DOI: 10.11883/bzycj-2017-0406

爆炸荷载下沉箱重力式码头模型毁伤效应*

李凌锋[1],韦灼彬[2],唐 廷[2],董 琪[1],刘靖晗[1],邱艳宇[3]

(1.海军工程大学舰船与海洋学院,湖北 武汉 430033;
2.海军勤务学院海防工程系,天津 300450;
3.陆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:在野外条件下开展了不同爆炸荷载条件下沉箱重力式码头模型毁伤效应实验,得到了沉箱重力式码头模型在 1 kg TNT 当量空中爆炸、水下爆炸以及结构内部爆炸后的毁伤模式,并针对不同毁伤模式给出了相应的抢修建议。实验结果表明:空中爆炸荷载下码头仅面板局部破坏形成爆坑;水下爆炸荷载下码头迎爆面及相近区域形成大量裂缝;结构内部爆炸荷载下码头仓格大变形破坏且中间面板被掀飞;从横向对比来看,在相同爆炸当量下空中爆炸荷载下码头毁伤程度最小,结构内部爆炸荷载下码头毁伤程度最大。

关键词:爆炸荷载;毁伤效应;沉箱重力式码头;空中爆炸;水中爆炸;结构内爆炸;码头仓格

中图分类号:O381;TV32+1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

我国海岸线漫长,岛屿众多,港口工程已成为我国和平时期经济建设的重要基础支撑。码头作为港口工程最主要的组成部分,承担着海上与陆地间人力、物资往来桥梁的作用。随着当前偶然爆炸和恐怖袭击的增多,码头结构一旦受损,势必影响港口的正常运转,造成重大经济损失。因此,开展码头结构在爆炸荷载下的毁伤效应研究、从而为码头结构抢建抢修技术方案提供科学依据,对于提高码头保障能力具有重要意义。

爆炸荷载下码头结构毁伤效应研究是一个涉及大体积混凝土本构、爆炸冲击波传播、多介质瞬态动力耦合、结构动态响应等多方面内容的复杂课题,国内外关于码头结构的毁伤模式、失事机理及其抗爆特性的研究成果很少,大部分研究主要集中在对钢筋混凝土构件抗爆性能上。已有研究结果显示:(1)爆炸荷载下钢筋混凝土板的破坏模式主要有爆坑、裂缝、震塌、贯穿破坏等[1-5];(2)爆炸荷载下钢筋混凝土柱的破坏模式主要有弯曲、弯剪以及剪切破坏等[6-7];(3)钢筋混凝土在空中爆炸荷载下的破坏程度明显小于水下爆炸荷载下的[8-9]。另有一些学者对钢筋混凝土框架结构建筑在爆炸荷载下的整体性能进行了研究[10-12]。韦灼彬[13]曾对桩基梁板码头的抗爆性能进行过试验及数值模拟研究,但对于分布更为广泛的沉箱重力式码头还未见相关研究报道。

本文中,以沉箱重力式码头作为研究对象,开展爆炸荷载下沉箱重力式码头模型毁伤效应的实验研究,探索该型结构在不同爆炸荷载下的毁伤模式,分析可能的破坏机理并对比不同爆炸荷载下码头损伤程度,以便进一步利用数值模拟方法开展全尺寸真实沉箱重力式码头在爆炸荷载下的毁伤效应研究。

1 实验设计

1.1 实验模型

以现有突堤式沉箱重力式码头为参考,按照与实际结构尺寸比 1:5 的整体尺寸缩比设计原则,兼顾施工可行性和实验条件,制作沉箱重力式码头模型。码头主体长(即岸壁方向)298 cm、宽 162 cm、高 219 cm。码头下部为沉箱结构,高 180 cm,由外墙、沉箱底板、封仓板、内隔墙及其所围成的 6 个仓格以及仓格内的饱和沙构成。码头上部结构高 39 cm,由面板、外墙、管沟底板、管沟内壁及其所围成的管沟

* **收稿日期**:2017-11-07;**修回日期**:2018-05-07
第一作者:李凌锋(1990—),男,博士研究生;**通信作者**:唐 廷,tangting1980@126.com。

和仓格以及仓格内的干沙构成。为了便于实验结果的描述,对码头四面外墙进行编号。将码头每侧长度方向外墙等分成 3 份、每侧宽度方向外墙等分成 2 份,从更靠近炸药的长度方向外墙起,按照逆时针方向依次编号 1＃～10＃。码头模型三视图及其剖面图如图 1 所示。

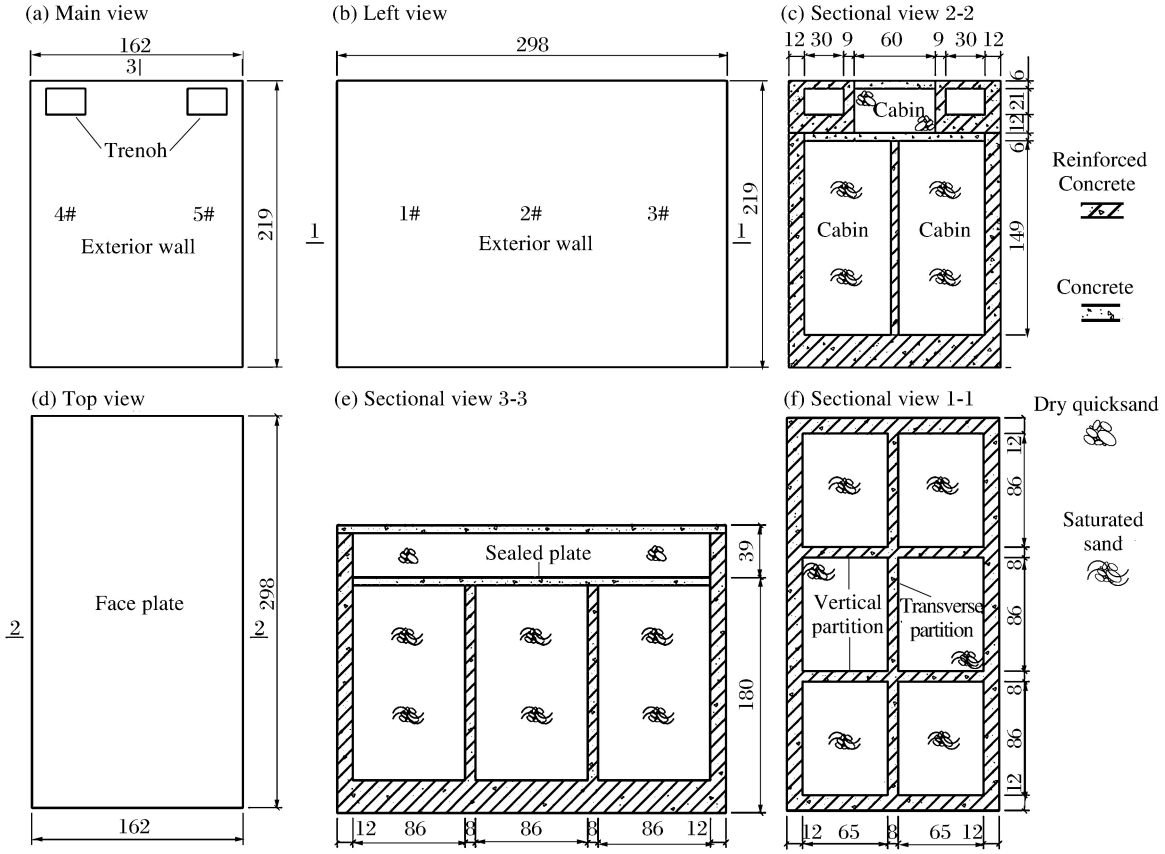


图 1　码头模型三视图及其剖面图

Fig. 1　Three-view drawing of the wharf model and its sectional view

码头模型为钢筋混凝土组合结构,只有上部仓格面板和封仓板未配筋。钢筋采用普通 Q235,混凝土设计强度 C30,沙为普通河沙。根据现场施工条件,对码头下部结构和上部结构混凝土分两次现场浇筑,并各自预留 3 块混凝土试件进行 28 d 自然养护下强度测试。测试结果表明下部结构混凝土平均强度为 35.0 MPa,上部结构混凝土平均强度为 28.2 MPa。主要部位混凝土厚度及配筋情况如表 1 所示。

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

位置	混凝土厚度/cm	配筋情况	保护层厚度/cm
仓格外墙	12	双层双向配筋,钢筋直径 1.2 cm,间距 18 cm	1.4
仓格内隔墙	8	双层双向配筋,钢筋直径 0.6 cm,间距 9 cm	1.7
沉箱底板	25	双层双向配筋,钢筋直径 2 cm,间距 18 cm	3
管沟底板	12	双层双向配筋,钢筋直径 0.6 cm,间距 16 cm	1.7
管沟外壁	12	双层单向配筋,钢筋直径 0.6 cm,间距 16 cm	1.7
管沟内壁	9	双层单向配筋,钢筋直径 0.6 cm,间距 15 cm	1.7
面板	6	管沟面板单层双向配筋,同管沟底板,其他不配筋	1.7
封仓板	6	不配筋	

1.2　实验方案

考虑到爆炸荷载环境条件对结构的毁伤模式影响较大，因此设计空中爆炸、水下爆炸及结构内爆炸 3 种典型的爆炸荷载工况、在野外进行结构抗爆实验。实验在直径 800 cm、深 800 cm 的圆柱形坑洞内开展。实验开始前将码头吊装至洞底中心位置附近，然后向坑洞内注水，使水深达到 180 cm。在保证安全性的前提下，为了使实验效果明显易于观察，各实验均采用 1 kg TNT 当量的圆柱状 PENT 炸药。

空中爆炸采用接触爆炸方式，炸药底面平置放于码头面板中心。水下爆炸采用非接触爆炸方式，炸药被固定在水中 90 cm 深处，底面朝向码头岸壁，其中心距离码头岸壁中间 100 cm。结构内爆炸中，炸药通过一预留在码头沉箱中间仓格中、紧靠横向内隔墙中间处的竖向通直 PVC 管被埋在距沉箱底部 90 cm 处，底面朝下。各实验的炸药布置方案如图 2 所示，实验方案如表 2 所示。



图 2　炸药布置方案

Fig. 2　Explosive arrangement

表 2　实验方案

Table 2　Experiment scheme

编号	爆炸类型	药量/kg	炸药位置	试件编号
1	空中爆炸	1	码头面板中心处	AE
2	水下爆炸	1	岸壁中间，离壁 100 cm，水深 90 cm 处	UW
3	结构内部爆炸	1	近似码头中心，距箱底 90 cm	IM

2　实验结果与分析

2.1　空中爆炸

空中爆炸荷载下码头毁伤模式如图 3 所示。码头面板爆点处局部区域被炸穿，形成一近似圆形的洞口。圆洞直径沿面板厚度方向分布不均，在面板上、下两面略大，在中间处最小。经测量，在码头长度方向上，圆洞上口直径为 49.2 cm、中间直径为 36.5 cm、下口直径为 50.1 cm；在码头宽度方向上，上口直径为 45.0 cm、中间直径为 35.2 cm、下口直径为 46.1 cm。圆洞正下方仓格内沙体略有凹陷但程度不大。沿圆洞周围在码头面板上产生一圈放射状黑线，这是爆炸遗留产物。除爆炸产生的圆洞外，码头面板上无其他明显损伤，码头结构整体亦完好无损。

空中爆炸荷载下码头的这一毁伤模式与固支混凝土板[13]类似。炸药爆炸产生的高温高压气体在极短时间内对混凝土产生冲击，使混凝土表面在压缩应力波的作用下粉碎破坏，形成上宽下窄的漏斗坑。当压缩应力波传递到混凝土背爆面时，由于干沙（或空气）的波阻抗远小于混凝土，压缩应力波将在介质表面反射产生强烈的拉伸应力波。在拉伸应力波的作用下，混凝土背爆面崩塌层裂，形成下宽上窄的漏斗坑。当混凝土板较薄时，上下漏斗坑贯穿相连，形成上下宽、中间窄的爆坑。

2.2　水下爆炸

水下爆炸荷载下码头毁伤模式如图 4 所示。码头迎爆面破坏较为严重。在爆炸冲击波的直接作用下，1＃、2＃和 3＃墙面均出现不同程度整体内凹，其中 2＃墙面内凹程度最重、1＃最轻。由于墙面内

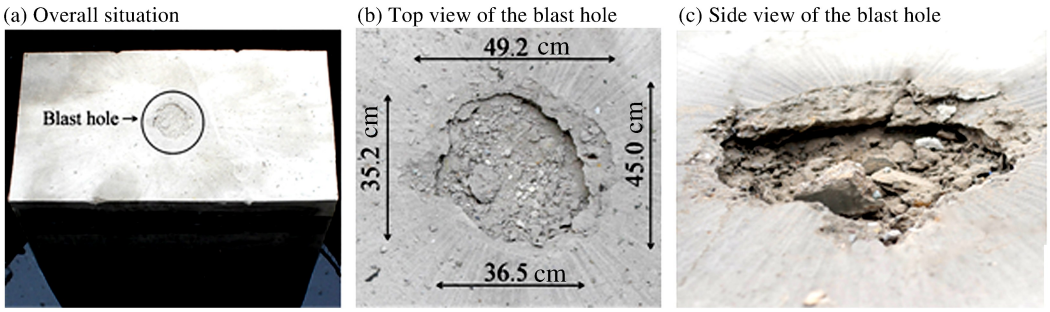


图 3　空中爆炸码头毁伤模式

Fig. 3　Damage mode of the wharf under explosion in air

凹，在各墙面凹陷区边缘产生了环状裂缝。在 2＃墙面中间偏下位置还出现一小块内凹区，且该处内凹区边缘环状裂缝宽度较其他环状裂缝宽度为大，其裂缝上部分混凝土剥落。这可能是因为爆炸冲击波在水中以球面波的形式传播，冲击波将最先抵达 2＃墙面中间位置，此时该区域混凝土在冲击波的冲剪作用下将首先破坏，而后冲击波陆续抵达 2＃墙面其余部分以及 1＃、3＃墙面。由于冲击波在传播过程中随着传播距离的增加而衰减，因此 1＃、3＃墙面破坏程度轻于 2＃墙面，而 2＃墙面中间区域破坏程度最大。迎爆面除了产生环状裂缝，在面板下沿与封仓板下沿对应位置还各出现一条横向贯通裂缝。此外，由于冲击波在迎爆面反射后形成的强拉伸波，在强拉伸波的作用下靠近迎爆面外表面的混凝土内粗骨料被拔出，使迎爆面形成许多小坑洞。



图 4　水下爆炸码头毁伤模式

Fig. 4　Damage mode of the wharf under explosion in water

码头侧面与面板破坏情况均轻于迎爆面。两侧墙面与面板的破坏模式基本相同，均以裂缝发展为主。其中侧墙面破坏主要发生在 4＃、10＃墙面。以 4＃墙面为例，管沟下方出现一条斜裂缝，斜裂缝向上扩展至面板，向下扩展至封仓板下沿。在封仓板下沿靠近迎爆面附近还出现一条横向裂缝并向背爆

面扩展。此外，整个侧墙面仍可见由强拉伸波拔出表面粗骨料造成的小坑洞。在码头面板上可见两条明显的通长横向裂缝，其中远离迎爆面的一条在码头两侧与两侧墙面的斜裂缝相连贯通。

码头背爆面几乎无破坏，只在墙面出现一些同样由强拉伸波拔出表面粗骨料造成的小坑洞。

2.3　结构内爆炸

结构内部爆炸荷载下码头毁伤模式如图 5 所示。码头上部结构面板中间混凝土大面积被掀翻，形成一“口”字型洞口。洞口上下两沿与上部仓格边缘平齐，左右各扩展至距码头侧墙约 50 cm 位置。面板洞口对应位置处上部仓格内沙体被抛出散落在洞口两侧。上部仓格下方两竖向内隔墙之间的封仓板亦被掀翻，漏出下部中间两仓格内沙体，可观察到有水流入沙体内。

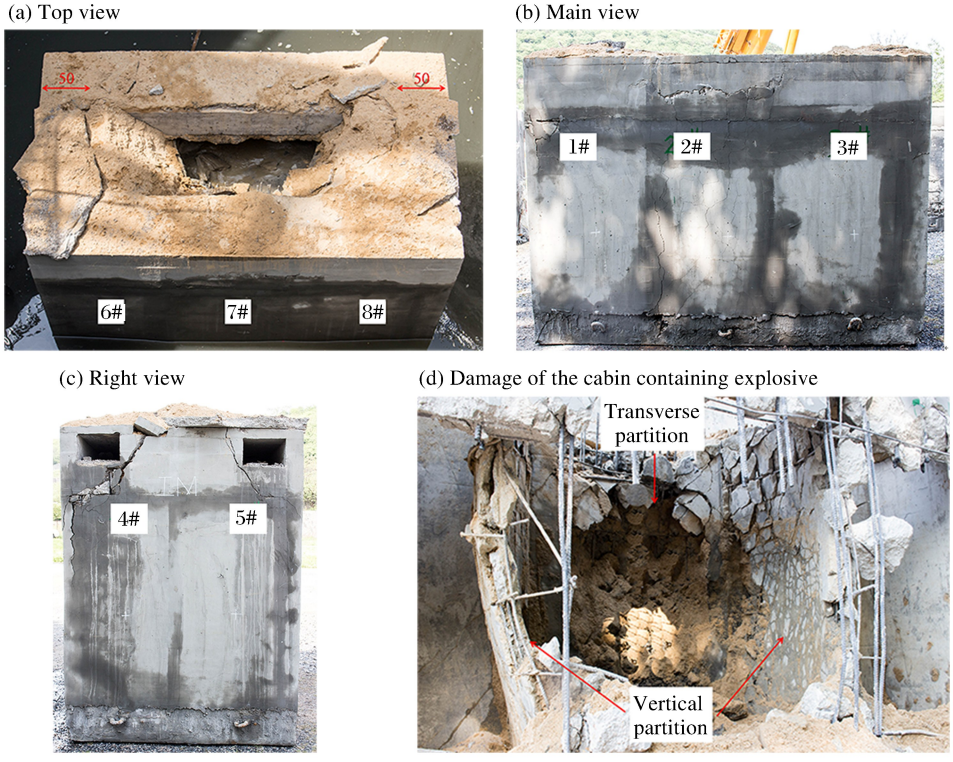


图 5　结构内部爆炸码头毁伤模式

Fig. 5　Damage mode of the wharf under explosion in structure

码头各外墙外凸明显，破坏模式均以裂缝扩展为主。1＃墙面封仓板角部对应位置处混凝土有少许剥落并产生一横一斜两条明显的裂缝。2＃墙面管沟中间对应位置处混凝土部分剥落并产生一条明显的横向裂缝，沿横向裂缝向下发展出多条竖向细小裂纹。3＃墙面右侧边缘中间偏上位置有一较短但明显的斜裂缝。在码头该侧外墙上还可观察到面板下沿有一条横向通长裂缝产生。码头侧向 4＃、5＃墙面上在管沟下方位置出现两条明显的对称斜裂缝，4＃墙面斜裂缝宽度明显大于 5＃墙面，且 4＃墙面斜裂缝上部分混凝土剥落并露筋。7＃墙面破坏情况类似于 2＃墙面但程度较轻，9＃、10＃墙面破坏现象与 5＃、4＃墙面相同。

剖开码头后发现，原炸药所在仓格内隔墙变形严重，在球面爆炸波的冲击下三面内隔墙严重外凸。其中，更靠近炸药的横向内隔墙破坏最为严重，混凝土大部分炸碎剥落，钢筋外凸变形；相比之下，两面竖向内隔墙破坏情况较轻，混凝土小部分剥落，但未剥落混凝土内外表面产生大量龟裂裂缝。

3　毁伤模式对比与抢修建议

实验结果表明，不同荷载条件下码头的毁伤模式差别较大。在 1 kg TNT 爆炸当量下，空中爆炸荷

载的毁伤模式主要体现为码头面板局部破坏,码头结构整体完好无损,表面无任何裂缝产生。水下爆炸荷载的毁伤模式主要体现为码头迎爆面及相近区域裂缝的大量扩展,尤其是迎爆面码头外墙的内凹破坏,码头背爆面基本完好无损。结构内爆炸荷载的毁伤模式主要体现为沉箱仓格的严重变形破坏以及码头面板的完全破坏失效,同时伴随着外墙面大量裂缝的生成。因此,横向比较毁伤程度,在炸药当量相同的情况下码头毁伤程度由轻至重依次为空中爆炸荷载、水下爆炸荷载和结构内爆炸荷载。

针对不同的毁伤模式,可以采用不同的抢修策略。当码头面板轻度毁伤时(即本文空中爆炸荷载下的毁伤模式),可以采用混凝土灌浆浇筑的方式从而较容易地快速修复恢复码头正常使用。当码头一侧外墙受损且出现大量裂缝区域时(即本文水下爆炸荷载下的毁伤模式),在对迎爆面毁伤区域进行加固的同时可以正常使用码头的另一侧,也即这种毁伤模式下码头功能具有一定的鲁棒性。当码头内沉箱仓格严重变形且面板严重破坏时(即本文结构内爆炸荷载下的毁伤模式),码头虽未完全破坏失效,但其主要受力构件面板和内隔墙已失去承载能力,对于这种毁伤模式的抢修较为困难,应尽量避免。

需要说明的是,不同比例爆距(爆炸当量)及多次爆炸荷载均是爆炸荷载下码头毁伤效应的影响因素,由于爆炸实验成本高、难度大,建议采用数值模拟的方法进行码头毁伤效应相关影响因素研究,本文的实验结果可以作为数值模拟的参考用于开展相关数值模拟研究工作。

4　结　论

通过对沉箱重力式码头模型在空中爆炸、水下爆炸以及结构内部爆炸 3 种爆炸荷载下的毁伤效应进行实验研究,得出以下结论:(1)得到了 1 kg TNT 当量各爆炸荷载下沉箱重力式码头模型的毁伤模式。其中空中爆炸荷载下码头仅面板破坏;水下爆炸荷载下码头迎爆面墙面明显内凹,且在迎爆面及相近区域产生大量裂缝;结构内部爆炸荷载下码头面板大部分被掀飞,沉箱仓格内隔墙严重变形;(2)在炸药当量相同的情况下,空中爆炸荷载下码头模型毁伤程度最小,结构内爆炸荷载下码头模型毁伤程度最大;针对试验得到的沉箱重力式码头在不同爆炸荷载下的毁伤模式给出了针对性抢修策略建议;(3)本文中的试验结果可以作为实际沉箱重力式码头爆炸毁伤效应数值模拟研究的参考用以指导相关数值模拟研究工作。

参考文献:

[1] 郑全平,周早生,钱七虎,等. 防护结构中的震塌问题[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1393-1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.
ZHENG Quanping, ZHOU Zaosheng, QIAN Qihu, et al. Spallation in protective structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(8):1393-1398. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.08.031.

[2] OHKUBO K, BEPPU M, OHNO T, et al. Experimental study on the effectiveness of fiber sheet reinforcement on the explosive-resistant performance of concrete plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1702-1708. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.022.

[3] SILVA P F, LU B. Blast resistance capacity of reinforced concrete slabs[J]. Journal of Structural Engineering, 2009,135(6):708-716. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000011.

[4] WANG W, ZHANG D, LU F, et al. Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2013,27:41-51.

[5] ZHAO C F, CHEN J Y. Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2013,63-64:54. DOI: 10.1016/j.tafmec.2013.03.006

[6] 师燕超,李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式[J]. 建筑结构学报,2008,29(4):112-117. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2008.04.015.
SHI Yanchao, LI Zhongxian. Dynamic responses and failuremodes of RC columns underblast loading[J]. Journal of Building Structures, 2008,29(4):112-117. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2008.04.015.

[7] AOUDE H, DAGENAIS F P, BURRELL R P, et al. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering. 2015,80:185-202.

[8] 张社荣，孔源，王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J]. 振动与冲击，2014，33(13)：148-153.
ZHANG Sherong，KONG Yuan，WANG Gaohui. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock，2014，33(13)：148-153.

[9] 张社荣，孔源，王高辉. 水下和空中爆炸时混凝土重力坝动态响应对比分析[J]. 振动与冲击，2014，33(17)：47-54. DOI：10.13465/j.cnki.jvs.2014.17.009.
ZHANG Sherong，KONG Yuan，WANG Gaohui. Dynamic responses of a concrete gravity dam subjected to underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock，2014，33(17)：47-54. DOI：10.13465/j.cnki.jvs.2014.17.009.

[10] SHI Y，LI Z，HAO H. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading[J]. Engineering Structures，2010，32(6)：1691-1703. DOI：10.1016/j.engstruct.2010.02.017.

[11] JAYASOORIYA R，THAMBIRATNAM D P，PERERA N J，et al. Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings[J]. Engineering Structures，2011，33(12)：3483. DOI：10.1016/j.engstruct.2011.07.011.

[12] PARISI F，AUGENTI N. Influence of seismic design criteria on blast resistance of RC framed buildings：a case study[J]. Engineering Structures. 2012，44：78-93. DOI：10.1016/j.engstruct.2012.05.046.

[13] 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.

[14] 王高辉，张社荣，卢文波. 近边界面的水下爆炸冲击波传播特性及气穴效应[J]. 水利学报，2015，46(8)：999-1007.
WANG Gaohui，ZHANG Sherong，LU Wenbo. The influence of boundaries on the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2015，46(8)：999-1007.

Damage effects of the caisson gravity wharf model subjected to explosion

LI Lingfeng[1]，WEI Zhuobin[2]，TANG Ting[2]，DONG Qi[1]，LIU Jinghan[1]，QIU Yanyu[3]

(1. *College of Surface Ship and Ocean，Naval University of Engineering，Wuhan* 430033，*Hubei*，*China*；
2. *Department of Coast Defence Engineering，Naval Logistics Collage of PLA，Tianjin* 300450，*China*；
3. *State Key Laboratory of Explosion and Impact and Disaster Prevention & Mitigation，Army Engineering University of PLA，Nanjing* 210007，*Jiangsu*，*China*)

Abstract：In this work we investigated the damage effects on the caisson gravity wharf using an on-situ test of the wharf model under 1 kg TNT explosion in air，in water and inside the internal structure，and obtained the corresponding damage modes of the wharf model under the different explosion conditions，with the emergent repair proposals presented addressing to the respective damage modes. The results showed that a blast hole was observed locally on parts on the wharf model's panel for air explosion，that lots of cracks developed on the blast side and nearby area of the wharf model for water explosion，and that under the blast in the wharf model's internal structure，the cabins underwent huge deformations and were destroyed while the middle of the model's panel plate was lifted and thrown away. At the same weight of the explosive charge，the damage degree appears minimum under air explosion while it appears the maximum under explosion inside the model's internal structure.

Keywords：explosion load；damage effect；caisson gravity wharf；explosion in air；explosion in water；explosion inside internal stracture；cabin

(责任编辑　王小飞)