



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



小水电技术导则 设计

第5部分：工程布置及水工建筑物

SHP/TG 002-5: 2019



免责声明

本导则未经联合国正式编辑。本导则内采用的名称和资料并不代表联合国工业发展组织的秘书处关于各国、领土、城市、地区或其当局的合法地位，以及关于国土、边界的界定、或对经济体系及其发展程度等问题的任何意见和立场。例如“发达的”、“工业化的”和“发展中”等一类词汇只为方便统计，未必表示一个国家或者地区的真实发展程度。本导则中提及的公司名称或者商业产品并非联合国工业发展组织为其代言。本导则尽可能保持内容的准确性，但联合国工业发展组织及其成员国均不对使用本导则可能产生的结果承担任何责任。本导则可被自由引用或转载，但需注明出处。

© 2019 UNIDO/INSHP – 版权所有

小水电技术导则 设计

第 5 部分：工程布置及水工建筑物

鸣谢

本导则是联合国工业发展组织（UNIDO）和国际小水电联合会（INSHP）共同合作努力的成果，约 80 名国际专家和 40 家国际机构参与了导则的编制、同行审查，并提出了具体意见和建议，使导则更具实用性和专业性。

UNIDO 和 INSHP 非常感谢许多机构在制定本导则期间作出的贡献，特别是以下国际组织：

——东南部非洲共同市场（COMESA）

——全球区域可持续能源中心网（GN-SEC），特别是西非国家经济共同体可再生能源和能源效率中心（ECREEE）、东非可再生能源和能源效率中心（EACREE）、太平洋可再生能源和能源效率中心（PCREEE）和加勒比可再生能源和能源效率中心（CCREEE）。

中国政府推动了本导则的最终定稿，对其完成具有重要意义。

以下人士为编制本导则作出了贡献，包括有价值的投入、审查和提供建设性意见：Mr. Adnan Ahmed Shawky Atwa, Mr. Adoyi John Ochigbo, Mr. Arun Kumar, Mr. Atul Sarthak, Mr. Bassey Edet Nkposong, Mr. Bernardo Calzadilla-Sarmiento, Ms. Chang Fangyuan, Mr. Chen Changjun, Ms. Chen Hongying, Mr. Chen Xiaodong, Ms. Chen Yan, Ms. Chen Yueqing, Ms. Cheng Xialei, Ms. Chileshe Kapaya Matantilo, Ms. Chileshe Mpundu Kapwepwe, Mr. Deogratias Kamweya, Mr. Dolwin Khan, Mr. Dong Guofeng, Mr. Ejaz Hussain Butt, Ms. Eva Kremere, Ms. Fang Lin, Mr. Fu Liangliang, Mr. Garaio Donald Gafiye, Mr. Guei Guillaume Fulbert Kouhie, Mr. Guo Chenguang, Mr. Guo Hongyou, Mr. Harold John Annegam, Ms. Hou ling, Mr. Hu Jianwei, Ms. Hu Xiaobo, Mr. Hu Yunchu, Mr. Huang Haiyang, Mr. Huang Zhengmin, Ms. Januka Gyawali, Mr. Jiang Songkun, Mr. K. M. Dharesan Unnithan, Mr. Kipyego Cheluget, Mr. Kolade Esan, Mr. Lamyser Castellanos Rigoberto, Mr. Li Zhiwu, Ms. Li Hui, Mr. Li Xiaoyong, Ms. Li Jingjing, Ms. Li Sa, Mr. Li Zhenggui, Ms. Liang Hong, Mr. Liang Yong, Mr. Lin Xuxin, Mr. Liu Deyou, Mr. Liu Heng, Mr. Louis Philippe Jacques Tavernier, Ms. Lu Xiaoyan, Mr. Lv Jianping, Mr. Manuel Mattiat, Mr. Martin Lugmayr, Mr. Mohamedain Seif Elnasr, Mr. Mundia Simainga, Mr. Mukayi Musarurwa, Mr. Olumide TaiwoAlade, Mr. Ou Chuanqi, Ms. Pan Meiting, Mr. Pan Weiping, Mr. Ralf Steffen Kaeser, Mr. Rudolf Hüpfel, Mr. Rui Jun, Mr. Rao Dayi, Mr. Sandeep Kher, Mr. Sergio Armando Trelles Jasso, Mr. Sindiso Ngwenga, Mr. Sidney Kilmete, Ms. Sitraka Zaraso Rakotomahefa, Mr. Shang Zhihong, Mr. Shen Cunke, Mr. Shi Rongqing, Ms. Sanja Komadina, Mr. Tareqemtairah, Mr. Tokihiko Fujimoto, Mr. Tovoniaina Ramanantsoa Andriampaniry, Mr. Tan Xiangqing, Mr. Tong Leyi, Mr. Wang Xinliang, Mr. Wang Fuyun, Mr. Wang Baoluo, Mr. Wei Jianghui, Mr. WU Cong, Ms. Xie Lihua, Mr. Xiong Jie, Ms. Xu Jie, Ms. Xu Xiaoyan, Mr. XuWei, Mr. Yohane Mukabe, Mr. Yan Wenjiao, Mr. Yang Weijun, Ms. Yan Li, Mr. Yao Shenghong, Mr. ZengJingnian, Mr. Zhao Guojun, Mr. Zhang Min, Mr. Zhang Liansheng, Mr. Zhang Zhenzhong, Mr. Zhang Xiaowen, Ms. Zhang Yingnan, Mr. Zheng Liang, Mr. Zheng Yu, Mr. Zhou Shuhua, Ms. Zhu Mingjuan.

使用中如有其他意见和建议，欢迎提供，以便再版更新。

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 防洪标准	1
4.1 一般规定	1
4.2 永久性水工建筑物	1
4.3 临时性水工建筑物	2
4.4 建筑物安全加高	2
5 工程总体布置	2
5.1 一般规定	2
5.2 坝址选择	3
5.3 闸址选择	4
5.4 水电站厂址选择	4
5.5 坝型选择	5
5.6 枢纽布置	5
6 挡水建筑物	5
6.1 重力坝	5
6.2 拱坝	19
6.3 混凝土面板堆石坝	24
6.4 碾压土石坝	30
6.5 水力自控翻板闸坝	38
7 泄水建筑物	41
7.1 溢洪道	41
7.2 水闸	46
8 引水建筑物	55
8.1 进水口	55
8.2 引水隧洞和调压室	59
8.3 引水渠道与压力前池	64
8.4 渠系建筑物	67
8.5 压力钢管	70
8.6 沉沙池	74
9 发电厂房	77
9.1 一般规定	77
9.2 厂区布置	77

9.3	厂房内部布置	78
9.4	地面厂房整体稳定分析	81
9.5	厂房结构设计	84
10	工程安全监测	91
10.1	一般规定	91
10.2	安全监测设计	91
11	混凝土强度、耐久性和钢材性能	95
11.1	混凝土强度	95
11.2	混凝土耐久性	96
11.3	钢筋	100
附录 A (规范性附录)	波浪爬高计算	103

前 言

联合国工业发展组织(UNIDO)是旨在促进全球包容和可持续工业发展(ISID)的联合国专门机构。为联合国和各国未来 15 年可持续发展提供框架的《2030 年可持续发展议程》和联合国可持续发展目标,已将 ISID 列为其可持续发展的三大支柱之一。能源对经济、社会发展和提高生活质量不可或缺,UNIDO 的 ISID 任务明确将支持建立可持续能源体系。过去 20 年里,国际社会对能源的关注和讨论越来越多,扶贫、环境风险和气候变化等问题正成为焦点。

国际小水电联合会(INSHP)是一个协调和促进全球小水电发展的国际组织,各区域、次区域和国家对口单位、相关机构、公共单位和企业自愿加入,以社会效益为其主要目标。INSHP 旨在通过发达国家、发展中国家和国际组织间的三方经济技术合作促进全球小水电发展,为广大发展中国家的农村提供环保、负担得起、充足的能源,从而增加就业机会、改善生态环境、减少贫困、提高农村生活文化水平和经济发展水平。

UNIDO 和 INSHP 自 2010 年起合作编制的《世界小水电发展报告》显示,全球对小水电的需求和其发展程度并不匹配,技术缺乏是大多数国家发展小水电的主要障碍之一。UNIDO 和 INSHP 决定基于成功发展经验并通过全球专家合作,共同编制《小水电技术导则》(简称导则)以满足各成员国的需求。

本导则根据 ISO/IEC 指令第二部分(详见 www.iso.org/directives)的编制规则起草。

提请注意,本导则中的一些内容可能涉及专利权问题。UNIDO 和 INSHP 不负责识别任何此类专利权问题。

引 言

小水电是广泛认可的解决偏远农村地区电气化问题的重要可再生能源。尽管欧洲、北美、南美和中国等大多数国家都拥有很高的装机容量,但许多发展中国家受到许多因素的阻碍(包括缺乏全球认可的小水电好案例或标准),仍有大量小水电资源未得到开发。

本导则将通过应用全球现有的专门知识和最佳实践,解决目前缺乏适用于小型水电站的技术导则的问题,让各国利用这些达成共识的导则来支持他们目前的政策、技术和生态环境。对于机构和技术能力有限的国家,将夯实他们发展小水电的知识基础,从而制定鼓励小水电发展的优惠政策和吸引更多的小水电投资,以促进国家经济发展。本导则对所有国家都是有益的,特别是在技术知识比较缺乏的国家中分享经验和最佳实践。

本导则适用于装机容量 30 MW 及以下的小型水电站,可作为小型水电站规划、设计、建设和管理的技术性指导文件。

- 《小水电技术导则 术语》给出了小型水电站常用的专业技术术语和定义。
- 《小水电技术导则 设计》给出了小型水电站设计的基本技术要求、方法学和程序,专业涵盖了电站选址规划、水文、工程地质、工程布置、动能计算、水工、机电设备选型、施工、工程造价估算、经济评价、投资、社会与环境评价等。
- 《小水电技术导则 机组》对小型水电站水轮机、发电机、调速系统、励磁系统、主阀和监控保护及直流电源系统设备提出了具体的技术要求。
- 《小水电技术导则 施工》对小型水电站施工技术提出了规范性指导意见。
- 《小水电技术导则 管理》对小型水电站项目管理、运行维护、技术改造和工程验收等技术方面提出了规范性指导意见。

小水电技术导则 设计

第 5 部分:工程布置及水工建筑物

1 范围

本部分规定了小型水电站水工建筑物防洪设计标准,工程总体布置、挡水建筑物、泄水建筑物、引水建筑物、发电厂房、开关站等建筑物型式选择和设计的具体要求,以及工程安全监测、混凝土和钢材性能等技术要求。

本文件适用于以下高度的水库大坝:

- a) 碾压式土石坝 30 m;
- b) 混凝土面板堆石坝 50 m;
- c) 混凝土(砌石)坝 70 m。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改)适用于本文件。

SHP/TG 001 小水电技术导则 术语和定义

3 术语和定义

SHP/TG 001 界定的术语和定义适用于本文件。

4 防洪标准

4.1 一般规定

4.1.1 水电站工程的防洪标准应根据经济、社会、政治、环境等因素对防洪安全的要求,统筹协调局部与整体、近期与远期以及上下游、左右岸、干支流的关系,通过综合分析论证确定。

4.1.2 防洪标准应以防御的洪水的重现期表示。防洪标准可根据不同防护对象的需要,采用设计、校核两级洪水标准。

4.2 永久性水工建筑物

不同库容和装机容量水电站水工建筑物防洪标准【重现期(年)】,可按表 1 确定,也可根据当地/国家有关保护目标的规定进行选择。

表 1 水工建筑物防洪标准【重现期(年)】

水工建筑物	≤10 MW 电站或水库库容 ≤1×10 ⁶ m ³ 的建筑物		10 MW~30 MW 电站或水库库容 (1~10)×10 ⁶ m ³ 的建筑物	
	设计标准	校核标准	设计标准	校核标准
混凝土(砌石)坝	20~30	100~200	30~50	200~500
碾压土坝、堆石坝	20~30	200~300	30~50	300~1 000
水闸(翻板闸)	10	20~50	10~20	50~100
厂房(开关站)	20~30	50	30~50	100
引水建筑物	10~20	30~50	10	20~30
消能防冲建筑物	10	—	20	—
渠系建筑物	10	20~30	10~20	30~50

4.3 临时性水工建筑物

水电站施工期使用的临时性挡水、泄水等建筑物的防洪标准应根据建筑物结构型式确定。当采用土石结构时,可采用 5 年~10 年设计,当采用混凝土或砌石结构时,可采用 3 年~5 年设计。

4.4 建筑物安全加高

4.4.1 水电站工程挡水建筑物坝顶(或防浪墙顶)高程,应按工程设计洪水情况和校核洪水情况时的静水位加相对应的波浪爬高、风壅高度和安全加高确定,不应低于水库正常蓄水位和校核洪水位。

4.4.2 水电站建筑物安全加高根据建筑物型式,可按表 2 确定。

表 2 水工建筑物安全加高

单位:m

水工建筑物	设计标准	校核标准
混凝土(砌石)坝	0.4	0.3
碾压土坝、堆石坝	0.5	0.3
水闸(挡水时)	0.3(正常蓄水)	0.2(最高挡水)
水闸(泄水时)	0.5	0.4
溢洪道	0.4(挡水时)	0.3(泄水时)

5 工程总体布置

5.1 一般规定

5.1.1 水电站按开发方式可分为坝后式、河床式、引水式和混合式水电站等基本类型。

5.1.2 小型水电站工程总体布置可包括首部枢纽(坝址、闸址)、引水系统(取水口、水道线路)、厂址(尾水渠、开关站)等选择以及坝型选择和枢纽工程布置等。

5.1.3 水电站进行枢纽布置时,可遵循以下原则:

- a) 综合考虑防洪、发电、航运、渔业、林业、交通、生态及环境等各方面的要求。
- b) 枢纽中各建筑物应紧凑布置,满足功能及强度和稳定性要求,保证各建筑物在任何工作条件下都能正常工作,枢纽布置应考虑降低工程总造价和年运行费用,减少工程投资,方便运行管理。
- c) 一个建筑物发挥多种用途或临时建筑物和永久建筑物相结合布置。
- d) 应考虑施工导流的方式、主要建筑物的施工方法和施工进度计划等要求,做到施工方便,工期短。
- e) 枢纽的外观应与周围环境相协调,与自然环境有机地结合。

5.1.4 挡水建筑物(拱坝除外)布置时,坝轴线宜短而直。根据实际情况,也可采用较长的直线或折线或部分曲线。

5.1.5 泄水建筑物的布置应根据挡水建筑物所采用的坝型和坝址附近的地形地质条件确定。

5.1.6 引水取水口布置的宜满足下列要求:

- a) 在任何时期,都应根据引水要求不间断地供水;
- b) 在多泥沙河流上,应采取有效的防沙措施,防止泥沙入渠;
- c) 对于综合利用的渠首,应保证各建筑物正常工作且互相不干扰;
- d) 应采取措施防止冰凌等漂浮物进入渠道;
- e) 取水口附近的河道应进行必要的整治,使主流靠近取水口,保证引取所需水量;
- f) 取水口建筑物布置应便于管理,易于采用现代化管理设施。

5.1.7 水电站厂房的布置应满足下列要求:

- a) 进水道、出水道尽量短、水流平顺,水头损失小,出水口不应被淤积或受到冰块等冲击;
- b) 尾水渠应有足够的深度和宽度,平面弯曲度不大,且深度逐渐变化,并与自然河道或渠道平顺连接;
- c) 泄水建筑物的出口水流或消能设施,应尽量避免抬高电站尾水位。

5.1.8 水工建筑物设计宜收集以下资料:

- a) 地形资料:包括小比例(1:10 000~1:50 000)的区域地形图和大比例(1:200~1:1 000)的坝址区地形图。
- b) 地质资料:坝址区地质勘察成果,包括区域地质状况、覆盖层分布,岩石岩性、构造、地下水位及相对隔水层埋深等。引水系统沿线的岩层性质和地质构造、水文地质、边坡的稳定性、岩溶、滑坡体、有害气体;高地应力地区尚应了解地应力及岩爆情况。
- c) 水文和气象资料:河流在坝址区的各种水文特性,如径流、洪水、相应水位、泥沙含量等;工程所在地区的气象要素,包括日照、降雨、降雪、风力、气温、水温等。
- d) 水利动能计算成果:包括水库各特征水位(正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位、发电死水位等),泄洪建筑物的特征参数(孔口尺寸、控制高程、调度方式)等。
- e) 建筑材料资料:坝址及附近地区的建筑材料分布,包括天然建筑材料(块石、砂卵石、粘土等)的质量、储量、物理力学性质等,人工材料(水泥、钢筋等)的特性参数、运距、价格等。
- f) 泥沙资料:多泥沙河流河道推移质和悬移质的含量、颗粒、硬度、容重及其运动规律。自水库引水的进水口,还应收集库区泥沙的淤积形态和淤积高程。
- g) 污染物资料:多防污河道污物的来源、种类、数量和漂移规律。
- h) 冰清资料:冰冻区河道冰期、流冰特征和流冰量;冰块大小和冰层厚度;类似条件下电站进水口的冬季运行资料。

5.2 坝址选择

5.2.1 应根据河段的地形地质条件及开发利用要求,拟定可能成立的各比较坝址,通过研究比较确定各坝址的代表坝线、坝型及枢纽布置,经过技术经济综合比较后选定工程坝址。

5.2.2 河段地形地质条件及开发利用应满足下列要求:

- a) 河谷狭窄,地质条件良好,适宜修建拱坝;
- b) 河谷宽阔,地质条件较好,可以选用重力坝;
- c) 河谷宽阔、河床覆盖层深厚或地质条件较差,且土石、砂砾等当地材料储量丰富,适于修建土石坝。

5.2.3 各种坝型的坝址应满足下列要求:

- a) 重力坝坝址,岩石应有足够的强度及完整性、均匀性;
- b) 混凝土拱坝坝址,对岩体的强度及完整性比重力坝要求更高,同时坝肩应具有良好的稳定性。
- c) 土石坝坝址应查清坝基覆盖层厚度,并注意坝基是否存在可能液化的土层。

5.2.4 坝址选择应考虑下列因素:

- a) 便于施工导流;
- b) 坝址附近应有较开阔的地形;
- c) 应注意施工总布置和运行管理条件的差别,使枢纽运行管理方便;
- d) 应考虑外部交通条件;
- e) 应考虑不同建筑材料的种类、储量、质量、数量、分布及运距情况。

5.2.5 坝址比选时应满足下列规定:

- a) 宜选择淹没少,征地少,人口迁移少的优良坝址;
- b) 应考虑对环境的影响,宜避开敏感对象;
- c) 应选择技术可靠、经济合理的坝址水库蓄水后,不会在库区产生大规模崩塌、滑坡。在丘陵和平原地区,应避免浸没面积过大。

5.2.6 坝址区地震动峰值加速度大于等于 $0.1g(g=9.81 \text{ m/s}^2)$ 的地区,建筑物应采取抗震措施。

5.3 闸址选择

5.3.1 拦河闸坝应根据水闸的功能、特点和运用要求,综合考虑地形、地质、水流、泥沙、冻土、冰情、施工、管理、周围环境等因素,经技术经济比较后选定。

5.3.2 选择闸址应考虑材料来源、对外交通、施工导流、场地布置、基坑排水、施工水电供应等条件,并满足下列要求:

- a) 水闸闸址宜选择在地形开阔、岸坡稳定的天然地基上,并应考虑闸基及两岸闸肩的渗漏、稳定性、变形条件。
- b) 翻板闸坝或泄洪闸、冲沙闸闸址宜选择在河道顺直,河势相对稳定的河段。闸的轴线宜与河道中心线正交,其上、下游河道直线段长度不宜小于 5 倍水闸进口处水面宽度。位于弯曲河段的泄洪闸,宜布置在河道深泓部位。
- c) 进水闸闸址宜选择在河岸基本稳定的顺直河段或弯道凹岸顶点稍偏下游处。进水闸中心线与河(渠)道中心线的交角不宜超过 30° ,其上游引河(渠)长度不宜过长。

5.3.3 多泥沙河流上的水闸枢纽,应在进水闸进水口或其他取水建筑物取水口的相邻位置设冲沙闸(排沙闸)或泄洪冲沙闸,并应采取有效措施避免进水闸进水口或其他取水建筑物取水口处产生的泥沙淤堵。

5.4 水电站厂址选择

5.4.1 引水式电站的厂房应远离大坝,厂址宜在高陡坡下,并宜在高陡坡上设置调压室或压力前池,厂房与调压室或压力前池之间山体应稳定,渗水性小。

5.4.2 河床式厂房进水口应避免泥砂的淤积和磨蚀、漂浮污物的堵塞和冰凌的壅阻。当厂房与溢流坝相邻时,两者之间宜设足够长的导流墙,厂房、变电设备及开关站等应离泄洪射流一定距离。

5.5 坝型选择

5.5.1 在筑坝地区,若交通不便或缺乏钢筋、水泥和混凝土骨料,而当地又有充足适用的土石料,又有合宜的布置河岸式溢洪道的有利地形时,则可就地取材,优先选用土石坝。

5.5.2 有较好的地质条件,当地有大量的砂石骨料或石料可以利用,交通又比较方便时,可修筑重力坝。重力坝可直接由坝顶溢洪。

5.5.3 当坝址地形为V形或U形狭窄河谷,且两岸坝肩岩基良好时,则可考虑选用拱坝。拱坝一般造价较低,工期短,可从坝顶或坝体内开孔泄洪。

5.6 枢纽布置

5.6.1 土石坝枢纽泄水建筑物宜布置在岸边岩基上,可采用开敞式溢洪道和隧洞。若两岸地势陡峭,但有高程合适的马鞍形埡口,或两岸地势平缓且有马鞍形山脊,以及需要修建副坝挡水的地方,其后又有便于洪水归河的通道,则宜布置河岸溢洪道。如果在这些位置上布置溢洪道进口,但其后的泄洪线路是通向另一河道的,应对另一河道的防洪问题进行处理。当坝址附近或其上游较远的地方均无上述有利条件时,可常采用坝肩溢洪道的布置形式。

5.6.2 混凝土或浆砌石重力坝枢纽宜采用溢流坝段作为主要泄水建筑物,泄水建筑物的布置宜使下泄水流方向与原河流轴线方向一致。沿坝轴线上地质情况不同时,溢流坝应布置在比较坚实的基础上。

5.6.3 混凝土或浆砌石拱坝枢纽宜采用溢流坝段作为主要泄水建筑物,泄水建筑物的布置应使下泄水流方向尽量与原河流轴线方向一致。若两岸有高程合适的马鞍形埡口,其后又有便于洪水归河的通道,可采用河岸溢洪道布置。

5.6.4 在含沙量大的河流上修建枢纽时,泄水及取水建筑物的布置应考虑水库淤积和对下游河床冲刷的影响。在多泥沙河流上的枢纽中,宜设置大孔径的底孔或隧洞。

5.6.5 枢纽布置应考虑下游生态环境用水等要求。

6 挡水建筑物

6.1 重力坝

6.1.1 重力坝设计

- a) 坝址选择及枢纽布置:选择坝址和坝轴线,确定枢纽建筑物布置、坝体结构型式、坝体与两岸或其他建筑物的连接方式等。坝体布置宜首先考虑泄洪建筑物的布置。
- b) 坝体泄水建筑物设计:通过径流调节计算,研究比较泄洪建筑物布置及尺寸,确定洪水位,进行泄洪建筑物消能防冲设施的设计。坝体溢流宜优先考虑开敞式溢流孔,坝身泄洪孔和放水孔,可根据功能要求设置。
- c) 坝体结构计算:确定坝体承受的荷载,分析荷载组合,进行坝体稳定和应力分析(包括抗震计算)。
- d) 坝体分区及材料设计:确定坝体选用的材料,进行坝体分区,提出各区性能指标要求以及对原材料、混凝土水灰比、水泥用量及骨料级配等的要求。
- e) 大坝建基面选择和基础处理设计:根据坝体稳定和基底应力要求,明确对建基面、坝基承载力、

防渗、排水及灌浆加固等要求。对基础裂隙、断层、破碎带及软弱夹层以及开挖边坡等进行处理设计。

f) 坝体温控设计:根据温控防裂要求,确定坝体分缝、分块、分层及温控措施等。

6.1.2 坝体结构

6.1.2.1 重力坝坝顶应高于校核洪水位,坝顶上游侧设防浪墙,防浪墙顶高程应高于波浪顶高程。防浪墙顶与正常蓄水位或校核洪水位的高差(坝顶超高),可由公式(1)计算,应选择两者中防浪墙顶高程的高者作为选定高程。

$$\Delta h = h_p + h_z + h_c \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- Δh ——防浪墙顶与正常蓄水位或校核洪水位的高差,m;
- h_p ——对应频率 P 的波高,按附录 A 计算(重力坝取 $P=1\%$),m;
- h_z ——波浪中心线至正常或校核洪水位的高差,按附录 A 计算,m;
- h_c ——安全超高,按表 2 选取,m。

6.1.2.2 非溢流坝的坝顶宽度应根据剖面设计、运行管理确定,并不小于 3 m。坝顶上游宜采用与坝体连成整体的钢筋混凝土防浪墙,防浪墙应高 1.2 m;坝顶下游侧应设栏杆。当坝顶布置移动式启闭机时,坝顶宽度要满足安装门机轨道的要求。

6.1.2.3 非溢流坝段断面的确定应符合以下要求:

- a) 非溢流坝段的基本断面呈三角形,其顶点宜在坝顶附近,基本断面上部设坝顶结构。
- b) 坝体的上游面可为铅直面、斜面或折面。实体重力坝上游坝坡宜采用 1:0~1:0.2。坝坡采用折面时,折坡点高程应结合电站进水口、泄水孔等布置,以及下游坝坡优选确定。
- c) 下游坝坡可采用 1:0.6~1:0.8,应根据稳定和应力要求,结合上游坝坡同时选定。对横缝设有键槽进行灌浆的整体式重力坝,可考虑相邻坝段联合受力的作用选择坝坡。

6.1.2.4 溢流坝段断面的确定应符合以下要求:

- a) 溢流坝段的堰面曲线,当设置开敞式溢流孔时可采用幂曲线;当设置有胸墙,且胸墙起挡水作用时,可采用孔口溢流的抛物线。经过论证和试验,也可采用其他堰面曲线。
- b) 泄洪表孔溢流段的前沿长度、孔数、孔口型式、尺寸和堰顶高程,应考虑水库运行和泄洪要求、下游河床及两岸防冲消能、坝体与相邻建筑物的关系等,综合比较确定。
- c) 泄洪下游消能防冲型式宜有挑流、底流、面流、消力戽和联合消能等,应根据坝体高度、坝基下游河床及两岸地形地质条件、下游河道水深变化情况,结合排冰、排漂等要求合理选择。
- d) 在当地大气压条件下,当宣泄常遇洪水闸门全开时,表孔和浅孔溢流堰顶附近不宜出现负压;当闸门局部开启时,经论证可允许出现不大的负压值;当宣泄设计洪水闸门全开时,负压值不得超过 0.03 MPa,当宣泄校核洪水闸门全开时,负压值不得超过 0.06 MPa。
- e) 应选择合理的闸门门槽型式,避免门槽处产生过大的负压而引起空蚀破坏。
- f) 溢流坝的反弧段应结合下游的消能型式选择。
- g) 闸墩的型式和尺寸应满足结构布置和水流条件的要求。当采用平面闸门时,闸墩在门槽处应有足够的厚度,满足闸墩结构的强度要求。
- h) 当溢流坝有排冰要求时,溢流孔尺寸还应结合冰情资料确定,堰上水深宜大于流冰期最大冰厚,冰块应能自由下泄而不致破坏下游设施;下游应有导墙、护岸等设施;闸墩墩头宜呈锐角形状。
- i) 砌石重力坝溢流宜采用开敞式。如有闸门控制,应对闸墩、闸室结构稳定和应力分析研究。

6.1.2.5 坝身泄水孔应符合以下要求:

- a) 坝身泄水孔可设在溢流坝段的下部或专设泄水孔坝段,并应有消能设施。
- b) 坝身泄水孔可采用明流孔,也可采用有压孔,孔内应避免有压流与无压流交替出现。
- c) 明流孔在平面上宜布置成直线形,如需布置成弯道时,应进行专题分析,并经水工模型试验验证。
- d) 坝身泄水孔的衬护,应根据水力条件、孔口尺寸、水流含沙特性、孔口运行条件等因素确定。内水压力较高的有压孔和明流孔的有压段,宜采用钢衬或高性能混凝土,钢衬应与外围混凝土可靠结合。

6.1.3 坝体断面设计

6.1.3.1 坝体断面设计应符合以下原则:

- a) 重力坝应以材料力学法和刚体极限平衡法计算成果作为确定坝体断面的依据。
- b) 重力坝的设计断面应由基本荷载组合控制,并以特殊荷载组合复核。复核特殊荷载组合时,可考虑坝体的空间作用或采取其他适当措施,不宜由特殊荷载组合控制设计断面。
- c) 设置横缝的重力坝,其强度和稳定计算可按平面问题考虑,可取一个坝段或取单位宽度进行计算。横缝灌浆的重力坝可考虑整体作用进行强度和稳定计算。

6.1.3.2 作用在重力坝上的荷载与荷载组合包括下列:

a) 荷载:

- 1) 坝体及其上永久设备重:坝体混凝土重度可采用 $23.5 \text{ kN/m}^3 \sim 24.0 \text{ kN/m}^3$,块石砌体重度可采用 $22.0 \text{ kN/m}^3 \sim 24.0 \text{ kN/m}^3$ 。
- 2) 静水压力:上游静水压力应根据水库功能和荷载组合规定的水位确定,下游静水压力应根据相应的不利下游水位确定。
- 3) 扬压力:应按垂直作用于全部计算截面积上的分布力计算。当设有防渗帷幕和排水孔时,可按渗透压力强度系数折减取值。
- 4) 泥沙压力:应根据坝址处河流的水文泥沙特性、枢纽布置、水库运行方式和泥沙冲淤计算等情况,确定坝前泥沙的淤积厚度。
- 5) 浪压力:应根据波浪要素计算。不同的荷载组合宜采用不同的风速,基本组合可采用重现期为 50 年的年最大风速,特殊组合可采用多年平均年最大风速。
- 6) 冰压力:严寒地区水库表面形成较厚的冰层时,应计及冰压力的作用。
- 7) 土压力:回填土作用在坝体上的作用。
- 8) 动水压力:采用坝顶或坝面溢流时,应计及过流面一定面积上的动水压力。
- 9) 地震荷载:包括坝体地震惯性力和地震动水压力;动峰值加速度 $\geq 0.1g$ 时应进行抗震计算。
- 10) 其他可能出现的荷载。

b) 荷载组合:

重力坝抗滑稳定及坝体应力计算的荷载组合可分为基本组合和特殊组合两种,按表 3 规定采用,必要时应考虑其他可能的不利组合。并满足下列要求:

- 1) 应根据各种荷载同时作用的实际可能性,选择计算中最不利的荷载组合。
- 2) 分期施工的坝应按相应的荷载组合分期进行计算。
- 3) 施工期的情况应作必要的核算,作为特殊组合。
- 4) 根据地质和其他条件,如考虑运用时排水设备易于堵塞,须经常维修时,应考虑排水失效的情况,作为特殊组合。

表 3 荷载组合表

荷载组合	主要考虑情况	荷载										附注
		自重	静水压力	扬压力	淤沙压力	浪压力	冰压力	地震荷载	动水压力	土压力	其他荷载	
基本组合	(1) 正常蓄水位情况	√	√	√	√	√	—	—	—	√	√	土压力根据坝体外是否填有土石而定(下同)
	(2) 设计洪水位情况	√	√	√	√	√	—	—	√	√	√	
	(3) 冰冻情况	√	√	√	√	—	√	—	—	√	√	静水压力及扬压力按相应冬季库水位计算
特殊组合	(1) 校核洪水情况	√	√	√	√	√	—	—	√	√	√	
	(2) 地震情况	√	√	√	√	√	—	√	—	√	√	静水压力、扬压力和浪压力按正常蓄水位计算,有论证时可另作规定

注：地震情况,如按冬季计及冰压力,则不计浪压力。

6.1.3.3 坝的应力计算应符合下列规定：

- a) 坝的应力计算可根据工程规模和坝体结构情况,计算下列部分或全部内容,或另加其他内容：
 - 1) 计算坝体选定截面上的应力(应根据坝高选定计算截面,包括坝基面、折坡处的截面及其他需要计算的截面)；
 - 2) 计算坝体削弱部位(如孔洞、泄水管道、电站引水管道部位等)的局部应力；
 - 3) 计算坝体个别部位的应力(如闸墩、胸墙、导墙、进水口支承结构等)；
 - 4) 需要时分析坝基内部的应力。
- b) 重力坝坝基面坝踵、坝趾的垂直正应力应符合下列要求：
 - 1) 运用期:在各种荷载组合下,坝踵垂直正应力不应出现拉应力,坝趾垂直正应力应小于坝基允许压应力；
 - 2) 施工期:混凝土重力坝坝趾垂直正应力可允许不大于 0.1 MPa 的拉应力。
- c) 重力坝坝体应力应符合下列要求：
 - 1) 运用期:坝体上游面的垂直正应力不应出现拉应力;坝体最大主压应力应不大于材料的允许压应力值；
 - 2) 施工期:坝体任何截面上的主压应力应不大于材料的允许压应力;在坝体的下游面,混凝土重力坝可允许有不大于 0.2MPa 的主拉应力。
- d) 混凝土的允许应力应符合下列规定：
 - 1) 坝体混凝土的允许应力可按混凝土强度标准值除以安全系数确定。混凝土强度标准值可取 90 d 龄期的 150 mm 立方体强度,强度保证率为 80%。
 - 2) 坝体混凝土抗压安全系数,基本组合应不小于 4.0;特殊组合(不含地震情况)应不小于 3.5。当局部混凝土有抗拉要求时,抗拉安全系数应不小于 4.0。
 - 3) 计及地震荷载时,坝体混凝土抗压安全系数 4.1,抗拉安全系数可取 2.4。
- e) 重力坝坝基、坝体截面的垂直正应力应按公式(2)计算：

$$\sigma_y = \frac{\sum W}{A} + \frac{\sum Mx}{J} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

σ_y ——计算截面的垂直正应力,kPa;

ΣW ——作用于坝段上或 1 m 坝长上全部荷载(包括扬压力,下同)在计算截面上法向力的总和, kN;

ΣM ——作用于坝段上或 1 m 坝长上全部荷载对计算截面形心轴的力矩总和, kN · m;

A ——坝段或 1 m 坝长的计算截面面积, m²;

X ——计算截面上计算点到形心轴的距离, m;

J ——坝段或者 1 m 坝长的计算截面对形心轴的惯性矩, 对矩形截面为 $h^2/6$, h 为计算截面高度, m⁴。

f) 坝体抗滑稳定计算应符合下列规定:

1) 坝体抗滑稳定计算主要包括以下内容:

- (1) 计算坝体沿坝基面的抗滑稳定;
- (2) 坝基岩体内存在软弱结构面、缓倾角裂隙时, 计算坝基深层抗滑稳定。

2) 重力坝坝体抗滑稳定可按抗剪断强度公式(3)计算或抗剪强度公式(4)计算。

$$K' = \frac{f' \Sigma W + C' A}{\Sigma P} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数;

ΣW ——作用于坝体上全部荷载(包括扬压力,下同)对滑动平面的法向分力, kN;

ΣP ——作用于坝体上全部荷载对滑动平面的切向分力, kN;

f' ——坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断摩擦系数;

C' ——坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断凝聚力, kPa;

A ——坝基接触面截面积, m²。

$$K = \frac{f \Sigma W}{\Sigma P} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数;

f ——坝体混凝土与坝基接触面的抗剪摩擦系数。

3) 深层抗滑稳定计算应将滑移体分为两块, 采用等安全系数法, 分别令其处于极限平衡状态, 如图 1 所示。重力坝坝基深层抗滑稳定可按抗剪断强度公式(5)、(6)计算或抗剪强度公式(7)、(8)计算:

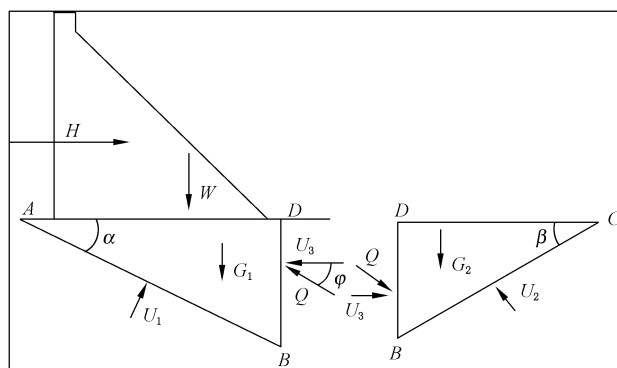


图 1 双斜滑动面示意图

(1) 考虑 ABD 块的稳定, 则有:

$$K'_1 = \frac{f'_1 [(W + G_1) \cos \alpha - H \sin \alpha - Q \sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3 \sin \alpha] + c'_1 A_1}{(W + G_1) \sin \alpha + H \cos \alpha - U_3 \cos \alpha - Q \cos(\varphi - \alpha)} \dots\dots (5)$$

(2) 考虑 BCD 块的稳定, 则有:

$$K'_2 = \frac{f'_2 [G_2 \cos\beta + Q \sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3 \sin\beta] + c'_2 A_2}{Q \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin\beta + U_3 \cos\beta} \dots\dots\dots (6)$$

按 $K' = K'_1 = K'_2$ 求解抗滑稳定安全系数 K' 。

式中：

- K'_1, K'_2 ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；
- W ——作用于坝体上全部荷载(不包括扬压力,下同)的垂直分力, kN；
- H ——作用于坝体上全部荷载的水平分力, kN；
- G_1, G_2 ——岩体 ABD、BCD 重量的垂直作用力, kN；
- f'_1, f'_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪断摩擦系数；
- c'_1, c'_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪断凝聚力, kPa；
- A_1, A_2 ——AB、BC 面的面积, m^2 ；
- α, β ——AB、BC 面与水平面的夹角, $^\circ$ ；
- U_1, U_2, U_3 ——AB、BC、BD 面上的扬压力, kN；
- Q ——BD 面上的作用力, kN；
- φ ——BD 面上的作用力与水平面的夹角, 需经论证后选用, 偏安全考虑可取 0° 。

(3) 考虑 ABD 块的稳定, 则有：

$$K_1 = \frac{f_1 [(W + G_1) \cos\alpha - H \sin\alpha - Q \sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3 \sin\alpha]}{(W + G_1) \sin\alpha + H \cos\alpha - U_3 \cos\alpha - Q \cos(\varphi - \alpha)} \dots\dots\dots (7)$$

(4) 考虑 BCD 块的稳定, 则有：

$$K_2 = \frac{f_2 [G_2 \cos\beta + Q \sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3 \sin\beta]}{Q \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin\beta + U_3 \cos\beta} \dots\dots\dots (8)$$

按 $K = K_1 = K_2$ 求解抗滑稳定安全系数 K 。

式中：

- K_1, K_2 ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；
- f_1, f_2 ——AB、BC 滑动面的抗剪摩擦系数。

4) 重力坝坝体抗滑稳定计算应符合下列要求：

- (1) 抗滑稳定分析应采用抗剪断强度公式计算, 当坝基岩体较差时, 如软岩或存在软弱结构面时, 可采用抗剪强度公式计算。
- (2) 坝基抗滑稳定计算安全系数 K', K 应不小于表 4、5 要求的数值。

表 4 按抗剪断公式计算的抗滑稳定安全系数 K'

荷载组合		K'
基本组合		3.0
特殊组合	(1) 校核洪水情况	2.5
	(2) 地震情况	2.3

表 5 按抗剪公式计算的抗滑稳定安全系数 K

荷载组合		K
基本组合		1.05
特殊组合	(1) 校核洪水情况	1.00
	(2) 地震情况	1.00

6.1.4 坝体构造

6.1.4.1 坝内廊道及通道应符合下列规定：

- a) 坝内廊道和通道设置,应兼顾基础灌浆、排水、安全监测、检查维修、运行操作、坝内交通、施工期的需要等多种用途。在满足运行和施工要求的前提下,应合并使用,尽可能减少廊道和通道的数目和尺寸。
- b) 低坝宜不设廊道,当坝高高于 30 m 或灌浆设备限制,应设置基础灌浆廊道。廊道底板混凝土厚度不宜小于 3 m,距上游坝面混凝土厚度应满足防渗要求(宜为 0.05~0.1 倍坝面作用水头)且不小于 3 m,与其他泄水孔洞的距离不宜小于 3 m~5 m。基础灌浆廊道的纵向坡度应小于 45°,坡度大于 45°的长廊道,应分段设置安全平台及扶手,安全平台高差宜为 15 m~20 m。当两岸坡度陡于 45°时,基础灌浆廊道可分层布置并用竖井连接。
- c) 坝内廊道断面可采用城门洞形或矩形断面。基础灌浆廊道的断面尺寸,应根据钻灌机具尺寸及工作要求确定,宽度可取 2.5 m~3.0 m,高度可为 3.0 m~3.5 m。其他廊道应有保证完成其功能且可以自由通行的尺寸,宽度应不小于 1.2 m,高度应不小于 2.2 m。
- d) 廊道内应设置足够的照明设施和具备良好的通风条件,各种电器设备与线路应绝缘良好。廊道底面高于校核尾水位时,可采用自流排水;廊道底面低于校核尾水位时,应设集水井并由水泵抽排。
- e) 下游高水位以上的下游坝面,宜设置坝后交通桥,并与坝身孔洞和廊道布置相协调。
- f) 廊道、水泵室等部位应满足消防安全要求。

6.1.4.2 坝体分缝应符合下列规定：

- a) 纵横缝的划分应根据坝基地质条件、坝体布置、坝体断面尺寸、温度应力和施工条件等因素综合比较确定。横缝间距宜为 15 m~20 m,纵缝间距宜为 15 m~30 m。
- b) 横缝作为伸缩缝或沉陷缝时,应做成永久缝,缝面不灌浆,在上游坝面附近设置止水措施。下列情况的横缝宜采用临时缝,全部或部分灌浆：
 - 1) 河谷狭窄,为利于坝体的强度和稳定,采用整体式重力坝;
 - 2) 岸坡较陡,为改善岸坡坝体的稳定性,将相邻坝段连成整体;
 - 3) 坐落在软弱破碎带上的各坝段,为增加坝体刚度,将相邻坝段连成整体;
 - 4) 地震动峰值加速度 0.2g 以上的强震区,为提高坝体的抗震性能,将相邻坝段连成整体。
- c) 横缝间距设置应与坝体构造适应,如坝内埋管、泄水孔、导流底孔及坝顶溢流表孔等。岸坡坝段宜在地形突变或转折处设置横缝。
- d) 中低坝宜不设纵缝,若由于浇筑能力限制或温控要求,可考虑设纵缝。纵缝可在某个高程进行并缝,如延伸至坝面,应与坝面垂直相交。纵缝缝面应设置水平向键槽,并埋设灌浆系统进行灌浆。
- e) 纵横缝灌浆缝面应用止浆片分隔成若干区进行灌浆,每一灌浆区的面积可为 200 m²~400 m²,其高度可为 10 m~15 m,灌浆压力可取 0.1 MPa~0.3 MPa。灌浆时间宜在低温季节,灌浆温度宜采用坝体稳定温度。
- f) 水平施工缝浇筑块厚度宜为 1.5 m~4.0 m,靠近基岩面附近取小值。上层混凝土浇筑前应对水平施工缝进行冲洗、薄铺 20 mm~30 mm 厚水泥砂浆或细骨料混凝土等处理,同一坝段相邻浇筑块水平施工缝应错开。当水平施工缝与廊道顶拱相交时,廊道以上的水平施工缝离廊道顶不应小于 1.5 m。

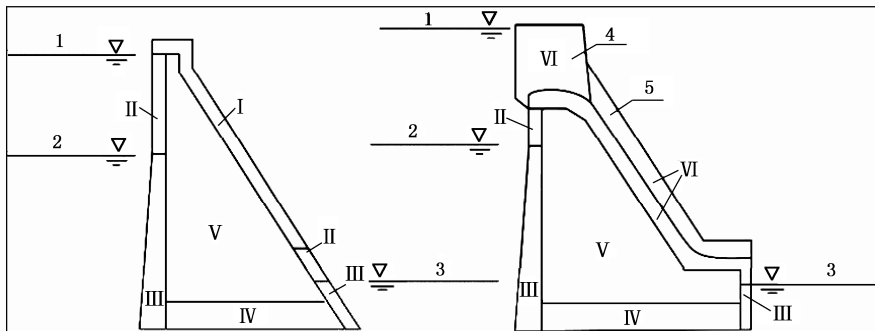
6.1.4.3 坝体止水和排水应符合下列规定：

- a) 重力坝横缝的上游面(含防浪墙)、溢流面、下游面最高尾水位以下及坝内廊道和孔洞穿过分缝处的四周等部位应布置止水设施。

- b) 溢流面上的止水需与闸门底坎金属结构埋件相焊接以形成封闭。防浪墙的止水设置应与坝体止水相连接。
- c) 上游面附近的横缝止水片应与坝基妥善连接,止水片埋入基岩内的深度可为 0.3 m~0.5 m。横缝止水可采用一道厚 1.0 mm~1.2 mm 的铜片止水,止水片至上游坝面间横缝内可充填柔性填缝材料。铜止水片宜加工成“}”形,每一侧埋入混凝土内的长度不应小于 0.2 m~0.25 m。坝高低于 30 m 的重力坝可采用塑料或橡胶止水带,应视工作水头、气候条件、所在部位和便于施工等因素选用合适的标准型号,并采取有效措施防止安装时发生变形。
- d) 坝体上游面防渗层下游应设置铅直或近乎铅直的排水管系。排水管下部应通至纵向排水廊道,上部应通至上层廊道或坝顶(或溢流面以下)。排水管可采用拔管、钻孔或预制无砂混凝土管,管距应为 2 m~3 m,内径应为 0.15 m~0.25 m。
- e) 渗入排水管的水应能够汇集到纵向排水廊道,沿集水沟或集水管汇入集水井,再用水泵抽排或自流方式排向下游,排水沟断面宜为 0.3 m×0.3 m,底坡为 3‰。排水管施工时应防止被混凝土和杂物等堵塞。
- f) 砌石坝防渗设施可采用在坝体上游面设混凝土(钢筋混凝土)防渗面板或在靠近上游面砌石体内设置混凝土防渗心墙的形式。混凝土面板或心墙顶部厚度不宜小于 300 mm,底部厚度宜为最大水头的 1/30~1/60。

6.1.4.4 坝体材料分区应符合下列规定:

- a) 大坝混凝土所用的水泥、骨料、水、掺合料、外加剂应符合当地现行标准的规定。
- b) 大坝混凝土应根据不同部位和不同条件分区,见图 2。分区性能要求应按表 6 规定。



- 1——上游最高水位;
- 2——上游最低水位;
- 3——下游最低水位;
- 4——闸墩;
- 5——导墙。
- I 区——上、下游水位以上坝体外部表面混凝土;
- II 区——上、下游水位变化区的坝体外部表面混凝土;
- III 区——上、下游最低水位以下坝体外部表面混凝土;
- IV 区——坝体基础混凝土;
- V 区——坝体内部混凝土;
- VI 区——抗冲刷部位的混凝土(例如溢流面、泄水孔、导墙和闸墩等)。

图 2 坝体混凝土分区图

表 6 大坝混凝土分区性能要求表

分区	强度	抗渗	抗冻	抗冲刷	抗侵蚀	低热	最大水灰比	选择分区的主要因素
I	+	-	++	-	-	+	+	抗冻
II	+	+	++	-	+	+	+	抗冻、抗裂
III	++	++	+	-	+	+	+	抗渗、抗裂
IV	++	+	+	-	+	++	+	抗裂
V	++	+	+	-	-	++	+	
VI	++	-	++	++	++	+	+	抗冲耐磨

注：表中有“++”的项目为选择各区混凝土等级的主要控制因素，有“+”的项目为需要提出要求的，有“-”的项目为不需提出要求的。

- c) 同一浇筑块中混凝土强度等级不宜超过两种，等级差不宜超过两级，分区厚度尺寸应不小于 2 m~3 m。
- d) 坝体内部的导流底孔、引水管、泄水孔等大孔口孔壁周围的混凝土以及地震动峰值加速度 0.2g 以上的坝体混凝土，其强度应适当提高。坝体内部混凝土强度等级不应低于 C₉₀ 10（按标准方法制作养护的边长为 150 mm 的立方体试件，在 90 d 龄期用标准试验办法测得的具有 80% 保证率的抗压强度，不低于 10 MPa）；过流表面的混凝土强度等级不应低于 C₂₈ 25（按标准方法制作养护的边长为 150 mm 的立方体试件，在 28 d 龄期用标准试验办法测得的具有 95% 保证率的抗压强度，不低于 25 MPa）。
- e) 大坝混凝土除应满足设计上对强度的要求外，还应根据大坝的工作条件，地区气候等具体情况，分别满足抗渗、抗冻、抗冲耐磨和抗腐蚀等耐久性以及低热性的要求。
- f) 大坝混凝土的抗渗等级应根据所在部位和水力坡降，按表 7 采用。承受腐蚀水作用的建筑物，其抗渗等级应进行专门的试验研究，但不得低于 W₄；混凝土的抗渗等级可根据坝体承受水压力作用的时间采用 90 d 龄期的试件测定抗渗等级。

表 7 大坝混凝土抗渗等级的最小允许值

项次	部位	水力坡降	抗渗等级
1	坝体内部		W ₂
2	坝体其他部位按水力坡降考虑时	$i < 10$	W ₄
		$10 \leq i < 30$	W ₆
		$30 \leq i < 50$	W ₈
		$i \geq 50$	W ₁₀

注：表中 i 为水力坡降。

- g) 对于有抗冻要求的地区，大坝混凝土应按表 8 根据气候分区、冻融循环次数、表面局部小气候条件、水分饱和程度、结构构件重要性和检修的难易程度等综合因素选用抗冻等级。最冷月平均气温低于 -25 °C 地区的混凝土抗冻等级宜根据具体情况研究确定。

表 8 大坝混凝土抗冻等级

气候分区	严寒		寒冷		温和
	≥ 100	< 100	≥ 100	< 100	
年冻融循环次数(次)	≥ 100	< 100	≥ 100	< 100	
结构重要、受冻严重且难以检修的部位： 流速大于 25 m/s、过冰、多沙或多推移质过坝的溢流坝、深孔或其他部位的过水面及二期混凝土	F400	F300	F300	F200	F100
受冻严重但有检修条件部位： (a) 重力坝上游面冬季水位变化区； (b) 流速小于 25 m/s 的溢洪道、泄水孔的过水面。	F300	F250	F200	F150	F50
受冻较重部位： 重力坝外露阴面部位	F250	F200	F150	F150	F50
受冻较轻部位： 重力坝外露阳面部位；	F200	F150	F100	F100	F50
重力坝水下部位或内部混凝土	F50				
<p>注 1：年冻融循环次数分别按一年内气温从 +3℃ 以上降至 -3℃ 以下，然后回升至 +3℃ 以上的交替次数和一年中日平均气温低于 -3℃ 期间设计预定水位的涨落次数统计，并取其中的大值。</p> <p>注 2：气候分区划分标准为： 严寒地区：最冷月平均气温低于或等于 -10℃ 的地区； 寒冷地区：最冷月平均气温高于 -10℃、低于或等于 -3℃ 的地区； 温和地区：最冷月平均气温高于 -3℃ 的地区。</p> <p>注 3：阳面指冬季大多为晴天，平均每天有 4 h 阳光照射，不受山体或建筑物遮挡的表面。否则均按阴面考虑。</p>					

h) 根据大坝混凝土耐久性要求，混凝土的水灰比不宜大于表 9 所列数值。

表 9 混凝土最大水灰比

气候分区	大坝混凝土分区					
	I	II	III	IV	V	VI
严寒和寒冷地区	0.55	0.45	0.50	0.50	0.65	0.45
温和地区	0.60	0.50	0.55	0.55	0.65	0.45

i) 在环境水有侵蚀性情况下，应选择抗侵蚀性能较好的水泥，外部水位变化区及水下混凝土的水灰比可较表 9 减少 0.05。高速水流区的混凝土应采用具有抗冲耐磨性的低流态高强度混凝土或高强硅粉混凝土。

6.1.4.5 砌石坝体材料应符合下列规定：

- 砌石料应新鲜、完整，质地坚硬，不得有剥落层和裂纹。砌用块石外形大致呈方形，上下两面基本平行且大致平整，无尖角、薄边，块厚宜大于 200 mm。
- 砌石体的胶凝材料有水泥砂浆和混凝土。砌石体泊松比 μ 宜采用 0.2~0.25。
- 砌石体的极限抗压强度 f_{cc} 可按表 10 选用。

表 10 砌石体的极限轴心抗压强度 f_{cc} 值

单位:MPa

砌石体形态	石料饱和 抗压强度	胶凝材料强度					
		混凝土		水泥砂浆			
		15.0	10.0	12.5	10.0	7.5	5.0
块石砌石体	≥ 100	24.0	18.8	18.8	16.0	13.2	11.2
	80	22.0	17.1	17.1	14.8	12.2	10.0
	60	19.2	14.8	14.8	12.8	10.8	8.8
	50	17.3	13.2	13.2	11.6	10.0	8.0
	40	14.6	11.8	11.8	10.0	8.8	7.2
	30	10.8	10.0	10.0	8.8	7.0	6.4

6.1.5 坝基处理设计

6.1.5.1 坝基处理原则应符合下列规定:

- a) 坝基处理设计应在查清坝址地质条件及分析大坝对地基要求的基础上,确定地基处理方案。坝基处理方案应满足以下要求:坝基有足够的强度,能满足渗透稳定要求,有足够的整体性和均匀性,能满足抗滑稳定要求和减少不均匀沉降,有足够的耐久性,能够防止在水的长期作用下岩体性质恶化。
- b) 坝基处理设计包括坝基开挖、固结灌浆、防渗排水、断层破碎带和软弱结构面处理、岩溶防渗处理。

6.1.5.2 坝基开挖设计应符合下列规定:

- a) 建基面位置应根据坝体结构对基础的要求、基础加固处理效果及施工工艺、工期和费用等因素经技术经济比较确定。可通过基础加固处理和调整上部结构的措施,在满足坝基强度和稳定的基础上,减少开挖量。坝高大于 50 m 时,可建在微风化至弱风化中部基岩上;坝高小于 50 m 时,可建在弱风化中部至上部基岩上。两岸地形较高部位的坝段,可适当放宽。
- b) 重力坝的建基面形态应根据地形地质条件及上部结构的要求确定,坝段的建基面上、下游高差不宜过大,并宜略向上游倾斜。若基础面高差过大或向下游倾斜时,宜开挖成带钝角的大台阶状。台阶的高差应与混凝土浇筑块的尺寸和分缝的位置相协调,并和坝趾处的坝体混凝土厚度相适应,不宜超过 5 m,且应以不大于 1:0.5 的缓坡连接。对基础高差悬殊的部位宜调整坝段的分缝或作必要的处理。
- c) 两岸岸坡坝段建基面在坝轴线方向应开挖成有足够宽度的台阶状,或采取其他结构措施,确保坝体侧向稳定。
- d) 基础中存在的表层夹泥裂隙、风化囊、断层破碎带、节理密集带、岩溶充填物及浅埋的软弱夹层等局部工程地质缺陷,均应结合基础开挖予以挖除,或局部挖除后再进行处理。
- e) 坝基开挖设计中爆破方式应能够保证坝基岩体不受破坏或产生不良后果。对易风化、泥化的岩体,应采取相应的保护措施。

6.1.5.3 坝基固结灌浆应符合下列规定:

- a) 坝基固结灌浆的设计,应根据坝基工程地质条件、坝高和灌浆试验资料确定,并符合下列规定:
 - 1) 宜在坝基上游和下游一定的范围内进行固结灌浆;当坝基岩体裂隙发育时,且具有可灌性时,可在全坝基范围进行固结灌浆,并根据坝基应力及地质条件,向坝基外适当扩大灌浆范围;

- 2) 防渗帷幕上游的坝基宜进行固结灌浆。
- 3) 断层破碎带及其两侧影响带或其他地质缺陷应加强固结灌浆。
- 4) 基础中的岩溶洞穴、溶槽等,在清挖回填后其周边应根据岩溶分布情况适当加强固结灌浆。
- b) 固结灌浆孔的孔距、排距可采用 3 m~4 m,或根据灌浆试验确定。固结灌浆深度应根据坝高和开挖以后的地质条件确定,可采用 5 m~8 m。
- c) 固结灌浆孔宜布置成梅花形,对于较大的断层和裂隙带应专门布孔。灌浆孔方向应根据主要裂隙产状结合施工条件确定,使其穿过较多的裂隙。
- d) 帷幕上游区和地质缺陷部位的坝基固结灌浆宜在有 3 m~4 m 混凝土盖重情况下灌浆,其他部位的固结灌浆可根据地质条件采用有混凝土盖重方式灌浆,经论证也可采用无混凝土盖重或找平混凝土封闭方式灌浆。
- e) 在不抬动基础岩体和盖重混凝土的原则下,固结灌浆压力宜尽量提高。有混凝土盖重时视其厚度可采用 0.4 MPa~0.7 MPa。采用找平混凝土封闭灌浆时,其灌浆压力宜通过灌浆试验确定,可采用 0.2 MPa~0.4 MPa。对缓倾角结构面发育的基岩及软岩,其灌浆压力应由灌浆试验确定。

6.1.5.4 坝基防渗排水设计应符合下列规定:

- a) 坝基防渗和排水设计,应以坝基的工程地质、水文地质条件和灌浆试验资料为依据,结合水库功能、坝高,综合考虑防渗和排水的相互关系来确定具体措施。
- b) 坝基防渗宜采用帷幕灌浆。防渗帷幕应能够满足下列要求:
 - 1) 减小坝基和绕坝渗漏,防止渗漏水对坝基及两岸边坡稳定产生不利影响;
 - 2) 防止在坝基软弱结构面、断层破碎带、岩体裂隙充填物以及抗渗性能差的岩层中产生渗透破坏;
 - 3) 在帷幕和坝基排水的共同作用下,使坝基扬压力和坝基渗漏量降至允许值以内;
 - 4) 具有可靠的连续性和足够的抗渗性、耐久性。
- c) 灌浆帷幕中心线宜设置在离坝面 1/10 坝底宽处。
- d) 帷幕灌浆的深度需根据岩基的水文地质条件而定,应遵守下列规定:
 - 1) 封闭式帷幕:当坝基下存在可靠的相对隔水层,并且埋深较浅时,防渗帷幕应伸入到该岩层内 3 m~5 m。相对隔水层的透水率 q 为 5 Lu。
 - 2) 悬挂式帷幕:当坝基下相对隔水层埋藏较深或分布无规律时,帷幕深度应参照渗流计算,考虑工程地质条件和坝基扬压力等因素,结合工程经验研究确定,宜在 0.3~0.7 倍水头范围内选择。
- e) 防渗帷幕伸入岸坡内的长度及帷幕轴线方向,应根据工程地质和水文地质条件确定。宜延伸到相对隔水层处或正常蓄水位与地下水位相交处,并与河床部位的帷幕保持连续。
- f) 防渗帷幕可采用一排。对地质条件较差、岩体裂隙特别发育或可能发生渗透变形的地段或研究认为有必要加强防渗帷幕时,可适当增加帷幕排数。当帷幕由多排灌浆孔组成时,应将其中的一排孔钻灌至设计深度,其余各排孔的孔深可取设计深度的 1/2~2/3。帷幕孔距可为 1.5 m~3 m,排距宜小于孔距。钻孔宜穿过岩体的主要裂隙和层理,可采用倾向上游 $0^\circ\sim 10^\circ$ 的斜孔。
- g) 帷幕灌浆应在浇筑一定厚度的坝体混凝土作为盖重后施工。灌浆压力应通过试验确定,宜在帷幕孔第 1 段取 1.0~1.5 倍坝前静水头,以下各段可逐渐增加,孔底段可取 2 倍~3 倍坝前静水头,灌浆时不得抬动坝体混凝土和坝基岩体。

- h) 如坝体设有基础灌浆排水廊道,可在廊道内防渗帷幕的下游设坝基主排水孔,在建基面上主排水孔与帷幕孔的距离不宜小于 2 m。坝高超过 30 m 时,如有必要,可在主排水孔下游设置 1~2 排辅助排水孔。主排水孔的孔距可为 2 m~3 m,辅助排水孔的孔距可为 3 m~5 m。当基础中存在相对隔水层和缓倾角岩层时,应根据其分布情况合理布置排水孔。
- i) 坝高较低,基岩条件较好且为弱透水层(渗透系数小于 1×10^{-5} mm/s)时,也可不设帷幕而只设排水,但应在坝基面的上游部位进行固结灌浆。
- j) 排水孔孔深应根据帷幕和固结灌浆的深度及基础的工程地质、水文地质条件确定:
 - 1) 主排水孔深为帷幕深的 0.4~0.6 倍,并不小于 10 m;当坝基内存在裂隙承压水层、深层透水区时,除加强防渗措施外,主排水孔宜深入此部位。
 - 2) 辅助排水孔深可为 6 m~12 m。
- k) 当高尾水位历时较长或岩体透水性较大时,宜在坝趾增设封闭防渗帷幕。
- l) 在岸坡坝段的坝基可设置专门的排水设施,必要时可在岸坡山体内设置排水隧洞,并布设排水孔。
- m) 当排水孔的孔壁有塌落危险或排水孔穿过软弱结构面、夹泥裂隙时,应采取相应的保护措施。

6.1.5.5 断层破碎带和软弱结构面等处理应满足下列要求:

- a) 坝基范围内出露的断层破碎带,其组成物质主要为坚硬的构造岩,对基础的强度和压缩变形影响不大时,可将断层破碎带及其两侧影响带岩体适当挖除。当其组成物质以软弱的构造岩为主,且对基础的强度和压缩变形有一定的影响时,可用混凝土塞加固,混凝土塞的深度可采用 1.0 倍~1.5 倍断层破碎带的宽度或根据计算确定。贯穿坝基上下游的纵向断层破碎带的处理,宜向上下游坝基外适当延伸。
- b) 软弱结构面埋深不同可分别采用混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土洞塞等措施。必要时也可采用抗滑桩、预应力锚索、化学灌浆等措施。
- c) 岩溶的防渗处理方式有防渗帷幕灌浆、防渗墙等,应根据岩溶的规模、发育规律、充填物性质及透水性等条件选定。对存在岩溶洞穴或具有强透水性的溶蚀裂隙,可采取开挖回填混凝土或设置阻浆洞(井)等措施后再进行高压灌浆处理。灌浆材料可根据岩溶洞穴和溶蚀裂隙规模及充填物选用纯水泥浆、水泥砂浆、水泥粘土浆、水泥粉煤灰浆等,必要时可钻大口径钻孔灌注高流态细骨料混凝土。

6.1.6 边坡处理

6.1.6.1 边坡的治理和加固设计应遵循下列原则,经技术经济比较后选定。

- a) 应综合考虑边坡的地形、地质条件、施工技术水平及难易程度等因素,与建筑物相关的边坡还应考虑建筑物与边坡的相互关系。
- b) 若需要采用多种措施进行边坡治理和加固,应综合考虑各种措施的技术特点和用途,使其形成有机的治理和加固体系。
- c) 应优先考虑采用治理措施,若仍不能满足要求或难以实施,再考虑采取加固措施。
- d) 应根据施工期揭露的地质条件变化和安全监测信息完善和修正设计。

6.1.6.2 与新建建筑物相关的边坡,在满足建筑物布置的前提下,开挖边坡的走向、形状应根据地形、地质条件的特点,以及边坡稳定的需要确定。若开挖边坡的走向、形状与相关建筑物布置相矛盾,在建筑物布置允许的前提下,宜调整建筑物的布置。

6.1.6.3 边坡的治理和加固可采用下列一种或多种措施:

- a) 减载、边坡开挖和压坡。

- b) 排水和防渗,排水包括坡面、坡顶以上地面排水、截水和边坡体排水。
- c) 坡面防护,包括用于土坡的各种形式的护砌和人工植被,用于岩坡的喷混凝土、喷纤维混凝土、挂网喷混凝土,以及柔性主动支护、土工合成材料防护等措施。
- d) 边坡锚固,包括各种锚杆、抗滑洞塞等。
- e) 支挡结构,包括各种形式的挡土墙、抗滑桩、土钉、柔性被动支护措施等。

6.1.6.4 进行边坡治理和加固时,宜设置完善的地面截水、排水系统,若边坡的稳定安全性状对地表水下渗引起的岩、土体饱和和地下水升高敏感,还应做好坡面防渗和坡面附近的地面防渗。

6.1.6.5 当需要采取锚固措施加固边坡时,应研究以下几种锚固与支挡结构组合的技术可行性和经济合理性:

- a) 锚杆与挡土墙。
- b) 锚杆与抗滑桩。
- c) 锚杆与混凝土格构。
- d) 锚杆与混凝土塞或混凝土板。

6.1.6.6 边坡的治理和加固应考虑环境保护,应与周围建筑物和环境相协调。

6.1.7 温度控制及坝体防裂

6.1.7.1 温度控制原则应符合下列规定:

- a) 对坝高超过 30 m 的中坝,应进行温度控制设计,提出温度控制标准及防止裂缝的措施。低坝可参照类似工程经验进行温度控制及防裂设计。
- b) 温度控制设计,应收集坝址区年平均气温和变幅、多年月平均和旬平均气温、气温骤降的幅度和历时及相应的频率、河流水温、坝基地温、日照、类似水库水温等资料。
- c) 温度控制设计应研究基础允许温差、内外温差和坝内最高温度,并重视遇寒潮及冬季的保温设计。
- d) 当基础约束区混凝土 28 d 龄期的极限拉伸值不低于 0.85×10^{-4} ,对施工质量均匀、良好,基岩与混凝土的变形模量相近、短间歇均匀浇筑上升的浇筑块,基础允许温差按表 11 的规定确定。

表 11 混凝土基础约束区混凝土允许温差 ΔT

距基础面高度(h)	浇筑块长边长度(l)				
	17 m 以下	17 m~21 m	21 m~30 m	30 m~40 m	40 m 至通仓
0~0.21	26~24	24~22	22~19	19~16	16~14
0.21~0.41	28~26	26~25	25~22	22~19	19~17

- e) 未满 28 d 龄期混凝土的暴露表面,应采取保温措施;对基础强约束区、上游坝面等重要部位应进行严格表面保护。长期暴露的基础混凝土、上游坝面及其他重要部位,28 d 后的混凝土暴露表面也需考虑保温措施。
- f) 施工过程中各坝块应尽量均匀上升,相邻坝块的高差不宜超过 10 m~12 m,相邻坝块浇筑时间间隔宜小于 30 d。

6.1.7.2 温度控制可采用下列措施:

- a) 根据抗裂要求,坝体基础部位混凝土强度等级不宜低于 $C_{90}20$,坝体内部混凝土强度等级不应低于 $C_{90}10$ 。迎水面还应根据抗渗、抗裂、抗冻要求和施工条件等综合确定混凝土强度等级。
- b) 合理安排全年混凝土施工程序及浇筑量,宜安排低温季节浇筑基础约束区混凝土,高温季节宜

利用夜间浇筑,严寒地区宜避免在冬季浇筑坝体混凝土。

- c) 在不影响混凝土强度和耐久性的前提下,应采取下列措施减少发热量:
- 1) 采用发热量较低或氧化镁含量较高的微膨胀水泥;
 - 2) 浇筑低流态混凝土或干硬性混凝土;
 - 3) 掺高效外加剂;
 - 4) 改善混凝土级配、加掺合料等综合措施。
- d) 可采用下列措施,降低混凝土最高温度,并满足接缝灌浆要求:
- 1) 控制浇筑层厚度。夏季宜减少浇筑层厚度,但不宜小于 1.0 m,保证正常的间歇时间,并可在浇筑层顶积水、浇水或层面喷雾。
 - 2) 降低混凝土浇筑温度。可采取在粗骨料堆上洒水、喷雾、料堆加高、地垅取料、冷却水拌和、加冰拌和混凝土,并严格控制混凝土运输时间和仓面浇筑坯覆盖前的暴露时间。
 - 3) 坝体内埋设冷却水管通水冷却。通水时坝体混凝土与冷却水间的温差不宜超过 25 °C,坝体降温速度不宜大于 1 °C/d。

6.2 拱坝

6.2.1 拱坝设计的主要内容

6.2.1.1 拱坝设计内容除符合 6.1.1 要求外,应重视拱坝体形选择、坝址拱座的工程地质条件和水文地质条件。

6.2.1.2 拱坝按其厚高比分为薄拱坝(厚高比小于 0.2),中厚拱坝(厚高比为 0.2~0.35),厚拱坝(厚高比大于 0.35)。对于薄拱坝,应研究坝身泄洪产生的结构问题。

6.2.1.3 拱坝应考虑降低或放空库水的设施。地震区拱坝应进行抗震设计。

6.2.2 坝体结构

6.2.2.1 拱坝坝顶结构布置应符合 6.1.2.1、6.1.2.2 条规定。

6.2.2.2 拱坝坝身泄流方式可有坝顶泄流、坝身孔口泄流等,宜优先考虑采用坝顶泄流。坝身孔口的位置宜避开高应力区和基础约束区。

6.2.2.3 当采用拱坝坝身泄洪时,应符合下列要求:

- a) 应使下泄水流平顺归槽,下泄水流与坝脚应保持足够的安全距离,下游宜保持足够的水垫深度,不得危及坝体、两岸山体稳定和其他建筑物的运行安全。
- b) 泄洪量较大时,宜研究落水点纵向拉开、横向扩散或采用对冲消能。
- c) 应重视泄洪雾化对下游两岸山体、电气设备以及交通等的不良影响,必要时应采取相应的防护措施。
- d) 当采用坝身孔口泄洪时,宜设置防污排污措施。

6.2.3 拱坝体形设计

6.2.3.1 拱坝体形选择应满足下列要求:

- a) 拱坝体形应根据坝址河谷形状(宽高比)、地质条件、拱座稳定、坝体应力、泄洪布置以及施工条件等因素进行选择。
- b) 根据坝址河谷形状选择拱坝体形时,应符合下列规定:
 - 1) V 形河谷,可选用双曲拱坝;
 - 2) U 形河谷,可选用单曲拱坝或双曲拱坝;

- 3) 当坝址河谷的对称性较差时,坝体的水平拱可设计成不对称的拱;
- 4) 当坝址河谷形状不规则或河床有局部深槽时,宜设计成有垫座的拱坝。
- c) 当地质、地形条件不利时,选择拱坝体形应符合下列要求:
 - 1) 可采用两端拱圈呈扁平状、拱端推力偏向山体深部的变曲率拱坝;
 - 2) 可采用拱端逐渐加厚的变厚度拱或设垫座的拱坝;
 - 3) 当坝址两岸上部基岩较差或地形较开阔时,可设置重力墩或推力墩与拱坝连接。
- d) 拱坝体形设计应符合下列要求:
 - 1) 必要时采用坝体应力变化平缓的变厚度、变曲率拱,并符合坝体计算应力要求。
 - 2) 水平拱圈最大中心角可选用 $75^{\circ}\sim 110^{\circ}$,拱端内弧面的切线与利用岩面等高线的夹角不应小于 30° 。
 - 3) 合理设计垂直悬臂梁断面,悬臂梁的上游面倒悬度不宜大于 $0.3:1$ 。在满足施工期自重拉应力控制标准及坝表孔布置的要求下,可选取较大的下游面倒悬度(水平比垂直)。
- e) 根据坝体应力、拱座稳定及工程具体条件,可采用抛物线、椭圆、双曲线、多心圆、对数螺线等变曲率拱型。

6.2.3.2 拱坝体形设计宜按照下列步骤:

- a) 首先应拟定拱坝坝轴线曲线方程、中心角及其相应坐标位置。当坝轴线为圆弧时,需先拟定圆心位置、坝轴线半径及半中心角。
- b) 拱坝体形设计应先确定拱冠梁、水平拱圈和初拟拱坝体型,再进行体形优化设计。
- c) 拱冠梁位置宜取河谷可利用基岩剖面线的最低点,河谷底部较平坦时可取在谷底的中心部位。拱冠梁梁剖面设计包括顶拱和底部厚度,上游面曲线,下游面曲线等。顶拱厚度同坝顶厚度,宜大于 3.0 m ,底部厚度可按经验初拟,再根据应力分析成果进一步调整。双曲拱坝上游面曲线可选择圆弧或圆弧组合、二次曲线、三次曲线及其他类型曲线,单曲拱坝上游面曲线可选择直线或折线。当上、下游坝面为曲线时,坝面应平顺连续,以使坝体获得较好的应力分布条件。
- d) 水平拱圈应先确定拱圈高程,拱圈数量可采用 $5\text{ 个}\sim 10\text{ 个}$ 。拱圈线型可采用单心圆拱、多心圆拱、椭圆拱、抛物线拱、对数螺旋线拱等变曲率拱型,宜自拱冠向拱端曲率逐渐减小。水平拱圈可利用拱圈中心线和拱厚函数描述,拱圈中心线可采用以中心角为自变量的曲率半径方程描述。
- e) 通过确定拱冠梁和水平拱圈,可获得拱坝初始体形。通过数值分析方法检验拱坝体形的合理性,宜数次迭代和优化才能获得合适的体形。宜采用拱梁分载法计算拱坝的应力分布和拱端作用力,采用刚体极限平衡法复核拱坝坝肩抗滑稳定。
- f) 拱坝体形优化设计应先设置若干约束条件,以拱坝体积作为优化目标函数,约束函数包括几何约束、应力约束和稳定约束,用数学规划法求解拱坝体形。结构应力分析方法宜采用拱梁分载法。

6.2.4 应力及稳定分析

6.2.4.1 作用在拱坝上的荷载与荷载组合应满足下列要求:

- a) 荷载包括:坝体自重、静水压力、扬压力、泥沙压力、浪压力、冰压力、动水压力、地震荷载、温度荷载,其他可能出现的荷载。
- b) 拱坝设计荷载组合可分为基本组合和特殊组合两种,按表 12 规定采用。

表 12 作用效应组合表

荷载组合	主要考虑情况	荷载类别										
		自重	静水压力	温度荷载		扬压力	泥沙压力	浪压力	冰压力	动水压力	地震荷载	
				设计正常温升	设计正常温降							
基本组合	1. 正常蓄水位情况	√	√	√	—	√	√	√	√	—	—	
	2. 正常蓄水位情况	√	√	—	√	√	√	√	—	—	—	
	3. 设计洪水位情况	√	√	—	√	√	√	√	—	—	—	
	4. 死水位(或运行最低水位)情况	√	√	—	√	√	√	√	—	—	—	
	5. 其他常遇的不利荷载组合											
特殊组合	1. 校核洪水情况	√	√	—	√	√	√	√	—	√	—	
	2. 地震情况	1) 基本组合 1+地震荷载	√	√	√	—	√	√	√	√	—	√
		2) 基本组合 2+地震荷载	√	√	—	√	√	√	√	—	—	√
		3) 常遇低水位情况+地震荷载	√	√	—	√	√	√	√	—	—	√
	3. 施工期情况	1) 未灌浆	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2) 未灌浆遭遇施工洪水	√	√	—	—	—	—	—	—	—	—
		3) 灌浆	√	—	√	√	—	—	—	—	—	—
		4) 未灌浆遭遇施工洪水	√	√	—	√	—	—	—	—	—	—
4. 其他稀遇的不利荷载组合												
<p>注 1: 上述荷载组合中,根据工程的实际情况选择控制性的荷载组合进行计算。</p> <p>注 2: 地震频繁地区,当施工期较长时,应采取及时封拱。必要时,荷载组合考虑地震荷载。</p> <p>注 3: 施工期情况 3)灌浆,应作必要的核算,作为特殊组合。</p>												

6.2.4.2 拱坝应力分析时,可根据工程规模、坝的具体情况和不同的设计阶段,至少计算下列内容的部分或全部:

- a) 各计算截面上的应力分布(包括拱端、拱冠和其他需要计算应力的部位);
- b) 坝体上下游面在各计算点上的主应力;
- c) 坝体削弱部位(孔洞、泄水管道部位等)的局部应力;
- d) 必要时尚需分析坝基(特别是软弱夹层、断层等部位)内部应力。

6.2.4.3 拱坝应力分析中应根据其重要程度和必要性,研究下列问题:

- a) 不同体形和布置对坝体应力分布的影响;
- b) 基础变形对坝体应力的影响;
- c) 坝体内大孔洞对坝体应力的影响;
- d) 分期蓄水、分期施工和施工程序对坝体应力的影响;
- e) 封拱温度对坝体应力的影响,并优选对坝体应力有利的封拱温度;
- f) 混凝土徐变对坝体应力的影响;
- g) 在坝体横缝灌浆以前,应验算各单独坝段的坝体应力和抗倾覆稳定性;
- h) 拱坝设有重力墩、推力墩或周边缝时对坝体应力的影响。

6.2.4.4 拱坝应力分析方法应满足下列要求:

- a) 情况比较复杂的拱坝(如拱坝内设有大的孔洞、基础条件复杂等),除用拱梁分载法计算外,还应采用有限元法分析。
- b) 用拱梁分载法进行应力分析时,应结合地形、地质条件,合理布置拱梁网格体系,在应力梯度变化较大处,宜加密网格。
- c) 用有限元法进行应力分析时,基础计算范围应不小于 1.5 倍坝高,应力计算成果应进行等效处理。单元的剖分应达到设计所要求的精度,单元的形式应结合拱坝体形合理选用,计算模型应接近于实际情况,计算坝体自重应计及施工过程。

6.2.4.5 控制指标应满足下列规定:

- a) 用拱梁分载法计算时,坝体的主压应力和主拉应力,应符合下列应力控制指标的规定:
 - 1) 允许压应力:坝体的允许压应力可按混凝土强度标准值(砌石体极限轴心抗压强度值)除以安全系数确定。混凝土强度标准值可取 90 d 龄期的 150 mm 立方体强度,强度保证率为 80%。对于基本荷载组合,安全系数采用 3.5;对于非地震情况特殊荷载组合,安全系数采用 3.0。
 - 2) 允许拉应力:在保持拱座稳定的条件下,通过调整坝的体形来减少坝体拉应力的作用范围和数值。对于基本荷载组合,拉应力不得大于 1.2 MPa;对于非地震情况特殊荷载组合,拉应力不得大于 1.5 MPa。
- b) 用有限元法计算时,应补充计算“有限元等效应力”。按“有限元等效应力”求得的坝体主拉应力和主压应力,应符合下列应力控制指标的规定:
 - 1) 允许压应力:按 6.2.4.5a)项的规定执行。
 - 2) 允许拉应力:对于基本荷载组合,拉应力不得大于 1.5 MPa;对于非地震情况特殊荷载组合,拉应力不得大于 2.0 MPa。
- c) 拱坝应力分析除研究运行期外,还应验算施工期的坝体应力和抗倾覆稳定性。在坝体横缝灌浆以前,按单独坝段分别进行验算时,坝体最大拉应力不得大于 0.5 MPa,并要求在坝体自重单独作用下,合力作用点落在坝体厚度中间的 2/3 范围内。坝体横缝灌浆前遭遇施工洪水时,坝体抗倾覆稳定安全系数不得小于 1.2。
- d) 计及地震荷载时,坝体混凝土抗压安全系数 4.1,抗拉安全系数可取 2.4。

6.2.4.6 拱坝稳定分析应满足以下原则:

- a) 评价两岸拱座稳定性时,应进行下列基础工作:
 - 1) 深入了解两岸岩体的工程地质和水文地质勘探资料;
 - 2) 了解岩石、结构面及其填充物的物理力学特性等的试验条件,研究试验成果,合理选用设计数据;
 - 3) 确定作用在拱座上的各种作用力;
 - 4) 采用合理的稳定分析方法。
- b) 研究拱座稳定时,应综合分析研究坝的布置(包括坝轴线、平面布置、拱端构造、体形、泄洪方式等)、坝体应力情况、基础处理和施工方法等影响因素。
- c) 拱坝稳定分析所需的地质资料,除进行常规勘探外,尚应查明影响岩体滑动或可能引起拱座较大变形的主要软弱结构面的产状(包括成组不连续裂隙的方向性)、不平整度、密集程度、连通率、填充物和错动情况,以及结构面的可能组合和拱座岩体内地下渗流的性质及其分布特性等。
- d) 拱座稳定分析所需岩石力学指标,包括抗压、抗剪、抗拉强度、变形模量、泊松比和渗透系数等,应通过取样进行室内试验取得。
- e) 拱座稳定分析主要研究岩体的可能滑动问题,但在拱座下游附近如存在较大断层或软弱带而有可能引起较大变形时,也应对拱座变形问题进行专门研究。

f) 抗滑稳定计算应满足下列要求:

- 1) 抗滑稳定分析中的可能滑动体边界,由若干个滑裂面和临空面组成。滑裂面应为岩体内的各种结构面,尤其是软弱结构面;临空面应为地表或软弱结构面。滑裂面应在工程地质勘测的基础上,经过研究得出最可能的滑动破坏形式之后确定。
- 2) 滑裂面及其两侧岩体(包括滑裂面中充填物)的抗剪强度系数,应根据取样试验值,结合岩体实际情况、蓄水后可能的变化以及所采取的工程处理措施,并参照类似工程的经验,由设计、地质、试验人员共同研究确定。
- 3) 拱座稳定计算应包括坝体传来的作用力、岩体自重、渗透压力和地震荷载。拱座抗滑稳定的数值计算方法以刚体极限平衡法为主,坝体传来的作用力采用拱梁分载法的相应计算成果。地质情况复杂的拱坝还应辅以有限元法或其他方法进行分析。
- 4) 采用刚体极限平衡法进行抗滑稳定分析时,可按公式(3)或公式(4)进行计算。
- 5) 抗滑稳定计算安全系数 K' 、 K 应不小于表 13 要求的数值。

表 13 抗滑稳定安全系数

荷载组合		K'	K
基本组合		3.0	1.30
特殊组合	非地震情况	2.5	1.10
	地震情况	2.7	—

6.2.5 坝体构造

6.2.5.1 坝体分缝应满足下列要求:

- a) 混凝土拱坝应设横缝,横缝宜采用径向或接近径向布置,横缝面可为铅直面,横缝底部缝面与基础面宜接近正交,夹角不得小于 60° 。横缝面应设置键槽并埋设灌浆系统。键槽应为铅直方向,宜采用梯形槽或圆弧形槽。
- b) 横缝位置和间距的确定,应考虑混凝土可能产生裂缝的坝基条件、温度控制、坝体内应力分布状态、坝身泄洪孔口尺寸、坝内孔洞等结构布置、混凝土浇筑能力等因素。横缝间距(沿上游坝面弧长)宜为 15 m~25 m。
- c) 横缝和纵缝都应进行接缝灌浆。灌浆时坝体温度应降到设计规定值。缝的张开度不宜小于 0.5 mm。缝两侧坝体混凝土龄期,在采取有效措施后,不宜小于 4 个月。灌浆浆液结石达到预期强度后,坝体方能挡水受力。拱坝横(纵)缝尚未灌浆而需临时拦洪时,应专门论证。
- d) 缝面应采用止浆片分成若干封闭区进行灌浆。横缝上游面和下游面止水片可兼作止浆片。每一灌浆区的面积宜为 $200\text{ m}^2\sim 400\text{ m}^2$,其高度宜为 9 m~15 m。灌浆升浆管路和出浆设施的形成,应优先采用塑料拔管方式,也可采用预埋管和出浆盒方式。横(纵)缝同一灌浆区的进、出浆管口、排水管出口等布置,宜集中于廊道或下游坝后桥附近。
- e) 横(纵)缝的灌浆压力,应根据坝体应力及变形条件确定。除顶层外,灌浆区上部宜有 9 m 厚的混凝土盖重。层顶灌浆压力可为 0.1 MPa~0.3 MPa。

6.2.5.2 坝内廊道及通道设置应兼顾基础灌浆、排水、安全监测、检查维修、运行操作、坝内交通、施工期的需要等多种用途。对于薄拱坝,也可不设廊道。廊道设置可参照 6.1.4.1 要求执行。

6.2.5.3 坝体横缝上游面、校核尾水位以下的横缝下游面、溢流面以及陡坡段坝体与边坡接触面等部位,均应设置止水片。横缝或基础止水片应与坝基妥善连接,止水片埋入基岩内的深度可为 0.3 m~0.5 m。止水可参照 6.1.4.3 要求执行。

6.2.5.4 坝身宜设置竖向排水管,可参照 6.1.4.3 要求执行。无冰冻地区的薄拱坝其坝身可不设置排水管。

6.2.5.5 坝体材料分区应满足下列要求:

- a) 拱坝坝体混凝土强度等级分区设计应以强度为主要控制指标。混凝土的其他性能指标应按照坝体不同部位的要求作校验,必要时可提高局部混凝土的性能指标,设不同强度等级分区。坝体厚度小于 20 m 时,混凝土强度等级不宜分区。同一层混凝土强度等级分区最小宽度不宜小于 2 m。
- b) 应综合研究混凝土的力学和热学指标,在满足混凝土低热要求的同时,混凝土应有足够的强度,尤其是早期强度。混凝土材料耐久性要求指标可按 6.1.4.4 要求选择。

6.2.6 坝基处理设计

6.2.6.1 拱坝坝基处理包括坝基开挖、固结灌浆、防渗排水、断层破碎带和软弱结构面处理、岩溶防渗处理,应符合 6.1.5 要求。应特别重视控制地基接触面形状对坝体应力分布的不利影响。

6.2.6.2 拱坝坝基开挖设计应满足下列要求:

- a) 两岸拱座利用岩面宜开挖成径向面。如拱端厚度较大而使开挖量过多时,宜采用非全径向面。经充分论证,拱座利用岩面也可开挖成其他形状。
- b) 河床段利用岩面的上、下游高差不应过大,宜略向上游倾斜。
- c) 坝基开挖爆破设计宜采用预裂爆破的方式。整个坝基利用岩面的纵坡应平顺,无突变。

6.2.6.3 为了提高拱坝坝基接触面上的抗剪强度,防止沿岩面接触面渗漏,对于坡度大于 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的陡壁面,应进行接触灌浆。接触灌浆宜利用固结灌浆孔和帷幕灌浆孔进行。

6.2.6.4 两岸拱座岩体内存在断层破碎带、层间错动等软弱结构面,影响拱座稳定安全时,必须对两岸拱座基岩采取相应的加固措施(如抗滑键、传力墙和高压固结灌浆等)。

6.2.7 温度控制

6.2.7.1 拱坝温度控制应根据坝址气温、水温、地温等自然条件,坝体结构特点以及混凝土原材料和混凝土性能等,制定合理的温度控制标准及温控防裂措施。

6.2.7.2 混凝土温度控制要求可参照 6.1.7 要求执行。

6.2.7.3 拱坝接缝灌浆时的温度场(即封拱温度场),应根据坝体混凝土温度场进行调整。冷却水管的布置和通水冷却方式选择应有利于降低拱坝温度荷载。有倒悬剖面的拱坝应及时灌浆。高温季节进行坝段接缝灌浆时,应做好坝体表面保温。

6.3 混凝土面板堆石坝

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 坝轴线应根据坝址的地形地质条件,按有利于趾板及枢纽中其他建筑物布置、方便施工的原则,经技术经济比较后确定。坝轴线宜布置成直线。

6.3.1.2 堆石坝体可建在密实的河床冲积层上。当冲积层内有粉细砂层、黏性土层时,应结合坝体稳定和变形分析,论证其安全性和经济合理性。

6.3.1.3 在坝肩布置溢洪道时,应作好面板和溢洪道边墙或导墙的连接设计。

6.3.1.4 在枢纽布置中,在确定建筑物型式和尺寸时,宜结合建筑物岩石开挖量和坝体填筑量的平衡进行综合比较。

6.3.2 坝顶

6.3.2.1 面板坝坝顶应不低于校核洪水位。坝顶上游侧应设防浪墙,防浪墙顶高程应高于波浪顶高程。防浪墙顶与正常蓄水位或校核洪水位的高差,可由公式(9)计算。防浪墙墙高可采用 4 m~6 m,墙顶高出坝顶 1 m~1.2 m。坝顶下游侧应设护栏或路缘石。

$$\Delta h = R_f + h_z + A \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中：

- Δh ——防浪墙顶与正常蓄水位或校核洪水位的高差, m;
- R_f ——波浪爬高,按附录 A 计算, m;
- h_z ——波浪中心线至正常或校核洪水位的高差,按附录 A 计算, m;
- h_c ——安全超高,按表 2 选取, m。

6.3.2.2 坝顶应预留沉降超高,其值由计算或工程类比确定。

6.3.2.3 坝顶宽度应根据运行需要、坝顶设施布置和施工要求确定,宜采用 5 m~8 m。当坝顶有交通要求时,坝顶宽度应遵照有关规定选用。

6.3.2.4 防浪墙应满足下列要求：

- a) 防浪墙与混凝土面板顶部的水平接缝高程,宜高于水库正常蓄水位。
- b) 防浪墙底部高程以上的坝体,应用细堆石料填筑,并铺设路面。当有坝顶公路时,应按公路标准设计坝顶路面。
- c) 防浪墙立墙上游的底板上,宜设宽度 0.6 m~0.8 m 的检查用人行道。
- d) 防浪墙应坚固不透水,并进行稳定和强度验算。防浪墙应设伸缩缝,缝内设一道铜止水片或 PVC 止水带,并和防浪墙与面板水平接缝的止水片连接。

6.3.2.5 坝顶结构应经济实用,建筑设计美观大方,并作好照明和排水设计。

6.3.3 坝坡

6.3.3.1 当筑坝材料为质量良好的硬岩堆石料时,上、下游坝坡可采用 1 : 1.3~1 : 1.4,当用质量良好的天然砂砾石料筑坝时,上、下游坝坡可采用 1 : 1.5~1 : 1.6。软岩堆石料筑坝和软基上建坝,坝坡由稳定计算确定。

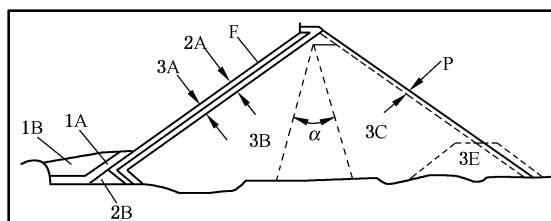
6.3.3.2 在下游坝坡上设有公路时,对公路之间的坝坡可作局部调整。

6.3.3.3 下游坝坡宜用大块石堆砌,要求坡面平整,具有良好的外观。

6.3.3.4 应对施工期垫层区的上游坡面提出平整度要求,并及时作好保护。

6.3.4 坝体分区

6.3.4.1 坝体应根据料源及对坝料的强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等要求进行分区。从上游向下游依次可分为垫层区、过渡区、主堆石区及下游堆石区。在周边缝下应设特殊垫层区。各区坝料的透水性宜按水力过渡要求从上游向下游增加。下游堆石区下游水位以上的坝料不受此限制。堆石坝体上游部分应具有低压缩性。必要时,可在坝体下游坝趾水下设硬岩抛石体,此抛石区可为下游围堰的组成部分。结合建筑物开挖石料和近坝区可用的料源,坝体可增加其他分区。岩基上硬岩堆石坝体分区示意图见图 3。



- | | | |
|--------------|--------------|------------------|
| 1A —— 上游铺盖区； | 3A —— 过渡区； | P —— 块石堆砌； |
| 1B —— 盖重区； | 3B —— 主堆石区； | Q —— 按坝料特性及坝高而定； |
| 2A —— 垫层区； | 3C —— 下游堆石区； | F —— 面板。 |
| 2B —— 特殊垫层区； | 3E —— 抛石区； | |

图 3 岩基上硬岩堆石坝体分区示意图

6.3.4.2 垫层区的水平宽度应由坝高、地形、施工工艺和经济比较确定。当用汽车直接卸料、推土机平料的机械化施工时，垫层区的水平宽度不宜小于 3 m。当采用专门铺料措施，垫层区宽度可以减小，并相应增大过渡区宽度。垫层区应沿基岩接触面向下游适当延伸，延伸的长度与岸坡地形、基岩特性、坝高有关。在周边缝下游侧应设置薄层碾压的特殊垫层区。

6.3.4.3 硬岩堆石料作主堆石区，它与垫层区之间应设过渡区。过渡区的水平宽度不应小于 3 m。

6.3.4.4 软岩堆石料用作中低坝主堆石区，其渗透性不能满足自由排水要求时，应在坝内偏上游设置竖向排水区、沿底部设置水平排水区。排水区的排水能力应保证全部渗水自由地排出坝外，必要时竖向排水区上游侧可设反滤层。排水区的堆石(砾石)料应坚硬、抗风化能力强。

6.3.4.5 用砂砾石填筑的坝体，应设置可靠的竖向和水平向排水区。竖向排水区的顶部高程宜高于水库正常蓄水位，排水区的排水能力应保证全部渗水自由地排出坝外。垫层区与砂砾料主堆石区之间设置过渡区的必要性依砂砾石料的级配而定。下游应设护坡，或用开挖石料作下游堆石区。

6.3.4.6 坝基为砂砾石层，且与坝体材料的层间关系不满足反滤要求时，应在坝基表面设置水平反滤层。

6.3.5 坝料

6.3.5.1 垫层料可采用人工砂石料、砂砾石料，或两者的掺料，人工砂石料应采用坚硬和抗风化力强的岩石加工。垫层料应具有良好的级配，最大粒径为 80 mm~100 mm，粒径小于 5 mm 的颗粒含量宜为 30%~50%，粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量不宜超过 8%。压实后具有低压缩性、高抗剪强度，并具有良好的施工特性。用天然砂砾石料筑坝时，垫层料应是级配连续、内部结构稳定，压实后渗透系数宜为 1×10^{-4} mm/s~ 1×10^{-5} mm/s。寒冷地区的混凝土面板堆石坝，垫层料的颗粒级配应满足排水性要求。

6.3.5.2 特殊垫层区应采用最大粒径不大于 40 mm，内部结构稳定，对缝顶粉煤灰、粉细砂或堵缝泥浆有自愈作用的反滤料。

6.3.5.3 过渡料应采用级配连续、最大粒径不宜超过 300 mm 的料。压实后应具有低压缩性和高抗剪强度，并具有自由排水性。过渡料可以采用专门开采的细堆石料、经筛分加工的天然砂砾石料或洞室开挖石料。

6.3.5.4 硬岩主堆石料压实后宜有良好的颗粒级配，最大粒径不应超过压实层厚度，小于 5 mm 的颗粒含量不宜超过 20%，粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量不宜超过 5%；并具有低压缩性、高抗剪强度。

6.3.5.5 下游水位以下的下游堆石区应用坚硬、抗风化能力强的堆石料，并应控制粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量不大于 5%，压实后应能自由排水；下游水位以上的下游堆石区，对坝料的要求可以降低。

6.3.5.6 用砂砾石料筑坝时，砂砾石料中粒径小于 0.075 mm 颗粒含量超过 8%时，宜用在坝内干燥区。

6.3.6 填筑标准

6.3.6.1 垫层料、过渡料、主堆石料及下游区堆石料的填筑标准可根据经验按表 14 初步选定，设计应同时规定孔隙率或相对密度、坝料的级配和碾压参数。设计干密度值可用孔隙率和岩石密度换算。平均干密度不应小于相应设计孔隙率或相对密度的换算值，其标准差不大于 100 kg/m³。特殊垫层区的填筑标准应不低于垫层区。

表 14 设计孔隙率或相对密度

坝料	垫层料	砂砾石料	过渡料	主堆石料	下游堆石料
孔隙率(%)	15~20	—	18~22	20~25	23~28
相对密度	—	0.75~0.85	—	—	—

6.3.6.2 填筑标准应通过碾压试验复核和修正,并确定相应的碾压参数。在施工过程中,宜采用碾压参数和孔隙率或相对密度两种参数控制,并宜以控制碾压参数为主。

6.3.6.3 软岩堆石料的设计指标和填筑标准应通过试验确定。

6.3.6.4 应对坝料填筑提出加水的要求,加水量可根据经验或试验确定。通过碾压试验验证,软化系数高的堆石料加水碾压作用不明显时,也可以不加水;寒冷地区冬季施工不能加水时,应采取措施达到设计要求。

6.3.7 趾板

6.3.7.1 趾板宜置于坚硬、抗冲蚀和可灌浆的弱风化至新鲜基岩上。

6.3.7.2 岩石地基上趾板布置应依据地形和地质条件选定,宜采用平趾板的布置型式;当岸坡很陡时,可采用其他的布置型式。

6.3.7.3 当受到地形或地质条件限制时,可采用增加连接板或回填混凝土等措施弥补;经过论证,局部可用趾墙代替趾板。

6.3.7.4 趾板基础一期开挖后,宜作趾板二次定线,必要时可适当调整坝轴线位置。

6.3.7.5 趾板的宽度可根据趾板下基岩的允许水力梯度和地基处理措施确定,其最小宽度宜为 3 m。允许的水力梯度应符合表 15 规定。趾板宽度在满足灌浆孔布置后,可以通过在趾板下游设置防渗板(钢筋混凝土板或钢筋网喷混凝土板)延长渗径满足水力梯度要求,并用反滤料覆盖在防渗板的上面及其下游部分岩面上。

表 15 趾板下基岩的允许水力梯度

风化程度	新鲜、微风化	弱风化	强风化	全风化
允许水力梯度	≥20	10~20	5~10	3~5

6.3.7.6 趾板的厚度可小于相连接的面板的厚度,但不小于 0.3 m。

6.3.7.7 采用防渗墙防渗的砂砾石地基上趾板宜分成上、下游两段施工。上游段趾板应在防渗墙竣工后并于水库第一次蓄水前施工。

6.3.7.8 趾板下游面应垂直于面板,面板底面以下的趾板高度不应小于 0.9 m,两岸坝高较低部位,可放宽要求。

6.3.7.9 趾板混凝土应具有较高的耐久性、抗渗性、抗裂性和施工和易性,要求与面板相同。混凝土材料耐久性要求指标可按 6.1.4.4 要求选择。

6.3.7.10 趾板宜采用单层双向钢筋,每向配筋率可采用 0.3%~0.4%。岩基上趾板钢筋的保护层厚度为 100 mm~150 mm;非岩基上趾板,钢筋宜布置在趾板截面的中部。

6.3.7.11 趾板应用锚筋与基岩连接,锚筋参数可按经验确定。趾板建基面附近存在缓倾角结构面时,锚筋参数应根据稳定性要求或抵抗灌浆压力确定。

6.3.8 混凝土面板

6.3.8.1 面板的厚度应使面板承受的水力梯度不应大于 200。面板厚度可按公式(10)计算确定,中、低坝面板厚度可采用 0.3 m~0.4 m 厚的等厚面板。

$$t = 0.30 + (0.002 \sim 0.0035)H \dots\dots\dots(10)$$

式中:

t —— 面板厚度, m;

H —— 计算断面至面板顶部的垂直距离, m。

6.3.8.2 应根据坝体变形及施工条件进行面板分缝,垂直缝的间距可为 12 m~18 m。

- 6.3.8.3 分期浇筑的面板,其顶高程宜低于浇筑平台的填筑高程 5 m 左右,其水平缝按施工缝处理。
- 6.3.8.4 面板混凝土应具有较高的耐久性、抗渗性、抗裂性和施工和易性。面板混凝土强度等级不应低于 C25,抗渗等级不应低于 W8,抗冻等级满足冻融要求。
- 6.3.8.5 面板混凝土宜采用高强度等级 52.5 强度等级硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。面板混凝土中宜掺粉煤灰或其他优质掺合料。粉煤灰质量等级不宜低于Ⅱ级,掺量宜为 15%~30%。严寒地区取较低值,温和地区取较高值。砂料较粗时宜采用粉煤灰超量取代水泥措施,改善混凝土性能。面板混凝土应掺用引气剂和减水剂,也可掺用调节混凝土凝结时间的其他种类外加剂。采用的外加剂和掺合料的种类及掺量应通过试验确定。
- 6.3.8.6 面板混凝土应采用二级配骨料。用于面板的砂料吸水率不应大于 3%,含泥量不应大于 2%,细度模数宜在 2.4~2.8 范围内。石料的吸水率不应大于 2%,含泥量不应大于 1%。
- 6.3.8.7 面板混凝土的水灰比,温和地区不应大于 0.50,寒冷和严寒地区不应大于 0.45。溜槽入口处的坍落度宜控制在 30 mm~70 mm,混凝土的含气量应控制在 4%~6%。
- 6.3.8.8 面板宜采用单层双向钢筋。钢筋宜置于面板截面中部,每向配筋率为 0.3%~0.4%,水平向配筋率可低于竖向配筋率。在高坝周边缝及临近周边缝的垂直缝两侧宜配置抵抗挤压的构造钢筋。
- 6.3.8.9 面板混凝土应进行配合比优化设计。采用优质外加剂和掺合料,降低水泥用量,减少水化热温升和收缩变形,防止面板裂缝。
- 6.3.8.10 面板的基础表面整体应平顺,不应存在大起伏差,局部不应形成深坑或尖包。侧模应平直。
- 6.3.8.11 面板混凝土宜在低温季节浇筑,混凝土入仓温度应加以控制,必要时应采取降低入仓温度。
- 6.3.8.12 面板混凝土出模后应及时覆盖保温保湿,进行不间断的潮湿养护,应防止曝晒、防止大风、防止寒潮袭击,防止养护水冷击,直到水库蓄水为止或至少 90 d。寒冷地区面板混凝土还应进行有效的表面保温,直到水库蓄水为止。
- 6.3.8.13 面板裂缝宽度大于 0.2 mm 或判定为贯穿性裂缝时,应采取专门措施进行处理;严寒地区的混凝土面板堆石坝,面板裂缝处理的标准应从严确定。

6.3.9 接缝和止水

- 6.3.9.1 混凝土面板坝接缝应设底部铜止水片。铜止水片宜选用延伸率不小于 20%的纯铜卷材,现场压制成型,异型接头宜专门加工。厚度 0.8 mm~1 mm。PVC 止水带、橡胶止水带的拉伸强度、断裂伸长率、邵氏硬度和脆性温度应满足设计要求。
- 6.3.9.2 底部铜止水片、中部 PVC 或橡胶止水带应自成封闭的止水系统。
- 6.3.9.3 铜止水片的底部应设置垫片。周边缝内部应设置沥青浸渍木板或其他有一定强度的填充板。
- 6.3.9.4 在两坝肩附近的面板内设张性垂直缝,其余部分的面板内设压性垂直缝。张性垂直缝的数量应根据地形地质条件,参照应力应变计算成果,并结合工程经验确定。
- 6.3.9.5 垂直缝内宜不设填充料,缝面应涂刷薄层沥青乳剂或其他防黏结材料。垂直缝在距周边缝法线方向约 0.6 m 范围内,应垂直于周边缝布置。
- 6.3.9.6 压性垂直缝应设底部铜止水片。铜止水片的底部应设置垫片和砂浆垫。砂浆的强度应和面板混凝土的强度等级相同。
- 6.3.9.7 岩基上趾板应按开挖后的地形或地质条件设置必要的伸缩缝,并和面板的垂直缝错开。伸缩缝内不设填充料,缝面应涂刷薄层沥青乳剂或其他防黏结材料。应设一道止水,并与周边缝的止水片和基岩构成封闭止水系统。
- 6.3.9.8 冲积层和有地质缺陷的岩基上趾板应设伸缩缝,缝的结构和岩基上趾板伸缩缝结构相同。
- 6.3.9.9 防浪墙和面板间的接缝,除设底部铜止水片外,缝内填预塑柔性填料;当此接缝高程高于正常蓄水位时,缝内中、下部预塑柔性填料可用沥青浸渍木板代替。

6.3.9.10 面板和溢洪道或其他建筑物边墙连接时,其接缝应按周边缝设计,并应有减少缝底堆石体位移的措施。

6.3.9.11 面板分期浇筑、施工工艺要求或浇筑中发生事故,应设施工缝。

6.3.10 坝基开挖

6.3.10.1 趾板基础开挖面应平顺,避免陡坎和反坡。当有妨碍垫层料碾压的反坡和陡坎,应作削坡或回填混凝土处理,或重新调整趾板位置。

6.3.10.2 趾板高程以上的上游边坡应按永久边坡设计。

6.3.10.3 趾板区下游接上坡开挖时,其坡度应比面板的坡度缓;接下坡开挖时,坡度应不大于 1:0.5。

6.3.10.4 堆石坝体可置于风化岩基上,变形模量应不低于堆石坝体的变形模量。趾板下游约 0.3~0.5 倍坝高范围内的堆石体地基应具备低压缩性,开挖后,不允许有妨碍堆石碾压的反坡和大于 1:0.25 的陡坎;其余部分对地基压缩性可放宽要求,开挖后只需满足开挖坡的稳定要求。

6.3.10.5 河谷岸坡大于 45°时,在坝轴线上游的两岸开挖坡度应在堆石体内设置低压缩区一并专门论证。

6.3.10.6 坝基砂砾石层的开挖,应经详细勘察、试验和论证后确定。

6.3.11 坝基处理

6.3.11.1 趾板范围内的基岩如有断层、破碎带和软弱夹层等不良地质条件时,应根据它们的产状、规模和组成物质,研究其渗透、渗透变形和溶蚀后对坝基的影响,确定趾板下基岩允许的水力梯度、防渗处理和渗流控制措施(如混凝土塞、截水墙、扩大趾板宽度或设下游防渗板,并在其上和下游用反滤料保护等)。

6.3.11.2 应做好趾板下基岩的固结灌浆和帷幕灌浆设计。固结灌浆应采用铺盖式,宜布置为 2 排~4 排,深度应不小于 5 m。

6.3.11.3 帷幕灌浆应布置在趾板中部,并可与固结灌浆相结合。帷幕灌浆孔的布置宜为 1 排,帷幕深度可按深入岩体透水性 5 Lu~10 Lu 区域内 5 m,或按(1/3~1/2)坝高确定,并作好两岸坝肩的渗流控制。在复杂的水文地质条件下,或相对不透水层埋藏较深时,防渗帷幕应结合类似工程经验专门设计。

6.3.11.4 灌浆设计应规定措施提高灌浆帷幕的耐久性和对表层基岩的灌浆压力,并经灌浆试验验证。

6.3.11.5 趾板建在河床砂砾石层上时,可采用混凝土防渗墙防渗,防渗墙底部应嵌入弱风化基岩。应作好渗流出逸区的反滤保护及趾板和防渗墙之间的连接设计。

6.3.11.6 当趾板建在岩溶地基上时,其防渗处理方法和岩溶地区重力坝坝基处理方法相同。

6.3.12 坝体计算

6.3.12.1 混凝土面板堆石坝存在下列情况之一时,应进行相应的稳定分析:

- a) 坝基有软弱夹层或坝基砂砾石层中存在细砂、粉砂或黏土层;
- b) 地震动峰值加速度大于等于 0.2 g;
- c) 施工期堆石坝体过水或堆石坝体用垫层和临时断面挡水度汛、且挡水水深较高时;
- d) 坝体主要用软岩堆石料填筑;
- e) 地形条件不利。

6.3.12.2 面板坝稳定计算可采用瑞典圆弧法或滑楔法。抗滑稳定安全系数取值应满足:

- a) 稳定渗流期、水位正常降落等正常运用工况不小于 1.15,
- b) 施工期、正常运用加地震等非常运用工况不小于 1.05。

6.3.12.3 趾板厚度大于 2 m 或采用高趾墙时,应进行稳定计算和应力分析。趾板稳定计算用刚体极限平衡法。计算中不计趾板锚筋作用及面板和趾板之间的传力,但可计入堆石体对趾板的主动土压力,或

计入面板承受库水压力产生的侧压力。

6.3.13 抗震措施

6.3.13.1 当地震动峰值加速度大于等于 0.2g 时,宜采用下列抗震措施:

- a) 采用较大的坝顶宽度和上缓下陡的坝坡,并在坝坡变化处设置马道;
- b) 采取加水平钢筋网等措施,增加顶部坡面稳定性;
- c) 采用较低的防浪墙,并采取增加防浪墙稳定的措施;
- d) 确定坝体安全超高时,应计入坝和地基在地震作用下的附加沉降;
- e) 增加坝体堆石料的压实密度,特别是在地形突变处的压实密度;
- f) 应加大垫层区的宽度。当岸坡很陡时,宜适当延长垫层料与基岩接触的长度,减小垫层料的最大粒径;
- g) 宜在面板中间部分选择几条垂直缝,在缝内填塞沥青浸渍木板或其他有一定强度又可压缩的填充板;
- h) 增加河谷中间顶部面板的配筋率,特别是面板坡向的配筋率。

6.3.13.2 坝体用砂砾石料填筑时,应增大排水区的排水能力;下游坡应用大块石压坡,或采用堆石料填筑下游坝坡。

6.3.14 分期施工

6.3.14.1 堆石坝体分期填筑规划应遵循下述原则:

- a) 垫层料、过渡料应和相邻的部分堆石料(至少 20 m 宽)平起填筑;
- b) 堆石料之间的接合坡度应不大于 1:1.3,天然砂砾石料应不大于 1:1.5;
- c) 堆石区内可按需要设置运输坝料用的临时坡道;
- d) 用堆石坝体拦洪度汛或坝面过水度汛,填筑分区和分期应与度汛要求相适应。

6.3.14.2 趾板建基面高程低于堆石坝体基础高程时,应作堆石坝体施工期的排水措施设计。

6.3.14.3 在混凝土面板浇筑之前,允许用堆石坝体或临时断面拦洪度汛,但应满足抗滑稳定和渗透稳定要求。

6.3.14.4 堆石坝体拦洪度汛时,应在垫层区上游坡面采用下列措施之一固坡:碾压低强度砂浆、喷射混凝土或喷洒阳离子乳化沥青。

6.3.14.5 施工期堆石坝体可在坝面有保护的情况下过水。

6.3.14.6 堆石坝体过水时,应能抵抗水流对坝面和坝基的冲蚀。坝面过水保护措施设计应重视堆石坝体与两岸及下游坝趾附近连接部位的保护。

6.4 碾压土石坝

6.4.1 一般规定

6.4.1.1 坝址宜选择在地质构造简单的岩基、厚度不大的砂砾石地基或密实的土基上。不宜选在深厚的强透水砂砾石层、岩溶发育地区、严重风化破碎的岩层、活动性断层带以及软基上,如不能避开,应采取处理措施。

6.4.1.2 碾压式土石坝,可采用土质防渗体土石坝、人工防渗体土石坝和过水土石坝等型式。

- a) 土质防渗体土石坝的防渗体可位于坝体中部(即心墙土石坝),坝体其余部分用透水料(砂、砂砾料或堆石料)填筑。土质防渗体也可位于坝体上游(即斜墙土石坝),坝体其余部分用透水料(砂、砂砾料或堆石料)填筑,土质斜墙的上游也可设置较厚的砂砾石层或堆石层。
- b) 人工防渗体土石坝的防渗体可采用钢筋混凝土、沥青混凝土、土工膜等材料,坝体其余部分由

砂砾料或堆石填筑。防渗体可位于坝上游面、中间或中间偏上游。地震动峰值加速度大于等于 0.1g 的地震区不宜修建刚性心墙坝。

6.4.2 筑坝材料

6.4.2.1 选择筑坝土石料应遵循以下原则：

- a) 填筑坝体的土石料应具有与其使用目的相适应的物理力学性质,并且有较好的长期稳定性;
- b) 在不影响工程安全的前提下,优先使用坝址附近的材料和枢纽建筑物的开挖料;
- c) 便于开采、运输。

6.4.2.2 水溶盐含量大于 5% 的土料、有机质含量大于 5% 的土料、干硬性粘土、分散性土、软粘土等不宜筑坝。

6.4.2.3 防渗体可用粘性土、砾石土(含岩石风化石料)填筑。压实后的渗透系数对于均质土坝不大于 1×10^{-5} mm/s; 对于心墙、斜墙和铺盖不大于 1×10^{-6} mm/s。防渗体宜选用塑性指数 $IP=7 \sim 20$ 的土料填筑,如采用塑性指数较小的土料,应适当加大防渗体厚度,并做好反滤层。土料的含水量宜与最优含水量相近,如相差较大应进行处理。

6.4.2.4 用于防渗体的砾石土(含岩石风化石料),粒径大于 5 mm 的含量不宜大于 50%,粒径小于 0.074 mm 的含量不宜小于 15%,最大粒径不宜超过 150 mm 或铺土厚度的 2/3,且不得发生粗粒集中现象。

6.4.2.5 如当地缺少天然防渗土料,可采用粘性土、砂质土和卵砾石,或粘性土、卵砾石的掺和料作为防渗料,但应掺和均匀。

6.4.2.6 使用砾石土(含岩石风化石料)或掺和料等做坝的防渗料时,应通过试验提出土料的级配范围。

6.4.2.7 具有稳定团粒结构的坡残积红土或红土状土,含水量高、干密度低,但抗剪强度较高、渗透性较小、压缩性较低,可用于填筑土石坝的防渗体。

6.4.2.8 使用膨胀土填筑防渗体时,应设置足够的压重保护层。

6.4.2.9 使用湿陷性黄土筑坝,应破坏其原状结构,填筑含水量宜等于或略大于最优含水量。

6.4.2.10 冻土不宜筑坝。使用冻土筑坝时,冻土块含量不得大于 10%;最大冻土块径不得大于铺土厚度的 1/2,冻土的含水量等于或略低于塑限含水量。

6.4.2.11 坝壳应满足坝体稳定和排水的要求。宜使用中粗砂、砂砾石、石渣或堆石填筑。均匀中细砂及粉砂可用于坝壳干燥区。对强度较低的软岩风化石料,应考虑压实后级配变化和浸水后强度及透水性的降低,用于坝壳适当部位。上游护坡和排水设施宜选用抗压强度较高和耐风化的石料。块石最大边长与最小边长之比不宜大于 2.0,石料的块径和重量应能满足抗风浪的要求。

6.4.2.12 坝的反滤层、垫层和过渡层宜使用中粗砂、天然砂砾料或筛选料,也可使用岩石轧制料,颗粒级配应能满足反滤排水要求,并具有长期稳定性,含泥量($d < 0.1$ mm)应小于 5%。

6.4.2.13 土石坝中用于防渗的土工膜和用于反滤排水的土工织物应满足与工程要求相适应的物理力学特性、水力特性和耐久性。并与被保护土的颗粒级配之间应满足反滤排水准则。

6.4.3 填筑标准

6.4.3.1 坝体应密实均匀,具有足够的抗剪强度,较小的压缩性,并满足渗流控制要求。填筑标准应能够使填土压实既满足安全要求又经济合理。在施工过程中应对规定的填筑标准进行校核和修正。

6.4.3.2 对于粘性土料,压实干密度应按标准击实仪试验的最大干密度乘以压实度确定。压实度可取 0.95~0.97。填土的含水量应按最优含水量控制,允许偏差为 $\pm 3\%$ 。

6.4.3.3 对于砾石土,宜采用大型击实仪进行全样击实试验,求得不同粗料($d \geq 5$ mm)含量的全样最大干密度和最优含水量,再将最大干密度乘以压实度 0.95~0.97,作为控制砾石土填筑的干密度。没有条件进行大型压实试验时,可根据粗料含量的不同,按下述两种情况确定:

- a) 对于粗料含量小于 40% 的砾石土,可取细料($d < 5 \text{ mm}$)部分进行击实试验,确定细料最大干密度和最优含水量,用式(11)和(12)算出相应于不同粗料含量的砾石土全样最大干密度和最优含水量,乘以压实度,得出砾石土填筑标准。

$$\gamma d_{\max} = \frac{1}{\frac{P}{\Delta s} + \frac{(1-P)}{(\gamma d)_0}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\omega_{\text{op}} = \omega_0(1-P) \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

- γd_{\max} —— 砾石土最大干密度, g/cm^3 ;
- P —— 粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的砾石含量,以小数计;
- Δs —— 粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的砾石密度, g/cm^3 ;
- $(\gamma d)_0$ —— 粒径 $d < 5 \text{ mm}$ 的细粒土的最大干密度, g/cm^3 ;
- ω_{op} —— 砾石土最优含水量;
- ω_0 —— 粒径 $d < 5 \text{ mm}$ 的细粒土最优含水量。

- b) 对于粗料含量大于 40% 的砾石土,还应对算出的全样最大干密度和最优含水量进行修正,或适当降低压实度。依此确定填筑标准。

6.4.3.4 砂料和砂砾料的压实标准宜以相对密度(D_r)控制,要求 $D_r \geq 0.7$ 。当缺乏试验资料时,也可以干密度(γ_d)控制,要求砂料 $\gamma_d = 1\ 600 \text{ kg}/\text{m}^3 \sim 1\ 700 \text{ kg}/\text{m}^3$;当砂砾料的含砾量为 40%~70%,根据不同砾石含量取 $\gamma_d \geq 2\ 000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。堆石料的压实标准宜以孔隙率(n)控制,要求 $n = 20\% \sim 28\%$ 。

6.4.4 坝基处理

6.4.4.1 砂砾石地基处理应符合以下原则:

- a) 坝基防渗可采用截水槽、铺盖,或采用高压喷射灌浆技术修建防渗墙,经技术经济比较,也可采用混凝土防渗墙等措施。下游排水设施可采用水平排水褥垫、棱体排水、坝趾排水沟、减压井和透水盖重等。
- b) 当砂砾石覆盖层厚度小于 15 m 时,宜采用明挖回填粘土截水槽处理。
- c) 截水槽宜布置在防渗体下面。均质土坝的截水槽可布置在坝轴线至上游坝脚的 1/3 坝底宽范围内。
- d) 截水槽底宽应根据回填土料的允许渗透比降确定。允许渗透比降砂壤土宜取 3,壤土宜为 3~5,粘土宜取 5~7。最小底宽应不小于 3.0 m。截水槽的开挖边坡由覆盖层材料的抗剪强度及开挖深度确定,可取用 1:1.5~1:2。截水槽宜采用与坝身防渗体相同的土料填筑,其压实干密度应与坝身防渗体相同。当截水槽土料与坝基砂砾石不满足反滤要求,应在截水槽下游面设置反滤层。
- e) 截水槽嵌入相对不透水层、不透水层或弱风化岩(包括河床及两岸)的深度应不小于 0.5 m。如基岩表面裂隙发育,可用水泥砂浆进行填堵,或铺设一层混凝土,将裂隙和坝体填土隔开。必要时可对基岩进行灌浆处理。
- f) 如坝基为砂砾石层与弱透水层相间的地层,而弱透水层与砂砾石层的渗透系数相差 100 倍以上,有一定厚度并且连续,可挖穿上部砂砾石层,将截水槽修建在该弱透水层上。
- g) 如坝基砂砾石覆盖层比较厚,开挖截水槽困难大而又需要采取垂直防渗措施时,可采用高压喷射灌浆或混凝土防渗墙等措施。
- h) 当砂砾石覆盖层较厚时,可采用上游铺盖防渗加下游反滤排水的措施。
- i) 铺盖设计应确定铺盖的合理长度、厚度和渗透系数,使坝基的渗透坡降和渗流量控制在允许范

围内。铺盖的长度不宜小于5倍水头。铺盖上游端的厚度宜采用0.5 m~1.0 m,其末端与防渗体连接处的厚度应满足坝基渗流和铺盖允许坡降的要求,但不宜小于2.5 m。铺盖应采用渗透系数等于或小于 1×10^{-5} mm/s的粘性土填筑。

- j) 铺盖地基面上的淤泥和腐植土等应全部清理干净。应在铺盖地基中挖坑取样,了解其颗粒组成。地基面应进行压实和平整,且不得有砾石集中。铺盖土料与坝基砂砾石之间应满足反滤原则,否则应设置反滤层。
- k) 利用天然土层做铺盖,应了解其分布、厚度及渗透性,确定其防渗效果以及是否需要补设人工铺盖或其他加固措施。在坝的上游取土筑坝,应限制在上游坝脚一定范围以外取土。
- l) 采用土工膜作为铺盖防渗,应做好土工膜的铺设、粘接和防护,避免遭受破坏。
- m) 铺盖完成后应在表面铺松土或渣料保护。在有可能受到波浪冲刷的部位,铺盖上应铺块石保护。
- n) 采用垂直防渗措施后,坝基渗流可得到控制,下游排水措施可适当简化,可在坝趾设置反滤排水沟。采用铺盖防渗时,下游应设置水平排水褥垫、堆石棱体、反滤排水沟等排水设施,必要时应设置减压井及下游透水盖重。
- o) 所有排水体的底部应设置在透水地基上。如坝基表层为厚度不大的弱透水层,应将弱透水层挖穿;如果弱透水层很厚,可采用伸入透水层的减压井将渗水引至下游坝脚排水沟,减压井深入透水层内的深度应不小于透水层厚度的1/2。排水沟应有足够的排水断面,并做好反滤设计。应设置横向(垂直坝轴线方向)排水沟,将渗水引至下游。
- p) 在坝下游出逸坡降大于允许值的地基范围宜铺设反滤排水。必要时还应铺设透水盖重层,透水盖重层与地基之间应满足反滤要求的原则。

6.4.4.2 易液化土及软土地基处理应符合以下原则:

- a) 位于地震区的饱和粉、细、中砂地基以及少粘性土(如饱和砂壤土、粉质砂壤土、轻壤土、轻粉质壤土等)地基应考虑地震液化的可能性。
- b) 对于判定可能发生液化的土层,宜挖除并换填符合要求的土料。如挖除有困难或不经济时,应采取加固措施,使其达到与设计地震烈度相适应的密实状态。加固措施可采用:表面夯实法、表层振动压密法、深层爆炸法、砂桩挤密法、振冲加固法、强夯法。
- c) 如需在软土上面筑坝时应进行地基处理,处理方法可采用换砂法、镇压平台法、砂井加水平排水褥垫法、振冲加固法、土工合成材料铺垫法。
- d) 采用任何一种处理软土地基的方法,均应控制坝体填筑速率。

6.4.4.3 湿陷性黄土地基处理应符合以下原则:

- a) 对于厚度不大的湿陷性黄土地基,可采取挖除、翻压或表面夯实的方法消除其湿陷性。在保证坝体稳定的前提下,也可将表面干密度较低、湿陷性较大的土层挖除,保留下部部分土层。
- b) 当坝基湿陷性黄土较厚时,宜采用预浸水法处理。当湿陷性黄土层的厚度超过15 m时,可采用钻孔或竖井深层预浸水法加速浸水过程。预浸水处理的范围应大于坝基范围,宜以坝基上下游方向各超出一倍浸水深度为预浸边界。坝基浸水处理应与坝体填筑相结合,以增加压重,加速湿陷。
- c) 坝基为湿陷性黄土时也可用强夯法处理,夯实遍数及影响深度由试验确定。
- d) 湿陷性黄土地基采用振冲法进行处理时,孔距、孔径、孔深应参考已成工程经验或试验确定。
- e) 对坝基黄土中的陷穴、动物巢穴、窑洞、墓坑等地下空洞,应查明并予以处理。

6.4.4.4 岩石及岩溶地基处理应满足以下要求:

- a) 当岩石地基的透水性较大,影响到水库蓄水和坝体及坝基的安全时,应采取处理措施。

- b) 当坝基或截水槽范围内的岩基存在节理裂隙密集带或断层破碎带时,应根据其产状、宽度、深度以及管涌和溶蚀对坝基和坝体的影响,确定相应的处理措施。可采用的处理措施包括:
 - 1) 开挖齿槽回填混凝土;
 - 2) 扩大截水槽底宽;
 - 3) 在下游断层和破碎带出露处铺设反滤层。
- c) 在岩溶地区筑坝,应查明库坝区及周边的水文地质条件和岩溶分布情况。
- d) 处理岩溶地基可采用截、堵、围、铺、隔等方法。根据工程及渗漏情况可采用一种型式或几种型式联合应用。

6.4.5 坝体与地基和岸坡的连接

6.4.5.1 坝体填土与地基和岸坡应有良好的结合,不应发生下述情况:

- a) 渗水沿坝体和坝基接触面产生冲刷;
- b) 形成软弱面,影响坝体稳定;
- c) 出现不均匀沉降及裂缝。

6.4.5.2 坝体填筑之前应按下述要求进行坝基与岸坡的清理工作:

- a) 清除坝断面范围内地基与岸坡上的草皮、树根、耕植土、乱石。对水井、洞穴、试坑、钻孔等进行处理;
- b) 土石坝防渗体与岩石地基和岸坡的连接处应清除表面松动的石块、凹处积土和突出的岩石,防渗体应与岩面相接触,如基岩裂隙发育,应沿基岩与坝防渗体接触面设混凝土盖板、喷水泥砂浆或喷混凝土,将基岩与防渗体隔开,必要时应对基岩进行灌浆。

6.4.5.3 岩坡应尽量平顺,不应成台阶状、反坡或突然变坡,岸坡上缓下陡时,凸出部位的变坡角宜小于 20° 。与防渗体接触的岩石岸坡不宜陡于 $1:0.5$,土质岸坡不宜陡于 $1:1.5$ 。防渗体与混凝土建筑物接触面的坡度不宜陡于 $1:0.25$ 。坝壳透水料与岸坡连接处,对接触坡度不作专门规定,但岸坡应能保持自身的稳定。

6.4.5.4 在土质防渗体与岸坡连接处宜扩大防渗体的断面或加厚下游反滤层。

6.4.5.5 地基覆盖层或岸坡岩石裂隙充填物与透水坝壳之间应符合反滤要求,否则需设置反滤层。

6.4.6 坝体结构

6.4.6.1 土石坝坝顶高程由正常蓄水位或校核洪水位加坝顶超高确定,坝顶超高可由公式(9)计算。当坝顶上游设防浪墙,防浪墙顶高程应高于波浪顶高程,且坝顶不低于校核洪水位或正常蓄水位以上 0.5 m 。在地震区,地震涌浪高度可根据地震烈度和坝前水深采用 $0.5\text{ m}\sim 1.0\text{ m}$ 。

6.4.6.2 坝顶应预留沉降超高,其值由计算或工程类比确定。在地震区可适当加大预留超高。

6.4.6.3 坝顶宽度应满足交通、施工和运行检修时的要求。坝顶宽度可采用 $4\text{ m}\sim 6\text{ m}$ 。

6.4.6.4 坝顶路面可采用碎石、砂砾石或沥青混凝土等柔性材料。坝顶路面可分别向上、下游或下游倾斜 $2\%\sim 3\%$,并应做好向下游的排水系统。

6.4.6.5 坝坡应满足稳定要求。上下游坝坡可根据需要确定是否设置马道,其宽度不小于 1.0 m ,每级马道的高差可采用 $8\text{ m}\sim 12\text{ m}$ 。

6.4.6.6 土质防渗体断面尺寸应满足渗流稳定要求,渗流量应控制在允许范围以内。

6.4.6.7 土质防渗体自上而下逐渐加厚,顶部宽度不宜小于 1.5 m ;底部厚度可按允许渗透坡降确定,但厚度不小于 3.0 m 。在寒冷地区,粘土心墙的保护土层厚度应大于当地冻土深度。

6.4.6.8 采用土工膜作防渗体应在土工膜上铺设保护层,其下设置支持层。保护层分面层和垫层。保

护层应能保护土工膜不受紫外线辐射。支持层应使土工膜受力均匀,免受局部集中应力的破坏。

6.4.6.9 防渗土工膜应与坝基、岸坡或其他混凝土建筑物形成封闭的防渗系统。应做好周边缝的处理,其结构尺寸应能满足渗透坡降和变形的要求。

6.4.6.10 防渗体顶部高程,应高出正常蓄水位 0.3m 以上,且不低于校核洪水位。如防渗体顶部设有防浪墙,防渗体顶部超高可不受本条限制,但不应低于正常蓄水位。

6.4.6.11 在土质防渗体(包括均质坝、心墙、斜墙、铺盖和截水槽等)与坝壳排水体或坝基透水层之间应满足反滤原则,否则应设置反滤层,或同时设置反滤层和过渡层。

6.4.6.12 坝壳与坝基之间,如不满足反滤原则,应设置反滤层。

6.4.6.13 当采用几种不同性质的土石料填筑坝体时,各土层之间应遵循反滤原则。靠近心墙或斜墙处宜填筑透水性较小、颗粒较细的土石料,靠近坝坡处宜填筑透水性较大,颗粒较粗的土石料。

6.4.6.14 反滤层应满足下列要求:

- a) 能防止被保护土的渗透变形,反滤层材料应为非管涌土;
- b) 应大于被保护土的透水性,能通畅地排除渗透水;
- c) 不被细颗粒($d < 0.1 \text{ mm}$)淤堵失效;
- d) 耐久、稳定,在使用期间不会随着时间的推移和环境的影响而改变性质。

6.4.6.15 反滤层和过渡层应压实。反滤的厚度应根据材料的用途及施工方法等情况确定。水平滤层每层的最小厚度可采用 0.3 m,竖向或倾斜反滤层每层的最小厚度可采用 0.4 m。采用机械填筑时,最小水平宽度视施工机械和施工方法确定。软土地基上填筑的反滤层,应适当加厚。

6.4.6.16 粒状反滤料按下列准则确定:

- a) 被保护土与反滤层之间应满足 $D_{15}/d_{85} \leq 5$ 、 $D_{15}/d_{15} \geq 5$ 的要求(D_{15} ——反滤料粒径,小于该粒径的土重占总土重的 15%; d_{85} (d_{15})——被保护土粒径,小于该粒径的土重占总土重的 85%(15%))。
- b) 当被保护土为细粒土(CL 和/CH),且其 $d_{85} = 0.01 \text{ mm} \sim 0.03 \text{ mm}$,可使用 $D_{15} \leq 0.5 \text{ mm}$ 的砂或砾质砂作为反滤。
- c) 对于不均匀系数(η)较大的被保护土,可取级配曲线中 η 小于或等于 5~8 范围的细粒部分的 d_{15} 、 d_{85} 作为计算粒径。
- d) 对于不连续级配的土,应取级配曲线平段以下(宜为 1 mm~5 mm 以下)粒组的 d_{15} 、 d_{85} 作计算粒径。
- e) 当第一层反滤料采用不均匀系数(η)大于 5~8 的砂砾石时,要求砾石($d \geq 5 \text{ mm}$)含量小于 60%,且应取其细料($d < 5 \text{ mm}$)部分的 D_{15} 作为计算粒径。

6.4.7 坝体排水

6.4.7.1 土石坝应设置排水设施,并满足以下要求:

- a) 降低坝体浸润线、减小孔隙压力,控制渗流,增加坝体稳定性;
- b) 具有充分的排水能力,保证自由地排出全部渗水;
- c) 按反滤原则设计,防止坝体与地基土产生渗透破坏;
- d) 排水的材料应使用坚硬的、耐风化的块石、碎石、砂砾料。

6.4.7.2 坝体排水设施可采用棱体排水、贴坡排水、坝内排水(包括褥垫排水、竖向排水、网状排水等)或由上述各种型式综合排水。

6.4.7.3 坝体排水设施型式的选择,应结合坝体和坝基排水的需要,综合考虑下列情况后确定:

- a) 坝型及坝体和坝基材料的性质;
- b) 坝基的工程地质和水文地质条件;
- c) 下游水位;

- d) 排水设施的材料及施工情况；
- e) 坝址区的气候条件。

6.4.7.4 对棱体排水的要求如下：

- a) 棱体排水适用于下游有水的情况，其顶部高程应超出下游最高水位 0.5 m 以上；
- b) 保证坝体浸润线与坝面的最小距离大于本地区的冻结深度；
- c) 棱体排水的顶宽应满足施工和观测的需要，不宜小于 1.0 m；
- d) 棱体排水的内、外坡可根据石料和施工情况确定，内坡可取 1 : 1.0，外坡取 1 : 1.5 或更缓。

6.4.7.5 对贴坡排水的要求如下：

- a) 贴坡排水的顶部应高出浸润线逸出点，超出高度应使坝体浸润线在冻深以下，且不小于 1.5 m；
- b) 贴坡排水的厚度应大于冻结深度。

6.4.7.6 对褥垫排水的要求如下：

- a) 褥垫排水适用于下游无水的情况；
- b) 在褥垫排水的坝脚处，应设置与之相连通的纵向排水明沟，沟底面应低于褥垫排水的底面；在寒冷地区，排水明沟结冰后，应保证冰层以下仍有足够的排水断面；
- c) 对于均质土坝，褥垫排水宜用中粗砂或砂砾料填筑，砂砾料应满足反滤要求，不得有砾石集中现象，较大的颗粒要剔除，含泥量($d < 0.1 \text{ mm}$)应小于 5%，渗透系数应大于坝基和坝体；
- d) 褥垫厚度可按排除 2.0 倍入渗量确定，对易产生不均匀沉降的坝基应增加褥垫排水的厚度；
- e) 褥垫排水伸入坝体内的长度可为坝底宽度的 $1/3 \sim 1/4$ ；
- f) 在两岸坝基面，应增设横向排水暗沟，以利于分段将褥垫中的渗水汇集并引至坝脚排水沟内。暗沟顶面应低于褥垫的底面。

6.4.7.7 均质土坝坝体内可设置竖向排水，与褥垫排水的上游端联接，拦截坝内渗水，降低浸润线。

6.4.7.8 网状排水带中的纵横向排水带的尺寸应根据渗流计算确定，其排水能力应不小于入渗量的 2.0 倍。横向排水带的宽度应大于 0.5 m，间距为 20 m~50 m，坡度不大于 1%。如网状排水带计算尺寸过大，排水带内可设置混凝土排水管，管壁开孔，管径不小于 0.15 m。管内流速为 0.2 m/s~1.0 m/s，管身四周应填反滤料。

6.4.8 护坡

6.4.8.1 坝面护坡的设置应满足下列要求：

- a) 上游护坡能抵御风浪冲击，能够防止冰层和漂浮物的损害；
- b) 能够防止坝体粘性土发生冻胀和干裂；
- c) 能够防止坡面被雨水冲刷；
- d) 能够防止无粘性土被风吹散；
- e) 能够防止动物破坏。

6.4.8.2 上游坡可采用抛石护坡、干砌块石护坡、浆砌石护坡、混凝土或沥青混凝土护坡。

6.4.8.3 在坝体与块石护坡之间应设置垫层。

6.4.8.4 在最低库水位 1.5 m 以下，可不设上游护坡。

6.4.8.5 下游护坡可采用草皮护坡、碎石或卵石护坡、块石(或混凝土预制块)护坡。如坝体为堆石、碎石或卵石填筑，可不设护坡。

6.4.8.6 寒冷地区土体的上下游护坡和垫层的厚度应不小于冻结深度。

6.4.8.7 浆砌石或混凝土护坡应设置纵横缝和排水孔。

6.4.8.8 护坡坡脚处应设置基座。

6.4.9 坝面排水

6.4.9.1 下游坝坡宜设置纵横向排水沟：

- a) 纵向(顺坝轴线方向)排水沟宜设在马道的内侧。
- b) 横向排水沟应从坝顶直到坝脚排水沟或最低尾水位以下。
- c) 横向排水沟可每隔 50 m~100 m 设置一条,总数不应少于两条。纵、横向排水沟应互相连通。
- d) 排水沟净断面尺寸可取 0.4 m×0.3 m。可采用浆砌石或混凝土块砌筑。

6.4.9.2 坝体与岸坡连接处应设置排水沟,其集水面积应包括岸坡的有效集水面积在内。

6.4.10 坝体计算

6.4.10.1 土石坝渗流计算应包括以下内容：

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

6.4.10.2 渗流计算应考虑水库运行中出现的各种不利情况,应包括以下水位组合：

- a) 上游正常蓄水位与下游相应的最低水位；
- b) 上游设计洪水位与下游相应的水位；
- c) 上游校核洪水位与下游相应的水位；
- d) 库水位降落时上游坝坡稳定最不利的情况。

6.4.10.3 渗流计算应考虑坝体和坝基渗透系数的各向异性。计算渗透流量时宜用土层渗透系数的大值平均值,计算水位降落时的浸润线宜用小值平均值。通过渗流计算应采取必要的渗流控制措施。

6.4.10.4 土石坝的稳定应计算以下四种情况：

- a) 稳定渗流期的下游坝坡；
- b) 水库水位降落期的上游坝坡；
- c) 施工期(包括竣工期)的上、下游坝坡；
- d) 正常运用遇地震的上、下游坝坡。

其中:a)、b)工况为正常运用条件,抗滑稳定安全系数不小于 1.25;c)工况为非常运用条件Ⅰ,抗滑稳定安全系数不小于 1.15;d)工况为非常运用条件Ⅱ,抗滑稳定安全系数不小于 1.10。

6.4.10.5 坝的静力稳定计算,对于均质坝、心墙坝和厚斜墙坝可采用瑞典圆弧法;对于薄斜墙坝、薄心墙坝、坝基有软土夹层的坝体可采用滑楔法。

6.4.10.6 土石坝施工期的稳定可采用总应力法计算,制备相应于填筑的设计干密度和含水量的土样进行直接快剪(或三轴不排水剪)试验,取其强度指标 C_u 、 φ_u 进行稳定计算。作用在滑弧上的应力,采用土体自重产生的总应力。

6.4.10.7 位于湿陷性黄土地基上的坝,如施工中对地基未做处理,应核算水库蓄水时,地基浸水后引起强度的降低对坝体稳定的影响。

6.4.10.8 软土地基上的坝,如地基未做处理,应核算施工期的稳定。可采用地基土天然干密度和含水量状态下直接快剪(或三轴不排水剪)试验的强度指标 C_u ,也可采用无侧限抗压强度试验或十字板剪力试验得出的强度指标。如地基设有排水固结措施,应考虑施工期和竣工期地基有不同程度的固结,孔隙压力有所消散,可采用有效应力法计算,此时采用直接慢剪(或三轴排水剪)试验的强度指标。

6.4.10.9 稳定渗流期应采用有效应力法计算,根据渗流流网等势线求出作用在滑动面上的孔隙压力及有效应力,采用直接慢剪(或三轴排水剪)的强度指标。为简化试验,抗剪强度也可近似采用直接固结快

剪强度指标。

6.4.10.10 水位降落期对于石料或砂砾料等无粘性土可认为坝体内的浸润线与库水位同步降落,不计其孔隙压力。

6.4.10.11 对于土质防渗体,当水位降落时,可根据水位降落后的流网图,求得水位降落期坝体或坝基中的孔隙压力,采用有效应力法计算;也可采用以下简化方法计算:假定水位降落前后浸润线位置不变;对降落前水位以下部分条块重用浮容重,而在降落后水位与浸润线之间条块重,计算滑动力时用饱和重,计算抗滑力用浮容重,浸润线以上部分条块重都用实重,抗剪强度采用直接固结快剪(或三轴固结不排水剪)强度指标。

6.4.10.12 土石坝应计算坝体和坝基的总沉降量和施工期的沉降量。坝的总沉降量可根据坝体和坝基的压缩曲线采用分层总和法计算,将各分层的沉降量相加,即为总沉降量:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_i}{1 - e_{0i}} h_i \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

S ——总沉降量, m;

n ——分层数目;

e_{0i} ——第 i 层土起始孔隙比;

e_i ——第 i 层土在上部荷载作用下的孔隙比;

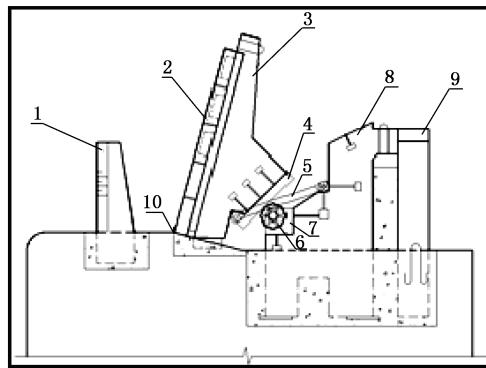
h_i ——第 i 层土层厚度, m。

6.4.10.13 施工期坝体的沉降量,根据经验资料对于土坝可取最终沉降量的 80%,对堆石或砂砾石坝取最终沉降量的 90%。将总沉降量减去施工期沉降量,得竣工后沉降量。

6.5 水力自控翻板闸坝

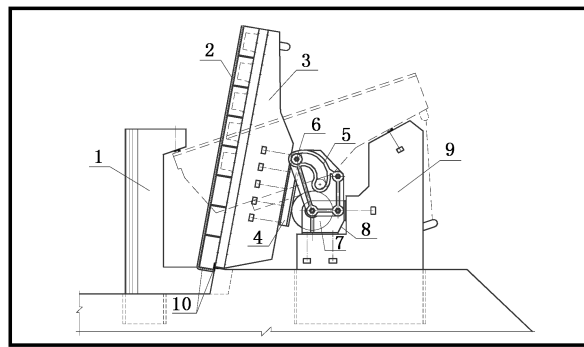
6.5.1 一般规定

6.5.1.1 水力自控翻板闸门门型选择应满足综合用水和行洪等要求。宜采用连杆轮式水力自控翻板闸门和双支点水力自控翻板闸门(见图 4、图 5),门高不宜大于 5 m。



- | | |
|---------|-------------|
| 1——防护墩; | 6——滚轮(或定轮); |
| 2——面板; | 7——轮座; |
| 3——支腿; | 8——支墩; |
| 4——轨道; | 9——工作桥; |
| 5——连杆; | 10——底止水。 |

图 4 连杆轮式水力自控翻板闸门结构图



- | | |
|---------|---------|
| 1——限位墩； | 6——动滑轮； |
| 2——面板； | 7——定滑轮； |
| 3——支腿； | 8——轮座； |
| 4——直轨； | 9——支墩； |
| 5——导轨； | 10——止水。 |

图5 双支点水力自控翻板闸门结构图

6.5.1.2 翻板闸门宜用于山区、丘陵区中小河流的蓄水工程。对于有防洪排涝及控泄要求的工程，不宜采用翻板闸门。

6.5.1.3 行洪时，闸前堰上水深大于2倍闸门高度时，不宜选用翻板闸门。

6.5.1.4 在平原河道和受下游水位顶托的河段设置翻板闸门时，应进行水工模型试验论证。

6.5.1.5 翻板闸门不得承受冰的静压力。寒冷地区采用翻板闸门时，应根据气温及库水位变化等条件，选用水力射流、压缩空气吹泡等防冰冻措施。

6.5.1.6 对运行管理有自动化控制要求的河道，宜选用液压辅控式翻板闸门。

6.5.1.7 翻板闸坝枢纽应根据河床地形条件设置调节闸或泄洪冲砂闸。

6.5.2 翻板闸坝的布置

6.5.2.1 翻板闸门闸址选择应有利于枢纽工程总体布置，宜选择河道顺直、水流平稳河段。布置在水流流态复杂河段的翻板闸门或泄流量超过 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的翻板闸门工程应经水工模型试验验证。

6.5.2.2 在多支流汇合口下游河道上建闸时，闸址宜在交叉河口下游水流条件平顺处。

6.5.2.3 翻板闸门轴线布置应与河段水流方向垂直，闸总宽度应满足下泄设计、校核洪水要求。

6.5.2.4 翻板闸门与两岸连接布置，应使过闸水流平顺。上、下游翼墙与岸墩两端应平顺连接，其顺水流方向长度应根据进出闸水流条件和防冲刷要求确定。

6.5.3 翻板闸构造

6.5.3.1 翻板闸门堰型宜采用宽顶堰或梯形实用堰。堰顶高程应根据地形、地质、水位、流量、泥沙、施工及检修条件等确定，宜比上游河床地形平均高程提高 $0.5\ \text{m}$ ；堰顶宽度应满足翻板闸门安装和检修要求。

6.5.3.2 闸底板分段长度应与翻板闸门跨距相协调，底板分缝宜布置在翻板闸门接缝处。岩基上的底板分段长度不宜超过 $20\ \text{m}$ ；土基上的底板分段长度不宜超过 $35\ \text{m}$ 。

6.5.3.3 翻板闸门总布置宽度大于 $50\ \text{m}$ 时中间宜加隔墩，将翻板闸门分为若干联，每联翻板闸门宜为5扇~8扇。隔墩端头向上游延伸至面板前沿的距离不应小于 $3\ \text{m}$ 。

6.5.3.4 翻板闸门面板前可设置防护墩，门后底板或支墩应埋设翻板闸门检修拉锚固定结构。在翻板闸门支墩后宜设置检修工作通道，宽度宜为 $0.6\ \text{m}$ 。

6.5.3.5 液压辅控式翻板闸门支墩和闸底板宜设置专用管沟,预留管沟尺寸应满足液压油缸与油管连接安装要求及二期混凝土覆盖厚度。

6.5.3.6 液压控制系统的液压泵站及电气设备应布置在控制室内。控制室应留有必要的设备安装、维修空间和宽度不宜小于 0.8 m 的人行通道。电气设备应采取防尘、防潮、防盐雾、防冻和防风沙措施。

6.5.4 翻板门设计

6.5.4.1 翻板闸门启门水深宜取高于门顶 0.1 m~0.25 m,堰上闭门水深不宜低于 0.9 倍铅直门高,翻板闸门最大翻门角度不宜大于 80°。

6.5.4.2 翻板闸门宜采用装配式钢筋混凝土结构,装配构件宜由面板、支腿、支墩等组成,应满足强度、抗裂、耐久性等要求。

6.5.4.3 闸门面板应采用双悬臂梁结构型式,双支腿(纵梁)支撑。翻板闸门门体重心高度不宜大于 0.45 倍门体高度。

6.5.4.4 支墩应采用钢筋混凝土结构。预制支墩底部应嵌入基础杯口中,嵌入深度不应小于短边长度的 2 倍。

6.5.4.5 翻板闸门宜在闸墩设置通气孔对门下补气。通气孔底部宜布置于门后 1/3 门高处,通气孔顶高程应根据校核洪水位加安全超高确定。

6.5.4.6 滚轮材质宜为铸铁或铸钢、连杆宜为型钢、轨道宜为轨道钢或铸钢、主轴宜为 45 号钢、轮座宜为板材或铸钢、导轨板宜为球墨铸铁,钢构件满足结构强度要求。

6.5.4.7 翻板闸堰体应进行抗滑稳定、结构应力、渗透稳定、消能防冲等计算,同时应考虑闸门卡阻、检修等造成集中出流不利工况消能的影响。

6.5.5 翻板闸门泄流计算

6.5.5.1 水力自控翻板闸门能借助水力和闸门自重等条件自主完成闸门的启门、全开、回关动作。翻板闸门主要设计运转指标应符合下列要求:

- a) 闸门启动水位无特殊要求时,应取高出闸门关闭状态时门顶 0.1 m~0.25 m。
- b) 闸门全翻后面板倾角可根据固定堰高、河道陡缓和有无回水影响确定,应取 75°~80°。
- c) 回门力臂应取 0.08 m~0.16 m。

6.5.5.2 翻板闸门泄流为门上堰流、门下孔流的混合出流方式。翻板闸过闸流量可按堰流公式(14)~(17)计算。

$$Q = mcB\sqrt{2g}H_0^{1.5} \dots\dots\dots(14)$$

$$c = -0.560\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 + 1.554\left(\frac{S_1}{S_2}\right) - 0.041 \dots\dots\dots(15)$$

$$S_1 = B \times (H_2 - H \times \cos\alpha) \dots\dots\dots(16)$$

$$S_2 = H_2 \times B \dots\dots\dots(17)$$

当翻板闸门堰孔混合自由出流时,过闸流量系数 m 和修正系数 c 可按公式(18)~(19)计算。

- a) 进口边缘为圆角的宽顶堰:

当 $0 < H_1/H_2 < 3.0$ 时,

$$m = 0.32 + 0.01 \frac{3 - H_1/H_2}{0.46 + 0.75H_1/H_2} \dots\dots\dots(18)$$

当 $H_1/H_2 \geq 3.0$ 时, $m = 0.32$

- b) 进口边缘为直角的宽顶堰:

当 $0 < H_1/H_2 < 3.0$ 时,

$$m = 0.36 + 0.01 \frac{3 - H_1/H_2}{1.2 + 1.5H_1/H_2} \dots\dots\dots(19)$$

当 $H_1/H_2 \geq 3.0$ 时, $m = 0.36$

式中:

Q ——过闸流量, m^3/s ;

m ——宽顶堰流量系数;

c ——修正系数,考虑面板、支墩阻水以及侧收缩影响;

S_1 ——有门板阻水时的过流面积, m^2 ;

S_2 ——无门板阻水同水位时堰顶以上的过流面积, m^2 ;

B ——过流宽度, m ;

g ——重力加速度, $9.81 m/s^2$;

H_0 ——计入行近流速水头的堰上水头, m ;

H_1 ——堰高, m ;

H_2 ——堰上水深, m ;

H ——翻板闸门高度, m ;

α ——门体翻转与铅直方向夹角, ($^\circ$)。

7 泄水建筑物

7.1 溢洪道

7.1.1 一般规定

7.1.1.1 河岸式溢洪道布置可包括进水渠、控制段、泄槽、消能防冲设施及出水渠。

7.1.1.2 溢洪道布置应结合枢纽总体布置全面考虑,避免泄洪、发电等建筑物在布置上的相互干扰。

7.1.1.3 溢洪道布置应合理选择泄洪消能布置和型式,出口水流应与下游河道平顺连接,避免下泄水流对坝址下游河床和岸坡的严重淘刷,冲刷以及河道的淤积,保证枢纽其他建筑物的正常运行。

7.1.1.4 溢洪道的位置应选择有利的地形和地质条件,布置在岸边或垭口,并宜避免开挖而形成高边坡。

7.1.1.5 当两岸坝肩山势陡峻而布置上又需要较大的溢流前缘宽度时,可采用侧槽式或其他型式的进口。

7.1.1.6 溢洪道应布置在稳定的地基上,并应充分注意建库后水文地质条件的变化对建筑物及边坡稳定的不利影响。

7.1.1.7 溢洪道进、出口的布置,应使水流顺畅。溢洪道轴线宜取直线,如需转弯时,宜在进水渠或出水渠段内设置弯道。

7.1.1.8 当溢洪道靠近坝肩布置时,其布置及泄流不得影响坝肩及岸坡的稳定。

7.1.1.9 溢洪道的闸门启闭设备及基础抽排水设备,应设置备用电源,保证供电可靠。

7.1.1.10 当设有正常、非常溢洪道时,正常溢洪道的泄洪能力不应小于设计洪水标准下所要求的泄量。非常溢洪道宜采用开放式,非常溢洪道最大总下泄量不应超过坝址同频率的天然洪水。

7.1.2 溢洪道布置

7.1.2.1 进水渠布置应遵循下列原则:

- a) 选择有利的地形、地质条件;
- b) 在选择轴线方向时,应使进水顺畅;

- c) 进水渠较长时,宜在控制段之前设置渐变段,其长度视流速等条件确定,不宜小于 2 倍堰前水深;
- d) 渠道需转弯时,轴线的转弯半径不宜小于 4 倍渠底宽度,弯道至控制堰(闸)之间宜有长度不小于 2 倍堰上水头的直线段。

7.1.2.2 进水渠进口布置应因地制宜,使水流平顺入渠,体型宜简单。当进口布置在坝肩时,靠坝一侧应设置顺应水流的曲面导水墙,靠山一侧可开挖或衬护成规则曲面。当进口布置在坝口面临水库时,宜布置成对称或基本对称的喇叭口型式。

7.1.2.3 进水渠底顺水流方向收缩时,进水渠首、末端底宽之比宜在 1~3 之间,在与控制段连接处应与溢流前缘等宽,底板宜为平底或不大的反坡。

7.1.2.4 基岩上的进水渠道底可不衬护,当水头损失较大或不满足不冲流速要求时,是否衬护应通过经济比较确定。当基岩岩性差时,应进行衬护。

7.1.2.5 进水渠的直立导墙的平面弧线曲率半径不宜小于 2 倍渠道底宽,导墙顺水流方向的长度宜大于堰前水深的 2 倍,导墙墙顶高程应高于泄洪时最高库水位。紧靠土石坝坝体的进水渠,其导墙长度以挡住大坝坡脚为下限。距控制段 2 倍堰前水深距离以内的导墙,其墙顶应高出泄洪时最高库水位; 2 倍堰前水深长度以远的导墙,可设置为下潜式,其墙顶应超出坝面适当高度。

7.1.2.6 控制段设计应包括控制泄量的堰(闸)及两侧连接建筑物。控制堰(闸)轴线的选定应满足下列要求:

- a) 统筹考虑进水渠、泄槽、消能防冲设施及出水渠的总体布置要求。
- b) 满足建筑物对地基的强度、稳定性、抗渗性及耐久性的要求。
- c) 便于对外交通和两侧建筑物的布置。
- d) 当控制堰(闸)靠近坝肩时,应与大坝布置协调一致。
- e) 便于防渗系统的布置,堰(闸)与两岸(或大坝)的止水,防渗排水系统应形成整体。

7.1.2.7 控制堰的型式应根据地形地质条件、水力条件、运用要求,通过技术经济综合比较选定。堰型可选用开敞式或带胸墙孔口式的实用堰、宽顶堰、驼峰堰等型式。宜优先选用开敞式溢流堰。堰顶是否设置闸门,应从工程安全、洪水调度、水库运行、工程投资等方面论证确定。

7.1.2.8 侧槽式溢洪道的侧堰可采用实用堰,堰顶可不设闸门。侧槽断面宜采用窄深式梯形断面,靠山一侧边坡可根据基岩特性确定,靠堰一侧边坡可取 1 : 0.5~1 : 0.9。

7.1.2.9 闸墩的型式和尺寸应满足闸门(包括门槽)、交通桥和工作桥的布置,水流条件,结构及运行检修等要求。

7.1.2.10 控制堰(闸)的工作桥,交通桥布置,应根据闸门启闭设备、运行、观测、检修和交通等要求确定。当有防洪抢险要求时,交通桥与工作桥应分开设置,桥下净空应满足泄洪、排凌及排漂浮物的要求。

7.1.2.11 控制段的闸墩、胸墙或岸墙的顶部高程,在宣泄校核洪水时不应低于校核洪水位加安全超高值;挡水时应不低于设计洪水位或正常蓄水位加波浪的计算高度和安全超高值。当溢洪道紧靠坝肩时,控制段的顶部高程应与大坝坝顶高程协调一致。

7.1.2.12 泄槽的纵坡、平面及横断面布置,应根据地形地质条件及水力条件等进行经济技术比较确定。泄槽在平面上设置弯道时,宜满足下列要求:

- a) 横断面内流速分布均匀。
- b) 冲击波对水流扰动影响小。
- c) 在直线段和弯段之间,可设置缓和过渡段。
- d) 宜在弯道及缓和过渡段渠底设置横向坡。
- e) 矩形断面弯道的弯道半径宜采用 6~10 倍泄槽宽度,泄量大、流速高的泄槽,弯道参数宜通过水工模型试验确定。
- f) 泄槽纵坡宜大于水流的临界坡,当条件限制需要变坡时,纵坡变化不宜过多,且宜先缓后陡。

g) 泄槽横断面宜采用矩形断面。当结合岩石开挖采用梯形断面时,边坡不宜缓于 1:1.5,并注意由此引起的流速不均匀问题。

7.1.2.13 溢洪道消能防冲设施的型式应根据地形地质条件、泄流条件、运行方式、下游水深及河床抗冲能力,消能防冲要求,下游水流衔接及对其他建筑物影响等因素通过技术经济比较选定。河岸式溢洪道可采用挑流消能或底流消能,亦可采用面流、戽流或其他消能型式。

7.1.2.14 挑流消能可用于岩石地基的高、中水头枢纽,溢洪道挑流消能设施的平面型式可采用等宽式、扩散式、收缩式。挑流鼻坎可选用连续式、差动式和各种异型鼻坎等。当采用挑流消能时,应慎重考虑挑射水流的雾化和多泥沙河流的泥雾对枢纽其他建筑物及岸坡的安全和正常运行的影响。遇有下列情况时,应采取措施妥善处理:

- a) 地基中存在延伸至下游的缓倾角软弱结构面及断层破碎带,有可能被冲坑切断,危及建筑物的安全。
- b) 岸坡有可能被冲塌,危及坝肩稳定,堵塞出水渠或下游河道。
- c) 下游涌浪及回流危及大坝与其他建筑物的安全和正常运行。

7.1.2.15 底流消能可用于各种地基,或对流态有严格要求的枢纽。底流消能设施可采用平底式、斜坡式、扩散式、收缩式等消力池及各种型式的辅助消能工。必要时可设多级消力池,并应注意泥沙磨蚀问题。

7.1.2.16 面流消能可用于下游尾水大于跃后水深且水位变幅不大,河床及两岸在一定范围内有较高的抗冲能力,或有排冰要求的枢纽。

7.1.2.17 消力戽或戽式消能工可用于下游水深大于跃后水深,下游河床及两岸有一定抗冲能力的枢纽,有排泄漂浮物要求时不宜采用。消力戽下游宜设置导墙。

7.1.2.18 当溢洪道下泄水流经消能后不能直接泄入河道而造成危害时,应设置出水渠。选择出水渠线路应经济合理,其轴线方向应顺应下游河势。出水渠宽度应使水流不过分集中,并应防止折冲水流对河岸有危害性的冲刷。

7.1.3 水力设计

7.1.3.1 溢洪道水力设计宜包括泄流能力计算、水流边界体形设计、水面线及压坡线计算、弯道水力计算、消能防冲水力设计、高速水流区防空蚀设计。溢洪道的水力设计应满足下列要求:

- a) 泄流能力应满足设计和校核工况下所要求的泄量。
- b) 体型合理、简单,水流平顺、稳定,并避免发生空蚀。
- c) 下泄水流流态及水流应满足对河床的冲淤要求。

7.1.3.2 进水渠水力设计应使渠内水流平顺、稳定,水面波动及横向水面比降小,并应避免回流和漩涡。

7.1.3.3 进水渠中的设计流速应大于悬移质不淤流速,小于渠道不冲流速,且水头损失较小。渠道设计流速宜采用 3 m/s~5m/s。

7.1.3.4 渠道水面线可由引水渠首部到位于堰前 3~5 倍堰上水头处的控制断面之间建立能量方程,用分段求和法计算。

7.1.3.5 开敞式实用堰(包括正堰和侧堰),堰顶下游堰面宜优先采用 WES 型幂曲线,堰顶上游堰头可采用双圆弧、三圆弧或椭圆曲线。

7.1.3.6 当选择低实用堰时,宜取上游堰高 $P1 \geq 0.3H_d$,下游堰高 $P2 \geq 0.6H_d$, H_d 为堰面曲线的定型设计水头。堰面曲线下接直线段,坡度宜陡于 1:1。

7.1.3.7 当堰顶以上最大水头与孔口高度的比值 $H_{\max}/D > 2$ 时,或闸门全开仍属孔口泄流时,孔口下游堰面曲线宜采用抛物线。胸墙底缘可采用椭圆、圆弧或其他型式。

7.1.3.8 堰高小于 3 m 的低堰,可采用宽顶堰或驼峰堰。

7.1.3.9 实用堰堰顶附近堰面压力应符合下列规定:

- a) 对于常遇洪水闸门全开情况,堰面不应出现负压。
 - b) 对于设计洪水闸门全开情况,堰顶附近负压值不得大于 0.03 MPa。
 - c) 对于校核洪水闸门全开情况,堰顶附近负压值不得大于 0.06 MPa。
- 7.1.3.10 实用堰末端与泄槽连接的反弧半径 R 可取 3 倍~6 倍反弧最低点最大水深,流速大时取大值。
- 7.1.3.11 泄槽段的水面线,应根据能量方程用分段求和法计算。计算中应正确确定起始计算断面及其水深。
- 7.1.3.12 当泄槽水流掺气时,应考虑水流掺气后的水深。
- 7.1.3.13 当泄槽段内布置收缩段时,收缩角小于 6° 可不进行冲击波验算,否则应进行急流冲击波验算。
- 7.1.3.14 当泄槽在平面上布置弯道时,应计算弯道段横向水位差。
- 7.1.3.15 侧槽溢洪道中侧槽段水力设计应满足下列要求:
- a) 侧槽底坡 i ,应取单一坡度,且小于按侧槽末端断面临界水深 h_{ke} 计算出的临界底坡 i_{ke} 。在宣泄设计流量时,槽内应为缓流。
 - b) 侧槽首端断面水深超过堰顶的高度 h_s 应小于堰上水头 H_0 的一半,保证侧槽内为非淹没出流。
 - c) 侧槽首、末端断面底宽比 b_u/b_e 可采用 0.5~1.0。
 - d) 侧槽内和槽末断面处均不得产生水跃,槽末宜设调整段,不宜紧接收缩段、弯道段。调整段长度 L_2 可采用 $(2\sim3)h_{ke}$,底坡宜水平。尾部升坎高度 d 可采用 0.1~0.2 倍泄槽首端断面临界水深 h_k 。
 - e) 侧槽段横向水面差应限制在一定范围内,靠山一侧水面壅高 Δh 宜取平均水深 h 的 10%~25%。
- 7.1.3.16 泄槽段底坡变化处,应采用曲线连接。当底坡由缓变陡时,可采用抛物线连接;当底坡由陡变缓时,可采用圆弧连接,圆弧半径 R 可采用 3~6 倍变坡处的断面水深 h ,流速大者宜取用大值。当泄槽段设置掺气减蚀设施时,在其保护范围内,变坡处的连接方式可不受上述限制。
- 7.1.3.17 泄槽段边墙高度,应根据计入波动及掺气后的水面线,再加上 0.5 m~1.5 m 的超高。对于收缩(扩散)段,弯道段等水力条件比较复杂的部位,宜取大值。
- 7.1.3.18 挑流消能水力设计应对各级流量进行系列计算。安全挑距、水舌入水宽度、允许最大冲坑深度的确定应不影响鼻坎基础、两岸岸坡的稳定及保证相邻建筑物的安全。冲刷坑上游坡度,应根据地质情况确定,宜在 1:3~1:6 之间选用。同时,还应考虑贴壁流和跌流的冲刷及其防护措施。
- 7.1.3.19 挑流鼻坎段反弧半径 R 可采用反弧最低点最大水深 h 的 6 倍~12 倍,对于泄槽底坡较陡,反弧段内流速及单宽流量较大者,反弧半径宜取大值。
- 7.1.3.20 挑流鼻坎挑角,可采用 $15^\circ\sim35^\circ$ 。当采用差动式鼻坎时,应合理选择反弧半径、高低坎宽度比、高程差及挑角差。
- 7.1.3.21 挑流鼻坎高程选定应保证能形成自由挑流情况,可略低于下游最高水位。
- 7.1.3.22 底流消能防冲的水力设计应满足下列要求:
- a) 保证消力池内形成低淹没度稳定水跃,并应避免产生两侧回流。
 - b) 消力池宜采用等宽的矩形断面。
 - c) 当跃前断面平均流速超过 16 m/s~18 m/s 时,池内不宜设置趾墩、消力墩等辅助消能工。
- 7.1.3.23 底流消能的水力设计应对各级流量进行计算,确定池底高程、池长及尾坎布置等。消力池两侧边墙高度,可根据跃后水深加适当超高确定。当消力池的出池水流流速超过基岩的允许抗冲流速时,或当消力池下游河床为非岩基时,应设置防冲齿墙、海漫、防冲槽等保护措施。
- 7.1.3.24 出水渠水流应平顺、稳定,不产生冲刷破坏。
- 7.1.3.25 应重视溢洪道的防空蚀设计。对于容易发生空蚀的部位和区域,可采用下列防空蚀措施:
- a) 选择合理的体型。

- b) 控制水流边界壁面的局部不平整度,包括混凝土施工中留下的接缝错台,模板印痕,钢筋头,混凝土表面的凹凸不平及其他突体,跌坎等。
- c) 当流速超过 35 m/s 时应设置掺气减蚀设施。
- d) 选用合理的运行方式。
- e) 采用抗蚀性能好的材料。

7.1.3.26 在多泥沙河流上,应同时考虑挟沙水流对边壁的磨损与空蚀的联合作用。选用抗蚀耐磨性能好的材料,当采用掺气减蚀设施时,应论证泥沙磨损及淤堵问题。

7.1.4 结构设计

7.1.4.1 溢洪道的混凝土结构应考虑温度应力的影响,并根据当地的气候条件、结构特点、地基约束等因素采取必要的结构措施和施工措施。

7.1.4.2 基岩上的进水渠渠底可不衬护。当渠底需要衬护时,可采用混凝土护面、浆砌块石或干砌块石等。

7.1.4.3 底板衬护厚度可按构造要求确定。混凝土衬砌厚度可取为 300 mm,必要时还应进行抗渗和抗浮稳定验算。

7.1.4.4 控制堰(闸)的结构型式,可采用分离式或整体式。分离式宜用于岩性比较均匀的地基,整体式适用于地基均匀性较差的情况。分离式底板的横缝(顺水流向),根据应力传递要求可选用铅直式、台阶式、倾斜式或键槽式。控制段范围内的结构缝,均应设置止水设施。分离式底板应校核其抗浮稳定性,必要时应采取排水和锚固等措施。

7.1.4.5 泄槽底板的厚度不应小于 0.3 m。可采取防渗、排水、止水、锚固等必要的工程措施。泄槽底板应设置结构缝,其位置应满足结构布置要求。其纵、横缝间距可采用 10 m~15 m,分缝宜设止水。

7.1.4.6 泄槽底板的纵、横缝宜可采用平缝。当地基不均匀性明显时,横缝宜采用半搭接缝、全搭接缝或键槽缝。对于可能发生不均匀沉陷或不设锚筋的泄槽底板,宜在板块上游端设置齿槽。并采用上下游板块的全搭接横缝。

7.1.4.7 挑流鼻坎不宜设垂直水流向的结构缝。

7.1.4.8 消力池护坦应进行抗浮稳定复核。当护坦设置锚筋时,宜将锚筋向上延伸并与护坦表层钢筋网连接。

7.1.4.9 护坦分缝间距宜与泄槽底板分缝间距相同。缝中宜设止水。垂直水流向的缝宜采用半搭接缝或键槽缝,顺水流向的缝宜采用键槽缝。

7.1.4.10 溢洪道进水渠、控制段、泄槽、挑流鼻坎及消力池的两侧挡土或不挡土的导墙、边墙或贴坡式边墙,宜设置结构缝与底板分开。边墙设计应进行抗滑稳定、基底正应力和基底合力偏心距的核算,必要时还应核算其抗倾稳定。

7.1.4.11 当消能设施出口区地质条件较差时,可根据消能型式设置防淘齿墙、翼墙、二道坝、海漫或防冲槽等设施。

7.1.5 地基处理设计

7.1.5.1 溢洪道的地基处理设计应结合建筑物的结构和运用特点,满足各部位对承载能力、抗滑稳定、地基变形、渗流控制、抗冲及耐久性的要求。

7.1.5.2 溢洪道重要部位的地基宜开挖至弱风化的中部至上部岩层。不衬砌的泄槽应开挖至坚硬、完整的新鲜或微风化岩层。对易风化、易泥化的基岩,应提出相应的施工保护措施。

7.1.5.3 对于岩层较差的地基还可采取加固措施改善地基条件,并通过技术经济比较确定开挖深度。

7.1.5.4 建筑物的基坑形状应根据地形地质条件及上部结构要求确定,开挖面宜连续平顺。控制段的基坑宜略向上游倾斜,若受地形地质条件限制,高差过大或略向下游倾斜时,可开挖成带钝角的台阶状。

7.1.5.5 溢洪道地基固结灌浆的范围和深度应根据岩石的破碎程度、风化深度、裂隙大小和基础应力情况确定。固结灌浆宜在混凝土浇筑后进行。

7.1.5.6 溢洪道地基的防渗、排水设施的布置应满足下列要求:

- a) 减少堰(闸)基的渗漏和绕渗;
- b) 防止在软弱夹层,断层破碎带,岩体裂隙软弱充填物及其他抗渗变形性能差的地基中产生渗透破坏;
- c) 降低建筑物基底的扬压力;
- d) 具有可靠的连续性和足够的耐久性;
- e) 防渗帷幕不得设置在建筑物底面的拉应力区;
- f) 在严寒地区,排水设施应防止冰冻破坏。

7.1.5.7 堰(闸)基及其两岸的防渗措施宜采用水泥灌浆帷幕,也可根据条件采用混凝土齿墙、防渗墙、水平防渗板或其组合措施。必要时应进行帷幕灌浆试验。

7.1.5.8 控制段防渗帷幕的范围及深度应遵守下列规定:

- a) 当地基下存在着明显的相对隔水层时,一般帷幕应伸入到该隔水层内 2 m~3 m。相对隔水层透水率的控制标准为小于 5 Lu。
- b) 当地基的相对隔水层埋藏较深或分布无规律时,可在 0.3~0.7 倍堰(闸)建基面以上最大水深范围内选择。遇透水性强的破碎带,应适当增加帷幕的深度和厚度。
- c) 防渗帷幕伸入岸坡的范围、深度及走向应根据水文地质、工程地质条件确定,宜延伸至正常蓄水位与相对隔水层范围线(或与蓄水前地下水位线)相交处。
- d) 靠近坝肩的溢洪道,其帷幕应与大坝帷幕衔接,形成整体防渗系统。

7.1.5.9 帷幕灌浆孔宜设一排,对地质条件较差,岩体破碎,裂隙发育或可能发生渗透变形地段,可增加至两排,且与第一排灌浆孔相间布置。帷幕灌浆的孔距可取为 1.5 m~3.0 m,排距宜略小于孔距。帷幕钻孔方向宜采用铅直或略向上游倾斜,应使钻孔尽量穿过岩体的层面和主要裂隙,但不宜倾向下游。

7.1.5.10 帷幕灌浆应在有一定厚度混凝土盖重及固结灌浆后进行。灌浆压力可通过试验确定,帷幕孔表层段不宜小于 0.2 MPa~0.5 MPa,孔底段不宜小于 0.4 MPa~0.8 MPa,以不抬动岩体为原则。

7.1.5.11 泄槽底板下的排水设施,应根据具体条件布置:

- a) 泄槽底板下,宜设纵、横向排水沟(管),构成互相贯通的沟(管)网系统。
- b) 软弱岩基、底板下扬压力过大或不便设锚筋的地段,可设连续的排水垫层或垫层与排水沟(管)相结合。
- c) 纵横排水沟(管)的间距宜与底板纵横缝相对应,但不宜骑缝布置。

7.2 水闸

7.2.1 一般规定

7.2.1.1 闸室结构可根据泄流特点和运行要求,选用开敞式、胸墙式、涵洞式或双层式等结构型式。整个闸室结构的重心应尽可能与闸室底板中心相接近,且偏高水位一侧。选用原则应按照下列规定:

- a) 闸槛高程较高,挡水高度较小的水闸,可采用开敞式。
- b) 闸槛高程较低,挡水高度较大的水闸,可采用胸墙式或涵洞式。

7.2.1.2 松软地基上的水闸结构选型布置应符合下列要求:

- a) 闸室结构布置匀称,重量轻,整体性强,刚度大。

- b) 相邻分部工程的基底压力差小。
- c) 选用耐久、能适应较大不均匀沉降的止水型式和材料。
- d) 适当增加底板长度和埋置深度。

7.2.1.3 冻胀性地基上水闸结构选型布置应符合下列要求：

- a) 闸室结构整体性强，刚度大。
- b) 冻胀土地基上的水闸，其基础埋深不小于基础设计冻深。
- c) 在满足地基承载力要求的情况下，减小闸室底部与冻胀土的接触面积。
- d) 在满足防渗、防冲和水流衔接条件的情况下，缩短进出口长度。
- e) 适当减小冬季暴露的水闸铺盖、消力池底板等底部结构的分块尺寸。

7.2.1.4 地震区水闸结构选型布置应符合下列要求：

- a) 闸室结构布置匀称、重量轻、整体性强、刚度大。
- b) 降低工作桥排架高度、减轻其顶部重量，并加强排架柱与闸墩和桥面结构的抗剪连接。
- c) 在闸墩上分缝，并选用耐久、能适应较大变形的止水型式和材料。
- d) 加强地基与闸室底板的连接，并采取有效的防渗措施。
- e) 适当降低边墩(岸墙)后的填土高度，减少附加荷载。
- f) 上游防渗铺盖采用混凝土结构，并适当布筋。

7.2.2 闸室布置

7.2.2.1 开敞式闸室结构可根据地基条件及受力情况等选用整体式或分离式。涵洞式闸室结构不宜采用分离式。

7.2.2.2 水闸闸顶高程应根据挡水和泄水两种运用情况确定：

- a) 挡水时，闸顶高程不应低于水闸正常蓄水位(或最高挡水位)加波浪计算高度与相应安全超高值之和；
- b) 泄水时，闸顶高程不应低于设计洪水位(或校核洪水位)与相应安全超高值之和。

7.2.2.3 闸槛高程应根据河(渠)底高程、水流、泥沙、闸址地形、地质、闸的施工、运行等条件，结合选用的堰型、门型及闸孔总净宽等经技术经济比较确定。

7.2.2.4 闸孔总净宽应根据泄流特点、下游河床地质条件和安全泄流的要求，结合闸孔孔径和孔数的选用，经技术经济比较后确定。

7.2.2.5 闸孔孔径应根据闸的地基条件、运用要求、闸门结构型式、启闭机容量、以及闸门的制作、运输、安装等因素，进行综合分析确定。闸孔孔数少于 8 孔时，宜采用单数孔。

7.2.2.6 一般情况下，闸室底板宜采用平底板；在松软地基上且荷载较大时，也可采用箱式平底板。

7.2.2.7 闸室底板厚度应根据闸室地基条件、作用荷载及闸孔净宽等因素，经计算并结合构造要求确定。

7.2.2.8 闸室结构垂直水流向分段长度(即顺水流向永久缝的缝距)应根据闸室地基条件和结构构造特点，结合考虑采用的施工方法和措施确定。

7.2.2.9 对坚实地基上或采用桩基的水闸，可在闸室底板上或闸墩中间设缝分段；对软弱地基上或地震区的水闸，宜在闸墩中间设缝分段。

7.2.2.10 岩基上水闸的分段长度不宜超过 20 m，土基上水闸的分段长度不宜超过 35 m。永久缝的构造型式可采用铅直贯通缝，斜搭接缝或齿形搭接缝，缝宽可采用 20 mm~30 mm。

7.2.2.11 闸墩外形轮廓设计应能满足过闸水流平顺，侧向收缩小，过流能力大的要求。上游墩头可采用半圆形，下游墩头宜采用流线形。

7.2.2.12 闸墩厚度应根据闸孔孔径、受力条件、结构构造要求和施工方法等确定。平面闸门闸墩门槽处最小厚度不宜小于 0.4 m。

7.2.2.13 工作闸门门槽应设在闸墩水流较平顺部位,其宽深比宜取 1.6~1.8。根据管理维修需要设置的检修闸门门槽,其与工作闸门门槽之间的净距离不宜小于 1.5 m。

7.2.2.14 闸门结构的选型布置应根据其受力情况、控制运用要求、制作、运输、安装、维修条件等,结合闸室结构布置合理选定。露顶式闸门顶部应在可能出现的最高挡水位以上有 0.3 m~0.5 m 的超高。

- a) 挡水高度和闸孔孔径均较大,需由闸门控制泄水的水闸宜采用弧形闸门。
- b) 当永久缝设置在闸室底板上时,宜采用平面闸门。
- c) 有排冰或过木要求的水闸,宜采用平面闸门或下卧式弧形闸门;多泥沙河流上的水闸,不宜采用下卧式弧形闸门。
- d) 检修闸门应采用平面闸门或叠梁式闸门。

7.2.2.15 工作桥、检修便桥和交通桥的梁(板)底高程均应高出最高洪水位 0.5 m 以上;若有流冰,应高出流冰面以上 0.2 m。

7.2.3 防渗排水布置

7.2.3.1 水闸防渗排水布置应根据闸基地质条件和水闸上、下游水位差等因素,结合闸室、消能防冲和两岸连接布置进行综合分析确定。

7.2.3.2 均质土地基上的水闸闸基轮廓线应根据选用的防渗排水设施,经合理布置确定。初步拟定的闸基防渗长度应满足公式(20)的要求。

$$L = C\Delta H \dots\dots\dots(20)$$

式中:

- L ——闸基防渗长度,即闸基轮廓线防渗部分水平段和垂直段长度的总和,m;
- ΔH ——上、下游水位差,m;
- C ——允许渗径系数值。

7.2.3.3 当闸基为中壤土、轻壤土或重砂壤土时,闸室上游宜设置钢筋混凝土或粘土铺盖,或土工膜防渗铺盖,闸室下游护坦底部应设滤层。粘土铺盖的渗透系数应比地基土的渗透系数小 100 倍以上。

7.2.3.4 当闸基为较薄的壤土层,其下卧层为深厚的相对透水层时,应验算覆盖土层抗渗、抗浮的稳定性。必要时可在闸室下游设置深入相对透水层的排水井或排水沟,并采取防止被淤堵的措施。

7.2.3.5 当闸基为粉土、粉细砂、轻砂壤土或轻粉质砂壤土时,闸室上游宜采用铺盖和垂直防渗体(钢筋混凝土板桩、水泥砂浆帷幕、高压喷射灌浆帷幕、混凝土防渗墙、土工膜垂直防渗结构等)相结合的布置形式,垂直防渗体宜布置在闸室底板的上游端。在震区粉细砂地基上,闸室底板下布置的垂直防渗体宜构成四周封闭的形式。粉土、粉细砂、轻砂壤土或轻粉质砂壤土地基除应保证渗流平均坡降和出逸坡降小于允许值外,在渗流出口处(包括两岸侧向渗流的出口处)应设置级配良好的滤层。

7.2.3.6 当闸基为较薄的砂性土层或砂砾石层,其下卧层为深厚的相对不透水层时,闸室底板上游端宜设置截水槽或防渗墙,闸室下游渗流出口处应设滤层。截水槽或防渗墙嵌入相对不透水层深度不应小于 1.0m。当闸基砂砾石层较厚时,闸室上游可采用铺盖和悬挂式防渗墙相结合的布置形式,闸室下游渗流出口处应设滤层。当闸基为粒径较大的砂砾石层或粗砾夹卵石层时,闸室底板上游端宜设置深齿墙或深防渗墙,闸室下游渗流出口处应设滤层。

7.2.3.7 当闸基为薄层粘性土和砂性土互层时,铺盖前端宜加设一道垂直防渗体,闸室下游宜设排水沟或排水浅井,并采取防止被淤堵的措施。

7.2.3.8 当闸基为岩石地基时,可根据防渗需要在闸室底板上游端设水泥灌浆帷幕。

7.2.3.9 闸室底板的上、下游端均宜设置齿墙,齿墙深度可采用 0.5 m~1.5 m。

7.2.3.10 铺盖长度可根据闸基防渗需要确定,宜采用上、下游最大水位差的 3~5 倍。

- a) 混凝土或钢筋混凝土铺盖最小厚度不宜小于 0.4 m,其顺水流向的永久缝缝距可采用 8 m~20 m,靠近翼墙的铺盖缝距宜采用小值,缝宽可采用 20 mm~30 mm。
- b) 粘土或壤土铺盖的厚度应根据铺盖土料的允许水力坡降值计算确定。其前端最小厚度不宜小于 0.6 m,逐渐向闸室方向加厚。铺盖上面应设保护层。
- c) 防渗土工膜厚度应根据作用水头,膜下土体可能产生裂隙宽度,膜的应变和强度等因素确定。但不宜小于 0.5 mm,土工膜上应设保护层。
- d) 在寒冷和严寒地区,混凝土或钢筋混凝土铺盖应适当减小永久缝缝距,粘土或壤土铺盖应适当加大厚度,并应避免冬季暴露于大气中。

7.2.3.11 钢筋混凝土板桩最小厚度不宜小于 0.2 m,宽度不宜小于 0.4 m,板桩之间应采用梯形榫槽连接。水泥砂浆帷幕或高压喷射灌浆帷幕的最小厚度不宜小于 0.1 m,混凝土防渗墙最小厚度不宜小于 0.2 m。地下垂直防渗土工膜厚度不宜小于 0.25 mm;采用复合土工膜,其厚度不宜小于 0.5 mm。

7.2.4 消能防冲布置

7.2.4.1 水闸闸下宜采用底流式消能。其消能设施的布置型式应满足下列要求:

- a) 当闸下尾水深度小于跃后水深时,可采用下挖式消力池消能。消力池可采用斜坡面与闸底板相连接,斜坡面的坡度不宜大于 1:4。
- b) 当闸下尾水深度略小于跃后水深时,可采用突槛式消力池消能。
- c) 当闸下尾水深度远小于跃后水深,且计算消力池深度又较深时,可采用下挖式消力池与突槛式消力池相结合的综合式消力池消能。
- d) 当水闸上、下游水位差较大,且尾水深度较浅时,宜采用二级或多级消力池消能。
- e) 下挖式消力池,突槛式消力池或综合式消力池后均应设海漫和防冲槽(或防冲墙)。
- f) 消力池内可设置消力墩,消力梁等辅助消能工。

7.2.4.2 当水闸闸下尾水深度较深,且变化较小,河床及岸坡抗冲能力较强时,可采用面流式消能。

7.2.4.3 当水闸承受水头较高,且闸下河床及岸坡为坚硬岩体时,可采用挑流式消能。

7.2.4.4 在夹有较大砾石的多泥沙河流上的水闸,不宜设消力池,可采用抗冲耐磨的斜坡护坦与下游河道连接,末端应设防冲墙。在高速水流部位,尚应采取抗冲磨与抗空蚀的措施。

7.2.4.5 对于大型多孔水闸,可根据需要设置隔墩或导墙进行分区消能防冲布置。

7.2.4.6 海漫应具有一定的柔性、透水性、表面粗糙性,其构造和抗冲能力应与水流流速相适应。海漫宜做成等于或缓于 1:10 的斜坡,末端应设防冲槽(或防冲墙),海漫下面应设垫层。

7.2.4.7 水闸上、下游护坡和上游护底工程布置应根据水流流态、河床土质抗冲能力等因素确定。护坡长度应大于护底(海漫)长度。护坡、护底下面均应设垫层。必要时,上游护底首端宜增设防冲槽(或防冲墙)。

7.2.5 两岸连接布置

7.2.5.1 水闸两岸连接应能保证岸坡稳定,改善水闸进、出水流条件,提高泄流能力和消能防冲效果,满足侧向防渗需要,减轻闸室底板边荷载影响,且有利于环境绿化等。两岸连接布置应与闸室布置相适应。

7.2.5.2 水闸两岸连接宜采用直墙式结构;当水闸上、下游水位差不大时,也可采用斜坡式结构,但应考虑防渗、防冲和防冻等问题。在坚实或中等坚实的地基上,岸墙和翼墙可采用重力式或扶壁式结构;在

松软地基上,宜采用空箱式结构。岸墙与边闸墩的结合或分离,应根据闸室结构和地基条件等因素确定。

7.2.5.3 当闸室两侧需设置岸墙时,若闸室在闸墩中间设缝分段,岸墙宜与边闸墩分开;若闸室在闸底板上设缝分段,岸墙可兼作边闸墩,并可做成空箱式。对于闸孔数较少,不设永久缝的非开敞式闸室结构,也可以边闸墩代替岸墙。

7.2.5.4 上、下游翼墙宜与闸室及两岸岸坡平顺连接。上游翼墙的平面布置宜采用圆弧式或椭圆弧式,下游翼墙的平面布置宜采用圆弧(或椭圆弧)与直线组合式或折线式。在坚硬的粘土和岩石地基上,上、下游翼墙可采用扭曲面与岸坡连接的型式。

7.2.5.5 上游翼墙顺水流方向的投影长度应大于或等于铺盖长度。下游翼墙的平均扩散角每侧宜采用 $7^{\circ}\sim 12^{\circ}$,其顺水流方向的投影长度应大于或等于消力池长度。在有侧向防渗要求的条件下,上、下游翼墙的墙顶高程应分别高于上、下游最不利的运用水位。

7.2.5.6 翼墙分段长度应根据结构和地基条件确定。建筑在坚实或中等坚实地基上的翼墙分段长度可采用 $15\text{ m}\sim 20\text{ m}$;建筑在松软地基或回填土上的翼墙分段长度可适当减短。

7.2.6 水力设计

7.2.6.1 水闸的水力设计内容应包括闸孔总净宽计算、消能防冲设施的设计计算、闸门控制运用方式的拟定。

7.2.6.2 进行水力设计时,应考虑到水闸建成后上、下游河床可能发生淤积或冲刷,以及闸下水位的变动等情况对过水能力和消能防冲设施产生的不利影响。

7.2.6.3 水闸的过闸单宽流量应根据下游河床地质条件,上、下游水位差,下游尾水深度,闸室总宽度与河道宽度的比值,闸的结构构造特点和下游消能防冲设施等因素选定。

7.2.6.4 水闸的过闸水位差应根据上游淹没影响,允许的过闸单宽流量和水闸工程造价等因素综合比较选定。平原区水闸的过闸水位差可采用 $0.1\text{ m}\sim 0.3\text{ m}$ 。

7.2.6.5 水闸闸下消能防冲设施应在各种可能出现的水力条件下,都能满足消散动能与均匀扩散水流的要求,且应与下游河道有良好的衔接。

7.2.6.6 底流式消能设计应根据水闸的泄流条件(特别是始流条件)进行水力计算,确定消力池的深度、长度和底板厚度等。

7.2.6.7 面流式消能设计应根据水闸的各级流量和可能组合的相应水位进行水力计算,选定跌坎高度、坎顶仰角、反弧半径和跌坎长度等,并研究解决防止闸基淘刷和下游两岸岸坡冲刷问题。

7.2.6.8 挑流式消能设计应根据水闸的各级流量进行水力计算,选定挑流鼻坎坎顶高程、反弧半径和挑角等,计算下泄水流的挑射距离及最大冲坑深度,并采取必要的防护措施。

7.2.6.9 海漫的长度应根据可能出现的不利的水位,流量组合情况进行计算确定。

7.2.6.10 下游防冲槽的深度应根据河床土质、海漫末端单宽流量和下游水深等因素综合确定。且不应小于海漫末端的河床冲刷深度。

7.2.6.11 上游防冲槽的深度应根据河床土质、上游护底首端单宽流量和上游水深等因素综合确定。且不应小于上游护底首端的河床冲刷深度。

7.2.6.12 闸门的控制运用应根据水闸的水力设计或水工模型试验成果,规定闸门的启闭顺序和开度,避免产生集中水流或折冲水流等不良流态。闸门的控制运用方式应满足下列要求:

- a) 闸孔泄水时,保证在任何情况下水跃均完整地发生在消力池内。
- b) 闸门尽量同时均匀分级启闭。如不能全部同时启闭,可由中间孔向两侧分段,分区或隔孔对称启闭,关闭时与上述顺序相反。

- c) 对分层布置的双层闸孔或双扉闸门应先开底层闸孔或下扉闸门,再开上层闸孔或上扉闸门,关闭时与上述顺序相反。
- d) 严格控制始流条件下的闸门开度,避免闸门停留在振动较大的开度区泄水。
- e) 关闭或减小闸门开度时,避免水闸下游河道水位降落过快。

7.2.7 防渗排水设计

7.2.7.1 水闸的防渗排水设计应根据闸基地质情况,闸基和两侧轮廓线布置及上、下游水位条件等进行。其内容应包括:渗透压力计算、抗渗稳定性验算、滤层设计、防渗帷幕及排水孔设计、永久缝止水设计。

7.2.7.2 岩基上水闸基底渗透压力计算可采用全截面直线分布法,但应考虑设置防渗帷幕和排水孔时对降低渗透压力的作用和效果。

7.2.7.3 土基上水闸基底渗透压力计算可采用改进阻力系数法或流网法;复杂土质地基上的重要水闸,应采用数值计算法。

7.2.7.4 当岸墙、翼墙墙后土层的渗透系数小于或等于地基土的渗透系数时,侧向渗透压力可近似地采用相对应部位的水闸闸底正向渗透压力计算值,但应考虑墙前水位变化情况和墙后地下水补给的影响;当岸墙、翼墙墙后土层的渗透系数大于地基土的渗透系数时,可按闸底有压渗流计算方法进行侧向绕流计算。

7.2.7.5 验算闸基抗渗稳定性时,要求水平段和出口段的渗流坡降应分别小于土体相应的允许渗流坡降值。

7.2.7.6 岩基上水闸基底帷幕灌浆孔宜设单排,孔距宜取 1.5 m~3.0 m,孔深宜取闸上最大水深的 0.3 倍~0.7 倍。帷幕灌浆应在有一定厚度混凝土盖重及固结灌浆后进行。灌浆压力应以不掀动基础岩体为原则,防渗帷幕体透水率的控制标准不宜大于 5 Lu。

7.2.7.7 帷幕灌浆孔后排水孔宜设单排,其与帷幕灌浆孔的间距不宜小于 2.0 m。排水孔孔距宜取 2.0 m~3.0 m,孔深宜取帷幕灌浆孔孔深的 0.4 倍~0.6 倍,且不宜小于固结灌浆孔孔深。

7.2.7.8 位于防渗范围内的永久缝应设一道止水,止水的型式应能适应不均匀沉降和温度变化的要求。止水材料应耐久,垂直止水与水平止水相交处应构成密封系统。

7.2.8 结构设计

7.2.8.1 水闸结构设计应根据结构受力条件及工程地质条件进行,其内容应包括:

- a) 荷载及其组合。
- b) 闸室和岸墙、翼墙的稳定计算。
- c) 结构应力分析。

7.2.8.2 当水闸部分结构采用砌石时,选用的条石或块石应能抗风化,冻融损失率应小于 1%,单块重量不宜小于 30 kg,砌筑砂浆强度等级不应低于 M7.5。砌石结构应采取有效的防渗排水措施;严寒、寒冷地区水闸砌石结构还应采取保温防冻措施。

7.2.8.3 动峰值加速度 $\geq 0.1g$ 以上地震区的水闸除应认真分析地震作用和做好抗震计算外,尚应采取安全可靠的抗震措施。

7.2.8.4 作用在水闸上的荷载包括:自重、水重、静水压力、扬压力、土压力、泥沙压力、风压力、浪压力、冰压力、地震荷载、其他可能出现的荷载。可分为基本荷载和特殊荷载两类。设计水闸时,应将可能同时作用的各种荷载进行组合,可按表 16 采用。必要时还可考虑其他可能的不利组合。

表 16 水闸计算荷载组合表

荷载组合	计算情况	荷载											说明	
		自重	水重	静水压力	扬压力	土压力	淤沙压力	风压力	浪压力	冰压力	土冻胀力	地震荷载		其他
基本组合	完建情况	√	—	—	—	√	—	—	—	—	—	—	√	必要时,可考虑地下水产生的扬压力
	正常蓄水位情况	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	√	按正常蓄水位组合计算水重,静水压力,扬压力及浪压力
	设计洪水位情况	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	—	按设计洪水位组合计算水重,静水压力,扬压力及浪压力
	冰冻情况	√	√	√	√	√	√	√	—	√	√	—	√	按正常蓄水位组合计算水重,静水压力,扬压力及冰压力
特殊组合	施工情况	√	—	—	—	√	—	—	—	—	—	—	√	应考虑施工过程中各个阶段的临时荷载
	检修情况	√	—	√	√	√	√	√	√	—	—	—	√	按正常蓄水位组合(必要时可按设计洪水位组合或冬季低水位条件)计算静水压力,扬压力及浪压力
	校核洪水位情况	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	—	—	按校核洪水位组合计算水重,静水压力,扬压力及浪压力
	地震情况	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	√	—	按正常蓄水位组合计算水重,静水压力,扬压力及浪压力

7.2.8.5 闸室稳定计算宜取两相邻顺水流向永久缝之间的闸段作为计算单元。

7.2.8.6 土基上的闸室稳定计算应满足下列要求：

- 在各种计算情况下,闸室平均基底应力不大于地基允许承载力,最大基底应力不大于地基允许承载力的 1.2 倍；
- 闸室基底应力的最大值与最小值之比应满足表 17 允许值规定；
- 沿闸室基底面的抗滑稳定安全系数应不小于安全允许值(基本组合 1.20,特殊组合 1.0~1.05)。

表 17 土基上闸室基底应力最大值与最小值之比的允许值

地基土质	荷载组合	
	基本组合	特殊组合
松软	1.50	2.00
中等坚实	2.00	2.50
坚实	2.50	3.00

7.2.8.7 岩基上的闸室稳定计算应满足下列要求：

- 在各种计算情况下,闸室最大基底应力不大于地基允许承载力。
- 在非地震情况下,闸室基底不出现拉应力;在地震情况下,闸室基底拉应力不大于 100 kPa。
- 沿闸室基底面的抗滑稳定安全系数应不小于安全允许值(按纯摩公式计算:基本组合 1.05,特

殊组合 1.0;按抗剪断公式计算,基本组合 3.0,特殊组合 2.5)。

7.2.8.8 闸室基底应力应根据结构布置及受力情况,分别按下列规定进行计算:

a) 当结构布置及受力情况对称时,按公式(21)计算:

$$P_{\max/\min} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \dots\dots\dots(21)$$

式中:

- $P_{\max/\min}$ —— 闸室基底应力的最大值或最小值, kPa;
- $\sum G$ —— 作用在闸室上的全部竖向荷载(包括闸室基础底面上的扬压力在内), kN;
- $\sum M$ —— 作用在闸室上的全部竖向和水平向荷载对于基础底面垂直水流方向的形心轴的力矩, kN·m;
- A —— 闸室基底面的面积, m²;
- W —— 闸室基底面对于该底面垂直水流方向的形心轴的截面矩, m³。

b) 当结构布置及受力情况不对称时,按公式(22)计算:

$$P_{\max/\min} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M_x}{W_x} \pm \frac{\sum M_y}{W_y} \dots\dots\dots(22)$$

式中:

- $\sum M_x, \sum M_y$ —— 作用在闸室上的全部竖向和水平向荷载对于基础底面形心轴 x, y 的力矩, kN·m;
- W_x, W_y —— 闸室基底面对于该底面形心轴 x, y 的截面矩, m³。

7.2.8.9 土基上沿闸室基底面的抗滑稳定安全系数 k_c 应按公式(23)或(24)计算:

$$K_c = \frac{f \sum G}{\sum H} \dots\dots\dots(23)$$

$$K_c = \frac{\text{tg}\varphi_0 \sum G + C_0 A}{\sum H} \dots\dots\dots(24)$$

式中:

- K_c —— 沿闸室基底面的抗滑稳定安全系数;
- f —— 闸室基底面与地基之间的摩擦系数;
- $\sum H$ —— 作用在闸室上的全部水平向荷载, kN;
- φ_0 —— 闸室基础底面与土质地基之间的摩擦角, (°);
- C_0 —— 闸室基底面与土质地基之间的粘结力, kPa。

7.2.8.10 岩基上沿闸室基底面的抗滑稳定安全系数,应按公式(23)或公式(25)计算:

$$K_c = \frac{f' \sum G + C' A}{\sum H} \dots\dots\dots(25)$$

式中:

- f' —— 闸室基底面与岩石地基之间的抗剪断摩擦系数;
- C' —— 闸室基底面与岩石地基之间的抗剪断粘结力, kPa。
- k —— 当闸室承受双向水平向荷载作用时,应验算其合力方向的抗滑稳定性。

7.2.8.11 在没有试验资料的情况下,闸室基底面与地基之间的摩擦系数 f 值,可根据地基类别按表 18 所列经验数值选用。

表 18 闸室基底面与地基之间的摩擦系数 f 经验值

地基类别		f
粘土	软弱	0.20~0.25
	中等坚硬	0.25~0.35
	坚硬	0.35~0.45
壤土,粉质壤土		0.25~0.40
砂壤土,粉砂土		0.35~0.40
细砂,极细砂		0.40~0.45
中砂,粗砂		0.45~0.50
砂砾石		0.40~0.50
砾石,卵石		0.50~0.55
碎石土		0.40~0.50
软质岩石	极软	0.40~0.45
	软	0.45~0.55
	较软	0.55~0.60
硬质岩石	较坚硬	0.60~0.65
	坚硬	0.65~0.70

7.2.8.12 闸室基底面与土质地基之间摩擦角 φ_0 值及粘结力 C_0 值,可根据土质地基类别按表 19 采用。

表 19 φ_0, C_0 值(土质地基)

土质地基类别	φ_0	C_0
粘性土	0.9φ	$(0.2\sim 0.3)C$
砂性土	$(0.85\sim 0.9)\varphi$	0

7.2.8.13 闸室基底面与岩石地基之间的抗剪断摩擦系数 f' 值及抗剪断粘结力 C' 值可根据室内岩石抗剪断试验成果,并参照表 20 所列数值选用。

表 20 f', C' 值(岩石地基)

岩石地基类别		f'	C' (MPa)
硬质岩石	坚硬	1.5~1.3	1.5~1.3
	较坚硬	1.3~1.1	1.3~1.1
软质岩石	较软	1.1~0.9	1.1~0.7
	软	0.9~0.7	0.7~0.3
	极软	0.7~0.4	0.3~0.05

7.2.8.14 当闸室设有两道检修闸门或只设一道检修闸门,利用工作闸门与检修闸门进行检修时,应进行抗浮稳定计算。在基本荷载组合条件下,闸室抗浮稳定安全系数不应小于 1.10;在特殊荷载组合条件

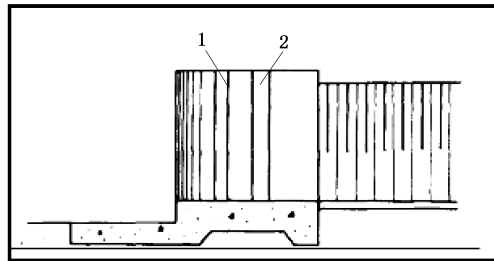
下,闸室抗浮稳定安全系数不应小于 1.05。

8 引水建筑物

8.1 进水口

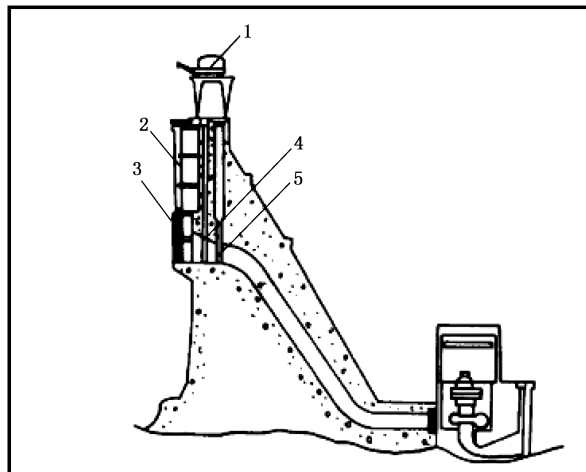
8.1.1 进水口型式及其适用范围应符合以下要求:

- a) 开敞式进水口宜用于无压引水式电站,进水口前缘水位变化幅度小。
- b) 河床式进水口宜用于河床式水电站,为厂房建筑物的组成部分。
- c) 坝式进水口宜用于各种混凝土坝、砌石坝。
- d) 岸式进水口宜用于有压引水式电站,按其结构特点和闸门位置可分为岸塔式、竖井式和岸坡式。岸塔式进水口宜适用于地质条件不利于将喇叭口设在岸边岩体内。竖井式进水口宜适用于岩体完整、稳定且便于对外交通的岸坡。岸坡式进水口适用条件与竖井式进水口同。



- 1——检修闸门槽;
- 2——工作闸门槽。

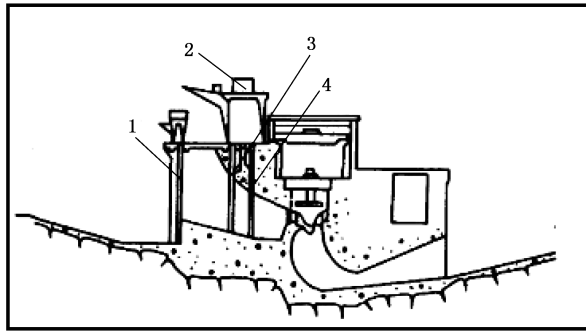
a) 开敞式进水口



- 1——启闭机;
- 2——拦污栅框架;
- 3——拦污栅;
- 4——检修闸门槽;
- 5——事故闸门槽。

b) 坝式进水口

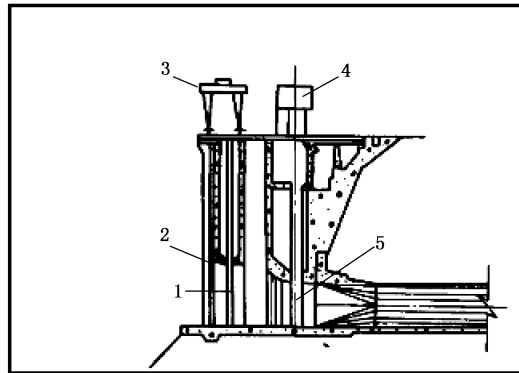
图 6 进水口型式



- 1——拦污栅；
- 2——启闭机；

- 3——检修闸门槽；
- 4——事故闸门槽。

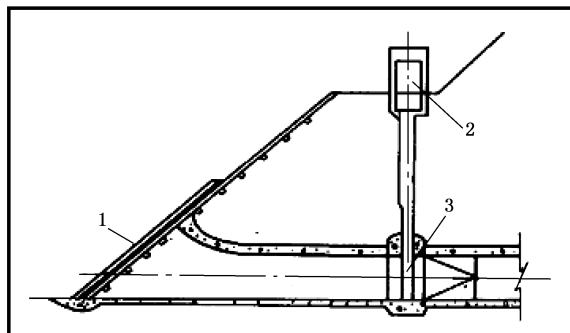
c) 河床式进水口



- 1——检修闸门槽；
- 2——拦污栅；
- 3——门机；

- 4——启闭机房；
- 5——事故闸门槽。

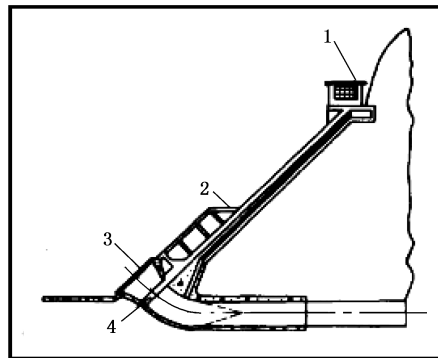
d) 岸塔式进水口



- 1——拦污栅；
- 2——启闭机房；
- 3——事故闸门槽。

e) 竖井式进水口

图 6 (续)



- 1——启闭机房；
- 2——清污台；
- 3——拦污栅；
- 4——事故闸门槽。

f) 岸坡式进水口

图 6 (续)

8.1.2 进水口的组成应满足下列规定：

- a) 进水口宜包括拦污段、入口段、闸门段、渐变段和上部结构，同时还应设有充水孔和通气孔。多泥沙、多污物河流和严寒地区的水电站，还应分别建造专门的防沙、防污或防冰建筑物。
- b) 进水口应设置拦污栅、闸门、启闭机、清污和观测设施。

8.1.3 进水口的布置应遵从下列原则：

- a) 在各级运行水位下，进水口应水流畅顺、流态平稳、进流匀称和尽量减少水头损失，并按运行需要引进所需流量或中断进水。
- b) 进水口应避免产生贯通式漏斗漩涡。否则，应采取消涡措施。
- c) 进水口所需的设备应齐全，闸门和启闭机应操作灵活可靠，充水、通气和交通设施应畅通无阻。
- d) 多泥沙河流上的进水口，应设置有效的防沙措施，防止泥沙淤堵进水口，避免推移质进入引水系统。
- e) 多污物河流上的进水口，应设置有效的导污、排污和清污措施，防止大量污物汇集于进水口前缘堵塞拦污栅影响电站运行。
- f) 严寒地区的进水口，应有必要的防冰措施。

8.1.4 进水口防沙、防污和防冰应满足下列要求：

- a) 多泥沙河流在选择枢纽位置、进行总体布置、设置泄洪建筑物和拟定水库运行方式时，都应把防沙问题放在重要地位予以考虑。进水口防沙设计综合采取导沙、拦沙、排沙、沉沙、冲沙等措施，并满足下列要求：
 - 1) 导沙：枢纽布置上应促使水、沙分离，引水排沙，将泥沙导离进水口。
 - 2) 拦沙：设置拦沙坎，将推移质泥沙阻拦在进水口前缘。
 - 3) 排沙：优化水库调度运行方案，将进水口前的泥沙排往下游。
 - 4) 沉沙：设置沉沙池，将悬移质泥沙沉淀在沉沙池内。
 - 5) 冲沙：优化水库调度运行方案，将沉沙池内的泥沙冲往下游。
- b) 多污物河流上的进水口不宜正对携带污物的主流。进水口防污设计综合采取导污、排污和拦污等措施。拦污设施应兼顾清污和引水的要求。

- 1) 导污:通过导墙设置,将污物导离进水口。
 - 2) 排污:优化水库调度运行方案,将进水口前的污物排往下游。
 - 3) 拦污:在进水口前缘设置拦污栅和清污平台,通过清污机将污物进行清理。
 - 4) 拦污栅孔口面积由过栅流速控制,过栅流速可采用 $0.8\text{ m/s}\sim 1.2\text{ m/s}$ 。
- c) 冰冻区进水口布置应避免流冰的直接撞击,优化水库调度运行方式,限制流冰的产生。进水口防冰设计采用导冰和排冰等措施。

8.1.5 无压引水系统宜采用开敞式进水口,开敞式进水口设计应满足下列要求:

- a) 进水口宜选在“稳定河段”上,并靠近主槽布置,不应布置在河床过宽、主流分散的河段上。不应在含有大量推移质的支流或山沟的汇口附近设置进水口。进水口应避免容易聚积污物的回流区,并应避免流冰或漂木的直接撞击。
- b) 进水口若以防沙为主,其位置宜选在弯曲河段的凹岸,最有利的位置为弯道顶点的下游附近;若以防污或防冰为主,宜选在直河段。
- c) 进水口上游引渠的两岸翼墙应平顺布置,确保引水水流平顺。
- d) 进水口孔口尺寸应根据运行水头和设计流量,考虑孔口流速、闸门尺寸系列和启闭机容量等选定。
- e) 进水口应保证在上游最低运行水位时能够引进发电所需流量。
- f) 进水口的底板高程应结合防沙、排沙设施确定,以防止推移质进入引水道。
- g) 进水口水力计算应包括引水流量计算。

8.1.6 有压引水系统宜采用岸式进水口,岸式进水口设计应满足下列要求:

- a) 进水口应结合地形地质条件进行选择。高地震区不宜设置塔式进水口。
- b) 进水口应充分利用有利地形,减少土石方开挖量,尽量避免高边坡开挖。应选择良好的地质地段,保证地基可靠,山坡稳定。
- c) 进水口应保证在上游最低运行水位以下有足够的淹没深度。
- d) 进水口的底板高程应满足防沙要求,高出孔口前缘水库冲淤平衡高程,或设在排沙漏斗范围以内、沉沙高程之上。
- e) 进水口入口段过水边界的外形宜采用接近流线型的曲线,也可选用圆弧曲线。
- f) 进水口的孔口面积宜不宜小于后接引水道的面积。
- g) 进水口闸门段宜设置工作闸门、事故闸门和检修闸门。上述闸门设置种类由进水口型式、引水道类型和长度、引水道是否装有闸阀、以及对进水口下游建筑物的保护要求而定。充水阀门的设置应便于操作、检查和维修。
- h) 进水口闸门后应设置通气孔。通气孔上口应和闸门操作室分开,通向室外,偏离人员活动场所,高于上游最高库水位。若上口通向挡水建筑物下游时,应考虑事故喷水不致危及厂区安全。当闸门为前止水时,宜可利用闸门井作通气孔,但应使其出口通气良好。
- i) 进水口与有压引水道连接宜采用渐变收缩型。渐变段长度不宜小于 $1.0\sim 2.0$ 倍引水道宽度(或洞径)。
- j) 进水口的水力计算包括进水口的水头损失、通气孔面积、管道充水时间等。水头损失包括拦污栅、入口、门槽、渐变段等局部损失和沿程损失。

8.1.7 进水口结构计算应满足下列要求:

- a) 进水口建筑物应按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行计算和验算。
 - 1) 承载能力极限状态:包括建筑物整体抗滑、抗浮和抗倾稳定计算,建基面基础岩体抗压承载力计算,抗震承载力计算。

2) 正常使用极限状态:按材料力学方法进行进水口建基面上、下游拉应力验算。进水口基础上游面标准组合下的垂直正应力不出现拉应力,下游面可允许有不大于 100 kPa 的拉应力。

- b) 进水口的结构应具有足够的稳定、强度、刚度和耐久性。
- c) 坝式进水口应根据运行条件、坝体荷载和应力分布分段计算孔口应力。
- d) 岸塔式进水口的塔座和塔身结构可分别按弹性地基上的倒框架和框架计算。
- e) 开敞式进水口的闸孔可按弹性地基上倒框架或弹性地基板设计。
- f) 塔式进水口应进行整体抗浮稳定计算。塔身根据外形轮廓可按圆筒或框架设计;塔座可按弹性地基板或弹性地基上倒框架设计。
- g) 在各种荷载组合情况下,岸式和塔式进水口地基表面承受的最大垂直正应力应小于地基允许压应力;最小垂直正应力应大于 0。必要时应复核地基深层应力。

8.1.8 进水口地基处理应满足下列要求:

- a) 岩基上的进水口应置于可供利用的基岩上,对局部断裂发育、软弱夹层和不稳定的岩石地基应进行挖除或加固处理,能够满足承载能力、抗滑稳定和沉陷变形等方面的要求。
- b) 岸式进水口的山坡应进行清理、整治和设置地表排水。对局部不稳定岩体应当挖除或加固处理。
- c) 软基上的进水口,应采取对应措施进行基础处理。

8.2 引水隧洞和调压室

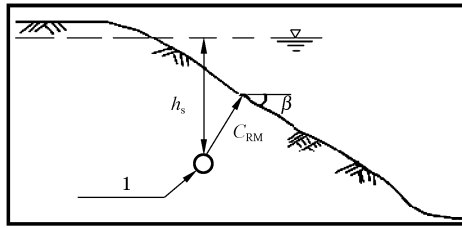
8.2.1 隧洞和调压室布置应满足下列原则:

- a) 隧洞线路选择应当满足水力枢纽总布置的要求。
- b) 引水隧洞的线路,应根据隧洞的用途,综合考虑地形、地质、水力学、施工、运行、沿线建筑物、枢纽总布置以及对周围环境的影响等各种因素,通过可能方案的技术经济比较选定。
- c) 在满足水力枢纽总布置要求的条件下,洞线宜选在沿线地质构造简单、岩体完整稳定、岩石坚硬、上覆岩层厚度大、水文地质条件有利及施工方便的地区。
- d) 洞线与岩层、构造断裂面及主要软弱带应尽量具有较大的夹角。在整体块状结构的岩体中,其夹角不宜小于 30°。在层状岩体中,特别是层间结合疏松的高倾角薄岩层,其夹角不宜小于 45°。
- e) 高地应力地区的隧洞,从围岩稳定考虑,宜使洞线与最大水平地应力方向一致或尽量减小其夹角。
- f) 洞顶以上和傍山隧洞岸边一侧岩体的最小覆盖厚度,应根据地形地质条件、隧洞断面形状及尺寸、施工成洞条件、内水压力、衬砌型式、围岩渗透特性、结构计算成果等因素,综合分析确定。有压隧洞洞身的岩体最小厚度可按公式(26)计算。并应保证围岩不产生渗透失稳和水力劈裂。

$$C_{RM} = \frac{F \gamma_w h_s}{\gamma_R \cos\alpha} \dots\dots\dots(26)$$

式中:

- C_{RM} —— 岩体最小覆盖厚度(不包括全、强风化厚度),m;
- h_s —— 洞内静水压力水头,m;
- γ_w —— 水的容重,kN/m³;
- γ_R —— 岩体容重,kN/m³;
- α —— 河谷岸边边坡倾角,(°),当 $\alpha > 60^\circ$ 时,取 $\alpha = 60^\circ$;
- F —— 经验系数,可取 1.3~1.5。



1——高压管道。

图7 地下埋管上覆围岩厚度计算

- g) 相邻两隧洞间岩体的厚度不宜小于二倍的洞径(或洞宽)。岩体较好时,可适当减小,但不应小于一倍洞径(或洞宽)。
- h) 洞线穿过坝基、坝肩或其他建筑物地基时,建筑物与隧洞间应有足够的岩体厚度,以满足结构和防渗上的要求。
- i) 洞线遇有沟谷时,应根据地形、地质、水文及施工条件,进行绕沟或跨沟方案的技术经济比较。当采用跨沟方案时,应合理选择跨沟位置,对跨沟建筑物地基、隧洞的连接部位及其洞脸山坡,应加强工程措施。
- j) 洞线在平面上应尽可能布置为直线。当采用曲线时,对于无压隧洞的弯曲半径,不宜小于5倍的洞径(或洞宽),转角不宜大于 60° ,有压隧洞可适当降低要求。在弯道的首尾应设置直线段,其长度不宜小于5倍洞径(或洞宽)。
- k) 洞身设置竖曲线时,无压隧洞的竖曲线半径不宜小于5倍的洞径(或洞宽),有压隧洞可适当降低要求。在布置竖曲线时,应方便施工
- l) 洞身段的纵坡,应根据运用要求、上下游衔接、沿线建筑物底部高程、以及施工和检修条件等,通过技术经济比较选定。沿程纵坡不宜变化过多,不宜设置平坡,避免设置反坡。
- m) 有压隧洞不应出现明满流交替的流态,在最不利运行条件下,全线洞顶处的最小压力水头不应小于2 m。
- n) 选择较长隧洞洞线时,应考虑设置施工支洞的问题。支洞的数目及长度,应根据沿线地形、地质条件、施工方法、对外交通情况,并有利于均衡各段隧洞的工程量及工期的要求等,分析决定。
- o) 有压引水隧洞的调压室设置,应在机组调节保证计算和运行条件分析的基础上,考虑水电站在电力系统中的作用、地形、地质、隧洞布置等因素,经技术经济比较后确定。调压室的位置宜靠近厂房,位置选择时宜避开不利的地质条件,以减轻渗水对围岩及边坡稳定的不利影响。
- p) 调压室选型应满足:
 - 1) 能有效地反射由压力管道传来的水击波;
 - 2) 在无限小负荷变化时,能保持稳定;
 - 3) 大负荷变化时,水面振幅小,波动衰减快。

8.2.2 隧洞和调压室结构要求应满足下列要求:

- a) 隧洞横断面形状和尺寸,应根据隧洞的用途、水力条件、工程地质条件、地应力情况、衬砌工作条件、施工方法等因素,通过技术经济分析决定。
- b) 发电引水隧洞常采用有压隧洞。当上游水位变化不大、引用流量比较稳定时,也可采用无压隧洞。
- c) 有压隧洞宜采用圆形断面。若洞径和内、外水压力不大,也可采用更便于施工的其他断面形状。
- d) 无压隧洞宜采用圆拱直墙式断面,圆拱中心角为 $90^\circ \sim 180^\circ$,当需要加大拱端推力时,也可选用

小于 90° 的中心角。断面的高宽比,应根据水力条件及地质条件选用,宜为 $1\sim 1.5$ 。洞内水位变化较大时,宜采用大的比值。若地质条件较差时,可选用圆形或马蹄型断面。

- e) 断面的高宽比,尚应与地应力条件相适应,若水平地应力大于垂直地应力时,可采用高度较小而宽度较大的断面;若垂直地应力大于水平地应力时,可采用高度较大而宽度较小的断面。
- f) 对较长的隧洞,可采用多种断面形状或衬砌型式,但不宜过多过密。不同断面或衬砌型式之间应设置渐变段。渐变段的边界应采用平缓曲线,并要便于施工。有压隧洞渐变段的圆锥角以采用 $6^\circ\sim 10^\circ$ 为宜,其长度不小于 $1.5\sim 2.0$ 倍洞径(或洞宽),两渐变段之间的长度不宜过短。
- g) 发电隧洞的横断面尺寸,应根据隧洞工程费用和能量损失费用之和为最低的原则分析决定。
- h) 考虑到施工的需要,横断面的最小尺寸:圆形断面的内径不宜小于 1.8 m ,非圆形断面的高度不宜小于 1.8 m ,宽度不宜小于 1.5 m 。对于超过 1.5 km 以上的隧洞洞宽宜大于 2.2 m 。
- i) 在低流速的无压隧洞中,若通气条件良好,在恒定流条件下,洞内水面线以上的空间不宜小于隧洞断面面积的 15% ,其高度不应小于 0.4 m 。在非恒定流条件下,计算中已考虑了涌波时,上述数值允许适当减小,对较长的隧洞和不衬砌或喷锚衬砌的隧洞,上述数值可适当增加。
- j) 调压室位置宜设在地下,采用锚喷衬砌、混凝土衬砌、钢筋混凝土衬砌等。

8.2.3 水力计算应满足下列要求:

- a) 无压隧洞水力计算的内容有过流能力、上下游水流衔接、水面线等。
- b) 压力隧洞水力计算的内容有过流能力、水头损失、压坡线等。
- c) 水工隧洞的水头损失分沿程损失和局部损失两种,应分别进行计算。
 - 1) 沿程损失计算中选用的糙率系数 n 值,应根据施工能达到的水平、运用后可能的变化及其经济效益综合分析决定。
 - 2) 局部水头损失计算中采用的系数,可参照水力学资料分析决定。
- d) 隧洞的过流能力,应根据水流条件判定是有压隧洞还是及无压隧洞后计算。
 - 1) 有压隧洞:按管流情况计算。
 - 2) 无压隧洞:开敞式进口,按堰流情况计算;深式进口,按管流情况计算。
- e) 对于无压隧洞的水面线计算,首先判别水面线的类别,在选定控制断面后,可按分段求和法或其他方法计算。

8.2.4 隧洞支护和衬砌

8.2.4.1 隧洞支护和衬砌应满足下列一般规定:

- a) 隧洞支护应保持围岩稳定或提供必要的围岩稳定时间。支护型式包括锚杆、锚喷、钢拱架、钢筋网喷混凝土等。
- b) 隧洞衬砌包括锚喷衬砌、混凝土衬砌、钢筋混凝土衬砌等。隧洞衬砌应具备下列功能:
 - 1) 加固围岩,围岩和支护联合承担荷载;
 - 2) 平整围岩表面,减少糙率;
 - 3) 提高围岩防渗能力;
 - 4) 防止水流、大气、温度和湿度变化对围岩的冲刷和破坏作用。
- c) 隧洞衬砌结构计算的荷载,按其作用的情况,可分为基本荷载和特殊荷载两类,包括衬砌自重、围岩压力、地应力、内水压力、外水压力、灌浆压力、施工荷载和温度荷载、地震荷载等。作用于衬砌上的荷载,应根据上列两类荷载同时存在的可能性,分别组合为基本组合和特殊组合两类。
- d) 作用在衬砌上的围岩压力,应根据围岩条件、埋设深度、断面形状和尺寸、施工方法、开挖后的支撑条件、衬砌浇筑时间及施工中围岩应力重分布等因素分析决定。
 - 1) 对于 I 类围岩,设计衬砌时,可不计围岩的松动压力,但要根据隧洞的埋深情况,研究围岩的地应力。

2) 对于Ⅱ、Ⅲ类围岩,在隧洞开挖前可按公式(27)估算围岩松动压力:

$$q_v = (0.1 \sim 0.2)\gamma_R B \dots\dots\dots(27)$$

式中:

γ_R ——岩石容重, kN/m^3 ;

B ——隧洞的开挖宽度, m ;

q_v ——垂直均布围岩压力, kN/m^2 。

在隧洞开挖后应根据补充的地质资料,用块体平衡法或有限元法,分析作用于衬砌上的压力,进行必要的修正。

3) 对于Ⅳ、Ⅴ类围岩,可按松动介质平衡理论估算围岩压力。

4) 当采用喷锚支护或钢支撑加固围岩,使围岩已达稳定时,内衬砌混凝土或钢筋混凝土层可少计或不计围岩压力。

8.2.4.2 混凝土和钢筋混凝土衬砌隧洞应满足下列要求:

- a) 混凝土和钢筋混凝土的衬砌厚度,应根据强度、抗渗和构造要求,并结合施工方法分析决定。单筋混凝土衬砌厚度不宜小于 0.3 m;双层钢筋混凝土衬砌厚度不宜小于 0.4 m。
- b) 混凝土和钢筋混凝土衬砌,应根据围岩条件、防渗要求、隧洞工作状态和工程的重要性,提出抗裂或限裂的要求。仅为平整围岩表面而设置的衬砌,可不提此要求。
- c) 若隧洞衬砌开裂后,内水外渗将危及围岩和相邻建筑物的安全时,应按抗裂设计,否则可按限裂设计。按限裂设计时,最大计算裂缝宽度不应超过 0.2 mm~0.3 mm。水质有侵蚀性时,最大计算裂缝宽度不宜超过 0.15 mm~0.25 mm。如衬砌不易满足抗裂、限裂要求时,可采取其他措施。
- d) 对混凝土和钢筋混凝土衬砌,应根据需要提出混凝土的强度、抗渗的要求,其强度等级不宜低于 C20。
- e) 混凝土和钢筋混凝土衬砌,在地质条件明显变化处(如通过较大的断层、软弱破碎带等部位)和井、硐等交会处,或其他可能产生较大相对变位处,应设置变形缝,并采取相应的防渗措施。围岩地质条件比较均一的洞身段,只设置施工缝。
- f) 沿洞线的浇筑分段长度,应根据浇筑能力和温度收缩等因素分析决定。可采用 6 m~12 m。底拱和边、顶拱的环向缝不得错开。
- g) 对无压隧洞衬砌的环向施工缝,如无防渗要求时,分布筋可不穿过缝面,混凝土可不凿毛处理,也不设止水。对有压隧洞和有防渗要求的无压隧洞,衬砌的环向施工缝应根据具体情况,采取必要的接缝处理措施。
- h) 对于初砌中的纵向施工缝,应进行凿毛处理,并应设置在衬砌结构拉应力及剪应力较小的部位。当施工上需要先衬砌顶拱时,对于拱座反缝缝面应进行妥善处理。
- i) 钢筋混凝土衬砌和钢板衬护的连接应有一定搭接长度(按水头大小决定,最少不小于 1 m),并在钢板衬护上设置阻水环或其他防渗措施。对内水压力较高的有压隧洞,应研究在钢筋混凝土衬砌末端设置阻水帷幕和排水设施的必要性。

8.2.4.3 不衬砌与锚喷衬砌隧洞应满足下列要求:

- a) 位于完整、坚硬、渗透性小的岩体中的隧洞,当洞内水流不致冲刷破坏岩石,并且内水外渗不致影响相邻建筑物、围岩和山坡稳定时,可不作衬砌。不衬砌隧洞的进、出口和有特殊要求的洞段,应采用适当的加固措施。不衬砌隧洞的底部,应用混凝土抹平。不衬砌的发电引水隧洞,应设置集石坑,其位置、容积、深度和数目,可根据洞段的长度、地质条件、水力条件、清理条件确定。
- b) 对不衬砌隧洞的开挖如采用钻爆法施工时,应采用光面爆破的方法,对光面爆破的质量要求为:
 - 1) 径向超挖值和开挖岩面的起伏差均应小于 0.2 m。

- 2) 炮孔痕迹应在开挖轮廓面上均匀分布,炮孔痕迹保存率不应少于 70%。炮孔痕迹保存率,是残留有孔痕的炮孔个数与周边炮孔总数之比的百分数。
- 3) 围岩中不得有明显可见的爆震裂隙。
- 4) 不应有欠挖。
- c) 位于较完整、坚硬、但抗风化能力及抗渗性能较差的岩体中,且内水外渗不致恶化的围岩,造成不良后果的隧洞洞段,通过技术经济分析,可采用喷锚衬砌。
- d) 对于喷锚衬砌,可根据围岩条件、隧洞工作特点、喷锚衬砌的作用和要求,选用下列类型:
 - 1) 喷混凝土衬砌。
 - 2) 喷混凝土与锚杆组合式衬砌。
 - 3) 喷混凝土、锚杆与钢筋网组合式衬砌。
 - 4) 喷锚与混凝土或钢筋混凝土组合式衬砌。
- e) 喷层与围岩的粘结强度,在Ⅲ类及Ⅲ类以上围岩中不宜小于 0.8 MPa。喷混凝土衬砌厚度,不宜小于 50 mm,最大不宜超过 200 mm。喷混凝土抗压强度不宜低于 20 MPa。
- f) 对于稳定性较差的围岩,宜采用喷混凝土与锚杆组合式衬砌加固。遇有局部不稳定岩块,可采用悬吊式的砂浆锚杆加固,锚杆应垂直岩面布置,锚入稳定围岩的长度,宜为 40~50 倍锚杆直径,锚杆直径不宜小于 16 mm。对于整体稳定性较差的围岩,宜采用系统锚杆。锚杆直径不宜小于 16 mm,长度宜为 2 m~4 m,并应遵守下列规定:
 - 1) 应尽量垂直于主结构面布置,当主结构面不明显时,可与洞周边轮廓线垂直。
 - 2) 在围岩表面上的位置,宜呈梅花形排列。
 - 3) 锚杆间距不宜大于其长度的二分之一,对不良围岩,应不大于 1.25 m。
- g) 对于构造、裂隙发育的围岩,宜采用喷混凝土、锚杆与钢筋网组合式衬砌。对钢筋网的布置应符合下列规定:
 - 1) 钢筋网纵向钢筋直径宜为 6 mm~10 mm,环向钢筋直径宜为 6 mm~12 mm。
 - 2) 网格间距为 200 mm~300 mm。
 - 3) 钢筋网的喷混凝土保护层厚度不应小于 50 mm。
 - 4) 钢筋网与锚杆的连接宜用焊接法固定。
 - 5) 钢筋网的交叉点应绑扎牢固(建议隔点相焊,隔点相绑)。
- h) 喷锚隧洞的进、出口部位,闸室前后,应采用混凝土或钢筋混凝土衬砌,其长度根据具体条件决定,宜不应小于 2~3 倍洞径(或洞宽)。

8.2.4.4 隧洞衬砌的灌浆、防渗和排水应满足下列要求:

- a) 混凝土、钢筋混凝土衬砌的顶部,应进行回填灌浆。回填灌浆的范围、孔距、排距、灌浆压力及浆液浓度等,应根据衬砌结构的型式、隧洞的工作条件及施工方法等分析决定。
- b) 回填灌浆的范围,宜在顶拱中心角 90°~120°以内,孔距和排距宜为 2 m~6 m,灌浆压力宜为 0.2 MPa~0.3 MPa,灌浆孔应深入围岩 50 mm 以上。
- c) 围岩的固结灌浆应通过技术经济比较决定。固结灌浆的参数,可通过工程类比或现场试验决定。宜排距为 2 m~4 m,每排不宜少于 6 孔,作对称布置。深入围岩的孔深约为 1 倍隧洞半径。灌浆压力为 1.5~2.0 倍的内水压力。
- d) 隧洞的防渗和排水设计,应根据隧洞沿线围岩的工程地质、水文地质、设计条件,针对具体情况,综合分析选用堵(如衬砌、灌浆)、截(如设置防渗帷幕)、排(如排水孔和排水廊道)等措施,以改善衬砌结构和围岩的工作条件。
- e) 在无压隧洞中,可设置排水孔。排水孔的间距、排距、孔深等,根据水文地质条件分析决定。排距各宜为 2 m~4 m,孔深宜约深入岩层 2 m~4 m。
- f) 对于外水压力控制衬砌设计的有压隧洞,宜研究设置排水措施,以减低外水压力强度,但应注意避免内水外渗。

- g) 对于不衬砌和喷锚衬砌隧洞,在有压隧洞的出口部位;Ⅳ、Ⅴ类围岩的洞段,洞顶以上围岩覆盖厚度小于1倍内水压力水头处;傍山岸边一侧围岩厚度小于1.5倍内水压力水头处,应采取必要的防渗措施,并应注意围岩及山坡的失稳问题。

8.3 引水渠道与压力前池

8.3.1 一般规定

8.3.1.1 自动调节渠道渠堤顶高度沿渠长不变,渠底以一定坡度沿渠延伸,渠末不设溢流堰。自动调节渠道宜在进水口设置事故检修闸门。非自动调节渠道渠堤顶高程沿渠长降低,与渠底坡度一致,渠道末端压力前池中设有泄水建筑物,如溢流堰等。非调节渠道应在进水口设置工作闸门和检修闸门(或预留门槽)。

8.3.1.2 引水渠道型式的选择,应结合地形、地质、施工、运行以及枢纽总体布置等条件,经技术经济比较选定自动调节渠道、非自动调节渠道,或自动与非自动相结合的调节渠道。

8.3.1.3 符合下列条件可选择自动调节渠道:

- a) 渠道进水口水位变幅不大,渠道长度较短,渠底纵坡较缓,渠道大都处于挖方内。
- b) 无适宜于修建泄水建筑物的条件。
- c) 运行要求利用渠道积蓄水量作为水电站的调节容量。
- d) 引水渠道及前池的设计,应处理好防洪、防污、防渗漏、防泥沙以及防冻等方面的问题。
- e) 对靠近进水口的渠段,其堤外坡的防洪应根据泄洪情况确定防护范围和相应的工程措施。

8.3.2 渠道和压力前池布置原则

8.3.2.1 渠道线路尽量选用直线,并选择在挖填方基本平衡的地方,如果不能满足,则应尽量避免高填方和深挖方地带,转弯也不能过急。对于衬砌渠道,转弯半径不应小于 $2.5B$ (B 为渠道水面宽度);对于不衬砌渠道,转弯半径不应小于 $5B$ 。

8.3.2.2 在山区及丘陵地区,渠道线路应尽量沿等高线布置。当渠道通过山谷,山脊时,应对高填、深挖、绕线、渡槽、穿洞等方案进行比较,从中优选方案。渠道应与道路、河流正交。

8.3.2.3 渠道线路应尽量避免避开渗漏严重、流沙、泥泽、滑坡以及开挖困难的岩层地带。必要时,可进行多种方案比较,如采用外绕回填的办法避开滑坡地带,采取防渗措施,采用箱涵跨越流沙地段,采用混凝土或钢筋混凝土衬砌以保证渠道安全应用等。

8.3.2.4 为了改善施工条件,确保工程质量,应全面考虑施工时的交通运输、水及动力供应、机械施工场地、取土及弃土场地等条件。

8.3.3 渠道上建筑物布置

8.3.3.1 泄水建筑物宜采用侧堰型式。侧堰宜布置在前池内(或距前池较远处)或渠道跨冲沟处。

8.3.3.2 堰水力设计应满足下列要求:

- a) 引水渠道在设计流量下电站正常运行时,侧堰的堰顶高程应高于过境水流的水面高程 $0.1\text{ m}\sim 0.2\text{ m}$ 。
- b) 堰顶长度、堰上平均水头,需经计算比较确定。
- c) 过堰水流应保持自由出流,堰后应因地制宜布置侧槽或陡槽泄水和必要的消能防冲设施。
- d) 堰型采用实用断面堰或梯形堰,也可采用真空剖面堰。
- e) 侧堰两侧导墙满足使水流保持平顺的要求。

8.3.3.3 为满足渠道检修要求,应设置放水孔。放水孔宜与排沙或灌溉、供水等设施相结合。

8.3.3.4 当渠道较长且沿途有较多污物进入渠道时,宜在适当部位增设拦污、清污设施。

8.3.3.5 对进入渠道的泥沙(主要是推移质),宜在渠道内设置排沙涡管等有效的排沙设施。

8.3.3.6 引水渠道沿线应设置必要的安全、交通等设施。

8.3.4 渠道纵坡及横断面设计

8.3.4.1 渠道纵断面设计包括:确定渠道纵坡、正常水位线、最低水位线、最高水位线、渠底高程线、渠道沿程地面高程线和堤顶高程线。

8.3.4.2 渠道纵坡选择时应注意以下几项原则:

- a) 地面坡度:渠道纵坡应尽量接近地面坡度。
- b) 地质情况:易冲刷的渠道,纵坡宜缓,地质条件较好的渠道,纵坡可适当陡一些。
- c) 流量大小:流量大时纵坡宜缓,流量小时可略陡些。
- d) 含沙量:水流含沙量小时,应注意防冲,纵坡宜缓;含沙量大时,应注意防淤,纵坡宜陡。
- e) 水头大小。

8.3.4.3 渠道的断面尺寸,应根据使用要求,通过水力计算确定。设计时应根据设计流量设计,按照加大流量校核。

8.3.4.4 合理的渠道断面设计,应满足以下几方面要求:

- a) 输水能力能够满足对用水量的需要。
- b) 水位能够满足自流灌溉的要求。
- c) 渠道水流流速,能够满足渠道不冲、不淤或周期性冲淤平衡的要求。
- d) 边坡,能够保证渠道安全运用。
- e) 断面形式,能够减少渗漏等损失,提高水利用系数。
- f) 宜满足综合利用要求,一专多能。
- g) 工程量尽可能少。

8.3.4.5 渠道的横断面形状,宜采用梯形。堤顶应有一定的宽度和超高。

8.3.4.6 水电站引水渠道的设计流速的选择范围:衬砌渠道宜选用 $1\text{ m/s}\sim 2\text{ m/s}$,土渠宜选用 $0.6\text{ m/s}\sim 0.9\text{ m/s}$ 。

8.3.4.7 水电站引水渠道应因地制宜、就地取材,选用耐久、防渗性能好的材料进行衬砌。

8.3.5 压力前池设计

8.3.5.1 压力前池包括前室及进水室、压力墙、泄水建筑物、冲沙、拦冰及排冰建筑物等组成。平面布置宜优先采用电站进水口中心线与引水渠道中心线相重合的正面进水方式。压力前池设计应满足下列要求:

- a) 进水室宜比渠道宽和深,应用渐变扩散段(前室)连接渠道与池身。
- b) 泄水建筑物应能保证前池水位不致漫溢堤顶。
- c) 拦冰、排冰道及冲沙廊道等应能防止泥沙及冰冻的危害。

8.3.5.2 压力前池布置应紧凑合理、水流顺畅、运行灵活可靠、结构安全经济。

8.3.5.3 压力前池宜布置在陡峭山坡的上部,应特别注意地基稳定及渗漏问题,保证前池稳定,宜靠近厂房。

8.3.5.4 道连接前池的平面扩散角 β 宜不大于 $10^\circ\sim 15^\circ$ 。

8.3.5.5 前室末端底板高度应比进水室底板高程低 $0.5\text{ m}\sim 1.0\text{ m}$ 。

8.3.5.6 当渠道中心线与压力水管中心轴线不一致时,可采用平缓的连接曲线和加设导流墙。前室宽约为进水室宽度的 $1.0\sim 1.5$ 倍,长度为宽度的 $2.5\sim 3.0$ 倍。

8.3.5.7 当压力管道为两根以上时,进水室应用隔墩分成各自独立的进水室,每个进水室都设有拦污栅、检修闸门、工作闸门、启闭设备、旁通管、通气孔和工作桥等。

8.3.6 水力计算

8.3.6.1 水力计算包括以下几项：

- a) 引水渠道-前池系统的恒定流和非恒定流的水力计算；
- b) 泄水建筑物的水利设计及消能计算；
- c) 排沙建筑物的水利设计和计算；
- d) 其他过水建筑物的水力计算。

8.3.6.2 渠道的设计流量应包括水电站的最大引水流量,以及计入渠道的渗漏、蒸发等损失的流量。必要时,可加大相应渠段的设计流量。

8.3.6.3 应以设计流量下水电站正常运行时的水位作为前池的正常水位。此时,渠道系统应在均匀流或接近均匀流状态下工作。

8.3.6.4 前池和渠道内的最高水位,应按照设计流量下正常运行时,水电站突然甩全部负荷时的最高涌波水位确定。对于自动调节渠道,经非恒定流计算所得出的渠末最高涌波水位;对非自动调节渠道,则是出现溢流堰下泄最大流量时的相应水位。

8.3.6.5 前池和渠道内的最低水位,按下列情况之一确定：

- a) 设计频率枯水期的最小引水发电流量,渠道正常运行时；
- b) 冬季有排冰运行要求时；
- c) 水轮机突然增加负荷,使前池中水位突然下降时的低水位,根据电站运行要求确定最低运行水位应保证进水室所要求的淹没深度。

8.3.6.6 水电站在设计流量正常运行条件下,对棱柱体渠道,应按明渠均匀流计算;对非棱柱体渠道,应按明渠恒定缓变流计算。

8.3.7 渠道防渗设计

8.3.7.1 渠道防渗材料宜包括土料、水泥土、砌石、膜料、沥青混凝土、混凝土等材料。其中灰土、三合土、四合土、水泥土宜用于温和地区的渠道防渗工程。

8.3.7.2 渠道防渗工程应贯彻因地制宜、就地取材的原则。应保证施工质量,满足防渗设计要求。同时应加强管理,保证设计使用年限,提高效益。

8.3.7.3 渠道防渗工程宜在温暖季节施工。

8.3.7.4 渠道防渗工程采用的土料,应符合表 21 规定。

表 21 防渗土料的技术要求

项目	粘性土、粘砂混合土防渗	灰土、三合土、四合土防渗	膜料防渗土保护层及过渡层	水泥土防渗
粘粒含量(%)	20~30	15~30	3~30	8~12
砂粒含量(%)	10~60	10~60	10~60	50~80
塑性指标 I_p	10~17	7~17	1~17	—
土粒最大粒径(mm)	<5	<5	<5	<5
有机质含量(%)	<3.0	<1.0	—	<2.0
可容岩含量(%)	<2.0	<2.0	<2.0	<2.5
钙质结核、树根、草根含量	不允许	不允许	不允许	不允许

8.3.7.5 土料参考配合比宜满足下列要求：

- a) 灰土的配合比宜可采用石灰：土=1：3~1：9。使用时，石灰用量还应根据石灰储放期的长短适量增减，其变动范围宜控制在±10%以内。
- b) 三合土的配合比宜采用石灰：土砂总重=1：4~1：9。其中，土重宜为土砂总重的30%~60%；高液限粘质土，土重不宜超过土砂总重的50%。
- c) 采用四合土时，可在三合土配合比的基础上加入25%~35%的卵石或碎石。
- d) 粘砂混合土中，高液限粘质土与砂石合重之比宜为1：1。

8.3.7.6 灰土、三合土等土料的最佳含水率，可按以下要求选择：

- a) 灰土可采用20%~30%；
- b) 三合土、四合土可采用15%~20%；
- c) 素土、粘砂混合土宜控制在塑限±4%范围内。

8.3.7.7 水泥土抗冻等级不宜低于F12。水泥用量宜为8%~12%，抗渗系数不大于 1×10^{-6} mm/s。

8.3.7.8 膜料宜选用厚度为0.2 mm~0.6 mm的深色塑膜。在寒冷和严寒地区，可优先选用聚乙烯膜。

8.3.7.9 渠道防渗结构的厚度宜按表22确定。

表 22 渠道防渗结构的适宜厚度

防渗结构类别		厚度(mm)
土料	粘土(夯实)	≥300
	灰土、三合土	100~200
水泥土		60~100
砌石	干砌卵石	100~300
	浆砌块石	200~300
	浆砌料石	150~250
	浆砌石板	>3
埋铺式膜料 (土料保护层)	塑料薄膜	0.02~0.06
	膜料下垫层(粘土、砂、灰土)	3~5
	膜料上土料保护层(夯实)	40~70
沥青混凝土	现场浇筑	5~10
	预制铺砌	5~8
混凝土	现场浇筑(无钢筋)	6~12
	现场浇筑(配置钢筋)	6~10
	预制铺砌	4~10
	喷射法施工	4~8

8.4 渠系建筑物

8.4.1 渡槽

8.4.1.1 渡槽布置应满足下列要求：

- a) 渡槽是渠道跨越河、沟、渠、路或洼地的明流架空输水建筑物，宜由进出口连接段、槽身、结构支承等组成，其工作情况及设计要求应满足整个引水工程规划设计的要求。

- b) 渡槽布置应根据地形、地质条件,工程规模和工程总体布置要求,经技术经济比较后确定。应能够缩短槽身长度,减少基础工程量,降低墩架高度。
- c) 渡槽轴线应短而直,进出口避免急转弯并应布置在挖方渠道上。
- d) 跨越河流的渡槽,槽址应稳定,水流顺直。

8.4.1.2 进出口段结构应满足下列要求:

- a) 进出口段布置应使渠道水流平顺地进入渡槽,避免冲刷和减小水头损失。
- b) 渡槽进出口前后的渠道上应有一定长度的直线段,与槽身平顺连接,在平面布置上要避免急转弯,防止水流条件恶化,影响正常输水,造成冲刷现象。
- c) 渡槽进出口均需设置渐变段。渐变段形式可选择扭曲面式、反翼墙式、八字墙式等。
- d) 进出口段应设置可靠的护底与护坡。

8.4.1.3 槽身段结构应满足下列要求:

- a) 槽身过水断面深宽比宜采用 $h/B=0.6\sim 0.8$ 。
- b) 槽身跨径及支承型式(简支或双悬臂)根据流量大小、地形地质及施工条件等因素确定。
- c) 简支梁式渡槽的跨径宜为 10 m~15 m;双悬臂梁式渡槽每节槽身长度宜为 20 m~30 m,可根据实际情况布置为等跨双悬臂式、等弯矩双悬臂式或不等跨不等弯矩双悬臂式。
- d) 槽身侧墙及底板厚度,应满足强度及抗裂要求,由应力分析确定。侧墙宜兼作纵梁,还应满足纵向稳定要求。对于带横杆的矩形槽,侧墙厚度 t 与墙高 H 之比值宜为 $t/H=1/12\sim 1/16$;对于无横杆加肋式槽身,墙厚可适当减小,但不宜小于 150 mm;对于无横杆无肋式槽身,侧墙应适当加厚,宜采用变厚度,墙顶厚度宜不小于 150 mm。槽底板厚度宜采用与侧墙底部厚度相同,对于多纵梁式槽身,底板厚度可小于侧墙底部厚。侧墙与底板交接处加设补角,补角宽及高宜为 200 mm~300 mm。
- e) 带横杆矩形槽的横杆间距采用 1.5 m~2.5 m,截面边长为 200 mm 左右。
- f) 无横杆加肋式槽身的横肋间距,应满足侧墙及槽底板成为双向板的要求。侧墙高 H 与肋距 L_1 的比值 H/L_1 及槽底板宽 B 与肋距 L_1 的比值 B/L_1 宜采用 1.0~2.0。肋宽宜不小于侧墙及槽底板厚,肋净厚宜等于或略大于肋宽。如欲使侧墙及槽底板均成为四边固定支承板,侧墙顶部及底部需局部加厚,并要求侧墙顶部、底部及肋的刚度应大于 8 倍板的刚度。
- g) 无横杆矩形槽的侧墙顶部宜设置外伸人行道悬臂板,板厚 60 mm~100 mm,板宽 700 mm~1 000 mm。带横杆的槽身人行道板宜搁置于横杆上。
- h) 箱形槽身的侧墙、顶板及底板多采用等厚,厚度宜不小于 300 mm。
- i) 侧墙超高根据流量大小及总体规划要求确定,宜等于或略小于上下游渠道超高。

8.4.1.4 水力计算应满足下列规定:

- a) 渡槽水力计算应确定渡槽过水断面形状和尺寸、槽底纵坡、进出口高程,校核水头损失是否满足渠系规划要求。
- b) 槽身过水断面尺寸,宜按设计流量设计,按最大流量校核,通过水力学公式进行计算。
- c) 当槽身长度 $L\geq(15\sim 20)h$ (h 为槽内水深)时,按明渠均匀流公式计算。当 $L<(15\sim 20)h$ 时,可按淹没宽顶堰公式进行计算。
- d) 渡槽纵坡初拟时,宜采用 $i=1/500\sim 1/1\ 500$,槽内流速 1 m/s~2 m/s。

8.4.2 倒虹吸管

8.4.2.1 倒虹吸管布置应满足下列规定:

- a) 倒虹吸管宜由进口段、管身段和出口段三部分组成,其工作情况及设计要求应满足整个引水工程规划设计的要求。
- b) 管线布置应根据地形、地质条件,工程规模和工程总体布置要求,经技术经济比较后确定。

- c) 管线应选择在地形、地质条件优越地区,应避免滑坡、崩塌或受地下水危害等地段。
- d) 管线在立面上,应力求避免上凸现象。若不能避开时,应在管道适当部位设置通气阀。
- e) 管线应布置冲砂、放空及进人检修等设施。对吊装管道还应布置便于拆换管节的活动接头。
- f) 管道及进出口段宜布置在挖方地基上。
- g) 园形管道的转弯半径不宜小于 3 倍管径。位置相近的平面转弯和立面转弯宜合并为空间转弯。位置相近的弯管和渐变段宜合并为渐变弯管段。
- h) 在寒冷地区,应按防冻要求设计,采取必要的防冻措施。
- i) 埋管的掩埋深度应满足下列要求。
 - 1) 保温:管顶埋入土内 0.5 m~0.8 m。
 - 2) 防冻:管顶埋入冻土层以下 1.0 m~1.5 m。
 - 3) 防冲:管顶至少应低于冲刷线以下 0.5 m。
 - 4) 道路或沟渠下的埋管:管顶应低于道路面或渠底以下 1.0 m。
 - 5) 耕作层:管顶应在耕作层以下(机耕的耕作层深度宜为 0.6 m~1.0 m)。

8.4.2.2 进出口段结构应满足下列要求:

- a) 进出口段应根据工程具体情况要求布设沉砂池、拦沙坎、冲砂闸、泄水闸、控制闸、消力池、拦污栅、喇叭口、渐变段等结构物。
- b) 进出口各结构物的型式及高程应保证在通过不同流量时,管道进出口处的水流为淹没流,防止产生水跃及漏斗式涡流带入空气。边界力求圆滑平顺,以减少水头损失。
- c) 在进出口处可设置消力池、控制闸等建筑物连接。

8.4.2.3 管身段结构应满足下列要求:

- a) 管身段设计包括管道的断面形式选择及尺寸、根数、材料等。
- b) 管道转弯处应设置镇墩。当管道的平直段较长时,宜每隔 150 m~200 m 设置镇墩。管道布置在坡度上时,每 50 m~100 m 设一个镇墩,以防止管体下滑。镇墩间距应根据地形地质条件,经计算确定。
- c) 管节与管节之间设伸缩沉陷缝。
- d) 管节与管节之间接头型式:对现浇钢筋混凝土管主要有平接和套接,前者用于水头比较低的管道;预制管和预应力管大多采用承插式接头。
- e) 现浇混凝土管管节长度在土基上宜为 15 m~20 m,在岩基上为 10 m~15 m。预制混凝土管管节长度宜在 5 m 以内。

8.4.2.4 水力计算应满足下列要求:

- a) 倒虹吸管水力计算的主要任务:
 - 1) 确定管道过水断面尺寸和管道根数。
 - 2) 确定进出口段布置、尺寸及各部位高程。
 - 3) 校核过水能力、水头损失及水面衔接是否满足设计要求。
- b) 倒虹吸管内流速应根据允许水头损失值,经技术经济比较和管内不淤条件选定。
 - 1) 混凝土管:当通过设计流量时,管内平均流速宜为 1.5 m/s~3.0 m/s,最大可达 4 m/s;最小流速按通过最小流量时,管内流速应大于挟砂流速。
 - 2) 钢管:流速宜为 4 m/s~6 m/s。
- c) 倒虹吸管水头损失应包括局部水头损失和沿程水头损失两大部分。其中局部水头应损失包括拦污栅、进口、门槽、渐变段、弯头、管节接头、出口等。
- d) 管道内的过水能力按压力管流公式计算。
- e) 倒虹吸管进出口宜先按设计流量以淹没流型式进行设计,然后验算以下两种工况:
 - 1) 通过中小流量时,进出口是否仍为淹没流。

2) 校核通过加大流量时,进出口渠道水位高程、渠堤顶部是否满足安全运行要求。

- f) 当管道出口流速较大时,应验算加大流量时的水面衔接情况。如出现远驱式水跃时,须设置出口消力池连接结构。当通过中小流量时,若进出口渠道水头差值大于管道总水头损失时,进口水面可能在管内出现跌落而产生水跃,引起脉动和掺气,影响安全运行。这时应根据总水头损失大小,对进出口设计进行修正。

8.4.2.5 结构计算应满足下列要求:

- a) 倒虹吸管结构设计的荷载组合应根据工程布置型式及运用期间可能出现的最不利的情况进行全面考虑。可按表 23 采用。

表 23 管道结构计算的荷载组合

管道类型	荷载组合	基本荷载								特殊荷载		备注	
		自重	满管水重	设计内水压力	外水压力	土压力	地面荷载	温度荷载	雪荷载	支座反力	校核内水压力		地震力
露天管	基本组合	✓	✓	✓				✓	✓	✓			
	特殊组合(I)	✓	✓					✓	✓	✓	✓		
	特殊组合(II)	✓	✓	✓				✓	✓	✓		✓	
掩埋管	基本组合(I)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			
	基本组合(II)	✓				✓	✓	✓	✓	✓			空管
	特殊组合	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓		
河床埋管	基本组合(I)	✓	✓	✓	✓	✓				✓			
	基本组合(II)	✓			✓	✓				✓			管道检修期
	特殊组合	✓	✓		✓	✓				✓	✓		

- b) 采用钢筋混凝土管道结构应按不允许开裂的要求进行设计,并采取抗裂防渗措施。

8.5 压力钢管

8.5.1 一般规定

8.5.1.1 钢管线路应符合总体布置要求,并考虑地形、地质条件,经过技术经济比较确定。线路宜短而直,使水流平顺,水头损失小,施工及运行安全、方便。

8.5.1.2 钢管根数应根据机组台数、管线长短、机组安装的分期、加工制作和安装水平、运输条件、地形和地质条件、电站运行方式及在电力系统中的地位等因素,经技术经济比较后确定。

8.5.1.3 管径应根据技术经济比较确定。可根据布置和内压变化情况分段定出几种管径。但变径次数不宜过多。

8.5.1.4 钢管顶部至少应在最低压力线以下 2 m。

8.5.1.5 明钢管、坝内钢管以及水轮机前不设进水阀的地下埋管,在管道首端须设快速闸阀和必要的检修设施。地下埋管,若自取水口至钢管道前的引水道较长,或钢管内压较大,而埋深不大,应在首端设事故闸阀。

8.5.1.6 钢管宜设过流保护装置。

8.5.1.7 钢管首端的快速闸阀或事故闸阀应有远方(中央控制室)和就地操作装置,操作装置应有可靠电源。

8.5.1.8 紧靠快速闸阀和事故闸阀下游应设置通气孔(井)或通气阀,充水阀出水水流不得封堵通气孔口。通气孔上端宜在启闭室之外,高于校核洪水位。

8.5.1.9 钢管转弯半径不宜小于3倍管径。位置相近的平面转弯和立面转弯宜合并成立体转弯;位置相近的弯管和渐缩管宜合并成渐缩弯管。

8.5.1.10 在钢管最低点宜设排水设施。

8.5.1.11 钢管构造宜满足以下规定:

- a) 管壁最小厚度(包括防锈蚀厚度),除满足结构分析要求外,还需考虑制造工艺、安装、运输等要求,保证必需的刚度。管壁最小厚度不宜小于 $D/800+4$ mm(D ——钢管直径,mm),也不宜小于6 mm。
- b) 钢管壁厚变化处,明管宜使外径不变,埋管宜使内径不变,钢管壁厚级差宜取2 mm。不同厚度的钢板对接焊,若厚度差大于4 mm,应将较厚板的接口处刨成1:3坡度。
- c) 直管环向焊缝间距不应小于0.5 m。岔管等特殊结构不应小于下列各项之大值:
 - 1) 10倍管壁厚度;
 - 2) 0.3 m;
 - 3) $3.5\sqrt{rt}$, r 为钢管半径, t 为管壁厚度。
- d) 弯管段相邻管节转折角宜在 10° 以下。
- e) 直径改变处的渐变圆锥管,锥顶角宜不大于 7° 。

8.5.2 明钢管

8.5.2.1 明钢管布置按照下列原则:

- a) 明管线路应避开可能产生滑坡或崩塌的地段。个别管段若不能避开山洪、坠石等影响时,可作成洞内明管、地下埋管或外包混凝土的回填管。
- b) 应设置事故排水和防冲设施。
- c) 明管底部至少应高出地表0.6 m。
- d) 明管宜做成分段式。转弯处设有镇墩,其间钢管用支墩支承。两镇墩间设有伸缩节。伸缩节宜设在镇墩下游。
- e) 若直线管段过长(约大于150 m),可在其间加设镇墩。若管道纵坡较缓,可不加镇墩,而将伸缩节置于该段中部。钢管穿过主厂房上游墙处,宜设柔性垫层圈。
- f) 支座间距应通过钢管应力分析,并考虑安装条件,支座型式、地基条件等因素确定。在两相邻镇墩之间,宜按等距布置。设有伸缩节的一跨,间距宜缩短。若地基可能产生不均匀沉陷,应采取相应结构措施。
- g) 支座型式可根据管径 D 确定:
 - 1) $D \leq 1$ m时,钢管无支承环,鞍型支座;
 - 2) $D \leq 2$ m时,钢管有支承环,鞍型支座;
 - 3) $D = 1$ m~3 m时,钢管有支承环,滑动支座;
 - 4) $D > 2$ m时,滚动支座;
 - 5) $D > 2$ m时,摇摆支座。
- h) 镇、支墩的间距,在地震区宜缩短。
- i) 管道两侧应布置排水沟,并应在钢管下的地面上设置横向排水沟。应沿管线设置交通道。

8.5.2.2 明管结构计算应满足下列要求:

- a) 明管结构计算包括管壁应力计算和抗外压稳定计算。可按表24采用。

表 24 明管结构计算的荷载组合

荷载	基本组合			特殊组合			
	正常运 行工况 I	正常运 行工况 II	放空 工况	特殊运 行工况	水压 试验	施工 工况	地震 工况
正常蓄水位的静水压力		√					
正常工作情况最高压力	√						
特殊工作情况最高压力				√			
水压试验内水压力					√		
钢管结构自重	√	√		√	√	√	√
钢管内的满水重	√	√		√			√
钢管充水、放水过程中,管内部分水重						√	
由温度变化引起的力	√	√			√		√
管道直径变化处、转弯处及作用在堵头、 闸阀、伸缩节上的水压力	√	√		√			√
镇墩、支墩不均匀沉陷引起的力	√	√					√
风荷载		√			√		
雪荷载		√			√		
施工荷载					√		
地震荷载							√
管道放空时,通气设备造成的气压差			√				

- b) 有支承环的钢管承受内压作用时,其基本计算部位为跨中、支承环旁管壁膜应力区边缘、加劲环及其旁管壁和支承环及其旁管壁。
- c) 支承环的支承型式,应结合整个管道工程的技术经济条件选择,可采用侧支承或下支承型式。
- d) 明管镇、支墩地基应坚实、稳定,宜设置在岩基上。地基应力最大值应不大于地基的允许承载力。墩体尺寸应有利于使基础应力趋于均匀分布。镇、支墩若置于土基、半岩基上,除应满足承载力及稳定等要求外,应研究基础不均匀沉陷对钢管内力的影响。

8.5.3 地下埋管

8.5.3.1 地下埋管布置应满足下列原则:

- a) 地下埋管线路宜选择在地形、地质条件优越的地区,应避开山岩压力、地下水压力和涌水量很大的地段。管线宜深埋,覆盖岩层厚度要求可按公式(28)计算确定。
- b) 地下埋管宜用单管多机供水方式。若管道较短引用流量较大、机组台数较多、分期时间间隔较长或工程地质条件不宜开挖大断面洞井,经技术经济比较,可采用两根或更多的管道,相邻两管间距除考虑开挖爆破影响外,还应进行岩体强度验算。
- c) 洞井型式(平洞、斜井、竖井)及坡度,应根据布置要求、工程地质条件、施工条件选用。
- d) 在地下水压较高的地区宜设置排水措施。排水措施可采用排水洞、排水孔、排水管系统,并结合灌浆帷幕等。排水措施应可靠,宜能检修。应布置长期观测井或测压计,监视地下水位变化情况。

8.5.3.2 地下埋管结构计算应满足下列要求：

- a) 地下埋管结构分析中,应由钢管、混凝土衬砌、岩石共同承担内水压力,并考虑三者之间存在着缝隙。
- b) 混凝土衬砌承受山岩压力及传递围岩弹性抗力,全部外水压力及负压应考虑由钢管承担。
- c) 地下埋管结构分析可按表 25 确定。

表 25 地下埋管结构计算的荷载组合

荷载	荷载组合	基本组合		特殊组合	
		正常运行 工况	放空 工况	特殊运行 工况	施工 工况
正常工作情况最高压力		√			
特殊工作情况最高压力				√	
地下水压力			√		
管道放空时,通气设备造成的气压差			√		
施工荷载:灌浆压力或未凝固混凝土压力等					√

- d) 地下埋管应充分利用围岩的承载能力。应对其工程地质条件作充分的研究,确定其承载能力。
- e) 邻近厂房上游的一段钢管衬砌,应将围岩单位弹性抗力系数酌减使用。
- f) 地下埋管承受的地下水压力值,可根据勘测资料并考虑水库蓄水和引水系统渗漏等影响确定。
- g) 与钢筋混凝土衬砌段相联的钢管,接头处应妥善处理。计算中应考虑因混凝土裂缝漏水而增加地下水压力的可能性。

8.5.4 坝内埋管

8.5.4.1 坝内埋管布置满足下列原则：

- a) 压力钢管的平面位置宜位于坝段中央,其直径不宜大于坝段宽度的 1/3。布置管线时应考虑钢管对坝体稳定和应力的影响及施工的干扰。
- b) 通气孔布置应防止管口溢水影响坝后电气设备的正常运行。
- c) 钢管进口处应设充水阀或旁通管充水,充水阀和旁通管面积宜小于通气孔面积的 1/5。

8.5.4.2 坝内埋管结构分析应满足下列要求：

- a) 若外围混凝土最小厚度大于钢管直径,应将坝内埋管视为钢管、钢筋和混凝土组成的多层管共同承担内水压力,并考虑钢管与混凝土间的缝隙和混凝土的裂缝影响。
- b) 若外围混凝土最小厚度在钢管半径与直径之间,是否考虑联合承载应经论证。
- c) 若外围混凝土最小厚度小于钢管半径,宜由钢管单独承载。
- d) 设有弹性垫层的钢管,可按明管设计。
- e) 全部外压应考虑由钢管承担。坝体渗流水压力可假定沿管轴线直线变化,最小外压力不小于 0.2 MPa。

8.5.5 岔钢管

8.5.5.1 岔管设计应满足下列原则：

- a) 结构合理,不产生过大的应力集中和变形。
- b) 水流平顺,水头损失小,减少涡流和振动。分岔后流速宜逐步加快。

c) 制作、运输、安装方便。

8.5.5.2 岔管结构应满足下列要求：

- a) 岔管型式应考虑制作和土建费用、水头损失、内水压力的的大小、岔管尺寸和受力条件、布置型式、施工经验等,经技术经济比较后确定。
- b) 岔管主、支管中心线宜布置在同一平面内。
- c) 岔管的典型布置有卜形布置、对称 Y 形布置、三岔布置等。

8.5.6 水力计算

8.5.6.1 压力钢管水力计算应包括水头损失和水锤计算。

8.5.6.2 水头损失计算成果应包括:正常工作情况最高压力线、特殊工作情况最高压力线、最低压力线。

8.5.6.3 水锤计算应与机组转速变化计算配合进行。并根据本电站及电力系统的运行情况确定计算工况。

8.5.6.4 钢管末端压力升高的采用值不应小于正常蓄水位钢管静水压力的 10%。

8.5.6.5 水锤压力初步计算可按下列工况进行：

- a) 正常工作情况最高压力计算:钢管水锤:相应于水库正常蓄水位,由本钢管供水的全部机组突然丢弃全部负荷。调压室或压力前池最高涌浪:相应于水库正常蓄水位,经由本调压室或压力前池供水的全部机组突然丢弃全部负荷。钢管水锤与调压室或压力前池涌浪如有重叠可能者应考虑其相遇效应。如研究电站运行情况,认为不可能同时丢弃全部负荷,可按丢弃部分负荷计算。
- b) 特殊工作情况最高压力计算:情况同上,但水库水位为最高发电水位。
- c) 最低压力计算:钢管水锤相应于水库死水位,由本钢管供水的全部机组除一台外都在满发,未带负荷的一台机组由空转增荷至满发。如系统有特殊运行要求,可根据具体情况确定增荷幅度。

8.6 沉沙池

8.6.1 一般规定

8.6.1.1 沉沙池的设置应进行运行设计,并应与枢纽工程的运行协调一致,经技术经济比较后确定。

8.6.1.2 应收集工程所在河段实测悬移质含沙量、泥沙颗粒级配和硬度资料。

8.6.1.3 应收集水轮机过流部件耐磨性能、抗磨措施及水轮机大修间隔,水轮机工作水头。

8.6.2 沉沙池布置原则

8.6.2.1 沉沙池的位置宜邻近首部取水枢纽进水口,当受地形条件限制或冲沙水头不能满足要求时,可沿引水道下移至适当的位置。布置沉沙池应合理利用地形、地质条件,避开不良地段,否则,应采取相应工程措施。

8.6.2.2 水电站沉沙池宜采用水力冲洗式沉沙池。水力冲洗式沉沙池应具有足够的冲沙水头及流量。若地形开阔,沉沙池宜选用定期冲洗式沉沙池;地形狭窄,沉沙池宜选用连续冲洗式沉沙池。

8.6.2.3 沉沙池轴线宜与沉沙池进口前引渠的轴线重合,有夹角时,应采取措施保证进入沉沙池工作段水流的流态向及竖向分布均匀。

8.6.2.4 沉沙池上游连接段布置要求如下：

- a) 扩散段平面布置宜采用对称扩散型式,单侧扩散角不宜大于 12° 。采用非对称扩散型式,两侧扩散角之和不宜大于 24° 。该段底板与工作段池底联接处不宜出现跌坎。

- b) 在联段内应设配水墩或其他整流设施,其位置、尺寸及方向应通过水力学模型试验确定。
- c) 定期冲洗式沉沙池应设池室进口闸。有污物来源的应在进口闸设拦污栅及清污设施。进口闸进水坎顶应与其上游底板齐平或略高,进口闸尺寸应满足闸门、启闭机、拦污栅及清污设施的布置和运行要求。
- d) 进口闸后整流栅的排距、栅距或配水墩的布置等应根据水力学模型试验确定。

8.6.2.5 沉沙池工作段除满足沉沙要求外还应满足清淤排沙的要求。排沙道出口在汛期应不受河道常遇洪水(重现期2年)的顶托。

8.6.2.6 定期冲洗式沉沙池工作段的要求如下:

- a) 定期冲洗式沉沙池工作段末端应设置冲沙闸。冲沙闸的闸门及启闭设备应满足闸门局部开启工况的要求。
- b) 冲沙闸下游排沙道宜采用无压排沙形式,其纵坡不应缓于沉沙池工作段纵坡。排沙道出口应有抗冲、防淤措施并保证排沙通畅。

8.6.2.7 连续冲洗式沉沙池工作段的要求如下:

- a) 连续冲洗式沉沙池冲洗系统应由若干条支廊道和主廊道组成。
- b) 连续冲洗式沉沙池工作段池底可沿池宽方向做成若干倒梯形槽,槽壁坡角(与水平向夹角)宜大于泥沙水下休止角。槽底板应布置进沙孔并与冲沙支廊道相通。
- c) 连续冲洗式沉沙池冲洗系统支廊道应顺水流方向布置于池底进沙孔下。各条支廊道应分别汇入一条主廊道。沉沙池工作段内宜设置多个冲洗系统,前段冲洗系统的支廊道长度宜短于后段冲洗系统的支廊道长度。
- d) 主、支廊道应具有良好的水力条件,并应采取抗磨措施。冲沙主廊道出口应有抗冲、防淤措施,并保证排沙通畅。
- e) 冲沙闸闸门及启闭设备,应满足闸门局部开启工况的要求。
- f) 单室连续冲洗式沉沙池宜在沉沙池工作段末端设置事故冲沙闸。

8.6.2.8 水电站沉沙池宜在沉沙池工作段、引渠或输水道适当部位设置旁侧溢流堰,堰顶高程宜略高于沉沙池运行水位。溢流能力应根据水电站机组丢弃负荷和进水闸可能引入过多流量等因素确定。

8.6.2.9 水电站沉沙池下游连接段宜采用逐渐收缩型式。当其下游为有压引水道时,该段水深应满足有压进水口最小淹没深度要求,不得出现立轴旋涡和掺气现象。

8.6.3 沉沙池主要尺寸确定

8.6.3.1 沉沙池尺寸主要包括工作深度、工作宽度、工作长度和工作段纵向底坡确定。

8.6.3.2 定期冲洗式沉沙池工作深度计算要求如下:

- a) 定期冲洗式沉沙池工作段进口水深,应满足公式(28)。

$$H \leq \Delta Z + \frac{q}{v_c} - (iL_w + i_0 L_0) \dots\dots\dots (28)$$

式中:

- H —— 工作段进口水深, m;
- ΔZ —— 沉沙池冲沙运行水位与排沙道出口天然河流水位差, m;
- q —— 排沙道冲沙单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$;
- v_c —— 排沙道冲沙流速, m/s;
- i —— 沉沙池工作段底坡;
- L_w —— 沉沙池工作段长度, m;
- i_0 —— 排沙道底坡;

L_0 ——排沙道长度, m。

b) 定期冲洗式沉沙池工作段进口工作深度按公式(29)计算。

$$H_c = H - \Delta H_k \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中:

H_c ——沉沙池工作段进口工作深度, m;

ΔH_k ——沉沙运行期允许淤沙厚度, m, 初拟方案时, 可选(0.25~0.30) H 。

8.6.3.3 连续冲洗式沉沙池工作段进口工作深度, 应满足公式(30)要求。

$$H_c = \Delta Z_i - (1 + \sum \xi) \frac{v_c^2}{2g} - v_c^2 \int_0^L \frac{dL}{c^2 R} \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中:

ΔZ_i ——沉沙池运行水位与廊道出口处顶的高差, m;

$\sum \xi$ ——局部水头损失系数总和;

L ——支、主廊道总长度, m;

c ——谢才系数;

R ——水力半径, m。

8.6.3.4 工作宽度可按公式(31)计算。

$$B = \frac{Q}{H_w v} \quad \dots\dots\dots(31)$$

式中:

B ——工作宽度, m;

Q ——工作流量, m^3/s ;

v ——池内平均流速, 初拟方案时, 可在下列范围内选择: 当沉降最小粒径为 0.05 mm~0.10 mm 时, 其值可选 0.05 m/s~0.15 m/s; 当沉降最小粒径为 0.25 mm 时, 其值可选 0.25 m/s~0.55 m/s; 当沉降最小粒径为 0.35 mm 时, 其值可选 0.40 m/s~0.8 m/s;

H_w ——平均工作深度, m。

8.6.3.5 水力冲洗式沉沙池工作段进口工作深度, 可选择 3 m~8 m。单室工作段宽度与深度之比不宜大于 4.5。

8.6.3.6 定期冲洗式沉沙池工作段分厢宽度应满足公式(32)。

$$b_s = \frac{Q'_s}{q_s} \quad \dots\dots\dots(32)$$

式中:

b_s ——定期洗式沉沙池工作段分厢宽度, m;

Q'_s ——池内冲沙流量, m^3/s ;

q_s ——池内单宽冲沙流量, $m^3/(s \cdot m)$ 。

8.6.3.7 沉沙池工作计算长度应根据沉降粒径的沉速、沉降率确定。设计工作段长度宜取计算长度的 1.2 倍。必要时, 应通过模型试验验证悬移质分组沉降率和出池分组含沙量。

8.6.3.8 定期冲洗式沉沙池的工作段应具有一定的纵向底坡, 且应满足公式(33)。

$$i \geq \frac{v_{1c}^2}{c^2 R} \quad \dots\dots\dots(33)$$

式中:

v_{1c} ——冲沙流速, m/s。

9 发电厂房

9.1 一般规定

9.1.1 按照厂房结构与受力特点,电站厂房应包括下列类型:

- a) 坝后式厂房:厂房位于坝后,厂坝之间宜采用伸缩/沉降缝分开,上游的水压力全部由坝承担,厂房不承受上游水压力,发电用水经穿过坝体的压力水管引入厂房中的水轮机。
- b) 引水式厂房:引水道较长,根据引水道中的水流是有压或无压,又分为有压引水式厂房和无压引水式厂房。
- c) 河床式厂房:厂房位于河床内,厂房本身起挡水作用,是挡水建筑物之一。

9.1.2 水电站厂房应由主厂房和副厂房两部分组成,包含水流系统、电流系统、电气控制设备系统、机械控制设备系统和辅助设备系统等五大系统。

9.2 厂区布置

9.2.1 水电站厂区布置应根据地形、地质、环境条件、枢纽总体布置应符合以下要求:

- a) 合理布置主厂房、副厂房、主变压器场地、开关站、高低压引出线、进厂交通、发电引水及尾水建筑物等,使水电站运行安全、管理和维护方便,并兼顾景观及生态、环保要求。
- b) 妥善解决厂房和泄洪、排沙、通航、鱼道等建筑物布置及运用的相互协调,避免干扰,保证水电站安全和正常运行。
- c) 综合考虑厂区防洪、排水、消防等安全措施及检修的必要条件。
- d) 少征或不征用耕地,保护天然植被,保护环境,保护文物。
- e) 做好厂区建筑环境总体规划及主要建筑物的建筑艺术处理。
- f) 统筹安排运行管理所应的生产辅助设施。
- g) 综合考虑施工程序、施工导流及首批机组发电投运的工期要求,优化各建筑物的布置。

9.2.2 主厂房应建在稳定的岩基或坚实的土基上。厂房位置宜避开冲沟口和崩塌体,对可能发生与厂房洪水标准一致的山洪淤积、泥石流或崩塌体等应在充分论证的基础上采取相应的防御措施;厂房位于高陡坡下时,应设有安全防护措施及截排水设施;厂房位于软弱地基土上时,需采取可靠的地基处理方案。布置在河岸的厂房,宜顺河流方向靠岸布置,不侵占河道的行洪断面,以免洪水直接冲击厂房。并应采取临时措施防止厂房在超设计标准洪水时被淹没。

9.2.3 当压力管道采用明敷方式时,宜将厂房布置在免受事故水流直接冲击的方向;当不可避免时,应采取其他保护措施。

9.2.4 副厂房的位置应与主变压器场地、主厂房的位置及环境要求相协调,经综合比较确定。同时应结合运行、管理方便的要求,合理利用有效空间,对外交通方便。

9.2.5 主变压器及开关站位置应结合安装检修、运输、消防通道、进线出线、防火防爆等要求按下列原则确定:

- a) 主变压器位置宜靠近主厂房,并宜与安装间高程相同。主变压器场地的防火防爆及通风散热等应符合有关规范规定。
- b) 开关站宜靠近主变压器,应选择地基及边坡稳定的地段或利用其他合适的场地进行布置,其进出线应避免跨越建筑物的水跃区、射流区。开关站位置宜避开冲沟,不能避开时,应对山洪、泥石流和崩塌体等采取防御措施。
- c) 出线场宜布置在开关站附近,户内式开关站可将出线场布置在厂房顶部。

9.2.6 扩建和改建水电站厂房,应使新老建筑物及设施协调一致,确保老建筑物安全;施工期不影响或少影响发电。

9.2.7 河床式水电站厂房进水部分布置应结合枢纽布置情况妥善解决泥沙、漂浮物和冰凌等对发电的影响。

9.2.8 坝后式厂房宜在厂、坝之间设永久变形缝,为满足厂坝整体稳定或有其他要求时,经论证可采用厂坝整体连接的形式。

9.2.9 厂房与泄水建筑物相邻时,在厂房与泄水建筑物间应设置足够长的导墙。

9.2.10 尾水渠应根据水电站具体情况按下列原则布置:

- a) 考虑机组运行条件、地形地质、河道流向、泄洪、排沙及其他建筑物影响进行布置,对可能发生的淘刷或淤积部位应加强防护措施。
- b) 应考虑枢纽泄水、下游梯级回水和河床采砂等引起的河床变化所造成的影响。
- c) 不应弃渣而抬高厂房发电尾水位。

9.2.11 厂区防洪及排水系统应按下列要求设计:

- a) 应保证主、副厂房和主变压器场地及开关站在设防水位条件下不受淹没。
- b) 厂区排水量、管沟布置、排水方式及排水设施,应根据水电站厂房的重要性、本地区气候特征、设计暴雨强度、降雨历时、暴雨设计重现期、汇水地区性质、地形特点及其他可能的集水量综合考虑确定。设计降雨重现期可取 $3a \sim 5a$,设计降雨历时为 $5 \text{ min} \sim 15 \text{ min}$ 。
- c) 应采取可靠措施防止洪水倒灌。
- d) 对泄洪、降水或雾化对厂区造成的不利影响,应采取相应的防护措施。
- e) 对可能导致水淹厂房的孔洞、管沟、通道、预留缺口等应采取必要的封堵和引排措施。
- f) 应进行各建筑物边坡地表水和地下水的排水设计。

9.2.12 厂区交通应按下列原则布置:

- a) 应根据近期和远景规模,全面规划,统筹安排,并应满足机电设备重件、大件的运输机装卸方便的要求。
- b) 主要交通在设计洪水标准条件下应保证畅通;在校核洪水标准条件下,应保证进出厂人行交通不被阻断;穿过泄水雾化区地段宜采取适当保护措施。
- c) 进厂公路进厂房前应设有平直段。
- d) 进厂公路的设计纵坡宜小于 8% ,受地形条件限制的布置困难地段最大纵坡宜小于 12% ,厂区内主要行车道路的宽度宜不小于 3.5 m ,厂前区可设置回车场。
- e) 高尾水位厂房,经论证,允许进出厂房主要交通采用垂直运输方式。
- f) 进厂公路宜从下游侧引入厂房。当因地形、地质和枢纽布置条件限制进厂公路应由厂房端部平行于厂房轴线方向进厂时,应设置警戒标志或阻进器。

9.2.13 厂区应设置消防设施,厂房的耐火等级应符合有关防火的规定。

9.3 厂房内部布置

9.3.1 厂房内部布置应根据水电站规模、厂房形式、环境特点、土建设计和机电设备布置、运行维护和安装、检修等情况,合理确定和分配各部位的尺寸及空间。

9.3.2 卧式机组厂房平面尺寸应根据蜗壳的平面尺寸(直径)和整个机组段的长度确定;立式机组厂房尺寸应根据发电机基座尺寸(宽度)和机组的长度确定;灯泡贯流式机组厂房尺寸应根据流道尺寸、闸墩厚度及进出口闸门和启闭机设备布置确定,此外还应考虑主阀、调速器和机旁盘等辅助设备,以及厂内人行通道布置要求等。厂房高度应根据设备的吊运条件和水轮机的安装高程等因素确定。

9.3.3 主厂房机组的间距,应符合下列要求:

- a) 当采用卧式机组时,应满足安装和检修要求,必要时能抽出和套入发电机转子,且机组之间的净距应不小于 1.5 m~2.0 m。
- b) 当采用立式机组时,宜按发电机风罩直径、蜗壳和尾水管的尺寸,在平面上统一考虑确定,相邻混凝土蜗壳之间和相邻尾水管之间的隔墩厚度,不宜小于 1.0 m~2.0 m(设永久缝时取大值)。相邻金属蜗壳之间的隔墩厚度,不宜小于 1.0 m。发电机风罩盖板之间的净距不宜小于 1.5 m~2.0 m。坝内式、溢流式厂房的机组间距,尚应考虑尾水管之间有必要的混凝土厚度。
- c) 当采用灯泡贯流式机组时,应根据流道宽度、机组台数和分缝方式确定,边机组段的附加长度由桥机吊钩限制线确定,宜取 3 m~5 m。

9.3.4 主厂房主机间的控制尺寸应按以下原则确定:

- a) 主机间的长度和宽度应综合考虑机组台数、水轮机过流部件、发电机及风道尺寸、起重设备的运行方式、进水阀及调速器位置、厂房结构要求、运行维护和厂内交通等因素确定。
- b) 水轮机过流部件及机组支撑方式应按制造厂家提供的资料结合水工结构要求选择。
- c) 机组段长度由水轮机蜗壳尺寸控制时,对金属蜗壳,机组段长度应满足蜗壳安装所需要的空间要求,最小空间尺寸不宜小于 0.8 m;对混凝土蜗壳,其壁厚由强度、刚度及构造需要确定。
- d) 机组段长度由发电机及其风道尺寸控制时,机组间距除满足设备布置要求外,还应保留必要宽度的通道。
- e) 坝后式厂房机组段长度宜与坝体分缝相协调。对隧洞引水式厂房,还应与压力管道之间的岩体厚度相适应。
- f) 当机组段有泄、排沙孔时,应同时满足各孔口的结构强度、构造及施工要求。
- g) 主机间的长度和宽度应满足起重机吊钩有效工作范围、进水阀及调速器布置、厂内交通及结构尺寸要求。
- h) 主厂房水下、水上部分的结构尺寸宜相互协调,统一考虑。
- i) 边机组段的长度,应结合安装场的位置、主机室与安装场的高差和起重机的起吊范围等因素确定。

9.3.5 主厂房安装间尺寸和布置可按下列原则确定:

- a) 安装间面积应根据厂房型式、机组结构、安装进度以及一台机组扩大性检修等因素综合确定。
- b) 缺乏资料时,安装间长度可取 1.25~1.5 倍机组段长度;多机组电站,安装间面积可根据需要增大或加设副安装间。
- c) 安装间地面高程宜与发电机层地面高程相同;如下游洪水尾水位高于发电机层地面高程,可抬高安装间高程。
- d) 安装间布置应根据装机台数,满足设备运输、安装及检修或车辆进厂装卸的需要。安装间可布置于主厂房的一端、两端或中间段。
- e) 安装间布置应与主要设备的进厂运输方式协调。

9.3.6 主厂房起重机布置及轨顶高程确定应符合下列要求:

- a) 应满足机组主要部件吊装的要求。厂内设有进水阀时,其中心线应布置在起重机吊钩工作范围以内。
- b) 起重机轨顶高程应根据起重机规格、机组或主变压器(若设置厂内主变压器)的安装及检修时吊装要求确定,并应满足进厂运输车辆的货物装卸要求。
- c) 起重机顶与厂房吊顶(或屋架下弦、灯具底)的净距不应小于 0.3 m。
- d) 在厂房顶部适当部位应有可供拆装起重机的减速器盖、卷筒、电动机等部件的必要空间。

- e) 起重机端边至上下游墙的距离除满足大车行走外,应在适当部位留有 大车行走机构的安装及检修需要的净空和人员行走让车位置。
- f) 吊车梁顶面宽度(包括走道板)应满足运行人员通行要求,并应设有供司机(若有驾驶室)和检修人员从安装场地面上、下起重机的扶梯。
- g) 吊装中的部件距已安装的设备、结构及地面的安全距离应不小于 0.3 m。

9.3.7 厂内交通应符合下列规定:

- a) 厂内交通(包括楼梯、转梯、爬梯、吊物孔、水平通道、廊道等)应满足方便管理、利于检修、处理故障迅速的要求。
- b) 主要通道尺寸及楼梯宽度、坡度、安全出口设置应符合机电、消防设计规范的要求。
- c) 发电机层及水轮机层宜设有贯穿全厂的直线水平通道。
- d) 发电机层、母线层、水轮机层等主要楼层间每 1~2 个机组段宜设置一个楼梯,全厂不宜少于 2 个楼梯。
- e) 在起重机吊钩工作范围内的主厂房和有机电设备吊运要求的副厂房,宜设置供安装检修的吊物孔。

9.3.8 水轮机机坑的布置及尺寸应满足机组安装及维修的需要;机组支撑结构和蜗壳、座环支撑结构应有足够的强度和刚度。

9.3.9 主厂房内各层高程应符合下列要求:

- a) 应满足机组及附属设备布置、安装检修、运行维护、结构尺寸和建筑空间要求。
- b) 水轮机安装高程应根据制造厂提供的机组特性、水轮机吸出高度、电站运行期下游最低尾水位,结合厂址的地形、地质条件,经技术经济论证确定。
- c) 水轮机层地面高程应根据蜗壳进口断面尺寸及蜗壳顶部最小混凝土结构厚度确定。
- d) 发电机层地面高程除应满足发电机层布置要求外,并应考虑水轮机层设备布置及母线电缆的敷设和下游水位影响。
- e) 如主厂房空间允许,可在发电机层下增设电缆层,其净空应满足发电机主引出线、电缆敷设、运行维护和消防等要求。
- f) 屋顶高程应根据屋盖形式和结构尺寸确定,并应满足起重机部件安装与检修、厂房吊顶、照明设施布置和保温等要求。

9.3.10 尾水平台布置应符合下列要求:

- a) 尾水平台宽度应满足尾水闸门及启闭设备布置、闸门吊运、交通、下游防洪设施和消防等对结构尺寸的要求。
- b) 尾水平台长度可根据启闭设备运行、闸门检修要求确定。
- c) 尾水管较长的厂房可利用尾水平台布置主变压器、开关站或副厂房,若为此需增加尾水管长度,应经技术经济论证。

9.3.11 中央控制室布置应按下列原则确定:

- a) 应方便运行、维修管理,便于分期过渡和节省电缆。宜避免振动、噪声和磁场等干扰的影响。
- b) 可与发电机层同一高程或略高。当中央控制室高于发电机层时,两者之间的交通应方便。
- c) 中央控制室设于远方集控中心时,可在副厂房内设置过渡值班室。
- d) 中央控制室周围不宜布置空压机房、通风机房等强噪声设备的生产副厂房。
- e) 设置在尾水平台上的中控室应采取防止机组振动的有效措施。
- f) 应选择有良好自然通风和采光条件的部位与朝向。
- g) 应至少设置两个进出口。

h) 应设置完备的安全消防设施。

9.3.12 副厂房的面积和内部各房间布置应根据机电设备布置、维修、试验及管理需要,结合厂房具体条件综合考虑确定。

9.4 地面厂房整体稳定分析

9.4.1 一般规定

9.4.1.1 厂房整体稳定分析应根据地基情况结构特点及施工条件进行。具体内容可包括:

- a) 建基面抗滑稳定计算。当厂房地基内部存在不利于厂房整体稳定的软弱结构面时,应进行厂房沿软弱结构面的深层抗滑稳定计算。对于非岩基上的厂房应校核齿墙基底土层抗滑稳定。
- b) 厂房基础面法向应力计算。
- c) 厂房抗浮稳定验算(包括厂房Ⅱ期混凝土未浇情况)。
- d) 非岩基上厂房尚应进行地基承载力、变形和沉降验算。

9.4.1.2 厂房整体稳定及地基应力宜采用材料力学法计算。

9.4.1.3 厂房整体稳定及地基应力计算应分别以中间机组段、边机组段及安装间段作为一个独立的单元,按结构特点和荷载组合情况分别进行。对有侧向水压力的边机组段及安装间段,还应核算双向水压力作用下的整体稳定性及地基应力。

9.4.1.4 坝后式厂房采取厂坝整体连接时,应考虑厂坝联合作用。

9.4.2 荷载及其组合

9.4.2.1 作用在水电站厂房上的荷载应包括:厂房结构及其永久设备自重、作用在厂房上的回填土石重和水重、静水压力、扬压力、泥沙压力、浪压力、冰压力、地震荷载、发电机短路时机组的动荷载,以及其他可能出现的荷载。

9.4.2.2 厂房各部分结构自重应按其几何尺寸及材料重度计算确定。常用材料重度宜按下列值取用:

- a) 钢筋混凝土重度取 25 kN/m^3 ;
- b) 浆砌石重度取 $21 \text{ kN/m}^3 \sim 25 \text{ kN/m}^3$;
- c) 回填土石重度取 $16 \text{ kN/m}^3 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ 。
- d) 水重应按实际体积计算,水的重度可取 10 kN/m^3 。

9.4.2.3 厂房内机电设备重量应计算固定的主要设备,可不考虑附属设备及非固定设备重量。

9.4.2.4 作用在厂房上的静水压力应根据厂房在不同运行工况下的上、下游水位计算确定。对于多泥沙河流应考虑含沙量对水重度的影响。

9.4.2.5 作用在岩基上厂房的扬压力应按下列原则进行计算:

- a) 按垂直作用于计算截面全部截面积上的分布力计算。
- b) 河床式厂房底面的扬压力分布图形可按下列三种情况分别确定:
 - 1) 当厂房上游设有防渗帷幕和排水孔时,扬压力图形按图 8(a)采用,渗透压力强度系数 α 取 0.25。
 - 2) 当厂房上游不设防渗帷幕和排水孔时,厂房底面上游处扬压力作用水头为 H_1 ,下游处为 H_2 ,其间以直线连接,见图 8(b)。
 - 3) 当厂房上游设有防渗帷幕和排水孔,并且在下游侧设有排水孔及抽排系统时,其扬压力图形如图 8(c)所示, α_1 取 0.2, α_2 取 0.5。

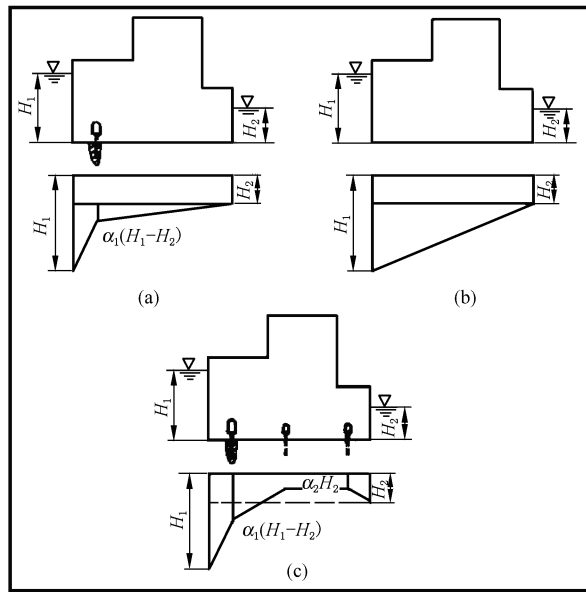
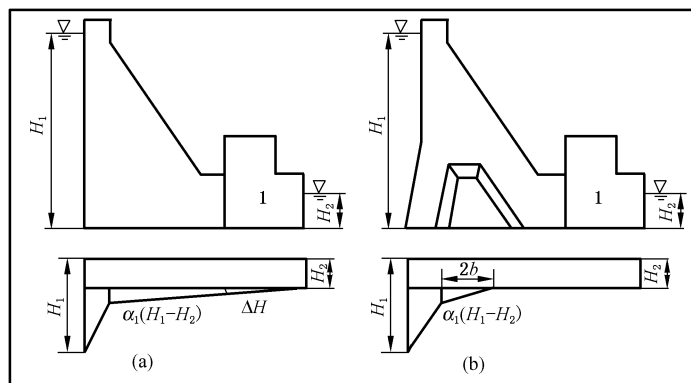


图 8 河床式厂房扬压力分布图形

c) 坝后式厂房,当厂坝整体连接或厂坝间设有永久变形缝并已用止水封闭时,其扬压力分布图形应与坝体共同考虑:

- 1) 实体重力坝坝后厂房,当上游坝基设有防渗帷幕和排水孔,下游坝基无抽排设施时,扬压力图形见图 9(a), ΔH 由帷幕、排水孔位置及 a 值计算确定。
- 2) 宽缝坝、空腹坝坝后式厂房 $\Delta H=0$,如图 9(b)所示。



1——厂房;
 b ——为宽缝处坝体宽度。

图 9 坝后式厂房扬压力分布图形

d) 岸边式厂房上游侧扬压力作用水头可据厂区地下水位和排水设施综合确定。

e) 当洪峰历时较短,下游洪水位较高时,经论证,厂房的扬压力分布图形可考虑时间效应予以折减。

9.4.2.6 非岩基上厂房扬压力分布图形应根据厂房建筑物地下轮廓设计具体情况,以及地基的渗透特性,通过计算或模拟试验研究确定。

9.4.2.7 荷载组合可分为基本组合和特殊组合两类,厂房整体稳定分析的荷载组合可按表 26 规定采用,必要时还可考虑其他可能的不利组合。

表 26 荷载组合

荷载组合	计算情况	上、下游水位		荷载类别										备注	
				结构自重	永久设备水重	回填土石重	静水压力	扬压力	浪压力	泥沙压力	土压力	冰压力	地震荷载		
基本组合	正常运行	a1	上游正常蓄水位 下游最低水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
		a2	上游设计洪水位 下游相应水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
		b	下游设计洪水位	√	√	√	√	√				√			
特殊组合	机组检修	a	上游正常蓄水位 下游检修水位	√		√	√	√	√	√	√	√	√		
		b	下游检修水位	√		√	√	√	√			√			
	机组未安装	a	上游正常蓄水位或 设计洪水位下游 相应水位	√		√	√	√	√	√	√	√	√		
		b	下游设计洪水位	√		√	√	√	√			√			
	非常运行	a	上游校核洪水位, 下游校核洪水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
		b	下游校核洪水位	√	√	√	√	√	√			√			
地震情况	a	上游正常蓄水位 下游最低水位	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
	b	下游正常水位	√	√	√	√	√	√			√		√		

(1) 蜗壳二期混凝土未浇
(2) 水重应根据实际情况确定

上下游水位若有其他论证时可另作规定

注 1: 表中 a 适用于河床式厂房, b 适用于坝后式及岸边式厂房;
 注 2: 浪压力与冰压力不同时存在可根据实际情况选择一种计算;
 注 3: 施工期的情况应作必要的核算可作为特殊组合;
 注 4: 厂房基础设有排水孔时如考虑排水失效情况可作为特殊组合;
 注 5: 正常运行 a2、机组未安装 a 和非常运行 a 中的下游相应水位是指当上游发生设计洪水位或校核洪水位时下游可能出现的对厂房建筑物最不利的水位包括枢纽泄洪或不泄洪情况;
 注 6: 坝后式厂房上游水位根据止水布置情况确定; 岸边式厂房上游水位应考虑地下水位。

9.4.3 整体稳定及地基应力计算

9.4.3.1 厂房整体抗滑稳定可按公式(23)~公式(25)计算,各作用力为作用在厂房基面上的力。厂房整体抗滑稳定最小安全系数应满足表 27 要求。

表 27 厂房整体抗滑稳定最小安全系数

地基类别	荷载组合	安全系数	适用公式
非岩基	基本组合	1.25	式(23)、(24)
	特殊组合 I	1.10	
	特殊组合 II	1.05	
岩基	基本组合	1.10	式(23)
	特殊组合 I	1.05	
	特殊组合 II	1.00	
	基本组合	3.00	式(25)
	特殊组合 I	2.50	
	特殊组合 II	2.30	

注：特殊组合 I 适用于机组检修、施工期、完建及非常运行情况。特殊组合 II 适用于地震情况。

9.4.3.2 厂房地基面上的法向应力,可按公式(22)计算。土基上厂房平均基底应力应不大于地基允许承载力;基底最大应力应不大于 1.2 倍地基允许承载力。地基面法向应力不均匀系数的允许值可按表 17 采用。

9.4.3.3 岩基上厂房地基面上的法向应力用材料力学法计算时应符合下列要求:

- a) 厂房地基面上所承受的最大法向应力不应超过地基允许承载力。在地震情况下地基允许承载力可适当提高;
- b) 厂房地基面上所承受的最小法向应力(计入扬压力)应满足下列条件:
 - 1) 对于河床式厂房除地震情况外都应大于零在地震情况下允许出现不大于 0.1 MPa 拉应力;
 - 2) 对坝后式及岸边式的厂房正常运行情况应大于零,机组检修、机组未安装及非常运行情况允许出现不大于 0.1 MPa~0.2 MPa 的局部拉应力,地震情况如出现大于 0.2 MPa 拉应力应进行专门论证。

9.4.3.4 厂房抗浮稳定性可选择表 25 特殊组合中的机组检修机组、未安装、非常运行三种情况中最不利的情况按公式(34)计算:

$$K_f = \frac{\sum W}{U} \dots\dots\dots (34)$$

式中:
 K_f ——抗浮稳定安全系数,任何情况下不得小于 1.1;
 $\sum W$ ——机组段或安装间段的全部重量(力),kN;
 U ——作用于机组段或安装间段的扬压力总和,kN。

9.4.3.5 土基上厂房的渗径长度应满足地基渗透稳定要求,渗径长度计算可按式(20)计算。

9.5 厂房结构设计

9.5.1 一般规定

9.5.1.1 水电站厂房结构可分为上部结构和下部结构。上部结构包括排架柱、吊车梁、地面层梁板、屋面、联系梁、圈梁和尾水框架等等,下部结构包括挡墙、底板、水轮机层梁板、机墩、蜗壳、尾水管、集水井、尾水闸墩和尾水平台等。

9.5.1.2 厂房结构设计应根据承载能力极限状态及正常使用极限状态的要求,分别按下列规定进行计算和验算:

- a) 承载能力:厂房所有结构构件均应进行承载能力计算;对需要抗震设防的结构,尚应进行结构的抗震承载能力计算。
- b) 变形:对使用上需要控制变形的结构构件,如吊车梁、厂房构架等,应进行变形验算。
- c) 裂缝控制:对承受水压力的下部结构构件,如钢筋混凝土蜗壳、闸墩、胸墙及挡水墙等应进行抗裂或裂缝宽度验算;对使用上需要限制裂缝宽度的上部结构构件,应进行裂缝宽度验算。

9.5.1.3 厂房结构的构件可只作静力计算,对直接承受设备振动荷载的构件如发电机支承结构等还应进行动力计算。结构可按结构力学法计算,对于复杂结构除用结构力学法计算外,宜采用有限元法进行计算分析。

9.5.1.4 厂房各部位混凝土除应满足强度要求外,应根据所处环境条件、使用条件、地区气候等具体情况分别提出抗渗、抗冻、抗侵蚀、抗冲刷等耐久性要求。混凝土强度等级可按表 28 规定采用。

表 28 厂房结构各部位混凝土强度等级表

序号	结构部位	强度等级(28 d 龄期)	备注
1	大体积基础	\geq C20	
2	尾水管、蜗壳、机墩、风罩、尾水闸墩、水下墙等	\geq C25	
3	水位变动区混凝土结构等	\geq C25	
4	上部结构梁、板、柱	\geq C25	
5	桥面梁、预制钢筋混凝土吊车梁屋架等	\geq C30	采用 HRB400 钢筋时不低于 C35。
6	预应力钢筋混凝土构件	\geq C35	当采用高强钢丝、热处理钢筋作为预应力钢筋时,混凝土强度等级不宜低于 C40。
<p>注 1: 采用 HRB400 钢筋及承受重复作用的构件,混凝土强度等级不宜低于 C25;</p> <p>注 2: 对冻融比较严重和有抗冲耐磨要求的部位,应进行专门研究确定,且混凝土强度等级不应低于 C25。</p>			

9.5.2 下部结构

9.5.2.1 当地基为坚硬完整的岩石时,可以做成分离式底板或取消底板。底板厚度宜为 0.3 m~0.5 m。取消底板的岩石表面应抹光,并能抗冲耐磨,对地质条件差的厂房,宜均做整体式钢筋混凝土底板,厚度宜达 2 m~3 m 以上。

9.5.2.2 尾水管结构可分成三个部分:锥管段、肘管段和扩散段,分别选择相应的方法分析内力。

9.5.2.3 尾水管结构的设计荷载可有以下几种:结构自重、尾水管顶板以上结构自重和设备重、内水压力、外水压力和扬压力。

9.5.2.4 尾水管结构的计算情况有以下四种工况:

- a) 正常运行:组合荷载为结构自重、尾水管顶板以上结构自重和设备重、内水压力(正常尾水位)、外水压力(正常尾水位)和扬压力(正常尾水位)。
- b) 检修期:组合荷载为结构自重、尾水管顶板以上结构自重和设备重、外水压力(检修尾水位)和扬压力(检修尾水位)。
- c) 施工期:组合荷载为结构自重、尾水管顶板以上结构自重和设备重。
- d) 校核洪水运行:组合荷载为结构自重、尾水管顶板以上结构自重和设备重、内水压力(校核尾水

位)、外水压力(校核尾水位)和扬压力(校核尾水位)。

9.5.2.5 尾水管结构内力计算应按下列原则进行:

- a) 垂直水流方向宜简化为平面问题考虑,即沿水流方向分区切若干剖面,按平面框架计算。
- b) 高尾水位厂房应验算顶板、底板及支墩的顺水流方向强度。

9.5.2.6 在中、高水头的电站应采用金属蜗壳,低水头(水头 <30 m)电站蜗壳尺寸较小宜采用钢筋混凝土蜗壳。

9.5.2.7 钢筋混凝土蜗壳结构的设计荷载有以下几种:

- a) 结构自重。
- b) 机墩及风罩传来荷载。
- c) 水轮机层地面活荷载。
- d) 内水压力。

9.5.2.8 钢筋混凝土蜗壳结构设计应按下列工况计算:

- a) 对不承受内水压力的蜗壳正常运行:组合荷载为结构自重、机墩及风罩传来荷载和水轮机层地面活荷载。
- b) 对承受内水压力的蜗壳正常运行:组合荷载为结构自重、机墩及风罩传来荷载、水轮机层地面活荷载和内水压力。

9.5.2.9 钢筋混凝土蜗壳结构设计计算宜采用下列假定:

- a) 不承受内水压力的蜗壳按允许出现裂缝设计。
- b) 承受内水压力的蜗壳按不允许出现裂缝设计,或按限制裂缝开展宽度设计。
- c) 不考虑温度应力。

9.5.2.10 机墩为发电机和水轮机的支承结构,承受着巨大的动荷载和静荷载,应具有足够的刚度、强度和稳定性,应采用钢筋混凝土结构。机墩设计也包括发电机风道周围的混凝土墙(风罩)。

9.5.2.11 机墩结构的设计荷载应有以下几种:

- a) 静荷载:
 - 1) 机墩自重;
 - 2) 发电机层楼板自重及其活荷重;
 - 3) 发电机定子重;
 - 4) 励磁机定子及附属设备重;
 - 5) 上机架重;
 - 6) 下机架重;
 - 7) 水轮机重。
- b) 动荷载:
 - 1) 发电机转子连轴重;
 - 2) 励磁机转子重;
 - 3) 水轮机转子连轴重;
 - 4) 水轮机轴向水推力;
 - 5) 水平离心力;
 - 6) 发电机正常扭矩;
 - 7) 发电机短路扭矩。

9.5.2.12 机墩设计计算应分为正常运行和发生短路二种工况,荷载组合应符合下列规定:

- a) 正常运行:组合荷载为静荷载(1)~(7)+动荷载(1)~(6);
- b) 发生短路:组合荷载为静荷载(1)~(7)+动荷载(1)~(5)+动荷载(7)。

9.5.2.13 机墩的动力计算应按下列原则进行:

- a) 应验算共振、振幅和动力系数。
- b) 机墩自振频率与强迫振动频率之差和自振频率之比应大于 20%~30%，或强迫振动频率与自振频率之差和机墩强迫振动频率之比应大于 20%~30%，以防共振。
- c) 机墩强迫振动的振幅应满足：垂直振幅长期组合不大于 0.1 mm，短期组合不大于 0.15 mm；水平横向与扭转振幅之和长期组合不大于 0.15 mm，短期组合不大于 0.2 mm。

9.5.2.14 风罩荷载结构的设计荷载有以下几种：

- a) 自重及发电机层楼板重。
- b) 发电机层活荷载。
- c) 温度应力。
- d) 发电机上机架千斤顶水平推力。
- e) 发电机发生短路扭矩时，发电机楼板施于风罩的约束扭矩。

9.5.2.15 风罩结构宜按下列原则和方法进行设计：

- a) 其底部为固端，顶部宜与发电机层楼板整体连接。
- b) 温度作用引起的内力，宜考虑结构开裂后的影响予以折减，或采取降低钢筋设计强度的方法以抵偿温度作用。
- c) 正常使用极限状态风罩最大裂缝宽度允许取 0.4 mm。

9.5.2.16 灯泡贯流式机组的荷载应满足下列规定：

- a) 灯泡贯流机组的荷载宜根据下列五种情况确定：
 - 1) 流道放空；
 - 2) 流道充水；
 - 3) 额定运行工况；
 - 4) 甩负荷工况；
 - 5) 飞逸工况。
- b) 流道进水口段和尾水管段事过流部位，可切取单位宽度结构按弹性地基梁上的平面框架计算。流道中段的结构设计应考虑径向和轴向两个方向，作用在流道中段的荷载及其组合见表 29。

表 29 流道中段荷载及组合表

设计状况	极限状态	荷载组合	计算工况	荷载							
				自重	水重	内水压力	外水压力	扬压力	机组作用力	温度	地震力
持久状况	承载力极限状态	基本组合	正常运行	√	√	√	√	√	√	√	—
			检修工况	√	—	—	√	√	—	√	—
偶然组合		校核洪水	√	√	√	√	√	√	—	—	
		地震	√	√	√	√	√	√	—	√	
		飞逸	√	√	√	√	√	√	√	—	
偶然状况		短路	√	√	√	√	√	√	√	—	
持久状况	使用极限状态	标准组合	正常运行	√	√	√	√	√	√	—	

- c) 结构计算原则和方法应满足下列要求：
 - 1) 流道中段的结构计算不考虑管形壳的里衬作用，由钢筋混凝土承受全部荷载。
 - 2) 在轴向荷载的作用下，底板和侧墩宜不做轴向（顺水流向）的结构计算，在配筋时适当加

强。流道顶板需单独计算其沿轴向的内力。

- 3) 用结构力学方法计算时,在径向荷载作用下沿水流方向切取单位宽度,按弹性地基上的平面框架进行计算。
- 4) 用结构力学方法计算时,顶板为支承在流道两侧墩上的拱形结构,也可简化为两端为固端的矩形梁进行计算;由于顶板管形壳上支柱集中力较大,宜按照梁上集中荷载计算并配置吊筋。当梁的高跨比 $h/l > 0.5$ 时(h 为梁高, l 为梁净宽),宜按深梁进行应力分析和配筋。
- 5) 按有限元法分析时,可取流道中段进行整体分析。管形壳立柱与混凝土结合部位应力集中,此处的配筋应相对加强。
- 6) 结构静力计算中动荷载应乘动力系数。

9.5.3 上部结构

9.5.3.1 吊车梁所承受的荷载有梁自重、钢轨及其附件重、吊车竖向轮压和横向及纵向水平作用。钢轨及其附件重标准值应根据厂家资料确定,初步计算时可取 $1.5 \text{ kN/m} \sim 2.0 \text{ kN/m}$ 。吊车竖向轮压和横向及纵向水平作用标准值应按制造厂提出的可能发生的最大值采用。

9.5.3.2 吊车梁计算应考虑作用于吊车梁的扭矩作用。

9.5.3.3 吊车梁设计应符合下列要求:

- a) 除按承载能力设计外,还应按正常使用要求验算挠度。
- b) 电动桥式吊车的吊车梁短期组合最大许可挠度:钢筋混凝土吊车梁为 $L_0/600$;钢结构为 $L_0/750$ 。(L_0 为吊车梁计算跨度)。
- c) 钢筋混凝土吊车梁尚应验算裂缝开展宽度,短期组合最大裂缝宽度不大于 0.3 mm 。
- d) 水电站厂房吊车属轻级工作制,吊车梁可不验算疲劳强度。

9.5.3.4 吊车梁与柱连接的设计,应满足支座局部承压、抗扭及抗倾覆要求。

9.5.3.5 厂房构架的布置应满足下列要求:

- a) 柱网布置应满足机电设备的安装和检修要求,柱距宜统一,并应与机组分缝相适应。
- b) 立柱宜避免直接落在尾水管、蜗壳或钢管的顶板上。
- c) 厂房构架除满足结构强度要求外,还应具有足够的刚度。在正常使用极限状态下,吊车梁轨顶的侧向位移不得超过吊车正常行驶所允许的限值,且在标准组合下轨顶高程处柱的最大位移不宜超过表 30 的允许值。

表 30 柱顶的允许位移值

序号	变形种类	按平面图形计算	按空间图形计算
1	横向位移(厂房封顶)	$H/1\ 800$	$H/2\ 000$
2	横向位移(厂房未封顶)	$H/2\ 500$	
3	纵向位移	$H/4\ 000$	

注: H 为柱下端基础面到吊车梁轨顶面的高度。

- d) 厂房构架承受的作用及其作用效应组合,可按表 31 规定采用。

表 31 厂房构架作用效应组合表

设计状况	极限状态	作用效应组合	计算情况	作用名称												
				结构自重	屋面永久机电设备重	屋面活荷载或雪荷载	发电机厂楼面荷载	水压力			吊车荷载		风荷载	温度作用	施工荷载	地震作用
								正常蓄水位	设计洪水水位	校核洪水水位	吊车轮压	吊车水平制动力				
持久状况	承载力极限状态	基本组合 (一)	1. 吊车满载	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓					
			2. 吊车空载+风荷载	✓	✓	✓	✓	✓			✓					
基本组合 (二)		1. 吊车满载+风荷载+温度作用	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓				
		2. 施工期	✓							✓				✓		
短暂状况	承载力极限状态	偶然组合	1. 吊车空载+地震作用	✓	✓		✓	✓		✓					✓	
			2. 吊车空载+校核洪水水压力	✓	✓		✓			✓	✓					
持久状况		使用极限状态	短期或长期组合 <i>n</i>	1. 吊车满载	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓				
				2. 吊车空载+风荷载	✓	✓	✓	✓	✓			✓				
短暂状况	短期组合		1. 吊车满载+风荷载+温度作用	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓				
			2. 施工期	✓							✓				✓	

注 1: 荷载效应组合时,应考虑施工期厂房未封顶或厂房封顶机坑二期混凝土未浇筑等情况,施工荷载作用值大小及其组合由具体条件确定;
注 2: 构架温度作用视上部结构型式和重要性等因素选定。

9.5.3.6 厂房构架可按平面构架进行计算,其计算简图按下列规定确定:

- a) 横向跨度应根据轴线确定,对阶形变截面柱,轴线通过最小截面中点。
- b) 下柱高度应取柱固定端至牛腿顶面的距离。上柱高度应为铰接时取牛腿顶面至柱顶面的距离;刚接时取牛腿顶面至横梁中心的距离。
- c) 楼板(梁)与柱筒支连接时,可不考虑板(梁)对柱的支承约束作用,若板(梁)柱整体连接,根据板(梁)刚度大小假定按不动铰、刚接或弹性结点考虑。
- d) 构架柱基础固定端高程,应根据基础的约束条件确定。
- e) 构架柱与屋面大梁整体浇筑或屋盖采用混凝土厚板结构时,构架柱与屋盖连接按刚接考虑,当屋盖采用屋架(预制混凝土、钢屋架)结构时,构架柱与屋架连接按铰接考虑。

9.5.3.7 厂房纵向构架主要承受结构自重、吊车纵向水平制动力、地震力、纵向风荷载、温度影响力和由两侧相邻吊车梁竖向反力差产生的纵向偏心弯矩。其纵向偏心弯矩标准值 M_y 可按公式(35)近似计算。

$$M_y = \Delta R e \dots\dots\dots (35)$$

式中:

ΔR —— 相邻吊车梁反力差标准值, kN;

e —— 对 ΔR 柱中心的偏心距, m。

9.5.3.8 屋盖系统设计应符合下列规定：

- a) 屋盖结构可根据屋盖荷载、厂房跨度、施工难易、工期等条件,采用混凝土结构或轻钢结构。
- b) 屋盖系统设计应结合水电站所处的自然环境、厂房布置和运行要求,满足排水、保温、防火、抗震等要求,屋顶可采用保温板材,必要时设自然采光带。
- c) 屋面坡度应结合当地降雨强度、屋盖结构型式和建筑立面处理综合选定。

9.5.4 消防设计

9.5.4.1 水电站厂房的火灾危险性分类和耐火等级,应依据国家标准规定的原则划分。

9.5.4.2 消防车道的净宽和净空高度均不宜小于 4.0 m,消防车应能到达地面厂房入口处,消防车道与厂房之间不应设置妨碍消防车作业的障碍物。消防道路面、扑救作业场地及其下面的管道和暗沟等应能承受大型消防车的压力。供消防车停留的空地,其坡度不宜大于 3%。尽头式消防车道应设置回车道或回车场。

9.5.4.3 水电站主厂房和高度在 24 m 以下的副厂房,宜划为一个防火分区。为了确保防火安全,对易失火的重点场所及有特殊要求的部位,如厂内油罐、油处理室、电缆室、母线廊道及竖井等,设置防火隔墙或防火门窗、防火阀等进行分隔。

9.5.4.4 主、副厂房安全出口的数目不应少于两个,且必须有一个直通屋外地面,进厂交通的出口可作为直通屋外地面的的安全出口。发电机层以下各层,室内最远工作地点到该层最近的安全疏散出口距离不宜超过 60 m。

9.5.4.5 安全疏散门、走道和楼梯应满足下列要求：

- a) 门净宽不应小于 0.9 m,并应向疏散方向开启。
- b) 走道净宽不应小于 1.2 m。
- c) 楼梯净宽不应小于 1.1 m,坡度不宜大于 45°。主厂房机组段楼梯净宽不宜小于 0.8 m。

9.5.5 采暖、通风

9.5.5.1 水电站厂房采暖、通风与空气调节设计中应执行国家的相关规定,经济合理、技术先进、符合工业卫生和环境保护的要求。

9.5.5.2 地面厂房通风优先考虑采用自然通风,当自然通风达不到室内空气参数要求时可采用自然与机械联合通风、机械通风和局部空气调节等方式。

9.5.6 构造设计

9.5.6.1 变形缝的设置应按下列要求确定：

- a) 机组间与大坝、安装间及副厂房等相邻建筑物之间,宜设置永久变形缝。
- b) 机组段永久变形缝的间距,宜为 20 m~30 m,经论证采取措施后可适当放宽。
- c) 永久变形缝的宽度应根据建筑物温度变形、沉降及抗震构造要求等条件确定。岩基上的建筑物,下部结构的永久变形缝缝宽为 10 mm~20 mm,上部结构的永久变形缝缝宽宜适当加大。非岩基上的厂房永久变形缝缝宽应按地基不均匀变形计算研究确定。
- d) 为保证永久变形缝的宽度,可在缝内设置填充材料。填充材料应具有弹性、能适应变形要求。

9.5.6.2 止水设置及材料选择应满足下列要求：

- a) 永久变形缝中应设置可靠的止水,止水布置应有利于结构的受力条件。必要时可在止水设施后加设排水孔和排水管道。
- b) 止水材料可根据变形缝的宽度、水压力、环境条件及其所处部位,选用紫铜片、不锈钢片、橡胶、塑料、沥青以及高分子合成材料等。
- c) 深入基岩的止水片必须与基岩妥善连接,埋入基岩内深度宜取 300~500 mm。

10 工程安全监测

10.1 一般规定

10.1.1 应根据大坝坝型、坝高、地质条件、结构型式及特点,设置必要的监测设施。安全监测设计的主要任务是:

- a) 监视工程建筑物在施工期、蓄水期和运行期的工作状态与安全;
- b) 检验设计,指导施工和运行;
- c) 为科学研究积累资料。

10.1.2 工程安全监测范围应包括坝体、坝基、坝肩,以及对工程安全有重大影响的近坝区岸坡和其他与工程安全有直接关系的建筑物和设备。

10.1.3 安全监测设计应遵循下列原则:

- a) 安全监测系统应能全面、准确地反映工程及基础在施工期、蓄水期和运行期的实际工作性态;
- b) 应根据坝高、地质条件、结构特点,以及在相同类型坝段中的代表性等因素,确定重点监测坝段和一般监测坝段,测点布置应突出重点;
- c) 监测项目应统筹安排,配合布置。重要监测断面或部位的某些重要测点,可采用两种以上监测手段,关键部位用于监测重要物理量的仪器可设备份。应结合影响工程安全的主要因素,有针对性地设置监测项目和布置监测仪器;
- d) 应选择性能稳定可靠,且适宜于在恶劣环境中长期工作的监测仪器和设备。仪器的量程和精度应满足监测要求。需要长期观测的重要监测项目,其仪器设备应便于更换。
- e) 宜采用先进技术并为后期技术改进留有余地;
- f) 小型水电站工程必要时也可设置自动化监测系统。采用自动化监测设备的同时,应具备人工观测条件。

10.1.4 安全监测设计应注重下列事项:

- a) 配合坝体构造设计,合理布置观测廊道和观测站;
- b) 为监测设施提供良好的交通、照明、防潮、防风、排水、保温及保安条件;
- c) 监测设施的埋设安装,应减少施工干扰。仪器和电缆应有可靠的保护措施;
- d) 根据理论计算或模型试验成果,对主要监测项目宜提出预计的测值变化范围;
- e) 应重视施工期和首次蓄水期的安全监测设计,及时取得主要监测项目各测点的基准值。水库首次蓄水前应制订详细的监测工作计划。若首次蓄水前永久性监测设施未完工或不具备监测条件时,应采取相应的临时监测措施;
- f) 根据工程具体条件,对各监测项目宜提出监测技术要求。

10.2 安全监测设计

10.2.1 重力坝监测应满足下列要求:

- a) 重力坝监测应以坝体变形和基础渗流监测为重点。可按大坝坝高,并结合工程特点和具体地质条件确定。
- b) 变形监测设施布置应符合下列要求:
 - 1) 坝体和坝基的水平位移宜采用引张线法、真空激光准直法和垂线法监测。若坝轴线较短,条件有利时,坝体水平位移也可采用视准线法或大气激光准直法监测。准直线的端点应设倒垂线作为工作基点。
 - 2) 坝体挠度宜采用垂线法监测。
 - 3) 近坝区岸坡和滑坡体的表层水平位移,宜采用边角网、视准线法和交会法监测。深层水平

位移可采用倒垂线组、多点位移计、挠度计或测斜仪等监测。

- 4) 坝基范围内的重要断裂构造或软弱结构面,宜布置倒垂线组、测斜仪或多点位移计监测。
 - 5) 坝体和坝基的垂直位移,宜采用精密水准法和真空激光准直法监测。根据具体情况也可采用流体静力水准法监测。精密水准测量的起测基点,宜布置在大坝附近的岸坡基岩上。水准基点应布设在大坝下游不受库区变形影响的地区。真空激光准直系统和流体静力水准测线应设在坝体水平廊道内,两端应布设垂直位移工作基点,其测点宜与精密水准测点配合布置。
 - 6) 近坝区岸坡和滑坡体的垂直位移,宜采用精密水准法、沉降仪或多点位移计等方法监测。高山区也可采用三角高程法监测。必要时可将三角高程法与边角网法结合组成“三维网”。
 - 7) 坝体和坝基倾斜,宜采用精密水准法、倾斜仪或流体静力水准法监测。
- c) 渗流监测设施布置应符合下列要求:
- 1) 应根据坝基地质条件和渗流控制工程措施等布置纵向监测断面和横向监测断面。纵向监测断面可设1~2个,横向监测断面宜不少于3个,可用测压管或渗压计监测坝基扬压力。纵向监测断面宜布置在第一道排水幕线上。每个坝段宜布置1个测点。地质条件复杂坝段,宜适当增加测点数量。横向监测断面宜选择在最高坝段、岸坡坝段及地质构造复杂的谷岸台地坝段布置。横向监测断面间距为50 m~100 m,坝基地质条件简单地区,可加大间距。每个监测断面布置的测点数量不少于3个。必要时应在防渗帷幕前布置测点。有下游防渗帷幕时,应在其上游侧布置测点。
 - 2) 坝基深部渗透压力监测,可根据坝基地质条件及存在的主要地质缺陷,应有针对性地布置测压管或渗压计。遇大断层或强透水带时,应沿可能的渗流方向布置测点。
 - 3) 坝体渗透压力的监测,宜在上游坝面至坝体排水管之间,沿坝体两相邻排水管中间,顺水流方向水平施工缝和上、下两层水平施工缝中间的坝体混凝土中,各布置一排渗压计,监测水平施工缝和坝体混凝土的渗透压力。
 - 4) 绕坝渗流监测,在两岸坝肩的防渗帷幕后,沿流线方向可布置2~3个监测断面。每个监测断面不少于3个测点。测压管孔深应达强透水层,并深入到筑坝前地下水位线以下。必要时,应在防渗帷幕前布置少量测点。
 - 5) 渗流量监测,宜在坝基廊道的排水沟上分段布设量水堰,分别监测坝基、坝体及河床和两岸的渗流量。坝体混凝土缺陷、冷缝和裂缝的漏水量较大时,应设法集中后用容积法量测。漏水量较大的排水孔,宜采用容积法单孔量测。
 - 6) 水质分析,应选择有代表性的排水孔或绕坝渗流监测孔,定期取水样进行水质分析,并与库水水质进行比较,若发现有析出物或有侵蚀性的水流出时,应取样进行全分析。
- d) 应力应变及温度监测设施布置应符合下列要求:
- 1) 在重点监测坝段沿坝段中心线应布置1个垂直于坝轴线的监测断面以及1个或几个水平监测截面;
 - 2) 应力应变监测仪器宜集中布置于重点监测断面和监测截面。必要时应选择有代表性的大孔口、廊道周边、混凝土与基岩结合面附近或其他应力复杂部位适当布置测点;
 - 3) 重点监测坝段可作为温度监测坝段。应根据坝体温度场的状态,并结合坝面温度和坝基温度布置测点。施工期临时性温度监测宜与永久性温度监测相结合;
 - 4) 在重点监测坝段,沿需要灌浆的纵横缝不同高程可布置测缝计。岸坡坝段宜根据具体情况沿混凝土与基岩接触面布置测缝计。对于可能产生裂缝的部位,宜在混凝土中布置裂缝计;
 - 5) 预应力锚杆或预应力锚索,应抽样监测其受力状态变化;

6) 重要的钢筋混凝土建筑物内,可布置钢筋应力测点。

10.2.2 拱坝监测应满足下列要求:

- a) 拱坝常规监测项目应以坝体和拱座的变形及渗流监测为重点。可按大坝坝高,并结合工程特性和具体地质条件确定。
- b) 水平位移与挠度监测应符合下列规定:
 - 1) 坝体和坝基的水平位移可采用垂线法、准直线法、边角网法、前方交会法、导线法等方法监测。宜优先采用垂线法监测坝体和坝基的水平位移。准直线和导线的端点应设置倒垂线作为工作基点。交会法的固定点可用边角网校核。对作为工作基点的倒垂线的稳定性,应有平面监测网定期校核。
 - 2) 拱座和近坝区岸坡表层的水平位移,可采用边角网或测边网、交会法、准直线法等方法监测。拱座和近坝区岸坡深部的水平位移,以及断层、裂隙等地质缺陷的水平位移,可采用倒垂组监测,或针对不同情况布置基岩变形计、多点位移计、钻孔倾斜仪等电测仪器进行监测。
 - 3) 坝体挠度宜采用垂直线法监测。监测坝段的挠度测点不应少于3点。
- c) 垂直位移与倾斜监测应符合下列规定:
 - 1) 坝体和坝基的垂直位移,宜采用精密水准法监测。根据具体情况也可采用流体静力水准法监测。精密水准测量的起测基点,宜布置在大坝附近的岸坡基岩上。起测基点的稳定性由水准基点定期检验。水准基点应布设在大坝下游不受库区变形影响或影响很小的地区。流体静力水准法,适用于在坝体水平廊道内监测坝体和坝基的垂直位移,其测点宜与精密水准点配合布置。
 - 2) 近坝区岸坡和滑坡体的垂直位移,宜采用精密水准法监测。高山区也可采用三角高程法监测。必要时可将三角高程法与边角法结合组成“三维网”。
 - 3) 重力拱坝坝体和坝基倾斜,应采用精密水准法或流体静力水准法监测。
- d) 渗流监测应符合下列规定:
 - 1) 重力拱坝坝基扬压力监测,可按纵向监测断面和横向监测断面布设测压管或渗压计。纵向监测断面宜布置在防渗帷幕后第一道排水幕线上,每个坝段宜布置1个测点。地质条件复杂地段,可适当增加测点数量。横向监测断面沿径向布置,宜根据坝高、坝长、坝厚及地质条件确定断面位置。横向监测断面上的扬压力测点数量不得少于3点。必要时可在重要监测坝段的灌浆帷幕前布置测点。地质条件优良的薄拱坝,可少设或不设扬压力监测设施。
 - 2) 拱坝坝基深部渗透压力监测可根据坝基地质条件及存在的主要地质缺陷,有针对性布置测压管或渗压计,监测坝基深部和拱座部位基岩的渗透压力。
 - 3) 坝体渗透压力的监测,对薄拱坝坝体可不进行;重力拱坝若需观测坝体排水管效能和坝体渗透压力分布时,可布置渗压计进行监测。
 - 4) 绕坝渗流监测,在两岸坝肩防渗帷幕后,沿流线方向布置2-3个监测断面,每个监测断面不少于3个观测孔。孔深应达强透水层,并深入到筑坝前地下水位线以下。
 - 5) 渗漏量监测,宜在坝基廊道内的排水沟上布设量水堰,分别监测坝基和坝体的渗漏量。漏水量较大的排水孔,宜采用容积法进行单孔量测。
- e) 应力、应变及温度监测应符合下列规定:
 - 1) 坝体监测断面和监测截面选择,宜根据坝高、坝长、体形、坝体结构及地质条件,按照拱和梁两个体系选择监测断面与监测截面。可选择拱冠、1/4拱弧或布置有大孔口的悬臂梁,沿径向布置垂直于坝轴线的铅直向监测断面。应选择最大拱座应力处布置监测截面。拱坝温度监测坝段应为安全监测系统的重点监测坝段。监测断面宜沿坝段中心断面布置。

- 2) 对监测仪器布置, 应应力应变监测仪器应集中布置于拱坝各监测断面和监测截面。必要时, 可在有代表性的孔口、廊道、坝缝等处适当布置测点。坝体温度测点应根据温度场的状态进行布置。
 - 1) 拱座的切向推力和径向剪力应为拱坝应力监测的重点。除了布置应变计外, 还可在拱推力方向布置压应力计直接监测切向拱推力。
 - 2) 应变计组的仪器数量和布置, 应根据各测点的应力状态确定。
 - 3) 在拱坝应力区、坝踵或其他可能出现拉应力的边界部位, 除了布置应变计外, 还可布置裂缝计监测可能发生的裂缝或混凝土与基岩结合情况。
 - 4) 在温度监测坝段, 根据坝高不同可布置 3-7 个监测截面。个监测截面与坝段中心断面的交线上可布置 3-5 个测点。温度梯度较大的坝面附近或大孔口周围, 可适当加密测点。拱坝二岸日照相差较大时, 左、右拱端下游面宜分别布置温度测点。在拱座应力监测截面上可增设必要的温度测点。
 - 5) 坝基温度监测可在温度监测断面的底部布置 5 m~10 m 深钻孔, 沿不同深度埋设温度计。
 - 6) 施工期临时性温度监测宜与永久性温度监测相结合。
 - 7) 拱坝横缝或纵缝开度变化监测, 可选择其有控制性的坝缝灌浆区中心位置布置测缝计进行监测。

10.2.3 面板堆石坝监测应满足下列规定:

- a) 面板堆石坝监测设施应按下列原则布置:
 - 1) 内部变形监测应与外部变形监测结合布置, 全面反映大坝的工作状态。
 - 2) 外部表面位移观测点可按等距离布置。
 - 3) 内部监测至少应在最大坝高处布置一个监测横断面, 并宜布置沿坝轴线的监测纵断面。
 - 4) 内部监测设施宜避免施工干扰, 并便于监测作业, 保证在恶劣气候条件下仍能进行必要项目的监测。
 - 5) 应突出变形渗流等监测内容, 重点监测混凝土面板变形、周边缝三向变位、坝体位移、渗流量等项目。
- b) 应根据设计计算结果, 并参照类似工程的监测成果, 确定监测值的预计范围, 选择监测仪器的型式及量程范围。
- c) 应设置下列监测项目:
 - 1) 坝面垂直位移和水平位移。
 - 2) 坝体内部垂直位移、顺河向水平位移和坝轴向水平位移。
 - 3) 接缝位移。
 - 4) 面板变形、应变。
 - 5) 如果坝基有覆盖层时, 应设置坝基覆盖层的沉降监测项目。
 - 6) 渗流量。

10.2.4 碾压土石坝监测应满足下列规定:

- a) 土石坝应设置观测设施。观测项目可根据工程的重要性、坝型、坝高、地质条件等确定。
- b) 土石坝的观测宜以肉眼巡检和外部观测为主, 应设置的观测项目主要为表面沉降及位移、渗流量及渗水的浑浊度、上下游水位等。
- c) 土石坝应沿坝轴线设置 1~2 个沉降及水平位移观测断面, 每个断面在坝顶及下游坝坡设 2~3 个观测点。土坝与混凝土建筑物的连接处, 坝下埋管及填土高度变化处应布置位移沉降标点。
- d) 可采用量水堰法或容积法观测渗流量, 并观测渗水的浑浊度。

- e) 位于砂砾石覆盖层上的坝,宜设置坝基水位观测管,沿坝轴线设 1~2 个观测断面。每个断面设 2~3 根观测管。必要时设置坝体浸润线观测管。
- f) 建于软土地基上的坝,应进行施工期的沉降位移观测,随着坝体的升高,应于上下游坝坡及坡脚以外,设置沉降位移观测点,沿坝轴线每隔 50 m~100 m 设一断面,每一断面设 3~5 个测点。施工期的测点应与永久标点相结合。必要时应设置坝基孔隙压力观测管。
- g) 地基为湿陷性黄土时,可设置地基沉降标点及坝体沉降位移测点。
- h) 土石坝应经常和定期进行宜外观观测(如裂缝、坍塌、隆起、砂沸、涌水等)。对溢洪道、输水洞的闸门、启闭机应定期检查,保证闸门启闭灵活。
- i) 所有观测资料及检查结果应及时整理分析,如有异常应及时采取措施。

10.2.5 厂房监测应满足下列规定:

- a) 水电站厂房建筑物的外部监测应设置建筑物的位移沉陷基础扬压力和渗流量等监测。
- b) 厂房地质条件不良的地基应根据基础处理设计设置必要的地基应力和变形监测。
- c) 对具有承压含水层的厂房地基和含有深层滑动面的厂房地基除监测沿建筑物基础面的扬压力外应同时埋设深层测压设备。
- d) 对厂边坡稳定性监测应根据其水文及工程地质条件和工程防护设计设置必要的边坡位移变形地下水位及渗流等监测。

10.2.6 边坡监测应满足下列规定:

- a) 边坡应以整体稳定性监测为主,兼顾局部稳定性监测;稳定性监测以变形监测为主;对于滑动面确定的滑坡,以地表变形监测为主。
- b) 位移与变形监测包括外部监测(坡面位移和沉降监测,坡面裂缝长度与开度监测),内部监测(地下变形监测,滑面或断层活动监测)。
- c) 地下水监测包括地下水位或水压力监测,排水点水量监测,地下水水质监测。
- d) 边坡加固结构监测包括抗滑桩、抗剪洞与锚固洞、锚杆锚索、挡墙的应力应变监测。
- e) 对于重要工程边坡的专项监测包括降雨量、地应力、地震监测等。
- f) 根据边坡地质与加固工程特点,布置 1 条或多条代表性监测剖面,每个剖面不少于 3 个监测点。监测剖面应尽可能与勘探剖面而和稳定性分析剖面相结合。地面位移监测点布置应与地下变形监测点位置相结合,以便建立地面与地下位移和变形的关系。
- g) 地面位移监测:较重要的边坡应建立三角网和水准网,采用大地测量方法对地面观测点进行监测。宜边坡可采用视准线等简易测量方法监测。
- h) 边坡地表和深部裂缝监测:视其重要性采用三维或简易测缝计进行监测。对地表裂缝还应注意其分布范围、数量与长度进行地质巡视和监测。

11 混凝土强度、耐久性和钢材性能

11.1 混凝土强度

11.1.1 混凝土应满足强度要求,并应根据建筑物的工作条件、地区气候等具体情况,分别满足抗渗、抗冻、抗侵蚀、抗冲刷等耐久性的要求。对于防止温度裂缝有较高要求的大体积混凝土结构,设计时应应对混凝土提出高延伸率和低热性要求,宜选用低热水泥或掺加合适的掺合料与外加剂。

11.1.2 钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20;当采用钢筋抗拉强度 400 MPa 及以上的钢筋时,混凝土强度等级不得低于 C25。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C40。

11.1.3 混凝土轴心抗压、轴心抗拉强度设计值 f_c 、 f_t 应按表 32 确定。计算现浇钢筋混凝土轴心受压和偏心受压构件时,如截面的长边或直径小于 300 mm,则表中的混凝土强度设计值应乘以系数 0.8;当构件质量(如混凝土浇筑、截面和轴线尺寸等)确有保证时,可不受此限制。

表 32 混凝土强度设计值

单位: N/mm²

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	fc	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5
轴心抗拉	ft	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04

11.1.4 在混凝土结构构件设计中,不宜利用混凝土的后期强度。但经过充分论证后,也可根据建筑物的型式、地区的气候条件以及开始承受荷载的时间,采用 60 d 或 90 d 龄期的抗压强度。混凝土不同龄期的抗压强度增长率,应通过试验确定。当无试验资料时,可参照表 33 采用。

表 33 混凝土不同龄期的抗压强度比值

水泥品种	混凝土龄期			
	7 d	28 d	60 d	90 d
普通硅酸盐水泥	0.55—0.65	1.0	1.10	1.20
矿渣硅酸盐水泥	0.45—0.55	1.0	1.20	1.30
火山灰质硅酸盐水泥	0.45—0.55	1.0	1.15	1.25

注:表中数值是以龄期 28 d 的强度设为 1.0 时的比值;对于蒸汽养护的构件,不考虑抗压强度随龄期的增长;表中数值未计入混凝土掺合料及外加剂的影响;表中数值适用于 M30 及其以下的混凝土,M30 以上混凝土不同龄期的抗压强度比值,应通过试验确定。

11.1.5 28 d 龄期时混凝土受压或受拉弹性模量 E_c 可按表 33 采用。混凝土的泊松比 ν_c 可取为 0.167。混凝土的剪变模量 G_c 可按表 34 中混凝土弹性模量 E_c 的 0.4 倍采用。

表 34 混凝土弹性模量

混凝土强度等级	E_c (N/mm ²)	混凝土强度等级	E_c (N/mm ²)
C15	2.20×10^4	C40	3.25×10^4
C20	2.55×10^4	C45	3.35×10^4
C25	2.80×10^4	C50	3.45×10^4
C30	3.00×10^4	C55	3.55×10^4
C35	3.15×10^4	C60	3.60×10^4

11.1.6 混凝土的重力密度(重度)应由试验确定。当无试验资料时,素混凝土可取 24 kN/m³;钢筋混凝土可取 25 kN/m³。

11.2 混凝土耐久性

11.2.1 设计永久性水工混凝土结构时,应满足结构的耐久性要求。设计时可根据结构所处的环境类别提出相应的耐久性要求。也可根据结构表层保护措施的实际情况及预期的施工质量控制水平,将环境类别适当提高或降低,但不低于一类,也不高于五类。临时性建筑物可不提出耐久性要求。

11.2.2 混凝土结构的耐久性要求应根据结构设计使用年限和表 35 所规定的环境类别进行设计。当

技术条件不能保证结构所有构(部)件均能达到与结构设计使用年限相同的耐久性时,在设计中应规定这些构(部)件在设计使用年限内需要进行大修或更换的次数。凡列为需要大修或更换的构件,在设计时应考虑其能具有修补或更换的施工操作条件。不具备修理条件的结构构件,其设计使用年限应与结构的整体设计使用年限相同。

表 35 水工混凝土结构所处的环境类别

环境类别	条件
一	室内正常环境
二	室内潮湿环境;露天环境;长期处于水下或地下的环境
三	水位变化区;有侵蚀性地下水的地下环境;海水水下区
四	海上大气区;轻度盐雾作用区
五	使用除冰盐的环境;海水水位变化区、浪溅区;离平均水位上方 15 m 以内的海上大气区;重度盐雾作用区;有严重侵蚀性介质作用的环境
<p>注 1: 海上大气区与浪溅区的分界线为设计最高水位加 1.5 m;浪溅区与水位变化区的分界线为设计最高水位减 1.0 m;水位变化区与水下区的分界线为设计最低水位减 1.0 m;重度盐雾作用区为离涨潮岸线 50 m 内的陆上室外环境;轻度盐雾作用区为离涨潮岸线 50 m 至 200 m 内的陆上室外环境;</p> <p>注 2: 冻融比较严重的二、三类环境条件的建筑物,可将其环境类别提高一类。</p>	

11.2.3 小型水电站设计使用年限为 50 年。配筋混凝土的耐久性基本要求宜符合表 36 的要求。

表 36 钢筋混凝土的耐久性基本要求

环境类别	混凝土最低强度等级	最小水泥用量 (kg/m ³)	最大水灰比	最大氯离子含量(%)	最大碱含量 (kg/m ³)
一	C20	220	0.60	1.0	不限制
二	C25	260	0.55	0.3	3.0
三	C25	300	0.50	0.2	3.0
四	C30	320	0.45	0.1	2.5
五	C35	360	0.40	0.06	2.5
<p>注 1: 配置钢丝、钢绞线的预应力混凝土结构的混凝土最低强度等级宜不小于 C40;最小水泥用量宜不少于 300 kg/m³;</p> <p>注 2: 当混凝土中加入活性掺合料或能提高耐久性的外加剂时,可适当降低最小水泥用量;</p> <p>注 3: 桥梁上部结构及处于露天环境的梁、柱结构,混凝土强度等级不宜低于 C25;</p> <p>注 4: 氯离子含量系指其占水泥用量的百分率;预应力混凝土构件中的氯离子含量不宜大于 0.06%;</p> <p>注 5: 使用非碱活性骨料时,混凝土中的碱含量可不作限制;</p> <p>注 6: 处于三、四类环境条件又受冻严重的结构构件,混凝土的最大水灰比应满足水工建筑物抗冰冻设计要求;</p> <p>注 7: 炎热地区的海水水位变化区和浪溅区,混凝土的各项耐久性基本要求宜比表中规定的适当加严。</p>					

11.2.4 素混凝土结构需要考虑耐久性时,其耐久性基本要求可由实际环境类别降低一类按表 36 取用。

11.2.5 对于有抗渗性要求的结构,混凝土应满足有关抗渗等级的规定。混凝土抗渗等级按 28 d 龄期的标准试件测定,混凝土抗渗等级分为:W2、W4、W6、W8、W10、W12 六级。根据建筑物开始承受水压

力的时间,也可利用 60 d 或 90 d 龄期的试件测定抗渗等级。结构所需的混凝土抗渗等级应根据所承受的水头、水力梯度以及下游排水条件、水质条件和渗透水的危害程度等因素确定,并不得低于表 37 的规定值。

表 37 混凝土抗渗等级的最小允许值

项次	结构类型及运用条件	抗渗等级	
1	大体积混凝土结构的下游面及建筑物内部	W2	
2	大体积混凝土结构的挡水面	$H < 30$	W4
		$30 \leq H < 70$	W6
		$70 \leq H < 150$	W8
		$H \geq 150$	W10
3	素混凝土及钢筋混凝土结构构件的背水面能自由渗水者	$i < 10$	W4
		$0 \leq i < 30$	W6
		$30 \leq i < 50$	W8
		$i \geq 50$	W10
<p>注 1: 表中 H 为水头(m), i 为水力梯度;</p> <p>注 2: 当结构表层设有专门可靠的防渗层时,表中规定的混凝土抗渗等级可适当降低;</p> <p>注 3: 承受侵蚀性水作用的结构,混凝土抗渗等级应进行专门的试验研究,但不得低于 W4;</p> <p>注 4: 埋置在地基中的结构构件(如基础防渗墙等),可按照表中项次 3 的规定选择混凝土抗渗等级;</p> <p>注 5: 对背水面能自由渗水的素混凝土及钢筋混凝土结构构件,当水头小于 10 m 时,其混凝土抗渗等级可根据表中项次 3 降低一级;</p> <p>注 6: 对严寒、寒冷地区且水力梯度较大的结构,其抗渗等级应按表中的规定提高一个等级。</p>			

11.2.6 混凝土抗冻等级按 28 d 龄期的试件用快冻试验方法测定,分为 F400、F300、F200、F150、F100、F50 六级。经论证,也可用 60 d 或 90 d 龄期的试件测定。对于有抗冻要求的结构,应按表 38 根据气候分区、冻融循环次数、表面局部小气候条件、水分饱和程度和检修条件等选定抗冻等级。在不利因素较多时,可选用提高一级的抗冻等级。

表 38 混凝土抗冻等级

项次	气候分区	严寒		寒冷		温和
	年冻融循环次数	≥ 100	< 100	≥ 100	< 100	—
1	受冻严重且难于检修的部位 (1) 水电站尾水部位、蓄能电站进出口的冬季水位变化区、闸门槽二期混凝土、轨道基础; (2) 冬季通航或受电站尾水位影响的不通航船闸的水位变化区的构件、二期混凝土; (3) 流速大于 25 m/s、过冰、多沙或多推移质的溢洪道,深孔或其他输水部位的过水面及二期混凝土; (4) 冬季有水的露天钢筋混凝土压力水管、渡槽、薄壁充水闸门井	F300	F300	F300	F200	F100

表 38 (续)

项次	气候分区	严寒		寒冷		温和
	年冻融循环次数	≥100	<100	≥100	<100	—
2	受冻严重但有检修条件的部位 (1) 大体积混凝土结构上游面冬季水位变化区； (2) 水电站或船闸的尾水渠, 导航道的挡墙、护坡； (3) 流速小于 25 m/s 的溢洪道、输水洞、引水系统的过水面； (4) 易积雪、结霜或饱和的路面、平台栏杆、挑檐、墙、板、柱、墩、廊道或竖井的薄壁等构件	F300	F200	F200	F150	F50
3	受冻较重部位 (1) 大体积混凝土结构外露的阴面部位； (2) 冬季有水或易长期积雪结冰的渠系建筑物	F200	F200	F150	F150	F50
4	受冻较轻部位 (1) 大体积混凝土结构外露的阳面部位； (2) 冬季无水干燥的渠系建筑物； (3) 水下薄壁构件； (4) 水下流速大于 25 m/s 的过水面	F200	F150	F100	F100	F50
5	水下、土中及大体积内部混凝土	F50	F50	—	—	—
<p>注 1: 年冻融循环次数分别按一年内气温从 +3℃ 以上降至 -3℃ 以下, 然后回升到 +3℃ 以上的交替次数和一年中日平均气温低于 -3℃ 期间设计预定水位的涨落次数统计, 并取其中的大值；</p> <p>注 2: 气候分区划分标准为： 严寒地区: 累年最冷月平均气温低于或等于 -10℃ 的地区； 寒冷地区: 累年最冷月平均气温高于 -10℃、低于或等于 -3℃ 的地区； 温和: 最冷月平均气温高于 -3℃；</p> <p>注 3: 冬季水位变化区是指运行期内可能遇到的冬季最低水位以下 0.5 m~1 m 至冬季最高水位以上 1 m (阳面)、2 m (阴面)、4 m (水电站尾水区) 的部位；</p> <p>注 4: 阳面指冬季大多为晴天, 平均每天有 4 h 阳光照射, 不受山体或建筑物遮挡的表面, 否则均按阴面考虑；</p> <p>注 5: 最冷月平均气温低于 -25℃ 地区的混凝土抗冻等级宜根据具体情况研究确定；</p> <p>注 6: 在无抗冻要求的地区, 混凝土抗冻等级也不宜低于 F50。</p>						

11.2.7 抗冻混凝土应掺加引气剂。其水泥、掺合料、外加剂的品种和数量、水灰比、配比及含气量等应通过试验确定或按照水工建筑物抗冰冻设计要求选用。海洋环境中的混凝土即使没有抗冻要求也宜适当掺加引气剂。

11.2.8 对于接触侵蚀性介质的混凝土, 应采用抗侵蚀性水泥, 掺用优质活性掺合料, 或同时采用特殊的表面涂层等防护措施。对遭受高速水流空蚀的部位, 应采用合理的结构型式、改善通气条件、提高混凝土密实度、严格控制结构表面的平整度或设置专门防护面层等措施。在有泥砂磨蚀的部位, 应采用质地坚硬的骨料、降低水灰比、提高混凝土强度等级、改进施工方法, 必要时还应采用耐磨护面材料或纤维混凝土。

11.2.9 当环境类别为四、五类时, 结构的外形应力求规整, 不宜采用薄壁、肋形及多棱角的结构型式。对于可能遭受高浓度除冰盐和氯盐严重侵蚀的配筋混凝土表面和部位, 可采取浸涂或覆盖防腐材料; 在混凝土中加入阻锈剂; 其受力钢筋宜采用环氧树脂涂层带肋钢筋; 对预应力筋、锚具及连接器, 应采取专门的防护措施; 对于重要的结构, 还可考虑在钢筋发生锈蚀后采用阴极保护措施, 并在设计和施工中预先设置为将来实施阴极保护的必要条件。

11.3 钢筋

11.3.1 钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。普通钢筋的强度标准值系根据屈服强度确定,用 f_{yk} 表示,应按表 39 采用;预应力钢绞线、钢丝、热处理钢筋及螺纹钢筋的强度标准值系根据极限抗拉强度确定,用 f_{ptk} 表示,应按表 40 采用。

表 39 普通钢筋强度标准值

单位: N/mm²

种类		d (mm)	f_{yk}
热轧钢筋	HPB235 (Q235)	8~20	235
	HRB335(20MnSi)	6~50	335
	HRB400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	6~50	400
	RRB400 (K20MnSi)	8~40	400
注 1: 热轧钢筋直径 d 系指公称直径; 注 2: 当采用直径大于 40 mm 的钢筋时,应有可靠的工程经验。			

表 40 预应力钢筋强度标准值

单位: N/mm²

种类	公称直径 d (mm)	f_{ptk}	
钢绞线	1×2	5,5.8	1 570,1 720,1 860,1 960
		8,10	1 470,1 570,1 720,1 860,1 960
		12	1 470,1 570,1 720,1 860
	1×3	6.2,6.5	1 570,1 720,1 860,1 960
		8.6	1 470,1 570,1 720,1 860,1 960
		8.74	1 570,1 670,1 860
		10.8,12.9	1 470,1 570,1 720,1 860,1 960
	1×3I	8.74	1 570,1 670,1 860
	1×7	9.5,11.1,12.7	1 720,1 860,1 960
		15.2	1 470,1 570,1 670,1 720,1 860,1 960
		15.7	1 770,1 860
		17.8	1 720,1 860
	(1×7)C	12.7	1 860
		15.2	1 820
		18.0	1 720
消除应力钢丝	光圆螺旋肋	4,4.8,5	1 470,1 570,1 670,1 770,1 860
		6,6.25,7	1 470,1 570,1 670,1 770
		8,9	1 470,1 570
		10,12	1 470
	刻痕	≤5	1 470,1 570,1 670,1 770,1 860
		>5	1 470,1 570,1 670,1 770

表 40 (续)

单位: N/mm²

种类		公称直径 d (mm)	f_{ptk}
螺纹钢	PSB 785	18、25、32、36、40	980
	PSB 830		1 030
	PSB 930		1 080
	PSB 1080		1 230
注 1: 钢绞线直径 d 系指钢绞线外接圆直径, 即公称直径 D_n ; 钢丝、热处理钢筋及螺纹钢的直径 d 均指公称直径;			
注 2: $1 \times 3I$ 为三根刻痕钢丝捻制的钢绞线; $(1 \times 7)C$ 为七根钢丝捻制又经模拔的钢绞线。			

11.3.2 普通钢筋的抗拉强度设计值 f_y 及抗压强度设计值 f'_y 应按表 41 采用; 预应力钢筋的抗拉强度设计值 f_{py} 及抗压强度设计值 f'_{py} 应按表 42 采用。当构件中配有不同种类的钢筋时, 每种钢筋应采用各自的强度设计值。

表 41 普通钢筋强度设计值

单位: N/mm²

种类		f_y	f'_y
热轧钢筋	HPB235(Q235)	210	210
	HRB335(20MnSi)	300	300
	HRB400(20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	360	360
	RRB400(K20MnSi)	360	360
注: 在钢筋混凝土结构中, 轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于 300 N/mm ² 时, 仍应按 300 N/mm ² 取用。			

表 42 预应力钢筋强度设计值

单位: N/mm²

种类		f_{ptk}	f_{py}	f'_{py}
钢绞线	1×2 1×3 $1 \times 3I$ 1×7 $(1 \times 7)C$	1 470	1 040	390
		1 570	1 110	
		1 670	1 180	
		1 720	1 220	
		1 770	1 250	
		1 820	1 290	
		1 860	1 320	
		1 960	1 380	
消除应力钢丝	光圆 螺旋 肋刻痕	1 470	1 040	410
		1 570	1 110	
		1 670	1 180	
		1 770	1 250	
		1 860	1 320	

表 42 (续)

单位: N/mm²

种类		f_{ptk}	f_{py}	f'_{py}
螺纹钢	PSB 785	980	650	400
	PSB 830	1 030	685	
	PSB 930	1 080	720	
	PSB 1080	1 230	820	

11.3.3 钢筋弹性模量 E_s 可按表 43 采用。

表 43 钢筋弹性模量 E_s 单位: N/mm²

钢筋种类	E_s
HPB 235 级钢筋	2.1×10^5
HRB 335 级钢筋、HRB 400 级钢筋、RRB 400 级钢筋	2.0×10^5
消除应力钢丝(光圆钢丝、螺旋肋钢丝、刻痕钢丝)	2.05×10^5
钢绞线	1.95×10^5
热处理钢筋、螺纹钢	2.0×10^5
注: 必要时钢绞线可采用实测的弹性模量。	

附录 A
(规范性附录)
波浪爬高计算

A.1 风浪计算的基本要素

A.1.1 年最大风速。系指水面上空 10 m 高度处 10 min 平均风速的年最大值；对于水面上空 $Z(m)$ 处的风速，应乘以表 A.1 中的修正系数 K_z 后采用。如采用陆地测站资料，应参照有关资料修正到相应库水位上空 10 m 的风速。如当地无实测风速资料，可按风力等级表，根据本地区已发生过的风力，估算风速，进行风浪计算。沿海地区，应考虑洪水位与最大风浪同时出现的条件。

表 A.1 风速高度修正系数

高度 $Z(m)$	2	5	10	15	20
修正系数 K_z	1.25	1.10	1.00	0.96	0.90

A.1.2 风区长度(有效吹程)按下列情况确定：

- a) 当沿风向两侧的水域较宽广时，可采用计算点至对岸的直线距离；
- b) 当沿风向有局部缩窄且缩窄处的宽度 b 小于 12 倍计算波长时，可按 5 倍 b 为风区长度，同时不小于计算点至缩窄处的直线距离。
- c) 当沿风向两侧的水域较狭窄或水域形状不规则、或有岛屿等障碍物时，可自计算点逆风向做主射线与水域边界相交，然后在主射线两侧每隔 7.5° 做一条射线，分别与水域边界相交。如图 A.1 所示，记 D_0 为计算点沿主射线方向至对岸的距离， D_i 为计算点沿第 i 条射线至对岸的距离， a_i 为第 i 条射线与主射线的夹角， $a_i = 7.5i$ (宜取 $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$)，同时令 $a_0 = 0$ ，则等效风区长度 D 可按下式计算：

$$D = \frac{\sum_i D_i \cos^2 a_i}{\sum_i \cos a_i} \quad (i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

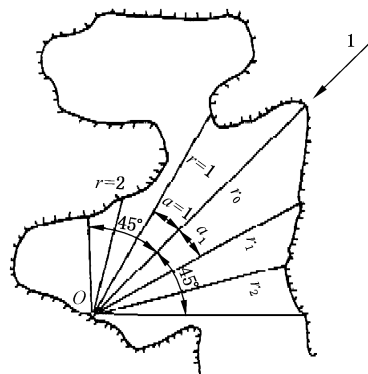


图 A.1 等效风区计算示意图

A.1.3 风区内的水域平均深度。宜可通过沿风向作出地形剖面图求得,其计算水位应与相应设计状况下的静水位一致。

A.2 波浪要素计算

A.2.1 计算波浪所用的设计风速应根据当地历年实测最大风速资料,按下列规定采用:

- a) 正常运用条件下(正常蓄水位),采用多年平均最大风速的 1.5 倍;
- b) 非常运用条件下(校核蓄水位),采用多年平均最大风速。

A.2.2 根据拟建水库的具体条件,按下述三种情况计算波浪要素。

- a) 平原、滨海地区水库,宜按(A.2)(A.3)公式计算

$$\frac{gh_m}{v_0^2} = 0.13 \operatorname{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{v_0^2} \right)^{0.7} \right] \operatorname{th} \left\{ \frac{0.0018 (gD/v_0^2)^{0.45}}{0.13 \operatorname{th} [0.7 (gH_m/v_0^2)^{0.7}]} \right\} \dots\dots (A.2)$$

$$\frac{gT_m}{v_0} = 13.9 \left(\frac{gh_m}{v_0^2} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- h_m ——平均波高, m;
- T_m ——平均波周期, s;
- v_0 ——计算风速, m/s;
- D ——风区长度, m;
- H_m ——水域平均水深, m;
- g ——重力加速度, 9.81 m/s^2 。

- b) 丘陵、平原地区水库,宜按(A.4)(A.5)公式计算(适用于库水较深, $v_0 < 26.5 \text{ m/s}$ 及 $D < 7.5 \text{ km}$):

$$\frac{gh_{2\%}}{v_0^2} = 0.00625 v_0^{1/6} \left\{ \frac{gD}{v_0^2} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.0386 \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

- $h_{2\%}$ ——累积频率为 2% 的波高, m;
- L_m ——平均波长, m。

- c) 内陆峡谷水库,宜按(A.6)(A.7)公式计算(适用于 $v_0 < 20 \text{ m/s}$ 及 $D < 20 \text{ km}$)

$$\frac{gh}{v_0^2} = 0.0076 v_0^{-1/12} \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (A.16)$$

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.331 v_0^{-1/2.15} \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3.75} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

- h ——当 $gD/v_0^2 = 20 \sim 250$ 时,为累积频率 5% 的波高 $h_{5\%}$;
- 当 $gD/v_0^2 = 250 \sim 1000$ 时,为累积频率 10% 的波高 $h_{10\%}$ 。

A.2.3 累积频率为 $P(\%)$ 的波高 h_p 与平均波高的关系可按表 A.2 进行换算。

表 A.2 累积频率为 $P(\%)$ 的波高 h_p 与平均波高的比值

\bar{H}/d	$P(\%)$	0.1	1	2	3	4	5	10	13	20	50
0.0	H_p/\bar{H}	2.97	2.42	2.23	2.11	2.02	1.95	1.71	1.61	1.43	0.94
0.1		2.70	2.26	2.09	2.00	1.92	1.86	1.65	1.56	1.41	0.96
0.2		2.46	2.09	1.96	1.88	1.81	1.76	1.59	1.51	1.37	0.98
0.3		2.23	1.93	1.82	1.76	1.70	1.66	1.52	1.45	1.34	1.00
0.4		2.01	1.78	1.69	1.64	1.60	1.56	1.44	1.39	1.30	1.01
0.5		1.80	1.63	1.56	1.52	1.49	1.46	1.37	1.33	1.25	1.01

A.2.4 平均波长 L_m 与平均波周期 T_m 可按(A.8)式换算。

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi H}{L_m} \dots\dots\dots (A.8)$$

A.2.5 风壅水面高度 h_z 可按(A.9)式换算。

$$h_z = \frac{k v_0^2 D}{2gH_m} \cos\beta \dots\dots\dots (A.9)$$

式中：

- k ——综合摩阻系数,取 $3.6E^{-6}$;
- β ——计算风向与坝轴线法线的夹角, ($^\circ$)。

A.3 波浪爬高计算

A.3.1 土石坝(堆石坝)设计波浪爬高值采用累计频率为 5% 的爬高值 $R_{5\%}$ 。对于坝高大于 30 m 的大坝,应采用累计频率为 1% 的爬高值 $R_{1\%}$ 。

A.3.2 在风的直接作用下,正向来波在单一斜坡上的波浪爬高可按如下方法确定：

a) 当 $m=1.5\sim 5.0$ 时,

$$R_F = \frac{K_\Delta K_V K_F}{\sqrt{1+m^2}} \sqrt{HL} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

- R_F ——累积频率为 F 的波浪爬高, m;
- K_Δ ——斜坡的糙率渗透性系数,根据护面类型取值。
沥青混凝土取 1.0,混凝土取 0.9,砌石取 0.75~0.8,草皮取 0.85~0.9;
- K_V ——经验系数,按表 A.3 取值;
- K_F ——爬高累积率换算系数,按表 A.4 取值;
- m ——斜坡坡比;
- \bar{H} ——堤前波浪的平均波高, m;
- L ——堤前波浪的平均波长, m。

表 A.3 经验系数 K_V

$\frac{V}{\sqrt{gd}}$	≤ 1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	≥ 5.0
K_V	1.00	1.02	1.08	1.16	1.22	1.25	1.28	1.30

表 A.4 爬高累积频率换算系数 K_F

$\frac{\bar{H}}{d}$	$F(\%)$	0.1	1	2	3	4	5	10	13	20	50
<0.1	$\frac{R_F}{R}$	2.66	2.23	2.07	1.97	1.90	1.84	1.64	1.54	1.39	0.96
0.1~0.3		2.44	2.08	1.94	1.86	1.80	1.75	1.57	1.48	1.36	0.97
>0.3		2.13	1.86	1.76	1.70	1.65	1.61	1.48	1.40	1.31	0.99

注： \bar{R} ——平均爬高， $K_F = \frac{R_F}{R}$

b) 当 $m \leq 1.25$ 时，

$$R_F = K_\Delta K_V K_F R_0 \bar{H} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

R_0 ——无风情况下，光滑坡面($K_\Delta = 1$)的相对爬高值，按表 A.5 确定。

表 A.5 R_0 值

$m = \cot\alpha$	0.00	0.50	1.00	1.25
R_0	1.24	1.45	2.20	2.50

c) 当 $1.25 < m < 1.5$ 时，可由 $m = 1.5$ 和 $m = 1.25$ 的计算值按内插法确定。



**UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION**

Vienna International Centre
P.O. Box 300 · 1400 Vienna · Austria
Tel.: (+43-1) 26026-0
E-mail: info@unido.org
www.unido.org



**INTERNATIONAL NETWORK
ON SMALL HYDROPOWER**

136 Nanshan Road
Hangzhou · 310002 · P.R.China
Tel.: (+86-571)87132793
E-mail: secretariat@inshp.org
www.inshp.org