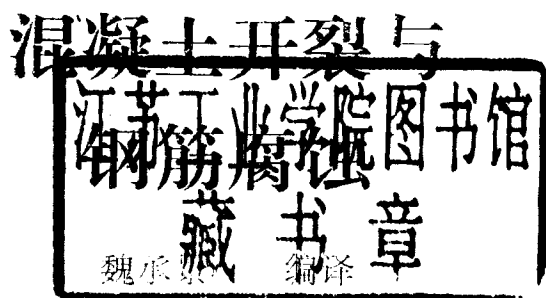


# 混凝土开裂与 钢筋腐蚀

魏承景 编译

广西有色金属学会  
广西混凝土协会



广西有色金属学会  
广西混凝土协会

本书系美国混凝土学会224委员会和222委员会的两个报告, ACI 224.1R-84和ACI 222R-85。前一报告概要分析了混凝土结构物产生裂缝的原因, 介绍了检测方法和修补程序, 叙述了修补裂缝的各种技术和它们的适用范围。后一报告反映了混凝土中钢筋腐蚀的现状, 提出了腐蚀机理, 归纳介绍了防止钢筋腐蚀的各种方法和补救措施。此外, 还列出了标准文件和参考文献。本书供设计、施工和研究人员阅读参考, 也供大专院校师生参阅。

## 混凝土开裂与钢筋腐蚀

魏承景 编译

•

广西有色金属学会  
广西混凝土协会  
(南宁市北大南路17号)  
广西地质印刷厂印刷  
1989年1月

# 目 录

## 混凝土结构物裂缝原因、检测和修补

|                |      |
|----------------|------|
| 绪 言            | (3)  |
| 第一章 裂缝原因与抑制    | (4)  |
| 1.1 引言         | (4)  |
| 1.2 塑态混凝土的裂缝   | (4)  |
| 1.3 硬化混凝土的裂缝   | (7)  |
| 第二章 裂缝检测       | (23) |
| 2.1 引言         | (23) |
| 2.2 开裂部位和范围的确定 | (23) |
| 2.3 修补方法的选择    | (32) |
| 第三章 裂缝修补方法     | (33) |
| 3.1 引言         | (33) |
| 3.2 注射环氧       | (33) |
| 3.3 刻槽封闭       | (36) |
| 3.4 钉合法        | (37) |
| 3.5 增加钢筋       | (39) |
| 3.6 钻孔加销       | (41) |
| 3.7 柔性封闭       | (42) |
| 3.8 灌浆         | (44) |
| 3.9 干填封闭       | (45) |
| 3.10 截阻裂缝      | (46) |

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| 3.11 浸渍聚合物.....                | (47)        |
| 3.12 罩面和表面处理.....              | (48)        |
| 3.13 自动愈合.....                 | (49)        |
| <b>第四章 概要总结.....</b>           | <b>(50)</b> |
| <b>第五章 参考文献.....</b>           | <b>(51)</b> |
| 5.1 推荐文献.....                  | (51)        |
| 5.2 引用文献.....                  | (52)        |
| <b>关于《混凝土结构物裂缝原因、检测和修补》的讨论</b> | <b>(57)</b> |

## 混凝土中金属的腐蚀

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| <b>第一章 绪言.....</b>                | <b>(67)</b>  |
| 1.1 基本情况.....                     | (67)         |
| 1.2 范围.....                       | (69)         |
| <b>第二章 混凝土中钢筋腐蚀的机理.....</b>       | <b>(70)</b>  |
| 2.1 引言.....                       | (70)         |
| 2.2 腐蚀原理.....                     | (70)         |
| 2.3 混凝土环境对腐蚀的影响.....              | (84)         |
| <b>第三章 新结构物的防腐蚀保护.....</b>        | <b>(93)</b>  |
| 3.1 引言.....                       | (93)         |
| 3.2 设计和施工操作.....                  | (93)         |
| 3.3 排除外来氯化物离子的方法.....             | (104)        |
| 3.4 保护钢筋免受氯化物离子侵蚀的方法.....         | (111)        |
| 3.5 腐蚀控制方法.....                   | (113)        |
| <b>第四章 腐蚀环境和混凝土中活腐蚀的鉴别方法.....</b> | <b>(115)</b> |
| 4.1 引言.....                       | (115)        |

|            |                  |       |
|------------|------------------|-------|
| 4.2        | 检测方法             | (116) |
| <b>第五章</b> | <b>补救办法</b>      | (122) |
| 5.1        | 引言               | (122) |
| 5.2        | 概述               | (122) |
| 5.3        | 适用性              | (123) |
| 5.4        | 补救办法和它们的适用范围     | (124) |
| 5.5        | 概要总结             | (134) |
| <b>第六章</b> | <b>标准文件与参考文献</b> | (136) |
| 6.1        | 标准编制机构的有关文件      | (136) |
| 6.2        | 参考文献             | (136) |
|            | 关于《混凝土中金属的蚀腐》的讨论 | (153) |
| <b>附录</b>  | <b>氯化物含量计算</b>   | (159) |

# 混凝土结构物 裂缝原因、检测和修补

ACI 224.1R-84

# Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures

Reported by ACI Committee 224

## 绪 言

有许多原因使混凝土发生裂缝。裂缝可能只影响外观，也可能表明结构物已明显损坏或耐久性不足。裂缝可以体现总的损坏程度，或指出更严重的问题。它们的重要性取决于结构物类型和开裂性质。例如，房屋结构容许的裂缝，在蓄水结构中可能就不允许。

裂缝的恰当修补，取决于对开裂原因的了解和考虑这些原因而选择的修补方法。否则，修补只会是暂时的。成功的一劳永逸的修补方法的选择，既要针对裂缝本身，又必须针对开裂原因。

为了帮助专业人员正确确定解决裂缝问题的最佳办法，本报告论述混凝土裂缝产生的原因，检测和修补方法。第一章简要介绍裂缝产生的原因并企图为检测提供基础。第二章叙述检测方法和标准。第三章叙述裂缝修补技术并介绍一些行之有效的方法。在许多情况下，要完全解决问题，需要联合采用多个方法。

# 第一章 裂缝原因与抑制

## 1.1 引言

本章简要介绍裂缝产生的原因和抑制方法。裂缝分为发生于塑态混凝土的和发生于硬化混凝土的两类<sup>(1,2)</sup>。除本报告提供的资料外，本委员会的最近报告 (ACI 224R)，凯利 (Kelly) <sup>(1)</sup>、普赖斯 (Price) <sup>(2)</sup>、卡尔逊 (Carlson) 等<sup>(3)</sup>的论文以及阿不丹纳 (Abdun-Nur) 的论文，都有更详细的介绍。更多的文献列于第五章。

## 1.2 塑态混凝土的裂缝

### 1.2.1 塑态收缩裂缝

新浇筑的混凝土楼面和板（或其他表面积大的构件）的裸露表面，由于湿度低、风和/或高温而快速损失水分时，最容易发生收缩裂缝（图1.1）。塑态收缩一般在没有开始养护、最后修整前发生。

新浇筑的混凝土表面，水分蒸发速度快于泌水补充时，混凝土就收缩。由于干燥中的表层受下部混凝土的制约，变硬中的软弱塑态混凝土发生拉应力，结果形成许多表面裂缝。

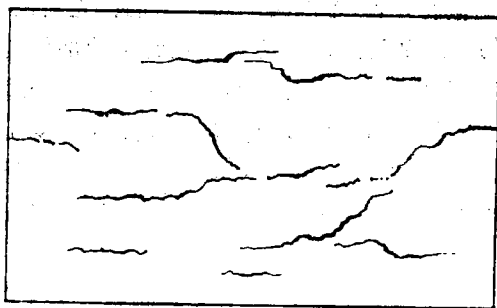


图1.1 典型的塑态收缩裂缝(2)

它们一般不长，且方向不定，往往布满整个表面。裂缝长度从几吋至几呎，间距从几吋大至10呎（3米）。高架结构板的塑态收缩裂缝可能延伸整个厚度。

由于塑态收缩裂缝是归因于混凝土中不同的体积变化，所以，成功的抑制办法，要求减少混凝土表层和其他部分的相对体积变化。

可采取许多措施防止由于炎热天气和干风所造成的水分快速损失（ACI 224R, ACI 302.1R, ACI 305R）。这些措施包括：用喷嘴喷雾、使表面上方的空气饱和，用塑料膜随着最后修整工序的进行覆盖表面。采用挡风设施以减低风速、采用遮阳措施以降低表面温度也都有效，平面作业安排在墙面装配后进行是有效的做法。增加泌水速度的一些措施也会有用。

### 1.2.2 沉降裂缝

在初始浇筑、振捣和修整后，混凝土仍有继续固结的趋

势。在此期间内，塑态混凝土受到钢筋、先前浇筑的混凝土或模板等的局部约束，可能在靠近约束的部件处形成孔隙和/或裂缝（图1.2）。当与钢筋有关时，沉降裂缝随钢筋尺码和混凝土坍落度的增加以及保护层厚度的减少而增加<sup>(4)</sup>。图1.3示这些变量在限定范围内的影响情况。沉降开裂的程度可能由于捣固不充分或者使用渗漏或柔性非常大的模板而增大。

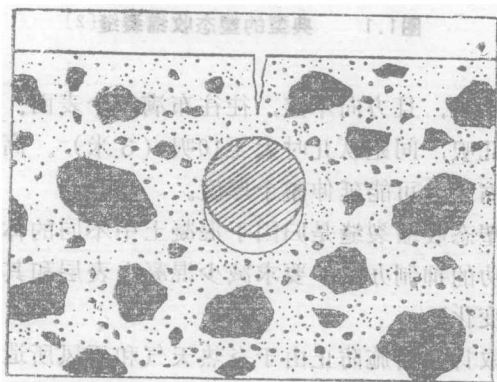


图1.2 由于沉降受阻而形成的裂缝(2)

恰当设计模板（ACI 347）和充分振捣（包括重复振捣），在浇筑柱混凝土和浇筑板与梁混凝土之间规定足够的时间间隔（ACI 309.2R），使用尽可能小的坍落度和增加混凝土保护层等，都能减少沉降裂缝。

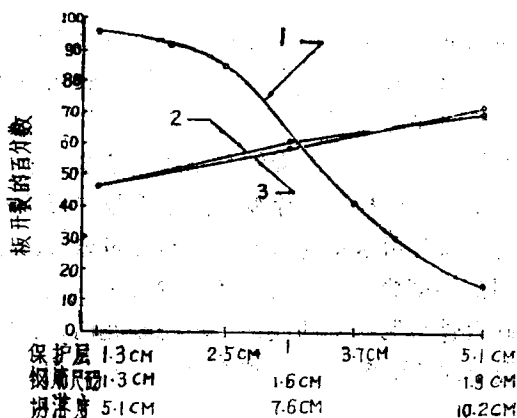


图1.3 沉降裂缝作为钢筋尺码、坍落度和保护层的函数(4)

1—保护层(净); 2—钢筋尺码; 3—坍落度

### 1.3 硬化混凝土的裂缝

#### 1.3.1 干缩

混凝土开裂的常见原因是干缩受约束。干缩是水泥浆水分损失所造成, 单位长度的收缩能大到1%。幸亏骨料提供内部制约, 使这种体积变化减小到约为0.05%。在潮湿状态下, 混凝土膨胀。

这种由水分诱发的体积变化是混凝土的特性。如果混凝土的收缩不受约束, 混凝土就不会开裂。正是收缩和约束(一般由结构物的其他部分或基层造成)凑在一起, 导致拉应力发展。当拉应力超过混凝土的抗拉强度时, 混凝土就要开裂。开裂后, 裂缝能在远低于开裂应力的情况下蔓延。

在大体积混凝土构件中，拉应力是由混凝土表面和内部收缩不同所造成。表面的较大收缩，使它开裂並能使裂缝随着时间的续延向深部发展。

拉应力的大小受许多因素综合制约。这些因素是：收缩量、约束程度、弹性模量和徐变量。干缩量主要受拌合物骨料用量和类型以及用水量的影响。骨料总量愈大，收缩量愈小<sup>(5)</sup>。骨料的劲度愈高，则它在减小混凝土的收缩方面愈有效（即：砂岩骨料混凝土的收缩，可能是花岗岩、玄武岩或石灰岩混凝土的两倍多<sup>(6)</sup>）。拌合物的含水量越高，干缩量越大<sup>(7)</sup>。

墙和板表面的发丝裂纹是小规模干缩的极好例子。发丝裂纹一般是在混凝土表层含水量高于内部时发生。结果是形成一连串浅的、密布的细小裂纹。

拌合物中的骨料用量采用切实可行的最大值，能减少混凝土干缩。含水量最好采用最低值。一种有助于减少墙的沉降裂缝和干缩的方法是，从底向顶浇筑墙的混凝土时，依次减少含水量。采用这种方法时，墙下部的泌水能使墙上下含水量达到均衡。要使这种方法获得成功，需要仔细控制並恰当捣固。

收缩缝布置合适、细部配筋恰当，能抑制收缩裂缝。使用收缩补偿水泥也能抑制收缩开裂。值得指出的是，在抑制裂缝是特别重要的情况下，ACI 318的最低要求不总是合适。这些观点在ACI 224R有更详细的叙述，它含有其他施工操作法，以帮助抑制要发生的收缩裂缝。

### 1.3.2 热应力

水泥水化或环境条件改变或两者兼而有之，都可能使混凝土结构物内形成温差，从而造成不同的体积变化。由于不同体积变化而导致的拉应变，超过混凝土的拉应变能力时，它们就要开裂。水泥水化所造成的温差，在正常情况下，只影响大体积混凝土（除坝外，还包括大柱、桥墩、梁和基础），而环境温度变化所造成的温差则能影响任何结构物。

考虑大体积混凝土中的热裂缝。波特兰水泥水化时能够放热，使养护初期的混凝土内部升温，强度和劲度迅速增长，直到冷却开始。冷却时，对自由收缩的任何约束，都会导致产生拉应力。冷却阶段产生的拉应力与温度变化、热膨胀系数、有效的弹性模量（弹性模量因徐变而减少）以及约束程度成比例<sup>(8-10)</sup>。结构物体积愈大，温差和约束程度的潜势也愈大。

有助于减少热裂缝的方法有：降低内部最大温度、推迟冷却开始时间、控制混凝土冷却速度和增加混凝土拉应变能力。这些方法和用于减少大体积混凝土开裂的其他方法，在ACI 207.1R、ACI 207.2R和ACI 224R中都有介绍。

硬化混凝土的热膨胀系数在  $4$  至  $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$  ( $7 \sim 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 之间，平均为  $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$  ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )。当结构物的一部分受热、发生体积变化时，就有可能发生热裂缝。对于一部分经受着温度变化而其他部分或是局部或是完全保护的結構物，设计师应特别注意。温度降低会导致裸露部件开裂，而温度提高则可能导致结构物未裸露部分开裂。温度梯度使结构件发生弯曲和转动；如果受到约束，就会产生

巨大应力<sup>(11,12)</sup>。恰当设置收缩缝,让混凝土能够移动,正确设计细部,都有助于减轻这些问题。

### 1.3.3 化学反应

许多有害的化学反应会导致混凝土开裂。这些反应可能是由于制作混凝土用的骨料或其他材料与已硬化的混凝土接触所造成。

减少有害化学反应的一些一般性原理已有介绍,但只有对确定的混合物进行预检测或持续的现场经验,才能确定某一具体办法的有效性。

含有活性二氧化硅的骨料与水泥水化产生的、外加剂中的或外来的碱(例如,养护水、地下水、在已完工结构物中存储或使用的碱溶液等)发生膨胀反应的结果,会使混凝土开裂。

碱-二氧化硅反应的结果,形成膨胀性胶体。它能从混凝土的其他部分吸取水分、导致局部膨胀并随之发生拉应力,最后可能造成结构物完全破坏。抑制办法是正确选择骨料,使用低碱水泥,使用含有非常细的、高活性二氧化硅的火山灰。第一个办法可以使问题不发生,而后面两个办法则能够减少碱与活性二氧化硅的比例、形成无膨胀性的碱性硅酸钙(Calcium Alkali Silicate)。

使用某些石灰石做骨料时,发生碱-碳酸盐反应,而且通常导致在骨料颗粒与周围水泥浆体之间生成碱与二氧化硅(ACI 201.2R)。受影响的混凝土呈现网状裂缝。这种反应与碱-二氧化硅反应的区别在于,裂缝表面一般没有二氧化硅胶体附着物。避免使用活性骨料,掺用非活性骨料,使用最大尺

寸较小的骨料，使用低碱水泥（ACI 201.2R）<sup>1</sup>等，可使问题减至最小。

含有硫酸盐的水对于混凝土的耐久性特别有问题。硫酸盐渗入已经水化的水泥浆体，与水化的铝酸钙接触，形成硫铝酸钙，体积大大增加，导致产生局部的高的拉应力，使混凝土破坏。铝酸三钙含量低的Ⅰ型和Ⅴ型波特兰水泥，会使问题的严重性降低。ASTM C 595规定的混合水泥，在这方面也有作用。在严重的情况下，经过恰当检验，可用耐硫酸盐腐蚀有名的火山灰。

硬化混凝土表面使用除冰盐也会发生不利情况。受水溶性盐类作用的混凝土，应充分加气，钢筋有足够的保护层，且混凝土的质量高、可渗性小。

这些问题以及其他与混凝土耐久性有关的问题，它们的影响在ACI 201.2R中有更详细的叙述。

硬化水泥浆中的氢氧化钙会和空气中的二氧化碳化合，形成碳酸钙。由于碳酸钙的体积小于氢氧化钙，所以会收缩（通常叫做碳化收缩）。这种情况可使表面产生显著的发丝裂纹。在冬季月份，为了保持混凝土的温度，使用不正确排烟的燃烧加热器时，新浇筑的混凝土表面，发丝裂纹会特别严重。

除表面碳化外，已遭受上述各种化学侵蚀的混凝土（ACI 201.2R），在保护和修补方面，没有什么办法。

### 1.3.4 风化

能使混凝土开裂的风化过程是：

（1）冻融：