

混凝土碳化对钢筋锈蚀的影响 及防护措施探讨*

曾 家 民

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 通过工程调研试验论证和理论探讨, 阐述大气中混凝土碳化与钢筋锈蚀机理, 分析影响混凝土碳化因素和提高混凝土护筋性措施, 提出钢筋混凝土等寿命配制法构想。

关键词 混凝土, 碳化, 钢筋, 锈蚀, 耐久寿命

分类号 TU 503

水泥混凝土用于建筑工程已有 160 多年的历史, 20 世纪 30 年代有较大应用, 60 年代以后大量发展。至今, 混凝土耐久性问题越来越多, 其中以碳化作用导致的耐久性问题最为普遍。强度与耐久性是混凝土的两大性能。由于强度是安全的首要保证, 易被重视, 而耐久性问题因种种原因常被忽视。从建筑物的“百年大计”来讲, 混凝土的耐久性应比强度更为重要。使用于大气中的钢筋混凝土结构面广量大, 碳化作用对建筑物使用寿命的影响不可低估。

1 混凝土护筋性机理

混凝土由于水泥水化, 产生了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等碱性水化产物, 以及水泥中少量的 K_2O , Na_2O , 所以 pH 值可高达 12.5~12.9。钢筋处于该环境中, 表面能形成约 200~1000 μm 厚的水化氧化物 $\text{r-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 组成的钝化膜层。这种膜层致密、稳定, 因而有效地保护了混凝土中的钢筋不被锈蚀。当混凝土中的碱性水化产物被溶析, 或因碳化降低了混凝土的碱度, 钢筋就容易受到侵蚀。前苏联学者 B. N. 巴布什金^[1]的研究证明, 混凝土的 $\text{pH} < 11.8$ 时, 钢筋表面的钝化膜层已不稳定并逐渐破坏; 日本学者浜田知斋等人也认为混凝土 $\text{pH} \geq 11.7$ 时, 钢筋不会锈蚀。一般认为混凝土中 $\text{pH} > 11.5$ 时^[2], 钢筋表面的钝化膜是稳定的, 它是混凝土中钢筋不被锈蚀的贴身护套。

2 混凝土碳化对钢筋锈蚀的影响

大气中 CO_2 与混凝土中碱性物质的作用过程, 是一个复杂的多相物理化学反应。它是在气相、液相和固相中进行的连续过程。混凝土的碳化由表及里。空气中的 CO_2 首先扩散到混凝土内部的毛细管孔隙中, 与水泥水化产生的氢氧化钙和水化硅酸钙等水化产物相互作用, 形成碳酸钙, 使混凝土的碱度逐渐降低。当碳化层达到钢筋后, 便会破坏钢筋的钝化膜层。其

* 本文 1993-09-15 收到

周围若存在发生电化学腐蚀所必须的水分和氧气或某些有害成分时,混凝土中的钢筋将产生锈蚀,体积膨胀,呈多孔疏松状态,极易透气和吸水,因此加剧了钢筋的锈蚀,进而破坏混凝土结构.这些有害成分主要是 Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} 和 S^{2-} . 其中, Cl^- 作用最强,能在钢筋表面引起孔蚀,因为使用含 Cl^- 的早强剂或海砂而使混凝土含有 Cl^- 的情形是常有的. 由于钝化膜层有一定的抑制作用,只要 Cl^- 不超过某限定值,钢筋就不会锈蚀. 因此,国标 GBJ204-83 第 7.3.3 条规定:钢筋混凝土中氯盐含量不得超过水泥重量的 1%. 当然,不含氯盐更好.

由于碳化过程中释放出水化产物中的结晶水,使混凝土产生了不可逆的收缩. 有人研究^[1]指出,碳化收缩若在约束条件下进行,往往引起混凝土表面微裂纹,因而又加剧碳化过程,导致钢筋锈蚀加快. 瑞典学者柯·图蒂^[3]把从混凝土碳化到钢筋锈蚀的全过程分为 3 个阶段:第一阶段为初始期,从保护层开始碳化到钢筋表面,钢筋已面临锈蚀;第二阶段从钢筋开始锈蚀,但仍在容许限度范围内,混凝土无破坏迹象;第三阶段为破坏期,钢筋已严重锈蚀,混凝土保护层已开裂破坏,丧失安全使用保证. 这样划分后,混凝土的护筋性也就有了时间的概念,即第一,二阶段经历的时间之和,必须大于设计所要求的使用年限. 对大气中正常使用的钢筋混凝土结构,设计的保护层厚度应大于要求使用年限的碳化深度.

3 混凝土碳化速度模型

空气中 CO_2 浓度很低,体积浓度一般仅 0.03%. 因此,混凝土碳化是非常缓慢的,其碳化过程可用图 1 表示. 设混凝土表面接触 CO_2 的体积分数为 φ_{CO_2} , 经 t 年后,碳化深度达 x cm, 混凝土表面到 x 深处的 CO_2 浓度按线性梯度分布,混凝土与 CO_2 接触面积为 S , 在时间 dt 渗入混凝土的 CO_2 量为 dQ . 按 Fick 第一扩散定律可得

$$dQ = DS \frac{\varphi_{\text{CO}_2}}{x} \quad (1)$$

式中: D 是 CO_2 在混凝土中的扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$); S 是混凝土与 CO_2 接触面积 (cm^2); φ_{CO_2} 是 CO_2 的体积分数 (%); x 是混凝土碳化深度 (cm); Q 是 CO_2 扩散进混凝土的量 (cm^3); t 是时间 (a). 扩散进混凝土的 CO_2 量 dQ , 在 $x+dx$ 的范围内与混凝土的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等物质反应,若单位体积混凝土 $S \cdot dx$ 吸收 CO_2 的能力为 a , 则

$$dQ = a \cdot S \cdot dx \quad (2)$$

由式 (1), (2) 可得

$$x = \sqrt{\frac{2D\varphi_{\text{CO}_2}}{a}} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

当混凝土护筋性能与环境条件确定后, $(2D\varphi_{\text{CO}_2}/a)^{\frac{1}{2}}$ 可简化成 A , 它表示影响混凝土碳化速度的综合因素. 因此, 式 (3) 又可表示为

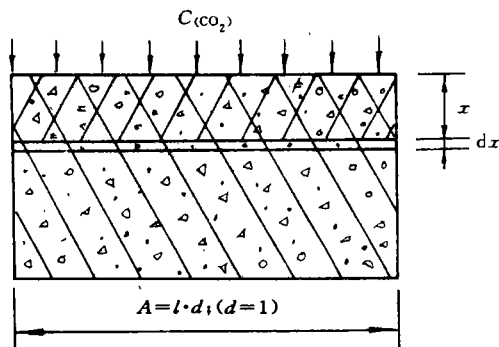


图1 混凝土碳化过程模型

$$x = A \cdot \sqrt{t}, \quad (4)$$

式(4)称为碳化方程式。从式(3)可知,要减少预定时间内混凝土的碳化深度,应降低渗透系数 D 和 CO_2 浓度 ρ_{CO_2} , 提高混凝土吸收 CO_2 的能力 a 。

4 影响碳化的主要因素及提高混凝土护筋性的技术措施

4.1 环境因素

环境对混凝土的碳化速度及钢筋锈蚀提供了外部条件。福建泉州汽车新站和石狮汽车站停车棚,均采用薄壳拱形变截面钢筋混凝土悬挑结构,设计美观新颖,轻巧实用,但它处于汽车发动的 CO_2 高浓度区,需加强碳化防护。某些工业区和车间的 CO_2 浓度较高,混凝土碳化速度也较快。图2(a)是50年代初建造的泉州某民居,处于烟囱周围的混凝土已严重开裂

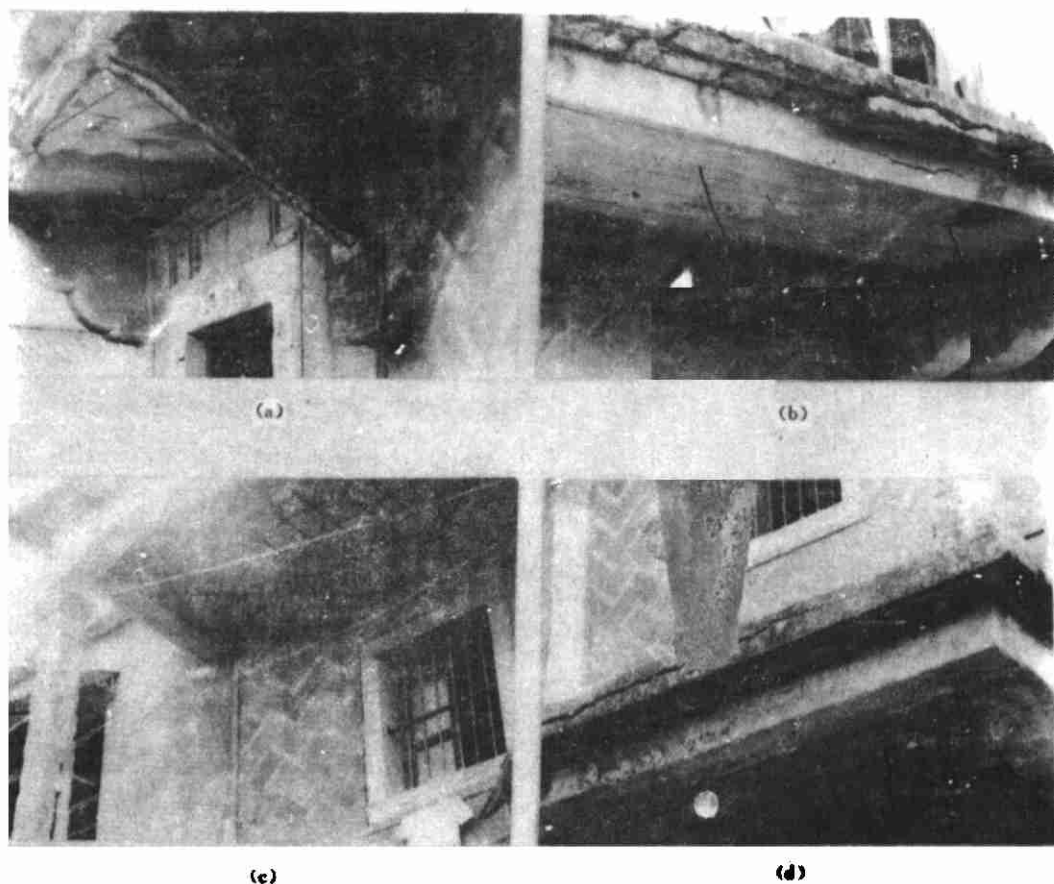


图2 环境对钢筋混凝土耐久性的影响

破坏,用酚酞酒精溶液测试,碳化深度已超过 4.3 cm,部分钢筋已全被腐蚀。离烟囱稍远的混凝土(图2a左侧),碳化深度仅 3.1 cm,尚未发现开裂破坏迹象,湿度低于 60%^[4]或毛细管充满水时,碳化非常缓慢。当环境湿度较大和受干湿循环交替作用时,可加速碳化和钢筋锈蚀。图2(b), (c), (d)是40年代初建造的某民居,处于干湿循环较频繁的阳台,部分混

凝土已开裂脱落，影响正常使用，测得碳化深度达 3.8 cm，而其它部位仅 2.5~3.0 cm，并很少出现开裂。我们考察多例 40 年代前后建造的混合结构房屋，均是烟囱附近和阳台楼檐的混凝土先破坏，规律性较强，其原因如前分析。

4.2 水泥品种及水泥用量

水泥品种、水泥熟料的化学成分、矿物组成、掺入水泥的混合材料品种和数量不同，其水化产物的碱度也不同。例如，普通硅酸盐水泥熟料含量比矿渣水泥高，其抗碳化能力也较强。对同一品种水泥，标号愈高，抗碳化性能愈好。为提高混凝土的护筋性，可适当增加水泥用量，它不仅可改善混凝土的和易性，提高密实度，还可增加混凝土的碱性储备。

4.3 水灰比 (w/c) 和保护层厚度

w/c 对混凝土的孔隙率及强度影响很大。w/c 增大，毛细孔增加，强度下降，抗渗性降低，给混凝土的抗碳化和护筋性带来极为不利的影响。我们用相同的水泥不同的 w/c 配制成两种水泥净浆试块，经 28 d 养护后烘干，测其表观密度、强度、密度及计算孔隙率，结果如表 1。

表 1 w/c 与强度 (σ)、表观密度 (ρ₀)、密度 (ρ) 及孔隙率 (P) 的关系

w/c	σ/MPa	ρ₀/t·m⁻³	ρ/t·m⁻³	P/(%)
0.25	61.9	1.65	2.3	28.3
0.40	36.3	1.38	2.3	40.0

从表 1 可清楚看出，w/c=0.25 的水泥石强度明显增大，孔隙率较小，它们的耐久性差异也就不言而喻了。

增加保护层厚度，特别是增加优质混凝土保护层厚度，对延缓碳化到达钢筋的时间有重要作用。日本 60 年代发表的研究结果^[3]，较早地提出了颇有参考价值的技术资料 (表 2)。

表 2 碳化深度达到混凝土保护层厚度 (mm) 的时间 (a)

混凝土 w/c	5	10	15	20	25	30
0.45	19	75	100	>100	>100	>100
0.55	3	12	27	49	76	>100
0.65	1.5	6	13	23	36	52

需要指出的是，混凝土保护层的完好性对钢筋的锈蚀有重要影响。例如，保护层存在裂缝和蜂窝孔洞等缺陷时，碳化将直接发生于缝隙孔洞深处，腐蚀性介质可直接通过捷径作用于钢筋表面，使钢筋很快锈蚀，大大缩短钢筋混凝土结构的使用寿命。据前苏联资料^[4]介绍，当裂缝宽度从 0.05~0.1 mm 增加到 0.2 mm 时，钢筋的平均锈蚀深度增加 20%~50%；当裂缝增加到 0.4~0.6 mm 时，钢筋的平均锈蚀深度增加 50%~300%。由裂缝和孔洞引起的腐蚀往往使钢筋局部锈蚀，导致应力集中，其危害更大。

4.4 外加防护层

采用表面涂层或复盖的方法，对减少或防止混凝土碳化，保护钢筋不受侵蚀，具有明显效果。例如，涂刷油漆、沥青，采用低分子聚乙烯或石蜡浸渍混凝土表面等措施，均有不同程度的防护作用。实践证明，在混凝土表面粉刷 1 层 1:2 水泥砂浆防水层，同样具有加厚保

护层和提高钢筋混凝土结构寿命的明显效果. 某些工程部位, 还可结合装修, 选用瓷砖或石材等贴面材料, 可收到装修与防护的双重效果.

1988年, 日本竹中工务店^[2]提出超耐久混凝土(超过500年)的主要措施: (1) 改善混凝土孔结构, 提高密实度; (2) 减少干缩; (3) 防止 CO_2 和 Cl^- , 消除混凝土中有害成分. 我们认为, 充分运用现代水泥混凝土技术成果, 加强施工管理, 生产超耐久混凝土是完全可能的, 并且耐久性的含义也将随之扩展.

5 结束语

目前建筑物基本采用单一的混凝土强度, 在防护处理上很少采取特殊措施, 以致于各部位混凝土因所处的环境条件不同, 耐久性差异较大, 而建筑物的安全使用期是由耐久性较差的部位决定的. 因此, 在本文节4分析的基础上, 建议采用混凝土等寿命配制法. 可对 CO_2 浓度较高或环境条件较差的混凝土, 在适当增加保护层厚度的同时, 采用较高强度等级的混凝土, 使整幢建筑各部位的混凝土具有较一致的耐久性. 提高混凝土强度等级, 水泥用量一般较大或 w/c 较低, 密实度较高, 抗碳化能力较强. 较高的混凝土强度对钢筋锈蚀膨胀所产生的内应力有较强的抑制作用, 可推迟保护层开裂时间. 为施工管理上方便, 强度等级不宜设计过多, 以1~3个为宜. 这样处理较经济合理, 简便易行. 但如何才能达到预期的“同寿命”, 仍有待于继续深入研究.

参 考 文 献

- 1 龚洛书. 混凝土的耐久性及其防护修补. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 61~62
- 2 吴中伟. 混凝土的耐久性问题. 混凝土, 1991, (4): 4~7
- 3 沈旦申. 碳化作用和钢筋锈蚀. 混凝土及加筋混凝土, 1985, (2): 40~41
- 4 莫斯克文 B M. 混凝土及钢筋混凝土的腐蚀及防护方法. 倪继森译. 北京: 中国化学工业出版社, 1988. 1~200
- 5 蔡光汀. 钢筋混凝土腐蚀机理和防护措施探讨. 混凝土, 1992, (1): 14~16

Effects of the Carbonization of Concrete on the Corrosion of Reinforcing Steel and Its Protective Measures

Zeng Jiamin

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract For preparing the steel reinforced concrete so that it has an equalized endurance life in different portions of a building, a plot about its mixed method is formed. The plot is formed during engineering investigation and is based on the following theoretical studies: the mechanism of the carbonization of concrete and the corrosion of reinforcing steel in the atmosphere; and the factors influencing the carbonization of concrete and the measures for improving the protective ability of concrete against corrosion of reinforcing steel.

Keywords concrete, carbonization, reinforcing steel, corrosion, endurance life