

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.008

陈旭东, 李俊杰, 霍中艳. 高桩码头裂缝开合度监测模型研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 53-59. (CHEN Xudong, LI Junjie, HUO Zhongyan. Study of monitoring model of crack opening displacement for high-pile wharf [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 53-59. (in Chinese))

高桩码头裂缝开合度监测模型研究

陈旭东^{1,2}, 李俊杰¹, 霍中艳³

(1. 郑州大学, 河南 郑州 450001; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316000)

摘要: 安全监测是确保水利工程安全运行的重要措施, 监测模型是安全监测分析的重要工具, 在水库大坝中应用广泛, 然而相关理论和研究在港口码头方面应用较少, 鉴于港口码头工作环境及工作性与水库大坝不同, 亟需研究符合码头自身工作特点的安全监测模型。针对高桩码头裂缝效应量和原因量的变化规律, 选取温度、风、堆荷和时效分量为高桩码头裂缝的主要影响因素, 探讨了相应的因子表达形式; 在此基础上, 建立了高桩码头裂缝开合度监测的统计模型和最小二乘支持向量机模型, 研究了模型评价方法, 对监测序列进行拟合和预测, 验证了模型的有效性和合理性。结果表明, 所建立的高桩码头裂缝开合度模型具有较高的精度和一定的预测能力, 可为分析高桩码头裂缝监测资料, 以及监控高桩码头安全提供科学依据。

关键词: 高桩码头; 裂缝开合度; 统计模型; 最小二乘支持向量机模型

中图分类号: U656 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)06-0053-07

安全监测模型是安全监测定量分析的主要工具, 对效应量与原因量之间的关系进行定量描述, 从而揭示效应量的变化规律, 并对建筑物结构性态变化发展进行预测, 在水库大坝及其基础、边坡工程等领域得到了广泛应用, 并取得了良好的社会效益^[1-4]。然而在港口码头安全监测模型研究方面的报道还十分有限, 这主要是因为港口码头安全监测仪器的布设远没有水库大坝中完备。近年来, 随着安全监控意识的加强, 已有一些港口码头开始监测研究工作^[5-9], 但是这些研究还不够深入。高桩码头是一种适用于软土地基的港口码头, 基础沉降、气候变化、冲刷、超负荷运行等因素会使码头出现裂缝^[10-12]。裂缝主要受哪些因素影响、变化规律如何、采用怎样的模型对其进行分析, 这些问题的研究对港口码头的安全运行至关重要。码头裂缝开合度实测数据序列是码头裂缝变化的宏观反映, 本文从裂缝开合度的实测数据序列着手, 利用过程线分析、特征值统计等定性分析结果, 结合荷载规范等现有资料^[13-16], 探讨高桩码头裂缝的主要影响因素, 构造其因子表达式, 对码头裂缝开合度监测模型进行研究。

1 高桩码头裂缝开合度监测模型因子

1.1 定性分析

定性分析方法主要有过程线图法和特征值统计法, 过程线图法根据效应量和原因量分别随时间的变化过程线, 分析效应量的影响因素及影响程度。图1为某高桩码头裂缝开合度和环境量变化过程。

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609217); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2015491411); 浙江省交通厅科技计划项目(2015-2-40)

作者简介: 陈旭东(1987—), 女, 河南郑州人, 讲师, 博士, 主要从事港工、水工结构安全监控技术研究。

E-mail: chenxudong@zzu.edu.cn 通信作者: 霍中艳(E-mail: silviahuo@qq.com)

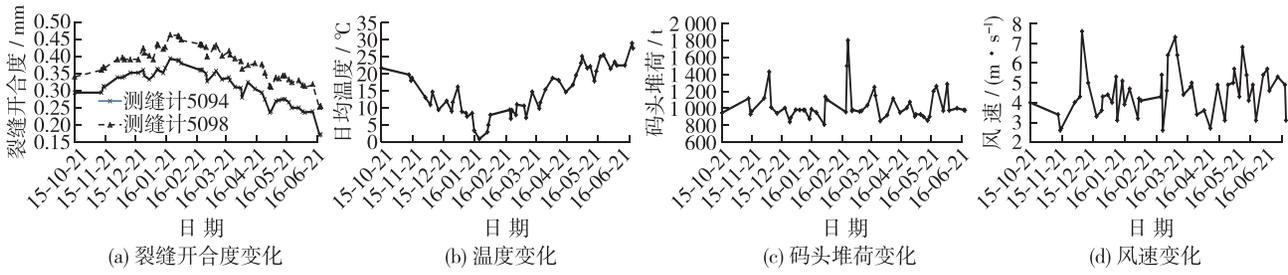


图1 裂缝开合度和环境量变化

Fig. 1 Process lines of crack opening displacement and other environment related parameters

从图1可知,高桩码头裂缝主要受温度、码头堆荷与风荷载的影响,尤其是温度及码头堆荷影响显著,一般在高温及堆荷量较低时期裂缝开合度减小,在低温及堆荷量较大时期裂缝开合度增加。除此之外,由于海水侵蚀、钢筋混凝土徐变及周期性波浪压力的作用,使得码头裂缝开合度产生时效变形。

1.2 高桩码头裂缝开合度理论统计模型

高桩码头裂缝开合度主要由温度、风、堆荷和时效分量组成,即

$$\delta = \delta_T + \delta_w + \delta_p + \delta_\theta \quad (1)$$

式中: δ 为裂缝开合度; δ_T 为温度分量; δ_w 为风压分量; δ_p 为堆荷分量; δ_θ 为时效分量。

(1)温度分量(δ_T)。混凝土裂缝的形成和扩展对温度变化极其敏感,温度分量 δ_T 正是码头结构混凝土由于变温所引起的变形,该分量对码头裂缝总变形量影响较大。从力学观点来看, δ_T 应选择码头混凝土中的温度计测值作为因子。当码头布设足够数量的温度计时,其测值便可以反映温度场;当码头内部没有布设温度计或只布设了极少量的温度计,而有气温资料时,采用气温测值。

根据弹性力学理论,在温度变化作用下,码头裂缝开合度与温度 T 有关,其表达式为:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^k a_i T_i \quad (2)$$

式中: T_i 为各温度计的测值; a_i 为温度因子回归系数; k 为温度计的支数,当只有气温资料时,取为1。

当气温随时间变化具有周期性时,温度分量可用周期函数项作为因子,其表达式为:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^2 (a_{1i} \sin(2\pi it/365) + a_{2i} \cos(2\pi it/365)) \quad (3)$$

式中: $i=1\sim 2$, $i=1$ 为年周期, $i=2$ 为半年周期; t 为从起始观测日开始计算的天数。

(2)风压分量(δ_w)。由工程力学及相关理论可知,码头裂缝开合度与作用面上风速的2次方有关,即

$$\delta_w = bv^2 \quad (4)$$

式中: v 为垂直于作用面上的风速值; b 为风压因子回归系数。

(3)堆荷分量(δ_p)。通过荷载分析,码头裂缝开合度的堆荷分量与码头堆荷量的1次方有关,即

$$\delta_p = cP \quad (5)$$

式中: P 为码头堆荷量; c 为堆荷分量的回归系数。

(4)时效分量(δ_θ)。参考水工建筑物安全监控理论,选择多项式时效因子和对数时效因子,即

$$\delta_\theta = d_1 \theta + d_2 \ln \theta \quad (6)$$

式中: d_1, d_2 为时效分量回归系数; θ 为从起测日开始的天数乘以0.01。

2 高桩码头裂缝开合度监测模型建立

建立统计模型是监测资料分析的一般方法。最小二乘支持向量机模型在处理非线性问题时表现出较强的稳健性和鲁棒性^[17]。因此,本文主要建立裂缝开合度的统计模型和最小二乘支持向量机模型。

2.1 统计模型

将各因子表达式代入式(1)可得:

$$\delta = aT + bv^2 + cP + d_1\theta + d_2\ln\theta \quad (7(a))$$

或

$$\delta = \sum_{i=1}^2 \left(a_{1i} \sin \frac{2\pi it}{365} + a_{2i} \cos \frac{2\pi it}{365} \right) + bv^2 + cP + d_1\theta + d_2\ln\theta \quad (7(b))$$

在实际建模时,为了避免初始因素的影响,选取相对值建立模型,即裂缝开合度统计模型表达式为

$$\delta - \delta_0 = a(T - T_0) + b(v^2 - v_0^2) + c(P - P_0) + d_1(\theta - \theta_0) + d_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \quad (8(a))$$

或

$$\delta - \delta_0 = \sum_{i=1}^2 \left(a_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + a_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right) + b(v^2 - v_0^2) + c(P - P_0) + d_1(\theta - \theta_0) + d_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \quad (8(b))$$

式中: $\delta_0, T_0, v_0, P_0, \theta_0$ 分别为起始监测日对应的效应量及原因量监测值。 a (或 a_{1i}, a_{2i}), b, c, d_1, d_2 为回归系数,通常采用多元回归或逐步回归等回归方法求得,其中逐步回归方程中只包含显著因子。

2.2 最小二乘支持向量机模型

在裂缝开合度最小二乘支持向量机模型中,模型输入为引起裂缝变化的温度因子、堆荷因子、风压因子和时效因子 \mathbf{x} ,模型输出为裂缝开合度 \mathbf{y} ,样本集表示为 $Q = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_l, y_l)\}$,其中 $\mathbf{x}_i \in R^m$ 为各个因子组成的 m 维列向量, y_i 为裂缝开合度测值, l 为样本总数。

最小二乘支持向量机通过把数据集从输入空间映射到高维特征空间,将输入空间的非线性拟合问题转变为高维特征空间中的线性拟合问题,即

$$y(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + b \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ 为输入空间到高维特征空间的非线性映射函数; \mathbf{w} 为权向量; b 为偏置量。

结合函数的复杂性和拟合误差,式(9)可归结为如下优化问题:

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{w}, b, \xi) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \\ \text{s.t. } y_i = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(x_i) + b + \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (10)$$

式中:超参数 γ 为正则化参数,用于避免过拟合; ξ_i 为第 i 个样本点的训练误差。

建立 Lagrangian 方程

$$L(\mathbf{w}, b, \xi, a) = J(\mathbf{w}, b, \xi) - \sum_{i=1}^l a_i \{ \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(x_i) + b - y_i + \xi_i \} \quad (11)$$

式中: $a_i \in R$ 为 Lagrangian 乘子,根据优化条件

$$\partial L / \partial \mathbf{w} = 0, \partial L / \partial b = 0, \partial L / \partial \xi_i = 0, \partial L / \partial a_i = 0 \quad (12)$$

可得:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^l a_i \boldsymbol{\varphi}(x_i), \sum_{i=1}^l a_i = 0, a_i = \gamma \xi_i, \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \quad (13)$$

消去变量 \mathbf{w} 和 ξ 可得:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}^T \\ \mathbf{1} & \boldsymbol{\Omega} + \gamma^{-1} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_l]^T, \mathbf{I} = [1, 1, \dots, 1]^T, \mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_l]^T, \mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\boldsymbol{\Omega}$ 为核函数矩阵。在 $\boldsymbol{\Omega}$ 矩阵中应用 Mercer 条件

$$\boldsymbol{\Omega}_{ij} = y_i y_j \boldsymbol{\varphi}(x_i)^T \boldsymbol{\varphi}(x_j) = y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (15)$$

可得裂缝开合度最小二乘支持向量机模型为

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l a_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \quad (16)$$

式中: a_i, b 为线性系统解; $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ 为核函数。任意满足 Mercer 条件的对称函数均可作为核函数, 常用核函数为多项式核函数、径向基核函数和 Sigmoid 函数, 其中径向基核函数具有较好的统计性能, 其表达式为:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\delta^2}\right), \delta > 0 \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可得裂缝开合度最小二乘支持向量机回归函数为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^l a_i \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\delta^2}\right) + b \quad (18)$$

裂缝开合度最小二乘支持向量机模型的主要参数是正则化参数 γ 和核参数 δ , 这两个参数在很大程度上决定了最小二乘支持向量机的学习和泛化能力, 可以采用遗传算法进行优化^[18]。

2.3 模型评价

为进一步了解所建模型对裂缝开合度监测资料的处理效果, 还需要对模型进行评价。对于拟合与回归模型的精度, 常用的评价指标为复相关系数 R 与剩余标准差 S , 其计算方法如下:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (\delta'_i - \bar{\delta})^2}{\sum_{i=1}^l (\delta_i - \bar{\delta})^2}} \quad S = \sqrt{\frac{1}{f_Q} \sum_{i=1}^l (\delta'_i - \delta_i)^2} \quad (19)$$

式中: $\bar{\delta}$ 为效应量实测序列平均值; f_Q 为剩余平方和的自由度, $f_Q = l - m - 1$ 。

在评价模型效果时, 除了模型精度之外, 还需要考查模型的预测外延性, 这对于建筑物的安全监控尤为重要。所谓预测外延性, 是指模型在未来一段时间内的预测能力, 通常采用绝对平均百分比误差 $MAPE$ 、均方误差 MSE 和平均绝对误差 MAE 来衡量, 其计算方法为:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^l \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|, MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2 / n}, MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - F_i| \quad (20)$$

式中: n 为测试样本的样本数; A_i 为实测值; F_i 为预测值。

3 工程实例

某高桩码头位于浙江省台州市椒江区, 码头平台长 162.55 m, 宽 14 m, 主要构件为横梁、纵梁和面板, 其结构简图如图 2 所示。

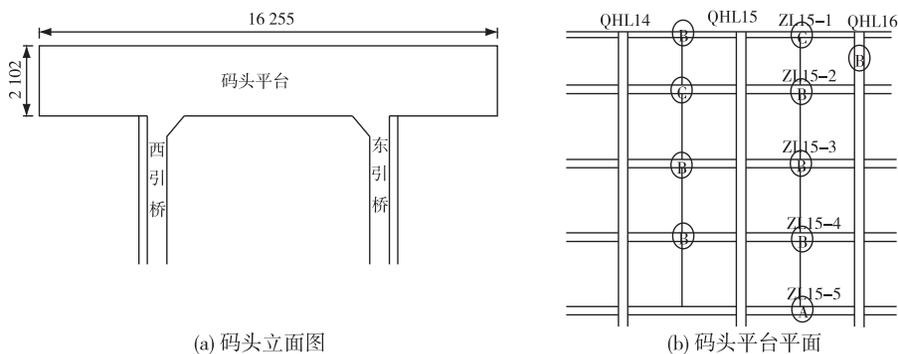


图 2 码头结构简图(单位: cm)

Fig. 2 Diagram of wharf structure (unit: cm)

在运行过程中, 由于受到温度变化、风荷载、码头堆荷等作用, 各构件存在混凝土胀裂、钢筋外露等侵蚀病害, 图 2(b)中 ①, ②, ③ 表示劣化等级逐渐增加。相关管理部门于 2015 年 8 月对其进行修复, 修复过程中

在纵梁 ZL15-2, ZL15-3, ZL15-4, 面板 15-4 等处布设了振弦式测缝计, 从 2015 年 10 月 21 日开始对构件裂缝开合度变化情况进行监测, 监测频次约每周 1 次。本文以位于纵梁 ZL15-2 南侧的测点 5094 和位于纵梁 ZL15-3 南侧的测点 5098 为例, 采用 2015 年 10 月 21 日—5 月 26 日的监测数据序列, 其实测值和环境量变化过程线如图 1 所示。由于数据序列相对较短, 图 1(b) 中气温变化的周期性不明显, 利用式 8(a) 建立统计模型, 其参数见表 1, 同时建立最小二乘支持向量机模型, 其参数见表 2。

表 1 统计模型系数

Tab. 1 Coefficients of statistical model

测点	回归方法	$a/10^{-4}$	$b/10^{-5}$	$c/10^{-3}$	$d_1/10^{-2}$	d_2	R	S
5094	多元回归	-2.45	1.34	1.37	-1.37	0.04	0.92	0.010
	逐步回归	-55.4			-1.36		0.92	0.011
5098	多元回归	-84.3	1.35	-5.98	-0.49	0.01	0.91	0.010
	逐步回归	-60.9					0.90	0.012

表 2 最小二乘支持向量机模型参数

Tab. 2 Parameters of LSSVM model

测点	γ	δ	R	S	测点	γ	δ	R	S
5094	10	4	0.94	0.009	5098	12	3.6	0.95	0.01

由表 1 和 2 可以看出, 统计模型和最小二乘支持向量机模型的复相关系数均在 0.9 以上, 剩余标准差较小, 相比于统计模型, 最小二乘支持向量机模型的精度更高。为了进一步了解裂缝开合度和各分量之间的关系, 找出裂缝开合度主要影响因素, 采用上述逐步回归模型对各分量进行分离, 实测值、拟合值和分量过程线如图 3 所示。

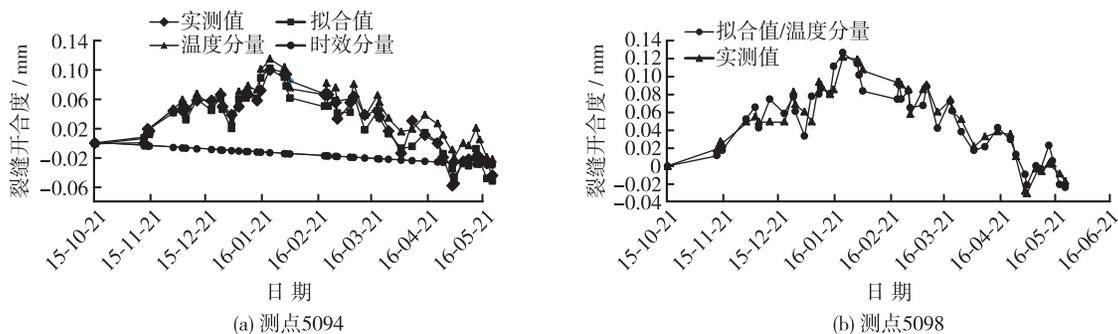


图 3 典型测点实测值、拟合值与各分量变化过程线

Fig. 3 Change curves of measured and fitted values and components of typical points

由图 3 可见, 对于测点 5094 和测点 5098, 其实测值和拟合值均较为接近。温度分量是两个测点裂缝开合度变化的主要因素, 验证了裂缝形成与扩展对温度变化极为敏感的结论, 此外, 测点 5094 裂缝开合度存在逐渐收缩的时效分量。风荷载对两个测点裂缝开合度变化的影响均不明显(风荷载因子没有被选入到逐步回归方程中), 这主要与两测点在码头平台上所处的位置有关, 至于码头堆荷(在该实例中其因子没有进入逐步回归方程)对两测点裂缝开合度影响不显著的原因及其影响规律还有待进一步收集数据利用长序列进行研究。

为验证模型的预测外延性, 采用逐步回归模型和 LSSVM 模型对 2016 年 6 月份的测值进行预测, 并对式 (20) 中各衡量参数进行计算, 结果如表 3 所示。

表3 两种模型预测结果

Tab. 3 Prediction results of statistical model and LSSVM model

序列	5094 实测值/mm	统计模型(逐步回归)	LSSVM 模型	序列	5098 实测值/mm	统计模型(逐步回归)	LSSVM 模型
2016-06-02	0.251	0.264	0.265	2016-06-02	0.330	0.343	0.349
2016-06-08	0.236	0.258	0.261	2016-06-08	0.314	0.337	0.317
2016-06-16	0.239	0.258	0.243	2016-06-16	0.320	0.336	0.275
2016-06-23	0.170	0.220	0.178	2016-06-23	0.253	0.297	0.268
<i>MAPE</i>		12.9%	5.64%	<i>MAPE</i>		8.41%	6.68%
<i>MSE</i>		0.029	0.015	<i>MSE</i>		0.027	0.026
<i>MAE</i>		0.026	0.013	<i>MAE</i>		0.024	0.021

由表3可见,统计模型和最小二乘支持向量机模型均表现出一定的预测能力,从预测效果来看,最小二乘支持向量机模型优于统计模型,这主要是因为最小二乘支持向量机模型具有更强的稳健性和鲁棒性。需要指出的是,由于资料所限,本文仅对未来1个月的监测数据进行了预报。

4 结 语

本文针对高桩码头自身工作特点对其裂缝开合度监测模型进行了研究,指出高桩码头裂缝开合度的主要影响因素为温度、风、堆荷与时效,给出了各个影响因子的表达式,建立了高桩码头裂缝开合度的统计模型以及最小二乘支持向量机模型,探讨了模型效果的评价方法。将所建立的模型应用于浙江某高桩码头的裂缝监测,结果表明,两种模型的精度均较高,且具有一定的预测能力,这说明模型因子选取较为合理;另外,最小二乘支持向量模型的预测外延性优于统计模型,可用于高桩码头裂缝开合度的预警,而在分离各分量时建议采用逐步回归统计模型。本文为高桩码头裂缝开合度监测研究提供了一定依据,然而,高桩码头裂缝是一个受到众多因素影响的复杂非线性问题,在因子选择完备性与模型建立高效性方面还有待于进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] SALAZAR F, TOLEDO M Á, OÑATE E, et al. Interpretation of dam deformation and leakage with boosted regression trees[J]. *Engineering Structures*, 2016, 119: 230-251.
- [2] ISIDORI D, CONCETTONI E, CRISTALLI C, et al. Proof of concept of the structural health monitoring of framed structures by a novel combined experimental and theoretical approach[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2016, 23(5): 802-824.
- [3] SIGTRYGGSDOTTIR F G, SNÆBJÖRNSSON J T, GRANDE L, et al. Interrelations in multi-source geohazard monitoring for safety management of infrastructure systems[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(3): 327-355.
- [4] 徐镇凯, 温勇兵, 魏博文, 等. 基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价[J]. *水利水运工程学报*, 2017(1): 10-17. (XU Zhenkai, WEN Yongbing, WEI Bowen, et al. Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(1): 10-17. (in Chinese))
- [5] 葛浩, 黄耀坤, 朱鹏宇. 高桩码头在船舶撞击力作用下的应变监测研究[J]. *水运工程*, 2015(1): 63-69. (GE Hao, HUANG Yaokun, ZHU Pengyu. Strain monitoring of pile-supported wharf under action of ship collision[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2015(1): 63-69. (in Chinese))
- [6] 范庆来, 刘远财. 库水位涨落与降雨联合作用下绿草码头滑坡渗流场分布规律及稳定性分析[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(1): 115-118. (FAN Qinglai, LIU Yuancai. Seepage field distribution and stability analysis of Lvcao wharf landslide under effects of water level fluctuation and rainfall[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 115-118. (in Chinese))
- [7] 张崇. 基于组态软件的开敞式码头系泊监控系统研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015. (ZHANG Chong. Study on the open sea terminal mooring system based on configuration software[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [8] 李亚婷. 斜坡码头施工监测与预警控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (LI Yating. Research on construction monitoring and early warning and control of slope wharf[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

- [9] KHAYAT K H, TAGNIT-HAMOU A, PETROV N. Performance of concrete wharves constructed between 1901 and 1928 at the Port of Montreal[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(2): 226-232.
- [10] KWON S J, NA U J, SANG S P, et al. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(1): 75-83.
- [11] STEWART M G, WANG X M, NGUYEN, M N. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(4): 1326-1337.
- [12] 陈凤山. 海洋环境下钢筋混凝土结构 CFRP 加固研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (CHEN Fengshan. Research on coastal concrete structures strengthened with CFRP [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [13] 吴锋. 港口工程高桩码头结构性能退化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. (WU Feng. Study on performance degradation of high-piled wharf structure in port[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [14] 韩理安, 席与耀. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (HAN Li'an, XI Yuyao. Port hydraulic structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [15] 王炳煌. 高桩码头工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (WANG Binghuang. High-piled wharf engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [16] 陈达, 沈才华. 高桩码头结构分段设计理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (CHEN Da, SHEN Caihua. Subsection design theory & its applications of high-piled wharf structures[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [17] 肖浩波, 谷艳昌. 混凝土坝安全监控最小二乘支持向量机模型[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 34-37. (XIAO Haobo, GU Yanchang. Monitoring model for concrete dam safety using least square support vector machine[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(5): 34-37. (in Chinese))
- [18] CHEN Xudong, GU Chongshi, CHEN Haonan. Early warning of dam seepage with cooperation between principal component analysis and least squares wavelet support vector machine[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(2): 500-507.

Study of monitoring model of crack opening displacement for high-pile wharf

CHEN Xudong^{1,2}, LI Junjie¹, HUO Zhongyan³

(1. *Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China*; 3. *Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China*)

Abstract: Safety monitoring is an important measure for the safe operation of water conservancy projects. The monitoring model plays an important role in monitoring data analysis, and is widely used in the safety monitoring of reservoirs and dams. However, its relevant theories and studies are rarely applied in port terminals. Since high-pile wharves are different from reservoirs and dams in working environment and working behavior, it is necessary to develop a monitoring model for high-pile wharves considering their own working characteristics. In this paper, it is proposed that principal effect factors of crack opening displacement of high-pile wharves are the temperature component, wind component, heap load component and aging effect, according to the change law of dependent and independent variables. The expressions of these factors are given. On the basis of it, the statistical model and the least squares support vector machine (LSSVM) model of crack opening displacement are established respectively. The evaluation method for these models is developed. Models are used in the fitting and prediction of data series of crack opening displacement of a high-pile wharf. The effectiveness and reasonableness of the models are verified. The results show that the proposed models with high precision and certain prediction ability can provide scientific principles for data analysis and safety monitoring of high-pile wharves.

Key words: high-pile wharves; crack opening displacement; statistical model; LSSVM model