

ICS 93. 160

P 55

**SL**

中华人民共和国水利行业标准

**SL 189—2013**

替代 SL 189—96

# 小型水利水电工程 碾压式土石坝设计规范

**Design code for rolled earth-rockfill dams  
in small size water resources and  
hydroelectric engineering**

2013-12-11 发布

2014-03-11 实施



中华人民共和国水利部 发布



中华人民共和国水利部

关于批准发布水利行业标准的公告  
(小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范)

2013 年第 79 号

中华人民共和国水利部批准《小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范》(SL 189—2013) 为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范	SL 189—2013	SL 189—96	2013.12.11	2014.3.11

水利部

2013 年 12 月 11 日



## 前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002)的要求，对《小型水利水电工程碾压式土石坝设计导则》(SL 189—96)进行修订。

本标准对原导则的八个章节保留并逐章补充、修订；同时，根据 SL 1—2002 的规定、结合近年来我国已建水库工程进行扩建加高和加固的现实需要，新增加了“术语、符号”、“坝体加高与加固”两个章节。

本标准共 10 章和 1 个附录，主要技术内容有：

- 编制目的和适用范围；
- 坝址选择、枢纽布置、坝型选择应遵循的原则；
- 筑坝材料的选择原则及填筑标准；
- 坝体结构设计、基础处理的工作内容、原则及要求；
- 坝体设计中的计算内容、方法及要求；
- 坝体加高、加固的原则、方法与要求；
- 增加附录，对波浪及护坡的计算等做了规定。

本标准中的强制性条文有：8.2.3 条。以黑体字标示，必须严格执行。

本标准所替代标准的历次版本为：

- SL 189—96

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中水北方勘测设计研究有限责任公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：席燕林 包日新 王 浩 时铁城  
池建军 蒋志勇 王永生 李新媛

于海江 时长波 刘洪启 林德金

本标准审查会议负责人：马毓淦

本标准体例格式审查人：牟广丞

# 目 次

1 总则 .....	1
2 术语、符号 .....	3
2.1 术语 .....	3
2.2 符号 .....	5
3 坝址选择及枢纽布置 .....	7
3.1 坝址选择 .....	7
3.2 枢纽布置 .....	7
4 坝型选择 .....	9
5 筑坝材料及填筑标准 .....	10
5.1 筑坝材料 .....	10
5.2 填筑标准 .....	12
6 坝体结构 .....	14
6.1 坝体分区 .....	14
6.2 坝顶超高 .....	14
6.3 坝顶构造 .....	15
6.4 坝坡 .....	15
6.5 防渗体 .....	16
6.6 反滤层及过渡层 .....	17
6.7 坝体排水 .....	18
6.8 护坡 .....	20
6.9 坝面排水 .....	21
6.10 坝体与地基、岸坡及其他建筑物的连接 .....	21
6.11 过水土石坝 .....	22
7 坝基处理 .....	24
7.1 一般要求 .....	24
7.2 砂砾石地基处理 .....	24

7.3	易液化土地基处理 .....	26
7.4	软土地基处理 .....	27
7.5	湿陷性黄土地基处理 .....	27
7.6	岩石地基处理 .....	28
8	土石坝计算 .....	29
8.1	渗流计算 .....	29
8.2	稳定计算 .....	31
8.3	沉降计算 .....	33
9	坝体加高与加固 .....	35
9.1	坝体加高 .....	35
9.2	坝体加固 .....	35
10	安全监测设计 .....	37
附录 A	波浪及护坡计算 .....	39
	标准用词说明 .....	47
	条文说明 .....	49



# 1 总 则

**1.0.1** 为规范小型水利水电工程碾压式土石坝设计,满足工程安全、经济合理和技术先进的要求,制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于4级、5级,且坝高小于30m的碾压式土石坝设计。

碾压式土石坝的级别按《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252)中的有关规定确定。

**1.0.3** 土石坝的坝高应从坝体防渗体(不含混凝土防渗墙、灌浆帷幕、截水槽等坝基防渗设施)底部或坝轴线部位的建基面计算至坝顶(不含防浪墙),取其大者。

**1.0.4** 土石坝在正常和非常运用条件的荷载组合情况下,应满足稳定、渗流、变形以及规定的超高等要求,保证工程长期安全运用并发挥功能。

**1.0.5** 坝址、库区及料场应进行测量,并按《中小型水利水电工程地质勘察规范》(SL 55)进行地质调查及勘探试验工作。

**1.0.6** 小型土石坝枢纽工程应进行水文、气象调查,水文分析和水利计算。缺少河流实测资料时,可利用水文图集和水文手册等资料,进行径流计算和洪水分析。有条件时应调查库区的历史洪水。

**1.0.7** 本标准引用标准主要有下列标准:

《中国地震动参数区划图》(GB 18306)

《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487)

《中小型水利水电工程地质勘察规范》(SL 55)

《土石坝安全监测技术规范》(SL 551)

《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL 62)

《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)

《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T 225)

《混凝土面板堆石坝设计规范》(SL 228)

《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252)

《碾压式土石坝设计规范》(SL 274)

《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》(SL 501)

**1.0.8** 小型水利水电工程碾压式土石坝设计除应符合本标准规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语、符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 碾压式土石坝 rolled earth - rockfill dam

将土石料分层填筑并碾压而成的坝。

#### 2.1.2 均质土坝 homogeneous earth dam

坝体断面不分防渗体和坝壳，绝大部分由一种土料组成的坝。

#### 2.1.3 土质材料防渗体分区坝 soil impervious zoned earth dam

坝体断面由土质材料防渗体及若干透水性不同的土石料分区构成，可分为心墙坝、斜心墙坝、斜墙坝，以及其他形式的土质材料防渗体分区坝。

#### 2.1.4 非土质材料防渗体坝 non - soil impervious zoned earth dam

防渗体由混凝土、沥青混凝土或土工膜等构成，其他部分由土石料构成的坝。防渗体在上游面的称为面板坝，在坝体中央的称为心墙坝。

#### 2.1.5 过水土石坝 overflow earth - rockfill dam

坝顶及下游坝坡设抗冲刷的护面，允许经坝顶及下游坝面过水的土石坝。

#### 2.1.6 无黏性土 cohesionless soil

粒径小于 0.005mm 的黏粒含量（质量）不大于 3%，塑性指数不大于 3，颗粒间不具有黏结力的土。

#### 2.1.7 砾石土 gravelly soil

含有碎石、砾、砂、粉粒、黏粒等组成的宽级配土。有冰碛的、风化的和开挖的风化岩石或软岩经碾压后形成的及人工掺合的各种砾石土。

#### 2.1.8 膨胀土 expansive soil

富含亲水矿物并具有明显吸水膨胀与失水收缩特性的高塑性黏土。

#### 2.1.9 分散性黏土 dispersive clay

遇水尤其是遇纯水容易分散，钠离子含量较高，大多为中、低塑性的黏土。

#### 2.1.10 软黏土 soft clay

天然含水率大，呈软塑到流塑状态，具有抗剪强度低，压缩性大，透水性小，灵敏度高的黏土。宜采用以下标准评定：液性指数  $I_L \geq 0.75$ ；无侧限抗压强度  $q_u \leq 50\text{kPa}$ ；标准贯入击数  $N_{63.5} \leq 4$ ；灵敏度  $S_t \geq 4$ 。

当  $I_L \geq 1.0$ ，孔隙比  $e_0 \geq 1.5$  为淤泥。

当  $I_L \geq 1.0$ ，孔隙比  $1.0 \leq e_0 < 1.5$  为淤泥质土。

#### 2.1.11 有机质土 organic soil

含有一定量有机质、呈浅灰、深灰色，有臭味，压缩性高的黏土或粉土。按有机质含量  $Q$  的大小可细分为有机质土 ( $5\% \leq Q < 10\%$ )、泥炭土 ( $10\% \leq Q < 60\%$ ) 和泥炭 ( $Q \geq 60\%$ )。

#### 2.1.12 湿陷性黄土 collapsible loess

主要由粉粒组成，呈棕黄或黄褐色，具有大孔隙或垂直节理特征。遇水产生自重湿陷的土，称为自重湿陷性黄土；不产生自重湿陷性的黄土，称为非自重湿陷性黄土。

#### 2.1.13 红黏土 laterite

石灰岩或其他溶岩经风化后形成的富含铁铝氧化物的褐红色粉土或黏土。

#### 2.1.14 不连续级配土 gap-graded soil

由于土中缺乏某一范围的粒径而使粒径分布曲线上出现台阶的土。

#### 2.1.15 喀斯特 (岩溶) karst

可溶性岩层被水长期溶蚀而形成的各种地质现象。

#### 2.1.16 硬岩 hard rock

饱和和无侧限抗压强度不小于  $30\text{MPa}$  的岩石。

### 2.1.17 软岩 weak rock

饱和和无侧限抗压强度小于 30MPa 的岩石。

### 2.1.18 流土 soil flow

在渗流作用下,局部土体表面隆起、顶穿或粗细颗粒同时浮动而流失的现象。

### 2.1.19 管涌 piping

土体中的细颗粒在渗流作用下从骨架孔隙通道流失的现象。

### 2.1.20 接触冲刷 erosion on contact surface

渗流沿着不同渗透系数的土层接触面流动时,沿层面带走细颗粒的现象。

### 2.1.21 接触流失 soil flow on contact surface

渗流垂直于渗透系数相差较大的两相邻土层流动时,将渗透系数较小的土层中的细颗粒带入渗透系数较大的土层中的现象。

### 2.1.22 压实度 degree of compaction

填土压实的干密度相应于试验室标准击实试验所得最大干密度的百分率。

### 2.1.23 相对密度 relative density

无黏性土处于最松状态的孔隙比与天然状态孔隙比之差和最松状态孔隙比与最紧密状态孔隙比之差的比值。

## 2.2 符 号

$A$ ——坝顶的安全加高;

$C_u$ ——土体的不均匀系数;

$c_u$ 、 $\phi_u$ ——直接快剪强度指标(或三轴不排水剪总强度指标);

$c'$ 、 $\phi'$ ——直接慢剪强度指标(或三轴排水剪有效强度指标);

$c_{cu}$ 、 $\phi_{cu}$ ——直接固结快剪强度指标(或三轴固结不排水剪强度指标);

$D_{15}$ ——保护料的粒径,小于该粒径的土重占总土重的 15%;

$D_r$ ——无黏性土的相对密度;

$d_{85}$ 、 $d_{15}$ ——被保护土的粒径,小于该粒径的土重占总土重的

85%、15%；

$e$ ——孔隙比；

$I_L$ ——土的液性指数；

$I_P$ ——土的塑性指数；

$J$ ——渗透比降；

$k$ ——渗透系数；

$N_{63.5}$ ——标准贯入击数；

$n$ ——土的孔隙率（或堆石体的孔隙率）；

$R$ ——波浪沿着坝坡的最大爬高；

$S_t$ ——总沉降量；

$P$ ——粒径  $d \geq 5\text{mm}$  的砾石含量；

$Y$ ——坝顶在静水位以上的超高；

$u$ ——孔隙水压力；

$\gamma_d$ ——干密度；

$\Delta_s$ ——粒径  $d \geq 5\text{mm}$  的砾石密度；

$\sigma$ ——法向总应力；

$\sigma'$ ——法向有效应力；

$\sigma'_c$ ——库水位降落前的法向有效应力；

$\tau$ ——土体的抗剪强度；

$\omega_{cp}$ ——砾石土最优含水量。

### 3 坝址选择及枢纽布置

#### 3.1 坝址选择

3.1.1 坝址选择应综合考虑地形、地质、建筑材料、枢纽布置及上、下游情况等，经方案比较后确定。

3.1.2 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。

3.1.3 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、活动性断层带以及软基上，如不能避开，应采取处理措施。

3.1.4 选择坝址时，应考虑水库蓄水后，不会在库区产生大规模坍塌、滑坡。在丘陵和平原地区，应避免浸没面积过大。

3.1.5 坝址区的地震动参数应按《中国地震动参数区划图》(GB 18306)的规定确定。地震基本烈度为Ⅵ度及Ⅵ度以上的地区，建筑物应根据 SL 203 的有关规定采取抗震措施。

#### 3.2 枢纽布置

3.2.1 土石坝枢纽一般由拦河坝、溢洪道、输水洞和水电站等组成，可结合输水洞设置泄洪洞。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。

3.2.2 坝轴线和坝型应根据地形地质条件，结合枢纽总体布置等因素确定。

坝轴线宜选用直线，如需转折，在转折处宜布置成曲线。坝轴线两端的岸坡要有足够的高度和厚度，两岸坝肩宜选择较缓岸坡。

3.2.3 泄水建筑物应能满足设计规定的运用条件和要求。泄洪能力应满足宣泄设计洪水、校核洪水的要求，以及排沙、排漂和排冰的要求。

3.2.4 泄水建筑物的布置形式，应根据地形、地质条件和泄洪规模、水头大小和防沙要求等综合比较后选定，宜优先布置开放式溢洪道。

3.2.5 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肩处。溢洪道进口附近坝坡应采取可靠的防护措施，出口应采取可靠的消能措施，消能后的水流不应淘刷坝脚和岸坡。确无上述布置条件时，经论证可采用坝面泄流。

3.2.6 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，转弯半径不宜小于5倍渠底宽度。

3.2.7 溢洪道不设置闸门时，堰顶高程宜取正常蓄水位；如下游有防洪要求或汛后需抬高水位，溢洪道可设置闸门，但应采取可靠的安全保障措施。

3.2.8 溢洪道宜选择在岩石地基上。软基溢洪道应修建在密实土层上，进口、泄槽及出口应采取防护设施，防护范围根据地形、地质条件和防冲要求确定。

3.2.9 泄洪洞或输水洞宜优先采用隧洞，也可采用坝下埋管。应根据地形、地质、施工、造价及运行条件等综合比较确定。

3.2.10 坝下埋管宜建在岩基上。如需设在软基上，应做好地基处理。地震烈度在Ⅶ度及Ⅶ度以上地区的软基上不应设坝下埋管。

3.2.11 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。

3.2.12 坝下埋管宜采用明流。管身尺寸应根据水力计算确定，并兼顾检查和维修的要求。

3.2.13 坝下埋管为明流时，应采用钢筋混凝土结构。如为压力流，应采用钢管或钢筋混凝土管。坝下埋管沿线应采取防止产生接触渗流破坏的构造措施。



## 4 坝型选择

4.0.1 小型碾压式土石坝可采用均质土坝、土质材料防渗体分区坝、非土质材料防渗体坝等型式。

4.0.2 坝型选择应综合考虑下列因素，经技术经济比较后确定：

1 坝址区河势地形、坝址基岩性质、覆盖层特征及地震烈度等条件。

2 筑坝材料的种类、性质、数量、位置、开采运输和填筑条件。

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 施工导流方式、施工进度、填筑强度、气象条件、施工场地、交通条件和初期度汛等施工条件。

6 坝及枢纽的总工程量、总工期和总造价。

4.0.3 坝址附近有性质适宜、数量足够的土料时，宜选用均质土坝。

4.0.4 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。

4.0.5 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，并应采取措施防止趾板不均匀变形。

4.0.6 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。

4.0.7 根据地质、地形及料场的具体条件，土石坝可分段采用不同坝型，但在坝型变化处应设置渐变段。

## 5 筑坝材料及填筑标准

### 5.1 筑坝材料

5.1.1 对筑坝材料应进行调查和土工试验,查明坝址附近各种天然土石料以及开挖料的性质、储量、开采条件和运距。

5.1.2 筑坝土石料选择应遵循下列原则:

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,并具有长期稳定性。

2 就地、就近取材,优先使用坝址附近的天然材料和开挖料,少占或不占农田。

3 便于开采、运输和压实。

5.1.3 干硬性黏土、膨胀土、分散性土、软黏土等不宜直接筑坝。

5.1.4 土质材料防渗体可用黏性土、砾石土(含岩石风化物)填筑。防渗土料中水溶盐(指易溶盐和中溶盐,按质量计)含量不大于5%;有机质含量(按质量计):均质坝不大于5%,心墙坝、斜墙坝不大于2%,超过此规定需进行论证。

5.1.5 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。

5.1.6 压实后防渗体的渗透系数,均质土坝应不大于  $1 \times 10^{-4}$  cm/s,心墙、斜墙和铺盖应不大于  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。

5.1.7 用于防渗体的砾石土(含岩石风化物),粒径大于5mm的含量不宜大于50%,粒径小于0.075mm的含量不宜小于15%,最大粒径不宜超过150mm或铺土厚度的2/3,且不应发生粗粒集中架空现象。应通过试验确定砾石土的级配范围。

5.1.8 当地缺少天然防渗土料时,可采用黏性土、砂质土和卵砾石,或黏性土、卵砾石的掺合料,但应拌和均匀,并符合

- 5.1.5条、5.1.6条、5.1.7条的规定。
- 5.1.9** 红黏土可用于填筑土石坝的防渗体。
- 5.1.10** 膨胀土填筑防渗体时，应设置足够厚的非膨胀土压重保护层。
- 5.1.11** 使用黄土类土筑坝，应破坏其原状结构，压实后应不再具有湿陷性。
- 5.1.12** 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。
- 5.1.13** 均匀的中、细砂及粉砂可用于坝壳干燥区，但地震区不宜采用。
- 5.1.14** 软岩可作为坝壳筑坝材料，但应考虑压实后级配变化和浸水后强度及透水性降低的影响。
- 5.1.15** 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填筑，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 $d < 0.075\text{mm}$ ）应小于5%。
- 5.1.16** 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。石料的块径和重量应能满足抗风浪和耐久性的要求。
- 5.1.17** 坝的反滤层、垫层和过渡层可使用天然砂砾料、筛选料或岩石轧制料，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（ $d < 0.075\text{mm}$ ）应小于5%。
- 5.1.18** 在缺乏土质防渗材料的地区，可采用混凝土、沥青混凝土或土工膜等非土质材料做坝的防渗体。
- 5.1.19** 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。混凝土强度等级不宜低于C25W6，宜采用普通硅酸盐水泥。面板可采用300mm的等厚板。
- 5.1.20** 沥青混凝土防渗体应满足防渗、抗裂、稳定和耐久性的要求。粗骨料宜采用碱性岩石（石灰岩、白云岩等）轧制的碎石。细骨料可选用天然砂、人工砂。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。

沥青混凝土的物理力学等性能指标应参照 SL 501 选定。

**5.1.21** 土石坝防渗土工膜和反滤排水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,依据 SL/T 225 选定。

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准则。

## 5.2 填筑标准

**5.2.1** 坝体应密实均匀,具有足够的抗剪强度,较小的压缩性,并满足渗流控制标准。应合理规定填筑标准,并通过生产性试验对规定的填筑标准进行验证。

**5.2.2** 对于黏性土料,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。压实度应为 95%~97%,对于设计地震烈度为 8 度、9 度的地区,压实度宜采用规定的上限。

填土的含水量应按最优含水量控制,允许偏差为±3%。

**5.2.3** 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 95%~97%,作为控制砾石土填筑的干密度。无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 (5.2.3-1) 和式 (5.2.3-2) 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。

$$(\gamma_d)_{\max} = \frac{1}{\frac{P}{\Delta_s} + \frac{(1-P)}{(\gamma_d)_0}} \quad (5.2.3-1)$$

$$\omega_{cp} = \omega_0(1 - P) \quad (5.2.3-2)$$

式中  $(\gamma_d)_{\max}$ ——砾石土最大干密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$P$ ——粒径  $d \geq 5\text{mm}$  的砾石含量, 以小数计;

$\Delta_s$ ——粒径  $d \geq 5\text{mm}$  的砾石密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$(\gamma_d)_0$ ——粒径  $d < 5\text{mm}$  的细粒土的最大干密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$\omega_{cp}$ ——砾石土最优含水量;

$\omega_0$ ——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, 依此确定填筑标准。

5.2.4 砂料和砂砾料的压实标准应以相对密度 ( $D_r$ ) 为设计控制指标, 相对密度不应低于 0.70, 对于设计地震烈度为 8 度、9 度的地区, 相对密度不应低于 0.75。堆石料的填筑标准以孔隙率 ( $n$ ) 为设计控制指标, 孔隙率应为 20%~28%。混凝土面板坝及过水土石坝坝体的压实相对密度应取大值, 孔隙率应取小值。

## 6 坝体结构

### 6.1 坝体分区

6.1.1 坝体分区设计应根据就地取材和挖填平衡原则,经技术经济比较确定。

6.1.2 坝体各种不同材料应有明确的分区,对各区材料的性质和施工质量等应有具体的技术指标要求。

6.1.3 当防渗体下游坝体不设置专门排水体时,坝体渗透性、填筑料粒径应沿远离防渗体方向逐步增大。

### 6.2 坝顶超高

6.2.1 坝顶超高系指坝顶高于静水位的高度,按式(6.2.1-1)确定:

$$Y = R + A \quad (6.2.1-1)$$

式中  $Y$ ——坝顶超高, m;

$R$ ——波浪沿着坝坡的最大爬高, m,可按附录 A 计算;

$A$ ——安全加高, m,正常运用条件取  $A=0.50\text{m}$ ,非常运用条件取  $A=0.30\text{m}$ 。

6.2.2 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条件的坝顶超高。

2 校核洪水位加非常运用条件的坝顶超高。

3 正常蓄水位加非常运用条件的坝顶超高,再加按 6.2.3 条规定的地震安全加高。

6.2.3 地震安全加高可根据设计地震烈度和坝前水深,取  $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 。

6.2.4 库区内可能因塌岸和滑坡而形成涌浪时,应对涌浪对坝顶超高的影响及其对坝面的破坏等作专门研究,并采取相应措施。

6.2.5 当坝顶上游侧设防浪墙时，坝顶超高可改为对防浪墙顶的要求。但在正常运用条件下，坝顶应高出静水位 0.5m；在非常运用条件下，坝顶应不低于静水位。

6.2.6 计算波浪爬高所采用的设计风速应根据历年实测最大风速资料，按下列规定采用。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。

1 正常运用条件下，采用多年平均年最大风速的 1.5 倍。

2 非常运用条件下，采用多年平均年最大风速。

6.2.7 坝顶高程应预留沉降超高。沉降超高应根据沿坝轴线方向坝地质条件变化、坝体材料及坝高变化等因素，按 8.3 节的规定计算后分段确定。预留沉降超高不应计入坝的计算高度。

### 6.3 坝顶构造

6.3.1 坝顶宽度应根据构造、施工、运行和抗震等因素要求确定，可采用 4~6m。

6.3.2 坝顶上游侧宜设防浪墙。防浪墙的设计应符合下列规定：

1 防浪墙坝顶以上部分的高度可采用 1.0~1.2m；

2 防浪墙应坚固不透水，并满足稳定和强度要求；

3 防浪墙底部应与防渗体紧密结合，墙身应设置伸缩缝和止水，与防渗体一同构成整体封闭的防渗系统。

6.3.3 坝顶面上游侧不设防浪墙时宜采取安全防护措施，下游侧宜设置路缘石或采取其他安全措施。

6.3.4 坝顶路面可采用碎石、砂砾石或沥青混凝土等柔性材料。坝顶路面宜向上、下游或下游侧倾斜 2%~3%，并应做好向下游的排水系统。

6.3.5 坝顶上游侧宜设置照明设施。

### 6.4 坝坡

6.4.1 坝坡应根据下列因素确定。设计中可通过工程类比初拟坝坡，再经稳定计算确定。沥青混凝土面板坝的上游坝坡不宜陡

于1:1.7。

- 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。

**6.4.2** 上、下游坝坡马道的设置应根据坝面排水、检修、观测等需要确定。

土质材料防渗体分区坝和均质坝上游坝坡宜少设马道，非土质材料防渗体面板坝上游坝坡不宜设置马道。

马道宽度不宜小于1.0m，各级马道之间的高差可采用8~12m。

## 6.5 防 渗 体

**6.5.1** 土质材料防渗体的断面尺寸应符合下列规定：

- 1 渗流量控制在允许范围内，并满足渗透稳定要求。
- 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部位满足渗透稳定要求。
- 4 经济合理。

**6.5.2** 土质材料防渗体应自上而下逐渐加厚，顶部宽度不宜小于1.5m。

**6.5.3** 土质材料防渗体顶部和土质斜墙上游应设保护层。保护层厚度应不小于当地冻结和干燥深度。

**6.5.4** 土工膜防渗体应在其上、下分别设置保护层和支持层。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。

**6.5.5** 防渗土工膜应与坝基、岸坡或其他相接的混凝土建筑物形成封闭的防渗系统。周边缝的处理及其结构尺寸应能满足渗透比降和变形的要求。

**6.5.6** 防渗体顶部高程应高出正常运用条件的静水位不小于



0.3m, 且不低于非常运用条件的静水位。

如防渗体顶部设有防浪墙, 防渗体顶部高程可不受上述限制, 但不应低于正常运用条件的静水位。

## 6.6 反滤层及过渡层

**6.6.1** 土质材料防渗体(包括心墙、斜墙、铺盖和截水槽等)与坝壳排水体或坝基透水层之间, 以及下游渗流出逸处应满足反滤准则要求, 如不满足, 应设置反滤层。

**6.6.2** 坝壳与坝基之间, 如不满足反滤准则要求, 应设置反滤层。

**6.6.3** 当采用几种不同性质的土石料分区填筑坝体时, 浸润线以下各分区之间应满足反滤准则要求。

**6.6.4** 反滤层应满足下列要求:

- 1 防止被保护土发生渗透变形, 反滤层材料应为非管涌土。
- 2 透水性大于被保护土, 能通畅排除渗透水。
- 3 不被细颗粒( $d < 0.075\text{mm}$ )淤堵失效。
- 4 耐久性和稳定性满足工程运行期的正常运用要求。

**6.6.5** 反滤层的厚度应根据材料用途及施工方法等因素确定。水平反滤层每层的最小厚度可采用0.3m, 竖向或倾斜反滤层每层的最小厚度可采用0.4m。采用机械填筑时, 最小水平宽度应根据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。

**6.6.6** 粒状反滤料应按下列准则确定:

1 被保护土与反滤层之间应满足式(6.6.6-1)和式(6.6.6-2)的要求。

$$D_{15}/d_{85} \leq 5 \quad (6.6.6-1)$$

$$D_{15}/d_{15} \geq 5 \quad (6.6.6-2)$$

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 当被保护土为一般土 (小于 0.075mm 粒径含量为 40%~85%), 应使其第一层反滤层  $D_{15} \leq 0.7\text{mm}$ , 不均匀系数应为 5~8。

3 对于不均匀系数  $C_u > 8$  的被保护土, 可取级配曲线中不均匀系数  $C_u \leq 5 \sim 8$  的细粒部分的  $d_{85}$ 、 $d_{15}$  作为计算粒径。

4 对于级配不连续的被保护土, 应取级配曲线平段以下 ( $d=1 \sim 5\text{mm}$ ) 粒组的  $d_{85}$ 、 $d_{15}$  作为计算粒径。

5 当第一层反滤料采用不均匀系数  $C_u > 5 \sim 8$  的砂砾石时, 砾石 ( $d \geq 5\text{mm}$ ) 含量应小于 60%, 且应取其细料 ( $d < 5\text{mm}$ ) 部分的  $D_{15}$  作为计算粒径。

6.6.7 反滤材料可采用土工织物, 但应防止淤堵。

6.6.8 土石坝的过渡层应具有协调相邻两侧材料变形的功能, 混凝土面板堆石坝的垫层和堆石之间, 沥青混凝土心墙和坝壳之间均应设置过渡层。土质材料防渗体分区坝是否设过渡层应根据防渗体和坝壳材料特性及反滤层厚度经综合研究确定。

## 6.7 坝体排水

6.7.1 土石坝应按下列要求设置坝体排水设施:

- 1 能自由排出全部渗水。
- 2 按反滤要求设计。

6.7.2 坝体排水设施型式应综合下列因素确定:

- 1 坝型及坝体、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条件。
- 5 坝址区的气候条件。

6.7.3 坝体排水可采用下列形式:

- 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, 由上述型式中的两种或多种综合组成。
- 6.7.4 棱体排水设计应遵守下列规定:
  - 1 棱体排水顶部高程应超出下游最高水位不小于 0.5m。
  - 2 坝体浸润线与坝面的最小距离大于本地区的冻结深度。
  - 3 顶宽满足施工和观测的需要, 且不宜小于 1.0m。
  - 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, 外坡可取不陡于 1:1.5。
- 6.7.5 贴坡排水设计应遵守下列规定:
  - 1 顶部高程高出浸润线逸出点, 超出高度应使坝体浸润线在冻结深度以下, 且不小于 1.5m。
  - 2 厚度应大于冻结深度。
- 6.7.6 褥垫排水设计应遵守下列规定:
  - 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, 应保证冰层以下有足够的过水断面。
  - 3 对于均质土坝, 褥垫排水可采用中粗砂或砂砾料填筑, 砂砾料应满足反滤要求, 不应有砾石集中现象, 较大的颗粒应剔除, 含泥量 ( $d < 0.075\text{mm}$ ) 应小于 5%, 渗透系数应大于坝基和坝体渗透系数的 100 倍。
  - 4 褥垫厚度可按排除 2.0 倍入渗量确定, 易产生不均匀沉降的坝基应适当增加褥垫排水厚度。
  - 5 褥垫排水伸入坝体内的长度可为坝底宽度的  $1/4 \sim 1/3$ 。
  - 6 在两岸坝基面应增设横向排水暗沟, 暗沟顶面应低于褥垫的底面, 分段将褥垫中的渗水汇集并引至坝脚排水沟内。
- 6.7.7 均质土坝坝体内设置竖向排水时宜与褥垫排水的上游端连接。
- 6.7.8 网状排水带中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

0.5m, 间距为 20~50m, 坡度不大于 1%。

网状排水带计算尺寸过大时, 排水带内可设置混凝土排水  
管, 管壁开孔, 管径不小于 150mm。管内流速为 0.2~1.0m/s,  
管身四周应填筑反滤料。

## 6.8 护 坡

6.8.1 坝体表面为土、砂、砂砾石等材料时应设置护坡。

6.8.2 上游护坡可采用下列型式:

- 1 堆石护坡。
- 2 干砌石护坡。
- 3 浆砌石护坡。
- 4 混凝土或沥青混凝土护坡。

6.8.3 下游护坡可采用下列型式。如坝体为堆石、碎石或卵石  
填筑, 可不设护坡。

- 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。

6.8.4 堆石、干砌石护坡与被保护料之间不满足反滤要求时,  
护坡下应按反滤要求设置垫层。

6.8.5 上游护坡的覆盖范围, 上游面上部自坝顶起, 如设防浪  
墙时应与防浪墙连接, 下部至死水位以下不宜小于 1.5m, 最低  
水位不确定时应护至坝脚; 下游面应由坝顶护至排水棱体, 无排  
水棱体时应护至坝脚。

6.8.6 寒冷地区的黏性土坝坡, 上、下游护坡和垫层的厚度应  
大于冻结深度。

6.8.7 浆砌石或混凝土护坡应设置纵横缝和排水孔。

6.8.8 除堆石坝护坡外, 应在马道和坡脚处设置基座。

6.8.9 护坡厚度和粒径应按附录 A 的方法计算, 风浪计算应符  
合 6.2.6 条的规定。

## 6.9 坝面排水

6.9.1 下游坝坡应设置纵横向排水沟，排水沟布置应满足以下要求：

- 1 纵向（顺坝轴线方向）排水沟应设在马道内侧。
- 2 横向排水沟应从坝顶延伸至坝脚排水沟或下游最低水位以下。
- 3 横向排水沟可每隔 50~100m 设置一条，纵、横向排水沟应互相连通。
- 4 排水沟可采用浆砌石或混凝土块砌筑。

6.9.2 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。

## 6.10 坝体与地基、岸坡及其他建筑物的连接

6.10.1 坝体与坝基和岸坡应结合良好，避免发生下列情况：

- 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。

6.10.2 坝基与岸坡清理应遵循下列原则：

- 1 坝体断面范围内应清除坝基与岸坡上的草皮、树根、含有植物根系的有机土、乱石、蛮石或其他废料，并将清理后的坝基土层压实。
- 2 防渗体范围内应清除与岩石地基和岸坡连接处表面松动的石块、凹处积土和突出的岩石。
- 3 防渗体应与岩面紧密接触，如基岩裂隙发育，应在防渗体与基岩接触面间浇筑混凝土盖板，必要时应对基岩进行灌浆处理。

6.10.3 岸坡开挖应遵循下列原则：

- 1 岩坡宜平顺，不应出现台阶、反坡或突然变坡，岸坡上

缓下陡时，凸出部位的变坡角应小于  $20^{\circ}$ 。

2 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  $1:1.5$ ，与混凝土建筑物结合面坡度不宜陡于  $1:0.25$ 。

3 坝壳透水料与岸坡连接处，岸坡应能保持自身稳定。

6.10.4 在土质材料防渗体与岸坡连接处，宜扩大防渗体的断面和加强下游反滤层。

6.10.5 坝基覆盖层或岸坡岩石裂隙充填物与透水坝壳之间如不符合反滤准则时，应设置反滤层。

6.10.6 坝体与混凝土坝、溢洪道、船闸、涵管等建筑物连接，应防止接触面产生冲刷，避免因不均匀沉降产生裂缝及其他有害影响。

6.10.7 坝体和混凝土坝、船闸、溢洪道等建筑物的连接可采用侧墙式、插入式或其他经过论证的连接形式。土质材料防渗体与混凝土建筑物之间的连接应有足够长的渗径。

6.10.8 地震区的土石坝与岸坡和混凝土建筑物的连接应遵照 SL 203 的相关规定执行。

## 6.11 过水土石坝

6.11.1 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 溢流面护面宜优先采用钢筋混凝土面板。

3 面板表面应平整，连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，其上游可设齿槽嵌入坝体。

4 过水土石坝宜修建在岩基上，在砂砾石覆盖层上修建时应做好消能与防冲刷设施。

5 沥青混凝土过水护面应满足抗冲蚀要求，严寒地区应采取防冻裂措施；炎热地区应采取预防沥青流淌的措施。

6.11.2 过水土石坝溢流面结构型式应根据坝高及单宽流量按表 6.11.2 选取。

表 6.11.2 过水土石坝溢流面结构型式选取表

溢流面结构型式	最大坝高 (m)	单宽流量 [ $\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ ]
钢筋混凝土护面	<30	<20
沥青混凝土护面	<20	<15
浆砌块石护面	<10	<8

6.11.3 过水土石坝应对下游坝脚进行防护，避免冲刷破坏。

## 7 坝基处理

### 7.1 一般要求

7.1.1 坝基处理应满足渗透稳定、控制渗流量、静力和动力稳定、允许沉降量和不均匀沉降量等方面要求，保证坝的安全运行。处理的标准与要求应根据具体情况在设计中确定。

7.1.2 坝基中遇到下列情况时，应慎重研究和处理：

- 1 深厚砂砾石层。
- 2 软黏土。
- 3 湿陷性黄土。
- 4 疏松砂土及少黏性土。
- 5 喀斯特（岩溶）。
- 6 有断层、破碎带、透水性强或有软弱夹层的岩石。
- 7 含有大量可溶盐类的岩石和土。
- 8 透水坝基下游坝脚处有连续的透水性较差的覆盖层。
- 9 矿区井、洞、暗沟、故河道、塌陷区、杂填土等隐患。

### 7.2 砂砾石地基处理

7.2.1 地基处理前，应查明坝基砂砾石层的平面与空间分布、砂砾石的级配、密度、渗透系数、允许渗透比降、有无软弱夹层、有无集中渗流带，以及基岩情况等。在地震区，还应了解标准贯入击数、剪切波速、动力特性等指标。

7.2.2 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、允许渗流量、施工条件和工程造价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形成的防渗墙，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垫层、棱体排水、坝趾排水沟、减压井和透水盖重



等。经技术经济论证后，也可采用其他安全有效的基础防渗和排水措施。

**7.2.3** 当砂砾石覆盖层厚度不大于 15m 时，宜采用明挖回填黏土截水槽处理，也可选用其他防渗措施；当砂砾石覆盖层厚度大于 15m 时，开挖截水槽困难或设置截水槽无法达到预期的防渗效果时，宜采用混凝土防渗墙或高压喷射灌浆形成防渗墙，或采用截水槽和防渗墙相结合的综合处理措施。

**7.2.4** 截水槽应布置在坝体的防渗体下面。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。

**7.2.5** 截水槽底宽应根据其填筑土料的允许渗透比降确定，但最小宽度宜不小于 3.0m。开挖边坡由覆盖层材料的抗剪强度及开挖深度确定，可采用 1:1.5~1:2.0。

截水槽宜采用与坝身防渗体相同的土料填筑，其压实干密度应大于坝体防渗土料的压实干密度。

当截水槽土料与坝基砂砾石之间不满足反滤准则要求时，应在截水槽下游面设置反滤层。

**7.2.6** 截水槽嵌入相对不透水层、不透水层或弱风化岩的深度应不小于 0.5m。如基岩表面裂隙发育，可用水泥砂浆填堵或浇筑混凝土，将裂隙和坝体填土隔开。必要时可对基岩进行灌浆处理。

**7.2.7** 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。

**7.2.8** 当坝基砂砾石覆盖层厚度较大，采用垂直防渗措施有困难或不经济时，可在上游设置铺盖防渗加下游反滤排水减压。

**7.2.9** 黏性土料铺盖的渗透系数应不大于  $10^{-5}$  cm/s。铺盖长度、厚度应满足坝基渗透比降和渗流量的控制要求。

铺盖长度宜不小于 5 倍水头。铺盖上游端厚度宜采用 0.5~1.0m，末端宜不小于 2.5m。

**7.2.10** 铺盖的建基面按 6.10.2 条的规定进行清理。建基面应

进行压实和平整，且不得有砾石集中。

铺盖与坝基砂砾石之间应满足反滤准则要求，否则应设置反滤层。

**7.2.11** 利用天然土层做铺盖，应查明其分布、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。

**7.2.12** 土工膜铺盖的铺设、粘接和防护，应满足 SL/T 225 的相关要求。

**7.2.13** 应在黏土铺盖表面铺松土或渣料保护，避免在施工和运行期间发生干裂、冰冻。对于可能受到波浪冲刷的部位，铺盖上应采取抗冲刷保护措施。

**7.2.14** 所有排水体的底部应设置在透水地基上。如坝基存在弱透水层或不透水层，应将其挖穿，或采用伸入透水层一定深度的减压井将渗水引至下游坝脚排水沟。排水沟沟底应设有适当的纵坡，并从沟底最低处连通横向排水沟，顺通至下游河槽。减压井深入透水层内的深度宜不小于透水层厚度的 1/2。如果透水层厚度太大，经计算减压井深度取值应满足透水层渗流稳定要求。

**7.2.15** 在坝体下游出逸比降大于容许值的地基范围内，应设反滤保护层。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准则要求。

**7.2.16** 高压喷射灌浆或混凝土防渗墙的设计，可参照 SL 62 及 SL 274 执行。

### 7.3 易液化土地基处理

**7.3.1** 位于地震区的饱和和无黏性土地基和少黏性土地基应考虑地震液化的影响。液化评价方法应按 GB 50487 执行。

**7.3.2** 对于可能发生液化的土层，宜挖除并换填符合要求的土料。在挖除有困难或不经济时，应采取加固措施，达到与设计地震烈度相适应的密实状态。加固可采用下列一种或多种措施：

- 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。

#### 7.4 软土地基处理

7.4.1 软土地基筑坝时应进行地基处理，处理可采用下列一种或多种方法：

- 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。
- 6 插塑料排水板法。
- 7 预压法。

7.4.2 任何软土地基的处理方法，均应控制坝体填筑速率。

为确定安全填筑速率，应在上、下游坝脚设置坝基沉降位移监测点。必要时可设置孔隙水压力观测设施。

#### 7.5 湿陷性黄土地基处理

7.5.1 湿陷性黄土地基应进行处理。

7.5.2 对于厚度不大的湿陷性黄土地基，可采取挖除、翻压或表面夯实等方法消除其湿陷性。

7.5.3 当坝基湿陷性黄土较厚时，宜采用预浸水法处理。厚度超过 15m 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。

7.5.4 湿陷性黄土坝基可用强夯法处理，夯实遍数及影响深度

由试验确定。

7.5.5 湿陷性黄土地基采用振冲加固法处理时，孔距、孔径、孔深可根据试验或参考已建成工程的经验确定。

## 7.6 岩石地基处理

7.6.1 当岩石地基有较大透水性、软弱夹层、风化破碎带或化学溶蚀等不良地质现象存在，影响到水库蓄水和坝体及坝基的安全时，应采取处理措施。

7.6.2 当坝基或截水槽范围内的岩基有节理裂隙密集带、断层、破碎带、软弱夹层等地质构造时，应根据产状、宽度、深度、延伸长度以及管涌和溶蚀对坝基和坝体的影响，采用下列一种或多种措施：

- 1 开挖齿槽，回填混凝土。
- 2 扩大截水槽底宽或浅层挖除。
- 3 帷幕灌浆。
- 4 设置防渗墙。
- 5 在下游断层和破碎带出露处铺设反滤层。

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

7.6.4 根据岩溶发育情况、充填物性质、水文地质条件、水头大小、覆盖层厚度和防渗要求，岩溶地基处理可采用堵、截、围、铺、隔等方法，或几种措施综合处理。

7.6.5 岩石地基混凝土面板堆石坝的坝基处理应按 SL 228 的规定执行。

## 8 土石坝计算

### 8.1 渗流计算

8.1.1 渗流计算应包括下列内容:

- 1 确定坝体浸润线位置, 绘制坝体及坝基的等势线图或流网图。
- 2 确定坝体及坝基的渗流量。
- 3 确定坝体及坝基的渗透比降和出逸比降, 并判断其渗透稳定性。

8.1.2 渗流计算应考虑水库运行中出现的各种不利情况, 可采用下列水位组合:

- 1 上游正常蓄水位与下游不利水位。
- 2 上游设计洪水位与相应下游水位。
- 3 上游校核洪水位与相应下游水位。
- 4 上游库水位降落。

8.1.3 渗流计算应考虑坝体和坝基渗透系数的各向异性。渗透流量计算时宜采用土层渗透系数的大值平均值, 水位降落时的浸润线计算宜用小值平均值。

8.1.4 采用公式法进行渗流计算时, 对比较复杂的实际条件可做下列简化:

1 渗透系数相差 5 倍以内的相邻薄土层可视为一层, 采用加权平均渗透系数作为计算依据。

2 双层结构坝基, 如下卧土层较厚, 且其渗透系数小于上覆土层渗透系数的  $1/100$  时, 可将下卧土层视为相对不透水层。

3 当透水坝基深度大于建筑物不透水底部长度的 1.5 倍以上时, 可按无限深透水坝基情况估算。

8.1.5 渗透稳定计算应包括下列内容:

- 1 判别土的渗透变形形式, 即管涌、流土、接触冲刷或接

触流失等。

2 判明坝体和坝基土体的渗透稳定。

3 判明坝下游渗流出逸段的渗透稳定。

8.1.6 渗透变形形式的判别方法应按 GB 50487 执行。

8.1.7 无反滤层保护时, 坝体坝基渗透出逸比降应小于材料的允许渗透比降。

8.1.8 坝基表层土的渗透系数小于下层土的渗透系数而下游渗透出逸比降又符合式 (8.1.8-1) 时, 应设置排水盖重层或排水减压井。

$$J_{a-x} > (G_s - 1)(1 - n_1)/K \quad (8.1.8-1)$$

排水盖重层的厚度  $t$  可按式 (8.1.8-2) 计算:

$$t = \frac{KJ_{a-x}t_1\gamma_w - (G_s - 1)(1 - n_1)t_1\gamma_w}{\gamma} \quad (8.1.8-2)$$

式中  $J_{a-x}$ ——表层土在坝下游坡脚点  $a$  至  $a$  以下范围  $x$  点的渗透比降, 可按表层土上下表面的水头差除以表层土层厚度  $t_1$  得出 (见图 8.1.8);

$G_s$ ——表层土的土粒密度与水的密度之比;

$n_1$ ——表层土的孔隙率;

$K$ ——安全系数, 取 1.5~2.0;

$t_1$ ——表层土的厚度, m;

$\gamma$ ——排水盖重层的容重, 水上用湿容重, 水下用浮容重,  $\text{kN/m}^3$ ;

$\gamma_w$ ——水的容重,  $\text{kN/m}^3$ 。

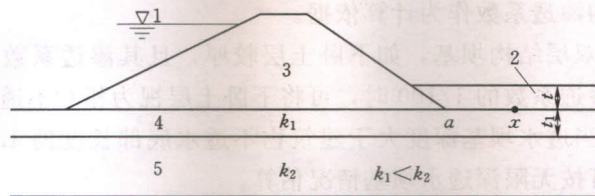


图 8.1.8 坝基结构示意图

1—上游水位; 2—排水盖重层; 3—坝体; 4—坝基表层; 5—坝基下层。

## 8.2 稳定计算

8.2.1 土石坝的稳定计算应包括下列内容:

- 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。

8.2.2 坝的静力稳定计算,宜采用刚体极限平衡理论,对于均质坝、心墙坝和厚斜墙坝,可采用瑞典圆弧法或简化毕肖普法;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,稳定计算方法可参照 SL 274—2001 附录 D 执行。对于岩基上的面板堆石坝,可类比已建面板堆石坝选定坝坡。

8.2.3 对于圆弧滑动法,可采用瑞典圆弧法或简化毕肖普法计算,坝坡抗滑稳定安全系数应不小于表 8.2.3 的规定。

表 8.2.3 坝坡抗滑稳定最小安全系数表

运用条件	最小安全系数	
	瑞典圆弧法	简化毕肖普法
正常运用条件	1.15	1.25
非常运用条件 I	1.05	1.15
非常运用条件 II	1.02	1.10

注 1: 正常运用条件包括:  
(1) 水库水位处于正常蓄水位和设计洪水位与死水位之间的各种水位的稳定渗流期;  
(2) 水库水位在上述范围内经常性的正常降落。

注 2: 非常运用条件 I 包括:  
(1) 施工期;  
(2) 校核洪水位有可能形成稳定渗流的情况;  
(3) 水库水位的非常降落(如水库水位自校核洪水位降落、降落至死水位以下,以及大流量快速泄空等)。

注 3: 非常运用条件 II: 正常运用条件遇地震。

8.2.4 采用滑楔法进行稳定计算时,若假定滑楔之间作用力平行于坡面和滑底斜面的平均坡度,安全系数应采用表 8.2.3 中毕肖普法的数值;若假定滑楔之间作用力为水平方向,安全系数应采用表 8.2.3 中瑞典圆弧法的数值。

8.2.5 小型土石坝的稳定计算宜采用有效应力法。为简化计算,对于黏性土填筑的坝体在施工期、水位降落期可采用总应力法。

有效应力法的抗剪强度应按式 (8.2.5-1)、式 (8.2.5-2) 计算:

$$\text{黏性土} \quad \tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (8.2.5-1)$$

$$\text{无黏性土} \quad \tau = \sigma' \tan \phi' \quad (8.2.5-2)$$

对于黏性土的总应力法,抗剪强度可采用式 (8.2.5-3)、式 (8.2.5-4) 方法确定:

$$\text{施工期} \quad \tau = c_u + \sigma \tan \phi_u \quad (8.2.5-3)$$

$$\text{水位降落期} \quad \tau = c_{cu} + \sigma'_c \tan \phi_{cu} \quad (8.2.5-4)$$

式中  $c_u$ ——直接快剪强度指标 (或三轴不排水剪总强度指标), kPa;

$c'$ ——直接慢剪强度指标 (或三轴排水剪有效强度指标), kPa;

$c_{cu}$ ——直接固结快剪强度指标 (或三轴固结不排水剪总强度指标), kPa;

$u$ ——孔隙水压力, kPa;

$\sigma$ ——法向总应力, kPa;

$\sigma'$ ——法向有效应力, kPa;

$\sigma'_c$ ——库水位降落前的法向有效应力, kPa;

$\tau$ ——土体的抗剪强度, kPa;

$\phi_u$ ——直接快剪强度指标 (或三轴不排水剪总强度指标), ( $^\circ$ );

$\phi'$ ——直接慢剪强度指标 (或三轴排水剪有效强度指标), ( $^\circ$ );

$\phi_{cu}$ ——直接固结快剪强度指标 (或三轴固结不排水剪总



强度指标), ( $^{\circ}$ )。

**8.2.6** 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水压力及有效应力, 采用直接慢剪(或三轴排水剪)试验的强度指标。

**8.2.7** 施工期稳定计算可采用总应力法, 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  $c_u$ 、 $\phi_u$  进行稳定计算。

**8.2.8** 土质材料防渗体坝, 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水压力, 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; 对降落后水位以下部分条块重量用浮容重, 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容重, 计算抗滑力用浮容重, 浸润线以上部分均用湿容重, 抗剪强度采用直接固结快剪(或三轴固结不排水剪)试验的强度指标。

**8.2.9** 湿陷性黄土坝基未完全处理时, 应核算水库蓄水时地基浸水后强度降低对坝体稳定的影响。

**8.2.10** 软土地基上的坝, 根据地基处理情况, 应核算施工期稳定性。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, 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。

**8.2.11** 坝体抗震稳定计算, 按 SL 203 执行。

**8.2.12** 土工膜防渗的斜墙土石坝, 除应按土质斜墙土石坝进行坝坡和坝基稳定分析外, 尚应沿土工膜和土的接触带进行稳定分析。

### 8.3 沉降计算

**8.3.1** 土石坝应计算坝体和坝基的竣工期沉降量和最终沉降量。

**8.3.2** 坝体和坝基的沉降量可根据相应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, 可按式(8.3.2)计算:

$$S_t = \sum_{i=1}^n \frac{e_{i0} - e_{it}}{1 + e_{i0}} h_i \quad (8.3.2)$$

式中  $S_t$ ——竣工时或最终的坝体和坝基总沉降量，m；

$n$ ——土层分层数；

$e_{i0}$ ——第  $i$  层土起始孔隙比；

$e_{it}$ ——第  $i$  层土相应于竣工时或最终的竖向有效应力作用下的孔隙比；

$h_i$ ——第  $i$  层土层厚度，m。

**8.3.3** 施工期坝体的沉降量，对土坝可取最终沉降量的 80%，对堆石或砂砾石坝可取 90%。竣工后的沉降量为总沉降量与施工期沉降量之差。

**8.3.4** 坝顶竣工后的预留沉降超高，应根据沉降计算、施工期观测和工程类比等综合分析确定。坝顶预留沉降超高，土质材料防渗体坝可取坝高的 1%。

**8.3.5** 岩石和砂砾石地基可不计其沉降量。黏性土地基施工期沉降应根据地基的条件进行专门研究。

## 9 坝体加高与加固

### 9.1 坝体加高

9.1.1 坝体扩建加高设计，应分析原坝体的原型观测资料，并对原坝体进行勘探、试验，了解坝体质量和安全状况，根据加高后的坝高和库容重新核定工程等别和洪水标准，作为坝体扩建加高设计的依据。

9.1.2 坝体扩建加高时，应对原坝基渗流、坝坡稳定、填筑质量，以及坝体与岸坡和其他建筑物的连接进行安全复核；应对已建的泄水、引水建筑物的过流能力和安全进行核算。不满足加高后运用要求时应进行加固或扩建。

9.1.3 土石坝扩建加高宜采用从下游面培厚加高的方法。如在水库的淤积物上加高，应根据淤积物固结情况，进行变形和稳定分析，研究采取排水固结措施和控制加高速率的必要性。

9.1.4 如加高相对高度不大，在对原坝体的填筑质量、坝坡安全裕度、坝地质条件以及抗震性能等情况进行复核后，坝的整体安全满足本标准要求时，也可采用戴帽加高法。

9.1.5 坝体加高或培厚，应对结合部位原坝体进行表层处理。

9.1.6 扩建加高坝体的土石料与原坝体填筑料性质不同时，应研究增设反滤层和过渡层的必要性。

9.1.7 坝体加高时，应对原坝防渗体与加高部分防渗体之间的连接和止水进行专门设计，形成完整的防渗体系。

9.1.8 扩建加高的坝顶布置与构造，除应满足功能要求外，宜与相邻建筑物及周边环境相协调。

### 9.2 坝体加固

9.2.1 坝体加固措施应满足安全可靠、经济合理、方便施工的要求。

**9.2.2** 对坝体缺陷、病害或安全隐患，可采取下列一种或多种措施加固处理：

1 对管涌、流土、接触冲刷等产生的渗透破坏，可采取增设上游铺盖、下游坝脚反滤和压重等措施，必要时也可采取坝内灌浆或增设防渗墙等工程措施。

2 对坝体出现变形异常、裂缝等安全问题，可采取降低水位、翻坡碾压、坝脚压重、裂缝灌浆等措施，对浅表裂缝宜采用开挖回填处理。

3 对坝体出现渗透压力异常，可采用增加透水压重、减压排水井等措施进行处理，必要时翻修反滤及排水系统。

4 对白蚁、鼠害等滋生繁衍造成的坝体破坏，可采用锥探灌浆处理，必要时可增设防渗墙。

5 对泄水、引水建筑物，应根据具体病害和安全隐患状况进行加固。

## 10 安全监测设计

**10.0.1** 土石坝应设置必要的监测项目及设施。监测项目可根据工程的重要性、坝型、坝高、地质条件等确定。应设置以下主要安全监测项目：

- 1 坝面垂直位移和水平位移。
- 2 渗流量及渗水的浑浊度。
- 3 上、下游水位。

**10.0.2** 监测设备的选择应符合可靠、耐久、实用、有效的原则。

**10.0.3** 土石坝宜沿坝轴线设置不少于 2 个垂直及水平位移监测断面，每个断面在坝顶及下游坝坡设 3 个测点。同时在坝头岩基或坚实土基上设垂直及水平位移监测基点。

测点沿坝轴线的间距，坝长小于 300m 时，宜取 50~100m，坝长不小于 300m 时，宜取 100~150m。

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垂直位移测点。

**10.0.4** 渗流量监测可采用量水堰法、容积法或沟内测流速法。

**10.0.5** 位于砂砾石覆盖层上的坝，宜设置坝基渗流压力监测，沿坝轴线设 1~2 个监测断面。每个断面可设 2~3 个测点。测压管宜进入砂砾石层地下水位以下 2m。必要时可设置坝体渗流压力监测。

**10.0.6** 渗流压力监测仪器，应根据不同的监测目的、土体渗透性、渗流场特征以及埋设条件等，选用测压管或孔隙水压力计等。

**10.0.7** 建于软土地基上的坝，应进行施工期的沉降位移监测，随着坝体的升高，应于上下游坝坡及坡脚以外，设置沉降位移监测点，断面沿坝轴线每隔 50~100m 设置，每个断面设 3~5 个

测点。施工期的测点应与永久测点相结合。

必要时应设置坝基孔隙水压力监测。

**10.0.8** 地基为湿陷性黄土时，宜设置地基沉降测点及坝体沉降位移测点。

**10.0.9** 土石坝施工期和运行期均应进行巡视检查，巡视检查的频次、内容、方法和要求可参照 SL 551 执行。

**10.0.10** 监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。

## 附录 A 波浪及护坡计算

### A.1 波浪计算

**A.1.1** 年最大风速应采用水面上空 10m 高度处 10min 的平均风速, 当仅能获得距水面其他高度的风速时, 应按式 (A.1.1) 计算:

$$W_{10} = K_z W_z \quad (\text{A.1.1})$$

式中  $W_{10}$ ——水面上空 10m 高度处 10min 的平均风速, m/s;

$K_z$ ——风速修正系数, 按表 A.1.1 查得;

$W_z$ ——距水面上空  $Z$  高度处 10min 的平均风速, m/s。

表 A.1.1 风速修正系数

高度 $Z$ (m)	2	5	10	15	20
修正系数 $K_z$	1.25	1.10	1.00	0.95	0.90

**A.1.2** 风向宜按水域计算点处 8 个方位角确定, 其允许偏差为  $\pm 22.5^\circ$ 。

**A.1.3** 风区长度的确定应符合下列要求:

1 当沿风向两侧的水域较宽广时, 可采用计算点  $A$  到对岸的距离。

2 沿风向有局部缩窄且缩窄处的宽度  $B < 12$  倍的计算波长时, 可采用  $5B$ , 同时不小于自计算点到缩窄处的长度。

3 如图 A.1.3 所示, 当沿风向两侧水域较狭窄或水域形状不规则或有岛屿等障碍物时, 应采用等效风区长度, 按式 (A.1.3) 计算:

$$D_e = \frac{\sum_i D_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (\text{A.1.3})$$

式中  $D_e$ ——等效风区长度, m;

$D_i$ ——计算点至水域边界的距离, m,  $i=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$ ;

$\alpha_i$ ——第  $i$  条射线与主射线的夹角,  $\alpha_i = i \times 7.5^\circ$ 。

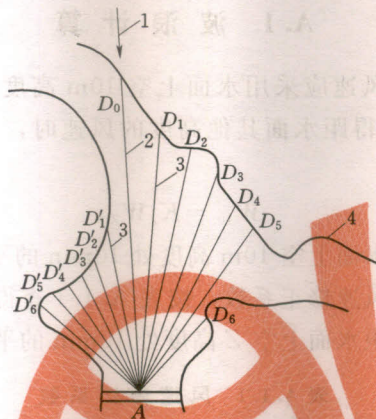


图 A.1.3 等效风区长度计算示意图

1—主风向; 2—主射线; 3—射线; 4—水域边界

A.1.4 风区内水域平均深度  $H_m$  宜沿风向作出地形剖面图求得, 计算水位应与相应设计状况下的静水位一致。

A.1.5 波浪的平均波高和平均波周期宜采用莆田试验站公式, 按式 (A.1.5-1)、式 (A.1.5-2) 计算:

$$\frac{gh_m}{W^2} = 0.13 \tanh \left[ 0.7 \left( \frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0018 \left( \frac{gD}{W^2} \right)^{0.45}}{0.13 \tanh \left[ 0.7 \left( \frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right]} \right\} \quad (\text{A.1.5-1})$$

$$T_m = 4.438 h_m^{0.5} \quad (\text{A.1.5-2})$$

式中  $h_m$ ——平均波高, m;

$T_m$ ——平均波周期, s;

$W$ ——设计风速, m/s;

$D$ ——风区长度, m;



$H_m$ ——水域平均水深, m;

$g$ ——重力加速度, 取  $9.81\text{m/s}^2$ 。

平均波长可按式 (A. 1.5-3) 计算:

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{L_m}\right) \quad (\text{A. 1.5-3})$$

式中  $L_m$ ——平均波长, m;

$H$ ——坝迎水面前水深, m。

**A. 1.6** 正向来波在单坡上的平均波浪爬高可按式 (A. 1.6-1)、式 (A. 1.6-2) 或有关规定计算:

1 当  $m=1.5\sim 5.0$  时:

$$R_m = \frac{K_\Delta K_w}{\sqrt{1+m^2}} \sqrt{h_m L_m} \quad (\text{A. 1.6-1})$$

式中  $R_m$ ——平均波浪爬高, m;

$m$ ——坡度系数,  $m = \cot\alpha$  ( $\alpha$  为坡角);

$K_\Delta$ ——斜坡的糙率渗透性系数, 根据护面类型由表 A. 1.6-1 查得;

$K_w$ ——经验系数, 由表 A. 1.6-2 查得。

表 A. 1.6-1 糙率渗透性系数  $K_\Delta$

护面类型	$K_\Delta$
光滑不透水护面 (沥青混凝土)	1.00
混凝土或混凝土板	0.90
草皮	0.85~0.90
砌石	0.75~0.80
抛填两层块石 (不透水基础)	0.60~0.65
抛填两层块石 (透水基础)	0.50~0.55

表 A. 1.6-2 经验系数  $K_w$

$\frac{W}{\sqrt{gH}}$	$\leq 1$	1.5	2	2.5	3	3.5	4	$\geq 5$
$K_w$	1.00	1.02	1.08	1.16	1.22	1.25	1.28	1.30

2 当  $m \leq 1.25$  时:

$$R_m = K_\Delta K_w R_0 h_m \quad (\text{A. 1.6-2})$$

式中  $R_0$ ——无风情况下, 波高等于 1.0m 时, 光滑不透水护面 ( $K_\Delta=1$ ) 的爬高值, 由表 A. 1.6-3 查得。

表 A. 1.6-3  $R_0$  值

$m$	0	0.5	1.0	1.25
$R_0$	1.24	1.45	2.20	2.50

3 当  $1.25 < m < 1.5$  时, 可由  $m=1.25$  和  $m=1.5$  的计算值按内插法求得。

A. 1.7 波浪爬高  $R$  可由平均波高与坝迎水面前水深的比值  $h_m/H$  按表 A. 1.7 规定的系数计算求得。

表 A. 1.7 波浪爬高与平均波浪爬高的比值 ( $R/R_m$ )

$h_m/H$	$< 0.1$	$0.1 \sim 0.3$	$> 0.3$
$R/R_m$	1.84	1.75	1.61

A. 1.8 正向来波在带有马道的复坡上的平均波浪爬高按下列规定计算:

1 马道上下坡度一致, 且马道位于静水位上、下  $0.5\%h_{1\%}$  范围内, 其宽度为  $(0.5 \sim 2.0)h_{1\%}$  时, 波浪爬高应为按单一坡计算值的  $0.9 \sim 0.8$  倍; 当马道位于静水位上、下  $0.5\%h_{1\%}$  以外, 宽度小于  $(0.5 \sim 2.0)h_{1\%}$  时, 可不考虑其影响。

2 马道上下坡度不一致, 且位于静水位上、下  $0.5\%h_{1\%}$  范围内时, 可先按式 (A. 1.8) 确定该坝坡的折算单坡坡度系数, 再根据 A. 1.6 条按单坡计算。  $h_{1\%}$  为累积频率为 1% 的波高,  $h_m/H_m < 0.1$  时, 取  $2.42h_m$ ;  $h_m/H_m = 0.1 \sim 0.2$  时, 取  $2.3h_m$ 。

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{m_\perp} + \frac{1}{m_\mp} \right) \quad (\text{A. 1.8})$$

式中  $m_e$ ——折算单坡坡度系数;

$m_\perp$ ——马道以上坡度系数,  $m_\perp \geq 1.5$ ;

$m_T$ ——马道以下坡度系数， $m_T \geq 1.5$ 。

**A. 1. 9** 当来波波向线与坝轴线的法线成  $\beta$  夹角时，波浪爬高等于按正向来波计算爬高值乘以折减系数  $K_\beta$ 。 $K_\beta$  应按表 A. 1. 9 确定。

表 A. 1. 9 斜向来波折减系数  $K_\beta$

$\beta$ (°)	0	10	20	30	40	50	60
$K_\beta$	1.00	0.98	0.96	0.92	0.87	0.82	0.76

**A. 1. 10** 如图 A. 1. 10 所示，作用在坡度系数为 1.5~5.0 的坝坡护面板上的波浪压力，可按式 (A. 1. 10-1) ~ 式 (A. 1. 10-6) 计算：

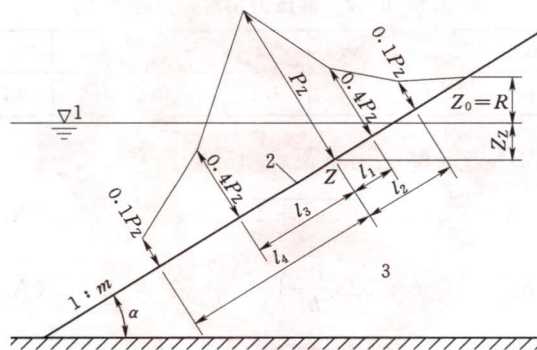


图 A. 1. 10 坝坡护面板上的波浪压力

1—上游水位；2—护坡面板；3—坝体

**1 最大压力强度：**

$$P_z = K_P K_1 K_2 K_3 \gamma_w h_s \quad (\text{A. 1. 10-1})$$

$$K_1 = 0.85 + \frac{4.8h_s}{L_m} + m \left( 0.028 - \frac{1.15h_s}{L_m} \right) \quad (\text{A. 1. 10-2})$$

式中  $P_z$ ——最大压力强度， $\text{kN/m}^2$ ；  
 $K_P$ ——频率换算系数， $K_P = 1.35$ ；

$K_2$ ——系数，按表 A. 1. 10-1 确定；

$K_3$ ——作用在点 Z 的浪压力相对强度系数，按表 A. 1. 10-2 确定；

$\gamma_w$ ——水的容重， $\text{kN/m}^3$ ；

$h_s$ ——有效波高，m，可取累计频率为 14% 的波高  $h_{14\%}$ 。

$h_m/H_m < 0.1$  时，取  $1.6h_m$ ； $h_m/H_m = 0.1 \sim 0.2$  时，取  $1.54h_m$ 。

表 A. 1. 10-1 系数  $K_2$

$L_m/h_s$	10	15	20	25	35
$K_2$	1.00	1.15	1.30	1.35	1.48

表 A. 1. 10-2 浪压力相对强度系数  $K_3$

$h_s$ (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	$\geq 4$
$K_3$	3.7	2.8	2.3	2.1	1.9	1.8	1.75	1.7

2 最大压力强度作用点距水面的距离  $Z_z$ ：

$$Z_z = A + \frac{1}{m^2}(1 - \sqrt{2m^2 + 1})(A + B) \quad (\text{A. 1. 10-3})$$

$$A = h_s \left( 0.47 + 0.023 \frac{L_m}{h_s} \right) \times \frac{1 + m^2}{m^2} \quad (\text{A. 1. 10-4})$$

$$B = h_s \left[ 0.95 - (0.84m - 0.25) \times \frac{h_s}{L_m} \right] \quad (\text{A. 1. 10-5})$$

当计算  $Z_z < 0$  时，取  $Z_z = 0$ 。

3 斜面上各计算点到点 Z 的距离：

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= 0.0125S \\ l_2 &= 0.0325S \\ l_3 &= 0.0265S \\ l_4 &= 0.0675S \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 1. 10-6})$$

$$S = \frac{mL_m}{\sqrt{m^2 - 1}}$$

4 波浪作用区域的上限  $Z_0$  等于设计波浪爬高  $R$ 。

## A.2 护坡计算

A.2.1 砌石护坡在最大局部波浪压力作用下所需的换算球形直径和质量、平均粒径、平均质量和厚度可按式 (A.2.1-1) ~ 式 (A.2.1-4) 确定:

$$D = 0.85D_{50} = 1.018K_t \frac{\rho_w}{\rho_k - \rho_w} \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m(m+2)} h_p \quad (\text{A.2.1-1})$$

$$Q = 0.85Q_{50} = 0.525\rho_k D^3 \quad (\text{A.2.1-2})$$

$$\text{当 } L_m/h_p \leq 15 \text{ 时 } \quad t = \frac{1.67}{K_t} D \quad (\text{A.2.1-3})$$

$$\text{当 } L_m/h_p > 15 \text{ 时 } \quad t = \frac{1.82}{K_t} D \quad (\text{A.2.1-4})$$

式中  $D$ ——石块的换算球形直径, m;  
 $Q$ ——石块的质量, t;  
 $D_{50}$ ——石块的平均粒径, m;  
 $Q_{50}$ ——石块的平均质量, t;  
 $t$ ——护坡厚度, m;  
 $K_t$ ——随坡率变化的系数, 按表 A.2.1 查得;  
 $\rho_k$ ——石块密度, t/m<sup>3</sup>;  
 $\rho_w$ ——水的密度, t/m<sup>3</sup>;  
 $h_p$ ——累计频率为 5% 的波高, m。  $h_m/H_m < 0.1$  时, 取  $1.95h_m$ ;  $h_m/H_m = 0.1 \sim 0.2$  时, 取  $1.87h_m$ 。

表 A.2.1 系数  $K_t$

$m$	2.0	2.5	3.0	3.5	5.0
$K_t$	1.2	1.3	1.4	1.4	1.2

A.2.2 采用经过整理的堆石(抛石)护坡的石块质量和厚度可按式 (A.2.2-1) ~ 式 (A.2.2-4) 计算:

$$Q_{50} = \frac{\rho_k h_s^3}{k(G-1)^3 m} \quad (\text{A.2.2-1})$$

$$Q_{\max} = (3 \sim 4)Q_{50} \quad (\text{A. 2.2-2})$$

$$Q_{\min} = \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}\right)Q_{50} \quad (\text{A. 2.2-3})$$

$$t = 1.10 \left(\frac{Q_{\max}}{\rho_k}\right)^{1/3} \quad (\text{A. 2.2-4})$$

式中  $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ ——石块的最大、最小质量，t；

$k$ ——系数，取 4.37；

$G$ ——石块密度与水的密度之比。

**A. 2.3** 对具有明缝的混凝土或钢筋混凝土板护坡，当坝坡坡度系数  $m = 2 \sim 5$  时，板在浮力作用下稳定的面板厚度可按式 (A. 2.3) 计算：

$$t = 0.07\eta h_p \sqrt[3]{\frac{L_m}{b} \frac{\rho_w}{\rho_c - \rho_w} \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{m}} \quad (\text{A. 2.3})$$

式中  $\eta$ ——系数，对整体式大块护面板取 1.0，对装配式护面板取 1.1；

$h_p$ ——累计频率为 1% 的波高，m，见 A. 1.8 条的规定；

$b$ ——沿坝坡向板长，m；

$\rho_c$ ——板的密度，t/m<sup>3</sup>。

0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

## 标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	





中华人民共和国水利行业标准

小型水利水电工程  
碾压式土石坝设计规范

SL 189—2013

条文说明



## 目 录

1 总则	51
2 术语、符号	53
3 坝址选择及枢纽布置	54
4 坝型选择	58
5 筑坝材料及填筑标准	61
6 坝体结构	69
7 坝基处理	78
8 土石坝计算	88
9 坝体加高与加固	92
10 安全监测设计	95

## 1 总 则

**1.0.2** 本条指出本标准的适用范围,明确按照《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252)规定确定的4级、5级碾压式土石坝的设计按本标准执行。对于山区及丘陵区的坝高超过30m的4级、5级碾压式土石坝的设计,可按照《碾压式土石坝设计规范》(SL 274)的有关规定执行。

关于枢纽工程的洪水设计标准,按挡水建筑物的高度不大于15m、上下游水头差不大于10m和挡水建筑物的高度大于15m、上下游水头差大于10m的两种情况分别按平原区、滨海区和山区、丘陵区确定。

**1.0.3** 为规范坝体高度的计算,明确了小型土石坝的坝高从坝体防渗体底部或坝轴线部位的建基面算至坝顶(不含防浪墙),取其大者。

**1.0.4** 在全国大、中、小型水库垮坝事故中,小型土石坝占绝大多数,主要原因为漫坝和质量问题。虽然质量事故中包含施工的原因,但不难看出,以往小型土石坝由于缺少调查研究和勘测设计工作不周,造成垮坝或不能发挥效益的工程较多。为此提出小型土石坝的设计要满足坝坡稳定、渗流稳定、有效控制变形和具有足够的坝顶超高等要求。保证工程质量,使工程能长期安全运行并发挥工程效益。

**1.0.5** 小型土石坝工程设计,要求进行必要的测量(包括查清汇水面积及库容)、地质勘探和试验工作,避免因地质情况不清楚而造成水库建成后失事、不能蓄水兴利、处理工作量大等问题。对于构造简单的岩基,可以由有经验的地质工程师经查勘并配以一定数量的坑槽探等,取得必要的资料,提出地质勘察报告。对于复杂的岩基和覆盖层,要求查明基岩的构造、风化程度、透水性等,覆盖层的分层厚度、级配、密度、渗透性、压缩

性等。

**1.0.6** 小型水库由于漫坝而造成的事故，占土石坝垮坝的多数，这表明以往小型水库设计，对于水文、气象这一基本资料的收集和分析不够深入。为此要求进行水文、气象的调查，并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，合理确定水库水位和坝高，以发挥水库兴利效益和防洪效益。由于4级、5级工程所在的河流往往缺少实测资料，可利用各地编制的《水文图集》和《水文手册》进行分析计算。有条件的还要调查库、坝区的历史洪水。



## 2 术语、符号

原 SL 189—96 中无术语、符号章节，本标准按《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002) 的规定，增加“2 术语、符号”一章。

本章共列了 23 个术语，其中 20 个术语的解释与 SL 274 中的解释相同，新增碾压式土石坝、过水土石坝、相对密度 3 个术语。其中非土质材料防渗体坝，只包括常用的混凝土、沥青混凝土和土工膜防渗体坝，未包括钢材、木材等其他材料的防渗体坝。

碾压式土石坝的解释引自《水利水电工程技术术语标准》(SL 26—2012)。

相对密度为无黏性土(砂性土)的压实度指标，根据《土工试验规程》(SL 237—1999) 定义。

本章列出了标准中使用的主要符号 31 个。

### 3 坝址选择及枢纽布置

#### 3.1 坝址选择

**3.1.1** 坝址要选在地形地质条件有利于拦河坝和泄水建筑物等布置的地方，附近有适宜的建筑材料，建库后不直接威胁下游村镇的安全，并使工程尽可能满足库容大，淹没补偿费用少，工程量小，施工方便，投资省等要求。

**3.1.2** 土石坝虽能适应各种地质条件，但基础处理的费用差别很大，选择坝址要重视地质工作，选择地质条件好的地基，以便减少地基处理工作量，缩短工期，节约投资。

**3.1.3** 深厚的强透水砂砾石层地基处理比较复杂。如采用垂直防渗，效果显著但施工复杂，投资较大。如采用水平铺盖，当地质条件比较简单时，可达到一定的防渗效果，当地基条件复杂时，对解决渗流稳定和减少渗流量方面效果并不一定理想。

在岩溶发育地区、严重风化破碎的岩层或活动性断层带上建坝，易产生严重渗漏，处理工作复杂，投资大。

软弱的地基，如粉细砂、软黏土、淤泥等承载力很低，在其上筑坝，坝体易产生较大的不均匀沉陷及变形，甚至滑动。地震区的粉细砂层还可能产生液化。

因此，尽量避免在上述地区筑坝。当不能避开时，要针对地基特点，采取相应的措施对坝基进行处理。

**3.1.4** 选择坝址时要重视水库蓄水后对库岸稳定的影响，避免库区产生大的塌岸、滑坡，造成库容减少、涌浪威胁大坝安全、堵塞泄洪设施进口引起洪水漫坝等事故，或影响库岸附近村镇、设施的安全。湿陷性黄土浸水后，抗剪强度大幅度降低，容易引起库岸坍塌，要尽量设法避开，否则要采取适当的措施。

在丘陵或平原地区建坝，要避免水库蓄水后因周围地下水位升高，而引起大面积农田或村镇的浸没。

**3.1.5** 小型土石坝工程一般可不进行地震危险性评估，直接按《中国地震动参数区划图》(GB 18306)确定地震动参数，并按《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)的规定采取抗震措施。

## 3.2 枢纽布置

**3.2.1** 小型水库一般有拦河坝、溢洪道、输水洞及水电站等建筑物，是否设置泄洪洞可结合地形地质条件，施工导流、放空水库及排沙等使用要求确定。对于有过木或过鱼要求的水库，还要设置相应的建筑物，满足其功能要求。

**3.2.2** 坝轴线一般采用直线，当采用折线时，要避免突变。坝轴线两端的岸坡要高于坝顶高程，坡度较缓且无突变，以利与坝体连接，防止产生不均匀沉降。

**3.2.3** 泄水建筑物是枢纽中的主要建筑物，在设计中要明确其运用条件和要求，使其能够运用灵活可靠。一般枢纽的设计洪水与校核洪水流量相差较大，考虑泄洪能力时均要满足。如果枢纽还有排沙、排漂和排冰的要求时，还要考虑不同形式的泄水建筑物，以满足不同功能要求。

**3.2.4** 溢洪道和隧洞是常用的泄水建筑物。相对而言，隧洞的布置位置较低，溢洪道的布置位置较高。国内外的工程实践证明，土石坝枢纽多采用溢洪道与隧洞相结合的形式，也有采用单一溢洪道、或单一隧洞泄洪的形式。由于开敞式溢洪道的超泄能力较强，可以提高特殊情况下的运行可靠性，因此本条强调优先布置开敞式溢洪道。

**3.2.5** 溢洪道一般布置在高程较低的天然垭口上，以避免深挖方并节省开挖量。如天然垭口地质条件比较复杂，要求在查明后采取相应处理措施，并经技术经济比较确定。

当坝址附近无天然垭口时，也可将溢洪道靠近坝肩布置。采用导墙将溢洪道和坝体隔开。上游坝坡也要设置可靠的防护，防止横向水流冲刷。

溢洪道出口必须有可靠的消能措施，使消能后的水流顺畅泄

入下游河道。为避免水流冲刷或回流淘刷坝脚，溢洪道出口距坝脚要有一定距离。

当坝址确无在天然垭口和坝肩布置溢洪道的地形地质条件时，也可采用坝面过流型式，但要经充分论证。

**3.2.6** 溢洪道泄槽一般流速较高，其轴线尽量布置成直线，如受地形限制布置成曲线时，可将弯道布置在流速较低的进水引渠和出水渠段。

**3.2.7** 开敞式溢洪道超泄能力大，施工和管理方便。为便于运行管理且节约投资，小型土石坝溢洪道一般不设闸门，堰顶高程与正常蓄水位齐平。但当下游有防洪要求，或汛后需抬高水位运行时，溢洪道也可设置闸门，但要有可靠的电源，健全的管理，保证必要时能及时启闭闸门。

**3.2.8** 溢洪道尽量选择在岩基上，是否要做护砌以及护砌的长度，主要取决于岩基的完整性、抗冲能力和溢洪道的过流流速及过水时间的长短。如不做护砌，则对断层破碎带、节理和裂隙密集带等缺陷要进行处理。可采用开挖回填混凝土塞、水泥砂浆填缝等措施。

软基溢洪道要建在密实的土层上，并采用较小的单宽流量。陡槽及侧壁可采用混凝土或浆砌石防护。堰体上游要做好防渗，陡槽及消力池底板下要设排水系统。

软基溢洪道尽可能采用底流式消能。岩基溢洪道可用挑流消能。

**3.2.9** 泄洪洞和输水洞是枢纽泄洪、灌溉、发电或放空水库的重要建筑物。为了减少工程量和节约投资，已建工程中有不少采用坝下埋管型式。实践经验表明，坝下埋管病害较多，往往引起坝体破坏，使水库不能正常蓄水，甚至导致大坝失事。坝下埋管一旦破损，处理相当困难。故当坝址区有修建隧洞的地形地质条件及施工条件时，尽可能采用隧洞。

**3.2.10** 地基不均匀沉降导致坝下埋管断裂、错位、变形的实例较多，因此，坝下埋管尽量建在岩基上。如需建在土基上，土基



必须坚实、均一。不能建在两种刚性相差很大的地基上。

地震烈度在Ⅶ度或Ⅶ度以上的地区和软基上的坝下埋管易产生断裂，危及坝的安全。

**3.2.12** 坝下埋管优先采用明流，不得在明满流交替状况下工作。为满足检查和维修的要求，埋管的最小断面尺寸建议圆形断面内径 1.0m，城门洞型断面高 1.4~1.5m，宽 0.8m。

**3.2.13** 为防止埋管与坝体之间产生接触渗流破坏，坝下埋管沿线要采取截渗环等构造措施。



## 4 坝型选择

**4.0.1** 在已建的小型土石坝工程中,采用非土质材料作防渗体的土石坝数量较少,但是在一些缺少合适防渗土料而又有充足石料、砂料的地区,可采用非土质材料作防渗体坝,常见的坝型有钢筋混凝土面板坝、沥青混凝土面板坝、沥青混凝土心墙坝和土工膜防渗土石坝等。

常见小型碾压式土石坝坝型代表断面见图 1~图 4。

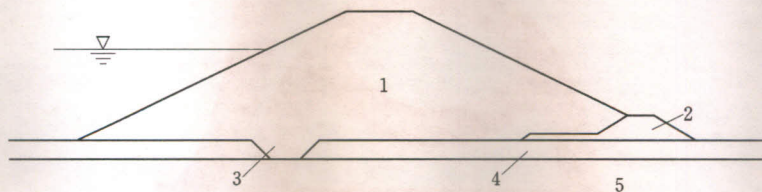


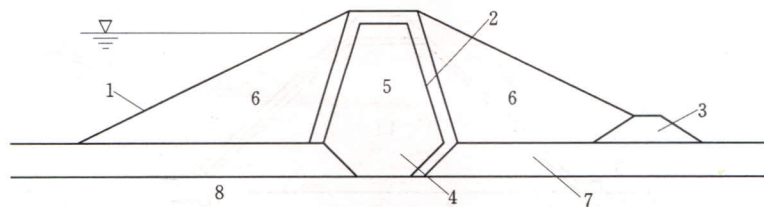
图 1 均质土坝

1—均质坝; 2—坝趾排水体; 3—截水槽; 4—覆盖层; 5—不透水地基

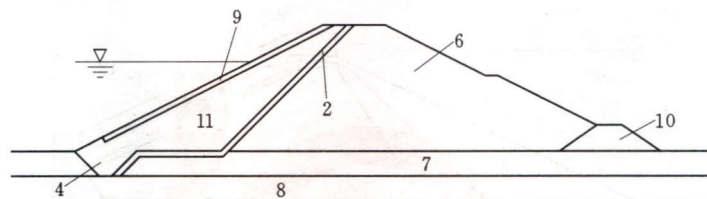
**4.0.3** 统计资料表明,已建小型土石坝工程中,均质土坝的数量占很大比例。这是因为,小型土坝所需土料少,一般坝址附近都能提供坝体所需的土料,施工方便,便于质量控制。

**4.0.6** 在没有适宜布置岸边溢洪道的地方,如单宽流量不大、消能可靠的条件下,采用过水土石坝解决小型水库工程的泄洪问题是一个较好的办法。国内外的工程实践表明,由于小型碾压式土石坝坝高较低且泄流量较小,故只要慎重对待,修建过水土石坝也是可行的。

**4.0.7** 在实际工程设计中存在坝轴线范围内地质、地形变化较大,且多个料场的土石料特性和储量相差较大的情况,需要用多个料场的土石料进行坝体填筑。往往通过调整不同坝型对不同的土石料进行利用,可获得较好的经济效益,在这种情况下可分段



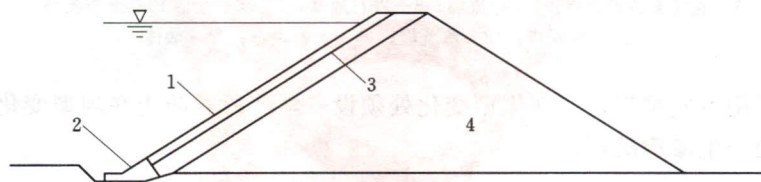
a) 心墙土石坝



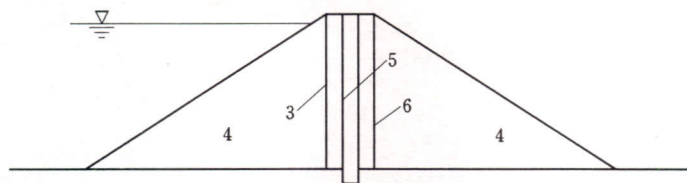
b) 斜墙土石坝

图 2 土质防渗体土石坝

1—块石护坡；2—反滤层；3—坝趾排水体；4—截水槽；5—土质心墙；  
6—砂砾料或堆石；7—覆盖层；8—不透水地基；9—斜墙保护层；  
10—坝趾排水体；11—土质斜墙



a) 面板堆石坝



b) 心墙土石坝

图 3 非土质材料防渗体土石坝

1—非土质材料防渗面板；2—趾板；3—垫层及过渡区；  
4—堆石或砂砾料；5—非土质材料防渗心墙；6—垫层

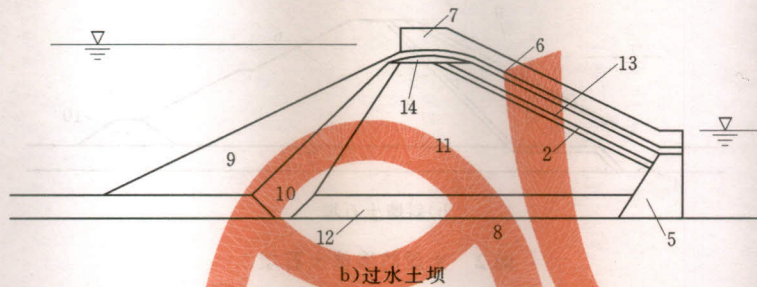
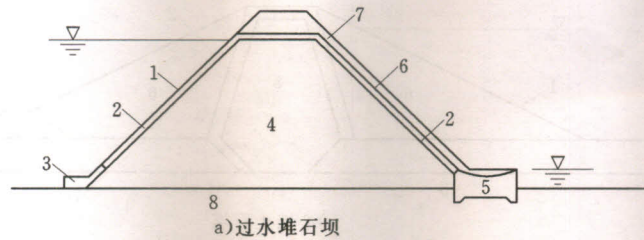


图4 过水土坝

- 1—混凝土防渗斜墙；2—垫层；3—趾板；4—堆石；5—混凝土墩；  
 6—混凝土溢流面板；7—导流墙；8—岩石地基；9—保护层；10—土质斜墙；  
 11—砂砾料；12—覆盖层；13—干砌块石；14—堰体

采用不同坝型，但在坝型变化处须设置渐变段，防止在坝型变化处产生渗透破坏。

## 5 筑坝材料及填筑标准

### 5.1 筑坝材料

**5.1.1** 对坝址附近的筑坝土石料进行调查和试验，目的是为选择坝型，设计坝体断面和选择施工方法提供依据。将开挖料提到与天然土石料同等地位，旨在引起设计者对开挖料应用的重视。

筑坝土石料调查和土工试验可按照《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL 251) 和《土工试验规程》(SL 237) 的有关规定执行。

**5.1.2** 对筑坝材料选择原则说明如下：

用于防渗体的土料在填筑完成后，必须具有足够的防渗性能和一定的抗剪强度，而且在长期渗流作用下，不致因水溶盐溶滤形成渗流通道，产生管涌破坏。用于坝壳的材料，要求具有能确保坝坡稳定的抗剪强度和一定的抗风化能力，浸润线以下部分要求具有好的透水性和渗透稳定性。

在不影响工程安全的前提下，充分使用坝址附近的材料，以缩短运距，降低工程造价。如开挖取料会对今后工程运用带来危害，则不能开采。我国土地资源匮乏，尽量少占或不占农田，有条件时，还可利用弃料造田。

**5.1.3** 本条列出几种不宜直接筑坝的黏性土，说明如下：

干硬性黏土：对含水量比较敏感，含水量不易调整均匀，失水后不易压散。

膨胀土：具有吸水膨胀、失水收缩的特点。浸水后土体将膨胀软化，降低土体的强度。更不利的是坝体将会由于不均匀膨胀引起分层或裂缝现象。

分散性土：遇到低含盐量的水时容易被冲蚀，造成土坝管涌破坏。

软黏土：不易压实，容易干裂，不好处理。

**5.1.4** 水溶盐含量太大，溶滤后将降低土的强度，甚至形成渗流通道，必须予以限制。SL 274 规定不超过 3%；《土坝设计》（水利电力部第五工程局，水利电力部东北勘测设计院编）及《水工手册》确定不超过 8%；本条文规定不超过 5%。

土料中的有机质经过化学变化后将改变土料的性质。特别是土料中的杂草、树根，腐败后会产生孔洞，对坝体的防渗不利，要求将其从土料中剔除。但是对有机质含量究竟限制多少为宜，各国规定不同，本条文与 SL 274 规定相同，偏于严格。

**5.1.5、5.1.6** 对土质防渗体材料的选择做了具体要求：

(1) 土的塑性指数 ( $I_p$ ) 与土的物理力学特性有密切关系，因此在条文中强调选用  $I_p=7\sim 20$  的土料填筑防渗体。如采用塑性指数较低的土料填筑斜墙或心墙，其防渗性和渗透稳定性较低，要适当加大防渗体的厚度并做好反滤层。

(2) 要求所选土料的天然含水量与最优含水量接近，一是为了方便施工，减少加水或翻晒的工序，有利于压实；二是适当的含水量可改善坝体的塑性，使之能适应坝体及坝基的变形而不易产生裂缝。

(3) 均质坝与分区坝的防渗体对渗透系数的要求有所不同，尤其是对薄心（斜）墙的渗透系数必需从严要求。

**5.1.7** 近年来，采用砾石土（含岩石风化石）作为防渗料的工程越来越多。砾石土具有良好的抗剪强度、不透水性、较小的压缩性、较好的压实性。

影响砾石土渗透性的主要因素是细料的性质和粗料的含量，当粗粒含量在 50% 之内时，其渗透系数变化不大，且主要依细料的性质而变；当粗粒含量超过 60%~70% 时，渗透性明显增大，本条文规定粗砾含量不宜大于 50%。

SL 237 中粒径 0.075mm 是区分粗、细颗粒的界限粒径。试验表明：砾石土的渗透系数与其中小于 0.075mm 颗粒的含量密切相关，见图 5。当小于 0.075mm 的颗粒含量大于 10% 时，砾石土才有可能作为防渗体填筑材料，其渗透系数可达到  $1\times 10^{-5}$

cm/s。考虑一定的安全度，本条文规定粒径小于 0.075mm 的含量不宜小于 15%。

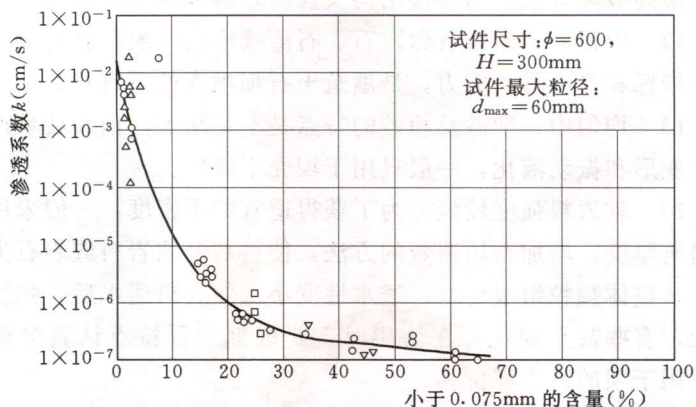


图 5 砾石土细颗粒 ( $d < 0.075\text{mm}$ ) 含量与渗透系数的关系

使用砾石土作为防渗土料时，为了保证工程质量和便于施工控制，要求提出土料的级配曲线。施工中要防止粗粒集中，压实后要取样检查。

**5.1.8** 人工掺合料需人工配制拌和，需要保证填筑料拌和均匀，无砾石集中（架空）现象，增加了施工费用，使用时要进行必要的技术经济论证。

**5.1.9** 红黏土是具有稳固团粒结构的土，压实后的干密度较低，一般为  $1.3 \sim 1.55\text{g/cm}^3$ 。红黏土的孔隙比大，但压缩性属中等。

红黏土的天然含水量和最优含水量以及界限含水量较高，无须进行特殊处理。

红黏土的黏粒含量一般在 50%~80% 之间。由于黏粒含量高，使土的表面积加大，且黏粒形状多为片状和鳞片状，因而土处于高分散状态，孔隙比较大。颗粒愈细，表面的负电荷愈多，使颗粒间的吸引力愈大，所以孔隙比虽然较大，但强度仍较高。

实践证明，红黏土可以作为防渗土料。

**5.1.11** 对于黄土类土，为消除黄土的湿陷变形，可采用下列方

法：其一是破坏土的原状结构，使土体达到相当的密实度；其二是填筑含水量等于或略大于最优含水量，使可溶性盐类溶解或软化，最终破坏颗粒间的连接结构及强度，得以压实。

**5.1.12** 中粗砂、砂砾（卵）石、石渣或堆石一般都具有较高的强度指标和自由排水能力，是填筑土石坝坝壳的适宜材料。

**5.1.13** 均匀中、细砂及粉砂的特点是不易压实，饱和后易产生渗透变形和振动液化，一般只用于坝壳干燥区。

**5.1.14** 软岩料强度较低，为了获得适宜的干密度，一般采用减小铺筑厚度，增加碾压遍数的方法，使得部分软岩料或岩石尖角破碎，整体颗粒组成变细，透水性变小。软岩料遇水后，强度会降低，有些甚至泥化，在使用时，要根据工程特点认真分析研究，用于坝的适当部位。

**5.1.15** 混凝土面板坝、沥青混凝土面板坝的面板，适应变形的能力相对较差，这两种坝型的坝坡也比较陡，尽量使用堆石或砂砾石等压缩变形量小、抗剪强度较高的材料填筑。对其含泥量加以限制，一是为了防止抗剪强度下降；二是确保其排水能力，降低浸润线；三是减少压缩变形量。

**5.1.16** 用于护坡和排水设施的材料，因长期暴露在大气中，经受干湿循环、冻融循环、波浪冲击和冰块冲击等物理、化学及外力的作用，有裂隙、风化、易崩解的石料易从结构、材质上发生破坏，故不能使用。因此所选石料不仅要强度高，而且要耐风化。此外，为保证块石不被风浪掀起，要求块石有一定的重量，可根据风浪大小，由计算或参照类似工程确定。

**5.1.17** 反滤层、垫层和过渡层对材料都有级配要求，只是侧重点不同。中粗砂、天然砂砾料或筛选料，如级配适宜（控制粒级能满足反滤排水要求），可优先使用。用石料轧制的级配料控制粒径较小时，加工出来的反滤料往往石粉含量较高，需用水冲洗。

含泥量（指颗粒粒径小于 0.075mm 部分）对于连续级配砂砾料（包括中粗砂和碎石筛选料等）的渗透变形、抗剪强度、渗



透系数, 以及压缩变形和压实密度等都有明显影响。一般认为, 当含泥量控制在 5% 以内时, 对上述性质影响不大。

**5.1.20 沥青混凝土防渗料的抗裂性**, 是指适应坝体沉降变形和低温收缩而不致开裂的性能。对于面板来说, 稳定性是指沥青混凝土在高温下不流淌的热稳定性和面板在自重作用下沿坝坡不发生滑动的结构稳定性; 对心墙来说, 稳定性是指沥青混凝土在自重作用下, 不发生过大的流变沉降变形和过大的流变侧压力。耐久性主要是指沥青混凝土的抗老化性能和水稳定性, 亦即沥青混凝土在一定的运用期内, 不因老化而丧失过多的变形能力和长期浸水而强度损失过多。对这几项基本性能的要求, 根据防渗体的类型、所在地区的气温条件及工程条件不同而有所侧重。

石油沥青生产量大, 性能稳定, 对水质无污染, 因而得到广泛应用。但所选用的石油沥青的含蜡量以低于 5% 为宜。

碎石表面粗糙并富有棱角, 可提高它与沥青的黏附力和骨料间咬合力, 抗剪强度高, 故可优先采用。

沥青混凝土骨料要求质地坚硬, 有好的耐久性和水稳定性。骨料表面洁净、不含或少含泥土和有机物, 以防因此而降低沥青的黏附力和抗渗性能。

碱性骨料与沥青的黏附性强, 适于采用。

级配良好的骨料可提高沥青混凝土的抗流变性和抗剪强度等。

填料是指粒径小于 0.075mm 的矿质材料, 适量的填料可以提高包裹骨料颗粒的沥青薄膜的黏度, 提高沥青混凝土强度等。

**5.1.21 土工膜和土工织物的有关特性**包括以下几方面:

- (1) 物理特性: 产品的厚度、单位面积质量以及均匀性等。
- (2) 力学特性: 抗拉强度、握持强度、梯形撕裂强度、顶破强度、刺破强度、蠕变特性以及摩擦系数等。
- (3) 水力特性: 对于土工膜指防渗性; 对于土工织物指孔隙率、织物的孔径、渗透系数和防淤堵性能。
- (4) 耐久性: 抗老化特性、抗化学腐蚀性和抗高温及耐寒冷

的性能。

土工合成材料的选择参照 SL/T 225 执行。

## 5.2 填筑标准

**5.2.1** 坝体填筑料采用碾压机具分层压实，达到规定的密实度和均匀性，使之具有足够的抗剪强度和较小的压缩性，保证坝坡稳定，减小坝体沉陷量和不均匀沉陷，防止坝体出现裂缝。

坝体填筑标准并非越高越好，设计要根据坝型、筑坝材料和施工条件等综合考虑，使确定的填筑标准既技术可靠、又经济合理。

**5.2.2** 黏性土料的填筑控制主要是确定填土的干密度和填筑含水量。填土的干密度和含水量与压实功能之间存在着密切关系。在压实功能一定的情况下，对应于最优含水量，可得到一个最大干密度。一般情况下土的最优含水量接近塑限。根据实践经验，针对小型土石坝的特点，本条要求填筑含水量与最优含水量的允许偏差为 $\pm 3\%$ 。

**5.2.3** 砾石土的干密度与其粗料（颗粒粒径大于 5mm 部分）的含量有一定的关系。粗料含量小于 40% 时，细料为主体，砾石充填其中；粗料含量大于 40% 时，则砾石起骨架作用，细料充填其中，细料不能压实到最大干密度。对于砾石土，最好采用大型击实仪进行全样击实试验，求得相应于不同粗料含量的全样最大干密度和最优含水量，将最大干密度乘以压实度 95%~97% 确定填筑标准。如无大型击实试验条件，可区别以下两种不同情况，通过公式计算确定填筑标准：

(1) 粗料含量小于 40% 时，可取其细料部分进行击实试验，确定细料最大干密度和最优含水量，再用式 (5.2.3-1)、式 (5.2.3-2) 计算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 95%~97%，得出控制填筑干密度。

(2) 粗料含量大于 40% 时，考虑到此时砾石已起骨架作用，

细料数量又逐渐减少，孔隙中的细料难以压实到相应于小型击实试验得出的最大干密度，全样最大干密度也低于用式(5.2.3-1)算出的数值，故先采用与以上相同方法求出不同粗料含量的全样最大干密度和最优含水量，再进行修正后，乘以压实度95%~97%作为填筑控制干密度。修正办法可参照《碾压式土石坝设计手册》(能源部、水利部水利水电规划设计总院编，1989年版)第六章第一节或其他有关参考资料。

如粗料为风化石，压实后，粗料易破碎变细，可采用碾压后的粗料含量按上述方法确定填筑标准。

根据工程实践经验，用作防渗体的砾石土，不同粗料含量的干密度为 $1.8\sim 2.2\text{g/cm}^3$ 。

**5.2.4 相对密度**是反映无黏性土密实度的指标，相对密度大，则材料密实、强度高、压缩性小；否则相反。一般认为相对密度大于0.67时，能满足工程要求，考虑到小型土石坝的特点，本条文规定不小于0.70。但对于设计地震烈度为8度、9度的地区，要适当提高相对密度，规定不小于0.75。

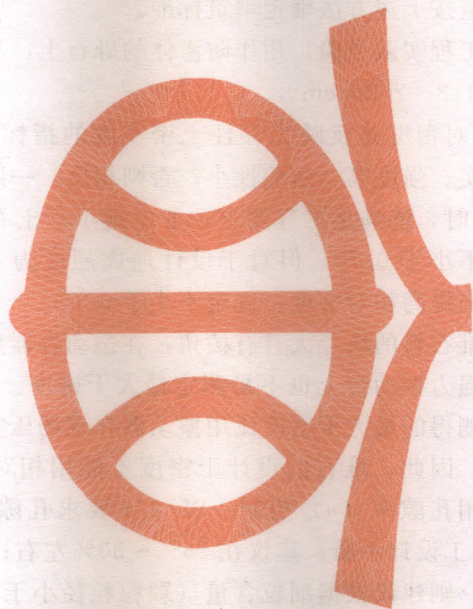
由于堆石料的块径大且有棱角，在振动容器里容易分离，所以即使在强力振动台上也不易测定最大干密度。有些试验结果，振动容器测得的最大干密度比用振动碾在现场压实的堆石干密度要小得多。因此，堆石的设计干密度不能用相对密度指标来确定，只有用孔隙率( $n$ )控制。SL 274 要求孔隙率小于20%~28%；《水工设计手册》建议在25%~30%左右；《土石坝》(潘家铮主编)则建议根据细粒含量(颗粒粒径小于5mm部分)来确定设计孔隙率，见表1。

表1 不同细粒(颗粒粒径小于5mm部分)含量的堆石压实孔隙率

细粒含量 (%)	压实孔隙率 (%)	细粒含量 (%)	压实孔隙率 (%)
<10	25~30	20~30	20~28
10~20	20~25	30~50	25~30

由于碾压设备（特别是大型振动碾）的运用，现有的堆石坝工程，孔隙率达到 25% 是不困难的，如果堆石的级配良好加上必要的施工措施，其孔隙率可小于 20%，故提出  $n=20\% \sim 28\%$  的要求。设计时可根据工程条件确定。

面板坝、过水土石坝要求采用堆石和砂砾料填筑，有较小的压缩性，以减少由于坝体沉陷引起防渗面板变形，故要求填筑相对密度采用建议值的大值，孔隙率采用建议值的小值。



坝高 (m)	相对密度 (D <sub>r</sub> )	孔隙率 (n)	填筑材料
100 ~ 150	0.90 ~ 0.95	20% ~ 25%	堆石
50 ~ 100	0.85 ~ 0.90	25% ~ 30%	堆石
20 ~ 50	0.80 ~ 0.85	30% ~ 35%	堆石
10 ~ 20	0.75 ~ 0.80	35% ~ 40%	堆石

## 6 坝体结构

### 6.1 坝体分区

**6.1.1、6.1.2** 为强调天然建筑材料的合理利用,明确坝体分区材料的定义,使坝体材料设计趋于标准化,故增加这两条。

**6.1.3** 为保证坝内渗水顺畅排出,防止因浸润线抬高而危及大坝安全,特增加本条。当坝体内部设置排水体(如竖式排水),可不受本条限制。

### 6.2 坝顶超高

**6.2.1** 坝顶超高计算中还含有风壅水面高度,但此项计算值仅有几厘米,为简化计算,略去不计。

参照 SL 274,按照风向、风速、风区长度及水深采用公式计算波浪爬高,再根据建筑物的等级和运用条件加上不同的安全加高值确定坝顶超高。

**6.2.3** 地震安全加高由地震引起的涌浪高度和坝顶沉陷两部分组成,鉴于其影响因素的复杂性和产生机理的多变性,准确的分析计算难度很大。本条将其合二为一,综合取值,其范围为 0.5~1.0m,地震烈度高、坝前水深大者取大值,反之取小值。

地震涌浪与地震机制、震级、坝面到对岸的距离、水面面积、岸坡和坝坡的坡度等因素有关。SL 203 规定,地震涌浪高度可根据设计烈度和坝前水深取 0.5~1.5m,日本地震涌浪按坝高 1% 计算。对于小型土石坝,因其坝高、坝前水深及水面面积均较小,地震涌浪高度根据设计烈度和坝前水深,可取 0.3~0.5m。

地震沉陷的产生机理很复杂。从国内外实例资料看,如果坝基与坝体质量良好,在地震烈度 7 度、8 度地区,地震引起的坝顶沉陷一般不超过坝高的 1%;根据《水工设计手册》土石坝分

册介绍, 8~9 度地震区附加沉陷等于坝高的 1.2%~1.44%。对于小型土石坝, 当设计地震烈度为 8 度、9 度时, 地震附加沉陷根据坝高取 0.3~0.5m。

**6.2.4** 土石坝有因库区内大体积滑坡引起涌浪而漫顶的事例, 故增加本条。滑坡的发生与库岸水文地质条件、地震、降雨、库水位等多种因素有关, 必须进行专门研究, 根据发生原因和规模采取加固或挖除滑坡体、抬高坝顶高程、加固护坡等必要措施。

**6.2.7** 沉降计算和已建坝的运行情况表明, 土石坝在竣工时只能完成其最终沉降量(包括坝体和坝基两部分)的大部分。坝体及坝基竣工时由于坝体填土自重而产生的孔隙压力不能全部消散, 不能完全固结, 需在运行期随着继续排水固结而逐渐完成其余沉降量。因此, 本条要求竣工时的坝顶高程要考虑足够的预留沉降量, 根据坝基和坝体的材料及固结情况, 通过计算和工程类比确定。

### 6.3 坝顶构造

**6.3.1** 经对大量土石坝进行统计, 坝高小于 30m 时, 坝顶宽度一般在 3~6m 之间, 其中以取 4m 的最多。调查中未发现因坝顶宽度较小而发生事故或运用上的问题, 但考虑到目前机械化施工水平的提高和度汛抢险的要求, 综合考虑条文所列各种因素, 提出坝顶宽度建议值为 4~6m。

**6.3.2** 在满足坝顶构造要求时, 设置稳定、坚固、不透水的防浪墙经济上是合理的。因此本条强调将防浪墙作为防渗体的一部分, 共同构成整体封闭的防渗系统, 删除了《小型水利水电工程碾压式土石坝设计导则》(以下简称为“原导则”) 对防浪墙的材料的具体规定。

### 6.4 坝坡

**6.4.1** 坝坡的变化范围较大, 主要与下列因素有关:

- (1) 坝型和坝高: 心墙坝上下游坝壳多采用强度较高的无黏

性土填筑，所以坝坡一般比均质坝陡。土质防渗体斜墙坝则因斜墙采用黏性土，除可能沿斜墙内部滑动外，还可能沿斜墙与坝壳接触面滑动，所以其上游坝坡较缓，下游坝坡则和心墙坝相仿。多种土质坝或土石混合坝的坝坡，与土料分区部位以及各区材料的性质有关。

根据稳定计算和以往的筑坝经验，坝高大于 10~13m 时，可分级采用不同的坡度。对于黏性土料占坝体大部分的土坝，一般坝坡为上陡下缓，而对于无黏性土占坝体大部分的土坝，可采用一个坡度。

(2) 土料性质及坝地质条件：坝体和坝基材料的强度指标和压缩性的高低，是影响坝坡坡度选择的重要因素之一。强度高、压缩系数小则坝坡比较陡，否则要缓。坝基中有软弱夹层、软土或易液化地层，一般要求有较缓的坝坡，必要时还要在上下坝脚设压重平台，以增加坝坡的稳定性。

(3) 坝体所承受的荷载：在分析坝坡的稳定时，对坝体自重、孔隙水压力、上下游水压力、地震力，以及坝面上的一些永久建筑物重量等，都要给予足够的重视。

(4) 施工情况和运用条件：土石坝的填筑速度及施工质量对坝坡稳定性有一定影响，水库的运用条件也是影响坝坡稳定的重要因素，例如当上游坝壳透水性较小又位于相对不透水地基上时，遇库水位骤降，坝体渗流指向上游，渗透力将对上游坝坡稳定产生不利影响。为满足稳定的要求，一般坝坡较缓。

根据沥青混凝土面板堆石坝的施工要求，本标准增加其上游坡度不陡于 1:1.7 的规定。

## 6.5 防 渗 体

**6.5.1、6.5.2** 土质防渗体要满足运用上的要求，保证工程安全，减少渗流量，控制渗透比降不超过允许值。

防渗体的构造尺寸在很大程度上取决于施工、防冻等要求，其顶部宽度一般不小于 1.5m。当采用机械施工时，受机械本身

尺寸和碾子宽度的限制，防渗体最小尺寸可为 3m。

**6.5.4** 利用土工膜作为防渗材料时，为了保护土工膜免遭损坏，要在土工膜上面设置保护层，下面设置支持层。

保护层一般分面层和垫层。面层防御风浪淘刷；垫层保护土工膜不被刺破。保护层的厚度能保护土工膜不受紫外线的辐射。支持层的作用是使土工膜受力均匀，免受局部集中应力而破坏，支持层要采用透水材料填筑，能通畅排除土工膜后的渗水。

**6.5.6** 防渗体顶部一般要高出正常运用条件静水位 0.3m，防止库水越过防渗体，引起不良后果。如防浪墙与防渗体结合良好，可以不要求防渗体超高，但其顶部不得低于正常运用的静水位。

## 6.6 反滤层及过渡层

**6.6.1~6.6.5** 设置反滤层是为了防止被保护土在水流作用下发生渗透破坏。两相邻土层如不满足层间关系，必须设置反滤层。坝体材料分区要由细到粗，并满足均匀变形的过渡原则。

反滤层的尺寸取决于下面三个因素：一是能顺利排出被保护土中的渗水；二是反滤自身能形成必要的滤网，其厚度一般不小于 30cm；三是能满足施工要求。

**6.6.6** 粒状反滤料的设计包括被保护土为非黏性土和黏性土两个基本类型。

当被保护土为非黏性土，且其不均匀系数  $C_u < 5 \sim 8$  时，采用太沙基准则进行粒状反滤料的设计。

当被保护土为黏性土，采用 SL 274 中介绍的谢拉德反滤设计方法。该方法将被保护土按其小于 0.075mm 粒径含量分为大于 85%、40%~85%、15%~39% 及小于 15% 四档，并对各档被保护土所需反滤料的  $D_{15}$  最大、最小值做了相应规定。考虑到小型土石坝一般采用上述第二档的土料，为简化设计，本标准对小于 0.075mm 粒径含量在 40%~85% 之间的一般土，规定其第一层反滤  $D_{15}$  不大于 0.7mm，其不均匀系数  $C_u = 5 \sim 8$ 。当小于



0.075mm 粒径含量在上述范围之外,可按 SL 274 中提供的方法进行设计。

当被保护土为砾石土(包括岩石风化物),或不均匀系数较大的砂砾料,以及一些不连续级配土,一般只要反滤能保护住其细粒或级配曲线平段以下的粒组部分,即能保证其渗透稳定性,不必用全料进行设计。

当使用含砾量(颗粒粒径不小于 5mm 部分)小于 60% 的砂砾料为反滤料时,其孔隙直径主要取决于细料(颗粒粒径小于 5mm)部分,要取细料部分进行设计。

**6.6.7** 土工织物作为反滤材料,由于其存在易被细颗粒淤堵而失效的问题,设计时需采取必要的防淤堵措施。

**6.6.8** 在坝体中如两种性质差别较大的材料(如土料和堆石)直接接触时,除要满足反滤要求外,还要求变形均匀过渡,避免突变,此时如反滤层厚度不满足均匀过渡要求,要另设过渡层。

## 6.7 坝体排水

**6.7.4~6.7.8** 棱体排水可以降低坝内浸润线,防止坝坡冻胀影响和渗透变形,保护下游坝脚不受尾水淘刷且有支持坝体、增加稳定的作用,比较可靠,但石料用量较大,适用于较高的坝或石料较多的地区。其顶部高程一般要求高出下游最高水位 0.5m 以上。棱体排水要满足坝体浸润线与坝面的最小距离大于当地最大冻土厚度的要求,防止由于结冰影响排水效果。

贴坡排水不能降低坝体浸润线,其作用是防止浸润线出逸点以下的坝坡面产生渗透破坏。贴坡排水的顶部高程要高出浸润线出逸点 1.5m 以上。厚度要大于冻结深度,其下部与坝脚排水沟相接。

褥垫排水也能降低浸润线,其厚度由反滤、排水要求确定,要求伸入坝内长度一般为  $1/3 \sim 1/4$  坝底宽,且有倾向下游的纵坡。

竖向排水一般与褥垫排水结合使用。此种排水型式,一方面

可有效地降低坝内浸润线，使下游坝壳形成干燥区；另一方面，因竖向排水具有反滤作用，在其上游侧防渗体产生裂缝时，堵截土粒流失，并承担一定的水头，起到裂缝自愈的作用。竖向排水体按反滤要求确定。

网状排水一般适用于反滤料不足的情况。纵横断面尺寸根据排渗量确定。

## 6.8 护 坡

**6.8.2** 上游坝面护坡常受风浪和雨水的冲刷、大气的侵蚀、冰层和漂浮物的冲击等作用，必须选用质地良好的材料。

常用于小型土石坝的上游护坡有下列几种：①堆石护坡；②干砌块石护坡；③浆砌块石护坡。其中以干砌块石护坡最常用。当石料比较丰富又有相应的施工设备时，可采用抛石护坡。如果石料不足、块石粒径偏小，可采用浆砌石护坡。护坡厚度和块石粒径可由计算和参照类似工程确定。浆砌石护坡的层厚和块径可适当减小，但要保证整体稳定性。

在缺少石料的地区，也可采用混凝土块（板）护坡或沥青混凝土护坡。沥青混凝土护坡的物理力学指标与沥青混凝土面板基本一致，但无防渗要求，柔性指标可降低一些，一般适用于非冰冻地区。

**6.8.3** 设下游护坡是为了防止雨水对坝坡的冲刷破坏，防止黏性土坝坡的冻胀干缩以及鼠、蚁等破坏。

草皮护坡是最经济的形式之一，一般适于下游坝壳为黏性土情况和比较温暖湿润地区。块石、卵石护坡厚度一般采用10~20cm，长边竖砌。碎石护坡厚度可采用15~20cm，块径在5~100mm之间。

**6.8.4** 坝体与护坡之间要设置垫层，满足库水位降落和风浪淘刷时坝体渗透稳定的要求，层间系数可适当放宽。

**6.8.5** 在水库最低水位1.5m以下为静水区，一般不受风浪作用，可不设护坡。

6.8.7 浆砌石或混凝土护坡的透水性较差，故要设置纵横缝和排水孔，使在库水位降落时，坝体孔隙水能顺畅排出，降低坝体浸润线，提高坝坡稳定性。

6.8.8 坝脚以及马道处往往是容易遭受破坏的部位，故要设置基座，以增加稳定性。

6.8.9 本条增加护坡计算方法，详见附录 A。

## 6.9 坝面排水

6.9.1 坝面纵向（平行于坝轴）排水沟设在马道内侧，以利于汇集坝坡来水和排水沟自身的结构稳定。为保证沟内水流顺利排往横向排水沟，纵向排水沟必须有一定的纵坡。纵横向排水沟的断面尺寸及横向排水沟的间距，要求能够顺畅排泄设计暴雨所形成的坝面径流量。

6.9.2 坝体与岸坡连接处一方面汇集坝坡来水；另一方面还要汇集岸坡来水，故需设置排水沟，将集水排至下游，其断面尺寸要满足最大过水量的要求。

## 6.10 坝体与地基、岸坡及其他建筑物的连接

6.10.2 土石坝与地基和岸坡的连接处，必须将结合面范围内的所有腐殖土层、树根、草根、松散堆积物及超出容许含量的有机质和可溶盐覆盖物彻底清除，以利于坝体与地基的结合。

与坝体防渗结构接触的岩石要求是透水性小的，如基岩的裂隙发育，必须采取措施将基岩与防渗体隔开，防止通过基岩裂隙的渗水冲刷防渗体。

6.10.3 为使坝体与岸坡结合紧密，防止坝体发生不均匀沉降，岸坡要开挖成平顺的斜面，不允许做成阶梯形，更不允许有反坡。

6.10.4 对于黏土心墙坝和黏土斜墙坝，防渗体与坝基、岸坡或混凝土建筑物连接处往往是薄弱环节。一是两种材料性质不同较

难紧密连接；二是一般岩石中都有裂隙（缝），水流容易通过缝隙冲刷土体，产生渗透破坏。在与岸坡接触部位，防渗体断面适当放大，可以延长接触渗径，减小防渗体的渗透比降。两岸防渗体放大断面时，与河床部分防渗体的连接要采用渐变形式。

**6.10.6** 涵管等混凝土建筑物与土坝坝体之间是易产生渗流破坏的部位，要做好与坝体的连接设计。

## 6.11 过水土石坝

**6.11.1~6.11.3** 过水土石坝坝顶过流时的工作条件比较复杂，因为当坝较高、流量较大、流速超过一定值时，面板所受的负压、脉动压力增大，如面板不平会引起较大的动水压力，将直接影响溢流护面的稳定性，并可能危及坝的安全。

近年来，随着经济和技术的发展，以及安全意识的提高，修建的过水土石坝呈越来越少趋势，但考虑到有的坝址由于地形、地质条件等因素制约，仍需采用这种坝型，为保证过水土石坝的安全，条文提出了必须满足的基本要求。

本次修编未收集到新的工程实例，以下是原导则编制过程中收集和参考的工程资料，本次修编认为仍具有参考价值。

从国内情况看，吉林省修建的沥青混凝土护面的小型过水土石坝，坝高一般在15m左右，单宽流量在 $15\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 以下。安徽省修建的过水土石坝具有以下特点：①沥青混凝土护面过水土坝，一般最大坝高20m左右，最大单宽流量 $15\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 以下；②沥青砂浆砌石护面过水土坝，一般最大坝高10m左右，最大单宽流量 $5\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 左右。根据已建过水土石坝建设经验，钢筋混凝土板一般可用于坝高20~30m左右的过水土坝护面；沥青混凝土护面用于坝高20m左右是可行的；浆砌石护面，一般适用于坝高10m以下。

从国外情况看，20世纪50年代苏联、美国等国所建的一批浆砌石和混凝土等护面的过水土坝，坝高一般均在10m左右，单宽流量一般在 $10\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 左右。据有关资料介绍，它们

也都在安全运行。

要建好一座过水土石坝，在设计与施工中必须对下列技术问题予以足够的重视：

- (1) 选择岩基或密实的砂砾石地基。
- (2) 提高坝的密实度，防止不均匀沉降。
- (3) 选择合理而有效的抗冲措施，防止下游遭受淘刷后危及坝身安全。
- (4) 选择可靠的溢流护面材料，提高施工工艺。
- (5) 处理好面板与坝体的变形协调。
- (6) 在溢洪坝段两侧设置导墙或防护结构，防止岸坡遭受冲刷危及坝身安全。



## 7 坝基处理

### 7.1 一般要求

7.1.1 坝基（包括坝肩）处理的目的是满足渗流、稳定及变形三方面的要求，以保证坝的安全运行及经济效益。在进行坝基处理设计时，必须根据具体情况对处理的标准和要求予以确定。

### 7.2 砂砾石地基处理

7.2.1 本条文主要是针对渗流控制提出砂砾石地基勘探的基本内容。

7.2.2 砂砾石坝基渗流控制的措施有多种，不外是上铺、中截、下排，以及各种措施的综合应用。具体某一工程采用哪种措施，要根据坝型、坝基地质状况、渗流控制要求、施工条件和工程投资等因素，通过经济技术比较后确定。

7.2.3 当砂砾石地基厚度小于15m时，采用明挖截水槽的防渗措施，防渗体直接与基岩或不透水地层相连，这是一种简单、普遍的做法。如果砂砾石透水地基深厚，截水槽底部没有达到不透水层，则形成悬挂式截水槽，使防渗效果大减，此时可采用混凝土防渗墙或高压喷射灌浆技术形成的防渗墙（含帷幕灌浆），加长渗径或阻断渗水通道，增强防渗效果。

高压喷射灌浆法在水利工程中的应用研究始于1980年，目前国内水利水电系统采用高喷灌浆技术已相当成熟，多项工程成功使用，效果大多较好。

7.2.5 截水槽的底宽根据槽内回填土料的允许渗透比降和施工要求确定。允许渗透比降一般砂壤土取3，壤土取3~5，黏土取5~7，允许渗透比降的取值，还要根据工程规模、填土密度进行选择。截水槽最小宽度按施工方法和施工机械而定，一般不小于3.0m。

截水槽实际上是坝体防渗体向地基中延伸，其组成材料通常与防渗体相同，多采用黏性土或塑性指数较大的土料填筑。

截水槽下游与砂砾石层接触面如处理不当，可能发生渗透破坏，因此要求土体和砂砾石层间满足反滤准则要求，否则必须设置反滤层。

**7.2.6** 为防止截水槽底与基岩或相对不透水层的接触面发生渗透破坏，截水槽底部必须嵌入相对不透水层、不透水层、弱风化岩（包括河床及岸坡）不小于 0.5m。

**7.2.7** 当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时，可视为相对不透水层，将截水槽修建在该层上。根据计算及工程实践，在截水槽后仍有少量的剩余水头，但已能满足坝基渗流稳定的要求。

**7.2.8** 一般认为当砂砾石覆盖层厚度大于 15m，采用垂直防护措施施工难度大且不经济时，可在上游设置铺盖防渗加下游反滤排水减压。黏土铺盖加长了坝基渗流的渗径，使坝的水头在较长的渗流途径中逐步消减，并降低其渗透比降，再与下游坝脚处的反滤排水设施相配合，可减少渗流量和防止坝基发生管涌。如砂砾石地基存在强透水层，其渗流条件会大大恶化，则需慎重研究铺盖的防渗效果。

**7.2.9** 铺盖设计主要是确定它的合理长度、厚度及铺填土料的密度和透水性等，上述指标均与地基土层的透水性和厚度有关。修建铺盖之后，必须使坝基渗流量与坝下出逸比降均控制在允许范围之内。

我国北方地区中小型土坝实际采用的铺盖长度是：当透水层较浅，水头不大时，取用  $(5 \sim 8)H$  ( $H$  是上下游水头差)；透水层较厚，水头较大时，采用  $(8 \sim 10)H$ 。

铺盖厚度必须保证在水头作用下铺盖不发生渗透破坏，即在铺盖的任一断面处，顶面与底面的水头差所引起的水力比降要不大于铺盖土料的允许比降。

根据工程实践,铺盖上游端的厚度一般不小于0.5m,下游端的厚度要满足坝基渗流和铺盖允许比降的要求,一般不小于2.5m。

铺盖是坝体防渗体(斜墙或心墙)向上游延伸的部分,因此铺盖的土料尽量与防渗体的土料相同。为保证防渗效果,碾压的密实度要大,根据对一些铺盖的统计分析结果,认为铺盖的渗透系数不大于 $10^{-5}$ cm/s,其渗透系数比地基的渗透系数小500~1000倍。

**7.2.10** 黏土铺盖的建基面清理与坝体建基面的清理同等重要,如清理不彻底,铺盖会产生裂缝和塌陷等破坏,故铺盖建基面的清理标准和清理要求也与坝体建基面相同。为减少基础变形量,避免发生集中渗漏和产生渗透破坏,建基面必须碾压平整、密实,并不得有砾石集中。

铺盖和坝基砂砾石之间不满足反滤准则要求时,层间渗透比降会加大,易产生渗透破坏,此时必须设置反滤层。

**7.2.11** 在河床及两岸的阶地上往往有覆盖土层,如其有一定的厚度、组成均匀且不透水性符合要求时,可以考虑用作天然铺盖。但需要探明铺盖范围内的土层情况。天然沉积土干密度一般较小,透水性可能偏大,并且往往厚薄不均,如果覆盖层较厚,常需要将表层翻开,重新进行碾压至要求的压实度。如果覆盖层薄,在翻压表层后,再在其上加填人工铺盖。

在库内取土筑坝时,要在距上游坝脚或铺盖范围以外一定距离取土,以保护天然铺盖。

**7.2.12** 目前国内已有多个工程使用土工膜作为防渗铺盖,铺设过程中需要做好防护和接头的黏结。如果存在地下水及空气顶膜破坏,必须根据不同情况采取防范措施。

**7.2.14** 当地基表层为不太厚的弱透水层或不透水层时,要将不透水层挖穿,将排水体设置在透水地基上,以减少坝趾下游的渗透压力,防止顶托不透水层。

如弱透水层较厚,开挖工作量较大时,可设置减压井深入透



水层一定深度内，将渗水引至坝脚排水沟内，削减水头、汇集渗水。

减压井设计的主要内容是，在满足预定的减压效果下，选择合理的井径、井距和井在透水层内的深度。

为排除坝脚排水沟内的渗水，可设置横向排水沟将渗水引至下游。

排水明沟与坝体排水相连并贯穿整个坝脚或盖重尾部，用以汇集排出的渗流。沟底宽一般大于或等于 0.5m。沟底要设适当的纵坡，并从沟底最低部位连接横向排水沟，通至下游河槽。

如果透水层厚度太大，减压井太深而不经济时，经计算减压井深度满足渗流稳定要求即可。

挖穿弱透水层或不透水层，还是设置减压井，或者其他措施，可根据施工情况、经济性等进行综合比选确定。

**7.2.15** 如下游坝基面出逸比降大于坝基允许比降，在出逸面铺填排水反滤层，能有效防止坝基管涌。

如反滤层重量不足以抵消渗流上举力，必须设置透水盖重。

### 7.3 易液化土地基处理

**7.3.2** 对于表层或埋深不大的可能液化土层，可挖除并换填好土。当挖除比较困难或很不经济时，则必须采取加固措施，使其达到与设计地震烈度相适应的密实状态。然后适当采取设置盖重、加强反滤排水等附加防护措施。

人工加密措施主要有以下几种：

(1) 表面夯实法：对厚度不大的饱和松砂地基，可采用重锤夯实。锤重一般采用 1~2t，落距 3~4m，有效夯实深度可达 1.2m。对于稍湿的砂壤土和轻壤土也可用此法夯实。

(2) 表层振动压密法：对厚度不大的饱和松砂坝基，可以用履带式拖拉机或振动碾碾压振密。

(3) 深层爆炸法：对地基深层的饱和松砂，可采用爆炸法加密。一般须通过试验来确定炸药用量、孔深、孔距和爆炸次数。

此法较多用于坝基处理，如安徽花凉亭水电站和横排头水库、河南鸭河口水库、内蒙古红山水库等土坝地基，都曾用此法处理。

经验证明，爆炸加密对于饱和疏松中粗砂的效果较好，对于细砂则效果较差，不适用于少黏性土。

(4) 砂桩挤密法：以带有活瓣管尖的钢管打入砂基中使其挤密，然后边拔管边回填粗砂、砾石等材料。

(5) 振冲加固法：振冲法用于加固地基，提高地基抗震性能。该法利用振冲器的径向振动和振冲器内中空轴端射出的压力水流或气流形成振动作用。这种振冲外力使砂土颗粒间的摩擦力迅速减小，出现短暂液化，砂土颗粒重新紧密排列，使孔隙比减小，因此能阻止砂层再度液化。此外，在振冲孔回填碎石、砾石或粗砂等形成的振冲桩具有较大的承载力并起排水井作用，当遇到地震时，可防止因冒水喷砂引起建筑物不均匀沉降破坏。振冲后形成的复合地基可提高允许承载力和相对密度。

(6) 强夯法：强夯法是用重锤（一般重为 10t、15t、20t、30t 不等）从高处（一般为 10~40m）落下的冲击力，反复多次夯击地面，对地基进行强力夯实。这种强大的冲击力在地基中产生应力和振动，使浅层和深层都得到不同程度的加固。工程实践证明该法效果显著。经强夯后可以提高地基强度，降低其压缩性。该法具有施工简便、速度快、节省材料等优点。

## 7.4 软土地基处理

**7.4.1** 软土是指抗剪强度低，压缩性高，透水性小，灵敏度高的饱和黏性土。其天然含水量往往大于液限和孔隙比大于 1。在软土上建造土石坝，将会遇到以下问题：

- (1) 由于地基强度低，可能产生地基的局部破坏乃至滑动。
- (2) 出现较大沉降和不均匀沉降，使坝体出现纵横向裂缝。
- (3) 由于渗透性小，排水固结速率慢，沉降的持续时间很长，在竣工后长时间内还继续有较大沉降。

(4) 由于灵敏度高, 施工中经扰动后会使土的强度迅速降低, 造成局部破坏和较大变形。

因此, 要尽量避开这种地基, 实在避不开时, 必须采取相应措施。常用的方法有: 换砂、设镇压平台、打砂井、振冲加固、土工合成材料铺垫、插塑料排水板、预压等。

换砂法是将地基下一定范围内的软弱土层挖去, 换以强度较大的砂、碎石或素土等, 并夯压密实。换砂的作用, 首先, 以强度较大的砂或碎石置换基础下强度较低的软弱土层, 防止持力层受剪切破坏, 并通过应力扩散作用, 减少下卧软土层的附加应力。其次, 通过换砂后形成垫层起排水作用, 使垫层下软土层固结, 提高部分软土的强度。此外, 通过置换软土层, 还可能减少基础的沉降量。实践证明, 利用这种砂垫层处理软土坝基是有效的。

镇压平台是在坝体两侧用土或砂石填筑形成反压荷载, 利用土体的重量增加地基的抗滑稳定。镇压平台的设计, 主要是选择镇压平台的宽度和厚度, 视地基土性质而定。一般情况其厚度约为坝高的  $1/3 \sim 1/2$ , 如果一级镇压层的厚度超过地基的允许承载力, 可采用多级较低的镇压层。镇压层的宽度一般为高度的  $2 \sim 4$  倍。以上数值只供初步拟定镇压层尺寸参考, 最后必须通过稳定分析确定。

在软土地基内设置砂井以加速地基排水固结, 提高其抗剪强度, 我国已成功地建成了一些土石坝。例如, 浙江省杜湖水库就是利用砂井处理软弱黏性土地基的成功范例。砂井法的特点是地基强度增长快、技术上比较可靠、可节省工程量和投资。

近年来, 振冲法在一些黏性土地基和软弱黏土地基中得到应用, 在强度较低的天津塘沽软黏土和浙江沿海软黏土地基上使用振冲法加固地基, 获得了满意的结果。用振冲法加固黏性土地基时, 主要是通过振冲做成碎石桩或砂桩, 将均一的地基变成复合地基, 在复合地基中碎石桩与黏土共同作用, 改变原来均一地基的物理力学性能。采用振冲法加固黏性土地基的施工技术较复

杂，可参照已建类似工程的成功经验进行地基处理设计。

土工合成材料铺垫法是通过在坝体底面铺设土工合成材料（土工织物、土工网、土工格栅、土工席垫、土工格室等）和砂石等组成加筋垫层，使基底保持完整连续，约束浅层地基软土的侧向变形，改善软基浅部的应力分布，从而提高地基的承载力和稳定性并调整不均匀沉降。此外，在地基与堤坝体之间铺设土工织物，可以加速地基土的排水固结。采用土工合成材料铺垫法处理软土地基，如果与上述的其他方法（一种或多种）联合作用，则效果更为显著。

插塑料排水板法是根据排水固结原理，将带状塑料板插入软土中，加荷预压或真空预压，使土体中的孔隙水沿塑料板的板缝中逸出，加速土体固结。此法用于含水量大、孔隙比大、压缩性高、深厚的软土地基中。它增加了土层的排水途径，缩短排水距离，在上部荷载的作用下，产生附加应力使土颗粒间的孔隙水通过排水板排走，降低孔隙比和含水量，增加土体密度，从而加速地基的固结与沉降，在较短的时间内达到较高的固结度，提高地基的承载力。它是处理软土地基的有效方法之一，既能够解决地基的沉降问题，又利于地基稳定。它与早期采用的沙井排水法相比具有更好的适应地基变形的能力，同时施工工艺简单，功效较高。

预压法是对地基进行堆载预压或真空预压，使地基土固结的地基处理方法。堆载预压或真空预压与插塑料排水板或沙井排水方法联合应用效果更好。

**7.4.2** 许多工程实践表明，在软土地基上筑坝，通常间断一个时间段，使软土地基有时间固结，然后再继续填土，重复上述工序，直至完工。此法实质即控制加荷速率，使地基抗剪强度增长能适应剪应力的发展，使坝基稳定。相反，不管用以上任何一种方法处理，如加荷过快，也会使软土地基破坏，造成滑坡事故。

例如四明湖水库坝基下为厚 12m 的淤泥质黏土，平均含水量为 42%，1959 年 7 月初为了提前蓄水，加速填筑，每天填土

最快达 80cm, 7 月 14 日坝趾位移达每天 43mm, 7 月 22 日产生滑动。究其原因主要是填土加荷速率过快。

目前由于以理论方法控制填土加荷速率尚不够完善, 因此, 还需依赖于施工中现场监测。主要观测项目有边桩位移、沉降和孔隙水压力等, 分述如下:

(1) 边桩水平位移的观测与控制: 为了安全施工, 在坝脚和镇压平台坡脚处设置一排或数排边桩, 监测施工过程中的位移, 控制填土速率。边桩位移速率允许值与软土性质、地基处理方法及加荷方式等因素有关, 可根据已有工程经验确定。

(2) 沉降观测与控制: 施工过程中, 如果软土坝基在施工期沉降速率突然增大, 这就预示着地基软土可能向侧向挤出产生塑流破坏, 为确保工程安全施工, 要监视地面沉降速率。

(3) 孔隙水压力观测: 在荷载的作用下, 软土坝基的孔隙水压力值直接反映地基土的变形和强度变化状况, 可通过孔隙压力的数值计算地基固结程度和坝的稳定性, 故必要时可进行孔隙水压力观测, 作为施工期控制加荷速率的依据。

孔隙水压力, 边桩位移和沉降观测互相有联系, 必须相互校核。其中沉降速率易于观测且较稳定。

## 7.5 湿陷性黄土地基处理

**7.5.1** 湿陷性黄土浸水并加荷时, 会产生较大的变形, 因此在筑坝前或筑坝期要对地基进行处理, 以保证蓄水后坝的安全。

**7.5.2** 处理湿陷性黄土地基, 较为彻底的方法是开挖回填。当强湿陷性土层较薄时, 最好全部挖除再重新回填压实, 也可采用表面夯实法, 或者采取两种方法联合使用。具体处理方法需经技术经济分析比较确定。

表面夯实法是将重锤提高一定高度后, 自由下落, 重复夯打, 使黄土的密度增大, 改善土的物理力学性质, 以减小或消除地基黄土的湿陷性。

**7.5.3** 预先浸水法可用于处理强或中等湿陷而厚度又较大的黄

土地基。在坝体填筑之前，对湿陷性黄土层预先加水浸泡，使在施工之前及施工过程中消除黄土地基的大部分湿陷性，有效减小蓄水后湿陷变形量。

湿陷性黄土层的厚度超过 15m，可通过钻孔或竖井进行深层预先加水，加速浸水过程。

具体处理方案需要从筑坝材料、坝高、技术经济等方面综合分析比较确定。

## 7.6 岩石地基处理

**7.6.2** 表层风化裂隙发育的岩基可开挖截水槽穿透风化裂隙密集带，槽底宽按回填防渗土料的允许渗透比降确定。下游侧按反滤准则铺设反滤料，在槽底喷薄层水泥砂浆或浇筑混凝土形成覆盖层。

可采用以下措施：

(1) 开挖齿槽，回填混凝土：当断层带为泥质充填时，可开挖齿槽，回填混凝土塞，延长渗径，阻断渗漏、管涌及溶蚀形成的条件。

(2) 扩大截水槽底宽或浅层挖除：为降低截水槽底的渗透比降，可在跨越断层带处扩大截水槽底宽，并于槽底浇筑混凝土板，再在下游出露处设置反滤层，防止断层充填物发生管涌破坏。对于浅层软弱岩层或透水性强的节理裂隙密集带，可在基础处理范围内挖除，解决渗透稳定问题。对于深层或多层软弱夹层影响到大坝抗滑稳定时，可采取锚固或放缓坝坡的处理措施。

(3) 帷幕灌浆：当断层破碎带或节理裂隙密集较深，透水性较强，且开挖有困难时，可采用帷幕灌浆处理。

**7.6.4** 在岩溶（喀斯特）地区筑坝，蓄水后可能产生严重渗漏和管涌破坏。首先要做好工程地质与水文地质的调查研究工作，然后根据实际情况，采取相应的处理措施。常用的处理方法如下：

(1) 堵：对于浅层的溶洞，在查明渗流的主要通道后，可采

用堵塞的方法。如溶洞呈竖井或漏斗状，可浇筑混凝土盖板堵住进口；如为水平溶洞，可在洞口筑挡水墙封堵。对于较大的溶洞，可将表部溶洞挖除，再回填混凝土，或回填黏土予以封堵。在回填黏土之前，可先在溶洞内抛大块石，再抛小块石、砾石和砂，形成反滤后，再填黏土夯实，最上层可用浆砌石或浇筑混凝土封闭。

(2) 截：适用于岩溶仅在岩层表面发育的情况。可采用截水墙（槽）深入到隔水层或相对隔水层，截断渗漏通道。

(3) 围：对于水库内既涌水又消水的反复泉、落水洞等，其处理形式一般可设置圆（环）形烟囱式围挡。围封时要注意基础牢固，高度要高于水库正常蓄水位，使其涌水时补水给水库，消水时不漏掉库水。围封材料优先采用混凝土。

(4) 铺：对于低坝，当大面积溶蚀而未形成溶洞时，或当岩溶发育轻微，溶洞较少，且没有大溶洞时，或只有沿岩溶岩层的裂隙漏水时，均可用黏土铺盖防渗。

(5) 隔：对于库区内比较多又比较集中且互相连通的反复泉、落水洞群，当采用围、堵等方法均不能收效或处理工作量太大时，则可采取隔的办法，即将渗漏区隔离于库外。

(6) 上述几种措施综合处理。

## 8 土石坝计算

### 8.1 渗流计算

**8.1.2** 渗流计算要考虑水库运行中可能出现的不利情况，同原导则相比，增加了 2 款、3 款两种水位组合，主要针对设计洪水水位、校核洪水水位能够形成稳定渗流的情况，为稳定计算提供依据。

**8.1.3** 坝体分层碾压、天然土层的分层沉积，会使坝体、坝基土层呈现各向异性。建议计算时偏安全地采用渗透系数：计算渗流量时用大值平均值，计算水位降落浸润线时用小值平均值。

**8.1.4** 严格的解析法只适用于某些简单的典型情况，对工程上经常遇到的复杂情况，需作一系列简化假定。本次修订对坝体及坝基比较复杂的边界条件做了适当的简化规定，使其在计算中更具操作性。

**8.1.5** 渗透稳定计算的任务，即为判断土的渗透破坏形式，计算坝体、坝基及出逸点的渗透比降，根据计算结果，分析坝体内部及下游渗流出逸段的渗透稳定，确定反滤料保护的范围及要求。

**8.1.6** 原导则条文说明中，对于渗透变形形式，有相应计算说明。本次修订指定按 GB 50487 附录 G 的规定执行。

**8.1.8** 原导则对于坝基表层土的渗透控制没有具体规定，本次修订增加了该部分规定。

### 8.2 稳定计算

**8.2.1** 土石坝必须核算几种控制条件的坝体稳定性，每种计算条件的安全系数不得小于规定的数值，条文列出四种计算条件，包括了坝的各种不利运用情况。



**8.2.2** 坝坡稳定计算，可按照不同的坝型和坝基地质条件选择不同的计算方法，并根据不同的运用条件，确定安全系数。

**8.2.3** 对于坝坡稳定计算采用的圆弧滑动法，原导则推荐采用不计土条间作用力的瑞典圆弧法，计算相对简单，已积累了丰富的经验，但该方法在理论上存在缺陷，1992年美国土木工程师学会在“堤坝稳定分析25年回顾”中邀请邓肯（Duncan）作当代水平报告。报告对传统的各种边坡稳定分析方法的计算精度和适用范围作了论述：“传统的瑞典法在平缓边坡高孔隙水压力情况下进行有效应力法分析时是非常不准确的。”如在援斯里兰卡金河土堤的计算实例中，地基为泥炭质淤泥，采用饱和重和实际孔隙压力，瑞典圆弧法的安全系数竟是负的，与简化毕肖普法相比差别较大；采用超孔隙水压力和浮容重，瑞典圆弧法的安全系数为与简化毕肖普法的计算结果相比仍偏小；陈祖煜在《土质边坡稳定分析—原理、方法、程序》中，对坡度为1:3的均质边坡进行了研究，在中心角和孔隙水压力较大的情况下，瑞典法误差极大，数值偏小，当属不正确的结果。因此，建议出现上述情况时，不采用瑞典圆弧法计算。随着计算机技术的发展和普及，采用计算机程序计算土石坝稳定已很普遍，本次修订增加了计入土条间作用力的简化毕肖普法，更为严谨。

**8.2.4** 滑楔法适应于薄斜墙坝等特殊的坝体断面，本次修订补充了采用此方法进行稳定计算的规定。

**8.2.5** 坝的稳定计算分为有效应力法和总应力法。有效应力法的抗剪强度指标采用排水剪试验成果，最好用三轴仪测定，如无三轴仪，也可用直剪仪测定。

**8.2.6** 在正常运行期，坝体沉降固结基本完成，土体的孔隙不再变化，稳定渗流基本形成，坝体荷载主要为填土的自身重量，地震力，孔隙水压力，上、下游水压力等。通过流网等势线可求出作用在滑动面上的孔隙水压力及有效应力，此时按有效应力法计算，土的强度可取直接慢剪（或三轴排水剪）试验所测定的强度指标。计算方法参见SL 274—2001附录D。

**8.2.7** 碾压式土石坝防渗体，渗透系数较小，一般可假定施工期孔隙水压力不消散。小型土石坝可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  $c_u$ 、 $\phi_u$  进行稳定计算。考虑到上坝含水量会有变幅，可制备几种含水量试样进行试验，取其平均值作为设计采用值。作用在滑弧上的应力，采取填土自重产生的总应力。计算方法可参见 SL 274—2001 附录 D。

**8.2.8** 土质防渗体坝由于填土的密实度较大，水位降落时，可认为坝体不会产生附加压密，可通过流网求得库水位降落时的孔隙水压力。坝体流网与坝的断面型式和地基渗透条件有关，计算时根据边界条件绘制坝体流网图，按照等势线计算滑动面上的孔隙水压力，采用有效应力法计算。计算方法参见 SL 274—2001 附录 D。

对于小型土石坝，也可采用以下简化的方法计算：即假定对于防渗土料部分，由于透水性小，库水位降落前后的浸润线保持不变；对于降落后库水位以下部分计算滑动力和抗滑力时，条块采用浮容重；对于降落后水位与浸润线之间条块重，计算滑动力用饱和容重，抗滑力用浮容重；浸润线以上部分条块采用湿容重；抗剪强度采用直接固结快剪（或三轴固结不排水剪）试验强度指标。简化方法的实质是假定坝体位于相对不透水或与坝体防渗土料具有相同透水性的坝基上，水位降落后坝体流线呈向上游方向，渗透力与滑弧方向接近一致，对抗滑力影响略而不计。

**8.2.9** 位于湿陷性黄土地基上的坝，如施工中对地基未做彻底处理时，当水库第一次蓄水时，地基由于湿陷变形产生孔隙水压力，使强度降低，对坝的安全不利，设计时必须考虑这一情况，采用适宜的抗剪强度指标进行计算。

**8.2.12** 土工膜作为防渗材料，在小型土石坝建设中逐渐普及，对此类坝，除按本标准进行坝坡及坝基的稳定计算外，还要按 SL/T 225 沿土工膜和土的接触带进行稳定计算。

## 8.3 沉降计算

**8.3.1** 土石坝主要在自重作用下,使坝体和坝基产生沉降变形,要计算坝体和地基的总沉降量和施工过程中的沉降量,以确定竣工后的预留超高。同时预测坝体各部位的不均匀沉降量,以判别坝体产生裂缝的可能性,并采取预防措施。

**8.3.2、8.3.3** 坝体和坝基的总沉降量可采用固结仪测定的压缩曲线分层计算,将各分层的沉降量相加,即为总沉降量。根据资料统计,施工期坝体的沉降量,对于土坝可达到最终沉降量的80%,对堆石或砂砾石坝可达到90%。将总沉降量减去施工期沉降量,得竣工后沉降量。

**8.3.4** 坝顶预留沉降超高,根据以往工程经验,土质防渗体坝一般为坝高的1%。

## 9 坝体加高与加固

### 9.1 坝体加高

**9.1.1** 在坝体扩建加高设计时，需通过相应手段了解原坝体的质量和安全状况，进行必要的核算与安全复核，作为论证和采用加高方案的设计依据。坝体加高后有可能坝高超过 30m 或库容超过 0.1 亿  $\text{m}^3$ ，故本条提出要根据加高后的坝高和库容重新核定工程等别和洪水标准，亦作为加高方案的设计依据。如超过本标准适用条件时，按 SL 274 执行。

**9.1.3** 对小型土石坝扩建加高方法的规定，考虑如下因素提出：

(1) 无论哪种土石坝坝型，从上、下游面同时加高培厚坝体，施工很困难，也不经济，除特殊情况外一般不采用。

(2) 从下游面加高培厚的方法适用于各种碾压式土石坝，既不影响施工期水库的正常运用，又施工方便，新老坝体结合可靠。工程实践中采用此法最为广泛，但其工程量较大，坝址附近需有充足的料源。

(3) 从下游面培厚加高时，若上游坝坡不再满足稳定要求，一般是将坝轴线下移，将上游坡削成较缓的坝坡，或在原坝顶高程处留一个适当宽度的马道，在马道下游加高坝体，以增加上游坝坡的稳定性。

(4) 下游坝坡培厚部分一般是采用透水性相对较大的材料填筑压实，起到排水作用，对提高均质土坝的渗透稳定和抗滑稳定有利。

(5) 对心墙坝加高，理论上以垂直加高为好，但实际难以做到，一般只能用上部斜墙与原坝心墙相接，而从下游面培厚加高。经验证明，适当加厚上部新填斜墙，做好新老防渗土体的结合处理，严格控制新填斜墙和坝壳料的填筑质量，裂缝或不均匀沉降是可以避免的。

(6) 从上游面培厚加高需要放空水库和拆除并重新修筑上游面护坡, 因此只有在原坝前泥沙淤积面较高时才采用, 可减少坝体培厚填筑工程量。这种在坝前淤积土上加高时, 需特别注意淤积土的排水固结处理, 分析研究采用合适的填筑速率, 防止加高坝体失稳和产生裂缝而致新的病害。

**9.1.4** 戴帽加高方法将降低坝坡抗滑稳定安全度, 只有在采用其他加高措施有困难, 需要加高的高度不大时才采用。当原坝顶较宽, 坝坡稳定安全裕度较大时, 也有采用顶部局部改陡坝坡的加高方式。若原坝体密实、变形小, 坝坡稳定安全裕度较大时, 也有采用坝顶上下游两侧设置刚性挡墙, 中间填土的加高方式。其优点是工程量小, 加高施工方便, 对原坝护坡、坝面排水设施等影响也小。但是戴帽加高对抗震不利, 坝体填筑质量不佳或地基软弱时易产生裂缝, 需要根据具体情况慎重对待。

**9.1.5** 坝体加高或培厚时, 为保证新老坝体结合紧密, 需对其结合部位的原坝体表层做好清表处理。对清表处理的深度、清挖方式及培厚加高前清基面的保护措施未作具体规定, 一般情况下按坝基清表的要求进行, 依据工程具体情况而定。

**9.1.7** 土石坝加高设计中, 保证原坝的防渗体与加高部分的防渗体形成完整的防渗体系是至关重要的, 要妥善、有效解决。

**9.1.8** 早期兴建的小型土石坝坝顶布置与构造, 多较简陋, 未能充分考虑运行检修、防汛抢险等功能要求, 亦未考虑与周边环境相协调等要求。为满足坝顶的功能要求, 条文对加高扩建后的坝顶布置与构造提出了相关要求。

## 9.2 坝体加固

**9.2.1** 本条规定了小型碾压式土石坝加固处理的目的是原则。

**9.2.2** 工程实践表明, 需要加固处理的土石坝只存在一种病患的较少, 多种病患同时存在的居多, 采用多种措施综合加固的亦较多。要针对工程存在安全问题的具体情况采用相应的加固处理措施, 有的采用一种措施就可达到安全和满足功能要求的目标,

有的需要同时采取多种措施进行综合加固,需要通过技术经济比较选择具体加固措施。

我国各地区因地制宜,通过摸索、试验、总结、提高,积累了一些加固坝体的经验,采用了新技术、新材料、新工艺,体现了坝体加固设计技术的进步,对此,本标准未做赘述,最终采取何种措施,需要通过具体分析论证。

**1~3** 列出了针对小型土石坝不同类型隐患、病害通常采用的加固处理措施,有众多成功的事例。对这些较为成熟的处理措施采用与否,条文中没有做出规定,均为可供参考的选项。

**4** 根据一些小型土石坝蚁害、鼠害治理的经验,采用锥探灌浆处理是有效的,予以推荐。根据蚁害、鼠害情况,在灌注的浆液中掺入有效的灭蚁、灭鼠药物,效果会更好。若蚁害、鼠害造成的破坏严重,必要时可采用坝体内增设防渗墙措施。

**5** 泄水、引水建筑物的安全状况有的影响水库功能,有的直接影响坝体的安全,因此要针对其存在的具体安全问题进行加固设计,防止因其破坏危及坝体安全。

## 10 安全监测设计

**10.0.1** 根据调查,目前我国小(1)型、小(2)型水库一般只有水位观测及外观检查,大部分没有其他监测设备。为保证工程施工和运行的安全,4级、5级土石坝要求设置必要的监测设备。

**10.0.3** 垂直及水平位移测点是监测坝体变形的最主要手段,简单易行,故通常埋设监测设备,以了解坝体各测点间的变形差及变形趋势。

位移监测断面要选择有代表性的断面或地质、地形、坝体填筑等方面有特点的断面,例如最大坝高断面,地基可压缩性土层最厚的断面,地形突变或坝下埋管填土高度变化处,坝体与混凝土建筑物连接处。各断面相同位置的测点,要尽可能布置在一条直线上。

**10.0.4** 为了解土石坝渗透流量变化的规律和是否有不正常的渗流现象,据以分析防渗和排水设施的工作情况,可进行渗流量的监测。根据渗流量大小和汇集条件,渗流量监测一般可采用容积法或量水堰法,当流量大于 $300\text{L/s}$ 或受落差限制不能设置量水堰时,可将渗漏水引入排水沟中,采用测流速法。

**10.0.5** 对于砂砾石地基上的土石坝,通常在地基内设置渗流压力监测设施,以了解坝基的渗流压力分布情况和防渗、排水的效果。

**10.0.6** 鉴于监测仪器技术的发展,现有孔隙水压力计在测量精度、耐久性、可靠性等方面均有了大幅提高,且相比测压管、孔隙水压力计具有测读快,测量精度高,在渗透系数小的土体中无压力变化滞后等优点,故渗流压力监测仪器可根据情况选用测压管或孔隙水压力计。

**10.0.7** 为了解软土地基上的坝在施工期的变形,保证坝的安全,随着填土的升高要进行坝体及上下游坡脚以外坝基的位移监

测。当位移超过一定数值时，要控制填筑速率或间歇填筑。必要时设置孔隙水压力监测，测点一般布置在最大断面上，要能控制整个断面的孔隙水压力值。

**10.0.8** 湿陷性黄土地基遇水和增荷后，将发生较大的沉降，地基的抗剪强度显著下降，因此可设置地面沉降测点，同时对坝坡及坝脚进行垂直及水平位移监测，了解坝体变形。

**10.0.9** 除设置必要的监测设施外，更主要的是要经常和定期的对土石坝及其附属建筑物的外观进行巡视检查，了解建筑物有无异常情况。

**10.0.10** 监测资料及巡视检查结果要及时记录、整理和分析，出现异常要及时采取措施。





# 中国水利水电出版社

## 水利水电技术标准咨询服务中心简介

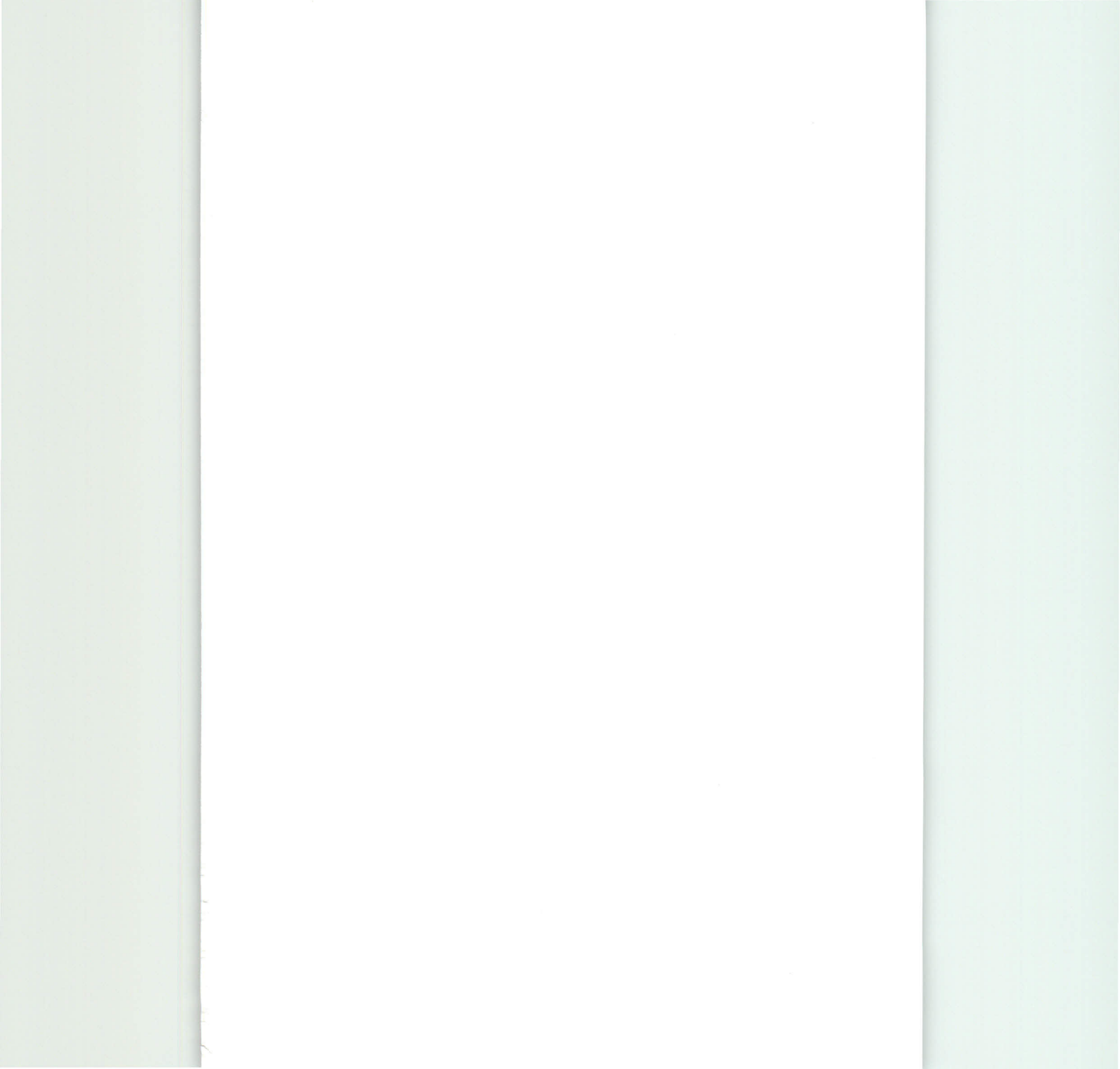
中国水利水电出版社，一个创新、进取、严谨、团结的文化团队，一家把握时代脉搏、紧跟科技步伐、关注社会热点、不断满足读者需求的出版机构。作为水利部直属的中央部委专业科技出版社，成立于1956年，1993年荣膺首批“全国优秀出版社”的光荣称号。经过多年努力，现已发展成为一家以水利电力专业为基础、兼顾其他学科和门类，以纸质书刊为主、兼顾电子音像和网络出版的综合性出版单位，迄今已经出版近三万种、数亿余册（套、盘）各类出版物。

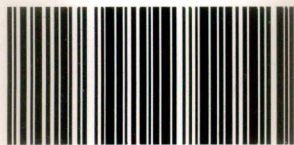
水利水电技术标准咨询服务中心（第三水利水电编辑室）主要负责水利水电技术标准及相关出版物的出版、宣贯、推广工作，同时还负责水利水电类科技专著、工具书、文集及相关职业培训教材编辑出版工作。

感谢读者多年来对水利水电技术标准咨询服务中心的关注和垂爱，中心全体人员真诚欢迎广大水利水电科技工作者对标准、水利水电图书出版及推广工作多提意见和建议，我们将秉承“服务水电，传播科技，弘扬文化”的宗旨，为您提供全方位的图书出版咨询服务，进一步做好标准和水利水电图书出版工作。

联系电话：010-68317913（传真） jwh@waterpub.com.cn  
主 任：王德鸿 010-68545951 wdh@waterpub.com.cn  
主任助理：陈 昊 010-68545981 hero@waterpub.com.cn  
首席编辑：林 京 010-68545948 lj@waterpub.com.cn  
策划编辑：王 启 010-68545982 wqi@waterpub.com.cn  
杨露茜 010-68545995 ylx@waterpub.com.cn  
王丹阳 010-68545974 wdy@waterpub.com.cn  
章思洁 010-68545995 zsj@waterpub.com.cn







155170. 115

SL 189—2013

中华人民共和国水利行业标准  
小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范  
SL 189—2013

\*

中国水利水电出版社出版发行  
(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)

网址: [www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

E-mail: [sales@waterpub.com.cn](mailto:sales@waterpub.com.cn)

电话: (010) 68367658 (发行部)

北京科水图书销售中心 (零售)

电话: (010) 88383994、63202643、68545874

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售

北京瑞斯通印务发展有限公司印刷

\*

140mm×203mm 32开本 3.25印张 87千字

2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷

\*

书号 155170·115

定价 34.00元

凡购买我社规程,如有缺页、倒页、脱页的,  
本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究