

龙羊峡大坝同位素示踪方法探测渗流场研究

陈建生 张发明

张虎成

(河海大学土木工程学院 南京 210098) (龙羊峡水力发电厂 青海龙羊峡 811800)

摘 要 论述了同位素及天然示踪方法探测大坝渗流场的基本原理与试验方法.通过夏季与冬季两次不同水位条件下对龙羊峡大坝进行的同位素综合示踪探测,已初步查清了南北大山水沟蓄水池的渗流及工业用水补给是造成左岸地下水位偏高的主要原因.综合示踪试验发现顺河断层 F₅₇ 存在较为严重的河水渗漏,该渗漏造成左岸地下水位的壅高,阻碍了左岸边坡水的排泄;G₄ 劈理带的渗漏不是引起左岸地下水位偏高的主要原因;跨河断层 F₁₈、F₇₁、F₇₃ 等与顺河断层 F₅₇ 交汇,将 F₅₇ 断层的渗漏河水补给这些跨河断层,造成 F₁₈、F₇₁、F₇₃ 等断层中的水位升高,并将渗漏河水补给右岸,造成 34[#]、18[#] 等孔位附近的地下水位升高.

关键词 同位素示踪;天然示踪;渗流场;裂隙;大坝;渗漏通道

中图号 TV139.1

同位素示踪与天然示踪方法测定坝基岩体渗流场及渗流通道是近十年发展起来的新技术,利用水库大坝的现存观测井进行坝区岩体绕坝渗流场同位素示踪测定,将天然流场的动态变化与岩体水力学、井流理论相结合,来研究坝基渗流场的发生与发展是近年发展起来的先进方法及手段,它不但发展了示踪岩石水力学渗流场井流理论与相关的同位素示踪测量技术,而且大大提高了观测孔的利用率,提高测定渗流通道的准确性^[1].与压水三轴试验、压水试验相比,同位素综合示踪方法简单而易于实施,获取的参数较多而且准确可靠,为深入研究岩体水力学提供了一种新的方法与手段.

龙羊峡大坝坝址的水文地质条件极其复杂,水库自运行以来左岸地下水位始终高于库水位,比右岸偏高 20~30 m,右岸部分孔水位也存在偏高异常现象.由于两岸的水位高于设计值,对两岸尤其是左岸的稳定产生不利的影响.为了降低坝后水位,加固补强工程一直在进行,但是由于没有查清库水绕渗的主渗通道,加固工程的效果并不明显.为此,采用同位素及天然示踪方法探测龙羊峡坝区渗流场显得尤为必要.

1 同位素示踪方法探测绕坝渗流场原理

1.1 同位素示踪单孔稀释法测定岩体渗流场原理

同位素示踪单孔稀释法测定岩体渗流场基本原理是将微量的放射性同位素¹³¹I 溶液均匀地标记在被测量的井孔水中,示踪同位素浓度随地下水运动而逐渐减少,井中同位素的浓度与分布将发生变化,通过对这些变化过程的测定,可以得到与之相关的地下水的流速、流向、渗透系数、裂隙隙宽、垂向流速、裂隙含水层分布以及渗漏层分布等参数.

稀释法测定裂隙渗流原理:带有止水装置的同位素示踪探头下到井中被测位置,同位素被投放在两止水装置中间的井段内并被搅拌均匀.被上下封堵的井段内只存在井壁侧向被揭露裂隙中的地下水流动,假设水是不可压缩的液体,垂直方向不存在水的交换,那么由裂隙的上游流进井段的水必然等于从井段流出到下游的水.根据稀释定理可推导出岩体裂隙渗透流速公式:

$$V_f = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{2r \cdot \alpha \cdot n \cdot t} \ln \frac{N_0}{N_1} \tag{1}$$

式中: r ——井半径; r_0 ——探头半径; α ——畸变系数,裸井中等于 2; n ——等隙宽裂隙条数; N_0 —— t_0 时刻

的计数率; N_1 —— t_1 时刻的计数率.

当所研究的裂隙含水层中受到孔中的垂向流补给量远大于裂隙层间的水平补给量时,此时裂隙中的水平流可以忽略不计.流入(出)第 k 条裂隙中的垂向流是由孔中的混合水位 S_0 与第 k 条裂隙的静水位 S_k 之间的水位差引起的.根据井流理论,流入或流出裂隙中的水量与渗透系数的关系:

$$K_k = \frac{Q_k}{2\pi \cdot b_k(S_0 - S_k)} \ln \frac{R_k}{r_1} \quad (2)$$

渗透系数与隙宽之间满足

$$K_k = \frac{b_k^2 g}{12v} \quad (3)$$

式中: Q_k ——各层段岩体裂隙的吸水量或涌水量; K_k ——第 k 条裂隙渗透系数; v ——地下水的运动粘滞系数; g ——重力加速度; b_k ——第 k 条裂隙隙宽; R_k ——第 k 条裂隙的影响半径; r_1 ——钻孔内半径.

联立式(2)与(3)可解出 b_k 与 K_k .

1.2 同位素示踪单孔测定岩体裂隙水平流向

由于孔内地下水中的正离子的运动速度比负离子快,从而在孔壁内侧形成由正负离子分布不同造成的不均匀电场.当同位素示踪剂 ^{131}I 被投入后,碘负离子在电场的作用下向水流方向运动富集,造成碘离子的不均匀分布,这个过程只须几分钟即可完成.所以同位素 ^{131}I 示踪剂在井四周的浓度分布会很快呈现出不均匀性,地下水流方向的浓度最高,补给方向的浓度最低,通过采用河海大学最新研制的“同位素地下水示踪仪”就可以在单孔中迅速测定地下水的流向与流速^[2].

1.3 同位素示踪测定垂向流

钻孔揭露多组裂隙(含水层)后,由于各裂隙(含水层)地下水的补给源不同,在库区坝后地下水的补给源通常为库水与地下水及表层水,孔中各组裂隙层的静水位也不一样,孔中可能有垂向流产生.我们通常采用峰峰法来测定井中地下水的垂向流速.

将四支串联探头放置井中被测井段,将同位素投放在2~3号探头的中间,仪表分别记录下各自在不同时刻的计数率变化.假设垂向流向上,我们测得计数率曲线,找出两条曲线的峰值所对应时间分别为 t_1 与 t_2 ,设两探头之间的距离为 L ,则垂向系数

$$v = \frac{L}{t_1 - t_2} \quad (4)$$

通过在孔中测定到的连续的垂向流速,可以计算出 Q_k ,代入式(2)可求出渗透系数.

2 天然示踪方法探测渗流场原理

探测坝基渗漏的示踪方法可以分为人工示踪与天然示踪两种.人工示踪方法是指地下水中的示踪剂是采用人工的方法在钻孔中或上游库底投入的,示踪剂可选用可溶性盐、荧光素、放射性同位素等;天然示踪方法是指地下水中的示踪剂不是采用人工的方法投入的,而是采用天然水中存在的某些化学的或物理的特征作为示踪指示剂,例如温度场、电导率、pH值、环境同位素、各种离子等.

2.1 地下水温度示踪原理

库水的表层温度是随着季节的温度而变化的,由于在4℃时的密度最大,所以造成库底的温度较低,龙羊峡水库库底的温度接近4℃,库底的温度年变化率一般不超过1℃.建坝前库区地下水的主要补给源来自两岸山体,山体地下水的温度较高,基本上不随季节变化.建坝后的地下水受到了绕坝库水渗漏的影响,由于绕坝库水的温度较低,可造成渗漏通道上的局部温度异常,在强渗漏的裂隙岩体中存在低温带,通过断层中发现的低温场可确定渗漏发生的程度.

2.2 地下水电导示踪原理

库水主要来自大气降水,一般来说其矿化度较低,电导值也非常低.两岸的地下水也来自大气降水补给,在长期运移的过程中地下水由于蒸发而产生浓缩和水与矿物产生的水化学反应等,使水中的矿化度不断提高,造成地下水具有较高的电导值,尤其是在我国的北方地区,地下水中的电导率一般比南方高接近一个数量级.简而言之,电导值的大小与地下水在地层中的停留时间有关,停留的时间越长,其电导值也越高;另外

电导值的大小还与地下水流经地层的岩石成分有关。

通过对天然流场下的绕坝渗流孔中的水、库水、河水、灌浆廊道扬压力孔中水、排水孔中水及泉水等不同高程水的电导值测量,我们便可以确定整个坝段不同位置、不同层位水中矿化度含量的变化,从而确定出库水、山坡渗水及地下水三者对该层的补给关系。水中的电导值可以作为另一种非常好的天然示踪剂进行水库渗流通道的测定,它不但有助于查清绕坝渗流情况,而且还可以确定地下水流场的分布及变化情况,对于检验同位素示踪效果是非常重要的。

3 龙羊峡坝区渗流场同位素示踪方法探测及分析

3.1 龙羊峡坝区渗流场分布概况

龙羊峡大坝坐落在质密、坚硬的燕山期花岗闪长岩岩基之上。两岸坝肩及河床基础大部分为极弱透水或不透水的Ⅰ、Ⅱ类岩体,少数部位为中等透水(局部强透水)的Ⅲ~Ⅴ类岩体。由于岩体本身为不透水的,其中发育众多的低级裂隙宽度小、延伸短,且多有钙质胶结或泥质填充,也难于形成地下水的运动通道。因此,坝址区地下水主要是沿 F_{57} 、 F_7 、 F_{73} 、 F_{71} 、 F_{120} 、 A_2 、 F_{18} 、 d_6 等高级断裂成网络状分布的裂隙型水,渗向各异。

建坝前左岸地下水位在 2 490~2 500 m 高程之间,右岸地下水位在 2 480~2 490 m 之间。自 1980 年大规模施工后,水位逐年快速上升,目前两岸的地下水位抬升了 50~60 m,左岸比右岸高 20~30 m,比预期的水位高出 30 m 左右,从而对大坝及岸坡的稳定造成威胁。坝址岸坡区的地下水运动方向是由两岸向黄河排泄。坝址区地下水的运动主要受 NWW 向及 NE 向断裂的控制。越靠近岸边或大断裂构造水位越低,且水力坡度越大。透水性良好的断裂破碎带影响范围内的地下水位相对于同岸同期的其他部位略显低些,且较为稳定。1998 年 8 月和 1999 年 2 月对龙羊峡全坝区进行了天然示踪试验,内容主要是在两岸的渗流观测孔、2 443 m 及 2 463 m 高程的灌浆廊道和排水廊道的排水孔及部分扬压力孔中测定水中的电导率、温度和水位。

3.2 龙羊峡大坝绕坝渗流场分布特征

龙羊峡大坝绕坝渗流场分布如图 1 所示。绕坝库水主要来自 F_{57} 断层,由于 F_{57} 断层存在着较为严重的渗漏,渗漏造成帷幕后 F_{57} 断层以及与其相交的诸多断层裂隙,如 F_{18} 、 F_{71} 、 F_{73} 、 A_2 等断层中及其附近区域的水位壅高。

在 2 443 m 高程基础灌浆廊道 10# 坝段的 4# 排水孔中测到了极低的电导率(26 ms/m)和温度(8.1~9.6℃),比邻近孔中(349~385 ms/m,8.8~11.5℃)的电导率低一个数量级,温度低 0.6~1.9℃,与水库尾水的值(22 ms/m,4.5℃)较为接近,显然基础灌浆廊道 4# 排水孔中的渗水来自库水,而且渗径相对较短。4# 孔揭露了 F_{57} 断层,由此我们推断 F_{57} 断层存在着较为严重的渗漏。我们在 F_{57} 断层经过的观测孔中又发现了较低的电导率与温度值,在 2 463 m 高程 F_{57} 和 A_5 经过的左岸交通洞口的 9# 排水孔中的电导率(38 ms/m)也比邻近孔中低了接近一个数量级。我们发现 F_{57} 经过区域的排水量较大,而且发现在 2 443 m 高程第二基础排水廊道 7~8 骑缝扬压力孔 1#~3# 的扬压力偏高,这 3 个扬压力孔处在 F_{57} 断层经过的区域。考虑到张性断层交汇区裂隙的导水作用,在与 F_{57} 相交的跨河断层 F_{71} 、 F_{73} 、 F_{18} 等断层中发现的低电导率、低温与高水位应与 F_{57} 断层的河水渗漏有关。

笔者在 2 463 m 高程右岸纵向排水廊道(F_{120} 和 A_2 的排水廊道)23#、41# 排水孔中测到电导率为 60 ms/m 和 63 ms/m 的低值,参见表 1,这两个分别在 F_{57} 和 F_{18} 断层上,位于 F_{120} 与 A_2 的交汇带,由于揭露 F_{120} 与 A_2 断层的邻近排水孔中的电导率都在 200 ms/m 以上,该低值只可能来自跨河断层 F_{58} 和 F_{18} ,也就是说,穿过断层 F_{57} 的库水经 F_{58} 和 F_{18} 向南流补给到右岸,造成 F_{18} 断层附近的地下水位上升,并补给到 F_{120} ,这说明 F_{120} 断层中的水压力低于 F_{58} 和 F_{18} 断层中的压力。34# 观测孔中的高水位(2 545 m)基本代表了 F_{18} 断层中的水头,很明显,跨河断层左岸的水位(2 553~2 565 m)高于右岸,而右岸 28# 观测孔中的低水位(2 509 m)基本代表了 F_{120} 、 A_2 断层排水降压后的典型值。另外几条跨河断层 F_{71} 与 F_{73} 等也存在类似的高水位现象,使得右岸 18# 孔及其附近区域的局部也处于高水位。我们注意到在右岸 F_{71} 与 F_{18} 孔之间的中部地区 28#、38# 及 36# 孔存在 2 509 m 以下的低水位,这是由于这一地区排泄好,夏季在 38# 孔中 2 514 m 高程附近测到 9.1℃ 的低温,由于在右岸 2 463 m 横向、纵向廊道排水孔同期测到的温度在 10.5℃ 以上,所以,该低温值只可能来自由 F_{57} 渗漏的低温河水。天然示踪结果也证实了上述这个观点。

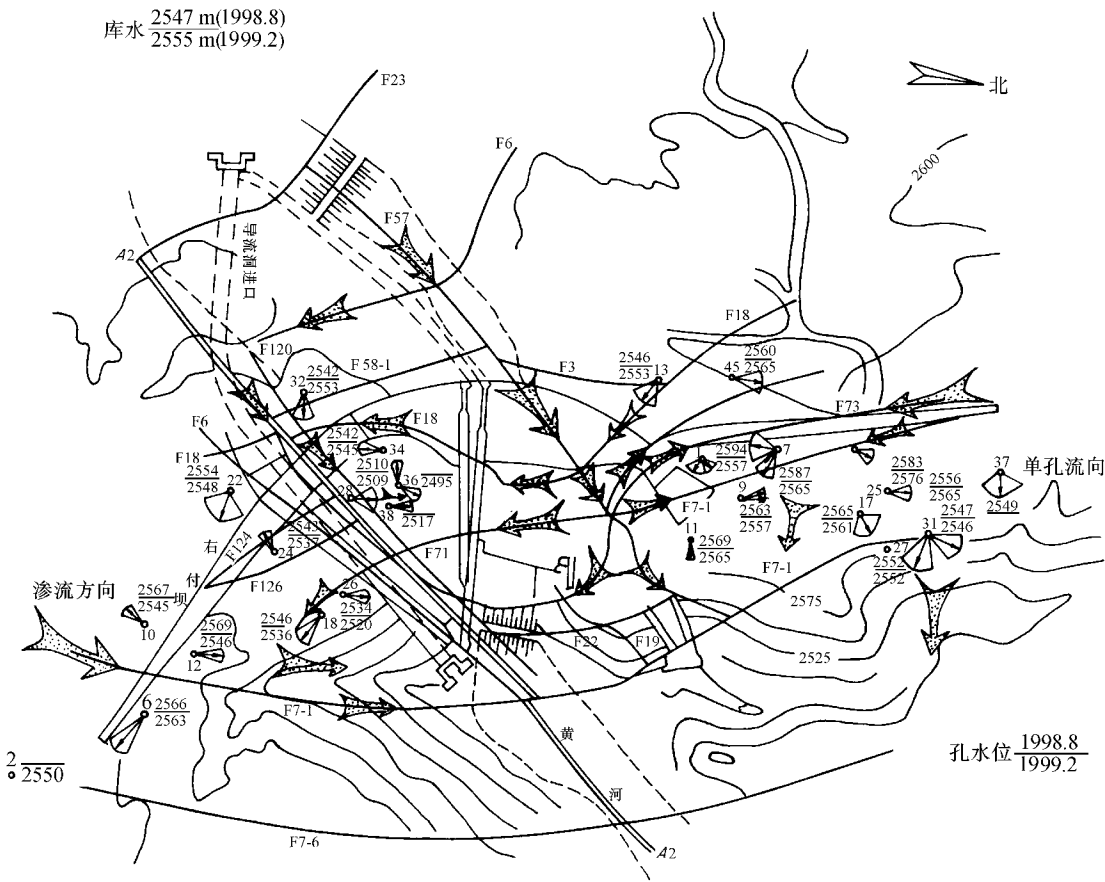


图 1 同位素及天然示踪探测龙羊峡大坝渗流场

Fig.1 Survey of Long-yang Gorge seepage flow by isotopic and natural tracer method

通过对 F_{120} 和 A_2 断层的示踪测定发现 :1994 年左右 ,该断层经帷幕灌浆处理后 34#、36#、38# 及 28# 孔的水位已经下降 20 m 以上 ,这说明帷幕灌浆和排水的效果是明显的 .天然示踪结果显示 ,距离 F_{120} 和 A_2 断层较近的 34# (82 ms/m) 和 28# (86 ms/m) 孔的电导率 ,远远高于帷幕后 F_{57} 中测到的最低值 (26 ms/m) ,也高于左岸的 1# (62 ms/m) 和 7# (69 ms/m) 孔 ,这也说明了对 F_{120} 和 A_2 断层的灌浆处理是有效果的 .

F_{71} 、 F_{73} 、 F_{18} 等断层是左岸边坡水的主要排泄通道 ,顺河向断层 F_{57} 延伸至左岸 ,河水渗漏的补给量大 ,渗径短 ,廊道排水效果不明显 ,造成左岸地下水位壅高 ,使左岸的生活区污水排泄不畅 ,水位居高不下 ,对岸坡的稳定造成威胁 .

3.3 右岸横向排水廊道渗流特征(2463 m)

同位素示踪试验发现右岸横向排水廊道排水孔中普遍存在向上的垂向流 ,测试结果参见表 1 .

垂向流表明 F_{120} 和 A_2 断层下的扬压力较大 ,由于排泄条件好 ,来自排水孔深部的上涌水在上部断层裂隙处流入裂隙被排走 ,虽部分孔口并无排水 ,但孔内由于上下的压差还是存在水的流动 .排水孔中的流向除个别偏东或偏北外 ,大部分流向为 NEE 方向 ,这表明主要排泄区在 F_{120} 和 A_2 断层的北边 ,这与实际情况是符合的 .

表 1 右岸横向排水廊道排水孔中流向、垂向流速、温度与电导率

Table 1 Direction ,vertical flow ,temperature and conductance in the wells in the horizontal drainage gallery at right dam

孔号	1	3	4	6	11	21	22	23
流向/(°)		150			20	110	0	
垂向流速(向上) (m·d ⁻¹)		3			15		18	
电导率/(ms·m ⁻¹)	134~292	166~259	167~372	134~292	180~523	120~134	170~179	193~200
温度/℃	9.7~	9.7~	9.8~13.4	9.8~13.4	9.8~13.1	9.7~11.1	9.6~10.9	9.8~10.9

3.4 右岸纵向排水廊道渗流特征(2463 m)

在右岸纵向排水廊道 41 # 和 23 # 孔中发现较低的电导率(60 和 63 ms/m), 参见表 2. 这两个孔分别揭露了 F₁₈ 和 F₅₈ 断层, 由于 F₁₈ 和 F₅₈ 为跨河断层, 受到 F₅₇ 断层渗漏河水的补给, F₁₈ 和 F₅₈ 断层中的水位北高南低, 渗漏河水通过跨河断层向南补给, 影响到右岸的地下水位. 41 # 和 23 # 孔中的电导率低于邻近排水孔, 显然它们不属于同一来源. 41 # 孔中的温度(8.5 ~ 10.1℃) 比邻近孔低 0.3 ~ 0.6℃, 比横向排水廊道中的温度低 1℃ 以上, 由此分析也可得出 41 # 孔中的水来自 F₁₈ 的河水渗漏.

分析可知, 右岸纵向排水廊道的排水与库水位存在相关关系, 主要受到 F₁₂₀、A₂、F₁₈ 和 F₅₈ 等断层渗漏的共同影响. 孔中的流向与裂隙的走向及排泄有关.

表 2 右岸纵向排水廊道排水孔中流向、垂向流速、温度与电导率

Table 2 Direction vertical flow ,temperature and conductance in the wells
in the vertical drainage gallery the at right dam

孔号	14	20	23	28	29	31	41	44
流向/(°)	330	5	160		85	165		310
垂向流速(向上) (m·d ⁻¹)	3	6	6		7	3		4
电导率/(ms·m ⁻¹)	191 ~ 236	161 ~ 174	63 ~ 65	187 ~ 130	185 ~ 174	155 ~ 157	60 ~ 190	169 ~ 171
温度/℃	9.4 ~ 10.9	9.4 ~ 10.9	9.2 ~ 10.7	9.1 ~ 10.6	9.1 ~ 10.6	8.9 ~ 10.5	8.5 ~ 10.1	

3.5 左岸 G₄ 排水廊道渗流特征(2463m)

由 1999 年 2 月左岸 G₄ 排水廊道各观测孔中的测量结果可以发现 (a) 与右岸不同, 排水孔中既有向上的垂向流, 大部分孔中又存在向下的垂向流, 扬压力普遍偏小. 这说明 G₄ 灌浆效果明显. (b) 排水孔中的电导率由排水廊道洞口向里逐渐增加, 这说明边坡水的成分在逐渐增加, 电导率逐渐增大. (c) 温度由排水廊道洞口向里逐渐增加, 也说明了库水的影响逐渐减少. G₄ 与右岸相比, 电导率普遍增大 100 ~ 200 ms/m, 温度高出 1 ~ 4℃, 这说明库水对 G₄ 造成的影响较小.

3.6 主灌浆廊道渗流特征(2443 m)

1999 年 2 月在 2443 m 高程主灌浆廊道 4 # 排水孔测到极低的电导率(26 ms/m) 和温度(8.1 ~ 9.6℃), 见表 3, 同时在相邻的 6 # 孔中也观测到较低的电导率(133 ~ 143 ms/m) 和低温值(7.5 ~ 9.2℃). 4 # 孔中的电导率比相邻的其他孔低一个数量级以上, 6 # 孔比邻近孔中的温度低 0.6℃ 以上. 由于 5 # 孔在 10 m 处淤堵, 所以该孔的值较大, 不能反映深部的渗漏情况. 4 # 和 6 # 孔揭露了帷幕后 F₅₇ 断层, 由于河水的电导率与温度分别为 22 ms/m 和 4.5℃. 1999 年 2 月以前的几个月, 龙羊峡地区已没有降雨了, 所以可以排除降雨造成的影响; 测量期间大部分施工已经停止, 测量孔附近未发现施工用水干扰, 故可以断定 4 # 和 6 # 孔中测到的渗漏水来自 F₅₇ 断层中的河水渗漏. 在 F₅₇ 及 A₂ 断层下游(2463 m 高程) 较远的副厂房交通洞口的排水孔中测到了电导率为 38 ms/m 的低值. 而且在 F₅₇ 断层经过的附近地区的扬压力比相邻孔偏高, 排水量也较大. 孔中出现向上的垂向流, 说明底部的压力大. 孔中的流向基本偏东, 与 F₅₇ 断层的走向一致.

表 3 基础灌浆廊道排水孔中流向、垂向流速、电导率与温度

Table 3 Direction ,vertical flow ,temperature and conductance in the wells
in the base grouting gallery

孔号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流向/(°)	160		90	120	70	95	105		
垂向流速(向上) (m·d ⁻¹)	12		10	6	10	10	20		
电导率 (ms·m ⁻¹)	520 ~ 580	224 ~ 248	527 ~ 546	26 ~ 27	376 ~ 385	133 ~ 143	429 ~	349 ~ 380	411 ~ 450
温度/℃	8.2 ~ 12.5	7.9 ~ 12.4	8.1 ~ 12.7	8.1 ~ 9.6	8.8 ~ 9.7	7.5 ~ 9.2	8.5 ~	8.3 ~ 12.4	9.3 ~ 13.0

4 结 束 语

- a. 龙羊峡左岸地下水位偏高的主要原因是南北大山水沟蓄水池的渗流及工业用水补给.
- b. 综合示踪试验发现顺河断层 F₅₇ 存在较为严重的河水渗漏, 该渗漏造成左岸地下水位的壅高, 阻碍了

左岸边坡水的排泄.

- c. 跨河断层 F_{18} 、 F_{71} 、 F_{73} 等与顺河断层 F_{57} 交汇, 将 F_{57} 断层的渗漏河水补给这些跨河断层, 造成 F_{18} 、 F_{71} 、 F_{73} 等断层中的水位升高, 并将渗漏河水补给到右岸, 造成 34[#]、18[#] 等孔位附近的地下水位升高.
- d. 对 F_{120} 与 A_2 进行的帷幕灌浆起到了一定效果, 虽然帷幕后的排水孔中存在较大的垂向流, 但由于排水效果显著, 对 F_{120} 和 A_2 的降压起到了重要作用.
- e. G_4 排水廊道排水孔中的探测表明, G_4 劈理带的渗漏不是引起左岸地下水位偏高的主要原因.

参 考 文 献

1 陈建生. 多含水层稳定流非干扰多孔混合井流物理模型及示踪测井方法. 水利学报, 1997, 10(5): 60 ~ 65

2 陈建生. 地下水同位素示踪仪. 核技术, 1992, 15(3): 167 ~ 172

Survey of the Leakage Passage at Long-yang Gorge Dam by Isotopic Tracer Method

Chen Jiansheng Zhang Faming

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

Zhang Hucheng

(Longyang Gorge Hydropower Plant , Qinghai Longyangxia 811800)

Abstract The basic principle of isotopic tracer , natural tracer theory and some testing methods for surveying the isotopic tracer leakage passage at the Long-yang Gorge Dam are enunciated in this paper. According to the results from the isotopic tracer method used in two different seasons , i. e. , summer and winter , the high level of groundwater on the left bank behind the dam is investigated thoroughly. The main reveals of the causes highwater level at the left dam abutment is the leakage from the Nanbeidashan reservoir and its raceway including the seepage of industrial waste water. Isotopic tracer test reveals that at bedding fault F_{57} exists serious leakage. The seepage causes high groundwater level and blocks the drainage of the left bank sloping water. The seepage from cleavage G_4 is not the main cause of the high groundwater level. River crossing faults F_{18} 、 F_{71} 、 F_{73} and bedding fault F_{57} intersect at the dam base , the leakage flow from fault F_{57} supplies water for the crossing faults and the right bank , resulting in the high groundwater level of the crossing faults and nearby of two nearby observation holes 34[#] and 18[#] .

Key words isotopic tracer ; natural tracer ; seepage flow ; fissure ; dam ; leakage passage