

混凝土结构 早期裂缝控制

■ 袁 勇 著



科学出版社
www.sciencep.com

混凝土结构早期裂缝控制

袁 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述现浇混凝土结构早期裂缝控制的基本理论与实际应用方法。全文的写作论及混凝土材料的基本性能、现浇混凝土早期性能特点、结构混凝土抗裂特性、温度和湿度等环境因素对混凝土性质变化的作用机理与分析原理、现浇混凝土结构的时变应力分析理论与实现方法,还给出了分析现浇混凝土结构早期应力和变形发展规律的工具,以及采用不同措施控制混凝土结构早期裂缝的若干工程案例。

本书的理论阐述深入浅出,若干方面涉及当前混凝土结构基本理论的研究热点,如混凝土力学性能的时变特性、混凝土内部的湿度场、考虑损伤的本构关系、纤维混凝土和预应力混凝土的抗裂度。在面向可持续发展的新世纪,本书阐述的议题对于混凝土早期性能、混凝土结构耐久性、基于结构性能设计方法等的研究也有重要的学术价值。

本书可供土木工程、水利工程、港口工程、电力工程、交通工程、地下工程、铁道工程、核能工程等方面的专业人员参考,也可作为研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构早期裂缝控制/袁勇著. —北京:科学出版社,2004

ISBN7-03-012844-3

I. 混… II. 袁… III. 现浇混凝土施工-裂缝-控制 N. TU755.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010282 号

责任编辑:刘宝莉/责任校对:包志虹

责任印制:吕春珉/封面设计:东方上林工作室

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>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2004年4月第一次印刷 印张:20

印数:1—2500 字数:383 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

序

喜闻我校袁勇教授的新著《混凝土结构早期裂缝控制》将付梓问世,备感高兴。袁教授早年在我校(同济大学)获结构工程博士学位并留校任职。我深知他理论基础扎实、专业功底好且又勤奋钻研,学识和专业上多年来都大有进展。这些年来,他在混凝土裂缝控制子学科领域,结合自己所承担的国家 and 上海市科学基金进行了许多卓有成效的理论与实验研究,这次将这方面的研究总结加以系统化并公开发表,对广大读者当有助益,这是十分可喜的。

书稿经粗阅一过,深感作者在上述方面做了不少有益的研究,有的在国内外均属少见,如:从混凝土材料的微观结构机理探索结构成型过程中温、湿度环境条件变化对诸材料参数的影响,并使之拓展到宏观结构构件;进而在完成相关试验的基础上,引入温度与湿度场的相互作用以及施工中与荷载应力场的耦合,很有创意地使之能以相应机理状态方程做描述,得到了多维复杂条件下的数值解答。在工程应用方面,还提出了混凝土结构产生早期裂缝的动因及其相应的控制、整治措施,深感难能可贵。我想,该书在研究内容和方法总体上处于国际水平是当之无愧的,有相当的理论与应用价值。

这是一部理论性很强的学术专著,我乐见该书稿早日出版。

中国科学院院士



2003 年 12 月

前 言

现浇混凝土结构的特殊性,在于它是一种现场加工成型的建筑工业产品。与其他工业产品不同的是,产品质量的优劣受多种因素的影响。出现质量缺陷的典型表现如混凝土材料的强度等级没有达到设计要求、结构构件局部蜂窝、出现贯穿裂缝等。其实,混凝土是一种可加工成型的非匀质混合材料,主要由水泥水化产物形成粘结基质,将砂、石等骨料粘结在一起;混凝土结构则是由这样的材料,按既定结构设计形式,在一定环境条件下施工作业完成的产品。

本书主要介绍现浇混凝土结构的裂缝生成机理与控制方法研究的一些进展。显然,结构裂缝的控制与结构构成和材料成型的几个方面密切相关。本书就这些方面逐一展开,分析该领域前人的研究成果,探讨有效可行的现浇结构裂缝控制理论。

(1) 关于混合材料

混凝土使用 100 年来,混凝土材料科学的进展是显著的。为达到特定的结构设计和满足施工工艺要求目标,发展了早强混凝土、高强混凝土、纤维混凝土、高耐久性混凝土、高流动性混凝土、自密实混凝土、高性能混凝土等,乃至提出了绿色混凝土的材料观念,这方面研究工作的重要性得到广泛的认同。

(2) 关于结构设计

结构工程师的工作关系到生命财产和生活质量。数 10 年来,经济的发展不断对工程结构提出新要求,如体系和形式复杂的高层建筑结构、桥梁结构、水工结构、海洋结构、核电工程结构等,使得结构工程的研究持续深入,结构设计方法也在演化,从构件设计向结构设计发展,从简化设计公式发展到复杂的计算机仿真。

(3) 关于环境条件

不同于其他工业产品,现浇混凝土工程实施的环境条件是多变的,既有炎热的季节,也会在寒冷的北方,或处于干旱的沙漠边缘,或必须于水下浇筑。在以往的实际工程应用中,开发了一些控制环境条件的措施,如大体积混凝土的降温措施等。

(4) 关于施工作业

施工作业是产品成型关键的一环。施工技术随其他工业技术在发展,如预拌商品混凝土的生产技术和高效泵送技术,使得现浇混凝土结构可以采用大流量连续泵送技术。在以往的施工积累中,开发了各种外加剂以调节出适宜工作性的混凝土,取得了很多成功的经验。

然而,这些方面的研究进展并不是完全协调的,可能忽略了“产品”生产环节的某些控制要求,以至于在新技术的运用时总存在或多或少的质量缺陷,或者说,产

品成型的环境因素与材料和结构特性间的协调性值得进一步剖析。

本书的写作基于前人的研究成果和当前的科学技术方法,提出实证案例深入研讨。本书的构成从控制混凝土结构早期裂缝研究的几个方面出发,在混合材料方面着重研讨混凝土的早期特征和改善早期抗裂能力的研究;环境方面从混凝土材料物理性质发育与环境的交互作用的本质出发,研究环境条件对材料品质的影响机理;结构的研究主要体现在考虑产品成型全过程的受力机制,从而提出结构设计的解决方案;施工作业为上述要求的综合体现。在这些综合研究的基础上,形成了不断完善发展的现浇混凝土结构的仿真理论,并以实例验证阐述。

本论著综合了作者所在学科组在教育部留学回国人员基金、国家自然科学基金资助项目(编号:59778031)、上海市科学技术委员会科技发展基金等支持下在基础理论和应用方面所取得的研究成果。作者谨此对在完成本论著中给予资助的上述机构表示诚挚感谢。

作者以为,现浇混凝土结构的裂缝控制需要研究人员的智慧和工程师的实践,也期待专家学者的建议和您的参与。混凝土技术在不断发展,研究也在不断前进。您可通过访问本研究室的主页 <http://hpc.tongji.edu.cn> 更新研究进展,提出您的建议。

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 工程结构的裂缝	1
1.2 结构构件裂缝验算	1
1.3 混凝土结构成型阶段	3
1.4 工程结构早期裂缝	3
1.5 现浇混凝土结构早期裂缝控制研究	5
1.5.1 温度作用	6
1.5.2 收缩变形作用	7
1.5.3 应力松弛和徐变变形效应	7
1.6 本书的主要内容	8
参考文献	9
第二章 混凝土材料的物理性质	10
2.1 微观结构特征	10
2.1.1 骨料	11
2.1.2 浆体	11
2.1.3 过渡区	13
2.1.4 孔隙率	13
2.2 热力学特征	16
2.2.1 水化热	16
2.2.2 比热 C_0	19
2.2.3 热传导系数	19
2.2.4 热扩散系数	20
2.2.5 热膨胀系数	20
2.2.6 蓄热系数	21
2.3 流相特征	21
2.3.1 亲水性	21
2.3.2 水密性	22
参考文献	24
第三章 混凝土材料的力学性质	25

3.1 混凝土的强度特征·····	25
3.1.1 抗压强度·····	25
3.1.2 抗拉强度·····	26
3.1.3 抗弯强度·····	28
3.1.4 各种强度间关系·····	29
3.1.5 影响混凝土强度的因素·····	30
3.2 混凝土的变形特性·····	35
3.2.1 弹性模量·····	35
3.2.2 影响混凝土弹性模量的因素·····	37
3.2.3 泊松比·····	38
3.2.4 混凝土的极限变形·····	39
3.2.5 混凝土的收缩·····	39
3.2.6 影响混凝土收缩的因素·····	40
3.2.7 基本计算公式·····	43
3.2.8 混凝土的徐变·····	44
参考文献·····	46
第四章 普通混凝土材料的早期性质 ·····	47
4.1 水泥水化程度与浆体的孔隙率·····	47
4.2 热工特性·····	48
4.2.1 混凝土水化热随龄期的发展·····	48
4.2.2 混凝土的热膨胀系数·····	49
4.3 早期的水分扩散·····	49
4.3.1 失水试验·····	49
4.3.2 混凝土内相对湿度的变化·····	50
4.4 早期抗压强度特性·····	53
4.4.1 过渡区粘结强度·····	53
4.4.2 早期抗压强度的预测·····	53
4.5 早期抗拉强度试验·····	55
4.5.1 劈拉强度·····	55
4.5.2 直接拉伸强度·····	56
4.6 混凝土的早期变形特性·····	57
4.6.1 弹模试验·····	57
4.6.2 开裂拉应变·····	57
4.7 收缩和徐变的测试·····	58
4.7.1 标准收缩试验·····	58
4.7.2 特殊收缩试验·····	58

4.7.3	基本计算公式的若干问题	59
4.7.4	混凝土的早期徐变	59
4.7.5	早期徐变系数的计算	63
	参考文献	64
第五章	高性能混凝土材料及其早期特性	65
5.1	高性能混凝土的早期物理性质	67
5.1.1	孔结构	67
5.1.2	早期高性能混凝土中的水分	68
5.1.3	渗透性	70
5.1.4	失水干燥	70
5.2	高性能混凝土的热力学特性	72
5.3	高性能混凝土的强度	75
5.3.1	高强混凝土的发展历史	75
5.3.2	抗压强度的发展	76
5.3.3	抗拉强度	77
5.3.4	抗拉强度的发展	78
5.4	高性能混凝土的变形特征	79
5.4.1	弹性模量的发展	79
5.4.2	极限拉应变	80
5.5	高性能混凝土的早期收缩	80
5.5.1	化学收缩	80
5.5.2	自干燥收缩	81
5.5.3	干燥收缩	82
5.5.4	影响因素	84
5.6	高性能混凝土的早期徐变	88
5.6.1	徐变的模型	89
5.6.2	影响因素	91
5.6.3	拉伸徐变	91
	参考文献	93
第六章	结构混凝土的抗裂性能	95
6.1	间接作用下构件的受力形式	95
6.2	配筋构件的拉伸试验	97
6.2.1	直接拉伸试验设计	99
6.2.2	试验过程概述	100
6.2.3	试验结果	101
6.3	早期拉伸试验研究	103

6.3.1	试验设计	103
6.3.2	试验结论	103
6.4	结构构件的裂缝	104
6.4.1	正常使用状态下裂缝验算	104
6.4.2	早期开裂的控制	104
	参考文献	108
第七章	纤维混凝土的抗裂性能	109
7.1	纤维混凝土概述	109
7.1.1	纤维混凝土的起源	109
7.1.2	纤维混凝土材料分类	110
7.2	纤维混凝土增韧作用	111
7.3	纤维混凝土研究与应用现状	112
7.3.1	钢纤维混凝土	112
7.3.2	玻璃纤维增强混凝土	112
7.3.3	碳纤维增强混凝土	113
7.3.4	聚合物纤维增强混凝土	113
7.3.5	混杂纤维混凝土	116
7.4	纤维复合材料的增强理论	116
7.4.1	纤维临界体积率的概念	116
7.4.2	纤维临界长径比	118
7.4.3	纤维增强机理理论	118
7.5	PVA 纤维混凝土材料性质试验	124
7.5.1	劈裂试验	125
7.5.2	弯折试验	128
7.6	配筋 PVA 纤维混凝土构件	132
7.6.1	梁的极限承载能力试验	132
7.6.2	板的承载能力试验	139
7.7	裂缝控制验算建议方法	142
7.7.1	裂缝开展准则	142
7.7.2	裂缝宽度预测	142
	参考文献	144
第八章	早期温度场与温度裂缝理论	146
8.1	混凝土结构早期温度裂缝研究现状	146
8.1.1	国外的研究近况	146
8.1.2	国内研究者的成果	147
8.2	热传导问题	147

8.2.1	控制方程的导出	147
8.2.2	定解条件	150
8.3	现浇混凝土的温度场	151
8.3.1	现浇混凝土的热传导状态方程	151
8.3.2	定解条件	152
8.4	现浇墙板厚度方向的温度分布	154
8.4.1	基本问题	154
8.4.2	基本假定	155
8.4.3	全过程的数理方程	155
8.4.4	等效热交换	157
8.4.5	导热方程的解	158
8.4.6	算例说明	161
8.5	柱体横截面温度场的理论解析	163
8.6	三维温度场的数值解析	165
8.6.1	加权余量法原理	165
8.6.2	三维瞬态热传导问题的伽辽金法	166
8.6.3	数值实现	168
8.7	温度变形和温度应力	169
8.7.1	温度变形	169
8.7.2	温度应力	169
	参考文献	172
第九章	混凝土结构的湿度场理论	173
9.1	扩散问题及其数学物理方程	173
9.1.1	扩散定律	173
9.1.2	质量守恒定律	174
9.2	混凝土中湿度的扩散	174
9.2.1	湿度扩散原理	174
9.2.2	基本参数	177
9.2.3	边界条件	178
9.2.4	初始条件	178
9.2.5	讨论	178
9.2.6	其他扩散模型	179
9.3	混凝土结构的湿度场	182
9.3.1	控制方程	182
9.3.2	边界条件	183
9.4	收缩变形机理模型	183

9.4.1	毛细管张力	183
9.4.2	互斥力	184
9.4.3	固体的表面拉力	186
9.4.4	中间层水分损失	186
9.4.5	应力所产生的收缩和孔湿度影响	187
9.5	孔结构理论	187
9.6	湿度场与宏观变形的联系	188
9.7	湿度场的数值模拟	189
9.7.1	实验概述	189
9.7.2	数据对比分析	189
9.8	早期干缩变形数值模拟	190
9.8.1	实验概述	190
9.8.2	数据对比分析	191
9.9	孔结构参数的反演	192
9.9.1	问题的引出	192
9.9.2	反问题简介	193
9.9.3	模型的建立	193
9.9.4	讨论	194
	参考文献	194
第十章	现浇混凝土结构的应力场	196
10.1	现浇混凝土结构的时变应力分析	196
10.1.1	初应力法	196
10.1.2	材料参数的时变性	197
10.1.3	结构配筋对刚度的贡献	198
10.1.4	预应力的刚度贡献	200
10.1.5	力筋(钢筋)单元数值模型	201
10.1.6	结构应力的松弛效应	205
10.2	多场耦合方程的数值实现	206
10.2.1	程序的模块构成	206
10.2.2	典型模块的系统分析	206
10.3	混凝土早期开裂预测	208
10.3.1	混凝土裂缝开展条件	208
10.3.2	配筋对裂缝宽度的控制	209
10.3.3	纤维增强对裂缝的控制	209
10.3.4	采用预应力抗裂的措施	209
10.4	混凝土结构裂缝控制分析专用软件	210

10.5	结构混凝土开裂后的数值模拟	210
10.5.1	连续损伤理论的历史与现状	211
10.5.2	连续损伤理论模型	211
10.5.3	有限元中单元开裂后的数值处理	214
	参考文献	215
第十一章	工程应用研究	217
11.1	混凝土超长预制管段	217
11.1.1	上海市外环线沉管隧道概况	217
11.1.2	研究要点	217
11.1.3	模型分析	218
11.1.4	小结	222
11.2	现浇楼板裂缝控制	222
11.2.1	工程概况	222
11.2.2	研究目标	223
11.2.3	楼板分析内容	223
11.2.4	计算条件	223
11.2.5	小结	226
11.3	超长地下室墙板的裂缝控制	226
11.3.1	合成纤维的应用	226
11.3.2	施工条件控制	229
11.3.3	释放带的设置	231
11.4	现浇混凝土屋面结构层裂缝控制	237
11.4.1	分析方法	238
11.4.2	小结	238
11.5	预应力抗裂技术	239
11.5.1	案例简介	239
11.5.2	测试研究	239
11.5.3	讨论	241
	参考文献	243
附录 I	一阶常微分方程组的数值积分	244
附录 II	非线性方程组的解法	253
附录 III	合成纤维抗裂设计施工要点	261
附录 IV	混凝土裂缝控制分析软件 CCCTM 用户说明书	264
附录 V	试验和工程实践照片	291

第一章 绪 论

1.1 工程结构的裂缝

我国的工业设施、基础设施以及民用建筑大量采用混凝土和钢筋混凝土结构。这些工程结构的设计中裂缝的控制是一项重要指标。尽管在我国的结构设计规范中已采用了可靠度理论,但是工程结构使用中的耐久性仍然是正在研究的重要问题之一。

工程结构裂缝与结构正常使用安全性的关系是研究最为深入的,也形成了设计规范和其他相关标准;工程结构长期使用的耐久性也逐步得到重视。1995 年国家自然科学基金委员会和国家科学技术委员会立项开展“重大土木与水利工程安全性与耐久性基础研究”(国家攀登计划 B)。其实,工程结构的裂缝还影响建筑的舒适性和设施使用功能要求,如高层建筑现浇楼板的裂缝,即使不影响使用的安全性和耐久性,在舒适性方面则让用户难以接受;又如高层建筑地下室外墙裂缝或高速公路隧道裂缝将导致地下水入渗,以致影响设备安全运转。

值得关注的是,现行的混凝土结构设计和施工规范都是基于混凝土材料的标准强度建立的,而工程现实是大量的工程结构是现场制作的“产品”,其加工过程可能会偏离原料——混凝土的标准制作要求,即产品质量受制作现场各种因素的随机性影响。随着混凝土材料和施工技术的飞速发展,大方量连续浇筑技术越来越普遍地应用于实际工程,然而,混凝土早期裂缝控制问题仍然是困扰工程技术人员的难题之一。

这里,为研究和叙述的方便,将混凝土结构的裂缝分为荷载作用裂缝和间接作用裂缝,其中荷载作用裂缝已有较广泛的研究,并为设计规范采纳;间接作用裂缝(尤其在混凝土强度发展期间的间接作用)的研究则较少。本书重点论述混凝土早期裂缝生成机理和控制措施研究,尤其侧重于间接作用的效应。

1.2 结构构件裂缝验算

原《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)^[1]第 3.1.3 条规定“……对使用上要求不出现裂缝的构件,应进行混凝土拉应力验算;对使用上允许出现裂缝的构件,应进行裂缝宽度验算……”,第 3.3.3 条规定了构件裂缝控制等级,第 3.3.4 条具体给出控制规定。一般而言,非预应力钢筋混凝土构件裂缝允许宽度在 0.2~

0.4mm,视使用条件从严;预应力构件的裂缝宽度严格得多,定义方式也不同。该规范的第五章给出了裂缝宽度验算的公式。上述规定表明,对直接作用(荷载)下构件的效应(开裂)的调查和研究已较完备。刚颁布的新版规范^[2]在考察了结构耐久性研究成果的基础上,建议裂缝宽度可以适当放宽。

为控制钢筋混凝土结构由于温度和施工条件等间接作用的影响,规范第6.1.1条给出了钢筋混凝土结构伸缩缝的构造规定(见表1.1)。这里施工条件实际反映了混凝土收缩等综合因素。值得指出的是,有些国家并未给出伸缩缝的具体限值,只提示应采取相应的措施。

表 1.1 钢筋混凝土结构伸缩缝最大间距(m)¹⁾

结构类型	施工方式	室内或土中	露天
排架结构	装配式	100	70
框架结构	装配式	75	50
	现浇式	55	35
剪力墙结构	装配式	65	40
	现浇式	45	30
挡土墙、地下室 墙壁等类结构	装配式	40	30
	现浇式	30	20

1) 本表摘自《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)。

工程实践中,无论是否留缝,大部分工程都存在施工期间裂缝病害^[3,5,9],然而也有实现地下室连续施工不设缝的成功实践^[3~5]。对于地下室外墙,即使很细小的裂缝(小于0.1mm)也会引起渗水,影响到结构的耐久性和建筑使用功能。

《地下工程防水技术规范》(GBJ 108-87)^[6]第2.2.1条将地下工程防水等级划分为四级,参见表1.2。但是,对于如何设计以达到控制等级并无直接的建议方法;该规范第3.1.4建议防水混凝土的裂缝宽度不得大于0.2mm。

表 1.2 地下工程防水等级¹⁾

防水等级	标 准
一级	不允许渗水,围护结构无湿渍
二级	不允许漏水,围护结构有少量、偶见的湿渍
三级	有少量漏水点,不得有线流和漏泥沙,每昼夜漏水量 $<0.5\text{L}/\text{m}^2$
四级	有漏水点,不得有线流和漏泥沙,每昼夜漏水量 $<0.5\text{L}/\text{m}^2$

1) 本表摘自《地下工程防水技术规范》(GBJ 108-87)。

1.3 混凝土结构成型阶段

研究混凝土施工期间裂缝的发展,必须明确混凝土材料的成熟规律(水泥水化和养护)、施工环境条件(温度和湿度变化)的影响、结构布置的约束作用、施工组织方式产生的活荷载等。所有这些方面对成型“早期”混凝土结构的综合作用决定裂缝的生成和发展。

在混凝土材料科学领域,研究者对于混凝土“早期”的定义较为模糊^[7]。作者认为,有必要统一定义混凝土的成型发展阶段,在本书中建议按水泥水化进程分为以下四个阶段:

(1) 塑性阶段

从浇捣完成开始至终凝完成的时段,对普通混凝土一般约为 6~12h 的时段。该阶段中,混凝土仍处于塑性流变阶段,水化反应剧烈,物理化学性质都极不稳定,体积变化强烈。

(2) 早前期阶段

一般指 12h(终凝完成后)至 72h 的时段。该阶段中,水化进程过半,混凝土内部形成了基本的微观结构体系,强度和刚度发展极为迅速。

(3) 早期阶段

一般指 72h 至 90d 的时段。该阶段中,水化过程基本结束,混凝土的强度和刚度发展减缓,而趋于成熟。

(4) 成熟阶段

一般指 90d 以后的时段。该阶段中仍有极微弱的水化过程继续,混凝土强度和刚度的发展达到稳定状态,属于通常讨论的结构混凝土的普通性质范畴,这方面有大量的研究文献。

本书所指的“混凝土早期裂缝”,主要是针对早前期阶段和早期阶段这两个主要时段而言。此时伴随水泥水化过程的进行,混凝土微观结构逐步形成,内部温、湿度场分布也在随龄期发生变化,从而引起温度变形、收缩变形和徐变等一系列体积变形。早期裂缝的生成和发展规律则是这些体积变形作用的结果,也是本书阐述的重点。

1.4 工程结构早期裂缝

调查数据显示,工程中普遍存在早期施工裂缝问题,部分工程的裂缝问题还相当严重。一般认为这类裂缝主要与以下因素直接相关:

(1) 边界约束

例如某工程设计意图通过加强地下室外墙板根部的防水性能来减少裂缝,而

实际却加大了底板连接处对于地下室外墙板的水平约束,反而使得竖向裂缝有增无减。相反,几个工程中外墙板一定范围内“应力释放带”(即后浇带)的设置,成功地控制了裂缝的发展。

(2) 养护

例如某网球场车库顶板混凝土浇捣后只浇水养护一星期,后由于多种原因裸露在外 8 个多月,裂缝数目达到 100 多条;而另一平面几何尺寸、混凝土强度、裸露时间各方面都基本近似的地下车库工程中的顶板,却未发现裂缝,主要区别就在于该工程重视顶板混凝土的早期养护。

(3) 配合比

一般认为,单位体积水泥含量越高,水灰比越高,裂缝问题也越严重;加入粉煤灰或掺加减水剂,可降低早期水化热和减小极限收缩量,将起到缓解拉应力发展的作用。

(4) 结构尺寸

墙板和楼板厚度的增加,外墙延长米的增长,都将增大裂缝出现的可能性。

(5) 其他

配筋、振捣方式、外界温度和湿度、拆模时间等也都对裂缝问题产生直接的影响。

大量工程实践经验表明,裂缝的出现是不可避免的,关键在于如何将早期裂缝控制在可以接受的范围内,而不影响结构自身的使用性能(耐久性)和安全性能,甚至于设施的功能性和建筑的舒适性。

然而,由于缺乏对于混凝土早期裂缝机理的认识和系统研究,实际工程中往往采用了不合理的结构体系或抗裂结构设计,或者不正确的施工工序、或不充分的养护,从而直接加剧裂缝的生成和发展,使其超出可接受的范围,而带来安全性、使用性等一系列问题,造成人力、物力的极大浪费。

混凝土构件为何可以一点不开裂、或可能开裂?在露置于环境后为何不立即开裂的理由?作为主要结构材料的现代混凝土,其主要缺点是抗拉强度低、脆性显著,而现浇混凝土结构强度/变形性能的发展历程还要受到时间和环境条件的控制。其实,早期裂缝的形成是混凝土内宏观拉应力的生成与混凝土材料抵抗这个应力的能力(抗拉强度发展)相互作用的表现。

Kelly^[8]早在 1963 年提出的徐变对混凝土收缩开裂影响的机理关系,图 1.1 在此基础上略作修改。当一混凝土构件受到限制,收缩应变诱发弹性拉伸应力(见图 1.1 曲线 a),徐变效应使这个拉伸应力随时间逐渐减小——松弛(见图 1.1 曲线 b)。为此,在混凝土中存在受限制条件时,徐变应变所松弛的应力与收缩应变产生的应力之间的相互关系,是大多数结构中变形与开裂的核心所在。因此,我们必须考虑混凝土在受约束限制条件下如何承担持续应力。

实际上,混凝土的应力-应变关系比图 1.1 所示要复杂得多。首先,混凝土并非