

ICS 93. 160  
P 59  
备案号: 18635—2006

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 25—2006

替代 SL 25—91

# 砌石坝设计规范

Design specification for stone masonry dam

2006-04-12 发布

2006-06-01 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《砌石坝设计规范》  
SL 25—2006 的通知

水国科〔2006〕139号

部直属各单位，各省、自治区、直辖市水利（水务）厅（局），各计划单列市水利（水务）局，新疆生产建设兵团水利局：

经审查，批准《砌石坝设计规范》为水利行业标准，并予发布。标准编号为 SL 25—2006，代替 SL 25—91。

本标准自 2006 年 6 月 1 日起实施。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

二〇〇六年四月十二日



# 前 言

《浆砌石坝设计规范》(SL 25—91) (以下简称原规范) 于 1991 年首次发布, 至今已十余年。现根据水利部水利水电规划设计管理局下发的《关于 2002 年度水利水电勘测设计技术标准制定、修订项目计划及主编单位的通知》(水总局科 2002 [15] 号文) 和《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002), 对原规范进行修订, 修订后改名为《砌石坝设计规范》(SL 25—2006) (以下简称本规范)。本规范中的砌石坝是指砂浆或混凝土砌石坝, 不包括干砌石坝。

本规范对原规范进行修改补充的主要内容如下:

——总则后增加了“主要术语与基本符号”一章, 整个规范由原规范的 9 章增为 10 章。

——原规范第三章第二节“荷载组合”中的基本组合增加了水库设计洪水位加设计正常温升的温度荷载的荷载组合; 在本规范 4.1 节中增列了泥沙冲淤计算的期限, 见附录 D。

——原规范第四章“浆砌石重力坝”第二节“坝体形状设计”改为坝体结构, 具体规定了浆砌石重力坝的坝体结构。对原规范第 4.3.4 条 (现为 5.3.3) 所提深层抗滑稳定问题, 增列附录 E, 提出了砌石重力坝深层抗滑稳定安全系数及计算公式。

——对原规范第五章“浆砌石拱坝”第二节“坝体应力分析中砌石体容许压应力”表 5.2.5—1 (现为表 A.0.7) 作了重要修改, 在毛石与块石砌体之间增加了毛石占 70%、块石占 30% 及毛石占 30%、块石占 70% 两档, 更为经济合理; 对表 5.2.5—2 (现为表 9) 砌石拱坝控制计算拉应力也作了重要修改, 即将表 5.2.5—2 中的中央悬臂梁底及其他部位两挡, 改为拱坝周边及其他部位两挡, 并将表列入该条说明中, 更符合目前所用设计

参数及分析方法所得的成果。

——原规范第九章“观测设计”（现为第 10 章）改为“安全监测设计”，明确规定工程监测范围，增补安全监测设计遵循的原则，增加主要设施的布置及要求。

——删除原规范附录三、附录五；附录一、二、四、六相应改为附录 A、C、G、B。

本规范实施后替代《浆砌石坝设计规范》（SL 25—91）。

本规范批准部门：中华人民共和国水利部

本规范主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本规范解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本规范主编单位：贵州省水利厅

本规范参编单位：水利部湖南水利水电勘测设计研究院、  
水利部福建水利水电勘测设计研究院、  
贵州省水利水电勘测设计研究院、  
贵州省遵义水利水电勘测设计研究院

本规范主要起草人：黎展眉 王良之 高世宝 何启荣  
杨卫中

本规范审查会议技术负责人：沈凤生 雷兴顺

本规范体例格式审查人：陈登毅

目 次

1 总则 ..... 1

2 主要术语与基本符号 ..... 3

2.1 主要术语 ..... 3

2.2 基本符号 ..... 3

3 筑坝材料及砌石体设计指标 ..... 6

3.1 筑坝材料 ..... 6

3.2 砌石体设计指标 ..... 7

4 荷载与荷载组合 ..... 9

4.1 荷载 ..... 9

4.2 荷载组合 ..... 11

5 砌石重力坝..... 13

5.1 坝体布置 ..... 13

5.2 坝体结构 ..... 13

5.3 坝体抗滑稳定计算 ..... 14

5.4 坝体应力计算 ..... 16

5.5 坝体温度控制和防裂 ..... 17

6 砌石拱坝..... 18

6.1 坝址、坝线和坝体布置 ..... 18

6.2 坝体应力分析 ..... 18

6.3 拱座稳定分析 ..... 20

6.4 温度控制 ..... 21

7 坝体防渗..... 23

7.1 一般规定 ..... 23

7.2 混凝土防渗面板与心墙 ..... 23

7.3 坝体自身防渗 ..... 24

7.4 横缝、止水和排水 ..... 24

8	坝基处理	26
9	坝体构造	28
9.1	坝顶布置和交通	28
9.2	坝内廊道和孔洞	28
9.3	坝体分缝、排水和基础垫层	29
10	安全监测设计	31
10.1	一般原则	31
10.2	监测项目与监测设施布置	32
附录 A	砌石体主要力学指标	34
附录 B	砌石体变形（弹性）模量、抗压强度试验方法	40
附录 C	荷载计算公式	43
附录 D	坝前泥沙冲淤计算的期限	57
附录 E	砌石重力坝坝基深层抗滑稳定 安全系数及计算公式	58
附录 F	考虑坝体分层异弹模特性，用材料力学方法计算 砌石重力坝坝体应力	61
附录 G	用材料力学方法计算重力墩、推力墩的应力	66
	标准用词说明	69
	条文说明	71

# 1 总 则

**1.0.1** 为适应砌石坝工程建设发展的需要，规范砌石坝设计，对《浆砌石坝设计规范》(SL 25—91) 进行修订，使砌石坝设计做到安全适用、经济合理、技术先进、质量保证，特制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于大、中型水利水电工程中的 2 级、3 级砌石坝或坝高超过 50m 的 4 级、5 级砌石坝的设计。其他砌石坝设计可参照使用。

对于坝高超过 100m 的砌石坝，设计时应进行必要的专题研究。

**1.0.3** 砌石坝按其坝高分为低坝、中坝和高坝。坝高在 30m 以下为低坝，坝高在 30~70m 为中坝，坝高在 70m 以上为高坝。

**1.0.4** 砌石拱坝按其厚高比分为薄拱坝、中厚拱坝和厚拱坝(或称重力拱坝)。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。

**1.0.5** 设计砌石坝应重视和研究下列问题：

1 建坝地区的各项基本资料。包括河流规划、综合利用要求以及水文、气象、地形、地质、地震、建筑材料、施工和运用条件等。

2 合理选择坝型、坝址、坝线，简化坝体结构，并结合枢纽布置全面研究坝体布置与其他建筑物的关系，力求选择最佳方案。

3 坝基处理和坝体防渗。

4 泄洪消能防冲。

5 施工导流和度汛。

6 建筑材料、施工方式及施工技术的采用，应因地制宜，在总结实践经验和进行科学试验的基础上，积极、慎重地采用新

材料、新技术、新工艺。

#### **7 降低工程造价和缩短建设工期的措施。**

此外，还应研究与同类型混凝土坝设计中的异同，重视砌石坝的材料试验、结构计算和分析研究，逐步探求和应用反映砌石坝结构特点的设计和计算方法。

**1.0.6** 砌石坝设计除应符合本规范规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**1.0.7** 本规范主要引用下列标准：

《水利水电工程地质勘察规范》（GB 50287—99）

《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL 252—2000）

《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203—97）

《水工混凝土结构设计规范》（SL/T 191—96）

《水工建筑物抗冰冻设计规范》（SL 211—98）

《混凝土重力坝设计规范》（SL 319—2005）

《混凝土拱坝设计规范》（SL 282—2003）

《水工混凝土试验规程》（SD 105—82）

《水利水电工程岩石试验规程》（SL 264—2001）

《混凝土坝安全监测技术规范》（试行）（SDL 336—89）

## 2 主要术语与基本符号

### 2.1 主要术语

#### 2.1.1 砌石坝 stone masonry dam

采用水泥砂浆或一、二级配混凝土作胶凝材料的砌石坝，其主要坝型有砌石重力坝和砌石拱坝两种。

#### 2.1.2 坝高 dam height

建基面的最低点（不包括局部深槽、井或洞）至坝顶的高度。

#### 2.1.3 刚体极限平衡法 limit equilibrium method

将可能滑动的岩体视为刚体，采用极限平衡原理，计算沿滑动面的抗滑稳定安全系数的分析方法。

#### 2.1.4 拱梁分载法 multi-arch beam method

将整个拱坝分为水平拱和悬臂梁两个系统，根据拱系和梁系在其交点处变位相等的条件来确定拱梁荷载分配的分析方法。

#### 2.1.5 重力墩 gravity pier

通过重力作用承受拱端推力的重力式结构物。

#### 2.1.6 推力墩 abutment block of arch dam

设置在拱坝坝体与基岩之间，将拱端推力传至稳定基岩的结构物。

### 2.2 基本符号

#### 2.2.1 荷载

$P_{sk}$ ——泥沙压力；

$p_{sk}$ ——泥沙压力强度；

$P_{wk}$ ——浪压力；

$F_{hk}$ ——冰块撞击坝面的动冰压力；

$P_x$ ——溢流反弧段上离心力合力的水平分力；

$P_y$ ——溢流反弧段上离心力合力的垂直分力；  
 $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——坝基面扬压力强度系数；  
 $T_m$ ——断面平均温度变化；  
 $T_d$ ——等效线性温差变化。

## 2.2.2 材料性能

$\gamma_w$ ——水（或含泥沙水）的重度；  
 $\rho_w$ ——水的密度；  
 $\gamma_{sd}$ ——泥沙的干重度；  
 $\gamma_{sb}$ ——泥沙的浮重度；  
 $\varphi_s$ ——泥沙的内摩擦角；  
 $R$ ——石料抗压强度；  
 $R_d$ ——石料干抗压强度；  
 $R_s$ ——石料饱和抗压强度；  
 $\gamma_c$ ——混凝土的重度；  
 $E_e$ ——混凝土的弹性模量；  
 $\gamma_b$ ——砌石体的重度；  
 $\alpha$ ——砌石体的线膨胀系数；  
 $\rho_d$ ——砌石体的干密度；  
 $E_0$ ——砌石体的变形模量；  
 $E_e$ ——砌石体的弹性模量；  
 $\mu$ ——砌石体的泊松比；  
 $\lambda_b$ ——砌石体的导热系数；  
 $C_b$ ——砌石体的比热；  
 $\alpha_b$ ——砌石体的导温系数；  
 $f_{cc}$ ——砌石体的抗压强度；  
 $f_t$ ——砌石体的抗拉强度；  
 $f_f$ ——砌石体的抗弯强度；  
 $f'$ ——滑裂面的抗剪断摩擦系数；  
 $c'$ ——滑裂面的抗剪断凝聚力；  
 $f$ ——滑裂面的抗剪摩擦系数。



### 2.2.3 计算指标

$K'$ ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

$K$ ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数。

### 3 筑坝材料及砌石体设计指标

#### 3.1 筑坝材料

##### 3.1.1 砌石体采用的石料应符合下列规定：

1 石料应新鲜、完整，质地坚硬，不得有剥落层和裂纹。

2 石料按外形可分为毛石、块石、粗料石三种。

毛石：无一定规格形状，单块重量宜大于 25kg，中部或局部厚度不宜小于 20cm。

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 20cm。

毛石、块石最大边长（长、宽、高）不宜大于 100cm。

粗料石：应棱角分明，六面基本平整，同一面最大高差不宜大于石料长度的 3%，石料长度宜大于 50cm，宽度、高度不宜小于 25cm。

3 石料的抗压强度可根据石料饱和抗压强度值划分为  $\geq 100\text{MPa}$ 、80MPa、60MPa、50MPa、40MPa、30MPa 六级。

4 石料使用前应进行岩块的物理力学性质试验，中小型工程无条件时，可按本规范附录 A 表 A.0.1 选用。

##### 3.1.2 砌石体采用的骨料应符合下列规定：

1 骨料的品质必须符合《水工混凝土试验规程》（SD 105—82）的规定。

2 细骨料分天然砂和人工砂两类。人工砂不应包括软质岩、风化岩石的颗粒。天然砂和人工砂最大粒径均宜小于 5mm。

3 粗骨料（砾石、碎石）宜按粒径分级：当最大粒径为 20mm 时，分成 5~20mm 一级；当最大粒径为 40mm 时，分成 5~20mm 和 20~40mm 两级。

##### 3.1.3 胶凝材料：

1 砌石体的胶凝材料主要有水泥砂浆和一、二级配混凝土。

2 胶凝材料采用的强度等级或标号强度如下：

水泥采用强度等级，常用的有 32.5、42.5、52.5 三种。

水泥砂浆常用的标号强度分为 5.0MPa、7.5MPa、10.0MPa、12.5MPa 四种。

混凝土常用的标号强度分为 10.0MPa、15.0MPa、20.0MPa 三种。

注：其标号强度是指 15cm 立方体 90d 或 180d 的抗压强度，其保证率为 80%。

3 胶凝材料的配合比应满足砌石体设计强度的要求。

4 胶凝材料宜适量掺入外加剂和掺和料，最优掺量应通过试验确定。

### 3.2 砌石体设计指标

3.2.1 砌石体的设计密度  $\rho_d$ ，可根据砌石体类别在下列范围内选用：

毛石砌石体： $\rho_d = 2100 \sim 2350 \text{kg/m}^3$ ；

块石砌石体： $\rho_d = 2200 \sim 2400 \text{kg/m}^3$ ；

粗料石砌石体： $\rho_d = 2300 \sim 2500 \text{kg/m}^3$ 。

3.2.2 砌石体的线膨胀系数  $\alpha$  可在  $(6 \sim 8) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  范围内选用，必要时可按《水工混凝土试验规程》(SD 105—82) 规定的方法试验确定。

3.2.3 砌石体的变形参数的选用应符合下列规定：

1 砌石体的变形模量  $E_0$  和弹性模量  $E_c$  宜按本规范附录 B 的方法试验测定，对无条件进行试验的工程，可按本规范附录 A 表 A.0.2 选用。

2 砌石体的泊松比  $\mu$  宜采用 0.2~0.25。

3.2.4 砌石体的极限抗压强度  $f_{cc}$ ，对 2 级建筑物应按本规范附录 B 的方法进行试验；对 3 级建筑物，当无条件试验时可按本规范附录 A 表 A.0.3 选用。

3.2.5 砌石体的抗拉强度  $f_t$ ，2 级建筑物应按《水工混凝土试

验规程》（SD 105—82）全级配混凝土抗拉试验方法或现场测定，但试件砌筑方法应与现场施工方法相同；3级建筑物砌石体的极限抗拉强度可按本规范附录 A 表 A. 0. 4 选用。

**3. 2. 6** 在初步设计阶段，砌石坝抗滑稳定计算所需的抗剪断强度参数，包括砌石坝沿垫层混凝土与基岩接触面、砌石体与垫层混凝土或砌石体本身的抗滑稳定，2级建筑物应做现场抗剪强度试验；3级建筑物无条件试验时可根据坝基岩体特征、砌石体强度、胶凝材料类别和强度标号由本规范附录 A 表 A. 0. 5 和表 A. 0. 6 查得。

## 4 荷载与荷载组合

### 4.1 荷载

**4.1.1** 作用在砌石坝上的荷载，应包括自重、静水压力、扬压力（或渗透压力）、泥沙压力、浪压力、冰压力、动水压力、温度荷载、地震荷载和其他可能出现的荷载。

**4.1.2** 自重：包括坝体的重量及坝体上永久设备的重量。砌石体重度应通过试验确定；无试验资料时可按本规范 3.2.1 的规定选用。

**4.1.3** 静水压力：上游静水压力应根据水库功能和荷载组合所规定的水库水位确定，下游静水压力应根据相应的不利下游水位按本规范附录 C.1 计算确定。水的重度宜采用  $9.81\text{kN/m}^3$ ，对于多泥沙河流应根据实际情况确定。

**4.1.4** 扬压力：进行砌石重力坝稳定分析、应力分析以及砌石拱坝坝基和拱座稳定分析时，应考虑垂直作用于全部计算截面积的扬压力或渗透压力，按本规范附录 C.2 计算确定。砌石拱坝坝体应力分析时，宜考虑扬压力的作用（对于薄拱坝可不计扬压力）。

**4.1.5** 泥沙压力：应根据坝址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，对于多泥沙河流应作专门研究。泥沙冲淤计算的期限按附录 D 执行，泥沙压力应按本规范附录 C.3 计算确定。

**4.1.6** 浪压力：应根据波浪要素（波高、波长）计算。对于山区峡谷水库，应按本规范附录 C.4 计算确定。

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。

**4.1.7** 冰压力：严寒地区当水库表面形成较厚的冰盖时，应计

及冰压力的作用。冰压力应包括静冰压力和动冰压力，按本规范附录 C.5 计算确定。

**4.1.8 动水压力：**当采用坝顶或坝面泄流时，应计及溢流坝段反弧面上的动水压力，按本规范附录 C.6 计算确定。对溢流坝面可不计脉动压力和负压力的影响。

**4.1.9 温度荷载：**砌石拱坝设计应分别计算设计正常温降和设计正常温升情况，按运行期坝体温度与封拱温度的差值确定。砌石重力坝设计可不考虑温度荷载。

**4.1.10 温度荷载应对封拱温度场、年平均温度场和表面温度变化引起的变化温度场，**根据坝址附近的环境气温、水库水温、日照、坝基岩体地温、坝体厚度、砌体材料的热学特性等因素，按本规范附录 C.7 计算确定。

**4.1.11 当坝体拱圈厚度  $d$  与坝体水平拱半径  $R$  的比值  $d/R \leq 0.5$  时，**可忽略坝面曲率的影响，按平板计算拱坝温度场。

根据坝体厚度方向的实际温度分布（见图 4.1.11），可将其分解为三部分：（I）断面的平均温度变化；（II）等效线性温差变化；（III）非线性温差变化。计算温度荷载时，可仅计及（I）和（II）两部分。

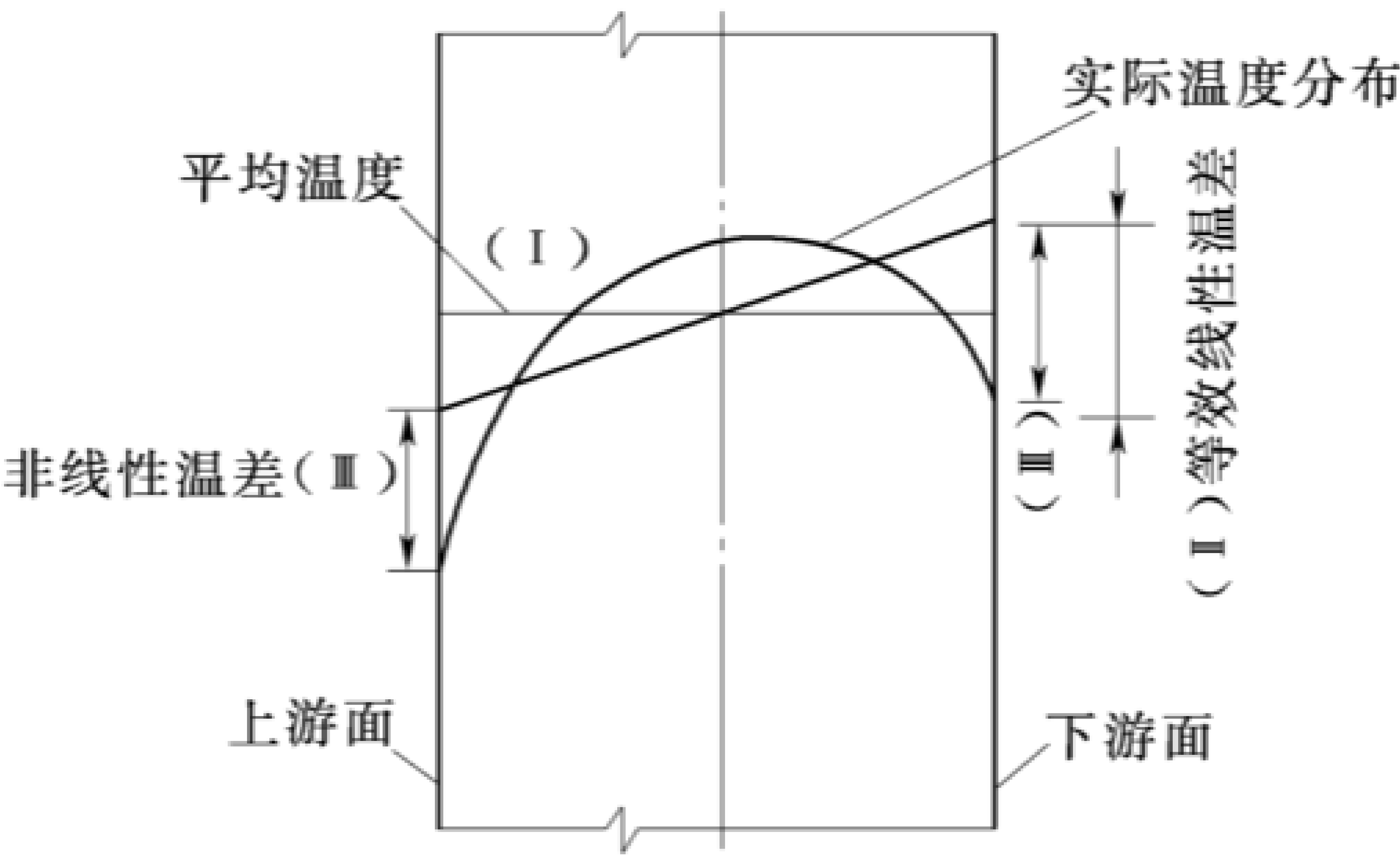


图 4.1.11 坝体温度分布图

**4.1.12 地震荷载：**应包括坝体地震惯性力和地震动水压力。可参照《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203—97）的规定计算

确定。

4.2 荷载组合

4.2.1 砌石坝荷载组合可分为基本组合和特殊组合两类。

4.2.2 砌石重力坝的荷载组合按《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 的规定确定，见表 4.2.2-1。砌石拱坝的荷载组合按表 4.2.2-2 的规定确定。

表 4.2.2-1 砌石重力坝荷载组合

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	正常蓄水位情况	√	√	√	√	√				√	√	土压力根据坝体外是否填有土石而定
	设计洪水位情况	√	√	√	√	√			√	√	√	土压力根据坝体外是否填有土石而定
	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	校核洪水情况	√	√	√	√	√			√	√	√	
	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 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； 注 2：分期施工的坝应按相应的荷载组合分期进行计算； 注 3：施工期的情况应作必要的核算，作为特殊组合； 注 4：根据地质和其他条件，如考虑运用时排水设备易于堵塞，需经常维修时，应考虑排水失效的情况，作为特殊组合； 注 5：地震情况，如按冬季计及冰压力，则不计浪压力。												

表 4.2.2-2 砌石拱坝荷载组合

荷载组合	主要考虑情况		荷 载 类 别										
			自重	静水压力	扬压力	泥沙压力	浪压力	冰压力	动水压力	温度荷载		地震荷载	其他
										设计正常温降	设计正常温升		
基本组合	正常蓄水位情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			
	设计洪水位情况		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
	死水位（或运行最低水位）情况 1		✓	✓	✓	✓		✓		✓			
	死水位（或运行最低水位）情况 2		✓	✓	✓	✓	✓				✓		
	其他常遇的不利荷载组合		✓										✓
特殊组合	校核洪水位情况		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		
	地震情况	正常蓄水位+地震荷载	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
		低水位情况 1+地震荷载	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	
		低水位情况 2+地震荷载	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
	施工期情况		✓										
	其他稀遇的不利荷载组合		✓										✓
注 1：上述荷载组合中，可根据工程的实际情况选择控制性的荷载组合进行计算； 注 2：浪压力与冰压力，二者取其中大者进行组合； 注 3：施工期的荷载组合，可根据实际施工情况按不利情况进行组合； 注 4：其他常遇的不利荷载组合和其他稀遇的不利荷载组合，可根据具体情况分析后进行组合。													



## 5 砌石重力坝

### 5.1 坝体布置

**5.1.1** 坝体布置应结合枢纽布置全面考虑，根据坝址区的地形、地质、水文等条件及综合利用要求，合理安排泄洪、发电、灌溉、供水、航运、过鱼、排漂、冲沙、水库放空、下游生态需水等建筑物的设置，进行全面技术经济比较，选择最优方案。

坝体布置时，还应重视排沙、冲淤及岸坡防护。

**5.1.2** 坝体布置时，应根据当地建筑材料的分布、储量、石料的开采成形情况、施工条件等因素，并通过技术经济比较，确定采用混凝土砌石重力坝或水泥砂浆砌石重力坝。

**5.1.3** 坝体溢流段的前沿长度、孔数、孔口型式、堰顶高程的确定，应考虑下列因素：

- 1 水库蓄、泄洪水和排漂浮物的需要。
- 2 地形、地质条件。
- 3 下游河床水深和消能防冲要求。
- 4 闸门型式及运行条件。

并在此基础上，经综合比较后选择最优方案。

**5.1.4** 坝体泄洪消能防冲设施应根据下游河床地形、地质条件、河槽水深变化情况，并考虑对其他建筑物的影响等合理确定。

**5.1.5** 坝体需要布设廊道和孔洞时，其位置、型式、高程、尺寸应按使用要求及管理运行需要合理确定。

**5.1.6** 坝体布置方案的最终选定，2级建筑物应进行水工模型试验验证，3级建筑物宜进行水工模型试验。

### 5.2 坝体结构

**5.2.1** 坝体结构应根据坝体受力条件，结合坝址地形、地质、

水文、建材、施工等条件，经技术经济比较后合理确定。

**5.2.2** 坝体非溢流坝段的基本断面为三角形，三角形顶点宜在正常蓄水位以上。基本断面上部设坝顶结构，坝顶宽度应根据设备布置、运行、交通等需要确定。

**5.2.3** 砌石重力坝各坝段上游面宜协调一致，利于防渗体的连接和布置。溢流坝段下游坝面应保持一致，其与非溢流坝面之间应用导墙隔开。

**5.2.4** 实体重力坝上游坝面可为铅直面、斜面或折面。上游坝坡可采用  $1:0.05 \sim 1:0.2$ ，当采用折面时应注意与坝身取水和泄水建筑物的进水口的布置协调；下游坝坡应根据应力和稳定要求确定。

**5.2.5** 砌石重力坝溢流坝面结构布置可参照 SL 319—2005 中第 4.3 节的规定确定。砌石坝溢流段宜采用开敞式。如溢流坝顶有闸门控制，应对闸墩、闸室结构稳定及应力分析研究，其设计可参考 SL 319—2005 中第 6.5 节。

**5.2.6** 砌石重力坝坝身泄水孔结构布置可参照 SL 319—2005 中第 4.4 节的规定确定。

### 5.3 坝体抗滑稳定计算

**5.3.1** 除深层抗滑稳定以外的坝体抗滑稳定计算，应考虑下列几种情况：

- 1 沿垫层混凝土与基岩接触面滑动。
- 2 沿砌石体与垫层混凝土接触面滑动。
- 3 砌石体之间的滑动。

**5.3.2** 坝体抗滑稳定应按公式 (5.3.2-1) 或公式 (5.3.2-2) 计算：

$$K' = \frac{f' \sum W + c'A}{\sum P} \quad (5.3.2-1)$$

$$K = \frac{f \sum W}{\sum P} \quad (5.3.2-2)$$

式中  $K'$ ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；  
 $f'$ ——滑裂面上的抗剪断摩擦系数；  
 $c'$ ——滑裂面上的抗剪断凝聚力，kPa；  
 $A$ ——滑裂面面积， $m^2$ ；  
 $\Sigma W$ ——作用于计算截面以上坝体全部荷载（含扬压力）对滑裂面的法向分值，kN；  
 $\Sigma P$ ——作用于计算截面以上坝体全部荷载（含扬压力）对滑裂面的切向分值，kN；  
 $K$ ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；  
 $f$ ——滑裂面上的摩擦系数。

按式（5.3.2-1）或式（5.3.2-2）计算时，坝体抗滑稳定安全系数应不小于表 5.3.2 中相应的规定值。

表 5.3.2 抗滑稳定安全系数

安全系数	采用公式	荷 载 组 合		2、3 级坝
$K'$	(5.3.2-1)	基 本		3.00
		特殊	1	2.50
			2	2.30
$K$	(5.3.2-2)	基 本		1.05
		特殊	1	1.00
			2	1.00

**5.3.3** 当坝基岩体内存在软弱结构面、缓倾角结构面时，应计算深层抗滑稳定。根据滑动面的分布情况，可分为单滑面、双滑面和多滑面计算模式，以刚体极限平衡法（见本规范附录 E）计算为主，必要时可辅以有限元法计算等，并进行综合评定，其成果可作为坝基处理方案选择的依据。深层抗滑稳定计算公式见本规范附录 E。

**5.3.4** 空腹重力坝除计算整体抗滑稳定外，还应核算前腿的抗滑稳定。

## 5.4 坝体应力计算

### 5.4.1 坝体应力计算方法应符合下列要求：

1 实体重力坝坝体应力计算应以材料力学法为基本分析方法，坝体应力计算公式参见 SL 319—2005 附录 C。当坝体设置混凝土防渗面板时，也可考虑坝体一个方向异性，按分层异弹模方法分析，计算方法见本规范附录 F。

2 对于高坝、修建在复杂地基上的坝和不能作为平面问题处理的坝体或坝段的应力计算，宜采用有限元法。

3 空腹重力坝可采用材料力学、结构力学和有限元法计算，所得应力成果应避免特别不利的应力分布状态。

### 5.4.2 坝体应力计算主要包括：

1 实体重力坝，计算坝基面和折坡处截面的上、下游面应力。对于中、低坝，也可只计算坝面应力。

2 空腹重力坝，计算腹拱周边、前后腿的应力。

### 5.4.3 重力坝砌体抗压强度安全系数应符合下列要求：

1 在基本荷载组合时，应不小于 3.5。

2 在特殊荷载组合时，应不小于 3.0。

### 5.4.4 用材料力学法计算坝体应力时，坝体应力应符合下列要求：

1 在各种荷载（地震荷载除外）组合下，坝基面垂直正应力应小于砌石体容许压应力和地基的容许承载力，砌石体容许压应力见本规范附录 A 表 A.0.7。

2 坝基面最小垂直正应力应为压应力。

3 坝体最大主压应力应小于砌石体容许压应力。

4 坝体内一般不得出现拉应力。溢流堰顶、廊道和孔洞周边除外，当这些部位出现拉应力时，应采用钢筋混凝土结构。

5 需进行抗震设计的重力坝，应符合 SL 203—97 的规定。

### 5.4.5 实体重力坝还应计算施工期坝体应力，其下游坝基面的垂直拉应力应不大于 100kPa。

**5.4.6** 空腹重力坝坝体应力应符合下列要求：

1 坝踵部位：坝基面以上 3%~5% 坝高处（高坝宜取小值，中、低坝宜取大值），不出现主拉应力。

2 坝趾部位：主压应力不超过砌体的容许压应力和地基的容许承载力。

**5.4.7** 空腹重力坝应进行体形调整以减小腹拱周边的拉应力区范围。腹拱拱圈部分宜采用钢筋混凝土结构。

**5.4.8** 用有限元法计算坝体应力时，可参照 SL 319—2005 中第 6.3 节的规定执行。

## **5.5 坝体温度控制和防裂**

**5.5.1** 对于砌石重力坝的高坝和重要工程的中坝，应进行温度控制设计，提出温度控制措施。大型工程宜采用有限元法进行温度场和温度应力分析，计算方法参见 SL 319—2005 的规定。对于一般工程的中、低坝，可参照类似工程经验，进行温度控制和防裂。

**5.5.2** 坝基垫层混凝土温度控制和抗裂要求，可参见 SL 319—2005 中有关规定。

**5.5.3** 砌石重力坝应进行坝体分缝。横缝的划分应根据温度应力、坝体布置、施工条件以及地形、地质条件综合确定。横缝间距宜为 20~40m。横缝位置应与垫层混凝土缝相适应。中、低坝可不设纵缝，高坝根据温度控制条件确定。

**5.5.4** 在不影响胶凝材料强度和耐久性的情况下，宜采取下列措施以减少发热量：

- 1 采用中、低热水泥。
- 2 采用粉煤灰或其他水泥掺和料。
- 3 使用外加剂。

## 6 砌石拱坝

### 6.1 坝址、坝线和坝体布置

**6.1.1** 砌石拱坝坝址宜选在河谷地形相对狭窄、坝肩地质条件相对较好、两岸山体厚实、有利于拱座稳定的地点。

**6.1.2** 坝轴线位置的选择，应优先考虑拱座稳定，并经多方案比较确定。

**6.1.3** 坝体布置应根据坝址地形、地质、水文等自然条件以及枢纽的综合利用要求统筹考虑，并进行技术经济比较确定。

**6.1.4** 坝的体形，应根据坝址地形、地质条件、泄洪方式、施工条件等合理选定。

坝体顶部拱圈最大中心角以  $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$  为宜；在河谷较宽的坝址，宜选用非圆弧形拱圈。砌石拱坝悬臂梁的倒悬度不宜大于  $0.3:1$ 。

**6.1.5** 坝体泄洪布置和泄洪方式的选择，应根据坝的体形、坝高、泄洪量大小、坝址地形、地质等情况进行技术经济比较确定。当由坝体泄洪时，宜优先考虑表孔泄洪。应重视砌石拱坝的溢流消能和防冲问题。水力设计应参照《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003) 的有关规定执行。2 级建筑物的拱坝溢流布置，应经水工模型试验验证。

### 6.2 坝体应力分析

**6.2.1** 坝体结构应力分析时，可视结构为各向同性的均质体；当有混凝土防渗体时，也可考虑坝体的一个方向异性。

**6.2.2** 坝体应力分析，宜以拱梁分载法计算成果作为衡量强度安全标准。对于 2 级或情况比较复杂的砌石拱坝，除用拱梁分载法计算外，必要时应用有限元法验算。

**6.2.3** 坝体应力分析的主要内容包括：

- 1 各计算截面上的应力分布。
- 2 坝体上、下游面在各计算点的主应力。
- 3 坝体削弱部位（廊道、孔洞等）的局部应力。

在不同的设计阶段，应根据具体情况，计算上述内容的部分或全部，必要时还应分析坝基内部的应力。

#### 6.2.4 坝体应力分析中应考虑下列问题：

- 1 坝的体形对坝体应力分布的影响。
- 2 坝内孔洞对坝体应力的影响。
- 3 封拱温度对坝体应力的影响。
- 4 不设横缝、整体上升的砌石拱坝坝体自重对应力的影响。
- 5 分期施工、分期蓄水对坝体应力的影响。
- 6 坝体设置横缝对灌浆前施工期各单独坝段的应力和抗倾覆稳定性的影响。

#### 6.2.5 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要求：

1 砌石体容许压应力的安全系数，对于基本荷载组合，采用 3.5；对于特殊荷载组合，采用 3.0。当无试验资料时，砌石体容许压应力值可按本规范附录 A 表 A.0.7 选用。

2 砌石拱坝非地震组合容许出现一定的计算拉应力。

3 砌石拱坝地震组合控制计算拉应力可视工程具体情况适当放宽。

用拱冠梁法计算时，拱和梁的法向应力应满足本条所规定的应力指标。

#### 6.2.6 用有限元法计算时，应力控制指标可参照 SL 282—2003 有关规定执行。地震组合下的容许拉应力可较非地震特殊组合适当放宽。

#### 6.2.7 2 级砌石拱坝应力分析中所采用的砌石体弹性模量、泊松比、坝基变形模量和弹性模量，应通过试验确定。在可行性研究阶段，当缺乏上述资料时，可参照类似条件下的经验数据采用。

**6.2.8** 对于重要工程的砌石拱坝，还可采用拱坝极限分析法核算。当采用拱坝极限分析法核算时，坝体强度安全系数  $K_J$  为极限荷载与设计荷载的比值，对于基本组合， $K_J \geq 3.2$ ；对于特殊组合， $K_J \geq 2.9$ 。

### 6.3 拱座稳定分析

**6.3.1** 在砌石拱坝设计的各阶段，应对两岸拱座的稳定性作出相应的分析论证。

**6.3.2** 在评价拱座的稳定性时，应合理确定滑裂面。对于滑裂面上的抗剪强度参数，2 级砌石拱坝应通过试验后研究选定；3 级砌石拱坝不具备试验条件时，可参照类似地质条件下的工程经验数据选定。

**6.3.3** 拱座的抗滑稳定分析，以刚体极限平衡法为主，必要时可辅以有限元法等。

拱座稳定分析应按空间问题处理，并以此确定其整体抗滑稳定安全系数。如情况简单且无复杂的滑裂面时，可按平面分层累计计算。

**6.3.4** 采用刚体极限平衡法进行拱座抗滑稳定分析时，应按公式 (6.3.4-1) 或公式 (6.3.4-2) 计算：

$$K' = \frac{\sum(Nf' + c'A)}{\sum T} \quad (6.3.4-1)$$

$$K = \frac{\sum(Nf)}{\sum T} \quad (6.3.4-2)$$

式中  $K'$ 、 $K$ ——抗剪断和抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；

$N$ ——垂直于滑裂面的法向力，kN；

$T$ ——沿滑裂面的切向力，kN；

$A$ ——计算滑动面的面积， $m^2$ ；

$f'$ ——抗剪断摩擦系数；

$c'$ ——抗剪断凝聚力，kPa；

$f$ ——抗剪摩擦系数。



抗剪断摩擦系数及凝聚力  $f'$ 、 $c'$  值应按相应于岩体的峰值强度采用。抗剪摩擦系数  $f$  值应按相应于下述特征值取用：对脆性破坏的岩体，采用比例极限；对塑性或脆塑性破坏的岩体，采用屈服强度；对已经剪切错动过的岩体，采用残余强度。

按公式（6.3.4－1）计算时，相应安全系数应不小于表 6.3.4 规定的数值。

表 6.3.4 抗滑稳定安全系数

安全系数	荷 载 组 合			建筑物级别	
				2	3
$K'$	按公式（6.3.4－1）	基本		3.25	3.00
		特殊	1	2.75	2.50
			2	2.25	2.00
$K$	按公式（6.3.4－2）	基本		1.40	1.30
		特殊	1	1.20	1.10
			2	1.10	1.00
注 1：特殊荷载组合 1 包括表 4.2.2－2 中的“校核洪水位情况”、“施工期情况”和“其他稀遇的不利荷载组合”。					
注 2：特殊荷载组合 2 指表 4.2.2－2 中的“地震情况的荷载组合”。					

6.3.5 当拱座下游存在较大断层或软弱带时，应采取加固措施，控制变形量，并核算拱座变形对坝体应力的影响。

6.3.6 应采取有效措施，减小作用在岩体上的渗透压力，保证拱座稳定安全。

6.3.7 砌石拱坝重力墩、推力墩的稳定分析应符合本节的有关规定，其应力及稳定计算见本规范附录 G。

6.4 温 度 控 制

6.4.1 砌石拱坝施工时，可根据需要在拱端附近或其他适当位置预留横向宽缝或窄缝。宽缝缝宽为 0.8~1.2m。

6.4.2 砌石拱坝的封拱温度（指封拱时日平均气温）应控制在

年平均气温以下，但不宜低于 5℃。严寒地区砌石拱坝封拱温度的确定应经专门论证。

整体上升的砌石拱坝，砌筑时的日平均气温宜在年平均气温以下，超过年平均气温时应采取降温措施；同时不宜在低于 5℃ 的气温下砌筑。

## 7 坝 体 防 渗

### 7.1 一 般 规 定

7.1.1 坝体防渗设施应根据当地自然条件、建筑材料、施工工艺和建坝经验等因素确定。

7.1.2 砌石坝防渗设施可采用下列几种形式：

- 1 在坝体上游面设置混凝土（钢筋混凝土）防渗面板。
- 2 在靠近迎水面砌石体内设置混凝土防渗心墙。
- 3 坝体自身防渗。
- 4 经过实践或论证的其他形式。

7.1.3 抗冻混凝土应掺引气剂，其水泥、掺和料、外加剂的品种和数量，水灰比、配合比及含气量均应通过试验确定。

### 7.2 混凝土防渗面板与心墙

7.2.1 防渗面板及心墙混凝土的抗渗等级应根据其承受的水头，按《水工混凝土结构设计规范》（SL/T 191—96）的规定确定，见表 7.2.1。

表 7.2.1 混凝土抗渗等级

水头 $h$ (m)	$<30$	$30\sim70$	$70\sim150$
抗渗等级	W4	W6	W8

7.2.2 防渗面板和外部保护层厚度小于最大冻深 2 倍的心墙混凝土，应根据气候分区、冻融循环次数、表面局部小气候、冰冻等因素按表 7.2.2 选用抗冻等级。

7.2.3 混凝土面板或心墙的底部厚度宜为最大水头的  $1/30\sim1/60$ ，顶部厚度不应小于 0.3m。

7.2.4 混凝土防渗面板宜配置温度钢筋，并做好分缝处理。

表 7.2.2 混凝土抗冻等级

气候分区	严寒		寒冷		温和
年冻融循环总次数（次）	≥100	<100	≥100	<100	—
受冻严重难于检修部位	F300	F300	F300	F200	F100
受冻严重但有修复条件的部位	F300	F200	F200	F150	F50
常年水位以下部位	F200	F150	F100	F100	F50
<p>注 1：气候分区按最寒冷月平均气温（<math>t_a</math>）划分：严寒区 <math>t_a &lt; -10^{\circ}\text{C}</math>；寒冷区 <math>-10^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq -3^{\circ}\text{C}</math>；温和区 <math>t_a &gt; -3^{\circ}\text{C}</math>；</p> <p>注 2：年冻融循环次数分别按一年内气温从 <math>+3^{\circ}\text{C}</math> 以上降至 <math>-3^{\circ}\text{C}</math> 以下，然后回升到 <math>+3^{\circ}\text{C}</math> 以上的交替次数，或一年中日平均气温低于 <math>-3^{\circ}\text{C}</math> 期间设计预定水位的涨落次数统计，取二者中最大值；</p> <p>注 3：混凝土的抗冻等级应按《水工混凝土试验规程》（SD 105—82）规定的快冻试验方法确定，也可采用 90d 或 180d 龄期的试件测定。</p>					

7.2.5 混凝土防渗面板或心墙与坝体的连接可采用联系钢筋或将相邻砌体砌成毛糙面。混凝土防渗心墙距上游坝面宜为 0.5～2.0m。

7.2.6 混凝土防渗面板或心墙宜嵌入建基面 1～2m，并与坝基防渗设施连成整体。

7.3 坝体自身防渗

7.3.1 用一、二级配混凝土作胶凝材料、使用机械振捣的砌石坝，宜采用坝体自身防渗。同时应采用钻孔检查压水透水率，如果压水试验达不到要求，应进行灌浆处理。

7.3.2 高度低于 50m、用水泥砂浆砌筑粗料石、迎水面用高强度水泥砂浆勾深缝的砌石坝，可采用坝体自身防渗。

7.3.3 利用坝体自身防渗时，应对坝体与地基的连接作出防渗设计。

7.4 横缝、止水和排水

7.4.1 砌石重力坝的混凝土防渗面板应设伸缩缝，缝距宜为

10~15m。如果坝体设横缝，混凝土面板和心墙的分缝应与坝体横缝按一定间距协调一致。

**7.4.2** 砌石拱坝混凝土防渗面板的横缝间距宜为 10~15m，心墙的横缝间距宜为 10~15m，或经论证确定，并与坝身横缝的形式和部位协调一致。

**7.4.3** 混凝土防渗面板和心墙的伸缩缝应设置可靠止水。高坝的混凝土防渗面板应设两道止水片，中、低坝的止水可适当简化。

止水材料可采用紫铜片、塑料止水带、橡胶止水带等，应结合工作水头、气候条件、施工等因素合理选用。

**7.4.4** 横缝止水片宜埋入基岩 30~50cm，必要时插锚筋以保证混凝土与基岩的结合。

**7.4.5** 陡坡段坝体与基岩的接触面止水，可采用接触灌浆、设置止水片等方法。

**7.4.6** 砌石重力坝横缝止水后面宜视需要设置竖向排水孔，通至下层排水廊道或坝体水平排水系统。渗入的水汇入集水井通过自排或水泵抽排排向下游。

## 8 坝基处理

**8.0.1** 砌石坝的地基处理设计，应根据地质条件、地基与其上部结构之间的相互关系、枢纽布置和施工方法等因素综合研究确定。地基处理后应满足强度、稳定、刚度和防渗、耐久的要求。

**8.0.2** 砌石坝的建基面应根据坝体稳定、地基应力、岩体的物理力学性质、岩体类别、基础变形和稳定性、上部结构对基础的要求、基础加固处理效果及施工工艺、工期和费用等技术经济比较确定，原则上应在考虑基础加固处理后，在满足坝的强度和稳定的基础上，减少开挖量。

坝高超过 100m 时，宜建在新鲜、微风化或弱风化下部基岩上；坝高 100~50m 时，宜建在微风化至弱风化中部基岩上；坝高小于 50m 时，宜建在弱风化中部至上部基岩上。两岸地形较高的坝段，宜适当放宽。

**8.0.3** 岩溶地区和坝基范围内有较大的软弱破碎带时，应有专门的坝基处理设计，必要时应对坝体一定范围内基岩的防风化处理作出设计。

岩溶地区的防渗处理方式有防渗帷幕灌浆和防渗墙两类，应根据溶洞的规模、溶缝透水性程度等条件选定。当坝基存在连通上、下游的溶洞，且埋藏不深或施工条件许可时，也可采用开挖回填混凝土进行处理。当坝基帷幕轴线上存在连通上、下游的岩溶洞穴或强透水溶缝，且埋藏较深不宜开挖时，可采取逐层洞挖、逐个回填混凝土形成连续防渗墙，也可采用槽式洞挖后回填混凝土形成防渗墙。

对于较大的软弱破碎带，可采用挖除、混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土塞、防渗墙、水泥灌浆或超细水泥灌浆、化学灌浆等。

**8.0.4** 砌石重力坝坝段基础利用岩面的上、下游高差不宜过大，

宜略向上游倾斜；在平行坝轴线方向宜开挖成有一定宽度的台阶状。

砌石拱坝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大时，也可采用半径向面。岸坡平行于轴线方向，不应有大的坡角及台阶。整个坝基利用岩面的纵坡应平顺，无突变。

**8.0.5** 坝基开挖设计中，应对爆破提出要求。在建基面与砌石坝之间宜视需要设置混凝土垫层。

**8.0.6** 砌石重力坝的坝基处理设计，可参照 SL 319—2005 的有关规定执行；砌石拱坝的坝基处理设计，可参照 SL 282—2003 的有关规定执行。

# 9 坝体构造

## 9.1 坝顶布置和交通

9.1.1 坝顶上游防浪墙墙顶的高程与正常蓄水位或校核洪水位的高差，应按公式（9.1.1）计算，应选择两者中防浪墙顶高程的高者作为选定高程。

$$\Delta h = h_b + h_z + h_c \tag{9.1.1}$$

式中  $h_b$ ——波浪高，按本规范附录 C.4 确定，m；  
 $h_z$ ——波浪中心线至正常蓄水位或校核洪水位的高差，按本规范附录 C.4 确定，m；  
 $h_c$ ——安全超高，按表 9.1.1 采用，m。

表 9.1.1 安全超高  $h_c$  值

相应水位	坝 的 安 全 级 别	
	2	3
正常蓄水位（m）	0.5	0.4
校核洪水位（m）	0.4	0.3

9.1.2 坝顶结构应满足设备布置、检修、交通和观测等方面的要求，注意安全、适用、经济、美观。

溢流坝段坝顶应根据需要设置交通桥或工作桥。

坝高 50m 以上的非溢流坝坝顶宽度不宜小于 3m。

9.1.3 防浪墙可采用浆砌石、混凝土或钢筋混凝土结构，应与坝体连成整体，两端与坝肩基岩相接。墙身应有足够的强度，其高度可为 1.2m。

9.1.4 砌石坝的下游面可视需要设置坝后桥。

## 9.2 坝内廊道和孔洞

9.2.1 坝体内应视需要设置廊道和孔洞，廊道和孔洞周围可采



用钢筋混凝土结构。廊道和孔洞应统一布置，并尽量设在坝体应力较小的部位。如坝体内廊道、孔洞立体交叉时，其净距不宜小于 3m。高度不大的薄拱坝坝体内可不设廊道。

**9.2.2** 纵向廊道的上游壁距上游坝面的距离宜为 0.05~0.10 倍坝面作用水头，且不得小于 3m。

坝基灌浆廊道底面距基岩面的距离不得小于 1.5 倍廊道宽度，廊道断面形状宜采用圆顶直墙形，宽度宜为 2.5~3.0m，高度宜为 3~4m。岸坡纵向廊道的坡度不宜陡于 45°。

**9.2.3** 坝基排水廊道，宜在基岩面或靠近基岩面布置。廊道宽度宜为 1.2~2.5m，高度宜为 2.2~3.0m。

**9.2.4** 纵向检查观测廊道的设置，应与相应的设施要求相配合。空腹重力坝的检查观测廊道宜与空腹接通，并通至坝外。

**9.2.5** 当需要布置多层廊道时，层间高差宜为 20~40m，各层廊道均应相互连通。

**9.2.6** 廊道内应设可靠的照明和排水设施，并应作好安全保护。

**9.2.7** 坝内埋设监测仪器时，宜在坝外设置观测房，将电缆引入观测房内集中观测。

### **9.3 坝体分缝、排水和基础垫层**

**9.3.1** 砌石坝根据地形、地质、温度等因素，可设置沉降或温度横缝。局部施工缝可根据需要设置。砌石重力坝横缝、拱坝底座水平缝应设置止水。砌石拱坝横缝的构造应满足封拱灌浆的要求。

**9.3.2** 坝体内宜设置一排竖直排水管。当坝体设防渗墙时，坝体排水管应设在防渗墙后，两者净距不得小于 2m。当不设防渗墙时，排水管距上游坝面距离不得小于 3m，并与排水廊道位置相协调。排水管管距宜为 3~5m，内径宜为 15cm 左右，上端通入纵向廊道或坝顶（设盖板），下游接入纵向检查廊道或水平排水管。水平排水管高差宜为 10~20m。

坝体排水管可采用如预制无砂混凝土管或改性塑料制成的盲

沟。混凝土溢流护面与坝体砌石的接触面上，可视需要设排水管通至坝后。

**9.3.3** 砌石坝建基面上可视需要设置刚度和相邻砌石体相近的混凝土垫层，厚度宜为 1m 左右。

## 10 安全监测设计

### 10.1 一般原则

**10.1.1** 砌石坝应根据坝的级别、高度、结构型式与特点、地形、地质条件等，设置必要的监测设施。监测工作应符合下列规定：

- 1 分别监视建筑物在施工期、蓄水期和运行期的工作状态与安全情况。
- 2 验证建筑物设计，指导工程施工。
- 3 积累科学研究的资料。

**10.1.2** 砌石坝安全监测设计可参照《混凝土坝安全监测技术规范（试行）》（SDL 336—89）的规定执行。

**10.1.3** 砌石坝安全监测范围，应包括坝体、坝基、坝肩以及对大坝安全有重大影响的近坝区岸坡和其他与大坝安全有直接关系的建筑物和设备。

**10.1.4** 安全监测设计应遵循下列原则：

- 1 应能全面、准确地反映建筑物在施工期、蓄水期及运行期的实际工作性态。
- 2 应结合影响大坝安全的主要问题，有针对性地设置监测项目和布置监测仪器。重要监测断面或部位的重点监测项目，宜采用两种以上的监测手段。
- 3 应选择性能稳定可靠、量程和精度满足监测要求的监测仪器和设备。采用的监测方法应技术成熟，便于操作。
- 4 宜采用先进技术或为后期技术改进留有余地。若采用自动化监测设备，同时应具备人工监测条件。

**10.1.5** 安全监测设计应符合下列要求：

- 1 应重视建筑物施工期和首次蓄水期的安全监测工作，及时取得主要监测项目的基准值，并应制定首次蓄水的监测工作计

划，若不具备监测条件，应采取相应的临时监测措施。蓄水过程中，应快速整理分析监测资料并及时反馈。

2 在布置安全监测设施的同时，应统筹安排监测站的布设，并为监测设施提供良好的监测条件。

3 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。

4 宜根据理论计算或模型试验成果，并参考类似工程经验，对主要监测项目提出预计的测值变化范围。

## **10.2 监测项目与监测设施布置**

**10.2.1** 砌石坝安全监测应设置必要的监测项目，仪器监测应和巡视检查相结合。

**10.2.2** 仪器监测分为常规监测和专门监测。各监测项目应符合下列规定：

1 常规监测包括环境量监测、变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测等内容。

2 专门监测项目指常规监测项目以外的监测项目，应根据工程需要，经论证后选设。

**10.2.3** 监测设施布置应符合下列要求：

1 环境量监测：主要包括水位、库水温、降水量、坝前淤积和下游冲刷等项目。监测设施布置可参照 SDL 336—89 的规定执行。

2 水平位移和挠度监测：重力坝坝体和坝基水平位移宜采用引张线法监测；若坝线较短，条件有利，坝体水平位移可采用视准线法监测。拱坝坝基水平位移宜采用导线法监测，有条件时亦可采用视准线法监测。近坝坡表层水平位移，可采用三角网或测边网、交会法、准直线法等方法监测。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。坝体挠度宜采用垂线法测设。

3 垂直位移监测：坝体和坝基的垂直位移，宜采用精密水准法测设，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。

4 渗流监测：坝基扬压力监测，按纵向和横向监测断面布设测压管和渗流计。纵向监测断面宜布置在防渗帷幕后第一排水幕线上，每个坝段宜布置一个测点。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坝段，测点数量不应少于3点。地质条件优良的薄拱坝，可不设扬压力监测设施。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，每个监测断面不应少于3个监测孔，孔深应达强透水层，并深入到筑坝前地下水位以下。渗漏量监测宜在坝基廊道内的排水沟上分段布置量水堰，分别监测坝基和坝体的渗漏量。

5 应力、应变的温度监测：监测面宜根据坝高、坝长、体形、坝体结构及地质条件选定，监测断面宜沿坝段中心布置。拱坝应选择最大拱座应力处布置监测截面，监测仪器集中布置于坝体各断面。温度监测坝段为监测系统的重点监测坝段，在能监测温度的其他仪器处，不应再布置温度计。重力坝监测坝段的中心断面上，宜按网格布置温度测点，拱坝根据坝高不同可布置3~7个监测断面，在受日照影响的下游坝面可适当布置坝面温度测点。

6 监测设施的布置及要求可参照 SDL 336—89 的规定执行。

#### 10.2.4 巡视检查应符合下列要求：

1 从施工期到运行期，均应对大坝及其附属建筑物定期进行巡视检查。在水库首次蓄水过程中、水库水位迅速消落期间、大洪水期间、坝区发生有感地震以及发生其他特殊情况时，应增加巡视检查次数。

2 发现大坝及附属建筑物损伤，或近坝区岸坡、地下水位、基础渗流等出现异常迹象时，应立即上报，加强观测和检查，并分析原因，研究处理措施。

3 巡视检查的项目可参照 SDL 336—89 的规定设置。

附录 A 砌石体主要力学指标

- A. 0. 1 几种石料的物理力学试验成果见表 A. 0. 1。
- A. 0. 2 砌石体的变形模量  $E_0$  及弹性模量  $E_e$  值见表 A. 0. 2。
- A. 0. 3 砌石体极限轴心抗压强度  $f_{cc}$  值见表 A. 0. 3。
- A. 0. 4 砌石体极限抗拉强度  $f_t$  值见表 A. 0. 4。
- A. 0. 5 砌石坝垫层混凝土与基岩接触面抗剪断及抗剪参数参考值见表 A. 0. 5。
- A. 0. 6 砌石体与垫层混凝土或砌石体本身的抗剪断参数及抗剪参数参考值见表 A. 0. 6。
- A. 0. 7 砌石体容许压应力值见表 A. 0. 7。

表 A. 0. 1 几种石料的物理力学试验成果

石料名称	干密度 $\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	线膨胀系数 $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /℃)	极限强度 (MPa)				弹性模量 $E_e$ (GPa)	备注
			干抗压 $R_d$	饱和抗压 $R_s$	抗拉 $f_t$	抗弯 $f_f$		
砂岩	2100~2400	9.02~11.2	45~100	40~60	1.0~3.0	4~8	4~12	主要参照四川红色砂岩试验资料
石灰岩	2600~2800	6.75~6.77	110~150	80~140	4.0~6.0	13~28	50~70	主要参照河南、湖南试验资料
花岗岩	2500~2700	5.6~7.34	90~160	72~150	4.0~8.0	10~22	30~60	主要参照湖南、广西、山东试验资料
石英岩 大理岩	2700~2800	6.5~10.12	100~120	80~100	4.5~6.0	6~16	20~30	主要参照陕西试验资料

表 A.0.2 砌石体的变形模量  $E_0$  及弹性模量  $E_e$  值

单位：GPa

砌石体 种类	石料饱和 抗压强度 $R_s$ (MPa)	胶凝材料标号强度 (MPa)											
		混 凝 土				水 泥 砂 浆							
		$\geq 15.0$		10.0		12.5		10.0		7.5		5.0	
		$E_0$	$E_e$	$E_0$	$E_e$	$E_0$	$E_e$	$E_0$	$E_e$	$E_0$	$E_e$	$E_0$	$E_e$
毛石砌 石体	$\geq 100$	6.5	11.5	6.0	11.0	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.0	7.0
	80	6.0	11.0	5.0	9.0	5.0	9.0	4.5	8.0	4.0	7.0	3.0	5.5
	60	5.0	9.0	4.5	8.0	3.5	6.5	3.0	5.5	3.0	5.5	2.5	4.5
	50	4.0	7.0	4.0	7.0	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5
	40	3.5	6.5	3.5	6.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
	30	3.0	5.5	3.0	5.5	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
毛石占 70%、块 石占 30%的 砌石体	$\geq 100$	7.9	14.1	7.4	13.4	7.4	13.4	6.7	12.4	6.2	11.1	5.2	8.7
	80	6.9	12.5	6.1	11.0	6.1	11.0	5.6	10.0	4.9	8.7	3.9	7.2
	60	5.6	10.5	5.3	9.4	4.3	7.9	3.8	6.9	3.6	6.6	3.1	5.6
	50	4.3	7.6	4.3	7.6	2.5	4.4	2.3	4.1	2.3	4.1	2.3	4.1
	40	3.7	6.7	3.7	6.7	2.0	3.4	1.8	3.1	1.8	3.1	1.8	3.1
	30	3.2	5.8	3.2	5.8	1.3	2.5	1.3	2.5	1.3	2.5	1.3	2.5
毛石占 30%、块 石占 70%的 砌石体	$\geq 100$	9.7	17.5	9.2	16.6	9.2	16.6	8.7	15.6	7.8	13.9	6.1	10.9
	80	8.1	14.5	7.5	13.6	7.5	13.6	7.0	12.6	6.1	10.9	5.1	9.4
	60	6.4	11.5	6.3	9.4	4.3	9.7	4.8	8.7	4.4	8.0	3.9	7.0
	50	4.7	8.4	4.7	8.4	3.1	5.6	2.7	4.9	2.7	4.9	2.7	4.9
	40	3.9	6.9	3.9	6.9	2.6	4.6	2.2	3.9	2.2	3.9	2.2	3.9
	30	3.4	6.2	3.4	6.2	1.7	3.1	1.7	3.1	1.7	3.1	1.7	3.1
块石 砌石 体	$\geq 100$	11.0	20.0	10.5	19.0	10.5	19.0	10.0	18.0	9.0	16.0	7.0	12.5
	80	9.0	16.0	8.5	15.5	8.5	15.5	8.0	14.5	7.0	12.5	6.0	11.0
	60	7.0	12.5	7.0	12.5	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.5	8.0
	50	5.0	9.0	5.0	9.0	3.5	6.5	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5
	40	4.0	7.0	4.0	7.0	3.0	5.5	2.5	4.5	2.5	4.5	2.5	4.5
	30	3.5	6.5	3.5	6.5	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5
粗料 石砌 石体	$\geq 100$	10.0	18.0	9.5	17.0	9.5	17.0	9.0	16.0	8.0	14.5	7.0	12.5
	80	8.0	14.5	8.0	14.5	7.5	13.5	7.0	12.5	6.5	11.5	5.5	10.0
	60	7.5	13.5	7.0	12.5	6.5	11.5	6.0	11.0	5.5	10.0	4.5	8.0
	50	6.5	11.5	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.5	8.0	4.0	7.0
	40	5.5	10.0	5.0	9.0	4.0	7.0	4.0	7.0	4.0	7.0	3.5	6.5
	30	4.0	7.0	4.0	7.0	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5
注：胶凝材料为混凝土的采用机械振捣、直接砌筑法砌筑的毛石砌石体， $E_0$ 、 $E_e$ 值可按表列毛石砌石体提高 10% 左右。													

表 A.0.3 砌石体极限轴心抗压强度  $f_{cc}$  值 单位：MPa

砌石体种类	石料饱和 抗压强度 $R_s$ (MPa)	胶凝材料标号强度 (MPa)					
		混 凝 土		水 泥 砂 浆			
		15.0	10.0	12.5	10.0	7.5	5.0
毛石砌 石体	$\geq 100$	14.4	11.2	11.2	9.6	8.0	6.8
	80	13.2	10.2	10.2	8.8	7.5	6.0
	60	11.6	8.8	8.8	7.6	6.4	5.2
	50	10.4	8.0	8.0	6.8	6.0	4.8
	40	9.2	7.0	7.0	6.0	5.2	4.4
	30	8.0	6.0	6.0	5.2	4.4	3.6
毛石占 70%、块 石占 30%的 砌石体	$\geq 100$	17.3	13.5	13.5	11.5	9.6	8.1
	80	15.8	12.3	12.3	10.6	8.9	7.2
	60	13.9	10.6	10.6	9.2	7.7	6.3
	50	12.5	9.6	9.6	8.2	7.2	5.8
	40	10.8	8.4	8.4	7.2	6.3	5.2
	30	8.8	7.2	7.2	6.3	5.2	4.4
毛石占 30%、块 石占 70%的 砌石体	$\geq 100$	21.2	16.5	16.5	14.1	11.6	9.9
	80	19.4	15.0	15.0	13.0	10.8	8.8
	60	16.9	13.0	13.0	11.2	9.5	7.7
	50	15.2	11.6	11.6	10.2	8.8	7.0
	40	13.0	10.4	10.4	8.8	7.7	6.4
	30	10.0	8.8	8.8	7.7	6.4	5.6
块石 砌石 体	$\geq 100$	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
粗料 石砌 石体	$\geq 100$	26.4	22.0	22.0	19.6	17.2	14.8
	80	24.4	19.9	19.9	18.0	15.6	13.7
	60	21.2	17.2	17.2	15.8	13.8	12.0
	50	18.9	15.3	15.3	14.4	12.8	10.8
	40	15.4	13.2	13.2	12.6	11.2	9.6
	30	10.8	10.8	10.8	10.8	9.6	8.4
注：胶凝材料为混凝土的毛石砌石体采用机械振捣、直接砌筑法 $f_{cc}$ 值可提高 5%~10%。							



表 A.0.4 砌石体极限抗拉强度  $f_t$  值      单位：MPa

类别	破坏形式	砌体种类	$f_t$ 计取方法	胶凝材料标号强度（MPa）				
				15.0	12.5	10.0	7.5	5.0
轴心 抗拉	沿灰缝接 触面通缝	各种砌石体	$f_t$	0.42	0.36	0.30	0.24	0.18
	沿灰缝接 触面齿缝	毛石砌石体	$0.7 \times 2f_t$	0.59	0.50	0.42	0.34	0.25
		粗料石、块石 砌石体	$r \times 2f_t$	0.84	0.72	0.60	0.48	0.36
弯曲 抗拉	沿灰缝接 触面通缝	各种砌石体	$1.9f_t$	0.80	0.68	0.57	0.46	0.34
	沿灰缝接 触面齿缝	毛石砌石体	$1.9 \times 0.7 \times 2f_t$	1.12	0.96	0.80	0.64	0.48
		粗料石、块石 砌石体	$1.9r \times 2f_t$	1.60	1.37	1.14	0.91	0.68
<p>注 1：表中 <math>r</math> 为砌合系数，其值等于石料砌合长度与每层砌石厚度之比，制表时假定粗料石、块石砌石体的砌合长度等于每层砌石厚度，因而 <math>r=1</math>。当 <math>r \neq 1</math> 时，应按实际情况采用；</p> <p>注 2：通过极限抗拉强度试验，取得砌石体沿灰缝接触面通缝破坏时的极限抗拉强度 <math>f_t</math>，然后按表中所列砌石体抗拉强度计取方法计取其他类别的破坏形式时的极限抗拉强度 <math>f_t</math> 值；</p> <p>注 3：根据毛石砌石体纯弯曲抗拉试验结果，采用机械振捣、直接砌筑法砌筑的毛石砌石体，极限抗拉强度 <math>f_t</math> 值可提高 10% 左右。</p>								

表 A.0.5 砌石坝垫层混凝土与基岩体接触面  
抗剪断及抗剪参数参考值

岩体 工程 分类	岩体综 合评价	坝 基 岩 体 特 征	抗剪断参数		抗剪参数
			$f'$	$c'$ （MPa）	$f$
I	很好的 岩体	完整、新鲜、致密坚硬、裂隙不发育、巨厚层、厚层状的岩体。饱和抗压强度 $R_s > 100\text{MPa}$ ，变形模量 $E_0 > 20\text{GPa}$ ，声波纵波速度 $V_p > 5\text{km/s}$	1.2~1.5	1.3~1.5	0.7~0.75
II	好的 岩体	完整、新鲜、坚硬、微裂隙、厚层状的岩体。饱和抗压强度 $R_s = 60 \sim 100\text{MPa}$ ，变形模量 $E_0 = 10 \sim 20\text{GPa}$ ，声波纵波速度 $V_p = 4 \sim 5\text{km/s}$	1.0~1.3	1.1~1.3	0.6~0.7

表 A.0.5 (续)

岩体工程分类	岩体综合评价	坝基岩体特征	抗剪断参数		抗剪参数
			$f'$	$c'$ (MPa)	$f$
Ⅲ	中等岩体	完整性较差、微风化、中等坚硬、微裂隙、层状的岩体。饱和抗压强度 $R_s=30\sim60\text{MPa}$ ，变形模量 $E_0=5\sim10\text{GPa}$ ，声波纵波速度 $V_p=3\sim4\text{km/s}$	0.9~1.2	0.7~1.1	0.5~0.6
Ⅳ	较差的岩体	完整性差、弱风化、较软弱、有裂隙、中厚层状的岩体，或节理不发育、层理片理较发育、易风化的、薄层状的岩体。饱和抗压强度 $R_s=15\sim30\text{MPa}$ ，变形模量 $E_0=2\sim5\text{GPa}$ ，声波纵波速度 $V_p=2\sim3\text{km/s}$	0.7~0.9	0.3~0.7	0.35~0.5
<p>注 1：本表不包括基岩内有软弱夹层或软弱结构面的情况，表中岩体即坝基基岩；</p> <p>注 2：垫层混凝土与基岩接触面上的抗剪断参数不得超过垫层混凝土本身的抗剪断参数值，垫层混凝土标号强度为 15.0MPa；</p> <p>注 3：对于Ⅰ、Ⅱ类岩体，如建基面起伏差较大时，则接触面上的抗剪断参数可采用垫层混凝土的抗剪断参数。</p>					

表 A.0.6 砌石体与垫层混凝土或砌石体本身的抗剪断参数及抗剪参数参考值

砌石体所用石料饱和抗压强度 $R_s$ (MPa)	抗剪断、抗剪参数类别	胶凝材料标号强度 (MPa)					
		混 凝 土		水 泥 砂 浆			
		15.0	10.0	12.5	10.0	7.5	5.0
>100	$f'$	1.1~1.4	1.0~1.3	1.0~1.3	0.9~1.2	0.8~1.0	0.7~0.9
	$c'$ (MPa)	1.0~1.1	0.8~0.9	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.5~0.6
	$f$	0.65~0.75	0.65~0.75	0.65~0.75	0.65~0.75	0.55~0.65	0.5~0.6
60~100	$f'$	0.9~1.2	0.8~1.1	0.8~1.1	0.7~1.0	0.6~0.8	0.5~0.7
	$c'$ (MPa)	0.8~1.0	0.6~0.7	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.6	0.4~0.5
	$f$	0.55~0.65	0.55~0.65	0.55~0.65	0.55~0.65	0.5~0.6	0.4~0.5
30~60	$f'$	0.8~1.1	0.7~0.9	0.7~0.9	0.6~0.8	0.5~0.7	0.4~0.6
	$c'$ (MPa)	0.5~0.8	0.4~0.6	0.4~0.7	0.4~0.6	0.3~0.4	0.2~0.3
	$f$	0.45~0.55	0.45~0.55	0.45~0.55	0.45~0.55	0.4~0.5	0.3~0.4
注：表中 $c'$ 值在采用时宜根据工程具体情况加以修正。							

表 A.0.7 砌石体容许压应力值 单位：MPa

砌石体 种类	石料饱和 抗压强度 $R_s$ (MPa)	基本荷载组合						特殊荷载组合					
		胶凝材料标号强度 (MPa)						胶凝材料标号强度 (MPa)					
		混凝土		水泥砂浆				混凝土		水泥砂浆			
		15.0	10.0	12.5	10.0	7.5	5.0	15.0	10.0	12.5	10.0	7.5	5.0
毛石砌 石体	$\geq 100$	5.1	4.0	4.0	3.4	2.9	2.4	6.0	4.7	4.7	4.0	3.3	2.8
	80	4.7	3.6	3.6	3.1	2.6	2.1	5.5	4.2	4.2	3.7	3.0	2.5
	60	4.1	3.1	3.1	2.7	2.3	1.9	4.8	3.7	3.7	3.2	2.7	2.2
	50	3.7	2.9	2.9	2.4	2.1	1.7	4.3	3.3	3.3	2.8	2.5	2.0
	40	3.3	2.4	2.4	2.1	1.9	1.6	3.8	2.8	2.8	2.5	2.2	1.8
	30	2.9	2.1	2.1	1.9	1.6	1.3	3.3	2.5	2.5	2.2	1.8	1.5
毛石占 70%、块 石占 30%的 砌石体	$\geq 100$	6.2	4.8	4.8	4.1	3.4	2.9	7.2	5.6	5.6	4.8	4.0	3.4
	80	5.7	4.3	4.3	3.8	3.1	2.6	6.6	5.1	5.1	4.5	3.6	3.1
	60	4.9	3.7	3.7	3.3	2.8	2.3	5.8	4.5	4.5	3.8	3.2	2.7
	50	4.4	3.4	3.4	2.9	2.5	2.1	5.1	4.0	4.0	3.4	3.0	2.4
	40	3.8	2.9	2.9	2.6	2.3	1.9	4.5	3.5	3.5	3.0	2.7	2.2
	30	3.2	2.6	2.6	2.3	1.9	1.6	3.7	3.0	3.0	2.7	2.2	1.9
毛石占 30%、块 石占 70%的 砌石体	$\geq 100$	7.6	5.9	5.9	5.0	4.2	3.5	8.8	6.9	6.9	5.9	4.8	4.1
	80	7.0	5.3	5.3	4.6	3.8	3.2	8.1	6.2	6.2	5.5	4.4	3.8
	60	6.1	4.6	4.6	4.0	3.4	2.7	7.0	5.4	5.4	4.7	4.0	3.3
	50	5.4	4.2	4.2	3.6	3.2	2.5	6.3	4.8	4.8	4.2	3.7	2.9
	40	4.6	3.7	3.7	3.2	2.7	2.3	5.3	4.1	4.1	3.7	3.3	2.6
	30	3.6	3.2	3.2	2.7	2.3	2.0	4.1	3.7	3.7	3.3	2.6	2.3
块石 砌石 体	$\geq 100$	8.6	6.7	6.7	5.7	4.7	4.0	10.0	7.8	7.8	6.7	5.5	4.7
	80	7.9	6.0	6.0	5.3	4.3	3.6	9.2	7.0	7.0	6.2	5.0	4.2
	60	6.9	5.2	5.2	4.6	3.9	3.1	8.0	6.2	6.2	5.3	4.5	3.7
	50	6.1	4.7	4.7	4.1	3.6	2.9	7.1	5.5	5.5	4.8	4.2	3.3
	40	5.1	4.2	4.2	3.6	3.1	2.6	6.0	4.9	4.9	4.2	3.7	3.0
	30	3.9	3.6	3.6	3.1	2.6	2.3	4.5	4.2	4.2	3.7	3.0	2.7
粗料 石砌 石体	$\geq 100$	9.4	7.9	7.9	7.0	6.1	5.3	11.0	9.2	9.2	8.2	7.2	6.2
	80	8.7	7.0	7.0	6.4	5.6	4.9	10.2	8.2	8.2	7.5	6.5	5.5
	60	7.5	6.1	6.1	5.7	5.0	4.3	8.8	7.0	7.0	6.5	5.8	5.0
	50	6.6	5.5	5.5	5.1	4.6	3.9	7.8	6.2	6.2	6.0	5.3	4.5
	40	5.5	4.8	4.8	4.6	4.0	3.4	6.4	5.4	5.4	5.2	4.7	4.0
	30	3.9	3.9	3.9	3.9	3.4	3.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.0	3.5
注：本表所列数值为按 28d 龄期设计的砌石体试验资料分析所得。													

## **附录 B 砌石体变形（弹性）模量、 抗压强度试验方法**

### **B. 1 试验目的和基本原则**

**B. 1. 1** 砌石体变形（弹性）模量、抗压强度试验的目的是测定砌石体抗压变形（弹性）模量和抗压强度。

**B. 1. 2** 砌石体变形（弹性）模量、抗压强度试验的基本原则是在保持胶凝材料和砌筑方法与原型相似的情况下，可将石料尺寸缩小，砌筑一定尺寸的立方体或棱柱体试体进行试验。在石料形状与上坝石料相似的情况下，石料边长应小于试体边长的  $1/3$ 。

### **B. 2 试体尺寸**

**B. 2. 1** 室内试验的试体边长不得小于  $50\text{cm}$ （试验受压面积不小于  $2500\text{cm}^2$ ）。在平硐内或试坑内进行现场试验，试体边长应大于  $70.7\text{cm}$ （受压面积应大于  $5000\text{cm}^2$ ）。

**B. 2. 2** 试体高度与边长的比值宜为  $1.2\sim 1.5$ 。

### **B. 3 试体砌筑**

**B. 3. 1** 同一组试验不应少于 5 个试体，同一组胶凝材料和砌筑方法应与施工方法一致。在特制的试模内，采用坐浆法砌筑时宜分四浆三石七层砌筑；当试体高度与边长的比值为  $1.5$  时，宜分五浆四石九层砌筑。采用直接砌筑法时石料不应少于 3 层。

**B. 3. 2** 在砌筑试体的同时，胶凝材料应按标准试件成型要求，制备一定数量的试件，试验前定期测定其抗压强度。

### **B. 4 试验设备及安装**

**B. 4. 1** 室内试验是将已砌筑好的试体安放在  $5000\text{kN}$  材料试验机上，试验可按《水工混凝土试验规程》（SD 105—82）的规定

进行。

**B. 4. 2** 现场试验设备主要由加载系统和量测系统组成。加载系统由液压千斤顶、电动油泵、高压油管、压力表和具有足够刚度的传力板等组成，量测系统由位移传感器（百分表）、液压传感器、声发射仪、非金属超声检测仪、函数记录仪和微机等组成。

在已砌筑好的试体上安装加载设备和量测仪表。

如试验在试坑内进行，试体应倒放，水平向安装加载设备和量测仪表。

## B. 5 试 验 方 法

**B. 5. 1** 试验前应用超声检测仪检测试体初始声波波速。

**B. 5. 2** 试验可采用分级加载或逐级一次加载法。先加压至第一次声发射信号出现或声波波速开始降低时退压至零，然后重新匀速加载直至试体破坏时即终止试验。试验过程中二次仪表或微机采样监测试体在力作用下的全过程。如用百分表测读变形，则应分级加载。

## B. 6 试 验 成 果

**B. 6. 1** 应将力值和变形值换算成单位压力  $\sigma$  和变形量  $s$ ，标记于记录仪绘制的  $\sigma \sim s$  过程线图上。

**B. 6. 2** 应计算声波波速  $v_p$ ，绘制  $\sigma \sim v_p$  关系曲线图。

**B. 6. 3** 根据  $\sigma \sim s$ 、 $\sigma \sim v_p$ 、 $\sigma \sim A_E$ （声发射率）的相关曲线，可准确地判定初裂（比例值）、裂纹扩展（屈服值）、破坏（峰值）三个阶段的特征点。

**B. 6. 4** 应按公式（B. 6. 4 - 1）和公式（B. 6. 4 - 2）分别计算砌石体变形模量  $E_0$  和砌石体弹性模量  $E_e$ 。

$$E_0 = \frac{P_2 - P_1}{A} \times \frac{L}{\Delta_{0L}} \times 10^{-5} \quad (\text{B. 6. 4 - 1})$$

$$E_e = \frac{P_2 - P_1}{A} \times \frac{L}{\Delta_{eL}} \times 10^{-5} \quad (\text{B. 6. 4 - 2})$$

式中  $E_0$ ——抗压变形模量，GPa；  
 $E_e$ ——抗压弹性模量，GPa；  
 $P_1$ ——加压荷载，N；  
 $P_2$ ——声波波速开始降低或声发射信号出现时的荷载，N；  
 $A$ ——试体受压面积， $\text{cm}^2$ ；  
 $L$ ——量测变形的标距，cm；  
 $\Delta_{0L}$ —— $P_1 \sim P_2$  之间的全变形，cm；  
 $\Delta_{eL}$ —— $P_1 \sim P_2$  之间的弹性变形，cm。

**B. 6. 5** 应按公式 (B. 6. 5) 计算泊松比  $\mu$ ：

$$\mu = \frac{\epsilon_{\text{横}}}{\epsilon_{\text{纵}}} \quad (\text{B. 6. 5})$$

式中  $\mu$ ——砌石体泊松比；  
 $\epsilon_{\text{纵}}$ ——试体纵向应变；  
 $\epsilon_{\text{横}}$ ——试体横向应变。

**B. 6. 6** 应按公式 (B. 6. 6) 计算砌石体抗压强度  $f_{cc}$ ：

$$f_{cc} = \frac{p_{\text{max}}}{A} \times 10^{-2} \quad (\text{B. 6. 6})$$

式中  $f_{cc}$ ——砌石体抗压强度，MPa；  
 $p_{\text{max}}$ ——最大荷载，N。

## 附录 C 荷载计算公式

### C.1 静水压力

**C.1.1** 垂直作用于坝体表面某点处的静水压力强度  $p$ ，可按公式 (C.1.1) 计算：

$$p = \gamma_w H \quad (\text{C.1.1})$$

式中  $p$ ——计算点处静水压力强度，kPa；

$H$ ——计算点处的作用水头，m；

$\gamma_w$ ——水（或含泥沙水）的重度，kN/m<sup>3</sup>。

**C.1.2** 作用于坝面单位宽度上的水平静水压力  $P$ ，可按公式 (C.1.2) 计算：

$$P = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \quad (\text{C.1.2})$$

式中  $P$ ——计算点处单位宽度上的水平静水压力，kN/m。

### C.2 扬压力

**C.2.1** 作用于坝基面的扬压力的计算应符合下列规定：

**1** 当坝基设有防渗帷幕和排水孔时，在坝踵处的扬压力作用水头为  $H_1$ （上游水深），排水孔线上为  $H_2 + \alpha (H_1 - H_2)$ ，坝趾处为  $H_2$ （下游水深），其间依次以直线连接。强度折减系数  $\alpha$  值可根据坝基地质情况确定，一般情况下河床坝段采用 0.25，岸坡坝段采用 0.35，见图 C.2.1 a)；对于两岸水文地质和工程地质条件较复杂者，应进行研究论证，以确定合适的  $\alpha$  值。

**2** 当坝基地质条件良好，未设防渗帷幕，但设有排水孔时，在坝踵处的扬压力为  $H_1$ ，排水孔线上扬压力为  $H_2 + \alpha_2 (H_1 - H_2)$ ，坝趾处扬压力为  $H_2$ ，其间依次以直线连接，强度折减系数  $\alpha_2$  值宜采用 0.3~0.45，见图 C.2.1 b)。

3 当坝基设有防渗帷幕，但未设排水孔时，在坝踵处的扬压力为  $H_1$ ，帷幕中心线上扬压力为  $H_2 + \alpha_1 (H_1 - H_2)$ ，坝趾处扬压力为  $H_2$ ，其间依次以直线连接，强度折减系数  $\alpha_1$  值宜采用 0.5~0.7，见图 C.2.1 c)。

4 当坝基未设防渗帷幕和排水孔时，在坝踵处为  $H_1$ ，坝趾处为  $H_2$ ，其间以直线连接，见图 C.2.1 d)。

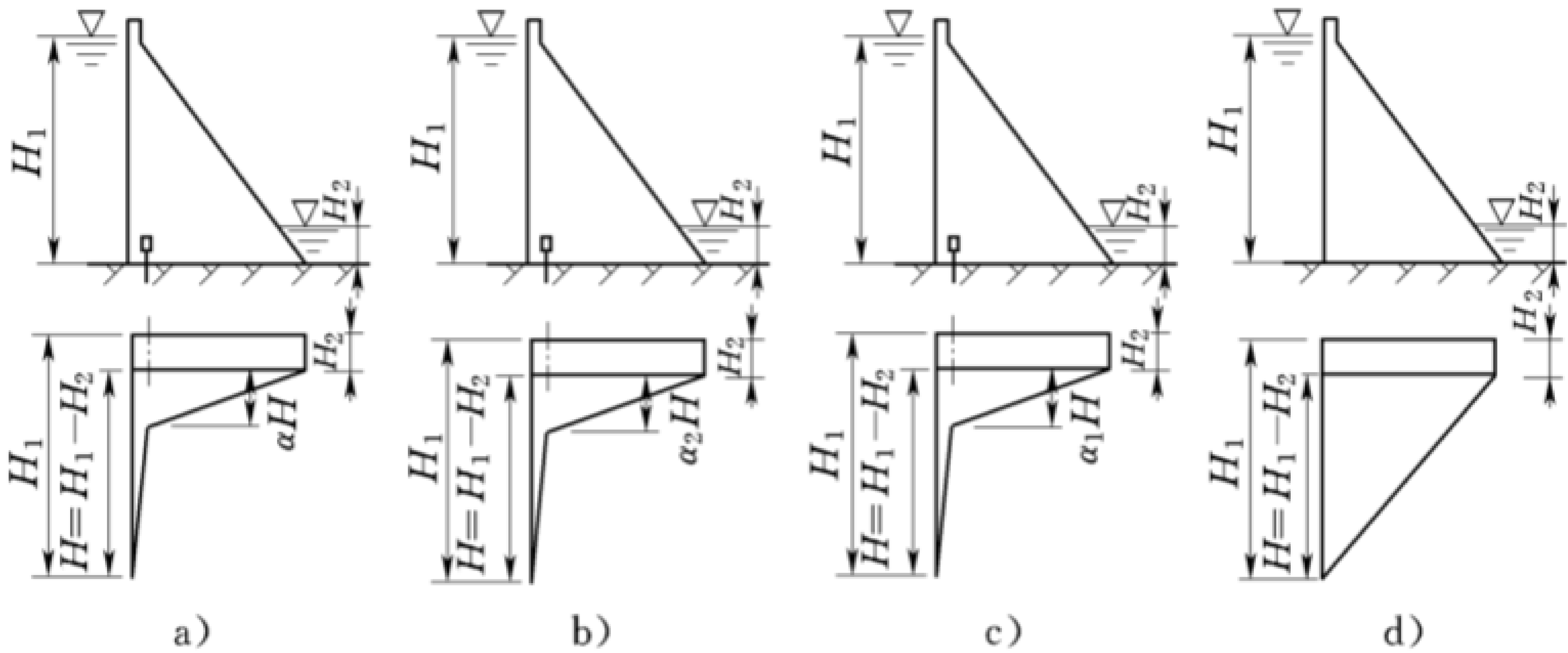


图 C.2.1 实体砌石坝坝基扬压力分布图

- a) 设有防渗帷幕和排水孔；b) 未设防渗帷幕但有排水孔；  
c) 设有防渗帷幕未设排水孔；d) 未设防渗帷幕和排水孔

C.2.2 空腹重力坝坝基扬压力由两部分组成：一部分为作用在坝踵至空腹上游边之间的扬压力，其大小及图形与 C.2.1 相同；另一部分为作用在空腹下游边至坝趾之间的扬压力，按空腹内基岩面是否有水的不同情况分别按图 C.2.2 中 a) 和 b) 采用。

C.2.3 岸坡坝段（包括岸坡拱座），因受岸坡地下水和三向渗流的影响，强度折减系数  $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  值宜较上述河床坝段适当提高。

C.2.4 当灌浆排水廊道底板高程较高，又无专门抽水设施而采用自流排水时，则扬压力不应低于廊道底板到坝基面的静水头。当坝基上设有多排排水廊道时，设计中可只考虑第一排廊道的作用。

C.2.5 作用于实体重力坝坝体内部的扬压力的计算，在上游坝



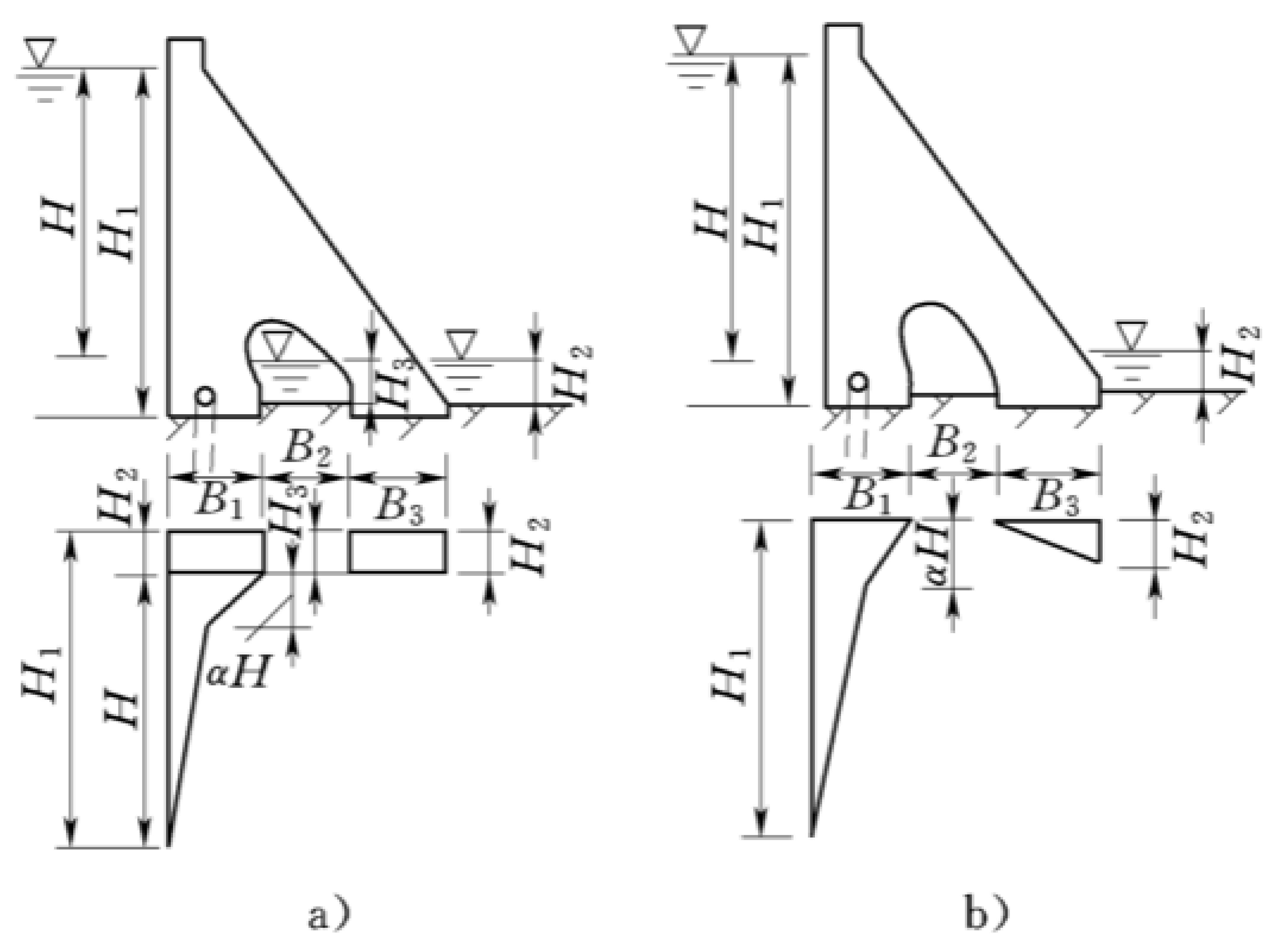


图 C.2.2 砌石空腹重力坝坝基扬压力分布图  
a) 空腹内有水；b) 空腹内无水

面处的扬压力为计算截面以上的上游水深  $H'_1$ ，在坝体排水管线  
上为  $H'_2 + \alpha_3 (H'_1 - H'_2)$ ，在下游坝面处的扬压力为计算截面  
以上的下游水深  $H'_2$ （当计算截面在下游水位以上时，取  $H'_2 =$   
0），其间以直线连接，强度折减系数  $\alpha_3$  值宜采用 0.15~0.25，  
见图 C.2.5a)。如未设坝体排水管，上游坝面处扬压力为  $H'_1$ ，  
下游坝面处扬压力为  $H'_2$ ，其间以直线连接，见图 C.2.5b)。

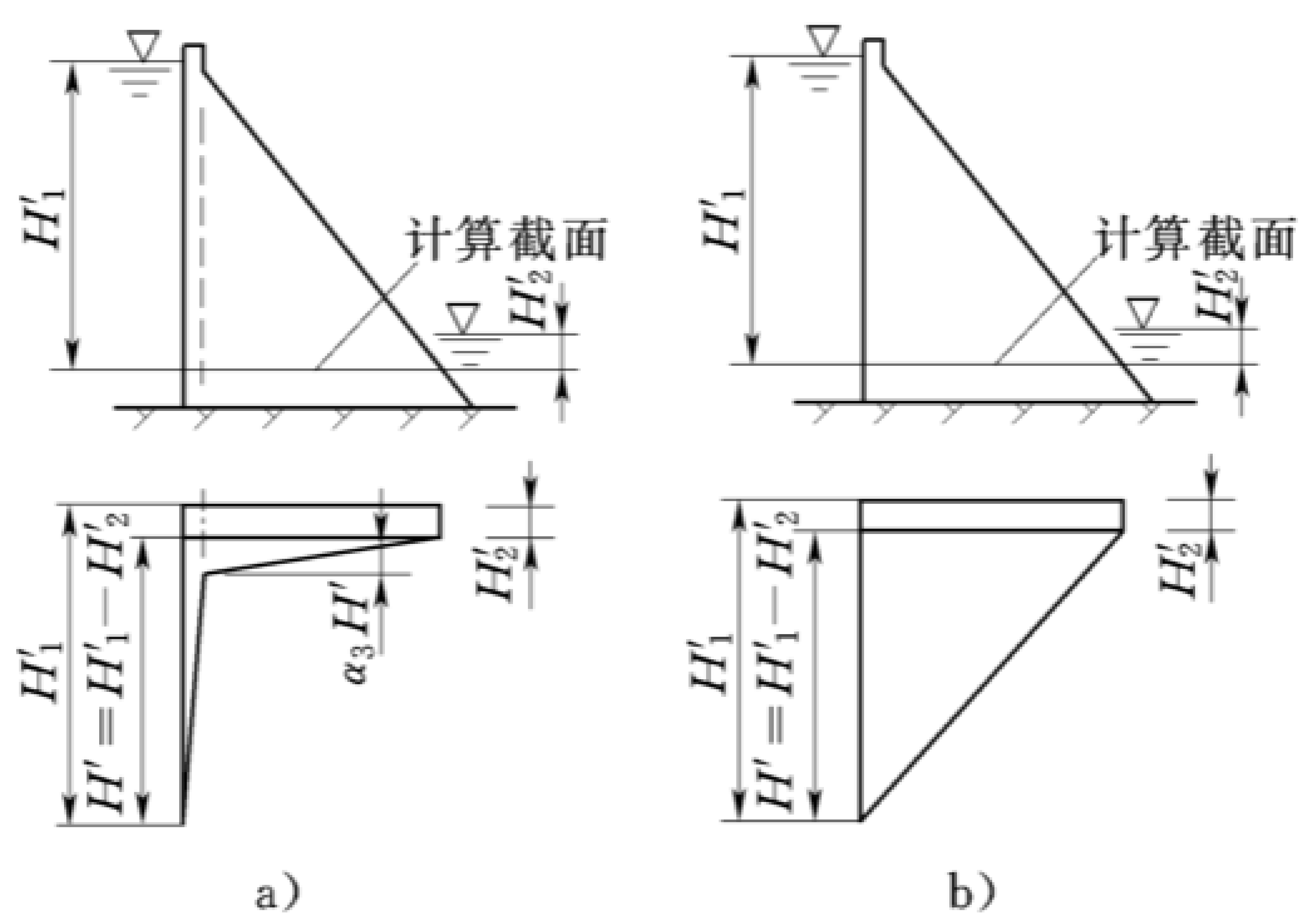


图 C.2.5 实体重力坝坝体内部扬压力图  
a) 设有排水管；b) 未设排水管

## C.3 泥 沙 压 力

**C.3.1** 作用于坝面单位宽度上的水平泥沙压力强度  $p_{sk}$ ，可按公式 (C.3.1-1) 和公式 (C.3.1-2) 计算：

$$p_{sk} = \gamma_{sb} h_s \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_s}{2} \right) \quad (\text{C.3.1-1})$$

$$\gamma_{sb} = \gamma_{sd} - (1 - n) \gamma_w \quad (\text{C.3.1-2})$$

式中  $p_{sk}$ ——泥沙压力强度，kPa；

$\gamma_{sb}$ ——泥沙的浮重度，kN/m<sup>3</sup>；

$\gamma_{sd}$ ——泥沙的干重度，kN/m<sup>3</sup>；

$\gamma_w$ ——水的重度，kN/m<sup>3</sup>；

$n$ ——泥沙的孔隙率；

$h_s$ ——坝前泥沙淤积高度，m；

$\varphi_s$ ——泥沙的内摩擦角，(°)。

**C.3.2** 作用于坝面单位宽度上的水平泥沙压力  $P_{sk}$ ，可按公式 (C.3.2) 计算：

$$P_{sk} = \frac{1}{2} \gamma_{sb} h_s^2 \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_s}{2} \right) \quad (\text{C.3.2})$$

式中  $P_{sk}$ ——泥沙压力，作用在距坝基以上  $\frac{1}{3}h_s$  处，kN/m。

## C.4 浪 压 力

**C.4.1** 浪高、波长按官厅水库公式 (C.4.1-1) 和公式 (C.4.1-2) 计算（适用于  $v_0 < 20\text{m/s}$  及  $D < 20\text{km}$  的山区峡谷水库）：

$$\frac{gh_b}{v_0^2} = 0.0076 v_0^{-\frac{1}{12}} \left( \frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3} \quad (\text{C.4.1-1})$$

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.33 v_0^{-\frac{7}{15}} \left( \frac{gD}{v_0^2} \right)^{4/15} \quad (\text{C.4.1-2})$$

式中  $h_b$ ——波高（当  $\frac{gD}{v_0^2} = 20 \sim 250$  时，为累积频率 5% 的波高

$h_{5\%}$ ；当  $\frac{gD}{v_0^2} = 250 \sim 1000$  时，为累积频率 10% 的波

高  $h_{10\%}$ ），m；

$L_m$ ——平均波长，m；

$v_0$ ——计算最大风速（基本组合可采用重现期 50 年的最大风速，特殊组合可采用多年平均年最大风速），m/s；

$D$ ——风区长度，m；

$g$ ——重力加速度， $9.81\text{m/s}^2$ 。

**C. 4. 2** 浪压力可近似按直墙式挡水建筑物的情况进行计算：

**1** 当坝前水深  $H_1 \geq H_{cr}$ ， $H_1 > L_m/2$  时，浪压力分布如图 C. 4. 2 a) 所示，单位长度上的浪压力可按下列公式计算：

$$P_{wk} = \frac{1}{4} \gamma_w L_m (h_{5\% \sim 10\%} + h_z) \quad (\text{C. 4. 2 - 1})$$

$$h_z = \frac{\pi h_{5\% \sim 10\%}^2}{L_m} \text{cth} \frac{2\pi H_1}{L_m} \quad (\text{C. 4. 2 - 2})$$

$$H_{cr} = \frac{L_m}{4\pi} \ln \frac{L_m + 2\pi h_{5\% \sim 10\%}}{L_m - 2\pi h_{5\% \sim 10\%}} \quad (\text{C. 4. 2 - 3})$$

式中  $P_{wk}$ ——单位长度坝面上的浪压力，kN/m；

$h_{5\% \sim 10\%}$ ——累积频率 5%~10% 的波高，m；

$h_z$ ——波浪中心线至计算水位的高度，m；

$H_{cr}$ ——使波浪破碎的临界水深，m。

**2** 当坝前水深  $H_1 \geq H_{cr}$ ， $H_1 \leq L_m/2$  时，浪压力分布如图 C. 4. 2 b) 所示，单位长度上的浪压力可按下列公式计算：

$$P_{wk} = \frac{1}{2} [(h_{5\% \sim 10\%} + h_z)(\gamma_w H_1 + p_{lf}) + H_1 p_{lf}] \quad (\text{C. 4. 2 - 4})$$

$$p_{lf} = \gamma_w h_{5\% \sim 10\%} \text{sech} \frac{2\pi H_1}{L_m} \quad (\text{C. 4. 2 - 5})$$

式中  $p_{lf}$ ——坝底面处的剩余浪压力强度，kPa。

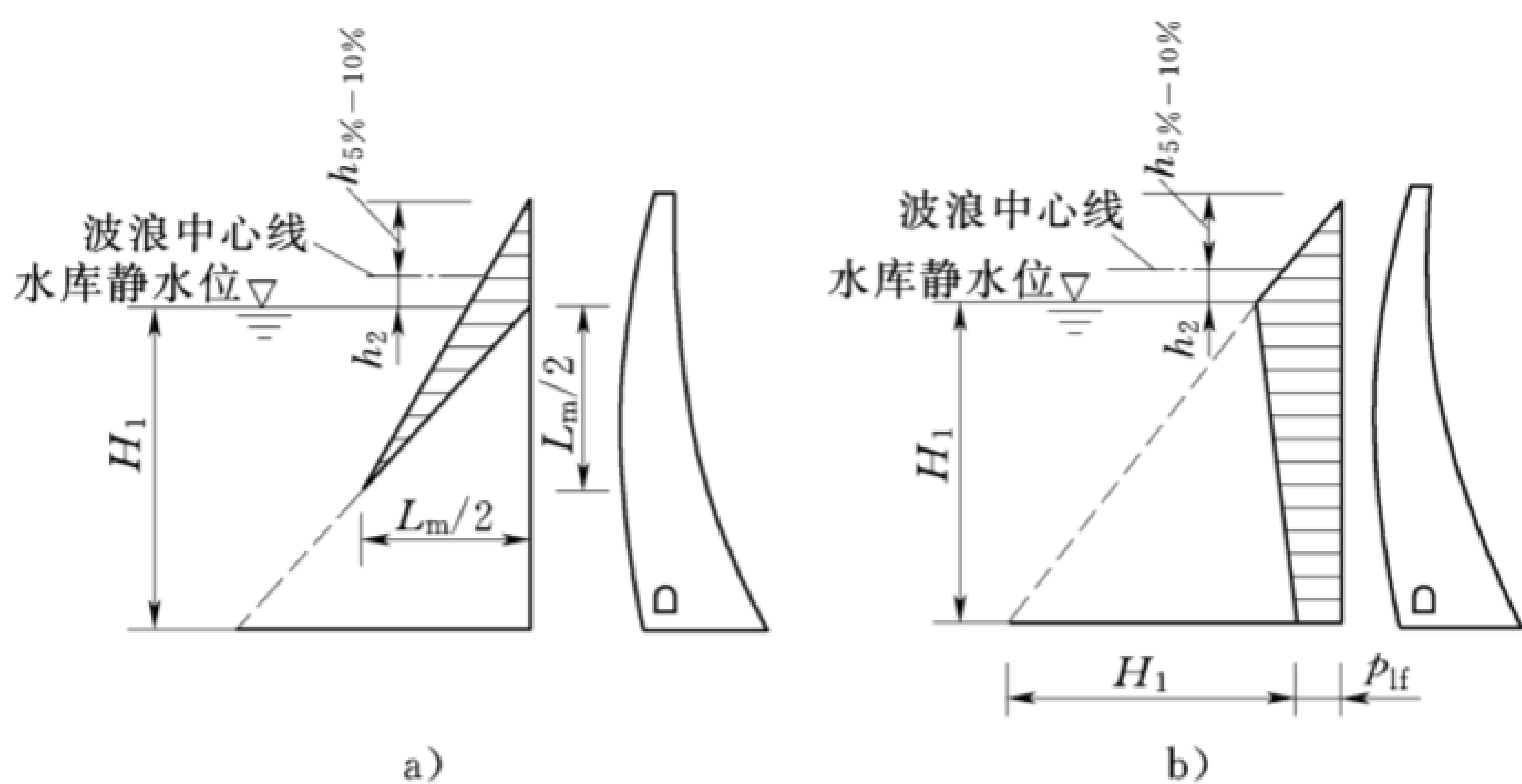


图 C.4.2 浪压力分布图

a)  $H_1 \geq H_{cr}$ ,  $H_1 > L_m/2$  时; b)  $H_1 \geq H_{cr}$ ,  $H_1 \leq L_m/2$  时

### C.5 冰 压 力

C.5.1 作用于坝面单位宽度上静冰压力可按表 C.5.1 的规定取值。

表 C.5.1 静冰压力值

冰层厚度 (m)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
静冰压力值 (kN/m)	85	180	215	245	280
注 1: 冰层厚度取多年平均年最大值; 注 2: 表中静冰压力适用于结冰期内水库水位基本不变的情况; 注 3: 对于小型水库应将表中静冰压力乘以 0.87 后采用。					

C.5.2 动冰压力应符合以下规定:

1 冰块撞击在铅直或接近铅直坝面上所产生的动冰压力可按公式 (C.5.2-1) 计算:

$$F_{bk} = 0.07vd_i \sqrt{Af_{ic}} \quad (C.5.2-1)$$

式中  $F_{bk}$ ——冰块撞击坝面的动冰压力, MN;

$v$ ——冰块流速 (按实测资料确定; 当无实测资料时, 可取冰块运动期内最大风速的 3%, 但不宜大于 0.6m/s), m/s;

$d_i$ ——计算冰厚（可取当地最大冰厚的 0.7~0.8 倍，流冰初期取大值），m；

$A$ ——冰块面积（可由当地或邻近地点的实测或调查资料确定）， $m^2$ ；

$f_{ic}$ ——冰块的抗压强度（宜由试验确定；当无试验资料时，可采用 0.3MPa），MPa。

2 作用于独立墩柱上的动冰压力，可按公式（C.5.2-2）计算：

$$F_{pl} = mf_{ib}d_ib \tag{C.5.2-2}$$

式中  $F_{pl}$ ——冰块切入三角形墩柱或作用于前沿垂直的矩形、多边形、圆形独立墩柱的动冰压力，MN；

$m$ ——墩柱前沿的平面形状系数，按表 C.5.2 的规定取值；

$f_{ib}$ ——冰块的挤压强度（流冰初期可取 0.75MPa，后期可取 0.45MPa），MPa；

$b$ ——冰作用高程处的墩柱前沿宽度，m。

表 C.5.2 形状系数  $m$  值

平面形状	夹角为 $2\alpha$ 的三角形					矩形	多边形 或圆形
	45°	60°	75°	90°	120°		
$m$	0.54	0.59	0.64	0.69	0.77	1.0	0.9
注： $\alpha$ 为三角形夹角的一半。							

## C.6 动水压力

C.6.1 溢流坝反弧段上的动水压力强度，近似取均匀分布，可按公式（C.6.1）计算：

$$p_0 = q\rho_w v/R \tag{C.6.1}$$

式中  $p_0$ ——水流动水压力强度，Pa；

$q$ ——相应泄洪设计状态下反弧段上的单宽流量， $m^3/(s \cdot m)$ ；

$\rho_w$ ——水的密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$v$ ——反弧段最低点处断面水的平均流速， $\text{m/s}$ ；

$R$ ——反弧半径， $\text{m}$ 。

**C. 6. 2** 溢流坝反弧段上的离心力合力的水平分力及垂直分力，可按公式 (C. 6. 2 - 1) 和公式 (C. 6. 2 - 2) 计算：

$$P_x = q\rho_w v(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1) \quad (\text{C. 6. 2 - 1})$$

$$P_y = q\rho_w v(\sin\varphi_2 + \sin\varphi_1) \quad (\text{C. 6. 2 - 2})$$

式中  $P_x$ ——单位宽度上离心力合力的水平分力， $\text{N/m}$ ；

$P_y$ ——单位宽度上离心力合力的垂直分力， $\text{N/m}$ ；

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——反弧段的夹角，见图 C. 6. 2，取绝对值。

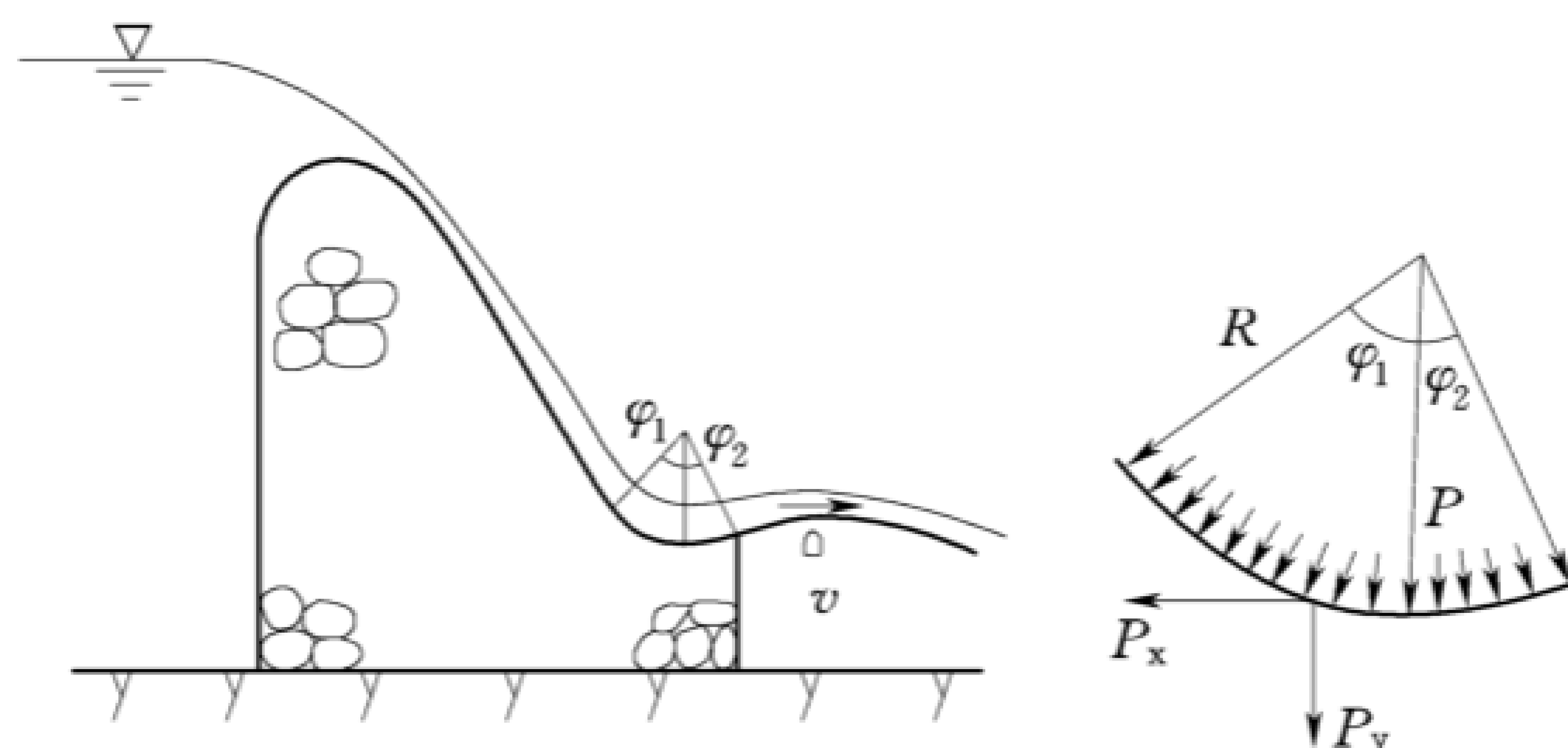


图 C. 6. 2 反弧段上水流离心力示意图

**C. 6. 3** 作用于反弧段边墙上水流离心力压力强度，在水面处为零，在墙底处为  $p_0$ ，其间应沿径向近似采用线性分布。 $p_0$  可按公式 (C. 6. 1) 计算，并垂直作用于墙面。

## C. 7 温度荷载

**C. 7. 1** 砌石拱坝温度荷载计算应符合下列规定：

1 坝体内温度分布可分解为平均温度  $T_m$ 、等效线性温差  $T_d$  和非线性温差  $T_n$  三部分，见图 C. 7. 1，三者可按下列公式分别计算：

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T dx \quad (\text{C. 7. 1 - 1})$$

$$T_d = \frac{12}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} T x dx \quad (C.7.1-2)$$

$$T_n = T - T_m - \frac{T_d x}{L} \quad (C.7.1-3)$$

式中  $T_m$ ——截面平均温度，℃；

$T_d$ ——截面等效线性温差，℃；

$T_n$ ——截面非线性温差，℃；

$L$ ——坝体厚度，m；

$T$ ——温度（为坐标  $x$  的函数），℃。

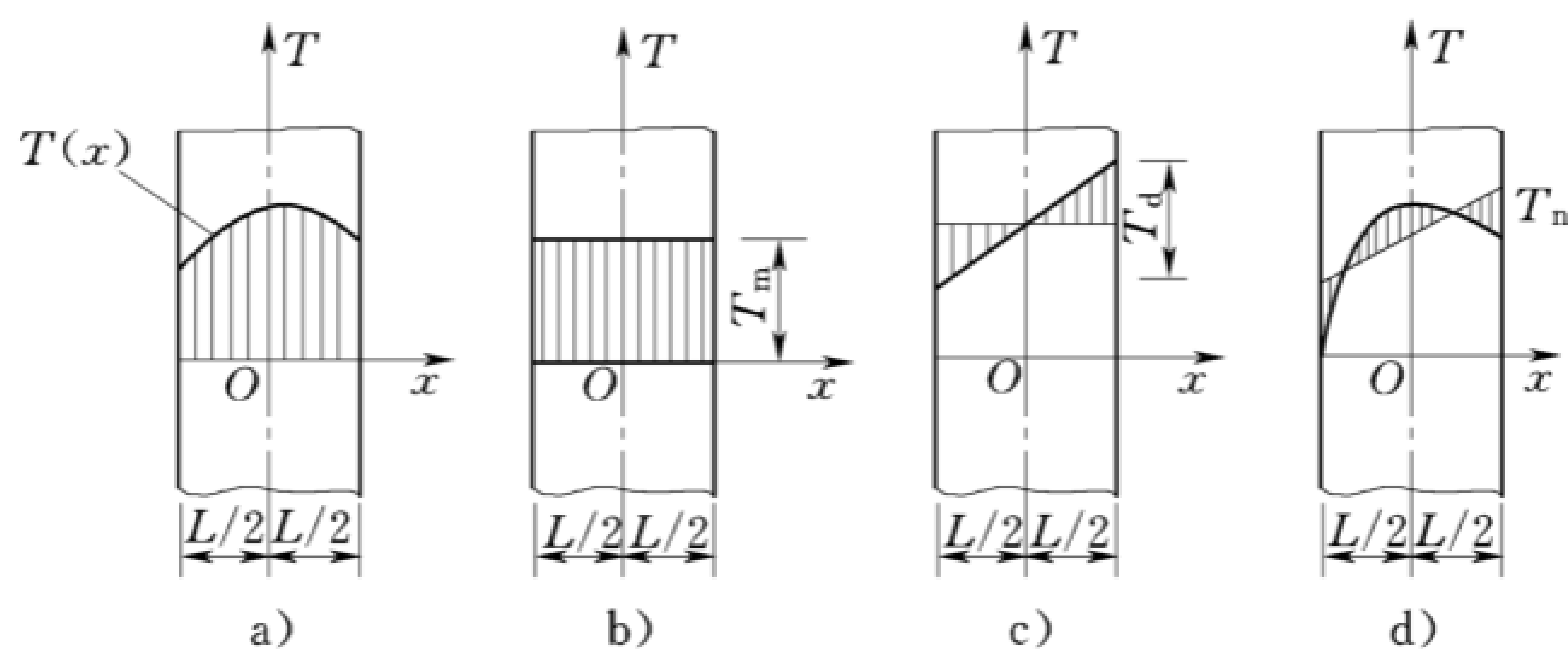


图 C.7.1 坝体温度分布示意图

a) 实际温度；b) 平均温度  $T_m$ ；

c) 等效线性温差  $T_d$ ；d) 非线性温差  $T_n$

2 拱坝运行期温度荷载可按下列公式分别计算：

$$T_m = T_{m1} + T_{m2} - T_{m0} \quad (C.7.1-4)$$

$$T_d = T_{d1} + T_{d2} - T_{d0} \quad (C.7.1-5)$$

$$T_{m1} = \frac{1}{2}(T_{me} + T_{mi}) \quad (C.7.1-6)$$

$$T_{d1} = T_{me} - T_{mi} \quad (C.7.1-7)$$

式中  $T_{m0}$ 、 $T_{d0}$ ——由坝体封拱温度场确定的截面平均温度和等效线性温差，可由封拱时的实际温度分布按公式 (C.7.1-1) 和公式 (C.7.1-2) 计算；

$T_{m1}$ 、 $T_{d1}$ ——由坝体多年年平均温度场确定的截面年平均温度和等效线性温差，可按公式 (C. 7. 1 - 6) 和公式 (C. 7. 1 - 7) 计算；

$T_{m2}$ 、 $T_{d2}$ ——由坝体多年平均变化温度场确定的截面年平均温度变化和等效线性温差，可按本附录 C. 7. 3 确定（当封拱温度等于坝体多年年平均温度时，即  $T_{m0} = T_{m1}$ ， $T_{d0} = T_{d1}$ ，则  $T_m = T_{m2}$ ， $T_d = T_{d2}$ ）；

$T_{mi}$ 、 $T_{me}$ ——上、下游表面多年年平均温度，可按本附录 C. 7. 2 确定。

### C. 7. 2 边界温度的确定应符合下列规定：

#### 1 下游面温度的年变化过程可按下列公式计算：

$$T_a = T_{am} + A_a \cos \omega(\tau - \tau_0) \quad (C. 7. 2 - 1)$$

$$T_{am} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ai} \quad (C. 7. 2 - 2)$$

$$A_a = (T_{a7} - T_{a1})/2 \quad (C. 7. 2 - 3)$$

$$\omega = 2\pi/p_a \quad (C. 7. 2 - 4)$$

式中  $T_a$ ——多年月平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_{am}$ ——多年年平均气温（可由当地实测多年月平均气温按公式 (C. 7. 2 - 2) 计算，若考虑日照影响，增加  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ）， $^{\circ}\text{C}$ ；

$A_a$ ——多年平均气温年变幅（可由当地实测多年月平均气温按公式 (C. 7. 2 - 3) 计算，若考虑日照影响，增加  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ，尾水位以下等于水温年变幅）， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\tau$ ——时间变量，月；

$\tau_0$ ——时间周期变化过程的初始相位，可取  $\tau_0 = 6.5$  月；

$\omega$ ——圆频率，可按公式 (C. 7. 2 - 4) 计算；

$p_a$ ——温度变化周期， $p_a = 12$  月；

$T_{ai}$ —— $i$  月多年平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_{a1}$ 、 $T_{a7}$ ——1 月、7 月多年平均气温， $^{\circ}\text{C}$ 。



2 上游面温度的年变化过程可按下列规定确定：

1) 水上部分的温度等于气温，可按公式 (C. 7. 2 - 1) 计算。

2) 水下部分坝前水温年变化过程，在初步设计阶段的温度可按公式 (C. 7. 2 - 5) 表示；在技施设计阶段，可根据条件相近、已建水库的实测水温资料研究确定。

$$T_w(y, \tau) = T_{wm}(y) + A_w(y) \cos \omega [\tau - \tau_0 - \epsilon(y)] \quad (C. 7. 2 - 5)$$

式中  $T_w(y, \tau)$  ——水深  $y$  处、 $\tau$  时的多年平均水温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$y$  ——水深， $\text{m}$ ；

$T_{wm}(y)$  ——水深  $y$  处的多年年平均水温，可按本条 3 款确定， $^{\circ}\text{C}$ ；

$A_w(y)$  ——水深  $y$  处的多年年平均水温年变幅，按本条 4 款确定， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\epsilon(y)$  ——水深  $y$  处的水温年周期变化过程与气温年周期变化过程的相位差，按本条 5 款确定，月。

3 水库水深  $y$  处的多年年平均水温可按下列公式计算：

$$T_{wm}(y) = c + (b - c)e^{-0.04y} \quad (C. 7. 2 - 6)$$

$$b = T_{am} + \Delta b \quad (C. 7. 2 - 7)$$

$$c = \frac{(T_{kd} - bg)}{(1 - g)} \quad (C. 7. 2 - 8)$$

$$g = e^{-0.04H} \quad (C. 7. 2 - 9)$$

式中  $b$  ——表面多年年平均水温，可按公式 (C. 7. 2 - 2) 计算（但在寒冷地区，当多年月平均气温  $T_{ai} < 0$  时，取  $T_{ai} = 0$ ）， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\Delta b$  ——受日照影响引起的温度增量，一般可取  $\Delta b = 2^{\circ}\text{C}$ ；

$c$  ——水深  $y$  处多年平均水温的首项值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_{kd}$  ——库底多年年平均水温（在一般地区约等于最低三个月平均气温，在严寒地区约等于  $4 \sim 6^{\circ}\text{C}$ ），在初步

设计中可按表 C. 7. 2 采用,℃;  
 $g$ ——计算所需的中间变量,  $g=e^{-0.04H}$ ;  
 $H$ ——水库深度, m。

表 C. 7. 2  $T_{kd}$  值

气候条件	严寒 (东北)	寒冷 (华北、西北)	一般 (华中、华东、西南)	炎热 (华南)
$T_{kd}$ (℃)	4~6	6~7	7~10	10~12

按式 (C. 7. 2 - 6) 计算时, 如  $T_{wm}(y)$  的值小于  $T_{kd}$ , 则令  $T_{wm}(y) = T_{kd}$ 。

4 水库水深  $y$  处的多年平均水温年变幅  $A_w(y)$ , 可按公式 (C. 7. 2 - 10) 计算:

$$A_w(y) = A'_a e^{-0.018y} \tag{C. 7. 2 - 10}$$

式中  $A'_a$ ——修正后的气温年变幅, 即表面水温年变幅 (当  $T_{am} < 10^{\circ}\text{C}$  时, 可取  $A'_a = T_{a7}/2 + \Delta a$ ; 当  $T_{am} \geq 10^{\circ}\text{C}$  时, 可取  $A'_a = A_a$ ),℃;

$\Delta a$ ——太阳辐射所引起的温度增量, 一般可取  $\Delta a = 1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

5 水库水深  $y$  处的水温年周期变化过程与气温年周期变化过程的相位差  $\epsilon(y)$ , 可按公式 (C. 7. 2 - 11) 计算:

$$\epsilon(y) = 2.15 - 1.30e^{-0.085y} \tag{C. 7. 2 - 11}$$

C. 7. 3 多年平均变化温度场的截面平均温度  $T_{m2}$  和等效线性温差  $T_{d2}$  计算应符合下列规定:

1 多年平均温度场的  $T_{m2}$  和  $T_{d2}$  可按下列公式计算:

$$T_{m2} = \frac{\rho_1}{2} [A_e \cos \omega(\tau - \theta_1 - \tau_0) + A_i \cos \omega(\tau - \theta_1 - \epsilon - \tau_0)] \tag{C. 7. 3 - 1}$$

$$T_{d2} = \rho_2 [A_e \cos \omega(\tau - \theta_2 - \tau_0) - A_i \cos \omega(\tau - \theta_2 - \epsilon - \tau_0)] \tag{C. 7. 3 - 2}$$

$$\rho_1 = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{2(\operatorname{ch}\eta - \cos\eta)}{\operatorname{ch}\eta + \cos\eta}} \quad (\text{C. 7. 3 - 3})$$

$$\rho_2 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (\text{C. 7. 3 - 4})$$

$$\theta_1 = \frac{1}{\omega} \left[ \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \left( \frac{\sin\eta}{\operatorname{sh}\eta} \right) \right] \quad (\text{C. 7. 3 - 5})$$

$$\theta_2 = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left( \frac{b_1}{a_1} \right) \quad (\text{C. 7. 3 - 6})$$

$$a_1 = \frac{6}{\rho_1 \eta^2} \sin(\omega\theta_1) \quad (\text{C. 7. 3 - 7})$$

$$b_1 = \frac{6}{\rho_1 \eta^2} [\cos(\omega\theta_1) - \rho_1] \quad (\text{C. 7. 3 - 8})$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\pi}{a_c p}} L \quad (\text{C. 7. 3 - 9})$$

- 式中  $\rho_1$ ——计算  $T_{m2}$  的系数，为  $\eta$  的函数；  
 $\rho_2$ ——计算  $T_{d2}$  的系数，为  $a_1$ 、 $b_1$  的函数， $a_1$ 、 $b_1$  又为  $\eta$ 、 $\rho_1$ 、 $\omega\theta_1$  的函数；  
 $\theta_1$ —— $T_{m2}$  最大的时间，月；  
 $\theta_2$ ——与  $T_{m2}$  最大的时间  $\theta_1$  相应的  $T_{d2}$  较大的时间，月；  
 $a_1$ ——与  $\theta_1$  最大相应的求  $\theta_2$  的变量之一；  
 $b_1$ ——与  $\theta_1$  最大相应的求  $\theta_2$  的另一变量；  
 $a_c$ ——砌石体的导温系数，与砌石体材料有关（一般花岗岩、石英砂岩砌体，可取  $a_c = 3.52$ ；石灰岩砌体可取  $a_c = 4.32$ ；玄武岩、流纹岩砌体，可取  $a_c = 2.52$ ）， $\text{m}^2/\text{月}$ ；  
 $\epsilon$ ——上、下游坝面温度年周期变化过程的相位差，当上游面为库水，下游面为空气时，可按本附录 C. 7. 2 确定，月；  
 $A_i$ 、 $A_e$ ——上、下游坝面多年平均温度年变幅， $^{\circ}\text{C}$ ；  
 $\tau$ ——温度荷载最不利组合的计算时点，可取  $\tau = 7.5$ （8 月中）或  $8.0$ （8 月底）计算与温升值相应的  $T_{m2}$ 、 $T_{d2}$ ，可改变符号作为与温降值相应的  $T_{m2}$ 、 $T_{d2}$ 。

2 在初步设计阶段多年平均变化温度场的  $T_{m2}$ 、 $T_{d2}$ ，可按下列公式简化计算：

1) 库水位以上：

$$T_{m2} = \pm \rho_1 A_e \quad (C. 7. 3 - 10)$$

$$T_{d2} = 0 \quad (C. 7. 3 - 11)$$

2) 库水位以下：

$$T_{m2} = \pm \frac{\rho_1}{2} \left( A_e + \frac{13.1 A_a}{14.5 + y} \right) \quad (C. 7. 3 - 12)$$

$$T_{d2} = \pm \rho_3 \left[ A_e - A_a \left( \xi + \frac{13.1}{14.5 + y} \right) \right] \quad (C. 7. 3 - 13)$$

3) 当坝体厚度  $L \geq 10m$  时：

$$\frac{\rho_1}{2} = \frac{2.33}{L - 0.90} \quad (C. 7. 3 - 14)$$

$$\rho_3 = \frac{18.76}{L + 12.6} \quad (C. 7. 3 - 15)$$

$$\xi = \frac{3.80e^{-0.022y} - 2.38e^{-0.081y}}{L - 4.50} \quad (C. 7. 3 - 16)$$

4) 当  $L < 10m$  时：

$$\frac{\rho_1}{2} = 0.50e^{-0.00067L^{3.0}} \quad (C. 7. 3 - 17)$$

$$\rho_3 = e^{-0.00186L^{2.0}} \quad (C. 7. 3 - 18)$$

$$\xi = (0.069e^{-0.022y} - 0.0432e^{-0.081y})L \quad (C. 7. 3 - 19)$$

式中  $\rho_3$ ——与  $\rho_2$  相当的简化值；

$\xi$ —— $T_{d2}$  简化公式中与  $A_a$  有关的首项。

公式 (C. 7. 3 - 10) ~ 公式 (C. 7. 3 - 13) 中，夏季取正号，冬季取负号。按公式 (C. 7. 3 - 10) ~ 公式 (C. 7. 3 - 13) 计算的结果，为相当于 8 月底和 2 月底的温度荷载。

## 附录 D 坝前泥沙冲淤计算的期限

水利水电工程主要挡水建筑物设计基准期为 50~100 年。重力坝、拱坝等设计规范规定，计算坝体荷载时坝前泥沙淤积高程计算年限为 50~100 年。

水库泥沙冲淤计算的期限，应按以下规定确定：

1 当水库冲淤相对平衡年限长于壅水建筑物结构的设计基准期时，计算到基准期。

2 当水库冲淤相对平衡年限短于壅水建筑物结构的设计基准期时，计算到相对平衡年限。

水库冲淤相对平衡年限，可根据悬移质年平均出库率大于 90%，或库区冲淤量基本稳定等条件分析判定。

# 附录 E 砌石重力坝坝基深层抗滑稳定 安全系数及计算公式

**E. 0. 1** 当坝基深层存在缓倾角结构面时，根据地质资料可概化为单滑裂面、双滑裂面和多滑裂面，进行抗滑稳定计算分析。  
双滑裂面为最常见情况，见图 E. 0. 1。

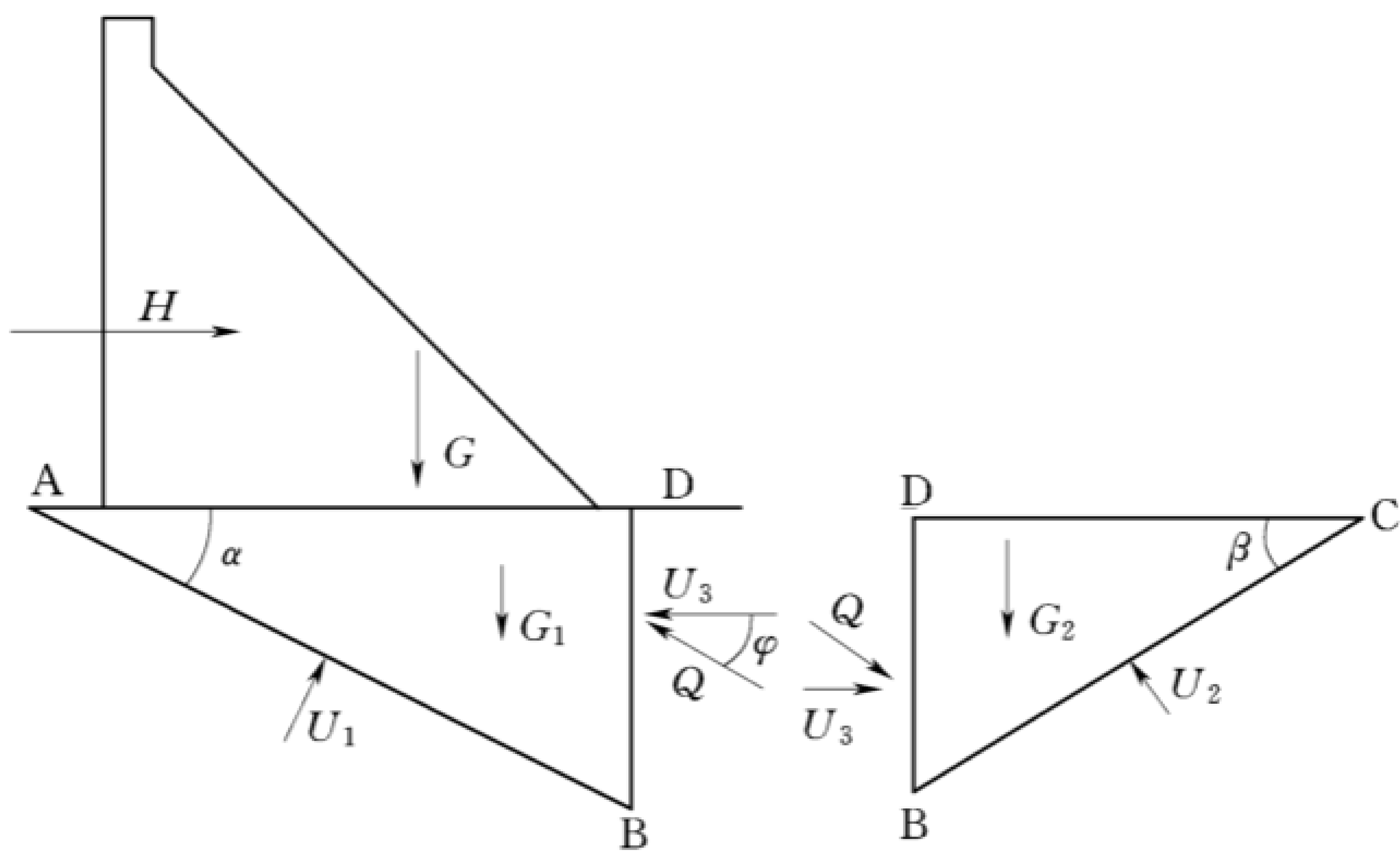


图 E. 0. 1 双滑裂面示意图

深层抗滑稳定计算应采用等安全系数法，按抗剪断强度公式 (E. 0. 2 - 1) 和公式 (E. 0. 2 - 2)，或按抗剪强度公式 (E. 0. 3 - 1) 和公式 (E. 0. 3 - 2) 进行计算。

**E. 0. 2** 采用抗剪断强度公式计算时，考虑 ABD 块的稳定，则有：

$$K'_1 = \frac{f'_1[(W + G_1)\cos\alpha - H\sin\alpha - Q\sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3\sin\alpha] + c'_1A_1}{(W + G_1)\sin\alpha + H\cos\alpha - U_3\cos\alpha - Q\cos(\varphi - \alpha)} \tag{E. 0. 2 - 1}$$

考虑 BCD 块的稳定，则有：

$$K'_2 = \frac{f'_2[G_2\cos\beta + Q\sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3\sin\beta] + c'_2A_2}{Q\cos(\varphi + \beta) - G_2\sin\beta + U_3\cos\beta} \tag{E. 0. 2 - 2}$$

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 滑裂面的抗剪断摩擦系数；  
 $c'_1$ 、 $c'_2$ ——AB、BC 滑裂面的抗剪断凝聚力，kPa；  
 $A_1$ 、 $A_2$ ——AB、BC 滑裂面的面积， $m^2$ ；  
 $\alpha$ 、 $\beta$ ——AB、BC 滑裂面与水平面的夹角（若下游侧岩体不存在明显的第二滑裂面时，则第二滑裂面可通过试算确定，即假定一组  $\beta$  角，从中求出安全系数最小的滑裂面与之对应的  $\beta$  即为确定第二滑裂面的  $\beta$  角）， $(^\circ)$ ；  
 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ ——AB、BC、BD 面上的扬压力，kN；  
 $Q$ 、 $\varphi$ ——BD 面上的作用力（kN）及其与水平面的夹角（夹角  $\varphi$  值需经论证后选用，从偏于安全考虑， $\varphi$  角可取  $0^\circ$ ）。

通过公式（E. 0. 2 - 1）和公式（E. 0. 2 - 2）及  $K'_1 = K'_2 = K'$ ，求解  $Q$ 、 $K'$  值。

**E. 0. 3** 对于采取工程措施后用抗剪断强度公式计算仍无法满足表 5. 3. 2 要求的坝段，可采用抗剪强度公式（E. 0. 3 - 1）和公式（E. 0. 3 - 2）计算抗滑稳定安全系数，其安全系数应不小于表 E. 0. 3 的规定值。

**表 E. 0. 3 抗滑稳定安全系数  $K$**

安全系数	荷载组合		建筑物级别	
			2	3
$K$	基本		1. 30	1. 25
	特殊	1	1. 15	1. 10
		2	1. 05	1. 05

考虑 ABD 块的稳定，则有：

$$K_1 = \frac{f_1[(W + G_1)\cos\alpha - H\sin\alpha - Q\sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3\sin\alpha]}{(W + G_1)\sin\alpha + H\cos\alpha - U_3\cos\alpha - Q\cos(\varphi - \alpha)} \quad (\text{E. 0. 3 - 1})$$

考虑 BCD 块的稳定，则有：

$$K_2 = \frac{f_2[G_2\cos\beta + Q\sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3\sin\beta]}{Q\cos(\varphi + \beta) - G_2\sin\beta + U_3\cos\beta} \quad (\text{E. 0. 3 - 2})$$

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 滑裂面的抗剪摩擦系数。

通过公式 (E. 0. 3 - 1) 和公式 (E. 0. 3 - 2) 及  $k_1 = k_2 = K$ ，求解  $Q$ 、 $K$  值。

**E. 0. 4** 多滑裂面的情况比较复杂，可参照双滑裂面的计算公式，列出各个滑裂体的计算公式，求解  $K'$  值或  $K$  值。



# 附录 F 考虑坝体分层异弹模特性，用材料力学方法计算砌石重力坝坝体应力

## F.1 计 算 说 明

对于混凝土防渗面板与砌石坝坝体弹模相差较大的砌石重力坝，可用下述方法计算坝体应力：

在原来垂直正应力  $\sigma_y$  直线变化的基础上，用类似于钢筋面积折算法的方法，将混凝土防渗面板虚拟扩大  $E_c/E_s$  倍，以体现两者弹模的变化（ $E_c$  为混凝土防渗面板弹模， $E_s$  为砌石坝体弹模），然后根据防渗面板与坝体交界面上的变形协调条件，在假定两者泊松比  $\mu$  相同的条件下，用弹性理论推得扩大后的防渗面板垂直正应力  $\sigma_y$ ，再乘以一个应力放大系数  $E_c/E_s$ ，即为实际的砌石重力坝防渗面板的应力。

考虑坝体分层异弹模特性，按折算断面转化为均质体计算。

## F.2 有 关 参 数 计 算

分层异弹模截面如图 F.2 所示。

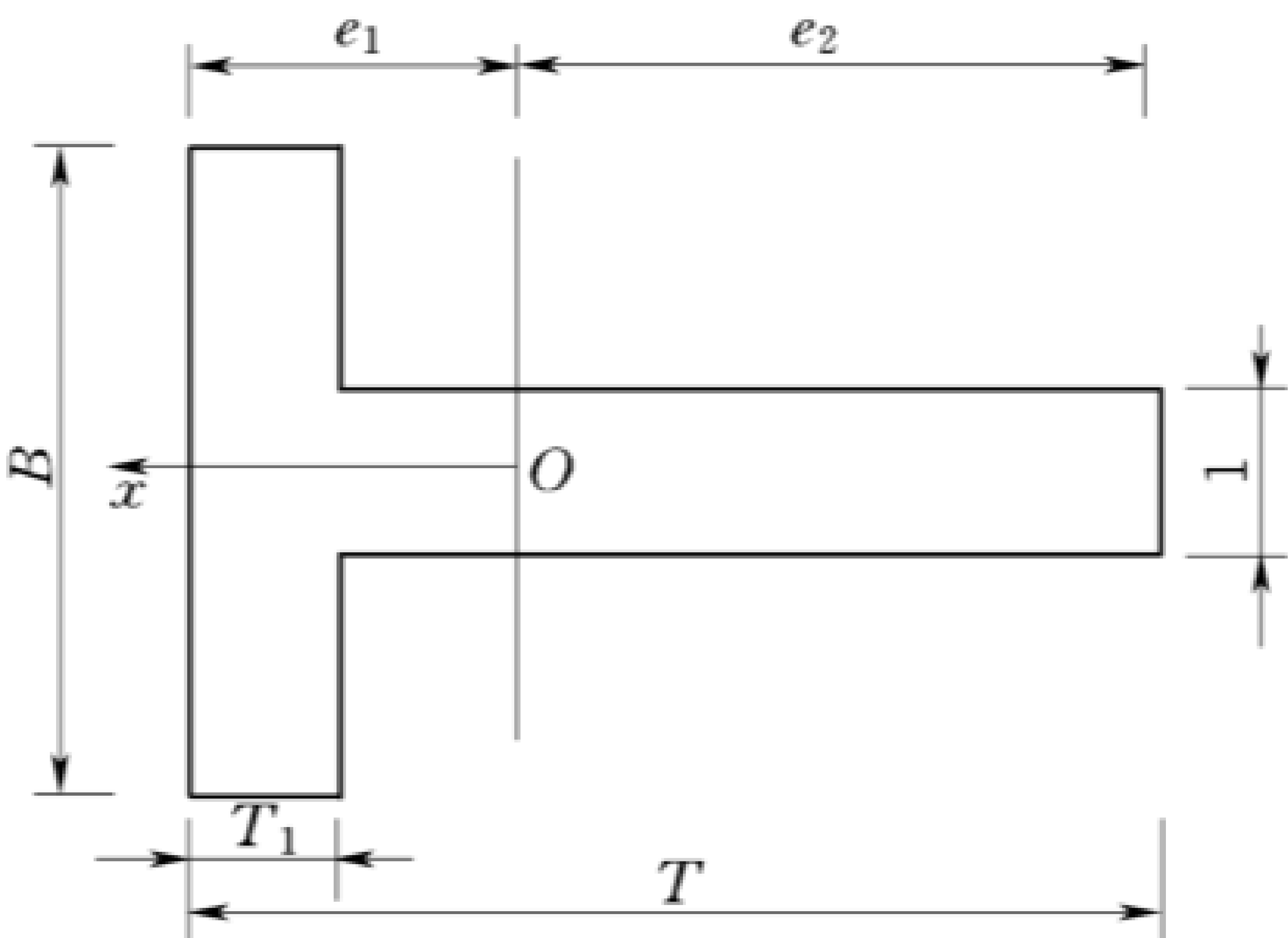


图 F.2

有关参数可按下列公式计算：

$$B = E_c/E_s \quad (\text{F. 2-1})$$

$$A = T + BT_1 - T_1 \quad (\text{F. 2-2})$$

$$e_1 = \frac{1}{2} \frac{T^2 + (B-1)T_1^2}{A} \quad (\text{F. 2-3})$$

$$e_2 = T - e_1 \quad (\text{F. 2-4})$$

$$J = \frac{1}{3} [Be_1^3 - (B-1)(e_1 - T_1)^3 + e_1^3] \quad (\text{F. 2-5})$$

式中  $B$ ——应力放大系数；

$E_c$ ——混凝土防渗面板弹性模量，GPa；

$E_s$ ——坝体砌石弹性模量，GPa；

$A$ ——折算面积， $\text{m}^2$ ；

$T$ ——坝厚，m；

$T_1$ ——防渗面板厚，m；

$e_1$ ——折算面积形心与上游面距离，m；

$e_2$ ——折算面积形心与下游面距离，m；

$J$ ——折算截面面积矩， $\text{m}^3$ 。

### F.3 坝面应力计算

**F.3.1** 坝体上游面垂直正应力可按下式计算：

$$\sigma_y^s = \left( \frac{\sum W}{A} + \frac{e_1 \sum M}{J} \right) \frac{E_c}{E_s} \quad (\text{F. 3.1})$$

式中  $\sigma_y^s$ ——坝体上游面垂直正应力，MPa。

**F.3.2** 坝体下游面垂直正应力可按下式计算：

$$\sigma_y^{\text{xi}} = \frac{\sum W}{A} - \frac{e_2 \sum M}{J} \quad (\text{F. 3.2})$$

式中  $\sigma_y^{\text{xi}}$ ——坝体下游面垂直正应力，MPa。

**F.3.3** 坝体上游面剪应力可按下式计算：

$$\tau^s = (p + \bar{p}_y - \sigma_y^s)n \quad (\text{F. 3.3})$$

式中  $\tau^s$ ——坝体上游面剪应力，MPa；

$p$ ——计算截面在上游坝面所承受的水压力强度（如有泥沙压力时，应计入在内），MPa；

$\bar{p}_y$ ——计算截面在上游坝面处的扬压力强度，MPa；

$n$ ——上游坝面坡度。

**F. 3. 4** 坝体下游面剪应力可按下式计算：

$$\tau^{xi} = (\sigma_y^{xi} - p' + \bar{p}'_y)m \quad (F. 3. 4)$$

式中  $\tau^{xi}$ ——坝体上游面剪应力，MPa；

$\sigma_y^{xi}$ ——坝体下游面垂直正应力，MPa；

$\bar{p}'_y$ ——计算截面在下游坝面处的扬压力强度，MPa；

$m$ ——下游坝面坡度。

**F. 3. 5** 坝体上游面水平正应力可按下式计算：

$$\sigma_x^s = (p + \bar{p}_y) - (p + \bar{p}_y - \sigma_y^s)n^2 \quad (F. 3. 5)$$

式中  $\sigma_x^s$ ——坝体上游面水平正应力，MPa。

**F. 3. 6** 坝体下游面水平正应力可按下式计算：

$$\sigma_x^{xi} = (p' + \bar{p}'_y) + (\sigma_y^{xi} - p' + \bar{p}'_y)m^2 \quad (F. 3. 6)$$

式中  $\sigma_x^{xi}$ ——坝体下游面水平正应力，MPa。

**F. 3. 7** 坝体上游面主应力可按下式计算：

$$\sigma_{z1}^s = (1 + n^2)\sigma_y^s - n^2(p + \bar{p}_y) \quad (F. 3. 7 - 1)$$

$$\sigma_{z2}^s = p + \bar{p}_y \quad (F. 3. 7 - 2)$$

式中  $\sigma_{z1}^s$ ——坝体上游面第 1 主应力，MPa；

$\sigma_{z2}^s$ ——坝体上游面第 2 主应力，MPa。

**F. 3. 8** 坝体下游面主应力可按下式计算：

$$\sigma_{z1}^{xi} = (1 + m^2)\sigma_y^{xi} - m^2(p' - \bar{p}'_y) \quad (F. 3. 8 - 1)$$

$$\sigma_{z2}^{xi} = p' - \bar{p}'_y \quad (F. 3. 8 - 2)$$

式中  $\sigma_{z1}^{xi}$ ——坝体下游面第 1 主应力，MPa；

$\sigma_{z2}^{xi}$ ——坝体下游面第 2 主应力，MPa。

以上所列坝体上游面垂直正应力、坝体下游面垂直正应力等计算公式适用于无扬压力作用的情况，当有扬压力作用时， $\tau^s$ 、 $\tau^{xi}$ 、 $\sigma_x^s$ 、 $\sigma_x^{xi}$ 、 $\sigma_{z1}^s$ 、 $\sigma_{z2}^s$ 、 $\sigma_{z1}^{xi}$ 、 $\sigma_{z2}^{xi}$ 与混凝土重力坝考虑扬压力的公式一致，参见 SL 319—2005。

## F. 4 内部应力计算

**F. 4. 1** 坝体内部垂直正应力可按下列公式计算：

$$\text{当 } x < T - T_1 \text{ 时: } \sigma_y = a + bx \quad (\text{F. 4. 1 - 1})$$

$$\text{当 } x \geq T - T_1 \text{ 时: } \sigma_{yc} = n' + (a + bx) \quad (\text{F. 4. 1 - 2})$$

$$a = \frac{\sum W}{A} - \frac{e_2 \sum M}{J} \quad (\text{F. 4. 1 - 3})$$

$$b = \frac{\sum M}{J} \quad (\text{F. 4. 1 - 4})$$

式中  $x$ ——水平坐标（原点在断面形心，向左为正），m；

$n'$ ——混凝土防渗面板与砌石体的弹性模量之比。

**F. 4. 2** 坝体内部剪应力可按下列公式计算：

1 砌石体的剪应力：

$$\tau = a_1 + b_1 x + c_1 x^2 \quad (\text{F. 4. 2 - 1})$$

2 混凝土防渗面板的剪应力：

$$a_1 = \tau^{\text{xi}} \quad (\text{F. 4. 2 - 2})$$

$$b_1 = b_m + \frac{\partial a}{\partial y} - \gamma_h \quad (\text{F. 4. 2 - 3})$$

$$c_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial b}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 2 - 4})$$

$$\tau^c = a_{1c} + b_{1c} x + c_{1c} x^2 \quad (\text{F. 4. 2 - 5})$$

$$\begin{aligned} a_{1c} = & a_{1c} + (b_1 - b_{1c})(T - T_1) + (c_1 - c_{1c})(T - T_1)^2 \\ & + (n' - 1)[a + b(T - T_1)] \text{ctg} \alpha \end{aligned} \quad (\text{F. 4. 2 - 6})$$

$$b_{1c} = n' \left( b_m + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \gamma_h \quad (\text{F. 4. 2 - 7})$$

$$c_{1c} = \frac{1}{2} n' \frac{\partial b}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 2 - 8})$$

式中  $n'$ ——混凝土防渗面板与砌石体的弹性模量之比；

$\alpha$ ——混凝土防渗面板与水平面的夹角，(°)。

**F. 4. 3** 坝体内部水平正应力可按下列公式计算：

1 砌石体的水平正应力：

$$\sigma_x = a_2 + b_2 x + c_2 x^2 + d_2 x^3 \quad (\text{F. 4. 3 - 1})$$

$$a_2 = \sigma_x^{\text{xi}} \quad (\text{F. 4. 3 - 2})$$

$$b_2 = b_1 m + \frac{\partial a_1}{\partial y} - \lambda \gamma_h \quad (\text{F. 4. 3 - 3})$$

$$c_2 = c_1 m + \frac{1}{2} \frac{\partial b_1}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 3 - 4})$$

$$d_2 = \frac{1}{3} \frac{\partial c_1}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 3 - 5})$$

2 混凝土防渗面板的水平正应力：

$$\sigma_x^c = a_{2c} + b_{2c} x + c_{2c} x^2 + d_{2c} x^3 \quad (\text{F. 4. 3 - 6})$$

$$\begin{aligned} a_{2c} = & [a_2 + (a_{1c} - a_1) \text{ctg} \alpha] + [(b_{1c} - b_1) \text{ctg} \alpha - (b_{2c} - b_2)](T - T_1) \\ & + [(c_{1c} - c_1) \text{ctg} \alpha - (c_{2c} - c_2)](T - T_1)^2 \\ & - (d_{2c} - d_2)(T - T_1)^3 \end{aligned} \quad (\text{F. 4. 3 - 7})$$

$$b_{2c} = b_{1c} m + \frac{\partial a_{1c}}{\partial y} - \lambda \gamma_h \quad (\text{F. 4. 3 - 8})$$

$$c_{2c} = c_{1c} m + \frac{1}{2} \frac{\partial b_{1c}}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 3 - 9})$$

$$d_{2c} = \frac{1}{3} \frac{\partial c_{1c}}{\partial y} \quad (\text{F. 4. 3 - 10})$$

式中， $\frac{\partial a}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial b}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial a_1}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial b_1}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial c_1}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial a_{1c}}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial b_{1c}}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial c_{1c}}{\partial y}$  为  $a$ 、 $b$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $a_{1c}$ 、 $b_{1c}$ 、 $c_{1c}$  沿  $y$  的变化率，可直接求偏导数，也可在离截面不远处，另取一截面，计算  $a$ 、 $b$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $a_{1c}$ 、 $b_{1c}$ 、 $c_{1c}$ ，再用差分表示，如：

$$\frac{\partial a}{\partial y} \approx \frac{\Delta a}{\Delta y}, \frac{\partial a_1}{\partial y} \approx \frac{\Delta a_1}{\Delta y}, \dots, \frac{\partial c_{1c}}{\partial y} \approx \frac{\Delta c_{1c}}{\Delta y}$$

以上所列坝体内部水平正应力的计算公式适用于无扬压力作用的情况，当有扬压力作用时可按 SL 319—2005 的规定方法加一校正项。

# 附录 G 用材料力学方法计算重力墩、推力墩的应力

## G.1 计 算 说 明

- G.1.1 当重力墩的高度比砌石拱坝相对较低时，可近似认为它的刚度与地基刚度相同，并假定为刚性地基，即计算重力墩应力时不考虑地基变形影响。
- G.1.2 计算重力墩应力时，应考虑重力墩与拱端接触面受拱坝传来的拱端力系作用及部分水压力作用，以及迎水面直接受水压力作用，按两个方向的弯曲应力进行计算叠加。

## G.2 重力墩应力计算

重力墩应力计算简图如图 G.2 所示，计算截面 1、2、3、4

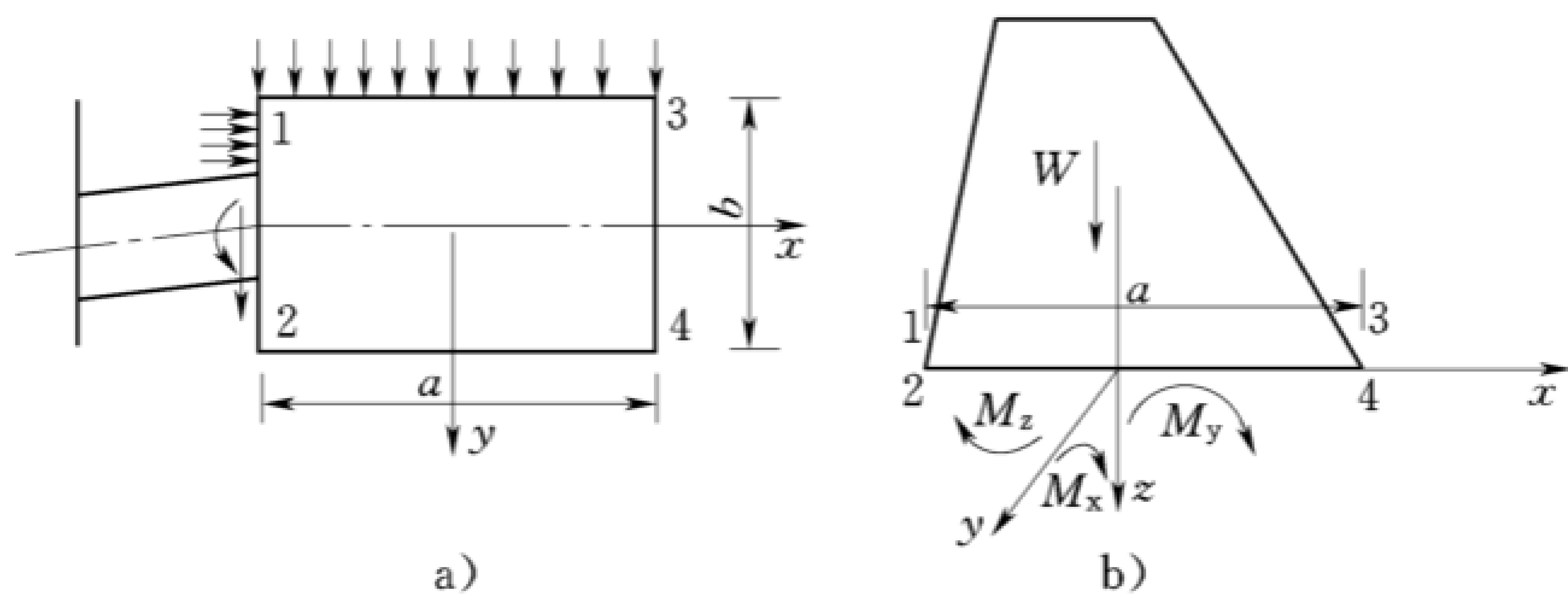


图 G.2 重力墩应力计算简图  
a) 水平截面图；b) 立面图

各点的垂直正应力按下列公式计算：

$$\sigma_{z1} = \frac{\sum W}{A} + \frac{\sum M_x}{I_x} \frac{b}{2} - \frac{\sum M_y}{I_y} \frac{a}{2} \tag{G.2-1}$$

$$\sigma_{z2} = \frac{\sum W}{A} - \frac{\sum M_x}{I_x} \frac{b}{2} - \frac{\sum M_y}{I_y} \frac{a}{2} \tag{G.2-2}$$

$$\sigma_{z3} = \frac{\sum W}{A} + \frac{\sum M_x}{I_x} \frac{b}{2} - \frac{\sum M_y}{I_y} \frac{a}{2} \tag{G.2-3}$$

$$\sigma_{z4} = \frac{\sum W}{A} - \frac{\sum M_x}{I_x} \frac{b}{2} + \frac{\sum M_y}{I_y} \frac{a}{2} \quad (\text{G. 2-4})$$

$$\sum W = W + G - U \quad (\text{G. 2-5})$$

式中  $\sigma_{z1}$ 、 $\sigma_{z2}$ 、 $\sigma_{z3}$ 、 $\sigma_{z4}$ ——计算截面 1、2、3、4 点的垂直正应力，kPa；

$\sum W$ ——作用于计算截面以上的竖向作用力的总和，kN；

$\sum M_x$ 、 $\sum M_y$ ——计算截面上全部荷载对截面形心力矩总和绕  $x$ 、 $y$  轴的分量，kN·m；

$I_x$ 、 $I_y$ ——计算截面对  $x$ 、 $y$  轴的惯性矩， $\text{m}^4$ ；

$a$ 、 $b$ ——计算截面长度、宽度，m；

$W$ ——重力墩自重，kN；

$G$ ——拱端传来的铅直力，kN；

$U$ ——重力墩底部的扬压力，kN。

计算截面上、下游面剪应力、水平正应力以及主应力的计算公式参见《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005)。计算重力墩底部剪应力时，应考虑拱端传来的绕铅直轴的扭矩  $M_z$ 。

应力符号以压应力为正， $W$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  的正方向示于图 G. 2 中。

### G. 3 重力墩抗滑稳定验算

重力墩抗滑稳定可按式验算：

$$K_2 = \frac{f \sum W}{\sqrt{H^2 + (V + P)^2}} \quad (\text{G. 3})$$

式中  $H$ ——拱端法向力，kN；

$V$ ——拱端剪力，kN；

$P$ ——作用于重力墩上的水压力，kN。

按公式 (G. 3) 计算的  $K_2$  值不应小于表 6. 3. 4 的规定值。

### G. 4 推力墩应力计算

推力墩应力可按本附录 G. 2 所列重力墩应力计算公式计算，

但式中 $\Sigma W$ 、 $\Sigma M_x$ 、 $\Sigma M_y$ 项中应考虑推力墩侧面基岩约束的影响，计入侧面上基岩作用于推力墩的力系，包括基岩压力、剪力、弯矩、渗透压力等，并作某些简化的假定，再用重力墩应力计算公式计算。



# 标准用词说明

执行本标准时，标准用词应遵守下表规定。

标准用词说明

本规范用词	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

砌石坝设计规范

SL 25—2006

条文说明

目次

1 总则..... 74

3 筑坝材料及砌石体设计指标..... 81

    3.1 筑坝材料 ..... 81

    3.2 砌石体设计指标 ..... 82

4 荷载与荷载组合..... 85

    4.1 荷载 ..... 85

    4.2 荷载组合 ..... 86

5 砌石重力坝..... 88

    5.1 坝体布置 ..... 88

    5.2 坝体结构 ..... 88

    5.3 坝体抗滑稳定计算 ..... 88

    5.4 坝体应力计算 ..... 89

    5.5 坝体温度控制和防裂 ..... 90

6 砌石拱坝..... 91

    6.1 坝址、坝线和坝体布置 ..... 91

    6.2 坝体应力分析 ..... 92

    6.3 拱座稳定分析 ..... 105

    6.4 温度控制 ..... 107

7 坝体防渗 ..... 108

    7.1 一般规定 ..... 108

    7.2 混凝土防渗面板与心墙 ..... 108

    7.3 坝体自身防渗 ..... 109

    7.4 横缝、止水和排水 ..... 109

8 坝基处理 ..... 110

9 坝体构造 ..... 113

    9.1 坝顶布置和交通 ..... 113

9.2 坝内廊道和孔洞 ..... 114

9.3 坝体分缝、排水和基础垫层 ..... 115

10 安全监测设计..... 117

10.1 一般原则 ..... 117

10.2 监测项目与监测设施布置 ..... 121

1 总 则

1.0.2 砌石坝的级别，应符合 SL 252—2000《水利水电工程等级划分及洪水标准》的规定。截至 2000 年底，我国已建成的砌石坝数量统计如表 1 所示。由表 1 可以看出，已建成的 3 级砌石坝有 467 座，2 级砌石坝有 34 座，坝高 50m 及 50m 以上的砌石坝共 217 座。我国已建成的若干 2 级、3 级砌石重力坝工程特性如表 2 所示，若干 3 级砌石拱坝工程特性如表 3 所示，鉴于目前国内尚缺乏 1 级砌石坝的实践经验，故本规范仅适用于 2 级、3 级砌石坝或坝高超过 50m 的 4 级、5 级砌石坝。对 4 级、5 级坝坝高 50m 的限制，主要是因为坝高达 50m 以上砌石坝的防渗问题、设计及施工难度问题显得更为突出，遵守本规范对保证大坝设计、施工质量及安全有利。对于坝高 50m 以下的 4 级、5 级砌石坝设计可参照使用，但无约束力；主要应考虑 4 级、5 级砌石坝工程的具体条件，在保证大坝安全的前提下，适当放宽要求，如对于砌石拱坝，应力控制标准可以放宽一些，而对于坝头稳定分析要求则不宜放得太宽；对于某些 4 级、5 级砌石坝工程很难办到的试验及分析方法可以适当放宽。

表 1 我国已建成的砌石坝统计表 单位：座

项目 \ 坝的类别		重力坝	拱坝	支墩坝	其他	合计
合 计		780	1538	83	282	2683
按库容分 (亿 m <sup>3</sup> )	大 (2) 型 (1.0~10)	17	3	3	11	34
	中型 (0.1~1.0)	162	113	13	179	467
	小 (1) 型 (0.01~0.1)	227	536	18	39	820
	小 (2) 型 (0.001~0.01)	374	886	49	53	1362
按坝高分 (m)	>100		2			2
	70~100	10	18	2	4	34
	50~70	48	92	5	36	181
	30~50	212	392	15	134	753
	15~30	510	1034	61	108	1713

表 2 我国若干砌石重力坝工程特性表

序号	工程名称	地点	库容 (万 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	底厚 (m)	坝体建筑材料	坝身防渗措施	泄洪方式	坝基情况	基岩摩擦系数	地基处理	建成年份
1	朱庄	河北沙河	43600	95	111	水泥砂浆砌石	混凝土防渗面板	坝身溢流	石英砂岩，有软弱夹层		灌浆排水，增加压重，并缝等	1979
2	宝泉	河南辉县	6850	91.1	102.9	水泥砂浆砌石	混凝土防渗面板	坝身溢流	花岗片麻岩		帷幕	已建 91.7m， 下库
3	石门	河南辉县	3000	90.5	79	水泥砂浆砌石	混凝土防渗面板	坝顶挑流	片麻岩		排水	1974
4	渔洞	云南昭通	36300	87	84.9	细石混凝土砌石	混凝土防渗面板	坝顶弧门			帷幕	1998
5	口上	河北武安	24600	77	58	水泥砂浆砌石	混凝土防渗墙	挑流	石英砂岩		灌浆	1969
6	青天河	河南博爱	1726	72	67	水泥砂浆砌石	混凝土防渗面板	坝身挑流	白云质灰岩	0.65	帷幕	1972
7	葫芦口	四川威远	7580	71	64.3	水泥砂浆砌石	混凝土防渗墙	坝身、底流消能	砂泥岩互层有软弱夹层		帷幕排水，坝后抗力体加重	1979
8	皎口	浙江鄞县	10960	66		细石混凝土砌石	混凝土防渗面板	坝顶弧门	凝灰流纹斑岩	0.6 ~0.65	帷幕、断层 挖截水井	1974

表 2 (续)

序号	工程名称	地点	库容 (万 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	底厚 (m)	坝体建筑材料	坝身防渗措施	泄洪方式	坝基情况	基岩摩擦系数	地基处理	建成年份
9	长诏	浙江 新昌	16400	64		细石混凝土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶弧门	凝灰岩	0.3 ~0.7	帷幕，断层挖 截水井，坝后 混凝土齿墙	1978
10	黄龙带	广东 从化	9000	63	50	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗墙	坝顶弧门	花岗岩		帷幕	1976
11	黄岑	湖南 宜章	1470	60.6	54	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	花岗岩		截水墙、灌浆	1975
12	峰头	福建 云霄	17700	59.6	54.8	细石混凝土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶弧门	似斑状花岗岩		排水	1987
13	金家洞	湖南 溆浦	1480	58	49.7	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	坝顶弧门	燧 石	0.7	帷幕、排水	1973
14	大江边	湖南 祁阳	5000	55	48.5	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	砂 岩		帷幕、排水、 截水墙	1972
15	黑龙滩	四川 仁寿	35600	53	67.4	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	旁侧溢 洪道	砂岩夹页岩		帷幕、加固 坝体	1972
16	龟石	广西 钟山	59000	42.7	38	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	坝身弧门	花岗岩		帷幕	1966
17	水府庙	湖南 湘乡	37000	35.4	28	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗面板	坝顶弧门	砂质板岩	0.53	帷幕	1959



表 3 我国若干砌石拱坝工程特性表

序号	工程名称	地点	库容 (万 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	底厚 (m)	河谷形状 及跨高比	厚高比	最大 中心角 (°)	坝体建筑 材料	坝身防渗 措施	泄洪 方式	坝基情况	建成 年份
1	下会坑	江西 上饶	3500	102.4	20.5	2.36	0.20	99.69	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	花岗岩	2002
2	群英	河南 修武	1950	101.3	52	V形 1.3	0.51	80	水泥砂浆 及小石子 砂浆砌石	混凝土 防渗面板	坝顶 挑流	石灰岩	1971
3	盐津桥	贵州 仁怀	3355	100	12 ~13.2	1.09	0.145	96	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗墙	岸边 溢洪道	白云岩	2003
4	井冈山冲	江西 井冈山	1517	92	24	V形 2.8	0.261	106.7	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	砂岩	1994
5	长潭岗	湖南 凤凰	9970	87.1	15	V形 2.4	0.172	108	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	石灰岩	1997
6	东固	福建 德化	5200	86.5	13	V形 2.3	0.15		细石混凝土 土砌石	坝体 自身防渗	坝顶	花岗岩	2002
7	雷公口	福建 建阳	4700	86.3					细石混凝土 土砌石	坝体 自身防渗	坝顶		1998
8	桑园	福建 福鼎	8000	84.2	19.5	V形 2.44	0.23		细石混凝土 土砌石	坝体 自身防渗	坝顶		1995
9	观音岩	贵州 施秉	13200	82.1	13.9	V形 1.7	0.169	98	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗墙	坝顶	白云质灰岩	1993
10	东石岭	河北 沙河	7073	82	41	U形 2.5	0.5	109.5	水泥砂浆 砌石	混凝土 防渗墙	坝顶 挑流	石英砂岩及 花岗岩片麻岩	1969

表 3 (续)

序号	工程名称	地点	库容 (万 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	底厚 (m)	河谷形状 及跨高比	厚高比	最大 中心角 (°)	坝体建筑 材料	坝身防渗 措施	泄洪 方式	坝基情况	建成 年份
11	大江口	湖南 涟源	4430	82	25	梯形 2.13	0.31	97.8	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	灰岩	1992
12	金坑	浙江 青田	2420	80.6	20	梯形 3.02	0.248	110	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	花岗岩	1984
13	南溪	福建 福鼎	5600	67.3	18.82	V形 3.31	0.292	128	细石混凝土 土砌石		坝顶	凝灰流纹岩	1979
14	天福庙	湖北 远安	6380	63.3	20	2.78	0.32	91.5	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	石灰岩	1978
15	板峡	广西 永福	9820	60.3	17	梯形 2.6	0.282	113.8	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗面板	坝顶	石英砂岩 夹页岩	1981
16	河口	四川 威远	6740	57	14	V形 1.64	0.246	120	水泥砂浆 砌条石	水泥砂浆 勾缝	旁侧 溢洪道	砂岩夹页岩	1972
17	东溪	福建 仙游	2282	57	18.96	V形 2.58	0.33	106	细石混凝土 土砌石		坝顶	流纹斑岩	1979
18	岩鹰山	贵州 修文	930	56	16	V形 2.5	0.286	121	水泥砂浆 混凝土砌石	混凝土 防渗墙	旁侧 溢洪道	白云质灰岩 有页岩夹层	1972
19	官厅	四川 青神	1291	52.8	15.2	V形 1.99	0.288	120	水泥砂浆 砌条石	混凝土 防渗面板	旁侧 溢洪道	泥质砂岩	1976
20	长沙坝	四川 威远	3470	52	15	U形 2.5	0.308	110	水泥砂浆 砌条石	水泥砂浆 勾缝	坝顶	砂岩夹页岩	1971
21	桐坑溪	浙江 天台	250	48	5	V形 1.34	0.104	143	细石混凝土 土砌石	混凝土 防渗墙	坝顶	花岗岩	1972

国内已建坝高 100m 以上的砌石坝现有 3 座（河南群英，坝高 101.3m；江西下会坑，坝高 102.4m；贵州盐津桥，坝高 100m。均为砌石拱坝），已建坝高 85~95m 的砌石坝现有 8 处，其中砌石重力坝 4 座（河北朱庄，坝高 95m；河南石门，坝高 90.5m；河南宝泉，坝高 91.1m；云南渔洞，坝高 87m），砌石拱坝 4 座（江西井冈冲，坝高 92m；湖南长潭岗，坝高 87.1m；福建东固，坝高 86.5m；福建雷公口，坝高 86.3m）。鉴于近二十余年来，国内在修建了若干座 80m 以上砌石坝的基础上，逐渐上升至 100m 左右的高坝，在这方面积累了一定的经验，本条将原规范 1.0.1 条中对于 1 级砌石坝或坝高超过 100m 时应进行专门研究，改为对于坝高超过 100m 的砌石坝，设计时应进行必要的专题研究。取消 1 级坝，主要是因为今后砌石坝达到 1 级的可能性很小；必要的专题研究是指坝高超过 100m 的砌石坝，应根据工程的具体情况，选择 1 个或几个专题（如地基处理、坝顶或坝身泄流、泄洪消能、防渗等）进行研究。

**1.0.3** 新增条文，关于坝高划分为低坝、中坝、高坝的规定，与《混凝土重力坝设计规范》（SL 319—2005）、《混凝土拱坝设计规范》（SL 282—2003）中的规定一致。

**1.0.4** 新增条文，关于砌石拱坝按厚高比划分为薄拱坝、中厚拱坝、厚拱坝的规定，与 SL 282—2003 中的规定一致。

**1.0.5** 本条是在总结我国砌石坝建设经验的基础上提出的。

（1）鉴于不少砌石坝因地形、地质、水文等方面基本资料不清，严重影响工程发挥效益，甚至成为病害水库，故本条强调认真分析研究建坝地区的各项基本资料。

（2）不少砌石坝，因忽视地基处理，造成工程隐患或出现坝体渗漏现象，因此在设计中对地基处理和防渗问题应引起足够重视。

（3）大量砌石坝采用坝顶或坝身泄流方式，泄洪消能防冲的问题应引起重视。

（4）砌石坝一般施工导流方式简单，也便于施工度汛，这也

是砌石坝的优点之一。

(5) 砌石坝是当地材料坝，在建筑材料、施工方式及施工技术的采用上，应因地制宜，是十分重要的，常可达事半功倍之效。近十几年来，坝工材料及施工技术等方面不断创新，故提出积极、慎重地采用新材料、新技术、新工艺。

(6) 砌石坝工程造价一般较同类型混凝土坝低 40% 左右，温控问题较混凝土坝要缓解许多，其单价与碾压混凝土相近，但因机械化程度不高，施工进度缓慢是它的主要缺点，因此，缩短建设周期是很重要的问题。

(7) 鉴于坝工结构试验近十几年已逐渐被淘汰，被相关的有限元法所取代，而砌石坝的结构试验难度更高，事实上已不可能也无必要做，故将原规范本条末段，结构试验改为结构计算。

**1.0.7** 列出本规范主要引用标准。

### 3 筑坝材料及砌石体设计指标

#### 3.1 筑坝材料

**3.1.1** 为了进一步统一砌石体所用石料名称，本条根据施工实际情况，参照有关规范，对毛石、块石和粗料石的规格、形状等作了明确的规定。

由于近年来砌石坝施工机械化程度不断提高，石料尺寸相应加大，考虑到施工技术和砌筑质量，不论采用何种施工方法，竖缝一次填入混凝土高度约 40cm，高 100cm 的石料分 2~3 层填入混凝土即可，所以石料不论横竖安放均可满足施工要求。

将原规范石材的标号划分成若干相对应的强度级别并换算成单位 MPa，石材的抗压强度测定方法依据《水利水电工程岩石试验规程》（SL 264—2001）中第 5.4 节岩块单轴抗压强度的试验方法执行。当抗压强度值介于两标号强度之间时，则采用低标号强度。

**3.1.2** 细骨料分天然砂和人工砂两类。混合砂是由人工砂和天然砂混合而成，是人工砂的一种。配置胶凝材料宜选用中砂，当选用粗砂或细砂时，应相应提高或降低砂率，以满足胶凝材料和易性、强度及耐久性的要求。

粗骨料分碎石和砾石，碎石是由机械破碎经筛分而成的人工碎石，砾石为天然卵石。

**3.1.3** 胶凝材料包括水泥砂浆和一、二级配混凝土。一、二级配混凝土通常又称细骨料混凝土或细石混凝土，并将原规范条文中的胶结材料改为胶凝材料。

明确了除水泥仍采用国家通用的强度等级标准外，其他胶凝材料则采用标号，水泥砂浆、混凝土胶凝材料的标号是根据标准试件（立方体）90d 龄期的极限抗压强度确定的。

胶凝材料配合比设计步骤是首先按原始资料进行初步计算，

得出“理论配合比”，经过试验室试拌调整，提出一个满足施工和易性的“基准配合比”，然后进行密度和强度的调整，确定出满足设计和施工要求的试验配合比。

胶凝材料中掺用粉煤灰具有改善胶凝材料的和易性及物理力学性能、降低胶凝材料的温度、提高工程质量、节约水泥、降低工程造价等效果，已被广泛应用并积累了很多成功的经验。粉煤灰混凝土设计是以“基准配合比”为基础，按等稠度、等标号强度的原则，用超量取代法进行调整。

粉煤灰的掺量和胶凝材料中掺入其他掺和料、外加剂时，其最优掺量均应进行专门的试验研究。

### 3.2 砌石体设计指标

**3.2.1** 砌石体的密度在设计取值时应考虑胶凝材料种类、施工技术及砌筑方法，混凝土砌石体机械振捣，直接砌筑法  $\rho_d$  可采用条文中高值。砂浆砌石体，特别是人工捣实的砌石体  $\rho_d$  应取低值或降低取值。

**3.2.2** 砌石体的线膨胀系数  $\alpha$  一般采用经验值，如有必要可由试验确定。

**3.2.3、3.2.4** 砌石体是由相对强度相差较大的石料和胶凝材料砌筑而成，并受多种施工因素影响，故砌石体的变形特性和抗压强度受多方面的因素制约而变得相对复杂，条文中明确了砌石体的变形（弹性）模量，应通过试验来确定。对于边长不超过  $60\text{cm} \times 60\text{cm}$  的砌石体试件可依据《水工混凝土试验规程》（SD 105—82）全级配混凝土的试验方法进行。边长大于或等于  $70\text{cm} \times 70\text{cm}$  的试件应按本规范附录 B 规定的方法进行试验。根据已有试验表明，砌石体试件尺寸边长应大于或等于  $70\text{cm}$  才能满足砌石体的特定条件。本规范附录 A 中表 A.0.2、表 A.0.3 中毛石和块石混合砌石体的两挡参数为计算值。表 4 中为实测成果，可供参考。

**3.2.5** 试验表明胶凝材料与石料接触面或砌石体层缝面的抗

表 4 砌石体力学试验实测成果表

砌石 体种 类	石料饱 和抗压 强度 $R_s$ (MPa)	石料 名称	试体 面积 ( $\text{cm}^2$ )	胶凝材料及 砌筑方法	胶凝材 料标号 (MPa)	试体纵 波速度 ( $\text{km/s}$ )	抗压强度 $f_{\text{cc}}$ (MPa)			变形模 量 $E_0$ (GPa)	弹性模 量 $E_e$ (GPa)	抗拉强 度 $f_t$ (MPa)	干密度 $\rho_d$ ( $\text{kg/m}^3$ )	试验 地点
							初裂 强度	屈服 强度	极限 强度					
毛石 砌石体	$\geq 80$	花岗岩	5000	二级配混凝土 直接砌筑法	20.0	4.10	8.01	11.62	20.33	9.35	15.58		2400	江西 下会坑
					15.0	4.10	7.44	10.80	18.70	8.00	13.40	1.55	2380	
毛石 砌石体	$\geq 80$	冰碛岩	6400	一级配混凝 土坐浆法	15.0	4.30	5.20	8.30	16.20	8.54	14.23	1.32	2410	湖南 玉龙岩
					10.0	4.00	3.90	6.70	13.70	7.82	13.03	1.13	2390	
块石 砌石体	$\geq 80$	石灰岩	10000	水泥砂浆 坐浆法	10.0		3.30	5.80	8.10	5.08	8.67	0.67		湖南 廖家坪
					7.5		2.60	4.60	7.30	4.41	7.34	0.61		

表 5 砌石体抗剪强度试验统计表

石料与胶凝 材料组合	石料饱和抗压 强度 $R_s$ (MPa)	胶凝材料标号 (MPa)	实验实测组数			抗 剪 强 度 指 标			
			算 术 平 均 值			95% 保 证 值			
			$f'$	$c'$ (MPa)	$f$	$f'$	$c'$ (MPa)	$f$	$c'$ (MPa)
I	$\geq 100$	10.0~12.5	6	6	16	1.28	0.955	0.72	1.126
II	60~100	10.0			5			0.56	
III	$\geq 100$	5.0~7.5	18	18	42	1.045	0.816	0.61	0.975
IV	60~100	2.5~5.0	1	1	13	0.69	0.84	0.58	
注：胶凝材料除第 I 种组合中有一部分为一级配混凝土外，其余均为水泥砂浆。									

拉强度总是低于石料或胶凝材料本身的抗拉强度，故测定砌石体层缝面或接触面的抗拉强度是主要的，试验方法主要有轴向拉伸和纯弯曲方法两种，可依据《水工混凝土试验规程》(SD 105—82)规定的方法进行。对于断面大于 50cm×50cm 的大试体可在现场采用纯弯曲方法进行。不管是室内还是现场试验，砌筑方法必须与现场施工方法相同。

**3.2.6** 砌石体垫层混凝土与岩体接触面、砌石体与垫层混凝土或砌石体本身的抗剪强度试验称抗剪断试验；剪断以后仍沿剪断面进行直剪称抗剪试验（也称摩擦试验）；对试件不施加法向荷载的直剪称抗切试验。以上三者统称抗剪试验。抗剪强度指标是工程设计中一项必要的参数，对 2 级建筑物，本条强调应通过现场试验确定抗剪强度参数，表 5 中所示的不同石料饱和抗压强度和胶凝材料标号四种组合情况下的抗剪强度结果可供 3 级建筑物参考。

应重视砌石体及组成砌石体的材料的物理力学性能试验研究，以便为设计提供安全、准确、可靠的设计参数。



## 4 荷载与荷载组合

### 4.1 荷载

**4.1.1~4.1.3** 基本保留原规范第 3.1.1 条中的内容，将原规范第 3.1.1 条内容拆分成三条，使得新条文简洁明了。静水压力是作用在砌石坝上的主要荷载，由于温度荷载在薄拱坝中所占比重较大，故扬压力在薄拱坝中可以不计，但在重力坝中所占比重较大；泥沙压力在少沙河流中可以不考虑。浪压力和冰压力一般所占的比重较小，冰压力只有在严寒地区才需考虑。在地震烈度 6 度以上地区应考虑地震荷载。

**4.1.3** 后半条保留原规范第 3.1.1 条中的内容。作用在坝体上游面的静水压力，一方面根据水库功能的不同，如发电为主的水库，以正常蓄水位计算；另一方面根据荷载组合不同，取用不同的计算水位，如基本组合时采用正常蓄水位或设计洪水位作为计算水位，特殊组合时采用校核洪水位作为计算水位，与地震荷载组合时可参照《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203—97）规定的水库水位计算。

下游面的静水压力应根据相应于上游水位时的不利下游水位计算，保留原规范第 3.1.1 条中的内容。

水的重度应根据水中含沙量的程度确定。

**4.1.4** 基本保留原规范第 3.1.2 条中的内容。通常只在排水孔处有扬压力的监测成果，没有帷幕灌浆处扬压力的监测成果，因此改用排水孔处的监测资料作为扬压力系数规定的依据，符合实际情况。

同时对作用于坝基面的扬压力，保留了原规范附录二中坝基面未设帷幕仅设置排水孔和仅设防渗帷幕未设置排水孔的情况；保留了原规范附录二中空腹重力坝扬压力的内容。

对岸坡坝段（包括岸坡拱座）渗透压力的计算，部分保留原

规范附录二中的相关内容。

**4.1.5** 基本保留原规范第 3.1.3 条中的内容。对计算泥沙压力的泥沙淤积厚度的计算期限按附录 D 规定。坝前泥沙淤积厚度，应根据河流水文泥沙特性和枢纽布置情况，经计算确定；对于多泥沙河流上的工程，宜通过物理模型试验或数学模型计算，并结合已建类似工程的实测资料，综合分析确定。

**4.1.6** 基本保留原规范第 3.1.4 条中的内容。浪压力对砌石坝的设计是一项次要的荷载，因此作了适当简化和降低标准（同 SL 282—2003）。本条引用上述规范中对内陆峡谷水库的官厅水库公式计算波浪要素后直接计算浪压力。本规范采用 5%~10% 的累积频率波高，同时删去了库水深小于波浪破碎临界水深情况下的浪压力计算公式。

**4.1.7** 保留原规范第 3.1.5 条的内容。与《水工建筑物抗冻设计规范》（SL 211—98）规定一致。将原规范正文中静冰压力和动冰压力的解释性内容移至条文说明中，即静冰压力是指坝前冰层升温膨胀时作用于坝面的压力；动冰压力是指由于冰块运动撞击坝面、闸墩、胸墙以及其他建筑物上所产生的压力。

**4.1.8** 保留原规范第 3.1.6 条的内容。增补了作用于反弧段边墙上水流离心力的计算，见本规范附录 C.6.3 的规定。

**4.1.9~4.1.11** 保留原规范第 3.1.7 条中的内容和附录二之七部分内容。将原规范第 3.1.7 条和附录二之七部分内容拆分成三条，使得新条文简洁明了。增加了坝体温度分布图。本规范附录 C.7 保留原规范附录二之七部分的内容。

**4.1.12** 保留原规范第 3.1.8 条的内容。地震荷载的计算参照现行的《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203—97）的规定执行。

## **4.2 荷载组合**

**4.2.1** 保留原规范第 3.2.1 条前半条关于荷载组合的两种类型。

**4.2.2** 增加了荷载组合表 4.2.2-1 和表 4.2.2-2，代替原规范第 3.2.2 条的内容，应用和选择更显直观，根据工程实际情况，选择控制性荷载组合进行计算。

**4.2.3** 基本保留原规范第 3.2.1 条后半条基本组合和特殊组合的定义。

## 5 砌石重力坝

### 5.1 坝体布置

**5.1.1** 大坝是水利枢纽中重要建筑物，坝体布置应结合枢纽建筑物的布置以及安全运行进行综合考虑。应特别重视泄洪建筑物的布置，因为泄洪建筑物的布置合理与否，会影响枢纽其他建筑物的正常运行，冲刷岸坡，甚至危及大坝安全。

**5.1.2** 砌石坝的胶凝材料采用水泥砂浆或一、二级配混凝土。本条提出砌石重力坝砌石体胶凝材料应考虑的因素。

**5.1.3** 坝体溢流段的设计应满足能安全宣泄校核洪水、不影响下游建筑物的正常运行。坝址地形地质条件、水库淹没状况对坝体溢流段前缘宽度和消能方案选择都是决定因素。

**5.1.4** 本条提出了确定坝体泄洪消能防冲设施应考虑的因素。

**5.1.5** 基本保留原规范第 4.1.3 条的内容。

**5.1.6** 基本保留原规范第 4.1.4 条的内容。

### 5.2 坝体结构

**5.2.1** 合理的坝体结构型式，应使坝体的受力条件与坝址的地形、地质、水文、建材、施工等建设条件相适应。

**5.2.2** 根据已建重力坝的剖面型式，规定了三角形基本剖面顶点的位置，使坝体剖面具有可比性。

**5.2.3** 本条在于阐明挡水坝段和溢流坝段的连接，也指出当坝段地基条件差异较大时，可以在不同的坝段采用不同的结构剖面。

**5.2.4** 本条由原规范 4.2.1 条修改而成，主要是考虑砌石体施工时的自身稳定的需要，坝坡坡度最小采用 1 : 0.05。

### 5.3 坝体抗滑稳定计算

**5.3.2** 本条保留原规范第 4.3.2 条的计算方法。条文中给出两

个计算公式，可选取其中任一种公式进行计算。滑动面上凝聚力  $c'$  值对坝体抗滑稳定的影响，随着坝高的增加而减小。高坝还受到坝体内砌体间的抗滑稳定（砌体间  $f'$  和  $c'$  值较小）控制或坝趾压应力控制，故两种公式计算结果差别不大；对中低坝来说，特别是当下游水深比较高时，计算结果差别较大，但是，受上游面应力的制约，按公式（5.3.2-1）计算所得的断面也不可能太瘦。

**5.3.3** 本条与原规范第 4.3.4 条规定基本相同，增加了当坝基岩体内存在软弱结构面、缓倾角结构面时应计算深层抗滑稳定的规定。并增列附录 E，提供深层抗滑稳定安全系数及计算公式，表 E.0.3 所列安全系数引自 SL 319—2005 条文说明。因深层滑动情况与拱坝坝肩岩体内结构面类似，计算公式来源于 SL 319—2005 附录 E。

**5.3.4** 保留原规范第 4.3.6 条的内容。

## 5.4 坝体应力计算

**5.4.1** 基本保留原规范第 4.4.1 条的内容。对于不能作为平面问题处理的坝体或坝段，提出宜进行有限元法计算。本条增加了对空腹重力坝的应力可采用结构力学和材料力学方法进行分析计算的规定。

**5.4.2** 由于中、低坝的断面设计一般受抗滑稳定控制，故规定对中、低坝，也可只计算坝面的应力。

**5.4.3** 保留原规范第 4.4.7 条的内容。

**5.4.4** 砌石重力坝的坝体应力分析，均以材料力学法为基本方法，因此应采用相应的应力控制标准。应力控制条件规定坝踵不产生垂直拉应力，坝体上游面垂直应力（计入扬压力）控制为零，取消了不计扬压力保持有  $0.25\gamma_w H$  的规定（ $\gamma_w$  为水的重度， $H$  为计算点处的作用水头），因为该规定在国内外有关工程中均不起控制作用。

**5.4.5** 保留原规范第 4.4.4 条的内容。

**5.4.6** 保留原规范第 4.4.5 条的内容，增加了对主压应力不超过地基的容许承载力的要求。

**5.4.7** 保留原规范第 4.4.6 条的内容。

**5.4.8** 新增条文。由于这条规定了参照 SL 319—2005 相关条文的规定，故条文说明也参见该规范的相关条文说明。

## **5.5 坝体温度控制和防裂**

**5.5.1** 由于砌石坝的水泥用量较混凝土坝少，同时也因施工速度较慢而散热条件较好，原型观测表明坝体的温度应力比混凝土坝小。因此，对砌石坝的温度控制设计可比混凝土坝放宽。对于一般工程的中、低坝，参照已建工程经验进行温度控制和防裂设计的要求。对于大型工程考虑其重要性，宜采用有限元法进行专门的温度控制设计。

**5.5.2** 基本保留原规范第 4.5.1 条的内容。

**5.5.3** 根据砌石坝胶凝材料普遍采用混凝土的趋向，提出坝体分缝的要求，要求坝体横缝布置与垫层混凝土横缝相适应，以便于设置止水。

**5.5.4** 为避免或减少砌石坝体的温度裂缝，采用低水化热胶凝材料是必要的，条文中提出了相应的措施。

## 6 砌石拱坝

### 6.1 坝址、坝线和坝体布置

**6.1.1** 坝址地形、地质条件对布置拱坝十分重要。近二十多年随着砌石拱坝建设的发展，这方面的条件有所放宽，如在不对称河谷、较宽河谷、地质条件复杂的坝址也可以筑坝，但总的来说，以中、小型工程居多，技术上还不够成熟，在地形、地质条件较好的坝址，修建拱坝仍比较经济。本条较原规范条文修改了两处：“地形狭窄”改为“地形相对狭窄”、“坝肩地质条件好”改为“坝肩地质条件相对较好”，也是根据实际工程经验，适当放宽了对修建拱坝的地形、地质条件的要求。

**6.1.2** 已建不少砌石拱坝，因坝轴线位置选择不当，往往带来一些缺陷或隐患。如拱端与基岩等高线交角过小、坝线布置在喇叭口地形最窄处，都对抗滑稳定不利。沿坝轴线地质情况不明，往往使开挖量增大，坝体工程量也增大，甚至按原有拱弧线开挖达不到坚硬基岩，从而被迫修改设计等，故本条强调重视坝轴线位置的选择，需反复布置。

**6.1.3** 本条强调坝体布置应根据坝址自然条件及枢纽综合利用要求统筹考虑，并经技术经济比较确定。

**6.1.4** 本条根据砌石拱坝建设实践经验及目前的技术水平，规定拱圈最大中心角以  $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$  为宜，受国内外混凝土拱坝设计扁平化的影响，近二十年所建砌石拱坝的最大中心角有逐渐减小的趋势，一般未超过  $110^{\circ}$ 。SL 282—2003 建议最大中心角为  $75^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ，考虑到砌石拱坝大都为中、小型工程，过小的中心角在设计、计算、分析上恐难适应，故以  $80^{\circ}$  为下限。

对于河谷较宽的坝址，采用圆弧形拱圈一般不很理想，如中心角过小，则应力条件不好；如中心角较大，则可能坝头稳定性不好。为了增强坝头稳定性且不使应力恶化，近年来国内拱坝设

计中，逐渐采用扁平化的非圆弧形拱圈，如对数螺旋线、抛物线、三心圆拱等。当然，采用何种拱圈形状，需因地制宜。

根据已建工程实践经验，只要胶凝材料标号较高（例如 10.0MPa 以上），且施工质量有保证，砌石拱坝采用 0.3 : 1 的倒悬度是可靠的。对于 V 形河谷，布置双曲拱坝时，最大倒悬度也以 0.3 : 1 为宜，过小则布置困难。

当倒悬度为 0.3 : 1 时，按悬臂梁核算结果如下：砌体高 1m 时，最大弯曲拉应力为 4.32kPa，最大剪应力为 5.76kPa；当砌体高 4m 时，则最大拉、剪应力为砌高 2m 时相应应力的 2 倍。这些数值都在砌石体允许应力范围之内，故可以按胶凝材料及施工水平，适当选择砌体上升强度，如水泥砂浆砌体，一次砌高可小些，混凝土砌石体则可大些；施工水平较高时，一次砌高可大些，反之则小些。

**6.1.5** 表孔泄洪一般布置比较紧凑、经济，是目前砌石拱坝普遍采用的一种溢流方式，这方面经验比较丰富，宜作为坝体泄洪优先考虑的方式。

原规范条文为：“浆砌石拱坝泄洪布置和泄洪方式的选择，应根据工程的特点确定。”本条将第二句修改为“应根据体形、坝高、泄洪量大小、坝址地形、地质等进行技术经济比较确定”，较原条文更为扼要和具体。

## 6.2 坝体应力分析

**6.2.1** 目前砌石坝设计中，对结构的计算假定和相应的设计方法主要有以下两种：

（1）视砌石体为各向同性的均质体，沿用同类型混凝土坝的设计计算方法。

（2）在一定程度上反映砌石体的各向异性和非均质性，对于设有混凝土防渗体的砌石坝，采用分层异弹模的简捷算法。

现仍以第一种设计分析方法为主，这一方面是受试验、科研、计算条件的限制，且沿用混凝土坝设计方法计算分析比较简



捷。下面几座砌石拱坝原型监测成果说明沿用混凝土拱坝的分析方法，一般是偏于安全的。下面列举三种：

(1) 福建南溪砌石拱坝（坝高 67.3m）运行期坝体实测应力基本上接近拱冠梁法设计计算的应力值。

原水利电力部大坝监测资料分析中心 1988 年的报告结论是：“砌石拱坝结构和混凝土坝不一样，……非均质性程度大，坝身应力分布要比混凝土坝复杂，……但从总的实测应力结果来看，该坝体测点部位应力分布，无论是施工期时段的应力，还是运行期的应力，都有较好的变化规律，并都同均质的混凝土坝应力变化规律相似，……因此按照混凝土拱坝设计计算方法进行砌石拱坝结构计算还是适合的。”

(2) 四川长沙坝砌石拱坝（坝高 52m）早期原型监测成果说明在水压作用下，拱圈及拱冠梁基本受压，应力分布与一般混凝土坝大体相似。

成都科技大学的结论是：“在一定程度上坝体为非均匀性的结构，但从整体来看，坝体位移曲线和拱向应力分布规律与一般均质坝类似，而梁向应力分布差异较大。……水平缝的存在……使坝体位移值远大于一般混凝土坝的位移值。……坝体应力发生再调整的性能比混凝土坝大，常可导致拉应力值降低甚至消除，使应力趋于均化，或受拉区不致扩展，这就有可能充分利用砌体抗压强度高的特点，而使坝体受力条件获得一定的改善。”

(3) 广西板峡砌石拱坝（坝高 60.3m），从施工期原型监测成果看，温度应力占主要成分，基本上符合混凝土拱坝应力分布的一般规律。

分层异弹模反映了设有混凝土防渗体的砌石坝的材料结构特点，比将砌石体视为均质弹性体更符合实际。折算断面的方法是材料力学中通用的方法，如钢筋混凝土对于复合材料杆件的分析即用之。分层异弹模坝的简捷算法本质上与折算断面法相同。就截面总力（法向力和剪力）而言，材料力学法将材料视为均质体或分层异弹模体，其差别可能不会很大，但应力分布则很不相

同。应该说考虑分层异弹模更为合理，特别是远离坝基部位的应力分布，但坝踵部位的应力有时和有限元法计算值相差较大，故对于高坝和地质情况复杂的坝，应用有限元法进行复核。

**6.2.2** 本条规定砌石拱坝应力分析宜以拱梁分载法为主，这点较能适应我国目前的计算分析水平与经验，与 SL 282—2003 是一致的。

拱梁分载法包括“多拱梁法”和“拱冠梁法”。我国近二十年来在拱梁分载法基本假定的基础上加以改进或简化的一些新的计算方法都属于拱梁分载法的范围。

应用拱梁分载法时，一般宜采用考虑拱和梁径、切、扭三向变位调整的多拱梁法。对于 2 级建筑物的低坝和 3 级建筑物的中、低坝，如果河谷比较对称，且受计算条件的限制，可采用考虑径向和扭转调整的拱冠梁法。

对于 2 级或情况比较复杂的砌石拱坝，除用拱梁分载法计算外，必要时可采用有限元法验算，以弥补拱梁分载法的不足。本条较原规范条文删去了“或做结构模型试验加以验证”，因近一二十年拱坝电算技术的发展（特别是有限元法），结构模型试验在国内外已基本被淘汰。

“情况比较复杂”一般指坝址地形地质条件、拱坝体形或泄洪消能较复杂的情况。

**6.2.3** 本条列出坝体应力分析的主要内容，将分析坝基内部应力的内容，加以“必要时”限定。

**6.2.4** 不少砌石拱坝施工时不设横缝，采用整体上升的方式，这时坝体自重对应力的影响与一般分缝建成后再封拱的混凝土拱坝是不同的。在拱梁分载法中，整体上升时，各时段坝体自重所产生的变位应参与拱梁变位协调计算，在应力分析中应予考虑。

**6.2.5** 本条规定用拱梁分载法计算时的坝体应力控制指标。

(1) 本规范表 A.0.7 所列砌石拱坝的容许压应力  $[\sigma_p]$  来源于下式：

$$[\sigma_p] = 1.25 f_{cc} / K$$

式中  $f_{cc}$ ——砌石体极限轴心压应力，可从本规范表 A.0.3 中查得；

$K$ ——抗压强度安全系数；

1.25——轴心受压换算为弯曲受压的系数。

(2) 砌石体抗压强度安全系数  $K$  的取值，基本荷载组合为 3.5，特殊荷载组合为 3.0，比 SL 282—2003 中 2 级建筑物降低了 0.5，与 3 级建筑物相同，这是因为已建砌石拱坝过去设计计算压应力取值较大，正常组合时一般  $K$  在 3.0 以下。目前所采用的容许压应力大体相当于过去的设计水平。

对原规范表 5.2.5-1 所列值，曾用 20 世纪 70 年代兴建的若干工程实际数据进行复核，见表 6、表 7。

由表 6 和表 7 可见，表 6 所列 3 级砌石拱坝最大计算压应力均小于本规范的容许值，但表 7 所列的计算最大压应力则接近或超过本规范的容许值。经研究认为：规范值是合理的、可行的。主要理由如下：

1) 表 7 中的工程，均经多年运行，未出现问题。

2) 过去设计中，温度荷载一般采用美国垦务局的经验公式。1985 年我国颁布的《混凝土拱坝设计规范》(SD 145—85) 改用热传导理论推导的公式更为合理，本规范亦沿用此公式，但所算出最大压应力一般要较用美国公式的成果增大 0.5MPa 左右，故容许应力亦应稍大，以资配套。

(3) 已建工程的最大计算压应力偏低，未能充分发挥砌石体抗压强度高的优势，这是历史条件使然。因早期砌石坝设计（如印度 20 世纪 60 年代、我国 20 世纪 70 年代初期），砌石体抗压强度系用胶结材料强度除以安全系数确定。砌筑砂浆通常用 100 号，故容许应力多为 3.0~3.5MPa。其论据不够全面，且应力值偏低。此外，当时电算尚未普及，手算工作量很大，很难进行多方案比较，以调整拱坝体形，加之受施工水平和习惯的影响，体形比较简单，故一般是受拉应力控制，压应力很少达到限度。近年研究表明，在保证安全可靠的前提下，提高设计容许压应

表 6 部分 3 级砌石拱坝最大计算应力与容许压应力

序号	工程名称	地 点	坝 高 (m)	库 容 (万 m <sup>3</sup> )	坝 的 级 别	最大计算应力 (MPa)		按规范查容 许压应力 (MPa)	坝 体 材 料
						压应力	拉应力		
1	索溪峪	湖南慈利	86	3240	3	3.60	0.74	6.0	混凝土砌块石
2	大江口	湖南涟源	82	4430	3	3.64	1.04	5.3	混凝土砌块石
3	长潭岗	湖南凤凰	81.6	9780	3	5.03	1.00	5.3	100 号混凝土砌石
4	南 溪	福建福鼎	67.3	6690	3	3.62	0.895	5.3	混凝土砌条石
5	峡口肚	广西昭平	64	1181	3	4.24	2.00	5.3	100 号混凝土砌石
6	天福庙	湖北延安	63.3	6253	3	3.51	1.23	4.6	水泥砂浆砌条石
7	板 峡	广西永福	60.3	8740	3	2.67	1.50	6.9	150 号混凝土砌块石
8	鸟 源	广西富川	58	1415	3	4.48	0.12	6.9	150 号混凝土砌石
9	茅 溪	湖南大庸	57	5630	3	3.37	0.34	5.3	混凝土砌块石
10	胜 利	四川酉阳	55.17	1218	3	2.95	0.67	4.4	水泥砂浆砌条石
11	龙岭下	福建浦城	53	1290	3	3.50	1.60	5.3	混凝土砌块石
12	水 埠	福建泰宁	50.7	1270	3	3.40	1.35	5.3	混凝土砌石
13	官 舟	贵州沿河	46	2030	3	3.08	1.62	5.3	150 号混凝土砌石
14	东 风	贵州习水	46	1250	3	4.00	1.87	4.6	100 号砂浆砌块石
15	小 桥	四川涪陵	45	1126	3	3.7	1.17	4.4	水泥砂浆砌条石
16	山虎关	四川武隆	45	1075	3	3.61	1.28	4.4	水泥砂浆砌条石
17	山 花	广西藤县	45	3886	3	2.40	1.13	4.6	100 号、150 号砂浆砌块石
18	马安关	湖北郧西	42.6	1675	3	2.67	1.65	5.3	混凝土砌块石

表 6 (续)

序号	工程名称	地 点	筑 坝 石 料		坝底厚 (m)	厚高比	河谷宽 高比	坝体形	建成年份	备 注
			岩 类	标号						
1	索溪峪	湖南慈利	石英砂岩	800	22.5	0.262	1.83	双曲	1978	多拱梁法 按开裂 计算
2	大江口	湖南涟源	石灰岩	600	25	0.298	2.32	双曲	已建成	
3	长潭岗	湖南凤凰	石灰岩	600	15	0.184	2.5	双曲	施工中	
4	南 溪	福建福鼎	流纹岩	600	18.8	0.28	3.86	双曲	1983	
5	峡口肚	广西昭平	砂 岩	600	8	0.125	1.71	双曲	已建成	
6	天福庙	湖北远安	石灰岩	600	20	0.32	2.78	双曲	1978	
7	板 峡	广西永福	砂 岩	600	17	0.283	2.75	双曲	1983	
8	鸟 源	广西富川	砂 岩	600	16	0.276	3.31	双曲	已建成	
9	茅 溪	湖南大庸	石灰岩	600	15	0.263	2.32	双曲	1979	
10	胜 利	四川西阳	砂 岩	400	23	0.417	2.65	单曲	1979	
11	龙岭下	福建浦城	凝灰熔岩	600	15	0.28	2.34	双曲	1976	
12	水 埠	福建泰宁	云母石英片岩	600	14	0.276	2.6	双曲	1978	
13	官 舟	贵州沿河	石灰岩	600	11	0.275	3.25	双曲	1982	
14	东 风	贵州习水	石灰岩	600	10.5	0.23	1.7	双曲	1973	
15	小 桥	四川涪陵	砂 岩	400	8.6	0.191	2.44	单曲	1981	
16	山虎关	四川武隆	砂 岩	400	11	0.244	2.5	单曲	1977	
17	山 花	广西藤县	长石石英砂岩	600	7	0.19	2.49	双曲	1980	
18	马安关	湖北郧西	片麻岩	600	7.65	0.212	2.62	双曲	1979	

注 1：应力分析方法除注明者外，都为拱冠梁法；

注 2：胶凝材料未注标号者按 100 号计；石料未注种类的，按块石计，条石按粗料石计。

表 7 部分砌石拱坝最大计算应力与容许压应力

序号	工程名称	地 点	坝 高 (m)	库 容 (万 m <sup>3</sup> )	坝的 级别	最大计算应力 (MPa)		按规范查容 许压应力 (MPa)	坝 体 材 料
						压应力	拉应力		
1	流清河	山东崂山	83	260	4	5.88	2.05	5.7	100 号砂浆砌条石
2	方 坑	浙江武义	80	710	3	3.99	0.95	2.7	100 号混凝土砌毛石
3	小岗岭	浙江江山	64			5.48	1.40	5.3	100 号混凝土砌块石
4	神 口	湖北蒙阳	60	2495	3	3.66	1.78	3.6	水泥砂浆砌块石
5	金 花	广西岑溪	53	468	4	5.71	1.50	5.3	200 号混凝土砌块石
6	富 强	广西昭平	52.9	400	4	4.35	1.53	5.3	100 号混凝土砌块石
7	长沙坝	四川威远	52	3470	3	4.57	2.06	4.4	100 号砂浆砌条石
8	钓鱼台	陕西宝鸡	48.8	272	4	4.47	2.83	6.0	100 号混凝土砌块石
9	铁炉坑	福建寿宁	37	117	4	5.23	3.97	3.1	100 号混凝土砌毛石
10	乌龙矶	河北承德	24	55	5	4.32	3.28	4.6	100 号砂浆砌块石
11	碰 沟	陕西洛南	20.7	15	5	4.00	1.00	4.0	80 号砂浆砌块石
12	石 门	山东崂山	20	18	5	6.80	4.00	5.3	100 号砂浆砌块石
13	高竹洋	福建松溪	20	33	5	4.05	3.30	4.4	80 号砂浆砌块石
14	后壁山	福建寿宁	19.5	12	5	5.06	4.19	4.6	100 号砂浆砌块石
15	龙琯峡	福建寿宁	19.4	22	5	3.55	2.83	2.7	100 号混凝土砌毛石
16	坪 坑	福建寿宁	18.5	65	5	4.48	3.97	4.6	100 号砂浆砌块石
17	龙 磔	福建寿宁	18.4	12	5	5.59	4.93	4.6	100 号砂浆砌块石
18	小车岭	福建寿宁	17	10	5	4.57	3.93	2.7	100 号混凝土砌毛石

表 7 (续)

序号	工程名称	地 点	筑 坝 石 料		坝底厚 (m)	厚高比	河谷宽 高比	坝体形	建成年份	备 注
			岩 类	标号						
1	流清河	山东崂山	粗粒花岗岩	600	13.6	0.184	2.48	双 曲	已成 68m	多拱梁 法分析
2	方 坑	浙江武义	凝灰流纹岩	600	10	0.125	1.58	双 曲	已建成	
3	小岗岭	浙江江山	花岗岩	600	10	0.156	2.3	双 曲		
4	神 口	湖北蒙阳	千枚岩, 板岩	400	14	0.25	2.47	双 曲	已建成	
5	金 花	广西岑溪	混合岩	500	5.5	0.104	2.72	双 曲	已建成	
6	富 强	广西昭平	砂 岩	600	5	0.1	2.57	双 曲	已建成	
7	长沙坝	四川威远	砂 岩	400	16	0.34	2.74	单 曲	1971	
8	钓鱼台	陕西宝鸡	花岗岩	800	9	0.21	3.4	双 曲	1978	
9	铁炉坑	福建寿宁	凝灰岩	600	2.74	0.074	2.01	双 曲	1978	
10	乌龙矶	河北承德	石灰岩	600	1.8	0.09	3.13	双 曲	1982	
11	碰 沟	陕西洛南	片麻花岗岩	600	3	0.14	2.2	单 曲	1982	
12	石 门	山东崂山	花岗岩	800	2.7	0.135	3.35	单 曲	1966	
13	高竹洋	福建松溪	花岗岩	800	2	0.1	3.2	单曲变厚	1977	
14	后壁山	福建寿宁	流纹岩	600	1.5	0.077	2.82	单曲变厚	1980	
15	龙瑯峡	福建寿宁	流纹岩	600	1.86	0.096	2.06	单曲变厚	1981	
16	坪 坑	福建寿宁	流纹岩	600	1.57	0.085	2.43	单曲变厚	1983	
17	龙 磔	福建寿宁	流纹岩	600	1.33	0.072	2.74	单曲变厚	1979	
18	小车岭	福建寿宁	流纹岩	600	1.2	0.071	2.62	单曲变厚	1981	

注 1：除注明者外，均为拱冠梁法计算应力成果；

注 2：毛石又称乱块石，块石又称方块石，条石又称料石或粗料石。

力，将使体形布置、应力分布更为合理，收到节省坝体方量、缩短工期的经济效益（详见黎展眉：“关于浆砌石拱坝容许压应力的专题报告”）。

原规范表 5.2.5-1 中石料只分毛石、块石、粗料石三种，毛石砌体的容许压应力一般只为块石砌体的 0.6 倍左右，而实际工程的石料情况大都介乎两者之间或两者有所掺和，若按毛石砌体取值，容许压应力较低，往往断面较大，很不经济。本次修编，将原规范表 5.2.5-1 中毛石、块石之间增加了两挡的容许压应力值，即增加毛石占 70%、块石占 30% 的砌石体及毛石占 30%、块石占 70% 的砌石体。根据计算分析，以增加两挡为宜，附表 A.0.2 和附表 A.0.3 也作了相应补充。经查阅有关资料，内插两挡的数据基本合理，应能满足要求（详见王良之：“介乎毛石与块石之间的浆砌石体容许压应力的研究”专题报告）。

（4）将修编后的砌石体容许压应力列入附录表 A.0.7，此表主要根据附录 A 表 A.0.3 砌石体极限轴心抗压强度 28d 龄期试验值加以整理分析，考虑弯曲受压换算系数及荷载组合安全系数而得。砌石体容许压应力，大型工程应通过试验确定；中型工程宜通过试验确定，不具备试验条件时可参考附录 A 表 A.0.7 采用，但对表中部分数值偏高（如 78.0MPa）的数据宜慎重采用。

（5）原规范表 5.2.5-2 所列控制计算拉应力的数值主要是根据砌石体的极限抗拉强度（见本规范表 A.0.4）及参照已建工程的经验确定的。其值接近砌石体极限抗拉强度。控制计算拉应力值虽较过去的指标有所提高，但因砌石坝应力调整的性能比混凝土坝要高，可使应力重分布，因此只要采用合理的设计体形，仍属可行。

原规范表 5.2.5-2 中央悬臂梁底控制计算拉应力数值较其他部位放宽了 0.1~0.2MPa，与编写规范时期主要采用的应力分析方法的成果相关。当时所用应力分析方法主要是拱冠梁法，而拱坝温度荷载大都沿用美国垦务局的经验公式（ $T_m = \frac{57.57}{t+2.44}^{\circ}\text{C}$ ， $t$  为拱厚），并且未计入等效线性温差  $T_d$ 。这



表 8 若干砌石拱坝两种计算方法最大应力成果

序号	工程名称	地点	库容 (万 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	坝底厚 (m)	厚高比	河谷宽高比	拱坝 体形	筑坝石料		顶拱厚 (m)	校核正常水位 差值 (m)	最大拉应力 (MPa)		
									岩 类	标号			拱 冠 梁 法		
													数值	荷载组合	发 生 部 位
1	井冈山冲	江西井冈山	3800	92	24	0.261	2.74	双曲	砂 岩	600	6.795	0.73	1.91	1	拱冠梁底上游面
2	长潭岗	湖南凤凰	9970	87.6	15	0.171	2.36	双曲	石灰岩	600	6.16	1.68	1.09	1	5号拱拱冠下游面
3	金 坑	浙江青田	2420	80.6	20	0.248	2.96	双曲	花岗岩	600	4.2	7.9	1.75	2	拱冠梁5号层上游面竖向
4	方 坑	浙江武义	510	76	10	0.147	1.54	双曲	凝灰岩	600	3.2	2.9	1.00	2	拱冠梁3号层上游面竖向
5	流清河	山东崂山	230	68	13.6	0.2	2.71	双曲	花岗岩	600	5.125	2.5	1.34	2	拱冠梁5号层上游面竖向
6	南 溪	福建福鼎	6760	67.3	18.82	0.28	2.18	双曲	流纹斑岩	600	4.5	6.4	1.02	2	拱冠梁底上游面
7	木浪河	贵州兴义	4710	66.5	7.836	0.135	1.55	双曲	白云岩	600	3.539	7.0	0.89	1	4号拱拱冠下游面
8	毛拉洞	海南保亭	4895	66	14.25	0.227	2.56	单曲	花岗岩	600	4.08	4.93	1.03	2	4号拱拱端上游面
9	香溪口	贵州赤水	1750	64.5	20	0.356	3.39	双曲	砂 岩	400	5.0	4.57	1.41	2	拱冠梁底上游面
10	东 溪	福建仙游	2282	57	18.96	0.33	2.58	双曲	流纹斑岩	600	4.0	2.97	0.65	2	拱冠梁4号层上游面竖向
11	岩鹰山	贵州修文	930	56	19	0.339	2.26	单曲	白云质灰岩	600	5.0	0	0.76	1	4号拱拱端上游面
12	龙岑下	福建浦城	1418	52	15	0.288	2.15	双曲	凝灰熔岩	600	3.42	3.28	0.55	1	5号拱拱冠下游面
13	长沙坝	四川威远	3470	52	16	0.31	2.15	单曲	砂 岩	400	3.0	4.25	0.60	1	4号拱拱端上游面
14	新荣溪	福建柘荣	454	51	10.76	0.21	2.49	双曲	砂 岩	600	3.0	3.0	0.64	1	拱冠梁底上游面
15	桐坑溪	浙江天台	280	48.8	5	0.102	1.01	双曲	花岗岩	600	3.3	3.0	1.91	1	拱冠梁底上游面
16	九道拐	贵州凤岗	4260	48	12.5	0.266	3.49	单曲	白云岩	600	5.0	9.21	1.83	2	拱冠梁底上游面
17	白溪关	湖南古丈	1640	47	10	0.21	2.17	单曲	石灰岩	600	5.0	1.7	1.05	1	拱冠梁底上游面
18	界 溪	福建政和	1750	47	10	0.21	2.0	双曲	花岗岩	600	3.0	2.5	0.54	1	5号拱拱冠下游面



样分析计算的结果，最大拉应力往往发生在拱冠梁底上游面，且高出其他部位的拉应力一般在 0.1MPa 以上或更大，最大压应力往往发生在拱冠梁底下游面。随着近二十年拱坝计算技术的发展，大量砌石拱坝，特别是中型工程的计算方法已由过去的拱冠梁法发展至多拱梁法，而不同的方法最大拉应力发生的部位及大小是有较大差别的，再用原规范规定作为控制计算拉应力的指标显然是不恰当的。表 8 列出了 18 座大中型或坝高 50m 以上的砌石拱坝用拱冠梁法、多拱梁法的对比计算结果。由于温度荷载计算方法及拱坝应力分析方法的改变，同一工程多拱梁法的最大拉应力数值大都较拱冠梁法为大，而最大压应力数值大都略小于拱冠梁法。多拱梁法最大主拉应力主要发生在荷载组合 1（正常水位+温降）下游面河谷周边或近底层地带以及荷载组合 2（校核水位+温升）上游面中下部梁底附近。可见，只放宽中央悬臂梁底的控制计算拉应力已不能适应多拱梁法的情况，因为边梁底部或近底部以及某些层次拱冠下游面都可能是最大拉应力发生的部位。为了使控制计算拉应力的指标合理，且不致增幅太大，故本条修编时在原规范表 5.2.5-2 中以“拱坝周边”取代“中央悬臂梁底”的栏目，“其他部位”不变；两栏数值与原表相同。为慎重起见，将该表内容列入条文说明，见表 9（详见黎展眉：“浆砌石拱坝控制计算拉应力的研究专题报告”）。多拱梁法分析时，对拱坝周边拉应力值偏大的点宜具体分析，酌情采用。对中、小型砌石拱坝主要宜控制压应力。

表 9 砌石拱坝控制计算拉应力参考值      单位：MPa

胶凝材料标号 强度（MPa）	毛 石 砌 体		粗料石、块石砌体	
	拱坝周边	其他部位	拱坝周边	其他部位
7.5	0.70	0.55	1.00	0.80
10.0	0.90	0.70	1.20	1.00
12.5	1.00	0.85	1.35	1.20
15.0	1.10	1.00	1.50	1.40

**6.2.6** 用拱梁分载法计算时，鉴于不少砌石拱坝在地震组合中最大拉应力往往超过表 9 所列指标，故本条规定在地震组合下，可视工程具体情况适当放宽。建议将表 9 所列数值放宽 0.3～0.5MPa。本条规定用有限元法计算时，应力控制指标可参照 SL 282—2003 的规定执行，并提出地震组合下的容许拉应力可较非地震特殊组合适当放宽。

**6.2.8** 1985 年，原武汉水利电力学院李新民教授等提出了拱坝坝体与拱座岩体联合工作的极限承载力计算方法，即用拱梁分载法的概念，视拱坝为拱、梁杆件体系，建立了抗压、抗拉极限强度不相等的杆件材料在弯矩和轴向力共同作用下杆件截面的屈服条件，并将塑性极限分析的下限定理转化为数学规划问题，从而求出拱坝的极限承载力。这一方法已于 1985 年 5 月由原水利电力部科技司委托湖北省教育委员会鉴定通过，可用于计算破坏时超载系数，代替超载试验，花费少，历时短。

在修编本规范过程中，曾对几座用常规拱梁分载法设计而应力明显偏大的砌石拱坝进行了坝体承载能力和拱座岩体稳定的核算，其结果（校核洪水位情况）如表 10 所示。

表 10 坝体强度安全系数及拱座岩体稳定安全系数

砌石拱坝名称	桐坑溪	流清河	南 溪	朝 阳	岩鹰山	瓮 坑
坝体强度安全系数	4.26	3.35	3.90	3.11	3.22	3.39
拱座岩体稳定安全系数		1.53	1.61	2.35	1.67	1.41

此外，还对三座拱坝的模型破坏试验作了对比计算，其结果如表 11 所示。

由表 10 和表 11 可以看出，用极限分析法所得成果与试验成果接近，对于弹性应力值明显偏大的拱坝，采用极限分析法核算更为合理。

6.2.8 条所列极限分析法的安全系数取值，主要按《水工钢筋混凝土设计规范》（SDJ 20—78）所得相应安全系数乘以 1.2

表 11 坝体强度安全系数试验值与计算值比较

模 型 名 称		丰 乐	东 江	梅 花
坝体强度 安全系数	试验值	11.6~12.2	8.8	1.3
	计算值	10.61	7.8	1.4
注 1：丰乐坝试验为安徽省水利科学研究所所做； 注 2：东江坝试验为原水利电力部中南勘测设计院水利科学研究所所做。 注 3：梅花坝试验和计算均为广西大学所做； 注 4：材料计算强度取模型材料实际的轴心抗压极限强度。				

而得。采用 1.2 的附加安全系数，主要考虑到目前极限分析法资料积累还少，以策安全。

在国外，利用塑性极限分析求解问题的研究较早，20 世纪 50 年代初是极限分析理论的创立阶段。国内对塑性极限分析的研究起步较晚，到 20 世纪 60 年代才开始，但短期内却取得了较大的成果，1987 年原武汉水利电力大学李新民、王开治两位教授用下限法对 10 余座砌石拱坝进行了塑性极限分析，求得了超载系数的下限值。1997 年，王均星、王开治、李新民等将有限元法的思路与塑性极限分析方法相结合，运用三角形单元和节理单元，采用线性规划求解课题。2003 年将塑性极限分析理论应用于岩质边坡领域，建立了带节理单元的有限元塑性极限分析方法。2004 年将塑性极限分析法应用于均质和非均质土坡稳定性的研究，并将塑性极限分析下限法扩张到三维。

6.3 拱座稳定分析

6.3.1 拱座稳定是选定坝址、布置坝线的先决条件，不少拱坝设计多着重坝体应力分析，而忽视了拱座稳定要求，以致造成工程的缺陷或隐患，影响了经济性和安全性。故本条强调在各设计阶段，都应重视拱座稳定问题。

6.3.2 天然岩体及结构面的物理力学性质比较复杂，现有理论及试验方法尚难彻底弄清其性质，在一定程度上还有赖于经验判

断，特别是凝聚力  $c$  值，需做很多工作。滑裂面上抗剪强度参数设计值的选定，考虑到砌石拱坝设计的具体条件，仅要求 2 级建筑物通过试验，3 级建筑物若不具备试验条件，可参照类似工程的经验数据选用。

**6.3.3** 砌石拱坝一般工程规模不大，分析手段有限，拱座抗滑稳定分析可以刚体极限平衡法为主，只有当地质情况较复杂时才辅以其他方法。

拱座稳定分析应按空间问题处理才比较合理，所求得的是整体抗滑稳定安全系数。目前国内砌石拱坝稳定分析中，为了简化计算，一般按平面分层累计计算。拱层次的选取应与应力分析一致，以利用从应力分析得到的拱端力系，故只有在结构简单、无复杂滑裂面的情况下才可如此选取。

**6.3.4** 本条规定在用刚体极限平衡法进行稳定分析时，可采用剪摩公式或纯摩公式计算。因拱坝坝肩一般节理裂隙发育， $c$  值很难选得恰当，考虑到过去设计的经验，从合理、安全考虑，规定不论建筑物等级，两种公式都可采用。当采用剪摩公式计算时， $c$  值宜慎重选取（特别对于高坝），以保安全。

表 6.3.4 所列整体抗滑稳定安全系数与 SL 282—2003 基本一致。

**6.3.5** 砌石拱坝因砌缝影响，坝体弹模较低，对拱座变形反应比较敏感。拱座基岩较弱时计算应力反而可能降低，但由于变形量大，很容易引起不均匀变形或应力集中，导致应力及稳定情况恶化。这些情况在常规分析计算中往往反映不出，所以应重视拱座变形问题，采取措施控制变形量。

**6.3.6** 岩体渗透压力对拱座稳定影响很大，不容忽视。有条件的工程应在拱座岩体中采取防渗、排水设施（如防渗帷幕、排水孔或排水廊道等），以减少渗压。

**6.3.7** 重力墩、推力墩受力情况比较复杂，属空间问题，应该用有限元法或其他较精确的结构分析方法来分析应力，但目前砌石拱坝设计由于条件所限，有关资料很少，所以本规范附录 G

只列出了进行简单计算的材料力学方法。

(1) 重力墩的竖向应力  $\sigma_z$  的计算，除了考虑截面平均压应力外，还将纵横两个方向的弯曲应力进行了叠加。

(2) 其他应力（上、下游面剪应力，水平正应力，主应力）的计算与重力坝没有多少区别，可参照 SL 319—2005 附录 C 计算。

(3) 推力墩由于另一侧基岩的约束影响，受力情况更复杂些。主要是约束侧面上基岩反力及渗透压力的数值及分布情况未知，要用精确方法求解，难度较大，所以只好近似估算，仍用重力墩公式计算。

(4) 为了便于应用，本规范附录 G 还列出了重力墩抗滑稳定验算公式。

## 6.4 温度控制

**6.4.1** 不少砌石拱坝施工时，只在距拱端适当位置预留横缝，一般于每年冬季或初春季节进行封堵，这样施工较简单。横缝缝宽根据各地经验，以 0.8~1.2m 为宜。

施工时预留横缝的有贵州大飞水砌石拱坝（坝高 36.5m）、瓮坑砌石拱坝（坝高 40m）以及山西省运城市一些砌石拱坝等。

砌石拱坝一般坝体不厚，没有必要设置纵缝，目前尚未见到设置纵缝的实例，所以未提纵缝问题。

**6.4.2** 拱坝变化温度场是以年平均气温为零点。另外，气温在 5℃ 以下砌石很难操作，气温更低时还有冬季施工防冻的问题，所以规定砌石拱坝的封拱温度应控制在年平均气温以下，且不宜低于 5℃。整体上升的砌石拱坝的砌筑温度应按封拱温度来要求。对于年平均气温低于 0℃ 的严寒地区，其封拱温度应作专门研究后确定。



## 7 坝 体 防 渗

### 7.1 一 般 规 定

7.1.1 保留原规范第 6.1.2 条的内容。

7.1.2 保留原规范第 6.1.1 条的内容。我国已建的砌石坝防渗结构，大都采用混凝土面板或心墙。福建省的砌石坝大部分不另设混凝土防渗结构，而是在施工时采用机械振捣，并且每上升 3~5m，采用钻孔检查透水率，若压水试验达不到要求，及时进行灌浆处理，整个新砌层透水率满足要求后，方可继续上升，故称坝体自身防渗。四川省的水泥砂浆砌细料石坝，则在上游坝面用水泥砂浆勾深缝护面，也没有单独设混凝土防渗体，应属于另一种坝体自身防渗。

7.1.3 保留原规范第 6.1.3 条的内容。

### 7.2 混凝土防渗面板与心墙

7.2.1 混凝土防渗面板和心墙的抗渗等级应根据其承受的水头采用 W4、W6、W8 三个等级。混凝土的抗渗等级一般按 28d 龄期的标准试件确定，也可根据建筑物承受水压力的时间，采用 60d 或 90d 龄期的增长值。

面板温控设计需对混凝土提出抗裂性能指标，一般采用混凝土极限拉伸值表示，为了便于现场控制，通常以相应的混凝土抗压和抗拉强度代替。

7.2.2 混凝土抗冻等级按 28d 龄期的试件确定，经试验论证后，也可利用 60d 或 90d 龄期的增加值。

对于重要的薄壁建筑物、承受动荷载的建筑物或一年中冻融循环总次数高于 150 次的部位，其混凝土抗冻等级应适当提高。

在无抗冻要求的温和地区，对 2 级、3 级建筑物水位涨落区的外部混凝土，提出 F50 或 F100 的要求，是为了确保该部位混



凝土的耐久性。

**7.2.3** 保留原规范第 6.2.2 条的内容。

**7.2.4** 基本保留原规范第 6.2.3 条的内容。

**7.2.5** 保留原规范第 6.2.4 条的内容。

**7.2.6** 保留原规范第 6.2.5 条的内容。

### **7.3 坝体自身防渗**

**7.3.1** 近年来，在采用混凝土作为胶凝材料建造砌石坝以后，福建省不少砌石坝不再设置混凝土面板或心墙作为坝体的防渗设施，而是利用坝体的自身防渗性能防渗，要求使用机械振捣，并采用钻孔检查透水率，若压水试验达不到要求，应及时灌浆处理。经处理后大部分砌石坝都做到基本无渗漏。

**7.3.2** 采用水泥砂浆在迎水面勾深缝防渗，对于使用水泥砂浆砌粗料石的砌石坝是适宜的。如四川省的水泥砂浆砌细料石坝，上游面用水泥砂浆勾深缝，坝体防渗效果也很好。但这类坝型的坝前水头一般限制在 50m 以下。

**7.3.3** 保留原规范第 6.3.2 条的内容。

### **7.4 横缝、止水 and 排水**

**7.4.1** 保留原规范第 6.4.1 条的内容。

**7.4.2** 基本保留原规范第 6.4.2 条的主要内容。由于混凝土面板自身设有横缝，而心墙混凝土在施工时自然会与坝体同一位置设缝和同时封拱，故不再明确提出心墙与坝体同时封拱的要求。

**7.4.4** 本条在保留原规范第 6.4.5 条内容的同时，增加了保证混凝土与基岩连接的措施要求。

**7.4.5** 在岸坡陡峻的坝段，当坝体产生温降或干缩时，接触面往往出现缝隙，将影响坝体的安全并产生渗漏，因此应对坝体与基岩接触面采取必要的补强或止水措施。

**7.4.6** 本条保留原规范第 6.4.6 条的内容。

## 8 坝基处理

**8.0.1** 砌石坝的坝基处理，应根据不同的坝型进行认真研究，因地制宜，不可拘于一格。规范中应着重强调对坝基处理的基本要求，坝基处理的各个方面都应围绕基本要求而提出原则性的意见，故本条对此作了原则规定。

坝基处理设计，应根据地质条件、枢纽布置及结构之间的关系、坝体结构对地基的要求、施工方法等因素综合研究确定。根据国内外岩基上地基处理经验，提出处理后的坝基应符合强度、稳定性、抗渗性和耐久性要求。

**8.0.2** 从多年来的工程实践中发现，过去对建基面的开挖要求偏严，使有些工程开挖量过大，从而影响造价和工期。本条是在 8.0.1 条规定的条件下，经地基处理后，在满足坝的强度、稳定、抗渗、耐久要求的基础上，参照 SL 319—2005 有关规定内容作出的规定，实际上适当放宽了对建基面风化程度的要求，以减少开挖量，缩短工期，节约投资。

坝基处理措施，通常有风化破碎岩石的挖除、基坑形状的控制、固结灌浆、接触灌浆、防渗帷幕灌浆、坝基排水、断层破碎带与软弱夹层的处理，以及用预应力加固基岩等。

近年来，坝基处理技术已有较大的进步和发展。在基础开挖方面，用控制爆破开挖井洞，挖除不良岩石与用光面爆破准确地控制基岩轮廓形状等均有发展。在灌浆方面，高压灌浆使水泥浆的可灌性大大提高，能使基岩得到很好的加固；用水泥灌浆或采用可灌性良好的化学材料进行帷幕灌浆已取得丰富的经验。采用排水措施，可有效地排出渗透水与地下水，降低孔隙水压力；采用预应力或非预应力锚索并辅以灌浆加固基岩的措施，提高坝体与基岩及基岩内部的结合强度。以上这些措施相互关联和影响，故需要针对具体情况，综合考虑，经综合分析后确定应采用的若

干处理措施。

**8.0.3** 根据国内外岩溶地区筑坝经验，即使地质条件复杂，岩溶发育，只要工程地质勘察清楚，又能认真进行防渗处理，一般都能达到设计要求。本条根据工程实践经验，提出了对岩溶和软弱破碎带的一般处理方法。当软弱破碎带较大时，对坝体一定范围内的基岩的防风化处理作出设计，对确保长期稳定性很有必要。

**8.0.4** 在本规范修编中，对于坝基开挖深度虽有所放宽，但对于某些关键性部位，如拱坝坝肩、断层破碎带、岩溶、软弱夹层、裂隙密集带等，则一定要严格参照现行混凝土坝设计和施工规范进行处理，不能放宽。

基坑形状应根据地形、地质条件及上部结构的要求确定。重力坝上、下游基础面高差过大往往造成向下游滑动的趋势，因此应控制上、下游面开挖高差。小台阶往往会连通形成向下游面的倾斜面，基础面宜开挖成大台阶，台阶面略向上游倾斜；大台阶高差应与砌筑层厚和分缝位置协调。位于陡坡的岸坡坝段，侧向稳定往往不易满足要求，此时可适当调整横缝间距。此外，也可将坝段的横缝采取并缝灌浆，以保证坝体侧向稳定。

拱坝基础形状，特别是拱坝两岸拱座利用岩面形状，在美国、日本、俄罗斯等国的相应规范中均有规定和说明，比较具体。我国的现行混凝土拱坝设计规范中也有规定和说明，宜开挖成径向面，但超径向拱座面一般采用较少，故不再列入。

若拱端厚度较大而使开挖量过多时，也可采用半径向面。图1所示的利用岩面形状可供参考。

经充分论证，在保证安全、经济的条件下，拱座利用岩面也可开挖成其他形状。

**8.0.5** 由于采用常规开挖爆破方法容易造成基础破坏或产生不良效果，因此对于不同的地质条件、枢纽布置、建筑物之间的关系、坝型和基础形状及深度，对开挖爆破提出相应的要求。在有条件时，宜采用梯段爆破和预裂爆破等造成破坏较小的爆破方

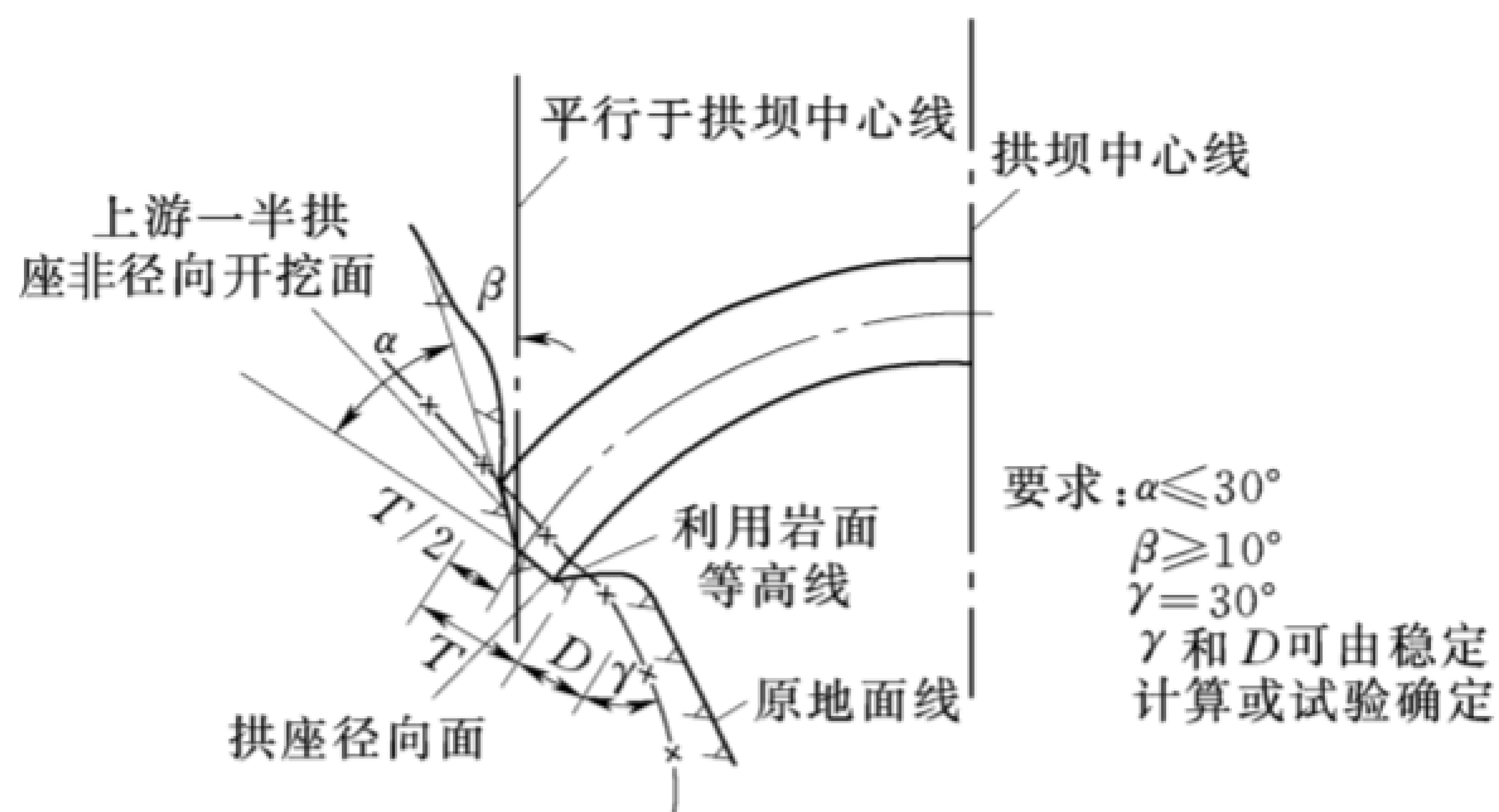


图 1 拱座利用岩面形状示意图

式。对易风化、泥化的坝基岩体，在开挖出建基面后，即采用喷水泥砂浆保护层或边挖边砌筑的方法。

**8.0.6** 现行混凝土重力坝、混凝土拱坝设计规范中有关坝基处理的规定，原则上适用于砌石重力坝和砌石拱坝的坝基处理设计，但应根据具体情况区别对待，有针对性地进行处理。

## 9 坝体构造

### 9.1 坝顶布置和交通

**9.1.1** 按照《防洪标准》(GB 50201—94)和《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2000),非溢流坝的坝顶应不低于水库正常运用和非常运用静水位加波浪的计算高度,以保证库水不溢过或溅过坝顶。本条明确规定有防浪墙的非溢流坝坝顶高程不低于水库正常蓄水位或校核洪水位加相应的波浪计算高度和安全超高(即 $\Delta h$ )。安全超高下限值即表 9.1.1 中的安全超高 $h_c$ 值。

正常蓄水位或校核洪水位,可以水工设计中的较大值为准。

计算风速和浪高可按有关规定,按正常运用和非正常运用两种情况分别计算 $\Delta h$ 值,最后取防浪高程的较大值。

**9.1.2** 坝顶布置对整个工程的适用、美观是非常重要的,投资虽不多,但影响不小,所以坝顶布置应符合安全、适用、经济、美观的原则。

为了便于交通,溢流坝顶可设置交通桥。

非溢流坝坝顶的宽度,据已建砌石坝工程的经验,一般中坝、高坝不宜小于 3m,且坝顶部分受温度的影响较大,对坝体的应力有明显影响,故本条提出坝高 50m 以上的非溢流坝坝顶宽度不宜小于 3m。

**9.1.3** 坝顶防浪墙必须保证安全可靠,故规定应与坝体连成整体,两端与坝肩基岩相接。防浪墙的高度均采用 1.2m。

**9.1.4** 为了便于对坝体下游面进行安全监测以及适应施工、交通等方面的需要,砌石拱坝的下游面一般需设置坝后桥,其高差间隔 15~30m、宽约 1.5m。考虑拱坝变形较大及温度变化,坝后桥应设置伸缩缝,缝宽 1~3cm。对坝顶溢流段的坝后桥,应避免水流冲击。

## 9.2 坝内廊道和孔洞

**9.2.1** 在枢纽布置中，因发电、灌溉放水、灌浆施工、运行监测、交通等各种要求，常在坝体内设置廊道和孔洞，并应统一布置、综合利用，适宜设在坝体应力较小的部位。当廊道、孔洞立体交叉时，应有一定的间距，以防应力恶化。本条根据已建工程经验，规定净距不宜小于 3m。

SL 282—2003 规定廊道与孔洞立体交叉时，净距不宜过小，因此对砌石拱坝应通过应力分析确定。

砌石坝体内的廊道和孔洞通常采用混凝土或钢筋混凝土结构及料石砌筑，应注意其与坝体砌石的紧密连接，尤其是灌溉设施、泄水洞洞壁与坝体砌石的连接。通常应设止水环，必要时再进行接触灌浆，以防止沿管壁漏水。

为防止廊道、孔洞裂缝，一般在地形或坝体结构变化处，应设环向缝，参照《水工隧洞设计规范》（SL 279—2002）第 6.7.2 条规定，分缝间距 6~12m。

薄拱坝由于底宽较窄，应力较大，布置困难，并且扬压力对这类型坝的安全性影响不是主要的，在坝体内可不设廊道，此时坝基防渗帷幕灌浆可在上游灌浆平台上进行，排水可在坝后布置。

**9.2.2** 纵向廊道距上游坝面的距离，前苏联 1977 年《混凝土和钢筋混凝土坝设计规范》第 1.27 条规定，重力坝为 0.05 倍作用水头，拱坝为 0.025 倍水头。我国 SL 319—2005 规定“纵向廊道的上游壁离上游坝面的最小距离应满足防渗要求（一般为 0.05~0.1 倍坝面作用水头），且不小于 3m”。SL 282—2003 规定“宜为 0.05~0.1 倍水头，且不小于 3m”。

确定纵向廊道距上游坝面的距离，应考虑工作需要和防渗要求，并要结合孔洞与坝体的应力分布来确定。因防渗措施不同，故本条规定的幅度也较大，关键是防渗体的质量。在设计中可根据地形、地质和水工设计、施工条件确定，但不宜小于 3m。

廊道的断面尺寸，主要是为了便于正常工作或进钻机施工。

岸坡纵向廊道的坡度，不宜太陡，以便交通。按 SL 319—2005 规定，当两岸坡度陡于  $45^\circ$  时，基础灌浆廊道可分层布置并用竖井连接。

**9.2.3** 基础排水廊道，可根据地质构造、裂隙发育分布情况，在基岩面或近基岩面纵横方向布置，以利于坝基充分排水。廊道的尺寸要便于正常工作，如运行监测或进钻机施工等。低于尾水位的排水廊道，可视设计的要求，作防渗抽排或允许暂时淹没。

水头较低部位的基础排水，也可采用基础排水管、沟，但应有防止排水堵塞的措施。

**9.2.4~9.2.6** 保留原规范第 8.2.4 条~第 8.2.6 条的内容。

**9.2.7** 新增条文，有关坝外设置观测房的规定。

### **9.3 坝体分缝、排水和基础垫层**

**9.3.1** 砌石坝常采用全断面施工方法，一般坝体不设横缝。有时由于地形、地质条件和结构、施工及布置上的需要，为适应不均匀沉降或温度变化，也可设置横缝以及局部临时施工缝等。

由于砌石的平整度较差，应注意缝面的处理，以便止水、止浆，防止不连续变形。横缝的底部缝面与基岩面或混凝土垫座应尽量正交。不等半径的拱坝，横缝可大致布置近乎径向面，拱冠部位一般不设缝。

拱坝、整体式重力坝的横缝，灌浆后应保持整体性，藉以传递应力，缝间一般设键槽。

在砌石拱坝施工中，常根据每年施工进度安排，设置局部宽缝，以适应温度变化。一般缝宽  $0.8\sim 1.2\text{m}$ 。在冬季或初春季节气温低于年平均值时进行封堵。

坝体内的廊道、孔洞和混凝土溢流护面等与坝体横缝交叉处，必须相应设缝，其本身的分缝应按照有关规定和需要来布置。

**9.3.2** 砌石坝体内的排水，对减少坝体的渗透压力有直接效果。

排水管距坝面的距离宜与纵向廊道距坝面的距离一致，不宜太近，以防坝面漏水。坝体排水管施工时，应注意防止堵塞，在设计中应考虑便于检修。

排水管施工时，可采用多种形式，除预制无砂混凝土管外，在 20 世纪 90 年代初研制和投入实际工程应用的，用改性塑料制成的网状导水盲沟材料有施工简单、排水性能好等优点。故在本条予以补充。

混凝土溢流护面的底部，除与坝体砌石紧密接触外，为了排除渗水，常在两者的接触面设置排水管。

**9.3.3** 据调查，很多省在修建砌石坝时，常在建基面上铺设一层混凝土作为垫层，使基岩与砌石体两种介质有一过渡，一般不参与坝体计算。垫层厚度过小，难以起到过渡作用；垫层厚度过厚，影响坝身结构，故常采用的尺寸是 1~3m。

垫层的作用主要是增强砌石坝的整体性。当需要对坝基做固结灌浆和帷幕灌浆时，可作为灌浆平台和压重，方便施工。如果坝体需要在底部布置水库放空洞、冲沙洞等，往往将孔、洞布置在垫层上部，并将孔、洞的钢筋混凝土和垫层形成整体，避免砌石坝开孔的难度。

垫层刚度和砌石体刚度接近，有利于接触部位应力调整，从而增强整体性。



## 10 安全监测设计

### 10.1 一般原则

**10.1.1** 基本保留原规范第 9.1.1 条的内容。本条明确指出，砌石坝应根据工程具体情况，设置必要的监测设施。其首要任务是监视工程建筑物在施工期、蓄水期（特别是首次蓄水期）及运行期的工作状态与安全，其次是为设计、施工及科学研究提供资料。

原规范第 9.1.1 条未将地形条件作为监测设计依据之一，由于河谷宽窄、形态等地形条件，对拱坝布置及体形选择、拱座及岸坡稳定性影响较大，故在监测设计依据中补充了地形条件的要求。

**10.1.2** 新增条文。《混凝土坝安全监测技术规范（试行）》（SDL 336—89）是一部包括设计、施工及运行各阶段安全监测工作的较系统的专业规范。砌石坝可参照执行其中的相关规定。

**10.1.3** 新增条文。本条明确规定了砌石坝的监测范围。除了应关注坝体、坝基和拱座的工作状态外，电站厂房、引水和泄水建筑物及设备以及近坝区岸坡的工作状态亦直接关系到大坝的安全。

**10.1.4** 新增条文。本条明确安全监测设计应遵循的原则：

（1）根据国内外经验，除了重视工程运行期的安全监测外，对工程施工期和首次蓄水期的安全监测亦应给予足够的重视。安全监测总体设计方案应便于分期实施，满足各阶段的安全监测要求。

（2）监测设施的布置应突出重点，兼顾全面。应根据工程的具体情况和结构特点，结合影响工程安全的主要不利因素设置监测项目。监测断面和监测截面的选择应有代表性。各监测项目的测点布置，可以相互验证监测数据，有利于资料

分析和对监测结果作出合理解释。某些重点监测断面或部位的重要测点，采用两种以上监测手段，可以保证监测资料的可靠性和连续性。若某测值出现异常时，可由另一种监测手段加以验证。

(3) 监测仪器和设备是采集监测数据的基本手段。没有稳定可靠的监测仪器和设备就不可能取得可靠的监测数据。由于安全监测设施一般埋设于坝体、坝基，或布置于坝内廊道、地下洞室、岸坡等部位，所处环境潮湿恶劣，除要求监测仪器设备的性能指标符合有关国家及行业标准外，还应具有良好的密封防潮性能，能长期稳定可靠地提供监测数据。重要监测项目的仪器损坏或失效后，应便于更换。

仪器的量程应根据不同监测项目和部位实际可能发生的物理量大小研究决定。仪器的精度应满足监测要求，过高的精度要求是不必要的，高精度的监测仪器不仅价格昂贵，而且还会使监测工作复杂化；但精度过低往往会使监测物理量易被监测误差所掩盖，从而达不到安全监测的预期目的。

(4) 监测新技术的采用可提高监测成果质量。宜选用成熟的、经过工程实践考验的新仪器和新技术，并为以后技术改进和监测仪器设备更新创造条件。

大坝安全监测自动化是安全监测设计的发展方向。实现大坝自动化监测，不但可以减轻观测人员的劳动强度，更重要的是可以快速、准确地获得观测数据，及时掌握大坝及其附属建筑物的工作状态。特别是地震和特大洪水时可以很方便地加密测次，及时获得最新信息，以便出现异常情况时有充分的时间采取补救措施，防止事故的发生。

大坝自动化监测包括数据采集自动化、资料整理分析及安全管理自动化。是否建立自动化监测系统，如何选择自动化监测系统的形式和规模，应根据工程等级和重要性通过技术经济论证确定。

不论采用何种形式和规模的自动化监测系统，在运行过程中

都有可能出现故障，为防止自动化监测系统发生故障时出现错误测值或丢失信息，除了特别强调仪器和系统的长期稳定性外，还应配备必要的人工监测手段作为检验和后备措施。

**10.1.5 新增条文。**本条明确在进行安全监测设计时应注意的事项：

(1) 应注意施工期和首次蓄水期的安全监测，及时确定主要监测项目的基准值。

施工期安全监测的主要目的，是监视大坝等永久性建筑物在施工期的安全；监视临时建筑物（开挖边坡、围堰及导流建筑物等）的安全；为大坝等永久性建筑物运行期的安全监测提供其施工期的性状数据，以便取得监测全过程资料；验证设计和指导施工。

施工期安全监测的基本要求，应及时埋设安装仪器；及时进行观测，并取得初始值或基准值；及时整理分析资料和及时反馈信息。

蓄水期，特别是首次蓄水，是检验大坝是否适宜蓄水运行的重要而敏感阶段。坝体、坝基及拱座的缺陷，会随着水库水位的上升而逐渐暴露出来；近坝区岸坡的稳定性，也会因地下水位升高而受到影响。根据国外大坝失事的统计资料，几乎 60% 左右的大坝失事是发生在水库初次蓄水或其后几年内。因此，世界各国都对施工期和首次蓄水期的安全监测特别重视。通常都规定在这两个阶段对大坝进行连续监测，其观测频率明显高于大坝正式运行期。监测手段包括巡视检查和仪器监测。监测内容几乎包括所有能表征大坝工作状态的项目。

水库蓄水前制定详细的监测工作计划十分重要。应对水库蓄水期间各监测项目的监测频次、技术要求、资料整理分析及快速反馈作出专门的规定。主管单位主要根据安全监测成果和反馈分析意见，实施或改变水库蓄水计划，并对发现的异常现象及时提出处理措施。

对于采用分期蓄水的高砌石坝，由于大坝变形等观测设施，

例如垂线、坝体上部及顶部水平位移与垂直位移监测设施等，往往在施工期难以与土建工程同步完成，这给了解大坝在首次蓄水期间的实际工作状态和运行期的监测资料分析工作带来了一定困难。故安全监测设计应注重坝基廊道、坝体中部检查廊道及大坝下游坝面测点的布设，尽可能在水库蓄水前完成倒垂线、扬压力、渗漏量等监测设施的埋设安装工作。若水库首次蓄水前已埋设安装的监测仪器不能满足安全监测的需要，应布置必要的临时性监测设施，防止重要监测资料漏测。但应注意初次蓄水阶段的临时监测系统与永久监测系统建立数据传递关系，以保证永久监测系统能获得可靠的初始值。

(2) 监测站应有良好的交通条件，要避免通道积水，影响安全监测和巡视检查工作。监测站及监测廊道应有良好的照明设备。必要时应设电热防潮装置和防风保温门。

监测站环境潮湿是大坝安全监测中普遍存在的问题，无论是人工监测，还是自动化仪器监测，潮湿都将对监测设备设施的使用寿命和监测成果的可靠性带来严重影响。因此，大坝安全监测设计时，应研究监测站的防潮措施，为营造监测站小气候环境创造条件。

另外，监测设施及电缆还应有可靠的防盗保安措施，防止监测设施受到人为破坏。

(3) 不少监测设施的埋设安装与土建施工同步进行，受开挖爆破和混凝土浇筑等施工作业的影响很大，仪器和电缆的选型应考虑施工特点。仪器和电缆布置应避免因灌浆孔和排水孔施工受到损坏，必要时水平敷设的电缆应采用钢管或槽钢保护，竖向牵引的电缆应设钢管保护。

(4) 对主要监测项目提出测值的预计变化范围，主要是指变形监测与渗流监测。根据预计的测值变化范围，确定相应监测设施的最佳量程与测量精度，为监测仪器的合理选型提供依据。在资料分析过程中，将实测成果与设计预计的测值变化范围相比较，可直接了解大坝的工作性态。

## 10.2 监测项目与监测设施布置

**10.2.1** 新增条文。本条明确指出按监测项目设置的仪器监测应与巡视检查相结合。由于影响工程安全的因素多，不可预见性较大，即使设置了比较完善的监测系统，也不能说其安全就有了保障。另外安全监测设计所选择的监测断面和布置的测点，相对于整个工程来说，仍具有较大的局部性和局限性。国外统计资料表明，大坝出现缺陷和危及安全的情况，50%~70%是被有经验的专业技术人员在现场巡视检查过程中发现的。因此，应强调二者紧密结合，才能有效地保证大坝安全运行。

**10.2.2** 基本保留原规范第9.1.2条的内容。本条将仪器监测划分改为常规监测项目与专门监测项目。

(1) 常规监测项目是指相同等级建筑物通常需要设置的监测项目，包括环境量监测、变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测等。对于2级、3级砌石坝，应进行上下游水位、气温、水温、坝体温度、水平位移、垂直位移、挠度、扬压力、裂缝、渗流量和绕坝渗流的监测；必要时宜进行坝体横缝、接触缝、冲刷和淤积等项目监测。对于2级或结构比较新颖的砌石拱坝，必要时对坝体的应力、应变进行监测。

渗流量监测是判断大坝安全简单而重要的手段之一。对坝基、坝体及两岸渗流量变化进行连续监测，有助于对大坝出现的异常情况迅速作出判断。从大坝首次蓄水开始，对坝基及坝体的渗漏量就要分别进行监测，并密切注意其随库水位、温度及时间变化的关系和发展趋势。

地质条件良好的薄拱坝，由于坝基面积小，由扬压力引起的总作用力与上游水压力总荷载相比，其值较小，可不作扬压力监测。对于中厚拱坝和厚拱坝，扬压力或拱座渗透压力大小及变化规律对拱座稳定的影响较大，应给予足够的重视。若发现扬压力或渗透压力大于设计值，应及时查明原因并采取专门措施，使其降至设计允许的范围。

坝基深部渗透压力对于全面了解大坝的工作状态和核算大坝的稳定性具有十分重要的意义。应根据坝基具体地质条件和两岸存在的地质缺陷，有针对性地布置监测断面和测点。深部渗透压力监测断面宜沿渗流方向或顺地质构造布置。测点的埋设深度应根据地质构造等情况决定。

(2) 专门监测项目是指常规监测项目以外的监测项目，应根据工程级别、重要性、结构型式与施工工艺、地形与地质条件，工程具体情况和监测的需要，并参考类似工程经验，经论证后选设。主要包括近坝区岸坡稳定性监测、地下洞室稳定性监测、坝体地震反应监测、水力学监测等。另外，锚固结构受力状态监测、施工期爆破影响监测、地应力监测等也是某些工程选设的专门监测项目。

对于某些结构新颖的大坝，为了进行科学试验，也可设置必要的专门监测项目。

**10.2.3 新增条文。**删除原规范第 9.2.2～9.2.12 条的内容，根据国内外工程经验，增列对环境量、变形、渗流、应力应变及温度等监测项目，提出了监测布置的参考性意见。

**10.2.4 新增条文。**提出对巡视检查的要求。

www.bzxz.net

免费标准下载网