

桩基损伤对引桥排架受载特性影响 及加固效果分析

董 腾¹, 薛 鹏^{1,2}, 何新锐³, 孟星宇¹, 陈灿明¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 长江下游某码头引桥因船舶失控事故导致桩基局部受损, 损伤检测与加固是恢复结构承载性能的关键。为了研究桩基损伤及加固方案对排架承载性能的影响, 根据现场检测结果, 拟定了外粘型钢的加固方案, 通过有限元数值模拟对引桥排架损伤前、后及修复加固后的应力分布与位移进行计算和对比分析。结果表明: 采用外粘型钢加固后, 排架在最不利荷载作用下竖向位移、水平位移、破损区应力均低于破损前, 桩顶与横梁联接处应力、桩底应力总体小于破损前水平, 说明拟定的外粘型钢加固方案可行、加固效果良好。

关键词: 排架; 损伤; 数值模拟; 受力分析; 加固效果评估

中图分类号: U655.54⁺4.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0079-06

Influence of Load Characteristics on Approach Bridges' Pile Foundation Damage and Analysis of Its Reinforcement Effects

DONG Teng¹, XUE Peng^{1,2}, HE Xinrui³, MENG Xingyu¹, CHEN Canming¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Nanjing R&D Tech Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: A ship out-of-control accident caused partial damage to the pile foundation of a dock approach bridge in the lower reaches of the Yangtze River. The detection and reinforcement of the damage were important for restoring the bearing performance of the structure. In order to analyze the influence of pile foundation damage and reinforcement scheme on the bearing performance of the bent frame, according to the field tests, a reinforcement plan for externally bonded steel was formulated. The stress distribution and displacement of the approach bridge bent before, after damage and after reinforcement are calculated through finite element numerical simulation. The results show that the stress, vertical and horizontal displacement in the damaged area of the bent frame under the most unfavorable load were lower than before the damage after being reinforced with externally bonded steel, and the stress level at the joint between the pile and the beam and that of the pile bottom are generally lower than those before the damage. The external bonding steel reinforcement scheme is feasible and the reinforcement effect is favorable.

Keywords: bent; damage; numerical simulation; force analysis; reinforcement effect evaluation

由于通航环境相对复杂,船舶失控漂移撞击码头结构事故时有发生,桩基受撞损伤严重影响码头结构的安全运行。受撞损伤的检测与加固是恢复结构承载性能的关键,学者们通过数值模拟方法对撞击力作用下桩基失效破坏机理^[1-2]、损伤分布与特性^[3-4]以及新型损伤加固方法^[5]进行了研究。桩基损伤加固技术已较为成熟,但桩基与加固材料的耦合承载效果尚不明确。为给船舶撞击引桥损伤的应急处理和加固修复提供技术支撑,根据损伤检测结果,采用数值模拟计算了在最不利荷载下排架损伤前、后及修复加固后各主要构件的应力和位移分布,分析船舶撞击损伤对引桥排架承载的影响,评价推荐加固方案的加固效果。

1 桩基损伤检测与加固

1.1 结构概况

受损引桥为长江下游某 1~3 万 t 级多用途码头和后方陆域连接的建筑物,该引桥宽 13.00 m,排架间距 10.0 m,高桩梁板结构。排架基础采用 3 根 $\Phi 800$ PHC 管桩,桩长 20.5 m;横梁为钢筋混凝土结构,矩形断面,梁高 1.2 m,宽 1.4 m;桥面板为厚 0.45 m 预制钢筋混凝土空心板,现浇层厚 0.15 m,钢筋混凝土设计强度等级 C40。引桥双向车道通行,设计车型为 12.19 m 集装箱牵引车、半挂车,40 t 牵引平板车,引桥上流动机械限速行驶。

事故货轮船长 43.05 m,型宽 8.21 m,型深 3.25 m,排水量 793.774 t,吃水 2.60 m,事故时满载。

1.2 船舶撞击后损伤

撞击点位于引桥 Y7 排架上游侧 3[#]桩。经过现场检测,引桥排架主要损伤为上游侧 PHC 管桩(3[#]桩)距桩顶 1.3 m 处出现 0.45 m \times 0.50 m 破损空洞,3 根纵向主筋和 6 根横向箍筋外露,破损处上方有三条斜向裂缝,裂缝长度 0.35 m~1.30 m,最大裂缝宽度 0.50 mm~0.70 mm,破损处下方未见明显裂缝(见图 1)。



图 1 排架受撞桩基混凝土破损

1.3 应急处理与加固方案

引桥排架在船舶撞击后桩基出现严重损伤导致结构整体承载力下降,应尽快修复^[6]。由于引桥是码头平台与陆域堆场间的主要通道,需要在保障码头整体运行安全前提下,尽可能减小对生产的影响,提出应急处置方案和加固方案。

(1) 应急处理方案。加固方案实施前对受损排架前后各一跨内采取应急处理方案:沿引桥轴线将其分为受损区域及受损临近区域,受损区域禁行车辆,受损临近区域控制荷载运行,仅允许空载车辆通行。

(2) 加固处理方案。通过各方案技术经济比较后拟采用外粘型钢加固法^[7-9],加固要点为:剔凿桩基破损处疏松混凝土至结构坚实部位,外露钢筋除锈并喷涂阻锈剂,PHC 桩内置模板后用高强度聚合物砂浆对破损部位修复至原截面。修复处混凝土达到相应强度后,在横梁底及桩身外包预先制作的 12 mm 厚型钢板,钢板下部超过破损下缘不小于 1.0 m,桩顶与横梁底部联接处设 6 块加劲钢板,型钢与桩基、横梁间灌注结构胶,横梁底部与型钢间植化学螺栓增加钢板与横梁连接。

方案实施前通过数值计算分析最不利荷载作用下排架的应力和变形,以评估加固方案的实施效果。

2 有限元模型建立

2.1 模型参数

以受损引桥为研究对象,建立引桥单排架三维有限元模型,模拟桩基破损空洞和型钢加固,对引桥排架受损前、受损后及加固后的受力特性开展计算分析,排架计算有限元模型见图 2。

为降低有限元计算代价,根据假定嵌固点理论简化土体对桩基的作用为嵌固约束,引桥横梁以上上部结构和水流对排架的影响作用均以外荷载的形式施加。横梁、桩基和加固钢板三者间的相互作用均设置为刚性连接^[10-11],桩基底部边界条件为固接。网格划分时模型主体选用 C3D8R 六面体单元,不规则区域选用四面体单元。桩基、横梁、加固型钢分部件单独建模划分网格,全局网格尺寸为 0.07 m~0.30 m,对桩基损伤处及高应力梯度区进行加密处理,整体模型单元数量约为 24 800 个。

为反映桩基受损后的受力特性,排架模型采用混凝土弹塑性本构模型,考虑混凝土塑性损伤^[12-14],混凝土损伤参数根据 Najjar 损伤理论法取值。取排架混凝土密度 2 500 kg/m³,弹模 32.5 GPa(横梁)、39.0 GPa(桩基),泊松比 0.20,钢板密度

7 850 kg/m³、弹模 206 GPa,泊松比为 0.30。

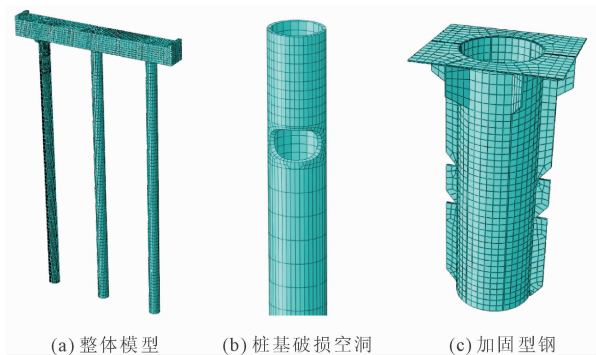


图 2 排架整体有限元模型图

2.2 模型荷载

根据引桥排架的实际情况,模型荷载主要考虑:

(1) 结构自重:排架横梁、桩基和加固型钢自重通过设置参数自动施加在模型上;上部预制面板和现浇层自重,以均布荷载施加于横梁上表面。

(2) 流动机械荷载:考虑一辆 12.19 m 集装箱牵引车重载,施加于受损桩(3#桩)上方横梁表面;引桥轴线上水平荷载考虑牵引车重载低速 30 km/h 刹车制动力,以面力施加在模型上。

(3) 水流力:水流速度取 1.5 m/s,方向垂直引桥轴线,荷载施加在桩基表面,作用点位于设计水位线以下 0.3 倍水深处。

3 排架受载分析

对排架受损前、受损后以及加固后在最不利工况作用下的受力和变形进行计算分析,最不利工况的荷载组合为:结构自重、一辆 12.19 m 集装箱牵引车重载在引桥上游侧(3#桩上方)低速行驶后刹车、桩基承受水流作用,计算中假定正为拉,负为压。

3.1 排架受损前受载分析

受损前引桥排架在最不利工况作用下的排架位移和应力云图见图 3,排架桩基各特征点应力计算结果见表 1。

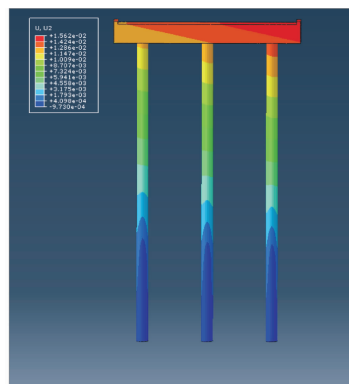
计算结果表明:

(1) 排架上部顺水流向位移 25.26 mm,垂直水流向位移 15.62 mm,竖向位移 8.89 mm。

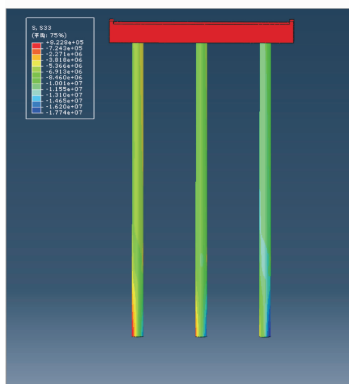
(2) 横梁跨中最大弯矩为 74.22 kN·m,支座最大负弯矩为 484.14 kN·m。

(3) 桩基受载后处于受压状态,车辆通行所在位置的桩基(3#)受力最不利。3#桩桩底(假定嵌固点,下同)位置应力最大,为 -16.77 MPa,桩与横梁连接处次之,为 -11.06 MPa,破损处在破损前应力

约为 -11.04 MPa。



(a) 受损前水平位移



(b) 受损前应力分布

图 3 排架桩基受损前受载分析(单位:Pa)

表 1 排架受损前桩基应力计算结果表 单位:MPa

位置	1#桩		2#桩		3#桩	
	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧
桩与横梁连接处	-7.08	-4.26	-8.95	-6.40	-11.06	-9.39
破损处上缘	-7.03	-4.30	-8.90	-6.38	-11.04	-9.42
破损处中心	-7.02	-4.32	-8.89	-6.39	-11.04	-9.43
破损处下缘	-7.01	-4.33	-8.88	-6.40	-11.00	-9.43
桩底(假定嵌固点)	0.80	-14.04	-1.15	-15.72	-3.82	-16.77

3.2 排架受损后受载分析

排架受损后在最不利荷载组合作用下桩基各特征点应力计算见表 2,桩基受损处应力云图见图 4。

计算结果表明:

(1) 排架上部顺水流向位移 28.32 mm,垂直水流向位移 16.27 mm,竖向位移 9.26 mm。

(2) 横梁最大跨中弯矩为 33.40 kN·m,最大负弯矩为 667.99 kN·m。

(3) 在最不利荷载作用下桩基破损区域约 4.11 m 范围应力状态发生明显改变,出现应力集中,破损处桩基二侧出现最大应力,分别为 -41.63 MPa、-41.56 MPa,破损处上缘和下缘局部有拉应力产生,分别为 1.12 MPa、0.47 MPa。

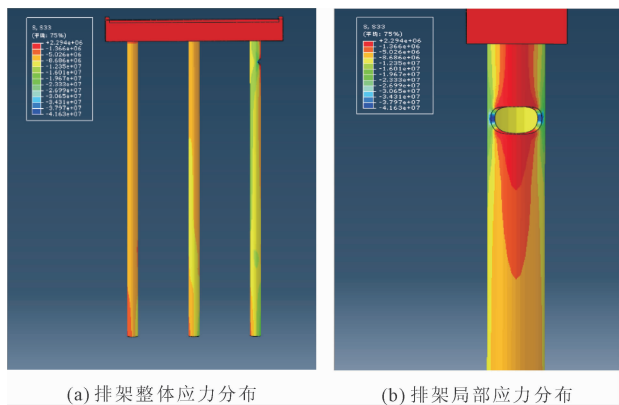


图 4 桩基损伤后排架应力云图(单位:Pa)

(4) 3[#]桩局部破损后承载,3[#]桩应力大幅度增加,而1[#]、2[#]桩应力略有下降。

(5) 排架桩基局部破损处将出现应力集中、损伤区域应力变化剧烈的结论与文献[15]一致。

表 2 排架受损后桩基应力计算结果表 单位:MPa

位置	1 [#] 桩		2 [#] 桩		3 [#] 桩	
	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧
桩与横梁连接处	-5.53	-5.86	-7.62	-8.41	-10.40	-14.22
破损处上缘	-5.62	-5.75	-7.70	-8.24	-11.40	1.12
破损处中心	-5.65	-5.72	-7.72	-8.20	-11.70	-41.63
破损处下缘	-5.67	5.70	-7.75	-8.16	-11.48	0.47
桩底(假定嵌固点)	-0.78	-12.60	-3.06	-14.50	-3.08	-18.80

3.3 排架加固后受力分析

排架受损加固后在最不利荷载组合作用下桩基各特征点应力计算见表 3,排架和破损处应力云图见图 5,计算结果表明:

(1) 排架上部顺水流向位移 17.18 mm,垂直水流向位移 14.48 mm,竖向位移 8.34 mm。

(2) 横梁跨中最大弯矩 60.78 kN·m,支座最大负弯矩为 528.39 kN·m。

(3) 桩基受载后处于受压状态,3[#]桩桩底应力最大,为 -17.23 MPa,桩与横梁连接处 -10.15 MPa,破损处在加固后应力约为 -10.27 MPa。

表 3 排架加固后桩基应力计算结果表 单位:MPa

位置	1 [#] 桩		2 [#] 桩		3 [#] 桩	
	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧	下游侧	上游侧
桩与横梁连接处	-6.34	-5.34	-9.38	-6.07	-10.15	-10.15
破损处上缘	-6.38	-5.29	-9.18	-6.23	-10.25	-10.09
破损处中心	-6.39	-5.28	-9.14	-6.28	-10.27	-10.09
破损处下缘	-6.40	-5.27	-9.09	-6.32	-10.30	-9.95
桩底(假定嵌固点)	-0.32	-13.30	-5.37	-10.99	-5.22	-17.23

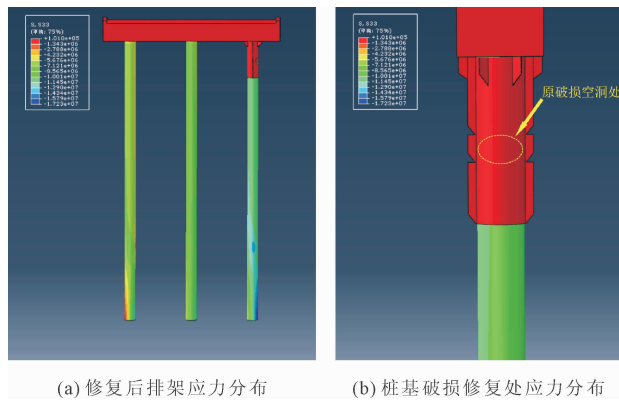


图 5 排架桩基修复后受力分析(单位:Pa)

4 排架损伤加固效果评估

排架受损前、受损后和加固后在最不利荷载组合作用下桩基竖向和水平向位移对比见图 6,引桥排架横梁弯矩变化见图 7,排架桩顶与横梁联接处、桩底最大应力变化见图 8,桩基破损处最大应力和二侧应力差的对比见图 9。

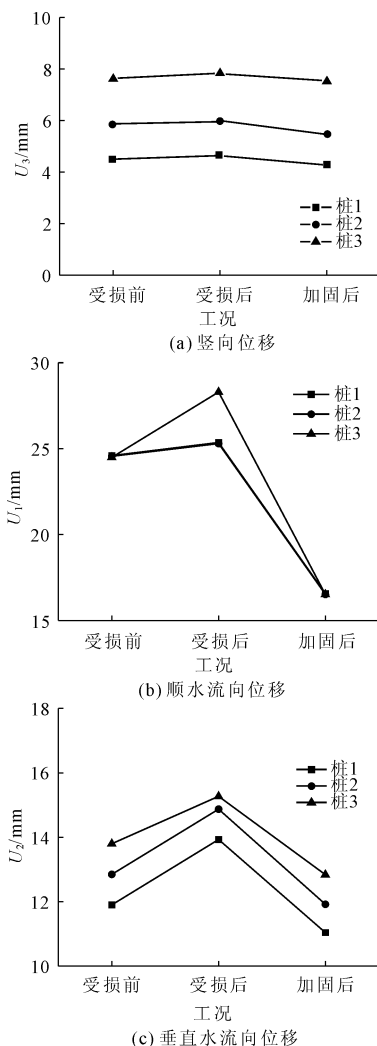


图 6 排架受损前、受损后和加固后位移对比

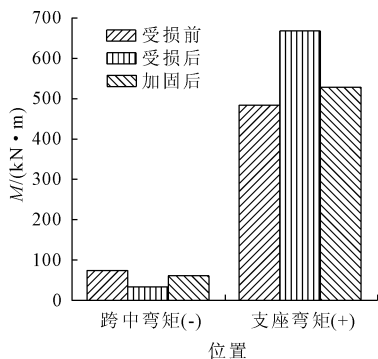


图 7 排架受损前、受损后和加固后横梁最大弯矩对比

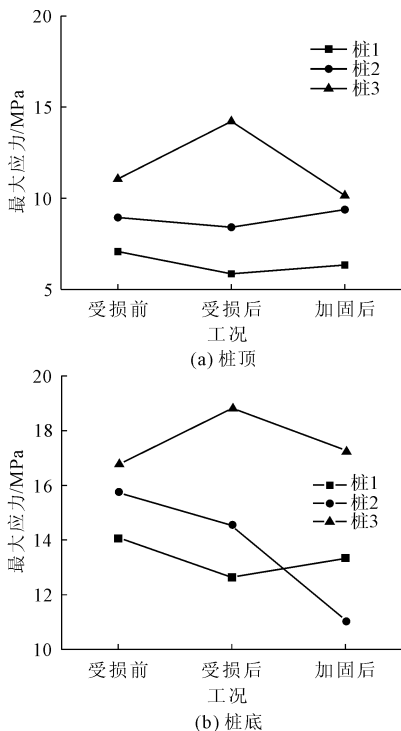


图 8 排架受损前、受损后和加固后桩顶与桩底最大应力对比

计算结果表明:

(1) 排架桩基受损对排架竖向位移影响较小,但对水平位移影响相对较大。最不利工况作用下桩基受损后竖向位移增加 2.09% ~ 2.80%,而水平位移增加 3.01% ~ 15.52% (水流向)、10.65% ~ 17.06% (垂直水流向);采用型钢加固后竖向位移比受损前下降 1.59% ~ 6.58%,水平位移下降 32.54% ~ 32.74% (水流向)、6.96% ~ 7.24% (垂直水流向)。

(2) 桩基受损后对横梁的支承刚度有所下降,横梁承载后内力发生变化,最不利荷载作用下,横梁支座处最大弯矩增加 37.97%,跨中弯矩有一定下降;采用型钢加固后横梁支座处比受损前最大弯矩

增加 9.14%,跨中弯矩略有减小。

(3) 桩基受损后排架在最不利荷载作用下应力状态变化最大,3#桩受损位置在未受损前应力为 -11.04 MPa,受损后为 -41.63 MPa,增加了 2.77 倍,破损处上下缘还出现 1.12 MPa 的拉应力,加固后应力为 -10.27 MPa,比破损前下降了 6.97%;1#、2#桩在受损后最大应力比原结构减小 19.52%、13.16%,加固后 1#最大应力比原结构下降 8.97%,而 2#桩最大应力比原结构增加了 2.81%。

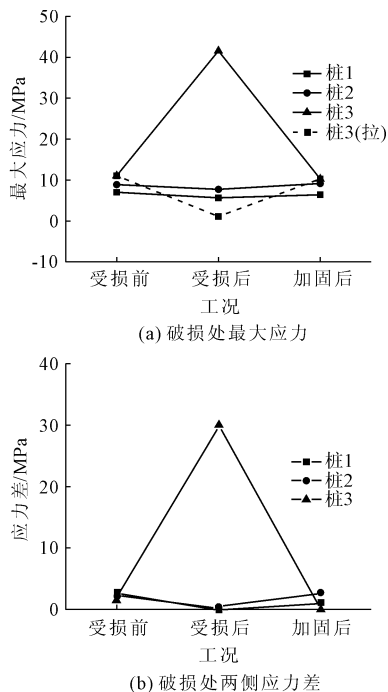


图 9 排架受损前、受损后和加固后破损处最大应力和两侧应力差对比

(4) 最不利荷载作用下排架桩基处于偏心受压状态,桩基二侧存在应力差,受损桩最明显,3#桩受损前受损位置应力差为 1.61 MPa,破损后应力差为 29.93 MPa,加固后应力差下降为 0.18 MPa。

(5) 桩基受损后在最不利荷载作用下,3#桩桩顶与横梁联接处应力增加 28.57%,1#、2#桩则下降 17.23%、6.03%;加固后 3#桩和 1#桩应力下降 8.23%、10.45%,而 2#桩应力有 4.80% 的增加。

(6) 桩基受损后最不利荷载作用下,3#桩桩底应力增加 12.10%,1#、2#桩则下降 10.26%、7.76%;加固后 3#桩桩底应力比破损前增加 2.74%,1#、2#桩桩底应力下降 5.27%、30.09%。

(7) 根据加固前后排架应力和位移结果对比分析,采用型钢加固排架桩基方案可行,实施后效果好。

5 结论与建议

以长江下游某高桩码头引桥排架碰撞事故为对象,基于塑性损伤模型采用有限元数值模拟计算,分析了排架桩基破损前、破损后和加固后的承载性能,主要结论如下:

(1) 排架破损后承载,破损区域将出现应力集中,局部有拉应力;影响范围约为受损区的 8.22 倍,应力放大倍数为 2.77,受损桩二侧应力差剧增。

(2) 受损桩承载后桩顶与横梁联接处应力增加 28.57%,其它桩下降 6.03%~17.23%;受损桩桩底应力增加 12.10%,其它桩下降 7.76%~10.26%。

(3) 桩基受损后横梁支座处最大弯矩增加 37.97%,跨中弯矩略有下降。

(4) 排架桩基受损后承载,排架桩基竖向位移增加 2.09%~2.80%,水流向位移增加 3.01%~15.52%、垂直水流向位移增加 10.65%~17.06%。

(5) 外粘型钢加固方案实施后,最不利荷载作用下排架的竖向位移、水平位移和破损区应力均低于破损前,桩顶与横梁联接处应力、桩底应力总体小于破损前水平,说明加固方案效果良好。

参考文献:

- [1] 汪宏,段金刚,陈浩. 船舶失控撞击高桩码头结构的数值仿真分析[J]. 水运工程,2015(6):51-55,74.
- [2] 李申,钟小帅. 高桩码头异常靠泊有限元仿真模拟[J]. 水运工程,2012(1):64-68.
- [3] 高荣雄,李敬,唐奇文. 船撞冲击下高桩桥墩高危损伤区域分布[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(1):24-31.

- [4] 徐静文,李致,苏晓栋,等. 走锚漂流船舶撞击下桥墩桩基损伤分析[J]. 水利水运工程学报,2020(5):79-85.
- [5] 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.
- [6] 陈程,苏晓栋,何建新,等. 高桩码头结构船舶碰撞损伤加固研究[J]. 施工技术,2018,47(22):136-139,151.
- [7] 钟伟,耿纪恩,黄慧峰. 基于 ANSYS 的粘钢加固钢筋混凝土梁的应力分析[J]. 水利与建筑工程学报,2009,7(1):124-126.
- [8] 赵安平,李昊洁,俞红升,等. 某高桩码头桩基受力有限元分析及结构损伤研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(9):128-132,137.
- [9] 邓宏彦,张玉硕,孙荣峰. 厚软土层上高桩码头桩基修复[J]. 水运工程,2018(1):77-82.
- [10] 徐静文,郭壮,李致,等. 基于堆场超载的引桥损伤检测与加固方案探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):109-114.
- [11] 陈灿明,孟星宇,董腾,等. 上混下钢组合桩竖向承载性能有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):43-49.
- [12] 戴鹏泉,周晶. 带有损伤的圆沉箱靠船墩结构的动力有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):162-167,198.
- [13] 郭明. 混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用[J]. 土木工程与管理学报,2011,28(3):128-132,163.
- [14] 贾明晓,周玉龙,刘祖军,等. 混凝土宏微观本构模型研究进展[J]. 混凝土,2019(1):52-56.
- [15] 夏凤,陈灿明,李瑜,等. PHC 桩损伤处应力释放与水平受力影响分析[J]. 水运工程,2017(3):145-149.