

地铁深基坑连续墙渗漏风险的量化控制

王 鹏¹ 钟有信² 杜广林³ 王 亮⁴

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430062, 武汉; 2. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁;
3. 广西帝坝科技有限公司, 530022, 南宁; 4. 中铁一局集团有限公司, 710054, 西安//第一作者, 高级工程师)

摘 要 深基坑连续墙止水帷幕发生渗漏, 会严重威胁工程建设安全。提出了一套基于声纳渗流测量原理的地下连续墙渗漏风险测量方法。以某地铁站基坑连续墙渗漏检测及堵漏效果为案例, 通过对该站 24 幅地下连续墙进行渗漏声纳检测, 并对测量结果进行分析计算, 获得了原位测量孔内渗透流速、渗流方向、渗流流量及渗透系数等参数的空间分布。计算结果与施工现场基本一致。基于可视化成像智能分析方法, 反演得到了复杂环境下地下水的三维空间可视化渗流场, 准确地确定了渗漏通道的位置, 用以指导局部封堵灌浆。灌浆前后渗流流速对比分析表明, 基坑渗漏得到有效控制。

关键词 地铁; 深基坑; 地下连续墙; 渗漏; 声纳检测; 三维渗流场

中图分类号 TU94+3.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.020

Quantitative Control of Diaphragm Wall Leakage Risk in Metro Deep Foundation Pit

WANG Peng, ZHONG Youxin, DU Guanglin, WANG Liang

Abstract The frequent diaphragm wall seepage flow in deep foundation pit during excavation will seriously threaten the safety of metro construction. Based on the principle of sonar seepage flow detection method, a diaphragm wall seepage risk measurement method is proposed. According to a practical project of diaphragm wall leakage measurement during deep foundation pit excavation, the sonar seepage flow detection method is applied to detect the seepage field of 24 diaphragm walls, the measurement results are calculated and analyzed. Using the calculated data, the spatial distribution of parameters is obtained, including seepage velocity per meter, seepage direction, seepage flow and permeability coefficient, and the calculation results are consistent with the construction site. On the basis of intelligent visualization analysis method, a three-dimensional visualization chart of seepage field is achieved after deduction, and the channel water curtain leakage is accurately detected, this chart is used to guide the local plugging grouting. A comparative analysis shows that the seepage velocity after the anti-seepage plugging measure is significantly reduced, and the potential risk of pipeline leaking is effectively controlled.

Key words metro; deep foundation pit; diaphragm wall; leakage; sonar detection; three-dimensional seepage field

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430062, Wuhan, China

随着城市轨道交通的快速发展以及地下空间的进一步开发, 基坑工程的建设规模向更深、更大的方向发展。地下连续墙止水帷幕的施工质量对基坑工程安全至关重要。但受当前施工技术的限制和复杂地质条件不确定因素的影响, 止水帷幕渗漏现象时有发生。一旦因止水帷幕缺陷造成管涌渗漏, 基坑稳定性将存在巨大的安全风险。据统计, 造成国内轨道交通建设事故的主因分别为渗流破坏(62%)、支撑失稳(13%)、坑内滑坡(13%)、机械伤人(8%)、踢脚破坏(2%)和突涌破坏(2%)等。可见, 地下连续墙渗漏是主要的工程事故诱因^[1-3]。因此, 在基坑开挖前, 准确检测出墙体是否存在渗漏, 并有针对性地采取超前补强措施, 可有效规避基坑渗漏风险。

目前, 止水帷幕缺陷的检测方法主要是通过坑内降水并观察坑外水位变化情况^[4-5]。该方法仅能做出定性判断, 无法定量确定缺陷的空间位置、渗流量和渗流速度, 从而难以指导增强堵漏方案的设计和施工。因此, 既不受环境条件制约又能准确全面获得水文地质参数的方法亟待创新, 特别是基于新技术手段, 亟待研究出先进、成熟、准确的检测止水帷幕缺陷渗流的新方法^[6-9]。

1 声纳渗流测量原理

声纳渗流探测技术, 是利用声波在水中的优异传播特性, 实现对水流速度场的测量。如果被测水体存在渗流, 则测点必然存在渗流场, 声纳探测器阵列能够精细地测量出声波能量在流体中传播的大小与分布。依据探测器阵列测量数据的时空分布, 即可检测出渗流发出的方向^[7-8]。

图1为三维流速矢量测量技术原理图。利用渗流声源方向上的传感器2与探头顶传感器1的距离和相位之差,建立连续渗流场的流速方程:

$$U = -\frac{L^2}{2X} \left(\frac{1}{t_{1,2}} - \frac{1}{t_{2,1}} \right)$$

式中:

U ——两传感器之间声道上的平均流速;

L ——声波在传感器之间传播路径的长度;

X ——传播路径的轴向分量;

$t_{1,2}, t_{2,1}$ ——从传感器1到传感器2和从传感器2到传感器1的传播时间。

轴向流速矢量的方向可以根据时间 $t_{1,2}$ 和 $t_{2,1}$ 的大小关系确定,径向流速矢量的方向可以通过将不同传感器之间测得的流速投影到直角坐标系中进行确定。

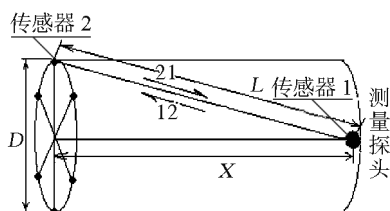


图1 三维流速矢量声纳测量仪原理图

2 声纳渗流测量方法

基于现有三维流速矢量声纳测量系统进行渗流测量。该系统由声纳测量探头、电缆和笔记本电脑三部分组成^[8]。在进行现场渗流测量之前,必须根据室内标准渗流试验对设备进行基本参数标定。在室外现场测量时,将声纳测量探头放入水文地质测量孔水面以下开展测量工作。测量从地下水位开始,顺序为自上而下,每1 m设置一个测量点,1个测点上的测量时间为1 min。该点测量完成后,测量数据将自动保存在电子文档中,再进行下一个点的测量,直到测至孔底。

3 地铁基坑连续墙渗漏及堵漏检测案例

3.1 案例概况

南宁某地铁站位于邕江南岸,基坑底部的砾石层较厚,且与邕江水相通。地下连续墙深度为地表以下49 m,并进行基岩隔断承压水,为施工难度极高的地下隐蔽工程。当基坑开挖至接近底板时,基坑内漏水量超标,水位升高,开挖困难。施工方曾采取高强度的灌浆,但对堵漏无任何效果。因此,采用

三维流速矢量声纳测量仪针对相关的24幅地下连续墙的止水效果进行了渗漏声纳检测,并对测量结果进行了分析计算,获得了原位测量孔内每米渗透流速、渗流方向、渗漏流量及渗透系数等数据的分布情况。

3.2 现场渗漏测量分析

图2为24个测孔单位时间的渗漏量结果,24个测量孔总渗漏量为 $3.82 \times 10^5 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。其中:有5个测孔的渗漏量显著高于其他测孔的结果,分别是8#、15#、16#、14#、7#;除7#孔外,其余4个测孔的渗漏流量均超过 $4.96 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。通过对比,判明上述5个孔发生了大量渗漏,这与现场降水施工所观察到的渗漏结果完全一致。

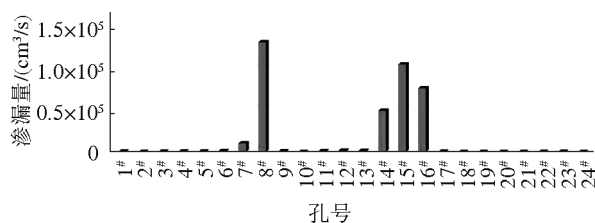


图2 车站基坑单孔声纳渗漏流量柱状图

渗漏流速作为基坑渗漏的关键指标之一,其大小及分布可以有效反映渗漏发生的空间位置,为后续堵漏施工提供准确的位置信息。24个测孔的渗漏流速的渗漏分布如图3所示。8#测孔是本项目施工中渗漏量最大的位置,其所测得的渗漏流速也比其他测孔大得多。通过图3可知,8#测孔的渗漏发生在深度17~22 m的位置。15#测孔的渗漏主要发生在21~27 m深度处,测孔16#在18 m和23 m处有两个明显的渗漏点。从平均流速看,数据分别为:8#孔 0.526 cm/s;15#孔 0.420 cm/s;16#孔 0.306 cm/s;14#孔 0.198 cm/s;7#孔 0.416 cm/s。平均流速的计算结果与图2中的渗漏量也相匹配。

为了能够更加清晰地认识渗漏破坏发生的原因和机理,基于声纳渗流测量的大量数据,反演计算得到了整个空间域的渗流场。如图4所示,将现场测量得到的所有540组(每组由60万个物理测量值组成)声纳原位测量数据导入声纳渗流可视化成像智能专家分析系统,反演得到了三维可视化空间渗流场。该渗流场同时包含了流速、流向和流量等的信息,这使得三者之间的相关分析成为可能。图4以指定三维坐标位置球形的大小来表征流量的大小,清晰地呈现了深基坑周围区域的渗漏流场,局部渗流流速异常大的位置正是止水结构有缺陷的位置。图

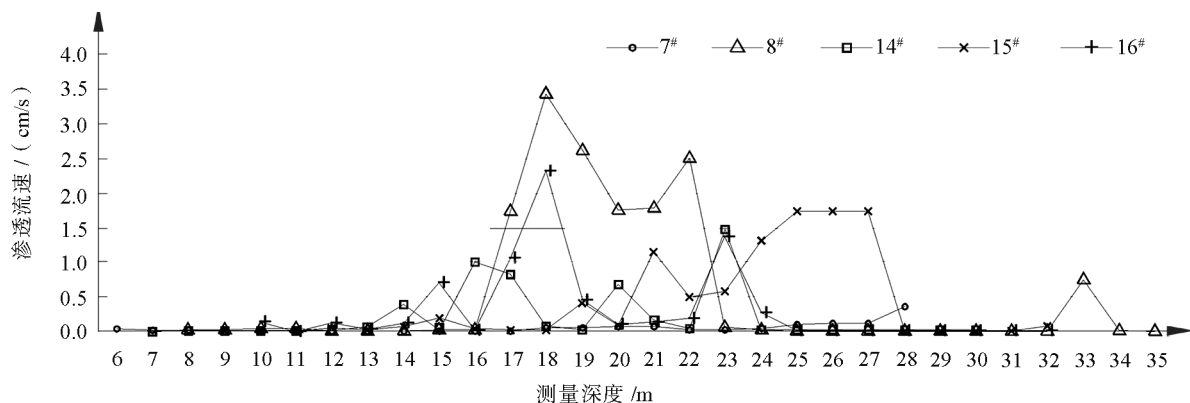


图3 各测量孔渗漏流速随测量深度分布曲线

4还全面地呈现了不同测井渗漏之间的关系:8#孔渗漏最大,其周围的测孔渗漏则较少。这说明了8#号测井位置止水结构施工时局部出现较大缺陷,同时周围止水较好,导致该处渗漏显著。14#、15#和16#三个测井在大致相同的深度范围发生大量渗漏,同时7#测井的位置也与上述三个测井接近,说明了此处渗漏的发生存在一定的相关性,可能是存在显著不良地质体或者存在系统性的施工缺陷。

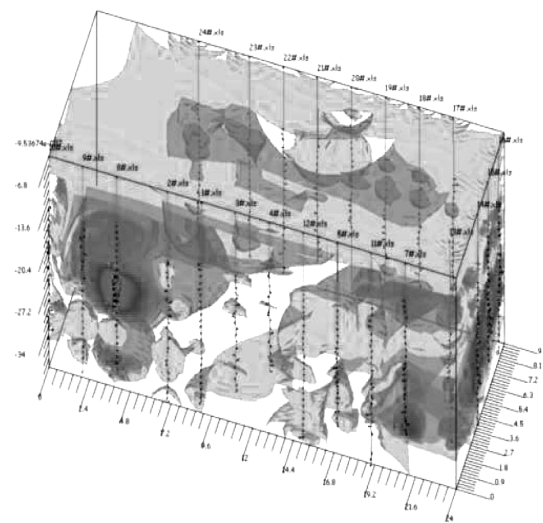


图4 车站基坑声纳渗流场三维成像截图

基于声纳技术测得的大量流速空间分布数据反演计算出三维流速等值线截图,如图5所示。流速的大小是以等值线的密度与色彩的深浅表示的,这为科学设计堵漏方案提供了直接有效的数据支持。

从以上数据分析可知,有5个测量孔的平均渗透流速大于0.1 cm/s,属超标流速,存在较大安全隐患。

针对5个渗漏异常位置设计合理的堵漏方案,渗流方向的识别至关重要。基于声纳渗流矢量的确定方法,图6给出这5个渗漏流场的主方向,其中:

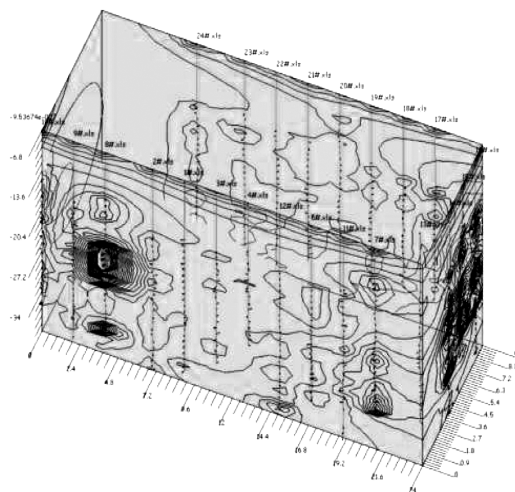


图5 车站基坑声纳渗流三维流速等值线截图

箭头的长度表示渗透流速的大小,箭头的方向显示渗透流速的指向。探测数据为现场施工堵漏指明了位置和方向。

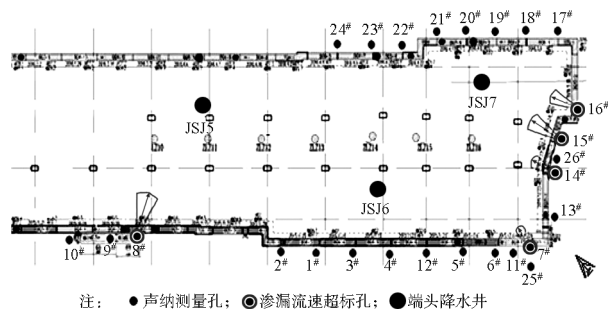


图6 车站基坑声纳测量渗漏方向图

3.3 灌浆堵漏效果分析

针对探明的连续墙渗漏通道,本项目进行了灌浆处理,然后再次进行声纳渗漏检测。选择7#孔和14#孔前后两次测量数据进行对比,分析处理方案的效果。总体上,灌浆封堵效果显著,达到预期的处

理效果。如图7、图8所示,从局部堵漏效果看,14#孔主要渗漏通道得到了显著抑制,处理后的渗漏流速及渗漏量极小,可以忽略不计。相比而言,如图9所示,7#孔的灌浆封堵效果不如14#孔,该孔处理后的平均渗透流速在 3×10^{-4} cm/s至 5×10^{-4} cm/s之间,仍然偏大。但较处理前,7#孔的渗漏流速已显著降低,主要的渗漏通道也得到了有效控制。

本项目在针对性局部灌浆后,再次观测了坑内降水效果。如表1所示,堵漏灌浆前(9月份)和灌浆后(10月份)进行对比,3个端头降水井(JSJ5、JSJ6、JSJ7)的坑内排水量均有所下降。特别是端头降水井

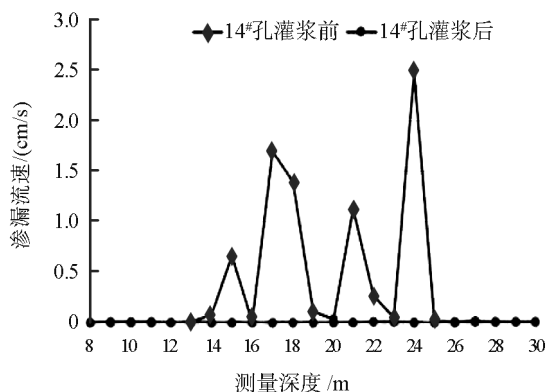


图7 车站14#孔灌浆前后渗漏流速对比曲线

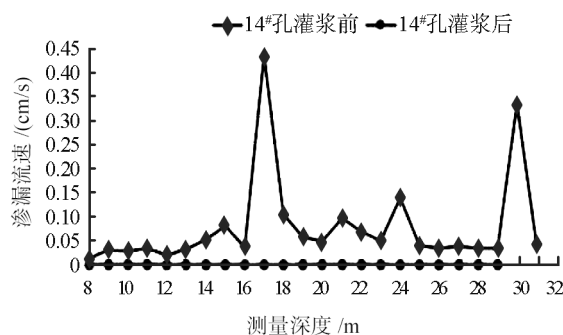


图8 车站14#孔灌浆前后声纳渗漏检测对比曲线

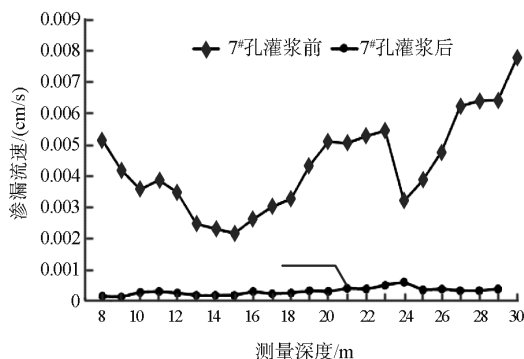


图9 车站7#孔灌浆前后渗漏流速对比曲线

JSJ7,其排水总量是14#、15#和16#等3个孔排水量之和,减小了83.5%,坑内降水得到了有效控制。

表1 灌浆前后端头降水井排水量对比表

端头井号	排水量/(m ³ /d)																		减少率/%
	9月(灌浆前)									10月(灌浆后)									
	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	累计	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	累计	
JSJ5	46	58	66	25	53	47	53	59	407	38	39	48	29	43	47	48	50	342	16.0
JSJ6	79	81	92	71	118	79	118	120	758	48	44	53	30	44	45	61	48	373	50.8
JSJ7	100	109	143	106	242	202	242	252	1 396	0	7	14	34	48	52	21	54	230	83.5

4 结语

采用声纳渗漏检测法对24幅地下连续墙止水结构进行渗流检测,可快速、准确地确定渗漏通道的位置。在此基础上指导局部封堵灌浆,从而使基坑渗漏水量迅速得到控制,并验证了灌浆效果。声纳渗漏检测为深基坑止水结构渗漏检测预警、风险治理、应急事故处置等方面提供了完整的渗漏缺陷解决方案,为同类型地铁深基坑地下连续墙缺陷堵漏提供了可靠的技术参考。

参考文献

- [1] 丁春林.软土地区弱透水层承压水基坑突涌计算模型研究[J].工程力学,2008,25(10):194.
- [2] 翁其平,王卫东.深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J].岩土工程学报,2008(增刊1):343.
- [3] 谭松林.考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析[J].中国地质大学学报(地球科学),2002,27(2):209.
- [4] CLOUGH G W,ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls [C]//Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures,1990:439-470.
- [5] TSUI Y,CHENG Y M. A fundamental study of braced excavation construction [J]. Computers and Geotechnics,1989,8(1):39.
- [6] 郑剑升,张克平,章立峰.承压水地层基坑底部突涌及解决措施[J].隧道建设,2003,23(5):25.
- [7] 杜国平,郑喜莲,王律,等.航空定向技术在地下水流速流向中的应用研究[J].南京航空航天大学学报,2000,32(4):483.
- [8] 杜家佳,杜国平,曹建辉,等.高坝大库声纳渗流检测可视化成像研究[J].大坝与安全,2016(2):37.
- [9] 杨建民,郑刚.基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J].岩土力学,2009,30(1):261.

(收稿日期:2018-12-17)