

地铁工程对地下水源热泵渗流场及温度场影响的实验

潘俊,杜晓宇,张宗禹

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究地铁工程建设对地下水源热泵渗流场及温度场的影响. 方法 以盛京医院滑翔分院地下水源热泵工程为研究对象,利用室内砂箱实验观测模拟地铁工程横向全部或部分断面隔断的地下水位和水温变化情况,进而绘制不同工况下的水位、水温时序图. 结果 通过实验发现,地下水渗流方向主要受地下构筑物横向隔断方式、地下构筑物下表面相对高度差与水头的影响,地下水温度场分布主要受渗流方向水平分量的影响,其热扰动影响范围与过水断面距离及位置密切相关. 结论 通过研究地铁工程对地下水源热泵渗流及温度场影响,完成多工况室内砂箱模拟实验及结论分析,对完善地下水环境稳定研究及地下水源热泵工程取回水安全运行具有重要意义.

关键词 地下水源热泵;地铁工程;渗流场;温度场

中图分类号 TK523

文献标志码 A

Experiments on Influence of Metro Engineering on Seepage Field and Temperature Field of Groundwater Source Heat Pump

PAN Jun, DU Xiaoyu, ZHANG Zongyu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to explore the influence of metro engineering on seepage field and temperature field of groundwater source heat pump, this article uses the indoor sand box experiment to observe the changes of groundwater level and groundwater temperature of simulated metro engineering of full or partial section partition, which is based on the groundwater source heat pump project of Shengjing Hospital at Huaxiang. Then, the timing chart of groundwater level and groundwater temperature is drawn under different conditions. There are mainly two experimental results. On the one hand, it shows that the direction of groundwater seepage is mainly influenced by the transverse partition mode and lower surface relative height difference of underground structure, and also affected by the water head. On the other hand, the distribution of groundwater temperature field is mainly

收稿日期:2017-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41072190)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士,主要从事水源热泵工程应用方面研究.

affected by the horizontal component of the groundwater seepage direction, and the influence scope of thermal disturbance is closely related to the distance and position of cross-section of water. Therefore, the simulation and analysis of the indoor sandbox experiment with multi-condition are of great significance to improve the research on the stability of the groundwater environment and safe operation of groundwater source heat pump.

Key words: groundwater source heat pump; metro engineering; seepage field; temperature field

城市发展过程中对于地下空间多维度、大规模地开发与利用,将使地下水环境受到不同程度的影响,主要表现在地下构筑物对于地下水渗流场和温度场的改变^[1-4]. 针对地下水渗流场的变化,众多学者从水位降深方面分析. 地铁隧道工程将导致地下水位变化^[5-6],侯贵保^[7]通过研究实际地铁工程的施工期与运营期,得到局部地下水环境所受影响程度的大小,最终认为整个地区由于存在自然环境的恢复特点,地下径流流场较少受地铁结构影响,但地下构筑物将对于整个地下水资源带产生水质污染和水位雍高等负面影响. 熊志涛等^[8]利用含水层三维水流模型,研究地铁建成前后地下水流场的变化,结合多种工况分析了不同地铁走向对地下水流向与水位的影响,虽然结论指出单一或复杂的地铁工程对于水位影响较小,但对于水环境长期且隐蔽的影响不可忽视,有待进一步探究. 许烨霜等^[9]利用基于一维固结方法而改进的三维有限元模型分析了地下构筑物对于地下水渗流的阻挡效应,结果表明抽水侧的水位降深和沉降量与地下构筑物深度和宽度成正比. 经过众多学者的讨论与分析,明确了地下构筑物将对地下水渗流场产生改变,但由于实验中对于地下构筑物实际形态参数的简化,导致现有研究难以实现对地下水渗流场改变的准确描述.

地下水渗流过程会伴随热量传递^[10-11],因此,开展关于地下水温度场特征的研究同样重要. 随着基于统计学分析地下水温特点方法和定量化分析地下水温度分布特点方法的普及^[12],使受地下构筑物影响的地下水温度场改变特征研究成为可能. 吴亚彬等^[13]以

避免热贯通为目标,取水构筑物主要考虑不同取回水井之间的影响,研究对于温度场影响最小且水头变化缓慢的水源热泵最佳布井方案,并通过数值模拟验证了其方案的有效性. 窦明等^[14]为在含有多种地下构筑物的复杂地下环境中选择最适宜该地区布井方式,对地下水流场和温度场建立数值模型,研究对于地下水环境影响最小的不同地温空调布井方式,并最终得到了考虑效率与节能相互影响作用的布井方式.

近些年,由于室内实验具有边界条件易控制、材质更均匀和结果更直观等优势,广泛应用于地下水环境分析的实验中^[15-17]. 测压水位的变化率反映水力梯度值^[18],许烨霜^[19]在室内砂箱实验中研究构筑物埋深与水利梯度间的指数关系,考虑阻挡宽度后,可以分析得到三种工况下水位分布特征,为工程施工提供了实验依据.

从目前研究成果来看,地下构筑物对于地下水环境中水位和水温改变的研究较为分散,并且未设计出用于统一研究渗流场和温度场受地下构筑物影响的室内实验模型. 因此,笔者总结出两方面亟待解决的问题:一是现有研究较少将渗流场与温度场同时作为分析目标进行室内实验,并得到准确的分析结果;二是室内实验研究参数的设置较为单一,忽略了地下构筑物复杂情况,以地铁工程的复杂程度为例,较少考虑若在地铁乘降站及隧道所“拦截”的迎水面一侧已建有水源热泵热源井的情况下,水力梯度和温度梯度等地下水环境的改变情况. 针对上述两种问题,笔者以沈阳地铁9号线车站—滑翔站周围的水源热泵工程为研究对象,实验模拟该地区

水文地质条件和地铁工程建设三种方案,设计能够统一反映地铁工程对地下水源热泵渗流及温度场影响的室内砂箱实验,为保证水源热泵的安全稳定运行提供技术支撑.

1 室内砂箱实验

1.1 实验概况

实验砂箱装置图如图 1 所示.

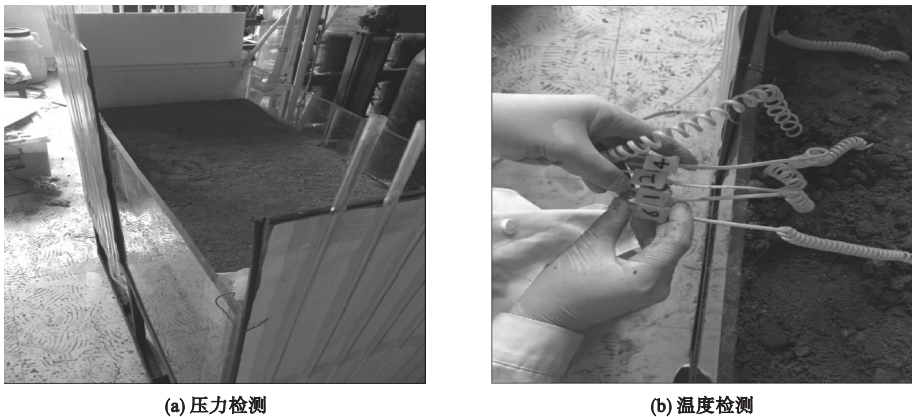


图 1 实验装置

Fig. 1 The diagram of experimental device

实验的主体部分是图 1 所示的实验砂箱,按照实际工程进行比例缩小. 该装置的制成材料为有机玻璃,长宽高为 $1.1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,由位处中间长为 1.0 m 的填充区和处于两侧长为 0.05 m 的调节水室两部分组成. 调节水室左侧进水且与高位水箱连接,进水流量由阀门和转子流量计控制,右侧出水且流量由阀门和转子流量计控制. 填充区内部及左右两端均铺设筛孔尺寸为 25 mm 的滤网,防止箱体内的沙子进入水室. 砂箱底端设有 26 个压力检测口,间距为 5 cm ,用软管将各压力检测口和带有坐标值的测压管连接,砂箱放置于高度为 0.5 m 的水平钢架上,其中 11 ~ 17 压力检测口属于垂直水流方向. 实验中用两个有机玻璃长方体作为地铁升降站模型,其中一个长宽高为 $0.5\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,另一个长宽高为 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,长方体下表面距箱体下表面距离为 31 cm ,与砂箱内的砂土和水保持隔离,且其内部装有可通热水的盘管和温度监测探头来控制升降站内的温度. 温度检测口布置如图 2 所示.

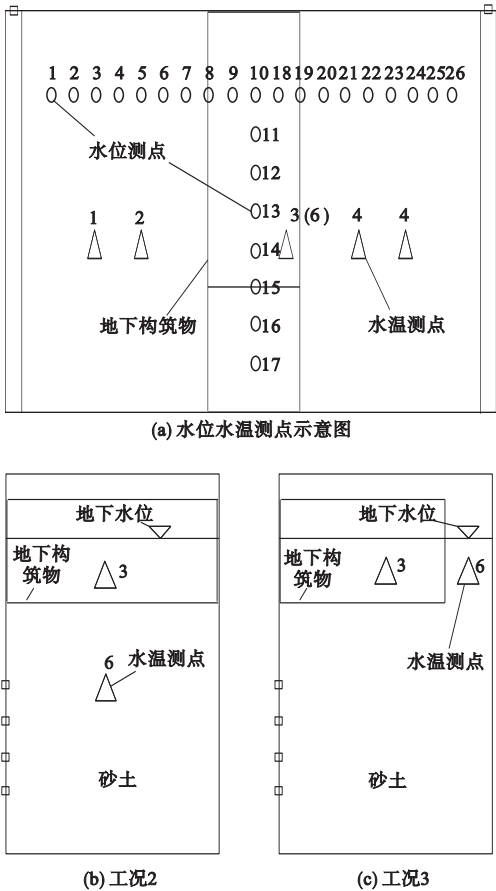


图 2 实验工况

Fig. 2 The diagram of experimental condition

高位水箱放置于高 3.5 m 的钢架上,是为实验砂箱提供定压恒温水流的装置.转子流量计流量通径为 25 mm,垂直安装.实验中的温度系统由 2 kW 加热棒、温度感测仪、XMTD 数显调节仪等组成,该装置可使高位水箱提供水温为 15 ~ 100 ℃ 的水,并且可以保持水温恒定.

1.2 实验步骤

砂土填装过程要加水再夯实,保证箱体内部的水等截面渗透,防止水流渗透过程中砂土发生沉降.利用吸耳球对各测压管进行排气,确保各测压管中的水受压平衡,水位和箱体内部的水位相同,填装完成后通水检查装置运行状况.

实验分为无地下构筑物(工况 1)、地下构筑物横向全断面隔断(工况 2)和地下构筑物横向部分断面隔断(工况 3)三种工况进行,工况 2 乘降站的两端与砂箱壁面完全贴合,无水流通过(见图 2).其中,每种工况下又以初始水位为控制条件分为三组进行,将初始水位的水头设置为 31 cm、41 cm 和 51 cm,三种水头设置分别代表地下构筑物处于水头之上、地下构筑物处于水头之中、地下构筑物处于水头之下,并对实际情况进行相应化简,且需保证进水口处的转子流量计在测量各组实验时的读数相同.在工况 2 和工况 3 条件下,取 5 min、10 min、15 min、30 min、60 min、90 min 及 120 min 为时间节点,对其测压管水位及各监测点的水温进行测量.

整个实验过程中,需要在不同时刻读取各测压管中水位值和温度感测仪上的温度值,要求人工记录.为保证实验时砂土的各项参数相同,每组实验时间间隔均为 24 h.

2 实验结果及分析

2.1 水位变化情况

2.1.1 地下构筑物横向全断面隔断实验

图 3 为地下构筑物全断面隔断情况下,初始水头为 31 cm、41 cm、51 cm 时各测压管

监测点水位结果.其中,测点 1 靠近上游进水口,测点 26 靠近下游出水口.

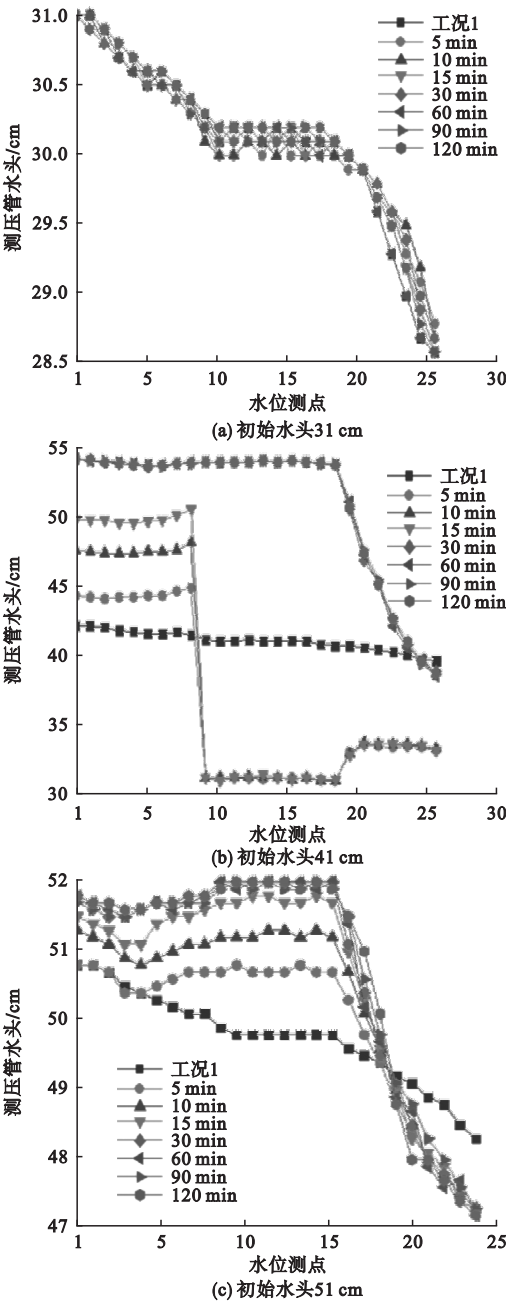


图 3 工况 2 下各监测点水位变化
Fig. 3 The changes of groundwater level at each monitoring point under condition 2

从图 3(a)可以看出,初始水头为 31 cm 时,工况 1 和工况 2 的水位变化趋于一致,水位由进水一侧到出水侧逐渐降低,水位差为 2.5 cm.工况 2 中由于地下构筑物下表面距砂箱底面恰好 31 cm,对地下水没有阻挡效

应,地下水渗流状态同工况1一样,相当于自然渗流状态,10~17测点处各测压管水位基本相同,最大水位差为0.2 cm.从图3可知其原因是由于这8个点处在同一过水断面,符合潜水的自然渗流变化规律.

从图3(b)可以看出,当初始水头为41 cm,即地下构筑物中心处在含水层时,工况2较工况1有较大差异,即地下水的渗流场发生了较大变化.图中工况1为潜水自然渗流变化,上下游水位差为2.3 cm.工况2中,15 min内各测点水位变化趋势一致,在达到构筑物顶端高度(51 cm)前,第1~9测点水位有较大幅度上升,10~19测点水位维持在31 cm,第20测点以后水位上升至33 cm并在出水端稍有下降;30 min后各测点水位基本稳定,第1~19测点水位保持在52 cm左右并稍有下降,第19测点后水位迅速下降至出水端水位39 cm,此时水位差为13 cm.

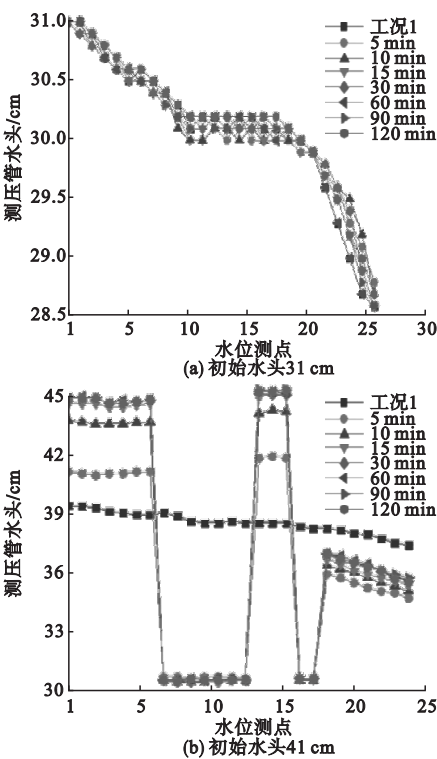
从图3(c)可以看出,当初始水头为51 cm,工况1条件下,水位由进水端到出水端逐渐降低,依旧符合地下水运动规律.工况2条件下,当初始水头与地下构筑物上表面(51 cm)等高时,15 min内1~9测点水位上升至51.2 cm,10~18测点水位则保持在51.4 cm,19测点以后水位明显下降,26测点水位下降至47.4 cm.30 min后各测点水位保持稳定,1~18测点水位维持在52 cm左右,第18测点以后水位迅速下降,出水端水位为47.5 cm.

综上所述,实验中地下构筑物全断面隔断后,当地下构筑物下表面高于初始水头时,其对地下水流没有阻挡效果,水位变化曲线同工况1条件下基本一致,地下水渗流场无变化;当地下构筑物恰好处在地下含水层时,由于是全断面隔断,其对地下水流的阻挡效果显著,迎水面水位迅速上升,而下游地下水又得不到及时的补给,所以背水面水位降深较大.由于地下构筑物在所处潜水自然水位线以下,因而该段的地下水相当于承压水,其

压力比潜水处要大.而在30 min之内,由于第20测点以后没有了地下构筑物的压力,地下水类型又转变为了潜水,所以水位又会出现一个上升的趋势.在30 min以后,地下水从构筑物上表面溢出,第20测点以后其又出现了明显的下降;对于地下构筑物上表面低于上游初始水头的情况,构筑物对渗流场的阻隔效果主要体现在下部,这样地下水只有积聚升高最终从地下构筑物的上部“溢出”.由于上游水头是定流量出水,通过构筑物前水位会有小幅度上升,而在其通过构筑物后,又出现了较大的降深.综合图3(b)、(c)可知,地下水在30 min之后达到渗流稳定时间.

2.1.2 地下构筑物横向部分断面隔断实验

实验中,构筑物的一侧与箱体壁贴合且不透水,另一侧不与箱体接触,为部分断面隔断.图4为地下构筑物部分断面隔断情况下,初始水头为31 cm、41 cm、51 cm时各测压管监测点水位结果.其中,测点1靠近进水口,测点26靠近出水口,测点15~17为未隔断部分水位监测点.



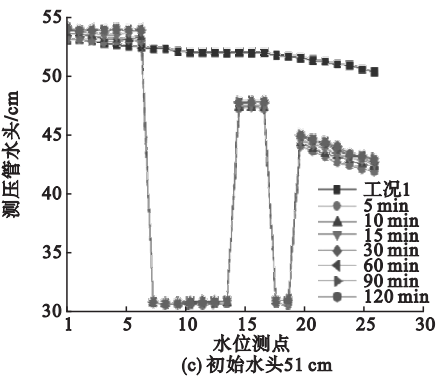


图4 工况3下各监测点水位变化

Fig. 4 The changes of groundwater level at each monitoring point under condition 3

从图4(a)可以看出,初始水头为31 cm时,工况1和工况3的水位变化趋于一致,水位由上游进水口到下游出水口逐渐降低,水位差为2.6 cm. 同样,工况3中由于地下构筑物下表面距砂箱底面恰好31 cm,对地下水没有阻挡效应,地下水渗流状态同工况1一样,符合潜水的自然渗流变化规律.

从图4(b)可以看出,当初始水头为41 cm时,工况3条件下地下水的渗流场发生了较大变化. 由于构筑物的阻挡效果,其迎水面水位随时间逐渐上升,15 min后水位稳定且并未超出构筑物高度(51 cm),并且维持在47 cm左右. 同时,未隔断部分的15~17监测点的水位也在随时间上升,最终维持在47.6 cm. 构筑物所覆盖区域的水位则保持在30.8 cm. 与迎水面相比,构筑物的背水面水

位出现了较大幅度的下降;在第5 min时测点20的水位为37 cm,测点26的水位为35.6 cm;在第60 min时测点20的水位为38.2 cm,测点26的水位为36.7 cm. 所以,同一时刻不同测点的水位逐渐下降,而同一测点的水位随时间略有上升.

从图4(c)可以看出,当初始水位与构筑物模型上表面平时,迎水面水位随时间略有上升,达到52 cm;构筑物模型所覆盖测点的水位基本保持在30.6 cm;而15~17测点的水位相比初始水头则出现下降,维持在46 cm;同样,背水面水位仍然出现了较大降深.

通过工况3与工况2的结果对比,不难发现当构筑物模型部分隔断横向断面时地下水流围绕构筑物出现了绕流现象. 以工况3第30 min时的实验结果为例(见图5),当初始水头处在构筑物中间时,由于构筑物的阻挡效果,迎水面水位壅高至47.2 cm,而此时由于过水断面的减小构筑物侧向水位升高至47.5 cm. 同时,与自然渗流状态相比,下游地下水得不到及时补给,背水面水位出现了较为明显降深,此时最高水位仅为38.2 cm. 当初始水头恰好处在构筑物上表面时,迎水面水位壅高值较小,仅为1 cm,此时侧向水位变化同样较小,基本保持在46 cm. 同时,背水面水位较侧向水位仍然有2.6 cm的水位差,说明背水面水位仍然有较大降深.

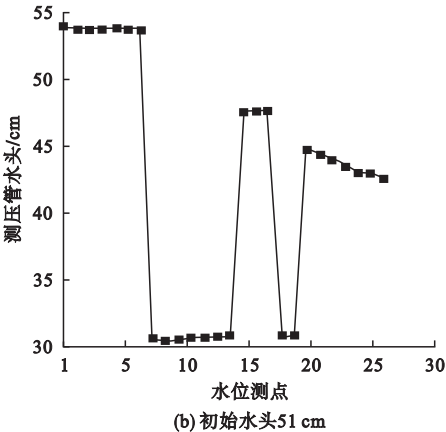
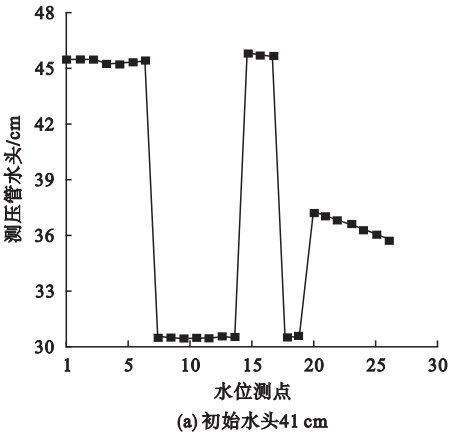


图5 第30 min时地下水位变化

Fig. 5 The changes of groundwater level at the 30th minute

2.2 水温变化情况

2.2.1 地下构筑物横向全断面隔断实验

为了保证站厅乘客的舒适程度,地铁乘降站建成后站厅内的温度将始终维持在18℃左右,比自然渗流状态下地下水温度(12℃)高出6℃.由于实验过程中自然水温为26℃,因此为保证实验结果不受外界温度变化干扰,三种工况初始水温均设为26℃.为了保证地铁乘降站模型与地下水的温度差,将地下构筑物的模型加热到32℃.工况2条件下各测点水温测量结果如图6所示.

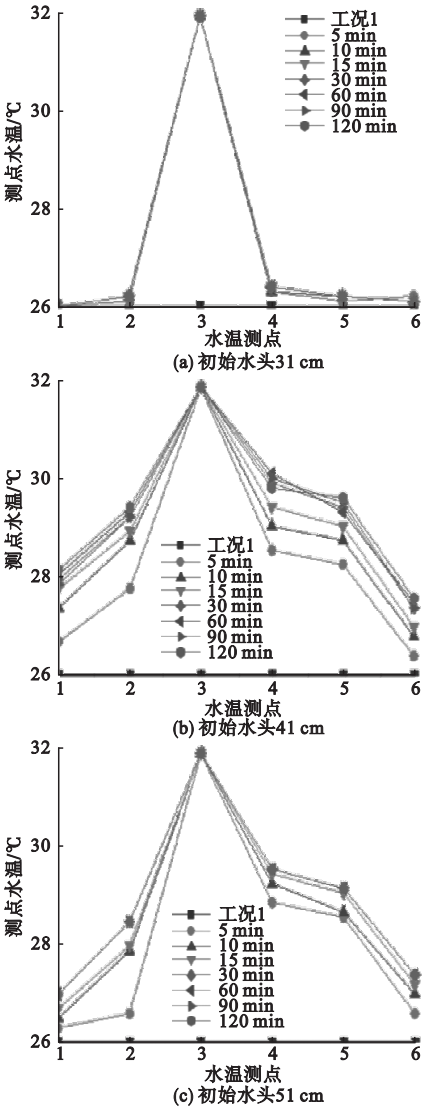


图6 工况2下各监测点水温变化

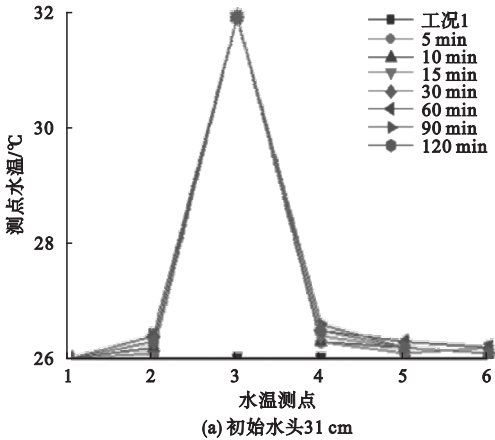
Fig. 6 The changes of groundwater temperature at each monitoring point under condition 2

从图6(b)可以看出,由于构筑物与周围含水层存在温差,其周围地下水温度随时间相应的发生了较为明显的变化.在构筑物两侧与其距离相同的点(测点2、4和测点1、5)的温度受影响程度不同,同一时刻测点4和测点5的水温明显高于测点2和测点1的水温.各点水温稳定时间为30 min.另一方面,测点6表示构筑物温度沿渗流垂向扩散情况,从图中可以看出,该点温度受构筑物影响不大.

由2.1.1节可知,在构筑物横向全断面隔断实验中,围绕构筑物出现了环向流迎水面水位持续上升并越过其上表面,背水面水位出现较大降深.通过图6(b)中上下游测点的温度并结合地下水的渗流规律不难发现,地下水水平渗流方向决定着地下构筑物热流传递方向,使得地下水的热量传递主要集中在渗流的方向上,热量随着水的流动向下游传递,而在垂直于渗流方向上的热量传递并不明显.

2.2.2 地下构筑物横向部分断面隔断实验

图7为初始水头为31 cm、41 cm、51 cm时各测点测得水温结果.地下构筑物存在时,渗流断面积减小,地下水的上游排泄受阻,下游补给不及时,导致地下水位在空间和时域上均发生变化.当横向断面部分隔断时,地下水围绕构筑物侧向发生侧向流,此时地下水的温度也相应地发生变化.



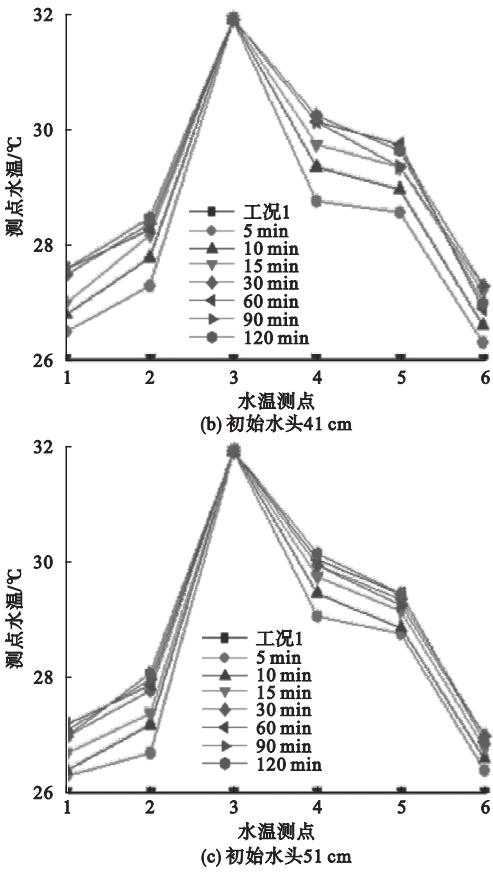


图 7 工况 3 下各监测点水温变化
Fig. 7 The changes of groundwater temperature at each monitoring point under condition 3

从图 7(b)可以看出,地下水初始水位为 41 cm 时,即构筑物处在地下水饱和带与非饱和带之间,其阻挡效果使得迎水面水位上升,同时围绕构筑物侧面发生侧向流。各测点温度在 30 min 之后保持稳定。根据达西定律可知,相同流量条件下过水断面减少必然导致流速的增加。而当流速增大时,下游的相同位置所受到的热扰动要比自然情况下增大许多,而且发生扰动的位置也会随水流速度的增大而向前移动,从而表现出热扰动随流速的增大而越来越活跃,但是对于构筑物的另一侧以及绕流处的热扰动影响却不明显。

3 结 论

(1)地下构筑物横向全断面隔断后,当地下构筑物下表面高于初始水头时,地下水

渗流场无变化;当地下构筑物中心处在地下含水层时,由于是全断面隔断,其对地下水流的阻挡效果显著,迎水面水位迅速上升,而下游地下水又得不到及时的补给,背水面水位降深较大。

(2)当构筑物模型部分隔断横向断面时,地下水在通过地铁乘降站时侧向发生了绕流,而在通过隧道的过程中侧向、顶部及底部均发生了绕流,其渗流速度增大。

(3)地下水平渗流方向决定着地下构筑物热流传递方向,使得地下水的热量传递主要集中在渗流的方向上,热量随着水的流动向下游传递,而在垂直于渗流方向上的热量传递并不明显。

(4)相同流量条件下过水断面减少必然导致地下水流速的增加,当其流速增大时,下游的热扰动的程度也相应地加大,而且发生扰动的位置也有所变化,向前移动,表现出的热扰动越来越活跃,但是对于上游以及绕流处的热扰动影响却不明显。

参考文献

[1] 王晓宏,施安峰,郑晓磊,等. 地下水源热泵地下水渗流场自适应网格法[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(6):621-626.
(WANG Xiaohong,SHI Anfeng,ZHENG Xiaolei,et al. Adaptive mesh refinement technique for seepage flow field in groundwater source heat pump system[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2012,30(6):621-626.)
[2] PAPADOPULOS S S,LARSON S P. Aquifer storage of heated water:part II-numerical simulation of field results[J]. Ground water,2010,16(4):242-248.
[3] LUíS P E. Super absorbent polymers;on their interaction with water and pore fluid [J]. Cement and concrete composites,2011,33(7):131-137.
[4] KIM J,LEE Y,YOON W S,et al. Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system[J]. Energy,2010,35(12):4955-4965.
[5] 彭泽健,钟世振,郑柱. 地铁隧道涌渗水诱发地下水位变化情况及变形监测范围研究[J]. 交通世界,2017(14):136-138.
(PENG Zejian, ZHONG Shizhen, ZHENG Zhu. Study on groundwater level changes and deformation monitoring range induced by water

- in subway tunnels[J]. Journal of transportation world, 2017(14):136-138.)
- [6] CHU E H. Groundwater management for sustainable underground subway development in manhattan, New York city [C]. Chicago Illinois: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [7] 侯贵保. 太原市地铁2号线工程对地下水环境的影响分析[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
(HOU Guibao. Analysis of the effect of the groundwater environment of Taiyuan metro line No. 2 project[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.)
- [8] 熊志涛, 张艺, 文美霞, 等. 武汉地铁三、四号线工程建设对地下水流场的影响分析[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(3):308-312.
(XIONG Zhitao, ZHANG Yi, WEN Meixia, et al. Analysis of influence of engineering construction of Wuhan metro line 3 and line 4 on groundwater flow field[J]. Resource environment & engineering, 2014, 28(3):308-312.)
- [9] 许烨霜, 沈水龙, 马磊. 地下构筑物对地下水渗流的阻挡效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10):1902-1906.
(XU Yeshuang, SHEN Shuilong, MA Lei. Cut-off effect of groundwater seepage due to existence of underground structure[J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2010, 44(10):1902-1906.)
- [10] 丁翰婉. 地下水渗流条件下土壤蓄热过程中地下传热特性的数值研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
(DING Hanwan. Numerical simulation of underground heat exchangers under the influence of groundwater advection[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.)
- [11] ESLAMI-NEJAD P, BERNIER M. Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications [J]. Applied energy, 2012, 98(5):333-345.
- [12] 潘俊, 张宗禹, 王灏瀚. 沈阳城区地下水温特征及其在水源热泵规划设计中的应用[J]. 制冷与空调, 2016(1):65-67.
(PAN Jun, ZHANG Zongyu, WANG Haohan. Shenyang city underground water temperature characteristics and its application in water source heat pump in the planning and design [J]. Refrigeration and air conditioning, 2016(1):65-67.)
- [13] 吴亚彬, 戴源德, 杜海存. 地下水源热泵含水层水头分布及温度场的模拟分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2014, 36(2):166-170.
(WU Yabin, DAI Yuande, DU Haicun. Simulation and analysis of aquifer's water head distribution and temperature field of the underground water source heat pump[J]. Journal of Nanchang university (engineering & technology), 2014, 36(2):166-170.)
- [14] 窦明, 张彦, 米庆彬, 等. 地温空调井布局方式对地下水流场和温度场的影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5):124-128.
(DOU Ming, ZHANG Yan, MI Qingbin, et al. Impact of ground temperature air-conditioning in different layouts on groundwater flow field and temperature field [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2014, 35(5):124-128.)
- [15] SOTTANI A, BERTI M, VETTORELLO L, et al. Groundwater field measurements for stream seepage estimation [C]. Bologna: Sinergeo, 2012.
- [16] HUI X U. Experiment on hexavalent chromium transport in seepage sand box with permeable reactive barrier [J]. Ecology & environmental sciences, 2010, 19(8):1941-1946.
- [17] 解磊, 马丽珠, 赵志勇, 等. 沈阳地区水位变化对砂土地基承载特性影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(5):875-881.
(XIE Lei, MA Lizhu, ZHAO Zhiyong, et al. Experimental study on bearing behavior of sandy soil foundation affected by water level changes in Shenyang area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(5):875-881.)
- [18] YU C, DENG S C, LI H B, et al. The anisotropic seepage analysis of water-sealed underground oil storage caverns [J]. Tunnelling & underground space technology incorporating trenchless technology research, 2013, 38(9):26-37.
- [19] 许烨霜. 考虑地下构筑物对地下水渗流阻挡效应的地面沉降性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
(XU Yeshuang. Evaluation of the behaviour of groundwater seepage and land subsidence via considering infrastructures penetrated into aquifers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.)