

水=库=管=理=人=员=培=训=教=材

水库工程的养护修理

成都科技大学 大连工学院

华北水利水电学院 武汉水利电力学院



水利电力出版社

——水库管理人员培训教材——

水库工程的养护修理

成都科技大学 大连工学院

华北水利水电学院 武汉水利电力学院

230024

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍以防洪灌溉为主的大中型水库土坝、浆砌石坝、溢洪道和放水建筑物等的日常养护修理方法和水库的防汛抢险工作。在附录中还阐述了我国南方地区常见的土坝白蚁防治问题和北方地区常见的冻害防治问题。为了便于学习和参考，书中收进了较多的附图和部分实例。

本书系水库管理人员的培训教材，也可供从事水库管理的技术人员和有关院校的师生参考。

水库管理人员培训教材

水库工程的养护修理

成都科技大学 大连工学院
华北水利水电学院 武汉水利电力学院

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16 $\frac{1}{2}$ 印张 367千字

1979年11月第一版 1979年11月北京第一次印刷

印数 00001—8720册 每册 1.35元

书号 15143·3512

前 言

水库的养护修理工作是水利管理的重要内容之一。多年来，广大水利管理职工在水库的养护修理方面积累了丰富的经验。为了总结推广这些经验，进一步提高管理水平，确保工程安全，充分发挥水库效益，更好地为工农业生产服务，原水利电力部水利司组织了有关高等院校等单位编写《水库管理人员培训教材》丛书。本书系这套丛书之一，主要介绍以防汛灌溉为主的大中型水库水工建筑物的日常养护工作和修理方法，使水库管理人员能够较系统地掌握这一方面的基本知识。

由于我们对水库的养护修理方面，调查研究工作做得不够，本书可能有不少缺点和错误，请读者提出批评指正，以便今后补充修改。

在我们编写过程中，得到水利部工程管理局牛运光工程师、安徽省滁县地区水利局尹维四等许多同志的大力支持与热情帮助，在此谨致谢意。

编 者

一九七八年十月一日

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 水库枢纽中的主要水工建筑物	1
第二节 加强水工建筑物养护与修理工作的重要意义	2
第三节 水库枢纽正常状态的标准	4
第四节 病害水库与危险水库	5
第二章 土坝的养护与修理	6
第一节 土坝的工作条件、土坝的型式、土料的性质和土坝的构造	6
第二节 土坝的日常检查和养护	20
第三节 土坝裂缝的处理	21
第四节 土坝滑坡的处理	37
第五节 土坝渗漏的处理	47
第三章 浆砌石坝的养护与修理	79
第一节 浆砌石坝的日常养护工作	79
第二节 增加浆砌石重力坝稳定性的措施	80
第三节 浆砌石坝坝体裂缝和渗漏的处理	84
第四节 基岩渗漏的帷幕灌浆处理	95
第五节 浆砌石坝的维修处理实例	98
第四章 溢洪道的养护与修理	104
第一节 河岸式溢洪道的组成及工作条件	104
第二节 河岸式溢洪道的日常养护工作	111
第三节 溢洪道常见病害及其处理方法	113
第四节 闸门及其启闭设备的养护与修理	144
第五章 放水建筑物的养护与修理	163
第一节 放水建筑物的组成及工作条件	163
第二节 放水建筑物的检查养护	171
第三节 输水洞断裂漏水的处理	174
第四节 输水洞气蚀的处理	190
第五节 输水洞消能设备冲刷的处理	192
第六章 水库的防汛抢险	194
第一节 概述	194
第二节 防止洪水漫顶的措施	196
第三节 散浸、滑坡及漏洞的抢护	209
第四节 翻沙涌水的抢护	213
第五节 涵洞(管)、闸门及溢洪道的抢护	217

第六节 水库防汛抢险实例	221
附录一 土坝白蚁的防治	224
第一节 概述	224
第二节 土栖白蚁的防治方法	227
附录二 水工建筑物的冻害及其防治	231
第一节 季节性冻土对建筑物的破坏及其防治	232
第二节 土坝护坡的冻害及其防治	246
第三节 混凝土建筑物的冻害及其防治	249

第一章 概 论

建国以来，我国水利建设事业得到了飞跃的发展。全国各地在除水害、兴水利、大搞农田基本建设中，建成了库容在十万立方米以上的水库八万余座，这些水库在灌溉、防洪、发电等方面都发挥了巨大的作用，有力地促进了工农业生产的发展。

做好水库的养护与修理工作，确保水库工程安全，充分发挥水库工程效益，是每个水库管理者为实现四个现代化应做的贡献。

第一节 水库枢纽中的主要水工建筑物

水库是由在河道中修建的拦河坝拦截水流，抬高水位而形成的。为了保证水库的安全，充分发挥其效益，同时还要相应的修建一些其它的水工建筑物。这种在河道上修建的、以坝为主体的水工建筑物综合体叫做水库枢纽。图1-1、1-2为我国建成的两个大中型水库枢纽的平面布置示意图。

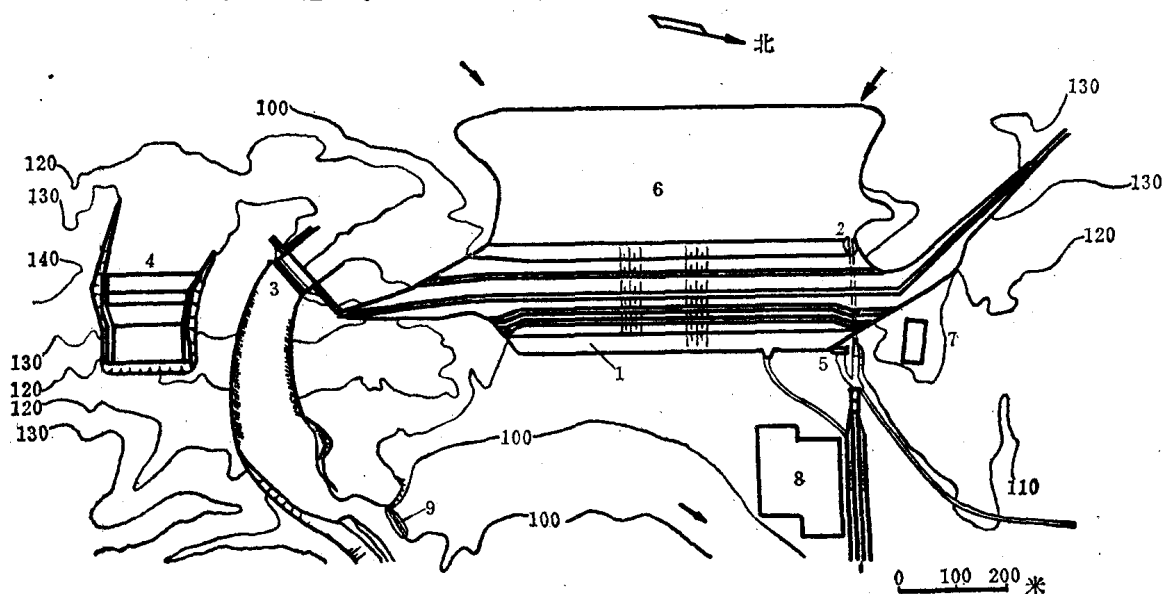


图 1-1 临城水库枢纽平面布置示意图

1—土坝；2—放水建筑物；3—第一溢洪道；4—第二溢洪道；5—电站；6—水平粘土铺盖；
7—管理处；8—鱼种场；9—导流坝

水库的任务不同，组成水库枢纽的水工建筑物也就不同。一般的水库枢纽由下列三种主要的水工建筑物组成：

(1) 挡水建筑物 如各种形式的坝，它的主要作用是拦截水流，抬高水位，形成水库，是水库枢纽中的主体建筑物。坝的类型很多，我国采用最多的为土坝及砌石坝。如图

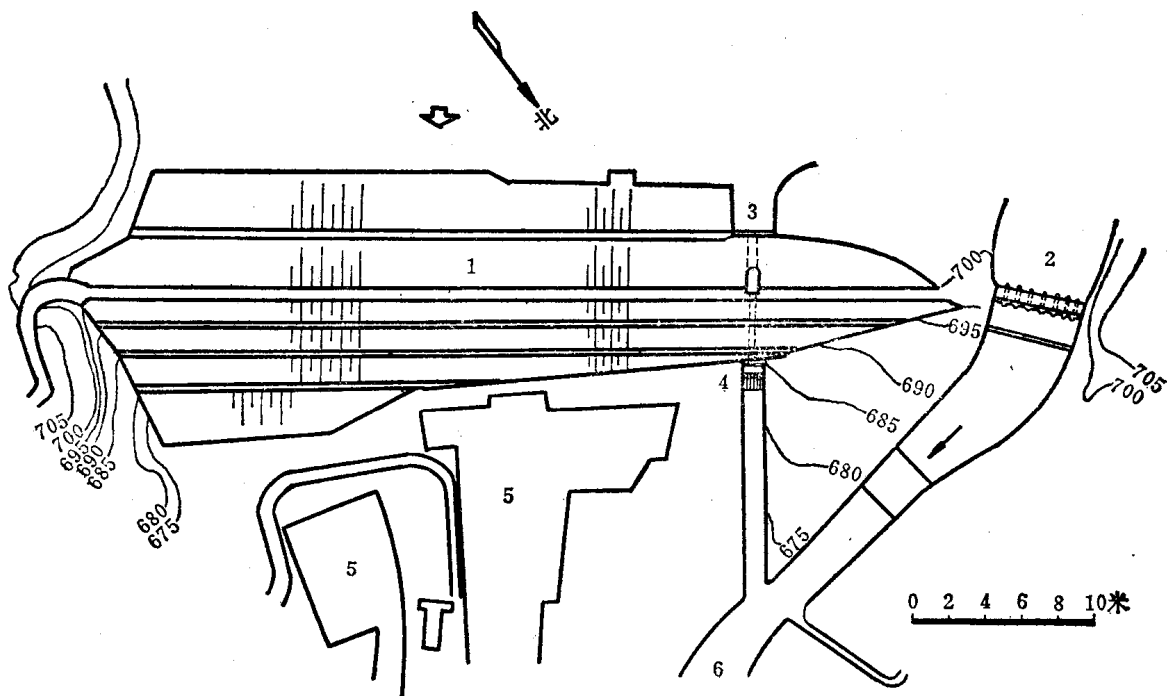


图 1-2 百丈水库枢纽平面布置示意图

1—土坝；2—溢洪道；3—放水建筑物；4—拦鱼栅；5—鱼池；6—下接取水闸

1-1、1-2水库枢纽中的挡水建筑物均为土坝。

(2) 泄水建筑物 如图1-1、1-2所示的河岸溢洪道，它的主要作用是宣泄多余的洪水，保证水库枢纽的安全。一般水库枢纽的泄洪建筑物多采用河岸溢洪道或泄洪隧洞。

(3) 取水建筑物 如图1-1、1-2所示的圆形压力涵管，它的主要作用是引取水库蓄水，然后通过输水建筑物将水流送到用水部门。取水建筑物也称为放水建筑物。放水建筑物如涵管、隧洞，有时也结合用以泄洪。

挡水建筑物（大坝）、泄水建筑物（溢洪道）和取水建筑物（涵管或隧洞）是组成水库枢纽的三种主要的水工建筑物，通常称为水库枢纽的三大件。研讨水库的养护与修理，主要就是指这三大件养护修理有关问题，研究如何进行妥善的养护与修理，以确保水库安全；研究水库中常见的一些病害并分析其产生原因以及有效的处理措施。

第二节 加强水工建筑物养护与修理工作的重要意义

在运用过程中，水库中的水工建筑物在以下外力和外界因素作用下，有的向不利的方向转化而受到损害：

1) 水工建筑物经常在水中工作，长期受到水压力、渗透、冲刷、气蚀和磨损等物理作用及侵蚀、腐蚀等化学作用；

2) 由于人们对自然界事物发展规律的认识还具有一定的局限性，因此，在水库工程的勘测、规划和设计中，难免有不符合客观规律之处，从而使水工建筑物本身存在一些不

同程度的缺陷和弱点；

3) 在施工过程中，由于各种主观因素和客观条件的限制，以致工程质量控制不严，未能按照规范规定和设计文件进行施工，造成建筑物中存在不同程度的缺陷和弱点；

4) 在长期运用中，建筑物可能受到设计中所不能预见的自然因素和非常因素的作用，如遭遇超标准洪水，强烈地震或特大流冰的作用等。

在水库运用中，如不加强管理或管理不善，显然，在上述各种外力和外界因素作用下，水库必将随着时间的推移，向不利的方向转化，逐渐降低其工作性能，缩短工程寿命，甚至造成严重事故，将给国家和人民生命财产造成很大损失。因此，对水库的水工建筑物进行妥善的养护，对其病害及时进行有效的维修，与各种不利因素进行斗争，促使水库工程向有利的方向发展，确保水库安全运行，并长期地充分发挥其应有效益，为社会主义工农业生产、为人民服务，这就是加强水库的水工建筑物养护修理的重要意义，也是我国广大水库管理人员的艰巨而光荣的任务。

建国以来，各级水利部门对加强水库工程的养护与修理，消除由于各种原因所造成的缺陷或弱点，促使其向有利方向转化，一直十分重视，并取得了很好的成效。

例如官厅水库(图1-3)，为心墙坝，坝高45米，河床覆盖层厚约20米，上部为细砂层，下部为砂卵石层，均用截水槽切断。两岸为砂质灰岩，左岸一带岩石裂隙发育，是坝区最大的渗漏段。大坝于1954年拦洪蓄水后，发现下游左岸岩壁上出现洇湿现象，距坝轴下游110~145米的下游坝坡与岩石交接处有多处集中渗流，造成塌坑20处，并于1956~1958年下游多次冒浑水，透明度仅3厘米，下游4号量水埝渗流量达187升/秒。经分析地质资料和测压管观测资料后，认为上述病害现象主要是由于左岸的绕坝渗流使下游棱体下的细砂层发生渗透破坏而造成的，因此采取了异重流淤积，水中抛土，浑水放淤和下游做

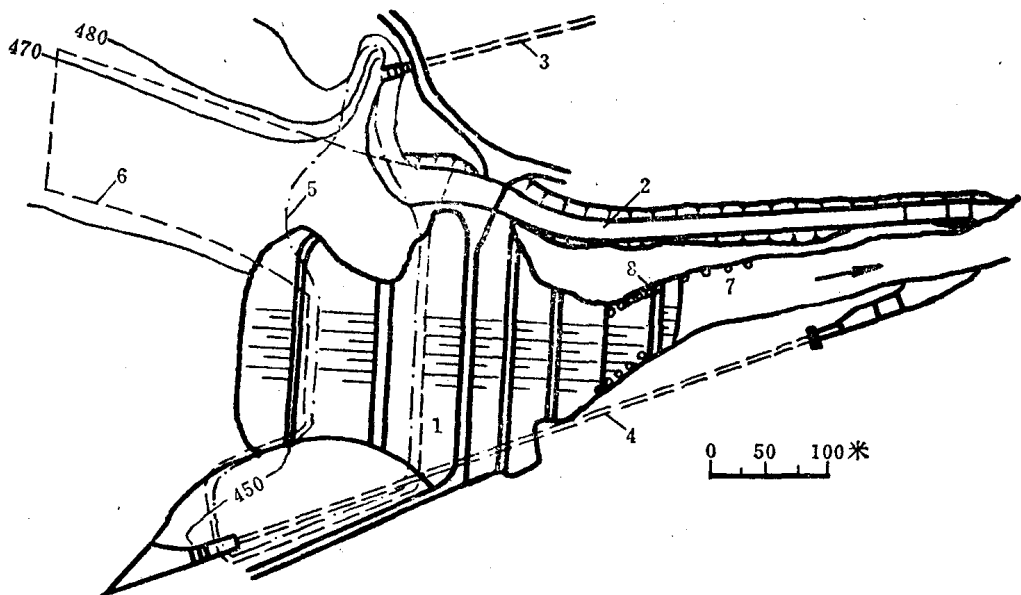


图 1-3 官厅水库绕坝渗漏处理示意图

1—土坝；2—溢洪道；3—发电引水隧洞；4—泄洪排沙洞；5—灌注浑水范围线；
6—抛土范围线；7—排水井；8—塌坑位置

排水减压井等养护修理措施。处理后左岸壁润湿线下降3米；绕流区内地下水测压管水位普遍下降2~4米；4号量水埝的渗流量降至155升/秒。迄今十余年来水库运用正常，为保证首都工农业及生活用水起了一定作用。

又如丰满电站，解放前由于大坝质量低劣而千疮百孔，整个工程向不利的方向转化，情况极为严重。解放后，在党的领导下，加强了养护修理工作，使整个工程向有利方向转化。通过两次较大的维修，使即将报废的大坝恢复了正常工作能力，为社会主义建设作出了应有的贡献。

另一方面，由于对工程养护修理重视不够，造成水库失事的实例也是有的。例如法国的马尔巴赛坝，是一个66.5米高的薄拱坝，最大库容5500万立方米，于1953年建成。在1959年12月2日晚突然从坝的中部破裂，彻底毁坏，死亡和失踪达500人。失事前一天，管理人员虽曾对大坝进行过检查，但是由于未埋设观测设备进行系统的观测以指导养护修理工作，所以没有发现任何不良预兆，以致造成严重的事故。

又如美国南福尔克土坝，坝高21.5米，库容2000万立方米。该水库在使用50年后，改为渔猎俱乐部的游湖。由于资本家不顾工程的养护修理以致坝顶坍陷成碟形，加以泄水管被堵塞，溢洪道尺寸不够，结果洪水漫坝失事。水库在45分钟内全部泄空，下游形成一股水头高10~12米、流速达22米/秒的洪峰，冲毁了桥梁、铁路和公路，造成死亡2500人的惨祸。

第三节 水库枢纽正常状态的标准

当水库枢纽的主要水工建筑物大坝、放水洞和溢洪道等，都达到了设计防洪标准，工程质量良好，在正常情况下均能安全可靠地运行并充分发挥水库枢纽的应有效益，渡汛安全基本没有问题，则该水库枢纽可以认为是处于正常状态。具体的标志为：

1) 土坝的水平位移和垂直位移变化规律正常且符合设计计算数值；坝身浸润线无突然升高迹象，不高于设计数值；坝体渗透流量小于设计允许值；渗透水清澈透明；没有严重的裂缝或滑坡现象。

2) 砌石坝及混凝土坝没有明显的水平位移或垂直位移；扬压力与设计情况相吻合；坝身无严重的渗漏和裂缝现象；坝体的抗滑稳定性能达到设计要求。

3) 坝基和坝端两岸没有渗透破坏现象；渗透流量在设计允许范围以内。

4) 溢洪道尺寸足够，过水能力符合设计要求，泄洪时能安全泄入下游河道。

5) 放水洞能保证在水库任何水位下安全放水，放水涵管与坝体接合密实，无断裂漏水现象。

6) 溢洪道和放水设备的闸门和启闭设备应保证操作灵活，能迅速而准确地控制流量。当泄洪和放水时无严重的振动或气蚀现象，关闭后无严重的漏水现象。

7) 溢洪道和放水设备下游有可靠的消能设备，下游不致于产生有危害的冲刷现象。

当水库枢纽处于正常状态时，并不意味着水库管理人员可以放松水库管理工作，此时应加强经常的、有计划、有秩序地进行日常养护工作，以保持水库枢纽的水工建筑物处于

经常完整和长期正常运用状态，并力争进一步扩大整个工程的效益。

应该注意，在不影响工程正常使用的轻微病害和使工程不能使用（或者使用受到很大限制）的严重病害二者之间，是没有严格界限的。轻微的病害如不及时维修，就会发展成为严重的病害。反之，虽然发生了严重的病害，只要及时采取适当的处理措施，也可防止事故，不致影响工程的使用。

“千里金堤，溃于蚁穴”。所以，虽然水库枢纽处于正常工作状态，仍必须加强日常养护修理工作，认真贯彻“养重于修，修重于抢”的精神。做到小坏小修、不等大修，随坏随修、不等岁修，以保持水库枢纽经常处于正常工作状态。

第四节 病害水库与危险水库

当水库枢纽中主要的水工建筑物均达到防洪标准，但存在一般的病害或隐患，而又能迅速维修处理安全渡汛的水库，称为病害水库。当水库枢纽中主要的水工建筑物未达到设计要求，如溢洪道泄洪能力过低，或主要的水工建筑物存在严重的病害，不能安全渡汛时，称为危险水库。

对于险、病水库，必须大力加强养护修理工作，提出有效的安全渡汛措施，确保水库安全，并及时对病害情况在充分分析研究的基础上，提出整治措施，报请上级机关批准后进行修复。在修复工作中如需要改变建筑物原有结构时，应进行重新设计并报上级审批。

为了保证水库的安全，1973年全国各地曾组织力量，对各种水利工程进行了大检查。根据检查结果，发现部分大、中、小型水库还存在有不同程度的质量隐患，这些险、病水库，由于安全没有可靠保证，以致不能充分发挥应有的工程效益，造成很大浪费。所以，加强险、病水库的养护修理，及时处理水库病害，充分发挥现有水库的工程效益，是有极大的实际意义的。

根据我国部分地区的检查结果分析，土坝险、病水库有四种主要病害情况：坝体裂缝滑坡；坝身、坝基或绕坝渗漏；溢洪道泄洪能力不够和放水洞断裂漏水。而浆砌石坝险、病水库有三种主要病害情况：浆砌石重力坝抗滑稳定不够；浆砌石坝坝体裂缝；坝基渗漏。因此，本书中除介绍各主要水工建筑物的日常养护与修理工作以外，并对上述各种常见病害的产生原因和处理方法加以阐述。

第二章 土坝的养护与修理

第一节 土坝的工作条件、土坝的型式、土料的性质和土坝的构造

一、土坝的工作条件

土坝是用土、砂、石料等堆筑成的。这种坝型不仅可以就地取材造价经济，而且坝体构造简单，对地基的要求不高，工作可靠，建筑技术易为广大群众所掌握，所以土坝是我国采用最广泛的坝型。据统计，建国以来（自1949年至1972年）除台湾省外，全国共建成了高于15米的坝12517座，其中土坝为11877座，约占总数的95%。

土坝与浆砌石坝及混凝土坝在结构上的主要区别是土坝属于散粒体结构。土坝在填筑过程中，虽然采用碾压、冲填和振动等方法来提高坝体材料间的紧密程度，但是毕竟不能使坝体象浆砌石坝和混凝土坝一样具有显著的整体性。因而土坝具有以下与浆砌石坝或混凝土坝不同的特点：

（1）无整体的水平抗滑问题 对于特定紧密度的散粒体必须具有一个相应的稳定坡度，因此，土坝的上下游坝坡必须较为平缓，使土坝在各种水位作用下，能保持上下游边坡稳定，不致产生滑坡。由于土坝上下游边坡较缓，剖面尺寸极大，因此，不存在整体的水平抗滑稳定问题。

（2）坝体具有透水性 由于散粒体结构的颗粒间存在较大孔隙，在土坝挡水后，上游的水就会通过孔隙向下游渗透，因此，在土坝的下游出现少量清水渗水现象是不可避免的。

渗透水流穿过坝体时，在坝体中形成的自由水面称为浸润面。土坝的横断面与浸润面的交线称浸润线如图 2-1 所示。

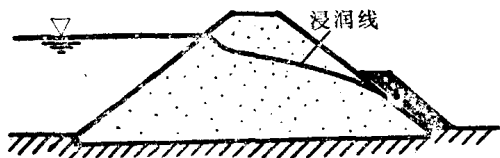


图 2-1 土坝的浸润线

但是，当渗透水流的水力坡降超过一定限度时，不仅会造成库内水量的损失，更严重的是渗水将逐渐带走坝体或坝基土壤中的细小颗粒，引起土体渗透破坏，这是不能允许的。

当土坝坝体或坝基是不均匀的非粘性土时，如渗流的速度达到一定限度，则土体中最小的颗粒开始处于悬浮状态，并被水流带走。小颗粒被带走后，土体孔隙增大，渗流速度也随之增大，于是渗流又带走较大的颗粒，这样继续发展下去，被带走的颗粒越来越多，越来越大，最后使坝体或坝基内形成集中的渗水通道，这种现象叫管涌（机械管涌）。而位于渗透水流逸出处的土体在渗透力的作用下，土体的一部分发生移动的现象称流土。通常在粘性土及均匀砂土中都可能发生流土。管涌和流土是土坝和地基具有危险性的渗透破坏现象，若发展下去，将会招致土坝的坍塌失事，必须采取妥善的防渗和排水设备，以保证坝体和坝基的不透水性并防止产生渗透破坏现象。

(3) 坝面抗冲能力低 散粒体结构的颗粒相互之间的联结能力是很差的, 因而土坝的抗冲能力很低, 在雨水冲刷或风浪作用下, 坝面也容易遭到破坏, 甚至发生坍塌现象, 所以土坝的上下游边坡均需采取护坡措施, 以保证坝体安全。当然, 土坝坝顶更不允许过水, 许多土坝的垮坝事故, 均系由于洪水漫坝所造成。因此, 土坝坝顶必须在最高库水位以上, 并保持一定的超高, 同时要求土坝枢纽中应建有泄洪能力足够的泄水建筑物, 并严格执行汛期控制运用计划, 防止超蓄或迟泄情况, 以确保土坝不发生漫顶事故。

(4) 坝体可压缩变形 对于散粒体结构来说, 由于颗粒间存在孔隙, 因此, 在荷重作用下, 孔隙被压缩、结构本身发生沉陷是不可避免的。土坝在施工过程中, 随着坝体的升高, 荷重逐渐加大, 坝体和坝基都会发生部分沉陷变形。土坝竣工蓄水后, 在水的作用下坝体和坝基将进一步产生沉陷变形。这些沉陷变形, 特别是不均匀沉陷, 往往成为坝体裂缝、渗漏的重要原因。

土坝的养护与修理工作, 应根据土坝的上述特点, 特别注意坝坡的稳定条件; 坝体和坝基的渗透条件; 坝坡保护条件以及坝体的沉陷变形等方面。通过经常的、全面的检查观测, 指导土坝的养护与修理工作。

二、土坝的类型

土坝按坝体土料的组合情况和防渗设备布置的位置, 常分为以下几种类型(图2-2):

(1) 均质坝(图2-2a) 坝体主要由一种土料筑成。

(2) 多种土质坝(图2-2b) 坝体主要由不同的几种土料筑成。

(3) 斜墙坝(图2-2c) 坝体的上游面用透水性较小的土料或其它不透水的材料做防渗斜墙, 而其他部分则用透水性较大的土料筑成。

(4) 心墙坝(图2-2d) 在坝体的中部或偏上游处, 用透水性较小的土料或其他不透水的材料做铅直的或稍微倾斜的防渗心墙, 而其他部分则用透水性较大的土料筑成。

(5) 混合坝(图2-2e) 坝体上游由一种或几种土料筑成, 而下游部分为堆石体。

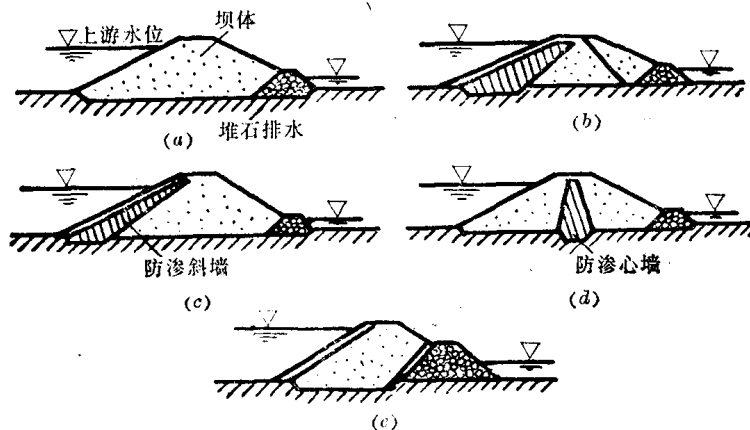


图 2-2 土坝的类型

三、土料性质

土坝的每一部分都要求有适合其特别需要的土料。例如上游部分坝体的土料, 一般要求透水性较小; 下游部分坝体的土料, 则要求透水性较大; 对于心墙, 特别重要的是要求

其具有不透水性；对于塑性斜墙，重要的则是要求具有可塑性、不透水性和一定的强度等。因此，水库管理人员对土料性质应该有所了解，这样才能结合设计和施工条件，观测和检查资料等，对坝的质量做出判断。对工程质量较好的土坝，则可在保证水库安全的前提下，充分发挥其作用，进一步扩大工程效益；对工程质量较差的土坝，则应加强日常检查、观测养护与修理工作，防止事故发生。

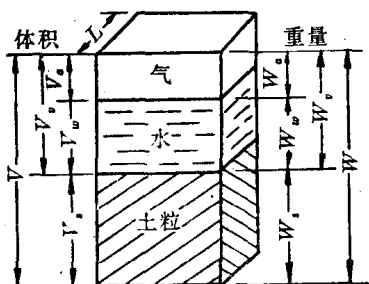


图 2-3 土体的组成部分

V 、 W ——表示土的总体积、总重量；
 V_w 、 W_w ——表示土中水的体积、重量；
 V_s 、 W_s ——表示土粒的体积、重量；
 V_v ——表示土中空气的体积

1. 土的物理性质

土是由不同大小的颗粒组成的。颗粒之间存在着孔隙，在这些孔隙中充满了水和空气。为了便于直观地认识各组成部分在数量上的比例关系，现将实际土体抽象绘制如图2-3。

土体的气、水、土粒三个部分数量间的不同比例关系，常用土粒比重、土的含水量、土的单位容重、土的孔隙比和土的饱和度等五个土的物理性质指标来表示，这些指标可反映出土的不同性质。

(1) 土粒比重 G 土粒单位体积的重量 (W_s/V_s) 与水单位体积重量 (γ_w) 的比值，叫做土粒比重或土的比重，用下式表示：

$$G = \frac{\text{土粒单位体积重}}{\text{水的单位体积重}} = \frac{W_s/V_s}{\gamma_w} \quad (2-1)$$

比重 G 为无单位的比值。通常 γ_w 等于 1 克/厘米³ 或吨/米³，故其计算公式可写成：

$$G = \frac{W_s}{V_s} \quad (2-1a)$$

土粒比重的大小随土中颗粒的矿物成分不同而变化，可用比重瓶测定。一般砂土土粒的比重约为 2.65，粘土土粒的比重在 2.70~2.75 之间。

(2) 土的湿容重 γ 即土单位体积的重量，用式表示：

$$\gamma = \frac{\text{土的总重量 } W}{\text{土的总体积 } V} = \frac{W_s + W_w}{V} \quad (2-2)$$

土的湿容重常用切土环刀测定，其单位以克/厘米³ 或吨/米³ 表示。土的湿容重数值一般为 1.5~2.2 克/厘米³。

(3) 土的含水量 w^* 即土的孔隙中的水分重量与土粒重量的比值，用百分数表示：

$$w = \frac{\text{土孔隙中的水分重}}{\text{土粒的重量}} = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (2-3)$$

不同的土其含水量可能变化很大，例如干砂的含水量一般为 1~2%，而稀软粘土，其含水量可达到 50%。

(4) 土的孔隙比 e 即土中孔隙的体积与土粒体积之比，以小数表示：

$$e = \frac{\text{土中孔隙的体积}}{\text{土粒的体积}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-4)$$

* 对含水量 w ，孔隙率 n ，饱和度 S_r 等在公式中均用小数，在计算结果中则采用百分数。

因为孔隙体积 V_v 和土粒体积 V_s 都不易测定出来，故通常孔隙比 e 须间接计算求得。由公式2-1a可知土粒体积 $V_s = W_s/G$ ，由公式2-2可知土的总体积 $V = W/\gamma$ ，则孔隙体积为：

$$V_v = V - V_s = \frac{W}{\gamma} - \frac{W_s}{G}$$

将上式代入公式2-4，则土的孔隙比为：

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_v}{V_s} = \frac{\frac{W}{\gamma} - \frac{W_s}{G}}{\frac{W_s}{G}} = \frac{W}{\gamma} \times \frac{G}{W_s} - 1 = \frac{W_s + W_w}{\gamma} \times \frac{G}{W_s} - 1 \\ &= \frac{\frac{W_s}{\gamma} + \frac{W_w}{\gamma}}{\frac{W_s}{G}} G - 1 = \frac{1+w}{\gamma} G - 1 \end{aligned} \quad (2-4a)$$

土的孔隙比是反映土密度的重要指标，一般土的 e 值为 $0.6 \sim 0.9$ ，当 $e > 1.0$ 时说明土体比较疏松，不适宜作为坝的地基。

另外，工程中还用孔隙率 n 来表示土的密度，它是土中孔隙的体积与土的总体积的比值，以百分率表示：

$$n = \frac{\text{土中孔隙体积}}{\text{土的总体积}} = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2-4b)$$

孔隙比与孔隙率的关系可表示如下：

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (2-4c)$$

将公式2-4a代入公式2-4c可得：

$$n = 100 \left[1 - \frac{\gamma}{G(1+w)} \right] \% \quad (2-4d)$$

孔隙率可直接表示土中孔隙的百分比，如 $n = 30\%$ ，就是说该土有30%的孔隙体积。但是在计算中使用是不方便的，因为土粒体积是不变的，而土的总体积是随孔隙体积而变化的，因此，计算中采用孔隙比 e 要比采用孔隙率 n 方便。

(5) 土的饱和度 S_r ，它是反映土孔隙中充水饱和程度的指标，即土中水的体积与其孔隙体积之比，以百分数表示：

$$S_r = \frac{\text{土孔隙中水所占的体积}}{\text{土的孔隙体积}} = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (2-5)$$

土的饱和度 S_r 也不易直接测定，而需按下面介绍的公式2-5a计算求得。

因 $W_w = V_w \cdot \gamma_w$ 及 $\gamma_w = 1$ 克/厘米³，所以 $V_w = W_w$ ，则由式2-3可得水的体积 $V_w = w \cdot W_s$ 。又按式2-4土中孔隙体积 $V_v = e \cdot V_s$ 。则公式2-5可改写为：

$$S_r = \frac{w \cdot W_s}{e \cdot V_s} \times 100\% = \frac{w \cdot G}{e} \times 100\% \quad (2-5a)$$

根据实践经验，对于砂土当 $S_r > 80\%$ ，即可作为完全饱和的砂土来看待，因它已具有

饱和土的特点了。例如，在动力作用下， S_r 大于80%的粉、细砂地基就会发生类似液体一样流动的液化现象，引起坝的滑坡事故。对于土坝填筑的粘性土，要求饱和度 S_r 在80~90%范围内，因为当 S_r 大于90%时，填土往往不易压实。

在实践中，土料的密实度除了以土的孔隙比 e 或孔隙率 n 表示以外，还常用干容重 γ_d 来表示，即以土单位体积中的颗粒重量表示：

$$\gamma_d = \frac{\text{土中颗粒重量}}{\text{土的总体积}} = \frac{W_s}{V} \quad (\text{克/厘米}^3) \quad (2-6)$$

由上式可知，土的干容重愈大，在一定程度上反映了土中颗粒排列或压实得愈紧密，故常用其做为土坝填料压实的指标。1959年全国中型水利水电工程经验交流会议认为：用重壤土或粘土筑坝，其压实干容重不宜低于1.5~1.55克/厘米³；用壤土或砂壤土筑坝，其压实干容重不得低于1.6~1.65克/厘米³。

土的干容重一般可直接测定，但也可利用其他的物理性指标换算得出，即可将公式2-6变换为：

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_v + V_s} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + 1}$$

然后将公式2-1a及2-4代入上式可得：

$$\gamma_d = \frac{G}{1+e} \quad (2-6a)$$

又将公式2-5a代入上式可得：

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + \frac{wG}{S_r}} = \frac{S_r G}{S_r + wG} \quad (2-6b)$$

【例题】 某土坝上游面为粘土防渗斜墙，压实后作质量检查，用体积为50厘米³的环刀切取土样，现场称得土重为96克，烘干后重为80克，粘土土粒比重 $G = 2.72$ 。求该土的湿容重 γ 、含水量 w 、孔隙比 e 、饱和度 S_r 和干容重 γ_d 。

因 $V = 50$ 厘米³， $W = 96$ 克，由公式2-2得 $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{96}{50} = 1.92$ 克/厘米³。

因 $W_s = 80$ 克， $W_w = 96 - 80 = 16$ 克，由公式2-3得 $w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% = \frac{16}{80} \times 100\% = 20\%$ 。

由公式2-4a得 $e = \frac{1+w}{\gamma} G - 1 = \frac{1+0.20}{1.92} \times 2.72 - 1 = 0.70$ 。

由公式2-5a得 $S_r = \frac{w \cdot G}{e} \times 100\% = \frac{0.20 + 2.72}{0.70} \times 100\% = 77.7\%$ 。

由公式2-6得 $\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{80}{50} = 1.60$ 克/厘米³。

应当指出，土的物理性质指标，在一定程度上从量的概念反映了土的特性，但还不能完全阐明影响土特性的因素。我们还必须从土颗粒的矿物成分、形状、大小以及土颗粒与水的相互作用方面作进一步的了解。

2. 土的颗粒级配

土颗粒是岩石经过风化作用形成的，因而其性质随矿物组成、形状和大小而不同，尤以土的颗粒大小具有重要的意义，因为其矿物组成和形状都与颗粒大小有密切关系。在自然界中，组成土的颗粒粗细相差很大，漂石粗大到数十厘米乃至数百厘米，而粘土粒可细小到千分之一毫米以下。根据实践总结，可以把组成土的在性质上有显著差别的某颗粒大小作为界限，将颗粒按大小划分为性质不同的若干组，这样就便于分析土中颗粒的大小及其对土性的影响。这些不同的组别，叫做粒组。表 2-1 列出各种粒组的范围和其相应的主要特性。

表 2-1 土的粒组及其特性

粒组名称		粒径范围 (毫米)	主要特性
漂石及块石	大	>800	矿物组成与母岩相似，无粘性，透水性大，不能保持水分
	中	400~800	
	小	200~400	
卵石及碎石	极大	100~200	
	大	60~100	
	中	40~60	
	小	20~40	
圆砾及角砾	粗	10~20	
	中	5~10	
	细	2~5	
砂粒	粗	0.5~2	由常见的石英、长石、云母等原生矿物组成。无粘性，易透水，不表现可塑性，遇水不膨胀，干燥时松散
	中	0.25~0.5	
	细	0.10~0.25	
	粉	0.05~0.10	
粉粒	粗	0.01~0.05	由强烈变化的石英或较小强度的长石、云母组成。透水性弱，湿润时出现微粘性，流水中易被冲刷
	细	0.005~0.01	
粘粒		<0.005	由次生矿物组成，几乎不透水，湿时呈可塑性，粘性大，遇水膨胀，干燥时收缩

一般土中不只包括单一的粒组，而常包含几种粒组，如粘粒、粉粒及砂粒等，当土中这些粒组中的某一粒组占了优势时，那末，这类土的性质就主要决定于这一粒组的特性。因此，要了解土料特性，必须测定这些粒组及其分布。一般以土中各粒组的相对含量（以占总土粒重量的百分数计）来表示土中粒组及其分布的情况，称为土的颗粒级配。

工程实践中常用的颗粒级配的分析（简称颗粒分析）方法，有筛分法和比重计法两种。前者适用于分析颗粒直径大于0.1毫米的非粘性土，后者适用于小于0.1毫米的非粘性土及粘性土。如土中含有大于和小于0.1毫米的颗粒时，必须同时采用两种方法进行试验。筛分法是用一套孔径等于各粒组分界值的标准筛直接分离各粒组，然后求出各粒组百分比。比重计法是将土加水经过处理，使土粒分离制成悬浮状，然后利用不同粒径的土颗粒在静水中沉降速度不同的原理，用特制的比重计来测定各粒组的含量和计算所占百分