

同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用

高正夏¹ ,徐军海¹ ,王建平¹ ,侯曙光¹ ,王汇明² ,陈云长² ,车林源²

(1. 河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 广东省水利水电勘测设计研究院 ,广东 广州 510180)

摘要 :介绍了利用同位素方法测试水文地质参数(主要是地下水的流速、流向)的基本原理 ,并结合广东省某研究区的实际测试成果进行了分析 ,指出在今后类似测试中需注意的 4 个问题 :完善测试钻孔的结构和成井工艺 ,特别是过滤器的结构 ;含水层水力坡度的精确测定 ;测试井孔的代表性和经济合理性 ;测试数据的解释必须具有扎实的地质和水文地质知识 .

关键词 :同位素测试 ;水文地质参数 ;地下水流速 ;地下水流向

中图分类号 :TV131.3 ;P641 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2003)06-0655-04

利用同位素测试含水层的水文地质参数 ,研究地下水的运动规律 ,是一种边缘技术测井方法 ,这种方法不受井液温度、压力、矿化度的影响 ,测试灵敏度较高 ,方便快捷 ,单井测定流速准确可靠 ,可测孔径为 50 ~ 300 mm ,孔深可达 100 m. 我国的一些科研机构在过去的 20 多年中 ,利用同位素技术在解决供水水文地质、基坑排水、矿山排水、环境保护、水库渗漏、堤防防渗加固等领域开展了大量卓有成效的工作 ,也取得了一批成果^[1,2] ,但同时也应当清醒地认识到 ,同位素技术并不是一种万能的技术 ,它的应用也有着很大的局限性 .

1 同位素测试的基本原理和方法

同位素单孔稀释法测定地下水流速 ,是对井孔滤水管中的地下水用少量示踪剂¹³¹I 标记 ,标记后的水柱示踪剂浓度不断被通过滤水管的含水层渗透水流稀释而降低 ,其稀释的速率与地下水渗透速度有关 ,

$$V_f = \frac{\pi r_1}{2\alpha t} \ln \frac{N_0}{N}$$

式中 : V_f ——地下水渗透速度 ,m/d ; r_1 ——过滤管的内半径 ,m ; N_0 ——同位素初始浓度($t = 0$ 时)计数率 ; N —— t 时刻同位素浓度计数率 ; α ——流场畸变校正系数 ; t ——同位素浓度从 N_0 变化到 N 所需的观测时间 .

通过测定不同时刻 t 的计数率 N ,将观测数据绘在 $t \sim \ln N$ 坐标系中 ,利用最小二乘法作直线 ,确定直线的斜率 ,即可计算出渗透速度 V_f . 以上计算和作图均借助于计算机来完成 . 如能在渗透流速测试时 ,同时测得试验孔处的水力坡度 ,就可根据达西定律 $K_f = V_f/I$ 进一步求取含水层的渗透系数 .

流场畸变校正系数 α 是由于含水层中钻孔的存在 ,引起滤水管附近地下水流场产生畸变而引入的一个参变量 ,其物理意义是地下水进入或流出滤水管的两条边界流线 ,在距离滤水管足够远处两者平行时的间距与滤水管直径之比 . 在均匀流场且井孔不下过滤管、不填砾的基岩裸孔中 ,取 $\alpha = 2$. 对于既下管又填砾的情况 , α 便是一个与滤管内、外半径 ,滤管渗透系数 ,填砾厚度及填砾渗透系数等多因素有关的变量 ,可用下式进行计算 :

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{K_3}{K_2}\right) \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{K_3}{K_2}\right) \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}}$$

$K_1 = 0.1f \qquad K_2 = C_2 d_{50}^2$

式中 : r_1 ——过滤管内半径 ,m ; r_2 ——过滤管外半径 ,m ; r_3 ——钻孔半径 ,m ; K_1 ——过滤管渗透系数 ,cm/s ,

过滤管渗透系数不是普通所用的术语,涉及井孔滤网的水力性质,可根据过滤管结构类型通过试验确定,或通过水力试验测得,或类比已有结构类型基本相同的过滤管来确定; f ——滤网的穿孔系数(孔隙率),%; K_2 ——填砾的渗透系数,cm/s; C_2 ——颗粒形状系数,当 d_{50} 较小时可取 $C_2 = 0.45$; d_{50} ——砾料筛下的颗粒重量占全重50%时通过网眼的最大颗粒直径,通常取粒度范围的平均值; K_3 ——含水层渗透系数,cm/s;可参照已有抽水试验资料或由估值法确定,也可由公式估算, K_3 对 α 的影响很小,本文经过计算取 $\alpha = 3.5$ 。

地下水流向测定采用单孔吸附示踪法,其原理是:用放射性示踪剂均匀标记井中水柱,并允许它流入含水层,随着地下水的流动,均匀分布的同位素逐渐呈不均匀分布,沿水流流出的方向上浓度最高,水流补充的方向上浓度最低,用对方向敏感的探测器测定滤水管内壁四周水柱示踪剂的分布,即可确定地下水的流向。

对方向敏感的探测器一般采用照准闪烁计数器,即将照准器安装在探头上,测试时照准窗在滤水管内可旋转360°得到方向图形,当照准窗指向示踪剂云流出滤水管的方向时计数达到最大值,照准窗的形状是一个不对称的有缝隙的铅罩,照准窗用连杆与地面定向装置连接,由地面转动手柄,通过联动杆带动照准窗间断地旋转,转动几周即可确定出孔壁四周方向上计数率的读数,将各个方位的计数率按同一比例作成极图,用矢量合成法即可求得地下水的流向,以上作图和计算均采用计算机来完成。

2 研究区水文地质条件概况

研究区位于广东省潮汕平原的北缘,属韩江三角洲冲洪积平原顶部,地势低平,略显北高南低,东高西低,偶见孤山残丘出露,地面标高一般5~10m,第四纪地层厚度较大,达70~100m,从上到下岩性特征如下:

alQ_4^1 现代河床冲积层:主要为中、粗砂,局部砾砂,松散状,分布于现代河床表层。

$m + alQ_4^3$ 上全新统:主要为黄灰色粉砂质粘土、粉土、粉细砂,局部夹淤泥及淤泥质中粗砂,层厚约9.0m,层面高程约7m。

$m + alQ_4^2$ 中全新统:主要为灰黑色淤泥质粘土、淤泥,间夹较多淤泥质粉细砂、腐木屑等,层厚相对稳定,一般10.6~17.8m,层面高程2~3m。

alQ_4^1 下全新统:该层上部局部分布的薄层(厚度一般2~6m)黄色粘土或中粗砂,中、下部主要为灰黄色砂卵石层,卵石含量一般达30%~50%,砾径一般3~6cm,该层厚12~22.7m,层面高程-8.88~-20.85m。

alQ_3^3 上更新统上段:成分以黄、灰黄色粘性土,花斑粘土为主,局部夹粘土质中细砂,层厚较薄,分布不连续。

alQ_3^2 上更新统中段:上部为灰色泥质粉细砂、中粗砂层,层厚2.5~5m,层面高程-31~-35m,层厚稳定,分布连续,下部为含卵石砾石层,层厚约35m,层面高程-34~-38m。

下伏基岩为白垩系下统官草湖群(K_{1gn}),岩性为褐红色含砾砂岩、粉砂岩,全风化带分布高程-68~-77m。

根据第四系地层岩性特征,淤泥、淤泥质土、粘性土为相对隔水层,砂砾石层为含水层或强透水层,地下水类型为潜水和承压水,潜水含水层主要为浅部砂层,受大气降雨入渗补给,与韩江河水力联系密切,互为补排,旱季潜水位一般高于河水位1~2m,洪水期潜水位接近或略低于河水位,承压含水层为相对隔水层之下的砂砾石层,受上层潜水越流补给,与韩江有一定的水力联系,水位升降与韩江水位变化基本一致,无论旱季、雨季,河水位大多高于承压水位,河水补给地下承压水。

3 实测结果及分析

现场测试使用中国工程勘察协会技术咨询部同位素方法仪器推广中心生产的FDC-250A型地下水参数测试仪,首先根据含水层埋深确定井孔结构,正确下置过滤器位置,选取实测段,然后用投源器将 ^{131}I 投入测试段,进行适当搅拌,对待测水柱均匀标定,接着换用测试探头定时对被标记段水柱的放射性浓度进行测量,根据浓度稀释的速率,确定观测的时间间隔,一般每隔10~30min观测一次,如遇到稀释速率较快或很慢,可适当缩短或延长观测时间,每个测段不少于3个测点,每个测点的观测次数不少于5次,以便在半对数坐标记录纸上确定稀释浓度随时间的线性变化关系,决定测试工作的结束时间,地下水流速部分测试结果见

表 1. 根据测试数据与研究区一般的水文地质规律对比 ,两者基本相符 .地下水流向部分测试结果见表 2 .

表 1 研究区部分井孔同位素流速测定成果

Table 1 Part of isotope tested result of groundwater velocity

孔号	静水位/m	测试高程/m	渗透流速/(m·d ⁻¹)	孔号	静水位/m	测试高程/m	渗透流速/(m·d ⁻¹)
TK22s	8.28	6.91	0.242 9	TK137c	6.28	1.98	1.044 3
TK24c	6.87	- 6.43	0.509 3	TK16c	5.39	- 2.26	0.027 2
TK33s	8.25	- 5.11	0.790 8	TK99s	4.93	- 1.07	0.170 1
TK05s	4.8	- 0.85	0.446 2	TK07c	5.05	1.05	0.245 5
TK136s	4.59	1.94	0.001 9	TK124s	4.19	- 6.11	0.052 5

表 2 研究区部分井孔同位素流向测定成果

Table 2 Part of isotope tested result of groundwater flow direction

孔号	静水位/m	测试高程/m	流向/(°)	孔号	静水位/m	测试高程/m	流向/(°)
TK22s	8.28	7.01	285	TK137c	6.28	2.28	73
TK24c	6.87	- 6.08	294	TK16c	5.39	- 1.36	147
TK33s	8.25	- 3.61	313	TK99s	4.93	- 0.97	326
TK05s	4.8	- 1.25	106	TK07c	5.05	1.05	227
TK136s	4.59	2.14	34	TK124s	4.19	- 6.10	296

从地下水流向测试结果看 ,测区地下水流向主要与井孔所处位置及地下水补排性质有关 ,地下水流向测试结果基本反映了水文地质条件的实际情况 .

4 结 论

运用同位素示踪技术测定地下水流速、流向是一项新技术 ,虽然它的理论和方法还不完全成熟 ,但它在地下水渗流研究的许多方面发挥了重要作用 .本文将这一技术运用于广东省某研究区地下水渗流场的研究 ,测试结果基本反映了水文地质的实际状况 ,揭示了地下水运动的特点 ,有利于帮助我们进一步分析和查清水文地质条件 ,为地下水渗流场计算提供水文地质参数 ,测试结果是真实可靠的 .通过研究 ,认为在今后的类似工作中应注意以下 4 个方面 :

- a. 对钻孔结构和成井工艺要进一步完善 ,增加过滤器长度 ,最好能与含水层的厚度一致 ,本次测试反映出 ,在过滤器长度有限的情况下 ,过滤器中间的速度比端部的速度有所增大 ,同时过滤器的结构也有待改进 ,这对地下水流向的测试尤为重要 .止水、洗井等成井环节的技术的提高 ,对测试成果的精度都是不可忽视的重要因素 .
- b. 为了获得含水层渗透系数 ,必须得到与测试同时期的含水层的水力坡度或等水位线图 ,因此最好能选择一些典型地段布置观测孔 ,测量地下水水力坡度 ,由此更大程度地发挥测试资料的效能 .
- c. 本次测试井孔少 ,分布稀 ,对完全控制面上的地下水渗流特征还显不足 .建议今后在类似测试中要尽可能多地布置测试井孔 ,当然也要仔细研究井孔的代表性问题以及成井及测试的费用 ,以最小的代价获得尽可能多的有用数据 .
- d. 要注意对比研究 ,同位素测试方法有它固有的优点 ,但不能盲目相信测试数据 .归根到底 ,同位素方法仅仅是若干种水文地质测试方法中的一种方法而已 ,要注意将同位素方法的测试成果与其它常规方法的测试成果进行比较 ,最终成果要反映一般的水文地质规律 .

参考文献 :

[1] 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 .
[2] 刘光尧 . 用放射性同位素测定含水层水文地质参数的方法(下) [J] . 勘察科学技术 ,1997 (2) 3—8 .
[3] 陈建生 ,董海洲 ,李兴文 等 . 新安江右坝裂隙岩体渗流同位素示踪研究 [J] . 水科学进展 ,2001 ,12(3) 336—342 .
[4] 陈建生 ,王媛 ,赵维炳 . 孔中同位素示踪方法研究裂隙岩体渗流 [J] . 水利学报 ,1999 (11) 20—24 .
[5] 陈建生 ,王媛 ,赵维炳 . 钻孔与裂隙岩体斜交渗流场并流理论与示踪方法研究 [J] . 水利学报 ,1999 (12) 43—47 .

[6] 刘光尧, 陈建生. 同位素示踪测井[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999. 240—245.

Isotope technology and its application to measurement of groundwater velocity

GAO Zheng-xia¹, XU Jun-hai¹, WANG Jian-ping¹, HOU Shu-guang¹,

WANG Hui-ming², CHEN Yun-chang², CHE Lin-yuan²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Water Conservancy and Hydropower Investigation, Design, and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510180, China)

Abstract :An introduction is given to the basic principle of measurement of hydrological-geological parameters (including the direction and velocity of groundwater) by use of the isotope technology. By analysis of the test data for a studied region in Guangdong Province, four issues, which should be noticed in the similar test, are identified, i.e. perfection of the structure of test holes and drilling technology, especially the structure of filter, precise measurement of hydraulic gradient of aquifers, representation and economic rationality of test holes, and analysis of test data based on enough geological and hydrological-geological knowledge.

Key words :isotope test; hydrological-geological parameter; velocity of groundwater; direction of groundwater flow

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

本刊以马列主义、毛泽东思想和邓小平理论为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

本刊为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。本刊为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

本刊由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行,每期定价5元,每期邮费1元,全年订费24元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码210098,联系电话(025)83786376。