

多含水层渗流系统电导示踪模型

柴 栋¹,方广涛¹,邱春雄¹,董海洲²,张利民¹,张博宇¹

(1. 中交隧道工程局有限公司,北京 100102; 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)

摘要:在利用钻孔测定含水层水文地质参数时,如遇到多含水层情况,需使用栓塞系统对各含水层进行隔离探测,由于现场操作较为不便且钻孔条件要求高,故提出多含水层渗流系统电导示踪模型。在不使用栓塞系统的情况下,考虑含水层涌水或吸水等不同情况,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,建立多含水层渗流系统电导示踪模型确定含水层渗透性参数。当钻孔中只存在涌水层时,直接利用电导率曲线面积与溶质质量的比例关系求解出流量;当钻孔中同时出现涌水层和吸水层时,根据溶质质量曲线的斜率可较准确地确定吸水层的位置,再由斜率的变化计算出含水层的流量。基于某工程实例采取3种方法求解各含水层的渗透系数、静水头、渗流速度、导水系数等水文地质参数,结果表明,采用电导示踪模型计算结果与同位素示踪测试及注水试验测试结果吻合较好,且电导示踪模型方法现场操作更为简便,可极大地提高含水层水文地质参数的测定效率。

关键词:电导示踪模型;渗流;多含水层;垂向流;电导率示踪

中图分类号:TV221.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0070-06

Electric conductivity tracer model of a multi-aquifer seepage system//CHAI Dong¹, FANG Guangtao¹, QIU Chunxiong¹, DONG Haizhou², ZHANG Limin¹, ZHANG Boyu¹ (1. *CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In hydrogeological survey, the situation of multiple aquifers is often encountered in borehole testing, and it is necessary to use packer system to isolate and detect each aquifer. Due to the inconvenience for field operation and high drilling conditions required, a multi-aquifer seepage tracing model without packer system was proposed. Considering different conditions of aquifer inflow and out flow without using plugging system, an electric conductivity tracer model for a multi-aquifer seepage system was established to determine the permeability parameters by measuring the conductivity of each aquifer during pumping. When only the outflow aquifer exists, the flow rate can be calculated directly by using the proportion relation between the area of conductivity curve and solute mass. When both outflow layer and inflow layer appear in borehole, the position of inflow layer can be found accurately according to the slope of electrical conductivity curve, and then the flow rate of aquifers can be calculated by the change of slope. In a field test, the hydrogeological parameters such as permeability coefficient, hydrostatic head, seepage velocity and water conductivity coefficient of each aquifer were calculated by using three methods. The results show that the detection results obtained by the conductivity tracing model is in good agreement with the isotope tracer test and water injection test, and the proposed model is simpler to operate, which can greatly improve the detection efficiency of aquifer hydrogeological parameters.

Key words: electric conductivity tracer model; seepage; multi-aquifer; vertical flow; conductivity tracing

地下水渗流是影响水利工程建设、地下空间开发安全性的重要因素之一^[1],地下水渗流调查是制定有针对性防渗处理措施的前提和基础^[2-3]。了解地层的水文地质情况,通常需要获取渗流区域的空间分布(位置和范围)和渗透性参数。在多含水层系统中,确定各含水层位置及其水力特性尤为重

要^[4]。钻孔勘探是常用的地下水渗流调查手段,已发展了多种方法以获取渗流信息^[5-6]。岩芯分析和物探方法^[7]可以对含水层进行定位,但难以确定含水层水力特性。钻孔栓塞抽水测试方法可以测定含水层渗透性,但由于需要使用栓塞进行阻水,现场操作较为复杂。许多工程实践表明^[8-9],钻孔示踪方法

是一种可以准确地对多含水层进行定位并确定其渗透性参数的测试方法,其中通过探测孔内地下水电导率参数来进行多裂隙系统渗流示踪研究已得到较多应用,但在不使用栓塞的情况下针对多含水层系统进行渗透性参数的研究尚不多见。

本文基于电导率示踪方法,建立多含水层渗流系统电导示踪模型,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,对比天然流场与人工流场,以求解各含水层的渗透系数、静水头、渗流速度及导水系数等水文地质参数,并通过工程实例验证该示踪模型的有效性。

1 多含水层渗流系统电导示踪方法

当钻孔揭露多个含水层时,由于各含水层的补给源和渗流路径不同,各含水层的静水头也往往不同。根据混合井流理论^[10-11],静水头高于混合水位的含水层均会发生涌水,而静水头低于混合水位的含水层则表现为吸水,涌水和吸水现象示意图见图1。

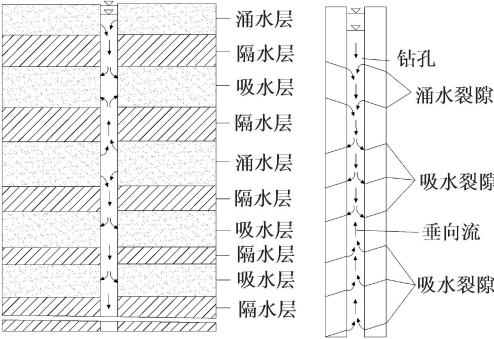


图1 多含水层渗流系统中的涌水和吸水现象示意图

电导示踪法是一种可以高效、经济地获得钻孔所揭露含水层水力特性的方法^[12-13],而且现场探测操作较为方便。该方法有两种实施方式:若地层中水的电导率较高,可将钻孔中的水置换为低电导率的水,此时含水层中的水可视为地下水渗流的示踪剂;反之,若地层中水的电导率较低,则可在钻孔中投放高电导率的盐水作为示踪剂,然后测量钻孔中水的电导率,以获得电导率随时间的变化曲线。本文以地层中水的电导率较高为例进行多含水层电导率示踪模型的研究,现场示踪测试的一般步骤如下:①将低电导率的水以恒定的速率沿下方开口的管道投放至钻孔底部,并在短时间内以相同速率从钻孔顶部抽水,这样钻孔水就与地层中水的电导率有着明显的区别,若钻孔初始电导率较小或者在钻孔不久后进行电导率测井,也可不进行钻孔水的置换。②以恒定的低流量从钻井顶部抽水,同时将电导率探头放置到钻孔中,监测钻孔电导率,以获得示踪剂质量浓度与深度的关系曲线。当地层水进入钻孔涌水点位置,电导率曲线显示为峰值,这些峰值随时间的增长

沿垂向移动;③通过分析获取的测井资料,可计算各个含水层中地下水流入速度和示踪剂质量浓度。

2 孔中存在不同含水层时的流量计算模型

2.1 孔中无吸水层时的流量计算模型

假定在1个钻孔中存在2个涌水层(图2),图中 q_1 、 q_2 分别为第1、第2含水层单位时间内的流量, ρ_1 、 ρ_2 分别为第1、第2含水层水的示踪剂质量浓度,则 $q_1\rho_1$ 、 $q_2\rho_2$ 分别为第1、第2含水层的溶质质量流入速率。设这两个含水层流量均不相同,且其流量之和等于钻孔顶部的抽水流量 Q 。

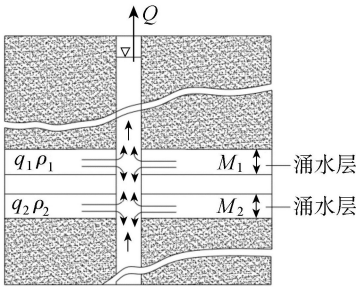


图2 涌水层示意图

各含水层示踪剂质量浓度呈单峰状分布,且峰值较高的曲线对应于较晚的时间。假设钻孔横截面直径远小于井深,则每个钻孔横截面处水的示踪剂质量浓度及化学成分是一致的;如果钻孔中不存在向上的垂向流且忽略密度效应,则每个涌水点的质量浓度曲线都是对称的。当以给定流量在井顶部抽水时,由于钻孔中水的向上流动,电导率曲线会存在倾斜,并且越靠近井顶部电导率曲线的倾斜越明显。

每个涌水层处电导率曲线积分面积与 $q_i\rho_i$ 是成比例的,具体关系如下:

$$\int_{x_i-\delta_1}^{x_i+\delta_2} \pi r_w^2 (\rho_i - \rho_0) dx = \alpha q_i \rho_i t \quad (1)$$

式中: i 为含水层序号; x_i 为示踪剂质量浓度峰值对应坐标; δ_1 、 δ_2 分别为示踪剂质量浓度曲线与质量浓度背景值线在示踪剂质量浓度峰值两侧的交点的 x 方向坐标; r_w 为钻孔半径; ρ_i 为第 i 含水层 x 位置处 t 时刻的示踪剂质量浓度; ρ_0 为示踪剂质量浓度背景值; α 为电导率与示踪剂质量浓度的关系常数(以Nap1溶液为示踪剂时常取1870); t 为含水层水进入钻孔的时间。

式(1)假定含水层 q_i 和 ρ_i 都是恒定的,由于经过一段时间以后电导率曲线上各峰值会相互干扰,因此,式(1)左边数据只能通过早期的电导率曲线获得,故式(1)只能使用早期电导率数据进行计算。理论上,只要得到每个峰值的 t 和 $q_i\rho_i$ 数据,每个涌水层的流量就能够计算出来。当测得两个不同时刻 t_1 和 t_2 的电导率曲线时,式(1)可改写为

$$\alpha q_i \rho_i = \frac{\int_{x-\delta_1}^{x+\delta_2} \pi r_w^2 (\rho_2 - \rho_1) dx}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

为简便起见,对 ρ_i 的取值进行简化,直接取 t_2 时的电导率所对应的示踪剂质量浓度,则可以直接计算出每个涌水层的 q_i 。

2.2 涌水吸水混合时的流量计算模型

当钻孔同时揭露涌水层与吸水层,且呈天然状态或钻孔顶部抽水流量很低时,高水头含水层中的地下水会进入到钻孔中,并经由钻孔流向低水头的含水层,该过程即为垂向流动,如图3所示。

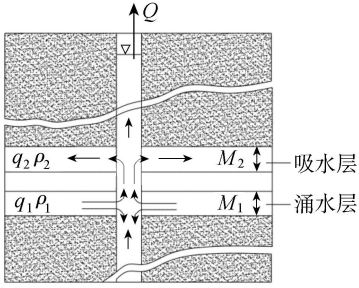


图3 吸水和涌水层系统示意图

理论上,在示踪剂质量浓度曲线上涌水层的位置会出现浓度峰值,吸水层的位置会出现浓度低谷,但是由于钻孔之间的内部流动补给量较小,实际吸水层的位置往往不会出现示踪剂质量浓度低谷,这就给求解吸水层的水力特性造成了一些困难。Doughty 等^[14-18]模拟出吸水层和涌水层相邻的情况,假设吸水层流量为涌水层流量的2倍,此时吸水层处示踪剂质量浓度曲线有一些微小的变化,模拟时间越长,示踪剂质量浓度曲线在该处的斜率就越大。但是,这些微小变化还不足以确定出吸水层的位置及水力特性,本文假设含水层吸水量、涌水量及示踪剂质量浓度不随时间变化,提出一种基于离子质量守恒的方法来求吸水层的水力特性:①根据所测得示踪剂质量浓度曲线,通过积分方法计算出每条曲线与背景值所围面积 $A(t)$, $A(t)$ 即为 $\delta_1 \sim \delta_2$ 范围内钻孔内示踪剂质量浓度之和(假定钻孔横截面上示踪剂均匀分布)。②将 $A(t)$ 乘以钻孔的横截面积得到 t 时刻的溶质质量 $M(t)$, $M(t)$ 是与 t 有关的函数。需要注意的是,当溶质扩散到吸水层之前, $M(t)$ 是线性的,其斜率为

$$k_1 = q_1(\rho_1 - \rho_0) \quad (3)$$

式中 k_1 为溶质到达吸水层之前的 $M(t)$ 的斜率。

当溶质扩散到吸水层时,由于溶质离开钻孔并进入吸水层, k_1 减小,当剩余溶质全部穿过吸水层并沿钻孔向上扩散,此时 $M(t)$ 的斜率呈线性变化,其斜率为

$$k_2 = q_1(\rho_1 - \rho_0) - q_2(\rho_1 - \rho_0) \quad (4)$$

式中 k_2 为溶质穿过吸水层之后的 $M(t)$ 的斜率。

为简化计算,取 ρ_1 为进入到吸水层中的溶质质量浓度,可得到吸水层的流量:

$$q_2 = \frac{k_1 - k_2}{\rho_1 - \rho_0} \quad (5)$$

通过比较 $M(t)$ 的斜率,能够比较容易地确定出吸水层的位置(斜率变化的位置)。

3 含水层导水系数的确定

假设井中水的流动满足达西定律^[19]且这种流动是径向的,通过裘布依公式^[20]可以得到:

$$q_i = \frac{2\pi T_i^* (S_i - S_0)}{\ln(R/r_w)} = T_i (S_i - S_0) \quad (6)$$

式中: T_i^* 、 T_i 分别为含水层导水系数和等效导水系数; S_i 为各含水层的静水头; S_0 为钻孔混合水位; R 为径向距离; r_w 为影响半径。

式(6)描述了垂直抽水井水平流动区的情况。如果不存在密度效应,式(6)也适用于非水平流动情况,此时 R 可理解为流动区平面上的测量距离。由于钻孔内的导水系数通常远大于任何流入区的导水系数,因此 S_0 在所研究的钻孔深度区间内是恒定的,故 $\sum q_i = Q$,则式(6)可改写成:

$$Q = \sum T_i (S_i - S_0) \quad (7)$$

如果将抽水流量从 Q 改为 Q' ,此时 T_i 和 S_i 保持不变,但 S_0 变为 S'_0 , q_i 变为 q'_i ,再将得到的公式与原公式(7)比较,于是有

$$\Delta q_i = T_i (S_0 - S'_0) \quad (8)$$

$$\Delta Q = T_{\text{tot}} (S_0 - S'_0) \quad (9)$$

其中 $\Delta q_i = q_i - q'_i$ $\Delta Q = Q - Q'$ $T_{\text{tot}} = \sum T_i$

由式(8)和式(9)可以得到:

$$\frac{\Delta q_i}{\Delta Q} = \frac{T_i}{T_{\text{tot}}} \quad (10)$$

式(10)即为含水层渗流流量变化与钻孔顶部抽水流量变化的基本关系式。当 Q 改变时,具有较大导水系数的渗流点或渗流区域表现出更大的强度变化。如果当第 i 含水层的导水系数比其他含水层大很多时, $T_i \approx T_{\text{tot}}$, $\Delta q_i \approx \Delta Q$,当抽水流量改变时,其他含水层的流量不会有太大改变。式(10)也可以用来比较第 i 含水层与特定的含水层 j ,即:

$$\frac{T_i}{T_j} = \frac{\Delta q_i}{\Delta q_j} \quad (11)$$

此外,根据式(6)和式(8)可以得到:

$$\frac{q_i}{\Delta q_i} = \frac{S_i - S_0}{S_0 - S'_0} \quad (12)$$

因此 $\frac{S_i - S_0}{S_j - S_0} = \frac{q_i / \Delta q_i}{q_j / \Delta q_j}$ (13)

如果事先使用压水试验或者其他勘测方法知道了某一含水层 j 的导水系数 T_j 和该层的静水头 S_j ,就可以通过两个不同的抽水流量条件下得到的 q_i 和 Δq_i ,再根据式(11)和式(13)计算出任一含水层的导水系数 T_i 和静水头 S_i 。这种方法不需要对每一含水层进行点稀释法测井。需要注意的是,式(11)和式(13)每次只考虑两个含水层,计算结果的精确性独立于其他含水层以及总的抽水流量 Q 和总导水系数 T_{tot} 。

式(10)有几种特殊情况,如果当所有含水层的 T_i 值相同时,有:

$$\Delta q_i = \frac{\Delta Q}{N}$$

(14)

式中 N 为含水层个数。当 Q 改变时,所有含水层流量改变相同。

另一方面,如果所有含水层的水头相同,可以得到:

$$\frac{q_i}{Q} = \frac{T_i}{T_{\text{tot}}} = \frac{\Delta q_i}{\Delta Q}$$

(15)

需要注意的是,当所有含水层的水头相同,所有含水层的性质需要一致,含水层都是吸水或者都是涌水。在这种情况下,如果改变 Q ,每个含水层的 $\Delta q_i/q_i$ 均相同,并且有:

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = \frac{\Delta Q}{Q}$$

(16)

最后,如果每个含水层的导水系数和水头都相同,通过式(6)可以得知所有含水层的流量都相同,于是有 $q_i = Q/N$,式(14)和式(16)等价。

根据上述分析,在两种抽水流量下得到的电导率曲线是合理的,如果现场测试只进行了一种抽水流量试验,可通过比较天然流场与抽水条件下的涌(吸)水量变化与钻孔顶部流量变化之间的关系,进而求解出任意含水层的导水系数等水文地质参数。

本文基于电导率示踪方法,通过测定各含水层的电导率得到各含水层流量计算公式,进而建立多含水层渗流示踪模型,该模型也可应用于钻孔注水条件,此时可将注水等价为抽水(即将注水试验视为流量为负值的抽水试验),然后重复上述步骤,通

过比较天然流场与注水条件下的涌(吸)水量的变化与钻孔顶部流量变化之间的关系,进而求解出任意含水层的导水系数等水文地质参数。

4 工程实例

某研究区岩层走向 NNE,倾向 NWW,倾角 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,总体呈单斜构造,其中 22 号勘察孔孔深 463.10 m,揭露有石炭系太原组和三叠系山西组、下石盒子组和部分上石盒子组地层,岩性为砂层、灰岩、泥岩和煤层互层沉积,因而形成多层承压含水层。从区域水文地质条件分析,地下水主要接受当地含水层出露区降水入渗补给,在河流切割地段可接受河床渗漏补给。受区域排泄基准控制,地下水总的流向为从西向东。

通过同位素示踪和电导示踪分别对人工流场和天然流场下的孔内垂向流速和流向进行探测。其中,人工流场采用注水方法,注水高度 17.10 m,稳定注水量 $6.23 \text{ m}^3/\text{h}$ 。根据两种流场状态下的垂向流速的测定成果,参照前期地质勘查结果,在测试段内划分了 7 个含水层,同时计算出每个含水层的渗透系数、静止水位和单位涌水量等参数,如表 1 所示(其中垂向流方向都为垂直向下,且表中仅列出含水层数据,隔水层未列出)。

取示踪试验所得天然流场各含水层涌水量(吸水量)作为 q_i ,取注水试验所得人工流场各含水层涌水量(吸水量)作为 q'_i 。由于天然流场和人工流场是两种不同情况,故有两个不同的 Q 。利用式(7)或式(8)计算各含水层的导水系数,所有含水层的总导水系数 T_{tot} 可通过注水试验获得,特定含水层导水系数 T_j 可通过抽水试验获得。

采用式(8)来计算各层导水系数,可以利用电导示踪直接获得各含水层的涌水量(吸水量),选用最浅含水层作为特定含水层 j ,计算得到 1~7 含水层导水系数分别为 3.87 m/h 、 3.90 m/h 、 1.23 m/h 、 0.61 m/h 、 0.11 m/h 、 0.07 m/h 和 0.04 m/h ,总导水系数为 9.83 m/h 。表 2 列出了按 3 种计算方法得出的有关参数,可以看出 3 种方法所得参数结果相近,说明

表 1 22 号孔多含水层渗透系数等参数计算结果

含水层 岩性	层厚/m	孔径/mm	垂向流速/ $(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$		垂向流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		涌吸水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		渗透系数/ $(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	导水系数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$
			天然流场	人工流场	天然流场	人工流场	天然流场	人工流场		
中砂岩	18.77	127	7.5	306.0	0.095	3.877	0.095	-2.356	20.622	3.871
粗砂岩	19.35	110	12.0	150.0	0.114	1.426	0.019	-2.451	20.659	3.998
中砂岩	7.00	110	10.0	66.0	0.095	0.628	-0.019	-0.798	17.921	1.254
细砂岩	10.06	110	6.0	21.6	0.057	0.206	-0.038	0.422	5.717	0.575
灰岩	5.97	110	4.5	12.6	0.043	0.120	-0.014	-0.086	1.646	0.098
灰岩	3.45	110	4.2	6.0	0.027	0.057	-0.016	-0.063	1.919	0.066
灰岩	2.93	90	0.9	1.9	0.006	0.012	-0.021	-0.045	1.226	0.036

式(8)计算方法可靠。

表2 不同方法含水层参数计算结果对比

方法	注(吸)水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	导水系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)
同位素测试	6.233	0.149	10.13
注水试验	6.233	0.146	9.86
本文模型	6.233	0.145	9.83

5 结 语

a. 基于电导率示踪方法,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,针对不同情况构建多含水层渗流示踪模型。当孔中只存在涌水层时,直接利用电导率曲线面积与溶质质量的比例关系求解出流量;当钻孔中同时出现涌水层和吸水层时,根据溶质质量曲线的斜率可较准确地找出吸水层的位置,再由斜率的变化计算出吸水层的流量。

b. 推导出天然流场与抽水条件下含水层涌(吸)水量的变化与钻孔顶部抽水流量变化之间的关系,并推广到天然流场与注水条件中(将注水试验视为抽水流量为负值的抽水试验),可求解出任意含水层的渗透系数、导水系数等水文地质参数。将本文模型应用于工程实例,求解出的参数值与同位素测试及注水试验所得的参数值相比误差较小,验证了该模型的有效性。

参考文献:

[1] 高明鹏,郑西来,郑天元,等. 截渗墙作用下滨海地下水渗流与排泄特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(4):111-119. (GAO Mingpeng, ZHENG Xilai, ZHENG Tianyuan, et al. Seepage and discharge characteristics of coastal groundwater under the action of the cutoff wall[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences), 2022, 52 (4): 111-119. (in Chinese))

[2] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):1-10. (in Chinese))

[3] ZHONG Q, WANG L, CHEN S, et al. Breaches of embankment and landslide dams-state of the art review [J]. Earth-science Reviews,2021,216:103597.

[4] 赵宝峰,吕玉广. 基于底板砂岩含水层放水试验的多含水层水力联系研究[J]. 煤矿安全,2020,51(12):34-39. (ZHAO Baofeng, LYU Yuguang. Study on hydraulic connection of multiple aquifers based on dewatering test of sandstone aquifer from floor[J]. Safety in Coal Mines, 2020,51(12):34-39. (in Chinese))

[5] 王刚,王烁,赵建粮,等. 地下水监测井钻探施工技术 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):51-56. (WANG Gang, WANG Shuo, ZHAO Jianliang, et al. Groundwater monitoring wells drilling technology [J]. Drilling Engineering,2019,46(9):51-56. (in Chinese))

[6] BEDMAR A P, ARAGUAS L. Detection and the prevention of leaks from dams [M]. Lisse: Taylor & Francis,2002.

[7] HOHLFELD T, DOERRER T, SERFLING U, et al. Der einsatz von innovativen geophysikalischen methoden bei der erkundung von hochwasserrueckhaltebecken und talsperren:fallbeispiele aus der praxis [R]. Wiesbaden: Springer-Fachmedien Wiesbaden for Viewegu,2013:103, 136-139.

[8] 万继伟,陈艳国,崔超,等. 引汉济渭工程黄三隧洞地下水渗流同位素综合示踪探测分析研究[J]. 水利水电技术,2017,48(8):111-119. (WAN Jiwei, CHEN Yanguo, CUI Chao, et al. Analysis on comprehensive isotopic-tracing detection of underground water seepage in Huangsan Tunnel of Hanjiang River to Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (8): 111-119. (in Chinese))

[9] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212:136-145.

[10] 陈建生,杜国平,郑正,等. 多含水层稳定流非干扰多孔混合井流理论及示踪测井方法[J]. 水利学报,1997,28(5):61-66. (CHEN Jiansheng, DU Guoping, ZHENG Zheng, et al. Multi-aquifer stable flow non-interference porous mixed well flow theory and tracer logging method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28 (5): 61-66. (in Chinese))

[11] 陈建生,杜国平,郑正,等. 坝基渗流场探测中多含水层稳定流混合井流理论与综合示踪法[J]. 江苏农业学报,1997,13(1):32. (CHEN Jiansheng, DU Guoping, ZHENG Zheng, et al. Multi-layers stable flow blending well theory and a synthetical trace method for detecting leaks of abutement and dam base [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 1997, 13 (1): 32. (in Chinese))

[12] 陈建生,杨松,樊哲超. 孔中测定多含水层渗透流速方法研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):327-330. (CHEN Jiansheng, YANG Songtang, FAN Zhechao. Researches on measuring seepage velocity in the borehole of multi-iaquifer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (3): 327-330. (in Chinese))

[13] 王新建,陈建生,陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):67-71. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam [J]. Advances in Science and

- Technology of Water Resources,2005,25(6):67-71. (in Chinese))
- [14] DOUGHTY C, TSANG C F, HATANAKA K, et al. Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan [J]. Water Resources Research,2008,44(8): doi:10.1029/2007WR006441.
- [15] TSANG C F,DOUGHTY C. Multirate flowing fluid electric conductivity logging method [J]. Water Resources Research,2003,39(12):doi:10.1029/2003WR002308.
- [16] DOUGHTY C, TSANG C F. Signatures in flowing fluid electric conductivity logs[J]. Journal of Hydrology,2005,310(1/2/3/4):157-180.
- [17] DOUGHTY C,TSANG C F,YABUUCHI S,et al. Flowing fluid electric conductivity logging for a deep artesian well in fractured rock with regional flow [J]. Journal of Hydrology,2013,482:1-13.
- [18] DOUGHTY C, TSANG C F, ROSBERG J E, et al. Flowing fluid electrical conductivity logging of a deep borehole during and following drilling; estimation of transmissivity, water salinity and hydraulic head of conductive zones[J]. Hydrogeology Journal,2017,25(2):501-517.
- [19] 李明, 缪海宾, 马明康, 等. 基于达西定律的渗流边坡稳定性分析 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 238-241. (LI Ming, MIU Haibin, MA Mingkang, et al. Stability analysis of seepage slope based on Darcy's law[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 238-241. (in Chinese))
- [20] 侯文高, 曹始友, 高旭波. 新安煤矿首采工作面顶板岩层富水性探测及涌水量评价 [J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊2): 270-272. (HOU Wengao, CAO Shiyu, GAO Xubo. Water detection and water inflow evaluation of first coalface roof in Xin'an coal mine [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Sup2): 270-272. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-04-28 编辑:骆超)

(上接第 69 页)

- [14] LOPERTE A, SOLDOVIERI F, PALOMBO A, et al. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at monte cotugno rock-fill dam (southern Italy) [J]. Engineering Geology, 2016, 211:162-170.
- [15] YILMAZ S, KOKSOY M. Electrical resistivity imaging and dye tracer test for the estimation of water leakage paths from reservoir of akdegirmen dam in Afyonkarahisar, Turkey[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(24): 1-9.
- [16] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法的进展与展望 [J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 576-584. (YAN Jiayong, MENG Guixiang, LYU Qingtian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576-584. (in Chinese))
- [17] 刘晓, 彭友文, 袁志辉, 等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 71-75. (in Chinese))
- [18] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用 [J]. 地学前缘, 2003(1): 171-176. (DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and application of high density electric method [J]. Earth Science Frontiers, 2003(1): 171-176. (in Chinese))
- [19] 郭福钟, 朱瑞, 闫汝华, 等. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2264-2273. (GUO Fuzhong, ZHU Rui, YAN Ruhua, et al. Research of geological bim model based on 3d electrical resistivity tomography [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2264-2273. (in Chinese))
- [20] ALSHEHRI F, ABDELRAHMAN K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography [J]. Journal of King Saud University-Science, 2021, 33(5): 101468.
- [21] 陈建生, 董海洲. 堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.
- [23] WANG T, CHEN J, LI P, et al. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 1-12.
- [24] WOLKERSDORFER C, GOEBEL J, HASCHKE-BERGER A, et al. Assessing subsurface flow hydraulics of a coal mine water bioremediation system using a multi-tracer approach [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 164: 58-68.
- (收稿日期:2022-03-29 编辑:刘晓艳)