

YANHAN DIQU DATIJI HUNNINGTU

WENDUCHANG BIANHUA GUILÜ

严寒地区

YANJIU YU SHIJIAN

大体积混凝土温度场变化规律 研究与实践

石泉 周富强 吴艳 著

55.8
34



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

严寒地区 大体积混凝土温度场变化规律 研究与实践

石泉 周富强 吴艳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从理论和实践两方面系统地总结了严寒地区大体积混凝土温度场变化规律与保温混凝土温度场的计算方法及保温防裂技术措施,结合工程实际监测资料,遵循从实践到理论再到实践的思路,系统研究了严寒地区大体积混凝土温度场变化规律、混凝土热学参数变化规律、气温对混凝土温度场的影响、寒潮对混凝土温度的影响、越冬期间混凝土温度降幅的估算、保温材料选择及实例,具有较强的指导性和实用性。

本书可供从事大体积混凝土结构设计、施工及管理的技术人员使用,也可供有关院校师生及相关领域的科研人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

严寒地区大体积混凝土温度场变化规律研究与实践 / 石泉, 周富强, 吴艳著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.7

ISBN 978-7-5084-7691-9

I. ①严… II. ①石… ②周… ③吴… III. ①严寒气候施工: 混凝土施工—温度场—研究 IV. ①TU755.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第132275号

书 名	严寒地区大体积混凝土温度场变化规律研究与实践
作 者	石泉 周富强 吴艳 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京鑫丰华彩印有限公司
规 格	150mm×223mm 16开本 12.5印张 211千字
版 次	2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	75.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

Preface

前言

大坝混凝土所产生的裂缝，绝大多数是表面裂缝，其中一部分会发展成深层或贯穿性裂缝，影响大坝结构的整体性和耐久性。

大量工程实践表明，在严寒地区对新浇筑混凝土或已浇筑混凝土表面采用合适的保温材料进行保温后，混凝土结构体产生裂缝的几率大为降低，尤其可以大幅度减少深层贯穿性裂缝产生的几率，提高混凝土结构体的安全度。

本书结合严寒地区混凝土重力坝设计、施工的需要，通过实际监测和数值计算分析等科研手段，深入研究并总结了混凝土内部温度变化规律，进一步丰富了热传导理论在混凝土温度控制领域中的应用研究，其主要内容包括如下几个方面。

(1) 提出了严寒地区混凝土内部温度场时空分布模型。通过对严寒地区保温混凝土施工期到运行期内部温度变化机理的分析，提出了研究保温混凝土温度变化的数学模型。结合严寒地区混凝土内部温度长期的监测资料，对混凝土内部不同深度温度随时间的变化规律进行了深入探讨和研究，总结了如何利用有限的温度观测资料，通过建立和优化数学模型，研究保温混凝土温度场时空变化规律的方法。

(2) 提出了通过监测资料反演严寒地区混凝土热学参数的数学模型。通过对混凝土温度场时空变化规律的研究，阐明了在严寒地区对混凝土采取保温措施后，引起混凝土温度的变化不仅体现在混凝土表面，更影响其内部温度分布的特性，对严寒地区混凝土导温系数和等效表面放热系数的计算进行了深入的研究和分析。系统的提出了反演严寒地区混凝土导温系数和等效表面放热系数的计算公式。

(3) 提出了严寒地区利用等效表面放热系数和越冬历时直接计算混凝土最低温度的计算方法。通过对越冬期间混凝土（保温和未保温）表面及棱角部位温度降幅的研究，阐明了越冬期间气温降幅、历时和等效表面放热系数与混凝土表面及棱角温度降幅的关系，针对严寒地区特有的气温条

件,科学地提出表面和棱角部位温度降幅的数学计算公式,以及在满足混凝土内外温差的前提下,其表面及棱角部位的等效表面放热系数的计算方法。

(4)提出了风速对保温混凝土表面等效放热系数影响的判别公式。在深入研究风速和保温材料的厚度对混凝土表面温度影响的基础上,提出了可忽略风速对混凝土表面等效放热系数影响的判别公式。确保选择保温材料厚度上的经济性,降低了保温材料的投资额,简化了施工工艺,同时提高了施工效率。

本书的主要特点是:补充完善了严寒地区混凝土温度变化规律计算理论,可以有效预测该地区混凝土温度变化趋势,简化同类工程保温材料选择设计方法。

本书承司志明教授级高级工程师认真的修改和审阅,并提出了宝贵意见,风家骥教授、赵长海教授级高级工程师也曾提出过意见。在本书写作过程中,还先后得到罗纬邦、刘涛、李江、夏世法老同志支持,并提供了很好的意见和资料,在此特向他们表示衷心的感谢!

由于水平有限,文中谬误、不妥之处敬请同行专家和读者批评指正。

作者

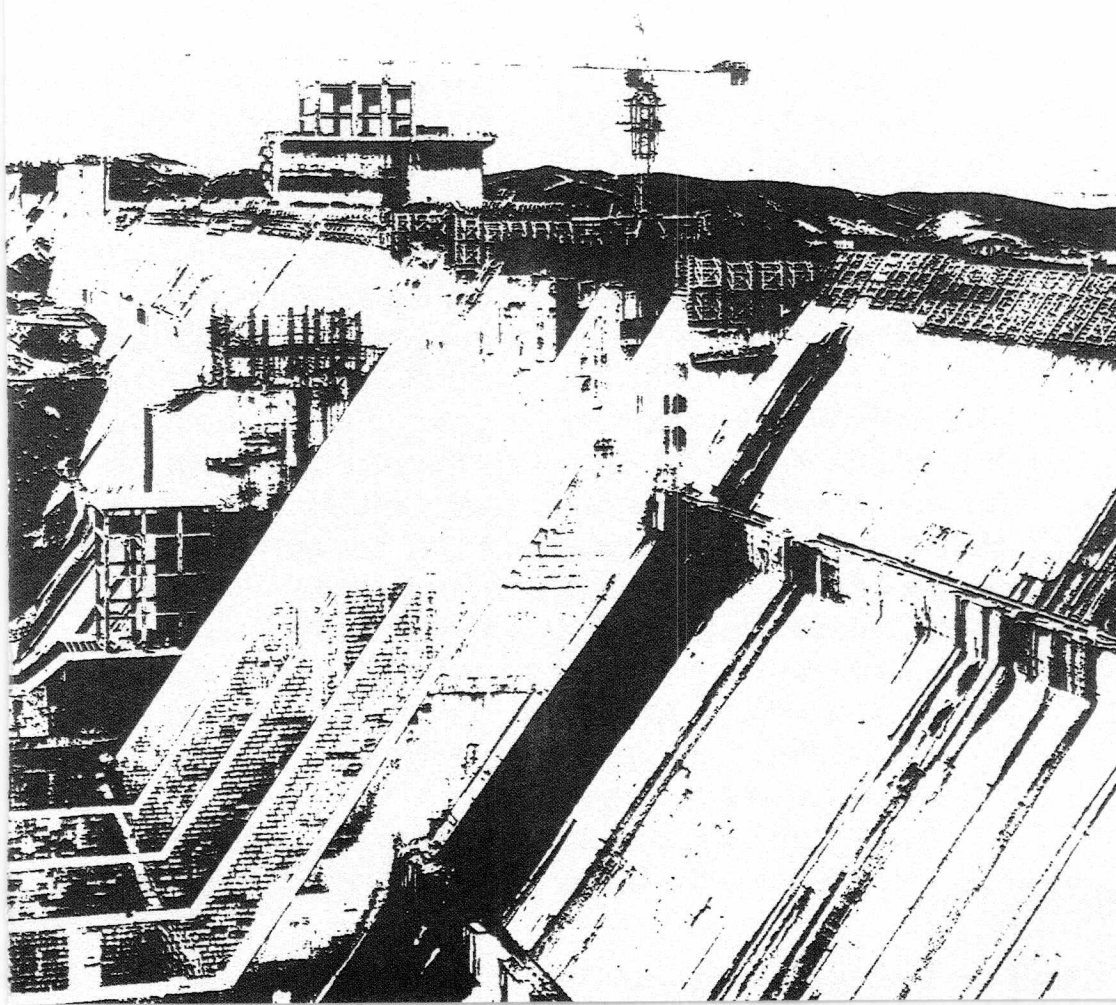
2009年9月

前言

1 绪论	1
1.1 大体积混凝土温度与温度控制	2
1.2 混凝土温度的计算原理	7
1.3 严寒地区工程现场保温实验研究概况	18
2 混凝土温度场变化规律的分析研究	27
2.1 混凝土内部温度场数学模型研究	28
2.2 典型工程混凝土内部温度变化规律分析	33
2.3 混凝土内部温度场变化规律的模型优化	38
2.4 观测序列较短时混凝土表面及内部温度变化规律分析	49
3 混凝土热学参数变化规律研究	57
3.1 导温系数的计算方法研究及反演	58
3.2 等效表面放热系数研究及反演	61
3.3 不同保温材料等效表面放热系数对比分析	69
3.4 风速与等效表面放热系数的关系	73
4 严寒地区气温对混凝土温度场的影响	77
4.1 气温对混凝土温度影响的理论分析与实践	78
4.2 两种典型保温材料下气温对保温混凝土温度的影响	92
4.3 气温对保温混凝土温度影响的实践	108
5 寒潮对混凝土温度的影响	121
5.1 寒潮对混凝土表面温度的影响	122
5.2 寒潮对混凝土棱角部位温度的影响	137
5.3 寒潮期间混凝土表面及棱角温度应力的关系	148
5.4 寒潮期间双向散热棱角部位温度影响深度问题的研究	155

6 越冬期间混凝土温度降幅的估算	165
6.1 混凝土温度降幅的计算与分析	166
6.2 混凝土表面及棱角部位温度降幅的规律研究	170
6.3 严寒地区某混凝土坝现场实验墩观测资料分析	174
7 表面保温及保温材料	181
7.1 国内外混凝土表面保温应用概况	182
7.2 表面保温材料种类、特性及应用情况	183
参考文献	194

1 绪 论



1.1 大体积混凝土温度与温度控制

1.1.1 概述

大体积混凝土在现代水利水电工程建设中占有重要的地位。我国每年水利水电工程浇筑的大体积混凝土在 1000 万 m^3 以上。举世瞩目的三峡大坝混凝土浇筑总量达到 3000 万 m^3 。

关于大体积混凝土的定义,各国有所不同。

美国混凝土学会 ACI207 委员会对于大体积混凝土的定义是“任何就地浇筑的大体积混凝土,其尺寸之大,必须要求采取措施解决水化热及随之引起的体积变形问题,以最大限度地减少开裂”。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的混凝土体积变化与开裂问题。

日本建筑学会 (JASS5) 的定义是“结构断面尺寸在 80cm 以上,同时水化热引起的混凝土内部最高温度与外界气温之差预计超过 25°C 的混凝土称之为大体积混凝土”。

国际预应力混凝土协会 (FIP) “海工混凝土设计与施工建议”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 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 时,应考虑采用水化热低的水泥或采取其他降温散热措施。”

大体积混凝土具有随温度变化而引起体积变化的性质,因此体积变化的约束会产生温度应力。大体积混凝土内的温度应力主要是由混凝土内水泥的水化热造成。混凝土温度的这种变化会产生一系列后果。首先,当混凝土内部温度与外界温度相差悬殊,温度梯度很陡时,就容易在混凝土表面引起巨大拉力而开裂。其次,在混凝土温度达到最高值开始下降时,体积随之收缩,当受到底部基岩或老混凝土约束时,有可能会产生裂缝,或者使结构缝张开,这对于建筑物结构和防渗都是极为不利的。美国的 Norfork 重力坝在每个泄洪底孔的侧面至少有 4 条纵向裂缝,而 Dworshak 坝裂缝更为严重,该坝高 218m,通仓浇筑,经人工预冷,采取了严格的传统温控措施,9 个坝段均发现有此类裂缝,其中 23 号坝段裂缝不仅扩展到基岩,而且向坝内深入 75m。我国的一些混凝土重力坝、拱坝、水闸等水工建筑物的混凝土也都程度不同的产生了裂缝。

大体积混凝土产生的裂缝 90% 以上属表面裂缝,而大多数发生在气温

较低或寒潮袭击的早期,从裂缝发生的部位看大多数为侧面裂缝,约占裂缝总数的60%~70%。这些裂缝的存在严重削弱了大坝坝体和各类水工建筑物的刚度,影响其防渗性、耐久性和结构的整体性,甚至危害结构的安全运行,有的已经造成了严重的后果。

严寒地区的施工条件与一般温和地区不同,水工混凝土的施工期一般为7个月,每年10月末至次年4月初停止混凝土施工。这种冬季长间歇式施工方式,使混凝土坝越冬层面附近,因较大的上、下层温差和较大的内、外温差,在其上下游表面附近会引起较大的拉应力集中,在越冬混凝土层面中间部位会引起较大的水平拉应力。

严寒地区大体积混凝土主要有以下特点:一是年平均气温低。混凝土内部散热慢,长期处于高温状态,冬季内外温差大,容易出现裂缝,对温度控制要求严;二是水工建筑物的裂缝容易引起渗漏;三是气温低,混凝土冻融破坏严重;四是空气干燥,全年空气湿度小,特别在夏季由于日蒸发量大,光照强度大、时间长,特别是有风的时候,水分蒸发特别快,很容易使混凝土在初凝之后因为水分不足而不能充分进行水化反应,甚至使混凝土因干缩而导致裂缝。

1.1.2 大体积混凝土温度

大体积混凝土的温度随水化热的逐渐释放而升高,当散热条件较好时,水化热造成的温度升高值并不大,也不致使混凝土产生较大裂缝。而当混凝土的浇筑块尺寸较大时,其散热条件较差,由于混凝土导热性能不良,水化热基本上都积蓄在浇筑块内,从而引起混凝土温度明显升高。由于混凝土温度高于外界气温,随着时间的延续,热量慢慢向外界散发,块体内温度逐渐下降。这种自然散热过程甚为漫长,大约要经历几年以至几十年的时间水化热才能基本消失。此后,块体温度即趋近于稳定状态。在稳定期内,坝体内部温度基本稳定,而表层混凝土温度则随外界温度的变化呈周期性波动。由此可见,大体积混凝土温度变化过程一般经历升温期、冷却期和稳定期3个时期(见图1-1)。

混凝土温度应力的产生主要有两个方面:一方面水泥在水化过程中将释放出大量的水化热,由于混凝土体积大,聚集在内部的水泥水化热不易散发,混凝土内部温度将显著升高;另一方面其表面则散热较快,温度降低的速度较快,从而在混凝土内外形成了较大的温度差。混凝土的边界受到外界环境量的约束,混凝土温度变化时混凝土不能自由变形而产生应

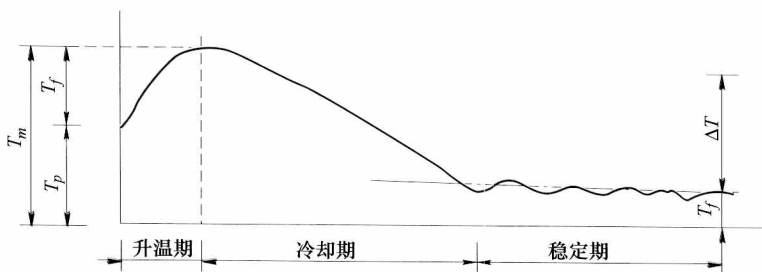


图 1-1 大体积混凝土温度变化过程

力，这一现象不仅在混凝土浇筑的初始阶段存在，而且还将在运行期相当长的一段时间内存在。在上述两种情况下，均使混凝土结构的温度梯度过大。温度梯度的变化不但对结构的应力状态具有重要影响，也可能引起裂缝。随着混凝土进入冷却期，保温混凝土内部温度逐步均匀化，温度非线性分布得以改善。混凝土内部结构的相互约束而产生的应力才会进一步降低。

混凝土在早期升温期，混凝土内部产生压应力，由于混凝土弹性模量比较小，松弛系数也比较小，因此压应力的数值不大；到了冷却期，混凝土内部的压应力不但被抵消，而且还会产生很大的拉应力，因此混凝土温度的分析和控制对于分析混凝土的应力是十分重要的。

1.1.3 温控标准与温控措施

混凝土重力坝由于温度原因产生的裂缝，根据其深度的不同可分为贯穿裂缝、深层裂缝及表面裂缝等（图 1-2 和图 1-3），其中贯穿裂缝及深层裂缝会影响或破坏结构的防渗性、耐久性和整体性，甚至危及结构的安全运行。

防止具有严重危害性裂缝的发生，是进行温度控制设计与表面保温的

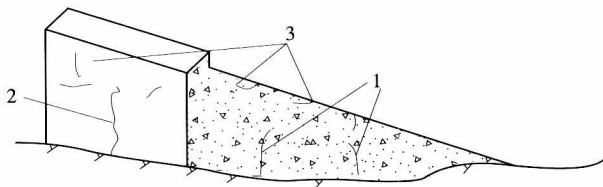


图 1-2 重力坝裂缝型式

1—贯穿裂缝；2—深层裂缝；3—表面裂缝

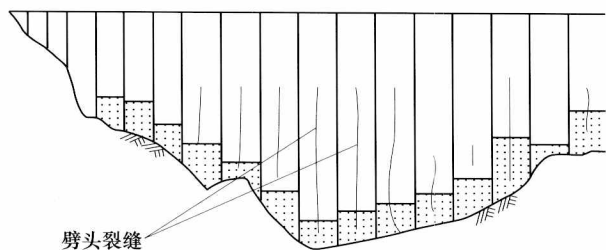


图 1-3 重力坝表面劈头裂缝

主要目的, 如何进行温控, 采取哪些防裂措施, 是必须解决的问题。

对混凝土大坝进行温度控制, 是保证混凝土浇筑质量、合理选择施工方案及温控标准, 消除大坝裂缝, 尤其是危害性较大裂缝的重要步骤。同时, 它是一个反复比较和优选的过程, 既要根据地理位置和浇筑季节因地制宜地确定温控标准与选择控制措施, 又要考虑施工能力和施工进度等, 以期达到经济有效地控制坝体温度和防止产生裂缝的目的。

1.1.3.1 温控标准

温度控制主要控制基础温差、内外温差及上下层温差。

(1) 基础温差。控制基础温差, 目的是防止坝块基础部位温度过高, 降温时受基础约束产生较大的温度应力而引起基础贯穿裂缝。基础温差是指基础部位的最高温度与相应区域稳定温度之差。

(2) 内外温差。混凝土块的内外温差实质上是反映坝块降温的非线性分布, 造成内部约束而产生的温度应力问题。气温年变化及气温骤降都在混凝土块内形成内外温差。气温骤降引起的温度应力主要在表层, 对混凝土块及时进行表面保温是缓解气温骤降作用的最有效措施。而气温年变化对混凝土块的影响深入内部一定深度截面, 改善其形成的内外温差, 需要控制混凝土块的温度来解决, 表面保温相当于在混凝土块外增加了很小的当量厚度, 对骤降的温度荷载可起到减缓作用。

(3) 上下层温差。上下层温差是指在长间歇老混凝土块上浇筑新混凝土时, 限制新老混凝土之间的温差, 目的是防止因上部新浇混凝土温度过高, 降温时受老混凝土约束而产生裂缝。

综上所述, 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。大体积混凝土的温度控制是控制上述温差, 但控制温差现场不易操作与检查, 实际上均把温差转换成设计允许最高温度来进行控制。

1.1.3.2 温度控制措施

施工阶段温度控制，一是，通过优化配合比及选择原材料来降低水泥水化热、提高混凝土的抗拉强度。混凝土的热量主要来自水泥水化热，尽量采用低水化热（粗水泥）或选择前期放热速度慢的水泥，精心设计混凝土配合比，必要时添加粉煤灰和减水剂，减少每立方米混凝土中的水泥用量，在确保不降低抗拉强度的基础上，以达到降低水化热的目的。二是，采取各种控制措施降低混凝土的温度应力和洒水养护防止混凝土表面干裂。浇筑混凝土应选择较适宜的气温，尽量避开夏季高温天气；采用制冷水或地下水搅拌混凝土，或在混凝土拌和水中加入冰块，如有可能，可拌制制冷混凝土，同时对骨料进行遮阳、洒水降温，在运输及浇筑过程中也采用遮阳保护等措施，以降低混凝土拌和物的入仓温度；加快混凝土的浇筑速度，浇筑完毕后及时进行表面覆盖，采取喷淋等措施，降低混凝土浇筑时的环境温度，减少太阳能的辐射热，降低混凝土浇筑温度；采用内部降温法来降低混凝土内部温度，从而降低混凝土内部与表面的温差，在混凝土内部预埋水管，通入冷却水，降低混凝土内部最高温度，冷却在混凝土刚浇筑完时就开始进行，在严寒地区，混凝土存在越冬的问题，如果混凝土内部温度依旧较高，对混凝土的防裂不利，可重复利用冷却水管，进行二次通水冷却，进一步降低混凝土内部温度。采用表面洒水或流水、现场喷淋等养护措施，加强混凝土表面养护。三是，加强表面保温措施。在混凝土块表面设置用导热系数较低的材料所制成的保温层，使气温变化时，混凝土内部不直接与大气进行热量交换，并使表面由于大幅度降温、温度梯度急剧增大部分仅仅在保温层里发生，从而防止环境低温的冲击、减少温度梯度、起到降低表层温度拉应力的效果，改善坝体内温度场的均匀性，减缓内部混凝土热量散失，提高混凝土徐变，防止混凝土表面裂缝的发生。表面保温的作用：①作为温控措施，防止混凝土表面温度裂缝；②作为混凝土冬季施工措施，防止混凝土冻害；③弥补混凝土养护的不足，以利于防止混凝土干缩裂缝。

目前，各种保温材料的导热系数见表 1-1。

表 1-1 各种保温材料的导热系数 单位: $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

材料名称	导热系数 λ	材料名称	导热系数 λ
泡沫塑料	0.1256	木板	0.837
玻璃棉毡	0.1674	木屑	0.628

续表

材料名称	导热系数 λ	材料名称	导热系数 λ
麦秆或稻草席	0.502	干棉絮	0.1549
炉渣	1.674	油毛毡	0.167
甘蔗板	0.167	干沙	1.172
石棉毡	0.419	湿沙	4.06
泡沫混凝土	0.377	矿物棉	0.209
XPS	≤ 0.108	麻毡	0.188
膨胀珍珠岩	0.1675	普通纸板	0.628
沥青	0.938	硬质聚氨酯	0.083

注 XPS 为挤塑聚苯乙烯泡沫塑料板的简称。

综上所述,运行期混凝土温度控制措施就是“内降外保”。大量工程实践表明,在严寒地区,对新浇筑混凝土或已浇筑混凝土表面采用合适的保温材料进行保温后,混凝土结构体产生裂缝的几率将大大降低,尤其可以大幅度减少深层贯穿性裂缝产生的几率,提高混凝土结构体的安全度。

1.2 混凝土温度的计算原理

为了解混凝土温度场的发展变化和分布规律,必须分析混凝土温度场。根据当地的气候条件、混凝土的热学参数等,按热传导原理进行计算。问题可归结为,在给定的边界条件和初始条件下求解热传导方程;对于比较简单的问题,可求出理论解,对于比较复杂的问题,可根据实测的混凝土温度资料进行反演计算予以解决。

1.2.1 混凝土热学参数估算

混凝土的热学性能参数包括:导热系数 λ , 单位为 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; 导温系数 α , 单位为 m^2/h ; 比热 c , 单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。这些参数是计算混凝土水化热温升,混凝土热量散失的重要参数和依据。原属于混凝土物理性能的密度之所以列入热学性能,是因为它也影响不稳定热导过程,并与另外三项热学性能构成下列的函数关系见式 $(1-1)^{[1]}$ 。

导热系数 λ 是反映混凝土导热性能的参数,它的主要影响因素是骨料用量及其本身的热性能,混凝土的温度和骨料含水量也对其有较大影响。

根据导温系数的定义：

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——混凝土密度， kg/m^3 。

在密度与比热一定时，导温系数与导热系数成正比关系；在导热系数一定时，密度、比热与导温系数成反比关系。

对于未能取得混凝土热学性能试验数据，可根据混凝土组成成分的重量百分比，参照表 1-2，利用混凝土各种材料不同导热系数，按照加权平均法，采用式 (1-2) 进行估算。估算的比热偏低，需乘以修正系数 $k_c=1.05$ 。

$$\lambda = \frac{\sum \omega_i \lambda_i}{\sum \omega_i} \quad (1-2)$$

式中 ω_i ——混凝土各种组成成分重量的百分比；

λ_i ——混凝土各种组成成分导热系数。

表 1-2 混凝土组成成分的热性能系数

材料名称	密度 ρ (kg/m^3)	导热系数 λ [$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]				比热 c [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]			
		21 $^\circ\text{C}$	32 $^\circ\text{C}$	43 $^\circ\text{C}$	54 $^\circ\text{C}$	21 $^\circ\text{C}$	32 $^\circ\text{C}$	43 $^\circ\text{C}$	54 $^\circ\text{C}$
水	1000	2.160	2.160	2.160	2.160	4.187	4.187	4.187	4.187
普通水泥	3100	4.446	4.593	4.735	4.865	0.456	0.536	0.662	0.825
石英砂	2660	11.129	11.099	11.053	11.036	0.699	0.745	0.795	0.867
玄武岩	2660	6.891	6.871	6.858	6.837	0.766	0.758	0.783	0.837
白云岩	2660	15.533	15.261	15.014	14.336	0.804	0.821	0.854	0.888
花岗岩	2680	10.505	10.467	10.442	10.379	0.716	0.708	0.733	0.775
石灰岩	2670	14.528	14.193	13.917	13.657	0.749	0.758	0.783	0.821
石英岩	2660	16.910	16.777	16.638	16.475	0.691	0.724	0.758	0.791
流纹岩	2660	6.770	6.812	6.862	6.887	0.766	0.775	0.775	0.808

在物体的传热过程中，导热系数说明了稳定导热状态下的物体导热能力，导温系数是说明在不稳定导热过程中的物体导热能力与导温速度。物体导温系数越大，说明其导热速度越大。水工混凝土的导温系数 α 一般在 $0.0025 \sim 0.0045 \text{m}^2/\text{h}$ 之间，比热和密度的乘积 ($c\rho$) 的范围一般在 $2200 \sim 2400 \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 之间。

本书采用的混凝土配合比见表 1-3 (实验墩混凝土配合比详见 1.3 节)。

表 1-3

实验块混凝土配合比及材料用量

材料名称	水	水泥	砂	粗 骨 料		总计
重量 (kg)	125	277	503	718 (小石)	718 (中石)	2341
百分比 (%)	5.3	11.8	21.5	61.3		100

按式 (1-2) 计算出导热系数、比热及密度、导温系数。

导热系数: $\lambda = [5.3 \times 2.16 + 11.8 \times 4.446 + 21.5 \times 11.129 + 61.4 \times 10.505 \text{ (花岗岩)}] / 100 = 9.48 \text{ kJ} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

比热: $c = 1.05 \times (5.3 \times 4.187 + 11.8 \times 0.456 + 21.5 \times 0.699 + 61.4 \times 0.716) / 100 = 0.91266 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

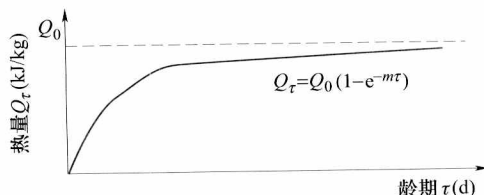
密度: $\rho = 2341 \text{ kg} / \text{m}^3$

导温系数: $\alpha = \lambda / c\rho = 0.004447 \text{ m}^2 / \text{h}$

石子对混凝土热性能的影响最大, 其次为砂子, 至于水和水泥, 所占重量百分比不大, 影响较小。由于混凝土热学参数是混凝土温度计算的基础, 推算方法较多, 出入也较大, 因此, 应采用多种方法推算并参考其他类似的工程资料、现场实验等多种手段进行比较确定。

1.2.2 混凝土水化热温升

水泥在凝结硬化过程中, 会放出大量的水化热。水泥在开始凝结时放热较快, 以后逐渐变慢, 普通水泥最初 3d 放出的总热量占总水化热的 50% 以上。水泥水化热与龄期的关系曲线见图 1-4。图 1-4 中 Q_0 为水泥的最终发热量 (kJ / kg), 其中 m 为系数, 它与水泥品种及混凝土入仓温度有关。



水泥水化热主要取决于水泥的矿物成分, 其中以 C_3S 和 C_3A

图 1-4 水泥水化热与龄期关系曲线

的发热量为最大, 降低这两种矿物成分, 可以适当降低水泥水化热, 得到低热或中热水泥, 但是减少 C_3S 和 C_3A , 水泥的强度特别是早期强度也会降低。

根据实验资料, 累计水化热一般可用表达式^[1] (1-3) 拟合:

$$Q_\tau = Q_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (1-3)$$

式中 Q_τ ——在龄期 τ 时的累计水化热, kJ / kg ;

Q_0 ——水泥水化热总量, kJ / kg ;

τ ——龄期；

m ——发热速率，随水泥品种，比表面积及浇筑温度而定。

根据实验资料，发热速率的取值见表 1-4。

表 1-4 发热速率 (m) 取值

浇筑温度 (°C)	5	10	15	20	25
m (1/d)	0.295	0.318	0.340	0.362	0.384

混凝土绝热温升可根据式 (1-4) 进行估算：

$$Q_0 = \frac{Q_r(W + kF)}{c\rho} \quad (1-4)$$

式中 W ——水泥用量， kg/m^3 ；

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

ρ ——混凝土密度， kg/m^3 ；

F ——混合材用量， kg/m^3 ；

k ——折减系数。

混凝土的绝热温升，随水泥品种而变化，同一品种的水泥，又随着水泥用量多少而不同，在相同的水泥品种和用量下，绝热温升随混凝土的容重、比热 c 的大小而波动。

混凝土的热学性能，则随着组成骨料的不同，它的比热 c 、导热系数 α 和密度 ρ 有所不同，在一定程度上影响浇筑块的初期水化热温升。

1.2.3 热传导的基本原理及边界条件

1.2.3.1 热传导方程

混凝土内部温度场在不同的时期、不同的深度处所受的内外条件的不同，其热传导方程也不尽相同。

由热量平衡的基本定律可知：混凝土在任何时候，温度升高所吸收的热量必须等于从外面流入的热量与内部水化热之和。在均匀各向同性的前提下，考虑水化热绝热温升时的热传导方程式 (1-5) 为：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial Q_0}{\partial \tau} \quad (1-5)$$

初始影响基本消除，在外界气温等环境量的影响下，混凝土内部温度场的热传导方程式 (1-6) 为：