

文章编号:1673-2049(2010)01-0117-05

# 混凝土桥梁结构的等耐久性设计

郭 猛<sup>1</sup>, 刘 洪<sup>2</sup>, 白文静<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068;  
3. 中国人民解放军总装备部工程设计研究总院, 北京 100028)

**摘要:**在对 6 个矩形、2 个 T 型、2 个 II 型混凝土梁进行风加速碳化试验的基础上, 结合已有工程检测数据, 对自然风环境下混凝土桥梁结构的等耐久性设计提出了初步建议。分析结果表明: 在实际桥梁耐久性设计中, 考虑风加速混凝土碳化具有重要意义和实用价值; 考虑风加速混凝土碳化的桥梁结构等耐久性设计方法较传统耐久性设计方法更加科学合理, 理论上避免了梁体各表面耐久性不等的弊病, 延长了桥梁结构的使用年限。

**关键词:**桥梁结构; 碳化; 混凝土保护层厚度; 自然风环境; 等耐久性设计

**中图分类号:** TU375.1 **文献标志码:** A

## Equal Durability Design of Concrete Bridge Structure

GUO Meng<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, BAI Wen-jing<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Highway Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Center for Engineering Design and Research Under the Headquarters of General Equipment, PLA, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Based on carbonization experiments of 6 rectangular, 2 T-type and 2 II-type concrete beams accelerated by wind, combining existing testing data, some primary advices were put forward about equal durability design of concrete bridge structure influenced by wind in natural wind environment. Analytical results show that the concrete carbonization accelerated by wind which has important significance and use value is considered. Concrete carbonization of bridge structure accelerated by wind which is more reasonable than traditional method is considered. The design method can avoid the shortage of durability unequal on beam sections in theory, and extend using time of bridge structure.

**Key words:** bridge structure; carbonization; thickness of concrete cover; natural wind environment; equal durability design

## 0 引 言

通过对既有混凝土结构的耐久性检测发现, 受风影响不同的混凝土碳化情况不一样: 前苏联学者古谢诺夫对巴库地区数 10 座混凝土高压输电塔碳化情况的调查资料表明, 长期受强风作用的迎风面

混凝土和背风面的混凝土碳化深度是其他各面的 1.5~2.0 倍<sup>[1]</sup>; 笔者所在的课题组对中国川黔铁路线上使用 30 余年的混凝土桥梁耐久性检测结果显示, 直接受风作用的迎风面碳化深度是不受风面的 1.15 倍<sup>[2]</sup>。这些实例说明了裸露的混凝土构筑物长期受风作用其各表面碳化速度不一致的现象是客

观存在的。

文献[3]中根据达西定律和传质学质量传递原理推导出了迎风面风加速混凝土碳化的数学模型,将风压导致 CO<sub>2</sub> 在混凝土中渗透引起的碳化转化为求解混凝土中 CO<sub>2</sub> 的质量浓度分布,从而再确定渗透碳化深度。文献[4]中进一步提出了适用于该模型的  $p$ - $x$ - $t$  关系式,即假设混凝土介质内的风压  $p$  与渗透碳化深度  $x$ 、外界风压  $p_0$  和碳化时间  $t$  符合某一具体的函数关系,得出介质内渗透碳化深度  $x$  处酸性气体的浓度分布,最后求出在外界给定风压作用下,渗透引起的碳化深度与时间的关系式。

为了验证风对混凝土碳化的影响程度,观察结构不同表面(迎风面、侧风面、背风面及间接受风面等)的碳化差异,在同济大学耐候实验室进行了风加速混凝土碳化的试验研究<sup>[5-6]</sup>,基本掌握了风环境下不同表面混凝土碳化速度受风影响的规律以及风加速混凝土碳化的作用机理。笔者在试验研究和理论分析的基础上,结合混凝土高压输电塔及铁路桥梁的耐久性检测数据,以混凝土桥梁结构为研究对象,对风环境下混凝土桥梁结构的等耐久性设计提出了初步建议。

1 风加速混凝土碳化试验

在温度、相对湿度、CO<sub>2</sub> 质量浓度相同的条件下,对相同材料配合比、相同尺寸的混凝土梁试件进

行风加速碳化试验,分别测量风作用和无风作用混凝土试件的碳化深度,观察试件不同受风作用面碳化深度的差异。试件设计以常见铁路、公路桥梁截面为原型,以影响混凝土碳化的主要因素为依据,根据耐候实验室的风洞条件设计了 6 个矩形、2 个 T 型、2 个 Π 型混凝土梁试件,如图 1 所示,括号内的数值为风压力系数。各试件混凝土试验参数如表 1 所示。

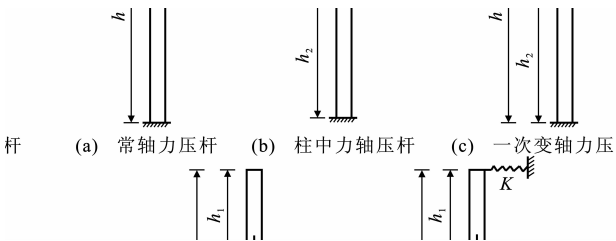


图 1 梁试件的形状及尺寸(单位:mm)  
Fig. 1 Shape and Dimension of Beam Specimens (Unit:mm)

碳化试验结束后取出混凝土梁试件,按照 2~3 cm 间距切成薄片,用质量分数为 1% 的酒精酚酞试剂测定试件新切面的碳化深度,整理试验数据得无风作用下的混凝土平均碳化深度分别为:矩形梁 26.94 mm、T 型梁 7.75 mm、Π 型梁 21.22 mm。以无风作用下的混凝土碳化深度为基准值,计算得出风作用下梁体各表面的混凝土碳化深度和无风作用下碳化深度的比值。

表 1 风加速混凝土梁试件碳化的试验设计参数

Tab. 1 Experiment Design Parameters of Concrete Carbonization for Beam Specimens Accelerated by Wind			
梁试件类型	矩形	T 型	Π 型
混凝土强度等级	C15	C35	C15
水灰比	0.73	0.45	0.70
水泥用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	300	365	300
渗透系数/(10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	123.200	1.635	6.120
周期/d	35	16	21
风作用时间与总时间比/%	35.0	52.0	49.2
实验室条件	空气相对湿度(65±5)%,室内温度 25℃~30℃,CO <sub>2</sub> 质量分数(15±2)%		
风的作用情况	3~4 级风,采用间歇式对混凝土梁施加风作用		

矩形梁各表面混凝土碳化深度比值为  
 $x_f : x_s : x_b : x_{nw} = 1.11 : 1.03 : 0.95 : 1$  (1)  
T 型梁各表面混凝土碳化深度比值为  
 $x_A : x_E : x_C : x_B : x_D : x_{nw} =$   
1.18 : 1.05 : 1.51 : 1.32 : 1.40 : 1 (2)  
Π 型梁各表面混凝土碳化深度比值为  
 $x_A : x_B : x_C : x_D : x_E : x_F : x_{nw} =$   
1.13 : 1.02 : 1.11 : 1.23 : 1.25 : 1.27 : 1 (3)  
式中: $x_f$ 、 $x_s$ 、 $x_b$ 、 $x_{nw}$  分别为迎风面、侧风面、背风面、

无风作用下的碳化深度; $x_A$ 、 $x_B$ 、 $x_C$ 、 $x_D$ 、 $x_E$ 、 $x_F$  分别为试件相应表面 A、B、C、D、E、F 的碳化深度。  
分析风加速混凝土碳化试验现象及试验结果,并结合工程检测结论,得出以下反映风作用对混凝土碳化影响程度的基本规律:  
(1)风作用下的混凝土碳化深度大于无风作用下的混凝土碳化深度。这是很多既有混凝土结构实际碳化速度大于预期碳化速度的原因之一。实验室按现行标准进行混凝土碳化试验时,应该施加风的

作用,使其更加符合自然界碳化的过程。

(2)风作用到结构表面形成的漩涡是混凝土碳化加速的主要因素之一。当风漩涡作用到混凝土表面时,由于其杂乱无规则的运动特点,将不断进入混凝土孔隙中,在变化的风压作用下,混凝土表层内部的气体与外界大气的交换速度加快,酸性气体浓度的补充速度加快,可以维持在一个相对稳定且接近外界大气的浓度值,使得碳化加速进行。

(3)风作用到结构表面形成的壕沟效应是混凝土碳化加速的另一个主要因素。不管结构的尺寸大小如何,壕沟内的混凝土由于受到壕沟效应和二次风流场作用,其碳化深度都将大于外部混凝土表面的,这就从另一个方面解释了风环境下构件各表面的混凝土碳化深度都大于无风状态下碳化深度的原因。

(4)混凝土的渗透碳化深度由风的压力、风的漩涡、构件壕沟效应 3 种因素共同作用所致,而这 3 种加速碳化机制的加速效果均与结构表面形状的复杂程度有关,因此混凝土结构表面形状越复杂,风对其碳化的加速作用越大。

(5)风加速高强度混凝土碳化的效果更明显。随着混凝土强度等级的提高和密实度的增加,受风影响而增加的碳化深度绝对数值减小,但所占总碳化深度的比重增加,风对混凝土碳化的影响形式由风压加速混凝土碳化为主转向风的漩涡加速混凝土碳化为主。

## 2 等耐久性设计

### 2.1 传统混凝土结构保护层设计的缺点

实际铁路、公路桥梁中混凝土梁体截面以矩形、T 型和工字型为主,其耐久性失效多首先表现在截面角区(易受风吹雨淋的上翼缘板角区,以及直接受风吹作用的梁截面受拉部位角区),即混凝土因锈胀开裂常发生在构件截面的角区。

对于混凝土保护层的取值,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[7]</sup>的规定略显得简单,工程调查和耐久性分析均表明现行规范中对复杂、恶劣环境下保护层的取值偏小,导致结构耐久性的可靠度偏低。就本文中所研究的风对混凝土碳化的影响而言,在非严寒(或严寒)地区,因地理位置、地形地貌及环境不同,风的分布规律大不相同,导致在其他条件相同的情况下,混凝土碳化速度也必然不一致,会出现风分布较强地区的结构混凝土碳化速度过快而导致钢筋发生提前脱钝锈蚀现象。具体到同一地

区同样的风环境下,也可能存在因结构形状各异而导致受风影响较大的混凝土结构的耐久性提前失效的现象。

### 2.2 设计建议

钢筋混凝土桥梁表面很少进行覆盖,其保护层受风吹日晒雨淋,碳化速度加快而易导致耐久性的破坏,梁体表面耐久性不等的现象十分明显。由于桥梁在交通中的重要性,耐久性的破坏对其影响远大于一般民用建筑,如位于繁忙铁路线上的桥梁更换,除旧桥的拆除费用、新桥的建设费用外,中断交通还带来巨大的间接损失,因此混凝土桥梁耐久性设计实际上是既考虑眼前利益又兼顾长远利益的耐久性优化设计。

对既有混凝土结构及混凝土桥梁结构保护层的设计问题,部分学者提出了侧重考虑不同因素的耐久性设计方法<sup>[8-13]</sup>,但对于自然环境中风对混凝土碳化的影响尚未涉及。本文中建议在铁路、公路桥梁中的混凝土保护层耐久性设计时,要充分考虑风加速混凝土碳化对耐久性的不利影响,为实现混凝土桥梁的等耐久性,需要对不同表面的混凝土保护层厚度进行合理调整,以期达到表面各边钢筋脱钝时间的一致。

风作用下混凝土桥梁等耐久性设计方法的主要步骤为:

(1)根据结构耐久年限,按规范给出混凝土结构基本保护层厚度  $c$ 。

(2)统计拟建地区的风资料,分析风向、风速、作用时间等的规律性。

(3)依据桥梁所在地的风作用规律,参考理论分析、试验结论和既有检测结果,利用通用流体力学软件模拟风作用到桥梁后形成的风流场,分析表面各部位受风压和漩涡影响的程度,借鉴相关工程检测结果和试验数据确定风对不同边混凝土碳化的影响系数  $K_i$ 。

(4)将  $K_i$  乘以基本保护层厚度  $c$ ,即为所求边的保护层厚度  $c_i$ ,即  $c_i = K_i c$ 。

现在分析常见风环境下混凝土碳化影响系数  $K_i$  的取值。比较式(1)~(3)所给数据可以看出一些共同的特点:大面积的迎风面(如 T 型梁腹板和 II 型梁的迎风面)碳化深度比值为 1.1~1.2,背风面为 1.0~1.1;小面积的迎风面和背风面(如 T 型梁的翼缘迎风面和背风面,从风作用到该部位形成的二次风流场来看,该部位基本以漩涡为主)碳化深度比值为 1.4~1.5;间接受风作用表面(如 II 型梁

内部的各面)碳化深度比值为 1.2~1.3。自然界中类似实验室内的风条件是常见的,而且较实验室内单一的风向和风速更加复杂多变,偏于安全考虑,建议工程中混凝土桥梁在风环境中的各表面碳化深度比值为

$$K_A : K_B : K_C : K_D : K_E : K_F =$$
$$1.2 : 1.5 : 1.3 : 1.4 : 1.3 : 1 \tag{4}$$

式中: $K_A$  为相对大面积迎风面碳化深度; $K_B$  为相对小面积迎风面和背风面碳化深度; $K_C$  为相对大面积背风面碳化深度; $K_D$  为侧风面碳化深度; $K_E$  为间接受风面碳化深度; $K_F$  为无风面碳化深度。

3 算例分析

某近海地区一跨度为 16 m 的桥梁,其截面形状及尺寸如图 2 所示,梁高 1 900 mm,约为跨度的 1/8.4。混凝土扩散系数为 $10.35\text{ mm}^2 \cdot \text{年}^{-1}$ (混凝土强度等级 C30,相当于混凝土单向碳化速度系数为 4.5),钢筋保护层厚度设计为 30 mm,因地理位置重要预计使用至少 50 年。已知当地风为海陆风,风向大多数垂直于桥梁走向,以 3~6 级风为主,试对风作用下桥梁表面进行等耐久性设计并与传统保护层设计方法进行比较,简单起见,混凝土保护层优化设计仅考虑风的影响。

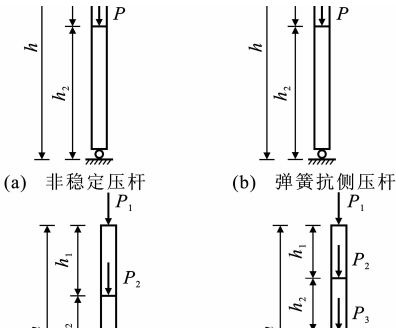


图 2 桥梁的截面形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Section Shape and Dimension of Bridge (Unit:mm)

结合风加速 T 型和 II 型混凝土梁碳化试验结果及式(4),并考虑海陆风的运动特点,确定风作用下桥梁各表面混凝土保护层的调整系数,结果如图 3 所示,其中,括号内的数值为风压力系数。

原设计中梁钢筋保护层厚度取 30 mm,则结构在不考虑风作用下,由混凝土碳化深度决定的耐久寿命为

$$t_n = \frac{c^2 t}{x_{c,t}^2} = 44.1 \text{ 年}$$

式中: $t_n$  为不考虑风作用桥梁的耐久寿命; $t$  为碳化时间;可暂取 20 年; $x_{c,t}$  为单一扩散作用在  $t$  时引起

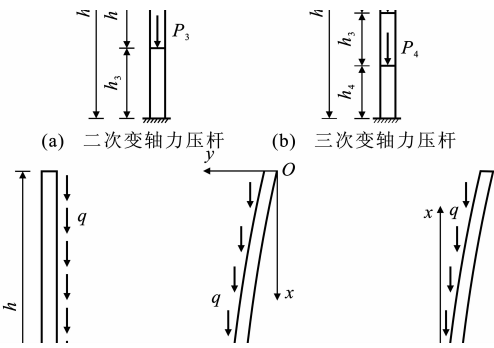


图 3 风作用下桥梁各表面混凝土保护层的调整系数(单位:mm)

Fig. 3 Adjustment Coefficients of Concrete Cover for Bridge Surfaces Influenced by Wind (Unit:mm)

的碳化深度,当  $t=20$  年时, $x_{c,t}=20.2\text{ mm}$ 。

考虑风对混凝土碳化的影响,在扩散和渗透双重作用下,桥梁的面  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  的耐久寿命  $t_{n,A'}$ 、 $t_{n,B'}$ 、 $t_{n,C'}$ 、 $t_{n,D'}$  分别为

$$t_{n,A'} = \frac{c^2 t}{(1.5x_{c,t})^2} = 19.6 \text{ 年}$$

$$t_{n,B'} = \frac{c^2 t}{(1.2x_{c,t})^2} = 30.6 \text{ 年}$$

$$t_{n,C'} = \frac{c^2 t}{(1.4x_{c,t})^2} = 22.5 \text{ 年}$$

$$t_{n,D'} = \frac{c^2 t}{(1.3x_{c,t})^2} = 26.1 \text{ 年}$$

由上面的计算结果可知,在使用 22 年以后,梁体钢筋便开始出现脱钝锈蚀的现象。考虑风加速混凝土碳化的影响,对桥梁保护层进行等耐久性设计,令各表面混凝土的碳化深度趋于一致,理论上将同时达到设计预期的 50 年使用年限,耐久寿命延长了 120% 以上。

算例中增加的保护层每延米比原来多使用混凝土  $0.105\text{ m}^3$ ,即每延米仅比原设计增加了约 4.1% 的混凝土用量,相对于桥梁建设总投资而言该费用所占比重很小。算例显示,将保护层按等耐久性原则调整后,仅增加较少的投入即可有效地延长结构的耐久性,改进后的耐久性设计方法是比较优越的。

4 结 语

(1)风环境中服役的混凝土结构物,在风作用下各表面碳化速度不等的现象已被巴库地区数 10 座混凝土高压输电塔和川黔铁路线上混凝土桥梁结构耐久性检测所证实。通过风加速 6 个矩形、2 个 T 型、2 个 II 型混凝土梁的碳化试验,进一步证实了风加速混凝土碳化的客观性,在此基础上,总结出了风

作用对混凝土碳化影响程度的基本规律,并进行了解释和说明。

(2)结合工程检测、试验研究和理论分析,给出了风环境下各表面混凝土碳化深度的比值;以混凝土桥梁结构为研究对象,首次对风环境下桥梁结构的等耐久性设计方法提出了初步建议。

(3)考虑风加速混凝土碳化下桥梁结构的等耐久性设计方法较传统耐久性设计方法更加科学合理,理论上避免了梁体各表面耐久性不等的弊病,延长了桥梁的使用年限,间接地为社会创造了财富。

## 参考文献:

## References:

- [1] 莫斯克文 B M. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法[M]. 倪继森,译. 北京:化学工业出版社,1988.  
MOSKVIN B M. The Corrosion and Defending Methods About Concrete and Reinforced Concrete [M]. Translated by NI Ji-miao. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [2] 屈文俊,张 誉,车惠民. 既有混凝土结构的碳化预测[J]. 建筑结构,1999,36(4):31-34.  
QU Wen-jun, ZHANG Yu, CHE Hui-min. Carbonization Predicting on Existing Concrete Structures [J]. Building Structure, 1999, 36(4): 31-34.
- [3] 白文静. 风压加速混凝土碳化计算模型[D]. 上海:同济大学,2003.  
BAI Wen-jing. Calculating Model of Concrete Carbonization Accelerated by Wind Pressure [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [4] 陈道普. 风对混凝土碳化速度影响的研究[D]. 上海:同济大学,2006.  
CHEN Dao-pu. The Study on the Influence on Carbonization Speed of Concrete by Wind [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [5] 郭 猛. 风加速混凝土碳化的试验研究[D]. 上海:同济大学,2005.  
GUO Meng. The Experimental Study on Carbonization of Concrete Accelerated by Wind [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [6] 屈文俊,赵红晓. 风压加速 II 型混凝土梁渗透碳化深度分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(4):15-18.  
QU Wen-jun, ZHAO Hong-xiao. Analysis of Filter Carbonization Depth of II Type Concrete Beam with Wind Pressure Acceleration [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 15-18.
- [7] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [8] 贺拴海,吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):71-75.  
HE Shuang-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.
- [9] 吴海军,陈艾荣. 桥梁结构耐久性设计方法研究[J]. 中国公路学报,2004,17(3):57-61.  
WU Hai-jun, CHEN Ai-rong. Study of Durability Design Method for Bridge Structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 57-61.
- [10] 李世秋,汪厚植,胡新民. 桥梁预应力钢筋混凝土结构耐久性影响因素及对策[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(6):41-43.  
LI Shi-qiu, WANG Hou-zhi, HU Xin-min. Influencing Factors on Durability and Counter Measure of Bridge Prestressed Concrete Structure [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6): 41-43.
- [11] 刘龄嘉,赵小星,贺拴海. 混凝土模型梁模态试验方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):58-61.  
LIU Ling-jia, ZHAO Xiao-xing, HE Shuan-hai. Modal Test Method for Concrete Beams Model [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 58-61.
- [12] 姚晓飞,徐 岳,付迎春. 混凝土铰接 T 梁桥结构体系损伤评价试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):65-69.  
YAO Xiao-fei, XU Yue, FU Ying-chun. Test on Damage Assessment of Hinged Concrete T-beam Bridge System [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 65-69.
- [13] 杨 剑,方 志. 预应力超高性能混凝土梁的受弯性能研究[J]. 中国公路学报,2009,22(1):39-46.  
YANG Jian, FANG Zhi. Research on Flexural Behaviors of Prestressed Ultra High Performance Concrete Beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 39-46.