

港池环境近水面水下爆炸特性及其毁伤效应

董琪^{1,2}, 韦灼彬², 唐廷², 李凌锋^{1,2}, 刘靖晗^{1,2}

(1. 海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033;

2. 海军勤务学院, 天津 300450)

摘要: 为研究港池环境近水面水下爆炸载荷及其对码头结构的损伤特性, 设计了一种典型码头结构, 并构建港池环境, 运用 LS-DYNA 程序开展水下爆炸数值模拟研究, 对爆炸现象、荷载特性、结构动态响应和能量吸收特性 4 个方面进行了详细研究, 分析了边界、比例爆距等参数的影响规律。结果表明: 爆炸气泡脉动主要受到码头结构边界和水面的影响, 水底和有限港池内的流体运动对其亦有一定影响; 冲击波荷载以比例爆深为中心呈垂向对称分布, 气泡脉动荷载主要分布于比例爆深以下位置; 结构变形和毁伤主要在冲击波传播阶段形成, 气泡脉动和射流的二次毁伤效果较弱; 混凝土和沉箱内填土是主要能量吸收部分。

关键词: 水下爆炸; 港池; 近水面; 毁伤效应; 沉箱重力式码头

中图分类号: O381; O383.2

文献标识码: A

港口是国家战略体系的重要组成部分, 一旦遭到破坏后果严重。水下爆炸是其可能遭受的主要威胁之一, 主要作用于港池内, 可能对港池作业环境和码头结构造成严重毁伤。开展港池内水下爆炸及其毁伤效应研究是提高码头抗爆设计和抢修抢建能力的基础, 具有重要的理论研究和工程应用意义。

国内外出于军事和工程目的, 对于有限水域水下爆炸问题已开展了一定的研究^[1-7], 对于各类边界面影响下的荷载作用机理、传播规律、宏观运动现象及数值模拟技术等均取得了较为丰富的研究成果, 但仍存在一些不足, 如: 研究多以爆炸冲击波传播或气泡脉动单一阶段为研究对象, 对全过程综合影响考量较少; 多考虑单一边界影响, 对多边界联合作用考量较少; 对边界面材料及形态特性考虑较少等。而水下爆炸对结构毁伤效应方面, 多以舰船、潜艇等水下浮体结构, 或大坝等大型钢筋混凝土结构为研究对象, 对港口环境和各型码头的相关研究尚处于起步阶段^[2, 8-10], 且现有研究或涉及敏感信息, 相关的工程案例和试验的详细参数、数据难以获取, 或年代久远, 时效性和工程指导意义难以满足现实需求, 为相关研究的深入和拓展带来了困难。

本工作首先讨论港池环境近水面水下爆炸特点及影响因素, 进而在浅水爆炸研究^[11-12]基础上, 引入简化码头结构, 构建典型港池环境, 开展数值模拟研究, 考察港池环境近水面水下爆炸特性及结构动态响应特性, 讨论各边界和爆距的影响规律。

1 港池环境特点

与一般近水面爆炸不同, 港池内码头结构和水底的存在实质上是在自由水面的基础上, 又增加了两个异向边界, 且港池空间有限, 爆炸多为近场爆炸或接触爆炸, 使该问题同时兼具“浅水”、“有侧向强或弱边界”和“近场或接触爆炸”等多种特性。一方面, 从水下爆炸荷载作用来看, 会对冲击波传播和气泡脉动的特性和规律造成重要影响。另一方面, 从码头结构来看, 这会使毁伤机理和规律变得复杂。

* 收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 军队后勤科研计划项目(CHJ13J006)

作者简介: 董琪(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事港口工程、防护工程研究. E-mail: dq_1990@163.com

通信作者: 唐廷(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事港口工程、防护工程研究. E-mail: kublai@126.com

港池环境对水下爆炸的影响可主要分为两个阶段。在爆炸冲击波传播阶段,冲击波在水底、水面和结构近水侧3个边界面上出现强烈的反射和散射。各边界之间的距离较近,反射波和散射波与冲击波在港池内相互叠加耦合,易产生较为复杂的波系,使港池内荷载环境更复杂,荷载毁伤效力更强烈。

而在气泡脉动阶段,港池环境的影响机理更为复杂。如图1所示,在脉动过程中,除受浮力的影响,气泡持续受到水面、水底和结构施加的3个机制复杂、方向不一的Bjerknes力作用,同时有限环境内受重力和惯性运动作用的水体亦会对气泡脉动造成一定影响。随着气泡脉动位置、形态和速率的变化,几种作用的强度和模式均会发生改变,持续变化的合力作用使气泡脉动和射流特性表现出复杂性和不规则性。港池环境水下爆炸的复杂性使物理试验和理论分析在相关问题的研究中不易开展。

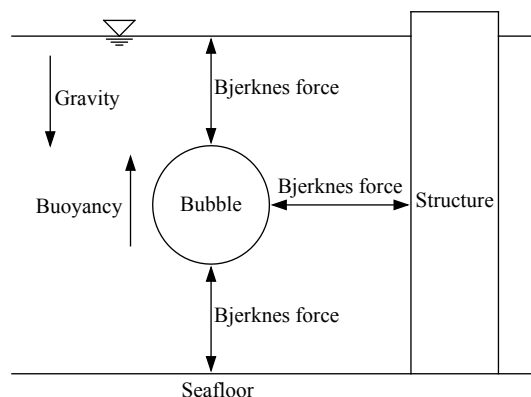


图1 港池内水下爆炸环境示意图

Fig. 1 Diagram of the environment of underwater explosion in harbor basin

2 有限元模型建立

2.1 码头结构

参考港工建筑物设计标准^[13],取一个沉箱及其上部结构为研究对象。以沉箱封仓板为界,上部结构包括胸墙、道面及填土,下部结构包括沉箱和仓格填土。为降低计算成本,主要考虑迎爆侧影响,故长度方向取5个仓格,宽度方向取1个仓格,仓格背爆面设定为刚性壁面。结构长27.6 m、宽3.6 m、高18.0 m,仓格尺寸均为长4.8 m、宽3.0 m、高14.4 m。沉箱仓格及上部结构回填料为河砂。上部结构和沉箱混凝土强度分别为C40、C45,钢筋采用HRB335。主要部分混凝土厚度及配筋情况见表1。

表1 主要部位混凝土厚度及配筋情况

Table 1 Concrete thickness and matching bar condition of main members

Position	Concrete thickness/cm	Reinforcement situation	Cover thickness/cm
Cabin ex-wall	60	Double two way, $\varnothing 2.2$ cm, @ 60 cm	20
Breast wall	60	Double two way, $\varnothing 2.2$ cm, @ 60 cm	20
Partition	60	No reinforcement	
Cabin floor	60	No reinforcement	
Sealed plate	30	No reinforcement	
Face plate	30	No reinforcement	

2.2 有限元模型

有限元模型如图2所示,考虑对称性,采用1/2建模,对称面为码头中间仓格中垂面。模型整体尺寸为2860 cm×1380 cm×350 cm,包括采用多物质ALE算法的欧拉域和采用拉格朗日算法的码头结构,欧拉域由空气、水、炸药、土壤、填土和空白材料6种物质组成,码头结构包括钢筋和混凝土。

欧拉域采用六面体单元均布划分网格,网格尺寸20 cm,其中空气区域高1720 cm,水域深1500 cm,土壤深280 cm,自由水面与沉箱封仓板下表面等高,与码头结构重合部分的欧拉域通过关键字MAT_ALE_VACUUM定义为空白材料,通过关键字CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID定义欧拉域与码头结构的流固耦合。炸药为集团装药,不同工况下炸药均正对中间仓格,且中垂面与模型对称面重合,通过关键字INITIAL_DETONATION和INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY实现中心起爆和球形装药。定义大小为9.8 m/s²的加速度场,以模拟重力场。通过关键字INITIAL_STRESS_DEPTH设定水域初始状态静水压力分布,并定义水域边界的压力随深度的增加而增加,以模拟水下静

水压力的影响。除对称面以外边界均采用无反射的 Outflow 边界,使出口流通符合完全发展条件且荷载在人工截断处无反射。港池环境涉及的空气、水、炸药、土壤、填土和空白材料 6 种物质,其中空气采用线性多项式状态方程描述,水采用 Grüneisen 状态方程描述,炸药采用 JWL 状态方程描述,土壤采用线弹性模型描述,填土通过 MAT_10 材料模型和 Grüneisen 状态方程描述,空白材料通过关键字 MAT_ALE_VACUUM 定义,各材料的具体参数如表 2、表 3 所示。

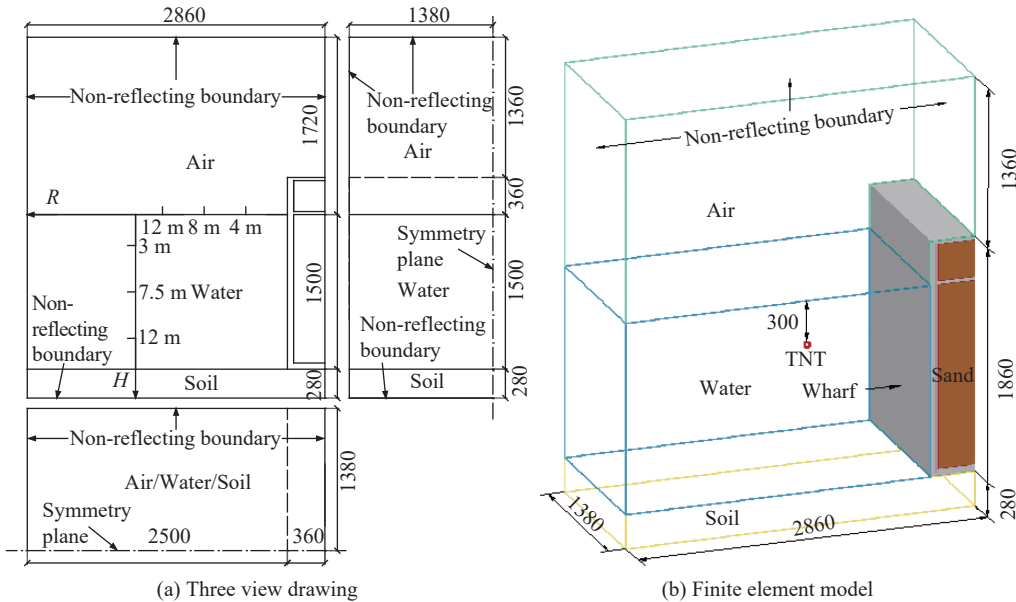


图 2 有限元计算模型(单位: cm)
Fig. 2 FEM calculation model (Unit: cm)

表 2 材料参数^[11-12]
Table 2 Material parameters^[11-12]

Material	$\rho_{a0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E_a/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
Air	1.293	0.25	0	0	0	0	0.4	0.4	0	
Material	$\rho_{w0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0				
Water	1000	1480	2.56	−1.986	1.2268	0.5				
Material	$\rho_{e0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa		
Explosive	1654	374	3.23	0.3	4.15	0.95	6390	27		
Material	$\rho_{s0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s/MPa	G_s/MPa							
Soil	1860	22.4	8							

表 3 填土参数^[14]
Table 3 Parameters of backfill^[14]

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	G/MPa	Yield stress/MPa	Cutoff pressure/MPa	Failure strain
1800	47.38	16.01	7.70	-0.70	1.2

码头结构如图 3 所示。刚性壁面和沉箱底面施加全约束,限制流体不能自由流入或流出。钢筋采用梁单元,单元长度为 30 cm,其余部分采用六面体单元划分网格,在水深方向、垂直外墙方向、平行外墙方向,分别取网格尺寸为 30、20 和 30 cm。钢筋和混凝土采用分离式建模,二者之间黏结耦合通过

关键字 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义。钢筋材料采用随动双线性硬化本构模型, 参数设置如表 4 所示。混凝土采用 HJC 本构模型, 参照 Holmquist^[15] 和张凤国^[16] 等的研究, 计算得到具体材料参数如表 5、表 6 所示。

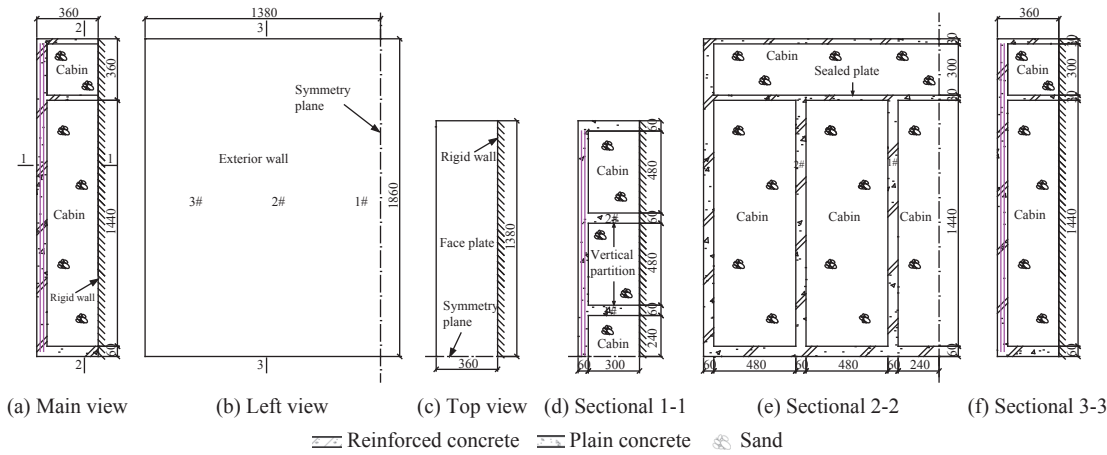


图 3 码头结构三视图和剖面图(单位: cm)

Fig. 3 Three views and sectional views of wharf(Unit: cm)

表 4 钢筋材料参数

Table 4 Parameters of steel bar

Density/ (g·cm ⁻³)	Poisson's ratio	Initial yield stress/MPa	Elastic modulus/GPa	Tangent modulus/GPa	Strain rate/s ⁻¹	Strain rate parameter	Failure strain	Reinforcement parameter
7.85	0.3	335	210	1.2	40	5	0.12	0

表 5 C40 混凝土 HJC 模型参数

Table 5 Parameters of C40 concrete used in HJC model

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	F_c'/MPa	A	B	C	N
2440	11.01	31.60	0.79	1.6	0.007	0.61
$S_{\max}$	D_1	D_2	EFMIN	T/MPa	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	μ_{crush}
7.0	0.036	1.0	0.0080	3.49	10.53	0.0013
$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	μ_{lock}	k_1/GPa	k_2/GPa	k_3/GPa	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	f_s
0.80	0.11	85	-171	208	1	0.004

表 6 C45 混凝土 HJC 模型参数

Table 6 Parameters of C45 concrete used in HJC model

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	F_c'/MPa	A	B	C	N
2440	11.68	35.55	0.79	1.6	0.007	0.61
$S_{\max}$	D_1	D_2	EFMIN	T/MPa	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	μ_{crush}
7.0	0.037	1.0	0.0085	3.70	11.85	0.0014
$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	μ_{lock}	k_1/GPa	k_2/GPa	k_3/GPa	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	f_s
0.80	0.11	85	-171	208	1	0.004

2.3 工况及测点设置

以自由水面与结构交点为原点, 设水深方向 H 、背离结构方向 R 和背离对称面方向 D 为 3 个坐标轴的正方向建立坐标系, 以确定炸药和测点位置。炸药和测点位置如图 4 所示。

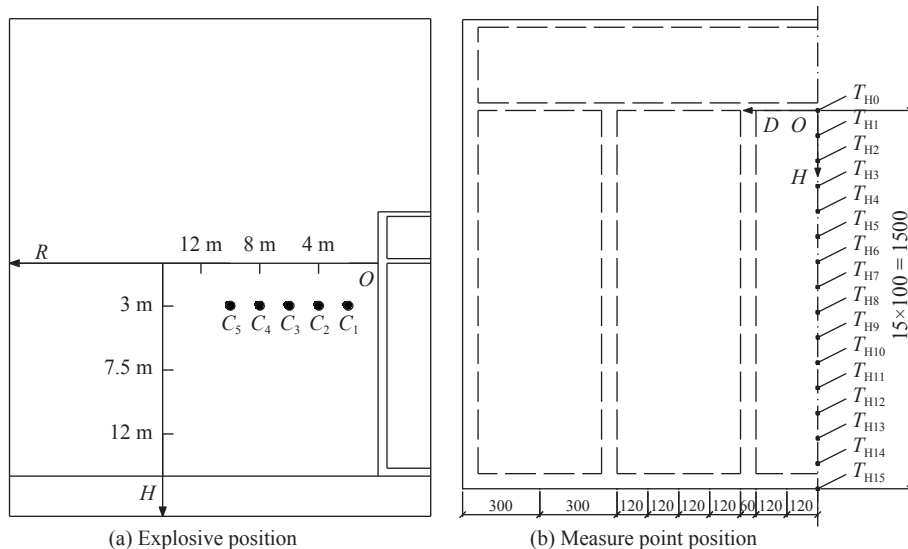


图 4 炸药及测点位置

Fig. 4 Positions of explosive and measure point

引入参数比例爆深 $\bar{H}$ 、比例爆距 $\bar{R}$ 、比例横向距离 $\bar{D}$ 和比例测深 $\bar{h}$ 以描述各变量, 分别取值为

$$\bar{H} = \frac{H}{W^{1/3}}, \quad \bar{R} = \frac{R}{W^{1/3}}, \quad \bar{D} = \frac{D}{W^{1/3}}, \quad \bar{h} = \frac{h}{W^{1/3}} \quad (1)$$

式中: W 为炸药当量, H 为爆炸深度, R 为结构与炸药中心的距离, D 为测点与炸药中垂面的距离, h 为测点水深, 本研究中 $\bar{H}$ 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{D}$ 和 $\bar{h}$ 单位均为 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

参考张显丕等^[6]的研究, 选取近水面 ($H=3 \text{ m}$) 和近场 ($R=2 \sim 10 \text{ m}$) 等位置特征量, 共设置 5 种工况, 如表 7 所示。为获取水下爆炸对结构的荷载作用, 在沉箱外壁外侧欧拉区域中选取 16 个单元为监测点, 记为 $T_{H0} \sim T_{H15}$, 监测点均位于对称面内, 沿着水深方向从上至下间隔 1 m 依次分布, 如图 4(b) 所示。

表 7 工况设置

Table 7 Simulation conditions

Condition	Explosive position	W/kg	R/m	H/m	D/m	$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$\bar{H}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$\bar{D}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$
1	C_1	100	2	3	0	0.43	0.65	0
2	C_2	100	4	3	0	0.86	0.65	0
3	C_3	100	6	3	0	1.29	0.65	0
4	C_4	100	8	3	0	1.72	0.65	0
5	C_5	100	10	3	0	2.16	0.65	0

3 结果分析

本研究在已有浅水爆炸研究基础上开展, 在文献 [11–12] 中已对数值模拟效果进行了验证和讨论。

3.1 宏观现象

图 5~图 9 为各工况气泡形态图, 图中采用色系变化表示气泡边界和水面各位置的速度, 其中红色最大, 蓝色最小。

在工况 1 中, 气泡未经历完整的脉动周期。炸药起爆位置距离水面和结构外墙均较近, 在气泡膨胀初期就受到二者较大的影响: 一方面, 受外墙 Bjerknes 力排斥, 气泡右侧 (靠近结构一侧) 膨胀较左侧慢; 另一方面, 气泡上方水体受气泡膨胀的推动逐渐上升形成水冢, 且在水面与气泡顶面之间形成高压

区吸引四周水体向其汇聚,进一步推动水冢升高,使气泡逐渐向垂向拉伸,呈近结构侧扁平的半鸭梨形态发展,如图5(a)所示。

由于气泡运动位置距离水面和结构均较近,向水冢汇聚的水体有限,而气泡膨胀势能较大,随着气泡继续膨胀,当 $t=0.18\text{ s}$ 时,如图5(b)所示,气泡顶破近结构侧水冢,爆轰产物外泄,气泡膨胀速度大幅下降,水冢破裂发展为向外扩散且持续升高的水幕。

当 $t=0.24\text{ s}$ 时,气泡达到最大体积,径向直径约为 7.8 m ,水柱高约 9.0 m 。随后,气泡收缩,在惯性和外泄气体黏滞作用下,水幕仍继续扩散,最高可达 16.0 m 。受浮力作用,在收缩过程中,气泡底部快速上升,形成向上的射流,进一步推动了气泡内气体的外泄和水体扰动,见图5(c)和图5(d)。当 $t=2.00\text{ s}$ 时,气泡基本溢出水面,随后港池内水体扰动和荷载逐渐减弱,如图5(e)所示。

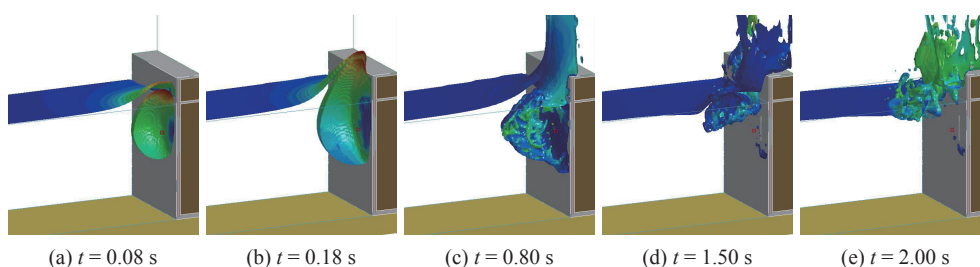


图5 工况1气泡形态图

Fig. 5 Configuration changing process of bubble in Condition 1

如图6所示,工况2的宏观现象与工况1相似,不同的是气泡顶破水面的时间较晚,气泡的最大半径和水冢、水幕高度较工况1大,且水中扰动程度更剧烈,持续时间更长。

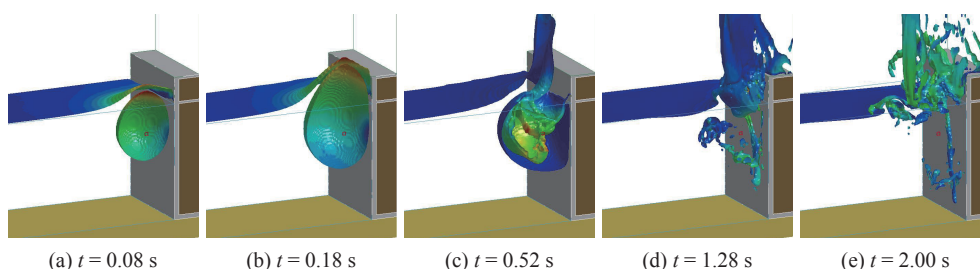


图6 工况2气泡形态图

Fig. 6 Configuration changing process of bubble in Condition 2

如图7所示,在工况3中,气泡主要经历了一个完整的脉动周期。如图7(a)所示,在气泡初始膨胀阶段,受水面影响,气泡垂向逐渐拉长,并呈鸭梨状。随着气泡继续膨胀,结构外墙对右侧边界的排斥作用增强,右侧边角膨胀速度变慢,逐渐较左侧边界扁平。当 $t=0.32\text{ s}$ 时,如图7(b)所示,气泡膨胀至最大,呈右侧扁平鸭梨状,径向直径约为 11.4 m ,水冢高约 10.6 m 。值得注意的是,在气泡膨胀过程中,除主水冢外,在近结构外墙侧出现了一个较小的侧水冢。侧水冢与外墙交界处水体上升较慢,使结构外壁与水冢之间形成了一个空气凹槽。

随后,如图7(c)所示,气泡收缩,受自由面 Bjerknes 力作用,从顶部形成向下的射流;受惯性影响,水冢顶部继续升高,宽度逐渐变窄。在气泡收缩过程中,如图7(d)所示,侧水冢水面收缩迅速,凹槽快速扩展、内凹,至 $t=0.58\text{ s}$ 时,凹槽内水面被顶破,爆轰产物溢出。

随着爆轰产物的溢出,气泡收缩加快,向下射流逐渐消失。当 $t=0.78\text{ s}$ 时,如图7(e)所示,气泡体积达到最小,呈环状多连通域,完成第一次脉动过程。此后,受内外压力差作用,气泡再次膨胀并向外辐射脉动荷载,逐渐形成两个独立运动的部分,空气凹槽亦逐渐消失。随后,两个较小的离散连通域各自小幅脉动,且先后溢出水面,水柱在重力作用下逐渐回落。

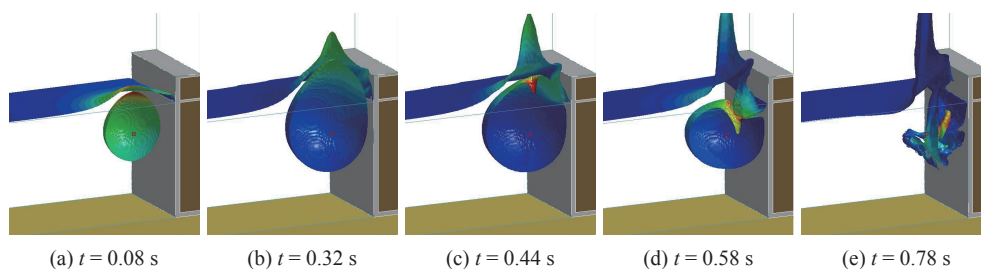


图 7 工况 3 气泡形态图

Fig. 7 Configuration changing process of bubble in Condition 3

在工况 4 中, 气泡主要经历了两个完整的脉动周期。在气泡初始膨胀阶段, 受水面影响, 气泡垂向逐渐拉长, 如图 8(a) 所示。当 $t=0.32$ s 时, 如图 8(b) 所示, 气泡膨胀至最大, 呈垂向对称鸭梨状, 径向直径约为 12.0 m, 水冢高约 10.6 m。与工况 3 相似, 在此过程中, 近外墙处亦出现了侧水冢和空气凹槽, 但尺寸较小。

图 8(c)、图 8(d) 和图 8(e) 为气泡第一次脉动中的收缩过程。随着气泡收缩, 气泡顶部形成向底部发展的射流并射穿气泡底面。受黏滞作用, 击穿点周边液体和爆轰产物随射流向下运动, 形成独立的离散气泡。 $t=0.78$ s 时, 气泡体积最小, 主要分为两部分: 主体部分呈环状多连通域, 在其下部有一个较小的细长连通域。壁面对气泡收缩过程的影响较大, 气泡右侧边界收缩较慢。期间, 空气凹槽内凹迅速, 但并未导致气泡边界面破碎。

随后, 气泡再次膨胀并向外辐射脉动荷载, 气泡脉动进入第 2 个周期, 即 t 在 0.78~1.38 s 时, 如图 8(e)~图 8(i) 所示。水面的变化更加复杂: 一方面气泡再次膨胀推动水体向上运动冲击水柱底部, 形成径向扩散的水裙; 另一方面, 凹槽处水体较少, 气泡对水体的推动效果明显, 形成指向码头上部结构的细长射流。第 2 次脉动中水面和结构的影响更为明显, 但并未形成直接作用于壁面的射流。在第 3 次脉动过程中, 水面破裂, 气泡内气体逐渐溢出, 水柱和径向飞溅水体回落, 港池内逐渐恢复平静。整个过程中, 气泡运动中心向结构移动并上浮, 在气泡膨胀阶段中心位置的移动速度较收缩阶段快。

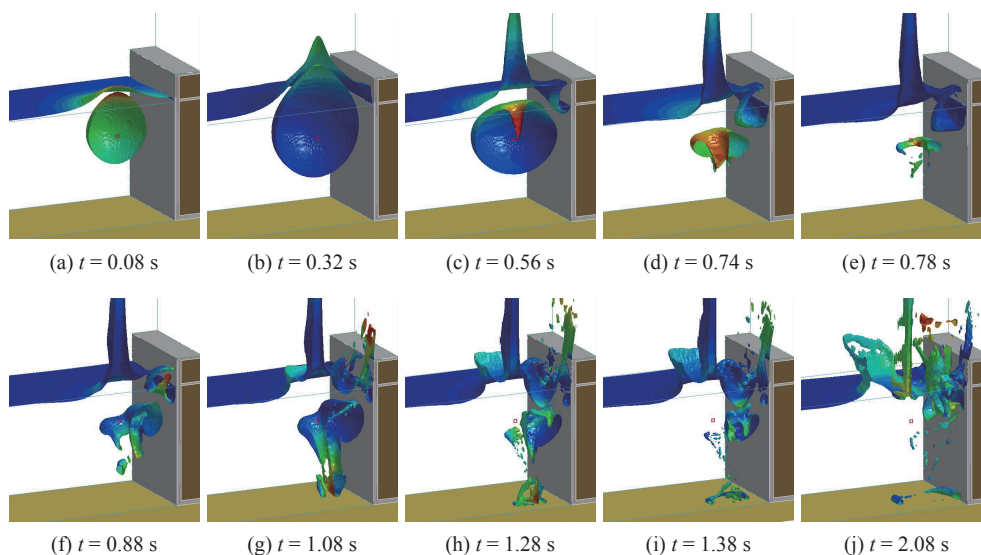


图 8 工况 4 气泡形态图

Fig. 8 Configuration changing process of bubble in Condition 4

如图 9 所示, 工况 5 的宏观现象与工况 4 相似, 不同的是第 1 次气泡脉动基本呈现垂向对称性, 侧水冢和凹槽亦较小, 最大半径和水冢的高度较大, 且壁面对气泡的影响自第 3 次气泡脉动起才变得明显, 水下扰动程度更剧烈, 持续时间更长。

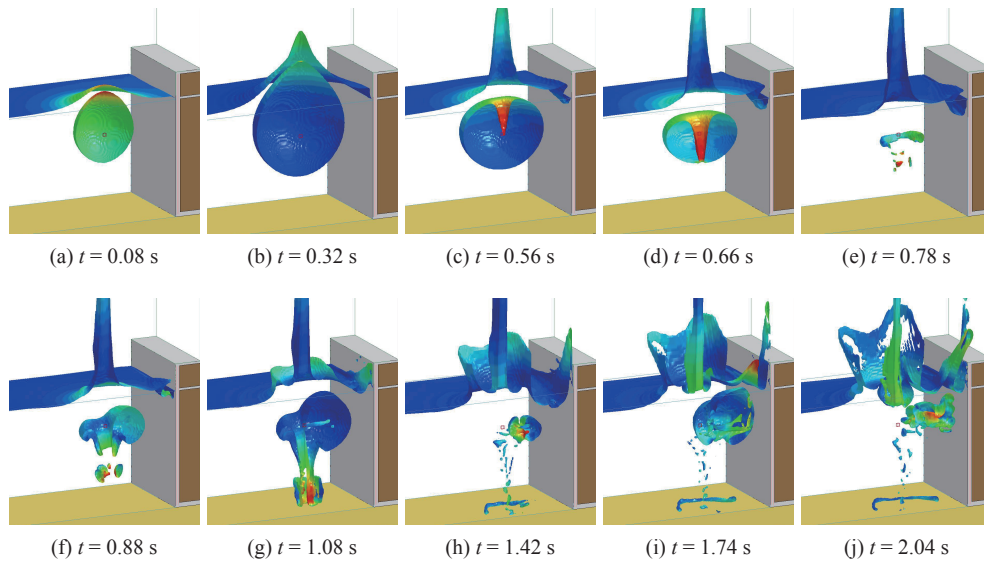


图 9 工况 5 气泡形态图
Fig. 9 Configuration changing process of bubble in Condition 5

表 8 为各工况下气泡脉动特征值。其中, t_{re} 为气泡最大半径到达时间, t_1 为第 1 次气泡脉动周期, t_2 为第 2 次气泡脉动周期, t_b 为气泡顶破水面时间, D_{re} 为气泡最大直径。

表 8 气泡脉动规律
Table 8 Pattern of bubble impulse

Condition	$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	t_{re}/s	Maximum shape	D_{re}/m	t_1/s	Minimum shape	t_2/s	t_b/s
1	0.43	0.24	Semi pyriform cavity	7.8		Irregular discrete bubble		0.18
2	0.86	0.34	Semi pyriform cavity	10.0		Irregularly multiconnected domain		0.42
3	1.29	0.32	Offside platy pyriform cavity	11.4	0.78	Cyclic multiconnected domain	1.50	0.58
4	1.72	0.32	Vertical symmetry pyriform cavity	12.0	0.78	Cyclic multiconnected domain	1.38	1.48
5	2.16	0.32	Vertical symmetry pyriform cavity	12.2	0.78	Cyclic multiconnected domain	1.42	2.52

宏观运动主要受水面和侧向结构的影响,水底亦有一定影响。气泡溃散方式和射流方向主要受浮力和水面、外墙施加的 Bjerknes 力控制,并受有限空间内水体运动的间接影响。一次射流形态主要为自气泡顶部边界始向底部边界发展,最终射穿底部边界,未出现直接作用于结构的射流。整个爆炸过程中,水体扰动剧烈,水柱、水冢、水幕、空气凹槽、水裙扩散和飞溅等现象多有发生,且范围较广。

气泡脉动过程中,有周期不完整或经历周期较少、脉动范围较广且程度较剧烈、形态复杂等特点,这主要由气泡的运动位置决定的。一方面,爆炸位置距水面较近,气泡在脉动和上浮过程中可能过早顶破水面,使气泡内气体外泄,脉动势能减小。但较浅的脉动位置使气泡周边静水压力和自由面对气泡的限制较小,气泡内外压力差较大,故在出现气体外泄前,气泡脉动更剧烈、范围更广。另一方面,在近场爆炸中侧向边界的 Bjerknes 效应较为强烈,使气泡失去垂向对称性,脉动形态更加复杂。

随着 $\bar{R}$ 增加,气泡脉动呈现以下变化: (1) 气泡最大直径增大, (2) 溢出水面时间延后, (3) 气泡最大形态由半鸭梨状空腔向右侧扁平鸭梨状转变,再变为垂向对称鸭梨状, (4) 最小形态由不规则离散气泡或多连通域向环状多连通域转变, (5) 经历脉动周期次数增加。

3.2 荷载特性和分布规律

选取荷载峰压和比冲量为指标,对水下爆炸中的两个主要荷载作用阶段:冲击波传播阶段和第 1 次气泡脉动阶段进行研究,分析水下爆炸荷载特性和分布规律。提取测点 $T_{H0} \sim T_{H15}$ 相应数据,绘制

两阶段码头外侧所受荷载沿水深分布情况,如图10所示,其中:图10(a)、图10(b)显示爆炸冲击波峰压和比冲量分布曲线,图10(c)、图10(d)显示第1次气泡脉动峰压和比冲量分布曲线。

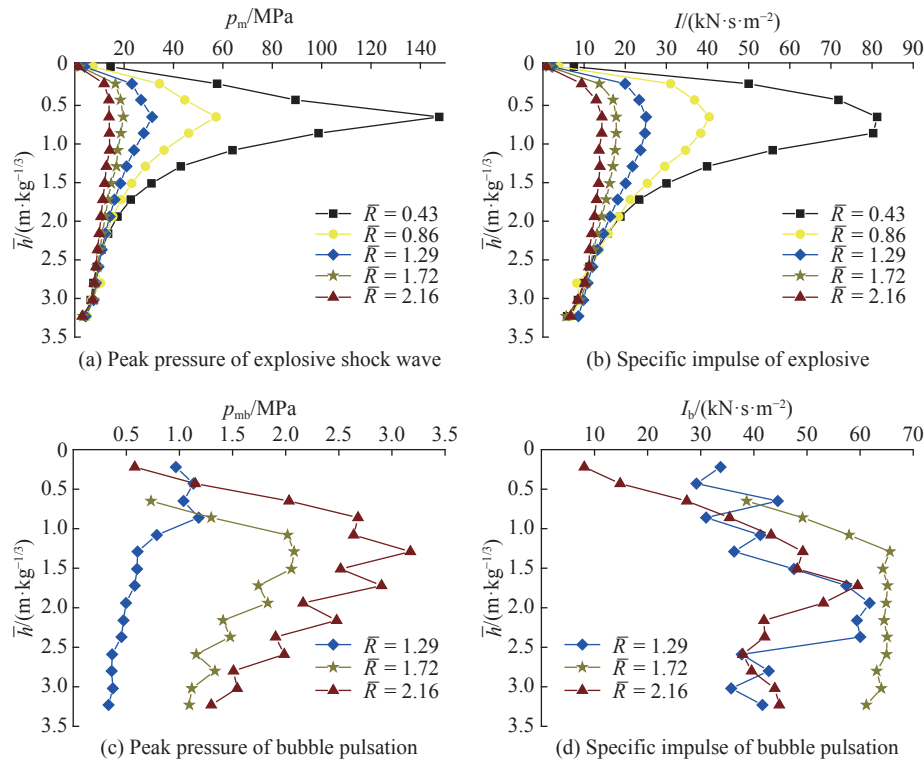


图10 荷载沿水深分布

Fig. 10 Load distribution at different depth

由图10(a)和图10(b)可知,作用于结构的冲击波荷载呈垂向对称分布,在与起爆位置同深处最大,向水底和水面两个方向衰减,其中向水面方向衰减速度较快。随着比例爆距增加,结构所受荷载减小,且沿水深分布趋于均匀。当 $\bar{R} \geq 1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,外墙各位置所受荷载均已明显低于码头结构中常用混凝土的强度。对于 $\bar{R} \geq 2.16 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 位置,各爆距下荷载趋于一致。

气泡脉动荷载方面,由图10(c)和图10(d)可知,气泡脉动峰压远低于结构材料强度,毁伤因素主要是持续超压作用导致的冲量累积。可按比例爆距变化分3种情况进行分析。(1)当 $\bar{R} \leq 0.86 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,未经历完整脉动过程,未测得明显的脉动峰压和比冲量。(2)当 $\bar{R} = 1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,在气泡膨胀过程中,水面被部分顶破,气体外泄,虽完成了一个脉动周期,但气泡运动势能较低,脉动荷载峰压较低。同时,由于众多离散小气泡的阻隔,脉动荷载不能有效地向水底方向传播。但由于离散气泡群以上位置水体扰动距离,以下位置气泡、水底和外墙3个界面距离较近,故码头前荷载衰减速度慢,各位置衰减规律不一,表现为比冲量较大且分布无规律。(3)当 $1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3} \leq \bar{R} \leq 2.16 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡脉动荷载主要分布于比例爆深以下,且沿水深方向变化不规律。随着 $\bar{R}$ 增大,气泡脉动峰压增大,比冲量减小。

值得注意的是,图10(c)和图10(d)中出现随着 $\bar{R}$ 增大气泡脉动峰压增大,以及锯齿状的不规则分布的特性,这与常见的自由场气泡荷载分布存在明显差异。对于前者,是因为当气泡位置距离码头结构越近时,脉动过程中气泡表面可能出现的局部破碎越严重,破碎时间越长,爆轰产物溢出越严重,气泡运动势能减小越多,再次膨胀时辐射荷载越小。对于后者,是因为本研究的5种工况中, $\bar{R}$ 在 $1.29 \sim 2.16 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 之间,气泡最小形态为环状多连通域,再次膨胀时表现出多压力波源特点,且射流荷载与气泡脉动荷载峰压出现的时间相近,它们共同作用且不易区分,射流荷载亦会使局部荷载增高。

总的来说,气泡脉动荷载变化较为复杂,这主要是由以下几点导致的:(1)港池内空间有限,气泡运动形态和位置变化复杂,脉动荷载压力波源个数较多且形态不一、位置交错;(2)近水面条件下,气泡

可能顶破水面,甚至出现反复破裂、闭合,使气泡脉动势能改变;(3)存在多个边界,脉动荷载在传播中辐射和衰减规律复杂;(4)以上3点互相作用、互相影响。

对比两个阶段可知,水下爆炸对码头结构的毁伤诱因:在冲击波传播阶段主要为荷载峰压超过结构材料强度,在气泡脉动阶段主要为持续超压作用导致的冲量累积。在水下爆炸对码头毁伤效应的研究中,可以选取爆炸冲击波峰压和第1次气泡脉动比冲量为毁伤能力指标。

3.3 码头结构动态响应及能量吸收特性

3.3.1 码头结构动态响应

综合考虑3.1节和3.2节内容,以工况1和工况3为例,研究码头结构的毁伤过程。

图11为工况1下码头结构的等效应变分布情况。爆炸冲击波作用后,结构变形和毁伤持续发展,至 $t=0.08\text{ s}$ 时基本完成。迎爆面毁伤区域以比例爆深为中心,呈椭圆形分布,近水底区域的分布范围和毁伤程度均较近水面区域大,水面以上部分变形较小。毁伤区域上边界略高于沉箱封仓板,左右两侧边界略宽于中间仓格内隔墙对应位置。比例爆深、上部和两侧边界的变形较为严重,沿内隔墙对应位置出现部分混凝土单元破坏删除。此外,在与中间仓格毁伤区域同深位置,两侧仓格外墙亦出现变形,但变形范围和程度远小于后者。从背爆面来看,外墙背爆面毁伤分布范围与迎爆面相近,程度较小,但分布更为集中。在与外墙毁伤区域同深位置,纵向内隔墙出现范围和程度略小的毁伤。

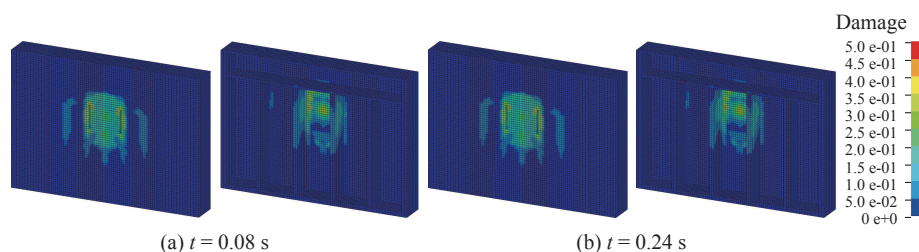


图11 工况1中结构变形与毁伤过程

Fig. 11 Process of the deformation and damage of structure in Condition 1

此后,气泡持续膨胀,中间仓格的变形和毁伤形态无明显变化,两侧仓格有所发展,但范围和程度仍较小。至气泡膨胀至最大,即 $t=0.24\text{ s}$ 后,不再发生变化。总的来说,该工况下,结构变形与毁伤在 $t=0.08\text{ s}$ 时基本完成,水下爆炸对结构的毁伤主要分布于中间仓格对应外墙区域和内隔墙。

由图12可知,工况3中结构变形和毁伤至 $t=0.08\text{ s}$ 时基本完成,至第1次气泡脉动周期结束,即 $t=0.78\text{ s}$ 后,不再发生变化。工况3的变形与毁伤程度较工况1小,迎爆面侧主要以比例爆深偏下位置为中心,广泛分布于各仓格外墙中垂线附近。毁伤分布范围和程度由中间向两侧仓格减小,沿中间仓格内隔墙对应位置亦有一定毁伤分布。从背爆面来看,中间仓格外墙中心和内隔墙混凝土单元的应变较大,其余位置较小。总的来说,该工况下,结构变形与毁伤在 $t=0.08\text{ s}$ 时基本完成,气泡脉动二次毁伤效应较弱。水下爆炸对结构的毁伤分布较广、毁伤程度较轻,主要分布于外墙迎爆面和中间仓格内隔墙。

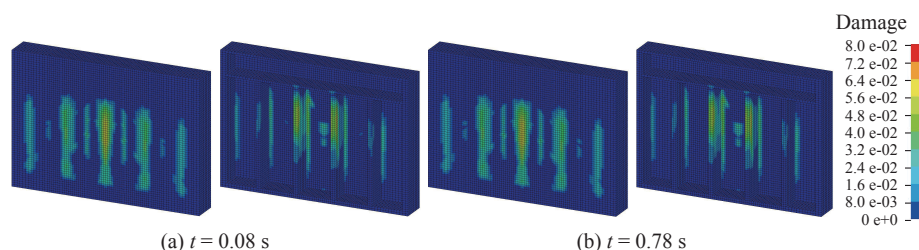


图12 工况3中结构变形与毁伤过程

Fig. 12 Process of the deformation and damage of structure in Condition 3

3.3.2 码头结构的能量吸收特性

水下爆炸能量主要通过冲击波荷载和气泡脉动持续作用传递至码头结构,并在码头内各部分间传递、衰减。通过与水体的耦合作用,外墙是爆炸能量的直接作用部分,主要通过整体或局部变形和材料破坏吸收一部分能量。随后,通过冲击波和荷载辐射的方式将剩余能量传递至结构内填土和其他构件。钢筋主要通过自身的形变吸收能量,当钢筋与包裹其的混凝土黏结较好时,其变形直接由混凝土变形决定。回填土对于能量的吸收,主要通过整体运动和转化为自身内能实现。

为考察结构能量吸收特性,通过关键字 DATABASE_GLSTAT 定义输出码头结构各部分能量变化,并将爆炸和港池内宏观运动结束后码头结构各部分吸收能量情况汇总于表 9。表 9 中: E_c 、 E_{cs} 、 E_s 、 E_{ts} 分别为混凝土、沉箱填土、钢筋吸收、上部结构填土吸收能量, E_{sum} 为码头结构吸收总能量, η_c 、 η_{cs} 、 η_s 和 η_{ts} 分别为混凝土、沉箱填土、钢筋吸收、上部结构填土吸收能量占结构吸收总能量的百分比。

表 9 码头结构各部分吸收能量

Table 9 Energy absorption of different parts of the harbor basin

$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	E_c/MJ	$\eta_c/\%$	E_{cs}/MJ	$\eta_{cs}/\%$	E_s/MJ	$\eta_s/\%$	E_{ts}/MJ	$\eta_{ts}/\%$	E_{sum}/MJ
0.43	5.08	57.44	3.56	40.29	0.1306	1.48	0.0703	0.79	8.84
0.86	1.97	44.30	2.41	54.16	0.0069	0.15	0.0618	1.39	4.46
1.29	0.81	29.98	1.85	68.19	0.0014	0.05	0.0485	1.78	2.71
1.72	0.36	19.03	1.49	78.97	0.0003	0.01	0.0374	1.99	1.88
2.16	0.19	12.72	1.26	85.41	0.0002	0.02	0.0272	1.85	1.47

传递至码头的能量主要被混凝土和沉箱内填土吸收,钢筋和上部结构填土吸收的能量可以忽略。随着比例爆距的增加,码头结构吸收的能量减小,其中混凝土对能量吸收的占比逐渐减小,沉箱填土对能量吸收的占比逐渐增加,主要吸能部分由混凝土变为沉箱填土。

4 结 论

在定性分析港池环境水下爆炸特点及影响因素基础上,构建典型港池环境,进行数值模拟,从宏观运动、荷载特性、结构动态响应和能量吸收特性 4 个方面,对港池环境近水面水下爆炸特性及毁伤效应开展研究,分析了边界、爆距等的影响规律和作用机理。

(1) 宏观运动方面,主要受侧向结构、水面和水底 3 个边界面影响,其中前两者影响较大。气泡溃散方式和射流方向受浮力以及水面、外墙施加的 Bjerknes 力控制,并受有限空间内水体运动间接影响。气泡脉动呈现周期不完整或经历周期较少、脉动范围较广且程度较剧烈、形态复杂等特点。一次射流形态主要为自气泡顶部边界始向底部边界发展,最终射穿底部,无直接作用于结构方向射流出现。港池内水体扰动剧烈,水柱、水冢、水幕、空气凹槽、水裙扩散和飞溅等现象多有发生,且范围较广。

(2) 荷载特性方面,沿水深方向上,作用于结构的冲击波荷载以比例爆深为中心呈对称分布,随着比例爆距增加,荷载沿水深分布趋于均匀。从气泡脉动荷载来看,荷载峰压远低于冲击波荷载,毁伤因素主要是持续超压作用导致的冲量累积。沿水深方向上,当 $\bar{R} \leq 1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,无明显气泡脉动荷载作用;当 $1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3} \leq \bar{R} \leq 2.16 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡脉动荷载主要分布于比例爆深以下位置,随着 $\bar{R}$ 增大,气泡脉动峰压增大,比冲量减小。

(3) 结构动态响应方面,本研究工况下,结构变形和毁伤在 $t=0.08 \text{ s}$ 时基本完成,气泡脉动和射流的二次毁伤作用较弱。结构毁伤主要分布于以炸药对应位置为中心的椭圆形区域内,其中比例爆深和内隔墙对应位置较为严重。背爆面和内隔墙的毁伤程度较迎爆面小。比例爆深一定时,随着比例爆距增加,毁伤区域范围扩大、程度较小,背爆面主要毁伤区域由外墙背爆面转变为内隔墙。

(4) 结构能量吸收特性方面,混凝土和沉箱内填土是主要能量吸收部位。比例爆深一定时,随着比例爆距的增加,结构吸收能量减小,主要吸能部分由混凝土逐渐变为沉箱填土。

参考文献:

- [1] ZAMYSHLYAYEV B V. Dynamic loads in underwater explosion; AD-757183 [R]. Suitland: Naval Intelligence Support Center, 1972.
- [2] SWISDAK M M. Explosion effects and properties (Part II) —explosion effects in water: AD-A056694 [R]. Sliver Spring: Naval Surface Weapons Center, 1978.
- [3] LI J, RONG J L. Bubble and free surface dynamics in shallow underwater explosion [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17/18): 1861–1868.
- [4] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(11): 1–25.
- [5] WANG G H, ZHANG S R, YU M, et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries [J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 46(2): 40–53.
- [6] 张显丕, 刘建湖, 潘建强, 等. 基于效应靶的装药水下近场爆炸威力评估方法 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1430–1435.
ZHANG X P, LIU J H, PAN J Q, et al. An evaluation method for near-field underwater explosion power based on effect target [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1430–1435.
- [7] 王振雄, 顾文彬, 陈江海, 等. 浅水中爆炸水底介质对水中冲击波峰值压力影响的试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(4): 243–248.
WANG Z X, GU W B, CHEN J H, et al. Experimental study on the influence of the bottom medium on the peak pressure of explosion shock waves in shallow water [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(4): 243–248.
- [8] 韦灼彬. 钢筋混凝土桩基梁板码头爆炸毁伤及抢修技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [9] 侯晓峰, 王全胜, 钱展芃, 等. 水中爆炸条件下结构毁伤评估方法研究 [J]. *防护工程*, 2014, 36(1): 40–45.
HOU X F, WANG Q S, QIAN Z P, et al. Study on the assessment methods of structures subjected to underwater explosion [J]. *Protective Engineering*, 2014, 36(1): 40–45.
- [10] 韦灼彬, 唐廷, 王立军. 港口水下爆炸荷载冲击特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(6): 18–22.
WEI Z B, TANG T, WANG L J. Shock characteristics of underwater explosion in port [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(6): 18–22.
- [11] 董琪, 韦灼彬, 唐廷, 等. 爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(2): 024102.
DONG Q, WEI Z B, TANG T, et al. Influence of explosion depth on bubble pulsation in shallow water explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(2): 024102.
- [12] 董琪, 韦灼彬, 唐廷, 等. 浅水爆炸特性数值模拟研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2018, 30(3): 76–81.
DONG Q, WEI Z B, TANG T, et al. Numerical simulation of characters of shallow water explosion [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2018, 30(3): 76–81.
- [13] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 水工混凝土结构设计规范: DLT 5057-2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [14] 高洪泉, 卢芳云, 赵宏伟. 不同土壤介质中爆炸的数值模拟 [C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 洛阳, 2007: 85–90.
- [15] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 051003.
- [16] 张凤国, 李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(3): 198–202.
ZHANG F G, LI E Z. A computational model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 198–202.

Loading Characteristics and Damage Effect of Near-Surface Underwater Explosion in Harbor Basin

DONG Qi^{1,2}, WEI Zhuobin², TANG Ting², LI Lingfeng^{1,2}, LIU Jinghan^{1,2}

(1. *College of Warship and Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

2. Naval Logistics Academy, Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to study the load of underwater explosion near the surface of the harbor basin and the damage effect on the wharf, we designed a typical wharf structure and built a harbor basin environment. Then through a series of numerical analysis which was accomplished based on finite element program LS-DYNA, the explosion phenomenon, loading characteristics, structural dynamic response and energy absorption characteristics were studied in details, the influence rules and action mechanism of the boundary, scaled collapse distance and other parameters were analyzed. The results show that: the explosion bubble pulsation is mainly affected by wharf structure boundary and free surface, the bottom and the movement of fluid in the limited space also have some impacts. The shock wave load is symmetrically distributed in the vertical direction with the scaled explosion depth as the center, and the bubble pulsation load is mainly distributed below the scaled explosion depth. The structural deformation and damage are mainly formed on the propagation of shock wave, and the secondary damage effect of bubble pulsation and jet is weak. Concrete and caisson fill absorb most of the explosive energy.

Keywords: underwater explosion; harbor basin; near-surface; damage effect; caisson gravity wharf