

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240921002

超深基坑地下连续墙渗漏缺陷温度示踪测试分析

刘明玮¹, 王小龙², 朱晶晶², 刘建刚³

(1. 江苏开放大学建筑工程学院, 江苏 南京 210036; 2. 江苏科能岩土工程有限公司, 江苏 南京 211102;
3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 为精准探测超深基坑地下连续墙接缝渗漏缺陷提出了温度示踪测试方法。该方法是在基坑外侧紧挨超深基坑地下连续墙接缝处打设与混凝土地下连续墙同深度的钻孔, 然后在基坑抽水前后分别测试钻孔内不同深度地下水温度, 获得地下水温度垂向分布曲线, 再根据温度曲线垂向标准形态和由于渗漏造成的温度曲线异常精准判断接缝渗漏位置深度。2个代表性超深盾构井基坑混凝土地下连续墙接缝渗漏探测分析结果表明, 精准判定的渗漏缺陷位置都得到了基坑开挖和基坑排水量两个方面直接和间接验证。得出了超深基坑防渗结构体渗漏缺陷引起的地下水垂向温度曲线局部变化恰好是判断渗漏缺陷深度位置的重要依据, 且因渗漏处温度变化十分微弱, 捕捉微弱温度异常的温度测井仪分辨率和稳定性十分重要。

关键词: 混凝土地下连续墙; 地下水温度; 示踪测试; 垂向温度曲线; 渗漏缺陷

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1525-07

Temperature Tracer Test Analysis for Leakage Defects of Underground Diaphragm Wall in Ultra-deep Foundation Pit

LIU Mingwei¹, WANG Xiaolong², ZHU Jingjing², LIU Jiangan³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China;
2. Jiangsu Keneng Geotechnical Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China;
3. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211106, China)

Abstract: A temperature tracer testing method was proposed to accurately detect leakage defects at the joints of underground diaphragm walls in ultra-deep foundation pits. This method involved drilling holes immediately outside the joints of the underground diaphragm walls of the ultra-deep foundation pit to the same depth as the concrete underground diaphragm wall, and then measuring the groundwater temperatures at different depths inside the holes before and after pumping water from the foundation pit, to obtain the vertical distribution curve of groundwater temperature. Based on the standard vertical pattern of the temperature curve and its anomalies induced by leakage, the leakage depth at the joint was accurately determined. The leakage detection analysis results of the joints of the concrete underground diaphragm wall in two representative ultra-deep shield shaft foundation pits showed that the accurately identified leakage defect locations were directly and indirectly verified by both the exca-

* 收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2025-05-29

作者简介: 刘明玮(1991—), 女, 讲师, 博士生。主要从事建筑岩土工程方向教学与科研工作。E-mail: 357802955@qq.com

通信作者: 刘建刚(1963—), 男, 教授, 博士。主要从事水文地质的教学与科研工作。E-mail: LiuJg02@163.com

vation process and pumped-water volume of the foundation pit. The local changes in the vertical temperature curve of groundwater caused by leakage defects in the seepage-control structure of ultra-deep foundation pits are an important basis for determining the depth of leakage defects. Moreover, due to the very weak temperature changes at the leakage site, the resolution and stability of temperature logging instruments that capture weak temperature anomalies are crucial.

Keywords: concrete underground diaphragm wall; groundwater temperature; tracer testing; vertical temperature curve; leakage defect

0 引言

超深基坑渗漏问题是岩土工程防灾减灾的一个重要方面,目前基坑因严重渗漏而发生事故的案例仍时有报道^[1-2]。基坑混凝土地下连续墙渗漏主要发生在两个部位:一是墙段本身在浇筑过程中产生的诸如马蜂窝等的缺陷,二是墙段接缝处。一般而言,墙段接缝处更容易发生渗漏。目前混凝土连续墙接缝防渗主要采用工字钢或十字钢连接两相邻墙段,如图1所示。

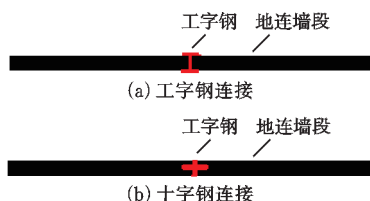


图1 墙段的工字钢和十字钢连接

Fig.1 Connection between I-beams and cross-shaped steel sections in wall segments

钢材和混凝土属于两种不同刚性材料,只要连续墙水平方向有一定的变形,接缝处两不同刚性材料之间仍容易产生裂缝从而导致渗漏。基坑开挖前对接缝处渗漏缺陷的探测并及时处理隐患有利于基坑工程的安全。

人们对混凝土防渗墙渗漏缺陷(如马蜂窝、空腔、接缝等)的探测主要采用工程物探法^[3-5],如超声波法、电法、磁法等,还有传统的水文地质连通试验法等。各种方法有各自优点,但也存在各自不足,主要不足是渗漏缺陷位置的不确定性。很多方法虽可以判断混凝土是否存在缺陷,但无法识别这些缺陷内是否存在地下水,地下水是否发生了流动,而缺陷内地下水的流动才真正反映混凝土连续墙存在渗漏。

近年来,ECR法(电渗法)^[6]、光纤测温技术^[7]被应用于基坑渗漏探测。ECR法是将渗流场与人工

地电场结合,在基坑外的孔(井)内不同深度上分别激发电流,在坑内地表利用多通道阵列电位观测系统观测坑内电位平面分布特征,当地下连续墙无渗漏时,坑内检测到的电位等值线(等势线)闭合,当地下连续墙存在渗漏时,电位等值线从漏点向坑内突出,据此确定基坑地下连续墙渗漏的平面位置。这种方法能确定电场覆盖范围内渗漏的大体平面位置,但电场容易受干扰,且不能确定渗漏缺陷的具体深度。早在30年前就提出利用分布式光纤测温技术来分析大坝的渗漏问题,根据观测到的温度场变化来识别渗漏部位的原理是成立的,但少见实际应用。

目前未见有利用温度示踪技术探测超深基坑地下混凝土连续墙渗漏缺陷的报道,本文结合南京2个超深盾构井基坑地下混凝土连续墙接缝的渗漏探测,介绍温度示踪技术及其应用效果。

1 温度示踪探测渗漏缺陷技术原理

静水条件下海洋、大型湖泊和水库的等温面是个平面,即相同水深处水温相等。反之,如果局部有流动,则局部流动处的水温呈现异常。利用这一规律作者曾对原丰满水电站大坝的浇筑块缝渗漏进行了成功探测^[8]。

任何因地下水渗漏导致工程缺陷处附近地下水物理化学因素异常变化的量都是示踪探测量,温度是其中之一。地下水温度的天然空间分布比地表水体要复杂很多,但仍然有一定的规律,只是影响温度变化的因素较多。天然条件下地下水温度的变化规律是:在渗流微弱或静止时地下水的温度和地温是一致的,将地下水温度在垂直剖面上分为3个带:变温带、常温带和增温带^[9],如图2所示。

常温带深度一般不超过30 m,厚度会有微小变化,温度相当于当地多年平均气温;变温带的温度变化较大,夏季和冬季绝然不同,主要受太阳辐射

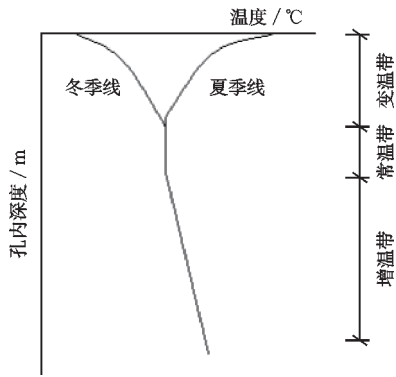


图2 地下水温度垂直分带

Fig.2 Vertical zonation of groundwater temperature

热影响;增温带温度受控于地球内部热源,按地温梯度变化。任何整体改变或局部改变温度垂向变化曲线形态的现象都是温度异常,正异常(温度偏高)或负异常(温度偏低)。工程活动常常是产生工程区地下水温度异常的主要因素,如图3所示堤坝基渗漏引起的变温带地下水温度异常^[10]。

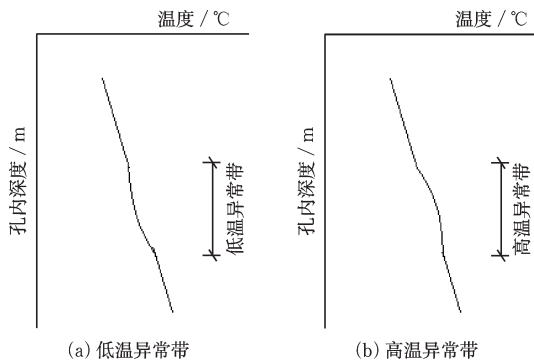


图3 渗漏引起的地下水温度示踪曲线异常

Fig.3 Abnormal groundwater temperature tracer curve caused by leakage

不同工程结构类型对地下水温度异常的表现不同。在基坑工程中,混凝土地下连续墙以及有关

其他防参加固措施所涉及的水泥材料,水化产生的大量热量可以使较大范围内地下水温度发生明显增大,从而改变垂向温度变化曲线的整体形态,图4就是因水泥土加固防渗区大量水化热导致连续墙深度范围内墙侧地下水垂向温度曲线的整体变化。

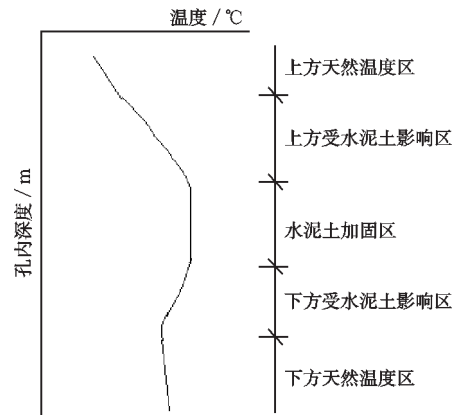


图4 水泥土加固区地下水温度垂向变化曲线

Fig.4 Vertical groundwater temperature curve in cement-soil reinforcement area

2 超深盾构井基坑地下连续墙接缝渗漏缺陷温度示踪探测分析

2.1 基坑工程概况

南京某 220 kV 线路工程位于南京市浦口区(江北段)和建邺区(江心洲段、江南段),电缆隧道中明挖隧道段长约 2 483 m,盾构段长约 1 095 m。其中有 4 个盾构井基坑采用了混凝土地下连续墙。各盾构井基坑连续墙的形状、平面尺寸、深度等见表 1。

表 1 盾构井基坑设计指标统计

Table 1 Statistics of design indicators for shield shaft foundation pit

盾构井编号	基坑形状	基坑平面尺寸/m ²	开挖深度/m	墙深/m	墙厚/cm	墙段数量/段	接缝数量/条
J3	长方形	18.4×10.4	25.49	49.5	100	10	10
K1	长方形	15.0×10.0	22.8	59.6	100	10	10
J7	长方形	18.4×10.4	21.2	41.0	100	10	10
J8	长方形	12.0×8.0	19.2	38.5	100	10	10

2.2 基坑防渗措施

盾构井基坑防渗采用了以下措施:①图 1(a)工字钢墙段连接;②坑外侧墙缝处高压旋喷桩止水,

设计高压旋喷桩半径 1.1 m;③坑底一定厚度的三轴水泥土搅拌桩封底加固,三轴搅拌桩搭接 25 cm,间距 180 cm。以 J3 井基坑为例基坑结构及防渗设计如图 5 所示。

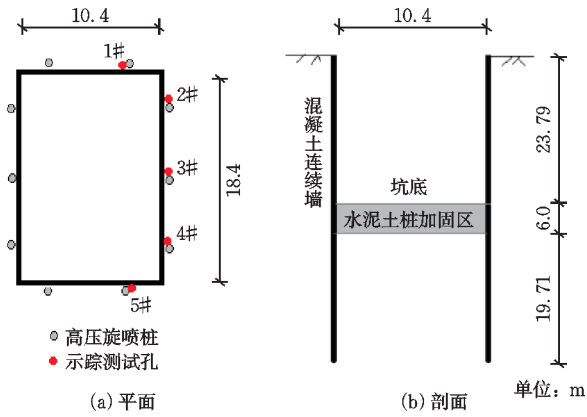


图5 J3盾构井基坑结构布置示意

Fig.5 Structural layout of J3 shield shaft foundation pit

2.3 地层和地下水

J3盾构井基坑在江心洲,其他基坑都位于江心洲夹江对岸(南京河西)江边,地层都属于长江漫滩相堆积地层。J3井基坑对角线上两个勘测孔连线剖面地层如图6所示。涉及到的地层为:①层为素填土,主要由粉质黏土、粉土等组成,混少量砖块、碎石等;④层为粉砂夹粉土;⑤层为粉砂。地下水埋深一般为0.90~3.20 m。J7井基坑地层与J3井类似,但总体含淤泥质土,透水性很小。

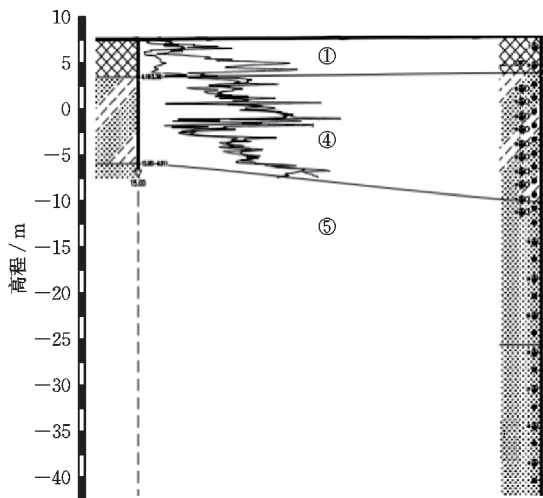


图6 J3盾构井基坑地层剖面示意

Fig.6 Geological profile of J3 shield shaft foundation pit

2.4 温度示踪方法

温度示踪法对温度测试仪测量精度和稳定性要求很高,本文所用的高精度温度测井仪由高精度温度传感器、电缆和笔记本电脑(软件)组成,软件

控制整个测量过程,数字信号传输,自动采集和保存数据。温度精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,分辨率 0.01°C 。

基坑试降水(抽水)前后分别进行温度测试,降水前至少测一次,降水后至少测一次。具体测试次数根据现场施工情况确定。测试时按1 m深度间隔从孔内地下水水面一直测到孔底,然后绘制地下水温度垂向变化曲线,再根据工程特点及垂向地下水温度标准曲线(或背景曲线),确定实测地下水温度垂向变化曲线的温度异常点,判定可能的连续墙接缝渗漏缺陷位置深度。

2.5 测试结果分析

每个基坑设置5个温度示踪测试孔,如图5(a)所示。孔布置在高压旋喷桩与连续墙间的空隙处,目的是探测高压旋喷桩所在连续墙接缝的渗漏缺陷。示踪测试孔孔深和连续墙深度相同,为防止塌孔,孔内安装了滤水管,滤水管内径60 mm。孔编号均为1#~5#,为便于区分,以盾构井编号-示踪测试孔编号区分,如J3-2#,指J3盾构井基坑2#测试孔。以J3井和J7井为代表开展分析。

2.5.1 J3井测试分析

2023年7月28日(抽水前)、8月1日、3日和5日分别对五个孔地下水进行了温度测试,测试结果如图7所示,抽水后三次测试温度曲线十分接近,反映了温度测量的可靠性。

首先看温度值大小。整体而言测深范围内地下水温度远高于当地常温带温度,也高于夏季地下水变温带温度,显然是受加固水泥土水化热影响所致,尤其是J3-5#温度最高,该侧是盾构的洞口侧,连续墙外一定范围内有洞口水泥土加固层,水化热比其他孔要多。

其次看温度曲线形态。五个孔温度曲线都十分类似图4标准曲线(下方天然温度区缺失),稍有变化的是水泥土加固区线段很短。这取决于水泥土加固区厚度,厚度越大,该线段越宽,反之则越短。由于基坑水泥土加固区在坑内,且厚度只有6 m,坑内水泥水化热通过混凝土连续墙热传导到坑外,水化热对坑外地下水温度的影响范围将减小,因而温度曲线呈现峰值状。

最后识别温度异常。从抽水后与抽水前温度曲线对比,或图4中三条线段(上方受水泥土影响区、水泥土加固区和下方受水泥土影响区)一般呈

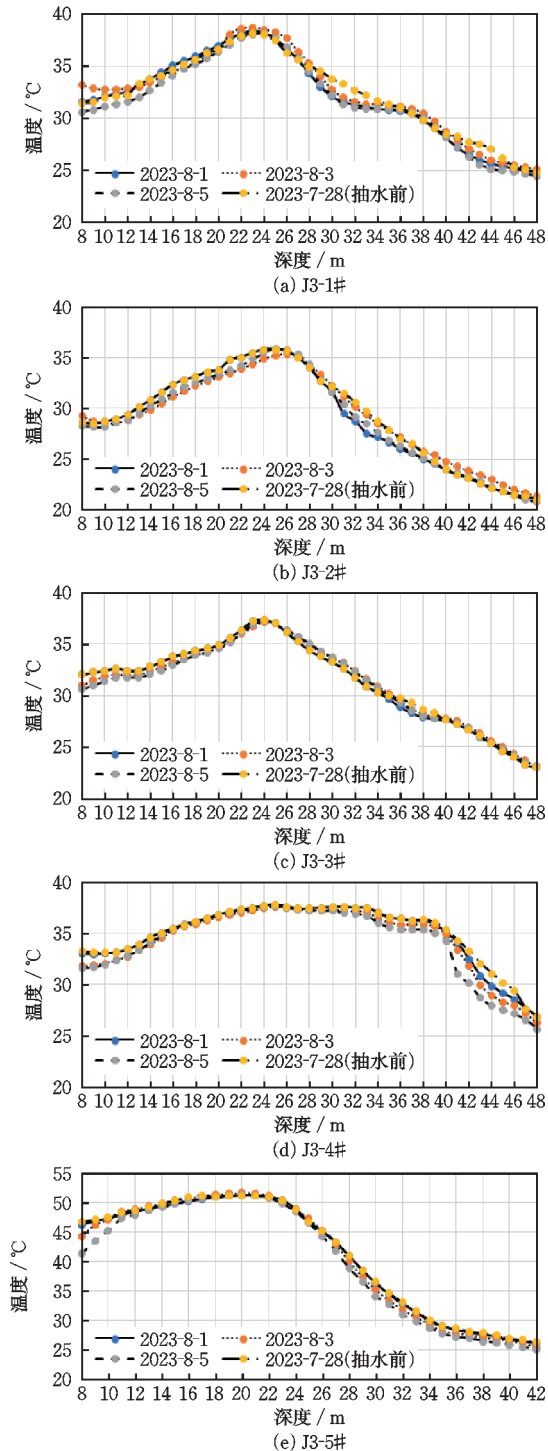


图7 实测J3井温度曲线

Fig.7 Measured temperature curve of J3 shaft

直线状或准直线状,形状上的任何改变都意味着温度异常。造成温度异常的原因是混凝土连续墙接缝存在渗漏,水泥水化热影响区外围地下水通过接缝渗漏向坑内流动,使渗漏路径上地下水温度降低,在温度曲线上具有温度负异常的特征。对比后发现,J3-1#孔负异常最为明显,在深度32 m和44 m

附近呈现两个负异常,J3-2#孔在33~34 m附近稍有微弱异常显示,J3-3#孔负异常在39 m附近,J3-4#孔负异常在42~44 m附近,而J3-5#孔没有异常显示。这说明J3-1#~J3-4#这些温度负异常位置,就是它们对应连续墙接缝存在渗漏缺陷的位置,但渗漏程度不同,而J3-5#对应接缝没有渗漏缺陷,不存在渗漏。

2.5.2 J7井测试分析

2023年10月9日(抽水前)和12日分别对五个测试孔进行了地下水温度测试,测试结果如图8所示。J7井温度曲线特点为:①各孔地下水温度普遍高于南京常温带温度,也高于夏季地下水变温带温度。②除了J7-3#外,其他4个孔抽水前后温度曲线几乎重合,说明这些孔对应接缝不存在渗漏。③J7-3#孔温度曲线在29 m附近出现异常,抽水后的温度低于抽水前的温度,表明该深度附近存在渗漏。

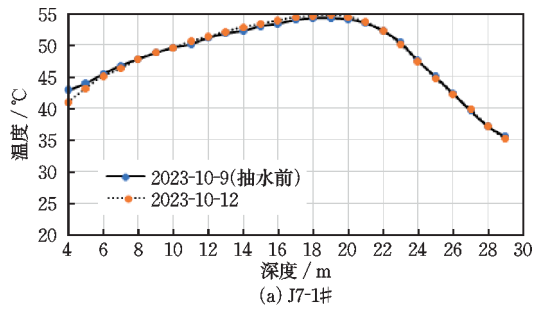
综上,J3井基坑地下连续墙接缝渗漏最为严重,渗漏部位在J3-1#孔32 m和44 m深附近,J3-2#孔33~34 m深附近,J3-3#孔39 m深附近,J3-4#孔42~44 m深附近;其次是J7井J7-3#孔29 m附近。

2.6 开挖验证

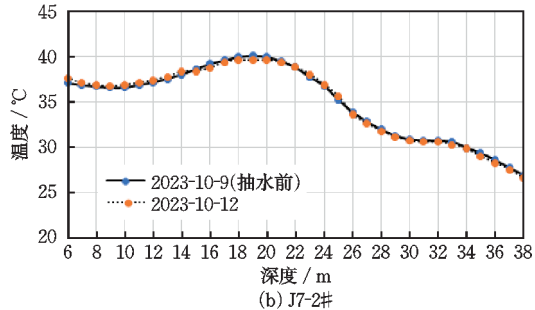
上述测试分析结论是否可靠需要通过开挖来验证,分为直接验证和间接验证。直接验证是指基坑设计开挖深度范围内的墙体,开挖后肉眼可直接观察到包括突水、流水、印水、干燥等现象。间接验证是指基坑设计开挖深度以下墙体,只能通过基坑抽水情况来判断。

结合表1和2.5节测试分析结果,所有接缝渗漏点位置都在基坑设计开挖深度以下。那么直接验证只要观察基坑壁是否干燥即可。实际开挖结果表明,2个基坑设计开挖深度范围内混凝土墙壁面都是干燥的,图9是J3井开挖后基坑壁面照片。

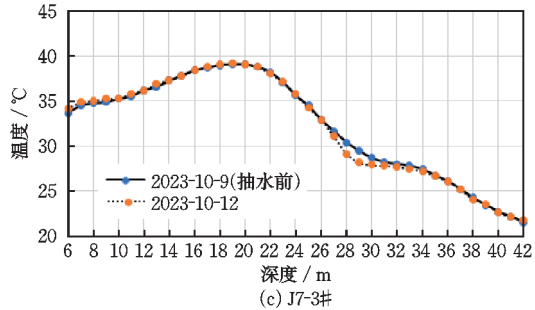
间接验证相对复杂,主要涉及基坑底部水泥土加固层。如果水泥土加固层防渗性能很好,那么即使坑底以下接缝存在严重渗漏,坑底也不会有涌水现象,否则坑底就会有水冒出。J3井接缝渗漏点最多,基坑一直维持2口管井抽水,出水流量约50~60 m³/h,用渗流达西理论估算从连续墙底部绕渗上来的水量远小于40 m³/h,这间接验证了连续墙接缝



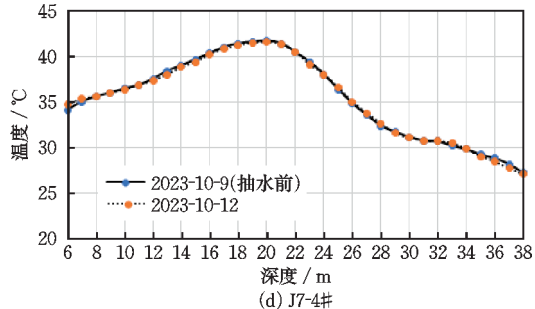
(a) J7-1#



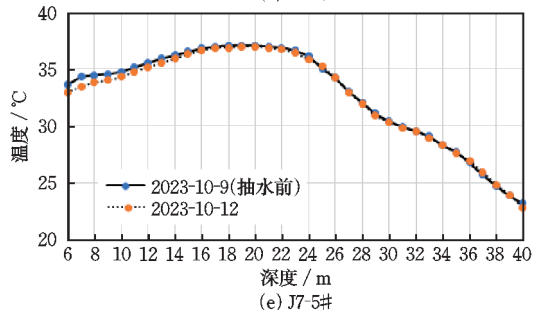
(b) J7-2#



(c) J7-3#



(d) J7-4#



(e) J7-5#

图8 实测J7井温度曲线

Fig.8 Measured temperature curve of J7 shaft

渗漏。J7井基坑开挖到15m深时出现了涌水,如图10所示。但开挖到设计深度后发现基坑壁都是干燥的,说明涌水来源于水泥加固层下方,水泥加固层本身有明显缺陷,地下水从缺陷处涌出。



图9 J3井开挖至坑底时接缝处照片

Fig.9 Photos of joint locations during excavation to bottom of J3 shaft



图10 J7井基坑涌水照片(15m深处)

Fig.10 Photo of surging water at J7 excavation face at depth of 15 m

3 结论

(1)工程活动可整体或局部改变防渗结构体附近地下水天然温度场,超深基坑防渗结构体渗漏缺陷会引起地下水垂向温度曲线的局部异常,这种局部异常恰好是判断渗漏缺陷的重要依据。

(2)地下连续墙周围地下水温度垂向分布规律受地下水渗流速度、地层岩性、含水量、水泥土含量和水化程度等因素影响,通过综合分析后获得地下水温度垂向分布标准曲线。基坑抽水前尽可能多次进行地下水温度测试可能获得更好的标准曲线。

(3)示踪测试孔内地下水温度异常将随着基坑内地下水位逐渐降低而显得越发明显,更容易精准判断接缝渗漏缺陷深度。但在基坑抽水后立即进行地下水温度测试,渗漏处温度变化十分微弱,为

捕捉微弱的温度异常,温度测试仪分辨率和稳定性十分重要。

(4)地下水温度作为一种天然示踪因子,在对超深基坑混凝土地下连续墙接缝渗漏缺陷精准探测分析判断上是可行的,值得包括混凝土地下连续墙在内的防渗结构体渗漏缺陷探测方面推广应用。

参考文献:

- [1] 张申,杨智,桂焱平,等.地铁深基坑围护结构渗漏病害规律分析[J].科技通报,2024,40(4):59-70.
Zhang S, Yang Z, Gui Y P, et al. Analysis on leakage disease law of metro deep foundation pit retaining structure [J]. Bulletin of Science and Technology, 2024, 40(4): 59-70. (in Chinese)
- [2] 刘俊城,谭勇,宋享桦,等.富水砂土基坑渗水对侧墙变形和周边环境的影响[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(3):530-541.
Liu J C, Tan Y, Song X H, et al. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(3): 530-541. (in Chinese)
- [3] 王宏坤.地下连续墙槽孔的超声波检测技术[J].岩土工程技术,1999,13(4):10-12,17.
Wang H K. Ultrasonic testing technique of trench in continuous concrete wall [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999, 13(4): 10-12, 17. (in Chinese)
- [4] 陈亮,颜书法,万昱.跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J].岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614.
Chen L, Yan S F, Wan Y. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1605-1614. (in Chinese)
- [5] 李奇涛,田野,董海洲,等.基于示踪连通试验和流速测试的地下连续墙渗漏研究[J].现代城市轨道交通,2022(3):44-48.
Li Q T, Tian Y, Dong H Z, et al. Study of underground diaphragm wall seepage based on hydraulic connectivity tracing and seepage velocity test [J]. Modern Urban Transit, 2022(3): 44-48. (in Chinese)
- [6] 高杉,宋思文.地下连续墙渗漏缺陷ECR检测技术应用及处理措施[J].施工技术,2019,48(增1):836-838.
Gao S, Song S W. Application and treatment measures of ECR detection technology for leakage defects of underground continuous wall [J]. Construction Technology, 2019, 48(Sup1): 836-838. (in Chinese)
- [7] 王成荣.基于光纤测温技术对地下连续墙接缝质量缺陷检测的研究[J].隧道与轨道交通,2021(4):26-28,55.
Wang C R. Research on detection of quality defects of diaphragm wall joints by fiber optic temperature measurement technology [J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(4): 26-28, 55. (in Chinese)
- [8] 刘建刚,洪光森.混凝土重力坝的渗漏及示踪探测研究[J].勘察科学技术,2009(5):21-24.
Liu J G, Hong G S. Study on leakage and trace detection of concrete gravity dam [J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(5): 21-24. (in Chinese)
- [9] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].7版.北京:地质出版社,2018.
Zhang R Q, Liang X, Jin M G, et al. Fundamentals of hydrogeology [M]. 7th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)
- [10] 陈建生,董海洲.堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究[M].北京:科学出版社,2007.
Chen J S, Dong H Z. Study on new theory and technology of dam leakage detection and tracing [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)