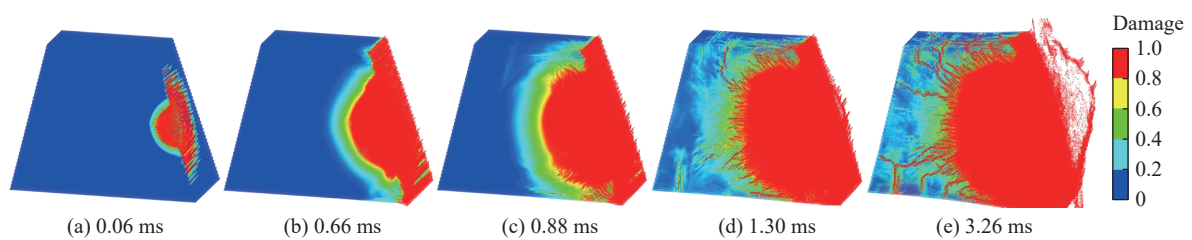


图 20 柱形装药在混凝土墩体侧面几何中心爆炸时墩体对称界面损伤过程

Fig. 20 Development of damage on the symmetrical interface of the concrete obstacle when the cylindrical charge explodes at the geometrical center of the side surface

3 混凝土墩体的易损性分析模型

3.1 不同作用位置处混凝土墩体的易损性

试验及数值计算结果表明,柱形装药的质量和放置位置均影响其对混凝土墩体的毁伤程度,由于数值计算及试验工况中柱形装药的放置位置是离散且有限的,为了表征柱形装药的具体放置位置,以墩体顶面为例,记柱形装药放置位置距混凝土墩体顶面中心的距离为 R ,相对中心的角度为 θ ,则装药放置位置由 (R, θ) 确定,如图 21 所示。基于试验和数值计算得到的混凝土残余高度数据,不同质量的炸药置于墩体不同位置处爆炸时,墩体的残余高度 $\eta(m, R, \theta)$ 可通过线性插值得到。

图 22(a)~(d) 分别为装药质量为 1.5、2.5、5.0 和 8.0 kg 的装药在墩体顶面不同位置爆炸时的等毁伤曲线, 反映了混凝土墩体在柱形装药接触爆炸作用下的易损特性。如图 22(c) 所示, 两条曲线将混凝土顶面划分为 3 个区域: 当质量为 5.0 kg 的柱形装药置于红色区域爆炸时, 可使墩体重度毁伤(S 级); 置于蓝色区域时, 可使墩体中度毁伤(M 级); 置于绿色区域时, 可使墩体轻度毁伤(L 级)。不同质量(1.5~8.0 kg)的柱形装药在混凝土墩体顶面爆炸时均形成了近似正方形的毁伤区域(图 22(a)~(d)), 毁伤区域中心与顶面中心重合, 其边界与顶面边界的夹角约为 45°。装药质量不同, 形成的毁伤区域的数量及对应的毁伤级别不同, 当装药质量为 1.5 kg (图 22(a))时, 墩体顶面形成轻度毁伤和无毁伤两个区域; 当装药质量增加至 2.5 kg(图 22(b))时, 墩体顶面形成中度毁伤、轻度毁伤和无毁伤 3 个区域; 当装药质量为 5.0 kg(图 22(c))时, 墩体顶面形成重度毁伤、中度毁伤和轻度毁伤 3 个毁伤区域; 当装药质量为 8.0 kg(图 22(d))时, 墩体顶面形成重度毁伤和

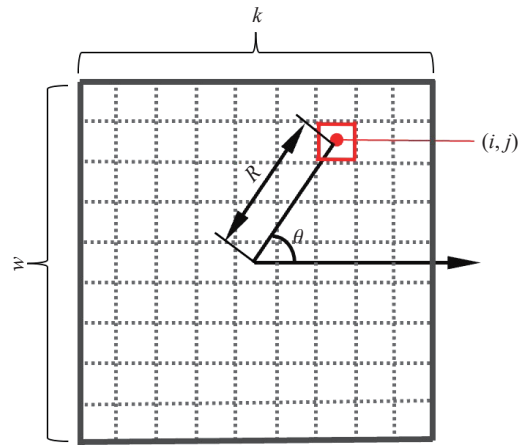


图 21 柱形装药放置位置及顶面网格划分示意图

Fig. 21 Schematic diagram of cylindrical charge position and grid division of the top surface

图 23(a)~(d) 为侧面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线, 不同质量的柱形装药在混凝土侧面爆炸时

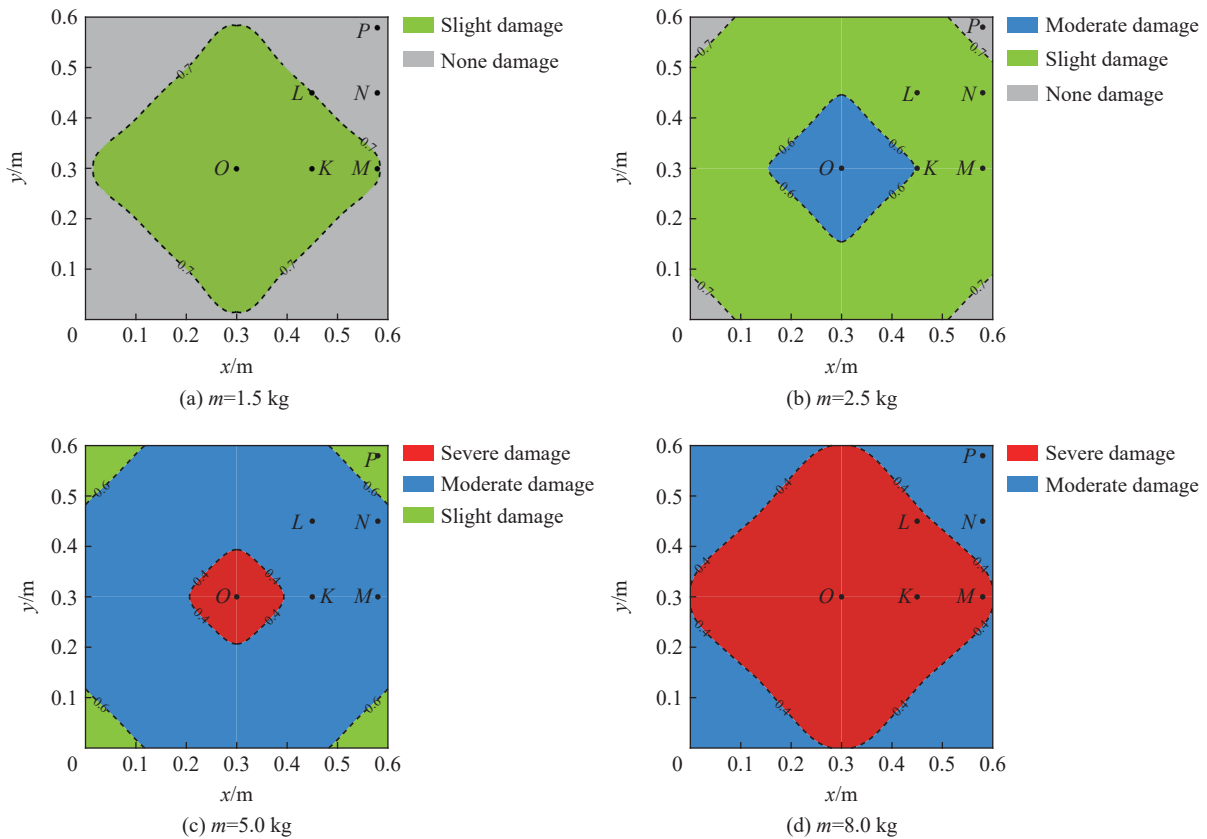


图 22 顶面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线

Fig. 22 Damage iso-curves of concrete obstacle under top contact explosion

同样形成了不同级别的毁伤区域, 毁伤区域的形状近似为圆角梯形, 其中心位于侧面几何中心下方约 10 cm 处, 随着装药质量的增加, 重度毁伤区域不断扩大。

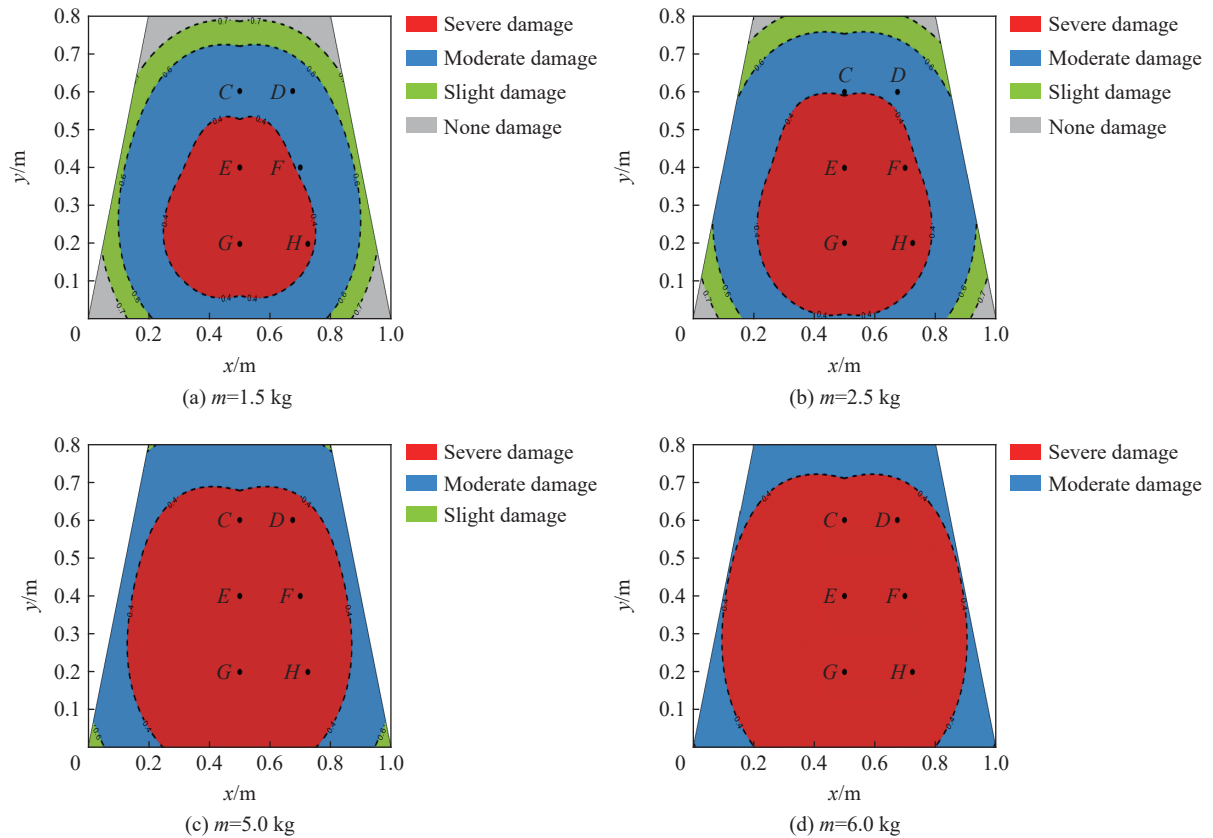


图 23 侧面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线

Fig. 23 Damage iso-curves of concrete obstacle under side contact explosion

3.2 混凝土墩体整体易损性评估

评估混凝土墩体在不同质量的装药置于顶面或侧面不同位置的易损特性时, 考虑了装药质量、装药放置位置等因素。而在实战使用中, 能够确定的因素只有投放的装药质量, 装药投放后其作用于墩体的位置具有随机性, 很难准确确定。采用不同装药质量对应的混凝土墩体等毁伤曲线图表征墩体的易损性, 在毁伤效能评估时不便于使用。因此, 为解决装药投放后其作用位置的随机性问题, 在上述方法的基础上, 采用易损面积表征混凝土墩体在不同质量装药作用下的整体易损性。假设质量为 m 的装药置于墩体顶面或侧面 (R, θ) 爆炸, 混凝土墩体的残余高度达到相应级别的毁伤时, 认为混凝土墩体的毁伤概率为 1, 否则为 0, 此时混凝土墩体不同级别的毁伤概率 $P^{(J)}(m, R, \theta)$ 为:

$$P^{(J)}(m, R, \theta) = \begin{cases} 0 & \eta(m, R, \theta) \geq \eta^{(J)} \\ 1 & \eta(m, R, \theta) < \eta^{(J)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为混凝土墩体的毁伤级别, 取为 L、M 和 S, 依次对应 L 级、M 级和 S 级毁伤; $\eta^{(J)}$ 为混凝土墩体对应 J 级毁伤的临界残余高度。

质量为 m 的装药放置于混凝土墩体顶面或侧面任意位置时的易损面积 $A_V^{(J)}(m)$ 可表示为:

$$A_V^{(J)}(m) = \iint P^{(J)}(m, R, \theta) ds = \iint P^{(J)}(m, R, \theta) R dR d\theta \quad (2)$$

由于 $P^{(J)}(m, R, \theta)$ 无解析解, 因此采用离散的方法计算易损面积 $A_V^{(J)}(m)$ 。以墩体顶面为例, 如图 21 所示, 将墩体顶面划分为 $k \times w$ 个网格单元, 分别计算当柱形装药置于网格 (i, j) 中心位置 (R, θ) 处爆炸时,

墩体不同级别毁伤的概率 $P^{(j)}(m, R, \theta)$ 。则混凝土墩体的易损面积为:

$$A_V^{(j)}(m) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^w P^{(j)}(m, R, \theta) \Delta A(i, j) \quad (3)$$

式中: $\Delta A(i, j)$ 为网格单元 (i, j) 的面积, k, w 分别为该面两个方向上划分的网格单元数目。

通过上述计算, 可以得到顶面接触爆炸作用下墩体不同级别毁伤的易损面积与装药质量之间的关系, 如图 24 所示。装药质量 $1.0 \text{ kg} \leq m < 4.17 \text{ kg}$ 时, 轻度毁伤的易损面积随着装药质量的增加先增大后减小; 装药质量 $m=2.23 \text{ kg}$ 时, 轻度毁伤的易损面积最大, 为 0.35 m^2 , 即该质量的装药最易使混凝土墩体轻度毁伤。装药质量 $2.02 \text{ kg} \leq m < 10.79 \text{ kg}$ 时, 中度毁伤的易损面积随着装药质量的增加先增大至最大值后保持不变再减小; 装药质量 $4.17 \text{ kg} \leq m < 5.1 \text{ kg}$ 时, 中度毁伤的易损面积最大且与墩体顶面的面积相等, 为 0.36 m^2 , 说明该质量范围内的装药置于墩体顶面任意位置均能使其中度毁伤。装药质量 $m \geq 5.1 \text{ kg}$ 时, 重度毁伤的易损面积先增大至最大值后保持不变; 当装药质量 $m=10.79 \text{ kg}$ 时, 重度毁伤的易损面积达到最大, 且等于墩体顶面面积, 为 0.36 m^2 , 即该质量装药置于混凝土墩体顶面任意位置爆炸均能使其重度毁伤。

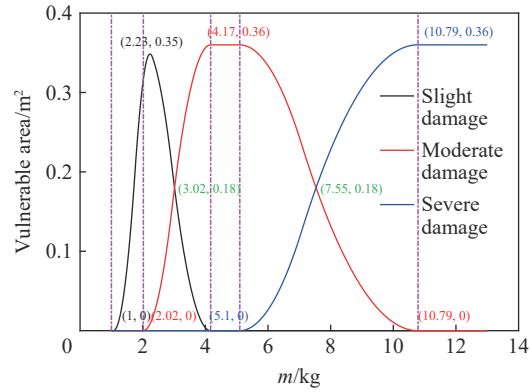


图 24 顶面接触爆炸作用下墩体的易损面积与装药质量之间的关系

Fig. 24 The relationship between the vulnerable area of concrete obstacle and the charge mass under top contact explosion

对于图 24 中轻、中和重度 3 个毁伤等级的易损面积与装药质量关系曲线的重叠部分, 当装药质量 $2.02 \text{ kg} \leq m < 4.17 \text{ kg}$ 时, 装药顶面爆炸可使墩体轻度或中度毁伤, 随着装药质量增加, 中度毁伤的易损面积逐渐增大, 而轻度毁伤的易损面积增至最大后逐渐减小, 表明该装药质量范围内, 装药质量越大, 越易导致墩体中度毁伤。当装药质量 $m=3.02 \text{ kg}$ 时, 轻度和中度毁伤易损面积相等, 且各占墩体顶面面积的一半 (0.18 m^2), 即该质量装药顶面爆炸时, 墩体出现轻度或中度毁伤的概率相等。装药质量 $5.1 \text{ kg} \leq m < 10.79 \text{ kg}$ 时, 装药顶面爆炸可使墩体中度或重度毁伤, 随装药质量增加, 重度毁伤易损面积增大, 而中度毁伤易损面积减小, 表明该装药质量范围内, 装药质量越大, 越易使墩体重度毁伤。当装药质量 $m=7.55 \text{ kg}$ 时, 中度和重度毁伤的易损面积相等, 均为 0.18 m^2 , 即该质量装药顶面爆炸时, 墩体出现中度或重度毁伤的概率相等。

按照同样的方法, 得到侧面接触爆炸作用下墩体不同毁伤级别的易损面积与装药质量的关系, 如图 25 所示, 装药在墩体侧面爆炸时, 随着装药质量的变化, 墩体轻、中、重度毁伤的易损面积变化规律与顶面爆炸时类似。当装药质量为 $0.75, 1.23$ 和 6.20 kg 时, 3 个毁伤级别的易损面积达到最大值, 分别为 $0.23, 0.49$ 和 0.64 m^2 。

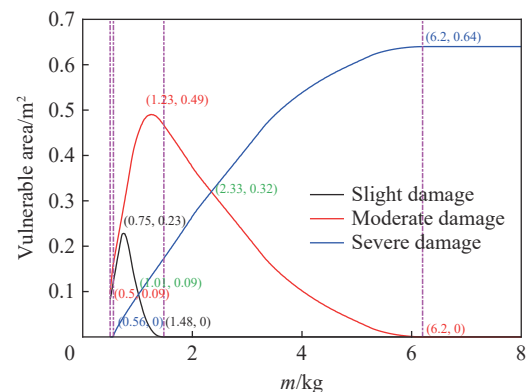


图 25 侧面接触爆炸作用下混凝土墩体的易损面积与装药质量之间的关系

Fig. 25 The relationship between the vulnerable area of concrete obstacle and the charge mass under side contact explosion

上面分别分析了装药置于混凝土墩体顶面和侧面爆炸时, 墩体的各级别毁伤的易损面积随装药质量的变化关系, 但并不便于比较顶面和侧面爆炸时墩体的易损性。因此, 在上面数据的基础上, 采用墩体重度毁伤易损面积占比 $R^{(S)}$ 表征装药在顶面和侧面爆炸时墩体的易损性差异:

$$R^{(s)} = \frac{A_V^{(s)}(m)}{A_P} \quad (4)$$

式中: A_P 为混凝土墩体顶面或侧面的面积。

通过式(4)计算,可以得到装药置于墩体顶面或侧面接触爆炸时墩体重度毁伤易损面积占比随装药质量的变化曲线,如图 26 所示。当 $0.5 \text{ kg} \leq m < 10.79 \text{ kg}$, 装药置于墩体顶面或墩体侧面爆炸时,墩体重度毁伤的易损面积占比均随着装药质量的增加而增大;与装药置于墩体顶面爆炸时相比,同质量的装药置于墩体侧面爆炸时墩体重度毁伤的易损面积占比更高,表明在该质量范围内的装药作用下,侧面接触爆炸时更易破坏混凝土墩体。

4 结 论

采用试验与数值模拟的方法研究了接触爆炸作用下混凝土墩体的易损性,提出了用等毁伤曲线和易损面积评估混凝土墩体易损性的方法,并建立了易损面积的计算模型,得到了接触爆炸作用下混凝土墩体顶面和侧面的毁伤区域特征及墩体不同毁伤级别的易损面积与装药质量之间的关系,主要结论如下。

(1)混凝土墩体顶面的毁伤区域形状近似为正方形,其中心与顶面中心重合;侧面的毁伤区域形状近似为圆角梯形,其中心位于侧面几何中心下方约 10 cm 处。

(2)顶面接触爆炸时,随着装药质量的增加,轻、中度毁伤的易损面积先增大后减小,最大值分别为 0.35 和 0.36 m^2 ;重度毁伤的易损面积先增大至最大值后保持不变,最大值为 0.36 m^2 。侧面接触爆炸时,3 个毁伤级别的易损面积随装药质量的变化规律与顶面接触爆炸时类似,最大易损面积分别为 0.23 、 0.49 和 0.64 m^2 。

(3)柱形装药(质量范围为 $0.5 \sim 10.79 \text{ kg}$)作用下,侧面接触爆炸时更易破坏混凝土墩体。

参考文献:

- [1] 张利, 钟世威, 肖艳文, 等. 爆炸成型弹丸侵彻轨条砦毁伤行为研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(7): 140–144. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.07.021.
ZHANG L, ZHONG S W, XIAO Y W, et al. Research on damage behavior of explosively formed projectiles penetrating rail stockade [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(7): 140–144. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.07.021.
- [2] 高源, 王树山, 梁振刚, 等. 破障火箭弹终点毁伤效能评估研究 [J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(12): 87–91. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2020.12.016.
GAO Y, WANG S S, LIANG Z G, et al. Evaluation of terminal damage effectiveness of concrete-piercing rocket projectile [J]. *Fire Control Command Control*, 2020, 45(12): 87–91. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2020.12.016.
- [3] GRISARO H Y, BENAMOU D, MITELMAN A. Field tests of fiber reinforced concrete slabs subjected to close-in and contact detonations of high explosives [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104136. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104136.
- [4] LI Z, LIU Y, YAN J B, et al. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 540–549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025.
- [5] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Experimental and numerical study of damage characteristics of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions [J]. *Marine Structures*, 2019, 66: 242–257. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.04.009.
- [6] LI J, WU C Q, HAO H. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 395–408. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.032.
- [7] REMENNIKOV A M, YOUSSEF J, NGO T D, et al. Breach diameter analysis of concrete panels subjected to contact charge

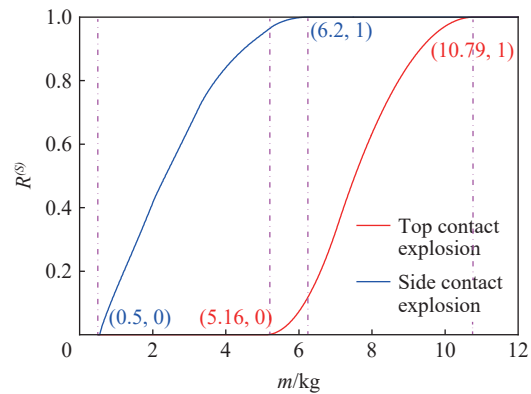


图 26 混凝土墩体重度毁伤易损面积占比与装药质量的关系

Fig. 26 The relationship between the severe damage area ratio of the concrete obstacle and the charge mass

- detonations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 95–109. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.011.
- [8] 岳松林, 王明洋, 张宁, 等. 混凝土板在接触爆炸作用下的震塌和贯穿临界厚度计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
YUE S L, WANG M Y, ZHANG N, et al. A method for calculating critical spalling and perforating thicknesses of concrete slabs subjected to contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- [9] 张强, 余曜, 迟德建, 等. 柱形装药接触爆炸条件下对钢筋混凝土板的毁伤规律研究 [J]. *空天防御*, 2020, 3(2): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4641.2020.02.003.
ZHANG Q, YU Y, CHI D J, et al. Study on the damage effect of cylindrical charge on reinforced concrete slabs [J]. *Air & Space Defense*, 2020, 3(2): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4641.2020.02.003.
- [10] 郝礼楷, 顾文彬, 邹绍昕, 等. 空气中集团装药对混凝土墩接触爆炸毁伤研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(5): 97–102. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.05.016.
HAO L K, GU W B, ZOU S X, et al. Damage study of concrete obstacle caused by air contact explosion of group charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(5): 97–102. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.05.016.
- [11] 刘路. 不同防护方式下钢筋混凝土墩柱的抗爆性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016: 46–49. DOI: 10.7666/d.Y3143068.
LIU L. Experimental study of differently protective RC pipers under blast loading [D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 46–49. DOI: 10.7666/d.Y3143068.
- [12] DUA A, BRAIMAH A, KUMAR M. Experimental and numerical investigation of rectangular reinforced concrete columns under contact explosion effects [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 109891. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109891.
- [13] 赵跃堂, 胡康, 刘绍臻, 等. 混凝土结构接缝处接触爆炸成坑效应研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(14): 245–251. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.14.032.
ZHAO Y T, HU K, LIU S L, et al. Cratering effect for a contact explosion at the joint of concrete structures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(14): 245–251. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.14.032.
- [14] 柳锦春, 方秦, 张亚栋, 等. 爆炸荷载作用下内衬钢板的混凝土组合结构的局部效应分析 [J]. *兵工学报*, 2004, 25(6): 773–776. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.027.
LIU J C, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Analysis of local effects on steel-backed concrete composite structures under blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 773–776. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.027.
- [15] 许庆新. 基于 SPH 方法的冲击动力学若干问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 80–81.
XU Q X. Study of some impact dynamics problems based on smoothed particle hydrodynamics method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 80–81.
- [16] ŻOCHOWSKI P, WARCHOŁ R, MISZCZAK M, et al. Experimental and numerical study on the PG-7VM warhead performance against high-hardness armor steel [J]. *Materials*, 2021, 14(11): 3020. DOI: 10.3390/ma14113020.
- [17] 杨程风, 闫俊伯, 刘彦, 等. 接触爆炸荷载下波纹钢加固钢筋混凝土板毁伤特征分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(5): 453–462. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.108.
YANG C F, YAN J B, LIU Y, et al. Damage characteristics of corrugated steel concrete slab under contact explosion load [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(5): 453–462. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.108.
- [18] LI Q, WANG G H, LU W B, et al. Failure modes and effect analysis of concrete gravity dams subjected to underwater contact explosion considering the hydrostatic pressure [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 85: 62–76. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.12.008.
- [19] TU Z G, LU Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 132–146. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.12.010.
- [20] 胡嘉辉, 吴昊, 方秦. 近区爆炸作用下砌体填充墙损伤破坏与动态响应的数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(9): 1–11. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.09.001.
HU J H, WU H, FANG Q. Numerical simulation of damage and dynamic response of masonry infilled wall under near zone explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(9): 1–11. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.09.001.
- [21] BORRVALL T, RIEDEL W. The RHT concrete model in LS-DYNA [C]//Proceedings of the 8th European LS-DYNA User Conference. Strasbourg, France, 2011.

(责任编辑 曾月蓉)