

潮汐影响下江底富水砂层地下水运动单孔示踪测试研究

董海洲^{1,2}, 王晋健¹, 林建忠³, 黄婷婷⁴, 刘星平⁵, 喻成⁶

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 至永建设集团有限公司, 福建 闽清 350899; 4. 福建省中禹水利水电工程有限公司, 福建 永安 366099;
5. 中大(福建)工程建设集团有限公司, 福建 建瓯 353199; 6. 湖南省科宏大坝监测中心有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:针对潮汐影响下河床富水砂层地下水渗流的复杂状况,采用单孔稀释法分别对钻孔内地下水垂向和水平流速进行测定,确定了江水位波动条件下地下水的运动规律。现场测试结果表明:江水位波动对两岸地下水渗流影响较小,对江心洲钻孔内地下水渗流影响较大;江水位下降时江心洲水位高于江水位,孔中将产生向下的垂向流,江水位上升时江心洲水位低于江水位,孔中有向上的垂向流;地层上部淤泥夹砂层具有一定的隔水性,减弱了江水对深部地层的影响,使下部砂卵石层无明显的垂向流,水平流速最大值仅为0.48 m/d,有利于地铁联络通道的冻结法施工。

关键词:潮汐影响;富水砂层;地下水运动;单孔示踪

中图分类号:P641.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)04-0024-07

Single-borehole tracer detection of groundwater movement in water-rich sand layer under riverbed impacted by sea tide//DONG Haizhou^{1,2}, WANG Jinjian¹, LIN Jianzhong³, HUANG Tingting⁴, LIU Xingping⁵, YU Cheng⁶
(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Zhiyong Construction Group Co., Ltd., Mingqing 350899, China; 4. Fujian Zhongyu Irrigation-Hydroelectric Power Engineering Co., Ltd., Yong'an 366099, China; 5. Zhongda (Fujian) Engineering Construction Group Co., Ltd., Jianou 353199, China; 6. Hunan Kehong Dam Monitoring Center Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: To address the complicated groundwater seepage conditions in water-rich sand layer under riverbed influenced by sea tide, the single-borehole dilution method was employed to measure both vertical and horizontal groundwater flow velocities within boreholes, so as to determine the groundwater movement patterns under the fluctuation of river stage. Field test results indicate that the fluctuation of river stage has little impact on the groundwater seepage on both banks, but has great impact on that of alluvial sand bar. If the river stage decreases, the water level of alluvial sand bar will be higher than the river water level, resulting in downward vertical flow in the boreholes. Conversely, when the river stage rises, the water level of alluvial sand bar will be lower, leading to upward vertical flow in the boreholes. The upper silty sand layer of the formation has a certain degree of impermeability, weakening the influence of river water on the deeper strata. As a result, there is no obvious vertical flow in the underlying sand and pebble layer, in which the maximum horizontal flow velocity is as low as 0.48 m/d and will be in favor of the implement of the freezing method.

Key words: impact of tide; water-rich sand layer; groundwater movement; single-borehole tracer

人工冻结法已在地铁联络通道施工中得到了广泛应用,该方法具有封水性好、强度高、适应性广、施工过程环保、可控性和实用性强等优点^[1-5]。地层温度场的发展与分布规律对冻结法的施工具有重要影响。陈凯文等^[6]开展了地铁联络通道冻结法施工全程监测,并分析了施工过程中温度场随时间的变

化规律;赵昊楠等^[7]建立了全地层三维冻结模型,预测了冻结温度场发展特性。而地层中的地下水渗流作用会对地层温度产生影响进而影响冻结效果^[8]。赵江涛等^[9]对冻结法施工过程中联络通道渗漏水病害的原因进行了分析并提出了治理方法;宋帅等^[10]研究了冻结法施工过程中渗流场对温度

场的影响,发现流速和渗流方向都会影响冻结效果;潘旭东等^[11]开展了富水地层渗流作用对冻结过程温度场的影响研究,并提出了冻结方法;Pimentel等^[12]基于大尺寸室内试验建立了高流速条件下冻结法物理模型;Marwan等^[13]提出了渗流条件下的冻结法优化方案。由此可见,了解场地地下水运动规律,对于地铁联络通道冻结法的顺利实施以及施工方案的优化设计都至关重要。

钻孔示踪法是一种探测地下水运动状况的高效且操作简便的方法,通过在钻孔中投放示踪剂,监测示踪剂浓度的变化规律,不仅可以测量地下水流速,还可以通过浓度曲线的分布分析渗漏层位置以及水平流、垂向流等信息。自Drost等^[14]开展用单孔稀释法测定含水层中地下水渗透流速的研究以来,国内外学者在示踪剂选择、流速计算模型等方面进行了进一步研究。陈建生等^[15]建立了井中测定流速广义示踪稀释物理模型,可以在存在垂向流的条件下测定水平流速;张茜等^[16]、叶合欣等^[17-18]对此模型进行改进,分别建立了基于示踪剂质量守恒和考虑示踪剂弥散作用的测流模型和渗透流速计算方法;Pitrak等^[19]采用回归分析提出了一种流速简化计算方法;Dong等^[20]考虑示踪剂峰值浓度积分,提出了存在垂向流条件下的水平流速简化计算方法;沈添耀等^[21]提出利用高密度电法和综合示踪法对堤坝渗漏通道进行联合探测;柴栋等^[22]考虑多含水层建立了电导示踪模型;刘国庆等^[23]在水库渗漏中进行了联合探测方法的应用。这些模型或计算方法都是在钻孔水位保持不变的情况下建立的,未考虑水位变化的情况,但受潮汐作用的影响,滨海地层钻孔水位会随潮位涨落产生相应变化。

福州地铁某区间线路下穿乌龙江,CP2和CP3两个联络通道位于江中,施工难度较大。经过比较,采用冻结法加固地层后暗挖施工是较为经济可靠的施工方案。但由于这两个联络通道大部分处于地层渗透性较大的粗中砂和砂卵石层中,渗透系数高达35~55 m/d,面临高水压、高渗透富水砂层^[24]等不利条件,而且由于福州临海,海洋潮汐使乌龙江水位有较大波动,导致地层中地下水渗流状况更为复杂。因此,必须事先对富水砂层中地下水运动状况进行探测和研究,确定其运动规律和流速等参数,才能制定合理的冻结法施工方案。

本文开展该场地高渗透富水砂层地下水流速的示踪稀释测试,分析海洋潮汐作用影响下地层地下水运动规律,确定地下水运动状况及流速、流向等特征。为此,在研究区域内布置了5个钻孔,在孔内利用单孔稀释法测定地下水垂向和水平流速,对潮汐

水位涨落影响下富水砂层地下水运动进行综合评价,以期为冻结法施工及方案制定提供依据。

1 测试方法和原理

1.1 单孔稀释法测定地下水水平渗透流速

研究区CP2、CP3联络通道处高渗透富水砂层地下水流速监测采用示踪剂稀释法进行,示踪剂可采用食盐或染色剂等。其基本原理为:如果地层中的含水层存在地下水渗流,滤水管中的整个水柱被少量示踪剂标记,标记地下水的示踪剂被流过滤水管的水带走,导致示踪剂浓度降低,示踪剂浓度稀释的速度与地下水渗透流速有关,根据这种关系(稀释原理)可以求出渗透流速。由于投放示踪剂和观测其浓度变化都在同一孔中进行,这种方法通常也被称为单孔稀释法^[25]。

设示踪剂稳定,在试验延续过程中,示踪剂在稀释水柱内均匀混合;滤水管的轴线与含水层整个厚度中的水流流线正交;通过滤水管的水平流连续均匀稳定;无垂直水流的干扰,则该段稀释水柱内的示踪剂是被水平流过滤水管的地下水量稀释。含水层中地下水渗透流速为^[24]

$$v_f = \frac{\pi r}{2\alpha t} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad (1)$$

式中: v_f 为渗透速度,即含水层中达西渗透速度; r 为滤水管内半径; t 为时间; ρ_0 为 $t=0$ 时的示踪剂质量浓度; ρ 为 t 时刻的示踪剂质量浓度; α 为因含水层中存在滤水管引起流场畸变的校正系数,通常取值为2^[20]。

单孔稀释法测定流速上限为湍流发生的临界速度,与井的结构等有关,一般为50~300 m/d;测量流速下限很低,主要受到因分子扩散而产生浓度降低的影响,一般为0.005~0.01 m/d。

1.2 单孔稀释法测定地下水垂向流速

孔中出现垂向流十分常见。垂向流的产生有3种情况:

a. 钻孔揭露了两个及以上不同水头的含水层时,在孔内会产生从高水头含水层流向低水头含水层的垂向流。

b. 当钻孔与承压含水层有联系时,并且它的上层存在渗透的饱和区或非饱和区地层时,将产生向上的垂向流。

c. 当含水层中的流线与孔轴线倾斜时,也会有垂向流产生,但这时垂向流速通常都很低。

井中地下水的垂向流测量采用峰值法来测定,用一个探头测量示踪剂质量浓度在孔中垂直方向的变化,由此计算孔中地下水的垂向流速。此时,采用

点投方式进行测量,先将示踪剂投放于孔中某一点,然后利用探测仪在该点上下方进行测量。如果钻孔中存在向下的垂向流,则在投源点下方测量出一个完整示踪剂峰值后,间隔一段时间继续向下移动探测仪可测量确定另一个完整示踪剂峰值,反之亦然。因此,若孔中存在垂向流,则可以测定在一定时间内示踪剂峰值位置的变化情况,就能够判断垂向流的流向并计算其流速。

垂向流速可用下式计算:

$$v_v = \Delta H / \Delta T \tag{2}$$

其中

$$\Delta T = t_1 - t_0$$

式中: v_v 为垂向流速; ΔH 为两示踪剂峰值之间的距离; ΔT 为示踪剂峰值到达时间差; t_1 、 t_0 分别为两次示踪剂质量浓度峰值测量时间。

1.3 存在垂向流时平均水平流速简化计算

当钻孔中同时存在水平流和垂向流时,在某一深度示踪剂质量浓度的减少不仅受地下水水平流的稀释作用,还受垂向流的作用。此时可以在某一深度点投示踪剂,采用类似测量垂向流的方法追踪示踪剂云在钻孔中的上下移动。由于示踪剂云在钻孔中的垂向移动并不会造成浓度的降低,其浓度的降低是由地下水的水平渗流引起的,故 ΔH 范围内这一孔段地下水的平均水平流速可用下式进行简化计算:

$$v'_f = \frac{\pi r}{2\alpha \Delta T} \ln \frac{A_0}{A_1} \tag{3}$$

式中: v'_f 为 ΔH 范围内地下水平均水平流速; A_0 、 A_1 分别为 t_0 、 t_1 时刻的示踪剂总质量浓度。

2 研究区概况

拟建场地为冲淤积平原地貌,下穿乌龙江,地形整体呈 U 字形,乌龙江地段地势较低,地面标高为 $-6.26 \sim 3.20$ m,乌龙江两岸地势较高,地面标高为 $7.72 \sim 12.93$ m。地质勘察揭露地层最大深度为 64.4 m,根据钻探资料及室内土工试验结果,按地层沉积年代、成因类型,将工程场地勘探范围内的土层划分为人工堆积层 (Q^m)、第四系全新统海相沉积层 (Q_4^m)、海陆交互沉积层 (Q_4^{mc})、第四系上更新统海相沉积层 (Q_3^m)、冲积层 (Q_3^{al})、冲洪积层 (Q_3^{al+pl})、更新统残积层 (Q^{el})、燕山晚期基岩五大类。

CP2 联络通道位于江心洲上,结构主体位于淤泥夹砂和砂卵石层中,CP3 联络通道位于江中,结构主体位于中粗砂层中,渗透系数为 $35 \sim 55$ m/d,施工风险极大。

在研究区内布置 5 个钻孔:3 个钻孔位于近地铁区间的江心洲上,1 个钻孔位于江东岸边,1 个钻

孔位于江西岸边。钻孔位置见图 1。

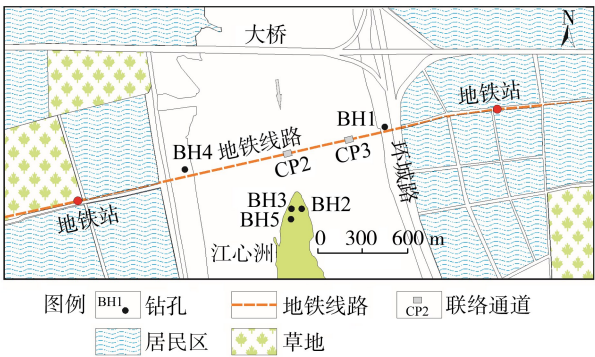


图 1 地铁线路、联络通道及钻孔位置分布

河流冲积层在纵向上渗透性差异很小,只在横向上有所区别。越靠近岸边,水力梯度越大,江中地层水力梯度小于岸边。地铁通道江边两侧各布置的一个测试孔所在位置是地铁通道过江段水力梯度最大的位置,其所测流速可以作为联络通道位置的流速上限,这样结合江心洲三孔流速数据基本可确定区域地层地下水流速的范围。

图 2 是 5 个钻孔的地层分布。除了两个岸边的钻孔,江心洲上的三孔地层分布类似,从上部到下部分依次为粉土、淤泥夹砂、砂卵石层,仅在具体深度上有微小差异,即具备河床冲积层的层状分布规律。三孔内所测定的地下水流向、流速能够较好地代表待建 CP2、CP3 联络通道处河流冲积层的地下水运动特征。

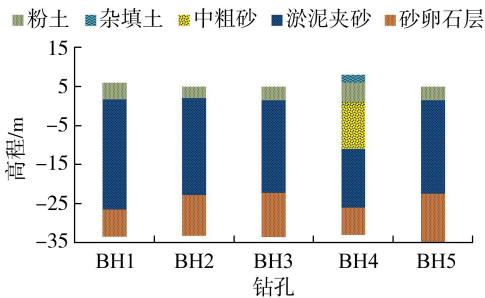


图 2 钻孔地层分布

3 地下水渗流单孔稀释分析

2016 年 6 月 27 日至 7 月 7 日对 BH1~BH5 孔进行了流速测试,先采用整孔投放示踪剂的方式,江心洲上 BH2 和 BH3 孔由于江水位的涨落而产生了垂向流,所以在整孔投放示踪剂的基础上,增加了点投方式来测量垂向流速。不同时间江水位的变化也引起了孔中水平流速的变化。

3.1 两岸钻孔内地下水渗流分析

BH1 和 BH4 两孔位于两岸江堤上,两者具有较为类似的地下水渗流规律。

BH1 孔中未发现明显垂向流。2016 年 6 月

27日在不同时间的水平流速分布如图3所示。由于不同时间江水位不同,孔内流速也有变化。总体来看,高程-2 m 以上孔段流速较大,范围为0.2~1.5 m/d,-2 m 以下至孔底(高程-32 m 处)流速较小,范围为0.001~0.2 m/d。其中12:00—14:00 孔中流速较其他时间段有所增大,这是因为此时正值退潮时期,江水位较低,对应的孔水位也较低,造成BH1 孔处水力梯度变大,从而流速增大,但流速增大的幅度很小。测量期间虽经历了江水位较大变化,但总体上流速保持上段高下段低的规律。

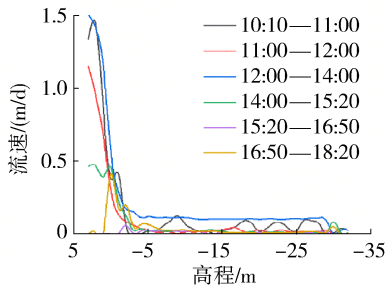


图3 2016年6月27日BH1孔不同时间段流速分布

与BH1孔类似,BH4孔内也未发现明显的垂向流,水平流速总体高于BH1孔,参见图4,较高流速主要在埋深20 m(高程为-12 m)以上,这对应了图2中BH4孔地层分布在此深度以上为中粗砂的情况。

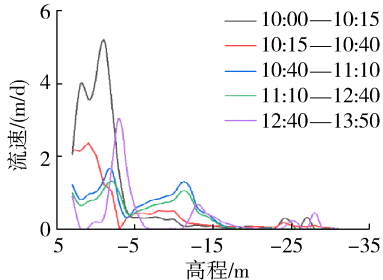


图4 2016年7月4日BH4孔不同时间段流速分布

3.2 潮汐影响下江心洲地下水运动规律

海洋潮汐作用引起了江水位的升降,从而使地下水渗流状况更为复杂。BH2和BH3两孔位于江心洲上,主要用来监测潮汐影响下地下水运动的变化情况。两孔水位变化与江水位变化具有对应关系,但滞后于江水位变化。江水退潮时,江心洲水位高于江水位,孔中将产生向下的垂向流;江水涨潮时,江心洲水位低于江水位,孔中有向上的垂向流。

2016年6月30日和7月1日,在BH2孔测试时江水位处于退潮时期,孔中产生了向下的垂向流,垂向流速如表1所示。

2016年7月5日对BH2孔进行了重复测试,主要是采用点投方式测量垂向流和水平流速,点投深度在高程-20 m处,点投后示踪剂质量浓度变化见图5。由于测试正处于江水涨潮时期,孔中存在向

上的垂向流,最大垂向流速为10:18—11:09期间的111.8 m/d。点投后刚开始测量次数比较频繁,每隔3~5 min 测量一次,9:56—10:18 期间高程-20~-25 m 的示踪剂质量浓度变化很小,表明此处水平流速也较小,否则示踪剂质量浓度会有较大幅度的减少。11:10 测量时示踪剂峰值已因为垂向流向上流动到高程-15 m 处,此时垂向流速为26.9 m/d。而示踪剂质量浓度在13:00 时有大幅度的减少,反映了高程-16~-14 m 附近存在相对较大的水平流速,经计算其水平流速为0.87 m/d。

表1 2016年6月30日BH2孔不同时间垂向流速

时间段	垂向流速/(m/d)	测量高程范围/m
2016-06-30 10:05—10:51	94.9	-20~-19
2016-06-30 10:51—11:42	85.4	-19~-17
2016-07-01 12:16—14:16	48.0	-17~-16
2016-07-01 14:16—17:43	27.8	-16~-14

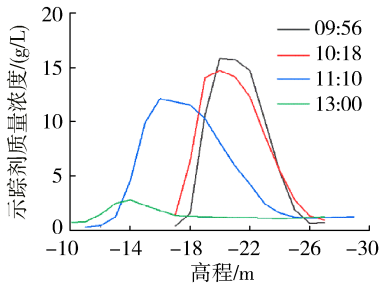


图5 2016年7月5日BH2孔高程-20 m处点投后示踪剂质量浓度随时间的变化

2016年7月1日上午9:50在BH3孔中整孔投放示踪剂,然后对孔内示踪剂质量浓度进行了重复测量,其随时间的变化见图6。可以看出,在11:30之前孔中示踪剂质量浓度曲线并无明显的上下偏移,表明其垂向流很小,此时可用式(1)计算水平流速,其分布见图7,呈现上部流速大、下部淤泥夹砂层流速较小的分布规律。之后随着江水位的下降,孔中产生较大的向下垂向流,示踪剂质量浓度曲线明显下移,据此计算得到11:50—13:15 平均垂向流速为70.75 m/d,13:15—14:40 平均垂向流速为84.96 m/d。此时用式(3)计算-16~-18 m、-18~-20 m、-20~-22 m 高程分段的平均水平流速分别为0.135、0.067、0.049 m/d。

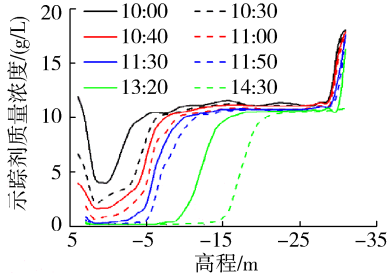


图6 2016年7月1日BH3孔不同时间示踪剂质量浓度分布

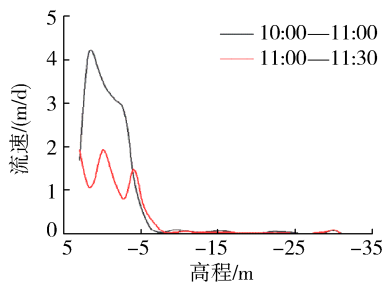


图7 2016年7月1日BH3孔不同时间段水平流速分布

3.3 砂卵石层地下水流速测试

为消除江水涨落引起的上层垂向流对深部砂卵石层渗透流速测试的影响,在江心洲BH3孔附近布设了BH5孔(位置见图1)。该孔在高程-20 m以上采用不透水的PVC套管并在套管与孔壁之间进行了水泥浆封堵以隔绝地下水渗流,而从高程-20 m至孔底置入能够透水的滤水管且在滤水管与孔壁之间进行填砾以使地下水能够渗流。

2016年7月7日对BH5孔高程-20 m以下至孔底进行了单孔稀释测试,投放示踪剂后不同时间的质量浓度分布如图8所示。从示踪剂质量浓度分布来看,钻孔内示踪剂并未有竖向偏移的现象,说明封堵起到了较好效果,砂卵石层未发现明显的垂向流。这也说明淤泥夹砂层具有一定的隔水效果,减弱了江水对深部地层的影响,因为地铁联络通道主要位于下部的淤泥夹砂层和砂卵石层,上部地层的隔水性有利于地铁联络通道的冻结法施工。

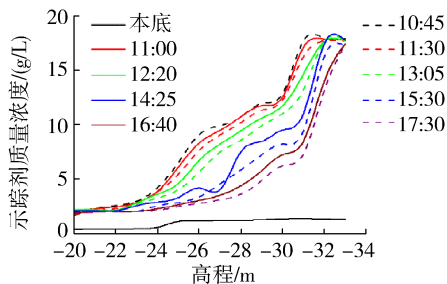


图8 2016年7月7日BH5孔不同时间示踪剂质量浓度分布

BH5孔水平流速分布见图9。受江水位波动的影响,不同时间段流速也不相同。流速较大的部位

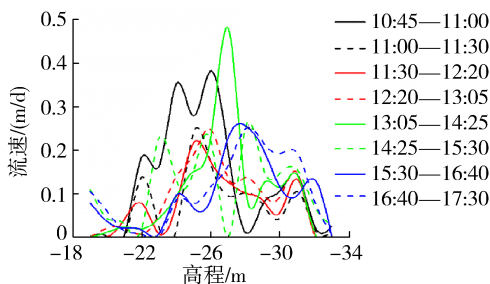


图9 2016年7月7日BH5孔不同时间段流速分布

在高程-25~-28 m之间,砂卵石层水平流速最大值仅为0.48 m/d,对应高程为-27 m,较低的地下水流速有利于冻结法施工。

3.4 场地地下水渗流特征

虽然地下水流速随江水位升降而变化,但每个钻孔的测量时间都至少涵盖了一次江水位的涨潮和退潮,这样得到的不同时间的流速就包含了一个较为完整的流速范围。

通过对5个钻孔的探测和分析,其地下水渗流及流速分布具有如下规律和特点:

a. 位于江堤的BH1孔和BH4孔中未发现明显垂向流。BH1孔和BH4孔上部水平流速较大,下部(包括砂卵石层)的流速较小。BH1孔高程-6 m以上流速较大,最大水平流速为1.6 m/d,下部砂卵石层流速较小,最大流速为0.2 m/d。BH4孔高程-12 m以上流速较大,最大流速为5.2 m/d,砂卵石层流速同样较小,最大流速为0.49 m/d。

b. 江水位涨落使BH2和BH3孔中产生了垂向流。江水位上升时,江心洲BH2和BH3孔中产生了向上的垂向流;江水位下降时两孔中有向下的垂向流。探测得到的最大垂向流速为BH3孔在2016年7月1日16:00—16:15的178.1 m/d,但这并不能说明地层中确实存在如此高速的垂向流。因为BH2孔和BH3孔从上至下都是透水的花管,钻孔连通了上部和下部地层,造成了较大的垂向流。

c. 由于垂向流的影响,BH2和BH3孔采用整孔投源的方式所测的水平流速受到影响,但从后来示踪剂点投测量的情况来看,两孔下层的水平流速都较小:如BH2孔7月5日所测高程-16~-14 m附近较大的水平流速为0.87 m/d;BH3孔7月1日-16~-18 m、-18~-20 m、-20~-22 m不同高程的分段平均水平流速分别为0.135、0.067、0.049 m/d。

d. BH5孔与BH2、BH3孔同处于江心洲上,为排除垂向流的干扰,BH5孔采取了砂卵石层上部封堵的措施,可以直接测量砂卵石层的水平流速。该孔流速较大的部位在高程-25~-28 m之间,水平流速最大值为0.48 m/d,对应高程为-27 m。砂卵石层并无明显的垂向流且水平流速也较低,说明上部淤泥夹砂层具有一定的隔水性,这有利于地铁联络通道采用冻结法施工。

4 结论

a. 钻孔中的垂向流会受到江水位涨落的影响。江水位上涨时会产生向上的垂向流,江水位下降时则会产生向下的垂向流。但是由于钻孔中透水花管的影响,钻孔中观测到的较大的垂向流速不完全是

由于地层内的垂向流所造成。

b. 江水位的涨落对孔中水平流速也具有一定影响。江水位较低时孔中水平流速变大;江水位较高时孔中水平流速变小。这是因为研究区域为两岸地下水补给江水,江水位降低时水力梯度变大,水平流速随之增大;反之则水力梯度变小,水平流速降低。

c. 为了避免垂向流的影响,将 BH5 孔上部封堵,直接测量地铁施工深度水平流速,结果显示其水平和垂向流速都较低,表明上部覆盖的淤泥夹砂层具有隔水性,使深部地层满足冻结法施工要求。

参考文献:

[1] 吴永哲,朱泽萱,杨平,等. 60 m 级超长联络通道冻结法施工与实测分析[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(6):148-156. (WU Yongzhe,ZHU Zexuan,YANG Ping, et al. Construction and measurement analysis of freezing method for 60 m level super long connecting passage[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6):148-156. (in Chinese))

[2] 张明,万博. 大流速强透水砂卵石地层地铁联络通道冻结法设计及施工问题处治技术研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(3):236-241. (ZHANG Ming, WAN Bo. Study on technical solutions to the problems in freezing method design and construction of subway cross passages in sandy cobble stratum with high flow rate and high permeability[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3):236-241. (in Chinese))

[3] 田海洋. 冻结法加固技术在富水粉细砂层联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术,2022,59(增刊2):214-222. (TIAN Haiyang. Application of the freezing method in connection channel construction in water-rich silty sand layer [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(Sup2):214-222. (in Chinese))

[4] FAN Wenhui, YANG Ping. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 20: 100250.

[5] HAN Lei, YE Guanlin, LI Yuanhai, et al. In situ monitoring of frost heave pressure during cross passage construction using ground-freezing method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3):530-539.

[6] 陈凯文,戴自航,张浩,等. 厦门滨海区某地铁联络通道冻结法施工监测与温度场分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5):1748-1756. (CHEN Kaiwen, DAI Zihang, ZHANG Hao, et al. Analysis of construction monitoring and temperature field of cross-passage of subway in seashore area in Xiamen using ground freezing method[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5):1748-1756. (in Chinese))

[7] 赵昊楠,夏才初,王兴开. 上海软土地层中地铁联络通道冻结法施工的温度场发展特性[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(1):80-86. (ZHAO Haonan, XIA Caichu, WANG Xingkai. Temperature field development characteristics of frozen method construction for metro link passages in Shanghai soft soil stratum [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1):80-86. (in Chinese))

[8] 周洁,李泽垚,万鹏,等. 组合地层渗流对人工地层冻结法及周围工程环境效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3):471-480. (ZHOU Jie, LI Zeyao, WAN Peng, et al. Effects of seepage in clay-sand composite strata on artificial ground freezing and surrounding engineering environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3):471-480. (in Chinese))

[9] 赵江涛,王笑欢,程敏,等. 冻结法施工联络通道渗漏水病害的原因及治理方法[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(8):77-81. (ZHAO Jiangtao, WANG Xiaohuan, CHENG Min, et al. Causes and treatment measures of water seepage and leakage diseases in freezing construction link passage [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8):77-81. (in Chinese))

[10] 宋帅,姜艳,尹文纲. 冻结法施工中渗流场对温度场的影响分析[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2023,38(4):68-76. (SONG Shuai, JIANG Yan, YI Wengang, et al. The influence of seepage field on temperature field in freezing method construction [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2023, 38(4):68-76. (in Chinese))

[11] 潘旭东,白云龙,白云飞,等. 富水地层冻结法施工渗流场对温度场的影响规律研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(5):122-128. (PAN Xudong, BAI Yunlong, BAI Yunfei, et al. Study on the influence pattern of seepage field on temperature field in the construction of the metro cross passage by freezing method in water-rich strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5):122-128. (in Chinese))

[12] PIMENTEL E, SRES A, ANAGNOSTOU G. Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage-flow conditions[J]. Géotechnique, 2012, 62(3):227-241.

[13] MARWAN A, ZHOU Mengmeng, ABDELREHIM M Z, et al. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 75:112-125.

[14] DROST W, KLOTZ D, KOCH A, et al. Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes[J]. Water Resources Research, 1968, 4(1): 125-146.

[15] 陈建生,董海洲. 井中测定流速广义示踪稀释物理模型 [J]. 水利学报, 2002(9):100-107. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou. Generalized physical model of tracer dilution for measuring seepage velocity in well [J]. Journal

- of Hydraulic Engineering, 2002 (9): 100-107. (in Chinese))
- [16] 张茜,陈建生,董海洲,等. 示踪法测定井中渗透流速的广义稀释模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2016, 33 (10): 126-130. (ZHANG Qian, CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, et al. Modified generalized dilution model of determining permeability velocity in wells by tracer method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33 (10): 126-130. (in Chinese))
- [17] 叶合欣. 基于示踪剂质量守恒的测流模型研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2007, 39 (5): 26-30. (YE Hexin. Study on model of measuring seepage velocity basing on tracer mass conservation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2007, 39 (5): 26-30. (in Chinese))
- [18] 叶合欣,陈建生,童海滨,等. 考虑示踪剂弥散作用的渗透流速计算方法 [J]. 水利学报, 2008, 39 (2): 240-244. (YE Hexin, CHEN Jiansheng, TONG Haibin, et al. Method for calculating seepage velocity in consideration of tracer dispersion effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (2): 240-244. (in Chinese))
- [19] PITRAK M, MARES S, KOBR M. A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow [J]. Ground Water, 2007, 45 (1): 89-92.
- [20] DONG Haizhou, CHEN Jiansheng, LI Xiaoying. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.
- [21] 沈添耀,董海洲. 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 63-69. (SHEN Tianyao, DONG Haizhou. Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 63-69. (in Chinese))
- [22] 柴栋,方广涛,邱春雄,等. 多含水层渗流系统电导示踪模型 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (2): 70-75. (CHAI Dong, FANG Guangtao, QIU Chunxiong, et al. Electric conductivity tracer model of a multi-aquifer seepage system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 70-75. (in Chinese))
- [23] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (6): 74-81. (LIU Guoqing, HONG Yunfei, WANG Wei, et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6): 74-81. (in Chinese))
- [24] 张申,李锦,王群敏,等. 基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (6): 60-68. (ZHANG Shen, LI Jin, WANG Qunmin, et al. Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 60-68. (in Chinese))
- [25] BEDMAR A P, ARAGUAS L. Detection and the prevention of leaks from dams [M]. Lisse: A A Balkema Publishers, 2002.

(收稿日期: 2024 - 11 - 21 编辑: 俞云利)

(上接第 23 页)

- [28] LEIFER I, MCCLIMANS T A, GJØSUND S H, et al. Fluid motions associated with engineered area bubble plumes [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2016, 142 (2): 04015015.
- [29] 张成兴,王永学,王国玉,等. 静水中气泡帷幕产生水平流的数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25 (1): 59-66. (ZHANG Chengxing, WANG Yongxue, WANG Guoyu, et al. Numerical simulation study on the horizontal current generated by air bubbles curtain in still water [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25 (1): 59-66. (in Chinese))
- [30] XU Tiaojian, WANG Xiaorong, GUO Weijun, et al. Numerical simulation of combined effect of pneumatic breakwater and submerged breakwater on wave damping [J]. Ships and Offshore Structures, 2022, 17 (2): 242-256.
- [31] 程以炫,董恒瑞,闫睿奎,等. 气泡羽流摆动特性及附壁效应研究 [J]. 高校化学工程学报, 2020, 34 (4): 904-911. (CHENG Yixuan, DONG Hengrui, YAN Ruikui, et al. Characteristics of bubble plume oscillation and the Coanda effect [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34 (4): 904-911. (in Chinese))
- [32] DHOTRE M T, SMITH B L. CFD simulation of large-scale bubble plumes: comparisons against experiments [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (23): 6615-6630.
- [33] 常聪聪,翟建国,黄筱云,等. 海船闸气幕防咸数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2022, 37 (1): 101-107. (CHANG Congcong, ZHAI Jianguo, HUANG Xiaoyun, et al. Numerical investigation of bubble curtain for mitigating salt intrusion through sea locks [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37 (1): 101-107. (in Chinese))
- [34] 吴风林, TSANG G. 关于气泡羽流的研究 [J]. 水动力学研究与进展, 1989, 4 (1): 104-112. (WU Fenglin, TSANG G. On bubble plumes research [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1989, 4 (1): 104-112. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 04 编辑: 俞云利)