

◆ 高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材 ◆

大体积混凝土 施工技术

DATIJi HUNNINGTU SHIGONG JISHU

◎王吉忠 孙学锋 主编

中国建筑工程出版社

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

大体积混凝土施工技术

王吉忠 孙学锋 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大体积混凝土施工技术/王吉忠, 孙学锋主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 11

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

ISBN 978-7-112-20117-4

I. ①大… II. ①王… ②孙… III. ①大体积混凝土施工-高等学校-教材 IV. ①TU755.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 285366 号

本书是高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材之一, 书中系统介绍了大体积混凝土的研究现状、施工技术及工程实例。全书共分 6 章, 主要内容包括: 绪论, 大体积混凝土裂缝成因分析及施工技术研究, 混凝土结构温度收缩裂缝控制理论以及两个大体积混凝土施工实例和结语。

本书可作为土木工程专业 (含建筑工程、桥梁工程、地下工程、道路与铁道工程四个方向) 卓越工程师教育培养计划相关院校本科生教材, 以及土木工程专业本科生、研究生参考教材; 亦可供城市地下空间工程、矿井建设工程、交通工程、水利工程等有关专业的师生、设计与施工技术人员和感兴趣的读者学习、参考。

责任编辑: 李天虹

责任校对: 李美娜 李欣慰

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材

大体积混凝土施工技术

王吉忠 孙学锋 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7½ 字数: 176 千字

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-20117-4

(29600)

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)

高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材 编写委员会

主任委员：

陈廷国 大连理工大学

马荣全 中国建筑第八工程局工程研究院

副主任委员：

王宝民 大连理工大学

苗冬梅 中国建筑第八工程局工程研究院

年廷凯 大连理工大学

孙学锋 中国建筑第八工程局工程研究院

委员（按姓氏笔画排序）：

于洪伟 中国建筑第八工程局工程研究院

王子寒 河北工业大学

王吉忠 大连理工大学

方兴杰 中国建筑第八工程局工程研究院

孔琳 中国建筑第八工程局工程研究院

牛辉 中国建筑第八工程局工程研究院

白羽 中国建筑第八工程局工程研究院

艾红梅 大连理工大学

石运东 天津大学

冉岸绿 中国建筑第八工程局工程研究院

孙旻 中国建筑第八工程局工程研究院

刘莎 大连理工大学

邱文亮 大连理工大学

李玉歧 上海大学

陈兴华	中国建筑第八工程局工程研究院
肖成志	河北工业大学
何建军	中国建筑第八工程局工程研究院
张建涛	大连理工大学
张明媛	大连理工大学
何 政	大连理工大学
李宪国	中国建筑第八工程局工程研究院
吴智敏	大连理工大学
张婷婷	大连理工大学
罗云标	天津大学
武亚军	上海大学
周光毅	中国建筑第八工程局工程研究院
范新海	中国建筑第八工程局工程研究院
郑德凤	辽宁师范大学
武震林	大连理工大学
姚守俨	中国建筑第八工程局工程研究院
姜韶华	大连理工大学
赵 璐	大连理工大学
徐云峰	中国建筑第八工程局工程研究院
郭志鑫	中国建筑第八工程局工程研究院
徐博瀚	大连理工大学
殷福新	大连理工大学
崔 瑶	大连理工大学
韩玉辉	中国建筑第八工程局工程研究院
葛 杰	中国建筑第八工程局工程研究院

前 言

本书作为高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列教材之一,编写时汲取了国内外有关大体积混凝土设计方法与施工技术的最新进展,坚持内容体系的科学性、系统性和先进性。该系列教材旨在满足土木工程专业的特色培养,以土木工程专业工程师培养为重点,以土木工程执业的基本资质为导向,借鉴国外优秀工程师培养的先进经验,探索并形成具有“工文交融”特色的卓越工程师培养模式。以“工程教育”为重点,建立“工程”与“管理”、“工程”与“技术”相融通的课程体系,树立“现代工程师”的人才培养观念。通过专业知识的学习,学生们应基础扎实、视野开阔、发展潜力大、创新意识强、工程素养突出、综合素质优秀,掌握土木工程的专门知识和关键技术。

本教材是以国内外大体积混凝土技术研究为背景,以国内现有规范为原则,以当今国内大体积混凝土的施工技术为基础所编写的一本相对全面系统的图书。本教材借鉴了国内外大量的研究成果和施工技术,是将理论教学内容与实际工程相结合,以理论为指导,以实践为目的,努力使学生将理论知识转化为施工技术,达到学有所用的目的。同时,本教材作为国内少数介绍“大体积混凝土”的图书之一,对各建筑单位的施工技术也具有指导和借鉴的意义,也将有力推动我国“大体积混凝土”的研究与发展,从而减少现场施工对场地等条件的要求,提高建筑功能和结构性能,实现“四节一环保”的绿色发展要求,促进我国建筑业的整体发展。

由于国内大体积混凝土的研究在计算与功能方面尚不完善,我国尚未出版相对全面的教材,不能为初学者提供相对权威的依据。因此,本教材致力于从全方位、多角度地阐述国内大体积混凝土结构设计方法和施工方法。教材编写组主要成员以我校土木工程学院与中建八局工程研究院专家为主,编写成员长期工作在教学科研或工程实践第一线,主讲土木工程专业的基础课程,教学经验丰富,深受学生的喜爱。教材编写前积累了多年的教学 and 实践经验,编写组成员对本教材的编写做了大量的前期工作,收集、研读了国内外相关的教材与文献,力图取其长,用其精。

按照“大体积混凝土设计方法与施工技术”的教学大纲编写,将研究+工程技术型教学模式体现在教材中,内容涵盖大体积混凝土设计方法、最新进展、信息化施工技术、工程案例等内容。紧密结合工程实际,在多个章节加入“工程实例及分析”内容,使学生充分认识到课程在实际工程中的重要地位。同时配备题量适度的思考题,也可供自学者和其他科技工作者阅读。

该教材根据大体积混凝土的教学大纲编写而成,内容涵盖了大体积混凝土的国内外研究及应用现状,大体积混凝土的裂缝,大体积混凝土施工方案和施工技术研究,大体积混凝土的浇筑与养护,特殊条件下大体积混凝土的施工,超长大体积混凝土跳仓法施工,大体积混凝土的温度控制措施,混凝土结构温度收缩裂缝控制理论等。本书具备以下特点:

1. 内容全面,编排合理。本教材从最简单的大体积混凝土结构的概念出发,涵盖了

必要的基础知识。注重理论基础和实例分析，重点突出，结构严谨。具有系统性、一致性和可扩展性。国内尚无合适的教材，本教材适应了部分本科生课程的实践化趋势。

2. 结构合理，循序渐进。本教材作为应届本科生走向建筑岗位的首要选择，内容由浅入深，详略得当，可为初学者打下良好基础，为进一步研究大体积混凝土结构施工技术提供理论依据。每章后配置相应思考题，使学生学有所思、学有所想，避免传统灌输式教学。

3. 适应国情，通俗易懂。近 20 年来，大体积混凝土在我国得到了充分的利用与发展，研究更加深入，但另一方面人们意识到大体积混凝土的众多问题还有待进一步解决，本书的出版能进一步推动大体积混凝土设计方法与施工技术在我国的 Research 与发展，使该项技术得到进一步提升，逐步实现建筑行业的绿色施工标准。在重要概念引入时，尽可能做到简明扼要、自然浅显。

4. 主编教师团队从事混凝土的设计、施工多年，在高校和研究院任职，有扎实的理论基础与现场实践能力，还有丰富的教学经验。主编教师队伍及团队成员工作认真负责、教学态度严肃端正，具有良好的职业道德和师德风范，能很好地胜任本教材的编写与教学工作。

本书由王吉忠、孙学锋主编。具体分工如下：前言、第 1 章、第 2 章、第 3 章由大连理工大学王吉忠编写；第 4 章、第 5 章由中国建筑第八工程局工程研究院孙学锋编写，最后由王吉忠统稿。

本书完稿后由大连理工大学王宝民教授审阅，并提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。对于本书的顺利出版，还要感谢大连理工大学教育教学改革基金（MS201536、JG2015025）和教材出版基金（JC2016023），以及辽宁省本科教育教学改革基金项目（201650）、住建部土建类高等教育教学改革项目土木工程专业卓越计划专项（2013036）的资助，特别感谢中国建筑工业出版社的领导和责任编辑的大力支持。对于书中所引用文献的众多作者（列出的和未列出的）表示诚挚的谢意！

由于编者水平所限，加之编写时间仓促，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 11 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 大体积混凝土概念	1
1.2 大体积混凝土应用现状及存在的问题	5
第 2 章 大体积混凝土裂缝成因分析与施工技术研究	8
2.1 大体积混凝土的裂缝	8
2.2 大体积混凝土施工方案和施工技术研究	17
2.3 大体积混凝土的浇筑与养护	51
2.4 特殊条件下大体积混凝土的施工	63
2.5 超长 大体积混凝土跳仓法施工	69
2.6 大体积混凝土的温度控制措施	75
第 3 章 混凝土结构温度收缩裂缝控制理论	85
3.1 温度应力计算的基本假定	85
3.2 混凝土的基本物理力学性能	85
3.3 混凝土温度的计算	88
3.4 大体积混凝土温度应力计算及抗裂验算	91
第 4 章 大体积混凝土施工实例一	94
4.1 工程概况	94
4.2 施工方案	94
4.3 大体积混凝土质量控制	97
4.4 混凝土质量保证及成品保护措施	99
第 5 章 大体积混凝土施工实例二	102
5.1 工程概况	102
5.2 大体积混凝土原材料和外加剂的选用	102
5.3 混凝土配合比设计	103
5.4 底板大体积混凝土质量控制措施	103
第 6 章 结语	106
参考文献	107

第 1 章 绪 论

本章学习要点:

随着中国经济的快速发展,我国的建筑行业也取得了辉煌的成就。其中,混凝土结构设计理论与设计已经处于世界领先的水平。同时,也开发出了一批新型建筑材料,出现了一大批的高层、超高层工业或民用建筑,大体积混凝土越来越多地被应用到各种各样的实际工程中。大体积混凝土在现代工程建设,特别是水利水电工程建设中占有重要的地位。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 。因此大体积混凝土的工作特性也随之越来越引起人们的重视。

关于大体积混凝土的定义,各国各有不同。本章简单介绍了混凝土材料的几种主要技术性质,以及国内外对大体积混凝土的定义。大体积混凝土具有结构厚实,混凝土数量大,配筋率低,容易出现温度裂缝和较大的拉应力等特点。根据大体积混凝土所具备的特点,人们逐渐意识到大体积混凝土施工时必须采取相应的技术妥善处理相应的问题,自 20 世纪 40 年代起,许多国家对大体积混凝土结构的设计、施工、温度控制指标和温度裂缝控制措施都作了深入研究,提出了一系列的理论与应用方法。通过分析目前对大体积混凝土的研究现状,发现对大体积混凝土的研究仍需要进一步深入的探讨。

1.1 大体积混凝土概念

1.1.1 混凝土材料的概念与主要技术性质

1.1.1.1 混凝土材料的概念

普通混凝土是由无机胶凝材料(如石灰、石膏、水泥等)和水,或有机胶凝材料(如沥青、树脂等)的胶状物,与集料按一定比例配合、搅拌,并在一定温湿条件下养护硬化而形成的一种复合材料。高性能混凝土是指采用常规材料和工业生产,具有混凝土结构所需求的各项力学性能,且具有高耐久性、高工作性和高体积稳定性的混凝土。高性能混凝土主要依靠选用适当水泥品种、矿物微细颗粒,以及水胶比并采用适当的化学外加剂来实现。

混凝土品种繁多,其分类方法也各不相同。一般按胶凝材料、集料、施工工艺、配筋方式、用途及性能进行分类。土木工程中常用的混凝土,主要是指普通水泥混凝土和沥青混凝土。普通水泥混凝土是以水泥为胶凝材料,与水和集料配置成的混凝土。其中水泥与水构成水泥浆而起胶凝作用,集料起骨架填充作用,水泥与水反应后形成坚固的水泥石,将集料牢固地粘结成整体,使混凝土具有所要求的物理力学性能;沥青混凝土是由沥青、

矿粉和集料配制成的混凝土，其中沥青与矿粉起胶凝作用，集料起骨架填充作用。

由于混凝土具有原料来源广，便于施工，可以浇筑成任意形状，能适应各种不同的用途、不同使用性能和环境，经久耐用等特点。因此，混凝土材料在国家基本建设中占有重要地位。一般混凝土质量的基本要求是：具有符合设计要求的强度；具有与施工条件相适应的施工和易性；具有与工程环境相适应的耐久性；具有与工程造价相适应的经济性。

1.1.1.2 混凝土材料的主要技术性质

1. 密度

混凝土拌合物成型捣实后单位体积的质量，称为拌合物的密度。硬化后混凝土的单位体积的质量称为已硬化混凝土密度，统称混凝土密度，均以 kg/m^3 表示。普通混凝土拌合物的密度因集料的密度、粗集料最大粒径 D_m 、配合比、含气量及成型方法和捣实程度的不同而有所不同。通常已硬化的混凝土平均表观密度比一般拌合物的表观密度要小。

2. 工作性

工作性指混凝土拌合物易于施工操作（拌合、运输、浇筑、捣实）并能获得质量均匀和成型密实的性能。工作性是一项综合的技术性质，包括流动性、黏聚性和保水性三方面含义，工作性有时又称为和易性。

流动性指混凝土拌合物在本身自重或施工机械振捣的作用下能产生流动，并均匀密实地填满模板的性能；黏聚性指混凝土拌合物在施工中其各组分之间具有一定的黏聚力，不致产生分层离析现象；保水性指混凝土拌合物在施工过程中具有一定的保水能力，不产生严重的泌水现象。

目前尚没有能全面评价混凝土拌合物工作性的测定方法。通常只能测定拌合物的流动性，而黏聚性和保水性只能靠直观经验评定。国际标准化组织（ISO）把混凝土拌合物的工作性统称为稠度，通常采用坍落度试验和维勃试验测试混凝土稠度。影响工作性的因素很多，主要有单位用水量、砂率、集灰比、集料、水泥品种和细度以及外加剂、时间和温度等。

3. 混凝土强度

混凝土的强度包含抗压、抗拉、抗弯和抗剪等强度，其中抗压强度最大。在工程中混凝土主要承受压力，特别是在钢筋混凝土的设计中，如何有效地利用抗压强度是结构设计重点，此外根据抗压强度还可以判断混凝土质量好坏和估计其他强度。因此抗压强度是混凝土最重要的性质。

（1）立方体抗压强度。指立方体单位面积上所能承受的最大值，用 $f_{cu,k}$ 表示，其计量单位为 N/mm^2 。它是以边长为 150mm 的立方体试件为标准试件，在标准养护条件（温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ，相对湿度 90% 以上）下养护 28d，测得的抗压强度。

按照国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010，混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。混凝土强度等级是混凝土结构设计、施工质量控制和工程验收的重要依据。

（2）轴心抗压强度。混凝土的立方体抗压强度（150mm×150mm×150mm）只是评定强度等级的一个标志，它不能直接用来作为结构设计的依据。为了符合实际工程，在结构设计中混凝土受压构件的计算采用轴心抗压强度。轴心抗压强度用 f_{ck} 表示。轴心抗压强度的测定采用 150mm×150mm×300mm 棱柱体作为标准试件。试验表明，轴心抗压强

度比同截面的立方体抗压强度小，棱柱体试件高宽比越大，轴心抗压强度越小，但当高宽比达到一定值后，强度就不再降低。但是过高的试件在破坏前由于失稳产生较大的附加偏心，会降低其抗压的试验强度值。

(3) 抗拉强度。混凝土在轴向拉力作用下，单位面积所能承受的最大拉应力，称为轴心抗拉强度，用 f_{ts} 表示。混凝土是种脆性材料，抗拉强度比抗压强度小很多，仅为 $1/10 \sim 1/20$ 。混凝土工作时一般不依靠其抗拉强度，但混凝土抗拉强度对抵抗裂缝的产生有重要意义，是混凝土抗裂性能的重要指标。

混凝土强度主要取决于集料与水泥石间的粘结强度和水泥石的强度，而水泥石与集料的粘结强度和水泥石本身的强度又取决于水泥的强度、水灰比及集料等，此外还与外加剂、养护条件、龄期、施工条件，甚至试验测试方法有关。

4. 混凝土变形性能

混凝土在硬化和使用过程中，所受多种因素影响会产生一定的变形。这些变形或使结构产生裂缝，从而降低其强度和刚度，或使混凝土内部产生微裂缝，破坏混凝土微观结构，降低其耐久性。

(1) 收缩。混凝土材料物理化学作用而产生的体积缩小现象称为收缩。混凝土收缩是指从成型后算起，经过 3d 标准养护后在恒温恒湿条件下，不同龄期所测得的收缩值。主要包括物理收缩、化学收缩、温度变形和碳化收缩。物理收缩是因为混凝土的干燥和吸湿引起其含水量的变化，进而引起混凝土体积变化；化学收缩是指水泥浆总体积在水化过程中不断减少的现象；温度变形指混凝土的热胀冷缩；碳化收缩指水泥石与 CO_2 共同作用引起的一种体积收缩现象。

(2) 徐变。指在持续的恒定荷载作用下，混凝土的变形随时间而增大的现象，又称蠕变。混凝土的徐变主要是水泥石的徐变，集料起限制作用。一般认为徐变的发生是由于水泥石中胶凝体在长期荷载作用下的黏性流动引起的。对于混凝土结构来说，徐变是一项十分重要的性质。徐变会使钢筋混凝土构件截面中应力重新分布，从而消除或减少内部应力集中现象，对于大体积混凝土能消除一部分温度应力；但对于预应力钢筋混凝土构件，徐变会造成预应力的损失。

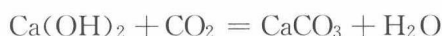
5. 混凝土耐久性

混凝土耐久性，是混凝土在实际使用条件下抵抗各种内在或外在的破坏因素，长期保持强度和外观完整性的能力。主要包括抗冻融、抗渗、抗碳化、抗腐蚀以及抗碱集料反应等。

(1) 抗冻性。混凝土的抗冻性指混凝土在使用环境中，能经受多次冻融循环作用而不破坏，同时也不急剧降低温度的性能，是评价混凝土耐久性的主要指标。我国常用慢冻法、快冻法两种试验方法来得到抗冻性的评价指标。

(2) 抗渗性。混凝土抗渗性是指混凝土抵抗压力水渗透的能力。混凝土渗透性主要是内部孔隙形成连通渗水通道所致。因此抗渗性直接影响混凝土的抗冻性及抗腐蚀性。

(3) 抗碳化。空气中的 CO_2 气体渗透到混凝土内，与其碱性物质起化学反应后生成碳酸盐和水，使混凝土碱度降低的过程，称为混凝土碳化。其化学反应式为：



水泥水化生成大量的氢氧化钙，pH 值为 $12 \sim 13$ 。碱性介质对钢筋有良好的保护作用

用，在钢筋表面形成难溶的 Fe_2O_3 钝化膜。碳化后，混凝土碱度降低，失去对钢筋的保护，造成钢筋的锈蚀。影响混凝土碳化的因素有材料、施工工艺、养护工艺及周围介质等。

(4) 抗碱集料反应。混凝土中碱性氧化物 (Na_2O 和 K_2O) 与集料中二氧化硅成分产生化学反应时，由于所生成的物质不断膨胀，导致混凝土发生裂纹、崩裂和强度降低，甚至混凝土破坏的现象称为碱集料反应。控制碱集料反应的关键在于控制水泥及外加剂或掺合料的碱含量（一般控制每立方米混凝土不大于 0.75kg 碱量）和可溶性集料。混凝土中可溶性碱总含量应小于 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。

1.1.2 大体积混凝土的定义与特点

1. 大体积混凝土的定义

目前，大体积混凝土并没有统一定义。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°C 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变形问题，以最大限度地减少开裂”。国际预应力混凝土协会 (FIP) 规定，凡是混凝土一次浇筑的最小尺寸大于 0.6m ，特别是水泥用量大于 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 时，应考虑采用水泥水化热低的水泥或采取其他降温措施。

《大体积混凝土施工规范》GB 50496—2009 的定义为：混凝土结构物实体最小几何尺寸不小于 1m 的大体量混凝土，或预计会因混凝土中胶凝材料水化引起的温度变化和收缩而导致有害裂缝产生的混凝土。

在一些学术文献中，对大体积混凝土的定义：①单面散热的结构断面最小尺寸在 75cm 以上，双面散热在 100cm 以上，水化热引起的最高温度与外界气温之差预计超过 25°C 的混凝土称为大体积混凝土；②大体积混凝土是指现浇混凝土结构的几何尺寸较大，且必须采用技术措施以避免水泥水化热及体积变化引起裂缝的结构；③所谓大体积混凝土，是指其结构尺寸已经大到必须采取相应的技术措施，妥善处理温度差值、合理解决温度应力、并按裂缝开展进行处理及控制的混凝土，等等。

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，大体积普定、砂牌、龙滩等一系列世界级碾压混凝土拱坝之后，在我国西南部即将兴建一系列世界级常规混凝土拱坝，如小湾拱坝 (291.5m)，比目前世界上最高的英古里拱坝 (271.5m) 还高 20m ；溪洛渡拱坝 (278m)，其规模已经超过了人类现有的实践水平，其重要性是显而易见的。拟建世界第一高常态混凝土拱坝锦屏拱坝 (313m) 也正在紧张地筹建当中。混凝土建筑还包括水闸、船坞、港工建筑物、重型机器基础等，因此大体积混凝土的工作特性也随之越来越引起人们的重视。

2. 大体积混凝土的特点

(1) 结构厚实，混凝土数量大，工程有特殊要求（如不允许开裂，受力复杂等）。

(2) 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 $(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-4}$ 。大体积混凝土结构设计中通常要求不出现拉应力或出现很小的拉应力，而大体积混凝土拉伸变形能力也很小，工程试验资料统计表明：大体积混凝土在施工和运营阶段由于温度变化会产生很大的拉应力，要把这种由于温度变化而引起的拉应力控制在允许范围内颇不容易，因此，大体积混凝土结构往往容易出现温度裂缝。

(3) 大体积混凝土结构断面尺寸较大，一般都是超长、超宽、超厚。由于体积庞大，混凝土在浇筑以后的水化过程中将释放大量的水化热，而混凝土自身的导热性能差，因此会导致内部温度急剧上升，此时混凝土的弹性模量很小，徐变较大，升温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，当混凝土内部温度与外界温度出现较大温差时，内外约束会产生相当大的拉应力。

(4) 大体积混凝土结构配筋率偏低，通常不配钢筋，或只在表面或孔洞附近配制少量钢筋，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，由于没有配制钢筋，拉应力主要由混凝土本身来承受。在土木建筑领域，承台、筏板等大体积混凝土基础虽然配置了钢筋，但是与大体积混凝土结构的巨大断面相比，配筋率是极低的，且钢筋分布不均匀。而大体积混凝土短期内产生水化热巨大，温度应力还是主要依靠混凝土来承担。

(5) 大体积混凝土结构通常暴露于周围环境中，混凝土表面或四周要么接触空气，要么接触水，一年四季气温和水温的变化在混凝土结构中也会引起相当大的拉应力。

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，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，按照生产应力的大小排列，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。在大体积混凝土的结构设计、施工以及养护等过程中，温度控制及监测，大体积混凝土的配制，防止裂缝的措施等具有重要意义。

1.2 大体积混凝土应用现状及存在的问题

随着中国经济的快速发展，我国的建筑行业也取得了辉煌的成就。其中，混凝土结构设计理论与设计已经处于世界领先的水平。同时，也开发出了一批新型建筑材料，出现了一大批的高层、超高层工业或民用建筑。因此，大体积混凝土也越来越多地被应用到各种各样的实际工程中。

大体积混凝土施工时必须采取相应的技术妥善处理水化热引起的混凝土内外温度差，合理解决温度应力并控制裂缝开展。其施工特点是：整体性要求比较高，要求连续浇筑；结构的体积较大，浇筑混凝土后形成较大的内外温差和温度应力。大体积混凝土工程结构较厚，体型较大、钢筋较密，混凝土数量较多，施工条件较为复杂，施工技术要求高，必须同时满足强度、刚度、整体性和耐久性要求，另外，还存在如何控制和防止温度应力，

变形裂缝产生等问题。随着大体积混凝土施工技术不断提高,高质量的施工技术也成为社会发展的必然要求。

根据前文所提到的大体积混凝土所具备的特点,在其结构的设计中,通常是要求不出现拉应力或者出现很小的拉应力,但是由于混凝土自身的性质决定了在施工的过程中,在大体积混凝土结构中往往由于温度的变化很大而产生很大的拉应力,同时由于温度应力直接作用其结构,并因为温度产生拉应力一般很难得到控制,这样就很容易在大体积混凝土的内部产生裂缝,从而可能严重影响大体积混凝土结构的使用性及耐久性。因此,随着大体积混凝土结构在土木工程中的广泛应用,使得温度应力以及混凝土裂缝的控制问题成为一个急需解决的重大问题。

自 20 世纪 40 年代开始,人们开始意识到这一问题,并认识到水泥水化热引发的温度应力是大体积混凝土产生裂缝的根本原因。许多国家,如美国、日本等对大体积混凝土结构的设计、施工、温度控制指标和温度裂缝控制措施都作了深入研究,提出了一系列的理论与应用方法:如适当减少水泥用量、冷却水管的应用、合理的分层分块、温度场、温度应力的计算公式、各种添加剂的掺量、混凝土的变形性能、大体积混凝土的水化规律、混凝土徐变与弹性模量的影响因素、损伤机理以及环境因素对温度裂缝影响。近十年来,国内外对大体积混凝土的温度应力做了很多的研究工作,进行了一系列的现场试验观测和理论研究。最初,曾以为温度产生的温度场和温度应力是均匀分布的,以此来分析结构的约束反力,但因为混凝土的弹性模量没有搞清楚,因此计算的温度场和温度应力与实际结果相差很大,也造成工程界对温度应力和温度场的怀疑,认为其是虚的理论。随着混凝土结构不断地裂损,此时才考虑混凝土的温度梯度问题,混凝土不均匀的温度分布,即温度场的分布理论研究。例如科学家 Mark 在对实际结构实测的基础上,对箱形连续梁进行了温度场理论的研究,并假定箱形连续梁的温度场是以线性分布的,假设箱形连续梁的界面和底板的温度是恒定的,但是随着试验的进一步加深,也逐渐认识到在混凝土结构的内部温度场是呈非线性分布的。

随着科学的不断融合,对混凝土结构的温度场的理论研究也逐渐应用了一些更为科学的计算方法,新西兰的科学家 Pretender 在分析了由垂直温度梯度引起的纵向温度应力的同时提出了可供计算编程的计算方法。现在已经应用了更新的计算研究方法,使得对混凝土结构的温度场和温度应力的理论研究得到不断补充。1992 年,美国的 P. K. Bazant 的 Smeared Crack 开裂模型引入到大坝的温度应力仿真分析中,参用三维温度应力计算软件 ANACAP,计算了一个高为 80 英尺的碾压混凝土模型的温度应力,并对坝体的开裂情况进行了分析研究。日本学者对大坝的温度应力场也进行了深入的研究,首先用有限元法或差分法计算出大体积混凝土的温度场,找到一些特征温度场后,利用 ADINA 程序计算出坝体的施工期和运行期的三维应力场,根据计算结果和结论预测其他坝体在施工期和运行期开裂的可能性。

在国内,对大体积混凝土的温度场和温度应力的研究起步也是比较早的,我国对大体积混凝土结构温度场和温度应力数值计算与理论分析,一直处于世界前列。进入 20 世纪 80 年代以来,中国水利水电科学院、清华大学、天津大学、河海大学、武汉水电大学、四川联合大学、大连理工大学、三峡大学等都展开了大体积混凝土结构应力的攻关研究,分别对沙溢口溢流坝、岩滩工程围堰、观音阁、铜街子、龙滩、普定、小湾、三峡等已

建、在建和待建的重力坝和拱坝进行了温度应力计算。随着计算科学的不断发展，与实际情况更加吻合的计算方法得到了广泛的应用，20 世纪中期，有限单元法的应用，使得温度场和温度应力的理论分析得到了较好的解决。

目前，对大体积混凝土施工的研究仍然需要进一步的探讨：

(1) 原始资料到实验数据的收集、整理。材料的热学参数和力学参数是计算的基础，是非常重要的。由于混凝土是一种组合的材料，其性质受到多种因素的影响，具有一定的离散性。

(2) 可靠性分析。结构的可靠性主要是引用概率论方法来表示结构的可靠度，这方面的分析仍然有待进一步的研究。

(3) 施工技术水平。有些工程出现了较多的裂缝问题，很多是由于施工上没有严格按照温控要求施工，或者施工技术水平低，达不到工程质量方面的要求而引起的。

(4) 混凝土内部因素的影响。混凝土干缩的复杂性，其理论还不是很完善，需要进一步研究。

思考题：

1. 混凝土立方体抗压强度与轴心抗压强度的区别是什么？
2. 列出四种国内外对于大体积混凝土的定义。
3. 大体积混凝土的特点有哪些？
4. 目前大体积混凝土仍然存在哪些问题？

第2章 大体积混凝土裂缝成因分析与施工技术研究

本章学习要点:

大体积或构件较厚的混凝土在施工期间受外界与自身温度变化的影响,往往会引起各种形式的裂缝,破坏其整体性,危及建筑物的安全,在施工中有效地控制大体积混凝土的施工裂缝是保证混凝土质量的重中之重。本章介绍了裂缝的成因、危害以及检测手段,通过对裂缝的详细了解,进而采取有效的裂缝防治与修复措施来预防和控制裂缝的产生与进一步发展。

本章详细介绍了大体积混凝土的施工方案和施工技术研究。大体积混凝土施工有其特殊性,应与普通混凝土施工区别对待。因此必须科学地优化施工技术方案,有步骤地合理组织施工,根据大体积混凝土工程施工的特点,大体积混凝土的施工应从原材料选用、施工配合比设计、施工缝的留置、后浇带的设置以及混凝土施工工艺等方面采取有效措施防范裂缝。在大体积混凝土施工中,通过对材料供应、入模温度的控制、机械设备选型和施工工艺确定,以及加强技术管理,加强混凝土养护,也可以减少和控制大体积混凝土裂缝的产生。

特殊地区的施工条件与一般温和地区不同,本章详细介绍了高温及低温环境下大体积混凝土施工的要求。考虑到实际工程中可能出现的超长大体积混凝土,介绍了超长大体积混凝土的跳仓法施工。

温控设计主要目的是为了研究如何降低混凝土温度,降低到什么程度及如何进行表面保护等,本章介绍了几种常用的温度控制措施。

2.1 大体积混凝土的裂缝

2.1.1 裂缝的基本概念与分类

裂缝是固体材料中的某种不连续现象,在学术上属于结构材料强度理论范畴。结构裂缝严格来讲,可以分为微观裂缝和宏观裂缝两种。

1. 微观裂缝

微观裂缝是指与结构材料有关的十分微细的裂缝,牵扯到结构材料的组成结构及生产工艺等一系列的化学物理过程。微观裂缝也称为“肉眼不可见裂缝”。一般肉眼可见裂缝的宽度大约为 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ 之内,所以取 0.05mm 为可见的“宏观裂缝”的起始宽度。微观裂缝的表现形式主要有三种:

- (1) 粘着裂缝,指骨料与水泥石的粘结面上的裂缝,主要沿骨料周围出现;
- (2) 水泥石裂缝,指水泥浆中的裂缝,出现在骨料与骨料之间;
- (3) 骨料裂缝,指骨料本身的裂缝。

在这三种裂缝中,前两种较多,骨料裂缝较少。混凝土的微裂主要指粘着裂缝和水泥石裂缝。混凝土中微裂缝的存在,对于混凝土的基本物理力学性质,如弹塑性、徐变、各种强度、变形、泊松比、结构刚度、化学反应等都有重要影响。

荷载试验表明,当混凝土受压,荷载在 30% 极限强度以下时,微裂缝几乎不变动;到 30%~70% 荷载时,微裂缝开始扩展并增加;到 70%~90% 荷载时,微裂缝显著的扩展并迅速增多,且微裂缝之间开始逐渐相互串联起来,直至完全破坏。由于微裂缝的分布是不规则的,沿截面是非贯穿的,故具有微裂缝的混凝土是可以承受拉力的。但是在结构的某些受拉力较大的薄弱环节,微裂缝在拉力作用下很容易扩展并串联贯穿全截面,从而较早导致断裂。

微裂缝产生的主要原因是混凝土凝结硬化所造成,因为水泥石与骨料间的粘结强度约为水泥石的抗拉强度的 40%~70%,说明水泥石和骨料接触面的粘结是混凝土内部的薄弱环节。在混凝土的凝结硬化过程中水泥石的失水收缩,混凝土中孔隙水的蒸发以及石子的吸水等都可以引起水泥石的收缩,水泥石的收缩虽然不会影响混凝土的外观尺寸,但会在水泥石和较大的骨料间形成月牙形的微裂缝,称为粘结裂缝。另一方面水泥石和骨料的热膨胀系数不同,它们之间的变形不能协调一致,相互之间的相对滑动,也是产生混凝土微裂缝的原因。微裂缝在物理化学及外力作用下,会在水泥石和骨料间裂缝基础上传播和发展,就会形成宏观裂缝,再进一步发展就会使结构破坏。

2. 宏观裂缝

宏观裂缝是指在混凝土中宽度不小于 0.05mm 的肉眼可见裂缝,宏观裂缝是微观裂缝不断扩展的结果。一般的工业及民用建筑中,由于宽度小于 0.05mm 的裂缝(微观裂缝)对使用(防水、防腐、承重)均没有危险性,故假定具有微观裂缝的结构为无裂缝结构。在结构中所谓的不允许出现裂缝的结构,也是指宽度不大于 0.05mm 的初始裂缝。宏观裂缝按照开裂深度可分为表面裂缝、深层裂缝、贯穿裂缝,见图 2-1。

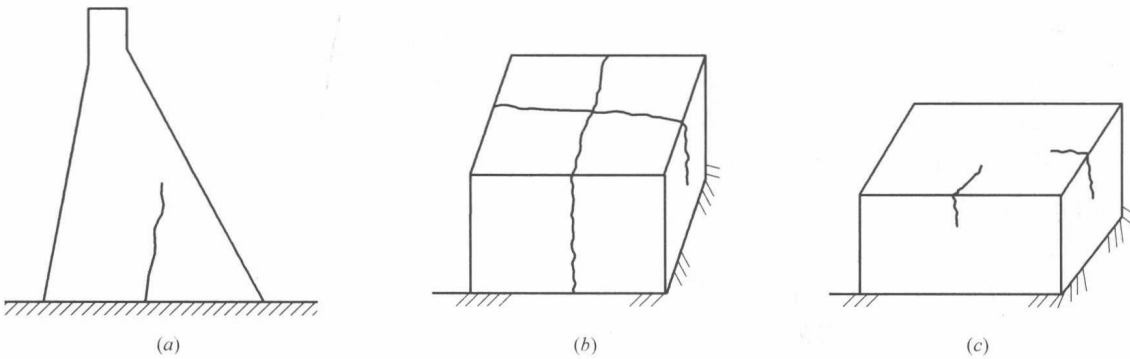


图 2-1 裂缝类型
(a) 贯穿裂缝; (b) 深层或表面裂缝; (c) 表面裂缝

(1) 表面裂缝

表面裂缝占全部裂缝的绝大部分,缝窄浅,有时可自行封闭,其危害程度较小。混凝土表面裂缝虽不属于结构性裂缝,但表面裂缝削弱了结构断面,造成应力集中现象,当混凝土产生收缩时,容易使裂缝进一步扩展。我国《混凝土结构设计规范》GB 50010—