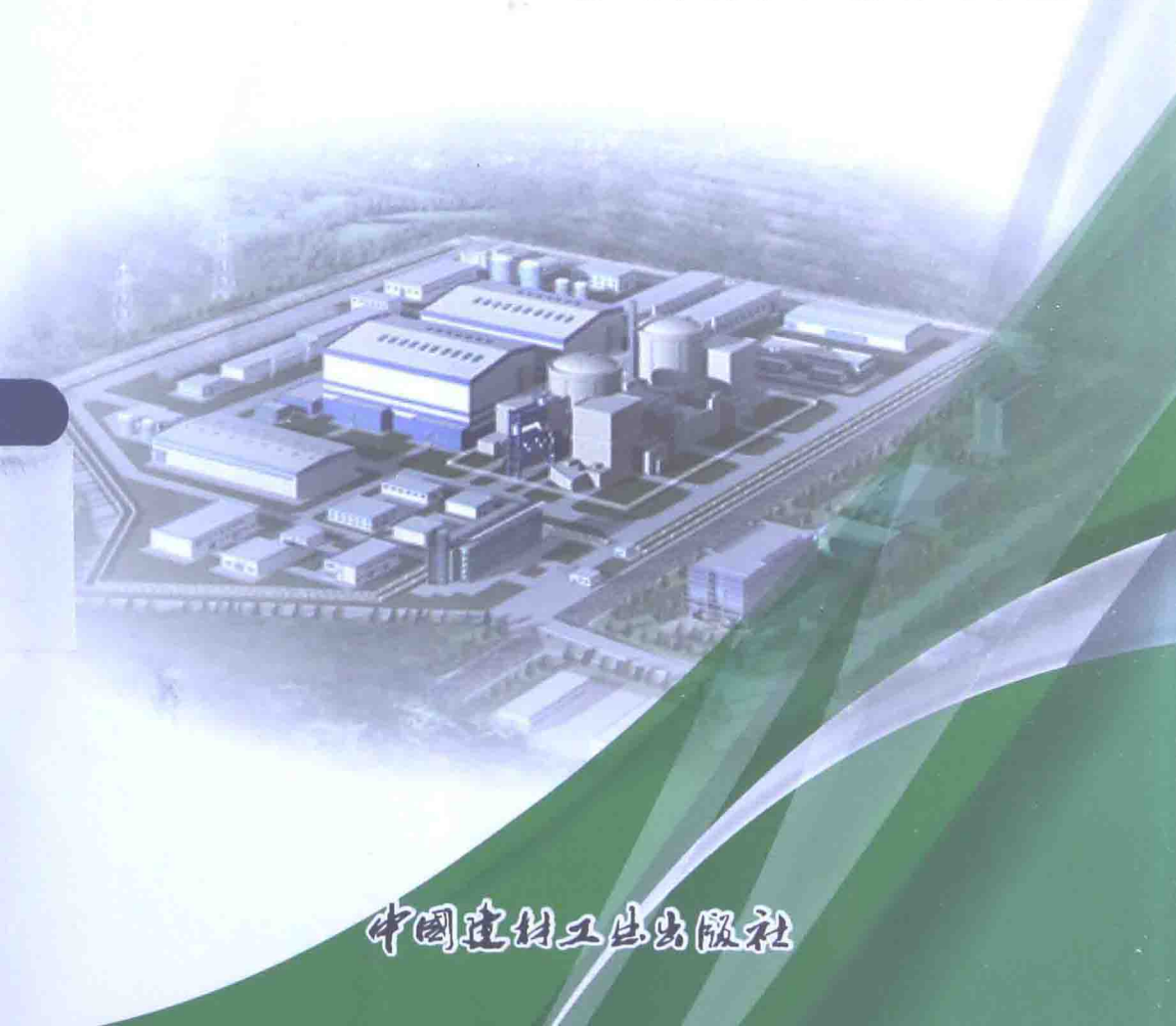


HEDIANZHAN DATIJI HUNNINGTU
LIEFENG KONGZHI JI SHIGONG JISHU

核电站大体积混凝土 裂缝控制及施工技术

张心斌 陈李华 张忠 程大业 著



中国建材工业出版社

核电站大体积混凝土裂缝 控制及施工技术

张心斌 陈李华 张 忠 程大业 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

核电站大体积混凝土裂缝控制及施工技术 / 张心斌, 陈李华, 张忠, 程大业著. —北京: 中国建材工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-5160-0953-6

I. ①核… II. ①张… ②陈… ③张… ④程… III. ①核电站—混凝土结构—建筑物—裂缝—控制 IV. ①TU271.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 193478 号

核电站大体积混凝土裂缝控制及施工技术

张心斌 陈李华 张忠 程大业 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地址: 北京市海淀区三里河路1号

邮编: 100044

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开本: 710mm × 1000mm 1/16

印张: 16

字数: 298 千字

版次: 2014 年 11 月第 1 版

印次: 2014 年 11 月第 1 次

定 价: 129.80 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 公众微信号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序

中国目前已建成和正在建造的核电站基础及上部主要结构混凝土强度都基本超过 C55，个别堆型混凝土强度达到 C70。只有采用美国技术的 AP1000 基础混凝土采用 C40 强度。中国目前的核电站主要分布在沿海地区，不同地区混凝土所用的水泥量差距很大，有的核电站每 1m^3 混凝土的水泥用量 410kg，有的核电站每 1m^3 混凝土的水泥最低用量 250kg。由于核电站分布区域广泛，从中国的南方炎热的防城港到北方寒冷的大连，不同季节混凝土施工的环境温度和湿度差距很大，有的地区施工时的环境温度达到 42°C ，钢筋温度可达 50°C ，而在北方地区施工的环境温度在几度左右。冬季施工时北方的风很大，干燥寒冷，而南方则闷热潮湿。气候环境的差异造成混凝土施工面临不同的情况，使控制混凝土裂缝非常困难，但核电站结构的特殊性又要求混凝土尽可能不产生裂缝。

核电站基础的质量要求非常的高，其重要功能是防止核泄漏以及对混凝土耐久性的需要，核电站基础位于地下水位以下，特别是沿海地区，海水容易渗透，因此对控制混凝土裂缝有极高的要求。由于混凝土所用的水泥用量大，强度高，因此混凝土施工过程中水化热非常大，混凝土温度非常高，同时温度上升得特别快，混凝土的水化收缩明显，尤其在南方地区。高的温度和大的收缩造成混凝土内部产生复杂的应力，混凝土在应力作用下，非常容易开裂，出现裂缝后修复处理非常困难。

我国早期建设的核电站全部遇到过这类问题，为了处理裂缝花费了大量的时间，严重影响了施工进度，国外核电站基础混凝土也面临着同样的问题，可以说高强混凝土裂缝控制问题已经成为一个世界性的难题。各国在建造核电站时都极为重视这一问题，为了解决这一问题花费了很高的代价，探讨了多种解决问题的方法，结果都不理想，特别是最近几年在欧洲建造的几个三代核电站基础中基础混凝土出现了大量的裂缝，处理非常困难，同时引发不好的社会影响。

我国从 2005 年开始核电建设，核电带来的经济效益有目共睹，解决核电站基础的混凝土裂缝控制技术迫在眉睫。从 2005 年起，中冶建筑研究总院与

中国广东核电集团展开深度合作，通过理论研究和实验研究，基本掌握了混凝土裂缝产生的原因，形成了一套行之有效的技术体系，完全控制和避免了裂缝的产生，在目前在建的核电站中得到成功应用。

课题首先全面运用计算机仿真技术，对核电站高强混凝土的施工过程出现的水化特性进行模拟，分析了混凝土从浇筑开始 50d 左右的温度应力、水化收缩应力及底板约束力发生、发展的全过程，全面分析和研究了高强混凝土裂缝产生原因。通过对大体积混凝土施工养护的全过程分析，提出了混凝土养护的最新方法，这一课题的研究主要获得了以下创新及理论成果：

(1) 对比研究了高强度混凝土和低强度等级混凝土抵抗温度收缩应力的规律，首次探索性地提出了较高强度混凝土具有更好的抗裂性能的观点。

(2) 提出混凝土入模温度、最高温度不是裂缝产生的控制因素，突破了降低水泥用量以控制混凝土裂缝的传统思想，提出了水泥含量不是控制混凝土裂缝关键因素的思路，水泥用量可以根据工程需要进行调整，在所实施的一些工程中，水泥含量在 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 以上，到目前为止，所有实施的项目中未出现裂缝。

(3) 通过计算机对混凝土水化过程的全过程仿真模拟和理论解析，提出了厚混凝土抗裂更为有效的观点，解除了大体积混凝土施工中人们对较大厚度混凝土更容易出现裂缝的疑虑。

(4) 提出对混凝土进行全过程主动分析的思想，找到一条混凝土温度应力发生、发展的最佳途径，以使混凝土的温度应力按照设定的路径进行演变，从而有效控制应力、避免裂缝生成。

(5) 提出和实施了以混凝土温度应力来平衡收缩应力以降低混凝土内的总体拉应力水平的方法，避免混凝土总拉应力大于混凝土同期抗拉强度，大大降低了混凝土裂缝出现的概率。

(6) 提出了对混凝土进行“动态养护”的方法，传统的混凝土养护，仅仅简单地控制混凝土内外温度差，而完全忽视了混凝土的收缩应力，使得很多混凝土在养护过程中，在温度得到很好控制的情况下仍然出现裂缝。实际上混凝土水化反应时的收缩非常复杂，统筹考虑混凝土的温度应力和水化收缩应力是控制混凝土裂缝的最重要方法，本法有效地解决了这一问题。

(7) 首次开发和运用了现场监测混凝土收缩应力的技术，对混凝土养护全过程中混凝土的收缩进行监控，以弹性受拉应变作为混凝土开裂控制指标。对多达 10 个核电站基础的大体积混凝土进行了应变、应力监控，首次在大体积混凝土中运用该技术并实际指导混凝土的养护，取得了非常好的效果。

课题以全新的视角研究了混凝土产生裂缝的主要原因，通过混凝土产生裂缝机理的研究，提出了一整套控制裂缝的理论与方法。这些理论和方法已经在 10 多个核电站得到运用，使用范围从南方（广西防城港）高温条件到北方（大连）零度条件，其研究成果已经转化为我国 CPR1000 核电站建造的施工标准，形成了成熟的应用技术，特别是在我国台山在建的 EPR 核电站中获得成功，该型核电站是目前世界上单机容量最大的第三代核电站。在法国和芬兰施工中，基础混凝土出现大量裂缝，处理非常困难。我国台山建造的两个同类型核电站基础一次性大体量施工全部获得成功，混凝土没有出现任何裂缝，赢得了我国核安全部门和法国同行的高度认同，经济和社会效益极其显著，被视为核电站高强度大体积混凝土施工的成功典范。

作者

2014 年 8 月



中国建材工业出版社

China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部

010-88386119

宣传推广

010-68361706

出版咨询

010-68343948

图书销售

010-88386906

设计业务

010-68343948

邮箱：jccbs-zbs@163.com

网址：www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

前 言

核电站基础是反应堆厂房主要支撑结构，一方面建于沿海地区的核电站易受到海水侵蚀，另一方面也是防止核泄露，为此对其施工裂缝控制要求很严。核电站基础混凝土浇筑量大、强度高、水化热大，核电特殊性能使得施工常规降低水化热措施无法使用，国内外一直采用分层分段小体量多次浇筑的施工方式，施工周期长并且均不可避免的出现了较多裂缝，处理裂缝对施工进度又造成了一定影响。随着核电市场的急剧扩张及减少施工层段数对总体工期缩短的明显有利作用，实施多层段合并为一次整体性浇筑，温度裂缝能否得到有效控制成为当前的一大尖锐课题。

本书在率先提出多层段合并整体浇筑可行性问题的基础上开展以有限单元法为理论基础的大体积混凝土温度及温度应力应变场分析和测试研究，试图揭示大体积混凝土温度应力发生、发展规律，为指导混凝土施工养护、裂缝控制提供基本理论依据。本书一方面基于理论分析与测试比较，通过编制有限元分析程序，建立和优化基础整体有限元模型，对整浇全程进行深入全面的仿真分析，研究了基础不同浇筑厚度、垫层不同滑动能力、不同养护方式及技术指标等对施工温度应力的影响，进一步优化了施工分层方案；另一方面本书还对混凝土的收缩进行了较全面的研究，研制了混凝土的无约束监测装置，对核电特定配合比混凝土的收缩进行监测和分析；除此之外本书还编制了核电大体积混凝土施工技术指南，为核电站基础整体浇筑施工提供广泛参考。

本书提出的“动态设计养护法”为大体积混凝土施工裂缝控制问题的一般处理思路和方法，为科学制定和优化设计施工方案提供基本依据。实践表明，本研究方法进行的理论分析及其指导下的大体积混凝土施工，开拓了设计施工技术空间，保证了混凝土浇筑质量，赢得了工期和积累了经验，为后续我国核电几十台机组基础混凝土整体浇筑成功实践和推广应用奠定了坚实基础，为国民经济建设创造了相当可观的经济和社会效益。

本书研究内容“CPR1000 核电站大体积混凝土温度应力全过程仿真和裂缝控制技术”于2010年荣获中冶集团科学技术一等奖。

本书在编写过程中尽量依据最新的规范来编写，并尽量反映业已在工程中

广泛应用的研究成果及最新进展，使得本书的内容具有先进性。

本书由中冶建筑研究总院张心斌主编，全书由张忠负责统稿和主审，程大业等同志参加了编写工作。具体分工如下：张心斌：第一篇第1、4、5、7章；张忠：第一篇第2、3、6、10、11章，第二篇；程大业：第一篇第8、9章，第三篇。

本书在编写过程中，中广核工程有限公司施工管理中心的陈李华总工以及中核华兴建设有限公司核电工程事业部的魏建国总工等提出了宝贵意见，特此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

2014年8月

目 录

第 1 篇 核电站大体积混凝土裂缝控制

1 大体积混凝土裂缝控制	2
1.1 概述	2
1.2 温度控制	3
1.3 变形控制	4
1.4 混凝土应力的现场控制	6
1.4.1 自身约束应力	7
1.4.2 外界约束力	7
1.5 小结	8
2 大体积混凝土施工养护方式及技术指标有限单元法分析与研究	9
2.1 概述	9
2.2 样板工程概况	9
2.3 有限元模型及分析参数	10
2.4 计算结果与分析	11
3 滑动层对上部基础施工温度应力影响有限元分析及应变监测研究	16
3.1 概述	16
3.2 样板工程概况	16
3.3 滑动层不同刚度的有限单元法分析	16
3.4 应变监测研究	19
4 CPR1000 核电站基础大体积混凝土温度应力特性	22
4.1 概述	22
4.2 方法	22
4.3 研究结果	27
5 核电站基础大体积混凝土水化特性	28
5.1 水泥水化热特点	28

5.2	水泥水化热温度计算	29
5.3	小结	33
6	有限单元法在大体积混凝土筏基温控施工中的应用	34
6.1	概述	34
6.2	样板工程概况	34
6.3	有限单元法确定养护技术指标	34
6.4	温控监测及分析	38
7	CPR1000 核电站基础大体积混凝土现场监控技术	40
7.1	概述	40
7.2	测试方法	41
7.3	工程应用	43
7.4	小结	46
8	“动态设计养护”法	47
8.1	背景	47
8.2	方法概述	47
8.3	有限元建模计算	48
8.4	监控指标	52
8.5	温度应变监控方案	52
8.6	动态养护	53
8.7	小结	54
9	高温高湿环境核电站核岛筏基整体浇筑温度应变监控研究	55
9.1	背景	55
9.2	有限元仿真计算	56
9.3	温度应变监控方案	56
9.4	温度应变监控分析	57
9.5	小结	59
10	CPR1000 核电站基础多层整体浇筑可行性有限元分析	60
10.1	有限单元法温度分析	60
10.2	有限单元法应力分析	62
10.3	结论	65
11	混凝土无约束监测装置研制及应用研究	66
11.1	无约束监测装置介绍	66

11.2	无约束应变监测分析	67
11.3	无约束监测装置工程中应用及成果	68
11.4	结束语	71
第2篇 CPR1000 核电站大体积混凝土温度应力 变化规律分析及施工分层方案		
1	有限元法及 Ansys 程序概述	74
1.1	有限元方法	74
1.2	Ansys 程序简介	75
2	本篇程序编制思路、方法及假设	76
2.1	编制思路及方法	76
2.2	计算假设	76
2.3	技术亮点	77
3	3.0m 厚筏基温度场及应变应力场分析	78
3.1	温度场有限元计算模型	78
3.1.1	模型假设	78
3.1.2	建模方式	80
3.1.3	单元选择	80
3.1.4	边界条件	81
3.1.5	计算参数	82
3.1.6	水化热情况	84
3.2	温度场计算结果及分析	85
3.2.1	温度及分析	85
3.2.2	同层温度比较	91
3.2.3	里表温差及分析	91
3.2.4	里表温度梯度及分析	93
3.2.5	降温速率及分析	94
3.3	应力场有限元计算模型	95
3.3.1	模型假设	95
3.3.2	建模方式	96
3.3.3	单元选择	96

3.3.4	边界条件	97
3.3.5	计算参数	97
3.4	应力应变场计算结果及分析	98
3.4.1	滑动层弹性模量取 3.45×10^7	98
3.4.2	滑动层弹性模量取 3.45×10^0	115
3.4.3	滑动层弹性模量取 3.45×10^{10}	118
3.4.4	三种应力应变场对比分析	121
4	1.2m 厚筏基温度场及应变应力场分析	123
4.1	有限元计算模型	123
4.2	边界条件	123
4.3	计算参数	124
4.4	温度计算结果	124
4.5	应力计算结果	126
5	3.8m 厚筏基温度场及应变应力场分析	129
5.1	有限元计算模型	129
5.2	边界条件	129
5.3	计算参数	129
5.4	温度计算结果	130
5.5	应力应变计算结果	131
6	筏基和安全壳筒身理论分析	135
6.1	不同厚度基础温度场分析	135
6.2	不同厚度基础应力场分析	138
6.3	安全壳筒身计算	143
6.3.1	建模依据和原则	144
6.3.2	安全壳筒壁 2.5m 厚理论分析计算	144
6.3.4	安全壳筒壁 3.0m 厚理论分析计算	146
6.3.4	安全壳筒壁分层结论	146
6.4	理论分析结论	147
7	CPR1000 大体积混凝土优化计算模型及理论实测数据对比分析	149
7.1	优化计算模型	149
7.2	混凝土理论分析及应力测试方法	150
7.3	混凝土温度内力规律分析	152

7.3.1	升温规律	153
7.3.2	降温规律	157
7.3.3	混凝土收缩规律	162
7.4	应变监控	165
7.5	理论分析和监测数据对比分析	171
8	优化后的施工分层方案	174
8.1	原施工分层方案	174
8.2	新施工分层方案	176
8.2.1	优化筏基施工方案原则和内容	176
8.2.2	优化安全壳筒壁施工方案原则和内容	177
8.3	新旧施工方案对比	178

第3篇 CPR1000 核电大体积混凝土施工技术指南

1	绪论	184
2	术语、符号	185
2.1	术语	185
2.1.1	大体积混凝土 (mass concrete)	185
2.1.2	温度应力 (thermal stress)	185
2.1.3	收缩应力 (shrinkage stress)	185
2.1.4	温升峰值 (peak value of rising temperature)	185
2.1.5	内外温差 (temperature difference of core and surface)	185
2.1.6	降温速率 (descending speed of temperature)	185
2.1.7	入模温度 (temperature of mixture placing to mold)	186
2.1.8	有害裂缝 (harmful crack)	186
2.1.9	贯穿性裂缝 (through crack)	186
3	大体积混凝土整浇施工的必要性和可行性	187
3.1	必要性分析	187
3.1.1	有利于缩短建设工期	187
3.1.2	有利于文明施工	187
3.1.3	有利于保证施工质量	188
3.2	可行性分析	188
3.2.1	温度应力分析	188

3.2.2	多个核电站筏基整浇已有成功经验	189
3.2.3	对 D 层混凝土浇筑的影响	189
3.2.4	混凝土浇筑能力分析	189
3.2.5	其他	189
4	混凝土材料及力学性能	191
4.1	原材料准备	191
4.1.1	水泥	191
4.1.2	粉煤灰	192
4.1.3	粗细骨料	192
4.1.4	拌合水	192
4.1.5	外加剂	192
4.1.6	坍落度	193
4.1.7	材料温度	193
4.2	配合比实例	193
4.3	抗压强度	194
4.4	抗拉强度	195
4.5	小结	196
5	施工准备	197
5.1	项目组织管理及施工人员安排	197
5.2	机械设备及施工机具准备	197
5.3	施工材料准备	197
5.4	技术准备	198
6	过程控制	199
6.1	施工平面管理规划	199
6.2	原材料质量控制	199
6.2.1	水泥	199
6.2.2	粉煤灰	199
6.2.3	粗细骨料	199
6.2.4	拌合水	199
6.2.5	外加剂	199
6.3	钢筋绑扎	200
6.4	模板支设	200

6.5	预应力管道安装与保护	201
6.6	永久性仪表 (EAU) 安装与保护	201
6.7	橡胶止水带	202
6.8	混凝土生产	202
6.9	混凝土运输	202
7	混凝土浇筑	204
7.1	全面分层法	204
7.1.1	混凝土浇筑前准备	204
7.1.2	混凝土布料	205
7.1.3	混凝土振捣	207
7.1.4	施工缝处理	208
7.2	分层分段斜向推移法	210
7.2.1	混凝土浇筑前准备	210
7.2.2	混凝土布料	210
7.2.3	混凝土振捣	215
7.2.4	施工缝处理	216
8	混凝土养护	218
8.1	入模温度和温升	218
8.2	搭设养护棚	218
8.3	保温材料和覆盖	220
8.3.1	保温材料	220
8.3.2	现场覆盖	220
8.4	动态养护	220
9	温度应变监控与裂缝控制	223
9.1	温度应变监控	223
9.1.1	监控指标	223
9.1.2	三维有限元整浇仿真分析	224
9.1.3	测温及应变传感器选型	224
9.1.4	传感器的安装	224
9.1.5	监测数据采集系统	225
9.1.6	温度监控测点布置	225
9.1.7	应变监控测点布置	226

9.1.8 零应力测点布置	227
9.2 裂缝预防措施	227
10 质量保证与安全保证	229
10.1 组织管理措施	229
10.2 技术管理措施	229
10.3 材料进场检验及试验管理措施	230
10.4 工序交接及成品保护措施	230
10.5 质量保证措施	230
10.6 分项工程施工质量控制措施	231
10.6.1 钢筋工程	231
10.6.2 模板工程	232
10.6.3 混凝土运输	233
10.6.4 混凝土浇筑	233
10.6.5 混凝土布料	233
10.6.6 混凝土振捣	233
10.6.7 混凝土压面和施工缝处理	234
10.6.8 混凝土养护	234
10.7 安全保证措施	234
11 设计优化建议	236
参考文献	237