

滨海地区反稀释法现场试验研究

李月奇^{1,2},陈亮^{1,2},文磊^{1,2},何健健^{1,2},姚斌斌^{1,2}

(1. 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;2. 河海大学,江苏省岩土工程技术工程研究中心 江苏 南京 210098)

摘要:人工示踪技术可较为准确地估算地下水渗透流速的大小,本文提出在地下水含盐度较高的滨海地区利用淡水作为间接示踪剂进行钻孔内水体置换,通过电导率试验采集电导数据并进行数据分析估算地下水渗透流速的大小,并推导了理想化条件下的地下水渗透流速的计算公式。在工程中进行了原位测试试验,试验结果表明该方法能较好的估算高盐度滨海地区地下水渗透流速的大小。

关键词:滨海地区;地下水;反稀释法;渗透流速;示踪剂

中图分类号:P641.73

文献标识码:A

Field test study of anti-dilution method in coastal areas

LI Yueqi^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, WEN Lei^{1,2}, HE Jianjian^{1,2}, YAO Binbin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China. 2. Jiangsu Research Center for Geomechanics Engineering Technology, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: Groundwater seepage velocity can be accurately estimated by tracer techniques. The fresh water was used as an indirect tracer in the coastal area of groundwater with high salinity to test Groundwater seepage velocity by conducting tracer test and analyzing the data collected. And then, the equation was deducted. The experimental results show that this method can estimate the groundwater seepage flow rate in high salinity coastal area.

Key words: anti-dilution method; groundwater; seepage flow velocity; tracer; coastal area

地下水渗透流速是一个重要的水文地质参数,其在工程勘察、设计和施工的过程中起着重要的作用。人工示踪技术可较为准确地估算地下水渗透流速的大小。自 Drost, Moser 建立同位素单井点稀释定理计算地下水流速以后^[1-2],众多学者在此基础上进一步发展了示踪测井技术,并被广泛应用于水文地质、工程勘察等领域,解决了许多工程实践问题。Sale 等通过单井示踪技术利用荧光剂作为示踪剂解决了轻质非水相液体的地下渗透流速计算问题^[3]。Pitrak 等用钻孔稀释技术采用色素作为示踪剂来标记流体柱进行地下水水平流速的测试计算,并通过实例证明了该技术的有效性和实用性^[4]。陈建生等在此基础上将垂向流统一考虑进去,提出了广义稀释模型,解决了

原点稀释理论的诸多缺陷,并运用于实际工程勘察和堤坝渗漏探测中,取得了良好的效果^[5-12]。高正夏等介绍了利用同位素方法测试地下水的流速、流向的基本原理,考虑到放射性同位素对环境的影响,目前主要使用食盐溶液等代替放射性同位素作为示踪剂进行单井示踪试验。滨海地区受海水入侵的影响,地下水含离子量很多,电导值很高,采用投放食盐的方法已不再适用。本文通过理想模型理论分析和现场试验相结合的方法,对滨海地区高电导值地下水的渗透流速测试方法进行了改进研究。

1 反稀释模型理论推导

反稀释基本模型示意图如图 1 所示,其中 d

收稿日期:2016-06-05

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(20155024511);南京水利科学研究院开放基金资助项目(20155005712)

作者简介:李月奇(1993-),男,安徽阜阳人,硕士。研究方向为岩土工程。

为钻孔直径, h 为被标记段水深度, Q 为流入和流出钻孔的流量, $C_c(N_c)$ 为地下水未进行洗孔置换水体前的离子浓度(电导值), $C_t(N_t)$ 为 t 时刻被标记段水体的测试电导值。

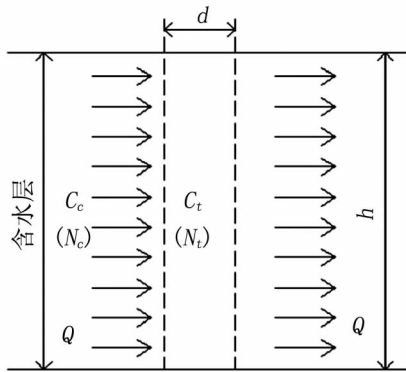


图1 反稀释模型示意图

Fig.1 Model of anti-Dilution Methods

1.1 基本假设

反稀释法计算公式推导的基本假设如下:(1) 测点地下水水流的模式处于稳定状态;(2) 含水层不可压缩,淡水置换后短时间内水位恢复到置换之前的水位;(3) 被标记段圆柱体积为 $V = \frac{\pi d^2}{4} h$, 示踪剂浓度示踪均匀分布;(4) 体积 V 内的示踪剂变化由水平流引起,即不考虑垂向流的影响;(5) 孔外示踪剂不引起探头的响应。

1.2 流速计算公式推导

对孔内标记段水体进行淡水置换后记起始浓度为 C_0 , 设经历任意时刻 t 后标记段离子浓度为 C_t , 经历一个短暂的微元间隔时间 ∇t , 则标记段离子含量变化为:

从标记段本身考虑:

$$\nabla m = C_{(t+\nabla t)} V - C_t V \quad (1)$$

从水体流量守恒考虑:

$$\nabla m = -C_t Q \nabla t + C_c Q \nabla t \quad (2)$$

联立(1)、(2)式, 两边同除 ∇t 以取极限可得:

$$\lim_{\nabla t \rightarrow 0} \frac{\nabla m}{\nabla t} = \frac{dC_t}{dt} V = (C_c - C_t) Q \quad (3)$$

(3)式分离变量两边积分后得:

$$\text{Ln} |C_c - C_t| + \text{const} = -\frac{Q}{V} t \quad (4)$$

其中 const 为一与初始条件相关的参数, 代入初始条件 $t = 0$ 时 $C_{t=0} = C_0$ 解得 $\text{const} = \text{Ln}(C_c -$

$C_0)$ 代入(4)式可得:

$$Q = \text{Ln} \left| \frac{C_c - C_0}{C_c - C_t} \right| \frac{V}{t} \quad (5)$$

由物理知识有:

$$\begin{cases} Q = \int_S v_f ds = v_f S \\ S = hd \\ V = \frac{\pi d^2}{4} h \end{cases} \quad (6)$$

(6)式代入(5)得:

$$v_f = \frac{\pi r}{2t} \text{Ln} \left| \frac{C_c - C_0}{C_c - C_t} \right| \quad (7)$$

加上流场畸变修正系数 a 可得^[8]:

$$v_f = \frac{\pi r}{2\alpha t} \text{Ln} \left| \frac{C_c - C_0}{C_c - C_t} \right| \quad (8)$$

又由物理知识知 $N_t \propto C_t$, 故得最终流速的反稀释计算公式为:

$$v_f = \frac{\pi r}{2\alpha t} \text{Ln} \left| \frac{N_c - N_0}{N_c - N_t} \right| \quad (9)$$

2 现场试验

2.1 测试区工程地质及水文地质条件概况

本次测试孔区域河网密布、沟渠交错, 有3条大型行洪河道穿境而过, 11条主要干支渠分布其间, 有面积 24km^2 的大型水库, 水资源丰富。

现场试验对三个钻孔进行了测试, 三个孔均为第四系的浅层孔, ①测试孔 GK1 深度为 19m , 该孔取芯样结果是 $0 \sim 2.4\text{m}$ 为杂填土, $2.4 \sim 4.8\text{m}$ 为素填土, $4.8 \sim 9.6\text{m}$ 为粉质粘土, $9.6 \sim 19\text{m}$ 为粉细砂。②测试孔 GK2 深度为 15m , 该孔取芯样结果是 $0 \sim 2.2\text{m}$ 为杂填土, $2.2 \sim 4.7\text{m}$ 为素填土, $4.7 \sim 9.2\text{m}$ 为粉质粘土, $9.2 \sim 15\text{m}$ 为粉细砂。③测试孔 GK3 深度为 17m , 该孔取芯样结果是 $0 \sim 2.5\text{m}$ 为杂填土, $2.5 \sim 5.0\text{m}$ 为素填土, $5.0 \sim 9.4\text{m}$ 为粉质粘土, $9.4 \sim 17\text{m}$ 为粉细砂。成孔后下有孔径 75mm 的透水性良好的钢套管, 测试用以确定浅层地下水的渗透流速大小。

2.2 测试方法

钻孔用电导值 $1600\ \mu\text{s}/\text{cm}$ 左右的淡水, 用大功率的汽油泵从孔底自下而上进行水体置换洗孔, 洗孔的同时用 DJS-1C 电导电极探头和配套的 DDBJ-350 电导率仪测试水体的电导值, 以便判断置换效果的好坏。GK1、GK2、GK3 置换水体

用水量分别为2、1.6、1.8 m²。置换完毕待水位静置恢复后开始电导率测试试验,记录各测试时间钻孔各深度的电导值。

2.3 试验结果与分析

经测试整理后得 GK1 孔各深度各时间点电导值如图 2 所示,由图可知该处地层测试深度范围内 5 m 以上为一个相对隔水层,5 m 以下为含水层;且无明显垂向流。每条曲线的突变拐点随着时间的推移逐渐向钻孔表层移动,最终停止在含水层与相对隔水层的分界面。这是受电导率试验时钻孔内水位并未完全恢复影响的结果。

由公式(9)变形得: $\ln|N_c - N_t| \propto t$ 。对采集到的钻孔电导数据处理按式(9)进行线性拟合,得到拟合直线的斜率和可决系数 R²,后者可用于度量曲线拟合优度,前者则用来计算地下水渗透流速大小。当曲线拟合优度较差时,应考虑偶然误差的影响,剔除误差较大的数据重新进行计算。经计算得该孔地下水渗透流速大小如图 2(b)所示,由图分析可知,该测点地下水 10 m 以下流速

在 3×10^{-6} cm/s 左右,10 m 以上受地表水影响大约在 2×10^{-5} cm/s 左右。

同样经测试整理后得 GK2 孔各深度各时间点电导值如图 3 所示,由图可知该处地层测试深度范围内 3 m 以上为一个相对隔水层,3 m 以下为含水层;且无明显垂向流。每条曲线的突变拐点随着时间的推移逐渐向钻孔表层移动,最终停止在含水层与相对隔水层的分界面。该测点地下水 10 m 以下流速在 5×10^{-5} cm/s 左右,4 ~ 10 m 上受地表水影响大在 3×10^{-4} cm/s 左右。

同样经测试整理后得 GK3 孔各深度各时间点电导值如图 6 所示,由图可知该处地层测试深度范围内 3 m 以上为一个相对隔水层,3 m 以下为含水层;且无明显垂向流。每条曲线的突变拐点随着时间的推移逐渐向钻孔表层移动,最终停止在含水层与相对隔水层的分界面。该测点地下水 9 m 以下流速在 9×10^{-5} cm/s 左右,4 ~ 10 m 上受地表水影响大在 3×10^{-4} cm/s 左右。

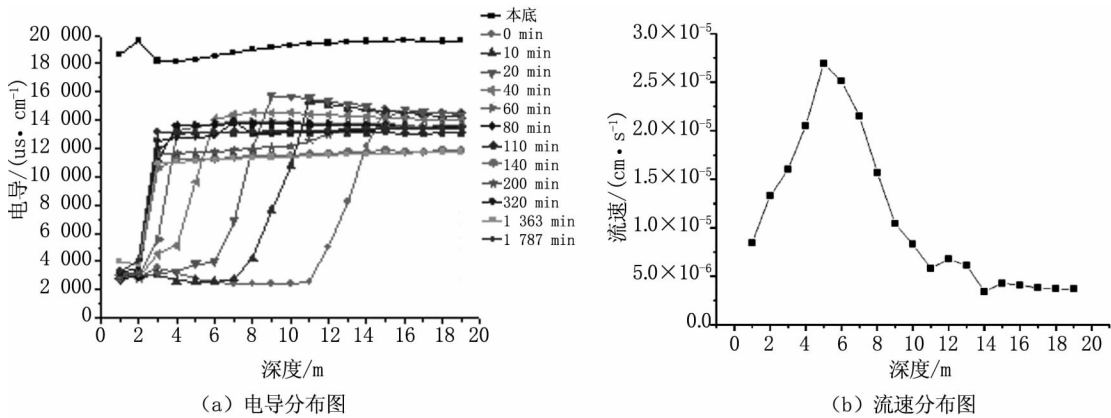


图2 GK1钻孔各深度电导分布图与流速分布图

Fig.2 Conductance and flow velocity distribution curve of the different depth of GK1 borehole

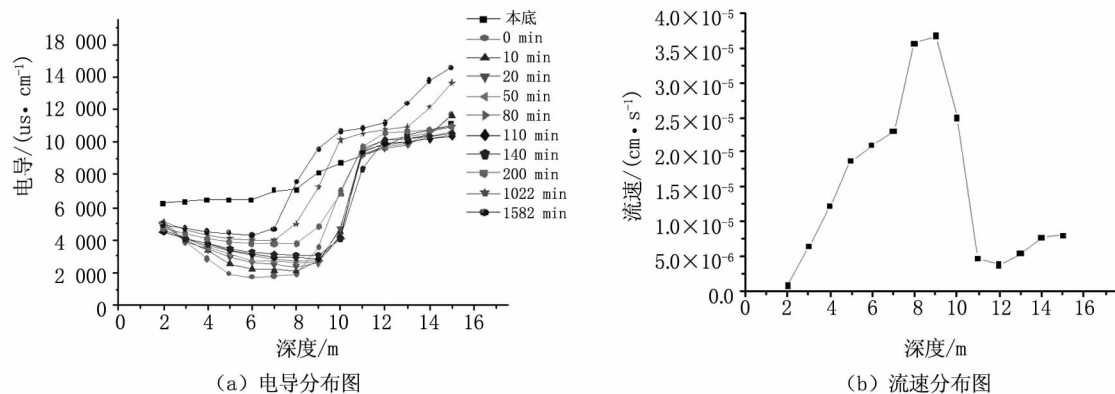


图3 GK2钻孔各深度电导分布图与流速分布图

Fig.3 Conductance and flow velocity distribution curve of different depth of GK2 borehole

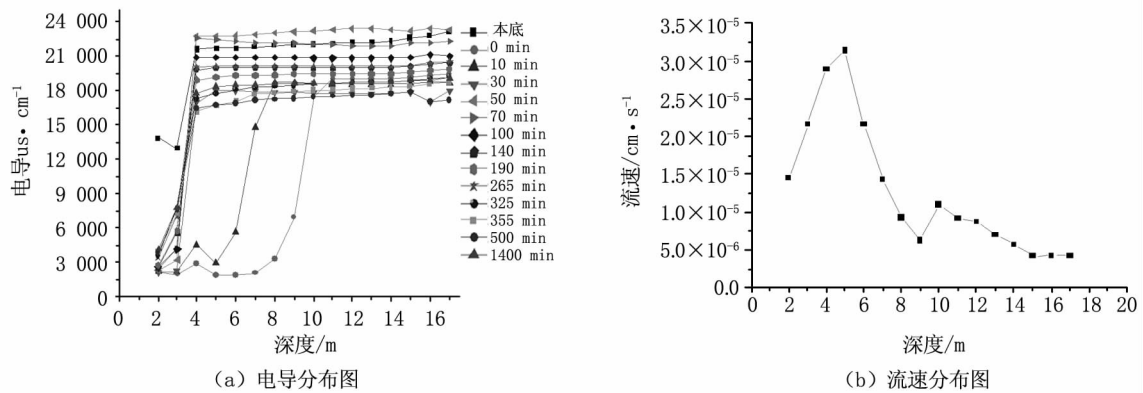


图4 GK3钻孔各深度电导分布图与流速分布图

Fig. 4 Conductance and flow velocity distribution curve of different depth of GK3 borehole

由以上三孔试验结果可知,计算结果与钻孔芯样的土层渗透流速的经验值对比差别不大,说明该测试结果可信度较高,具有良好的工程适用性。

3 结论

1) 现场实际情况与理想化模型之间存在差异,计算结果存在误差,总体来说计算结果偏于保守。

2) 测试结果与地层情况相吻合,该方法对高电导值地下水渗透流速测试具有良好的适应性。

3) 成孔工艺,套管的选用,测试时间以及现场实际情况对测试有一定的影响,测试人员应综合考虑。

参考文献:

- [1] DROST W. Groundwater measurements by means of radioactive tracers[J]. Atomenergie kerntechnik, 1986, 48(2): 81-86.
- [2] 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.
- [3] SALE T, TAYLOR G R, ILTIS G, et al. Measurement of LNAPL flow using single - well tracer dilution techniques[J]. Groundwater, 2007, 45(5): 569-578.

- [4] PITRAK M, MARES S, KOBR M. A simple borehole dilution technique in measuring horizontal ground water flow[J]. Groundwater, 2007, 45(1): 89-92.

- [5] 陈建生. 同位素示踪单井试验研究[J]. 地下水, 1987. (2): 19.
- [6] 陈建生. 探测地下水参数的同位素示踪仪及其应用[J]. 物理, 1989, 18(4): 221-225.
- [7] 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.
- [8] 钟世英, 陈建生, 丛波日, 等. 广义示踪稀释模型水平流速计算原理的再思考[J]. 中国水运: 学术版, 2007, 7(11): 126-128.
- [9] 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.
- [10] 杨松堂, 陈建生. 小浪底坝肩绕坝渗漏的综合示踪研究[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(7): 1-3.
- [11] 杜国平, 陈建生. 同位素示踪模拟地下水溶质运移速度的研究[J]. 地下水, 1995, 17(3): 121-123.
- [12] 高正夏, 徐军海, 王建平, 等. 同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 655-658.
- [13] 韩庆之, 陈辉, 万凯军, 等. 武汉长江底钻孔同位素单井法地下水流速, 流向测试[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2): 74-76.

(责任编辑 李军)