

单孔示踪方法测定裂隙岩体渗透性研究

陈建生, 赵维炳

(淮海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 :论述了单孔中测定裂隙岩体渗透系数、等效水力隙宽及静水头的方法与有关的井流理论,单孔稀释定理推广到测定岩体渗透流速、流向等参数方面.推导了钻孔揭露多裂隙组稳定流混合井流理论,分别对吸水、涌水及单裂隙(组)的情况进行了讨论,并且介绍了试验仪器与方法.将单孔示踪方法应用于群孔之中,结合裂隙岩体的走向、倾角、裂隙分布等参数,确定出研究区域的裂隙岩体中的渗流场分布.该项成果已应用于刘家峡左坝肩裂隙岩体渗流场的研究之中.

关键词 :单孔示踪;裂隙;井流理论;等效水力隙宽

中图分类号 :TV139.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)03-0044-07

由于岩体渗透空间千变万化,不同地质单元、不同层序和岩相岩类的裂隙岩体都具有各自的渗透空间结构特色.目前应用的裂隙岩体渗透性参数的测量方法主要是压水试验和抽水试验.由于现场测定裂隙岩体渗透性的方法落后,测量到的参数不能满足数值计算及模型的需要,从而制约了大量的数学模型的实际应用,未能达到预期的效果.

用同位素示踪方法研究多孔介质含水层已近 40 年,获得极大的成功,并已广泛地应用于水利、采矿、地下水勘察等领域.它的优点是便于实施,可在钻孔中获取大量的参数.将示踪测井方法用于裂隙岩体参数的研究之中,在单孔中通过稀释方法测定裂隙岩体水平方向的流速与流向,示踪方法测定出天然流场下孔中裂隙(组)与裂隙(组)之间的垂向补给流量,然后在注水(或抽水)条件下再进行垂向流复测,建立相应的稳定流非干扰井流理论,便可确定出各裂隙(组)的等效水力隙宽、渗透系数、静水头、导水系数等参数.单孔示踪方法可直接用于堤坝、采矿、地下水勘察等工程的观测孔中,由于研究裂隙岩体渗透性的钻孔一般是裸井,基本上都可以直接用来进行单孔示踪,测定裂隙岩体局部的渗透性.由于单孔示踪技术实施简单,实用性强,可进行研究区域内大范围的探测,对于进一步研究岩体水力学提供了一种新的测量手段.

将井流理论与示踪方法相结合应用于裂隙岩体渗流场的研究之中还是首次,笔者进行了多次现场试验,目前已建立了单孔及多孔示踪岩体水力学裂隙岩体渗流井流理论.除了本文介绍的模型之外,我们已另文介绍了有关的示踪裂隙渗流理论、试验方法及现场试验^[1,2].

1 单孔同位素示踪法探测裂隙岩体渗流场基本原理

当钻孔揭露岩体裂隙、断层、含水层中的地下水时,不同补给的裂隙水之间(或与多孔介质含水层中的地下水之间)将在孔中发生交换,即高水头的裂隙水(或含水层中的地下水)补给水头较低的裂隙(或含水层),从而在孔中形成垂向水流.通过示踪技术可以在孔中各点测定出垂向流的分布情况,示踪法测定的垂向流速下限小于 1 m/d ,可满足在天然流场下测定垂向流速的要求.为了得到联立方程组,我们在注水条件下重复孔中垂向流速的测定,从而建立起与裂隙等效水力隙宽、渗透系数及静水头有关的混合井流理论.研制成功了新一代的单孔地下水流速、流向测定仪,仪器的主控系统为 Windows95 软件支持下的适用于野外用的笔记本电脑^[3].

1.1 单孔中测定垂向流速的示踪原理

钻孔揭露多组裂隙(或含水层)后,由于各裂隙(或含水层)地下水的补给源不同,孔中各组裂隙(或含水层)的静水头也不一样,孔中将可能产生垂向流.通常采用同位素示踪峰峰法来测定孔中的垂向流速与流向.

将四支串联探头放置在井中被测井段 ,投源器装在 2~3 号探头的中间段 ,同位素示踪剂被投放后 ,四路计数器开始分别记录不同时刻的计数率变化 ,假设垂向流向上 ,可测到如图 1 所示的计数率变化曲线 ,显然只有 1、2 号探头接收到了放射性示踪剂 ,在图中找出 1、2 号计数器测到的计数率峰值所对应的时间 t_1 与 t_2 ,设两探头之间的距离为 L ,则垂向流速

$$V_v = \frac{L}{t_1 - t_2} \tag{1}$$

于是通过钻孔断面的水流量

$$Q = \pi (r^2 - r_0^2) V_v \rho_w \tag{2}$$

式中 ρ_w 为水的密度.

1.2 注水条件下测定垂向流

为了在单孔中测定出裂隙岩体渗流特性规律 ,还必须进行注水条件下垂向流测定 .通过对所研究裂隙顶部和底部位置在天然流场与注水条件下垂向流速的测定 ,可以得到两个相互独立的方程 ,将立方定理与这两个方程组联立 ,可求出岩体裂隙的等效水力隙宽 b 、渗透系数 K 、静水头 S 等参数 ,公式推导见 2.2. 为了满足稳定流的要求 ,注水水头不宜过高 ,注水量不要过大 .注水条件下测定垂向流的方法与 1.1 论述的基本相同 .此时垂向流一般向下 ,同位素投源器应安装在 1 号探测器的上方 ,为了查清整个孔中注水水位以下裂隙岩体的渗流情况 ,测量一般是逐米进行的 .

1.3 单孔点稀释法测定裂隙岩体渗透流速原理

在孔中被研究的裂隙段不存在垂向流时 ,天然流场下该裂隙的涌水量或吸水量为零 ,此时只能建立一个注水条件下的裘布依方程 ,还必须采用点稀释方法进行渗透流速测定 ,才能求出裂隙等效水力隙宽与渗透系数 ,公式推导见 2.1.

点稀释法测裂隙渗流原理 :假设水是不可压缩的液体 ,在孔中由于垂直方向不存在水的交换 ,那么通过上游裂隙流进井段的水量必然等于从井段流出到下游裂隙的水量 .假设被标记井段内有 m (g) 的示踪剂 ,标记井段水中示踪剂的浓度为 m/Θ (g) ,井段中的水量为常数

$$\Theta = \pi (r^2 - r_0^2) h \rho_w$$

式中 : r ——井半径 ; r_0 ——探头半径 ; h ——被标记井段的高度 ; ρ_w ——水的密度 .假设有 $\Delta\theta$ (g) 的水量从上游裂隙一侧流入井段 ,那么必定有 $\Delta\theta$ (g) 的水量通过裂隙下游侧流出井段 ,在流出的 $\Delta\theta$ (g) 水中有 Δm (g) 示踪剂 ,示踪剂被搅拌均匀 ,以保证在标记井段内各点水中的示踪剂浓度相等 ,于是可近似得到如下比例关系 :

$$\frac{m - \Delta m}{\Theta} \approx - \frac{\Delta m}{\Delta \theta} \tag{3}$$

即流出井段的水中含有的示踪剂浓度与被标记井段中的浓度相等 ,负号表示反应向减少的方向进行 ,对上式两端取极限

$$\lim_{\substack{\Delta \theta \rightarrow 0 \\ \Delta m \rightarrow 0}} \frac{m - \Delta m}{\Delta \theta + \Theta - \Delta \theta} \approx - \lim_{\substack{\Delta \theta \rightarrow 0 \\ \Delta m \rightarrow 0}} \frac{\Delta m}{\Delta \theta} \tag{4}$$

得到微分方程

$$\frac{m}{\Theta} = - \frac{dm}{d\theta} \tag{5}$$

移项并积分

$$\int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{\Theta} = - \int_{m_0}^{m_1} \frac{dm}{m} \tag{6}$$

积分得到

$$\frac{\theta_1}{\Theta} = \ln \frac{m_0}{m_1} \tag{7}$$

考虑裂隙组情况 ,如图 2 所示 ,在层流情况下 t 时刻后流入裂隙的水量 θ_1 可表达为

$$\theta_1 = 2r \cdot V \cdot t \cdot h \cdot n$$

式中 : h ——被标记段高度 ; n ——等宽度裂隙条数 ; V ——孔中流速 .孔中流速与渗透流速的关系可表示为

$$V_f = V/\alpha$$

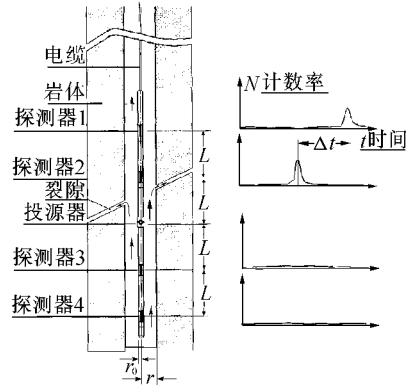


图 1 同位素示踪垂向流速测试原理示意图

Fig.1 Principle of isotope tracer method for detecting vertical flow

α 为流场畸变因子^[5]. 放射性示踪剂的浓度变化的比值可用其计数率的比值来代替,即

$$m_0/m_1 = N_0/N_1$$

如果考虑到放射性本底的影响,上述关系还应改为

$$m_0/m_1 = (N_0 - N')(N_1 - N')$$

N' 为水中的放射性本底,如果 $N_0, N_1 \gg N'$, 此时可不考虑本底的影响. 将上述关系代入式 (6) 得

$$V_f = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{2r \cdot \alpha \cdot n \cdot t} \ln \frac{N_0}{N_1} \tag{8}$$

流场畸变因子 α 可采用 Drost 提出的公式进行计算^[5], 它是个 2 附近的数, 在裸孔中等于 2; 式 (8) 中假定孔中稀释段 h 内存在等隙宽的裂隙 n 条, 等隙宽裂隙条数 n 的获取可采用在孔中注入吸附性放射性示踪剂, 通过测定孔中裂隙内放射性强度分布而获得, 我们也可从钻孔岩芯中获得 n . 但从钻孔岩芯中得到的裂隙隙宽是不可靠的. 一个原因是由于取出后的岩芯应力已经释放, 隙宽值往往偏大; 另一个原因是岩体中的裂隙隙宽是变化的, 岩芯中的隙宽不能够代表它的平均隙宽, 由于裂隙面粗糙度不宜直接测量, 因而对渗流计算造成较大的误差. 对于隙宽不等的裂隙需要逐条进行测量, 并要考虑到立方定律的适用隙宽的下限.

隙宽的定义主要有三种, 平均隙宽、力学隙宽(机械隙宽)和等效水力隙宽. 等效水力隙宽是为了应用立方定律于实际裂隙而提出的概念, 既是将试验所得裂隙渗流量代入到立方定律, 反求出的裂隙隙宽. 对于光滑平行板裂隙, 这三种隙宽值是相同的, 而对于实际粗糙裂隙, 它们通常是不等的.

1.4 同位素示踪单孔测定水平流向

将一种易溶于水的具有弱吸附性的放射性同位素示踪剂投放到被测井段, 如在裂隙中存在水平流动(孔中存在垂向流探头上需加止水装置, 参见图 3), 同位素将随井水运动进入到裂隙中, 在井中被测段裂隙周围同位素浓度分布逐渐呈不均匀性, 地下水流方向的浓度最高, 补给方向的浓度最低. 通过装有 6 支 G—M 计数器的流向探头测定井中的放射性强度分布, 根据 6 个不同方向接受到的计数率可计算出观测孔中裂隙水的水平流动方向 α 角, 电罗盘同时测定到 1 号探测器与北极方位的夹角 β , 实际流向 $\gamma = \alpha - \beta$.

2 多裂隙含水层稳定流混合井流理论

当钻孔揭露了两个以上的裂隙组(或含水层)系统时, 孔中将可能产生垂向流, 见图 4. 假设钻孔揭露了 n 个裂隙组系统, 我们研究其中第 k 裂隙组 ($k \leq n$), 假设第 k 裂隙组的等效水力隙为 b_k , 考虑裂隙中水的流动为层流情况, 裂隙组在孔中的静水位为 S_k , 孔水位为 S_0 (混合水位).

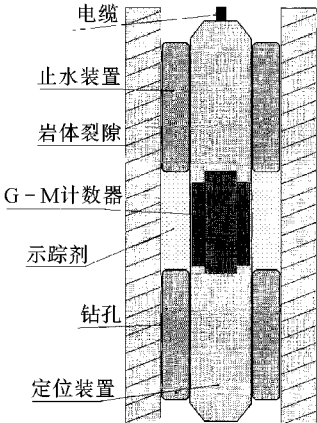


图 3 同位素示踪仪示意图

Fig.3 Schematic diagram of Isotope Tracer Meter

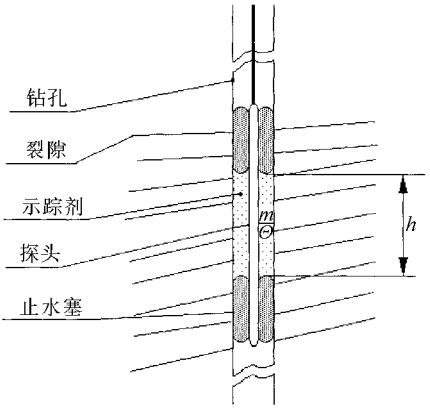


图 2 点稀释法测定岩体裂隙渗透流速原理示意图

Fig.2 Principle of point dilution logging for detecting fissure water flow velocity

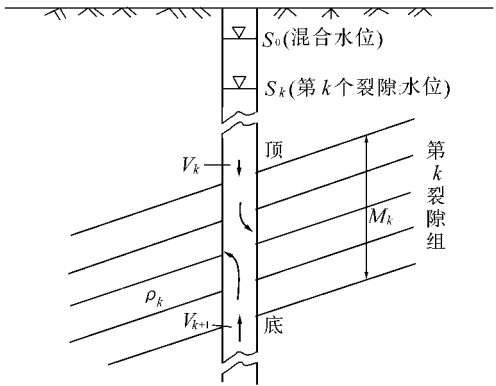


图 4 第 k 裂隙组在孔中的流场分布

Fig.4 Diagram of the k th fissure group flow distribution in borehole

当 $S_k \neq S_0$ 时,在第 k 裂隙组将发生吸水或涌水现象,我们可利用 1.1 中介绍的方法,测定出第 k 裂隙组的吸水量或涌水量

$$Q_k = \pi r^2 |V_k - V_{k+1}| \rho_w \tag{9}$$

式中 V_k 和 V_{k+1} 分别为第 k 裂隙组顶底两端测到的垂向流速。

流入(出)第 k 裂隙组中的垂向流是由孔中的混合水位 S_0 与第 k 裂隙组的静水头 S_k 之间的水头差引起的,设第 k 裂隙组厚度为 M_k ,裂隙密度为 ρ_k ,测点内的各条等效水力隙宽相等,井中流入或流出裂隙组中的水量为

$$Q_k = 2\pi \cdot r \cdot b_k \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \rho_w \cdot K_k \frac{dh}{dr} \tag{10}$$

将此式移项并积分

$$Q_k \int_r^{R_k} \frac{dr}{r} = 2\pi \cdot b_k \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \rho_w \cdot K_k \int_{S_k}^{S_0} dh \tag{11}$$

由此可以得到

$$K_k = \frac{Q_k}{2\pi \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \rho_w \cdot b_k \cdot (S_0 - S_k) \ln \frac{R_k}{r}} \tag{12}$$

式中: S_0 ——井水位(混合水位); S_k ——第 k 裂隙组的静水位(未知待求); K_k ——裂隙渗透系数; R_k ——第 k 裂隙组的影响半径,可近似用 $R_k = 10 |S_0 - S_k| \sqrt{K_k}$ 迭代确定; b_k ——第 k 裂隙组的等效水力隙宽(未知待求)。

式(12)中有三个未知数,还必须建立另外两个包括这三个未知数的独立方程才能求解。对观测孔考虑进行注水或抽水,为了满足稳定流条件,注水或抽水头差一般都较小,见图 5。此时我们在孔中第 k 裂隙组顶底两端相同位置重复垂向流速测定,得到裂隙组吸水量或涌水量

$$Q'_k = \pi r^2 |V'_k - V'_{k+1}| \rho_w \tag{13}$$

式中 V'_k 和 V'_{k+1} 分别为注水或抽水条件下第 k 裂隙组顶底两端测到的垂向流速。于是又得到一个方程

$$K_k = \frac{Q'_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot b_k (S_0 - S_k + \Delta S) \ln \frac{R_k}{r}} \tag{14}$$

2.1 单裂隙组渗流井流理论

当钻孔仅揭露了一组裂隙,此时由于孔中不存在垂向流,利用注水条件下得到的裘布依方程和立方定理可得到

$$\left. \begin{aligned} K_k &= \frac{Q'_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot b_k (S_0 + \Delta S) \ln \frac{R_k}{r}} \\ K_k &= \frac{g \cdot b_k^2}{12\nu} \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

解(15)方程组得

$$\left. \begin{aligned} b_k &= \left(\frac{6\nu \cdot r^2 \cdot |V'_k - V'_{k+1}|}{g \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot (S_0 + \Delta S) \ln \frac{R_k}{r}} \right)^{1/3} \\ K_k &= \frac{g}{12\nu} \left(\frac{6\nu \cdot r^2 \cdot |V'_k - V'_{k+1}|}{g \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot (S_0 + \Delta S) \ln \frac{R_k}{r}} \right)^{2/3} \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

将计算出的 b_k 代入式(8)得

$$V_{fk} = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{2r \cdot \alpha \cdot n_k \cdot t} \ln \frac{N_0}{N_1} \tag{17}$$

稀释法测定的渗透流速 V_{fk} 为纵向剖面平均值,而注水方法测定的 K_k 为裂隙渗透系数,还必须乘以 $b_k \rho_k$ 才为纵剖面上的平均值,假设裂隙水为层流,应用达西定理第 k 裂隙组的水力梯度可得

$$J_k = V_{fk} / (K_k b_k \rho_k) \tag{18}$$

由于公式(9)~(18)中 R_k 、 r 、 α 、 V_k 、 ρ_k 等参数的测定存在一定误差,所以由此式得到的水力梯度为近似值。

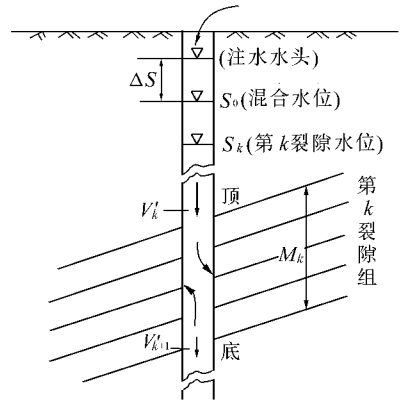


图 5 注水条件下测定裂隙组的吸水量或涌水量示意图

Fig.5 Determination of fissure group flow in or out of borehole by water injection

2.2 多裂隙组渗流井流理论

当钻孔揭露多个不同补给的裂隙组后,由于各层中的静水头 S_k 不同,孔中可能产生垂向流,含水层将表现为吸水或涌水性质,我们分三种情况进行分析:

a. 当 $S_k < S_0$ 时,第 k 裂隙组为吸水性质,即钻孔中的水进入到裂隙中,将天然流场与人工流场(注水或抽水)下得到的式(12)(14)与地下水运动的立方定理联立得到方程组:

$$\left. \begin{aligned} K_k &= \frac{Q_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot \rho_k \cdot M_k \cdot b_k \cdot (S_0 - S_k)} \ln \frac{R_k}{r} \\ K_k &= \frac{Q'_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot \rho_k \cdot M_k \cdot b_k \cdot (S_0 - S_k + \Delta S)} \ln \frac{R_k}{r} \\ K_k &= \frac{g \cdot b_k^2}{12\nu} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: ν ——地下水的运动粘滞系数; g ——重力加速度.

解联立方程组(19)得

$$\left. \begin{aligned} K_k &= \left(\frac{g}{12\nu} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{Q_k - Q'_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \Delta S} \ln \frac{R_k}{r} \right]^{\frac{2}{3}} \\ b_k &= \left[\frac{6\nu \cdot (Q'_k - Q_k)}{\pi \cdot g \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \Delta S \ln \frac{R_k}{r}} \right]^{\frac{1}{3}} \\ S_k &= S_0 + \frac{Q_k}{Q_k - Q'_k} \Delta S \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

将此法推广到孔中所有裂隙组中,便可以求出任一岩体裂隙组的等效水力隙宽、渗透系数和静水头.

b. 当 $S_k > S_0$ 时,第 k 裂隙组为涌水性质,即裂隙中的水流入到钻孔中(19)(20)式仍然成立,只需将式中的 $S_0 - S_k$ 换成 $S_k - S_0$ 即可,得到方程组的解为

$$\left. \begin{aligned} K_k &= \left(\frac{g}{12\nu} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{Q_k - Q'_k}{2\pi \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \Delta S} \ln \frac{R_k}{r} \right]^{\frac{2}{3}} \\ b_k &= \left[\frac{6\nu \cdot (Q'_k - Q_k)}{\pi \cdot g \cdot \rho_w \cdot M_k \cdot \rho_k \cdot \Delta S \ln \frac{R_k}{r}} \right]^{\frac{1}{3}} \\ S_k &= S_0 - \frac{Q_k}{Q_k - Q'_k} \Delta S \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

c. 当 $S_k = S_0$ 时,由于第 k 组的裂隙水与其它的裂隙组(或含水层)没有补给关系,此时裂隙组的渗流与2.1介绍的单裂隙组的情况相同,可直接代入相关的公式求解.

利用同位素示踪仪在单孔中不同裂隙组测定的地下水流向^[6],我们就可以确定出不同裂隙组的补给源的方位,如果与天然示踪方法配合使用,通过井水中电导率的测定,则可以准确判断不同裂隙组的补给源来自何种补给^[6].

3 现场试验

3.1 单孔示踪技术选择

在单孔中测定裂隙岩体的渗透性具有很强的实用价值,我们完全可以在所研究区域内的现存观测孔中进行渗流场探测,由于同位素流速流向示踪仪的示踪探头最小直径仅仅为 30 mm,可适用于孔径大于 35 mm 的观测孔,基本上能满足现存水位观测孔直径多为 38 mm 的要求,不需要另外进行钻孔.单孔示踪测定裂隙岩体渗透性方法增加了注水条件下测定垂向流的内容.注水的原则是保证地下水流为稳定流,这在裂隙岩体渗流场中是可以实现的,一般效果都较好.由于大部分情况下孔中垂向流速很低,即使是在注水条件下,垂向流速可能还小于 1 m/h,这么低的垂向流速采用其它种类的流量仪是无法准确测量的.

当孔中不存在垂向流时,我们除了进行注水条件下测定垂向流速之外,还进行了渗透流速的测定,可在单孔中确定任意裂隙组含水层的水力梯度.但必须指出,对于存在交叉裂隙的情况,由于在交叉裂隙中存在

偏流,所以不能简单地采用这种方法确定水力梯度等参数。Rommm 研究了微裂隙($10 \sim 100 \mu\text{m}$)和极微裂隙($0.25 \sim 4.3 \mu\text{m}$)的情况,提出了只要隙宽大于 $0.2 \mu\text{m}$,立方定理总是成立的^[7]。

3.2 应用单孔示踪方法在坝区开展绕坝渗流场测试研究

在裂隙岩体渗流的地下水中,采用这种单孔技术对整个渗流区域内所有观测孔进行多裂隙组岩体渗透性测定,可以确定出区域内的渗流场分布。通过对所测到的等效水力隙宽、渗透系数、静水头、渗透流速、水平流向等参数的归类分析,确定出该研究区内的主要导水裂隙(断层),对于这些起主要作用的裂隙(断层),我们可采用离散的方法进行渗透性研究,这样可以使问题大大简化。

3.3 刘家峡左坝肩裂隙岩体渗流场测试

刘家峡大坝左岸岩层产状倾向下游河谷,又有断裂与构造挤压破碎切割,左岸构造挤压破碎带发育,存在 F_{80} 、 F_{152} 及 F_{93} 三条大断层,共有 18 层。断层附近透水性大,裂隙率为 $0.5\% \sim 1.0\%$,靠近岸坡的高达 4% ,分布在 $1610 \sim 1720 \text{ m}$ 之间,一般宽度为 $2 \sim 15 \text{ cm}$,其中个别最大的达 40 cm ,贯穿性和厚度较大者有 5 条,集中在 1655 m 高程以上,充填物主要为岩石碎屑。断层所包围的区域,见图 6。我们在观测孔中测定的等效水力隙宽一般在 $0.001 \sim 0.0001 \text{ m}$ 之间,渗透系数在 $0.01 \sim 0.64 \text{ m/d}$ 之间,最大渗透流速为 0.16 m/d 。

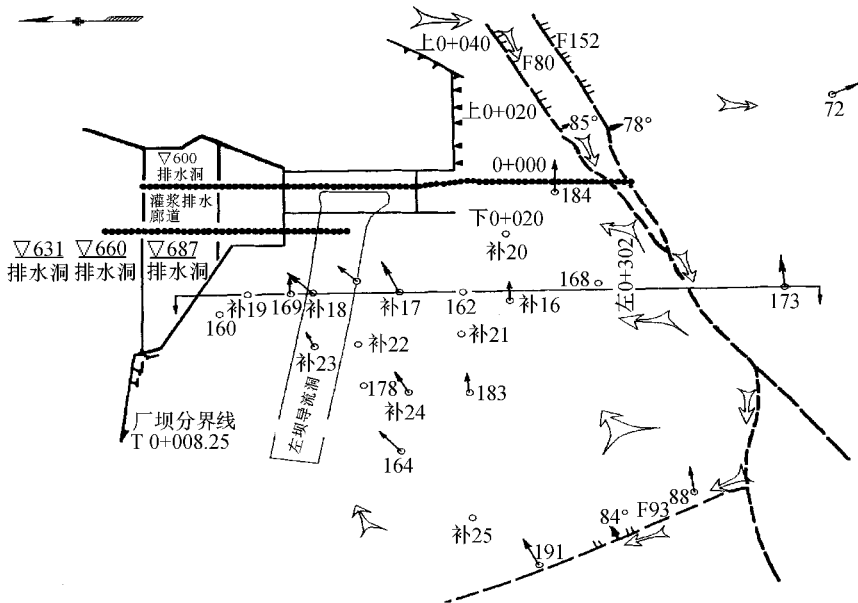


图 6 刘家峡大坝左岸库水绕坝渗流场分布图
Fig.6 Seepage flow distribution around left dam abutment of Liujiaxia dam

从实测到的地下水渗流场分布可知,库水通过断层 F_{152} 和 F_{80} 渗漏到坝后区,通过断层向两侧的次一级渗流通道排泄,由于受到排水幕的影响,断层中的大部分水补给灌浆排水洞和左导流洞。试验结果表明,对三条大断层(等效水力隙宽大于 0.01 m)采用离散模型进行渗流场计算,而对较均质的裂隙岩体(等效水力隙宽小于 0.001 m)采用连续介质等效模型计算渗流场,根据边界上水位相等的条件,求解出渗流场分布。由单孔示踪法测试结果建立起来的模型与实际较为符合。

4 结 束 语

岩体水力学是一门新的研究学科,由于大型的建筑物如大坝、高层楼房等都是修建在岩体基础之上的,所以岩体水力学是一门应用性很强的学科。最近 20 年国内外对裂隙岩体渗流机理与模型的研究已取得了很大的成就,我国在岩体水力学方法的研究虽起步较晚,但研究工作成绩卓著。但同时我们必须看到,岩体水力学尚处在发展阶段,虽然在实验室模型方面做了许多研究,但由于裂隙岩体的复杂性,能真正应用于工程实际的模型与方法并不多,我们的现场测量技术的研究远远未能跟上时代发展的步伐。三段压水试验和交叉压水试验虽然是目前较新的研究裂隙岩体的渗流的试验方法,但这两种试验基本上不可能进行大范围的推广,原因是费用太高。

由于单孔示踪技术测定裂隙岩体渗透性的方法简单易行,原来仅仅用来测量水位的观测孔现在可以用

来研究裂隙岩体的渗透性,使以前很难进行的大范围低成本的现场测试成为现实.

采用同位素示踪方法进行现场普通观测孔中的裂隙渗流场探测与计算,可以求出实际裂隙的等效水力隙宽、渗透系数、导水系数、静水头、水力梯度、流向、流速、吸水量或涌水量等,这些参数与计算所得到的等效模型参数有很大的不同,它可以基本反映岩体裂隙的渗流情况.而我们通过钻孔取岩芯或野外调查的方法获取的裂隙隙宽、粗糙度等参数的误差是较大的,这是由于我们得到的岩芯样和出露的岩体的应力已经释放掉,隙宽已经改变了,而且岩层内部的粗糙度不一定与样品所揭露的一致.而我们通过同位素示踪方法实测到的参数,却能基本上真实地反映裂隙渗流场的客观实际,这正是我们所要求的.

参考文献:

- [1] 陈建生,王媛,赵维炳.裂隙岩体渗流井流理论及同位素示踪方法研究[J].水利学报,1999(11):20~24.
- [2] 陈建生,王媛,赵维炳.钻孔与岩体裂隙斜交渗流场井流理论与示踪方法研究[J].水利学报,1999(12):43~47.
- [3] 陈建生,杜国平,郑正等.多含水层稳定流非干扰多孔井流物理模型及示踪技术研究[J].水利学报,1999(5):60~65.
- [4] 陈建生,许惠义,杜国平等.单孔同位素示踪测试 $S \sim Q$ 曲线[J].勘察科学技术,1999(6):12~15.
- [5] Drost W. Single-well and multi-well nuclear tracer techniques[M]. Unesco Paris, 1989.
- [6] Chen Jian-sheng, Du Guo-ping, Zheng Zheng etc. Radioactive or natural tracer techniques for leak determining of dam abutment[J]. Nuclear Science and Techniques, 1995, 9(4):230~237.
- [7] Romm E S. Flow characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra, 1966. 25~40.

Study of Fissured Rock Permeability Measurement by Using Single-well Tracer Method

CHEN Jian-sheng, ZHAO Wei-bing

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

Abstract: A single-well flow principle for the detection of fissured rock permeability coefficient, equivalent mechanical fissured rock width and hydrostatic level is studied in this paper. Single-well dilution logging for detecting the direction, velocity and other hydrogeological coefficient is applied to fissured rocks. The well flow principle of multi-fissure group is deduced in detail. Borehole water flowing in or out of the fissure is discussed separately. The equipment and testing method are introduced in this paper. In combination with fissured rock strike, dip angle and distribution seepage flow in fissured rocks is determined by use of single-well tracer method for the area under study. The achievements have been applied to seepage flow around the left dam abutment of Liujiaxia dam.

Key words: single-well tracer; fissure; well flow principle; equivalent mechanical fissured rock width