

基于光纤温度测量的土石坝渗漏监测技术

Aufleger, M

孙东亚¹, Markus Aufleger²

TV68.12

TV68.1

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. Technische Universität München, Obernach, 82432 Germany)

摘要:采用具有高信息密度的分布式光纤温度传感测量系统进行土石坝渗漏监测技术研究. 经过理论研究和室内、现场试验, 已取得了初步研究成果. 实践表明, 该传感系统可以埋置于防渗体的下游排水或反滤层内, 不会因机械施工而损伤, 具有施工干扰小, 抗电磁干扰等特点, 系统测量精度能满足工程应用的要求. 该项测量技术还可用于混凝土坝的温度场测量.

关键词: 渗漏; 温度; 土石坝; 监测; 混凝土坝

中图分类号: TV642

文献标识码: B

光纤温度传感测量系统

文章编号: 1006-7647(2000)04-0029-03

据 1980 年底的不完全统计, 我国大、中、小型水库的破坏共 2976 次, 其破坏率为水库总数 86852 座的 3.4%. 按坝型分析, 土石坝所占比例最大, 约 98.3%. 按破坏类型分析, 漫顶占 51.5%, 渗漏占 29.1%, 其它占 19.4%. 根据国内 241 座大型水库发生过 1000 宗工程事故的分析, 不同破坏类型所占的比例如表 1^[1]所示.

表 1 1000 宗工程事故中不同破坏类型所占比例

破坏类型	渗漏 管涌	塌坑	裂缝	滑坡	护坡 破坏	冲刷、 空蚀	闸门 失灵	其它
所占 比例/%	31.7	2.5	25.3	8.4	6.5	14.7	4.8	6.6

土石坝工程中近 1/3 存在不同程度的渗漏、水下塌陷、边坡失稳等问题, 其中渗漏所占的比例最大. 在过去的 20 年中, 针对土坝内部渗漏发展初期的监测方法, 已进行了很多研究工作. 进行广泛研究的参数之一便是温度^[2]. 当土体存在渗漏通道时, 河道或库水温度便成为天然的示踪剂. 渗漏将引起大坝的温度场出现局部不规则. 如能对该不规则区域的温度偏差量进行现场量测, 对渗漏通道便可以定位并定性判断渗漏速度. 该方法的局限性在于需要知道随季节变化的天气情况, 而且常规的点式监测方法信息量小, 不利于对渗漏区信息的捕捉. 最近发展起来的电热脉冲法分布式光纤温度测量系统可以克服这一局限性而实施坝内渗漏监测^[3]. 如要检查渗漏区有无细粒土的冲蚀, 可以结合核子密度测量技术来检测土体的密度变化. 分布式测量技术较之常规点式监测技术具有极高的信息密度, 减小对渗

漏区的漏检概率, 有利于信息的有效评估.

1 物理背景

无渗流土的温度场分布由单纯的热传导控制. 在土表层 10~15 m 范围内, 温度场受流体(空气、水)的季节性温度变化控制, 越靠近表面区域与流体温度越一致. 由于土具有较低的热传导特性, 流体温度与土体内部的温度差别随深度而增加. 常规的大坝填筑材料热扩散系数为 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 在深度 5 m 位置, 便可以导致持续时间达几个月的温度差异, 另外季节温度变化的幅度随深度明显减小. 在 5 m 位置, 该变化幅度仅达到近表面区域变化的 20% 左右.

土体内热传导强度将因大量水在土体内迁移而发生改变(图 1). 如渗透系数大于 10^{-6} m/s , 土体导热传递将明显被流体运动所引起的平流热传递所超越, 即使很少的液体流动也将导致土体温度与渗漏水温度相适应, 由此引起温度场不规则的程度是土体内渗漏监测的非常灵敏的指标.

2 测量技术

温度场测量为土石坝内渗漏通道的监测提供了一种技术方案. 早在 1955 年, 在德国北部几座土坝上进行过基于温度测量的渗漏监测试验, 但由于当时技术要求和费用太高, 无法推广应用. 80 年代初, 该项监测技术又重新提到议事日程上来. 80 年代中期, 德国学者曾采用热红外成像技术在土坝上进行了大量的试验. 当时的考虑是坝内渗漏引起的温度

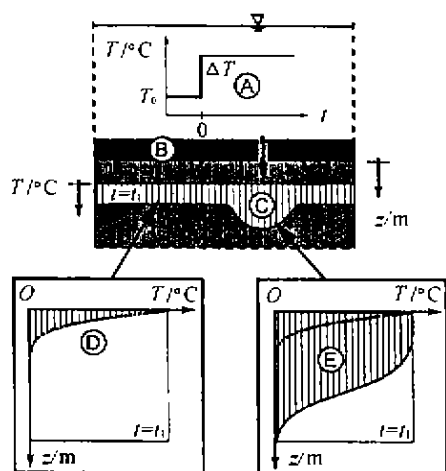


图1 土内热传递

①—水温升高;②—止水系统;③—地温不规则;④—传导热传输;⑤—平流热传输

场不规则性将在坝面有所表现,但试验测量说明表面温度受植被、降雨和蒸发影响太大,无法取得预期成果,仅当渗漏发生在坝面附近和其它例外情况时,该技术才稍微有效.近些年,德国又采用对已安装或专门安装的测压仪进行温度测量实现渗漏监测,但仪器测量效果不甚理想.新近发展的 GTC 温度测量技术测量深度可达 20 ~ 25 m,它是在坝体内打一中空竖管,把几个温度传感器成串装入管中进行温度测量.1990 年至今,欧洲已有 200 km 长的大坝和堤防成功地实施了测量.

上述测量方法的致命缺陷是对土体内温度实施点式测量,因测量点有限,对温度场分布中的不规则区域往往漏检,因此增大了对渗漏通道的漏检概率.最新发展的光纤温度分布测量系统可以很好地解决这一问题.该项技术可以使用常规通信光缆,因此又从实用上解决了光纤易断裂的问题,费用也较低.常规通信光缆内一般有一圈金属保护铠,因此还可以对该金属铠通电加热,在光纤沿程局部形成一个均匀温度场.如某点产生渗漏将打破温度分布的均匀性,形成局部温度降低,从而实现渗漏监测.目前,分布式光纤温度测量系统对温度的分辨率为 0.5 °C,空间定位精度为 0.5 m.基于温度场的测量,许多学者还把研究工作放在土体内冲刷区的确切水力条件的分析上,如现场的水力梯度和渗透系数,这些分析可以用于确定局部流速并用于稳定分析.

光纤温度测量技术于 1981 年由 Southampton 大学首先提出,此后,该方法得到了持续发展,其基本测量原理在于光纤内传输的光在光纤沿程各点存在后向散射,这一后向散射信号特性部分依赖于散射位置光纤的温度.因温度引起的散射光强度变化很少,所以对这一信号的处理技术要求非常高.为实施

光纤沿程各点温度的分布测量,必须确定后向散射各点的位置和与之相对应的温度.实施这些测量所必需的测量装置为:①严格校准和功率强大的光源(激光);②传导和传感光纤;③确定温度分布的处理单元.

激光发射一定的光信号进入位于塑料包裹层中心的光纤,这一信号沿光纤全程存在后向散射.尽管返回的信号强度非常弱,但仍可以对它进行频谱分析,这一频谱可以分成 Rayleigh 和 Raman 两部分,它们具有更低的强度;而且可以再分解成 Stokes 和 Anti-stokes 光,后者的强度最终依赖于散射点的温度.这些思路可以纳入下面的模型.

光脉冲(光子)在光纤芯内传播,这些光子撞击介质光纤的分子(如硅),这些分子的能量状态即受激分子数和能态随环境温度而变化.在光子和分子的撞击中,可能存在如下几种相互作用形式:①能量传递到分子(Raman 散射, Stokes 光);②能级无永久变化(Rayleigh 散射);③光子的附加激励(Raman 散射, Anti-stokes 光).

随着温度即受激分子数变化,返回的 Anti-stokes 光强度发生变化(图 2).利用高度发展的频率分析可以确定非常短的时间内(接近于 10 ns)的温度值 T .

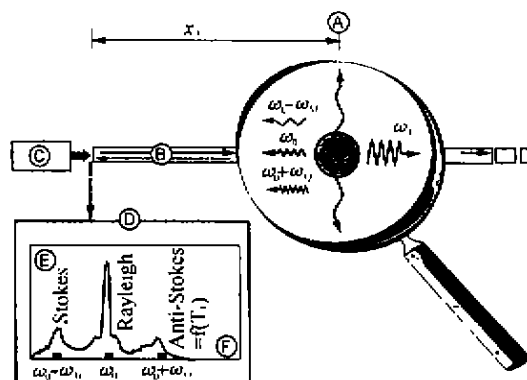


图2 Raman 散射效应

①—散射点;②—光纤芯;③—激光;④—后向散射光的频谱;⑤—强度;⑥—频率

利用散射的延迟时间 Δt_i 和光纤内的光速 C_k , 可以计算不同散射点的位置 x_i , 因而可以得到光纤沿程几乎连续的温度分布, x_i 可按式(1)计算.

$$x_i = C_k (\Delta t_i / 2) \quad (1)$$

式中: x_i 为后向散射点的距离, m; C_k 为纤芯内光速, m/s; Δt_i 为后向散射的时间延迟, s.

3 渗漏监测

土石坝内部冲刷是渗漏的直接结果并严重威胁其安全.对渗漏点可靠定位是土石坝工程中最困难的课题之一.如前所述,渗漏水能导致土体温度场的

不规则,因此通过测量土体内温度分布可以对渗漏点予以定位.由于光纤传感系统具有极高信息密度,因此特别适合于这一测量工作的实现.测量系统的理想埋入位置是在防渗体的下游,因为在这一位置温度不规则变化幅度可能最大,其布置如图3所示.

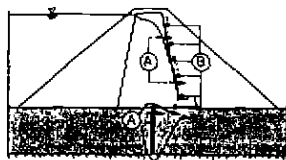


图3 测量系统的布置

①—渗漏;②—光缆

测量有两种方法,即梯度法和电热脉冲法.梯度法即利用光纤系统直接测量土体内实际温度,不对光缆进行加热,其前提是河道或库水温与量测位置土体温度有一定差别.要保证这一点,光纤埋设位置要距离集水区一定距离,并尽量避开气候的影响.为克服可能的各种不利影响,可以采用电热脉冲法,通过对光缆保护层的金属铠或特制光缆中的电导体通电,可以对光缆加热.其周围环境温度的增加与环境的热能和导热系数直接相关,如有渗漏发生,较低的传导热传输可被效率更高的平流热传输所超越,因此加热过程中可以看到渗漏区的明显温度分布异常.

1996年以来,慕尼黑科技大学为上述的渗漏监测系统的应用做了一些基础试验,图4是人工试验水池断面示意图.水池长30m,在池底塑料防水膜下面设置了8环约300m长的光缆,为了有效地确定光缆铺设参数,光缆被埋置于不同充填材料的沟槽内.其中关键参数之一是光缆与池水之间的距离.在塑料防水膜的不同位置设置了一些带有控制装置的渗漏通道,并量测渗漏量($0.2 \sim 0.4 \text{ L/s}$).同时在一些位置也布置了常规温度传感器.

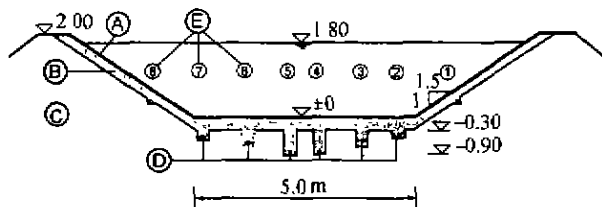


图4 试验水池断面

①—PVC膜;②—卵石;③—砂砾石;

④—光缆;⑤—光缆环号

本次试验实施了梯度法和电热脉冲法两种测量,均取得了满意的成果.对光缆金属导线的电能输入为 $3.8 \sim 8.0 \text{ W/m}$,时间持续3h.梯度法和电热脉冲法试验结果如图5所示.加热3h后的温度分布与

加热前的比较显示,渗漏区的温升明显低于无渗漏区,金属铠的热能被渗漏水体的平流热传输所转移.

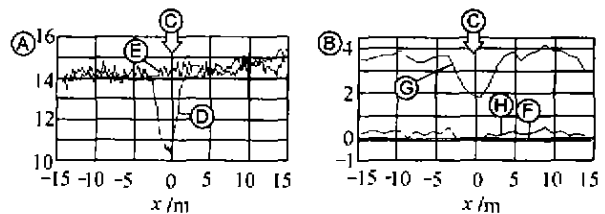


图5 梯度法和电热脉冲法试验结果

①—梯度法;②—电热脉冲法;③—渗漏位置;④—渗漏开;⑤—渗漏关;⑥—加热开始前;⑦—3h加热;⑧—加热停止30min后

除进行人工水池的试验外,研究人员还在一段被维修的 Mitterer Isarkanal 运河底板表面防水层下面铺设了光纤温度测量系统,采用梯度法定期测量光纤沿程温度分布,取得了成功,并解决了有关技术疑难问题.

4 结 语

土石坝内的温度场分布测量可以成为工程运行状态评估的有效手段,特别是对渗漏通道的监测具有重要意义.分布式光纤温度测量系统可以精确实施光纤沿程各点的温度测量,而且光缆适宜在新建和已建工程中铺设,成本也较低.该项技术的初步试验和应用的成功为进一步工程应用打下了坚实的基础.

除进行土石坝的渗漏监测以外,该测量系统也可以用于其它水利水电工程,如水渠、堤防渗漏通道监测.把光缆埋设在混凝土面板底部,可对因混凝土裂缝、接缝止水破坏所引起的渗漏进行监测.在常规混凝土坝、碾压混凝土坝的温度场监测方面,其应用优势也非常明显.其测量精度可以满足工程应用要求,其分布测量的特点可以获得多点信息,且光缆数量较常规仪器埋设所需电缆数量要少得多,减小了施工干扰.

参考文献:

- [1] 张启岳主编.土石坝加固技术[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] Dornstdter J. Detection of internal erosion in embankment dams [A]. Proceedings of ICOLD, Florence, Q73-R7 Paris: International Commission on Large Dams [C]. 1997.
- [3] Aufleger M, et al. Fiber optic temperature measurements for dam monitoring [A]. Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Civil Infrastructure System [C]. 1999.

(收稿日期:2000-02-20 编辑:张志琴)