



Seepage Control of Earth-Rock Dams
Theoretical Basis, Engineering Experiences and Lessons

土石坝渗流控制理论 基础及工程经验教训

● 刘杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利水电科学研究院学术著作专项资助

土石坝渗流控制理论 基础及工程经验教训

◎ 刘杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一本专门论述水工建筑物渗透破坏机理、渗流控制原理和反滤层设计原理及方法方面的著作。书中详述了当前渗流控制的发展水平,全面地提出了确定各类土渗透破坏型式及抗渗强度的方法。系统地阐述了反滤层设计方法的发展水平,并提出了各类土选择反滤层的方法。书中列举了大量的工程实例,通过对工程实例的分析,提出了病险水库的评价原则和方法,并用已有研究成果分析了几座水库渗透破坏及溃坝的原因。通过对工程实例分析,进一步确立了保护渗流出口是渗流控制的关键因素。

本书可供从事土石坝渗流控制理论的研究者及设计人员参考,也可供大专院校水工建筑专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训 / 刘杰著.
北京:中国水利水电出版社,2005
ISBN 7-5084-3358-0

I. 土... II. 刘... III. 土石坝—渗流控制
IV. TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 122810 号

书 名	土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训
作 者	刘杰 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14.5 印张 344 千字
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

渗流和渗流控制是土石坝工程中的一项极其重要的课题，直接关系到工程费用和安全。国内外许多破坏和溃决的工程，多数都是由于渗流控制在设计和施工方面存在的不足和缺陷造成的。土的渗透和渗透稳定性质以及抗渗强度是渗流控制理论的主要组成部分。反滤层是控制水工建筑物渗透破坏的首要措施。刘杰同志从20世纪50年代开始，就在中国水利水电科学研究院岩土所从事土石坝及地基的渗流和渗流控制的试验研究工作。半个世纪以来，他积累了丰富的实验室和工程实践的经验，在土的渗透性、渗透稳定性及各类土反滤层的设计方法方面取得了卓越成就；在无粘性土的渗透稳定性方面最先提出了以土中细料的含量判别渗透破坏型式的理论。在反滤层设计方面，对不均匀多级配的砂砾石料，提出采用保护细料的方法；对粘性土提出按有裂缝的原则设计反滤层的方法。在土的渗透破坏机理及防止渗透破坏方面，明确地提出渗流破坏开始于渗流出口，反滤层是防止渗透破坏的首要措施的观点。土石坝防渗体中的裂缝，在反滤层的保护下运行过程中可以自愈。基于以上理论，明确地提出土石坝的渗流控制应是防渗、排渗及反滤层三结合的原则。上述见解，对土石坝渗流控制理论均有一定地发展和提高，有些理论已被工程所采用，发挥了显著的效益。

本书系统地介绍了作者近半个世纪以来从事土石坝渗流控制的研究成果，总结了工程中的实践经验和教训，阐述了土石坝渗流控制的基本原理和方法，对土石坝的渗流控制在设计和施工方面都有一定的指导意义，对今后渗流控制理论的深入研究也有一定的推动作用。故乐于作序。

中国科学院院士

汪南岳



2005年5月

前 言

土石坝的渗流控制理论始建于 20 世纪初期, 布莱 (W. G. Bligh) 功不可没。他首次提出了第一个渗流控制的数学模式, 明确给出渗流控制中三要素之间的本构关系, 即作用水头、防渗体的渗径长度及土的抗渗强度三者之间的关系, 并根据工程实践经验, 从统计学的角度给出了几种类型土的抗渗强度。布莱理论早期称为爬行比理论, 抗渗强度以爬比系数 $1/C$ 而命名。渗透理论的发展结果是将爬比系数正式定名为土的抗渗强度, 而且可以通过试验确定, 并将布莱模式概化为

$$J = J_{\text{允许}} \quad (1)$$

$$J = \frac{H}{L} \quad (2)$$

式中: H 为水工建筑物承受的水头; L 为防渗体的渗径长度; $J_{\text{允许}}$ 为防渗体的允许抗渗强度。式 (1) 表明, 布莱法则的实质内涵是土体实际承受的水力比降应与土体本身的抗渗强度相一致。随着渗流理论的发展及工程实践的不断深化, 对堤坝渗流控制的研究形成两个分支: 一个分支是研究如何确定水工建筑物实际承受的水力比降, 也称水力条件; 另一个分支是研究土的实际抗渗强度。渗流场计算分析方法的发展属前一个分支。

在水力条件方面, 布莱法则起初是针对设计水闸底板长度提出的, 它的 L 值是整个闸底板的水平长度, 也称为地下轮廓长度, 他并未考虑渗流在闸底板进出口处的水头损失, 也未考虑地下轮廓有垂直段的情况。后来, 在水力条件方面, 由莱因提出将具有垂直段的地下轮廓长度用加权的方法换算为水平轮廓长度的方法, 即以垂直段的轮廓长度为基准, 水平段的长度只有 $1/3$ 的效应, 按此原则确定式 (2) 中的 L 值。随后在 20 世纪 50 年代邱加也夫 (Чугаев, Р) 以流体力学求解渗流场为基础提出了确定水闸的地下轮廓长度 L 的近似解法, 并称为阻力系数法。该方法既考虑了闸底板地下轮廓进口和出口段的水头损失, 也考虑了垂直段的水头损失, 远远优于莱因方法。

布莱法则提出后, H. H. 巴甫洛夫斯基在渗流场的理论分析中发现, 水闸底板下的水头分布并不是沿地下轮廓长度呈均匀分布的, 而是在进口和出口处的水头分布最大。因此, 他于 1922 年提出, 式 (2) 中的 J 值应采用渗流出口处的水力比降。为此, 20 世纪 50 年代前苏联有一派学者主张, 式 (1) 中的 J 值应采用渗流出口处的水力比降, 并按此原则确定了一套设计水闸底板长度的原则和方法, 制定为国家设计标准。

在土石坝的渗流控制中, 我国目前斜墙和心墙厚度的设计, 在确定水力比降时渗径长度仍直接采用其本身的厚度。透水地基渗径的控制长度, 曾经一度采取控制渗流出口的水力比降不超过地基土允许水力比降的方法来确定。由于反滤层的广泛应用, 目前已很少采用此法, 而仍然采用布莱法则, 即直线比例法。

20 世纪 40 年代以后渗流控制理论的另一研究分支蓬勃兴起, 并取得了很有价值的研究成果, 目前式 (1) 中的 $J_{\text{允许}}$ 已不单纯是经验统计值, 而是直接采用试验值。从 50 年代后期开始, 中国水利水电科学研究院就在这方面开展了大量的研究工作, 并在前苏联专家 E. A. 鲁巴契克夫的直接指导下, 首先创建国内第一座研究土的渗透稳定的实验室, 同时结合国内土石坝工程中存在的各类问题, 展开了有针对性的研究工作。半个世纪以来, 不仅解决了许多工程的实际问题, 而且提供了许多有价值的研究成果, 形成了一座较为完整的渗透稳定实验室, 有力地推动了这一学科的发展。概括起来有以下四个方面。

1. 明确了土和土工建筑物的渗透破坏机理

通过室内试验的观察及对遭到渗透破坏的工程实例的分析与总结, 明确地提出了土的渗透破坏机理。渗透破坏开始于渗流出口, 继而向上游发展, 无渗流出口的内部薄弱环节, 不会产生渗透破坏。因而, 防止渗流出口的渗透破坏是渗流控制的关键中的关键。

2. 反滤层是防止土体渗透破坏的最直接而且最有效的措施

反滤层的功能是滤土同时又能减压, 它既保证了渗透水流无任何阻力地顺畅地排向下游, 又可防止土颗粒的流失, 使土的抗渗强度至少提高 2 倍, 流土型的土提高得更多。因而, 它是保护渗流出口防止渗透破坏的极其有效的措施。为此, 对各类土的反滤层设计准则进行了广泛的试验研究。根据土的渗透稳定性质, 首先将自然界的土质分为三大类, 即无粘性土、粘性土及砾质土。分别研究了三类土各自的反滤层设计准则。

无粘性土方面, 基本原理仍然是太沙基反滤层设计原理, 其先进之处, 在于确定被保护土的控制粒径时考虑了土的渗透稳定性质。因而控制粒径在土中出现的概率不再是某一固定的数值, 如 d_{85} , 而是随土的渗透稳定性质在变化。简单而言, 均匀土的控制粒径出现的概率为常量, 而且具有较大值。不均匀土的控制粒径出现的概率则是变量, 且随土的不均匀系数的增大而减小。为确保土中的细颗粒不流失, 管涌土的控制粒径甚至采用了 d_{15} 。在控制粒径出现的概率方面, 根据土体渗透破坏的类型, 分门别类给出了一套确定方法。所以, 建议的方法既适用于各种均匀土, 又适合于天然的不均匀土; 既适用于渗透破坏型式为流土型的土, 又适用于管涌型的土, 具有广泛的适用范围。

粘性土方面, 为确保防渗体的安全, 建议按可能出现裂缝的原则设计反滤层, 并通过各类粘性土的试验研究结果, 提出了一套按土的液限状态时的孔隙比设计反滤层的方法。

砾质土方面, 建议以全料中小于 2mm 的颗粒组成为基础确定全料的控制粒径。

反滤层研究工作的独创之处, 在于全面而系统地研究了各类土控制粒径的取值问题, 结合土的渗透破坏性质, 给出了一套确定各类土的控制粒径的方法。既遵循了太沙基反滤层设计原理, 又拓宽了反滤层的使用范围, 确保反滤层的滤土和减压作用, 确保渗流出口的渗透稳定性。

3. 渗流控制的原则应是防渗、排渗、反滤层三结合

早期工程界虽然已认识到保护渗流出口的重要性, 由于对反滤层防止渗透破坏的能力认识不足, 加之反滤层设计方法的不完善, 防止出口渗透破坏的工程措施依然是加大建筑物防渗体的长度, 以减小渗流出口的水力比降。结合多年的工程实践经验及研究结果, 汇集国内外专家的论述, 可以认为, 用反滤层保护渗流出口是防止水工建筑物渗透破坏既经济又可靠的措施, 在反滤层的研究日臻完善的今天, 它将是保证堤坝安全的后盾。因此,

提出渗流控制的基本原理应从单纯的防渗、减小渗流量发展为防渗、排渗、反滤层三结合的原理。

防渗主要起控制渗流量的作用，渗透稳定主要依靠渗流出口的反滤层。

4. 提出了判别无粘性土渗透稳定性质及确定各类土抗渗强度的方法

根据大量的试验研究成果，对无粘性土首次提出以土中细料含量的多少判别土的渗透稳定特性的方法，即细料含量法；再根据渗透稳定性质，同时给出了确定抗渗强度的方法，为国内所广泛采用。对粘性土分为有无裂缝两种情况，分别给出了确定抗渗强度的方法。

本书第一篇主要阐述了作者多年的大部分研究成果，其中第二、三、四、八章在专著《土的渗透稳定与渗流控制》^①中已有论述，在本书中又作了一定的补充和修订。在其他各章的论述中，有的内容曾公开发表在一些刊物上，在本书的论述中主要只阐明其结论，省略了研究方法及资料分析等细节，如果读者对细节尚有一定的兴趣，请参阅专门的论文。

第二篇的内容除通过作者调查研究的工程实例来进一步阐明上述四个问题外，主要还展现了如何应用已有的研究成果来分析工程中实际出现的问题，同时阐明了如何正确地对待防渗体内部存在的裂缝及薄弱环节；如何正确地进行工程安全评价，并试图对土石坝的渗流安全评价作出示范。在第十一章第八、九、十三节中主要阐明以上问题。本书提出工程渗透破坏实例的另一目的是希望读者对提供的资料作进一步地深入分析，使失败的教训真正变成“成功之母”，推动水利工程建设蓬勃发展。

在完成上述研究工作的过程中，已故的中国水利水电科学研究院原院长、中国科学院院士、教授黄文熙先生，岩石土工研究所原所长、教授蒋彭年先生从1958年筹建实验室开始始终给予了大力的支持、热情的关怀与指导，在此对他们表示深切地怀念。中国水利水电科学研究院渗流稳定实验室的同仁凌均熙、张静敏、缪良娟三位同志给予了大力的协助及我的夫人唐淑晶的鼎力相助，保证了各项研究任务的顺利完成。总结40多年的研究的成果，他们功不可没。在此表示衷心的感谢！

中国科学院资深院士、教授汪闻韶先生欣然为本书作序，特此表示诚挚的谢意！

本书在出版过程中得到中国水利水电科学研究院及岩石土工研究所领导的大力支持，并给予出版资助，在此也一并向他们致以真诚的感谢！

由于作者水平和时间的限制，一定会有不足和欠妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2005年5月

① 刘杰．土的渗透稳定与渗流控制．北京：水利电力出版社，1992。

目 录

序 前言

第一篇 土石坝渗流控制理论基础

第一章 土石坝渗流控制理论的发展成就及现状	3
第一节 发展简史	3
第二节 土石坝渗流控制方面已有的成就及当前的水平	6
参考文献	12
第二章 土的渗透性质及渗透系数的计算方法	13
第一节 概述	13
第二节 土中渗透的基本定律	13
第三节 渗透系数的物理意义	15
第四节 无粘性土渗透系数的计算方法	15
第五节 砾石土的渗透性	24
第六节 几种类型土渗透系数的计算方法	28
参考文献	28
第三章 无粘性土及砾石土的渗透稳定特性及抗渗强度	30
第一节 概述	30
第二节 砂和砂砾(卵)石的渗透破坏型式及判别方法	31
第三节 判别各类无粘性土渗透破坏型式的细料含量法	35
第四节 判别各类无粘性土渗透破坏型式的渗透系数法	40
第五节 天然无粘性土渗透破坏型式的各类判别方法综述	41
第六节 确定各类无粘性土抗渗强度的方法	41
第七节 砾石土的渗透变形型式及判别方法	43
参考文献	45
第四章 粘性土的抗渗强度	46
第一节 概述	46
第二节 各类粘性土的渗透破坏型式	46
第三节 分散性粘性土的基本性质、鉴别方法及抗渗强度	47

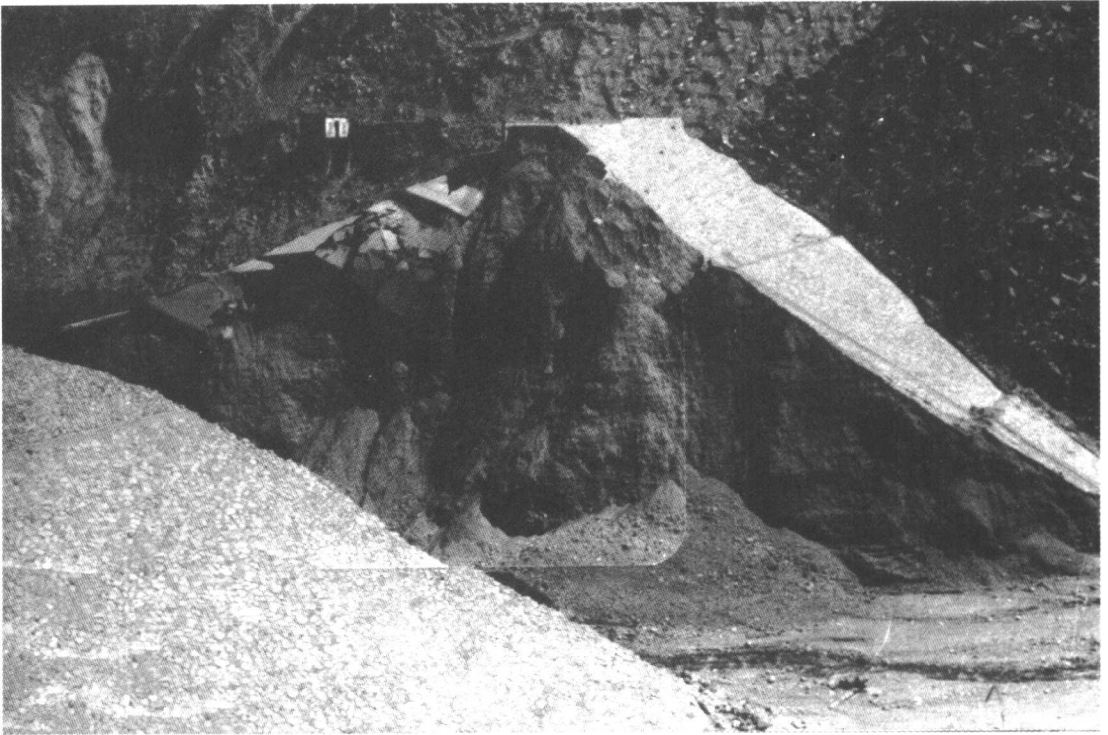
第四节 一般粘性土正常条件下的抗渗强度及确定方法	52
参考文献	57
第五章 土的渗流接触冲刷的抗渗强度	58
第一节 概述	58
第二节 土质防渗体与基岩接触带的渗流接触冲刷的抗渗强度	58
第三节 成层无粘性土层之间的渗流接触冲刷的抗渗强度	66
第四节 土与刚性水工建筑物之间的渗流接触冲刷的抗渗强度	68
参考文献	69
第六章 土的渗透压密性质	70
第一节 概述	70
第二节 土体渗透压密的基本原理及性状	70
第三节 土的渗透压密性质的试验研究	71
第四节 土的渗透压密工程实例	75
参考文献	76
第七章 土质防渗体裂缝自愈机理及抗渗强度的确定方法	77
第一节 概述	77
第二节 心墙土体裂缝自愈机理	78
第三节 土体裂缝自愈试验研究方法	80
第四节 裂缝土体自愈性状的试验研究	82
第五节 裂缝土体抗渗强度的确定方法	86
参考文献	88
第八章 反滤层控制渗流的基本原理与各类土反滤层的设计方法	89
第一节 反滤层的崛起及发展过程	89
第二节 反滤层控制渗流的基本原理	97
第三节 无粘性土反滤层设计方法	99
第四节 砾石土反滤层设计方法	102
第五节 粘性土反滤层设计方法	104
第六节 分散性土反滤层的设计方法	106
第七节 反滤层的粒径组成及层厚和层数的确定方法	107
第八节 反滤层防止土体渗透破坏的能力及被保护土的抗渗强度	107
参考文献	109
第九章 排水体功能的基本原理与设计方法	110
第一节 排水体的功能及型式	110
第二节 排水体在渗流控制中的重要地位	111
第三节 排水体设计原理与方法	113
参考文献	114

第二篇 土石坝渗流控制经验与教训

第十章 综述	117
第十一章 渗透破坏和溃决的工程实例	120
第一节 龙凤山水库坝基渗透破坏实况	120
第二节 龙门水库坝体渗透破坏性状	123
第三节 玉马水库土坝斜墙管涌塌坑的开挖结果	129
第四节 太河水库上游坝坡四处塌坑原因分析	137
第五节 西斋堂水库土坝混凝土防渗墙顶部的塌坑	142
第六节 嵩山水库土坝渗透破坏原因分析	152
第七节 黄壁庄水库副坝坝体混凝土防渗墙加固中的大规模多处塌陷	160
第八节 一座裂缝自愈的斜墙坝	168
第九节 一座极薄心墙坝的渗流安全评价	171
第十节 用钻孔注水方法评价土坝心墙裂缝的教训	180
第十一节 分散性土土坝的破坏特征及防护措施	185
第十二节 岭落水库均质土坝渗透破坏性状及溃坝原因分析	193
第十三节 八一水库溃坝原因分析	198
第十四节 沟后面板砂砾石坝溃坝机理分析——溃坝模型试验	204
参考文献	218

第一篇

土石坝渗流控制理论基础



第一章 土石坝渗流控制理论的发展成就及现状

渗流理论包括渗流的基本原理、渗流场的计算分析方法、土的渗透和渗透稳定性四个方面，它是渗流控制理论的基础。渗流控制包括控制理论和控制技术两个方面。控制理论是指基本原理和方法，如防渗、排渗和反滤层三结合的基本原理以及反滤层的设计方法等；控制技术是指原理的实施措施，在地基方面，如灌浆、防渗墙及水平铺盖等技术，在坝体方面，如防渗斜墙、心墙、混凝土面板等技术。渗流控制理论是渗流理论在工程实践中的发展和应用，是实践反馈的结果。渗流控制的目的包括减小水工建筑物及地基的渗漏量和保证建筑物及地基的渗透稳定两个方面。其中，保证建筑物及地基的渗透稳定以保安全是首要问题，就绝大部分工程而言，安全控制比渗流量控制更显重要。

第一节 发展简史

土石坝是挡水建筑物，它和渗流并存，有土石坝就有渗流，土石坝的发展史也就是渗流理论和渗流控制理论的发展史。正是由于1856年达西（Darcy）提出了土中渗流的基本理论，使土石坝设计在20世纪的前半个世纪在设计理论方面就出现了六大突破。

一是1886年佛契海姆（P. Forchheimes）发现土中渗流符合拉普拉斯方程，并在1914年提出了用流网法进行图解试算坝体渗流场。

二是1910年布莱根据修建在不同土壤上水闸的运行经验，发表了水工建筑物渗流控制的第一个法则，即布莱法则。它首次描述了作用水头、渗径长度及土壤渗透稳定性质三者之间的本构关系，为以后渗流控制理论的发展奠定了基础。

三是1916~1926年瑞典的彼得森（K. E. Petterson）及弗伦尼斯（W. Fellenius）提出了坝坡稳定分析方法瑞典圆弧法。

四是1922年太沙基（K. Terzaghi）在渗流控制方面提出了用反滤层保护渗流出口的原理，并给出了第一个反滤层设计的准则。

五是1925年太沙基提出了有效应力的概念，这一概念成为土力学理论的奠基石。

六是1933年普若克特（P. R. Proctor）给出了压实土的含水量与压实干密度的基本关系，并根据土的力学性质提出了压实土最大干密度和最优含水量的概念及相应的压实方法，使土石坝的压实问题有一明确的概念和标准。

以上六项突破使土石坝的设计理论与方法从纯经验的阶段，步入了半经验半理论的阶段。六项突破中有五项与渗流有关，其中三项纯粹是渗流问题。这充分表明了渗流问题的研究在土石坝建设中的重要地位。特别是渗流控制理论的建立与发展使水工建筑物的结构型式更加完备，断面尺寸更加经济，安全性显著提高。

此后, 渗流控制理论得以大力发展, 其发展过程可分为如下三个阶段。

一、以防渗为主的阶段

1910 年布莱首次提出了以渗径长度控制闸基渗流的概念, 并根据建筑物实际运行经验, 给出了建于各类散离体地基上闸坝的底板长度 (L) 与水头 (H) 的关系, 以保证闸坝地基的渗透稳定性, 成为著名的布莱法则, 并称为爬行比 (Creep ratio) 理论, 其表达式为 $L=CH$ 。随着渗流理论的发展, 以后深化为作用于闸坝底板不透水轮廓的平均水力比降 (J) 等于或小于土壤的允许水力比降 ($J_{\text{允许}}$) 的方法, 即: $H/L = J \leq 1/C$, 式中, C 为布莱的爬比系数, 它取决于地基土壤的种类, 并将 $1/C$ 深化为地基土的允许水力比降。以后布莱法则又进一步推广到土石坝及地基的渗流控制中, 成为普遍的渗流控制法则。继后 1932 年吕荣 (Lugeon) 提出了岩基渗流控制的方法, 岩基灌浆以 1Lu 单位为标准^①, 即控制渗透系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。长期以来成为岩石地基的渗流控制标准。

1922 年 H. H. 巴甫洛夫斯基在渗流场的理论分析中发现渗流场中的水头分布并不是按布莱法则沿地下不透水轮廓长度呈均匀分布的, 而是在渗流出口处最大。因此, 提出渗流控制应以渗流出口的水力比降不超过地基土的允许水力比降为原则, 进一步确定闸坝的地下不透水轮廓长度。这种方法首次明确了控制渗流出口的重要性, 但是仍然属于以渗径长度控制渗流的范畴, 然而在渗流场的认识方面比布莱法则前进了一大步。控制水工建筑物渗流出口水力比降的方法, 20 世纪 50 年代在前苏联广为流行, 对我国也有深远的影响。

二、防渗与排渗相结合的阶段

防渗措施虽然是减小渗流量的根本方法, 但渗流量的大小不单纯决定于防渗体的渗径长度, 还与渗透系数有直接关系。所以, 它只表明建筑物和地基防止渗透水量的能力, 并不能表明渗流场水头的分布情况, 即渗透力的分布情况, 因而不能反映渗透稳定的性状。国内外许多土石坝的渗透破坏或失事, 都不是由于防渗性能不好渗漏量过大而造成。如第二篇所举渗透破坏的一些工程实例, 其渗漏量都不大。究其主要原因是被防渗体拦截断的渗流, 在水工建筑物的整个运行过程中始终都是在寻找出路, 企图释放能量, 特别是寻找薄弱的渗流出口, 一旦发现薄弱的渗流出口就要造成渗透破坏, 所以往往防不胜防。另外, 防渗体的渗径越长, 作用于坝体或坝基的总水压力越大, 建筑物的静力稳定性越差。如闸基的不透水底板越长, 作用于底板的扬压力越大, 水工建筑物的造价也越高。随后发现, 排渗是种疏导的方法, 其目的是主动而有意识地释放防渗体中的能量, 并将渗流主动地排向下游, 以防其任意寻找薄弱的出口, 同时起到降低闸坝地基的扬压力或坝体浸润线的作用。通过实践的不断总结, 认识到排渗的方法同样是渗流控制的有效措施。但排水措施缩短了渗径, 加大了水力比降, 反而会加剧渗透破坏, 致使初期阶段工程界对此种方法不敢随意使用。随着反滤层研究工作的不断深入及方法的日臻完善, 并广泛地使用于渗流出口后, 使排水措施的不足之处有了补救措施, 从此排水措施的安全性得到了保证, 其作用也相应地得到有效发挥。

早在 1922 年太沙基就用反滤排水的方法, 成功地解决了闸基的渗透稳定问题, 并提出了第一个无粘性土反滤层设计准则。以后又建议在均质土坝坝内设置垂直排水体, 以保

① 压水试验时水压力为 10bar, 每米钻孔长度每分钟的耗水量为 1L, 称此水量为 1 吕荣单位 (Lu)。

证降低坝体浸润线。从此, 水工建筑物的渗流控制措施逐渐由单纯的防渗阶段进入了防渗与排渗相结合的阶段。

由于对反滤层的作用和水工建筑物渗透破坏机理的认识不足, 以及土的渗透变形理论的研究刚刚兴起, 前苏联从 20 世纪 50 年代开始在渗流控制理论方面曾出现了一场新的争论, 争论的焦点是: 在渗流理论已经得到发展的条件下, 布莱法则是否仍然适用。仔细分析当时争论的情况, 其焦点问题有二:

(1) 土的抗渗强度的确定方法是否仍然沿用布莱的工程实例统计法。一种意见是坚持采用工程实例统计的方法。其理由是水工建筑物的渗透破坏都是由一些偶然因素所造成, 经验统计所得的抗渗强度在一定程度上能反映这种偶然因素, 并将统计所得抗渗强度称为偶然抗渗强度。同时, 在计算闸底板的渗径长度时要求考虑有效的渗径长度, 即要考虑渗流进口、出口及垂直防渗板墙的附加水头损失, 并提出了近似算法——阻力系数法。另一种意见是土的抗渗强度的确定应考虑土的渗透稳定理论方面的发展水平。因为土的渗透稳定的研究已经有了一些明确的结果, 应考虑土的渗透稳定理论方面的研究成果。

(2) 在水力比降方面, 一种意见是仍按布莱法则确定需要控制的水力比降; 另一种意见认为, 主要应是控制渗流出口的水力比降, 使之保持在土的允许水力比降范围之内。同时还强调在渗流出口一定要设置反滤层, 但反滤层的作用此时仍放在辅助地位^[1]。争论的结果, 有力地促进了土的渗透稳定性质及反滤层的研究, 使之有了长足的进步, 用统计方法获得的允许平均水力比降也得到了大幅度的提高, 致使水工建筑物防渗体的尺寸明显减小, 薄心墙坝大力发展, 而且提高了对保护渗流出口的重要性, 以及对反滤层在渗流控制中重要作用的认识。

三、明确反滤层保护渗流出口是渗流控制的关键措施

理论和实践不断发展的结果表明, 水工建筑物及地基的渗透稳定问题, 首先取决于渗流出口的渗透稳定性, 渗透破坏都是开始于渗流出口的。渗流出口包括内部和外部两个方面, 内部渗流出口包括与下游相连通的强透水层或内部排水等, 而不与下游相连通的强透水体不能算作渗流出口。单纯延长渗径长度, 加强防渗措施, 固然可以起到减小渗流出口水力比降的作用, 但用反滤层直接保护渗流出口, 保证水工建筑物的安全, 要比加强防渗更直接, 更有效, 而且更经济, 是一种事半功倍的方法。从 20 世纪 40 年代开始, 反滤层的研究不断深入, 设计方法不断完善, 而且得到广泛使用, 使水工建筑物的安全性, 可靠性显著提高。直到 70 年代末期, 由于土的渗透稳定性研究的更加深入发展, 对渗透破坏的机理也有了明确的认识: 渗流破坏都是开始于渗流出口, 然后向上游发展^[2]。因而也就提出了用反滤层保护渗流出口, 是防止渗透破坏保证土工建筑物安全的首要措施, 渗流控制的原则应是防渗和排渗相结合, 反滤层是后盾^[3]的概念。在此以后, 进入 80 年代中期, 世界著名坝工专家谢拉德 (J. L. Sherard) 同样明确地提出反滤层是防止土石坝渗透破坏的关键性措施的观点^[4]。此时, 高土石薄心墙坝大量崛起, 1980 年高 237m 的契夫斜心墙坝建成并投入运行; 第一座高 140m 的面板坝安奇卡亚坝于 1974 年建成并投入运行, 高土石坝建设方兴未艾。

从 20 世纪 80 年代开始, 防渗和反滤层各自的作用更加明确: 防渗体的功能主要是防止渗漏, 减小渗流量, 承担作用于坝体的水头, 而保证渗透稳定的作用主要依靠渗流出口的反滤层。从此使渗流控制理论及实践逐渐明确地进入了防渗、排渗和反滤层三结合的新阶段。

可以说现代渗流控制理论包括了布莱法则、巴甫洛夫斯基渗流理论、土的渗透稳定理论及太沙基反滤层保护渗流出口等四个方面的综合内容,是四个方面的综合运用,特别是在安全方面突出了渗流出口及用反滤层保护渗流出口的重要性。

第二节 土石坝渗流控制方面已有的成就及当前的水平

一、渗透破坏的机理更加明确

大量的室内试验及工程原型观测结果表明,土的渗透破坏都是从薄弱的渗流出口开始的,渗流先从出口带走土颗粒,然后继续向上游发展,最后形成上下游连通的渗流通道。出口无渗流破坏的条件,内部即使有薄弱层或裂缝也不会发生渗透破坏。第二篇中列举的工程实例充分地阐明了渗透破坏的上述机理。黑龙江省龙凤山水库地基的渗透破坏就是一例,破坏过程就是先从下游开始而后向上游发展的。国内对坝面出现塌坑的几座土坝开挖检查的结果表明,出现塌坑的普遍原因都是塌坑的出口部位无反滤层,或者有的是反滤层遭破坏,出现北京西斋堂水库短铺盖上的塌坑,就是反滤层遭破坏而造成的;除此以外,有的渗透破坏是因在心墙部位钻孔,人为地造成无保护的渗流出口,如河北省龙门水库大坝破坏的起因,就是穿过已废的导流洞的钻孔,成为坝体土料无保护的渗流出口,渗流从穿过导流洞洞壁的钻孔带走坝体土料进入导流洞,然后由导流洞不断带到下游,坝体的渗透破坏并沿导流洞外壁向上游发展,最后沿外壁形成向上游连通的渗流通道。国际上两座有名的被渗流破坏的土坝是英国的巴尔特海德坝和美国 93m 高的提堂坝,尽管这两座坝渗流破坏的分析结果是与水库初次蓄水速度过快有关,但关键是前者薄心墙的上部和后者岸边深入基岩深度达 21m 的截水键槽与防渗心墙连接带产生水力劈裂裂缝,工程界共同的认识是巴尔特海德坝心墙的反滤层粒径 $D_{15} \leq 8\text{mm}$,过粗,不能防止心墙中的水力劈裂裂缝渗透冲蚀而导致破坏。提堂坝岸边的截水键槽的下游面与裂缝发育的岩面直接相接触,未设反滤层,水力劈裂后的低塑性粘土遭裂缝渗流冲蚀,并从岩石缝隙中流失,造成大坝失事。

工程实践又从另一方面说明,只要渗流出口有合适的反滤层作保护,即使内部有薄弱带也不会引起渗透破坏。如加拿大 1975 年建成的 108m 高的马尼克 3 号坝,是座砂砾石坝壳冰碛土厚心墙坝,心墙较厚,底宽达 0.75 倍水头。水库首次蓄水满库后,不久就发现心墙下游侧测压管水位很高,接近水库水位。为此,在心墙及下游坝壳中钻孔检查,证明心墙中存在水力劈裂产生的水平缝,使上下游相连通。但在同一断面中,心墙下游侧反滤层中的水位却很低,表明通过心墙裂缝的渗流量很小,反滤层仍能保证排水作用。虽然发现心墙中的测压管水位很高,有裂缝,但因下游侧的反滤层粒径很细, $D_{15} = 0.2\text{mm}$,能起到渗流控制的作用,因此大坝一直安全运行。

对于土的渗透破坏机理问题通过室内试验进行仔细观察均能得出:无论管涌或流土破坏,渗流都是首先由出口带出颗粒然后逐步向上游发展,直至全部破坏,没有发现先从内部破坏而向上游发展的任何实例。这一概念的明确,使渗流控制在保证安全方面需要控制的重点得到了明确的肯定,即渗流出口渗透稳定的控制是渗流安全控制的关键因素。

二、下游反滤层是土石坝安全的保障

反滤层的功能是滤土减压,既能阻止坝体或地基的土颗粒被渗流带走,同时又能排水减压,主动地释放防渗体中的水压力,使渗透水流进入反滤层后压力全部消失。渗流出口设置反滤层后,实际上是提高了土的抗渗强度,并将渗流出口移至无水压力的反滤层中,使渗流完全失去能量。只要土颗粒不从渗流出口带向下游,整个大坝的渗透稳定就可得到保证。国内外近30多年来建成的一些土石坝的运行情况表明,即使防渗体局部存在些薄弱环节,甚至出现贯通性的裂缝,只要防渗体下游面反滤层的性能良好,薄弱环节在长期运行中的性能可以改善,土体密度可以提高,裂缝会自行愈合,大坝仍可安全运行。下面事例可以充分说明这一问题。

1. 防渗体的薄弱环节未能影响坝的安全运行

如第二篇所述的我国1974年建成的辽宁省柴河大坝^[5],坝高42m,是当前世界上最薄的一座心墙土石坝,心墙边坡为1:0.064,土料为粉质粘土,是在高含水量的情况下填筑的,填筑过程中曾出现过太范围的弹簧土,压实度较低,仅为普氏标准的0.94。水库蓄水后进一步在心墙中钻孔检查,发现心墙下部缩孔现象严重,表明有软土层,并通过钻孔电视检查,发现心墙中有裂缝,所以一直限制库水位,大坝不能投入正常运行。后经多方面安全论证,确认心墙下游面的反滤层是可靠的。反滤层是天然砂砾石料,厚度达4.0m,砂砾石料的不均匀系数 $C_u=48.5$ mm,等效粒径 $D_{20}<0.5$ mm。经过心墙土有裂缝情况下的试验,结果表明,大坝心墙裂缝在反滤层保护下不仅不会引起渗流冲蚀,而且会自身愈合。故结论是心墙后的反滤层能保证大坝的安全运行,1985年决定大坝投入正常运行。1995年7月经过了特大洪水考验,库水位达设计最高洪水位116.0m,大坝安全无恙,至今运行正常,心墙中的裂缝和软土层并未影响特薄心墙坝的安全运行,心墙下游面反滤层的保护作用功不可没。

2. 裂缝在渗流作用下将会自行愈合

我国1970年投入运行的河南省昭平台水库,坝高35.5m,为斜墙土坝,土料为重粉质壤土,填筑质量较高。坝壳为砂砾石,与斜墙之间设一层4m厚的细砂层,不均匀系数 $C_u=3.3$,等效粒径 $D_{20}\leq 0.2$ mm,是一种严格的斜墙反滤层。反滤层与坝壳之间的层间关系同样良好,不会进入坝壳砂砾料。因此,斜墙下游的坝壳料是良好的反滤排水体。1979年9月,库水位超过了以往的运行水位,并由167.0m迅速上升到174.52m。当库水位达到171.82m时,1+166m断面坝后脚出现了渗流,1980年3月库水位降至167.0m后坝后渗流全部消失。事后用同位素在上游坝面测试,结果是在桩号1+658~1+662m范围内,高程169m附近斜墙中有裂缝。以后库水位一旦高于167.0m,1+166m断面坝脚处就有渗流逸出,但渗流量逐年在减小,同时坝后渗流消失时的库水位呈逐年升高的趋势。^[6]

上述现象说明,斜墙在初次进入高水位运行时由于水位上升速度过快产生了裂缝,并出现了集中渗流,但在下游面细反滤层的保护下依然可以正常运行,而且在运行过程中裂缝又逐渐自愈。这工程实例说明,反滤层有效地起到了控制裂缝渗流的作用。

3. 反滤层可以保证裂缝的自愈

20世纪80年代,中国水利水电科学研究院进行了大量的裂缝自愈的试验研究,试验是在高水头下进行的,而且采用了一次突然施加水头的方法。试验分两种情况:一种是模