



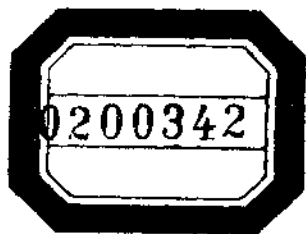
白永年 吴士宁 王洪恩等 编著

土石坝加固

水利电力出版社

土石坝加固

白永年 吴士宁 王洪恩等 编著



005903 水利部信息所

水利电力出版社

(京)新登字115号

土石坝加固

白永年 吴士宁 王洪恩等 编著

责任编辑：薛云霞

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 28.5印张 756千字 1插页

1992年3月第一版 1992年3月北京第一次印刷

印数 0001—5120册

ISBN 7-120-01457-9/TV·527

定价 30.50元

内 容 提 要

本书系统地介绍了近年来具有国内先进水平的病险土石坝工程加固治理技术的研究成果及其应用实例，是理论与实践结合的精湛著述，对我国水库、堤防等工程防洪保安全建设，具有重要的实用价值和学术价值。

本书共分十章，主要内容包括：土石坝的病害和失事；土石坝、堤防工程隐患探测；土石坝砂壳抗震加固技术；土石坝坝体劈裂灌浆加固技术；堤坝地基劈裂灌浆；高压喷射灌浆防渗技术；基岩及岩溶灌浆；浆液；其它防渗加固技术；排水反滤及坝内建筑物病害处理。

本书读者对象主要是水利水电工程管理、规划设计、专业施工和其他工程技术人员，亦可供大专院校有关专业师生参考。

推廣加固技
術使水庫永葆
青春

楊振懷

一九八九年
十二月三十日

前 言

我国大部分地区处于北温带季风气候区，年内和年际降水量极不均匀，历史上江河多次泛滥，旱涝洪灾交替频繁发生，给人民生命财产造成过巨大的灾难。中华人民共和国成立后，为战胜自然灾害，党和人民政府广泛发动群众、依靠群众，到1987年底已修建水库8.2万余座，堤防20万余km，在防洪、除涝、灌溉、发电、养殖等方面发挥了巨大作用，为发展工农业生产，促进我国的国民经济建设，保证人民生命财产的安全，创造了十分有利的条件，其效益之大是历史上从未有过的。

为适应土石坝工程的加速建设，我国有关专家作了大量的理论研究，并在工程实践中总结出许多好经验，编写了许多有关论著，先后出版了《土坝设计》、《土石坝施工》等书，为促进我国的土石坝建设作出了积极的贡献。但由于种种原因，特别是施工和管理方面的问题，已建的许多土石坝和堤防质量较差，存在不同程度的渗漏、管涌、裂缝、洞穴和坝壳质量松散等隐患，成为病库险堤，不能正常蓄水运用，影响着工程效益的充分发挥，有的造成滑坡甚至垮坝事故，给国家和人民带来严重损失。

为了解决土石坝存在的这些问题，山东省根据本省土坝多、质量差、渗漏现象严重等实际情况，早在70年代就开始对病险水库土坝进行了灌浆加固等试验研究，经过10多年的努力，获得了若干好的科研成果。并先后发表过一些论文和著作，如《土坝坝体和堤防灌浆》、《土坝坝体劈裂灌浆技术》等，深受广大工程技术人员的欢迎，在土石坝加固治理工作中发挥了积极作用，收到了良好的效果。随着生产的发展，土石坝加固技术发展很快。近年来为适应生产的需要，我们在土石坝加固技术上分专题进行了更为系统深入的研究，从坝体到坝基（包括岩基），从粘土心

墙到砂壳，从隐患探测到加固处理等，形成了一套相互配套的加固技术，获得了一批较完整的科研成果，在理论上和实践上都有了进一步的提高和发展。为把这些技术更好地运用于土石坝加固治理工作中，以充分发挥我国已建水库工程的效益，并与我国原有的土石坝工程著作相配套，山东省水利科学研究所以自己多年来的研究成果为基础，并参考、搜集了国内其它有关的先进技术，系统地编写了这本《土石坝加固》专著。

本书的编著出版得到了水利部领导、水管司和许多专家学者的关心支持，在此一并表示感谢。

本书不涉及水库防洪标准的有关问题。主要内容是近年来对病险土石坝工程加固治理技术研究最新成果的荟萃。这些成果中有两项获国家科技进步二等奖，一项获国家科技成果推广奖，还有的成果获部级、省级科技进步一等奖或二等奖，在国内处于领先地位，有的在国际上也属先进水平。书中介绍的一些新技术、新工艺，没有受经典理论的约束，在机理上进行了大胆的探索，提出了一些新的理论和见解，并运用系统的原型观测资料作了充分论证，从而发展了前人尚未探索的基础理论，为这些新技术、新工艺的脱颖而出和全面开发应用，提供了有力的论据。书中的研究成果是根据我国土石坝存在的实际问题，结合我国的具体情况，经过反复的实验研究提出的，具有广泛的实用性和推广价值。经各地实际应用，证明这些技术设备简单，施工方便，有良好的技术经济指标。其中坝体劈裂灌浆和高压喷射灌浆技术经鉴定后，国家科委和水利部发文向全国推广。目前，全国已有20多个省（自治区、直辖市）普遍推广运用了这项技术。约计加固处理病险土石坝2000余座，堤防1000余km，收到了重大的经济效益和社会效益。与采用或引进国外技术相比，已为国家节省资金数亿元，在病险水库和堤坝工程的加固中发挥了重要作用。

书中介绍的技术和经验是在一定条件下取得的，有其一定的适用条件，不能生搬硬套；在具体运用时，要进行多种方案的技术经济比较，根据实际情况，因地制宜地选用。

本书的读者对象主要是水利水电工程管理、规划设计、专业施工及其他工程技术人员，亦可作为大专院校和中等专业学校的教学参考书。

本书共分10章。为保持本书的完整性和技术上的系统性，对已发表过的一些著作和某些广泛应用的常规技术，也扼要地编入了本书。

本书涉及的专业多，业务面广，是集体努力和创作的结果，渗透着集体的劳动和智慧。

本书由白永年、吴士宁、王洪恩主编。参加各章编写的人员如下：第一章，顾淦臣；第二章，第一至六节，张春华，第七节，朱济圣、董新美；第三章，吴士宁、林木春，其中第二节中的有效应力分析部分由孙明权、顾淦臣编写；第四章，白永年、王洪恩、刘宪奎；第五章，王洪恩；第六、七章，王宝玉、王明森；第八章，王洪恩；第九章，王洪恩、于素华、耿灵生、卢超；第十章，关德斌。全书由水利部牛运光高级工程师审定。

由于水平有限，书中错误和不足之处，敬请读者批评指正。

编著者

1991年3月

目 录

前 言

第一章 土石坝的病害和失事	1
第一节 概况	1
第二节 管涌和流土等渗透破坏	5
第三节 滑坡	24
第四节 裂缝	43
第五节 动物破坏	68
第六节 地震震害	76
第二章 土石坝、堤防工程隐患探测	106
第一节 直流电阻率法	106
第二节 自然电场法	137
第三节 激发极化法	146
第四节 甚低频电磁法	163
第五节 放射性同位素法	172
第六节 其它勘探方法	179
第七节 渗流观测与流网法的应用	189
第三章 土石坝砂壳抗震加固技术	208
第一节 土石坝砂壳填筑质量的检验	208
第二节 土石坝地震液化或破坏可能性的判别	215
第三节 土石坝的抗震加固措施	278
第四章 土坝坝体劈裂灌浆加固技术	332
第一节 土坝坝体劈裂灌浆机理	332
第二节 灌浆设计	371
第三节 灌浆适用范围	408
第四节 灌浆施工	416
第五节 观测工作	464
第六节 灌浆效果检查和验收	494
第七节 灌浆设计与施工实例	498
第五章 堤坝地基劈裂灌浆	549
第一节 概述	549

第二节	堤坝地基劈裂灌浆机理	550
第三节	堤坝地基劈裂灌浆试验	558
第四节	灌浆设计	567
第五节	灌浆施工	577
第六节	工程实例	582
第六章	高压喷射灌浆防渗技术	589
第一节	概述	589
第二节	基本原理	592
第三节	高压喷射灌浆施工	616
第四节	工程应用实例	649
第七章	基岩及岩溶灌浆	699
第一节	坝基渗漏处理原则	700
第二节	帷幕灌浆施工	701
第三节	岩溶灌浆	726
第四节	工程应用实例	730
第八章	浆液	743
第一节	概述	743
第二节	浆液及其结石的物理力学性试验	746
第三节	粘性土浆液的物理力学性质	766
第四节	水泥浆及其结石的物理力学性质	774
第五节	粘土水泥浆及其结石的物理力学性质	785
第六节	粘土水泥浆结石渗透破坏坡降的试验	801
第七节	水泥砂浆及粘土水泥砂浆	809
第八节	一般常用化学灌浆液	810
第九章	其它防添加固技术	834
第一节	射水造槽法建造混凝土防渗墙技术	834
第二节	组合潜水钻机法构筑地下混凝土防渗墙技术	840
第三节	板桩灌注防渗墙技术	848
第四节	倒挂井法防渗墙技术	854
第五节	土坝套孔冲抓防渗墙技术	862
第十章	排水反滤及坝内建筑物病害处理	869
第一节	概述	869
第二节	反滤及排水的处理	872
第三节	坝体内建筑物存在问题的处理	882
参考文献		892

第一章 土石坝的病害和失事

第一节 概 况

由于勘测设计不周、施工不良和管理运行不当等内因，以及水压力、地震、战争等外因，使坝及枢纽建筑物发生缺陷病害以致存在潜在危险的称为病害事故，坝及枢纽建筑物毁坏致使大坝溃决的称为溃坝失事。

现在全世界约有40余万座水坝。其中我国水库库容在10万 m^3 以上的坝约8.29万余座，美国有6.8万余座，瑞典有1万座；高于15m的坝，我国有1.8万余座，全世界除我国以外有1.4万余座。据美国1980年的统计认为，世界上对下游有潜在危险的坝约有15万座。

国际大坝委员会对大坝安全问题很重视。1948年第三届国际大坝会议安排了防止管涌最新措施的议题；1951年第四届大会安排了在坝址可能出现的最大设计洪水估计的议题；1967年第九届大会列入了从基础和库岸角度看大坝安全的议题；1970年第十届大会列入了大坝和水库运行时的监测的议题；1979年第十三届大会列入了大坝的老化与失事的议题；1982年第十四届大会列入了运行中大坝的安全的议题。

我国自1975年8月河南发生大洪水致使板桥、石漫滩两座大型水库溃坝失事后，美国自1976年提堂（Teton）坝初次蓄水发生溃坝失事后，都开始对各类大坝的安全进行了检查，并对病险坝逐步进行了加固处理。

一、溃坝失事原因

研究土石坝失事的原因，对勘测设计、施工和管理运行应注意的重点问题将有所启示。据美国垦务局R.B. Jason估计，在国

外,过去800年间约有2000座水库失事。至于失事原因,有不少人作过分析,择要介绍如下: 1953年,密得尔布鲁克(T. A. Middle Brooks)对100多年来200例失事坝进行了分析,其分析结果为:洪水漫坝占30%,漏水管涌占25%,坝下埋管漏水占13%,滑坡占15%,上游护坡毁坏占5%,其它占7%,原因不明占5%。

1979年,在第十三届国际大坝会议上,西班牙的一位工程师分析了本国200年来52座坝溃坝的原因,其中:洪水漫坝占14%,溢洪道冲蚀占10%,闸门漏水破坏占6%,坝体坝基漏水管涌占16%,冰冻占11%,沉陷占10%,滑动失稳占15%,施工错误占42%

1980年,苏联的一位工程师分析了700多座失事坝(包括混凝土坝)的原因,其中:洪水漫坝占12%,坝基或岸坡漏水管涌占16%,坝体漏水管涌占11%,坝基失稳占15%,兽类挖洞造成渗漏破坏占9%,温度或收缩裂缝占6%,地震(包括诱发地震2%)占6%,初蓄水或水位突然消落占5%,波浪侵蚀占2%,冻融占4%,运行不当占4%,其它未查明原因占10%。

我国溃坝总数约2000余座。其中96%是区、乡自建的小型水库。在溃坝总数中,运行期溃坝占74%,施工期溃坝占26%。其中:经过良好勘测设计和按规范施工的板桥、石漫滩两座土石坝,是因洪水漫坝而失事;其它溃坝的都是草率设计施工的小坝。失事原因百分比为:洪水漫坝占51.5%,坝体漏水占22.7%,坝基漏水占1.3%,溢洪道基础漏水和混凝土或砌石冲刷占6.6%,隧洞漏水占4.5%,隧洞衬砌破坏占0.8%,坝体滑坡占2.6%,工程管理不当占4.2%,库区或坝头塌岸及其它占4.6%,原因不详占1.2%。

综上所述,国内以洪水漫坝失事为最多,其次为漏水管涌(包括坝体坝基溢洪道基)失事。国外以漏水管涌失事为最多。我国漫坝失事比率大的原因是:很多小型水库为乡镇自建,未经设计;有些溢洪道断面太小或未设溢洪道,有的在土基上开挖泄洪槽,

一冲即刷深，造成溃决。本书不涉及洪水分析，在加固土石坝防止溃坝失事方面，除了提高坝的防洪标准外，重点着眼于坝体坝基防止渗漏管涌问题。

二、土石坝病害类型

有很多土石坝，由于勘测设计不周，施工缺陷以及管理维护不善，存在许多病害。为了防止溃坝失事，不得限制在低水位运行，使工程不能发挥应有效益。在汛期则提心吊胆，唯恐溃坝失事，使下游居民寝不安枕；工厂企业生产不稳。分析这些病害的类型，将有助于提高勘测、设计、施工管理的技术水平，有利于研究工程加固的重点。

原水利电力部水利管理司于1981年分析了土石坝损伤病害1000例，这些病例虽未造成溃坝，但都影响工程的正常运行。现将各种病害类型的百分比介绍如下：①坝体裂缝12.9%；②防渗铺盖裂缝1.1%；③其它建筑物裂缝11.3%；④坝基漏水6.7%；⑤坝体漏水7%；⑥坝头山体漏水3.1%；⑦沙沸潜蚀5.3%；⑧其它建筑物漏水9.6%；⑨坝体滑坡5.3%；⑩坝坡塌坑2.5%；⑪岸坡塌滑3.1%；⑫坝上游护坡破坏6.5%；⑬冲刷破坏11.2%；⑭泄洪建筑物气蚀破坏3.0%；⑮闸门启闭失灵4.8%；⑯白蚁洞穴及其它6.6%。

我国土石坝存在上述各种病害的数量较多。80年代中期，第一批列为下游有重要城镇工矿企业和铁路的大型（库容在1亿 m^3 以上）和重点中型（库容1000万~1亿 m^3 ）险库有433座，急待处理，其它还有很多病险水库，均需要加固处理。从上述统计资料看，主要的病害是裂缝和漏水。裂缝和漏水如不加固，会发展成管涌等渗透破坏以致溃坝，因此需要特别注意防渗加固。其它病害也要对症下药逐步加固。

40年代以后，由于岩土力学的发展，设计理论、计算技术、施工技术、运行管理监测工作等技术的进步，以及对病险坝的及时维修加固，近年来，土石坝溃坝失事频率已大为降低。根据国际大坝委员会的统计：1900年以前投入使用的土石坝，其失事频

率比近代的土石坝失事频率高3~10倍。如图1-1所示的统计曲线，为1900年以前、1940~1950年、1970~1978年三个阶段投入使用的土石坝的失事频率与坝年龄的关系。

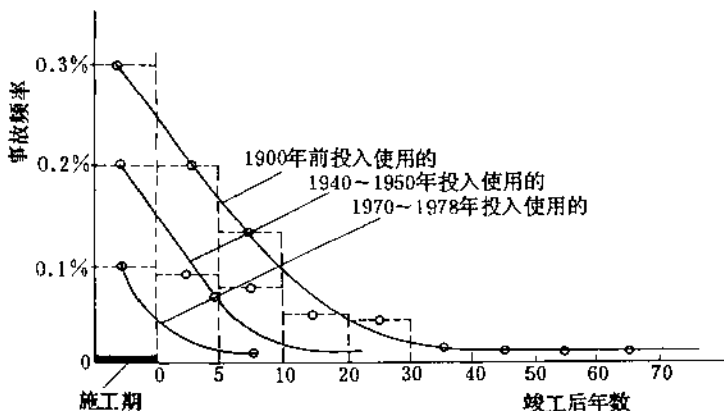


图 1-1 失事频率与失事坝年龄的关系曲线

[引自国际大坝委员会前任主席龙德 (P.Londe) 文章]

该曲线表明，施工期失事频率高，多数是由于施工安排不当，施工期洪水漫坝所致；竣工后0~5年，失事频率也较高，这是由于水库初蓄时，暴露出来的缺陷来不及处理所致。70年代以后，竣工运行后0~5年失事率为0.05%~0.02%，运行后10年，失事频率明显降低，70年代以后，失事频率在万分之一以下。

苏联戈戈别里德 (М. И. Гогоберидзе) 等人根据世界上1190座土石坝的分析，得到图1-2的曲线。从该图可见，70年代以后，正常运行期的坝失事频率很低。

美国陆军工程师团在1978年分析了4906座坝（包括混凝土坝），表明大多数非洪水漫坝失事是发生在水库第一次充水和运行5年期间内。由此可见，水库初蓄和运行初期要特别注意监测和维修。

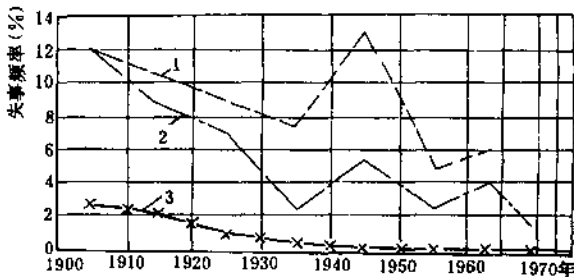


图 1-2 土石坝各阶段失事频率

1—水库充水阶段（竣工后1~2年）；2—水库运行初期（竣工后5~7年）；3—水库正常运行（竣工后7~60年）

第二节 管涌和流土等渗透破坏

一、管涌和流土的成因

土体受渗透力的作用，有些细颗粒被渗流冲刷，向下游方向移动，由渗流出口流失，或向相邻的粗粒土体的孔隙中流失。流失土粒逐渐增多，渗流流速增大，较粗颗粒也逐渐流失，这样恶性发展，久而久之，便会贯穿成连续通道，从而酿成管涌。如果渗流出口是级配均匀的砂土或粘壤土，而且在渗流出口附近存在较高的剩余水头，此水头的浮托力超过上覆砂土或粘壤土的有效压力时，则渗流出口土体被顶破、隆起、击穿，发生砂沸，或土体突然被冲失，局部成为洞穴、坑孔，这种现象称为流土。

砂卵石坝基缺乏防渗措施，或采取不正确的水平防渗措施（例如铺盖长度不足、厚度不足、碾压不密实、渗透系数太大等）时，容易发生管涌流土事故，这种事故亦称渗透破坏。渗透破坏有一个发展过程，大多数渗透破坏事故发生在蓄水以后2~3年或更长时间以后。但是，如果坝基砂卵石地层完全没有防渗措施，致使渗透比降太大，则也可能在蓄水后短时间内发生管涌流土等渗

透破坏。

渗透破坏发展过程一般有如下两种形式：

(1) 由于砂卵石地层不均一，有的部位颗粒很粗，缺乏细粒，有架空现象，渗透系数很大。其上游部位颗粒细，渗透流速大，则细颗粒向下游部位的粗粒孔隙中移动，并逐渐溯源流失细粒，使上游部位渗透系数变大，水头损失减小，以致下游部位承受绝大部分水头，因而发生流土，且上下游贯通成连续孔道，造成渗透破坏事故。

(2) 下游部位渗流出口有薄层粘性土或均匀细砂层，如果该处流网位势较高，将出口处粘性土或细砂层顶穿发生流土，并逐渐溯源流失，形成连续孔洞，以致发生渗透破坏事故。

此外，当渗流沿两种不同介质的接触面流动时，有可能将接触层面上的颗粒冲走，或其中一层的细粒进入另一层的粗粒孔隙中，此现象称之为接触冲刷或接触流土。心墙或斜墙与混凝土或与坝下埋管的接触面，因填土不密实、渗径太短或管壁向外漏水而导致沿接触面冲刷，酿成溃坝的亦不乏其例。如英国布雷德福德 (Breadford) 土坝高29m，心墙为粘土和砂砾掺合土，心墙底部有深入砂卵石地层的粘土砂砾掺合土截水槽，深18.3m，坝下埋管为铸铁管。由于土与管壁接触不密实，水库蓄水后半年，水头达22m时，于1964年3月11日半夜，因埋管外壁粘土被冲刷而溃坝。死238人，卷走房屋800多幢。

粘性土心墙、斜墙如果有贯穿性裂缝(包括因地震产生的裂缝)，缝壁土疏松，其土颗粒会被通过裂缝的集中渗流冲刷流失，致使裂缝逐渐扩展，冲刷成连续孔洞，最后导至溃坝失事。缝壁土的冲刷扩展速度视裂缝宽度、土料性质、渗透流速而定。粘土抗冲刷力强，粉土抗冲刷力差，分散性土抗冲刷力更差。心墙、斜墙裂缝冲刷有一个发展过程，一般要经历较长时间，但也有在几天内溃坝失事的。心墙、斜墙上下游侧如有良好的反滤，则抗冲刷能力将大为增强。用土工织物作反滤有良好的抗冲刷效果。

填筑密实的粘性土心墙或斜墙可承受很大的水力比降而不发

生渗透破坏。密实的粘土破坏比降可达到200；密实的壤土，破坏比较可达100~150；密实的粉质壤土或砂质壤土，破坏比降可达50~100。由于填土的土质不均匀，层面之间也可能存在薄弱面，故设计允许渗透比降常采用较小值，粘土采用5~10，壤土采用4~6，粉质壤土或砂质壤土采用3~4。

填筑密实的粘性土与混凝土建筑物的接触面，如果细致夯实，接触良好，接触面渗径的允许渗透比降可采用上述填土允许渗透比降的50%。粘性土心墙或斜墙与混凝土底板的接触面，与混凝土防渗墙的接触面，与混凝土坝的接触面，与混凝土翼墙的接触面都属于此种情况。当填土与良好的基岩直接接触时，允许渗透比降约为上述数据的50%~70%。

砂砾卵石在较小的渗透比降作用下就会发生渗透破坏，能够承受的渗透比降与其级配、密实程度、形成历史等有关。砂砾卵石层以管涌形式破坏，均匀砂以流土形式破坏。级配良好的砂砾卵石可承受渗透比降0.2~1.0；不连续级配（缺中间颗粒）容易管涌，只能承受渗透比降0.07~0.3；均匀砂可承受渗透比降0.5~0.8才发生流土破坏。所有上述砂砾卵石密实度高者能承受稍高渗透比降，反之只能承受稍低渗透比降。凡形成历史久的砂砾石地层可承受较大渗透比降，形成历史短的只能承受较小渗透比降，有的形成历史久远又有胶结力的砂砾卵石可承受渗透比降1~4不致破坏。由于砂砾卵石在地层中变化较大，影响其破坏渗透比降的因素较多，故采用的允许渗透比降还需将上述破坏比降除以1.5~2的安全系数。

在渗流出口设置反滤层可使上述这些渗流介质的破坏渗透比降有所提高。当粘性土发生裂缝，裂缝中的集中渗流会将缝壁土冲刷移动，移动的土粒被反滤层阻挡，不会流失，集中贴在反滤层的上游面。但这集中在反滤层上游面的一薄层土粒将承受通过裂缝的全部水头，致使薄层粘土粒的渗透比降很大面可能被击穿。砂砾石的渗流出口有反滤层保护时，如果渗透比降超过砂砾石的破坏比降，砂砾石中的细颗粒则向反滤层移动，集中贴在反滤层