

民国江浙地区钢筋混凝土结构寿命预测计算方法研究

淳庆¹, 潘建伍²

(1. 东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 江苏南京 210096;

2. 南京航空航天大学土木系, 江苏南京 210016)

摘要: 民国钢筋混凝土结构使用年代较长, 一般已超过正常使用年限, 有不同程度的耐久性问题。为了科学规范地保护民国钢筋混凝土建筑, 通过对6个典型案例的现场检测分析, 对这类建筑的耐久性问题和寿命预测方法进行研究, 得出民国钢筋混凝土结构的耐久性问题规律, 并提出了针对民国钢筋混凝土建筑的碳化寿命计算公式, 建议民国钢筋混凝土建筑的使用寿命取锈胀开裂寿命, 最后结合案例对民国钢筋混凝土建筑的剩余寿命进行分析。结果表明, 民国钢筋混凝土建筑的剩余寿命基本在10年以内。因此, 迫切需要对这类建筑进行加固修缮。

关键词: 民国; 钢筋混凝土结构; 碳化寿命; 锈胀开裂寿命; 使用寿命

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A

0 引言

民国钢筋混凝土结构使用至今一般已有七、八十年的时间, 已超出钢筋混凝土结构的正常使用年限, 均有不同程度的耐久性问题, 而这类建筑大多属于文物建筑或保护性历史建筑, 承载了一些重要的历史信息和文化价值, 迫切需要得到较好的保护。民国时期钢筋混凝土建筑所用的主要材料和现代建筑相比有较为明显的区别, 钢筋一般采用方钢(又

称竹节钢), 形式不同于现代的螺纹钢和圆钢, 如图1所示。混凝土的强度一般较低, 基本均低于现行混凝土结构设计规范要求的最小值。此外, 民国钢筋混凝土建筑的诸多结构特征也明显区别于现代建筑, 如受弯构件的高跨比、受压构件的高厚比、梁柱节点的构造、梁柱板钢筋的布置方式、钢筋的保护层厚度等。为了科学、规范地保护这类建筑, 需要对其剩余寿命进行分析, 再根据其剩余寿命采取相应的保护方法。



图1 民国钢筋混凝土构件中的方钢

Fig. 1 Rectangular reinforcements in concrete members built during the period of the republic of China

结构的寿命预测方法主要可以分为四类: 1) 碳化寿命准则; 2) 锈胀开裂寿命准则; 3) 裂缝宽度与

钢筋锈蚀量控制准则; 4) 承载力寿命准则。钢筋混凝土结构的碳化寿命基本上是以混凝土碳化深度达

收稿日期: 2012-08-31; 修回日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51138002), 江苏省建设厅科技项目资助(JS2011JH02), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2242013 R30001)

作者简介: 淳庆(1979—), 男, 2007年1月毕业于东南大学土木工程学院防灾减灾与防护工程专业, 获工学博士学位。现为东南大学建筑学院, 副教授, 博士, 国家一级注册结构工程师, 南京市四牌楼2号, 210096, E-mail: cqj1979@163.com

到钢筋表面的时间作为结构寿命终结的标志。碳化寿命预测模型主要可分为理论模型、经验模型和基于理论与试验的实用模型。在理论模型方面,国外的一些学者基于扩散动力学、水泥物理化学等理论提出了多种混凝土碳度的理论模型,其中阿列克谢耶夫模型^[1]和 Papadakis 模型^[2]得到了广泛的认可。在经验模型方面,朱安民^[3]和日本建筑学会^[4]等分别给出了以混凝土水灰比为主要参数的经验模型, Lesage - de - Contenay C^[5]和 邸小坛^[6]等分别给出了以混凝土抗压强度为主要参数的碳化模型。在实用模型方面,张誉^[7]、牛荻涛^[8]等分别给出了考虑多因素的碳化寿命预测模型。锈胀开裂寿命是以混凝土表面出现顺筋锈胀裂缝所需时间作为结构的寿命。锈胀开裂寿命模型主要可以分为理论模型和经验模型两大类。在理论模型方面,国内外的学者提出多种理论模型,如 Bazant 模型^[9]、刘西拉模型^[10]、肖从真模型^[11]等。在经验模型方面, Andres A^[12]通过电化学快速锈蚀试验,得到了混凝土保护层锈胀开裂时的钢筋锈蚀深度计算公式。牛荻



图2 混凝土构件碳化深度过大

Fig. 2 Large carbonation depth in concrete member

以笔者参与的江浙地区六个民国钢筋混凝土建筑的典型加固修缮工程为例,对这六个民国钢筋混凝土结构现场碳化深度检测结果进行分析:

1) 绍兴大禹陵禹庙大殿。系全国重点文物保护单位,建于1933年,由曾任浙江省长的张载阳领导的重建禹王庙委员会负责修建。1956年9月至1957年12月,绍兴县政府对大殿进行了修复,1964年10月,再次对禹庙大殿屋顶进行了局部维修。根据检测结果,其混凝土柱平均碳化深度33mm,平均保护层厚度40mm;混凝土梁平均碳化深度40mm,平均保护层厚度41mm;混凝土板平均碳化深度45mm,平均保护层厚度30mm。

2) 南京中山东路1号历史建筑。系江苏省文物保护单位,建于1935年,由上海缪凯伯工程公司主持设计,新亨营造厂承建。1937年,汪伪政府在

涛^[13]、张伟平^[14]等也通过试验研究分别给出了相应的模型。

综上所述,目前国内外学者关于钢筋混凝土结构寿命预测的研究基本针对现代钢筋混凝土结构而言,由于民国时期的钢筋混凝土结构无论从材料性能还是结构构造上均有别于现代钢筋混凝土结构,因此,照搬现在的寿命预测方法是不够准确的。本工作结合笔者加固修缮的多个民国钢筋混凝土结构典型案例,对这类结构的寿命预测方法进行阐述。

1 材料性能及结构构造分析

民国混凝土结构使用至今,早已超出其正常使用年限,混凝土表面由于空气和水汽的不断深入,导致碳化深度的不断加大,当混凝土构件的碳化深度达到或超过保护层厚度时,钢筋由于失去混凝土碱性环境的防护,有可能开始加速锈蚀,当发生锈胀开裂时,构件基本丧失承载能力,结构随时可能失效。图2、3为民国钢筋混凝土建筑的典型耐久性问题。



图3 混凝土构件内部钢筋锈蚀

Fig. 3 Reinforcement corrosion in concrete member

其顶部增建了两层小楼。根据检测结果,其混凝土柱平均碳化深度62mm,平均保护层厚度34mm;混凝土梁平均碳化深度65mm,平均保护层厚度27mm;混凝土板平均碳化深度35mm,平均保护层厚度16mm。

3) 南京大华电影院。系江苏省文物保护单位,建于1934年,是由美籍华人司徒英铨集资建造,著名建筑大师杨廷宝主持设计。根据检测结果,其混凝土柱平均碳化深度63mm,平均保护层厚度33mm;混凝土梁平均碳化深度40mm,平均保护层厚度34mm;混凝土板平均碳化深度30mm,平均保护层厚度15mm。

4) 常州大成一厂老厂房。系常州市文物保护单位,建于1935年,由爱国实业家刘国钧投资建造。根据检测结果,其混凝土柱平均碳化深度45mm,平

均保护层厚度 35mm; 混凝土梁平均碳化深度 40mm, 平均保护层厚度 34mm; 混凝土板平均碳化深度 40mm, 平均保护层厚度 20mm。

5) 南京博物院老大殿。系全国重点文物保护单位, 建于 1937 年, 由民国建筑师徐敬直设计, 江裕记营造厂承建。根据检测结果, 其混凝土柱平均碳化深度 43mm, 平均保护层厚度 34mm; 混凝土梁平均碳化深度 49mm, 平均保护层厚度为 35mm; 混凝土板平均碳化深度 35mm, 平均保护层厚度 20mm。

6) 江苏省会议中心黄埔厅(原国民党“励志社”)。系江苏省文物保护单位, 建于 1931 年, 由建筑师范文照、赵深担纲设计, 陆根记营造厂承建。根据检测结果, 其混凝土柱平均碳化深度 45mm, 平均保护层厚度 35mm; 混凝土梁平均碳化深度 54mm,

平均保护层厚度为 33mm; 混凝土板平均碳化深度 42mm, 平均保护层厚度 18mm。

检测结果表明: 对于民国钢筋混凝土结构而言, 梁、柱构件的碳化深度一般已接近甚至超过保护层厚度, 板构件的碳化深度一般均已超过保护层厚度。一般而言, 对于这类结构, 钢筋发生锈蚀可能的概率依次为: 混凝土板 > 混凝土梁 > 混凝土柱。

此外, 民国混凝土结构由于建造当初的施工工艺水平而导致一开始混凝土强度就偏低, 再加上后期的性能退化, 容易导致混凝土强度的进一步降低。对这六个民国钢筋混凝土结构混凝土强度取芯分析试验的结果见表 1。从表 1 可以看出, 民国钢筋混凝土结构混凝土强度大多小于现行混凝土结构设计规范中规定的最低值 C20 的要求。

表 1 混凝土抗压强度检测结果

Table 1 Results of concrete compression strength

(MPa)

典型案例	绍兴大禹陵 禹庙大殿	南京中山 东路 1 号	南京大华 电影院	常州大成一 厂老厂房	南京博物院 老大殿	江苏省会议 中心黄埔厅
柱抗压强度平均值	15.7	12.4	15.6	17.0	18.0	14.7
梁抗压强度平均值	15.4	11.7	17.8	22.9	23.2	17.6

2 碳化寿命计算分析

考虑到民国钢筋混凝土结构虽然与现代钢筋混凝土结构在钢筋用材、混凝土组成配比、保护层厚度、钢筋布置方式等方面有一定差别, 但总体而言, 两者在这些方面的做法还是比较相似的。因此, 可假设民国钢筋混凝土结构与现代钢筋混凝土结构在老化机理方面相似。由于目前尚缺乏对民国钢筋混凝土结构的水灰比、单位体积水泥用量等数据的检测方法, 故建议在分析民国钢筋混凝土结构碳化寿命时, 采用以抗压强度为主要参数的碳化寿命计算模型。这里参考相关文献^[15~16], 引入考虑材料性能和构造影响的修正系数 α , 碳化寿命计算公式如下:

$$t_1 = (c/k)^2 \quad (1)$$

$$k = 3\alpha k_j k_{co_2} k_p k_s T^{1/4} (1 - RH) \times$$

$$RH^{1.5} \left(\frac{58}{f_{cuk}} - 0.76 \right) = \frac{x_c}{\sqrt{t_0}} \quad (2)$$

式中, t_1 为碳化寿命(a); c 为混凝土保护层厚度; k 为碳化系数; k_j 为位置影响系数, 角部取 1.4, 非角部取 1.0; k_{co_2} 为 CO_2 浓度影响系数, 人群密集(如教学楼、影剧院)时取 3.2~2.7, 人群较密集(如医院、商店)时取 2.7~2.1, 人群密集程度一般(如住宅、

办公楼)时取 2.1~1.6, 人群稀少(如车库、地下停车场)时取 1.6~1.1; k_p 为浇筑面修正系数, 对浇筑面取 1.3, 非浇筑面取 1.0; k_s 为工作应力影响系数, 受压时取 1, 受拉时取 1.2; RH 为环境湿度(%); T 为环境温度($^{\circ}C$); f_{cuk} 为混凝土强度标准值(MPa); x_c 为实测碳化深度(mm); t_0 为结构建成至检测时的时间(a)。

结合这六个典型案例进行分析, 通过回归得出 $\alpha = 0.86$, 因此, 建议民国钢筋混凝土结构的碳化寿命计算公式为:

$$t_1 = \left(\frac{c}{3 \times 0.86 \times k_j k_{co_2} k_p k_s T^{1/4} (1 - RH) \times RH^{1.5} \left(\frac{58}{f_{cuk}} - 0.76 \right)} \right)^2 \quad (3)$$

3 剩余寿命计算分析

民国钢筋混凝土建筑多为文物建筑或保护性历史建筑, 安全性要求高, 因此, 对其使用寿命建议取锈胀开裂寿命, 由于未对案例中的钢筋锈蚀程度进行检测, 故参考相关文献^[16], 锈胀开裂寿命计算公式如下:

$$t_{cr} = t_1 + \frac{\delta_{cr}}{\lambda} \quad (4)$$

$$\lambda = 5.92k_d (0.75 + 0.0125T) (RH - 0.50)^{2/3}$$

$$c^{-0.675} f_{cu}^{-1.8} \quad (5)$$

$$\delta_{cr} = 0.012c/d + 0.00084f_{cu} + 0.018 \quad (6)$$

式中, δ_{cr} 为临界钢筋锈蚀深度 (mm); λ 为钢筋锈蚀速率 (mm/a); k_{cl} 为钢筋位置修正系数, 角部钢筋取 1.6, 非角部钢筋取 1.0; c 为混凝土保护层厚度; f_{cu} 为混凝土强度标准值 (MPa); T 为环境温度 ($^{\circ}\text{C}$); RH 为环境湿度 (%); t_1 为碳化寿命 (a); t_{cr} 为锈涨

开裂寿命 (a)。

依据碳化寿命计算公式和锈涨开裂寿命计算公式, 得出这几个民国钢筋混凝土建筑的剩余寿命见表 2。从表 2 可以看出, 这些民国钢筋混凝土建筑目前均已超过其碳化寿命, 和实际检测情况基本吻合, 而其剩余寿命基本在 10 年以内。

表 2 民国钢筋混凝土建筑剩余寿命计算

Table 2 Calculation results of remained service lives of these buildings

(a)

典型案例	绍兴大禹陵禹庙大殿	南京中山东路 1 号	南京大华电影院	常州大成一厂老厂房	南京博物院老大殿	江苏省会议中心黄埔厅
碳化寿命	52	38	36	40	38	40
锈涨开裂寿命	90	59	68	80	82	70
已使用寿命	80	78	79	78	76	82
剩余寿命	10	无	无	2	6	无

注: (1) 表中案例的剩余寿命计算是在 2013 年完成, 部分案例计算结果显示已没有剩余寿命, 这并不表示这些建筑马上就存在倒塌可能, 只是表示这些建筑存在较严重的结构安全隐患; (2) 表中案例建筑在 2013 年前均已完成了结构加固修缮, 确保了这些建筑后续使用的结构安全。

4 结 论

民国钢筋混凝土结构大多为文物建筑或保护性历史建筑, 承载着一些历史文化信息, 迫切需要科学化、规范化地进行保护。本工作结合笔者加固修缮的绍兴大禹陵禹庙大殿、南京中山东路 1 号历史建筑、南京大华电影院、常州大成一厂老厂房、南京博物院老大殿以及江苏省会议中心黄埔厅六个民国钢筋混凝土结构的实际检测和调研结果, 对这类建筑的寿命预测方法进行了研究, 得出了一些有价值的结论:

1) 民国钢筋混凝土结构的耐久性问题主要有混凝土碳化深度较大、钢筋锈蚀、混凝土强度较低等。通常这类建筑的梁、柱构件的碳化深度一般已接近甚至超过保护层厚度, 板构件的碳化深度一般均已超过保护层厚度。钢筋发生锈蚀可能的概率依次为: 混凝土板 > 混凝土梁 > 混凝土柱。

2) 结合典型民国钢筋混凝土结构案例, 对传统的碳化寿命计算方法进行修正, 提出了适用于民国钢筋混凝土结构的碳化寿命计算方法。

3) 建议民国钢筋混凝土建筑的使用寿命取锈涨开裂寿命, 通过计算分析, 民国钢筋混凝土建筑的剩余寿命基本在 10 年以内, 因此, 迫切需要对这类建筑进行加固修缮。

参考文献:

- [1] 阿列克谢耶夫. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
Aleksyev. Reinforcement corrosion and protection in reinforcement concrete structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983.
- [2] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Mat J, 1991, 88: 363 - 373.
- [3] 朱安民. 混凝土碳化与钢筋混凝土耐久性[J]. 混凝土, 1992, (6): 18 - 22.
ZHU An - min. Concrete carbonation and RC concrete durability [J]. Concrete, 1992, (6): 18 - 22.
- [4] 张富春. 日本建筑学会建筑设计标准委员会. 建筑物的损伤和耐久性对策[S]. 北京: 中国冶金建设管理协会, 1984.
ZHANG Fu - chun. Architecture Institute of Japan. Damage and durability countermeasure for the buildings[S]. Beijing: The Chinese Association of Metallurgical Construction Management, 1984.
- [5] Lesage - de - Contenay C. Deterioration and repair [M] // Bahrain Proceedings, Vol. 6, 1995: 467 - 483.
- [6] 邸小坛, 周 燕. 混凝土碳化规律研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1994.
DI Xiao - tan, ZHOU Yan. Concrete carbonation [R]. Beijing: China Academy of Building Research, 1994.
- [7] 张 誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16 - 19.
ZHANG Yu, JIANG Li - xue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. Ind Constr, 1998, 28(1): 16 - 19.
- [8] 牛获涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版

- 社, 2003.
- NIU Di - tao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] Bazant. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - Theory [J]. J Struct Div, 1979, (6): 1137 - 1153.
- [10] 刘西拉, 苗澎柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算 [J]. 土木工程学报, 1990, 23(4): 69 - 78
- LIU Xi - la, MIAO Shu - ke. Steel corrosion and the durability calculation of reinforced concrete structures [J]. China Civil Eng J, 1990, 23(4): 69 - 78.
- [11] 肖从真. 混凝土中钢筋腐蚀的机理研究及数论模拟方法 [D]. 北京: 清华大学, 1995.
- XIAO Cong - zheng. Mechanism study and number - theoretic method for reinforcement corrosion in the RC Structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [12] Andres A, Torres - Acosta, Alberto A Sagues. Concrete cracking by localized steel corrosion - geometric effects [J]. ACI Mat J. 2004, 101(6): 501 - 507.
- [13] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型 [J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 8 - 10.
- NIU Di - tao, WANG Qing - lin, WANG Lin - ke. Predeterminate model of steel corrosion extent in reinforced concrete structures before producing corrosion crack [J]. Ind Constr, 1996, 26(4): 8 - 10.
- [14] 张伟平. 混凝土结构的钢筋锈蚀损伤预测及其耐久性评估 [D]. 上海: 同济大学, 1999.
- ZHANG Wei - ping. Damage prediction and durability estimation for corrosion of reinforcement in concrete structures [D]. Shanghai: Tongji University, 1999.
- [15] 徐善华, 牛荻涛, 陈新孝. 钢筋混凝土结构锈胀寿命分析 [J]. 建筑科学. 2002, 18(5): 32 - 35.
- XU Shan - hua, NIU Di - tao, CHEN Xin - xiao. The life - span analysis of reinforced concrete corrosion cracking [J]. Build Sci, 2002, 18(5): 32 - 35.
- [16] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性评定标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for durability assessment of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

Research on the methods for calculation and prediction of the service life of reinforced concrete buildings built during the period of the Republic of China in Jiangsu and Zhejiang provinces

CHUN Qing¹, PAN Jian - wu²

(1. Key Lab of Urban & Architectural Heritage Conservation, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Civil Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In China, reinforced concrete buildings built during the period of the Republic of China have been used for a long time and have various degrees of durability problems. In order to establish scientific standards for preserving such buildings, six typical cases were investigated on site in order to predict the durability and service life of this kind of building. Criteria for calculating the durability and carbonation life of this kind of building were proposed. It is suggested that the service life can be calculated based on the degree of steel bar corrosion and concrete cracking. The projected service lives of these buildings were calculated and analyzed, and the results shows that the remaining service lives of this kind of building are less than 10 years. Therefore this kind of building is in urgent need of strengthening and repair.

Key words: Republic of China Period on the Chinese Mainland; Reinforced concrete buildings; Carbonation life; Steel bar corrosion and concrete cracking life; Service life

(责任编辑 谢 燕)