

土石坝 加固技术

张启岳
主编

TUSHIBAJIAGUJISHU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



土石坝加固技术

张启岳 主编

蒋彭年 王 韦 方永凯 陶同康 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

该书针对土石坝病害和破坏,提出了渗流控制及对滑动破坏坝坡、裂缝破坏坝体、地震损害和液化以及其他土石坝病害和破坏的实用加固技术。

该书共分六章,包括绪论、土石坝坝坡滑动破坏加固技术、土石坝坝体灌注粘土浆加固技术、坝体和坝基的密度加固技术、土工合成材料加固技术以及防渗墙及其坝体坝基加固技术等章组成。

该书内容丰富,取材新颖,可供水利水电工程设计、施工、管理和其他工程技术人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝加固技术/张启岳主编. —北京:中国水利水电出版社, 1999
ISBN 7-5084-0045-3

I. 土… II. 张… III. ①土坝-加固 ②砌石坝-加固 IV. TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第10561号

书 名	土石坝加固技术
作 者	张启岳 主编
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: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 19印张 445千字
版 次	1999年11月第一版 1999年11月北京第一次印刷
印 数	0001—2100册
定 价	48.80元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国广大地区，为了兴利除灾，兴建了大中小型水库近9万座，堤防数十万公里，在防洪、灌溉、发电、养殖等方面发挥了巨大作用。由于种种原因，水库平均破坏率高，影响了工农业生产与国民经济建设，人民生命财产的安全难以保障。已建的土石坝和堤防存在着不同程度的渗流破坏、滑坡、裂缝、地震液化等问题，因而出现了许多病险库，使工程不能充分发挥效益，甚至发生溃坝，给人民生命和财产带来严重的损失和灾害。为此，为充分发挥工程效益，适应生产的需要，系统地总结推广土石坝加固新技术，就显得非常必要。

针对土石坝病害和破坏类型，本书提出了以下几种加固技术：①渗流控制加固技术，包括混凝土防渗墙、灌浆帷幕及其混凝土防渗墙与灌浆帷幕组合防渗技术和应用土工合成材料防渗排渗加固技术等；②滑动破坏坝坡的加固技术；③裂缝破坏坝体的加固技术，裂缝灌浆等；④地震损害和液化加固技术，重点介绍振冲法坝体和坝基密度加固技术；⑤其他土石坝病害和破坏的加固技术等。

本书第一、二、六章由蒋彭年编写；第三章由王韦编写；第四章由方永凯编写；第五章由陶同康编写。全书由张启岳策划和拟定编写提纲，张云波协助统稿和校阅订正。

在编写过程中，南京水利科学研究院陈肇华、杭伟良和时良玟帮助完成插图工作，在此一并表示感谢。

作 者

1999年8月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 土石坝加固的目的和意义.....	1
第二节 土石坝的病害与失事.....	4
第三节 土石坝病害的观测与探测	33
第四节 土石坝加固方法的分类、适用范围及其选用原则	34
第五节 加固工程质量检查验收与鉴定	37
参考文献	41
第二章 土石坝坝坡滑动破坏加固技术	43
第一节 概述	43
第二节 滑坡勘探与土工试验	45
第三节 滑坡加固设计	46
第四节 滑坡加固的施工与质量检查	50
第五节 工程实例	53
参考文献	65
第三章 土石坝坝体灌注粘土浆加固技术	67
第一节 概述	67
第二节 土石坝坝体灌浆机理	67
第三节 灌浆的适用范围	70
第四节 灌浆设计	74
第五节 灌浆工艺	82
第六节 灌浆期的观测	87
第七节 灌浆效果检查与验收	93
第八节 工程实例	95
参考文献	100
第四章 坝体和坝基的密度加固技术	101
第一节 概述.....	101
第二节 振冲法加固坝体及坝基的作用机理.....	105
第三节 振冲加固法的适用范围.....	113
第四节 勘探及土工试验.....	120
第五节 坝体及坝基密度加固设计与现场试验.....	124
第六节 施工技术管理.....	140
第七节 施工质量的检验与验收.....	148

第八节 工程实例·····	150
参考文献·····	163
第五章 土工合成材料加固技术·····	164
第一节 概述·····	164
第二节 土工合成材料的功能及其应用·····	170
第三节 土工合成材料的性能测试·····	173
第四节 土工薄膜防渗加固·····	175
第五节 土工织物排渗加固·····	186
第六节 土工织物滤层加固·····	191
参考文献·····	203
第六章 防渗墙及其坝体坝基加固技术·····	205
第一节 概述·····	205
第二节 机械造槽法修建混凝土防渗墙·····	209
第三节 高压喷射灌浆修建防渗板墙·····	265
第四节 套孔冲抓桩柱式防渗墙·····	285
第五节 倒挂井法修建混凝土防渗墙·····	289
参考文献·····	295

第一章 绪 论

第一节 土石坝加固的目的和意义

一、土石坝安全的要求与准则

历史事实表明：建坝蓄水可进行灌溉；修筑大堤可防止洪灾。都江堰分岷江之水灌溉着成都大平原；黄河两岸的千里大堤，防止了洪水泛滥。发展和促进工农业生产，保障人类生存，不仅必须修建坝堤，而且更应修建安全的坝堤。

为了确保土石坝的安全，必须满足三项基本要求^[1]：

(1) 必须保证防止漫顶以及防止降雨、波浪和风引起的冲蚀脱坡，必须保护坝坡和坝顶。

(2) 必须阻止坝体和坝基内渗漏的逐渐冲蚀、管涌，而使之不透水。

(3) 不论何种荷载及饱和条件下，所设计的土料分配及土石坝断面，都能确保稳定而不滑坡和不发生破坏。

土石坝设计的八条安全准则^[2]如下：

(1) 必须没有漫顶的危险，即有足够的溢洪道容量可以宣泄洪水和足够的出水高（超高）。

(2) 浸润线必须远在下游坡面以内。

(3) 上游坝坡在骤降时必须保证安全。

(4) 上、下游坝坡必须具有足够的平坦坡度，以致坝体所用材料的两坝坡保持稳定，并且通过所用的计算方法，获得一个合适的安全系数。

(5) 上、下游坝坡必须具有足够的平坦坡度，以致坝基中的剪应力小于坝基材料的抗剪强度，保证有适宜的安全系数。

(6) 水从上游坝面到下游坝面没有自由通道。

(7) 通过坝体和坝基的水，到达流出面时必须具有很小的压力和速度，以致坝体材料与坝基材料不能有所移动。

(8) 上游坝面对波浪作用必须有适宜的保护措施，下游坝面对降雨作用必须有保护措施。

土石坝如果不能满足三项基本要求和八条安全准则，则易产生病害和事故，甚至失事和垮坝。

二、土石坝加固的必要性

坝工不安全而失事，其破坏不是局限于坝区附近，当洪水倾泻，不仅人民的生命和财产要遭受损失，而且下游大片地区都要受灾。现举例说明如下。

(一) 意大利瓦依昂双曲薄拱坝前岩滑灾害

意大利瓦依昂 (Vajont) 双曲薄拱坝，坝高 265.5 m，1963 年上游左岸突然发生剧烈

的岩滑灾害。上游南岸岩体从 Mount Toc 山边断裂,跨越峡谷,在对岸爬高 140 m 以上,滑方约 2 亿~3 亿 m^3 。滑体坠入水库后,掀起水浪,浪高 150~200 m,溢过坝顶,洪水横溢河道上下,死亡约 2500 人,淹没 Piave 村庄,毁灭 Longaroue 小镇。瓦依昂薄拱坝坝体抵住了巨大的冲力而没有损害,但水库已淤塞,无法发电。此次岩滑的重要原因之一是浮托力的作用^[3]。

(二) 法国马尔帕塞薄拱坝岩基与坝体破坏

法国马尔帕塞 (Malpasset) 薄拱坝,坝高约 60 m,库水渗过左岸岩体,在下游岸坡的坡脚、坝趾附近产生最大的裂隙水压力,使充填的油滑性土质材料的裂隙岩体强度大大降低。又由于裂隙水压力作用,开始发生喷穿,继而导致岩滑,岩滑后除去了拱坝坝底的下部分,岩滑向岸坡的上部继续扩展。1959 年 12 月 2 日下午拱坝失去支承,整个拱坝遭到破坏,死亡 400 多人,毁灭 Fre'jus 市镇的一部分^[3]。

(三) 美国 Fort Peck 水力冲填粉土坝右坝岸附近上游坝坡滑坡

美国 Fort Peck 水力冲填粉土坝,坝高 68.6 m,1938 年右坝岸附近上游坝体发生滑坡。滑坡时间只有 10 min,滑坡体约 383 万 m^3 或为坝料的 5% 弱。滑坡开始时,滑坡区内约有 180 人,其中 8 人死亡。滑坡的原因是坝基内风化页岩和其中膨润土缝的抗剪强度不足以抵抗坝基所受到的剪力。滑坡向上游发展的范围,在某种程度上是由于滑坡中坝料局部液化造成的。滑坡部分后来按新的坝体横断面重建大坝,心墙很窄而且用碾压填土法进行填筑与压实^[2]。

(四) 美国 Teton 风成粉土宽心墙土坝管涌破坏

美国 Teton 坝,坝高 91.5 m (河床以上),用风成粉土坝料筑成宽心墙,坝壳为砂、砾、卵石,筑在透水性强、有裂隙的流纹岩、凝灰岩坝基上。

1966 年 6 月 5 日前 2 天,坝体下游约 457 m 的河床高程处有一些小泉,渗漏量约 6.3 L/s。翌日,距下游坝趾约 122 m 处,一些泉水的渗漏量约 1.26 L/s。当日 21:00,进行坝体下游坝坡检查时,无异常现象。6 月 5 日约 7 时,观察到在右坝肩测站 14+00,坝顶下约 39.6 m,高程 5200 m,坝体与坝肩连接部位附近一处坝体下游面的渗漏量约 56.6 L/s。同时,坝体的坝趾附近岩崩堆积出现 708 L/s 的水,渗水浑浊。以后 3 h,较高的高程处流量增加到 425 L/s。10 时 30 分,听到强烈的爆炸声,距坝肩约 4.6 m 处发生渗漏。此后渗漏量增加,逐渐向上冲蚀。11 时,填筑冲蚀孔的推土机沉入坝内冲蚀孔的渗水中。11 时 55 分,坝顶决口而发生完全破坏。垮坝流量为 7 万 m^3/s ,洪水向下游泛滥,14 人死亡,损失约 4 亿美元。Teton 坝破坏的基本原因如下:由于右坝肩测站 14+00~15+00 之间基岩的张开节理系统的透水性,以及在极易冲刷的分散性心墙坝料接触部位形成的逐渐内部冲刷,由于没有反滤与排水设施,开始水流集中的流径必然通过坝体底部形成冲刷,发展成一条连续的管道,最后导致了大坝完全决口破坏。又认为,破坏也与梯形键槽内填土拱作用所产生的水平裂缝以及水力劈裂形成的垂直裂缝有关^[4]。

(五) 中国板桥水库洪水漫顶决口垮坝

中国板桥水库位于汝河上,属淮河流域,库容 4.92 亿 m^3 ,控制流域面积 768 km^2 ,1952 年建成。1975 年 8 月 3 日台风,又发生特大暴雨,集中于 8 月 5~8 日 3 天。板桥流域 3 日平均降雨量达 1035.4 mm,入库洪峰流量达 1300 m^3/s ,3 日洪水量 6.4 亿 m^3 。由于暴雨强

度过大，枢纽泄水能力偏低，8月8日1时库水沿整个坝长漫顶，形成跨坝。垮坝最大流量约86800 m³/s。高30 m水柱自垮坝口门汹涌而下，至50 km以外的京汉铁路，水深还有4~5 m，流速约4~5 m/s，所经之处一切荡然无存。沿汝河两岸宽约10 km、长约60 km的范围及遂平县遭受毁灭性灾害。板桥水库现已复建。

以上不安全水库带来了严重的危害性，其失事造成了人类的沉重灾难。根据迄今各界对事故病害与破坏的统计，了解它们的分类与原因，获得经验教训，对做好土石坝加固工作，很有必要。

三、破坏类型及其比重统计

根据1980年底的统计，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%，平均每年为110次，年平均破坏率为3.6%。按水库等级分析，小型水库的破坏最多，占96%。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%，其他占19.4%^[6]。

根据国内241座大型水库发生过1000宗工程事故的分析，得出不同破坏类型所占比重如表1-1所示^[6]。

表 1-1 国内 1000 宗工程事故中不同破坏类型所占比重

破坏类型	所占比重 (%)	破坏类型	所占比重 (%)	破坏类型	所占比重 (%)	破坏类型	所占比重 (%)
渗漏管涌	31.7	裂 缝	25.3	护坡破坏	6.5	闸门失灵	4.8
塌 坑	2.5	滑 坡	8.4	冲刷、气蚀	14.7	其 他	6.6

注 比重系指占总破坏数的百分比。

1961年西班牙 Revista de Obras Publicas 提出1620座各类坝的统计结果，有308座坝出事或破坏，其中土坝177座，占57.4%。根据分析，造成破坏的原因所占比重如表1-2所示^[6]。

1953年 T. A. Middlebrooks 提出了美国206座坝的病例，统计分析的结果如表1-3所示^[7,8]。

表 1-2 西班牙坝工破坏原因及比重

破坏原因	所占比重 (%)	破坏原因	所占比重 (%)
地基破坏	40	沉降不均匀	10
溢洪道不足	23	孔隙压力过高	5
施工不良	12	其 他	10

注 表中其他包括土坝坝坡材料缺陷、运行错误、战争、地震等。

表 1-3 Middlebrooks 统计中破坏类型所占比重

破坏类型	所占比重 (%)	破坏类型	所占比重 (%)
漫 顶	30	涵管漏水	3
渗漏管涌	25	护坡破坏	5
滑 坡	15	其 他	12

1971年 Biswas 和 Chatterjee 根据对世界上300多座已破坏的坝的分析研究得出，洪水超过溢洪道宣泄能力的占35%，地基出问题的有25%，其余40%是由于设计和施工有缺陷、材料不良、波浪淘刷、战争、运用不当等造成的。

综上所述，虽然各界统计分析结果基于不同的国家背景和不同的材料来源，但造成事

故病害和破坏的主要原因如下：防止洪水漫顶的水文设计不足，坝体、坝基和坝肩渗流控制的水力设计不力，以及地基破坏、施工质量不良和运用管理方面的问题。为了使不安全土石坝变为安全土石坝，避免事故病害与破坏，必须针对现有病险水库土石坝的病因，如渗漏管涌、滑坡、裂缝、地震震害与液化以及其他土石坝病害和破坏（包括护坡破坏、掘穴动物破坏、水溶物病害、地表干燥病害等），进行病险水库土石坝加固，促使水库安全而可有效利用，增加经济效益。

第二节 土石坝的病害与失事

土石坝的事故病害与破坏常出现的有渗流破坏、滑坡、裂缝、地震震害与液化以及其他土石坝病害与破坏（包括波浪对护坡的破坏、掘穴动物破坏等方面），现分别论述如下。

一、渗流破坏

（一）管涌、流土等渗流破坏

水库蓄水后，库水在水力作用下沿着土石坝坝体、地基及坝端两岸渗向下游，发生下游坝体、坝基及岸坡的渗漏。土石坝渗漏有的渗流量小、水质清澈可见，不含土粒，不会造成渗流破坏；有的渗流量较大，较集中，水质混浊，使下游坝体、坝基与岸坡发生渗流破坏，如管涌和流土，还有接触冲刷和接触流失。

国内 241 座大型水库发生的 1000 宗工程事故中，渗流管涌塌坑占 34.2%，即约占总破坏的 1/3 以上。美国 206 座坝 100 的病例中渗漏管涌占 25%，除库水漫顶外渗流破坏占破坏总数的 1/4。故病险水库中渗流稳定问题的解决极其重要，必将给国民经济带来巨大的收益。

许多大坝以下坝基土明显地突然形成管状水流通道，使这些大坝遭受破坏。离开水库的蓄水流入输出通道，通道的宽度和深度迅速增加，直到坝基被破坏，建筑物也随之崩塌，并破成碎块，被急流带走。这种事故统称为管涌破坏。管涌破坏的发生可能有两种形式，一是由于下游坝趾附近涌水所开始的淘刷或地下冲刷，这种冲刷沿着建筑物底面或一些土层面向上游进展。冲刷通道的上游端或进口端一旦接近水库底，就发生破坏。二是由于建筑物趾部附近大量土体的突然隆起。在趾部以下土体内向上渗水的渗透压力大于土的有效重量时，就发生此种隆升破坏。第一种管涌破坏是属于地下冲刷破坏，第二种管涌破坏是属于隆升破坏。管涌破坏不仅引起建筑物破坏，而且也是较大深度内地基土的大范围破坏。管涌破坏往往造成河谷下游人民生命财产的巨大损失^[9]。以上两种管涌破坏是从宏观上的渗流破坏，但按渗流破坏的机理，渗流破坏又可分为流土、管涌、接触流失和接触冲刷四种形式，前两种发生在单一土层，而后两种发生在成层土^[10]，现分述如下。

（1）流土是在渗流出口无任何保护措施以及在上升渗流作用下，局部土体的表面隆起、浮动或一粒群同时起动流失的现象。粉粒土体或均匀砂土发生隆起和浮动，不均匀砂性土发生一粒群同时起动流失。

（2）管涌是在渗流作用下土体内细粒在孔隙通道中移动，并被带出土体以外的现象。砂砾石层中常发生此现象。

（3）接触流失是在层次分明、渗透系数相差很大的两层土内垂直于层面的渗流将细粒

层内细粒带入粗粒层的现象。接触流失可以是单个颗粒进入邻层，也可以是粒群同时进入邻层，故包括接触管涌与接触流土。

(4) 接触冲刷是渗流沿着两种不同粒径组成的土层层面带走细粒的现象。在工程上沿着两种介质界面的冲刷都属于接触冲刷，如建筑物与地基、土坝与涵管之间的接触冲刷。

如前所述，国内 241 座大型水库发生的 1000 宗工程事故中渗漏管涌塌坑占总破坏的 1/3 以上。美国 206 座坝的病例中渗漏管涌占 25%。除库水漫顶外，渗流破坏是大、中、小土石坝破坏的首要原因之一。土石坝渗水是无法避免的，开始并无危害，但如不加控制，水库的渗流量就要增加，浸湿坝体，削弱坝体强度，造成滑坡。严重的渗流将冲刷坝体或坝基，形成管涌，使坝崩垮。诸凡坝基透水、坝体渗水、沉降裂缝、收缩裂缝、动物洞穴、坝体与建筑物或涵管的接触渗漏，如不进行加固处理，都将发展成为渗流破坏。统计表明，渗流破坏几乎一半发生在水库蓄水后数年（如 2~3 年）之内，尤以第一年发生的较多。

(二) 渗流控制

1. 三个基本渗流问题与渗流控制准则

坝前蓄水总要渗水，在极端情况下会导致垮坝，由此就产生了三个基本渗流问题：一是水带走土粒，流出未防护的逸出点，从而穿越坝体或坝基，发展成为隐蔽的通道，产生管涌。二是由于渗透力作用，引起隆起或流土或坝坡破坏（包括崩塌），或因浸润线过高产生不稳定的坝坡。三是过大的渗流量损失。控制渗流的基本方法也有三种：一是用反滤层或过渡层，防止管涌和流土，使水流能自由流出，而又不会带走细粒料。二是防渗，可用薄防渗墙，如混凝土防渗墙或钢板墙、上游不透水层或面板、不透水心墙、不透水上游铺盖、碾压土截水槽、灌浆帷幕或泥浆槽防渗墙、自凝灰浆防渗墙来防渗。三是排水，可用不透水斜墙或心墙下游的透水区、管式排水、水平排水垫层、垂直截水、部分嵌入坝基的排水或减压井、排水盖重来排水等。由此可见，通过坝体、坝基或两岸坡的渗流所发生的任何不必要的水流作用或危险性作用，即土的渗流破坏或渗流变形，均需采取渗流控制加固措施。采取渗流控制加固措施的目的是使渗流量损失最小或在容许范围以内，但更重要的是，减免渗流破坏的危险性，确保坝体、坝基及岸坡的渗流稳定性。

在加固设计中，首先需要了解筑坝后，土坝坝体、坝基和两岸坡内的渗流场，即流网，从而求得渗流场中各点的渗流水头或孔隙水压力以及渗流梯度或渗透压力和流速，此外，可根据流网计算渗流量。渗流控制的目的在于以下三方面：一是控制渗流梯度或流速，不发生渗透变形，确保坝体、坝基和坝肩的渗透稳定。二是控制下游的剩余水头或水位，降低下游坝体及两岸坡渗出水面的高度，增强下游坝坡或岸坡的稳定性。三是控制渗流量，使渗透水量损失最小或在容许范围以内。

渗流控制的准则是，不论坝体或坝基都必须采取上堵下排、上游防渗与下游排渗相结合的措施。对于坝体，一般在上、中游设置斜墙或心墙防渗体，在下游除靠坝壳排水外，另外设置坝内排水，防止渗水从坡面逸出，并降低浸润线。对于透水坝基，可在上游设置水平防渗铺盖，在上、中游设置切断透水坝基的垂直防渗设施（如截水槽、混凝土防渗墙、泥浆槽防渗墙、灌浆帷幕或其组合等）。仅凭防渗措施以求完全截断渗流，往往是不经济的，也是不可能的。因此必须采用适当的排水设备（如贴坡排水层、棱体排水坝趾、褥垫排水层及其组合、排水沟、排水减压井、透水盖重等），以排除从上游渗过来的水，降低下游坝

基的水头。对于消灭三向绕流的危害，尤以排渗效果较为显著。

2. 渗流控制加固措施

应针对坝址的水文地质情况，采取渗流控制加固措施。对于无相对不透水表层的单层透水地基，当其深度不深时，可采用明挖回填粘土截水槽防渗。当透水地基较深，而漏水不严重时，可采用上游水平粘土铺盖防渗；如漏水严重时，可采用混凝土防渗墙或灌浆帷幕防渗。当透水地基很深，混凝土防渗墙施工困难时，可采用灌浆帷幕，或在深层采用灌浆帷幕，上层采用明挖回填粘土截水槽或混凝土防渗墙。

对于有相对不透水表层的双层透水地基，可利用表面层作为天然铺盖，但应进行补强加固，使之符合防渗要求。尤其应注意到天然铺盖与其下卧层之间的层间关系是否符合反滤要求（如不符合，则应采用垂直防渗措施，以免将来发生管涌塌坑）。在坝下游应设置排水设备，以减除渗透压力，避免渗透变形或沼泽化，或降低坝体浸润线。当相对不透水表层不厚时，可用排水沟排渗，沟底应穿过表层，与下卧强透水层相接，否则应采用排水减压井深入强透水层中排渗。对于互层的透水地基，只有采用排水减压井深入最强的透水层中，才能达到排水减压的目的。必须做好反滤层或过渡层，使两种不同粒度的材料之间符合反滤要求，使水流能自由流过，而又不会带走细粒料。

3. 其他渗流控制加固措施

应做好各接触部位的防渗措施，如土石坝的防渗体与基岩、混凝土结构物及粗粒料的接触部位的防渗措施。对于基岩，应将基岩表面风化层清除干净，也将裂隙节理断层等缝面清理干净，用砂浆或混凝土封堵，防止通过裂缝的渗水冲刷防渗体土料。基岩面上一般应采取混凝土盖板或铺盖式灌浆等措施，使防渗体土料与基岩中的渗透水流分隔开来，以防接触冲刷。

对于与混凝土防渗墙或其他混凝土建筑物连接处，应有足够的插入长度，以保证一定的渗径长度，并应保证接触部位的填筑质量，防止接触部位脱开或有松散层，以避免接触冲刷。对坝下埋管，除应处理好接触渗流外，埋管的地基应坚实，涵管本身应保证其质量，防止其本身漏水引起的渗流破坏。

4. 多重保险或称多道防线渗流控制加固措施

渗流控制对土石坝的安全是最主要的影响因素，1969年A. Casagrande^[1]在讨论S. D. Wilson和R. Squier的土坝与堆石坝总报告的透水冲积层渗流控制时，评述了地基加固处理的补充实例，如沉箱式混凝土防渗墙，双排宽0.61 m、深122 m的深混凝土防渗墙，深挖方的土截水槽（深79.3 m），以及允许渗流的上游铺盖和下游减压井的坝基处理。在结束语中论及透水坝基渗流控制加固措施介于可靠加固措施与高度不可靠加固措施之间，依赖于可靠程度或计算风险程度，建议必须采用第二条防线，必要时采用第三条防线，也就是太沙基主张的：设计人员必须作出适合于地质条件的最坏假定。此种多道防线或称多重保险的加固措施的建议，对做好渗流控制工作很有必要。

（三）管涌与抗管涌性

1. 管涌

除漫顶外，管涌或集中渗流的逐渐冲刷也造成了大量土石坝的严重破坏。土石坝设计与施工对管涌控制近年来有许多新技术要求。例如，施工含水量与重度控制方面，强调均

匀压实不透水墙的严格要求，以减少集中渗流，或在发生渗流时能够阻抗管涌。由于这些要求以及大坝下游部分的反滤层作用，重要的近代土石坝很少发生管涌破坏。

水渗过坝体压实土或坝基自然土时，压力水头会消失掉，以克服通过土的小孔隙时渗水的粘滞阻力。因此，通过坝体与坝基的渗水产生了对土粒牵引的冲刷力。如果阻抗冲刷的力小于引起冲刷的力，则土粒被带走，开始管涌。阻抗冲刷的力取决于土的粘聚强度、粒间咬合作用、土粒重量以及下游反滤层的作用。

但由于坝体与坝基是不均匀渗透介质，因此，即使总渗流量小也不可避免地要发生渗流量与流速的集中，在下游坝坡处出现这种集中，对土粒的冲刷力最大。任何处的冲刷作用将移除坝体或坝基的一部分，这就加重了该处渗流以后的集中与冲刷力。

大多数严重的管涌事故，是由于坝体或坝基内集中渗流的逐渐向后冲刷产生的。在渗水出逸处开始冲刷，并向水库发展，渗流通道逐渐扩大，一直到完全破坏。在理论上，从不透水区细料流出的渗水会流入附近较粗的透水区，此种分区土石坝的内部，管涌也能产生。

2. 引起管涌的渗漏与砂沸

第一次观测时，引起管涌破坏的渗漏在其大小上有很大差异，渗漏发展的速率也很不同。对于一些坝，水库第一次蓄满水后即可见渗漏，而对于另一些坝，是在自由渗流多年后才出现渗漏。在一些情况中，先发现一股小小的渗漏，肉眼看到它多年流着清水，以后渗漏逐渐增加，一直到迅速发生破坏。在另一些情况中，完全破坏前几天或几小时内只有一个大的浑浊渗漏。

引起管涌破坏的渗漏有许多原因。坝体渗漏的最普遍原因大概是不良的施工控制。不良的施工控制产生了坝体内的不充分压实层，混凝土出水管或其他建筑物附近的不良压实，或者坝体与坝基或坝肩之间的不良压实与结合。通过差异沉降裂缝的坝体渗漏也是一个事故的主要原因。坝体渗漏的另一原因是出水管的开裂。出水管的开裂是由于坝基沉降、坝底扩展，或管子本身的破坏引起的。除坝体渗漏的这些来源外，有时动物的孔穴与坝体干燥开裂也会引起事故。

与坝体渗漏相比，通过坝基自然土的渗漏较为普遍，因为自然土较不规则，常不如坝体土密实。大坝下游天然坝基内，以泉水形式喷出的任何未控制渗漏具有潜伏性危险。必须细心观测，并用反滤层来控制它。

坝基的自然地表层是砂层，当渗漏的水向上渗流到足以带走砂粒时，通常地面上发生的泉水四周是沉积下来成环状的砂。此种“砂沸”可引起由管涌的完全破坏。

砂沸的尺寸和间距随坝基材料与水压力而不同。个别砂沸常发生于勘探钻孔的位置。在一些坝，出现过直径几米的孤立砂沸。在另一些坝，大坝下游整片坝基地面发生了直径只有几厘米、间距0.6~0.9 m的许多砂沸。沿着大堤发生过大的地下渗漏与砂沸的地基孔隙水压力观测值表明，形成砂沸的条件各处大不相同，无粘性细土中向上渗流坡降超过0.5~0.8时，预料到必有砂沸。

用砂袋或其他材料筑成的围堤把砂沸围住，可暂时控制单独的大砂沸。此堤对砂沸可产生一个反压力，使向上水力坡降减少，防止地而上砂的损失。用减压井或反滤层可永久控制砂沸。在大面积上间距接近的许多小砂沸，可用反滤层来防止砂沸，反滤层是由厚0.9

~1.5 m, 底部为砂变化到顶部为粗砾的透水垫层组成。

3. 抗管涌性

坝体土的抗管涌性是该土对管涌的阻力。集中渗漏发生过的土石坝记载表明, 对管涌的敏感性有一极广的范围。对 31 座土石坝渗漏进行了研究, 分析了土的性质与坝体施工方法对渗漏条件下的抗管涌性的影响。由此得出, 与坝体压实方法相比, 坝体土的性质, 尤其是细料的塑性, 对抗管涌性具有较大的影响。列有此项研究总成果的表 1-4 表明, 塑性指数 $I_p > 15$ 的粘土所组成的坝体具有最大的抗管涌性, 即对管涌的最大阻力, 而无粘性均匀细砂所组成的坝体具有较小的抗管涌性。土类与重度对压实土抗管涌性的影响迫切需要进行实验室研究。

表 1-4 土坝坝体抗管涌性与土类、施工方法之间的粗略经验关系 (按抗管涌性递减的顺序)^[6]

抗管涌性	土 类	压实方法
最 大	1. 高塑性粘土 ($I_p > 15$) 2. 高塑性粘土 ($I_p > 15$)	良好压实 不良压实
中 等	3. 中塑性粘土 ($I_p > 6$) 结合料的级配优良的粗砂或砂、砾混合料 4. 中塑性粘土 ($I_p > 6$) 结合料的级配优良的粗砂或砂、砾混合料 5. 级配优良、无粘性、砾、砂、粉土混合料 ($I_p < 6$)	良好压实 不良压实 良好压实
最 小	6. 级配优良、无粘性、砾、砂、粉土混合料 ($I_p < 6$) 7. 很均匀、无粘性、细砂 ($I_p < 6$) 8. 很均匀、无粘性、细砂 ($I_p < 6$)	不良压实 良好压实 不良压实

经验表明, 级配反滤层对控制管涌很有效。许多坝肩或坝基渗漏强烈, 足以引起严重的冲刷, 但设置透水料排水或垫层后, 获得了安全, 透水料级配能使被冲刷土不被冲走。

另一种防渗材料按其抗集中渗流能力的分类, 可供设计参考选用^[12]。

(1) 很好的防渗体材料: 砂、砾与细粒的粗细混合料, 级配很好, $D_{85} > 50 \text{ mm}$, $D_{50} > 6 \text{ mm}$ 。如果是无粘性细料, 则要求小于 $74 \mu\text{m}$ 的细料含量小于 20%。

(2) 良好的防渗体材料: ①砂、砾与粘粒的混合料, 级配良好, $D_{85} > 25 \text{ mm}$, 细料是无机粘土, $I_p > 12$; ②高塑性坚韧粘土, $I_p > 20$ 。

(3) 还好的防渗体材料: ①砾质中砂至粗砂与无粘性细料的混合料, 级配还好, $D_{85} > 19 \text{ mm}$, $0.5 \text{ mm} < D_{50} < 30 \text{ mm}$, 则要求小于 $74 \mu\text{m}$ 的细料小于 25%; ②中塑性粘土, $I_p > 12$ 。

(4) 不好的防渗体材料: ①低塑性粘土, 含粗粒很少, $5 < I_p < 8$, $w_L > 25\%$; ②中塑性至高塑性粉土, 含粗粒很少, $I_p > 10$; ③中砂, 含无粘性细料。

(5) 很不好的防渗体材料: ①细、均匀、无粘性的粉质砂, $D_{85} < 0.3 \text{ mm}$; ②中塑性至无粘性的粉土, $I_p < 10$ 。

(四) 防渗排渗加固技术

渗流控制加固技术方面, 除砂砾石地层水泥粘土灌浆帷幕 (见第三章)、泥浆槽防渗墙^[6, 14~16]和自凝灰浆防渗墙^[17]外, 混凝土防渗墙 (倒挂井法)、高压喷射灌浆防渗板墙及粘土防渗墙 (机械造槽法、套孔冲抓法) 等垂直防渗措施的加固技术可见第六章。土工织物防渗排渗加固技术见第五章。

(五) 渗流破坏工程实例

1. 龙凤山水库土坝管涌

龙凤山水库位于黑龙江省五常县松花江支流拉林河上,控制流域面积 1740 km^2 ,总库容 2.4 亿 m^3 ^[20]。大坝为粘土斜墙砂壳坝,最大坝高 27 m ,坝顶高程 224.0 m ,全长 916 m ,坝基覆盖层厚 $10\sim 27\text{ m}$,其表面一层为厚约 1 m 的淤泥质壤土,表面以下为厚 $10\sim 15\text{ m}$ 的粗砂和砾质粗砂层。坝上游以铺盖与斜墙相接,隔断透水地基,长 $70\sim 90\text{ m}$ 。坝左端设溢洪道,电站位于坝右岸。1958年9月开工兴建,1960年春合龙竣工。由于施工质量未达到设计要求,特别是上游铺盖有一部分是水中抛筑冻土块,不仅长度和厚度不足,而且大坝左(西)段有局部地区还未筑铺盖。而且从大坝左端开始,桩号 $0+000\sim 0+450$,下游贴坡排水体未填筑反滤料,因此,使大坝埋下了隐患。

1960年5月底坝前蓄水深为 7.5 m 时,左岸河滩段 $0+040\sim 0+170$ 坝段,下游坝趾外 20 m 范围内,普遍出现直径 $3\sim 5\text{ mm}$ 的小泉眼,翻水冒泡,挟出淤泥颗粒。8月9日汛期来临,洪水入库,库水深度增至 11.8 m ;10时, $0+140$ 下游坝趾处翻砂冒水,孔径 10 cm ,流失淤泥与砂粒,用碎石填压无效,仍冒浑水。12时, $0+100$ 下游坝趾出现翻砂冒水。10日3时流量增大,涌水高达 0.3 m 。继则又在其两侧出现另两个冒水口,后用围井将此二孔围堵。同时, $0+093$ 上游坝坡 223.3 m 高程处出现弧形裂缝数条,长约 20 m ,宽 0.5 m 。险情发生后,于东坝头发电管放水,流量为 $100\text{ m}^3/\text{s}$,库水位逐渐下降,但因坝基已被破坏,延至11日10时,该围井涌水达 $0.96\text{ m}^3/\text{s}$,上游坝坡裂缝向上发展,于 $224\sim 225\text{ m}$ 高程又产生宽 2 cm 的弧形裂缝数条,防浪墙开裂,坝顶出现斜缝,坝顶沉降约 12 cm ,下游填压石料坍塌。12日16时,下游坝坡于 218 m 高程突陷,形成涌水洞,流量高达 $1\text{ m}^3/\text{s}$,当时库水位为 222 m ,水深约 11.2 m 。14日,抽调1万民工上坝,在上游沿水边 120 m 范围内大量抛土,涌水稍减。继由潜水员在 $0+000$ 斜墙与铺盖连接处发现 $7\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的大洞,先抛堵粘土麻袋无效,后经潜水员用粘土麻袋逐个围填,缩小洞口,最后堵死。15日15时,管涌停止。总计管涌挟出泥沙约 2000 m^3 。上游抛土约 4 万 m^3 ,粘土麻袋 250 个,下游抛填砂石料约 8000 m^3 。

大坝管涌破坏经抢堵制止后,于当年汛后即开挖检查坝体破坏情况。在下游坝坡从 216 m 高程向下挖槽至 212 m 高程,槽宽 8 m ,发现竖洞、横洞和斜洞3条管涌通道,洞内存在粗粒砂,并夹有抢险时投放的草袋、碎砾,细粒已为渗水冲失。

经水库放空后检查,上游出现宽 8 m 、高 6 m 的洞口。上游坝坡槽探为T形深槽,布置在 $0+100$ 桩号,从 222 m 高程向下开挖至斜墙的保护层面,检查坝体变位情况。量测结果表明: 222 m 高程以下,顺坝轴线 30 m 范围内最大沉降 1.8 m ; $216\sim 219\text{ m}$ 高程 20 m 一段坝体的相对沉降 $0.8\sim 1.4\text{ m}$ 。在 $0+086\sim 0+126$ 坝段,测得斜墙下陷,相对沉降 1.2 m 。图1-1是大坝出险实测断面,其中表示出渗流通道与进、出口分布。

大坝发生管涌的主要原因是上游铺盖质量极差,坝基渗透比降较大,特别是有一段未做铺盖,产生渗透捷径,故于此段的斜墙末端形成 $7\text{ m}\times 5\text{ m}$ 大漏水进口,铺盖既短又薄,防渗能力不够。另一原因是下游贴坡式排水体建于淤泥质壤土坝基表层,未填反滤层,渗透破坏从此开始,先翻水冒泡,土粒在出水口跳动。随着水头增大,就流失淤泥和细砂,粗土粒在涌水口堆成砂环。淤泥质壤土层顶穿后,下卧砂层大量涌出,逐步向上游发展,形

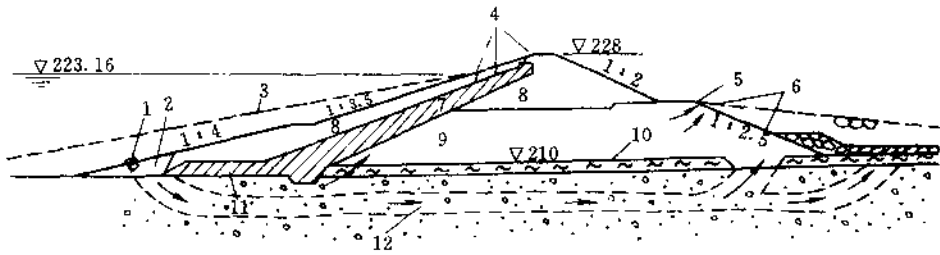


图 1-1 龙凤山水库土坝及其坝基管涌出险实测断面^[20] (单位: m)

- 1-堵口麻袋; 2-漏水洞进口; 3-抢险抛土; 4-裂缝; 5-冒水最高点高程 219.3 m; 6-管涌冒水口;
7-粘土斜墙; 8-碎石; 9-砂砾; 10-淤泥质壤土层; 11-铺盖; 12-渗流通道

成管涌破坏。后经彻底大修, 加长加厚铺盖, 才正常运行。

2. 西斋堂水库混凝土防渗墙附近塌坑破坏

北京市西斋堂水库土坝是座重粉质壤土斜墙坝, 坝高 58 m, 坝顶高程 470 m, 坝基砂砾石覆盖层的最大厚度 48 m, 上层 20 m 为洪积砂砾石层, 8 m 以上多漂石, 8 m 以下结构较松散; 20 m 以下为砂砾石夹泥, 结构较紧密, 时有薄层粘土透镜体。采用混凝土防渗墙防渗, 如图 1-2 所示。防渗墙紧靠斜墙趾部, 并用短铺盖相接。混凝土防渗墙墙厚 0.7~0.8 m, 插入铺盖长度为 5 m。设计斜墙厚度为 $0.2H$ (H 为水头), 最大厚度为 10 m, 设计干重度为 16.8 kN/m^3 ^[10,20]。

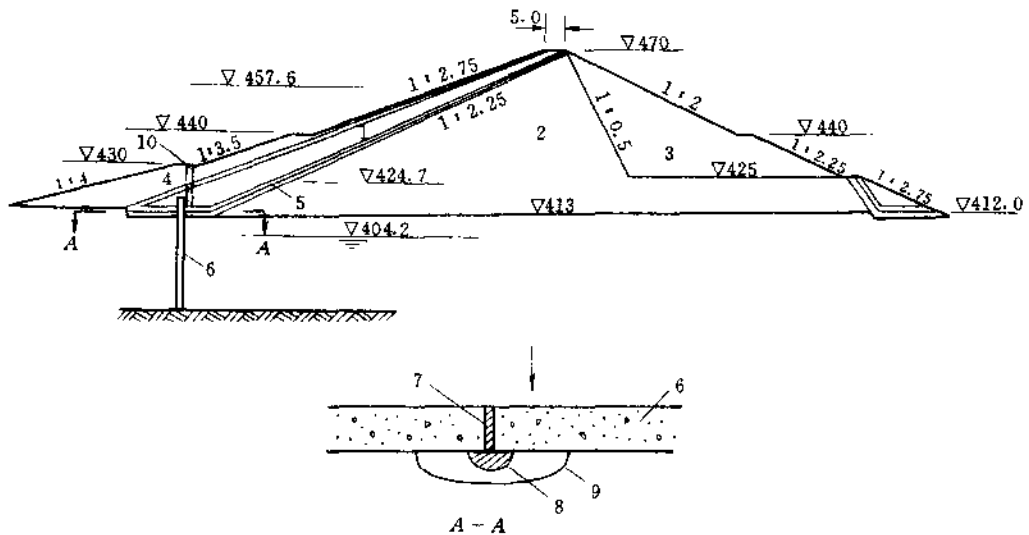


图 1-2 西斋堂土坝渗流破坏 (1号塌坑)^[10,20] (单位: m)

- 1-粉质壤土斜墙; 2-砂砾料; 3-石渣; 4-代替料; 5-反滤层与过渡层; 6-混凝土防渗墙;
7-墙上接头缝, 4~6 cm; 8-反滤层破坏面积; 9-斜墙出口破坏范围; 10-塌坑渗流漏管进口

混凝土防渗墙施工程序为: 先在河床表面铺两层反滤。上层第一层为粗砂, 最大粒径 10 mm, $d_{20}=0.4\sim 0.5 \text{ mm}$ 。第二层为最大粒径小于 100 mm 的河床砂砾石, $d_{20}=2\sim 3 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u=30\sim 35$, 反滤层无论是等效粒径或不均匀系数都满足要求而有足够的安全

度。反滤层铺好后填筑铺盖，并作为防渗墙的施工平台。墙建成后，清除铺盖和上部混凝土防渗墙，重新铺筑墙附近的反滤层和铺盖，再进行地面立模，浇筑上部混凝土防渗墙。但实际只清除到 415.6 m 高程，还保留了下部厚 1.1 m 的铺盖及就地在槽孔中浇筑的混凝土防渗墙，留下了隐患。

1974 年大坝建成蓄水，当年库水位升到 450.10 m。由于混凝土防渗墙的防渗性能好，下游河床地下水大幅度降低，直至低于斜墙底部表面 9.0 m。水库一直蓄水运行到 1978 年 4 月，库水位最高达 457.6 m。7 月份库水位降落时，上游发现两个大的塌坑。1 号塌坑位于桩号 0+243、高程 430.0 m 的坝坡平台上，其形状为椭圆形，顺坝轴线方向长 9.5 m，垂直坝轴线方向长 7.0 m，深 3 m。2 号塌坑位于桩号 0+160，较 1 号塌坑偏上游 3.5 m，高程约低 1 m，直径 2.5 m，深 0.3 m。两个塌坑的下部是漏管，垂直向下，由坝壳砂石料充填。

1978 年 10 月，对塌坑进行大面积的开挖检查，最后查明 1 号塌坑位于混凝土防渗墙的下游侧，2 号塌坑位于混凝土防渗墙的上游侧。并且还查清了渗透破坏是由于残留的厚 1.1 m 混凝土防渗墙的缺陷所致，而不是由于墙土间渗径长度的不足或墙土间的接触冲刷作用。

通过大开挖，查明槽孔中就地浇筑的混凝土中，在两个浇筑导管之间的混凝土，局部槽孔泥浆不易排挤干净，墙内存在上下游方向的夹泥缝，还有渗水逸出；两期槽孔之间的接头处，夹泥较厚，最厚 4 cm，墙与墙之间结合不紧密，存在有接头缝，也有渗水逸出。

又查明 1 号塌坑正沿着混凝土防渗墙接头缝的方向垂直向下形成漏管，漏管出口处接头缝的最大宽度 4~6 cm，为第一反滤层 d_{85} 的 8~10 倍，漏管一直延伸到反滤层以下，进入砂砾石坝基。该处反滤层已被接头缝中渗漏冲走，反滤层破坏范围 0.2 m×0.3 m，斜墙破坏范围 5.3 m×1.5 m 大于反滤层的破坏范围，如图 1-2 所示，但壤土都从反滤破坏处流失，并灌入砂砾石坝基深达 2.5 m，而反滤层完整部位尽管斜墙已破坏而砂砾石内并无壤土淤灌痕迹。显然，渗漏是从接头缝中带走反滤料，然后大量壤土从反滤层破坏处流失。塌坑的原因与形成过程是由于接头缝较宽，夹泥松软，混凝土防渗墙上部承受的水头最大，渗流先冲刷了接头缝中的泥皮，接着破坏了反滤层，使壤土斜墙失去保护，遭到渗流的冲刷，在重力作用下垂直向上发展，从而形成漏管，坝面出现塌坑。

水库建成后，由于混凝土防渗墙的渗流控制作用，使下游地下水位下降约 10 m。此情况下，斜墙底部和地下水位以上的混凝土防渗墙中接头缝夹泥与墙外泥皮易于干缩，使混凝土防渗墙与坝基及接头之间产生缝隙，使夹泥层的抗渗流破坏能力降低，在高水头作用下遭受冲刷。开挖后查明混凝土防渗墙与斜墙壤土之间结合不紧密，斜墙底部二次回填结合面以下防渗墙与壤土之间留有一条泥皮干缩后的水平洞，水平洞距斜墙底部 0.9 m，洞径 4~6 m。1 号塌坑处混凝土防渗墙接头缝中的泥皮被冲刷，留下 4~5 cm 的孔洞，孔洞中的渗流呈射流状，冲刷掉该部位内斜墙下部的反滤层。下游水位大幅度下降，使斜墙踵部渗流垂直向下，一旦反滤层破坏，在重力和渗透力的作用下斜墙加速破坏，很快形成垂直向上的渗漏管道。

漏水途径与破坏型式有三种，如图 1-3 所示。

型式 I：壤土底面附近混凝土防渗墙接头缝张开，反滤层破坏，斜墙中形成贯穿上下