
混凝土结构钢筋腐蚀损坏的 评估与修复

中国建筑科学研究院建筑科技资料交流部

建筑科技资料

混凝土结构钢筋腐蚀损坏的 评估与修复

中国建筑科学研究院建筑科技资料交流部

译 序

随着建筑物使用时间的增长,对建筑物的安全需要进行检查和鉴定,对损坏的部分需要进行维修和加固。为了满足这一实际需要我国有关部门已下达编制相应标准的任务,例如正在编制的《工业建筑可靠性鉴定标准》和《民用建筑可靠性鉴定标准》。1990年译者受“全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会”负责同志的托付,收集国外有关建筑物检查、鉴定、维修及加固方面的资料。在收集资料中发现,一向认为耐久性很好的钢筋混凝土结构也出现了一些问题。由于钢筋锈蚀引起混凝土开裂、剥落甚至发生结构破坏。最近二、三十年国外在这方面比较重视。由于问题的重要性,国际材料与结构试验协会(RILEM)早在1960年就成立了第一个关于钢筋锈蚀的RILEM技术委员会12-CRC,于1974年提出了第一份报告。1981年又成立了新的有关钢筋锈蚀的RILEM技术委员会60 CSC,于1988年再次提出了一份报告(一本101页的书,书名为Corrosion of Steel in Concrete)

英国建筑工业研究与情报协会(CIRIA)亦很重视这方面工作,组织了这方面专家编写一本书。1987年出版了“Corrosion Damaged Concrete—assessment and repair, Peter Pullar-Strecker”一书。该书系统地介绍了钢筋混凝土结构由于钢筋腐蚀产生结构损坏的现象、破坏的机理、

损坏的检查、评估以及维修、加固的方法。该书对从事结构设计、施工、房屋管理与维修工作的实际工程师有参考价值。本书就是按照该书译出的。本书由季直仓等人翻译。由于原书图、表无编号，译本中将图、表编了号。删去了个别不清楚的照片，改编了部分图说明。希望本书对工程技术人员有所裨益。

季直仓

1991.1.20

原 序

钢筋混凝土是用途最广泛、最耐久的材料之一，设计者可以将其用于各种形式的建筑或结构。钢筋混凝土可以达到长期耐久，但是要求细心地设计，精心地制作和施工。

由于高标准的要求不是常能达到，所以少数钢筋混凝土结构产生了耐久性问题，需要进行早期修复工作。

本书可帮助读者处理一些由于钢筋锈蚀产生的最普遍的混凝土耐久性问题和损坏问题。

本书是为业主、业主的专业顾问及营造商编写的。目的是解释什么地方做得不对，损坏如何修复，使有需要时可以作出决定和找专家帮助解决。

本书不能使一般工程承包商成为维修技术专家，也不能为维修承包商提供详细的施工说明书。本书主要是提供了解问题的办法，使不致由于疏忽大意而发生错误，以及由于任务紧迫而使委托工作做得不合适。

编写本书时考虑到了使非专家人员能理解，但同时亦考虑到在这方面已有较多了解的人增加知识。已从这一课题的大量文献中仔细地挑选了参考书目，供需要作更深入了解的人参考。

本书没有地理上的倾向性，其建议适用于宽广的气候范围。本书主要是根据英国的部分材料、美国公路修补计划以及对钢筋混凝土特别有害的热含盐气候的阿拉伯海湾地区的经验编写的。海湾地区气候炎热，大气含盐对钢筋混凝土特别不利。

目 录

第一章 概述	(1)
1.1 损坏的处理	(1)
1.2 钢筋为什么会锈蚀	(1)
1.3 裂缝—钢筋锈蚀的迹象	(3)
1.4 混凝土质量的重要性	(6)
1.5 环境的影响	(6)
1.6 修复方案选择	(8)
1.6.1 事故荷载	(8)
1.6.2 施工缺陷	(9)
1.6.3 材料缺陷	(9)
1.6.4 保护系统的维护	(9)
1.6.5 维修策略	(10)
1.6.6 结构构件的更换	(10)
1.6.7 拆除重建	(11)
1.7 小结	(11)
第二章 结构情况的评估	(13)
2.1 检查和试验	(14)
2.2 裂缝检查	(17)
2.2.1 裂缝类型	(18)
2.2.1.1 纵向裂缝	(18)
2.2.1.2 混凝土硬化后形成的横向裂缝	(18)
2.2.1.3 剪切裂缝	(19)
2.2.1.4 塑性干缩裂缝	(19)

2.2.1.5	塑性下沉裂缝	(20)
2.2.1.6	地图状裂缝	(20)
2.2.1.7	表面裂缝	(20)
2.2.2	裂缝可见度	(20)
2.2.2.1	0.05 ~ 0.1mm宽的裂缝	(20)
2.2.2.2	宽度大于 0.1 mm的裂缝	(21)
2.2.3	裂缝宽度	(21)
2.2.4	裂缝的意义	(21)
2.3	混凝土表面的声音	(22)
2.4	碳化试验	(23)
2.5	氯化物含量的测定	(26)
2.6	保护层厚度的测定	(28)
2.7	裂缝活动的观测	(28)
2.8	现场强度测定	(30)
2.9	圆柱体试样的制取	(31)
2.10	超声波速度测量	(32)
2.11	吸水性和渗透性的测定	(33)
2.12	电位测量	(34)
2.13	电阻率测量	(36)
2.14	评估策略建议小结	(37)
第三章	检查和维修任务的委托	(39)
3.1	征求合适的意见	(39)
3.2	公共关系	(40)
3.3	技术要求	(41)
3.4	专利材料	(41)
第四章	维修方法	(43)
4.1	裂缝的修补	(43)
4.1.1	塑性收缩裂缝	(43)

4.1.2	塑性沉降裂缝	(43)
4.1.3	剪切裂缝和横向裂缝	(44)
4.1.4	活动裂缝	(45)
4.1.5	由锈蚀产生的纵向裂缝	(46)
4.2	混凝土保护层的清除	(47)
4.2.1	修补边缘的处理	(48)
4.2.2	清除深度	(49)
4.2.3	清除的范围	(51)
4.2.4	接缝处混凝土的清除	(51)
4.2.5	防止倒坍	(53)
4.3	钢筋清除	(53)
4.4	附加钢筋	(54)
4.5	钢筋涂料	(55)
4.6	更换混凝土	(57)
4.6.1	材料性能	(57)
4.6.2	重浇混凝土	(59)
4.6.2.1	旧混凝土表面的准备	(59)
4.6.2.2	粘结涂料	(60)
4.6.2.3	混凝土配合比设计	(61)
4.6.2.4	重浇混凝土的捣实	(62)
4.6.2.5	维修模板	(63)
4.6.3	用水泥砂浆修补	(64)
4.6.4	喷射混凝土	(65)
4.6.4.1	干法喷射	(65)
4.6.4.2	湿法喷射	(66)
4.6.5	预填骨料混凝土	(66)
4.6.6	养护	(67)
4.6.7	用树脂砂浆修补	(68)

第五章 表面处理	(71)
5.1 抵抗盐和水的涂料	(71)
5.2 抵抗碳化的涂料	(72)
5.3 涂料的应用	(73)
第六章 阴极防腐法	(76)
附录 英、美有关氯化物与钢筋腐蚀的研究和建议	
.....	(79)
参考文献	(98)

第一章 概 述

1.1 损坏的处理

如果钢筋混凝土结构出现裂缝、剥落、锈蚀或其他损坏现象时，首要的任务是调查严重的程度，是什么原因产生的，以及如何能恢复正常。

损坏的可能原因很多，包括基础位移、结构超载、偶然损坏、硫酸盐的侵蚀、碱性骨料的作用以及钢筋的锈蚀。后者是本书讨论的内容。任何损坏都可能需要立即采取措施，以保证结构的安全，但是损坏的原因通常总是慢慢形成的。因此，处理工作不一定是采取紧急措施，应了解产生问题的原因，估计可能的发展，从而拟定一个有效而经济的处理方案。

1.2 钢筋为什么会锈蚀

钢筋锈蚀时，通常劣化过程缓慢，但常是发展的。处理方法是否有效完全取决于是否了解锈蚀的原因和如何能控制发展。

钢筋混凝土中的钢筋或钢丝是为了承受拉力和控制收缩裂缝而设置的，从理论上讲，它是能防止锈蚀的，因为它被包围在碱性的混凝土之中。在实践中这也是对的，这种防锈作用在很长时间内有效。但是，当混凝土中渗透入空气中存在的酸性气体（大多数情况常是二氧化碳，但在工业污染地区亦有二氧化硫）时、或从海水或马路上融化冰雪的盐中渗透入氯化

物时，这种保护作用就可能永久地减弱。为了加速混凝土硬化，过去广泛使用氯化钙，也产生这种影响。在附录中简要地介绍了在混凝土中使用氯化钙的历史。

气体或盐类渗入混凝土的能力在很大程度上取决于混凝土的渗透性。低质量的混凝土很易渗透，而高质量的混凝土相对较难渗透。混凝土渗透性和钢筋保护层厚度的不同完全可以说明，暴露在同样环境条件下的不同结构，钢筋开始锈蚀前的时间长短有很大差别。

虽然，在混凝土中不膨胀的锈蚀也是可能的（见后面），但是当钢筋锈蚀时通常钢筋体积要增大，最后产生足以使混凝土开裂的力，裂缝随着钢筋继续锈蚀而逐渐扩大。最后，随着钢筋锈蚀，钢筋保护层完全剥落，钢筋不但没有防锈保护，而且将完全没有将拉力传递给混凝土的粘结力。

结构最后将发生破坏，虽然这个过程是缓慢的，除了有时在预应力混凝土中发展较快外，通常有几年的预兆。

后张预应力混凝土也是利用钢筋承受拉应力的，但是有其重要的不同之处。首先，在结构受荷载前钢筋已有拉力；其次是后张预应力钢筋可能只在混凝土两端锚固，在其间整个长度上钢筋可以自由滑动。这一不同点说明，锈蚀可能在混凝土表面没有任何可见迹象下发生，因而结构可能在没有预兆下突然破坏。

近几年对钢筋锈蚀的机理进行了深入细致的研究，也发表了很多论文，作了详细的论述。简要的情况如下。

在混凝土中的钢筋可以分为四种可能情况：

1. “惰态”，钢筋腐蚀受一层氧化膜保护，这层膜在无污染的碱性水泥浆环境中是稳定的。

2. “一般腐蚀”，钢筋表面均匀地锈蚀，通常是由于碳化结果，碱性已经降低，腐蚀速度很大程度上取决于含水率和温度。

3. “锈坑”，由于在钢筋与水泥浆之间有氯化物污染，钢筋表面很多点快速锈蚀（图1）。

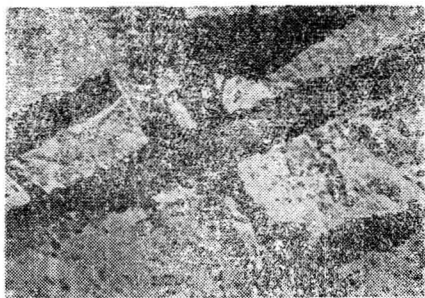


图1 在水分饱和和混凝土中产生的严重锈坑

4. “无保护（但阴极反应受约束）”，钢筋处于水分饱和而不足够氧气的混凝土中，由于缺乏阴极电流，通常腐蚀受到限制，因为整个系统中由于缺乏氧气不能形成反应的阴极（不腐蚀的）端。但是在单块混凝土中当小部分混凝土水分饱和时，腐蚀能很快进行，并且可在不形成常见的膨胀铁锈下损伤钢筋。

在每一种情况中，腐蚀是一个电解过程，它在混凝土中需要水分，以提供足够的导电电解液（在无盐的混凝土中当相对湿度小于50%时腐蚀实际上停止，在受氯化物污染的混凝土中这个相对湿度值稍低一些），在无腐蚀点（阴极点）还需要氧气，以维持反应进行，给腐蚀点（阳极点）提供电流。象许多其他化学反应过程一样，温度增高，腐蚀加速。

1.3 裂缝—钢筋锈蚀的迹象

除了锈斑外（当然由铁锈污染骨料产生的锈迹除外），钢筋严重锈蚀的早期可见迹象通常是在钢筋处的混凝土表面沿钢筋方向出现发丝裂缝。这种裂缝表明，膨胀的铁锈已足以使混凝土产生劈裂（图2）

由于混凝土抗拉弱且塑性差，所以只要很少的锈蚀就可产生裂缝。在这一时期若混凝土剥离，钢筋看起来几乎是不锈的。

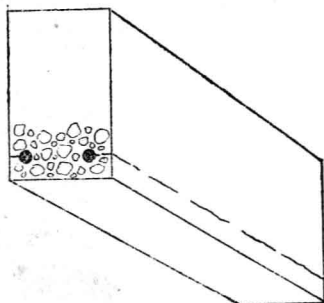


图2 钢筋锈蚀的早期迹象—发丝裂缝

但是事实上，沿钢筋纵向混凝土出现裂缝时常常表明锈蚀

很快将成为问题，过一段时间（取决于钢筋附近的混凝土条件）将产生进一步的破坏。图3a说明，梁上出现第一条裂缝后将在另一面上产生其他裂缝。图3b说明，松动的混凝土最后将脱落，钢筋将露出。图3c说明，板中的裂缝可以从一根钢筋通到另一根钢筋。在图中示出板下混凝土下凹。实际上可能看不出，但若用锤敲击可明显听出空洞声。

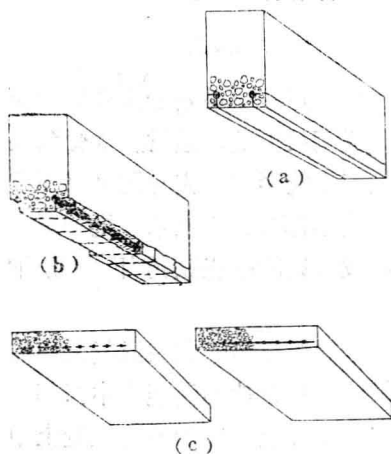


图 3

很难预料，如图 4 这样的板还能支持多久而不坍落。

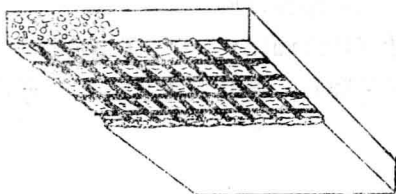


图 4

并非所有裂缝都是由于锈蚀产生，钢筋混凝土中发丝裂缝是否真的说明破坏已经发生并将发展呢，这主要看裂缝的原因和裂缝与钢筋的相对位置。

在 2.2.4 节中将讨论各种形式裂缝的意义。但是垂直于主筋方向的裂缝（横向裂缝）一般并不表明钢筋锈蚀。这种裂缝或者是由于混凝土硬化后收缩受到限制而产生（通常是温度收缩或干缩的结果），或者是由于结构上荷载产生的应力产生。

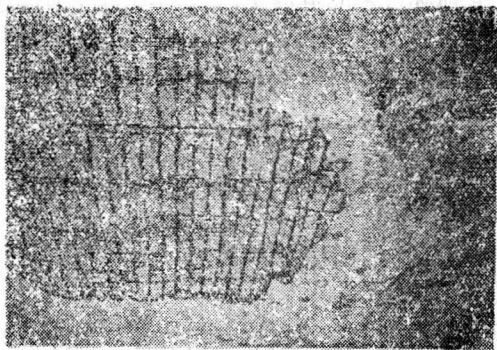


图 5

若这些裂缝保持很细（如宽度小于 0.3 mm ），它亦很少会造成钢筋锈蚀，除非钢筋与裂缝的方向平行并重合。

即使是很细的裂缝，若裂缝正好在钢筋上，并与钢筋平行，几乎都会产生锈蚀并发展。

图 5 是巴林 (Bahrain) 一有屋盖走道板的下面，混凝土大片分层剥落。毫无疑问，混凝土质量差，不能对钢筋起一点保护作用。

1.4 混凝土质量的重要性

假使钢筋的混凝土保护层厚度适当，知道保护钢筋的混凝土质量就可以帮助估计早期的裂缝是否将产生严重的损坏。用锤敲击混凝土时，有经验的人用眼睛观察，再用耳朵听就可以知道整个混凝土质量的许多情况。但是，不进行简单的化学试验，就不能知道混凝土是否受到污染和碳化程度。

1.5 环境的影响

当检查有损坏迹象的混凝土时，环境的侵蚀性是一个很重要的考虑因素。在有遮盖的室内环境里，质量好的混凝土，有些小裂缝或小缺陷（但不是氯化物污染）不一定会产生严重的问题。但是在某些恶劣的环境中，如受海水溅洒、时干时湿，特别是在干热气候区，只有无损坏的高质量混凝土可以满足长期使用的要求。

若混凝土长期处于水分饱和状态，一般可以防止腐蚀，因为缺乏氧气（见 1.2 节）。

与混凝土开裂和密实性的检查相结合，暴露条件和环境的侵蚀性是估计混凝土劣化速度的一个很有用的因素。

在路桥上使用防冻盐可以造成局部人为的侵蚀性环境，在美国这种损坏价值数十亿美元。在北欧也有类似情况，但是桥的

下部结构很少由于桥面上雨水冲洗下来的防冻盐产生损坏。

除局部侵蚀因素外，一般的环境侵蚀条件是较易识别的。环境条件包括海洋地区（在那里结构受海水冲洒或受潮汐作用时干时湿）及有化学污染物排出的工厂。

在上述侵蚀环境中当混凝土有损坏迹象时常意味着将产生严重的破坏。采取什么措施将是下面讨论的内容。

图 6 是在巴林 (Bahrain) 的一个阳台，虽然用低质量混凝土制作和受风吹来的盐尘污染，但是由于钢筋锈蚀产生的破坏只发生在受空调器受潮的区段（图上将空调器中的水引至地面的管子是后加的，显然是在已经明显损坏后加上的）。当锈蚀发展到大部分钢筋时，这个阳台将坠落到街上。

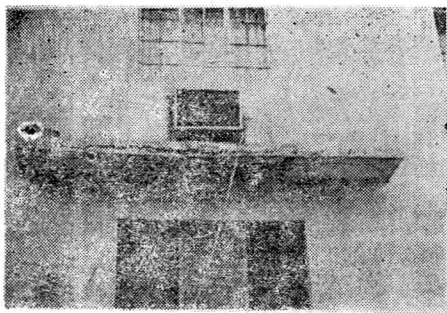


图 6

另一个环境侵蚀的例子是结构圈梁局部受到侵蚀。因为圈梁上面有排水沟，排水沟中填有从海岸吹来的带盐砂。露水和雨水将盐洗出，进入混凝土中，再蒸发而浓度增大，然后破坏了钢筋的保护层。这一情况发生在阿拉伯海湾地区。

1.6 修复方案选择

有损坏迹象的钢筋混凝土结构应由专家进行调查和试验。专家应能确定损坏的原因，提出今后结构维护的建议及修复方案。根据专家的建议，结构主管者将决定采取什么措施。方案选择是广泛的，例如：

1. 除进行定期检查外不做任何其他处理。允许劣化部分继续存在。

2. 采取措施，防止进一步劣化。

3. 将结构的损坏部分修复，以满足要求。

4. 拆除或重建整个结构或其部分。

象技术问题一样，在方案选择前有一些策略问题必须回答：业主将来的需要和意图是什么？他的财力和愿在结构上投资多少？他是否要求保持结构的使用性或至少保持结构安全？

若不知道修复到什么程度是可能的，则所考虑的方案是不切实际的。概括地说，方案选择取决于损坏的原因、混凝土的质量、受氯化物污染的程度，以及损坏的严重程度。

1.6.1 事故荷载

若钢筋混凝土结构是由于某种事故超载而引起损坏的（包括早期过渡收缩或温度应力），并且混凝土质量良好，没有氯化物，则当结构损坏修复后没有理由说结构不完全符合使用要求。

由事故荷载引起的裂缝，当荷载移去后，一般都很细微，常不需要作处理。宽度超过0.3mm的裂缝，若预计不会发展，可能需要用压力灌注树脂的方法将其封闭，以防水分、含酸气体或盐类进入。