

**水运工程大体积混凝土温度裂缝
控制技术规程**

Technical Specification for Thermal Cracking Control of
Mass Concrete of Port and Waterway Engineering

2010-05-24 发布

2010-09-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业标准

水运工程大体积混凝土温度裂缝控制 技术规程

JTS 202—1—2010

主编单位：中交武汉港湾工程设计研究院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2010 年 9 月 1 日

人民交通出版社

2010 · 北京

中华人民共和国行业标准

书 名：水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程

著 作 者：中交武汉港湾工程设计研究院有限公司

责任编辑：董 方

出版发行：人民交通出版社

地 址：(100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址：<http://www.chinasybook.com> (中国水运图书网)

销售电话：(010) 64981400, 59757915

总 经 销：北京中交盛世书刊有限公司

经 销：人民交通出版社交实书店

印 刷：

开 本：

印 张：

字 数： 千

版 次：2010年7月第1版

印 次：2010年7月第1次印刷

统一书号：15114·1536

印 数：0001—3000册

定 价：35.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

关于发布《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》(JTS 202—1—2010)的公告

2010 年第 21 号

现发布《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》。本规程为强制性行业标准,编号为 JTS 202—1—2010,自 2010 年 9 月 1 日起施行。

本标准第 5.2.4 条、第 7.3.4 条、第 7.4.4 条和第 7.4.6 条中的黑体字部分为强制性条文,必须严格执行。

本标准由部组织中交武汉港湾工程设计研究院有限公司等单位编制完成,由部水运局负责管理和解释,由人民交通出版社出版发行。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

二〇一〇年五月二十四日

制定说明

本规程是在深入调查研究和总结我国水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术经验的基础上,结合水运工程大体积混凝土建设技术发展需要,借鉴国内外相关标准并吸收新的研究成果,经广泛征求意见编制而成。主要包括温控设计、原材料、配合比设计、温控措施、施工期温控监测等技术内容。

本规程的主编单位为中交武汉港湾工程设计研究院有限公司,参加单位为中国交通建设股份有限公司、大连理工大学、中交第一航务工程勘察设计院有限公司、中交第二航务工程局有限公司、中交天津港湾工程研究院有限公司和中交四航工程研究院有限公司。

随着我国水运工程建设技术的持续发展,水运工程建设规模不断扩大,大体积混凝土应用范围日益广泛,与此同时,混凝土结构耐久性和质量安全的要求不断提高,为控制大体积混凝土温度裂缝,提高水运工程大体积混凝土工程质量,促进我国水运工程建设事业不断发展,交通部水运局组织中交武汉港湾工程设计研究院有限公司等单位制定本规程。

本规程第 5.2.4 条、第 7.3.4 条、第 7.4.4 条和第 7.4.6 条中的黑体字部分为强制性条文,必须严格执行。

本规程共分 8 章 14 节和 7 个附录,并附条文说明。本规程编写人员分工如下:

1 总则 甘新平

2 术语 杨昌维 刘可心

3 基本规定 张国志 贡金鑫

4 温控设计 刘秉京 田俊峰 屠柳青

5 原材料 刘秉京 李俊毅

6 配合比设计 屠柳青 王迎飞

7 温控措施 甘新平 张国志 赵晓岚 屠柳青 刘可心 李俊毅 王迎飞

8 施工期温控监测 刘可心 贡金鑫

附录 A 贡金鑫

附录 B 屠柳青

附录 C 张国志

附录 D 甘新平

附录 E 刘可心

附录 F 赵晓岚

附录 G 李俊毅 王迎飞

目 次 n

本规程 2009 年 11 月 10 日通过部审,2010 年 5 月 24 日发布,2010 年 9 月 1 日起实施。

本规程由交通运输部水运局负责管理和解释。请各有关单位在执行过程中将发现的问题和意见及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街 11 号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码 100736)和本规程管理组(地址:武汉市武昌区民主路 553 号,中交武汉港湾工程设计研究院有限公司,邮政编码 430071),以便修订时参考。

目次

1	总则	(1)
2	术语	(2)
3	基本规定	(3)
4	温控设计	(4)
4.1	一般规定	(4)
4.2	温控标准	(4)
5	原材料	(5)
5.1	水泥	(5)
5.2	矿物掺合料	(5)
5.3	粗骨料	(5)
5.4	细骨料	(6)
5.5	外加剂	(6)
5.6	拌和水	(6)
6	配合比设计	(7)
7	温控措施	(8)
7.1	一般规定	(8)
7.2	浇筑温度控制	(8)
7.3	内部最高温度控制	(8)
7.4	混凝土浇筑	(9)
7.5	表面保温和养护	(10)
7.6	其他措施	(10)
8	施工期温控监测	(11)
附录 A	胶凝材料水化热总量计算	(12)
附录 B	混凝土绝热温升计算	(13)
附录 C	混凝土温度及温度应力计算	(14)
附录 D	混凝土出机口温度、浇筑温度计算	(17)
附录 E	混凝土保温层厚度计算	(19)
附录 F	温度监测记录表格式	(20)
附录 G	本规程用词用语说明	(21)
附加说明	本规程主编单位、参加单位、主要起草人、总校人员 和管理组人员名单	(22)
附	条文说明	(25)

1 总 则

1.0.1 为控制水运工程大体积混凝土结构温度裂缝,确保工程质量,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水运工程永久性水工建筑物大体积混凝土温度裂缝控制设计与施工。水运工程附属的工业、民用建筑的大体积混凝土温度裂缝控制设计与施工,可参照执行。

1.0.3 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制设计和施工除应符合本规程规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 大体积混凝土

预计因胶凝材料水化热等因素引起混凝土温度变化导致裂缝,或结构断面最小尺寸等于或大于 1m 的混凝土。

2.0.2 绝热温升

绝热状态下,胶凝材料水化放热使混凝土温度升高的数值。

2.0.3 温控抗裂安全系数

标准养护条件下的混凝土劈裂抗拉强度试验值与对应龄期温度应力计算最大值之比。

2.0.4 浇筑温度

混凝土平仓振捣后,上层混凝土未覆盖前距上表面 100mm 处的混凝土温度。

2.0.5 内表温差

混凝土内部最高温度与同一时刻距表面 50mm 处的混凝土最低温度之差。

2.0.6 降温速率

混凝土浇筑体内部温度到达峰值后,单位时间内的温度下降值。

2.0.7 开裂敏感性

不同配合比混凝土在相同试验条件下的开裂趋势。

2.0.8 出机口温度

混凝土拌和均匀后,搅拌机出料口处的混凝土温度。

2.0.9 基础强约束区

浇筑块从底部算起至 0.2 倍长边尺寸高度范围内的混凝土区域。

2.0.10 浇筑间歇期

分层浇筑时,相邻两层混凝土浇筑的时间间隔。

2.0.11 气温骤降

日平均气温在 3d 内连续下降累计 6℃ 以上。

2.0.12 稳定温度

混凝土建筑物在环境温度作用下,最终达到而又处于长期不变状态的温度。

2.0.13 准稳定温度

混凝土建筑物在环境温度作用下,最终达到而又处于重复循环变化状态的温度。

3 基本规定

3.0.1 大体积混凝土应在结构设计、材料选用、混凝土配制及施工的全过程采取保证结构安全、适用、耐久的温度裂缝控制措施。

3.0.2 大体积混凝土应根据结构所处的环境选择合适的结构型式、构造措施和混凝土强度等级。结构型式应简单,减少应力集中,降低基础约束,并应考虑温度应力对结构的影响,配置必要的构造钢筋。

3.0.3 大体积混凝土结构最大裂缝宽度应按表 3.0.3 控制。

大体积混凝土结构最大裂缝宽度限值 (mm) 表 3.0.3

环境类别	淡水环境			海水环境			
	水上区	水位变动区	水下区	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
裂缝宽度限值	0.25	0.30	0.40	0.20	0.20	0.25	0.30

注:缝宽小于等于 0.1mm 时,无需修补;缝宽在 0.1mm 与表中规定的限值之间时,应根据缝深、缝型、钢筋保护层厚度、混凝土表面有无涂料等情况,综合判断,确定是否应予修补。

3.0.4 当不影响结构安全时,大体积混凝土强度评定可采用 60d 或 90d 强度。

3.0.5 大体积混凝土应合理安排施工时间,宜选择温度相对较低时段浇筑混凝土,并应避免在极端不利气象条件下施工。

4 温控设计

4.1 一般规定

4.1.1 大体积混凝土应根据结构设计使用年限、使用环境和结构特点等因素进行温控设计。

4.1.2 温控设计应包括下列内容：

- (1) 混凝土原材料选择、配合比设计和性能指标确定；
- (2) 大体积混凝土温度及温度应力分析计算；
- (3) 温控标准；
- (4) 温控措施；
- (5) 温控监测方案等。

4.1.3 大体积混凝土宜分层、分块浇筑，并应合理设置施工缝。施工缝的设置应考虑混凝土结构特点、耐久性要求和施工方便等因素。

4.1.4 底板上连续浇筑墙体结构时，水平施工缝宜设置在距墙底不小于 1m 的位置。

4.1.5 分块施工时，块体平面最大尺寸不宜大于 30m，相邻块高差不宜超过 12m，相邻块浇筑时间间隔宜小于 30d。

4.1.6 大体积混凝土温度应力分析前，宜进行胶凝材料水化热总量、混凝土绝热温升、线膨胀系数、抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量等试验，确定其数值及变化规律。无试验资料时，胶凝材料水化热总量可按附录 A 计算；混凝土绝热温升可按附录 B 计算；弹性模量可按附录 C 计算。

4.1.7 大体积混凝土温度及温度应力宜采用有限元方法分析计算，也可按附录 C 估算。

4.1.8 大体积混凝土应采用温控抗裂安全系数评定温控抗裂安全性。温控抗裂安全系数不应小于 1.4，计算方法见附录 C。

4.2 温控标准

4.2.1 大体积混凝土施工阶段的温控标准宜满足下列要求：

- (1) 混凝土浇筑温度不高于 30°C ，不低于 5°C ；
- (2) 混凝土内表温差不大于 25°C ；
- (3) 混凝土内部最高温度不高于 70°C ；
- (4) 混凝土块体降温速率不大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

4.2.2 重要的大体积混凝土结构温控标准应根据温度应力分析计算确定。

5 原 材 料

5.1 水 泥

5.1.1 大体积混凝土宜采用矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥,不宜使用早强水泥。所用水泥应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175)或《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥》(GB 200)的规定。水泥的铝酸三钙含量不宜大于8%。

5.1.2 与侵蚀性介质接触的混凝土结构所用水泥应符合国家现行标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476)和《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规程》(JTJ 275)的有关规定。

5.1.3 水泥 $80\mu\text{m}$ 方孔筛筛余不应小于1%,比表面积不应超过 $400\text{m}^2/\text{kg}$ 。

5.2 矿物掺合料

5.2.1 大体积混凝土宜掺加粉煤灰、粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料,其质量应符合国家现行有关标准的规定。

5.2.2 大体积混凝土采用粉煤灰作为矿物掺合料时,应选用Ⅰ级或Ⅱ级粉煤灰。

5.2.3 粒化高炉矿渣粉的比表面积宜为 $400 \sim 450\text{m}^2/\text{kg}$ 。

5.2.4 大体积混凝土的矿物掺合料不应单独使用硅粉。

5.3 粗 骨 料

5.3.1 粗骨料应符合现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202)的有关规定。

5.3.2 粗骨料应洁净、坚固、级配良好。

5.3.3 粗骨料含泥量不应大于1%,其中泥块含量不应大于0.5%;有抗冻性要求时含泥量不应大于0.7%,其中泥块含量不应大于0.2%。

5.3.4 大体积混凝土宜选用粒径较大的粗骨料,最大粒径应满足下列要求:

(1) 不大于构件截面最小尺寸的 $1/4$;

(2) 不大于钢筋最小净距的 $3/4$;

(3) 当混凝土保护层厚度为50mm时,不大于保护层厚度的 $4/5$;在南方地区浪溅区不大于混凝土保护层厚度的 $2/3$ 。

5.3.5 海水环境工程中不得采用碱活性粗骨料;淡水环境工程中所用的粗骨料具有潜在碱活性时,应采用抑制碱骨料反应的相应措施。

5.3.6 粗骨料宜选用线膨胀系数较小的碎石。

5.4 细 骨 料

- 5.4.1 细骨料应符合现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202)的有关规定。
- 5.4.2 细骨料宜采用级配稳定的中砂。
- 5.4.3 细骨料含泥量不应大于 3%, 其中泥块含量不应大于 1%。
- 5.4.4 海水环境工程中不得采用碱活性细骨料, 淡水环境工程中所用的细骨料具有潜在碱活性时, 应采用抑制碱骨料反应的相应措施。

5.5 外 加 剂

- 5.5.1 大体积混凝土使用的减水剂、缓凝剂、引气剂、膨胀剂等外加剂的质量应符合国家现行有关标准的规定。
- 5.5.2 大体积混凝土宜选用缓凝型高效减水剂, 其减水率不宜小于 18%, 其中缓凝成分不应为糖类。
- 5.5.3 掺外加剂混凝土的 28d 收缩率比不应大于 125%。
- 5.5.4 外加剂使用前应进行胶凝材料相容性检验, 掺量应通过试验确定。

5.6 拌 和 水

- 5.6.1 大体积混凝土拌和水应符合现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202)的有关规定。
- 5.6.2 拌和水中不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害物质, pH 值不宜小于 5。

6 配合比设计

6.0.1 大体积混凝土配合比应满足设计与施工要求, 并应按照绝热温升低、抗裂性能良好的原则通过优化确定。

6.0.2 配合比设计除应按现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202) 的有关规定执行外, 尚宜满足下列要求：

- (1) 在满足施工工艺要求的条件下, 选择较小的坍落度；
- (2) 在满足施工工艺要求的条件下, 选择较小的砂率；
- (3) 矿物掺合料掺量根据掺合料种类和混凝土水胶比按表 6.0.2 选定。

大体积混凝土中矿物掺合料掺量 表 6.0.2

矿物掺合料种类	水 胶 比	掺量范围(%, 占胶凝材料总量)
粉煤灰	≤0.40	30 ~ 50
	> 0.40	20 ~ 40
粒化高炉矿渣粉	≤0.40	30 ~ 70
	> 0.40	30 ~ 60
粉煤灰与粒化高炉矿渣粉复合	≤0.40	≤70
	> 0.40	≤60

注：水泥中的混合料应计入混凝土矿物掺合料总量。

6.0.3 大体积混凝土含气量宜为 2% ~ 4% ;有抗冻要求时含气量宜为 4% ~ 6% 。

6.0.4 配合比设计宜进行开裂敏感性试验。

6.0.5 大体积混凝土宜限制早期强度的发展, 12h 抗压强度不宜大于 8MPa 或 24h 不宜大于 12MPa。

7 温控措施

7.1 一般规定

- 7.1.1 温控措施应根据工程环境条件、结构特点和温控标准,按照经济、有效、便于操作的原则制定。
- 7.1.2 大体积混凝土施工应采取减小结构所受外部约束的措施,优化施工方案。
- 7.1.3 施工设备和原材料应满足大体积混凝土连续浇筑的要求。
- 7.1.4 施工应采取措施提高混凝土匀质性。
- 7.1.5 内表温差和降温速率应根据混凝土升降温历程,采取相应温控措施控制在规定范围内。

7.2 浇筑温度控制

- 7.2.1 大体积混凝土应控制出机口温度,保证浇筑温度满足温控标准的要求,出机口温度和浇筑温度可按附录 D 计算。
- 7.2.2 热天施工出机口温度宜采取下列措施进行控制:
- (1) 利用温度较低时段施工;
 - (2) 水泥温度不高于 60°C ;
 - (3) 骨料堆场采用遮阳、堆高或喷淋等措施;
 - (4) 使用地下水、制冷水或冰水等低温水拌和混凝土;
 - (5) 必要时,采用风冷骨料、液氮冷却混凝土拌和物等措施。
- 7.2.3 冷天施工时,出机口温度宜采用料场遮盖和拌和水加热等措施进行控制。
- 7.2.4 浇筑温度宜采取下列措施进行控制:
- (1) 提高混凝土浇筑能力,缩短暴露时间;
 - (2) 缩短混凝土运输时间,减少转运次数;
 - (3) 对混凝土运输设备进行遮阳、隔热、降温;
 - (4) 热天进行仓面喷雾。

7.3 内部最高温度控制

- 7.3.1 降低大体积混凝土内部最高温度宜采取下列措施:
- (1) 降低浇筑温度;
 - (2) 掺入缓凝剂,延长混凝土凝结时间;
 - (3) 分层施工,并控制分层厚度;

(4) 埋设水管通水冷却。

7.3.2 混凝土分层施工宜满足下列要求：

- (1) 分层厚度不大于 3.0m, 其中基础强约束区不大于 1.5m；
- (2) 浇筑间歇期不超过 7d。

7.3.3 冷却水管宜满足下列要求：

- (1) 采用内径 25 ~ 50mm 的金属或塑料水管；
- (2) 水管间距 0.5 ~ 1.5m；
- (3) 单根水管长度不超过 200m；
- (4) 进出水口集中布置。

7.3.4 混凝土浇筑前冷却水管应进行压水试验, 管道系统不得漏水。

7.3.5 混凝土覆盖冷却水管后应开始通水冷却, 通水冷却宜满足下列要求：

- (1) 定期改变通水方向；
- (2) 冷却水流速不小于 0.6m/s；
- (3) 冷却水的温度与混凝土内部温度之差不超过 25℃；
- (4) 通水时间根据降温速率确定, 不超过 15d。

7.3.6 通水结束后, 冷却水管应及时进行压浆封堵, 压浆材料应采用不低于混凝土强度等级的微膨胀砂浆或净浆。

7.4 混凝土浇筑

7.4.1 大体积混凝土浇筑前, 除应进行常规施工检查验收外, 尚应检查冷却水管和测温元件的位置及可靠性, 并掌握水文气象预报资料。

7.4.2 大体积混凝土应由搅拌站或搅拌船集中搅拌, 新拌混凝土应品质均匀、性能稳定, 不应出现泌水、离析和较大的坍落度损失。

7.4.3 大体积混凝土应分层摊铺。泵送混凝土的摊铺厚度不宜大于 500mm, 非泵送混凝土的摊铺厚度不宜大于 300mm。

7.4.4 上层混凝土必须在下层混凝土初凝之前浇筑完毕, 不得随意留施工缝, 严禁出现施工冷缝。

7.4.5 混凝土布料应均匀, 不得用振捣棒赶料。

7.4.6 顶层混凝土浇筑完毕, 初凝前必须进行二次抹面并及时覆盖保湿, 初凝前宜进行二次振捣。

7.4.7 大体积混凝土施工缝的处理应满足下列要求：

- (1) 清除浇筑表面的浮浆、软弱混凝土层及松动的石子, 均匀露出粗骨料；
- (2) 在上层混凝土浇筑前, 清除混凝土表面污物, 并充分润湿, 无积水；
- (3) 低流动度混凝土浇筑前, 采用接浆措施；
- (4) 设计对施工缝有特殊要求时, 按设计要求处理。

7.4.8 垂直施工缝处宜采用快易收口网模板。

7.4.9 后浇带宜采用微膨胀混凝土浇筑并蓄水养护, 养护时间不应少于 14d。

7.4.10 无筋或少筋大体积混凝土中埋放块石应符合下列规定。

7.4.10.1 埋放的块石尺寸应根据运输条件和振捣设备能力而定,块石形状应大致方正,最长边与最短边之比不应大于 2;有显著风化迹象、裂缝夹泥砂层、片状体或强度低于规定粗骨料强度指标的块石不得使用。

7.4.10.2 块石应立放在新浇筑的混凝土层上,并被混凝土充分包裹,埋放前应冲洗干净并保持湿润;块石间净距不得小于 100mm,且不小于混凝土粗骨料最大粒径的 2 倍。

7.4.10.3 块石距混凝土结构物表面的距离不得小于 100mm,且不小于混凝土粗骨料最大粒径的 2 倍,当有抗冻要求时,不得小于 300mm。

7.4.10.4 埋放块石的总量不得超过混凝土体积的 25%。

7.4.10.5 水平施工缝处埋入的块石应外露一半。

7.4.10.6 混凝土受拉区不得埋放块石。

7.4.10.7 当环境温度低于 0℃ 时,应停埋块石。

7.4.11 当采用预制混凝土块替代块石时,混凝土块强度不应低于现浇混凝土强度,块体表面应进行凿毛处理。

7.5 表面保温和养护

7.5.1 大体积混凝土施工模板构造设计和验算应考虑保温和养护措施的要求。

7.5.2 混凝土浇筑完毕后应及时养护,养护时间不宜少于 14d。

7.5.3 养护宜采取覆盖、蓄水、洒水、喷雾和涂养护剂等措施,不得采用海水养护。

7.5.4 养护水温度与混凝土表面温度之差不宜大于 15℃,蓄水深度不宜小于 200mm。

7.5.5 当日平均气温低于 5℃ 时,裸露的混凝土表面不得直接洒水养护,应采用塑料薄膜和保温材料进行保湿、保温养护。混凝土保温层厚度可按附录 E 计算。

7.5.6 低温季节拆模应选择气温较高时段并立即采取保温措施,混凝土表面温度与环境温度之差大于 15℃ 时应推迟拆模时间。

7.5.7 气温骤降时,龄期低于 28d 的混凝土应进行表面保温。

7.5.8 保温材料应覆盖严密,接缝处重叠覆盖不应少于 300mm,边角处应加倍保温。

7.5.9 低温季节应封堵竖井、廊道等孔洞,基础部位大体积混凝土浇筑后应及时回填。

7.6 其他措施

7.6.1 有特殊防裂要求的混凝土结构,可采用纤维混凝土等特种混凝土,或掺加降低水化热、减少收缩的特种外加剂。

7.6.2 腐蚀环境下的混凝土结构,宜使用透水模板布。

8 施工期温控监测

8.0.1 大体积混凝土施工过程中应监测混凝土浇筑温度、内部温度、环境温度、冷却水温度等参数,同时监控内表温差和降温速率,并及时调整和优化温控措施,必要时应监测混凝土应变。

8.0.2 测温元件的选择应满足下列要求:

- (1) 25℃环境下测试误差不超过 0.3℃;
- (2) 测试范围 -30 ~ 150℃;
- (3) 绝缘电阻大于 500MΩ。

8.0.3 应变测试元件的选择应满足下列要求:

- (1) 测试误差不超过 1.0μ ϵ ;
- (2) 测试范围 -1000 ~ 1000μ ϵ ;
- (3) 绝缘电阻大于 500MΩ。

8.0.4 测点的布置应符合下列规定。

8.0.4.1 测点应布置在混凝土浇筑块体平面对称区域构成的测试区,测试区内测点应按平面分层布置。

8.0.4.2 测点位置与数量应根据混凝土浇筑块内温度分布、应力分布和温控要求确定。

8.0.4.3 温度测点应能测出混凝土内部最高温度、表面温度和温度梯度。

8.0.4.4 环境温度测点应同时监测气温和水温。

8.0.4.5 应变测试应能测出混凝土内部最大应变。

8.0.4.6 应变测试应设置零应力测点。

8.0.5 测试元件的安装和保护应符合下列规定。

8.0.5.1 安装前测试元件应进行水下 1m 浸泡试验,并达到 24h 不损坏的要求。

8.0.5.2 安装位置应准确,元件应固定牢固,并与钢筋等金属体绝缘。

8.0.5.3 测试元件引出线应集中布置,并加以保护。

8.0.5.4 混凝土浇筑和振捣时不得直接冲击测试元件及引出线。

8.0.6 混凝土温度和应变监测应符合下列规定。

8.0.6.1 混凝土浇筑温度监测每台班不应少于 2 次。

8.0.6.2 升温期间,环境温度、冷却水温度和内部温度应每 2 ~ 4h 监测一次,降温期间应每天监测 2 ~ 4 次。

8.0.6.3 温度监测持续时间不应少于 20d,应变监测不应少于 60d。

8.0.6.4 监测数据应及时记录,温度监测记录表格式可参照附录 F。

8.0.7 监测数据应及时分析整理。

附录 A 胶凝材料水化热总量计算

A.1 水泥水化热总量

A.1.1 水泥水化热总量可参考出厂检验值确定。

A.1.2 无参考值时,水泥水化热总量可分别按下列公式计算:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{n}{Q_0} + \frac{t}{Q_0} \tag{A.1.2-1}$$

$$Q_0 = \frac{4}{7/Q_7 - 3/Q_3} \tag{A.1.2-2}$$

式中 Q_t ——龄期 t 时的累积水泥水化热 (kJ/kg);

Q_0 ——水泥水化热总量 (kJ/kg);

t ——龄期 (d);

n ——常数 (d), 随水泥品种、比表面积等因素不同而异;

Q_3 、 Q_7 ——龄期分别为 3d 和 7d 时的累积水泥水化热 (kJ/kg)。

A.1.3 水泥水化热总量也可通过以下方法确定:

(1) 根据公式 (A.1.2-1), 以龄期 t 为横坐标, t/Q_t 为纵坐标作图, 拟合一条直线;

(2) 确定直线的斜率 $1/Q_0$;

(3) 确定水泥水化热总量 Q_0 。

A.2 胶凝材料水化热总量

A.2.1 胶凝材料水化热总量宜在水泥、外加剂和矿物掺合料用量确定后通过试验得出。

A.2.2 无试验数据时,胶凝材料水化热总量可按下列公式计算:

$$Q = k_1 k_2 Q_0 \tag{A.2.2}$$

式中 Q ——胶凝材料水化热总量 (kJ/kg);

k_1 ——粉煤灰掺量对应的水化热调整系数,按粉煤灰掺量参照表 A.2.2 取值;

k_2 ——粒化高炉矿渣粉掺量对应的水化热调整系数,按粒化高炉矿渣粉掺量参照表 A.2.2 取值;

Q_0 ——水泥水化热总量 (kJ/kg)。

矿物掺合料水化热调整系数

表 A.2.2

掺量 (%)	0	10	20	30	40	50	60	70
粉煤灰	1	0.94	0.89	0.85	0.81	0.77	—	—
粒化高炉矿渣粉	1	0.97	0.95	0.91	0.86	0.81	0.74	0.66

注 表中掺量为矿物掺合料占胶凝材料总量的百分比。

附录 B 混凝土绝热温升计算

B.0.1 混凝土绝热温升宜根据混凝土实际配合比通过试验确定。

B.0.2 无试验数据时,混凝土绝热温升可按下列公式计算:

$$T_{\alpha} = \frac{WQ}{\rho c} \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$T_t = T_{\alpha} (1 - e^{-mt}) \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中 T_{α} ——混凝土最终绝热温升($^{\circ}\text{C}$);

W ——每立方米混凝土胶凝材料用量(kg/m^3);

Q ——胶凝材料水化热总量(kJ/kg);

ρ ——混凝土质量密度(kg/m^3),可取 $2400\text{kg}/\text{m}^3$;

c ——混凝土比热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$),可取 $1.0\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

T_t ——龄期 t 时的混凝土绝热温升($^{\circ}\text{C}$);

m ——系数(d^{-1}),与水泥品种、比表面积、浇筑温度等因素有关,一般可取 $0.3 \sim 0.5\text{d}^{-1}$;

t ——混凝土龄期(d)。

附录 C 混凝土温度及温度应力计算

C.1 混凝土内部最高温度计算

C.1.1 混凝土内部最高温度可按式计算：

$$T_{\max} = T_p + \xi T_{\alpha} - T_{co} \tag{C.1.1}$$

式中 $T_{\max}$ ——混凝土内部最高温度(℃)；
 T_p ——混凝土浇筑温度(℃)；
 ξ ——温升折减系数；
 T_{α} ——混凝土最终绝热温升(℃)；
 T_{co} ——冷却水管降温效果值(℃)，一般可取 2~4℃，水管间距较小时取较大值，反之取较小值；无水管时取 0℃。

C.1.2 温升折减系数应根据浇筑层厚度按下列原则取值：

- (1) 一次浇筑大体积混凝土时，直接按表 C.1.2 取值；
- (2) 分层连续浇筑时，第一层直接按表 C.1.2 取值；第二层及以上浇筑层，当已浇筑各层总厚度小于 2m 时，按本层厚度加已浇筑各层总厚度取值；当已浇筑各层总厚度大于等于 2m 时，按本层厚度加 2m 取值。

温 升 折 减 系 数 表 C.1.2

浇筑层厚度 (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
温升折减系数 ξ	0.28	0.46	0.55	0.62	0.68	0.74
浇筑层厚度 (m)	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
温升折减系数 ξ	0.80	0.85	0.90	0.95	0.99	1.00

C.2 混凝土弹性模量计算

C.2.1 混凝土弹性模量可按式计算：

$$E(t) = E_0 (1 - e^{-at^b}) \tag{C.2.1}$$

式中 $E(t)$ ——龄期 t 时的混凝土弹性模量(MPa)；
 E_0 ——混凝土最终弹性模量(MPa)，通过试验确定；
 a ——系数，通过试验确定，无试验数据时可取 0.40；
 t ——混凝土龄期(d)；
 b ——系数，通过试验确定，无试验数据时可取 0.60。

C.3 混凝土温度应力计算

C.3.1 混凝土表层拉应力可按式计算：

$$\sigma_s(t) = \frac{\alpha}{2} \times E(t) \times \Delta T_{nb}(t) \times K_p \quad (\text{C.3.1})$$

式中 $\sigma_s(t)$ ——龄期 t 时混凝土表层拉应力 (MPa)；

α ——混凝土线膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)，可取 $1.0 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

$E(t)$ ——龄期 t 时混凝土弹性模量 (MPa)；

$\Delta T_{nb}(t)$ ——龄期 t 时混凝土内表温差 ($^{\circ}\text{C}$)；

K_p ——混凝土徐变引起的应力松弛系数，通过试验确定，无试验资料时可取 0.5。

C.3.2 混凝土内部最大拉应力可按式计算：

$$\sigma_{cmax} = \frac{\alpha}{1 - \mu} \times E'_0 \times K_p \times R \times (T_{max} - T_w) \quad (\text{C.3.2})$$

式中 σ_{cmax} ——混凝土内部最大拉应力 (MPa)；

α ——混凝土线膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)，可取 $1.0 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

μ ——混凝土泊松比，可取 1/6；

E'_0 ——混凝土内部达到稳定温度或准稳定温度龄期时的混凝土弹性模量 (MPa)；

K_p ——混凝土徐变引起的应力松弛系数，通过试验确定，无试验资料时可取 0.5；

R ——混凝土基础约束系数；

T_{max} ——混凝土内部最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

T_w ——混凝土浇筑块体稳定温度或准稳定温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

C.3.3 混凝土基础约束系数可按式计算：

$$R = 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{C_x}{H \cdot E'_0}} \cdot \frac{L}{2}\right)} \quad (\text{C.3.3})$$

式中 R ——混凝土基础约束系数；

H ——混凝土浇筑块体厚度 (mm)；

E'_0 ——混凝土内部达到稳定温度或准稳定温度龄期时的混凝土弹性模量 (MPa)；

C_x ——外约束介质单位面积的水平变形刚度 (N/mm^3)，可按表 C.3.3 取值；

L ——混凝土浇筑块体长度 (mm)。

水平变形刚度

表 C.3.3

外约束介质	软粘土	砂质粘土	硬粘土	风化岩、低等级素混凝土	配筋混凝土
$C_x (10^{-2} \text{N}/\text{mm}^3)$	1 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 10	60 ~ 100	100 ~ 150

C.4 混凝土抗裂安全性评价

C.4.1 表层混凝土温控抗裂安全系数应满足下列公式：

$$K = f_{sp}(t) / \sigma_s(t) \quad (\text{C. 4. 1-1})$$

$$K \geq 1.4 \quad (\text{C. 4. 1-2})$$

式中 K ——表层混凝土温控抗裂安全系数；

$\sigma_s(t)$ ——龄期 t 时混凝土表层拉应力计算值 (MPa)；

$f_{sp}(t)$ ——龄期 t 时混凝土劈裂抗拉强度试验值 (MPa)。

C.4.2 内部混凝土温控抗裂安全系数应满足下式：

$$K' = f'_{sp}(t) / \sigma_{cmax} \quad (\text{C. 4. 2-1})$$

$$K' \geq 1.4 \quad (\text{C. 4. 2-2})$$

式中 K' ——内部混凝土温控抗裂安全系数；

σ_{cmax} ——混凝土内部最大拉应力计算值 (MPa)；

$f'_{sp}(t)$ ——混凝土块体达到稳定温度或准稳定温度时劈裂抗拉强度试验值 (MPa)。

附录 D 混凝土出机口温度、浇筑温度计算

D.1 混凝土出机口温度计算

D.1.1 混凝土出机口温度可按下式计算：

$$T_0 = \frac{(0.2 + Q_s) W_s T_s + (0.2 + Q_g) W_g T_g + 0.2 W_c T_c + (W_w - Q_s W_s - Q_g W_g) T_w}{0.2 (W_s + W_g + W_c) + W_w} \quad (\text{D. 1. 1})$$

式中 T_0 ——混凝土出机口温度(℃)；

Q_s ——细骨料的含水率,以质量百分比计(%)；

W_s ——每立方米混凝土中细骨料的质量(kg)；

T_s ——细骨料的温度(℃)；

Q_g ——粗骨料的含水率,以质量百分比计(%)；

W_g ——每立方米混凝土中粗骨料的质量(kg)；

T_g ——粗骨料的温度(℃)；

W_c ——每立方米混凝土中胶凝材料的质量(kg)；

T_c ——胶凝材料的温度,取水泥和矿物掺合料温度的质量加权平均值(℃)；

W_w ——每立方米混凝土中水的质量(kg)；

T_w ——水的温度(℃)。

D.2 混凝土浇筑温度计算

D.2.1 混凝土浇筑温度可按下式计算：

$$T_p = T_0 + (T_a - T_0)(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + T_f \quad (\text{D. 2. 1})$$

式中 T_p ——混凝土浇筑温度(℃)；

T_0 ——混凝土出机口温度(℃)；

T_a ——环境温度(℃)；

θ_1 ——混凝土装、卸转运时的温度变化系数；

θ_2 ——混凝土运输时的温度变化系数；

θ_3 ——混凝土浇筑时的温度变化系数；

T_f ——泵送施工时的摩擦升温值(℃),按每百米泵送距离温度升高 0.7 ~ 0.8℃ 考虑。

D.2.2 温度变化系数可分别按下列公式计算：

$$\theta_1 = 0.032N \quad (\text{D. 2. 2-1})$$

$$\theta_2 = A \cdot \tau$$

(D. 2. 2-2)

$$\theta_3 = 0.003\tau'$$

(D. 2. 2-3)

式中 θ_1 ——混凝土装、卸转运时的温度变化系数；
 N ——混凝土装、卸转运次数；
 θ_2 ——混凝土运输时的温度变化系数；
 A ——热量损失参数(min^{-1})，可按表 D. 2. 2 取值；
 τ ——运输时间(min)；
 θ_3 ——混凝土浇筑时的温度变化系数；
 τ' ——浇筑振捣时间(min)。

混凝土运输时热量损失参数 A 值

表 D. 2. 2

运 输 工 具	容积(m^3)	A (min^{-1})
混凝土搅拌车	6.0 ~ 12.0	0.0030 ~ 0.0040
吊斗	1.6 ~ 6.0	0.0005 ~ 0.0013

注 混凝土搅拌车和吊斗容量小时取大值，反之取小值。

附录 E 混凝土保温层厚度计算

E.0.1 混凝土保温层厚度可按式计算：

δ = (0.5hλψ(Tmax - ΔTnb,co - Ta,min)) / (λcΔTnb,co) (E.0.1)

- 式中 δ——保温层厚度(m)；
h——混凝土浇筑层厚度(m)；
ψ——传热修正系数,可按表 E.0.1-2 取值；
λ——保温材料导热系数(kJ/(m·h·℃)),按表 E.0.1-1 取值；
λc——混凝土导热系数(kJ/(m·h·℃)),可取 8.28kJ/(m·h·℃)；
Tmax——混凝土内部最高温度(℃)；
ΔTnb,co——混凝土内表温差控制值(℃)；
Ta,min——混凝土内部达到最高温度时的可能最低气温(℃)。

常用保温材料导热系数 表 E.0.1-1

材料名称	λ(kJ/(m·h·℃))	材料名称	λ(kJ/(m·h·℃))
木模	0.83	草袋	0.50
钢模	209.50	麻袋	0.25
砖砌体	2.92	泡沫塑料板	0.11~0.18
粘土	4.97~5.29	泡沫混凝土	0.36
干砂	1.19	棉织毯	0.22
湿砂	4.07~4.72	水	2.16
空气	0.11	普通纸板	0.63
塑料薄膜	0.12~0.17	土工布	0.67

传热修正系数 表 E.0.1-2

保温层种类	ψ	
	风速不大于 4m/s	风速大于 4m/s
由易透风材料组成,但混凝土面层上再铺一层不透风材料	2.0	2.3
在易透风保温材料上铺一层不易透风材料	1.6	1.9
在易透风保温材料上下各铺一层不易透风材料	1.3	1.5
由不易透风的材料组成	1.3	1.5

附录 G 本规程用词用语说明

G.0.1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

(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,在正常情况下均应该这样做的:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或者“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”或“可”;

反面词采用“不宜”。

G.0.2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时,写法为“应符合……的有关规定”或“应按……执行”。

附加说明

本规程主编单位、参加单位、 主要起草人、总校人员和管理组人员名单

主 编 单 位：中交武汉港湾工程设计研究院有限公司

参 加 单 位：中国交通建设股份有限公司

大连理工大学

中交第一航务工程勘察设计院有限公司

中交第二航务工程局有限公司

中交天津港湾工程研究院有限公司

中交四航工程研究院有限公司

主 要 起 草 人：甘新平（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

张国志（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

贡金鑫（大连理工大学）

（以下按姓氏笔画为序）

王迎飞（中交四航工程研究院有限公司）

田俊峰（中国交通建设股份有限公司）

刘可心（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

刘秉京（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

李俊毅（中交天津港湾工程研究院有限公司）

杨昌维（中交第二航务工程局有限公司）

赵晓岚（中交第一航务工程勘察设计院有限公司）

屠柳青（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

总 校 人 员 名 单：胡 明（交通运输部水运局）

李德春（交通运输部水运局）

阚 津（交通运输部水运局）

吴敦龙（中交水运规划设计院有限公司）

甘新平（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

张国志（中交武汉港湾工程设计研究院有限公司）

屠柳青(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

刘可心(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

李顺凯(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

管理组人员名单：甘新平(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

屠柳青(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

刘可心(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

李顺凯(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

张伟源(中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

中华人民共和国行业标准

水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范

JTS 202—1—2010

条文说明

目 次

1 总则	(29)
2 术语	(30)
3 基本规定	(31)
4 温控设计	(32)
4.1 一般规定	(32)
4.2 温控标准	(33)
5 原材料	(35)
5.1 水泥	(35)
5.2 矿物掺合料	(35)
5.3 粗骨料	(35)
5.5 外加剂	(36)
5.6 拌和水	(36)
6 配合比设计	(37)
7 温控措施	(39)
7.1 一般规定	(39)
7.2 浇筑温度控制	(39)
7.3 内部最高温度控制	(39)
7.4 混凝土浇筑	(40)
7.5 表面保温和养护	(40)
7.6 其他措施	(41)
8 施工期温控监测	(42)
附录 A 胶凝材料水化热总量计算	(43)
附录 C 混凝土温度及温度应力计算	(48)
附录 D 混凝土出机口温度、浇筑温度计算	(52)

1 总 则

1.0.1 大体积混凝土的特点主要是胶凝材料在水化反应过程中释放出大量的热量, 这些热量积聚在混凝土内部不易散发, 引起温度变化造成混凝土的收缩变形, 混凝土收缩变形受到内部或外部约束时产生拉应力, 超过混凝土的抗拉强度易导致开裂。

2 术 语

2.0.1 美国混凝土学会 ACI-207 认为,大体积混凝土是“现浇混凝土结构,尺寸大到需要采取措施降低水化热和水化热引起的体积变化,以最大限度地减少混凝土的开裂”,该学会还认为,结构最小尺寸大于 0.6m,即应考虑水化热引起混凝土体积变化与开裂问题。国际预应力混凝土协会(FIP)《海工混凝土结构设计与施工建议》中规定,“凡是混凝土一次浇筑最小尺寸大于 0.6m,特别是水泥用量大于 400kg/m^3 时,应考虑采用水化放热慢的水泥或采取其他降温散热措施”。日本建筑学会标准(JASS)认为,“结构断面最小尺寸在 0.8m 以上,水化热引起混凝土内最高温度与外界气温之差超过 25°C 的混凝土,称为大体积混凝土”。我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)中大体积混凝土的定义为“混凝土结构物实体最小尺寸等于或大于 1m,或预计会因水泥水化热引起混凝土内外温差过大而导致裂缝的混凝土。”可以看出,上述标准和建议都是从定性和定量两个方面对大体积混凝土进行定义的。考虑到与国内标准的协调,本条参考国家现行标准《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)给出大体积混凝土的定义。

2.0.3 温控抗裂安全系数用于评价混凝土产生温度裂缝的可能性。我国现行行业标准《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91)中温控抗裂安全系数表述为某一龄期的混凝土轴心抗拉强度标准值与计算温度应力之比;欧洲丹麦采用开裂风险评价温控抗裂安全性,表述为计算温度应力与轴心抗拉强度之比或劈裂抗拉强度之比;日本将温控抗裂安全系数表述为某一龄期的混凝土劈裂抗拉强度标准值与计算温度应力之比。我国的工程经验表明劈裂抗拉试验易于操作,试验结果波动较小;而轴心抗拉试验操作复杂,试验结果波动较大。所以,本规程将温控抗裂安全系数定义为标准养护条件下混凝土劈裂抗拉强度试验值与计算温度应力之比。

2.0.12 ~ 2.0.13 当混凝土体积足够大时,运行期混凝土表面接触的气温和水温是随时间变化的,但影响深度有限,中心区域温度将不受外界气温与水温变化的影响而处于稳定状态,即为稳定温度。而对于多数水运工程的大体积混凝土结构,整体温度的变化可能受气温与水温影响,处于年复一年的重复循环变化之中,即不存在稳定温度,故谓准稳定温度。

3 基本规定

3.0.2 要求大体积混凝土结构型式简单,即采用平顺、少棱角和少突变等结构型式。一方面可减小结构自身约束,另一方面方便采取保温等温控措施。降低基础约束的措施包括设置滑动层等。

3.0.3 混凝土的裂缝会影响结构的耐久性。《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ 267—98)中对最大裂缝宽度限值作了规定,见表 3.0.3-1。《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275—2000)中,对于海洋环境下的最大裂缝宽度限值作了规定,见表 3.0.3-2。本条参照上述规范的规定给出了裂缝宽度限值,为满足耐久性要求,在条文表注中提出修补的规定。

《港口工程混凝土结构设计规范》最大裂缝宽度限值(mm) 表 3.0.3-1

环境类别	淡水环境			海水环境			
	水上区	水位变动区	水下区	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
裂缝宽度限值	0.25	0.30	0.40	0.20	0.20	0.25	0.30

《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》最大裂缝宽度限值(mm) 表 3.0.3-2

环境类别	海水环境			
	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
裂缝宽度限值	0.20	0.20	0.25	0.30

3.0.4 本条给出了大体积混凝土强度的评定原则。大体积混凝土一般掺有大量矿物掺合料,以减少水泥用量,降低混凝土水化热;该类型混凝土早期强度发展较慢,后期强度增长幅度较大,有充分利用后期强度的条件。某军工码头工程和某大桥锚碇工程采用 60d 的强度评定标准,现场监测结果表明大体积混凝土没有出现温度裂缝,温控效果良好。因此建议采用 60d 或 90d 龄期强度进行评定验收。

3.0.5 外界施工条件对混凝土开裂具有重要影响。天气温度较低时施工可降低混凝土的浇筑温度,减小温度裂缝;而极端不利的气象条件,如大雨、暴晒、大风、冰冻等,会造成混凝土收缩开裂甚至影响正常凝结硬化。

4 温控设计

4.1 一般规定

4.1.1 本条是对大体积混凝土温控设计的一般要求。不同设计使用年限的结构对混凝土性能要求不同,不同的使用环境适用温控措施不同,不同的结构出现温度裂缝后对适用性和耐久性的影响不同,这些都是温控设计时的考虑因素。另外,同一结构中的不同构件或同一构件中的不同部位,由于所处局部环境条件有异,予以区别对待。

4.1.3 本条对大体积混凝土施工提出了分层、分块的浇筑要求以及设置施工缝时的考虑因素。设置施工缝考虑的因素根据具体情况确定,例如温度裂缝控制的要求、混凝土的浇筑能力以及方便结构钢筋绑扎、预埋管件安装等;合理设置施工缝包括:避开结构受力较大的截面处和变截面处,海洋环境下水平施工缝的设置避开水位变动区和浪溅区等。

4.1.4 本条给出了连续浇筑的墙体结构水平施工缝的设置要求。为减小基础的约束避免应力显著增加而导致墙体开裂,要求底板上连续浇筑的墙体结构的水平施工缝设置在距底板较高的位置。

4.1.5 本条给出了分块施工时最大分块尺寸、相邻块高差和浇筑时间间隔的要求。分块尺寸过大不利于减少基础约束,易造成应力显著增加。《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)中规定软基上的墙体和水闸底板的最大分块尺寸为30m,岩基的最大分块尺寸为20m;《钢筋混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中规定现浇剪力墙结构最大分块尺寸为30m,挡土墙和地下墙壁结构最大分块尺寸为20m。水运工程经验表明,块体平面最大尺寸不大于30m时能有效避免混凝土温度裂缝的产生。相邻块高差和浇筑时间间隔的控制要求参照《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)中的相关规定。

4.1.7 大体积混凝土温度及温度应力分析,采用有限元分析软件计算分析,可以较好地模拟温控施工过程,因此本条推荐采用有限元分析结果。附录C给出了温度应力计算的公式,方便于简单结构的温度和温度应力估算。

4.1.8 本条给出了大体积混凝土温控抗裂安全性的评价方法,并提出了温控抗裂安全系数的要求。国内及国外的一些规范对温控抗裂安全系数有不同的表述,但无明确定义。《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91)中温控抗裂安全系数表述为某一龄期的混凝土轴心抗拉强度标准值与计算温度应力之比,并规定温控抗裂安全系数不小于1.15。欧洲一般采用开裂风险的概念,即混凝土计算拉应力与对应龄期劈裂抗拉强度的比值,并对开裂风险作了规定。日本规范要求劈裂抗拉强度与计算温度应力比不得小

于 1.25 ~ 1.5。厄勒海峡隧道和丹麦大带桥要求计算温度应力与劈裂抗拉强度之比不大于 0.7, 即劈裂抗拉强度与计算温度应力比不小于 1.4, 现场监测结果表明混凝土没有出现温度裂缝, 温控效果良好。

本规程将温控抗裂安全系数定义为标准养护条件下混凝土劈裂抗拉强度试验值与计算温度应力之比。国内多个水运工程大体积混凝土温控实践表明, 按此定义的温控抗裂安全系数不小于 1.4 时能有效控制温度裂缝的产生。

4.2 温控标准

温度控制标准包括浇筑温度、内表温差、内部最高温度和降温速率四个指标。对于重要的大体积混凝土结构, 温度控制更重要、标准更严格, 所以提出根据温度应力分析确定。

对于混凝土浇筑温度, 国内《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000) 中规定夏季浇筑温度应控制在 32°C 以下, 冬季不应低于 5°C 《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010) 中规定冬季应控制在 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$; 中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版)) 中规定夏季浇筑温度不超过 28°C , 负温下不宜低于 12°C 。某船闸工程, 控制夏季浇筑温度小于等于 28°C 、冬季不低于 5°C ; 某军工码头工程控制夏季浇筑温度小于等于 30°C 、冬季不低于 5°C , 现场监测结果表明大体积混凝土没有出现温度裂缝, 温控效果良好。参照国内外规范和工程经验, 提出夏季浇筑温度不高于 30°C 、冬季不低于 5°C 。

对于内表温差, 英国建筑工业研究和情报协会 (CIRIA) 指南《Early-age Thermal Crack Control in Concrete》(CIRIA C660) 中规定内表温差控制在 20°C 以内 ; 国内《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000) 中规定应将内表温差控制在 25°C 以内 《块体基础大体积混凝土施工技术规程》(YBJ 224—91) 中也规定内表温差 (不含混凝土收缩的当量温度) 不超过 25°C 。国内多项工程控制内表温差小于等于 25°C , 现场监测结果表明混凝土未出现温度裂缝。

混凝土内部最高温度与浇筑温度、配合比、几何尺寸和现场条件等因素密切相关, 混凝土早期温度过高一方面容易形成延迟钙矾石, 另一方面容易导致水泥“假凝”。另外, 混凝土内部温度过高, 当降温到稳定温度或准稳定温度时, 整个过程温度应力过大, 从而增大混凝土开裂的可能性。英国建筑工业研究和情报协会 (CIRIA) 指南《Early-age Thermal Crack Control in Concrete》(CIRIA C660) 中提出混凝土内部温度不应超过 70°C , 厄勒海峡隧道与桥梁和加拿大联盟桥也要求混凝土内部温度不应超过 70°C 。中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版)) 也规定混凝土内部温度不应高于 70°C 。

对于降温速率, 《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 中规定坝体降温速度不宜大于 $1^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 《块体基础大体积混凝土施工技术规程》(YBJ 224—91) 中规定降温速度为 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版)) 也规定混凝土的最大降温速率不宜大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。某船闸工程控制降温

速率小于等于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 现场监测结果表明船闸混凝土没有出现温度裂缝 ;某大桥锚碇工程控制降温速率小于等于 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 现场监测结果表明锚碇大体积混凝土没有出现温度裂缝, 温控效果良好。而某船坞大体积混凝土工程控制降温速率为 $3^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 由于降温过快, 船坞坞墙出现了温度裂缝, 裂缝宽度大多在 1.0mm 左右。对照国内规范并结合调研资料和工程经验, 本规程提出降温速率不大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

5 原 材 料

5.1 水 泥

5.1.1 有资料表明,水泥中铝酸三钙(C_3A)的3d水化热分别是硅酸三钙(C_3S)的3.7倍和硅酸二钙(C_2S)的17.7倍,7d的水化热则分别约为硅酸三钙(C_3S)的7倍和硅酸二钙(C_2S)的37倍; C_3A 的收缩率大约是硅酸三钙(C_3S)和硅酸二钙(C_2S)的3倍。本条提出水泥中的铝酸三钙(C_3A)含量不宜大于8%。

5.1.3 水泥磨细后细颗粒增多,过大的水泥比表面积会加快水泥的水化速率,增加水泥的早期水化热,增大混凝土干缩。因此,水泥过细对大体积混凝土抗裂不利。

5.2 矿物掺合料

5.2.1 对于大体积混凝土施工,使用矿物掺合料的主要目的是为了降低大体积混凝土的水化热,目前常用的矿物掺合料包括粉煤灰、粒化高炉矿渣粉等。国家现行有关标准包括《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)、《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》(DL/T 5055—2007)和《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2008)等。

5.2.2 粉煤灰分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级,其品质会严重影响混凝土的性能。Ⅲ级粉煤灰细度偏大、含碳量过高,容易造成混凝土需水量大、坍落度损失加快,不利于大体积混凝土施工;同时会影响混凝土抗渗、抗裂和抗冻等耐久性能。所以,本条提出配制大体积混凝土时,应选用Ⅰ级和Ⅱ级粉煤灰。

5.2.3 粒化高炉矿渣粉分为S105、S95和S75三个等级,国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2008)中粒化高炉矿渣粉的比表面积要求为:S75 $\geq 300\text{m}^2/\text{kg}$ 、S95 $\geq 400\text{m}^2/\text{kg}$ 和S105 $\geq 500\text{m}^2/\text{kg}$ 。行业标准《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010)中规定粒化高炉矿渣粉的比表面积均应大于 $400\text{m}^2/\text{kg}$ 。大量的研究资料表明,粒化高炉矿渣粉越细,活性越高;在一定掺量范围内,混凝土的水化热温升随粒化高炉矿渣粉掺量的增加而增大。从大体积混凝土温控和减少混凝土收缩开裂的角度考虑,粒化高炉矿渣粉的比表面积宜为 $400\sim 450\text{m}^2/\text{kg}$ 。

5.2.4 硅粉具有超细度、超高活性等特点,可迅速与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,释放大量的热,不利于混凝土温升的控制;同时掺硅粉会增大混凝土的收缩、变形,易导致混凝土开裂。

5.3 粗 骨 料

5.3.3 粗骨料中含泥量过多对混凝土强度、干缩、抗冻、徐变、抗渗及和易性能都将产生

不利影响, 尤其会增加混凝土收缩, 使抗拉强度降低。本条参照《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010) 中的有关规定给出了粗骨料含泥量和泥块含量的要求。

5.3.5 碱性骨料易发生碱骨料反应而使混凝土产生开裂, 破坏混凝土的整体性, 对于海洋环境中的混凝土结构, 增大了钢筋锈蚀的风险, 所以严格限制海水环境中的粗骨料的碱活性。对于淡水环境, 混凝土开裂后的风险相对较小, 所以淡水环境中使用粗骨料的要求稍有降低, 但需采用抑制碱骨料反应的措施, 如使用低碱水泥、掺加粉煤灰, 并按照《混凝土碱含量限值标准》(CECS 53 93) 所示限值控制混凝土总碱含量。

5.3.6 不同骨料的线膨胀系数存在较大差异, 同时混凝土线膨胀系数与温度应力成正比比例关系。朱伯芳等人研究表明, 用石英岩配制的混凝土的线膨胀系数较高, 而用石灰岩配制的混凝土线膨胀系数较低, 具体研究结果见表 5.3.6。

用不同骨料配制的 1:6混凝土的线膨胀系数 表 5.3.6

骨料种类	石英岩	砂岩	玄武岩	花岗岩	石灰岩
$\alpha(10^{-5}/^{\circ}\text{C})$	1.22	1.01	0.86	0.85	0.61

5.5 外 加 剂

5.5.1 本条规定了大体积混凝土使用的外加剂类型和质量要求。混凝土外加剂品种规格众多、性能各异, 所选外加剂应分别符合《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)、《混凝土膨胀剂》(GB 23439—2009) 和《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010) 等国家和行业标准的规定。

5.5.2 缓凝型减水剂主要对水泥水化起抑制作用, 从而延长混凝土凝结时间, 推迟水泥的水化放热, 降低混凝土水化热温升。实测结果表明: 含有糖类的外加剂与以非二水石膏作为调凝剂的水泥适应性差, 易导致混凝土用水量增加和促凝。因此大体积混凝土缓凝组分不应为糖类。

5.5.3 掺外加剂的水泥水化机理表明: 外加剂特别是减水剂有助于水泥的充分水化, 但增大了混凝土的收缩量, 对大体积混凝土抗开裂不利。国家标准《混凝土外加剂》(GB 8076—2008) 中规定, 掺外加剂混凝土的 28d 收缩率比不大于 135% 《水工混凝土外加剂技术规程》(DL/T 5100—1999) 规定的 28d 收缩率比不大于 125% ; 国际上有的国家要求 28d 收缩率比不大于 120% ~135% 。根据大体积混凝土的特点, 本条提出掺外加剂混凝土的 28d 收缩率比不应大于 125% 。

5.6 拌 和 水

规定了大体积混凝土的拌和水水质应符合的要求。《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010) 规定钢筋混凝土和预应力混凝土拌和用水的 pH 值大于 5, 素混凝土拌和用水的 pH 值大于 4.5, 因此本条提出水的 pH 值不宜小于 5。

6 配合比设计

6.0.2 本条提出了大体积混凝土配合比的要求。在满足施工要求的条件下,选择较小的坍落度和较小的砂率时,骨料中粗骨料用量相应增多,从而可以降低浆骨比和抑制混凝土收缩,有利于大体积混凝土的抗裂。

《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275—2000)中规定高性能混凝土宜采用硅酸盐或普通硅酸盐水泥,粉煤灰的适宜掺入量为25%~50%,粒化高炉矿渣粉适宜掺入量为50%~80%。某海洋码头工程(水胶比为0.40,强度等级为C40)采用40%的粉煤灰与20%的粒化高炉矿渣粉复合后等质量取代P·II 42.5水泥后,28d强度为50.0MPa,胶凝材料水化热降低了35%,混凝土的绝热温升降低约7℃,现场监测结果表明混凝土未出现温度裂缝。某大体积混凝土温控工程,混凝土强度等级为C50,采用P·II 42.5水泥,水胶比为0.35,胶材用量为450kg/m³,用45%的II级粉煤灰等质量取代水泥后,胶材水化热总量降低了约30%,混凝土绝热温升降低了约10℃,现场温控结果表明混凝土未出现温度裂缝。本条将水泥中的混合材计入掺合料,并根据一些重点水运工程中的经验数据,提出了不同水胶比的大体积混凝土中矿物掺合料的掺量。

6.0.3 混凝土中适量引气能提高混凝土的抗冻性、匀质性和抗裂性能。R. Springenschmid 和 R. Breitenbücher 两位学者研究认为,引气混凝土极限拉应变比普通混凝土大20%,硬化混凝土弹性模量较低,改善混凝土抗开裂性能。因此本条提出混凝土含气量宜2%~4%。

引气混凝土抗冻效果与含气量直接相关。中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版))规定冻融环境下引气混凝土含气量在4%~7%。《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010)也对有抗冻要求的混凝土含气量根据骨料的粒径作出了相关规定。因此本条提出有抗冻要求时混凝土含气量宜控制在4%~6%。

6.0.4 目前评价混凝土抗裂性能的试验方法主要有:水化热试验、绝热温升试验、收缩试验、环约束试验、平板约束试验和轴约束试验等。前三种是间接评价方法,后三种则为直接评价方法。

间接评价方法是通过检测影响混凝土开裂的因素来评价抗裂性能,这种方法的缺陷是准确性不够。直接评价方法则通过检测混凝土的开裂行为(如开裂时间、开裂温度、开裂应力等)来评价抗裂性能。目前采用的一些评价混凝土、砂浆、净浆早期开裂敏感性的直接方法,如平板法、圆环法,虽然简单方便,但有很大的局限性。中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版))附录A提出了开裂评价试验方法,但此试验方法不能用于定量分析混凝土开裂性能,只能用于不同原材

料和配合比抗开裂性能的优选。20 世纪 80 年代发展起来的温度应力试验机是研究混凝土开裂问题和检测混凝土抗裂性能的新型设备之一,采用这种设备可以同时考虑温度、约束、收缩和应力等多个关键因素的影响,根据试验结果可以直观了解和比较混凝土的抗裂性能。

6.0.5 混凝土早期强度发展快,水化热温升高,导致混凝土弹性模量增长快,徐变减小,易产生温度裂缝。中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004 (2005 年修订版))指出,为限制混凝土的早期开裂,可通过对混凝土早期强度的控制,要求 12h 抗压强度不大于 8MPa 或 24h 不大于 12MPa,当抗裂要求较高时,宜分别不高于 6MPa 或 10MPa。工程经验表明该指标具有可操作性,能够有效防止温度裂缝的产生。

7 温控措施

7.1 一般规定

7.1.5 本条提出了温控措施的一般指导性原则,即采取措施降低混凝土内表温差和控制降温速率,具体为:在混凝土升温阶段,主要采取措施降低混凝土内部的最高温度来降低内表温差;在混凝土降温阶段,主要采取措施保温,提高表面温度来降低内表温差。

7.2 浇筑温度控制

7.2.2 本条提出了热天施工时出机口温度控制的一般措施。

利用温度较低时段施工能明显降低出机口温度。工程经验表明,夏季夜间施工出机口温度普遍比白天低 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

水泥使用温度过高一方面提高了混凝土浇筑温度控制的难度,另一方面易带来混凝土用水量增加,水泥假凝等问题,影响混凝土施工质量。因此提出水泥使用温度不超过 60°C 。

骨料在混凝土中用量最大,对出机口温度影响也最大。控制骨料温度一般有遮阳、堆高或喷淋等措施。由于使用成本较高,所以提出必要时,采用风冷骨料、液氮冷却等措施,如三峡工程中曾采用风冷骨料措施,国外有液氮冷却混凝土的实例。

7.3 内部最高温度控制

7.3.2 本条提出了大体积混凝土分层设计应遵循的一般性原则。

《混凝土拱坝设计规范》(SL 282—2003)中规定,基础约束区的浇筑层厚度宜采用 $1.5\sim 2.0\text{m}$,应采取短间歇均匀上升的分层浇筑方法,层面不应长期暴露。三峡右岸厂坝三期工程温控设计,大坝基础强约束区分层厚度为 $1.0\sim 1.5\text{m}$,脱离基础强约束区为 2.0m ;厂房大体积混凝土分层厚度一般为 2.0m ,上部结构混凝土则达到了 3.0m 。某船闸工程大体积混凝土的分层方案为:船闸底板基础强约束区的分层厚度为 1.0m ,其他的分层厚度最大为 2.0m ,现场温控效果表明混凝土没有出现温度裂缝。

7.3.3 本条提出了冷却水管的材质、管径、间距、长度和布置原则。

从冷却效果来看,塑料水管虽热传导性能比金属管差,但通过调整水管间距可达到与金属管相当的降温效果。国内有使用聚乙烯塑料水管的实例。

冷却水管的间距对冷却效果的影响非常明显。因此在温控设计时为提高冷却水效率可缩小水管间距。冷却水管长度增加后,冷却效果有所降低,因此要选择适宜的长度,在实际工程中一般要求不超过 200m 。

冷却水管进出水口集中布置有利于连接水泵和施工过程监控和检修。

7.3.4 冷却水管压水试验主要是检验冷却水管的抗水压能力,避免通水过程中水管破裂或水管接头漏水而影响通水。

7.3.5 本条提出冷却水管通水冷却的要求。

通水时间对混凝土水化热温升影响显著,及早通水可以延缓混凝土的水化速率,推迟温峰出现的时间,有效降低最高温度。

冷却水流速要求大于 0.6m/s ,使冷却水在管内产生紊流,确保冷却效果。冷却水与混凝土温差越大,理论上冷却效果就越好,但过大的温差会造成混凝土的冷激,在水管周围的混凝土中引起较大的拉应力,甚至导致裂缝。

条文“冷却水与混凝土内部温度之差不超过 25°C ”中的内部温度指冷却水管周边的混凝土的温度。混凝土覆盖冷却水管后即开始通水冷却并持续不断,水管周边的混凝土的温度与水温接近,温度梯度平稳。本条主要针对通水不及时或中断后再通水的情况,避免冷却水温度与水管周边的混凝土的温度之差超过 25°C ,对内部混凝土造成冷激。

7.4 混凝土浇筑

7.4.3 本条提出了大体积混凝土浇筑时分层摊铺的要求。《水运工程混凝土施工规范》(JTS 202—2010)中规定,浇筑混凝土最大允许分层厚度采用插入式振捣器时为 500mm ,采用附着外挂振捣器时为 300mm 。工程经验表明,混凝土的摊铺厚度应根据所用振动器的作用深度及混凝土和易性确定,一般情况下泵送和非泵送混凝土的摊铺厚度分别不宜大于 500mm 和 300mm 。因此,本规程用泵送和非泵送分类,将允许分层厚度分别定为 500mm 和 300mm 。

7.4.4 “冷缝”是指在已经初凝的混凝土面上继续浇筑混凝土。“冷缝”会导致混凝土连接处出现软弱结合面,降低混凝土结构的整体性。因此在大体积混凝土施工过程中,不允许出现“冷缝”。

7.4.6 大体积混凝土浇筑完后初凝前,在表面进行二次抹面并及时覆盖保湿,避免早期出现塑性裂缝和防止混凝土干缩失水。

大体积混凝土采用二次振捣工艺,即在混凝土初凝前再次振捣,可以增加混凝土的密实度,减少表面微裂缝。

7.4.7 对于低流动度的混凝土,采用接浆措施可以提高新老混凝土之间的粘结强度,具体做法是:经凿毛处理的混凝土施工缝,表面排除积水后,先浇一层 30mm 厚水泥浆或与混凝土配比相同的水泥砂浆,然后继续浇筑混凝土。

7.4.10 埋放块石的总量不得超过埋放块石部分混凝土体积的 25% 是根据工程施工经验提出的。

7.5 表面保温和养护

7.5.1 目前在大体积混凝土施工中,主要采用的模板有钢模和木模或胶合板。当采用钢模时因其对保温不利,就要根据保温养护的需要再增加保温措施;当采用木模或胶合板

时,一般将其直接作为保温材料考虑。

7.5.4 养护水温与混凝土表面温度之差较大时会增大内表温差,从而增加混凝土的开裂风险。

7.5.5 保温养护是大体积混凝土施工的关键环节之一,主要目的是通过减少混凝土表面的散热,从而降低大体积混凝土内表温差。

7.6 其他措施

7.6.1 钢纤维的掺入可提高混凝土的抗拉强度,聚丙烯纤维可提高混凝土表面抗开裂性能,其他特种混凝土还有微膨胀混凝土等。减缩剂可减小混凝土收缩,降低收缩应力,水化热降低剂可降低混凝土水化热,这两种特种外加剂可以用于常规温控措施无法实施的特殊结构。

7.6.2 透水模板布可提高表层混凝土密实性和外观质量。

8 施工期温控监测

8.0.1 一般采用混凝土温度状况反映其应力状况, 应变监测则能直接校验温度应力。

8.0.5 本条规定是为了保证测试元件具有良好的抗冲击、防水等性能, 因为混凝土浇筑过程中对传感器存在一定的冲击, 且混凝土内部是潮湿环境。测试元件和引线的保护也十分重要, 采取措施保障测试元件和引线的安全非常必要。

8.0.6 升温期间和降温初期温度变化较快, 所以数据采集频率较高; 降温后期温度变化相对缓慢, 可以适当降低测试频率。测温持续时间根据温度变化确定。

附录 A 胶凝材料水化热总量计算

A.2 胶凝材料水化热总量

本规程首先推荐对掺入掺合料之后的胶凝材料进行水化热测定,如无该试验结果时参考本条中的计算方法进行估算。

在广泛调研国内外资料的基础上,结合相关试验数据,对各因素的影响规律进行总结归纳,给出了矿物掺合料不同掺量时的水化热调整系数,便于在没有试验数据的情况下进行胶凝材料水化热总量的估算。现分述如下:

(1) 粉煤灰

在三峡水利枢纽工程第二阶段曾研究过粉煤灰对水化热的影响规律,试验结果见表 A.2.0-1。研究表明,随着粉煤灰掺量的增大,浆体的水化热降低较为明显,同时水化热调整系数逐渐降低。

粉煤灰掺量对水泥水化热的影响 表 A.2.0-1

水泥品种	粉煤灰掺量 (%)	水化热 (kJ/kg)			7d 水化热降低量 (%)	7d 水化热调整系数
		1d	3d	7d		
42.5 中热	0	183	242	271	—	—
	30	138	202	232	14.4	0.86
	40	123	175	203	25.1	0.75
	50	111	158	184	32.1	0.67
32.5 低热	0	110	173	228	—	—
	15	95	165	214	6.1	0.94
	25	86	149	194	14.9	0.85
	35	83	142	178	21.9	0.78
	45	69	109	141	38.2	0.62

注:水胶比为 0.42,粉煤灰为Ⅱ级灰。

国内相关单位研究了粉煤灰对水泥净浆水化热的影响,采用 525 号水泥,Ⅱ级磨细粉煤灰,试验结果见表 A.2.0-2。

粉煤灰对水泥水化热的影响 表 A.2.0-2

编号	胶凝材料 (kg/m³)	粉煤灰掺量 (%)	3d 水化热 (J/g)	3d 水化热调整系数
1	400	0	224.34	1
2	360	10	205.22	0.92
3	320	20	187.18	0.84
4	280	30	172.76	0.77

本规程相关研究数据如表 A. 2. 0-3。

粉煤灰掺量对水泥水化热影响试验结果 表 A. 2. 0-3

编号	胶凝材料 (kg/m³)	水 胶 比	水泥品种	粉煤灰品种及掺量 (%)	7d 水化热 (J/g)	7d 水化热 调整系数
1	450	0. 35	P · II42. 5	—	290. 7	1
2	450	0. 35	P · II42. 5	II 级, 35	233. 3	0. 80
3	450	0. 35	P · II42. 5	II 级, 45	203. 2	0. 70

朱伯芳的研究给出了粉煤灰对水泥水化热及绝热温升的影响, 见表 A. 2. 0-4。

掺加粉煤灰对混凝土绝热温升的影响效果 表 A. 2. 0-4

水 泥 品 种	与不掺矿物掺合料的混凝土 28d 绝热温升的比值		
普通水泥	粉煤灰掺量 (%)		
	20	30	40
	0. 90	0. 86	0. 82

考虑到本规程中推荐的粉煤灰掺量为 20% ~ 50%, 因此综合以上的资料计算不同粉煤灰掺量时水化热调整系数的平均值, 见表 A. 2. 0-5, 并根据表 A. 2. 0-5 的数据拟合出不同粉煤灰掺量的水化热调整曲线, 见图 A. 2. 0-1。

不同粉煤灰掺量水化热调整系数平均值 表 A. 2. 0-5

掺 量 (%)	0	10	20	30	40	50
粉煤灰	1	0. 92	0. 90	0. 85	0. 82	0. 76

注 表中掺量为粉煤灰占胶凝材料总用量的百分比。

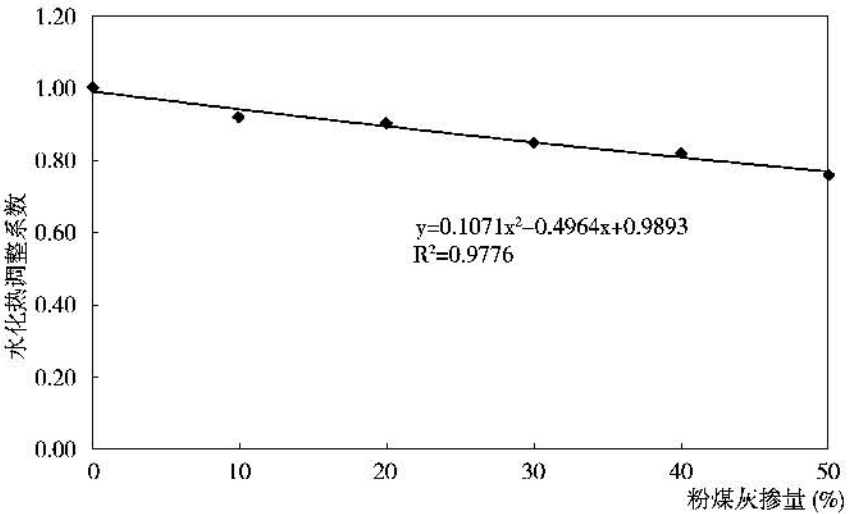


图 A. 2. 0-1 不同粉煤灰掺量水化热调整系数拟合曲线

因此, 对于不同的水泥和粉煤灰品种, 单掺粉煤灰时, 其不同掺量时调整系数变化较大, 为了估算方便本附录根据图 A. 2. 0-1 的拟合曲线给出了不同掺量的水化热调整系数参考值。

(2) 粒化高炉矿渣粉

单掺粒化高炉矿渣粉在水运工程中的应用并不多见, 混凝土绝热温升资料也较少。相关研究数据见表 A. 2. 0-6。

单掺粒化高炉矿渣粉对浆体水化热的影响 表 A. 2. 0-6

编号	粒化高炉矿渣粉掺量 (%)	水化热(J/g)			7d 水化热降低率 (%)	7d 水化热 调整系数
		1d	3d	7d		
1	—	162	228	261	—	—
2	30	143	202	235	10. 0	0. 90
3	40	115	190	231	11. 5	0. 88
4	50	112	181	220	15. 7	0. 84
5	60	82	148	189	27. 6	0. 72
6	70	70	67	134	34. 5	0. 66

注 采用 525# 中热水泥, 粒化高炉矿渣粉比表面积为 500m²/kg。

某大桥混凝土抗裂性能研究提出的粒化高炉矿渣粉掺量对水泥水化热的影响, 见表 A. 2. 0-7。

单掺粒化高炉矿渣粉对浆体水化热的影响 表 A. 2. 0-7

编号	粒化高炉矿渣粉掺量 (%)	水化热(J/g)			7d 水化热降低率 (%)	7d 水化热 调整系数
		1d	3d	7d		
1	—	158. 6	248. 3	305. 6	—	—
2	20	125. 1	204. 7	277. 7	9. 2	0. 91
3	30	112. 0	189. 6	262. 2	14. 3	0. 87

注 采用 P042. 5 水泥, 粒化高炉矿渣粉比表面积为 450m²/kg。

朱伯芳的研究给出了粒化高炉矿渣粉对混凝土绝热温升的影响, 见表 A. 2. 0-8。

粒化高炉矿渣粉对混凝土绝热温升的影响效果 表 A. 2. 0-8

水 泥 品 种	普 通 水 泥		
粒化高炉矿渣粉掺量(%)	40	50	70
与不掺矿物掺合料的混凝土 28d 绝热温升的比值	0. 92	0. 90	0. 72

考虑到本规程中推荐的粒化高炉矿渣粉掺量为 30% ~ 70%, 因此综合以上的资料计算不同掺量时水化热调整系数的平均值, 见表 A. 2. 0-9, 并根据表 A. 2. 0-9 的数据拟合出了不同掺量的水化热调整曲线, 见图 A. 2. 0-2。

不同粒化高炉矿渣粉掺量水化热调整系数平均值 表 A. 2. 0-9

粒化高炉矿渣粉掺量(%)	0	10	20	30	40	50	60	70
水化热调整系数	1	0. 98	0. 92	0. 90	0. 88	0. 84	0. 72	0. 66

注 表中掺量为粒化高炉矿渣粉占胶凝材料总用量的百分比。

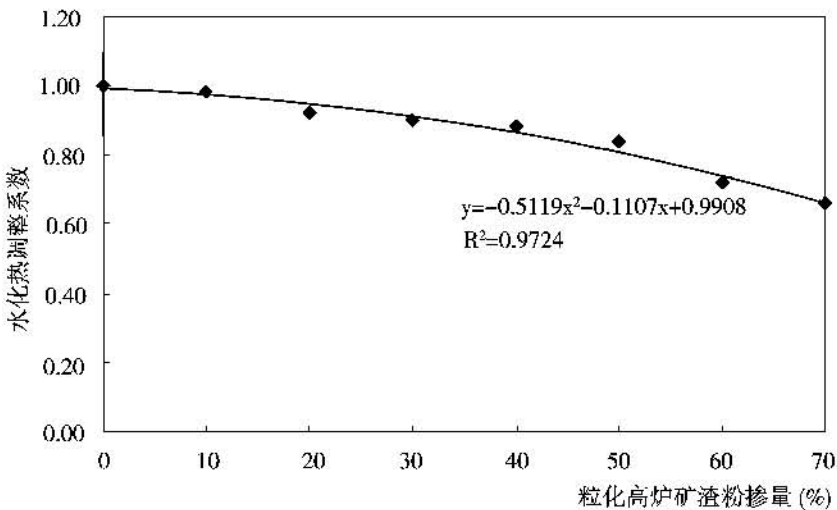


图 A.2.0-2 不同粒化高炉矿渣粉掺量水化热调整系数拟合曲线

由调研资料可知,对于不同品种的水泥和粒化高炉矿渣粉,单掺粒化高炉矿渣粉时,不同掺量调整系数变化较大,为了估算方便本附录根据图 A.2.0-2 的拟合曲线给出了粒化高炉矿渣粉不同掺量的水化热调整系数参考值。

(3) 粉煤灰和粒化高炉矿渣粉复合

在水运工程中,为降低混凝土的水化热同时又能提高混凝土的密实性,多采用粉煤灰和粒化高炉矿渣粉复掺。有关试验结果见表 A.2.0-10。

粉煤灰和粒化高炉矿渣粉对浆体水化热的影响 表 A.2.0-10

编号	粒化高炉矿渣粉掺量 (%)	粉煤灰掺量 (%)	水化热 (J/g)			7d 水化热调整系数	$k_1 \times k_2$
			1d	3d	7d		
1	—	—	162	228	261	—	—
2	24	16	107	175	225	0.86	0.85
3	42	28	72	145	194	0.75	0.73

注 采用 42.5 中热水泥。

本规程相关研究数据见表 A.2.0-11。

粉煤灰和粒化高炉矿渣粉对浆体水化热的影响 表 A.2.0-11

编号	粒化高炉矿渣粉掺量 (%)	粉煤灰掺量 (%)	7d 水化热 (J/g)	7d 水化热调整系数	$k_1 \times k_2$
1	—	—	297.9	—	—
2	35	15	225.2	0.76	0.81
3	40	20	205.76	0.69	0.77
4	20	40	194.8	0.65	0.76

注 采用 P·Ⅱ42.5 水泥,水胶比为 0.40。

某大桥混凝土宽箱梁抗裂性研究的试验结果见表 A.2.0-12。

粉煤灰和粒化高炉矿渣粉对浆体水化热的影响 表 A.2.0-12

编号	粒化高炉矿渣粉 掺量 (%)	粉煤灰掺量 (%)	7d 水化热 (J/g)	7d 水化热 调整系数	$k_1 \times k_2$
1	—	—	305.6	—	—
2	10	10	270.5	0.88	0.91
3	15	15	247.0	0.81	0.88

注 采用 42.5 普硅水泥。

粉煤灰和粒化高炉矿渣粉复掺,相当于粒化高炉矿渣粉掺入到混合材中含有粉煤灰的水泥中,或者粉煤灰掺入到混合材中含有粒化高炉矿渣粉的水泥中,因此采用 $k_1 \times k_2$ 来计算粉煤灰和粒化高炉矿渣粉复掺时的水化热调整系数。由 $k_1 \times k_2$ 计算的 7d 水化热调整系数值要略大于试验实测值,这对大体积混凝土温度控制是偏安全的。

附录 C 混凝土温度及温度应力计算

C.1 混凝土内部最高温度计算

C.1.1 大体积混凝土结构内部最高温度由浇筑温度和水化热温升两部分组成。本条给出了内部最高温度的计算方法。混凝土的水化热温升与混凝土的绝热温升密切相关,通过温升折减系数确定两者之间的关系。水管间距一般为 0.5 ~ 1.5m,间距较密时折减温度取较大值,反之取较小值。

C.1.2 郭之章根据温度与温度应力的计算原理,计算给出了五种不同厚度 ($h = 1\text{m}$ 、 2m 、 3m 、 4m 、 5m) 的嵌固板中心的温度变化过程线,见图 C.1.2。采用大体积混凝土施工期温度场和仿真应力分析程序包计算不同厚度的温升折减系数 ξ 值 (环境温度 20°C , 浇筑温度 25°C , 无冷却水管), 与郭之章的计算结果比较接近。因此,给出条文表 C.1.2 的温升折减系数值。当分层浇筑时,考虑到下层混凝土传热对上层混凝土的影响,对于第二层及以上浇筑层,当已浇筑各层总厚度小于 2m 时, ξ 按本层厚度加已浇筑各层总厚度取值; 当已浇筑各层总厚度大于等于 2m 时, ξ 按本层厚度加 2m 取值。

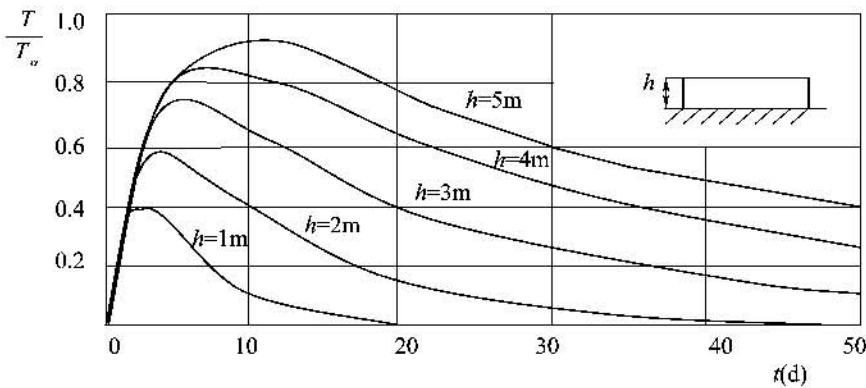


图 C.1.2 水化热引起的浇筑块中心温度变化过程线

注 纵坐标为混凝土浇筑块中心温度与混凝土最终绝热温升的比值; 混凝土导温系数 $\alpha = 0.004\text{m}^2/\text{h}$, 导热系数 $\lambda = 9.04\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 表面放热系数 $\beta = 83.74\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$

浇筑层厚度指浇筑块体的最小断面尺寸。例如墙体则指墙体厚度,柱体则为最短边长度或圆柱直径。

C.2 混凝土弹性模量计算

C.2.1 本条给出了混凝土抗压弹性模量的估算方法。朱伯芳等的研究表明,采用复合指数式表示的弹性模量模型与试验数据符合得很好,因此本规程采用了复合指数式模型。

大体积混凝土水化放热导致收缩变形, 受到约束产生的拉应力值大小与混凝土的弹性模量成正比, 而混凝土的弹性模量随龄期的增长呈非线性递增, 混凝土的最终弹性模量的大小直接影响到温度应力估算值的大小, 从而影响抗裂安全性的评价, 因此混凝土最终弹性模量应通过试验确定。掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料的大体积混凝土最终弹性模量值参见表 C. 2. 1。

大体积混凝土最终弹性模量参考值

表 C. 2. 1

混凝土强度等级	混凝土弹性模量 (MPa)	混凝土强度等级	混凝土弹性模量 (MPa)
C20	$2.8 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4$	C50	$4.2 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$
C30	$3.0 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^4$	C60	$4.8 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$
C40	$3.2 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$		

C. 3 混凝土温度应力计算

混凝土的表层拉应力主要是由内表温差产生的自约束引起的, 表层拉应力的大小取决于混凝土的线膨胀系数、内表温差、弹性模量和应力松弛作用, 参照《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91) 自约束应力的计算方法给出了表层拉应力的计算方法。

混凝土内部的拉应力主要是由混凝土内部降温受到基础约束引起的, 内部最大拉应力取决于混凝土的线膨胀系数、弹性模量、内部最高温度与稳定温差或准稳定温度之差、基础约束强度和应力松弛作用。《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 把温差 ($T_{\max} - T_w$) 分为两部分: (1) 水化热温升 T_r ; (2) 混凝土由浇筑温度 T_p 降低到最终稳定温度或准稳定温度 T_w , 相应的温差为 $(T_p - T_w)$ 。其中 $(T_p - T_w)$ 为均匀温差, 使用约束系数法计算温度应力; 水化热温升 T_r 为非均匀温差, 采用影响线法计算温度应力。郭之章对于最高温度降至稳定温度引起的温度应力与《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 的方法类似, 但对于水化热温升引起的温度应力计算给出了半经验公式, 其中均匀温差引起的温度应力计算公式与水化热温升引起的半经验温度应力计算公式不同之处在于: 水化热温升引起的温度应力计算时采用的是基础影响系数 A , 均匀温差引起的温度应力计算采用的是基础约束系数 R , 但 R 值比 A 值大。本规程为了计算简便, 并考虑到 R 值比 A 值大, 采用约束系数 R 进行简化计算安全系数更大, 所以把 $(T_p - T_w)$ 和 T_r 综合到一起, 采用温差 $(T_{\max} - T_w)$ 和约束系数 R 进行内部最大拉应力的计算。

对于基础约束系数 R , 《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 中给出了其确定方法, 但考虑到基岩的弹性模量大小一般较难确定, 而《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91) 中给出的基础约束系数的计算方法使用较为方便, 且本规程的简化设计计算经验表明, 采用《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91) 中的提供的计算方法得出的基础约束系数与工程实际吻合较好。因此, 采用该规程中提供的方法计算基础约束系数 R 。

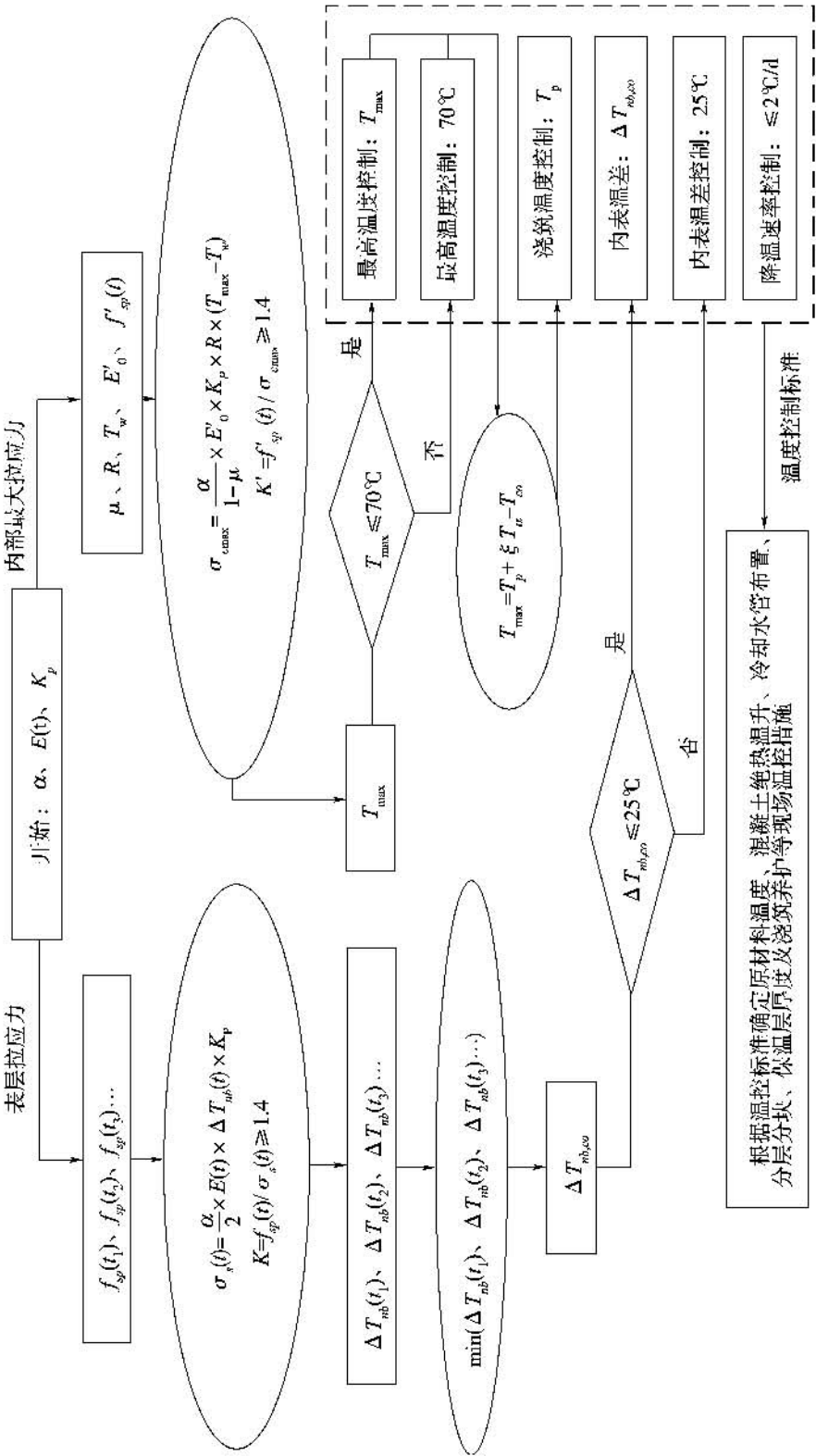


图 C.4.0 温控设计流程图

应力松弛系数 K_p 取决于加载的龄期和荷载持续的时间, 而 K_p 直接影响到温度应力估算值的大小, 因此通过试验确定。经验表明, 简化计算时参照《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 取 K_p 值为 0.5, 计算结果与有限元计算结果和应力实测值较为吻合。因此无试验资料时应力松弛系数简化计算和温控设计时可取 0.5。

C.4 混凝土抗裂安全性评价

混凝土抗裂安全性评价方法, 是参照国家现行标准《块体基础大体积混凝土施工技术规范》(YBJ 224—91) 和《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2005) 制定的。采用该方法进行大体积混凝土的温控设计(见图 C.4.0), 可以提出温控指标, 进行温度应力验算和抗裂安全性评价。

附录 D 混凝土出机口温度、浇筑温度计算

D.2 混凝土浇筑温度计算

本节给出了浇筑温度的计算方法。浇筑温度取决于混凝土的出机口温度,但考虑到混凝土出机后还受装卸、转运和运输等过程的影响,参照朱伯芳和郭之章的浇筑温度计算公式和热量损失系数,并结合工程经验给出了相关环节的影响系数计算方法。考虑到泵送施工使用的普遍性,根据已有的实际工程经验,若采用泵送,因摩擦生热,须另外考虑每百米泵送距离温度升高 $0.7 \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。

水运图书工作室



欢迎光临中国水运图书网
www.chinasybook.com

统一书号：15114 · 1536

定 价：35.00元

网上购书 / www.chinasybook.com