



辽宁科协资助

辽宁省优秀自然科学著作·2015年

● 杨璐 沈新普 著

大体积混凝土结构的 损伤理论与应用

Damage Theory and Application of Mass Concrete Structure



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

辽宁省优秀自然科学著作

大体积混凝土结构的损伤 理论与应用

杨璐 沈新普 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2016 杨璐 沈新普

图书在版编目 (CIP) 数据

大体积混凝土结构的损伤理论与应用/杨璐, 沈新普
著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2016. 8

(辽宁省优秀自然科学著作)

ISBN 978-7-5381-9835-5

I. ①大… II. ①杨… ②沈… III. ①混凝土结构
—损伤(力学)—数值模拟—研究 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126478 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印刷者: 鞍山市春阳美日印刷有限公司

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印 张: 7

字 数: 153 千字

印 数: 1~1 000

出版时间: 2016 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 李淑敏

书 号: ISBN 978-7-5381-9835-5

定 价: 30.00 元

联系电话: 024-23284526

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

《大体积混凝土结构的损伤理论与应用》是一本用损伤力学研究混凝土材料和构件力学行为的专著。

随着水利、建筑工程技术的迅速发展,大型、复杂且重要的混凝土结构如大体积混凝土大坝、核电站混凝土保护壳、地下混凝土墙、高耸混凝土建筑等不断涌现。常规的混凝土力学理论往往不能满足此类复杂且重要混凝土结构的安全承载力分析需要,因此,混凝土的种种非弹性理论应运而生。

本书首先提出了大体积混凝土温度应力问题在现代工程建设中越来越引起人们的重视。一直以来,在大体积混凝土的施工过程中,防止混凝土由于温度造成的裂缝是工程设计与施工中必须面对的关键技术问题。对大体积混凝土温度场及温度应力进行合理的数值模拟及分析计算,是施工中实施大体积混凝土温度控制的重要前提。运行期间,对溢流坝段温度场与渗流场进行仿真计算。对于温度场,考虑库水温度、空气温度、太阳辐射等因素的影响。对于渗流场,施加孔隙水压力进行坝体渗流分析,并采用子模型技术局部分析坝踵排水孔渗流情况,采用自定义单元子程序法与常规有限元法分别进行计算,并将结果进行对比。

同时,就混凝土尺寸效应的材料力学性能进行研究,关系到混凝土材料的真实强度、承载性和结构耐久性的评定。研究混凝土材料的强度、断裂能、应力强度因子和 J 积分等力学参数受尺寸变化的影响,对混凝土材料问题的研究有重要的理论意义和工程意义。

随着计算技术和实验技术的发展,混凝土在重要且复杂工程结构中的应用日益增多,相关科学研究成果层出不穷。但是系统介绍大体积混凝土坝施工期运行期数值模拟及塑性损伤计算与理论方法的图书目前不算多。本书的目的是要弥补这一不足。

本书的主要内容是作者近年来在两项国家自然科学基金课题(11102118, 11272216)支持下的理论和实验研究成果。

作者希望本书能够为相关工程技术人员和高年级本科生、研究生提供一本较有价值的混凝土损伤力学研究的参考书。

感谢沈阳工业大学计算力学研究所硕士研究生李士民、刘东博、孔令娟在本书部分章节写作过程中提供的帮助。

作者

2015年6月2日

目 录

1	绪论	001
1.1	大体积混凝土温度应力问题的研究意义	001
1.2	大体积混凝土温度应力国内外研究现状	001
1.3	重力坝概述	003
2	混凝土温度效应原理、塑性损伤本构理论及孔压渗流原理	006
2.1	温度场有限元计算原理	006
2.2	温度应力场有限元计算原理	009
2.3	混凝土的塑性损伤本构理论	010
2.4	渗流原理	013
2.5	小结	015
3	混凝土尺寸效应	016
3.1	引言	016
3.2	混凝土尺寸效应的研究意义	016
3.3	国内外混凝土尺寸效应的研究现状	017
3.4	混凝土强度尺寸效应	018
3.5	断裂参数尺寸效应	022
3.6	小结	025
4	某水库施工期数值模拟	026
4.1	引言	026
4.2	某水库施工期工程概况	026
4.3	施工期温度场仿真计算	029
4.4	施工期应力场仿真计算	031
4.5	温度场计算结果提取与分析	035
4.6	温度应力耦合计算结果提取与分析	040
4.7	小结	044
5	某水库运行期的数值模拟研究	046

5.1	引言	046
5.2	子模型技术	046
5.3	运行期温度场仿真计算	047
5.4	运行期流固耦合仿真计算	049
5.5	温度场模拟结果分析	054
5.6	应力场及渗流场模拟结果分析	057
5.7	小结	061
6	混凝土塑性损伤耦合本构数值模拟	062
6.1	引言	062
6.2	棚洞结构滚石灾害综述	062
6.3	基于 ABAQUS 下的滚石冲击棚洞的模型设计分析	063
6.4	计算结果及分析	065
6.5	小结	072
7	混凝土抗压强度尺寸效应的数值模拟分析	073
7.1	模型参数	073
7.2	基于塑性损伤本构的混凝土强度算例分析	073
7.3	基于塑性损伤本构的混凝土抗压强度尺寸效应分析	080
7.4	小结	085
8	断裂能尺寸效应的数值模拟分析	086
8.1	引言	086
8.2	黏结单元	086
8.3	三点弯曲梁数值模拟分析	087
8.4	结果分析	090
8.5	小结	096
9	应力强度因子、J 积分尺寸效应的数值模拟分析	098
9.1	引言	098
9.2	模型建立	098
9.3	结果分析	099
9.4	小结	103
	参考文献	104

1 绪论

1.1 大体积混凝土温度应力问题的研究意义

我国水资源贫乏,年人均约 $2\,300\text{ m}^3$;而水能资源又十分丰富,总蕴藏量达 6.76 亿 kW ,约占全世界的 $1/6$,居世界第一,可能开发的容量约 4 亿 kW ,年发电量 $10\,000$ 亿~ $20\,000$ 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这相当于每年提供 4 亿~ 8 亿 t 标准煤或 3 亿~ 6 亿 t 重油的能量。为了开发和利用这些水资源和水能资源,新中国成立以来共修建了 $87\,000$ 余座大坝,居世界第一,水库总蓄水量 $6\,900$ 亿 m^3 。这些水库大坝兼有防洪、发电、灌溉、供水等多种功能,在保障防洪安全、供水安全、粮食安全、生态安全等方面发挥了重要作用,为促进国民经济发展、社会稳定和人民生活水平提高做出了巨大贡献。

混凝土大坝承受巨大的水压力、温度荷载和地震荷载等,工作条件十分复杂。混凝土裂缝是混凝土大坝的主要病害之一。其成因复杂,但主要原因是由温度荷载产生的。混凝土结构所承受的温度荷载大致分为两类:一类混凝土结构在浇筑后,凝结硬化过程中要逐渐释放出大量的水化热,导致温度上升。另一类是外界条件的影响,诸如日照、气温、水温、地温、高温辐射、寒潮袭击等。温度作用必然引起混凝土结构中材料的不均匀变形,当这种变形受到约束时(包括基础边界的约束、混凝土坝体内部和外部不均匀变形产生的约束),一般都会使混凝土坝体产生较大的拉应力,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,就会产生裂缝。这种裂缝的发生和发展,不仅影响大坝的外观,而且往往导致大坝漏水,破坏坝体的整体性,影响工程的耐久性,尤其是贯穿性裂缝的出现,还将危及坝体或整个枢纽工程的安全。所以,混凝土大坝的温度应力研究至关重要。

混凝土大坝的温度应力与坝体采用的结构形式、混凝土热力学性能、施工方法及当地的气候条件等多种因素有关。混凝土大坝的温度应力受混凝土水化热和外部环境影响较大,因此混凝土温度应力的分析比自重荷载、水压力荷载、淤沙及坝基的压力荷载等其他外荷载的分析复杂。混凝土大坝的温度应力的分析是混凝土坝体设计和施工中必须面临和解决的难题。

1.2 大体积混凝土温度应力国内外研究现状

混凝土结构温度应力的研究有着悠久的历史,温度应力问题一直是水工结构设计和施工中的关键问题。根据国际坝工委员会(ICOLD)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都或多或少存在着温度裂缝。

对于大体积混凝土温度的系统研究,源于20世纪30年代中期美国修建的胡佛坝。

由于胡佛坝当时是世界上最高的混凝土建筑物,人们在坝体分缝分块通水冷却及天然散热冷却方面取得了许多成果。1968年美国 Wilson 教授研制二维温度场有限元仿真程序 DOT-DICE,对德沃夏克坝进行了温度应力的有限元计算。1985年,工程师 Taturo 和 Schrader 修改了仿真程序 DOT-DICE,并应用其对柳溪坝进行温度应力有限元分析,由于受当时计算机技术的限制,当时采用的是比较简单的模型,按平面应力问题来模拟。他们突破性地将施工过程与结构计算有效地结合到一起,求出了不同施工期坝体的温度场,将分析得到的结果同实测结果比较吻合得非常好。不过由于当时对弹性模量和徐变随时间变化的关系等问题尚无深入准确的研究,所以计算的温度应力与实测值相差较大。1987年,Vecchio 对钢筋混凝土框架进行温度作用下的非线性分析,并且推导了计算公式,对大体积混凝土的数值模拟计算提供了指导。1988年,Elgaaly 对混凝土结构中的梁、墙板和楼板的温度梯度进行了实验测试和理论研究,通过对比结果推导出了结构影响参数的计算公式。1992年,巴瑞特等介绍了三维温度应力计算软件 ANACAP,其创造性地把 Bazant 的 Smeared Crack 开裂模型引入到温度应力的分析中,限于当时的计算机硬件水平,他们的计算是带有一种尝试性质的。1994年,Emborg 和 Bernander 通过对混凝土早期温度应力和温度裂缝进行多项实验研究,提出综合考虑早期混凝土的温度变化、温度传导以及混凝土配筋等因素理论计算模型,证明了在计算机有限元计算分析中,对于混凝土结构的温度裂缝,只考虑混凝土结构内部的温度分布是不充分的。

在 20 世纪 50 年代的时候,我国水利界就开始了大体积混凝土温度应力的研究,以朱伯芳院士为代表的老一辈科技工作者,结合实际工程,经过长期的辛勤努力,获得了一系列的研究成果,并编制了我国第一个不稳定温度场有限元程序,第一个混凝土温度徐变应力有限元程序,把有限元方法成功运用于分析大体积混凝土结构的温度场和温度应力;通过其对三门峡坝底孔温度应力的仿真分析,实现了我国首次大体积混凝土温度应力仿真计算,并得到一系列可供实际工程参考的数据。80 年代中期以来,朱伯芳院士又提出了一整套求解方法用于解决数值分析存在的一些问题,使大体积混凝土温度应力数值计算的一些问题得到了解决。1990—1992 年,河海大学通过大体积混凝土结构的有限元仿真程序系统 (TCSAP) 对小浪底工程进行了数值计算。天津大学赵代深等对铜街子碾压混凝土坝和五强溪等工程做了全过程温度场和应力场仿真计算研究,提出增量的全过程仿真动态模拟方法;清华大学等单位还研制了专用的有限元程序,进行混凝土温度场、徐变应力场的数值仿真计算,并在实际工程中得到了很好的应用和验证。清华大学张国新、刘光廷教授通过试验观测和数值计算相结合的方法,研究了碾压混凝土水平接缝初温的 3 种不同赋值方式及其对最终温度场的影响。李守义、杨婷婷提出了基于遗传算法对混凝土坝进行温度场反分析,反演得到混凝土热学参数并与试验做了对比。曹为民、谢先坤、朱岳明提出了双线性过渡单元和层合单元模型用于模拟施工期混凝土分层浇筑后的温度场,简化了某些规模超大复杂的水工结构问题的仿真计算。赵代深提出了混凝土拱坝应力分析的动态模拟方法。陈里红、傅作新教授等在温度应力分析中考虑了混凝土的软化性能。陈敏林提出了估算应力方法。刘光廷的大体积混凝土结构温度

场随机有限元算法。张国新教授、李荣湘教授提出用边界元方法计算大体积混凝土结构应力。黄达海等提出仿真分析的波函数法。王建江博士提出非均质单元法。

1.3 重力坝概述

重力坝为由混凝土或石料修筑的,主要依靠坝体自重保持自身稳定的坝。按其结构形式,可分为实体重力坝、空腹重力坝和宽缝重力坝;按溢流情况,可分为非溢流重力坝和溢流重力坝;按筑坝材料,可分为混凝土重力坝和浆砌石重力坝。

重力坝主要依靠坝体自重产生的抗滑力来满足自身稳定性要求,同时,坝体自重产生的压应力能够用来抵消由水压力引起的拉应力。重力坝基本剖面为三角形。在平面上,坝轴线通常为直线,有时为了适应地形、地质条件,或为了枢纽布置上的要求,也可布置成折线或曲率不大的拱向上游的拱形。

在施工过程中,若坝身长度过长,当受到温度、地震、水的冲刷等因素的影响时,容易发生断裂。因此,在施工中会考虑施加施工缝,即为坝体横缝,用于降低裂缝生成的可能性。

在运行期,蓄水完成后,在坝址和坝基位置会发生渗流状况,为减小渗流对坝体强度造成的影响,一般需在坝体内部上游位置设置排水管,在坝踵附近的坝基处设置防渗帷幕墙,在帷幕后还设置有排水孔。

1.3.1 大体积混凝土温度应力计算意义

大体积混凝土结构的特点主要有:

- (1) 混凝土为脆性材料,其受拉强度远小于受压强度。
- (2) 大体积混凝土体积较大,当完成浇筑初期,弹性模量较小,收到的温度应力也较小,但由于水泥水化生热,此时会产生大量的热。当混凝土温度逐渐降低时,弹性模量增大,由于约束以及温度的影响,其内部会产生较大的拉应力。
- (3) 大体积混凝土通常为水工建筑物等,其外表常与空气或水相接触,由于外界温度、水体等环境条件的变化,混凝土内部容易产生较大应力。
- (4) 大体积混凝土结构通常不进行钢筋的配置,如果配置,也只是在局部范围或洞口等较薄弱区域进行配置。对于钢筋混凝土结构,结构内部产生的拉应力由钢筋承担,混凝土只承担其内部压应力。而对于大体积混凝土,由于没有钢筋配置,内部拉应力与压应力均需由混凝土本身承担。

通常情况下,在大体积混凝土结构设计中,需要控制拉应力的产生。对于结构自重、水压等外部荷载,产生拉应力通常较小,一般不需要进一步的控制。而对于温度荷载,其所引起的内部拉应力通常较大,因此不能忽视。由于温度应力的存在,容易造成大体积混凝土结构中裂缝的生成,对于温度荷载影响的控制,颇为不易。影响温度应力的因素有外界气候、结构组成、施工安排等,因此,温度应力的变化十分复杂,对于温度应力的控制要比自重等荷载的控制更为繁琐。

综上,对于大体积混凝土结构,温度应力的测试、温度裂缝的预防等措施是需要重

点进行分析的内容。

1.3.2 重力坝材料及构造设置方案

重力坝的建筑材料主要是混凝土。对于水工混凝土,除强度外,还应考虑其他因素的影响,如抗冻、抗渗、抗侵蚀等因素。

随着龄期的增长,混凝土强度逐渐增强。通常情况下,在坝体施工中,混凝土的选择需要考虑强度与硬化龄期两个因素。一般工程中混凝土设计龄期可选为 90 d,当施工期较长例如为中、高层坝时,设计龄期可选为 180 d。

由于工况的不同,同一坝段中,混凝土材料的选取可以根据不同位置而发生改变,以实现材料的充分利用,减少经济损失等目的。同时,为了便于施工,同一浇筑层中的材料种类不应过多,通常不宜超过两类。根据规定,同一层中的混凝土强度种类不应超过两种,强度等级不应超过两级,而坝段分区宽度不应小于 2~3 m,以便于施工的进行。

1.3.3 重力坝温度效应

根据已有理论,在温度场中,坝体施工期的温度变化过程大致可分为 3 个阶段。

第一阶段为温度上升期。当混凝土浇筑完成初期,由于水化热作用的影响,混凝土温度在短时期内会得到显著提升,将由入仓温度 T_i 上升至温度最高值 $T_{\max}$ 。温度上升时间为 3~7 d。此段时间内混凝土的温度上升值称为水化温升,根据相关资料可知其值在 15~25 °C。

第二阶段为温度下降期。当水化生热基本完成后,随着混凝土热量的散失其温度逐渐降低,其中,坝体外部区域由于更易与外界产生热量传递,其温度达到稳定值速度较快,而在坝体内部,由于热量散失较慢,达到稳定温度的时间相对较长。

第三阶段为温度稳定变化期。坝体外部区域由于与外界直接接触,温度变化趋势将与外界温度一致。坝体内部距外界较远区域,其稳定温度一般接近于当地的年平均气温。

由于所处环境及坝体材料散热性能的不同,坝体温度由最高值下降到稳定值所需时间也会不同,温度下降到稳定值的时间长度也是温控的重要指标之一。

坝体各浇筑层的温度变化将引起自身体积的改变,由坝体与坝基之间的约束以及坝层自身的约束,当体积发生改变时,会有相应的变形应力产生,如何控制温度的变化,降低温度应力,是工程中应该进行考虑的问题。此类问题,工程上一般称为温度控制问题。

由于温度变化产生的裂缝一般只在大体积混凝土工程中较为常见,因此主要在大体积混凝土工程中考虑温度控制措施的施加。温度控制的目的是大致为:减少建筑物温度裂缝的生成以及在温控措施中找到较为简便高效的控制手段,提高经济效益和温控效果。

在大体积混凝土施工中,常见的温控措施主要有:

(1) 降低混凝土建筑温度。降低混凝土浇筑温度,常用方法有骨料预冷和加制冷剂拌和等。

(2) 减少混凝土水化温升。水泥的水化温升主要发生在浇筑初期,可以采用的有效手段有:采用水化生热小的水泥,施工中预埋冷却水管,浇筑层厚度不要过大,加大浇

筑后混凝土的散热面积,提高散热速率,在混凝土中添加掺加剂用以减少水泥的用量从而起到降低温升的效果。

(3) 加强对混凝土表面的养护和保护。通过对混凝土进行养护,能够起到防止温度裂缝生成的作用,通常使用的方法有:加盖保温板、浇水养护等。同时,要注意冬季寒冷气温的影响,防止混凝土冻裂,在夏季防止热量回灌,造成混凝土的温度应力发生过大变化。

1.3.4 溢流重力坝

溢流重力坝又称泄水重力坝,其既可以承担挡水作用,又可以承担排水作用。溢流重力坝是重力坝中重要的泄洪建筑,主要承担泄洪任务,降低水坝受洪水冲刷的影响。溢流坝段需要满足的要求有:

(1) 坝体孔口的尺寸和形状应满足要求,保证其过水流量满足要求。

(2) 尽量较少因水流产生的负压和振动现象。否则水体中容易产生气泡对坝体产生空蚀作用。

(3) 泄水时,大量流动的水会对坝体下游河床造成冲刷,应尽量避免这类现象的产生。

(4) 应具备控制坝体上游水流下溢的装置,如挡水闸门、启闭机等。

溢流坝面设计是溢流坝设计的重要部分,其能够影响到水流下泄时的流速与水压。溢流坝面的组成通常可分为3部分:顶部曲线段、中间直线段、反弧段。

顶部曲线段是控制坝体流量的关键,常用的设计主要有两种:克—奥曲线与WES曲线。克—奥曲线多用于早期坝段的设计,随着科技的进步,电子科技的提升,现在多使用WES曲线,其能更加有效地控制流体流量,简化施工。

反弧段主要用于水流压力卸载。其设计方案多与下游消能情况相结合。反弧段构造多为半圆形,在末端向上扬起以减小水压。在反弧段中,水体流速较快,易产生空化作用,使坝体发生空蚀破坏,应注意后期的防护与维修。

中间直线段是连接顶部曲线段与反弧段的部分,其构造较为简易,一般为直线,坡度与溢流坝下游坡度一致,用于承载溢流水流。

2 混凝土温度效应原理、塑性损伤本构理论及孔压渗流原理

2.1 温度场有限元计算原理

2.1.1 热传导基本概念

在热传导分析中,求解能率守恒方程并确定温度的分布。

$$\rho c \dot{\theta} = Q - I_q \quad (2.1)$$

式中, ρ 为密度; c 为比热; $\dot{\theta}$ 为温度变化率; Q 为外部热量; I_q 为内部热量。

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

式中, λ 为导热系数, 衡量物质中热量流动的能力, 单位为 $\text{J}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; q 为热流密度, 正比于热传导率和温度梯度。

图 2.1 为二维热传导示意图。

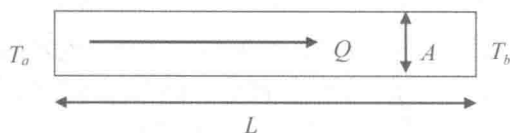


图 2.1 二维热传导示意图

$$Q = qA = -\lambda A \frac{T_b - T_a}{L} \quad (2.3)$$

$$Q \Delta t = \rho V c \Delta \theta \quad (2.4)$$

式中, Δt 为时间增量; c 为比热, $\Delta \theta$ 为温度增量。

一维热传导公式

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

式中, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$, 为导温系数。

2.1.2 三维热传导基本原理

假设混凝土围均匀、各向同性体, 且内含有热源, 从中选取出一个无限小的六面体 $dx dy dz$, 如图 2.2 所示, 单位时间内沿 x 方向进入的热量为 $q_x dy dz$, 流出的热量为 $q_{x+dx} dy dz$, 则单位时间内沿 x 方向进入的净热量为:

$$Q_x = (q_x - q_{x+dx}) dy dz \quad (2.6)$$

图 2.2 为三维热传导示意图。

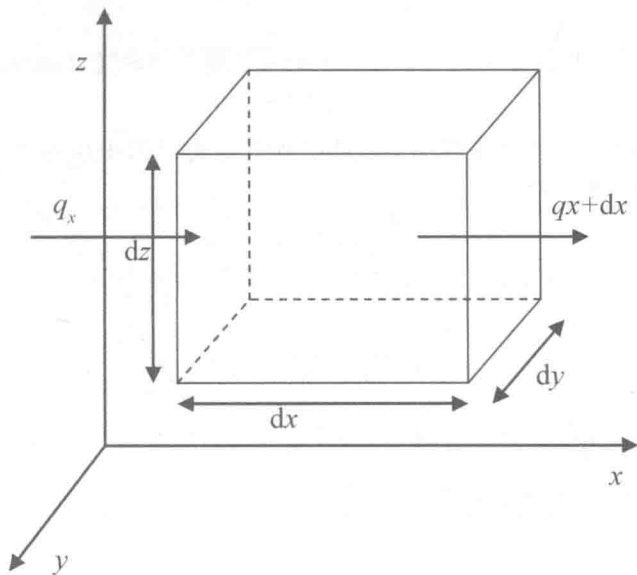


图 2.2 三维热传导示意图

由固体热传导理论, 热流密度 q_x [单位时间内通过单位面积的热流量, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$] 可表示为:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

式中, λ 为导热系数 [$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]。则

$$q_{x+dx} = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right) \quad (2.8)$$

$$Q_x = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy dz \quad (2.9)$$

同理, 沿 y, z 方向进入的净热量分别为:

$$Q_y = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dx dy dz \quad (2.10)$$

$$Q_z = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dx dy dz \quad (2.11)$$

则六面体吸收的总净热量为:

$$Q_1 = Q_x + Q_y + Q_z \quad (2.12)$$

假定在水泥水化热作用下, 六面体内单位时间发出的热量为 Q , 则在体积 $dx dy dz$ 内发出的热量为:

$$W = Q(t) dx dy dz \quad (2.13)$$

在单位时间内, 六面体由于温度升高所吸收的热量为

$$Q_2 = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} dx dy dz \quad (2.14)$$

式中, c 为混凝土的比热 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), ρ 为混凝土的密度 (kg/m^3); θ 为混凝土的绝热温升 ($^\circ\text{C}$)。

由热量平衡原理, 混凝土温度升高所吸收的热量必须等于从外界进入的总净热量与混凝土本身水化热之和, 即

$$Q_2 = Q_1 + Q \quad (2.15)$$

代入 Q , Q_1 , Q_2 的表达式, 简化后得固体热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.16)$$

式中, α 为混凝土的导温系数 (m^2/h); $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ , c , ρ 的含义与前述相同。

由于水化热作用, 在绝热条件下混凝土的温度上升速度为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{Q}{c\rho} = \frac{\bar{W}q}{c\rho} \quad (2.17)$$

式中, θ 为混凝土的绝热温升 ($^\circ\text{C}$); W 为水泥用量 (kg/m^3); q 为单位质量水泥在单位时间内放出的水化热 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

根据式 (2.15), 导热方程可以改写为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (2.18)$$

式中, 当 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \neq 0$, $\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0$ 时, 即温度场不但受混凝土水化热的影响, 而且还随时间变化,

为非稳定温度场; 当 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0$ 时, 即混凝土内无热源, 但温度场还随时间的变化而

变化, 为准稳定温度场; 当 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$ 时, 即混凝土内不但没有热源, 而且温度场不随时间变化, 为稳定温度场。

2.1.3 边界条件

(1) 第一类边界条件, 混凝土表面的温度 T 是时间的函数, 即

$$T(\tau) = f(\tau) \quad (2.19)$$

混凝土与水接触时, 属于第一类边界条件, 混凝土表面温度等于已知水温。

(2) 第二类边界条件, 混凝土表面的热流量是时间的已知函数, 即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = f(\tau) \quad (2.20)$$

式中, n 为表面外法线方向, 若表面是绝热的, 则有

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (2.21)$$

(3) 第三类边界条件, 经过混凝土表面热流量与混凝土表面温度 T 和环境温度 T_a 之差成正比, 即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta (T - T_a) \quad (2.22)$$

式中, β 为表面放热系数。

当表面放热系数趋于无限时, $T = T_a$, 即转化为第一类边界条件; 当表面放热系数趋于 0 时, $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, 又转化为绝热条件。

混凝土与空气接触, 属于第三类边界条件。

(4) 第四类边界条件, 当两种不同固体接触时, 则在接触面上温度和热流量都是连续的, 边界条件如下:

$$\begin{pmatrix} T_1 = T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

如果两固体之间接触时, 温度是不连续的, $T_1 \neq T_2$, 这时需要引入接触热阻 R_c 。 R_c 为因接触不良而产生的热阻, 由实验确定。假设接触缝隙的热容量可以忽略, 那么接触面上热流量应保持平衡, 因此边界条件如下:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \frac{1}{R} (T_2 - T_1) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

2.2 温度应力场有限元计算原理

求解温度变化产生的应力与求解一般面力和体力作用下的应力问题一样, 需要求出温度变化产生的等效结点荷载。

2.2.1 由变温引起的等效结点荷载计算

设弹性体各点的温度变化为 ΔT , 其产生的自由变形为 $\alpha \Delta T$, α 为热膨胀系数。在各向同性体中 α 不随方向而发生改变, 因而各向正应变均相同, 且不伴生角应变。于是, 由 ΔT 产生的初应变可表示为:

$$\{\varepsilon^0\} = \{\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_z^0, \gamma_{xy}^0, \gamma_{yz}^0, \gamma_{zx}^0\}^T = \alpha \Delta T \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T \quad (2.25)$$

则由应力产生的应变与变温产生的应变之和等于总应变。应力应变关系可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)] + \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)] + \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)] + \varepsilon_z^0 \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} + 0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} + 0 \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx} + 0 \end{aligned} \right. \quad (2.26)$$

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^0\}) = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon^0\} = [D][B]\{\delta\}^e - [D]\{\varepsilon^0\} \quad (2.27)$$

式中, $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$; $[D]$ 为单元弹性矩阵; $[B]$ 为单元特性矩阵; $\{\delta\}^e$ 为单元节点位移列阵。

结点力与结点位移的关系:

$$\begin{aligned} \{F\}^e &= \iiint_e [B]^T [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^0\}) dx dy dz \\ &= [K]^e \{\delta\}^e - \iiint_e [B]^T [D] \{\varepsilon^0\} dx dy dz \\ &= [K]^e \{\delta\}^e - [F_{\Delta T}]^e \end{aligned} \quad (2.28)$$

式中, $[K]^e = \iiint_e [B]^T [D] [B] dx dy dz$ 为单元刚度矩阵, $[F_{\Delta T}]^e = - \iiint_e [B]^T [D] \{\varepsilon^0\} dx dy dz$ 为由变温引起的等效节点荷载。

由于 $\{\varepsilon^0\}$ 与 x, y, z 无关, 可以放到积分号外面, 即

$$[F_{\Delta T}]^e = - \iiint_e [B]^T [D] dx dy dz \{\varepsilon^0\} = - [L] \{\varepsilon^0\} \quad (2.29)$$

式中, $[L] = \iiint_e [B]^T [D] dx dy dz$ 。

2.2.2 弹性体变温应力的有限元计算

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e - [F_{\Delta T}]^e \quad (2.30)$$

$$[F_{\Delta T}]^e = - \iiint_e [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy dz = [K]^e \{\delta\}^e \quad (2.31)$$

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^0\}) = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon^0\} = [D][B]\{\delta\}^e - [D]\{\varepsilon^0\} \quad (2.32)$$

由式 (2.30) 求得变温引起的等效结点荷载后, 将结果代入式 (2.31) 可求得结点位移, 然后利用式 (2.32) 计算变温应力。

2.3 混凝土的塑性损伤本构理论

混凝土类材料结构的失效破坏是以裂纹生成、扩展及沿裂纹面的摩擦滑动为特征