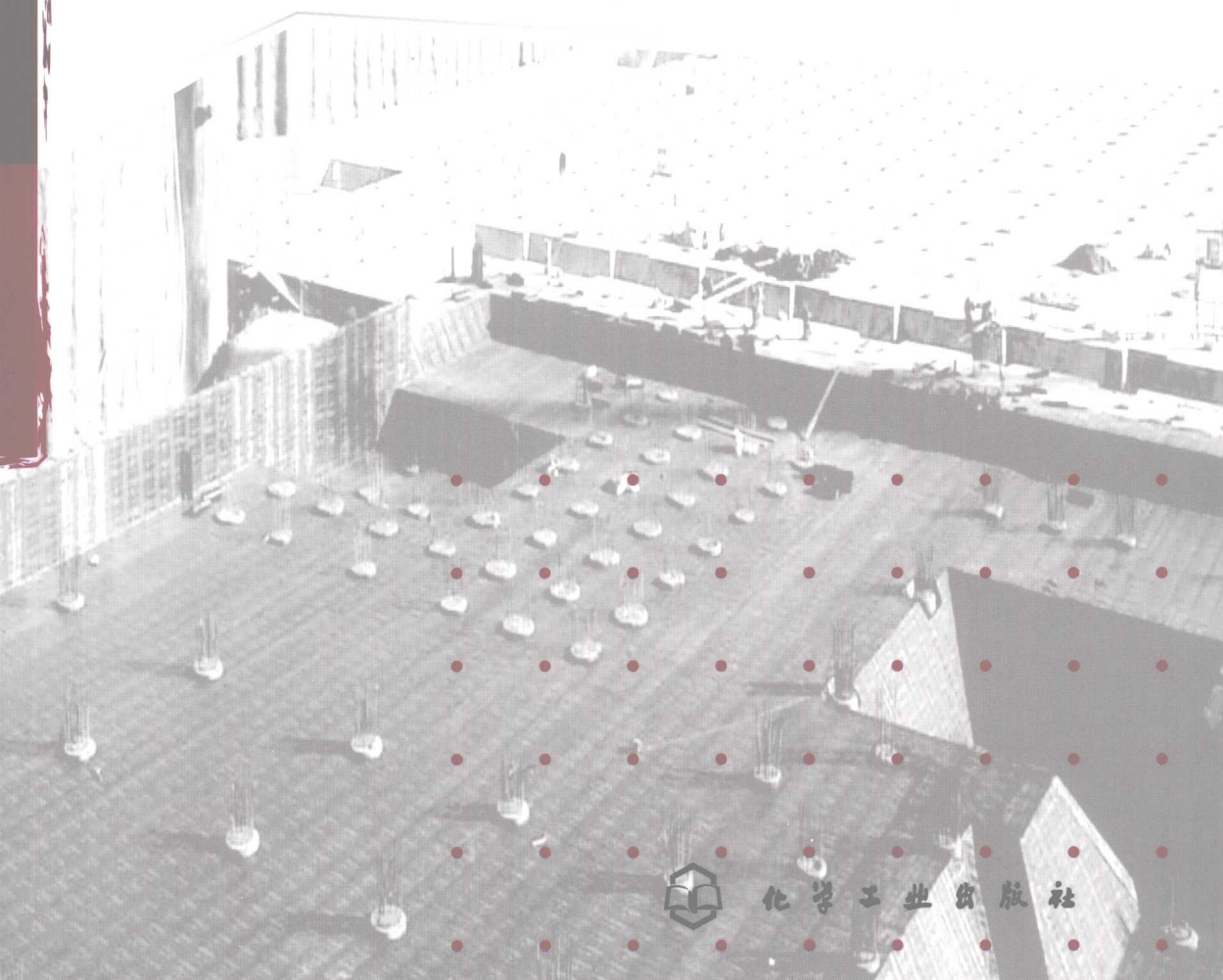


HUNNINGTU LIEFENG KONGZHI ZHONG DE
CAILIAO XUANZE

混凝土裂缝控制中的

材料选择

孙跃生 仲朝明 谷政学 丁宁 编著

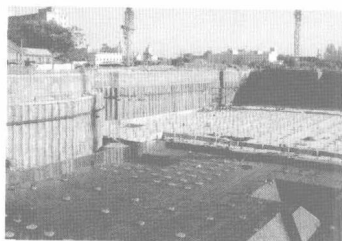


化学工业出版社

HUNNINGTU LIEFENG KONGZHI ZHONG DE
CAILIAO XUANZE

混凝土裂缝控制中的

材料选择



孙跃生 仲朝明 谷政学 丁宁 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

混凝土及钢筋混凝土的裂缝问题已经成为建筑工程中的重要技术难题,本书结合作者大量实际工程经验,理论联系实际,详细介绍了混凝土中各种材料,包括水泥、砂、石、水、外加剂及其他掺和料对裂缝的影响,还探讨了复合材料对混凝土的抗拉、收缩、弹性模量、水化热等各种性能的影响。

本书对于从事混凝土研究、施工、设计的工程技术人员有很好的参考作用,也可供相关专业大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土裂缝控制中的材料选择/孙跃生等编著. —北京:
化学工业出版社, 2009. 3
ISBN 978-7-122-04575-1

I. 混… II. ①孙… III. 混凝土结构-裂缝-控制-建筑
材料 IV. TU755.6 TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 002475 号

责任编辑: 仇志刚 李姿娇
责任校对: 凌亚男

文字编辑: 颜克俭
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 15 3/4 字数 328 千字 2009 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 40.00 元

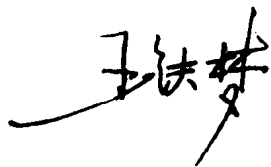
版权所有 违者必究

序

近年来我国经济迅速发展，建设规模日趋扩大，结构形式日趋复杂，混凝土及钢筋混凝土的裂缝问题已成为建筑工程中的重要技术难题，它不仅涉及结构的正常使用极限状态（例如防水、防腐蚀、美观、耐久性等），有些裂缝还会影响到结构的承载力极限状态。孙跃生同志多年来一直从事混凝土的研究工作，并紧密联系工程实践，系统地总结了混凝土裂缝控制中的主要因素——“材料选择”。他详细研究了水泥、砂、石和水，以及各种外加剂、掺和料、纤维、聚合物等多种材料复合对混凝土性能的影响，特别是复合材料对混凝土的抗拉强度、收缩、弹性模量、水化热等除抗压强度以外的各种性能的影响。孙跃生同志还根据水泥及混凝土的发展历史详细说明了新型建筑材料对混凝土整体性能的影响，这对于普通混凝土、泵送混凝土、高强混凝土、高性能混凝土、绿色高性能混凝土和高强高耐久混凝土的技术发展起到很重要的参考作用。

《混凝土裂缝控制中的材料选择》一书有关混凝土原材料对混凝土裂缝的影响方面撰写得非常全面、详细、高水平而有特色，是孙跃生同志多年从事并热爱混凝土工程实践的结果。我和他一起在混凝土新技术试点工程现场工作的时候，深深感受到工程现场就像一个巨大的磁场，不断吸引他热情忘我地工作，他对每一个混凝土施工现场都兴致勃勃充满激情，并和同志们团结协作、亲密无间，对这些混凝土新技术试点工程的成功起到了重要的作用。

让我们大家认真学习和研究本书的内容，它必将对混凝土工程裂缝控制具有很大的实践参考价值。



2008 年 11 月 14 日

前 言

随着我国经济的高速发展、科学技术的不断进步、建设规模的不断扩大，钢筋混凝土的规模日趋增大、结构日趋复杂、材料日趋高强度，工程施工领域的超长、超厚、超宽和高强大体积混凝土不断增加，同时与之相关的新材料、新工艺和配套技术也不断涌现，随之而来的是面对上述结构如何提高混凝土的耐久性和使用年限的问题。对此，国内外的许多学者和研究机构都在进行探讨，提出了“高性能混凝土”的概念，并发表了许多有价值的论文和专著，提出了一些理论和建设性的意见。然而，笔者认为混凝土耐久性的基础是对混凝土有害裂缝的控制，因为一旦混凝土出现有害裂缝，其所具有的耐久性指标则无从谈起，且还会使混凝土的劣化速度加剧，甚至导致混凝土整体结构的破坏。例如混凝土有害裂缝的产生，将会使腐蚀介质更容易到达钢筋表面，导致钢筋锈蚀，钢筋锈蚀后体积增大，导致裂缝扩展，裂缝扩展又进一步加剧了腐蚀介质的入侵，形成恶性循环，最终导致结构的破坏。因此，要使混凝土的耐久性得到提高，必须首先对混凝土的裂缝加以控制，特别是对超长、超厚、超宽和高强大体积混凝土，由于此类混凝土在施工和使用中极易出现有害裂缝，所以更应该引起足够的重视。

长期以来，人们对于裂缝的认识总是伴随着材料技术的发展而变化，对于混凝土中所使用的材料而言，从早期的水泥、砂、石和水，发展到目前的外加剂、掺和料、纤维、聚合物等多种复合材料，混凝土的各种性能得到了极大的改善，然而，由此所带来的裂缝问题却日渐突出。究其原因是多方面的，但最重要的一点是在考虑改善混凝土性能的同时却忽略了由此会对混凝土的裂缝控制所产生的不利影响，特别是各种材料对混凝土抗拉强度、收缩、弹性模量、水化热等抗压强度以外的性能指标的影响重视不够，且只是单一地强调降低水灰比和提高混凝土的抗压强度，由此所带来的负面影响是很大的。100多年来，混凝土的水灰比越来越小，抗压强度越来越大，各种收缩也越来越大，由此导致了混凝土的高自应力，使裂缝出现的概率也相应地增加。同时，混凝土早期强度提高但耐久性变差的另外三个原因是水泥的高细度、高 C_3S 含量以及高碱。虽然目前高碱问题已引起了水泥生产行业的高度重视，碱含量也得到了有效的控制，但水泥的细度过细、早期强度过高、水化热偏高等都是对混凝土裂缝控制和耐久性十分不利的因素。

随着混凝土从普通混凝土、泵送混凝土、高强混凝土、高性能混凝土、绿色高性能混凝土，一直发展到现在的超高耐久性混凝土，各种材料的选择及配比一直是其中的关键问题。然而混凝土技术的高速发展为什么会导致裂缝控制的难度增加呢？特别是对于超长、超厚、超宽和高强大体积混凝土而言更是如此。笔者认为，这主

要是目前混凝土所使用材料的多样性和材料性能的复杂性所导致的。

混凝土在非荷载作用下裂缝产生的原因是：混凝土变形受到约束而产生的应力大于混凝土自身的抗拉强度。因此，研究如何正确地选择以及合理使用材料，减少混凝土的收缩、降低约束产生的应力就成为控制混凝土产生非荷载裂缝的关键所在。

本书从混凝土的各种原料入手，重点研究了矿物掺和料对混凝土抗拉强度及抗压比的影响，并结合笔者二十多年的混凝土裂缝控制工程实际经验，详细叙述了混凝土裂缝控制中如何进行原材料的选择及合理使用。希望本书的出版，可以帮助混凝土设计、施工单位更好地进行混凝土裂缝控制，共同推动我国混凝土行业的发展。

感谢王铁梦教授在混凝土裂缝控制理论、实践中对我的指导和帮助，以及在百忙之中抽空为本书写序。

感谢仲晓林教授、林松涛教授以及他们带领的国家标准《大体积混凝土施工技术规范》编制组对本书出版的帮助，本书中部分重要实验数据来源于国标编制组。

除了书后所列参考文献，本书在编写过程中还参考了很多标准编制、技术交流等会议的资料以及一些互联网上的资料，在此对作者一并表示感谢。

鉴于作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

孙跃生

2008 年 12 月 20 日 于北京

目 录

第 1 章 混凝土裂缝产生的原因与机理	1
1.1 当前我国混凝土工程裂缝问题及现状	1
1.2 混凝土工程裂缝的分类	2
1.2.1 按裂缝产生的时间来划分	2
1.2.2 按裂缝产生的原因来划分	3
1.3 混凝土结构性裂缝产生的原因	3
1.3.1 结构性裂缝	3
1.3.2 无荷载变形裂缝	4
1.3.3 导致混凝土裂缝产生的其他原因	6
1.4 混凝土裂缝控制的简化计算	13
1.4.1 混凝土自约束应力的计算	13
1.4.2 混凝土外约束应力的计算	14
1.4.3 控制温度裂缝的条件	17
1.5 混凝土收缩的分类与产生的机理	18
1.5.1 混凝土的干燥收缩及产生的原因	18
1.5.2 混凝土的化学收缩	21
1.5.3 混凝土的自生收缩	22
1.5.4 混凝土的碳化收缩	24
1.5.5 混凝土的温度收缩	24
1.5.6 混凝土的塑性收缩	25
第 2 章 混凝土外加剂与表面活性剂及相关机理	27
2.1 混凝土外加剂及相关机理	27
2.1.1 国内外混凝土外加剂发展现状及趋势	27
2.1.2 我国混凝土外加剂发展趋势	30
2.1.3 混凝土外加剂及其应用技术的重要性	31
2.1.4 混凝土外加剂应用技术中的热点、难点	33
2.1.5 特种混凝土用外加剂及其配套技术	40
2.1.6 预拌砂浆专用外加剂的研制与应用	40
2.1.7 混凝土外加剂的分类	40

2.2	表面活性剂及其作用机理	41
2.2.1	表面现象	41
2.2.2	表面活性剂的种类	42
2.2.3	表面活性剂的基本性质	43
2.2.4	表面活性剂的分散作用	45
2.2.5	表面活性剂的湿润作用	46
2.2.6	表面活性剂的结构与性能的关系	49
2.2.7	表面活性剂对水泥分散体系的影响	51
2.2.8	表面活性作用对混凝土流变性能的影响	54

第3章 混凝土外加剂应用技术及常见问题和对策 56

3.1	普通减水剂	56
3.1.1	定义	56
3.1.2	品种及主要成分	56
3.1.3	功能及用途	56
3.1.4	应用技术要点	56
3.1.5	现状和发展趋势	57
3.2	高效减水剂	57
3.2.1	定义	57
3.2.2	品种及主要成分	58
3.2.3	高效减水剂对混凝土性能的影响	65
3.2.4	高效减水剂对硬化后水泥石结构的影响	70
3.2.5	高效减水剂作用机理模型	71
3.2.6	高效减水剂对混凝土力学性能的影响	72
3.2.7	高效减水剂的功能及用途	83
3.2.8	关于减水率的误区	83
3.2.9	现状和发展趋势	83
3.2.10	影响混凝土坍落度损失的几种因素	84
3.2.11	减少混凝土坍落度损失的方法	85
3.3	缓凝剂、缓凝减水剂及缓凝高效减水剂	85
3.3.1	定义及主要成分	85
3.3.2	品种、主要成分及作用机理	86
3.3.3	功能及用途	87
3.3.4	应用技术要点及使用注意事项	87
3.3.5	使用过程中如何避免假凝现象	88
3.3.6	现状和发展趋势	89
3.4	引气剂及引气减水剂	90
3.4.1	定义	90

3.4.2	品种及主要成分	90
3.4.3	引气剂的作用机理	90
3.4.4	水泥品种及用量对混凝土含气量的影响	91
3.4.5	引气剂掺量对混凝土含气量的影响	91
3.4.6	水灰比对混凝土含气量的影响	91
3.4.7	砂率对混凝土含气量的影响	92
3.4.8	粉煤灰掺量对混凝土含气量的影响	92
3.4.9	粗骨料级配及最大粒径对混凝土含气量的影响	93
3.4.10	细骨料(砂)细度模数对混凝土含气量的影响	93
3.4.11	混凝土搅拌温度、静停时间对混凝土含气量的影响	93
3.4.12	引气剂和引气减水剂的掺入对水泥水化热的影响	94
3.4.13	其他影响混凝土含气量的因素	94
3.4.14	含气量与气泡分布及气泡孔径的关系	95
3.4.15	引气剂对硬化混凝土性能的影响	95
3.4.16	功能及用途	96
3.4.17	我国引气剂现状和发展趋势	98
3.5	早强剂及早强减水剂	98
3.5.1	定义	98
3.5.2	特点	99
3.5.3	功能及用途	99
3.5.4	品种及主要成分	99
3.5.5	应用技术要点	101
3.5.6	现状和发展趋势	102
3.6	增稠剂	102
3.6.1	定义	102
3.6.2	品种及主要成分	102
3.6.3	功能及用途	102
3.6.4	现状和发展趋势	102
3.7	泵送剂	102
3.7.1	定义	103
3.7.2	品种及主要成分	103
3.7.3	适用范围	104
3.7.4	性能要求	104
3.7.5	对硬化混凝土性能的影响	107
3.7.6	使用泵送剂应注意的几个问题	112
3.7.7	泵送混凝土常见问题及对策	113
3.7.8	现状和发展趋势	114
3.8	膨胀剂	114

3.8.1	品种与性能	115
3.8.2	应用范围	115
3.8.3	应用技术要点——膨胀时间	116
3.8.4	影响膨胀剂作用效果的因素	117
3.8.5	使用膨胀剂的注意事项	118
3.8.6	膨胀剂自身因素对混凝土的影响	119
3.8.7	膨胀剂发展趋势	121
3.9	防水剂	122
3.9.1	作用机理	122
3.9.2	种类	122
3.9.3	影响防水剂作用效果的因素	124
3.9.4	主要用途	124
3.10	速凝剂	124
3.10.1	种类及主要成分	125
3.10.2	功能及用途	125
3.10.3	性能要求	125
3.10.4	我国速凝剂的主要品牌	125
3.10.5	影响速凝剂作用效果的因素	127
3.10.6	速凝剂使用中存在的问题	128
3.10.7	速凝剂的发展趋势	128
3.11	钢筋阻锈剂	128
3.11.1	定义	128
3.11.2	钢筋锈蚀的危害	128
3.11.3	钢筋钝化膜破坏的机理	129
3.11.4	钢筋锈蚀的防护方法	130
3.11.5	设计施工阶段采取钢筋保护措施必要性	130
3.11.6	钢筋阻锈剂的作用机理	131
3.11.7	品种及主要成分	131
3.11.8	功能与用途	132
3.11.9	现状和发展趋势	132
3.12	消泡剂	132
3.12.1	定义	132
3.12.2	品种及主要成分	132
3.12.3	功能及用途	132
3.12.4	现状和发展趋势	133
3.13	着色剂	133
3.13.1	定义	133
3.13.2	品种及主要成分	133

3.13.3	技术性能	133
3.13.4	应用范围	133
3.14	防冻剂	133
3.14.1	温度对混凝土性能的影响	134
3.14.2	定义	135
3.14.3	发展历史	135
3.14.4	防冻机理	136
3.14.5	种类	139
3.14.6	配制防冻剂时应注意的事项	140
3.14.7	适用条件	141
3.14.8	使用范围	141
3.14.9	生产应用	142
3.14.10	现状和发展趋势	143
第4章	骨料对混凝土裂缝（控制）的影响	144
4.1	粗骨料的粒径效应	144
4.1.1	粗骨料的粒径变化对混凝土强度的影响	144
4.1.2	粗骨料粒径的变化对混凝土内应力的影响	145
4.2	粗骨料粒径变化在界面区的反应特征	145
4.3	骨料对混凝土线膨胀系数的影响	146
4.4	骨料的体积含量对混凝土干缩的影响	146
4.5	骨料对混凝土极限拉伸的影响	147
第5章	矿物掺和料对混凝土裂缝（控制）的影响	149
5.1	粉煤灰对混凝土裂缝控制的影响	149
5.1.1	粉煤灰掺入混凝土中的作用机理	149
5.1.2	粉煤灰的掺量对混凝土性能的影响	152
5.2	磨细矿渣粉对混凝土裂缝控制的影响	179
5.2.1	磨细矿渣粉掺入混凝土中的作用机理	179
5.2.2	磨细矿渣粉的掺量对混凝土性能的影响	180
第6章	防水材料对混凝土裂缝控制的影响	204
6.1	防水材料在混凝土中的应用	204
6.2	防水材料对混凝土性能的影响	205
第7章	裂缝控制简化计算公式中材料修正系数的确定	208
7.1	水化热计算公式的修正	208
7.2	混凝土弹性模量计算公式的修正	209

7.3 混凝土抗拉强度计算公式的建立 209

第8章 工程实践 212

8.1 超厚大体积混凝土的裂缝控制 212

8.2 大面积底板混凝土的裂缝控制 219

8.3 超长结构大体积混凝土的裂缝控制 228

第9章 混凝土裂缝控制与材料使用的关系 232

9.1 关于混凝土的一些典型观点 232

9.2 材料对混凝土裂缝的影响 236

参考文献 239

第1章

混凝土裂缝产生的原因与机理

1.1 当前我国混凝土工程裂缝问题及现状

近十多年来,随着建设规模的不断扩大,商品混凝土的用量也不断增加,尽管人们普遍认为商品混凝土和泵送混凝土的出现是现代混凝土技术的重大发展,它以其高匀质性、高效率、自动化、环保效果好、施工和运输便捷给我们的城市建设带来了快速的发展。但是商品混凝土和泵送混凝土的使用却使裂缝控制的技术难度大大增加了,其综合原因如下所述。

(1) 混凝土由干硬性、预制化转为泵送高流态整体现浇施工,水泥用量、水用量增加,加之水泥标准的修订使水泥的活性、细度和早期强度均有所增加,导致水泥水化热和混凝土的收缩变形显著增加 [收缩由 $(200\sim 300)\times 10^{-6}$ 增加至 $(600\sim 800)\times 10^{-6}$],同时为满足泵送的要求,混凝土配合比中骨料粒径减小、砂率提高、坍落度加大等客观因素导致混凝土的体积稳定性下降,裂缝产生的原因更加复杂,对设计和施工人员的要求更高。

(2) 混凝土及水泥向早强、高强发展,水泥强度不断提高,水化速率加快,水泥用量不断增加,抗压强度显著提高而抗拉强度滞后于抗压强度,拉压比降低,弹性模量增长迅速。胶凝材料用量增多,体积稳定性成比例地下降(温度收缩变形显著增加)。

(3) 现浇混凝土结构、砖混结构刚度增加,抗震烈度提高,结构约束较过去显著提高,约束应力增大。采用高强度钢筋代替中低强度钢筋,导致钢筋使用应力显著增加,裂缝宽度也会相应增加。特别是在超长、超厚、超静定结构为常用结构形式的情况下,约束应力就更大。

(4) 结构设计中只重视承载力极限状态(结构不倒塌、不破坏、不失稳、无安全问题)而忽略正常使用极限(结构必须满足正常使用,最大允许变形、允许无害裂缝、防止渗漏、耐久性、美观及精神作用的极限状态);忽略构造设计及构造配筋的作用,保护层偏厚。

(5) 施工工艺缺乏对温度收缩变形较大的混凝土的养护方法,经常采用传统、一般的方法,养护时间不足与工期要求产生矛盾。

(6) 外加剂及掺和料品种繁多,针对具体工程进行选择存在困难。对于抗压强度试验多,但对于体积稳定性缺乏研究。

(7) 对矿物掺和料的品种、掺量的试验只注重抗压强度,但对其他性能的研究

较少,特别是对高掺量矿物掺和料混凝土的使用范围和特性的研究就更少,造成使用中的误区,无形之中增加了裂缝出现的概率。

(8) 对混凝土的抗拉、温度、收缩、徐变、疲劳、冻融、极限拉伸等长期性能以及大体积混凝土的抗裂性能研究较少。

(9) 现代建筑对工程质量的要求越来越高,但是对结构裂缝控制缺乏规范和统一的标准。设计软件及有限元程序也不包括变形效应的计算,有些虽有计算,但脱离实际。

(10) 对高强高性能混凝土研究较多,但对水泥标准修订后,量大面广的中低强度高性能混凝土却研究很少。

上述的诸多原因导致了涉及混凝土裂缝问题的工程事故也不断增多,尽管在设计、施工过程中采取各种措施,小心谨慎,但在实际工程中混凝土裂缝仍时有发生,并且大多数发生在商品混凝土应用面较大的大中城市及大中型工程中,混凝土裂缝问题也越来越引起各方的关注。图 1-1 为混凝土工程常见裂缝。

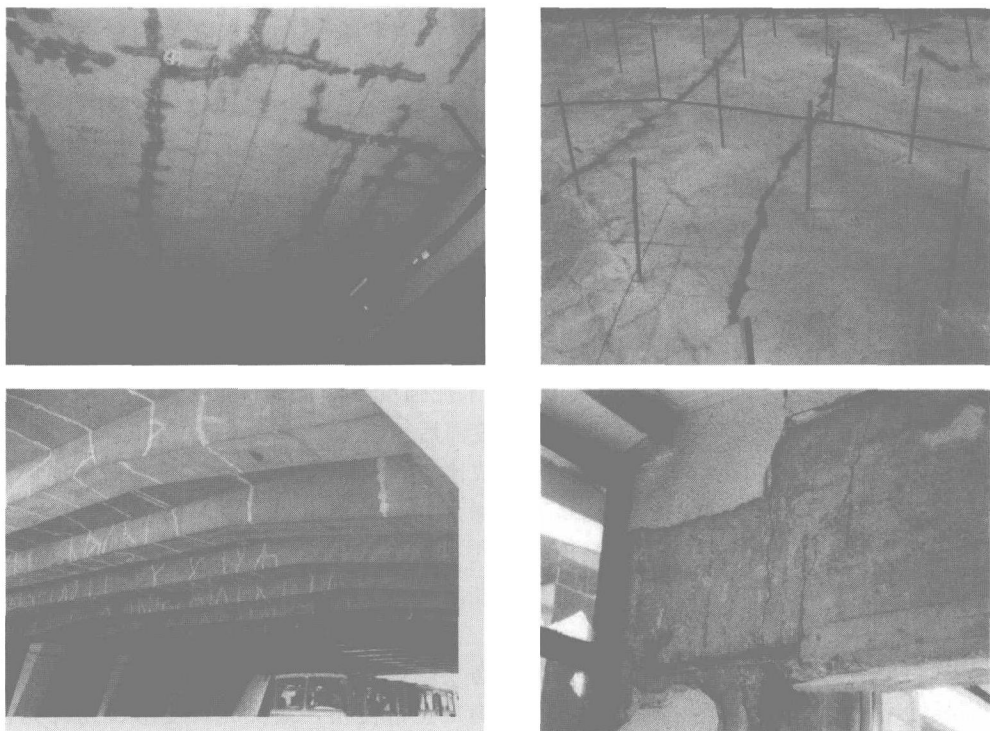


图 1-1 混凝土工程常见裂缝

1.2 混凝土工程裂缝的分类

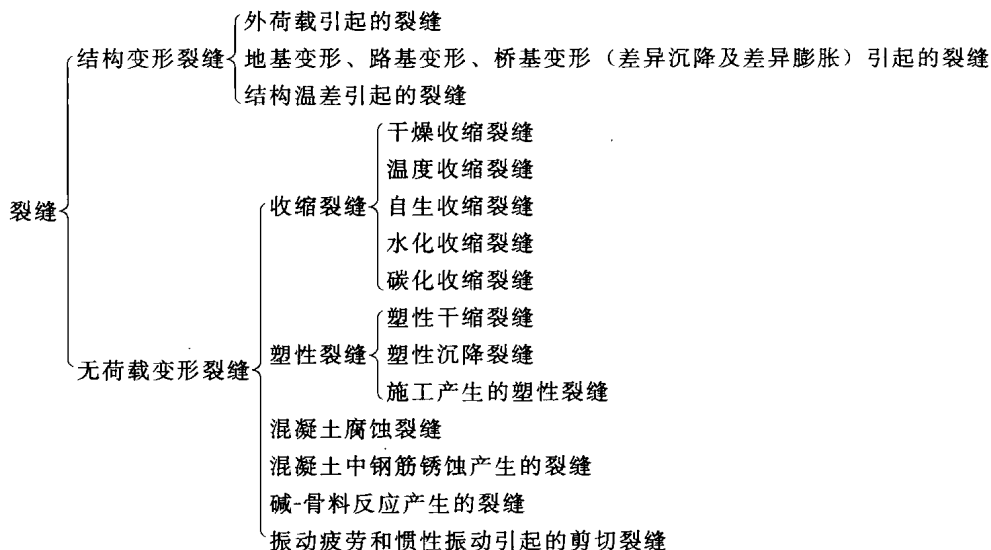
1.2.1 按裂缝产生的时间来划分

① 施工阶段产生的裂缝 (0~3d)

- ② 早期裂缝 (3~28d)
- ③ 中期裂缝 (28~180d)
- ④ 后期裂缝 (180~360d、720d, 最终 20a)
- ⑤ 长期放置产生的裂缝和使用阶段产生的裂缝

1.2.2 按裂缝产生的原因来划分

- ① 荷载作用下的裂缝 (结构性裂缝, 约占 10%)
- ② 耦合作用下的裂缝 (约占 5%~10%)
- ③ 碱-骨料反应膨胀应力引起的裂缝 (AAR、ASR、ACR 约 0.1%)
- ④ 变形作用下的裂缝 (非结构性裂缝, 约占 80%)



1.3 混凝土结构性裂缝产生的原因

1.3.1 结构性裂缝

是指混凝土结构在外部荷载作用、环境温度变化等因素作用下产生的裂缝 (约占裂缝的 10%)。

结构裂缝产生的主要原因:

- ① 外加荷载引起的结构裂缝 (图 1-2);
- ② 地基沉降引起的结构裂缝 (图 1-3);
- ③ 结构温差引起的结构裂缝。

结构在温度变化或受辐射热作用下, 造成结构各部分的温度差别, 引起结构内应力过大而产生裂缝。这种裂缝会随温度的变化而变化, 冬季的裂缝会窄一点, 夏季宽一些, 温度裂缝也是受力裂缝。

从图 1-2 可以清楚地看到结构在受到外部荷载的作用下裂缝产生的大小、方向

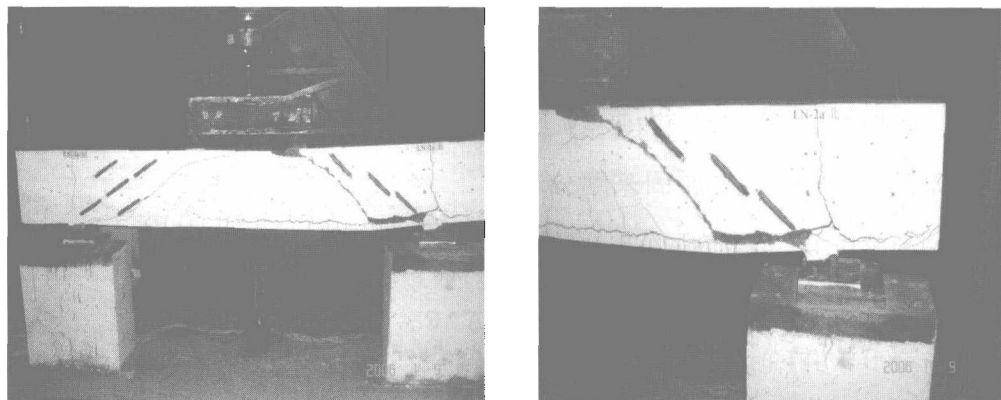


图 1-2 外加荷载引起的结构裂缝

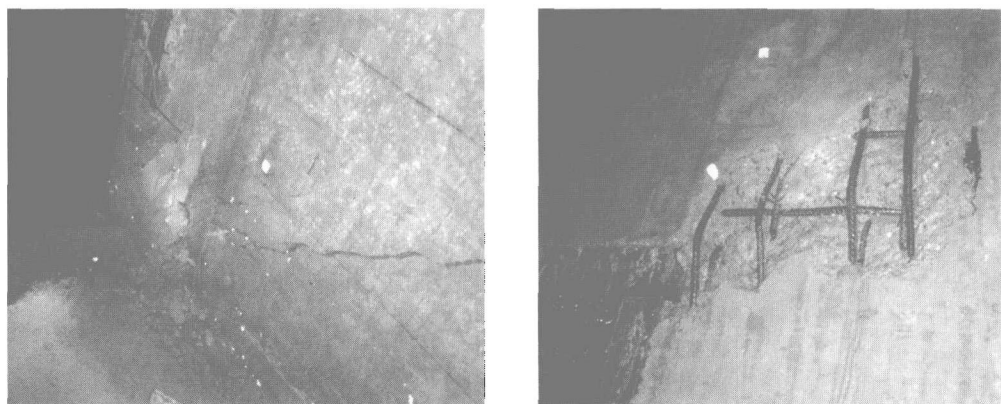


图 1-3 地基沉降引起的结构裂缝

和形状，这对于我们分析裂缝产生的原因是很有意义的。试验室的试验在实际工程中也同样得到了验证，图 1-3 是某工程在缺少抗浮措施的情况下底板上浮对剪力墙的作用，使墙体产生荷载作用下的裂缝和钢筋弯曲。

裂缝产生的方向、形状等与试验的结果完全相同，说明在外部荷载的作用下，混凝土产生的裂缝是特征明显的。

图 1-4 是说明不同的混凝土结构在外荷载的作用下产生裂缝的部位、形状和方向，以供在进行裂缝成因分析时参考。

结构变形产生的裂缝，其裂缝的大小和宽度与沉降量有关，如图 1-5 所示。

1.3.2 无荷载变形裂缝

无荷载变形裂缝是指混凝土受到外部环境的影响（如气温、水化热、太阳辐射等）和自身材料的特性而发生的变形在受到约束时产生的拉应力大于混凝土的抗拉强度所出现的裂缝。

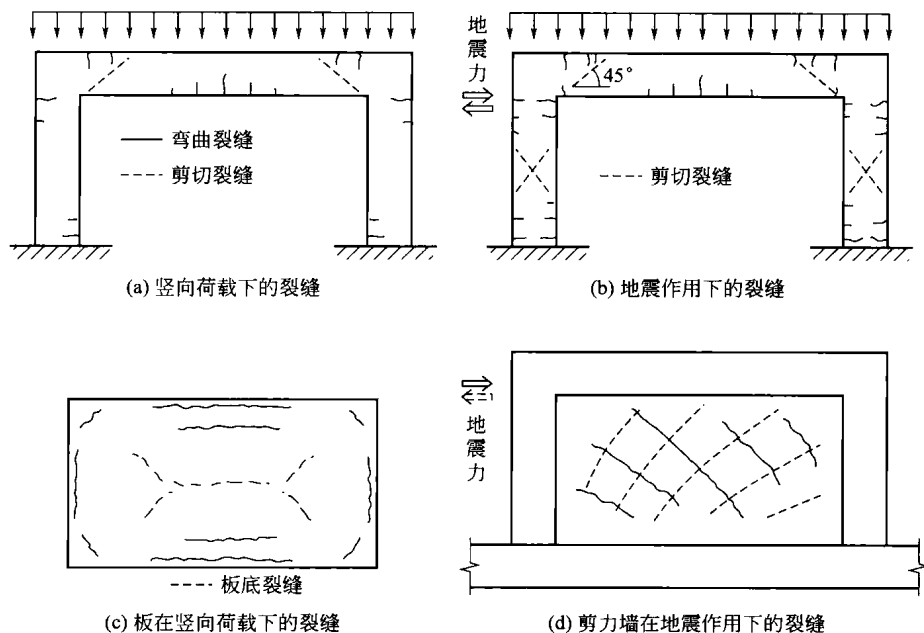


图 1-4 不同结构裂缝的形式

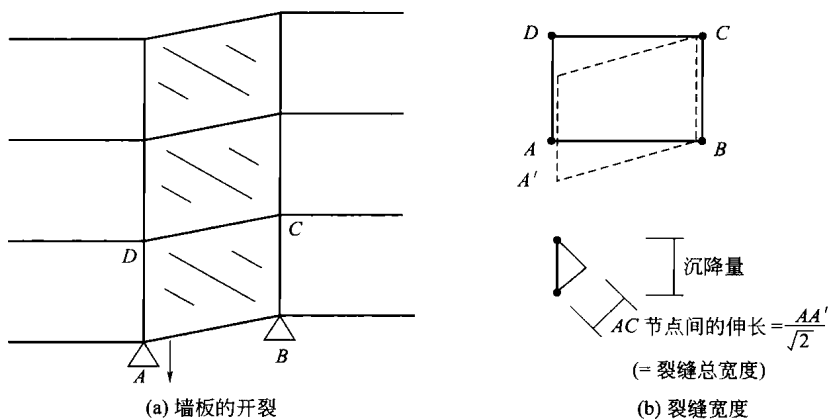


图 1-5 不均匀沉降产生的裂缝

对于变形作用引起的裂缝没有详细的技术规范和规程进行约束，而裂缝频频出现在大规模工程建设过程中（特别是超长、超宽、超厚的大体积混凝土工程）究其原因有多方面的，有设计、施工、材料、环境、管理和人们的传统观念，但主要矛盾是材料方面的问题，因此有必要对混凝土的变形作用与使用材料的关系进行研究，以便减少材料引起的混凝土变形作用所导致的裂缝。

混凝土是多种材料的复合体，而多相复合体材料内部潜伏着随时间变化的残余应力，在自发和诱发因素的作用下引起混凝土内部和外部的裂缝。因此，研究混凝土材料的特性和产生收缩的机理对于控制混凝土裂缝的产生是十分必要的。