爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves
DOI：10.11883/bzycj-2025-0347

不同起爆位置下钢筋混凝土拱的水下抗爆性能研究

周涛[1,2]，杨广栋[1,2*]，骆祖俊[1,2]，苏都都[1,2]，范 勇[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：钢筋混凝土拱作为工程中常见的结构，其运行周期内可能遭受爆炸荷载作用。为探究不同起爆位置对涉水钢筋混凝土拱动力响应特性及破坏特征的影响，制作了两个钢筋混凝土拱试件，并开展了水下爆炸试验。试验分为顶部爆炸和侧向爆炸两组，每组试验采用 6 g TNT 炸药，试验时爆源距结构面最小距离为 10 cm（起爆点分别位于拱结构正上方和侧向 45°），通过传感器记录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)算法建立了多介质动态耦合模型，并通过试验结果验证了模型的可靠性。基于验证后的数值模型，进一步分析了钢筋混凝土拱在顶部和侧向爆炸作用下的动力响应差异。结果表明：相同炸药当量下，侧向爆炸引起结构的损伤程度大于顶部爆炸，裂缝数量增多；顶部爆炸下结构变形较为对称，变形主要集中在拱顶和拱腰，而侧向爆炸作用引起拱结构在水平和竖直方向的不对称变形，爆源正对面及远侧拱腰区域响应最为剧烈。

关键字：钢筋混凝土拱；水下爆炸；爆炸位置；动力响应；毁伤机理
中图分类号：O383.1　　国标学科代码：13035　　文献标识码：A

Effect of Detonation Location on the Underwater Blast Resistance of Reinforced Concrete Arches

ZHOU Tao[1,2], YANG Guangdong[1,2*], LUO Zujun[1,2], SU Dudu[1,2], FAN Yong[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: Reinforced concrete (RC) arches are common structures in engineering and may be subjected to explosion loads during their service life. To investigate the influence of detonation location on the dynamic response and failure characteristics of submerged RC arches, two specimens were fabricated and underwater explosion tests were conducted. The two specimens were designed and cast with identical concrete mixture, reinforcement arrangement and curing conditions, so that their initial mechanical properties were kept consistent. The tests were divided into two groups: vault explosion and lateral explosion. In each test, 6 g TNT charges were used, with the standoff distance of 10 cm from the arch surface (the initiation points were located directly above the arch, and at 45° on the side). The charge was carefully positioned and fixed before each detonation, and the same explosive weight and standoff distance were maintained throughout the two groups, so that the detonation location served as the only controlled variable. Pressure and acceleration time histories at typical sections of the RC arch were recorded by sensors during the tests. The sensors were connected to a synchronous data acquisition system, which captured the water pressure acting on the arch and the acceleration response of the structure at the corresponding sections. A multi-medium dynamic coupling model, including air, water, explosive, and RC arch, was established based on the Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algorithm. In the model, the air, water and explosive were represented by Eulerian elements to accommodate large deformation and fluid flow,

*收稿日期：2025-10-21　　；修回日期：2026-11-04
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52579128，52209162，52379128)；中国水力发电工程青年人才托举工程(CSHE-YESS-2024004)
第一作者：周 涛（1982— ）男，博士研究生，35964740@qq.com
通讯作者：杨广栋（1991— ）男，博士，副教授，ygd@ctgu.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

while the RC arch was meshed with Lagrangian elements, and the interaction between them was implemented through a fluid-structure coupling algorithm. Suitable material models and equations of state were assigned to the respective media, and non-reflecting boundary conditions were applied at the boundaries to simulate the infinite water domain and to prevent artificial wave reflection. The numerical model was verified through comparison with experimental results. The simulated pressure and acceleration time histories, together with the predicted crack patterns and failure modes, were compared with the measured data, and good agreement was achieved. Based on the validated model, the dynamic response of RC arches under vault and lateral explosions was further analyzed. The results show that under the same explosive weight, the damage to the structure caused by lateral explosion is greater than that caused by top explosion, and the number of cracks increases. Under the top explosion, the structural deformation is relatively symmetrical, mainly concentrated in the arch vault and arch waist, while the lateral explosion causes asymmetric deformation in the horizontal and vertical directions. The response is most severe in the areas directly opposite the explosion source and the arch waist on the far side.

Keywords: reinforced concrete arch; underwater explosion; explosion location; dynamic response; damage mechanism.

全球化背景下，非传统安全威胁日益突出，由局部军事冲突、恐怖爆炸袭击及工业意外事故所构成的爆炸风险，对重要基础设施的安全性与韧性提出了前所未有的挑战[1-6]。钢筋混凝土拱结构因其良好的受力性能，在工程中得到广泛应用，其在静力或地震荷载作用下的力学行为已有广泛研究。但传统结构设计方法难以有效应对爆炸产生的高强度、短历时冲击荷载，对钢筋混凝土拱在爆炸荷载作用下的动力特性研究相对不足，尤其缺乏针对水下工况的系统性分析。

目前对拱形结构爆炸响应的研究，主要集中在空气或者埋地条件下。霍庆等[7]通过试验与数值模拟，系统研究了 45°侧向爆炸作用下钢筋混凝土拱结构的动态响应与破坏模式，揭示了装药量、混凝土强度、截面厚度及跨度对地下拱结构抗爆性能的影响规律。刘光昆等[8]通过试验研究了顶爆条件下地下钢筋混凝土拱结构的破坏模式，提出了基于挠跨比的破坏等级划分方法，为抗爆设计提供了数据支持。Meng 等[9]通过现场爆炸试验揭示了地下拱结构的爆炸动力响应特性，并提出了预测拱顶峰值位移的理论模型。Chen 等[10]开展了不同当量 TNT 炸药的地下近场爆炸试验，揭示了拱结构的挠度、应变、加速度及破坏等空间分布规律。Xiao 等[11]对两块全尺寸混凝土拱进行了不同位置接触爆炸试验，通过比较二者应力波传播、变形模式和能量转换特征等差异，揭示了空气中不同位置起爆下拱的损伤机理。Shan 等[12]通过现场试验与有限元分析，系统评价了钢箱形拱肋在空中接触爆炸下的破坏模式和修复策略。

与空中爆炸相比，水下爆炸更为复杂，相同炸药当量将对结构造成更严重的破坏[13-14]。目前大量学者已经开展了水下爆炸下结构抗爆性能的研究。Zhao 等[15]研究了空中和水下接触爆炸下钢筋混凝土板的损伤特性，发现水下接触爆炸对钢筋混凝土板的破坏远大于同等炸药量的空气接触爆炸。唐丽莹等[16]采用 Abaqus 声固耦合法研究了水下爆炸冲击波荷载作用下钢筋混凝土板的毁伤特性，分析了影响毁伤的主要参数，提出了轻微、中等和严重三类毁伤等级，并建立了基于 Kriging 模型的毁伤模式预测方法。Chen 等[17]通过数值模拟的方法研究了水下近距离爆炸荷载下背空钢筋混凝土板的损伤，并根据支撑旋转角确定了背空钢筋混凝土板的损伤模式，提出其损伤程度预测公式。Zhuang 等[18]通过试验研究了水下爆炸作用下钢筋混凝土柱的动力响应和损伤特征，评估了高桩码头的抗爆安全性能。闫秋实等[19]针对近场水下爆炸荷载作用下钢筋混凝土桩的动力响应与破坏模式开展了研究，并提出了相应的损伤评估方法。董琪等[20]研究发现，水下接触与近场爆炸作用下沉箱码头的主要毁伤集中于迎爆外墙和面板区域，其破坏过程主要受沉箱内部冲击波在隔墙及填砂界面的反射、透射与衰减规律控制。周龙云等[21]基于任意拉格朗日-欧拉方法研究了近场水下爆炸荷载作用下桥墩的动力响应与损伤机理，结果表明气泡脉动对桥墩损伤具有不可忽视的影响，且在相同 TNT 当量下，桥墩内部起爆所致损伤最为严重。Yang 等[22]通过现场试验和数值模拟，研究了水下爆炸作用下孔口的抗爆性能，并分析了炸药量、爆炸位置、孔口尺寸、钢筋和混凝土强度等参数的影响。然而，针对

录用稿件，非最终出版稿

钢筋混凝土拱结构在水下爆炸荷载作用下的研究仍相对匮乏。

本文通过水下爆炸试验研究了顶爆和侧爆条件下钢筋混凝土拱的动力响应和毁伤分布规律。制作了 2 块钢筋混凝土拱试样，开展了水中不同爆炸位置条件下拱结构的抗爆性能试验，记录了作用于拱结构的水压力时程曲线、结构的加速度时程曲线及爆后毁伤空间分布特征。利用 ALE 方法构建了钢筋混凝土拱水下爆炸动力响应的数值模型，并结合试验结果对模型进行了验证。基于验证后的数值模型，进一步探究了爆炸冲击波传播特性、拱结构变形分布以及能量变化过程。相关成果可为拱结构的水下抗爆设计提供参考。

1 水下爆炸试验布置

1.1 钢筋混凝土拱试件

本试验共设计了两块钢筋混凝土拱试件，如图 1 所示。在试验设计中，钢筋混凝土拱试件的尺寸经过合理选取，以保证试件的安全搬运与安装，并参考了类似尺寸拱的空气爆炸试验[23]。拱试件的内径 400 mm、外径 480 mm，拱厚 80 mm、宽 250 mm。在半径 440 mm 处布置直径 6 mm 的 HRB400 钢筋，其中环向钢筋间距 100 mm、宽度方向钢筋间距 120 mm。每立方米混凝土配料见表 1，根据表 1 中的配合比，制作了 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体混凝土试件进行单轴压缩实验，测得混凝土的平均抗压强度为 40.7 MPa。在浇筑过程中，采用木制模板，以确保拱试件表面平整光滑。试验所用的砂、石等材料均提前人工筛选，保证颗粒级配良好且无杂质。混凝土的填充与振捣工作同时进行，振捣时间充分，以确保内部气泡充分排出，避免产生孔洞和蜂窝状缺陷，从而提升试件的密实性与结构完整性。浇筑完成后，在试件表面覆盖保护膜并定时洒水养护，减少收缩裂缝的产生，确保混凝土拱试件的内部质量和后续试验结果的可靠性。脱模后，试件被转运至通风、阴凉的室内环境中，进行持续 28 天以上的洒水养护，以保证混凝土强度的充分发展。

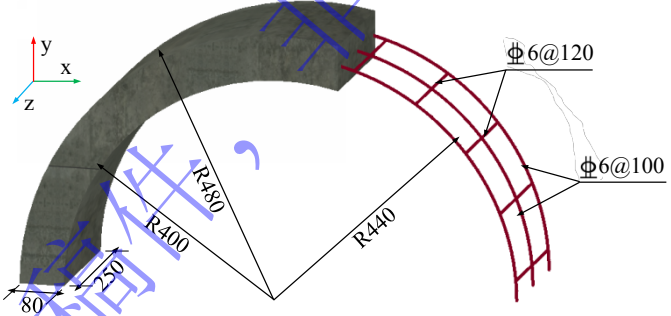


图 1 拱试件尺寸(单位：mm)
Fig.1 RC arch dimension (unit: mm)

表 1 混凝土配料

Table 1 Amounts of each cubic material for concrete

材料	立方体用量/kg	配合比例	规格
水泥	428	1	P.O 42.5
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

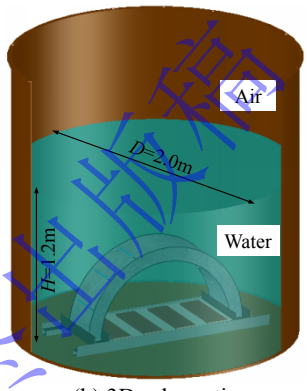
试验在直径 2.0 m、深度 2.0 m 的圆柱形爆炸罐中开展，爆炸罐掩埋在土体中，试件放置在钢架卡槽内，拱脚处的位移受到约束，如图 2 所示。试验时水深为 1.2 m，通过预制支架，固定炸药位置。图 3 为炸药和测点布置图，试验主要通过加速度传感器和压力传感器监测试件在爆炸冲击下的加速度响应及其表面受到的水压力大小。沿着拱轴线把试件分成八个相等区间段，每段圆心角为 22.5°，从而形成七个典型断面，用于安装传感器及统计损伤分布情况。对于试件 A-1（顶部爆炸工

录用稿件，非最终出版稿

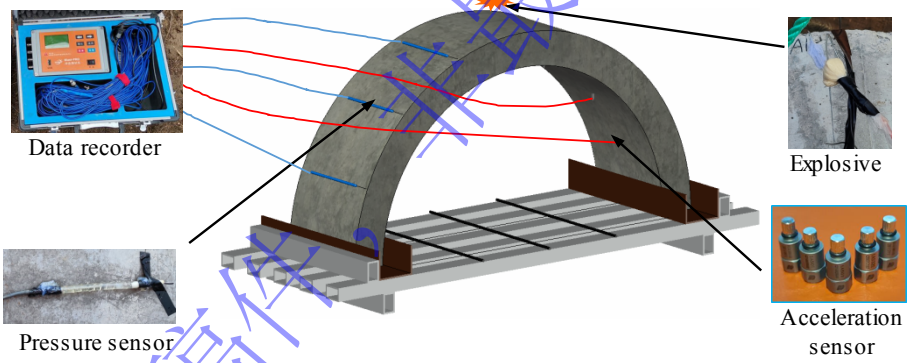
况），水压力测点 P1、P2 分别布置于左侧拱段 S 的内外表面，主要用于对比内外表面在冲击波作用下的压力响应差异，从而分析冲击波透射与反射效应；P3 和 P4 分别布置于 Ha 和 Hb 的迎爆面，用以捕捉冲击波沿拱结构传播过程中的压力衰减特征。加速度测点 A1、A2、A3、A4、A5 分别布置于 V、S′、Hb′、Ha′及 Ha 的背爆面，其目的是获取结构关键位置在冲击荷载作用下的动力响应。对于试件 A-2（侧向爆炸工况），由于爆源位置发生改变，冲击波传播路径及能量分布随之调整，因此将水压力测点 P3、P4 布置于 Hb 和 V 的迎爆面，以更有效地记录侧向入射冲击波在拱结构上的作用过程。同时，加速度测点 A1～A5 分别布置于 S、Ha、Ha′、Hb 及 V 的背爆面，使测点分布与冲击波主要传播方向相匹配，从而能够更准确地反映结构在不同方位上的动力响应差异。6 g TNT 炸药分别放置于拱正上方和侧 45°上方 10 cm，具体工况见表 2。



(a) scene photograph



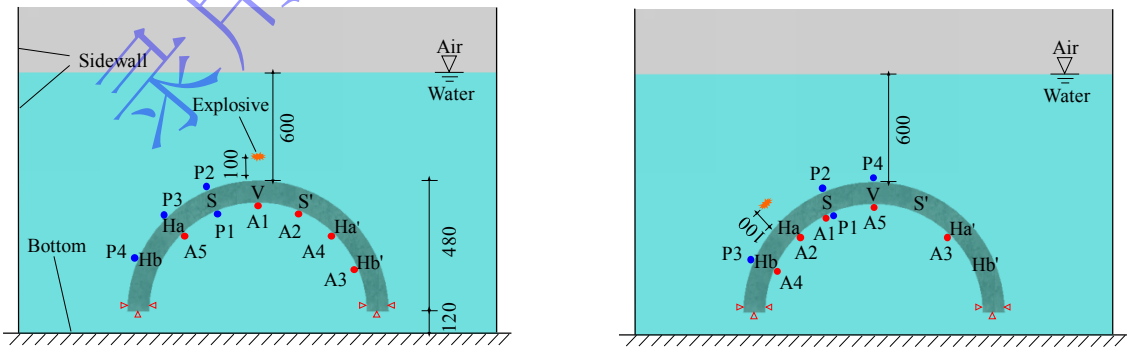
(b) 3D schematic



(c) layout of equipment

图 2 试验布置

Fig. 2 Layout of blast test



(a) Specimen A-1　　(b) Specimen A-2

图 3 炸药和测点布置(单位：mm)

Fig. 3 Layout of explosive and measurement points (unit: mm)

表 2 工况类型

Table 2 Types of operating conditions

录用稿件，非最终出版稿

试件编号	TNT 炸药当量/g	起爆角度 θ/°	起爆距离/cm	尺寸/mm
A-1	6	0	10	960×250×480
A-2	6	45	10	960×250×480

2 数值模拟

2.1 数值模型

为研究水下爆炸作用下钢筋混凝土拱的抗爆性能及其影响因素，采用数值模拟方法对试验进行再现，并借助验证模型对不同工况进行计算。该模型基于 Arbitrary Lagrange-Euler (ALE)算法，涵盖空气、水、炸药及钢筋混凝土拱等，如图 4 所示。空气、水和炸药采用 Euler 网格；混凝土采用 Lagrange 网格，通过*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID[24]实现流体和固体之间的相互作用；钢筋采用 Beam 单元，与混凝土采用分离式建模，二者之间通过固接实现相互作用。Euler 域的尺寸设置为 1500 mm×1000 mm×1400 mm，网格大小为 10 mm；混凝土和钢筋单元的网格均划分为 5 mm。炸药采用体积分数法，通过关键词*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 定义。为简化模型，在距拱脚表面 60 mm 处对节点施加位移约束，并考虑到罐壁反射波经远距离传播后峰值明显衰减，对结构响应和损伤分布影响较小，因此在 Euler 域外表面设置无反射边界，忽略罐壁反射。

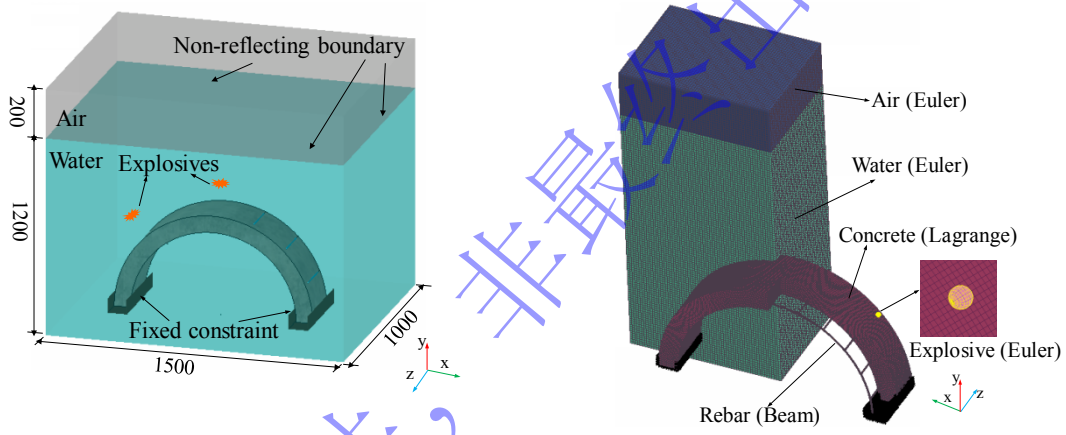


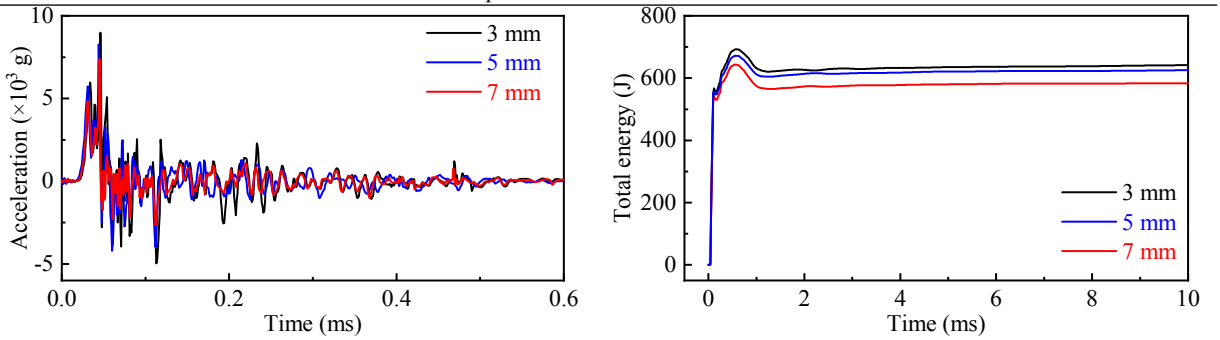
图 4 钢筋混凝土拱数值模型(单位：mm)

Fig.4 Numerical model of the RC arch (unit: mm)

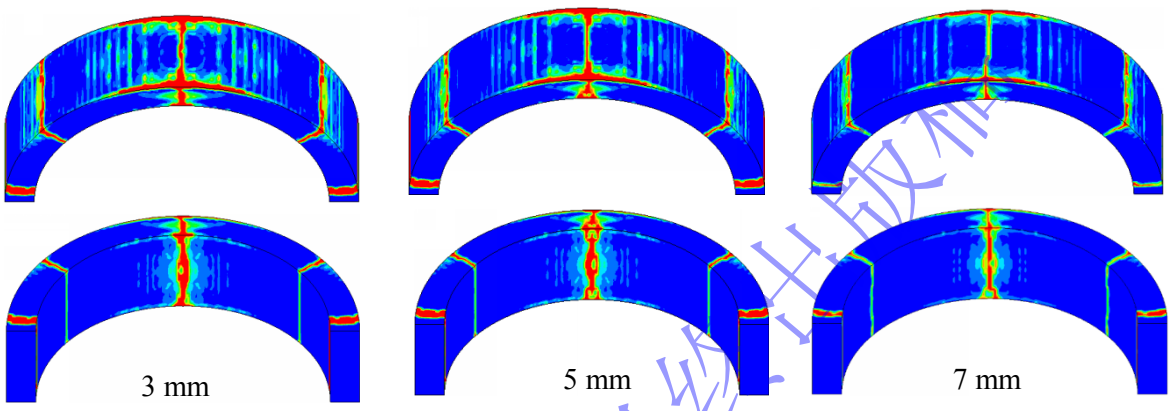
2.2 网格敏感性分析

为保证爆炸过程数值模拟结果的准确性，并在计算精度与计算效率之间取得合理平衡，本文开展了网格敏感性分析。针对本文工况，分别采用 3 mm、5 mm 和 7 mm 三种网格尺寸进行计算。图 5(a)给出了不同网格尺寸下背爆面拱顶（V 断面）处测点的加速度时程曲线。结果表明，随着网格尺寸增大，测点峰值加速度逐渐减小。其中，当网格尺寸为 7 mm 时，加速度响应明显低于 5 mm 和 3 mm 两种情况，表明网格尺寸过大可能影响冲击响应的模拟精度；而 5 mm 与 3 mm 网格尺寸下的加速度曲线变化趋势及峰值较为接近，表明计算结果已基本达到网格收敛。图 5(b)给出了不同网格尺寸下混凝土总能量的变化情况。可以看出，随着网格尺寸增大，总能量逐渐减小，其中 7 mm 网格对应的总能量明显低于 5 mm 和 3 mm，而后两者数值较为接近，说明进一步细化网格对计算结果的影响已较为有限。图 5(c)展示了不同网格尺寸下拱试件的最终损伤形态。当网格尺寸为 3 mm 和 5 mm 时，试件迎爆面和背爆面的损伤形态较为相似，表明计算结果已趋于收敛；而当网格尺寸增大至 7 mm 时，试件压缩损伤区域面积明显减小，裂缝长度和宽度也明显缩短。综合以上分析，本文最终采用 5 mm 的网格尺寸。

录用稿件，非最终出版稿



(a) Acceleration (b) Total energy



(c) Damage

图5 网格敏感性分析

Fig.5 Results of mesh sensitivity analysis

2.3 材料参数

2.3.1 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，本文混凝土采用RHT[25]材料模型。RHT模型已广泛应用于爆炸冲击荷载作用下混凝土结构动态响应和破坏行为的研究，是一种较为成熟的高应变率混凝土本构模型，能够较好地反映材料的应力硬化、应变率效应、孔隙压实以及损伤演化过程，较适合描述水下爆炸荷载作用下混凝土的非线性动力行为。模型参数的取值主要参考相关文献[26-27]，并结合本文混凝土强度试验结果进行修正确定。模型主要参数依据实测抗压强度进行调整，初始压实压力、初始孔隙度以及应变率相关参数按照RHT模型相应关系确定，具体参数见表3。

表 3 混凝土参数

Table 3 Concrete parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
抗压强度 f_c (MPa)	40	状态方程参数 B_1	1.22	失效压缩应变率 ε_T (s^{-1})	3e+25
密度 ρ_0 ($kg·m^{-3}$)	2400	状态方程参数 T_1 (GPa)	35.27	侵蚀体积应变 ε_{ero}	0.5
初始孔隙度 α_0	1.09	状态方程参数 T_2 (GPa)	0	多项式参数 A_1 (GPa)	35.27
孔隙度指数 α_P	3.0	失效面参数 A	1.6	多项式参数 A_2 (GPa)	39.58
拉压强度比 f_t*	0.13	失效面指数 N	0.61	多项式参数 A_3 (GPa)	9.04
剪压强度比 f_s*	0.2	拉压子午比参数 Q_0	0.6805	状态方程参数 B_0	1.22
剪切模量 G_{el} (GPa)	17.21	罗德角相关系数 B	0.0105	损伤参数 D_1	0.04
破碎压力 P_{cr} (MPa)	30	压缩应变率指数 β_c	0.0285	损伤指数 D_2	1
压实压力 P_{co} (GPa)	6.0	拉伸应变率指数 β_t	0.033	最小失效应变 ε_{min}	0.01

录用稿件，非最终出版稿

参考拉伸应变率 ε_{0C} (s^{-1})	3e-5	压缩屈服面参数 G_C*	0.53	残余面参数 A_f	1.6
参考压缩应变率 ε_{0T} (s^{-1})	3e-6	拉伸屈服面参数 G_T*	0.7	残余面指数 N_f	0.61
失效拉伸应变率 ε_C (s^{-1})	3e+25	剪切模量缩减系数 X	0.5		

2.3.2 钢筋

采用 Cowper-Symonds 模型[28]描述钢筋的非线性行为，屈服方程定义为：

$$\sigma_y=\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\eta}\right)^{\frac{1}{\lambda}}\right]\left(\sigma_0+\beta E_P\varepsilon^{\text{eff}}\right) \tag{1}$$

式中：σ_y 为动态屈服强度，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率；η 为应变率参数，E_P 为塑性硬化模量，λ 为应变率指数；σ_0 为初始屈服应力，硬化参数 β 设定为 0，ε^{eff} 为等效塑性应变。试验所用钢筋的材料参数详细参数见表 4[29]。

表 4 钢筋参数

Table 4 Reinforcement parameters

材料类型	密度 ρ_s/kg·m^{-3}	弹性模量 E/GPa	泊松比 υ	屈服强度 σ/MPa	切线模量 G/GPa
钢筋	7850	200	0.3	400	2.0

2.3.3 炸药

TNT 炸药用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程[30]描述，其形式为：

$$p_e=m\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+n\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_e}{V} \tag{2}$$

式中：R_1、R_2、ω、m 和 n 表示与炸药种类有关的经验常数，p_e 为爆轰压力，V 为 TNT 的相对体积，E_e 为每初始单位体积爆轰能；D 为爆速，P_{CJ} 为爆轰 C-J 压力。炸药的具体材料参数见表 5。

表 5 炸药参数

Table 5 Explosive parameters

密度 ρ_e/kg·m^{-3}	爆速 D/m·s^{-1}	C-J 压力 P_{CJ}/GPa	m/GPa	n/GPa	R_1	R_2	ω	E_e/MPa
1630	6930	21	373.77	3.75	4.15	0.9	0.35	6e+3

2.3.4 水

采用 Gruneisen 状态方程[31-33]描述水体，当水处于压缩状态时：

$$p_w=\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu)E_w \tag{3}$$

当水处于膨胀状态时：

$$p_w=\rho_0C^2\mu+(\gamma_0+a\mu)E_w \tag{4}$$

式中：p_w 为水中压力，C=2417 m/s，表示 v_s-v_p 曲线的截距；S_1=1.41、S_2=0 和 S_3=0 为斜率系数；γ_0=1.0 且 a=0 为修正参数；压缩比 $\mu=\rho/\rho_0-1$，ρ_0=1000 kg/m^3 为水的密度，E_w 为水单位体积的内能。

2.3.5 空气

用理想气体状态方程描述空气，采用线性多项式状态方程[31]描述：

$$p_a=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_a \tag{5}$$

式中：p_a 为空气压力，系数 C_0、C_1、C_2、C_3、C_6 均为 0，C_4 和 C_5 为 0.4；E_a 为气体单位体积的内能，压缩比 $\mu=\rho_1/\rho_2-1$；ρ_1 为当前空气密度，ρ_2 为初始空气密度。

录用稿件，非最终出版稿

3 试验与数值模拟结果

3.1 水中爆炸压力

图 6 展示了试件A-1 各测点的水压力时程曲线，数值模拟压力峰值及变化趋势与实测数据基本一致。爆炸后，位于爆源附近的P2 测点压力迅速增至峰值，随后呈指数式衰减。随着与爆源距离增加，P3 与P4 测点的峰值逐渐减小。P1 测点由于混凝土拱体的遮挡，其压力峰值显著低于P2。P1 的试验峰值水压力为 10.52 MPa，数值模拟峰值为 11.83 MPa，相对误差为 12.5%。P2 的试验峰值为 40.48 MPa，数值模拟峰值为 44.79 MPa，相对误差为 10.6%。P3 的试验峰值为 14.94 MPa，数值模拟峰值为 14.04 MPa，相对误差为 6.0%。P4 的试验峰值为 8.17 MPa，数值模拟峰值为 7.52 MPa，相对误差为 8.0%。

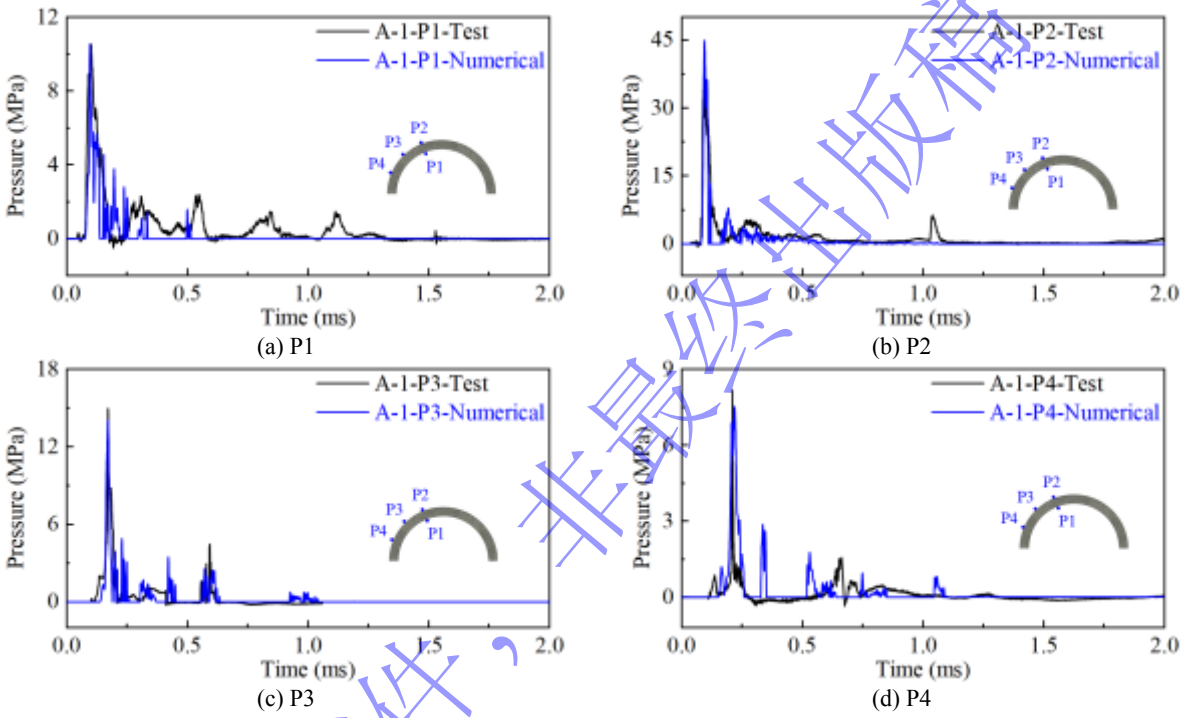


图6 试件A-1试验与数模水压力对比

Fig.6 Comparison of experimental and numerical water pressure results for Specimen A-1

图7为试件A-2水压力时程曲线的试验结果与数值模拟结果对比，其中测点P1和P4在爆炸过程中损坏，未能获得有效的试验数据，但数值模拟得到了对应点的压力峰值。这主要是因为在爆炸冲击作用下，传感器可能出现脱落、位置偏移或信号连接异常等情况，从而导致部分测点数据未能有效记录。侧向起爆后，冲击波几乎同时传播至P2和P3测点，因此两者的压力峰值接近。随着传播距离的增加，P4测点的压力峰值显著降低。P1的数值模拟峰值为11.39 MPa。P2的试验峰值为41.73 MPa，数值模拟峰值为46.46 MPa，相对误差为16.0%。P3的试验峰值为42.42 MPa，数值模拟峰值为45.72 MPa，相对误差为7.8%。P4的数值模拟峰值为15.43 MPa。

总体而言，数值模拟结果与试验峰值水压力吻合良好，测点的相对误差均在20%以内，验证了数值模型在模拟爆炸荷载方面的可靠性。同时，上述结果表明，拱结构不仅对爆炸波的衰减产生阻隔效应，同时还会引起波的反射、透射和绕射，使各测点记录的压力时程曲线呈现出明显差异，从而对拱结构的动力响应产生显著影响。

录用稿件，非最终出版稿

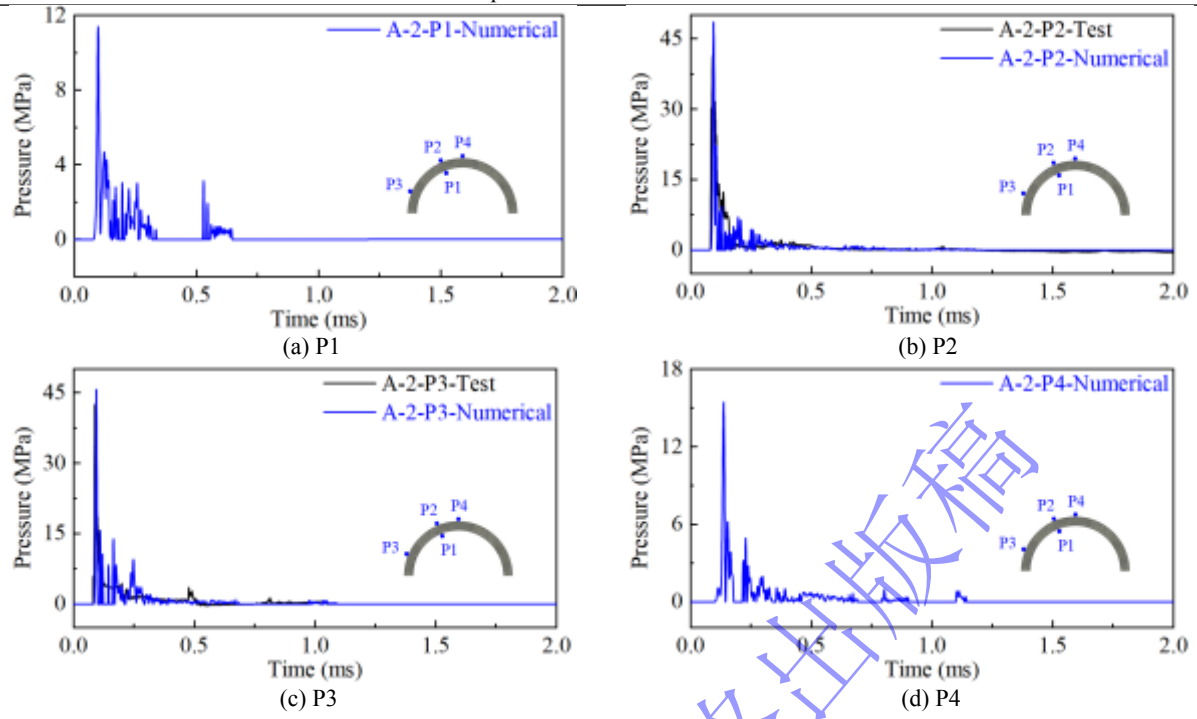
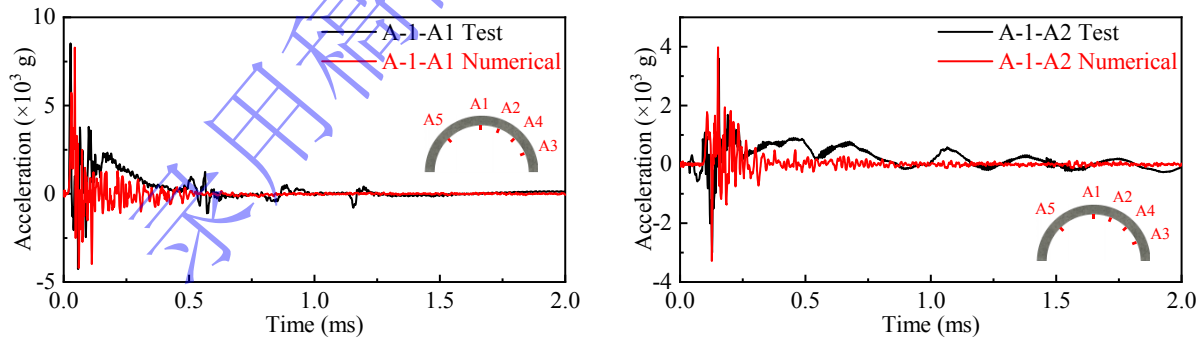


图7 试件A-2试验与数模水压力对比

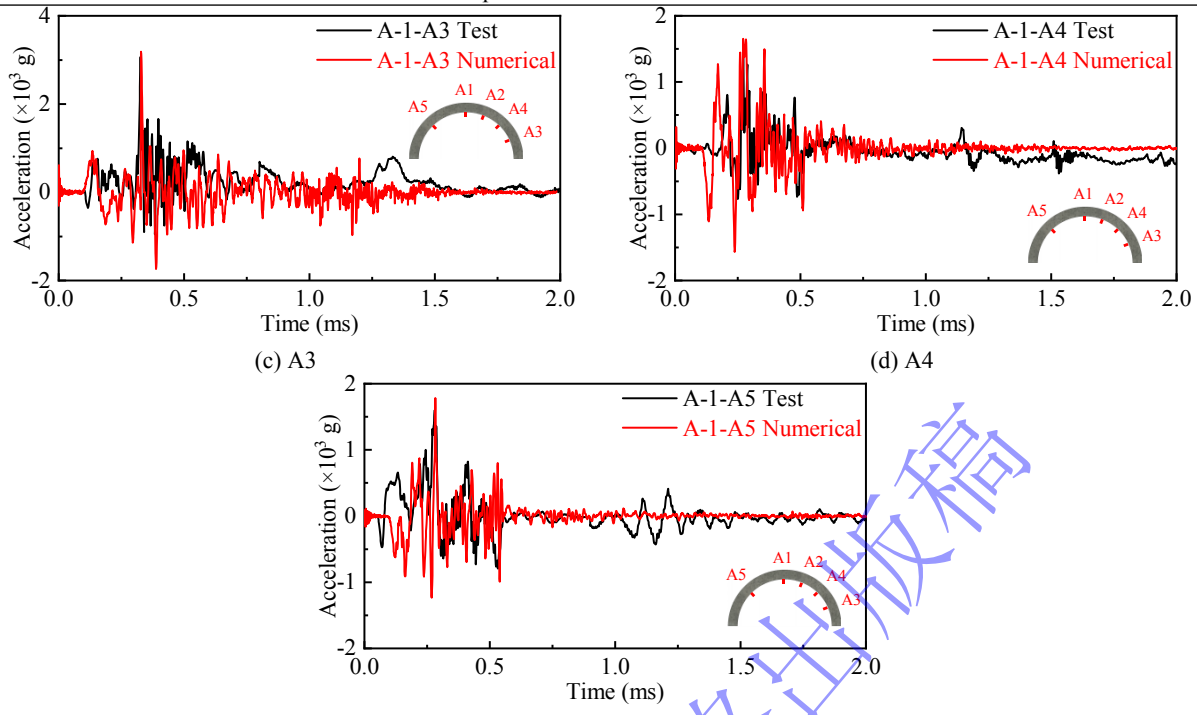
Fig.7 Comparison of experimental and numerical water pressure results for Specimen A-2

3.2 加速度

图 8 展示了试件 A-1 加速度时程曲线的试验结果与数值模拟结果。总体上，爆炸发生后结构加速度在极短时间内迅速升至峰值，其后呈震荡式衰减。随着测点远离爆源，结构响应幅值减小，振动持续时间延长。试验测得测点 A1、A2、A3、A4 和 A5 的加速度峰值分别为 8.53×10³ g、3.59×10³ g、3.07×10³ g、1.50×10³ g 和 1.60×10³ g。相应地，数值模拟在这些测点的加速度峰值分别为 8.28×10³ g、3.98×10³ g、3.19×10³ g、1.65×10³ g 和 1.79×10³ g，相对误差依次为 2.94%、10.86%、3.91%、10.00%和 11.88%。同时，由实测数据可以看出 A2、A3、A4 和 A5 测点加速度震荡衰减的持续时间明显比 A1 测点长，峰值加速度较 A1 处分别衰减了 57.91%、64.00%、82.41%和 81.24%。



录用稿件，非最终出版稿



(c) A3　　(d) A4

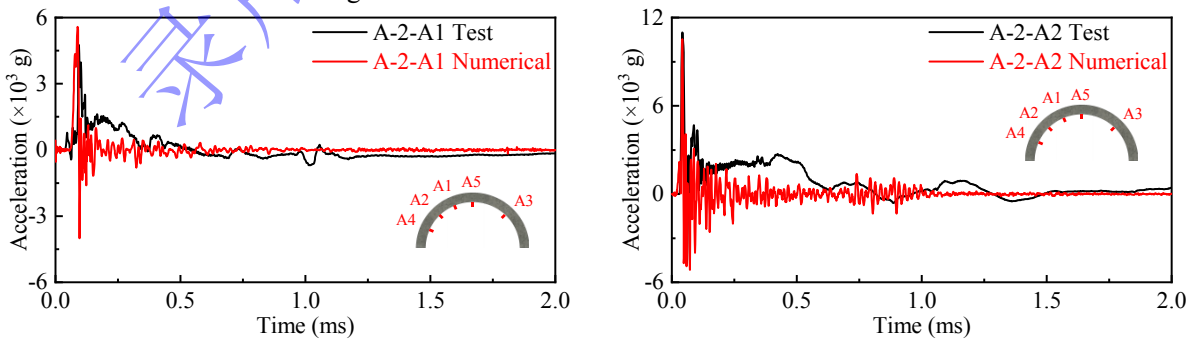
(e) A5

图 8 试件 A-1 试验与数模加速度对比

Fig.8 Comparison of experimental and numerical acceleration results for Specimen A-1.

图 9 展示了试件 A-2 加速度时程曲线的试验结果与数值模拟结果对比。除测点 A2 外，试件 A-2 各加速度测点的峰值整体基本处于同一水平，由爆源传播至另一侧拱腰的过程中加速度衰减幅度较小。试验中测点 A1、A2、A3、A4 和 A5 的加速度峰值分别为 4.76×10³ g、10.98×10³ g、2.13×10³ g、4.63×10³ g 和 3.45×10³ g。对应的数值模拟峰值则为 5.58×10³ g、10.53×10³ g、2.41×10³ g、4.83×10³ g 和 3.83×10³ g。两者之间的相对误差依次为 17.22%、4.10%、13.15%、4.32%和 11.01%。与 A2 相比，A1、A3、A4 和 A5 的试验实测加速度峰值分别衰减了 56.65%、80.59%、57.87%和 68.56%。

总体而言，数值模拟结果与试验数据吻合较好，验证了数值模型在加速度响应预测方面的有效性。与顶部起爆相比，侧向起爆时，正对爆源的测点 A2 的加速度峰值明显增大。同时，侧向爆炸时靠近爆源的测点 A1 和 A4 的加速度峰值也高于顶部起爆时相同距离的测点 A2；即使在爆源另一侧，测点 A3 的峰值也高于顶部起爆时同位置的测点 A4。试件 A-2 的试验实测平均峰值加速度为 5.19×10³ g，相比试件 A-1 的 3.66×10³ g 高出约 42%，表明侧向爆炸引发的整体结构响应更为强烈和集中。



(a) A1　　(b) A2

录用稿件，非最终出版稿

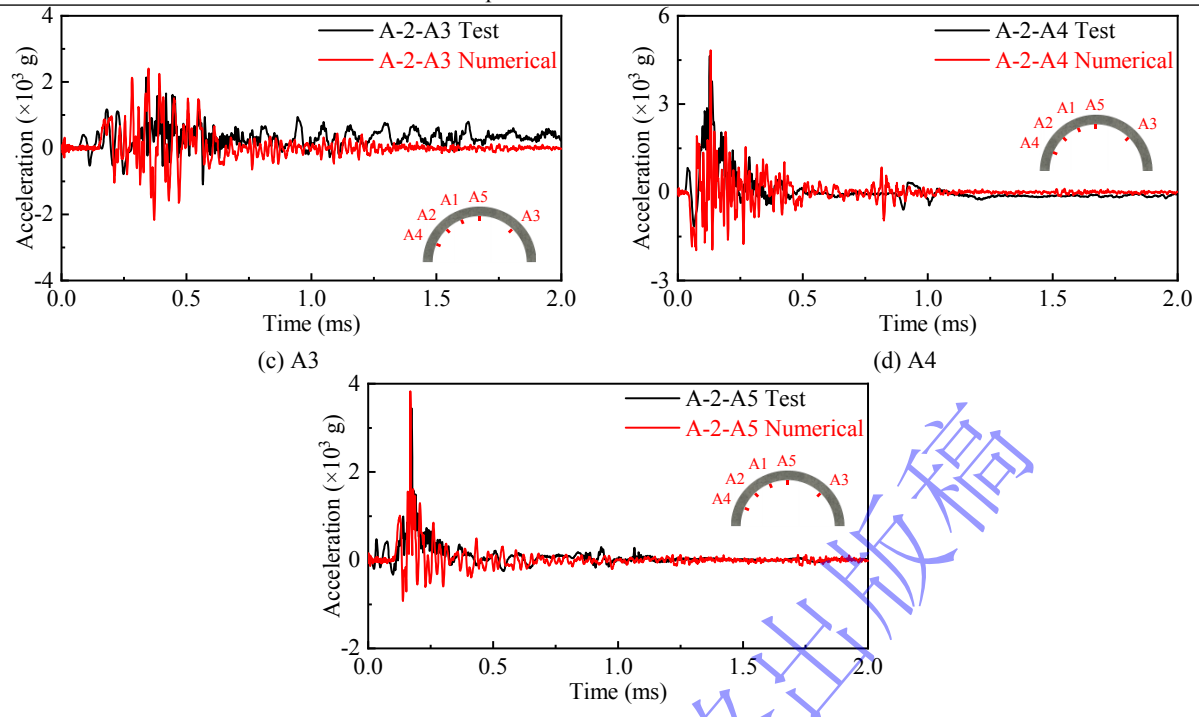


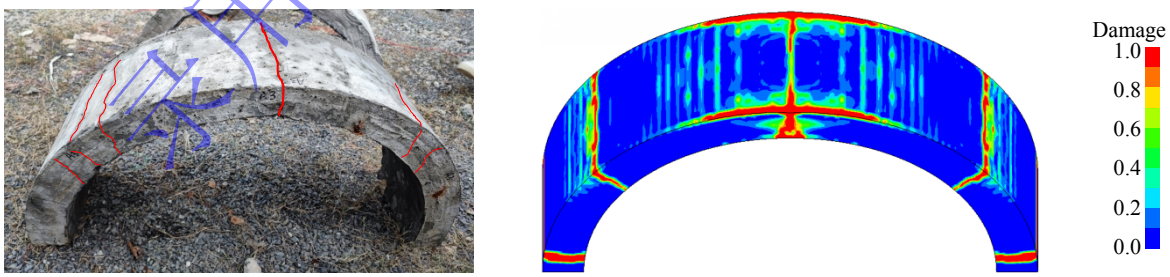
图 9 试件 A-2 试验与数模加速度对比

Fig.9 Comparison of experimental and numerical acceleration results for Specimen A-2

3.3 损伤

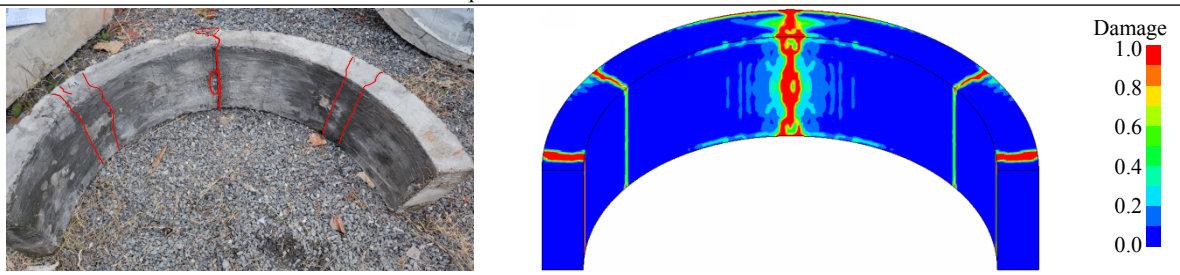
试件 A-1 试验与数值模拟的损伤对比如图 10 所示。爆炸作用下，拱试件整体发生弯曲破坏，损伤主要集中在拱顶和拱腰区域。迎爆面拱顶处形成一条贯穿裂缝，并伴随边缘混凝土剥落，见图 10(a)；在背爆面，压缩波传播至拱顶后反射形成拉应力波，当该拉应力超过混凝土的动态抗拉极限时，出现剥落损伤，见图 10(b)。同时，拱脚约束与拱顶向下变形的联合作用导致拱腰向外变形，使两侧拱腰前表面承受较大的拉应力，进而引发拱腰处裂缝的产生。

试件 A-2 试验与数值模拟损伤对比如图 11 所示。爆炸后，拱腰（Ha 段）出现三条贯穿裂缝，而另一侧拱腰（Ha'段）则产生一条较深的贯穿裂缝，拱肩附近也出现了细微裂缝。当炸药施加在侧向位置时，拱的爆炸荷载承受能力明显下降，结构破坏主要表现为水平失稳，整体损伤呈不对称分布，损伤程度较顶部爆炸条件更为严重。裂缝数量增多，表明侧向爆炸作用下拱结构的应力传递与能量分布发生明显变化，不均匀受力加剧了结构的破坏程度。



(a) Front surface

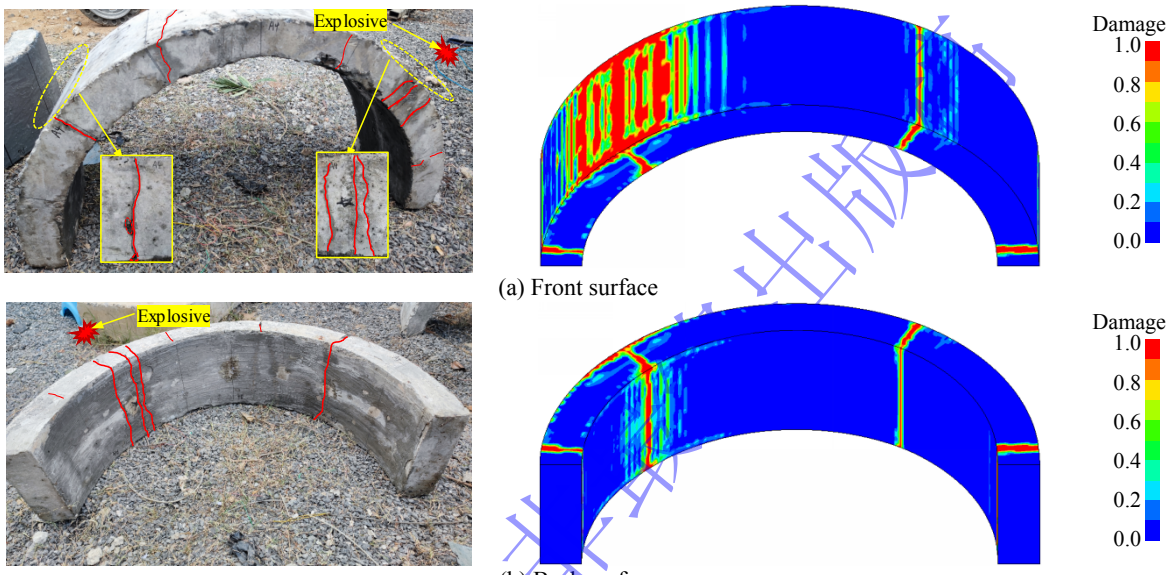
录用稿件，非最终出版稿



(b) Back surface

图10 试件A-1试验与计算损伤结果对比

Fig.10 Comparison of experimental and numerical damage for Specimen A-1



(a) Front surface

(b) Back surface

图11 试件A-2试验与计算损伤结果对比

Fig.11 Comparison of experimental and numerical damage for Specimen A-2

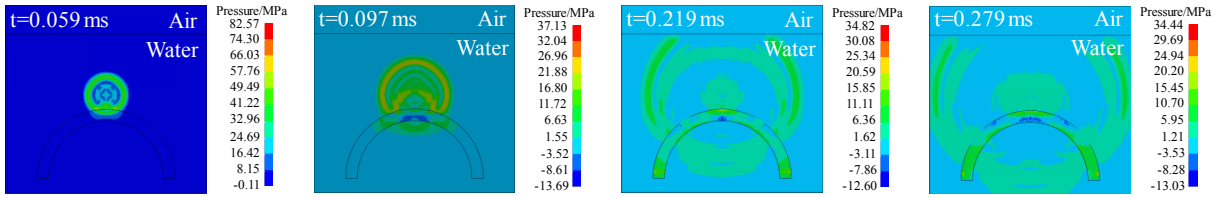
综上所述，侧向爆炸下拱结构的响应与顶部爆炸存在显著差异。对于顶部爆炸，拱结构主要承受轴向压缩，破坏集中于拱顶和拱腰部位；而侧向爆炸产生了弯矩和水平推力，削弱了拱的整体抗压能力，产生的弯曲变形导致爆炸源附近迎爆面出现压应力集中，同时在对侧拱腰（Ha'段）产生拉应力，诱发裂缝产生，关键区域（Ha 段和 Ha'段）应力集中加剧，加速了拱结构的破坏。

4 顶爆、侧爆下拱结构动力响应

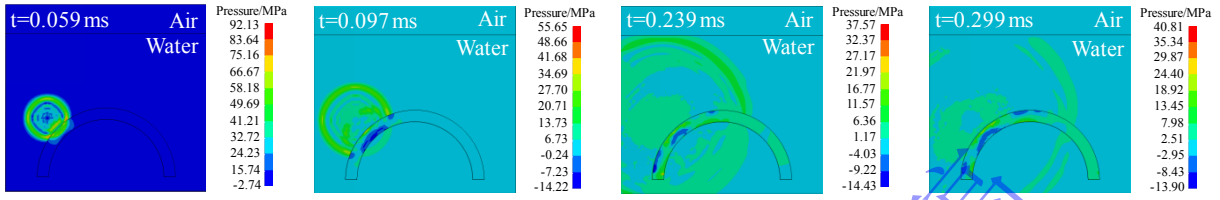
试验结果验证了数值方法的可靠性。基于验证后的数值模型，对爆炸作用下冲击波传播特性、钢筋混凝土拱的结构变形及能量分布进行了进一步分析，旨在探究水下顶爆、侧爆条件下拱结构的动力响应差异与破坏机理。

4.1 爆炸冲击波传播特性

图 12 展示了顶爆与侧爆条件下冲击波的传播过程，其中正值表示压力，负值表示拉力。从图 12(a)可以看出，炸药在拱顶起爆后，所产生的冲击波以球面波的形式向周围传播，在 t=0.059 ms 时，当冲击波到达拱顶并发生反射时，入射波与反射波的叠加作用显著增加了拱顶的荷载水平。在 t=0.097 ms 时，压力波穿透拱结构并进入下方水体。由于水体阻抗较低，压缩波到达结构底面时被反射，形成拉应力波。在 t=0.219 ms 时，当水中压力波向上传播至自由水面时，反射形成稀疏波，使局部压力骤减，导致自由水面附近形成气穴。在 t=0.279 ms 时，爆轰产物作用使得拱顶受压，在拱顶背爆面及拱肩处出现受拉区。



(a) Shock wave propagation under vault explosion



(b) Shock wave propagation under lateral explosion

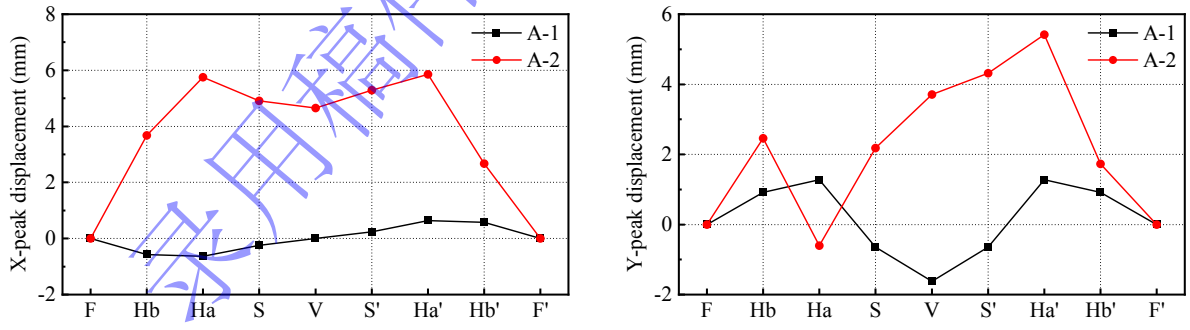
图12 爆炸冲击波传播过程

Fig.12 Propagation of the explosive shock wave

图 12(b)为侧向起爆下冲击波的传播过程。可以看出，在 t=0.059 ms 时和 t=0.097 ms 时冲击波的传播规律和顶爆时基本相似。冲击波传播至正对爆源的结构表面并发生反射，入射波与反射波叠加，形成受压区。随后，压力波透过拱体进入下方水体，在正对爆源处的结构底面产生受拉区。与顶爆相比，侧爆作用下拱结构受拉区域更大。在 t=0.239 ms 时，拉应力波经背爆面反射后传递至拱顶，形成新的受拉区。在 t=0.299 ms 时，受拉区范围进一步扩大，同时冲击波在自由水面反射并诱发气穴现象。顶爆与侧爆的传播规律相近，但侧爆作用下受拉区域更大。

4.2 拱结构变形分析

顶爆和侧爆作用下钢筋混凝土拱典型断面处的位移分布情况如图13所示。图13(a)展示了试件A-1和A-2在X方向上的典型断面峰值位移分布。在顶部爆炸荷载作用下，试件A-1整体发生水平向外变形，最大位移出现在两侧拱腰(Ha和Ha'断面)位置，峰值为0.63 mm。在侧向起爆条件下，试件A-2主要沿冲击波传播方向发生水平位移，最大位移分别出现在正对爆源的拱腰(Ha断面)及另一侧拱腰(Ha'断面)，对应峰值为5.75 mm和5.85 mm。侧爆条件下拱结构在水平方向产生更显著的位移响应，峰值位移远大于顶爆时。



(a) Peak displacement in X direction (b) Peak displacement in Y direction

图13 拱试件变形分布

Fig.13 Deformation distribution of arch specimens

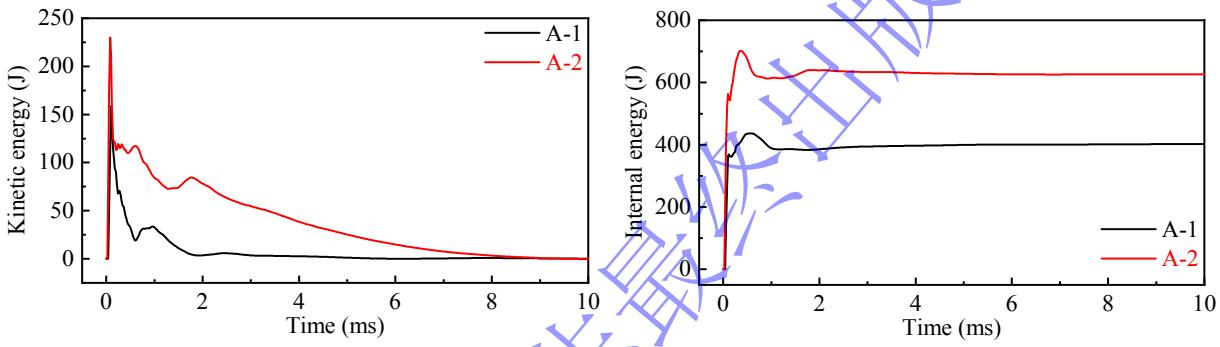
图13(b)展示了试件A-1和A-2在Y方向上的典型断面峰值位移分布。可以看出，在顶爆条件下，最大竖向位移出现在正对爆源的拱顶处，峰值为1.62 mm。而侧爆条件下，最大竖向位移出现在另一侧拱腰(Ha'断面)处，峰值为5.42 mm。分析原因，侧向爆炸使正对爆源部位产生内凹变形，结合拱脚约束的作用，在结构远离爆源一侧的拱腰区域易形成外凸变形，从而导致该处竖向位移显著增大。顶爆条件下结构变形相对对称，位移集中于拱顶及拱腰部位；而侧爆作用下，拱体在水平和竖直方向均表现出更剧烈、非对称的变形，峰值位移显著增加，爆源正对面及远侧拱腰区域响应最为剧烈。

录用稿件，非最终出版稿

4.3 拱结构能量分析

图14(a)展示了顶爆与侧爆条件下钢筋混凝土拱的动能时程曲线。在两种工况下，拱结构动能变化趋势基本一致：爆炸冲击初期，结构振动速度迅速增大，动能迅速达到峰值；随后局部振动迅速衰减，动能快速下降；约2 ms后，动能下降幅度减弱，结构整体响应逐渐衰减至接近零。顶爆条件下动能峰值为158 J，侧爆条件下为230 J，约为顶爆的1.45倍，表明侧爆条件下拱结构的动力响应更为显著。

图14(b)显示了顶爆和侧爆条件下钢筋混凝土拱的内能随时间的变化曲线。爆炸开始后，冲击波传递至混凝土拱，拱的内能迅速增加，随后逐渐趋于稳定。顶部爆炸下混凝土拱的内能峰值为437 J，侧向爆炸下混凝土拱的内能峰值为702 J，约为顶爆的1.61倍。内能主要包括弹性应变能和塑性应变能。爆炸能量通过冲击波作用于结构，被吸收后转化为内能，能够反映结构的弹性和塑性变形，同时表征混凝土材料在爆炸冲击下的非弹性损伤和能量耗散过程。较高的内能通常意味着结构经历了更严重的损伤和更大的变形，从而可用于评估结构的爆炸响应[34-35]。由此可见，侧爆条件下拱结构吸收了更多变形能量，导致其损伤程度更为显著。



(a) Kinetic energy time histories of concrete (b) Internal energy time histories of concrete

图14 拱试件能量变化

Fig.14 Energy variation of the arch specimens

5 结论

本文通过爆炸试验和数值模拟方法研究了不同起爆位置下钢筋混凝土拱的水下动力响应特性和破坏特征。基于已验证的数值模型，对爆炸冲击波传播、拱体变形以及能量变化过程进行了分析。主要结论如下：

(1) 基于ALE方法建立了钢筋混凝土拱水中爆炸动力响应分析模型，各测点压力峰值及加速度峰值与试验实测误差均小于20%，证明了模型在描述混凝土拱结构响应和损伤特征等方面的可靠性。

(2) 顶爆条件下，拱结构变形具有对称性，水平位移主要集中在两侧拱腰(Ha、Ha')，峰值为0.63 mm；竖向位移集中在拱顶，峰值为1.62 mm；裂缝主要分布在拱顶及两侧拱腰，伴随局部混凝土剥落；为增强结构承载能力，可适当加固拱顶和拱腰关键部位或采用高强混凝土。

(3) 侧爆条件下，拱结构水平和竖向位移显著增大，水平峰值达5.85 mm，竖向峰值为5.42 mm，正对爆源及远侧拱腰区域响应最为显著；裂缝数量增多且呈非对称分布，动能和内能峰值分别约为顶爆条件的1.45倍和1.61倍，表明结构吸收了更多能量，其损伤和变形更为显著；对于可能承受侧向爆炸的拱结构，应考虑增加安全距离、局部加强或采用高强混凝土，以减轻关键断面的应力集中和非对称变形。

参考文献

录用稿件，非最终出版稿

[1] 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.

[2] GAO Z, WANG G H, LU W B, et al. A new impact factor considering structural morphology for concrete gravity dams subjected to underwater non-contact explosion[J]. Engineering Structures, 2025, 341: 120826. **DOI:** 10.1016/j.engstruct.2025.120826.

[3] 李忠献, 赵文浩, 崔健, 等. 近距离爆炸作用下钢管混凝土柱损伤评估与性能化抗爆设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(08): 190-200. **DOI:** 10.14006/j.jzjgxb.2024.0668.

LI Z X, ZHAO W H, CUI J, et al. Research on damage assessment and performance-based design method for CFST columns under close-in blast loading[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(08): 190-200. **DOI:** 10.14006/j.jzjgxb.2024.0668.

[4] CASTEDO R, SANTOS A P, ALAÑÓN A, et al. Numerical study and experimental tests on full-scale RC slabs under close-in explosions[J]. Engineering Structures, 2021, 231: 111774. **DOI:** 10.1016/j.engstruct.2020.111774.

[5] 汤长兴, 曹克磊, 赵瑜, 等. 钢纤维增强多孔混凝土板水下接触爆炸防爆机理及损伤等级预测[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(05): 60-75. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0239.

TANG C X, CAO K L, ZHAO Y, et al. Study on explosion-proof mechanism and damage level prediction of steel fiber reinforced cellular concrete slab in underwater contact explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(05): 60-75. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0239.

[6] GALAL M A, BANDYOPADHYAY M, BANIK A K. Progressive collapse analysis of three-dimensional steel-concrete composite building due to extreme blast load[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(3). **DOI:** 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001419.

[7] 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.

[8] 刘光昆, 刘瑞朝, 汪维, 等. 地下钢筋混凝土拱形结构在顶爆条件下的抗爆试验[J]. 含能材料, 2021, 29(2): 157-165. **DOI:** 10.11943/CJEM2020137.

LIU G K, LIU R Z, WANG W, et al. Blast resistance experiment of underground reinforced concrete arch structure under top explosion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 157-165. **DOI:** 10.11943/CJEM2020137.

[9] MENG F M, JIN F N, KONG X L, et al. Field test and theoretical analysis of a large underground arch structure subjected to buried explosion[J]. Structures, 2023, 57: 105141. **DOI:** 10.1016/j.istruc.2023.105141.

[10] CHEN H L, ZHOU J N, FAN H L, et al. Dynamic responses of buried arch structure subjected to subsurface localized impulsive loading: Experimental study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 89-101. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.012.

[11] 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.

[12] SHAN Y L, ZONG Z H, RICHARD L J Y, et al. Damage modes and mechanism of steel box arch ribs under contact explosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 224: 109115. **DOI:** 10.1016/j.jcsr.2025.109115.

[13] KLASEBOER E, HUNG K C, WANG C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537: 387-413. **DOI:** 10.1017/S0022112005005306.

[14] LIBRESCU L, OH S, HOHE J. Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to underwater and in-air explosions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(11-12): 3794-3816. **DOI:** 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.052.

录用稿件，非最终出版稿

[15] ZHAO X H, WANG G H, LU W B, et al. Experimental investigation of RC slabs under air and underwater contact explosions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 25(1): 190-204. **DOI:** 10.1080/19648189.2018.1528892.

[16] 唐丽莹, 高鹏, 彭茂林, 等. 水下爆炸冲击波载荷作用下钢筋混凝土板毁伤特性分析[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(19): 50-55. **DOI:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.19.009.
TANG L Y, GAO P, PENG M L, et al. Analysis on damage characteristics of reinforced concrete slabs under underwater explosion shock wave load[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(19): 50-55. **DOI:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2024.19.009.

[17] CHEN Z J, ZONG Z H, GAN L, et al. Numerical investigation on dynamic response of air-backed RC slabs subjected to close-in underwater explosion[J]. Ocean Engineering, 2023, 273: 113962. **DOI:** 10.1016/j.oceaneng.2023.113962.

[18] ZHUANG T S, WANG M Y, WU J, et al. Experimental investigation on dynamic response and damage models of circular RC columns subjected to underwater explosions[J]. Defence Technology, 2020, 16(4): 856-875. **DOI:** 10.1016/j.dt.2019.10.015.

[19] 闫秋实, 宁素瑜, 王全胜 ,等. 近场水中爆炸作用下钢筋混凝土桩破坏模式及损伤评估研究[J]. 混凝土, 2019, (07): 32-36+40. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.07.007.
YAN Q S, NING S Y, WANG Q S, et al. Damage effect for a typical reinforced concrete pile under the near field explosion in water[J]. Concrete, 2019, (07): 32-36+40. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.07.007.

[20] 董琪, 刘靖晗, 李凌锋, 等. 水下接触和近场爆炸作用下沉箱码头的毁伤特性[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(01): 75-88. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0332.
DONG Q, LIU J H, LI L F, et al. Damage characteristic of caisson gravity wharf subjected to underwater contact and near-field explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2026, 46(01): 75-88. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0332.

[21] 周龙云, 李小军, 闫秋实. 近场水下爆炸荷载作用下桥墩动力响应分析[J]. 兵工学报, 2023, 44(S1): 90-98. **DOI:** 10.12382/bgxb.2023.0717.
ZHOU L Y, LI X J, YAN Q S. Analysis on dynamic response of bridge pier under near-field underwater explosion loading[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(S1): 90-98. **DOI:** 10.12382/bgxb.2023.0717.

[22] YANG G D, FAN Y, WANG G H, et al. Experimental and numerical investigation on dynamic behavior of RC orifice targets subjected to underwater explosions[J]. Engineering Structures, 2023, 279: 115541. **DOI:** 10.1016/j.engstruct.2022.115541.

[23] 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.

[24] SU Q, WU H, SUN H S, et al. Experimental and numerical studies on dynamic behavior of reinforced UHPC slab under medium-range explosions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 148: 103761. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2020.103761.

[25] 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]// 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures. Berlin-Strausberg, Germany, 1999: 315-322.

[26] ZHAO X H, WANG G H, LU W B, et al. Damage features of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 531-545. **DOI:** 10.1016/j.oceaneng.2017.11.007.

[27] YANG G D, FAN Y, WANG G H, et al. Mitigation effects of air-backed RC slabs retrofitted with CFRP subjected to underwater contact explosions[J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113261. **DOI:** 10.1016/j.oceaneng.2022.113261.

[28] 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.

录用稿件，非最终出版稿

[29] 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.

[30] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422[R]. Livermore, CA, USA: University of California Radiation Laboratory, 1968. **DOI:** 10.2172/4783904.

[31] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual: VOLUME II Material Models[M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2017.

[32] 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.

[33] 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.

[34] LE L H, GAO X N, WANG W B. Study on explosion effects of a spherical reticulated shell under internal explosions[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16: 1713-1724. **DOI:** 10.1007/s40999-018-0323-y.

[35] LI M H, ZONG Z H, LIU L, et al. Experimental and numerical study on damage mechanism of CFDST bridge columns subjected to contact explosion[J]. Engineering Structures, 2018, 159: 265-276. **DOI:** 10.1016/j.engstruct.2018.01.006.

录用稿件，非最终出版稿