



土木工程精品系列

混凝土结构的 裂缝与对策

冯乃谦 顾晴霞 郝挺宇 编著

Cracking in Concrete Structure
and Its Countermeasures



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



土木工程精品系列

混凝土结构的裂缝与对策

Cracking in Concrete Structure and Its Countermeasures

冯乃谦 顾晴霞 郝挺宇 编著
刘崇熙 审



机械工业出版社

本书共分 16 章, 分别从混凝土结构的设计、施工、混凝土的配比、养生及外部环境的影响和内部材料的劣化方面入手, 全面解析了裂缝产生的原因和机理, 同时通过大量的工程实例和现场结构物的裂缝图片辅以说明, 提出了裂缝的防治对策。

本书以全新的视角和新建理论体系, 对混凝土的裂缝及其对策进行了详细的阐述, 体现了本书的实用性、科学性与先进性特色。

本书适合于广大建设工程的科研、设计及施工技术人员; 对于高校土木工程专业的师生来说, 也是一本不可多得的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构的裂缝与对策/冯乃谦, 顾晴霞, 郝挺宇
编著. —北京: 机械工业出版社, 2006. 6
(土木工程精品系列)
ISBN 7-111-19033-5

I. 混... II. ①冯... ②顾... ③郝... III. 混凝土
结构—裂缝—研究 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 039309 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 薛俊高 版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文
封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm·15.75 印张·2 插页·610 千字
0001—4000 册
定价: 56.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)68327259
封面无防伪标均为盗版

序

回顾往事，有两件事与本书的主题，息息相关。

一件事，在一次会议上，见到一位德高望重的施工专家，他感慨地说：“我一生与混凝土打交道，一生与混凝土的裂缝作斗争，但谁战胜谁的问题，依然没有解决”。

另一件事，笔者聆听一次文件传达会，文件介绍我国某大型混凝土坝施工中，第二期混凝土浇筑顺利进展，但到了第二年期时，许多混凝土坝块突然开裂。人们为之警惕、惶惑。一位知名的专家概括地指出：“世界上没有不裂缝的混凝土坝”，“裂缝是混凝土的常发病”。

事后，这个坝的第三期工程，设计上吸取了第二期工程的教训，改革了混凝土的设计和浇筑设计，历时三年来，至今没有出现裂缝。

刹那地表观，对混凝土裂缝作出的概括，很难经受住时间的考验。现在该是上升到理性认识的时候了。

本书就是一部对混凝土裂缝作出理性认识和对策的专著。作者把混凝土裂缝问题抽提为一个中心命题，采取从个别到一般，逐层剖析，从混凝土材性设计和浇筑入手，分析混凝土裂缝的机理，制定出因应的对策。无疑，这是一部意义重大的基础性的开山之作。本书的出版，无疑对我国混凝土质量的提升，起着指导的作用。

据此，混凝土的耐久寿命设计问题，出现了曙光。

长江科学院

刘崇熙

2006.3.7

前 言

混凝土结构物产生裂缝,是结构物的承载能力、耐久性、防水性等的各种性能下降的主要原因;其对策的重要性直接影响到结构物的耐用年数,以及能否达到设计要求的服役年限。

混凝土结构的裂缝原因甚多。结构设计是首位的,故要保证设计的结构有足够的强度和强度储备。混凝土结构的裂缝还与混凝土的原材料及其配合比例密切相关;与施工的环境条件、施工工艺密切相关;与混凝土结构的使用环境、维护和管理密切相关,等等。

混凝土结构的裂缝是混凝土结构劣化损伤的宏观反映。当结构发生裂缝时在采取相应的对策之前,首先要查明原因,诊断其危险,采取适宜的材料和修补工艺,才能取得实效。

本书共分16章,力图对混凝土结构的开裂与对策问题,从实用性、科学性与先进性的角度加以全面的阐述,使读者从本书中得以受益。但限于作者水平,亦难免有不尽之处。敬请读者批评指正。

中国建筑工程总公司第三工程局的教授级高级工程师顾晴霞为本书撰写了第7章、第8章;中冶集团建筑研究总院(国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心)的郝挺宇博士为本书撰写了第16章。本书稿聘请了长江科学院刘崇熙教授审阅了第1章、第6章。在编写本书过程中,参考引用了冷发光博士、封孝信博士、牛全林博士及李崇智博士学位论文中的某些科研成果和实验数据,在此表示深深的谢意。同时,对曹永康教授和马孝轩教授给予本书的支持和帮助也表示衷心感谢!

冯乃谦

2006年2月5日

于清华大学

目 录

序 前言

第 1 章 混凝土开裂损伤与结构的安全性和耐久性	1
1.1 钢筋混凝土建筑物的劣化现象	1
1.2 混凝土的开裂	3
1.3 混凝土开裂原因的分析	13
1.4 混凝土裂缝的类型	16
1.5 裂缝允许宽度	19
1.6 强度劣化与结构开裂	27
第 2 章 混凝土收缩与开裂的检测和评估	33
2.1 混凝土开裂的图像分析与劣化度的评估	33
2.2 高强混凝土的开裂特性	40
2.3 混凝土收缩的检测	46
2.4 混凝土开裂的检测	47
2.5 混凝土早期收缩、开裂的试验与评估	48
2.6 早期收缩的试验结果与分析	52
2.7 开裂试验与评估	59
2.8 混凝土早期收缩开裂的对策	66
2.9 混凝土的长期收缩	67
第 3 章 混凝土组成材料及配合比引起的开裂	70
3.1 引言	70
3.2 混凝土浇筑成型后到终凝时发生的开裂	71
3.3 终凝到一周龄期时混凝土发生的开裂	74
3.4 硬化混凝土(长龄期)的开裂	81
3.5 降低混凝土干燥收缩的对策	87
3.6 本章总结	93
第 4 章 结构(荷载)裂缝	95

4.1 引言	95
4.2 施工荷载引起结构的开裂	97
4.3 长期荷载引起的开裂	98
4.4 疲劳荷载作用下的开裂	101
4.5 动荷载作用引起的开裂	103
4.6 地震荷载作用引起的开裂破坏	105
4.7 不同沉降引起的开裂	111
4.8 预测抗弯开裂的裂缝宽度	111
4.9 结束语	112
第5章 混凝土施工引起的开裂与对策	113
5.1 引言	113
5.2 施工初期引起的混凝土的开裂	116
5.3 施工中期混凝土的开裂	122
5.4 施工后期混凝土的开裂	127
第6章 大体积混凝土结构施工的开裂与对策	133
6.1 大体积混凝土的定义	133
6.2 大体积混凝土温度裂缝的成因	134
6.3 大体积混凝土的温度应力	138
6.4 材料的力学性质和膨胀系数	141
6.5 预测温度应力, 判断裂缝发生	143
6.6 裂缝宽度	144
6.7 建筑结构物中大体积混凝土温度裂缝控制方法	150
6.8 粉煤灰高性能大体积混凝土的施工应用	159
6.9 承台大体积混凝土开裂的控制	164
6.10 日本桥梁大体积混凝土的施工和裂缝控制	167
6.11 明石大桥拉索锚固基础混凝土地下连续墙施工	176
第7章 施工期间±0.00以下混凝土结构的开裂与对策	194
7.1 施工期间混凝土结构裂缝的特征	194
7.2 地下室底板的裂缝控制	195
7.3 地下室墙的裂缝控制	202
7.4 地下室梁板结构的裂缝	208
第8章 施工期间±0.00以上混凝土结构的开裂与对策	214
8.1 保护层不足或露筋引起的裂缝	214
8.2 施工不当引起的裂缝及对策	219

8.3 柱的裂缝·····	222
8.4 混凝土墙体的裂缝·····	223
8.5 梁板结构的裂缝·····	227
8.6 重晶石混凝土的裂缝控制·····	234
第9章 不同部位的构件开裂与对策 ·····	242
9.1 原因与现象·····	242
9.2 墙体的约束与裂缝·····	243
9.3 发生开裂的影响因素·····	246
9.4 易裂性的评价·····	248
9.5 墙体裂缝的对策·····	249
9.6 屋面板的开裂与对策·····	252
9.7 楼板的开裂与对策·····	254
9.8 室内土地面上混凝土的开裂与对策·····	255
9.9 阳台与外廊的开裂与对策·····	258
9.10 女儿墙的开裂与对策·····	260
第10章 混凝土内部劣化因子引起的开裂与对策 ·····	261
10.1 引言·····	261
10.2 碱—骨料反应造成混凝土开裂的机理·····	268
10.3 碱—骨料反应混凝土结构物的损伤状况·····	274
10.4 关于钢筋混凝土 ASR 膨胀的研究·····	285
10.5 碱碳酸盐反应 (ACR)·····	291
10.6 预防碱骨料反应的对策·····	298
第11章 盐害造成混凝土结构的开裂与对策 ·····	302
11.1 引言·····	302
11.2 盐害的机理·····	305
11.3 混凝土中的含盐量·····	307
11.4 含盐量与钢筋锈蚀·····	309
11.5 钢筋锈蚀对混凝土结构物的影响·····	312
11.6 从环境侵入混凝土中的盐·····	314
11.7 盐分从混凝土表面向钢筋表面的移动过程·····	321
11.8 全氯离子含量与有效氯离子含量·····	324
11.9 砂浆、混凝土导电量与氯离子渗透扩散间的关系·····	329
11.10 盐害对策·····	331
11.11 结束语·····	335

第 12 章 混凝土受硫酸盐侵蚀造成的开裂与对策	338
12.1 引言	338
12.2 国内外对硫酸盐腐蚀研究的进展	340
12.3 硫酸盐的侵蚀机理	343
12.4 混凝土盐碱腐蚀试验	347
12.5 磨细矿渣对水泥砂浆抗硫酸盐腐蚀的影响	354
12.6 检验和评价硫酸盐腐蚀的有关标准	363
12.7 对策	365
第 13 章 混凝土冻害开裂与预防对策	367
13.1 引言	367
13.2 冻害劣化的特征	367
13.3 混凝土冻融破坏过程中宏观特性的变化	372
13.4 冻害劣化的主要影响因素	377
13.5 混凝土抗冻害开裂的对策	384
第 14 章 混凝土结构中性化开裂与对策	387
14.1 混凝土中性化破坏综述	387
14.2 混凝土中性化劣化机理	393
14.3 混凝土中性化速度	393
14.4 预防混凝土中性化的对策	401
第 15 章 混凝土结构裂缝的调查、诊断与修补	402
15.1 混凝土结构物的劣化诊断	402
15.2 结构构件开裂汇总图示	403
15.3 不同情况下裂缝图形及其分类	406
15.4 裂缝的调查与诊断	426
15.5 裂缝宽度、长度的调查	427
15.6 裂缝进行性的调查	429
15.7 裂缝漏水的调查	430
15.8 判断裂缝是否要修补	431
15.9 裂缝的修补	431
第 16 章 工程裂缝的检测与修复实例	435
16.1 引言	435
16.2 某大型公共建筑结构裂缝调查分析	436
16.3 某高速公路立交桥梁体裂缝分析	438
16.4 某无梁楼盖结构裂缝分析	443

16.5 某铁路特大桥梁体裂缝检测分析	447
16.6 某混凝土桁架梁开裂诊治	461
16.7 某特大桥刚构裂缝	475
参考文献	487

第 1 章 混凝土开裂损伤与结构的安全性和耐久性

混凝土是当今世界上用量最大、用途最广泛的工程材料。在土木、水利与建筑工程，海洋及港湾建设工程，交通运输与铁路工程，甚至航空航天工程，都有混凝土应用的实例。混凝土材料为人类的文明与建设，作出了巨大的贡献。

我国是世界上混凝土生产与应用最多的国家。2004 年，我国水泥的产量达到了 9.4 亿 t；混凝土的产量约 20 亿 m^3 。在我国，建造了大量的高层与超高层建筑，钢筋混凝土铁路桥、公路桥、跨海大桥，海港码头及航空港等。混凝土结构的安全性和耐久性，对我国人民来说尤为重要。

混凝土是一种人造石材，应具有类似天然石材的耐久性。但试验和应用证明：混凝土结构在使用过程中，受土壤中、水中及空气中有害介质的侵蚀，或混凝土材料本身有害成分的物理、化学作用，会产生劣化；宏观上会出现开裂、剥落、膨胀、松软及强度下降等，严重影响了混凝土结构的使用寿命，甚至会发生结构破坏、倒塌，造成人员伤亡和经济损失。

混凝土结构的过早劣化开裂与破坏，也是资源与能源的巨大损失，给环境带来了污染。

混凝土的开裂，是混凝土结构劣化病变的宏观体现，也会进一步引起其他病害的发生与发展。因此，要了解混凝土开裂的原因与机理；了解混凝土结构开裂与安全性、耐久性的关系；以便采取措施抑制裂缝的发生与发展。

1.1 钢筋混凝土建筑物的劣化现象

钢筋混凝土建筑物的劣化，一般来讲，是由以下 8 个方面造成的。

开裂、漏水、强度劣化、大挠度、中性化、钢筋腐蚀、冻害与表面劣化等。如表 1-1 所示。但是，在这些劣化现象中，如中性化是造成钢筋腐蚀劣化的原因，但混凝土本身还没有发生直接劣化现象。而大挠度变形以及漏水等其他方面的原因，会造成混凝土结构物出现劣化现象；此外，开裂与强度劣化、钢筋腐蚀等，和混凝土本身的劣化现象混杂在一起，这些现象的相互关系如图 1-1 所示，是相当复杂的。因此，推论各种劣化现象的原因以及由此而引起的修补和补强也就变得复杂了。

表 1-1 钢筋混凝土建筑的八大劣化现象

劣化现象	说 明
中性化	混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，与空气中的 CO_2 作用，逐渐地变成了 CaCO_3 ，失去了碱性的现象。是造成钢筋腐蚀的原因
强度劣化	使用低品质的材料，由于使用环境、热的作用和化学作用等，使混凝土强度降低，还不如初始强度的场合很多
钢筋腐蚀	由于中性化，开裂，以及 Cl^- 作用，钢筋生锈膨胀，使混凝土开裂、剥落等现象发生
混凝土开裂	混凝土受到拉力，发生龟裂失去整体性的现象 造成钢筋腐蚀的同时，混凝土结构也产生开裂
冻 害	混凝土中的水分受到反复冻融，由于膨胀而使混凝土开裂，从混凝土表面产生剥落，接着会发生劣化现象
大挠度变形	梁板等水平构件引起的抗弯变形，过载而出现结构大挠度变形。这一方面是由于设计上构件的断面尺寸不足，施工时钢筋偏移而导致的
漏 水	屋顶上、外墙以及室内与水接触部分，由于混凝土的开裂，从缝隙中漏出水的现象
表面劣化	由于使用环境、热作用、化学作用等，混凝土表面发生开裂

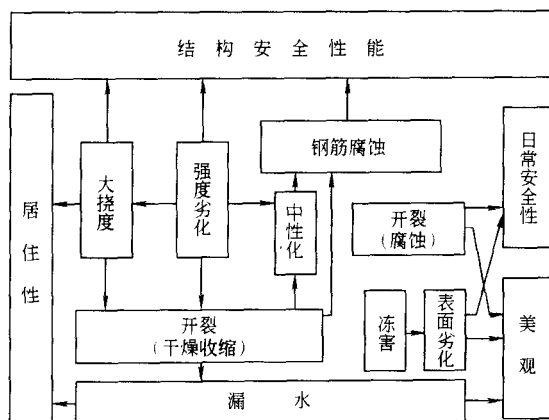


图 1-1 八大劣化现象的关联图

因此，钢筋混凝土结构物是由混凝土和钢筋组成的，钢筋混凝土结构的劣化，可以认为是其组成材料劣化的结果。这样对劣化原因的推定，对维修、补强的方法，也可比较明快地选定。

从上述观点出发，钢筋混凝土结构的劣化，可以分成混凝土的劣化和钢筋的劣化。如果把混凝土开裂作为混凝土劣化的代表，而钢筋的劣化以腐蚀为代表的，那么这两种劣化现象的原因及其相互关系如图 1-2 所示。

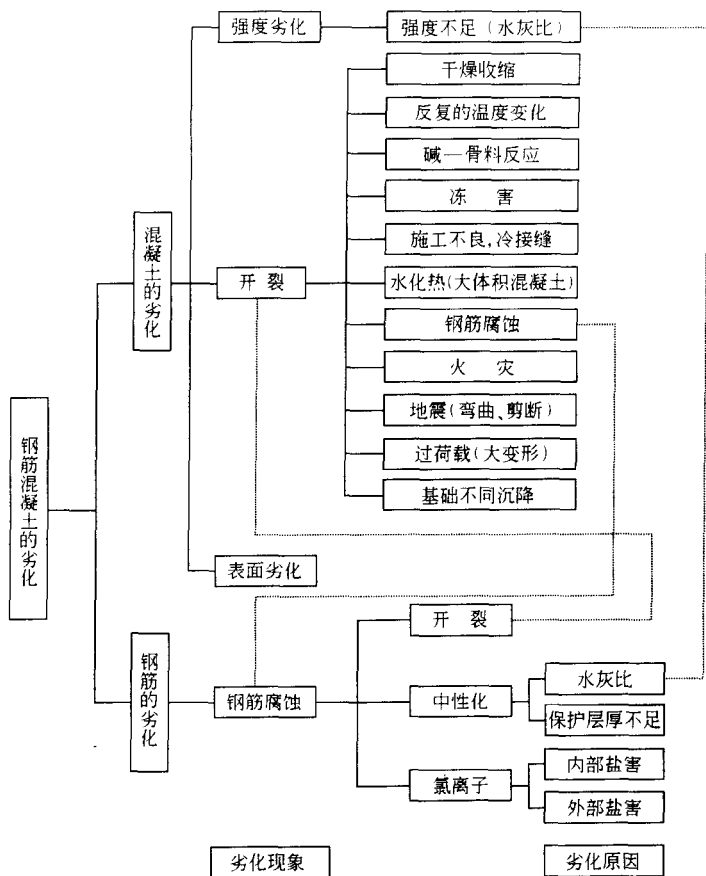


图 1-2 混凝土结构劣化现象与劣化原因的关系

1.2 混凝土的开裂

1.2.1 混凝土结构开裂渐增的原因

表示混凝土劣化征兆最一般的现象是开裂。自古以来对抑制混凝土开裂就有许多研究。关于混凝土发生开裂的原因、开裂现象的详细分析，如表 1-2 所示。其原因可以列举出 40 项以上。这些原因对裂缝发生的综合影响是复杂的。即使是现在，对裂缝发生的抑制与防止，还没有一个十分有效的方法，由于种种原因混凝土结构的开裂依然呈现出渐增的趋势。

表 1-2 混凝土开裂的原因

	分 类	原 因		分 类	原 因
材 料	使用环境	水泥凝结不正常	施 工	模 板	模板变形
		水泥的水化热			漏水
		水泥的异常膨胀			脱模太早
		骨料的含泥量			模板支撑下沉
		低品位的骨料		其 他	不适当的敲打
		碱—骨料反应			填充不良
	混凝土	混凝土中的氯化物	使 用 环 境	物 理 环 境	环境温湿度变化
		混凝土的沉降泌水			构件两面温度、湿度差
		混凝土的干燥收缩			受到了反复冻融
		混凝土的自收缩			火灾
					表面受热
施 工	混凝土	掺合料不均匀分布		化 学 环 境	酸、盐类的化学作用
		搅拌时间过长			由于中性化内部钢材锈蚀
		泵送时配合比例的变化			由于氯离子渗透内部钢材锈蚀
		不适当的浇筑程序		荷 载	设计荷载内的长期作用荷载
		浇筑太快			超过设计荷载的长期作用荷载
		振捣不充分			设计作用荷载内的短期荷载
		硬化前受到振动或荷载作用			超过设计荷载的短期荷载
		早期养护过程中干燥过快		结 构 设 计	断面及配筋不足
		早期冻害			结构物的不同沉降
		施工缝设置不当		支 承 条 件	冻土
	钢筋	钢筋被弄乱		其 他	
		保护层厚度不够			

1. 混凝土浇灌方法

伴随着混凝土泵送施工，必须是塑性、流动性混凝土，同时也带来砂率和单方混凝土用水量增大，其结果是耐久性降低，裂缝增加。

2. 骨料的质量下降

为了抑制骨料质量下降而带来的混凝土强度和和易性下降，要增加水泥用量，同时也带来混凝土裂缝增多。此外，由于使用具有碱活性的骨料，混凝土也由于膨胀而发生开裂。这也使得混凝土开裂增多。

3. 保护层厚度不够

由于保护层厚度不够，碳化到达钢筋的时间变短了，混凝土中氯化物增加以及

由外部浸入的氯化物增加,内部钢筋的生锈膨胀而导致发生开裂的现象也在增加。

4. 不同沉降与过载

由于结构物不同部位的沉降与过载,而导致的结构裂缝也在呈增加趋势。

1.2.2 钢筋混凝土结构物与建筑物的收缩开裂与荷载作用开裂

钢筋混凝土结构物与建筑物发生的裂缝,对不同结构部位所发生裂缝的位置以及裂缝的形态来看,可以估计到裂缝发生的主要原因。

裂缝一般是在混凝土受拉应力集中的部位发生。混凝土的抗拉强度低,只有抗压强度的 $1/10$ 左右。在窗户、出入口、换气口等开口部位的四个角,由于收缩最容易产生开裂。周边受约束较大的墙面;长向构件受约束力虽小,但受拉应力集中的部位,也会开裂。如图 1-3~图 1-8 所示。

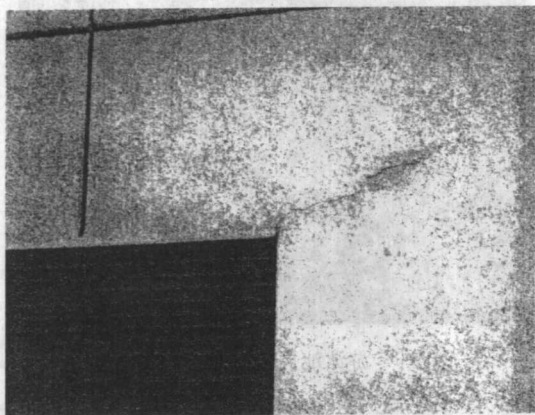


图 1-3 开口部角头处收缩开裂

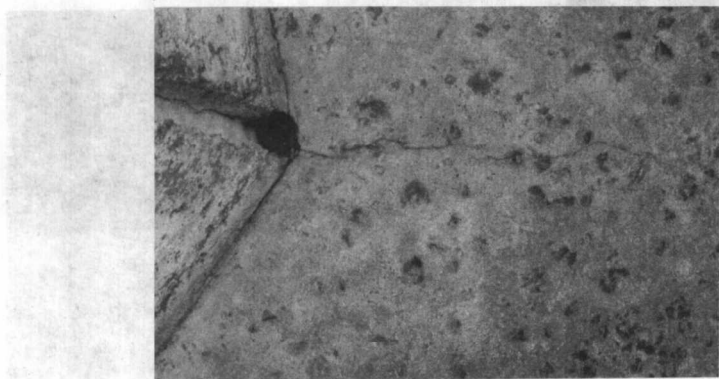


图 1-4 地面上开口部转角处的收缩开裂

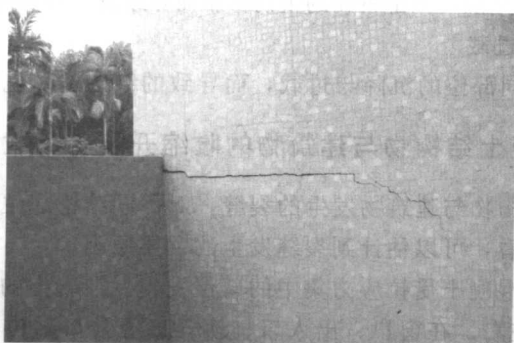


图 1-5 墙面的沉降开裂

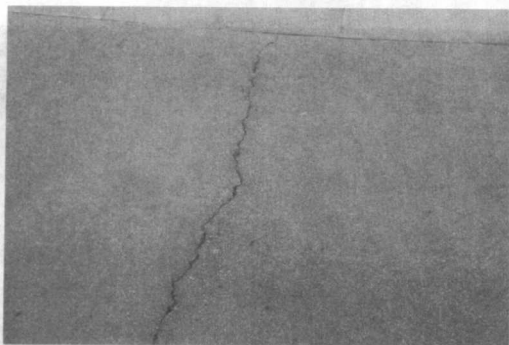


图 1-6 游泳池周边混凝土收缩开裂

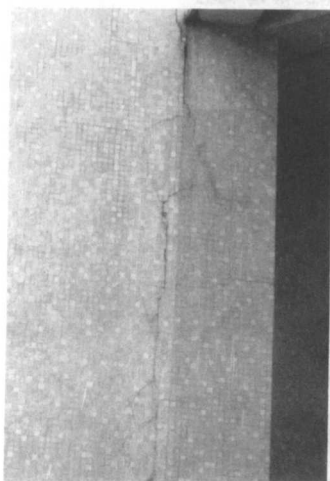


图 1-7 墙体受剪开裂

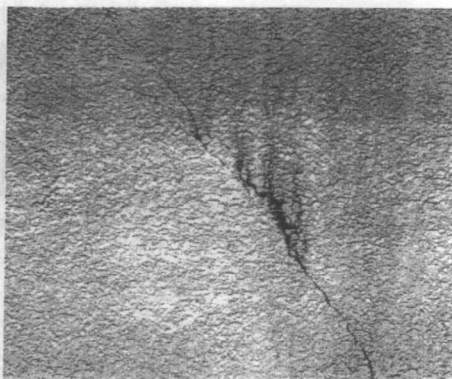
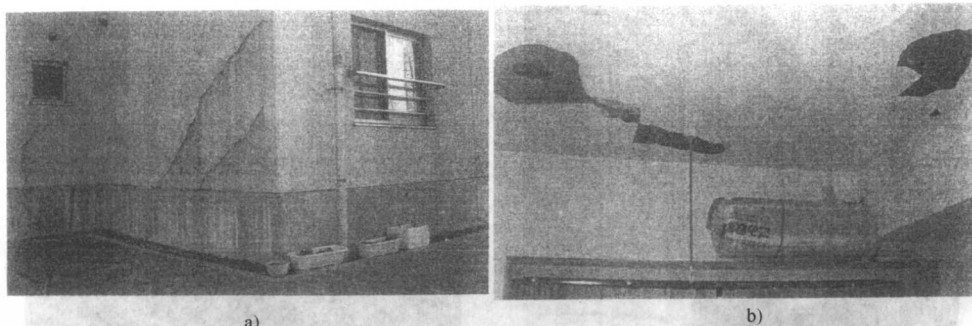


图 1-8 大墙面发生干燥收缩开裂



a)

b)

图 1-9 建筑物干缩收缩开裂与漏水

a) 温度变化与干缩开裂 b) 干缩开裂与漏水

1.2.3 环境条件的作用对混凝土结构引发的开裂

我国西部地区，气候条件特殊，冷热温差悬殊，干旱少雨，相对湿度低；混凝土结构在浇筑成型过程中，水分从混凝土表面迅速蒸发，如果养护不善，表面产生龟裂，如图 1-10 所示。

风蚀使混凝土表面在风沙的强力磨耗下，产生麻面，如图 1-11 所示。

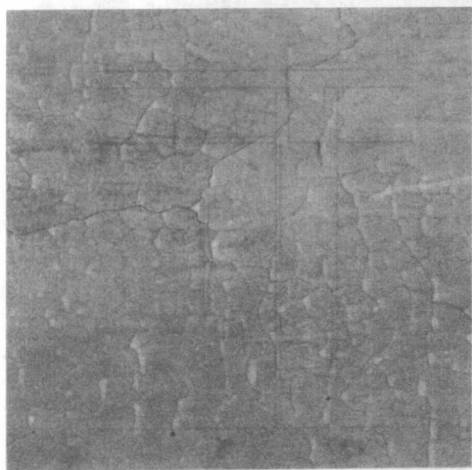


图 1-10 混凝土表面干裂(龟裂)

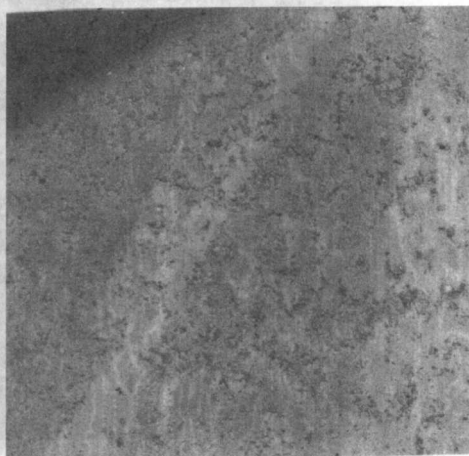


图 1-11 混凝土的风蚀

西部地区气温低、温差大；昼夜之间温差更大。一天之内，可能出现多次冻融循环。在反复低温冻融作用下，混凝土桥墩剥蚀开裂，如图 1-12a、b 所示。

特殊的气候条件和生态环境，给混凝土施工也带来了困难；混凝土结构在服役过程中又受到严酷的环境作用。因此，提高混凝土结构承载力，控制裂缝的发生与发展，对保证混凝土结构的安全性、耐久性更显重要。