

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0235

钢筋混凝土拱的水下抗爆性能*

杨广栋^{1,2}, 田许杰^{1,2}, 范勇^{1,2}, 田斌^{1,2}, 卢晓春^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探究水下爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱的动力响应特性和破坏特征, 制作了两个钢筋混凝土拱试件, 并开展了水下爆炸试验。试验分为拱外爆炸和拱内爆炸两组, 采用 10 g 乳化炸药, 试验时爆源距结构面最小距离为 10 cm (起爆点位于拱结构正上方和正下方), 通过传感器记录爆炸试验中钢筋混凝土拱典型断面处的水压力及加速度时程曲线。基于 Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) 算法, 建立了空气-水-炸药-钢筋混凝土拱等多介质动态耦合作用模型, 将数值模拟结果与试验结果对比, 验证了数值方法的可靠性。采用验证后的数值模型进一步研究了拱外及拱内爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱的动力响应差异。结果表明: 相同炸药当量下, 内部爆炸有更多的能量作用于混凝土拱, 使结构的动力响应更强烈; 外部爆炸下, 拱顶、拱腰处产生较大裂缝; 内部爆炸时, 迎爆面裂缝数量明显增多, 拱肩位置出现裂缝。钢筋混凝土拱形结构抵抗外部爆炸荷载的能力明显强于内部爆炸荷载。

关键词: 钢筋混凝土拱; 拱外爆炸; 拱内爆炸; 水下爆炸; 抗爆性能

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Blast resistance of reinforced concrete arches subjected to underwater explosions

YANG Guangdong^{1,2}, TIAN Xujie^{1,2}, FAN Yong^{1,2}, TIAN Bin^{1,2}, LU Xiaochun^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering,

China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: As common structures in hydraulic engineering, the arch structures may suffer from explosion load during their operation life. In order to explore the dynamic response characteristics and failure features of reinforced concrete arches subjected to underwater explosions, two reinforced concrete arch specimens were fabricated and underwater explosion tests were carried out. The tests consisted of two groups: external explosion and internal explosion. 10 g emulsion explosives were used, and the minimum distance between the explosion source and the structure was 10 cm (the explosives were placed directly above or below the arch). The time history curves of water pressure and structural acceleration at typical sections of the arches during the explosion tests were recorded. Based on the Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algorithm, a multi-material dynamic coupling model, including air, water, explosive, and reinforced concrete arch was established. The initiation of explosive, the propagation of shock wave, the interaction between fluid and solid, and the dynamic response of the structure were considered in the numerical model. The reliability of the numerical model was verified by comparing the numerical results and the

* 收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(52209162, 52379128); 湖北省自然科学基金(2023AFA048, 2023AFB657); 湖北省水电工程施工与管理重点实验室(三峡大学)开放基金(2023KSD04); 湖北省青年拔尖人才培养计划项目

第一作者: 杨广栋(1991—)男, 博士, 副教授, ygd@ctgu.edu.cn

通信作者: 范勇(1988—)男, 博士, 教授, yfan@ctgu.edu.cn

experimental results. With the calibrated numerical model, the difference of dynamic response of reinforced concrete arches under external explosion and internal explosion was further studied. The results show that more energy acts on the concrete arch, and the structural response is stronger when subjected to internal explosion. Large cracks occur at the vault and waist induced by external explosion. Compared with the external explosion, the number of cracks significantly increases under internal explosion, and cracks also appear at the spandrel. The ability of reinforced concrete arch to resist external explosive loads is significantly stronger than that of internal explosive loads although the explosive weight is the same. For concrete arches that are vulnerable to external explosions, high strength concrete or reinforced reinforcement can be appropriately used in the arch vault and waist. For concrete arches that may be subjected to internal explosions, protective nets can be set to make the explosion occur at a longer distance away from the structures, or high strength materials can be used to resist the overall deformation.

Keywords: reinforced concrete arch; external explosion; internal explosion; underwater explosion; blast resistance.

近年来, 国际局势日益复杂, 发生恐怖袭击和局部战争的风险逐渐增大。精确制导武器的飞速发展, 更是大幅提升了其命中精度和破坏能力, 对重大基础设施的抗爆防护带来严峻挑战, 结构在爆炸荷载下的响应特性及毁伤模式逐渐成为工程防护领域的研究热点。拱结构由于具有跨越能力强、承载能力高等优势, 在土木、水利和交通等领域被广泛应用, 如拱坝、隧道、涵洞、桥梁等。拱形结构所处的环境可以分为空气、水和岩土等, 其在常规静力荷载和地震荷载作用下的受力特性已被广泛研究^[1-6], 但对拱形结构在爆炸等极端荷载作用下的动力响应及破坏特性的研究仍有待深入。由于拱结构的受力特点, 外部和内部爆炸荷载作用下拱形结构的响应差异较大。对于混凝土拱坝或连拱坝, 可能遭受拱外爆炸或拱内爆炸荷载的作用, 如图 1(a) 所示; 对于大型“U”型渡槽, 爆炸冲击波在其内部相对封闭空间内的传播环境与拱形结构内部爆炸非常相似, 如图 1(b) 所示。



(a) Multiple-arch dam



(b) Diversion aqueduct

图 1 水利工程中常见的拱形结构

Fig. 1 Arch structures in hydraulic engineering

对于空中或埋地条件下拱形结构的爆炸响应研究, Chen 等^[7]分析了高强度连拱钢结构在不同炸药当量下的爆炸响应, 并探讨了不同曲率半径、厚度等对拱结构抗爆性能的影响; 周忠欣等^[8]利用几何关系与介质中超压、位移衰减公式得出埋地拱形结构表面荷载和位移的分布规律, 在解析解基础上推导了偏离中心线任意角度荷载作用下埋地拱形结构的弹性动态响应公式; Liu 等^[9]分析了地下拱结构应力荷载的分布规律, 得到了作用于结构的超压和冲量时程曲线, 建立了可以预测拱顶点爆炸荷载的简化公式; 吴克刚等^[10]通过数值方法计算了钢筋混凝土拱在拱顶外部接触爆炸荷载作用下的动态响应过程, 分析了爆炸波与结构的作用形式, 得到拱结构爆后的裂纹分布情况; Wang 等^[11]开展了 8 个钢筋混凝土拱的现场爆炸实验, 探究了结构在 CFRP 加固面积大小和不同爆距两种因素下的破坏模式; Xiao 等^[12]考虑了跨中底面接触和非接触两种爆炸冲击下钢筋混凝土拱板的动态响应, 分析了拱板的破坏模式与毁伤机理; 霍庆等^[13]探讨了地下拱形结构在 45°侧顶爆炸作用下的破坏模式及影响因素, 给出了以挠跨比为毁伤判据的破坏等级划分; 陈昊等^[14]研究了土中浅埋混凝土拱受二次打击的破坏规律, 认为初次爆炸对

结构的最终损伤影响较大。

冲击波在空气中的传播特性与在水中相比有明显不同, 相同当量水中爆炸产生的冲击波峰值和冲量远大于空中爆炸, 对结构的破坏能力更强^[15]。由于空气的压缩性较大, 炸药在空中爆炸后, 爆炸能量将迅速释放, 爆炸压力峰值随距离迅速衰减; 当炸药在水中爆炸时, 水的近似不可压缩性使得水中压力峰值较空中爆炸衰减较慢, 因此相同炸药当量和起爆距离条件下, 空中爆炸和水中爆炸引起拱形结构的破坏模式可能不同。对于拱外爆炸情况, 当爆源距离结构较远时, 入射波及背爆面反射波的强度小于混凝土的动抗压强度和抗拉强度, 结构以整体响应为主; 当爆源距结构较近时, 迎爆面可能出现压缩破坏, 背爆面可能出现拉伸剥落破坏, 同时伴随着整体变形破坏。对于拱形结构内部爆炸情况, 相对封闭的空间将阻碍爆炸能量的快速释放, 结构将产生明显的整体响应; 若起爆距离较近, 爆源近区混凝土还将产生明显的局部破坏。但目前对于水下爆炸荷载作用下混凝土结构的抗爆性能研究主要集中在板、梁、柱等构件。如闫秋实等^[16]对某高桩码头进行了水下近场爆炸计算, 研究了炸药当量及爆源深度等参数对钢筋混凝土桩动力响应和破坏模式的影响, 并给出该钢筋混凝土桩在特定情况下的安全距离; 刘靖晗等^[17]对 2 个不同形式的高桩码头模型进行了水下爆炸试验, 通过总结桩基和上部面板结构的毁伤情况, 分析了炸药位置对高桩码头毁伤效应和破坏机理的影响; Zhao 等^[18]开展了 6 块不同强度、不同钢纤维掺量的混凝土板水下爆炸试验, 通过研究板的破坏特征, 发现钢纤维以不超过 1.5% 的体积含量掺入可以显著提高混凝土的抗爆能力; 贺铭等^[19]研究了近场水下爆炸气泡作用下双层破口结构的破坏机理; Yang 等^[20]研究了不同截面钢筋混凝土柱在水下爆炸冲击波作用下的抗爆性能, 比较了接触和近距离爆炸作用下钢筋混凝土柱的动力响应和破坏特征, 证明了采用圆形截面可以有效提高柱的抗爆性能; Wen 等^[21]开展了混凝土板水下爆炸试验, 揭示了不同装药量下混凝土板的损伤差异。关于水下爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱形结构的抗爆性能研究极少。

本文中采用试验和数值模拟相结合的方法, 探究不同水下爆炸荷载作用下拱形结构的响应特性及破坏机理。

1 试验布置

1.1 试件

预先浇筑两个钢筋混凝土拱形试件, 如图 2 所示, 拱内径 500 mm、外径 600 mm、矢跨比 0.5, 拱厚 100 mm、宽 300 mm; 在半径 550 mm 处 (即中间位置) 布置直径 8 mm 的 HRB400 钢筋, 其中环向 4 根, 间距 80 mm, 下层横向分布 18 根, 间距 100 mm。试件浇筑使用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 每立方米混凝土配料见表 1。试件脱模后在室内自然环境下洒水养护 28 d, 通过 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试样压缩实验, 测得混凝土的平均抗压强度为 45 MPa。

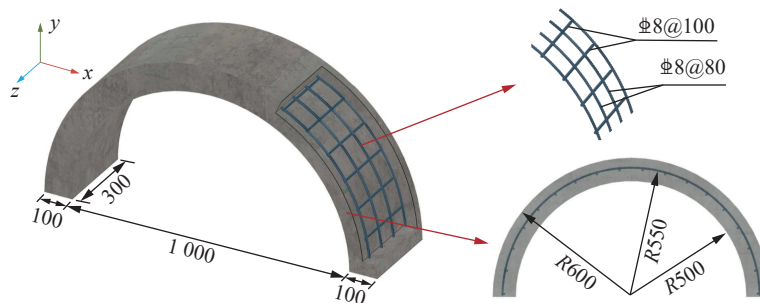


图 2 试件尺寸和配筋 (单位: mm)

Fig. 2 Specimen size and reinforcement (unit: mm)

表 1 每立方米混凝土配料
Table 1 Concrete ingredients per cubic meter

材料	用量/kg	配合比例	规格
水泥	428	1	P.O 42.5
天然河砂	728	1.7	0~3 mm粒径
碎石	1047	2.45	5~15 mm粒径
水	167	0.39	普通自来水
减水剂	5.56	0.013	聚羧酸型

1.2 试验设计

图 3 为试验的现场布置图, 两组试验均在一个直径 2 m、深度 2 m 的爆炸罐中进行, 爆炸罐中水深 1.2 m。将试件放置在预制钢支撑上, 拱脚与钢架之间空隙使用楔形钢片填充, 并利用螺杆夹紧固定, 通过吊机将钢架吊入爆炸罐中。沿拱轴线将试样平均分为如图 4 所示的 8 个区间, 各区间所对应的圆心角为 22.5°, 形成 7 个典型断面, 便于传感器布置及区间内的裂缝分布统计。

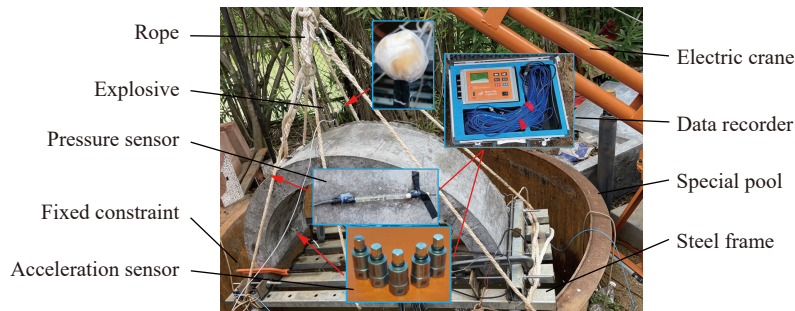


图 3 试验现场布置

Fig. 3 Layout of blast test

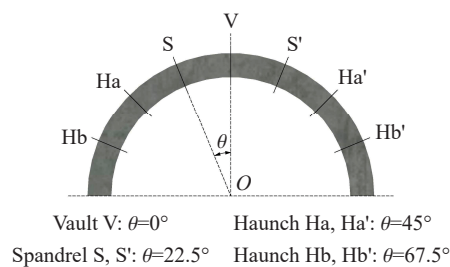


图 4 典型断面划分

Fig. 4 Section division of arch specimen

采用乳化炸药, 通过电雷管起爆, 乳化炸药质量为 10 g。测点布置见图 5, 试验 A-1 为外部爆炸场景 (图 5(a)), 试验 A-2 为内部爆炸场景 (图 5(b))。两组试验起爆点均位于拱顶垂直平面内, 爆源距结构最小距离为 10 cm。在典型断面处布置了加速度和水压力传感器, 监测爆炸过程中结构响应和水中压力时程变化。考虑到试验布置的对称性, 在每个试件的一侧布置 2 个加速度测点和 4 个水压力测点; 外部爆炸在迎爆面 (拱外) S、Ha、Hb 断面布置水压力测点 P1、P2、P3, 在背爆面 (拱内) S 断面布置水压力测点 P4, V 断面和 Ha 断面处布置加速度测点 A1、A2 (图 5(a)); 内部爆炸在迎爆面 (拱内) S、Ha、Hb 断面布置水压力测点 P1、P2、P3, 在背爆面 (拱外) S 断面布置水压力测点 P4, V 断面和 Ha 断面处布置加速度测点 A1、A2 (图 5(b))。

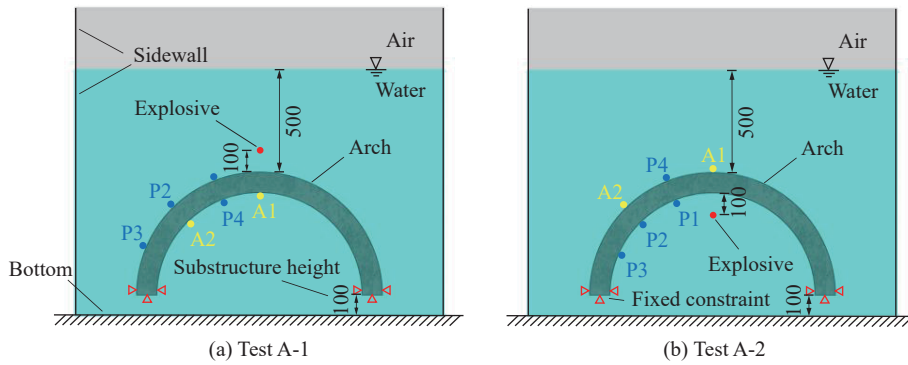


图 5 炸药和测点布置 (单位: mm)

Fig. 5 Explosive and measurement point arrangement (unit: mm)

2 非线性有限元模型

2.1 爆炸试验数值模型

为了深入研究水下外部和内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱形结构的动力响应差异及破坏机理,建立了基于 Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) 算法的多介质动态耦合作用模型,如图 6 所示。该模型主要包括空气、水、炸药和钢筋混凝土拱等;混凝土采用 Lagrange 网格,钢筋采用 Beam 单元,使用分离式建模并通过 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义两者之间的相互作用; Euler 网格用来描述空气、水和炸药;固体和流体间的相互作用通过 ALE 方法^[22]实现。模型中 Euler 域的尺寸为 1 800 mm×1 500 mm×1 500 mm,其中水域高度 1 200 mm,空气域高度 300 mm。混凝土和钢筋单元网格尺寸均为 7 mm;炸药网格尺寸 3 mm;水和空气采用渐变网格,从靠近炸药部分向远处由密到稀。数值模型中在拱脚底面及上部 8 cm 范围内的外表面(试验中夹持拱脚的铁片高 8 cm)上施加作用在节点上的位移约束;数值模拟不考虑爆炸罐壁面的反射作用,在 Euler 域的侧面和顶面施加无反射边界。

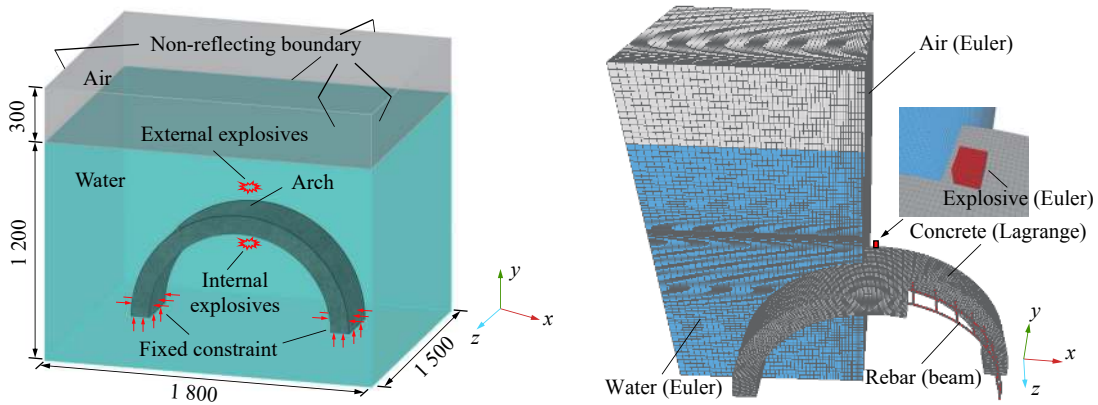


图 6 钢筋混凝土拱水下爆炸数值模型 (单位: mm)

Fig. 6 Numerical model of reinforced concrete arch subjected to underwater explosion (unit: mm)

2.2 材料参数

2.2.1 钢筋

采用随动硬化模型描述冲击、爆炸等动荷载作用下钢材的力学行为。该模型通过 Cowper-Symonds 模型^[23]中的 η 和 λ 两个参数考虑了材料应变率效应,钢筋的屈服应力定义为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\eta} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中: σ_y 为动态极限屈服应力; ε 为应变率; η 为应变率参数, 取 40; λ 为应变率指数, 取值为 5; σ_0 为初始屈服应力, 硬化参数 $\beta=0$, E_p 为塑性硬化模量, ε^{eff} 为等效塑性应变。

试验用钢筋的屈服强度标准值为 400 MPa, 密度 $\rho_0=7850 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 200 GPa, 泊松比 $\nu=0.3$, 切线模量为 2 GPa^[24]。

2.2.2 空气

空气假定为理想气体, 采用线性多项式状态方程描述:

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

式中: p_a 为空气压力, 系数 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$, $C_4=C_5=0.4$ ^[25]; 压缩比 $\mu=\rho/\rho_0-1$, ρ 为当前空气密度, $\rho_0=1.25 \text{ kg/m}^3$ 为初始空气密度; E_a 为气体单位体积的内能, 取值为 250 kJ/m³。

2.2.3 水

水体采用 Grüneisen 状态方程^[25], 当水处于压缩状态时:

$$p_w = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E_w \quad (3)$$

当水处于膨胀状态时:

$$p_w = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E_w \quad (4)$$

式中: p_w 为水中压力, C 为 v_s-v_p (v_s 为冲击波波速, v_p 为波后粒子速度) 曲线的截距 (以速度单位表示), $C=2417 \text{ m/s}$ ^[26]; S_1 、 S_2 和 S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率的无量纲系数, $S_1=1.41$ 、 $S_2=0$ 和 $S_3=0$; $\gamma_0=1.0$; a 为对 γ_0 的无量纲一阶体积修正, $a=0$; 压缩比 $\mu=\rho/\rho_0-1$, 水的密度 $\rho_0=1000 \text{ kg/m}^3$, E_w 为水的体积内能。相关研究发现, 采用 Grüneisen 状态方程可以很好地描述水中爆炸压力的变化规律^[27]。

2.2.4 炸药

Jones-Wilkins-Lee(JWL) 状态方程^[28] 可以较精确地描述爆炸过程中爆生产物的膨胀压力、能量、体积等特性, 压力方程定义为:

$$p_e = m \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + n \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_c}{V} \quad (5)$$

式中: p_e 为爆轰压力, V 为炸药爆轰产物的相对体积, 参数 m 和 n 具有压力单位, E_c 为单位体积爆轰能量的初始值; R_1 、 R_2 、 ω 为无量纲参数。炸药材料参数见表 2, 表中 D 为爆速, p_{CJ} 为 C-J 爆轰压力。

表 2 炸药参数

Table 2 Explosive parameters

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	m/GPa	n/GPa	R_1	R_2	ω	E_c/MPa
1630	6930	21	373.77	3.75	4.15	0.9	0.35	6000

2.2.5 混凝土

爆炸荷载下混凝土材料的动力响应是一个复杂的非线性过程, 本文中采用 RHT 模型^[29] 模拟水下爆炸荷载下混凝土的力学行为。该模型除了具有压力依赖性、应变率敏感性和压缩损伤软化等特点外, 同时引入了第三不变量——偏应力张量对破坏面形状的影响, 考虑了拉静水区和压静水区应变率敏感性的差异性。该模型中采用了弹性极限面、失效面及残余强度面作为 3 个控制破坏面以描述混凝土材料的初始屈服强度、失效强度和残余强度, 如图 7^[29] 所示。该模型不仅可以描述弹性极限面与失效面之间的线性强化阶段, 还可以较好地描述混凝土材料在部分损伤和完全损伤条件下继续抵抗剪切变形的特征。状态方程采用 p - α 方程, 可反映出混凝土在不同孔隙压实程度下的体积改变特征。混凝土的 RHT 模型参数见表 3。

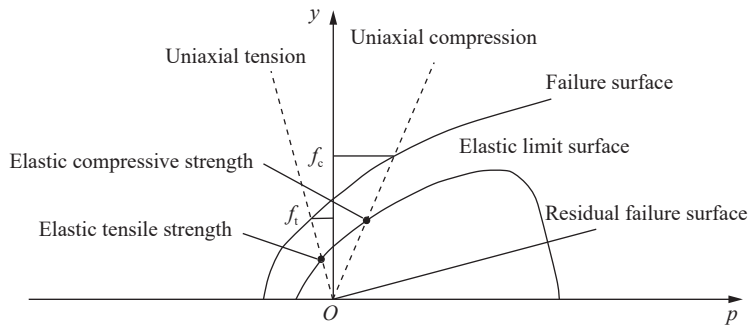


图 7 RHT 模型失效面^[29]

Fig. 7 Failure surface of RHT model^[29]

表 3 RHT 混凝土参数

Table 3 Concrete parameters of RHT model

参数	取值	参数	取值	参数	取值
抗压强度 f_c /MPa	45	失效压缩应变率 ϵ_r/s^{-1}	3×10^{25}	罗德角相关系数 B	0.0105
密度 $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	2314	侵蚀体积应变 ϵ_{e0}	2.0	压缩应变率指数 β_c	0.026
初始孔隙度 α_0	1.1884	多项式参数 A_1/GPa	35.27	拉伸应变率指数 β_T	0.031
孔隙度指数 α_p	3	多项式参数 A_2/GPa	39.58	压缩屈服面参数 G_c^*	0.53
抗压强度比 f_c^*	0.102	多项式参数 A_3/GPa	9.04	拉伸屈服面参数 G_T^*	0.7
剪压强度比 f_s^*	0.18	状态方程参数 B_0	1.22	剪切模量缩减系数 X	0.5
剪切模量 G_{cr}/GPa	17.21	状态方程参数 B_1	1.22	损伤参数 D_1	0.04
破碎压力 p_{cr}/MPa	30	状态方程参数 T_1/GPa	35.27	损伤指数 D_2	1
压实压力 p_{co}/GPa	6	状态方程参数 T_2/GPa	0	最小失效应变 ϵ_{min}	0.01
参考拉伸应变率 ϵ_{0c}/s^{-1}	3×10^{-5}	失效面参数 A	1.6	残余面参数 A_f	1.6
参考压缩应变率 ϵ_{0T}/s^{-1}	3×10^{-6}	失效面指数 N	0.61	残余面指数 N_f	0.61
失效拉伸应变率 ϵ_c/s^{-1}	3×10^{25}	拉压子午比参数 Q_0	0.6805		

3 试验与数值模拟结果

为了验证材料模型和耦合方法的可靠性, 首先将数值模拟的水中压力时程曲线、结构加速度时程曲线与实测数据进行对比。

3.1 水中爆炸压力

爆炸水中压力时程曲线数值计算结果与实测结果的对比见图 8, 测点布置见图 5。图 8(a) 为拱外爆炸水压力对比: P1、P2、P3、P4 测点的峰值误差分别为 13.21%、12.35%、9.24%、9.85%, 均在 15% 以内, 压力峰值及变化趋势与实测数据基本一致。炸药起爆后, P1 测点距离爆源最近, 在较短的时间内达到峰值, 而后以近似指数的形式衰减; 随着与爆源距离的增大, P2 和 P3 测点的峰值逐渐减小。由于 P3 测点与爆源之间的传播路径被混凝土拱遮挡, 致使 P3 测点的水压力变化过程较为复杂; 实测数据中 P3 测点的第 2 个峰值为爆炸罐壁面的反射波峰值。爆炸波透过混凝土拱后传播至 P4 测点, 第 1 个峰值为透射波的峰值, 第 2 个峰值为水中绕射波峰值。

图 8(b) 为拱内爆炸水中压力对比图: P2 测点实测数据异常, 不予分析, P1、P3、P4 测点峰值误差分别为 8.62%、16.74%、15.78%。内部爆炸条件下, 冲击波的传播环境相对封闭, P1 和 P3 测点正对爆源, 在极短的时间内达到峰值, 峰值压力分别为 49.87、20.43 MPa。P3 测点的试验与数值结果均有 2 个明显峰值, 这是由于 P3 测点处于试件下部位置, 距离爆炸罐底部较近, 冲击波在底部发生反射产生的反射波

峰值。总体而言,数值计算的水中各测点的压力时程曲线与实测结果吻合较好,证明了数值模型在模拟爆炸荷载方面的可靠性。

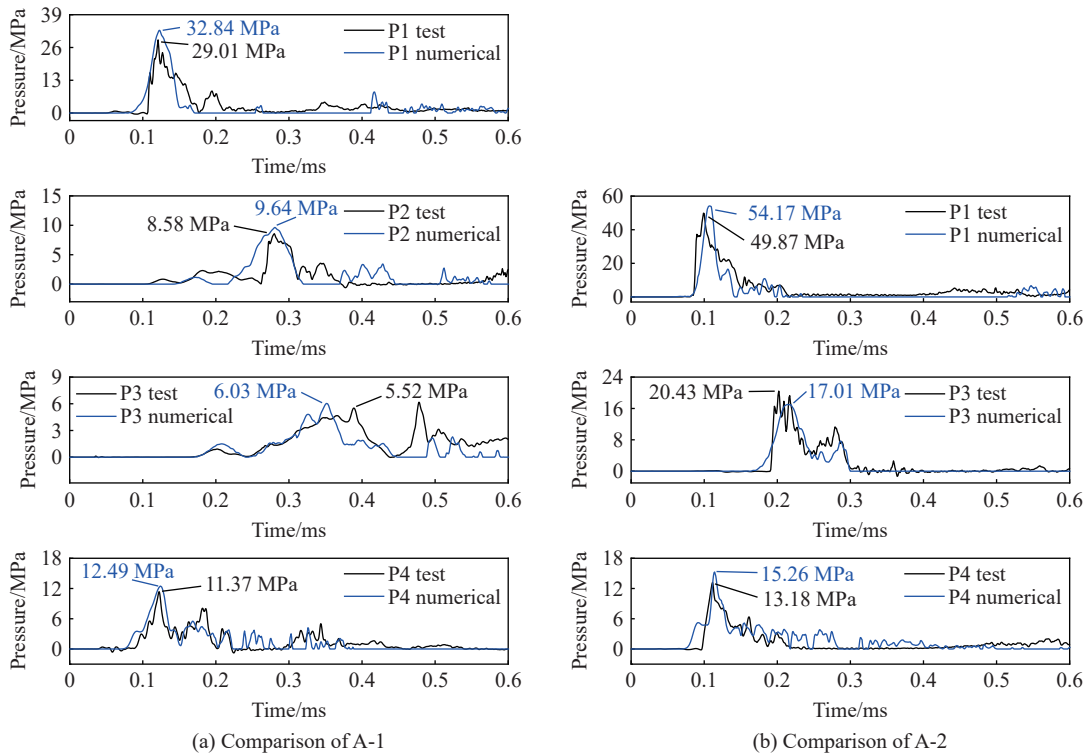


图 8 试验与数值水压力结果对比

Fig. 8 Comparison of water pressure between experimental and numerical results

3.2 钢筋混凝土拱加速度

为了验证数值计算方法在模拟结构爆炸响应方面的可靠性,采用本文数值模型分别模拟拱形结构外部和内部爆炸的两组试验,将计算的典型断面加速度时程曲线与实测结果对比。试件在爆炸荷载的冲击下会产生极高的加速度,加之水下爆炸环境更为复杂,因此试验数据的获取极为困难。由于 A-1 试验中的 A2 测点加速度数据出现异常,因此将其余三组实测加速度数据与数值计算结果进行对比,如图 9 所示。

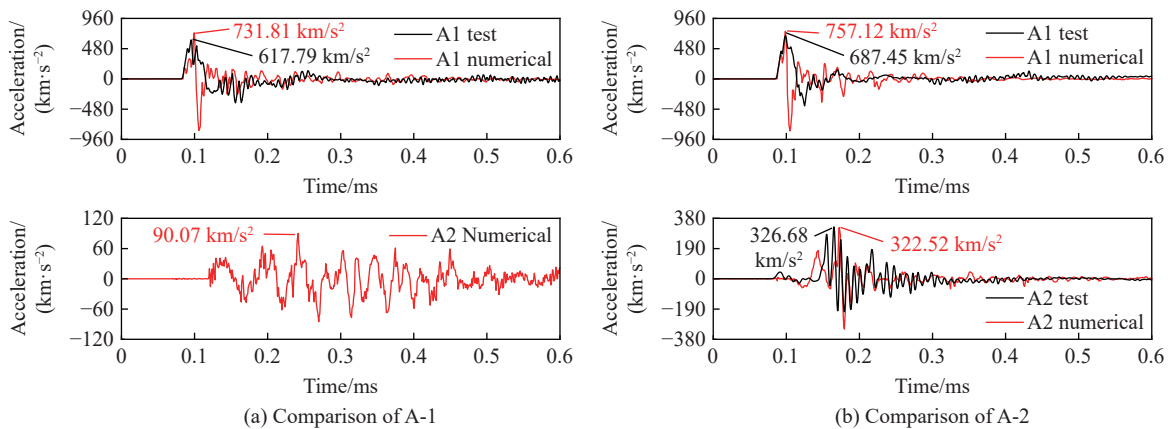


图 9 试验与数值加速度响应结果对比

Fig. 9 Comparison of acceleration between experimental and numerical results

加速度正方向为冲击波传播方向, A-1 试验中 A1 测点和 A-2 试验中 A1、A2 测点峰值误差分别为 18.49%、10.14%、1.25%, 数值计算加速度峰值与试验结果吻合较好。结构的加速度在爆后极短的时间内达到峰值, 而后震荡衰减。由于试验过程中很难做到结构底部的完全固定约束, 而数值模型中假设拱脚是理想状态下的固定约束, 导致试验过程中加速度的谷值均小于数值计算结果, 且数值模拟加速度频率要高于实测结果。从 A-2 试验结果来看, 拱腰处的加速度峰值约为拱顶处的一半, 峰值响应时间滞后于拱顶; 而 A-1 试验在拱腰处的加速度峰值远小于拱顶的一半, 说明内部爆炸条件下拱形结构整体响应大于外部爆炸条件。总体而言, 数值计算结构加速度响应与实测结果较为接近, 证明了采用本文数值方法在模拟结构爆炸响应方面的可靠性。

4 拱外、拱内爆炸下拱形结构动力响应

基于验证后的数值模型, 从爆炸冲击波的传播、钢筋混凝土的受力特性、结构的能量变化、变形分布和损伤分布等方面, 进一步分析水中拱外和拱内爆炸冲击下拱形结构的响应差异。

4.1 爆炸冲击波传播特性

图 10 给出了拱外和拱内爆炸水中冲击波的传播过程, 其中压力为正值, 拉力为负值。从图 10(a) 可以看出, 炸药起爆后, 冲击波以球面波的形式向外传播, 爆源附近水压力达到了几百兆帕; 在 $t=0.064$ ms 左右, 冲击波传播至拱结构顶面并发生反射, 入射波与反射波的叠加使得作用在结构顶面的荷载增大。随着时间的推移, 在 $t=0.135$ ms 时, 压力波透过拱结构, 传播至拱下方的水中, 由于水的波阻抗小于混凝土的波阻抗, 导致压缩波传至结构下表面时产生了反射拉伸波; 同时可以看出, 应力波在混凝土中的传播速度明显快于在水中的传播速度。在 $t=0.191$ ms 时, 背爆面反射产生的拉伸波传播至拱结构顶面, 在顶面出现受拉区; 水中向上传播的压力波遇到自由水面后反射产生稀疏波, 在自由水面附近产生气穴现象。

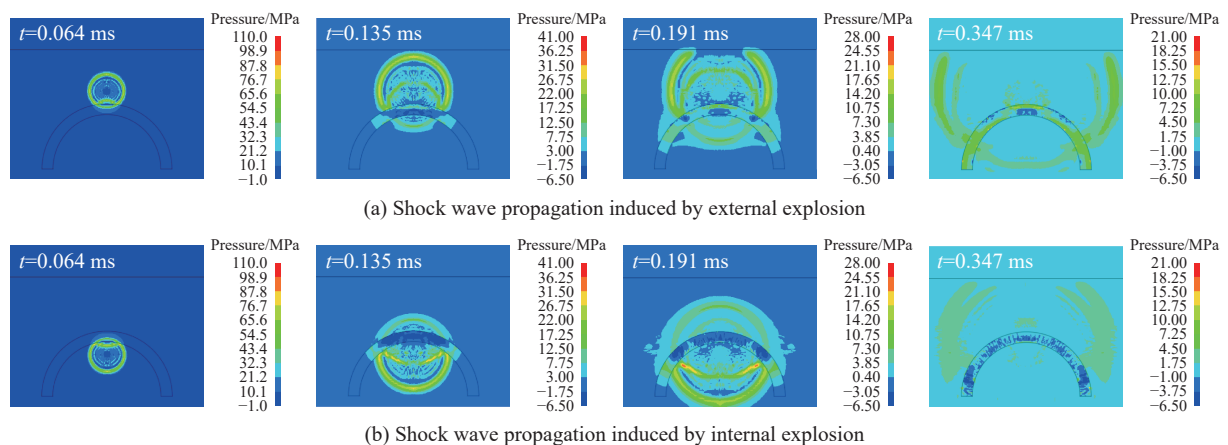


图 10 爆炸冲击波传播过程

Fig. 10 Propagation process of explosion shock wave

图 10(b) 为拱内爆炸时冲击波的传播过程。可以看出, 在拱内和拱外爆炸条件下, 冲击波的传播特性存在明显差异。在与结构作用之前, 冲击波在水中均以球形波的形式向外传播, 且峰值相同。拱内爆炸水中冲击波作用于结构后产生反射, 拱形内部相对封闭的空间使得爆炸能量不能快速消散, 相同时刻拱内爆炸作用于结构的压力峰值明显高于拱外爆炸。在 $t=0.135$ ms 时, 透过混凝土结构的压缩波在水中以更加发散的形式向上传播, 同时可以看出, 水中冲击波作用区域内的混凝土以受拉为主。在 $t=0.191$ ms 时, 受拉区进一步扩大, 且可以看出拱内爆炸时结构的受拉区明显大于拱外爆炸 (图 10(a), 在 $t=0.191$ ms) 时。主要是因为内部爆炸时, 爆炸荷载使得受冲击区域的混凝土向外运动, 加之底部的固定约束, 导致内部爆炸拱形结构以整体受拉为主。

4.2 混凝土受力分析

爆炸荷载作用下拱形结构各部位受力复杂, 通过截面的应力云图可以直观了解结构内部受力状态的变化过程。图 11(a) 给出了 A-1 试验中中心纵剖面最大主应力变化过程, 其中拉应力为正值, 压应力为负值。炸药起爆之初, 拱顶迎爆面由于水压力的作用处于受压状态, 压缩波在背面反射产生拉伸波, 因此在背面出现受拉区 ($t=0.079$ ms); 背爆面反射拉伸波传至迎爆面与入射压缩波叠加, 使得正对爆源的迎爆面也处于受拉状态, 同时压缩波从拱顶向拱脚传播 ($t=0.127$ ms)。由于两端拱脚是固定约束, 在外部爆炸荷载冲击下, 拱结构顶部向内产生变形, 在拱顶及近似 45° 拱腰部位出现受拉区 ($t=0.347$, 0.568 ms)。

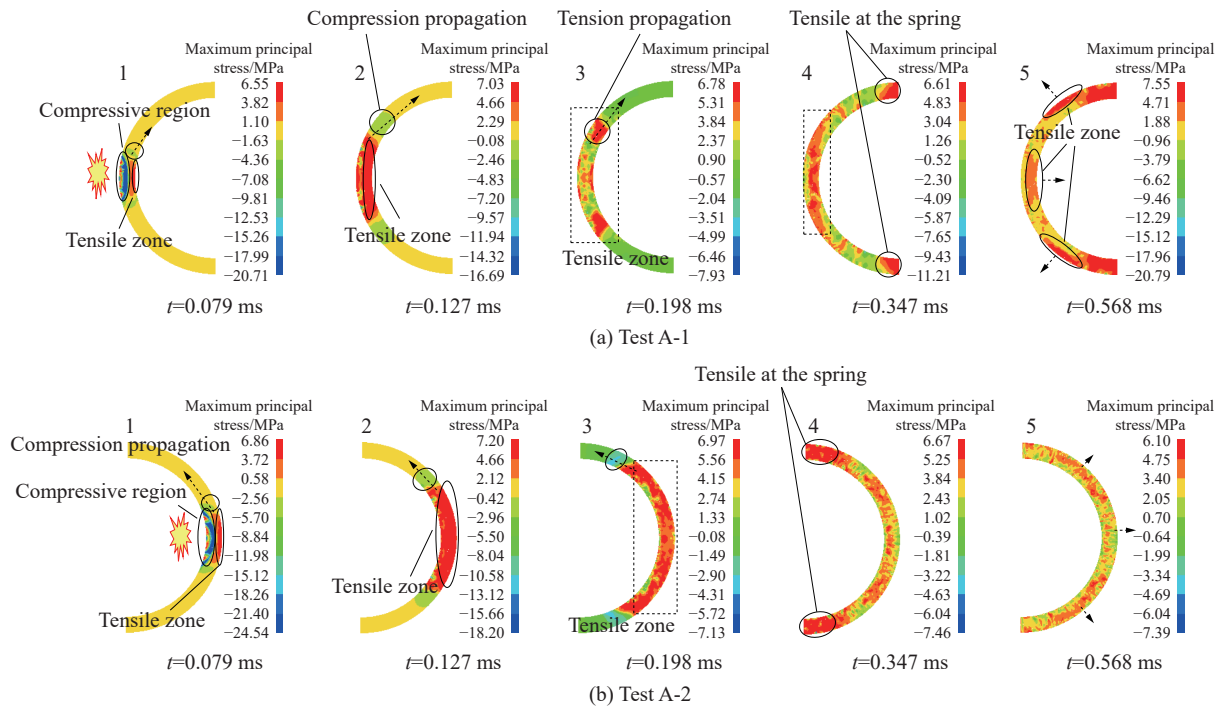


图 11 中心纵剖面最大主应力变化过程

Fig. 11 Change process of maximum principal stress of central longitudinal cross section

图 11(b) 为 A-2 试验中试件纵剖面的最大主应力变化过程, 与外部爆炸相同: 在炸药起爆瞬间, 拱顶迎爆面产生很大的压力、背爆面产生拉应力 ($t=0.079$ ms); 在 $t=0.127 \sim 0.347$ ms 时, 压缩波由拱顶向拱脚传播, 压缩波之间的混凝土均以受拉为主。随着时间的推移, 受拉区域不断增大。由于混凝土的抗拉强度远小于抗压强度, 因此内部爆炸荷载作用下, 沿拱圈极易产生拉裂。与内部爆炸相比, 外部爆炸条件下混凝土受力状态变化更为复杂, 且混凝土拱结构抗压能力强的特性能够被更好利用。

4.3 钢筋受力分析

图 12 给出了钢筋在拱顶和拱腰处的轴向应变时程曲线。拱外和拱内爆炸下, 拱顶处钢筋均以受拉为主, 且拉应变出现峰值的时间相近; 拱顶处钢筋应变达到峰值后逐渐回弹, 内部爆炸下钢筋产生较大残余变形, 残余应变约为 0.006; 外部爆炸下拱顶处钢筋的残余应变较小, 如图 12(a) 所示。

图 12(b) 为拱腰处钢筋应变随时间的变化过程。对于外部爆炸, 结构受力状态变化过程较为复杂, 拱腰处钢筋在初始阶段先受到压应力, 而后受到拉应力, 钢筋残余应变约为 0.001; 对于内部爆炸, 钢筋主要受拉, 且产生的拉应变明显大于外部爆炸荷载产生的应变, 残余应变约为 0.004。对比不同位置处钢筋受力变化过程可以发现, 内部爆炸钢筋产生的残余应变均大于外部爆炸情况, 结构整体受拉, 加之混凝土材料抗拉强度较低, 因此内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱形结构极易产生开裂。

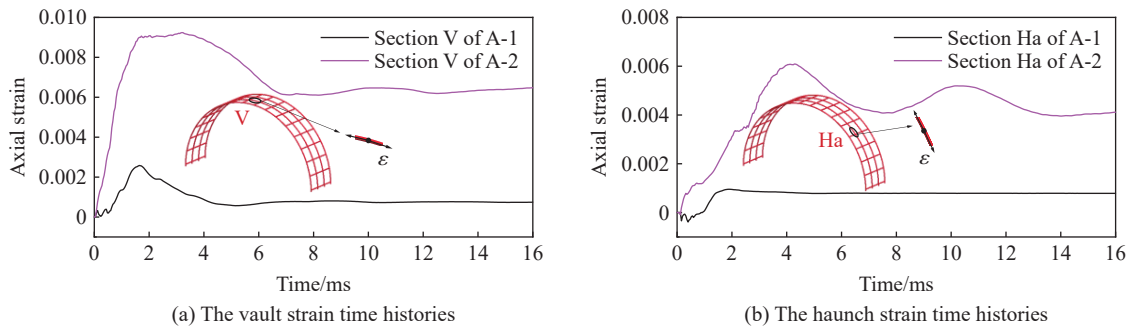


图 12 钢筋轴向应变时程曲线
Fig. 12 Axial strain time histories of steel bars

4.4 拱结构能量分析

图 13(a) 显示了外部爆炸和内部爆炸两种情况下混凝土拱的动能时程曲线。可以看出, 外部和内部爆炸荷载引起结构的动能变化趋势基本一致; 爆炸荷载冲击下混凝土拱的动能在极短的时间内达到峰值 ($t=0.2\text{ ms}$), 而后迅速下降; 在 $t=0.5\text{ ms}$ 时, 动能衰减速率明显下降。这是因为炸药爆炸后, 炸药周围的混凝土在极短的时间内获得了极高的振动速度, 导致动能瞬间达到峰值; 然后局部振动响应急剧下降, 导致动能快速下降; 最后, 结构的整体响应逐渐减小为零。相同炸药当量作用下, 外部爆炸下混凝土拱的动能峰值为 249.85 J , 而内部爆炸下混凝土拱的动能峰值为 408.46 J , 为外部爆炸引起动能的 1.63 倍, 内部爆炸引起结构的动能峰值明显大于外部爆炸, 说明内部爆炸下引起拱形结构的动力响应明显大于外部爆炸荷载引起的响应。

图 13(b) 为外部和内部爆炸荷载作用下拱形结构的内能随时间的变化过程, 两种爆炸荷载作用下混凝土拱的内能变化规律基本相同, 但内部爆炸荷载引起的混凝土内能峰值明显大于外部爆炸荷载。外部爆炸下混凝土拱的内能峰值为 1055.69 J , 内部爆炸下混凝土拱的内能峰值为 1698.37 J , 内部爆炸下混凝土拱的内能为外部爆炸下的 1.61 倍, 导致内部爆炸下结构产生更大的变形和更严重的损伤。

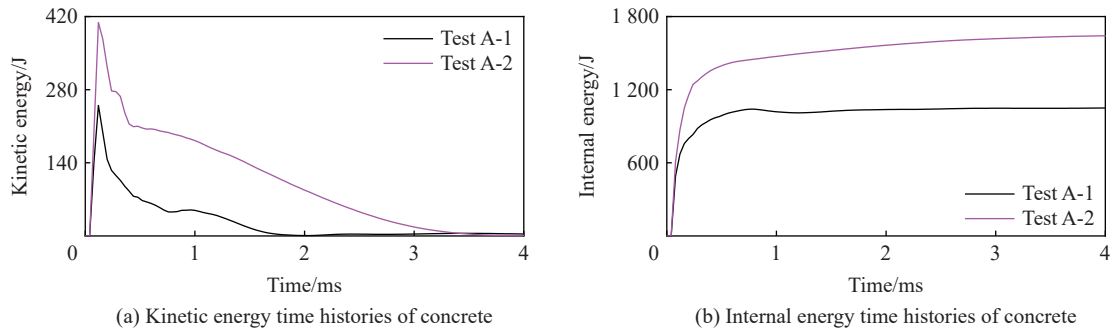


图 13 爆炸冲击下混凝土的能量变化
Fig. 13 Energy time histories of concrete during the explosion

4.5 拱结构变形分析

外部和内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土拱典型断面处的竖向最大位移分布如图 14 所示。图 14(a) 为外部爆炸 (A-1) 下拱结构的位移分布, 可以看出结构顶部受到冲击压缩后产生向内变形, 而由于拱脚处受到固定约束, 导致拱腰以下的部位产生向外变形。外部爆炸冲击下, 正对爆源的拱顶位置产生的最大变形为 2.52 mm , 两侧拱腰产生向上的最大位移为 0.92 mm 。在爆炸荷载与拱脚位移约束的联合作用下, 拱结构的顶部和腰部产生较大变形并出现开裂, 如图 14(b) 所示。

内部爆炸 (A-2) 条件下拱形结构的最大竖向位移分布如图 14(c) 所示, 可以看出, 内部爆炸冲击下结构整体产生向外的变形, 间接说明了内部爆炸情况下拱形结构沿环向处于受拉状态。正对爆源的部位

产生的变形最大, 竖向最大位移为 7.49 mm; 由于混凝土的抗拉强度远小于抗压强度, 内部爆炸冲击下拱形结构沿环向出现多条裂缝, 如图 14(d) 所示。通过以上分析可以看出: 由于混凝土拱结构强受压和弱受拉的受力特性, 在相同爆炸荷载作用下, 内部爆炸引起结构的最大变形远大于外部爆炸。

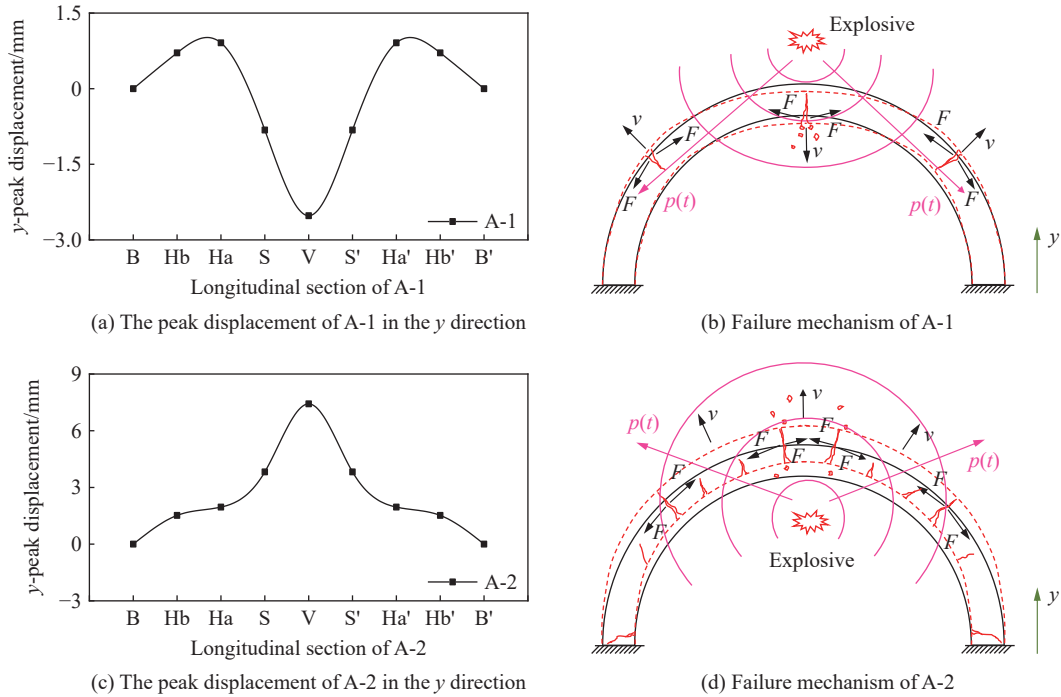


图 14 试件变形分布特征

Fig. 14 Deformation distribution of the specimens

4.6 拱结构损伤分析

外部爆炸荷载作用下, 拱结构的损伤发展过程如图 15(a) 所示。炸药爆炸后, 由于炸药当量较小以及混凝土材料的应变率效应, 在拱结构迎爆面并未出现明显的压缩破坏, 但由于反射拉应力的作用, 在两侧自由面出现了震塌拉伸破坏 (图 15(a), $t=0.2$ ms); 顶部冲击荷载作用下拱顶产生向下变形, 在背爆面出现贯穿宽度方向的拉裂缝 (图 15(a), $t=0.6$ ms); 拱脚的固定约束及拱顶的向下变形, 使得拱腰处产生向外变形, 出现拉裂缝 (图 15(a), $t=16$ ms)。

图 15(b) 为内部爆炸拱形结构损伤发展过程。拱形结构相对封闭的空间使得作用于混凝土的荷载较外部爆炸大, 在两侧自由面产生的震塌破坏 (图 15(b), $t=0.2$ ms) 要大于外部爆炸; 内部爆炸荷载作用于拱圈, 使得整个拱圈产生向外变形, 在拱顶及拱脚出现裂缝 (图 15(b), $t=0.6$ ms); 随着时间的推移, 沿拱圈出现多条拉裂缝 (图 15(b), $t=16$ ms), 裂缝数量明显多于外部爆炸情况 (图 15(a), $t=16$ ms)。

外部和内部爆炸荷载下钢筋混凝土拱爆炸试验损伤分布如图 16 所示, 试验与数值损伤对比见图 17。对于试验 A-1, 混凝土的损伤主要集中在拱顶 V 断面和拱腰 Ha、Ha' 断面处。爆炸试验后, 拱顶正对爆源处出现贯穿裂缝, 背爆面出现轻微剥落破坏, 同时在两侧 45° 位置 (Ha 到 Ha' 断面) 出现贯穿裂缝; 在迎爆面有细小的裂纹产生, 较为均匀地分布在 Ha 到 Ha' 断面区间内的外表面, 如图 16(a) 所示。内部爆炸时迎爆面主要表现为受拉破坏, 拱顶处出现 2 条贯穿裂缝, 特征为外部表面破坏程度较轻, 迎爆面出现更多、破坏更大的细小裂纹, 见图 16(b)。与外部爆炸相比, 内部爆炸混凝土拱产生的裂缝更多, 且分布范围更大。由图 17 的对比可以看出, 不同爆炸荷载下拱形结构损伤分布的数值模拟结果与试验结果均吻合较好, 再次验证了本文采用数值方法的可靠性。对比结果也可以看出, 相同爆炸荷载作用下, 内部爆炸荷载对拱形结构产生的破坏更严重。

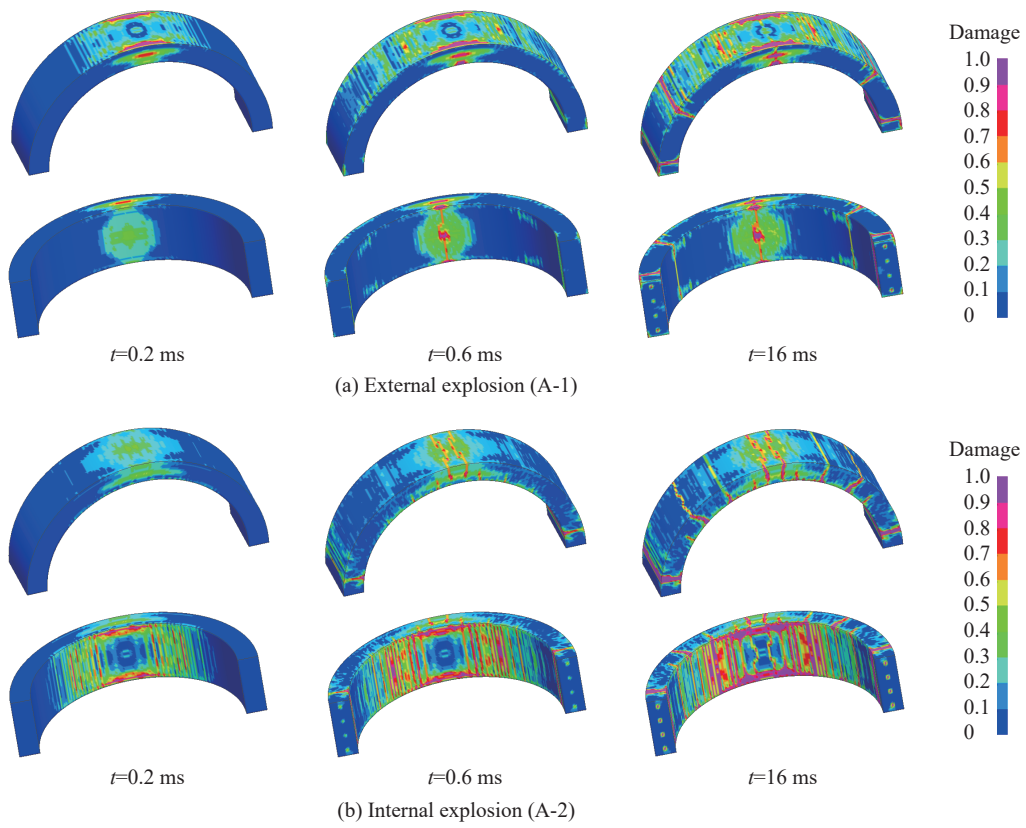


图 15 试件损伤过程

Fig. 15 Specimen damage process

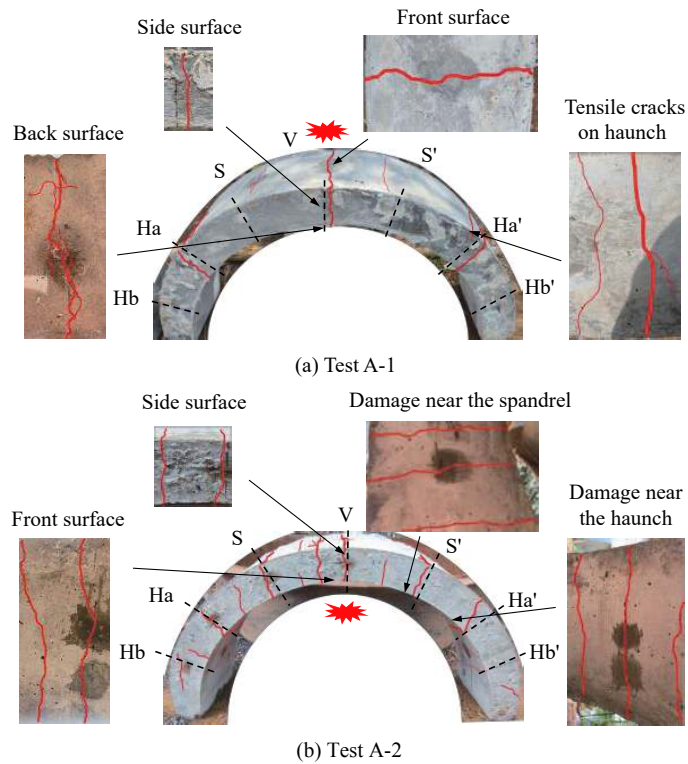


图 16 钢筋混凝土拱爆炸试验损伤分布

Fig. 16 Damage distribution of reinforced concrete arches subjected underwater explosions

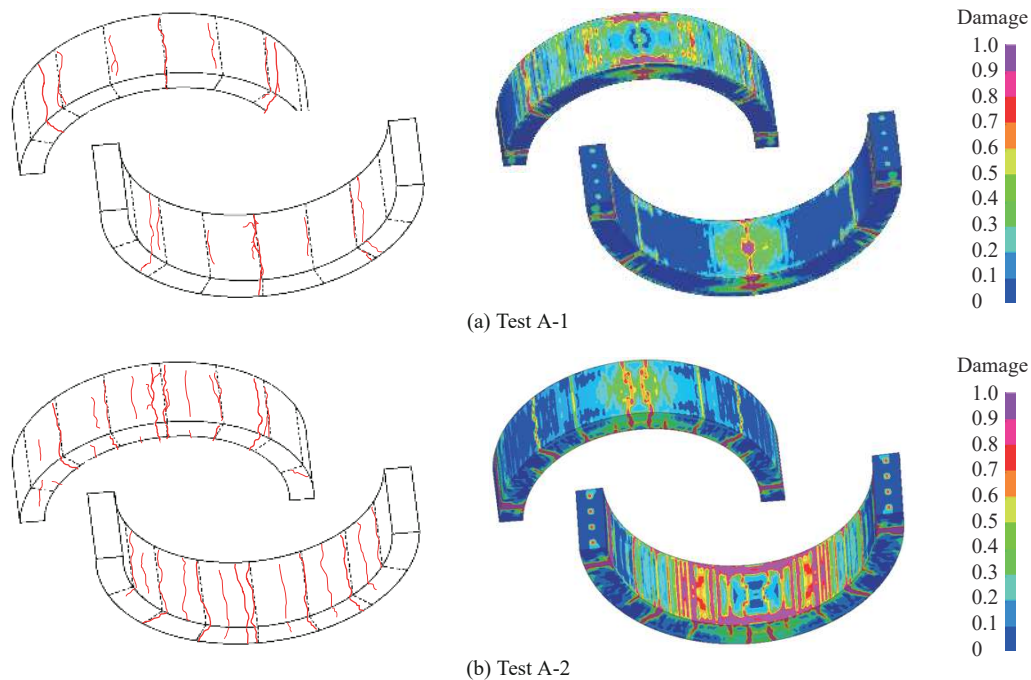


图 17 试验与数值模拟的损伤结果对比

Fig. 17 Comparison of damage results between experiments and numerical simulations

5 结 论

为研究钢筋混凝土拱在爆炸等极端荷载作用下的生存能力,围绕水中爆炸荷载下钢筋混凝土拱的动态响应与破坏机理等,采用爆炸试验和数值模拟相结合的方法,对比分析了外部和内部水中爆炸冲击下钢筋混凝土拱的响应特性及损伤分布特征,得到以下主要结论。

(1) 数值计算的水压力、结构加速度时程曲线和损伤分布规律与试验结果吻合较好,证明了基于 ALE 算法建立的水下爆炸耦合分析模型可以较好地描述钢筋混凝土拱形结构的抗爆性能。

(2) 外部爆炸条件下水中冲击波消散速度较快,爆炸荷载与拱脚固定约束的联合作用使得拱顶向内变形、拱腰向外变形,在拱顶 V 断面和拱腰 Ha、Ha'断面出现较大裂缝,迎爆面出现多处微小裂纹;对于易发生外部爆炸破坏的混凝土拱,在拱顶和拱腰区域可适当选用高强度混凝土或加强配筋。

(3) 内部爆炸环境相对密闭,水中冲击波消散较慢,结构整体向外变形,沿拱圈产生多条裂缝,损伤集中在拱顶 V 断面、拱肩 S、S'断面和拱腰 Ha、Ha'断面,拱顶出现两条较大裂缝,迎爆面产生更多的裂纹;对可能承受内部爆炸的混凝土拱可设置防护网,使爆炸发生在距结构较远的位置以降低传播到结构上的爆炸荷载,或者采用新型高强材料以抵抗结构的整体变形。

(4) 相同当量下,内部爆炸有更多的能量作用于钢筋混凝土拱,引起结构的动态响应比在外部爆炸下更强烈,造成拱形结构破坏更严重;拱形结构抵抗外部爆炸荷载的能力强于抵抗内部爆炸荷载。

参考文献:

- [1] 任伟,盖轶婷,张岗. 纤维复合材料加固初应力下的钢筋混凝土拱分析 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(2): 232-238. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.02.016.
REN W, GAI Y T, ZHANG G. Analysis of RC arch strengthened by bonded FRP under initial stress [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2015, 49(2): 232-238. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.02.016.
- [2] 周健南,金丰年,范华林,等. 震后地下拱结构的抗冲击波动载能力评估 [J]. 工程力学, 2012, 29(2): 159-164,171.
ZHOU J N, JIN F N, FAN H L, et al. Residual dynamic resistance of seismic damaged underground arch [J]. *Engineering*

- Mechanics, 2012, 29(2): 159–164,171.
- [3] ZHANG X, WANG P, JIANG M R, et al. CFRP strengthening reinforced concrete arches: strengthening methods and experimental studies [J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 852–867. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.034.
- [4] 杨绿峰, 陈致. 钢筋混凝土拱承载力分析的齐次广义屈服函数 [J]. *工程力学*, 2023, 40(4): 71–79. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.09.0734.
- YANG L F, CHEN Z. Homogeneous generalized yield function for bearing capacity analysis of reinforced concrete arch [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(4): 71–79. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.09.0734.
- [5] TANG Z X, ZHOU Y Z, FENG J, et al. Concrete protective arches reinforced with BFRP bars: construction and quasi-static structural performances [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103731. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103731.
- [6] TANG L Z, YU L, LUO X, et al. Shaking table test on the seismic response and reinforcement measures of double-arch tunnels in mountainous areas [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 139: 105232. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105232.
- [7] CHEN W S, HAO H. Numerical study of a new multi-arch double-layered blast-resistance door panel [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 43: 16–28. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.11.010.
- [8] 周忠欣, 金丰年, 袁小军, 等. 侧向点爆炸作用下地下拱结构的动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 639–646. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0295.
- ZHOU Z X, JIN F N, YUAN X J, et al. Dynamic response of underground arch structure under lateral point blast loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 639–646. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0295.
- [9] LIU G K, WANG W, LIU R C, et al. Deriving formulas of loading distribution on underground arch structure surface under close-in explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115: 104608. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104608.
- [10] 吴克刚, 胡玉峰, 宋殿义, 等. 钢筋混凝土拱抗爆性能的数值模拟研究 [J]. *采矿技术*, 2018, 18(6): 153–156. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2018.06.051.
- WU K G, HU Y F, SONG D Y, et al. Numerical simulation study on explosion resistance of reinforced concrete arch [J]. *Mining Technology*, 2018, 18(6): 153–156. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2018.06.051.
- [11] WANG P, JIANG M R, ZHOU J N, et al. Spalling in concrete arches subjected to shock wave and CFRP strengthening effect [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74: 10–19. DOI: 10.1016/j.tust.2018.01.009.
- [12] XIAO Y, ZHU W Q, WU W C, et al. Damage modes and mechanism of RC arch slab under contact explosion at different locations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170: 104360. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104360.
- [13] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.014.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.014.
- [14] 陈昊, 卢浩, 孙善政, 等. 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 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(8): 085104. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0260.
- CHEN H, LU H, SUN S Z, et al. Failure law of shallow buried reinforced concrete arch structure under secondary explosion of conventional weapons [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(8): 085104. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0260.
- [15] 周昕清. 爆炸动力学及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 108–118.
- [16] 闫秋实, 宁素瑜, 杜修力, 等. 水中近场爆炸作用下钢筋混凝土桩毁伤效应研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(2): 153–159. DOI: 10.11936/bjutxb2017110011.
- YAN Q S, NING S Y, DU X L, et al. Damage effect for a typical reinforced concrete pile under the near field explosion in water [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, 45(2): 153–159. DOI: 10.11936/bjutxb2017110011.
- [17] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 水下爆炸对高桩码头毁伤效应的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 105–11408. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0467.
- LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Experimental research in damage effects of high-piled wharf under underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 105–114. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0467.
- [18] ZHAO H N, ZHAO X H, FANG H Y, et al. Experimental investigation of steel fiber reinforced concrete slabs subjected to underwater contact explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114664. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114664.

- [19] 贺铭, 张阿漫, 刘云龙. 近场水下爆炸气泡与双层破口结构的相互作用 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 111402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0110.
HE M, ZHANG A M, LIU Y L. Interaction of the underwater explosion bubbles and nearby double-layer structures with circular holes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 111402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0110.
- [20] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Cross-section shape effects on anti-knock performance of RC columns subjected to air and underwater explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 252–266. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.031.
- [21] WEN Y B, CHI H, LAI Z C, et al. Experimental and numerical investigation on saturated concrete subjected to underwater contact explosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 384: 131465. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131465.
- [22] LIU Z P, LI H, LI L. Anti-explosion performance analysis of marine interdiction system based on ALE method [J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e13873. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13873.
- [23] HERNANDEZ C, MARANON A, ASHCROFT I A, et al. A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single Taylor test [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(7): 4698–4708. DOI: 10.1016/j.apm.2012.10.010.
- [24] YUAN S J, HAO H, ZONG Z H, et al. A study of RC bridge columns under contact explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 378–390. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.07.017.
- [25] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual: VOLUME II material models [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2017.
- [26] WEBSTER K G. Investigation of close proximity underwater explosion effects on a Ship-Like structure using the multi-material Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element method [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007: 223–233.
- [27] HAI L, REN X D. Computational investigation on damage of reinforced concrete slab subjected to underwater explosion [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106671. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106671.
- [28] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422 [R]. Livermore: University of California Radiation Lab, 1968. DOI: 10.2172/4783904.
- [29] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures. Berlin, 1999: 315–322.

(责任编辑 曾月蓉)