

工程结构 裂缝控制

王铁梦 著

中国建筑工业出版社

工程结构裂缝控制

王铁梦 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程结构裂缝控制/王铁梦著.-北京:中国建筑工业出版社,1997

ISBN 7-112-03237-7

I.工… II.王… III.建筑物-裂缝-控制 IV.TU746.3

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第04919号

本书在大量工程实践基础上,对结构物由于变形作用引起的裂缝作了系统的论述。其中包括许多新的观点、分析和处理方法,特别对近十年来的实践经验和研究成果作了详细的分析。作者提出的有关伸缩缝计算公式已成功地处理了我国许多重点建设工程的裂缝问题。书中还重点介绍了作者最近提出的有关“后浇带”的经验及许多城市结构裂缝控制实例,并首次发表了作者有关现场结构温度收缩应力的实测研究成果。

本书可供土木工程广大技术人员、科研工作者和大专院校师生参考。

* * *

责任编辑:王 跃

责任设计:刘玉英

责任校对:孙 梅

工程结构裂缝控制

王铁梦 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:38 $\frac{3}{4}$ 字数:989千字

1997年8月第一版 2000年12月第七次印刷

印数:10,501—12,500册 定价:72.00元

ISBN 7-112-03237-7

TU·2486(8380)

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)



作者简介

王铁梦,1931年生于辽宁铁岭,满族,1955年毕业于哈尔滨工业大学土木工程系,任冶金部建筑研究总院副院长、上海宝钢副总工程师。40余年来持之以恒坚持理论联系实际,为建设服务,在重点工程现场开展科学实验和理论研究。他先后参加了首都人民大会堂等十大工程、上海宝钢一、二、三期工程,他为鞍钢、包钢、武钢、攀钢、上海浦东新区建设、核电站建设、地铁建设、上海合流污水工程以及国内许多重点工程解决了大量钢筋混凝土裂缝、地基基础、地下结构、滑坡、桩基位移、危房、危桥等技术难题,为提高工程质量、节约投资和加快工期作出了突出贡献。

他于1955年最早对规范性问题——工业与民用建筑温度伸缩缝与裂缝控制问题提出异议,运用综合研究方法,结合设计、施工、材料、地基、环境等条件,提出“抗”与“放”的设计原则,统一了留缝与不留缝的两种设计流派的技术观点,结合实践提出伸缩缝间距及裂缝控制的计算公式,获得了广泛的应用。他在国内外有关杂志上发表了50余篇论文并完成三部著作。其研究成果获国家科技进步特等奖,上海市重大科技进步奖、冶金部科技进步奖、全国科技大会奖。他荣获全国劳动模范称号,是结构工程与地基基础专业的博士生导师,是我国著名工程结构裂缝控制专家。

序 言

近年来,工程建设规模迅猛发展,结构形式日趋大型化、复杂化,质量要求日趋严格。工程裂缝问题是具有相当普遍性的技术难题。

根据大量的工程实践和近代工程材料的细观研究,建筑结构的裂缝是不可避免的,但其有害程度是可以控制的。有害与无害的界限是由工程的生产及生活使用要求确定的,对于某些工程还要考虑精神和美观的要求。因此,有害与无害的裂缝限制对于不同领域的工程是不同的。如何因地制宜地把裂缝控制在无害范围之内就是结构工程师的艺术。

工程结构裂缝问题是十分复杂的,它涉及到岩土、结构、材料、施工、环境等多专业、多学科。本书是总结作者40余年来,运用综合的分析方法,结合大量工程实践开展现场观测试验研究,参加和指导许多重点工程大体积混凝土结构设计与施工,从事大量工程裂缝事故处理等一些科研成果和实践经验。作者提出的有条件地取消伸缩缝理论与实践依据,以及“抗”与“放”的原则并在国内、外许多重点工程中推广应用的经验,在本书中作了详细总结。

近年来,后浇带的应用,高强混凝土(HSC)及高性能混凝土(HPC)获得迅速发展。如何考虑结构环境及受力条件使新型材料适应工程结构裂缝控制的要求,最终使工程达到“高抗裂及防水性能工程”目的,涉及到需要研究的诸多设计施工及建筑维护问题。

自然科学正以日新月异的速度向前发展,作为第一生产力的科学技术,是在不断辩证地肯定和否定自身的过程中前进的。一个科技工作者不但要善于遵守和运用规范、规程和规定,而且应该成为向传统的规范、规程和规定挑战的战士。

作者深信,广博丰富的建设实践是认识和解决裂缝这个古老又新颖的课题的基础。这需要广大科技工作者与工程技术人员携手努力,长期探索,使裂缝控制理论日臻完善。本书以此作为抛砖引玉献给亲爱的读者。

王铁梦

一九九六年十一月于上海

该书荣获：

国家科学技术进步奖二等奖

冶金工业部科学技术进步奖二等奖

第四届国家图书奖提名奖

1999年“全国优秀科技图书奖”暨“科技进步奖（科技著作）”二等奖

目 录

作者简介

序言

1 工程结构裂缝的基本概念	1
1.1 裂缝的基本概念	2
1.2 混凝土的微观裂缝与宏观裂缝	4
1.3 裂缝产生的主要原因、广义荷载及其特点	5
1.4 裂缝的形式与质量控制	6
1.5 混凝土的裂缝与防水	9
1.6 混凝土裂缝的自愈与渗漏标准	10
1.7 结构物的抗裂和断裂韧性问题及对高性能混凝土(HPC)要求	12
1.8 结构长度和基础刚度对混凝土温度收缩应力的影响(美国ACI的方法)	15
2 混凝土的某些基本物理力学性质	17
2.1 混凝土的收缩	17
2.2 混凝土收缩的种类	19
2.3 混凝土的收缩变形与徐变变形的实用算法	20
2.4 标准极限收缩与标准极限徐变度	24
2.5 任意时间收缩计算公式	24
2.6 外加剂对混凝土收缩的影响	25
2.7 YJ-2型减水剂的物理力学特性	26
2.8 混凝土和钢筋混凝土的极限拉伸	29
2.9 配筋对混凝土极限拉伸的影响	30
2.10 钢筋混凝土结构中钢筋对混凝土收缩应力的影响	31
2.11 混凝土硬化过程中的早期沉缩及收缩裂缝(塑性裂缝)	33
2.12 混凝土抗拉力学性能随龄期变化规律的试验研究	34

2.13 极慢速加载条件下混凝土抗拉性能试验研究	52
2.14 龄期对混凝土的弹性模量、抗拉强度和极限拉伸的影响汇总与建议	60
3 温度应力理论的若干问题	62
3.1 约束的概念	62
3.2 温度应力的基本概念	65
3.3 温度应力与变形的关系	66
3.4 弹性应力平衡基本方程	68
3.5 无应力温度场	70
3.6 变形应力解答的“等效荷载法”或“杜哈梅(Duhamel)相似”	73
3.7 简支梁式结构承受非线性温差(或收缩)的温度应力	74
3.8 厚壁梁及墙式结构由于表面冷却及收缩引起的自约束应力	76
3.9 简支梁的变位与外约束应力	79
3.10 矩形水池池壁内外温差应力计算	82
3.11 热弹理论的应力函数法与位移函数法	83
3.12 烟囱、水池、容器、贮仓的温度应力及边缘效应	85
3.13 厚壁圆管的温度应力	88
3.14 厚壁圆环及薄壁圆环的温度应力	91
3.15 高层建筑及高耸构筑物的热变形	94
3.16 圆形厚板的内约束应力	100
4 对荷载裂缝的若干探索	103
4.1 概述	103
4.2 钢筋混凝土中心受拉的应力状态	104
4.3 中心受拉构件的裂缝间距	106
4.4 中心受拉构件裂缝开展宽度	107

4.5	受弯结构的应力状态	107	7.3	某大型设备基础裂缝的分析和 处理	225
4.6	弯矩作用下的裂缝间距	110	7.4	宝钢中央水处理吸水池混凝土 池壁裂缝	228
4.7	受弯构件的裂缝开展宽度	111	7.5	某轧钢厂铁皮沉淀池侧墙的 裂缝	231
4.8	工字形截面钢筋混凝土受弯 构件	113	7.6	某半地下油泵房的裂缝	232
4.9	相似模型的试验结果及应力 与几何尺寸关系	119	7.7	钢筋混凝土地下隧道裂缝	232
5	混凝土的应力松弛与裂缝的若干 特点	121	7.8	露天钢筋混凝土薄壁结构物的 裂缝	244
5.1	混凝土的徐变和应力松弛	122	7.9	“后浇缝”的设计与施工	250
5.2	应力异常现象	124	7.10	关于有条件地取消后浇带	253
5.3	裂缝运动的稳定性	129	7.11	混凝土面层的膨胀受压失稳 破坏	262
5.4	吴淞大桥的裂缝与超载通行	132	7.12	裂缝控制措施	264
5.5	动荷载作用下裂缝运动的现场 观测	137	7.13	上海某广场大厦工程裂缝分析 与处理	273
5.6	变形变化的失稳破坏	139	7.14	香港某水处理厂水池裂缝的 分析	276
5.7	变形变化中的“声发射”	141	7.15	上海某地铁站裂缝控制	283
5.8	裂缝的“模箍作用”	142	7.16	毛主席纪念堂大体积混凝土 基础工程的温控	285
6	大体积混凝土结构裂缝控制	144	7.17	陕西蒲城电厂 20000m ³ 大块式 大体积混凝土设备基础	288
6.1	概况	144	7.18	天津无缝钢管总厂环形加热炉 基础大体积混凝土工程温控	289
6.2	承受连续式约束的现浇大体积 钢筋混凝土裂缝控制	146	7.19	北京首都国际机场航站区扩建 工程旅客航站楼结构温度应力 计算	291
6.3	关于地基水平阻力系数 C_x	151	7.20	秦山核电站核岛底板混凝土施工 裂缝控制	295
6.4	结构中的温度场	153	7.21	人民大会堂主体结构 132m 取消 伸缩缝	297
6.5	长墙及地基板的温度收缩应力	158	7.22	地上露天 9MV 直线加速器探伤室 大体积混凝土裂缝控制	299
6.6	桩基对结构的附加约束	169	7.23	上海 8 万人体育场 300m 直径 现浇大体积钢筋混凝土结构 不留伸缩缝、沉降缝和后浇带	299
6.7	地基上大块式设备基础的自约束 应力	170	7.24	某车站候车大厅框架大梁裂缝 分析与处理	301
6.8	不稳定热传导的“滞后现象”	172	7.25	大体积混凝土温度应力现场测 试的研究	302
6.9	弹性地基上超长超厚大体积混凝土 结构物温度收缩应力的光弹性 实验研究	175	7.26	混凝土强度等级的合理选择	
6.10	连续式约束边的剪应力修正及其 裂缝	180			
6.11	关于剪力裂缝的工程实例	183			
6.12	高强混凝土(HSC)及高性能 大体积混凝土(HPC)的裂缝 控制	185			
7	大体积混凝土结构裂缝控制实践	189			
7.1	宝钢转炉基础大体积混凝土的 裂缝控制	189			
7.2	686m 长无伸缩缝基础的裂缝	212			

与施工	319	11.2 钢筋混凝土采矿立井环状裂缝	
7.27 大体积混凝土裂缝事故处理	320	的形成机理	437
8 大体积混凝土结构裂缝控制的		11.3 沉井的裂缝问题	448
综合措施	322	11.4 某厂引水泵房矩形沉井的裂缝	
8.1 大体积混凝土的若干设计构造		控制	452
要求	322	11.5 钢筋混凝土烟囱的裂缝	455
8.2 “抗”与“放”的裂缝控制原则	323	11.6 受热设备基础的裂缝与防水	460
8.3 关于裂缝宽度的限制问题	325	11.7 控制自约束应力裂缝,提高	
8.4 混凝土配合比及其材料	335	炉龄与爆炸裂缝	462
8.5 混凝土的浇筑与养护	336	11.8 无缝地面的裂缝控制途径	469
8.6 温控施工的现场监测与试验	339	11.9 由生产热源引起的钢筋混凝土	
9 钢筋混凝土预制构件的裂缝	341	大梁的裂缝	471
9.1 预应力大型屋面板	341	11.10 圆环基础的温度收缩应力与	
9.2 预应力钢筋混凝土梁	346	裂缝	475
9.3 板式构件	350	11.11 200m 周长环形圈梁大体积	
9.4 梁式预制构件的变位与内力	351	混凝土施工裂缝控制	477
9.5 高温车间的屋面板	352	11.12 几种特殊结构变形缝作法	486
9.6 屋面板受热后的状态	354	12 民用建筑物的裂缝	488
9.7 预制构件的裂缝处理	360	12.1 民用建筑物的裂缝概况	488
10 排架及框架结构的温度应力		12.2 混合结构温度收缩应力与裂缝	
与温度伸缩缝	362	分析	489
10.1 单层工业厂房的温度伸缩缝		12.3 地基动态变形引起墙体的开裂	499
间距	362	12.4 地基变形引起结构物的裂缝	501
10.2 钢筋混凝土排架结构温度收缩		12.5 地基差异沉降引起的墙体剪力	
应力分析方法	370	裂缝	504
10.3 钢结构单层工业厂房温度应力		12.6 地基相邻影响差异沉降引起	
计算	381	的裂缝	505
10.4 结构物的长度问题	394	12.7 地基处理的“抗”与“放”问题	514
10.5 框架结构温度应力近似算法	396	12.8 变形速率和允许变形	516
10.6 多层框架	400	13 低温条件下混凝土工程的裂缝	
10.7 排架结构温度应力算法		控制	518
(精确法)	402	13.1 一般概念	518
10.8 以“抗”为主纵向排架的温度		13.2 较低温条件下混凝土施工	
应力(精确法)	404	的裂缝控制	519
10.9 框架结构(包括排架)各跨温差		13.3 低温(0~-45℃)对混凝土	
不均匀时的变形算法	407	变形的影响	525
10.10 多层钢筋混凝土框架的温度		13.4 现浇钢筋混凝土露天墙式结构冬季	
收缩应力	409	施工的防冻与防裂经验	528
10.11 单柱伸缩缝的构造	415	13.5 地基低温变形引起基础的	
10.12 工程裂缝调查统计及分析	419	破裂	534
11 特殊构筑物的裂缝	432	13.6 八万吨散粮筒仓超长大体积	
11.1 梁板结构的裂缝	432	混凝土在-8℃条件下浇灌	

的裂缝控制	539	裂缝的经验	571
14 荷载裂缝分析	541	15.4 氯化铁防水技术	576
14.1 上海某影剧院 24m 普通钢筋 混凝土桥式屋架下弦裂缝 问题	541	15.5 地上结构物裂缝的一般修补 方法	578
14.2 工程实例(某工程矩形梁 的裂缝)	548	15.6 可延性堵漏构造	581
14.3 12m 工字形屋面梁的裂缝 验算与试验对比	552	15.7 从材料的角度看控制裂缝 的发展方向	582
14.4 上海某影剧院工程楼座大梁 裂缝	556	16 工程结构裂缝控制新发展	585
15 结构物裂缝的修补	561	16.1 大体积混凝土的瞬态温度场 和温度收缩应力的计算机 仿真	585
15.1 地下构筑物的防渗堵漏	561	16.2 大体积现浇混凝土结构裂缝 控制专家系统	590
15.2 某热轧厂箱形基础化学灌浆 实例	567	16.3 工程实例的验证	597
15.3 采用甲凝修补大体积混凝土		参考文献	604
		编后记	609

1 工程结构裂缝的基本概念

许多混凝土结构、砌体结构等建筑物在建设过程和使用过程中出现了不同程度、不同形式的裂缝，这是一个相当普遍的现象。它是常期困扰着建筑工程技术人员的技术难题。

虽然结构设计是建立在强度的极限承载力基础上的，但大多数工程的使用标准却是由裂缝控制的。

结构的破坏和倒塌也都是从裂缝的扩展开始的，如强烈地震后震区的建筑物上布满了各种各样的裂缝，荷载试验的钢筋混凝土梁上出现大量裂缝等等。所以人们对裂缝往往产生一种破坏前兆的恐惧感。的确，从近代固体强度理论的发展中可以看到，裂缝的扩展是结构物破坏的初始阶段；相对的某些裂缝，其承载力也可能受到一定威胁。同时，结构物裂缝可以引起渗漏，引起持久强度的降低，如保护层剥落、钢筋腐蚀、混凝土碳化等。所以，习惯的概念，甚至某些验收规范和某些工程现场都是不允许结构物上出现裂缝的，例如某引进工程的一位外国专家即要求混凝土不得出现裂缝。

但是，近代科学关于混凝土强度的细观研究以及大量工程实践所提供的经验都说明，结构物的裂缝是不可避免的，裂缝是一种人们可以接受的材料特征，如对建筑物抗裂要求过严，必将付出巨大的经济代价；科学的要求应是将其有害程度控制在允许范围内。这些关于裂缝的预测、预防和处理工作，统称之为“建筑物的裂缝控制”，这方面的科学研究工作具有重要的现实意义和技术经济意义。但迄今国际上一些有关的研究论文和技术报告都只是零散地发表在期刊杂志上，并且专题性问题讨论较多，综合性资料及论著则很少。

国际上许多国家都有专门的科研机构从事钢筋混凝土在荷载作用下裂缝的研究工作，编制了规范，如美国混凝土协会 ACI224 委员会；英国水泥与混凝土协会 C&CA 及其规范 BS8110、BS8001；德国钢筋混凝土协会及规范 DIN1045—1972；法国规范 CCBA；欧洲混凝土协会 CEB；欧洲混凝土协会-国际预应力混凝土协会 (CEB-FIP)；前苏联混凝土及钢筋混凝土研究院及穆拉雪夫学派等。

我国清华大学、东南大学、大连理工大学、中国建筑科学研究院、冶金部建筑研究总院等都做了大量研究工作并编制出钢筋混凝土规范有关裂缝方面的设计规定，在工程设计中发挥作用。

上述各研究机构及其成果针对外荷载作用引起的裂缝问题是相当丰富的。

工程实践中的许多裂缝现象往往无法用荷载的原因加以解释。大批高层建筑地下室在施工期间出现早期裂缝，其宽度及数量均随时间的推移而增加，并未发现荷载的变化。

所以，我们重点探索了由“变形变化引起的裂缝问题”。这种变形作用包括温度（水化热、气温、生产热、太阳辐射等）、湿度（自生收缩、失水干缩、碳化收缩、塑性收缩等）、地基变形（膨胀地基、湿陷地基、地基差异沉降等）。

作者在处理裂缝的经验中，包括混凝土结构、混合结构、砌体结构、地下管线通廊、水池、容器等特殊构筑物，特别是各种工业设备基础，高低温作用下的基础工程，包括核电

站的一些基础等，在这些工程中变形作用引起的裂缝占绝大部分，所以这方面的研究与工程实践显得十分现实和迫切。

按现代国际上发展的极限状态设计理论，工程设计必须满足两个极限状态：

1. 承载力的极限状态 (Ultimate Limit States)
2. 使用极限状态 (Serviceability Limit States)

使用极限状态主要是从生产、生活包括精神等方面要求，对建筑物在裂缝、变形等方面必须控制的状态。

从国内外有关规范及一些重大工程的实际设计可看出，对待建筑结构变形作用引起的裂缝问题，客观上存在着两类学派：

第一类，设计规范规定得很灵活，没有验算裂缝的明确规定，设计方法留给设计人员自由处理。对伸缩缝和沉降缝的设置，没有严格规定，基本上按经验设置，有许多工程不留伸缩缝，不留沉降缝，基本上采取“裂了就堵，堵不住就排（有防排水要求的工程）”的实际处理手法。一些有关的裂缝计算则只作为参考资料而不作为规定（包括荷载引起的裂缝）。

第二类，设计规范有明确规定，对于荷载裂缝有计算公式并有严格的允许宽度限制。对于变形引起的裂缝没有计算规定，只要按规范每隔一定距离留一条伸缩缝，荷载差别大，留沉降缝就认为问题不复存在了，即留缝就不裂的设计原则。

采取第一类设计原则的如日本、英、美等国家；采取第二类设计原则的如前苏联、德国、东欧一些国家和我国。

大量的工程实践证明，留缝与否，并不是决定结构变形开裂与否的唯一条件，留缝不一定不裂，不留缝不一定裂，是否开裂与许多因素有关。

至于把工程建设的安全和防水要求完全寄托在补裂和堵漏上也是靠不住的，因为并不是任何裂缝都能顺利堵住。有些开裂经过长时期、多次反复堵漏也不成功，其影响生产和造成的经济损失往往超过土建投资若干倍。例如，某工程施工工期仅一年半，堵漏数次却花了三年的时间；有的设备基础长期漏水，影响加热温度，降低了产品质量。

有些裂缝虽然没有达到使建筑物倒塌的危险程度，但由于精神作用以及建筑装饰及美观方面的原因，也常常影响到建筑物的使用。

我们认为：控制裂缝应该防患于未然，首先尽量预防有害裂缝，防不住的就堵，堵不住再排（有防排水要求的工程），重点在防。实践证明，只要设计与施工紧密配合，这是完全可以做到的。过去许多工程，凡是采取了控制措施的，一般都取得了良好效果。

本书是作者根据其工程结构实际裂缝处理和预防方面的点滴经验，结合运用一些有关的建筑力学基础理论，并同时参考不同专业的某些资料和论文，提出的有关结构物裂缝控制的若干方法和技术措施的专著，可供读者在设计、施工、科研及生产实践中参考。

1.1 裂缝的基本概念

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。混凝土的强度理论大致可以分为四种：唯象理论、统计理论、构造理论、分子理论等。

唯象理论是建立在简单的基本试验基础上的，它归纳分析了大量试验数据，以提出基

本假定, 建立计算模型, 并在均质、弹性、连续假定前提下推导出材料强度的各种计算公式, 从而形成材料力学中的一些强度理论, 如最大主应力理论、最大变形理论、最大剪应力理论、八面体强度理论等。后期又在弹性假定基础上引进了塑性理论。在设计中, 它考虑了混凝土和钢筋混凝土的弹-塑性质, 并发展了极限状态的强度理论, 包括极限强度、极限变形和极限裂缝开展三种极限状态。这些理论直至今天, 国际上仍在继续发展。外荷载作用下建筑材料强度问题, 应用唯象理论研究得相当充分, 解决了大量工程实际问题。

但是很早就发现过一些与唯象理论相悖的现象, 波恩 (Born) 于 1932 年用微观力学方法计算物质的原子间作用力时, 按连续假定求得材料的理论强度比实际强度大 10 至 100 余倍。又如格里菲斯 (Griffith) 于 1921 年所作的玻璃丝的强度试验, 直径由 1.02mm 减少到 0.0033mm, 其强度却猛增, 由 175MPa 增至 3460MPa。后来证实, 玻璃丝存在的“初始缺陷”, 即匀质材料中的不连续现象——“微观裂缝”, 在较粗的玻璃丝中, 比高压成型的细纤维中为多, 所以导致巨大差异。这是最早提出的固体材料中存在“微观裂缝”的概念, 并为后来许多试验和工程实践所证实。又如在金属结构方面, 第二次世界大战期间, 美国近 5000 艘货船共发生 1000 多次破坏事故, 其中 238 艘完全报废; 1938~1942 年, 世界上共有 40 多座桥梁先后倒塌; 1954 年英国两架喷气式飞机在地中海上空失事; 很多国家多次发生高压锅炉、石油及化工压力容器和管道的爆炸或损坏事故等。早在本世纪之初, 同类性质的事故已时有发生, 但当时人们并不理解, 因为, 破坏时的荷载远小于设计荷载, 按照常用的固体力学的强度理论和设计方法去推理, 是不应该出现这种破坏现象的。后来的研究把这种屈服极限以内的破坏, 称为“低应力脆性断裂”, 认为是由于材料内部的初始缺陷微裂扩展引起的。因之就产生了断裂力学, 当时主要是针对金属结构的。近年来断裂力学的某些原理正在向混凝土领域渗透和发展。但混凝土结构裂缝并不是“低应力脆性断裂”问题, 特别是钢筋混凝土更不是“低应力脆性断裂”问题。由于混凝土和钢筋混凝土的复杂组成和物理性质的变化, 无规则的应力集中可引起大量微裂, 但是裂缝的扩展又受到各种孔隙、骨料及钢筋的阻抗, 裂缝的断裂分析比均质材料复杂得多, 因此, 断裂力学在钢筋混凝土及砖混结构中远未达到实用阶段, 还有待于深入研究。

唯象理论忽略了混凝土内部的构造组成, 如混凝土内部固相、气相、液相的相互作用, 导热过程、水分转移、蒸发过程以及各种孔隙、缺陷、内部微裂等不连续现象, 计算结果与实际相差较大。后来又发展了统计强度理论, 虽仍把材料当作连续的固体, 但视其内部存在的缺陷及微裂、裂纹等的分布服从统计规律, 从而使强度理论计算结果能接近于实际。

构造理论进一步考虑材料的内部构造, 考虑到混凝土是由不同材料组成的非均质体, 内部存在着固、液、气体, 当温度和湿度变化, 而且在外荷载作用下, 混凝土内部产生了复杂的物理现象, 引起了内部“初始应力”、“初始微裂”、内部扩散及质量转移等随时间变化的现象, 从而具体补充了唯象理论所不能解释的现象, 如相同组分材料的不同施工及养护工艺条件下抗裂强度可差数倍之多, 以及内部微裂对宏观强度之显著影响等。如前所述, 可概括地说, 唯象理论以及近代发展的极限强度理论的最大缺点是忽略了“时间”参数, 只知道最终状态而不了解中间全过程。

最后, 关于材料的分子强度理论, 它是应用物理力学方法研究分子间的作用力, 求出材料的宏观强度, 从而可以按人的意志设计超高强度建筑材料的理论。分子强度理论尚处于探索阶段, 远不到工程应用阶段。

本书仍然以唯象理论为基础，考虑材料的某些构造、结构形式、施工特点及时间关系，提出结构物裂缝的分析方法。

1.2 混凝土的微观裂缝与宏观裂缝

多年来，特别是 60 年代，因有关混凝土的现代试验研究设备的出现（如各种实体显微镜、X 光照像设备、超声仪器、渗透观测仪等），完全证实了在尚未受荷的混凝土和钢筋混凝土结构中存在肉眼不可见的微观裂缝（简称“微裂”）。据此，有些学者考虑了混凝土的实际结构，建立了构造模型，如骨料和水泥石组成的“层构模型”、“壳-核模型”和“组合盘体模型”等，并通过弹性理论计算，从理论上证明变形约束应力可以引起微裂。图 1-1 所示为混凝土的微裂及三种计算模型。微裂主要有三种：

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

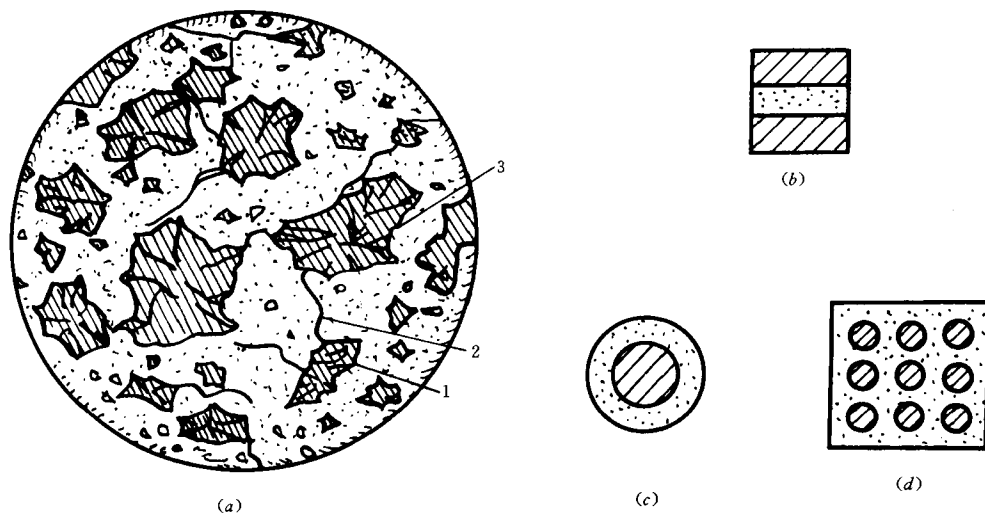


图 1-1 微裂计算模型示意图

(a) 微裂；(b) 层构模型；(c) 壳-核模型；(d) 组合盘体模型

1—粘着裂缝；2—水泥石裂缝；3—骨料裂缝

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，微裂几乎不变动；到 30%~70% 荷载时，微裂开始扩展并增加；到 70%~90% 荷载时，微裂显著地扩展并迅速增多，且微裂之间相互串连起来，直至完全破坏。

由于微裂的分布是不规则的，沿截面是非贯穿的，故具有微裂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，微裂在拉力作用下很容易扩展并串连全截面，从而较早地导致断裂。另外，混凝土材料的非均匀性对混凝土抗拉甚为敏感，故

抗拉强度的离散程度远较抗压过大。实际工程结构的裂缝，绝大多数由抗拉强度和抗拉变形（极限拉伸）不足而引起。但以往的科研和技术工作，在这方面大都只是围绕抗压强度方面进行研究（人们关心抗压强度），在抗拉方面研究工作却很少，这使得在目前条件下很难找到准确的计算理论。

在混凝土抗剪，微裂扩展串连之前，混凝土截面有良好的抗剪能力，即使微裂扩展并串连横贯全截面，仍可靠摩擦力及交错面的咬合而维持工作。但进一步扩展将会失去抗剪能力，这时欲维持其继续工作必须配置钢筋。结构物纯剪破坏是很少的，而剪拉破坏（主拉应力）则是常见的。

微裂的原因可按混凝土的构造理论加以解释，即视混凝土为骨料、水泥石、气体、水分等所组成的非均质材料，在温度、湿度变化条件下，混凝土逐步硬化，同时产生体积变形。这种变形是不均匀的：水泥石收缩较大，骨料收缩很小；水泥石的热膨胀系数大，骨料较小。它们之间的变形不是自由的，产生相互约束应力。在构造理论中一种极为简单的计算模型，是假定圆形骨料不变形且均匀地分布于均质弹性水泥石中，当水泥石产生收缩时引起内应力，这种应力可引起粘着微裂和水泥石变裂。

混凝土微裂的存在、扩展、增加，使应力-应变曲线向水平线倾斜，应力滞后于应变，泊松比增加，刚度下降，持久强度降低，徐变增加。

混凝土微裂是肉眼不可见的。肉眼可见裂缝范围一般以 0.05mm 为界（实际最佳视力可见 0.02mm）。大于等于 0.05mm 的裂缝称为“宏观裂缝”。宏观裂缝是微观裂缝扩展的结果。

一般工业及民用建筑中，宽度小于 0.05mm 的裂缝对使用（防水、防腐、承重）都无危险性，故假定具有小于 0.05mm 裂缝的结构为无裂缝结构，所谓不允许裂缝设计，也只能是相对的无大于 0.05mm 初始裂缝的结构。

可以认为，混凝土有裂缝是绝对的，无裂缝是相对的，所谓结构的抗裂质量只是把裂缝控制在一定的范围内而已。近代混凝土亚微观的研究认为：微裂的扩展程度就是材料破损程度的标志，同时，微裂的存在也是材料本身固有的一种物理性质。

随着混凝土预制工艺的不断改进（如高温高压成型、真空脱水、新型压轧板工艺、掺入各种外加剂等），会使微裂逐步减少，从而获得高强和超高强的构件。

热拌混凝土的新工艺可使混凝土在硬化前的塑性状态时沿全截面受热，促进水化。混凝土各组分产生不均匀热膨胀几乎处于自由状态，从而减少了内部初始应力，具有减少微裂的优点，这是发展热拌的最早理论基础。蒸养的混凝土承受初凝后的剧烈温差，硬化过程中的不均匀热膨胀受到显著的约束，所以含有较多的微裂。处于长期潮湿状态下养护的混凝土初始内应力较小，因为收缩差别较轻，收缩速率较低，故微裂亦较轻。

1.3 裂缝产生的主要原因、广义荷载及其特点

结构物在实际使用过程中承受两大类荷载，有各种外荷载和变形荷载（温度、收缩、不均匀沉陷），统称为广义荷载。其中静荷载、动荷载和其他荷载，称为第一类荷载；而变形荷载，称为第二类荷载。裂缝的主要成因不外乎以下三种：

- (1) 由外荷载（如静、动荷载）的直接应力，即按常规计算的主要应力引起的裂缝。

(2) 由外荷载作用, 结构次应力引起的裂缝。因为许多结构物的实际工作状态同常规计算模型有出入, 例如壳体计算常用薄膜理论假定, 相对壳面误差不大, 相对边缘区域误差较大, 于是该区域常因弯矩和切力引起裂缝; 而弯矩和切力相对薄膜理论的直接应力来说, 称之为次应力。又如屋架按铰接节点计算, 但实际混凝土屋架节点却有显著的弯矩和切力, 它们时常引起节点裂缝, 此处的弯矩和切力称为次应力。还有些常规不计算的外荷载应力, 但实际却引起结构裂缝。

(3) 由变形变化引起的裂缝(我们称之为第二类“荷载”)。结构由温度、收缩和膨胀、不均匀沉降等因素而引起的裂缝。应特别注意这种裂缝起因是结构首先要求变形, 当变形得不到满足才引起应力, 而且应力尚与结构的刚度大小有关, 只有当应力超过一定数值才引起裂缝, 裂缝出现后变形得到满足或部分满足, 同时刚度下降, 应力就发生松弛。某些结构, 虽然材料强度不高, 但有良好的韧性, 也可适应变形要求, 抗裂性能较高。这是区别于荷载裂缝的主要特点。

其次, 按普通外荷载的计算原则, 从外荷载的作用、结构内力的形成, 直至裂缝的出现与扩展, 荷载不变条件下, 似乎都是在同一时间瞬时发生并一次完成的, 是个“一次过程”。但是变形荷载的作用, 从环境的变化, 变形的产生, 到约束应力的形成, 裂缝的出现与扩展等都不是在同一时间瞬时完成的, 它有一个“时间过程”, 称之为“传递过程”, 即应力累积和传递的过程, 它是一个多次产生和发展的过程, 这是区别于外荷载裂缝的第二个特点。

建筑物的裂缝也可能由于特殊的变形变化引起, 如地震引起的裂缝可看作地基的“动态变形变化”; 滑坡、地基水平位移引起建筑物裂缝也是由于地基变形引起的, 可能是缓慢地徐变变形, 也可能是突然失稳变形。

次应力引起的裂缝也是由荷载引起, 只是按常规一般不计算, 但应该看到, 随着设计技术的不断发展, 所谓的“常规”也在不断改进, 计算逐渐做到全面合理, 故可归到第一类, 即荷载引起的裂缝中去。这样, 裂缝就分为两大类: 荷载引起的裂缝及变形变化引起的裂缝。

一个令人感兴趣的问题是, 引起裂缝的上述两大类原因中, 哪一种主要的?

根据笔者的经验和国内外的调查资料, 工程实践中结构物的裂缝原因, 属于由变形变化(温度、收缩、不均匀沉降)引起的约占80%以上; 属于由荷载引起的约占20%左右。前述80%的裂缝中也包括变形变化与荷载共同作用, 但以变形变化为主所引起的裂缝; 同时, 在20%的裂缝中也包括变形变化与荷载共同作用, 但以荷载为主所引起的裂缝。

1.4 裂缝的形式与质量控制

裂缝按其形状分为表面的、贯穿的、纵向的、横向的、上宽下窄、下宽上窄、枣核形、对角线式、斜向的、外宽内窄的和纵深的(深度达 $\frac{1}{2}$ 厚度)等等。裂缝形状与结构受力状态有直接关系。一般裂缝的方向同主拉应力方向垂直, 但在砌块结构中和结构物的变截面处, 剪应力可能同裂缝平行(纯剪裂缝)。

同一条裂缝上的裂缝宽度是不均匀的, 控制裂缝宽度是指较宽区段的平均宽度。所谓较

宽区段,指该裂缝长度的10%~15%范围。这样确定的平均裂缝宽度为该裂缝的最大宽度,以 δ_{\max} 表示;同样可在裂缝长度的10%~15%较窄区段内,确定平均宽度为最小的裂缝宽度,以 δ_{\min} 表示;在最大及最小之间有平均裂缝宽度,以 δ_f 表示(为最大与最小之平均值)。

在某一构件上的同一受力区存在有最大裂缝宽度(各条裂缝最大宽度的平均值),最小裂缝宽度(各条裂缝最小宽度的平均值)及最大与最小平均值的平均裂缝宽度。

同样方法可确定最大、最小及平均裂缝间距,以 $[L_{\max}]$ 、 $[L_{\min}]$ 及 $[L]$ 表示。

为了描绘某一工程,如一面墙、一段公路、一块地坪、一块楼板等结构物的裂缝程度,将裂缝条数除以结构物的长度(长条形结构物)、结构物的面积(大面积结构)或体积,称为“裂缝密度”,也叫“裂缝率”, $e = N/M$ 。 e 为裂缝密度或裂缝率; N 为裂缝条数; M 为长度或面积。有时尚须表明具有不同裂缝长度、裂缝宽度及深度的裂缝率。

裂缝分为愈合、闭合、运动、稳定的及不稳定的等。地下防水工程或其他防水结构,在水压头不高(水位在10m以下)的情况下,产生0.1~0.2mm的裂缝时,开始有些渗漏,水通过裂缝同水泥结合,形成氢氧化钙,浓度不断增加,生成胶凝物质胶合了裂缝。此外,氢氧化钙与空气中水分带入的二氧化碳结合,发生碳化,形成白色碳酸钙结晶,使原裂缝被封闭,裂缝仍然存在,但渗漏停止,这种现象称为裂缝的自愈现象。这种裂缝不影响持久应用,是稳定的。

结构的初始裂缝,在后期荷载作用时,有可能在压应力作用下闭合,裂缝仍然存在,但是稳定的。

结构上的任何裂缝及变形缝,在周期性温差和周期性反复荷载作用下产生周期性的扩展和闭合,称为裂缝的运动,但这是稳定的运动。许多防水工程冬季渗漏,夏季停止就是这种道理。有些裂缝产生不稳定性的扩展,视其扩展部位,考虑加固措施。

根据国内外设计规范及有关试验资料,混凝土最大裂缝宽度的控制标准大致如下:

- (1) 无侵蚀介质,无防渗要求,0.3~0.4mm;
- (2) 轻微侵蚀,无防渗要求,0.2~0.3mm;
- (3) 严重侵蚀,有防渗要求,0.1~0.2mm。

上述标准是设计上和检验上的控制范围,在工程实践中,有一些结构物带有数毫米宽的裂缝工作,但多年并无破坏危险。如冶金建筑中的各种受热结构、各种大型特种结构及设备基础等,一般均存在大量裂缝,欲完全控制裂缝不出现是不可能的,主要根据裂缝的部位,所处环境,配筋情况及结构形式,进行具体分析作出判断。笔者根据实际结构物的裂缝处理经验,认为规范中限制的裂缝宽度应当根据具体条件加以放宽,例如大量性的表面裂缝,如果经分析由变形作用引起,其宽度不受限制,只须作表面封闭处理即可。

一般情况下,在由变形变化引起裂缝的工程中,超静定结构占多数,裂得较严重,如刚架、特构、组合结构等。但是,这类结构的承载能力方面具有较大的安全度,有良好的韧性,能适应较大的变形而不致出现倒塌性破坏,所以在处理质量问题时可根据裂缝出现后,应力衰减等的具体情况放宽控制范围。在基本建筑工程中控制裂缝宽度的质量标准应加以改进,在目前阶段一般可采取既保证质量又保证效率的控制办法。

当结构的裂缝由荷载引起,荷载(内力 P 或 M)和变形(应变)的关系如图1-2所示。

从图1-2中可看出,普通钢筋混凝土构件内力不到30%极限荷载(混凝土应力达到抗拉强度,钢筋应力达50~60MPa左右)便出现裂缝,裂缝宽度在0.05~0.1mm左右,这