

岩土工程国家重点学科专著系列

# 堤坝渗漏探测示踪新理论与 技术研究

陈建生 董海洲 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统论述了利用天然示踪和人工示踪调查堤坝渗流的理论和方法,探讨了堤坝集中渗漏通道的形成机理。全书共分九章,包括总论、堤坝建设各阶段渗漏研究、渗流研究常规方法、温度示踪方法、环境同位素示踪及水化学方法、人工示踪方法、示踪方法测定裂隙岩体渗透性、堤坝管涌和接触冲刷破坏机理、水库内部的渗漏试验。本书重视理论与工程实践的结合,通过大量工程实例检验理论的可靠性。

本书可供水文地质、工程地质、水利水电工程、地下水勘察等专业技术人员参考,以及大专院校有关专业师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究/陈建生,董海洲著. —北京:科学出版社,2007

(岩土工程国家重点学科专著系列)

ISBN 978-7-03-018869-4

I. 堤… II. ①陈…②董… III. 大坝-渗流控制-研究 IV. TV64

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第055262号

责任编辑:童安齐 任加林/责任校对:赵燕

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年4月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—2 000 字数:300 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

## 前 言

我国现有的很多大坝与河堤都不同程度地存在各种病险隐患,而渗漏是隐患发生的主要原因,不仅使堤坝运行存在安全隐患,而且还浪费了宝贵的水资源,因此探测堤坝的渗漏通道与渗流场成为一项非常重要的工作。目前判断堤坝渗漏的方法主要是通过堤坝后的扬压力观测,也有采用地球物理勘探方法的,这些间接的测量方法在很多情况下具有多解性。很多堤坝渗漏加固工程表明,不采用示踪方法是很难将堤坝的渗漏通道查清楚的。

作者多年从事堤坝渗漏调查,曾经尝试过使用多种技术探测堤坝渗漏,成功的经验表明人工与天然示踪的方法在探测堤坝渗漏方面有独特的效果。作者曾经在国际著名堤坝渗漏探测专家 Plata Bademar 和 Drost 教授的实验室做过访问学者,两位大师对于堤坝渗漏探测的理念使我们受益匪浅。在这些前辈的启迪下,我们将堤坝渗流探测的理论进行了一些深化,将利用温度场测定渗漏的方法发展成为热源法,从而定量或半定量地研究堤坝渗漏,并反演出渗流参数;将天然示踪与人工示踪方法结合,对堤坝集中渗漏的形成机理进行了探讨。

利用钻孔中地下水温度进行渗漏分析在探测堤坝渗漏方面具有独到的优点,可以探测出钻孔没有揭露的强渗漏区域。钻孔中进行的所有水力学方面的试验都与周围的介质的渗透性关系密切,如果钻孔没有直接揭露基岩中的强渗漏的断层或溶洞,孔中进行试验就不能够真实地反映出实际问题,而热源法恰好可以补充这方面的不足,不但可以通过温度场异常来判定钻孔周围是否存在渗漏,而且可以定量计算渗漏量等参数。

在钻孔中投放示踪剂测定地下水渗透流速的方法简单易行,具有很好的使用前景,但是该方法对使用条件的限定使这种优势性很强的方法很难推广到广泛的领域中。德国发展起来的采用两个止水塞的测量技术在一定程度上减少了垂向流的影响,但由于仪器制造复杂,使用不方

便,而且也不可能完全阻隔垂向流,所以在实际应用中仍受到极大限制。针对传统点稀释方法由于孔中垂向流的存在以及其他稀释因素的影响,使其应用受到限制的现状,作者建立了不用止水与搅拌的广义稀释模型,对各种情况下模型的应用进行了探讨,从而发展和完善了人工示踪理论及探测技术。采用同位素、食盐等作为示踪剂,采用稀释方法测定地下水参数的方法受到国内外专业人士的高度重视。广义稀释模型可以放宽点稀释方法的限制条件,可以定量地同时测定出地下水的渗透流速和垂向流速,扩大了稀释方法的应用范围。

作者研究了堤坝集中渗漏形成的机理,首创性地运用地下水动力学中的井流理论,分完整井和非完整井两种情况分析管涌这个水与土体相互作用的复杂的力学过程,计算出随着管涌带出的土粒在地层中的分布范围,估计管涌口的冒水量,刻画了管涌的发展过程,定性地论述管涌发生后在多孔介质的透水层中将会产生集中渗漏通道(或渗漏带),理性地分析产生集中渗漏通道的原因,揭示了集中渗漏通道的形成过程,为堤坝渗透破坏的预防和堤防加固提供了理论依据。

全书以实用为目的,对渗流中的一些基本理论进行了探讨;书中的理论与工程实例主要以作者的研究成果为主,同时也借鉴了国内外同行的一些研究成果。全书共九章。第一章主要对天然示踪和人工示踪方法的研究历史进行了总结和回顾,并总结了在堤坝渗流破坏机理方面前人的研究成果。第二章提出了一些指导方针,以便对某一个特定的调查选出最适合的方案,探讨了各个阶段应该进行渗流研究的指导方针以及合适的研究方法。第三章对调查堤坝、水库和湖泊渗漏常用的几种方法进行了总结,论述了在钻孔中测定渗透系数的试验方法和地球物理学探测技术。第四章分析了温度在库水和地层中分布规律的不同之处,以及钻孔的温度分布,提出利用热源法定性地研究堤坝渗漏,并且建立了堤坝管涌渗漏持续线热源模型、虚拟热源法模型和圆柱状模型等,可以定量计算堤坝渗漏。第五章着重论述利用环境同位素氘、氧-18、氦、电导以及水化学等研究堤坝渗流的基本原理和相关探测技术。用多种方法系统地调查堤坝渗漏可得到准确的结论。第六章和第七章主要对人工示踪方法在多含水层和裂隙岩体系统中探测地下水渗流进行论述。第八章论述了管涌和接触冲刷两种破坏形式下形成集中渗漏通道的机理,并建立了相关的数学物理模型。第九章主要论述利用漂浮指示物以及库水

跟踪法在水库内部查找渗漏范围,特别是在水库内部利用库水温度场分布的异常现象,即温度追踪法,可以简单有效地得到库水的渗漏区域。

在本书编写过程中,河海大学岩土工程研究所白兰兰硕士和陆艳梅硕士做了大量的修订工作,刘建刚教授、陈亮博士、樊哲超博士、王新建博士、李兴文博士、焦月红硕士、杨松堂硕士、余波硕士及其他研究生参加了相关的科研项目,吴勇硕士、朱前林硕士、赵正信硕士等帮助进行编排校对,在此一并表示衷心感谢!

书中的错误或不当之处,请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 总论                 | 1  |
| 1.1 背景和意义              | 1  |
| 1.1.1 水库渗漏与大坝安全        | 1  |
| 1.1.2 渗漏与渗流的调查         | 2  |
| 1.1.3 研究大坝渗漏的本质和目标     | 3  |
| 1.2 天然示踪方法研究现状         | 4  |
| 1.2.1 环境同位素示踪方法        | 6  |
| 1.2.2 温度示踪方法研究堤坝渗漏     | 7  |
| 1.3 人工示踪方法研究进展         | 9  |
| 1.4 堤坝渗漏破坏机理研究         | 9  |
| 主要参考文献                 | 11 |
| 第二章 堤坝建设各阶段渗漏研究        | 14 |
| 2.1 引言                 | 14 |
| 2.2 可行性阶段的研究           | 14 |
| 2.2.1 基本常识             | 14 |
| 2.2.2 一般建议             | 15 |
| 2.2.3 渗漏风险             | 16 |
| 2.2.4 一些常见技术和方法        | 16 |
| 2.3 在水库的最初蓄水阶段的研究      | 18 |
| 2.3.1 概述               | 18 |
| 2.3.2 水量平衡             | 18 |
| 2.3.3 测压管水位的进一步研究      | 19 |
| 2.3.4 孔中流速的进一步研究       | 19 |
| 2.3.5 对流量的进一步研究        | 20 |
| 2.3.6 通过岩层的破碎和溶洞研究水的渗漏 | 20 |
| 2.3.7 坝下渗流             | 22 |
| 2.4 渗漏出现后的调查研究         | 22 |
| 2.5 水库与当地含水层的关系        | 24 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 主要参考文献 .....               | 25        |
| <b>第三章 渗流研究常规方法</b> .....  | <b>26</b> |
| 3.1 引言 .....               | 26        |
| 3.2 水量平衡原理与水压力 .....       | 27        |
| 3.2.1 水库的水量平衡 .....        | 27        |
| 3.2.2 库水位的影响 .....         | 28        |
| 3.2.3 水位压力研究 .....         | 31        |
| 3.3 钻孔中测定渗透系数 .....        | 32        |
| 3.3.1 注水试验 .....           | 33        |
| 3.3.2 吕容试验 .....           | 35        |
| 3.3.3 分段压水试验 .....         | 36        |
| 3.3.4 抽水试验 .....           | 37        |
| 3.3.5 测量有效孔隙度试验 .....      | 39        |
| 3.4 地球物理学方法 .....          | 40        |
| 3.4.1 概述 .....             | 40        |
| 3.4.2 地表面探测技术 .....        | 41        |
| 3.4.3 地球物理测井技术 .....       | 43        |
| 主要参考文献 .....               | 48        |
| <b>第四章 温度示踪方法</b> .....    | <b>51</b> |
| 4.1 库水温度分布 .....           | 51        |
| 4.2 温度信息解析 .....           | 54        |
| 4.3 堤坝管涌渗漏持续线热源模型 .....    | 56        |
| 4.3.1 模型的建立 .....          | 57        |
| 4.3.2 热源强度的确定 .....        | 57        |
| 4.3.3 现场实例 .....           | 58        |
| 4.4 堤坝渗漏流速虚拟热源法模型 .....    | 61        |
| 4.4.1 模型的建立 .....          | 61        |
| 4.4.2 计算方法 .....           | 63        |
| 4.4.3 工程实例 .....           | 64        |
| 4.5 根据能量守恒原理计算堤坝渗漏量 .....  | 67        |
| 4.5.1 模型的建立 .....          | 67        |
| 4.5.2 根据温度分布曲线推测渗漏范围 ..... | 68        |
| 4.5.3 陡河水库左坝肩渗漏应用实例 .....  | 69        |
| 4.6 温度探测土坝圆柱状集中渗漏模型 .....  | 72        |
| 4.6.1 渗漏+体热传导模型 .....      | 72        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 4.6.2      | 模型求解                      | 73         |
| 4.6.3      | 工程应用修正                    | 75         |
| 4.6.4      | 工程实例                      | 77         |
|            | 主要参考文献                    | 80         |
| <b>第五章</b> | <b>环境同位素示踪及水化学方法</b>      | <b>81</b>  |
| 5.1        | 环境同位素示踪                   | 81         |
| 5.1.1      | 环境同位素的表示方法                | 81         |
| 5.1.2      | 环境同位素的取样要求                | 83         |
| 5.1.3      | 稳定同位素                     | 83         |
| 5.1.4      | 放射性同位素                    | 95         |
| 5.2        | 水化学分析                     | 99         |
| 5.2.1      | 概述                        | 99         |
| 5.2.2      | 水的主要化学成分                  | 100        |
| 5.2.3      | 化学分析的评价                   | 101        |
| 5.2.4      | 离子的常见浓度与来源                | 101        |
| 5.2.5      | 矿物的溶解                     | 101        |
| 5.2.6      | 应用                        | 103        |
| 5.3        | 电导                        | 104        |
| 5.3.1      | 基本理论                      | 104        |
| 5.3.2      | 应用                        | 105        |
| 5.4        | 水库、堤防的应用实例                | 106        |
| 5.4.1      | 应用环境同位素和水化学推测北江大堤深层集中渗漏通道 | 106        |
| 5.4.2      | 应用水化学和环境同位素分析江都运河的渗漏状况    | 109        |
| 5.4.3      | 天然示踪方法探测小浪底绕坝渗漏通道         | 112        |
|            | 主要参考文献                    | 117        |
| <b>第六章</b> | <b>人工示踪方法</b>             | <b>119</b> |
| 6.1        | 引言                        | 119        |
| 6.2        | 示踪剂的选择                    | 119        |
| 6.3        | 测定水平地下水流速的点稀释技术           | 121        |
| 6.3.1      | 测量原理                      | 121        |
| 6.3.2      | 流场畸变校正系数                  | 122        |
| 6.3.3      | 实验方法                      | 127        |
| 6.3.4      | 点稀释法的限制                   | 128        |
| 6.4        | 广义稀释模型                    | 129        |
| 6.4.1      | 广义稀释物理模型                  | 129        |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 6.4.2      | 稀释法测定渗透流速适用条件 .....         | 133        |
| 6.4.3      | 稀释法测速方法的探讨 .....            | 136        |
| 6.4.4      | 误差分析 .....                  | 139        |
| 6.4.5      | 北江大堤示踪探测实例分析 .....          | 140        |
| 6.4.6      | 广义稀释定理再推导 .....             | 143        |
| 6.5        | 全孔标注水柱法 .....               | 145        |
| 6.5.1      | 实验方法 .....                  | 145        |
| 6.5.2      | 实验孔要求 .....                 | 146        |
| 6.5.3      | 示踪剂注入技术 .....               | 147        |
| 6.5.4      | 成果解释 .....                  | 148        |
| 6.6        | 垂向流测量 .....                 | 150        |
| 6.6.1      | 概述 .....                    | 150        |
| 6.6.2      | 使用示踪剂测量技术 .....             | 150        |
| 6.6.3      | 使用标准仪器测量 .....              | 154        |
| 6.7        | 地下水流向的确定 .....              | 155        |
| 6.7.1      | 流向测量的原理 .....               | 155        |
| 6.7.2      | 测定地下水流向的装置 .....            | 155        |
| 6.7.3      | 流向测量中的异常现象 .....            | 158        |
| 6.8        | 渗透系数的确定 .....               | 163        |
| 6.9        | 工程实例 .....                  | 167        |
|            | 主要参考文献 .....                | 169        |
| <b>第七章</b> | <b>示踪方法测定裂隙岩体渗透性 .....</b>  | <b>172</b> |
| 7.1        | 单孔示踪测定裂隙岩体渗透性 .....         | 172        |
| 7.1.1      | 概述 .....                    | 172        |
| 7.1.2      | 单孔同位素示踪法探测裂隙岩体渗流场基本原理 ..... | 172        |
| 7.1.3      | 多裂隙含水层稳定流混合井流理论 .....       | 177        |
| 7.1.4      | 现场试验 .....                  | 181        |
| 7.2        | 裂隙岩体渗流场双井模型 .....           | 187        |
| 7.2.1      | 双井模型 .....                  | 187        |
| 7.2.2      | 钻孔与裂隙平行(斜交)条件下的双井模型 .....   | 190        |
| 7.2.3      | 现场试验 .....                  | 193        |
| 7.3        | 双孔二维裂隙网络渗流计算 .....          | 194        |
| 7.3.1      | 交叉裂隙(含水层)系统混合井流理论 .....     | 195        |
| 7.3.2      | 复杂裂隙网络系统计算 .....            | 200        |
| 7.3.3      | 水头损失与误差分析 .....             | 201        |

---

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 7.3.4 试验算例 .....               | 203        |
| 主要参考文献 .....                   | 205        |
| <b>第八章 堤坝管涌和接触冲刷破坏机理</b> ..... | <b>206</b> |
| 8.1 无黏性土的渗透破坏 .....            | 206        |
| 8.1.1 无黏性土的渗透系数的确定 .....       | 206        |
| 8.1.2 无黏性土颗粒组成的类型与分类 .....     | 207        |
| 8.1.3 无黏性土的渗透破坏形式 .....        | 208        |
| 8.1.4 渗透变形的判别 .....            | 209        |
| 8.1.5 管涌临界坡降及临界速度 .....        | 210        |
| 8.2 管涌渗透破坏形成集中渗漏通道的模型 .....    | 212        |
| 8.2.1 模型的建立 .....              | 212        |
| 8.2.2 管涌发生后的水力坡降和渗透系数 .....    | 217        |
| 8.2.3 算例分析 .....               | 220        |
| 8.2.4 工程实例分析 .....             | 224        |
| 8.3 接触冲刷渗透破坏形成集中渗漏通道的模型 .....  | 224        |
| 8.3.1 模型的建立 .....              | 224        |
| 8.3.2 算例分析 .....               | 228        |
| 8.3.3 工程实例分析 .....             | 233        |
| 主要参考文献 .....                   | 234        |
| <b>第九章 水库内部的渗漏试验</b> .....     | <b>235</b> |
| 9.1 引言 .....                   | 235        |
| 9.2 利用漂浮指示物 .....              | 235        |
| 9.3 库水跟踪法 .....                | 236        |
| 主要参考文献 .....                   | 239        |

# 第一章 总 论

## 1.1 背景和意义

我国现有  $26.5 \times 10^4 \text{km}$  的防洪大堤,近 9 万座水库大坝,还有许多尾矿库坝和废水库坝。其中 30% 的土石坝和大堤不同程度地存在各种病险隐患。尤其是在汛期,由于洪水的作用,一些平时极难察觉的细小隐患很有可能发展成重大险情从而造成严重后果,而这些隐患或多或少与渗流或渗漏有关。据不完全统计,由于土坝发生渗漏而造成的溃坝事故约占全部垮坝事故的 30% 以上,所以渗漏不仅使水漏失,甚至使水库漏空,还严重危害坝的稳定性,给人民生命财产带来巨大的损失。

水患自古以来就是中华民族的“切肤之患”,1998 年我国长江流域及松花江流域遭受了百年不遇的特大洪水,造成直接经济损失 1666 亿元。治水直接关系到国家繁荣、社会安定和我国社会主义现代化建设的进程。治理水患、防洪减灾在国民经济建设中占有举足轻重的地位,是我国各级政府和全国人民关心的头等大事之一。

### 1.1.1 水库渗漏与大坝安全

尽管在建坝前和建设过程中都对大坝修建后可能产生的渗漏进行过水文地质方面的研究,但也很难精确地测定出位于水位之上岩体断裂带的渗透性。根据物探和水文地质调查,可以预测出坝体或邻近坝体的地质岩层蓄水后水压力的分布,但是与实际发生的渗漏情况差距往往很大,因为建坝前所做的渗流与渗漏量计算都是将复杂的裂隙岩体等效成各向同性或异性的均质裂隙,所以通常的计算结果反映的只是均化结果,不能反映出渗漏的实际情况。通常只要渗漏或渗流的状况不危及大坝安全,渗流计算结果都是可以接受的,但采用渗流计算结果评价大坝的安全却是相当困难的。

如果堤坝的渗漏难以控制,则它的潜在危害就会影响堤坝及其辅助性建筑的安全。由于堤坝渗漏和渗流的复杂性,研究渗漏和渗流还涉及堤坝安全问题,所以从大坝建设选址研究开始,一直持续到结构设计期间以及运行阶段,都需要对大坝的渗漏情况进行不断的检测。

对于很多大型坝,由于事先缺乏坝址附近完整的水文地质资料,对渗漏和渗流可能引起的危害就成了评价大坝安全的主要因素。就土石坝来说,引起大坝失事的

原因主要有以下几个方面：

- 1) 由于库容不够引起的覆顶破坏。
- 2) 上游面和下游面的坡面失稳滑动。
- 3) 坝基扬压力的增加。
- 4) 坝脚处的管涌。
- 5) 坝基或坝肩产生的接触冲刷。
- 6) 通过坝体或沿着周围地质构造面形成的渗漏。

尽管大坝运行初期投入大量的人力与物力,采取各种修补措施减少大坝失事概率,这些修补方案大多从工程角度出发,但由于缺乏详细的水文地质资料,其结果并不尽如人意。国内外有许多这样的例子,建设初期投入大量资金修建的防护工程,如灌浆、排水、防渗墙等都没有收到很好的效果。

很多工程实例表明:因事先缺乏合适的水文地质调查,建设时又没有正确的监测方案,仅凭有限的水文地质资料,导致采取补救措施时只注意到短期效应。如今随着现代水文地质勘察水平的发展,我们已经可以通过很多新技术的对水文地质进行勘查、监测,得出更符合实际情况的结论,本书将详细介绍一些工程、监测中用到的新方法和新技术,为读者今后的调查工作带来方便。

### 1.1.2 渗漏与渗流的调查

渗漏的通常解释为水流集中从建筑物的结构缺陷中流失的现象。例如,汛期高水位时,水流通过坝体与地基之间的接触面或岩溶通道,在下游形成泉眼。渗流可描述为水在松散介质的孔隙或岩石裂隙中的流动。

若水力学参数和土颗粒的几何粒径已知,则可以确定出介质的渗透系数,通过模拟地下水的流动可计算出水库在不同水位下水的损失量,损失的水可以直接进入坝下游的含水层,也可能在坝下游地表大范围地溢出。

水库蓄水后,堤坝渗流是不可避免的,若此时的渗流是在设计控制之下,则堤坝任何部位的土体都不会产生渗透破坏,我们称之为正常渗流。就土坝来说,正常渗流不仅不会产生危害,有时还会产生积极的效果,它可以促进土体孔隙水应力消散,同时通过调查堤坝附近地层的渗透性,可计算出其渗流量。反之,能引起土体渗透破坏的渗流则为异常渗流。严重的渗漏将在坝体或坝基形成管涌、流土等,使坝崩垮,从而造成灾难性的事故。在具有一定的渗透坡降的渗流作用下,土体中的细颗粒在孔隙中发生移动,并被带出土体以外的现象,称为管涌。发生管涌的原因有以下几点:

- 1) 具有一个完整的渗漏通道。
- 2) 出口处没有保护,颗粒容易被带出地表面。
- 3) 坝体或坝基材料级配不良,管涌能够进一步发展。

4) 渗漏通道周围材料不同而引起接触冲刷,致使较多的颗粒被带至逸出点。

显然,管涌为最典型的渗透变形,且造成的危害也最大。大多情况下,土石坝灾难性事故都与管涌有关,尽管实施了例行的监测及安全评价,但由于管涌存在一定隐蔽性,工程人员长时间内难以及时察觉,管涌一旦形成就会造成严重后果。所以,及时发现管涌并采取相应的修补措施,如在建筑物内进行灌浆处理等,可大大减少事故发生,避免造成严重损失。土石坝渗漏主要由填筑坝体材料的密实度不够所引起,混凝土坝的渗漏起源于混凝土接缝和质量较差处,这主要是因为:

- 1) 水泥、沙、石子的级配不良。
- 2) 混凝土振捣不够。

3) 水泥浆被水流冲刷掉,这种情况在铺筑混凝土时经常发生。并且,混凝土坝失事还会由于坝体的上抬或风蚀,扬压力过大,导致坝体坡面失稳。

因此,对水库进行渗漏计算之前,必须对坝基、坝体进行必要的钻探勘察,其中主要是了解坝址水文地质条件,进行地质勘探和试验。从水文地质调查数据中可获得地层中地下水的运动情况。在水库较高的水压力作用下,大坝附近岩层的水力参数在短距离内可能发生很大的变化,因此调查渗漏时需使用一些特殊方法,如天然或人工示踪法,可准确获得小范围内的地下水流动主要模式。

地下水运动对渗漏有决定性作用,对其进行详细调查是一项极其困难的任务,使用多种新技术、新方法对地下水进行长期监测,可获得更为详尽的水文地质资料。

### 1.1.3 研究大坝渗漏的本质和目标

理想的情况是在水库修建前和修建过程中将与渗漏有关的潜在问题都进行相应处理,通常堤坝建设阶段为减少岩层的渗漏所花费的代价是很少的,但在建坝的初期完成所有的防渗工程几乎不可能,因为在建坝初期,地质岩层由于位置较高,通常是不饱和的,我们很难预测蓄水后地下水的运动状态,这些情况在裂隙发育的复合岩体中尤为突出。

在建设前和建设中的渗流研究的主要目的如下:

1) 在坝址附近预测蓄水后在地质构造和结构面或岩层中可能产生的渗漏通道,尤其重要的是,如果坝址选在老河床的位置,则很可能形成由水库到坝下游的渗漏通道,详细的探测技术和方法将在后面进行介绍。

2) 在坝址或在下游查找溢出泉眼可能出现的位置。对泉眼最初冒水点的调查是极其重要的,即使出渗点流速很小,但由于可能存在来自河水的入渗,水库蓄水后,泉眼中的水流速度会明显增大,周围地区将会被库水淹没,这在石灰熔岩地区是常见的,河堤侧出现的泉水通常由上游河水补给。

3) 对与水库有关冒水点的详细调查范围依赖于当地的地质状况,调查范围可以延伸到下游 10~ 20km。对溢出泉水进行的化学和同位素分析,水同位素及化学分析结果可以作为这些地区的本底值,蓄水后通过跟踪调查水的流速和同位素构成以及化学成分就可以获得由库水补给地下水量及其与时间的函数关系,如果工程初期进行本底检测有困难,不能完成包括同位素在内的分析工作,我们可以将出露点的水样收集起来并保存在密封容器中,供以后对比分析用。将水库渗漏水的测试结果与堤坝修建前水化学和同位素成分进行对比分析将会更好地研究堤坝渗漏问题。

显然,水库蓄水后渗漏研究的主要目的是确定渗流是否形成了集中渗漏通道并观察承压水头的变化。

渗漏常发生在以下几个地区:

1) 通过位于坝址岩层的构造面,例如断层、结构上的缺陷、裂隙等,这些常与渗漏有很大的联系,有时渗漏也会通过透水性较强地层发生,如沙质松散地层,包括洪积层和冲积层。

2) 通过坝基的岩层常常是由冲积材料沉积而成,在开挖时清基不彻底,或者基础的防渗处理存在薄弱环节。

3) 渗漏水主要来自坝体混凝土和地层的接触面,大量的渗漏水会通过地层和坝体的接触面流失掉。

4) 就土坝而言,坝体的渗漏是由填筑坝体的黏土材料质量较差,或这些材料的压实度不够引起的。

5) 混凝土坝的渗漏主要是由于混凝土的质量低下所造成的。

6) 混凝土坝渗漏也可由坝体施工浇筑块连接缝所引起。

由此看来,渗漏是由多种原因引起的,所以并不存在一个能适用于所有堤坝渗漏探测的通用方法。每种情形都必须根据特定的地质和水力条件,通过观测与检测,对所获得的所有资料进行全面的整理分析,才能找出具体的渗漏原因,制定出补强加固措施。同时建坝初期制定的建设方案在建设过程中应该是可以随时进行更改,而且这些更改有时是非常必要的,这与其他工程不同,在连续的检测分析过程中所获得的信息可以反映最新的水文地质状况,根据新出现的情况可以随时调整工程措施和进一步的实验方法。

## 1.2 天然示踪方法研究现状

在地下水渗流的研究中,环境同位素示踪方法和温度示踪方法都属于天然示踪方法,可以用来探测湖泊或水库的渗漏,获得以下几个方面的信息:

1) 决定出现在堤坝下游或没有出现但通过下面的地层的地下水的来源,例如

坝下游冒出的水是完全来自于邻近的含水层或含水层中的水与库水的混合,由于这个原因,当着手调查渗漏时,我们首先要做的事是调查冒出的水是否真正来自于水库,有时候好像渗漏水是来自于库水,但实际测试结果却完全相反,例如小浪底30号排水洞靠近坝下游一侧的渗漏水就是来自于尾水的渗漏。

2) 调查下游冒水的水力学特征,这是建立在以下因素的基础上:时间、库水的化学、同位素成分以及这些冒水的特征。在这种情况下,研究的主要目的是当库水的某些成分发生变化时,是否冒水的成分也发生了变化。在定性的研究中,还要考虑到浓度随时间的变化,时间上的滞后可以提供库水与坝下游钻孔水或泉水之间的流动速度,如果有不同的泉存在,则水在其间的流动时间是不同的,因此要对每个泉分别进行调查。显然在这种情况下,首先要做的事是确定这些泉水中是否含有相似的化学或同位素成分。

水的天然示踪常包括以下一些方面:

- 1) 水的温度。
- 2) 电导率。
- 3) 化学成分包括水的其他成分。
- 4) 水中的稳定同位素、氘、氧-18。
- 5) 天然氙,主要来自于近几十年来的热核反应中的核试验。
- 6) 碳-13。

需要指出的是除了上述提及的示踪剂外,其他通过不同方式或途径进入水中的物质在适当的情况下也可作为示踪剂,例如:

1) 城市、工业、农业排放到水库中的废水,这些废水根据它们的来源不同常常包含一些特定的化学元素,这可以建立起库水与泉水以及坝下游的地下水之间的水力联系。例如城市废水常使得库水被污染,因而氮化合物以及  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等离子浓度较高;工业废水中,重金属元素如铁、铬、钒、锰、汞、铅等以及一些有机成分如苯酚、烃等能进入水库;农业废水中,一些杀虫剂、硝酸、铜化合物等,都用来调查水库的渗漏。

2) 海拔位置较高的沉积物在高水位期间能够进入库水,这是由于当地的洪水排放时对土壤的侵蚀作用,这些沉积物能对整个库水进行标记,并能在与库水相关联的泉水中探测到,特别是当渗流通过坚固岩体的破碎带时,可获得很好的结论。

3) 利用出现在水中微量元素和示踪元素,例如位于地震活动区的水库或由于残余的火山活动,使得水中的一些微量元素硼的含量较高。

4) 氦元素同样可测出库水与下游的泉水或地下水是否存在的水力联系,氦-226是一种放射性惰性元素,属于铀-238家族,因此在地下水或气体中,它的浓度极易发生改变。由于氦是一种气体,水表面的氦极易逃逸出来进入空气,因此在河水 and 水库中其浓度极低,但在地下水中浓度会很高,特别是在花岗岩中,由于铀元

素的浓度较高,因此对库水和下游泉水中的氦元素进行简单的分析就能知道泉水是否来自于水库。

一些水库中的天然示踪剂随着时间(季节)的变化,它的浓度也有着很大的变化,利用这些示踪剂来调查水库的渗漏问题一般需要花较长的时间去观察以及取大量的水样,以便合理地建立起库水与下游泉水之间的水力联系。

### 1.2.1 环境同位素示踪方法

环境同位素是指存在于天然环境中浓度不固定的稳定同位素和放射性同位素,人们不能直接控制它们的浓度变化。水分子中氢元素包括一种放射性同位素氚( $^3\text{H}$ 或T)和两种稳定同位素氕( $^1\text{H}$ )和氘( $^2\text{H}$ 或D),其丰度分别约为99.985%和0.015%,同位素比率 $^1\text{H}/^2\text{H}\approx 0.0015$ 。因为同位素之间相对较高的质量差异,这种同位素比率的自然含量约为250‰。氧有七种同位素,自然界中常见的只有三种: $^{16}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$ ,它们都是稳定同位素,其丰度分别为99.76%、0.035%和0.2%。从严格意义上来说,观测 $^{17}\text{O}$ 的浓度几乎不能为我们提供任何水文信息,相关的水文信息可以通过研究 $^{18}\text{O}$ 的变化获得, $^{18}\text{O}$ 的丰度较大,具有更准确的可测量性。

水文学中最常用环境同位素有稳定同位素氕、氧-18、碳-13、放射性同位素氚和碳-14。其他一些有应用前景的环境同位素在水文学中已经或正在研究之中。其中硅-32引起人们的重视,在印度已经对其作了大量测量工作。其他还有氦-85和氦-3等研究。本书仅对稳定同位素氕、氧-18和放射性同位素氚进行研究。

在渗漏研究中应用的环境同位素技术,有参与组成水分子的稳定同位素氕方法,氧-18和放射性同位素T等方法。环境同位素示踪方法是研究地下水运动规律的重要方法之一。在快速蒸发的湖泊和水库中,水中稳定同位素富集作用是很显著的。Payne以肯尼亚Chala湖为例,已经证明了这一点,他排除了湖水与某些泉水相联系的可能性。Stichler等对莱因河谷中一个小湖进行了同位素调查,发现它基本上是由地下水及降水补给,证实了湖泊和下游含水层之间的水力联系,并计算出了地下水的流速。放射性同位素氚作为环境示踪剂来研究水库的渗漏,其使用价值只局限于地下水中的氚含量很低或比库水要低的地区。Aksoy调查了土耳其Keban水库蓄水后新出现的大泉,发现库水比地下水更富集氚,但在蓄水一年之后,从泉中排出的地下水氚含量有较大增长,据此认为泉水与水库相连通,而且由水库渗漏水与当地地下水的混合水所不及。显然,比库水要老的多的地下水,其起源很可能不同于库水。Burgmann等在研究赞比亚Itezitezhi坝区渗漏时曾指出这一点。同位素示踪方法要有足够的采样数目,以便查清在时间和空间上的所有可能变化。如果水库有不同的来源,则其同位素组成可能是不均一的,在这种情况下,只有渗漏点的水才对地下水有影响。水样的分析项目不应只局限于一种环境同位素。一般说来,综合测定氕、氧-18和氚,可为渗漏的范围和条件提供有用的信息。在突尼

斯的 Nebaana 水库、法国的 Grandes Patruies 水库、墨西哥的 Las Lajas 水库和德国的 Sylvenstein 水库,都曾采用这样的渗漏探测方法。

国内在利用环境同位素研究地下水流动方面也做了大量研究工作。陈建生等利用该方法对北江大堤、新安江水库、小浪底水库等多个堤坝进行了渗漏分析,取得了良好的效果。顾慰祖等利用环境同位素方法对中国西北干旱地区水资源进行了研究。

环境同位素研究的基础是要了解环境同位素在水圈中的分布。Craig 在 1961 年提出了大气降水中稳定同位素的分布规律,Erikson 对氡的分布进行了研究。自 1961 年以来,根据国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)的研究计划,在世界 100 多个台站进行了降水中氡浓度及稳定同位素组成的监测,并定期发表这方面的数据。国内刘进达等对中国大气降水中稳定同位素的时空分布规律进行了研究,贾艳琨等研究了我国大气氡的分布规律。

大量研究表明,测试环境同位素可以有效地确定地下水补给源、排泄关系、龄期、流向、流速、补给量等水文地质参数。

### 1.2.2 温度示踪方法研究堤坝渗漏

温度可以通过介质传递,在地层中的变化是连续的,这就为我们除直接测定地下水流速之外提供了另一种了解渗流场的物理量。在许多工程问题中需要研究地下水运动和温度场分布之间的关系,利用温度分布状况判断研究区域内地下水运动及其分布已得到广泛应用。周志芳等分析了河流峡谷区地下水温度异常特征,定性研究了区域地下水的渗漏状况。肖才忠等利用建坝前后地温场的对比,对坝基渗漏进行了研究。王志远等人利用在帷幕后排水孔中监测水温研究坝基渗流场,其结果表明坝基温度变幅和分布与渗漏源的温度、地质条件和施工质量有密切关系,证实了从温度监测渗漏的有效性。张键等根据盆地地温场分布特征与地下流体活动规律的关系,利用井温资料估算出地下水的运移速度。

常规的大坝渗漏监测手段包括使用测压管及渗压计观测渗透压力,量测排水井、孔口处溢出的水量以及外观检查等,无疑这些手段都是很必要的。然而由于岩石的不均匀和不连续性以及仪器精度的制约,观测效果常常不够理想,无论是在定性或者定量分析时常常感到根据不足,因而难以确切掌握渗漏的实际性态,对有效地维护大坝安全十分不利。利用观测温度来监测渗漏是国内外正在发展中的一项新技术,已在我国及美国、俄罗斯、瑞典等国家得到了成功的应用。其基本原理是基于水的热传导系数及比热和岩石及混凝土相比差别较大。水库蓄水后,在库水渗过的部位其热效应必然会使该处及其附近的温度场发生变化,渗流场和温度场之间呈明显的相关关系,因此从温度场的变化中可以辨认出渗漏变化的规律性。

国际上少数国家较早开始利用监测水工建筑物基础温度的方法来监测水工建

筑物基础的渗漏状况。这是一种基于地球物理学的探测技术,称为温度示踪渗漏监测技术。温度示踪渗漏监测技术的原理是将一组或几组具有较高灵敏度的温度传感器测头埋在堤(坝)等挡(蓄)水建筑物的基础或内部的不同深度,在温度扰动的影响消散后,测定测量点的温度。如土堤(坝)的土体孔隙介质内无渗漏水流动,则其导热性较差,温度场分布较均匀。如测量点处或附近有渗漏水流通过(渗漏水流速一般必须大于  $10^{-6} \text{ m/s}$ ),将打破该测量点处附近温度分布的均匀性及同一组温度测量点之间温度分布的一致性。一定深度的地层温度和湖水、河水或渠道水温的差值是受季节温度变化影响的,水温在夏季高于地层温度,冬季则低于地层温度,在过渡期间(春季和秋季)渗漏在温度剖面上不会出现大的异常,河水温度和原状土温度的差值会减小。因此,在研究该处正常温度后,可独立地确定测量点处温度异常是否是由渗漏水活动引起的,从而实现了对土体内集中渗漏点的定位和监测。

美国、德国、西班牙等国 20 世纪 70 年代以来,就采用温度场来研究大坝渗漏,将温度作为天然示踪剂,通过温度异常发现坝体、坝基或坝肩是否存在集中渗漏。该方法后来被应用于堤坝的渗漏探测,在堤顶每隔 50m 钻一个观测孔,深度 6~7m,然后在不同季节测定孔中不同深度的温度变化,当河水位上涨时通过温度场的异常来判定堤坝下是否存在集中渗漏通道,试验证实,只要钻孔的深度超过 3 m 就可以观测到堤坝下的渗漏,随着钻孔深度的增加,温度的差异程度增加,渗漏的范围与程度也更加明显。采用这种方法可以探测到的渗漏通道深度达到 40m。美国加利福尼亚 Occidental 大学地质系的 Joseph H Birman 等人从 1958 年开始研究利用这一技术勘探地下水,1965 年 Joseph H Birman 将这一技术用于水坝的漏水探查,并申请了专利。美国垦务局也将这一技术成功地应用于一些病险土石坝的治理。前苏联除将这种技术大量应用于土石坝外,还将其扩展至混凝土坝,在施工期就埋设了大量基础温度计监测帷幕检查孔的水温,在水库蓄水后发现了地下集中渗漏通道。该方法在 20 世纪 80 年代被引入我国,已经成功地在新安江、湖南镇等水库进行了绕坝渗漏通道的探测,并取得了成功,后来又将该方法推广到河堤渗漏探测领域,成功地探测出北江大堤石角段基岩管涌渗漏通道,并成功地预测了黄壁庄副坝的塌坝事故发生。

早期温度示踪渗漏监测技术的实现主要是通过在水工建筑物或其基础内埋设大量热敏温度计来进行温度测量的。尽管用温度示踪法进行渗漏监测比埋设测压管及渗压计更灵敏有效,并且还具有一定的成本优势,但这种通过埋设点式温度计的测温技术,同样会因布置的测量点有限而出现对温度场分布中不规则区域的集中渗漏漏检的情况。近年来发展起来的分布式光纤温度测量技术,可通过埋设在建筑物或基础内的光缆实现对沿程各连续测量点进行实时温度采集,并能对测量点进行空间定位。分布式光纤测温系统使用的光缆为常规通讯光缆,费用较低。这一技术不仅克服了点式温度计测量点有限和成本高的缺点,而且大大提高了发现

水工建筑物及其基础集中渗漏通道的概率。德国还通过对保护光缆的金属铠通电加热的方法,增加渗漏监测点的温度梯度,提高识别渗漏异常部位的分辨率。

### 1.3 人工示踪方法研究进展

自从 Moser 等人建立了单井中测定地下水渗透流速的示踪剂点稀释定理以来,人工同位素示踪技术已经被广泛地应用于水利、水文地质、工程勘察、环境保护、供水、水资源、采矿等领域。

国外自 20 世纪 70 年代开始将人工同位素示踪技术引入坝基渗流场的探测之中。Drost、Plata 等人在这个领域进行了多年研究,取得了丰富的经验。他们利用分布在基岩岸坡中钻孔探测到的强水平流速和垂向流来判定大坝是否存在基岩裂隙渗漏,并应用这种技术解决水库的渗漏问题。进入 20 世纪 80 年代,我国从国外引进这种方法,作者将其应用于大量工程实践之中,取得了很好的效果。

在采用人工示踪方法研究地下水渗漏时,通常分为标记法和钻井法两种。选用各种人工同位素对储水体或其一部分作标记后,通常观察储水体本身或其周围含水层对示踪剂脉冲作何反应。只有在水库的环境同位素富集不明显时,才需要对整个库水作标记。在所有示踪剂注入之后,不仅应对库水进行监测,而且在示踪剂可能通过的地方,也应对地下水进行监测,这样可提供从渗漏点至观测点之间地下水流模式的补充信息。在普泽克扎卡湖曾使用本方法探查各个渗漏点与下游各地下水露头之间的连通情况。

使用人工放射性同位素的单井法和多井法,在检查坝体或坝下渗漏中已得到广泛的应用。单井法测定的是地下水的渗透流速,多井法测定的是平均实际流速,或通常称为平均孔隙流速。多井法是在含水层的渗漏段上游某观测孔或某漏水点投入适当的放射性同位素示踪剂,然后在其下游的检查孔或出水点连续进行监测。由此可得到平均孔隙流速、流向和弥散率等水文地质参数,可以检查帷幕灌浆或防渗墙的漏水通道,可以探测堤坝及各种防渗结构和水工建筑物的渗漏通道等。

### 1.4 堤坝渗漏破坏机理研究

无黏性土是各类沙石和沙砾(卵)石混料的统称。其颗粒组成的变化范围很广,不仅是土石坝的主要筑坝材料,而且是常遇到的地基土。无论是建筑材料还是建筑地基,在渗流作用下都需考虑渗流破坏问题。许多水工建筑物的破坏都是由渗透破坏引起的。管涌是造成堤坝等水利工程失事的主要原因之一。因此,对堤坝渗流管涌形成机理的研究不仅有理论意义,而且有很大的实用价值。管涌主要发生在沙砾石土等无黏性岩土体中。管涌特性是指沙砾石土或粗碎屑土在渗流作用下发生管

涌后的不同表现形式及其渗透稳定性。

20世纪40年代以前,对土的渗透破坏研究主要是经验统计为主,以后逐渐建立了一套试验手段,并从理论上进行了分析和总结,对无黏性土的渗透破坏有了长足的进展。近几十年来,对此取得了不少研究成果,其主要特征是将渗透破坏特性和土的基本性质,特别是将土的颗粒组成和密实程度相结合,从而建立了破坏特性与基本性质的关系,形成了一套理论。Terzaghi首先给出了确定物黏性土破坏水力比降的理论表达式,依斯托梅将理想的单一粒径土的研究首次引申到天然不均匀无黏性土,给出了不均匀渗透系数与渗透破坏形式及水力坡降的关系。随后康德拉切夫将天然土按颗粒组成曲线分为双峰土和单峰土,并给出了它们与渗透破坏的关系。

从宏观上分析,无黏性土的渗透在后期多表现为集中渗流对土体的冲刷,形如管中涌水,以往称为管涌。但由于土质的不同,形成集中渗透管道的机理各不相同,一种是局部土体在渗流出口被渗流所破坏,然后继续发展而成;另一种岩土体孔隙中的细颗粒被渗流不断带走的结果。在成层结构的土中破坏又是从层面开始,渗透破坏的机理不同,土体能承受的渗透力以及形成集中渗漏通道直到最后破坏的时间都不同。从20世纪50年代开始,对土的渗透从宏观对比深入到机理研究,并从渗流机理的角度将破坏形式分为流土、管涌、接触流失和接触冲刷四种形式,称为土的渗透破坏的四种模式,前两种模式发生在单一的土层中,后两种发生在成层土层中。20世纪60年代初期,刘杰等根据国内实践经验系统地研究了缺乏中间粒径的砂砾石的渗透稳定性,从而明确了细料含量在土体渗透稳定性中的作用,并据此拟定了渗透破坏形式的判别准则,以及破坏水力坡降的确定方法。

现在对无黏性土的渗透破坏的研究主要针对无黏性土的管涌的研究,综合分析管涌的破坏机理,Arulanandan和Perry通过大量调查和试验,建议用临界剪应力 $\tau_c$ 值来对土进行分类:当 $\tau_c \leq 4 \text{ dyn/cm}^2$  ( $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$ )时,属于侵蚀性土;当 $\tau_c \geq 9 \text{ dyn/cm}^2$ 时,属于非侵蚀性土。也就是说,临界剪应力值越小越易受到侵蚀,即在适当的水力条件下可能发生管涌。对于管涌的研究常用的实验方法有:针孔实验和泥浆实验。应该说,不管何种实验方法,都涉及到土颗粒在孔隙中的运动,差别仅仅是颗粒运动的尺寸和受力的类型不同。有许多学者从事孔隙中颗粒的运动的研究,或通过模拟孔隙中颗粒的运动来讨论反滤层设计中的地基土颗粒的启动以及在反滤层中颗粒的沉积问题。这些成果表明,从孔隙中颗粒的运动入手来研究渗透变形是一个行之有效的途径。

殷建华利用有限元法,模拟了管涌区的长度和渗透性对堤身渗流的影响,发现管涌区越长和渗透系数越大,流向或流入管涌区的水量就越多,也就是说,更多的水流集中于管涌区附近,同时最大流速和总流量就越多,由于流速的增大,作用在颗粒上的作用力就更大,所以可以推断出将会有更大的颗粒起动,从而导致管涌区

的范围的增大和渗透性的提高。因此了解管涌发展中渗流场的变化情况十分必要。

曹郭履及其合作者认为土层的抗渗强度的不同,同时孔隙大小的不一,分布也不均匀,这就使得各处的水头梯度和渗流速度也不相同,有的地方水力梯度大、流速大或者抗渗较弱,就有可能发生管涌,随之而来的是水头和流速的重新分布。他们考虑了介质渗透性的随机性,模拟了管涌的发展情况,同时可以求出在统一条件下渗流管涌导致破坏的概率。

从各个地方不同的管涌情况来看,管涌表现的形式虽有差别,但它们都最终形成渗漏通道。我们通常研究的地层为:表层为弱透水黏性土,下卧强透水沙层及砂砾石层,这也是沿江较普遍的一种地层。由于沙层和沙卵石层的渗透系数在  $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  以上,而黏土层的渗透系数在  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  以下,因此管涌发生地层的地下水流态为:除局部地方外,在沙层和沙卵石层中的渗流主要为水平流,在黏性土层中较薄的地带被顶穿形成近乎垂直流,携带大量的沙溢出地表形成管涌。堤基及堤后地下水类型主要有冲积潜水,承压水和基岩裂隙水(潜水或承压水)。在没有上部黏土层盖板的情况下,堤内地下水为潜水。在堤外由于受水流冲刷作用,深泓下切,表层弱透水黏性土层被冲去,使江水直接进入下卧沙层或沙卵石层,致使汛期堤内弱透土层下形成很高的承压水头,在弱透水层的薄弱处,土层被顶穿形成管涌,这是堤坝中常见的险情。对于双层地基,当堤防受水后,弱透水黏性土下形成较高的承压水头。而表层土层各处的厚度和物理力学特性很不均匀,往往个别地方比较薄弱,这样在江水位升到一定高度后,承压水头足够高而在此薄弱处将土层顶穿形成冒水孔。在一定条件下,下卧细沙层的沙粒被水流带出,就形成冒水翻砂或管涌。这种管涌也是堤坝中最常见的。当堤基表层土质沙性较大时,这种管涌很容易扩展而导致堤防崩溃。

只有了解清楚随着管涌带出的土粒在地层中的分布范围以及管涌的逐步发展过程,我们才能在堤防加固时做到有的放矢。我们知道,管涌的发生是一个水与土体相互作用的复杂的力学过程,管涌的发生与地层中土的组成成分、结构、土的级配、水力梯度、管涌发生的距离、深度、表面覆盖黏土层的内摩擦角、覆盖层厚度、黏滞系数、土的饱和度、固结系数、浸泡时间等因素有关,是一个多元的复杂问题。通过研究管涌发生过程中各个阶段管涌周围地层中水力梯度发生的变化,流线的改变,地层中细颗粒在水流作用下被移动而造成渗透系数的不均匀增大,渗透系数变大后,细颗粒被移动量将成倍增加,从而在水力梯度最大的地段可形成集中渗漏通道。

### 主要参考文献

[1] 刘光尧. 水库检漏[J]. 勘测科学技术, 1997, (4): 3~ 18

- [2] 汝来华,牛运华. 大坝事故与安全[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001
- [3] 董海洲. 堤坝热源法及示踪理论研究[D]. 南京:河海大学,2004
- [4] 冷元宝等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展,2002,22(2): 59~ 62
- [5] 刘建刚. 堤基渗透变形理论与渗漏探测方法研究[D]. 南京:河海大学,2002
- [6] 刘光尧,陈建生. 同位素示踪测井[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999
- [7] Antonio P B. Manual de fugas en embalses[M]. Madrid: CEDEX, Centro de Estudios Y Experimentacin de Obras Publicas,1999
- [8] Lad D,Nijampurkar V N,Rama S. Silicon-32 hydrology[A]. Isotope Hydrology 1970 (Proc. Symp. Vienna,1970),IAEA,Vienna,1970,8~ 47
- [9] Rozanski K, Florkowski T. Krypton-85 dating of groundwater[A]. Isotope Hydrology 1978 (Proc. Symp. Neuherberg,1970),IAEA,Vienna,1979,(2): 9~ 49
- [10] Torgersen T,Clarke W B,Jenkins W J. The tritium/helium-3 method in hydrology[A]. Isotope Hydrology 1978 (Proc. Symp. Neuherberg,1978),IAEA,Vienna,1979,9~ 17
- [11] Payne B R. Water balance of lake chala and its relation to groundwater from tritium and stable isotope data[A]. Hydrol,1970,(11): 4~ 7
- [12] Stichler W, Moser H. An example of exchange between lake and groundwater[A]. Isotopes in Lakes Studies (Proc. Panel Vienna,1977),IAEA,Vienna,1979,115
- [13] Burgman J O S, Eriksson E,Kostov L,et al. Application of oxygen-18 and deuterium for investigating the origin of groundwater in connection with a dam project in Zambia[A]. Isotope Hydrology 1978 (Proc. Symp. Neuherberg,1978),IAEA,Vienna,1979,27
- [14] Molinari J. Contribution to discussion of isotope hydrology 1978(Proc. Symp. Neuherberg,1978)[C]. IAEA,Vienna,1979,41
- [15] Andreu Ibarra B, Galvez Cruz L, Ruiz Pena et al. Estudio isotopico de fugas de la presa las lajas,chi-huahua,Mexica[A]. Isotope hydrology 1978(Proc. Symp. Neuherberg,1978),IAEA,Vienna,1979,125
- [16] Drost W. Groundwater measurement at the site of the sylvenstein dam in the bavarian alps[A]. Isotope Hydrology 1970 (Proc. Symp. Vienna,1970),IAEA,Vienna,1970,421
- [17] 肖才忠,潘文昌. 由温度场研究坝基渗流初探[J]. 人民长江,1999,30(5): 21~ 23
- [18] 王志远,王占锐,王燕. 一项渗流监测新技术-排水孔测温法[J]. 大坝观测与土工测试,1997,21(4): 5~ 7
- [19] H. A. Мухегдинов,苏伯林译. 将温度作为土石坝性态的指示因子[J]. 大坝观测技术,1994,(2)
- [20] Guidebook on nuclear techniques in hydrology[C],IAEA,Vienna,1983
- [21] Drost W, Klotz D, Koch A, et al. Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes[J]. Water Resource Research,1968,(4)
- [22] Drost W, Moser H, Neumaier F,et al. Isotope methods in groundwater hydrology[A]. Eurisotop Information Booklet,Eurisotop,Brussels,1974,(61)
- [23] Drost W. Application of groundwater measurements by means of radioisotopes on groundwater exploration[A]. Water for the Human Environment I (Proc. Congress Chicago,1973),IWRA,Champaign, Illinois,1975,357
- [24] Plata A. Detection of leaks from reservoir and lakes[A]. Using of artificial tracer in hydrology[S], IAEA-TECDOC-601. Vienna: IAEA,1991,71

- [25] Chen Jiansheng, et al. A test of using isotope trace in single hole to detect the flow direction of underground water[A]. Second Symposium on Exploration Geophysics[M], Beijing: China Academic Publishers, 1986
- [26] Jiansheng Chen, Honggui Dai. Determining direction and velocity of deep underground water flow in single borehole[C]. Geophysics, USA, 1987
- [27] Jiansheng Chen, Jie Fang. Isotope methods in environmental studies[C]. Hydrology and Geochemistry, Beijing, IAEA, 1990, 163~ 173
- [28] 陈建生. 探测地下水参数的同位素示踪仪及其应用[J]. 物理, 1989, 18(4): 6~ 10
- [29] 陈建生. 同位素示踪法测定多含水层混合井试验研究[J]. 勘察科学技术, 1994, (5): 28~ 32
- [30] 陈建生等. 利用天然与人工示踪法探测岩体裂隙渗流构造及渗透性研究[J]. 西北水资源与水工程, 1995, (4): 18~ 32
- [31] 许惠义, 刘应翹, 陈建生等. 应用同位素示踪技术测试多含水层分层参数的研究[J]. 水文地质与工程地质, 1996, (3): 24~ 27
- [32] 陈建生, 赵维炳. 单孔示踪方法测定岩体裂隙渗透性研究[J]. 河海大学学报, 2000. 5, 28(3): 44~ 50
- [33] 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~ 52
- [34] 陈建生, 王媛, 赵维炳. 孔中同位素示踪方法研究岩体裂隙渗流[J]. 水利学报, 1999, (11): 20~ 24
- [35] 陈建生, 董海洲. 二维岩体裂隙网络渗流同位素示踪研究[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(增刊): 188~ 192
- [36] Makowski J. Radiometric method for investigating the permeability of reservoir beds[A]. Isotope Hydrology 1970 (Proc. Symp. Vienna, 1070), IAEA, Vienna, 1970, 727
- [37] 李樟苏等编著. 同位素技术在水利工程中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [38] Moser H, Drost W. Application of single and multi-well techniques in fractured rocks[A]. Isotope techniques in the study of the hydrology of fractured and fissured rocks[C]. IAEA-AG-329, 2/12. Vienna: IAEA, 1989, 223
- [39] Drost W. Single-well techniques isotope hydrology[C]. IAEA, 1982
- [40] Drost W. Single-Well and multi-well nuclear tracer techniques[C]. Unesco Paris, 1989

## 第二章 堤坝建设各阶段渗漏研究

### 2.1 引言

用于调查水库和湖泊渗漏和渗流的各种技巧和方法,并不是在所有的情况下都是可靠的,在一般的情况下,它们并不都能得到有用的结论。因此,在某一特定的情况下,需要挑选最适合的方法。由于这个原因,采取合适的方案对于调查渗漏的成功与否是相当重要的。

本章提出了一些指导方针,以便对某一个特定的调查选出最适合的方案。作为通常的指导方针,需要指出的是对水库的渗漏调查需要在以下四个阶段进行:

- 1) 在水库修建前,进行渗漏研究(即坝的可行性研究阶段)。
- 2) 在水库刚蓄水时以及在刚蓄水几个月内进行渗漏研究。
- 3) 一旦出现渗漏问题,对渗漏部位的直接分析研究。
- 4) 对库水与地下水的联系进行长期的调查分析。

在某些情况下,当准备遗弃水库时,对当地的水文资料的研究是十分必要的,尤其是对曾经储存有污水的水库是相当重要的,需要分析周围地下水的污染程度与范围。

### 2.2 可行性阶段的研究

#### 2.2.1 基本常识

坝的修建经常需要冒一定的风险,这个风险主要来自于渗漏问题。通常坝址的自然和地质条件是极不规则的,即使对坝址的地层进行了详细的调查研究,这种风险仍然存在。现实情况往往是,虽然大多数渗漏问题都与水库有关,但对前期的研究常常开展得不够,有时甚至没有这种研究。经验表明,在许多情况下如果在坝的建设阶段对坝址附近地层的水文地质特征进行了详细彻底的调查研究,水库的渗漏问题是可以预知并可以得到解决。

由此看来,需要重视可行性阶段的渗漏调查研究,并且花费也较小。其主要原因是,在坝的建设阶段对地层进行灌浆处理或防渗处理要比水库在建成运行时进行处理的花费要小得多,特别是考虑水体的损失以及水库运行时间推迟时,这些损失的差别将会更加大。另一方面,对坝址的详细研究所需的花费相比坝的修建所需

花费来说几乎可以忽略不计。

通常在坝修建前,对坝址的水文地质都进行了勘测研究,但是极少应用到本书中所描述的一些技术,其主要原因是由于这些技术所获得的数据并不完好地吻合,更重要的是这些技术通常并没有出现在土木水利类专业的教材中。

对坝址的预先调查研究可能存在两个完全不同的目的:一个是包括在可行性研究范围内,当坝址的渗漏问题相当严重时,通过可行性研究,就会放弃在这里修建大坝;第二个目的是在坝修建前或修建时对地层进行灌浆或防渗处理以减少渗漏。

### 2.2.2 一般建议

坝修建前或修建过程中的勘测研究经常通过钻孔进行。这些钻孔专门用于对坝址地层的取样工作。在其他情况下,也用于渗漏试验。许多孔在坝修建完成后就不再利用它们,但一些孔就不同,所以建议对这些孔进行保护和维护。经常有这样的情况,当要研究渗漏问题时,由于对这些孔没有进行保护,使得这些孔无法使用,需要重新钻孔。我们需要考虑到在大多情况下,这些孔是非常有用的,它可在水库的整个寿命期内作为研究水力特征的控制点。

当新的孔钻好后,孔的构造要比较合理,以便能进行相关人工示踪等试验研究,大体上这些特征有以下几方面:

- 1) 孔的内径不小于 52mm (理想半径为 78mm),以便投源器和探测器能放入孔中。
- 2) 当水库蓄水时测压管水位以下的套管必须采用花管。
- 3) 花管上要有足够数量的孔或槽,孔或槽的表面积应不小于整个套管表面积的 1%。

若花管的打孔长度只有 2~ 3m,则安装在这些花管中的测压管只能用于测量水位。这种孔的用途较小,但是即使知道这些钻孔中收集到的水样并不代表从上部地层中的来水,也应该对这些孔进行保护和维护,而且孔的位置、最初的结构、所揭露的地层、地质构造和成分等资料同样应该保存下来,作为建坝的部分文献资料。

另一方面,当开始研究渗漏问题时,通常会遇到这样现象,库水已经改变了渗漏区域内地下水的化学、同位素以及水文地质特征,由于并不知道在坝修建前的各种参数特征,这种变化关系很难通过后来的研究数据得到。因此,非常有必要在坝修建前和修建过程中进行水文特征调查。但是用于这些分析的设备甚至财政都经常很难得到保证。在这种情况下,建议保存坝址 15km 范围内所有从泉水、钻孔、井中收集到的水样,也包括坝基范围内钻井中收集到的水样。这些水样应保存在密封性完好的玻璃瓶内,每一种水样只需 2L 就足够了,当需要时可对这些水样进行分析,以便知道坝修建前地层中水的主要状况。

总之,在坝修建前的可行性研究应该包括准确确定将要被蓄进水库的水的化学性质。

### 2.2.3 渗漏风险

显然,渗漏风险的发生直接与坝址的地质状况有关。在沉积岩和含有细颗粒(如黏土、泥灰、泥沙等)的变质岩中,以及粉砂岩、砾岩、冰碛等,通常并不出现渗漏问题。最大的风险发生在以下岩层中:

- 1) 可熔岩,如石灰岩、白云石、岩盐、石膏。
- 2) 火山岩,特别是火山是在近来发生的。
- 3) 粗沙粒,如冲积的和塌积的材料,同样,与含石灰质母岩结合的地层也会引起严重问题。

在大多数坝址位置常出现冲积材料,如果这些冲积沉积物的厚度不大,例如不足 10m 厚,可将这些冲积层挖掉,将坝建立在新鲜的基岩上。但是如果这些厚度特别大,由于技术或经济上的原因,不可能将其全部挖除,这就需要防渗墙。防渗墙包括混凝土连续墙、钻孔成墙等。选择合适的防渗墙以及深度需要对坝址附近的地层进行详细的勘测研究。

调查位于坝址下面的渗漏性地层的结构以及厚度等方面的资料是非常必要的,它可用于在水库蓄水后对这些地层的渗漏流量进行估计和评价,这种计算是通过建立理论模型来完成的。通常将损失的水量作为地层渗透系数和厚度的函数,并假定这些地层是各向同性的,当然,在大多条件下,这是不准确的。

当下游泉的位置要比库底的高程要低时,往往容易出现大的渗漏危险。在这种情况下,对出现在下游的水的来源调查是绝对必要的。调查的主要目的是这些水是否来自于库水的补给,或者是在水库淹没区域内河水的补给。在下一节中,将介绍一些用于这一目的的技术和方法。

### 2.2.4 一些常见技术和方法

一些用于在建设前进行调查研究的技术可能有较大的局限,主要原因在于:在这个阶段,含水层井中或测压管中的水位要远远低于水库蓄水时的水位。因此,用天然示踪方法在这个阶段只能局限在饱和带。

在非饱和带,只能应用以下的一些方法:①利用地球物理方法。②利用钻孔渗漏试验,加之在钻井时的观察报告,包括岩心的试验资料,这些资料对于探测所研究区域岩层的破碎和渗漏情况有重要的意义。当水库蓄水水位上升到破碎带或渗漏岩层高度时,可以进行孔中流速测定,这些原始资料为最终解释这些流速数据提供有价值的信息。

同样的道理,在钻孔时,对浅部含水层的鉴别也是很重要的。如果它们位于水

库蓄水时的最大高度以下,在饱和带,孔中将有向下的垂向流,这可通过示踪试验很容易测量出。对于通过浅部含水层进入孔中的水,应进行化学和环境同位素分析。

在饱和带,本书中描述的大多数技术和方法都可应用,试验方案决定于特定的情况。但是,研究工作应以常规的方式进行,有以下几方面:

1) 对研究区域内不同的地下水进行化学和同位素分析,要求所取水样的在坝址 10~ 20km 范围内。显然,这也取决于当地的水文地质条件。稳定同位素 D 和  $^{18}\text{O}$  以及自然 T 的含量应该在水样中测得。当然,若两种或多种水样具有同样的化学成分,只需对一种水样进行同位素分析。

2) 在所有的井和孔中进行温度和电导,以及自然伽马测量。

3) 在孔中测试地下水流的情况,此操作可在适当的条件下进行,对整个孔进行标记,并对垂向流进行测量。

当地地下水的化学和同位素成分可以为研究区域内的不同地下水之间的关系提供信息,并可提供判断水库蓄水后含水层中的水是否被库水所替代方面的信息。

特别有意义的是,可以利用这些天然示踪剂来探测在坝下游出现的泉水的来源,以及这些泉水与河水的关系,这需要长时间(例如一整年)的观察,才能得到准确的结论。河水与泉水的化学和同位素的变化(季节的或零星的改变)关系能提供它们之间的关系方面的证据。同样,泉水流速与河水流速的变化关系也有助于此项研究。

若所有泉水的化学和同位素成分都表明水是来自于河水,下一步则需要根据河水与泉水流速的相对关系,调查这些泉水是否通过水库将来要淹没过的地层渗漏。这项调查可在水库蓄水后形成的河的淹没带长度内进行,可通过示踪技术实现。

但是,在大多情况下河水中的水流速度要远大于泉水的水流速度,因此,上述技术的实施是很困难的。在这种情况下,可以利用铀、若丹明 B 做人工示踪剂进行人工示踪试验,示踪剂在水库淹没区域内上游 1~ 2km 的河中注入。如果注入的示踪剂在泉水中可以探测到,说明这种试验是成功的。但是,一个否定的结论并不意味着河水的渗漏地点位于水库的淹没点外,这种结论有以下两种解释方式:①水从河水渗漏到泉水的时间要比所采取的观察时间要长。②注入的示踪剂太少以至不能探测到。当然,大多数示踪剂都被河水冲走了,只有少部分示踪剂进入渗漏地层,为了增加进入渗漏地层的示踪剂比例,一些试验只能在低水位的情况进行。有时,视觉上的察看就可发现有水流渗入地层中,Plata 在西班牙 Saja 河就看到这种情况。在这种情况下,应在这些点注入示踪剂进行连通试验。只需注入很少量的一点示踪剂,河水的表面变化即可帮助我们寻找这种渗漏点。

在孔中进行的流速试验在坝址岩层的渗漏方面能提供有价值的信息,无论是

在多孔介质或在坚固的岩层中。所得到的结论可以帮助我们确定采取何种防渗措施。通常,由于地层的各向异性以及地层渗漏材料的不连续性,水流不能从地层的结构和种类中得到确定,因此,对地层渗透特性的测量是绝对必要的。

当冲积材料的厚度太大,而不可能完全挖除它们时,对这层材料进行渗漏流速测试是非常必要的。这些试验可通过许多方法来完成。

假如渗漏试验已经提供证据需要修建防渗墙,那么孔中的流速试验可用于评价防渗墙的质量。防渗墙下游的一系列钻孔可用于在防渗墙修建前和修建后以及水库一旦蓄水时测量地下水的流速。

另一方面,在坝址处的钻孔中进行自然伽马测井可以半定量地测量出黏土在不同的冲积地层中所占的比例,由于黏土的多少与土的渗透性有关系,所以这些资料是极其重要的。在坚硬的岩层中,自然伽马测井联同地球物理方法以及示踪试验可以用于鉴别岩层的破碎带,包括填充有水、空气或黏土材料的破碎带。

## 2.3 在水库的最初蓄水阶段的研究

### 2.3.1 概述

当水库刚蓄水时,邻近的含水层中测压管水位将会有很大的改变。测压管中水位对于更好地了解库水和周围地层中水的关系有很大的帮助。当然,这最终用于调查库水的损失。但是,很多技术人员对这种更进一步的调查并不很重视,也并不在适当的条件下进行调查。除了这种更进一步的研究外,在刚蓄水时还应该做一些必要的试验和测量。

### 2.3.2 水量平衡

显然,水库刚蓄水时,很大一部分库水进入了周围岩层的空隙中。这些地层中的测压管和井中水位的上升与库水水位上升的关系主要取决于这些地层和库水的水力联系。水位上升影响的岩层范围增大,用于填补空隙中的水量也增加。

在刚蓄水时应用水量平衡能够对水填补的空隙有个定量的了解。这个方法需要对进入水库的水量  $V_{IN}$  和最终排放的水量  $V_{OUT}$  有个精确的数据,这两个水量的差值  $\Delta V$  就是在同一时期内储存在水库中的水。 $\Delta V$  可通过库容和库水位的变化关系求得,这种变化关系可由地形上的数据进行确定。 $\Delta V$  可是正的(水位上升)或负的(水位下降),它取决于这段时间内的流入和流出总量。利用下面的方程可得到渗入地层的水量损失  $V_L$  为

$$V_L = V_{IN} - V_{OUT} - V_E - \Delta V \quad (2.1)$$

式中,  $V_E$  是蒸发损失,它可通过理论方程进行估算得到。相比蒸发的损失来说,  $V_L$

要大得多,因此由估算产生误差可忽略不计。

显然,时间的影响是非常大的,如即使水位上升到最高水位并保持不变,水在填补空隙的过程仍在继续。

### 2.3.3 测压管水位的进一步研究

在水库刚蓄水时,周围地层中测压管和井中的水位会有重大变化,因此孔中或井中的水位变化与库水位变化之间的关系将对了解孔所揭露地层的渗漏性有很重要的意义,通常有三个方面:

1) 当库水位分别处在不同高程时,孔中水位都没有发生变化,则孔可能与库水没有水力联系。但在这种情况下,需要对孔进行长期观测,这是由于孔中的水位变化常常经历相当长的滞后。

2) 钻孔与水库之间的地层的渗透性较差时,在刚蓄水时,孔与水库之间的水力梯度非常大。随着时间的增加,这个梯度不断变小,变化的快慢也取决于地层的渗透性强弱。当库水位保持不变时,孔中的水位也慢慢地保持不变。水位的变化率在岩层的渗漏方面能提供许多有价值的资料。在某些情况下,这种资料是定量的或半定量的。

3) 如果连接水库和孔之间的地层渗透性非常强,库水位和孔水位基本上是同时变化。

显然,在最后两种情况下,如果库水不断地进入含水层,孔中的水位将会一直低于库水位,这是由于地层中的渗漏水流会引起水头损失。但是,需要指出的是,库水位和孔水位的平行变化并不意味着有大的水流从水库渗漏出来后通过孔中。没有大的水流,水流也可通过地层流到孔中。这种情况只会在孔所处的区域内含水层中水可以自由流动时才会发生,在含水层中的水流动缓慢时则不明显。

经常是这样的情况,钻孔所揭露地层的渗透性在垂直方向上有很大的变化,此时孔中的水位对库水位变化的反应将有显著的不同。例如,在一个很大的间隔范围内,库水与孔中的水没有水力联系,但一旦库水位上升到一定高度后,孔中的水位立即发生变化。这在坚硬岩层中特别是在石灰岩地层中经常发生。显然,通过鉴别这些渗漏性地层以及连接钻孔与水库的水平地层对于水库的渗漏研究是非常有价值的,所得到的资料可知道水的渗漏发生在哪些深度之内。

### 2.3.4 孔中流速的进一步研究

对位于水库周围孔中流速的进一步研究是非常重要的。对流速的测量可通过人工示踪技术进行,流速的测量包括水平流速和垂向流速。

在大多情况下,这是水库管理人员所开展的唯一一项研究,这项研究也包括孔中的水位控制。但是,这些获得的资料对于了解地层中水的动力特征是不够的。与

水库较近或孔较深的孔中出现的地下水流速要么很慢要么很快,主要取决于它相对于水库和排水处的位置。若孔靠近于排水处,则孔中的水位要比库水位要深。同样,靠近水库的孔也是如此。但若地层的渗漏性很差,则不一定如此。

总之,仅通过钻孔测量流速与库水位之间的变化关系就可能知道与水库邻近的地层中的主要水流模式。

### 2.3.5 对流量的进一步研究

确定泉中的流量变化与库水位之间的变化关系是很重要的,同样重要的是在坝修建前控制最终会出现在坝下游的泉水的流量。通常,在水库修建后,泉水中的流量会增加,但这也并不意味着库水对泉水有直接的补给作用,因为库水位的上升也使得周围含水层中水位的上升会引起泉水中流量的增加,库水对它并不一定有直接的作用。只有当地引起渗流的水头增加时才是这样,水头是通过地层作用的。

库水是否对泉水有着真正补给,可通过分析水的化学和同位素成分进行判断。

### 2.3.6 通过岩层的破碎和溶洞研究水的渗漏

由于可行性原因,不可能确定水库淹没区域内所有土层的渗漏特性,这样就需钻设大量的孔。但是,在水库蓄水前,可用相对简单的方法定性确定渗漏性最大的地层或者破碎带。水库底部和坝下部地层破碎带、溶洞、岩熔地带应可确定出来,以及水库淹没区内的冲积地层,通过现存的孔可以对所揭露岩层的相对渗漏性有一定的了解。对这种前期研究,需要注意的是地层岩性差别很大,表现出很强的各向异性,这一点在基岩中尤为突出。

在水库刚蓄水时,可以利用荧光示踪剂进行示踪试验,调查水是否通过坝侧面和库底渗漏出去。这项技术是在可能的渗漏点注入数倍示踪剂来实现的。如果渗漏是发生在水库的堤身内,示踪剂可选在离岸几米远的地方内注入,用眼就可看到渗漏现象。如果渗漏发生在地层内,示踪剂将沿水流方向移动,几分钟后就会消失。显然,示踪实验应根据库水位的上升间隔进行。示踪剂的注入点可选择在以前鉴别出来的最易发生渗漏的地方。

当调查基岩渗透性时,破碎带的定位是非常重要的。如果破碎带由较高的位置延伸向低处,水位到达破碎带开口处时,将不会马上进入破碎带。这是由于破碎带内气压的作用,只有当水位高于这个开口一定高度时,水才开始进入破碎带。

为了克服上述困难,可以应用另一种方法。这个方法是基于一旦库水蓄满后或水位到达较高时,在渗漏极强的区域前测量流速。其实施过程是,将一根绳子紧紧地固定在基岩可能的渗漏点上。当然,这项工作需在水位上升到这个位置前完成,这根绳可用尼龙绳或柔软的电缆。依据岩层的种类,绳可通过插入一小块混凝土或利用登山者使用的一种钉子进行固定。在绳的另一端,系上一个浮标。绳的长度应