

郭诚谦 陈慧远 编著

土石坝

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水利电力出版社

THE HYDRAULIC STRUCTURE
DESIGN SERIES
DESIGN OF EARTH AND
ROCKFILL DAMS

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

土 石 坝

郭诚谦 陈慧远 编著

水利电力出版社

(京)新登字115号

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

土石坝

郭诚谦 陈慧远 编著

*

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

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 23印张 512千字 1插图

1992年3月第一版 1992年3月北京第一次印刷

印数 0001—2740册

ISBN 7-120-01317-3/TV·463

定价 18.90元

序 言

二十多年前笔者曾写过一套《水工结构应力分析丛书》，虽然体例庞杂，取材不精，而且有不少讹误，但在当时尚能满足实际设计同志的需要，所以受到欢迎。直到目前，笔者还经常接到各地读者来信的鼓励，并建议重版，这不仅是对笔者的勉励，更是一种鞭策。但在跨入八十年代的今日，原书内容显然不能满足要求了，所以再重版旧版是不适宜的。

为了满足许多读者的期望，在有关领导的关心和鼓励下，我们试图以一套新的丛书来替代旧著，这就是即将陆续与读者见面的《水工建筑物设计丛书》。编写这套丛书的目的，乃在弥合教科书、论文文献和实际设计工作间的距离，供广大的水利水电设计同志，特别是基层设计同志在实际工作中参考，还可作为有志进修者的自学材料。在编写时，我们除力图保持原著一本书一个专题、篇幅精简短小的特点外，还想有所提高。即除了仍以结构的分析计算为中心外，适当论述一点有关设计上的问题，同时尽量反映国内外在近二十年来的成就和进展，力求跟上当前形势的需要。全书以实用为主，但也适当注意理论上的论述和概括，并不写成像手册一样。当然，要做到这些是很困难的。每种水工建筑物都有它的特点和复杂的一面，要详尽地讨论它们的设计问题，不仅是我们水平所不及，而且也断非小小的篇幅所能容纳。所以，本书在选材时力求在篇幅所及的范围内结合分析计算，择要介绍一些主要设计原则。基于同样理由，对理论分析中的许多详细的推导过程，也不得不割爱，而只列出基本理论、假定

和重要的成果和公式。当然，我们也力求写得清晰连贯，使读者不难自行导证，并尽量给出有关的文献名称，使读者在必要时可以找到出处。

要编写这样一套丛书，已非笔者个人的能力和时间所及，因此邀请了有较丰富实践经验的同志来共同撰写，笔者只分担了小部分编写任务并做了力所能及的校阅工作。

根据原丛书的内容，并在征求了一些同志的意见后，本书将暂定为以下十种分册：压力钢管、水工隧洞和调压室、重力坝、拱坝、土石坝、溢洪道、坝内的孔口和廊道、水工建筑物的温度控制、水工建筑物的有限单元分析以及工程地质计算和基础处理。各分册将视撰稿进度陆续出版。

最后，笔者代表所有参加编写的同志，向热情审阅和加工本丛书的同志们表示衷心的感谢。对本丛书的批评和改进意见请寄水利电力出版社转。

潘家铮

1981年

目 录

序 言	1
第一章 枢纽布置和坝型选择	1
第一节 枢纽布置的基本原则	1
第二节 坝址及坝轴线选择	3
第三节 泄洪建筑物	10
第四节 厂房及引水建筑物的布置	17
第五节 坝型选择	19
第二章 筑坝材料的性质与压实设计	111
第一节 压实土体的基本工程性质	111
第二节 筑坝材料的压实设计	112
第三章 渗流分析与反滤层设计	240
第一节 渗流分析的基本理论	240
第二节 水库水位降落时坝体浸润线计算	248
第三节 反滤层设计	256
第四章 坝基渗流控制	272
第一节 渗流控制的基本要求与发展	272
第二节 岩基的渗流控制	282
第三节 砂砾石地基的渗流控制	290
第四节 粘性土地基的渗流控制	328
第五章 静力稳定分析	329
第一节 稳定分析方法的发展	329
第二节 土石坝的作用力与安全系数	344
第三节 稳定分析	355
第六章 土石坝的构造	377

第一节	土石坝的外形轮廓	377
第二节	坝的分区与细部结构	402
第三节	护坡	417
第四节	土石坝与基础、岸坡、混凝土等刚性建筑物的连接	423
第五节	土石坝的防裂设计	441
第七章	混凝土面板堆石坝	449
第一节	混凝土面板堆石坝的发展	449
第二节	基础处理	453
第三节	坝体设计	464
第四节	趾板及面板的设计	480
第五节	观测设计	504
第八章	土石坝变形和裂缝	508
第一节	土石坝的沉降	508
第二节	土石坝的水平位移	530
第三节	土石坝的裂缝	545
第九章	土石坝有限元分析	576
第一节	土的应力应变关系	576
第二节	非线性分析方法	589
第三节	土石坝的有限元分析	599
第四节	计算实例	618
第十章	土石坝抗震	629
第一节	土石坝的地震特性	629
第二节	土石坝材料的动力性质	657
第三节	土石坝的抗震设计	680
参考文献	724

第一章 枢纽布置和坝型选择

第一节 枢纽布置的基本原则

枢纽布置是对水利水电枢纽的主要建筑物，如大坝、泄水建筑物、引水建筑物、发电厂房系统以及过木、鱼道、航运等建筑物相互间位置的优化选择，是工程设计的关键。它受地质、地形、水文、水工、施工等多方面因素的制约，最终要求满足运行安全、方便、经济合理、技术先进等条件。枢纽布置既具有高度的技术性，又须根据前人的经验加以巧妙处理，尤其是在高山峡谷地区，建筑物往往十分集中，因此选择多种方案，进行深入的技术、经济比较，从而选出最优的布置，是十分必要的。

一、安全要求

一般土石坝枢纽布置要求，以大坝为主体，以泄洪建筑物为中心，特别是高土石坝不允许坝体溢流。因此，如何确保大坝防洪安全，是土石坝布置的首要原则。在某种程度上可以这样说，选定土石坝的坝址、坝段、坝轴线，主要是选定合适的溢洪道或泄洪建筑物的位置，并兼顾其它，然后进行优化。重视泄洪建筑物的原因，主要是由土石坝不允许过水的特点所决定。我国中小型水利枢纽，甚至包括个别大型水利枢纽，大坝失事的原因竟有50%是由于泄洪能力不足，或设计洪水标准偏低。我国一些河流已发生多次特大洪水，如河南板桥（汝河），1593年、1975年曾两次发生600~

1000年一遇的洪水)，湖南省的澧水（1935年7月5日，历史最大洪水 $Q=30200\text{m}^3/\text{s}$ ，而水文分析的千年一遇洪峰流量为 $32200\text{m}^3/\text{s}$ ）、黄河（1843年，历史最大洪水达 $Q=36000\text{m}^3/\text{s}$ ）等，皆已发生600~1000年一遇的特大历史洪水，国外巴西的帕尔多河流域，曾发生万年一遇洪水^[1]。因此，除特别重要的枢纽应按最大可能洪水校核外，对于一般大型工程和特别重要的中型工程，如果采用开敞式溢洪道或混合式泄洪洞为主的泄洪枢纽布置，笔者建议，可以考虑按二千至万年一遇洪水校核；如以泄洪洞为主的泄洪建筑物，对于大型水利水电枢纽工程，可按最大可能洪水校核，因前者的超泄能力大于后者。

二、地形要求

在高山峡谷地区修建土石坝枢纽和布置溢洪道以及泄洪洞、发电引水建筑物的进出口等水工建筑物时，都可能遇到高边坡问题，这不仅增加了施工的难度、加大了工程量，而且要为长期安全运用增加处理工作量。因此，要求在枢纽布置时，尽量减少高边坡开挖，例如采取各种工程措施（如溢洪道进口引渠采取弯道布置），采用垂直的阶梯式开挖布置等。

三、地质要求

尽量避开顺坡向的缓倾角、夹泥层等构造发育的工程地质条件。不良的工程地质条件，对各种泄洪建筑物、引水建筑物、厂房开挖边坡的稳定性是很不利的，往往要增加很多的工程处理措施，才能保证建筑物的安全。所以在进行枢纽布置时，要十分注意考虑这些不良的工程地质条件。

四、施工要求

要有良好的施工条件，使枢纽各个建筑物之间的施工干扰最少。枢纽布置时，要充分注意到为施工创造良好的条件，包括减少或者避免同时多层施工作业，便于开挖、出碴与混凝土浇筑、土石坝填筑等，这不仅为安全施工打下了基础，也有利于缩短工期、降低造价。

五、其他要求

对于土石坝（混凝土面板坝除外），围堰应布置成为坝体的一部份。

必须使枢纽水工建筑物运行可靠、方便、灵活。特别是泄洪建筑物，当设有各种型式的泄洪孔口时（如溢洪道、各个高程的泄洪洞以及排砂孔口等），能灵活地控制与调节泄量。

第二节 坝址及坝轴线选择

一、坝址及坝轴线的选择

坝址的选择必须在可行性设计阶段确定，坝轴线选择在可行性研究阶段应初步选定，并在初步设计阶段选定。

与其他坝型一样，土石坝坝址与坝轴线的选择对枢纽布置至关重要。坝址和坝轴线选定后，枢纽的各种建筑物布置也大体上确定，只是相互位置可以优化。坝址及坝轴线选择主要应根据地形、地质、枢纽布置以及施工条件等，选择几种可能的方案，通过技术经济比较决定。

1、良好的工程地质与水文地质条件是选择坝址和坝轴

线的必要条件

土石坝对坝址工程地质条件的要求较宽，可以建在各种地基上，只要求满足抗滑稳定、渗透稳定、变形与抗震要求，有的地基可以经过一定的处理，使其满足以上基本要求。对地基的要求可归纳如下：

1. 对岩石地基的要求

土石坝的防渗体（特别对高坝）如有条件直接修建在完整、均一的岩石地基上，往往是安全的，基础处理也较简单。岩石构造以单斜和向斜为优。背斜层位的岩石通常很破碎，易产生严重渗漏。岩层最好具有水平或近似水平层面或倾向上游。当岩层产状为高倾角时，其走向以垂直河流流向为宜；当岩层走向为顺河向时，可能造成施工开挖边坡的稳定和水库蓄水时边坡的稳定问题。

（1）有足够的岩石强度。从岩石的抗压强度来讲，即使对于坝高300m的高土石坝而言，包括弱风化岩石在内，地基强度一般都是足够的，作为土石坝地基也是满足要求的。但页岩和粘土岩则应作为软弱基础来研究和设计。

（2）岩石地基的完整性与均匀性。主要要求避开活动性断层，尽可能避开大断层和缓倾角裂缝（顺坡方向）、夹泥层发育的区段或复杂地基坝址。对于强风化层很深的地基，也应考虑避开；对于顺河向的高倾角裂隙发育的坝址，要认真研究防渗灌浆的效果，尽量减少坝基防渗处理的工程量和处理的难度，因此岩石地基的完整性与均匀性对基础处理难易的影响十分重要，甚至要大大超过对岩石强度的要求。

（3）避免选择沿基础软弱夹层整体滑动的坝址。我国小浪底土石坝，坝基约70m以下的粉砂岩中，仍有十分发育

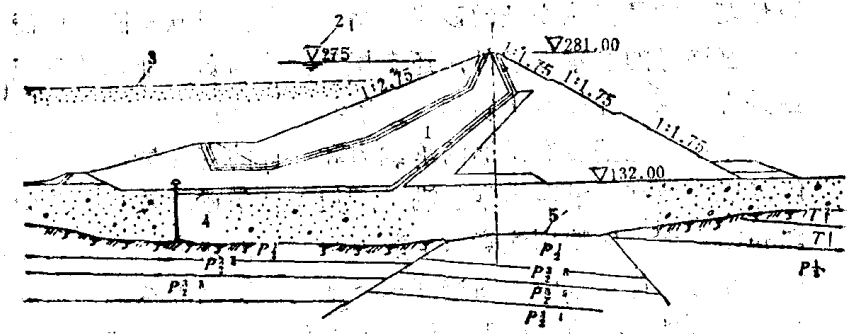


图 1-1 小浪底土石坝典型设计断面(初设方案)

- 1—斜坡；2—最高洪水位；3—最高淤积高程；4—防渗墙；
5—原地面线； P_1^m 、 T_1^m 为含泥化夹层的各种砂岩

的泥化夹层，抗剪强度 c' 、 ϕ' 仅为 $0.5N/cm^2$ 、 14° （如图 1-1 所示），因此工程量增加较多。这些情况，对某些坝址无法避免。但是，有更多的坝址，只要作好勘查，可以设法找到更好的坝基，从而减少工程量，简化坝基处理。总之，在坝址和坝轴线比较时，坝基的软弱夹层发育情况及其特性应作为重要的比较条件之一。

(4) 岩石要有足够的抗水性。岩石浸水后应不至溶蚀和软化。例如在坝基中有石膏、酸酐等。含石膏很多的岩石及岩盐层，对筑坝非常不利，应力求避免。石灰岩地基应研究其岩溶问题，对粘土页岩应研究遇水软化而形成大坝稳定与变形等问题。

(5) 要有一定的抗渗梯度。对于混凝土面板堆石坝，趾板下的岩石要满足足够的抗渗梯度要求。

2. 对软基的要求

除岩基外，其他地基都可称为软基。包括河床砂砾石地基、砂基、土基、残积层、坡积层、冰积层以及某些软弱岩

石地基（如曼格拉坝址的砂岩、粘土岩）。对软基除了应满足岩石基同样的基本要求外，还有振动液化与黄土地基的湿陷性处理问题。在软基上筑坝，要求具备下列条件：

（1）地基要有足够的承载力和允许的变形量。对于一般砂砾石地基，承载力常能满足；但对于细砂、软粘土、淤泥和泥炭土，应特别注意对承载力与变形的研究。一般在选择坝址时应首先考虑力图避开这类地基，否则应考虑挖除或采取其他处理措施，以保证施工期的稳定和坝体不开裂。例如斯里兰卡金河防洪堤，高4.0~6.5m，最高7.62m，长24.4km，大部分地基是泥炭质软粘土，压缩性很大，强度低，含水量为34.4%~388.5%，容重 $10.7\sim 18.7\text{kN/m}^3$ ，比重2.01~2.74，烧失量一般低于40%，平均22%，为了保证施工期的稳定，减少裂缝，采用了分期填筑和一系列施工技术措施。

对于砂基、黄土地基等某些软基，还应考虑震动的液化的条件。

（2）软基要有足够的渗透稳定性，即满足抗渗强度的要求，这是软基渗流控制的关键。软基中软弱夹层的分布与性质，对坝体的抗滑稳定十分重要，一般也应力求避开，或采取工程处理措施。

（3）坝基要有足够的抗水性、不溶解、不软化。一般规定地基内含有可溶性盐，如氯化盐和硫酸盐5%以上，硫酸盐2%以上，则需经专门论证才能筑坝。

对于含有未分解的有机质土，均需从地基中挖除。分解度不低于50%的泥炭，可作为坝高小于20m的坝基，如上述的金河防洪堤。

（4）应避开分散性土的坝基，或予以挖除。分散性土

极易产生冲蚀问题，如作为坝基，必须专门论证。

(5) 对于湿陷性黄土地基，由于在坝体自重荷载作用下，常会发生很大的浸水变形与压缩变形，产生严重的内部裂缝与表面裂缝，危及大坝安全。例如山西省文峪河水库土坝开挖后，曾发现裂缝宽达230mm，蓄水运行的12年中，对黄土台地连续灌浆，总吸浆量达6181t（土与水泥总重），尤其是1977年~1980年，平均每米耗浆量达478kg。因此，在这样的地基上建坝，亦需有专门的论证。

II、地形条件

合适的地形条件对于溢洪道的布置十分重要，对于坝体的工程量多少、施工的难易也影响显著。例如平原、丘陵地区，河谷常较开阔，施工布置较比容易，可选择较短的坝轴线。而高山峡谷地区，往往不一定是轴线最短为优，要考虑施工问题和溢洪道的布置选择。

III、土石坝坝轴线必须远离上游库区的滑坡体

库区如有巨大滑坡体产生较大涌浪对水工建筑物的破坏已久为人知。例如，意大利的瓦依昂拱坝，水库建成后左岸山体滑坡，在30秒钟内，2.4~3.0亿 m^3 的土石方滑入水库，使坝前1.8km水库段填满，整个工程报废，滑坡体激起的涌浪超过高262m的拱坝冲向下游，成为震惊世界的严重工程事故。我国湖南柘溪水电站，在施工期亦受到滑坡涌浪翻越施工期的坝体，造成巨大损失。碧口工程施工后期，方发现大坝上游的库岸滑坡问题，因此不得不在坝顶增设5.3m的防浪墙。如上述瓦依昂和柘溪工程为土石坝，其损失可能更为惨重。1976年召开的第九届国际大坝会议，将水库岸坡稳定列为四大议题之一，讨论了库岸稳定对大坝安全的影响。并提出评价一个坝址是否适宜建坝，不仅要分析坝址的地形、地

质条件，而且还要从岸岸的稳定条件加以深入论证。

因此，在选择土石坝坝轴线时，必须查清岸区不稳定的山体，尽量远避，并用潘家铮等的公式，来计算主坝前的滑坡涌浪参数，以便正确设计。对于重要的工程，尚应用模型试验加以论证。如涌浪不高，可以用加高坝顶或设置防浪墙的措施来解决。

IV、在选择坝址与坝轴线时必须充分考虑泄洪建筑物的布置

泄洪建筑物的布置是土石坝安全与否的关键，因此必须修建在合适的地形与良好的地质条件地区。由于泄洪时往往会引起下游河岸冲刷（经常出现危及岸坡稳定与进厂交通道路的安全）、厂房尾水淤积等问题，因此在选择坝址及坝轴线时，应估计到下游水流衔接条件的难易，冲刷坑范围内淤层的分布与性状。

V、应慎重考虑枢纽建筑物的综合布置

在进行坝址、坝轴线选择时，除了大坝、泄洪建筑物外，尚应充分考虑到枢纽其他建筑物，如发电厂房、航运建筑物、过木建筑物及施工围堰、导流建筑物的布置，尤其是发电厂房，往往是水利水电枢纽的主要建筑物，必须予以充分重视。

VI、要有足够数量的筑坝材料

坝址附近要有足够数量的土、砂、石料、砾石土（包括风化料）等筑坝材料，并具备开采的条件。对于混凝土面板堆石坝，则要求具有足够数量的石料或砂砾料，石料的饱和抗压强度不宜低于30MPa，最好是60~100MPa左右，并非强度愈高愈好。

VII、坝址及坝轴线的选择要结合施工总布置考虑

施工总布置（包括施工企业、交通运输道路、生活区等）对工程的施工十分关键，在选择坝址时，应结合施工总布置进行。

二、坝轴线的布置

土石坝，特别是高土石坝的坝轴线一般布置成直线。某些峡谷中的土石坝也有采用向上游凸出的曲线形式，即拱形布置。这些曲线形式的坝轴线曲率半径约为坝顶长度的 $1\sim 5$ 倍，矢高与弦长之比为 $3\%\sim 18\%$ 不等。但也有的高土石坝坝轴线采用凹向下游的曲线，如奥地利的盖伯奇堆石坝，或采用凸向下游的折线，如法国谢尔庞桑土石坝。我国的岳城水库土坝也是凹向下游布置。巴西一些宽河谷的高土石坝则多采用多折点不规则的坝轴线（图1-2），这些大多根据地形、

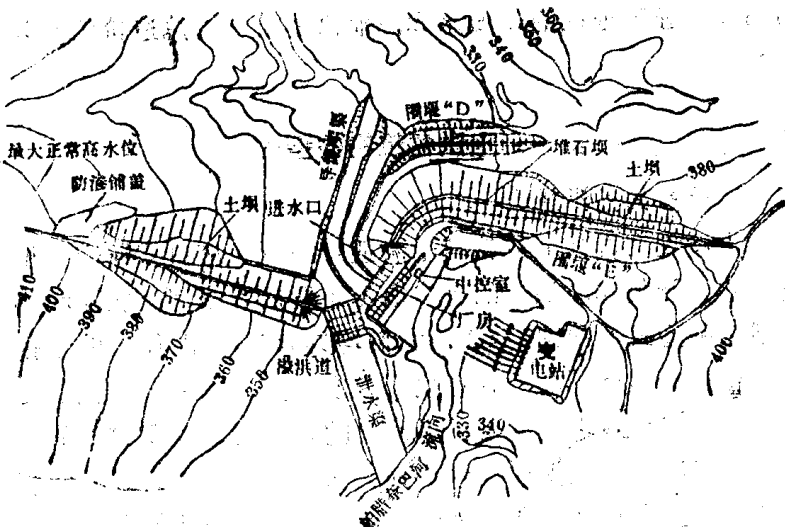


图 1-2 圣西蒙电站总体布置

地质条件而布置。J.L. 谢腊得认为某些设计者采用曲线形坝线，是认为可利用上游水压力将坝料压紧，不发生裂缝。但土石坝主要靠重力作用，拱作用实际上很小。总之，坝轴线的布置应因地制宜，一般宜选用直线布置，有时根据地形、地质条件，可用折线或凸向上游，亦或凹向下游，但在转折处应布置曲线连接段。

第三节 泄洪建筑物

泄洪建筑物是水利工程枢纽的极重要组成部分，有的泄洪洞也兼作发电、灌溉、工农业给水、排砂、导流和紧急情况下放空水库等用途。泄洪建筑物的规模与布置型式（图1-3），又是影响水利工程枢纽造价的主要因素之一。例如，建于峡谷地区的碧口电站，泄洪建筑物的造价占总造价的25%。丘陵地区的岳城水库，泄洪建筑物占总造价的20%左右。

一、泄洪建筑物的型式

1. 开敞式溢洪道

可设置在岩基上或软基上，适宜布置在坝口、坝床、坝肩等处。开敞式溢洪道的进口堰可布置成直线型、侧堰和曲线型三种型式（如图1-4），它们均具有超泄能力，便于排泄漂浮物，运行可靠，管理检修方便，安全度高，开挖料可结合上坝，一般也较经济。进水口的布置要着重研究如何使进口水流顺畅，减少局部水头损失和防止上游入口处的冲刷（特别是上游坝坡处）。为此，应尽量采用较小的堰前行近流速，例如控制在 5m/s 左右。碧口水电站溢洪道进口在设