

文章编号:1673-9469(2016)01-0047-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.01.011

地震作用下高桩码头安全性评价

许海波,沈才华

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了研究高桩码头在使用过程中遭受地震灾害的影响,结合工程实际,基于数值模拟分析技术,采用瞬态动力学时程分析法对地震下高桩码头上部结构裂纹扩展情况进行分析。提出基于裂纹扩展深度和裂纹分布范围两个指标的高桩码头地震灾害下上部结构4级安全性评价方法,并通过不同地震等级下裂纹扩展分析进行验证。结果表明:不同地震等级下采用4级安全评价方法对高桩码头进行安全评估是合理可行的。可以为不同地震等级下码头的受损进行评估,为提前预测地震灾害对码头的损伤程度,改进设计提供科学依据。

关键词:高桩码头;地震灾害;裂纹;安全评价

中图分类号:U656.1+13

文献标识码:A

The safety evaluation of high-piled wharf under earthquake action

XU Hai-bo, SHEN Cai-hua

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the piled wharf in the influence of earthquake disasters in use process, combination with the engineering practice, based on the numerical simulation analysis technology, the transient dynamic analysis of earthquake under the course calendar piled wharf upper structure crack propagation conditions is analyzed. Based on crack propagation depth and the distribution of crack two indicators of piled wharf upper structure under seismic disasters 4 level security evaluation method, and validated by the crack propagation analysis under different earthquake magnitude. Results show that under different earthquake magnitude 4 safety assessment methods for safety assessment of piled wharf is feasible. To assess the damage to the wharf under different earthquake magnitude, to predict earthquake disasters in advance to the damage degree of wharf, provide a scientific basis for improving design.

Key words: high-piled wharf; earthquake Disaster; crack; safety evaluation

前言

高桩码头是淤泥质海岸及河口地区常见的水工建筑物,使用年限大于15年以上时,破坏情况一般较为严重,直接影响了码头结构安全。因此迫切需要对这些高桩码头结构进行安全评估,以此确定码头的损伤程度及维修加固方法,以保证安全生产,促进港口健康发展^[1]。

近年来,许多学者采用模型试验^[2]或数值模拟对高桩码头进行过检测评估。史青芬等^[3-5]基

于模糊评判法,结合码头的结构特点建立评估模型,通过层次分析法确定各影响因素的权重。张戈等^[6-8]基于可靠度理论,采用失效概率或可靠度指标来衡量结构的安全状况。现有规范^[9]中针对不同结构形式的港口水工建筑物规定了相应的检测项目和内容,主要从构件的破损情况、材料老化程度及性能等方面考虑。文章基于数值模拟技术,针对裂纹扩展过程特性,提出采用裂纹扩展深度和裂纹分布范围两个指标,建立高桩码头地震灾害下上部结构安全性评价方法,为提前预测地

收稿日期:

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(2011W03、2015J09);江苏省自然科学基金面上项目(BK20141419);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B04914)

作者简介:许海波(1989-),男,江苏泰兴人,硕士,主要从事高桩码头安全稳定性研究。

震灾害的损失,改进设计提供科学依据。

1 高桩码头动力灾害数值模拟技术理论

1.1 动力学运动方程

结构动力学中建立了有限元系统的运动方程:

$$M \ddot{a}(t) + C \dot{a}(t) + K a(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $a(t)$ 为结点位移向量; $\ddot{a}(t)$ 为节点加速度向量; $\dot{a}(t)$ 为节点速度向量; $Q(t)$ 为节点荷载向量。

有限元分析中常分为直接积分法和振型叠加法,本文采用瞬态动力学时程分析法。

1.2 Rayleigh 比例阻尼

结构动力分析中,在计算一般外力作用下结构的动力响应时,阻尼对结构的最大响应起控制作用。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中, α 为质量阻尼系数;中,在计算一般外力作用下结构的动力响应时,阻尼对结构的最大响应起控制作用。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{为刚度阻尼系数。}$$

如果根据实验或者相似结构的资料已知两个振型的模态阻尼比 ξ_i 和 ξ_j ,则质量阻尼系数、刚度阻尼系数可由下式求得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \\ \beta = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 三维有限元 SOLID65 单元

SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型增加了描述开裂和压碎的性能。本单元最重要的方面在于其对材料非线性的处理,其可模拟混凝土的开裂(三个正交方向)、压碎、塑性变形及徐变,还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变。文章需考虑表 1 所表示的 C1 – C4 四个参数。

表 1 Solid65 混凝土材料数据表

Tab. 1 The data table of Solid65 concrete material

参数	说明
C1	张开裂纹的剪力传递系数
C2	闭合裂纹的剪力传递系数
C3	单轴开裂应力(单轴抗拉强度)
C4	单轴压碎应力(单轴抗压强度)

2 工程概况

某码头桩台宽为 9 m × 7 m,桩排架间距 9 m。PHC 管桩直径 1.2 m,壁厚 0.15 m,内径 0.9 m,截面面积 $4.95 \times 105 \text{ mm}^2$,截面惯性矩 $6.958 \times 10^{10} \text{ mm}^4$,截面模量 $1.16 \times 10^8 \text{ mm}^3$,弹性模量 $3.5 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$ 。考虑的荷载有板上的附加荷载 10 kN/m^2 ,板的自重 23 kN/m^2 。地基土特性为淤泥 4 m、砂砾 9 m、圆砾 5 m。

3 基于裂纹扩展过程的高桩码头结构安全性评价方法

3.1 参数选择与确定

根据工程概况,基于 El Centro7.1 级地震选择材料及参数如表 2。

表 2 数值模拟参数表

Tab. 2 Numerical simulation parameter table

本构模型	地震波	C30	Solid65	
参 数 混 凝 土 模 型 (与 SOL- ID65 单 元 结 合 模 拟 开 裂)	2 倍地震波,根据地 震波加速度峰值参 考规范插值计算地 震荷载对应烈度为 8.6 度	弹性模量	$3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$	C1 0.8
		屈服强度	17.48 N/mm^2	
		峰值应力	20.1 N/mm^2	C2 0.9
		峰值应变	1.64×10^{-3}	
		卸载模量	$1.82 \times 10^4 \text{ MPa}$	C3 2.01 MPa
		切线模量	$8.21 \times 10^2 \text{ MPa}$	
		半峰值应变	0.003 772	C4 20.1 MPa

3.2 建立模型

地层土采用实际地层,为简化计算,地层模型两边界取桩周围20倍直径以上,深度取桩底向下3 m。沿纵向输入地震波,设置两侧边为地震波输入输出边界,前后边界为Y方向受约束边界、X和Z方向自由。

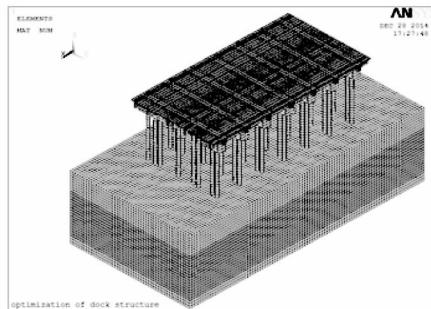


图1 高桩码头有限元模型

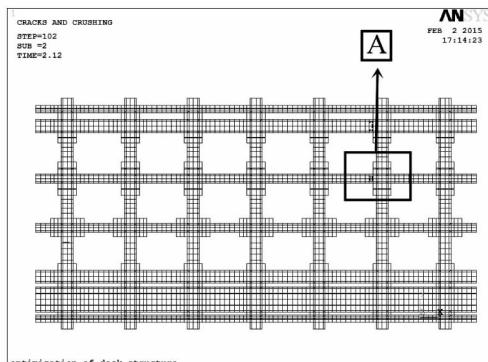
Fig. 1 The finite element model of piled wharf

高桩码头有限元模型见图1,通过模态分析得出前三阶振型频率 $F_1 = 0.566\ 96$, $F_2 = 0.617\ 11$, $F_3 = 0.756\ 52$,采用Rayleigh比例阻尼,假设初始阻尼比均为0.05,则由式(3),求得Rayleigh阻尼系数 $\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.203\ 6 \\ 0.012\ 0 \end{bmatrix}$ 。

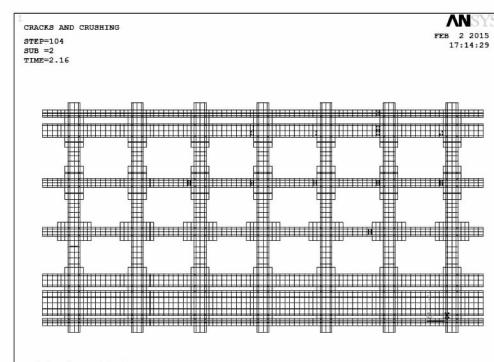
3.3 裂纹扩展分析

通过图2俯视图观测裂纹扩展情况。

从地震烈度为8.6度的裂纹扩展情况俯视图2可以看出,裂纹首次开裂时刻为2.04 s,首次开裂程度较严重。当达到2.08 s时,裂纹已经扩展到多处梁体,取俯视图中首次开裂的A区域作放大图分析。



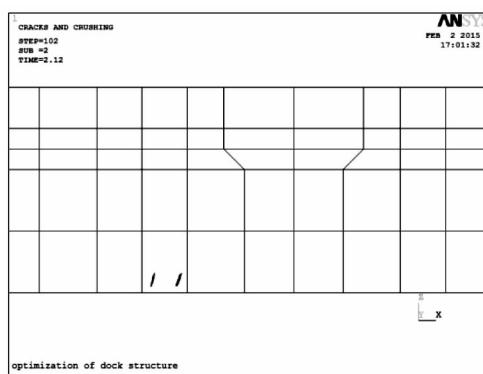
2.04 s (裂纹开裂)



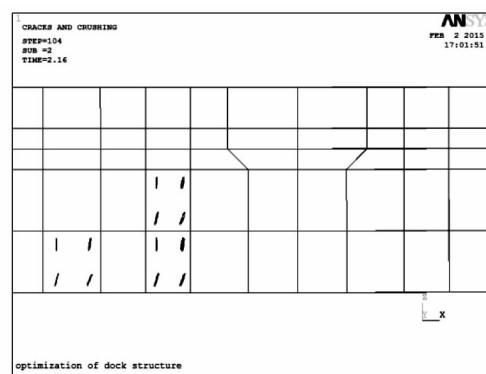
2.08 s (裂纹扩展)

图2 俯视图

Fig. 2 The vertical view



2.04 s (裂纹开裂)



2.08 s (裂纹扩展)

图3 A区域的正视图

Fig. 3 The front view of A regional

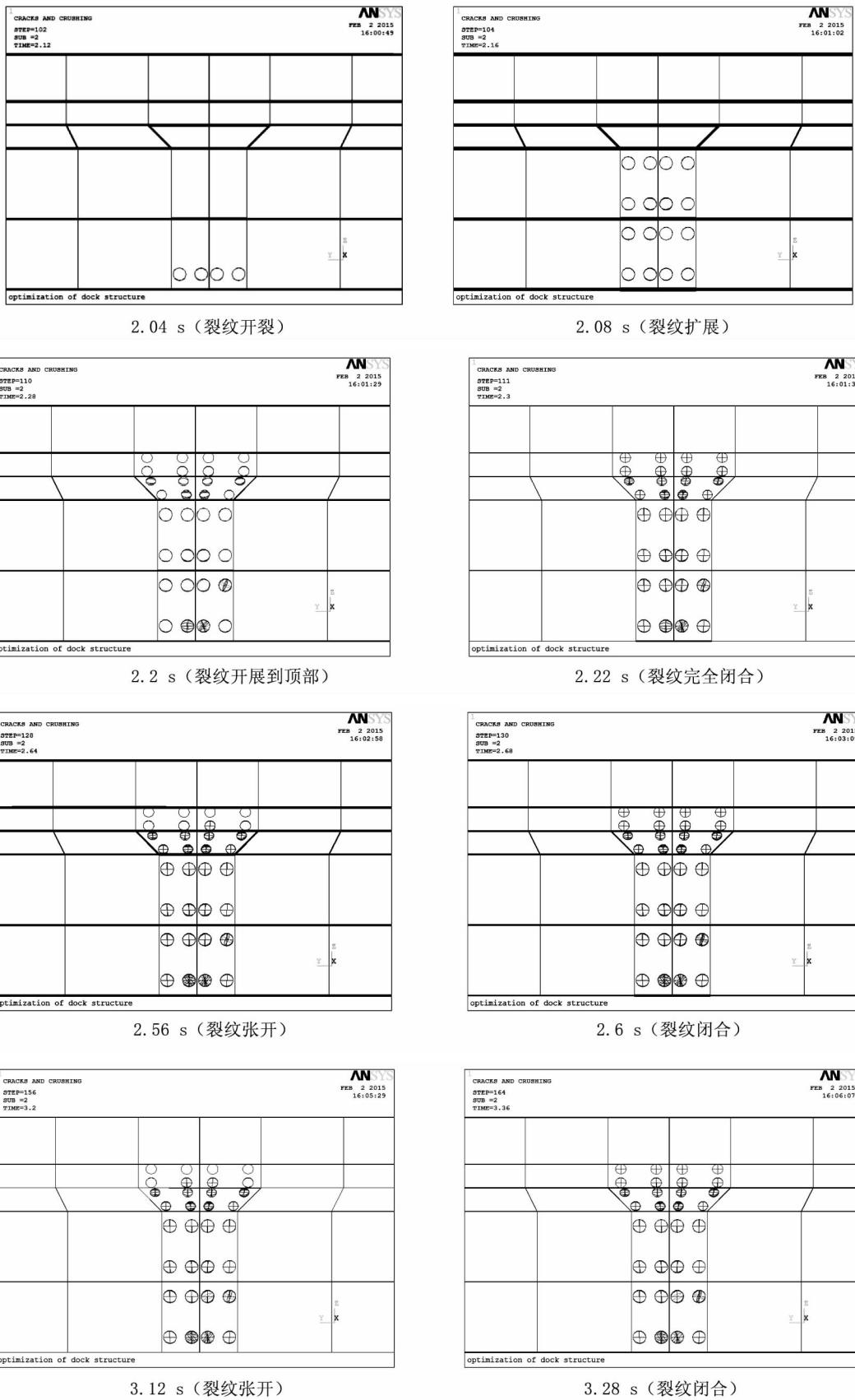


图4 A区域的左视图

Fig. 4 The left view of A region

由 A 区域的正视图 3 中可以看出,裂纹在 2.04 s 开裂后,裂纹继续向上扩展。而在左视图 4 中可以看出,裂纹在扩展到纵梁体顶部后出现多次张开、闭合、再张开的现象。在 2.2 s 时梁体底部出现了绿色、蓝色圆圈,标志着这一区域存在同一点开裂多次的裂纹。绿色圆圈表示第二次开裂的裂纹,蓝色圆圈表示第三次开裂的裂纹,在 3.28 s 裂纹处于闭合状态,且开裂至纵梁顶部,底部出现多次开裂现象。

3.4 地震动力灾害安全评估方法

根据以上工况地震灾害过程中码头上部结构从开裂到破碎的过程分析可知,在地震动力灾害下可以采用裂纹扩展深度和裂纹分布范围大小作为安全评估的主要指标,因此提出基于地震灾害破损过程分析的 4 级综合安全评估方法。

表 3 地震荷载下破损程度评估等级表

Tab. 3 The degree of damage assessment scale under the seismic load

破损程度等级	A 级	B 级	C 级	D 级
破碎的深度	裂纹只分布在表面、局部	裂纹贯穿整个梁身,但没有沿梁轴向全部分布,没有出现严重压碎区域	裂纹贯穿整个梁身并有梁轴向出现全部裂纹分布,但没有出现严重压碎区域	裂纹贯穿整个梁身并裂纹沿梁轴向全部分布,出现严重压碎区域

表 4 地震荷载下破损范围评估等级表

Tab. 4 The extent of damage assessment scale under the seismic load

破损范围等级	1 级	2 级	3 级	4 级
破碎的面积	5% 以下 梁上有裂纹或裂纹区域值占码头总面积的 5% 以内	20% 以内 梁上出现裂纹或裂纹总面积占码头面积的 20% 以内	40% 以内 梁上出现裂纹或裂纹总面积占码头面积的 40% 以内	60% 以内 梁上出现裂纹或裂纹总面积占码头面积的 60% 以内

注:破碎面积计算方法:把码头上部结构梁与梁中心线划分成网格状,只要某个区域有裂纹则就算整个区域有裂纹,即面积按整个区域算。

表 5 地震荷载下灾害安全性综合评估等级表

Tab. 5 The safety comprehensive assessment scale under the seismic load

综合评价	1 级	2 级	3 级	4 级
安全性等级	A,1(符合规范要求)	B,1 以上或 A,2 及以上(略低于规范要求,不影响安全及正常使用)	C,1 以上或 B,3 及以上(不符合规范要求,影响安全及正常使用)	D,2 以上或 C,4(严重不符合规范要求,危及安全或不能正常使用,须立即采取措施)

3.5 实例分析

表 6 工况列表

Tab. 6 The list of working condition

工况	本构模型	地震波	地震烈度
CW1.5	混凝土模型(与 SOLID65 单元结合模拟开裂)	1.5 × 地震波	7.8
CW3.0		3.0 × 地震波	9

(1) CW 1.5 工况震害破坏等级评估分析

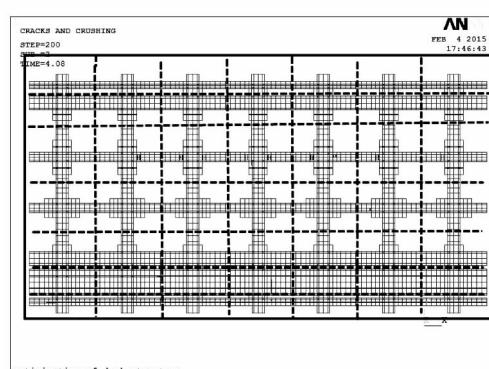
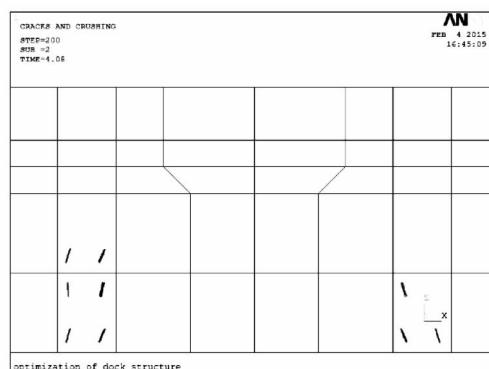


图 5 CW 1.5 工况下裂纹分布

Fig. 5 The crack distribution under the condition of the CW1.5

图 5 显示裂纹只分布在局部区域,没有出现竖向贯穿梁身的裂纹,破损程度等级可判定为 A

级;在6个区域出现裂纹,占到6/49,即12%,20%以下梁上出现裂纹,破损范围评估为2级;综合安全性等级为2级。

(2) CW 3.0 工况震害破坏等级评估分析

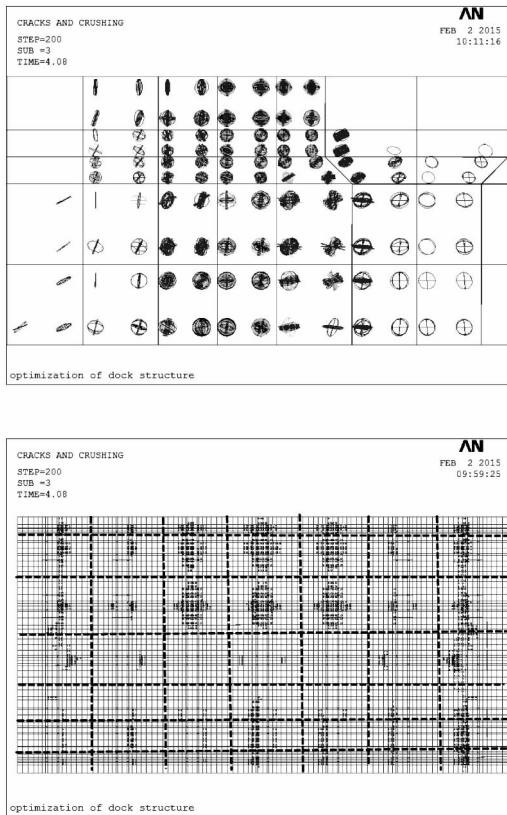


图6 CW 3.0工况下裂纹分布

Fig. 6 The crack distribution under the condition of the CW3.0

图6显示裂纹分布区域剧增,多数区域裂纹竖向贯穿梁体,沿梁轴线方向布满裂纹,个别区域出现严重的压碎情况,破损程度等级可判定为D级;在40个区域均有裂纹,即80%以上,破损范围评估为超过4级;综合安全性等级为4级。

4 结论

1)通过不同工况地震荷载下,同一码头裂纹开裂程度、分布范围的动态变化过程显示,对于码头在地震等级烈度为7.8度时属轻微受损、安全

等级2级;地震等级烈度为8.6度时属严重受损、安全等级3级;地震等级烈度为9度时属特严重破坏、安全等级4级,基本需按重建处理;

2)根据地震灾害过程中码头上部结构的裂纹开裂过程可以对未来可能的某震级下安全性进行评价,评价方法可以根据4级破损程度指标和4级破损面指标建立的4级受损安全综合评价指标,为施工设计提供参考,为高桩码头动力灾害结构优化设计提供依据。

3)研究显示,基于数值模拟分析技术,文章提出的高桩码头动力灾害数值模拟方法可以有效模拟裂纹开裂后应力状态的重新分布,因此可以有效真实的预测码头可能出现的破坏动态过程;基于该方法提出的4级受损安全综合评价指标体系是合理可行的。可以为不同地震等级下码头的受损进行评估,为设计、后期维护提供参考。

参考文献:

- [1]田双珠,王笑难,李颖.港口工程已建码头的检测与评估[J].水道港口,2004,25(4):219-221.
- [2]杨树标,李荣华,刘建平,等.振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(1):8-11.
- [3]史青芬.高桩码头结构安全性评估[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [4]程婷.用模糊层次分析法评估海港梁板式高桩码头的安全性[J].水运科技信息,2014,(4):145-147.
- [5]王德虎,鲁子爱,侯代云.基于模糊层次分析法的高桩码头安全性评估[J].水运工程,2013,(1):76-80.
- [6]张戈.高桩码头横向排架可靠性分析[D].长沙:长沙理工大学,2004.
- [7]高树奇.高桩码头整体安全度定量分析与分级方法研究[D].天津:天津大学,2012.
- [8]张富玲.高桩码头全结构段数值模拟及可靠度分析[D].天津:天津大学,2012.
- [9]JTJ302-2006,《港口水工建筑物检测与评估技术规范》[S].

(责任编辑 李军)