



中华人民共和国行业标准

P

SL 189—96

小型水利水电工程 碾压式土石坝设计导则

**Design Guide for Rolled Earth—Rock Fill Dams
in Small Size Water Resources and
Hydroelectric Engineering**

1997—02—13 发布

1997—05—01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国行业标准
小型水利水电工程
碾压式土石坝设计导则

SL 189—96

主编单位：水利部天津水利水电勘测设计研究院
批准部门：中华人民共和国水利部

中华人民共和国水利部

关于批准发布《小型水利水电工程
碾压式土石坝设计导则》
SL 189—96 的通知

水科技[1997]48号

根据部水利水电技术标准制定、修订计划，由水利水电规划设计总院主持，天津水利水电勘测设计研究院主编的《小型水利水电工程碾压式土石坝设计导则》，经审查批准为水利行业标准，现予以发布。标准的名称和编号为：《小型水利水电工程碾压式土石坝设计导则》**SL 189—96**

本标准自 1997 年 5 月 1 日起实施。望各单位注意结合实际，总结经验，如有问题请函告水利水电规划设计总院，由其负责解释。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

1997 年 2 月 13 日

目 次

1 总则	(4)
2 坝址选择及枢纽布置	(4)
2.1 坝址选择	(4)
2.2 枢纽布置	(4)
3 坝型选择	(5)
4 筑坝材料及填筑标准	(6)
4.1 筑坝材料	(6)
4.2 填筑标准	(7)
5 坝基处理	(8)
5.1 砂砾石地基处理	(8)
5.2 易液化土及软土地基处理	(10)
5.3 湿陷性黄土地基处理	(10)
5.4 岩石及岩溶地基处理	(11)
5.5 坝体与地基和岸坡的连接	(11)
6 坝体结构	(11)
6.1 坝顶超高	(11)
6.2 坝顶构造	(12)
6.3 坝坡	(13)
6.4 防渗体	(13)
6.5 反滤层及过渡层	(13)
6.6 坝体排水	(14)
6.7 护坡	(15)
6.8 坝面排水	(16)
7 坝的计算	(16)
7.1 渗流计算	(16)
7.2 稳定计算	(16)
7.3 沉降计算	(18)
8 观测设计	(18)
附加说明	(19)

1 总 则

- 1.0.1** 为规范小型水利水电工程碾压式土石坝的设计,特制定本导则。
- 1.0.2** 本导则适用于《水利水电工程等级划分及设计标准》(山区、丘陵区部分)(SDJ 12—78)中的4、5级且坝高小于30 m和《水利水电工程等级划分及设计标准》(平原、滨海部分)(SDJ 217—87)中4、5级的碾压式土石坝的设计。
- 1.0.3** 小型土石坝的设计,应在尊重科学的基础上,充分吸取已有工程的经验,努力提高设计水平,使设计符合客观实际。
- 1.0.4** 对坝址、库区及料场应进行测量、地质调查及勘探试验工作。对于构造简单的岩基,可由地质人员进行查勘,提出地质报告。对于复杂的岩基和覆盖层应查明坝址区的工程地质条件。
- 1.0.5** 小型土石坝枢纽工程应进行水文、气象调查,作好水文分析和水利计算。如工程所在的河流缺少实测资料,可利用当地的《水文图集》和《水文手册》,求出不同频率的年径流和年内分配,不同历时暴雨量、洪峰流量、洪量及洪水过程线等。有条件的还要调查库坝区的历史洪水。
- 1.0.6** 小型水利水电工程碾压式土石坝的设计,除应遵守本导则外,还应符合现行的国家、行业标准中的有关规定。

2 坝址选择及枢纽布置

2.1 坝址选择

- 2.1.1** 坝址选择应综合考虑地形、地质、建筑材料、枢纽布置及上、下游情况,经方案比较后确定。
- 2.1.2** 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建坝。
- 2.1.3** 坝址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、大的断层带以及软弱的地基上,如不能避开,应采取处理措施。
- 2.1.4** 选择坝址时,应考虑水库蓄水后,不会在库区产生大的坍岸、滑坡。在丘陵和平原地区,应避免浸没面积过大。
- 2.1.5** 坝址区的地震基本烈度应按中国地震烈度区划图(1990)确定。设防烈度可采用基本烈度。地震基本烈度为6度和6度以上的地区,建筑物应根据《水工建筑物抗震设计规范》(SDJ 10—78)的有关规定采取抗震措施。

2.2 枢纽布置

- 2.2.1** 土石坝枢纽一般由拦河坝、溢洪道、输水洞和电站等组成,并根据需要决定是否设置泄洪洞。枢纽布置应力求紧凑,满足功能要求,节省工程量,并方便施工和运行管理。
- 2.2.2** 应根据地形地质条件,结合枢纽总体布置,选定坝轴线和坝型;确定坝顶高程、断面尺寸和基础处理措施等。
- 坝轴线宜选用直线,如需转折,在转折处宜布置成曲线。两岸坝肩宜选择较缓岸坡。
- 2.2.3** 溢洪道宜修建在天然垭口上。如无天然垭口,溢洪道可布置在靠近坝头处,溢洪道进口附近坝坡应有可靠的防护,溢洪道出口应采取妥善的消能措施,并使消能后的水流不淘刷坝脚。
- 2.2.4** 溢洪道宜布置成直线。如设置弯道,宜设在进水渠段和出水渠段上。曲率半径不宜小于4倍渠底宽度。

2.2.5 溢洪道宜优先采用开敞式,且不宜设置闸门,堰顶高程宜与正常蓄水位齐平。如下游有防洪要求或汛后需抬高蓄水位时,溢洪道也可设置闸门,但必须采取可靠的安全保障措施。

2.2.6 溢洪道宜选择在岩石地基上,建筑物的砌护长度取决于地形、地质条件和防冲要求。

软基溢洪道应修建在密实土层上,做好进口、泄槽的防护和消能设施,以及建筑物的防渗、排水。

2.2.7 泄洪洞或输水洞可采用隧洞或坝下埋管,但宜优先采用隧洞,应根据地形、地质、施工、造价及运行条件等比较确定。

2.2.8 坝下埋管宜建在岩基上。如需设在软基上,必须做好地基处理。地震烈度在7度及7度以上的地区,软基上不应设坝下埋管。

2.2.9 坝下埋管的轴线宜与河流主流方向一致。管身宜布置成直线。

2.2.10 坝下埋管宜采用明流。管身的尺寸,除根据水力计算需要确定外,还应考虑检查和维修的要求。

2.2.11 坝下埋管为明流时,应采用混凝土或钢筋混凝土结构,不宜用浆砌石砌筑。

如为压力流,宜用钢管或钢筋混凝土管。

坝下埋管严禁用缸瓦管。

3 坝型选择

3.0.1 小型碾压式土石坝,可采用均质土坝、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。

(1)均质土坝的坝体由性质相近的土料组成,坝体应满足防渗要求。

(2)心墙土石坝的土质防渗体位于坝体中部,坝体其余部分用透水料(砂、砂砾料或堆石料)填筑。斜心墙坝土质防渗体稍向上游倾斜。

斜墙土石坝的土质防渗体位于坝体上游,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。

(3)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而、中间或中间偏上游。

(4)过水土石坝按照坝体主要材料的不同可分为过水堆石坝和过水土坝。

3.0.2 坝型选择应综合考虑下列因素,进行技术经济比较后选定。

(1)坝址区的地形、地质条件:包括河谷地形,坝基岩石性质,覆盖层的厚度、分层及其性质,地震烈度等;

(2)筑坝材料的物理力学性质、储量、位置、开采运输和填筑条件(包括枢纽建筑物开挖出来的渣料);

(3)工程的总体布置及坝体与泄洪、输水建筑物的连接;

(4)坝基处理方式;

(5)施工条件包括施工期坝址区气象和水文条件、场地布置条件、施工技术水平和经验等;

(6)工程量及投资。

3.0.3 坝址附近有性质适宜、数量足够的土料时,宜选用均质土坝。

3.0.4 混凝土面板堆石坝宜修建在岩基上。如坝基砂砾石中无淤泥、细砂等软弱土层,也可将坝体置于砂砾石地基上。

3.0.5 混凝土面板坝的趾板宜置于岩基上。如趾板修建在砂砾石地基上,应做好防渗处理。

3.0.6 小型碾压式土石坝可利用土工膜作为防渗材料。

3.0.7 7度及7度以上的地震区不宜修建刚性心墙坝。

3.0.8 当坝址没有适宜的地形地质条件布置岸边溢洪道时,经技术经济比较后可采用过水土石坝。坝高与单宽流量的数值可按表3.0.8选取。

表 3.0.8 过水土石坝最大坝高及单宽流量

最大坝高(m)			单宽流量[m ³ /(s·m)]		
钢筋混凝土 护面	沥青混凝土 护面	浆砌石、干 砌条石护面	钢筋混凝土 护面	沥青混凝土 护面	浆砌石、干 砌条石护面
<30	<20	<10	<20	<15	<8

注:超过表中数值时,应作专门论证。

3.0.9 修建过水土石坝应符合下列要求:

(1)过水土石坝宜采用斜墙坝型,下游坝体应使用砂砾料或堆石填筑,并碾压密实,溢流面板宜在坝体断面填筑完成后施工。

(2)应做好溢流面板的设计。对于较高的坝,宜采用混凝土或钢筋混凝土不透水面板,其上游可设齿槽嵌入坝体。

面板表面应平整,联接处应防止下游块高于上游块,接缝处应设置止水,面板下铺设反滤排水垫层。

(3)过水土石坝宜修建在岩基上,如修建在砂砾石覆盖层上,应做好消能设施。

(4)采用沥青混凝土作为过水土石坝的护面,在严寒地区应注意防止冻裂;炎热地区应注意防止沥青流淌。

4 筑坝材料及填筑标准

4.1 筑坝材料

4.1.1 应对筑坝材料进行调查和土工试验,查明各种天然土石料的性质、储量、开采条件和运距。

4.1.2 选择筑坝土石料应遵循以下原则:

(1)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;

(2)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,少占或不占农田;

(3)便于开采、运输。

4.1.3 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。

4.1.4 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^{-4} cm/s;对于心墙、斜墙和铺盖不大于 1×10^{-5} cm/s。

防渗体宜选用塑性指数 $I_p = 7 \sim 20$ 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。

4.1.5 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 15 cm 或铺土厚度的 2/3,且不得发生粗粒集中现象。

4.1.6 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,并符合 4.1.4、4.1.5 条的规定。

4.1.7 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。

4.1.8 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。

4.1.9 使用膨胀土填筑防渗体时,应设置足够的压重保护层。

4.1.10 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。

4.1.11 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。

4.1.12 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。

4.1.13 混凝土面板坝、沥青混凝土面板坝的坝体宜使用堆石料或砂砾料。压实后应具有较低的压缩性、较高的抗剪强度和自由排水能力。含泥量(粒径 $d < 0.1 \text{ mm}$)不大于 5 %。

4.1.14 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。

4.1.15 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($d < 0.1 \text{ mm}$)应小于 5 %。

4.1.16 在缺乏天然防渗材料的地区,可采用混凝土、沥青混凝土或土工膜等人工材料做防渗体。

4.1.17 混凝土面板堆石坝的面板及趾板应满足防渗性、耐久性和抗冻性的要求。混凝土应采用二级配,其标号不宜低于 C20,宜采用普通硅酸盐水泥。面板可采用 30 cm 的等厚板。

4.1.18 沥青混凝土防渗体应满足防渗、抗裂、稳定和耐久的要求。粗骨料宜采用碱性岩石(石灰岩、白云岩等)轧制的碎石。细骨料可选用天然粗砂或人工轧制砂。骨料应坚硬、新鲜。粗骨料含泥量不宜大于 0.5 %,细骨料含泥量不宜大于 2 %。填料可采用石灰岩粉、白云岩粉或滑石粉等。掺合料应根据改善沥青混合料的性质和提高沥青混凝土的物理力学指标等要求通过试验选定。

4.1.19 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。

利用土工织物作为反滤材料,与被保护土的颗粒级配之间应满足反滤排水准则,可根据渗流情况、土的性质、荷载情况等选择。

土工膜或土工织物可类比已建工程的经验选用。

4.2 填筑标准

4.2.1 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。应合理规定填筑标准,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。

4.2.2 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±3%。

如无试验资料,可根据土料的性质,参考当地类似已建工程的经验确定。

4.2.3 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($d \geq 5 \text{ mm}$)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:

(1) 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(4.2.3-1)和式(4.2.3-2)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。

$$(\gamma_d)_{\max} = \frac{1}{\frac{P}{\Delta_s} + \frac{(1-P)}{(\gamma_d)_0}} \quad (4.2.3-1)$$

$$\omega_{\text{op}} = \omega_0(1-P) \quad (4.2.3-2)$$

式中 $(\gamma_d)_{\max}$ ——砾石土最大干密度;

P ——粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的砾石含量,以小数计;

Δ_s ——粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的砾石比重;

$(\gamma_d)_0$ ——粒径 $d > 5 \text{ mm}$ 的细粒土的最大干密度;

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。

(2) 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。

4.2.4 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 $\gamma_d = 1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$;当砂砾料的含砾量为 40%~70%,根据不同砾石含量取 $\gamma_d \geq 2.0 \text{ g/cm}^3$ 。

堆石料的压实标准宜以孔隙率(n)控制,要求 $n = 20\% \sim 30\%$ 。

对于混凝土面板坝及过水土石坝的坝体的压实标准应取大值。

5 坝基处理

5.1 砂砾石地基处理

5.1.1 选择地基处理措施之前应查明坝基砂砾石层的平面分布与空间分布、砂砾石的级配、透水性、渗透稳定性、有无软弱夹层、有无集中渗流带,以及基岩的情况等。

在阶地地段应查明是否有表层为粘性土而下部为砂砾石的双层地层,或粘性土与砂砾石层互为夹层的多层地层。

5.1.2 砂砾石坝基渗流控制采用坝基防渗和下游排水设施时,应根据坝型、坝基覆盖层的性质、允许渗水量、施工条件和工程费用等经综合分析比较后确定。

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。

5.1.3 当砂砾石覆盖层厚度小于 15 m 时,宜采用截水槽处理。

5.1.4 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下 1/3 坝底宽范围内。

5.1.5 截水槽底宽应根据回填土料的允许渗透坡降确定。允许渗透坡降:轻壤土为 2~4,壤土为 3~5,粘土为 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的层间系数超过规定值时,应在截水槽下游面设置反滤层。

5.1.6 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。

5.1.7 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。

5.1.8 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。

5.1.9 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。

当砂砾石覆盖层深厚且渗透系数较大时,应研究设置铺盖能否达到预期的防渗效果。

5.1.10 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容许范围内。

铺盖的长度不宜小于 5 倍水头。铺盖上游端的厚度宜采用 0.5~1.0 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 10^{-5} cm/s 的粘性土填筑。

5.1.11 铺盖地基面上的淤泥和腐植土等应全部清除干净。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。

5.1.12 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,必须限制在上游坝脚一定范围以外取土。

5.1.13 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。

5.1.14 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,铺盖上应铺置石(渣)料保护。

5.1.15 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。

5.1.16 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。

5.1.17 在坝下游出逸坡降大于容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。

5.2 易液化土及软土地基处理

5.2.1 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。液化评价方法应按照《水工建筑物抗震设计规范》附录一进行。

5.2.2 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:

- (1)表面夯实法;
- (2)表层振动压密法;
- (3)深层爆炸法;
- (4)砂桩挤密法;
- (5)振冲加固法;
- (6)强夯法。

5.2.3 软土的承载力小、压缩性大、抗剪强度低,如需在上面筑坝时必须进行地基处理,处理方法可采用:

- (1)换砂法;
- (2)镇压平台法;
- (3)砂井加水平排水褥垫法;
- (4)振冲加固法;
- (5)土工合成材料铺垫法。

以上方法可以取其一种或几种组合,应通过技术经济比较后确定。

5.2.4 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。

为确定安全填筑速率,应在上下游坝脚设置坝基位移沉降标点。必要时可设置孔隙水压力观测设施。

5.3 湿陷性黄土地基处理

5.3.1 湿陷性黄土地基应进行处理。

5.3.2 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。

5.3.3 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。

5.3.4 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。

5.3.5 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。

5.3.6 对坝基黄土中的陷穴、动物巢穴、窑洞、墓坑等地下空洞,必须查明并予以处理。

5.4 岩石及岩溶地基处理

5.4.1 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。

5.4.2 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:

(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。必要时进行灌浆处理。

5.4.3 在岩溶地区筑坝,应查明库坝区的全部地形、地质及水文地质条件和岩溶分布情况。

5.4.4 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。

5.4.5 建于岩石地基上的混凝土面板堆石坝的坝基处理应按照《混凝土面板堆石坝设计导则》(DL 5016—93)的有关条文执行。

5.5 坝体与地基和岸坡的连接

5.5.1 坝体填土与地基和岸坡应有良好的结合,不发生下述情况:

(1)渗水沿坝体和坝基接触面产生冲刷;

(2)形成软弱面,影响坝体稳定;

(3)出现不均匀沉降及裂缝。

5.5.2 坝体填筑之前应按下述要求进行坝基与岸坡的清理工作:

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;

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。

5.5.3 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。

5.5.4 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。

5.5.5 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 坝体结构

6.1 坝顶超高

6.1.1 坝顶超高系指坝顶高于静水位(正常运用情况或非常运用情况)的高度。

坝顶超高按下式确定:

$$Y = R + A \quad (6.1.1)$$

式中 Y ——坝顶在静水位以上的超高, m;

R ——风浪沿着坝坡的最大爬高, m, 由计算确定;

A ——安全加高, m, 正常运用情况取 $A = 0.50$ m, 非常情况取 $A = 0.30$ m。

6.1.2 坝顶高程应分别按以下情况进行计算, 取其最大值。

(1) 正常蓄水位或设计洪水位加正常运用情况的坝顶超高;

(2) 校核洪水位加非常运用情况的坝顶超高;

(3) 正常蓄水位加非常运用情况的坝顶超高加地震涌浪高。

6.1.3 在地震区, 地震涌浪高度可根据设计烈度和坝前水深采用 $0.5 \sim 1.0$ m。

6.1.4 竣工时的坝顶高程应预留沉降量。沉降量应根据坝基和坝体材料的性质通过计算或类比确定。

在地震区可适当加大预留沉降量。

6.1.5 当坝顶上游侧设有稳定、坚固、不透水且与坝的防渗体紧密结合的防浪墙时, 可利用防浪墙抵御风浪, 坝顶超高可以是静水位到防浪墙顶的高差。但在正常运用情况下, 坝顶应高出静水位至少 0.5 m; 在非常情况下, 坝顶应不低于静水位。

防浪墙高度(坝顶以上部分)可采用 $1.0 \sim 1.2$ m。

6.1.6 计算波浪爬高, 所用的设计风速应根据历年满库期实测最大风速资料, 按下列规定采用:

(1) 正常运用条件下, 采用多年平均最大风速的 1.5 倍;

(2) 非常运用条件下, 采用多年平均最大风速。

如采用陆地测站的风速, 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。

6.1.7 浪高可采用莆田试验站公式或官厅——鹤地公式等算出, 再根据上游坝坡及护坡情况计算波浪爬高。

6.2 坝顶构造

6.2.1 坝顶宽度根据下列因素确定:

(1) 当坝顶有交通要求时, 路面宽度宜按公路标准确定;

(2) 坝顶宽度应满足施工和运行检修时设备通行的要求;

(3) 对于心墙坝或斜墙坝, 坝顶宽度应能满足心墙、斜墙及反滤过渡层的布置要求;

(4) 在寒冷地区, 粘土心墙或斜墙上、下游侧保护层厚度应大于当地冻土深度。

坝顶宽度可采用 $3 \sim 6$ m。

6.2.2 防浪墙的设计应满足下列要求:

(1) 防浪墙可采用浆砌石或混凝土预制块砌筑;

(2) 防浪墙应有足够的坚固性;

(3) 墙身应设置伸缩缝;

(4) 防浪墙底部应与防渗体紧密结合, 混凝土面板堆石坝的防浪墙的伸缩缝应设止水。

6.2.3 坝顶面下游侧宜设置路缘石。结合坝顶排水,路缘石应设置排水口。

如有条件,可在坝顶上游侧设置照明设备。

6.2.4 坝顶路面可采用碎石、砂砾石或铺渣油。坝顶路面可向上、下游分别倾斜 2%~3%,当设防浪墙时,只向下游倾斜。

6.3 坝坡

6.3.1 坝坡应根据下列因素确定:

- (1)坝型、坝高;
- (2)坝体和坝基材料的物理力学特性;
- (3)坝体所承受的荷载;
- (4)施工情况和运用条件。

设计中可类比已建工程的经验初拟坝坡,再进行坝坡稳定计算,使确定的坝坡满足稳定要求。

6.3.2 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 8~12 m。

6.4 防渗体

6.4.1 土质防渗体断面尺寸应满足下列要求:

- (1)将渗流量控制在允许范围以内,并满足渗流稳定要求;
- (2)满足施工要求;
- (3)防渗体与坝基、岸坡或混凝土建筑物的连接,应满足抗渗要求;
- (4)经济合理。

6.4.2 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 5.1.5 条的允许渗透坡降确定,但厚度不小于 3.0 m。

6.4.3 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。

6.4.4 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。

6.4.5 防渗体顶部高程,应高出正常运用的静水位 0.3m 以上;非常运用情况应不低于非常运用的静水位。

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,但不应低于正常运用的静水位。

6.5 反滤层及过渡层

6.5.1 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。

6.5.2 坝壳与坝基之间,如不满足反滤原则,应设置反滤层。

6.5.3 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。

6.5.4 对反滤层的要求如下:

- (1)能防止被保护土的渗透变形,反滤层材料应为非管涌土;
- (2)应大于被保护土的透水性,能通畅地排除渗透水;

(3)不被细颗粒($d < 0.1 \text{ mm}$)淤堵失效;

(4)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。

6.5.5 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。水平反滤层每层的最小厚度可采用 30 cm ,竖向或倾斜反滤层每层的最小厚度可采用 40 cm 。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。

6.5.6 粒状反滤料按下列准则确定:

(1)被保护土与反滤层之间应满足式(6.5.6—1)和式(6.5.6—2)要求:

$$D_{15}/d_{85} \leq 5 \quad (6.5.6-1)$$

$$D_{15}/d_{15} \geq 5 \quad (6.5.6-2)$$

式中 D_{15} ——反滤料的粒径,小于该粒径的土重占总土重的 15% ;

d_{85} (d_{15})——被保护土的粒径,小于该粒径的土重占总土重的 85% (15%)。

(2)当被保护土为细粒土(CL和CH),且其 $d_{85} = 0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$,可使用 $D_{15} \leq 0.5 \text{ mm}$ 的砂或砾质砂作为反滤。

(3)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 $5 \sim 8$ 范围的细粒部分的 d_{15} 、 d_{85} 作为计算粒径。

(4)对于不连续级配的土,应取级配曲线平段以下(一般是 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 以下)粒组的 d_{15} 、 d_{85} 作为计算粒径。

(5)当第一层反滤料采用不均匀系数(η)大于 $5 \sim 8$ 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。

6.6 坝体排水

6.6.1 土石坝应设置排水设施,并满足以下要求:

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

6.6.2 坝体排水设施可采用:

- (1)棱体排水;
- (2)贴坡排水;
- (3)坝内排水(包括褥垫排水、竖向排水、网状排水等);
- (4)综合排水,由上述各种型式综合组成。

6.6.3 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:

- (1)坝型及坝体和坝基材料的性质;
- (2)坝基的工程地质和水文地质条件;
- (3)下游水位;
- (4)排水设施的材料及施工情况;
- (5)坝址区的气候条件。

6.6.4 对棱体排水的要求如下:

- (1)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;
- (2)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;
- (3)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
- (4)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。

6.6.5 对贴坡排水的要求如下:

- (1)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;
- (2)贴坡排水的厚度应大于冻结深度。

6.6.6 对褥垫排水的要求如下:

- (1)褥垫排水适用于下游无水的情况;
- (2)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;
- (3)对于均质土坝,褥垫排水一般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;
- (4)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;
- (5)褥垫排水伸入坝体内的长度可为坝底宽度的 1/3~1/4;
- (6)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。

6.6.7 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。

6.6.8 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 20~50 m,坡度不超过 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 15 cm。管内流速为 0.2~1.0 m/s,管身四周填反滤料。

6.7 护坡

6.7.1 坝面护坡的设置应满足下列要求:

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

6.7.2 上游坡可采用下列型式:

- (1)抛石护坡;
- (2)干砌块石护坡;
- (3)浆砌石护坡;
- (4)混凝土或沥青混凝土护坡。

6.7.3 在坝体与块石护坡之间应设置垫层。

6.7.4 在最低库水位 1.5 m 以下,可不设上游护坡。

6.7.5 下游护坡可采用下列型式:

- (1)草皮护坡;
- (2)碎石或卵石护坡;
- (3)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。

6.7.6 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。

6.7.7 浆砌石或混凝土护坡应设置纵横缝和排水孔。

6.7.8 护坡坡脚处应设置基座。

6.8 坝面排水

6.8.1 下游坝坡宜设置纵横向排水沟。

- (1)纵向(顺坝轴线方向)排水沟宜设在马道的内侧。
- (2)横向排水沟应从坝顶直到坝脚排水沟或最低尾水位以下。
- (3)横向排水沟可每隔 50~100 m 设置一条,总数不应少于两条。纵、横向排水沟应互相连通。
- (4)排水沟净断面尺寸可取 25 cm×25 cm。可采用浆砌石或混凝土块砌筑。

6.8.2 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。

7 坝的计算

7.1 渗流计算

7.1.1 应进行以下渗流计算:

- (1)确定坝体浸润线位置,绘制坝体及坝基的流网图;
- (2)确定坝体及坝基的渗流量;
- (3)确定坝体及坝基的渗透坡降和出逸坡降,并判断其渗透稳定性。

7.1.2 渗流计算应考虑水库运行中出现的各种不利情况,可计算以下两种水位组合:

- (1)上游正常蓄水位与下游不利水位;
- (2)上游库水位降落。

7.1.3 通过渗流计算应采取必要的渗流控制措施。

7.2 稳定计算

7.2.1 土石坝的稳定应计算以下四种情况:

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

7.2.2 坝的静力稳定计算,对于均质坝、心墙坝和厚斜墙坝可按刚体极限平衡理论采用瑞典圆弧法;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;对于岩基上的面板堆石坝可不作坝坡稳定计算,类比已成面板堆石坝,选定坝坡。

采用瑞典圆弧法计算时,坝坡抗滑稳定安全系数应不小于表 7.2.2 规定的数值。

表 7.2.2 坝坡抗滑稳定最小安全系数表

运 用 条 件	最小安全系数
正常运用条件(稳定渗流期,库水位正常降落)	1.15
非常运用条件(施工期,库水位非常降落,正常运用条件加地震)	1.05

注:库水位正常降落——水库在正常工作条件下库水位的经常性降落。

库水位非常降落——水库在非常工作条件下库水位的降落(如自校核洪水位的降落、从水库某一水位降落至死水位以下,水库要求短时间内紧急放空等)。

7.2.3 小型土石坝的稳定计算根据不同运用条件可分别采用总应力法或有效应力法。对粘性土的抗剪强度可采用以下方法确定:

施工期(总应力法):

$$\tau = C_u + \sigma \operatorname{tg} \phi_u \quad (7.2.3-1)$$

稳定渗流期(有效应力法):

$$\tau = C' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi' = C' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (7.2.3-2)$$

水位降落期:

$$\tau = C_{cu} + \sigma'_0 \operatorname{tg} \phi_{cu} \quad (7.2.3-3)$$

对无粘性土的抗剪强度采用:

$$\tau = \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (7.2.3-4)$$

式中 τ ——土体的抗剪强度;

C_u 、 ϕ_u ——直接快剪强度指标(或三轴不排水剪总强度指标);

σ ——法向总应力;

σ' ——法向有效应力;

u ——孔隙压力;

C' 、 ϕ' ——直接慢剪强度指标(或三轴排水剪强度指标);

σ'_0 ——库水位降落后的法向有效应力;

C_{cu} 、 ϕ_{cu} ——直接固结快剪强度指标(或三轴固结不排水剪总强度指标)。

7.2.4 小型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。

7.2.5 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。

7.2.6 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 、 ϕ_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。

7.2.7 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。

7.2.8 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。

7.2.9 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。

7.2.10 计算地震时坝体稳定,可按照《水工建筑物抗震设计规范》有关规定进行。

7.3 沉降计算

7.3.1 土石坝应计算坝体和坝基的总沉降量和施工期的沉降量。

7.3.2 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:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_i}{1 + e_{0i}} h_i \quad (7.3.2)$$

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。

7.3.3 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。

7.3.4 岩石地基不计其沉降量。

砂砾石地基可不计算其沉降量。

粘性土地基施工期沉降量应根据地基的条件专门研究。

8 观测设计

8.0.1 小型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。

小型土石坝的观测一般以肉眼巡检和外部观测为主,应设置的观测项目主要为:

(1) 表面沉降及位移;

(2) 渗流量及渗水的浑浊度;

(3) 上、下游水位。

8.0.2 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。

8.0.3 可采水量堰法或容积法观测渗流量,并观测渗水的浑浊度。

8.0.4 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。

8.0.5 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 50~100 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。

8.0.6 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。

8.0.7 对岩溶地基,观测设施应专门研究。

8.0.8 土石坝应经常和定期进行一般外表观测(如裂缝、坍陷、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。

8.0.9 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。

附加说明

主 编 单 位:水利部天津水利水电勘测设计研究院

主要起草人:林 昭 陈培杰 李培基 李文林

张沁成 李 强