

# 工程问题的矛盾性

——从一起钢筋锈蚀导致的工程事故说起

曲哲

2004-4-22

本文的重点在于说明工程问题的矛盾性，它是由其的复杂性与综合性决定的。为了避免空洞的议论，举一个实际的例子是很有必要的。

## 一、 建筑结构缺陷与事故综述

我国现行的《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[1]</sup>规定，结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求：

- 1 在正常施工和正常使用时能承受可能出现的各种作用
- 2 在正常使用时具有良好的工作性能
- 3 在正常维护下具有足够的耐久性能
- 4 在设计规定的偶然事件发生时及发生后仍能保持必需的整体稳定性

如果一幢建筑满足不了上述规定，那么就说明这一建筑结构存在缺陷。缺陷可大可小，小的缺陷仍不会影响结构安全，比如墙体不平整、防水层没做好之类；但大的缺陷很可能带来严重的后果，比如建筑物变形过大无法正常使用，甚至会导致建筑物的倒塌。仅从以上对缺陷的定义就可以看出工程问题有多模糊了，上述四条准则中诸如“可能”、“良好”等字眼在数学家看来也许太不可靠了。

由建筑物存在缺陷而造成的建筑物临近破坏、破坏和倒塌，统称建筑结构的质量事故。除了质量事故外，人为的使用不当也可能造成事故，比如将一般教学楼未作加固即改用作图书馆，则可能由于荷载的增加而导致结构破坏。

单就质量事故而言，其原因也多种多样。文[2]将造成工程质量事故的原因为五大类，如表 1 所示。

表 1：事故原因分析

事故原因类型	勘察缺陷	设计缺陷	材料缺陷	施工缺陷	使用缺陷
频率 (%)	14	27.8	12	37.6	8.6

其中前四类都属于工程质量事故，而最后一类“使用缺陷”占很小的比重。

事故的原因往往是错综复杂的，下文中的例子就是这样。那么对于一次由多种缺陷，比如又有施工缺陷又有设计缺陷，造成的事故，应该算到哪一类里面呢？文[2]的作者并没有解释。所以我对表 1 的数据尚有点儿怀疑。不过这个表毕竟为我们总结出一些事故原因的大类，并且大概的告诉了我们各种缺陷在工程事故中占的份量。必须强调的是，这一张看似清晰的表格实际上包含着极其复杂的工程问题。

建筑工程事故的一个罪魁是设计与施工缺陷的复合作用。下文中的例子正属于这种情况。这种复合作用在各种缺陷中占主要地位，按表 1 来看，其出现的频率远远高于其它缺陷。

## 二、 建筑结构中的钢筋锈蚀概述

下文要举的例子与钢筋锈蚀有关。钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的最关键问题<sup>[3]</sup>。

### 1. 钢筋锈蚀的后果<sup>[4]</sup>

(1) 混凝土保护层沿钢筋长度方向开裂，局部保护层剥落，锈蚀钢筋外露  
钢筋锈蚀产生的体积膨胀可达原体积的数倍，使钢筋位置处的混凝土受到内压力而产生

裂缝，并随之剥落。

#### (2) 钢筋与混凝土脱开

钢筋在混凝土内的有效面积减小，这时混凝土构件表面虽然无明显开裂迹象，但钢筋已与混凝土脱开。

(3) 钢筋截面减小，导致构件承载力不足，发生局部破坏或过大变形

(4) 只有大自然自己才知道还会产生其它什么出人意料的后果

### 2. 钢筋锈蚀的原因<sup>[3]</sup>

#### (1) 骨料中含有氯化盐

混凝土环境通常为高碱性，这是由水泥中少量  $Na_2O$ 、 $K_2O$  及其水化放出的  $Ca(OH)_2$  形成的。沉淀在钢材表面的  $Fe_3O_4$  形成一层粘附牢固的薄膜，抑制了进一步的锈蚀，即为钝化。但是如果碱性环境被破坏，这层保护膜也不再存在，这样失去保护的钢筋会非常迅速的腐蚀并导致破坏。许多因素都可能破坏混凝土的碱性环境， $Cl^-$  侵入和混凝土碳化是两个主要因素。

#### (2) 外部进入氯化盐

与(1)相同，只是氯离子的来源不同而已。

#### (3) 混凝土碳化

大气中的  $CO_2$  与混凝土中的碱性物质发生反应，使破坏混凝土的碱性环境，这就是混凝土的碳化。 $H_2S$ 、 $SO_2$  等物质也能产生同样的效果。

#### (4) 保护层不足

这会使混凝土更容易碳化，也使  $Cl^-$  更容易侵入到钢筋附近的混凝土中。

## 三、 一起钢筋锈蚀导致结构失效的事故案例

### 1. 事故概况

青岛市某 16 层混凝土结构大楼 1989 年 11 月竣工，1990 年 4 月交付使用。3 年后楼盖钢筋严重腐蚀，致使结构失效，16 层楼盖全部拆卸，其使用期远远低于设计要求。

该楼距海岸不足 100m；建筑面积 10700m<sup>2</sup>；结构形式为现浇剪力墙-密肋楼盖，肋间填充轻质加气混凝土块。

### 2. 钢筋锈蚀情况

这起事故非常典型的展示了钢筋锈蚀对结构的影响。

(1) 楼盖混凝土出现沿钢筋走向的裂缝，破坏了钢筋与其周围混凝土的粘结。早在 1990 年，在使用不足一年时间内就开始出现这种裂缝，至 1992 年，裂缝发展迅速，遍布于各层楼盖。一个特点是楼盖钢筋严重锈蚀而剪力墙却无大碍。

(2) 楼盖局部混凝土保护层剥落。在严重腐蚀的地方，楼板纵横向钢筋处出现空鼓，成片脱落。全楼出现大面积混凝土保护层脱落的房间数量达总量的 12%。

(3) 钢筋截面面积削减。最严重的楼层钢筋全部腐蚀，截面面积削减至 0；最轻微的，则难以区别是否是在混凝土浇注前形成的微锈。在多数情况下，钢筋腐蚀形成的锈皮厚度从 2.0mm 至 8.0mm 不等。因腐蚀而出现截面面积削减的钢筋主要是肋梁主筋、板底受力筋，另外有少部分楼梯平台梁内的主筋和箍筋。

### 3. 锈蚀原因的分析

这起事故的原因几乎涵盖了上文列举的可能引发钢筋锈蚀的所有原因，其中最主要的原因来自氯离子对混凝土碱性环境的破坏。

#### (1) 混凝土中氯离子含量过高；

我国对混凝土中  $Cl^-$  含量的限制是不得大于水泥重量的 0.3%，但本楼混凝土中  $Cl^-$  含量在有些地方高达 0.7%，那里的钢筋完全锈蚀了，另外一些钢筋严重锈蚀的地方， $Cl^-$  含量平均是 0.4~0.5%。可见  $Cl^-$  含量过高是导致这幢大楼钢筋严重锈蚀的致命原因，于是  $Cl^-$  的来源成为本例事故原因分析的重点。

$Cl^-$  的可能来源包括：海洋环境中  $Cl^-$  的侵入；肋间加气混凝土中含量丰富的  $Cl^-$ ；楼盖混凝土自身材料中  $Cl^-$  含量过高。

这幢大楼位于距海不足 100m，很容易想到海洋大气环境中  $Cl^-$  的侵入。但本楼钢筋锈蚀的特点是：包裹在室内的楼盖钢筋严重锈蚀而担当维护大任的剪力墙却无大碍。另外锈蚀如此之快，也不像是外界  $Cl^-$  侵入所为。故可肯定海洋大气环境中的  $Cl^-$  不是罪魁。

这幢大楼填充在楼盖肋梁间的加气混凝土块的  $Cl^-$  含量高达 0.997%，故怀疑加气混凝土块中的  $Cl^-$  大量侵入了楼板混凝土。但是按照普通混凝土中  $Cl^-$  的渗透速度，以 2 年时间计算，从加气块中渗入的  $Cl^-$  远小于从混凝土试样中检测到的  $Cl^-$  含量。这说明楼盖混凝土中  $Cl^-$  的主要来源不是填充用的加气块。

排除了以上两种可能，则大量的  $Cl^-$  很可能来自组成混凝土的砂和水，即海砂和海水。

#### (2) 混凝土碳化；

大楼拆卸时，也就是大楼落成 3 年后，其混凝土质量普遍很差，有的地方混凝土质地疏松，有的混凝土断面上有泥砂团块，有的断面上的粗骨料可以用手指剥下，可见混凝土施工质量之差。这些低劣的混凝土在短短 3 年内已经基本碳化，加剧了钢筋的锈蚀。

#### (3) 保护层过薄；

这幢大楼的最小保护层厚度几近于无，许多地方也只有 10mm 左右。虽然这已不是导致钢筋锈蚀的主要原因，但也足见施工质量之差。

#### (4) 设计失误；

我国有关部门建议在离海 500m 内的建筑物要采取必要的防腐措施。这幢大楼距海不足 100m，处于严重的盐害地区，但在设计上没有采取必要的防护措施，造成先天的缺陷。

## 四、教训与总结——工程问题的矛盾性

钢筋锈蚀导致的工程事故只是众多事故原因中一个分支，但仅从这样一个典型的事故就足以看出工程问题的复杂性与综合性。仅以上文的事例为例，虽然很明显是钢筋锈蚀导致结构失效，但钢筋锈蚀的原因则涉及了设计、选材、施工等各个方面。这例事故对于具体知识或工程实践方面的教训这里不再赘述，下面通过钢筋锈蚀这一具体问题谈谈工程问题的矛盾性。

工程问题的复杂性与综合性决定了它的矛盾性。一方面，工程设计人员不断的提出新的理念，一步步的完善工程设计计算的方法，使我们对工程问题的认识不断深化，工程问题逐渐清晰起来；但另一方面，工程设计人员又不断的在精确的设计结果上附加各种各样的经验系数，使工程问题又归于模糊。

钢筋锈蚀从理论上非常清晰，混凝土天然的碱性环境被酸性离子破坏从而引起了钢筋锈蚀，几个化学方程式就把钢筋锈蚀的全过程解释无遗。但在实际工程中，如此简单的钢筋锈蚀却屡屡造成工程事故，足见其防范之复杂。从上面对这个特定事故的分析也可以看出，钢筋锈蚀的原因是多方面的。首先，酸性离子多种多样；其次，离子来源也多种多样；

再次，施工质量千差万别。为了避免钢筋锈蚀导致工程事故，我国限制了混凝土中  $Cl^-$  的含量（0.3%），还规定了许多工程做法，比如不使用  $Cl^-$  含量高的材料，对近海建筑进行防腐设计，混凝土保护层要达到一定厚度等等。这些做法都非常模糊，有的甚至是概念化的。以混凝土中  $Cl^-$  含量的限制为例，各国的规定各不相同，从 0.1% 到 0.4% 不等，我国取 0.3%，其中含有很大部分的经验考虑。另一方面，一旦我们极其精确的规定了混凝土  $Cl^-$  含量的限值，这样反而不适用于工程问题了，因为工程中混凝土  $Cl^-$  的含量本身就不是一个定值。这些模糊措施仍不能完全杜绝钢筋锈蚀，这正是因为我们对于混凝土中的钢筋锈蚀这一现象仍未完全认识清楚。

正是实际发生着的种种事故深化着我们关于钢筋锈蚀的认识。数学、物理、化学的认识只是我们认识自然规律的起点，这些基础学科极尽严密与简约，但它们与自然规律之间并非空无一物，中间填充的是丰富到无以复加的自然万物。而工程师们就跋涉在从基础科学到自然规律之间广袤的自然万物之中，并且这样的跋涉看不见尽头（即使我们宁愿相信它有限头）。

工程师从基础科学中汲取清晰的概念，又在工程实践中运用模糊的方法，这正是工程问题的矛盾性。这样的矛盾正是推动工程技术不断进步的动力。工程实践为基础科学提出问题，基础科学为工程实践指明方向。

因此工程师的头脑要远比科学家的容错性更强，工程师的概念中极少有绝对，工程师更懂得何为辩证并且亲身实践着辩证的方法。

#### 四、 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准：建筑结构可靠度设计统一标准 GB 50068 2001
- [2] 肖寒、徐劲：建筑结构工程事故的分析总结. 中外建筑，2003年06期
- [3] 叶列平：混凝土结构（上册）. 清华大学出版社. 北京：2002
- [4] 罗福午等：建筑结构缺陷事故的分及防治. 清华大学出版社. 北京：1996
- [5] 李家康、董攀：混凝土结构中钢筋腐蚀的分析. 工业建筑，1998 年 01 期