

基于耐久性检测的运煤栈桥碳化寿命预测

关 琥, 牛荻涛, 王家滨

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 运煤栈桥是大型矿场和燃煤电厂的重要运输设施, 而混凝土的碳化对运煤栈桥的使用寿命有着极大的影响, 对其进行科学的耐久性评估和使用寿命预测有着重要的意义. 对陕北地区某栈桥的气候环境、工作环境、外观质量、混凝土强度、混凝土碳化深度及混凝土保护层厚度耐久性参数进行了调查与检测, 基于检测结果, 分析了运煤栈桥的主要病害及结构性能劣化原因, 并预测了栈桥的剩余寿命, 为栈桥的正常运营及维护加固提供了科学依据.

关键词: 运煤栈桥; 耐久性; 碳化; 寿命预测; 剩余寿命

中图分类号: TU528.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2015)01-0071-06

Carbonation life prediction of coal trestle based on durability testing

GUAN Xiao, NIU Ditao, WANG Jiabin

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: A trestle of transportation coal is an important facility to large mines and coal-fired power plants. Concrete carbonation has a great impact on the service life of trestle, and the evaluation of durability and the prediction of life is extremely significant to structure of the trestle. The durability of the coal trestle, including climate environment, work environment, the visual quality, concrete strength, concrete carbonation depth and concrete cover thickness, was inspected and tested and the results of the inspection and testing were all analyzed in this paper. The main disease and the reason of deterioration of the trestle were analyzed based on the result of testing, and the remaining life of the trestle was predicted. The research provides the scientific basis for maintenance and reinforcement of the trestle.

Key words: a trestle of transportation coal; durability; carbonation; service life prediction; the remaining life

钢筋混凝土运煤栈桥结构在服役过程中, 不仅要承受输煤皮带转动时产生的振动荷载作用, 同时还受到各种环境因素的作用, 如严寒、潮湿、腐蚀介质等, 从而使得结构性能逐渐退化, 承载力降低, 使用寿命必然缩短^[1-5]. 为了保障栈桥能够安全正常的使用, 且尽可能延长其受用寿命, 对其进行定期的耐久性检测是很有必要的, 通过检测不仅可以实时的全面掌握栈桥病害、损伤情况等信息, 同时, 还可根据检测结果对栈桥结构进行准确的耐久性评估和寿命预测, 为栈桥的维护加固提供技术依据.

在混凝土结构的耐久性研究中, 一般是以混凝土中的钢筋开始锈蚀作为结构寿命终止的标志. 而碳化可导致混凝土保护层酥松、剥落, 使混凝土失去对钢筋的保护作用, 从而发生钢筋锈蚀现象. 本文对陕北地区某运煤栈桥开展了详细的病害调查和现场检测, 基于检测结果, 分析了栈桥性能劣化的主要原因, 并用概率统计方法研究了栈桥混凝土构件的碳化耐久性和剩余寿命预测, 为运煤栈桥的安全使用和维护加固提供了可靠的科学依据.

1 工程概况

该栈桥位于榆林市神木县西北 15 km 处 (如图 1 所示). 栈桥总长约 5.6 km; 抗震设防烈度为 6 度 (第一组), 基本地震加速度为 0.05 g, 通廊采用钢



图 1 运煤栈桥

Fig.1 Coal trestle

桁架结构, 支架采用钢筋混凝土框架结构, 柱和梁的混凝土强度设计等级为 C30, 设计混凝土保护层厚度为 30 mm. 柱最大截面 800 mm×700 mm; 梁最大截面 300 mm×750 mm. 构件受力钢筋最小直径为 $\Phi 20$, 最大直径为 $\Phi 25$, 箍筋最小钢筋直径为 $\phi 8$, 最大为 $\phi 10$. 混凝土框架结构施工使用材料为: 水泥采用声威水泥厂 P.O 42.5R 水泥; 细骨料为常家

收稿日期: 2014-04-14

修改稿日期: 2015-01-30

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT13089); 国家自然科学基金项目(51278403); 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项项目(2010ZDKG-55);

作者简介: 关琥(1984-), 男, 博士生, 主要从事混凝土结构耐久性研究. E-mail: 86484869@qq.com

沟砂子;粗骨料为电塔卵石,粒径20~40 mm连续级配.该栈桥所处地区年平均气温为8.5℃,年平均相对湿度为56%,栈桥附近大气CO₂浓度为0.0385%.

2 栈桥耐久性检测

课题组于2012年9月对红柳林矿业有限公司的运煤栈桥进行了较为详细的耐久性检测与环境调查,主要包括气候环境、工作环境、外观质量、混凝土强度、碳化深度和混凝土保护层厚度.

2.1 气候环境调查

课题组于2012年9月将温湿度记录仪安放在运煤栈桥之上,用以监测栈桥所在地区2012年-2013年的温湿度变化情况.对检测结果进行整理、分析,得到了栈桥所处环境的年平均、月平均温湿度以及各月份的温湿度变化情况.

皮带栈桥所处地区的年平均气温为8.7℃;月平均最高气温(7月)为23.0℃,月平均最低气温(12月)为-7.0℃,月平均温度如图2所示.

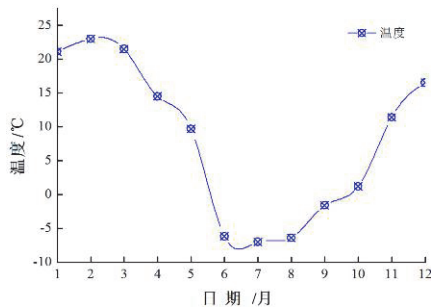


图2 月平均气温

Fig.2 Monthly mean temperature

栈桥所处地区的年平均相对湿度为50.7%,月平均最高相对湿度(9月)为72.7%,月平均最低相对湿度(3月)为27.5%,月平均相对湿度如图3所示.

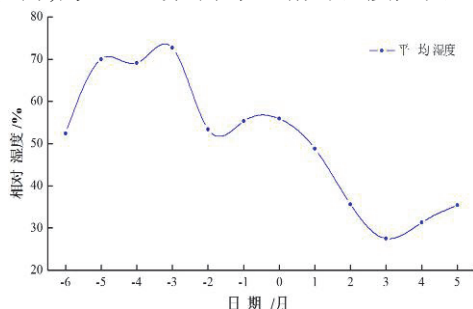


图3 月平均相对湿度

Fig.3 Monthly mean relative humidity

此外,课题组又查阅了2002年至2012年栈桥所处地区的温湿度情况.资料显示,栈桥所处地区的年平均气温为9.5℃,月平均最高气温(7月)为23.7℃,月平均最低气温(1月)为-8.2℃,如图4所示.栈桥所处地区的年平均湿度为35%~70%,

月平均最高相对湿度(9月)67.4%,月平均最低相对湿度(4月)34.9%,如图5所示.

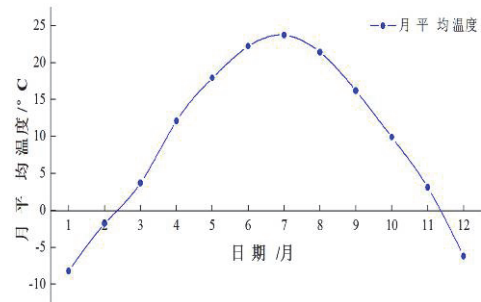


图4 2002年-2012年月平均气温

Fig.4 Monthly mean temperature during 2002-2012

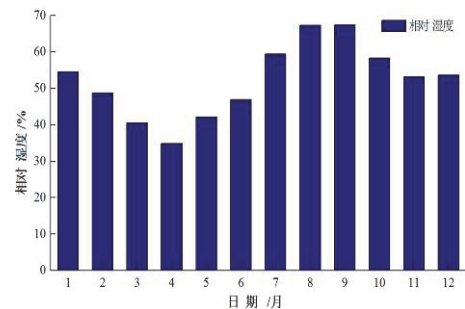


图5 2002-2012年月相对湿度

Fig.5 Monthly mean relative humidity between 2002-2012

对实际监测结果及调查结果进行对比和分析后发现,栈桥所处地区的年平均气温相对稳定,月平均最高气温在22.7~25.3℃之间,月平均最低气温在-10.4~-6.4℃之间.而湿度情况变化并不明显,波动范围均在35%到70%之间.

2.2 工作环境调查

在进行工作环境调查时,温湿度测试仪被安放在栈桥之上,因此,测试结果可以代表栈桥工作环境的温湿度.对测试数据进行整理和分析后得到了2012~2013年栈桥工作环境的温湿度情况,如表1所示.

表1 栈桥工作环境温湿度
Tab.1 The temperature and humidity of trestle working environment

月份	9	10	11	12	1	2	3	4
温度/℃	13.7	9.1	-7.3	-9.3	-6.0	-1.5	1.1	11.0
湿度/%	74.2	52.9	55.0	56.2	56.5	41.3	25.9	30.1

2.3 栈桥裂缝及表观质量调查

栈桥长度约5.6 km,跨度范围大,不同区域环境的风速、风向、干湿交替状况、CO₂浓度也不尽相同,这些因素对栈桥的耐久性有一定的影响(厂区人员活动密集,二氧化碳浓度较高;山上温度较低,区域风速较大;山下栈桥穿越悬崖、公路,环境条件复杂).故根据栈桥所处地理位置,将栈桥划分为三类进行分析:厂区环境、山上环境、山下

环境.

经调查,厂区环境部分栈桥构件存在箍筋外露锈蚀现象.箍筋外露是由于冻融作用引起混凝土保护层剥落造成.厂区外栈桥支架混凝土构件施工质量多不如厂区内栈桥构件.混凝土崩模、二次浇注、振捣不密实等现象多有存在.栈桥构件冻融现象也较为严重,栈桥经过长期运行,通廊里面积累了大量的煤灰需要清洗去除,清洗栈桥的残水和大气降水便不断侵蚀栈桥构件,使构件产生很多冻胀裂缝.调查发现,厂区外栈桥混凝土裂缝可以分为以下几种:混凝土收缩产生的收缩裂缝、冻融作用下的裂缝、皮带通廊运行过程振动引起的梁身和柱顶裂缝.

2.4 混凝土强度检测

栈桥主要构件混凝土设计强度等级均为 C30,依据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》^[6](JGJ/T23-2011)及《钻芯法检测混凝土强度技术规程》^[7](CECS03: 2007)的有关规定,采用回弹法与钻芯法测试混凝土强度,回弹法测试栈桥主要构件混凝土强度结果如表 2 所示.

表 2 混凝土构件强度评定结果/MPa
Tab.2 The results of the assessment of concrete component strength/MPa

构 件	厂区内构件	山上构件	山下构件
回弹平均值 R_m	41.4	40.2	36.1
强度换算值 f_{cu}	45.0	36.9	31.3

可以看出各种环境下混凝土强度均满足原设计要求.厂区内混凝土构件施工质量控制良好,其混凝土强度检测结果普遍较高.同时课题组在厂区山下栈桥主要构件损伤较为严重区域上钻取 14 个混凝土芯样对测区混凝土强度换算值进行修正.钻芯法测试混凝土强度结果如表 3 所示.

表 3 混凝土芯样强度测试结果/MPa
Tab.3 The results of concrete core sample strength

试件编号	试样尺寸/mm		破坏荷载/kN	砼强度换算值/MPa
	d	h		
1-1	99.5	99	272.21	35.0
2-1	99.5	101	255.65	32.9
3-1	99.5	100	173.32	22.3
4-1	100.0	101	207.02	26.4
5-1	99.5	101	250.61	32.2
6-1	99.5	101	239.07	30.8
7-1	99.0	101	150.75	19.6
8-1	99.5	102	202.23	26.0
9-1	99.5	101	217.41	28.0
0-1	100.0	102	257.39	32.8
0-2	99.5	101	161.88	20.8
0-3	100.0	102	147.82	18.8
0-4	99.5	101	202.48	26.1
0-5	99.5	102	200.55	25.8

从取芯测试结果可以看出,芯样的混凝土强度

普遍低于回弹法测试的强度,这是由于取芯时主要针对破损较为严重区域构件进行的,从结果也可看出,厂区外栈桥混凝土构件的质量低于厂区内,破损情况较厂区内严重.

2.5 混凝土保护层厚度

混凝土保护层厚度是影响钢筋锈蚀的重要参数,对混凝土结构的耐久性影响极大,因此结构混凝土保护层厚度的检测对于结构耐久性评估及使用寿命预测具有重要意义.混凝土保护层厚度测量时沿柱子轴线方向测量,每个柱子的每个侧面作为一个测区.对于厂区内混凝土构件共计 136 个测区,厂区外山上混凝土构件共计 396 个测区,厂区外山下混凝土构件共计 84 个测区.测试统计结果如表 4 所示,保护层厚度的概率分布直方图如图 6-8 所示.

表 4 混凝土钢筋保护层厚度统计结果
Tab.4 The statistical results of RC protective layer

构件名称	厂区内栈桥	厂区外山上栈桥	厂区外山下栈桥
样本数	136	396	84
平均值/mm	37.8	43.1	42.0
标准差/mm	7.8	11.5	9.1
变异系数	0.21	0.28	0.22
概率分布	正态分布	正态分布	正态分布

统计结果分析表明,该栈桥主要构件的混凝土保护层厚度分布离散性较小,变异系数均小于 0.28,构件混凝土保护层厚度检测结果通过 IBM SPSS Statistics 20 软件的 K-S 检验服从正态分布.

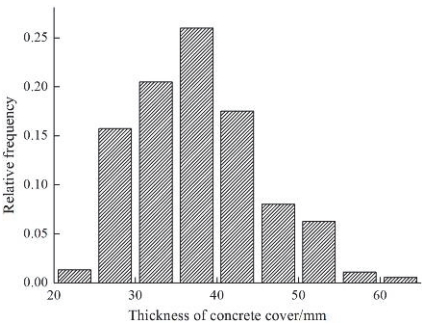


图 6 厂区内构件保护层厚度直方图
Fig.6 The histogram of concrete cover thickness in factory

由原设计资料可知栈桥梁和柱的钢筋保护层厚度均为 30mm.从表 4 可知,栈桥梁和柱的纵筋保护层厚度均满足设计要求.根据《混凝土结构设计规范》^[8]中结构耐久性的有关规定,该栈桥所处环境为二类 b (严寒和寒冷地区的露天环境),在此类环境中,对于混凝土强度等级介于 C25 和 C45 之间的梁和柱,受力钢筋的混凝土保护层最小厚度为 35mm.根据实测结果,栈桥构件的混凝土保护层平均厚度满足现行规范要求.

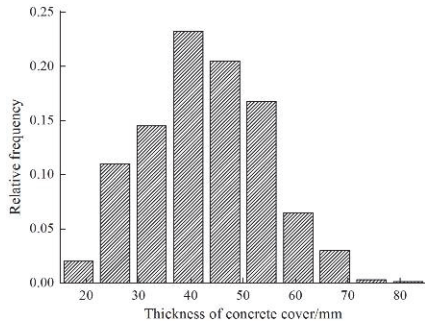


图7 厂区外山上构件保护层厚度直方图
Fig.7 The histogram of concrete cover thickness on the mountain outside factory

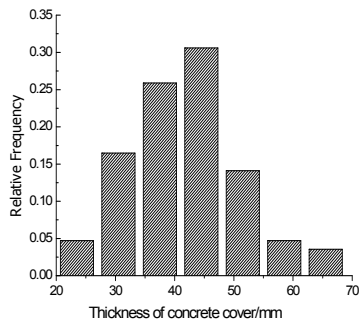


图8 厂区外山下构件保护层厚度直方图
Fig.8 The histogram of concrete cover thickness at the foot of mountain outside factory

2.6 混凝土构件碳化深度

混凝土碳化深度是大气环境下混凝土结构耐久性评估和寿命预测时的重要参数,也是回弹法检测混凝土强度时必不可少的参数.混凝土碳化深度检测方法,有X射线法和化学试剂法,现场常用的检测方法有酚酞试剂法和彩虹试剂法,具体可参见《混凝土结构耐久性评定标准》^[9] (CECS220:2007)的有关规定.

由于现场条件限制,在检测混凝土碳化深度时采用化学试剂对栈桥梁和柱敲去其角部混凝土的方法检测.各区域碳化深度测试统计结果如表5所示,碳化深度概率分布直方图如图9-11所示.混凝土碳化深度检测结果通过IBM SPSS Statistics 20软件的K-S检验服从正态分布.

表5 混凝土碳化深度统计结果/mm
Tab.5 The statistical results of the carbonation depth of concrete

构件名称	厂区内栈桥	厂区外山上栈桥	厂区外山下栈桥
样本数	26	104	29
平均值/mm	6.65	14.0	14.6
标准差/mm	2.86	7.21	6.95
变异系数	0.43	0.51	0.48
概率分布	正态分布	正态分布	正态分布

统计结果分析表明,该栈桥主要构件的混凝土碳化深度分布离散性偏大,各类环境中碳化深度的变异系数均大于0.4,构件混凝土的密实性存在很

大的差异;厂区外栈桥混凝土构件碳化深度明显大于厂区内构件碳化深度,造成此类差别原因是由于各个环境区域栈桥浇筑的施工质量和工作环境不同所造成.

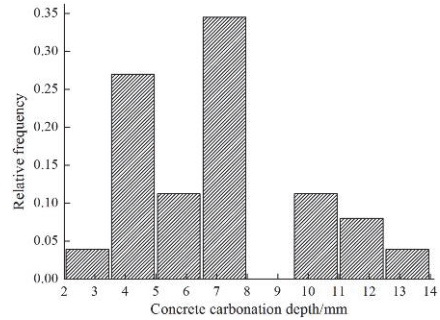


图9 厂区内构件碳化深度直方图
Fig.9 The histogram of the carbonation depth of concrete inside the factory

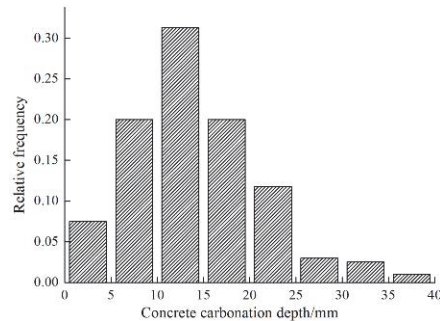


图10 厂区外山上构件碳化深度直方图
Fig.10 The histogram of the carbonation depth of concrete on the mountain outside factory

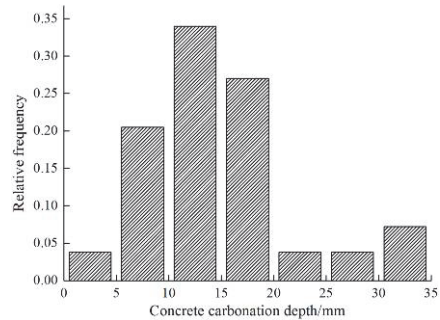


图11 厂区外山下构件碳化深度直方图
Fig.11 The histogram of the carbonation depth of concrete at the foot of mountain outside factory

3 栈桥混凝土结构剩余寿命预测

3.1 栈桥结构性能劣化原因分析

分析栈桥所处环境及检测结果,本文认为栈桥结构性能劣化的主要原因为混凝土的碳化与钢筋锈蚀.由于碳化作用导致钢筋锈蚀,随着锈蚀产物的不断增多,混凝土表明逐渐出现锈胀裂缝,同时,裂缝的出现又加速了钢筋的锈蚀行为,最终使得混凝土保护层成片状剥落,锈蚀引起的钢筋截面减小直接导致构件承载力的劣化.

3.2 栈桥结构剩余寿命预测

混凝土的耐久寿命是指混凝土结构在外界环

境(如混凝土碳化、氯离子渗透、硫酸盐侵蚀、碱骨料反应等)和本身因素(裂缝、渗漏和孔隙结构等)作用下所能达到的使工程正常使用的年限,它是各种影响因素共同作用的结果。目前,在混凝土结构耐久性评估中,常用的寿命准则主要包括:锈胀开裂寿命准则,碳化寿命准则,裂缝宽度与钢筋锈蚀量限值寿命准则和承载力寿命准则。其中,碳化寿命准则是以保护层混凝土碳化,从而失去对钢筋的保护作用,使钢筋开始产生锈蚀的时间作为混凝土结构的寿命^[10-11]。采用碳化寿命准则的原因主要是由于钢筋一旦开始锈蚀,不大的锈蚀量、不长的时间就足以使混凝土开裂,而开裂后锈蚀受到很多随机因素的影响,很难做出定量的估计。该准则比较适合不允许钢筋锈蚀的混凝土构件^[12-13]。根据栈桥所处环境及破坏特点,本文采用碳化寿命准则对栈桥混凝土结构进行剩余寿命预测。

混凝土碳化寿命准则可以表示为:

$$\Omega_c = \{c - x_0 - X(t) \geq 0\} \quad (1)$$

式中: Ω_c 是混凝土碳化寿命准则; c 为混凝土保护层厚度; $X(t)$ 是混凝土碳化深度,是一随机过程; x_0 为混凝土碳化残量,可以表示为如下形式:

$$x_0 = (1.2 - 0.35k^{0.5})D_c - (6.0/m + 1.6)(1.5 + 0.84k) \quad (2)$$

式中: D_c 为与混凝土保护层厚度及碳化系数有关的参数,按下列条件计算:

$c \leq 28\text{mm}$ 时;

当 $k \geq 0.8$ 时, $D_c = c$

当 $k < 0.8$ 时, $D_c = c - 0.16/k$

$c > 28\text{mm}$ 时;

当 $k \geq 1.0$ 时, ($k > 3.3$ 取 $k = 3.3$)

$$D_c = c + 0.066(c - 28)^{0.47k}$$

当 $k < 1.0$ 时

$$D_c = c - 0.389(c - 28)(0.16/k)^{1.5}$$

m 为局部环境系数。

由式(1)得混凝土碳化寿命极限状态方程为:

$$c - x_0 - X(t) = 0 \quad (3)$$

栈桥混凝土碳化深度的随机模型为^[12]:

$$X = k\sqrt{t} \quad (4)$$

$$k = 2.56K_{mc}k_jk_{co_2}k_pk_s\sqrt[4]{T}(1 - RH)RH[(57.94/f_{cu})m_c - 0.76] \quad (5)$$

式中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度(MPa),是随机变量; m_c 为混凝土立方体抗压强度平局值与标准值之比; k_j 为角部修正系数; k_{co_2} 为二氧化碳浓度影响

系数; k_p 为浇筑面修正系数; k_s 为工作应力影响系数; K_{mc} 为计算模式不定性随机变量。

根据栈桥主要构件混凝土保护层厚度、混凝土强度及环境条件的现场测试结果代入公式(1),求得碳化寿命和剩余寿命结果如表6所示。

表6 实测栈桥混凝土构件碳化耐久年限

Tab.6 The concrete component carbonation durability life of coal trestle sit

环境类别	碳化系数/ mm/\sqrt{a}	碳化残量 /mm	碳化寿命/a	剩余碳化寿命 /a
厂内	3.46	16.8	36.78	33.03
厂外山上	7.23	3.4	30.15	26.40
厂外山下	7.54	1.8	28.48	24.73

同时,课题组对该项目也进行了室内快速碳化试验的研究,对栈桥支架构件进行了基于试验的寿命预测,其各项参数及寿命预测结果如表7所示。

表7 室内试验的栈桥混凝土构件碳化耐久年限

Tab.7 The concrete component carbonation durability life of coal trestle in lab

环境类别	碳化系数/ mm/\sqrt{a}	碳化残量/mm	碳化寿命/a	剩余碳化寿命/a
厂内	2.9	18.3	44.78	41.03
厂外山上	2.9	18.5	71.54	67.79
厂外山下	2.9	15.7	81.73	77.98

经比较可以看出,基于试验结果预测的寿命要大于基于现场实测。造成这种现象的原因,经分析可以知道:由于试验室制作的同材料、同配比和同条件养护的试块的质量要优于现场条件的构件,且在现场条件下,有风压,风沙侵蚀、干湿交替和冻融作用,使得构件的劣化速度要快于实验室条件。由此对于构件的碳化寿命,采用现场实测寿命,并且作为预测构件锈胀开裂寿命的基准。

4 结论

(1) 通过对陕北地区运煤栈桥的耐久性检测发现:各种环境工况下混凝土强度均满足原设计要求;根据实测结果,栈桥混凝土构件的混凝土保护层厚度控制良好,基本满足现行规范要求,且具有较好的统计规律;混凝土碳化深度离散性较大,说明混凝土的密实性存在一定差异。

(2) 依据混凝土碳化寿命预测准则,并结合对栈桥主要构件所处的气候环境、工作环境、保护层厚度及混凝土强度的现场实测结果,得到了该栈桥的碳化寿命。不同工作环境下栈桥碳化寿命分别为:厂区内栈桥碳化寿命年限为36.78年,厂区内山上栈桥为30.15年,厂区内山下栈桥为28.48年。

(3) 基于检测结果结合概率统计手段研究运煤栈桥的碳化耐久性和剩余寿命预测的方法,具有一定的理论依据和普遍性,可为其他运煤栈桥的耐久性及剩余寿命预测研究提供可靠的科学依据。

参考文献 References

- [1] 元成方, 牛荻涛. 基于AHP法和模糊综合评价的钢筋混凝土桥梁耐久性评估[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010,42(6):829-834.
YUAN Chengfang, NIU Ditao. The durability evaluation of RC bridge based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010,42(6):829-834.
- [2] MIAO Changwen, MU Ru, TIAN Qian, et al. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement[J]. Cement and Concrete Research, 2002,32:31-34.
- [3] MU Ru, MIAO Changwen, LUO Xin, et al. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32:1061-1066.
- [4] 张誉. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
ZHANG Yu. Durability of concrete structures [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [5] 金伟良, 牛荻涛. 工程结构耐久性与全寿命设计理论[J]. 工程力学, 2011,28(增2):1-37.
JIN Weiliang, NIU Ditao. The state-of-the-art on durability and life-cycle design theory of engineering structures[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(S2): 31-37.
- [6] JGJ/T23-2011, 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ/T23-2011, Technical specification for inspecting of concrete compressive strength by rebound[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [7] CECS03: 2007, 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
CECS03:2007, Technical specification for testing concrete strength with drilled core[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [8] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010, Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] CECS220:2007, 混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
CECS220:2007, The evaluation standard of durability of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [10] FUNAHASHIM. Predicting corrosion free service life of a concrete structure in chloride environment[J]. ACI Materials Journal, 1990,87(6): 581-587.
- [11] MORINAGA S. Prediction of service Lives of Reinforced Concrete Buildings Based on the Corrosion Rate of Reinforcing Steel. Durability of Building Materials and Components[C]// Proceedings of in the Fifth International Conference, 1990.
- [12] 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.
NIU Ditao. Durability and life prediction of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2002.

(本文编辑 吴海西)