

三峡水利枢纽 混凝土工程温度控制研究

Study of Temperature Control
for the Three Gorges Project Concrete Engineering

《三峡水利枢纽混凝土工程温度控制研究》

编辑委员会 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

《三峡水利枢纽混凝土工程温度控制研究》

编辑委员会

主 任 张超然 郑守仁 彭启友

副主任 邓景龙 王忠诚 戴会超

委 员 薛砺生 汪安华 周厚贵 史振寰

 张小厅 吕樟顺 涂传林 陈聿伦

 洪文浩 杨宗立 张锡详 段亚辉

 许 平 何有忠 朱承军 尹庭伟

主 编 张超然

副主编 王忠诚 戴会超

前 言

水工混凝土建筑物的裂缝,不仅会影响工程外观和正常运行,还可能影响工程安全,缩短工程寿命。防止水工混凝土建筑物产生裂缝,历来是水工建筑物设计和施工的重大研究课题。由于水工混凝土裂缝大都属于温度裂缝,温控防裂成为解决问题的关键。

三峡枢纽工程混凝土总量达 2800 万 m^3 , 施工的第二阶段是混凝土工程的高峰期,混凝土浇筑总量 1846 万 m^3 , 2000 年计划浇筑混凝土量达 540 万 m^3 , 月高峰强度达 50 多万 m^3 , 其混凝土总量及浇筑强度均居世界之最。三峡大坝浇筑块体尺寸大,泄洪坝段布置有导流底孔、深孔和表孔等三层孔口;电站厂房、永久船闸、升船机等建筑物结构形式复杂,多为钢筋混凝土薄壁结构。加以三峡地区夏季气候炎热,气温骤降频繁。因而,三峡工程温控防裂任务极为艰巨。

三峡工程规模巨大,影响深远,关系我国经济和社会发展全局,是全国人民关心、全世界瞩目的跨世纪工程,必须确保一流的工程质量。朱镕基总理对三峡工程质量提出了“千年大计,国运所系”的严格要求。三峡工程温控防裂的主要目标是:尽可能地减少一般性表面裂缝,力求避免产生危害性的裂缝,特别是迎水面的劈头缝和基础贯穿性裂缝。

早在工程可行性研究和初步设计、技术设计阶段,经过长江水利委员会和有关科研单位、高等院校的多年研究和国内外专家的反复审议,已经确定了严格和合理的各项温控标准。在工程正式开工后,又在大量试验和研究的基础上,优化了混凝土的设计指标和配合比。在实践阶段,高度重视混凝土的温度控制,各混凝土拌和系统都配备了二次风冷和加冰拌和新工艺,能满足高温季节生产出 7°C 的低温混凝土的要求。

为保证混凝土的高强度施工和快速入仓,二期混凝土施工方案和主要施工设备的选型进行过长期的比较和研究,选定以塔带机为主、辅以高架门塔机、胎带机和缆机的综合机械化施工方案。1999 年三峡工程全年浇筑混凝土 458.5 万 m^3 , 月浇筑混凝土 55.35 万 m^3 , 年、月混凝土浇筑强度均创造了新的世界记录,标志着中国水利水电工程机械化施工已经达到了国际先进水平。

1999 年夏季浇筑的大坝混凝土,由于混凝土施工初期浇筑手段尚未完全形成,绝大部分位于基础强约束区,温度控制要求很严,在夏季混凝土浇筑月强度达到 40 万~45 万 m^3 的条件下,做到了混凝土出机口温度不超过 7°C , 浇筑

温度不超过 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ ，混凝土最高温度基本控制在设计要求的范围内，有效地防止了大坝混凝土产生贯穿性裂缝的风险。

永久船闸衬砌混凝土是位于强约束区的薄壁结构，相当于施工中薄层长间歇的大体积混凝土，容易产生温度裂缝，混凝土一旦开裂，裂缝的宽度较大，将影响运行安全，必须严格温控措施。

为了加强对三峡工程混凝土温控防裂的协调和管理，中国长江三峡工程开发总公司（以下简称三峡总公司）除经常邀请国内外著名专家进行咨询外，并成立了有设计、施工、监理和业主共同组成的三峡工程混凝土温控小组。温控小组定期组织例会，组织现场检查，对三峡工程混凝土温度控制进行指导和监督；修订和完善三峡工程温度控制标准，对施工中迫切需要解决的有关混凝土温控和相关质量问题组织研究。因而，混凝土浇筑温度得到了较好的控制。

本书共分十二章。第一章、第二章、第三章和第十二章资料由三峡工程混凝土温度控制小组提供，第四章、第五章、第六章由长江水利委员会设计院提供，第七章由三峡总公司技术委员会提供，第八章、第九章由武汉水利电力大学提供，第十章由成都勘测设计研究院提供，第十一章由中国水利水电科学研究院提供。本书由张超然和戴会超负责统稿和审改。

本书是三峡混凝土温度控制和相关质量方面的科研成果专著，可供从事水利工程设计、施工、管理和科研人员使用。因时间仓促，编者水平所限，难免有不妥之处，敬请读者指正。三峡工程正在建设之中，愿本书能为三峡工程建设一流的质量和提高我国水工混凝土温控技术，奉献微薄之力。

本书编委会

2000 年 7 月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 大体积混凝土温度裂缝的危害性及主要分类	1
第二节 大体积混凝土温度与温度应力	3
第三节 混凝土抗裂能力及分缝分块	4
第四节 稳定温度、基础允许温差与设计允许温度	6
第五节 混凝土浇筑温度、水化热温升与混凝土最高温度	10
第六节 内外温差、气温骤降与表面保护	12
第七节 填塘、陡坡	16
第八节 水管冷却	17
第九节 设计综合温控防裂措施	19
第二章 混凝土施工主要参数和温度控制概况	21
第一节 气温、水温 and 地温	21
第二节 混凝土原材料和耐久性	23
第三节 混凝土标号及主要设计指标	29
第四节 混凝土施工配合比	31
第五节 砂石骨料生产系统	43
第六节 混凝土生产系统	48
第七节 大坝混凝土浇筑方案及二期厂坝工程主要施工设备	57
第八节 永久船闸施工概况	62
第九节 混凝土力学、热学性能	64
第三章 温控标准与温控措施	71
第一节 大坝温控标准与温控措施	71
第二节 厂房温控标准与温控措施	82
第三节 永久船闸温控标准与温控措施	88
第四章 大坝夏季浇筑基础约束区混凝土温度研究	102
第一节 运输及浇筑过程中混凝土温度回升	102
第二节 混凝土早期最高温度计算	112
第三节 混凝土温度应力计算	118
第四节 高温季节混凝土施工温控措施	125
第五节 研究结论	129
第五章 大坝非约束区采用 3m 浇筑层厚研究	132
第一节 3m 浇筑层厚温度控制	132

第二节	3m 层厚施工工艺	144
第三节	施工机械设备配套	151
第四节	研究结论	154
第六章	左岸电站厂房“1~5 机尾水管封闭块回填研究	156
第一节	尾水管封闭块布置	156
第二节	“1~5 机下部混凝土施工情况	159
第三节	尾水管典型剖面与研究方案	160
第四节	结构计算方法	161
第五节	典型剖面施工温度荷载计算	162
第六节	尾水管肘管段典型剖面施工期结构计算分析	171
第七节	尾水管扩散段典型剖面施工期结构计算与分析	177
第八节	混凝土施工技术要求	187
第九节	研究结论	188
第七章	大坝导流底孔施工方案和温控、防裂研究	189
第一节	概述	189
第二节	泄洪坝段导流底孔施工方案	193
第三节	导流底孔施工期温控措施	195
第四节	导流底孔运转期及封堵期的温控措施	207
第五节	研究结论	209
第八章	永久船闸闸室混凝土夏季施工温控研究	210
第一节	基本资料	210
第二节	混凝土底板温度及温度应力研究	213
第三节	闸室混凝土薄边墙温度及温度应力分析	229
第四节	闸首边墙混凝土温度及温度应力分析	238
第五节	研究结论	244
第九章	永久船闸输水系统衬砌混凝土温控试验研究	246
第一节	地下工程混凝土衬砌温度控制情况	246
第二节	输水系统衬砌混凝土性能试验情况	247
第三节	输水系统现场应力与温度观测试验	248
第四节	隧洞衬砌混凝土温度应力估算	259
第五节	输水隧洞裂缝原因分析与防裂措施	261
第十章	大坝混凝土浇筑施工计算机模拟系统及其应用	263
第一节	概述	263
第二节	计算机模拟仿真系统的特点与三峡工程的管理	263
第三节	模拟系统的研制与开发	265
第四节	系统计算成果及分析	272
第五节	计算机模拟系统计算成果分析	286
第六节	研究结论	287

第十一章 大坝温控仿真反馈分析系统	289
第一节 理论基础与算法	289
第二节 考虑水管冷却效果的等效热传导方程	293
第三节 地温、日照温升与库水温度	296
第四节 弹性徐变体应力计算	300
第五节 系统简介	307
第十二章 施工温控防裂实施技术	317
第一节 原材料的优选	317
第二节 配合比的优化	318
第三节 拌和制冷	320
第四节 供料线、运输遮阳及楼前喷雾	323
第五节 仓面覆盖与仓面喷雾	325
第六节 表面养护	329
第七节 冷却通水	331
第八节 采用软冷却水管研究	334
第九节 外露面保温	350
第十节 温控综合管理	354
参考文献	357
参考资料	358
三峡水利枢纽工程简介	359

第一章 绪 论

第一节 大体积混凝土温度裂缝的危害性及主要分类

大体积混凝土的体积很大,以至需要考虑并采取措施、解决混凝土硬化过程中水泥水化的发热在块体内产生的温度变化而带来的应变与应力,使之不会发生裂缝。这是因为,混凝土的发热量虽然由其性质决定的,为固定不变的,是不会有在浇筑块内引起温度应变与应力,与所浇块体的尺寸大小有关。对小体积而言,例如断面尺寸或厚度小于数十厘米的混凝土构件,混凝土发热量很快散失,块体内部温度基本没有变化,与初始温度始终保持一致,不构成明显的温度变化,尺寸厚度大于数米,混凝土的发热因此水泥水化热基本不产生温差及温度应力。当块体尺寸很大,例如断面尺寸较大,水化热不能很快散失,而使内部温度升高,有的水化热温升可达 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ 或更高,以后又在环境温度影响下逐渐下降,块体内温度随时间不断变化,热胀冷缩的变化过程,将在块体约束条件下产生温度应力。

混凝土不同于钢材和木材,其温度变化过程中还伴随着性质的变化(主要指弹性模量),即使是早期的升温与后期降温相同,也会产生很大拉应力。因为弹性模量变化了,且随龄期不断增长,因此混凝土由早期水化热温升产生的压应力很小,而后期降温产生的拉应力很大。在分析计算混凝土块体温度应力时,由于升温阶段的压应力很小,往往被忽略不计。因此大体积混凝土一方面后期降温的拉应力很大,另一方面混凝土是抗拉强度仅为抗压强度 $1/10\sim 1/14$ 的脆性不均质体,因而抵抗温度拉应力的能力很低。

当块体温度变化产生的拉应力(或拉伸应变)大于其混凝土抗拉强度(或极限拉伸值)就要发生裂缝。裂缝的出现将损坏结构的耐久性和整体性,应尽量避免甚至不允许出现,尤其是避免发生在坝体基础部位的贯穿性裂缝和上游坝面的劈头缝。

平行坝轴线方向的基础贯穿裂缝,会改变设计的分缝分块条件,减少坝段刚度,使结构应力发生难以预料的重新组合与分布,甚至影响坝体安全。如三峡大坝左厂“1~5”坝段,其稳定问题一直被人们所关注,经反复论证,决定在上游坝踵设置齿槽等措施,以增加坝段的稳定性。如果在施工过程中,于基础约束区发生了平行坝轴线的贯穿性裂缝,就会切断齿槽与坝体的联系,不仅使齿槽失去作用,同时由于坝体的整体性被削弱,稳定问题就更加突出,甚至没有保障。

另外,发生在坝体上游面的竖向裂缝,由于其长期暴露,不断受外界气温与气温骤降的反复作用,以及蓄水后受高水头、低水温的影响,极易向纵深发展,形成很大的横向劈头缝,国内外有许多这种实例。如:我国的柘溪大头坝“1”、“2”支墩,以及美国德沃夏克坝的上游面劈头缝,都是由施工期的表面裂缝,在大坝投入运转后不断发展形成的,深度均穿过半个坝段以上,严重危害大坝安全,后期不得不花费更大力气进行处理。对三峡大坝而言,由于坝高达 181m ,蓄水后水头高、压力大,这些情况都会使上游面裂缝更具有潜在发展的危险性,必须千方百计地防止这种裂缝的发生。值得注意的是三峡大坝导流底孔和深孔,由于抗冲磨混凝土标号高,仓

面的长宽比大,如温控不力较易产生裂缝,这些裂缝在低气温和运行期高压水作用下,也同样具有向纵深发展的潜在危险,因而应重视这类结构部位的防裂。

有关部门曾组织国内有关专家,对全国大中型水电工程耐久性进行了调查,调查结果表明,影响大坝耐久性的最主要和最普遍因素是混凝土裂缝。因为坝体一旦有了裂缝,混凝土内的氧化钙就会随裂缝中的渗水析出,使混凝土强度明显降低,并加快表层风化;如果是钢筋混凝土,裂缝的存在会使钢筋很快锈蚀、断面减小直到断裂,从而使结构发生破坏。三峡大坝是“千年大计,国运所系”,既使是从大坝耐久性的角度出发,也应努力减少大坝裂缝,尤其危害性较大的基础贯穿裂缝和上游坝面的劈头缝。

在工程实践中,通常把大体积混凝土温度裂缝,按其发生的部位、原因及性质主要归纳为下列几类。

1. 基础贯穿裂缝

它位于坝块基础部位,裂缝宽度较大,深度穿过一个甚至几个浇筑层。这类裂缝一般发生于坝块后期的整体降温过程中,或长间歇的基础约束区混凝土受气温骤降及内部降温的联合作用引起的。缝宽表现为上大下小,这是由于基础约束区限制了坝块底部变形的缘故。

基础贯穿裂缝危害性较大,影响坝体的整体性与安全,防止基础贯穿裂缝是大体积混凝土温控设计主要目标。坝体一旦发生这类裂缝,必须查清原因,认真处理,消除影响并防止继续向上发展。

2. 深层裂缝

裂缝限于坝块表层,但其深度及长度较大,贯穿了整个仓面及浇筑层,由于其位于块体表面,又是从表面裂起的,也可称为表面深层裂缝。这类裂缝发生于大坝施工过程中,多为长间歇浇筑层顶面不断受气温骤降作用,或长期暴露受气温年变化构成的内外温差与气温骤降的联合作用引起的;另外如果浇筑层底部不平整成台阶状,也会引发这种裂缝。这类裂缝现场中比较常见,需根据发生的部位及裂缝危害性,坝块内温度状态及边界条件,作妥善处理,以防继续发展为基础贯穿裂缝。

3. 表面裂缝

它是大体积混凝土最常见的裂缝,分为竖向或水平向,即位于浇筑层顶面或水平施工缝上,其长度及深度一般较小,未贯通整个仓面和浇筑层。它主要发生在大坝施工过程中,多为层面间歇受气温骤降作用引起的,以混凝土龄期 6~20d 间最容易出现。

表面裂缝的危害性一般较小,但也视发生的部位及坝块内温度状态而定。如果位于基础约束区及上游面等敏感部位,且块体内部温度较高,须作适当处理,以防止它继续发展和恶化,而成为基础贯穿或深层裂缝。

4. 网状裂缝

一般发生在混凝土块体的暴露面,裂缝的形态与分布很不规则,且深度极浅,一般小于 10cm,主要是由于混凝土浇筑后养护不善造成的,尤其是高标号混凝土的表面在早期更容易出现这类裂缝。

网状裂缝主要由块体表面混凝土干缩引起的,因此混凝土浇筑后,必须及时洒水进行保湿养护,特别是高标号混凝土。虽然网状裂缝本身危害性不大,但混凝土干缩会与坝块降温收缩相叠加,共同作用产生危害性较大的裂缝。

5. 劈头缝

劈头缝是发生在坝体上游面的竖向裂缝，它虽然从性质上不能单独列为一类，但由于其发生的位置特殊，发展并带来危害的程度相当大，因此予以特别强调。

强调并单独提出劈头缝，一方面是由于这种裂缝发展的可能性很大且后果严重；同时也表明把裂缝按其发生的性质来分类是不全面的。事实上裂缝的性质可以转化而不是固定不变的，表面裂缝可以在一定条件下发展为深层或基础贯穿裂缝。因此，当对裂缝作出处理时，除根据当时裂缝情况大致区分为那一类性质裂缝外，还需要考虑块体内温度是否已经下降到足够程度，距稳定温度还有多少差距，以及块体的约束条件、暴露条件和整体性要求。也就是说，既要根据当时的裂缝性质，又要考虑今后发展的可能性和危害性，作出妥善处理。

国内外建坝经验表明，在恰当而适度的温度控制条件下，水工大体积混凝土的裂缝是可以防止的。由于种种原因仍可能发生一些裂缝，但这些裂缝主要是表面裂缝，即使出现个别深层与贯穿裂缝，通常也是由表面裂缝发展形成的。因此，防止大坝裂缝，应把防止表面裂缝和贯穿裂缝视为同等重要，尤其是坝体基础约束区及上游面。

第二节 大体积混凝土温度与温度应力

大体积混凝土温度与温度应力，是说明以混凝土水化热为内部热源的大体积混凝土，其温度与温度应力的基本概念与特点，并结合混凝土坝块加以说明。

混凝土大坝由于现有拌和设备、浇筑机械生产力限制和温控防裂的需要，通常是用纵缝和横缝（通仓浇筑只设横缝）将坝体分成柱状块（坝块）进行施工，而每个柱状块又是分层浇筑的，当所有坝块（或相关坝块）浇筑完成后，再通过强迫冷却（坝内埋设水管进行通水冷却），将各坝块内部温度降至稳定温度，对张开的纵缝或横缝通过预埋的接缝灌浆系统，进行灌浆连成整体。可见，坝体温度场中高温低温的出现，以及温度下降过程，都是在坝块内完成的。因此，本节所述大体积混凝土温度与温度应力，具体为分层浇筑情况下，混凝土坝块施工期的温度与温度应力。

1. 大体积混凝土温度

混凝土浇筑后，由水化热作用，使坝块内部温度升高。由于混凝土为不良导热体，因此其硬化过程中发生的热量绝大部分不能消散，被蕴藏于坝块内部。根据热传导规律，物体的热量传递与其最小尺寸的平方成反比，因此坝块越厚，水化热消散越慢。以两侧暴露双向散热的自由墙为例，当墙厚为 15cm，混凝土内部热量在 36h 即可基本消散于大气中；1.5m 墙厚时，同样的热量需一周方能散失；墙厚为 15m 时，储藏的热量需经 2 年才能消散完毕；像三峡大坝，底宽 150m 以上，在自然散热的条件下，内部混凝土发生的热量，需要 200 年左右才能消散完。而分层浇筑的坝块在施工期主要由顶面散热，其散热速度比墙体还慢，因此混凝土水化热绝大部分残留在坝块内，即使浇筑层厚为 1.5m，残留比（混凝土水化热温升/混凝土绝热温升）也在 0.6 左右。且由于坝块需短间歇薄层连续上升，其平面尺寸又大，散热十分缓慢，积聚在坝块内的较高温，往往依靠强迫冷却来散发。

根据热传导理论，大体积混凝土温度，是由内部热源（混凝土水化热）、初始温度（混

凝土浇筑温度)、混凝土导热系数(热传导性能)与边界条件(坝块尺寸、环境温度)确定的。因此,对同一坝块而言,除标号分区的影响外(热源不同),内部温度主要与混凝土浇筑季节有关。夏季浇筑的混凝土,由于浇筑温度高(初始温度高),又受外界高气温(边界温度高)倒灌及太阳辐射的影响,因此其温度比冬季浇筑的混凝土要高得多。另外也表明,减少混凝土的水泥用量、通水冷却、降低混凝土浇筑温度、采用薄层浇筑、改善环境温度等都能有效的降低大体积混凝土内部温度。

2. 大体积混凝土温度应力

坝块是通过一层层浇筑而成的,因此每个浇筑层的温度是坝块温度的基础。由于采用薄层浇筑(一般层厚为1.5~2.0m),每层混凝土浇筑后3~6d即出现最高温度,在短间歇连续上升的情况下,各浇筑层最高温度的连线,即可近似的视为坝块最高温度沿高度的分布。同时由于混凝土升温阶段的弹模很小,早期产生的压应力可忽略不计,因此工程实用上又是坝块最高温度作起点,计算与分析坝块的温差与温度应力。因此,坝块最高温度,在温控设计中是一项重要考察指标。

坝块到达最高温度后,在环境温度影响下,内部温度会逐渐向外消散而下降,靠近表面散热快,基本随气温变化,但向内变化幅度迅速减小。在距表面60cm处,仅反应10%的日气温变化;然而气温年度化的10%,可波及到表面以下7.5m;大于7.5m的内部混凝土散热非常缓慢,15m处,仅反应年气温变化的1%。因此坝块在降温过程中,内部温度的变化是不均匀的,既存在均匀降温,又存在非均匀降温。降温的不均匀性,主要由气温年变化引起的,虽然气温骤降也引起坝块降温的不均匀性,而且降温的幅度与梯度很大,但其影响仅限于坝块暴露面表层,作用又是短暂的,一般持续3~5d后,气温即恢复正常,坝块温度又恢复至气温年变化影响的轨道。

在大坝投入运转前,需要通过灌浆把各坝块连成整体。为了保证连接的整体性和稳定性,灌浆后块与块间的缝面不再张开,这就要求把各坝块内部温度下降到坝体稳定温度。由于坝块尺寸大,靠自然散热是不够的,还需要借人工冷却帮助降温。这样坝块从开始的最高温度到灌浆前的稳定温度,就存在一个温度变化过程与温差(最高温度减去稳定温度),这一温差可通过坝块已知有关条件,用工程实用方法或有限元计算来计算温度应力。

固体有一条基本性质,那就是热胀冷缩,混凝土坝体也不例外。因此混凝土坝块在升温时体积膨胀,降温时体积收缩,而体积膨胀(或收缩)的大小,与混凝土线胀系数(α)、温升(或降温)值及坝块尺寸大小成正比。但当混凝土坝块与其它物体相连接,其温度变化引起的体积变形(膨胀或收缩)便不能自由发生,要受到连接物体的限制,即谓受到外部约束,从而引起温度应力,如坝块降温受基岩约束就属于这种情况。另外如果坝块的温度变化在截面上的分布是非线性的,即造成坝块内部质点体积变形(膨胀或收缩)的不协调,相互约束而不能自由发生,也将在块体内引起应力,这种情况即谓受内部约束,如脱离基础约束部位坝块的内部温差及气温骤降在坝块表层引起的应力等。

第三节 混凝土抗裂能力及分缝分块

混凝土抗裂能力是指大体积混凝土抵抗(防止)温度裂缝的能力。混凝土是否产生裂

缝可以从应力或应变角度来判别。

1. 混凝土抗裂能力

如果混凝土块体因温度变化受到约束产生的应力 (σ), 大于混凝土允许抗拉强度 (R_t) 将导致发生裂缝, 反之当产生的应力明显小于混凝土允许抗拉强度, 则不会发生裂缝。用判别式表达即为

$$\begin{aligned}\sigma < R_t/K & \quad \text{防止裂缝} \\ \sigma = R_t & \quad \text{临界状态} \\ \sigma > R_t & \quad \text{发生裂缝}\end{aligned}$$

式中: K 为安全系数。

同理, 也可以从应变角度来判别, 即如果混凝土块体因温度变化受到约束产生的应变 ϵ 大于混凝土极限拉伸值 ϵ_p 将导致发生裂缝, 反之当产生的应变明显小于混凝土极限拉伸值则不发生裂缝。相应判别式为

$$\begin{aligned}\epsilon < \epsilon_p/K & \quad \text{防止裂缝} \\ \epsilon = \epsilon_p & \quad \text{临界状态} \\ \epsilon > \epsilon_p & \quad \text{发生裂缝}\end{aligned}$$

由上可知, 混凝土抗裂能力与温度应力 (应变) 的大小和混凝土抗拉强度 (极限位伸值) 有着密切关系。下面对影响混凝土抗裂能力因素提出以下几点认识:

(1) 混凝土的干缩变形及应力都很大, 但主要发生在混凝土表面 10cm 以内, 因此对水工大体积混凝土内部温度应力计算, 可不予考虑; 但对大坝表面必须进行严格养护, 基本消除干缩的影响。

(2) 混凝土自生体积变形的影响因素十分复杂, 主要与水泥品种、混合材和骨料等有关。当混凝土自生体积变形为膨胀受约束产生压应力, 收缩则产生拉应力, 为有利于防止裂缝, 希望混凝土自生体积变形不收缩, 最好能有一定的微膨胀。

(3) 影响温度应力的因素中, 泊松比 μ 值一般变化不大, 为 1/6 左右; 弹模 E 越高一般徐变效应越小, 温度应力越大; 线膨胀系数 α 越大温度应力越大, 其主要与岩石类别有关, 如石灰岩的 α 值仅为花岗岩的 3/4 左右; 混凝土坝块的温度降低值越大, 温度应力越大, 而降温值为其最高温度与稳定温度之差, 所以影响坝块最高温度的混凝土浇筑温度和水化热温升越高, 温度应力就越大。

(4) 混凝土抗拉强度或极限拉伸值越高, 其抗裂能力也越高。因此改善混凝土性质、提高混凝土质量, 就意味着改善与提高混凝土的抗裂能力。

从大体积混凝土施工过程分析, 影响混凝土质量波动的因素有原材料、配合比、拌和、浇筑和养护等。如把混凝土质量作为随机变量, 则经统计分析可以看出, 混凝土质量越均匀, 其离散程度就越小, 即离差系数越小 (或称均方差越小)。此外还需使有一定离散程度的混凝土质量, 满足设计要求的保证率。由于坝块裂缝往往是在温度应力较大处或混凝土质量薄弱处发生, 所以提高混凝土质量的均匀性, 无疑将有利于提高混凝土的抗裂能力。这就是为什么大型水电工程要把混凝土施工质量均匀性指标 (离差系数和保证率), 也作为混凝土抗裂能力一个主要方面的原因。

综上, 混凝土抗裂能力是受混凝土干缩、自生体积变形、弹模、徐变、线膨胀系数、浇

筑温度、水化热温升、抗拉强度（极限拉伸值）等诸每因素制约的一个综合性指标。从理论上讲，混凝土干缩较小，自生体积变形不收缩或有微膨胀、混凝土弹模较低、徐变度较大、线膨胀系数较小、浇筑温度和水化热温升较低、抗拉强度较高、施工质量均匀性较好的混凝土，其抗裂能力就较高。然而实际上由于上述影响因素中有的互相制约，所以很难寻求到一种各项因素均最优的混凝土，在设计和施工中通常作法是结合具体工程和自然条件，尽量利用有利于混凝土抗裂能力的因素，避免或改变不利混凝土抗裂能力的因素，以求实际的混凝土抗裂能力满足设计要求。

2. 分缝分块

分缝分块是指通过设计，有计划的用纵缝和横缝将大坝整体分成许多柱状块进行浇筑。这样做一方面是由于受混凝土初凝时间及浇筑设备的制约，限制每次混凝土浇筑面积及方量不能太大；更主要的是因为混凝土浇筑时块体内部温度升高，以后受环境温度作用还要下降到稳定温度，这一温度变化将在坝体内引起温度应力，且浇筑块尺寸越大温度应力也越大，需要采取分缝分块使温度应力得到必要的释放，以利混凝土防止裂缝；此外不同基岩承受坝体荷载后的沉降量不同，也可能导致裂缝，需在不同岩基分界处设沉降缝，以适应地基不均匀沉降。因此，对大坝进行合理的分缝分块，可以避免混凝土浇筑出现初凝、减少温度裂缝和适应地基不均匀沉降。

坝体内分缝可分为横缝、纵缝和水平施工缝。

横缝有两种，为温度收缩和沉降缝。温度横缝有永久性和临时性两种，永久性横缝内不灌浆，临时性横缝需灌浆，并设有键槽。大坝采用横缝划分为坝段。

纵缝方向与坝轴线平行，缝面设键槽能传递压应力和剪应力，需对纵缝进行灌浆，以保证坝体整体性。大坝采用纵缝将坝段再划分为坝块或仓。

大坝被纵、横缝分为坝块后，再由低至高分层浇筑上升。由于分层和层间间歇，就形成了水平施工缝。坝块被水平缝划分为浇筑层。水平施工缝必须认真处理，保证质量。

在坝体内设置纵横缝，称柱状法浇筑。创建这种筑坝方法已有半个世纪的历史，至今沿用并不断发展和完善。总结起来，横缝间距一般取为 15~25m，始终变化不大。横缝间距所以始终保持在 20m 左右，主要因为坝体上下游面为永久暴露面，施工期受气温变化的影响，运转期要受水头及低水温的作用，从防止劈头缝的角度考虑，不宜放大横缝间距。早期建坝纵缝间距采用较小，如美国胡佛坝为 9.2m，大古力为 15.2m，以后随预冷混凝土与温控技术的发展，纵缝间距逐渐放大，一些大坝甚至采用了不设纵缝的通仓浇筑方法。

关于纵向分缝，是采用通仓浇筑，还是设置纵缝，且设几条纵缝为宜，需要通过技术经济比较分析决定。

第四节 稳定温度、基础允许温差与设计允许温度

1. 稳定温度

稳定温度是指大坝建成投入运转后，施工期温度（初始温度、混凝土水化热温升）的影响已经消失，在环境温度（坝区气温、上游库内水温、下游河水温度）作用下，最终达到而又处于长期不变的温度状态。虽然坝体在运转期与其表面接触的气温与水温是随时间

变化的,但影响深度不超过 15m,对占坝体绝大部分的中部区域温度,将不受外界气温与水温的变化影响(只决定于年平均值),而处于稳定状态。由此可见,对高大的实体重力坝,总存在稳定温度场;而对厚度或高度较小的结构,整体温度都在变化的气温与水温影响范围以内,即不存在稳定温度,而处于年复一年的重复循环变化之中,即谓准稳定温度,如三峡水利枢纽中的永久船闸室侧墙、底板以及厂房尾水管等。

稳定温度是分析坝体内部温差与温度应力的最终下限温度,基础温差控制就是相对稳定温度而言。因此稳定温度的合理确定非常重要,直接影响到大坝温控及冷却灌浆的温度要求。

影响坝体稳定温度的主要因素是坝体结构尺寸与运转期边界条件,而其中又以坝体上游面水温的变化与分布最难确定。通过大量国内外实测资料对比分析及考虑三峡水库调节的特点,经反复论证与专家审查,取三峡大坝稳定温度的边值条件如下:

(1) 上游库底多年平均水温为 14°C 。垂直分布采用折线变化,即水面 175m 高程为 18°C ,直线变化至 107m 高程为 14°C ,107m 高程以下保持 14°C 不变。

(2) 下游水面 (76.4m 高程) 的平均水温为 17°C ,河床底部 (10m 高程) 的平均水温为 15°C ,其间为直线变化。

(3) 多年平均气温为 17.3°C ;下游坝面受太阳辐射影响的平均升温值为 4.5°C 。

(4) 水库蓄水后,在地基 150m 深处的地温为 17°C 。

在上述边值条件下,通过计算得三峡泄洪坝段及厂房坝段典型剖面的稳定温度场如图 1-4-1~图 1-4-4 所示。

2. 基础允许温差

基础允许温差 ($[\Delta T]$) 是基础温差 (ΔT) 的最大允许值,即基础温差的一个特定值,为说明其概念,就需要把它同基础温差一道叙述。

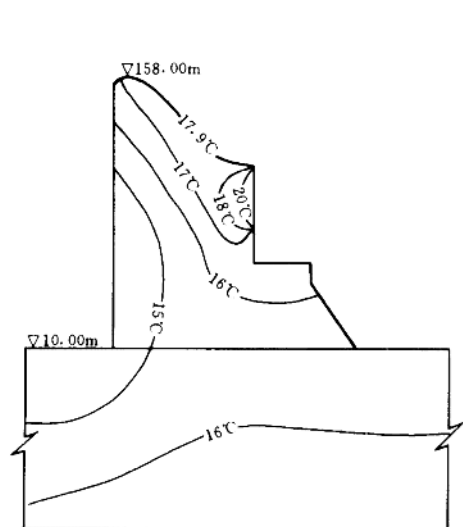


图 1-4-1 泄洪坝段典型剖面稳定温度场 (表孔)

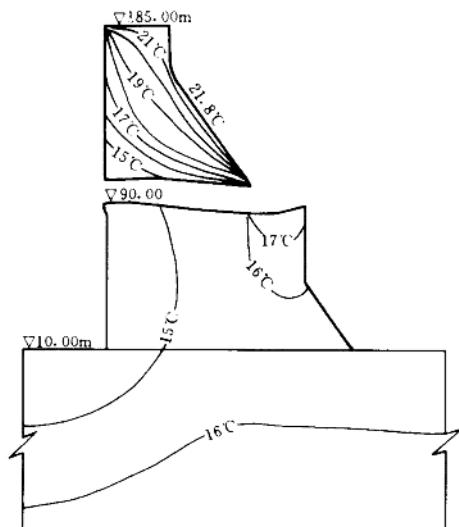


图 1-4-2 泄洪坝段典型剖面稳定温度场 (深孔)

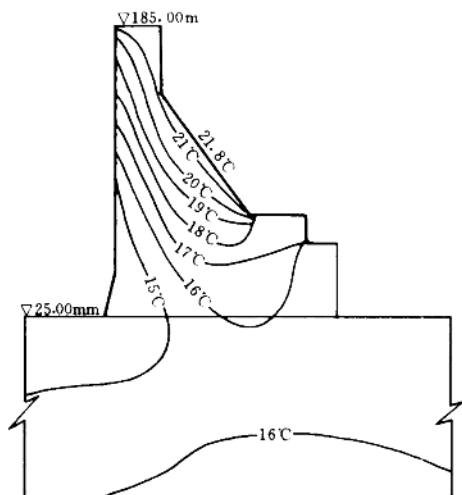


图 1-4-3 厂房坝段典型剖面稳定
温度场 (实体坝段)

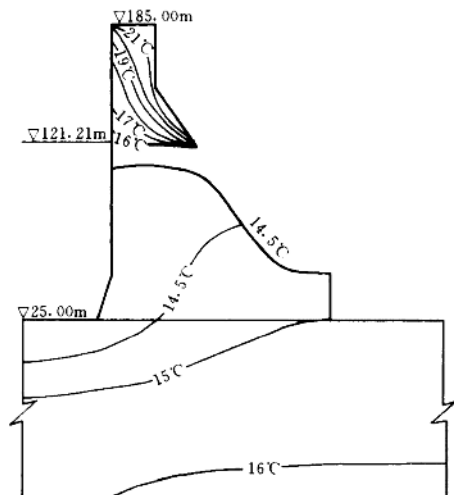


图 1-4-4 厂房坝段典型剖面稳定
温度场 (钢管坝段)

控制基础温差的目的,是防止浇筑块基础部位施工期温度过高,降温受基岩约束产生较大温度应力,而导致基础贯穿裂缝。所以控制(或称限制)基础温差也就是限制浇筑块基础部位的温度应力。因此应该按浇筑块的强度条件定出基础温差的最大允许值,这样得出的基础温差即称为基础允许温差。

基础温差是指浇筑块基础部位(高度为 $0 \sim 0.2$ 浇筑块底宽的范围)的最高温度与相应区域内稳定温度之差,其值为

$$\Delta T = T_M - T_f = T_p + T_r - T_f \quad (1-4-1)$$

式中: ΔT 为基础温差; T_M 为浇筑块基础约束区的最高温度; T_f 为浇筑块基础约束区的稳定温度; T_p 为混凝土浇筑温度; T_r 为混凝土水化热温升。

由于在计算基础温差中一般假定基岩内温度始终保持稳定不变,因此也可以把基础温差理解为:浇筑块基础部位从最高温度下降到稳定温度时,相对于基础的降温量(温差)。其中的最高温度,通常取为浇筑块内基础约束区层最高温度的平均值,也可以取为该区域内点最高温度的平均值,但稳定温度与最高温度的取法应一致。

所谓按浇筑块的强度条件求出基础允许温差,即为:当浇筑块在基础温差作用下,基础约束区产生的拉应力(或拉伸应变)等于混凝土强度(或极限拉伸值);或换种说法,即设浇筑块混凝土强度等于某温差在基础约束区引起的温度应力,反求出温差,这一温差即为基础允许温差。它的物理意义是:当浇筑块基础约束区实际发生的温差,小于等于基础允许温差时,其相应引起的温度应力就小于等于混凝土强度;当实际温差大于基础允许温差时,其引起的应力将大于混凝土强度,是浇筑块强度条件所不允许的。

基础允许温差与浇筑块的混凝土材料性能(混凝土强度、极限拉伸值、徐变、线胀系数、自生体积变形)、尺寸(反映在基础约束系数内)、防裂要求(反映在安全系数内)、混

凝土施工质量（反映在混凝土离差系数及保证率内）以及基岩弹模（反映在基础约束系数内）等有着密切关系，因此它是一个受诸多因素影响的控制指标，需要通过全面分析并参照规范来确定。

我国 SDJ21—78《重力坝设计规范》规定，当基础混凝土 28d 龄期的极限拉伸值不低于 0.85×10^{-4} 时，对施工质量均匀、良好，基础与混凝土的弹性模量相近，短间歇均匀连续上升的浇筑块，基础允许温差一般采用表 1-4-1 值。

表 1-4-1		基础允许温差				单位: $^{\circ}\text{C}$
距基础面高(h)	浇筑块长度(L)	16m 以下	17~20m	21~30m	31~40m	通仓浇筑
	0~0.2L	26~25	24~22	22~19	19~16	16~14
	0.2~0.4L	28~27	26~25	25~22	22~19	19~17

结合三峡工程参照规范时需注意：①三峡大坝基岩弹模高，为 45GPa 左右，而混凝土设计龄期的弹模约为 30GPa，基岩对浇筑块的约束程度相对较大；②规范值是以单个浇筑块降温为对象提出的，当考虑相邻浇筑块降温的互相影响时，要适当从严；③规范中未考虑混凝土自生体积变形，当混凝土自生体积为微膨胀，计入其补偿收缩作用，可适当放宽；④三峡为特大工程，要采用较高的安全系数。

3. 设计允许最高温度

设计允许最高温度是浇筑块最高温度的最大允许值，然而它在温控上并不是一个独立的指标，它来源于温差控制，是实现温差控制的具体体现与手段。因为温度场变化才产生温度应力，因此大体积混凝土的温度控制是控制温差，如基础温差、内外温差、上下层温差控制等。但控制温差不易现场具体操作与检查，最好是把温差控制转换为最高温度控制，所以设计允许最高温度实质上是允许温差的反映与体现。

设计允许最高温度可来自基础温差、内外温差或上下层温差，但出自不同温差，反映与满足不同要求。如由基础温差转换而来的设计允许最高温度，是反映与控制浇筑块满足基础允许温差的要求；而脱离基础约束区的设计允许最高温度，是由允许内外温差转换得出的，反映与满足内外温差的要求。当然对于基础约束区，可分别转换提出反映基础温差与内外温差要求的允许最高温度，比较选择其中较低者作控制。

当通过分析，浇筑块的基础允许温差已被确定，那么即可算出基础约束区的设计允许最高温度

$$[T_M] = [\Delta T] + T_f \tag{1-4-2}$$

如：某浇筑块基础允许温差为 15°C ，稳定温度在基础约束区为 16°C ，则设计允许最高温度即为：

$$[T_M] = 15 + 16 = 31^{\circ}\text{C} \tag{1-4-3}$$

同样，对脱离基础约束区及老混凝土上浇筑，都可以分别通过允许内外温差与上下层允许温差，得出设计允许最高温度，详见有关参考文献，这里不作阐述。

第五节 混凝土浇筑温度、水化热温升与混凝土最高温度

前面已叙述了为什么要控制设计允许最高温度，以及如何确定设计允许最高温度。本节将叙述怎样在施工中控制坝块实际最高温度，来满足设计允许的最高温度。

水工大体积混凝土的施工过程主要可分为：原材料储运——混凝土拌和——混凝土运输——仓面作业（平仓、振捣等）——冷却与养护——新浇混凝土再行上升。

从施工过程可以了解到与混凝土拌和密切相关的是混凝土出机口温度，它是混凝土拌和好之后倾卸出拌和机口时的温度，为组成混凝土的五种原材料（石、砂、胶凝材料、水、外加剂）在拌制中热量平衡的混凝土拌和物温度。混凝土拌和出机口后经水平和垂直运输，要与外界气温等进行热传导，卸入浇筑仓内时称为混凝土入仓温度。混凝土入仓后摊铺、平仓、振捣成约 50cm 厚混凝土坯，随后暴露在环境温度下一段时间后才能覆盖，在混凝土入仓后至混凝土上坯覆盖期间进行热传导，通常将上坯混凝土覆盖时下坯混凝土在距表面深度为 5~10cm 处的温度称为混凝土浇筑温度。

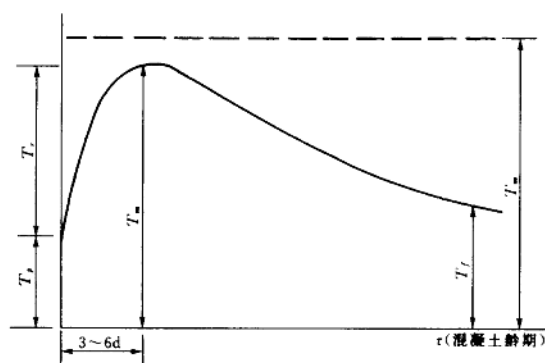


图 1-5-1 典型混凝土坝块内部温度过程线示意图

T_p 为混凝土浇筑温度； T_0 为混凝土水化热温升；

T_m 为混凝土实际最高温度； T_f 为大坝稳定温度；

$[T_m]$ 为混凝土设计允许最高温度

采用上述平仓、振捣作业浇筑混凝土，当浇筑层厚达到设计规定的 1.5~2.0m 后，必须停歇一段时间，以便浇筑层充分利用顶面向空气（或环境温度）散发热量，必要时还可通过浇筑层内埋设的蛇形水管，通冷水带走混凝土内部热量。由于胶凝材料水化热一般随时间衰减较快，在一定的层厚或水管等散热条件下，会在 3~6d 左右形成一个温度高峰，之后随着水化热衰减加剧，温度渐次降低。典型的大坝混凝土内部温度过程如下图 1-5-1 所示。图中纵坐标为温度 T ，横坐标为时间 τ 。

从图中可以看出混凝土最高温度基本由混凝土浇筑温度和混凝土水化热温升两部分组成。因此控制坝块实际最高温度可以通过控制混凝土浇筑温度与混凝土水化热温升两个方面来实现。

混凝土浇筑温度可以通过以下主要措施来控制。

1. 控制出机口温度

控制混凝土原材料温度和利用冰的融解热可以有效控制出机口温度。混凝土原材料中的水泥一般难以采用降温措施。拌和用水可采用制冷水 2℃ 左右，但所占权重小，影响很小。砂石用量占混凝土的权重最大，常采用净料堆存高度大于 5m 的措施，使沙、石温度趋近或略高于旬平均气温。由于预冷沙的技术较复杂，因此常用的最有效的措施是预冷粗骨料至