

· 港口 ·



梁板式高桩码头爆炸毁伤效应研究现状及 应急抢修方法*

刘靖晗^{1,2}, 高屹¹, 唐廷¹, 韦灼彬¹, 李凌锋¹, 李树青²

(1. 海军勤务学院, 天津 300450; 2. 91292 部队, 河北 保定 071000)

摘要: 梁板式高桩码头作为国内重要的码头结构形式之一, 在战时可能遭到敌方打击而无法使用。为了快速恢复码头功能, 考虑战时高桩码头可能遭到的空中、水下爆炸, 根据国内外已有研究成果, 梳理高桩码头面层、纵横梁和桩基 3 类典型部位可能面临的战伤模式, 分析空中和水下爆炸作用下高桩码头的毁伤特征, 考虑现有施工手段和工程应用案例, 针对各部位典型破坏形式提出抢修技术方法的建议。结果表明: 高桩码头面层、纵横梁和桩基在空中和水下爆炸荷载下展现出不同的破坏模式, 存在裂缝、层裂、爆坑、破口、变形等典型局部破坏现象和码头上部结构、桩基的整体贯通破坏现象; 针对不同破坏部位和毁伤程度, 现有工程修复技术能够基本满足码头局部战伤应急抢修任务要求, 采用预制构件能够提升抢修效率; 水下桩基的抢修技术要求高、难度大, 是制约高桩码头抢修速度的关键, 战时复杂工况下的抢修作业仍需要进一步实践检验。

关键词: 梁板式高桩码头; 空中爆炸; 水下爆炸; 应急抢修; 破坏模式

中图分类号: U656.1+13; O383

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0045-12

Research status of blasting damage effects and emergency repair methods for beam-slab pile-supported wharf subjected to explosion

LIU Jinghan^{1,2}, GAO Yi¹, TANG Ting¹, WEI Zhuobin¹, LI Lingfeng¹, LI Shuqing²

(1. Naval Logistics Collage of PLA, Tianjin 300450, China; 2. No. 91292 Unit of PLA, Baoding 071000, China)

Abstract: Beam-slab pile-supported wharf is an important wharf structural type in China. The wharf is inclined to be unusable in wartime by enemy strikes. For the rapid restoration of wharf functions, we analyze possible air and underwater explosions during war and terrorist attacks, and summarize damage modes of surface layer, longitudinal and transverse beams and pile based on research results from home and abroad. Then we analyze the damage characteristics of pile-supported wharf under air and underwater explosions, and propose suggestions for emergency repair methods for typical damage forms of various parts of wharf considering existing emergency repair methods and engineering application cases. The results show that surface layer, longitudinal and transverse beams and pile have different damage modes subjected to air and underwater explosion. The local damage includes cracks, spalling, craters, break, deformation. The overall damage includes the topside and pile foundation of the wharf have penetration failure. For different damaged parts and damage degrees of wharf, existing engineering technologies can basically repair the local damage in surface layer, longitudinal and transverse beams and pile. Prefabricated components can improve construction efficiency. Emergency repair for pile under water is of high technical requirements in design and more difficulty in construction. Pile repair is a key factor which restricts the construction speed and quality. Considering complex damage conditions and working during wartime, existing repair techniques still need be verified by practice.

Keywords: beam-slab pile-supported wharf; air explosion; underwater explosion; emergency repair; damage mode

收稿日期: 2024-05-20

*基金项目: 海军勤务学院科研发展基金资助项目(2024-17)

作者简介: 刘靖晗(1992—), 男, 博士, 讲师, 从事海洋结构物、港口工程、防护工程研究。

高桩码头是我国港口工程最主要的水工结构形式之一，在东南沿海和内河港口应用广泛，如洋山港、马迹山港等。高桩码头作为重要的交通运输枢纽和军事战略支撑，面临敌方导弹等武器引起的空中、水下爆炸等多类型毁伤作用。为了确保码头战时遭袭后能够快速恢复其驻泊和补给能力，研究梁板式高桩码头的爆炸毁伤效应，从而对分析其战伤应急抢修方法具有重要的现实意义。

梁板式高桩码头在遭受空中、水下爆炸时，由于传播介质、爆炸部位的不同，炸药引爆产生的爆炸荷载特性存在显著差异，李凌锋等^[1]通过重力式沉箱码头模型试验，分析空中爆炸、水下爆炸和侵入内爆炸对码头的不同毁伤效应，由此可见，不同爆炸类型对梁板式高桩码头的毁伤效应有很大影响；韦灼彬^[2]基于大量高桩码头模型空中爆炸试验数据，得到空中爆炸下码头面层、梁板结构的破坏模式。相较于空中爆炸，水下爆炸的破坏效应更强，抢修难度也更大，闫秋实等^[3]通过有限元软件分析水下爆炸作用下单个桩基的毁伤效应，水下爆炸时冲击波和气泡受到水下桩基影响^[4-5]，造成高桩码头水下爆炸毁伤效应研究的复杂性；刘靖晗等^[6-7]通过模型试验、数值模拟的方式，研究水下爆炸对高桩码头的破坏效应，得到不同炸药当量下高桩码头的典型破坏现象。目前国内外关于高桩码头爆炸毁伤效应的研究相对较少，但关于板、梁、柱结构的毁伤效应研究开展较为广泛，这些研究对高桩码头爆炸毁伤及应急抢修研究有一定的参考价值。

梁板式高桩码头结构主要包括面层、纵横梁、桩基以及接岸结构。考虑到梁板式高桩码头各部分的功能性和抗爆性，接岸结构遭袭的概率低且自身抗打击能力强，码头面层、纵横梁和桩基作为主体结构最容易遭到敌方空中或水下打击，是战时梁板式高桩码头抢修恢复的主要部位。因此，本文针对梁板式高桩码头爆炸毁伤效应的研究成果进行综述，总结高桩码头面层、纵横梁和桩基在各类爆炸作用下的典型破坏现象，结合现有抢修技术和工程实例探讨不同部位、不同破坏程度

下的抢修技术办法，指出高桩码头战损应急抢修的重点和难点，并提出相应建议。

1 码头面层的战损及抢修方法

1.1 面层的毁伤效应

梁板式高桩码头的面层位于水面之上，主要面临空中爆炸的直接打击和水下爆炸的间接打击。空中爆炸作用下钢筋混凝土面板的典型破坏模式包含裂纹、坑槽、破口、弯曲破坏、剪切破坏和混凝土层裂等^[8-10]。水下爆炸作用下码头面层典型爆坑和裂纹破坏现象见图1。码头面层破坏模式有弯曲破坏、剪切破坏和层裂破坏，其中面层背爆面的层裂破坏更加隐蔽。近距离爆炸下钢筋混凝土面板(RC板)的典型破坏现象见图2，面层迎爆面冲切破坏形成破口，背爆面出现明显层裂破坏，破口附近大面积混凝土破碎剥落。空中爆炸时伴随混凝土层裂会产生大量高速混凝土碎片，有可能对附近人员和设备二次伤害。Leppänen^[11]同时考虑冲击波和破片的联合毁伤效应，通过试验和数值模拟分析冲击波和破片对RC板的毁伤程度，冲击波和破片对面板造成的联合毁伤现象见图3。除了空中爆炸，水下爆炸也对码头上部结构产生毁伤效应，水下爆炸时码头面层的破坏现象见图4，面层顶部由于面部弯曲出现“龟裂状”裂纹，面板自由端由于应力波反射导致混凝土拉伸破坏，水下爆炸时码头面层主要受到由桩、梁传递的应力波以及水下气泡脉动产生的水冢作用。水下爆炸时气泡膨胀引发的水冢现象是造成码头面板毁伤的因素之一，见图5^[12]。

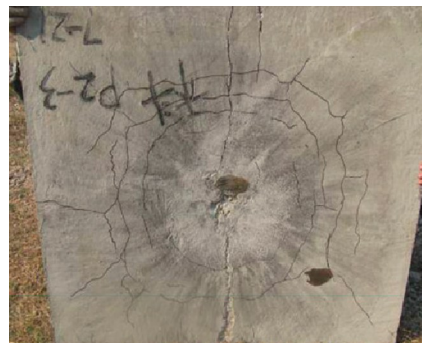


图1 钢筋混凝土板迎爆面典型破坏现象

Fig. 1 Typical damage phenomena of blast face on RC plate

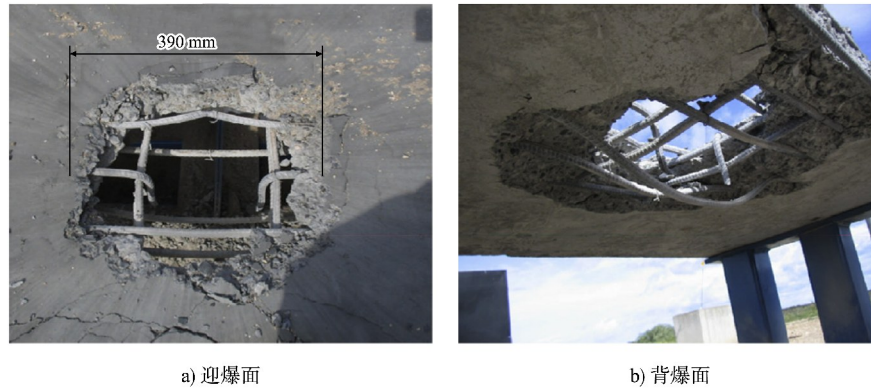


图2 钢筋混凝土面板接触爆炸下的典型破坏现象

Fig. 2 Typical damage phenomena of RC plate under contact explosion

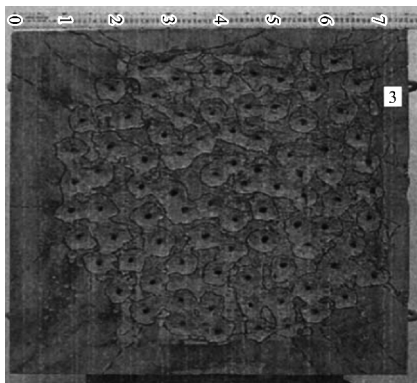


图3 冲击波和破片联合作用

Fig. 3 Combined action of shock waves and fragments



图4 水下爆炸下码头面层破坏现象

Fig. 4 Damage phenomena of wharf surface layer caused by underwater explosion

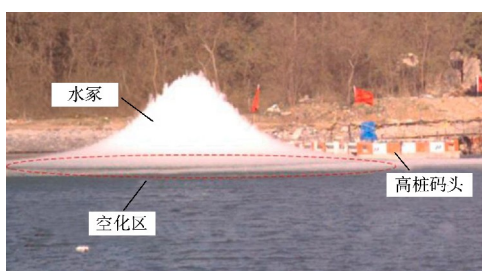


图5 水下爆炸产生的水冢

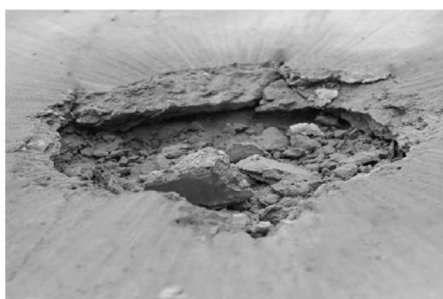
Fig. 5 Water mounds generated by underwater explosion

综合考虑高桩码头面层在战时可能遭受的空中、水下爆炸,高桩码头面层的主要破坏现象包括裂缝、坑槽、局部破口等,对比空中爆炸和水下爆炸高桩码头模型试验可以发现,空中爆炸造成的码头面层裂缝和坑槽毁伤区域较为集中,而水下爆炸造成的码头面层的裂缝和坑槽毁伤区域更为分散。

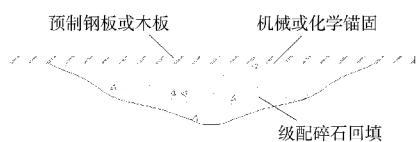
1.2 面层的抢修方法

当码头面层仅出现局部坑槽、裂纹时,面层承载性能一般仅出现局部损失,并不影响码头整体使用,但是为了避免码头受损部位在后续使用过程中受到二次荷载而造成裂缝、坑槽发展,宜采用修复材料进行抢修。常见的混凝土结构修复材料分为无机水泥类、有机类^[13]和有机无机复合类^[14]三种。无机水泥类包括:普通硅酸盐水泥(OPC)、硫铝酸盐水泥(SAC)、磷酸镁水泥(MPC)、磷酸盐水泥(PAC)等,具备早强、快凝、低温硬化等材料特性^[15-16]。国内学者研究发现使用海水^[17]、海砂^[18]代替淡水和细集料能够加快SAC以及不同矿物组成的铝酸盐水泥^[19]的凝结时间并提升早期强度,因此对于远距离抢修作业或者材料紧张的情况下,在港区就地取材可以缩短抢修时间、提高抢修成效。有机类修补材料主要包括环氧树脂类和聚氨酯类两种,由环氧树脂配制的环氧树脂砂浆^[20]、环氧树脂混凝土可直接进行裂缝或坑槽抢修,也可配制黏结剂加固使用^[21]。有机类修复材料相较无机水泥类修补材料,其黏结强度高、反应时间短,并且具有耐磨、耐腐蚀、抗渗、抗冻等优点,既可用于水利、土木、交

通工程修复^[22]，也可作为黏结剂完成纤维增强复合材料(FRP)或钢结构加固。针对码头面层上的坑槽、爆坑，见图 6a)^[23]，除了采用修复材料修复，时间紧迫时也可采取级配碎石回填的方式，并视情况采用预制钢板或木板覆盖于坑槽部位，通过机械锚固或化学锚固于面层，修复方法见图 6b)。



a) 毁伤现象



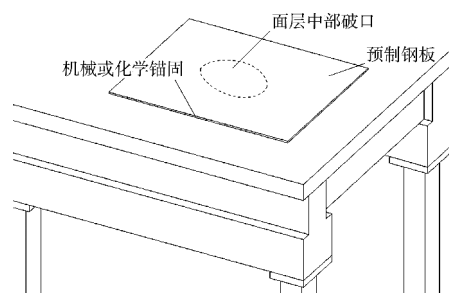
b) 抢修方法

图 6 面层坑槽
Fig. 6 Panel pothole

当炸药在面层中部爆炸时，仅面板出现破口破坏，纵梁、横梁和桩基均未出现明显损伤时，见图 7a)，可切除码头面层毁伤面的外露钢筋，清理面层附近混凝土碎片，生成作业面，覆盖预制钢板。为了保证抢修后面板的整体承载性能，预制钢板尺寸参照面板破口大小，宜取 2 倍破口大小或单个排架跨度，通过机械或化学锚固于既有完好面层，并在钢板四周设置斜坡便于人员和装备通过，见图 7b)。



a) 毁伤现象



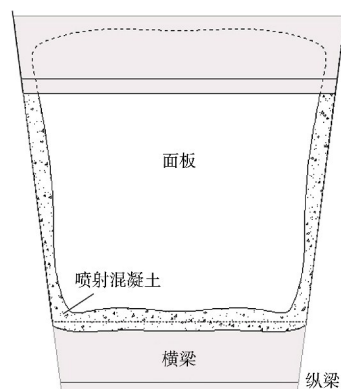
b) 抢修方法

图 7 面层破口
Fig. 7 Panel break

当炸药在水下爆炸时，码头面层与纵、横梁的连接区域出现裂缝和坑槽等损伤现象，并导致面板内钢筋向上弯折甚至断裂，见图 8a)，考虑到面板与纵、横梁连接区域位于面层下方，施工空间狭小，宜采取喷射 MPC^[24]、SAC^[25-26]、超高性能混凝土(UH-PC)等快硬速凝水泥的方式，以实现板梁连接部位的快速修复，见图 8b)。为了提升喷射水泥与既有混凝土的黏结强度，可在喷射水泥中添加钢渣粉、纤维等矿物掺合料，同时也起到提升早期强度的作用^[27]。



a) 毁伤现象



b) 抢修方法

图 8 梁板连接区域破坏
Fig. 8 Damage in beam-slab connection area

2 纵、横梁的战损及抢修方法

2.1 纵、横梁的毁伤效应

高桩码头的纵梁和横梁是联系桩基与面板的关键结构,其破坏效应直接关系到码头上部面层的变形挠曲、承载能力甚至码头整体的连续性倒塌。Zhang et al.^[28]通过爆炸试验研究空中爆炸下RC梁的毁伤效应,随着爆距增加,其破坏模式由局部层裂破坏转变为整体弯曲破坏,见图9。由于高桩码头结构形式,无论是空中爆炸,还是水下爆炸都难以直接对梁造成爆轰荷载,纵、横梁和码头面板、桩基往往作为一个整体共同承受空中或水下爆炸载荷。通过高桩码头模型试验发现,水下爆炸引起的水泵,在冲击作用于面板底部时,纵、横梁与面板的连接区域由于应力集中毁伤程度要大于纵、横梁,见图10a),在冲击作用于纵梁时,纵梁呈现出倒八字形裂缝,见图10b)。



图9 空中爆炸荷载作用下的RC梁破坏效应
Fig.9 Failure effects of RC beam under air explosion



图10 水下爆炸下横梁的破坏效应
Fig.10 Damage effects of crossbeam by underwater explosion

综合考虑高桩码头纵、横梁在战时可能遭受的空中、水下爆炸,高桩码头纵、横梁的主要破坏现象主要包括裂缝、挠曲、层裂、梁板连接区域断裂以及面层和纵横梁贯穿性破坏,无论是空中爆炸,还是水下爆炸,高桩码头纵、横梁的破坏程度要小于码头面层或桩基,基于纵横梁的剩余承载性能或局部加固能够为后续码头抢修提供便利。

2.2 纵、横梁的抢修方法

梁板式高桩码头的纵梁、横梁通常位处于浪溅区,因此采用的抢修材料应具有一定的耐水性和耐腐蚀性。针对纵、横梁上的裂缝等轻微损伤,可采用玻璃纤维增强塑料(FRP)或钢结构,通过焊接、螺栓、粘贴及组合加固等方法,通过增大受损截面提高其承载能力,见图11。当仅单跨出现贯穿破坏时,可根据纵梁的毁伤程度选择抢修方法,若纵梁未出现明显损伤,仅面层和横梁出现破坏,见图12,可直接在破口处,在纵梁上堆放模袋混凝土,铺设预制钢板,并通过机械锚固或化学锚固于面层,见图13a)。若纵梁出现一定损伤,可采取钢结构、FRP或两者复合加固^[29],从而在已加固的纵梁上搭接万能杆件^[30],并铺设预制钢板,见图13b)。

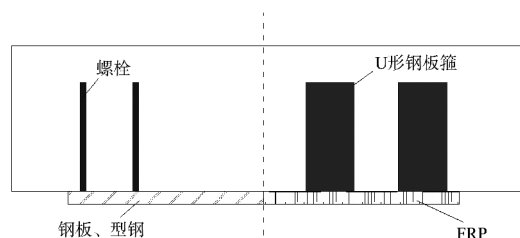


图11 钢结构与FRP加固方法
Fig.11 Reinforcement method for steel structure and FRP



图 12 单跨面层、横梁出现贯穿性破坏
Fig. 12 Penetrating damage occurred in single span panel and cross-beam

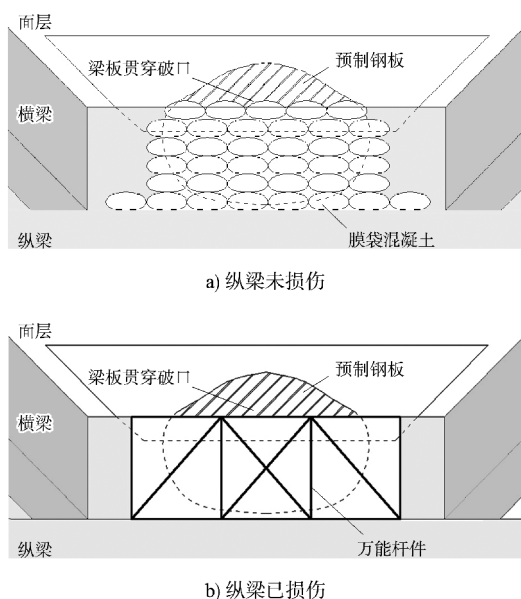
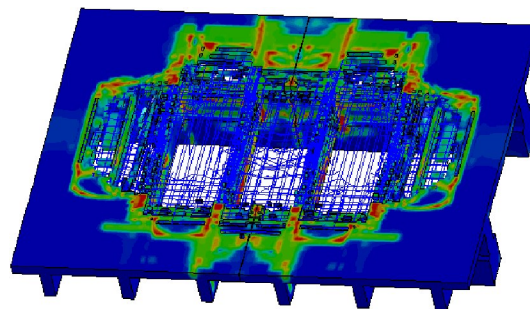
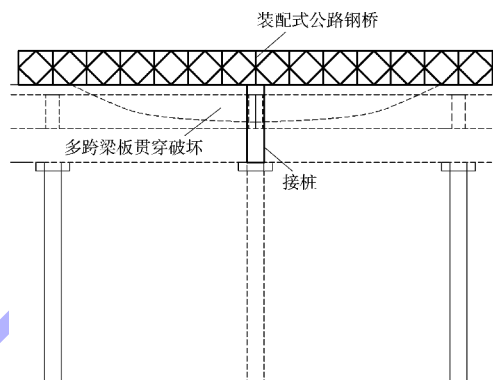


图 13 纵梁未损伤和已损伤的抢修方法
Fig. 13 Repair methods for undamaged and damaged longitudinal beams

由于纵、横梁位于码头面层和桩基之间，当纵、横梁出现断裂等严重破坏时，码头面层、桩基的破坏程度往往更甚，因此当大当量炸药在空中、水下爆炸时，可能出现码头多个跨度的上部结构整体破坏，甚至码头上部结构以及附近桩基整体破坏。当仅码头上部结构整体破坏，见图 14a)，此时应切除码头面层、纵梁、横梁的外露钢筋，清理面层附近混凝土碎片，生成作业面，在破口区域桩基的基础上焊接桩基至码头面层高度，以接桩顶和既有完好面层为支撑，架设 321 型、HD200 型或 ZB-200 型装配式公路钢桥^[31]，从而恢复码头面层的通行使用，见图 14b)。码头上部结构和附近桩基均出现严重破坏，见图 15a)，此时由于桩基在发生严重破坏时存在大变形而无法接桩，需要进行补桩作为装配式公路钢桥的竖向支撑，见图 15b)^[32]。

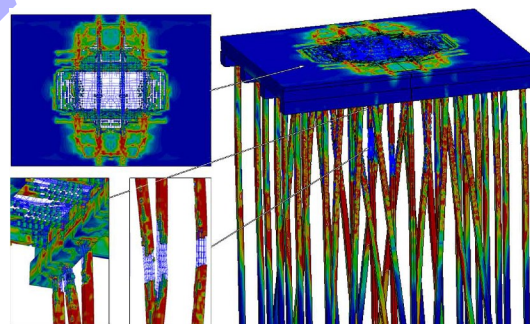


a) 破坏现象

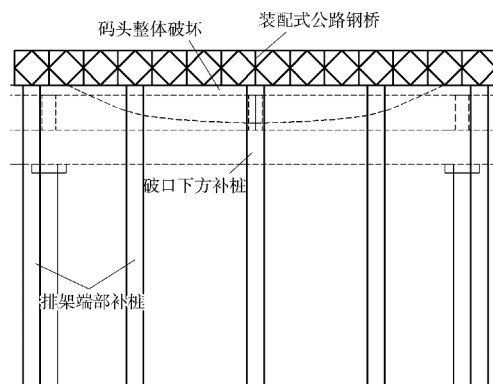


b) 抢修方法

图 14 码头多跨梁板结构贯穿破坏
Fig. 14 Penetrating damage of continuous beams and panels of wharf



a) 破坏现象



b) 抢修方法

图 15 码头上部结构和桩基均破坏
Fig. 15 Damaged superstructure and piles of wharf

3 桩基的战损及抢修方法

3.1 桩基的毁伤效应

桩基作为高桩码头竖向支撑, 相较于梁板结构, 其动态响应、残余变形以及断裂破坏都会直接影响整个码头结构的受力, 导致码头应力重分布甚至连续性倒塌。El-Dakhkhni et al. [33] 通过建立多自由度模型(MDOF), 采用超压-冲量($P-I$)曲线评估理想化钢筋混凝土柱(RC 柱)的毁伤程度, Mutalib et al. [34] 在此基础上通过离散模型得到 RC 梁的典型破坏模式见图 16a); 国内韦灼彬率先开展高桩码头的空中爆炸研究, 试验结果见图 16b),

在空中接触爆炸下桩基引爆处直接冲切断裂, 桩基整体变形较小。

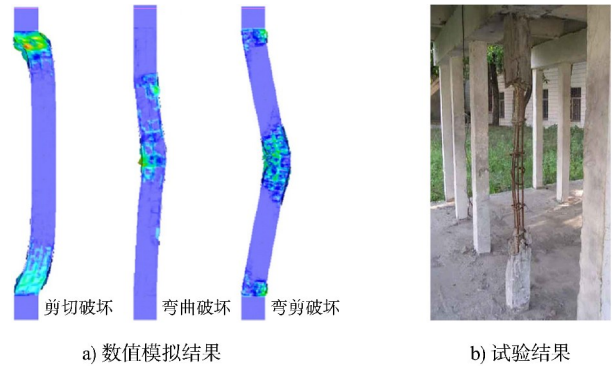


图 16 空中爆炸桩基典型破坏模式

Fig. 16 Typical failure modes of pile by air explosion

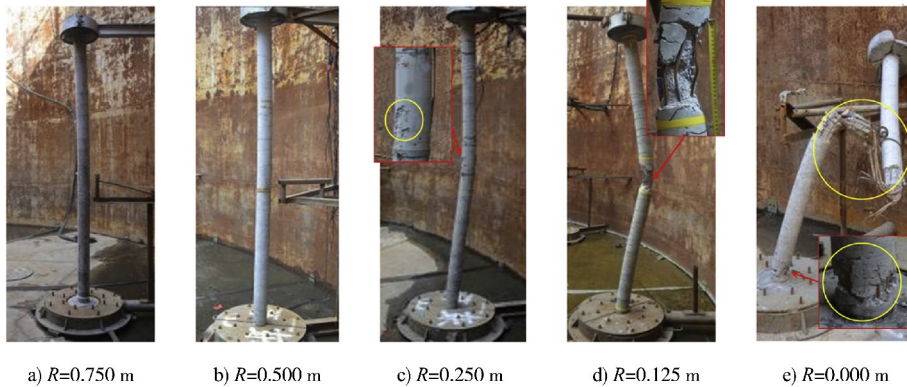


图 17 水下爆炸典型桩基典型破坏模式

Fig. 17 Typical failure modes of pile by underwater explosion

Zhuang et al. [35] 通过缩尺水下爆炸试验和数值模拟研究了 RC 柱的荷载分布特征和损伤机理, 见图 17(R 为 RC 柱与爆炸点的距离), 结果表明, RC 柱有弯曲破坏、弯剪破坏和冲切破坏 3 种典型破坏模式, 不同于空中爆炸, 模型试验研究发现, 水下爆炸时桩基在冲击波和气泡联合作用下, RC 柱断裂后会产生较大变形见图 18a)。文献[12]采

用高桩码头模型进行水下爆炸试验, 结果表明除了炸药引爆区域, 桩基顶部与横梁或桩帽的连接区域也是易损伤部位, 该区域由于剪切应力作用易产生裂缝甚至断裂, 见图 18b)~e)。高桩码头桩基在水下爆炸作用下, 破坏区域主要集中在桩中引爆区域、桩顶与横梁或桩帽连接部位以及桩底区域, 主要破坏形式包括裂缝、爆坑、变形挠曲以及断裂。



图 18 桩基典型破坏现象

Fig. 18 Typical failure phenomena of pile

3.2 桩基的抢修方法

由于水下爆炸对高桩码头的毁伤现象更为隐蔽，而高桩码头的桩基大部分位于水面以下或浪溅区，导致桩基的毁伤勘测和抢修作业难度很大，并且对抢修材料和抢修工具的选择提出了水下适应性的要求。当桩基出现断裂而丧失承载能力时，需要在断桩附近补桩提供竖向支撑，见图 19a)。桩基的顶部与横梁或桩帽的连接区域通常位于浪溅区，在水下爆炸作用下，易出现剪切破坏，桩基顶部混凝土保护层脱落，形成裂缝、爆坑、钢筋裸露甚至断裂等破坏现象，考虑桩顶大部分时间位于水面以上，可待退潮时清理桩顶裂缝、坑槽表层泥沙、松散混凝土以及其他不牢附着物，在桩顶裂缝、爆坑处喷涂早强水泥或快硬早强混凝土，早强水泥可采用快硬硫铝酸盐水泥(R·SAC)、铁铝酸盐水泥(FAC)等具备一定防水能力的修复材料，或采用钢结构、FRP 等材料包裹加固，见图 19b)、c)。当桩顶出现断裂破坏且变形不大时，可采用候潮施工，待潮位较低时实施作业，清理

桩基受损区域混凝土碎片及杂质，生成作业面，通过在桩基作业面和横梁之间支模浇筑桩帽，从而连接已破坏的桩基，见图 19d)。水下桩基的裂缝和坑槽可采用水下环氧密封胶等水下修补胶液填充修复，并在受损部位贴覆碳纤维布等纤维复合材料^[36]，也可使用钢套筒或玻纤套筒进行加固，见图 19e)、f)。采用钢套筒或玻纤套筒可以有效增加桩基的截面积，从而提高桩基的承载能力。当水下桩基出现断裂破坏且变形不大，可采用水下钢套筒压力灌浆加固法^[37]，经防腐处理的钢套筒既是灌浆料的模板，也是桩基损伤部位的加固构件。当桩顶或桩中断裂且变形较大、桩基承载能力损伤较多时，宜通过补桩恢复码头承载性能。水下爆炸作用下，桩基底部，临近水底土附着的部位也是桩基的薄弱部位，若桩底出现断裂破坏，可在桩底断裂部位绑扎钢筋笼并灌注水下不分散混凝土(NDC)、聚合物混凝土(PBM)、水下聚合物树脂混凝土(MB-PBM)等^[38]，见图 20g)。

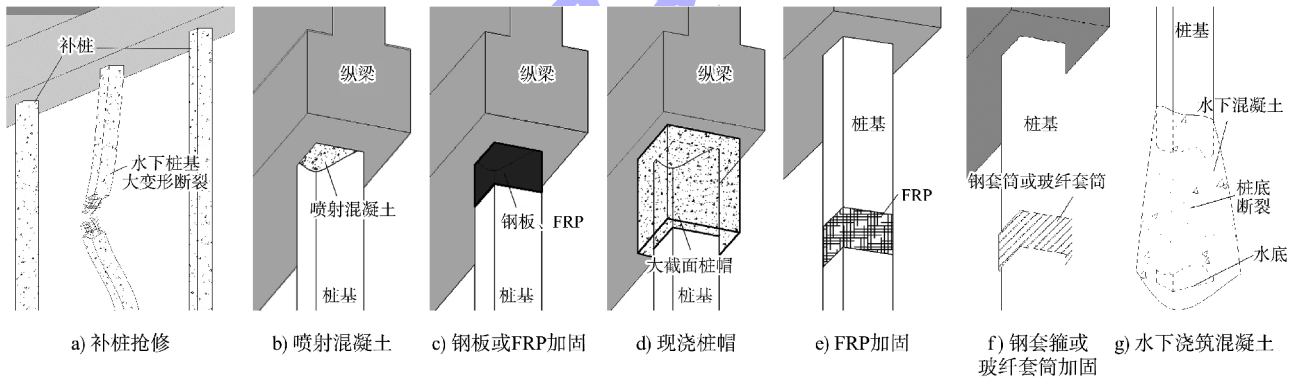


图 19 桩基抢修典型方法
Fig. 19 Typical repair methods of pile

码头多个桩基失去承载能力见图 20，为防止局部承载力丧失而引起码头连续倒塌，须进行局部补桩。若失效桩基在码头前沿，可通过搭设贝雷架等沉桩平台^[39]或者使用打桩船等大型机具，根据水下失效桩基的分布情况，采取桩间插桩或外侧加桩的方式对称补打预应力钢筋混凝土桩或钢管桩。若失效桩基在码头内，此时可在码头外侧增设钢管桩、预应力混凝土管桩或者钢板桩等

预制构件作为竖向支撑，通过六四型军用梁、八七型应急抢修钢梁、拆装式桁梁等制式装配器材完成面层分载，以恢复码头受损区域的承载性能。当码头桩基和上部结构均破坏严重时，可采用钢混结构抢修，在保证承载性能的同时提升抢修速度，国内京张高铁官厅水库特大桥主桥某两侧邻跨采用该方法，基于永久墩、临时墩基础完成了 32 m 简支钢-混结合梁的原位拼接作业，见图 21^[40]。

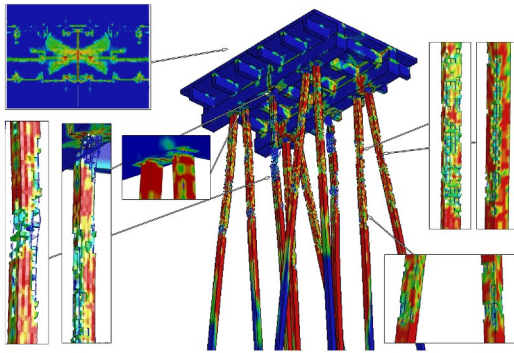
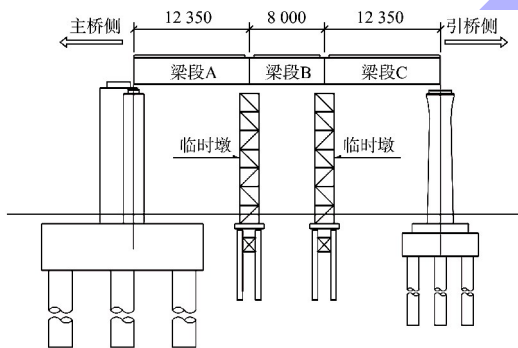


图 20 多桩基断裂

Fig. 20 Multi-pile foundation fracture



a) 32 m 剪支钢-混结合梁



b) 抢修作业(单位: mm)

图 21 京张高铁应急抢修设计

Fig. 21 Emergency repair design for Beijing-Zhangjiakou high-speed railway

4 结论

1) 高桩码头面层的主要破坏现象包括裂缝、坑槽、局部破口以及面板底部与纵、横梁连接区域断裂,空中爆炸造成的码头面层裂缝和坑槽毁伤区域较为集中,而水下爆炸造成的码头面层的裂缝和坑槽毁伤区域更为分散,面层的抢修方法较为成熟,可采用无机、有机修复材料或预制构件抢修。

2) 高桩码头纵、横梁的主要破坏现象包括裂缝、挠曲、层裂、梁板连接区域断裂以及面层和纵横梁贯穿性破坏,轻微损伤下可采取 FRP 或钢结构加固,码头上部结构整体破坏时,可采取补桩或接桩作为竖向支撑,通过装配式公路钢桥等预制拼装构件完成面层分载。

3) 高桩码头桩基的破坏区域主要集中在桩中引爆处、桩顶与横梁或桩帽连接部位以及桩底,破坏形式包括裂缝、爆坑、变形挠曲以及断裂。水下桩基的抢修技术要求高、作业难度大,是制约高桩码头抢修速度的关键,现有抢修方法主要应用于水下桩基缺陷加固或平时水工构筑物施工,复杂工况下的抢修作业缺乏工程实践检验。

4) 针对高桩码头复杂多变的爆炸毁伤现象,采用构件预制和现场加工两种方法结合,能够达到作业速度快、结构适配性好的效果。根据码头结构尺寸提前预制抢修作业所需的钢板、型钢、钢套筒、玻纤套筒等预制构件能够有效提升抢修效率。

参考文献:

- 李凌峰, 韦灼彬, 唐廷, 等. 爆炸荷载下沉箱重力式码头模型毁伤效应[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(1): 13-19.
LI L J, WEI Z B, TANG T, et al. Damage effects of the caisson gravity wharf model subjected to explosion [J]. Explosion and shock waves, 2019, 39(1): 13-19.
- 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.
WEI Z B. Study on the explosive and emergency repair technique of the pile wharf with reinforced concrete plate and beam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- 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.
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.
- 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5): 166-173.

- LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Pressure characteristics of shallow water explosion near the rigid column [J]. Chinese journal of high pressure physics, 2019, 33 (5): 166-173.
- [5] 刘靖晗, 韦灼彬, 唐廷, 等. 刚性壁或刚性单柱附近水下爆炸气泡脉动的数值研究[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(4): 106-112.
- LIU J H, WEI Z B, TANG T, et al. Numerical study on dynamic behaviors of UNDEX bubble near rigid wall or rigid column [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(4): 106-112.
- [6] 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): 108-117.
- 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): 108-117.
- [7] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 水下爆炸作用下高桩码头毁伤效应的数值研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4): 145-156.
- LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Numerical study of damage effect for high-piled wharf subjected to underwater explosion [J]. Chinese journal of high pressure physics, 2020, 34(4): 145-156.
- [8] LI J, WU C Q, HAO H. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion [J]. Engineering structures, 2015, 102: 395-408.
- [9] EKSTRÖM J, REMPLING R, PLOS M. Spalling in concrete subjected to shock wave blast [J]. Engineering structures, 2016, 122: 72-82.
- [10] WANG W, ZHANG D, LU F Y, 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.
- [11] LEPPÄNEN J. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete [J]. International journal of impact engineering, 2005, 31(7): 843-860.
- [12] LI S T, CHEN Y Q, GUO D, et al. Study on the dynamic characteristics of pier wharves subjected to underwater explosion [J]. Ocean engineering, 2024, 291: 116406.
- [13] 张文静, 王晖, 尹健, 等. 高速公路路面快速修复用聚氨酯混凝土的研究 [J]. 混凝土, 2011(5): 128-131.
- ZHANG W J, WANG H, YIN J, et al. Experimental study on the polyurethane concrete used for rapid repair of highway pavement [J]. Concrete, 2011(5): 128-131.
- [14] 李伟, 冯春花, 李东旭. 水工混凝土结构裂纹修补加固材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2012, 26(7): 136-140.
- LI W, FENG C H, LI D X. Research progress in patching and strengthening materials of hydraulic concrete structural crack [J]. Materials reports, 2012, 26 (7): 136-140.
- [15] 刘周强, 张力文, 孙卓, 等. 磷酸镁嵌入式纤维筋加固系统界面试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9): 1287-1294.
- LIU Z Q, ZHANG L W, SUN Z, et al. Experimental study of the interface of magnesium phosphate cement near-surface mounted GFRP system [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(9): 1287-1294.
- [16] CHEN B, ODERJI S Y, CHANDAN S, et al. Feasibility of magnesium phosphate cement (MPC) as a repair material for ballastless track slab [J]. Construction and building materials, 2017, 154: 270-274.
- [17] 刘泽平, 王传林, 张宇轩, 等. 海水和矿物掺合料对硫铝酸盐水泥砂浆性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(4): 1245-1255.
- LIU Z P, WANG C L, ZHANG Y X, et al. Effects of sea water and mineral admixture on properties of sulphoaluminate cement mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4): 1245-1255.
- [18] 王中平, 彭相, 赵亚婷, 等. 海水对不同矿物组成的铝酸盐水泥水化的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1240-1248.
- WANG Z P, PENG X, ZHAO Y T, et al. Effect of seawater on hydration of calcium aluminate cement with different mineral compositions [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8): 1240-1248.
- [19] 梅军帅, 吴静, 李海南, 等. 硫铝酸盐水泥及硅酸盐水泥对海砂浆性能的影响 [J]. 混凝土, 2022 (5): 122-125, 132.
- MEI J S, WU J, LI H N, et al. Effect of sulphoaluminate cement and portland cement on the performance of sea sand mortar [J]. Concrete, 2022 (5): 122-125, 132.
- [20] 裴须强, 尹润平, 朱玉雪. 可用于潮湿界面修补的环氧

- 树脂砂浆的研制[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(1): 84-88.
- PEI X Q, YIN R P, ZHU Y X. Preparation of epoxy resin mortar applicable to moist interface repair [J]. New Building materials, 2021, 48(1): 84-88.
- [21] 吴若冰, 王熙. 聚氨酯基道路修补材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(1): 164-166, 163.
- WU R B, WANG X. Progress in polyurethane based road repair materials [J]. Journal of materials science and engineering, 2021, 39(1): 164-166, 163.
- [22] 杨卫风, 韩伟, 孟海, 等. 北京某地铁 U 形槽墙体裂缝环氧树脂修补技术及效果评定[J]. 施工技术, 2015, 44(S1): 276-279.
- YANG W F, HAN W, MENG H, et al. U-shaped slot wall crack epoxy resin repairing technology and detection effect in Beijing subway [J]. Construction technology, 2015, 44(S1): 276-279.
- [23] 李凌锋, 韦灼彬, 唐廷, 等. 接触爆炸下沉箱重力式码头面板毁伤效应分析[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(3): 82-89.
- LI L F, WEI Z B, TANG T, et al. Damage effects of contact explosion on face plate of caisson gravity wharf[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(3): 82-89.
- [24] 刘雄飞, 李琦, 王里, 等. 喷射 3D 打印磷酸镁水泥与混凝土界面粘结性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1895-1904.
- LIU X F, LI Q, WANG L, et al. Bonding behavior of spray-based 3D printing magnesium phosphate cement and concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(6): 1895-1904.
- [25] 范成文, 白银, 李平. 快硬硫铝酸盐水泥基封堵材料早期性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 30-35.
- FAN C W, BAI Y, LI P. Study on early performance of rapid hardening sulphotoaluminate cement-based sealing material[J]. Hydro-science and engineering, 2020 (2): 30-35.
- [26] 王成启, 林东, 张章龙. 硫铝酸盐水泥对快速施工海工混凝土性能的影响[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(4): 26-30.
- WANG C Q, LIN D, ZHANG Z L. Effect of sulphotoaluminate cement on performance of marine engineering concrete for rapid construction [J]. China harbour engineering, 2020, 40(4): 26-30.
- [27] 杨正宏, 刘思佳, 吴凯, 等. 纤维增强磷酸镁水泥基复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(1): 118-124.
- YANG Z H, LIU S J, WU K, et al. Research progress on fiber reinforced magnesium phosphate cement composites [J]. Materials reports, 2023, 37(1): 118-124.
- [28] ZHANG D, YAO S J, LU F Y, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading[J]. Engineering failure analysis, 2013, 33: 497-504.
- [29] 卢亦焱. 纤维增强复合材料与钢材复合加固混凝土结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 138-146.
- LU Y Y. Research advances in hybrid strengthening of concrete structures with FRP and steel [J]. Journal of building structures, 2018, 39(10): 138-146.
- [30] 付祥能. 万能杆件栈桥设计与施工技术[J]. 重庆建筑, 2015, 14(6): 48-51.
- FU X N. Master rod trestle bridge design and construction technology [J]. Chongqing architecture, 2015, 14(6): 48-51.
- [31] 刘玉娟, 姚文奇, 刘永健, 等. 基于 321 型和 HD200 型的大跨径装配式公路钢桥的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(12): 1488-1492.
- LIU Y J, YAO W Q, LIU Y J, et al. Research on large span assembled highway steel bridge based on type-321 and type-HD200 [J]. Journal of Hefei University of Technology(nature science), 2014, 37(12): 1488-1492.
- [32] 康思伟. 海洋工程基础打桩船的技术现状与发展动态[J]. 船舶工程, 2021, 43(2): 1-7, 47.
- KANG S W. Technology status and development trend of offshore engineering foundation pile driver [J]. Ship engineering, 2021, 43(2): 1-7, 47.
- [33] EL-DAKHAKHNI W W, MEKKY W F, CHANGIZ-REZAEI S H. Vulnerability screening and capacity assessment of reinforced concrete columns subjected to blast[J]. Journal of performance of constructed facilities, 2009, 23(5): 353-365.
- [34] MUTALIB A A, HAO H. Development of P-I diagrams

- for FRP strengthened RC columns [J]. International journal of impact engineering, 2011, 38(5): 290-304.
- [35] 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.
- [36] 李海洪, 陈昊翔, 邓春林. 碳纤维修复混凝土桩水下裂缝工程实践[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2119-2121.
LI H H, CHEN H X, DENG C L. Application of CFRP on underwater crack repair of concrete piles [J]. Building structure, 2021, 51(S1): 2119-2121.
- [37] 韩路, 顾祥奎. 高桩码头混凝土桩基修复加固技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(8): 58-62, 73.
HAN L, GU X K. Reinforcement technology of concrete pile foundation of high-piled wharf [J]. China harbour engineering, 2020, 40(8): 58-62, 73.
- [38] 郭群力, 王磊, 巴涛, 等. 钢筋笼模板在水下不分散混凝土浇筑中的应用: 以某工程水下混凝土修复为例[J]. 大坝与安全, 2021(2): 68-70.
GUO Q L, WANG L, BA T, et al. Case study and application of reinforcement cage formwork into underwater concrete pouring[J]. Dam & safety, 2021(2): 68-70.
- [39] 荀明智. 贝雷架沉桩平台工艺在海外高桩码头中的应用[J]. 珠江水运, 2023(8): 78-81.
XUN M Z. Application of Bailey frame pile sinking platform technology in overseas high-piled wharf[J]. The Pearl River water transport, 2023(8): 78-81.
- [40] 杨永明, 李彦博. 京张高铁应急抢险管支钢-混结合梁设计应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 199-203, 219.
YANG Y M, LI Y B. Design and application of simply supported steel-concrete composite beam for emergency repair of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway standard design, 2020, 64(1): 199-203, 219.
- (本文编辑 王璁)
-
- (上接第 13 页)
- [18] 徐云乾. 美国河流近自然化综合治理措施初探及其借鉴[J]. 中国农村水利水电, 2017(7): 94-98.
XU Y Q. Preliminary exploration and reference of comprehensive management measures for near naturalization of rivers in USA [J]. China rural water and hydropower, 2017(7): 94-98.
- [19] 南京水利科学研究所, 清华大学. 航道整治工程对河流生态影响的评价指标体系研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2011.
Nanjing Hydraulic Research Institute, Tsinghua University. Research on the evaluation index system of the ecological impact of waterway regulation projects on rivers [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011.
- [20] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 卵砾石生态河床对河流水质净化和生态修复的效果[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 46-49.
HOU J, WANG C, WANG P F, et al. Effects of ecological gravel bed on water quality purification and ecological restoration in streams [J]. Advances in science and technology of water resources, 2012, 32(6): 46-49.
- [21] 李婧, 张国宇, 孙娜, 等. 生态砾石床+植物碎石床用于城市黑臭水体治理[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 102-107.
LI J, ZHANG G Y, SUN N, et al. Application of ecological gravel bed and plant gravel bed combined process in urban black odor water body treatment [J]. China water and wastewater, 2019, 35(6): 102-107.
- [22] MEZZA-GARCIA N. The floating island project: self-organizing complexity [J]. Proceedings, 2017, 1(3): 173.
- [23] YEH N, YEH P, CHANG Y H. Artificial floating islands for environmental improvement [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 47: 616-622.
- (本文编辑 赵娟)