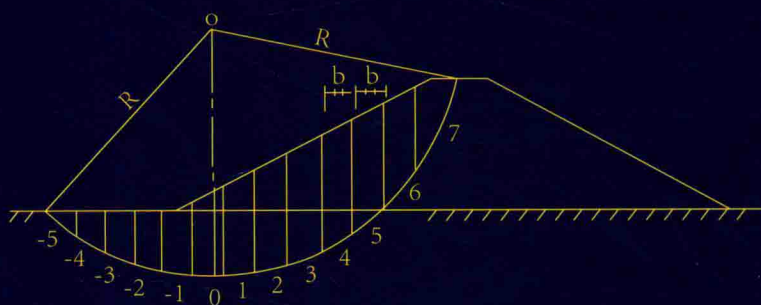


王绍春 编

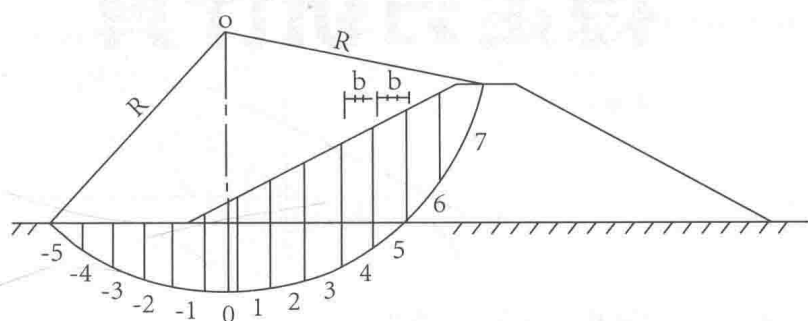
碾压式土石坝 稳定分析计算



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

王绍春 编

碾压式土石坝 稳定分析计算



常州大学图书馆
藏书章

图书在版编目(CIP)数据

碾压式土石坝稳定分析计算 / 王绍春编. — 昆明 :
云南大学出版社, 2016
ISBN 978-7-5482-2773-1

I. ①碾… II. ①王… III. ①土石坝—稳定分析
IV. ①TV641

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第212773号

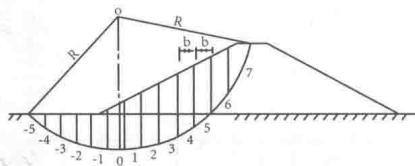
策划编辑: 张丽华

责任编辑: 张丽华

装帧设计: 郑明娟

碾压式土石坝 稳定分析计算

王绍春 编



出版发行: 云南大学出版社

印 装: 云南大学出版社印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 15

字 数: 350千

版 次: 2016年9月第1版

印 次: 2016年9月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5482-2773-1

定 价: 40.00元

社 址: 昆明市一二一大街182号(云南大学东陆校区英华园内)

邮 编: 650091

电 话: (0871) 65031071 65033244

网 址: <http://www.ynup.com>

E-mail: market@ynup.com

本书若发现印装质量问题, 请与印厂联系调换, 联系电话: 0871-65033247。

前 言

土石坝是一种历史悠久的坝型，具有就地取材、结构简单、施工方便、造价较低的优点，而且它能适应各种地质条件，应用较广。

土石坝稳定分析计算是确定坝的设计剖面 and 评价坝体安全的主要依据，稳定分析计算的可靠程度对坝的经济性和安全性具有重要影响。近年来，随着土石坝稳定分析计算软件的发展和应用，计算软件和 CAD 软件可直接链接，需要计算人员输入的边界条件越来越少，应用日趋简便。但有些年轻计算人员在没有深入理解土石坝稳定分析计算的基本原理和方法以及适用条件的前提下，直接引用软件计算成果，缺乏对筑坝材料指标和适用边界条件进行研究、对计算成果的合理性和可靠性进行深入分析。软件计算成果直接引用，一定程度上存在实际施工后的安全隐患。针对以上问题，本书较全面地介绍了土石坝稳定分析计算的基本原理和方法，并对土石坝稳定分析计算必要的筑坝土料抗剪强度指标确定、大坝渗流稳定计算和坝坡稳定计算三方面内容进行说明和分析。由于作者水平有限，不足之处欢迎读者指正。

作者

2016 年 6 月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 土石坝的特点	(1)
第二节 土石坝的类型	(3)
第三节 土石坝稳定计算目的和内容	(6)
第二章 筑坝材料	(8)
第一节 筑坝材料选择与填筑要求	(8)
第二节 筑坝土料	(11)
第三章 土石坝的渗流计算	(42)
第一节 土石坝渗流计算的方法	(42)
第二节 达西定律和杜平方程	(44)
第三节 渗流计算的水力学方法	(48)
第四节 渗流计算的流网法	(98)
第五节 渗流计算的有限单元法	(107)
第六节 土石坝与其他建筑物和岸坡连接处的渗流计算	(112)
第七节 土石坝不稳定渗流的计算	(119)
第八节 土石坝的渗透变形	(137)
第四章 土石坝的稳定计算	(152)
第一节 稳定计算的基本方法	(152)
第二节 不考虑土条间侧向力作用的稳定分析方法(瑞典圆弧法)	(157)
第三节 考虑土条间侧向力作用的稳定分析方法	(171)
第四节 最小稳定安全系数的确定	(189)
第五节 土石坝的抗震稳定性	(194)
第六节 三向问题的坝坡稳定分析	(208)
第七节 斜墙坝的边坡稳定计算	(212)
第八节 心墙坝的稳定计算	(221)
第九节 无黏性土坡的稳定性计算	(226)
参考文献	(231)

第一章 概 述

第一节 土石坝的特点

土石坝是应用很广的一种坝型，在我国广泛用作水库的拦河坝。根据 1984 年的统计，在我国已建成的 2000 座大、中型水库中，土石坝占 91.0%，砌石坝占 5.4%，混凝土坝占 3.1%，其他形制的坝占 0.5%。在土石坝中，各类坝型的比重为：均质坝占 62.1%，心墙坝占 28.3%，土石混合坝占 5.4%，斜墙坝占 4.2%。

近年来，随着土力学、土工试验和筑坝技术的不断发展，土石坝的应用范围得到进一步扩大，筑的坝的高度得到迅速发展，从过去的几十米发展到百米以上，甚至二三百米。在我国已建成的 2000 座大、中型水库的大坝中，有 11 座土石坝的坝高超过 100m，世界上已建成的最高土石坝，高度为 320m（罗贡坝），而计划要修建的土石坝中有的竟高达 400m 以上。

土石坝之所以得到如此广泛的应用和迅速发展，除上述条件外，还有以下主要原因：

（1）土石坝的主要建筑材料是土石料，可以就地取材，既可减轻交通运输上的困难，又可避免使用价格较高的水泥、钢材和木材。

（2）土石坝适应地基变形的能力较强，因此对地基的要求较其他坝型低，几乎可以修建在一切地基上。

（3）土石坝的结构简单，工作性能可靠，使用年限也较长。

（4）土石坝的施工方法比较简便，既可用人力施工，又可采用高度机械化的设备进行施工。

（5）土石坝的运用管理和维修、加高均较方便。

（6）在交通不便，而当地又有足够土石料的山区，土石坝往往是一种经济的坝型。

但是土石坝的应用也会受到下列因素的影响：在一般情况下，土石坝的坝顶是不允许过水的，因此必须另外修建溢洪道来宣泄经水库调节后的洪水；土石坝的施工导流较混凝土坝复杂；土石坝的体积较大，施工时所花费的劳力和机械设备较多；土料的填筑受气候的影响比较大；等等。以上原因常常会使土石坝的工期延长，使枢纽的造价提高。

土石坝在运用中有下列特点：

（1）由于土石料是透水的，所以水库蓄水后在水压力的作用下，坝体和坝基内将产生渗流，坝体内渗流的自由表面线称为浸润线（图 1-1）。紧靠浸润线以上的土体，在毛细管作用下土中的水分增加，形成所谓的毛细管上升区（图 1-1），其高度决定于土的性

质,对于黏性土可达 $0.5 \sim 1.5\text{m}$,对于砂土约为 $0.05 \sim 0.15\text{m}$ 。在毛细管上升区以上的土体,处于自然含水量状态,含水量的大小与土的性质、气温的高低和湿度的大小等因素有关。浸润线以下的土体,则处于饱和状态,土颗粒在水的浮力作用下有效重量减小,土的有效表观密度为浸水表观密度。此外,土体浸水后其抗剪强度减弱,渗透水流对土粒还将产生渗透动水压力。所有这些因素,对坝体和坝基的稳定性都是不利的。

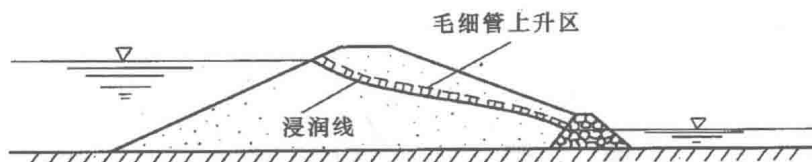


图 1-1 毛细管上升区示意图

水在坝体和坝基内渗流,以及从坝坡和坝基表面出逸时,都具有一定的水力坡降(渗透坡降),当水力坡降达一定值后,就可能将坝体和坝基内的土粒携出,或将坝坡或坝基面的土粒成群托起,形成所谓管涌和流土现象,产生渗透破坏。例如美国的堤堂坝是一座黏土心墙坝,坝基为多孔洞且裂隙严重的凝灰岩和玄武岩,上部覆盖 30m 厚的冲积土和风化岩层,心墙下的坝基中设有3道防渗帷幕,深度达 100m ,但施工质量不高,水库蓄水后渗流击穿帷幕,从靠近下游坝坡脚处的坝坡上逸出,产生管涌,致使大坝溃决。又如美国的马歇尔溪坝,是一座高 27.4m 的土石混合坝,由于坝基内有一层厚约 15m 的黏土层,在水库蓄水后黏土层饱和,抗剪强度减弱,因而引起溯流,导致坝坡坍塌。

为了防止坝体和坝基发生失稳和渗透破坏的现象,应使坝体具有一定的边坡坡度,并采取适当的防渗措施以削弱渗流,同时在渗流出逸处设置不同类型的排水,以防止渗透变形。

(2) 土石坝极易因气温骤变而产生不利的影响,当气温低于零度时,暴露在大气中的黏性土将由于冰冻而膨胀,并在融化后形成孔穴和裂缝。当气温较高时,黏性土会由于水分的损失而干裂。这些裂缝和孔穴可能成为渗流的集中通道,或者使坝体产生坍塌。所以,坝体的黏性土部分常常要用非黏性土覆盖,以防温度的影响。

(3) 在上下游水面附近及其变动区内,由于风浪的冲刷作用,坝坡将会受到冲蚀和淘刷,以致产生局部失稳。因此,在上下游水位变动区内,应采取各种类型的护坡来加强坝坡的防护。

(4) 降落在坝面上的雨水,一部分沿坝面流动,对坝面产生冲蚀;另一部分则渗入坝体,形成渗流,并且当渗流在坝坡上逸出时,可能会引起渗透变形。因此,在坝顶和坝坡面应设置排水沟和护面,以排除雨水和防止冲刷。

(5) 在坝体自重和各种荷载作用下,坝体会产生不同程度的变形(沉降)。由于各部位的地基性质不同和荷载大小不一,各部位的沉降也各不相同,而当相邻部位的沉降差达到一定数值时,坝体将会产生裂缝。因此对于不良地基应进行处理,同时坝体应采用合理的结构和适宜的土料,以增强其适应变形的能力。此外,由于沉降会降低坝体的高度,因此在设计土石坝时,应将坝顶适当加高,以预留一部分沉降值。

(6) 在地震区,在地震力的作用下,坝体会产生裂缝和坍塌,松砂地基会产生液化。因此,位于地震区的土石坝,除应进行抗震稳定核算外,还应采取必要的抗震措施。

第二节 土石坝的类型

碾压式土石坝常根据坝的高度和结构来进行分类。

根据《碾压式土石坝设计规范》规定,土石坝按其高度可分为:低坝、中坝和高坝;高度在 30m 以下为低坝,高度在 30~70m 为中坝,高度在 70m 以上为高坝;土石坝的坝高应从坝体防渗体(不含混凝土防渗墙、灌浆帷幕、截水槽等坝基防渗设施)底部或坝轴线部位的建基面算至坝顶(不含防浪墙),取其大者。

根据相关文献,土石坝按其最高的作用水头可分为下列三类:低坝(作用水头在 15m 以下)、中等高度坝(作用水头在 15~50m 之间)和高坝(最高的作用水头大于 50m)。

根据土石坝的结构,可分为均质坝和非均质坝两大类。均质坝[图 1-2(a)]的坝体是用同一种土料(例如壤土)填筑的;非均质土坝的坝体各部位是用不同的材料(透水性材料和弱透水性材料)填筑的,通常又可分为:

1. 斜墙坝

坝体的上游部分用透水性小的材料做成防渗体,下游部分用透水性较大的土料填筑。根据上游防渗体材料的性质,斜墙坝又可分为:

(1) 塑性斜墙坝[图 1-2(c)]。坝体的上游部分采用透水性小的土料(黏土、黏壤土等)做成防渗体,坝体的下游部分则采用透水性大的土料(砂砾石、卵砾石、堆石等)做成支撑体。

(2) 刚性斜墙坝[图 1-2(s)]。坝体的上游防渗体采用沥青混凝土、钢筋混凝土等材料建筑。

2. 心墙坝[图 1-2(b)(r)]

坝体的中间部分用透水性小的材料做成防渗体(心墙),防渗体的两侧坝体则用透水性较大的材料(砂砾石、卵砾石、堆石等)做成支撑体(坝壳)。根据防渗心墙材料的不同,又可分为:

(1) 塑性心墙坝[图 1-2(b)]。心墙是用透水性小的土料(黏土、黏壤土等)建筑。

(2) 刚性心墙坝[图 1-2(r)]。心墙是用浆砌石、混凝土、钢筋混凝土、沥青混凝土等建筑。

3. 组合式坝[图 1-2(d)(e)]

坝体由多种土料建筑而成。根据透水性小的土料在坝体中的位置,又可分为两种类型,一种是将透水性小的土料放在坝体的上游部分,坝的其他部分则按材料的透水性从上游向下游依次排列[图 1-2(d)];另一种是将透水性小的土料放在坝体的中部,两侧按材料的透水性从坝的中部向上下游两侧依次排列[图 1-2(e)],起排水和支撑体作用。

在透水地基上,为了减小地基中的渗透,可在透水地基上用透水性小的黏性土建筑铺盖[图 1-2(i)(m)(q)],以增加渗径长度;或者在透水地基中挖截水槽,回填透水性小的黏性土,做成防渗齿槽[图 1-2(f)(j)(n)];或者在透水地基内设置防渗墙

[图 1-2 (g) (k) (o)]; 或者在透水地基内进行帷幕灌浆, 形成防渗帷幕 [图 1-2 (h) (l) (p)]. 因此, 根据地基防渗的方式, 土石坝又可分为:

- (1) 有铺盖的坝。包括有铺盖的均质坝, 有铺盖的斜墙坝和有铺盖的心墙坝。
- (2) 有截水槽的坝。包括有截水槽的均质坝, 有截水槽的斜墙坝和有截水槽的心墙坝。
- (3) 有防渗墙的坝。包括有防渗墙的均质坝, 有防渗墙的斜墙坝 (防渗墙设在斜墙底部处的透水地基内) 和有防渗帷幕的心墙坝 (防渗墙设于心墙底部的透水地基内)。
- (4) 有防渗帷幕的坝。包括有防渗帷幕的均质坝, 有防渗帷幕的斜墙坝 (在斜墙下面的透水地基中设防渗帷幕) 和有防渗帷幕的心墙坝 (在心墙下面的透水地基中设防渗帷幕)。

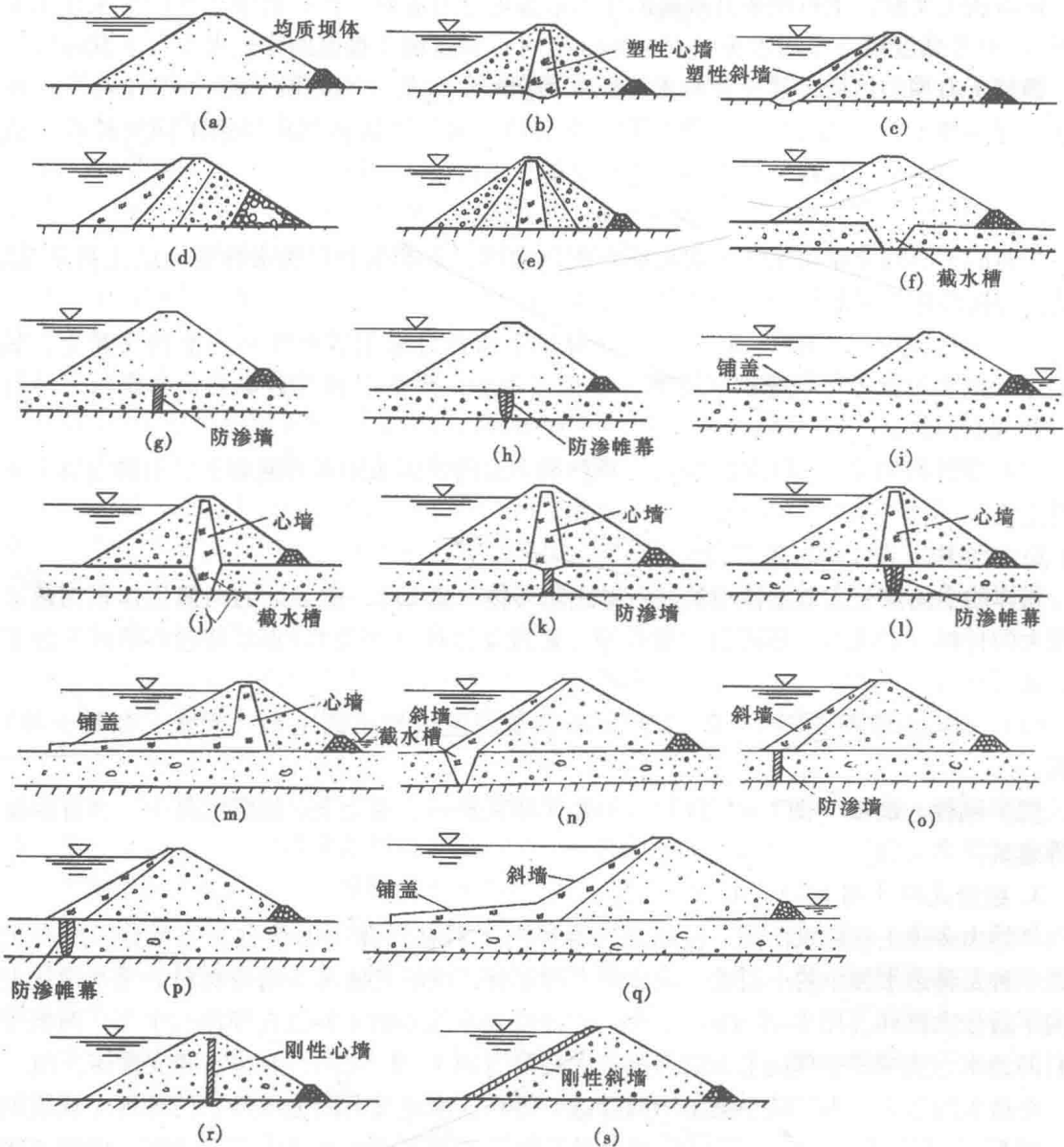


图 1-2 土石坝的类型

设计土石坝时究竟应选择哪一种坝型，主要决定于所具有的筑坝材料条件、工程地质及水文地质条件、气候条件、施工条件和经济条件等因素。

(1) 筑坝材料条件。当具有足够数量的、透水性不大而又适宜于筑坝的砂壤土、黏壤土、冰碛土和黄土时，可采用均质土坝。如果同时具有多种透水性较小的适于筑坝的土料时，应选择其中抗剪强度较大的土料，因为用这种土料建筑的坝，稳定性好，坝坡可以较陡，坝的体积可以较小。

如果筑坝地点没有足够数量的适于建筑均质土坝的土料，但是有足够数量的砂砾石、卵砾石或石块，则可考虑建筑塑性斜墙坝或塑性心墙坝，即将数量有限的透水性小的黏性土用作防渗斜墙或心墙，而坝体的其余部分则采用透水性较大的砂砾石、卵砾石或堆石建筑。

如果各种土料的数量均不多，则可采用混合式坝（也称多种土质坝）。在采用混合式坝时，应考虑利用从枢纽其他建筑物，如电站厂房、隧洞、溢洪道等建筑物开挖出来的土石料的可能性，以降低坝体的造价，这是近代建筑土石坝时特别重视的一个问题。

如果透水性小的土料的数量很少，不足以用来筑坝，则可考虑采用刚性斜墙坝或刚性心墙坝，其中采用较多的有钢筋混凝土斜墙和心墙坝，沥青混凝土斜墙和心墙坝等。但是钢筋混凝土心墙坝常常会因为坝体的变形而产生裂缝，而且检修也比较困难。金属心墙（如钢板桩心墙）则因为造价较高而很少采用。

(2) 工程地质及水文地质条件。地质条件有时对坝型的选择也起着重要的作用。对于岩石地基，可建筑各种类型的土石坝。如果在靠近坝轴线的上游基岩中有破碎带，则以采用心墙坝为宜；如果破碎带靠近上游坝脚，则以采用斜墙坝为宜。

如果坝基为较厚的软弱黏性土层（如黏土和黏壤土），则不宜修建刚性斜墙坝和刚性心墙坝，因为这种地基将会产生较大的变形，从而使防渗体产生裂缝。

如果坝基为透水地基，透水层的深度不大（在 15m 以内），能够开挖截水槽，建筑直达基岩或地基中弱透水层的防渗齿墙，则可采用有截水槽的坝，例如，有截水槽的均质坝、有截水槽的斜墙坝、有截水槽的心墙坝和多种土质坝。

当坝基透水层较深时（深度 15 ~ 30m），建筑截水槽在一定程度上存在困难，而且经济上也不合理，此时可以在坝下透水地基中修建防渗墙，即采用各种类型的有防渗墙的坝。如果水库的水量补给充足，允许有一定的水量损失，也可采用带有铺盖的各种坝型。如果河床上有天然淤积的弱透水层，能起防渗作用，则应尽量加以利用，以减小人工铺盖的工程量（减小人工铺盖的厚度），或者用以代替人工铺盖。如果河道水流中有很高的含沙量，在坝前淤积后能形成天然的防渗铺盖，则在筑坝时坝前可仅设临时性的较短的人工铺盖，等天然铺盖淤积完成之后，利用天然铺盖作为最后的防渗设备。在一些小河道上，也可采用人工放淤的办法，即在坝的上游河道中堆放黏性土，待洪水将其冲至坝前，形成铺盖。

如果透水层的深度很大，而其颗粒级配条件允许，则可采用在透水地基中灌浆的办法形成防渗帷幕。防渗帷幕常设在均质坝坝轴线上游侧的地基中，或者设在斜墙和心墙下面的透水地基中。

(3) 气候条件。在寒冷地区，宜采用黏性较小的土料来筑坝。在这种地区，塑性心墙

坝较塑性斜墙坝优越，因为心墙位于坝体的中部，其防冻条件较好。

在多雨地区，应尽量少采用黏性土来筑坝，因为如无防雨设备，黏性土的压实就存在一定困难。所以在这些地区，宜采用刚性斜墙坝或塑性斜墙坝。因为这种坝型在雨季时可先施工下游非黏性土料的坝体部分，而斜墙可以在雨季后施工。

(4) 施工条件。从施工角度来看，均质坝由于结构简单，施工方便，既可用人力施工，也可用高度机械化的设备来施工，所以采用较多。其次是斜墙坝。再次是心墙坝。混合式土石坝由于施工时各种土料的填筑互相牵制，干扰较大，因此在施工方面较其他坝型复杂。

此外，施工条件的好坏往往影响到施工的速度，也就是影响到工期，因此也是坝型选择的一个重要条件。

(5) 经济条件。在选择坝型时，除考虑上述各种因素外，还应对可供选择的坝型做技术经济比较，最后应选定技术上可靠、施工上可能、运用管理上方便、经济上合理的坝型。

第三节 土石坝稳定计算目的和内容

一、土石坝稳定计算目的

土石坝是依靠重力维持稳定。由于是散粒体堆筑，坝坡稳定须采用宽大的剖面，坝体不可能产生水平滑动，其失稳主要是坝坡滑动或坝坡、坝基一起滑动。主要影响因素：坝体滑坡滑裂面的形状、坝体结构、土料、地基的性质、坝的工作条件等。

土石坝稳定计算包括渗流稳定计算和坝坡抗滑稳定计算（简称坝坡稳定计算）。

渗流稳定计算的目的在于：①对初选的坝的形式与剖面尺寸进行检验，为核算上下游坝坡稳定提供依据。②根据坝体内部的渗流要素与渗流逸出坡降，检验土体的渗流稳定性，进行坝体防渗布置与土料配置，防止渗流逸出处发生管涌和流土。③计算通过坝体和河岸的渗流水量损失，并设计排水系统的容量和尺寸。

土石坝坝坡稳定计算是确定坝的设计剖面 and 评价坝体安全的主要依据，稳定分析的可靠程度对坝的经济性和安全性具有重要影响。分析坝体及坝基在各种不同条件下可能产生的失稳形式，校验其稳定性，确定坝体经济剖面。坝的安全性设计太保守，经济上也会造成浪费。

二、土石坝稳定分析计算内容

根据《碾压式土石坝设计规范》，土石坝稳定分析计算内容主要包括：筑坝材料抗剪强度的确定、渗流计算、渗透稳定计算和坝坡稳定计算。

筑坝材料抗剪强度的确定将在第二章中详细分析。

渗流计算应包括以下内容：

(1) 确定坝体浸润线及其下游出逸点的位置，绘制坝体及坝基内的等势线分布图或流

网图；

- (2) 确定坝体与坝基的渗流量；
- (3) 确定坝坡出逸段与下游坝基表面的出逸比降，以及不同上层之间的渗透比降；
- (4) 确定库水位降落时上游坝坡内的浸润线位置或孔隙压力；
- (5) 确定坝肩的等势线、渗流量和渗透比降。

渗透稳定计算应包括以下内容：

- (1) 判别土的渗透变形形式，即管涌、流土、接触冲刷或接触流失等；
- (2) 判明坝和坝基土体的渗透稳定；
- (3) 判明坝下游渗流出逸段的渗透稳定。

土石坝施工、建设、蓄水和库水位降落的各个时期，在不同荷载下，应分别计算其稳定性。控制稳定的有施工期（包括竣工时）、稳定渗流期、水库水位降落期和正常运用遇地震四种工况，应计算的内容如下：

- (1) 施工期的上、下游坝坡；
- (2) 稳定渗流期的上、下游坝坡；
- (3) 水库水位降落期的上游坝坡；
- (4) 正常运用遇地震的上、下游坝坡。

各工况正常和非正常运用条件的区分应按《碾压式土石坝设计规范》的规定执行。

第二章 筑坝材料

第一节 筑坝材料选择与填筑要求

一、筑坝材料选择

筑坝土石料调查和土工试验应分别按照《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》和《土工试验规程》的有关规定，查明坝址附近各种天然土石料的性质、储量和分布，以及枢纽建筑物开挖料的性质和可利用的数量。在当地有多种适于筑坝的土石料时，应进行技术经济比较后选用。筑坝上石料选择应遵守下列原则：

- (1) 具有或经加工处理后具有与其使用目的相适应的工程性质，并具有长期稳定性；
- (2) 就地、就近取材，减少弃料，少占或不占农田，并优先考虑枢纽建筑物开挖料的利用；
- (3) 便于开采、运输和压实。

枢纽建筑物开挖料的利用应与天然土石料场开采料一样，从材料性质、数量、弃料对环境的影响、施工进度安排及工程费用等方面进行论证。料场应统一规划。料场开采或枢纽建筑物的开挖料原则上均可直接作为筑坝材料，或经处理后用于坝的不同部位，但沼泽土、膨润土和地表上不宜采用。防渗土料应满足下列要求：

- (1) 渗透系数：均质坝不大于 1×10^{-4} cm/s，心墙和斜墙不大于 1×10^{-5} cm/s；
- (2) 水溶盐含量（指易溶盐和中溶盐，按质量计）不大于 3%；
- (3) 有机质含量（按质量计）：均质坝大于 5%，心墙和斜墙不大于 2%，超过此规定需进行论证；
- (4) 有较好的塑性和渗透稳定性；
- (5) 浸水与失水时体积变化小。

以下几种黏性土不宜作为坝的防渗体填筑料，必须采用时，应根据其特性采取相应的措施。

- (1) 塑性指数大于 20 和液限大于 40% 的冲积黏土；
- (2) 膨胀土；
- (3) 开挖、压实困难的干硬黏土；
- (4) 冻土；
- (5) 分散性黏土。

红黏土可用于填筑坝的防渗体，用于高坝时，应对其压缩性进行论证。经处理改性的分散性黏土仅可用于填筑3级低坝的防渗体，其所选用的反滤料应经过试验验证。防渗体与坝基、岸坡接触处等易产生集中渗流的部位，以及易受雨水冲刷的坝表面不得采用分散性黏土填筑。湿陷性黄土或黄土上可用于填筑防渗体，但压实后应不再具有湿陷性、采用的反滤料级配应经过试验验证。用于填筑防渗体的砾石土，粒径大于5mm的颗粒含量不宜超过50%，最大粒径不宜大于150mm或铺土厚度的2/3，0.075mm以下的颗粒含量不应小于15%，填筑时不得发生粗料集中架空现象。人工掺和砾石土中各种材料的掺和比例应经试验论证。当采用含有可压碎的风化岩石或软岩的砾石土作防渗料时，其级配和物理力学指标应按碾压后的级配设计。用膨胀土作为土石坝防渗料时，填筑含水量应采用最优含水量的湿侧，并在顶部设盖重层，盖重层产生的约束应力应足以制约其膨胀性，盖重层应采用非膨胀土。采用土工膜作为防渗体材料时，应按照《土工合成材料应用技术规范》的规定执行。反滤料、过渡层料和排水体料应符合下列要求：

- (1) 质地致密，抗水性和抗风化性能满足工程运用条件的要求；
- (2) 具有要求的级配；
- (3) 具有要求的透水性；
- (4) 反滤料和排水体料中粒径小于0.075mm的颗粒含量应不超过5%。

反滤料可利用天然或经过筛选的砂砾石料，也可采用块石、砾石轧制，或天然和轧制的掺和料。3级低坝经过论证可采用土工织物作为反滤层。料场开采和建筑物开挖的无黏性土（包括砂、砾石、卵石、漂石等）、石料和风化料、砾石土均可作为坝壳料，并根据材料性质用于坝壳的不同部位。均匀中砂、细砂及粉砂可用于中、低坝坝壳的干燥区，但地震区不宜采用。采用风化石料和软岩填筑坝壳时，应按压实后的级配研究确定材料的物理力学指标，并应考虑浸水后抗剪强度的降低、压缩性增加等不利情况。对软化系数低、不能压碎成砾石土的风化石料和软岩宜填筑在干燥区。下游坝壳水下部位和上游坝壳水位变动区应采用透水料填筑。开采坝壳堆石料，应遵守下列规定：

- (1) 开采前应彻底清除覆盖层；
- (2) 不同程度的风化料与新鲜石料应分区开采；
- (3) 易风化的软岩（如泥岩、页岩）宜边开采、边填筑；
- (4) 宜进行爆破设计，必要时进行爆破试验。

护坡石料应采用质地致密、抗水性和抗风化性能满足工程运用条件要求的硬岩石料。

二、填筑要求

填筑标准应根据以下因素综合研究确定：

- (1) 坝的级别、高度、坝型和坝的不同部位；
- (2) 土石料的压实特性和采用的压实机具；
- (3) 坝料的填筑干密度和含水率与力学性质的关系，以及设计对土石料力学性质的要求；
- (4) 土料的天然干密度、天然含水率，以及土料进行干燥或湿润处理的程度；
- (5) 当地气候条件对施工的影响；

- (6) 设计地震烈度及其他动荷载作用;
- (7) 坝基土的强度和压缩性;
- (8) 不同填筑标准对造价和施工难易程度的影响。

含砾和不含砾的黏性土的填筑标准应以压实度和最优含水率作为设计控制指标。设计干密度应以击实最大干密度乘以压实度求得。黏性土的压实度应符合下列要求:

(1) 1 级、2 级坝和高坝的压实度应为 98% ~ 100%, 3 级中、低坝及 3 级以下的中坝压实度应为 96% ~ 98% ;

(2) 设计地震烈度为 8 度、9 度的地区, 宜取上述规定的大值;

(3) 有特殊用途和性质特殊的土料的压实度宜另行确定。

黏性土的最大干密度和最优含水率应按照《土工试验规程》规定的击实试验方法求取。对于砾石上应按全料试样求取最大干密度和最优含水率。砂砾石和砂的填筑标准应以相对密度为设计控制指标, 并应符合下列要求:

(1) 砂砾石的相对密度不应低于 0.75, 砂的相对密度不应低于 0.70, 反滤料的相对密度宜为 0.70;

(2) 砂砾石中粗粒料含量小于 50% 时, 应保证细料 (小于 5mm 的颗粒) 的相对密度也符合上述要求;

(3) 地震区的相对密度设计标准应符合《水工建筑物抗震设计规范》的规定。

堆石的填筑标准宜用孔隙率为设计控制指标, 并应符合下列要求:

(1) 土质防渗体分区坝和沥青混凝土心墙坝的堆石料, 孔隙率宜为 20% ~ 28% ;

(2) 沥青混凝土面板坝堆石料的孔隙率宜在混凝土面板堆石坝和土质防渗体分区坝的孔隙率之间选择;

(3) 采用软岩、风化岩石筑坝时, 孔隙率宜根据坝体变形、应力及抗剪强度等要求确定;

(4) 设计地震烈度为 8 度、9 度的地区, 可取上述孔隙率的小值。

堆石的碾压质量可用施工参数 (包括碾压设备的型号、振动频率及重量、行进速度、铺筑厚度、碾压遍数等) 及干密度同时控制。堆石碾压时宜加水, 加水量宜通过碾压试验确定。对于软化系数较高的硬岩堆石, 应通过碾压试验确定是否加水。

设计填筑标准应在施工初期通过碾压试验验证; 当采用砾石、风化岩石、软岩、膨胀土、湿陷性黄土等性质特殊的土石料时, 对 1 级、2 级坝和高坝, 宜进行专门的碾压试验, 论证其填筑标准。黏性土的施工填筑含水率应根据土料性质、填筑部位、气候条件和施工机械等情况, 控制在最优含水率的 -2% ~ +3% 偏差范围以内。有特殊用途和性质特殊的黏性土的填筑含水率应另行确定。填筑含水率还应符合下列要求:

1. 上限值

- (1) 不影响压实和运输机械的正常运行;
- (2) 施工期间土体内产生的孔隙压力不影响坝坡的稳定;
- (3) 在压实过程中不产生剪切破坏。

2. 下限值

- (1) 填土浸水后不致产生大量的附加沉降使坝顶高程不满足设计要求、坝体发生裂缝

以及在水压力作用下不产生水力劈裂等；

(2) 不致产生松土层而难以压实。

在冬季气温零摄氏度以下填筑时，应使土料在填筑过程中不冻结，黏性土的填筑含水率宜略低于塑限；砂和砂砾料中的细料部分的含水率宜小于4%，并适当提高填筑密度。

第二节 筑坝土料

一、土料的鉴别

(一) 土料的野外鉴别

土料的野外鉴别可参考表2-1进行。

表2-1 土料的野外鉴别方法

土料的名称	鉴别方法				
	用手搓捻时的感觉	用眼和放大镜观察的情况	干燥时的状况	湿润时的状况	搓滚时的状况
砂土	明显感觉是砂粒，无黏着感	绝大部分是砂粒	颗粒分散	湿润时用手拍击无明显水印；无塑性	搓不成土条或滚不成土球
砂壤土	感觉有砂粒，也有些黏性	砂粒多于黏粒	土块用手捏或抛掷极易破碎	无塑性	搓不成土条，滚成的土球极易开裂和散落
粉土	感觉是粉末状	砂粒少，粉粒多	土块极易散落	有流动性，用手可捏成团，经振动可成饼状	不能搓成土条
粉质黏壤土	砂粒少，土块易捻碎	砂粒很少，细粉粒多	土块不坚固，用手压或锤击土块极易碎开	有一定塑性和黏结力	不能搓成很长的土条，且土条易破裂
黏壤土	感觉有少许砂粒，土块容易被压碎	在细粉末中可清楚地看到砂粒	土块用手压或锤击容易碎开	有塑性或一定黏结力	能搓成3mm直径以上的土条，能滚成小球
黏土	不感觉有砂粒，土粒细而均匀，土块很难用手搓碎	均质细粉末，看不见砂粒	土块很坚硬，用锤可打成碎块，但碎块不散落	塑性和黏性较大，有滑腻感；将土团压成饼状时，其周边不起裂缝	能搓成直径为1mm的长条，易滚成小球

(二) 土料的实验室鉴别

土料的实验室鉴别是通过土的筛分试验、密度试验和限界含水量试验，测定颗粒的粒径及其含量和土的限界含水量。按下列方法来鉴别土的种类。

1. 根据颗粒大小鉴别土的种类

根据颗粒大小鉴别土的种类如表 2-2 所示。

表 2-2 根据粒径鉴别土的种类

土的名称	粒径范围 (mm)	土的名称	粒径范围 (mm)
漂石（磨圆的）、块石（棱角的） 大 中 小	>200 >800 800~400 400~200	砂粒 粗 中 细 极细	2~0.05 2~0.5 0.5~0.25 0.25~0.10 0.10~0.05
卵石（磨圆的）、碎石（棱角的） 极大 大 中 小	200~20 200~100 100~60 60~40 40~20	粉粒 粗 细	0.05~0.005 0.05~0.01 0.01~0.005
圆砾、角砾 粗 中 细	20~2 20~10 10~5 5~2	黏粒 胶粒	<0.005 <0.002

2. 根据土粒含量鉴别土的种类

(1) 黏性土。

根据土中砂粒、粉粒和黏粒的含量，由图 2-1 确定土的种类。

(2) 砾质土。

根据土中砂粒、砾、粉粒和黏粒的含量，由图 2-2 确定砾质土的种类。