

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.009

敏感因素劣化对导堤边坡稳定性影响的数值模拟

杜家论¹, 范建军¹, 王颖轶², 黄醒春¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学海洋水下工程科学研究院, 上海 200231)

摘要: 以吴淞导堤工程为案例, 基于超声波现场检测及室内强度试验、探地雷达现场检测试验、潜水员水下探摸及测量结果, 分别评价导堤在长期运营过程中护面混凝土结构、内部堆石结构、导堤两侧坡度变化以及两侧冲淤演变等敏感因素的劣化程度, 并采用有限元数值模拟方法研究导堤护面混凝土结构等4种敏感因素劣化对导堤边坡变形及稳定性的影响。结果表明: 导堤护面混凝土及内部堆石结构弹性模量与导堤水平位移最大值均呈负指数关系; 导堤安全系数随着坡度的增大而呈现出近似线性减小; 导堤位移的最大值随着导堤左侧淤积和右侧冲淤高程的增加呈线性增大, 在实际加固维护方案设计中应该引起重视。

关键词: 导堤; 边坡稳定性评价; 参数劣化; 数值模拟; 吴淞导堤工程

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)06-0525-06

Numerical simulation of effect of sensitivity factor degradation on stability of jetty slope

DU Jialun¹, FAN Jianjun¹, WANG Yingyi², HUANG Xingchun¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Underwater Technology Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200231, China)

Abstract: A case study of the Wusong Jetty during long-term service is presented. Based on the results of field ultrasonic testing, laboratory strength testing, ground-penetrating radar testing, and underwater detection and measurement by divers, the degrees of degradation of sensitivity factors, including the concrete structure for the protective face, the internal rockfill structure, and the variation of the slope and evolution of erosion/deposition on both sides of the jetty, were evaluated. The effect of degradation of the four sensitivity factors on the deformation and stability of the jetty slope was investigated using the finite element numerical simulation method. The results show that the elastic moduli of the concrete structure for the protective face and internal rockfill structure exhibit negative exponential relationships with the maximum horizontal displacement of the jetty; the safety factor of the jetty decreases linearly with the increase of the slope, approximatively; and the maximum displacement of the jetty increases linearly with the increase of elevation induced by deposition on the left side and erosion/deposition on the right side of the jetty. The phenomena should be given more attention in design of schemes for reinforcement and maintenance in practice.

Key words: jetty; slope; stability evaluation; degradation of parameter; numerical simulation; Wusong Jetty Project

防浪建筑物的损坏是海岸工程界历来关注的课题^[1]。作为防浪建筑物之一的导堤在波浪、水流、泥沙等动力因素及环境水腐蚀的长期作用下, 其护面结构、内部结构质量和地基土等会出现一定的劣化, 导堤边坡存在整体失稳的风险。

海岸工程边坡稳定性分析理论是基于常规边坡稳定性方法发展而来, 常规边坡稳定性分析方法中应用最为广泛的方法则是数值分析方法, Matsui 等^[2]、Griffiths 等^[3]、连锁营等^[4]和赵尚毅等^[5]将强度折减有限

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 杜家论(1978—), 男, 广西邕宁人, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: djlm@hotmail.com

通信作者: 王颖轶, 副研究员。E-mail: wangyingyi@sjtu.edu.cn

元法应用于边坡的稳定分析中。影响常规边坡稳定性的因素复杂多变,李雪平等^[6]研究指出斜坡稳定性敏感因素程度依次为:岩土类型、高程、地下水位埋深、距有影响构造线距离、坡度或坡形。在有关导堤等防浪建筑物的边坡稳定性研究中试验研究居多。金辉等^[7]研究了射阳港进港航道工程潮流特征和导堤堤头冲刷问题。柳玉良等^[8]针对波浪周期对斜坡堤护面块体稳定性的影响进行模型试验研究。陈国平等^[9]研究了混凝土人工护面块体在模型试验中的强度模拟问题。闫澍旺等^[10]针对长江口导堤地基软黏土的强度软化问题,通过动三轴试验模拟波浪荷载作用下地基变形及稳定性问题。一些学者也开展了数值模拟研究,例如,肖忠等^[11]针对天津港防波堤建设工程,建立简型基础防波堤稳定性分析的三维弹塑性有限元模型,研究其位移及承载特性。目前尚缺导堤边坡护面结构和内部结构劣化对其变形及稳定性影响的研究。

笔者以吴淞导堤工程为案例,开展超声波现场检测及室内强度试验、探地雷达现场检测试验、潜水员水下探摸及测量,以此分别评价导堤在长期运营过程中护面混凝土结构、内部堆石结构、导堤两侧坡度变化以及两侧冲淤演变等敏感因素的劣化程度,并采用有限元数值模拟的方法研究导堤护面混凝土结构等4种敏感因素劣化对导堤边坡变形及稳定性的影响。

1 工程案例及结构劣化评价

1.1 工程概况

吴淞导堤位于黄浦江出口处的左岸,东临黄浦江深泓,北濒长江口宝山支水道,西靠炮台湾浅滩,南接黄浦江西岸。吴淞导堤始建于1907年,建成于1911年,是一个混凝土预制块护面层的弧形抛石坝。导堤初建时全长1395 m,曲率半径2400 m,距起点411 m处筑海堤与长江南岸相接,填土成陆,984 m导堤伸入江中;堤顶高程3.0~3.5 m,堤顶宽5.0 m,护坡坡度1:3,堤脚宽40 m,如图1所示。

1.2 结构劣化评价

目前导堤已安全运行了100余年,超过了设计使用年限。据统计,1949年以来,导堤共维修4次,目前仍为上海运营服务。为了评价导堤长期运营期间结构的劣化程度,对导堤护面顶部和两侧的混凝土结构开展了超声波现场检测和室内强度试验,采用探地雷达及高密度面波法对导堤内部堆石结构开展了现场检测试验,对导堤两侧坡度及冲淤高程进行潜水员水下探摸及测量,测线布置如图1所示。主要试验结果如下:

a. 图2为超声波现场检测800个测点获得的护面混凝土结构的强度概率分布,可见混凝土强度近似服从正态分布,护面强度概率峰值区间位于8~10 MPa之间,约为设计强度的30%,分布密度分别为67%。图3为护面混凝土结构的弹性模量衰减状态,导堤试样变形模量均小于混凝土弹性模量设计值的80%,21%试样的变形模量大于设计标准值的50%,多数试样变形模量小于弹性模量设计值的25%。护面混凝土强度分布区域及变形模量均远小于设计强度,因此护面混凝土结构质量劣化较严重。

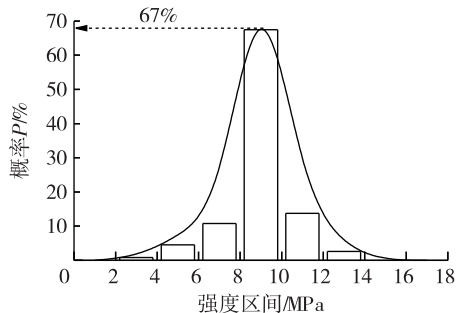


图2 护面混凝土结构强度概率分布

Fig. 2 Probability distribution of strength of concrete structure for protective face

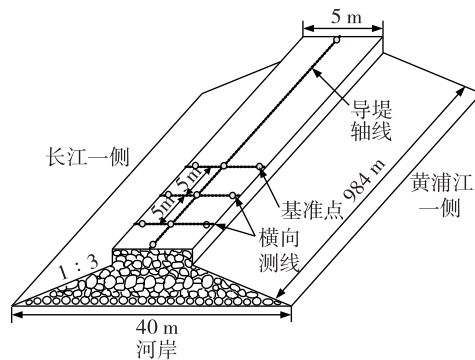


图1 吴淞导堤概况

Fig. 1 Overview of Wusong Jetty

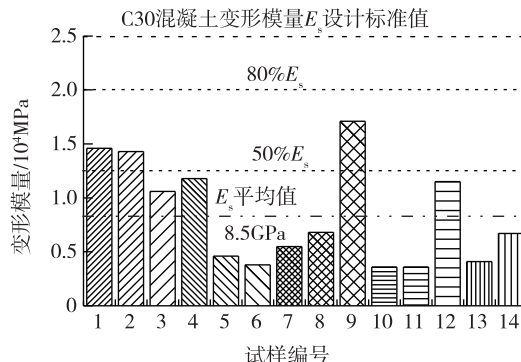


图3 护面混凝土结构弹性模量衰减状态

Fig. 3 Attenuation state of elastic modulus of concrete structure for protective face

b. 图4为探地雷达及高密度面波现场检测试验得到的导堤内部堆石结构(试验范围0~954 m,图中仅以370~410 m为例)。可以看出,深度0~3 m范围内的堆石体纵向速度分布较均匀,稳定性较好;深度3~6 m范围内的堆石与混凝土块间存在较大孔隙,波速有所下降,纵向存在较明显的界面,堆石与混凝土块体的界面起伏不大,稳定性较好;深度6~11 m范围内的混凝土块体间填充大量淤积土,波速明显下降,与下部淤积土界面起伏较大,370~510 m和670~824 m区间段平均速度下降更加显著,淤积土填充率高达70%以上。由此可见局部区域的混凝土堆砌状态受到破坏,存在局部失稳的可能性。

c. 图5为靠近黄浦江一侧导堤坡度的测量结果,坡度比在1.93(27.4°)至3.74(15.0°)之间变化,平均值为2.71(20.5°)。坡度比设计值为3(18.4°),46个断面检测中,39个断面坡度大于18.4°。靠近长江一侧导堤受冲淤的影响,坡度变化可忽略。因此,主要考虑靠近黄浦江一侧导堤坡度变化对导堤稳定性的影响。

d. 图6为长江侧导堤淤积高程及厚度的检测结果,长江侧淤积高程-1.95~1.2 m,淤积厚度在2.12~6.87 m(平均值为5.9 m)。检测结果还指出黄浦江侧水下有不同程度的冲刷,靠近坡脚处6个检测断面有严重冲刷,最大冲刷深度达5.87 m;由于长江侧淤积和黄浦江侧冲积演变导致导堤两侧形成高程差,最大高程达到15 m左右。由此导致导堤抗侧移性能弱化,影响导堤整体稳定性。

以上试验结果表明,由于导堤结构各因素的劣化,需对其变形和稳定性进行评估以便合理加固及修复。

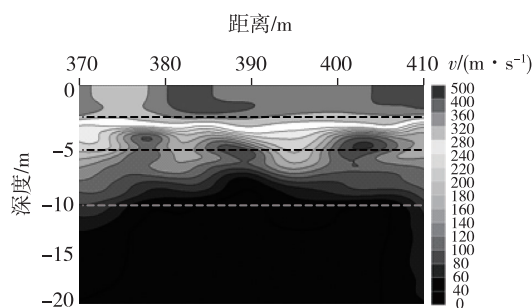


图4 间导堤内部剪切波速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of shear waves inside jetty

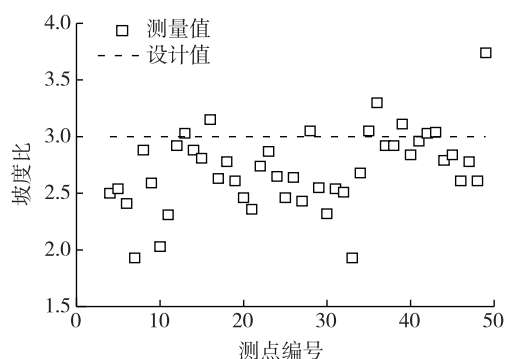


图5 坡度的变化

Fig. 5 Slope changes

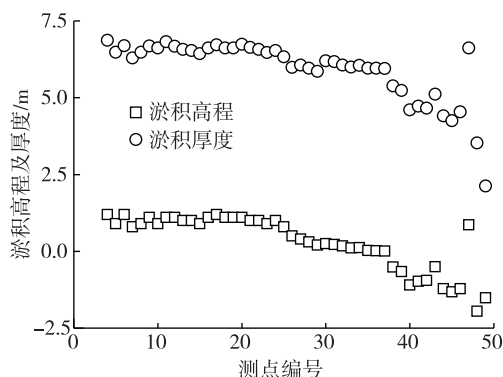


图6 导堤两侧冲淤高程演化

Fig. 6 Evolution of elevation induced by erosion/deposition on two sides of jetty

2 稳定性分析数值模型

2.1 数值分析模型

图7为导堤各区间危险截面的FEM模型,基准模型的导堤右侧坡度为1:2.50,顶部高程为2.26 m,左侧淤积高程为1.09 m,右侧导堤坡脚高程为-14.9 m,危险截面共取13个。模型几何尺寸:水平方向上各延伸一倍的导堤底部宽度作为模型两侧的几何边界,深度方向上取导堤底部以下40 m作为模型下部几何边界。模型边界条件:模型左、右及下部边界均取法向零位移约束,海水作用部分处理为自由面及荷载作用面。模型荷载条件:整体施加静态体积力,在右侧坡面施加海水水位高度的等效静水压力以及等效最危险波浪力。单元类型:桩为梁单元,其他为实体单元。

2.2 计算参数

a. 土性参数。考虑往复波浪荷载导致土体参数的劣化,土体变形模量、泊松比等变形参数取原状土变形参数的80%,土体强度参数(采用Mohr-Coulomb准则)取原状土强度参数的34%~85%。土体密度与导堤原址地基土相同。

b. 混凝土结构参数。坡顶和坡面混凝土变形模量、泊松比等变形参数取试验数据的平均值。考虑混凝土内部裂隙发育及内部损伤状态,强度参数(采用 Mohr-Coulomb 准则)取试验数据的 80%。密度按 C25 混凝土的密度计算。混凝土结构弹性模量为 $E = 28 \text{ GPa}$ 。

c. 导堤内部堆石结构参数。变形参数(满足邓肯 E-B 本构模型)按经验取值,其范围见表 1。考虑堆石内部不连续面发育及内部损伤状态,强度参数(采用 Mohr-Coulomb 准则)取试验数据的 $1/20 \sim 1/12$ 。堆石密度按同种岩石密度计算。堆石结构弹性模量为 $E_r = 30.4 \text{ GPa}$ 。

d. 海水参数。主要考虑海水对模型的静力荷载及波浪力荷载作用。其中,静力荷载部分按各向等压直接作用于模型,波浪力荷载由式(1)计算^[12]。波高取 6 m ,波长取 48 m 。

$$p_m = K_p K_1 K_2 K_3 \rho_w g h_s \tag{1}$$

其中

$$K_1 = 0.85 + 4.8 \frac{h_s}{L_m} + m \left(0.028 - 1.15 \frac{h_s}{L_m} \right)$$

式中: p_m ——最大浪压力强度; K_p ——频率换算系数,采用 1.35; K_1 、 K_2 ——系数; K_3 ——浪压力相对强度系数; ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度; h_s ——有效波高,约相当于累积频率为 14% 的波高。

2.3 敏感因素劣化参数

护面混凝土结构劣化参数的计算,弹性模量取 $5E$ 、 E 、 $0.5E$ 、 $0.2E$ 、 $0.1E$ 、 $0.001E$ 。导堤内部堆石结构劣化参数的计算,弹性模量取 $10E_r$ 、 $2E_r$ 、 E_r 、 $0.8E_r$ 、 $0.5E_r$ 、 $0.2E_r$ 、 $0.1E_r$ 。坡度变化,取 $1:3.00(18.43^\circ)$ 、 $1:2.80(19.65^\circ)$ 、 $1:2.50(21.80^\circ)$ 、 $1:2.30(23.50^\circ)$ 、 $1:2.10(25.46^\circ)$ 、 $1:1.90(27.76^\circ)$ 。导堤两侧冲淤演变,左侧(长江侧)淤积土高程分别取 1.09 m 、 1.29 m 、 1.49 m 、 1.69 m 、 2.09 m ,右侧(黄浦江侧)河床高程取 -14.90 m 以及左侧(长江侧)淤积土高程取 2.09 m ,右侧(黄浦江侧)河床高程分别取 -15.40 m 、 -15.90 m 、 -16.40 m 、 -16.90 m 。

3 结果及分析

3.1 护面结构劣化的影响

图 8 为护面混凝土结构劣化对导堤位移的影响。由图 8 可得到护面混凝土结构弹性模量与导堤水平位移最大值的相关关系:

$$S_x = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{R_E - x_0}{\Delta x}}} \tag{2}$$

式中: S_x ——导堤水平位移的最大值; R_E ——护面混凝土结构劣化系数,即与混凝土弹性模量标准值 E 的比值; A_1 、 A_2 、 x_0 、 Δx ——相关系数,见图 8。

由式(2)及图 8 可见,当护面混凝土结构劣化弹性模量降低 20% 以后,导堤最大水平位移呈指数快速增大

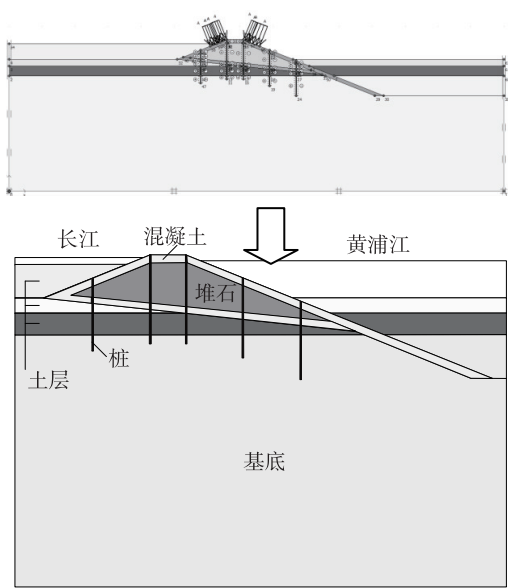


图 7 导堤边坡的 FEM 模型
Fig. 7 FEM model of jetty slope

表 1 导堤内部堆石变形参数取值

Table 1 Deformation parameter values for internal rockfill of jetty

参数值	K	R_f	n
密集范围值	300~1000	0.83~0.92	0.27~0.43
最小值	200	0.60	0.12
最大值	2500	1.05	0.70

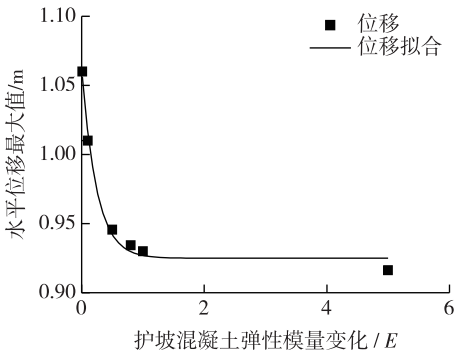


图 8 护面结构劣化对导堤位移的影响

Fig. 8 Effect of degradation of concrete structure for protective face on displacement of jetty

趋势,弹性模量降低 50%以后导堤水平位移急剧增大并向失稳方向快速增长。

由图 3 所示的室内试验结果表明,多数试样变形模量小于混凝土弹性模量设计值的 25%,与图 8 所示护面混凝土弹性模量与水平位移最大值的相关关系比较,可以看出导堤处于位移非线性突变的不稳定状态。

3.2 堆石结构劣化的影响

图 9 为堆石结构劣化对导堤位移的影响。由图 9 可得到堆石结构弹性模量与导堤水平位移最大值的相关关系,与式(2)相同,式中系数见图 9。由图 9 可见,堆石结构劣化堆石弹性模量降低 50%后,导堤水平位移急剧增大,可能发生失稳。

3.3 坡度变化的影响

图 10 为坡度对导堤位移及稳定性的影响。由图 10(a)可见,水平位移最大值随着坡度的增加而线性增加,将数据进行线性拟合,得到水平位移与角度的相关关系,该相关关系可对相似条件下导堤截面进行水平位移的预测。对于竖向位移,其随着坡度的变化并不显著,可见导堤的竖向位移对坡度的敏感性不高。同时,采用毕肖普条分法对导堤整体抗滑稳定性进行分析计算,结果如图 10(b)所示。可以看出,安全系数随着坡度的增大呈现近似线性的减小,导堤的滑移风险增大。当坡度大于 21° 时,安全系数小于 1.17;当坡度大于 27° 时,安全系数小于 1。前述导堤测量结果,部分断面坡度大于 27° ,因此存在失稳的风险。

3.4 导堤两侧高程冲淤演变的影响

图 11 为导堤两侧冲淤演变对导堤位移的影响。由图 11(a)可见,导堤水平位移的最大值随着导堤左侧

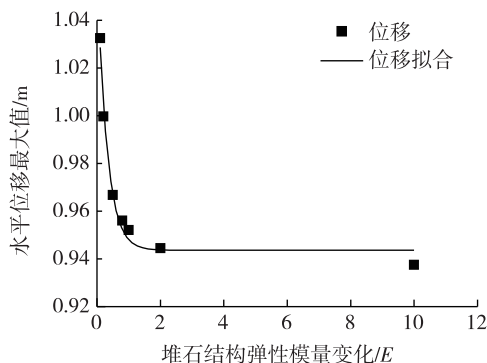


图 9 堆石结构劣化对导堤位移的影响

Fig. 9 Effect of degradation of rockfill structure on displacement of jetty

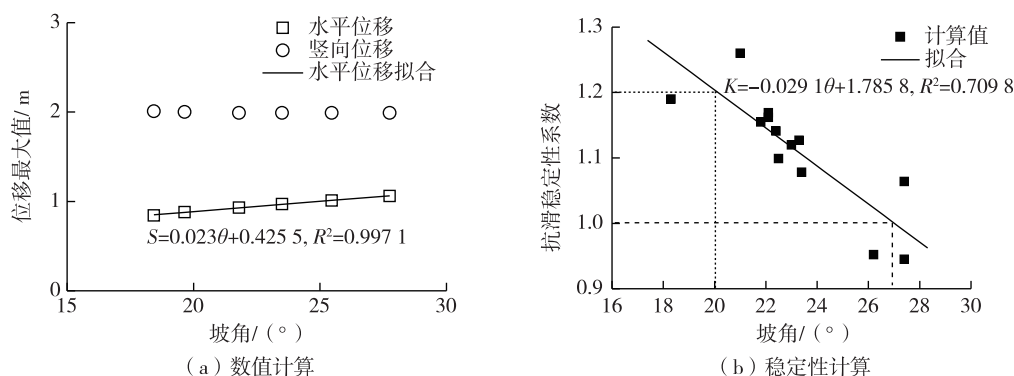


图 10 坡度对导堤位移及稳定性的影响

Fig. 10 Effect of slope on displacement and stability of jetty

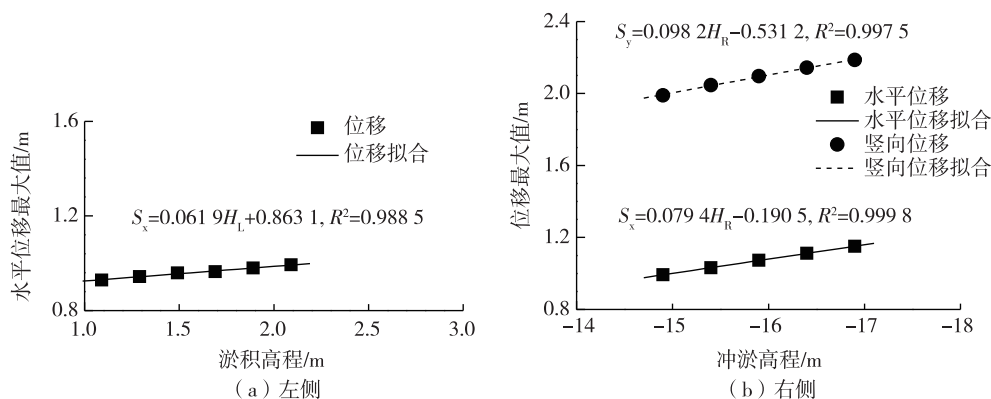


图 11 导堤两侧冲淤演变对导堤位移的影响

Fig. 11 Effect of evolution of erosion/deposition on both sides on displacement of jetty

淤积高程增加呈线性增大。由图 11(b)可见,导堤右侧冲淤与左侧淤积对导堤位移影响相似,导堤水平及竖向位移的最大值随着右侧冲淤高程增加呈线性增大。由图 11 可见,相对左侧淤积高程差变化对导堤水平位移的影响,右侧冲淤高程差变化的影响更加显著,即右侧河床高程差的变化对水平位移的敏感度更高,导堤有向黄浦江一侧滑移或倾覆的隐患,因此,在实际加固维护方案中可重点针对导堤右侧河床高程进行修复。

4 结 论

a. 以吴淞导堤工程为案例,采用超声波现场检测等方法评价了导堤护面混凝土结构、内部堆石结构、导堤两侧坡度变化以及冲淤演变等敏感因素的劣化程度。

b. 导堤边坡 FEM 数值模拟结果表明,护面混凝土劣化弹性模量降低 20%以后,导堤最大水平位移呈指数快速增大趋势,弹性模量降低 50%以后导堤水平位移急剧增大并向失稳方向快速增长,与试验结果对比,判定导堤处于位移非线性突变的不稳定状态。

c. 堆石结构劣化堆石弹性模型降低 50%后,导堤水平位移急剧增大,可能发生失稳。

d. 水平位移最大值随着坡度的增加而线性增加,竖直位移随着坡度的变化不显著;导堤整体抗滑稳定性分析计算结果表明,安全系数随着坡度的增大呈现近似线性的减小,坡度大于 27°时,安全系数小于 1,导堤部分断面存在失稳的风险。

e. 导堤位移的最大值随着导堤左侧淤积和右侧冲淤高程的增加呈线性增大;相对左侧淤积高程差变化对导堤水平位移的影响,右侧冲淤高程差变化的影响更加显著,在实际加固维护方案中可重点针对导堤右侧河床高程进行修复。

参考文献:

- [1] 李炎保, 蒋学炼, 刘任. 防波堤损坏特点与其成因的关系[J]. 海洋工程, 2006, 24(2): 130-138. (LI Yanbao, JIANG Xuelian, LIU Ren. Discussion on the relationship between characteristics and the reasons of breakwater failures[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(2): 130-138. (in Chinese))
- [2] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 59-70.
- [3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [4] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-410. (LIAN Zhenying, HAN Guocheng, KONG Xianjing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 407-410. (in Chinese))
- [5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346. (in Chinese))
- [6] 李雪平, 唐辉明. 似然比检验在区域斜坡稳定性敏感因素分析中的应用[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 44-48. (LI Xueping, TANG Huiming. Application on likelihood ratio test used for sensitivity factors of area slope stability[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(5): 44-48. (in Chinese))
- [7] 金辉, 李志涛, 章日红, 等. 射阳港进港航道工程导堤堤头冲刷试验研究[J]. 水科学与工程技术, 2011(4): 81-84. (JIN Hui, LI Zhitao, ZHANG Rihong, et al. Research of enter the port sea-route project reflected port head guide dike scouring test [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2011(4): 81-84. (in Chinese))
- [8] 柳玉良, 王海峰, 卢燕. 波浪周期对防波堤护面块体稳定性影响的试验分析[J]. 海洋工程, 2012, 31(3): 9-14. (LIU Yuliang, WANG Haifeng, LU Yan. Experimental analysis of the influence of wave period on stability of breakwater armor block [J]. The Ocean Engineering, 2012, 31(3): 9-14. (in Chinese))
- [9] 陈国平, 胡智农, 王红. 抛石防波堤人工护面块体强度模拟研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(1): 28-36. (Chen Guoping, HU Zhinong, Wang Hong. The simulation of the strength of model armour unit on rubble-mound breakwaters [J]. The Ocean Engineering, 1995, 13(1): 28-36. (in Chinese))
- [10] 闫澍旺, 侯晋芳, 刘润, 等. 长江口导堤在波浪荷载作用下的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 3245-3249. (YAN Shuwang, HOU Jinfang, LIU Run, et al. Stability analysis of guide dike in yangtze estuary under action of wave load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1): 3245-3249. (in Chinese))
- [11] 肖忠, 王元战, 及春宁. 筒型基础防波堤稳定性有限元数值分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 119-125. (XIAO Zhong, WANG Yuanzhan, JI Chunling, et al. Finite element analysis of the stability of bucket foundation breakwater[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 119-125. (in Chinese))
- [12] 电力工业部中南勘测设计研究院. DL 5077—1997 水工建筑物荷载设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.