

混凝土 结构裂缝 防治技术

张 雄 主 编
张小伟 李旭峰 副主编

施工养护

构造设计

监测诊断

材料优化

修复治理



化学工业出版社

混凝土 结构裂缝 防治技术

张 雄 主 编

张小伟 李旭峰 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构裂缝防治技术/张雄主编. —北京:
化学工业出版社, 2006. 6
ISBN 978-7-5025-9012-3

I. 混… II. 张… III. 混凝土结构-裂缝-防治
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 071122 号

混凝土结构裂缝防治技术

张 雄 主 编

张小伟 李旭峰 副主编

责任编辑: 窦 臻

责任校对: 郑 捷

封面设计: 张 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

购书咨询: (010)64518888

购书传真: (010)64519686

售后服务: (010)64518899

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 20¼ 字数 418 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9012-3

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

混凝土结构裂缝特别是非荷载变形导致的裂缝,对建筑物的长期耐久性、使用性能甚至安全可靠性能产生严重危害,是多年来一直困扰工程界的重大课题。近年来,伴随国内城市化进程的加快,基础设施建设、商品住宅建设飞速发展,混凝土结构裂缝问题则显得尤为突出。一方面,商品混凝土广泛应用,其组成复杂,材料性质波动大,且普遍采用掺合料和外加剂,使混凝土往往具有较高的收缩变形;而对利益的最大追求,使有些建设单位在建筑物构造设计上往往偷工减料;对施工进度追求,则使某些施工单位往往不重视规范对施工养护等方面的严格规定;这些都是造成裂缝大量出现的重要原因。另一方面,客观上,设计和施工人员实际上也缺乏有效的指导,尤其缺乏切实可行的材料控制措施,这已成为当前混凝土结构裂缝控制的最大瓶颈。

针对如此现状,为了有效控制和防止混凝土结构裂缝的产生,特组织从事裂缝研究的有关材料、设计和施工技术人员编写此书,内容完整地涉及了混凝土结构裂缝防治过程中的材料优化、构造设计、施工养护、监测诊断、修复维护五个方面,重点对当前裂缝防治中最为欠缺的材料措施进行了详尽的论述,并开展了大量的工程实验进行验证。期望本书能对工程建设有参考应用价值,对国内混凝土结构裂缝的防治提供有效帮助。

全书共分十一章,编写人员为:

主编

张 雄 博士 教授 博士生导师 同济大学

副主编

张小伟 同济大学博士生 苏州科技学院副教授

李旭峰 教授级高级工程师 上海市浦东新区规划设计研究院

参编人员

李 悦 博士后 副教授 北京工业大学

胡 恒 硕士 副教授 苏州科技学院

郑 敏 博士后 副教授 南京航空航天大学

孔祥红 硕士 高工 上海市建筑设计院浦东分院

肖瑞敏 博士 讲师 苏州科技学院

邓安仲 同济大学博士生 中国人民解放军后勤工程学院副教授

各章编写人员

第1章 混凝土结构裂缝类型和成因 张小伟 张雄

第2章 普通混凝土组成、对比对收缩裂缝的影响 张小伟 张雄

- 第3章 抗裂混凝土优化设计理论与方法 张小伟 张雄
- 第4章 混凝土抗裂组分及其应用技术 胡恒 李旭峰
- 第5章 混凝土的自收缩开裂与控制 李悦 张雄
- 第6章 设计构造对混凝土结构裂缝的影响及其控制技术 孔祥红 李旭峰
- 第7章 混凝土结构裂缝预应力控制技术 孔祥红 李旭峰
- 第8章 混凝土结构裂缝的施工控制 张小伟 张雄
- 第9章 混凝土结构裂缝控制导则与工程实践 张小伟 张雄
- 第10章 混凝土结构裂缝监测与诊断技术 郑敏 邓安仲
- 第11章 混凝土结构裂缝修复技术 肖瑞敏 张小伟

本书内容反映了编写者的研究结果，并引用了国内外有关同行的大量研究结论，在此表示深深感谢！由于编者水平有限，难免有不当之处，诚请广大读者批评指正。

编著者

2006年12月

目 录

第 1 章 混凝土结构裂缝类型与成因	1
1.1 混凝土结构裂缝的界定	1
1.2 混凝土结构裂缝的类型和成因	2
1.2.1 荷载裂缝	2
1.2.2 非荷载裂缝	3
1.3 混凝土结构裂缝的危害和控制途径	11
1.3.1 混凝土结构裂缝的危害	11
1.3.2 混凝土结构裂缝的控制途径	14
第 2 章 普通混凝土组成、对比对收缩裂缝的影响	17
2.1 混凝土收缩机理	17
2.2 混凝土收缩的影响因素	20
2.2.1 混凝土的相组成与收缩	20
2.2.2 影响混凝土收缩的内在因素	22
2.2.3 影响混凝土收缩的外在因素	26
2.3 混凝土抗收缩开裂性能的评价方法	26
2.3.1 混凝土自由收缩变形测定	27
2.3.2 混凝土自由收缩变形估算	28
2.3.3 平板试验方法	31
2.3.4 环约束实验方法	31
2.3.5 轴向约束实验方法	32
2.4 组成、对比对混凝土抗收缩开裂性能的影响	32
2.4.1 组成、对比对混凝土自由收缩的影响	33
2.4.2 组成、对比对混凝土初龄期抗裂性能的影响	41
2.4.3 组成、对比对混凝土塑性收缩裂缝的影响	47
附录 A 混凝土塑性抗裂性能试验方法 (平板法)	51
附录 B 胶凝材料体系抗裂性能试验方法 (环约束法)	53
附录 C 混凝土抗裂性能试验方法 (环约束法)	55
附录 D 外加剂 (减水剂) 对水泥适应性试验方法	55
第 3 章 抗裂混凝土优化设计理论与方法	57
3.1 抗收缩开裂混凝土配比优化设计理论	57
3.1.1 胶结浆体组成优化设计理论	58
3.1.2 临界骨料体积含量理论	61

3.2 抗收缩开裂混凝土的原材料选择和控制参数	67
3.2.1 抗收缩开裂混凝土的原材料选择	67
3.2.2 抗收缩开裂混凝土的配比控制参数	68
3.3 抗收缩开裂混凝土配合比优化设计方法	69
3.3.1 优化设计思路	69
3.3.2 抗收缩开裂混凝土配合比优化设计方法	72
3.4 抗收缩开裂混凝土的优选和评价	76
3.5 粗骨料级配优化设计方法	76
3.5.1 定量体视学基本原理和方法	77
3.5.2 混凝土粗骨料堆积定量体视学研究的一般方法	79
3.5.3 体视学参数与骨料堆积空隙率的相关性和定量关系	81
3.5.4 骨料级配优化设计的定量体视学方法	85
第4章 混凝土抗裂组分及其应用技术	87
4.1 纤维抗裂混凝土及其应用技术	88
4.1.1 纤维混凝土的抗裂机理	88
4.1.2 纤维抗裂混凝土的应用技术	90
4.2 混凝土减缩剂及其应用技术	102
4.2.1 混凝土减缩剂的作用机理及制备	102
4.2.2 混凝土减缩剂的应用	104
4.3 混凝土膨胀剂及其应用	107
4.3.1 混凝土膨胀剂的生产发展	107
4.3.2 混凝土膨胀剂的性能与应用	107
第5章 混凝土的自收缩开裂与控制	111
5.1 概述	111
5.1.1 自收缩的定义与现象	111
5.1.2 自收缩的产生机理	112
5.1.3 自收缩应变的测量方法	113
5.2 自收缩的影响因素	115
5.2.1 水泥矿物成分与水泥类型	115
5.2.2 水胶比	116
5.2.3 矿物掺合料	116
5.2.4 骨料	118
5.2.5 膨胀剂与减缩剂	118
5.2.6 物理化学因素	119
5.3 自收缩应力及其评估	122
5.3.1 自收缩应力的主要影响因素	122
5.3.2 自收缩应力评估	123
5.3.3 温度变化对自收缩应力的影响	130
5.3.4 干燥条件对混凝土自收缩应力的影响	132

5.3.5 高强混凝土构件的自收缩应力的试验与数值模拟	133
5.4 自收缩开裂的控制方法	136
5.4.1 自收缩开裂的测量方法	136
5.4.2 控制自收缩开裂的方法	138
第6章 设计构造对混凝土结构裂缝的影响及其控制技术	141
6.1 设计构造对混凝土结构裂缝的影响	141
6.1.1 概述	141
6.1.2 设计构造对混凝土结构裂缝影响的理论分析	143
6.2 混凝土结构裂缝控制的设计和构造措施	147
6.2.1 裂缝控制的设计构造原则	147
6.2.2 裂缝控制的常见设计构造措施	148
6.3 混凝土结构裂缝控制的设计构造措施工程实例	159
6.3.1 工程实例一	159
6.3.2 工程实例二	161
6.3.3 工程实例三	162
6.3.4 工程实例四	164
6.3.5 工程实例五	164
第7章 混凝土结构裂缝预应力控制技术	166
7.1 预应力混凝土的裂缝控制机理	166
7.1.1 预应力混凝土	166
7.1.2 预应力度	166
7.1.3 预应力的施加方法	167
7.2 预应力抗裂混凝土的应用技术	167
7.2.1 简介	167
7.2.2 预应力抗裂混凝土结构体系	173
7.2.3 预应力抗裂设计中应注意的问题	176
第8章 混凝土结构裂缝的施工控制	178
8.1 混凝土微缺陷成因及危害	178
8.2 混凝土结构裂缝施工控制技术	179
8.2.1 施工操作控制措施	179
8.2.2 养护剂及应用技术	183
第9章 混凝土结构裂缝综合控制导则与工程实践	190
9.1 混凝土结构裂缝控制导则	190
9.1.1 总则	190
9.1.2 基本规定	190
9.1.3 结构缝的设置	191
9.1.4 混凝土材料与配合比	192

9.1.5	混凝土结构裂缝控制的设计构造措施	197
9.1.6	混凝土结构裂缝控制的施工措施	201
9.2	混凝土结构裂缝控制导则的工程实践	202
9.2.1	商品混凝土现浇楼板的开裂现状	202
9.2.2	楼板裂缝成因	203
9.2.3	裂缝控制思路	204
9.2.4	试点工程一——某住宅小区 C 地块	205
9.2.5	试点工程二——某住宅花园	214
9.2.6	试点工程三——某住宅小区地下车库	216
第 10 章	混凝土结构裂缝监测与诊断技术	221
10.1	光纤在线监测裂缝技术	221
10.1.1	分布式强度型微弯光纤传感技术	221
10.1.2	分布式光纤温度传感检测 (DTS 系统)	227
10.1.3	分布式光纤传感的特点	229
10.1.4	光纤布拉格光栅传感技术	229
10.2	碳纤维诊断裂缝技术	234
10.2.1	检测基本原理	234
10.2.2	实例	235
10.3	超声波检测技术	240
10.3.1	基本原理	240
10.3.2	超声波检测混凝土裂缝深度的基本方法	241
10.3.3	超声波检测混凝土需注意的问题	253
10.3.4	超声波检测混凝土裂缝的优缺点	255
10.3.5	超声波检测仪器的的发展	255
10.4	冲击回波检测技术 (IE)	255
10.4.1	基本原理	256
10.4.2	频域分析方法	256
10.4.3	时域分析方法	258
10.4.4	检测中需注意的问题	263
10.4.5	冲击回波法测试的技术特点	264
10.4.6	检测过程	264
10.4.7	测试仪器	264
10.5	声发射检测技术	264
10.5.1	基本原理	265
10.5.2	实例	265
10.5.3	声发射检测技术特点	268
10.6	以射线作为探测媒介的检测方法	269
10.6.1	红外热像检测技术 (IT)	269
10.6.2	计算机断层 X 射线扫描技术 (CT)	270
10.7	应变膜裂缝检测技术	271

10.7.1 应变膜裂缝检测原理.....	271
10.7.2 典型案例.....	272
第 11 章 混凝土结构裂缝修复技术	278
11.1 混凝土结构的修复方法.....	278
11.1.1 表面处理法.....	278
11.1.2 填充法.....	278
11.1.3 灌浆法.....	278
11.1.4 结构补强法.....	279
11.2 混凝土结构裂缝修补材料和性能.....	279
11.2.1 表面处理法与填充法裂缝修补材料.....	279
11.2.2 灌浆法裂缝修补材料.....	288
11.2.3 结构补强法裂缝修补材料.....	295
11.3 修补材料的应用技术.....	298
11.3.1 表面处理法与填充法裂缝修补材料的应用.....	298
11.3.2 灌浆法裂缝修补材料的应用.....	301
11.3.3 结构补强法裂缝修补材料的应用.....	304
主要参考文献.....	306

第 1 章 混凝土结构裂缝类型与成因

混凝土结构耐久性良好、造价低廉、易于施工、维修便捷，在工业与民用建筑中一直获得最广泛的应用。近年来，为应对资源、环境、性能、造价以及施工等方面不断提高的要求，现代混凝土正向高强混凝土、高性能混凝土、大流动性（自流平）混凝土、绿色混凝土发展，在原料制备和选择、配合比组成上都已产生了巨大的变化。组成材料上，水泥的强度等级越来越高，细度越来越细；可供选择的骨料越来越缺乏；大量工业废弃物通过用于制备混凝土而实现资源化；矿物掺合料、外加剂广泛应用，成为不可或缺的第 5、第 6 组分。配合比组成上，胶凝材料用量在增加；细骨料用量、微细矿物掺合料掺量在增大；外加剂和矿物掺合料的广泛应用，使水胶比可根据混凝土性能的要求在极低到较高的范围内变化。所有这一切都使混凝土成为日趋复杂的组成体系。

由于混凝土材料组成和配比的复杂化，以及建筑施工、结构设计、环境条件等因素的影响，目前，在建设工程中，混凝土结构与混凝土构件频繁出现不同程度的裂缝，对结构造成一定损伤，并影响建筑物的耐久性和正常使用功能，甚至对结构的安全可靠性产生严重的潜在威胁，已成为亟待解决的重大课题。了解混凝土结构裂缝的类型、特征和形成原因，对控制和减少混凝土结构裂缝的产生，建立切实可行的裂缝控制方法和途径具有重要意义。

1.1 混凝土结构裂缝的界定

混凝土是胶凝材料胶结砂石骨料形成的一种非均质多相复合材料，在相组成上，混凝土包括水泥石、骨料和骨料-水泥石界面过渡区 3 部分。所谓裂缝实际上是同相连续性或不同相之间黏结性的中断或破坏。这种连续性的中断或破坏，按照尺度可分为“微观裂缝”和“宏观裂缝”。“微观裂缝”是肉眼观察不到的微小裂纹，裂缝宽度小于 0.05mm（肉眼的最佳视力为 0.02mm）；“宏观裂缝”是“微观裂缝”不断发展而显现的结果，裂缝宽度大于等于 0.05mm。

混凝土中有 3 种常见的微观裂缝（见图 1-1 所示）。

① 黏着裂缝 是骨料与水泥石的黏结面上的裂缝，也叫界面裂缝，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。

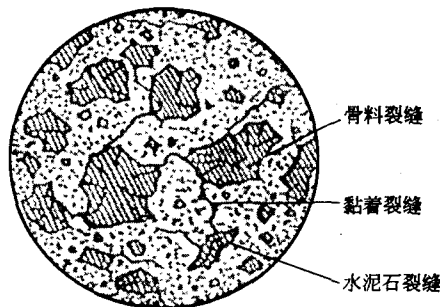


图 1-1 混凝土中的微观裂缝

③ 骨料裂缝 是指骨料本身的裂缝。

由于混凝土材料组成、制备、施工以及环境温湿度变化等因素的影响,“微观裂缝”在混凝土结构中实际上是不可避免的,具有非贯穿、不规则分布、可承受拉应力以及及时变性的特点,因此,绝对无裂缝的混凝土结构实际上是不存在的,本书所探讨的混凝土结构裂缝主要指肉眼可观察到的“宏观裂缝”。但需要再次强调的是,无论何种原因导致“宏观裂缝”产生,裂缝总是“微观裂缝”扩展演化的结果。

1.2 混凝土结构裂缝的类型和成因

按照裂缝产生的原因,混凝土结构裂缝一般可分为荷载裂缝和非荷载裂缝。荷载裂缝是混凝土由于受到外力作用产生的裂缝,可进一步分为外荷载裂缝和荷载次应力裂缝;非荷载裂缝主要指未受到外加荷载时,由于混凝土自身变形或结构变形受到约束产生拉应力而导致的裂缝。

1.2.1 荷载裂缝

荷载裂缝是由于结构物受到外荷载作用,导致混凝土内部产生的拉应力超过混凝土的极限抗拉强度,使混凝土产生的裂缝。

混凝土结构的荷载裂缝多为楔形裂缝,按照荷载的性质,混凝土结构的荷载裂缝可分为弯曲裂缝、剪切裂缝、扭转裂缝。由于混凝土是典型的脆性材料,抗拉强度很低,因此,在混凝土结构设计中,荷载裂缝主要通过设置受力钢筋加以控制。

弯曲裂缝是由弯矩引起的,出现在受弯构件弯矩较大的部位,如在简支梁的跨中下翼缘的混凝土受拉区、连续梁支座上翼缘的混凝土受拉区。通常通过设置纵向钢筋来控制裂缝的开展。

剪切裂缝是指由剪力或在弯矩和剪力的共同作用下而产生的斜裂缝。斜裂缝的形成有两种方式:一种是因受弯正应力较大,先在梁底出现垂直裂缝,然后向上沿主压应力迹线发展形成斜裂缝,这种斜裂缝称为弯剪斜裂缝;另一种是梁腹部剪应力较大,会因梁腹主拉应力达到抗拉强度而先开裂,然后分别向上、向下沿主压应力迹线发展形成斜裂缝,这种斜裂缝称为腹剪斜裂缝。斜裂缝的开展将会导致沿斜截面的受剪承载力不足从而产生破坏。梁中通常通过设置垂直箍筋,或将纵筋弯起形成弯起钢筋,来提高斜截面受剪承载力,控制斜裂缝的开展。箍筋和弯起钢筋统称为腹筋。按理说,箍筋沿主拉应力方向布置更为有效,但从施工考虑,斜箍筋不便于绑扎,而且斜箍筋也不能承受方向荷载的作用,故工程中一般均采用垂直箍筋。弯起钢筋可直接由正截面抗弯钢筋弯起形成,且弯起钢筋的方向可与主拉应力方向一致,但由于其传力较为集中,受力不均匀,且有可能在弯起处引起混凝土的劈裂裂缝,同时增加了钢筋施工的难度,也就很少采用,一般仅在箍筋略有不足的大跨简支梁上采用。

扭转裂缝是在扭矩单独作用,或在弯矩、剪力、扭矩同时作用下产生的。混凝土构件在荷载作用下,截面上的剪应力成环状分布,主拉应力和主压应力迹线沿构件表面成螺旋形。当主拉应力达到混凝土的抗拉强度时,在构件中某个薄弱部位形成裂缝,裂缝沿主压应力迹线迅速延伸。如果是素混凝土构件,则裂缝的出现会迅速导致

构件的破坏,破坏面呈一空间扭曲裂面。扭转裂缝通常通过设置封闭型箍筋和受扭纵筋来控制裂缝的开展。受扭纵筋应沿截面周边均匀布置,在截面四角必须布置受扭纵筋。受扭纵筋的搭接和锚固均应按受拉钢筋的构造要求处理。

按照《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002 规定,受弯构件,如无特殊要求,在荷载标准值下是允许出现裂缝的,但裂缝宽度在荷载长期效应组合下不得超过规范限定值。但钢筋混凝土框架结构的梁柱接点核心区、框架柱和一般钢筋混凝土柱以及一般受弯构件的斜截面剪力区是不允许出现裂缝的。

通常,严格执行设计、施工和验收规范,正常荷载作用下,混凝土结构裂缝宽度不会超过规范限值,但由于设计考虑不周、构造措施不当,特别是不能有效控制减少混凝土的非荷载变形,并采取对应的材料、设计和构造措施时,会导致大量的混凝土结构出现超出规范规定宽度的裂缝。

1.2.2 非荷载裂缝

研究表明,80%以上的混凝土结构裂缝与非荷载变形有关,是以变形变化为主所引起的裂缝;剩余20%的裂缝以荷载为主要原因,并包括变形变化与荷载的共同作用。因此,大部分混凝土结构裂缝是非荷载裂缝,或是非荷载变形与荷载共同作用的结果。

混凝土的非荷载变形并不必然导致混凝土结构裂缝的产生。裂缝的产生与非荷载变形分布的不均匀性(变形不协调)以及变形受到的约束程度有关。非荷载变形分布的不均匀性取决于变形的种类和作用机理以及混凝土非荷载变形的影响因素,包括混凝土的材料组成,力学性能,构件内部温度、湿度的梯度分布等。混凝土非荷载变形受到的约束分为内约束和外约束,内约束指一个物体或一个构件本身各质点之间的相互约束作用,如混凝土组成材料内部砂石对水泥石的约束作用;钢筋混凝土中钢筋对混凝土变形的约束作用以及混凝土内部自身变形的不协调等。外约束指一个构件变形受到其它构件的阻碍,或一个结构变形受到另一结构的阻碍,如圈梁对楼板的约束作用。无论内约束或者外约束,变形不协调或变形受到约束都将导致拉应力产生,在拉应力作用下,混凝土中会产生大量“微观裂缝”;或者“微观裂缝”将不断发展为“宏观裂缝”,即非荷载裂缝。按照非荷载变形的种类,可将混凝土的非荷载裂缝分为以下几种典型类型。

1.2.2.1 塑性塌落裂缝

塑性塌落裂缝也叫沉降裂缝,一般在混凝土浇筑时或者浇筑成型后,在初凝前,由于混凝土沉降收缩所致。所谓沉降收缩指混凝土浇筑后,因原材料相对密度差异,在重力或其它外力(振动)作用下,骨料下沉,水泥浆上升,产生泌水的过程。

当混凝土沉降受到阻挡时,将在阻挡部位上部混凝土中产生拉应力,当拉应力大于混凝土的张拉应力时,混凝土表面即产生塑性塌落裂缝。塑性沉降裂缝可依据混凝土沉降受阻的形式不同分为3种类型。

① 钢筋或螺栓阻碍 混凝土结构中的钢筋或固定模板用的螺栓阻碍了混凝土的沉降,在混凝土浇筑面上形成塑性塌落裂缝,特点是裂缝沿钢筋的布置走向分布,如

图 1-2 所示。一般情况下,塑性塌落裂缝的深度多达钢筋表面,裂缝宽度可达 1~2mm,大流动性混凝土或水灰比大的混凝土尤为严重。

② 模板不平或吸水 混凝土细柱和薄墙会因两边模板凹凸不平或构件尺寸变化限制了混凝土的均匀下沉,以及模板吸水太快造成部分混凝土很快失去流动性时,也会形成塑性塌落裂缝,如图 1-3 所示。

③ 沉降深度不同 厚混凝土较薄混凝土的沉降量大,在连续浇筑变截面结构时,由于混凝土沉降速度的差异,塑性塌落裂缝在变截面部位也极易产生,如图 1-4 所示。

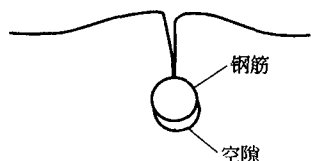


图 1-2 钢筋造成的
塑性塌落裂缝

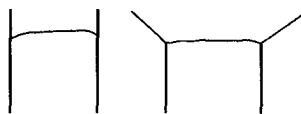


图 1-3 剪力墙、柱塑性
塌落裂缝

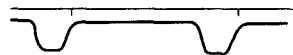


图 1-4 变截面塑性
塌落裂缝

实际施工中,对混凝土及时进行二次振捣,一般可有效防止这类裂缝的产生。

1.2.2.2 塑性收缩裂缝

塑性收缩裂缝是指混凝土浇筑后,在硬化前由于塑性收缩导致的裂缝。

混凝土浇筑完毕后,各种固体颗粒之间存在一层水膜,由于原材料相对密度的差异,混凝土在凝结之前将产生泌水。混凝土表面泌水可使固体颗粒互相靠近,饱水毛细孔细化,理论上,可减少混凝土的体积,有利于提高密实度,不会使混凝土在水平方向产生体积变化。但当混凝土表面水分的蒸发速度大于泌水速度时,由于表面张力的作用,毛细孔失水形成凹液面,将导致毛细管压力产生,使混凝土浆体产生体积收缩,即塑性收缩。当混凝土流动性不好或混凝土还未产生足够的抗拉强度时,混凝土就会产生塑性收缩裂缝。

塑性收缩裂缝产生的关键原因在于混凝土表面干燥速度远大于内部,面层混凝土迅速失水结硬,收缩大,变形受到内部混凝土约束产生拉应力导致开裂,因此,塑性收缩裂缝均在表面出现。裂缝形状不规则,多在横向,长度在 50~4750mm 之间,间距 50~90mm,宽度通常在 0.5~2mm 左右,细而多且互不贯通。

混凝土塑性收缩裂缝在体表比小的板式结构中最为普遍,天气炎热、蒸发量大、大风或混凝土本身水化热高都是产生塑性裂缝的直接原因。实测结果表明,当混凝土拌和物表面失水速度大于 $0.5\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ 时,极易产生塑性收缩裂缝。实际施工中,加强覆盖养护,及时收水,都可有效减少塑性裂缝的产生。采取二次搓毛压平措施,对已形成的塑性收缩裂缝有良好的愈合作用。

1.2.2.3 干燥收缩裂缝和自收缩裂缝

干燥收缩裂缝是混凝土干燥收缩变形导致的裂缝。

干燥收缩变形是混凝土凝结硬化后由于含水孔隙失水导致的体积收缩,混凝土内

部和环境之间存在的湿度梯度是水分迁移的驱动力。

混凝土的干燥收缩变形存在复杂的作用机理，本质上是水泥石的收缩，骨料由于弹性模量大实际上是不收缩的，且起着约束水泥石收缩的作用。混凝土干燥收缩变形的大小取决于水泥石的数量、水泥石中的孔隙含量、孔径分布和含水状态，与混凝土材料组成、配合比以及构件的尺寸密切相关，且受温湿度影响大，具有明显的时变性（参见第2章）。

当干燥收缩变形受到外约束作用时，混凝土中将产生拉应力。拉应力的大小与混凝土干燥收缩变形大小、所受约束程度以及混凝土的变形模量、徐变等力学性能有关，当拉应力大于混凝土的抗拉强度时，即出现干燥收缩裂缝。试验研究表明，普通混凝土干燥收缩超过400个微应变时，开裂的概率将大大增加。此外，混凝土干燥失水总是从表面开始的，因此，结构中混凝土的干燥收缩并不均匀，存在明显的梯度分布，表现为一种内约束，这也被认为是混凝土结构产生干燥收缩裂缝的主要原因之一。

普通混凝土干燥收缩随时间的发展存在一定规律，通常半个月可完成收缩终值的10%~25%；3个月完成50%~60%；1年完成75%~80%，因此，混凝土结构的干燥收缩裂缝通常在1年左右开始出现。

混凝土结构的干燥收缩裂缝总是在拉应力集中部位或结构最薄弱部位率先出现，并与拉应力聚集的方向垂直。视结构约束条件以及配筋形式的不同，裂缝一般有两种形状：一种为不规则龟纹状或放射状裂缝；另一种为每隔一段距离出现1条的裂缝，其中以后者居多，多为枣核形，最初表现为不贯穿的表面裂缝，随后大部分裂缝都将逐渐演化为贯穿型裂缝。裂缝宽度通常在0.1~0.5mm，严重时可达0.5~1.5mm。实际工程中，这种干燥收缩裂缝多出现于纵长的结构、体表比较大的结构以及结构变截面部位（如图1-5所示）。

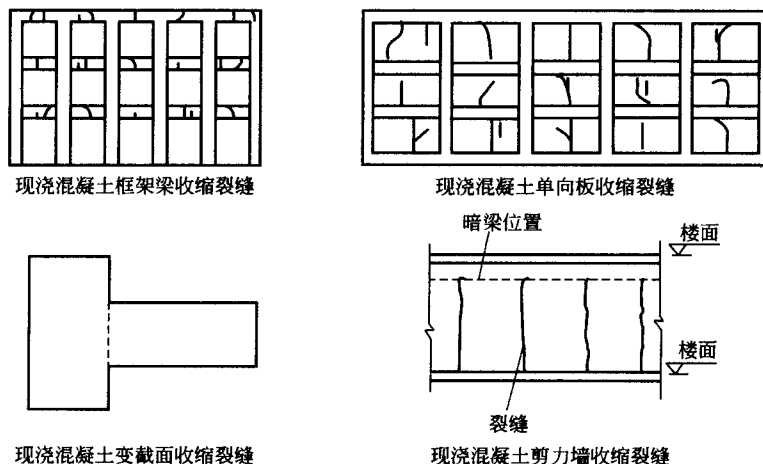


图1-5 典型的干燥收缩裂缝

混凝土自收缩（自干燥）是指混凝土在不与外界发生水分交换条件下产生的收缩变形，它不同于混凝土的化学减缩，但与化学减缩密切相关。自收缩在高强混凝土中表现尤为突出，高强混凝土的水胶比低、所用的水泥强度等级高、水泥用量大，而且掺入了磨细的活性矿物掺和料，因此早期胶凝材料的水化快，导致混凝土内自由水迅速消耗，随着水泥水化的进行，在硬化水泥石中形成大量微细孔，水的饱和蒸汽压也随之降低，即水泥石内部相对湿度降低，但同时水泥石质量没有任何损失，这种现象称为自干燥。许多试验结果都证实了混凝土自收缩与干缩现象有明显差异，首先它是在与外界无水分交换的条件下出现的，其次，它在混凝土体内均匀发生，而不是仅发生在表面。自干燥现象的结果是使毛细孔中的水由饱和状态变为不饱和状态，于是在毛细孔水中产生弯月面，造成硬化水泥石受负压的作用而产生收缩，因此，自收缩作用机理类似于干缩机理，都是由于混凝土体内湿度分布变化产生的毛细管应力、劈张力等变化导致的。但自收缩与干缩在相对湿度降低的机理上不同，造成干缩的原因是由于水分扩散到外部环境中，而自收缩是由于内部水分被水化反应所消耗而形成的。

混凝土的自收缩发展速度很快，通常在几天后就达到稳定。当混凝土处于塑性状态时，自收缩不会对混凝土结构产生危害。但对于水灰比低的高性能（高强）混凝土，混凝土凝结硬化后仍将产生相当数量的自收缩，在内约束的作用下将导致混凝土内部产生大量的微裂纹，这些微裂纹在后续拉应力作用下将演化为显见裂缝，在极端情况下，自收缩可直接导致混凝土的开裂。

1.2.2.4 温度变形裂缝

混凝土由于温度变化产生的热胀冷缩变形即为温度变形。当混凝土结构或构件的温度变形受到约束时，将在混凝土结构内部产生温度应力，当由此产生的内部拉应力超过混凝土极限抗拉强度时，混凝土便产生温度变形裂缝。按照温度的变化，温度裂缝可分为温升裂缝和温降裂缝。

混凝土产生温度变形的热源来自于环境因素或者混凝土材料本身，前者指环境的热传导及太阳的辐射传热作用，后者指水泥的水化反应热。温度变形的大小与传热量、材料的比热容以及温度膨胀系数有关，而一定温度变形下，温度应力的产生则取决于变形约束度和材料的变形模量。因此，温度裂缝是否产生，裂缝的部位、形状、宽度都与约束程度及材料的抗拉强度有关。而无论外约束还是内约束，温差或者材料膨胀系数不同导致的温度变形是温度应力产生的根本原因。

通常，混凝土结构中，环境因素导致的温度裂缝绝大部分与外约束有关，少部分是由于内约束所造成，太阳辐射造成的温差是温度裂缝产生的主要原因。依据结构形式、施工和建筑材料的差异，温度裂缝可表现为墙体裂缝、构件和构件间温度裂缝。

（1）墙体温度裂缝

墙体温度裂缝是混凝土结构中最常见的温度裂缝，在多层砖混建筑中尤为显著，框架结构、剪力墙结构墙体温度裂缝相对较少，但其作用机理相同。温度裂缝主要是温升裂缝，少量为温降裂缝。多层砖混结构中，楼盖（楼板）材料为钢筋混凝土，墙体材料为砖砌体，两者线膨胀系数相差1倍以上。而夏季，屋面受到太阳辐射或较高

气温作用引起的温升高于墙体,其表面温度最高可达 $55\sim 65^{\circ}\text{C}$,而室内温度一般在 $25\sim 35^{\circ}\text{C}$,使顶板和墙体之间产生很大的变形差,由于屋面板膨胀受到砖砌体的约束,将在墙体中产生拉应力和剪应力,从而导致开裂。

墙体温度裂缝主要出现在受温度变化较大的墙体和墙体变截面处。往往具有顶层重、下层轻;两端重、中间轻;向阳重、背阴轻的特点。裂缝可发生在外纵墙、女儿墙、山墙及部分横墙上,在形式上有正八字裂缝、倒八字裂缝、水平裂缝、竖向裂缝等。

① 正八字裂缝 通常出现在顶层纵墙的两端,一般在 $1\sim 2$ 开间的范围内,严重时可发展至房屋长度的 $1/3$,有时在横墙上也可能发生。正八字裂缝是温升导致的墙体内拉应力和剪应力引起主拉应力作用的结果,冬季施工的房屋更易出现。由于剪应力分布是中间为零,两端最大,因此裂缝主要分布在墙体两端。当外纵墙两端有窗时,裂缝沿对角裂开。基于同样原理,夏季施工的女儿墙,到了冬季,由于季节温差和室内外温差影响,收缩大于其底部墙体,沿长度方向受到拉应力和剪应力的作用,也会在与山墙的拐角两端形成正八字裂缝,此时裂缝为温降裂缝。

② 倒八字裂缝 一般很少出现。低温或冬季施工的女儿墙,到了夏季,由于季节温差和室内外温差影响,造成纵横向女儿墙砌体相对于下部墙体膨胀伸长大,由于女儿墙根部受到主体的约束,其上部接近自由状态,因此在女儿墙端部附近产生较大的斜向主拉应力,可能产生倒八字裂缝。

③ 水平裂缝 墙体水平温度裂缝多出现在外纵墙窗口上下处、平顶房屋檐口下或屋顶圈梁下 $2\sim 3$ 皮砖的灰缝中、女儿墙靠近圈梁处。

檐口下水平裂缝沿外墙顶部分布,从两端向中间逐渐减少,裂缝缝口外张,外墙缝明显,同时还存在包角现象,四角处开裂严重,裂缝宽度大。裂缝产生的原因由于温升产生的剪应力超过了墙体的平均抗剪强度。

外纵墙窗口上下处出现水平裂缝的主要原因是由于平屋面结构受到升温作用,产生较大的伸长变形,在墙顶形成水平力,使砌体产生弯曲拉应力而造成的。当屋面结构采用非预应力屋架时,由于屋架下弦伸长,使墙、柱的顶部受到较大的水平推力,砌体也会产生类似的裂缝。裂缝宽度一般在窗的上口处较小,下口处较大。

女儿墙出现水平裂缝的主要原因在于屋面板因温度变化对女儿墙产生的反复推拉作用,通常,山墙部位女儿墙裂缝往往严重于外纵女儿墙。

④ 竖向裂缝 墙体温度裂缝大部分是斜裂缝和水平裂缝,竖向裂缝较少,多发生在局部。墙体因温度变形受到楼板的拉应力作用是竖向裂缝产生的原因。竖向裂缝多发生在每道女儿墙的中部或长度均分点上、无门窗洞口的山墙中部以及房屋檐口下方。此外,房屋错层处的墙体、楼梯平台和楼板间的墙体也会出现局部竖向裂缝。对于小型砌块墙体上的竖向裂缝,其产生机理是由于室内外温差在墙体内产生弯曲应力,高温侧受拉,低温侧受压,从而导致开裂。

(2) 构件和构件间温度裂缝

由于太阳的辐射作用,当屋面保温、隔热达不到节能设计标准时,将导致混凝土