

ICS 27.140  
P 59  
备案号: J2346—2017

**NB**

中华人民共和国能源行业标准

**P**

**NB / T 35092 — 2017**

---

# 混凝土坝温度控制设计规范

Design code for temperature control of concrete dam

**2017-03-28 发布**

**2017-08-01 实施**

---

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

# 混凝土坝温度控制设计规范

Design code for temperature control of concrete dam

**NB/T 35092 — 2017**

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2017 年 8 月 1 日

中国电力出版社

2017 北 京

国家能源局

公 告

2017 年 第 6 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《页岩气 储层改造 第2部分：工厂化压裂作业技术规范》等159项行业标准，其中能源标准（NB）34项、电力标准（DL）39项，石油标准（SY）86项，现予以发布。

上述标准中电力领域标准由中国电力出版社及中国计划出版社出版发行，煤炭领域标准由煤炭工业出版社出版发行，石油天然气、页岩气领域标准由石油工业出版社出版发行，锅炉压力容器标准由新华出版社出版发行。

附件：行业标准目录

国家能源局

2017 年 3 月 28 日

NB/T 35092 — 2017

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
13	NB/T 35092— 2017	混凝土坝温度 控制设计规范			2017-03-28	2017-08-01
...						



## 前 言

根据《国家能源局关于下达 2010 年第一批能源领域行业标准制（修）定计划的通知》（国能科技〔2010〕320 号）的要求，经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规范。

本规范的主要技术内容是：混凝土原材料选择、混凝土及配合比设计、温度控制设计资料与计算参数、温度场计算、坝体分缝及接缝灌浆温度、温度控制标准、温度应力及控制标准、混凝土温度控制措施、通水冷却、特殊部位的温度控制、表面保护和养护、低温季节施工温度控制、施工期温度监测与分析。

本规范由国家能源局负责管理，由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理，由能源行业水电勘测设计标准化技术委员会负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水电水利规划设计总院（地址：北京市西城区六铺炕北小街 2 号，邮编：100120）。

本规范主编单位：中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

本规范参编单位：中国水利水电科学研究院

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

本规范主要起草人员：许文涛 解 敏 吕大勇 张国新

刘 毅 向 弘 张 敬 雷丽萍

刘有志 杨 梅 徐 旭 易俊新

胡 平 杨 萍 梁静敏 郭红彦

陈利刚

本规范主要审查人员：魏志远 陈惠明 卢兆钦 石青春

方光达 冯海波 周 伟 徐建强

**NB/T 35092 — 2017**

黄 维	李新宇	罗 林	计家荣
刘大文	王洪军	谭志伟	何 伟
吴宝隆	王晓峰	艾永平	李晶华
饶宏玲	卢昆华	雷丽华	赵五一
喻葭临	李仕胜		

目 次

1 总则.....1

2 术语.....2

3 混凝土原材料选择.....4

    3.1 水泥.....4

    3.2 掺合料.....4

    3.3 骨料.....5

    3.4 外加剂及拌和用水.....5

4 混凝土及配合比设计.....6

    4.1 混凝土设计.....6

    4.2 混凝土配合比设计.....6

5 温度控制设计资料与计算参数.....8

    5.1 气温、水温和地温.....8

    5.2 基岩参数.....8

    5.3 混凝土性能参数.....9

6 温度场计算.....10

    6.1 稳定温度场和准稳定温度场边界温度拟定.....10

    6.2 稳定温度场.....11

    6.3 准稳定温度场.....12

    6.4 不稳定温度场.....12

7 坝体分缝及接缝灌浆温度.....14

    7.1 坝体分缝.....14

    7.2 接缝灌浆温度.....14

8 温度控制标准.....16

    8.1 温差标准.....16

NB/T 35092 — 2017

8.2 容许最高温度 .....17

9 温度应力及控制标准 .....19

9.1 温度应力计算 .....19

9.2 温度应力控制标准 .....19

10 混凝土温度控制措施 .....21

10.1 一般规定 .....21

10.2 原材料温度控制 .....21

10.3 混凝土生产过程温度控制 .....22

10.4 混凝土运输和浇筑过程温度控制 .....22

10.5 浇筑后温度控制 .....23

11 通水冷却 .....24

11.1 一般规定 .....24

11.2 冷却水管布置 .....25

11.3 初期通水冷却 .....25

11.4 中期通水冷却 .....26

11.5 后期通水冷却 .....26

12 特殊部位的温度控制 .....30

12.1 陡坡坝段 .....30

12.2 施工期临时过水的坝块 .....30

12.3 填塘混凝土 .....31

12.4 闸墩 .....31

12.5 孔洞周边混凝土 .....31

12.6 坝身封堵体混凝土 .....32

12.7 垫座混凝土 .....32

12.8 抗冲磨混凝土 .....32

12.9 并缝部位混凝土 .....33

13 表面保护和养护 .....34

13.1 表面保护 .....34

13.2 养护 .....34

14 低温季节施工温度控制 .....36

14.1 一般规定 .....36

14.2 原材料与拌和 .....36

14.3 运输与浇筑 .....37

15 施工期温度监测与分析 .....38

15.1 一般规定 .....38

15.2 原材料温度监测 .....38

15.3 混凝土出机口温度、入仓温度和浇筑温度监测 .....38

15.4 混凝土内部温度监测 .....39

15.5 通水冷却监测 .....39

15.6 浇筑仓气温及保温层温度监测 .....39

15.7 数据分析与反馈 .....40

附录 A 混凝土性能参数估算 .....41

附录 B 稳定温度场和准稳定温度场边界温度计算 .....45

附录 C 不稳定温度场计算 .....50

附录 D 温度应力计算 .....60

附录 E 混凝土出机口温度、入仓温度、浇筑温度的计算 .....70

本规范用词说明 .....73

引用标准名录 .....74

附：条文说明 .....75

Contents

1 General provisions .....1

2 Terms .....2

3 Selection of concrete raw materials .....4

    3.1 Cement.....4

    3.2 Admixture.....4

    3.3 Aggregate .....5

    3.4 Additive and mixing water .....5

4 Design of concrete and mix proportion .....6

    4.1 Design of concrete.....6

    4.2 Design of concrete mix proportion .....6

5 Design data and calculating parameters of temperature control.....8

    5.1 Air temperature, water temperature and ground temperature.....8

    5.2 Parameters of bedrock .....8

    5.3 Parameters of concrete performance.....9

6 Calculation of temperature field .....10

    6.1 Determination of steady and quasi-steady temperature field border temperature.....10

    6.2 Steady temperature field .....11

    6.3 Quasi-steady temperature field .....12

    6.4 Transient temperature field.....12

7 Jointspacing of dam and joint grouting temperature .....14

    7.1 Jointspacing of dam .....14

7.2	Joint grouting temperature·····	14
8	Criteria of temperature control ·····	16
8.1	Allowable temperature difference ·····	16
8.2	Allowable highest temperature·····	17
9	Calculation and criteria of thermal stress·····	19
9.1	Calculation of thermal stress·····	19
9.2	Criteria of thermal stress control·····	19
10	Measures of concrete temperature control ·····	21
10.1	General requirement·····	21
10.2	Temperature control of raw materials·····	21
10.3	Temperature control in concrete producing process ·····	22
10.4	Temperature control in concrete transport and pouring process ·····	22
10.5	Temperature control after pouring ·····	23
11	Pipe cooling ·····	24
11.1	General requirement·····	24
11.2	Cooling pipe layout·····	25
11.3	Initial stage of pipe cooling·····	25
11.4	Midterm stage of pipe cooling ·····	26
11.5	Late stage of pipe cooling·····	26
12	Temperature control of special parts·····	30
12.1	Steep slope section of dam·····	30
12.2	Temporary overtopped puring block during construction period·····	30
12.3	Pond filling concrete ·····	31
12.4	Piers·····	31
12.5	Concrete around holes ·····	31
12.6	Plug concrete of dam·····	32
12.7	Pedestal concrete ·····	32



## NB/T 35092 — 2017

12.8	Abrasion resistant concrete .....	32
12.9	Concrete at joints conjunction .....	33
13	Surface protection and curing .....	34
13.1	Surface protection .....	34
13.2	Curing .....	34
14	Temperature control in construction in low temperature season .....	36
14.1	General requirement .....	36
14.2	Raw materials and mixing .....	36
14.3	Transport and pouring .....	37
15	Temperature monitoring and analysing during construction period .....	38
15.1	General requirement .....	38
15.2	Temperature monitoring of raw materials .....	38
15.3	Temperature monitoring at outlet, concrete pouring and concrete placing .....	38
15.4	Temperature monitoring inside concrete .....	39
15.5	Monitoring of pipe cooling .....	39
15.6	Monitoring of air temperature at pouring site and temperature at insulating layer .....	39
15.7	Analysing and feedback of data .....	40
Appendix A	Estimation of concrete performance parameters .....	41
Appendix B	Border temperatures calculation of steady and quasi-steady temperature field .....	45
Appendix C	Calculation of transient temperature field .....	50
Appendix D	Calculation of thermal stress .....	60



Appendix E	Calculation of temperature at concrete outlet, concrete pouring and concrete placing .....	70
	Explanation of wording in this code .....	73
	List of normative standards .....	74
	Addition: Explanation of provisions .....	75

## 1 总 则

**1.0.1** 为规范混凝土坝温度控制设计，保证设计质量，制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于混凝土高坝、中坝的温度控制设计，也可用于低坝的温度控制设计。

**1.0.3** 混凝土坝温度控制设计，除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 绝热温升 *adiabatic temperature rise*

混凝土在绝热条件下由混凝土中胶凝材料水化释放出的热量引起的温升值。

### 2.0.2 稳定温度场 *steady temperature field*

坝体建成多年水化热影响消除后，坝体内部温度不随外界环境温度变化的温度场。

### 2.0.3 准稳定温度场 *quasi-steady temperature field*

坝体建成多年水化热影响消除后，坝体内部温度随外界环境温度周期性变化的温度场。

### 2.0.4 基础约束区 *foundation restraint area*

基础面以上  $0\sim 0.4l$  的高度范围，其中  $0\sim 0.2l$  称强约束区， $0.2l\sim 0.4l$  称弱约束区， $l$  指混凝土浇筑块长边的长度。

### 2.0.5 基础温差 *foundation temperature difference*

基础约束区内，混凝土最高温度与稳定温度之差。

### 2.0.6 新老混凝土温差 *temperature difference between new and old concrete*

龄期超过 28d 的老混凝土面上新浇混凝土的最高温度与新混凝土开始浇筑时下层老混凝土的平均温度之差。

### 2.0.7 内外温差 *temperature difference between interior and surface of concrete*

混凝土内部最高温度与混凝土表面温度之差。

### 2.0.8 出机口温度 *temperature at outlet*

在拌和楼出料口测得的混凝土拌和物深 3cm~5cm 处的温度。

### 2.0.9 入仓温度 *temperature at concrete pouring*

混凝土下料后平仓前测得的深 5cm~10cm 处的温度。

**2.0.10 浇筑温度** temperature at concrete placing

混凝土经平仓振捣或碾压后、覆盖上坯混凝土前，本坯混凝土面以下 5cm~10cm 处的温度。

### 3 混凝土原材料选择

#### 3.1 水 泥

##### 3.1.1 水泥选择应符合下列原则：

- 1 应选用旋窑工艺生产的水泥。
- 2 选用的水泥品种及使用的部位应符合现行行业标准《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定。大坝混凝土宜选用中热硅酸盐水泥，经论证可选用低热硅酸盐水泥或低热微膨胀水泥。
- 3 环境水对混凝土有侵蚀性时，选用的水泥品种及使用的部位应符合现行行业标准《水工混凝土耐久性技术规范》DL/T 5241 的有关规定。
- 4 选用水泥应进行混凝土试验。

3.1.2 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定；中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥应符合现行国家标准《中热硅酸盐水泥 低热硅酸盐水泥 低热矿渣硅酸盐水泥》GB/T 200 的有关规定；低热微膨胀水泥应符合现行国家标准《低热微膨胀水泥》GB/T 2938 的有关规定；抗硫酸盐硅酸盐水泥应符合现行国家标准《抗硫酸盐硅酸盐水泥》GB/T 748 的有关规定。

3.1.3 有特殊要求的高坝可根据需要对水泥的化学成分、矿物组成、水化热和细度等提出专门要求，并应通过生产性工艺试验确定专供水泥的生产工艺。

#### 3.2 掺 合 料

##### 3.2.1 混凝土掺合料选择应符合下列原则：

1 作为混凝土胶凝材料的掺合料，宜选用粉煤灰、火山灰、矿渣粉、磷渣粉等活性材料。对高坝或碾压混凝土坝，宜选用 I 级或 II 级粉煤灰。选用其他品种掺合料应进行专门论证。

2 非活性或活性较低的掺合料不宜替代胶凝材料，若采用应经试验论证。

3 选用掺合料应进行混凝土试验。

**3.2.2** 粉煤灰应符合现行行业标准《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》DL/T 5055 的有关规定；火山灰应符合现行行业标准《水工混凝土掺用天然火山灰质材料技术规范》DL/T 5273 的有关规定；矿渣粉应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的有关规定；磷渣粉应符合现行行业标准《水工混凝土掺用磷渣粉技术规范》DL/T 5387 的有关规定。

### 3.3 骨 料

**3.3.1** 骨料的强度应满足混凝土设计强度的要求，其品质应符合现行行业标准《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定。宜选用石灰岩等线膨胀系数小的人工骨料。

**3.3.2** 大坝混凝土不得使用具有潜在碱-碳酸盐反应活性的骨料。使用具有潜在碱-硅酸反应活性骨料时，应采取抑制措施并进行专门论证。

### 3.4 外加剂及拌和用水

**3.4.1** 大坝混凝土应掺加适宜的减水剂、引气剂等外加剂。外加剂应符合国家现行标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《水工混凝土外加剂技术规程》DL/T 5100 的有关规定。应结合工程选定的混凝土原材料和混凝土性能要求及施工条件，进行外加剂适应性试验；工程有特殊要求时，应进行外加剂优选试验。

**3.4.2** 混凝土拌和用水的水质应符合现行行业标准《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定。

## 4 混凝土及配合比设计

### 4.1 混凝土设计

**4.1.1** 重力坝坝体混凝土分区设计应符合现行行业标准《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 的有关规定，拱坝坝体混凝土分区设计应符合现行行业标准《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 的有关规定；环境水对混凝土有侵蚀性时，还应符合现行行业标准《水工混凝土耐久性技术规范》DL/T 5241 的有关规定。混凝土强度等级、抗渗及抗冻等级应相互匹配，分区合理。

**4.1.2** 混凝土设计宜考虑下列要素：

- 1 合理利用混凝土的后期强度，常态混凝土设计龄期宜采用 90d，碾压混凝土设计龄期宜采用 180d，采用更长设计龄期需经论证。
- 2 宜采用大级配骨料混凝土。
- 3 宜采用绝热温升较低、极限拉伸值较大、自生体积变形不收缩或呈延迟性微膨胀的混凝土。

### 4.2 混凝土配合比设计

**4.2.1** 应根据混凝土各项性能指标要求进行混凝土配合比设计；通过试验确定胶凝材料用量、单位用水量、粗骨料合理级配、最优砂率。

**4.2.2** 重力坝混凝土的水胶比应符合现行行业标准《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 的有关规定，拱坝混凝土的水胶比应符合现行行业标准《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 的有关规定。混凝土总胶凝材料用量不宜少于  $140\text{kg/m}^3$ 。



4.2.3 应考虑混凝土的强度、耐久性要求及运输距离、浇筑方法、气候等条件，通过试验确定混凝土的含气量。

4.2.4 常态混凝土的坍落度和碾压混凝土 *VC* 值，应根据结构断面及钢筋布置、运输距离及方式、浇筑方法及浇筑强度、气候等条件，通过试验确定。常态混凝土仓面坍落度宜采用 3cm~6cm，碾压混凝土仓面 *VC* 值宜采用 3s~8s。

4.2.5 高坝、中坝混凝土试验项目宜按表 4.2.5 的规定进行；坝高大于 200m 的混凝土坝宜增加全级配混凝土试验，其主要试验项目宜包括抗压强度、劈拉强度、极限拉伸值、弹性模量、抗渗等级、抗冻等级，碾压混凝土还应进行抗剪强度试验。

表 4.2.5 高坝、中坝混凝土试验项目

试 验 项 目		高坝	中坝
力学性能	抗压强度	●	●
	抗拉强度	●	●
	弹性模量	●	●
	碾压混凝土抗剪强度	●	●
变形性能	极限拉伸值	●	●
	自生体积变形	●	●
	干缩	●	○
	徐变	●	○
热学性能	绝热温升	●	●
	比热容	●	○
	导热系数	●	○
	线膨胀系数	●	●
耐久性性能	抗冻等级	●	●
	抗渗等级	●	●

注：●表示应选项目，○表示可选项目。



## 5 温度控制设计资料与计算参数

### 5.1 气温、水温 and 地温

**5.1.1** 温度控制计算采用的气温应符合下列规定：

1 应根据坝址区气象站的实测资料，确定多年平均气温及年内变幅、多年月平均或旬平均气温、多年极端气温、多年日平均气温及日变幅、气温骤降的降幅和历时及频率、日照影响。

2 坝址区无气象站或气象站的实测资料系列较短时，可收集坝址区周边的气象站实测资料，并考虑坝址区与气象站的纬度、经度、高程等差别进行修正。

**5.1.2** 温度控制计算采用的河水水温应符合下列规定：

1 应根据坝址区水文站实测的天然河水水温资料，确定多年平均河水水温和多年月平均河水水温。

2 坝址区无水文站时，宜在坝址区设简易观测点获取河水水温资料，或收集坝址所在河流上下游水文站及梯级水库的实测资料和区间支流资料修正后采用。

**5.1.3** 应收集类似工程水库水温等资料进行类比。

**5.1.4** 应根据坝址区实测资料，确定多年平均地温或多年月平均地温。坝址区无实测地温资料时，可收集周边气象站实测资料分析采用。

### 5.2 基 岩 参 数

**5.2.1** 温度控制设计所需的基岩参数应包括弹性模量、密度、比热容、导热系数、泊松比。

**5.2.2** 基岩弹性模量、密度等参数宜采用试验值，并考虑基础处

理的影响。

**5.2.3** 比热容、导热系数、泊松比等参数无试验资料时，应参考类似工程资料分析确定。

### **5.3 混凝土性能参数**

**5.3.1** 温度控制设计所需的混凝土性能参数应包括力学、变形和热学参数。力学参数应主要包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、密度；变形参数应主要包括极限拉伸值、自生体积变形、干缩、徐变；热学参数应主要包括绝热温升、比热容、导热系数、导温系数、线膨胀系数。

**5.3.2** 混凝土性能参数宜通过试验确定。

**5.3.3** 宜将混凝土弹性模量、绝热温升、极限拉伸值、自生体积变形的试验值拟合为与龄期的关系式。

**5.3.4** 宜将混凝土徐变试验值拟合为与加荷龄期及荷载持续时间的关系式。

**5.3.5** 无试验值时，混凝土绝热温升、导热系数、比热容、导温系数、线膨胀系数、泊松比、密度等混凝土性能参数估算可按本规范附录 A 的有关规定确定。

## 6 温度场计算

### 6.1 稳定温度场和准稳定温度场边界温度拟定

**6.1.1** 运行期混凝土坝稳定温度场和准稳定温度场应根据与空气接触的坝面的温度、坝上游坝前水库水温、坝下游水体水温和坝基温度经计算确定，边界温度示意图见图 6.1.1。

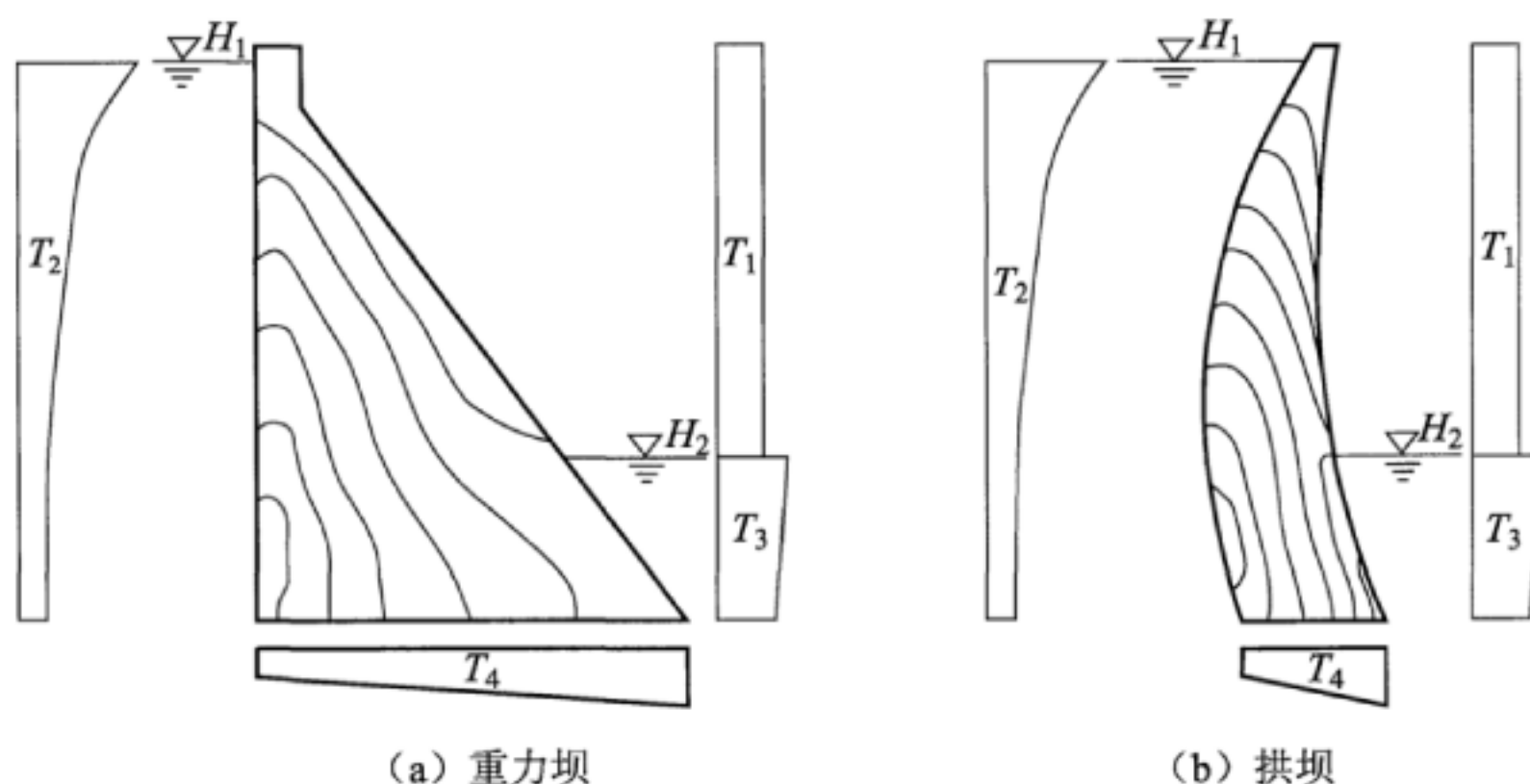


图 6.1.1 边界温度示意图

$H_1$ —上游水位； $H_2$ —下游水位； $T_1$ —坝面温度； $T_2$ —坝前水库水温；  
 $T_3$ —坝下游水体水温； $T_4$ —坝基温度

**6.1.2** 坝面与空气接触时，坝面温度应为气温与日照影响之和。气温宜采用坝址区多年年平均气温或年周期变化的月平均气温。气温与日照影响可按本规范附录 B 的方法计算。

**6.1.3** 坝前水库水温宜根据坝址区的气候特点、河道水温、水库运行条件、库底淤积等，按照本规范附录 B 的方法计算并结合已

建类似工程水库实测资料经分析综合确定。对于高坝，宜采用数值分析方法确定。

#### 6.1.4 坝下游水体水温可按照下列方法确定：

1 水深小于 50m，采用水体的多年年平均温度或多年月平均温度。

- 1) 坝下游水体主要源于上游库水时，采用对应泄水口或取水口高程的坝前水温，并考虑日照影响确定；
- 2) 坝下游水体主要源于降水、水库渗漏和下游河道回水时，采用多年年平均或多年月平均水温，并考虑日照影响确定。

2 水深大于或等于 50m，可按本规范附录 B 中坝前水库水温的计算方法分析确定。

6.1.5 坝踵处温度取坝上游坝前水库底部水温，坝趾处温度取坝下游水体底部水温，坝踵到坝趾的温度呈直线变化。高坝的坝基温度宜根据水库形成前的地温、坝前水库底部水温、坝下游水体底部水温及坝基渗流等条件分析确定；地温受地热影响较大时，宜按不同深度拟定坝基温度。

## 6.2 稳定温度场

6.2.1 坝体稳定温度场  $T(x, y, z)$  应满足如下方程：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6.2.1)$$

式中： $T$ ——混凝土温度（℃）；

$x$ 、 $y$ 、 $z$ ——各向坐标（m）。

6.2.2 应计算河床坝段、泄水孔坝段、溢流坝段、岸坡坝段等典型坝段的稳定温度场。稳定温度场可采用有限元法、差分法、流网法计算，高坝应采用有限元法计算。计算稳定温度场时，图 6.1.1 中的边界温度宜取多年年平均值。

### 6.3 准 稳 定 温 度 场

**6.3.1** 坝体准稳定温度场  $T(x, y, z, \tau)$  应满足如下方程：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6.3.1)$$

式中： $\lambda$ ——混凝土导热系数  $[\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})]$ ；

$c$ ——混凝土比热容  $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ ；

$\rho$ ——混凝土密度  $(\text{kg}/\text{m}^3)$ ；

$\tau$ ——时间  $(\text{h})$ 。

**6.3.2** 对于本规范第 6.2.2 条所列的典型坝段，特别是坝体厚度小于 30m 的拱坝的典型坝段、严寒和寒冷地区的拱坝的典型坝段，还应计算准稳定温度场。准稳定温度场可采用有限元法、差分法计算，高坝应采用有限元法计算。计算准稳定温度场时，图 6.1.1 中的边界温度宜取年变化的月平均值。

### 6.4 不 稳 定 温 度 场

**6.4.1** 应计算施工期坝体混凝土不稳定温度场，并应符合下列要求：

1 宜选择河床坝段、泄水孔坝段、溢流坝段、岸坡坝段等作为典型坝段，宜选择基础约束区、固结灌浆盖重区、孔口部位、新老混凝土约束范围等部位作为典型部位。

2 宜将年气温变化过程划分为高温、常温、低温等典型计算时段。

3 应拟定不同的温度控制措施组合。

**6.4.2** 不稳定温度场可采用有限元法或差分法计算，可按本规范附录 C 的方法计算。计算条件复杂时，宜采用有限元法计算不稳定温度场；对高坝宜采用有限元法计算不稳定温度场。

**6.4.3** 对高坝应进行不稳定温度场仿真计算；拱坝宜进行多坝段

联合仿真或全坝仿真。仿真计算应考虑大坝施工进度、固结灌浆、接缝灌浆、压力管道安装、金属结构及机电设备安装、坝体临时挡水计划等因素。



## 7 坝体分缝及接缝灌浆温度

### 7.1 坝 体 分 缝

**7.1.1** 重力坝的横缝分缝应符合现行行业标准《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 的有关规定；拱坝的横缝分缝应符合现行行业标准《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 的有关规定。横缝间距宜为 15m~25m。

**7.1.2** 坝体纵缝设置应根据坝体混凝土温度控制难度及防裂要求，并结合坝体布置、结构体形、混凝土施工强度等因素，通过基础混凝土温度应力计算分析确定。

**7.1.3** 常态混凝土坝顺河向长度超过 40m 时宜设置纵缝，纵缝间距宜为 15m~30m。碾压混凝土坝宜通仓浇筑，当浇筑块长度超过 40m 时应进行分析论证。

### 7.2 接 缝 灌 浆 温 度

**7.2.1** 有接缝灌浆要求的坝体，应选择河床坝段、泄水孔坝段、溢流坝段、岸坡坝段等典型坝段进行接缝灌浆温度分区设计，并提出全坝的接缝灌浆温度。接缝灌浆温度分区应考虑施工期坝体温度应力、结构布置和接缝灌浆分区等因素，根据相应部位的稳定温度场或准稳定温度场分析确定。坝身孔口部位的接缝灌浆温度宜单独分区。

**7.2.2** 分区接缝灌浆温度应按照相应部位的稳定温度场或准稳定温度场的温度等值线面积加权平均计算，并应符合下列要求：

- 1 上下相邻分区的接缝灌浆温度之差不宜大于 2℃。
- 2 孔口部位、溢流部位的接缝灌浆温度应根据相应部位的准

稳定温度场分析确定。

**3** 拱坝的分区接缝灌浆温度应结合施工期温度应力和运行期坝体应力的计算成果分析确定。

**4** 严寒和寒冷地区的拱坝或拱坝坝体厚度小于 30m 时，宜采用气温较低的多个月份的准稳定温度场分析确定。

**7.2.3** 应在接缝灌浆前将混凝土温度降至接缝灌浆温度。提高或降低接缝灌浆温度应有专门论证。



8 温度控制标准

8.1 温差标准

8.1.1 温差标准应包括基础容许温差、新老混凝土容许温差和内外容许温差。

8.1.2 基础约束区混凝土的基础容许温差应按下列规定选取：

1 当常态混凝土 28d 龄期的极限拉伸值不低于  $0.85\times 10^{-4}$ 、混凝土所用骨料的线膨胀系数与  $1.0\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  相差不大、施工质量良好、基岩弹性模量与混凝土弹性模量相近、浇筑块短间歇均匀上升时，常态混凝土基础容许温差可按表 8.1.2-1 的规定取值。

表 8.1.2-1 常态混凝土基础容许温差（℃）

基础面以上高度 $h$	浇筑块长边长度 $l$				
	17m 以下	17m~21m	21m~30m	30m~40m	40m 至通仓
基础强约束区 $0\sim 0.2l$	26~24	24~22	22~19	19~16	16~14
基础弱约束区 $0.2l\sim 0.4l$	28~26	26~25	25~22	22~19	19~17

注：1 表中  $h$  以坝段内最高建基面为起点计， $l$  为建基面的水平面投影最大边长。

2 坝段内基础强约束区还应包括最高与最低建基面之间的混凝土。

2 当基础约束区碾压混凝土 28d 龄期的极限拉伸值不低于  $0.70\times 10^{-4}$ 、混凝土所用骨料的线膨胀系数与  $1.0\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  相差不大、基岩弹性模量与混凝土弹性模量相近、薄层连续上升时，碾压混凝土基础容许温差可按表 8.1.2-2 的规定取值。

表 8.1.2-2 碾压混凝土基础容许温差 (°C)

距基础面高度 $h$	浇筑块长边长度 $l$		
	30m 以下	30m~70m	70m 以上
基础强约束区 $0\sim0.2l$	18~15.5	14.5~12	12~10
基础弱约束区 $0.2l\sim0.4l$	19~17	16.5~14.5	14.5~12

注：1 表中  $h$  以坝段内最高建基面为起点计， $l$  为建基面的水平面投影最大边长。

2 坝段内基础强约束区还应包括最高与最低建基面之间的混凝土。

### 3 对以下情况的混凝土基础容许温差应加以论证：

- 1) 混凝土所用骨料的线膨胀系数与  $1.0\times10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  相差较大；
- 2) 常态混凝土 28d 龄期的极限拉伸值低于  $0.85\times10^{-4}$  或碾压混凝土 28d 龄期的极限拉伸值低于  $0.70\times10^{-4}$ ；
- 3) 基岩弹性模量和混凝土弹性模量相差较大；
- 4) 采用含氧化镁较高的水泥，试验或实测资料表明混凝土具有明显的自生体积变形；
- 5) 在基础约束范围内长期停歇的浇筑块；
- 6) 坝块结构尺寸长宽比大于 2.0；
- 7) 结构尺寸高长比小于 0.5；
- 8) 坝高大于 200m。

**8.1.3** 在龄期超过 28d 的老混凝土面上浇筑混凝土时，应采取短间歇均匀上升或薄层连续上升的浇筑方式。新老混凝土容许温差可取  $15^{\circ}\text{C}\sim20^{\circ}\text{C}$ ，当浇筑块长边长度大于 40m 时宜取小值。

**8.1.4** 施工过程中各坝块应均匀上升，相邻块高差不宜超过 12m，浇筑时间间隔宜小于 28d。

**8.1.5** 应根据当地气候条件，进行表层混凝土温度应力分析和表面保温设计，提出混凝土内外容许温差。

## 8.2 容许最高温度

**8.2.1** 坝段内不同区域的混凝土容许最高温度应按下列方法确定：

1 以基础容许温差为依据时按下式计算：

$$T_{\max 1} = T_f + \Delta T \quad (8.2.1-1)$$

式中：  $T_{\max 1}$  ——混凝土容许最高温度（℃）；

$T_f$  ——相应部位的稳定温度或分区接缝灌浆温度（℃）；

$\Delta T$  ——基础容许温差（℃）。

2 以内外容许温差为依据时按下式计算：

$$T_{\max 2} = T_m + \Delta T_1 \quad (8.2.1-2)$$

式中：  $T_{\max 2}$  ——混凝土容许最高温度（℃）；

$T_m$  ——混凝土表面温度（℃）；

$\Delta T_1$  ——内外容许温差（℃）。

3 以新老混凝土容许温差为依据时按下式计算：

$$T_{\max 3} = T_l + \Delta T_2 \quad (8.2.1-3)$$

式中：  $T_{\max 3}$  ——混凝土容许最高温度（℃）；

$T_l$  ——浇筑新混凝土时下层老混凝土 0.25l 高度范围内的平均温度（℃）；

$\Delta T_2$  ——新老混凝土容许温差（℃），为老混凝土面上 0.25l 高度范围内的新混凝土最高温度与  $T_l$  的差值。

**8.2.2** 坝段内不同区域的混凝土容许最高温度应采用本规范第 8.2.1 条中计算所得各种容许最高温度值的小值。

**8.2.3** 应选择河床坝段、泄水孔坝段、溢流坝段、岸坡坝段等典型坝段，根据坝段内温度场和温度应力计算成果，结合基础约束区、混凝土材料分区、接缝灌浆范围及分区、固结灌浆盖重区，以及泄水孔、引水管道、闸墩布置等条件，自下而上进行坝段内混凝土温度控制分区，并提出全坝的温度控制分区。

## 9 温度应力及控制标准

### 9.1 温度应力计算

**9.1.1** 应计算施工期坝体混凝土温度应力。混凝土温度应力可按本规范附录 D 的方法计算。计算条件复杂时，宜采用有限元法计算温度应力；对高坝宜采用有限元法计算温度应力。

**9.1.2** 计算混凝土温度应力时应考虑混凝土自重、徐变和自生体积变形。

**9.1.3** 气温日变幅较大时，宜计算气温日变幅引起的混凝土表面温度应力。

**9.1.4** 对高坝应进行温度应力仿真计算；拱坝宜进行多坝段联合仿真或全坝仿真。

### 9.2 温度应力控制标准

**9.2.1** 混凝土温度应力控制标准可按综合安全系数法或分项系数法确定。

**9.2.2** 采用综合安全系数法时，施工期混凝土温度应力应满足下式要求：

$$\sigma \leq \varepsilon E / K_f \quad (9.2.2)$$

式中： $\sigma$ ——不同区域的混凝土浇筑块最大温度应力或表层混凝土最大温度应力（MPa）；

$\varepsilon$ ——混凝土极限拉伸值，由试验确定；

$E$ ——混凝土弹性模量（MPa），由试验确定；

$K_f$ ——综合安全系数，中、高坝宜采用 1.5~1.8，坝高大于 200m 的高坝宜采用 2.0；确定表层混凝土温度应

力控制标准时宜采用 1.3~1.5。

**9.2.3** 采用分项系数法时，施工期混凝土温度应力应满足下式要求：

$$\gamma_0 \sigma \leq \varepsilon_p E_c / \gamma_d \quad (9.2.3)$$

式中：  $\gamma_0$ ——结构重要性系数，对应于结构安全级别为 I、II、III 级的结构及构件可分别取用 1.10、1.05、1.00；

$\sigma$ ——各种温差所产生的温度应力之和（MPa）；

$\varepsilon_p$ ——混凝土极限拉伸值的标准值；

$E_c$ ——混凝土弹性模量标准值（MPa）；

$\gamma_d$ ——温度应力控制正常使用极限状态结构系数，取 1.50。

## 10 混凝土温度控制措施

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 施工期应对混凝土原材料、混凝土生产过程、混凝土运输和浇筑过程及浇筑后的温度进行全过程控制。对高坝宜采用具有信息自动采集、分析、预警、动态调整等功能的温度控制系统进行全过程控制。

**10.1.2** 应提出符合坝体分区容许最高温度及温度应力控制标准的混凝土温度控制措施，并提出出机口温度、浇筑温度、浇筑层厚度、间歇期、表面冷却、通水冷却和表面保护等主要温度控制指标。

**10.1.3** 气候温和地区宜在气温较低月份浇筑基础混凝土；高温季节宜利用早晚、夜间气温低的时段浇筑混凝土。

**10.1.4** 常态混凝土浇筑应采取短间歇均匀上升、分层浇筑的方法。基础约束区的浇筑层厚度宜为 1.5m~2.0m，有初期通水冷却的浇筑层厚度可适当加厚；基础约束区以上浇筑层厚度可采用 1.5m~3.0m。浇筑层间歇期宜采用 5d~7d。在基础约束区内应避免出现薄层长期停歇的浇筑块。宜在下层混凝土最高温度出现后，开始浇筑上层混凝土。

**10.1.5** 碾压混凝土宜薄层浇筑连续上升。

### 10.2 原材料温度控制

**10.2.1** 水泥运至工地的入罐或入场温度不宜高于 65℃。

**10.2.2** 应控制成品料仓内骨料的温度和含水率，细骨料表面含水率不宜超过 6%，应采取下列主要措施：



1 成品料仓宜采用筒仓；料仓除有足够的容积外，宜维持骨料不小于 6m 的堆料厚度，或取料温度不受日气温变幅的影响；细骨料料仓的数量和容积应足够细骨料脱水轮换使用。

2 料仓搭设遮阳防雨棚，粗骨料可采取喷雾降温。

3 宜通过地坑取料，采取其他运料方式时应减少转运次数。

10.2.3 拌和水储水池应有防晒设施，储水池至拌和楼的水管应包裹保温材料。

### 10.3 混凝土生产过程温度控制

10.3.1 降低混凝土出机口温度宜采取下列措施：

1 常态混凝土的粗骨料可采用风冷、浸水、喷淋冷水等预冷措施，碾压混凝土的粗骨料宜采用风冷措施。采用风冷时冷风温度宜比骨料冷却终温低 10℃，且经风冷的骨料终温不应低于 0℃。喷淋冷水的水温不宜低于 2℃。

2 拌和楼宜采用加冰、加制冷水拌和混凝土。加冰时宜采用片冰或冰屑，常态混凝土加冰率不宜超过总水量的 70%，碾压混凝土加冰率不宜超过总水量的 50%。加冰时可适当延长拌和时间。

10.3.2 混凝土出机口温度可按本规范附录 E 的方法计算。

### 10.4 混凝土运输和浇筑过程温度控制

10.4.1 应提出混凝土运输及卸料时间要求；混凝土运输机具应采取隔热、保温、防雨等措施。应提出混凝土坯层覆盖时间要求；混凝土入仓后、初凝前应及时进行平仓、振捣或碾压。混凝土出拌和楼机口至振捣或碾压结束，温度回升值不宜超过 5℃，且混凝土浇筑温度不宜大于 28℃。入仓温度和浇筑温度可按本规范附录 E 的方法计算。

10.4.2 混凝土平仓、振捣或碾压后，应及时覆盖聚乙烯泡沫塑料板、聚乙烯气垫薄膜、保温被等保温材料；浇筑或碾压上坯层混凝土时应揭去保温材料。

**10.4.3** 浇筑仓内气温高于  $25^{\circ}\text{C}$  时应采用喷雾措施，喷雾应覆盖整个仓面，雾滴直径应达到  $40\mu\text{m}\sim 80\mu\text{m}$ ，同时应防止混凝土表面积水。喷雾后仓内气温较仓外气温降低值不宜小于  $3^{\circ}\text{C}$ 。混凝土终凝后，可结束喷雾。

## **10.5 浇筑后温度控制**

**10.5.1** 混凝土浇筑后温度控制宜采用冷却水管通水冷却、表面流水冷却、表面蓄水降温等措施。坝体有接缝灌浆要求时，应采用水管通水冷却方法。

**10.5.2** 高温季节，常态混凝土终凝后可采用表面流水冷却或表面蓄水降温措施。表面流水冷却的仓面宜设置花管喷淋，形成表面流动水层；表面蓄水降温应在混凝土表面形成厚度不小于  $5\text{cm}$  的覆盖水层。

**10.5.3** 坝高大于  $200\text{m}$  或温度控制条件复杂时，宜采用自动调节通水降温的冷却控制方法。



## 11 通 水 冷 却

### 11.1 一 般 规 定

**11.1.1** 宜通过分期通水冷却控制混凝土温度。分期通水冷却可包括初期、中期、后期通水冷却。

**11.1.2** 在已确定浇筑温度、浇筑层厚度和浇筑间歇期等措施的前提下，混凝土最高温度仍高于容许最高温度时，应进行初期通水冷却。

**11.1.3** 符合下列条件之一者应进行中期通水冷却：

1 初期通水冷却结束后，混凝土温度回升值过大的。

2 坝体临时挡水、坝面及孔洞临时过水或其他需要减小混凝土内外温差的。

3 需要分担后期冷却降温幅度的。

**11.1.4** 在计划时间段内，自然冷却混凝土温度达不到接缝灌浆或接触灌浆温度要求时，应进行后期通水冷却。

**11.1.5** 各期通水冷却宜采用小温差、均匀缓慢的降温方式，避免温度陡降。通水冷却应符合混凝土容许最高温度、降温速率、降温幅度，以及不同龄期混凝土温度应力控制标准的规定。

**11.1.6** 用作坝内冷却水管的管材应有良好的导热性能和足够的强度。固结灌浆盖重区需要固定冷却水管时宜采用金属管，其他部位可采用高密度聚乙烯塑料管或金属管。

**11.1.7** 冷却水管流向变换间隔时间不宜超过 24h，可选择 12h 或 24h 换向。

**11.1.8** 坝外输水干管和支管应包裹保温材料，冷水厂出口至坝内冷却水管进口的水温回升值不宜超过 2℃。

**11.1.9** 冷水厂制冷容量计算应符合现行行业标准《水电水利工程混凝土预冷系统设计导则》DL/T 5386 的有关规定。

## **11.2 冷却水管布置**

**11.2.1** 冷却水管在铅直断面上可呈梅花形、正方形或长方形布置。冷却水管应呈蛇形铺设在浇筑层底部的层面上；当浇筑层较厚时可在浇筑层中部加铺一层冷却水管。

**11.2.2** 冷却水管的水平间距宜采用 1.0m~1.5m，铅直间距宜采用 1.5m~2.0m 或与浇筑层厚一致。

**11.2.3** 单根水管长度不宜超过 300m，当同一仓面上布置多根水管时，水管长度宜基本相当。坝内冷却水管不应分叉设置。

**11.2.4** 冷却水管距离上下游面、孔洞、廊道、缝面的距离宜采用 1.0m~2.0m。冷却水管进出口应引至廊道内或坝后靠近栈桥处。

**11.2.5** 冷却水管不宜过缝设置，需过缝时应有适应水管及混凝土变形的措施。冷却水管不应穿越廊道和孔洞。

**11.2.6** 固结灌浆盖重区的冷却水管应进行固定，在盖重区布置钻孔应避开冷却水管。

## **11.3 初期通水冷却**

**11.3.1** 初期通水开始时间宜与混凝土下料时间同步，延迟通水开始时间不宜超过 12h。初期通水过程中的混凝土最高温度不应高于容许最高温度。初期通水冷却宜连续进行；初期通水冷却时间由计算确定，宜为 14d~21d；通水结束时混凝土温度宜比容许最高温度低 5℃~8℃。

**11.3.2** 初期通水冷却混凝土日最大降温不宜超过 1℃，且日平均降温不宜超过 0.6℃。

**11.3.3** 混凝土温度与冷却水管进口水温之差不宜超过 20℃。

**11.3.4** 自开始通水至混凝土最高温度出现后 2d，通水流量宜为 1.2m<sup>3</sup>/h~2.0m<sup>3</sup>/h；最高温度出现 2d 后，通水流量不宜超过

1.2m<sup>3</sup>/h。

## 11.4 中期通水冷却

**11.4.1** 坝段内中期通水冷却同批次冷却的高度不宜小于 0.2 倍冷却区域的最大底宽，同批次冷却范围内的所有冷却水管应同时开始通水和同时结束通水。

**11.4.2** 防止混凝土温度回升过大的中期通水冷却，混凝土温度宜保持为初期通水冷却结束时的温度。

**11.4.3** 需要减小坝体混凝土内外温差的中期通水冷却，宜提前 1 个~2 个月进行，中期通水冷却结束时混凝土温度可比初期通水冷却结束时的温度低 3℃~7℃。

**11.4.4** 分担后期通水冷却降温幅度的中期通水冷却，其降温幅度、冷却批次和程序宜与后期通水冷却统一规划。中期通水冷却结束时混凝土温度宜比初期通水冷却结束时的温度低 3℃~5℃。

**11.4.5** 混凝土温度与进口水温之差不应超过 20℃，宜控制在 15℃以内。

**11.4.6** 中期通水冷却混凝土日最大降温不宜超过 0.6℃，且日平均降温不宜超过 0.4℃。

**11.4.7** 中期通水冷却的通水流量不宜超过 1.2m<sup>3</sup>/h；可间歇通水，通水与闷水的间隔时间根据温度监测情况动态调整。

## 11.5 后期通水冷却

**11.5.1** 拱坝后期通水冷却开始时的混凝土龄期不宜少于 90d；重力坝后期通水冷却开始时的混凝土龄期不宜少于 60d。

**11.5.2** 应进行后期通水冷却规划，并应符合下列要求：

1 各坝段应自下而上分批次进行后期通水冷却，后期通水冷却宜连续进行。

2 坝段内后期通水冷却过程中应避免在高程方向及上下游方向形成过大的温度梯度，并应符合下列要求：

1) 高坝的坝段内第一冷却批次自下而上应包括两个冷却区、一个冷却过渡区、一个盖重区，且冷却区和冷却过渡区的总高度不宜小于 0.4 倍坝段最大底宽。第二冷却批次自下而上应包括一个冷却保温区、一个冷却区、一个冷却过渡区、一个盖重区，且冷却保温区、冷却区和冷却过渡区的总高度不宜小于 0.4 倍坝段最大底宽。盖重区厚度不应小于 6m。高坝的坝段内后期通水冷却程序宜符合表 11.5.2-1 的规定。

表 11.5.2-1 高坝的坝段内后期通水冷却程序

后期冷却 分区编号		冷却批次编号									
		1	2	3	...	$n-3$	$n-2$	$n-1$			
	$n$	盖重区	盖重区	盖重区	盖重区	盖重区	冷却 过渡区	冷却区			
	...					冷却 过渡区	冷却区	冷却 保温区			
	...					冷却区	冷却 保温区	可灌区			
	...					冷却 保温区	可灌区				
	...					可灌区					
	...										
	...										
	...										
	...										
	...										
	...										
	...										
	5	盖重区	冷却 过渡区	可灌区							
	4	冷却 过渡区	冷却区								

续表 11.5.2-1

后期冷却 分区编号	冷却批次编号						
	1	2	3	...	$n-3$	$n-2$	$n-1$
3	冷却 过渡区	冷却区	冷却 保温区	可灌区	可灌区	可灌区	可灌区
2	冷却区	冷却 保温区	可灌区				
1	冷却区	可灌区					
坝基							

注：表中每个冷却区、冷却过渡区、冷却保温区包括的接缝灌浆分区个数宜为整数。

2) 中、低坝的坝段内第一冷却批次自下而上应包括一个冷却区、一个冷却过渡区、一个盖重区，且冷却区和冷却过渡区的总高度不宜小于 0.4 倍坝段最大底宽。盖重区厚度不应小于 6m。中、低坝的坝段内后期通水冷却程序应符合表 11.5.2-2 的规定。

表 11.5.2-2 中、低坝的坝段内后期通水冷却程序

后期冷却 分区编号	冷却批次编号							
	1	2	3	...	$n-2$	$n-1$	$n$	
$n$					盖重区	冷却 过渡区	冷却区	
...					冷却 过渡区	冷却区	可灌区	
...					冷却区	可灌区		
...				盖重区	可灌区			
...				冷却 过渡区				可灌区
...				冷却区				
...			盖重区	可灌区				
4		冷却 过渡区						

续表 11.5.2-2

后期冷却 分区编号	冷却批次编号						
	1	2	3	...	$n-2$	$n-1$	$n$
3	盖重区	冷却 过渡区	冷却区	可灌区	可灌区	可灌区	可灌区
2	冷却 过渡区	冷却区	可灌区				
1	冷却区	可灌区					
坝基							

注：表中每个冷却区、冷却过渡区包括的接缝灌浆分区个数宜为整数。

- 3) 冷却过渡区降温幅度宜为该区后期通水冷却总降温幅度的 0.5 倍。
- 4) 坝段内同一冷却批次的所有冷却水管应同时开始通水和同时结束通水。
- 3 冷却区应冷却至相应的分区接缝灌浆温度。
- 4 应保持冷却保温区温度与分区接缝灌浆温度相同。
- 11.5.3 混凝土温度与进口水温之差不应超过 15℃，宜控制在 10℃ 以内。
- 11.5.4 后期通水冷却混凝土日最大降温不宜超过 0.5℃，且日平均降温不宜超过 0.3℃；通水流量不宜超过 1.2m<sup>3</sup>/h。
- 11.5.5 后期通水冷却混凝土达到分区接缝灌浆温度后应及时进行接缝灌浆；否则应进行间歇通水控制温度回升，间歇通水应避免超冷。



## 12 特殊部位的温度控制

### 12.1 陡 坡 坝 段

**12.1.1** 陡坡坝段基础混凝土容许温差宜采用本规范第 8.1.2 条中基础容许温差低值，或比非陡坡坝段基础容许温差低  $1^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

**12.1.2** 宜采用三维有限元法进行陡坡坝段基础混凝土温度应力计算；高拱坝计算时宜选择一个或两个先浇筑的支撑坝段与陡坡坝段联合建模。

**12.1.3** 陡坡坝段基础混凝土应短间歇连续浇筑，避免出现老混凝土。楔形体部位浇筑层厚度不宜小于 2.0m，宜采用平铺法浇筑。

**12.1.4** 需进行接触灌浆的陡坡坝段，灌浆前应将基础混凝土冷却至相应部位的稳定温度。

### 12.2 施工期临时过水的坝块

**12.2.1** 施工期需临时过水的坝块，宜采用有限元法通过温度应力计算确定温度控制措施，可采取下列措施：

1 过水前通水冷却，将过水坝块及相邻坝段的坝块温度降至设计温度。

2 在表层混凝土内铺设防裂或限裂钢筋。

3 在坝块顶表面浇筑薄层低强度混凝土或设置其他材质保护层。过水后清除保护层。

**12.2.2** 开始过水时，混凝土强度不应低于设计强度的 85%，或混凝土龄期不少于 14d。

**12.2.3** 过水后，在老混凝土面上浇筑混凝土应符合本规范第 8.1.3 条的规定。



### 12.3 填 塘 混 凝 土

**12.3.1** 填塘深度超过 3m 时，宜采用分层浇筑和通水冷却等措施满足混凝土容许最高温度要求。填塘混凝土容许最高温度可在相应坝段强约束区混凝土容许最高温度的基础上适当放宽。

**12.3.2** 填塘混凝土有接触灌浆要求时，应采用通水冷却将填塘混凝土冷却至设计温度。条件允许时，接触灌浆可结合坝基固结灌浆一并实施。

**12.3.3** 填塘混凝土可采用发热量较低或氧化镁含量较高的水泥。

### 12.4 闸 墩

**12.4.1** 闸墩分缝宜与坝体分缝位置一致。当闸墩需预留宽槽时，除应增设插筋或构造补强钢筋外，宽槽回填宜采用微膨胀混凝土。

**12.4.2** 中、低坝闸墩容许温差可按本规范第 8.1.2 条第 1 款的规定取值；高坝宜采用三维有限单元法将闸墩与坝体联合建模进行温度应力计算，确定闸墩混凝土容许最高温度。

**12.4.3** 闸墩混凝土应采取短间歇均匀上升的浇筑方式；间歇时间可为 5d~7d，不宜大于 14d，避免出现老混凝土。闸墩布置冷却水管时，可适当加密。

### 12.5 孔 洞 周 边 混 凝 土

**12.5.1** 坝段内孔洞两侧和孔洞上下方各 1 倍孔洞直径的周边混凝土，其容许最高温度应采用三维有限元法通过温度应力计算分析确定；施工期孔洞周边混凝土温度低于稳定温度时，其容许最高温度也应采用三维有限元法通过温度应力计算分析确定。

**12.5.2** 孔洞周边混凝土浇筑应采取短间歇均匀上升的浇筑方式；间歇时间可为 5d~7d，不宜大于 14d，避免出现老混凝土；孔洞两侧混凝土长宽比较大时，可设置施工缝分段浇筑；孔洞封顶浇筑层厚度不宜小于 1.5m。

## 12.6 坝身封堵体混凝土

**12.6.1** 坝身封堵体混凝土容许最高温度宜采用有限元法通过温度应力计算分析确定，或在周边混凝土容许最高温度基础上适当放宽。

**12.6.2** 封堵体周边缝应进行接缝灌浆，灌浆前应将封堵体混凝土冷却至相应部位的稳定温度。

**12.6.3** 封堵体混凝土宜采用低流态混凝土；可采用发热量较低或氧化镁含量较高的水泥。

## 12.7 垫座混凝土

**12.7.1** 对高坝，应结合基岩均匀性、坝体分缝等要素，采用三维有限元法进行温度应力分析，提出垫座混凝土分缝及温度控制措施。

**12.7.2** 垫座有分缝且需接缝灌浆时，灌浆前宜将垫座混凝土冷却至相应部位的稳定温度。

## 12.8 抗冲磨混凝土

**12.8.1** 应通过专项试验选择抗冲磨混凝土原材料及配合比。抗冲磨混凝土所用原材料除应符合本规范第3章的规定外，还应符合下列要求：

- 1 宜优先选用强度等级不低于42.5级的中热硅酸盐水泥。
- 2 应选用质地坚硬、级配良好的天然或人工骨料，细骨料应选用中粗砂。
- 3 宜选用Ⅰ级粉煤灰、磨细矿渣等活性较高的掺合料。
- 4 可掺用适量的硅粉、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、纤维素纤维。
- 5 宜选用减水率较高的减水剂，可选择聚羧酸类减水剂。

**12.8.2** 对面积较大的抗冲磨混凝土宜进行分缝分块浇筑。抗冲

磨混凝土容许最高温度应通过有限元法进行温度应力计算分析确定。

**12.8.3** 宜利用气温适宜的时段浇筑抗冲磨混凝土。抗冲磨混凝土宜与下层混凝土同时浇筑。

**12.8.4** 抗冲磨混凝土表面应自终凝开始不间断地流水养护至设计龄期。表面保护宜从混凝土出现最高温度后开始，保护至过水前。流水养护期间遇到气温骤降时，应停止流水养护，宜采取既有保温又有保湿效果的综合保护措施。

## **12.9 并缝部位混凝土**

**12.9.1** 可在缝端设置骑缝廊道、骑缝半圆钢管、单层或多层限裂钢筋进行并缝。

**12.9.2** 缝端顶面以上高度为 0.2 倍缝端平面最大底宽的混凝土，容许最高温度宜降低  $1^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。宜利用气温适宜的时段短间歇均匀浇筑，避免出现老混凝土。

## 13 表面保护和养护

### 13.1 表面保护

**13.1.1** 大坝上下游面、坝段侧面、浇筑层面混凝土均应进行保护设计。可采用有限元法、影响线法或经验公式计算表面温度应力，提出表面保护时段及保护标准。闸墩、抗冲磨混凝土、无钢衬的孔洞等特殊部位宜进行专门的表面保护设计。气温日变幅对混凝土表面温度应力影响较大时，宜考虑气温日变幅作为表面保护设计的因素。

**13.1.2** 选用的保温材料应符合保护标准，保温材料的保温效果宜通过试验确定。保温材料应具有保温性能好、耐久性强、无毒、耐老化、不易燃烧、方便施工等特点。

**13.1.3** 施工期坝内孔口、廊道、竖井等部位应进行封闭保温。

**13.1.4** 坝址区日平均气温在 2d~6d 内连续下降超过 5℃时，应分析加强表面保护措施必要性。

**13.1.5** 对于高坝及严寒和寒冷地区的大坝，其上下游面等永久暴露面，施工期可采取全年保温方式。

### 13.2 养 护

**13.2.1** 坝体混凝土施工过程中出现的所有临时或永久暴露面均应进行养护。常态混凝土应在初凝后 3h 开始保湿养护；碾压混凝土可在收仓后进行喷雾养护，并尽早开始保湿养护。养护期内应始终使混凝土表面保持湿润状态。

**13.2.2** 混凝土养护可采用喷雾、旋喷洒水、表面流水、表面蓄水、花管喷淋、覆盖潮湿草袋、铺湿砂层或湿砂袋、涂刷养护剂、人

工洒水等方式。

**13.2.3** 混凝土宜养护至设计龄期，养护时间不宜少于 28d。闸墩、抗冲磨混凝土等特殊部位宜适当延长养护时间。

## 14 低温季节施工温度控制

### 14.1 一般规定

**14.1.1** 日平均气温连续 5d 稳定在  $5^{\circ}\text{C}$  以下或最低气温连续 5d 稳定在  $-3^{\circ}\text{C}$  以下时，应按低温季节施工进行混凝土温度控制，提出包括混凝土原材料、拌和、运输和浇筑过程的保温防冻措施。

**14.1.2** 日平均气温在  $-20^{\circ}\text{C}$  以下时不宜浇筑混凝土，需要浇筑混凝土时应经论证。

**14.1.3** 在气候温和地区宜采用蓄热法保温。在严寒和寒冷地区，日平均气温在  $-10^{\circ}\text{C}$  以上时宜采用蓄热法保温；日平均气温为  $-20^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$  时可采用综合蓄热法或暖棚法保温。

**14.1.4** 大体积混凝土早期允许受冻临界强度应不低于  $7.0\text{MPa}$  或成熟度不低于  $1800^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ ；混凝土成熟度计算方法应符合现行行业标准《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的有关规定。

### 14.2 原材料与拌和

**14.2.1** 拌制混凝土所用的骨料不应有冻块，宜采取下列措施：

- 1 骨料宜在低温季节前筛洗完毕，宜储备足够的成品料。
- 2 成品料仓宜搭设防雨防雪棚或采用筒仓。
- 3 宜通过地坑取料，骨料需要转运时宜对运输机具进行保温。

**14.2.2** 低温季节采用的外加剂品种和掺量宜通过适应性试验确定。

**14.2.3** 低温季节混凝土出机口温度应不低于  $5^{\circ}\text{C}$ ，宜采取下列措施：

- 1 宜采用热水拌和，拌和水温度不宜高于  $60^{\circ}\text{C}$ 。
- 2 当日平均气温连续 5d 低于  $-5^{\circ}\text{C}$  时，宜将骨料加热；粗骨



料可采取蒸汽加热,细骨料可在料仓底部铺设封闭的蛇形管加热。

3 拌和时宜先投入骨料与水拌和,再加入水泥。

14.2.4 低温季节混凝土拌和时间宜比常温季节适当延长,延长时间宜通过试验确定。

### 14.3 运 输 与 浇 筑

14.3.1 低温季节运输混凝土时宜选用大型混凝土运输机具,宜对混凝土运输机具保温,减少转运次数,保证混凝土拌和物在运输过程中不冻结。

14.3.2 在负温的基岩或老混凝土面上浇筑混凝土时,应将基岩或老混凝土加热至正温,且温度高于 $3^{\circ}\text{C}$ ,加热深度不小于 $10\text{cm}$ 。

14.3.3 宜尽量缩短浇筑时间,混凝土浇筑温度宜为 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

14.3.4 低温季节浇筑混凝土时,应对模板进行保温。混凝土平仓、振捣或碾压后仓面应覆盖保温材料;浇筑或碾压上坯层混凝土时应揭去保温材料。

14.3.5 混凝土浇筑完毕后,暴露表面应及时进行保温,在混凝土强度达到允许受冻临界强度前,混凝土温度不应低于 $5^{\circ}\text{C}$ 。

14.3.6 低温季节浇筑的混凝土拆模时,强度应大于允许受冻临界强度;模板拆除后应继续进行保温,并应符合本规范第13.1节的规定。



## 15 施工期温度监测与分析

### 15.1 一般规定

**15.1.1** 应对施工期混凝土温度控制全过程进行监测，监测内容主要包括原材料温度监测、混凝土温度监测、通水冷却监测、浇筑仓气温及保温层温度监测等。施工期温度监测原始记录应完整有效。

**15.1.2** 测温仪器应经过率定，其测温误差为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。

### 15.2 原材料温度监测

**15.2.1** 水泥、掺合料、骨料、水和外加剂等原材料的温度应至少每 4h 测量 1 次，低温季节施工宜加密至每 1h 测量 1 次。

**15.2.2** 测量水、外加剂溶液和细骨料的温度时，温度传感器或温度计插入深度不小于 10cm；测量粗骨料温度时，插入深度不小于 10cm 并大于骨料粒径的 1.5 倍，周围用细粒径料充填。

### 15.3 混凝土出机口温度、入仓温度和浇筑温度监测

**15.3.1** 混凝土出机口温度应每 4h 测量 1 次；低温季节施工时宜加密至每 2h 测量 1 次。

**15.3.2** 混凝土入仓后平仓前，应测量深 5cm~10cm 处的入仓温度。入仓温度应每 4h 测量 1 次；低温季节施工时，宜加密至每 2h 测量 1 次。

**15.3.3** 混凝土经平仓、振捣或碾压后、覆盖上坯混凝土前，应测量本坯混凝土面以下 5cm~10cm 处的浇筑温度。浇筑温度测温点应均匀分布，且应覆盖同一仓面不同品种的混凝土；同一坯

层每  $100\text{m}^2$  仓面面积应有 1 个测温点，且每个坯层应不少于 3 个测温点。

#### 15.4 混凝土内部温度监测

**15.4.1** 施工期坝体混凝土温度监测应充分利用坝内埋设的永久观测仪器。

**15.4.2** 混凝土温度监测可采用电阻式温度计、数字式温度计等观测仪器；也可采用预设测温孔灌水方法，孔深大于 15cm，用温度计测量。

**15.4.3** 各坝段基础约束区每 1 个~2 个浇筑层宜布置 1 个测温点，非约束区每 2 个~3 个浇筑层宜布置 1 个测温点；自开始浇筑至最高温度出现期间每 8h 或 12h 测量 1 次，最高温度出现后至上层混凝土覆盖前每 12h 或 24h 测量 1 次；高坝宜增加测温点和测温频次。

#### 15.5 通水冷却监测

**15.5.1** 应在每仓混凝土中选择 1 根~3 根冷却水管进行进出口水温、流量、压力的测量，并记录各期通水开始时间、结束时间。水温、流量、压力宜每 6h~12h 测量 1 次。

**15.5.2** 各期通水冷却结束时，宜采用水管闷水测温方法监测混凝土温度，闷水时间宜采用 5d~7d，并记录闷水开始日期、结束日期及测温结果。

#### 15.6 浇筑仓气温及保温层温度监测

**15.6.1** 混凝土施工过程中，应测量仓内中心点附近距混凝土表面高度 1.5m 处的气温，并同时测量仓外气温。宜采用自动测温仪器；人工测温时，每天应至少测量 4 次。

**15.6.2** 混凝土表面保温期间，应选择典型保温部位及保温方法进行保温层下的混凝土表面温度测量，可在混凝土最高温度出现前

每 8h 观测 1 次，最高温度出现至 28d 每 24h 观测 1 次，28d 至保温材料拆除前每周观测 1 次。

**15.6.3** 气温骤降期间，宜增加仓内外气温和保温层下的混凝土表面温度监测频次。

## **15.7 数据分析与反馈**

**15.7.1** 应对监测得到的温度控制数据进行整编、分析和处理。

**15.7.2** 应按仓位统计混凝土出机口温度、浇筑温度、最高温度；埋设冷却水管的部位，应按仓位或冷却批次统计各期水管冷却的降温速率、降温幅度。

**15.7.3** 应绘制各坝段、各部位的温度控制状况图表，分析评价温度控制效果。

**15.7.4** 应依据温度控制实施效果进行温度过程预测，对可能超出控制标准的部位提出预警。

## 附录 A 混凝土性能参数估算

### A.1 混凝土绝热温升

**A.1.1** 混凝土绝热温升可采用双曲线式或复合指数式进行拟合，并按下列公式计算：

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 \tau}{n + \tau} \quad (\text{A.1.1-1})$$

$$\theta(\tau) = \theta_0 (1 - e^{-a\tau^b}) \quad (\text{A.1.1-2})$$

式中： $\theta(\tau)$ ——龄期 $\tau$ 时混凝土绝热温升（℃）；

$\tau$ ——龄期（d）；

$\theta_0$ ——最终绝热温升（℃）；

$a$ 、 $b$ 、 $n$ ——常数。

**A.1.2** 混凝土绝热温升无试验成果时，可根据胶凝材料水化热按下式估算：

$$\theta(\tau) = \frac{Q(\tau)W}{c\rho} \quad (\text{A.1.2})$$

式中： $\theta(\tau)$ ——龄期 $\tau$ 时混凝土绝热温升（℃）；

$Q(\tau)$ ——龄期 $\tau$ 时胶凝材料水化热（kJ/kg）；

$W$ ——单位胶凝材料用量（kg/m<sup>3</sup>）；

$c$ ——混凝土比热容 [kJ/（kg·℃）]；

$\rho$ ——混凝土密度（kg/m<sup>3</sup>）。

**A.1.3** 胶凝材料水化热无试验成果时，水泥水化热可按下式估算：

$$Q_\tau = Q_0 (1 - e^{-m\tau^n}) \quad (\text{A.1.3})$$

式中： $Q_\tau$ ——龄期 $\tau$ 时水泥水化热（kJ/kg）；

$Q_0$ ——最终水化热 (kJ/kg), 可按表 A.1.3 的规定取值;  
 $\tau$ ——龄期 (d);  
 $m$ 、 $n$ ——常数, 可按表 A.1.3 的规定取值。

表 A.1.3 水泥水化热的  $Q_0$  及  $m$ 、 $n$  值

水泥品种	$Q_0$	$m$	$n$
42.5 级普通硅酸盐水泥	340	0.69	0.56
32.5 级普通硅酸盐水泥	340	0.36	0.74
42.5 级中热硅酸盐水泥	280	0.79	0.70

A.2 混凝土导热系数、比热容、导温系数

A.2.1 混凝土导热系数和比热容无试验成果时, 混凝土导热系数和比热容可按下列公式进行估算:

$$\lambda = \frac{\sum W_i \lambda_i}{\sum W_i} \tag{A.2.1-1}$$

$$c = \frac{\sum W_i c_i}{\sum W_i} \tag{A.2.1-2}$$

式中:  $\lambda$ ——混凝土导热系数 [kJ/ (m · h · °C)];  
 $W_i$ ——混凝土各组成成分的用量 (kg/m<sup>3</sup>);  
 $\lambda_i$ ——混凝土各组成成分的导热系数 [kJ/ (m · h · °C)], 可按表 A.2.1 的规定取值;  
 $c$ ——混凝土比热容 [kJ/ (kg · °C)];  
 $c_i$ ——混凝土各组成成分的比热容 [kJ/ (kg · °C)], 可按表 A.2.1 的规定取值。

表 A.2.1 混凝土组成成分的  $\lambda_i$  及  $c_i$  值

材料	导热系数 $\lambda_i$ [kJ/ (m · h · °C)]	比热容 $c_i$ [kJ/ (kg · °C)]
水	2.16	4.19

续表 A.2.1

材料	导热系数 $\lambda_i$ [kJ/ (m · h · °C)]	比热容 $c_i$ [kJ/ (kg · °C)]
水泥	4.57	0.52
石英砂	11.10	0.74
玄武岩	6.87	0.77
白云岩	15.31	0.82
花岗岩	10.48	0.72
石灰岩	14.25	0.76
石英岩	16.80	0.72
粗面岩	6.80	0.77

A.2.2 混凝土导温系数可按下式计算：

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \tag{A.2.2}$$

式中： $a$  ——混凝土导温系数 (m<sup>2</sup>/h)；  
 $\lambda$  ——混凝土导热系数 [kJ/ (m · h · °C)]；  
 $c$  ——混凝土比热容 [kJ/ (kg · °C)]；  
 $\rho$  ——混凝土密度 (kg/m<sup>3</sup>)。

A.3 混凝土线膨胀系数、泊松比、密度

A.3.1 混凝土线膨胀系数无试验成果时，不同品种骨料混凝土线膨胀系数可按表 A.3.1 的规定取值。

表 A.3.1 不同品种骨料混凝土线膨胀系数 (1/°C)

名 称	线膨胀系数
石英岩混凝土	11×10 <sup>-6</sup>
砂岩混凝土	10×10 <sup>-6</sup>
花岗岩混凝土	9×10 <sup>-6</sup>

续表 A.3.1

名 称	线膨胀系数
玄武岩混凝土	$8\times10^{-6}$
石灰岩混凝土	$7\times10^{-6}$

**A.3.2** 混凝土泊松比无试验成果时可取 0.167~0.200。

**A.3.3** 混凝土密度无试验成果时可取  $2350\text{kg/m}^3\sim2450\text{kg/m}^3$ 。



## 附录 B 稳定温度场和准稳定温度场边界温度计算

### B.1 气温与日照

**B.1.1** 气温年变化的月平均气温可按式计算：

$$T_a = T_{am} + A_a \cos \omega(\tau - \tau_0) \quad (\text{B.1.1-1})$$

式中：  $T_a$  ——多年月平均气温 (°C)；

$\tau$  ——时间变量 (月)；

$\tau_0$  ——初始相位 (月)，纬度高于 30°地区，取 6.5 月，纬度低于或等于 30°地区，取 6.7 月；

$\omega$  ——圆频率， $\omega = 2\pi/p$ ， $p$  为温度变化周期 (月)，取  $p = 12$  (月)；

$T_{am}$  ——多年年平均气温 (°C)；

$A_a$  ——多年平均气温年变幅 (°C)。

$T_{am}$ 、 $A_a$  应采用当地实测多年月平均气温按下列公式计算：

$$T_{am} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ai} \quad (\text{B.1.1-2})$$

$$A_a = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} T_{ai} \cos \omega(\tau_i - \tau_0) \quad (\text{B.1.1-3})$$

式中：  $T_{ai}$  —— $i$  月多年平均气温 (°C)；

$\tau_i$  —— $i$  月计算时点， $\tau_i = i - 0.5$  (月)。

$A_a$  也可近似地按下式计算：

$$A_a = (T_{a7} - T_{a1})/2 \quad (\text{B.1.1-4})$$

式中：  $T_{a1}$ 、 $T_{a7}$  ——1 月、7 月多年平均气温 (°C)。

**B.1.2** 气温年变化的月平均气温也可按下式计算：

$$T_a(\tau) = T_{am} + \sum_{i=1}^5 [A_i \sin(\omega_i \tau + \theta_i)] \quad (\text{B.1.2-1})$$

式中：  $T_a(\tau)$  ——  $\tau$  月平均气温 (°C)；

$\tau$  —— 时间变量 (月)；

$T_{am}$  —— 多年年平均气温 (°C)；

$A_i$  —— 气温变幅 (°C)；

$\omega_i$  —— 角频率(弧度/月)， $\omega_1 \sim \omega_5$  分别为  $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{2\pi}{3}$ 、 $\pi$ ；

$\theta_i$  —— 初始相位 (rad)。

$T_{am}$ 、 $A_i$ 、 $\theta_i$  应采用当地实测多年平均气温按下列公式计算：

$$T_{am} = \frac{1}{12} \sum_{\tau=1}^{12} T_a^*(\tau) \quad (\text{B.1.2-2})$$

$$A_i = \frac{1}{6} \left\{ \cos \theta_i \sum_{\tau=1}^{12} [T_a^*(\tau) \sin \omega_i \tau] + \sin \theta_i \sum_{\tau=1}^{12} [T_a^*(\tau) \cos \omega_i \tau] \right\} \quad (\text{B.1.2-3})$$

$$\theta_i = \arctan \frac{\sum_{\tau=1}^{12} [T_a^*(\tau) \cos \omega_i \tau]}{\sum_{\tau=1}^{12} [T_a^*(\tau) \sin \omega_i \tau]} \quad (\text{B.1.2-4})$$

式中：  $T_a^*(\tau)$  —— 当地实测  $\tau$  月平均气温 (°C)。

注：式 (B.1.2-1) 中的简谐函数项也可取第一项或前两项。

**B.1.3** 运行期坝面暴露在空气中时，坝面温度应为气温与日照影响之和，通常简化为在当地实测气温的基础上增加 2°C~4°C 的日照影响。日照影响也可考虑纬度、季节、云量、河谷地形等因素分析确定。

## B.2 坝前水库水温

**B.2.1** 水库水温分布类型可通过参数  $\alpha$ - $\beta$  判别法确定，结合类比分析予以估判，并应符合下列规定。

1 判别系数应按下列公式进行计算:

$$\alpha = W / V \quad (\text{B.2.1-1})$$

$$\beta = W_1 / V \quad (\text{B.2.1-2})$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ ——判别参数;

$W$ ——多年平均年径流量 ( $\text{m}^3$ );

$W_1$ ——一次洪水总量 ( $\text{m}^3$ );

$V$ ——正常蓄水位库容 ( $\text{m}^3$ )。

2 计算出  $\alpha$ 、 $\beta$  值之后, 应按下列方法判别水库水温分布类型:

1) 当  $\alpha \leq 10$  时, 水库水温分布类型为分层型。对于分层型水库, 如果遇到  $\beta > 1$  的洪水, 水库水温将出现临时混合现象; 但如果  $\beta < 0.5$  时, 洪水对水库水温的分布类型没有影响。

2) 当  $10 < \alpha < 20$  时, 水库水温分布类型为过渡型。

3) 当  $\alpha \geq 20$  时, 水库水温分布类型为混合型。

**B.2.2** 分层型水库表面年平均水温可按以下方式选取:

1 年平均气温在  $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  的一般地区和大于  $20^\circ\text{C}$  的炎热地区, 可按下列式估算:

$$T_s = T_{\text{am}} + \Delta b \quad (\text{B.2.2-1})$$

式中:  $T_s$ ——水库表面年平均水温 ( $^\circ\text{C}$ );

$T_{\text{am}}$ ——当地年平均气温 ( $^\circ\text{C}$ );

$\Delta b$ ——由于日照影响产生的水库表面年平均水温的温度增量 ( $^\circ\text{C}$ ), 可根据实测资料选取, 无实测资料时可取  $2^\circ\text{C}$ 。

2 在寒冷及严寒地区, 可按下列公式估算:

$$T_s = T'_{\text{am}} + \Delta b \quad (\text{B.2.2-2})$$

$$T'_{\text{am}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_i \quad (\text{B.2.2-3})$$

$$T_i = \max(0, T_{ai}) \tag{B.2.2-4}$$

式中：  $T'_{am}$ ——修正后的年平均气温（℃）；  
 $T_i$ ——修正后的月平均气温（℃），当月平均气温等于或低于 0℃ 时，该月月平均气温应按 0℃ 取值；  
 $T_{ai}$ ——月平均气温（℃）。

**B.2.3 分层型水库表面水温年变幅  $A_0$  可按以下方式选取：**

**1 寒冷及严寒地区，可按下式计算：**

$$A_0 = \frac{1}{2}T_7 + \Delta a \tag{B.2.3-1}$$

式中：  $A_0$ ——水库表面温度年变幅（℃）；  
 $T_7$ ——7 月平均气温（℃）；  
 $\Delta a$ ——由于日照影响产生的水库表面温度年变幅的温度增量（℃），可根据实测资料选取，无实测资料时可取 1.5℃。

**2 一般及炎热地区，可按下式计算：**

$$A_0 = \frac{1}{2}(T_7 - T_1) \tag{B.2.3-2}$$

式中：  $T_1$ ——1 月平均气温（℃）。

**B.2.4 水库底部年平均水温宜按以下方式选取：**

- 1** 水库底部年平均水温宜参照条件相近的已建水库的实测资料，用类比方法确定。
- 2** 如果没有可供类比的资料，对于深度在 50m 及以上的水库，水库底部年平均水温  $T_b$  可按表 B.2.4 取值。

表 B.2.4 水库底部年平均水温  $T_b$  建议值

	寒冷 (华北、西北)	一般 (华东、华中、西南)	炎热 (华南)
	6~7	7~10	10~12

**3** 对于深度在 50m 以下的水库，在严寒地区取 4℃~6℃，

在其他地区取最低三个月的平均气温。

**4** 在多泥沙河流上,如有可能形成异重流,应对水库底部温度增高的情况进行专门分析。

**5** 水库来水主要是融雪水时,应对水库底部温度降低的情况进行专门分析。

**B.2.5** 分层型水库的不同深度坝前水温年周期变化可按下列公式计算:

$$T(y, \tau) = T_m(y) + A(y) \cos \omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon) \quad (\text{B.2.5-1})$$

$$T_m(y) = c + (T_s - c)e^{-0.04y} \quad (\text{B.2.5-2})$$

$$c = (T_b - T_s g) / (1 - g) \quad (\text{B.2.5-3})$$

$$g = e^{-0.04H} \quad (\text{B.2.5-4})$$

$$A(y) = A_0 e^{-0.018y} \quad (\text{B.2.5-5})$$

$$\varepsilon = 2.15 - 1.30e^{-0.085y} \quad (\text{B.2.5-6})$$

式中:  $T(y, \tau)$  ——水深  $y$  处在时间为  $\tau$  时的水温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$y$  ——水深 (m);

$\tau$  ——时间 (月);

$T_m(y)$  ——水深  $y$  处的年平均水温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$A(y)$  ——水深  $y$  处的水温年变幅 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\omega$  ——取  $2\pi/12$ ;

$\tau_0$  ——气温最高的时间 (月), 气温通常以 7 月中旬为最高, 可取 6.5 月;

$\varepsilon$  ——水深  $y$  处的水温年变化相对于气温变化的相位差 (月);

$H$  ——水库深度 (m)。

## 附录 C 不稳定温度场计算

## C.1 热传导方程

**C.1.1** 坝体不稳定温度场应满足下式：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (\text{C.1.1-1})$$

式中：  $T$  ——混凝土温度 (°C)；

$\tau$  ——时间 (h)；

$a$  ——导温系数 ( $\text{m}^2/\text{h}$ )；

$\theta$  ——混凝土绝热温升 (°C)；

$x$ 、 $y$ 、 $z$  ——各向坐标 (m)。

**C.1.2** 热传导方程式 (C.1.1-1) 的边界条件应按下列方式选取：

1 混凝土与水接触时，应按下式计算：

$$T = f(\tau) \quad (\text{C.1.2-1})$$

式中：  $f(\tau)$  ——水温 (°C)。

2 混凝土表面热流量是时间的已知函数时，应按下式计算：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(\tau) \quad (\text{C.1.2-2})$$

式中：  $q(\tau)$  ——给定热流 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]，当  $q(\tau) = 0$  时为绝热

边界，即  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ；

$\lambda$  ——混凝土导热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ]；

$n$  ——边界表面外法线方向。

3 混凝土与空气接触时，应按下式计算：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a) \quad (\text{C.1.2-3})$$

式中:  $\beta$ ——表面放热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$T_a$ ——气温 ( $^\circ\text{C}$ )。

4 混凝土与固体接触时, 边界条件应按下列方式选取:

1) 混凝土与固体接触良好, 应按下列公式计算:

$$T = T_1 \quad (\text{C.1.2-4})$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \quad (\text{C.1.2-5})$$

2) 混凝土与固体接触不良, 应按下列公式计算:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{1}{R_c}(T_1 - T) \quad (\text{C.1.2-6})$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \quad (\text{C.1.2-7})$$

式中:  $T_1$ ——与混凝土接触的固体温度 ( $^\circ\text{C}$ );

$\lambda_1$ ——与混凝土接触的固体导热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$R_c$ ——因接触不良产生的热阻 ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kJ}$ ), 热阻值由试验确定。

## C.2 混凝土浇筑块温度场计算

**C.2.1** 可采用有限元法或差分法计算施工期混凝土浇筑块温度场。施工期混凝土浇筑块温度场应根据各浇筑层厚度及间歇期自建基面起逐层向上计算; 各浇筑层最高温度出现前的计算时间步长宜取  $0.25\text{d} \sim 0.5\text{d}$ , 以后可取  $1\text{d} \sim 2\text{d}$ 。

**C.2.2** 混凝土浇筑块的特征温度相互关系可按下列公式表示:

$$T = T_r + T_p \quad (\text{C.2.2-1})$$

$$\Delta T = T_r + T_p - T_f \quad (\text{C.2.2-2})$$

式中:  $T$ ——混凝土浇筑块温度 ( $^\circ\text{C}$ );



$\Delta T$ ——混凝土浇筑块温度与相应部位的稳定温度的差值 (°C);

$T_r$ ——混凝土浇筑块水化热温升 (°C);

$T_p$ ——混凝土浇筑温度 (°C);

$T_f$ ——浇筑块相应部位的稳定温度 (°C)。

**C.2.3** 采用差分法计算基础约束区温度场和非基础约束区温度场时应满足下列要求:

1 单向差分法应满足稳定条件  $a\Delta\tau/\Delta x^2 \leq 1/2$ , 双向差分应满足稳定条件  $a\Delta\tau/\Delta x^2 \leq 1/4$ 。

2 各浇筑层初始温度应取相应层的浇筑温度, 坝基初始温度取多年平均地温或相应月的月平均地温。

3 混凝土绝热温升增值  $\Delta\theta$ , 应取混凝土绝热温升过程线相应时段的增值; 混凝土和坝基界面的温升取 0.5 倍  $\Delta\theta$ ; 坝基  $\Delta\theta = 0$ 。

4 混凝土表面暴露在空气中时, 作用于表面的外界温度可取相应的月平均气温与日照影响之和, 并应采用混凝土表面与空气间的放热系数; 混凝土表面覆盖保温材料时, 作用于保温材料外表面的外界温度可取相应的月平均气温与日照影响之和, 并应采用混凝土表面与保温层之间的放热系数; 混凝土表面采用喷淋或薄层流水冷却时, 混凝土表面温度可取相应的月平均气温与水温之和的 1/2。

5 有初期通水冷却时, 可将表面冷却与初期通水冷却合并计算。

6 可整理出各计算点的最高温度值, 形成基础浇筑块中央垂直剖面的最高温度包络线, 以及其他后续温度应力计算所需剖面的最高温度包络线。

7 可将最高温度值减去相应计算点的稳定温度值, 得到最大温差包络线; 可将最高温度值减去相应计算点的浇筑温度值, 得到水化热最高温升包络线; 可将浇筑温度值减去相应计算点的稳定温度值, 得到均匀温差。

**C.2.4** 单向差分法可按式计算：

$$T_{n,\tau+\Delta\tau} = T_{n,\tau} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}(T_{n-1,\tau} + T_{n+1,\tau} - 2T_{n,\tau}) + \Delta\theta \quad (\text{C.2.4})$$

式中：  $T_{n,\tau}$  ——计算点 ( $n$ ) 在第  $\tau$  时段末的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T_{n,\tau+\Delta\tau}$  ——计算点 ( $n$ ) 在下一时段末 ( $\tau + \Delta\tau$ ) 的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T_{n-1,\tau}$ 、 $T_{n+1,\tau}$  ——计算点 ( $n$ ) 上下相邻的两点 ( $n-1$ 、 $n+1$ ) 在第  $\tau$  时段末的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$a$  ——混凝土导温系数 ( $\text{m}^2/\text{d}$ )；

$\Delta\tau$  ——计算中时间步长 ( $\text{d}$ )；

$\Delta x$  ——计算中所取距离分段 ( $\text{m}$ )；

$\Delta\theta$  ——在  $\tau$  至  $\tau + \Delta\tau$  时段的混凝土绝热温升增量 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

**C.2.5** 双向差分法可按式计算：

$$T_{mn,\tau+\Delta\tau} = T_{mn,\tau} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}(T_{m-1,\tau} + T_{m+1,\tau} + T_{n-1,\tau} + T_{n+1,\tau} - 4T_{mn,\tau}) + \Delta\theta \quad (\text{C.2.5})$$

式中：  $T_{mn,\tau}$  ——计算点 ( $m$ ,  $n$ ) 在第  $\tau$  时段末的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T_{mn,\tau+\Delta\tau}$  ——计算点 ( $m$ ,  $n$ ) 在下一时段末 ( $\tau + \Delta\tau$ ) 的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T_{m-1,\tau}$ 、 $T_{m+1,\tau}$  ——计算点 ( $m$ ,  $n$ ) 左右相邻的两点 ( $m-1$ 、 $m+1$ ) 在第  $\tau$  时段末的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$T_{n-1,\tau}$ 、 $T_{n+1,\tau}$  ——计算点 ( $m$ ,  $n$ ) 上下相邻的两点 ( $n-1$ 、 $n+1$ ) 在第  $\tau$  时段末的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；

$a$  ——混凝土导温系数 ( $\text{m}^2/\text{d}$ )；

$\Delta\tau$  ——计算中时间步长 ( $\text{d}$ )；

$\Delta x$  ——计算中所取距离分段 ( $\text{m}$ )；

$\Delta\theta$  ——在  $\tau$  至  $\tau + \Delta\tau$  时段的混凝土绝热温升增量 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

**C.3** 水管冷却温度场计算**C.3.1** 有热源时初期水管通水冷却温度场可按下列公式计算：

1 采用金属管时, 混凝土初期水管冷却可按下列公式计算:

$$T_m = T_w + X(T_0 - T_w) + X_1\theta_0 \quad (\text{C.3.1-1})$$

$$X = f\left(\frac{a\tau}{D^2}, \frac{\lambda L}{c_w \rho_w q_w}\right) \quad (\text{C.3.1-2})$$

$$X_1 = f\left(\frac{a\tau}{b^2}, b\sqrt{\frac{m}{a}}, \frac{b}{c}, \frac{\lambda L}{c_w \rho_w q_w}\right) \quad (\text{C.3.1-3})$$

式中:  $T_m$ ——混凝土平均温度 (°C);

$T_w$ ——冷却水水温 (°C);

$X$ ——混凝土平均温度残留比, 见图 C.3.1-1;

$T_0$ ——开始冷却时混凝土初温 (°C);

$X_1$ ——水管散热残留比, 见图 C.3.1-2;

$\theta_0$ ——混凝土绝热温升 (°C);

$a$ ——混凝土导温系数 ( $\text{m}^2/\text{h}$ );

$q_w$ ——水管通水流量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\tau$ ——混凝土浇筑后历时 (h);

$b$ ——冷却圆柱体的半径 (m);

$D$ ——冷却圆柱体的直径 (m);

$\lambda$ ——混凝土导热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$L$ ——单根水管总长 (m);

$c_w$ ——水的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$\rho_w$ ——水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$m$ ——混凝土水化热发散系数 (1/d);

$c$ ——冷却水管外半径 (m)。

当  $b/c \neq 100$  时, 将混凝土导温系数按下式修正成等效导温系数  $a'$  后, 仍可采用图 C.3.1-1、图 C.3.1-2, 按式 (C.3.1-1) 进行计算:

$$a' = a \frac{\ln 100}{\ln(b/c)} \quad (\text{C.3.1-4})$$

2 采用非金属管时,将混凝土导温系数按下式修正成等效导温系数  $a''$  后,仍可采用图 C.3.1-1、图 C.3.1-2,按式 (C.3.1-1) 进行计算:

$$a'' = a \frac{\ln 100}{\ln(b/r_1)} \tag{C.3.1-5}$$

$$r_1 = c \left( \frac{r_0}{c} \right)^\eta \tag{C.3.1-6}$$

$$\eta = \frac{\lambda}{\lambda_1} \tag{C.3.1-7}$$

式中:  $\lambda$ ——混凝土导热系数 [kJ/ (m · h · °C)];  
 $\lambda_1$ ——冷却水管导热系数 [kJ/ (m · h · °C)];  
 $c$ ——冷却水管外半径 (m);  
 $r_0$ ——冷却水管内半径 (m)。

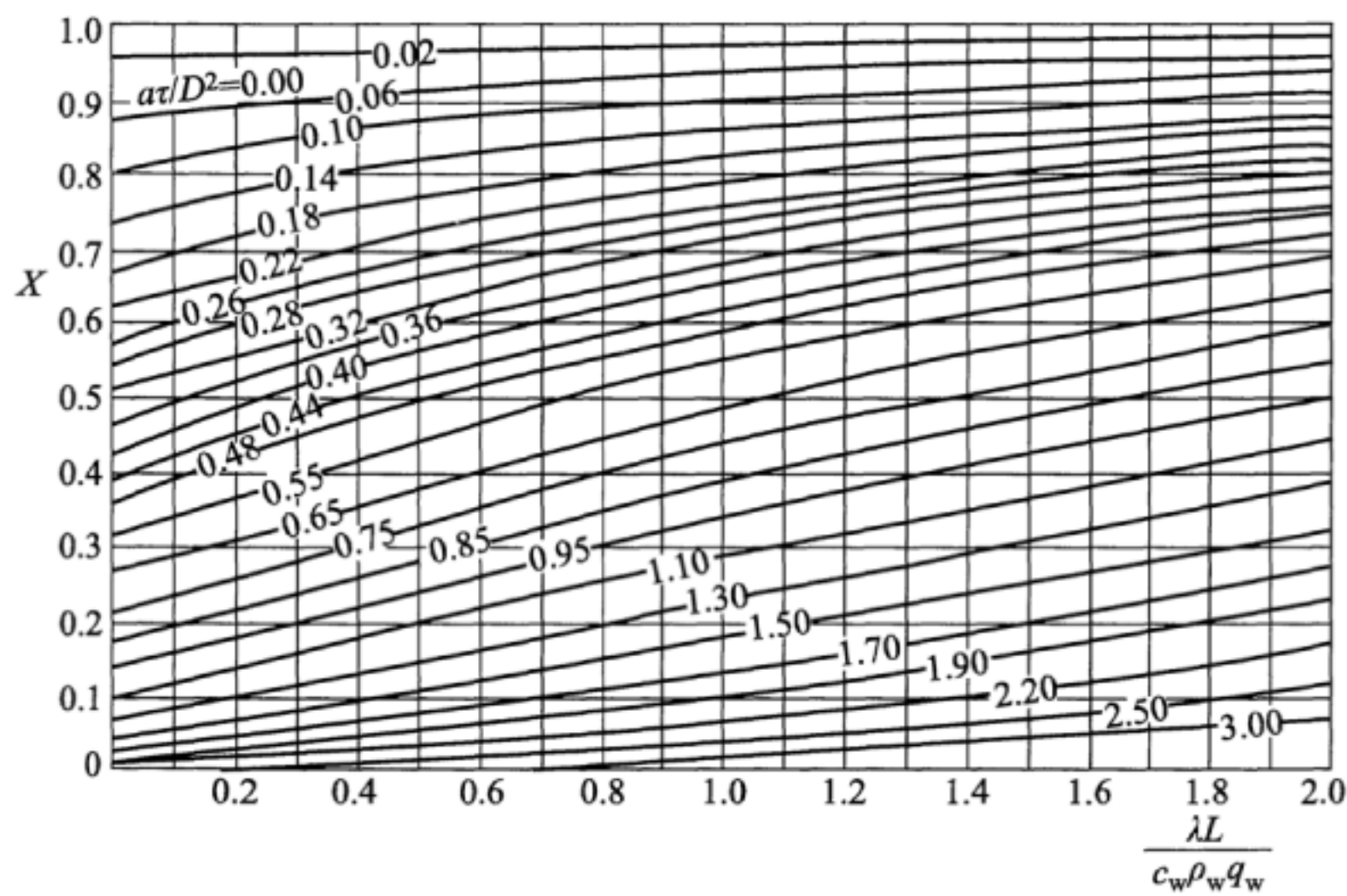


图 C.3.1-1 水管冷却混凝土圆柱体平均温度散热残留比 ( $b/c=100$ )

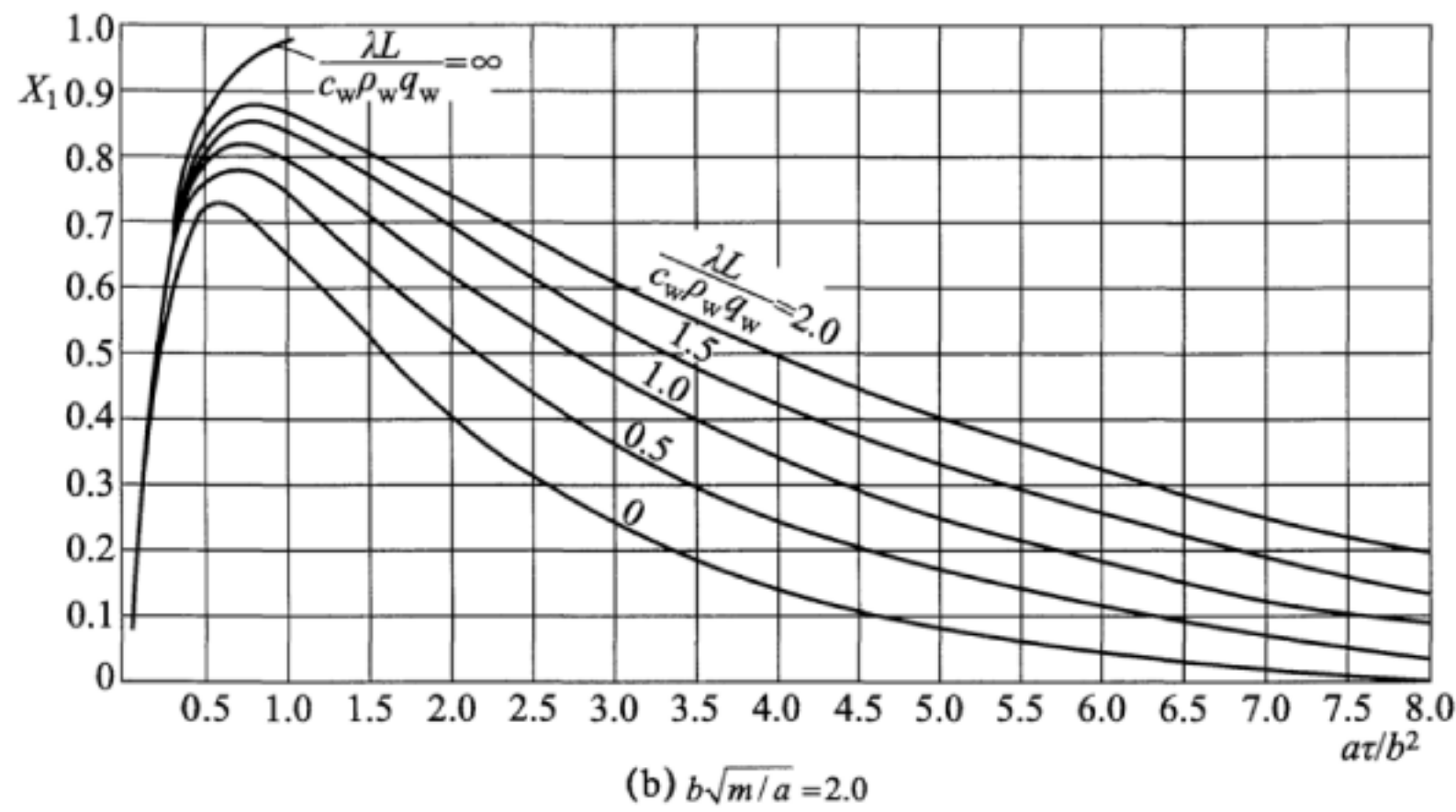
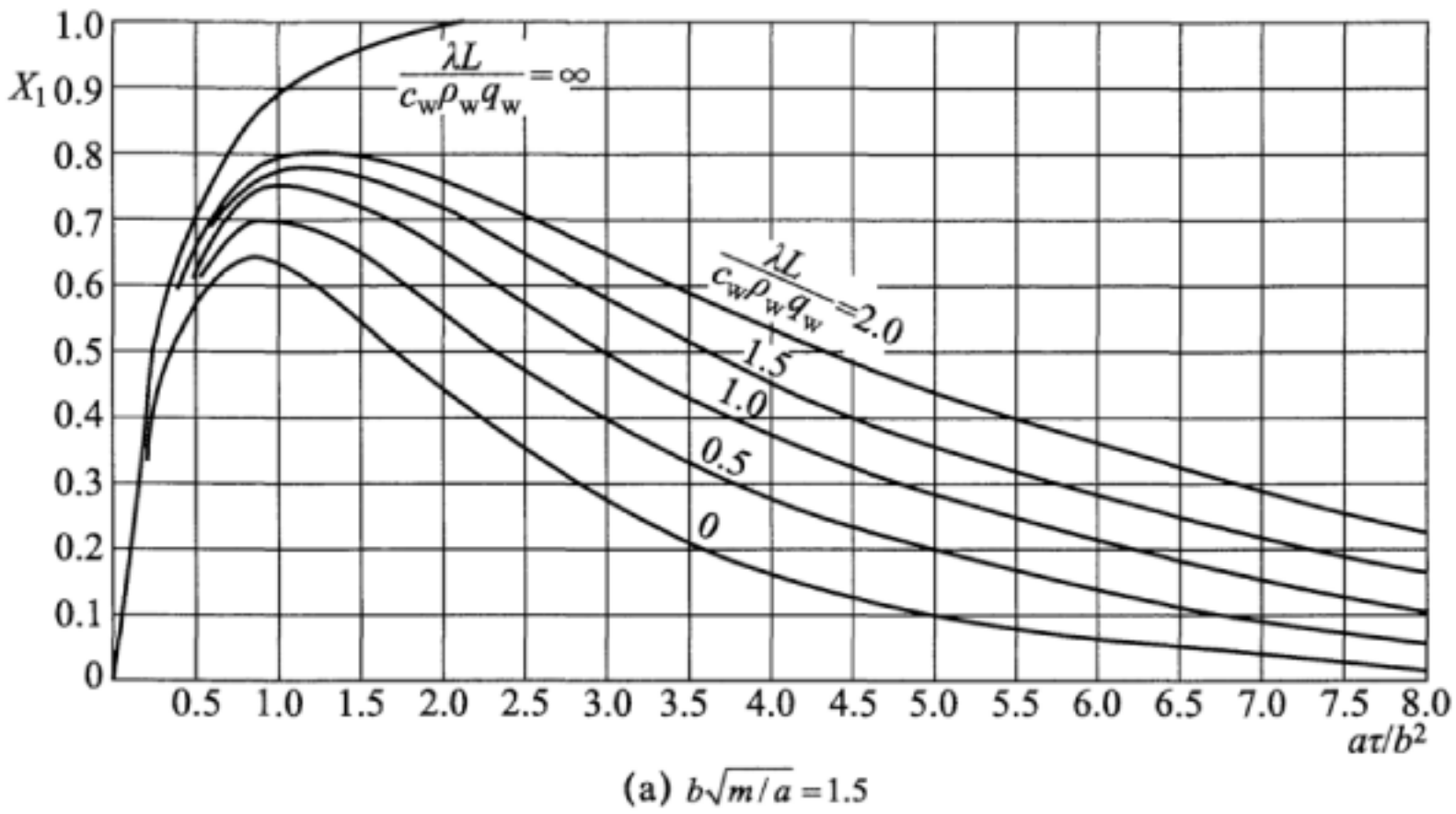


图 C.3.1-2 水管散热残留比 ( $b/c=100$ )

**C.3.2** 无热源时中后期水管通水冷却可采用下列公式计算:

$$T_m = T_w + X(T_0 - T_w) \tag{C.3.2-1}$$

$$X = f\left(\frac{a\tau}{D^2}, \frac{\lambda L}{c_w \rho_w q_w}\right) \quad (\text{C.3.2-2})$$

式中：  $T_m$  ——混凝土平均温度 (°C)；

$T_0$  ——开始冷却时混凝土初温 (°C)；

$T_w$  ——进口水温 (°C)；

$X$  ——混凝土平均温度残留比，见图 C.3.1-1。

**C.3.3** 当混凝土绝热温升采用式 (C.3.3-1) 计算时，可采用式 (C.3.3-2) 等效热传导方程，用有限元法计算层面和水管共同散热的温度场，即

$$\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (\text{C.3.3-1})$$

式中：  $\theta(\tau)$  ——混凝土绝热温升 (°C)；

$\tau$  ——龄期 (d)；

$\theta_0$  ——最终绝热温升 (°C)；

$m$  ——常数 (1/d)。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + (T_0 - T_w) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \theta_0 \frac{\partial \psi(t)}{\partial \tau} \quad (\text{C.3.3-2})$$

$$\phi = e^{-p\tau} \quad (\text{C.3.3-3})$$

$$\psi(t) = \frac{m}{m-p} (e^{-p\tau} - e^{-m\tau}) \quad (\text{C.3.3-4})$$

$$\zeta = \lambda L / (c_w \rho_w q_w) \quad (\text{C.3.3-5})$$

$$k = 2.09 - 1.35\zeta + 0.32\zeta^2 \quad (\text{C.3.3-6})$$

$$p = ka / D^2 \quad (\text{C.3.3-7})$$

式中：  $T_0$  ——开始冷却时混凝土初温 (°C)；

$\phi$ 、 $\psi(t)$  ——函数；

$\zeta$ 、 $k$ 、 $p$  ——系数；

$T_w$  ——进口水温 (°C)。



## C.4 表层混凝土温度场计算

**C.4.1** 可采用有限元法或差分法计算施工期表层混凝土温度场。

**C.4.2** 计算表层混凝土温度场时应根据气温变化的周期确定计算时段。气温年变化计算时程应取一年以上，计算时间步长可取 0.5 月~1.0 月；气温骤降计算时程应为一次气温骤降全过程，计算时间步长可取 0.5d~1.0d。

**C.4.3** 表层混凝土温度场计算边界处理应满足下列要求：

1 表面与水接触时可按式 (C.1.2-1) 选取；表面受气温年变化作用时可按式 (C.1.2-1) 选取，并应考虑日照影响；表面受气温骤降作用时可按式 (C.1.2-3) 选取。

2 表面暴露在空气中时，应采用混凝土表面与空气间的放热系数；若采取了表面保温，则混凝土表面与保温层之间的放热系数可按下式计算：

$$\beta = \frac{1}{1/\beta_0 + \sum_{i=1}^n [h_i / (\lambda_i k_1 k_2)]} \quad (\text{C.4.3})$$

式中： $\beta$  ——混凝土表面与保温层之间的放热系数 [kJ/(m<sup>2</sup>·h·℃)]；

$\lambda_i$  ——保温材料导热系数 [kJ/(m·h·℃)]，各种保温材料的导热系数见表 C.4.3-1；

$\beta_0$  ——混凝土表面与空气间的放热系数 [kJ/(m<sup>2</sup>·h·℃)]，按表 C.4.3-2 取值；

$h_i$  ——保温层厚度 (m)；

$k_1$  ——风速修正系数，见表 C.4.3-3；

$k_2$  ——潮湿程度修正系数，潮湿材料取 3~5，干燥材料取 1；

$n$  ——保温材料层数。



表 C.4.3-1 各种保温材料的导热系数 $\lambda_i$  [kJ/ (m · h · °C)]

材料名称	$\lambda_i$	材料名称	$\lambda_i$
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
稻草和麦秆席	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 C.4.3-2 混凝土表面与空气间的放热系数 $\beta_0$

风速 $v_a$ (m/s)	$\beta_0$ [kJ/(m <sup>2</sup> · h · °C)]		风速 $v_a$ (m/s)	$\beta_0$ [kJ/(m <sup>2</sup> · h · °C)]	
	光滑表面	粗糙表面		光滑表面	粗糙表面
0.0	18.5	21.1	5.0	90.1	96.7
0.5	28.7	31.4	6.0	103.2	111.0
1.0	35.8	38.6	7.0	116.1	124.9
2.0	49.4	53.0	8.0	128.6	138.5
3.0	63.1	67.6	9.0	140.8	151.7
4.0	76.7	82.2	10.0	152.7	165.1

表 C.4.3-3 风速修正系数  $k_1$

保温层透风性	风速 $\leq 4\text{m/s}$	风速 $> 4\text{m/s}$
易透风保温层不加隔层	2.6	3.0
外面加不透风隔层	1.6	1.9
内面加不透风隔层	2.0	2.3
内外加不透风隔层	1.3	1.5
不透风保温层	1.3	1.5

## 附录 D 温度应力计算

### D.1 有限元法

**D.1.1** 采用有限元法计算温度应力时，网格划分、浇筑层厚度、间歇时间、计算时段、时间步长等条件应与采用有限元法计算不稳定温度场的条件一致。

**D.1.2** 采用有限元增量法求解混凝土温度应力整体平衡方程见下式：

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} - \{\Delta F_c\} - \{\Delta F_T\} - \{\Delta F_G\} \quad (\text{D.1.2-1})$$

式中：[K] ——刚度矩阵；

$\{\Delta\delta\}$  ——节点位移增量列阵；

$\{\Delta F\}$  ——节点荷载增量列阵；

$\{\Delta F_c\}$  ——混凝土徐变引起的节点荷载增量；

$\{\Delta F_T\}$  ——温度应变产生的节点荷载增量；

$\{\Delta F_G\}$  ——混凝土自生体积膨胀变形产生的节点荷载增量。

相应的应力增量见下式：

$$\{\Delta\sigma_n\} = [\bar{D}](\{\Delta\varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta\varepsilon_n^G\}) \quad (\text{D.1.2-2})$$

式中： $\{\Delta\sigma_n\}$  ——应力增量；

$[\bar{D}]$  ——等效弹性矩阵；

$\{\Delta\varepsilon_n\}$  ——应变增量；

$\{\eta_n\}$  ——徐变应变增量；

$\{\Delta\varepsilon_n^T\}$  ——温度应变增量；

$\{\Delta\varepsilon_n^G\}$  ——自生体积应变增量。

D.2 约 束 系 数 法

D.2.1 采用约束系数法计算基础浇筑块均匀温差温度应力应与差分法计算的不稳定温度场中的均匀温差配套使用。

D.2.2 基础浇筑块中央垂直剖面的水平方向均匀温差温度应力可按下式进行计算：

$$\sigma_1 = \frac{K_p E_c R \alpha}{1 - \mu} \Delta T \tag{D.2.2}$$

式中：  $\sigma_1$  ——均匀温差温度应力（MPa）；  
 $K_p$  ——混凝土松弛系数，缺乏试验资料时可取 0.5；  
 $R$  ——基础约束系数，当混凝土弹性模量和基岩弹性模量相等时，可按表 D.2.2-1 取值，不相等时，建基面的基础约束系数可按表 D.2.2-2 取值，并结合表 D.2.2-1、表 D.2.2-2 求出其余基础约束系数；  
 $E_c$  ——混凝土弹性模量（MPa）；  
 $\alpha$  ——混凝土线膨胀系数（1/℃）；  
 $\mu$  ——混凝土泊松比；  
 $\Delta T$  ——均匀温差（℃），为浇筑温度与稳定温度的差值。

表 D.2.2-1 基 础 约 束 系 数

$y/l$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$R$	0.61	0.44	0.27	0.16	0.10	0

注：  $l$ ——浇筑块长边长度（m）；  $y$ ——计算点离建基面的高度（m）。

表 D.2.2-2 建基面基础约束系数

--

注：  $E_R$ ——基岩弹性模量（MPa）。

### D.3 影 响 线 法

**D.3.1** 采用影响线法计算基础浇筑块水化热温度应力应与差分法计算的不稳定温度场中的水化热最高温升包络线配套使用。

**D.3.2** 基础浇筑块中央垂直剖面水化热温升引起的水平方向温度应力可按式(3.2)进行计算：

$$\sigma_2 = \frac{K_p E_c \alpha}{1 - \mu} \left[ T(y) - \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n A_y(\xi) T(\xi) \Delta y \right] \quad (\text{D.3.2})$$

式中： $\sigma_2$ ——水化热温升引起的水平方向温度应力 (MPa)；

$K_p$ ——混凝土松弛系数，一般取 0.50~0.85；

$E_c$ ——混凝土弹性模量 (MPa)；

$\alpha$ ——混凝土线膨胀系数 (1/°C)；

$\mu$ ——混凝土泊松比；

$T(y)$ ——应力计算点  $y$  处的温差值 (°C)；

$\Delta y$ ——两个计算点间的高度差 (m)；

$l$ ——浇筑块的长边长度 (m)；

$T(\xi)$ ——在  $y=\xi$  处的温差值 (°C)；

$A_y(\xi)$ ——在  $y=\xi$  处加一单位荷载  $p=1$ ，对各计算点  $y$  处所产生的正应力影响系数，可由图 D.3.2-1 和图 D.3.2-2 查取。

**D.3.3** 可采用有限元法或影响线法计算表层混凝土温度应力。采用影响线法时，可根据表层混凝土不稳定温度场计算得到的各时段末的温差值分布，计算浇筑块水平剖面或垂直剖面自表面向内部不同深度的温度应力。影响线法计算表层温度应力的公式同式 (D.3.2)，向顶面散热的内外温差应力影响线可采用图 D.3.3-1，向侧面散热的内外温差应力影响线可采用图 D.3.3-2。

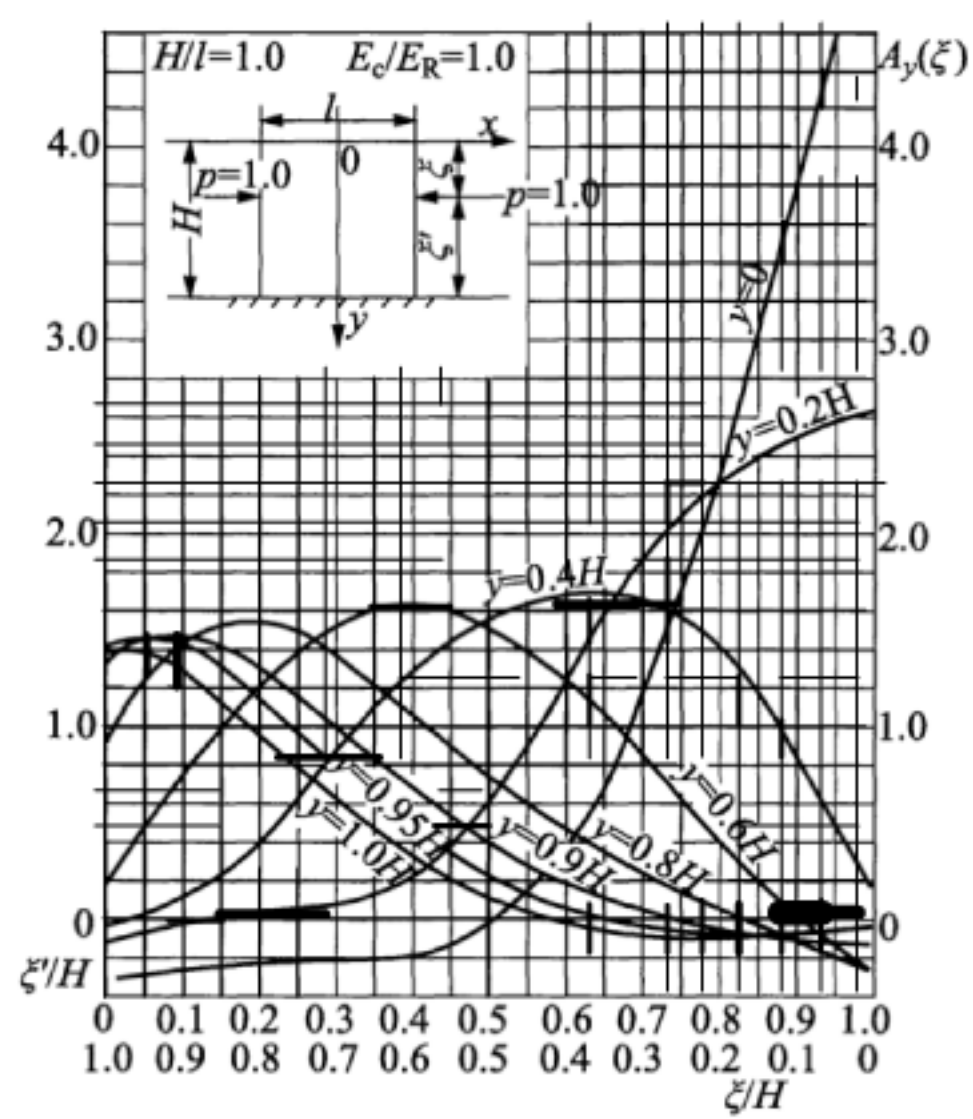


图 D.3.2-1 基础浇筑块温度应力影响线 ( $E_c = E_R$ )

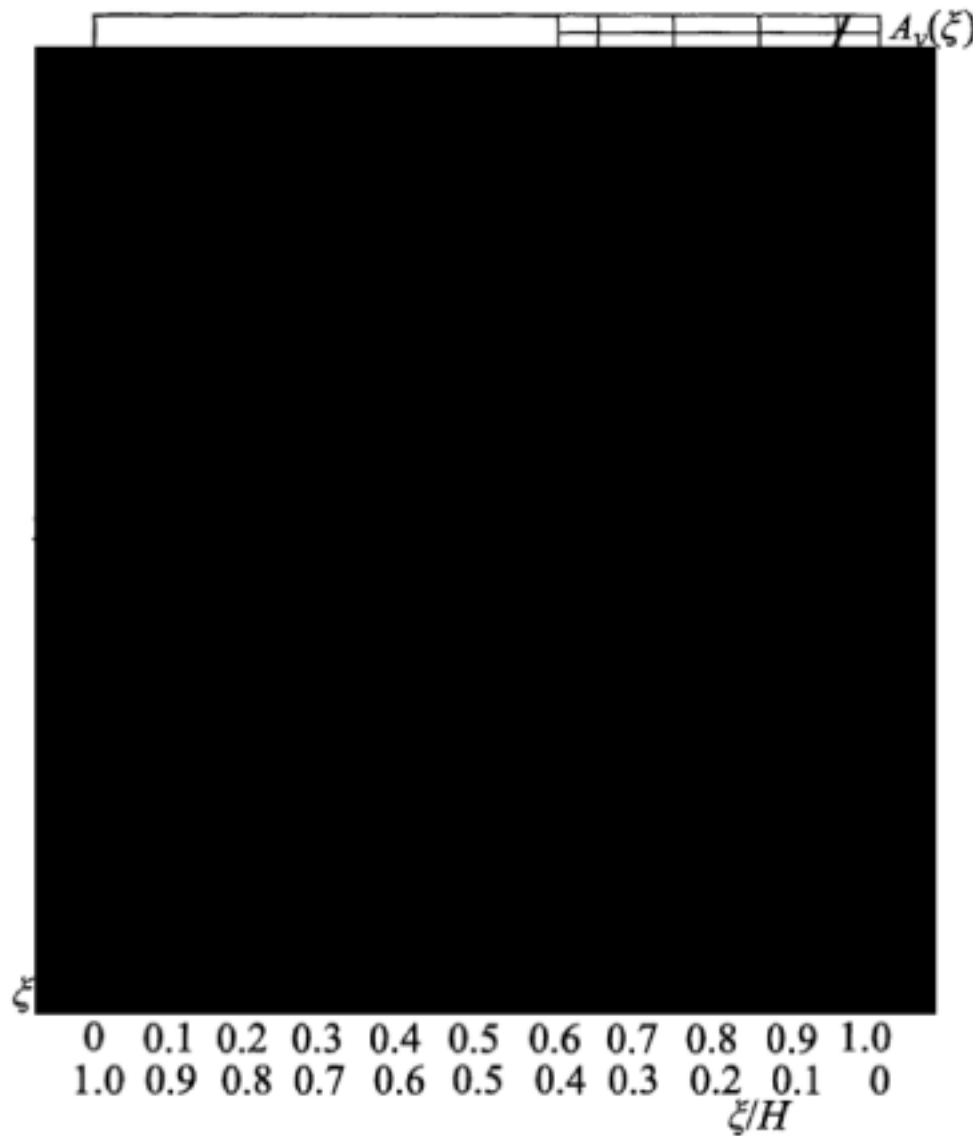


图 D.3.2-2 基础浇筑块温度应力影响线 ( $E_c = E_R / 2$ )

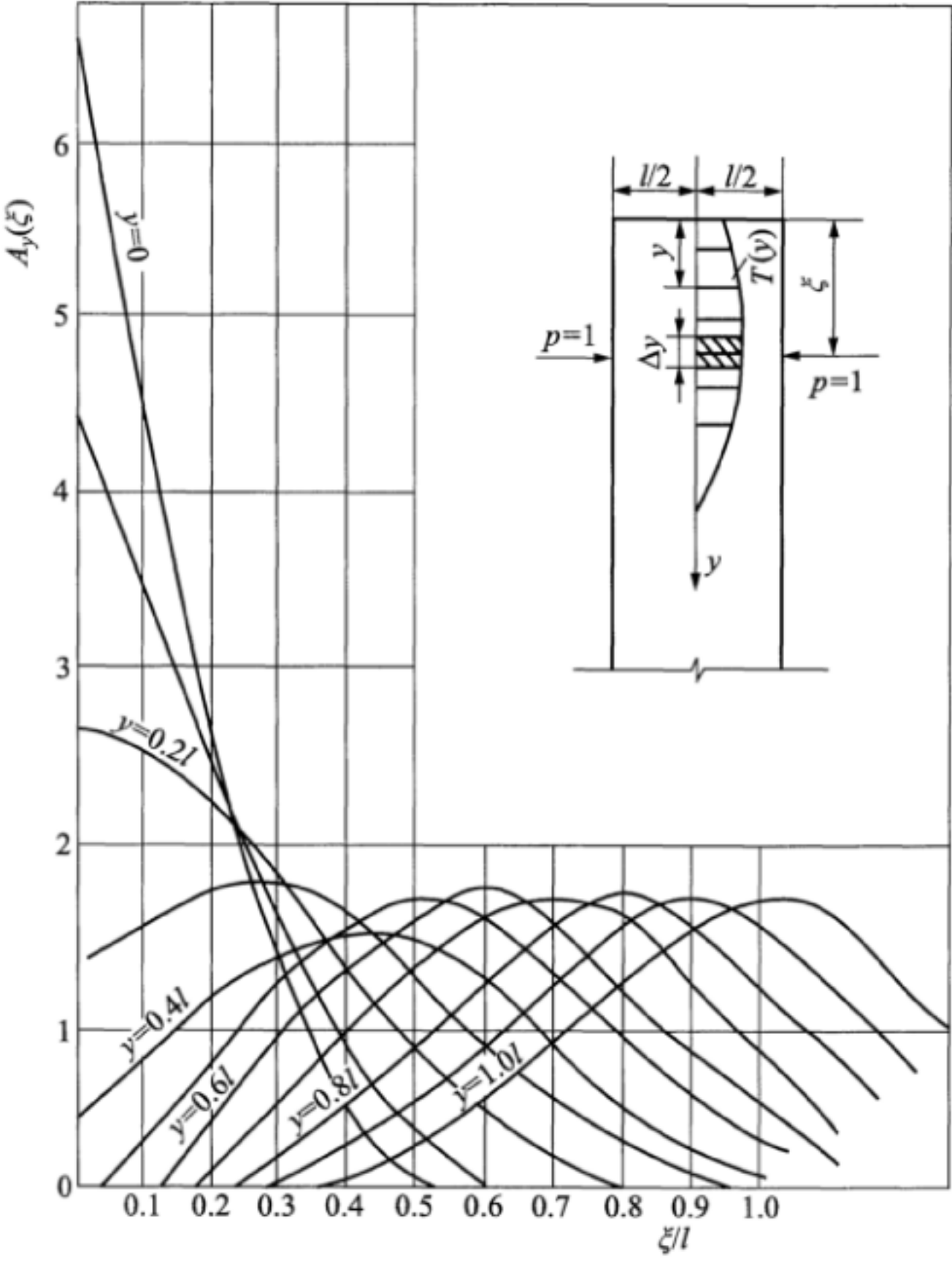


图 D.3.3-1 矩形截面应力影响线

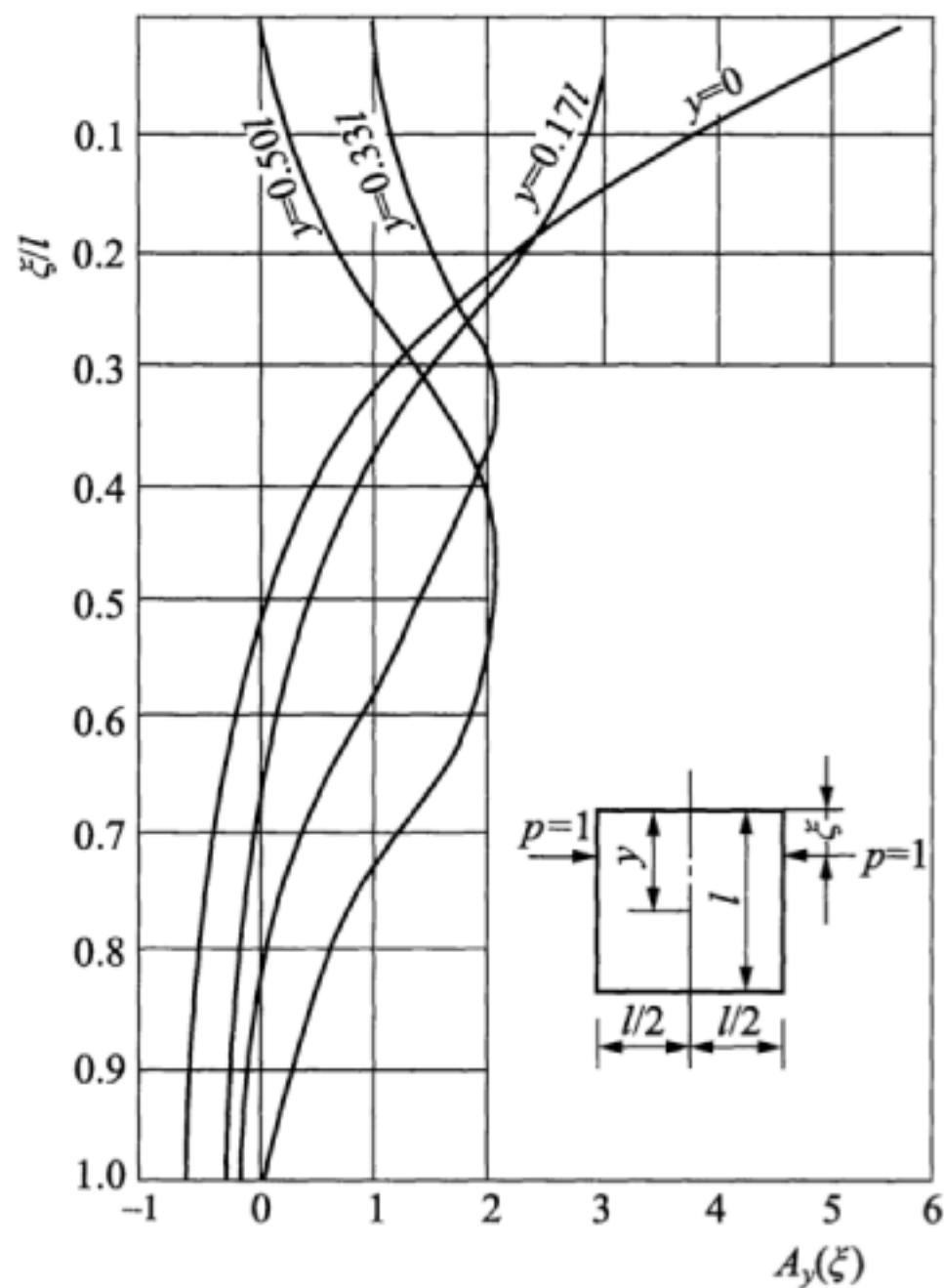


图 D.3.3-2 方形截面应力影响线

**D.3.4** 新老混凝土中央垂直剖面的水平方向约束应力按式 (D.3.2) 计算，影响线可按图 D.3.3-1 查取；新老混凝土约束应力分析计算成果用于拟定新老混凝土温差及新浇混凝土的最高温度，拟定的温差不应超过新老混凝土容许温差。计算新浇混凝土中央垂直剖面的水平方向最大温度应力时，可按式 (D.3.2) 计算，影响线可按图 D.3.3-1 查取；最大温差应为其最高温度与相应部位稳定温度的差值。

**D.4 表面温度应力经验公式**

**D.4.1** 当气温骤降的天数 ( $P$ ) 为 1d~8d 时，气温骤降引起的混凝土表面最大应力可按下列公式计算：



$$\sigma = f_1 \rho_1 E(\tau_m) \alpha A / (1 - \mu) \quad (\text{D.4.1-1})$$

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.85u + 1.12u^2}} \quad (\text{D.4.1-2})$$

$$\rho_1 = \frac{0.830 + 0.051\tau_m}{1 + 0.051\tau_m} \exp[-0.095(P-1)^{0.60}] \quad (\text{D.4.1-3})$$

$$P = Q + \Delta \quad (\text{D.4.1-4})$$

$$\Delta = 0.4gQ \quad (\text{D.4.1-5})$$

$$u = \frac{\lambda}{2\beta} \sqrt{\frac{\pi}{aQ}} \quad (\text{D.4.1-6})$$

$$g = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{1}{1 + 1/u} \right) \quad (\text{D.4.1-7})$$

$$\tau_m = \tau_1 + \Delta + \frac{1}{2}P \quad (\text{D.4.1-8})$$

式中：  $\sigma$  ——气温骤降引起的混凝土表面最大应力 (MPa)；

$\rho_1$  ——考虑混凝土徐变影响的系数；

$E(\tau_m)$  ——气温骤降期间混凝土平均弹性模量 (MPa)；

$\mu$  ——混凝土泊松比；

$f_1$ 、 $u$ 、 $\Delta$  ——系数；

$\lambda$  ——混凝土导热系数 [kJ/ (m · h · °C)]；

$\beta$  ——混凝土表面放热系数 [kJ/ (m<sup>2</sup> · h · °C)]；

$\alpha$  ——混凝土线膨胀系数 (1/°C)；

$a$  ——混凝土导温系数 (m<sup>2</sup>/d)；

$Q$  ——降温历时 (d)；

$A$  ——气温降幅 (°C)；

$\tau_m$  ——气温骤降期间混凝土的平均龄期 (d)；

$\tau_1$  ——气温开始骤降时混凝土龄期 (d)。

**D.4.2** 当越冬期的天数 ( $P$ ) 大于或等于 20 天时，越冬期混凝土表面最大应力可按下列公式计算：

$$\sigma = r f_1 \rho_2 E(\tau_m) \alpha A / (1 - \mu) \quad (\text{D.4.2-1})$$

$$\rho_2 = \frac{0.830 + 0.051 \tau_m}{1.00 + 0.051 \tau_m} \exp(-0.104 P^{0.35}) \quad (\text{D.4.2-2})$$

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.85u + 1.12u^2}} \quad (\text{D.4.2-3})$$

$$u = \frac{\lambda}{2\beta} \sqrt{\frac{\pi}{aQ}} \quad (\text{D.4.2-4})$$

式中： $\sigma$  ——越冬期混凝土表面最大应力 (MPa)；

$\rho_2$  ——考虑混凝土徐变影响的系数；

$\tau_m$  ——越冬期混凝土的平均龄期 (d)；

$r$  ——约束系数，由图 D.4.2 查得；

$E(\tau_m)$  ——越冬期混凝土平均弹性模量 (MPa)；

$\alpha$  ——混凝土线膨胀系数 (1/°C)；

$A$  ——越冬期气温最大降幅 (°C)；

$\mu$  ——混凝土泊松比。

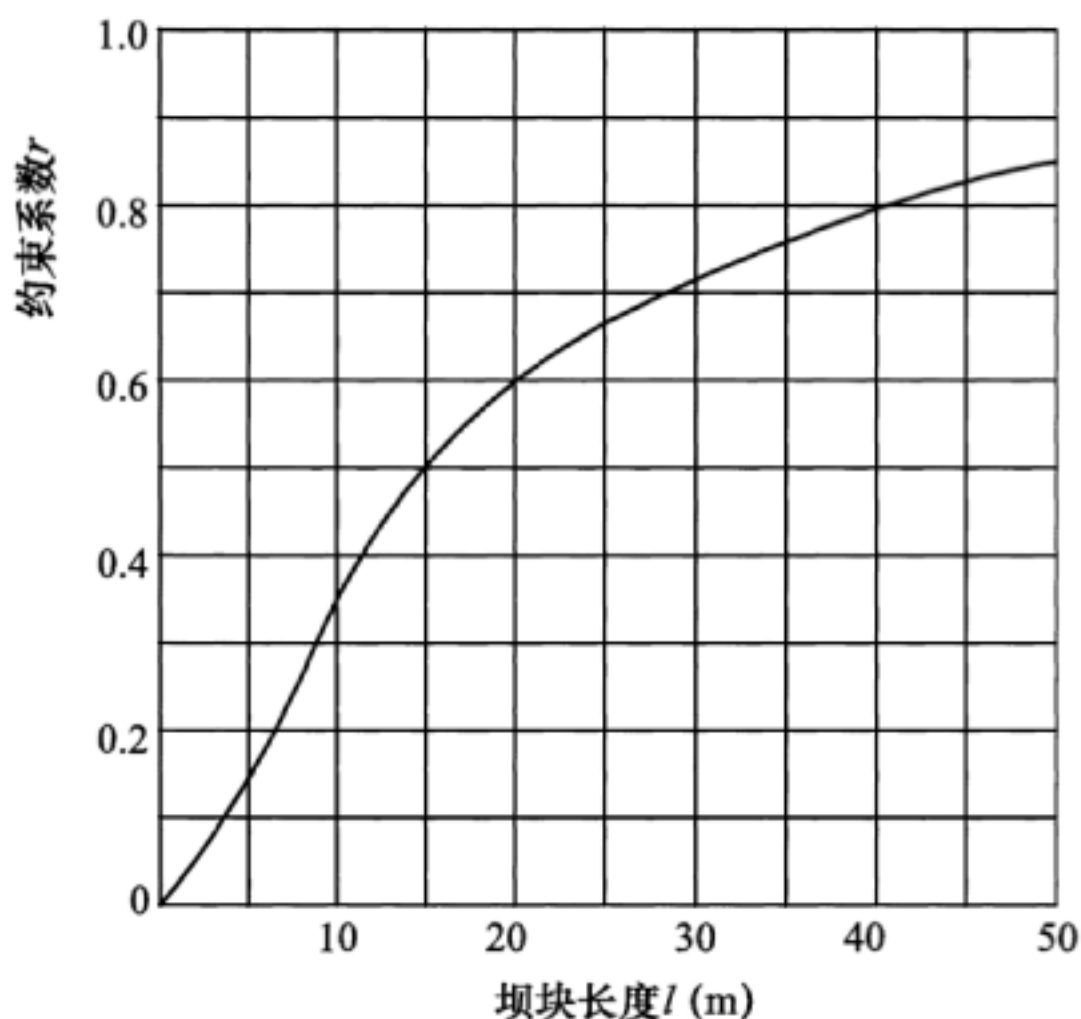


图 D.4.2 约束系数

**D.4.3** 气温日变幅引起的混凝土表面最大应力可按下列公式计算：

$$\sigma = fK_p E(\tau) \alpha A / (1 - \mu) \quad (\text{D.4.3-1})$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 + 2u + 2u^2}} \quad (\text{D.4.3-2})$$

$$u = \frac{\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\pi}{aP}} \quad (\text{D.4.3-3})$$

式中： $\sigma$ ——气温日变幅引起的混凝土表面最大应力（MPa）；

$\lambda$ ——混凝土导热系数 [kJ/（m·h·℃）]；

$a$ ——混凝土导温系数（m<sup>2</sup>/d）；

$\beta$ ——混凝土表面放热系数 [kJ/（m<sup>2</sup>·h·℃）]；

$K_p$ ——混凝土松弛系数，可取 0.9；

$\alpha$ ——混凝土线膨胀系数（1/℃）；

$\mu$ ——混凝土泊松比；

$f$ ——系数；

$P$ ——气温变化周期（d），取 1d；

$A$ ——气温日变幅（℃）；

$E(\tau)$ ——混凝土弹性模量（MPa）。

## D.5 温度应力分类叠加

**D.5.1** 基础混凝土浇筑块中央垂直剖面的水平方向最大温度应力应为按约束系数法计算的均匀温差温度应力和按影响线法计算的水化热温度应力之和；非基础约束区浇筑块中央垂直剖面的水平方向最大温度应力应为其最高温度与相应部位稳定温度的差值引起的应力。

**D.5.2** 采用影响线法计算的表层混凝土单项温度应力，可将同一位置、相同时间产生的单项温度应力进行叠加。叠加的基本类型可分为：

1 气温年变化引起的应力、气温骤降引起的应力、水化热温升引起的内外温差应力或其他因素引起的内外温差应力。

2 越冬期混凝土表面应力、气温骤降引起的应力、水化热温升引起的内外温差应力或其他因素引起的内外温差应力。

3 越冬期混凝土表面应力、气温日变幅引起的应力、水化热温升引起的内外温差应力或其他因素引起的内外温差应力。

4 气温年变化引起的应力、气温日变幅引起的应力、水化热温升引起的内外温差应力或其他因素引起的内外温差应力。

**D.5.3** 采用有限元法计算的单项温度应力,也可按本规范第 D.5.1 条、第 D.5.2 条进行分类叠加。

## 附录 E 混凝土出机口温度、入仓温度、 浇筑温度的计算

### E.1 出机口温度计算

**E.1.1** 未预冷混凝土出机口温度按下列公式计算：

$$T_{01} = (\sum T_i G_i c_i + Q) / \sum G_i c_i \quad (\text{E.1.1-1})$$

$$Q = 42 P \tau / V \quad (\text{E.1.1-2})$$

式中：  $T_{01}$ ——未预冷混凝土出机口温度（℃）；

$T_i$ ——第  $i$  种材料的温度（℃）；

$G_i$ ——每立方米混凝土中第  $i$  种材料的质量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）；

$c_i$ ——第  $i$  种材料的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]；

$Q$ ——每立方米混凝土拌和时产生的机械热（ $\text{kJ}/\text{m}^3$ ），若进料温度按进入拌和楼（站）前的温度计算，还应计入运输和二次筛分增加的机械热；

$P$ ——搅拌机的电动机功率（kW）；

$\tau$ ——搅拌时间（min）；

$V$ ——搅拌机容量（ $\text{m}^3$ ），按有效出料容积计。

**E.1.2** 预冷混凝土出机口温度按下式计算：

$$T_{02} = (\sum T_i G_i c_i - k \eta G_c + Q) / \sum G_i c_i \quad (\text{E.1.2})$$

式中：  $T_{02}$ ——预冷混凝土出机口温度（℃）；

$G_c$ ——每立方米混凝土的加冰量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）；

$\eta$ ——冰的冷量利用系数，干燥冰可取 1.0，潮湿冰可取 0.9；

$k$ ——冰的融化潜热（ $\text{kJ}/\text{kg}$ ），取 335 $\text{kJ}/\text{kg}$ ；

$Q$ ——每立方米混凝土拌和时产生的机械热 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ ),  
计算见式 (E.1.1-2), 当拌和楼 (站) 料仓采取  
骨料预冷措施时, 可不计入运输和二次筛分增加的  
机械热;

$T_i$ ——第  $i$  种材料的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 对采取预冷措施的材料,  
取预冷后的温度。

E.2 入 仓 温 度 计 算

混凝土入仓温度可按下式计算:

$$T_1 = T_0 + (T_a + R/\beta - T_0) \times \phi \tag{E.2-1}$$

式中:  $T_1$ ——混凝土入仓温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_0$ ——混凝土出机口温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_a$ ——混凝土运输时的气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$R$  ——太阳辐射热 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ], 运输机具有保温遮阳  
措施时, 可不考虑;

$\beta$ ——混凝土表面放热系数 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];

$\phi$ ——混凝土运输过程中的温度回升系数, 包括装卸料、  
转运及运输机具上的温度回升系数。

混凝土运输过程中温度回升系数可按下式估算:

$$\phi = n \times 0.032 + A\tau \tag{E.2-2}$$

式中:  $\tau$  ——运输及等待时间 ( $\text{min}$ );

$n$  ——混凝土装、卸和转运次数;

$A$  ——温度回升计算系数, 可按表 E.2 取值。

表 E.2 运输机具上混凝土温度回升计算系数  $A$

运输工具	混凝土容积 ( $\text{m}^3$ )	$A$	运输工具	混凝土容积 ( $\text{m}^3$ )	$A$
自卸汽车	3.0	0.0035	圆柱形吊罐	3.0	0.0007
自卸汽车	6.0	0.0020	圆柱形吊罐	6.0	0.0005
自卸汽车	9.0	0.0016	圆柱形吊罐	9.0	0.0004

## E.3 浇筑温度计算

混凝土浇筑温度可按下列公式计算：

$$T_p = T_1 + (T_a + R / \beta - T_1)(\phi_1 + \phi_2) \quad (\text{E.3-1})$$

$$\phi_1 = k\tau \quad (\text{E.3-2})$$

式中：  $T_p$ ——混凝土浇筑温度（℃）；

$T_1$ ——混凝土入仓温度（℃）；

$T_a$ ——仓内气温（℃）；

$R$ ——太阳辐射热 [kJ/ (m<sup>2</sup> · h)]；

$\beta$ ——混凝土表面放热系数 [kJ/ (m<sup>2</sup> · h · ℃)]；

$\phi_1$ ——平仓过程中的温度系数；

$\phi_2$ ——平仓后的温度系数，可采用单向差分法进行计算；

$\tau$ ——混凝土入仓后到平仓前的时间（min）；

$k$ ——经验系数，可取 0.0030（1/min）。



## 本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的:  
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:  
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:  
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

《通用硅酸盐水泥》 GB 175

《混凝土外加剂》 GB 8076

《中热硅酸盐水泥 低热硅酸盐水泥 低热矿渣硅酸盐水泥》

GB/T 200

《抗硫酸盐硅酸盐水泥》 GB/T 748

《低热微膨胀水泥》 GB/T 2938

《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046

《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》 DL/T 5055

《水工混凝土外加剂技术规程》 DL/T 5100

《水工混凝土施工规范》 DL/T 5144

《水工混凝土耐久性技术规范》 DL/T 5241

《水工混凝土掺用天然火山灰质材料技术规范》 DL/T 5273

《混凝土拱坝设计规范》 DL/T 5346

《水电水利工程混凝土预冷系统设计导则》 DL/T 5386

《水工混凝土掺用磷渣粉技术规范》 DL/T 5387

《混凝土重力坝设计规范》 NB/T 35026

中华人民共和国能源行业标准

混凝土坝温度控制设计规范

**NB / T 35092 — 2017**

条 文 说 明

## 制 定 说 明

《混凝土坝温度控制设计规范》NB/T 35092—2017，经国家能源局 2017 年 3 月 28 日以第 6 号公告批准发布。

本规范制定过程中，编制组在广泛调查、深入研究的基础上，总结了混凝土坝温度控制设计方面的实践经验，吸收了近年来混凝土坝温度控制研究方面所取得的科技成果，并征求了有关设计和科研单位的意见。

为便于广大勘察、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《混凝土坝温度控制设计规范》编写组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

## 目 次

1	总则	80
3	混凝土原材料选择	81
3.1	水泥	81
3.2	掺合料	82
3.3	骨料	83
3.4	外加剂及拌和用水	84
4	混凝土及配合比设计	85
4.1	混凝土设计	85
4.2	混凝土配合比设计	85
5	温度控制设计资料与计算参数	89
5.1	气温、水温 and 地温	89
5.2	基岩参数	90
5.3	混凝土性能参数	90
6	温度场计算	94
6.1	稳定温度场和准稳定温度场边界温度拟定	94
6.2	稳定温度场	95
6.3	准稳定温度场	95
6.4	不稳定温度场	95
7	坝体分缝及接缝灌浆温度	97
7.1	坝体分缝	97
7.2	接缝灌浆温度	100
8	温度控制标准	102
8.1	温差标准	102
8.2	容许最高温度	105
9	温度应力及控制标准	106

9.1	温度应力计算 .....	106
9.2	温度应力控制标准 .....	106
10	混凝土温度控制措施 .....	109
10.1	一般规定 .....	109
10.2	原材料温度控制 .....	112
10.3	混凝土生产过程温度控制 .....	113
10.4	混凝土运输和浇筑过程温度控制 .....	114
10.5	浇筑后温度控制 .....	115
11	通水冷却 .....	116
11.1	一般规定 .....	116
11.2	冷却水管布置 .....	117
11.3	初期通水冷却 .....	119
11.4	中期通水冷却 .....	120
11.5	后期通水冷却 .....	121
12	特殊部位的温度控制 .....	123
12.1	陡坡坝段 .....	123
12.2	施工期临时过水的坝块 .....	123
12.3	填塘混凝土 .....	124
12.4	闸墩 .....	124
12.5	孔洞周边混凝土 .....	125
12.6	坝身封堵体混凝土 .....	125
12.7	垫座混凝土 .....	125
12.8	抗冲磨混凝土 .....	126
12.9	并缝部位混凝土 .....	127
13	表面保护和养护 .....	128
13.1	表面保护 .....	128
13.2	养护 .....	128
14	低温季节施工温度控制 .....	130
14.1	一般规定 .....	130

14.2 原材料与拌和.....132

14.3 运输与浇筑.....132

15 施工期温度监测与分析.....134

15.1 一般规定.....134

15.2 原材料温度监测.....134

15.3 混凝土出机口温度、入仓温度和浇筑温度监测.....134

15.4 混凝土内部温度监测.....134

15.5 通水冷却监测.....135

15.6 浇筑仓气温及保温层温度监测.....135

15.7 数据分析与反馈.....135



## **1 总 则**

**1.0.1** 混凝土温度控制设计是混凝土坝设计的重要组成部分，水电行业目前还没有统一的标准对混凝土坝温度控制设计的原则、内容、方法和技术要求作出规定，制订本规范对水电工程的建设具有重要的指导意义。

**1.0.2** 本条明确了本规范的使用范围。《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 和《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定：坝高在 50m 以下为低坝，坝高在 50m~100m 为中坝，坝高在 100m 以上为高坝。

### 3 混凝土原材料选择

#### 3.1 水 泥

**3.1.1** 应按优质、经济、就近取材的原则选择水泥供应厂家，供应商的生产规模应满足工程用量要求。为方便混凝土施工和质量控制，一个工程选用水泥品种以 1 种~2 种为宜，并应选择供应可靠的 1 个~2 个厂家。大型工程可选择年生产能力不低于  $30 \times 10^4 \text{t}$  的 1 个~3 个厂家供应。旋窑水泥熟料的强度等级高、质量稳定、安定性保障率高，因此应选择旋窑生产的水泥。

选择水泥品种主要是根据工程部位、技术要求和环境条件进行。坝体混凝土应优先选用中热硅酸盐水泥，既可满足混凝土各项性能要求，又可降低混凝土发热量，减少温度裂缝。低热硅酸盐水泥具有发热量低的特点，低热微膨胀水泥具有微膨胀性能，经论证后两者均可用于大坝混凝土。

根据坝体混凝土的性能指标要求，选用水泥强度等级应与混凝土设计的强度等级相适应。对于特殊部位或抗冻要求较高的混凝土，应选用强度等级较高的水泥。

无论选择何种水泥，均应结合工程条件进行水泥品质鉴定和混凝土性能试验，据此最终确定水泥品种和供应厂家。

**3.1.3** 影响水泥性能的主要因素包括水泥颗粒级配、细度、矿物成分、比表面积、烧失量、氧化镁含量、碱含量、三氧化硫含量等。为了获得抗裂性能较好的混凝土，水泥应稍粗一些，根据国内部分工程实际检测情况，水泥细度过小，混凝土早期发热快，不利于温度控制，因此部分工程针对水泥细度提出了 0.08mm 方孔筛筛余宜在 3%~6% 范围内；为了降低水泥水化热，要求硅酸

三钙（ $C_3S$ ）的含量在 50%左右，铝酸三钙（ $C_3A$ ）的含量小于 4%；水泥熟料的碱含量宜控制在 0.6%以内；氧化镁（ $MgO$ ）含量不宜大于 5.0%。

水泥熟料中适当的氧化镁含量可使混凝土体积具有微膨胀性质，部分地补偿混凝土温度收缩，三峡、小湾、溪洛渡、锦屏一级、大岗山等工程合理利用氧化镁的这一性能，提出水泥中氧化镁含量宜控制在 3.5%~5.0%范围内。

### 3.2 掺 合 料

**3.2.1** 水工混凝土中掺入合适的掺合料，具有改善混凝土的性能、提高混凝土质量、减少混凝土水化热、抑制碱骨料反应、提高抗硫酸盐侵蚀性、节约水泥、降低成本等作用。大中型水利水电工程已普遍掺用掺合料。混凝土中掺入粉煤灰已广泛采用，且应用技术成熟；抗冲磨混凝土掺入硅粉，堵头、填塘混凝土掺入氧化镁已有工程应用；也有选用其他品种掺合料的，如漫湾大坝混凝土掺用凝灰岩粉，大朝山大坝混凝土掺用磷矿渣粉加凝灰岩粉，景洪大坝混凝土采用水淬锰铁矿渣和石灰石粉混掺等。

近年来新建的大型火力发电厂机组，锅炉的燃煤条件好，采用静电收尘装置，粉煤灰的分选设施较完善，一般均具有生产 I 级或 II 级粉煤灰的条件。I 级、II 级粉煤灰具有减水和改善混凝土性能的效果，并可降低混凝土水化热温升。三峡、小湾、溪洛渡、锦屏一级等水电站使用了 I 级粉煤灰，对降低水泥用量、提高混凝土质量，起到了十分重要的作用。

应结合工程技术要求、掺合料资源条件，通过试验论证确定掺合料品种；无论选择何种掺合料，均应结合工程条件进行品质鉴定和混凝土性能试验。

当采用国家或行业标准规定以外的材料作掺合料时，应在试验论证的基础上提出细度、比表面积、活性指数、烧失量、需水量比等指标要求；对非成品掺合料应通过生产性试验确定工艺及

指标。

掺合料的活性可用“胶砂抗压强度比”表示，即试验胶砂和基准胶砂在标准条件下养护至相同规定龄期的抗压强度之比，用百分数表示。胶砂配合比见表 3-1。一般认为 28d 龄期“胶砂抗压强度比”小于 60%的掺合料为非活性或活性较低的掺合料，不宜替代胶凝材料。

表 3-1 胶 砂 配 合 比

胶砂种类	水泥 (g)	掺合料 (g)	标准砂 (g)	加水量 (mL)
基准胶砂	450	—	1350	225
试验胶砂	315	135	1350	225

3.3 骨 料

3.3.1 线膨胀系数小的骨料，对减小混凝土温度应力有利；通常情况下天然骨料都存在级配不连续的问题，而人工骨料可做到连续级配。故本条规定宜选用石灰岩等线膨胀系数小的人工骨料。

3.3.2 碱-骨料反应不仅会降低混凝土结构的强度，还会加剧环境水及其他介质对混凝土的侵蚀破坏，致使混凝土建筑物的使用寿命缩短。

《水工混凝土耐久性技术规范》DL/T 5241 指出：清华大学冯乃谦等采用小混凝土柱法检验矿物质超细粉对碱-碳酸盐反应的抑制作用，即使浮石粉掺量高达 30%、磨细矿渣粉掺量高达 60%、硅粉掺量高达 30%，都不能有效抑制碱-碳酸盐反应的膨胀。唐明述等研究了低碱水泥、粉煤灰和磨细矿渣粉对碱-碳酸盐反应膨胀的影响，使用低碱水泥，粉煤灰对水泥的取代量为 70%，磨细矿渣粉对水泥的取代量为 90%时，才能有效降低碱-碳酸盐反应膨胀，这在实际工程中很难实现。Graffan 和 Cadu 的研究结果表明，若要阻止混凝土的碱-碳酸盐反应膨胀，混凝土中的有效碱必须低

于  $0.8\text{kg/m}^3$ ，相当于总碱量为  $1.3\text{kg/m}^3$ ，在实际工程中难以做到。到目前为止，仍没有切实可行的抑制碱-碳酸盐反应的有效措施，因此应避免使用碱-碳酸盐反应活性骨料。

抑制碱-硅酸反应，可采取控制混凝土总碱量、掺入较高掺量活性掺合料等措施，掺合料的品种及掺量应通过试验论证确定。

### 3.4 外加剂及拌和用水

**3.4.1** 在水工混凝土中掺入品种适宜的外加剂，能改善混凝土和易性、可调节凝结时间、提高强度和耐久性，掺用外加剂已成为混凝土配合比优化设计的一项重要措施。

外加剂与水泥间大都存在适应性问题，工程中选择外加剂时，一般应检验外加剂与水泥的适应性，符合要求方可使用。

混凝土中加入适量的优质引气剂，能产生大量独立并分布均匀的微小气泡，可以改善混凝土和易性，显著提高硬化混凝土抗冻融性，因而对有抗冻融要求的混凝土，必须掺用引气剂。不同级配混凝土要求含气量不一样，可通过调节引气剂的掺量来控制。不同抗冻等级、不同级配混凝土的含气量可按《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 执行，也可通过试验确定。

不同品种外加剂复合使用时，应注意其相容性及对混凝土性能的影响。

工程选用外加剂时，应根据工程使用的材料及施工条件通过试验确定。



## 4 混凝土及配合比设计

### 4.1 混凝土设计

**4.1.1** 应根据大坝的工作条件、工程区气候特点等进行混凝土设计，大坝混凝土分区设计应考虑混凝土强度等级与抗渗、抗冻、抗冲耐磨、抗腐蚀、抗碳化等性能的合理匹配。

**4.1.2** 本条强调进行混凝土设计时应考虑温度控制的可实施性，不能单纯追求混凝土高强度等级。

### 4.2 混凝土配合比设计

**4.2.2** 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 规定：大体积内部混凝土的胶凝材料用量不宜低于  $140\text{kg}/\text{m}^3$ ；《水工碾压混凝土施工规范》DL/T 5112 规定：永久建筑物碾压混凝土的胶凝材料用量不宜低于  $130\text{kg}/\text{m}^3$ ；《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 规定：碾压混凝土的总胶凝材料用量不宜低于  $140\text{kg}/\text{m}^3$ 。考虑目前大多数工程均采用较长设计龄期，且混凝土强度等级不高，本规范按照不低于  $140\text{kg}/\text{m}^3$  控制。

**4.2.3** 混凝土的含气量主要对混凝土的强度和抗冻性能有较大的影响，配合比设计过程中应采用适当的含气量标准，并应考虑混凝土在运输、浇筑过程中的含气量损失。

**4.2.4** 混凝土以坍落度进行分类的方法及名称是依据《混凝土质量控制标准》GB 50164 进行的，其分级标准见表 4-1。大坝混凝土主要采用低塑性和塑性混凝土施工，对配筋率不超过 1% 的钢筋混凝土，坍落度采用 3cm~6cm 是根据表 4-1 中 T1 和 T2 的坍落度值进行内插确定的。

表 4-1 混凝土坍落度的分级

名称	名称
塑性混凝土	流动性混凝土
塑性混凝土	大流动性混凝土
近年来大	土现场
内部分碾	表 4-2。

表 4-2 国内部分碾压混凝土 VC 值统计

工程名称	强度等级	水胶比	掺合料品种	掺合料掺量 (%)	砂率 (%)	骨料品种	VC 值 (s)
岩滩	C <sub>90</sub> 15	0.57	F	65.4	34	灰岩 (人工)	5~15
普定	C <sub>90</sub> 15	0.55	F	65	34	灰岩 (人工)	5~15
汾河二库	C <sub>90</sub> 20	0.5	F	45	35.5	灰岩 (人工)	3~15
江垭	C <sub>90</sub> 15	0.58	F	60	33	灰岩 (人工)	3~11
棉花滩	C <sub>180</sub> 15	0.6	F	65	34.5	花岗岩 (人工)	3~8
石门子	C <sub>90</sub> 15	0.49	F	64	30	卵石天然砂	1~10
大朝山	C <sub>90</sub> 15	0.5	PT	60	34	玄武岩 (人工)	3~10
龙首	C <sub>90</sub> 20	0.48	F	65	30	卵石天然砂	0~5
蔺河口	C <sub>90</sub> 20	0.47	F	62	34	灰岩 (人工)	3~5
索丰营	C <sub>90</sub> 15	0.55	F	60	32	灰岩 (人工)	3~8
景洪	C <sub>90</sub> 15	0.5	MH	60	33	天然骨料	3~5
招徕河	C <sub>90</sub> 20	0.48	F	50	34	灰岩 (人工)	3~5
龙滩	C <sub>90</sub> 25	0.41	F	56	34	灰岩 (人工)	3~5
	C <sub>90</sub> 20	0.45	F	61	33	灰岩 (人工)	3~5
	C <sub>90</sub> 15	0.48	F	66	34	灰岩 (人工)	3~5
光照	C <sub>90</sub> 20	0.45	F	55	34	灰岩 (人工)	3~5
观音岩	C <sub>90</sub> 20	0.5	H	55	34	灰岩 (人工)	1~5
黄登	C <sub>90</sub> 25	0.5	F	34	34	灰岩 (人工)	3~5

注：F—粉煤灰；PT—磷矿渣和凝灰岩；MH—锰铁矿渣和石灰石粉；H—电厂灰渣粉。



4.2.5 美国垦务局和国内的中国水利水电科学研究院、长江科学院、河海大学、成都勘测设计研究院、中国水电八局和昆明勘测设计研究院等均针对有关工程的全级配混凝土性能进行过一些试验研究。现有成果表明，全级配混凝土的抗压强度约为湿筛混凝土（标准试件）的 70%，劈拉强度为湿筛混凝土的 80%~95%，轴拉强度为湿筛混凝土的 50%~65%，极限拉伸值为湿筛混凝土的 50%~70%，7d~180d 加载时全级配混凝土徐变比湿筛混凝土的小 10%~40%，弹性模量为湿筛混凝土的 100%~120%。表 4-3 为全级配混凝土与湿筛混凝土性能对比。一般而言，劈拉强度、轴拉强度、极限拉伸值和徐变均比湿筛混凝土低，抗拉弹性模量比湿筛混凝土高。因此，坝高大于 200m 的混凝土坝宜增加全级配混凝土性能试验进行对比。

表 4-3 全级配混凝土与湿筛混凝土性能对比

工程	项目（全级配/湿筛）							
	抗压强度	劈拉强度	抗弯强度	轴拉强度	极限拉伸值	徐变	压弹性模量	拉弹性模量
东江水电站（水电八局）	0.80~0.81	0.74~0.98		0.60~0.70	0.55~0.70			0.94~1.20
二滩水电站（成都院）	1.04~1.13	0.89~0.95	0.64~0.68	0.68~0.73	0.61~0.81	0.66~0.70	1.02~1.22	1.03~1.27
二滩水电站（南科院）	0.73~0.80		0.58~0.86	0.56~0.74	0.49~0.69			1.01~1.19
三峡水电站（长科院）	0.76~0.97	0.82~0.93		0.74~0.87	0.64~0.87			0.85~1.01
三峡水电站（北科院）	1.08	0.86		0.61~0.62	0.56~0.60	0.50~0.98	1.13~1.22	
小湾水电站（北科院）	0.85~0.91	0.83~0.89	0.70~0.78	0.52~0.60	0.65~0.71	0.60~0.83	1.00~1.01	1.01~1.03
小湾水电站（昆明院）	1.04~1.17	0.78~0.89	0.71~0.75	0.50~0.55	0.74~0.78		1.01~1.06	1.05~1.16

续表 4-3

工程	项目（全级配/湿筛）							
	抗压强度	劈拉强度	抗弯强度	轴拉强度	极限拉伸值	徐变	压弹性模量	拉弹性模量
溪洛渡水电站（成都院）	0.82～1.05	0.54～0.73	0.57～0.62	0.60～0.84	0.54～0.74	0.61～0.75	1.08～1.20	1.03～1.14
玛尔档水电站（南科院）	0.66～0.78	0.80～0.82		0.43～0.55	0.59～0.62		1.00～1.14	0.76～0.84
构皮滩水电站（长科院）	0.96～1.05			0.60～0.75	0.47～0.65	0.69～0.75	1.08～1.20	

## 5 温度控制设计资料与计算参数

### 5.1 气温、水温 and 地温

**5.1.1~5.1.4** 外界温度主要包括气温、水温、日照及地温等，为较准确地确定边界温度条件，外界温度宜取自坝址区气象水文观测站的实测资料。故应收集坝址区（或工程所在地）以下气象、水文及相关资料：

- 1 多年各月平均气温、极端最高气温、极端最低气温、各月气温日温差和气温骤降等统计资料。
- 2 多年各月风速、相对湿度、蒸发量、月平均日照时数、日照百分率、太阳总辐射热等气象要素统计资料。
- 3 多年各月平均地温统计资料。
- 4 气象资料采集站的纬度和高程等。
- 5 河段的多年逐月平均水温、极端最高水温、极端最低水温等统计资料。
- 6 多年逐月平均流量、平均径流量等统计资料。
- 7 类似工程水库库水温度统计资料。

当坝址区无气象观测站或气象站的实测资料系列较短时，可以工程周边的气象站实测资料为基础，采用一定的方法进行适当修正后作为温度控制计算的参数取值。一般情况下，由赤道向两极，气温逐渐降低；低纬度气温高，高纬度气温低；海拔越高气温越低，海拔每上升 100m，气温下降约  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。

河水水温随河流流经的地区不同而异。发源于高山或以冰雪融水补给的河流的水温一般向下游沿程增高；以湖泊为水源的河流，湖水温度对河水温度的影响，随流出的水量和气候条件而异；

平原河流水温的分布，取决于流经地区的纬度，汇入的区间支流、流程和地下水源的水温。有温泉注入的河段和有工业热废水排放口河段的水温，都比上下游河段的水温高。水库上下游水温，经水库调节后，夏季可使下游水温降低；中高纬度地区，冬季可使下游水温提高。

水文气象观测站实测地温一般统计地表及地表以下 0.2m、0.4m、0.8m、1.6m 及 3.2m 处的地温，据此确定计算采用的地温值。

## 5.2 基 岩 参 数

**5.2.2** 大坝基础一般需进行固结灌浆处理，灌浆后基岩岩体的整体性、抗压强度和弹性模量均会有所提高，岩体越破碎、固结灌浆后其强度和弹性模量提高得越大，对其上部混凝土的约束越强；因此，本条规定大坝基岩参数需考虑基础处理的影响。

## 5.3 混 凝 土 性 能 参 数

**5.3.3** 试验提供的混凝土弹性模量通常有轴拉弹性模量、劈拉弹性模量两种，其试验值差异较大。一般情况下，弹性模量宜取试验平均值，并可将其拟合为双曲线函数或指数函数。

混凝土绝热温升与大坝施工中的温度控制密切相关，是大体积混凝土的一项重要性能。混凝土绝热温升可以采用绝热温升试验设备直接测定，也可以根据胶凝材料的水化热及混凝土的比热容、密度和胶凝材料用量推算。目前受绝热温升试验方法和设备的影响，测得的混凝土绝热温升波动较大，且一般只进行 28d 龄期的测定，故混凝土绝热温升设计取值除采用试验成果拟定外，必要时还应与根据水化热试验值计算的绝热温升进行比较，一般宜选择相对较高的值作为设计取值。通常情况下，常态混凝土掺用粉煤灰达到 30%，碾压混凝土达到 50%~60%，高掺粉煤灰的混凝土（常态和碾压）绝热温升试验值应考虑粉煤灰的延迟水化

作用作适当修正。

一般情况下，极限拉伸值可拟合为双曲线函数或指数函数。

混凝土自生体积变形曲线较为复杂，难以用统一的函数式表达，计算中一般可采用分段函数进行拟合。

5.3.4 为方便计算，混凝土徐变可按照下式进行拟合：

$$C(t,\tau)=\sum_{r=1}^R\phi_r(\tau)[1-e^{-S_r(t-\tau)}](\text{MPa}^{-1})$$

(5-1)

5.3.5 影响混凝土线膨胀系数的主要因素是其骨料岩石的品种，一般情况下骨料的线膨胀系数大，配制的混凝土线膨胀系数也较大，如用石英岩配制的混凝土的线膨胀系数可达  $12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而采用石灰岩配制的混凝土的线膨胀系数仅在  $6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  左右。

《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057 规定：混凝土的泊松比可取为 0.167。混凝土泊松比的大小直接影响混凝土温度应力，实践表明，混凝土泊松比采用 0.167 进行温度应力计算的结果比实际监测的温度应力偏小。根据国内水电工程混凝土泊松比室内试验成果，其试验值为 0.17~0.236，平均在 0.20。另外，美国垦务局对美国境内已建的 10 个大坝，钻芯取样 106 个试件，实测了大坝混凝土的动力和静力性能，平均动态与静态泊松比均略大于 0.2。静态泊松比为 0.14~0.29，平均在 0.23；动态泊松比在 0.18~0.28，平均在 0.24。因此，混凝土泊松比设计取值宜通过试验确定，无试验资料时可取 0.167~0.20，高坝宜取上限。国内部分水电工程混凝土泊松比室内试验成果列于表 5-1 中，美国部分大坝混凝土钻芯泊松比试验成果列于表 5-2 中。

表 5-1 国内部分水电工程混凝土泊松比室内试验成果

	坝型		泊松比（平均值）
	双曲拱坝		0.176
	双曲拱坝		0.176



续表 5-1

工程名称	坝型	坝高（m）	骨料岩性	泊松比（平均值）
小湾	双曲拱坝	294.5	片麻岩	0.214
大花水	双曲拱坝	134.7		0.168
龙滩	碾压重力坝	216.5	灰岩	0.236
观音岩	碾压重力坝	159	灰岩	0.22
金安桥	碾压重力坝	160	玄武岩	0.205
功果桥	碾压重力坝	105		0.17
平均值				0.196

表 5-2 美国部分大坝混凝土钻芯泊松比试验成果

大坝名称	泊松比				平均动、静态泊松比的比值
	静态		动态		
	平均值 (试件数)	标准差	平均值 (试件数)	标准差	
Deadwood	0.24 (14)	0.05	N/A	N/A	N/A
Elephant butte	0.26 (25)	0.18	0.28 (15)	0.14	1.08
Monticello	0.28 (6)	0.09	0.25 (5)	0.04	0.89
Warm springs (96)	0.26 (19)	0.13	0.44 (3)	0.11	1.69
Hoover	0.21 (5)	0.02	0.21 (4)	0.21	1.00
Stewart mountain	0.29 (12)	0.17	0.20 (24)	0.09	0.69
Englebright	0.14	N/A	0.21 (19)	0.06	1.50
Folsom	0.17	N/A	0.21 (17)	0.10	1.24
Pine flat	0.15	N/A	0.18 (6)	0.05	1.20
Warm springs (98) Group A	0.28 (4)	0.02	0.26 (4)	0.10	0.93

续表 5-2

大坝名称	泊松比				平均动、 静态泊松 比的比值
	静态		动态		
	平均值 (试件数)	标准差	平均值 (试件数)	标准差	
Warm springs (98) Group B	0.15 (5)	0.11	0.25 (3)	0.09	1.67
Roosevelt group 1 (a)	0.22 (2)	0.03	0.22 (2)	0.04	1.00
Roosevelt group 1 (b)	0.23 (2)	0.04	0.23 (2)	0.08	1.00
Roosevel-12in.dia.Group 2	0.27 (2)	N/A	0.20 (2)	N/A	0.74
Roosevelt Group 3	0.21 (8)	0.03	0.20 (8)	0.05	0.95
Roosevelt Group 3	0.28 (8)	0.05	0.21 (3)	0.06	0.75
平均	0.23		0.24		



## 6 温度场计算

### 6.1 稳定温度场和准稳定温度场边界温度拟定

**6.1.1** 混凝土坝建成以后，初始温度和水化热的影响逐渐消失，在外界温度作用下，坝体内部温度缓慢下降，一段时间后基本稳定，坝体温度达到稳定温度或准稳定温度。一般情况下，坝体越厚，达到稳定温度场的时间越长；坝体的稳定温度或准稳定温度取决于边界温度，距表面 10m 左右范围内的混凝土受外界温度变化的影响较明显。

**6.1.2** 日照引起的坝面升温，一般可采用  $2^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ ；需精确计算时，还需考虑辐射热、云量、经纬度、日照角度、地形等因素的影响。朱伯芳院士在《大体积混凝土温度控制与温度应力》一书中给出了相关计算方法。

**6.1.3** 坝前水库水温计算是确定温度边界条件的难点。影响水库水温分布的主要因素是水库的形状、库区水文气象条件、水库运行条件和水库初始蓄水条件。预测水库水温分布的计算方法主要有经验公式方法、数值分析方法、综合类比数值分析方法三类。

本规范采用附录 B 中 B.2 的经验公式方法，主要依据中国水利水电科学研究院结合二滩水电站水库水温实测资料开展的研究成果，结论如下：

**1** 采用《水工建筑物荷载设计规范》DL 5077—1997 推荐的经验公式，按照非多年调节水库计算，水库底部水温仅为  $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ ；而按照多年调节水库计算，水库表层水温变幅过小，与实测值差距较大。

**2** 本规范采用的经验公式方法确定的水库底部水温取值较

为灵活，适用范围较广，可考虑高坝大库成库后引起的库区小环境气候变化及泄洪、库底淤积等的影响。

**6.1.4** 不同水电站的坝后水体来源各不相同，一般有天然降雨、下游河道回水、水库渗漏、水电站尾水及水库弃水等。

当水深小于 50m 时，由于水体深度较浅，受气温、降雨、下游河道回水、表面层流混掺及水库弃水等的影响，坝后水体通常呈紊流状态，不易形成层流分布，因此可采用水体的年平均温度或月平均温度。

当水深大于或等于 50m 时，由于水体深度较深，在上部约 50m 的变温层以下，水体将呈现层流状态分布。特别是对于一些坝后水体深度大于 100m、弃水建筑物高程相对较高的大型水电站，在坝后水体底部还会形成较为稳定的低温水层。本规范参考二滩、小湾、锦屏一级、溪洛渡等水电站实测的坝后水温资料，建议采用与上游水库水温相同的方法计算。

## 6.2 稳定温度场

**6.2.2** 一般底宽大于 40m 的坝体均存在稳定温度场。对于底宽小于 40m 的坝体，可先进行准稳定温度场计算，判断是否存在稳定温度场，如存在，再进行稳定温度场计算。计算稳定温度场时可采用二维模型；当有孔口或压力钢管时宜采用三维模型计算，此时横缝面应采用绝热边界。

## 6.3 准稳定温度场

**6.3.2** 准稳定温度场计算时可采用二维模型；当有孔口或压力钢管时宜采用三维模型计算，此时坝体横缝面应采用绝热边界。

## 6.4 不稳定温度场

**6.4.1~6.4.3** 规定了施工期不稳定温度场计算的主要内容和方法。工程实践中，有限元法计算通常使用不稳定温度场—温度应

力计算一体化类软件。

应针对坝体不同部位、不同浇筑时段，采用不同的温度控制措施组合计算不稳定温度场，基本要求如下：

- 1** 分析坝址区的气温资料，确定年内高温、常温、低温等时段。
- 2** 拟定施工期浇筑块或坝体的边界温度。
- 3** 拟定坝体混凝土及基岩性能参数。
- 4** 结合坝体混凝土材料分区、接缝灌浆范围、固结灌浆盖重区和泄水孔、引水管道、闸墩布置等条件，选定典型坝段。
- 5** 结合坝体分缝、仓面面积及尺寸、混凝土浇筑强度等，拟定典型坝段的浇筑层厚和间歇期。
- 6** 根据大坝施工进度、坝体临时挡水、接缝灌浆和固结灌浆等条件，拟定典型坝段的温度控制措施及其组合。

7 坝体分缝及接缝灌浆温度

7.1 坝 体 分 缝

7.1.1~7.1.3 坝体分缝的目的是减小混凝土拉应力、降低裂缝出现的概率。现行规范对混凝土坝横缝和纵缝间距的规定见表 7-1。国内部分工程混凝土坝横缝和纵缝设置情况见表 7-2。与横缝相比，纵缝对坝体应力影响更大，无纵缝通仓浇筑及各种纵缝的特点见表 7-3。

表 7-1 现行规范对混凝土坝横缝和纵缝间距的规定

规范名称	横缝间距	纵缝间距
《混凝土重力坝设计规范》 NB/T 35026	可为 15m~20m，超过 24m 或小于 12m 时，应作论证。碾压混凝土重力坝的横缝间距可比常态混凝土重力坝的横缝间距适当加大	纵缝间距宜为 15m~30m。条件允许时，宜采用通仓浇筑。 碾压混凝土坝不宜设置纵缝
《混凝土重力坝设计规范》 SL 319	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	纵缝间距一般为 15m~30m
《混凝土拱坝设计规范》 DL/T 5346	横缝间距（沿坝顶上游面弧长）宜为 15m~25m	未作具体规定
《混凝土拱坝设计规范》 SL 282	横缝间距（沿坝顶上游面弧长）宜为 15m~25m	拱坝厚度大于 40m 时，可考虑设置纵缝
《碾压混凝土坝设计规范》 SL 314	碾压混凝土重力坝横缝或诱导缝间距宜为 20m~30m。碾压混凝土拱坝设计应研究横缝或诱导缝的分缝位置、分缝结构和灌浆体系	不宜设置纵缝

表 7-2 国内部分工程混凝土坝横缝和纵缝设置情况

工程	坝型	最大坝高 (m)	最大底宽 (m)	横缝间距 (m)	纵缝设置情况
大朝山	1 号~8 号坝段为常态混凝土坝段, 9 号~23 号为碾压混凝土坝段	118		11~25.5	碾压混凝土重力坝不设纵缝, 仅在大体积的常态混凝土部位设有纵缝
二滩	混凝土双曲拱坝	245	58	一般为 20	通仓浇筑
构皮滩	混凝土双曲拱坝	232.5	50.28	16.48~24	不设纵缝
光照	碾压混凝土重力坝	200.5	159.05	16.6~25	不设纵缝
龙滩	碾压混凝土重力坝	192	168.58	9.5~30	不设纵缝, 垫层混凝土设临时纵缝
三峡	混凝土重力坝	181	126.7	13.3~45.3	设置 1 条~2 条纵缝, 顺河向浇筑块长 25m~57m
思林	碾压混凝土重力坝	117	89	16~24	不设纵缝
索风营	碾压混凝土重力坝	115.95	97	14.52~25	不设纵缝
东江	混凝土双曲拱坝	157	35	15~20	不设纵缝
五强溪	混凝土重力坝	85.83	65	10.5~33.5	不设纵缝
向家坝	常态(碾压)重力坝	162	166	20	设两条纵缝
大华桥	碾压混凝土重力坝	106	80	17.5~28.25	不设纵缝
天花板	碾压混凝土拱坝	107	93.88	26.45~42.65	不设纵缝
龙首	碾压混凝土拱坝+左岸碾压混凝土重力坝	80	13.5	40~60	不设纵缝
沙沱	碾压混凝土重力坝	101	83.39	20~61	不设纵缝
格里桥	碾压混凝土重力坝	124	97.1	20.5~36.92	不设纵缝
大花水	碾压混凝土拱坝+左岸重力墩	134.50		25	不设纵缝

续表 7-2

工程	坝型	最大坝高 (m)	最大底宽 (m)	横缝间距 (m)	纵缝设置情况
普定	碾压混凝土拱坝	75	28.2	30~80	不设纵缝
立洲	碾压混凝土拱坝	132	26	44~84	不设纵缝
石垭子	碾压混凝土重力坝	133.5	100.45	10~24.5	不设纵缝
周公宅	混凝土双曲拱坝	125.5	29.44	20	不设纵缝
龙开口	碾压混凝土重力坝	119	103.1	35	不设纵缝
棉花滩	碾压混凝土重力坝	113		33~64	不设纵缝
金安桥	碾压混凝土重力坝	160	156	20~34	不设纵缝
观音岩	碾压混凝土重力坝	159	144.5	6~27	不设纵缝
小湾	混凝土双曲拱坝	294.5	73	20	不设纵缝
阿海	碾压混凝土重力坝	138	110	20~34	不设纵缝
景洪	碾压混凝土重力坝	110	68	20~34.3	不设纵缝
黄登	碾压混凝土重力坝	202	161	20~27	不设纵缝
漫湾	混凝土重力坝	132	22	20~26	设 3 条纵缝, 间距为 20m~22m

表 7-3 无纵缝通仓浇筑及各种纵缝的特点比较

比较项目	通仓	斜缝	垂直纵缝	错缝
温度控制	要求高	一般	一般	一般
冷却方式	控制出机口温度如加冰、预冷骨料等; 埋设冷却水管等	一般不埋水管, 当块体尺寸较大时, 考虑预冷混凝土	常需埋设冷却水管, 一般需加冰或当块体尺寸大时考虑预冷混凝土	一般不埋水管, 夹有宽槽时常需埋设冷却水管
缝面灌浆	无缝	原则上不灌浆	必须进行灌浆	不灌浆
温度配筋	不配筋	必要时配筋	不配筋	必要时需配筋
施工期及进度	一般	适用快速施工	一般	慢



续表 7-3

比较项目	通仓	斜缝	垂直纵缝	错缝
蓄水	浇妥坝体即可蓄水	浇妥坝体即可蓄水	一般需灌浆后蓄水	浇妥坝体即可蓄水
裂缝情况	温度控制不当易产生严重裂缝	一般	一般	浇筑间歇期无法保证,遇寒潮易产生表面裂缝
主要优缺点	<p>优点:①可节省模板、接缝灌浆设备和人工;②施工工序简单,浇筑面积大,便于大规模机械化施工。</p> <p>缺点:①浇筑块很长,温度应力大,基础约束范围大,要求更严格的温度控制;②每一坝段必须全断面均匀上升,不利于提前挡水;③坝体降温缓慢,蓄水以后在坝体上游面容易产生劈头裂缝;④基础约束范围大,在约束范围内产生的表面裂缝和小裂缝在坝体冷却后处于受拉区,容易发展为大的贯穿性裂缝</p>	<p>优点:①可取消纵缝灌浆;②如坝内有引水钢管,斜缝可以为钢管安装带来一些方便。</p> <p>缺点:①各浇筑块之间存在一定施工干扰;②为避免坝踵应力恶化,对斜缝前后浇筑块的高差和温差,都应严格控制;③斜缝应在一定高程中止,不应穿出上游坝面,以防渗水</p>	<p>优点:①可根据施工浇筑设备及温度控制能力,合理确定纵缝间距,以保证施工质量,控制温度应力,适用于任何高度的大坝;②可根据开挖后的地形、地质条件,灵活地布置纵缝位置,避免应力集中现象;③各柱状块可分别上升,彼此间干扰较少,有利于施工安排,降低围堰高度或提前挡水。</p> <p>缺点:立模和灌浆工作量大</p>	<p>由于设置错缝的坝体混凝土,降温后容易被拉开,从缝两端向上下方向发展为裂缝,错缝目前在混凝土坝中已被淘汰</p>

7.2 接 缝 灌 浆 温 度

7.2.1～7.2.3 坝体需进行接缝灌浆的情况一般有拱坝的横缝灌浆、重力坝的纵缝灌浆、因坝体稳定要求进行的重力坝横缝灌浆,以及因其他特殊要求需进行的接缝灌浆。

冷却过程中,如果冷却区沿高程方向或沿上下游方向出现过大的温差,容易导致混凝土变形不协调,易产生裂缝,故本条规



定了上下相邻分区的接缝灌浆温度差不超过  $2^{\circ}\text{C}$ 。

降低接缝灌浆温度会增加施工期的温度应力，故应结合施工期温度应力计算成果和运行期应力计算成果综合分析确定分区接缝灌浆温度。

8 温度控制标准

8.1 温差标准

8.1.2 本条给出了常态混凝土和碾压混凝土的基础容许温差。  
国内部分工程的基础约束区混凝土强度等级、极限拉伸值和基础容许温差见表 8-1。

表 8-1 国内部分工程的基础约束区混凝土强度等级、  
极限拉伸值和基础容许温差

工程名称	坝型	强度等级	极限拉伸值 (×10 <sup>-6</sup> )			基础强约束区容许温差 (℃)
			28d	90d	180d	
小湾	常态拱坝	C <sub>180</sub> 40	108	111	130	14
溪洛渡	常态拱坝	C <sub>180</sub> 40			105	13
周公宅	常态拱坝	C <sub>90</sub> 25		98		21
二滩	常态拱坝	C <sub>180</sub> 35	90	117	123	14
构皮滩	常态拱坝	C <sub>180</sub> 35	93	102		16~17
三峡	常态重力坝	R <sub>90</sub> 200	82.5	88.5		14~16
五强溪	常态重力坝	C <sub>90</sub> 20	85	92		14~16
景洪	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 15	54.2	70.2	79.1	13
金安桥	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 20	70.9	80.1	107.9	12
阿海	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 20	54.2	82.3	93.5	13
大华桥	碾压重力坝	C <sub>180</sub> 20	57	66	78	13
龙滩	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 25	65	74	83	16
光照	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 15	70	81		16

续表 8-1

工程名称	坝型	强度等级	极限拉伸值 ( $\times 10^{-6}$ )			基础强约束区容许温差 ( $^{\circ}\text{C}$ )
			28d	90d	180d	
索风营	碾压重力坝	C <sub>90</sub> 15	63	71		14
天花板	碾压拱坝	C <sub>180</sub> 20	51	66	73	15
大花水	碾压拱坝	C <sub>90</sub> 20	73	84		14
立洲	碾压拱坝	C <sub>90</sub> 20	68	83		14

《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 和《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定的基础约束区混凝土容许温差基本一致，仅浇筑块长边长度  $l$  在 17m~21m 及 17m 以下的两个区间的温差有所差别，本规范采用《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 的规定。

常态混凝土拱坝、常态混凝土重力坝均采用常态混凝土基础容许温差；碾压混凝土坝包含的常态混凝土部分也应采用相应的常态混凝土基础容许温差。碾压混凝土拱坝、碾压混凝土重力坝均采用碾压混凝土基础容许温差。

有些工程也规定了非约束区的容许温差标准，一般是在弱约束区的基础容许温差的基础上放宽  $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。对于需进行接缝灌浆的工程，这样做也可以减少后期冷却的降温幅度，减小温度应力。

**8.1.3** 《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定新老混凝土温差标准的范围为  $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 规定新老混凝土约束应力由计算分析确定，其温差标准可比基础部分适当放宽。计算结果表明，当浇筑块长边长度大于 40m 后，新浇混凝土拉应力范围明显增大，故新老混凝土容许温差宜取小值。

工程实践中，有的工程采用的新老混凝土温差标准为  $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ ，也有的工程采用基础容许温差与相应部位的稳定温度之和进行控制。

施工中应尽量避免出现老混凝土，尤其是当基岩上薄层浇筑块长间歇时，出现温度裂缝的概率将大大增加，故需尽量缩短坝基固结灌浆时间，并应避免因灌浆抬动产生裂缝。

**8.1.4** 相邻坝块浇筑间隔时间长、高差较大时，通常出现的问题是：接缝灌浆的键槽被挤压，影响灌浆质量，严重时可能引起键槽的局部破坏，同时过大的剪切变形对横缝内的止水片产生不利影响；先浇块长期暴露在空气中，受到气温骤降的影响，容易产生表面裂缝；各坝块变形不一致，有可能减小横缝开度，对灌浆不利。因此，本规范规定相邻坝块高差不宜超过 12m，浇筑间隔时间不宜超过 28d。

**8.1.5** 混凝土裂缝大多是表面裂缝，在一定条件下表面裂缝可发展为深层裂缝，甚至发展为贯穿裂缝，因此需结合表面保护设计，确定内外温差控制标准。工程实践中，混凝土内外容许温差一般通过温度应力计算分析确定。但也有部分工程规定浇筑块中心与顶表面的内外容许温差取 10℃～15℃，浇筑块中心与侧表面的内外容许温差取 20℃～25℃。

气温骤降是引起表面裂缝的主要原因。进行表面保护设计时，应根据气温资料选取几种典型的气温骤降的降温幅度和历时，作为设计依据。我国季风气候特点明显，虽然全年发生的天数不多，但一次降温幅度都较大。我国各地（工程）不同纬度的气温骤降（寒潮）统计见表 8-2。

表 8-2 我国各地（工程）不同纬度的气温骤降（寒潮）统计

工程	月 份												年平均次数	最大降温（℃）
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
白山	3.3	2.3	1.7	1.2	2.4	1.2	0.5	0.6	0.6	2.2	3.2	3.6	22.8	16.3
恒仁	2.7	1.7	0.9	1.0	1.0	0.6	0.2	0.5	1.1	2.6	2.9	3.3	18.5	
青铜峡	2.2	1.4	1.0	1.9	1.6	0.9	0.8	0.4	1.3	2.1	2.4	1.9	17.9	
丹江口	0.8	0.8	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	1.1	1.1	0.8	10.4	

续表 8-2

工程	月 份												年平均次数	最大降温(℃)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
葛洲坝	0.7	0.8	1.4	1.4	1.0	0.6	0.4	0.4	1.0	0.8	0.9	1.0	10.4	15.6
新安江	1.0	0.4	0.8	1.3	0.5	0	0	0	0.6	1.4	0.9	1.0	7.9	
枫树坝	2.5	2.1	2.4	2.4	1.4	0.8	0.5	0.5	0.8	1.7	2.0	2.4	19.5	20.7
流溪河	2.3	1.7	2.2	2.0	1.2	0.6	0.4	0.3	0.7	1.6	2.0	2.4	17.4	
观音岩	0.3	0.3	0.7	0.7	1	0.7	0.5	0.2	0.5	0.6	0.3	0	5.8	
小湾	0	0.6	1.4	1.7	1.6	1.0	0.3	0	0.5	0.7	0.5	0	8.3	
构皮滩	0.46	0.65	1.26	1.25	0.88	0.12	0	0	0.14	0.4	0.6	0.23	6	20.7
龙滩	1.18	1.18	1.71	1.56	1.09	0.12	0.06	0.03	0.35	0.76	1.09	1.12	10.24	16.9
拉西瓦	0.7	0.7	0.8	1.7	1.8	0.6	0.4	0.6	0.6	0.9	1.1	0.3	10.2	14.5
漫湾	1	0	1	1	3	4	0	0	0	1	2	1	14	8.9
岩滩	1.5	2.3	2.4	2.2	0.9	0.4	0	0	0.2	1.2	2.3	2.0	16.5	
东风	1.5	1.3	2.2	2.1	1.7	0.77	0.65	0.24	1.2	1.3	1.5	1.2	15.6	18.9
三峡	0.67	0.78	1.56	1.78	1.11	0.89	0.33	0.78	1.00	0.67	0.78	0.89	11.2	14.6
五强溪	0.92	0.92	1.56	1.88	1.32	0.88	0.60	0.56	1.56	0.88	1.16	1.24	13.48	17.8

8.2 容许最高温度

8.2.3 本条提出了坝段内混凝土温度控制分区通常考虑的主要因素。大坝混凝土温度控制分区成果的主要内容有分区容许最高温度、接缝灌浆温度分区、不同的温度控制措施组合、浇筑层厚度及间歇期、按月或季的浇筑温度、冷却水管间距、表面冷却方法、表面保护标准等。

## 9 温度应力及控制标准

### 9.1 温度应力计算

**9.1.2** 由于徐变的存在，混凝土在长期恒定荷载作用下，将产生随着时间而增长的变形，其内部的应力和变形都会不断产生重分布，对混凝土受力条件的影响较大，混凝土温度应力计算时应计入徐变。

混凝土的自生体积变形主要与水泥水化过程中水泥晶体成分的体积变化、水化胶状生成物与晶体生成物的体积变化有关。若自生体积变形是膨胀的，则在约束条件下，将产生压应力；反之，则产生拉应力，故温度应力计算时应计入自生体积变形。

### 9.2 温度应力控制标准

**9.2.1~9.2.3** 分项系数法是《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 和《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定的温度应力控制标准。分项系数法要求混凝土极限拉伸值和弹性模量均取标准值，参数获取困难，且未反映工程重要性和开裂危害性的差异。

综合安全系数法是《混凝土重力坝设计规范》SL 319 和《混凝土拱坝设计规范》SL 282 规定的温度应力控制标准。《混凝土重力坝设计规范》SL 319 规定  $K_f$  一般采用 1.5~2.0，视工程重要性和开裂的危害性而定；《混凝土拱坝设计规范》SL 282 规定  $K_f$  一般采用 1.3~1.8，视工程重要性和开裂的危害性而定。

采取表面保护措施后降低表面温度应力效果明显，且表面裂缝相对于深层裂缝和贯穿性裂缝危害性较小，故本规范综合安全系数法用于控制表层混凝土温度应力时，安全系数取 1.3~1.5。



本规范规定综合安全系数法极限拉伸值的设计值由试验确定。国内各个设计单位确定极限拉伸值的具体做法不一，有的单位采用试验平均值，有的单位采用试验值的小值平均值，有的单位采用试验平均值的 0.8 倍~0.9 倍。

朱伯芳院士于 2005 年提出了一种新的采用综合安全系数表示的温度应力控制公式，其中混凝土的抗裂能力以轴拉强度表征，即

$$\sigma \leq R_t / K_f \quad (9-1)$$

式中： $\sigma$ ——各种温差所产生的温度应力之和（MPa）；

$R_t$ ——混凝土轴向抗拉强度（MPa）；

$K_f$ ——安全系数，采用式（9-2）确定。

$$K_f = \frac{a_1 a_2 a_3 a_4 a_5}{b_1 b_2 b_3} \quad (9-2)$$

式中： $a_1$ ——建筑物重要性系数，对于 I、II、III 等级建筑物，分别取 1.1、1.0、0.9；

$a_2$ ——拉应力所在部位的重要性系数，基础约束区内部和表面及上游坝面取 1.0，约束区外的侧面取 0.9，下游表面取 0.8；

$a_3$ ——超载系数，考虑气温及寒潮变幅超过计算值、绝热温升试验 28d 时间偏短带来的误差等，取 1.05~1.10；

$a_4$ ——变形后龄期系数，通常弹性模量和徐变加载龄期只有 180d，据此推算的后龄期弹性模量偏小，徐变偏大，早龄期  $\tau \leq 1$  年， $a_4 = 1.0$ ，后龄期  $\tau \geq 3$  年， $a_4 = 1.1 \sim 1.2$ ；

$a_5$ ——校正系数，考虑大量实际工程经验及工程实施的可行性，建议  $a_5 = 0.7 \sim 1.0$ ；

$b_1$ ——试件尺寸及湿筛影响系数，最大集料粒径 150mm、80mm 分别取 0.62、0.73；



- $b_2$ ——时间效应系数，气温日变化、寒潮、年变化及灌缝前冷却、通仓浇筑及自然冷却，分别取 0.88、0.80、0.78、0.70；
- $b_3$ ——强度后龄期系数，通常强度试验只做到 180d，据此推算的后龄期强度偏低，早龄期 $\tau \leq 1$  年， $b_3=1.0$ ，后龄期 $\tau \geq 3$  年， $b_3=1.2 \sim 1.3$ 。

朱伯芳院士提出的采用轴向抗拉强度控制的公式及配套的安全系数，考虑了骨料最大粒径、尺寸效应、湿筛影响、时间效应、建筑物等级、应力部位、超载系数、龄期影响等因素并进行了合理量化。

溪洛渡、大岗山、锦屏一级、拉西瓦等工程均采用综合安全系数法，其综合安全系数取值为 1.8，如换算为轴向抗拉强度控制，相应的安全系数见表 9-1。

表 9-1 部分工程安全系数换算成果

工程项目	参数取值	换算为轴向抗拉强度控制的安全系数
大岗山	施工图阶段试验值	2.02~2.04（180d）
溪洛渡	施工图阶段试验值	2.05~2.15（180d）
锦屏一级	施工图阶段试验值	1.83~1.97（180d）
锦屏一级	施工图阶段现场试验统计值	1.91~1.96（180d）
拉西瓦	文献	2.01（90d）

## 10 混凝土温度控制措施

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 本条强调温度控制是全过程的行为，各个环节均应重视。

随着通信技术、控制技术的发展，国内已建、在建的多个大型、巨型工程均开发了相应的混凝土动态温度控制系统，系统架构、系统功能、技术手段、技术指标、实施效果方面各具特色，是大体积混凝土温度控制精细化施工管理的体现，也代表了混凝土温度控制的重要发展方向。

动态温度控制系统可对坝体混凝土温度进行实时数字监控，跟踪反演关键部位的温度场，通过仿真模拟，及时掌握大坝整体温度及应力的变化，对其后的温度变化及温度应力进行预测，并对开裂风险进行预警，提出调整措施。此外，通过对大坝的智能监控，可以直接获取大坝每一仓混凝土的浇筑情况、温度控制情况等，进而为大坝施工质量的评价提供直接依据，为大坝竣工验收提供强有力的技术支撑。

动态温度控制系统一般包括：①坝内数字动态测温；②通过计算机专家系统软件分析、处理数据；③全过程反馈跟踪仿真分析；④发出预警信息，调整下一步温度控制措施；⑤温度控制信息资料集成管理等方面的内容。

**10.1.2** 温度控制设计应满足混凝土的分区容许最高温度和温度应力控制标准，可通过控制出机口温度、浇筑温度、通水冷却等措施来实现，其中控制出机口温度和浇筑温度是主要控制环节。应结合工程条件，按每月或每季度划分容许最高温度的控制时段，若坝址区气温年变幅不大，也可将全年划分为高温和低温两个时

段，并按划分的时段提出满足容许最高温度要求的浇筑温度、浇筑层厚度、间歇期、水管布置等温度控制措施。

**10.1.3** 利用多年月平均气温低于年平均气温的时段浇筑混凝土，可降低能耗，容易实现对最高温度的控制。

**10.1.4** 浇筑层厚度和层间间歇对工程进度影响较大。采用短间歇、均匀上升的浇筑方法，对温度控制及防裂较为有利，但由于金属结构安装及其他因素等的影响，有时候难以做到，因此对混凝土浇筑和其他工序需要统筹规划以减少影响。

常态混凝土在基础约束区部位浇筑层厚度一般为 1.5m～2.0m，基础约束区以上在满足温度控制标准或施工控制条件的前提下，较多工程也采用了 3.0m 的浇筑层厚度。

**10.1.5** 碾压混凝土具有水化热低、放热慢、快速施工等特点，碾压混凝土的浇筑方式受控于坝体尺寸、仓面大小、施工季节、施工进度要求、施工设备等因素，一般情况下压实厚度为 0.3m，升层厚度为 3m，近年来国内工程多采用翻转模板技术，不占压碾压仓面，碾压混凝土可连续上升。

国内一些混凝土坝工程浇筑层厚度及层间间歇时间见表 10-1。

表 10-1 国内一些混凝土坝工程浇筑层厚度及层间间歇时间

工程	坝型	浇筑层厚度（m）	层间间歇时间（d）
二滩	混凝土拱坝	3	5～10
构皮滩	混凝土双曲拱坝	基础强约束区 1.5，脱离强约束区 3；陡坡坝段仓面宽度 6m 以内采用 3	5～10
龙滩	碾压混凝土重力坝	强约束区 1.5，弱约束区 3，非约束区 3	常态混凝土：约束区 5～7，非约束区 7～10；碾压混凝土：约束区 3～5，非约束区 ≥3
索风营	碾压混凝土重力坝	初期基础约束区层厚度为 2～3。后期为满足施工工期要求，设计层厚度增大到 6（实施中层厚一般为 6～15，最厚达到 31	5～7 大多数情况层间间歇时间超过设计要求，一般为 10～25，最长超过 60

续表 10-1

工程	坝型	浇筑层厚度 (m)	层间间歇时间 (d)
大华桥	碾压混凝土重力坝	3	3~7
天花板	碾压混凝土拱坝	常态混凝土 2~3; 碾压混凝土: 强约束区 1.5~3, 弱约束区 3, 非约束区 3~5	5~7
东江	混凝土双曲拱坝	强约束区 1, 弱约束区 2, 非约束区 2~3	强、弱约束区 5~7, 非约束区 7~10
五强溪	混凝土重力坝	约束区 1, 非约束区 2	约束区 5~7, 非约束区 $\geq 7$
向家坝	常态 (碾压) 重力坝	强约束区 1.5~3, 弱约束区 3, 非约束区 3	约束区 5~7, 非约束区 5~10
光照	碾压混凝土重力坝	3	5~7
沙沱	碾压混凝土重力坝	3	5~7
思林	碾压混凝土重力坝	3	5~7
格里桥	碾压混凝土重力坝	3	5~7
东风	混凝土拱坝	约束区 1.5, 非约束区 3	约束区 6~7, 非约束区 11~14
观音坪	碾压混凝土拱坝	强约束区 1.5, 弱约束区 2, 非约束区 3	约束区 6~7, 非约束区 11~14
大花水	碾压混凝土拱坝+左岸重力墩	强约束区 1~2, 弱约束区 3, 非约束区 3	5~7
普定	碾压混凝土拱坝	3	5~7
立洲	碾压混凝土拱坝	3	5~7
石垭子	碾压混凝土重力坝	3	5~7

续表 10-1

工程	坝型	浇筑层厚度（m）	层间间歇时间（d）
周公宅	混凝土双曲拱坝	约束区 1.5~2，非约束区 1.5~3	约束区 5~7，非约束区 7~10
龙开口	碾压混凝土重力坝	强约束区 1.5，弱约束区 3，非约束区 3	约束区 5~7，非约束区 7~10
金安桥	碾压混凝土重力坝	垫层常态混凝土不大于 1.5，碾压混凝土不大于 3	1.5m 浇筑层厚度不少于 6，3.0m 浇筑层厚度不少于 7
观音岩	碾压混凝土重力坝	垫层常态混凝土 1~2，约束区 1.5~3，非约束区 3	1.5m 浇筑层厚度 3~5，大于 1.5m 层厚度 5~7
小湾	混凝土双曲拱坝	1.5 或 3	1.5m 浇筑层厚度 5~7，3.0m 浇筑层厚度 7~10
阿海	碾压混凝土重力坝	不大于 3	1.5m 及以下浇筑层厚度少于 6，1.5m 及以上浇筑层厚度不少于 7
景洪	碾压混凝土重力坝	垫层混凝土 1，碾压混凝土 3，常态混凝土 1.5 或 3	垫层混凝土 4~6，碾压混凝土 5~10，常态混凝土 5~8
黄登	碾压混凝土重力坝	垫层混凝土 1.5，碾压混凝土 3	不少于 5
漫湾	混凝土重力坝	约束区 1.5，非约束区 2 或 3	1.5m 及 2m 浇筑层厚度 5~7，3.0m 浇筑层厚度 7~10

10.2 原材料温度控制

10.2.1 若进入拌和楼的水泥温度过高，将影响混凝土出机口温度的控制，甚至会出现水泥与外加剂在搅拌中适应性不良，导致混凝土发生“假凝”“快凝”等不良现象。

10.2.2 成品骨料特别是细骨料在堆存和运输过程中，为了使含水量不因下雨超标或因受太阳辐射影响而使温度上升，可搭设防雨遮阳棚；要求骨料在运输过程中减少转运次数和堆料厚度不小于 6m，是为了避免骨料内部温度因骨料受日照变化影响而产生波动或升高，有利于混凝土出机口温度的控制或降低制冷费用。



控制细骨料含水率是控制水胶比和出机口混凝土坍落度稳定的主要措施之一，同时也是为了拌和预冷混凝土时满足加冰量的要求。二滩、三峡等工程施工中，均采用了包括真空脱水机、脱水筛等加速脱水的综合措施。

10.2.3 拌和用水水温对混凝土出机口温度有一定影响，故应采取措施防止拌和水水温过高。

10.3 混凝土生产过程温度控制

10.3.1 混凝土生产过程中对骨料进行预冷具有较好的降温效果。预冷骨料时应采取有效的隔热、保温措施，防止骨料从预冷仓到拌和楼过程中产生过快的温度回升。

采用水冷法时，应有脱水措施，使骨料含水量保持稳定。采用风冷法时，应采取措施防止骨料（尤其是小石）冻仓。当温度控制标准低、预冷混凝土生产规模较小、混凝土拌和楼的料仓容积能满足粗骨料的降温幅度要求时，可只在拌和楼料仓内风冷粗骨料；当温度控制标准较高、预冷混凝土生产规模较大，仅在拌和楼料仓内对粗骨料进行风冷不能满足粗骨料的降温要求时，可采取二次风冷或水冷加拌和楼料仓风冷的预冷方式。

本条中的总水量包括骨料表面所含水量。

加冰时，为保证搅拌均匀，一般适当延长拌和时间 30s（强制式拌和机取 15s）。《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 提出了混凝土最少拌和时间，见表 10-2。

表 10-2 混凝土最少拌和时间

拌和机容量 $Q$ ( $m^3$ )	最大骨料粒径 (mm)	最少拌和时间 (s)	
		自落式拌和机	强制式拌和机
$0.8 \leq Q \leq 1$	80	90	60
$1 < Q \leq 3$	150	120	75
$Q > 3$	150	150	90

10.4 混凝土运输和浇筑过程温度控制

10.4.1 为避免混凝土运输过程中温度回升过大，冷量损失过多，应对混凝土运输工具采取喷淋、搭设防雨遮阳棚、包裹隔热保温材料等措施，同时混凝土拌和系统的布置和入仓方式选择应考虑尽可能减少混凝土转运次数和运输时间的要求。

混凝土浇筑温度超过 28℃时，可能出现假凝现象。

根据《水工混凝土施工规范》DL/T 5144，掺普通减水剂的混凝土运输时间不宜超过表 10-3 的规定；掺普通减水剂混凝土的允许间歇时间可参照表 10-4。

表 10-3 混凝土运输时间

运输时段的平均气温（℃）	混凝土运输时间（min）
20~30	45
10~20	60
5~10	90

表 10-4 混凝土的容许间歇时间

混凝土浇筑时的 气温（℃）	容许间歇时间（min）	
	中热硅酸盐水泥、硅酸盐水泥、 普通硅酸盐水泥	低热矿渣硅酸盐水泥、矿渣硅 酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥
20~30	90	120
10~20	135	180
5~10	195	—

10.4.2 当外界气温较高、太阳辐射较强时，尽快覆盖隔热保温材料是减少浇筑过程中热量倒灌的有效措施，国内工程已普遍采用。

10.4.3 一般情况下，喷雾后仓内气温可比仓外气温降低 3℃~8℃。施工中应采用喷雾机进行仓面喷雾，不应采用人工喷雾或喷毛枪



喷水等方式。

## 10.5 浇筑后温度控制

**10.5.1** 水管通水冷却是混凝土浇筑后控制温度较为有效的手段，以其应用的适应性和灵活性在世界各国混凝土坝的施工中被广泛采用。对于有接缝灌浆要求的坝体，水管通水冷却是使混凝土温度在规定时间内降至接缝灌浆温度要求的主要措施。

**10.5.2** 采用表面流水冷却或表面蓄水降温时应保持仓面的平整度，使整个仓面覆盖有流水，并应避免排水对相邻坝段的施工造成干扰；表面蓄水降温对面积较大的仓面实施难度较大，采用时对仓面平整度有更高的要求。

**10.5.3** 在复杂温度控制条件下，智能通水能够实现通水过程的实时、在线、个性化精细控制，保证温度控制质量。在溪洛渡、锦屏、黄登等国内高坝都有应用案例，取得了较好效果。

自动调节通水系统包括热交换装置、热交换辅助装置、控制装置和大坝数据采集装置，以及温度控制策略。采用智能通水应达到三个目的：①控制混凝土最高温度不超过分区容许最高温度；②控制混凝土时空温度变化的协调；③混凝土冷却过程中异常温度的预警预控。

## 11 通 水 冷 却

### 11.1 一 般 规 定

**11.1.1** 通水冷却过程一般分为三期，存在不同称谓，有的称一期冷却、中期冷却和二期冷却，有的称初期冷却、中期冷却和后期冷却，本规范统一为初期冷却、中期冷却和后期冷却。

**11.1.2~11.1.4** 规定了初期通水冷却、中期通水冷却和后期通水冷却的适用条件。初期通水的主要目的是削减混凝土水化热温升，控制混凝土温度不超过容许最高温度；中期通水的主要目的是控制初期通水后的温度回升，减小内外温差，以及分担后期冷却降温幅度；后期通水的主要目的是将混凝土冷却至设计接缝灌浆或接触灌浆温度。

**11.1.5** 通水冷却过程中应注意避免因冷却产生过大的拉应力导致混凝土开裂。早期降温速度过快或幅度较大，可导致早期混凝土温度应力大于自身抗裂强度而开裂；后期通水冷却幅度大，将增大施工期最大拉应力，降低混凝土的抗裂安全度。因此，宜采用小温差、均匀缓慢的降温方式。

小温差是指水温与混凝土温度之差不宜过大，通水冷却期间将水温分为几档逐步降低可使混凝土温度应力有所减小。均匀缓慢冷却是指混凝土降温速率不能过快，以充分利用混凝土的徐变，在相同降温幅度及水管布置条件下，由于徐变作用，分三期冷却的温度应力小于分两期冷却的温度应力。

**11.1.6** 通水冷却主要是依靠管内流水与混凝土之间的热交换来降低混凝土温度，因此要求用作冷却水管的管材必须具有良好的导热性能。为防止水管在混凝土振捣或碾压过程中被破坏，

冷却水管应具有较高的强度。目前国内工程普遍采用管径为 25.4mm 的铁管及内径为 28mm、外径为 32mm、导热系数为 1.66kJ (m · h · °C) 的高密度聚乙烯塑料管，其性能指标要求见表 11-1。铁管导热系数大，冷却效果较好，但施工接头多，且弯管部分需提前预制；塑料管冷却效率比铁管低，但管子盘成卷，施工时可随浇随铺，便于施工；也有国外工程采用铝管，其质地较软，易于现场弯折，施工简单，但造价较高。

表 11-1 高密度聚乙烯塑料水管指标

项目		单位	指标
导热系数		kJ/ (m · h · °C)	≥1.0
拉伸屈服应力		MPa	≥20
纵向尺寸收缩率		%	<3
破坏内水静压力		MPa	≥2.0
液压试验	温度：20℃ 时间：1h 环向应力：11.8MPa	不破裂 不渗漏	
	温度：80℃ 时间：170h 环向应力：3.9MPa	不破裂 不渗漏	

11.1.7 为避免水管进口处水温较低、出口处水温较高造成混凝土冷却不均匀，需要变换水管内水流方向。

11.1.8 强调输送冷却水的干管和支管需包裹保温材料，减少冷水厂输出的制冷水的温度在输送过程中受外界气温和太阳辐射热的影响而回升，节约制冷量。

11.2 冷却水管布置

11.2.1 冷却水管水平布置及铅直布置示意图 11-1 和图 11-2。在铅直断面呈梅花形布置时，铅直断面上每根水管冷却范围类似正六边形，水管冷却效果最好。

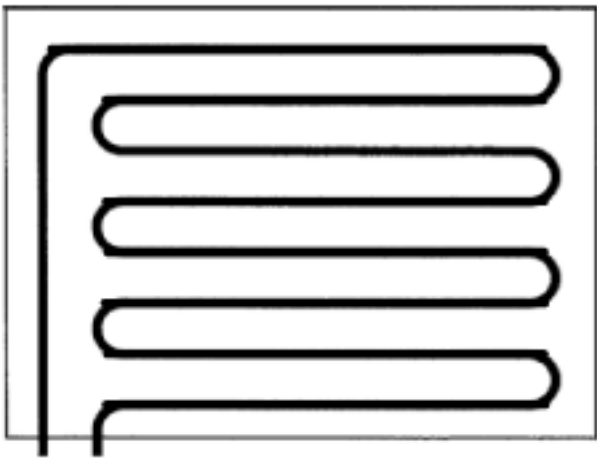


图 11-1 冷却水管平面布置示意图

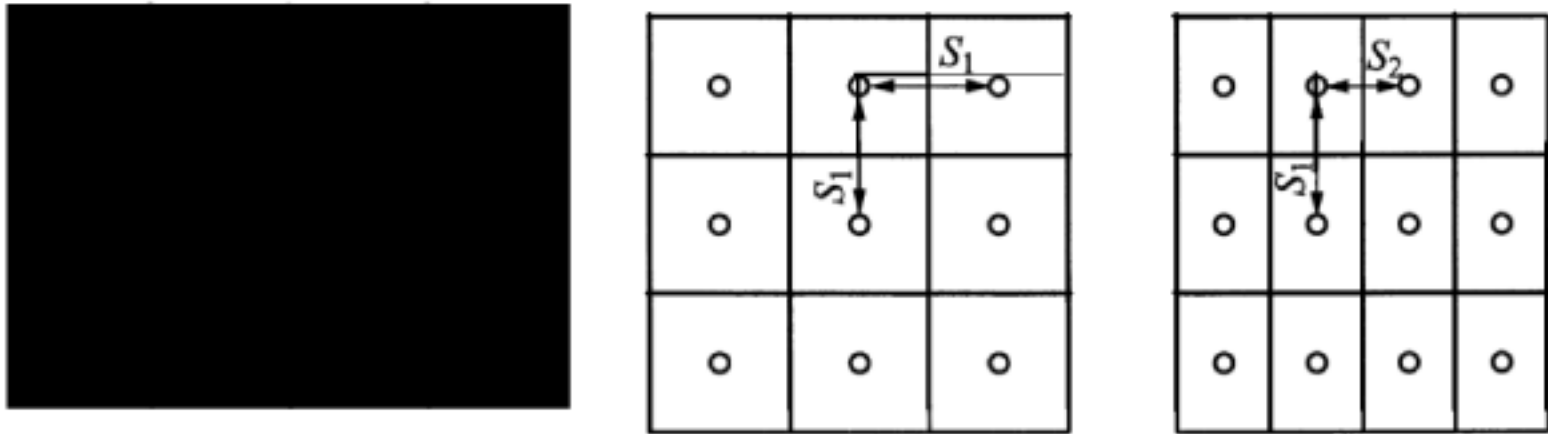


图 11-2 冷却水管铅直断面布置示意图

混凝土施工中一般是将冷却水管铺设在层面上，但有两个缺点：①对新浇混凝土的冷却效率降低；②会在下层混凝土内产生拉应力，故可在浇筑层中部铺设冷却水管。对浇筑层较厚的混凝土，为增大对新浇混凝土的冷却效率，均化温度梯度，可在浇筑层中部加铺一层冷却水管。

**11.2.2** 理论分析及工程实践表明，冷却水管间距采用 1m~1.5m 可保证各期冷却时间适当，使冷却降温过程中混凝土温度分布均匀。

**11.2.3** 冷却水沿水管流动，吸收混凝土放出的热量，水温逐渐升高，出口处水温必然高于进口处。如果同一仓面上单根水管长度相差较大，会在冷却时造成较短水管控制区域温度较低、较长水管控制区域温度较高的相对温差。为保证冷却效果，使同一仓面上温度均匀分布，要求单根水管长度一般不超过 300m。

坝内冷却水管分叉设置会导致同高程上下游混凝土温度不同，难以对分叉水管的通水参数进行逐根调整，尽管有工程曾采取分叉布置冷却水管，但效果并不理想。

**11.2.4** 冷却水管距离上下游面、孔洞、廊道、缝面的距离过大将不能保证冷却效果，过小则容易使水管冷却温度应力与表面温度应力叠加。

**11.2.5** 缝面两侧混凝土浇筑的时间不同、成熟度不同、变形不协调，会使过缝的冷却水管变形或拉断，因此一般不宜过缝。确需过缝时，应使冷却水管具有一定的自由变形能力，可在缝两侧各设置 1m~2m 的柔性包裹段。

如冷却水管穿越廊道或孔洞，不仅妨碍施工，且容易损坏冷却水管。

### 11.3 初期通水冷却

**11.3.1** 初期通水开始时间与混凝土下料时间同步，有利于防止水管破损以及破损后的及时修复，也有利于水化热削峰。初期通水的持续时间与通水水温、通水流量、通水降温幅度和降温速率要求等有关，应通过计算确定，通水结束标准可采用时间与降温幅度双重控制。

**11.3.2** 《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定：通水冷却时坝体降温速度不宜大于  $1^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ；《混凝土拱坝设计规范》SL 282 规定：坝体降温速度每天不宜大于  $1^{\circ}\text{C}$ ；《混凝土重力坝设计规范》SL 319 规定：坝体降温速度不宜大于  $1^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ；美国垦务局《拱坝设计》规定：温度下降的速度一般限制在每天  $0.5^{\circ}\text{F} \sim 1^{\circ}\text{F}$  ( $0.28^{\circ}\text{C} \sim 0.56^{\circ}\text{C}$ )，初期冷却时间为 10d~16d，中期和后期通水冷却降温速度维持在每天  $1^{\circ}\text{F}$  ( $0.56^{\circ}\text{C}$ ) 以下，最好是每天  $1/2^{\circ}\text{F}$  ( $0.28^{\circ}\text{C}$ ) ~  $3/4^{\circ}\text{F}$  ( $0.42^{\circ}\text{C}$ )，中期和后期通水冷却总需时 30d~60d；美国陆军工程兵团《拱坝设计》规定：初期通水冷却每天降温幅度不宜超过  $1/2^{\circ}\text{F}$  ( $0.28^{\circ}\text{C}$ ) ~  $1^{\circ}\text{F}$  ( $0.56^{\circ}\text{C}$ )，冷却持续时间不宜超过 15d~30d。

考虑目前国内水泥早期发热速率较快的特点，混凝土冷却降温速率过小对降低混凝土最高温度不利，故本规范提出初期通水每日最大降温不宜超过  $1^{\circ}\text{C}$ ，平均日降温不宜超过  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。



**11.3.3** 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 规定：混凝土温度与水温之差不宜超过 20℃；《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定：通水时坝体混凝土温度与冷却水之间温差不宜超过 20℃~25℃。本条要求初期通水时混凝土温度与冷却水管进口水温之差不超过 20℃，主要考虑采用小温差通水，减小管周温度梯度。

**11.3.4** 冷却水管管内水流呈紊流状态比层流状态的冷却时间短、效果好，因此通水冷却应在管内形成紊流，通水流量（或通水流速）应大于临界值，参考表 11-2。本条分阶段提出初期通水参考流量，开始通水至混凝土最高温度出现后 2d，采用较大通水流量，使最高温度满足容许最高温度要求；最高温度出现 2d 后，采用较小通水流量，使降温速率放缓，防止温度陡降。

表 11-2 不同水温临界流量及临界流速参考表

水管内径 (mm)	水温 (℃)	0	5	10	15	20
28	临界流速 (m/s)	0.128	0.109	0.093	0.081	0.072
	临界流量 (m³/h)	0.28	0.24	0.21	0.18	0.16
25.4	临界流速 (m/s)	0.141	0.120	0.103	0.090	0.079
	临界流量 (m³/h)	0.26	0.22	0.19	0.16	0.14
12.7	临界流速 (m/s)	0.282	0.239	0.206	0.179	0.158
	临界流量 (m³/h)	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07

11.4 中 期 通 水 冷 却

**11.4.1** 为避免高程方向产生过大的温度梯度，故提出中期冷却同批次冷却的高度不宜小于 0.2 倍冷却区域的最大底宽。

**11.4.2~11.4.4** 对三种不同目的的中期通水冷却要求作出具体规定。中期通水应提前规划，保证有足够的通水时间，采用小温差、缓慢降温的方式使混凝土内部温度在要求的时间内降至规定的温度。考虑中期通水冷却一般降温幅度相对较小，提前 1 个~2 个

月开始通水即可。低温季节来临前对高温季节浇筑的混凝土进行通水冷却的措施曾在三峡、隔河岩、阿海、金安桥、观音岩等工程中采用。

**11.4.5** 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 规定，中期通水需控制混凝土内部温度与通水水温之差不宜大于  $20^{\circ}\text{C}$ 。考虑中期通水时混凝土弹性模量已有所增长，宜选择小温差通水，本规范规定通水水温与混凝土温度之差宜控制在  $15^{\circ}\text{C}$  以内。

**11.4.6** 为充分发挥徐变的作用，本条对中期通水冷却提出了每日最大降温、混凝土平均日降温要求，以实现小温差、缓慢冷却。

**11.4.7** 为避免初期通水后温度回升超过前期峰值，小湾、溪洛渡、锦屏等工程采用了小流量间歇通水的方式，保持中期通水期间混凝土温度处于初期通水结束时的温度值。小湾工程采用的是通水 3d~4d 后闷水 5d~7d 的方式。

## 11.5 后 期 通 水 冷 却

**11.5.1** 本条提出了后期通水冷却开始时的混凝土最短龄期要求。

《混凝土拱坝设计规范》DL/T 5346 规定：缝两侧坝体混凝土龄期不宜小于 90d；《水电水利工程接缝灌浆施工技术规范》DL/T 5712 规定：缝两侧坝体混凝土龄期不宜小于 4 个月。考虑后期通水冷却时间一般为 1 个月左右，且后期通水冷却开始时间过早，混凝土抗裂能力不足，可能会增加混凝土出现裂缝的概率，故本条规定拱坝后期通水冷却开始时的混凝土龄期不宜少于 90d。

《混凝土重力坝设计规范》NB/T 35026 未对坝体混凝土接缝灌浆龄期进行规定，考虑后期通水冷却开始时间过早，混凝土抗裂能力不足，可能会增加混凝土出现裂缝的概率；此外，重力坝接缝灌浆后缝面再次张开的危害性小于拱坝，故本条规定重力坝后期通水冷却开始时的混凝土龄期不宜少于 60d。

**11.5.2** 对于中、高坝，一方面受分期蓄水发电的工期限制，需进行分期灌浆、分期蓄水；另一方面，冷水系统设置一般不能满足



全坝所有混凝土同步冷却的要求，冷却需分批次进行，这就需要结合灌浆分区要求进行后期通水冷却程序设计，最大限度地减小分区冷却混凝土间的温差和温度梯度。高坝底宽较大，基础约束和灌浆后下部混凝土对上部混凝土的约束更大，同批次冷却的混凝土高度范围大对减小温度应力有利。

小湾、锦屏、溪洛渡、大岗山等高坝均采用了本条规定的后期通水冷却方式。

**11.5.3** 后期通水冷却时，混凝土弹性模量已较高，混凝土温度与水温之差将产生更大的管周温度应力，故通水水温与混凝土温度之差要求适当加严，宜控制在  $10^{\circ}\text{C}$  以内。

**11.5.4** 后期通水冷却时，为充分利用混凝土的徐变，减小冷却产生的拉应力，需进一步控制降温速率进行缓慢冷却，本条提出混凝土每日最大降温 and 日平均降温分别为  $0.5^{\circ}\text{C}$  和  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。

## 12 特殊部位的温度控制

### 12.1 陡 坡 坝 段

**12.1.1** 陡坡坝段为建基面与水平面夹角大于  $45^{\circ}$  的坝段。陡坡坝段基岩约束范围广，约束应力大，温差标准宜偏严采用。约束区域的界定可视不同情况，结合温度应力计算成果进行细化，一般楔形及梯形区域宜划分在强约束区内。

**12.1.2** 陡坡坝段的坝基开挖体形较复杂，需采用三维有限元法进行分析，以反映结构形态和约束条件。拱坝陡坡坝段基础面可能不是一个平面，采用单坝段计算时，受自重的影响，大坝有向河床产生位移的趋势，基础边坡局部范围混凝土因自重引起法向拉应力增大，施工时一般要求先浇筑河床坝段，防止岸坡坝段向河床产生位移。为使应力计算更符合实际，陡坡坝段温度应力计算时宜考虑以 1 个~2 个先浇坝段作为陡坡坝段的支撑坝段，在侧面考虑施加法向约束。

**12.1.3** 陡坡坝段基础部位为细长条楔形体，体形不利，若浇筑时出现老混凝土则更容易产生温度裂缝，故应短间歇连续均匀浇筑。

**12.1.4** 陡坡坝段建基面的接触灌浆，为保证灌浆效果，需在灌浆前采用通水冷却措施使混凝土温度降至相应部位的稳定温度。

### 12.2 施工期临时过水的坝块

**12.2.1** 过水冷击引起的表面拉应力大小主要取决于过水时混凝土的降温幅度。对有过水要求的坝块，为减少表面裂缝，主要应减小内外温差和温度梯度，可采取混凝土表面保护、通水冷却、铺设限裂钢筋等措施。

过水后应对过水面进行全面的检查和清理，必要时应清除过水损毁的面层混凝土。

**12.2.2** 为减少因过水引起混凝土表面裂缝和防止混凝土损毁，本条规定混凝土需具有一定的强度。

### 12.3 填 塘 混 凝 土

**12.3.1** 坝基面的局部地质缺陷置换处理、断层置换处理等，均属于填塘混凝土。

**12.3.2** 为防止填塘混凝土与基岩接触面在后期张开，通常需对填塘混凝土与基岩接触面进行接触灌浆。灌浆方式可单独埋设接触灌浆系统，也可结合坝基有盖重固结灌浆等实施。填塘混凝土冷却需达到的设计温度可采用坝址区地表以下 3m 处的地温，也可在相应坝段约束区混凝土稳定温度基础上适当放宽。

**12.3.3** 采用微膨胀水泥可使填塘混凝土产生延迟性膨胀体积变形，在地基约束下产生预压应力，补偿混凝土降温收缩，可以简化填塘混凝土温度控制措施，加快施工进度。

### 12.4 闸 墩

**12.4.1** 分缝可有效减小基岩或下部混凝土对闸墩的变形约束，使闸墩与坝体之间的变形基本相同，故闸墩分缝时宜与坝体分缝位置一致。

**12.4.2、12.4.3** 高坝闸墩的长、高方向尺寸较大，但闸墩厚度较薄，结构受力条件复杂，且常采用高强度的混凝土，部分高坝闸墩混凝土强度达到 C45，乃至 C50。由于钢筋密集，闸墩混凝土基本采用二级配混凝土浇筑，胶凝材料用量高。通过三维有限元法分析可以确定闸墩的温差标准，进而提出闸墩的容许最高温度。

锦屏一级拱坝在计算分析的基础上，规定闸墩混凝土的容许最高温度为 32℃；闸墩冷却水管布置间距为 1.0m×0.8m（水平×垂直），冷却水采用与大坝相同的制冷水；降温速率分别为初期

0.8℃/d、中期 0.5℃/d、后期 0.3℃/d。

## 12.5 孔洞周边混凝土

**12.5.1** 坝身孔洞主要是指为满足工程泄洪、冲沙、供水、放水及导流要求而设置的坝身孔口，以及由于引水发电要求而设置的进水口等。坝身孔洞在体形设计及布置上不仅应考虑其对坝体应力的影响程度，还应考虑其周围混凝土在外界温度变化下的应力状况。孔洞周边混凝土必要时应配置施工期温度构造钢筋。

**12.5.2** 坝身孔洞周边混凝土对温度变化敏感，长间歇将导致浇筑层面长期暴露，在外界气温变化作用下较易出现裂缝。

坝身孔洞两侧的混凝土一般长宽比较大，体形不利，在长度方向上易产生较大的温度应力，通过设置施工缝减小浇筑块长宽比，可有效减小温度应力并改善应力分布状况。

为降低孔洞封顶时的应力集中导致的顶部混凝土开裂风险，要求孔洞封顶浇筑层厚度不小于 1.5m。

## 12.6 坝身封堵体混凝土

**12.6.1** 确定封堵体混凝土容许最高温度时，需考虑封堵体在坝身的部位、浇筑条件、入仓方式、混凝土强度等级和级配等特点。

**12.6.2** 封堵体混凝土宜分期冷却，降温过程同样应遵循小温差、早冷却、缓慢冷却的原则。锦屏一级水电站坝身导流底孔封堵体的降温速率为初期 0.6℃/d、中期 0.5℃/d、后期 0.3℃/d。

## 12.7 垫座混凝土

**12.7.1** 对于拱坝，如果基岩地质条件较差，为了提高基础承载力，采取挖除和扩大基础的形式进行处理。垫座是设置在坝体与基础之间，宽度大于相应位置处坝体厚度的混凝土传力结构。垫座混凝土是作为基础考虑，还是作为坝体的一部分，目前认识并不统一。



垫座常见的分缝方式有两种：一种是将垫座作为大的回填混凝土，单独进行分缝设计；另一种是考虑拱坝结构传力要求，垫座横缝设置与坝体一致，是否设置纵缝可根据混凝土浇筑能力和温度控制条件确定。垫座混凝土分缝与坝体混凝土分缝不一致时，应在错缝部位采取适当措施，避免缝端应力集中导致的劈裂。

锦屏一级水电站左岸混凝土垫座顺河向最大长度近 100m，横河向尺寸约 60m，处于左岸中部以上范围，不分缝的最大仓面面积达 4400m<sup>2</sup>，经铅直缝、错缝、斜缝等方案比较，最后选择垫座中设一条斜缝的分缝方案。

垫座与基岩接触面积大，体形相对复杂，基础约束强，应采用三维有限单元法进行温度应力分析。计算模型应同时包含坝基基岩、垫座混凝土、上部坝体混凝土，以准确地反映三者之间的相互影响。

**12.7.2** 垫座作为拱坝的传力结构，垫座与拱坝接触面、垫座与基岩的接触面及垫座分缝缝面应设置灌浆系统，并在冷却到设计温度后进行灌浆。

将垫座混凝土作为基础时，大坝混凝土浇筑前，应将垫座混凝土冷却到设计温度，其设计温度可采用坝址区地表以下 3m 处的地温。

将垫座混凝土作为坝体的一部分时，坝体混凝土和垫座混凝土可连续浇筑，垫座的稳定温度应采用相应部位坝体的稳定温度。垫座混凝土分缝缝面可与坝体接缝同时进行灌浆。

## 12.8 抗冲磨混凝土

**12.8.1** 抗冲磨混凝土除应达到设计强度等级的要求外，还应具有较优的抗磨蚀性能、体积稳定性和施工性能。针对抗冲磨混凝土的特殊性，本条强调水泥、骨料、掺合料及外加剂等原材料选择的特殊要求。

根据相关试验研究成果，在水泥品种及水胶比相同的条件下，

掺入聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维（PVA 纤维）或纤维素纤维的混凝土，其用水量虽然比不掺的混凝土多  $2\text{kg/m}^3 \sim 3\text{kg/m}^3$ ，但掺纤维的混凝土极限拉伸值高于不掺的混凝土，特别是掺 PVA 纤维，混凝土极限拉伸值比不掺的高出  $10\% \sim 34\%$ ，早期提高较明显。此外，掺纤维的混凝土抗冲磨强度也有一定程度提高。

**12.8.2** 大面积浇筑的抗冲磨混凝土，一般具有强度等级高、厚度薄、面积大的特点，受基岩或下层混凝土约束强，为典型的嵌固板结构。高长比对浇筑块应力分布有着显著影响，对于厚度较薄的大面积抗冲磨混凝土，均匀温降产生的温度应力就会使浇筑块中央断面全断面受拉。当高长比为  $1/8$  时，整个中央断面接近于均匀受拉，基础约束系数为  $0.962 \sim 0.997$ 。

根据相关三维有限单元法计算分析成果，基础约束区范围内的混凝土浇筑块长越长，产生的温度拉应力越大；随着长度的增加，应力增幅虽逐渐变小，但高拉应力区范围扩大，混凝土出现缺陷及裂缝的风险增大。因此，从温度应力控制的角度，控制浇筑块尺寸是减小混凝土基础约束、控制温度应力、减小开裂风险的最有效措施。一般混凝土浇筑块长边长度控制在  $20\text{m}$  以下为宜。

**12.8.3** 抗冲磨混凝土的强度等级与下层混凝土相差较大，宜安排在同一层内分坯浇筑且同时振捣，使不同混凝土的交界面接合良好。有的工程抗冲磨混凝土未与下层混凝土同时浇筑振捣，且层面处理不好，在动水压力作用下，造成抗冲磨混凝土大面积掀开破坏。

**12.8.4** 表面流水是控制抗冲磨混凝土最高温度的有效措施之一，在终凝后宜进行不间断流水养护。但在气温骤降时，应采取综合保护措施防止出现表面裂缝。采用的表面保护材料应兼有保湿养护及保温的效果，可考虑采用密封硬化剂等。

## 12.9 井缝部位混凝土

**12.9.1、12.9.2** 缝端应力集中易产生裂缝。为防止缝面向上延伸，除缝端采取结构措施并缝外，还应增加适当的温度控制措施。



## 13 表面保护和养护

### 13.1 表面保护

**13.1.1** 混凝土表面保护的目的是：①为减小内外温差防止表面裂缝；②高温季节浇筑低温混凝土时防止热量倒灌；③严寒及寒冷地区低温季节采用蓄热法防止热量散失。

**13.1.2** 混凝土表面保护的常用材料有聚乙烯泡沫塑料板、聚乙烯气垫薄膜、保温被（弹性聚氨酯被、棉被、矿渣棉被等）、草袋、砂层等。

对不同部位选择既能达到保温效果又方便施工的保护材料。大坝上下游面、暴露时间较长的坝段侧面等宜采用聚乙烯泡沫塑料板。防止热量倒灌为目的的仓面保温或施工期间临时保护，宜选择可重复使用、易于铺设和拆除的柔性保温材料。严寒及寒冷地区仓面过冬可采用多层柔性保温被保温，便于分层揭开，使混凝土逐渐适应环境温度，避免对混凝土造成冷击。

**13.1.3** 施工期坝内孔口、廊道、竖井等部位进行封闭保温的目的是防止孔洞内空气对流。

**13.1.4** 当气温骤降来临时，可在原有保护措施的基础上，分部位、有针对性地提出表面保护加强措施。

**13.1.5** 永久暴露面的全年保温措施需考虑耐久性强、易于施工的保温材料，同时还需考虑其对环境的影响。国内已有多个高坝在施工期采取了全年保温措施，效果良好。

### 13.2 养 护

**13.2.1** 水泥水化反应需要适当的温度和湿度条件，使其强度不断

增长。混凝土浇筑后，如不及时养护，会因为表面水分蒸发过快而脱水，导致混凝土中已形成凝胶体的水泥颗粒不能充分水化并转化为稳定的结晶，混凝土表面出现片状或粉状脱落。此外，在混凝土尚未具备足够的强度时，水分过早的蒸发还会产生较大的收缩变形，出现干缩裂缝，影响混凝土的耐久性和整体性。

**13.2.2** 本条提出了常用的混凝土保湿养护方式。有表面保护要求的混凝土宜将养护与表面保护措施一并考虑；严寒及寒冷地区低温季节浇筑的混凝土应采取既有保温作用又有养护效果的综合措施。

**13.2.3** 鉴于目前多数大坝混凝土采用设计龄期为 90d 或 180d 的实际情况，为有利于表面散热和混凝土后期强度增长，本条规定混凝土可养护至设计龄期。

14 低温季节施工温度控制

14.1 一般规定

14.1.1 日平均气温降至 5℃ 以下后，混凝土强度增长明显减缓；最低气温在-3℃ 以下时，混凝土易受早期冻害，故本条采用《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 中规定的低温季节混凝土施工的气温标准。

各规范规定的混凝土低温季节施工的气温标准见表 14-1。

表 14-1 各规范规定的混凝土低温季节施工的气温标准

规范名称	混凝土低温季节施工的气温标准
中国原水电部《水工混凝土及钢筋混凝土工程施工技术暂行规范》（1964 年）	日平均气温在 5℃ 以下或最低气温在-3℃ 以下
中国交通部航务工程局《混凝土及钢筋混凝土冬季施工若干规定》（1962 年）	室外最低气温低于 0℃
苏联规范（1976 年）	日平均气温低于 0℃ 或最低气温低于-5℃
美国 ACI 306—1978	日平均气温连续 3d 低于 4.5℃
日本土木学会规范	日平均气温低于 4℃
联邦德国工业标准 DIN1045 的规定	日平均气温低于 5℃
国际建设材料及结构试验研究协会 RILEM 的规定（1963 年）	日平均气温低于 5℃
《水工混凝土施工规范》DL/T 5144	日平均气温连续 5d 稳定在 5℃ 以下或最低气温连续 5d 稳定在-3℃ 以下
《水工碾压混凝土施工规范》DL/T 5112	日平均气温连续 5d 稳定在 5℃ 以下或最低气温连续 5d 稳定在-3℃ 以下
《建筑工程冬期施工规程》JGJ/T 104	根据当地多年气象资料统计，当室外日平均气温连续 5d 稳定低于 5℃ 即进入冬期施工，当室外日平均气温连续 5d 高于 5℃ 即解除冬期施工

**14.1.2** 为保证混凝土在低温条件下的正常施工及浇筑质量，需增加人力、物力投入，故提出需论证混凝土低温季节施工的必要性。

根据桓仁、白山、红石等水电工程的经验，日平均气温在-20℃以下时，施工设备、建筑材料及混凝土浇筑各环节出现问题的概率会成倍增加，施工人员的劳动生产率也将大大降低，故提出除工程特殊需要外，日平均气温低于-20℃时不宜浇筑混凝土。

**14.1.3** 混凝土保温方法通常有表面保温法、蓄热法、综合蓄热法（包括蒸汽养护、电加热等）和暖棚法等。各种保温方法适用的条件和要求各不相同，应根据气温、风速、保温材料的供应及其他条件，选择合适的保温方法。严寒和寒冷地区风沙大的地方不适用暖棚法，可采用铺设供热设施，其上覆盖保温被的方法。对特别严寒地区，如青藏高原、黑龙江漠河一带，应专门研究特别严寒地区的保温方法。

**14.1.4** 相关规范对混凝土容许受冻的临界强度的规定见表 14-2。本规范引用《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的规定，以混凝土强度或成熟度作为大体积混凝土容许受冻的临界强度衡量标准。

表 14-2 各规范对混凝土容许受冻临界强度的规定

规范名称	混凝土容许受冻临界强度
《水工混凝土施工规范》 DL/T 5144	1 大体积混凝土不应低于 7.0MPa 或成熟度不低于 1800℃·h。 2 非大体积混凝土和钢筋混凝土不应低于设计强度的 85%
《水工混凝土施工组织设计规范》 DL/T 5397	成熟度不应小于 1800℃·h
《建筑工程冬期施工规程》 JGJ/T 104	1 采用蓄热法、暖棚法、加热法等施工的普通混凝土，采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥配制时，其受冻临界强度不应小于设计混凝土强度等级值的 30%；采用磷矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥时，不应小于设计强度等级值的 40%。

续表 14-2

规范名称	混凝土容许受冻临界强度
《建筑工程冬期施工规程》 JGJ/T 104	2 当室外最低气温不低于-15℃时，采用综合蓄热法、负温养护法施工的混凝土受冻临界强度不应小于4.0MPa；当室外最低气温不低于-30℃时，采用负温养护法施工的混凝土受冻临界强度不应小于5.0MPa。 3 对强度等级等于或高于 C50 的混凝土，不宜小于设计混凝土强度等级值的 30%。 4 对有抗渗要求的混凝土，不宜小于设计混凝土强度等级值的 50%。 5 对有抗冻耐久性要求的混凝土，不宜小于设计混凝土强度等级值的 70%

14.2 原 材 料 与 拌 和

14.2.1 若拌制混凝土所用的骨料中含有冻块，易在混凝土中形成空腔、胶结薄弱面等缺陷，影响混凝土质量，本条给出了成品骨料保温防冻的措施。

14.2.2 早强剂具有促进水泥水化和早强的作用；防冻剂能使混凝土在负温下硬化并在规定养护条件下达到预期性能；复合型的早强防冻剂同时具有减水、早强、防冻的作用，能改善混凝土拌和物的施工性能，同时掺量较大对混凝土的后期强度及耐久性等有影响。故本条提出外加剂掺量须通过试验确定。

14.2.3 控制出机口温度首先考虑热水拌和，水温不宜超过 60℃，超过 60℃时，为避免水泥发生假凝，应先将骨料与水拌和，再加入水泥。当采用热水拌和不能满足出机口温度要求时，需加热骨料，加热骨料时应避免过热和过分干燥。水泥不得直接加热；外加剂溶液不得直接用蒸汽加热。

14.2.4 为避免混凝土拌和物中出现冻块，使拌和物温度更加均匀，本条规定低温季节混凝土拌和时间宜比常温季节适当延长。

14.3 运 输 与 浇 筑

14.3.1 运输中的热量损失与运输机具有关，如采用大型混凝土运



输机具，热量损失一般不大。如使用自卸汽车，可用废气加热车底，车皮及车棚应覆盖保温材料。如使用皮带运输机，宜搭盖帐篷进行封闭。

**14.3.2** 在浇筑混凝土前，应检测基岩及老混凝土的温度，如出现负温，需提前进行预热，避免新浇混凝土受冻。

**14.3.3** 《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 对浇筑温度仅做了下限值规定，具体为：温和地区不宜低于  $3^{\circ}\text{C}$ ；严寒和寒冷地区采用蓄热法不应低于  $5^{\circ}\text{C}$ ，采用暖棚法不应低于  $3^{\circ}\text{C}$ 。

对于坝体大体积混凝土，虽浇筑完成后表面温度很低，但内部温度却因水化热而急剧上升，导致产生较大的内外温差和基础温差，不利于混凝土防裂。因此，为控制混凝土内部最高温度及内外温差，冬期施工的大体积混凝土浇筑温度不宜过高，一般不超过  $10^{\circ}\text{C}$ 。如果气温很低，在达到临界受冻强度前，表面混凝土有遭受冻害的可能，则应加强保温措施，不可为了防冻而选择过高的浇筑温度。



## 15 施工期温度监测与分析

### 15.1 一般规定

**15.1.1** 本条规定了施工期温度监测的内容。施工期温度监测的目的是评价温度控制措施的效果，为调整温度控制措施提供依据。工程实施过程中需通过周报或月报及时反映原材料温度、混凝土出机口温度、入仓温度、浇筑温度、混凝土内部温度、通水冷却参数、浇筑仓气温及保温层温度等温度监测成果，并进行对比分析，以及及时掌握温度控制实施情况，解决存在的问题。

### 15.2 原材料温度监测

**15.2.1、15.2.2** 对原材料温度监测的内容、频次和方法做了规定，本规范主要参考了《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的相关规定。

### 15.3 混凝土出机口温度、入仓温度和浇筑温度监测

**15.3.1、15.3.2** 对混凝土出机口温度、入仓温度监测的内容、频次和方法做了规定，本规范主要参考了《水工混凝土施工规范》DL/T 5144 的相关规定。

**15.3.3** 浇筑温度的测点分布宜比较平均地分布在整個仓面上，并考虑不同强度等级、不同级配混凝土的分布情况。

### 15.4 混凝土内部温度监测

**15.4.1、15.4.2** 混凝土内部温度监测可利用混凝土中的永久监测仪器，也可采用简易制作的临时测温装置。由于埋设永久温度计

或采用光纤测温费用较高，一般仅用在典型坝段或重要部位，其他部位可采用临时测温装置。

**15.4.3** 本条规定了临时测温装置在坝体混凝土不同约束区域的布点及测温频次。在混凝土最高温度出现之前，应采用较密的测温频次，以避免错过最高温度的出现时刻。

三峡、小湾、溪洛渡等工程在混凝土浇筑初期均采用了分布式光纤测温技术。近年来溪洛渡、锦屏、黄登等工程采用了更为先进的数字式温度计测温技术。

## 15.5 通水冷却监测

**15.5.1** 通水冷却监测的目的是评价通水冷却效果，为调整通水冷却措施提供依据。本条规定的通水冷却监测内容、频次和相关要求适用于各期通水冷却。

**15.5.2** 通水冷却结束时的混凝土内部温度大多采用闷水测温。闷水测温必须用压缩空气将管内积水缓慢吹出，不能通河水或制冷水赶水。用水桶盛水测温，选定层的每根水管单独测量，每根水管的水温取多桶水温的平均值作为测量结果。

## 15.6 浇筑仓气温及保温层温度监测

**15.6.3** 气温骤降期间混凝土仓内外气温和保温层的温度变化剧烈，故提出增加温度观测频次，以得到较为连续的温度观测资料，为调整保温措施提供依据。

## 15.7 数据分析与反馈

**15.7.1** 温度控制的实施效果主要通过相关数据来反映，数据的去伪存真和及时整编入库是非常重要和必要的。

**15.7.2** 温度控制数据应整理为便于理解分析的图表格式，能反映实时的动态和整体状态。实施过程中，浇筑温度、最高温度、降温速率、降温幅度不可能完全满足设计控制标准，为便于现场控

制和效果评价，可以对各控制标准提出合格率的要求和最大超标范围的要求，如锦屏一级工程确定浇筑温度合格率要求大于 90%，且超标值不大于 2.0℃。

**15.7.3** 根据当前温度监测数据，可通过反馈仿真计算预测今后一段时间的温度演变过程，并进行预警。

---