

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201908044

基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析

江杰^{1,2}, 魏丽^{1,2}, 钟有信³, 胡盛斌³, 杨杉楠^{1,2}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西南宁 530029)

摘要: 随着声纳渗流检测技术在水文地质勘探中的应用,其测量结果精度的高低对获取的水文地质参数的准确性起着至关重要的作用。文章依托南宁某基坑工程,采用现场试验方法,同时考虑天然流场和人工流场,分三个阶段对基坑止水帷幕进行声纳渗流检测,对比不同阶段渗漏缺陷暴露的情况,同时根据渗透流速量级变化判断其检测结果精度的高低,并在实际工程中验证其准确性。研究结果表明:不同降水阶段的渗透流速大小变化显著,基坑地下水位降深每增加10 m,声纳检测到的渗透流速平均提高1~2个量级。其原因为降水导致基坑内外水头差增大,水力坡度的增加使渗漏缺陷附近的渗流场发生变化,高水头作用下渗透流速变化明显,渗漏缺陷定位更加精准,声纳检测精度也越高。可见,抬高基坑内外水头差对墙体渗漏缺陷的精准定位十分必要。因此,在对基坑止水帷幕采取声纳渗流检测时,建议将地下水位降至基坑底板以下,以提高检测结果的精度,有效探测止水帷幕渗漏风险。

关键词: 声纳渗流检测; 基坑降水; 水头差; 渗透流速; 渗漏缺陷

中图分类号: TU46⁺3; P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0073-08

Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy

JIANG Jie^{1,2}, WEI Li^{1,2}, ZHONG Youxin³, HU Shengbin³, YANG Shannan^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning, Guangxi 530004, China;
3. Nanning Rail Transit Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract: With the application of sonar seepage detection technology in hydrogeological exploration, the accuracy of the measurement results plays an important role in obtaining accurate hydrologic parameters. Based on a foundation pit project in Nanning of Guangxi, this paper adopts the method of field test and considers the combination of natural flow field and artificial flow field. Sonar seepage detection was carried out on the foundation pit waterproof curtain in three stages, and the exposure of leakage defects at different stages is compared. The accuracy of the measured results is judged according to the change of the magnitude of osmotic velocity. The correctness is verified in the actual engineering progress. The research results show that the permeability velocity varied significantly in different precipitation stages, and with each 10 m increase in the depth of foundation pit water level, the seepage velocity detected by sonar seepage increases by an average of 1 to 2 orders of magnitude. The reason is that the difference between the water head inside and outside the foundation pit is increased due to precipitation, and the increase of hydraulic gradient makes the seepage field near the leakage defect change. Under the action of high water head, the seepage velocity changes obviously, so the location of the leakage defect is more accurate, and the accuracy of sonar detection is also higher.

收稿日期: 2019-08-25; 修订日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568006); 广西自然科学基金资助项目(2018JJA160134)

第一作者: 江杰(1979-), 男, 研究员, 主要从事岩土地下工程的研究。E-mail: jie_jiang001@126.com

Therefore, it is very necessary to raise the head difference between the inside and outside of the foundation pit to accurately locate the wall leakage defects. When the sonar seepage detection is adopted, it is recommended to lower the groundwater level below the foundation pit floor, so as to effectively detect the risk of seepage of waterproof curtain.

Keywords: sonar seepage detection; foundation pit dewatering; water head difference; seepage velocity; leakage defect

长期以来,如何准确测量水文地质参数一直是水文地质工作者重要的研究内容^[1]。目前,普遍采用的水文地质探测方法有抽水试验、注水试验、压水试验^[2-5]等,这类方法具有成本高、难度大、周期长等特点。声纳渗流检测技术利用声波在水下的传播特性,通过电声转换和信息处理完成水下探测,从而获得原位水文地质参数^[6-8]。该方法将矢量声纳技术^[9]引入地下水渗漏探测,具有定位准、精度高、成本低等特点,成为水文地质勘探一个新的研究方向。

声纳渗流检测技术首先被应用于水利工程大坝的渗流场测量,而后逐渐在排水管道、地铁联络通道、深基坑止水帷幕等的渗漏检测中得以应用。刘迪等^[10]、高大水等^[11]和杜家佳等^[12]利用声纳探测器对水利闸坝进行天然流场的声纳渗流检测,成功检测出渗漏部位,为后续的渗漏处理提供了有力支撑;白丁^[13]利用声纳技术检测排水管道的内壁情况,检测结果可直观反映纵向段管道的过水面积和管道内部缺陷的实际情况;郑伟强等^[14]将声纳渗流检测技术应用于地铁车站,对天然状态下的渗流场进行检测,从而得出工程所需的水文地质参数;胡盛斌等^[15]对地铁联络通道进行声纳渗流检测,快速找出渗漏部位,提前采取措施防控了涌水渗漏风险;王鹏等^[16]、杜家佳等^[17]、庞振勇等^[18]将声纳渗流检测技术引入深基坑止水帷幕的渗漏检测中,明确指示出渗漏部位,指导了施工。以上学者结合具体工程进行声纳渗流检测,并找到对应渗漏缺陷,然而降水对声纳渗流检测精度的影响还少有学者进行探讨。在对基坑止水帷幕进行声纳渗流检测时,通常需要通过降水营造人工流场环境。降水在基坑内外形成水头差,水力坡度的增加使渗流场发生变化,对检测结果精度也会产生一定影响,检测结果精度的高低又会对止水帷幕渗漏治理工程设计方案产生较大影响。

本文以南宁轨道交通 5 号线广西大学站为工程背景,设计了天然流场和人工流场状态下声纳渗流检测的现场试验方案,旨在分析基坑内外不同水头差状态下止水帷幕的声纳渗流检测结果,进而研究各个阶段

渗流场分布规律。通过对比不同阶段止水帷幕渗透流速的变化,根据所暴露出的渗漏点位置及规模和渗透流速的量级大小评估检测结果的精度,并在实际工程施工中进行验证,为类似工程的渗漏风险控制治理提供借鉴和指导。

1 声纳渗流检测技术

声纳渗流检测技术是利用“震电效应^[19]与声纳测量技术”的融合,借助海军声纳监听技术^[20],将传统的水力梯度重力下的渗流测量问题上升到利用含流体多孔介质中固-液交界面上的双电层化学作用,探测出微渗透力的大数据解析路径,其测量精度将比传统测量数据提高 2~3 个量级。利用声纳对水流声音高度的敏感性,构建声纳探测器阵列,精细地测量出水流声波能量场分布,再以高速率的声场数据采集系统进行数据建模并解析成像,从而得出地下渗流场(流速、流向、流量、渗透系数)的可视化大数据解析成果。在基坑开挖之前,以数字化三维渗流成像技术标记出止水帷幕渗漏的位置,有针对性地对止水结构采取超前止水补强措施,并对所采取的效果进行验证与评估,以有效规避基坑安全风险。

1.1 声纳渗流检测原理

声纳渗流矢量法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,则必然在测点产生渗流场,声纳探测器阵列能够精细地测量出声波在流体中能量传递的大小与分布。依据声纳阵列测量数据的时空分布,即可显示出渗流声源发出的方向;同时利用渗流生源方向上的声纳探测器的距离和相位之差,可建立连续的渗流场的水流质点流速方程,如图 1 所示。

声波在静止水体中的传播速度为一常数 C ,逆流从传感器 B 传送到传感器 1 的传播速度被流体流速 U 影响从而减慢,其流速方程式为:

$$\frac{L}{T_{B1}} = C - U \left(\frac{X}{L} \right) \quad (1)$$

声波顺流从传感器 1 传送到传感器 B 的传播速

后,继续进行第二次基坑地下水位降深,将基坑内的地下水位测量值降到开挖底板以下 2 m(约 28 m),待地下水位稳定 12 h 后,进行地下连续墙接缝声纳测量孔的测量。

随着降水深度的变化,基坑内外水头差也增加,依

据测量数据模拟不同降水环境下地下连续墙周边流速分布,从而判断墙体渗漏缺陷位置。比较三阶段渗漏位置的暴露数量、精度以及渗漏数据,综合得出三阶段地下连续墙渗漏缺陷位置的流速量级,并以流速作为判断渗漏缺陷的指标。

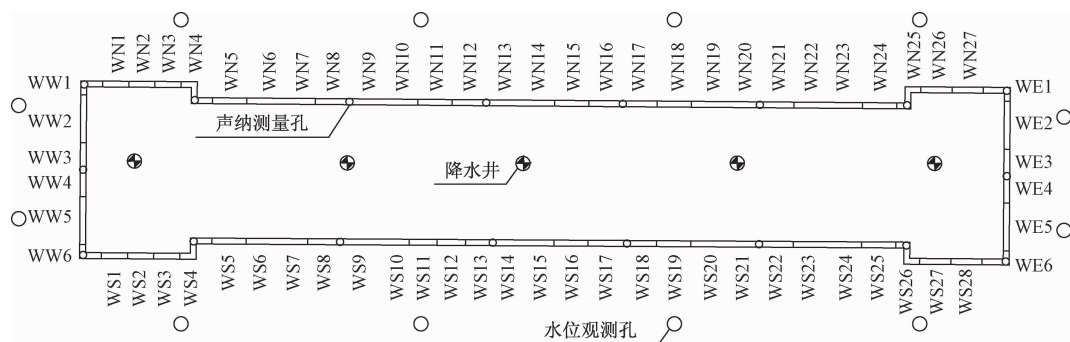


图 3 声纳渗流检测孔位布置图

Fig. 3 Arrangement diagram of sonar inspection hole

3 试验结果及分析

本文现场试验的目的是评估人工降水对声纳渗流检测精度的影响。因此,为了更好地比较分析,进行三组基坑内外不同水头差状态下墙体周边渗流场测量的现场试验,同步记录测量结果并进行分析。通过测量模拟三阶段地下连续墙周边流速分布,综合得出不同降水阶段地下连续墙渗漏缺陷处的流速。然后筛选出流速较大的个别墙缝,分析其在三个阶段沿高程分布的流速变化,从而确定各墙缝相应高程的渗漏缺陷,以达到精确判断渗漏位置、精准进行补漏预

防的目的。

3.1 三阶段各墙缝流速变化

为直观比较天然流场和人工流场两次降深状态下渗漏缺陷的位置,绘制各墙缝的流速分布云图(图 4)。通过三阶段云图的比较可以看出,天然流场状态下流速较小,各墙缝沿高程的流速差异并不明显,表现为流速等值线云图梯度较小,渗漏位置比较模糊;人工流场降深为 18 m 时,流速变大,渗漏位置逐渐清晰,表现为流速等值线梯度相应增大,各渗漏位置的流速等值线曲线逐渐独立;当降深为 28 m 时,流速变化又增加一个量级,此时的流速等值线已经充分独立。

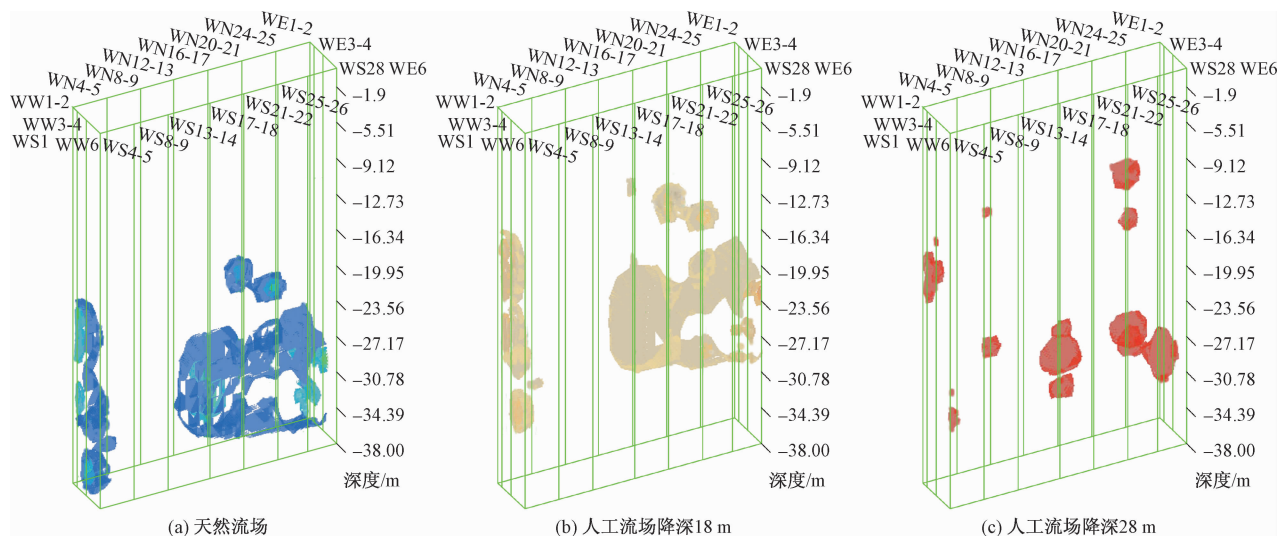


图 4 各墙缝流速分布云图

Fig. 4 Velocity distribution cloud of each wall mullion

各墙缝平均流速变化趋势如图5所示。从图中可以看出总体流速变化趋势,天然流场状态下各墙缝流速值大都集中在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,而人工流场状态下降深为18 m时流速分布集中在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,降深为28 m时流速集中在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。随着水位每下降10 m,水头差变大,势能增大,地下水的总机械能增大,从而转化为动能增大,表现为流速变大。随降深每增加10 m,流速平均增加一个量级,这是降水暴露墙体渗漏缺陷的根本原因。从局部来看,由于总势能的变大,在墙体的渗漏缺陷处,流速变化显著,而在其他相对不透水的位置流速变化比较小。在本试验测量地下连续墙接缝的18个测量孔中,有4个测量孔的渗透流速平均值超过 $2.00 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,按大小排序依次为WW1-2、WS21-22、WN24-25、WN16-17,具有明显的渗漏通道特征。这四个测量孔有两个在基坑拐角处,可见,基坑拐角处的止水帷幕易发生渗漏,需引起重视。进一步地,对发现的这四处渗漏墙缝逐个分析,找出对应墙缝渗漏点的具体高程位置。

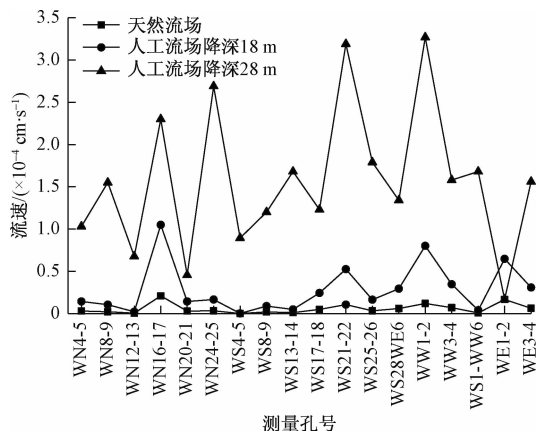


图5 各墙缝平均流速图

Fig.5 Average velocity in wall mullions

3.2 三阶段渗漏墙缝流速变化

通过观察18幅墙缝的流速分布云图和平均渗透流速结果,可知渗漏通道在WW1-2、WS21-22、WN24-25、WN16-17这4幅墙缝处,这4幅墙缝的流速沿高程具体分布情况如图6所示。

从图6可知,天然流场状态下流速量级为 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,个别高程处流速有较小波动,无法判别渗漏点高程位置;降深18 m时流速量级为 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,不同高程处流速出现明显波动,较大流速分布的范围逐渐扩大,渗漏位置逐渐显露;降深28 m时流速量级接近 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,随着水头变大,流速高

低变化起伏明显,较大流速集中分布的高程范围缩小分离,渗漏位置逐渐精确。

3.3 渗漏墙缝流速矢量方向分布

声纳矢量技术可对每个探测点进行 360° 全方位的渗流流速测量,不同方向的流速投影到笛卡尔坐标系中即可得到渗流流速的矢量方向。渗漏墙缝WW1-2、WS21-22、WN24-25、WN16-17的流速矢量方向分布见图7,箭头方向对应流速的矢量方向,箭头长度对应流速的大小。

该图显示在高水头作用下止水帷幕各渗漏点的具体渗流方向。从图中可以看出,这4个墙缝的渗流方向均指向基坑,这是因为基坑内外降水形成水头差,地下水形成水头由高到低的渗流,在有渗漏点的部位通过渗漏缺陷流向基坑内部,形成渗漏通道。在图中未发现指向基坑止水帷幕底部的渗流,因此可判断基坑止水帷幕底部未发生绕流现象。

通过以上分析可知,三个阶段流速前后变化较大,且流速值较高的高程为渗漏缺陷位置,需对其采取补强加固措施进行处理;三个阶段流速变化较小或流速值未达风险预警值的高程位置为相对不渗漏位置,无需进行特殊处理。在本试验中,渗漏缺陷所在位置即为图6中流速值超过预警线的对应高程。至此,通过分析18幅墙缝在三个阶段的流速变化过程,对可能产生渗漏缺陷的4幅墙缝完成排查,进而对相应墙缝的渗漏缺陷深度完成定量精确锁定。

4 验证复测及处理

针对广西大学站基坑止水帷幕有渗漏风险的4幅墙缝,在测量数据的指导下,采取了针对性的灌浆处理措施,并对灌浆处理后的墙缝进行验证性测量,以详细说明堵漏效果。灌浆前后渗透流速测量对比数据如图8所示。从局部堵漏效果看,这4幅墙缝偏大的渗透流速明显减小,灌浆后测量数据均减小1~2个量级,应急处理措施效果明显,渗漏风险得到了控制。

经后期现场开挖查勘,在声纳渗流检测出的渗漏缺陷位置处,止水帷幕暴露部分呈现出帷幕搭接不佳现象,且止水帷幕大部分处于富水粉细砂及圆砾地层中,地层渗透性强,少量孔隙水由此涌出,实测涌水流速为 $9.24 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,声纳渗流检测的渗漏流速为 $8.87 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,与现场实际情况相吻合。在随后开挖期间,止水帷幕未出现大量涌水涌砂现象,于2018年12月底全面封底。由此可见,超前实施定量定位检测、预防、封堵,可有效控制渗漏水隐患,是保证基坑顺

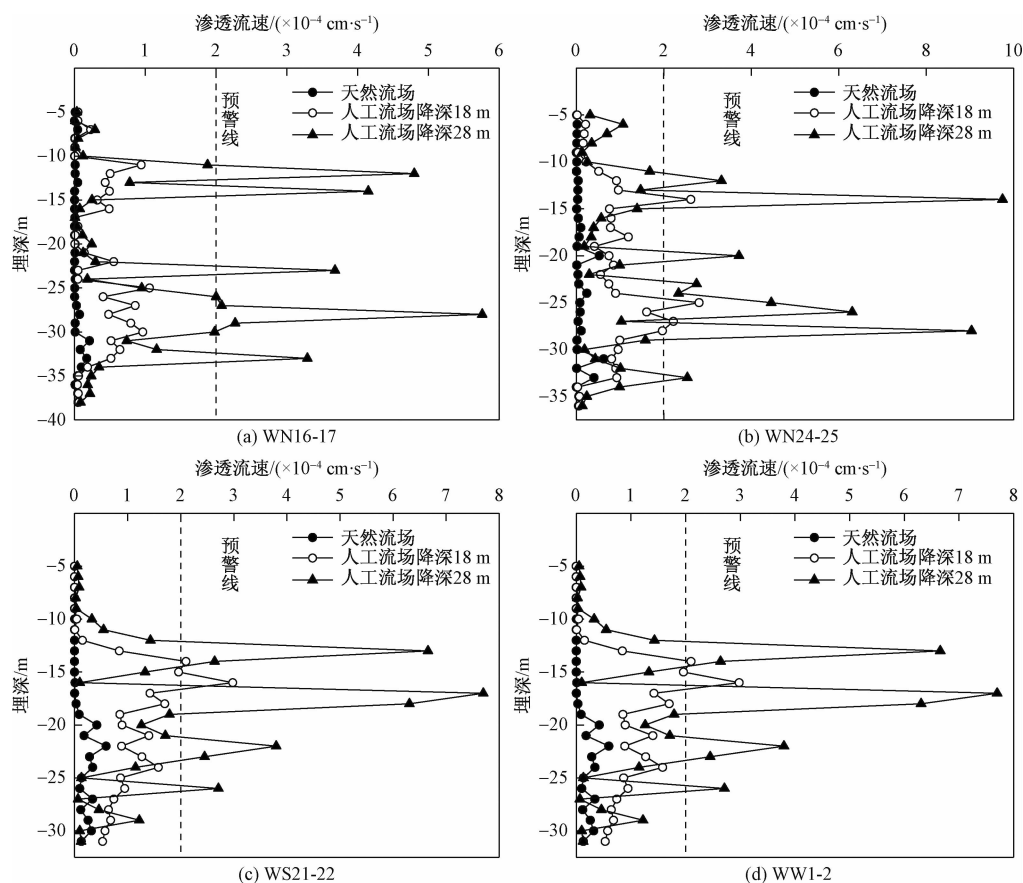


图 6 渗漏墙缝流速沿深度分布图

Fig. 6 Velocity distribution along the depth in leakage cracks

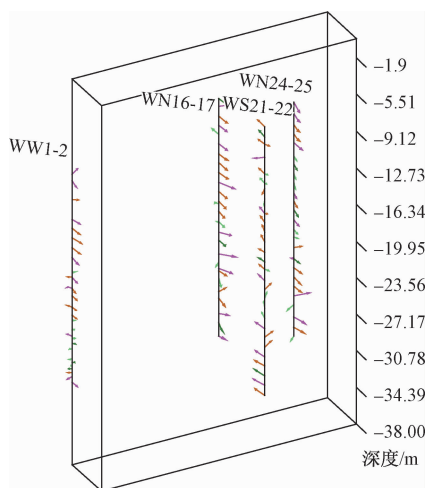


图 7 渗漏墙缝流速矢量方向分布图

Fig. 7 Velocity vector direction distribution in leakage cracks

利开挖的重要保证。

5 结论及建议

(1) 地下水位每下降 10 m, 声纳渗流检测所测得

的渗透流速平均增加 1 ~ 2 个量级, 检测结果精度提高, 渗漏位置也逐渐精确, 为止水帷幕渗控风险治理提供精确指导。

(2) 在进行深基坑声纳渗流检测时, 应提前进行基坑降水, 建议将地下水位下降至基坑底板以下, 因较大的水头差有助于提高声纳渗流检测的精度, 从而精准定位渗漏缺陷并进行针对性补强加固, 为后续防渗治理节省经济成本。

(3) 声纳渗流检测技术可根据工程需要加密测量, 当渗漏检测异常时, 应加密测点的布置, 并依据前次测点的指示方向跟踪渗漏的准确位置。同时采取补强加固措施, 并对加固效果进行验证性复测, 对复测不达标的渗漏点, 重新加固灌浆, 直到止水帷幕的止水功能满足要求后, 方可进行土方开挖。

(4) 声纳渗流检测仍存在技术方面的不足, 如在机械振动的噪音环境下工作, 其声波信号会受到干扰, 进而使测量结果产生一定的误差。因此, 如何有效地去噪, 滤波, 从而提高测量结果的准确性, 成为该技术下一步急待解决的问题。

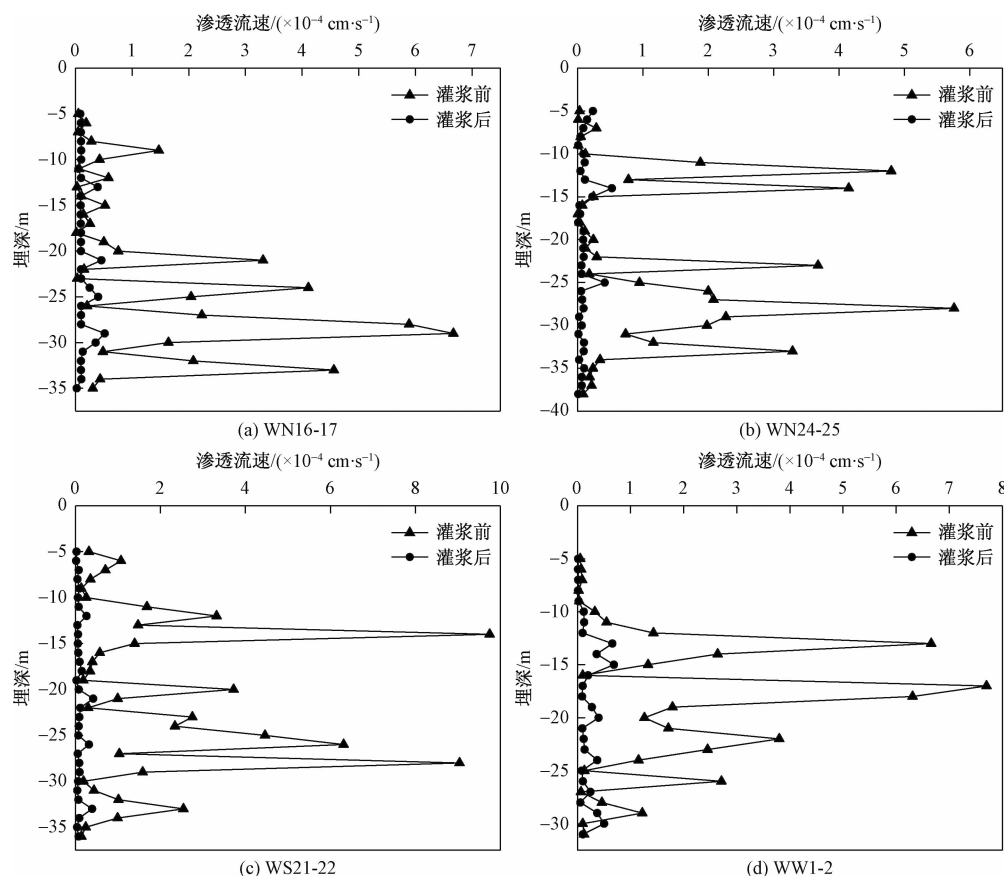


图8 渗漏墙缝灌浆前后流速对比图

Fig.8 Comparison diagram of leakage cracks velocity before and after grouting

参考文献 (References):

- [1] 周志芳, 庄超, 戴云峰, 等. 单孔振荡式微水试验确定裂隙岩体各向异性渗透参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 271-278. [ZHOU Z F, ZHUANG C, DAI Y F, et al. Determining anisotropic hydraulic conductivity in fractured rocks based on single-borehole slug tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 271-278. (in Chinese)]
- [2] 徐亚, 胡立堂, 刘玉强, 等. 双层抽水试验中观测井井筒效应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 36-42. [XU Y, HU L T, LIU Y Q, et al. Numerical simulation study on wellbore effects of observation well in pumping test of double-aquifer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 36-42. (in Chinese)]
- [3] 王新峰, 梁杏, 孙蓉琳, 等. 一种层状岩体压水试验成果计算分析渗透性的新方法[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 46-52. [WANG X F, LIANG X, SUN R L, et al. A new method of hydraulic conductivity calculating and analysis by water pressure test in layered rock [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 46-52. (in Chinese)]
- [4] 原国红, 马琳. 水文地质参数自动监测处理系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 834-839. [YUAN G H, MA L. Development and application of auto hydrogeological parameters monitoring and data processing system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 834-839. (in Chinese)]
- [5] 张必昌, 胡成, 陈刚, 等. 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 62-69. [ZHANG B C, HU C, CHEN G, et al. Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 62-69. (in Chinese)]
- [6] ROGERS A, MANES C, TSUZAKI T. Measuring the geometry of a developing scour hole in clear-water conditions using underwater sonar scanning [J].

- International Journal of Sediment Research, 2020, 35 (1): 105 – 114.
- [7] 赵冬冬, 刘雪松, 周凡, 等. 兼顾远场和近场性能的便携式三维声纳设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(2): 364 – 372. [ZHAO D D, LIU X S, ZHOU F, et al. Design of portable three-dimensional sonar for both far-field and near-field[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 364 – 372. (in Chinese)]
- [8] 钟世航, 孙宏志, 李术才, 等. 隧道及地下工程施工中岩溶裂隙水及断层、溶洞等隐患的探查、预报[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3298 – 3327. [ZHONG S H, SUN H Z, LI S C, et al. Detection and forecasting for hidden danger of karst fissure water and other geological disasters during construction of tunnels and underground projects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3298 – 3327. (in Chinese)]
- [9] 杜国平, 杜家佳, 宋晓峰, 等. 三维流速矢量声纳测量系统[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(3): 359 – 367. [DU G P, DU J J, SONG X F, et al. [3D velocity vector sonar measurement system [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16 (3): 359 – 367. (in Chinese)]
- [10] 刘迪, 李雪娇, 于艳秋. 声纳渗流检测于桥水库大坝渗漏点的应用研究[J]. 海河水利, 2013(3): 46 – 47. [LIU D, LI X J, YU Y Q. Application research of sonar seepage detection in the seepage point of Yuqiao reservoir dam [J]. Haihe Water Resources, 2013(3): 46 – 47. (in Chinese)]
- [11] 高大水, 陈艳, 杜国平. 声纳渗漏检测技术在闸坝检测中的应用[J]. 人民长江, 2016, 47(5): 73 – 75. [GAO D S, CHEN Y, DU G P. Application of sonar leakage detection technology in dam and gate detection[J]. Yangtze River, 2016, 47(5): 73 – 75. (in Chinese)]
- [12] 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 – 40. [DU J J, DU G P, CAO J H, et al. Study on visualized-imaging of sonar detection for measurement of high dams with large seepage[J]. Dam & Safety, 2016(2): 37 – 40. (in Chinese)]
- [13] 白丁. 城市排水管道检测技术的应用及发展[J]. 建材世界, 2019, 40(4): 83 – 86. [BAI D. [Application and development of detection technology for urban drainage pipeline [J]. The World of Building Materials, 2019, 40(4): 83 – 86. (in Chinese)]
- [14] 郑伟强, 戴阿福, 杜国平. 三维流速矢量 声纳技术在地铁工程中的应用及分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(22): 68 – 69. [ZHENG W Q, DAI A F, DU G P. Application and analysis of three-dimensional velocity vector sonar in subway engineering[J]. Shanxi Architecture 2018, 44(22): 68 – 69. (in Chinese)]
- [15] 胡盛斌, 杜国平, 徐国元, 等. 基于声纳渗流技术的地铁联络通道涌水探测应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 51 – 56. [HU S B, DU G P, XU G Y, et al. Application research on water inflow detection of metro connecting passage based on sonar seepage technology [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(2): 51 – 56. (in Chinese)]
- [16] 王鹏, 钟有信, 杜广林, 等. 地铁深基坑连续墙渗漏风险的量化控制[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 90 – 93. [WANG P, ZHONG Y X, DU G L, et al. Quantitative control of diaphragm wall leakage risk in metro deep foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 90 – 93. (in Chinese)]
- [17] 杜家佳, 陆剑锋, 王震, 等. 武汉绿地中心深基坑声纳渗流控制技术[J]. 施工技术, 2018, 47(1): 6 – 10. [DU J J, LU J F, WANG Z, et al. Sonar seepage control technology for deep foundation pit of Wuhan greenland center [J]. Construction Technology, 2018, 47(1): 6 – 10. (in Chinese)]
- [18] 庞振勇, 崔王洪. 基于渗流场变化的基坑止水帷幕缺陷判别研究与实践[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(6): 99 – 105. [PANG Z Y, CUI W H. Research and practice on identifying defects of waterproof curtain for excavation engineering based on changes of seepage field[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 99 – 105. (in Chinese)]
- [19] LORNE B, PERRIER F, AVOUAC J P. Streaming potential measurements: 1. Properties of the electrical double layer from crushed rock samples[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (B8): 17857 – 17877.
- [20] 杨鲲. 海洋调查技术及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009. [YANG K. Technology and application of marine investigation [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. (in Chinese)]

编辑:汪美华