

水电工程大体积混凝土温度 裂缝控制及实例分析

Thermal Crack Control in Mass Concrete and Case Study of Hydropower Projects

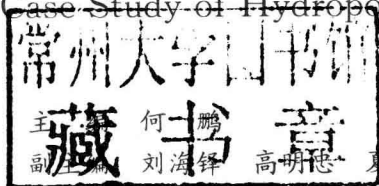
编：何 鹏

海铎 高明忠 夏明建 董建华

中国建筑工业出版社

水电工程大体积混凝土温度裂缝 控制及实例分析

Thermal Crack Control in Mass Concrete and
Case Study of Hydropower Projects



夏明建 董建华

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

水电工程大体积混凝土温度裂缝控制及实例分析/何鹏主编.
北京:中国建筑工业出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-112-15197-4

I. ①水… II. ①何… III. ①水利水电工程-大体积混凝土施工-裂缝-温度控制 IV. ①TV544

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041497 号

水电工程大体积混凝土温度裂缝
控制及实例分析

Thermal Crack Control in Mass Concrete and
Case Study of Hydropower Projects

主 编 何 鹏

副主编 刘海锋 高明忠 夏明建 董建华

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 4 $\frac{5}{8}$ 字数: 123 千字

2013 年 5 月第一版 2013 年 5 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978-7-112-15197-4
(23288)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

大体积混凝土在施工过程中，由于混凝土中水泥的水化放热反应，造成混凝土内部温升幅度要比表面温升大；而在混凝土升温峰值过后的降温过程中，内部降温速度又比表面慢。在上述过程中，混凝土各部分的热胀冷缩(称为温度变形)及相互约束，加上边界的约束作用而使混凝土内部产生的应力(称为温度应力)状态则相当复杂。一旦温度应力超过混凝土的拉力极限值时，混凝土就会出现裂缝，影响结构的安全性、适用性和耐久性等。

藤子沟水电站混凝土拱坝经多次检查，混凝土体中基本未出现通常意义上的宏观裂缝(宽度 $>0.2\text{mm}$)，这在同类工程中是十分少见的，说明所采取的防裂缝工程技术措施成效显著。因此，作者根据大坝施工及运行期间的监测资料，对其混凝土施工环节进行了回顾、总结，以期找出该工程混凝土施工质量优良的内、外原因，以为今后的同类工程施工提供有益的借鉴。

本书与以往类似研究相比，有所不同的是：

(1) 深入地研究了骨料的岩矿特性、料场的地质特征、坝址区的工程地质条件对坝体混凝土开裂的影响。

(2) 加强了温度场以及温度应力场的数值模拟计算。基于所采用的混凝土材料特性、配合比、温控措施等计算条件，通过数字模拟计算，所求得의藤子沟大坝混凝土体内的水化热最高温升值未超出设计要求；计算最大拉应力为 0.3MPa ，小于同龄期的混凝土抗拉强度 1.46MPa 。

(3) 通过敏感性分析，认为：①浇筑温度对混凝土中心最高温度影响比较大，大约浇筑温度每降低 1°C ，混凝土中心最高温度随之降低 1°C ；②冷却水温度对混凝土中心最高温度影响相对较小，大约冷却水温度每降低 1°C ，混凝土中心最高温度仅降低

0.1℃；③冷却水温度变化对混凝土中心温度影响虽不大，但当完全不加冷却水时，其温度将有大幅度上升，最高可升至46℃。

(4) 认为在秉承传统温控措施设计的基础上，还应加强施工前混凝土体水化热温升过程的三维有限元模拟计算。

在回答了藤子沟工程混凝土浇筑质量良好原因的同时，本书提出了变被动温度控制为主动温度控制的工程管理思路。作者所谓的被动控制，即混凝土浇筑施工的各个环节均严格按照现行相关规范执行，这从施工工艺、技术的层面保障了施工的质量。但除了从少量的监测仪器上获得一些独立信息外，对混凝土浇筑后的内部温度以及温度应力的连续演变过程却不甚清楚。因此，在这样一种工程管理模式下，施工质量的预期只是建立在较为盲目的对规范严格执行的程度上。但是，土木工程施工环境千变万化，现行技术规范不能穷尽所有的问题。在此情况下，如果对温度控制的各个要素的影响程度、相互间的关联了解不够深入，则可能导致某项控制工作的力度过大造成浪费，或某些方面的工作不力而出现失误，或在出现预期以外的结果时显得无所适从，无所准备。

藤子沟工程参建各方在大坝混凝土浇筑施工过程中基本沿袭作者所谓的被动控制工作模式，因此，在施工前并未对如此大规模混凝土浇筑工程裂缝控制的效果有充分的预见，以至于仍将大坝浇筑成型并经过一段时间的运行后未发现明显裂缝的现象视为少见的工程奇迹，说明参建各方对施工过程中所采取的一系列温控措施仍带有一定的不确定性，对将要得到的施工结果缺乏必要的思想准备，从另一个侧面也说明当初的温控设计的针对性不够强，这也是通过总结得出的工程管理不够完善之处。

而主动温度控制强调全过程的温度、温度应力数值模拟计算，不同计算阶段的结果可以用于温度演变预测，对拟采用的温度控制措施的效果进行提前预演，以及在异常情况出现时为调整正在实施的温控措施提供指导。因此，主动温度控制较之于被动控制的不同就在于：①可以提前预知不同施工条件下大体积混凝

土体内部的温度以及温度应力状态；②可以检验将要采取的措施的可靠性和灵敏性，找出关键的温度控制因素；③即使是在施工过程中，也可在模拟计算中快速确定某些变化发生时对混凝土温度及温度应力状态将要带来的影响及程度，应对措施也将因此而更加的有针对性；④由于对未来预期较为明确，传统施工过程中措施过度或不及的诟病有望得到有效的缓解。

本书相关工作是四川大学水电学院与中国水利水电第五工程局有限公司科研所合作完成的，参编者刘海铎高工、高明忠博士、夏明建高工、董建华博士为此付出了辛勤的汗水，其间也得到了梁川教授的帮助和指导。

由于作者水平有限，书中难免有缺点与错误，恳请读者批评指正。

目 录

1 综述	1
1.1 混凝土裂缝类型及成因	1
1.1.1 按发展深度和范围的分类	1
1.1.2 按产生的时间段分类	2
1.2 大体积混凝土温度裂缝控制研究现状	4
1.3 目前常用混凝土裂缝控制方法	7
1.3.1 温度控制的理想状态及现实	7
1.3.2 降低骨料温度,控制混凝土入模温度和浇筑温度	8
1.3.3 合理选择原材料,优化混凝土配合比	9
1.3.4 加强混凝土的温度监测工作	10
1.3.5 加强混凝土的保温与养护	10
1.3.6 对温度及温度梯度的控制	11
1.3.7 从管理角度重视温控措施	12
1.4 本项研究工作的目的	13
1.4.1 研究技术路线	13
1.4.2 实施方案	13
1.5 本项研究工作与当前国内外同类研究工作的比较	16
2 藤子沟工程骨料特性研究	20
2.1 藤子沟工程人工骨料砂岩矿物构成及定名	21
2.1.1 岩石的矿物组成及组分定名	21
2.1.2 岩石碎屑粒度分析及综合定名	22
2.2 骨料砂岩的热学性质及其对混凝土抗裂性能的影响	24
2.2.1 骨料砂岩的比热容	24

2.2.2	骨料砂岩的导热系数	26
2.2.3	骨料砂岩的热扩散率	28
2.2.4	骨料砂岩的热膨胀系数	28
2.2.5	藤子沟骨料砂岩热学性质综述	31
2.3	骨料砂岩理化特性及其混凝土性能的影响	32
2.3.1	最大粗骨料粒径对水泥用量的影响	32
2.3.2	骨料粒径对混凝土自生收缩的影响	32
2.3.3	粗骨料形状对混凝土性能的影响	33
2.3.4	粗骨料不良物质含量评价	37
2.3.5	骨料砂岩表面的亲水性对混凝土强度的影响	42
2.4	粗骨料级配及对混凝土性能的影响	42
2.4.1	不同级配骨料的密度和空隙率	43
2.4.2	粗骨料级配对混凝土和易性的影响	43
2.4.3	粗骨料级配对混凝土力学性能和耐久性的影响	44
2.4.4	粗骨料级配与水泥用量	45
2.4.5	藤子沟工程大坝混凝土粗骨料级配评价	46
2.5	本章小节	46
3	藤子沟工程所用水泥、粉煤灰和外加剂质量评价	48
3.1	水泥	48
3.1.1	混凝土工程中常用水泥主要品种及特性	48
3.1.2	水泥使用原则	49
3.1.3	藤子沟工程所用水泥主要技术性质检测结果	51
3.2	粉煤灰	55
3.2.1	粉煤灰对混凝土性能的影响	55
3.2.2	粉煤灰的物理性质	56
3.2.3	粉煤灰的化学特性	58
3.2.4	粉煤灰的掺用方法	60
3.2.5	粉煤灰最佳掺量选择	61
3.3	外加剂	61
3.3.1	常用的外加剂类型	61

3.3.2	藤子沟工程所用引气剂评价	62
3.3.3	藤子沟工程所用缓凝高效减水剂	64
3.3.4	外加剂的掺加方法	67
3.4	本章小节	68
4	混凝土配合比的合理性评价	70
4.1	原材料选择原则	70
4.2	混凝土配合比设计过程	71
4.3	混凝土性能试验结果	72
4.3.1	不同原材料对陷度的影响	72
4.3.2	不同原材料对混凝土干缩和自生体积变形的 影响	73
4.3.3	不同原材料对混凝土线膨胀系数的影响	76
4.3.4	不同原材料对极限拉伸的影响	77
4.3.5	不同原材料对劈裂抗拉强度的影响	78
4.4	本章小结	79
5	混凝土浇筑块温度-应力耦合计算	80
5.1	有限单元法简介	80
5.2	有限元分析软件 ANSYS	81
5.2.1	ANSYS 分析温度场的本质	82
5.2.2	ANSYS 热分析单元类型	83
5.2.3	ANSYS 热分析特点	83
5.3	引用经验公式介绍	84
5.3.1	水化热随龄期变化公式	84
5.3.2	弹性模量随龄期变化公式	85
5.3.3	抗压强度随龄期变化公式	85
5.3.4	抗拉强度随龄期变化公式	86
5.4	参数选取及计算边界条件的确定	87
5.4.1	计算参数	87
5.4.2	分析模型	87
5.4.3	边界条件	88

5.5	计算成果	89
5.5.1	温度场计算成果	89
5.5.2	温度应力计算成果	92
5.5.3	温度裂缝预测	94
5.6	混凝土浇筑块温度-应力计算成果小结	97
6	混凝土浇筑块温度影响因素敏感性分析	99
6.1	基本方法	99
6.2	敏感性分析成果	100
6.3	敏感性分析小结	101
7	混凝土施工措施评价	102
7.1	控制出机口温度	103
7.2	控制浇筑温度	104
7.3	布置冷却水管	105
7.4	养护	107
7.5	温度实时监测	109
7.6	本章小结	109
8	藤子沟混凝土工程常规温控方法总结及未来温控 工作思路	112
8.1	参建单位及工程管理	113
8.1.1	参建单位及选定	113
8.1.2	参建单位的工程管理措施	114
8.2	先进的施工设备	114
8.3	优良的混凝土浇筑材料	115
8.4	合理的混凝土配合比设计	116
8.5	科学合理的混凝土施工方法及有效的降温 措施	117
8.5.1	科学合理的混凝土施工方法	117
8.5.2	有效的降温措施	118
8.6	优越的施工区自然地理及工程地质环境条件	119
8.7	对未来混凝土施工温控工作的启示	120

8.7.1 藤子沟大坝混凝土施工质量缺乏预见性	120
8.7.2 提高大体积混凝土施工质量预见性的技术措施	121
8.7.3 提高大体积混凝土施工质量预见性的管理措施	123
附图	125
参考文献	128

1 综 述

1.1 混凝土裂缝类型及成因

混凝土裂缝的成因十分复杂，包括混凝土的不均匀沉陷、物理干缩、内外温差、外部荷载、基础及老混凝土的约束以及结构形式等^[1]。由于本书的侧重点在于混凝土温度及温度应力引发的裂缝，因此，以下的对混凝土裂缝的成因分类仅围绕温度成因进行。

1.1.1 按发展深度和范围的分类

按其发展深度和范围可分为三类：表面裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝^[1]。

混凝土浇筑初期升温阶段，水泥水化产生大量水化热，使混凝土温度很快上升，混凝土表面散热条件较好，热量可向大气中散发，温度上升较少；混凝土内部由于其传热系数较小，热量散发较少，温度上升较多，这样就形成了内外温度梯度，导致内约束，其结果是表面产生拉应力，如果此时产生的拉应力大于混凝土当时抗拉强度，就会在混凝土表面产生表面裂缝，如图 1.1 所示。混凝土表面裂缝虽不属结构性裂缝，但表面裂缝削弱了结构断面，造成了应力集中现象，当混凝土产生收缩时，容易使裂缝进一步扩展。



图 1.1 表面裂缝

受基础或下层混凝土约束范围内的混凝土，在浇筑后的最初阶段，由于水泥的水化释放水化热，导致温度上升、体积膨胀。

由于混凝土的升温膨胀受到约束而产生了压应力，如图 1.2 所示。但因早期混凝土弹性模量和强度较低，受压时产生较大的塑性变形而出现应力松弛现象，因此压应力的数值不大，对内部混凝土基本上不产生影响。

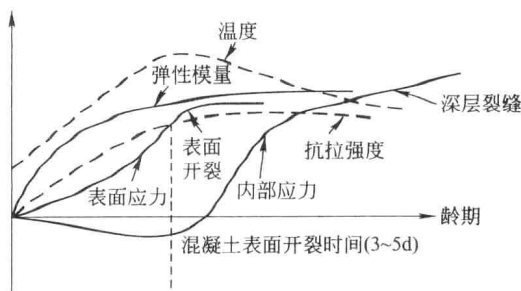


图 1.2 混凝土弹性模量及应力随龄期变化曲线

在降温过程，混凝土体积收缩，由于混凝土内部热量是通过表面向外散发的，降温阶段混凝土温度场的分布仍是中心温度高，表面温度低的状态，因此，混凝土中心部分与表面部分的冷却程度不同，在混凝土内部产生较大的内约束，同时，基础或下层混凝土也对收缩的混凝土产生较大的外约束，内外约束的作用使收缩的混凝土产生拉应力。当混凝土中的拉应力超过当时的混凝土抗拉强度时就引起混凝土的深层裂缝，如图 1.3 所示。这种裂缝有时会贯穿全断面，成为贯穿裂缝，带来严重的危害。

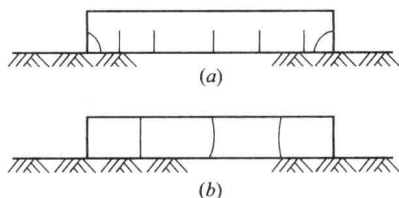


图 1.3 混凝土裂缝
(a)深层裂缝；(b)贯穿裂缝

1.1.2 按产生的时间段分类

按产生的时间段混凝土裂缝可分为硬化前裂缝和硬化过程裂缝。

(1) 混凝土硬化前裂缝

混凝土硬化前裂缝包括塑性收缩裂缝和塑性沉降裂缝。

① 塑性收缩裂缝。塑性收缩是指混凝土在凝结之前，表面因失水较快而产生的收缩，大都出现在较薄的结构中。这种裂缝出现的时间较早，一般混凝土在初凝前就已经开始发生；若不加以处理和养护，局部裂缝将会贯穿整个混凝土结构。

② 塑性沉降裂缝。混凝土在初凝前，处于一种自由状态，虽经过振动器械的振捣，内部的空隙大部分排除，但在混凝土内部骨料自身重量的作用下仍会缓慢下沉；若是素混凝土，内部的下沉大致是均匀的；若是钢筋混凝土，其内部的粗骨料下沉会因为钢筋或其他埋件的存在而受阻，这样会在钢筋或埋件周围形成裂缝。

(2) 混凝土硬化过程(含硬化后)裂缝

混凝土硬化过程中产生的裂缝主要有：温度裂缝和干缩裂缝等。

① 温度裂缝。温度裂缝产生的主要原因是由于温差较大引起的，混凝土结构在硬化期间水泥放出大量水化热，内部温度不断上升使得混凝土结构发生膨胀，但表面的温度和内部相比较低，因此混凝土内部膨胀高于外部，从而在混凝土内部产生压应力，在表面产生拉应力，而混凝土的早期抗拉强度很低，因而易出现裂缝。这种裂缝的特点是裂缝出现在混凝土浇筑后的 3~5d，初期出现的裂缝很细，随着时间的发展而继续扩大，甚至达到贯穿的情况。

② 干缩裂缝。对于混凝土材料，水在水泥石中是以化学结合水、层间水、物理吸附水以及毛细水等状态存在，当这些水在混凝土硬化过程中失去时，混凝土内的固体水泥浆体体积会随含水量的减小而产生收缩，称为干缩。目前，混凝土干燥收缩的机理尚不完全清楚，一般认为是干燥时混凝土内的孔隙水拉力发生变化，胶凝体粒子的表面张力增加，胶凝体内的膨胀蒸汽压力减小和层间水渗出的综合结果。当这种干缩受到地基或混凝土内部

骨料的约束时,便会产生拉应力,当拉应力超过抗拉强度时就产生干燥收缩裂缝。

1.2 大体积混凝土温度裂缝控制研究现状

按照美国混凝土协会的界定,所谓的大体积混凝土,指的是当尺寸达到一定程度后,为了最大限度地减少开裂,需要采取措施以应对水泥水化热及其伴随的体积变化的混凝土体^[2]。

大体积混凝土区别于结构混凝土的最为重要的特征就是其热学性质。大体积混凝土施工过程中,由于混凝土中水泥的水化作用是放热反应,大体积混凝土本身又具有一定的保温性能,因此,其内部温升幅度要比表面温升大得多;而在混凝土升温峰值过后的降温过程中,内部降温速度又比表面慢。在这些过程中,混凝土各部分的热胀冷缩及由于其相互约束及外界约束作用而在混凝土内产生的应力状态则相当复杂。一旦温度应力超过混凝土的拉力极限值时,混凝土就会出现裂缝,影响结构的安全性、适用性和耐久性。

大多数结构混凝土施工过程中,由水泥水化而生成的热量中的绝大部分会很快消散,由此而形成的混凝土内外温差很小。例如,一堵 150mm 厚的墙体,约在 1~1/2h 即可达到热学平衡;1.5m 厚的墙体达到类似平衡需要 1 周;而 15m 厚的墙体(可近似于一座拱坝的厚度)需要 2 年;152m 厚的坝体,如胡佛大坝、夏斯特大坝、大古力坝等,约需近 200 年的时间才能达到类似的热学平衡状态^[2]。一般结构性建筑单元的温差不会很大,因此,这类混凝土构件内部温度开裂现象相对偏少。相反,随着厚度的增大,大体积混凝土内部未加以控制的温度的升高会形成几乎是隔热的状态。由此,内外大温差形成的可能性大增,如果不加以调控,将会危及结构整体性。

由此可知,从水化升温的角度讲,大体积混凝土在施工时存在的问题主要有:

(1) 混凝土浇筑后水泥释放大量的水化热，由于混凝土体积大，聚集在内部的水泥水化热不易散发，混凝土的内部温度将显著升高，从而导致混凝土的内外温差超过 25°C 的经验界限值；

(2) 由于内外温差较大，在混凝土升温、降温过程中引起的温度应力剧烈变化有可能导致混凝土结构发生有害裂缝，给混凝土结构的强度、整体性、抗震性及耐久性造成严重隐患。

自 20 世纪初开始，大体积混凝土由于水泥水化热而产生开裂就引起了普遍的关注，针对大体量混凝土坝及其他大型水工结构物防止此类开裂的各种方法也应运而生。为减少生热，使用了火山灰，并从 1932 年开始使用低热水泥。随后通过尽可能地减少水泥用量、使用粗骨料、对混凝土材料进行冷却、限制举升高度以及采用管道冷却等技术措施，在减低最大水化升温方面取得了更大的进展。

虽然生热及扩散的过程已为人所熟悉，但混凝土体与其基底之间以及其内部与外表面之间的允许最大温差标准还是仅仅建立在经验的基础之上，实际混凝土的基本特性（如抗拉强度、热膨胀系数等）并未考虑其中。

随着混凝土的使用，基础、桥梁、隧道衬砌等结构混凝土以及其他中等规模混凝土构件中出现开裂的现象也与日俱增。通过观察发现，干缩引起的开裂往往影响不大，而水化热以及其他温度变化才是加筋或不加筋混凝土约束应力及开裂产生的主要原因。

20 世纪 60 年代后期，首次尝试估算了约束性热变形产生的应力，并将其与早期混凝土的抗拉强度进行比较，但工作中存在两处极大的难点：

(1) 热应力计算结果过于依赖于混凝土由半液态向固态转化过程中不断增长的硬度的估计，然而，该硬度的量测和估计难度极大；

(2) 约束应力难以用常规方法确定，因此，应力计算结果没

有资料进行验证。

1969年,第一台试验室设备,开裂试验架开发成功,由此展开了模型试验。通过测量早期混凝土对温度变化的应力响应,使得人们更加深刻地理解了当混凝土构件在膨胀或收缩受到遏制,并转而形成应力时所产生的上述变化的原因。

20世纪90年代中后期,针对早期约束应力的计算以及如何确定开裂危险程度进行了大量的研究工作。在相关计算程序考虑的基本因素中,主要有材料特性、水化热的演变、硬度的增长及松弛能力的降低、不断增长的抗拉强度、热膨胀系数,以及化学反应对变形的影响等。上述所有因素,均在很大程度上取决于龄期、温度、水泥类型以及混凝土拌合物的组成。事实上,对这些因素也只能粗略地进行估计。但通过模型试验,还是在材料特性近似研究上取得了很大的进展。此类模型设置时,需要对现场的约束条件及预期的温度条件进行假定。

日本、法国提出了具有良好的应用前景的现场约束应力测试新方法,未来本领域的进展,将会源自室内以及现场试验结果与计算成果间的相互比较。

最近的研究成果显示,对于早期开裂来讲,高强混凝土被认为是敏感性极高的材料。这不仅仅是因为水化热作用的结果,由于脱水以及硫酸盐物质的化学反应而产生的自身收缩,同样也不可小视。

结构物或大体积混凝土中不期而至的开裂,不能总是归咎于现场工程师的经验缺乏。该领域许多问题上认知的有限,在全世界范围内已经激起了研究的热情。1989年,国际材料及结构测试研究实验室联盟,针对“避免早期混凝土热开裂”问题专门成立了一个技术委员会——TC119。在交流经验和观点的同时,该委员会还推荐了以下的试验方法:

- 半绝热水化热的确定
- 绝热水化热的确定
- 使用室内开裂试验架进行约束应力测试