

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL319 — 2005

替代 SDJ21-78

混 凝 土 重 力 坝 设 计 规 范

Design specification for concrete gravity dams

2005 - 07 - 21 发布

2005 - 11 - 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《混凝土重力坝设计规范》 SL319—2005 的通知

水国科[2005]301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《混凝土重力坝设计规范》为水利行业标准，并予发布。标准编号为SL319-2005，替代SDJ21-78及其补充规定。

本标准自2005年11月1日起实施。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

二〇〇五年七月二十一日

前 言

《混凝土重力坝设计规范》于 1978 年首次发布，1984 年作了局部修改。本次根据水利部水利水电规划设计管理局（水总局科[2001]1 号）文件《关于下达 2001 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》以及《水利技术标准编写规定》（SL1-2002），对《混凝土重力坝设计规范》（SDJ21—78）及其补充规定（以下简称原标准）进行修订。

本标准主要包括下列技术内容：

- 坝体布置；
- 实体重力坝、宽缝重力坝、空腹重力坝的体形选择、泄水建筑物坝体结构布置；
- 泄洪、消能、防冲的水力设计；
- 作用在坝体上的荷载、坝体应力与稳定计算及其控制标准；
- 坝基处理设计，开挖、固灌、防渗排水、岩溶、断层破碎带的处理设计；
- 坝体构造、大坝材料、坝顶、坝内廊道、坝体分缝及止水、排水坝体构造；
- 温度控制标准和防止裂缝措施；
- 安全监测设计。

对原标准修订的主要技术内容如下：

- 增加泄洪消能建筑物设计的洪水标准；
- 增加新型消能工的设计；补充泄洪雾化设计的有关内容；
- 增加无盖重和薄混凝土盖重时进行固结灌浆的有关内容；
- 增加岩溶地区防渗处理的有关内容；
- 在混凝土防裂措施中，补充混凝土自身体积变形；在基础允许温差中，应考虑基础弹性变形模量和混凝土线膨胀系数等因素，并补充混凝土内外温差的规定，以及混凝土表面保温的相关计算方法。

—— 将原“观测设计”一章名称改为“安全监测设计”；修正观测任务的性质划分；明确规定工程安全监测范围，增补安全监测设计遵循的原则；调整专门监测项目的内容；增加主要监测设施布置要求。

—— 碾压混凝土重力坝设计已制定专门设计规范，本规范不包含该部分内容。

本标准的强制条文有 6.3.2 条、6.3.4 条、6.3.10 条、6.4.1 条、7.4.5 条、10.1.1 条 1 款、10.1.4 条 5 款、10.2.2 条 1 款、10.2.2 条 2 款，以黑体字标识。

本标准代替标准的历次版本为：

SDJ21-78。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计管理局

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：水利部长江水利委员会长江勘测规划设计研究院

本标准主要起草人：徐麟祥 王小毛 王犹扬 陈际唐 廖仁强 胡进华 郭艳阳
汪安华 汪庆元 范五一 雷兴顺 张志勇 周和清 高大水
向光红 樊路琦

本标准审查会议技术负责人：沈凤生

本标准体例格式审查人：曹阳

目 次

1	总 则	1
2	主要术语与符号	1
2.1	主要术语	1
2.2	基本符号	1
3	坝体布置	3
4	坝体结构	5
4.1	一般规定	5
4.2	非溢流坝段	5
4.3	溢流坝段	6
4.4	坝身泄水孔	6
5	泄水建筑物的水力设计	8
5.1	一般规定	8
5.2	泄流能力及消能计算	9
5.3	高速水流区的防空蚀设计	9
5.4	消能防冲设施的设计	10
6	坝体断面设计	12
6.1	荷载及其组合	12
6.2	主要设计原则	13
6.3	坝的应力计算	14
6.4	坝体抗滑稳定计算	16
6.5	溢流坝闸墩结构设计	17
7	坝基处理设计	19
7.1	一般规定	19
7.2	坝基开挖	19
7.3	坝基固结灌浆	20
7.4	坝基防渗和排水	20
7.5	断层破碎带和软弱结构面处理	23
7.6	岩溶的防渗处理	24

8	坝体构造	25
8.1	坝顶	25
8.2	坝内廊道及通道	25
8.3	坝体分缝	26
8.4	坝体止水和排水	27
8.5	大坝混凝土材料及分区	28
9	温度控制及防裂措施	31
9.1	一般规定	31
9.2	温度控制标准	31
9.3	温度控制及防裂措施	32
附录 A	水力设计计算公式	39
A.1	堰面曲线、堰面压力及反弧段半径	39
A.2	坝身泄水孔体型设计	42
A.3	泄流能力及掺气水深计算公式	46
A.4	挑流消能的水力要素	47
A.5	底流消能的水力要素	48
A.6	防空蚀设计	49
附录 B	荷载计算公式	52
B.1	垂直作用于坝体表面某点的静水压强	52
B.2	淤沙压力	52
B.3	扬压力	52
B.4	冰压力	54
B.5	反弧段水流离心力	55
B.6	浪压力	56
附录 C	实体重力坝的应力计算公式	60
C.1	上、下游坝面垂直正应力	60
C.2	上、下游面剪应力	60
C.3	上、下游面水平正应力	60
C.4	上、下游面主应力	60
附录 D	坝基岩体工程地质分类及岩体力学系数	62

附录 E	坝基深层抗滑稳定计算.....	64
附录 F	施工期坝体温度和温度应力计算.....	66
F.1	混凝土温度计算.....	66
F.2	冷却水管降温计算.....	72
F.3	混凝土表面保温.....	75
F.4	温度应力.....	77

1 总 则

1.0.1 为适应混凝土重力坝建设发展的需要，规范混凝土重力坝设计，使工程设计做到安全适用、经济合理、技术先进、质量保证，特对《混凝土重力坝设计规范》（SDJ21—78）及其补充规定进行修订，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于水利水电大、中型工程岩基上的 1、2、3 级混凝土重力坝的设计，4、5 级混凝土重力坝设计可参照使用。

坝高大于 200m 或特别重要的混凝土重力坝设计，在遵照执行本规范的同时，对一些特殊问题应进行专门研究。

1.0.3 混凝土重力坝按其坝高分为低坝、中坝、高坝。坝高在 30m 以下为低坝，坝高在 30m～70m（含 30m 和 70m）为中坝，坝高在 70m 以上为高坝。

1.0.4 本规范引用的标准主要有：

《防洪标准》（GB50201）；

《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL252）；

《水利水电工程进水口设计规范》（SL285）；

《水工建筑物抗震设计规范》（SL203）；

《水工建筑物抗冰冻设计规范》（SL211）；

《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL74）；

《水工混凝土结构设计规范》（SL/T191）；

《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL62）。

1.0.5 混凝土重力坝设计除应满足本规范外，尚应符合国家现行的有关标准的规定。

2 主要术语与符号

2.1 主要术语

2.1.1 坝高 dam height

大坝建基面的最低点（不包括局部深槽、井或洞）至坝顶的高度。

2.1.2 混凝土实体重力坝 concrete solid gravity dam

整个坝体除若干小空腔外均用混凝土填筑的重力坝。

2.1.3 混凝土空腹重力坝 concrete hollow gravity dam

在坝的腹部沿坝轴线方向布置有大尺度空腔的混凝土重力坝。

2.1.4 混凝土宽缝重力坝 concrete slotted gravity dam

两个坝段之间的横缝中部扩宽成空腔的混凝土重力坝。

2.1.5 宽尾墩 end-flared pier

后段加宽成鱼尾状的溢流坝闸墩。

2.1.6 联合消能 combined energy dissipation

指宽尾墩与挑流鼻坎、宽尾墩与底流消力池、宽尾墩与屏式消力池等联合运用消能。

2.1.7 扭曲式挑坎 distorted type flip bucket

底面扭曲、坎顶不等高并与流向成一定夹角的挑坎。

2.1.8 窄缝式挑坎 slit-type flip bucket

急流出口处的泄槽边墙急剧收缩形成窄缝的挑坎。

2.2 基本符号

2.2.1 材料性能参数

γ_w ——水的重度；

C_w ——水的比热；

a_c ——混凝土导温系数；

λ_c ——混凝土导热系数；

α ——混凝土线膨胀系数；

E_c ——混凝土弹性模量；

μ ——混凝土泊松比；

γ_c ——混凝土的重度；
 f' ——抗剪断强度摩擦系数；
 C' ——抗剪断强度凝聚力；
 f ——抗剪强度摩擦系数
 E_R ——基岩变形模量；

2.2.3 几何特征

B ——溢流堰净宽；
 A_k ——孔口出口处的面积；

2.2.4 计算指标

K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数 $\sigma \delta$ ；
 K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数；

2.2.5 计算参数

v ——流速；
 Q ——流量；
 H_d ——定型设计水头；
 t_k ——冲坑水垫厚度；
 h_b ——波动或掺气后的水深；
 P_m ——脉动压力强度；
 P_d ——消力墩所受冲击力；

2.2.6 计算系数

δ_k ——空化数；
 F_r ——弗劳德数；
 m ——溢流堰的流量系数；
 δ_s ——淹没系数；
 ϕ ——流速系数；
 K_p ——由混凝土徐变引起的应力松弛系数；

3 坝体布置

3.0.1 坝体布置应结合枢纽布置全面考虑，合理安排泄洪、供水、发电、灌溉、航运、排沙、排漂、过鱼等建筑物的布置，避免相互干扰。宜首先考虑泄洪建筑物的布置，使其下泄水流不致冲淘坝基和其它建筑物的基础，并使其流态和冲淤不致影响其它建筑物的使用。

3.0.2 坝体溢流段的前沿长度、孔数、孔口型式、尺寸和堰顶高程，应考虑下列因素综合比较决定：

- 1 水库运行和泄洪以及排漂浮物的要求；
- 2 坝址地形地质条件、下游河床及两岸抗冲性能；
- 3 下游水深及消能要求；
- 4 坝体分段情况，与相邻建筑物的关系；
- 5 闸门型式、工作条件及运行方式。

开敞式溢流孔，具有较大泄洪潜力，宜优先考虑。

3.0.3 坝体泄洪消能防冲型式应根据坝体高度、坝基下游河床及两岸地形地质条件，下游河道水深变化情况，结合排冰、排漂浮物等要求合理选择。

3.0.4 坝体根据以下功能要求设置泄水孔：

- 1 有泄洪要求时；
- 2 地震设计烈度为 8 度以上或坝地质条件极为复杂有降低或放空库水要求时；
- 3 有下游供水要求时；
- 4 有排沙要求时；
- 5 有施工期泄洪要求，又适宜于结合为永久泄洪孔时。

3.0.5 泄水孔型式、位置、高程、孔数和孔口尺寸的选择应考虑以下因素：

1 布置条件：在狭窄河道泄水孔宜与溢流坝段结合，其消能方式应与溢流坝统一考虑；宽阔河道可考虑分设。排沙孔应靠近发电(或灌溉、供水)进水口、船闸闸首等部位，其流态不得影响这类建筑物的正常运行。

2 运行条件：下泄流量、放水期限、检修条件、排沙及排漂等。

3 施工条件：泄水孔设于不同位置对施工进度和施工方法的影响，施工期泄洪及下游供

水要求等。

4 闸门工作条件、启闭机及坝体结构强度等。

3.0.6 设于坝体内的底孔、缺口、梳齿等施工导流建筑物，应根据导流方案和地形、地质、水文等条件确定，其布置应考虑下列要求：

- 1 能宣泄所承担的施工期流量；
- 2 与永久泄水建筑物布置相结合；
- 3 在通航河流上应考虑施工期通航要求，或采取其他措施来满足；
- 4 有需要时，能通过浮冰或其它漂浮物；
- 5 泄洪时应不致冲坏永久建筑物或影响施工进度；
- 6 施工方便，运行可靠，便于回填封堵。

导流建筑物的封堵应有妥善的设计和施工措施。

3.0.7 工农业及城市生活供水管道取水口高程，应根据供水期引水高程、流量和水量等要求确定，必要时宜考虑水温和泥沙情况分层设置。

设于坝内的发电引水管道的进水口高程，应根据水利动能设计要求和泥沙淤积等条件确定。

各种进水口的布置尚应符合《水利水电工程进水口设计规范》（SL285）。

设置在坝上的过坝建筑物的进出口宜远离泄洪建筑物的进出口。

3.0.8 大型枢纽工程的重力坝布置应做水工模型试验，以验证运行期和施工期的流态与冲淤状况是否满足各项建筑物的运行需要。

中型工程宜进行水工模型试验。

4 坝体结构

4.1 一般规定

4.1.1 坝体结构应根据坝的受力条件以及坝址的地形地质、水文气象、建筑材料、施工工期等条件，通过总体技术经济比较确定。

4.1.2 各坝段上游面宜协调一致，坝段两侧横缝上游面止水设施宜呈对称布置，需要调整时宜逐步过渡。

4.1.3 坝顶高程的确定应符合本规范 8.1.1 的规定。

4.1.4 建在地震区的混凝土重力坝的抗震设计应符合《水工建筑物抗震设计规范》(SL203) 的规定。

4.1.5 建在寒冷地区的混凝土重力坝的抗冰冻设计应符合《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL211) 的规定。

4.1.6 经技术经济比较，坝型除采用实体重力坝外，也可考虑采用宽缝重力坝、大头坝、空腹重力坝等。

4.2 非溢流坝段

4.2.1 非溢流坝段的基本断面呈三角形，其顶点宜在坝顶附近。基本断面上部设坝顶结构。

4.2.2 坝体的上游面可为铅直面、斜面或折面。实体重力坝上游坝坡宜采用 1:0~1:0.2。坝坡采用折面时，折坡点高程应结合电站进水口、泄水孔等布置，以及下游坝坡优选确定。

下游坝坡可采用一个或几个坡度，应根据稳定和应力要求并结合上游坝坡同时选定。下游坝坡宜采用 1:0.6~1:0.8；对横缝设有键槽进行灌浆的整体式重力坝，可考虑相邻坝段联合受力的作用选择坝坡。

4.2.3 宽缝重力坝的上游坝坡宜适当放缓。宽缝宽度，可取坝段宽的 20%~40%。

当坝体布置有引水管道、泄水孔、导流底孔时，该部分坝体结构和宽缝布置应经论证确定。

4.2.4 宽缝重力坝头部尺寸的设计应考虑下列因素：

- 1 头部应力状态；
- 2 坝面防渗和止水系统的布置；
- 3 帷幕灌浆廊道、坝内排水廊道和检修廊道的布置；

4 其他要求。

迎水面头部最小厚度可取 0.07~0.10 倍该高程库水作用水头，并不得小于 3m；宽缝尾部最小厚度不宜小于 2m，寒冷地区应适当加厚。

4.2.5 宽缝重力坝的宽缝不应贯穿坝顶。宽缝的上、下游及顶部的渐变段应有足够长度。宽缝水平截面的渐变坡度（平行坝轴线长度与垂直坝轴线长度之比），头部可用 1：1.5~1：2.0，尾部可用 1：1.0~1：1.5。顶部竖向截面渐变坡度（垂直高度与水平长度之比），可用 2.0：1~1.5：1。宽缝顶部高程可根据稳定、应力要求与上、下游坝坡和宽缝宽度等选定。

4.3 溢流坝段

4.3.1 溢流坝段的堰面曲线，当设置开敞式溢流孔时可采用幂曲线；当设置有胸墙，且胸墙起挡水作用时，可采用孔口溢流的抛物线。堰面曲线的确定见附录 A.1。

经过论证和试验，也可采用其他堰面曲线。

4.3.2 在当地大气压条件下，当宣泄常遇洪水闸门全开时，表孔和浅孔溢流堰顶附近不宜出现负压；当闸门局部开启时，经论证可允许出现不大的负压值；当宣泄设计洪水闸门全开时，负压值不得超过 $3 \times 9.81 \text{kPa}$ ，当宣泄校核洪水位闸门全开时，负压值不得超过 $6 \times 9.81 \text{kPa}$ 。

4.3.3 应选择合理的闸门门槽型式，避免门槽处产生过大的负压而引起空蚀破坏。

4.3.4 溢流坝段的反弧段应结合下游消能型式选择，见附录 A.1。

4.3.5 闸墩的型式和尺寸应满足结构布置和水流条件的要求。当采用平面闸门时，闸墩在门槽处应有足够的厚度，以满足闸墩结构的强度要求。

4.3.6 溢流坝段的堰面曲线、闸墩型式、门槽、堰面压力、泄流能力和反弧半径等，大型工程应经水工模型试验验证；中型工程宜经水工模型试验验证；水力条件较简单时，可参照类似工程经验，经计算确定。

4.3.7 当溢流坝段有排冰要求时，溢流孔口尺寸还应结合冰情资料确定，堰上水深宜大于流冰期最大冰厚，冰块应能自由下泄而不致破坏下游设施；下游应有导墙、护岸等设施；闸墩墩头宜呈锐角形状，必要时宜经试验确定。

4.3.8 溢流坝段设置的闸门应符合《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL74）的要求。

4.4 坝身泄水孔

4.4.1 泄水孔可设在溢流坝段的下部或专设泄水孔坝段，并应有消能设施。

4.4.2 坝身泄水孔内应避免有压流与无压流交替出现。

4.4.3 坝身泄水孔可采用明流孔，也可采用有压孔。

4.4.4 明流孔由有压段和明流段组成。

有压段包括进口段、门槽段和压坡段，该段的体型设计应使其在各种流量下保持正压，并要求断面变化均匀，泄流能力大。有压段末端设工作闸门，其上游设事故检修门。该段体型设计见附录 A.2。

明流段的孔顶高度应留有余幅。直线段孔身为矩形时，孔顶距水面的高度可取最大流量时不掺气水深的 30%~50%；孔顶为圆拱形时，其拱脚距水面的高度可取不掺气水深的 20%~30%；孔顶为扁圆拱时，可参照圆拱孔顶的要求略予增加，并应保证泄流时不淹没。

明流段出口宜高出尾水位，防止在无压段出现水跃。

明流段水流流速较大时，应采取掺气减蚀措施。

4.4.5 明流孔在平面上宜布置成直线形，如需布置成弯道时，应进行分析研究，并经水工模型试验验证。

4.4.6 有压孔进口段体型布置要求与明流孔进口段基本相同，其后宜设置事故检修闸门门槽段，再接平坡或小于 1:10 的缓坡段。工作闸门则设在有压孔出口端，出口端上游设一压坡段。孔口断面可为矩形或圆形。有压孔的体型设计见附录 A.2。

4.4.7 坝身泄水孔的闸门和启闭机的设计应符合下列要求：

明流孔的工作闸门，可采取弧形闸门或平面闸门；事故检修门为平面闸门。弧形闸门的启闭机室宜设于坝内，对于中坝也可设于坝顶；平面闸门的启闭机室宜设于坝顶。位于坝内的启闭机室应考虑通风、防潮及采暖等设施。

有压孔的工作闸门可采用弧形闸门、平面闸门、锥形阀或其他型式的门、阀。当有压孔不设钢衬时，非汛期宜用事故检修闸门挡水。

4.4.8 坝身泄水孔的闸门门后不能充分通气时，则应在紧靠闸门下游的孔口顶部设置通气孔，其上端应与启闭机室分开，并应有防护设施。通气孔设计应符合《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74)的有关要求。

4.4.9 高坝坝身泄水孔水力条件复杂时，应作水工模型试验，必要时进行减压箱模型试验验证。

4.4.10 当坝身导流底孔必须与上部泄水设施同时宣泄洪水时，应考虑底孔出流受封堵的不利情况，并研究采取避免空蚀的措施。

4.4.11 坝身泄水孔的衬护，应根据水力条件、孔口尺寸、水流含沙特性、孔口运行条件等因素确定。内水压力较高的有压孔和明流孔的有压段，宜采用钢衬或高性能混凝土，钢衬应与外围混凝土可靠结合。

5 泄水建筑物的水力设计

5.1 一般规定

5.1.1 泄水建筑物的水力设计内容应包括：

- 1 泄流能力的计算；
- 2 下游水流衔接和消能防冲设施的设计；
- 3 与高速水流有关的水力设计；
- 4 其它有关的水力设计。

5.1.2 泄水建筑物和消能防冲建筑物的洪水标准应按《防洪标准》(GB50201)和《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252)的规定执行。

5.1.3 泄水建筑物的水力设计计算可按附录 A 所列公式进行。

5.1.4 泄水建筑物的消能防冲设计，除应符合本规范的 3.0.3 要求外，尚应满足下列要求：

- 1 消能设施应做到消能效果良好，结构可靠，防止空蚀和磨损，防止淘刷坝基和岸坡，保证坝体及有关建筑物的安全；

- 2 选定的消能型式在宣泄设计洪水及其以下各级洪水流量，尤其是常遇洪水流量时，都应具有良好的消能效果；对超过消能防冲设计标准的洪水，允许消能防冲建筑物出现不危及挡水建筑物安全，不影响枢纽长期运行并易于修复的局部损坏；

- 3 淹没于水下的消力池、消力戽等消能设施，应为运行期的排水检修提供条件。

5.1.5 挑流消能适用于坚硬岩石上的高、中坝，低坝需经论证才能选用。

当坝基有延伸至下游的缓倾角软弱结构面，可能被冲坑切断而形成临空面，危及坝基稳定，或岸坡可能被冲塌时，不宜采用挑流消能，或须做专门的防护措施。

5.1.6 底流消能适用于中、低坝或基岩较软弱的河道；高坝采用底流消能需经论证，但不宜用于排漂和排冰。

5.1.7 面流消能适用于水头较小的中、低坝，河道顺直，水位稳定，尾水较深，河床和两岸在一定范围内有较高抗冲能力，可排漂和排冰。

5.1.8 消力戽消能适用于尾水较深且下游河床和两岸有一定抗冲能力的河道。

5.1.9 联合消能适用于高、中坝，泄洪量大，河床相对狭窄，下游地质条件较差或单一消能型式经济合理性差的情况。联合消能应经水工模型试验验证。

5.1.10 泄水建筑物的闸门宜同步、对称、均匀地启闭，以控制流态稳定，并提出运行规划。

5.1.11 大型工程和高坝的泄水建筑物设计应经水工模型试验验证，中型工程宜进行水工模型试验，水力条件较简单的中型工程则可参照类似工程经验计算确定。

5.2 泄流能力及消能计算

5.2.1 溢流坝和泄水孔的泄流能力，可按照附录 A.3 计算。

5.2.2 溢流坝水面线计算，当弗劳德数 $F_r > 2$ 时，应考虑波动及掺气影响，估算公式见附录 A.3。边墩或导墙顶高程应根据计算水面线加 0.5m~1.5m 的超高确定。

5.2.3 挑流消能设计应对各级下泄流量进行水力计算，挑流水舌挑射距离和跌入下游河床的最大冲坑深度可按照附录 A.4 计算。

5.2.4 底流消能设计应对各级下泄流量进行水力计算，确定护坦高程、长度、厚度和尾水淹没度等。

5.2.5 护坦长度可根据其上是否设置辅助消能设施及水力特性，按照附录 A.5 计算。当护坦上无辅助消能设施时，尾水淹没度可取 1.05~1.10 倍跃后水深。

5.2.6 护坦上的时均水压力分布，可按下列规定取值：

1 当护坦面为水平时，作用在其上的时均水压力可近似取计算断面上的水深；

2 当不设消力墩、坎等辅助消能设施的护坦上发生水跃时，可取跃首、跃尾间水面连一直线，作为近似水面线；

3 当护坦上设有消力墩时，则墩下游可按跃后水深计算，墩上游可按跃后水深的一半计算。

5.2.7 鼻坎、溢流式厂房顶板、护坦等部位的脉动压力和护坦上消力墩及尾坎等所受的冲击力，可按照附录 A.5 的公式进行计算。

5.3 高速水流区的防空蚀设计

5.3.1 泄水建筑物的高速水流区，应注意下列部位或区域发生空蚀破坏的可能性：

1 进出口、闸门槽、弯曲段、水流边界突变处；

2 反弧段及其附近；

3 异形鼻坎、分流墩；

4 溢流坝面和泄水孔壁流速大于 20m/s 的区域。

5.3.2 在高速水流区各部位的水流空化数 σ 宜大于该处的初生空化数，其估算公式见附录 A.6。

5.3.3 对容易产生空蚀破坏的部位或区域，应采取以下防空蚀措施：

1 选择合理的建筑物体形尺寸；

- 2 过流面的不平整度控制标准，可按附录表 A. 6. 2 执行；
- 3 可按附录 A. 6. 3 设置掺气措施，过流面在设置掺气设施之后的不平整度控制标准可适当放宽；
- 4 采用抗蚀性能好的护面材料；
- 5 选用合理的运行方式。

5.3.4 流速超过 30m/s 的泄水建筑物宜采取掺气措施，特殊重要工程和流速大于 35m/s 的建筑物应通过减压箱模型试验确定防空蚀措施。

5.3.5 在多泥沙河流上，泄水建筑物应考虑挟沙的高速水流磨损和空蚀的相互作用。

5.4 消能防冲设施的设计

5.4.1 挑流鼻坎有连续式、差动式、窄缝式和扭曲式等型式，应经比较选定。鼻坎最低高程，宜高出按 5.1.2 规定的消能防冲设计洪水标准泄洪时相对应的下游水位，但可略低于下游最高水位。挑流鼻坎的挑角，应通过比较选定。

1 采用差动式鼻坎，鼻坎处平均流速大于 16 m/s 时，应合理选择反弧段半径、挑角差、高低坎宽度比和高低坎的高差，并可考虑在鼻坎和反弧段间接入直线过渡段以改善流态。

差动式鼻坎的上齿坎挑角和下齿坎挑角的差值以 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 为宜；上齿宽度和下齿宽度之比宜大于 1.0，齿坎高差以 1.5m 为宜；高坎侧宜设通气孔；高坎顶面的棱角宜做成圆弧状。

2 窄缝式挑坎适用于狭窄河道高水头的溢洪道和深孔。出口断面型式有矩形、梯形、Y 形、V 形及不对称形等。窄缝式挑坎的断面型式、挑角、收缩比和长宽比宜通过试验比较确定。

3 扭曲式鼻坎应通过水工模型试验选择转向角度和水舌落点。

5.4.2 挑流消能的安全挑距，应不影响坝趾基岩稳定。冲坑最低点距坝趾的距离应大于 2.5 倍坑深。水舌入水宽度应不影响冲坑两侧岸坡或其它建筑物的稳定。

5.4.3 采用底流消能时应保证消力池内形成稳定的水跃，避免产生回流。消力池内和尾坎前后要清理干净，不允许堆积石渣等杂物。

5.4.4 消力池宜采用等宽矩形断面。水跃前段，地形许可时，可设计成斜护坦。跃前断面平均流速小于 16m/s 时，护坦上可设置消力墩等辅助消能设施。寒冷地区，辅助消能设施应满足《水工建筑物抗冻设计规范》(SL211) 的要求。

5.4.5 消力池两侧导墙顶的高程，可根据跃后水深加超高决定。消力池导墙外侧河床中如有一定水深，可适当降低墙高，允许墙顶有不大的漫溢水头。

5.4.6 面流消能、屏流消能流态复杂，且不稳定。宜采取下列措施，防止坝基和下游河岸

的淘刷，保证工程安全。

- 1 鼻坎下设置齿墙或短护坦；
- 2 两侧设置一定长度的导墙，防止横向回流；
- 3 下游设置护岸；
- 4 闸门均匀开启泄流。

5.4.7 两种或两种以上消能型式联合运行时，防冲设施可按照 5.4.1~5.4.6 的规定设计。对于宽尾墩与消力池联合运用型式，应进行水工模型试验，确定消力池底板上的脉动压力分布，并据此加强消力池底板的强度,加强自身以及与基础结合的整体性，并应采取措施保证消力池底板止水的可靠性。

5.4.8 选择消能型式时应研究雾化对枢纽其它建筑物运行安全及边坡稳定的影响，尤其对于窄河谷、干旱少雨地区更应重视。坝下游的建筑物及露天电气设备、输电线路、交通道路等，宜避开强雾化区，或采取保护措施。

6 坝体断面设计

6.1 荷载及其组合

6.1.1 作用在坝上的荷载分为基本荷载和特殊荷载，分列如下：

1 基本荷载

- 1) 坝体及其上永久设备自重；
- 2) 正常蓄水位或设计洪水位时大坝上、下游面的静水压力（选取一种控制情况）；
- 3) 扬压力；
- 4) 淤沙压力；
- 5) 正常蓄水位或设计洪水位时的浪压力；
- 6) 冰压力；
- 7) 土压力；
- 8) 设计洪水位时的动水压力；
- 9) 其他出现机会较多的荷载。

2 特殊荷载

- 10) 校核洪水位时大坝上、下游面的静水压力；
- 11) 校核洪水位时的扬压力；
- 12) 校核洪水位时的浪压力；
- 13) 校核洪水位时的动水压力；
- 14) 地震荷载；
- 15) 其他出现机会很少的荷载。

上述各种荷载的计算公式见附录 B。

6.1.2 混凝土重力坝抗滑稳定及坝体应力计算的荷载组合应分为基本组合和特殊组合两种。荷载组合应按表 6.1.2 规定进行，必要时应考虑其他可能的不利组合。

表 6.1.2 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	其它荷载	
基本组合	(1) 正常蓄水位情况	1)	2)	3)	4)	5)	-	-	-	7)	9)	土压力根据坝体外是否填有土石而定(下同)
	(2) 设计洪水水位情况	1)	2)	3)	4)	5)	-	-	8)	7)	9)	
	(3) 冰冻情况	1)	2)	3)	4)	-	6)	-	-	7)	9)	静水压力及扬压力按相应冬季库水位计算
特殊组合	(1) 校核洪水情况	1)	10)	11)	4)	12)	-	-	13)	7)	15)	
	(2) 地震情况	1)	2)	3)	4)	5)	-	14)	-	7)	15)	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
<p>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。</p> <p>注 2: 分期施工的坝应按相应的荷载组合分期进行计算。</p> <p>注 3: 施工期的情况应作必要的核算, 作为特殊组合。</p> <p>注 4: 根据地质和其它条件, 如考虑运用时排水设备易于堵塞, 须经常维修时, 应考虑排水失效的情况, 作为特殊组合。</p> <p>注 5: 地震情况, 如按冬季计及冰压力, 则不计浪压力。</p>												

6.2 主要设计原则

6.2.1 混凝土重力坝应以材料力学法和刚体极限平衡法计算成果作为确定坝体断面的依据, 有限元法作为辅助方法。

用材料力学法计算实体重力坝坝体上、下游面应力的计算公式见附录 C。

高坝及修建在复杂地基上的中坝宜进行有限元分析, 必要时可采用结构模型试验验证。

坝体内的孔口等结构复杂部位的配筋设计, 宜用有限元法确定其应力分布, 据以进行钢筋配置。

6.2.2 重力坝的设计断面应由基本荷载组合控制, 并以特殊荷载组合复核。复核特殊荷载组合时, 可考虑坝体的空间作用或采取其他适当措施, 不宜由特殊荷载组合控制设计断面。

6.2.3 宽缝重力坝可用材料力学法计算坝体应力, 头部附近等部位, 也可用有限元法计算, 并允许在离上游面较远的局部区域出现拉应力, 但不得超过坝体混凝土的允许拉应力。

6.2.4 空腹重力坝可用结构力学、材料力学和有限元法计算坝体应力, 应尽量优选体形, 避免出现不利的应力分布状态。

6.2.5 设置横缝的重力坝, 其强度和稳定计算应按平面问题考虑, 可取一个坝段或取单位宽度进行计算。

设置横缝并灌浆的重力坝属于三向应力问题，设计中可考虑其整体作用。

6.3 坝的应力计算

6.3.1 坝的应力计算主要内容包括：

- 1 计算坝体选定截面上的应力（应根据坝高选定计算截面，包括坝基面，折坡处的截面及其他需要计算的截面）；
- 2 计算坝体削弱部位（如孔洞、泄水管道、电站引水管道部位等）的局部应力；
- 3 计算坝体个别部位的应力（如闸墩、胸墙、导墙、进水口支承结构、宽缝重力坝的头部等）；
- 4 需要时分析坝基内部的应力。

设计时可根据工程规模和坝体结构情况，计算上述内容的部分或全部，或另加其他内容。

6.3.2 重力坝坝基面坝踵、坝趾的垂直应力应符合下列要求：

1 运用期

1) 在各种荷载组合下（地震荷载除外），坝踵垂直应力不应出现拉应力，坝趾垂直应力应小于坝基容许压应力；

2) 在地震荷载作用下，坝踵、坝趾的垂直应力应符合《水工建筑物抗震设计规范》（SL203）的要求；

2 施工期

坝趾垂直应力可允许有小于 0.1MPa 的拉应力。

6.3.3 重力坝坝基截面的垂直应力应按下列式计算：

$$\sigma_y = \frac{\sum W}{A} \pm \frac{\sum M \cdot x}{J} \quad (6.3.3)$$

式中： σ_y ——坝踵、坝趾垂直应力，kPa；

$\sum W$ ——作用于坝段上或 1m 坝长上全部荷载（包括扬压力，下同）在坝基截面上法向力的总和，kN；

$\sum M$ ——作用于坝段上或 1m 坝长上全部荷载对坝基截面形心轴的力矩总和，kN·m；

A ——坝段或 1m 坝长的坝基截面积， m^2 ；

x ——坝基截面上计算点到形心轴的距离，m。

J ——坝段或者 1m 坝长的坝基截面对形心轴的惯性矩， m^4 。

6.3.4 重力坝坝体应力应符合下列要求：

1 运用期

- 1) 坝体上游面的垂直应力不出现拉应力（计扬压力）。
- 2) 坝体最大主压应力，应不大于混凝土的允许压应力值。
- 3) 在地震情况下，坝体上游面的应力控制标准应符合《水工建筑物抗震设计规范》（SL203）的要求。

4) 关于坝体局部区域拉应力的规定：

(1) 宽缝重力坝离上游面较远的局部区域，可允许出现拉应力，但不超过混凝土的允许拉应力。

(2) 当溢流坝堰顶部位出现拉应力时，应配置钢筋。

(3) 廊道及其他孔洞周边的拉应力区域，宜配置钢筋；有论证时，可少配或不配钢筋。

2 施工期

1) 坝体任何截面上的主压应力应不大于混凝土的允许压应力。

2) 在坝体的下游面，可允许有不大于 0.2MPa 的主拉应力。

6.3.5 计算重力坝坝体应力时，可不考虑纵缝的影响；但对于高坝，及坝上游面有倒悬的，应考虑在施工期纵缝灌浆前上游坝块的应力情况，在设计中对不利应力情况应采取措施加以限制和改善。

6.3.6 对岸坡坝段，根据地形、地质条件，结合坝基开挖，应计算在三向荷载共同作用下的抗滑稳定及应力。在难以避免的情况下，坝踵垂直应力允许出现不大的拉应力，且应采取采取措施保证运用期和施工期的稳定和应力要求。

6.3.7 不能作为平面问题处理的坝体或坝段，以及其他不能用材料力学进行应力分析的结构，可采用有限元法分析，局部应力值可不受本规范 6.3.4 关于应力指标的规定，但如果局部应力数值超过指标较多时应研究其原因，并应设法改善。

6.3.8 用有限元法计算坝体应力，单元剖分应达到设计所要求的精度，单元的型式应结合坝体体形合理选用，计算模型及计算条件等应接近于实际情况。

6.3.9 有限元法计算的坝基应力，其上游面拉应力区宽度，宜小于坝底宽度的 0.07 倍，或小于坝踵至帷幕中心线的距离。

6.3.10 混凝土的允许应力应按混凝土的极限强度除以相应的安全系数确定。

坝体混凝土抗压安全系数，基本组合应不小于 4.0；特殊组合（不含地震情况）应不小于 3.5。

当局部混凝土有抗拉要求时，抗拉安全系数应不小于 4.0。

在地震情况下，坝体的结构安全应符合《水工建筑物抗震设计规范》(SL203)的要求。

注1：混凝土极限抗压强度，指90d龄期的15cm立方体强度，强度保证率为80%；

注2：坝体局部结构的设计和计算，应符合《水工混凝土结构设计规范》(SL/T191)。

6.4 坝体抗滑稳定计算

6.4.1 坝体抗滑稳定计算主要核算坝基面滑动条件，应按抗剪断强度公式(6.4.1-1)或抗剪强度公式(6.4.1-2)计算坝基面的抗滑稳定安全系数。

1 抗剪断强度的计算公式：

$$K' = \frac{f' \sum W + c' A}{\sum P} \quad (6.4.1-1)$$

式中： K' —— 按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

f' —— 坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断摩擦系数；

c' —— 坝体混凝土与坝基接触面的抗剪断凝聚力， KPa ；

A —— 坝基接触面截面积， m^2 。

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

$\sum P$ —— 作用于坝体上全部荷载对滑动平面的切向分力， kN ；

2 抗剪强度的计算公式：

$$K = \frac{f \sum W}{\sum P} \quad (6.4.1-2)$$

式中： f —— 坝体混凝土与坝基接触面的抗剪摩擦系数；

3 抗滑稳定安全系数的规定

1) 按抗剪断强度公式(6.4.1-1)计算的坝基面抗滑稳定安全系数 K' 值应不小于表6.4.1-1的规定。

表 6.4.1-1 坝基面抗滑稳定安全系数 K'

荷载组合		K'
基本组合		3.0
特殊组合	(1)	2.5
	(2)	2.3

2) 按抗剪强度公式(6.4.1-2)计算的坝基面抗滑稳定安全系数 K 值应不小于表6.4.1-2规定的数值。

表 6.4.1-2 坝基面抗滑稳定安全系数 K

荷 载 组 合		坝 的 级 别		
		1	2	3
基 本 组 合		1.10	1.05	1.05
特 殊 组 合	(1)	1.05	1.00	1.00
	(2)	1.00	1.00	1.00

4 坝基岩体内存在软弱结构面、缓倾角裂隙时，坝基深层抗滑稳定安全系数按附录 E 计算。

按抗剪强度公式 (E.0.1-1)，(E.0.1-2) 计算的 K' 值应不小于表 6.4.1-1 的规定。

当采取工程措施后 K' 值仍不能达到表 6.4.1-1 要求时，可按抗剪强度 (E.0.1-3) 及 (E.0.1-4) 公式计算坝基深层抗滑稳定安全系数，其安全系数指标应经论证后确定，对于单滑面情况，尤须慎重。

6.4.2 坝体混凝土与坝基接触面之间的抗剪断摩擦系数 f' 、凝聚力 C' 和抗剪摩擦系数 f 的取值：规划阶段可参考附录 D 选用；可行性研究阶段及以后的设计阶段，应经试验确定；中型工程的中、低坝，若无条件进行野外试验时，宜进行室内试验，并参照附录 D 选用。

6.4.3 在坝体抗滑稳定计算中，经论证可考虑位于坝后的水电站厂房或其他大体积建筑物与坝体的联合作用，但应做好相应的结构设计。

6.4.4 当坝基岩体内存在软弱结构面、缓倾角裂隙时，需核算深层抗滑稳定。根据滑动面的分布情况综合分析后，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（见附录 E）计算为主，必要时可辅以有限元法、地质力学模型试验等方法分析深层抗滑稳定，并进行综合评定，其成果可作为坝基处理方案选择的依据。

当坝基岩体内无不利的顺流向断层裂隙及横缝设有键槽并灌浆，核算深层抗滑稳定时可计入相邻坝段的阻滑作用。

6.5 溢流坝闸墩结构设计

6.5.1 溢流坝上闸墩的强度计算包括：

- 1 闸墩承受最大纵向力、相应侧向力、竖向力及自重情况下，核算其纵向强度；
- 2 闸墩承受最大不平衡侧向力、相应纵向力、竖向力及自重情况下，核算其横向强度；
- 3 对闸门槽和弧形闸门铰支座等部位的强度进行核算；
- 4 必要时核算闸墩的变位。

6.5.2 闸墩强度计算应符合下列要求：

1 核算纵向强度时，应使墩内不产生拉应力，此时闸墩周边可按构造或其他条件配置钢筋。如拉应力较难避免时，应按小偏心受压的钢筋混凝土构件设计。

2 核算横向强度时，应将闸墩视为固端的整体构件，按偏心受压或按偏心受拉的钢筋混凝土构件设计。

3 弧门支座附近闸墩的局部受拉区的裂缝控制和支座截面的剪跨比应满足设计构件要求。

4 地震作用下闸墩强度应满足《水工建筑物抗震设计规范》（SL203）的规定。

6.5.3 弧形闸门的闸墩承受较大作用力时，可采用预应力结构。

7 坝基处理设计

7.1 一般规定

7.1.1 混凝土重力坝的基础经处理后应符合下列要求：

- 1 具有足够的强度，以承受坝体的压力；
- 2 具有足够的整体性和均匀性，以满足坝体抗滑稳定和减小不均匀沉陷；
- 3 具有足够的抗渗性，以满足渗透稳定，控制渗流量，降低渗透压力；
- 4 具有足够的耐久性，以防止岩体性质在水的长期作用下发生恶化。

7.1.2 坝基处理设计应综合考虑基础与其上部结构之间的相互关系，必要时可采取措施，调整上部结构的型式，使上部结构与其基础工作条件相协调。

7.1.3 基础处理设计时，应同时论证两岸坝肩部位和上、下游附近地区的边坡稳定、变形和渗流情况，必要时应采取相应的处理措施。

7.1.4 岩溶地区的坝基处理设计，应在认真查明岩溶洞穴、宽大溶隙等在坝基下的分布范围、形态特征、充填物性质及地下水活动状况的基础上，进行专门的处理设计。

7.2 坝基开挖

7.2.1 建基面位置应根据大坝稳定、坝基应力、岩体物理力学性质、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、工期和费用等因素经技术经济比较确定。可考虑通过基础加固处理和调整上部结构的措施，在满足坝基强度和稳定的基础上，减少开挖量。

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

7.2.2 重力坝的建基面形态应根据地形地质条件及上部结构的要求确定，坝段的建基面上、下游高差不宜过大，并宜略向上游倾斜。若基础面高差过大或向下游倾斜时，宜开挖成带钝角的大台阶状。台阶的高差应与混凝土浇筑块的尺寸和分缝的位置相协调，并和坝趾处的坝体混凝土厚度相适应。对基础高差悬殊的部位宜调整坝段的分缝或作必要的处理。

7.2.3 两岸岸坡坝段建基面在坝轴线方向应开挖成有足够宽度的台阶状，或采取其它结构措施，确保坝体侧向稳定。

7.2.4 基础中存在的表层夹泥裂隙、风化囊、断层破碎带、节理密集带、岩溶充填物及浅埋的软弱夹层等局部工程地质缺陷，均应结合基础开挖予以挖除，或局部挖除后再进行处理。

7.2.5 坝基开挖设计中应对爆破方式提出相应的要求，保证坝基岩体不受破坏或产生不良后果。对易风化、泥化的岩体，应采取相应的保护措施。

7.3 坝基固结灌浆

7.3.1 坝基固结灌浆的设计，应根据坝基工程地质条件、坝高和灌浆试验资料确定。

1 宜在坝基上游和下游一定的范围内进行固结灌浆；当坝基岩体裂隙发育时，且具有可灌性时，可在全坝基范围进行固结灌浆，并根据坝基应力及地质条件，向坝基外及宽缝重力坝的宽缝部位适当扩大灌浆范围；

2 防渗帷幕上游的坝基宜进行固结灌浆；

3 断层破碎带及其两侧影响带或其它地质缺陷应加强固结灌浆。

4 基础中的岩溶洞穴、溶槽等，在清挖回填后其周边应根据岩溶分布情况适当加强固结灌浆。

7.3.2 固结灌浆孔的孔距、排距可采用 3m~4m，或根据开挖以后的地质条件由灌浆试验确定。

固结灌浆深度应根据坝高和开挖以后的地质条件确定，可采用 5m~8m；局部地区及坝基应力较大的高坝基础，必要时可适当加深，帷幕上游区宜根据帷幕深度采用 8m~15m。

7.3.3 固结灌浆孔通常布置成梅花形，对于较大的断层和裂隙带应专门布孔。灌浆孔方向应根据主要裂隙产状结合施工条件确定，使其穿过较多的裂隙。

7.3.4 帷幕上游区和地质缺陷部位的坝基固结灌浆宜在有 3m~4m 混凝土盖重情况下施灌，其它部位的固结灌浆可根据地质条件采用有混凝土盖重方式施灌，经论证亦可采用无混凝土盖重或找平混凝土封闭方式施灌。

7.3.5 在不抬动基础岩体和盖重混凝土的原则下，固结灌浆压力宜尽量提高。有混凝土盖重时视其厚度可采用 0.4MPa~0.7MPa。采用找平混凝土封闭灌浆时，其灌浆压力宜通过灌浆试验确定，可采用 0.2MPa~0.4MPa。对缓倾角结构面发育的基岩及软岩，其灌浆压力应由灌浆试验确定。

7.4 坝基防渗和排水

7.4.1 坝基防渗和排水设计，应以坝基的工程地质、水文地质条件和灌浆试验资料为依据，结合水库功能、坝高综合考虑防渗和排水措施的适应性及二者的联合作用，确定相应的措施。水文地质条件复杂的高坝，应进行渗流计算分析。

7.4.2 坝基及两岸的防渗措施，可采用水泥灌浆，亦可采用水泥混合材料灌浆，必要时可采用化学材料灌浆；经研究论证坝基也可采用混凝土齿墙、防渗墙或水平防渗铺盖；两岸岸坡也可采用明挖或洞挖后回填混凝土形成的防渗墙。多泥沙河流上，经分析淤积物的渗透系数及上游的淤积厚度能起防渗作用时，设计中可适当考虑其效果，但应确保大坝初期运行的安全。

7.4.3 防渗帷幕应符合下列要求：

- 1 减小坝基和绕坝渗漏，防止渗漏水对坝基及两岸边坡稳定产生不利影响；
- 2 防止在坝基软弱结构面、断层破碎带、岩体裂隙充填物以及抗渗性能差的岩层中产生渗透破坏；
- 3 在帷幕和坝基排水的共同作用下，使坝基扬压力和坝基渗漏量降至允许值以内；
- 4 具有连续性和足够的耐久性。

7.4.4 大、中型工程或高坝应事先进行帷幕灌浆试验。在施工过程中可根据钻孔资料修正防渗帷幕设计。主帷幕应在水库蓄水前完成。

7.4.5 帷幕的防渗标准和相对隔水层的透水率根据不同坝高采用下列控制标准：

- 1 坝高在 100m 以上，透水率 q 为 $1Lu\sim 3Lu$ ；
- 2 坝高在 100m~50m 之间，透水率 q 为 $3Lu\sim 5Lu$ ；
- 3 坝高在 50m 以下，透水率 q 为 $5Lu$ 。

抽水蓄能电站和水源短缺水库坝基帷幕防渗标准和相对隔水层的透水率 q 值控制标准取小值。

7.4.6 防渗帷幕的设计深度，应遵守下列规定：

1 封闭式帷幕：当坝基下存在可靠的相对隔水层，并且埋深较浅时，防渗帷幕应伸入到该岩层内 3m~5m，不同坝高的相对隔水层的 q 值控制标准见 7.4.5；

2 悬挂式帷幕：当坝基下相对隔水层埋藏较深或分布无规律时，帷幕深度应符合本规范 7.4.3 的规定，并参照渗流计算，考虑工程地质条件和坝基扬压力等因素，结合工程经验研究确定，通常在 0.3~0.7 倍水头范围内选择。

7.4.7 当坝肩及两岸帷幕深度较深时，应分层设置灌浆隧洞，灌浆隧洞的布置应根据地形地质条件、钻孔灌浆技术水平、施工通风和排水等因素确定，岩溶地区还应根据岩溶分布高程确定。隧洞层间高差可取 30m~60m。上、下层帷幕的搭接型式可采用斜接式、直接式及错列式等，应保证搭接部位连续封闭和密实。

7.4.8 两岸坝头部位，防渗帷幕伸入山体长度及帷幕轴线的方向，应根据工程地质、

水文地质条件确定，宜延伸到相对隔水层处或正常蓄水位与地下水位相交处，并与河床部位的帷幕保持连续性。

7.4.9 防渗帷幕的排数、排距及孔距，应根据工程地质、水文地质、作用水头以及灌浆试验资料选定。

帷幕排数在考虑帷幕上游区的固结灌浆对加强基础浅层的防渗作用后，坝高 100m 以上的坝可采用两排，坝高 100m 以下的可采用一排。对地质条件较差、岩体裂隙特别发育或可能发生渗透变形的地段或研究认为有必要加强防渗帷幕时，可适当增加帷幕排数。

当帷幕由多排灌浆孔组成时，应将其中的一排孔钻灌至设计深度，其余各排孔的孔深可取设计深度的 1/2~2/3。

帷幕孔距可为 1.5m~3m，排距宜比孔距略小。

钻孔宜穿过岩体的主要裂隙和层理，可采用倾向上游 0° ~ 10° 的斜孔。

7.4.10 帷幕灌浆必须在浇筑一定厚度的坝体混凝土作为盖重后施工。灌浆压力应通过试验确定，通常在帷幕孔第 1 段取 1.0~1.5 倍坝前静水头，以下各段可逐渐增加，孔底段可取 2~3 倍坝前静水头，但灌浆时不得抬动坝体混凝土和坝基岩体。

7.4.11 坝基主排水孔一般设置在基础灌浆廊道内防渗帷幕的下游，在建基面上主排水孔与帷幕孔的距离不宜小于 2m。高坝可设置 2~3 排辅助排水孔，中坝可设置 1~2 排辅助排水孔，必要时可沿横向排水廊道或宽缝设置排水孔。当基础中存在相对隔水层和缓倾角岩层时，应根据其分布情况合理布置排水孔。

7.4.12 尾水位较高的坝，采取抽排措施时，应在主排水下游坝基设置纵、横向辅助排水孔。当高尾水位历时较长或岩体透水性较大时，宜在坝趾增设封闭防渗帷幕。

7.4.13 坝高较低，基岩条件较好且为弱透水层（渗透系数小于 0.1m/d）时，也可不设帷幕而只设排水，以降低坝基渗透压力，但应在坝基面的上游部位进行固结灌浆。

7.4.14 主排水孔的孔距可为 2m~3m，辅助排水孔的孔距可为 3m~5m。

7.4.15 排水孔孔深应根据帷幕和固结灌浆的深度及基础的工程地质、水文地质条件确定。

1 主排水孔深为帷幕深的 0.4~0.6 倍；高、中坝的坝基主排水孔深，应不小于 10m；当坝基内存在裂隙承压水层、深层透水区时，除加强防渗措施外，主排水孔宜深入此部位。

2 辅助排水孔深可为 6m~12m。

7.4.16 在岸坡坝段的坝基可设置专门的排水设施，必要时可在岸坡山体内设置排水隧洞，并布设排水孔。

7.4.17 当排水孔的孔壁有塌落危险或排水孔穿过软弱结构面、夹泥裂隙时，应采取相应的

保护措施。

7.5 断层破碎带和软弱结构面处理

7.5.1 坝基范围内的断层破碎带或软弱结构面，应根据其所在部位、埋藏深度、产状、宽度、组成物性质以及有关试验资料，研究其对上部结构的影响，进行专门处理。

在地震设计烈度为 8 度以上的区域，其处理要求应适当提高。

低坝的断层破碎带处理要求，可适当降低。

7.5.2 倾角较陡的断层破碎带，可用下述方法处理：

1 坝基范围内单独出露的断层破碎带，其组成物质主要为坚硬构造岩，对基础的强度和压缩变形影响不大时，可将断层破碎带及其两侧影响带岩体适当挖除。

2 断层破碎带规模不大，但其组成物质以软弱的构造岩为主，且对基础的强度和压缩变形有一定影响时，可用混凝土塞加固，混凝土塞的深度可采用 1.0~1.5 倍断层破碎带的宽度或根据计算确定。贯穿坝基上、下游的纵向断层破碎带的处理，宜向上、下游坝基外适当延伸。

3 规模较大的断层破碎带或断层交汇带，影响范围较广，且其组成物质主要是软弱构造岩，并对基础的强度和压缩变形有较大的影响时，必须进行专门的处理设计。

7.5.3 提高坝基深层抗滑稳定性处理原则有：

- 1 提高软弱结构面抗剪能力；
- 2 增加尾岩抗力；
- 3 提高软弱结构面抗剪能力与增加尾岩抗力相结合。

应根据软弱结构面产状、埋深、特性及其对坝体影响程度，结合工程规模、施工条件和工程进度，进行综合分析比较后选定。

7.5.4 根据软弱结构面埋深不同可分别采用混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土洞塞等措施，提高软弱结构面抗剪能力；必要时也可采用抗滑桩、预应力锚索、化学灌浆等措施。

7.5.5 当采用规模较大的混凝土塞、大齿墙或混凝土洞塞进行缓倾角软弱结构面的处理时，应制定相应的温度控制等措施，并进行接触灌浆。

7.5.6 伸入水库区内的断层破碎带或软弱结构面，有可能造成渗漏通道并使地质条件恶化时，应进行专门的防渗处理。

7.5.7 断层破碎带或软弱结构面部位基础排水设施的设置，应根据地质条件确定，并应符合本规范 7.4.17 的规定。

7.6 岩溶的防渗处理

7.6.1 岩溶的防渗处理方式有防渗帷幕灌浆、防渗墙等，应根据岩溶的规模、发育规律、充填物性质及透水性等条件选定。对存在岩溶洞穴或具有强透水性的溶蚀裂隙，可采取追索开挖回填混凝土或设置阻浆洞（井）等措施后再进行高压灌浆处理。

7.6.2 当坝基存在连通上、下游的溶洞，埋藏不深或施工条件许可时，应采用开挖回填混凝土处理；埋藏较深不宜明挖时，可采取洞挖回填混凝土处理，也可采用抽槽开挖回填混凝土处理。

7.6.3 两岸防渗帷幕线路应根据两岸地形地质条件和岩溶分布特征选定，可采用直线式、折线式、前翼式及后翼式等布置方式，地质条件复杂的坝基防渗线路需经多方案技术经济比较，必要时结合坝轴线比较选定。帷幕线路应尽量选择岩溶发育较弱地带通过，如必须通过岩溶暗河或岩溶通道时，宜与其垂直。

7.6.4 岩溶地区灌浆帷幕深度应根据相对隔水层的埋深、坝高、坝基及两岸允许的渗漏量及幕后扬压力等因素，在保证大坝安全的前提下，通过技术经济比较选定。

7.6.5 帷幕排数、孔距、排距和灌浆压力应根据地质构造和岩溶水文地质条件，通过帷幕灌浆试验选定，灌浆试验时应研究不同类型的溶洞及充填物灌浆所形成幕体的允许渗透水力比降及耐久性。

7.6.6 灌浆材料可根据岩溶洞穴和溶蚀裂隙规模及充填情况选用纯水泥浆、水泥砂浆、水泥粘土浆、水泥粉煤灰浆等，必要时可钻大口径钻孔灌注高流态细骨料混凝土。

8 坝体构造

8.1 坝 顶

8.1.1 坝顶应高于校核洪水位，坝顶上游防浪墙顶的高程应高于波浪顶高程，其与正常蓄水位或校核洪水位的高差，可由式(8.1.1)计算，应选择两者中防浪墙顶高程的高者作为选定高程。

$$\Delta h = h_{1\%} + h_z + h_c \quad (8.1.1)$$

式中： Δh —防浪墙顶至正常蓄水位或校核洪水位的高差(m)；

$h_{1\%}$ —波高(m)；

h_z —波浪中心线至正常或校核洪水位的高差(m)；

h_c —安全超高，按表8.1.1采用。

表 8.1.1 安全超高 h_c

相应水位	坝的安全级别		
	1	2	3
正常蓄水位	0.7	0.5	0.4
校核洪水位	0.5	0.4	0.3

8.1.2 防浪墙宜采用与坝体连成整体的钢筋混凝土结构，墙身有足够的厚度以抵抗波浪及漂浮物的冲击，在坝体横缝处应留伸缩缝，并设止水，墙身高度可取1.2m。坝顶下游侧应设置栏杆。

8.1.3 非溢流坝段的坝顶宽度应根据剖面设计、运行要求确定，并不宜小于3m。坝顶路面应具有横向坡度和排水设施，严寒地区，横向坡度应适当加大。

8.1.4 溢流坝顶应结合闸门、启闭设备布置、操作检修、交通和观测等要求设置坝顶工作桥、交通桥。坝顶上的桥梁可采用装配式钢筋混凝土结构或预应力钢筋混凝土结构，桥下应有足够的净空。

8.1.5 溢流坝的坝顶工作桥、交通桥等结构，应满足《水工建筑物抗震设计规范》(SL203)的要求。

8.1.6 坝顶用作公路时，公路侧的人行道宜高出坝顶路面30cm。

8.1.7 坝顶布置应结合工程建筑的总体规划，并与周围环境相协调。

8.2 坝内廊道及通道

8.2.1 坝内廊道设置，应兼顾基础灌浆、排水、安全监测、检查维修、运行操作、坝内交通、施工期的需要等多种用途。

8.2.2 高、中坝内必须设置基础灌浆廊道。基础灌浆廊道的纵向坡度应缓于 45° ，坡度较陡的长廊道，应分段设置安全平台及扶手。当两岸坡度陡于 45° 时，基础灌浆廊道可分层布置并用竖井连接。

基础灌浆廊道底板混凝土厚度不宜小于 3m。

8.2.3 坝体内设置多层廊道时，各层高宜为 20m~40m，并应在上、下层廊道间设置通道。坝内廊道与其它泄水孔洞的距离不宜小于 3m~5m，应通过应力分析确定，防止开裂贯通。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。

8.2.4 下游高水位以上的下游坝面，宜分层设置坝后交通桥，每层间隔与坝身孔洞和廊道布置相协调。廊道通向坝外的进出口，应设保安防寒门。在泄洪和施工度汛时，应有防止廊道进水的措施。电梯井是坝内的主要竖向交通设施，大型工程的高坝，宜设置不少于 2 座电梯及便梯，中坝可视需要设置电梯。

8.2.5 坝内廊道断面力求标准化，可采用城门洞形或矩形，沿横缝设置的横向廊道可用三角形顶平底断面。

8.2.6 基础灌浆廊道的断面尺寸，应根据钻灌机具尺寸及工作要求确定，宽度可取 2.5m~3.0m，高度可为 3.0m~3.5m。较长的基础灌浆廊道，可设置若干灌浆机房。其它廊道亦应有保证完成其功能且可以自由通行的尺寸，其最小尺寸：宽度为 1.2m，高度为 2.2m。

8.2.7 廊道内应有足够的照明设施和良好的通风条件，各种电器设备与线路应保证绝缘良好，并宜设置应急照明。

8.3 坝体分缝

8.3.1 坝体横缝、纵缝、斜缝的设置，应满足 9.3.3 的要求。

8.3.2 横缝作为伸缩缝或沉陷缝时，缝面不设键槽，不灌浆，一般只在上游坝面附近设置止水措施。

8.3.3 下列情况的横缝宜采用全部或部分灌浆：

1 对横缝有很高防渗要求时；

2 位于陡坡上的坝段或坝体承受侧向荷载，其侧向稳定或应力不能满足要求，需将相邻坝段联结成整体时；

3 河谷狭窄，经过技术经济比较后认为选用整体式重力坝有利时；

4 地震设计烈度在 8 度以上或有其它特殊要求，需将大坝联结成整体，提高大坝的抗震性能时。

8.3.4 当坝内布置压力钢管、泄水孔、导流底孔以及坝顶布置溢流表孔时，横缝间距应与其相适应。

岸坡坝段宜在地形突变或转折处设置横缝。

8.3.5 纵缝的设置需根据坝块尺寸和温控标准进行论证。纵缝可采用竖缝型式，缝面应设置键槽，并埋设灌浆系统进行灌浆。纵缝也可在某个高程进行并缝，如延伸至坝面，应与坝面垂直相交。

8.3.6 纵（横）缝灌浆缝面需用止浆片分隔成若干区进行灌浆，每一灌浆区的面积可为 $200\text{m}^2\sim 400\text{m}^2$ ，其高度可为 $10\text{m}\sim 15\text{m}$ 。

8.3.7 纵缝灌浆时坝体温度应符合 9.3.10 的要求。纵缝灌浆完成后，需待水泥浆结石达到预期强度，水库才能蓄水。

8.3.8 纵（横）缝同一灌浆区的进、出浆管口、排气管出口等，应集中于廊道或平台附近。纵（横）缝的灌浆压力应根据应力及变形条件确定，层顶压力可取 $0.1\text{MPa}\sim 0.3\text{MPa}$ 。当同一坝段有数条纵缝时，各纵缝间灌浆进度宜相同，或先灌下游纵缝。各横缝间灌浆进度也宜相同。

8.3.9 同一坝段相邻浇筑块水平施工缝应错开。当水平施工缝与廊道顶拱相交时，可以 $1:1.0\sim 1:1.5$ 的坡度与拱座连接，廊道以上的水平施工缝离廊道顶不应小于 1.5m 。

8.3.10 斜缝适用于中、低坝，可不灌浆；用于高坝时应经论证。

8.4 坝体止水和排水

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

8.4.2 溢流面上的止水需与闸门底坎金属结构埋件相焊接以形成封闭。防浪墙的止水设置应与坝体止水相连接。

8.4.3 高坝上游面附近的横缝止水应采用两道止水片，其间宜设一道排水井或经论证的其它措施。第一道止水片至上游坝面间横缝内可贴沥青油毡，当有特殊需要时，可考虑在横缝的二道止水片与排水井之间进行灌浆作为止水的辅助设施。

中、低坝的横缝止水可适当简化。

8.4.4 高坝横缝的两道止水片应采用厚 $1.0\text{mm}\sim 1.6\text{mm}$ 的止水铜片；中坝的第一道止水片应为铜片。铜止水片宜加工成“}”形，每一侧埋入混凝土内的长度不小于 $20\text{cm}\sim 25\text{cm}$ 。

塑料止水带、橡胶止水带应视工作水头、气候条件、所在部位和便于施工等因素选用合适的标准型号，一般可应用于较低水头的上游面止水、最高尾水位以下的横缝下游面止水

和廊道止水。对塑料止水带及橡胶止水带的安装，应采取措施防止变形。

8.4.5 横缝止水片必须与坝基妥善连接。止水片埋入基岩内的深度可为 30~50cm，必要时止水槽混凝土与基岩之间用锚筋连接。

8.4.6 陡坡段坝体与边坡基础接触面的基础止水可采用以下方法：

1 沿陡坡基岩设置止水埂或止水槽，埋入止水铜片。

2 埋设灌浆系统或后期钻孔，待基础混凝土充分收缩以后进行接触灌浆。有条件时，可利用帷幕灌浆孔与固结灌浆孔进行接触灌浆。

8.4.7 坝体上游面防渗层下游应设置铅直或近乎铅直的排水管系。排水管下部应通至纵向排水廊道，上部应通至上层廊道或坝顶（或溢流面以下），以便于检修。排水管可采用拔管、钻孔或预制无砂混凝土管，管距可为 2~3m，内径 15~25cm。

渗入排水管的水可汇集到下层纵向廊道，沿集水沟或集水管汇入集水井，再用水泵抽排或自流方式排向下游，排水沟断面常用 30×30cm，底坡 3%。排水管施工时必须防止被混凝土和杂物等堵塞。

8.5 大坝混凝土材料及分区

8.5.1 大坝混凝土所用的水泥、骨料、水、活性掺合料、外加剂应符合现行的国家标准及有关行业标准的规定。

大坝混凝土除应满足设计上对强度的要求外，还应根据大坝的工作条件，地区气候等具体情况，分别满足抗渗、抗冻、抗冲耐磨和抗腐蚀等耐久性以及低热性的要求。

8.5.2 大坝混凝土应根据不同部位和不同条件分区（见图 8.5.2）。

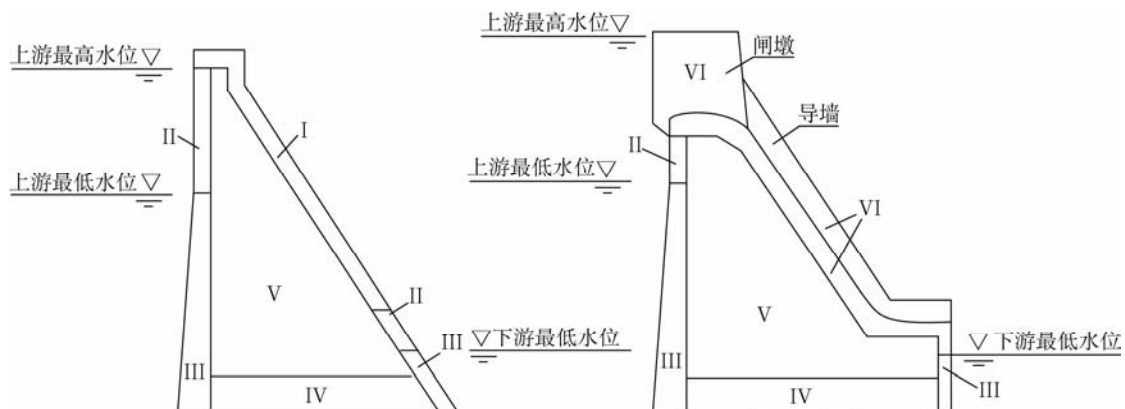


图 8.5.2 坝体混凝土分区图

I 区—上、下游水位以上坝体外部表面混凝土；

II 区—上、下游水位变化区的坝体外部表面混凝土；

III区—上、下游最低水位以下坝体外部表面混凝土；

IV区—坝体基础混凝土；

V区—坝体内部混凝土；

VI区—抗冲刷部位的混凝土（例如溢流面、泄水孔、导墙和闸墩等）；

分区性能要求见表 8.5.2。

表 8.5.2 大坝混凝土分区性能要求表

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

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

8.5.3 坝体内部的导流底孔、引水管、泄水孔等大孔口孔壁周围的混凝土以及地震设计烈度 8 度以上的坝体混凝土，其强度应适当提高。

选择混凝土标号时，应考虑由于温度、渗透压力及局部应力集中所产生的拉应力、剪应力或主应力。

坝体内部混凝土的标号不应低于 $R_{90}100$ ，过流表面的混凝土标号不应低于 $R_{90}250$ 。

8.5.4 大坝混凝土的抗渗等级应根据所在部位和水力坡降，按表 8.5.4 采用。

表 8.5.4 大坝混凝土抗渗等级的最小允许值

项次	部位	水力坡降	抗渗等级
1	坝体内部		W2
2	坝体其它部位按水力坡降考虑时	$i < 10$	W4
		$10 \leq i < 30$	W6
		$30 \leq i < 50$	W8
		$i \geq 50$	W10

注 1：表中 i 为水力坡降；
 注 2：承受腐蚀水作用的建筑物、其抗渗等级应进行专门的试验研究，但不得低于 W4；
 注 3：混凝土的抗渗等级应按《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL211) 规定的试验方法确定。根据坝体承受水压力作用的时间也可采用 90d 龄期的试件测定抗渗等级。

8.5.5 大坝混凝土应根据气候分区、冻融循环次数、表面局部小气候条件、水分饱和程度、

结构构件重要性和检修的难易程度等综合因素选用抗冻等级，并满足《水工建筑物抗冰冻设计规范》(SL211) 的要求。

8.5.6 根据大坝混凝土耐久性要求，混凝土的水灰比不宜大于表 8.5.6 所列数值。

表 8.5.6 混凝土最大水灰比

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

8.5.7 在环境水有侵蚀性情况下，应选择抗侵蚀性能较好的水泥，外部水位变化区及水下混凝土的水灰比可较表 8.5.6 减少 0.05。

8.5.8 高速水流区的混凝土应采用具有抗冲耐磨性的低流态高强度混凝土或高强硅粉混凝土。当采用耐磨材料衬护时，应与混凝土可靠结合。

8.5.9 同一浇筑块中混凝土标号不宜超过两种，等级差不宜超过两级。分区厚度尺寸最小为 2m~3m。

9 温度控制及防裂措施

9.1 一般规定

9.1.1 对于高、中坝，应进行温度控制及防裂设计，提出温度控制标准及防裂措施。高坝宜采用有限元法进行温度场、温度应力分析。对于低坝，可参照类似工程的经验进行温度控制及防裂设计。

9.1.2 混凝土重力坝的温度裂缝可分为以下三类：

- 1 贯穿裂缝；
- 2 深层裂缝；
- 3 表面裂缝。

贯穿裂缝和深层裂缝都应避免产生，发生在上游面和基础部位的表面裂缝，有可能发展成贯穿裂缝或深层裂缝，亦应避免。

9.1.3 应注意分缝、分块及控制温度，同时应提高混凝土的抗裂性能。在温度控制设计中，应提出混凝土抗裂指标。

9.1.4 应收集并整理坝址地区年平均气温和变幅、多年月平均和旬平均气温，气温骤降的幅度、历时和出现的频率，坝基地温，日照，类似水库水温等资料。

9.1.5 对于高、中坝，应进行混凝土力学、热学、极限拉伸、徐变和自生体积变形等性能试验，低坝可根据需要进行必要的试验。

9.2 温度控制标准

9.2.1 基础温差：系指建基面 $0.4L$ （ L 为浇筑块长边尺寸）高度范围的基础约束区内混凝土的最高温度和该部位稳定温度之差。

当基础约束区混凝土 28d 龄期的极限拉伸值不低于 0.85×10^{-4} 时，对于施工质量均匀、良好，基岩与混凝土的变形模量相近，短间歇均匀上升浇筑的浇筑块，基础容许温差可采用表 9.2.1 规定的数值。

表 9.2.1 基础约束区混凝土容许温差 ΔT （ $^{\circ}\text{C}$ ）

距离基础面高度 h	浇筑块长边 L				
	17m 以下	17m~20m	20m~30m	30m~40m	40m 至通仓长块
$0 \sim 0.2L$	26~25	25~22	22~19	19~16	16~14
$(0.2 \sim 0.4)L$	28~27	27~25	25~22	22~19	19~17

对以下情况的基础混凝土容许温差应进行论证：

- 1 坝块结构尺寸高长比小于 0.5；

- 2 基础约束区范围内长间歇或过水的浇筑块；
- 3 基岩变形模量与混凝土变形模量相差较大者；
- 4 基础填塘混凝土、混凝土塞及陡坡等浇筑块；
- 5 试验和实测资料充分证明混凝土自生体积变形有明显稳定的膨胀或收缩者。

在某些情况下，坝块在施工和运用期间的温度低于稳定温度时（例如深孔、宽缝坝段、闸底板等），在设计中应考虑其影响。

9.2.2 上下层温差：系指在老混凝土面（混凝土龄期超过 28 天）上下各 1/4 块长范围内，上层新浇混凝土的最高平均温度与开始浇筑混凝土时下层老混凝土的平均温度之差，当上层混凝土短间歇均匀上升的浇筑高度 h 大于 0.5 块长时，上下层容许温差一般为 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。当上层混凝土浇筑高度 h 小于 0.5 块长时，上下层容许温差标准应另行研究。

9.2.3 表面保护

当日平均气温在 2d~3d 内连续下降达到或超过 $6^{\circ}\text{C}\sim 9^{\circ}\text{C}$ 时，对未满 28d 龄期的混凝土暴露面应进行表面保护（温和地区，龄期 5d 以前不易开裂），对基础强约束区、上游坝面等重要部位应进行严格表面保护，其它部位也应进行一般表面保护。

长期暴露的基础混凝土、上游坝面及其它重要部位，由于气温年变化等因素的影响，其表面保护的时间和材料应根据当地气候条件研究确定。

应根据当地气候条件，提出不同季节或各月坝体最高温度控制标准。

9.2.4 施工过程中各坝块应尽量均匀上升，相邻坝块的高差不宜超过 10m~12m，相邻坝块浇筑时间的间隔宜小于 30d。

9.3 温度控制及防裂措施

9.3.1 根据抗裂要求，高坝基础部位 28d 龄期的混凝土标号不宜低于 R150~R200 号（相应极限拉伸值为 $0.80\times 10^{-4}\sim 0.85\times 10^{-4}$ ）。坝体内部 90d 龄期混凝土标号不应低于 $R_{90}100$ 号。迎水面还应根据抗渗、抗裂、抗冻要求和施工条件等确定混凝土标号。

中、低坝，上述各部位混凝土标号及其极限拉伸值，可根据具体情况适当降低。

9.3.2 应采用合适的混凝土原材料，改善混凝土性能，改进混凝土施工管理和施工工艺等，提高混凝土质量，控制混凝土强度的离差系数或标准差。

9.3.3 纵横缝的划分应根据坝基地形地质条件、坝体布置、坝体断面尺寸、温度应力和施工条件等因素通过技术经济比较确定。

- 1 横缝间距一般为 15m~20m。横缝间距超过 22m 或小于 12m 时，应作论证。
- 2 纵缝间距一般为 15m~30m。块长超过 30m 应严格温度控制。高坝通仓浇筑应有专门

论证，应注意防止施工期和蓄水以后上游面产生深层裂缝。

9.3.4 混凝土的表面保温措施应达到结合当地气候条件确定的等效放热系数（计算方法见附录 F），廊道、输水洞、竖井等孔洞进出口在低温季节及气温骤降期间应进行遮闭或封堵。

9.3.5 合理安排混凝土施工程序及全年混凝土浇筑量，宜安排低温季节浇筑基础约束区混凝土，并控制相邻块、相邻坝段高差。基础约束区混凝土应短间歇均匀上升，不得出现薄层长间歇；高温季节宜利用夜间浇筑，严寒地区宜避免在冬季浇筑坝体混凝土。

9.3.6 应采取合适的综合措施减少混凝土水化热温升，包括选用低发热量水泥、浇筑低流态混凝土、掺高效外加剂、加大骨料粒径、优选骨料级配、掺适宜的掺合料、控制浇筑层厚和层间间歇期、通水冷却等措施。浇筑层厚根据温控标准通过计算确定，在基础部位宜采用层厚 1.5m~2.0m，基础以上浇筑层厚可在满足温度控制前提下适度放宽。夏季宜减小浇筑层厚，但不宜小于 1.0m，保证正常的间歇时间，利用天然低温水流水养护。

9.3.7 应按设计要求降低混凝土浇筑温度，包括降低混凝土出机口温度，如在粗骨料上洒水喷雾、骨料堆高、地垅取料、混凝土拌和加冰、冷水拌和、预冷骨料、对预冷混凝土进行保温等；严格控制混凝土运输时间和仓面浇筑坯覆盖前的暴露时间，设法减少混凝土运输和浇筑过程中的温度回升。

9.3.8 坝体内埋设冷却水管通水冷却：初期通制冷水或低温河水，降低混凝土最高温度；中期可通河水冷却，控制坝体内外温差；后期通制冷水或河水降温，使坝体达到接缝灌浆温度。应通过分析计算确定通水类别和通水时间。

通水时坝体混凝土与冷却水之间的温差不宜超过 25℃，坝体降温速度不宜大于 1℃/d。

9.3.9 高标号钢筋混凝土墩、墙等部位的防裂和限裂宜采取结构分缝、温度控制、钢筋配置和表面保护等综合措施。

9.3.10 坝体接缝灌浆温度一般采用坝体稳定温度，寒冷地区经论证可略予提高。坝体接缝灌浆遵照 SL62-94《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》执行。灌浆时间宜在低温季节，实体坝段如在高温季节进行坝体接缝灌浆时要加强坝体表面保温，防止坝体表面附近温度过高。

9.3.11 宽缝重力坝在宽缝封闭以前，施工期应加强长期保温。

9.3.12 空腹重力坝空腔封顶前，封孔高程以下混凝土应降至坝体稳定温度；封孔高程以上新浇混凝土，应尽量降低其最高温度。

10 安全监测设计

10.1 一般规定

10.1.1 混凝土重力坝应根据大坝级别、坝高、地质条件、结构型式及特点，设置必要的监测设施。安全监测设计的主要任务是：

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

10.1.2 混凝土重力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。

10.1.3 安全监测设计应遵循下列原则：

1 安全监测系统应能全面、准确地反映大坝及基础在施工期、蓄水期和运行期的实际工作性态；

2 应根据坝高、地质条件、结构特点，以及在相同类型坝段中的代表性等因素，确定重点监测坝段和一般监测坝段，测点布置应突出重点；

3 监测项目应统筹安排，配合布置。重要监测断面或部位的某些重要测点，可采用两种以上监测手段，关键部位用于监测重要物理量的仪器可设备份。应结合影响工程安全的主要因素，有针对性地设置监测项目和布置监测仪器；

4 应选择性能稳定可靠，且适宜于在恶劣环境中长期工作的监测仪器和设备。仪器的量程和精度应满足监测要求。需要长期观测的重要监测项目，其仪器设备应便于更换。

5 宜采用先进技术并为后期技术改进留有余地；

6 1、2级重力坝的重要测点，宜设置具有数据采集和数据管理功能的自动化监测系统。3级重力坝，必要时也可设置自动化监测系统。采用自动化监测设备的同时，应具备人工观测条件。

10.1.4 安全监测设计应注重下列事项：

1 配合坝体构造设计，合理布置观测廊道和观测站；

2 为监测设施提供良好的交通、照明、防潮、防风、排水、保温及保安条件；

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 根据理论计算或模型试验成果，对主要监测项目宜提出预计的测值变化范围。1级和2级重力坝重点监测坝段的位移值和扬压力值，宜提出警戒值；

5 应重视施工期和首次蓄水期的安全监测设计，及时取得主要监测项目各测点的基准值。水库首次蓄水前应制订详细的监测工作计划。若首次蓄水前永久性监测设施未完工或不具备监测条件时，应采取相应的临时监测措施；

6 根据工程具体条件，对各监测项目宜提出监测技术要求。

10.1.5 混凝土重力坝安全监测设计，还应符合《混凝土大坝安全监测技术规范》(SDJ336)的规定。

10.2 监测项目与监测设施布置要点

10.2.1 混凝土重力坝安全监测包括巡视检查和仪器监测。

10.2.2 巡视检查应符合下列要求：

1 从施工期到运行期，各级混凝土重力坝及其附属建筑物均应定期进行巡视检查。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、坝区发生有感地震及其它特殊情况时，应增加巡视检查次数；

2 发现大坝及附属建筑物有损伤，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，并分析原因和研究处理措施；

3 对 1、2 级重力坝的重要部位，有条件的工程可建立电视图像监测系统。

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

1 常规监测项目可按大坝级别，并结合工程特点和具体地质条件，按表 10.2.3 的规定确定。常规监测项目中，应以变形和基础渗流监测为重点。

表 10.2.3 仪器监测的常规项目

序号	监测项目		大坝级别		
			1	2	3
1	变形	1. 坝体位移	●	●	●
		2. 倾斜	●	○	
		3. 接缝	●	●	○
		4. 裂缝	●	●	●
		5. 坝基位移	●	●	●
2	渗流	1. 渗流量，廊道抽水	●	●	●
		2. 扬压力及坝基深部渗透压力	●	●	●
		3. 坝体渗透压力	○	○	
		4. 绕坝渗流	●	●	●
		5. 水质分析	●	●	○
3	应力、应变与温度	1. 应力	●	○	
		2. 应变	●	○	

		3. 混凝土温度	●	●	○
		4. 坝基温度	●	○	
4	环境量	1. 上下游水位	●	●	●
		2. 气温	●	●	●
		3. 降水量	●	●	●
		4. 库水温	●	○	
		5. 坝前淤积	●	○	
		6. 下游冲刷	●	○	
		7. 冰冻	○		

注：●为必设项目，○为选设项目。

2 专门监测项目应根据大坝级别、重要性、结构型式及施工工艺、地质条件，参照下列项目研究确定：

- 1) 近坝区岸坡稳定性监测；
- 2) 地下洞室稳定性监测；
- 3) 地震反应监测；
- 4) 水力学监测；
- 5) 其它。

10.2.4 变形监测设施布置应符合下列要求：

1 坝体和坝基的水平位移宜采用引张线法、真空激光准直法和垂线法监测。若坝轴线较短，条件有利时，坝体水平位移也可采用视准线法或大气激光准直法监测。准直线的端点应设倒垂线作为工作基点；

2 坝体挠度宜采用垂线法监测；

3 近坝区岸坡和滑坡体的表层水平位移，宜采用边角网、视准线法和交会法监测。深层水平位移可采用倒垂线组、多点位移计、挠度计或测斜仪等监测；

4 坝基范围内的重要断裂构造或软弱结构面，宜布置倒垂线组、测斜仪或多点位移计监测；

5 坝体和坝基的垂直位移，宜采用精密水准法和真空激光准直法监测。根据具体情况也可采用流体静力水准法监测。精密水准测量的起测基点，宜布置在大坝附近的岸坡基岩上。水准基点应布设在大坝下游不受库区变形影响的地区。真空激光准直系统和流体静力水准测线应设在坝体水平廊道内，两端应布设垂直位移工作基点，其测点宜与精密水准测点配合布置；

6 近坝区岸坡和滑坡体的垂直位移，宜采用精密水准法、沉降仪或多点位移计等方法监

测。高山区也可采用三角高程法监测。必要时可将三角高程法与边角网法结合组成“三维网”；

7 坝体和坝基倾斜，宜采用精密水准法、倾斜仪或流体静力水准法监测。

10.2.5 渗流监测设施布置应符合下列要求：

1 应根据工程规模、坝地质条件和渗流控制工程措施等布置纵向监测断面和横向监测断面，设纵向监测断面可设1~2个，横向监测断面宜不少于3个，可用测压管或渗压计监测坝基扬压力。

纵向监测断面宜布置在第一道排水幕线上。每个坝段宜布置1个测点。地质条件复杂坝段，宜适当增加测点数量。

横向监测断面宜选择在最高坝段、岸坡坝段及地质构造复杂的谷岸台地坝段布置。横向监测断面间距为50~100m，坝地质条件简单地区，可加大间距。每个监测断面布置的测点数量不少于3个。必要时应在防渗帷幕前布置测点。有下游防渗帷幕时，应在其上游侧布置测点；

2 坝基深部渗透压力监测，可根据坝地质条件及存在的主要地质缺陷，应有针对性地布置测压管或渗压计。遇大断层或强透水带时，应沿可能的渗流方向布置测点；

3 坝体渗透压力的监测，宜在上游坝面至坝体排水管之间，沿坝体两相邻排水管中间，顺水流方向于水平施工缝和上、下两层水平施工缝中间的坝体混凝土中，各布置一排渗压计，监测水平施工缝和坝体混凝土的渗透压力；

4 绕坝渗流监测，在两岸坝肩的防渗帷幕后，沿流线方向可布置2~3个监测断面。每个监测断面不少于3个测点。测压管孔深应达强透水层，并深入到筑坝前地下水位线以下。必要时，应在防渗帷幕前布置少量测点；

5 渗漏量监测，宜在坝基廊道的排水沟上分段布设量水堰，分别监测坝基、坝体及河床和两岸的渗漏水量。坝体混凝土缺陷、冷缝和裂缝的漏水量较大时，应设法集中后用容积法量测。漏水量较大的排水孔，宜采用容积法单孔量测；

6 水质分析，应选择有代表性的排水孔或绕坝渗流监测孔，定期取水样进行水质分析，并与库水水质进行比较，若发现有析出物或有侵蚀性的水流出时，应取样进行全分析。

10.2.6 应力应变及温度监测设施布置应符合下列要求：

1 在重点监测坝段沿坝段中心线应布置1个垂直于坝轴线的监测断面以及1个或几个水平监测截面；

2 应力应变监测仪器宜集中布置于重点监测断面和监测截面。必要时应选择有代表性的大孔口、廊道周边、混凝土与基岩结合面附近或其它应力复杂部位适当布置测点；

3 重点监测坝段可作为温度监测坝段。应根据坝体温度场的状态，并结合坝面温度和坝基温度布置测点。施工期临时性温度监测宜与永久性温度监测相结合；

4 在重点监测坝段，沿需要灌浆的纵横缝不同高程可布置测缝计。岸坡坝段宜根据具体情况沿混凝土与基岩接触面布置测缝计。对于可能产生裂缝的部位，宜在混凝土中布置裂缝计；

5 预应力锚杆或预应力锚索，应抽样监测其受力状态变化；

6 重要的钢筋混凝土建筑物内，可布置钢筋应力测点。

10.2.7 环境量监测除应符合表 10.2.3 要求外，还应符合国家现行有关标准。

附录 A 水力设计计算公式

A. 1 堰面曲线、堰面压力及反弧段半径

A. 1. 1 开敞式堰面堰顶下游堰面采用 WES 幂曲线, 可按下式计算:

$$x^n = kH_d^{n-1}y \quad (\text{A. 1. 1-1})$$

式中: H_d —堰面曲线定型设计水头, m, 可根据容许负压的大小按堰顶最大作用水头 H_{\max} 的 75%~95% 计算。

x 、 y —原点下游堰面曲线横、纵坐标;

n —与上游堰坡有关的指数, 见表 A. 1. 1;

k —当 $P_1/H_d > 1.0$ 时, k 值见表 A. 1. 1, 当 $P_1/H_d \leq 1.0$ 时, 取 $k=2.0\sim 2.2$, P_1 为上游相对堰高 (见图 A. 1. 2-3)。

表 A. 1. 1 堰面曲线参数

上游面坡度($\Delta y/\Delta x$)	k	n	R_1	a	R_2	b
3:0	2.000	1.850	$0.5H_d$	$0.175H_d$	$0.2H_d$	$0.282H_d$
3:1	1.936	1.836	$0.68H_d$	$0.139H_d$	$0.21H_d$	$0.237H_d$
3:2	1.939	1.810	$0.48H_d$	$0.115H_d$	$0.22H_d$	$0.214H_d$
3:3	1.873	1.776	$0.45H_d$	$0.119H_d$	-	-

A. 1. 2 开敞式堰面堰顶上游堰头曲线可采用下列三种曲线:

- 1 双圆弧曲线, 如图 A. 1. 2-1 所示, 图中 R_1 , R_2 , k , n , a , b 等参数取值见表 A. 1. 1。

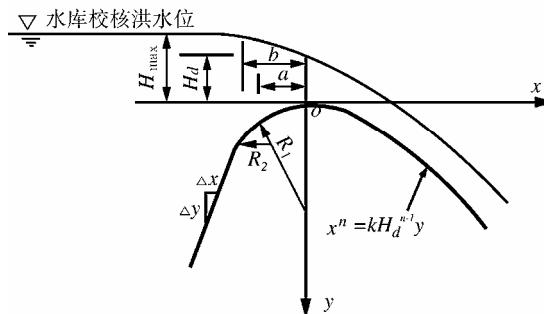


图 A. 1. 2-1 堰顶上游堰头为双圆弧曲线、下游为幂曲线

- 2 三圆弧曲线, 上游堰面铅直, 如图 A. 1. 2-2 所示。

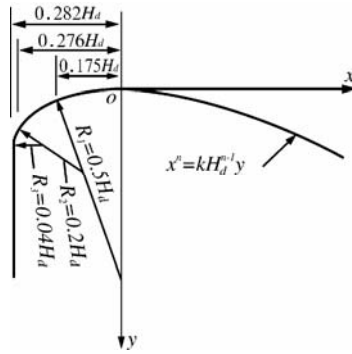


图 A. 1. 2-2 堰顶上游堰头为三圆弧曲线、下游为幂曲线

3 椭圆曲线, 可按下列方程计算:

$$\frac{x^2}{(aH_d)^2} + \frac{(bH_d - y)^2}{(bH_d)^2} = 1.0 \quad (\text{A.1.2})$$

式中: aH_d 、 bH_d —椭圆曲线长半轴和短半轴(当 $P_1/H_d \geq 2$ 时, $a=0.28 \sim 0.30$, $a/b=0.87+3a$;
当 $P_1/H_d < 2$ 时, $a=0.215 \sim 0.28$, $b=0.127 \sim 0.163$; 当 P_1/H_d 小时, a 与
 b 取小值)。

上游堰面采用倒悬时, 应满足 $d > H_{\max}/2$ 的条件, 如图 A. 1. 2-3 所示。

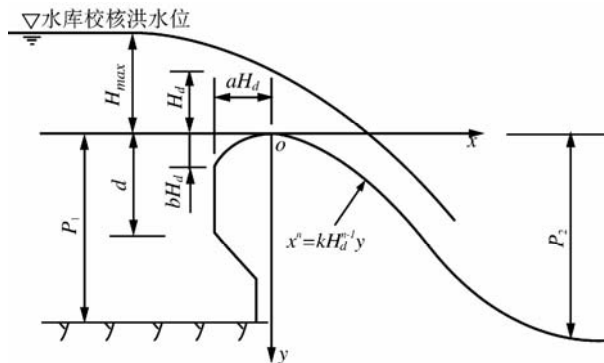


图 A. 1. 2-3 上游堰面倒悬, 堰头为椭圆曲线, 下游为幂曲线

A. 1. 3 选择 WES 实用堰堰面曲线定型设计水头时, 还应结合堰面允许负压值综合确定。堰顶附近的最小相对压力 h_{\min}/H_d 与相对水头 H_{\max}/H_d 和上、下游相对堰高 P_1/H_d 及 P_2/H_d 有关, 见表 A. 1. 3。

A. 1. 4 带胸墙孔口式实用堰堰面曲线采用抛物线时, 若校核洪水情况下最大作用水头 H_{\max} (孔口中心线上) 与孔口高 (D) 的比值 $H_{\max}/D > 1.5$, 或闸门全开时仍属孔口泄流, 可按下列式计算:

$$y = \frac{x^2}{4\phi^2 H_d} \quad (\text{A.1.4})$$

式中: H_d ——定型设计水头, m, 一般取孔口中心线至水库校核水位的水头的 75%~95%;

ϕ ——孔口收缩断面上的流速系数，一般取 $\phi = 0.96$ ；若孔前设有检修闸门槽时取 $\phi = 0.95$ 。

其余符号参照图 A.1.4。

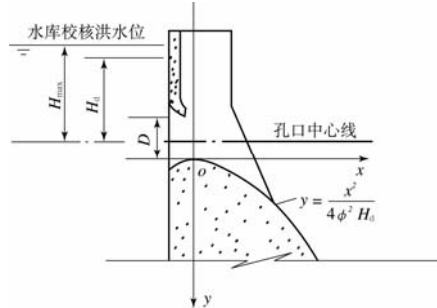


图 A. 1. 4 堰顶孔口式堰面曲线

堰顶上游堰头曲线可选用单圆、复式圆弧或椭圆曲线。

A. 1. 5 溢流堰下游反弧段半径，应结合下游消能设施来确定。对不同的消能设施可选用不同的公式。

1 对于挑流消能，可按下式求得反弧段半径

$$R = (4 \sim 10)h \quad (\text{A. 1. 5-1})$$

式中：h—为校核洪水位闸门全开时反弧段最低点处的水深，m；反弧段流速 $v < 16\text{m/s}$ 时，可取下限，流速越大，反弧半径也宜选用较大值，以致取上限。

2 对于岸流消能，反弧段半径 R 与流能比 $K = \frac{q}{\sqrt{gE^{1.5}}}$ 有关，一般选择范围为 $E/R =$

2.1~8.4，E 为自岸底起算的总能头，m；q 为单宽流量， $\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ ；g 为重力加速度， m/s^2 。

E/R 与 K 的相关曲线如图 A. 1. 5 所示。

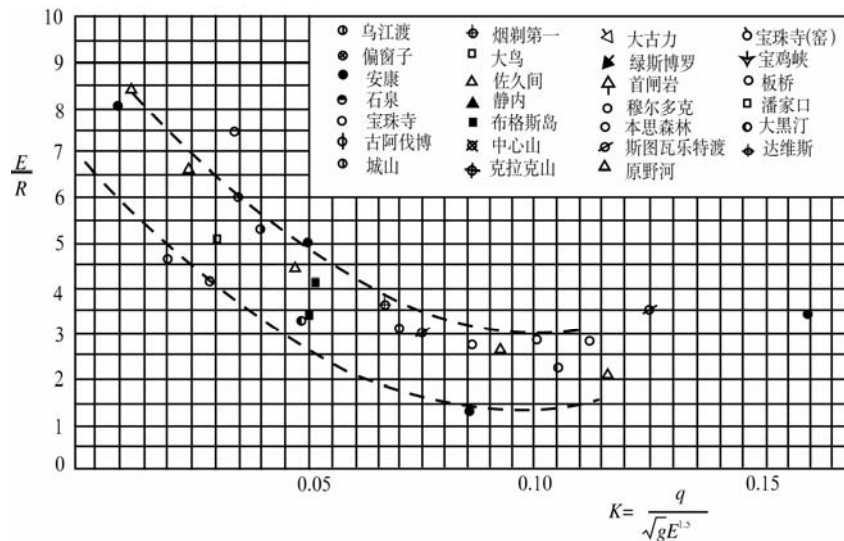


图 A. 1. 5 E/R 与 k 的相关曲线

3 对于底流消能，反弧段半径可参照式 (A. 1. 5-1) 进行计算。

A. 2 坝身泄水孔体型设计

A. 2. 1 坝身明流孔的体型设计

坝身明流孔的典型布置如图 A. 2. 1-1。包含有较短的压力段和较长的明流段。压力段又分为进口段、事故检修门槽段和压坡段三个部分，压坡段下游侧设工作闸门。检修闸门采用平板门，工作闸门则多采用弧形门。

明流段自上游至下游按顺序布置直线段、抛物线段和反弧段。

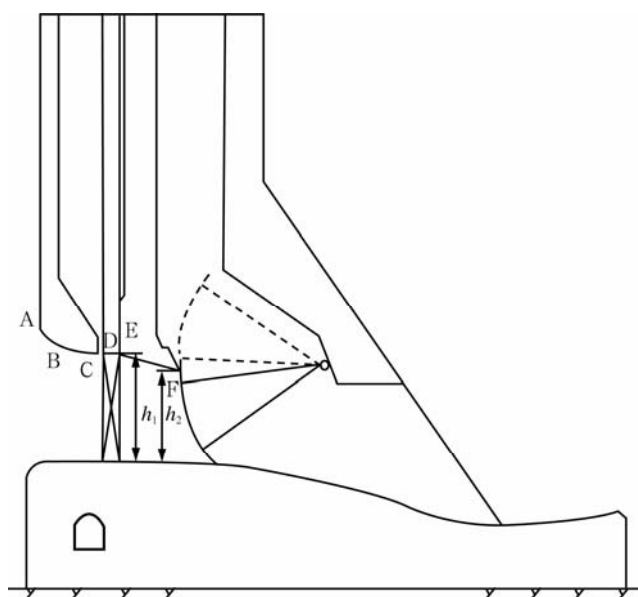


图 A. 2. 1-1 无压坝身泄水孔的典型布置

1 进口段

进口段各部分的体型可按如下方式进行设计。

进口段的顶部曲线可分为 AB、BC 两段，分述如下：

(1) AB 段：顶曲线宜采用椭圆曲线。椭圆的长半轴可取为进口段的孔高，短半轴可取为长半轴的 1/3，即 AB 段的曲线（如图 A. 2. 1-2）的方程式可表示为

$$\frac{x^2}{(kh_1)^2} + \frac{y^2}{(kh_1/3)^2} = 1 \quad (\text{A. 2. 1-1})$$

式中：x、y—曲线的坐标轴；

h_1 —进口段末端的孔高；

k—系数，通常取 $k=1$ ，但为了使椭圆长、短半轴为整数，有时也可取 k 值稍大于 1.0。

表 A.1.3 WES 实用堰堰顶附近最小相对压力 h_{\min}/H_d

$\frac{H_d}{H_{\max}}$	$\frac{H_{\max}}{H_d}$	h_{\min} / H_d													
		$\frac{P_1}{H_d} \geq 1.33$	$P_1 / H_d = 0.5$				$P_1 / H_d = 0.2$					$P_1 / H_d = 0.1$			
			P_2 / H_d				P_2 / H_d					P_2 / H_d			
			0.5	1.0	1.5	3.0	0.2	0.4	0.6	1.2	2.2	0.1	0.2	0.8	1.1
0.6	1.67	-1.00	-0.02	-0.27	-0.48	-0.74	0.57	0.28	-0.18	-0.55	-0.72	0.85	0.34	-0.09	-0.48
0.65	1.54	-0.80	-0.01	-0.22	-0.42	-0.60	0.53	0.24	-0.16	-0.47	-0.56	0.79	0.24	-0.08	-0.42
0.70	1.43	-0.60	-0.00	-0.15	-0.30	-0.41	0.48	0.21	-0.14	-0.38	-0.40	0.76	0.23	-0.07	-0.37
0.75	1.33	-0.45	0.02	-0.12	-0.23	-0.31	0.44	0.19	-0.10	-0.27	-0.27	0.71	0.20	-0.06	-0.30
0.775	1.29	-0.40	0.03	-0.09	-0.19	-0.26	0.43	0.18	-0.09	-0.24	-0.24	0.67	0.20	-0.05	-0.27
0.80	1.25	-0.30	0.05	-0.07	-0.16	-0.20	0.41	0.18	-0.07	-0.20	-0.20	0.65	0.20	-0.04	-0.24
0.825	1.21	-0.25	0.06	-0.04	-0.12	-0.16	0.39	0.18	-0.05	-0.16	-0.16	0.63	0.20	-0.03	-0.20
0.85	1.18	-0.20	0.07	-0.03	-0.11	-0.15	0.37	0.17	-0.04	-0.14	-0.14	0.62	0.20	-0.02	-0.18
0.875	1.14	-0.15	0.08	-0.02	-0.10	-0.12	0.36	0.17	-0.02	-0.11	-0.11	0.60	0.20	-0.01	-0.16
0.90	1.11	-0.10	0.08	0	-0.08	-0.09	0.35	0.17	0	-0.08	-0.08	0.57	0.20	0	-0.13
0.95	1.05	-0.05	0.10	0.02	-0.03	-0.04	0.33	0.16	0.03	-0.04	-0.04	0.55	0.20	0.03	-0.07
1.0	1.0	0	0.11	0.05	0	0	0.22	0.17	0.05	0	-0.01	0.52	0.20	0.03	-0.04

(2) BC 段：为 AB 段的 1/4 椭圆在 B 点的切线，切点 B 的位置可由下式求得

$$\begin{cases} \frac{x}{3\sqrt{(kh_1)^2 - x^2}} = J_1 \\ \frac{x^2}{(kh_1)^2} + \frac{y^2}{(kh_1/3)^2} = 1 \end{cases} \quad (\text{A. 2. 1-2})$$

式中： J_1 为切线 BC 的坡度，一般取 1 : 4.5 ~ 1 : 6.5。

(3) 进口段的顶部曲线亦可采用上述 AB 段的 1/4 椭圆，不设 BC 段。

(4) 侧面曲线：侧面曲线可采用 1/4 椭圆，曲线方程可取为：

$$\frac{x^2}{a_2^2} + \frac{y^2}{b_2^2} = 1 \quad (\text{A. 2. 1-3})$$

式中： b_2 ——可取为 (0.22 ~ 0.27) B； $a_2 = 3b_2$ ；

B——为泄水孔的正常宽度。

(5) 底部形式：可根据实际情况布置。

(6) 上游面 A 切点以上的垂直面高度，不宜小于 1 倍进口段末端的孔高。

(7) CD 间：为一条空口，其宽度约为 5 倍止水宽度。

(8) 点 C 与点 E 应位于同一高程。

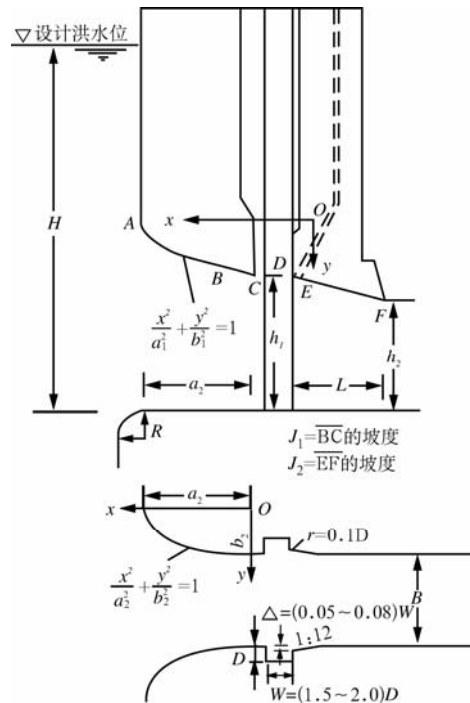


图 A. 2. 1-2 压力段布置图

2 事故检修门槽段

事故检修门槽段应选择体型较优且初生空化数较低的门槽。

3 压坡段

压坡段体型的选择应使压坡段不产生负压为准，其顶坡宜取稍陡于 BC 段的顶坡，可相应采用 1:4.0~1:6.0；高水头的坝身泄水孔压坡段的顶坡宜取大值（1:4.0），水头较低或次要泄水建筑物，可取小值（1:6.0）。压坡段两端断面面积之比 A_2/A_1 可参照实际工程所选用的值确定。

当事故检修门的止水为下游止水时，应注意在该段的首端设置通气孔。

4 明流段

明流段：竖曲线段常设计为抛物线，抛物线方程一般可采用

$$y = \frac{g}{2(kv)^2 \cos^2 \theta} x^2 + x \tan \theta \quad (\text{A. 2. 1-4})$$

式中： θ —抛物线起点（坐标 x 、 y 的原点）处切线与水平方向的夹角，当起始段呈水平时，

则 $\theta = 0$ ；

v —起点断面平均流速；

g —重力加速度；

k —为防止负压产生而采用的安全系数，其值可在 1.2~1.6 范围内选用，一般可取 $k = 1.6$ 。

明流段的反弧段，一般采用单圆弧式，末端为挑坎，鼻坎高程应高于该处的下游水位以保证发生自由挑流，但可略低于下游最高水位。

A. 2. 2 有压坝身泄水孔的体型设计

有压坝身泄水孔的典型布置如图 A. 2. 2，进口段形状与无压坝身泄水孔基本相同，但工作门布置在出口端，事故检修门仍设在进口段之后；压坡段位于工作门上游，事故检修门槽段与压坡段之间设有较长的有压平坡段。

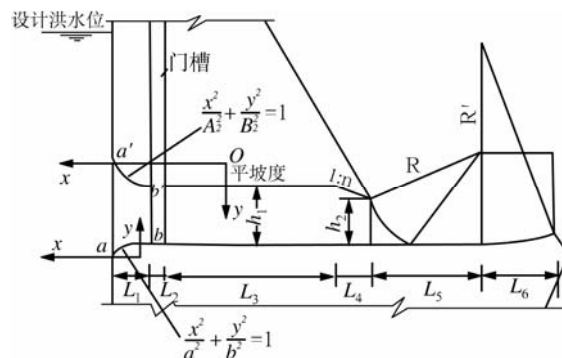


图 A. 2. 2 有压坝身泄水孔的典型布置

A.3 泄流能力及掺气水深计算公式

A.3.1 开敞式溢流堰泄流能力计算公式

$$Q = Cm\epsilon\sigma_s B\sqrt{2g}H_w^{3/2} \quad (\text{A.3.1})$$

式中：Q—流量，m³/s；

B—溢流堰净宽，m；

H_w—堰顶以上作用水头，m；

g—重力加速度，m/s²；

m—流量系数，见表 A.3.1-1；

C—上游面坡度影响修正系数，见表 A.3.1-2，当上游面为铅直面时，C 取 1.0；

ε—侧收缩系数，根据闸墩厚度及墩头形状而定，可取 ε = 0.90~0.95；

σ_s—淹没系数，视泄流的淹没程度而定，不淹没时 σ_s = 1.0。

表 A.3.1-1 流量系数 m 值

H _w /H _d	P ₁ /H _d				
	0.2	0.4	0.6	1.0	≥1.33
0.4	0.425	0.430	0.431	0.433	0.436
0.5	0.438	0.442	0.445	0.448	0.451
0.6	0.450	0.455	0.458	0.460	0.464
0.7	0.458	0.463	0.468	0.472	0.476
0.8	0.467	0.474	0.477	0.482	0.486
0.9	0.473	0.480	0.485	0.491	0.494
1.0	0.479	0.486	0.491	0.496	0.501
1.1	0.482	0.491	0.496	0.502	0.507
1.2	0.485	0.495	0.499	0.506	0.510
1.3	0.496	0.498	0.500	0.508	0.513

注：P₁为上游堰高，m；H_d为定型设计水头，m，按堰顶最大作用水头 H_{max} 的 75%~95% 计算。

表 A.3.1-2 上游面坡度影响修正系数 C 值

坡度 Δy/Δx	P ₁ /H _d									
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3
3:1	1.009	1.007	1.005	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.998	0.998
3:2	1.015	1.011	1.008	1.006	1.004	1.002	1.001	0.999	0.996	0.993
3:3	1.021	1.015	1.010	1.007	1.005	1.002	1.000	0.998	0.993	0.988

A.3.2 孔口泄流能力计算公式：

$$Q = \mu A_k \sqrt{2gH_w} \quad (\text{A.3.2})$$

式中：Q—流量，m³/s；

A_k—出口处的面积，m²；

H_w—自由出流时为孔口中心处的作用水头，淹没泄流时为上下游水位差，m；

μ—孔口或管道流量系数，对设有胸墙的堰顶高孔，当 H_w/D = 2.0~2.4 (D 为孔口高，

m) 时, 取 $\mu = 0.74 \sim 0.82$; 对短有压深孔, 取 $\mu = 0.83 \sim 0.93$; 对长有压深孔, μ 必须计算沿程及局部水头损失后确定。

A.3.3 掺气水深计算公式

$$h_b = \left(1 + \frac{\zeta v}{100}\right) h \quad (\text{A.3.3})$$

式中: h —不计入掺气的水深, m;

h_b —计入掺气后的水深, m;

v —不计入掺气的计算断面上的平均流速, m/s;

ζ —修正系数, 一般为 $1.0\text{s/m} \sim 1.4\text{s/m}$, 视流速和断面收缩情况而定, 当流速大于 20m/s 时, 宜采用较大值。

A.4 挑流消能的水力要素

A.4.1 水舌抛距(见图 A.3.1)可按公式 (A.4.1-1) 估算:

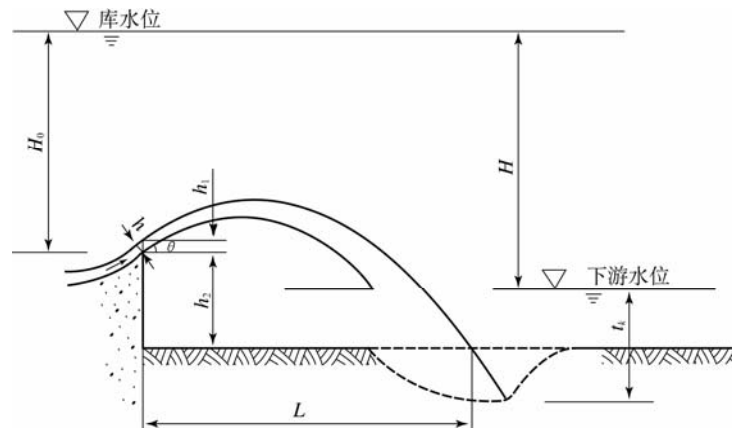


图 A.4.1 挑流消能水力要素

$$L = \frac{1}{g} \left[v_1^2 \sin \theta \cos \theta + v_1 \cos \theta \sqrt{v_1^2 \sin^2 \theta + 2g(h_1 + h_2)} \right] \quad (\text{A.4.1-1})$$

式中 L ——水舌抛距, m, 如有水流向心集中影响者, 则抛距还应乘以 $0.90 \sim 0.95$ 的折减系数;

v_1 ——坎顶水面流速, m/s, 按鼻坎处平均流速 v 的 1.1 倍计, 即 $v_1 = 1.1v = 1.1\phi\sqrt{2gH_0}$ (H_0 为水库水位至坎顶的落差, m);

θ ——鼻坎的挑角, $^\circ$;

h_1 ——坎顶垂直方向水深, m, $h_1 = h \cos \theta$ (h 为坎顶平均水深, m);

h_2 ——坎顶至河床面高差, m, 如冲坑已经形成, 可算至坑底;

ϕ ——堰面流速系数。

A.4.2 最大冲坑水垫厚度按下式估算 (参照图 A.4.1)

$$t_k = kq^{0.5}H^{0.25} \quad (\text{A. 4. 2})$$

式中： t_k —水垫厚度，自水面算至坑底，m；

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

H —上下游水位差，m；

k —冲刷系数，其数值见表 A. 4. 2。

表 A. 4. 2 基岩冲刷系数 k 值

可冲性类别		难冲	可冲	较易冲	易冲
节理 裂缝	间距 cm	>150	50~150	20~50	<20
	发育程度	不发育，节理（裂隙）1~2 组，规则	较发育，节理（裂隙）2~3 组，X 形，较规则	发育，节理（裂隙）3 组以上，不规则，呈 X 形或米字型	很发育，节理（裂隙）3 组以上，杂乱，岩性被切割呈碎石状
基岩 构造 特征	完整程度	巨块状	大块状	块（石）碎（石）状	碎石状
	结构类型	整体结构	砌体结构	镶嵌结构	碎裂结构
	裂隙性质	多为原生型或构造型，多密闭，延展不长	以构造型为主，多密闭，部分微张，少有充填，胶结好	以构造或风化型为主，大部分微张，部分张开，部分为黏土充填，胶结较差	以风化或构造型为主，裂隙微张或张开，部分为黏土充填，胶结很差
k	范围	0.6~0.9	0.9~1.2	1.2~1.6	1.6~2.0
	平均	0.8	1.1	1.4	1.8
注：适用范围：水舌入水角 $30^\circ \sim 70^\circ$ 。					

A. 5 底流消能的水力要素

A. 5. 1 护坦长度计算公式：

- 1 收缩断面的弗劳德数 $Fr \geq 4.5$ ，护坦上不设辅助消能设施时

$$L = 6(h'' - h') \quad (\text{A. 5. 1-1})$$

式中： L —— 护坦消力池长度，m；

h' —— 跃前共轭水深，m；

h'' —— 跃后共轭水深，m。

- 2 当 $Fr > 4.5$ ，池首断面平均流速 v' 大于 16m/s，护坦上设梳流坎及尾坎，但不设消力墩时，其消力池长度

$$L = (3.2 \sim 4.3) h'' \quad (\text{A. 5. 1-2})$$

- 3 当 $Fr > 4.5$ ，池首断面平均流速 v' 小于 16m/s，护坦上设梳流坎、消力墩及尾坎时

$$L = (2.3 \sim 2.8) h'' \quad (\text{A. 5. 1-3})$$

A. 5. 2 底流消力池护坦和尾坎上的脉动压力可按下式估算：

$$P_m = \pm a_m \frac{v^2}{2g} \gamma_w \quad (\text{A.5.2})$$

式中： P_m —— 脉动压力强度，沿法线方向作用于建筑物表面， kN/m^2 ；
 v —— 计算断面处的平均流速， m/s ；
 α_m —— 脉动压力系数，根据水流缓急程度分别取 0.05~0.20；
 γ_w —— 水的重度， kN/m^3 ；
 其余符号同前。

A. 5.3 护坦中设消力墩(包括梳流坎及尾坎)时，其所受冲击力 P_d ，可按下式估算：

$$P_d = \pm k_d \frac{v^2}{2g} \gamma_w A_d \quad (\text{A. 5.3})$$

式中： P_d —— 消力墩(包括梳流坎及尾坎)所受冲击力， kN ；
 v —— 墩、坎附近的流速， m/s ，或近似按墩、坎断面处的平均流速计算；
 A_d —— 墩、坎迎水面在流速方向上的投影面积， m^2 ；
 k_d —— 阻力系数，视墩、坎位置、形状及流速大小，取 $k_d=1.2\sim 2.0$ ；
 其余符号同前。

A. 6 防空蚀设计

A. 6.1 水流空化数估算公式

$$\sigma_k = \frac{h_0 + h_d - h_v}{v_0^2 / 2g} \quad (\text{A. 6.1})$$

式中： σ_k —— 水流空化数，无量纲；
 h_0 —— 计算断面处的动水压力水头，水柱高， m ；
 h_d —— 计算断面处的大气压力水头，水柱高， m ，对于不同高程按 $(10.33 - \nabla/900)$ 估算，即相对于海平面，每增加高度 900m，较标准大气压力水头降低 1m， ∇ 为海平面以上的高程；
 h_v —— 水的汽化压力水头，水柱高， m ，对于不同的水温可参照表 A. 6. 1；
 $v_0^2 / 2g$ —— 计算断面处的平均流速水头， m 。

表 A. 6. 1 水的汽化压力水头与水温关系

水温 $^{\circ}\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40
水柱高 h_v m	0.06	0.09	0.13	0.17	0.24	0.32	0.43	0.75

A. 6.2 水流边壁表面的不平整度指施工后的混凝土表面不符合设计体型的孤立突体或凹陷。在施工时必须严格控制表面不平整度，控制标准可参考表 A. 6. 2 选用。确定不平整度的

控制标准时，应充分考虑体型、部位的重要性、水流空化数、结构材料和可能连续运行的历时等。

A.6.3 掺气减蚀设施

1 掺气减蚀设施布置应满足下列要求：

- (1) 在保护范围内应有足够的通气量，临近保护面的掺气浓度不宜低于3%~4%；
- (2) 设施本身有足够的强度和可靠性；
- (3) 宣泄设计及以下各级流量时，通气空腔应保持稳定，并应防止通气孔掺气槽堵塞，

以保证通气顺畅。

表 A.6.2 不平整度控制标准

溢流落差 m	不平整高度 mm	无空蚀坡度		
		上游坡	下游坡	横向坡
20 以下	60 以下	任意	任意	任意
20~30	30 以下	任意	任意	任意
	30~40	1:1	1:2	1:1
	40~60	1:1	1:2	1:1
30~40	8 以下	任意	任意	任意
	8~10	任意	1:2	1:1
	10~20	1:2	1:4	1:2
	20~40	1:6	1:10	1:3
	40~60	1:10	1:12	1:3
40~50	5 以下	任意	任意	任意
	5~10	1:4	1:8	1:2
	10~20	1:8	1:10	1:3
	20~40	1:12	1:14	1:3
	40~60	1:14	1:18	1:3
50~60	3.5 以下	任意	任意	任意
	3.5~5	1:4	1:6	1:2
	5~10	1:10	1:14	1:3
	10~20	1:12	1:16	1:3
	20~40	1:16	1:18	1:3
	40~60	1:20	1:22	1:3
60~70	2.5 以下	任意	任意	任意
	2.5~5	1:1.7	1:11	1:2
	5~10	1:14	1:18	1:3
	10~20	1:16	1:20	1:3
	20~40	1:20	1:24	1:3
	40~60	1:24	1:28	1:3
70~80	10 以下	1:20	1:24	1:3
	10~20	1:22	1:26	
	20~40	1:26	1:30	
	40~60	1:28	1:34	
80~90	10~20	1:28	1:32	1:4
	20~40	1:30	1:36	
	40~60	1:34	1:40	
90~100	10~20	1:32	1:38	1:4
	20~40	1:36	1:42	
	40~60	1:40	1:46	

2 掺气减蚀的形式可分为：

(1) 底部通气设施。一般都是过流面上设置挑坎、跌坎或掺气槽，使水流脱离底部边界形成空腔，由空腔中的气水交界面掺入空气。对水流干扰小，流态平顺，使泄水建筑物的底板防蚀；

(2) 底侧（又称突扩、突跌）通气设施。这种设施底部边壁有突跌，两侧边壁有突扩有利于高水头闸门正向止水的设置。空气经三个面进入空腔与水流掺混，可以提高水流的掺气量，但由于侧向水流对边墙的脉动加大，采用时应应对边墙的空蚀等进行论证。

3 掺气减蚀设施的保护段长度。根据国内外已运行工程的经验，一个选型良好的掺气减蚀设施，大约可以保护 70m~100m 长的反弧段，或 100m~150m 的直线段，并可根据工程布置和试验研究成果适当加长。

附录 B 荷载计算公式

B.1 垂直作用于坝体表面某点的静水压强

$$P_w = \gamma_w H \quad (B-1)$$

式中： P_w —— 计算点处的静水压强， kN/m^2 ；

γ_w —— 水的重度， kN/m^3 ，一般采用 9.81kN/m^3 ，对多泥沙河流应根据实际情况确定；

H —— 计算点处的作用水头， m ，按计算水位与计算点之间的高差确定。

B.2 淤沙压力

作用于坝面单位长度上的水平淤沙压力按下式计算：

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

式中： P_{sk} —— 淤沙压力值， kN/m ；

γ_{sb} —— 淤沙的浮重度， kN/m^3 ，

$\gamma_{sb} = \gamma_{sd} - (1-n) \gamma_w$ ；

γ_{sd} —— 淤沙的干重度， kN/m^3 ；

n —— 淤沙的孔隙率；

h_s —— 坝前淤沙的淤积厚度， m ；

φ_s —— 淤沙的内摩擦角，度。

当坝面倾斜时，应计及竖向淤沙压力。

B.3 扬压力

B.3.1 坝基面扬压力计算

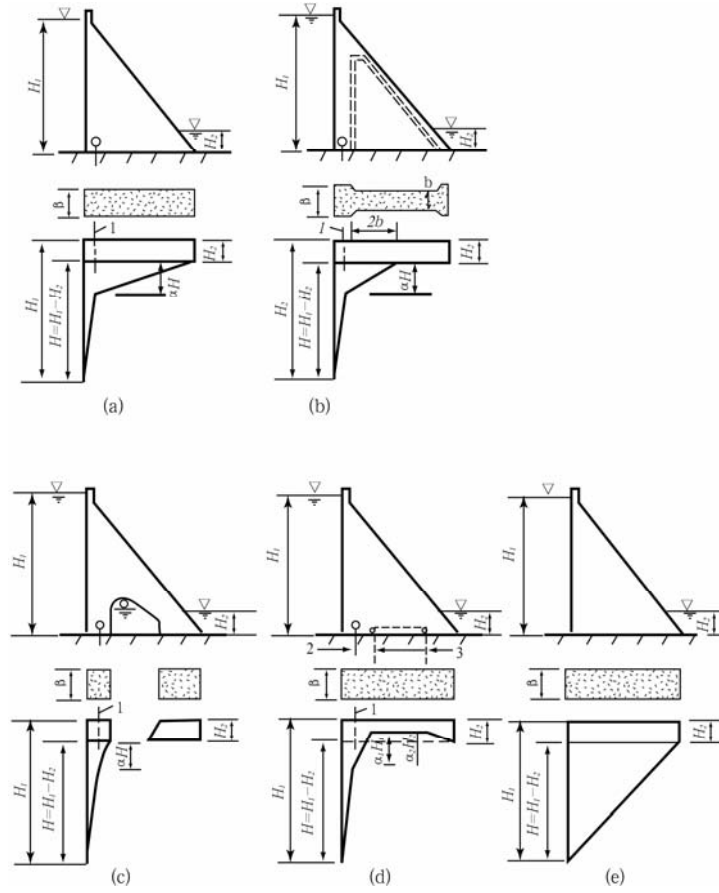
岩基上各类重力坝底面扬压力分布图形按下列三种情况分别确定：

1 当坝基设有防渗帷幕和排水孔时，坝底面上游（坝踵）处的扬压力作用水头为 H_1 ，排水孔中心线处为 $H_2 + \alpha (H_1 - H_2)$ ，下游（坝趾）处为 H_2 ，其间各段依次以直线连接 [见图 B.3.1(a)、(b)、(c)]；

2 当坝基设有防渗帷幕和上游主排水孔，并设有下游副排水孔及抽排系统时，坝底面上游处的扬压力作用水头为 H_1 ，主、副排水孔中心线处分别为 $\alpha_1 H_1$ 、 $\alpha_2 H_2$ ，下游处为 H_2 ，其间各段依次以直线连接 [见图 B.3.1(d)]；

3 当坝基未设防渗帷幕和上游排水孔时，坝底面上游处的扬压力作用水头为 H_1 ，下游处为 H_2 ，其间以直线连接 [见图 B.3.1 (e)]。

上述情况中，渗透压力强度系数 α 、扬压力强度系数 α_1 及残余扬压力强度系数 α_2 可按表 B.3.1 采用。



1—排水孔中心线； 2—主排水孔； 3—副排水孔

(a) 实体重力坝； (b) 宽缝重力坝及大头支墩坝；

(c) 空腹重力坝； (d) 坝基设有抽排系统； (e) 未设帷幕及排水孔

图 B.3.1 坝底面扬压力分布

表 B.3.1 坝底面的渗透压力、扬压力强度系数

坝型及部位		坝基处理情况		
		(A) 设置防渗帷幕及排水孔	(B) 设置防渗帷幕及主、副排水孔并抽排	
部位	坝型	渗透压力强度系数 α	主排水孔前的扬压力强度系数 α_1	残余扬压力强度系数 α_2
河床坝段	实体重力坝	0.25	0.20	0.50
	宽缝重力坝	0.20	0.15	0.50
	大头支墩坝	0.20	0.15	0.50
	空腹重力坝	0.25	—	—
岸坡	实体重力坝	0.35	—	—
	宽缝重力坝	0.30	—	—

坝段	大头支墩坝	0.30	-	-
	空腹重力坝	0.35	-	-

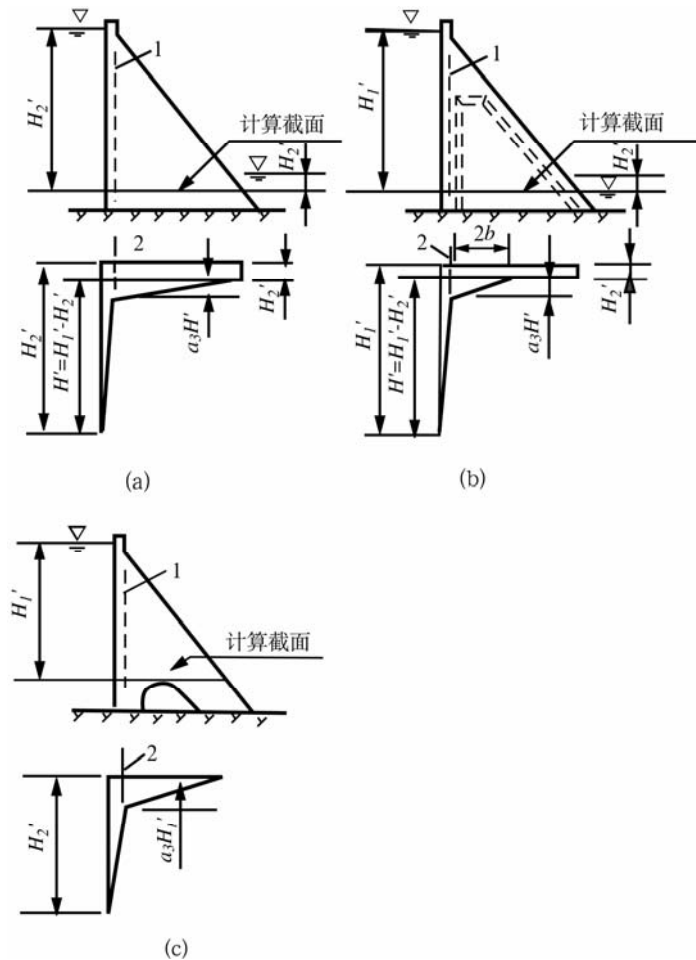
注 1: 当坝基仅设排水孔而未设防渗帷幕时, 渗透压力强度系数 α 可按表中 (A) 项适当提高。

B.3.2 坝体内部计算截面上的扬压力分布图形, 当设有坝体排水管时, 可按图 B.3.2 确定。

其中排水管处的坝体内部渗透压力强度系数 α_3 可按下列情况采用:

1. 实体重力坝及空腹重力坝的实体部位采用 0.2;
2. 宽缝重力坝、大头支墩坝的无宽缝部位采用 0.2, 有宽缝部位采用 0.15。

当未设坝体排水管时, 上游坝面处扬压力作用水头为 H_1 , 下游坝面处为 H_2 , 其间以直线连接。



1—坝内排水管; 2—排水管中心线

(a) 实体重力坝; (b) 宽缝重力坝; (c) 空腹重力坝

图 B.3.2 坝体计算截面上扬压力分布

B.4 冰压力

B.4.1 静冰压力

冰层升温膨胀时, 作用于坝面单位长度上的静冰压力可按表 B.4.1 采用。

B.4.2 动冰压力

作用于铅直坝面上的动冰压力可按下式计算：

$$F_{bk}=0.07 v d_i \sqrt{A f_{ic}} \quad (B.4.1)$$

式中： F_{bk} —— 冰块撞击建筑物时产生的动冰压力 (MN)；

v —— 冰块流速 (m/s)，宜按实测资料确定，当无实测资料时，对于河(渠)冰可采用水流流速；对于水库冰可采用历年冰块运动期内最大风速的 3%，但不宜大于 0.6m/s；对于过冰建筑物可采用该建筑物前流冰的行近流速；

A —— 冰块面积 (m²)，可由当地或邻近地点的实测或调查资料确定；

d_i —— 流冰厚度，可采用当地最大冰厚的 0.7~0.8 倍，流冰初期取大值；

f_{ic} —— 冰的抗压强度 (MPa)，宜由试验确定，当无试验资料时，对于水库可采用 0.3MPa；对于河流，流冰初期可采用 0.45MPa，后期可采用 0.3MPa。

表 B.4.1 静冰压力

冰层厚度 (m)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
静冰压力标准值 (kN/m)	85	180	215	245	280

注：1. 冰层厚度取多年平均年最大值。
 2. 对于小型水库，应将表中静冰压力值乘以 0.87 后采用；对于库面开阔的大型平原水库，应乘以 1.25 后采用。
 3. 表中静冰压力值适用于结冰期内水库水位基本不变的情况；结冰期内水库水位变动情况下的静冰压力应作专门研究。
 4. 静冰压力数值可按表列冰厚内插。

B.5 反弧段水流离心力

B.5.1 溢流坝等泄水建筑物反弧段底面上的动水压强近似取均匀分布，其代表值可按下式计算：

$$p_{cr}=q \rho_w v/R \quad (B.5.1)$$

式中： P_{cr} —— 水流离心力压强代表值，N/m²；

q —— 相应设计状况下反弧段上的单宽流量 [m³/(s·m)]；

v —— 反弧段最低点处的断面平均流速，m/s；

R —— 反弧半径，m。

B.5.2 溢流坝等泄水建筑物反弧段上离心力合力的水平及垂直分力代表值可按下式计算：

$$P_{xr}=q \rho_w v (\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1) \quad (B.5.2-1)$$

$$P_{yr}=q \rho_w v (\sin\varphi_2 + \sin\varphi_1) \quad (B.5.2-2)$$

式中： P_{xr} —— 单位宽度上离心力合力的水平分力代表值，N/m；

P_{yT} —— 单位宽度上离心力合力的垂直分力代表值, N/m;

ϕ_1 、 ϕ_2 ——图 B. 5. 2 中所示的角度, 取其绝对值。

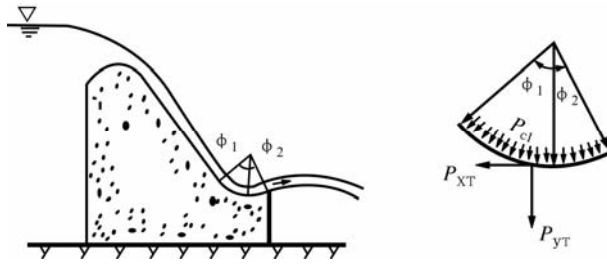


图 B. 5. 2 反弧段水流离心力示意

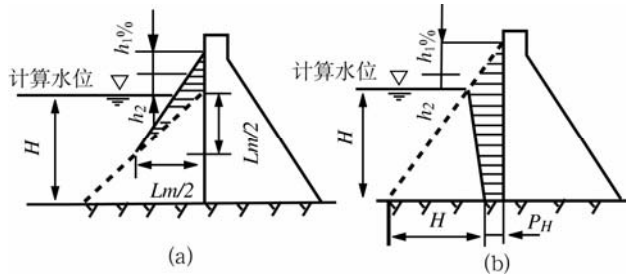


图 B. 6. 1 直墙式挡水建筑物的浪压力分布

B. 6 浪压力

B. 6. 1 作用于铅直迎水面建筑物上的浪压力, 应根据建筑物迎水面前的水深, 按以下两种波态分别计算:

1 当 $H \geq H_{cr}$ 和 $H \geq \frac{L_m}{2}$ 时, 浪压力分布如图 B. 6. 1 (a) 所示, 单位长度上的浪压力值按

下式计算:

$$P_{wk} = \frac{1}{4} \gamma_w L_m (h_{1\%} + h_z) \quad (B. 6. 1-1)$$

式中: P_{wk} ——单位长度迎水面上的浪压力, kN/m;

γ_w ——水的重度, kN/m³;

L_m ——平均波长, m;

$h_{1\%}$ ——累积频率为 1% 的波高, m;

H ——挡水建筑物迎水面前的水深, m;

h_z ——波浪中心线至计算水位的高度 (m), 按下式计算:

$$h_z = \frac{\pi h_{1\%}^2}{L_m} \operatorname{cth} \frac{2\pi H}{L_m} \quad (B. 6. 1-2)$$

H_{cr} ——使波浪破碎的临界水深 (m), 按下式计算:

$$H_{cr} = \frac{L_m}{4\pi} \ln \frac{L_m + 2\pi h_{1\%}}{L_m - 2\pi h_{1\%}} \quad (\text{B. 6. 1-3})$$

2 当 $H \geq H_{cr}$, 但 $H < \frac{L_m}{2}$ 时, 浪压力分布如图 B. 6. 1(b) 所示, 单位长度上的浪压力按下

式计算:

$$P_{wk} = \frac{1}{2} [(h_{1\%} + h_z) (\gamma_w H + p_{1f}) + H p_{1f}] \quad (\text{B. 6. 1-4})$$

式中: p_{1f} —— 建筑物底面处的剩余浪压力强度 (kN/m^2), 按下式计算:

$$p_{1f} = \gamma_w h_{1\%} \operatorname{sech} \frac{2\pi H}{L_m} \quad (\text{B. 6. 1-5})$$

B. 6. 2 计算波浪要素 (波高、波长等) 的基本资料。

1 年最大风速。系指水面上空 10m 高度处 10min 平均风速的年最大值; 对于水面上空 z (m) 处的风速, 应乘以表 B. 6. 2-1 中的修正系数 K_z 后采用。陆地测站的风速, 应参照有关资料进行修正。

表 B. 6. 2-1 风速高度修正系数

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

2 风区长度 (有效吹程) 按下列情况确定:

- 1) 当沿风向两侧的水域较宽时, 可采用计算点至对岸的直线距离;
- 2) 当沿风向有局部缩窄且缩窄处的宽度 b 小于 12 倍计算波长时, 可采用 5 倍 b 为风区长度, 同时不小于计算点至缩窄处的直线距离;
- 3) 当沿风向两侧的水域较狭窄或水域形状不规则、或有岛屿等障碍物时, 可自计算点逆风向做主射线与水域边界相交, 然后在主射线两侧每隔 7.5° 做一条射线, 分别与水域边界相交。如图 B. 6. 2 所示, 记 D_0 为计算点沿主射线方向至对岸的距离, D_i 为计算点沿第 i 条射线至对岸的距离, α_i 为第 i 条射线与主射线的夹角, $\alpha_i = 7.5i$ (一般取 $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$), 同时令 $\alpha_0 = 0$, 则等效风区长度 D 可按下列式计算:

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

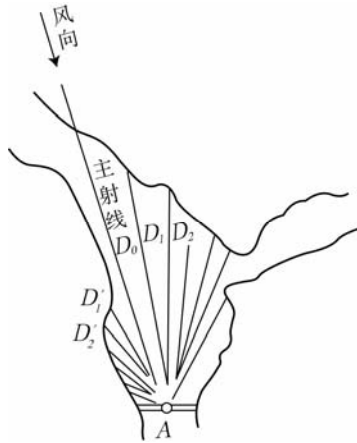


图 B. 6. 2 等效风区长度计算示意

3 风区内的水域平均深度。一般可通过沿风向作出地形剖面图求得，其计算水位应与相应设计状况下的静水位一致。

B. 6. 3 波浪要素计算

1 宜根据拟建水库的具体条件，按下述三种情况计算波浪要素：

1) 平原、滨海地区水库，宜按莆田试验站公式计算：

$$\frac{gh_m}{v_0^2} = 0.13 \operatorname{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{v_0^2} \right)^{0.7} \right] \operatorname{th} \left\{ \frac{0.0018(gD/v_0^2)^{0.45}}{0.13 \operatorname{th} [0.7(gH_m/v_0^2)^{0.7}]} \right\} \quad (\text{B. 6. 3-1})$$

$$\frac{gT_m}{v_0} = 13.9 \left(\frac{gh_m}{v_0^2} \right)^{0.5} \quad (\text{B. 6. 3-2})$$

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

2) 丘陵、平原地区水库，宜按鹤地水库公式计算（适用于库水较深、 $v_0 < 26.5\text{m/s}$ 及 $D < 7.5\text{km}$ ）：

$$\frac{gh_{2\%}}{v_0^2} = 0.00625 v_0^{1/6} \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3} \quad (\text{B. 6. 3-3})$$

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.0386 \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/2} \quad (\text{B. 6. 3-4})$$

式中： $h_{2\%}$ —— 累积频率为 2% 的波高， m；

L_m —— 平均波长， m。

3) 内陆峡谷水库， 宜按官厅水库公式计算（适用于 $v_0 < 20\text{m/s}$ 及 $D < 20\text{km}$ ）：

$$\frac{gh}{v_0^2} = 0.0076 v_0^{-1/12} \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3} \quad (\text{B. 6. 3-5})$$

$$\frac{gL_m}{v_0^2} = 0.331 v_0^{-1/2.15} \left(\frac{gD}{v_0^2} \right)^{1/3.75} \quad (\text{B. 6. 3-6})$$

式中： h —— 当 $gD/v_0^2 = 20 \sim 250$ 时， 为累积频率 5% 的波高 $h_{5\%}$ ； 当 $gD/v_0^2 = 250 \sim 1000$ 时，
为累积频率 10% 的波高 $h_{10\%}$ 。

2 累积频率为 P (%) 的波高 h_p 与平均波高的关系可按表 B. 6. 3-1 进行换算。

表 B. 6. 3-1 累积频率为 P (%) 的波高与平均波高的比值

$\frac{h_m}{H_m}$	P (%)									
	0.1	1	2	3	4	5	10	13	20	50
0	2.97	2.42	2.23	2.11	2.02	1.95	1.71	1.61	1.43	0.94
0.1	2.70	2.26	2.09	2.00	1.92	1.87	1.65	1.56	1.41	0.96
0.2	2.46	2.09	1.96	1.88	1.81	1.76	1.59	1.51	1.37	0.98
0.3	2.23	1.93	1.82	1.76	1.70	1.66	1.52	1.45	1.34	1.00
0.4	2.01	1.78	1.68	1.64	1.60	1.56	1.44	1.39	1.30	1.01
0.5	1.80	1.63	1.56	1.52	1.49	1.46	1.37	1.33	1.25	1.01

3 平均波长 L_m 与平均波周期 T_m 可按下式换算：

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi H}{L_m} \quad (\text{B. 6. 3-7})$$

对于深水波， 即当 $H \geq 0.5L_m$ 时， 上式可简化为：

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \quad (\text{B. 6. 3-8})$$

B. 6. 4 波浪要素可按 B. 6. 3 计算。 其中计算风速的取值应遵循下列规定：

- 1 当浪压力参与荷载基本组合时， 采用重现期为 50 年的年最大风速；
- 2 当浪压力参与特殊组合时， 采用多年平均年最大风速。

附录 C 实体重力坝的应力计算公式

C.1 上、下游坝面垂直正应力

C.1.1 上游面垂直正应力（参见图 C）：

$$\sigma_y^u = \frac{\sum W}{T} + \frac{6\sum M}{T^2} \quad (\text{C. 1. 1})$$

C.1.2 下游面垂直正应力（参见图 C）：

$$\sigma_y^d = \frac{\sum W}{T} - \frac{6\sum M}{T^2} \quad (\text{C. 1. 2})$$

C.2 上、下游面剪应力：

C.2.1 上游面剪应力：

$$\tau^u = (P - P_u^u - \sigma_y^u) m_1 \quad (\text{C. 2. 1})$$

C.2.2 下游面剪应力：

$$\tau^d = (\sigma_y^d - P' + P_u^d) m_2 \quad (\text{C. 2. 2})$$

C.3 上、下游面水平正应力

C.3.1 上游面水平正应力：

$$\sigma_x^u = (P - P_u^u) - (P - P_u^u - \sigma_y^u) m_1^2 \quad (\text{C. 3. 1})$$

C.3.2 下游面水平正应力：

$$\sigma_x^d = (P' - P_u^d) + (\sigma_y^d - P' + P_u^d) m_2^2 \quad (\text{C. 3. 2})$$

C.4 上、下游面主应力

C.4.1 上游面主应力：

$$\sigma_1^u = (1 + m_1^2) \sigma_y^u - m_1^2 (P - P_u^u) \quad (\text{C. 4. 1-1})$$

$$\sigma_2^u = P - P_u^u \quad (\text{C. 4. 1-2})$$

C.4.2 下游面主应力：

$$\sigma_1^d = (1 + m_2^2) \sigma_y^d - m_2^2 (P' - P_u^d) \quad (\text{C. 4. 2-1})$$

$$\sigma_2^d = P' - P_u^d \quad (\text{C. 4. 2-2})$$

以上公式 (C. 2. 1) ~ (C. 4. 2-2) 适用于计及扬压力的情况。如需计算不计及截面上扬压力的作用时, 则上、下游面的各种应力计算公式中将 P_u^u 、 P_u^d 取值为 0。考虑地震荷载作用时, 按《水工建筑物抗震设计规范》(SL-203) 有关规定计算。

式中: T —— 坝体计算截面上、下游方向的宽度, m;

m_1 —— 上游坝坡;

m_2 —— 下游坝坡;

P 、 P' —— 计算截面在上、下游坝面所承受的水压力强度 (如有泥沙压力时, 应计入在内);

P_u^u 、 P_u^d —— 计算截面在上、下游坝面处的扬压力强度;

ΣW —— 计算截面上全部垂直力之和 (包括扬压力, 下同), 以向下为正。对于实体重力坝, 计算时切取单位长度坝体 (下同);

ΣM —— 计算截面上全部垂直力及水平力对于计算截面形心的力矩之和, 以使上游面产生压应力者为正。

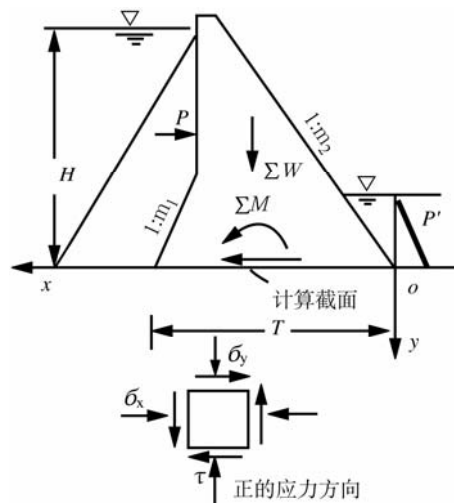


图 C 实体重力坝坝面应力计算示意图

附录 D 坝基岩体工程地质分类及岩体力学系数

表 D.1 坝基岩体工程地质分类

类别	A 坚硬岩 ($R_b > 60\text{MPa}$)		B 中硬岩 ($R_b = 60 \sim 30\text{MPa}$)		C 软质岩 ($R_b < 30\text{MPa}$)	
	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价
I	A _I : 岩体呈整体状或块状、巨厚层状、厚层状结构, 结构面不发育—轻度发育, 延展性差, 多闭合, 具各向同性力学特征	岩体完整, 强度高, 抗滑、抗变形性能强, 不需作专门性地基处理。属优良高混凝土坝地基				
II	A _{II} : 岩体呈块状或次块状、厚层结构, 结构面中等发育, 软弱结构面分布不多, 或不存在影响坝基或坝肩稳定的楔体或棱体	岩体较完整, 强度高, 软弱结构面不控制岩体稳定, 抗滑抗变形性能较高, 专门性地基处理工作量不大, 属良好高混凝土坝地基	B _{II} : 岩体结构特征同 A _I , 具各向同性力学特性	岩体完整, 强度较高。抗滑、抗变形性能较强, 专门性地基处理工作量不大, 属良好高混凝土坝地基		
III	A _{III1} : 岩体呈次块状或中厚层状结构, 结构面中等发育, 岩体中分布有缓倾角或陡倾角(坝肩)的软弱结构面或存在影响坝基或坝肩稳定的楔体或棱体	岩体较完整, 局部完整性差, 强度较高, 抗滑、抗变形性能在一定程度上受结构面控制。对影响岩体变形和稳定的结构面应作专门处理	B _{III1} : 岩体结构特征基本上同 A _{II}	岩体较完整, 有一定强度, 抗滑、抗变形性能受结构面和岩石强度控制	C _{III} : 岩石强度大于 15MPa, 岩体呈整体状或巨厚层状结构, 结构面不发育—中等发育, 岩体具各向同性力学特性	岩体完整, 抗滑、抗变形性能受岩石强度控制。
	A _{III2} : 岩体呈互层状或镶嵌碎裂结构, 结构面发育, 但贯穿性结构面不多见, 结构面延展差, 多闭合, 岩块间嵌合力较好	岩体完整性差, 强度仍较高, 抗滑、抗变形性能受结构面和岩块间嵌合力以及结构面抗剪强度特性控制, 对结构面应做专门性处理	B _{III2} : 岩体呈次块或中厚层状结构, 结构面中等发育, 多闭合, 岩块间嵌合力较好, 贯穿性结构面不多见	岩体较完整, 局部完整性差, 抗滑抗变形性能在一定程度上受结构面和岩石强度控制		
IV	A _{IV1} : 岩体呈互层状或薄层状结构, 结构面较发育—发育, 明显存在不利于坝基及坝肩稳定的软弱结构面、楔体或棱体	岩体完整性差, 抗滑、抗变形性能明显受结构面和岩块间嵌合力控制。能否作为高混凝土坝地基, 视处理效果而定	B _{IV1} : 岩体呈互层状或薄层状、存在不利于坝基(肩)稳定的软弱结构面、楔体或棱体	同 A _{IV1}	C _{IV} : 岩石强度大于 15MPa, 结构面发育或岩体强度小于 15MPa 结构面中等发育	岩体较完整, 强度低、抗滑、抗变形性能差, 不宜作为高混凝土坝地基。当局部存在该类岩体, 需专门处理
IV	A _{IV2} : 岩体呈碎裂结构, 结构面很发育, 且多张开, 夹碎屑和泥, 岩块间嵌合力弱	岩体较破碎, 抗滑、抗变形性能差, 不宜作高混凝土坝地基。当局部存在该类岩体, 需作专门性处理	B _{IV2} : 岩体呈薄层状或碎裂状, 结构面发育—很发育, 多张开, 岩块间嵌合力差	同 A _{IV2}		
V	A _V : 岩体呈散体状结构, 由岩块夹泥或泥包岩块组成, 具松散连续介质特征	岩体破碎, 不能作为高混凝土坝地基。当坝基局部地段分布该类岩体, 需作专门性处理	同 A _V	同 A _V	同 A _V	

注 1: 本分类适用于高度大于 70m 的混凝土坝。R_b 为饱和单轴抗压强度。

表 D.2 坝基岩体力学参数

岩体 分类	混凝土与坝基接触面			岩 体		变形模量 E ₀ (GPa)
	f'	C' (MPa)	f	f'	C' (MPa)	
I	1.50~1.30	1.50~1.30	0.85~0.75	1.60~1.40	2.50~2.00	40.0~20.0
II	1.30~1.10	1.30~1.10	0.75~0.65	1.40~1.20	2.00~1.50	20.0~10.0
III	1.10~0.90	1.10~0.70	0.65~0.55	1.20~0.80	1.50~0.70	10.0~5.0
IV	0.90~0.70	0.70~0.30	0.55~0.40	0.80~0.55	0.70~0.30	5.0~2.0
V	0.70~0.40	0.30~0.05	/	0.55~0.40	0.30~0.05	2.0~0.2

注 1: f'、C' 为抗剪断参数, f 为抗剪参数;
注 2: 表中参数限于硬质岩, 软质岩应根据软化系数进行折减。

表 D.3 结构面、软弱层和断层力学参数

类型	f'	C' (MPa)	f
胶结的结构面	0.80~0.60	0.250~0.100	0.70~0.55
无充填的结构面	0.70~0.45	0.150~0.050	0.65~0.40
岩块岩屑型	0.55~0.45	0.250~0.100	0.50~0.40
岩屑夹泥型	0.45~0.35	0.100~0.050	0.40~0.30
泥夹岩屑型	0.35~0.25	0.050~0.020	0.30~0.23
泥	0.25~0.18	0.005~0.002	0.23~0.18

注 1: f'、C' 为抗剪断参数, f 为抗剪参数;
注 2: 表中参数限于硬质岩中的结构面;
注 3: 软质岩中的结构面应进行折减;
注 4: 胶结或无充填的结构面抗剪断强度, 应根据结构面的粗糙程度选取大值或小值。

附录 E 坝基深层抗滑稳定计算

E. 0. 1 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动面、双滑动面和多滑动面，进行抗滑稳定分析。

双滑动面为最常见情况，如图 E。

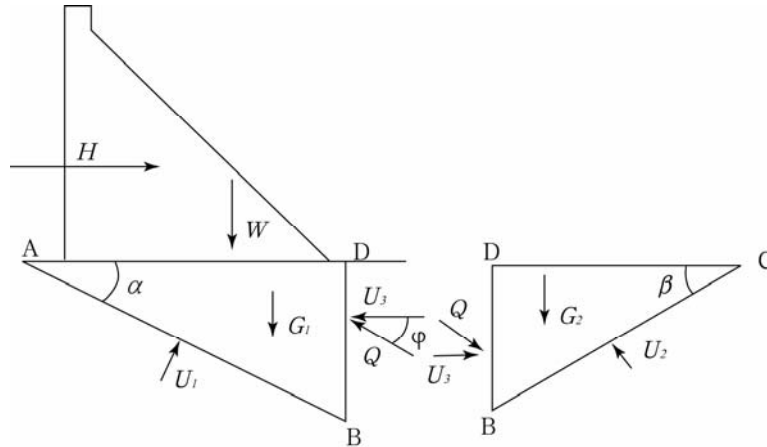


图 E 双斜滑动面示意图

深层抗滑稳定计算采用等安全系数法，应按抗剪断强度公式 (E. 0. 1-1)，(E. 0. 1-2) 或按抗剪强度公式 (E. 0. 1-3)，(E. 0. 1-4) 进行计算。

1 采用抗剪断强度公式计算：

考虑 ABD 块的稳定，则有：

$$K_1' = \frac{f_1' [(W + G_1) \cos \alpha - H \sin \alpha - Q \sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3 \sin \alpha] + c_1' A_1}{(W + G_1) \sin \alpha + H \cos \alpha - U_3 \cos \alpha - Q \cos(\varphi - \alpha)} \quad (\text{E. 0. 1-1})$$

考虑 BCD 块的稳定，则有：

$$K_2' = \frac{f_2' [G_2 \cos \beta + Q \sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3 \sin \beta] + c_2' A_2}{Q \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin \beta + U_3 \cos \beta} \quad (\text{E. 0. 1-2})$$

通过 (E. 0. 1-1)、(E. 0. 1-2) 及 $K_1' = K_2' = K'$ ，求解 Q、 K' 值。

式中： K_1' 、 K_2' 、 K' ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数；

W——作用于坝体上全部荷载（不包括扬压力，下同）的垂直分力，kN；

H——作用于坝体上全部荷载的水平分力，kN；

G_1 、 G_2 ——分别为岩体 ABD、BCD 重量的垂直作用力，kN；

f_1' 、 f_2' ——分别为 AB、BC 滑动面的抗剪断摩擦系数；

c_1' 、 c_2' ——分别为 AB、BC 滑动面的抗剪断凝聚力，kPa；

A_1 、 A_2 ——分别为 AB、BC 面的面积, m^2 ;

α 、 β ——分别为 AB、BC 面与水平面的夹角;

U_1 、 U_2 、 U_3 ——分别为 AB、BC、BD 面上的扬压力, kN;

Q 、 φ ——分别为 BD 面上的作用力及其与水平面的夹角。夹角 φ 值需经论证后选用, 从偏于安全考虑 φ 可取 0° 。

2 采用抗剪强度公式计算:

对于采取工程措施后应用抗剪断强度公式计算仍无法满足表 6.4.1—1 要求的坝段, 可采用抗剪强度公式 E.0.1-3, E.0.1-4 计算抗滑稳定安全系数, 其安全系数指标可经论证确定。

考虑 ABD 块的稳定, 则有:

$$K_1 = \frac{f_1 [(W + G_1) \cos \alpha - H \sin \alpha - Q \sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3 \sin \alpha]}{(W + G_1) \sin \alpha + H \cos \alpha - U_3 \cos \alpha - Q \cos(\varphi - \alpha)} \quad (\text{E.0.1-3})$$

考虑 BCD 块的稳定, 则有:

$$K_2 = \frac{f_2 [G_2 \cos \beta + Q \sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3 \sin \beta]}{Q \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin \beta + U_3 \cos \beta} \quad (\text{E.0.1-4})$$

通过 (E.0.1-3)、(E.0.1-4) 及 $K_1 = K_2 = K$, 求解 Q 、 K 值。

式中: K_1 、 K_2 、 K ——按抗剪强度计算的抗滑稳定安全系数;

f_1 、 f_2 ——分别为 AB、BC 滑动面的抗剪摩擦系数;

单滑面的情况比较简单, 这里不再列出计算式。多滑面的情况又比较复杂, 可参照双滑面的计算式, 列出各个滑裂体的算式, 求解 K 值。

附录 F 施工期坝体温度和温度应力计算

F.1 混凝土温度计算

F.1.1 坝体混凝土初期温度计算

坝体混凝土初期温度计算，主要是比较各种温控措施条件下混凝土浇筑后出现的最高温度，判别混凝土温度是否控制在基础容许温差、上下层温差及内外温差或坝体内部最高温度等控制标准范围内，为温控措施和温度应力分析提供依据。混凝土初期温度计算一般可用差分法或实用计算法，对于边界条件复杂者可用有限元法。

F.1.2 单向差分法

$$T_{n,\tau+\Delta\tau} = T_{n,\tau} + \frac{a_c \Delta\tau}{\delta^2} (T_{n-1,\tau} + T_{n+1,\tau} - 2T_{n,\tau}) + \Delta\theta_\tau \quad (\text{F.1.2-1})$$

式中： $T_{n,\tau+\Delta\tau}$ ——计算点计算时段的温度，℃；

$T_{n,\tau}$ ——计算点前一时段的温度，℃；

$T_{n-1,\tau}$ 、 $T_{n+1,\tau}$ ——与计算点相邻的上下两点在前一时段的温度，℃；

a_c ——混凝土导温系数， m^2/d ；

δ ——计算点间距，m；

$\Delta\tau$ ——计算时段时间步长，d；

$\Delta\theta_\tau$ ——计算时段混凝土绝热温升增量，℃；

计算中需满足的稳定条件为 $\frac{\alpha_c \Delta\tau}{\delta^2} \leq \frac{1}{2}$ 。

混凝土绝热温升用公式 $\theta_\tau = \frac{\theta_0 \tau}{DN + \tau}$ 表示时，绝热温升增量表示为：

$$\Delta\theta_\tau = \theta_0 \left(\frac{\tau + \Delta\tau}{DN + \tau + \Delta\tau} - \frac{\tau}{DN + \tau} \right) \quad (\text{F.1.2-2})$$

$$\theta_0 = \frac{Q_0 W}{C_c \gamma_c}$$

混凝土绝热温升也可用公式 $\theta_\tau = \theta_0 (1 - e^{-m\tau^b})$ 表示，此时绝热温升增量表示为：

$$\Delta\theta_{\tau} = \theta_0 [e^{-m\tau^b} - e^{-m(\tau+\Delta\tau)^b}] \quad (\text{F. 1. 2-3})$$

式中: DN —— 混凝土水化热产生一半时的时间, d;

m —— 胶凝材料水化热发散速率, d^{-1} ;

b —— 胶凝材料水化热发散参数;

Q_0 —— 胶凝材料最终水化热, kJ/kg ;

W —— 胶凝材料用量, kg/m^3 ;

C_c —— 混凝土比热, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

γ_c —— 混凝土重度, kg/m^3 。

F. 1. 3 双向差分法

$$T_{0,\tau+\Delta\tau} = T_{0,\tau} + \frac{2a_c\Delta\tau}{\delta^2} \left[\frac{1}{L_1+L_2} \left(\frac{T_{1,\tau}}{L_1} + \frac{T_{2,\tau}}{L_2} \right) + \frac{1}{L_3+L_4} \left(\frac{T_{3,\tau}}{L_3} + \frac{T_{4,\tau}}{L_4} \right) - T_{0,\tau} \left(\frac{1}{L_1L_2} + \frac{1}{L_3L_4} \right) \right] + \Delta\theta_{\tau} \quad (\text{F. 1. 3})$$

式中: $T_{0,\tau+\Delta\tau}$ —— 计算点计算时段温度, $^\circ\text{C}$;

$T_{0,\tau}$ —— 计算点前一时段温度, $^\circ\text{C}$;

$T_{1,\tau}$ 、 $T_{2,\tau}$ —— 与计算点相邻的左右计算点前一时段温度, $^\circ\text{C}$;

$T_{3,\tau}$ 、 $T_{4,\tau}$ —— 与计算点相邻的上下计算点前一时段温度, $^\circ\text{C}$;

δ —— 计算点平均点距, m;

L_1 、 L_2 —— 计算点距左右相邻两点距离与 δ 之比;

L_3 、 L_4 —— 计算点距上下相邻两点距离与 δ 之比。

采用双向差分法计算时, 须满足稳定条件 $\frac{\alpha_c\Delta\tau}{\delta^2} \leq \frac{1}{4}$, 混凝土表面温度一般可按第三类

边界条件处理。表面流水养护时, 混凝土表面温度可取水温与气温的平均值。对于初期通水冷却者, 可将差分法与 F. 1. 3 节中一期通水冷却计算相结合进行。

F. 1. 4 实用算法

鉴于热传导微分方程和边界条件都是线性的, 可以利用迭加原理, 将浇筑块复杂的散热

过程分解为图 F. 1. 4-1 的四个单元求解。

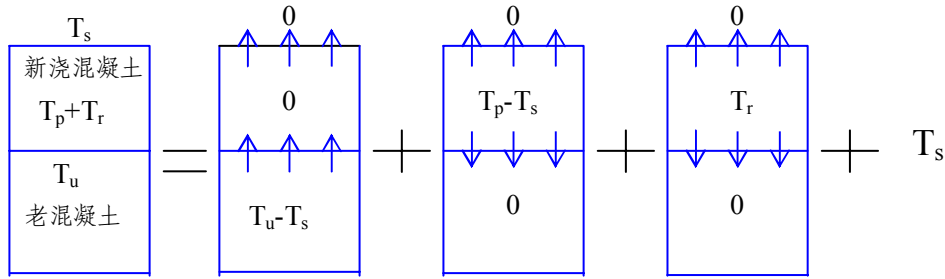


图 F. 1. 4-1 混凝土块温度计算示意图

无初期通水冷却时混凝土浇筑块早期平均温度计算式

$$T_m = (T_u - T_s)E_1 + (T_p - T_s)E_2 + T_r + T_s \quad (\text{F. 1. 4-1})$$

在短间歇均匀上升情况下，可简化计算，令 $T_u \approx T_m$ ，得计算式为：

$$T_m = \frac{(T_p - T_s)E_2}{1 - E_1} + \frac{T_r}{1 - E_1} + T_s \quad (\text{F. 1. 4-2})$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{F_0}}{\sqrt{\pi}} \left(1 + e^{-\frac{1}{F_0}} - 2e^{-\frac{1}{4F_0}} \right) + P\left(\frac{1}{\sqrt{F_0}}\right) - P\left(\frac{1}{2\sqrt{F_0}}\right) \quad (\text{F. 1. 4-3})$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{F_0}}{\sqrt{\pi}} \left(4e^{-\frac{1}{4F_0}} - e^{-\frac{1}{F_0}} - 3 \right) - P\left(\frac{1}{\sqrt{F_0}}\right) + 2P\left(\frac{1}{2\sqrt{F_0}}\right) \quad (\text{F. 1. 4-4})$$

$$F_0 = \frac{a_c \tau}{l^2}$$

式中： T_m —— 混凝土浇筑块平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_p —— 混凝土浇筑温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_r —— 混凝土水化热温升，采用时差法计算，详见表 F. 1. 4， $^{\circ}\text{C}$ ；

E_1 —— 新浇混凝土接受老混凝土固定热源作用并向顶面散热的残留比，可由式

F. 1. 4-3 求得，或由图 F. 1. 4-2 查得；

a_c —— 混凝土导温系数， m^2/d ；

τ —— 计算时间， d ；

l —— 混凝土浇筑层层厚， m 。

E_2 —— 新浇混凝土固定热源向空气和老混凝土传热的残留比，可由式 F. 1. 4-4 求得，

或由图 F. 1. 4-3 查得；

表 F. 1. 4 时差法计算 T_r

时段	时间 τ	绝热温升 θ_τ	绝热温升增量 $\Delta\theta_i$	F_0	E_2	温度计算			
						时段1	时段2	时段3
1	$\Delta\tau$	$\theta_{\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\Delta\theta_1 = \theta_{\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\frac{a_c \Delta\tau}{l^2}$	E_{21}	$E_{21}\Delta\theta_1$	$E_{22}\Delta\theta_1$	$E_{23}\Delta\theta_1$
2	$2\Delta\tau$	$\theta_{1\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\Delta\theta_2 = \theta_{1\frac{1}{2}\Delta\tau} - \theta_{\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\frac{2a_c \Delta\tau}{l^2}$	E_{22}		$E_{21}\Delta\theta_2$	$E_{22}\Delta\theta_2$
3	$3\Delta\tau$	$\theta_{2\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\Delta\theta_3 = \theta_{2\frac{1}{2}\Delta\tau} - \theta_{1\frac{1}{2}\Delta\tau}$	$\frac{3a_c \Delta\tau}{l^2}$	E_{23}			$E_{21}\Delta\theta_3$
.....
						Σ	Σ	Σ

注1: 表中 E_2 根据 F_0 值由式F. 1. 3-4计算或由图F. 1. 3-3查得。

T_a —— 气温, °C;

T_s —— 新浇混凝土表面温度, °C, $T_s = T_a + \Delta T$;

ΔT —— 混凝土表面温度高于气温的差值, 当气温为常温时, 可用有热源半无限体公式作近似解, 即利用式 F. 1. 4-5 及式 F. 1. 4-6 求出不同 τ 与 ΔT 的对应关系, 再根据计算时间 τ 通过内插法求得所需 ΔT 。也可根据实测资料, 近似取 $\Delta T=2\sim 5^\circ\text{C}$ (混凝土标号较低时取小值), 当顶部履盖一层草袋或其它相当的保温材料时, $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$; 当顶面流水养护时,

$$T_s = \frac{1}{2}(T_a + T_w)。$$

$$\Delta T = \frac{\theta_\tau}{2 + \frac{\beta}{\lambda_c} x} \quad (\text{F. 1. 4-6})$$

$$\tau = \frac{1}{6a_c} \left[\frac{x^2}{2} + \frac{2\lambda_c}{\beta} x - \left(\frac{2\lambda_c}{\beta} \right)^2 \ln \left(\frac{\beta}{2\lambda_c} x + 1 \right) \right] \quad (\text{F. 1. 4-7})$$

式中: x —— 时间为 τ 时, 表面散热影响半无限体距表面以下的深度, m;

θ_τ —— τ 时刻混凝土水化热温升, 按实测混凝土绝热温升归纳计算式计算, °C。

有初期通水冷却时需计入通水冷却散热, 浇筑层平均温度计算式为:

$$T_m = \frac{(T_p - T_s)E_2 X}{1 - E_1 X} + \frac{(T_w - T_s)E_2(1 - X)}{1 - E_1 X} + \frac{T_r}{1 - E_1 X} + T_s \quad (\text{F. 1. 4-8})$$

式中: T_w —— 冷却水管进水口处水温, °C;

X —— 水管散热残留比, $X = f\left(\frac{a_c \tau}{D^2}, \frac{\lambda_c L}{C_w \rho_w q_w}\right)$, 见图 F. 1. 4-4, 或由式 F. 1. 4-9

求得。

$$X = e^{-kF_0^s} \quad (\text{F. 1. 4-9})$$

$$k = 2.08 - 1.174\xi + 0.256\xi^2$$

$$F_0 = \frac{a_c \tau}{D^2}$$

$$s = 0.971 + 0.1485\xi - 0.0445\xi^2$$

$$\xi = \frac{\lambda_c L}{C_w \rho_w q_w}$$

$$D = 2b = 1.21\sqrt{S_1 \times S_2} \quad (\text{F. 1. 4-10})$$

$F_0 = \frac{a_c \tau}{D^2} \leq 0.75$ 时也可用下式计算:

$$X = e^{-k_1 F_0} \quad (\text{F. 1. 4-11})$$

$$k_1 = 2.09 - 1.35\xi + 0.320\xi^2$$

式中: C_w —— 水的比热, $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$;

ρ_w —— 水的容重, kg/m^3 ;

q_w —— 单根水管通水流量, m^3/h ;

L —— 单根水管长度, m ;

D —— 通水冷却等效圆直径, m 。

图 F. 1. 4-4 是在 $\frac{b}{c} = 100$ 的条件下给出的, 当 $\frac{b}{c} \neq 100$ 时, 可用混凝土等效导温系数 a_c' 代

替 a_c 计算:

$$a_c' = \left(\frac{\alpha_1 b}{0.7176}\right)^2 a_c \quad (\text{F. 1. 1-15})$$

$$\alpha_1 b = 0.926e^{-0.0314\left(\frac{b}{c}-20\right)^{0.48}}, \quad 20 \leq \frac{b}{c} \leq 130$$

式中： b —— 通水冷却等效圆半径，m；
 c —— 冷却水管半径，m；

也可用近似公式 F. 1. 4-12 直接计算等效导温系数。

$$a_c' = \frac{a_c \ln 100}{\ln \frac{b}{c}} \quad (\text{F. 1. 4-12})$$

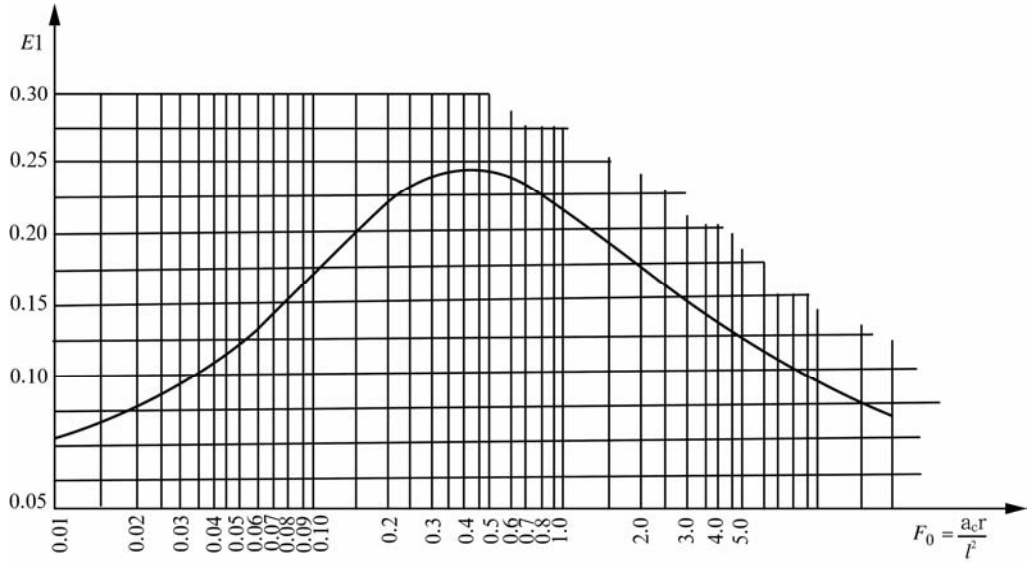


图 F. 1. 4-2 新混凝土接受老混凝土固定热源作用并向顶面散热的残留比 E_1 曲线

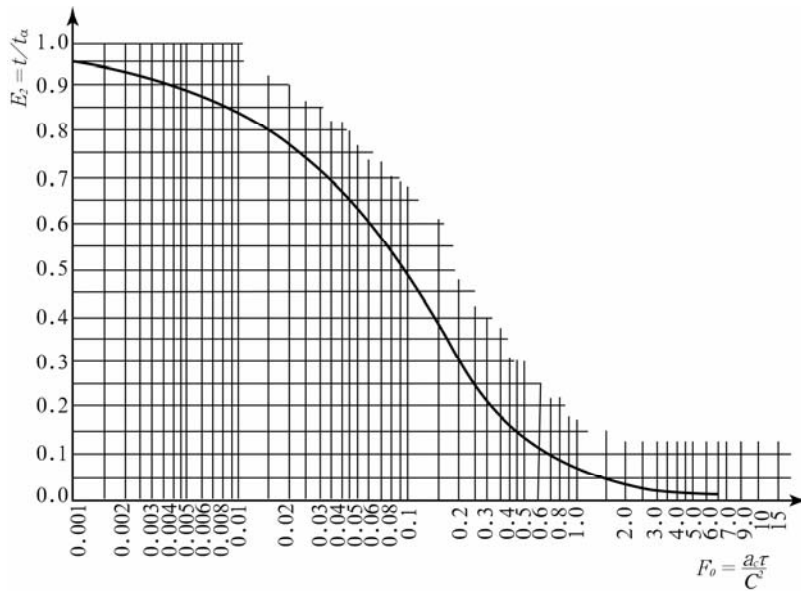
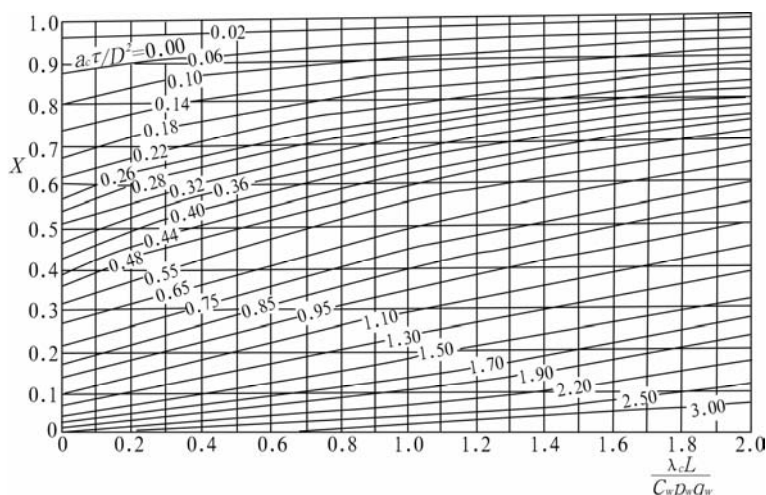


图 F. 1. 4-3 新混凝土固定热源向空气和老混凝土传热的残留比 E_2 曲线



图F.1.4-4 水管冷却混凝土圆柱体平均温度散热残留比 X 曲线

F.1.5 混凝土坝后期温度计算

混凝土坝后期水化热已不再发生，且已浇至一定高度，主要通过上游、下游表面和顶面与周围环境作热交换，属于无热源温度场计算。为了判断混凝土内外温差及由此而产生的温度应力，估算降温速度，决定坝体接缝灌浆时间，都需要作此计算。计算可采用差分法或有限元法。

F.2 冷却水管降温计算

F.2.1 一期水管冷却

1) 混凝土一期水管冷却（有热源）可用下式计算：

$$T_m = T_w + X(T_0 - T_w) + X_1 \theta_0 \quad (\text{F.2.1-1})$$

式中： T_m —— 混凝土平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_0 —— 开始冷却时混凝土初温， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_w —— 冷却水水温， $^{\circ}\text{C}$ ；

θ_0 —— 混凝土绝热温升， $^{\circ}\text{C}$ ；

X —— 水管散热残留比， $X = f\left(\frac{a_c \tau}{D^2}, \frac{\lambda_c L}{C_w \gamma_w q_w}\right)$ ，见图 F.1.4-4，或由式 F.1.4-9

计算。

X_1 —— 水管散热残留比, $X_1 = f\left(\frac{a_c \tau}{b^2}, b \sqrt{\frac{m}{a_c}}, \frac{b}{c}, \frac{\lambda_c L}{C_w \gamma_w q_w}\right)$, 见图 F. 2. 1;

a_c —— 混凝土导温系数, m^2/h ;

τ —— 混凝土浇筑后历时, h;

b, D —— 冷却圆柱体的半径、直径, m;

λ_c —— 混凝土导热系数, $kJ/m \cdot h \cdot ^\circ C$;

L —— 单根水管总长, m;

C_w —— 水的比热, $kJ/kg \cdot ^\circ C$;

γ_w —— 水的重度, kg/m^3 ;

q_w —— 水管通水流量, L/min.

m —— 水泥水化热发散系数, d^{-1} ;

c —— 冷却水管半径, m.

2) 等效热传导方程

设混凝土绝热温升为 $\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-m\tau})$, 采用式 F. 2. 1-2 考虑水管冷却效果的等效热传导方程, 可用一般有限元网格计算层面和水管共同散热问题。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + (T_0 - T_w) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \theta_0 \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (F. 2. 1-2)$$

其中: $\phi = e^{-p\tau}$

$$\psi(\tau) = \frac{m}{m-p} (e^{-p\tau} - e^{-m\tau})$$

$$p = \frac{a_c k}{D^2}$$

$$k = 2.09 - 1.35\xi + 0.320\xi^2$$

$$\xi = \frac{\lambda_c L}{C_w \rho_w q_w}$$

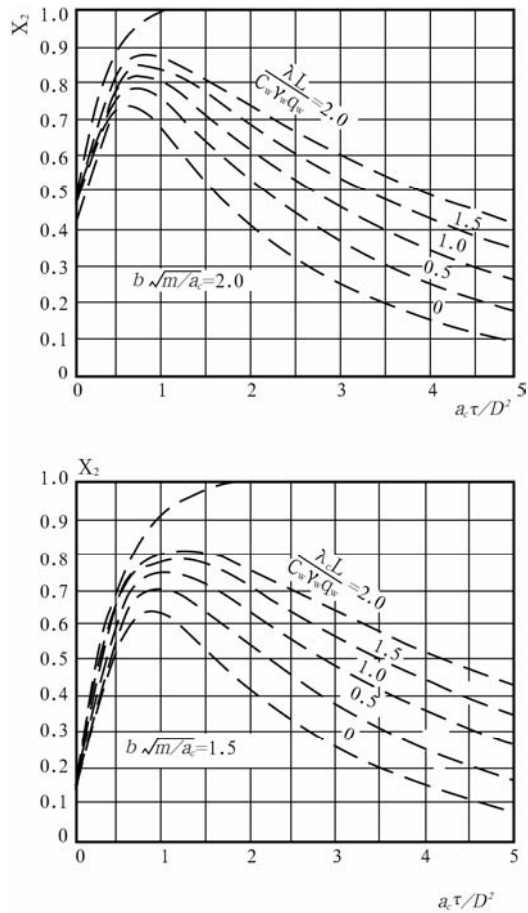


图 F. 2. 1 水管散热残留比 X_1

3) 单向差分

采用差分法计算一期通水冷却及层面散热时混凝土温度计算式:

$$T_{n,\tau+\Delta\tau} = T_{n,\tau} + \frac{a_c \Delta\tau}{\delta^2} (T_{n-1,\tau} + T_{n+1,\tau} - 2T_{n,\tau}) + (T_0 - T_w) \Delta\phi + \theta_0 \Delta\psi \quad (\text{F. 2. 1-3})$$

$$\Delta\phi = \phi(\tau + \Delta\tau) - \phi(\tau)$$

$$\Delta\psi = \psi(\tau + \Delta\tau) - \psi(\tau)$$

式中: T_0 —— 混凝土初温, $^{\circ}\text{C}$;

T_w —— 水管进口水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

F. 2. 2 二期水管冷却计算

二期水管冷却(无热源)可用下式计算:

$$T_m = T_w + X(T_0 - T_w) \quad (\text{F. 2. 2-1})$$

式中 T_m —— 混凝土平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

X —— 水管散热残留比, $X = f\left(\frac{a_c \tau}{D^2}, \frac{\lambda_c L}{C_w \gamma_w q_w}\right)$, 见图 F. 1. 4-4, 或由式 F. 1. 4-9 计

算。

F.3 混凝土表面保温

新浇混凝土遇寒潮时，因内外温差较大，而混凝土强度较低，混凝土表面易出现裂缝，因而寒潮期间须对混凝土表面进行保温。越冬期间外部气温较低，且寒潮频繁，在混凝土内部温度较高，内外温差较大时也要对混凝土表面进行保温。混凝土表面保温后需达到的等效放热系数及保温层厚度可按下述方法进行计算。

F.3.1 寒潮期间混凝土表面保温

单向散热混凝土表面抵御寒潮所需表面等效放热系数可用下式计算：

$$\beta = \frac{\lambda_c}{2u} \sqrt{\frac{\pi}{a_c Q}} \quad (\text{F. 3. 1-1})$$

$$u = 0.9449\sqrt{b^2 - 0.2360} - 0.8259 \quad (\text{F. 3. 1-2})$$

$$b = \frac{\rho_1 E(\tau_m) \alpha A}{(1 - \mu)(\sigma_a - \sigma_0)} \quad (\text{F. 3. 1-3})$$

$$\rho_1 = \frac{0.830 + 0.051\tau_m}{1 + 0.051\tau_m} e^{-0.095(P-1)^{0.60}} \quad (\text{F. 3. 1-4})$$

$$P = Q + \Delta$$

$$\Delta = 0.4gQ$$

$$g = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{u'}} \right)$$

$$u' = \frac{\lambda_c}{2\beta_{\text{效}}} \sqrt{\frac{\pi}{Qa_c}}$$

式中： a_c —— 混凝土导温系数， m^2/d ；

λ_c —— 混凝土导热系数， $\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ；

ρ_1 —— 考虑徐变影响的系数；

$E(\tau_m)$ —— 寒潮降温期间混凝土平均弹性模量， MPa ；

α —— 混凝土线膨胀系数；

A —— 气温降幅， $^\circ\text{C}$ ；

μ —— 混凝土泊桑比；

σ_a —— 混凝土允许拉应力, MPa;

σ_0 —— 其它因素引起的初始应力, MPa;

τ_m —— 寒潮降温期间混凝土的平均龄期, 计算如下:

$$\tau_m = \tau_1 + \Delta + \frac{1}{2}P$$

τ_1 —— 遭遇寒潮时混凝土龄期, d;

Q —— 寒潮降温历时, d;

$\beta_{\text{效}}$ —— 混凝土表面等效散热系数, $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$;

保温材料厚度:

$$h = k_1 k_2 \lambda_s \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_0} \right)$$

式中: h —— 保温材料厚度, m;

λ_s —— 保温材料导热系数, 参见表 F. 3. 2-1, $\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$;

β_0 —— 不保温时混凝土表面放热系数, $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$;

k_1 —— 风速修正系数, 见表 F. 3. 2-2;

k_2 —— 潮湿程度修正系数, 潮湿材料取 3~5, 干燥材料取 1。

表 F. 3. 2-1 各种保温材料导热系数 λ

材料名称	λ ($\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)	材料名称	λ
泡沫塑料	0.1256	膨胀珍珠岩	0.1675
玻璃棉毡	0.1674	沥青	0.938
木板	0.837	干棉絮	0.1549
木屑	0.628	油毛毡	0.167
稻草或麦秆席	0.502	干砂	1.172
炉渣	1.674	湿砂	4.06
甘蔗板	0.167	矿物棉	0.209
石棉毡	0.419	麻毡	0.188
泡沫混凝土	0.377	普通纸板	0.628

表 F. 3. 2-2 风速修正系数 k1

保温层透风性		风速<4m/s	风速>4m/s
易透风保温层 (稻草锯末等)	不加隔层	2.6	3.0
	外面加不透风隔层	1.6	1.9
	内面加不透风隔层	2.6	2.3
	内外加不透风隔层	1.3	1.5
不透风保温层		1.3	1.5

开始计算时可先假定 $\beta_{\text{效}}$ 值进行试算，得 β 值后代入重新算得 β 值，即可作为所需值，再根据保温材料性能求出所需厚度。对于棱角等多向散热部位保温层应适当加厚。

F. 3. 3 越冬期间混凝土表面保温

单向散热表面越冬期间混凝土表面等效放热系数仍用式 F. 3. 2-1 计算，但 b 值按式 F. 3. 3-1 计算：

$$b = \frac{r\rho_2 E(\tau_m)\alpha A}{(1-\mu)(\sigma_a - \sigma_0)} \quad (\text{F. 3. 3-1})$$

$$\rho_2 = \frac{0.830 + 0.051\tau_m}{1.00 + 0.051\tau_m} e^{-0.104P^{0.35}} \quad (\text{F. 3. 3-1})$$

式中： r —— 约束系数，与坝块长度有关，据图 F. 3. 3 查取。

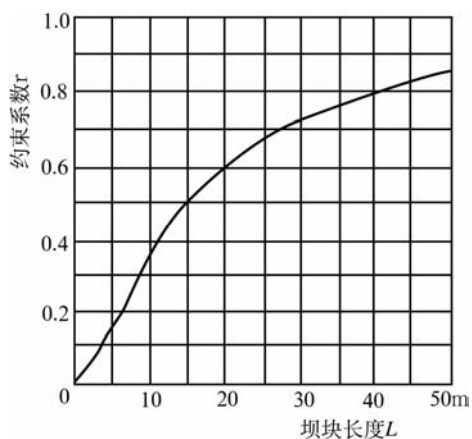


图 F. 3. 3 约束系数 r

F. 4 温度应力

F. 3. 1 基础浇筑块温度应力

基础浇筑块温度应力计算主要是验证浇筑块中央部位的水平应力，以及沿基础面剪应力。温度应力可用有限元法计算，将前述温度场计算成果和边界条件，根据程序要求输入相应数

据后，由计算机进行计算。也可用影响线法计算，即假定基础块温度应力为单连域线性弹性应力问题，分别计算浇筑温度与稳定温度之差所引起的温度应力 σ_1 和水化热温降引起的温度应力 σ_2 （经论证也可考虑混凝土自身体积变形引起的应力），然后进行迭加：

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (\text{F. 4. 1-1})$$

1 浇筑温度和稳定温度的温差，为均匀温度场，其应力可用约束系数法计算：

$$\sigma_1 = K_p \frac{RE_c \alpha}{1 - \mu} (T_p - T_f) \quad (\text{F. 4. 1-2})$$

式中： K_p —— 由混凝土徐变引起的应力松弛系数，在缺乏试验资料时，可取 0.5；

R —— 基础约束系数，当混凝土弹模 E_c 和基岩弹模 E_R 相近时， R 可按表 F. 4. 1-1

取值。当混凝土弹模 E_c 和基岩弹模 E_R 不相等时，建基面处 R 可按表 F. 4. 1-2

取值，建基面以上 R 值可按比例折算。

E_c —— 混凝土弹性模量，MPa。

μ —— 混凝土的泊桑比；

α —— 混凝土线膨胀系数；

T_p —— 混凝土浇筑温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_f —— 坝体稳定温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

表 F. 4. 1-1 基础约束系数

$\frac{y}{L}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
R	0.61	0.44	0.27	0.16	0.10	0

注 1: y —— 计算点离建基面的高度，m；

注 2: L —— 浇筑块长边尺寸，m。

表 F. 4. 1-2 建基面基础约束系数

$\frac{E_R}{E}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
R	1.0	0.72	0.61	0.51	0.44	0.36	0.32

2 水化热温降应力 σ_2 ，可将基础块各层水化热最高温升包络图作为计算温差，按影响

线法计算:

$$\sigma_2 = \frac{K_p E_c \alpha}{1 - \mu} \left[T(y) - \frac{1}{L} \sum A_y(\zeta) T(\zeta) \Delta y \right] \quad (\text{F. 4. 1-3})$$

式中: E_c —— 混凝土弹性模量, MPa;

$T(y)$ —— 应力计算点 y 处的温度值, $^{\circ}\text{C}$;

$A_y(\zeta)$ —— 在 $y = \zeta$ 处加一对单位荷载 $P=1$, 对计算点 y 所产生的正应力影响系数,

可由图 F. 4. 1-1 和图 F. 4. 1-2 查取;

$T(\zeta)$ —— 在 $y = \zeta$ 处的温度, $^{\circ}\text{C}$;

Δy —— 坐标 y 的增量, m;

l —— 筑块长边尺寸, m。

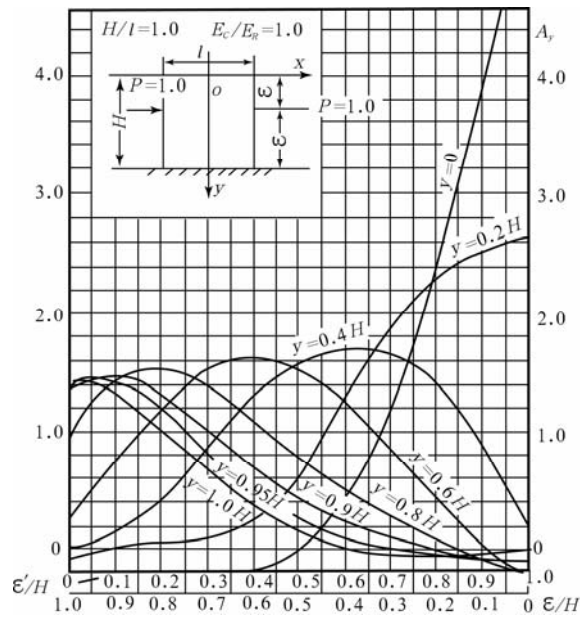


图 F. 4. 1-1 浇筑块温度应力影响线 $E_c = E_R$

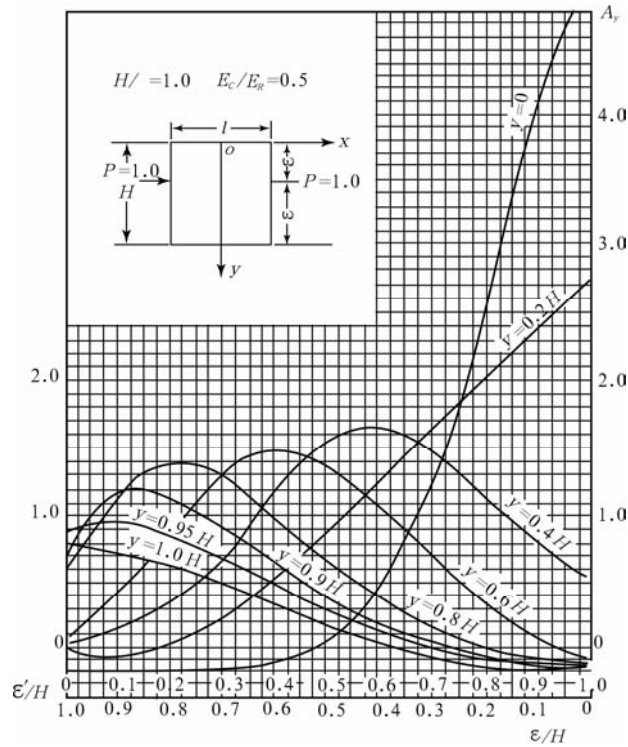


图 F. 4. 1-2 浇筑块温度应力影响线 $E_c = E_R / 2$

F. 4. 2 表层温度应力

可根据表层温度场各时段的温差值分布图，用有限元法或影响线法计算浇筑块水平剖面或浇筑块垂直剖面自表面向内部的应力分布。影响线法计算表层应力公式同式 F. 4. 1-3，其影响线可采用图 F. 4. 2-1 和图 F. 4. 2-2。温度场分布可取自差分法计算结果。

F. 3. 3 温度应力控制

1 坝体水平拉应力和主拉应力控制：

$$\sigma \leq \frac{\varepsilon_p E_c}{K_f} \quad (\text{F. 4. 3-1})$$

式中： σ —— 各种温差所产生的温度应力之和，MPa；

ε_p —— 混凝土极限拉伸值，重要工程须通过试验确定，一般工程可取 (0.7~1.0) $\times 10^{-4}$ ；

K_f —— 安全系数，一般采用 1.5~2.0，视工程重要性和开裂的危害性而定。

2 作用于大坝上游面水平施工缝的铅直拉应力控制：

$$\sigma \leq \frac{R_f C}{K_f} \quad (\text{F. 4. 3-2})$$

式中： σ —— 大坝上游面附近区域水平施工缝的各种铅直拉应力之和，MPa；

R_f —— 混凝土抗拉强度，重要工程须通过试验确定；

C —— 水平施工缝抗拉强度折扣系数，可取 0.6~0.8；

K_f —— 安全系数，一般采用 1.5~2.0，视工程重要性和开裂的危害性而定。

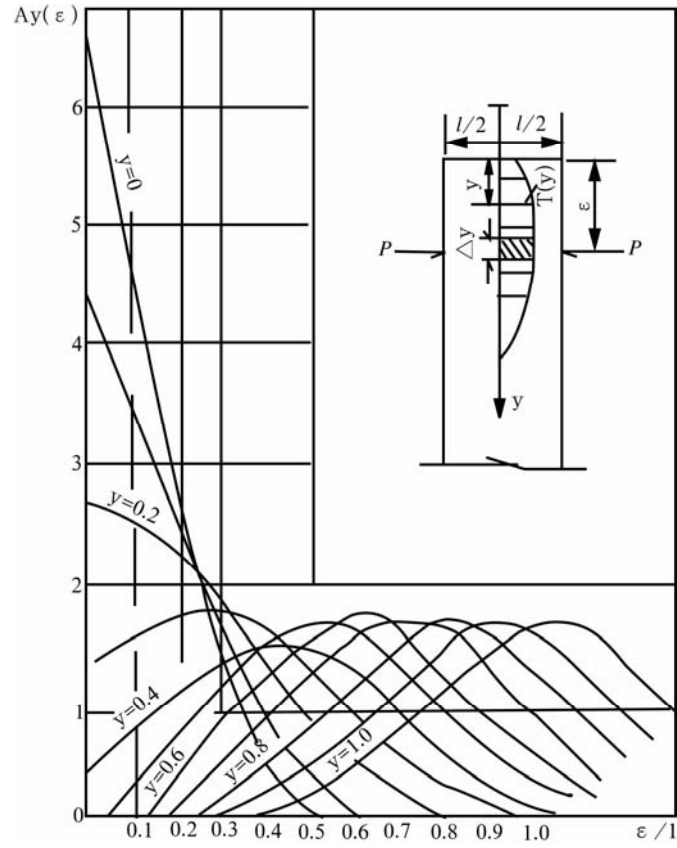


图 F. 4. 2-1 矩形截面应力影响线

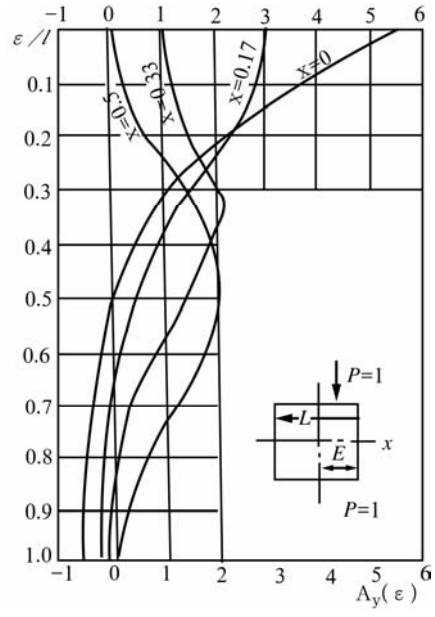


图 F. 4. 2-2 方形截面应力影响线