

SL

中华人民共和国行业标准

P

SL 25—91

浆砌石坝设计规范

1991—07—29 发布

1991—10—01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国行业标准
浆砌石坝设计规范
SL 25—91

主编部门:贵州省水利电力厅
批准部门:中华人民共和国水利部
实行日期:1991 年 10 月 1 日

中华人民共和国水利部
关于发布《浆砌石坝设计规范》SL 25—91 的通知

水建[1991]6 号

各有关单位:

根据原水利电力部标准制修订计划,由贵州省水利水电厅主编的《浆砌石坝设计规范》,经审定批准为水利水电行业标准。标准的名称与代号为《浆砌石坝设计规范》SL 25—91,从 1991 年 10 月 1 日起实施。执行中如有问题和意见,请函告部建设开发司并由该司负责解释。该标准由水利电力出版社出版发行。

1991 年 7 月 29 日

目 次

第一章	总则	(4)
第二章	筑坝材料及浆砌石体的设计指标	(4)
第三章	荷载及其组合	(5)
第四章	浆砌石重力坝	(7)
第五章	浆砌石拱坝	(10)
第六章	坝体防渗	(13)
第七章	坝基处理	(14)
第八章	坝体构造	(14)
第九章	观测设计	(15)
附录一	浆砌石体主要力学指标	(17)
附录二	荷载计算公式	(19)
附录三	用材料力学方法计算浆砌石重力坝坝体应力	(28)
附录四	用材料力学方法计算重力墩、推力墩的应力	(31)
附录五	石料主要物理力学指标及胶结材料配合比	(32)
附录六	浆砌石体变形(弹性)模量、抗压强度的试验方法	(34)
附加说明		(36)

第一章 总 则

第 1.0.1 条 本规范适用于大、中型工程中的 2、3 级浆砌石坝或坝高超过 50 m 的 4、5 级浆砌石坝的设计。其他浆砌石坝设计可参照使用;对于 1 级浆砌石坝及坝高超过 100 m 的浆砌石坝,设计时应进行专门研究,制订补充规定。

第 1.0.2 条 浆砌石坝设计,应符合现行《水利水电工程等级划分(山区、丘陵区部分)》、《水利水电工程地质勘察规范》、《水工建筑物抗震设计规范》以及其他有关规范、规程、规定的要求。

第 1.0.3 条 设计浆砌石坝应重视和研究下列问题:

一、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。

二、合理选择和确定坝型、布置及荷载组合,简化坝体结构。

三、地基处理和坝体防渗。

四、泄洪消能防冲。

五、施工导流和渡汛。

六、建筑材料、施工方式及施工技术的采用,应因地制宜。

七、降低工程造价和缩短建设周期的措施。

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

第二章 筑坝材料及浆砌石体的设计指标

第一节 筑坝材料

第 2.1.1 条 石料。

一、砌体所用石料必须质地坚硬、新鲜、完整。砌体石料按其形状可分为毛石、块石、粗料石三种。

毛石:无一定规则形状,块重应大于 25 kg,中部厚不小于 15 cm。

块石:上下两面大致平整,无尖角,块厚宜大于 20 cm。

粗料石:棱角分明,六面大致平整,同一面最大高差宜为石料长度的 1 %~3 %。石料长度宜大于 50 cm,块高宜大于 25 cm,长厚比不宜大于 3。

二、石料的标号分为 1000、800、600、500、400、300 等六级。其标号根据 $\phi 5 \times 10$ cm 或 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的岩石试件的饱和极限抗压强度确定,当此值在分级的两个标号之间时,应按较低标号取值。

三、石料使用前,必须鉴定其标号,同时宜进行有关物理力学指标的测定。中小型工程无试验条件时,可参照附表 5.1 选用。

第 2.1.2 条 胶结材料。

一、浆砌石坝的胶结材料应采用水泥砂浆或混凝土。

二、胶结材料标号:

1. 水泥砂浆标号根据 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 的立方体试件 28 天龄期的极限抗压强度确定。浆砌石体常用的水泥砂浆标号有 50、75、100、125 四种。

2. 混凝土标号根据 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 立方体试件 28 天龄期的极限抗压强度确定。浆砌石体常用混凝土标号有 100、150 两种。

3. 根据工程具体情况并经论证,上述胶结材料标号也可用试件 90 天龄期的极限抗压强度确定。

三、胶结材料的配合比,必须满足砌体设计标号的要求,并采用重量比。对于 2、3 级浆砌石坝,可参照附表 5.2 和附表 5.3 初选配合比,但应根据实际所用材料的试拌试验进行调整。

四、胶结材料采用掺合料或外加剂时应专门进行试验研究。

第二节 浆砌石体的设计指标

第 2.2.1 条 浆砌石体的设计容重,根据砌体类别可在下述范围内选用,但应按《浆砌石坝施工技术规定》(SD120—84)附录三(一、浆砌石体容重检查)的规定复核。

毛石砌体: $\gamma_{\text{砌体}} = 2.1 \sim 2.3\text{ t/m}^3$

块石砌体: $\gamma_{\text{砌体}} = 2.2 \sim 2.4\text{ t/m}^3$

粗料石砌体: $\gamma_{\text{砌体}} = 2.3 \sim 2.5\text{ t/m}^3$

第 2.2.2 条 浆砌石体的线胀系数可在 $(6 \sim 8) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内选用。

第 2.2.3 条 浆砌石体的变形性能:

一、浆砌石体的变形模量和弹性模量宜按附录六的方法进行试验测定,对无条件试验的工程,可参照附表 1.1 选用。

二、浆砌石体的泊桑比宜采用 0.2~0.25。

第 2.2.4 条 浆砌石体的极限抗压强度,对 2 级建筑物应按附录六的方法试验确定。对 3 级建筑物,当无条件试验时,可参照附表 1.2 选用。

第 2.2.5 条 浆砌石体的抗拉强度,2 级建筑物应进行石料与材料接触面间的极限抗拉强度试验,取得砌体沿灰缝接触面通缝破坏时的极限抗拉强度 σ_t ,然后按附表 1.3 中所列砌体抗拉强度计算方法计取其他类别和破坏形式时的极限抗拉强度 R_T 。3 级建筑物浆砌石体的极限抗拉强度可参照附表 1.3 选用。

第 2.2.6 条 在初步设计阶段,浆砌石坝抗滑稳定计算所需的抗剪断、抗剪参数,及对沿垫层混凝土与基岩接触面的滑动情况;2 级建筑物应作现场试验;3 级建筑物可根据基岩特征,从附表 1.4 中查用。对于沿浆砌石体与垫层混凝土接触面滑动或沿浆砌石体本身滑动的情况,2 级建筑物应在室内作浆砌石体的抗剪(断)强度试验;3 级建筑物,当无条件进行砌体试验时,可查用附表 1.5。

第 2.2.7 条 应重视浆砌石材料的力学、变形性能和热学性能的试验研究,以便为设计提供正确的依据。

第三章 荷载及其组合

第一节 荷载

第 3.1.1 条 作用在浆砌石坝上的荷载,按其作用的情况分为基本荷载和特殊荷载两类。

一、基本荷载:

1. 坝体及坝体上永久设备的自重。

2. 坝体上游面静水压力。选择正常蓄水位或设计洪水位进行计算,下游面静水压力取其相应

的不利水位计算。

3. 相应于正常蓄水位或设计洪水位时的扬压力(包括渗透压力和浮托力,下同)。
4. 泥沙压力。
5. 相应于正常蓄水位或设计洪水位时的浪压力。
6. 按多年平均冰层厚度确定的冰压力。
7. 相应于设计洪水位时的动水压力。
8. 温度荷载。
9. 其它出现机会较多的荷载。

二、特殊荷载:

1. 校核洪水位的静水压力。
2. 相应于校核洪水位时的扬压力。
3. 相应于校核洪水位时的浪压力。
4. 相应于校核洪水位时的动水压力。
5. 地震荷载。
6. 其它出现机会很少的荷载。

第 3.1.2 条 扬压力:进行浆砌石重力坝稳定分析、应力分析以及浆砌石拱坝稳定分析时,必须计入扬压力的作用,并按垂直作用于全部计算截面积考虑。扬压力的图形见附录二。分析浆砌石拱坝坝体应力时,宜考虑扬压力的作用,但薄拱坝一般可以不计。

第 3.1.3 条 泥沙压力:根据坝址河流水文泥沙资料及淤积计算成果确定泥沙压力。泥沙压力的计算公式见附录二。

坝前淤沙高的计算年限可采用 50~100 年,或经专门论证决定。

第 3.1.4 条 浪压力:浪高和波长应根据吹程和风速结合水库所在位置的地形采用适宜的经验公式进行计算。对于山区峡谷水库可采用附录二中有关公式计算。在正常蓄水位及设计洪水位时,风速宜采用同期多年平均最大风速的 1.5 倍;在校核洪水位时宜采用相应洪水期多年平均最大风速。浪高、波长确定后,可采用附录二中的公式计算浪压力。

第 3.1.5 条 冰压力:在严寒地区水库表面形成较厚的冰盖时,应考虑冰压力。

一、静冰压力:当气温升高受热膨胀时,坝前冰盖层对坝面产生的压力。

二、动冰压力:由于冰块流动撞击坝面、闸墩、胸墙以及其他建筑物上所产生的压力。冰压力计算方法见附录二。

第 3.1.6 条 动水压力:当采用坝顶或坝面泄流时,应计算溢流坝段反弧面上的动水压力。对溢流面上的脉动压力和负压力可不考虑。动水压力计算见附录二。

第 3.1.7 条 温度荷载:浆砌石拱坝的温度荷载应根据运行期间坝体内部温度变化考虑。计算方法见附录二。浆砌石重力坝可不考虑温度荷载。

第 3.1.8 条 地震荷载:地震荷载包括地震惯性力和地震动水压力。地震荷载应按现行《水工建筑物抗震设计规范》进行计算。

第二节 荷载组合

第 3.2.1 条 应根据坝型合理确定浆砌石坝设计荷载及其组合。浆砌石坝设计荷载组合分为基本组合和特殊组合两类。基本组合由基本荷载组成;特殊组合由相应的基本荷载与一种或几种特殊荷载组成。

第 3.2.2 条 荷载组合按下述规定进行计算。

一、基本组合：

1. 水库正常蓄水位与相应的不利尾水位的静水压力、坝体自重、扬压力、泥沙压力、浪压力或冰压力(二者取其中大者)。在拱坝设计中还应计入设计正常温降的温度荷载。

2. 对于以防洪为主的水库,其正常蓄水位很低者,可考虑设计洪水位及相应尾水位的静水压力、动水压力、坝体自重、扬压力、泥沙压力、浪压力。在拱坝设计中还应计入设计正常温升的温度荷载。

3. 在拱坝设计中还应考虑水库死水位(或运行最低水位)及相应尾水位的水压力、泥沙压力、坝体自重、扬压力和此时出现的正常温降(或温升)的温度荷载的组合情况。

4. 其它出现机会较多的不利荷载组合。

二、特殊组合：

1. 校核洪水位及相应尾水位的静水压力、坝体自重、扬压力、泥沙压力、动水压力、浪压力。在拱坝设计中还应计入设计正常温升。

2. 基本组合加地震荷载。

3. 施工期的不利荷载组合。

4. 基本组合加其它出现机会较少的荷载。

第四章 浆砌石重力坝

第一节 浆砌石重力坝的布置

第 4.1.1 条 重力坝的布置应根据坝址地形、地质、水文等自然条件,结合泄洪、发电、灌溉、航运等枢纽建筑物的综合利用要求,统筹考虑,还应重视冲淤、排沙及岸坡防护等问题。

第 4.1.2 条 坝体溢流段的前沿长度、孔数等,应根据泄洪、排漂浮物等要求,以及下游河床和两岸的抗冲能力、水深与消能要求等因素,综合比较确定。

第 4.1.3 条 坝体需要开设廊道和孔洞时,其位置、尺寸、数目应结合运用要求、施工条件以及坝体结构应力状态,合理确定。

第 4.1.4 条 溢流重力坝枢纽布置方案的最终选定,2 级建筑物应经水工模型试验验证;3 级建筑物在必要时也应进行水工模型试验。

第二节 坝体形状设计

第 4.2.1 条 实体重力坝上、下游面可分别采用一个或几个坡度,上游坝坡可采用 $1:0 \sim 1:0.2$,下游坝坡可采用 $1:0.6 \sim 1:0.8$ 。

第 4.2.2 条 溢流坝的水力设计应按照现行《混凝土重力坝设计规范》的有关规定执行。

第 4.2.3 条 空腹重力坝宜按以下要求拟定断面：

一、外廓尺寸宜采用满足稳定和应力要求的、较经济的实体重力坝断面。

二、空腹宜位于坝底中部,略偏下游;空腹底宽宜为坝底宽度的 $1/3$ 左右,高度宜为坝高的 $1/4 \sim 1/3$ 。

三、空腹剖面形状设计,宜采用应力状态较好的组合圆式或经论证的其它形状。空腹下游面的倒悬度不宜大于 $0.3:1$,空腹上游面宜倾向上游一定角度,使空腹断面轴线趋向于坝体合力作用线。

第三节 坝体抗滑稳定计算

第 4.3.1 条 坝体抗滑稳定计算,必须考虑下列三种情况:

- 一、沿垫层混凝土与基岩接触面滑动。
- 二、沿浆砌石体与垫层混凝土接触面滑动。
- 三、浆砌石体之间滑动。

第 4.3.2 条 坝体抗滑稳定计算应采用公式(4.3.2-1)或公式(4.3.2-2)。

$$K_1 = \frac{\sum (f_1 W + c_1 A)}{\sum P} \quad (4.3.2-1)$$

$$K_2 = \frac{\sum (f_2 W)}{\sum P} \quad (4.3.2-2)$$

上二式中 K_1 ——抗剪断计算的抗滑稳定安全系数;
 f_1 ——滑动面上的抗剪断摩擦系数;
 c_1 ——滑动面上的抗剪断凝聚力, 10^4 Pa;
 A ——滑动面截面积, m^2 ;
 W ——作用于计算截面以上坝体的全部荷载(包括扬压力)对滑动平面的法向分力,
 10^4 N;
 $\sum P$ ——作用于计算截面以上坝体的全部荷载对滑动平面的切向分力, 10^4 N;
 K_2 ——抗剪计算的抗滑稳定安全系数;
 f_2 ——滑动面上的抗剪摩擦系数。

第 4.3.3 条 采用第 4.3.2 条的公式计算时,坝体抗滑稳定安全系数应不小于表 4.3.3 中的规定值。

表 4.3.3 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_1	(4.3.2-1)	基本		3.00
		特殊	1	2.50
			2	2.30
K_2	(4.3.2-2)	基本		1.05
		特殊	1	1.00
			2	1.00

第 4.3.4 条 当坝基岩体内有软弱夹层时,应重视深层抗滑稳定问题研究,且必须核算坝体带动部分基岩沿该软弱结构面的抗滑稳定性。

第 4.3.5 条 对于岸坡坝段,应视地形、地质条件,核算坝体侧向和抗滑稳定,必要时应采取措
 施,以保证施工期和运用期的稳定。

第 4.3.6 条 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性。

第四节 坝体应力计算

第 4.4.1 条 坝体应力计算方法:

一、实体重力坝以材料力学法为基本分析方法;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,计算方法参见附录三。

二、对于实体重力坝中的高坝、修建在复杂地基上的坝、以及不能作为平面问题处理的坝体或坝段,还应进行有限元法计算或结构模型试验研究。

三、空腹重力坝应采用有限元法计算。

第 4.4.2 条 坝体应力计算内容主要包括:

一、各计算截面上的应力(计算截面个数可根据坝高选定,坝基面、折坡处的截面应进行计算。对于中、低坝,也可只计算坝体边缘应力)。

二、坝体廊道、孔洞等削弱部位的局部应力。

三、空腹重力坝的腹拱周边、前后腿的应力。

设计时,应根据坝的具体情况和不同设计阶段,计算上述内容的部分或全部,或增加其它内容。必要时,尚应分析坝基内部的应力。

第 4.4.3 条 实体重力坝的应力应符合下列要求:

一、在各种荷载(地震荷载除外)组合下,坝体垂直正应力应满足下列要求:

1. 计入扬压力和不计场压力两种情况时,坝基面垂直正应力均应小于砌体容许压应力。

2. 计入扬压力情况时,坝基面最小垂直正应力应为压应力。

二、坝体主应力应满足下列要求:

1. 坝体最大主压应力应小于砌体容许压应力。

2. 不计扬压力时,坝体上游面最小主压应力 $\sigma \geq 0.25 \gamma H$, 此中 γ 为库水容重, H 为计算点的静水头(m)。

3. 坝体内不得出现主拉应力(溢流堰顶及反弧段、廊道和孔洞周边除外)。

4. 当溢流堰顶部出现拉应力或不计扬压力时,应力 $\sigma < 0.25 \gamma H$, 该部分可采用高标号胶结材料砌筑,也可采用混凝土或钢筋混凝土结构。

三、在地震情况下,坝基面的垂直正应力和坝体上游面的主应力的控制标准应符合现行《水工建筑物抗震设计规范》的规定。

第 4.4.4 条 实体重力坝坝体应力除按第 4.4.3 条控制外,还应核算坝体施工期应力,其下游坝基面的垂直正应力只允许有不大于 $10 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的拉应力。

第 4.4.5 条 浆砌石空腹重力坝计算应力可用下列指标控制:

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

二、坝趾部位:主压应力不超过容许压应力值。

第 4.4.6 条 对于空腹重力坝,应通过调整坝体和空腹体形,改善空腹周边部位的应力状态,减小腹拱拉力区范围。腹拱拱圈部分宜采用钢筋混凝土结构。

第 4.4.7 条 浆砌石重力坝的浆砌石体抗压强度安全系数应符合以下要求:

一、在基本荷载组合时,应不小于 3.5。

二、在特殊荷载组合时,应不小于 3.0。

第五节 温度控制

第 4.5.1 条 坝基垫层混凝土温度控制应按现行《混凝土重力坝设计规范》有关规定执行。

第 4.5.2 条 坝体浆砌石砌筑时的温度控制,应按现行《浆砌石坝施工技术规定》的有关规定执行。

第 4.5.3 条 浆砌石坝体横缝的设置宜根据当地具体情况确定。

第五章 浆砌石拱坝

第一节 浆砌石拱坝的布置

第 5.1.1 条 浆砌石拱坝宜选河谷地形狭窄、坝肩地质条件好的坝址。其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。

第 5.1.2 条 拱坝坝轴线位置的选择,应优先考虑拱座稳定,并经多方案比较确定。

第 5.1.3 条 浆砌石拱坝体形的选择,应根据坝址地形、地质条件、泄洪方式、施工条件等合理选定。

浆砌石拱坝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。浆砌石拱坝悬臂梁的倒悬度不宜大于 $0.3:1$ 。

第 5.1.4 条 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。当由坝体泄洪时,宜优先考虑表孔泄洪。应重视浆砌石拱坝的溢流消能和防冲问题。水力设计应按照《混凝土拱坝设计规范》(SD 145—85)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。

第二节 坝体应力分析

第 5.2.1 条 浆砌石拱坝结构分析时,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。

第 5.2.2 条 浆砌石拱坝应力分析,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浆砌石拱坝,除用拱梁分载法计算外,必要时应用有限元法验算或作结构模型试验加以验证。

第 5.2.3 条 浆砌石拱坝应力分析的主要内容包括:

- 一、各计算截面上的应力分布。
- 二、坝体上、下游面在各计算点的主应力。
- 三、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应力。

第 5.2.4 条 浆砌石拱坝应力分析中应考虑下述问题:

- 一、选择应力分布比较有利的体形。
- 二、坝内孔洞对坝体应力的影响。
- 三、封拱温度对坝体应力的影响。
- 四、不设横缝、整体上升的浆砌石拱坝坝体自重对应力的影响。
- 五、分期施工、蓄水对坝体应力的影响。
- 六、坝体设横缝时,坝体横缝灌浆前施工期各单独坝段的应力和抗倾覆稳定性。

第 5.2.5 条 用拱梁分载法计算时,坝体内的主压应力和主拉应力应符合以下要求:

一、浆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,可参考表 5.2.5-1 值选用。

二、浆砌石拱坝计算拉应力不应大于表 5.2.5-2 所列数值。

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。

第 5.2.6 条 2 级浆砌石拱坝应力分析中所采用的砌体弹性模量、泊桑比、坝基变形模量和弹性模量,应通过试验确定。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。

表 5.2.5-1 浆砌石体容许压应力(10^4 Pa)

砌体种类	石料 标号	基本荷载组合						特殊荷载组合					
		胶结材料标号						胶结材料标号					
		混凝土		水泥砂浆				混凝土		水泥砂浆			
		150	100	125	100	75	50	150	100	125	100	75	50
毛石	≥ 1000	510	400	400	340	290	240	600	470	470	400	330	280
	800	470	360	360	310	260	210	550	420	420	370	300	250
	600	410	310	310	270	230	190	480	370	370	320	270	220
	500	370	290	290	240	210	170	430	330	330	280	250	200
	400	330	240	240	210	190	160	380	280	280	250	220	180
石块	300	290	210	210	190	160	130	330	250	250	220	180	150
	≥ 1000	860	670	670	570	470	400	1000	780	780	670	550	470
	800	790	600	600	530	430	360	920	700	700	620	500	420
	600	690	530	530	460	390	310	800	620	620	530	450	370
	500	510	470	470	410	360	290	600	550	550	480	420	330
粗料石	400	440	400	400	360	310	260	520	470	470	420	370	300
	300	390	360	360	310	260	230	450	420	420	370	300	270
	≥ 1000	940	790	790	700	610	530	1100	920	920	820	720	620
	800	870	700	700	640	560	470	1020	820	820	750	650	550
	600	760	610	610	570	500	430	880	720	720	670	580	500
料石	500	510	510	510	510	460	390	600	600	600	600	530	450
	400	440	440	440	440	400	340	520	520	520	520	470	400
	300	390	390	390	390	340	300	450	450	450	450	400	350

表 5.2.5-2 浆砌石拱坝控制计算拉应力(10^4 Pa)

胶结材料标号	毛石砌体		粗料石、块石砌体	
	中央悬臂梁底	其他部位	中央悬臂梁底	其他部位
75	70	55	100	80
100	90	70	120	100
125	100	85	135	120
150	110	100	150	140

第 5.2.7 条 对于重要的浆砌石拱坝,宜再用拱坝极限分析法核算,进一步了解其安全度。当采用拱坝极限分析法核算时,坝体强度安全系数为极限荷载与设计荷载的比值,对于基本荷载组合,不应小于 3.2;对于特殊荷载组合,不应小于 2.9。

第三节 拱座稳定分析

第 5.3.1 条 在浆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。

第 5.3.2 条 在评价拱座的稳定性时,应合理确定滑裂面。滑裂面上的抗剪强度参数 f 和 c 的设计值,2 级浆砌石拱坝应通过试验后研究选定;3 级浆砌石拱坝不具备试验条件时,可参照类似地质条件下工程的经验数据选定。

第 5.3.3 条 浆砌石拱坝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,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。

第 5.3.4 条 采用刚体极限平衡法进行抗滑稳定分析时,应采用公式(5.3.4-1)或公式(5.3.4-2)计算。

$$K_1 = \frac{\sum (Nf_1 + c_1 A)}{\sum T} \quad (5.3.4-1)$$

$$K_2 = \frac{\sum (Nf_2)}{\sum T} \quad (5.3.4-2)$$

上二式中 K_1 、 K_2 ——抗滑稳定安全系数;

N ——垂直于滑动方向的法向力, 10^4N ;

T ——沿滑动方向的滑动力, 10^4N ;

A ——计算滑裂面的面积, m^2 ;

f_1 ——抗剪断摩擦系数;

c_1 ——抗剪断凝聚力, 10^4Pa , f_1 、 c_1 应按相应于岩体的峰值强度采用;

f_2 ——抗剪摩擦系数,应按相当于下述特征值取用: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。

第 5.3.5 条 采用第 5.3.4 条公式计算时,相应安全系数应不小于表 5.3.5 规定的数值。

第 5.3.6 条 当拱座下游存在较大断层或软弱带时,应进行专门研究,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。

表 5.3.5 抗滑稳定安全系数

安全系数	荷载组合	建筑物级别	
		2	3
K_1	按公式 (5.3.4-1)	基本	
		3.25	3.00
		特殊	1
			2
K_2	按公式 (5.3.4-2)	基本	
		1.40	1.30
		特殊	1
			2

第 5.3.7 条 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。

第 5.3.8 条 浆砌石拱坝重力墩、推力墩的稳定分析应符合本节的有关规定。其应力及稳定计算参见附录四。重力墩、推力墩的荷载组合应与坝体的荷载组合一致。

第四节 温度控制

第 5.4.1 条 浆砌石拱坝施工时,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。宽缝缝宽可为 $0.8\sim 1.2\text{m}$ 。

第 5.4.2 条 浆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°C 。严寒地区工程封拱温度的确定需经专门论证。

整体上升的浆砌石拱坝,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°C 的气温下砌筑。

第六章 坝体防渗

第一节 一般规定

第 6.1.1 条 浆砌石坝应有防渗设施,可采用下列几种形式:

- 一、设置在坝体上游面的混凝土防渗面板。
- 二、设置在靠近迎水面砌石体内的混凝土防渗心墙。
- 三、利用坝体自身防渗。
- 四、经过实践或论证的其他形式。

第 6.1.2 条 坝体防渗形式应结合建筑物等级、当地建筑材料、自然条件、施工工艺、建坝经验等因素,比较论证后确定。

第 6.1.3 条 在有冰冻地区,坝体上游面水位涨落部位的胶结材料或混凝土防渗面板应采用普通硅酸盐水泥。

第二节 混凝土防渗面板与心墙

第 6.2.1 条 防渗面板与心墙的混凝土标号应满足抗渗、抗裂、抗冻、强度等要求。其抗渗标号应满足表 6.2.1-1 的要求,抗冻标号应满足表 6.2.1-2 的要求。

表 6.2.1-1 混凝土抗渗标号要求

面板或心墙承受水头(m)	<30	30~70	>70
抗 渗 标 号	S_4	S_6	S_8

表 6.2.1-2 混凝土抗冻标号要求

气候条件	结构类别	工作条件 水位涨落区的外部混凝土冻融循环总次数		水位涨落区以上的外部混凝土
		≤50	>50	
严寒气候条件(最冷月平均气温低于-10℃)	钢筋混凝土	D200	D250	D100
	混凝土	D150	D200	
寒冷气候条件(最冷月平均气温在-3~-10℃之间)	钢筋混凝土	D150	D200	D50
	混凝土	D150	D150	

第 6.2.2 条 混凝土防渗面板与心墙的底部厚度宜为最大水头的 $1/30 \sim 1/60$,顶部厚度不应小于 0.3 m。

第 6.2.3 条 混凝土防渗面板应根据温度应力计算或参照已建工程的实践经验,配置钢筋。

第 6.2.4 条 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 m。

第 6.2.5 条 混凝土防渗面板或心墙必须嵌入建基面 1~2 m,并与坝基防渗设施连成整体。

第三节 利用坝体自身防渗

第 6.3.1 条 适合下列条件之一者,可利用坝体自身防渗:

- 一、用混凝土作为胶结材料,使用机械振捣并辅以必要的补强灌浆的砌石坝。
 二、高度低于 50 m,用水泥砂浆砌筑粗料石,迎水面用高标号水泥砂浆勾深缝的浆砌石坝。
 第 6.3.2 条 利用坝体自身防渗,应对坝体与地基的连接作出防渗设计。

第四节 横缝、止水和排水

- 第 6.4.1 条 重力坝的混凝土防渗面板应设伸缩缝,缝距宜为 10~20 m。如坝体设横缝,混凝土防渗面板或心墙的分缝应与坝体一致。
 第 6.4.2 条 拱坝混凝土防渗面板或心墙的横缝间距宜为 10~20 m,并与坝身砌体横缝的形式和部位一致。混凝土防渗面板或心墙应和坝体同时封拱。
 第 6.4.3 条 混凝土防渗面板或心墙的工作缝除必须按有关规定处理外,竖直工作缝应埋设止水,水平工作缝宜采用键槽连接。
 第 6.4.4 条 混凝土防渗面板与心墙的伸缩缝,在水头大于 30 m 或死水位以下的部位应设两道止水,死水位以上且水头小于 30 m 的部位可设一道止水。
 第 6.4.5 条 横缝止水应与坝基岩石紧密连接,止水片宜埋入基岩内 30~50 cm。
 第 6.4.6 条 横缝止水后面宜设竖向排水孔,通至纵向排水检查廊道或坝体水平排水系统。

第七章 坝基处理

- 第 7.0.1 条 浆砌石坝的地基处理设计,必须根据地质条件、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、刚度和抗渗、耐久的要求。
 第 7.0.2 条 对岩溶地区和坝基范围内有较大的软弱破碎带者,应有专门的坝基处理设计。
 第 7.0.3 条 浆砌石重力坝的坝基处理设计,可参照现行《混凝土重力坝设计规范》有关规定执行;浆砌石拱坝的坝基处理设计,可参照现行《混凝土拱坝设计规范》有关规定执行。

第八章 坝体构造

第一节 坝顶布置和交通

- 第 8.1.1 条 非溢流坝坝顶不得低于水库最高静水位,防浪墙顶不得低于正常运用或非常运用的水库静水位加相应的超高 Δh 。 Δh 按下式计算:

$$\Delta h = 2h_l + h_0 + h_c$$

式中 $2h_l$ ——波浪高,m;
 h_0 ——波浪中心线超出水库静水位的风壅高度,m;
 h_c ——安全超高,m,按表 8.1.1 采用。

$2h_l$ 和 h_0 值应分别按正常和非常运用情况,参照附录二计算,取坝顶高程较大值。

表 8.1.1 安全超高 h_c 值(m)

荷 载 组 合 (运用情况)	坝 的 级 别	
	2	3
基本组合(正常运用)	0.5	0.4
特殊组合(非常运用)	0.4	0.3

- 第 8.1.2 条 坝顶结构应满足设备布置、检修、交通和观测等方面要求,注意安全、适用、经济、

美观。

溢流坝顶应根据需要设置交通桥或工作桥。坝高 50 m 以上的非溢流坝坝顶宽度不宜小于 3 m。坝顶下游侧宜设置栏杆。

第 8.1.3 条 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 1.2 m。

第 8.1.4 条 浆砌石坝的下游面可视需要设置坝后桥。

第二节 坝内廊道和孔洞

第 8.2.1 条 坝体内应视需要设置孔洞和廊道,应统一布置并尽量设在坝体应力较小的部位。坝内廊道、孔洞有立体交叉时,其净距不宜小于 3 m。薄拱坝坝体内可不设廊道。

第 8.2.2 条 纵向廊道的上游壁距上游坝面的距离宜为 0.05~0.1 倍坝面作用水头,且不得小于 3 m。

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,廊道断面形状可为圆顶直墙形,宽度宜为 2.5~3 m,高度宜为 3~4 m。岸坡纵向廊道的坡度不宜陡于 45°。

第 8.2.3 条 坝基排水廊道,宜在基岩面或靠近基岩面按裂隙分布发育情况,纵、横方向布置。廊道宽度宜为 1.2~2.5 m,高度宜为 2.2~3 m。

第 8.2.4 条 纵向检查观测廊道的设置,必须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。

第 8.2.5 条 当需要布置多层廊道时,层间距离高宜为 20~40 m,各层廊道均应相互连通。

第 8.2.6 条 廊道内应设可靠的照明和排水设施。

第三节 坝体分缝和坝体排水

第 8.3.1 条 浆砌石坝根据地形、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。拱坝横缝的构造应满足封拱灌浆的要求。重力坝横缝、拱坝底座水平缝应设置可靠的止水。

第 8.3.2 条 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 2 m。当不设防渗墙时,排水管距上游坝面的距离不得小于 3 m。排水管道距宜为 3~5 m,内径宜为 15 cm 左右,上端通入纵向廊道或坝顶(设盖板),下端接入纵向检查廊道或水平排水管。水平排水管高差宜为 10~20 m。

坝体排水管可采用预制无砂混凝土管,或用料石砌筑成排水孔。混凝土溢流护面与坝体浆砌石的接触面上,可视需要设排水管通至坝后。无冰冻地区的薄拱坝坝体内可不设置排水管。

第九章 观测设计

第一节 观测设计原则和项目

第 9.1.1 条 浆砌石坝应按级别、坝高、结构型式及地质条件等确定观测项目 and 设备布置。观测项目不宜过多,但应能掌握施工期、蓄水期和运行期大坝的工作状态。

第 9.1.2 条 对于 2、3 级浆砌石坝,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、扬压力和渗流的观测;必要时宜进行坝体横缝、接触缝、冲刷和淤积等项目观测。对于 2 级或结构比较新颖的浆砌石坝,可根据设计和科研的需要,对坝体的应力、应变、坝体局部结构和

孔洞的应力、应变、水力学以及地震反应等项目进行专门观测。

第二节 观测设备的布置

第 9.2.1 条 观测设备布置应符合下列要求：

一、测点布设应能反映大坝的主要工作状态,观测成果便于与设计、试验成果对比分析。

二、应根据坝型、坝的结构特点和观测目的选择观测断面。

三、各相关因素的观测设备布置要互相配合,尽量集中,其各类仪器布设的数量应能满足资料分析的需要。

四、观测方法宜简便、直观和满足精度要求,观测值应能互相校核。

第 9.2.2 条 坝体上下游水位观测可设置水尺或遥测水位计观测。

第 9.2.3 条 坝体温度观测点沿坝高方向不宜少于 4 层,每层至少 3 个测点。水温观测宜与坝体温度观测配合进行。

第 9.2.4 条 水平位移观测,可根据坝型、观测内容等具体条件选用垂线法、引张线法、视准线法、激光准直法、三角网法和精密导线法等。

第 9.2.5 条 坝体、坝基的垂直位移,宜用精密水准测量,每坝段设一测点。观测用的基准点,应远离坝体。

第 9.2.6 条 扬压力观测应以横断面观测为主,纵横结合。观测横断面宜选在最大坝高及基础较差处。每一水平截面不得少于 3 个测点。必要时,可对坝肩岩体进行扬压力观测,测点的位置,可根据地质条件作适当的调整。地质条件优良的薄拱坝,可不作扬压力观测。

第 9.2.7 条 渗流观测宜在廊道(或坝基井、洞)排水沟的适当位置设置量水堰和水位测针,或在坝址下游能汇集渗水处设置集水井等量水设施。

第 9.2.8 条 对坝后的冲刷坑及坝前淤积情况应定断面进行观测。

第 9.2.9 条 裂缝的开合度观测,应在坝体与岸坡、基岩接触部位和坝体横缝处埋设测缝计。

第 9.2.10 条 坝体应力、应变观测,对于拱坝,可选择拱冠和左右拱端断面进行;对于重力坝,宜在溢流坝段和非溢流坝段各选一个观测断面;对于重要的或地质条件复杂的工程,可酌情增加断面。

每个观测断面,除在基础附近布置一个观测截面外,还可根据坝高和结构特点,沿坝高大致均匀地布置几个观测截面。每个截面上至少应在距上下游坝面 0.6 m 左右及断面中心处各布置一个测点。

第 9.2.11 条 测点应变、应力计的支数和方向,应根据不同的应力状态确定,每个应变计组附近,应埋设无应力计。布置无应力计应满足以下要求:

一、无应力计与应变计组距坝面的距离相等。

二、在坝面附近温度梯度较大的部位,无应力计的轴线宜垂直坝面。

三、无应力计与应变计组的距离,不宜小于放置无应力计外罩尺寸的 3 倍。

第 9.2.12 条 观测站的布置应靠近大量埋设仪器的断面,并有良好的交通、照明、防潮和安全设施。

附录一 浆砌石体主要力学指标

附表 1.1 浆砌石体的变形模量 E 及弹性模量 E' 值表附表 1.2 浆砌石体极限轴心受压应力 $\bar{\sigma}_{\text{压}}$ 值表附表 1.3 浆砌石体的极限抗拉强度 R_T 值表

附表 1.4 浆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

附表 1.5 浆砌石体与垫层混凝土或浆砌石体本身的抗剪断参数 f_1 、 c_1 及抗剪参数 f 参考值附表 1.1 浆砌石体的变形模量 E 及弹性模量 E' 值表(10^9 Pa)

砌体种类	石料标号	胶 结 材 料 标 号											
		混 凝 土				水 泥 砂 浆							
		≥ 150		100		125		100		75		50	
		E	E'	E	E'	E	E'	E	E'	E	E'	E	E'
毛 石	≥ 1000	6.5	11.5	6.0	11.0	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.0	7.0
	800	6.0	11.0	5.0	9.0	5.0	9.0	4.5	8.0	4.0	7.0	3.0	5.5
	600	5.0	9.0	4.5	8.0	3.5	6.5	3.0	5.5	3.0	5.5	2.5	4.5
	500	4.0	7.0	4.0	7.0	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	3.5
	400	3.5	6.5	3.5	6.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
	300	3.0	5.5	3.0	5.5	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
块 石	≥ 1000	11.0	20.0	10.5	19.0	10.5	19.0	10.0	18.0	9.0	16.0	7.0	12.5
	800	9.0	16.0	8.5	15.5	8.5	15.5	8.0	14.5	7.0	12.5	6.0	11.0
	600	7.0	12.5	7.0	12.5	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.5	8.0
	500	5.0	9.0	5.0	9.0	3.5	6.5	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5
	400	4.0	7.0	4.0	7.0	3.0	5.5	2.5	4.5	2.5	4.5	2.5	4.5
	300	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	≥ 1000	10.0	18.0	9.5	17.0	9.5	17.0	9.0	16.0	8.0	14.5	7.0	12.5
	800	8.0	14.5	8.0	14.5	7.5	13.5	7.0	12.5	6.5	11.5	5.5	10.0
	600	7.5	13.5	7.0	12.5	6.5	11.5	6.0	11.0	5.5	10.0	4.5	8.0
	500	6.5	11.5	6.0	11.0	5.5	10.0	5.0	9.0	4.5	8.0	4.0	7.0
	400	5.5	10.0	5.0	9.0	4.0	7.0	4.0	7.0	4.0	7.0	3.5	6.5
	300	4.0	7.0	4.0	7.0	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5

附表 1.2 浆砌石体极限轴心受压应力 $\bar{\sigma}_{\text{压}}$ 值表(10^4 Pa)

砌 体 类 别	石 料 标 号	胶结材料标号						备 注
		混 凝 土		水 泥 砂 浆				
		150	100	125	100	75	50	
毛 石	≥1000	1440	1120	1120	960	800	680	本表所列数值经实测资料验证。按屈服强度的安全系数为 2.3
	800	1320	1000	1000	880	720	600	
	600	1160	880	880	760	640	520	
	500	1040	800	800	680	600	480	
	400	920	680	680	600	520	440	
	300	800	600	600	520	440	360	
块 石	≥1000	2400	1880	1880	1600	1320	1120	
	800	2200	1680	1680	1480	1200	1000	
	600	1920	1480	1480	1280	1080	880	
	500	1440	1320	1320	1160	1000	800	
	400	1240	1120	1120	1000	880	720	
	300	1080	1000	1000	880	720	640	
粗 料 石	≥1000	2640	2200	2200	1960	1720	1480	
	800	2440	1960	1960	1800	1560	1320	
	600	2120	1720	1720	1600	1400	1200	
	500	1440	1440	1440	1440	1280	1080	
	400	1240	1240	1240	1240	1120	960	
	300	1080	1080	1080	1080	960	840	

附表 1.3 浆砌石体的极限抗拉强度 R_T 值表(10^4 Pa)

类 别	破 坏 形 式	砌 体 种 类	R_T 计取方法	胶 结 材 料 标 号				
				150	125	100	75	50
轴心抗拉	沿灰缝接触面通缝	各种砌体	σ_t	42	36	30	24	18
	沿灰缝接触面齿缝	毛石砌体	$0.7 \times 2 \sigma_t$	59	50	42	34	25
		粗料石、块石砌体	$r \times 2 \sigma_t$	84	72	60	48	36
弯曲抗拉	沿灰缝接触面通缝	各种砌体	$1.9 \sigma_t$	80	68	57	46	34
	沿灰缝接触面齿缝	毛石砌体	$1.9 \times 0.7 \times 2 \sigma_t$	112	96	80	64	48
		粗料石、块石砌体	$1.9 r \times 2 \sigma_t$	160	137	114	91	68

注：表中 r 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、块石砌体的砌合长度等于每层砌石厚度，因而 $r=1$ 。当 r 不等于 1 时，应按实际情况采用。

附表 1.4 浆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

基岩分类	岩石综合评价	基 岩 特 征	抗 剪 断 参 数		抗 剪 参 数
			f_i	C_1 (10^4 Pa)	
I 级	很好的岩石	完整的、新鲜的、致密坚硬的、裂隙不发育的、块状的、厚层状的岩石。饱和抗压强度 $>10^8$ Pa, 变形模量 $>20 \times 10^9$ Pa, 声波纵波速度 >5000 m/s	1.2~1.5	130~150	0.70~0.75
II 级	好的岩石	完整的、新鲜的、坚硬的、微裂隙的、块状的、厚层状的岩石。饱和抗压强度 $(6 \sim 10) \times 10^7$ Pa, 变形模量 $(10 \sim 20) \times 10^9$ Pa, 声波纵波速度 4000~5000 m/s	1.0~1.3	110~130	0.60~0.70
III 级	中等岩石	完整性较差的、微风化的、微裂隙的、中等坚硬的、块状的、层状的岩石。饱和抗压强度 $(3 \sim 6) \times 10^7$ Pa, 变形模量 $(5 \sim 10) \times 10^9$ Pa, 声波纵波速度 3500~4500 m/s	0.9~1.2	70~110	0.50~0.60
IV 级	较差的岩石	完整性差的、弱风化的、弱裂隙的、较软弱的、中厚层状的岩石，或节理不发育，层理片理较发育、易风化的、薄层状的岩石。饱和抗压强度 $(1.5 \sim 3) \times 10^7$ Pa, 变形模量 $(2 \sim 5) \times 10^9$ Pa, 声波纵波速度 2500~3500 m/s	0.7~0.9	30~70	0.35~0.50

注：①本表不包括基岩内有软弱夹层的情况；

②混凝土与基岩接触面上的抗剪断参数不能超过混凝土本身的抗剪断参数值；

③对于 I、II 级基岩，如果建基面能做成较大的起伏差，则接触面上的抗剪断参数，可采用混凝土的抗剪断参数。

附表 1.5 浆砌石体与垫层混凝土或浆砌石体本身的抗剪断参数 f_i 、 C_1 及抗剪参数 f 参考值

砌体所用石料标号	抗剪断、抗剪参数类别	胶 结 材 料 标 号					
		混 凝 土		水 泥 砂 浆			
		150	100	125	100	75	50
>1000	f_i	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_1 (10^4 Pa)	100~110	80~90	90~100	80~90	70~80	50~60
	f	0.65~0.75	0.65~0.75	0.65~0.75	0.65~0.75	0.55~0.65	0.50~0.60
600~1000	f_i	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_1 (10^4 Pa)	80~100	60~70	70~80	60~70	50~60	40~50
	f	0.55~0.65	0.55~0.65	0.55~0.65	0.55~0.65	0.50~0.60	0.40~0.50
300~600	f_i	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_1 (10^4 Pa)	50~80	40~60	40~70	40~60	30~40	20~30
	f	0.45~0.55	0.45~0.55	0.45~0.55	0.45~0.55	0.40~0.50	0.30~0.40

注：表中 C_1 值在采用时宜根据工程具体情况加以修正。

附录二 荷载计算公式

(一)静水压力

垂直作用于建筑物某一点处的静水压力按下式计算:

$$p = \gamma \cdot H \quad (\text{附 } 2.1)$$

式中 p ——静水压力, 10^4 Pa ;

H ——从水面至计算点的水深, m ;

γ ——水(或含泥沙水)的容重, 10^4 N/m^3 。

(二)动水压力

溢流坝反弧段上的动水压力(离心力)合力的水平及垂直分力可按下式计算(见附图 2.1):

$$P_x = \frac{q\gamma}{g}v(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)10^4 \text{ N} \quad (\text{附 } 2.2)$$

$$P_y = \frac{q\gamma}{g}v(\sin \varphi_2 + \sin \varphi_1)10^4 \text{ N} \quad (\text{附 } 2.3)$$

$$p = \frac{q\gamma}{g} \times \frac{v}{R} \quad (\text{附 } 2.4)$$

上三式中 φ_1 、 φ_2 ——反弧段的夹角(如附图 2.1);

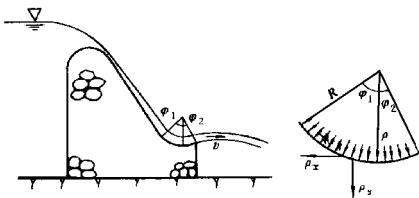
R ——反弧的半径, m ;

v ——反弧段上平均流速, m/s ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

q ——反弧段上的单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;

γ ——水的容重, N/m^3 。



附图 2.1

(三)扬压力

1. 作用于坝基面的扬压力

设计时可根据坝基地质条件、帷幕和排水的布置情况,分别选用扬压力图形。

(1)实体浆砌石坝:

①坝基设有防渗帷幕和排水孔时,在坝踵处的扬压力为 H_1 (上游水深),排水孔线上为 $H_2 + \alpha H$ (H 为上下游水位差),坝趾处为 H_2 (下游水深),其间均以直线连接,如附图 2.2(a)所示。 α 值根据坝基地质情况,河床坝段采用 0.2~0.3,岸坡坝段采用 0.3~0.4,对于两岸水文和工程地质条件较复杂者,应进行研究论证,以确定适合的数值。

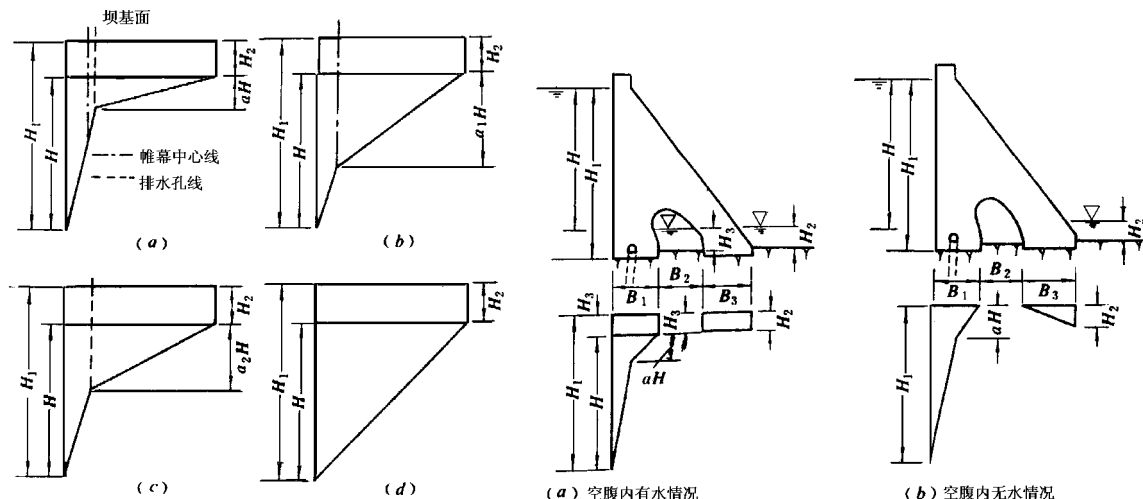
②坝基设有防渗帷幕而未设排水孔时,在坝踵处的扬压力为 H_1 ,帷幕中心线上为 $H_1 + \alpha_1 H$,坝趾处为 H_2 ,其间以直线连接,如附图 2.2(b)。 α_1 值宜采用 0.5~0.7。

③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 ,排水孔线上为 $H_2 + \alpha_2 H$,坝趾处为 H_2 ,其间均以直线连接,如附图 2.2(c)所示。 α_2 值宜采用 0.3~0.45。

④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,如附图 2.2(d)。

(2)空腹浆砌石坝:坝内的空腹有利于坝基排水,减少坝基扬压力。空腹浆砌石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,其大小及图形与实体浆砌石坝相

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附图 2.3 中(a)和(b)采用。



(a) 设有防渗帷幕和排水孔;

(b) 设有防渗帷幕未设排水孔;

(c) 未设防渗帷幕但设有排水孔;

(d) 未设防渗帷幕和排水孔

(a) 空腹内有水情况;(b) 空腹内无水情况

附图 2.3 空腹浆砌石坝坝基扬压力图

附图 2.2 实体浆砌石坝坝基扬压力图

(3)岸坡坝段(包括岸坡拱座):因受岸坡地下水 and 三向渗流的影响, α 、 α_1 、 α_2 值宜较上述河床坝段适当提高。

(4)在主排水幕下游坝基面上,设置由纵横廊道组成的排水系统;下游尾水位较高时宜在下游坝趾设一道防渗帷幕。低于下游水位的坝基,有足够容积的集水井,并有可靠的自动抽水设备及电源和事故报警设施,能保证在运用期中通过排水降低扬压力时,坝基面上的扬压力图形可按附图 2.4 所示的图形。主排水幕处的 α_1 ,对河床坝段可采用 0.2~0.3,对岸坡坝段可采用 0.3~0.4。坝基面上残余扬压力系数 α_2 ,可采用 0.3~0.5。

(5)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。当坝基上设有多个排水廊道时,设计中只考虑第一排廊道的作用。

2. 作用于坝体内部的扬压力

实体浆砌石坝坝体内部的扬压力,在上游坝面处为计算截面以上的上游水深 H'_1 ,在坝体排水管线上为 $H'_2 + \alpha_3(H'_1 - H'_2)$ (计算截面在下游水位以上时,取 $H'_2 = 0$,下同)。在下游坝面处为计算截面以上的下游水深 H'_2 ,其间均以直线连接, α_3 值宜采用 0.15~0.25。如未设坝体排水管时,上游坝面处为 H'_1 ,下游坝面处为 H'_2 ,其间以直线连接,如附图 2.5 所示。

(四)泥沙压力

垂直泥沙压力按作用面上土的浮容重计算,水平泥沙压力按下式计算:

$$P_n = \frac{\gamma_n h_n^2}{2} \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2}) \quad (\text{附 2.5})$$

式中 $\gamma_n = \gamma_1 - (1 - n)\gamma$;

γ_1 ——为泥沙的干容重, n 为泥沙的孔隙率;

h_n ——坝前泥沙淤积高度 m;

φ_n ——泥沙的内摩擦角。

在初步设计阶段,如无可靠资料时,可取以下近似值:泥沙干容重 $\gamma_1 = 15 \sim 18 \text{ kN/m}^3$,空隙率 $n = 0.35 \sim 0.4$;对于较粗糙的砂砾,沉积期较长时,取 $\varphi_n = 18^\circ \sim 20^\circ$,对于粘土质淤积物, $\varphi_n = 12^\circ \sim 14^\circ$,对于极细的淤泥、粘土和胶质颗粒, φ_n 接近于 0。在施工详图阶段 γ_n 及 φ_n 宜通过试验决定。水平泥沙压力合力作用在距坝基以上 $\frac{1}{3} h_n$ 处。

(五)浪压力

1. 浪高、波长

浪高、波长可按式计算(适用于山区峡谷水库,库缘地势高峻,风速 $4 \sim 16 \text{ m/s}$ 吹程 $1 \sim 13 \text{ km}$):

$$2h_2 = 0.0166 v_f^{\frac{5}{4}} D_f^{\frac{1}{3}} \quad (\text{附 2.6})$$

$$2L_L = 10.4(2h_2)^{0.8} \quad (\text{附 2.7})$$

上二式中 $2h_2$ ——浪高, m;

$2L_L$ ——波长, m;

v_f ——计算风速, m/s;

D_f ——计算吹程,即由坝前沿水面至对岸水面的最大直线距离,。当这一距离大于水库宽度 5 倍时,取计算吹程 D_f 为水库宽度 B 的 5 倍,即 $D_f = 5B$ 。

2. 浪压力计算

(1)坝前水深 H_1 满足 $H_{ij} < H_1 < L_L$ 时,假定坝面坡度近似铅直(陡于 1:1),波浪压力计算图形如附图 2.6(a)所示。即假定在水库静水位上下近似作直线分布,作用在单位坝长的坝面上的波浪压力 P_L 可按式计算:

$$P_L = \gamma \frac{(H_1 + 2h_2 + h_0)(H_1 + \rho_1)}{2} - \gamma \frac{H_1^2}{2} \quad (\text{附 2.8})$$

式中 h_0 ——波浪中心线至水库静水位的高度,

$$h_0 = \frac{4\pi h_2^2}{2L_L} \text{cth} \frac{\pi H_1}{L_L} \quad (\text{附 2.9})$$

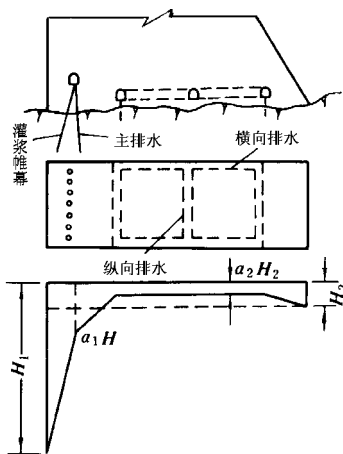
ρ_1 ——坝基面的浪压力剩余强度,

$$\rho_1 = 2h_2 \text{sech} \frac{\pi H_1}{L_L} \quad (\text{附 2.10})$$

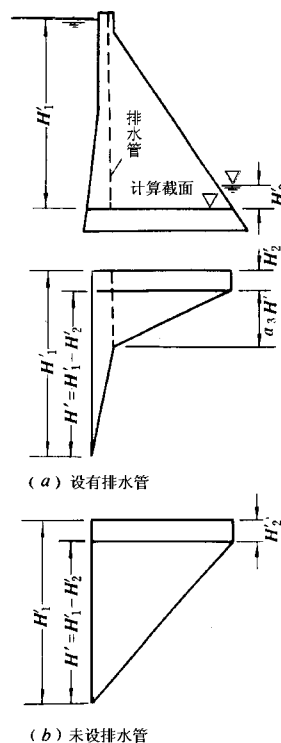
H_{ij} 是使波浪破碎的临界水深,其值为:

$$H_{ij} = \frac{L_L}{2\pi} \ln \frac{2L_L + 4\pi h_2}{2L_L - 4\pi h_2} \approx 3 \sim 5 h_2 \quad (\text{附 2.11})$$

(2)当坝前水深 $H_1 > L_L$ 时,在距水库静水位深 L_L 以下各点的浪压力可以忽略,并假定坝面近似铅直,其浪压力可按式计算:



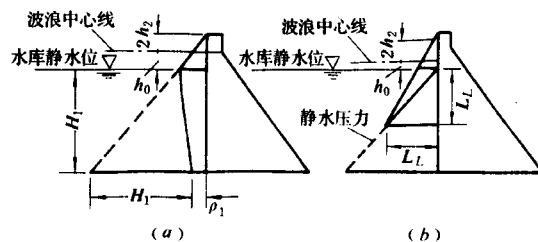
附图 2.4 坝基抽排系统及扬压力图形



(a) 设有排水管; (b) 未设排水管
附图 2.5 实体浆砌石坝坝体内部扬压力图

$$P_L = \gamma \frac{(L_L + 2h_2 + h_0)L_L}{2} - \frac{1}{2} \gamma (L_L)^2 \quad (\text{附 2.12})$$

浪压力的分布见附图 2.6(b)。



(六)冰压力

1. 静冰压力

根据当地的冰层厚度,可按附表 2.1 选取作用

在单位长度坝体上的最大静冰压力值(10^4 N/m)。

附图 2.6

冰层膨胀压力的合力作用点位于冰层表面以下约 $0.3 d_b$ (d_b 为计算冰厚, m)。

附表 2.1 静冰压力表

冰厚(m)	<0.40	0.40~0.80	0.80~1.20
静冰压力(10^4 N/m)	<10	10~30	30~35

2. 动冰压力

(1)冰块撞击在坝面上所产生的压力。当冰的运动方向垂直或接近垂直(运动方向与坝轴线的交角 $\varphi = 80^\circ \sim 90^\circ$)于铅直坝面时,动冰压力值按(附 2.13)式计算。

$$P_{bd} = K_b v_b d_b \sqrt{A_b} (10^4 \text{ N}) \quad (\text{附 2.13})$$

当冰块的运动方向与坝轴线的交角 $\varphi < 80^\circ$ 时,作用于建筑物正面的动冰压力值 P_{bd} 按(附 2.14)式计算。

$$P_{bd} = C_b v_b d_b^2 \sqrt{\frac{A_b}{\mu A_b + \lambda d_b^2}} \cdot \sin \varphi \quad (\text{附 2.14})$$

上二式中 K_b ——系数,决定于流冰的抗碎强度 R_b 值(当 $R_b = 100 \times 10^4 \text{ Pa}$, $K_b = 4.3$; $R_b = 50 \times 10^4 \text{ Pa}$, $K_b = 3.0$; $R_b = 30 \times 10^4 \text{ Pa}$, $K_b = 2.36$);

v_b ——冰块流速, m/s,一般不大于 0.6 m/s,对于大水库应该通过研究决定;

d_b ——冰块厚度(取冬季最大冰厚的 0.8), m;

A_b ——冰块面积, m^2 ;

C_b ——系数,等于 $136 \times 10^4 \text{ s} \cdot \text{N/m}^2$;

λ ——与流冰的极限抗碎强度 R_b 值有关的系数(当 $R_b = 45 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\lambda = 2220$; $R_b = 1000 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\lambda = 1000$; $R_b = 150 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\lambda = 667$);

μ ——系数, $\mu = \frac{\cos^2 \varphi}{\tan^2 \varphi}$ 。

(2)冰块撞击在闸墩上所产生的压力。作用于铅直的闸墩上的动冰压力 P'_{bd} ,可按(附 2.15)式计算。

$$P'_{bd} = m A R_b B d_b (10^4 \text{ N}) \quad (\text{附 2.15})$$

式中 R_b ——冰的抗碎强度,当无试验资料时,结冰初期, $R_b = 75 \times 10^4 \text{ Pa}$,结冰末期, $R_b = 45 \times 10^4 \text{ Pa}$;

A ——地区系数,气温在零度以上解冻时为 1,气温在零度以下解冻且冰温为 -10°C 及以下者为 2,介于两者之间用插入法求得;

B ——闸墩在冰层平面处的宽度, m;

m ——与闸墩平面形状有关的系数, 对于半圆形闸墩, 采用 $m = 0.9$; 对于三角形闸墩, 根据其平面上的顶端角度 2α 按附表 2.2 采用。

附表 2.2 m 值表

2α	45°	60°	75°	90°	120°
m	0.60	0.65	0.69	0.73	0.81

(七) 温度荷载

浆砌石拱坝的温度荷载, 应计算坝体设计正常温降(温升)情况。设计正常温降(温升)采用多年平均最低(最高)月平均气温与多年平均年平均气温的差值。

1. 一般计算公式

拱坝温度荷载是指坝体封拱形成整体后的温度变化产生的荷载。当坝体厚度 L 与坝体水平拱半径 R 的比值 $L/R \leq 0.5$ 时, 可忽略坝面曲率的影响, 按平板计算拱的温度场。

拱坝内温度可等效的分解为三部分, 即沿截面厚度的平均温度 T_m 、等效温差 T_d 和非线性温度 T_n , 如附图 2.7 所示, 其计算公式如下:

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T dx \quad (\text{附 2.16})$$

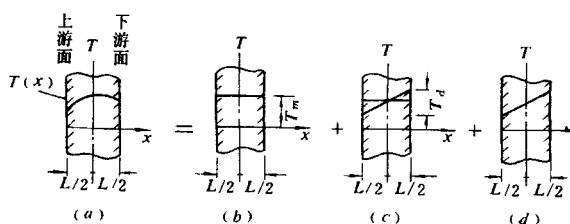
$$T_d = \frac{12}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} T x dx \quad (\text{附 2.17})$$

$$T_n = T - T_m - \frac{T_d x}{L} \quad (\text{附 2.18})$$

上三式中 L ——坝体厚度;

T ——温度, 是坐标 x 的函数, $^\circ\text{C}$ 。

这三种温度荷载中, 平均温度 T_m 对拱的推力以及拱和悬臂梁的弯矩影响很大, 上下游方向等效线性温差 T_d 线性分布温度 $T_d x/L$ 对拱产生纯弯矩; 非线性温度 T_n 是引起坝体表面裂缝的重要原因, 但因其引起的应力具有自身平衡性质, 不影响坝体的变位和内力, 故拱坝温度荷载计算通常只考虑 T_m 和 T_d 。



(a) 实际温度; (b) 平均温度 T_m ;
(c) 等效线性温差 T_d ; (d) 非线性温度 T_n

附图 2.7

拱坝温度荷载可由封拱温度场、年平均温度场和变化温度场三个特征温度场的相应值求得。拱坝温度荷载计算中的坝内平均温度、等效线性温差可由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} T_m &= T_{m1} - T_{m0} + T_{m2} \\ T_d &= T_{d1} - T_{d0} + T_{d2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 2.19})$$

其中:

(1) T_{m0} 为封拱时平均温度, T_{d0} 为拱时的等效温差, 设封拱时实际温度为 T_0 , 代入式(附 2.16)、(附 2.17) 即可计算 T_{m0} 和 T_{d0} 。

(2) T_{m1} 、 T_{d1} 为与坝体年平均温度场相应的 T_m 和 T_d , 可按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} T_{ml} &= \frac{1}{2}(T_{sm} + T_{xim}) \\ T_{dl} &= T_{xim} - T_{sm} \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 2.20})$$

式中 T_{sm} ——上游表面年平均温度；

T_{xim} ——下游表面年平均温度。

(3) T_{m2} 、 T_{d2} 为与坝体变化温度场相应的 T_m 、 T_d ，变化温度场是指由于坝体表面温度变化所引起的温度变化。当封拱温度等于坝体年平均温度时，即 $T_{m0} = T_{ml}$ ， $T_{d0} = T_{dl}$ ，则

$$T_m = T_{m2}, T_d = T_{d2}$$

2. 边界温度的确定

下游面与空气接触，其表面温度可按式计算：

$$T_{xi} = T_{xim} + A_{xi} \cos \omega(\tau - \tau_0) \quad (\text{附 2.21})$$

式中 T_{xi} ——下游表面温度；

T_{xim} ——下游表面年平均温度，等于年平均气温加日照影响。尾水位以下等于年平均尾水温度；

A_{xi} ——下游表面温度年变幅，等于气温年变幅加日照影响(约 1~2 °C)，尾水位以下等于水温年变幅；

ω ——温度变化的圆频率， $\omega = 2\pi/P$ ， P 为温度变化周期(12 月)；

τ ——时间，月；

τ_0 ——气温最高的时间，通常在 7 月中旬气温达到最高值，可取 $\tau_0 = 6.5$ 月。

在上游表面，水上部分的温度等于气温，可对照式(附 2.21)计算，水下部分的温度可按式计算：

$$T_s = T_{sm} + A_s \cos \omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon) \quad (\text{附 2.22})$$

式中 T_s ——上游表面温度；

T_{sm} ——上游表面年平均温度；

A_s ——上游表面温度年变幅；

ε ——水温与气温的相位差，月。

水下部分表面温度等于库水温度：

$$T_{sm} = T_{shm}(y), A_s = A_{sh}(y) \quad (\text{附 2.23})$$

式中 $T_{shm}(y)$ ——水深 y 处年平均水温；

$A_{sh}(y)$ ——水深 y 处水温年变幅。

库水温度受到多种因素的影响，应参照条件相近的已成水库的实测资料，结合本水库情况，加以推算，在初步设计中可按下列法估算：

(1) 水温相位差：

$$\varepsilon = 2.15 - 1.30e^{-0.085y} \quad (\text{附 2.24})$$

式中 ε ——水温相位差，月；

y ——水深，m。

(2) 水温年变幅：

$$A_{sh}(y) = A_{sh0}e^{-0.018y} \quad (\text{附 2.25})$$

式中 $A_{sh}(y)$ ——深度 y 处水温年变幅;

A_{sh0} ——表面水温年变幅。

在一般地区可按下式计算:

$$A_{sh0} = \frac{1}{2}(T_7 - T_1) \quad (\text{附 2.26})$$

式中 T_1 、 T_7 ——分别为 1 月及 7 月的平均气温。

在寒冷地区,改用下式计算:

$$A_{sh0} = \frac{1}{2}T_7 + \Delta a \quad (\text{附 2.27})$$

式中 $\Delta a = 1 \sim 2^\circ\text{C}$,用以考虑日照影响。

(3)年平均水温:

$$T_{shm}(y) = c + (b - c)e^{-0.04y} \quad (\text{附 2.28})$$

式中 $T_{shm}(y)$ ——水深 y 处年平均水温;

b ——表面年平均水温, $b = T_a + \Delta b$,在一般地区, T_a 为年平均气温,在寒冷地区, T_a 为修正年平均气温,计算如下:

$$T_a = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_i$$

式中 T_i ——月平均气温,但是当 $T_i < 0$ 时取 $T_i = 0$, Δb 为日照影响,可取平均值 $\Delta b = 2^\circ\text{C}$ 。式(附 2.28)中 $c = \frac{T_{kd} - bg}{1 - g}$, T_{kd} 为库底年平均水温,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 $4 \sim 6^\circ\text{C}$,在初步设计中可按附表 2.3 采用。 $g = e^{-0.04H}$, H 为水库深度(m)。

附表 2.3 c 值表

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}	$4 \sim 6^\circ\text{C}$	$6 \sim 7^\circ\text{C}$	$7 \sim 10^\circ\text{C}$	$10 \sim 12^\circ\text{C}$

按式(附 2.28)计算时,如 $T_{shm}(y)$ 的值小于 T_{kd} ,则令 $T_{shm}(y) = T_{kd}$ 。

3. 变化温度场的 T_{m2} 、 T_{a2} 计算

$$\left. \begin{aligned} T_{m2} &= \frac{\rho_1}{2} [A_d \cos \omega(\tau - \theta_1 - \tau_0) + A_s \cos \omega(\tau - \varepsilon - \theta_1 - \tau_0)] \\ T_{a2} &= \rho_2 [A_d \cos \omega(\tau - \theta_2 - \tau_0) - A_s \cos \omega(\tau - \varepsilon - \theta_2 - \tau_0)] \\ \rho_1 &= \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{2(\text{ch } \eta - \cos \eta)}{\text{ch } \eta + \cos \eta}} \\ \rho_2 &= \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \\ \theta_1 &= \frac{1}{\omega} \left[\frac{\pi}{4} - \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sin \eta}{\text{sh } \eta} \right) \right] \\ \theta_2 &= \frac{1}{\omega} \text{tg}^{-1} (b_1 / a_1) \\ a_1 &= \frac{6}{\rho_1 \eta^2} \sin \omega \theta_1 \\ b_1 &= \frac{6}{\eta^2} \left(\frac{1}{\rho_1} \cos \omega \theta_1 - 1 \right) \\ \eta &= \sqrt{\frac{\pi}{ap}} \cdot L, \omega = \frac{2\pi}{p} \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 2.29})$$

式中 L ——坝体厚度, m;
 p ——温度变化周期, 月;
 α ——浆砌石体导温系数, 其值主要根据砌石体岩性不同而异 ($\alpha = 2.5 \sim 5 \text{ m}^2/\text{日}$);
 A_{xd} ——下游表面温度年变幅;
 A_{xs} ——上游表面温度年变幅;
 ε ——水温相位差。

对于库水位以上的截面, 由于上下游两面均与空气接触, 可按下列式计算:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{m2}} &= \rho_1 A_{\text{xd}} \cos \omega(\tau - \theta_1 - \tau_0) \\ T_{\text{d2}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 2.30})$$

在变化温度场中, 温度应力的极值约滞后 1~1.5 个月, 所以在初步计算中只需计算 8 月中 ($\tau = 7.5$) 或八月底 ($\tau = 8.0$) 的温度荷载及应力, 再改变符号即得二月中或二月底的温度荷载及应力, 因变化温度场在时间上具有反对称性质。

初始温差 $T_{\text{m1}} - T_{\text{m0}}$ 及 $T_{\text{d1}} - T_{\text{d0}}$ 是稳定的, 不随时间而变化, 将上面热天和冷天的温度应力与初始温度应力叠加, 便得到温升、温降情况的不利组合。

4. 简化计算

在初步设计中, 也可采用水利水电科学研究院提出的简化公式计算。

库水位以上:

$$T_{\text{m2}} = \pm \rho_1 A_{\text{xd}}, T_{\text{d2}} = 0 \quad (\text{附 2.31})$$

库水位以下:

$$T_{\text{m2}} = \pm \frac{\rho_1}{2} \left(A_{\text{xd}} + \frac{13.1 A_{\text{sh0}}}{14.5 + y} \right) \quad (\text{附 2.32})$$

$$T_{\text{d2}} = \pm \rho_3 \left[A_{\text{xd}} - A_{\text{sh0}} \left(\xi + \frac{13.1}{14.5 + y} \right) \right] \quad (\text{附 2.33})$$

式中 y 为水深(m), $\frac{\rho_1}{2}$ 、 ρ_1 、 ξ 按下列公式计算:

$$\text{当 } L \geq 10 \text{ m 时} \quad \frac{\rho_1}{2} = \frac{2.33}{L - 0.9} \quad (\text{附 2.34})$$

$$\rho_3 = \frac{18.76}{L + 12.6} \quad (\text{附 2.35})$$

$$\xi = \frac{3.8e^{-0.022y} - 2.38e^{-0.081y}}{L - 4.5} \quad (\text{附 2.36})$$

$$\text{当 } L < 10 \text{ m 时} \quad \frac{\rho_1}{2} = 0.5e^{-0.00067L^3} \quad (\text{附 2.37})$$

$$\rho_3 = e^{-0.00186L^2} \quad (\text{附 2.38})$$

$$\xi = (0.069e^{-0.022y} - 0.0432e^{-0.081y}) \quad (\text{附 2.39})$$

式中 L 为坝体厚度, m。

在(附 2.31)~(附 2.33)三式中, 夏季取正号, 冬季取负号, 按公式计算的是相当于二月和八月底变化温度场的温度荷载 T_{m2} 、 T_{d2} 。

附录三 用材料力学方法计算浆砌石重力坝坝体应力

(一)视浆砌石重力坝坝体为各向同性的均质体

计算方法可参照《混凝土重力坝设计规范(试行)》(SDJ 21—78)附录三。

(二)考虑坝体分层异弹模特性,按折算断面转化为均质体计算

1. 说明

对于混凝土防渗墙与浆砌石坝体弹模相差较大的浆砌石重力坝,可用下述方法计算坝体应力。即在原来垂直正应力 σ_y 直线变化的基础上,增加了用类似钢筋混凝土学中的钢筋面积折算法,将混凝土防渗墙虚拟扩大 E_c/E_s 倍,以体现两者弹模的变化(E_c 为混凝土防渗墙弹模, E_s 为坝体浆砌石弹模),然后根据防渗墙与坝体交界面上的变形协调条件,用弹性理论,在假定两者泊桑比 μ 相同的条件下,可推得扩大后防渗部分的垂直正应力 σ_y ,再乘以一个应力放大系数 E_c/E_s ,即为实际的浆砌石重力坝防渗墙的应力。

2. 计算

设分层异弹模截面如附图 3.1 所示。

$$B = E_c/E_s = n' \quad (\text{附 3.1})$$

折算面积:

$$A = B \cdot T_1 + (T - T_1) \cdot 1 = T + BT_1 - T_1 \quad (\text{附 3.2})$$

折算面积形心与上游面距离:

$$e_1 = \frac{1}{2} \frac{T^2 + (B-1)T_1^2}{T + (B-1)T_1} \quad (\text{附 3.3})$$

形心与下游面距离:

$$e_2 = T - e_1 \quad (\text{附 3.4})$$

折算截面面积矩:

$$J = \frac{1}{3} [Be_1^3 - (B-1)(e_1 - T_1)^3 + e_1^3] \quad (\text{附 3.5})$$

3. 坝面应力

上游面垂直正应力:

$$\sigma_y^s = \left(\frac{\sum W}{A} + \frac{e_1 \sum M}{J} \right) \frac{E_c}{E_s} \quad (\text{附 3.6})$$

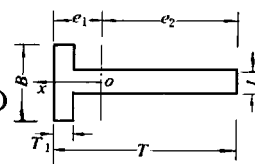
下游面垂直正应力:

$$\sigma_y^{xi} = \left(\frac{\sum W}{A} - \frac{e_2 \sum M}{J} \right) \cdot 1 = \frac{\sum W}{A} - \frac{e_2 \sum M}{J} \quad (\text{附 3.7})$$

上游面剪应力:

$$\tau^s = (p + \bar{p}_y - \sigma_y^s) n \quad (\text{附 3.8})$$

下游面剪应力:



附图 3.1

$$\tau^{xi} = (\sigma_y^{xi} - p' + \bar{p}'_y) m \quad (\text{附 3.9})$$

上游面水平正应力:

$$\sigma_x^s = (p + \bar{p}_y) - (p + \bar{p}_y - \sigma_y^s) n^2 \quad (\text{附 3.10})$$

下游面水平正应力:

$$\sigma_x^{xi} = (p' - \bar{p}'_y) + (\sigma_y^{xi} - p' + \bar{p}'_y) m^2 \quad (\text{附 3.11})$$

上游面主应力:

$$\sigma_{z1}^s = (1 + n^2) \sigma_y^s - n^2 (p + \bar{p}_y) \quad (\text{附 3.12})$$

$$\sigma_{z2}^s = p + \bar{p}_y \quad (\text{附 3.13})$$

下游面主应力:

$$\sigma_{z1}^{xi} = (1 + m^2) \sigma_y^{xi} - m^2 (p' - \bar{p}'_y) \quad (\text{附 3.14})$$

$$\sigma_{z2}^{xi} = p' - \bar{p}'_y \quad (\text{附 3.15})$$

若计扬压力, 则 $\tau^s, \tau^{xi}, \sigma_x^s, \sigma_x^{xi}, \sigma_{z1}^s, \sigma_{z1}^{xi}, \sigma_{z2}^s, \sigma_{z2}^{xi}$ 与重力法考虑扬压力的公式一致, 以上符号含义同《混凝土重力坝设计规范(试行)》(SDJ 21—78)附录三。

4. 内部应力

(1) 垂直正应力 σ_y 的公式:

$$\sigma_y = a + bx \quad (\text{附 3.16})$$

$$a = \frac{\sum W}{A} - \frac{e_2 \sum M}{J} \quad (\text{附 3.17})$$

$$b = \frac{\sum M}{J} \quad (\text{附 3.18})$$

$$\text{当 } x < T - T_1 \text{ 时} \quad \sigma_y = a + bx \quad (\text{附 3.19})$$

$$\text{当 } x \geq T - T_1 \text{ 时} \quad \sigma_{yc} = n' (a + bx) \quad (\text{附 3.20})$$

(2) 剪应力 τ 的公式:

浆砌石体的剪应力:

$$\tau = a_1 + b_1 x + c_1 x^2 \quad (\text{附 3.21})$$

混凝土防渗墙的剪应力:

$$\tau^c = a_{1c} + b_{1c} x + c_{1c} x^2 \quad (\text{附 3.22})$$

$$a_1 = \tau^{xi} \quad (\text{附 3.23})$$

$$a_{1c} = a_1 + (b_1 - b_{1c})(T - T_1) + (c_1 - c_{1c})(T - T_1)^2 + (n' - 1) \left[a + b(T - T_1) \right] \text{ctg} \alpha \quad (\text{附 3.24})$$

$$b_1 = b_m + \frac{\partial a}{\partial y} - \gamma_h; \quad c_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial b}{\partial y} \quad (\text{附 3.25})$$

$$b_{1c} = n' \left[b_m + \frac{\partial a}{\partial y} \right] - \gamma_h; \quad c_{1c} = \frac{1}{2} n' \frac{\partial b}{\partial y} \quad (\text{附 3.26})$$

上诸式中 n' ——混凝土与浆砌石的弹模比;

α ——混凝土防渗墙与水平面的夹角。

(3) 水平正应力 σ_x 的公式:

浆砌石体的水平正应力:

$$\sigma_x = a_2 + b_2 x + c_2 x^2 + d_2 x^3 \quad (\text{附 3.27})$$

混凝土防渗墙的水平正应力:

$$\sigma_x^c = a_{2c} + b_{2c} x + c_{2c} x^2 + d_{2c} x^3 \quad (\text{附 3.28})$$

$$a_2 = \sigma_x^d \quad (\text{附 3.29})$$

$$a_{2c} = [a_2 + (a_{1c} - a_1) \operatorname{ctg} \alpha] + [(b_{1c} - b_1) \operatorname{ctg} \alpha - (b_{2c} - b_2)](T - T_1) \\ + [(c_{1c} - c_1) \operatorname{ctg} \alpha - (c_{2c} - c_2)](T - T_1)^2 - (d_{2c} - d_2)(T - T_1)^3 \quad (\text{附 3.30})$$

$$\left. \begin{aligned} b_2 &= b_1 m + \frac{\partial a_1}{\partial y} - \lambda \gamma_h \\ c_2 &= c_1 m + \frac{1}{2} \frac{\partial b_1}{\partial y} \\ d_2 &= \frac{1}{3} \frac{\partial c_1}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 3.31})$$

$$\left. \begin{aligned} b_{2c} &= b_{1c} m + \frac{\partial a_{1c}}{\partial y} - \lambda \gamma_h \\ c_{2c} &= c_{1c} m + \frac{1}{2} \frac{\partial b_{1c}}{\partial y} \\ d_{2c} &= \frac{1}{3} \frac{\partial c_{1c}}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (\text{附 3.32})$$

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,可以直接求偏导数(先表达为 y 的函数,再求偏导),也可以在离截面不远处,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:

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

以上所列出的求剪应力 τ 及水平正应力 σ_x 的计算公式适用于计算无扬压力作用的情况,当有扬压力作用时可按《混凝土重力坝设计规范(试行)》(SDJ 21—78)附录三中的规定方法加一校正项。

附录四 用材料力学方法计算重力墩、推力墩的应力

(一)说明

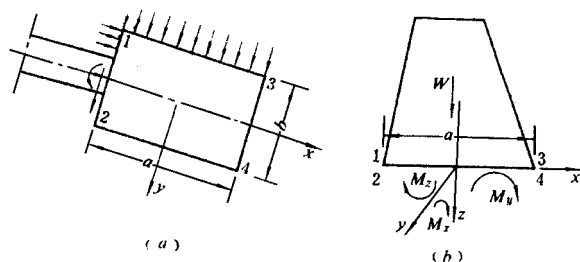
拱坝作用于重力墩的力系,随墩的刚度而变,故对重力墩的分析,应与拱坝的稳定和应力分析结合起来,但难度较大,目前还未见实际应用。当重力墩的高度比拱坝相对较低时,可近似认为它的刚度与地基相同,并假定为刚性地基,即不考虑地基变形影响。

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,迎水面直接受水压力作用,故应计算两个方向的弯曲应力,进行叠加。

(二)重力墩应力计算

设重力墩简图如附图 4.1 所示,计算截面 1、2、4、3 各点的垂直正应力 σ_z 的计算公式如下:

$$\sigma_{z1} = \frac{\sum W}{A} + \frac{\sum M_x}{I_x} \frac{b}{2} - \frac{\sum M_y}{I_y} \frac{a}{2} \quad (\text{附 4.1})$$



(a)水平截面图; (b)立面图

附图 4.1

$$\sigma_{22} = \frac{\Sigma W}{A} - \frac{\Sigma M_x}{I_x} \frac{b}{2} - \frac{\Sigma M_y}{I_y} \frac{a}{2} \quad (\text{附 4.2})$$

$$\sigma_{23} = \frac{\Sigma W}{A} + \frac{\Sigma M_x}{I_x} \frac{b}{2} + \frac{\Sigma M_y}{I_y} \frac{a}{2} \quad (\text{附 4.3})$$

$$\sigma_{24} = \frac{\Sigma W}{A} - \frac{\Sigma M_x}{I_x} \frac{b}{2} + \frac{\Sigma M_y}{I_y} \frac{a}{2} \quad (\text{附 4.4})$$

上诸式中 ΣW ——计算截面上重力墩竖向作用力的总和, $\Sigma W = W + G - U$, 其中 W 为重力墩自重, G 为拱端传来的铅直力, U 为重力墩底部扬压力;

A ——计算截面面积;

a, b ——计算截面长度、宽度;

I_x, I_y ——计算截面对 x, y 轴的惯性矩;

ΣM_x ——计算截面上全部荷载对截面形心力矩总和绕 x 轴的分量;

ΣM_y ——计算截面上全部荷载对截面形心力矩总和绕 y 轴的分量。

计算截面上、下游面剪应力、水平正应力以及主应力计算参见附录三。计算重力墩底部剪应力时,应考虑拱端传来的扭矩 M_z (绕铅直轴)。

应力符号以压应力为正, W, M_x, M_y 的正方向示于附图 4.1 中。

(三)重力墩抗滑稳定验算

重力墩抗滑稳定验算可按下式:

$$K_2 = \frac{f \Sigma W}{\sqrt{H^2 + (V + P)^2}} \quad (\text{附 4.5})$$

式中 K_2 ——抗滑稳定安全系数,按表 4.3.3 选用;

H ——拱端法向力;

V ——拱端剪力;

P ——重力墩上的水压力。

(四)推力墩应力计算

推力墩应力可采用上述重力墩应力公式计算,但在式中的 $W, \Sigma M_x, \Sigma M_y$ 项中须考虑墩侧面基岩约束的影响,计入侧面上基岩作用于墩的力系,包括基岩压力、剪力、弯矩、渗透压力等。这些力一般不易确切算出,可作某些简化的假定,再利用上式计算。

附录五 石料主要物理力学指标及胶结材料配合比

附表 5.1 几种石料的物理力学试验成果表

石料类别	干容重 (t/m ³)	膨胀系数 (10 ⁻⁶ /℃)	极限强度(10 ⁴ Pa)				弹性模量 (10 ⁹ Pa)	备 注
			干抗压	湿抗压	抗拉	抗弯		
砂岩	2.1~2.4	9.02~11.2	4500~10000	4000~6000	100~300	400~800	4~12	主要参照四川红色砂岩试验资料
石灰岩	2.6~2.8	6.75~6.77	11000~15000	8000~14000	400~600	1300~2800	50~70	主要参照河南、湖南试验资料
花岗岩	2.5~2.7	5.6~7.34	9000~16000	7000~15000	400~800	1000~2200	30~60	主要参照湖南、广西、山东试验资料
石英大理岩	2.7~2.8	6.5~10.12	10000~12000	8000~10000	450~600	600~1600	20~30	主要参照陕西试验资料

附表 5.2 水泥砂浆配合比表

水泥品种与标号	砂浆标号	砂子粒度	水灰比	稠度 (cm)	灰砂比	每立方米材料用量(kg)		
						水	水泥	砂
普通硅酸盐水泥或矿渣水泥 325 [#]	50	粗中细	1.04	4~6	1:6.3	275	264	1663
					1:5.8	290	279	1618
					1:5.1	313	301	1535
	75	粗中细	0.89	4~6	1:5.3	274	308	1632
					1:4.8	391	327	1570
					1:4.3	311	349	1501
	100	粗中细	0.78	4~6	1:4.5	275	353	1589
					1:4.1	291	373	1529
					1:3.7	308	395	1462
	125	粗中细	0.70	4~6	1:4.0	274	391	1560
					1:3.6	290	415	1494
					1:3.3	307	439	1427
普通硅酸盐水泥或矿渣水泥 425 [#]	50	粗中细	1.13	4~6	1:6.9	276	244	1684
					1:6.4	289	256	1638
					1:5.6	313	277	1551
	75	粗中细	0.99	4~6	1:6.0	273	276	1656
					1:5.5	289	292	1606
					1:4.8	314	317	1522
	100	粗中细	0.89	4~6	1:5.3	274	308	1632
					1:4.8	291	327	1570
					1:4.3	311	349	1501
	125	粗中细	0.80	4~6	1:4.7	274	342	1600
					1:4.3	290	362	1538
					1:3.8	310	387	1467

注：①本配合比比按试验所得 $R_{zs} = 0.566 R_c \left[\frac{C}{W} - 0.650 \right]$ 式计算所得强度，增加了 15 %；

②稠度在本表范围外增减 1 cm, 1 m³ 砂浆用水量需增减 8 kg 左右。

附表 5.3 混凝土配合比表

水 泥 品 种 与 标 号	混 凝 土 标 号	砂子 粒度	水灰比	坍落度 (cm)	砂率 (%)	每立方米材料用量(kg)				
						水	水 泥	砂	卵 石 ()	
									5~20	20~40
普通硅酸盐水泥 或矿渣水泥 325 [#]	100	粗 中 细	0.73	6~8	43	182	249	827	1096	
					40	186	255	763	1145	
					37	192	263	697	1187	
	100	粗 中 细	0.73	6~8	38	162	222	760	558	682
					35	165	226	696	581	711
					32	170	233	630	603	736
	150	粗 中 细	0.59	6~8	41	182	308	767	1104	
					38	186	315	705	1150	
					35	192	325	641	1190	
	150	粗 中 细	0.59	6~8	36	162	275	703	563	687
					33	165	280	642	585	715
					30	170	288	576	605	739
普通硅酸盐水泥 或矿渣水泥 425 [#]	100	粗 中 细	0.83	6~8	44	182	219	858	1092	
					41	186	224	793	1142	
					38	192	231	727	1186	
	100	粗 中 细	0.83	6~8	39	162	195	789	555	679
					36	165	199	724	580	708
					33	170	205	658	601	735
	150	粗 中 细	0.69	6~8	42	182	264	802	1108	
					39	186	270	739	1156	
					36	192	278	674	1198	
	150	粗 中 细	0.69	6~8	37	162	235	736	564	689
					34	165	239	672	587	718
					31	170	246	607	608	743

注：①本配合比表是按试验所得经验公式 $R_{28} = 0.573 R_c (C/W - 0.716)$ 计算所得强度，增加了 20 %；

②坍落度在本表范围外增减 1 cm 时，每 m^3 混凝土用水量需增减 1 %；

③卵石若改用碎石时，可将表中水灰比乘以 1.03~1.05 并将砂率增加 3 %~5 %，每 m^3 混凝土用水量增加 10~15 kg；

④若用火山灰质硅酸盐水泥时，每 m^3 混凝土用水量需增加 10~20 kg。

附录六 浆砌石体变形(弹性)模量、抗压强度的试验方法

砌石体试件按原型砌筑，试件尺寸很大，限于试验设备不能进行试验时，允许在保持胶结材料和灰缝布局与原型相同的情况下，将石料尺寸缩小，砌筑小型的正方形棱柱体砌体试件，进行试验。试件高度与截面边长的比值，可采取 2~2.5。截面边长要求至少沿边长能排列三块石块和两条灰缝。尺寸缩小后的石块，其形状必须与上坝石料相似，其表面粗糙度则应与上坝石料相同。例如上坝粗料石的表面为一寸三钻，表面凸凹度 1 cm 时，试件所用粗料石的表面，也同样要一寸三钻，凸凹度 1 cm。

试验的具体操作程序如下：

(1)在砌筑前，对所用石料选取代表性的石块，进行干抗压强度 R' 、水饱和抗压强度 R_1 、弹性模量 E_1 及容重、比重、吸水率等试验各一组。据 R_1 与 R' 的比值求得其软化系数。

(2)砌体试件数量，一般采用三个为一组，砌筑时，石料表面应浇水湿润。每组砌体试件，对胶结材料，至少应作抗压试验试块、弹模试验试块各一组，与砌体相同的条件自然养护，并在砌体试验的同时进行抗压强度 R_2 和弹模 E_2 的试验。

(3)试验前，如砌体顶面不够平整，应垫放柔性垫板如橡皮垫等或以干砂铺平，在试件相对的两个侧立面，各布置变形测线 3 条，量取各变形测线内的石块总厚度 h_i 和胶结材料总厚度 h_{iz} 。

(4) 试验时采取分级加荷, 每级荷载约等于破坏荷载的 10%, 直至破坏为止。在每级荷载下, 尽量控制压力机所加压力不变, 待砌体变形趋于稳定时, 借千分表或百分表测读各变形测线的变形量 λ_i , 然后再施加下一级荷载, 并随时详细记录试验过程中灰缝接触面裂缝、石块断裂等情况。

(5) 按下式计算试件在各级荷载下的平均应力 σ_i (10^5 Pa) 和平均应变 ε_i 。

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (\text{附 6.1})$$

式中 P_i ——各级荷载, 10N;

A ——试件截面积, cm^2 。

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{h_{11} + h_{12}}}{n}$$

式中 h_{11} ——各变形测线内的石块厚度, cm;

h_{12} ——各变形测线内的胶结材料厚度, cm;

λ_i ——各变形测线在各级荷载 P_i 下的变形量, cm;

n ——变形测线条数。

据以上计算结果, 绘制如下图的应力与应变的关系曲线。此曲线中近似直线段 (ab 线段) 的斜率, 即为该砌体试件的变形模量 E_3 (Pa)。当此曲线无近似直线段时, 则以设计应力与原点割线的斜率作为 E_3 。

当设计需取用弹性模量时, 则试验加荷至设计应力 (图中 d 点) 后, 应逐级卸荷至零, 待回弹变形终止, 获得图上的 e 点后, 然后再继续施加荷载, 以 ed 直线的斜率, 作为该砌体试件的弹性模量 E_4 。

当 P_i 为破坏荷载时, 其所对应的 σ_i , 即为该砌体试件的极限抗压强度。

附图 6.1

当 P_i 为石块断裂时荷载, 则应力与应变曲线屈服点 (图中 c 点) 所对应的 σ_i , 即为该砌体试件的屈服强度。

应力与应变曲线中近似直线段的终点 (图中 b 点) 所对应的 σ_i , 可作该砌体试件的允许轴心受压应力, 当曲线中无直线段时, 则根据极限抗压强度或屈服强度, 分别取安全系数 4 或 2.3 来确定允许压应力。

(6) 由于砌体试件中石块厚度和胶结材料厚度与实际坝体不一, 可按下述方法, 换算坝体的变形模量 E 、弹性模量 E' 。

按下式计算砌体试件的理想弹性模量 E_0 (10^5 Pa):

$$E_0 = \frac{\frac{\bar{h}_{11} + \bar{h}_{12}}{\frac{h_{11}}{E_1} + \frac{h_{12}}{E_2}}}{\quad} \quad (\text{附 6.2})$$

式中 $\bar{h}_{11}$ ——试件各变形测线内石块的总平均厚度, cm,

$$\bar{h}_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{11}}{n}$$

$\bar{h}_{12}$ ——试件各变形测线内胶结材料的总平均厚度, cm,

$$\bar{h}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{12}}{n}$$

E_1 、 E_2 ——分别为石料及胶结材料的弹性模量, 10^5 Pa。

令 $a = E_0/E_3$, $a' = E_0/E_4$, 分别按下二式计算坝体变形模量 E (10^5 Pa)、弹性模量 E' (10^5 Pa):

$$E = \frac{h_1 + h_2}{a \left(\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right)}, E' = \frac{h_1 + h_2}{a' \left(\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} \right)}$$

式中 h_1 及 h_2 分别为实际坝体每层石料厚度及胶结材料厚度, cm。

(7) 由于浆砌石坝是在水下运行, 由上述砌体抗压试验结果所获得的允许轴心受压应力, 还应乘以岩石的软化系数后, 方可作为砌石坝的允许轴心受压应力。当考虑砌体在水下运行期胶结材料强度的增长因素时, 可将试验所得允许压应力, 按插入法乘以附表 6.1 所列与岩石软化系数相对应的砌体强度降低系数后再行采用。

附表 6.1

岩石软化系数	0.9	0.8	0.7	0.5
砌体强度降低系数	0.94	0.86	0.78	0.64

附加说明

主持部门: 水利部建设开发司

主编部门: 贵州省水利电力厅

参编单位: 湖南省水利水电勘测设计院、四川省水利水电勘测设计院、福建省水利水电科学研究所、福州大学土建系、广西壮族自治区桂林地区水利电力局、河南省新乡市水利局、山东省水利科学研究所、武汉水利电力学院

主要起草人: 黎展眉 谭抑愆 罗任潮 张善余 任卓群 陈泰明 岑书龙 高洪来
高庆铭 李云波 王开治