

DOI: 10.11779/CJGE20230348

声呐渗流测试技术之质疑

刘建刚¹, 刘明玮^{*2}

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211106; 2. 江苏开放大学建筑工程学院, 江苏 南京 210036)

摘要: 介绍了近年来新出现的用声呐法测试渗流速度和渗流方向这一技术的核心内容, 包括测试装置、测试原理和计算方法等。从理论和实践上对其提出了 4 方面的质疑: 测试原理的理论基础、渗流速度计算方法、渗流方向确定和流场畸变。通过理论分析、公式的推导和数据的可靠性分析后认为: 声呐测试渗流的原理缺乏理论解释; 计算渗流速度的公式反映的只是孔内垂向流速度, 实际还是由测量误差产生的伪垂向流速度, 且该公式本身就推导不成立; 无论垂向流是向上流动或向下流动, 探头上部的水声器发射的声波到达下部平面对称分布的 6 个水声器的时间在理论上是相等的, 因而也无法通过合成法求得渗流方向, 所提供的渗流方向实际是由指数级时间误差计算得到的伪流向; 即声呐法无法获得渗流速度, 包括水平向渗流速度和垂直向流动速度, 也无法获得水平向渗流方向。

关键词: 声呐; 渗流; 垂向流; 地下水流向; 单孔示踪法; 流场畸变

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0678-05

作者简介: 刘建刚(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事水文地质的教学与科研工作。E-mail: LiuJG02@163.com。

Question of sonar seepage detection technology

LIU Jiangang¹, LIU Mingwei²

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211106, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China)

Abstract: The core content of the new technology of detecting seepage velocity and seepage direction by sonar is introduced, including detection devices, detection principle and calculation method. It is questioned in theory and practice from four aspects: detection principle, seepage velocity calculation method, seepage direction determination and flow field distortion. After analyzing the correctness of the formula and the reliability of the data, it is considered that the principle of the sonar seepage detection lacks theoretical explanation. The formula for calculating the seepage velocity itself is not valid, and the vertical flow velocity in the hole can be obtained by using this formula, which is actually the pseudo vertical flow velocity caused by the measurement error. Regardless of whether the vertical flow is upward or downward, the time it takes for the sound waves emitted by the upper part of the probe to reach the six symmetrically distributed underwater acoustic devices in the lower plane is theoretically equal, and therefore the seepage direction cannot be obtained through the synthesis method. The provided seepage direction is actually a pseudo flow direction calculated by the exponential measurement error. The sonar method cannot obtain the seepage velocity, including horizontal and vertical flow velocities, nor can it obtain the horizontal seepage direction.

Key words: sonar; seepage; vertical flow; groundwater flow direction; single-hole tracer method; flow field distortion

0 引言

(1) 质疑之由来

近 40 年来, 国内工程界已经普遍接受了渗流速度和渗流方向的现场测试技术, 即单孔稀释法技术, 是源于放射性同位素技术的引进和推广应用。但从 2008 年起中国对放射性同位素的野外使用有了严格的规定后, 在实际操作层面已经无法使用放射性同位素进行渗流速度和方向的测定。2011 年前后出现了声呐渗流测试技术^[1-7], 到目前已经有 12 a 时间了, 但该技术一直没有得到学界和岩土工程界的普遍接受, 原因在

于一方面该法的提出者没有对该技术进行必要合理的理论和技术的解释, 另一方面岩土工程界也没有感觉到该法的实质性效果。但该法却已有多个规范发布^[8-9], 这就引起了岩土工程界的普遍疑虑。本文对声呐渗流测试技术进行了广泛深入的剖析, 发现该法存在的诸多严重问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979078)

收稿日期: 2023-04-21

*通信作者 (E-mail: 357802955@qq.com)

(2)单孔稀释法测定水平向渗流速度和渗流方向原理简介

为便于理解声呐渗流测试技术, 有必要对单孔稀释法测定水平向渗流速度和方向做简单的介绍。在满足必要的条件后, 如要对钻孔的某个深度范围孔段进行水平向渗流速度和方向的测试, 则必须对该孔段进行同位素示踪剂标注 (即将微量同位素示踪剂均匀投放在该孔段), 见图 1 中黑色孔段。之后孔中的示踪剂因地下水的水平流动被带到孔外而被逐渐稀释, 图 2 (a) 是示踪剂刚投入孔中, 孔外含水层中没有示踪剂, 经过一段时间到了 t1 时刻, 示踪剂在孔外有一定的扩散范围, 同时孔中的示踪剂浓度已经降低 (黑色变浅), 再经过一段时间到了 t2 时刻, 孔外示踪剂的扩散范围更大, 浓度更小, 同时孔中的示踪剂浓度也更低。地下水流动越快, 孔内示踪剂浓度被稀释得越快。用国际上通用的稀释公式 (也称稀释定理) 就可以计算得到孔中地下水的水平向渗流速度:

v_f = (pi * (r_1^2 - r_0^2) / (2 * alpha * t)) * ln((C_0 - C_b) / (C_t - C_b))

式中: v_f 为水平向渗流速度 (m/d); r_1 为滤水管半径 (m); r_0 为探头半径 (m); alpha 为流场畸变因子 (无量纲); C_t 为 t 时刻的示踪剂浓度 (ug/L); C_b 为示踪剂本底浓度 (ug/L); C_0 为示踪剂初始浓度 (ug/L); t 为示踪剂浓度从 C_0 变化到 C_t 所需的时间 (d)。

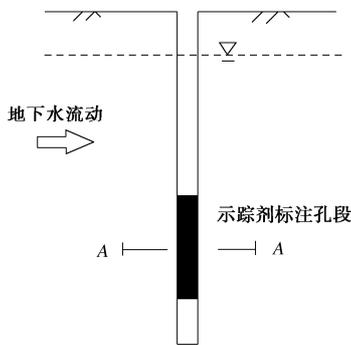


图 1 钻孔中示踪剂的标注

Fig. 1 Labeling of tracers in drilling

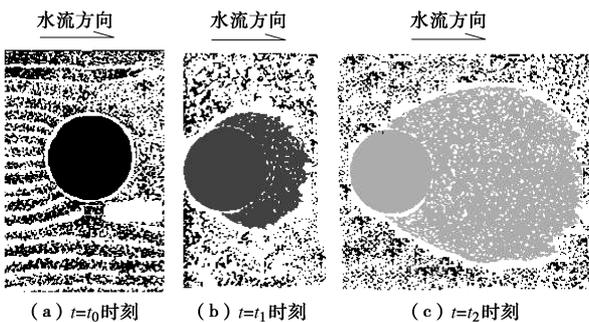


图 2 A—A 水平截面上示踪剂的扩散

Fig. 2 Diffusion of tracer on A—A horizontal cross section

另外, 标注孔段任意同一深度的水平截面上, 孔内不同方向孔壁附近有不同的示踪剂浓度: 孔内的下游壁附近示踪剂浓度最大, 上游壁附近浓度最小, 其他方向上的浓度依次变化, 如果同时获得了不同方向上示踪剂的浓度, 就可按“力学合成”原理求得最终的地下水流动方向。图 3 用测得的孔内 8 个不同方向上的示踪剂浓度合成获得了地下水流动的方向[3]。

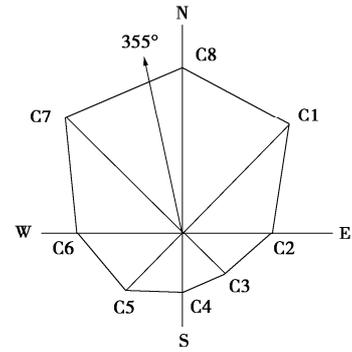


图 3 渗流方向合成

Fig. 3 Synthesis of seepage direction

(3) 关于声呐

“声呐技术”实际就是声波探测的简称。在岩土工程地质勘察领域早就有声波探测或声波测井这一技术, 但从来没有用声波探测技术获得岩土层中地下水的渗流速度和渗流方向, 它只能获得声波在岩土层中传播的平均波速, 用以反映岩土层固有的物理力学特性, 如岩土层的平均强度或密度等。

声呐最突出的用途始于多普勒效应的发现, 依据多普勒效应, 声呐可以用来确定目标声源体和声波观测器之间的相对运动速度 (注意: 不是声波传播媒介的运动速度)。如果目标声源体和声波观测器两者之一是静止不动的, 就得到另一个的绝对运动速度。在特殊情况下, 如一个是固定的, 另一个可以随水流自由漂移的, 则这个绝对速度可视为等同于水流的速度 (理论上是不等的)。水文地质学界和业界从来没有将声呐技术用于地下水渗流的测试。声呐技术多应用于地表水体, 用来测定地表水体 (江、河、湖、海、水库) 中的能产生噪音的物质或具有反射界面能反射声波的物质 (目标声源体)。

1 声呐渗流测试技术的核心内容

1.1 声呐渗流测试技术的原理

声呐渗流测试技术的基本装置见图 4 探头的内部结构图。

探头的上部安装有 1 个水声传感器 (水听器) B, 下部在一个水平面上安装有夹角为 60° 的 6 个水听器

1~6, 这种布局是由同位素示踪仪测定水平向渗流速度和流向装置演变而来的。水听器 1~6 用来测定地下水的流向, 水听器 B 和水听器 1~6 中的任意一个用来测定它们之间的水流运动速度。Y 相当于探头的长度, X 相当于探头的半径, L 为声波传播路径长度, θ 为声波传播路径与探头长轴方向的夹角。探头直径一般 5 cm 左右, 即 $X=2.5$ cm 左右, 探头长度 Y 一般 60 cm 左右, 因此 θ 角小得几乎可以看做是 0° 。

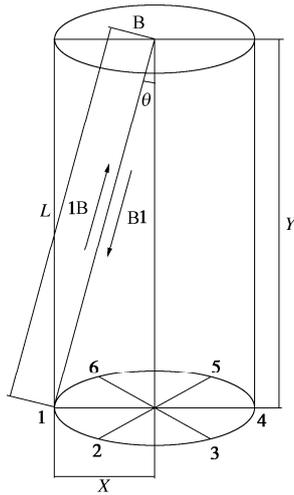


图 4 声呐渗流测试探头内部结构^[3]

Fig.4 Internal structure of sonar seepage testing probe^[3]

该技术的原理是: 声波在静止水体中的传播速度为常数, 当声波逆水流传播时传播速度被流体减慢, 当声波顺水流传播时传播速度被流体加快。

1.2 声呐法的渗流速度计算公式

根据上述装置及原理, 声波在静止水体中的传播速度为常数 C , 当声波逆流从探头下部水听器 1 传送到上部水听器 B 时, 其传播速度被流体流速 U 所减慢, 其传播方程为 (2); 当声波顺流从上部水听器 B 传送到下部水听器 1 时, 传播速度则被流体流速加快, 其传播方程为 (3), 两者相减就求得水流速度 U 的计算式 (4), T_{B1} (T_{1B}) 为声波从水听器 1 (B) 到水听器 B (1) 的传播时间。式 (2)~(4) 见于参考文献[1~9]。

$$\frac{L}{T_{B1}} = C - U \frac{X}{L}, \quad (2)$$

$$\frac{L}{T_{1B}} = C + U \frac{X}{L}, \quad (3)$$

$$U = \frac{L^2}{2X} \left(\frac{1}{T_{1B}} - \frac{1}{T_{B1}} \right). \quad (4)$$

1.3 声呐法的渗流方向确定

渗流方向的确定由水听器 B 和水听器 1~6 共同

完成测定, 当水听器 B 发送声波后, 声波分别到达水听器 1~6 的传播时间认为是不一样的, 由此可由水听器 1~6 接收到声波的时间差别通过图 3 的原理合成获得。

2 质疑点分析

2.1 声呐渗流测试技术原理的质疑

1.1 节所述的技术原理“声波顺水流加快, 逆水流减慢”, 这种表达过于简单且口语化, 没有适当的数学表达, 也没有从波动理论上进行合理解释, 更没有提供试验验证材料, 如何让人相信? 加快和减慢是简单的叠加还是线性变化抑或指数变化?

2.2 渗流速度计算公式的质疑

文献[1~9]无论是论文还是专利或规范, 都使用了式 (4) 计算渗流速度, 依据的是简单叠加原理。速度是个矢量, 具有方向性, 矢量的简单加或减必须在同一个方向上进行。式 (4) 中的渗流速度 U 没有被提到是什么方向, 既然简单叠加了, 说明 U 的方向就是声波的接发收方向, 即水听器 B 到水听器 1 或 2~6 的连线方向, 由于 θ 角非常小, U 实际代表的是垂直方向的水流速度, 即垂向流速度。图 4 的这种装置实际上不具有测定水平向渗流速度的功能。那么问题就来了, 地下水的渗流方向一般以水平向为主, 垂直向渗流速度是非常小甚至可以忽略的。人们提到渗流速度通常指的是水平向渗流速度, 上述单孔稀释法确定的就是水平向渗流速度。不明确告知是垂直向水流速度而称其为渗流速度是对设计和有关应用方的严重误导。

下面再来分析式 (2)~(4) 的正确性和可靠性。

先看公式的正确性。式 (2), (3) 中的 T_{B1} 或 T_{1B} (简单计为 T) 是声波在水听器 B 和 1 之间的传播时间, 那么 L/T 就是声波在水听器 B 和 1 之间的传播速度, 其传播方向理应是水听器 B 和 1 的连线方向, 或称为 L 方向 (由于 θ 角接近 0 , 实际可视为垂向方向), 依据其 1.1 节的原理及速度矢量叠加的方向性原则, 式 (2), (3) 中的 C 和 U 也应该是 L 方向, 但因 $X/L = \sin \theta$, (UX/L) 项就是 U 在水平方向的分量, 那既然 (UX/L) 是水平方向, 那 C 也应该是水平方向。显然, 不仅公式中的 C 存在方向性矛盾, 等号两边的速度矢量的方向性也不一致, 等号左边项是垂向方向的, 右边是水平方向的。因而, 式 (2), (3) 是不成立的, 式 (4) 当然也就不成立。

再看 U 数值上的可靠性。声波在空气中的传播速度是 340 m/s 左右, 但声波在水中的传播速度接近 1500 m/s, 因为水的密度远大于空气密度。式 (2), (3)

的 L/T 和 C 都是声波在水中的传播速度,数值上是 10^3 m/s 量级的,而地下水渗流速度是 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ m/d 量级的,也就是说垂向流速 U 比 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ m/d 量级更小。如果将式(2), (3)中的所有项都换算成同一个计量单位,譬如都以 m/s 为单位,结合水中波速达到 10^3 m/s,那么 (UX/L) 项在数值上是 10^{-8} 量级, (UX/L) 项纯粹是忽略不计项,也就是求不出 U 的真值的。

再者,从式(4)看,现场测试实际就测 T_{B1} 或 T_{1B} ,这两个数据是 10^{-4} s 量级的,因为 L 就 $50 \sim 60$ cm,声速 1500 m/s。现实中时间的测量是否可达到 10^{-4} s 量级?如果只能达到 10^{-2} s 量级,那么通过式(4)计算得到的 U 值实际是由 T 的指数级测量误差导致的误差数值,根本不是 U 的真值。因此,所谓的声呐渗流测试技术测得的渗流速度实际是个垂向流的伪速度。

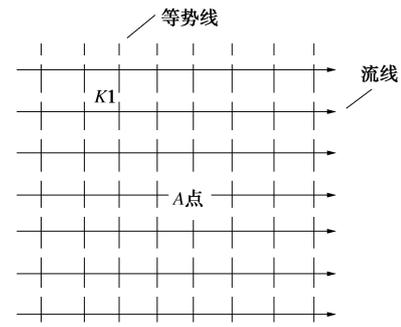
2.3 声呐测试渗流方向的质疑

与单孔示踪法测渗流方向的原理对比就很容易看出声呐法测定渗流方向的错误。图3中的钻孔内某深度水平截面上的不同方向的示踪剂浓度由于地下水的水平流动是完全可以有明显的差异的,因而可以用力学合成原理求得真实的地下水水平流动方向。而声呐法测定水流方向的原理是水听器B发送的声波到达水听器1~6的时间 $t_1 \sim t_6$ 认为是不等的,因而由不等的时间合成计算得到渗流方向。但事实是,垂直向的水流对 $t_1 \sim t_6$ 的影响是一样的,水平向的水流依据1.1节的原理对 $t_1 \sim t_6$ 都没有影响,也就是说理论上 $t_1 \sim t_6$ 是相等的,因而理论上是无法通过力学合成原理获得水流方向的。然而, $t_1 \sim t_6$ 是有指数级测量误差的,误差值是肯定有大小的,用不同大小的误差值也可以用力学合成原理求得方向值的,但这个方向没有任何实际意义,是伪方向。

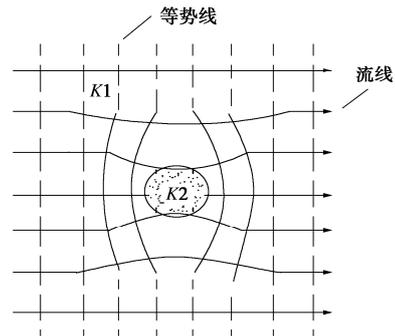
2.4 关于流场畸变

均质各向同性介质中的稳定流场用流网来表达,如图5(a)所示。如介质中有一个强透水的透镜体存在,则透镜体周围的流线向透镜体偏转,等势线也相应变化。如果将透镜体换成钻孔,则钻孔周围的流场变化更大。

式(1)中有个流场畸变因子 α ,单孔稀释法通过 α 将流场畸变条件下获得的流速转换成了天然条件下的渗流速度,即钻孔未打设条件下该孔所在位置的渗流速度,这是设计和有关方面需要的流速。然而,声呐法在流场畸变条件下进行的测试,全然没有考虑流场畸变,其测得的所谓的垂直向流速代表的是垂直向“水流”速度,而不是垂直向渗流速度。



(a) 均匀分布的流线和等势线



(b) 强透水透镜体周围流线和等势线

图5 流网

Fig.5 Flow nets

3 结 论

(1)声呐作为用于水体中探测目标声源体的技术用于渗流测试只是一种尝试,但理论上缺乏必要的合理解释、技术上不可行,且计算公式不成立,是个伪公式。

(2)单孔示踪法中的示踪剂扩散是进入到岩土层中的,扩散程度受孔的结构和孔周岩土层渗透性的影响,示踪法获得的渗流速度是水平速度,反映的是该孔处的天然水平渗流速度,即水文地质意义上的渗流速度。而声呐法从测试原理到数据采集的整个过程,声波一直没有真正进入岩土介质中,只是在孔内水中,即使获得了孔内水流速度,该水流速度不是水文地质意义上的渗流速度,也就不能称为渗流速度。

(3)从声呐技术的探头结构和所谓的测试原理、计算公式推导看,声呐法测速计算公式不成立,实际反映的是孔内的垂向流,且计算值是由指数级测量误差产生的伪垂向流速度值;声呐法不具有测定水平向水流速度的功能;声呐法也不具有测定水平向水流方向的功能,所测得的水流方向也是伪水流方向。

参考文献:

- [1] 胡盛斌,杜国平,徐国元,等. 基于能量测量的声呐渗流矢量法及其应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2143-2154. (HU

- Shengbin, DU Guoping, XU Guoyuan, et al. Sonar seepage vector method based on energy measurement and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(6): 2143-2154. (in Chinese))
- [2] 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 Jiajia, DU Guoping, CAO Jianhui, 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))
- [3] 杜国平, 郭建强, 黎咏泉, 等. 南京城际轨道交通宁高线盾构井声纳渗流控制技术应用[J]. *铁道勘察*, 2017, **43**(6): 61-65. (DU Guoping, GUO Jianqiang, LI Yongquan, et al. The application and sonar seepage detection technology in Nanjing Lishui subway line LiShui River Shield well[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2017, **43**(6): 61-65. (in Chinese))
- [4] 周游, 王益楠, 史剑. 基于声纳渗流检测的地下连续墙渗漏处置措施研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, **57**(增刊 1): 1288-1292. (ZHOU You, WANG Yinan, SHI Jian. Study on the disposal measures of retaining structure leakage based on sonar seepage detection[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, **57**(S1): 1288-1292. (in Chinese))
- [5] 江杰, 魏丽, 钟有信, 等. 基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, **47**(5): 73-80. (JIANG Jie, WEI Li, ZHONG Youxin, et al. Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, **47**(5): 73-80. (in Chinese))
- [6] 南京帝坝工程科技有限公司. 地铁深基坑止水结构渗漏缺陷声纳渗流检测装置. 中国, 201620755194.0[P], 2016.12.14. (Nanjing Diba Engineering Technology Co., Ltd. Sonar seepage detection device for leakage defects of water stop structures in subway deep excavation. China, 201620755194.0[P]. 2016.12.14. (in Chinese))
- [7] 南京帝坝工程科技有限公司. 单井地下水流速流向及水库渗漏点测量方法及其测量装置. 中国, 201110295635.5[P], 2012.05.09. (Nanjing Diba Engineering Technology Co., Ltd. Measurement method and device for single well groundwater flow velocity direction and reservoir leakage point. China, 201110295635.5[P]. 2012.05.09. (in Chinese))
- [8] 建筑基坑止水帷幕声纳渗流检测技术规范: DBJ/T 45—117—2021[S]. 2021. (Technical Specification for Sonar Seepage Detection of Watertight Curtain in Foundation Pit: DBJ/T45—117—2021[S]. 2021. (in Chinese))
- [9] 中国潜水打捞行业协会规程: 水下工程声纳渗漏检测规程 T/CDSA 305 23—2017[S]. 2017. (Regulations of China Diving salvage Industry Association: Code for Detection of Sonar Leakage in Underwater Engineering: T/CDSA 305 23—2017[S]. 2017. (in Chinese))
- [10] 刘光尧. 用放射性同位素测定含水层水文地质参数的方法(上)[J]. *勘察科学技术*, 1997(1): 21-27. (LIU Guangyao. Method to determine the hydrogeological parameters of aquifer using radisactive isotopes[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997(1): 21-27. (in Chinese))