

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.02.008

引用格式:梅世嘉,姜月华,杨海,等.基于WFBG技术的崩岸场地变形和渗流特征研究——以扬中指南村为例[J].华东地质,2024,45(2):228-239.(MEI S J, JIANG Y H, YANG H, et al. Deformation and seepage characteristics of the bank collapse site based on WFBG technology—a case study of Zhinan Village, Yangzhong[J]. East China Geology, 2024, 45(2):228-239.)

基于WFBG技术的崩岸场地变形和渗流特征研究 ——以扬中指南村为例

梅世嘉^{1,2}, 姜月华^{1,2}, 杨海^{1,2}, 周权平^{1,2}, 陈孜^{1,2}, 贾正阳^{1,2},
金阳^{1,2}, 张鸿^{1,2}, 张博³

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京210016;

2.自然资源部流域生态地质过程重点实验室,江苏南京210016;

3.南京大学,江苏南京210023)

摘要:崩岸灾害对长江岸线城镇和重大基础设施安全构成严重威胁,目前常用的监测技术存在参数受限、监测频率低等问题。为了提升崩岸灾害的监测和预警效果,文章引入了基于弱光栅(WFBG)技术的实时监测方法。该方法利用弱光栅串传感器作为测量单元,采用时分/波分混合复用解调技术和换算公式,通过主动施加热源以区分地下水流速的大小,实现了崩岸场地内应变、温度、位移、流速等多个参数的实时监测。在扬中市指南村崩岸场地实验中,WD02孔的监测数据反映20~30 m和62~80 m深度存在两个流速异常区域,流速分别达 2.98×10^{-6} m/s和 3.4×10^{-6} m/s,较上下相邻地层高出近1倍。因此,应密切关注这两个异常区域的地层。实践表明,该技术具有定位准确、数据丰富和实时监测的优势,能够克服极端天气条件下的挑战,可为崩岸灾害的监测预警提供一种先进可靠的手段。

关键词:WFBG;温度;应变;渗流;崩岸;扬中市指南村

中图分类号:P954;P642.2

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2024)02-228-12

崩岸场地是指由于水流冲刷、地震、人为干扰等因素导致的河岸或海岸的不稳定和崩塌区域^[1]。近年来,受上游重大水利工程影响,长江中下游地区长江径流和输沙时空过程发生大幅改变^[2],岸滩和河槽整体上以冲刷为主,岸坡崩岸呈显著上升趋势^[3],对长江岸线城镇安全和重大基础设施规划建设构成严重威胁。

崩岸场地的监测对于防止和减轻崩岸灾害具有重要意义^[4]。目前,常用的监测方法主要是开展汛前、汛后的水沙及地形数据观测,以获取相关崩岸信息(如河岸高度、坡度及坡脚冲刷幅度等)^[5];运用全站仪、电子水准仪、GNSS、单波束测深系统、多

波束测深系统等电子仪器来测量水下和陆上地形^[6-7];基于遥感影像提取河段地形地貌的信息,反映岸线变化过程^[8-10];利用无人机航测技术,获取高分辨率的影像和点云数据,重建崩岸的三维模型,分析崩岸的形态变化和物质损失^[11-13];采用三维激光扫描仪等先进崩岸监测技术,实现对崩岸的高精度、高效率 and 全方位的监测^[7,14]。然而,大多数监测技术存在着布设困难、覆盖范围小、监测参数有限、数据更新慢、精度低、易受恶劣天气影响等缺点,难以满足崩岸场地多参数实时监测的需求^[15]。

弱光栅(weak fiber Bragg grating, WFBG)技术是一种基于光时域和光频域反射原理的分布式

* 收稿日期:2023-05-05 修订日期:2023-11-15 责任编辑:叶海敏

基金项目:国家重点研发计划“岩溶发育特征的快速探测与精细刻画技术和装备研发(编号:2022YFC3705001)”和中国地质调查局“长江经济带暨长三角一体化发展区资源环境承载能力监测评价(编号:DD20221728)”项目联合资助。

第一作者简介:梅世嘉,1993年生,男,工程师,硕士,主要从事水文地质工程地质调查研究工作。Email:meishijia@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介:杨海,1988年生,男,高级工程师,博士,现从事水文地质环境地质领域研究工作。Email:yhasan@163.com。

传感技术,具有布设灵活、覆盖范围大、数据更新快、精度高等优点^[16-17]。该技术利用光纤传感器实时测量目标场地的温度、应变、水位等参数,并通过光纤通信系统实现数据的远程传输和监控^[18],具备较为广阔的应用前景和潜力,例如:在结构监测领域开展了轨道偏心、变形和损伤等异常情况检测^[19],T 型梁加载卸载过程和杭州下沙大桥应变监测^[17],钢管桩竖向抗压静荷载试验^[20]等,均获取了良好的监测效果;利用 LPFG 和 WFBG 辅助 OTDR 监测管道内外壁温差,实现了高达 0.047 mv/ $\mu\epsilon$ 和 0.675 mv/ $^{\circ}\text{C}$ 的应变和温度灵敏度的分布式测量,可以有效地检测管道的泄漏、堵塞和腐蚀等异常情况^[21];在地质灾害防治方面,开展了三峡库区藕塘滑坡地下多元信息的实时监测^[22],衡水市地面沉降的长期自动化监测^[23],并开发火灾、冰雪的监测传感器^[24]等。

目前,该技术在应变和位移方面的研究较为广泛,而在温度和地下水流速方面的研究较少。一些学者提出,借助温度作为示踪剂可以准确测定地下水流速,并进行了一系列实验研究^[25]和现场测试^[26]。但这些研究仍局限于初步拟定定量关系和基础的定性分析,尚未进行高精度的对地下水流速原位实时监测的深入研究。本文基于分布式光纤传感技术,选择扬中市指南村的崩岸场地作为研究对象,采用移动线源模型在多孔介质中的传热理论,并结合详细的地层信息,精确计算出地下水流速的数值,以期完善崩岸监测应变、温度、位移、流速的监测技术体系,提升崩岸灾害的监测和预警效果。

1 WFBG 监测原理

1.1 应变和温度监测

WFBG 是一种监测应变和温度的光纤传感技术,利用光纤中的微弱反射点来测量外界物理量的变化。WFBG 的反射波长会随着应变和温度的变化而发生位移,因而通过测量反射波长的变化,可以得到应变和温度的信息。WFBG 的反射率很低,一般 $<0.1\%$,因此可以在同一根光纤中制作多个 WFBG,形成光栅阵列,实现多点或分布式传感^[20]。

当入射光经过光纤光栅时,满足布拉格反射条件的入射光会被反射回来,透射光几乎不受影响。布拉格反射条件为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,式中: Λ 为折射率调

制周期; λ_B 为中心波长; n_{eff} 为纤芯有效折射率。

应变和温度的变化都与 WFBG 的中心波长漂移存在线性关系^[27],如公式(1)所示。

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot (\epsilon - \epsilon_0) + (a + \xi) \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

式中: λ 是波长,nm; ϵ 为光纤轴向应变; T 是温度, $^{\circ}\text{C}$; P_e 为弹光系数, a 为光纤的热膨胀, ξ 为热光系数, $(1 - P_e)$ 为应变比例系数, $(a + \xi)$ 为温度比例系数。应变和温度比例系数常见的标定结果为 $0.78 \times 10^{-6} \epsilon^{-1}$ 和 $6.67 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ^[28]。

WFBG 的应变、温度测量精度分别为 1 $\mu\epsilon$ 和 0.1 $^{\circ}\text{C}$,在时效性和精度上有很大的优势。WFBG 技术在崩岸场地应变监测中的测量范围为 0 ~ 20 000 $\mu\epsilon$ ^[29],经过预拉 8 000 $\mu\epsilon$ 后^[30],实际测量范围为 -8 000 ~ 12 000 $\mu\epsilon$ 。为了消除应变和温度的交叉影响,采用双波长或双光栅的温度补偿方法,或者使用特殊结构的光纤光栅(如啁啾光纤光栅),分别测量应变和温度^[31]。温度和应变是直接采集的原始数据,位移和地下水流速则通过计算得出。

1.2 监测位移解算

位移数据可以通过应变数据计算得出。

建立坐标系,垂直方向上为 y 轴,地面水平面为原点,向下为正,坐标为 10 表示该点距离地面 10 m,光纤监测应变大小,应变-位移计算公式如下^[32]。

$$\Delta L = \int_{y_2}^{y_1} \epsilon_y dy = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(y_1 + \frac{i}{n}(y_2 - y_1)) \times \frac{y_2 - y_1}{n}, \quad (2)$$

式中: L 是位移,m; ϵ 是应变。

1.3 地下水流速解算

流速测量通常采用主动式的测试方法,其基本原理是:通过向渗流介质施加热源或冷源,产生温度梯度,然后观察温度传感器的响应,从而分析地下水流速特性。

对传感器持续加热,稳定时温度场和地下水流速的关系如下^[33]。

$$\theta = \frac{q_s}{2\pi\lambda} \cdot e^{-\frac{vr}{2a}} \cdot K_0\left(\frac{v\sqrt{x^2 + y^2}}{2a}\right), \quad (3)$$

式中: θ 是升高温度, $^{\circ}\text{C}$; v 是地下水流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a 是热扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; λ 是热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$; q_s 是单位长度的线热源的热流量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

通常采用在地面上沿垂直方向开挖钻孔、布设传感器的方式监测地下水流速^[34-35],当 $q_s=1\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$, $a=1\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, $\lambda=1\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ 时,图1显示了温度稳定时的钻孔水平剖面的等温线分布示意

图。当水流速更快时,区域内热量被快速带走。通过光纤传感器测量热源周围的温度分布,根据温度随时间的变化,可判断地下水的流动方向以及地下水的流速大小。

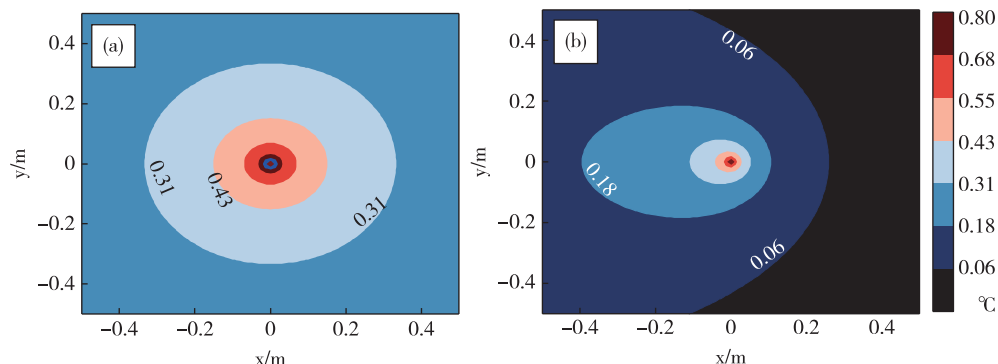


图1 0 m/s 流速下等温线分布(a)和 5 m/s 流速下等温线分布(b)示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of isotherm distribution at 0 m/s flow rate (a) and 5 m/s flow rate (b)

2 研究区域及监测方案

扬中市位于江苏省中南部,辖区面积(含水域)327 km²,是长江中仅次于崇明岛的第二大岛^[36],地形地貌以平原为主,海拔高度一般是4~4.5 m,全境由西北向东南微倾。地层主要由第四纪河流相、冲洪积相沉积物组成,主要为粉砂、粉砂质黏土、黏土和粗砂等。上部为河漫滩相沉积,下部为冲洪积相沉积,属于典型的二元结构。基底较为稳定,新近纪以来存在新构造运动但是活动并不强烈,多为3.0级以下小震^[37]。自三峡蓄水以来,河道持续冲刷下切,影响河床稳定性^[38]。2017年11月8日发生了严重的崩岸灾害^[39],几小时内,440 m主江堤、540 m江岸线坍失,9栋民房塌陷,堤防塌开缺口,进而威胁岛上34万人口的安全^[40]。

指南村崩岸是近期长江下游最大的一次崩岸险情^[41],被誉为近年来的“长江第一崩”^[26],其严重危及长江堤防和人民生命财产安全。为了防治崩岸提供有效的监测技术,本文选择扬中市指南村崩岸场地作为研究对象,采用分布式光纤监测技术,在研究场地沿着垂直地面方向打了4组水文地质钻孔,并分别布设了4组光纤传感器,每组光纤传感器包含2根光缆,其中1根用于应变监测,另1根用于温度监测。随后对钻孔进行了回填。监测示意图见图2。每条光纤传感器埋深约80 m,监测孔(WD01~WD04)位置见图3。

此次研究使用一款无线密集分布式光纤解调仪作为专用的数据采集仪器,该仪器具有48通道,波长为1528~1568 nm,波长分辨率为1 pm,解调速率为1 Hz,动态范围为35 dB。数据采集仪器将实时采集到的数据接收并储存至云端,随后下载数据,并以图表的形式在远程监控中心的屏幕上显示。为了进一步处理数据,采用MATLAB作为数据分析软件,并基于第1节描述的位移和地下水流速的关系对数据进行详细处理。

数据采集和分析的时间为2022年9月至2023年3月,为期半年。在这段时间内,应变和温度数据每10 min采集一次,地下水流速的监测频率为1次/日,在加热实验测流速时,提高了监测频率,将采集间隔缩短至10 s,加热持续时间为3 h。

3 监测数据获取及分析

本文使用MATLAB数据分析软件对所有钻孔的监测结果进行了处理和评估,WD01、WD03和WD04数据相对较为稳定,而WD02孔的监测数据显示出了明显的异常。在对4组数据进行分析后,认为WD02孔最接近江边,江水、地下水与岸坡相互作用更为密切,因此其数据更具有代表性,能够更好地反映该区域地层的异常变化。因此,在本文中,我们以WD02孔为例,将处理后的数据以图像和表格的形式进行展示。

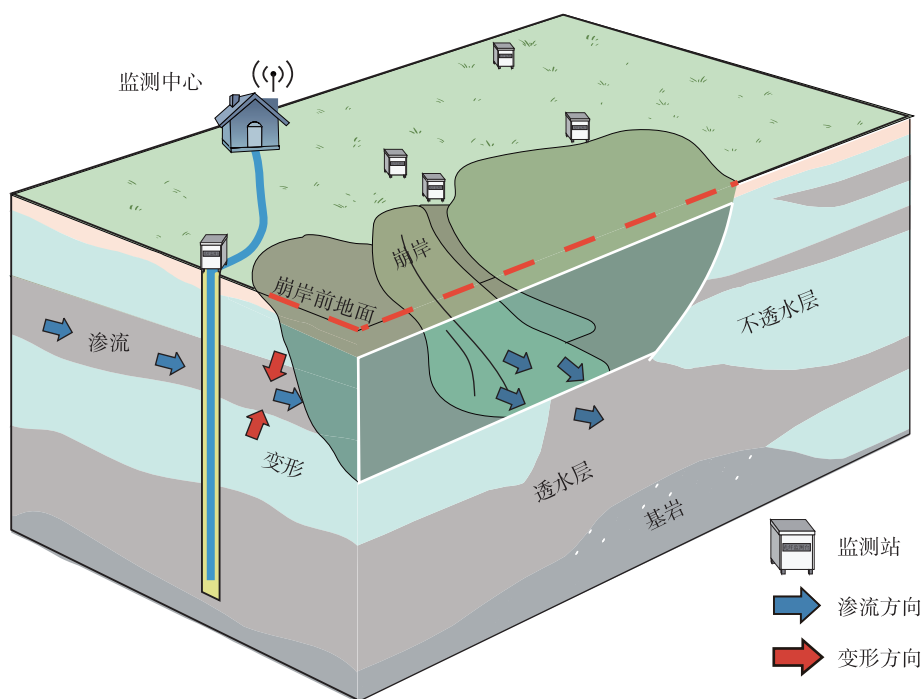


图 2 崩岸光纤监测方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fiber optic monitoring collapsed banks

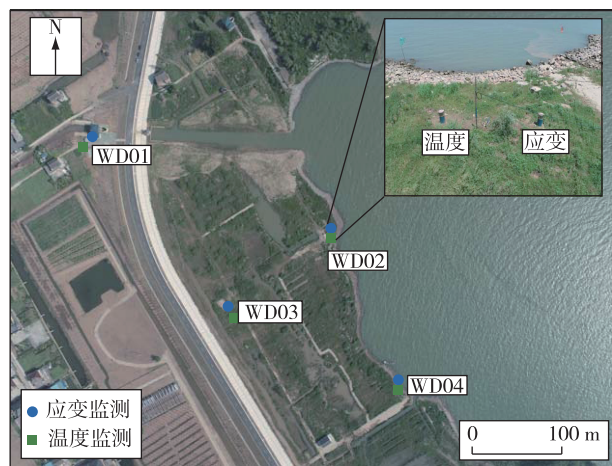


图 3 扬中指南村应变和温度监测孔位置图

Fig. 3 Location of the boreholes monitored by strain and temperature in Zhinan Village, Yangzhong

3.1 应变

本文对 WD02 孔的应变监测数据进行了统计分析,绘制了崩岸场地应变随深度和时间变化的折线图(图 4)。应变为 $-980 \sim 566 \mu\epsilon$,平均值为 $-47 \mu\epsilon$,标准差为 $128 \mu\epsilon$ 。如图 4(a)所示,2022 年 9 月至 2023 年 4 月,崩岸场地 2~10 m 地层应变较大,而

10 m 以深的地层应变较小。从图 4(b)可以看出,崩岸浅部地层应变受到长江水位回落、潮汐等因素的影响,呈现出周期性减小的特征(图 4(b) I),深部地层受到的影响较小(图 4(b) III)。

3.2 温度

对 WD02 孔的温度监测数据进行了统计分析,得到崩岸场地温度的最大值、最小值、平均值、标准差等指标,并绘制了崩岸场地温度随深度变化的折线图(图 5(a))。结果表明,温度为 $16.6 \sim 26.2^\circ\text{C}$,平均值为 18.7°C ,标准差为 1°C 。图 5(b)所示,在崩岸场地,温度受到季节和深度等因素的影响,呈现出相应变化。具体而言,在 2022 年 9 月至 2023 年 3 月,近地表温度经历了显著的波动,整体趋势是温度逐渐降低。相比之下,深部地层的温度变化相对稳定。

3.3 位移

根据公式(2)中应变-位移的关系解算应变数据,获得了崩岸场地不同深度的地层位移量和累计位移量,其中负值代表地层下沉,正值代表地层抬升。结果表明,各深度地层单位长度的位移量为 $-0.98 \sim 0.57 \text{ mm}$,最大位移发生在 5 m 深度,达 -0.98 mm ,表示该深度的地层下沉了 0.98 mm

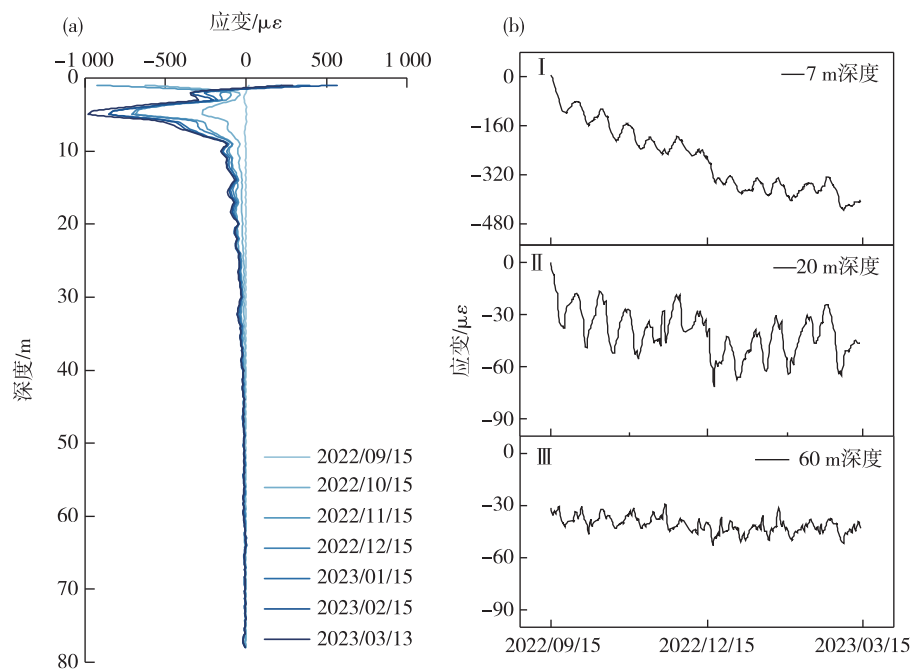


图4 WD02孔不同深度应变测量结果(a)和特定深度应变随时间变化图(b)

Fig. 4 Strain measurements at different depths (a) and the variation of strain over time at a specific depth (b) for borehole WD02

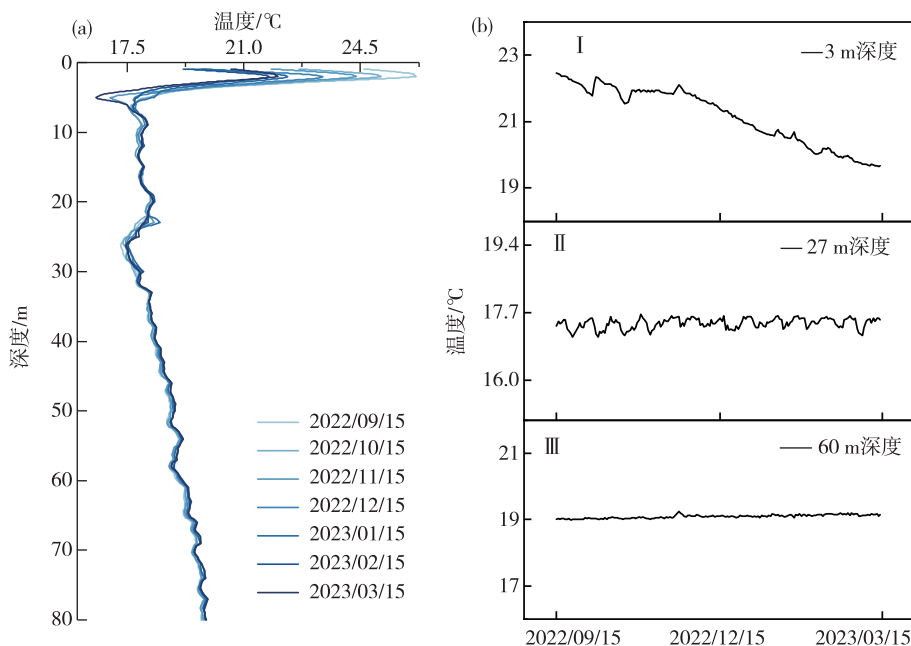


图5 WD02孔不同深度温度图(a)和特定深度温度随时间变化图(b)

Fig. 5 Temperature profile at different depths (a) and the variation of temperature over time at a specific depth (b) for borehole WD02

(图 6(a))。累计位移的统计结果显示,从 2022 年 9 月至 2023 年 3 月,地层持续下沉,总下沉量达

15.26 mm(图 6(b))。观测结果为深入了解崩岸的变形特征提供了重要的参考,为进一步的研究和应

对崩岸灾害提供了有价值的信息。

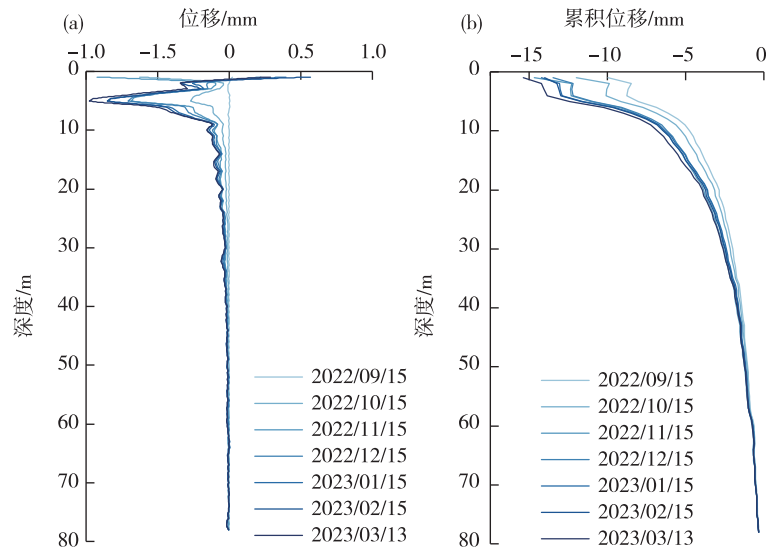


图 6 WD02 孔各深度地层位移大小(a)和累计位移大小(b)

Fig. 6 Displacement magnitude of strata at each depth (a) and cumulative displacement magnitude (b) for borehole WD02

3.4 地下水流速

本文利用光缆作为传感器和加热源,实现对崩岸场地内温度场的动态监测,并通过深入分析钻孔内的传热特性和温升数据^[42-43],成功反演出场地内

的地下水流速。图 7 是温度随时间和深度变化的云图。实验结果表明,在加热期间(2022 年 7 月 14 日 04:30~07:10),同一时间不同深度的地层温度升高值存在显著差异。以 26 m 和 41 m 深度为例,26 m

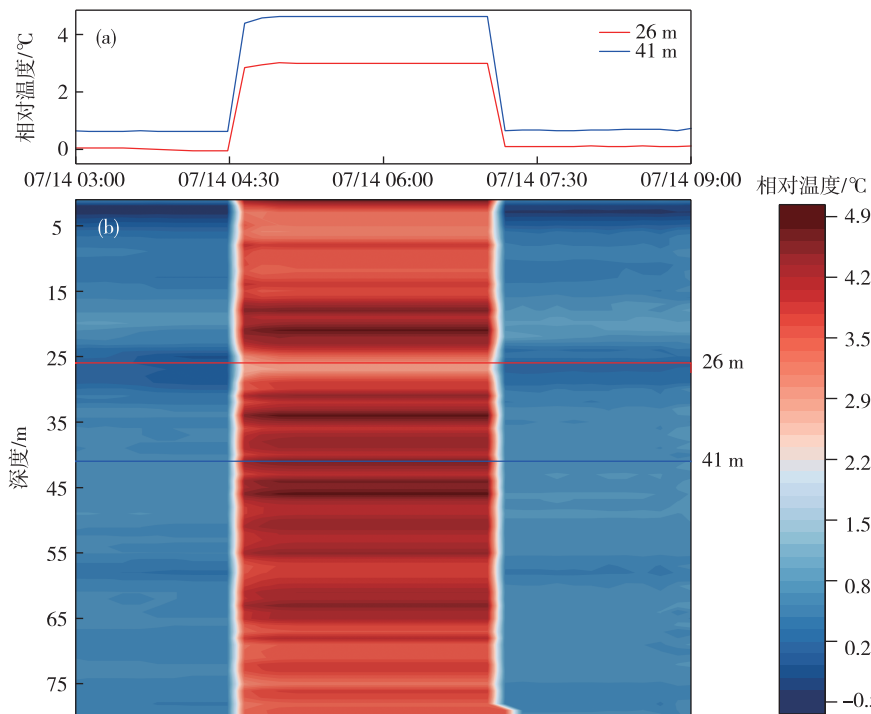


图 7 特定深度加热时温度随时间变化图(a)和所有深度加热时温度随时间变化图(b)

Fig. 7 Plots of temperature versus time for specific depth heating (a) and for all depths (b)

深度的地层相对温度由 0°C 升高至 2.9°C , 温度升高值为 2.9°C , 而 41 m 深度处则从 0.59°C 升高至 4.5°C , 温度升高值约为 3.9°C 。在同样的加热功率下, 26 m 深度的地层温度升高值比 41 m 深度的地层温度升高值小了近 1°C 。这种差异主要受到崩岸场地土壤的热物性和地下水渗流等因素的影响造成的^[26]。具体而言, 当处于相同地层的条件下, 土壤热物性参数相同, 更快的地下水流会导致区域内热量被迅速带走, 因此温度升高值较小。当然, 在不同性质的地层中, 还需综合考虑热物性和地下水渗流的影响, 更大的热物性参数会导致温度升高不明显。

本文使用专用的传感器 TEMPOS SH-3 测定指南村钻孔内岩土体热物性参数(表 1), 根据钻孔内地层性质和岩土体的热物性参数, 结合温度场和地下水流速的关系, 根据式(3)可以利用温升数据来反演地下水流速。将流速数据与一个卷积核函数进行卷积运算, 得到地下水流速的估计值(图 8), 其中黑色点为实测结果, 红线为卷积方法(移动平均法, 5 点相邻平均平滑)获取的地下水流速值。可以看出, 卷积方法能够较好地拟合实测数据, 揭示地下水流速的变化趋势。

表 1 扬中指南村地层热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of the strata in Zhinan Village, Yangzhong

	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	热扩散系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
粉质黏土	1.8	4.26×10^{-7}
粉土	1.6	4.06×10^{-7}
细砂	1.5	3.41×10^{-7}
砂砾	1.7	3.75×10^{-7}

根据测量结果, WD02 钻孔内 $20\sim 30\text{ m}$ 深度处流速突然增大, 达 $2.98 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, 明显高于上下相邻地层地下水流速(约 $1.86 \times 10^{-6}\text{ m/s}$)。实测的流速最大值在 27 m 深度, 可达 $4.48 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, 该深度地下水流速是周围深度地下水流速的 $1.6\sim 2.4$ 倍。这种现象可能源于该深度范围地层的特殊性, 由于这一深度处于粉质黏土和细砂的交界处, 使得地层渗透性呈现出显著变化。值得注意的是, 这一深度还与 2017 年指南村崩岸坍失的土体深度相吻合^[44], 说明在这一深度地层很可能存在强渗流带、古河道等软弱面^[36]。渗透性差异和地层结构的变化相互作用, 最终导致了地下水流速的局部异常。

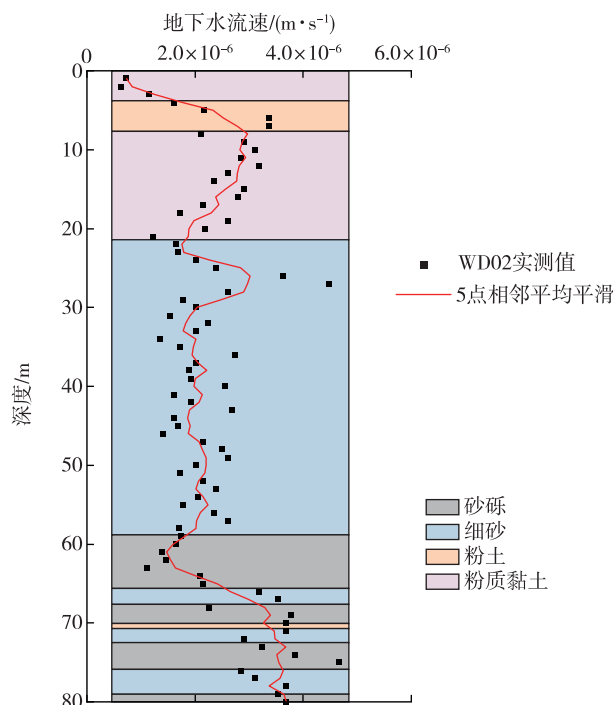


图 8 WD02 钻孔不同深度地层地下水流速图

Fig. 8 The velocity of groundwater in strata of different depths in borehole WD02

4 讨论

崩岸的机制研究和监测预警采用了多种方法, 过去多集中于理论计算^[45-48]、室内模型试验^[49-50]和 水下地形变化^[51]的监测预警研究, 然而关于崩岸区岩土体稳定性的研究较少, 特别缺乏综合应变、温度、位移、流速等参数的联合监测研究。本文开展了高精度的地下水流速原位实时监测的深入研究, 进一步完善了多参数监测技术体系。

如图 4、图 5、图 6 和图 8 所示, 基于 WFBG 的崩岸场地多参数实时监测技术通过在一个钻孔内布设应变和温度两根光缆, 提供了详尽的地下应变、温度、位移和地下水流速曲线。随着时间和深度变化, 这些多参数监测数据为垂向地层中形变和流速的演变提供了有益的见解。

WFBG 多参数实时监测技术的一个显著优势在于其精确的定位能力, 如图 8 所示, $20\sim 30\text{ m}$ 和 $62\sim 80\text{ m}$ 深度处分别存在两个地下水流速异常区域, 这两个深度处地下水流速急剧增大, 因此应当被视为研究崩岸成因机制和灾害防治的关键层位。在 $62\sim 80\text{ m}$ 深度, 存在一个渗透系数急剧增加的

砂砾层,其地下水流速的急剧增大符合认知。而20~30 m深度是粉质黏土和细砂的分界处,推测是地下水长期渗流侵蚀,带走了细砂层的细小颗粒,从而增大了地层的渗透系数导致流速增大。WFBG多参数实时监测技术的另一个优势在于能够追踪光缆上不同位置和不同时段的多参数变化过程。例如,通过观察图4(a),我们可以准确定位应变异常的深度,这为制定有效的处置方案提供决策依据;同时,图4(b)展示了在监测时段内特定深度的地层参数的详尽数据,这使我们能够深入了解地下环境的变化趋势,为进一步的研究和预测提供了有力支持。此外,根据对长期监测效果的观察,该技术还具备在恶劣条件下(如暴雨、洪水)进行实时监测的优势。

尽管WFBG技术监测陆域崩岸段的岩土体应变、温度、位移和流速等参数取得了良好的效果,但在实际应用中,仍然需要将这种技术与水域测试技术(例如水沙条件和水下地形监测)结合,相互补充。这样的综合监测系统能够提供更为全面的数据,帮助我们更好地了解崩岸的情况,从而制定更有效的应对策略。

5 结论

(1)扬中市指南村监测场地地下水流速垂向变化明显,WD02孔内20~30 m和62~80 m深度处存在两个流速异常区域,其流速分别达到 2.98×10^{-6} m/s和 3.4×10^{-6} m/s,比上下相邻地层地下水流速高出近1倍,这种异常现象可能是崩岸发生的潜在原因或重要影响因素,应密切关注这两个深度的地层,将其作为崩岸防治工作的重点。

(2)WFBG技术具有定位准确、数据丰富和实时监测的优点,能够克服暴雨、洪水等极端天气条件下的挑战,为崩岸安全管理提供了高效、准确的支持。这不仅拓宽了WFBG技术的应用,也为类似地质灾害监测提供了有益经验。

参考文献

- [1] 夏军强,邓珊珊. 冲积河流崩岸机理、数值模拟及预警技术研究进展[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11): 1-10.
XIA J Q, DENG S S. Review on bank erosion processes in alluvial rivers: mechanism, modelling and early-warning[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11): 1-10.
- [2] 姜月华,程和琴,周权平,等. 重大水利工程对长江中下游干流河槽和岸线地质环境影响研究[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1681-1696.
JIANG Y H, CHENG H Q, ZHOU Q P, et al. The influence of major water conservancy projects on the geological environment of channel and shoreline in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Geology in China, 2021, 48(6): 1681-1696.
- [3] 许全喜,董炳江,袁晶,等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 650-661.
XU Q X, DONG B J, YUAN J, et al. Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 650-661.
- [4] 刘世振,冯国正,张亭,等. 一种基于水-雨-工情的新型堤防崩岸综合监测技术应用及探讨[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 107-110.
LIU S Z, FENG G Z, ZHANG T, et al. Application and discussion of a new comprehensive monitoring technology for bank collapse monitoring based on hydrological condition and rain conditions and engineering conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S1): 107-110.
- [5] 李洁,夏军强,张晓雷,等. 黄河下游准平衡状态下平滩流量及面积与水沙条件的关系[J]. 泥沙研究, 2015, 40(5): 37-43.
LI J, XIA J Q, ZHANG X L, et al. Relationships between bankfull discharge-area and flow-sediment condition in Lower Yellow River under quasi equilibrium[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(5): 37-43.
- [6] 冯传勇,郑亚慧,周儒夫. 长江中下游崩岸监测技术应用研究[J]. 水利水电快报, 2018, 39(3): 47-50, 52.
FENG C Y, ZHENG Y H, ZHOU R F. Application research on bank collapse monitoring technology in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2018, 39(3): 47-50, 52.
- [7] 邓宇,赖修蔚,郭亮. 长江中下游崩岸监测及分析研究[J]. 人民长江, 2018, 49(15): 13-17.
DENG Y, LAI X W, GUO L. Monitoring and analysis of bank collapse in middle and lower reaches of

- Yangtze River[J]. Yangtze River, 2018, 49(15): 13-17.
- [8] 高超. 基于 MSS/TM/ETM 图像的长江马芜铜段江心洲演化研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 135-141.
- GAO C. Study on channel islands in Ma-Wu-Tong section of Yangtze River based on MSS/TM/ETM remote sensing image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 135-141.
- [9] ZOLINA T, STRELKOV S, KUPCHIKOVA N, et al. Monitoring of the collapse of the shores of reservoirs and the technology of their surface and deep fixing[C]. E3S Web of Conferences, 2020, 157: 02011.
- [10] 靳婷婷, 段学军, 邹辉. 岸线资源利用变化与影响因素——以长江南京段为例[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 9-20.
- JIN T T, DUAN X J, ZOU H. Change and influencing factors of shoreline resources utilization in the Nanjing section of the Yangtze River[J]. East China Geology, 2021, 42(1): 9-20.
- [11] HEMMELDER S, MARRA W, MARKIES H, et al. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery—a case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 428-437.
- [12] 刘世振, 樊小涛, 冯国正, 等. 现代高时空分辨率崩岸应急监测技术研究进展与展望[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 85-88, 93.
- LIU S Z, FAN X T, FENG G Z, et al. Modern emergency monitoring technology for bank collapse with high spatio-temporal resolution: review and prospect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 85-88, 93.
- [13] 白宇, 郑志忠, 修连存, 等. 无人机高光谱遥感技术在自然资源调查中的应用进展[J]. 华东地质, 2022, 43(4): 527-538.
- BAI Y, ZHENG Z Z, XIU L C, et al. UAV hyperspectral remote sensing technology and its application progress in natural resources survey[J]. East China Geology, 2022, 43(4): 527-538.
- [14] LYONS N J, STAREK M J, WEGMANN K W, et al. Bank erosion of legacy sediment at the transition from vertical to lateral stream incision[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(13): 1764-1778.
- [15] 胡维忠. 长江中下游干流河道崩岸状况及其防治[J]. 长江技术经济, 2020, 4(1): 17-20.
- HU W Z. Bank collapse and its prevention in the main stream of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 4(1): 17-20.
- [16] 张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405006.
- ZHANG Y J, XIE X P, BI W H. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0405006.
- [17] 陈考奎, 李院峰, 周次明, 等. 基于弱光纤布拉格光栅阵列的桥梁应变测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0706003.
- CHEN K K, LI Y F, ZHOU C M, et al. Bridge strain measurement based on weak fiber Bragg grating array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0706003.
- [18] 廖令军, 莫成, 岳琪迪, 等. 基于弱光栅技术的基坑围护结构变形自动化监测研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1963-1969.
- LIAO L J, MO C, YUE Q D, et al. Research on deformation automatic monitoring of foundation pit retaining structure based on weak FBG[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1963-1969.
- [19] ZHANG C, TAO Y, TONG X L, et al. Application of the encapsulation technology of WFBG distributed array sensors in track monitoring system[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors. Lausanne: Optica Publishing Group, 2018: WF39.
- [20] 亓乐, 孟志浩, 孙长帅, 等. 基于弱光栅技术的钢管桩静载荷试验[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1645-1650.
- QI L, MENG Z H, SUN C S, et al. Static load test of steel pipe pile based on weak-reflection fiber gratings[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1645-1650.
- [21] WANG X C, YAN Z J, WANG F, et al. A distributed and key-position fiber sensing system based on LPFG and WFBG assisted OTDR[C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides 2014. Barcelona: Optica Publishing Group, 2014: BW3D.7.
- [22] YE X, ZHU H H, WANG J, et al. Subsurface multiphysical monitoring of a reservoir landslide with the fiber-optic nerve system[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(11): e2022GL098211.
- [23] 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉

- 降自动化监测系统[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 146-153.
- HE J H, ZHANG J C, CHEN Y, et al. Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 146-153.
- [24] DE MOURA C C, DE OLIVEIRA V, KALINOWSKI H J. Characterization of encapsulated temperature sensors based on Bragg gratings[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors. Lausanne: Optica Publishing Group, 2018: ThE30.
- [25] YAN J F, SHI B, ZHU H H, et al. A quantitative monitoring technology for seepage in slopes using DTS[J]. Engineering Geology, 2015, 186: 100-104.
- [26] 威海博, 顾凯, 张博, 等. 基于单孔热响应测试的地下水渗流场评价——以扬中指南村崩岸场地为例[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1713-1720.
- QI H B, GU K, ZHANG B, et al. Evaluation of groundwater flow field based on single-borehole thermal response test—a case study of Zhinan village bank collapse site[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1713-1720.
- [27] 段超喆, 施斌, 曹鼎峰, 等. 一种准分布式内加热刚玉管FBG渗流速率监测方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 504-510.
- DUAN C Z, SHI B, CAO D F, et al. A quasi-distributed seepage velocity monitoring method using FBG embedded in internal heated alundum tube[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 504-510.
- [28] 朱鸿鹄, 殷建华, 张林, 等. 大坝模型试验的光纤传感变形监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1188-1194.
- ZHU H H, YIN J H, ZHANG L, et al. Deformation monitoring of dam model test by optical fiber sensors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1188-1194.
- [29] 何斌, 徐剑飞, 何宁, 等. 分布式光纤传感技术在高面板堆石坝内部变形监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 627-633.
- HE B, XU J F, HE N, et al. Application of inner deformation monitoring of concrete face rockfill dams based on distributed optical fiber technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 627-633.
- [30] 刘春, 施斌, 吴静红, 等. 排灌水条件下砂黏土层变形响应模型箱试验[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1746-1752.
- LIU C, SHI B, WU J H, et al. Model box tests on response of deformation of sand and clay layer under draining-recharging condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1746-1752.
- [31] 张荫民, 祝连庆, 骆飞, 等. 单FBG双波长掺铒光纤激光器的设计与实验研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 789-792.
- ZHANG Y M, ZHU L Q, LUO F, et al. Design and experimental study of dual-wavelength erbium-doped fiber laser using single fiber Bragg grating[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 789-792.
- [32] 卢毅, 施斌, 席均, 等. 基于BOTDR的地裂缝分布式光纤监测技术研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 8-13.
- LU Y, SHI B, XI J, et al. Field study of BOTDR-based distributed monitoring technology for ground fissures [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 8-13.
- [33] DIAO N R, LI Q Y, FANG Z H. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(12): 1203-1211.
- [34] ZHANG W K, YANG H X, GUO X Q, et al. Investigation on groundwater velocity based on the finite line heat source seepage model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 391-401.
- [35] BAKKER M, CALJÉ R, SCHAARS F, et al. An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2760-2772.
- [36] 杨达源, 黄贤金, 施利锋, 等. 1973~2017年扬中市江岸冲淤遥感监测及古河道塌江分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2796-2804.
- YANG D Y, HUANG X J, SHI L F, et al. Erosion and siltation monitoring along the river bank of Yangzhong City during 1973-2017 by remote sensing and analyzing the bank collapse[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2796-2804.
- [37] 于俊杰, 王明路, 魏乃颐, 等. 镇江扬中地区工程地质条件及其评价[J]. 地质学刊, 2013, 37(1): 127-131.
- YU J J, WANG M L, WEI N Y, et al. On engineering geological conditions and evaluation of Yangzhong area in Zhenjiang[J]. Journal of Geology, 2013, 37(1): 127-131.

- [38] 赵维阳, 胡勇, 张胡. 长江下游过江隧道工程河段极限冲刷深度研究[J]. 水运工程, 2023(1): 120-126.
ZHAO W Y, HU Y, ZHANG H. Maximum scouring depth for river reach of underwater tunnel project in lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(1): 120-126.
- [39] 姚仕明, 胡呈维, 渠庚. 三峡水库下游河道演变与生态治理研究进展[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 16-26.
YAO S M, HU C W, QU G. Research advances in river evolution and ecological regulation in the downstream of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 16-26.
- [40] 栾华龙, 刘同宜, 高华峰, 等. 新水沙形势下长江中下游干流岸线保护研究——以扬中市 2017 年江堤崩岸治理为例[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 14-19.
LUAN H L, LIU T H, GAO H F, et al. River bank protection of middle and lower reaches of Yangtze River under new flow and sediment condition: case of levee collapse in Yangzhong City in 2017[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 14-19.
- [41] 李强, 王乃茹, 曹双, 等. 长江中下游岸滩稳定性评价指标体系构建及应用[J]. 人民长江, 2022, 53(8): 1-8.
LI Q, WANG N R, CAO S, et al. Establishment of beach stability evaluation index system for middle and lower reaches of Changjiang River and its application[J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 1-8.
- [42] 潘杰, 杨冬, 朱探, 等. 超临界压力水在垂直上升内螺旋管中的传热特性[J]. 化工学报, 2011, 62(2): 307-314.
PAN J, YANG D, ZHU T, et al. Heat transfer characteristics of supercritical pressure water in vertical upward rifled tube[J]. CIESC Journal, 2011, 62(2): 307-314.
- [43] 殷术贵, 郭伟科, 黄栋, 等. 流延薄膜传热特性及冷却水量设计的仿真研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 23-34.
YIN S G, GUO W K, HUANG D, et al. Simulation study on heat transfer characteristics and cooling water design for the casting film[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(12): 23-34.
- [44] 罗龙洪, 苏长城, 应强, 等. 长江扬中河段指南村窝崩应急治理及效果分析[J]. 江苏水利, 2020(2): 25-28.
LUO L H, SU C C, YING Q, et al. Emergency treatment and effect analysis of arc collapsing in Zhinan Village, Yangzhong Reach of the Yangtze River[J]. Jiangsu Water Resources, 2020(2): 25-28.
- [45] 周侗, 陈伟伦, 王俊, 等. 波动水位影响下的滨岸稳定性预警技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 77-84, 93.
ZHOU T, CHEN W L, WANG J, et al. Research on forewarning technology of estuary riverbank stability under the influence of fluctuating river level[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 77-84, 93.
- [46] 孙启航, 夏军强, 邓珊珊, 等. 基于圆弧与平面滑动模式的上荆江崩岸过程模拟对比分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(1): 38-51.
SUN Q H, XIA J Q, DENG S S, et al. Comparison of simulated bank erosion processes in the upper Jingjiang reach using the circular and planar sliding modes[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(1): 38-51.
- [47] 徐富刚, 杨斌, 黎良辉, 等. 水流作用下临水岸坡稳定性计算模型[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 169-175, 180.
XU F G, YANG B, LI L H, et al. Model for the stability calculation of waterside slope under water flow[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 169-175, 180.
- [48] 李诺, 夏军强, 邓珊珊, 等. 长江中游荆江河段典型断面崩岸预警方法及应用[J]. 人民长江, 2023, 54(3): 9-15.
LI N, XIA J Q, DENG S S, et al. Study on early-warning method of bank collapse at typical sections of Jingjiang Reach of Middle Yangtze River and its application[J]. Yangtze River, 2023, 54(3): 9-15.
- [49] 黎良辉, 罗星, 赵旭, 等. 降雨条件下临水岸坡失稳试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 758-767.
LI L H, LUO X, ZHAO X, et al. Experiment on water bank instability under rainfall[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 758-767.
- [50] 况卫明, 黎良辉, 赖敬飞, 等. 水位骤变条件下河流崩岸模型试验及机理研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 130-133.
KUANG W M, LI L H, LAI J F, et al. Model test and mechanism study of river bank collapse at sudden change of water level[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 130-133.
- [51] 张家豪, 周丰年, 程和琴, 等. 多模态传感器系统在河

槽边坡地貌测量中的应用[J]. 测绘通报, 2018(3): 102-107.
ZHANG J H, ZHOU F N, CHENG H Q, et al. Ap-

plication of multimodal sensor system in channel slope topographic surveying[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(3): 102-107.

Deformation and seepage characteristics of the bank collapse site based on WFBG technology—a case study of Zhinan Village, Yangzhong

MEI Shijia^{1, 2}, JIANG Yuehua^{1, 2}, YANG Hai^{1, 2}, ZHOU Quanping^{1, 2}, CHEN Zi^{1, 2},
JIA Zhengyang^{1, 2}, JIN Yang^{1, 2}, ZHANG Hong^{1, 2}, ZHANG Bo³

(1.Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2.Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: The riverbank collapse poses a serious threat to the safety of urban areas and critical infrastructures along the Yangtze River. At present, the commonly used monitoring techniques expose some problems, such as limited parameters and low monitoring frequency. To improve the effectiveness of riverbank collapse monitoring and early warning, a real-time monitoring approach based on weak fiber Bragg grating (WFBG) technology is introduced. This method employs weak fiber bragg grating sensors as measuring units, and then utilizes time-division/wavelength-division hybrid multiplexing demodulation techniques together with some relevant conversion formulas to distinguish groundwater flow velocities under active heat source. A real-time monitoring system of riverbank collapse site can be set up for collecting multiple parameters simultaneously, including strain, temperature, displacement, flow velocity, and so on. We analyzed the monitoring data of WD02 borehole, which was located at the Zhinan Village riverbank collapse site in Yangzhong City. The results showed that there were two abnormal flow velocity zones at the depth of 20~30 m and 62~80 m, where the follow velocities reached 2.98×10^{-6} m/s and 3.4×10^{-6} m/s, respectively, nearly twice of the values observed in adjacent layers. Consequently, it is necessary to pay more attention to these two abnormal zones. Typical practice case shows that this technology has the advantages of accurate positioning, abundant data collecting and real-time monitoring even under extreme weather conditions. This research provides a cutting-edge and reliable alternative solution for the monitoring and early warning of riverbank collapse disasters.

Key words: WFBG; temperature; strain; seepage; bank collapse; Zhinan Village, Yangzhong