

韦水倒虹工程混凝土碳化深度预测研究

杜应吉, 梁正平

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了比较基于抗压强度的混凝土碳化深度预测模型的适应性和准确性, 在分析预测模型基础上, 根据韦水倒虹工程现场环境的温度、湿度、CO₂ 浓度及现场检测的芯样强度资料对混凝土碳化深度进行了预测, 并与该工程实测碳化深度进行了比较. 结果表明: 牛荻涛等的预测模型对于强度等级较低的混凝土预测较准确, 邱小坛等的预测模型对于强度等级较高的混凝土预测较符合实际, 而 Smolczyk 预测模型的预测值明显比实测值大; 认为建立碳化深度与实际龄期混凝土抗压强度的关系模型比建立碳化深度与混凝土 28 d 龄期抗压强度的关系模型更有意义.

关键词: 混凝土; 碳化深度; 抗压强度; 预测模型; 韦水倒虹工程

中图分类号: TU503

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)03-0048-03

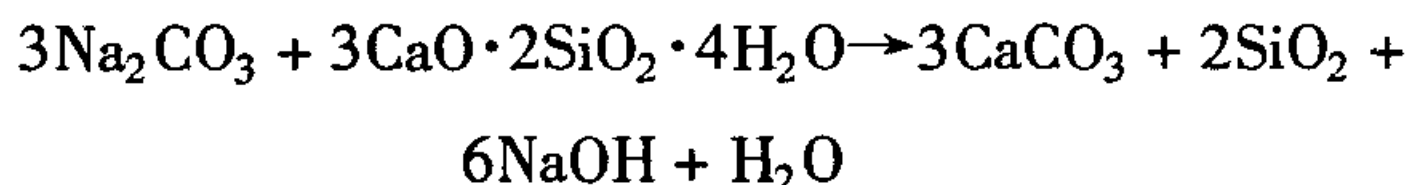
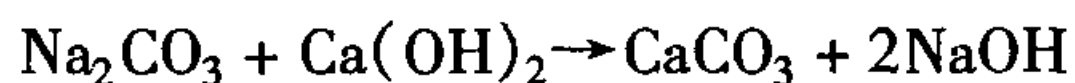
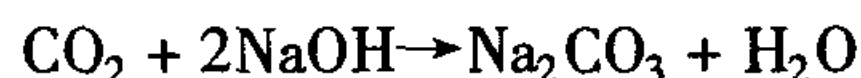
Study on prediction of concrete carbonation depth of Weishui inverted siphon project//DU Ying-ji, LIANG Zheng-ping (College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: For comparison of the adaptability and accuracy of the compressive strength-based forecasting models of concrete carbonation depth, the models were adopted to forecast the concrete carbonation depth for the Weishui project according to the field data of temperature, humidity, and density of CO₂ of the project and the strength of concrete core samples from field detection. The comparison of forecast results with measured data shows that the forecasting model, presented by NIU Di-tao, et al, is accurate in forecasting for low-strength concrete, that the forecasting model, presented by QIU Xiao-tan, et al, well accords with the reality in forecasting for high-strength concrete, while the forecast result of the Smolczyk model is obviously larger than the measured data. Moreover, it is considered that to establish a model for the relationship between the carbonation depth and age-dependent compressive strength of concrete is of great significance as compared to develop a model for the relationship between the carbonation depth and the compressive strength of concrete at 28 d.

Key Word: concrete; carbonation depth; compressive strength; forecasting model; Weishui inverted siphon project

1 混凝土碳化机理

混凝土碳化实质就是水泥水化产物(如 Ca(OH)₂ 和 C-S-H 凝胶等)的碳酸化过程, 其反应过程如下:



在素混凝土结构中, 由于 C-S-H 凝胶孔隙和部分毛细孔被碳化产物堵塞, 使混凝土的密实度有所提高, 一定程度上阻碍了 CO₂ 向混凝土内部扩散的速率^[1], 因此素混凝土碳化后, 其抗压、抗折强度和抗冻性、抗冲耐磨性可得到一定提高^[2].

在钢筋混凝土结构中, 钢筋被置于混凝土保护层内, 而混凝土的高碱性使其表面产生一层致密的

钝化膜, 钢筋得到保护而不会锈蚀. 但当混凝土结构内部存在较多的孔隙, 使得大气中的 CO₂ 不断地进入混凝土中尚未完全充水的毛细孔, 与混凝土中的 Ca(OH)₂ 发生碳化反应, 使混凝土的碱性下降; 当碳化深度到达钢筋表面时会破坏钝化膜, 使钢筋发生锈蚀, 其锈蚀产物体积会膨胀至原来的 1.0 ~ 1.5 倍, 巨大的膨胀压力使铁锈周边的混凝土承受着拉应力, 由于混凝土的抗拉强度仅有抗压强度的 1/10 ~ 1/20^[3], 因此当混凝土受到的拉应力超过自身的极限抗拉强度时, 混凝土就会产生裂缝, 裂缝不断发展就会导致结构耐久性劣化.

2 基于混凝土抗压强度的碳化深度预测研究现状

由于现代工程建设主要是钢筋混凝土结构, 研究碳化机理并预测混凝土碳化深度就成为水泥基材

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA2Z4131)

作者简介: 杜应吉(1963—), 男, 陕西咸阳人, 副教授, 博士研究生, 从事水泥基材料耐久性研究.

料领域的一个研究热点.近年来国内外学者提出了许多有价值的研究成果和预测模型^[4~7],主要有基于扩散理论建立的理论模型、基于快速碳化试验和长期野外暴露试验以及实际工程碳化实测资料的经验模型、基于随机理论和实测资料建立的随机预测模型等.经过大量的碳化机理分析和试验研究,得出比较公认的混凝土碳化深度 $X(t)$ 与使用年限 t 的关系模型:

$$X(t) = k\sqrt{t}$$

式中的 k 是反映环境综合影响的碳化系数.不同的碳化深度预测模型 k 的解析式是不同的,建立碳化深度预测模型的主要任务就是定量确定 k 值,其考虑的碳化影响因素有水灰比(W/C)、水泥用量和抗压强度等.

混凝土抗压强度是反映混凝土力学性能的基本指标,它综合反映了混凝土水灰比、水泥和骨料品种、水泥用量、施工质量及养护条件等对混凝土耐久性的影响,且抗压强度测试方法简单成熟,在混凝土配合比设计和工程现场检测时易得到实测数据,因此建立基于混凝土抗压强度的碳化深度预测模型更有意义^[8].目前国内外基于混凝土抗压强度的经验预测模型主要有:

a. 牛狄涛等从碳化理论模型出发,利用大量的工程实测结果和气象调查资料,建立了以混凝土立方体强度标准值为主要参数,考虑环境影响(环境温湿度)和 CO_2 浓度的碳化深度与混凝土碳化龄期的预测模型:

$$X(t) = k_{\text{CO}_2} k_e \left(\frac{57.94}{f_{\text{cuk}}} - 0.761 \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为混凝土的碳化深度, mm; k_{CO_2} 为 CO_2 浓度影响系数; f_{cuk} 为混凝土立方体抗压强度标准值, MPa; k_e 为环境温湿度影响系数; t 为碳化龄期, a.

b. Smolczyk 给出了一个考虑无碳化极限强度的碳化深度预测模型^[9]:

$$X(t) = 79.06 \left(\frac{1}{\sqrt{f_{\text{cuk}}}} - \frac{1}{\sqrt{f_{\text{cu0}}}} \right) \sqrt{t} \quad (2)$$

式中: f_{cu0} 为混凝土无碳化的极限强度, $f_{\text{cu0}} = 62.5$ MPa.

c. 邸小坛等考虑环境、养护条件和水水泥品种修正系数而得到的基于混凝土抗压强度的碳化深度预测模型^[10]:

$$X(t) = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \left(\frac{60.0}{f_{\text{cuk}}} - 1.0 \right) \sqrt{t} \quad (3)$$

式中: α_1 为养护条件修正系数; α_2 为水泥品种修正系数; α_3 为环境条件修正系数.

本文结合韦水倒虹工程的现场环境、混凝土抗压强度和实际使用年限等资料,利用模型公式(1)~(3)计算预测碳化深度,并与实测碳化深度进行比

较,分析预测结果并比较预测模型的适应性.

3 混凝土碳化深度预测计算

3.1 工程概况

韦水倒虹工程位于陕西省扶风县城东南 1.5 km,是宝鸡峡灌区塬上总干渠上跨越韦水河谷的一座大型输水建筑物,1971 年建成.倒虹为低填方、低管桥、高水头、钢筋混凝土管与钢管组合的桥式倒虹,设计过流量为 $52 \text{ m}^3/\text{s}$,最大水头 70 m,工程由镇墩、管道、进水口、管桥和退水等部分组成.管桥横架在韦水河床上,龄期为 33 a;镇墩起固定倒虹管作用,离河床较远,龄期为 43 a.该工程当地的平均湿度为 $R_H = 69.6\%$,年平均气温 $T = 12.4^\circ\text{C}$, CO_2 平均体积分数 $\varphi(\text{CO}_2) = 0.03\%$.

3.2 碳化深度预测计算

该工程抗压强度采用配制混凝土时的实测 28 d 抗压强度(试验室环境下),混凝土的碳化深度检测采用酚酞溶液比色法进行测试.各预测模型计算参数确定如下:①预测模型(1).考虑当地的碳化影响因素,取 $k_{\text{CO}_2} = \sqrt{\frac{\varphi(\text{CO}_2)}{0.03\%}} = 1.0$ (属于西安地区), $k_e = 2.56 \sqrt[4]{T(1 - R_H) R_H} = 1.02$.②预测模型(2).认为混凝土强度达到 62.5 MPa 时混凝土几乎无碳化.③预测模型(3).取 $\alpha_1 = 1.0$;由于使用的是普通硅酸盐水泥,故 $\alpha_2 = 1.0$;考虑到扶风处于西安附近,故取 $\alpha_3 = 0.95$.将以上参数代入公式(1)~(3)中,得到混凝土碳化深度预测值,见表 1.

表 1 混凝土碳化深度实测值与计算值比较

部位	编号	$f_{\text{cuk}}/\text{MPa}$	混凝土碳化深度 $X(t)/\text{mm}$			
			实测值	公式(1) 计算值	公式(2) 计算值	公式(3) 计算值
镇墩	1	33.9	2.4	5.6	20.8	4.2
	3	34.2	1.3	5.5	20.4	4.1
	5	34.1	1.9	5.5	20.6	4.2
	7	35.8	2.8	4.3	17.5	3.9
	9	42.8	4.9	3.5	12.1	2.2
	11	42.2	2.2	3.6	12.7	2.3
	13	41.5	2.2	3.7	13.3	2.4
	15	34.7	2.2	5.3	19.9	3.9
管桥	1	14.2	18.7	22.2	63.3	20.1
	2	16.7	19.5	18.1	53.9	16.2
	3	18.5	18.4	15.9	48.4	14.0
	4	16.2	19.3	18.8	55.6	16.8
	5	17.5	19.2	17.1	51.3	15.1
	6	18.4	18.6	16.3	50.5	14.6

从表 1 可以看出,牛狄涛等的碳化深度预测模型对于强度等级较低的混凝土(如该工程的管桥混凝土)预测较准确,邸小坛等的预测模型对于强度等级较高的混凝土(如镇墩部位混凝土)的预测较符合实际,而 Smolczyk 预测模型的碳化深度计算值明显

偏大,与实测值误差很大.

4 结 语

a. 由于碳化深度现场检测中的误差和利用预测模型计算时参数 k 的取值偏差,致使碳化深度计算值和实测值有较大不同,因此,虽然国内外学者建立了不同的预测模型,但可以说目前碳化深度预测还停留在半定量化阶段,对有关模型进行优化还需要做大量的试验研究工作.

b. 建立混凝土碳化深度与混凝土 28 d 龄期抗压强度的关系模型很有意义,但是如果能建立实际龄期混凝土抗压强度、碳化深度与碳化龄期的关系,则对混凝土碳化耐久寿命的预测研究更有帮助.

c. 本文碳化深度预测计算是针对韦水倒虹工程进行的,由于仅有当地平均湿度和 CO_2 浓度等资料,考虑到管桥混凝土离河面很近,因此其实际碳化深度应比表 1 中预测值稍大.

参考文献:

[1] Parrrt A. Study of carbonation-induced corrosion[J]. Magazine

(上接第 7 页)

[2] 赵平,刘祚秋,陈文义,等.大型渡槽上、下部整体三维有限元分析[J].华北水利水电学院学报,1997,18(1):35—38.
[3] 陈淮,祁冰,杜晓伟.大型双槽渡槽结构振动特性分析[J].世界地震工程,2001,17(1):93—97.
[4] 徐建国,王博.渡槽结构动力性能的有限元分析[J].郑州工业大学学报,1999,20(2):67—69.
[5] 李正农,孟吉复.多槽体渡槽的自振特性分析[J].武汉大学学报(工学版),2001,34(4):11—16.
[6] 戴湘和,陈玲玲,吴杰芳.南水北调中线跨黄河渡槽抗震计算研究[J].长江科学院院报,2002,19(3):52—55.
[7] 李遇春,楼梦麟.排架式渡槽流-固耦合动力特性分析

of Concrete Research,1994,46(2):23—28.

[2] 方王景,梅国兴,陆采荣.碳化对混凝土性能影响的研究[J].水利水电技术,1996(2):58—64.
[3] 刘建生,苏跃.保护层已碳化的预应力钢筋混凝土管正常使用年限探讨[J].水利水电技术,1993(3):57—60.
[4] 金伟良,鄢飞.混凝土碳化指数的概率模型[J].混凝土,2000(1):35—37.
[5] 牛荻涛,董振平.预测混凝土碳化深度的随机模型[J].工业建筑,1999,29(9):1—6.
[6] 李文华,孟文清.基于神经网络的混凝土碳化预测研究[J].工业建筑,1999,29(1):1—4.
[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.
[8] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.10—32.
[9] 陈迅捷,张燕弛.活性掺合料对混凝土抗碳化耐久性的影响[J].混凝土与水泥制品,2002(3):7—9.
[10] 冯乃谦.高性能混凝土结构[M].北京:机械工业出版社,2004.65—78.

(收稿日期:2004-11-04 编辑:熊水斌)

[J].水利学报,2000(12):31—37.

[8] 杜晓伟,陈淮,孙国均,等.大型双槽渡槽地震反应分析[J].世界地震工程,2003,19(2):23—26.
[9] 李遇春,朱墩,乐运国,等.大型高墩渡槽横向地震反应分析[J].武汉水利电力大学学报,1999,32(3):43—46.
[10] 张俊发,刘云贺,王克成.设置叠层橡胶支座梁式渡槽的地震响应分析[J].水利学报,1999(1):50—54.
[11] 王博.大型渡槽结构地震反应分析理论与应用[D].上海:同济大学,2000.
[12] 徐伟,陈淮,王博,等.考虑流固耦合的大型渡槽动力特性计算[J].水利水电技术,2004,35(4):20—22.
[13] 居荣初,曾心传.弹性结构与液体的耦联振动理论[M].北京:地震出版社,1983.115—154.

(收稿日期:2004-10-22 编辑:骆超)

(上接第 44 页)

6 结 论

本文方法仅适用于开较大扁矩形孔的梁,开孔后形成空腹桁架结构,上、下弦杆可看作为压(拉)弯剪构件.对于小圆孔、大圆孔、椭圆孔或狭长矩形孔等还需另外考虑.

参考文献:

[1] 王瑶.钢筋混凝土开孔梁非线性有限元全过程可视化仿真分析[D].南京:河海大学,2001.

[2] 刘荣桂.混凝土(RC/PC)开孔梁实验研究与理论分析[D].南京:东南大学,1999.
[3] Kennedy J B, Abdalla H A. Static response of prestressed concrete beams with openings[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1992, 118(2): 488—504.
[4] 杨建明.预应力混凝土开洞梁的抗剪强度和抗裂度试验研究[D].南京:东南大学,1987.
[5] Wafa F F. Prestressed concrete beams with openings under torsion, bending[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 1161—1166.

(收稿日期:2004-03-24 编辑:骆超)