

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0260

# 常规武器二次爆炸作用下浅埋钢筋 混凝土拱结构破坏规律\*

陈昊, 卢浩, 孙善政, 熊自明, 岳松林, 王德荣

(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)

**摘要:** 为研究常规武器二次爆炸作用下土中浅埋拱结构的破坏规律, 对土中浅埋钢筋混凝土直墙拱结构进行爆炸试验和数值模拟。试验对结构模型设置多个缩比工况, 同时, 利用 LS-DYNA 对 3 组工况进行数值模拟。通过对比土中测点压力、结构测点速度和结构挠度等数据, 发现模拟结果与试验结果基本一致并拓展了二次爆炸的数值模拟工况。结果表明: 比例爆距设置在  $0.4\sim 0.6\text{ m/kg}^{1/3}$ , 以保证结构以整体破坏为主。综合结构毁伤宏观描述和结构最大挠跨比, 对整体作用下结构的毁伤等级进行划分。通过讨论结构的初始毁伤及不同爆炸顺序时钢筋混凝土直墙拱结构的破坏规律, 结构受爆炸作用发生开裂、弯曲等破坏时, 部分混凝土因开裂或进入塑性而退出工作, 从而导致结构的刚度发生改变; 结构最终毁伤程度受打击顺序影响, 初次爆炸对结构最终损伤影响比重较大。

**关键词:** 浅埋坑道; 钢筋混凝土结构; 二次爆炸; 破坏规律

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Failure law of shallow buried reinforced concrete arch structure under secondary explosion of conventional weapons

CHEN Hao, LU Hao, SUN Shanzheng, XIONG Ziming, YUE Songlin, WANG Derong

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,  
Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** The failure law of shallow buried reinforced concrete straight wall arch structure in soil under secondary explosion of conventional weapons was studied by explosion test and numerical simulation. Test structure adopts scale model based on similarity principle. Three groups of six shots were set up in the test. LS-DYNA is used to simulate the three groups of working conditions. By comparing the pressure of the measuring point in the soil, the speed of the structural measuring point, the structural deflection and other data, it is found that the simulation results are basically consistent with the experimental results. After comparing the numerical simulation results with the test, the numerical simulation conditions of the secondary explosion are expanded. When the comparison verifies that the numerical simulation is consistent with the experimental results, the secondary explosion conditions under the action of conventional weapons are simulated to study the dynamic response of structures under repeated impacts. Through calculation, it is found that when the proportional distance is set between  $0.4\sim 0.6\text{ m/kg}^{1/3}$ , the damage of the structure is mainly caused by the overall damage. Combined with the macroscopic description of structural damage and the maximum deflection span ratio, the damage grade of the structure under the overall effect is divided. By discussing the initial damage of the structure and the failure law of reinforced concrete straight wall arch structure under

\* 收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51808552)

第一作者: 陈昊(1998—), 男, 博士研究生, 1084456589@qq.com

通信作者: 卢浩(1987—), 男, 博士, 副教授, lh829829@163.com

different explosion sequences, the following conclusions are obtained: when the structure is damaged by explosion, such as cracking and bending, some concrete is out of work due to cracking or entering plasticity, resulting in the change of stiffness of the structure. The final damage degree of the structure is affected by the strike sequence, and the effect of initial explosion on the final damage of structure is greater than that of secondary explosion.

**Keywords:** shallow buried tunnel; reinforced concrete structure; secondary explosion; failure law

现代化战争中武器的打击精度越来越高,在一次打击未能达到打击效果时,可采取重复打击的方式达到毁伤目的。因此,针对重要防护结构在多次打击下的破坏程度、防护能力以及使用功能变化的研究尤为重要。钢筋混凝土直墙拱型结构是常见的地下结构形式,广泛应用于地下防护工程,研究其在二次爆炸作用下的破坏模式对防护设计及结构毁伤评估均有着重要意义。

目前针对一次打击下钢筋混凝土结构的破坏模式,已有学者开展了诸多研究,在结构破坏的影响因素、破坏模式及破坏机理等方面取得了较为丰厚的成果。王辉明等<sup>[1]</sup>通过试验总结了钢筋混凝土梁在接触爆炸作用下的 4 种破坏模式,并给出了以比例装药量为判据的毁伤等级评估;Shi 等<sup>[2]</sup>结合钢筋与混凝土之间的滑移现象,利用数值模拟计算了近距离爆炸作用下的钢筋混凝土柱的等毁伤曲线;Yao 等<sup>[3]</sup>对钢筋混凝土板在空爆下的破坏模式进行了试验和数值模拟对比研究,并通过大量数值模拟计算拟合了适用于此类工况下的比例爆距、配筋率与挠厚比的关系曲线;汪维等<sup>[4]</sup>利用数值模拟研究了钢筋混凝土板在空爆作用下的破坏模式;Kiger 等<sup>[5]</sup>通过有限元计算和试验研究了土体与拱结构之间摩擦力对拱结构抗力的影响,指出在考虑土与结构相互作用时应当考虑二者之间的摩擦力引起结构发生弯剪组合破坏;孙惠香等<sup>[6]</sup>利用数值模拟研究了浅埋拱结构在近区爆炸作用下的破坏模式,并讨论了以爆炸距离为判据的破坏模式转换阈值;李秀地等<sup>[7-8]</sup>基于波的反射理论讨论了拱结构震塌破坏的机理;邓春梅等<sup>[9]</sup>通过数值模拟计算了拱结构在爆炸荷载作用下不同位置的压力时程曲线,并讨论了拱结构受力与变形的关系;霍庆等<sup>[10]</sup>对地下拱结构的侧顶爆进行了试验和数值模拟,并利用数值模拟计算给出了以挠跨比为毁伤判据的毁伤等级划分。针对二次打击条件下荷载、结构变形破坏等方面已开展初步研究,邓国强<sup>[11]</sup>假定每次爆炸时地冲击相互独立,利用 Constantino 荷载模型和梁霍夫荷载模型分别计算了拱顶结构和平顶结构在重复打击下的荷载分布规律;戎志丹等<sup>[12]</sup>研究了钢纤维混凝土靶体在接触二次爆炸作用下的破坏规律;马林建等<sup>[13-15]</sup>对钢筋混凝土梁在二次爆炸作用下的动力响应进行了数值模拟,并提出了将二次爆炸作用等效成单次爆炸下荷载的提高系数;唐廷等<sup>[16]</sup>对带裂缝工作的坑道结构开展了二次爆炸试验和数值模拟,比较了不同部位的初始损伤对二次爆炸的影响,并指出最不利的损伤位置。上述针对二次打击的研究主要采用理论和数值模拟方法,对于土中浅埋直墙拱结构的二次爆炸试验研究开展较少,缺乏较为可靠的现场结构毁伤数据支撑。

为研究土中浅埋钢筋混凝土直墙拱结构在二次爆炸作用下的破坏规律,本文中对直墙拱结构开展缩比试验和数值模拟,设置 3 种比例爆距,开展 6 次现场试验,对比验证数值模拟方法;在此基础上,利用验证后的数值模拟方法讨论结构初始损伤、二次爆炸顺序对整体作用下拱结构破坏模式的影响,为研究多次打击作用下的直墙拱结构破坏规律以及初次打击对结构防护能力的影响提供依据。

## 1 钢筋混凝土直墙拱重复打击试验

### 1.1 试验结构模型

试验研究跨度 3.6 m 的直墙拱结构在重复打击下的破坏模式。受试验场地和装药当量的限制,对直墙拱结构进行缩比模型试验。结构主体为 C40 混凝土,钢筋采用 HRB235。模型结构跨度为 1.2 m,侧板、底板及拱顶厚度均为 0.12 m。拱截面的等效直径为 1.5 m,结构总长度 4.8 m(满足技术要求不小于 3 倍等效直径)。配筋采用双层网状配筋,纵向钢筋采用 10 mm HRB235 钢筋双层布置,在拱范围内间隔

12.4°布置, 在直墙范围内间隔 135 mm 布置, 在底板范围内间隔 143 mm 布置(见图 1(a)); 环向钢筋采用 6 mm HRB235 钢筋双层布置, 间隔 110 mm 布置(见图 1(b))。保护层厚度 20 mm。

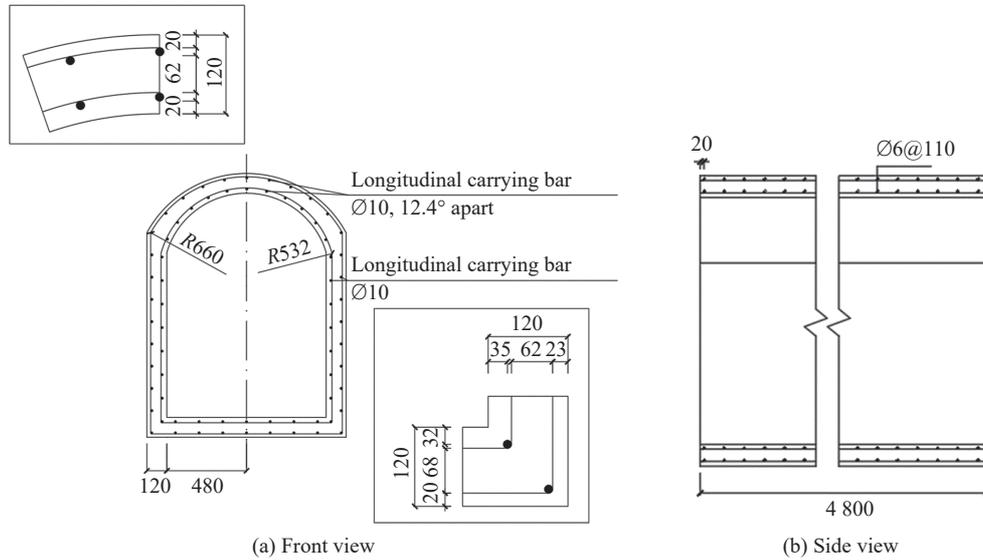


图 1 直墙拱模型尺寸及钢筋布置 (单位: mm)

Fig. 1 Size of structure and layout of steel bars (unit: mm)

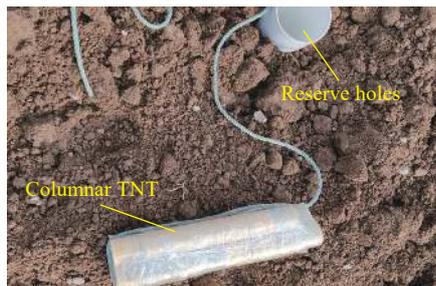
### 1.2 试验设置

在野外试验场进行爆炸试验如图 2 所示。根据工况设置预留装药口, 在结构埋置后从预留口进行装药。TNT 采用长径比为 3 : 1 的柱状装药形式(图 3(a)), 使用雷管引爆。进入预留观测井(图 3(b))采集单次打击下结构内部的破坏现象, 而后根据试验计划开展重复打击, 试验流程如图 4 所示。试验共设置 3 组重复打击方案, 共 6 个工况, 具体方案设置如表 1 所示。其中, 设置工况 T1-0(试验 1 号靶体无初始毁伤下打击)、T2-0 和 T3-0, 观察随比例爆距减小结构的毁伤形态的变化, 后缀 0 表示结构无初始毁伤。对毁伤程度较小的结构设置减小比例爆距的二次爆炸工况(工况 T1-1); 对产生较大毁伤的结构分别设置减小比例爆距的二次爆炸工况(工况 T2-1)和完全重复的二次爆炸工况(工况 T3-1)。其中, 后缀 1 表示在后缀 0 工况打击基础上对结构进行二次打击。观察带有不同程度初始毁伤的结构在不同条件二次爆炸工况下的破坏规律。



图 2 直墙拱模型现场

Fig. 2 Straight wall arch model site



(a) Charge



(b) Reserved charge holes and observation wells

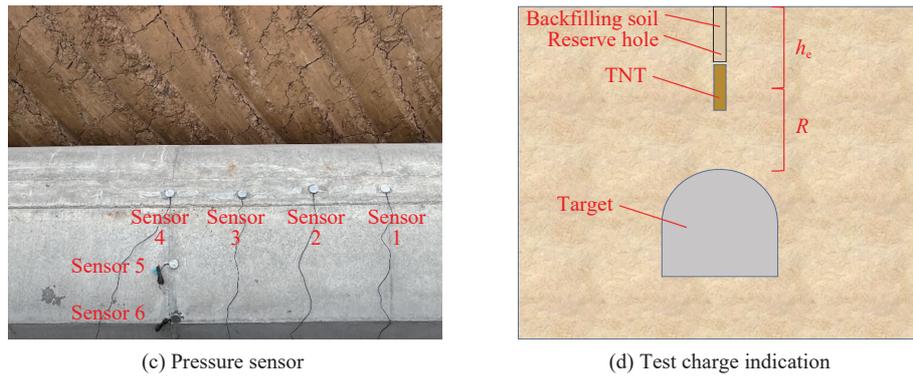


图 3 装药及采集手段布置

Fig. 3 Layout of charge and acquisition means

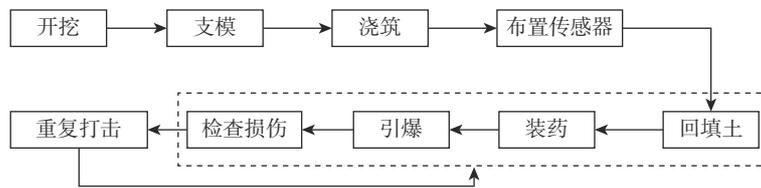


图 4 试验开展流程

Fig. 4 Test development process

表 1 试验工况设置

Table 1 Setting of test conditions

工况	爆炸距离/m	装药当量/kg	比例爆距/( $m \cdot kg^{-1/3}$ )
T1-0	1.0	5.0	0.585
T1-1	0.8	5.0	0.468
T2-0	0.8	5.0	0.468
T2-1	0.8	7.5	0.409
T3-0	0.8	7.5	0.409
T3-1	0.8	7.5	0.409

## 2 试验现象

### 2.1 模型结构试验结果

对缩比试验模型进行 3 组重复打击试验, 其主要毁伤形态如图 5 所示。

T1-0 工况中结构出现 2 条纵向通长裂缝, 在爆心投影附近结构内侧出现环向的裂纹, 在结构端部出现细裂缝(图 5(a)); 在 T1-1 工况下纵向通长裂缝加深, 端部细裂缝加宽(图 5(b))。

T2-0 工况中结构出现纵向通长裂纹, 裂缝宽度大于 1 号靶第 1 炮次的通长裂纹(图 5(c)); 在 T2-1 工况下爆心投影附近出现 1.60 m×0.55 m 的贯穿区域, 拱脚内侧纵向混凝土震塌, 钢筋裸露且发生弯曲变形(图 5(d))。

T3-0 工况中结构拱顶处出现一条较深的裂缝, 在模型端部出现较严重的混凝土震塌层裂(图 5(e)); 在 T3-1 工况下结构发生整体的弯曲坍塌, 破坏范围一直延续到拱脚处, 拱顶钢筋出现大变形, 部分钢筋被拉断(图 5(f))。



图 5 模型结构特征毁伤形态

Fig. 5 Damage forms of model structural characteristics

### 2.2 结构的破坏模式分析

爆炸产生的球面爆炸波在土介质中传播, 通过土介质与结构相互作用将爆炸的荷载作用到结构上。当爆炸距离较大或炸药当量较小时, 结构表面的荷载分布较为均匀, 往往引起结构的弯曲变形, 如图 6(a) 弯曲破坏所示, 此时拱顶混凝土内侧受拉、外侧受压, 拱脚处外侧受拉、内侧受压。随着爆炸距离减小, 荷载的分布范围有限, 荷载分布不均产生的剪应力与弯曲变形产生的拉应力在 1/4 跨处叠加, 导致结构发生剪切破坏(图 6(b))。由于爆炸波传至结构背爆面自由表面时会发生反射, 产生拉伸波使结构承受拉应力, 且混凝土材料的抗拉性能弱, 结构中的拉伸波会导致混凝土受拉开裂, 从而导致层裂或震塌现象发生(图 6(c))。当爆炸距离较小或炸药当量足够大时, 爆炸作用在结构表面引起不均匀的荷载分布。当结构厚度较薄, 且由于爆炸高频响应的激发, 导致结构发生冲切破坏(图 6(d))。

在 T1-0 工况中拱顶受压向下运动, 此时拱顶混凝土上侧受压下侧受拉, 拉应力达到混凝土的抗拉强度导致结构出现通长的受拉裂缝; 在 T1-1 工况中裂缝变宽, 并没有新的裂缝开展, 由于初次爆炸仅造成结构的轻度破坏(通长裂缝开展), 并未改变结构的内力分布, 仅仅使拱顶处向下的位移加大, 结构发生弯曲变形下的轻度破坏。

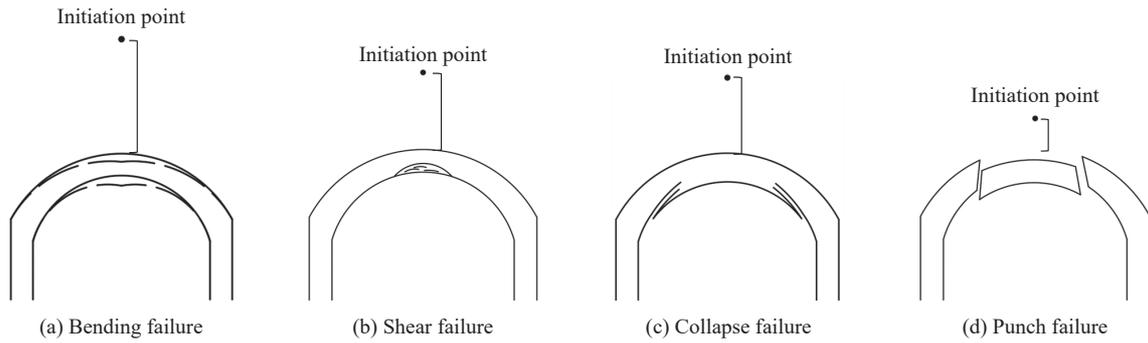


图 6 几种典型混凝土拱结构破坏模式

Fig. 6 Several typical failure modes of concrete arch structure

在 T2-0 工况中拱顶弯曲变形, 出现与 1 号靶初次爆炸作用下相似的拱顶通长裂缝; 在 T2-1 工况中拱顶整体发生较大弯曲变形, 拱脚处混凝土压碎导致钢筋裸露, 拱顶处钢筋发生一定程度的变形, 同时拱顶在已有裂缝的基础上混凝土发生局部贯穿破坏。

在 T3-0 工况中拱顶出现较大开裂, 钢筋裸露, 并伴随局部混凝土的层裂, 此时结构已发生较为严重的局部破坏; 进行 T3-1 工况试验后, 结构拱顶裂缝贯穿伴随钢筋拉断, 导致整个拱结构坍塌, 同时在爆心投影位置有明显的钢筋弯曲, 此时破坏形式为严重的弯剪破坏。

### 3 数值模拟

使用 LS-DYNA 数值模拟软件对试验中工况进行数值模拟计算, 将两者结果进行对比, 从而获得可靠的数值模拟模型。

#### 3.1 有限元模型建立

利用 TrueGrid 建立结构的 1/4 模型(图 7), 直墙拱结构模型结构跨度为 1.2 m, 圆拱外径为 0.68 m, 内径为 0.5 m, 侧板、底板及拱顶厚度均为 0.12 m, 完全参照试验缩比模型建立。适当加密结构重点关注区域的网格, 经过网格敏感性分析检验, 在网格尺寸小于 30 mm 时, 网格改变对计算结果收敛, 考虑到要较为精细地模拟混凝土的开裂和震塌, 选用网格尺寸为 15 mm。模型共计约有 45 万个单元。

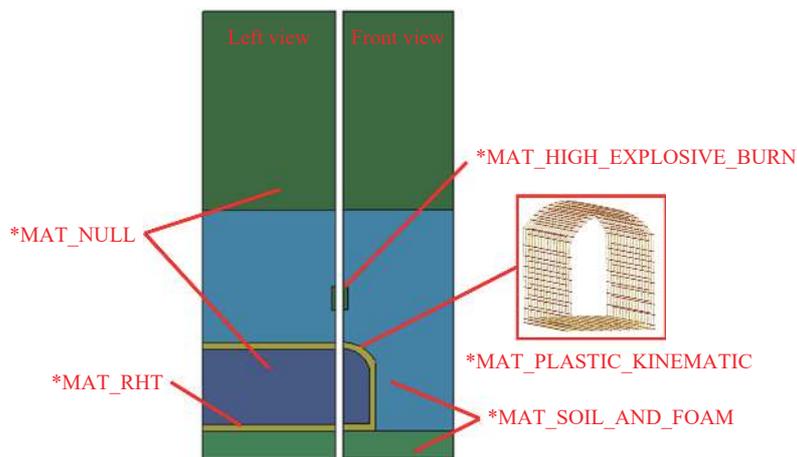


图 7 有限元模型及材料示意图

Fig. 7 Finite element model and material description

#### 3.2 材料参数设置

土介质材料模型采用 SOIL\_AND\_FOAM 模型, 密度为 1800 kg/m<sup>3</sup>, 剪切模量为 50.8 MPa, 具体参数

设置参照 Wang<sup>[17]</sup> 的浅埋爆炸模拟参数设置。为适应爆炸作用下的大变形, 将土体网格定义成 ALE 网格。

描述混凝土的材料模型为 RHT 模型, 该模型可以描述在高压冲击作用下的混凝土结构响应, 其参数按表 2 设置。

以 PLASTIC\_KINEMATIC 模型作为钢筋的材料模型, 为了使钢筋与混凝土能够协调工作, 利用 LAGRANGE\_IN\_SOLID 中的速度耦合命令约束钢筋与混凝土, 使其共同工作。

以 LINEAR\_POLYNOMIAL 方程描述空气状态方程, 其材料模型为 NULL 模型<sup>[19]</sup>。炸药材料模型使用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 模型, 材料参数如表 3 所示, 采用 JWLV 状态方程描述, 表达式为:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为状态方程参数,  $V$  为炸药相对体积。

表 2 混凝土 RHT 材料关键参数<sup>[18]</sup>

密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗压强度/ MPa	最小残余 损伤应变
2440	32.5	16.7	40	0.01

表 3 TNT 材料关键参数

Table 3 Key parameters of TNT material

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	爆速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$p_{c0}$ /GPa	$E_0$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$A$ /GPa	$B$ /GPa
1600	6300	28.5	7	4.15	0.95	0.3	3730	3.75

### 3.3 数值模拟中二次爆炸试验的设置方式

通过数值模拟得到了初次打击下结构的毁伤形态以及应力等特征响应的分布云图。利用 LS-prepost 中的 Output 命令导出初次爆炸后结构的节点信息和单元应力-应变信息<sup>[20]</sup>, 通过设置初始应变命令 \*INITIAL\_STRAIN\_SOLID 和初始应力命令 \*INITIAL\_STRESS\_SOLID 对导出的结构施加累积塑性应变和初始应力, 作为二次爆炸模拟的初始损伤条件。基于以上方法对带有初始损伤的结构进行二次爆炸模拟。

### 3.4 数值模拟结果与试验结果对比

对比试验与数值模拟的毁伤情况, 并借助数值模拟对试验中无法观测位置的毁伤形态进行描述分析。数值模拟中结构的损伤用 History variable#4 描述, 其含义为混凝土结构塑性的积累。

图 8 给出了试验工况下结构破坏特征的数值模拟结果 S1-0(数值模拟 1 号靶体无初始毁伤下打击)、S2-0 和 S4-0 与试验结果 T1-0、T2-0 和 T3-0 的对比。数值模拟计算得出的破坏特征均存在相应的试验现象与之对应, 可见数值模拟可以反映出靶体在爆炸作用下的破坏形态。同时, 可以观察到在拱脚外侧均出现沿纵向的混凝土损伤, 这是由于整体作用导致拱脚处外侧混凝土受拉所致。可以发现在顶

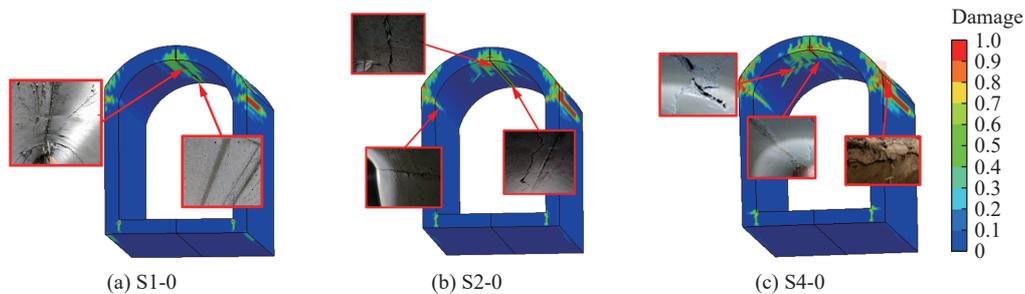


图 8 数值模拟与试验的结构破坏形态对比

Fig. 8 Comparison of structural failure modes in numerical simulation and test

部爆炸工况下,直墙拱结构的拱顶处和拱脚处为最先发生破坏的位置。图 9 给出了测量点位的示意图,其中土压传感器布设于拱顶外侧 Sensor 1~6 点位,速度传感器布设于拱顶内侧 Sensor 3~5 点位。图 10 给出了 T3-0 工况下测得的部分点位的压力和速度,其中压力峰值在数值模拟与试验测量中相差 2.4%,速度峰值在数值模拟与试验结果相差 3.5%,对速度曲线积分得到该点残余挠度  $W_t=8.46$  mm,对应的数值模拟计算中该点残余挠度  $W_n=7.59$  mm,结果相差 11.46%。综合以上比较结果,认为数值模拟计算的结果具有可信性。

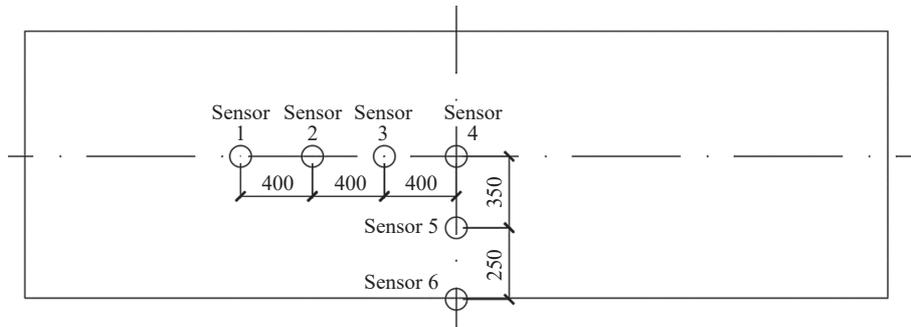


图 9 测量点布置示意图(单位: mm)

Fig. 9 Mapping of measuring points (unit: mm)

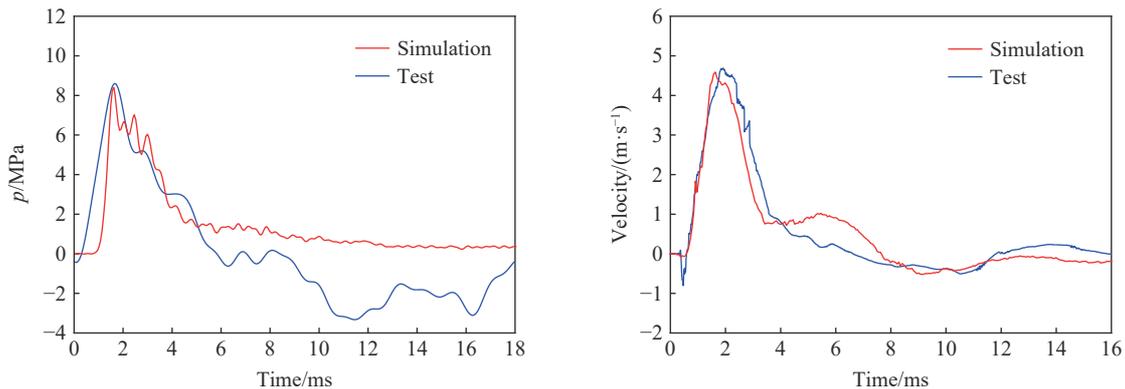


图 10 数值模拟与试验的测点压力、速度时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of pressure and velocity time-history curves at measuring points between simulation and test

## 4 初始毁伤对结构破坏模式的影响

利用数值模拟对已有毁伤的结构进行重复打击,对比无毁伤结构和存在初始毁伤结构在相同工况打击下的破坏特征,并对其破坏模式展开讨论。在工况命名中,后缀为 1~3 的工况均为对后缀为 0 的工况叠加带有初始毁伤的结构进行二次打击的工况。

### 4.1 爆炸作用下结构局部破坏计算

当爆点距离结构较近时,结构出现局部的材料破坏行为<sup>[21]</sup>。利用震塌系数描述各工况的材料破坏行为,震塌系数的计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$K_z = \left( \frac{rK_{p2}}{K_{p1}} + h_c \right) \frac{1}{m\sqrt{m_e}} \quad (2)$$

式中:  $r$  为爆炸距离,  $K_{p1}$  为土体的破坏屈服系数,  $K_{p2}$  为混凝土的破坏屈服系数,  $h_c$  为拱顶厚度,  $m$  为填塞系数,  $m_e$  为装药当量。

经过计算得到的震塌系数如表 4 所示。可以看出单次打击下各种工况出现不同程度的震塌层裂现象。发生局部破坏后,结构的刚度随混凝土的层裂或剥落而降低。对于初次打击下未发生严重材料破坏的工况,可以通过刚度折减描述结构的总体毁伤情况。

拱式体系主要依靠顺拱轴线的轴压力流来传递竖向荷载,拱平面内的内力分布优于平板平面,传力路径较短,导致拱内的应力分布更均匀。已知的,平板结构在比例爆距小于  $0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$  时以局部作用为主,拱结构的承载性能优于平板结构,因此在拱结构中,为划清拱结构破坏以局部破坏为主时比例爆距的阈值,开展了不同比例爆距下结构破坏形式的数值模拟研究。

通过数值模拟计算发现,对于无初始损伤的结构,比例爆距小于  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时结构以局部作用为主,当比例爆距大于  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时结构以整体作用为主。以下主要讨论比例爆距大于  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  的工况下重复打击下的结构响应。

#### 4.2 单次打击下结构的刚度变化

结构受爆炸作用发生开裂、弯曲等破坏时,部分混凝土因开裂或压碎而退出工作,从而导致结构的刚度发生改变。因此,刚度的改变在一定程度上可以反映结构的毁伤程度和结构的抗力性能。

由 Rayleigh 法可知,在单自由度振动体系下结构的自振频率与刚度存在关系为:

$$\omega^2 = \frac{k}{m_{\text{eq}}} \quad (3)$$

式中:  $k$  为结构的等效刚度,  $m_{\text{eq}}$  为结构的等效质量。

爆心位置处于结构顶部正上方,在此忽略爆炸作用所激发出的结构高频振动。因此,可通过计算结构的自振周期反映结构的刚度变化。利用数值模拟计算结构受较小扰动下弹性范围内的振动,采集结构自由振动阶段振动曲线波峰之间的时长作为结构的自振周期,得到无损伤的结构自振周期  $T_0$  为 6 ms。定义无量纲刚度描述为:

$$\bar{K} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (4)$$

其意义为结构受打击后的刚度与原结构刚度之比(后文称为刚度比)。式中:  $T_0$  为无损伤结构的自振周期,  $T$  为受到打击后的结构自振周期。由此,可以计算出数值模拟工况作用后结构的刚度比如表 5 所示。

由于拱结构的结构特性优于平板结构,采用已有的以挠跨比为判据的评估标准对本文中的试验结果有较大误差。通过大量数值模拟计算,发现在挠跨比达到 0.75% 时(图 11(a))结构拱顶与拱脚之间出现斜向裂缝,认为此时结构毁伤达到中等毁伤等级;当挠跨比约在 1.8% 时(图 11(b)),拱顶与拱脚之间的破坏区域延伸至拱顶,结构发生明显大的弯曲变形,认为此时结构毁伤等级达到重度毁伤等级。给出相应的毁伤程度见表 5。

表 4 数值模拟初次打击局部震塌计算

Table 4 Numerical simulation of local collapse in initial shock

试验	工况 (距离-当量)	震塌系数 $K_z$	毁伤描述
S1-0	1.0 m-5.0 kg	0.371	无明显震塌现象
S2-0	0.8 m-5.0 kg	0.319	小范围内混凝土脱落
S3-0	1.0 m-7.5 kg	0.330	小范围内混凝土脱落
S4-0	0.8 m-7.5 kg	0.284	较大范围的混凝土层裂

表 5 初次打击数值模拟计算结果

Table 5 Numerical simulation results of initial explosion

试验	工况 (距离-当量)	自振周期/ms	刚度比	挠跨比/%	毁伤程度
S1-0	1.0 m-5.0 kg	6.03	0.990	0.395	轻度毁伤
S2-0	0.8 m-5.0 kg	7.00	0.735	0.772	中度毁伤
S3-0	1.0 m-7.5 kg	6.95	0.745	0.797	中度毁伤
S4-0	0.8 m-7.5 kg	7.24	0.687	1.729	中度毁伤

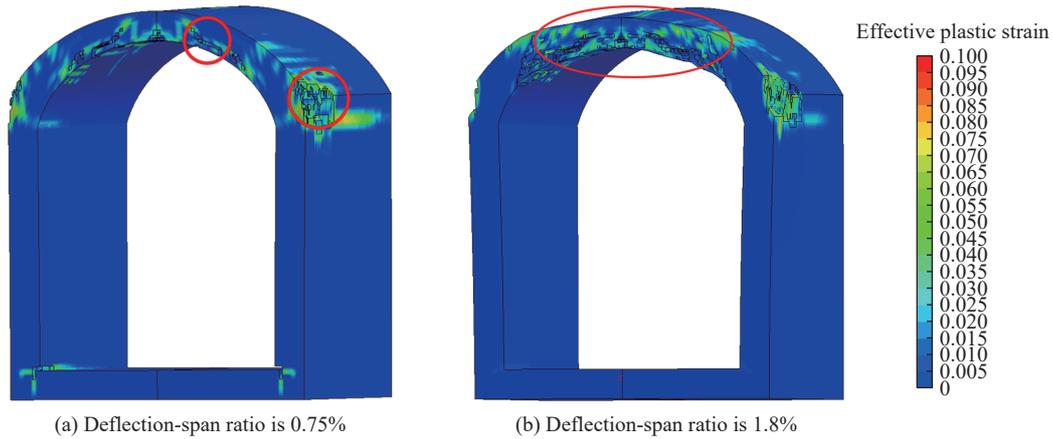


图 11 数值模拟毁伤等级划分示意

Fig. 11 Numerical simulation of damage grade division

### 4.3 重复打击下结构响应对比

对 4.2 节中 4 组工况得到的结构模型进行二次爆炸作用数值模拟, 以拱顶处的挠跨比作为比较结构响应的量化指标。结合经验, 通过挠跨比和数值模拟算得的毁伤特征对结构的毁伤程度进行评价。各工况具体见表 6。

表 6 二次打击数值模拟计算

Table 6 Numerical simulation of secondary explosion

试验	工况(距离-当量)	拱顶挠度/mm	挠跨比/%	累积挠度/mm	累积挠跨比/%	毁伤等级
S1-1	1.0 m-7.5 kg	7.94	0.827	11.735	1.222	中度毁伤
S1-2	0.8 m-5.0 kg	7.90	0.823	11.695	1.218	中度毁伤
S1-3	1.0 m-5.0 kg	4.70	0.490	8.495	0.885	中度毁伤
S2-1	1.0 m-5.0 kg	5.06	0.527	12.470	1.299	中度毁伤
S2-2	0.8 m-7.5 kg	17.20	1.792	24.610	2.564	重度毁伤
S2-3	0.8 m-5.0 kg	8.53	0.870	15.760	1.642	中度毁伤
S3-1	1.0 m-5.0 kg	4.97	0.518	12.620	1.315	中度毁伤
S3-2	0.8 m-7.5 kg	17.20	1.792	24.850	2.589	重度毁伤
S3-3	1.0 m-7.5 kg	8.09	0.843	15.740	1.640	中度毁伤
S4-1	0.8 m-5.0 kg	22.50	2.344	39.100	4.073	重度毁伤
S4-2	1.0 m-7.5 kg	14.30	1.490	30.900	3.219	重度毁伤
S4-3	0.8 m-7.5 kg	—	—	—	—	重度毁伤

以挠跨比为判据对结构毁伤情况进行评估, 可知结构在 S1-0 工况下发生轻度毁伤, S2-0、S3-0、S4-0 组工况下发生中度毁伤。为比较结构在不同初始毁伤条件下的破坏情况, 设置 S3-0、S1-1、S3-3 和 S4-2 为一个对比组, 比较不同初始毁伤情况下结构受到 1.0 m-7.5 kg 工况打击后的结构响应; 工况 S2-0、S1-2、S2-3 和 S4-1 为一个对比组, 比较不同初始毁伤情况下结构受到 0.8 m-5.0 kg 工况打击后的结构响应; 工况 S1-0、S1-3、S2-1 与 S3-1 为一个对比组, 比较不同初始毁伤情况下结构受到 1.0 m-5.0 kg 工况打击后的结构响应; 工况 S4-0、S2-2、S3-2 与 S4-3 为一个对比组, 比较不同初始毁伤情况下结构受到 0.8 m-7.5 kg 工况打击后的结构响应。

在 S1-0、S2-0、S3-0 和 S4-0 组工况打击后, 结构在第 2 炮次下的拱顶挠度较以此工况作为第 1 炮次时结构拱顶挠度有小幅增加, 即此时结构抗力降低。在初次打击作用下, 结构在拱顶和拱脚处出现塑性

应变累积和裂缝开展。塑性应变累积以及裂缝开展会导致结构截面处受压区混凝土有效高度减小, 从而导致结构的刚度降低, 即结构抵抗爆炸荷载能力降低。此时受拉区混凝土开裂使受拉混凝土退出工作, 拉力主要由钢筋承担。

在此展示 S2-0、S1-2、S2-3 和 S4-1 的比较结果, 如表 7 所示, 这 4 组工况可总结为结构在无初始毁伤、轻微初始毁伤和轻度初始毁伤的情况下承受相同二次爆炸工况。

在 S1-0 组工况下(图 12(a))结构截面仅出现较小面积的塑性区域, 此时对结构进行 S1-2 工况打击, 其单次打击下挠跨比为 0.823%, 较无初始毁伤打击(S2-0 组)工况挠度(0.772%)有 6.6% 的增幅, 推断此时结构内形成了面力效应, 导致结构的承载能力有了小幅度的降低。

表 7 相同工况下不同初始毁伤结构响应对比

Table 7 Responses of different initial damaged structures under the same conditions

试验	工况 (距离-当量)	初始刚度比	初始毁伤程度	挠跨比/%
S2-0	0.8 m-5.0 kg	1.000	无毁伤	0.772
S1-2	0.8 m-5.0 kg	0.990	轻度毁伤	0.823
S2-3	0.8 m-5.0 kg	0.735	中度毁伤	0.870
S4-1	0.8 m-5.0 kg	0.687	中度毁伤	2.344

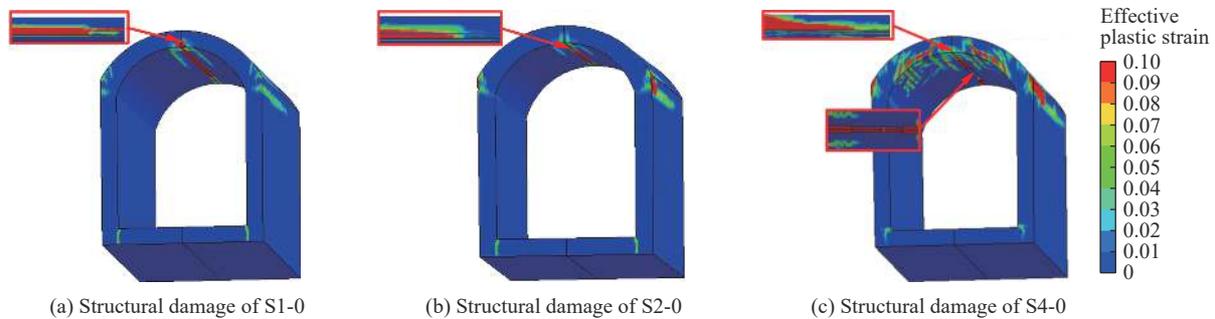


图 12 二次打击工况结构的初始损伤特征

Fig. 12 Initial damage characteristics of structures under secondary explosion

结构在 S2-3 组工况打击下, 结构拱顶挠跨比为 0.87%, 较无初始毁伤打击(S2-0 组)工况挠度(0.772%)有 12.7% 的增幅。在 S2-0 组工况下结构出现一定范围的塑性区(图 12(b)), 拱顶截面处有效高度减小。4.2 节的计算结果显示此工况下结构的刚度比降低了 25.5%, 即结构抗力降低, 从而使得结构在爆炸荷载作用下发生更大的变形。

结构在 S4-1 组工况下拱顶处挠跨比为 2.344%, 较无初始毁伤打击(S2-0 组)工况挠度(0.772%)有 203.6% 的增幅。在 S4-0 组工况下(图 12(c))结构出现较大范围的塑性区, 拱顶截面处有效高度减小。4.1 节的计算结果显示此工况下结构的刚度比降低了 31.3%, 结构抗力明显降低, 以至结构几乎丧失抵抗二次打击的能力。

表 8 不同起爆次序下结构响应对比

Table 8 Structural response under different initiation sequence

试验	工况顺序(距离-当量)	累积挠跨比/%
S2-2	先 0.8 m-5.0 kg, 后 0.8 m-7.5 kg	2.564
S4-1	先 0.8 m-7.5 kg, 后 0.8 m-5.0 kg	4.073

为讨论不同爆炸顺序对结构毁伤程度的影响, 对比 S1-1 与 S3-1, S1-2 与 S2-1, S2-2 与 S4-1, S3-2 与 S4-2 工况下结构顶部的累积挠度, 以讨论爆炸工况作用顺序对结构响应的影响。以 S2-2 与 S4-1 工况为例(表 8), 其中 S2-2 工况组合第 1 次打击工况为 0.8 m-5.0 kg, 第 2 次打击工况为 0.8 m-7.5 kg; 其中 S4-1 工况组合第 1 次打击工况为 0.8 m-7.5 kg, 第 2 次打击工况为 0.8 m-5.0 kg。

S2-2 工况作用下累积挠跨比为 2.564%, S4-1 工况作用下累积挠跨比为 4.073%, 两组工况下结构均发生重度毁伤。由两组工况作用下的挠跨比的对比可以看出: 初次爆炸工况比例爆距小(即初次破坏程度较大)的工况组合对应拱顶累积挠度大, 即二次爆炸作用下的结构毁伤程度受第 1 次爆炸结果影响大。在其他组对比中也呈现此规律。

## 5 结 论

本文中对多次打击下钢筋混凝土直墙拱结构的破坏规律展开分析,并通过数值模拟计算带有不同初始损伤的结构在相同工况二次打击作用下的破坏机理,并研究不同打击次序结构破坏程度的规律。

(1) 分析 3 组试验工况下结构的毁伤机理,发现在爆炸距离较近的工况下,结构的破坏形式既包含整体压缩-弯曲破坏,也包含局部震塌破坏。通过数值模拟计算发现,当比例爆距小于  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,结构的局部震塌破坏程度加大,结构的破坏以局部破坏为主。

(2) 数值模拟得到的速度、压力与试验结果的相对误差均小于 4%,得到的挠度与试验结果的相对误差为 11.46%,验证了数值模拟的可靠性。结合数值模拟和试验现象分析,发现拱顶内侧和拱脚处为直墙拱在近爆作用下常见的破坏位置。

(3) 通过数值模拟计算结构在受打击后的自振周期,通过自振周期改变反映结构的刚度及抗力变化。利用数值模拟计算得出以挠跨比为毁伤判据的毁伤等级评价标准,当挠跨比达到 0.75% 时,结构发生中度毁伤,当挠跨比达到 1.8% 时,结构发生重度毁伤。并以此对数值模拟计算中结构的毁伤情况进行了等级划分。

(4) 对已有毁伤结构进行二次打击数值模拟,带有较大初始毁伤的结构在相同二次打击工况下产生更大的挠跨比。通过数值模拟计算不同打击顺序工况下的结构响应,发现结构的最终毁伤程度受其初次打击影响较大。

在整体作用下,结构的刚度与其承载能力相关,通过刚度折减的概念来定性地表征结构的破坏程度和抗力变化。若能找到刚度折减与抗力降低的映射关系,则可以利用结构的剩余刚度对结构承载能力进行定量地描述。因此,接下来需对这一映射关系展开进一步研究。本文中归纳出打击顺序对结构的破坏程度存在一定的影响,但未详细说明其机理。在接下来的研究中需对爆炸作用下结构传力体系的变化展开讨论。

## 参考文献:

- [1] 王辉明,刘飞,晏麓晖,等. 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(12): 121404. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0171.  
WANG H M, LIU F, YAN L H, et al. Local damage effects of reinforced concrete beams under contact explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(12): 121404. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0171.
- [2] SHI Y C, HONG H, LI Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11): 1213-1227. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.09.001.
- [3] YAO S J, ZHANG D, CHEN X G, et al. Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 66: 120-129. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.027.
- [4] 汪维,张舵,卢芳云,等. 钢筋混凝土楼板在爆炸荷载作用下破坏模式和抗爆性能分析 [J]. *兵工学报*, 2010, 31(S1): 102-106.  
WANG W, ZHANG D, LU F Y, et al. Analysis for blast resistance and damage mode of reinforced concrete slab subjected to explosive load [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 102-106.
- [5] KIGER S A, DALLRIVA F D, HALL R L. Dynamic skin-friction effects on buried arches [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(7): 1768-1781. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:7(1768).
- [6] 孙惠香,许金余,李庆. 爆炸荷载作用下地下结构破坏模式研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(5): 89-92, 98.  
SUN H X, XU J Y, LI Q. The failure mode study of underground structure subjected to blast load [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(5): 89-92, 98.
- [7] 李秀地,郑颖人,徐干成. 爆炸荷载作用下地下结构的震塌破坏模型研究 [J]. *爆破*, 2006, 23(1): 6-9. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2006.01.002.  
LI X D, ZHENG Y R, XU G C. Spall model of underground structures under blast loads [J]. *Blasting*, 2006, 23(1): 6-9. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2006.01.002.

- [8] 李秀地, 郑颖人, 徐干成. 爆炸荷载作用下地下结构的局部层裂分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(6): 853–855, 877. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2005.06.010.  
LI X D, ZHENG Y R, XU G C. Spall response analysis of underground structures under blast loads [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(6): 853–855, 877. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2005.06.010.
- [9] 邓春梅, 许金余, 沈刘军. 装药爆炸下地下拱形结构变形及破坏特征分析 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2007(5): 534–537. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070522.  
DENG C M, XU J Y, SHEN L J. Deformation and damage characteristics analysis of underground arch structure subjected to subsurface blast [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007(5): 534–537. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070522.
- [10] 霍庆, 王逸平, 刘光昆, 等. 地下拱形结构侧顶爆炸的破坏模式及影响因素 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(S1): 105–116.  
HUO Q, WANG Y P, LIU G K, et al. Failure mode and influencing factors of underground arched structure subjected to side top blast [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(S1): 105–116.
- [11] 邓国强. 重复打击下防护结构地冲击初步分析 [C]//第 26 届全国结构工程学术会议论文集 (第 III 册). 2017: 38–42.
- [12] 戎志丹, 孙伟, 张云升, 等. 超高性能钢纤维混凝土抗二次接触爆炸性能研究 [J]. *华北水利水电学院学报*, 2012, 33(6): 1–4. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.001.  
RONG Z D, SUN W, ZHANG Y S, et al. Study on the characteristics of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete under the second explosion [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2012, 33(6): 1–4. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.001.
- [13] 马林建, 赵岩, 张晓, 等. 二次爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁动力响应分析 [J]. *工业建筑*, 2011, 41(S1): 145–148. DOI: 10.13204/j.gyjz2011.s1.179.  
MA L J, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Dynamic response analysis of reinforced concrete beams subjected to secondary impulsive loading [J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(S1): 145–148. DOI: 10.13204/j.gyjz2011.s1.179.
- [14] 马淑娜, 刘新宇, 马林建, 等. 常规武器在土中二次爆炸后对钢筋混凝土梁的动力响应分析 [C]//第 2 届全国工程安全与防护学术会议论文集. 2010: 401–405.
- [15] 杨大兴, 马林建, 马淑娜, 等. 常规武器对钢筋混凝土梁二次爆炸效应分析 [J]. *防护工程*, 2012(6): 38–41.  
YANG D X, MA L J, MA S N, et al. An analysis of the damage effects of a second conventional weapon explosion on reinforced concrete beams [J]. *Protective Engineering*, 2012(6): 38–41.
- [16] 唐廷, 周健南. 地震后地下受损拱结构的抗爆炸能力研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(9): 1736–1744. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.09.010.  
TANG T, ZHOU J N. Study of anti-blasting ability of damaged underground arch structure after earthquake [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(9): 1736–1744. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.09.010.
- [17] WANG J. Simulation of landmine explosion using ls-dyna3d software: benchmark work of simulation of explosion in soil and air [R]. Fishermans Bend, Victoria, Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [18] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. A SPH-lagrangian-eulerian approach for the simulation of concrete gravity dams under combined effects of penetration and explosion [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018(22): 3085–3101. DOI: 10.1007/s12205-017-0610-1.
- [19] ZHANG Y D, FANG Q, LIU O, et al. Numerical and experimental investigation into plane charge explosion technique [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(10): 1179–1185. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.01.009.
- [20] 孙善政, 卢浩, 李杰, 等. 侵爆作用下混凝土靶破坏效应试验与数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(1): 206–212. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.01.026.  
SUN S Z, LU H, LI J, et al. Test and numerical simulation for damage effect of concrete target under penetration and explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 206–212. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.01.026.
- [21] 马维. 地下管道结构爆振效应和冲击破坏行为实验 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2008, 9(1): 39–46. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080109.  
MA W. Experimental investigations on effects of blast vibration and behaviors of impacting failure of underground pipeline structures [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(1): 39–46. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080109.
- [22] 钱七虎. 防护结构计算原理 [M]. 南京: 中国人民解放军工程兵工程学院, 1981: 73–77.

(责任编辑 王易难)