

北江大堤石角段同位素综合 示踪探测管涌研究报告

河海大学土木工程学院

广东省水利电力厅

广东省水利水电科学研究所

广东省水利厅北江大堤管理局

1999年8月20日

北江大堤石角段同位素综合示踪探测管涌研究报告

主要完成单位：河海大学土木工程学院

广东省水利电力厅

广东省水利科学研究所

北江大堤管理局

主要完成人：陈建生 茹建辉 黄春华

郑存灼 羽海英

撰写：陈建生

审查：茹建辉 郑存灼

校核：黄春华 羽海英

1999年8月20日

目 录

前 言	3
第一章 同位素综合示踪试验内容目的与要求	4
第二章 管涌探测中的同位素综合示踪方法及其管涌渗透破坏机理简述	5
2.1 探测方法简述	5
2.2 管涌渗漏探测原理	5
2.2.1 同位素示踪单孔稀释法测定岩体渗流场原理	5
2.2.2 利用天然示踪剂测定坝基渗漏	8
2.3 枯水期测定管涌区渗透性	9
2.4 枯水期探测管涌的试验方法	10
2.5 管涌渗透破坏机理	11
2.5.1 堤防管涌产生的必要条件	11
2.5.2 管涌开始时涌水量的确定	12
2.5.3 管涌发生后各点渗透坡降的确定	13
2.5.4 管涌临界面的确定	15
2.5.5 渗漏通道的形成	16
2.5.6 出沙量与流速之间的关系	17
2.5.7 管涌破坏	18
2.6 管涌产生堤防破坏原理	19
2.6.1 渗透变形和渗透破坏的关系与判断	19
2.6.2 渗透变形的判断	19
2.6.3 渗透破坏的判别	20
第三章 同位素综合示踪方法探测北江大堤石角段堤坝管涌研究	21
3.1 石角段各层渗透系数分布	21
3.2 莲藕塘啤酒厂一带各层中渗透流速分布	21
3.3 天然流场条件下孔中的垂向流现象	21
3.4 石角段地下水流向分布	27
3.5 石角段莲藕塘啤酒厂一带地层温度分布	30
3.6 石角段莲藕塘啤酒厂一带地层电导率分布	34
第四章 石角段管涌产生的原因及其危害	39
4.1 石角段管涌区堤坝渗漏概况	39
4.2 莲藕塘啤酒厂一带孔中实测资料分析	41
4.3 石角段莲藕塘啤酒厂一带砂砾石层管涌渗流计算	46
4.3.1 管涌区概况	46
4.3.2 推算粘土层被顶破的外江最小水头	46
4.3.3 推求管涌开始时涌水量	47
4.4 集中渗漏管涌地带孔水与江水之间的关系	48
4.5 涨水时江水与孔水位之间的关系	49
第五章 结束语	52
附图集	54~109

前 言

经过将近一年的 4 次现场同位素示踪测试研究工作，我们在 60 多个观测孔中进行了同位素示踪与天然示踪等的探测与分析计算工作，通过建立管涌破坏机理的研究，排除了莲藕塘啤酒厂一带管涌发生在砂层或砂砾石层的可能性。通过多次试验探测出了基岩渗漏通道，初步确定了通道穿过堤坝的位置范围，已基本查清了北江大堤石角段莲藕塘、啤酒厂一带产生管涌的原因。

在我们的项目实施过程中，我们首先感谢广东省水电厅、北江大堤管理局等上级部门对我们的信任和支持；感谢广东省水科所对这项工作的支持、帮助与真诚的的合作，感谢北江大堤石角管理所。

省水利厅茹建辉总工自始至终对我们的研究工作对给予高度的信任、支持和帮助；尤其值得一提的是水利厅张厅长、北江大堤管理局陈局长、吕局长等领导在百忙之中亲自听取汇报，关注我们的每一次试验；管理局的郑总、羽总对这项研究工作更是关心倍至，每次试验前后都对我们的方案进行仔细推敲，对我们作出的每一个结论都要进行认真讨论分析，经常与我们交换意见，严谨的工作作风使我们受益匪浅；

我们与水科所黄春华、刘超常经理的合作非常愉快，他们负责完成的试验孔质量很高，完全满足同位素示踪测量的需要，黄经理对我们的生活也给予了无微不至的关怀；

水科所陆培炎教授、曹洪博士、张挺硕士等对我们的工作也给予了许多帮助和指导，我们之间进行的多次讨论对我们的试验和研究工作帮助很大；

我们还要感谢水电设计院涂总、杨鹏儒、李守才高工等给予我们的帮助指导；还要感谢水利厅工管处、科教处、基建处、水科所等有关领导。感谢石角管理所冯所长、苏所长、林所长、薛书记、梁冠勋等同志给予我们试验工作的帮助和支持；感谢那些上面没有提到的单位和人员对我们这次研究工作的支持！

第一章 同位素综合示踪试验内容目的与要求

北江大堤基础原系内海沉积层，上部有薄层壤土，下层为透水性卵砾石层，深达 30 余米，加上历史上各堤段溃决时剧烈冲刷，堵口后形成背河堤脚淤塘，致使全堤有近 1/3 长度为堤基渗漏严重的线段。

为了确保北江大堤的安全运行，曾对石角、下灵洲一带 5 公里范围的大堤进行了高压喷射灌浆处理。但经过 1994、1997 年的洪水考验后，发现高压喷射灌浆后的堤坝仍存在隐患。

为了查清莲藕塘、啤酒厂一带 1994、1997 年发生管涌原因，排除存在的隐患，我们在广东省水利厅，北江大堤管理局以及广东省水科所的领导与协作配合下对石角段五公里范围进行同位素示踪综合试验普查，（桩号 6+124~9+827），普查内容包括测定石角段五公里范围内的渗透系数分布，各区段的渗透流速、流向、渗漏层位的分布、确定主渗漏层及外江与内江的补给关系等。根据合同书要求对发生管涌的莲藕塘、啤酒厂一带进行详查，（桩号 6+500~8+000），查清产生管涌的原因，确定管涌区的渗流场分布特征、主渗流层带的空间位置分布与相应的含水层介质的关系，测定渗漏带与基岩断层、裂隙、溶洞之间的关系，对曾经发生漏浆、掉钻、冒浆的地层地段进行探测，查出其原因所在。

同位素综合示踪方法探测北江大堤石角段渗流场分布工作为两项内容：即人工同位素示踪探测地下水及含水层参数与天然示踪方法探测地下水的补给关系。

同位素示踪渗流场测定试验在现有的 40 个测压管及增补的 16 个钻孔中进行，天然示踪试验在 40 个测压管及增补的 21 个钻孔中进行，重点对 1997 年产生管涌的莲藕塘、啤酒厂一带（桩号 6+500~8+000）的渗流场进行详细探测。对石角段其余的 4 公里进行了普测；

探测选择在内、外江不同的水位条件下进行。试验共进行了 4 次，比合同上要求的增加了一次同位素示踪试验，目的是为了探测结果的真实可靠。在枯水期进行了两次试验，分别在 1998 年 9~10 月，1998 年 12 月~1999 年 1 月，另外两次选择在 1999 年 4~5 月和 6 月中旬，最高的江水位达到 8 米，试验期间江水位变化幅度超过 1 米以上，基本上满足了试验的要求。

根据合同要求，我们已经基本上完成了第一期的试验的要求。我们已经向厅、局、水科所等主管部门提交了三份报告，并附有大量的图表。现将四次的试验结果进行分析、计算、研究和总结，并提出结论性意见。

在第四次试验中我们针对大家提出的问题对 10[#]、12[#]、7[#]等孔进行了同位素示踪重点测试，在黄春华高工、曹洪博士、张挺硕士、陈小丹硕士的共同参与下对发现集中渗漏通道的 10[#]孔进行了连续 5 天的几十次同位素示踪渗漏测定，已初步查清造成石角段管涌的原因。

第二章 管涌探测中的同位素综合示踪方法及其管涌渗透破坏机理简述

2.1 探测方法简述

管涌的发生是有条件的。在级配良好的土中即使水力梯度很高也不会发生管涌。也就是说管涌只会发生在“管涌型土”的堤坝段。管涌的探测主要就是依据管涌发生时相伴的各种物理场、化学场的变化进行的。我们可以在管涌区探测到的各种场以及水力学参数包括:

- (1) 内江水位与外江水位的变化, 如果地下水水位与江水位几乎同步变化, 而且变幅相当, 水位接近, 那么该堤段将存在管涌的可能;
- (2) 当江水温度与地下水温度的变化同步而且温度值也较为接近的话, 说明江水与地下水的互补性很强;
- (3) 江水中的电导率与各含水层中的电导率同步变化, 而且地下水中的电导率稍小于江水, 表明江水与地下水的互补性很强;
- (4) 管涌发生区的堤坝后排水量与江水位正相关, 当江水位达到一定高度时, 排水开始变浑浊, 在某一时刻流量突然非线性增大, 并伴有粗砂砾涌出;
- (5) 管涌发生在吸水量或涌水量最大的含水层中, 管涌发生层的渗透系数最大;
- (6) 管涌发生在渗透流速最大的含水层;
- (7) 管涌发生的含水层中地下水向管涌点汇集;

2.2 管涌渗漏探测原理

坝基管涌测渗漏方法包括测定观测井与库水位的变化及其水量平衡; 天然示踪与人工示踪测定渗流场及渗流通道; 通过单井中测速、测流向及含水层之间的补给关系确定断裂构造对坝区渗流场造成的影响; 注水条件下测定含水层分布、渗透层及静水头等; 为了进一步查清观测井中不同裂隙水的来源、通道及与库水的关系, 环境同位素如 ^2H 、 ^{18}O 、 ^3H 等的取样分析是十分必要的。实践证明, 若不进行示踪试验要查清复杂的坝基岩体裂隙绕坝渗流通道几乎是不可能的。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来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。

2.2.1 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的岩体渗流场基本原理是将微量的放射性同位素碘 ^{131}I 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、裂隙含水

层分布以及渗透层分布等参数。

①. 同位素单孔稀释法测定渗透流速原理

单孔稀释法测定渗透流速原理：孔中不存在垂向流，示踪同位素在孔中与井水混合均匀，示踪剂随着地下水进行水平方向的流动，放射性示踪剂活度的减少与渗透流速 V_f 有关，通过理论推倒可证明计数率 N 的对数与渗透流速成正比，我们可得出，

$$V_f = \frac{\pi (r_1^2 - r_0^2)}{2 r_1 \cdot \alpha \cdot t} \ln \frac{N_0}{N_1} \quad (2-1)$$

式中， t —井中计数率测量间隔时间； r_1 —观测井内半径； r_0 —探头半径； α —畸变系数，裸井中为 2； N_0 、 N_1 —为 0 时刻和 t 时刻测定到的计数率。

点稀释法测定流速上限为湍流发生的临界速度与井的结构等有关，一般为 50~300m/d；测量流速的下限很低，主要受到因分子扩散而产生浓度降低的影响。一般为 0.01~0.005m/d。

②. 同位素示踪单孔测定水平流向

示踪同位素随地下水运动进入到含水层中，同位素在井四周的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 计数器的流向探头在井中进行放射性强度测定，见图 2-1。用电罗盘测定探头在井中的方位。计算机随时算出结果并打印出方位角、相对流向、实际流向、每个计数管的计数率以及总计数率

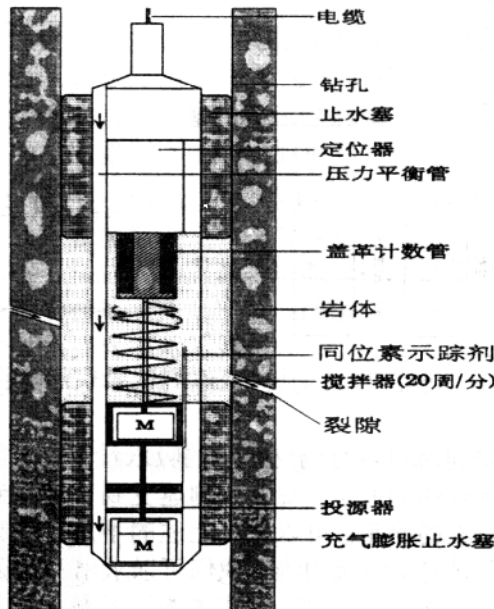


图 2-1 同位素示踪仪示意图

③. 同位素示踪测定垂向流

钻孔揭露多组裂隙（层含水层）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。

将四支串联探头方置在井中被测井段，将同位速投放在 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，我们可得到如图 2-2 所示的变化曲线，找出两条曲线的峰值所对应的时间 t_B 与 t_A ，设两探头之间的距离为 L ，则垂向流速 v 为

$$V_v = \frac{L}{T_A - T_B} \quad (2-2)$$

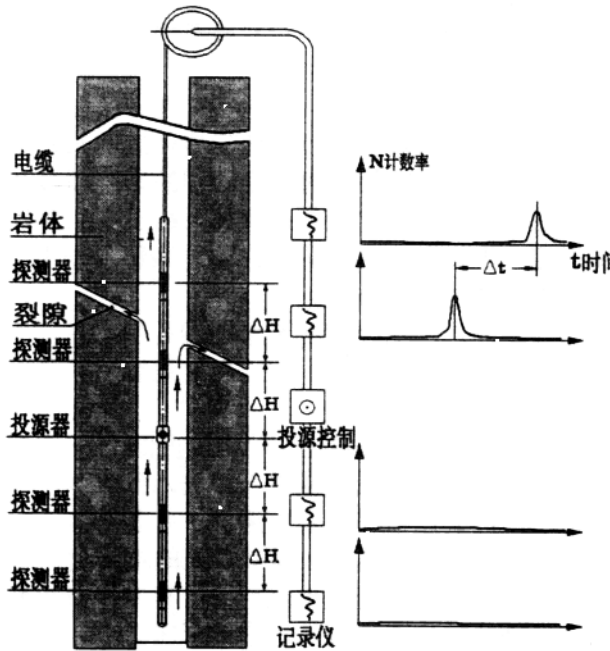


图 2-2 同位素示踪垂向流速测试原理示意图

④. 注水条件下测定垂向流

注水条件下测定垂向流可以查清含水层的吸水量，主要含水层以及强渗透层及渗透部位。在垂向流较强的井段，稀释法测速受到一定限制，测量误差增大。注水条件下通过对垂向流的测定，可以弥补上述的不足。更为重要的是，通过对天然流场与注水条件下测定垂向流的测定我们可以求出补给源的不同的岩体裂隙层的静水头（参考水利学报 97 年 5 期）。注水条件下测定垂向流的方法与③论述

的基本相同。此时垂向流一般向下，同位素投在 A 号探头的上方，测量是逐米进行的。

2.2.2 利用天然示踪剂测定坝基渗漏

①. 地下水温度示踪原理

我们知道水在 4℃ 时密度最大，4~100℃ 之间的水服从热胀冷缩原理，冷水的密度大向下沉，热水的密度小而上升，从而造成在河水、库水、湖水等的表层的温度最高，而低部的温度最低，而地层中温度的变化趋势与水中相反，我们知道地球表面的温度最低，地球的深部为熔融状，温度可达到数千度，随着地层深度的增加，温度也随之增加，一般深度每增加 100 米，温度增加 3 度。

由于上述原因堤坝后地层中地下水温度的变化可以反映河水对两岸地下水的补给情况和程度，由此可以推断出强渗漏区域。在堤坝渗漏较强的堤坝后的观测井中我们可以测定到低温区，温度最低的区域一般是渗透性最强的区域，也是管涌最可能发生的堤段。利用温度异常测定和检查堤坝帷幕的渗透性是目前最为有效的方法之一。

由于温度是可以通过介质传递的，于是我们在较浅的钻孔中，如钻孔深度在 4 米以下排除了地表温度的影响就可以安置温度传感器来进行渗流场监测。北江大堤的浅层的渗透性较强，地表降雨对温度探测的影响超过 8 米，所以在 8 米以下的观测孔中通过温度测定堤坝渗漏是可行的。由于在石角段莲藕塘啤酒厂一带存在着基岩渗漏通道，通过温度场的分布来确定深层基岩渗漏通道是否参与堤坝渗漏及其管涌是非常重要的测量方法。

将温度传感器安置的堤坝后堤脚下 8 米的浅孔中，在江水与地下互补的条件下，可以测定出温度变化的敏感区间，初步判定强渗漏堤段。

②. 地下水电导示踪原理

河水主要来自大气降水，一般来说其矿化度很低，水中的电导率也非常低。地下水的形成是降水通过垂向渗透缓慢进入渗透到含水层中，在长期的运移的过程中地下水与地层中的矿物质作用发生溶解、物理化学反应、蒸发浓缩等作用，水中的矿化度不断提高，从而使地下水具有较高的电导值。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与污染源影响有关。

通过天然流场下测定河水与内江电导率的分布，我们便可以确定整个堤坝不同位置、不同层位水中矿化度含量的变化，从而确定出河水对地下水的补给关系。水中的电导值可以作为另一种非常好的天然示踪剂进行堤坝渗流通道的测定，它不但有助于查清堤坝的渗流情况，而且还可以确定地下水的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。

电导率的测定方法有两种，一种是在通过钻孔揭露的地下水中采用电导率测定探头进行测定，这种方法的精度很高，缺点是要在钻孔内测定；另一种方法是采用电磁方法在地面上进行地层电导率的测定，又分为频率域和时间域两种方

法：频率域测定地层的电导率为一纵向横截面积上的加权积分结果，主要用于地质填图；时间域测定地层的电导率为在纵向截面上的二维分布，用于测定局部区域电导率的变化。两种电磁方法相比较，时间域测定电导率的方法更适合与渗漏管涌的测定。

2.3 枯水期测定管涌区渗透性

枯水期江水低水位时将是利用天然示踪方法测定管涌渗漏的最佳时机。低水位期间地下水补给江水，参见图 2-3。由于江水位存在小的涨落(1 米范围内)，所以在堤坝下的含水层中将存在江水与地下水的渗漏互补，在渗透性小的地带，互补的范围也很小，在强渗漏带，这种渗透互补的范围会很大。管涌发生地带的渗透性一般都是很强的，通过测定互补区域范围，我们就可以定性地知道管涌可能发生的坝段与层位。我们就是通过在距离较远的 8"等孔中探测到温度、电导率的异常，从而怀疑存在较严重的集中渗漏通道的。

① 测定含水层中的温度、电导率

温度：冬季的枯水期江水低水位期间地下水的温度相对江水较高，在北江流域江水温度随气温而变，最低时可达 7°C 以下；江水的温度与深度有关，由于水在 4°C 时密度最大，所以江底部的温度最低，表面温度最高。地下水的温度与地层的温度有关，地层温度场分布一般的规律是深度每增加 100m，温度增加 3 度，排除地表水的干扰因素，在 6~7m 以下一般就符合这个规律。地下水温度的年变化率较小，一般小于 1 度。由于受到江水渗漏补给的影响和附近工厂排出的废水影响，石角段地下水温度变化较大，在 20°C ~ 27°C 之间。由于江水底部的温度与内江地下水的温度相差较大，我们可以通过对地下水中温度场的测定来判断地下水的来源，从而划分出江水穿过堤坝基础入侵到坝后的轮廓线，并通过相对比较划分出渗漏区域。

在石角段温度场测定中发现两个异常现象，即在基岩中和距离堤坝较远区域发现了低温场，参见附图。

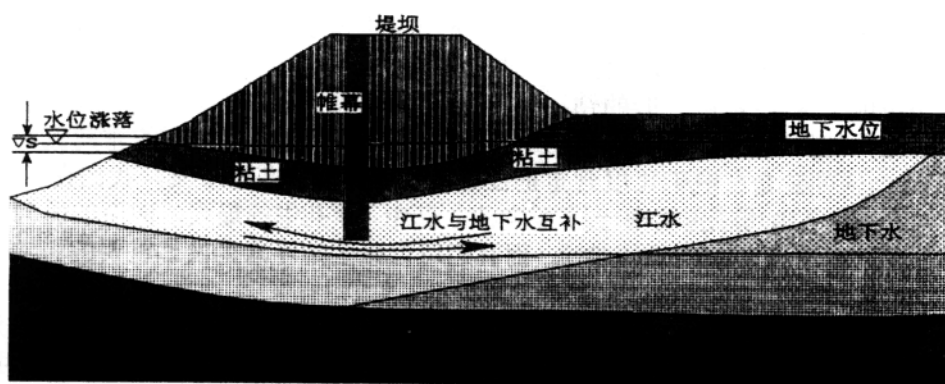


图 2-3 枯水期地下水位高于江水位时堤坝下的渗漏分析

电导率：同理，在冬季由于地下水运动变得缓慢，地下水中的矿化度比夏季时要高得多。一般来说，地下水中的电导率随着深度而增加，如果出现异常，则可能是由于江水入侵渗漏和污染水引起的。江水主要的补给是降雨和少量的泉水、地下水等，江水中的电导率年变化率很小。冬季江水与地下水中电导率的差值较大，一般能相差几倍到十几倍，很容易通过对地下水中电导率的测定来判断堤坝下的渗透互补区域。

我们正是通过在距堤坝较远的 8[#] (320m) 等孔中探测到温度、电导率异常，在 40m 以下的基岩中普遍探测到低温和低电导率，温度和电导率的变化与江水温度、电导率以及江水位有关，我们从而怀疑在基岩中存在渗流量较大、流速较快的集中渗漏通道，参见 4 次试验测定温度、电导率变化曲线图。

由于枯水期很少降雨，对测定温度、电导率及 pH 值是极为有利的。

② 枯水期在可能发生管涌的堤段进行钻孔勘探最安全

如果我们通过前述的天然示踪方法已定性地探测出堤坝下的渗漏区，在枯水期就可以进行钻孔勘测，因为这时不存在任何垮坝溃堤的危险，我们可以有相对长的时间对渗漏区进行较为细致的研究。管涌可能发生的地层一般在级配不连续的砾石层，而且渗透系数、渗透流速等参数的变化很大。

2.4 枯水期探测管涌的试验方法

颗粒分析：通过钻孔中取出的岩心样进行土性分析，首先确定无粘性土的埋深情况，然后对这些无粘性土进行颗粒分析，确定出可能产生管涌的级配不连续的管涌型土质的范围，并根据砾径分布曲线计算出管涌临界水力梯度。

渗透流速：在钻孔中进行同位素示踪方法测定渗透流速随孔深的分布，在渗透流速最大的地层发生管涌的概率最大。莲藕塘、啤酒厂一带砂砾石层的渗透流速分布为越靠近堤坝渗透流速越大，但都小于 1m/d。在基岩中，在无垂向流干扰情况下我们测到的最大渗透流速为 6 m/d (6 月 18 日 9 时在 10[#] 孔中)。

流向：在单孔中采用同位素地下水流速流向仪测定到的流向分布我们可以判定出堤坝下的集中渗漏通道。四次试验我们在 56 个孔中共测定到近万个流向值，我们选取了其中一部分制成图表。砂砾石层中的流向的一致性普遍较好，基岩通道中的流向由于流速太快，效果差一些。

垂向流：在枯水期一般的钻孔中不存在垂向流，但有些渗漏是通过断层导水形成的，当钻孔揭露岩体断层后有可能在孔中形成向下或向上的垂向流。通过对垂向流的测定，我们可以判定是否存在较强的基岩裂隙渗流。我们在 10[#]、7[#]、12[#]、9[#]、bb1[#] 等孔中均测到了垂向流，其中 10[#] 孔中的最强，向下的垂向流达到 288m/d (6 月 20 日 10 时)，对我们研究该区的管涌提供了重要的科学依据，参见附图。

注水试验：同位素示踪注水试验与普通的注水试验有很大区别，它可以分层测定含水层的吸水量，最小的分层间隔可小于 10cm。对于多含水层系统，我们还可以通过注水试验来测定各含水层的静水头以及水力梯度。通过吸水量测

定我们可以求出渗透系数的连续分布，对于渗透系数大于 5m/d 的砾石层，都要引起我们的重视。由于我们通过注水试验测定的最大渗透层位也是洪水期间管涌发生时的涌水层位，所以我们只要将测定到的渗透性极大的那些渗透层进行处理，就可以防止洪水期管涌的发生。莲藕塘、啤酒厂一带砂砾石层的渗透系数一般在 $0.6\sim 11\text{m/d}$ 之间，参见附图。经过理论计算，砂砾石层中的渗漏水不足以维持该区管涌所必须的水量。

水位变化率：观测孔中的水位上升与下降的速度与江水位的涨落速度与滞后时间对于判断管涌也是非常重要的。观测孔水位的变化率越是接近江水位的变化率，表明该堤坝段的基础渗漏越是严重。北江大堤石角段莲藕塘、啤酒厂一带由于存在基岩渗漏通道，江水与地下水之间的补给除了通过堤身渗漏补给外，还通过基岩渗漏通道直接将江水补给到距离堤脚较远的区域，如 8#孔附近，造成该区水位的变化非常快，而且造成涨水期间 B5#孔的水位高于 B4#孔的“异常”情况。

由于江水位很低，枯水期试验可以较长时间进行而不存在任何危险。根据测试结果对渗透性很强级配不连续的堤坝基础进行必要的加固处理，包括：帷幕灌浆、连续墙、铺盖、排水等工程措施。

2.5 管涌渗透破坏机理

2.5.1 堤防管涌产生的必要条件

根据试验资料统计，如透水层各砂层的颗粒级配组成多为不良，某一粒级集中或一些粒组缺失，各层透水层差异较大，此类地基甚易产生管涌，参见图 2-4。

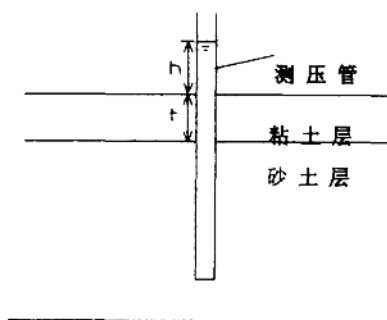


图 2-4 测压管示意图

按地层结构分析，管涌的发生，首先由于顶板的阻水作用，使含水层的水压力过大，冲决顶板而发生的。根据顶板冲决条件，对承压水顶板土层的平衡条件，可以通过土层的重量 γt 和水在土体中受到的摩擦力 P_f 的合力与自下而上作用于该土层的承压水压力 $h+t$ 来测定，即

$$\gamma t + P_f = (h+t) \gamma_w \quad (2-3)$$

式中: γ —土的天然容重(g/cm^3); h —压力水头高度(m)(如图 1 所示); t —土层厚度(m); γ_w —水容重, 取 $\gamma_w = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$; P_f —水在土体中受到的摩擦力;

$P_f = \gamma_w \cdot t \cdot n \cdot J$, n 为孔隙率; J 为水力坡度。

由上式求得顶板被顶穿的承压含水层中必须具有最小承压水头, 或者在一定的压力水头下, 顶板被顶穿处的粘土层的最薄厚度。(如图 2-5 所示)

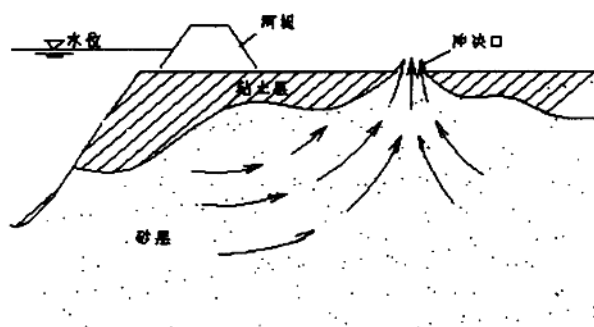


图 2-5 顶板冲决形成管涌示意图

2.5.2 管涌开始时涌水量的确定

当顶板发生冲决而形成冒水孔以后, 上述渗流场的特征立即发生改变, 渗透水流向冒水孔流动, 流线由水平变为垂直, 平面上的渗压势线可近似理解成以冒水孔为中心的同心圆, 水流具有放射状的特征, 与自流井的条件类似, 我们应用裘布依集水井的渗流理论来对渗流进行估算。在均质各向同性介质条件下, 各等势面是以汇点为中心, 半径不同的同心球面, 离汇点半径为 r 的过水断面面积为 ω , 水力坡降为 J , 则流向汇点的流量为

$$Q = k \omega J \quad (2-4)$$

式中: $\omega = 4\pi r^2$; $J = dH/dr$ 。代入得

$$Q = 4\pi r^2 K \frac{dH}{dr} \quad (2-5)$$

式中: T —导水系数 ($T = KM$, M 为含水层厚度); r —离井轴的距离; K —渗透系数。

写成势函数 ($\phi = KH$) 的形式为:

$$Q = 4\pi r^2 \frac{d\phi}{dr} \quad (2-6)$$

分离变量后积分得

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi r} + c \quad (2-7)$$

把砂井底部近似看成半球形进水井底，设半球形井底进水不完整井的流量为 Q ，则它应等于汇点强度的一半，即 $Q' = 2Q$ ，代入上式得

$$\varphi = -\frac{Q}{2\pi r} + c \quad (2-8)$$

考虑到边界条件： $r=R$ 时， $\varphi = \varphi_k = KH_0$ ； $r=r_w$ 时， $\varphi = \varphi_w = Kh_w$ 。代入上式得

$$Q = \frac{2\pi K(H_0 - h_w)}{\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R}} \quad (2-9)$$

注意到 $R \gg 1$ ， $\frac{1}{R} \rightarrow 0$ ，得

$$Q \approx 2\pi K r_w (H_0 - h_w) = 2\pi K r_w S_w \quad (2-10)$$

式中： K —含水层加权平均渗透系数； r_w —假想砂井的半径； S_w —砂井的降深。

当渗透水流冲决顶板发生喷水后，其发展是管涌现象，受出逸流速控制，流速越大，渗流量越大，出砂量越大，这时管涌口的断面也随之扩大。此时涌口的砂呈悬浮状态，在此过程中涌出大量地基砂，最终导致管涌口附近的地面沉降。

2.5.3 管涌发生后各点渗透坡降的确定

在管涌发生之前，由于外江水位造成的静水压力作用在顶板下，当顶板被冲决形成管涌后，静水压力变成动水压力，砂层中的压差很大，地表粘土层冒水孔中的压差变得非常小，参见图 2。假设含水层为承压水层，并且均质等厚，各向同性，其中的渗透水流符合达西定律。我们取一个水平截面如图 2-6 所示。

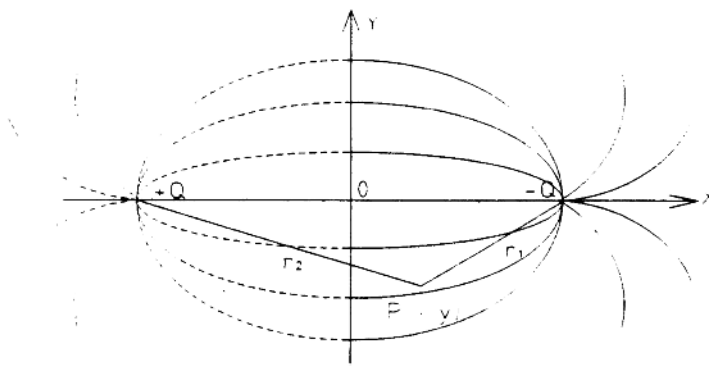


图 2-6 直线补给半无界井流示意图

我们可近似将管涌形成的涌水孔看作自流井，它的流量为 Q ，这是一个定降深变流量的半无界问题。把堤坝当作直线补给边界，此时渗透水流属层流。这一点有别于管渗——土中洞穴管道中的紊流作用。取 y 轴与边界重合， x 轴通过井轴，流线如上图所示。由镜像法假设离边界 a 处有一等强度的注水井（虚井），则任一点 $p(x, y)$ 处降深 $S(x, y)$ 为

$$s(x, y) = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_1} - \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2-11)$$

式中： T —导水系数； R —影响半径。

$$r_1 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x+a)^2 + y^2}$$

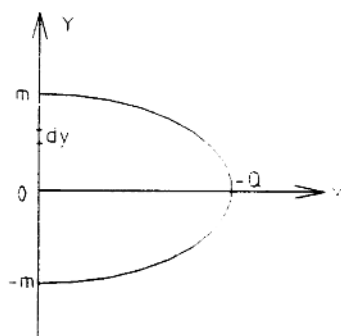


图 2-7 dy 段供水量示意图

考虑到任一点的水头 H 和降深 S 有如下关系

$$H = H_0 - S$$

则 x 方向和 y 方向渗透坡降 J_x 和 J_y 分别为

$$\begin{cases} J_x = -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} \\ J_y = -\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial y} \end{cases} \quad (2-12)$$

将 $s(x, y) = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\sqrt{(x+a)^2 + y^2}}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2}}$ 代入上式求得

$$\begin{cases} J_x = \frac{-aQ}{\pi K_0 M} \frac{x^2 - a^2 - y^2}{[(x-a)^2 + y^2][(x+a)^2 + y^2]} \\ J_y = \frac{-aQ}{\pi K_0 M} \frac{2xy}{[(x-a)^2 + y^2][(x+a)^2 + y^2]} \end{cases} \quad (2-13)$$

则初始时刻任一点的渗透坡降为

$$J(x, y) = \sqrt{J_x^2 + J_y^2} = \frac{aQ}{\pi K_0 M} \frac{\sqrt{(a^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2 y^2}}{[(x-a)^2 + y^2][(x+a)^2 + y^2]} \quad (2-14)$$

任一点的渗透流速为

$$V(x, y) = K_0 J(x, y) = \frac{aQ}{\pi M} \frac{\sqrt{(a^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2 y^2}}{[(x-a)^2 + y^2][(x+a)^2 + y^2]} \quad (2-15)$$

其中 K_0 为初始时刻的渗透系数。

在 Y 轴上任取一对称区间 $(-m, m)$, 考虑其对管涌水量的贡献 (如图 2-7), 取任一小段 dy , 则其中流量 $dQ = V \cdot A = K \cdot J \cdot M \cdot dy = T \cdot J \cdot dy$, 设此区间流量为 $Q(m)$ 。

$$Q(m) = \int_{-m}^m (-T \frac{\partial H}{\partial x})_{x=0} dy = \int \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{a}{a^2 + y^2} dy = \frac{2Q}{\pi} \arctg \frac{m}{a} \quad (2-16)$$

则

$$\frac{Q(m)}{Q} = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{m}{a} \quad (2-17)$$

表 1. M 和 $Q(m)/Q$ 的关系表

M	a	$2a$	$3a$	$4a$	$5a$	$12.7a$
$Q(m)/Q$	0.5	0.7	0.795	0.844	0.87	0.95

由上表可直观地看出涌水量的绝大部分由冒孔附近处的堤坝补给。

2.5.4 管涌临界面的确定

管涌是单个土粒在土体中移动和带出, 根据渗流场中单个土粒受到渗流力、浮力以及自重作用时的极限平衡条件, 考虑土体的不均匀系数、颗粒级配的连续性、孔隙率等因素的影响, 并结合试验资料分析的结果, 用中国科学院的砂砾石土管涌的临界水力坡降

$$J_f = 2.2(G_s - 1)(1 - n)^2 d_s / d_{20} \quad (2-18)$$

由 $J = J_f$ 可判断出临界面方程为

$$x^4 + 2x^2y^2 + y^4 - 2a^2x^2 + 2a^2y^2 + a^4 \\ = (J_f \frac{\pi T}{K_0 a Q})^2 [(x-a)^2 + y^2][(x+a)^2 + y^2]^2 \quad (2-19)$$

当 $x=a$, $y=0$ 时, 即冒水孔处。

当 $x=0$ 时, 方程变为

$$y^4 + 2a^2y^2 + a^4 = (J_f \frac{\pi T}{K_0 a Q})^2 (a^2 + y^2)^4 \quad (2-20)$$

令 $J_f \frac{\pi T}{K_0 a Q} = A$, 则方程的解为

$$y_1 = \sqrt{\frac{1 - Aa^2}{A}} \quad y_2 = -\sqrt{\frac{1 - Aa^2}{A}}$$

故管涌临界面和 y 轴的交点为 $M(0, \sqrt{\frac{1 - Aa^2}{A}})$ 和 $N(0, -\sqrt{\frac{1 - Aa^2}{A}})$ 两点,

任一水平截面上管涌区域为 M 、 N 和冒水孔连成的如图 5 所示的区域。

要使上述推导成立, 必须使得 $\frac{1 - Aa^2}{A} > 0$, 即

$$Q > a\pi MJ_f \quad (2-21)$$

由上式可看出, 随着 a 的增大, 即管涌冒孔处离堤坝距离的增加, 则维持管涌的流量要加大。

2.5.5 渗漏通道的形成

渗漏通道的形成, 是经过渗透水流的冲刷, 使某一局部区域的渗透系数迅速增大, 致使邻近区域的水流向其汇合形成集中渗流。

由达西渗透系数

$$K = \frac{\beta n^2}{\lambda(1-n)} d^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \quad (2-22)$$

式中: β —球体系数 (圆球取 $\beta = \pi/6$); n —孔隙率; λ —决定于邻近颗粒的影响系数; d —颗粒直径; γ_w —水的容重; μ —水的粘滞性。