

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.007

丁勇,姚庆雄,关云飞,等.基于侧向土压力确定冲淤深度的可行性研究[J].水利水运工程学报,2015(1):47-52.(DING Yong, YAO Qing-xiong, GUAN Yun-fei, et al. Feasibility study of scour depth determination based on lateral soil pressure measurement[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1):47-52.)

基于侧向土压力确定冲淤深度的可行性研究

丁勇^{1,2}, 姚庆雄¹, 关云飞², 张振东³, 颜腾腾¹

(1. 南京理工大学 土木工程系, 江苏 南京 210094; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 淮海工学院 土木工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 由于冲刷和淤积引起的结构物和航运安全问题,水下泥面的冲淤监测已经成为结构健康监测中的一项重要任务。对基于侧向土压力确定水下冲淤深度的方法进行可行性研究。该方法利用以光纤光栅作为传感元件的传感器,正面承受水土,背面承受水压力,通过测量正面和背面的压力差可以精确测量侧向土压力;由于水体中水平方向只有水压力,水体中水平方向由侧向土压力和孔隙水压力组成,因此通过若干只不同深度位置的传感探头,可计算出冲淤深度。该方法能实现实时反馈水工结构的冲淤情况,为水工结构安全运行提供可靠的数据支持。

关键词: 冲淤深度; 侧向土压力; 传感器; 光纤光栅

中图分类号: TP212.4⁺4; U442.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)01-0047-06

在港口、水利、桥梁和海洋工程等水工结构中,水流冲刷对结构造成破坏的现象相当普遍。结构物地基往往由于水流的冲蚀而强度降低,给结构物安全带来隐患,而且因为水流的冲刷都在水下,一般很难及时发现。另外,结构物因冲刷而产生的破坏具有突然性,往往导致诸如垮塌等恶性事故,危及广大人民群众的生命和财产安全^[1-5]。

目前我国建有各类堤防 25 万 km,公路桥梁达 65.81 万座。我国堤防一般傍河而建,堤线选择受到河势条件制约,堤岸冲刷和淤积现象十分普遍,如长江中下游的堤岸冲刷、北江大堤险段的堤脚淘刷等^[6]。而桥墩通常受到水流阻碍作用,冲蚀桥墩附近地基,使桥梁处于不安全的状态^[7]。据不完全统计,近 5 年我国桥梁垮塌事故中,有 20.8% 是因为桥基冲刷,死伤 100 多人。我国经常受到夏季洪涝的影响,由于近年全球气候变暖,极端天气更加频繁,暴雨、洪水、泥石流对堤岸、桥基冲刷危害更加突出。

现有传统的冲淤监测方法主要有人工深度尺、声纳、雷达和时域反射计(TDR)等,存在易离线、精度低、稳定性差、成本高和传感元件耐久性差等缺点,在实际工程应用中有很大的局限性。而目前基于光纤光栅传感技术的冲淤监测手段,使用可靠性高,耐久性好。例如,林咏彬等开发的基于光纤光栅冲刷传感器^[8]、刘鲲等开发的高耐久性光纤光栅冲刷传感器^[9]、吴智深等开发的长标距光纤光栅冲刷传感器,均能实现准分布式远程监测,相较于传统的监测手段已有很大的进步,具有很好的借鉴意义。但由于传感器设计不成熟,监测精度不高,并未能达到水下泥面冲淤状态实时监测的理想效果。

冲刷和淤积导致的结构物和航运安全问题,日益引起人们的重视,水下泥面的冲淤监测已经成为结构健康监测中的一项重要任务。鉴于此,本文旨在提出以侧向土压力测量确定水下冲淤深度的方法,开发出一种光纤光栅冲淤深度的传感器,以实时掌握水下冲刷和淤积的发展过程,实现智能监测的目的。

收稿日期: 2014-07-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30920130112008); 海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201005006)

作者简介: 丁勇(1977-),男,江苏海安人,副教授,主要从事结构健康监测方面的研究。E-mail: njustding@163.com

1 传感器设计

1.1 光纤光栅传感技术简介

当光纤光栅受到外界应变或温度变化时,光栅栅格周期会发生变化,同时光弹效应会导致光栅有效折射率变化,从而改变光栅中心波长,通过监测反射光谱中光栅中心波长的变化可得到外界应变或温度的变化^[10]。

根据模耦合理论,光纤光栅的中心波长为: $\lambda_B = 2n\Lambda$ (1)

式中: n 为光纤光栅的折射率; Λ 为光纤光栅的栅格周期。

由于光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda_B$ 与外界应变 ε 及温度变化 ΔT 成正比,当外界影响导致光纤光栅的折射率或者周期发生相应的改变,会使光纤光栅反射的波长发生漂移:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

式中: K_ε 为光纤光栅轴向应变与中心波长变化关系的灵敏度系数; K_T 为光纤光栅与温度变化关系的灵敏度系数^[11]。

当外界压力发生变化时,传感器中的光纤光栅发生变形,导致光纤光栅中心波长的变化。文中以此作为传感器设计的基础。

1.2 传感器设计理论依据

如图1所示,将水下泥面视作水体和土体(含孔隙水)的分界面,水体中水平方向压力只有水压力,土体中水平方向压力由侧向土压力和孔隙水压力组成,因此水体与土体的重要区别在于水平方向上后者比前者多出侧向土压力,具体表现为侧向土压力在泥面位置趋近于零,并与土体深度正相关。因此,只要测量得到水下某深度位置的侧向土压力,就可以判断该深度位置是在水体或土体中,若能测量得到土体中若干个不同深度位置的侧向土压力,就可以拟合计算出侧向土压力为零的深度位置,即为冲淤深度。

1.3 传感器结构

根据以上基本原理,采用光纤光栅传感技术,研发一种高精度冲淤深度传感器(见图2)。该传感器由固定架和测压管组成:固定架起到保护和固定测压管的作用;测压管由管身和一系列按深度间隔排布的光纤光栅传感探头组成,探头为双面构造,正面承受管外水土压力,背面承受管内水压力(管内外水压力保持连通),通过测量正面和背面的压力差可以精确测量管外侧向土压力,再对不同深度的侧向土压力进行拟合计算,最终得到泥面深度。

测压管作为固定土压力探头的主体结构,同时承担了隔绝管外土体、连通管内外静水压力的作用(见图3)。测压管的1个侧面为透水板,连通管内外静水压力,其他3个侧面用于固定传感探头,探头的数量和位置可根据实际需要灵活配置。

传感探头中圆形的膜片将探头分成两面,正面朝向管外,承受管外水土压力,背面朝向管内,承受管内静水压力,膜片中央沿径向贴有光纤光栅(见图4)。根据弹性力学原理,在均布压力 p 作用下,其径向应变为^[12]:

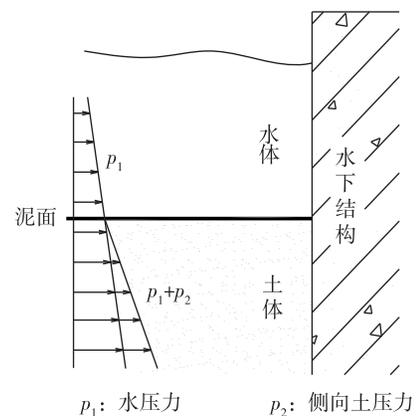


图1 测量原理

Fig. 1 Basic principle of measuring

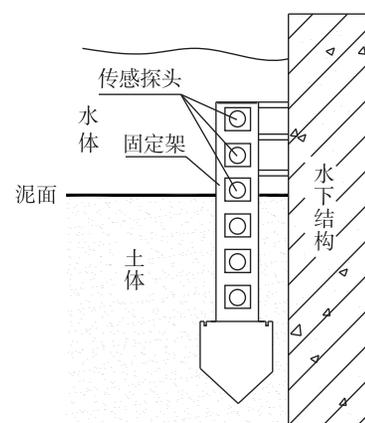


图2 冲淤传感器结构

Fig. 2 Sensor for monitoring scour and siltation

$$\varepsilon_r = \frac{3p}{8h^2E}(1 - \mu^2)R^2 \quad (3)$$

式中: p 为均布压力(Pa); h 为圆形膜片的厚度(m); R 为圆形膜片的半径(m); μ 为圆形膜片的泊松比; E 为圆形膜片的弹性模量(N/m²)。

若不考虑温度变化,将式(3)代入式(2)中,即:

$$\Delta\lambda_B = \frac{3p}{8h^2E}(1 - \mu^2)R^2K_e \quad (4)$$

令:

$$K_p = \frac{3}{8h^2E}(1 - \mu^2)R^2K_e$$

即

$$\Delta\lambda_B = K_p p \quad (5)$$

从式(5)可见,传感探头正面和背面的静水压力相互抵消后,探头读数只与管外侧向土压力相关。

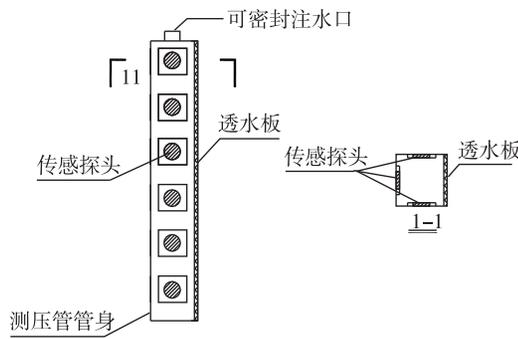


图3 测压管结构
Fig. 3 Pipe for measuring pressure

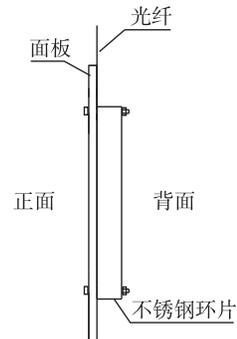


图4 传感探头结构
Fig. 4 Structure of sensing probe

2 传感探头标定

由于冲淤传感器是通过测量传感探头正反两面的压力差值来确定泥面深度,需要对传感探头的性能进行测试。

2.1 水标法标定

采用水标法,对探头进行压力标定试验(见图5)。制作一个底部有孔的水箱,将传感探头水平安装在水箱底部的孔洞上,正面朝向承受水箱中水体压力;水箱被安装在支座上,底部悬空。

试验过程中,逐级向水箱中注水,记录水位高度(即水压力)和光纤光栅中心波长值,以水位高度为 X 轴,以光纤光栅中心波长为 Y 轴,建立探头所受压力与光纤光栅中心波长之间的对应关系。

2013年7月14日的标定试验数据见图6(a)。标定试验数据的线性拟合公式为:

$$y = 0.013x + 1543.966 \quad (6)$$

由于第1次标定存在传感探头材料内部原有内力的重分布,故试验数据线性拟合略有一些波动。

2013年7月15日的标定试验数据见图6(b)。标定试验数据的线性拟合公式为:

$$y = 0.013x + 1544.003 \quad (7)$$

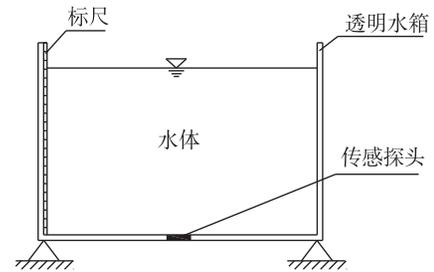


图5 探头水标法试验装置
Fig. 5 Test device for calibrating probe pressure by water

此次标定试验数据线性拟合十分稳定。

两次标定试验数据线性拟合后斜率吻合,表明此传感探头对压力的敏感度保持一致。

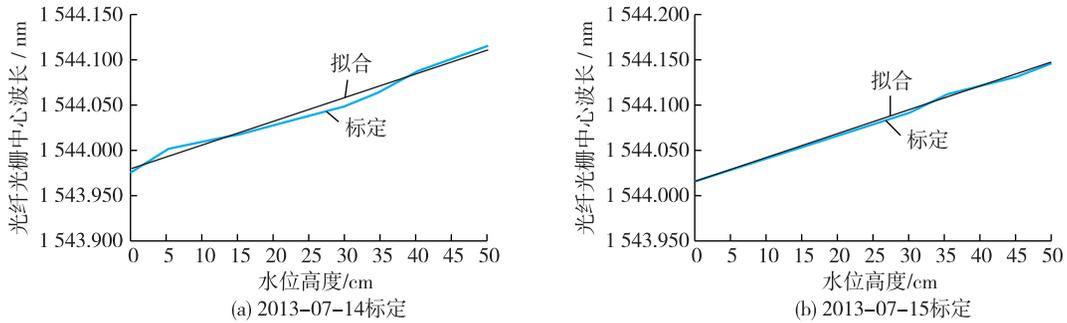


图6 传感探头水标法试验数据

Fig. 6 Data from calibrating test of sensing probe by water

2.2 砂标法标定

为了验证传感探头与砂介质的压力关系,分别用标准砂和粉细砂进行标定,标定装置见图7。同图5所示水箱,在水箱内放入一定厚度的砂,加入水没过砂表面,保持固定水头。在砂表面安放加载板,加载板中心与传感探头中心在同一轴线,通过在加载板上安放砝码施加荷载。

试验过程中,逐级在加载板上增加砝码,记录砝码质量(即砂表面施加荷载)和光纤光栅中心波长值,以砝码质量为 X 轴,以光纤光栅中心波长为 Y 轴,建立砂表面所受压力与光纤光栅中心波长之间的对应关系。

图8为粉细砂标定试验数据。标定试验数据的线性拟合公式为:

$$y = 0.009x + 1543.944 \quad (8)$$

砂标法试验数据线性拟合良好,表明在砂介质环境下,传感探头保持良好的工作性能。

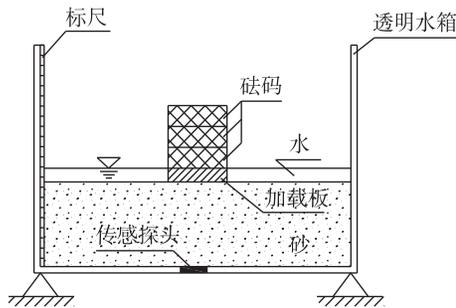


图7 探头砂标法试验装置

Fig. 7 Test device for calibrating probe pressure by sand

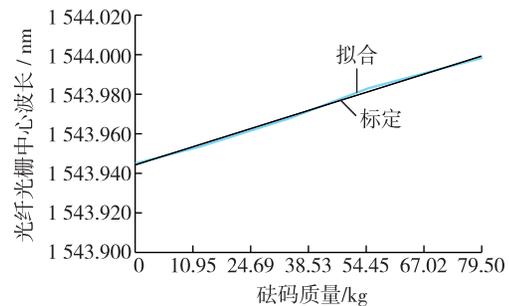


图8 传感探头砂标法试验数据

Fig. 8 Data from calibrating test of sensing probe by sand

3 冲淤深度计算

水体与土体的重要区别在于水体中没有侧向土压力,在传感器上表现为:泥面以上探头读数为零,泥面以下探头读数大于零,并且探头读数与其深度呈正相关。因此,如图9所示,泥面深度可依据下式进行计算:

$$h = h_s - h_c \quad (9)$$

式中: h 为泥面深度; h_s 为探头深度; h_c 为探头相对于泥面的埋置深度,以下简称“探头埋深”。

一般情况下,传感探头布置间距为1 m,那么泥面以下1.5 m范围内,至少有一只埋深不小于0.5 m的探头。因为“探头深度”是在传感器安装时便可精确测出并长期保持不变,所以根据这只探头的埋深就可以

计算得出泥面深度。

基于土体内侧向土压力与深度正相关的特性,探头埋深可根据探头所受侧向土压力(已标定探头的读数)来测算。

4 结 语

本文介绍的冲淤深度监测方法,是利用水体与土体在侧向土压力上的差异,区分水体与土体,从而测量得到冲淤深度位置。与传统的监测方法相比,该方法不受水体运动条件的限制以及土体运移的干扰,可在静水和动水环境下工作,因而可以同时监测冲刷和淤积两种情况,监测精度可由传感探头布设间距来控制。

由于该方法运用的传感器是基于光纤光栅传感技术而开发的,因而具有远程实时监测的能力,能构建自动化结构冲淤过程监测系统,实现水工结构的冲淤情况实时反馈,为水工结构安全运行提供可靠的数据支持。

参 考 文 献:

- [1] 曾成杰,陆培东,王艳红,等. 洋口港 LNG 码头栈桥沿程桩基局部冲刷分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 18-23. (ZENG Cheng-jie, LU Pei-dong, WANG Yan-hong, et al. Research on local scour around the trestle piers of LNG station at Yangkou port[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 18-23. (in Chinese))
- [2] 张磊,余小建. 环形桩群加承台基础结构局部冲刷试验研究[J]. 长江科学院院报, 2011,28(11): 10-13,18. (ZHANG Lei, SHE Xiao-jian. Experimental study on local scour around annulus pile-group foundation with cushion caps[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011,28(11): 10-13,18. (in Chinese))
- [3] 梁镨,方理刚,段靛靛. 冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2006,27(9): 1643-1645. (LIANG Kai, FANG Li-gang, DUAN Liang-liang. Finite element analysis of influence of scour on stability of piers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(9): 1643-1645. (in Chinese))
- [4] 吴国雄,黄志才. 沿河路基局部冲刷深度计算研究[J]. 中国公路学报, 2005,18(4): 12-15,53. (WU Guo-xiong, HUANG Zhi-cai. Research on local scour depth calculation of roadbed along river[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005,18(4): 12-15,53. (in Chinese))
- [5] 陈国平,左其华,黄海龙. 波浪作用下大尺径圆柱周围局部冲刷[J]. 海洋工程, 2004,11(1): 46-51,58. (CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long. Local scour around large-scale cylinder under wave action[J]. The Ocean Engineering, 2004,11(1): 46-51,58. (in Chinese))
- [6] 周银军,刘焕芳,何春光,等. 透水丁坝局部冲淤规律试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 57-60. (ZHOU Yin-jun, LIU Huan-fang, HE Chun-guang, et al. Experimental study on local scour and silting around permeable spur[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(1): 57-60. (in Chinese))
- [7] LEE S O, STURM T W. Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,135(10): 793-802.
- [8] LIN Yung-bin, LAI Jihn-sung, CHANG Kuo-chun, et al. Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2006,15(6): 1950-1959.
- [9] ZHOU Zhi, HUANG Ming-hua, HUANG Li-qing, et al. An optical fiber Bragg grating sensing system for scour monitoring[J]. Advances in Structural Engineering, 2011,14(1): 67-78.
- [10] 潘洪亮,何俊,杨衍. 监测桩基冲刷状态的新型光纤 Bragg 光栅传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2010(7): 10-12,15. (PAN Hong-liang, HE Jun, YANG Kan. New method on scouring sensor based on FBG[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(7): 10-12,15. (in Chinese))
- [11] 马磊磊. 基于光纤光栅传感的水工混凝土结构健康监控系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012. (MA Lei-lei. A study of hydraulic concrete structures safety monitoring based on optical fiber sensor[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012. (in Chinese))

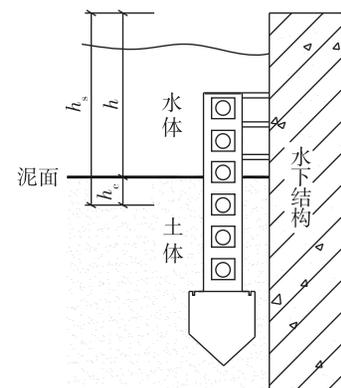


图9 冲淤深度计算

Fig. 9 Calculating changes in scour and siltation depth

Chinese))

- [12] 德贝林. 测量系统应用与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (DE Bei-lin. Application and design of measurement system[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese))

Feasibility study of scour depth determination based on lateral soil pressure measurement

DING Yong^{1,2}, YAO Qing-xiong¹, GUAN Yun-fei², ZHANG Zhen-dong³, YAN Teng-teng¹

(1. *Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*
2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;* 3. *School of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China*)

Abstract: In view of safety aspects of hydraulic structures and waterways caused by erosion and siltation, underwater mud silting monitoring has become an important task in structural health monitoring. This paper introduces feasibility study of the scour depth determination based on lateral soil pressure measurement. Sensors which are made of FBG are used as the sensing element, whose front side is under soil pressure, and back side is under the water pressure. It can accurately monitor the lateral soil pressure by measuring the front and back pressure difference. The pressure in the horizontal direction is only water pressure in water, while it consists of lateral earth pressure and pore water pressure in soil. Therefore, it can calculate the scour and siltation depth according to the measured values given by the sensor probes placed at different depths and positions. The method can do feedback of erosion and siltation of the hydraulic structures in time during calculating analysis, and provide reliable data for the safe operation of hydraulic structures.

Key words: change in scour and siltation depth; lateral soil pressure; sensor; fiber Bragg grating