



高桩码头运营期耐久性模糊评估方法*

吴 锋, 庞丹丹, 张 章

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 根据高桩码头结构特点, 基于层次分析法, 采用模糊综合评估理论, 建立了高桩码头适用的耐久性层次结构模型, 给出了分层评估指标变权重和隶属函数的计算方法, 提出了一套高桩码头运营期耐久性模糊综合评估方法, 该方法将复杂的高桩码头耐久性评估问题层次化、定量化, 可操作性强, 为高桩码头耐久性评估提供了理论依据。

关键词: 高桩码头; 层次分析法; 模糊理论; 耐久性评估

中图分类号: TU 375; U 656.1¹

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0062-06

Fuzzy evaluation for durability of high-pile wharf in service

WU Feng, PANG Dan-dan, ZHANG Zhang

(Shanghai Third Harbour Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on the analytic hierarchy process method and the fuzzy comprehensive evaluation theory, this paper establishes the durability hierarchical structure model of high-pile wharf, and it also gives the calculation method for variable weight and membership function of layered evaluation index. This paper puts forward a set of durability fuzzy comprehensive evaluation method for high-pile wharf in service, which has strong maneuverability and thus can provide a theoretical basis for the durability evaluation of high-pile wharf.

Key words: high-pile wharf; analytic hierarchy process; fuzzy theory; durability evaluation

高桩码头是我国港口建设采用最早、应用最广泛的码头结构形式, 共有万吨级以上泊位570多个, 占全国万吨级以上深水泊位的85%以上。高桩码头为透空式结构, 结构自质量小, 对波浪的反射率小, 船舶较易靠泊, 装卸作业时泊稳条件较好, 可较大程度采用预应力构件, 增大预制安装的百分比, 有利于组织机械化施工, 建设速度快、材料消耗省、造价较低。但高桩码头的不足之处也特别突出, 从施工期到使用期, 易发生冲刷、淤积、船舶撞击, 结构受力复杂, 容易损伤, 对超载的适应性较差。接岸挡土结构处理较复杂, 处理不当时, 易发生侧向位移、变形、开裂等现象。此外, 因其为透空式结构, 结构的耐久性问题最突出, 也相对复杂。开展高桩

码头结构运营期耐久性评估方法, 有助于完善耐久性设计方法和全寿命设计理论研究、评估高桩码头的耐久性质量、节约高桩码头全寿命成本, 是水运工程建设发展的需要。

1 基于层次分析法的高桩码头层次结构模型

1.1 层次结构模型

评估指标的选取应该满足可靠性、客观性、一致性、简明性和灵敏性的原则, 评估指标体系必须科学、客观, 尽可能全面考虑各种因素。选择评估指标时只能选择一些对评估系统起重要作用的指标, 忽略一些次要指标。高桩码头是一个复杂的结构系统, 影响其耐久性的因素复杂多样。基于层次分析法结合高桩码头的结构特点,

收稿日期: 2012-05-30

*基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2009 328 521 076)

作者简介: 吴锋(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港工结构研究。

将高桩码头耐久性评估这个复杂的非定量问题分成如图1所示的二级层次结构模型。对高桩码头进行耐久性评估时, 各类构件的耐久性评估指标主要考虑了构件的外观状态、构件裂缝和构件锈蚀, 使得高桩码头耐久性评估问题简单化、量化。

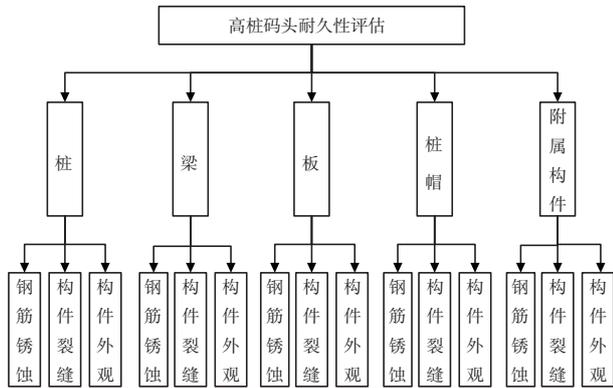


图1 高桩码头耐久性评估层次结构模型

1.2 评估指标的权重

1) 初始权重。

通过两两比较桩、梁、板、桩帽和附属设施对高桩码头耐久性的影响程度, 采用1~9标度法^[1], 确定构件层的比较判断矩阵, 用同样的方式确定指标层的比较判断矩阵。判断矩阵建立后, 使用相对性一致指标 $C.R.$ ($C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$) 检验其一致性^[2], 其中: $C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$; n 为判断矩阵的维数; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; $R.I.$ 为平均随机一致性指标(表1)。

表1 平均随机一致性指标 $R.I.$

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R.I.$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

当随机一致性指标 $C.R. \leq 0.1$ 时, 认为判断矩阵符合完全一致性条件, 否则, 需要对判断矩阵的因素取值进行调整, 重新分配权系数。

当构造的两两判断矩阵满足一致性条件后, 采用式(1)求解判断矩阵的特征根:

$$A \times W = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 是 A 的最大特征根; W 是相应的特征向量, 归一化 W 即得到相对应各构件及评估指标的初始权重。

2) 变权原理修正权重。

随着码头建成后的时间的增长, 在自然环境

和人为因素影响下, 高桩码头结构的耐久性能不断退化。影响码头耐久性各指标的退化速率往往又不完全一致, 这样使得各指标对耐久性的影响相对重要性发生改变, 即不同的损伤程度对耐久性评估的贡献不同。为了解决这个问题, 使评估结果更能准确地反映出码头的实际情况, 本文引入式(2)所示的变权理论对初始权重进行修正:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}}{\sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (2)$$

变权后得到码头耐久性评估结果如式(3)所示:

$$m(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j^{(0)} x_j^{\alpha}}{\sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (3)$$

式中: $w_j^{(0)}$ 为第 j 个指标的权重; w_j 为第 j 个指标变权后的权重; x_j 为第 j 个指标的评价值; m 为变权评估值。 α 的取值反映了对均衡性的要求, 在很大程度上将影响最终评估结果。当对各指标的均衡问题考虑较多时取 $\alpha < 0.5$, 当比较能容忍某方面的缺陷时取 $\alpha > 0.5$, 当取 $\alpha = 1$ 时, 即为等同于常权综合模式。

1.3 评估指标检测结果的规范化处理

高桩码头耐久性评估体系中, 底层评估指标的检测结果均为一数据序列, 各个检测点的检测数据不尽相同, 为便于计算, 需要对检测数据序列进行处理, 模糊综合评估中常借用灰色关联度法来处理序列型数据。此种方法首先采用式(4)求出实测数据与其标准值的斜率关联度, 再代入式(5)求得评估指标检测数据的标准化值。

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\left| 1 + \left| \frac{a^{(1)}[x_0(k+1)]}{x_0(k+1)} - \frac{a^{(0)}[x_i(k+1)]}{x_i(k+1)} \right| \right|} \quad (4)$$

$$R = \gamma(x_0, x_i) \cdot \sum_{k=1}^n w_k x_k \quad (5)$$

式中: $a^{(1)}[x_0(k+1)] = x_0(k+1) - x_0(k)$, $k=1, 2, \dots, n-1$; $a^{(0)}[x_i(k+1)] = x_i(k+1) - x_i(k)$, $k=1, 2, \dots, n-1$; $\gamma(x_0, x_i)$ 为斜率关联系数; w_k 为各检测点的权分配; x_0 为高桩码头竣工状态某检测项目的标准值(或设计值); x_i 为码头服役状态检测项目的第 i 次检测实测值。

2 高桩码头耐久性模糊评估模型

2.1 模糊综合评估的基本概念

运用模糊理论首先要确定由评估对象的 n 个影响因素组成的因素集 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，由 m 个评估结果组成的评价集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 及由各评估因素权重分配所组成的权值集 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。假设第 i 个影响因素相对 V 的模糊评估子集为 $R_i=\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$ ，则单层模糊评估模型可由式(6)表示：

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_m] = A \times R = [a_1, a_2, \dots, a_n] \times \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $B=[b_1, b_2, \dots, b_m]$ 为评估结果。

当把模糊理论运用到高桩码头耐久性评估这个概念时，被讨论的对象为若干码头结构、构件

或构件耐久性影响因素，这些讨论对象的全体就构成了论域，每一个讨论的结构、构件或构件耐久性影响因素就是元素。

2.2 结构评估标准及隶属函数

运用模糊理论对高桩码头进行耐久性评估，关键是建立模糊评估分级标准及隶属函数。参照已有研究成果及相关港口工程规范，制定如表2所示的高桩码头耐久性模糊评估分级标准。

隶属函数是模糊数学最显著的特征，它描述了事物的不确定性。常用的函数形式有正态分布型、矩形分布型、梯形分布型、 Λ 形分布型、S分布型等，所选取的分布函数应尽量符合模糊集合的本质特性。本文选取计算简便且更能反映高桩码头耐久性评估实际情况的梯形分布制定如图2所示的高桩码头耐久性模糊评估隶属函数。

表2 高桩码头耐久性评估模糊等级划分

评价等级	等级状态	模糊评级	维修及加固建议	评分
I	良好状态	(1 0 0 0 0)	正常使用	$(\alpha_6, 100)$
II	较好状态	(0 1 0 0 0)	继续使用，局部损伤部位及时进行修复处理	(α_4, α_5)
III	差的状态	(0 0 0 1 0)	继续使用，对病害部位采取修复、补强措施	(α_2, α_3)
IV	危险状态	(0 0 0 0 1)	视情况对结构采取修复、补强措施或报废	$(0, \alpha_1)$

注： $\alpha_i(i=1,2,\dots,6)$ 是专家根据经验、规范及待测码头结构、构件、评估指标给出的评估等级分界点评分值。

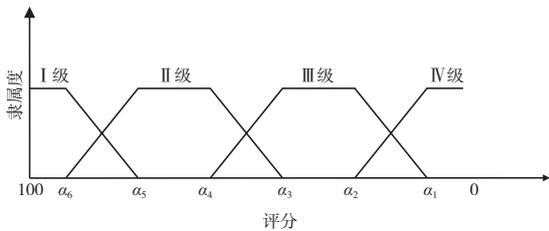


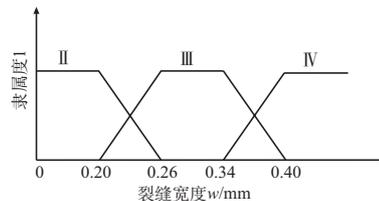
图2 高桩码头耐久性模糊评估隶属函数

2.3 底层评估指标的隶属函数

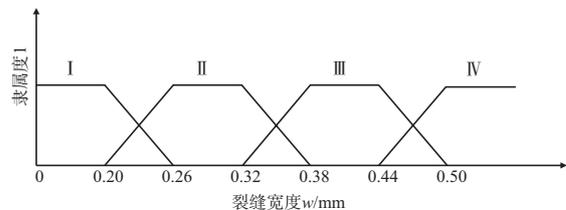
1) 构件裂缝。

混凝土裂缝是混凝土结构常见的病害之一，裂缝的产生往往是多种因素互相作用的结果。码头出现裂缝会降低其安全性和耐久性，对整体性和外观造成不利影响。裂缝检测的内容包括裂缝长度、宽度、裂缝扩展情况、形态、分布的确定。码头耐久性评估中主要检测裂缝的宽度。工程评估时，根据相关规范和待测工程情况确定混凝土裂缝评估分级界限值。由于规范对预应力构件和非预应力构件裂缝限值的规定不同，故其相对应的耐久性模糊评估隶属函数图也不同。参考

港工规范及文献[3-4]的研究成果，制定如表3所示的高桩码头耐久性评估的构件裂缝分级标准，其相对应的隶属函数图分别如图3所示。



a) 预应力构件



b) 非预应力构件

图3 构件耐久性评估构件裂缝隶属函数分级

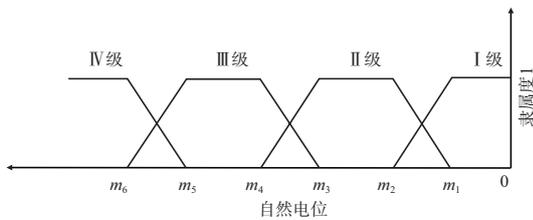
2) 钢筋锈蚀。

钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性失效和破坏的主要因素。钢筋锈蚀会导致钢筋本身抗

表3 预应力构件耐久性评估构件裂缝分级评估标准

评价等级	评估状态	最大裂缝宽度w/mm(评估准则)		模糊评级	评分
		预应力	非预应力		
I	良好状态	无裂缝	$w \leq 0.20$	(1 0 0 0)	$(\alpha_6, 100)$
II	较好状态	$w \leq 0.20$	$0.20 < w \leq 0.35$	(0 1 0 0)	(α_4, α_5)
III	差的状态	$0.20 < w \leq 0.40$	$0.35 < w \leq 0.50$	(0 0 1 0)	(α_2, α_3)
IV	危险状态	$0.40 < w$	$0.50 < w$	(0 0 0 1)	$(0, \alpha_1)$

拉强度和延展性下降,钢筋与混凝土之间的粘结性能下降导致混凝土保护层开裂,产生顺筋裂缝,最终威胁码头结构安全和耐久性。最常用的现场检测钢筋锈蚀程度的方法是半电池自然电位法。根据钢筋自然电位特性制定如图4所示的钢筋自然电位隶属函数图(因为钢筋自然电位是负数,所以其隶属函数图与其他评估指标有所区别),评估时根据相关规范确定钢筋自然电位评估分级界限值。



注: $m_i, i=1,2, \dots, 6$ 是专家制定的钢筋自然电位分级界限值。

图4 钢筋自然电位隶属函数分级

3) 构件的外观状态。

构件外观状态属于定性指标,其检测需要借助工具尺和肉眼进行测量。构件外观状态的检测主要考虑构件表面钢筋锈蚀程度、锈蚀裂缝宽度、锈蚀裂缝分布形状、构件表面剥落、空鼓及其空鼓剥落面积等。由于规范在构件外观状态方面对高桩码头面板、梁、桩及桩帽的规定有所不同,所以在工程评估时,需由专家根据规范针对不同的高桩码头构件分别给定相应的评估分级界限分值(构件外观状态属于定性指标,需专家打分将其定量化,以便计算)。专家给定各构件的评估分级界限分值之后,便可根据图2所示的隶属函数模型图制定出各构件相对应外观状态隶属函数图。

2.4 高桩码头耐久性模糊评估模型

从高桩码头耐久性评估层次结构模型(图1)易知,高桩码头耐久性模糊综合评估属于2层模糊综合评估。结合模糊评估理论及图1确立高桩码头

耐久性双层模糊综合评估模型。

其中,高桩码头耐久性模糊评估一级因素集:

$U=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$, 即:高桩码头耐久性={桩,板,梁,桩帽,附属构件}。

高桩码头耐久性模糊评估二级因素集:

$U_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}$, 即:桩耐久性={钢筋锈蚀,桩裂缝,桩的外观};

$U_2=\{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}$, 即:板耐久性={钢筋锈蚀,板裂缝,板的外观};

$U_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\}$, 即:梁耐久性={钢筋锈蚀,梁裂缝,梁的外观};

$U_4=\{u_{41}, u_{42}, u_{43}\}$, 即:桩帽耐久性={钢筋锈蚀,桩帽裂缝,桩帽的外观};

$U_5=\{u_{51}, u_{52}, u_{53}\}$, 即:附属构件耐久性={钢筋锈蚀,附属构件裂缝,构件外观}。

高桩码头耐久性模糊综合评估一级模型如式

(7):

$$V_i = A_i \times R_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}) \times \begin{bmatrix} R_{i11} & R_{i12} & R_{i13} & R_{i14} \\ R_{i21} & R_{i22} & R_{i23} & R_{i24} \\ R_{i31} & R_{i32} & R_{i33} & R_{i34} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $i=1,2,3,4,5$ 。

高桩码头耐久性模糊评估二级模型如式

(8):

$$V = A \times R = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) \times \begin{bmatrix} A_1 \times R_1 \\ A_2 \times R_2 \\ A_3 \times R_3 \\ A_4 \times R_4 \\ A_5 \times R_5 \end{bmatrix} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) \times \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} \\ V_{51} & V_{52} & V_{53} & V_{54} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 高桩码头耐久性模糊综合评估流程

运用模糊综合评估法对高桩码头进行耐久性评估的流程可用图5表示。

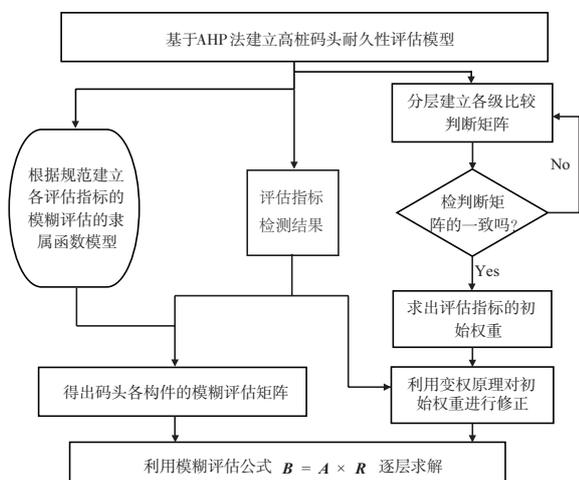


图5 高桩码头耐久性模糊综合评估流程

4 应用实例

上海某码头采用高桩梁板形式，码头平台长330.82 m，宽20 m，上部纵向结构采用吊车梁、边梁、纵梁和滑触线沟，面板为38 cm厚的大块迭合板。码头有55个排架，每榀框架由6根边长为600 mm的预应力混凝土桩组成，其中，4根直桩、2根斜桩，直桩长35 m，斜桩长37 m^[5]。

4.1 底层评估指标隶属度及权重

1) 底层评估指标隶属度。

根据码头现场检测报告得到各构件耐久性影响因素的检测数值。高桩码头各底层评估指标评估结果属于序列性指标，利用灰色关联度理论对评估结果进行计算处理，结合相应评估指标隶属函数图得到其隶属度（表4）。

2) 底层评估指标权重。

比较评估指标对构件耐久性影响的重要程度，提出相应的比较判断矩阵、一致性判断矩阵后得出各构件耐久性评估指标初始权重如表5所示。由于各评估指标评估初始权重和检测结果比较均衡，故变权公式中取 $\alpha=1$ ，则变权重与初始权重相同。

4.2 码头耐久性模糊综合评估

1) 码头各构件耐久性模糊综合评估。

由表4的评估指标隶属度及表5的评估指标权

表4 底层评估指标隶属度

构件	评估指标	检测结果	隶属度			
			r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}
桩	构件裂缝	0.19 mm	0	1	0	0
	钢筋锈蚀	-145 mV	1	0	0	0
	构件外观	90	0.89	0.11	0	0
梁	构件裂缝	0.22 mm	0	0.66	0.34	0
	钢筋锈蚀	-123 mV	1	0	0	0
	构件外观	78	0.17	0.83	0	0
板	构件裂缝	0.25 mm	0	0.20	0.80	0
	钢筋锈蚀	-135 mV	1	0	0	0
	构件外观	75	0	1	0	0
桩帽	构件裂缝	0.34 mm	0	0.66	0.34	0
	钢筋锈蚀	-150 mV	1	0	0	0
	构件外观	88	0.77	0.23	0	0
附属构件	构件裂缝	0.36 mm	0	0.34	0.66	0
	钢筋锈蚀	-210 mV	0.25	0.75	0	0
	构件外观	50	0	0.47	0.53	0

注：构件外观是专家根据现场具体情况的打分值。

表5 底层评估指标权重

构件	评估指标	权重
桩	构件裂缝	0.37
	钢筋锈蚀	0.37
	构件外观	0.26
梁	构件裂缝	0.40
	钢筋锈蚀	0.36
	构件外观	0.24
板	构件裂缝	0.38
	钢筋锈蚀	0.35
	构件外观	0.27
桩帽	构件裂缝	0.38
	钢筋锈蚀	0.38
	构件外观	0.24
附属构件	构件裂缝	0.33
	钢筋锈蚀	0.33
	构件外观	0.34

重，根据式(7)所示的高桩码头耐久性模糊综合评估一级模型，可得桩的耐久性模糊综合评估结果为：

$$V_1 = A_1 \times R_1 = [0.37 \quad 0.37 \quad 0.26] \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.89 & 0.11 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.37, 0.37, 0, 0]$$

归一化后得: $V_1=[0.50, 0.50, 0, 0]$ 。

同样的思路可得梁、板、桩帽和附属构件的耐久性模糊综合评估结果分别为: $V_2=[0.33, 0.36, 0.31, 0]$, $V_3=[0.35, 0.27, 0.38, 0]$, $V_4=[0.40, 0.24, 0.36, 0]$, $V_5=[0.28, 0.36, 0.36, 0]$ 。

2) 码头整体耐久性模糊综合评估。

比较各构件耐久性对码头整体结构耐久性影响的重要程度, 提出相应的结构比较判断矩阵, 一致性判断矩阵后得出各构件权重分配如表6所示。各构件评估结果及权重分配比较均衡, 故无需变权修正。

表6 码头各构件权重

构件	桩	梁	板	桩帽	附属构件
权重	0.25	0.23	0.21	0.18	0.13

由表6及各构件耐久性模糊评估结果, 利用式(8)可得此高桩码头耐久性模糊综合评估结果为:

$$B = A \times R = [0.25, 0.23, 0.21, 0.18, 0.13] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0.36 & 0.31 & 0 \\ 0.35 & 0.27 & 0.38 & 0 \\ 0.40 & 0.24 & 0.36 & 0 \\ 0.28 & 0.36 & 0.36 & 0 \end{bmatrix} = [0.25, 0.25, 0.23, 0]$$

归一化得: $B=[0.34, 0.34, 0.32, 0]$ 。

由计算结果可知, 此高桩码头整体结构耐久性属于良好状态为34%, 属于较好状态为34%, 属于差的状态为32%。由此可知, 码头仍可继续使用, 需要对局部病害部位进行维修、加固和补强措施。

5 结论

本文以模糊理论为基础, 采用层次分析法和变权理论, 结合高桩码头的结构特点, 建立了一套高桩码头耐久性模糊综合评估方法, 并通过典型工程实例给出了高桩码头耐久性模糊综合评估方法的评估过程, 该方法在建立高桩码头耐久性评估的层次模型后, 参考港口工程规范和相关文献, 考虑码头各构件及耐久性影响因素劣化速度的差异, 制定了高桩码头结构、构件和底层评估指标的模糊分级隶属函数, 通过判断矩阵的一致性检验, 求出各评估指标的初始权重, 根据实际工程情况, 利用各评估指标的监测数据和变权原理对评估指标的初始权重进行修正, 将复杂的高桩码头耐久性评估问题层次化、定量化, 可操作性强, 为高桩码头耐久性评估提供了理论依据, 可用于运营期高桩码头结构及构件的耐久性评估及加固。

参考文献:

- [1] 涂雪, 占和平. 基于层次分析法与变权理论的桥梁状态评估[J]. 商品储运与养护, 2008(7): 28-29.
- [2] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 竺存宏, 韩玉, 刘卫民. 海港高桩码头结构可靠度的模糊数学评估[J]. 水道港口, 1992(4): 1-11.
- [4] 田双珠, 刘卫民. 天津港7~8、12~13段码头破坏情况调查分析报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 1988.
- [5] 上海港湾工程质量检测有限公司. 世博会园区浦西江南广场工程和浦西滨江景观绿地工程老码头、船坞安全检测评估报告[R]. 上海: 上海港湾工程质量检测有限公司, 2009.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。