



混凝土墩接触爆炸毁伤研究

李先成¹, 杜忠华^{1,2*}, 胡汪洋¹, 徐立志², 郑贺龄¹, 王展翔², 李欣田², 王 猛¹

(1.沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 210100; 2.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为评估不同药量的矩形装药在混凝土墩体表面爆炸对墩体的毁伤效果,通过仿真对墩体的毁伤特性展开深入的探究,采用等毁伤曲线评估毁伤效果,阐明了混凝土墩体在冲击波作用后顶面位置、侧面位置和侧棱位置的毁伤特性,得到装药质量和装药放置位置对墩体毁伤效果的影响。构建易损性体积的函数模型,得到不同位置的毁伤情况,以及墩体剩余体积随装药质量的变化曲线,在此基础上比较了不同药量的矩形装药在混凝土墩体上 8 个不同位置接触爆炸时墩体的易损性差异,研究了爆炸后产生的大量碎块数量和最大碎块体积。研究结果表明:混凝土墩体顶面与侧面呈现出的毁伤区域形状大体为圆形,且该圆形中心和顶面中心处于重合状态;侧棱的毁伤区域形态接近椭圆形;装药在顶面、侧面和侧棱区域接触爆炸时,中心位置的毁伤效果最佳;当装药质量为 1~3 kg 时,炸药在混凝土墩体顶面几何中心位置爆炸的毁伤效果最佳;当装药质量大于 3 kg 时,在侧面几何中心位置爆炸的毁伤效果最好。

关键词:矩形装药;混凝土墩体;接触爆炸;易损性;数值模拟

中图分类号:TJ410.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)01-0093-11

Study on Contact Explosion Damage of Concrete Pier

LI Xiancheng¹, DU Zhonghua^{1,2*}, HU Wangyang¹, XU Lizhi², ZHENG Heling¹,

WANG Zhanxuan², LI Xintian², WANG Meng¹

(1.School of Equipment Engineering, Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 210100, China;

2.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to evaluate the damage effect of block charges with different masses on the surface of concrete pier body, the damage characteristics of the concrete pier under the action of contact explosion were studied by numerical simulation, and the damage effect of the concrete pier body was evaluated by the equal damage curve, and the characteristics of the damage area of the top surface, side and side edge of the pier body under the action of contact explosion were obtained, and then the influence of charge quality and placement position on the damage effect of pier body was revealed. By establishing the calculation model of vulnerable volume, the variation curves of the remaining volume of concrete pier body with the charge mass under the action of contact explosion on the top surface, side and side edge were obtained. On this basis, the block charge with different masses was compared in 8 different positions on the concrete pier body during contact explosion, and the number of large fragments and the maximum fragment volume after the explosion were studied. The result shows that the shape of the damage area on the top surface and side of the concrete pier is approximately circular, and its center coincides with the

收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(12202207);中国博士后科学基金面上项目(2022M711623);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20220968);冲击与安全工程教育重点实验室(宁波大学)开放基金(CJ202201);工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金(22kfkg03)

*通信作者邮箱:duzhonghua@aliyun.com。

center of the top surface. The shape of the damage area on the side edge is approximately elliptical. When the charge explodes in contact with the top surface, side and side edges, the damage effect at the center position is the best. When the charge mass is 1–3 kg, the damage effect of the explosive exploding at the geometric center of the top surface of concrete pier is the best. When the charge mass is greater than 3 kg, the damage effect of the explosion at the side geometric center is the best.

Key words: block charge; concrete pier; contact explosion; vulnerability; numerical simulation

混凝土墩是一种墩式防御堡垒,通常设置在沿海易于登陆的沙滩地带,由钢轨或工字钢桩柱构成,主要作用是拦阻中小型登陆设备,同时也能够破坏登陆设备的底部。混凝土墩包括基座和桩柱两部分,基座一般为钢筋混凝土结构,底部边长 0.8~1.2 m,顶部边长 0.6~0.8 m,高度 0.6~0.8 m。桩柱采用钢轨或工字钢,长度约 2.5 m,露出基座约 2 m,顶端尖锐。一根桩柱放置为独角防御堡垒,朝海外 45°角,总质量约 1 t。三根桩柱分布于 3 个方向,称为三角砦。

针对混凝土的爆炸毁伤特性,国内外学者进行了大量的研究。鲍小恒等^[1]提出了一种新型的设计思路,用于破坏混凝土墩障碍物上的炸弹。SHI 等^[2]进行了钢筋混凝土板在不同药量时的近爆试验,探究碎块质量以及大小的分布规律。王瑞臣等^[3]从实验结果和理论两个方面对不同龄段的混凝土进行了深入分析,得出混凝土强度和受震时龄期与爆破产生的震动有一定的关系。马世鑫等^[4]研究装药在混凝土墩体表面爆炸对墩体的毁伤效果。李必红^[5]针对 EFP 装药技术在破碎混凝土墩体中的应用,研究得出了毁伤混凝土墩体的主要 EFP 装药结构参数。BELYTSCHKO 等^[6]模拟了弹塑性介质内裂纹扩展状况,数值模拟结果与试验结果相吻合。DUA 等^[7]探究冲击波作用下混凝土柱横截面宽度的变化规律。LI 等^[8]针对不同抗拉强度的混凝土板进行毁伤试验,剖析其抗爆性能。杜闯等^[9]对混凝土主要的 3 种动态本构模型(HJC、RHT、K&C)进行分析。雷永智等^[10]研究 CFRP 加固钢筋混凝土柱的抗爆特性。汪剑辉等^[11]利用 HJC 模型研究了混凝土梁在接触爆炸下的抗爆性能。

本文以提高炸药接触爆炸混凝土墩的毁伤效能为研究目标,建立三维数值计算模型,分析混凝土墩爆炸的破坏特征,验证所建数值计算模型的正确性。炸药置于混凝土墩体上不同位置对墩体毁伤能力也

是不同的,因此将炸药置于混凝土墩顶面中心位置、顶面左上方位置、侧面中心位置、侧面左上方位置、侧面左下方位置、侧棱上方位置、侧棱下方位置、棱中间位置,进行模拟仿真,并对比结果,分析规律,得出最佳毁伤位置。

1 数值计算模型和参数

1.1 三维数值建模

在数值模拟之前,首先建立对应工况的三维模型,混凝土墩顶面中间位置采用 1/4 模型建模,混凝土墩侧面中间位置采用 1/2 模型建模,剩余的工况都采用全模型建模。

图 1 为炸药在混凝土墩体顶面中心位置的工况,采用 SolidWorks 建立的 1/4 模型,总体为墩体、装药、空气和地面四部分组成。

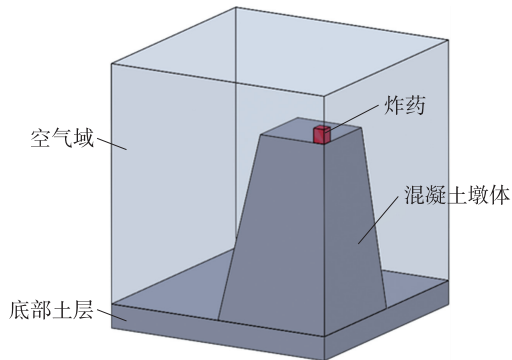


图 1 1/4 模型三维示意图

Fig.1 3D illustration of the 1/4 model

墩体的基座为四棱台形状,其尺寸上表面为 600 mm×600 mm,下表面为 1 000 mm×1 000 mm,高为 800 mm。装药为矩形 TNT 炸药,且置于混凝土墩上方中间位置,不设置起爆点,该起爆方式为全局起爆。空气域尺寸大小为 2 000 mm×2 000 mm×1 000 mm,土层厚度为 100 mm。计算剩余工况需要用到半模型和全模型时,只需要在 Ls-PrePost 中采用模型对称,并且共节点。其他工况如图 2 所示,顶面中心位置、顶面左上方位置、侧面左上方位置、

侧面中间位置、侧面左下方位置、棱上方位置、棱中间位置、棱下方位置依次对应的编号为 1~8,图 3 为全部工况具体位置图。

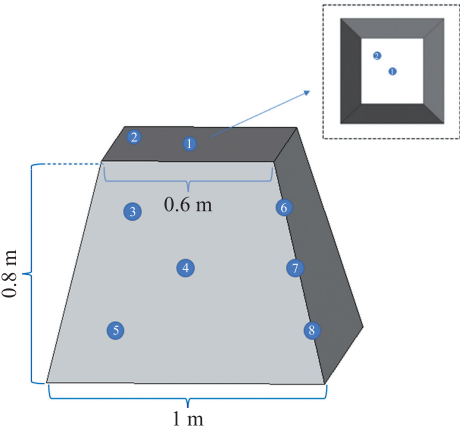


图 2 全部工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of all working conditions

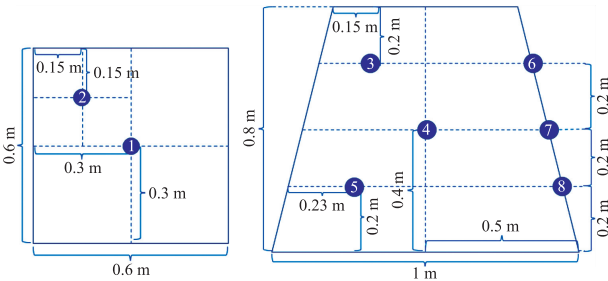


图 3 全部工况具体位置

Fig. 3 The specific location of all working conditions

在 1/4 模型、半模型与全模型里均运用六面体单元,墩体及土层以拉格朗日算法计算,炸药和空气则用 ALE 算法处理。炸药于空气域中以填充形式存在。在 1/4 模型与半模型对称面设对称约束,给空气和土层施透射边界条件,以此模拟土层与空气无限域,防止压力于边界反射而干扰计算结果。计算采用 cm-g-us 单位制。

1.2 材料本构模型

在仿真时,借助关键字 * MAT _ HIGH _ EXPLOSIVE_BURN 与 JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程对 TNT 炸药予以描述。炸药参数如表 1 所示。表中, E_0 为初始相对体积, w 为状态方程系数, v_D 为爆轰速度, p 为爆轰压力。其中对炸药的爆轰产物采用 JWL 方程^[12],其一般形式为

$$p=A\left(1-\frac{w}{R_1V}\right)\exp(-R_1V)+B\left(1-\frac{w}{R_2V}\right)\times\exp(-R_2V)+\frac{wE}{V}$$

式中: p 为爆轰压力; V 为体积; E 为爆轰过程中所产生能量的密度; A,B,R_1,R_2,ω 均为常数。

表 1 TNT 炸药材料参数

Table 1 Material parameters of the TNT explosive				
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_0	A/MPa	B/MPa	R_1
1 630	0.060	3.712	0.037	4.15
R_2	w	$v_D/(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	p/MPa	—
0.90	0.35	0.673	0.210	—

表 2 中的数据能够准确表述空气模型。表中, C_0,C_4,C_5 为多项式方程系数。采用 * MAT_NULL 材料模型描述混凝土墩体,混凝土墩体材料参数见表 3。表中, S 为弹性剪切模量, F_c 为抗压强度, F_T 为相对抗拉强度, F_s 为相对剪切强度, A 和 N 为失效表面参数, D_1 和 D_2 为破坏参数。

表 2 空气材料模型

Table 2 Air material model				
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_4	C_5	$E/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
1.25	-1×10^{-6}	0.4	0.4	2.5×10^{-6}

表 3 混凝土墩体材料模型

Table 3 Concrete material model				
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	S/Mbar	F_c/Mbar	F_T	F_s
2.3	0.167	4.0×10^{-4}	0.1	0.18
A	N	D_1	D_2	—
1.6	0.61	0.04	0.1	—

2 数值模拟

2.1 TNT 炸药模型参数的验证

2.1.1 仿真工况

在无限空气域内,仿真计算不同 TNT 当量(1 kg,2 kg,3 kg)且在不同距离(1 m,2 m,3 m,4 m)位置处的冲击波超压峰值。

2.1.2 建立有限元模型

炸药为球形装药,置于空气对称边界中间位置,以 1 kg TNT 炸药置于空气中间为例,如图 4 所示,模型由炸药和空气两部分组成。空气为 12 m×12 m×6 m 的正方体模型,空气的网格尺寸为 50 mm,由于炸药受到网格尺寸的限制,采用的是填充的方式。在距离炸药 1 m、2 m、3 m 和 4 m 处设置观测点,以便准确观测到峰值的变化。计算采用 cm-g-us 单位制。

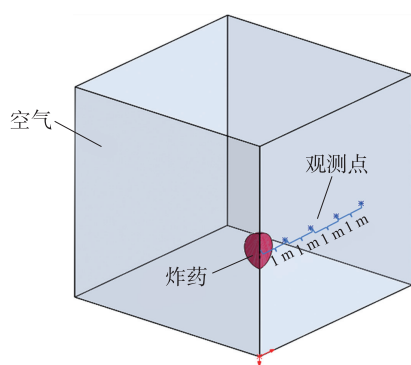


图 4 球形装药在无限空气域中爆炸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the explosion of spherical charge in infinite air domain

2.1.3 理论公式的计算

对于不同当量的 TNT 炸药在无限空气域中爆炸,许多学者在理论与试验相结合的情况下,对冲击波超压峰值提出了不同的经验公式。

王儒策等^[13]根据原子爆炸的经验装药,提出在无限空气介质中爆炸的超压公式:

$$p_m = \frac{0.082}{\bar{r}} + \frac{0.26}{\bar{r}^2} + \frac{0.69}{\bar{r}^3}$$

我国国防工程设计规范(草案)中规定的空爆冲击波超压公式^[14]为

$$p_m = \frac{0.084}{\bar{r}} + \frac{0.27}{\bar{r}^2} + \frac{0.7}{\bar{r}^3}$$

HENRYCH^[15]在 1979 年提出的计算超压峰值的计算公式为

$$p_m = \begin{cases} \frac{1.40717}{\bar{r}} + \frac{0.55397}{\bar{r}^2} - \frac{0.03572}{\bar{r}^3} + \frac{0.000625}{\bar{r}^4} & 0.05 \leq \bar{r} < 0.3 \\ \frac{0.61938}{\bar{r}} - \frac{0.03262}{\bar{r}^2} + \frac{0.21324}{\bar{r}^3} & 0.3 \leq \bar{r} \leq 1 \\ \frac{0.0662}{\bar{r}} + \frac{0.405}{\bar{r}^2} + \frac{0.3288}{\bar{r}^3} & 1 < \bar{r} \leq 10 \end{cases}$$

式中: $\bar{r} = r/\omega^{1/3}$, r 为距离; ω 为装药质量。

2.1.4 理论与仿真冲击波超压值比较

不同药量(1 kg, 2 kg, 3 kg) TNT 炸药理论与仿真冲击波超压值比较如图 5~图 7 所示。采用数值模拟和理论计算相结合的方法,得出不同质量、不同距离的 TNT 爆炸的冲击波超压峰值,最后数值模拟和理论计算得出的结论较为相近,所以仿真模型较为准确。

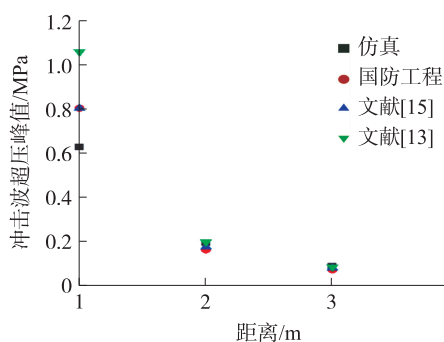


图 5 1 kg TNT 炸药下理论与仿真冲击波超压值比较

Fig. 5 Comparison of theory and simulated overpressure-value of shock-wave under 1 kg TNT explosive

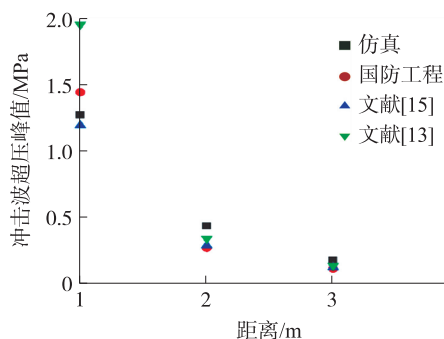


图 6 2 kg TNT 炸药下理论与仿真冲击波超压值比较

Fig. 6 Comparison of theory and simulated overpressure-value of shock wave under 2 kg TNT explosive

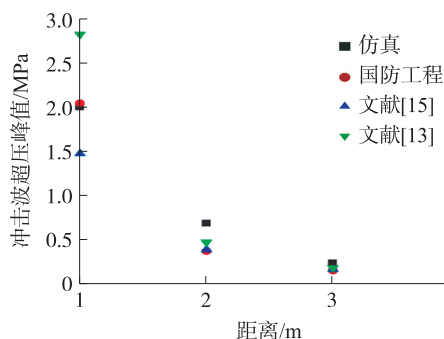


图 7 3 kg TNT 炸药下理论与仿真冲击波超压值比较

Fig. 7 Comparison of theory and simulated overpressure-value of shock wave under 3 kg TNT explosive

2.2 数值计算模型的有效验证

为了验证混凝土参数的正确性,采用 1 kg 炸药在混凝土墩体的顶面几何中心位置爆炸,对比了数值模拟结果与试验数值。炸药爆炸之后,由于冲击波的作用,混凝土墩体呈现四周低中间高的状态。混凝土墩体中心的最大高度为 0.7 m,4 个侧面剩余高度均较墩体中心最大高度低约 0.2 m,各侧面爆炸后高度依次为 0.46 m, 0.47 m, 0.54 m, 0.52 m, 相关

数据记录见表 4。图 8 为面 1~面 4 位置图。

表 4 试验与数值仿真结果

Table 4	Test and numerical simulation results				
	面 1	面 2	面 3	面 4	顶面
高度试验值/m	0.46	0.47	0.54	0.52	0.70
高度仿真值/m	0.49	0.50	0.49	0.50	0.65
误差/%	6.5	6.3	9.2	3.8	7.1

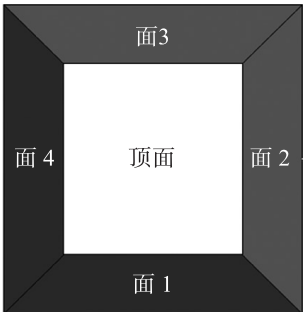


图 8 面 1~面 4 的位置图

Fig. 8 Face 1-4 position diagram

图 9 为墩体毁伤结果示意图,图 9(c)和图 9(d)为文献[16]的试验图片。如图 9 和表 4 所示,在面对诸多不确定因素时,通过仿真与试验相结合的方式,并对结果进行分析,误差均小于 10%,仿真结果与试验吻合较好。表明数值计算模型能够作出合理预测,此模型正确且有效。

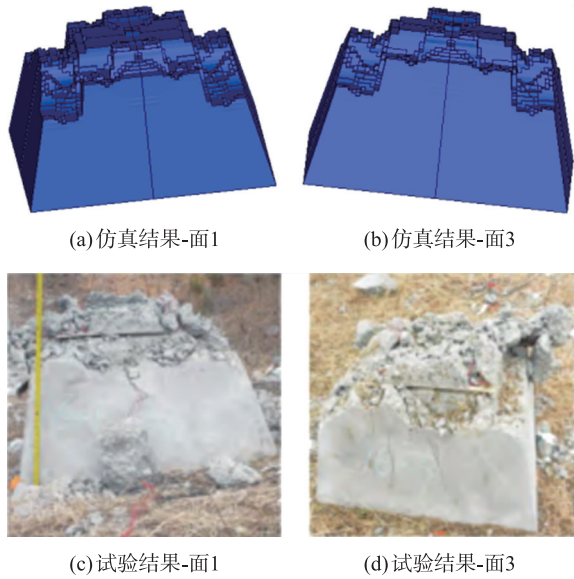


图 9 墩体毁伤结果示意图

Fig. 9 Schematic of damage results diagram of pier body

2.3 混凝土墩体的数值模拟结果及分析

开展了不同质量(1 kg,2 kg,3 kg,6 kg, 10 kg)装药接触爆炸对混凝土墩体 8 个位置(顶面中间位

置、顶面左上方位置、侧面中间位置、侧面左上方位置、侧面左下方位置、棱上方位置、棱下方位置、棱中间位置)毁伤的数值模拟仿真。图 10~图 17 为不同质量装药置于混凝土墩体 8 个位置的毁伤情况。

图 10 和 11 所示为矩形装药正上方位置接触爆炸,墩体顶面破碎较为严重,剩余墩体上无裂纹,且没有发生倾倒或移位。顶面中心位置的爆炸毁伤比顶面左上方位置的要严重,顶面左上方位置的剩余墩体仍保持较完整的形态,毁伤后的最大高度几乎与毁伤前一致。

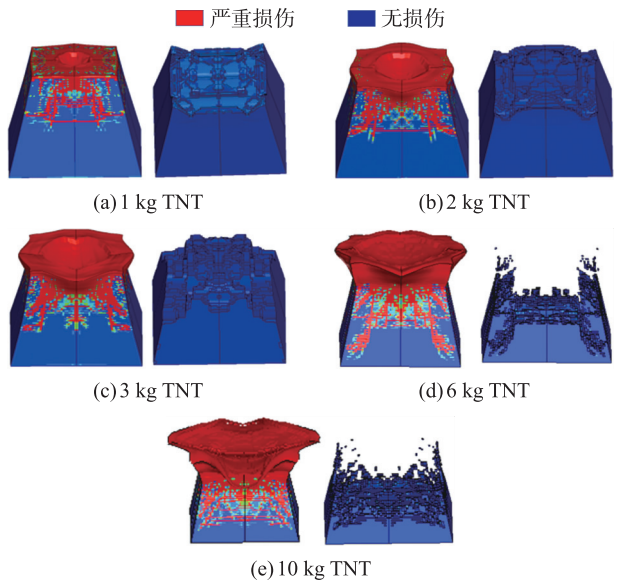


图 10 正上方中心位置接触爆炸

Fig. 10 Contact explosion in center position

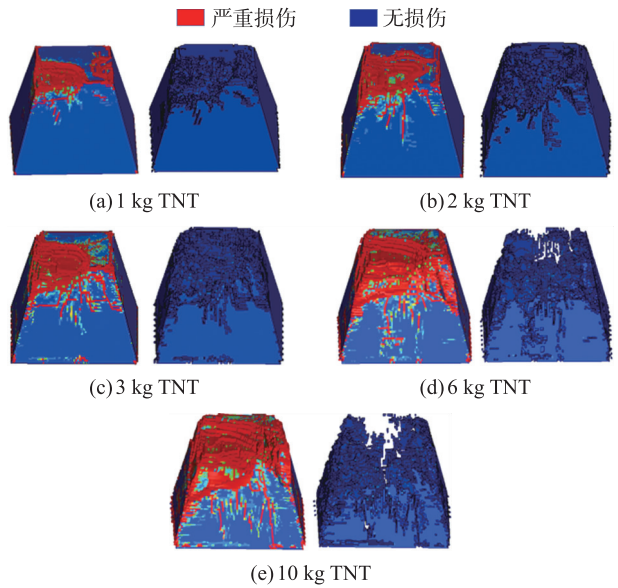


图 11 正上方左上角位置接触爆炸

Fig. 11 Contact explosion in the left upper position

图 12~图 14 所示为矩形装药在墩体侧面位置接触爆炸。在墩体侧面中心位置接触爆炸,墩体侧面损伤较为严重,残余墩体侧面几乎全部破碎,有裂纹贯穿墩体。侧面中心有明显的凹陷;在侧面左上方位置和侧面左下方位置接触爆炸毁伤程度比侧面中心位置轻,墩体顶面没有受到太大的影响,剩余墩体保持较为完整。

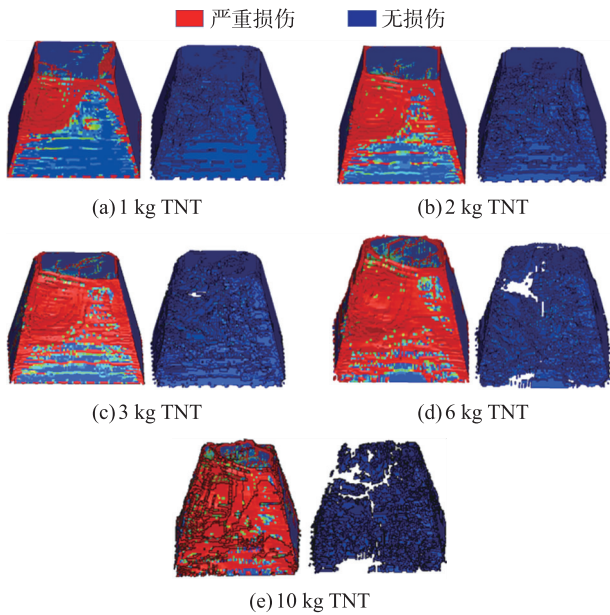


图 12 侧面中心位置接触爆炸

Fig. 12 Contact explosion in side center position

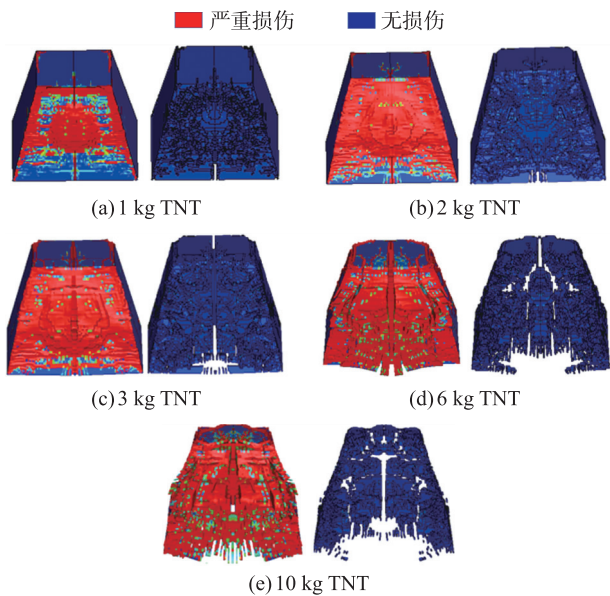


图 13 侧面左上方位置接触爆炸

Fig. 13 Contact explosion in side left upper position

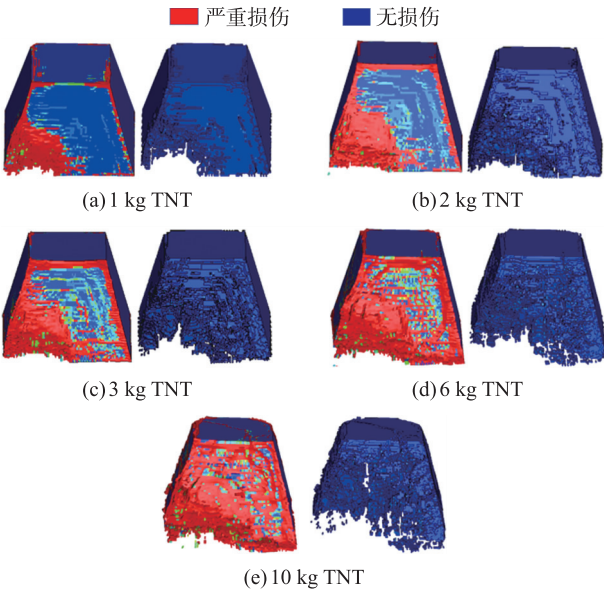


图 14 侧面左下方位置接触爆炸

Fig. 14 Contact explosion in side left lower position

图 15~图 17 所示为矩形装药在墩体侧棱位置接触爆炸。当矩形装药在棱上方位置接触爆炸时,棱上方有轻微损伤,相邻的两个面不同程度损伤,墩体的顶面并未受到爆轰波的影响,无裂纹贯穿墩体,剩余墩体仍保持较完整的形态;1 kg,2 kg,3 kg,6 kg 和 10 kg 装药情况下棱下方位置接触爆炸,棱下方位置损伤比较严重,形成一个粉碎区域,相邻的两个面只有轻微的毁伤,墩体的顶面并未受到爆轰波的影响,无裂纹贯穿墩体,剩余墩体仍保持较完整的形态;矩形装药棱在中间位置接触爆炸,棱中间位置以及棱下方位置都会有毁伤,相邻的一个面有一半区域被破坏,另一个面有轻微的损伤。

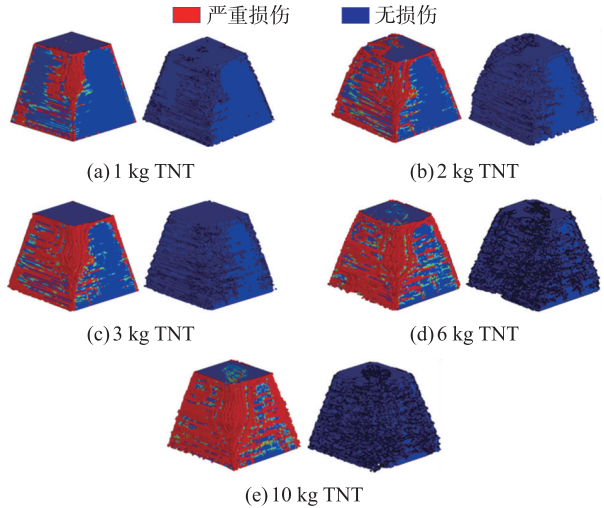


图 15 棱上方位置接触爆炸

Fig. 15 Contact explosion above the edge

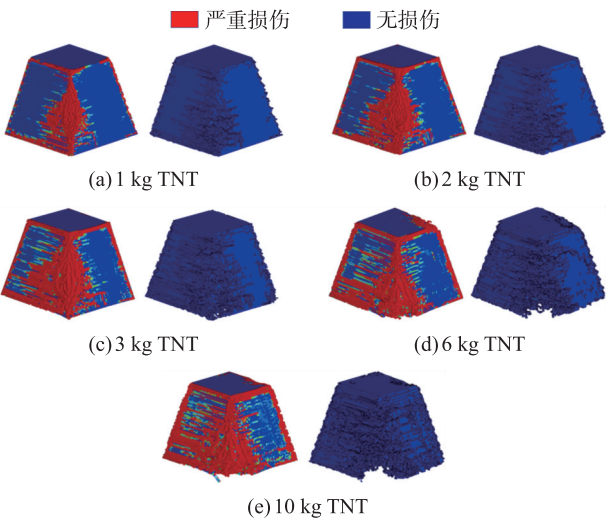


图 16 棱下方位置接触爆炸

Fig. 16 Contact explosion below the edge

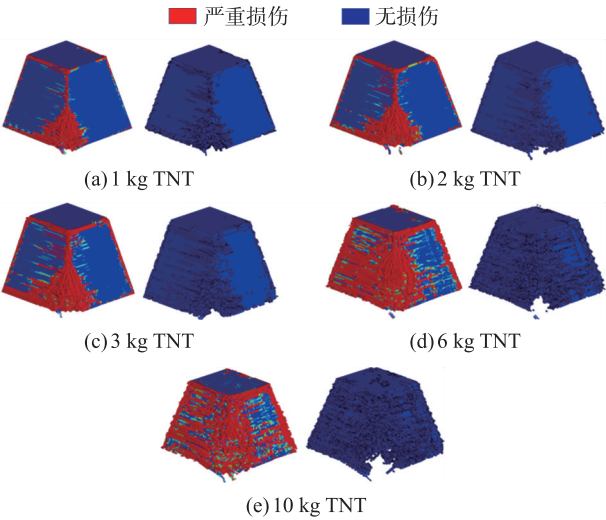


图 17 棱中间位置接触爆炸

Fig. 17 Contact explosion in middle position of the edges

整体来看,当混凝土墩体受到爆炸的爆炸距离较小时,这时压缩波对混凝土墩体的影响较大,压缩破坏^[17]是冲击波此时破坏墩体的主要方式。当冲击波传播至混凝土墩体的表面时,由于墩体表面会对冲击波进行反射,因此拉伸波就此形成,假如混凝土墩体的抗拉强度低于拉伸波的强度,这时混凝土墩体会在拉伸波的作用下倒塌^[18]。在炸药当量较小的情况下,这时混凝土墩体顶面中心位置的爆坑主要是由压缩波作用墩体表面所造成的;反之,在炸药当量较大的情况时,混凝土墩体的毁伤情况是由拉伸波所造成的。由于需要用具体数据量化炸药在混凝土墩体上接触爆炸的毁伤效果,提出了一个毁伤判据模型。

3 混凝土墩体的毁伤特性与易损性分析模型

3.1 墩体毁伤与破坏特征

1 kg TNT 当量装药于墩体不同中心位置进行毁伤时,墩体对称界面的应力波传播进程与破坏历程如图 18~图 20 所示,揭示了混凝土墩体表面在炸药爆炸作用下的毁伤特性。通过 Von Mises 应力云图对应力波的传播过程进行描述。

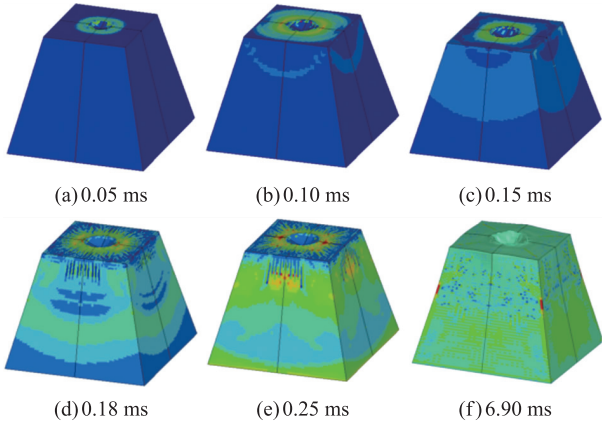


图 18 墩体顶端爆炸

Fig. 18 Explosion at the top of pier

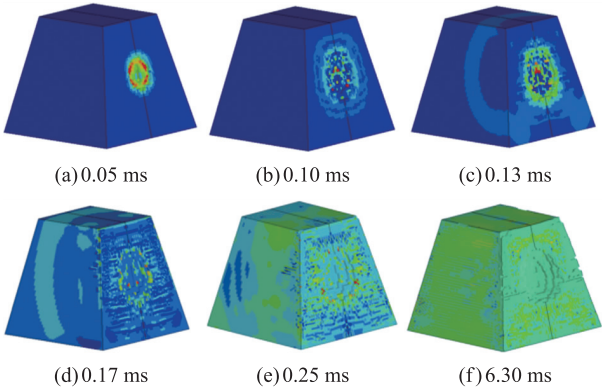


图 19 墩体侧面爆炸

Fig. 19 Explosion on the side of pier

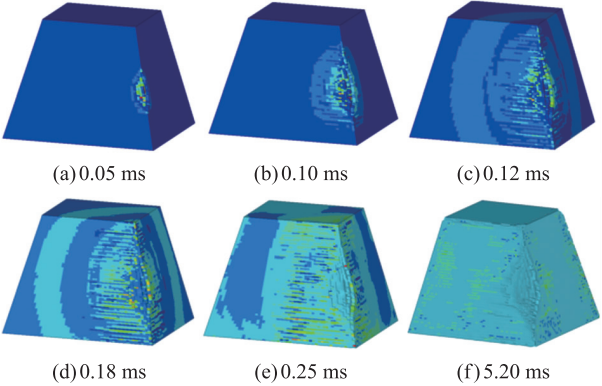


图 20 墩体侧棱爆炸

Fig. 20 Explosion on the side edge of pier

矩形装药起爆后,在爆炸区域混凝土墩体沿应力波传播的方向扩张,从而形成爆坑,此应力波超压峰值远高于墩体材料动态抗压强度。首先到达离爆点较近的墩体侧面的是水平方向的压缩波,并以拉伸波的形式反射,从而墩体侧面开始断裂,碎块向四周抛散,因为此时的拉伸波强度比墩体材料的动态抗拉强度要大。在墩体侧面几何中心放置炸药爆炸时,压缩波沿着爆坑法线的方向向四周扩散,同时也形成了一个爆破点附近区域的爆破坑。压缩波传至墩体顶面经反射生成拉伸波,与顶面下方压缩波相互作用,使部分裂隙向上扩展。压缩波率先抵达墩体底面,反射后与上方压缩波所生成的拉伸波相互交织,致使局部裂纹朝下延展。装药置于墩体侧棱中心位置时,爆炸催生的压缩波朝棱两侧扩散,因该时刻应力波峰值远超混凝土墩体动态抗压强度,混凝土墩体侧棱呈近似流体状,沿应力波传播路径膨胀,导致棱角被抹去。

3.2 建立易损性模型

混凝土墩体的毁伤程度受块状装药质量和放置位置的影响十分明显,考虑到块状装药在数值计算中的放置位置有限,深入研究尤为重要。以墩体侧面为例,更准确地刻画块状装药的具体放置位置。将墩体的水平方向分为 $m(i=1,2,\cdots,m)$ 份,竖直方向分为 $z(q=1,2,\cdots,z)$ 份。TNT 炸药离墩体侧面中心的距离为 ρ ,相对墩体侧面中心的角度为 θ ,那么装药放置位置则由 (ρ, θ) 和 (i, q) 表示,如图 21 所示。

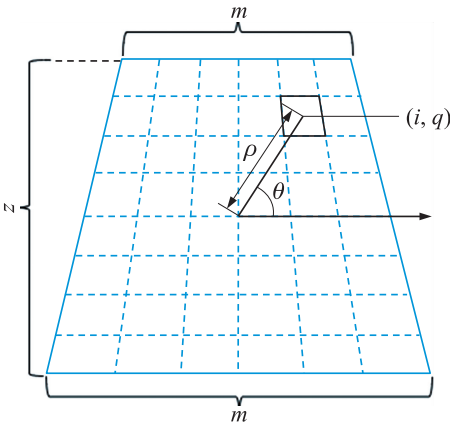


图 21 TNT 炸药与墩体相对位置图

Fig. 21 Relative position diagram of TNT explosive and pier

图 22 为顶面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线图。图 22 反映了混凝土墩体在墩体顶面不同位

置发生爆炸的毁伤程度。在墩体顶面放置质量为 2.0 kg 的块状装药并发生爆炸时,3 条曲线将混凝土顶面划分为 4 个区域,可产生不同的破坏面积,其中红色(S 级)为破坏严重区域的面积,绿色(M 级)为中度毁伤区域,白色(L 级)为破坏程度较轻的区域,蓝色(N 级)为不受破坏区域的面积。当混凝土墩体顶面发生爆炸时,不同质量的块状装药(1.0~3.0 kg)在顶面中心重合成近似圆形的受损区(图 22(a)~图 22(c))。因装药质量有别,所形成毁伤面积的数量与对应毁伤等级亦不同。以装药质量 1.0 kg 为例,墩体顶面形成严重毁伤、中等毁伤、轻微毁伤和无毁伤 4 个面积,无毁伤面积相对较大,其余 3 个相对较小;当装药质量提高到 2.0 kg 时,墩体顶面形成的 4 个区中,破坏严重的区比图 22(a)的范围要大一些;当装药质量提高到 3.0 kg,6 kg,10 kg 时,在墩体顶面形成严重毁伤和中等毁伤两个区域,严重毁伤的比例随药量的增加而提高。

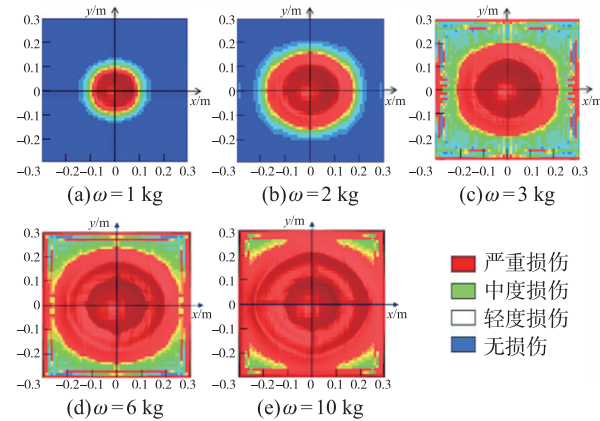


图 22 顶面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线

Fig. 22 Equal damage curve of pier under the top surface contact-explosion

不同装药质量下墩体侧面不同位置爆炸时的等毁伤曲线如图 23 所示。混凝土墩体侧面爆炸时,不同质量的块状装药也形成了不同等级的毁伤区域,毁伤区域形状近似为圆形,严重的毁伤区域随着装药质量的提高而不断扩大,其破坏程度不同,当药量达到 10 kg 时,墩身侧面已被彻底毁伤。

不同装药质量下墩体侧棱不同位置爆炸时的等毁伤曲线如图 24 所示。毁伤区域的形状近似为中间宽两端窄的椭圆形,随着装药质量的增加,与棱相邻的两个侧面均受到不同程度的毁伤,左侧相邻的面比右侧面受到的毁伤面积要大,两侧面下方均有裂纹。

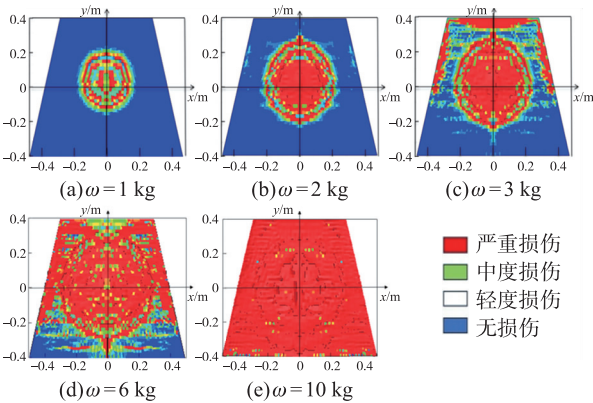


图 23 侧面接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线
Fig. 23 Equidestructive profile of pier under side contact-explosion

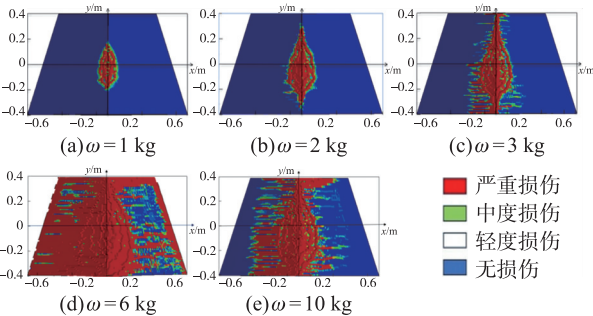


图 24 侧棱接触爆炸作用下墩体的等毁伤曲线
Fig. 24 Equidestructive curve of pier under the lateral contact-explosion

3.3 混凝土墩体的易损性评估

上文从装药质量和放置位置等因素考虑,研究了混凝土墩体在顶面、侧面、侧棱放置不同质量装药时的易损性特点。但在实际应用中,对墩体起作用的位置是随机的,很难精确确定,只能确定投放的装药质量。为解决装药作用部位的随机性问题,混凝土墩体在不同质量装药作用下的总体易损性,可根据剩余体积和碎块数量进行评估。

假设在墩体顶面或侧面(ρ, θ)位置放置质量为 ω 的装药并发生爆炸,若混凝土墩体残余体积满足相应毁伤等级标准,则认定其毁伤概率为 1;反之则为 0。据此,混凝土墩体各级别毁伤概率可确定:

$$P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z) = \begin{cases} 0 & \eta(\omega, \rho, \theta, z) \geq \eta^{(J)} \\ 1 & \eta(\omega, \rho, \theta, z) \leq \eta^{(J)} \end{cases}$$

式中: J 代表混凝土墩体毁伤等级,其中有严重损伤、中度损伤和轻度损伤 3 个毁伤程度; $\eta^{(J)}$ 为临界残余高度。

混凝土墩体顶面、侧面及侧棱任一位置布设质量为 ω 的装药,其易损体积 $V^{(J)}(\omega)$ 可表示为

$$V^{(J)}(\omega) = \iiint P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z) ds = \iiint P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z) \rho d\rho d\theta dz$$

由于 $P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z)$ 并没有解析式,在计算易损体积时运用离散化方法处理。如图 21 所示,将墩体的水平方向分为 m 份,竖直方向分为 z 份,分别计算当矩形装药置于网格中心位置处爆炸时,墩体不同级别毁伤的概率 $P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z)$,则混凝土墩体的易损体积为

$$V^{(J)}(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^z P^{(J)}(\omega, \rho, \theta, z) \Delta V(i, j, q)$$

式中: $\Delta V(i, j, q)$ 为网格单元的体积, m 和 n 分别为水平面对混凝土墩体横截面划分的网格数目, z 为对该墩体高度划分的网格数量。

经上述运算,墩体于顶面、侧面与侧棱不同位置受接触爆炸影响时,其残余体积和装药质量的关联呈图 25 所示态势。

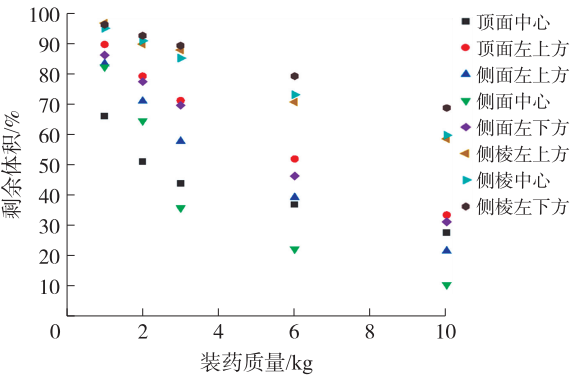


图 25 顶面、侧面及侧棱受爆炸冲击下墩体残余体积与装药质量的关联特性
Fig. 25 Correlation characteristics between pier remaining-volume and charge mass under the explosion impact on the top surface, side surface and side edge

侧棱上、中、下 3 个位置在装药质量为 1 kg 时,侧棱上方位置的毁伤能力最弱,下方位置次之,中间位置毁伤能力最强。当 2 kg 和 3 kg 装药时,侧棱下方位置毁伤能力最弱,上方位置次之,中间位置毁伤能力最强。总之,炸药在侧棱中间位置对混凝土墩体的毁伤效果最佳。当装药质量在 1~10 kg 时,在侧面左下方位置炸药对混凝土墩体的毁伤效果较

弱,毁伤效果最强的是炸药在混凝土墩体侧面几何中心位置爆炸。当炸药质量相同时,在顶面中心爆炸对混凝土墩体的毁伤效果要明显好于在顶面左上方位置。由图 25 可以明显看出,在装药质量相同的情况下,顶面中心位置和侧面中心位置的剩余体积要比其余位置低,也就是说,炸药在这 2 个位置爆炸对混凝土墩体的毁伤效果要比其余 6 个位置好。

在上述数据的基础上,采用除去墩体爆炸时产生最大碎块的体积所占墩体总体积的占比 $P^{(V)}$ 表示墩体易损程度,在顶面、侧面、侧棱爆炸时,分别给出了不同药量装药的毁伤线,以表示墩体的易损性差异:

$$P^{(V)} = 1 - \frac{V_m(\omega)}{V_p}$$

式中: V_p 为混凝土墩体的总体积, $V_m(\omega)$ 为墩体的最大碎块体积。

当装药置于墩体顶面、侧面、侧棱发生爆炸时,除去墩体爆炸时所产生的最大碎块体积所占比例全部增加,墩体的易损性随装药质量的提高而提高,如图 26 所示。当 $V_m(\omega) = 3 \times 10^5 \text{ cm}^3$ 时, $P^{(V)} = 0.458$, 图中的红线为毁伤线。在毁伤线以上的工况认为是全部毁伤;在毁伤线以下的工况认为是未毁伤。

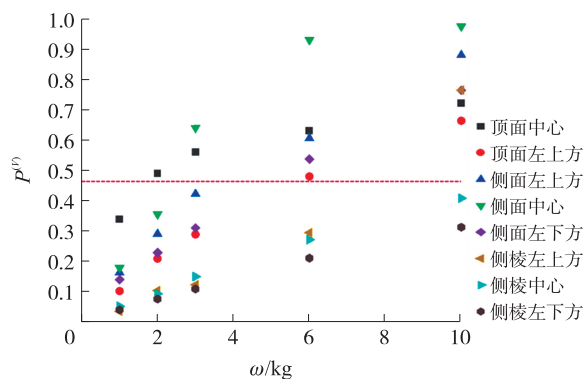


图 26 墩体的易损性与装药质量的关系

Fig. 26 Relationship between pier-body vulnerability and the charge mass

炸药在顶面、侧面以及侧棱接触爆炸作用下墩体产生碎块的数量是不均匀的,图 27 为墩体爆炸产生体积为 $1\,000 \sim 600\,000 \text{ cm}^3$ 的碎块数量,数量在 0~5 块之间,碎块数量为 0 块的情况最多,其次是碎块数量为 1 块的情况。由图 27 可以看出,炸药在侧面左上方位置爆炸的碎块体积在各个区间分布比较均匀,其余位置碎块体积分布不均。

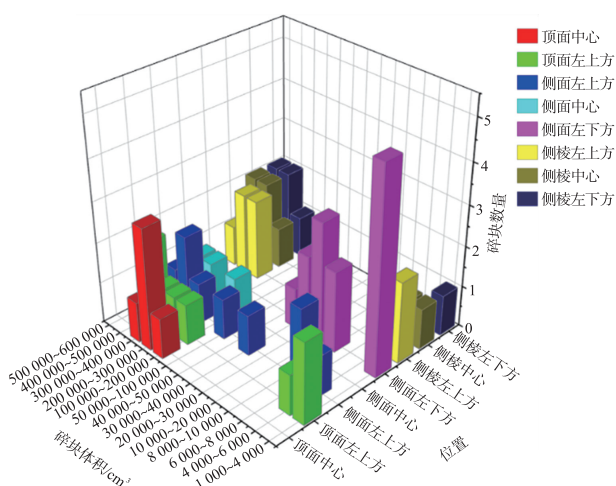


图 27 墩体碎块数量与碎块体积的关联特性

Fig. 27 Correlation characteristics between pier-fragment number and fragment volume

4 结束语

运用数值模拟方法,探究了混凝土墩体接触爆炸毁伤特性,并且构建易损体积的计算模型,获取在冲击波作用下混凝土墩体的不同位置相关情况,包括不同毁伤区域特征、易损体积、混凝土墩体的最大碎块体积以及混凝土墩体的碎块数量与 TNT 装药质量的关系。结论如下:

①混凝土墩体顶面与侧面所呈现出的毁伤区域形状为圆形;侧棱的毁伤区域形态为椭圆形。

②当装药质量为 $1 \sim 10 \text{ kg}$ 时,炸药在混凝土墩体顶面几何中心位置爆炸的毁伤效果最佳;当装药质量大于 3 kg 时,在侧面几何中心位置爆炸的毁伤效果最好。

③在顶面、侧面和侧棱上爆炸时,均是在中心位置对混凝土墩体的毁伤效果最佳。

④矩形装药(质量大于 3 kg)作用期间,侧面接触爆炸对混凝土墩体具有更强破坏力;只有在侧面中心位置爆炸时可以用最小的药量完全毁伤混凝土墩体。

⑤装药在侧面爆炸产生的碎块数量最多,因此在侧面爆炸对墩体的毁伤效果最好。

参考文献

- [1] 鲍小恒,堵永国,白书欣. 一种新型轨条器灵巧破障炸弹的设计[J]. 兵工装备研究,2006,25(1):5-8.
BAO Xiaoheng, DU Yongguo, BAI Shuxin. Design on a new smart breaching bomb for rail obstacles [J]. Engineer Equipment

- Research,2006,25(1):5-8. (in Chinese)
- [2] SHI Yanchao, WANG Jing, CUI Jian. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 144:103630.
- [3] 王瑞臣,龚红良. 混凝土中爆炸的破坏效应数值模拟[J]. 四川兵工学报,2008,29(6):1-2.
WANG Ruichen, GONG Hongliang. Numerical simulation of the damaging effect of an explosion in concrete[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2008,29(6):1-2. (in Chinese)
- [4] 马世鑫,纪杨子焱,钟明寿,等. 接触爆炸作用下混凝土墩体的易损性研究[J]. 爆炸与冲击,2023,43(7):105-120.
MA Shixin, JI Yangziyi, ZHONG Mingshou, et al. Study on the vulnerability of concrete obstacle under contact explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43 (7): 105 - 120. (in Chinese)
- [5] 李必红. EFP 装药技术在破碎混凝土桩砦中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2004.
LI Bihong. Research on the application of EFP charge technology in crushing concrete piles [D]. Changsha: Central South University,2004. (in Chinese)
- [6] BELYTSCHKO T, CHEN H. Singular enrichment finite element method for elastodynamic crack propagation [J]. International Journal of Computational Methods,2004,1(1):1-15.
- [7] 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
- [8] LI J, WU C, HAO H, et al. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions [J]. International Journal of Impact Engineering,2016,93:62-75.
- [9] 杜闯,宋帅,张江鹏. 爆炸冲击作用下三种混凝土本构模型对比研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(11):49-56.
DU Chuang, SONG Shuai, ZHANG Jiangpeng. Comparative study on three concrete constitutive models under blast loading [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43 (11): 49 - 56. (in Chinese)
- [10] 雷永智,秦青阳,吕佼佼,等. 考虑 CFRP 与混凝土动态界面特性的 RC 柱抗爆响应动力分析[J]. 兵器装备工程学报,2023, 44(2):100-107.
LEI Yongzhi, QIN Qingyang, LYU Jiaojiao, et al. Dynamic analysis of anti-explosion response of RC columns considering dynamic interface characteristics of CFRP and concrete [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44 (2): 100 - 107. (in Chinese)
- [11] 汪剑辉,吕林梅,尚伟,等. 接触爆炸载荷下钢筋混凝土梁的毁伤特性研究[J]. 防护工程,2020,42(2):22-27.
WANG Jianhui, LYU Linmei, SHANG Wei, et al. Study of damage characteristics of reinforced concrete beams under contact explosion load [J]. Protective Engineering, 2020, 42 (2): 22 - 27. (in Chinese)
- [12] 郝莉,宁建国,王成. 水中障碍物爆炸毁伤效应的二维数值模拟[J]. 高压物理学报,2006,20(1):39-44.
HAO Li, NING Jianguo, WANG Cheng. Two-dimensional numerical simulation of the damage effect of an obstacle explosion in water [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1):39-44. (in Chinese)
- [13] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
WANG Ruce, ZHAO Guozhi. Projectile end-point effect [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1993. (in Chinese)
- [14] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1959.
LI Yiqi, MA Suzhen. Mechanics of explosions [M]. Beijing: Science Press,1959. (in Chinese)
- [15] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam:Elsevier,1979.
- [16] 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.
HAO Likai, GU Wenbin, ZOU Shaoxin, 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. (in Chinese)
- [17] 王靖. 近距离爆炸下钢筋混凝土板局部破坏试验研究与数值模拟[D]. 天津:天津大学,2016.
WANG Jing. Experimental and numerical studies on the local damage of reinforced concrete slabs under close-in explosions[D]. Tianjin:Tianjin University,2017. (in Chinese)
- [18] 赵跃堂,胡康,刘绍鑒,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.
ZHAO Yuetang, HU Kang, LIU Shaoli, 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. (in Chinese)