

大体积混凝土 温度应力与裂缝控制

张 研 韩 林
蒋林华 张子明 编著



科学出版社

大体积混凝土温度应力 与裂缝控制

张 研 韩 林 编著
蒋林华 张子明

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要论述大体积混凝土温度应力和裂缝控制的理论和方法。全书分为8章,内容包括:混凝土产生裂缝的原因、危害性及温度应力的特点;混凝土热传导问题,基于有效时间的混凝土绝热温升理论和热传导方程;基于细观力学理论的混凝土热力学性质预测,各种细观力学方法在预测混凝土热力学性质中的应用;库水温度场的计算方法,加权余量法在一维库水温度场模型中的应用,龙滩水电站水库水温的数值计算;混凝土温度场的计算方法,计算温度场的有限差分法和有限单元法,有保温层拱坝温度荷载的计算;混凝土的弹性、徐变和应力松弛,材料的流变模型,弹性徐变理论;混凝土的温度应力,温度应力场的弹性力学解答,混凝土徐变温度应力问题的有限元法,大体积混凝土施工仿真,应用对称逐步超松弛预处理共轭梯度法提高计算效率;大体积混凝土温度控制和防裂措施,水管冷却、骨料预冷、分缝分块、表面保护以及允许温差。

本书可供土木工程、工程力学、水利工程等有关专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大体积混凝土温度应力与裂缝控制/张研等编著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-041397-0

I. ①大… II. ①张… III. ①大体积混凝土施工-温度变化-应力分析-研究②大体积混凝土施工-裂缝-控制 IV. ①TU755.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第156057号

责任编辑:童安齐 王 钰 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年7月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:370 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

大体积混凝土在现代工程建设,特别是水利水电建设中,占有重要地位。我国每年仅在水利水电工程中浇筑的大体积混凝土就在 1000 万 m^3 以上。大坝、水闸、船坞、港工建筑物及重型机器基础等都是大体积混凝土结构的具体形式。大体积混凝土结构具有不同于一般混凝土结构的典型特征,即必须考虑水泥水化热对结构变形和受力的影响,需要采取措施解决水化热引起的体积变形问题,最大限度地减少混凝土开裂。

在大体积混凝土结构中,温度变化对结构应力和变形具有重要影响,有时温度应力大大超过其他外荷载产生的应力。因此,大体积混凝土结构除涉及一般的强度问题外,更重要的是如何控制温度应力和裂缝。由于大体积混凝土体积巨大,难以用试验手段研究温度应力和温控防裂措施的实际效果,数值计算就成为研究大体积混凝土温度应力和裂缝控制必不可少的途径。所以,混凝土徐变特性、数值建模、温度场和应力场的计算、施工仿真方法等都是大体积混凝土结构设计、施工中十分重要的课题。

近几十年来,在傅作新教授的指导下,河海大学在大体积混凝土温度应力和温度控制领域进行了研究,本书主要阐述大体积混凝土温度应力和裂缝控制的理论和方法,内容包括作者的研究成果和积累的经验,并博采众家之长。

本书由张研、韩林、蒋林华和张子明撰写,宋智通博士和倪志强博士等计算了书中的部分例题。王德信教授对书稿进行了详细的审阅,他的宝贵而富于建设性的意见,使得本书结构更为合理,内容更为严谨,在此表示衷心的感谢。特别感谢傅作新教授多年来对此领域知识的尽心传授与指教。

在安排本书内容时,作者从朱伯芳院士的《大体积混凝土温度应力与温度控制》、傅作新教授的《工程徐变力学》及王润富教授的《温度场和温度应力》等著作中得到很大教益。在编著本书过程中,参考了上述著作中的部分内容,特此对他们表示感谢。本书得到国家自然科学基金和教育部留学回国人员科研基金的资助,也一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,热忱希望各位专家和读者批评指正。

编著者

2013年10月18日

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 混凝土裂缝的形成与危害性	1
1.1.1 混凝土裂缝的形成和发展	1
1.1.2 裂缝的危害性	3
1.2 混凝土温度应力的特点和类型	3
1.3 混凝土温度应力分析研究现状	5
1.4 控制温度应力和防止裂缝的措施	6
第二章 热传导方程及边值条件	8
2.1 热传导方程	8
2.2 温度场的边值条件	9
2.2.1 混凝土的浇筑温度	11
2.2.2 第三类边界条件的近似处理	12
2.2.3 气温	14
2.2.4 水温	15
2.3 混凝土的热学性能	16
2.4 水泥水化热和混凝土绝热温升	17
2.4.1 水泥水化热	17
2.4.2 混凝土绝热温升	20
2.4.3 绝热温升与水泥水化程度关系	21
2.4.4 基于有效时间的混凝土绝热温升	22
第三章 基于细观力学的混凝土热力学性质预测	26
3.1 混凝土细观力学简介	26
3.1.1 混凝土的多重尺度	26
3.1.2 混凝土细观力学研究进展	27
3.1.3 基于细观尺度的混凝土特性研究	31
3.2 混凝土热力学性质预测	31
3.2.1 代表性体积单元的定义	31
3.2.2 复合材料的均匀化	32
3.2.3 复合材料的有效弹性模量	34
3.2.4 复合材料的有效热膨胀系数	39
3.2.5 混凝土有效弹性模量的数值试验	44
3.2.6 混凝土有效热膨胀系数的数值试验	53

3.3	基于细观尺度的混凝土绝热温升预测	56
3.3.1	混凝土细观组成	56
3.3.2	混凝土有效绝热温升预测	57
3.3.3	基于细观尺度的混凝土温度场	59
第四章	库水温度场的数值计算	65
4.1	库水温度场的预测方法	65
4.1.1	经验法	65
4.1.2	数学模型法	67
4.2	库水温度场的数学模型	70
4.2.1	水体分类及分层指标	70
4.2.2	影响水体蓄热状况的因素	71
4.2.3	数学模型	72
4.3	加权余量法在库水温度场中的应用	74
4.3.1	加权余量法	74
4.3.2	伽辽金有限单元法的步骤	76
4.4	库水温度场的一维数学模型的数值模拟	78
4.4.1	控制方程的离散	78
4.4.2	边界条件的处理	82
4.4.3	相关参数的计算	83
4.4.4	热对流和风吹掺混对库水温度场的影响	86
4.4.5	库水温度场计算的程序设计	87
4.5	库水温度场数学模型法的应用	92
4.5.1	离散方法对库水温度场的影响	93
4.5.2	出入水流速分布对库水温度场的影响	95
第五章	混凝土的温度场	97
5.1	一维温度场的理论解	97
5.1.1	外温为零、第一类边界条件下平板的冷却	97
5.1.2	初温均匀分布、第三类边界条件下平板的冷却	99
5.1.3	混凝土水化热温升产生的平板温度场	101
5.1.4	成层浇筑混凝土的温度场	103
5.1.5	圆环或圆筒的轴对称稳定温度场	106
5.2	计算温度场的差分法	108
5.2.1	差分公式的推导	108
5.2.2	稳定温度场的差分解	110
5.2.3	不稳定温度场的差分解	112
5.3	计算温度场的有限单元法	114
5.3.1	稳定温度场的计算	114
5.3.2	不稳定温度场的计算	120

5.4	有保温层拱坝的温度荷载	124
5.4.1	温度荷载和边界温度的确定	124
5.4.2	平均温度场的精确解	127
5.4.3	年平均温度场的 T_{m1} 和 T_{d1} 的简化计算方法	128
5.4.4	变化温度场的精确解	132
5.4.5	变化温度场 T_{m2} 和 T_{d2} 的简化计算方法	133
第六章	混凝土的弹性、徐变和应力松弛	136
6.1	材料的复杂变形现象	136
6.1.1	材料的徐变与松弛	136
6.1.2	简单的流变模型	137
6.1.3	广义流变模型及黏弹性材料物理方程的一般表达式	142
6.2	混凝土的弹性、徐变和徐变理论	144
6.2.1	混凝土的弹性模量	144
6.2.2	混凝土的徐变	148
6.2.3	混凝土的徐变度	149
6.2.4	弹性徐变理论	154
6.2.5	老化理论	154
6.3	混凝土的应力松弛	155
6.3.1	混凝土的松弛模量和松弛系数	155
6.3.2	变应变作用下混凝土的应力	156
第七章	混凝土的应力场	158
7.1	温度应力场的理论解	158
7.1.1	空间问题基本方程	158
7.1.2	位移势函数的引用	161
7.1.3	平面温度应力	162
7.1.4	用极坐标求解问题	164
7.1.5	楔形坝体中的温度应力	166
7.2	混凝土线性徐变力学的基本理论	170
7.2.1	线性徐变力学的基本方程式	170
7.2.2	线性徐变力学的基本定理及其应用	173
7.3	计算应力场的有限元法	178
7.3.1	弹性温度应力问题的有限元法	178
7.3.2	一般混凝土徐变问题的数值解法	181
7.3.3	混凝土弹性徐变方程的显式解法和隐式解法	183
7.3.4	混凝土弹性徐变温度应力分析	187
7.4	混凝土施工仿真	189
7.4.1	简介	189
7.4.2	计算效率问题	191

7.4.3	线性方程组的解法	192
7.4.4	碾压混凝土重力坝仿真分析	195
7.5	弹性基础梁的温度应力	197
7.5.1	基本方程	197
7.5.2	结论	199
第八章	混凝土的温度控制和防裂措施	200
8.1	水管冷却	200
8.1.1	金属水管的冷却计算	201
8.1.2	非金属水管的冷却计算	206
8.1.3	水管冷却的精细算法	210
8.1.4	水管冷却的等效热传导方程	213
8.1.5	水管冷却施工中的若干问题	215
8.2	混凝土预冷	216
8.2.1	地笼取料	217
8.2.2	冷却拌和水及加冰拌和	217
8.2.3	预冷骨料	218
8.3	混凝土分缝分块	219
8.3.1	横缝形式和间距	220
8.3.2	纵缝形式和间距	220
8.3.3	浇筑层厚度	222
8.3.4	相邻坝块高差	224
8.4	混凝土表面保温与养护	227
8.4.1	混凝土的早期养护	227
8.4.2	气温折线变化时混凝土的表面保温	228
8.4.3	气温正弦变化、单向散热时的表面保温	229
8.4.4	气温正弦变化、双向散热时的表面保温	233
8.4.5	临界表面放热系数	234
8.4.6	表面保温材料	236
8.5	混凝土的允许温差	238
8.5.1	混凝土允许温差的计算	238
8.5.2	国内外混凝土允许温差规范	239
主要参考文献		244

第一章 绪 论

目前,大体积混凝土并没有统一的定义。日本建筑学会标准中将“结构断面最小尺寸在 80cm 以上,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℃的混凝土”定义为大体积混凝土。美国混凝土学会将其界定为“任何就地浇筑的混凝土,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”。

大体积混凝土在现代工程建设,特别是水利水电和土木工程建设中占有重要地位。在世界各国兴建的高度在 30m 以上的坝中,混凝土重力坝、拱坝和支墩坝约占 70%。我国每年仅在水利水电工程中所浇筑的大体积混凝土就在 1000 万 m^3 以上。另外,大体积混凝土建筑还包括水闸、船坞、港工建筑物、重型机器基础等。

大体积混凝土结构具有下列重要特点:

(1) 混凝土是脆性材料,抗拉强度只有抗压强度的 1/10 左右,拉伸变形能力也很小,短期加载时的极限拉伸变形只有 $(0.6 \sim 1.0) \times 10^{-4}$,相当于温度降低 $6 \sim 10^\circ\text{C}$ 的变形,长期加载时的极限拉伸变形也只有 $(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-4}$ 。

(2) 大体积混凝土结构断面尺寸较大,混凝土浇筑以后,由于水泥的水化热,内部温度急剧上升,此时混凝土的弹性模量很小,徐变较大,引起的压应力并不大;但在此后温度逐渐降低时,弹性模量较大,徐变较小,会产生相当大的拉应力。此外,大体积混凝土表面通常与空气或水接触,气温和水温的变化在混凝土结构中也会引起很大的拉应力。

(3) 大体积混凝土结构通常不配钢筋,或只在表面或孔洞附近配置少量钢筋,与结构的巨大断面相比,含钢率极低。在钢筋混凝土结构中,拉应力主要由钢筋承担,混凝土只承受压应力。在大体积混凝土结构内,由于没有配置钢筋,拉应力主要由混凝土本身来承受。

大体积混凝土中经常出现的问题,不只是力学上的强度问题,更重要的是如何控制混凝土的温度变形裂缝,以及提高混凝土的抗渗、抗裂、抗侵蚀性能等问题。大体积混凝土中,温度应力及温度控制具有重要意义。无论是在施工期,还是在运行期,温度变化会引起较大的温度应力,则使结构产生裂缝,影响结构的整体性和耐久性。大体积混凝土结构中,温度变化对结构的应力具有重要影响,有时温度应力大大超过其他外荷载所产生的应力。我国某重力坝孔口应力的研究表明,按照产生应力的大小排列,各种荷载的次序是温度、水压力、自重,而且温度应力比其他各种荷载产生的应力总和还要大。因此,温度应力仿真分析、温度控制和防止裂缝的措施是大体积混凝土结构设计、施工中十分重要的课题。

1.1 混凝土裂缝的形成与危害性

1.1.1 混凝土裂缝的形成和发展

大体积混凝土结构通常要承受两种不同的荷载:一种是结构荷载,包括建筑物所承受

的水压力、土压力、扬压力、地震力以及建筑物自重等；另一种为混凝土本身的体积变化荷载。大体积混凝土的体积变化荷载，主要是由温度、徐变、自身体积变形以及表面湿度的变化等引起的，这种体积变化荷载会引起很大的应力，其中温度应力最重要。

在大体积混凝土结构的设计中，通常要求不出现拉应力或者只出现很小的拉应力，对于自重、水压力等外荷载，要做到这点一般并不困难。但在施工过程中和运行期间，在大体积混凝土结构中往往会因温度的变化而产生很大的拉应力，要把这种温度变化引起的拉应力限制在允许范围内是不容易的。因此，在大体积混凝土结构中往往会出现裂缝。

总的来说，大体积混凝土施工阶段所产生的温度裂缝，是其内部矛盾发展的结果。一方面是混凝土内部因内外温差而产生应力和应变；另一方面是结构的外部约束和混凝土各质点间的约束阻止这种应变。一旦温度应力超过混凝土的抗拉强度时，即会产生裂缝。产生裂缝的主要原因有：①水泥水化热；②外界温度变化；③约束条件的影响；④混凝土的收缩变形。

混凝土结构中常见的裂缝主要是温度裂缝和干缩裂缝。

大体积混凝土结构一般断面较厚，混凝土中的水泥在硬化过程中会产生大量水化热。水泥发出的热量聚集在结构内部不易散失，导致温度不断上升，其程度与混凝土单位体积中水泥用量和水泥品种有关。我国生产的水泥，一般在 28d 内总的水化热为 209~335J/g；绝热温升可达 10~40℃，即使考虑表面散热，混凝土内部最高温度仍比浇筑时高 7~35℃，多数发生在浇筑后的 3~5d 内。由于混凝土的导热性能较差，浇筑初期混凝土的强度和弹性模量都很低，对水化热引起的急剧温升约束不大，相应的温度应力也较小。随着混凝土龄期的增加，弹性模量逐渐增大，对混凝土内部降温收缩的约束也就越来越大，导致产生很大的拉应力。当混凝土的抗拉强度不足以抵抗拉应力时，便开始出现裂缝。

研究表明，混凝土降温发生体积收缩，受基岩约束将会产生很大的拉应力，如果超过混凝土的抗拉强度，就将出现基础贯穿裂缝。在脱离基岩约束部位，如果混凝土的最高温度与外部介质的温差过大，内部热的混凝土约束外部冷的混凝土收缩，受混凝土内部非线性温度场的约束条件控制，也可能出现深层裂缝或表面裂缝。浇筑层面的表面裂缝主要由水平方向的非线性温度场决定，垂直方向的裂缝（在脱离基岩约束以后）主要由垂直方向的非线性温度场造成，并与浇筑的长间歇期有关。早期的表面裂缝是混凝土表层薄弱点，在继续降温过程中，将会发展成为破坏性裂缝。

气温的降低也会在混凝土表面引起很大的拉应力。混凝土传热性能不佳，气温骤降使混凝土表层急剧降温，而其内部仍处于高温阶段，因而在表层附近形成很大的温度梯度，限制表层混凝土的急剧收缩，使混凝土的徐变性能不能发挥。所以，气温骤降容易导致混凝土表层产生裂缝。如果这些裂缝出现在基岩面附近，由于混凝土后期均匀降温，受基岩约束产生的温度应力，将在这些裂缝出现的部位产生应力集中，并逐步发展成基础贯穿裂缝。如果这些裂缝出现在脱离基础约束范围以外，在经历一个较长降温过程以后，如果内部温度较高，则在混凝土内部形成一个梯度较大的非线性温度场，从而使裂缝向纵深发展，形成深层裂缝。需要指出的是，在龄期 3~5d 拆模的混凝土，使表层混凝土突然暴露在较冷的空气中，也相当于一次气温骤降，因此拆模后必须立即进行保温。

干缩也是引起混凝土裂缝的一个原因。大体积混凝土内部湿度变化很小，表面湿度

可能发生剧烈变化。如养护不周或时干时湿,表面干缩变形受到内部混凝土约束,也会导致裂缝。但表面湿度的影响只局限在表面很浅的范围内,只要加强养护,就不难解决干缩裂缝问题。

1.1.2 裂缝的危害性

根据国际坝工委员会 1988 年所作的关于大坝工作状态的调查报告,在遭受灾难性破坏的 243 座混凝土坝中,就有 30 座是由温度问题而引起的,世界各国已建成的混凝土坝绝大多数或多或少都存在着温度裂缝。一般说来,20 世纪 50 年代我国建造的大坝在不同程度上都出现了裂缝。20 世纪 80 年代,中国水利科学研究院对我国的拓溪、新安江、丹江口、刘家峡、葛洲坝、龙羊峡等十五座大型混凝土坝的温度裂缝情况做了系统调查,发现几乎每座混凝土坝都存在数百条,甚至数千条裂缝。其中,丹江口、葛洲坝等混凝土坝裂缝均超过千条,尤以丹江口工程最为严重,出现裂缝 3332 条,其中的基础贯穿裂缝 18 条,深层裂缝 19 条。据三峡枢纽工程验收组副组长、专家组组长潘家铮院士介绍,举世瞩目的三峡工程在 2000 年 10 月开始出现一些表面裂缝,其中在已浇筑的 2000 多万 m^3 混凝土中,出现了 2000 多条裂缝,裂缝最宽超过 1mm,最长的有 20~30m;温度裂缝集中在上游坝面上。

大体积混凝土内出现的裂缝,按其深度不同,可分为贯穿裂缝、深层裂缝及表面裂缝三类,如图 1.1 所示。贯穿裂缝切断了结构断面,破坏了结构的整体性和稳定性,具有严重的危害性,如与迎水面相通,还可能引起漏水。深层裂缝部分切断了结构的断面,也有一定的危害性。表面裂缝危害性较小,但处于基础或者老混凝土约束范围以内的表面裂缝,在内部混凝土降温过程中,可能发展为深层甚至贯穿裂缝。

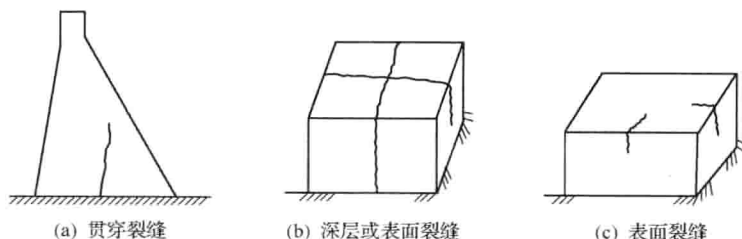


图 1.1 裂缝类型

一旦形成平行于结构轴线方向的基础贯穿裂缝或深层裂缝,其危害性十分严重。这些裂缝破坏了结构的整体性,改变了混凝土建筑物的受力条件和应力分布,可能使局部甚至整体结构发生破坏。即使是一般的表面裂缝,也可使混凝土耐久性降低。在结构运行期,温度应力和结构应力叠加,对整个结构的应力状态具有不容忽视的影响,所以温控设计与结构设计具有同等重要的意义。

1.2 混凝土温度应力的特点和类型

混凝土结构温度应力的变化规律不同于其他结构(如钢结构等),其主要原因是混

土弹性模量等材料性质随龄期变化,而且在一般情况下,需要考虑混凝土徐变。

由于混凝土弹性模量 $E_c(\tau)$ 随着龄期 τ 而变化,应采用增量法计算温度应力,将时间 τ 划分为一系列时段 $\Delta\tau_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 在第 i 个时段 $\Delta\tau_i$ 内,温度增量为 ΔT_i , 平均弹性模量为 $E(\tau_i)$, 单向应力状态下,弹性应力增量为

$$\Delta\sigma_i = -\alpha E(\tau_i) \Delta T_i \quad (1.1)$$

叠加后,得到混凝土弹性应力为

$$\sigma_c(\tau) = -\alpha \sum E(\tau_i) \Delta T_i \quad (1.2)$$

若考虑混凝土徐变的影响,应力可以表示为

$$\sigma_c(\tau) = -\alpha \sum E(\tau_i) K(t, \tau_i) \Delta T_i \quad (1.3)$$

式中: $K(t, \tau_i)$ 为应力松弛系数。

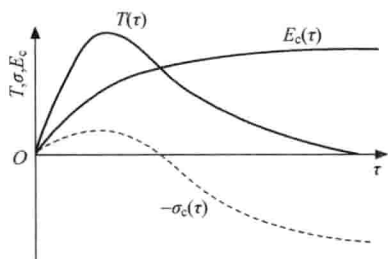


图 1.2 混凝土杆温度应力时变曲线

图 1.2 显示了固端混凝土杆件内温度 $T(\tau)$ 和应力 $\sigma_c(\tau)$ 随时间的变化。在早期升温阶段,杆内产生压应力,但因早期混凝土弹性模量较小,松弛系数也较小,因此压应力的数值不大;在后期降温阶段,混凝土弹性模量较大,松弛系数也较大,单位温差产生的应力增量较大,因此随着杆内温度的逐步降低,不但抵消了早期压应力,而且在杆内还产生了很大的拉应力。最终,当时间 $\tau \rightarrow \infty$ 时,温度 $T(\infty) \rightarrow 0$, 会产生很大的剩余拉应力。

在一般情况下,当温度变幅达到 $12 \sim 20^\circ\text{C}$ 时,对于受到完全约束的混凝土,后期产生的拉应力足以使混凝土被拉断。

刘兴法曾阐述温度应力的特点为:①与一般荷载应力不同,应力和应变不再符合简单的胡克定律,出现了小应变大应力和大应变小应力的情况,但平面变形规律仍然适用,温差应力则与平面变形后保留的应变和温度自由应变之差成正比;②由于温度荷载沿壁板厚度方向非线性分布,截面上温度应力分布具有明显的非线性;③由于温度分布瞬时变化,结构中的温度应力也瞬时变化,具有明显的时间性。

由于混凝土的材料性质随龄期变化,大体积混凝土温度应力的发展可以分为以下三个阶段。

(1) 早期应力。自浇筑混凝土开始至水泥放热作用基本结束时止,约一个月时间。在这个阶段,水泥放出大量水化热,引起温度场和混凝土弹性模量等材料性质急剧变化。

(2) 中期应力。自水泥放热作用基本结束至混凝土冷却至稳定温度时止,主要由混凝土冷却及外界气温变化引起温度应力,并与早期应力叠加。混凝土材料性质变化较小。

(3) 晚期应力。混凝土完全冷却以后的运行期,主要由外界气温和水温变化引起温度应力,并与早期应力和中期应力叠加形成了混凝土晚期应力。

根据引起应力的原因,温度应力可以分为两类。

(1) 自生应力。边界上没有受到任何约束或者完全静定的结构,如果结构内部温度线性分布,则不产生应力;如果结构内部温度非线性分布,由于结构本身互相约束产生的

温度应力,称为自生应力。例如,混凝土冷却时,表面温度较低,内部温度较高,表面的温度收缩变形受到内部的约束,在表面出现拉应力,在内部产生压应力。自生应力的特点是在整个截面上拉应力与压应力保持平衡,也称为自平衡应力,如图 1.3(a)所示。

(2) 约束应力。结构的全部或部分边界受到外界约束,温度变化时不能自由变形引起的温度应力,称为约束应力。例如,混凝土浇筑块在冷却时受到基础约束而产生温度应力,如图 1.3(b)所示。

在静定结构内只出现自生应力,而在超静定结构内可能同时出现约束应力和自生应力。

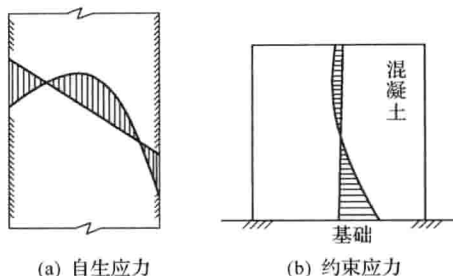


图 1.3 温度应力类型

1.3 混凝土温度应力分析研究现状

在 20 世纪初,人们对混凝土坝的温度变化过程及后果还知之甚少,在设计和施工中采用整体式大块的浇筑,各种水工建筑物内出现了许多性质不同的裂缝。通过长期的观测和试验,人们开始认识到混凝土产生裂缝的主要原因是温度应力,于是开始研究温度变化、温度应力和控制温度的措施等问题。

20 世纪 30 年代中期,美国在修建胡佛坝时开始研究大体积混凝土的温度应力和温度控制。40 年代起,美国垦务局、日本京都大学、苏联水工研究院等对大体积混凝土结构的设计和施工技术、温度控制指标、温度控制措施都做了深入的研究,如浇筑块的合理分缝分块、适当减少水泥用量、选择低热水泥和各种骨料预冷方法等。1953 年,美国陆军工程师团在修订混凝土坝施工规范时首次对混凝土的表面保温提出了明确要求:①温度骤降超过 14°C 时,必须对混凝土表面进行保温;②在每年九月至次年四月的低温季节,当浇筑块顶面和侧面暴露时间超过 30d 时,也需对混凝土表面进行保温。至此,美国混凝土坝温度控制的基本框架已经完成。苏联为解决混凝土坝的温控防裂问题,经历了 20 年时间。

美国加州大学的 Wilson 最早把有限元时间过程分析方法引入混凝土坝温度应力分析中。他在 1968 年为美国陆军工程师团研制出可模拟大体积混凝土结构分期施工温度场的二维有限元程序 DOT-DICE,并用于德沃歇克坝温度场的计算。后来,又与他人合作研制了考虑混凝土徐变的应力分析程序。

1985 年,美国陆军工程师团的工程师 Tatro 和 Schrader 在美国混凝土学会会刊上发表了他们对美国第一座碾压混凝土坝(柳溪坝)的一维温度场有限元分析成果,被认为是碾压混凝土坝温度场有限元分析的第一份文献。之后,美国 Woodward-Clyde 咨询公司又采用 DOT-DICE 的最新版本对斯特基特奇坝的温度场进行了二维有限元分析,重点研究了从施工结束到蓄水完毕的两年多时间内温度场的变化,较好地反映了水库蓄水后水温对坝体温度场的影响,这是柳溪坝一维有限元模型无法考虑的。1992 年 2 月,在美国

加州圣地亚哥市举行的第三次混凝土会议上,Barrett 等的论文介绍了三维温度应力分析软件 ANACAP。该软件不但能模拟逐层浇筑计算施工期混凝土坝的温度场和应力场,而且可以考虑用温度、龄期、弹模、徐变、干缩等因素分析坝体蓄水后自重、渗流和温度应力的影响,还可采用虚拟裂纹模型,用随机有限元描述不同层面的离差特性,分析评估坝体可能开裂的部位及规模。

20 世纪 80 年代,日本工程界对约束分析法进行了较深入的研究,取得了引人注目的成果。英国、法国、澳大利亚、苏联的情况大致相似,也有一些自己的有限元程序包和做法,但整体水平落后于美国、日本。

早在 20 世纪 50 年代,我国坝工界就认识到温度荷载和水压力、自重、渗透压力、地震力等是重力坝的五种主要荷载。潘家铮院士、朱伯芳院士等提出了大体积混凝土结构温度控制和设计的整套理论,解决了重力坝和混凝土浇筑块的温度应力计算、拱坝的温度荷载、水泥水化热的绝热温升的计算、无限域内圆形孔的温度应力、混凝土浇筑块的临界表面放热系数、大体积混凝土结构表面温度应力的计算,以及碾压混凝土重力坝及碾压混凝土拱坝的温度应力计算与温度控制方法等问题,并分别用差分法、有限元法和数理统计理论对混凝土结构的温度场进行了研究,提出了解决各种边界条件和初始条件下的板梁、圆管、浇筑块、拱坝、重力坝等温度应力的分析方法。

20 世纪 80 年代以来,中国水利水电科学研究院、清华大学、河海大学、天津大学、西安理工大学、武汉水利电力大学、大连理工大学等,都进行了混凝土温度应力的攻关研究,分别对沙溪口溢流坝、盐滩工程围堰、观音阁、铜街子、二滩、三峡、溪洛渡、小湾、普定、龙滩等混凝土坝进行了温度应力的计算分析,取得了一批有价值的研究成果。

温度应力的计算方法主要有:朱伯芳提出的并层算法和分区异步长法;肖明的考虑外部温度变化效应的三维损伤开裂非线性有限元分析方法;赵代深的混凝土坝浇筑块长度三维仿真敏感分析问题;陈敏林的估算应力方法;刘光廷的人工短缝法和大体积混凝土结构温度场随机有限元算法;陈里红的考虑混凝土软化特性的温度应力仿真分析方法等。这些温度场、应力场分析方法都是结合具体工程进行研究的,为大体积混凝土温度应力计算奠定了坚实的基础。

1.4 控制温度应力和防止裂缝的措施

大体积混凝土结构内一旦出现大的裂缝,难以通过修补恢复结构的整体性。我国曾经有几座大型水利水电工程,由于出现大量裂缝,被迫停工修补,费时数年才恢复正常施工。因此,对于大体积混凝土结构的裂缝,应以预防为主。由于裂缝问题牵涉的因素较多,施工周期较长,需要精心设计、精心施工。

总结国内外经验,为了防止大体积混凝土结构出现裂缝,应从以下几方面着手。

1) 选择合适的结构形式

结构形式对温度应力和裂缝具有重要影响。我国桓仁水电站采用大头坝,青铜峡水电站采用河床式水电站。这两个工程的特点是结构单薄,对外界温度变化比较敏感,而当地气候寒冷,气温年变幅很大,在施工过程中出现了大量裂缝,被迫停工修补,数年后才恢

复正常施工。这些工程实例说明,在设计阶段应充分重视结构形式对温度应力和裂缝问题的影响,特别在寒冷地区,应尽量少用对温度变化敏感的薄壁结构。在实体重力坝与宽缝重力坝的对比中,由于宽缝重力坝暴露面积大,比实体重力坝易于出现裂缝,在寒冷地区应尽量少用宽缝重力坝。

浇筑块尺寸对温度应力有重要影响,浇筑块越大,温度应力也越大,越容易产生裂缝。因此,合理的分缝分块对防止裂缝有重要意义。实际经验和理论分析都表明,当浇筑块平面尺寸控制在 $15\text{m} \times 15\text{m}$ 左右时,温度应力比较小,基础约束高度也只有 $3 \sim 4\text{m}$ 。在气候温和地区,产生裂缝的可能性较小;但在寒冷地区,由于温差过大,这种尺寸的浇筑块仍然难免出现大量裂缝,需要采取严格的保温措施。

在同一浇筑块内应避免基础过大的起伏,在结构形式上应尽量避免或减缓应力集中。

2) 选择混凝土原材料、优化配合比

选择混凝土原材料、优化混凝土配合比,使混凝土具有较大的抗裂能力,即要求混凝土绝热温升小、抗拉强度大、极限拉伸变形能力大、线胀系数小、自生体积变形小。

(1) 选择水泥。内部混凝土满足抗裂性能好、兼顾低热和高强的要求,采用低热矿渣水泥、中热硅酸盐水泥或硅酸盐水泥掺入一定量的粉煤灰。外部混凝土除了满足抗裂性能外,还要具有抗冻融性、耐磨性、抗蚀性、强度高及干缩小等特性,一般采用较高标号的中热硅酸盐水泥。当环境水具有硫酸盐侵蚀性时,应采用抗硫酸盐水泥。

(2) 掺用混合材料。掺用混合材料的目的是降低混凝土的绝热温升、提高抗裂能力。常用的混合材料有矿渣、粉煤灰、烧黏土等。

(3) 掺用外加剂。外加剂有减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂等。减水剂是最常用、最重要的外加剂,具有减水和增塑作用,在保持混凝土坍落度及强度的条件下,可减少用水量,节约水泥,降低绝热温升。引气剂的作用是在混凝土中产生大量微小气泡以提高混凝土的抗冻融耐久性。缓凝剂用于夏季施工,早强剂则用于冬季施工。

(4) 优化混凝土配合比。在保证混凝土强度及流动性条件下,尽量节省水泥,降低混凝土绝热温升。

3) 严格控制混凝土温度,减小基础温差、内外温差及表面温度骤降

(1) 降低混凝土浇筑温度。通过冷却拌和水、加冰、预冷骨料等办法降低混凝土出机口温度,采用加大混凝土浇筑强度、仓面保冷等方法减少浇筑过程中的温度回升。

(2) 水管冷却。在混凝土内埋设水管,通低温水以降低混凝土温度。

(3) 表面保温。在混凝土表面覆盖保温材料,减少内外温盖、降低混凝土表面温度梯度。

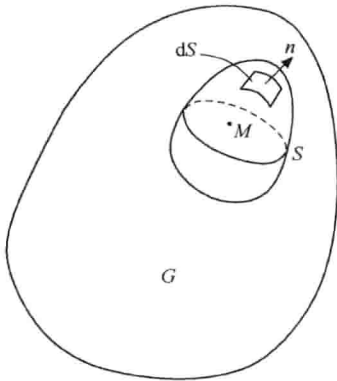
在混凝土浇筑时,做到薄层、短间歇、均匀上升,利用低温季节浇筑基础部分混凝土。加强养护,严格控制温度。

第二章 热传导方程及边值条件

2.1 热传导方程

热传导就是物体内部温度较高点处的热量向温度较低点处的流动。在任一瞬时,所有物体上各点温度值的总体,称为温度场。

在物体 G 中任取一闭曲面 S , 如图 2.1 所示, 以函数 $T(x, y, z, t)$ 表示物体 G 在位置 $M(x, y, z)$ 时刻 t 的温度。根据 Fourier 热传导定律, 在无穷小时段 dt 内流过物体的一个无穷小面积 dS 的热量 dQ 与时间 dt 、曲面面积 dS , 以及物体温度 T 沿曲面 dS 的外法线方向的方向导数 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 三者成正比, 即



$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS dt \quad (2.1)$$

式中: $\lambda = \lambda(x, y, z, t)$ 为物体在点 $M(x, y, z)$ 处的热传导系数或导热系数, 取正值, 表示在单位温度梯度下通过等温面单位面积的热流速度, 单位为 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; n 为外法向, 规定 n 指向的一侧为 dS 的正侧; 负号表示热量的流向与温度梯度方向相反。

对于 G 内任意封闭曲面 S , 设其所包围的空间区域为 V , 则从时刻 t_1 到时刻 t_2 经曲面 S 流出的热量为

$$Q_1 = - \int_{t_1}^{t_2} \left[\iint_S \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS \right] dt \quad (2.2)$$

设物体的比热容为 $c(x, y, z)$, 单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 密度为 $\rho(x, y, z)$, 单位为 kg/m^3 ; 则无穷小体积 $dV = dx dy dz$ 的温度由 $T(x, y, z, t_1)$ 升高到 $T(x, y, z, t_2)$ 所需热量为

$$dQ = c\rho [T(x, y, z, t_2) - T(x, y, z, t_1)] dV \quad (2.3)$$

因此, 使 V 内各点温度由 $T(x, y, z, t_1)$ 变化为 $T(x, y, z, t_2)$ 所需热量为

$$Q_2 = \iiint_V c\rho [T(x, y, z, t_2) - T(x, y, z, t_1)] dV \quad (2.4)$$

根据热量守恒定律, 有

$$Q_2 = -Q_1 \quad (2.5)$$

即

$$\iiint_V c\rho [T(x, y, z, t_2) - T(x, y, z, t_1)] dV = \int_{t_1}^{t_2} \left[\iint_S \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS \right] dt \quad (2.6)$$

假设函数 $T(x, y, z, t)$ 关于 x, y, z 具有二阶连续偏导数, 关于 t 具有一阶连续偏导

数,则由 Gauss 公式可得

$$\int_{t_1}^{t_2} \iiint_V \left[c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dV dt \quad (2.7)$$

由于时间间隔 $[t_1, t_2]$ 及区域 V 是任意选取的,而且被积函数是连续的,在任何时刻 G 内任何一点,得到非均匀各向同性体的热传导方程,即

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

式中: $T = T(x, y, z, t)$ 为温度场,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $\lambda = \lambda(x, y, z)$ 为导热系数,单位为 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $c = c(x, y, z)$ 为比热容,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $\rho = \rho(x, y, z)$ 为密度,单位为 kg/m^3 。

若物体是均匀的,则 λ, c 及 ρ 均为常数,令 $a = \lambda/(\rho c)$, 则均匀各向同性体的热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (2.9)$$

式中: a 为导温系数,单位为 m^2/h 。

若对物体进行微元体分析,可以认为微元体是均匀各向同性的,故一般考虑均匀各向同性体的热传导方程即可。

若考虑物体内有热源,其热源密度为 $F(x, y, z, t)$, 则有热源的热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + f(x, y, z, t) \quad (2.10)$$

式中: $f = F/(\rho c)$ 。

如果经过长期热交换后,温度场不再随时间变化,称作稳定温度场。此时热传导方程成为

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.11)$$

2.2 温度场的边值条件

为了能够求解热传导方程,从而求得温度场,必须已知物体在初瞬时的温度分布,即所谓初始条件;同时还必须已知初瞬时以后物体表面与周围介质之间进行热交换的规律,即所谓边界条件。初始条件和边界条件统称为边值条件或定解条件。热传导方程和相应的边值条件结合构成了一个定解问题。

初始条件一般表示为

$$T|_{t=0} = f(x, y, z) \quad (2.12)$$

在某些特殊情况下,在初瞬时,温度为均匀分布,即

$$T|_{t=0} = C \quad (2.13)$$

式中: C 为常数。

边界条件可以归纳为四类。

第一类边界条件是:已知物体表面上任意一点在所有时刻的温度,即

$$T|_r = f(t) \quad (2.14)$$