

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.010



混凝土裂缝处碳化深度计算模型

田稳苓^{1,2}, 常翔宇¹, 王浩宇¹, 余建福¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:普通钢筋混凝土结构一般都是带裂缝工作, 裂缝的存在会使 CO_2 更易侵入混凝土内部, 加速混凝土的碳化, 对结构的耐久性不利。结合已有研究成果, 定义了裂缝对混凝土碳化的影响系数 γ_c , 通过对预制裂缝的砂浆及混凝土试件进行碳化试验, 分析了水灰比、碳化时间、环境相对湿度、裂缝宽度、裂缝深度对 γ_c 的影响, 得出裂缝处混凝土碳化深度计算模型, 并通过实际工程进行了验证。结果表明, 裂缝宽度范围为 0.06~0.7 mm 时, 模型均适用, 且桥梁运营时间对 γ_c 影响不显著。

关键词:钢筋混凝土结构; 裂缝; 碳化; 计算模型

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0071-08

Calculation model of carbonation depth in concrete cracks

Tian Wenling^{1,2}, Chang Xiangyu¹, Wang Haoyu¹, Yu Jianfu¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Reinforced concrete structures generally work with cracks. Base on the studies at home and abroad, a crack influence coefficient about concrete carbonation γ_c , is defined. Mortar and concrete specimens with prefabricated cracks have been made for carbonation test. And the effect of water cement ratio, carbonation time, environment relative humidity, crack width, crack depth on γ_c is analyzed. A calculation model about carbonation depth in concrete cracks is obtained. Actual projects have been implemented to validate the model. It is shown that the model is applicable when the width of cracks in the range of 0.06~0.7 mm, and the bridge operation time have no significant effect on γ_c .

Keywords: reinforced concrete structures; crack; carbonation; calculation model

普通钢筋混凝土结构一般都是带裂缝工作, 裂缝的存在, 使 CO_2 更易进入混凝土内部, 导致裂缝处混凝土碳化深度加大, 从而过早诱发钢筋的锈蚀, 造成结构耐久性下降。对混凝土的碳化研究已较为成熟^[1-5], 但对带裂缝混凝土的碳化研究较少, 雷

涛^[6]通过研究不同裂缝宽度混凝土试件在干燥环境(环境相对湿度 20%)下碳化后裂缝处的碳化深度发现, 在干燥环境下, 开裂混凝土沿着裂缝壁发生碳化反应, 碳化深度会直达裂缝前端, 碳化深度与裂缝宽度关系不大。刘欣等^[7]结合试验, 分析了钢筋混

收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2012047)

作者简介: 田稳苓(1961-), 女, 教授, 博士, 主要从事新型建筑材料及结构体系研究, (E-mail) fish10086@126.com。

Received: 2016-11-17

Foundation item: Science and Technology Project of Hebei Provincial Transportation Department (No. Y-2012047)

Author brief: Tian Wenling (1961-), professor, PhD, main research interests: new building materials and structural system, (E-mail): fish10086@126.com.

混凝土结构细微裂缝(0.10~0.20 mm)对碳化深度和钢筋锈蚀的影响,得出微裂缝处的碳化深度是非裂缝处碳化深度的1.4~1.8倍。Ann等^[8]对桥梁墩柱上不同损伤程度的混凝土进行碳化深度测试,发现当混凝土裂缝宽度为0.10~0.20 mm时,裂缝处混凝土碳化深度大约是非裂缝处碳化深度的2.12倍。金祖权等^[9]通过三点弯曲使混凝土试件产生裂缝,发现当裂缝宽度小于0.07 mm时,裂缝宽度对混凝土裂缝处碳化深度影响不大;当裂缝宽度大于0.07 mm时,碳化深度随裂缝宽度增加而呈二次函数增加。Zhang等^[10]通过冻融循环使混凝土产生裂缝,发现当裂缝宽度在0~0.10 mm时,碳化深度随裂缝宽度增加而快速增加,当裂缝宽度超过0.10 mm时,碳化深度随裂缝宽度的变化量很小。学者们采用不同的实验方法,研究了相对湿度和裂缝宽度对碳化深度的影响,朱元祥等^[11]对带裂缝混凝土碳化深度进行了理论分析,建立了裂缝处混凝土碳化深度的随机过程模型,但该模型仅考虑了基于概率的碳化速度经验系数及裂缝宽度,且其中的经验系数是由特定条件下的试验结果统计所得,不适用于条件变化的实际工程。笔者借鉴Jiang等^[12]建立的疲劳损伤混凝土碳化模型,提出了裂缝对混凝土碳化的影响系数 γ_c ,在室内试验基础上,系统分析了水灰比、碳化时间、环境相对湿度、裂缝宽度、裂缝深度对 γ_c 的影响,建立了综合考虑环境相对湿度、裂缝宽度、裂缝深度的裂缝处混凝土碳化深度计算模型,并通过实际工程进行了验证。结果表明,模型计算结果与工程实际吻合良好,模型可用于带裂缝混凝土结构的寿命预测。

1 裂缝处碳化模型形式的确定

Jiang等^[12]认为疲劳损伤混凝土的碳化深度取决于 CO_2 在未损伤混凝土和裂缝中的扩散系数,并在Papadakis碳化模型基础上,结合混凝土梁疲劳

损伤后的碳化试验结果,建立了疲劳损伤混凝土的碳化模型

$$x_c = x_0 + \alpha x_1 \quad (1)$$

式中: x_c 为疲劳损伤混凝土碳化深度,mm; x_0 为未损伤混凝土碳化深度,mm; x_1 为混凝土在疲劳荷载下最大应变时的 CO_2 扩散系数计算得到的碳化深度,mm; α 为与水灰比、相对湿度、碳化时间等因素有关的系数,无量纲。

因 x_0 也受水灰比、相对湿度、碳化时间等因素的影响^[2-5],取与各因素对 x_0 、 αx_1 影响程度有关的系数 γ 使 $\gamma x_0 = \alpha x_1$,并令 $1 + \gamma = \gamma_c$,式(1)可以改写为

$$x_c = x_0 + \gamma x_0 = (1 + \gamma)x_0 = \gamma_c x_0 \quad (2)$$

根据式(2)的表达形式,定义 X_c 为裂缝处碳化深度,mm; X 为非裂缝处碳化深度,mm;令 $\gamma_c = X_c/X$,为裂缝对混凝土碳化的影响系数,即

$$X_c = \gamma_c X \quad (3)$$

式中: X 可通过实验测得; γ_c 通过试验研究及理论分析,综合确定 γ_c 与水灰比、相对湿度、碳化时间、裂缝宽度、裂缝深度之间的关系模型,从而建立裂缝处碳化深度计算模型。

2 预制裂缝试件碳化试验及结果

采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体砂浆试件及尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的C40混凝土试件进行试验。砂浆与混凝土的配合比及其28 d抗压强度分别见表1、表2。

表1 砂浆配合比

Table 1 Mortar mix ratio

水灰比	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压强度 平均值/MPa
0.4	735	1 470	294	54.0
0.5	714	1 428	357	45.2
0.6	694	1 388	417	33.4

表2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix ratio

水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	5~10 mm 碎石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	10~20 mm 碎石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压强度平 均值/MPa
298	99	761	274	821	3.6	143	49.1

通过预置薄片法在砂浆和混凝土试件中预制裂缝。首先,将薄钢片固定在模板中,再拌制砂浆或混凝土,拆模后标准养护28 d,在混凝土养护结束后,

借助电子万能试验机将薄片缓缓拔出。通过改变薄钢片的厚度、宽度来控制预制裂缝的宽度、深度。砂浆试件裂缝宽0.2 mm,裂缝深40 mm,水灰比为

0.4、0.5、0.6,碳化时间为 3、7、14 d,共 9 组,每组 3 个试件,合计 27 个试件(见表 3)。混凝土试件裂缝宽 0.1、0.2、0.3mm,裂缝深 10、20、30、40、50、60 mm,碳化时间为 3 d,共 18 组,每组 3 个试件,合计 54 个试件(见表 4)。

依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009),对各试件进行加速碳化试验,在碳化箱内(湿度为 $70 \pm 5\%$)碳化至 3、7、14 d 时,取出试件,垂直于裂缝面切开,在切开面上喷洒质量分数 1% 酚酞酒精溶液,经 30 s 后,测量碳化深度。水灰比为 0.6,碳化至 14 d 的单缝砂浆试件碳化图如图 1(a)所示,裂缝宽度 0.3 mm,深度 60 mm,碳化至 14 d 的混凝土试件碳化图如图 1(b)所示。

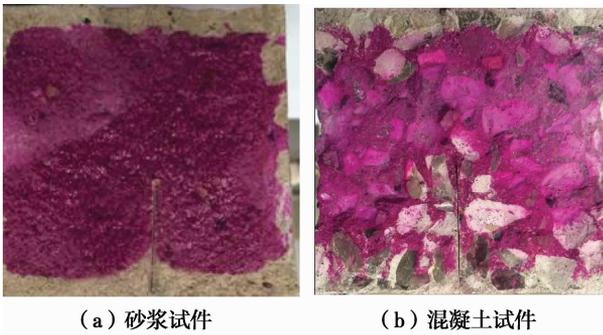


图 1 预制裂缝试件碳化图

Fig. 1 Carbonation picture of prefabricated crack specimen

砂浆试件在不同水灰比 W/C 及碳化时间 T 下的 X_c 、 X 、 γ_c 的值如表 3 所示,混凝土试件在不同裂缝宽度 w 及裂缝深度 d_c 下的 X_c 、 X 、 γ_c 的值如表 4 所示。

表 3 不同水灰比和碳化时间砂浆试件的碳化深度
Table 3 Carbonation depth of mortar specimens with different water cement ratio and carbonation time

W/C	T/d	X_c/mm	X/mm	γ_c
0.4	3	0.4	0.3	1.33
0.4	7	1.1	0.4	2.75
0.4	14	2.7	1.3	2.08
0.5	3	5.5	2.7	2.04
0.5	7	9.1	3.8	2.39
0.5	14	11.0	5.7	1.93
0.6	3	9.2	4.5	2.04
0.6	7	13.0	6.2	2.10
0.6	14	22.0	9.8	2.24

表 4 不同裂缝宽度和深度混凝土试件的碳化深度
Table 4 Carbonation depth of concrete specimens with different crack widths and depths

d_c/mm	w/mm	X_c/mm	X/mm	γ_c
10	0.1	11.9	11.0	1.08
10	0.2	13.9	10.6	1.31
10	0.3	16.3	10.7	1.52
20	0.1	12.9	12.0	1.08
20	0.2	14.6	11.0	1.33
20	0.3	16.6	11.2	1.48
30	0.1	13.5	9.5	1.42
30	0.2	16.2	10.0	1.62
30	0.3	17.3	10.4	1.66
40	0.1	14.2	10.8	1.31
40	0.2	16.8	10.7	1.57
40	0.3	18.4	11.1	1.66
50	0.1	14.3	11.3	1.27
50	0.2	16.9	10.9	1.55
50	0.3	18.3	10.3	1.78
60	0.1	14.3	11.6	1.23
60	0.2	16.9	10.3	1.64
60	0.3	18.5	10.7	1.73

3 各因素与 γ_c 之间的关系研究

3.1 W/C 、 T 与 γ_c 之间的关系

运用 SPSS 软件对表 3 中数据进行分析,当其他因素一定的条件下, W/C 、 T 对 γ_c 影响显著性水平 α 分别为 0.831、0.571,即置信水平仅为 0.169、0.429,裂缝处碳化深度未大于裂缝深度时,计算模型中可不考虑水灰比和碳化时间的影响。

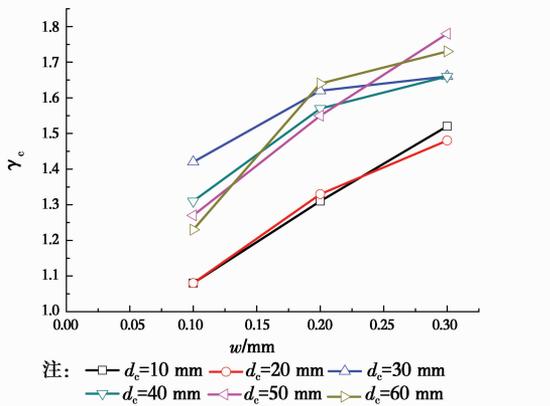
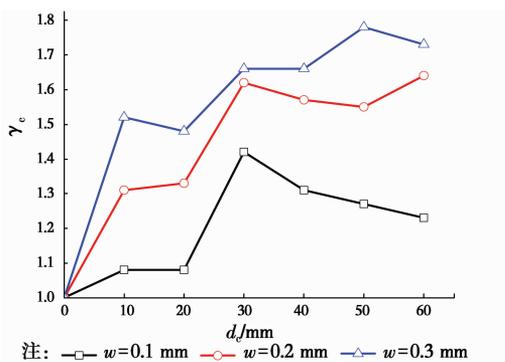
3.2 w 与 γ_c 之间的关系

根据表 4 数据,绘制不同 d_c 时 w 与 γ_c 关系曲线和不同 w 时 d_c 与 γ_c 关系曲线,如图 2、图 3 所示。

由图 2 可见,在 d_c 、环境相对湿度 RH 一定的情况下, γ_c 随着 w 的增大而增加,但增加速度逐渐减小,与金祖权等^[10]研究结果一致,增加速度逐渐减小的主要原因是 CO_2 在裂缝内壁混凝土中的扩散速度逐渐接近于在外表面的扩散速度。

根据 w 与 γ_c 关系曲线图,取 w 影响系数 γ_w 形式为

$$\gamma_w = a_w - \frac{b_w}{w + c_w} \quad (0.1 \text{ mm} \leq w \leq 0.3 \text{ mm}) \quad (4)$$

图 2 w 与 γ_c 关系曲线Fig. 2 Relationship curves between w and γ_c 图 3 d_c 与 γ_c 关系曲线Fig. 3 Relationship curves between d_c and γ_c

3.3 d_c 与 γ_c 之间的关系

因裂缝内部几乎无空气流动,且由于裂缝壁的吸附作用,水分子较难扩散到外界空气中,裂缝内的水分汽化比混凝土表面的水分汽化慢^[12]。在混凝土中孔隙水不断蒸发情况下,裂缝内保持较高相对湿度,甚至达到 100%,在裂缝开口位置,因与外界环境的蒸气压差会形成湿度梯度。当环境相对湿度在 50%~70%时,混凝土碳化速度最大,在当环境相对湿度接近 100%时,混凝土碳化几乎停止^[13-14]。因此,存在一个临界裂缝深度 d_0 ,当 $d_c < d_0$ 时, γ_c 随着 d_c 增加,当 $d_c \geq d_0$ 时 γ_c 变化量很小,视为定值。由图 3 可知,当 $d_c < 30$ mm 时, γ_c 随着 d_c 以二次函数增加;当 $d_c \geq 30$ mm 时, γ_c 变化量较小。即在本试验条件下 $d_0 = 30$ mm。且当 $0.1 \text{ mm} \leq w \leq 0.3 \text{ mm}$ 时, w 对 d_0 影响不大。

雷涛^[6]在湿度为 20%的条件下,对带裂缝混凝土进行了碳化试验。当裂缝宽度大于 0.13 mm、裂缝深度约 66 mm 时,裂缝尖端存在碳化痕迹,即当 $RH=20\%$ 时, $d_0 \geq 66$ mm。试验湿度为 70%,即当 $RH=70\%$ 时, $d_0 = 30$ mm。因此,可以认为 RH 影

响 d_0 的值,简化考虑两者关系为

$$d_0 = (1 - RH) \times 100 \text{ mm} \quad (5)$$

在 $RH=70\%$ 情况下,当 $d_c \geq d_0$ 时, γ_c 仅与 w 有关;当 $d_c < d_0$ 时, γ_c 受 w 、 d_c 影响。则取 γ_c 的表达式为

$$\gamma_c = \begin{cases} (\gamma_w - 1)\gamma_{d_c} + 1 & (d_c < d_0) \\ \gamma_w & (d_c \geq d_0) \end{cases} \quad (6)$$

同时,当 $d_c < X_c$ 时,裂缝位置碳化前端开始凸起,形状不再为图 1 中的尖角状, X_c/X 逐渐减小,表达式不再适用,因此其适用范围为 $X_c \leq d_c$ 。

3.4 RH 与 γ_c 之间的关系

环境相对湿度越低,裂缝内失水速度越快,二氧化碳在裂缝内扩散速度越快,裂缝内壁混凝土还会保有一定水分,能保证初期碳化反应的进行。因此,裂缝处混凝土碳化深度随着环境相对湿度的降低而单调增加。借鉴文献[2-4]混凝土碳化模型中湿度与碳化速度的二次方程关系,及文献[5]混凝土碳化模型中湿度影响系数的形式,定义 γ_{RH} 为湿度修正系数,考虑边界条件:当 RH 为 100%时,裂缝处混凝土碳化速度接近于 0,取 γ_{RH} 为 0;试验条件为 $RH=70\%$,不进行修正,即 γ_{RH} 为 1。取 γ_{RH} 与 RH 关系式为

$$\gamma_{RH} = \frac{(1 - RH)^2}{(1 - 70\%)^2} \quad (7)$$

4 裂缝处混凝土碳化深度计算模型

4.1 模型的建立

取表 4 中 $d_c \geq 30$ mm 时不同的 w 及对应的 γ_c 平均值(0.1, 1.308 5)、(0.2, 1.595 3)、(0.3, 1.706 7)代入式(4)中,求得 $a_w = 1.959 6$ 、 $b_w = 0.082 7$ 、 $c_w = 0.027$,即

$$\gamma_w = 1.959 6 - \frac{0.082 7}{w + 0.027} \quad (8)$$

(0.1 mm $\leq w \leq$ 0.3 mm)

根据图 3 中 d_c 与 γ_c 关系曲线形状,令

$$\gamma_{d_c} = ad_c^2 + bd_c + c \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 为与 w 、 d_0 有关的参数或常数。

将两个端点(0, 0)、(d_0 , 1),代入式(9)中,求得

$$b = -\frac{d_0^2 a - 1}{d_0}, c = 0, \text{ 即}$$

$$\gamma_{d_c} = ad_c^2 - \frac{d_0^2 a - 1}{d_0} d_c \quad (10)$$

因 $d_c = 10$ mm 时, $d_c < X_c$,不参与计算。为简化计算,取 $d_c = 20 \text{ mm} = 2d_0/3$,求得各宽度下的 γ_{d_c}

分别代入式(10),得: $w=0.1\text{ mm}$ 时, $a = \frac{1.83}{d_0^2}$;

$w=0.2\text{ mm}$ 时, $a = \frac{0.53}{d_0^2}$; $w=0.3\text{ mm}$ 时, $a =$

$\frac{-0.06}{d_0^2}$ 。

从而拟合得到 a 与 w 的关系式

$$a = \frac{1}{d_0^2}(35.5w^2 - 23.65w + 3.84) \quad (11)$$

即裂缝处碳化深度计算模型

$$X_c = \gamma_c X \quad (X_c \leq d_c)$$

$$\gamma_c = \begin{cases} [(\gamma_w - 1)\gamma_{d_c} + 1]\gamma_{RH} & (d_c < d_0) \\ \gamma_w\gamma_{RH} & (d_c \geq d_0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: γ_{RH} 、 γ_w 、 γ_{d_c} 分别通过式(7)、(8)、(10)、(5)、(11)进行计算。

4.2 模型计算值与试验数据对比

朱元祥等^[11]认为影响裂缝处混凝土碳化深度的因素较多,每个影响因素都具有随机性,且它们相互影响,难以定量考虑,仅考虑了基于概率的碳化速度经验系数 A_{cr} 及裂缝宽度 w ,建立了计算模型(以下简称朱元祥模型)为

$$y = (\mu_{A_{cr}} + U\sigma_{A_{cr}})\tau w^{\frac{1}{2}} T^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

式中: y 为裂缝处碳化深度, mm; $\mu_{A_{cr}}$ 为 A_{cr} 的均值,取 42.59; $\sigma_{A_{cr}}$ 为 A_{cr} 的方差,取 12.28; U 按 95% 保证率取 1.645; τ 为裂缝宽度, mm; T 为碳化时间, a, 加速试验 14 d 等效为实际碳化 20.2 a。

将该计算模型与朱元祥模型分别结合表 4 中试验数据(不含 $d_c = 10\text{ mm}$)进行计算,并与试验值进行对比分析,计算结果如表 5 所示。

表 5 模型计算值与试验值对比

Table 5 Comparison between model calculation values and experimental values

d_c/mm	w/mm	$\gamma_{c\text{试}}$	$\gamma_{c\text{计}}$	$\gamma_{c\text{朱}}$	$\gamma_{c\text{计}}/\gamma_{c\text{试}}$	$\gamma_{c\text{朱}}/\gamma_{c\text{试}}$
20	0.1	1.08	1.080	3.51	1.00	3.25
20	0.2	1.33	1.327	5.41	1.00	4.07
20	0.3	1.48	1.481	6.51	1.00	4.40
30	0.1	1.42	1.308	4.43	0.92	3.12
30	0.2	1.62	1.595	5.95	0.98	3.67
30	0.3	1.66	1.707	7.01	1.03	4.22
40	0.1	1.31	1.308	3.90	1.00	2.98
40	0.2	1.57	1.595	5.56	1.02	3.54
40	0.3	1.66	1.707	6.57	1.03	3.96
50	0.1	1.27	1.308	3.73	1.03	2.94
50	0.2	1.55	1.595	5.46	1.03	3.52
50	0.3	1.78	1.707	7.08	0.96	3.98

续表 5

d_c/mm	w/mm	$\gamma_{c\text{试}}$	$\gamma_{c\text{计}}$	$\gamma_{c\text{朱}}$	$\gamma_{c\text{计}}/\gamma_{c\text{试}}$	$\gamma_{c\text{朱}}/\gamma_{c\text{试}}$
60	0.1	1.23	1.308	3.63	1.06	2.95
60	0.2	1.64	1.595	5.78	0.97	3.52
60	0.3	1.73	1.707	6.81	0.99	3.94

注: $\gamma_{c\text{试}}$ 为 γ_c 试验值; $\gamma_{c\text{计}}$ 为应用本文模型的 γ_c 计算值; $\gamma_{c\text{朱}}$ 为应用朱元祥模型计算出 y/X 的值。

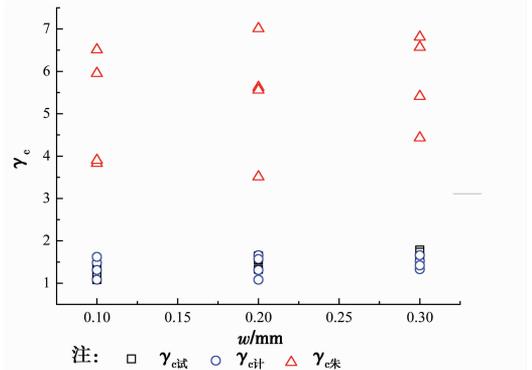


图 4 本文模型、朱元祥模型计算值与试验值对比图
Fig. 4 Comparison diagram between model calculation values and experimental values of the model of this paper and Zhu Yuanxiang's model

由表 5 可得 $\gamma_{c\text{计}}/\gamma_{c\text{试}}$ 的平均值为 1.001 1, 标准差为 0.025 1; $\gamma_{c\text{朱}}/\gamma_{c\text{试}}$ 的平均值为 3.603 8, 标准差为 0.400 9。由图 4 可明显看出,通过朱元祥模型计算结果与试验室预制裂缝碳化试验结果偏差较大,是因为其考虑的因素较少,在此基础上建立的概率模型很难适用于大多数情况;而本文模型综合考虑多个因素,计算结果与试验结果吻合程度较高。

5 计算模型的工程验证

为验证模型的可应用性,在不同地区、不同年份的混凝土桥梁主梁上选取了 43 条裂缝,裂缝分为正常受弯裂缝及预应力梁纵向裂缝 2 种类型。正常受弯裂缝为钢筋混凝土梁在荷载作用下,跨中附近产生的正常受力裂缝,桥梁运营时即会出现;预应力梁纵向裂缝主要由于泊松效应等原因,在混凝土较薄弱位置产生,如后张预应力空心板梁空心位置、预应力箱梁波纹管位置,此类裂缝一般在桥梁运营前即会出现。因此,裂缝产生的时间与桥梁混凝土开始碳化的时间比较接近,不考虑其时间差的影响。

在裂缝位置及相同环境条件下同一片梁非裂缝位置借助内径为 5 cm 的钻芯机钻取芯样,裂缝位置芯样钻取的长度大于超声波法测出的裂缝深度值,非裂缝位置芯样钻取 5~10 cm。将芯样上下各垫

一根钢筋,在压力试验机上劈裂,其中带裂缝芯样垂直于裂缝劈裂,如图 5(a)所示。劈裂前,可在两侧粘贴胶带,防止出现所取芯样强度低、骨料过多导致芯样碎裂、难以拼装等问题。将芯样劈裂后,进行碳化深度测量,方法同第 2 节。芯样测试情况如图 5(b)所示。



(a) 芯样劈裂

(b) 芯样碳化深度测试

图 5 芯样碳化深度测试

Fig. 5 Carbonation depth test of core samples

根据本文模型及朱元祥模型,对各条裂缝的 γ_c 值进行计算,并与实测值进行对比,见表 6。

表 6 模型计算值与实测值对比

Table 6 Comparison between model calculation values and measured values (engineering example)

序号	建成年份	裂缝类型	混凝土强度等级	w/mm	d_c/mm	$RH/\%$	X/mm	X_c/mm	$\gamma_{c测}$	$\gamma_{c计}$	$\gamma_{c朱}$	$\gamma_{c计}/\gamma_{c测}$	$\gamma_{c朱}/\gamma_{c测}$
1	1999	2类	C40	0.06	57	59.94	12.0	20.0	1.667	1.799	2.603	1.079	1.561
2	2003	1类	C30	0.07	80	58.96	19.5	32.0	1.641	2.072	1.618	1.263	0.986
3	1999	2类	C40	0.08	41	60.53	12.5	25.0	2.000	2.054	2.885	1.027	1.442
4	2001	1类	C30	0.08	69	59.79	8.0	15.5	1.938	2.132	4.369	1.100	2.254
5	2003	1类	C30	0.10	156	58.96	17.0	37.0	2.176	2.449	2.218	1.125	1.019
6	2001	1类	C30	0.10	71	59.79	11.0	25.0	2.273	2.351	3.552	1.034	1.563
7	1992	1类	250号	0.10	200	64.93	20.0	33.0	1.650	1.788	2.197	1.084	1.332
8	2009	2类	C50	0.10	88	60.71	5.0	10.0	2.000	2.244	6.460	1.122	3.230
9	1986	1类	400号	0.10	58	60.93	18.5	38.0	2.054	2.219	2.512	1.080	1.223
10	1992	1类	250号	0.12	200	64.93	19.5	34.0	1.744	1.909	2.469	1.095	1.416
11	1986	1类	400号	0.12	65	60.93	17.5	40.0	2.286	2.369	2.909	1.036	1.272
12	1992	1类	250号	0.12	59	61.18	15.0	33.0	2.200	2.339	3.210	1.063	1.459
13	2009	2类	C50	0.13	120	60.71	4.5	11.0	2.444	2.458	8.183	1.006	3.348
14	1986	1类	400号	0.13	71	60.93	17.5	42.0	2.400	2.430	3.028	1.013	1.262
15	2003	1类	C30	0.14	86	58.63	12.5	33.0	2.640	2.785	3.569	1.055	1.352
16	1992	1类	250号	0.14	200	64.93	19.0	38.0	2.000	2.001	2.737	1.001	1.368
17	2009	2类	C50	0.14	132	60.71	4.5	11.0	2.444	2.512	8.492	1.028	3.475
18	1992	1类	250号	0.14	62	61.18	15.5	37.0	2.387	2.452	3.355	1.027	1.405
19	1992	1类	250号	0.14	65	61.18	16.5	36.0	2.182	2.452	3.152	1.124	1.444
20	1993	1类	250号	0.15	138	60.99	22.0	49.0	2.227	2.523	2.421	1.133	1.087
21	1986	1类	400号	0.15	75	60.93	18.0	42.0	2.333	2.531	3.162	1.085	1.355
22	1992	1类	250号	0.15	67	61.18	16.0	37.0	2.313	2.499	3.364	1.080	1.454
23	2009	2类	C50	0.16	143	60.71	5.0	12.0	2.400	2.603	8.171	1.085	3.404
24	1986	1类	400号	0.16	74	60.93	18.5	44.0	2.378	2.574	3.177	1.082	1.336
25	1992	1类	250号	0.17	66	61.18	17.0	41.0	2.412	2.578	3.371	1.069	1.397
26	1992	1类	250号	0.18	200	64.93	20.0	38.0	1.900	2.132	2.948	1.122	1.552
27	1986	1类	400号	0.18	78	60.93	18.0	45.0	2.500	2.646	3.464	1.058	1.385
28	1987	1类	400号	0.20	46	60.92	17.0	36.5	2.147	2.707	3.833	1.261	1.785
29	2003	1类	C30	0.20	88	58.63	13.0	36.5	2.808	3.034	4.102	1.080	1.461
30	1992	1类	250号	0.20	200	64.93	19.0	41.0	2.158	2.180	3.271	1.010	1.516
31	1999	2类	C40	0.20	63	59.94	12.0	31.0	2.583	2.845	4.752	1.101	1.840

续表 6

序号	建成年份	裂缝类型	混凝土强度等级	w/mm	d_c/mm	$RH/\%$	X/mm	X_c/mm	$\gamma_{c测}$	$\gamma_{c计}$	$\gamma_{c朱}$	$\gamma_{c计}/\gamma_{c测}$	$\gamma_{c朱}/\gamma_{c测}$
32	1999	2类	C40	0.20	86	59.94	10.0	27.0	2.700	2.845	5.702	1.054	2.112
33	1999	2类	C40	0.20	88	59.94	10.5	28.0	2.667	2.845	5.430	1.067	2.036
34	1999	2类	C40	0.20	68	59.94	11.0	28.0	2.545	2.845	5.184	1.118	2.037
35	1999	2类	C40	0.20	93	59.94	11.0	29.0	2.636	2.845	5.184	1.079	1.966
36	1999	2类	C40	0.20	85	59.94	10.5	29.0	2.762	2.845	5.430	1.030	1.966
37	1999	2类	C40	0.22	79	59.94	11.0	30.0	2.727	2.897	5.437	1.062	1.994
38	1999	2类	C40	0.22	82	59.94	11.0	29.5	2.682	2.897	5.437	1.080	2.027
39	1987	1类	400号	0.24	128	61.59	17.0	45.0	2.647	2.705	4.199	1.022	1.586
40	1987	1类	400号	0.25	136	60.92	20.0	53.0	2.650	2.819	3.643	1.064	1.375
41	1987	1类	400号	0.25	151	61.00	18.0	46.5	2.583	2.807	4.048	1.087	1.567
42	1993	1类	250号	0.50	146	60.99	21.0	58.5	2.786	3.048	4.630	1.094	1.662
43	1999	2类	C40	0.70	52	60.53	12.0	38.0	3.167	3.195	8.889	1.009	2.807

注:1.裂缝类型中,1类为正常受弯裂缝,2类为预应力梁纵向裂缝。

- 2.根据中国气象数据网上“中国地面累年值数据集(1981—2010年)”确定桥梁所在区县与市区 1981—2010 年年平均湿度差值,并通过“中国地面国际交换站气候资料月值数据集”查询自桥梁建成至今市区年平均湿度, RH 为两者之和。
3. $\gamma_{c测}$ 为 γ_c 实测值, $\gamma_{c计}$ 为应用本文模型的 γ_c 计算值, $\gamma_{c朱}$ 为应用朱元祥模型计算出 y/X 的值。

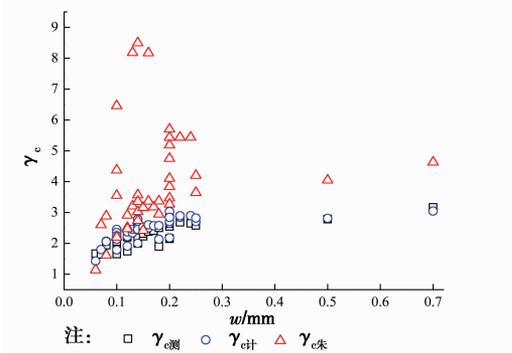


图 6 本文模型、朱元祥模型计算值与工程实测值对比图
Fig. 6 Comparison diagram between model calculation values and measured values of the model of this paper and Zhu Yuanxiang's model

由表 6 可知,43 组试验的 $\gamma_{c计}/\gamma_{c测}$ 平均值为 1.076 6,标准差为 0.054 8,略大于表 5 中 $\gamma_{c计}/\gamma_{c试}$ 的平均值 1.001 1,可能是因为工程中裂缝为“V”形,且表面裂缝宽度与裂缝深度之间存在一定的相关性所致; $\gamma_{c朱}/\gamma_{c测}$ 平均值为 1.746 9,标准差为 0.640 0。通过 SPSS 软件分析,桥梁运营时间(2016 减去桥梁建成年份)对 $\gamma_{c测}$ 影响显著性水平 α 为 0.665,即置信水平仅为 0.335,故当 $X_c \leq d_c$ 时,桥梁运营时间对 γ_c 影响不显著。由图 6 可见,工程实例裂缝宽度范围为 0.06~0.7 mm,本模型计算结果与试验结果吻合程度较高,裂缝宽度范围为 0.06~0.7 mm。

6 结论

通过理论与试验相结合的方法,定义并研究了与裂缝宽度、深度及环境相对湿度有关的裂缝对混凝土碳化的影响系数 γ_c ,得出了裂缝处碳化深度不大于裂缝深度,且裂缝宽度在 0.1~0.3 mm 范围的裂缝处混凝土碳化深度计算模型。通过工程实例验证,模型计算结果与实测值吻合程度较高。并得出以下结论:

- 1)水灰比、碳化时间对 γ_c 影响不显著。
- 2)桥梁运营时间对 γ_c 影响不显著。
- 3)试验裂缝宽度范围为 0.1~0.3 mm,工程实例裂缝宽度范围为 0.06~0.7 mm,但提出的计算模型 γ_c 计算值与试验实测值和工程实例实测值均吻合较好,模型裂缝宽度范围为 0.06~0.7 mm。

参考文献:

[1] PAPADAKIS V G, VAYENAS C G, FARDIS M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation [J]. Materials Journal, 1991, 88 (4): 363-373.

[2] 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 D T. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

- [3] 刘志勇,孙伟. 多因素作用下混凝土碳化模型及寿命预测[J]. 混凝土, 2003(12): 3-7.
LIU Z Y, SUN W. Modeling carbonation for corrosion risk service life prediction of concrete under combined action of durability factors [J]. Concrete, 2003(12): 3-7. (in Chinese)
- [4] ISGOR O B, RAZAQPR A G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 26: 57-73.
- [5] GREVE-DIERFELD S, GEHLEN C. Performance based durability design, carbonation part 1- Benchmarking of European present design rules [J]. Structural Concrete, 2016, 17(3): 309-328.
- [6] 雷涛. 裂缝宽度对混凝土碳化的影响[J]. 铁道建筑, 2014(6):156-158.
LEI T. The influence of crack width of concrete carbonation [J]. Railway Engineering, 2014(6): 156-158. (in Chinese)
- [7] 刘欣,高妍,季海霞,等. 钢筋混凝土结构微裂缝下的碳化试验分析[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2010, 10(1): 25-27.
LIU X, GAO Y, JI H X, et al. Experimental analysis of carbonization on microcracks of reinforced concrete structure [J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2010, 10(1): 25-27. (in Chinese)
- [8] ANN K Y, PACK S W, HWANG J P, et al. Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(8): 1494-1501.
- [9] 金祖权,侯保荣,赵铁军,等. 收缩裂缝对混凝土氯离子渗透及碳化的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2011,33(1): 7-11.
JIN Z Q, HOU B R, ZHAO T J, et al. Influence of shrinkage cracks on chloride penetration and carbonation of concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1): 7-11. (in Chinese)
- [10] ZHANG S P, ZONG L, DONG L F, et al. Influence of cracking on carbonation of cement-based materials [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 84-88.
- [11] 朱元祥,侯应武,屈文俊. 混凝土结构裂缝处的碳化分析[J]. 西北建筑工程学院学报,1998(4):34-38.
ZHU Y X, HOU Y W, QU W J. Analysis of concrete carbonization on cracks of concrete structure [J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering, 1998(4):34-38. (in Chinese)
- [12] JIANG C, GU X L, ZHANG W P, et al. Modeling of carbonation in tensile zone of plain concrete beams damaged by cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 479-488.
- [13] JANG J G, KIM G M, KIM H J, et al. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 762-773.
- [14] PAPADAKIS V G, FARDIS M N, VAYENAS C G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation [J]. Materials and Structures, 1992, 25(5): 293-304.

(编辑 胡英奎)