

考虑风压影响混凝土箱梁的碳化规律及耐久性设计

蔺鹏臻^{1,2}, 王雲一¹, 颜维毅¹, 张若男¹, 保琛¹

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 已有工程检测、理论分析和试验研究表明: 风对混凝土碳化的加速作用是客观存在的, 风对混凝土碳化的影响会使混凝土结构截面提前发生破坏。为使混凝土结构各截面耐久性一致, 对该问题进行深入研究很有必要。基于试验与实测数据以及有限元软件 FLUENT 的分析, 对风压作用下混凝土箱梁结构截面等耐久性设计提出了建议, 同时, 也为混凝土结构等耐久性设计理论的建立做了初步探索。通过构造简单的算例显示, 对混凝土结构截面进行等耐久性设计时, 将风对混凝土碳化的影响这一因素考虑在内会使设计更加科学合理, 能够有效延长桥梁结构的使用寿命, 并对指导实际混凝土工程设计、施工和维护具有重要的应用价值。

关键词: 箱梁; 碳化; 风压; 渗透; 保护层厚度; 等耐久性设计

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0009-06

Carbonation law and durability design of concrete box girder considering the effect of wind pressure

LIN Pengzhen^{1,2}, WANG Yunyi¹, YAN Weiyi¹, ZHANG Ruonan¹, BAO Chen¹

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University,

Lanzhou 730070, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The existing engineering tests, theoretical analysis and experimental studies show that the acceleration effect of wind on concrete carbonization is objective, so the section of concrete structure will be damaged in advance. In order to make the durability of each section of concrete structure consistent, it is very necessary to study this problem. Based on the test and measured data and the analysis of the finite element software FLUENT, in this paper, some opinions on the equal durability design of concrete box girder structure section under the influence of wind pressure are put forward. At the same time, it also makes a preliminary work for the establishment of equal durability design theory of concrete structure. In the design process, consideration of the influence of wind pressure on concrete carbonization can make the equal durability design of concrete structure section more scientific and reasonable by means of simple calculation example. The method can effectively extend the service life of the bridge structure, which has important application value for guiding the design, construction and maintenance of practical concrete engineering.

Key words: box girder; carbonization; wind pressure; filter; thickness of concrete cover; equal durability design

建筑物在长期使用过程中, 在内部和外部因素作用下, 材料随时间的推移发生不可逆的劣化, 结构也会逐渐出现损伤, 这将导致结构承载力下降和耐久性能降低, 进而影响结构的使用功能, 甚至安全性^[1]。

混凝土结构在大气环境下导致其耐久性失效大多是由钢筋锈蚀引起的^[2-3], 钢筋锈蚀会导致混凝土结构的保护层剥落。从耐久性失效的混凝土结构

实际检测情况来看, 碳化是造成钢筋锈蚀的主要原因^[4]。混凝土碳化又称中性化, 是指空气中的二氧化碳等酸性气体通过孔隙渗透到混凝土内, 与其碱性物质发生反应, 生成碳酸钙或其他物质的现象。混凝土碳化会降低混凝土的 pH 值, 完全碳化混凝土的 pH 值约为 8.5~9.0, 使混凝土中的钢筋脱钝、失去保护而锈蚀。混凝土碳化的影响因素包括^[5]: (1)混凝土本身的密实度; (2)空气中二氧化

收稿日期: 2020-05-25

修改稿日期: 2021-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(11790281); 国家自然科学基金资助项目(51878323); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题基金资助项目(2017G010-C)

第一作者: 蔺鹏臻(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事桥梁结构性能理论及耐久性研究。E-mail: pzhlin@mail.lzjtu.cn

碳含量;(3)环境湿温度;(4)结构的受力状态;(5)外界风压,其中风速大小和作用时间长短是风压影响混凝土碳化的主要控制因素.风速越大、作用时间越久,碳化速率越快,风形成的漩涡及交替风压也会加速混凝土的碳化.大气环境下风压对混凝土耐久性的影响主要体现在风使混凝土中的二氧化碳气体扩散加快,以及空气中的水、氧气和其他有害气体杂质(如氯离子)在混凝土中的加速渗透,这些因素都会加快混凝土的劣化.

苏联学者古谢诺夫调研巴库地区高压输电塔混凝土支座的耐久性,发现在强风长期作用下,混凝土支座在迎风面的碳化深度是其他面碳化深度的1.5~2.0倍^[6].屈文俊等^[7-8]对中国川黔铁路线上服役34 a的桥梁进行调研,发现在混凝土碳化深度方面,受风影响较大面是其他面的1.15倍,迎风面角区混凝土由碳化引起钢筋锈蚀导致的破坏提前发生.实际工程中,风加速混凝土碳化导致结构截面耐久性不等,这一现象是客观存在的.因此,针对风影响混凝土的碳化规律研究具有重要工程意义.

陈道普等^[9-12]通过在同济大学耐候实验室进行风压加速混凝土碳化的试验,分析了风加速矩形截面梁,T型截面梁和Π型截面梁等碳化规律,证明了风可以导致混凝土构件截面耐久性不等,进一步验证了这种影响的客观性.在风压作用下,二氧化碳在混凝土中的流动为渗透作用,符合达西定律和传质守恒定律.白文静等^[13]根据达西定律和介质中质量传播定律建立了风压加速混凝土碳化的数学模型,验证了该模型的正确性,并对风压影响混凝土的碳化规律进行了初步分析.

涉及风影响混凝土碳化的国内外研究中,大多是针对矩形截面梁这类简单结构,而对风加速箱梁等复杂结构的研究较少;本文在已有理论研究和试验工作的基础上,基于有限元分析软件FLUENT,以混凝土箱梁为研究对象,分析箱梁周围的风压、风速以及流场分布,结合风加速混凝土碳化试验结果,给出风作用下混凝土箱梁截面等耐久性设计的初步建议,进而为后续的风加速箱梁等复杂结构碳化研究提供理论支持与参考依据.

1 风压加速混凝土碳化

1.1 风压加速混凝土碳化计算模型

利用文献^[13]中建立的迎风面风加速混凝土碳

化的计算模型公式,即

$$\frac{\partial \rho(\text{CO}_2)}{\partial t} = \frac{k}{\mu} m_0 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数, $k=5.592 \times 10^{-17} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为气体的粘性系数, $\mu=1.95 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; m_0 为大气中 CO_2 的质量密度; $\rho(\text{CO}_2)$ 为混凝土中 CO_2 的质量浓度.

由式(1)可见,先求出混凝土内 CO_2 的质量浓度分布,再求出 CO_2 渗透引起的碳化深度.碳化深度 x 、时间 t 和外界风压都会影响混凝土内部压力 p 的取值,因此,建立合理的 p - x - t 模型极为重要.

p - x - t 关系采用 $p=cx^\alpha t^\beta+d$ 模型^[13],对 p - x - t 关系式两次求导,得

$$\partial^2 p / \partial x^2 = c\alpha(\alpha-1)x^{\alpha-2}t^\beta \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),并对时间 t 积分,得

$$\rho = \frac{k}{\mu} m_0 c\alpha(\alpha-1)x^{\alpha-2} \frac{t^{\beta+1}}{\beta+1} + b \quad (3)$$

迎风面压强 $p=p_0$,大气中 CO_2 质量浓度为 $6.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,边界条件①: $p(x=0, t=\text{任意值}) = -p_0$,求得 $d=-p_0$.设风压在 $x \leq 50 \text{ mm}$ 范围内下降为0,时间为25 a,则得边界条件②: $p(x=50 \text{ mm}, t=25)=0$,即

$$c 50^\alpha 25^\beta = p_0 \quad (4)$$

CO_2 浓度在混凝土中分布状态是非线性的,为方便计算, CO_2 浓度按线性分布考虑.不考虑部分碳化区,仅考虑 CO_2 浓度变化,假设完全碳化处 $\rho(\text{CO}_2)=0.3\rho_0$.参考文献^[13]构造的算例,取 $\beta=-1.5$,且8.5 a由风引起的渗透作用碳化深度为2.85 mm,得到边界条件④: $\rho(x=2.85 \text{ mm}, t=8.5 \text{ a})=0.3\rho_0$.设系数 b 为常数,则可以得到边界条件③: $\rho(x=0, t=\text{任意值})=6.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,计算出 $b=6.0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.代入式(3),得

$$\begin{aligned} 0.3 \times 6.0 \times 10^{-4} &= \frac{k}{\mu} m_0 c\alpha(\alpha-1) \times \\ &2.85^{\alpha-2} \times \frac{8.5^{\beta+1}}{\beta+1} + 6.0 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可求出 c 和 α ,从而得到风压影响混凝土碳化的 p - x - t 表达式.

1.2 风压加速混凝土碳化试验

文献^[9]中陈道普团队对三种不同截面梁试件进行了风压加速混凝土碳化试验研究:在相同温湿度和二氧化碳浓度条件下,对相同配合比试件进行

试验. 如图 1 所示, 括号内的数值为风压力系数.

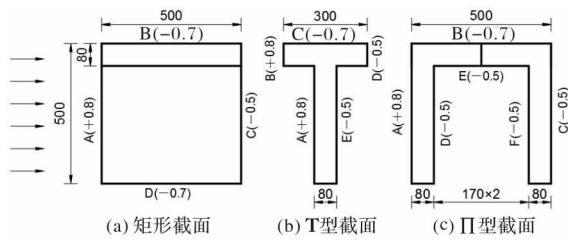


图 1 试件截面尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Section size of specimens/mm

在该试验中, 测定达到既定反应时间的混凝土试件碳化深度, 整理实验数据, 分别得到试件各面混凝土碳化深度, 以不受风作用面碳化深度为基准, 计算出风作用下梁体各面平均碳化深度的比值. 表 1 为梁试件各面碳化深度比值.

文献[9]中通过风对混凝土碳化加速试验以及工程中实际检测结果, 初步得到风加速混凝土碳化的基本规律:

(1) 大气环境下, 导致混凝土碳化加速的主要原因之一就是风压作用. 不断变化的风压会比较平稳的风压更能加快混凝土结构的碳化破坏, 因为, 不断变化的风压可以在孔隙内部产生压力, 另外, 不断变化的风压比较容易形成漩涡, 使混凝土内外部的气体加速交换. 风受结构表面扰动也会产生一定的涡旋气流, 混凝土孔隙内的气体与大气环境交换加快, 加速混凝土碳化.

(2) 由风压引起的混凝土结构碳化, 在渗透作用下, 在后期高强混凝土的碳化深度比低强混凝土更加明显, 风对混凝土碳化的最主要影响原因是由风压转变为风的漩涡导致混凝土碳化加速.

(3) 对于在结构内部有壕沟的混凝土结构, 受风压作用后, 必定有风压存在于壕沟内. 外部风作用消失后, 内部的风流场并不能马上消失, 因此, 不管结构的尺寸大小如何, 壕沟内部面的混凝土碳化深度在交替风压下会比结构外部其他面的碳化深度更大.

表 1 试件各面碳化深度比值

Tab. 1 Carbonization depth ratio of each surface of specimens

受风面	A 面	B 面	C 面	D 面	E 面	F 面	无风面
矩形梁	1.11	1.03	0.95	1.03	—	—	1
T 型梁	1.18	1.51	1.32	1.40	1.05	—	1
Π 型梁	1.13	1.11	1.02	1.23	1.25	1.27	1

2 有限元分析混凝土箱梁周围流场分

2.1 箱梁模型、边界条件及数值方法

箱梁跨度为 6 000 mm, 横截面如图 2 所示. 实际工程中为减少箱内外温差, 常常在箱梁两侧腹板设置通风孔, 该模型设置直径 10 mm 的通风孔,

顺桥向间距为 1 500 mm, 孔中心距箱梁底面 160 mm.

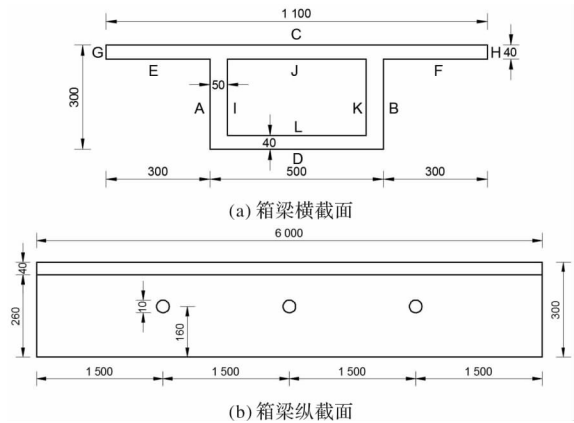


图 2 箱梁的截面尺寸 (单位: mm)

Fig. 2 Section size of box girder/mm

风对箱梁的绕流是一个完全开口的流场, 但是在有限元软件分析计算时, 必须给定一个在箱梁周围有限大小的计算区域, 为使风流场充分发展, 计算域大小为: 8 400 mm × 5 900 mm × 2 700 mm, 流体为空气, 风力等级为 4~5 级风, 风速为 8 m/s. 整个模型包含 222 759 个网格, 网格划分结果如图 3 所示. 模型计算域各边界条件:

- (1) 入口边界: 采用速度入口边界条件;
- (2) 出口边界: 采用完全发展流动边界条件;
- (3) 箱梁表面固定不动, 采用无滑移壁面条件.

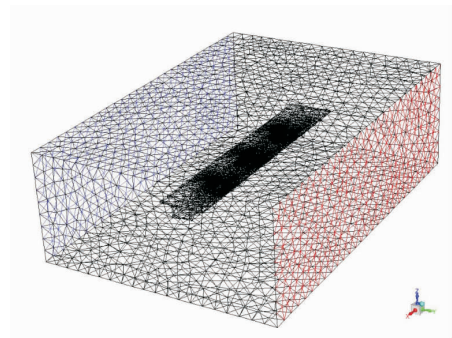


图 3 箱梁模型与网格划分

Fig. 3 Boxgirder model and grid partition

桥梁结构是非流线体, 也称为钝体, 对风表现为钝体形状, 空气绕过桥梁结构时, 其边界上形成流动分离, 流场存在分离流和剪切层的非定常振动, 钝体周围的流场是由撞击、分离、再附、环绕和漩涡等确定的^[14], 十分复杂多变. 另外桥梁结构位于大气边界层中, 气体流动杂乱无序, 流动表现为湍流运动. 湍流最主要特征是流体微团在时间和空间上都是非线性随机运动的, 在工程应用中, Realizable $k-\epsilon$ 模型能在整体上很好地反映出箱梁结构表面风压的变化规律, 模拟结果精确度较高, 与试验值相差较小且计算效率高, 所以采用该模型. 考虑到风对箱梁的作用属于定常状态, 由于

SIMPLE 可以加快收敛速度, 因而压力-速度耦合方程的解法采用 SIMPLE 算法。

2.2 计算结果

(1) 箱梁截面周围风速分布

选取跨中截面的分析结果, 可得到箱梁截面周围风速分布如图 4 所示。

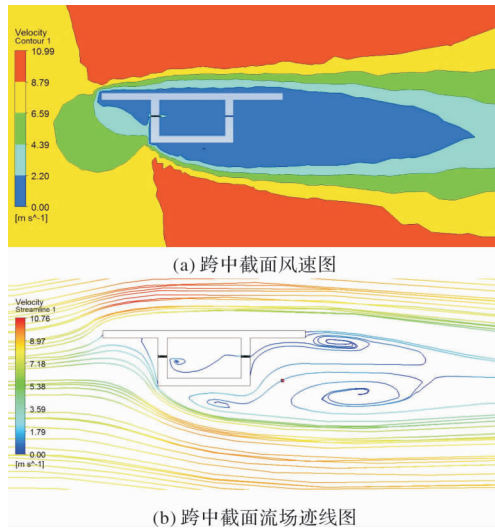


图 4 箱梁周围风速分布图

Fig. 4 Wind velocity distribution graph around box girder

参考风对结构物作用的有关文献^[14-16], 由风速分布图和迹线分布图可以看出, 箱梁阻风面较大, 风流场到达箱梁迎风面时, 风向迅速转变, 气流绕流到箱梁上下表面, 并且偏离箱梁上下表面, 此时流动速度加快, 然后在背风面形成回流, 在侧风面和背风面形成不规则漩涡, 风通过腹板两侧通风孔及箱梁两端进入箱梁内部, 也会产生漩涡。

(2) 箱梁截面周围风压分布

选取跨中截面的分析结果, 可得到箱梁截面周围风压分布如图 5 所示。

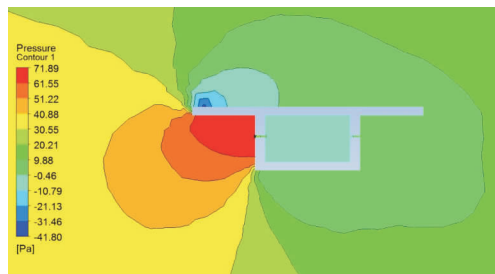


图 5 箱梁周围风压分布图

Fig. 5 Wind pressure distribution graph around box girder

由风压分布图可以看出, 迎风面腹板和翼缘下侧风压最大, 对于风流场来势, 翼缘迎风面较突出, 动压力较大。气流在迎风面和侧风面角区分离, 在侧风面角区产生最大负压力, 顺着风向侧风面受到的负压力逐渐减小, 并转变为正压力。由于侧风面较大, 前半部分受到的平均作用力为吸力,

后半部分受到的平均作用力为压力, 侧风面的气体在表面附着较多, 在负压力作用及表面不规则漩涡的影响下, 气流交换速度较快。

2.3 迎风面渗透碳化深度

(1) 迎风 A 面平均压强 $p = p_0 = 65 \text{ Pa}$, 结合式(4)和式(5)可求出 $c = 2.3 \times 10^{-5}$, $\alpha = 5.02$ 。风压表达式为

$$p = 2.3 \times 10^{-5} x^{5.02} t^{-1.5} - 65 \quad (6)$$

A 面在风压作用下(渗透引起的)混凝土中 CO_2 质量浓度为

$$\rho = -4.86 \times 10^{-5} x^{3.02} t^{-0.5} + 6.0 \times 10^{-4} \quad (7)$$

A 面在渗透作用下的碳化深度为

$$x = (8.66 \sqrt{t})^{1/3.02} \quad (8)$$

(2) 迎风 G 面平均压强 $p = p_0 = 40 \text{ Pa}$, 结合式(4)和式(5)可求出 $c = 3.2 \times 10^{-5}$, $\alpha = 4.83$ 。风压表达式为

$$p = 3.2 \times 10^{-5} x^{4.83} t^{-1.5} - 40 \quad (9)$$

G 面在风压作用下(渗透引起的)混凝土中 CO_2 质量浓度为

$$\rho = -6.43 \times 10^{-5} x^{2.83} t^{-0.5} + 6.0 \times 10^{-4} \quad (10)$$

G 面在渗透作用下的碳化深度为

$$x = (6.53 \sqrt{t})^{1/2.83} \quad (11)$$

$p-x-t$ 关系如图 6 所示, 渗透碳化深度 x 与时间 t 的关系如图 7 所示。

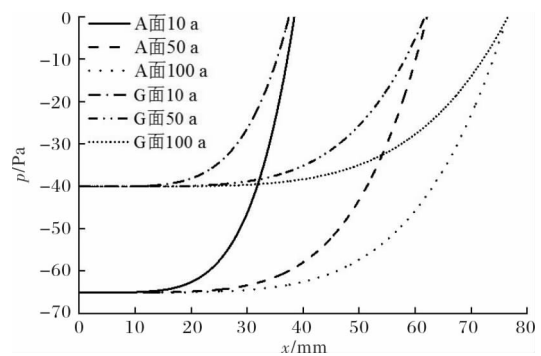


图 6 $p-x-t$ 关系

Fig. 6 $p-x-t$ Relationship

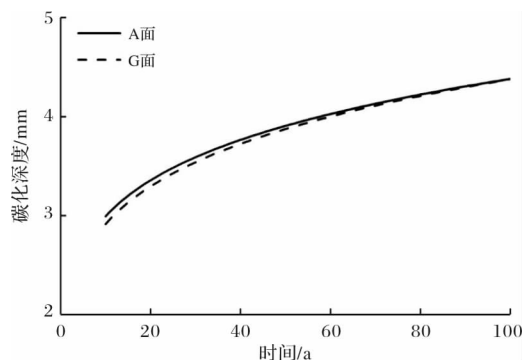


图 7 碳化深度-时间关系

Fig. 7 $x-t$ Relationship

3 等耐久性设计

混凝土构件由钢筋锈蚀引起的胀裂大多发生在直接受风压作用面的角区(角区混凝土受双向侵蚀作用), 通过对既有混凝土结构耐久性检测表明, 混凝土构件角区部位最先发生耐久性破坏^[17-19], 说明按传统方法对混凝土结构进行耐久性设计时, 并没有考虑到这一因素, 这会导致混凝土梁截面耐久性不等。因此, 本文建议在设计箱梁混凝土保护层厚度过程中, 将风压对混凝土碳化的不利影响考虑在内, 对箱梁各面的混凝土保护层厚度重新设计, 使截面各边钢筋钝化膜破坏时间基本一致, 避免耐久性能的浪费, 从而达到截面等耐久性设计的目的, 其设计流程为:

(1) 根据规范给出混凝土结构基本保护层厚度 C ;

(2) 调查桥梁建设地区风气象资料, 包括各个季节的风力等级、风向等;

(3) 根据查阅的气象资料, 整理得到该地区的风作用规律, 结合相关试验结论、既有桥梁检测结果, 以及风对结构物作用相关理论, 利用有限元软件分析混凝土箱梁在风作用下周围的流场分布, 针对箱梁各表面风压和漩涡的分布情况, 分别给出箱梁各个面的混凝土碳化影响系数 K_i ;

(4) 箱梁截面各边的混凝土保护层厚度 C_i 等于 K_i 乘以基本保护层厚度 C , 即: $C_i = K_i \times C$ 。

现在分析常见风环境下箱梁混凝土碳化影响系数 K_i , 根据风压加速混凝土碳化试验数据整理出的表 1 试件碳化深度比值, 并结合 FLUENT 分析风作用下混凝土箱梁的流场分布, 可以得到以下共同特点: 大面积迎风面碳化深度比值为 1.1~1.2; 背风面碳化深度比值为 1.0~1.1; 小面积迎风面和背风面碳化深度比值为 1.4~1.5; 箱梁内部各受风面碳化深度比值为 1.1~1.2。试验室内的风是单一风向的, 风环境比较简单, 但是自然界中的风环境比试验室的风环境更加复杂, 所以应偏安全设计, 建议实际工程中箱梁在风环境中各面碳化影响系数取值如表 2 所示:

表 2 箱梁各面碳化影响系数

Tab. 2 Carbonization influence coefficient of each surface of box girder

受风面	K_A	K_B	K_C	K_D	K_E	K_W
碳化影响系数	1.2	1.5	1.3	1.4	1.2	1

注: K_A 为相对大面积箱梁迎风面; K_B 为相对小面积箱梁迎风面和背风面; K_C 为相对大面积箱梁背风面; K_D 为箱梁侧风面; K_E 为箱梁内部受风面; K_W 为不受风作用面。

4 等耐久性设计应用

位于三门峡的豪华铁路一座公铁两用桥梁, 梁体截面采用箱梁, 其截面形状及尺寸见图 8 所示。箱梁截面高 3.4 m, 约为跨度的 1/11.76, 考虑 2% 的桥面横坡, 箱梁中心线处梁高 3.488 m, 顶板宽度为 12.1 m, 底板宽度为 5.5 m, 截面中心线处顶板厚 0.418 m, 底板厚 0.3 m, 腹板厚 0.48 m, 翼缘板厚为 0.25~0.6 m。为减少箱内外温差的影响, 箱梁在结构两侧腹板上设置直径 100 mm 的通风孔, 顺桥向间距 2 m, 竖向位置距箱梁底面 1.7 m。为保证箱内排水, 在底板处设置直径 100 mm 的泄水孔。混凝土强度等级为 C50, 保护层厚度为 30 mm, 混凝土单向碳化系数 $A = 4.1$, 已知当地以 4~6 级风为主。简单起见, 混凝土保护层优化设计仅考虑风的影响, 桥梁受风压作用及改变钢筋保护层厚度的部位如图 9 所示。

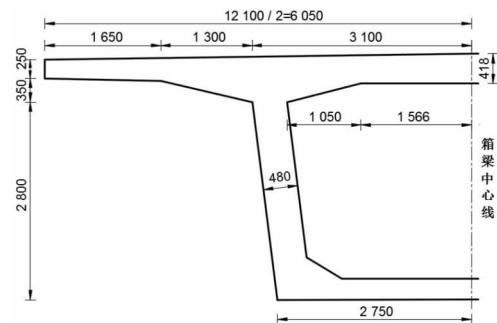


图 8 箱梁的截面形状及尺寸(单位: mm)

Fig. 8 Section shape and dimension of box girder/mm

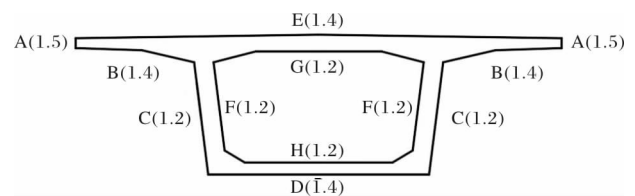


图 9 考虑风压作用下箱梁保护层厚度调整比值

Fig. 9 Adjustment ratio of thickness of concrete cover for box girder considering the effect of wind pressure

原设计中, 箱梁钢筋保护层厚度为 30 mm, 不考虑风作用下, 耐久寿命为

$$t_n = \frac{c^2 t}{x_{c,t}^2} = \frac{30^2 \times 30}{22.5^2} = 53.3 \text{ a}$$

式中, t_n 为不考虑风作用桥梁的耐久寿命, 单位 a; c 为混凝土保护层厚度, 单位 mm; t 为碳化时间, 可取 $t = 30 \text{ a}$; $x_{c,t}$ 为单一扩散作用在 t 年时引起的碳化深度, 当 $t = 30 \text{ a}$ 时, $x_{c,t} = 22.5 \text{ mm}$ 。

考虑风加速混凝土碳化的影响, 在扩散和渗透双重作用下, 箱梁的 A 面、B 面、C 面耐久寿命

$t_{n,A}$ 、 $t_{n,B}$ 、 $t_{n,C}$ 分别为

$$t_{n,A} = \frac{c^2 t}{(1.5x_{c,t})^2} = \frac{30^2 \times 30}{(1.5 \times 22.5)^2} = 23.7 \text{ a}$$

$$t_{n,B} = \frac{c^2 t}{(1.4x_{c,t})^2} = \frac{30^2 \times 30}{(1.4 \times 22.5)^2} = 27.2 \text{ a}$$

$$t_{n,C} = \frac{c^2 t}{(1.2x_{c,t})^2} = \frac{30^2 \times 30}{(1.2 \times 22.5)^2} = 37.0 \text{ a}$$

通过对桥梁耐久寿命计算可知,如果未考虑风加速混凝土碳化这一影响因素,桥梁服役时间达到27 a时,梁体钢筋就会出现脱钝锈蚀的现象.如果将这一因素考虑在内,重新进行等耐久性设计,对保护层厚度进行适当调整,桥梁的耐久寿命将会达到53 a,服役寿命延长95.96%.

对保护层厚度进行重新设计后,每延米增加的混凝土用量为0.43 m³,即,每延米多使用约4.57%的混凝土.从算例可以看出,采用新设计理论,仅增加较少的材料投入就能有效的延长桥梁的服役寿命,极大地减少了因为耐久性问题带来的经济损失.

5 结论

(1)通过理论分析、试验结论和既有桥梁检测结果显示,风压加速混凝土碳化这一现象是客观存在的,这也是导致实际工程中混凝土结构耐久性不等,并过早发生碳化破坏的原因之一;

(2)以实际工程中常见的箱梁结构为研究对象,在针对箱梁结构等耐久性设计过程中,首次考虑风压对箱梁耐久性的影响,并改进等耐久性设计方法,给出了箱梁各表面碳化影响系数,为混凝土结构等耐久性设计理论的建立做了初步工作;

(3)弄清风对混凝土碳化的影响规律,完善风加速混凝土桥梁碳化相关理论,尽可能减少外界环境中的有害物质对混凝土桥梁结构的侵蚀,使桥梁结构服役到设计使用年限甚至更久,对实际工程具有重要的经济价值.

参考文献 References

- [1] 黄耿东. 混凝土结构的碳化深度与寿命预测方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
HUANG Gengdong. The research on carbonation depth and life prediction of concrete structures[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [2] 王晓初,金明君,杨春峰. 混凝土结构耐久性研究现状综述[J]. 混凝土,2006(2): 31-33.
WANG Xiaochu, JIN Mingjun, YANG Chunfeng. Reliability of concrete structure[J]. Concrete, 2006, (2): 31-33.

- [3] 武俊曦,王艳. 混凝土碳化研究现状[J]. 四川建筑科学研究,2011,37(6): 202-204.
WU Junxi, WANG Yan. Research status of concrete carbonation[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(6): 202-204.
- [4] 董佳慧,杜应吉,赵永兴. 混凝土碳化开裂时的钢筋锈胀力数值模拟研究[J]. 水利发电学报,2017,36(1): 112-120.
DONG Jiahui, DU Yingji, ZHAO Yongxing. Numerical simulation of corrosion expansion force of steel bars at initial cracking of carbonated concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 112-120.
- [5] 金伟良,赵习羽. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2002.
JIN Weiliang, ZHAO Xiyu. Concrete structure durability[M]. Beijing: China Science Press, 2002.
- [6] 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]. 北京:化学工业出版社,1988.
MOSKVIN B M. The corrosion and defending methods about concrete and reinforced concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [7] 屈文俊,车惠民. 既有混凝土桥梁的碳化分析及耐久性预测[J]. 铁道学报,1996,18(3): 80-85.
QU Wenjun, CHE Huimin. Analysis of concrete carbonization and durability prediction for existing concrete bridges[J]. Journal of The China Railway Society, 1996, 18(3): 80-85.
- [8] 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 Wenjun, ZHANG Yu, CHE Huimin. Carbonization predicting on existing concrete structures[J]. Building Structure, 1999, 36(4): 31-34.
- [9] 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 Daopu. The study on the influence on carbonization speed of concrete by wind[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] 屈文俊,郭猛. 风加速 II 型混凝土梁碳化试验研究[J]. 铁道学报,2005,27(6): 85-89.
QU Wenjun, GUO Meng. Test study on II type beam concrete carbonization accelerated by wind[J]. Journal of The China Railway Society, 2005, 27(6): 85-89.
- [11] 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 Wenjun, ZHAO Hongxiao. Analysis of filter carbonization depth of II type concrete beam with wind pressure accelerated[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 15-18.

(下转第108页)