

基于人工干扰流场的黄土介质水动力弥散试验研究

卜新峰 曾 峰 孙 璐 苗旺
(岩土工程事业部地质工程院)

[摘要] 弥散系数是描述进入地下水系统中可溶的污染物质随时间、空间变化的参数,开展野外现场水动力弥散试验能够避免水动力弥散的尺度效应,较好的反映场地介质的实际情况。通过在三门峡市西南部两处赤泥堆场黄土介质中开展的现场弥散试验,利用标准曲线法对试验数据进行了整理和计算。结果表明,抽水条件下的径向收敛流弥散试验方法简单,条件可控,适用性较强;两处场地黄土介质含水层的径向弥散度 a_L 为0.26~0.32 m,弥散系数 D_L 为0.09~0.12 m²/d,计算结果可为该地区具有类似地质条件的黄土介质弥散参数的取值提供参考和借鉴。

[关键词] 人工流场 弥散试验 标准曲线法 黄土介质

近年来,随着工业社会的不断发展,地下水污染问题日趋严重,地下水污染预测已成为地下水科学与工程领域的热点之一,并广泛应用于地下水环境影响评价工作之中。

弥散系数是描述进入地下水系统中可溶的污染物质随时间、空间变化的参数,是用来进行地下水污染预测的必备参数,为了对赤泥堆场场地地下水中污染物的运移、扩散规律进行研究与分析,建立地下水的溶质运移模型对特征污染物的运移进行模拟,分析污染物的扩散规律,需要获取含水层的弥散系数。国内外学者获取弥散参数的方法主要有实验室模拟与野外就地测量两种,相对而言,室内试验易于开展,条件可控,且经济可行,但却存在着天然缺陷,即大部分试验及其计算公式都是在理想的预设条件下进行的,不能完全刻画野外的实际地质条件,不能很好的反映多孔介质的非均质性,计算结果与实际情况一般都存在较大的偏差。相关研究认为,由于尺度效应的存在,野外弥散试验确定的弥散度值比室内土柱弥散试验确定的值大2~4个数量级^[1-2],因此开展野外现场水动力弥散试验,进而获取符合实际地质条件和介质特征的水动力弥散参数的重要性不言而喻。

1 试验场地基本条件

野外现场弥散试验的场地选择在三门峡市西南

部某企业的 HQG 赤泥堆场和 DP 赤泥堆场,两处堆场地层基本一致,野外现场弥散试验共进行 2 组,分别为 HQG 堆场内的 KM-01 孔弥散试验和 DP 堆场的 KM-02 孔弥散试验,两个堆场直线距离约为 2 km。地貌类型为黄土丘陵区,HQG 堆场浅层地下水位埋深一般小于 30 m,DP 堆场浅层地下水位埋深小于 7.0 m,含水层岩性为中、下更新统黄土(含裂隙)及黄土夹钙质结核层,富水性差。根据现场开展的抽水试验资料,HQG 堆场浅层含水层综合渗透系数为 0.23 m/d,DP 堆场浅层含水层综合渗透系数为 0.19 m/d^[3]。

两组试验均为抽水条件下(径向收敛流)弥散试验,由于试验场地浅部地层岩性以粉质壤土为主,渗透系数较小,地下水天然渗透流速较慢,加之很难准确掌握试验场地范围内的地下水流向,考虑到利用天然流场试验耗时长、成本高、成功率偏低等风险,野外弥散试验采用人工干扰流场,即利用抽水条件下的流场,此时地下水流向明确,现场弥散试验孔位明确,操作相对简单。

2 试验方法及示踪剂

野外现场弥散试验在试验孔抽水试验过程中同时开展,即在抽水试验某一落程的稳定阶段,当流量和水位达到相对稳定时,首先测定抽水孔水样中的 Cl⁻背景值,然后将 50 kg 食盐(NaCl)完全溶解后

作者简介:卜新峰(1985—),男,河南省商丘人,工程师,硕士,从事水利水电工程地质勘察及水文地质方向的研究。

一次性注入观测孔中,定时在抽水孔中采取水样进行现场滴定实验,确定水样中 Cl⁻浓度变化情况,绘制浓度变化曲线,计算弥散系数。

用 NaCl 作为示踪剂是基于两个考虑:一是稀释后的食盐溶液对水的运动状态影响不大,且对周边地下水环境基本不造成影响;二是便于对 Cl⁻的检测,即在滴定过程中消耗 AgNO₃ 的体积与 NaCl 示踪剂的体积能保持一定的关系。

3 弥散方程及参数计算

利用管井抽水时,井附近的天然流速与抽水产生的流速相比可以忽略不计,形成以抽水井为中心的径向流场。在抽水试验达到稳定阶段后,一次性瞬时注入示踪剂。径向收敛流场瞬时注入示踪剂的数学模型需要满足以下假设条件:(1)含水层为均质各向同性,底板水平、等厚、在平面上无限展布;(2)抽水井及观测井的井径较小,且为完整井;(3)瞬时向投放井注入示踪剂后,必须保证对含水层及其他井孔没有干扰,或产生的干扰可以忽略不计;(4)示踪剂一经注入,则立即与井中地下水完全混合均匀;(5)机械扩散满足 Fick 定律,且示踪剂浓度足够小,可忽略密度对地下水运动的影响;(6)抽水井中示踪剂浓度不影响含水层中示踪剂浓度。

描述稳定的径向渗流场溶质运移的基本方程(对流二维弥散方程)为^[4-5]:

∂c/∂t = a_L |u| ∂²c/∂r² - u ∂c/∂r + (a_T |u| / r²) ∂²c/∂θ² (1)

u = Q / (2π h r n) (2)

式中:a_L—纵向弥散度,m;a_T—横向弥散度,m;u—地下水流速,m/d;c—示踪剂浓度,mg/L;θ—方位角,°;Q—抽水量(或注水量),m³/d;r—投源孔与观测孔的距离,m;h—投源孔与观测孔之间含水层的平均厚度,m;n—含水层有效孔隙率。

式(1)适用于径向散发流(u>0)和径向收敛流(u<0)。式中 u = Q / (2π h r n),Q 是流量,对注水井(散发流)Q>0,对抽水井(收敛流)Q<0,h 是含水层平均厚度,n 是有效孔隙率。

试验不考虑地层或钻孔结构物对食盐的吸附及其它物理化学反应,对流—弥散方程的最后一项是由于横向弥散产生的,对径向散发或径向收敛的渗流场,由于径向流速较大,故可以忽略横向弥散作用产生的影响,式(1)可以进一步简化为:

∂c/∂t = a_L |u| ∂²c/∂r² - u ∂c/∂r (3)

对于瞬时注入径向流的情况,目前尚无解析解,法国水文地质学家 J. P. Sauty 采用有限差分的数值法进行参数计算,求得以 Peclet 数 P 为参数,以无因次浓度 C_r和无因次时间 t_r(或 lgt_r)分别为纵横坐标的标准曲线,用以确定含水层的弥散度 a_L。

将所得的现场试验数据进行分析整理,具体方法如下:将观测浓度换算成无因次浓度 C_r,观测时间换算成无因次时间 t_r(式 5)。

C_r = (C - C_0) / (C_max - C_0) (4)

t_r = t / t_0 (5)

式中:C—示踪剂的观测浓度,mg/l;C₀—示踪剂的背景浓度,mg/l;C_{max}—示踪剂的峰值浓度,mg/l;t—累计观测时间,min;t₀—纯对流时间,min。

纯对流时间 t₀由式(6)计算:

t_0 = (π r² h n) / Q (6)

将试验数据整理后,再与标准曲线绘制在相同模数的半对数坐标纸上,并将该曲线与相应标准曲线相配合,通过移动两曲线,直至实测的 C_r - lgt_r(或 C_r - t_r)关系曲线与某一 P 值的标准曲线配合得最好。配线时注意两曲线横坐标要重合,通过配线,确定 P 值,并由公式 a_L = r / P 求得 a_L 值,再由公式 D_L = a_L · u 求得纵向弥散系数,其中 u 为地下水流速^[6-7]。

4 试验结果

根据上述计算方法,将弥散试验的数据按式(4)~式(6)进行整理,并分别与标准曲线进行匹配,配线结果见图 1 和图 2。

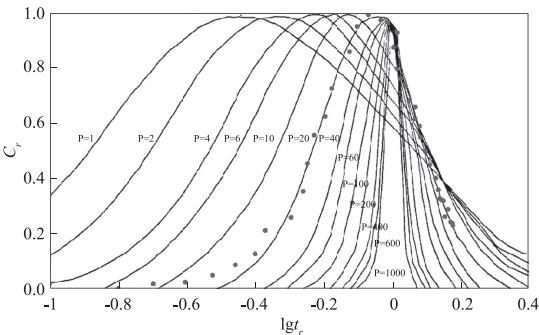


图 1 KM-01 孔弥散试验配线图

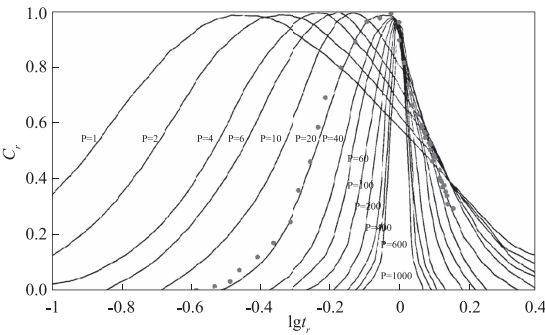


图2 KM-02孔弥散试验配线图

表1 弥散试验计算成果表

试验编号	孔间距(m)	P 值	弥散度 a_L (m)	地下水流速 u (m/d)	弥散系数 D_L (m^2/d)
KM-01	6.4	20	0.32	0.29	0.09
KM-02	5.2	20	0.26	0.46	0.12

5 结论

(1)本次试验采用野外现场抽水条件下的径向收敛流弥散试验,试验方法简单,条件可控,经济可行,野外操作适宜性较强。

(2)通过对三门峡市西南部两处赤泥堆场进行的野外现场水力弥散试验,获取了两处场地的黄土介质含水层的水动力弥散参数,HQG堆场径向弥散度为0.32 m,弥散系数 D_L 为 $0.09 m^2/d$;DP堆场径向弥散度 a_L 为0.26 m,弥散系数 D_L 为 $0.12 m^2/d$ 。计算结果可为该地区具有类似地质条件的黄土介质弥散参数的取值提供参考和借鉴。

(3)标准曲线配线法求解过程简单,在实际操作过程中适用性较强,数值稳定性较好,该方法获取的水动力弥散参数能够为进一步建立地下水溶质运移模型提供支撑。

参考文献

[1] Fried, J. J. Groundwater Pollution [M]. New York: Elsevier, 1972: 764.

[2] Sudicky E. A., Frind E. O. Contaminant transport in fractured porous media: analytical solutions for a system of parallel fractures [J]. Water Resour. Res., 1982, 18(6): 1634 – 1642.

[3] 王伟锋, 张海丰, 卜新峰, 等. 开曼铝业(三门峡)有限公司110万t/a氧化铝厂地下水环境影响评价专题报告[R]. 郑州: 黄河勘测规划设计有限公司, 2012.

[4] 苏贺, 康卫东, 曹珍珍, 等. 潜水含水层水力弥散试验研究[J]. 水土保持通报, 2014. 34(2): 83 – 85.

[5] 郑西来, 张俊杰, 梁春, 等. 石油污染多孔介质水动力效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011. 40(2): 286 – 291.

[6] 宋树林, 林泉. 地下水弥散系数的测定[J]. 海岸工程, 1998. 17(3): 61 – 65.

[7] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论与模型[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 1996.

公司积极参与水利部组织的援阿工作

为进一步指导帮助西藏阿里地区推进水利改革发展,水利部人事司按照《水利部“十三五”对口援阿工作方案》部署,组织选派第三批技术人员短期“组团式”援助阿里。公司积极响应,选派测绘院杨远程同志赴藏援阿。

阿里地区位于中国西南边陲,西藏自治区西部,青藏高原西南部,平均海拔4500 m以上,被称为“世界屋脊的屋脊”,与克什米尔及印度、尼泊尔毗邻。阿里地区自然条件恶劣,主要为农牧业为主,经济落后,国土总面积34.5万 km^2 ,辖7个县,共10.8万人。

阿里地区水利事业起步晚、起点低,本次技术人员短期“组团式”援阿是从水利部各流域机构选派从事规划设计、工程运行管理、河(湖)长制等技术的人员,帮助阿里地区开展规划编制、工程建设与运行管理、河(湖)长制建设、农村饮水管理等专业技术指导,同时帮助谋划“十四五”水利工作,通过现场指导、座谈交流,加快培养一批本土化水利专业技术人才。

目前,25名来自各流域的技术人员已经全部到位。水利部副部长蒋旭光同志带队考察西藏水利事业,并会见了全体援阿技术人员。他要求大家从服务水利事业发展,助力脱贫攻坚和乡村振兴战略的大局出发,切实做好相关工作。大家一致表态,发扬“艰苦不怕吃苦,缺氧不缺精神”的作风,在阿期间尽职尽责地工作,不辜负水利部的期望,为当地百姓的幸福生活贡献自己的一份力量。

摘自《黄河设计院内部信息网》