

混凝土碳化研究现状分析

张海燕 杜应吉 姜宗科

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要 综述了混凝土碳化机理、影响因素和碳化深度预测模型 3 个方面的研究成果,指出今后混凝土碳化研究的重点为:结合理论模型和经验模型的优点,建立既有充分理论依据,又兼具实用性和适用性的预测模型;在混凝土碳化影响因素方面,需要加强温度、湿度条件对混凝土碳化深度影响的研究。

关键词 混凝土 碳化 预测模型 综述

中图分类号:TU528

文献标识码:A

文章编号:1006-764X(2006)S1-0176-03

混凝土是一种强碱性材料($\text{pH} > 12.5$),钢筋在这种环境下产生钝化膜而不会锈蚀,而一旦暴露在大气的 CO_2 中,大气中的 CO_2 浸入混凝土并中和混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使它碱性下降,从而使钢筋钝化膜破坏并导致锈蚀。因此,一般环境下混凝土碳化是钢筋锈蚀的重要前提^[1]。钢筋不断地锈蚀促使混凝土保护层开裂,产生沿筋裂缝和剥落,进而导致黏结力减小,钢筋受力面积减小,结构耐久性和承载力降低等一系列不良后果^[2]。因此,进行混凝土碳化研究,无论是对既有建筑物的耐久性评定、维修加固还是对建筑物的耐久性设计均有重要的现实意义。

国内外学者对混凝土的碳化机理、影响因素和碳化深度预测模型 3 个方面进行了深入研究,取得了很多科研成果。对混凝土碳化机理和碳化深度测量的研究已成熟^[3],但在混凝土碳化影响因素和碳化深度预测模型方面还存在一些缺陷,成为当今土木建筑学者的研究重点。

1 混凝土碳化影响因素的研究

混凝土碳化是一个多相物理化学过程,影响混凝土碳化的因素有:材料本身的因素,如水灰比、水泥品种与用量、骨料品种与粒径、外加剂、装修覆盖层等;施工的因素,如混凝土搅拌与振捣、养护方法与时间等;环境条件的因素,如 CO_2 浓度、相对湿度、温度等^[4]。

混凝土碳化速度主要取决于以下 3 个方面^[5]:化学反应本身的速度; CO_2 向混凝土内扩散的速度;

混凝土孔隙中可碳化物质,主要是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的扩散速度。材料本身的因素和施工的因素是影响碳化的决定因素,因为它们决定了混凝土的孔结构和可碳化物质的含量。对这两种因素的研究成果表明,国内外学者的看法基本一致。但环境因素对混凝土碳化速度影响的研究还存在一些异议^[6]。

相对湿度是影响碳化速度的环境因素,但这方面的研究很少。Papadakis 等^[7]曾通过试验研究得到相对湿度对扩散系数的影响,并在验证理论碳化模型时做过试验研究;中国矿业大学的李果等^[8]研究过气候条件对混凝土碳化速度的影响,试验结果表明:若环境温度不变,随着环境相对湿度的增大,混凝土的碳化速度显著减小。环境相对湿度大于 80%,可使混凝土孔隙处于饱和状态,反应附加水分无法向外扩散, CO_2 向混凝土内部扩散渗透的速度将降低甚至终止,从而使混凝土碳化速度大大降低;当在极干燥的环境中,如果相对湿度处于 0~45%时,混凝土处于干燥或含水率很低的状态,空气中的 CO_2 虽然扩散渗透速度很快,但无法溶于混凝土的孔隙水中,或溶解极少、极慢,碳化反应无法进行。试验证明,当混凝土周围介质的相对湿度为 50%~75%时,混凝土碳化速度最快^[9]。

根据文献[10]的资料,有学者认为对混凝土碳化的速度起决定作用的不是空气的相对湿度而是混凝土的湿润状态。干、湿混凝土试块的透气性可能相差 3 个数量级或更大些。 CO_2 在风干的和水饱和的混凝土中扩散的速度可相差 4 个数量级。费尔拜

奇^[10]对截面尺寸为 2.5 cm × 2.5 cm、5 cm × 5 cm 和 7.5 cm × 7.5 cm 的混凝土棱柱体进行了试验并得出重要结论。大气湿度为 100% 时,材料的碳化程度不高,截面最大的试块的碳化程度最低。截面尺寸为 7.5 cm × 7.5 cm 的棱柱体在 25% 的湿度和 60% 的湿度时一样,其碳化程度相当高,然而 2.5 cm × 2.5 cm 的试块几乎不会被碳化。尺寸较大的试块,甚至在干燥的大气中其水分也能保留很长时间,因而就具备了碳化的条件。小的试块干燥得快,碳化也早就停止。

从以上分析可以看出,混凝土的含水率对碳化速度有一定影响,但目前还没有这方面的研究成果。笔者在这方面做了一些工作,结果为:随着混凝土含水率的增大,碳化深度减小。怎样把相对湿度和混凝土的含水率对碳化速度的影响相结合,这是混凝土碳化研究的一个方向。

环境温度对混凝土碳化速度影响的试验研究成果很少。李果等^[8]研究过气候条件对混凝土碳化速度的影响,试验结果表明:若环境相对湿度不变,随着环境温度的升高,混凝土的碳化速度显著增大,比如,对应 70% 相对湿度,环境温度从 10℃ 提高到 50℃,混凝土的碳化速度提高了近 3 倍。文献^[10]中曾给出温度影响 CO₂ 扩散系数的理论表达式。和一般的化学反应一样,温度的升高有利于反应速度的提高,而且温度升高将导致 CO₂ 扩散速度、离子运动速度提高,这些都使混凝土的碳化速度提高,但是温度升高还将导致 CO₂ 溶解度的下降,因而使碳化速度下降。目前温度变化对混凝土碳化的影响各国学者看法尚不统一^[3]。

2 混凝土碳化深度预测模型的研究

国内外学者提出了许多碳化深度预测模型,大致可分为两类^[11]:一类是基于试验数据或实际结构的碳化深度实测值,采用数学统计或神经网络等方法拟合得到的经验模型,如 Nishi^[12]、朱安民^[13]等提出的以水灰比为主要参数的碳化模型,许丽萍等^[14]、龚洛书等^[15]、邱小坛等^[16]以水灰比和水泥用量为主要参数建立的碳化模型,Nagataki 等^[17]、Smolczyk^[18]、牛荻涛等^[19]建立过用混凝土抗压强度预测碳化深度的经验模型,袁群等^[20]提出的基于随机时间序列法的碳化深度 ARIMA(1,1,0) 预报模型,金伟良等^[21]基于函数型神经网络建立的混凝土碳化深度的预测模型,张喜德等^[22]、陈志红等^[23]建立的混凝土碳化深度的灰色预测模型,张仲先^[24]等建立的基于 BP 网络的混凝土碳化深度的预测模型;另一类为基于碳化反应过程的定量分析建立的理论

模型,如 Papadakis 模型^[7]、张誉等^[25]提出的混凝土碳化深度实用数学模型。这些碳化深度预测模型均可统一为如下的形式:

$$D = \alpha t^\beta \quad (1)$$

式中:D 为混凝土碳化深度,mm;t 为时间,a;α、β 分别为碳化系数和碳化指数。

以上模型的不同之处主要在于 α 和 β 的取值。造成这种差异的原因一是分析时采用的数据来源于不同环境条件下不同配合比的混凝土,二是建模时考虑的因素不同。

就目前的研究成果而言,经验模型虽然应用方便,但是均未考虑可碳化物质含量对碳化速度的影响,而且采用的数据是基于特定的环境和材料得到的,模型中系数的物理概念不是很明晰,因此模型的适用范围有限。理论模型建模过程概念清晰,各个参数都有明确的定义和量纲,但是模型中参数选取和计算有一定的困难,缺乏一定的实用性^[26]。怎样建立既有充分理论依据,又具有一定实用性的数学模型,成为以后混凝土碳化研究的重点。

3 结 语

综合各国学者在混凝土碳化研究方面取得的成果,笔者认为混凝土碳化研究存在的问题有:①混凝土碳化深度的预测模型分为理论模型和经验模型两大类,两类模型在建模和应用上各有优缺点。今后应结合两类模型的优点,建立既有充分理论依据,又兼具实用性和适用性的预测模型。②对混凝土碳化影响因素的研究现状来说,需要加强温度、湿度条件和混凝土含水率对碳化深度影响的研究。

参考文献:

- [1] 徐善华,牛荻涛,王庄霖.钢筋混凝土结构碳化耐久性分析[J].建筑技术开发,2002(8):10-15.
- [2] 混凝土研究协会.混凝土耐久性研究与工程应用手册[M].北京:中国科技文化出版社,2005:5-6.
- [3] 张誉,蒋利学.混凝土碳化和钢筋锈蚀研究动态[J].福州大学学报,1996,24(增刊):18-24.
- [4] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003:14-16.
- [5] 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.
- [6] 杜应吉,梁正平.韦水倒虹工程混凝土碳化深度预测研究[J].水利水电科技进展,2005,25(3):48-50.
- [7] PAPADAKIS V G, VAYENAS C G, FARDIS M N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation[J].ACI Material Journal,1991,88(4):363-373.
- [8] 李果,袁迎曙,耿欣.气候条件对混凝土碳化速度的影响[J].混凝土,2004(11):49-51.

- [9] 丁威 崔国惠. 大气条件下混凝土中钢筋锈蚀程度发展对保护层开裂和钢筋力学性能影响的试验研究: 重点工程混凝土耐久性研究与工程应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000: 36-48.
- [10] 费尔拜奇. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M]. 黄可信, 吴兴祖, 蒋仁敏, 等译. 北京: 建筑工业出版社, 1983: 19-120.
- [11] 夏宁, 于孝民, 任青文. 混凝土结构耐久性研究现状[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(8): 63-66.
- [12] NISHI T. Testing of concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1992(6): 485-489.
- [13] 朱安民. 混凝土碳化与钢筋混凝土耐久性[J]. 混凝土, 1992(6): 23-25.
- [14] 许丽萍, 黄士元. 预测混凝土中碳化深度的数学模型[J]. 上海建材学院学报, 1991(4): 10-15.
- [15] 龚洛书, 苏曼青. 混凝土多系数碳化方程及其应用[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1985(6): 12-18.
- [16] 邱小坛, 周燕. 旧建筑物的检测加固与维护[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 18-35.
- [17] NAGATAKIS. Effect of curing conditions on the carbonation of concrete with fly ash and the corrosion of reinforcement in long-term test[J]. ACI Material Journal, 1986, 18(1): 521-540.
- [18] SMOLCZYK H G. Predicting the service life of concrete[C]// Proceedings of 5th International Symposium on Chemistry of Cement. Tokyo, 1968: 343-368.
- [19] 牛荻涛, 石玉钗, 雷怡生. 混凝土碳化的概率模型及碳化可靠性分析[J]. 西北建筑科技大学学报, 1995(2): 252-256.
- [20] 袁群, 赵国藩. 混凝土碳化深度随机时间序列预报模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 344-347.
- [21] 金伟良, 张亮, 鄢飞. 函数型神经网络法在混凝土碳化分析中的应用[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(5): 519-525.
- [22] 张喜德, 韦树英, 彭修宁. 混凝土碳化深度的灰色预测[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2002(2): 44-47.
- [23] 陈志红, 尹红宇, 陈川亮. 混凝土碳化深度灰色关联分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2005(2): 38-42.
- [24] 张仲先, 张灵, 张耀庭. 基于 BP 网络的混凝土碳化深度预测与分析[J]. 华中理工大学学报, 2000(10): 97-99.
- [25] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度的实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28: 16-19.
- [26] 章国成, 杨利伟, 王天稳. 混凝土碳化深度预测模型的对比分析[J]. 建筑技术开发, 2005(3): 81-83.

(收稿日期 2006-04-11 编辑 熊水斌)

(上接第 155 页)

- [10] GOGU R C, DASSARGUES A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium[J]. Hydrogeology Journal, 2000, 8: 337-345.
- [11] BABIKER I S, MOHAMED M A A, HIYAMA T, et al. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan[J]. Science of the Total Environment, 2005, 345: 127-140.
- [12] EVANS B M, MAYERS W L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 45: 242-245.
- [13] SECUNDA S, COLLIN M L, MELLOUL A J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region[J]. Journal of Environmental Management, 1998, 54: 39-57.
- [14] VIAS J M, ANDREO B, PERLES M J, et al. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions[J]. Environmental Geology, 2005, 47: 586-595.
- [15] MELLOUL A J, COLLIN M. A proposed index for aquifer water quality assessment: the case of Israel's Sharon region[J]. Journal of Environmental Management, 1998, 54: 131-142.
- [16] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 33-38.
- [17] SOPHOCLEOUS. 地下水的污染脆弱性评价[J]. 何雪洲摘译.
- [18] CHATUPOTE W, PANAPITUKKUL N. Regional assessment of nutrient and pesticide leaching in the vegetable area of Rattaphum catchment, Thailand[J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2005, 5: 165-173.
- [19] TESORIERO A J, VOSS F D. Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: Implication for aquifer susceptibility and vulnerability[J]. Ground Water, 1997, 36(5): 1029-1039.
- [20] 姜桂华. 关中盆地地下水脆弱性研究[D]. 陕西: 长安大学, 2002.
- [21] 郭永海, 沈照理, 钟佐荣, 等. 河北平原地下水有机氯污染及其与防污性能的关系[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(1): 40-42.
- [22] 林学钰, 陈梦熊. 松嫩盆地地下水资源与可持续发展研究[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 1-157.
- [23] 陈守煜, 王国利. 含水层脆弱性的模糊优选迭代评价模型及应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(6): 811-815.
- [24] 贺新春, 邵东国, 陈南祥, 等. 几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 17-20.
- [25] 郑西来, 吴新利, 荆静. 西安市潜水污染的潜在性分析与评价[J]. 工程勘察, 1997(4): 22-25.
- [26] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法——DRASTIC 指标体系[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(2): 4-9.
- [27] 陈梦熊. 地下水资源图编图方法指南[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-86.

(收稿日期 2006-04-04 编辑 高建群)