

基于耐久性检测的 钢筋混凝土铁路桥碳化寿命预测

牛荻涛, 元成方, 王春芬, 徐善华

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 东岗镇黄河大桥是重要的交通枢纽, 对其进行耐久性评估和寿命预测对于确保包兰铁路的正常运营有极其重要的意义. 对大桥结构技术状况进行了详细的检测与调查, 测试了大桥主要构件混凝土保护层厚度、混凝土强度、及混凝土碳化深度和钢筋锈蚀程度, 分析了大桥混凝土结构的主要病害及其产生原因. 基于大桥环境条件和主要构件实测结果, 分析了大桥主要构件的碳化可靠指标和剩余寿命, 为大桥的继续使用与维修加固提供了科学依据.

关键词: 混凝土桥梁; 耐久性; 保护层厚度; 碳化深度; 寿命预测

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0160-06

钢筋混凝土桥梁在服役过程中, 不仅要承受各种荷载的作用, 还要受到环境介质的侵蚀, 使得结构性能逐步退化, 承载能力降低, 缩短结构的使用寿命^[1]. 为了保证既有桥梁的安全运营并尽可能延长其使用寿命, 需要定期对其进行耐久性检测. 通过检测不仅可以及时了解桥梁的病害情况、损伤程度等信息, 同时, 还能依据检测结果对桥梁进行准确的耐久性评估和剩余寿命预测, 为桥梁的正常运营和维修加固提供技术依据.

在混凝土桥梁耐久性分析中, 一般以混凝土中钢筋开始锈蚀作为结构寿命终结的标志. 文献[2-3]曾对既有钢筋混凝土桥梁进行了耐久性调查和使用寿命预测. 本文对东岗镇黄河大桥开展了详细的病害调查与检测, 在此基础上, 对大桥混凝土结构的病害和产生损伤的主要原因进行分析, 基于大桥环境条件和主要构件实测结果, 利用概率方法分析大桥主要构件的碳化耐久性和剩余寿命预测, 为大桥的继续使用与维修加固提供科学依据.

1 工程概况

包兰铁路东岗镇黄河大桥是包兰铁路的控制性工程, 桥梁全长 221.09 m, 正桥为 3 孔跨度各 53 m 的钢筋混凝土空腹式拱桥, 矢高 16.0 m, 两肋中心距 2.6 m, 桥面板厚 0.3 m, 按 6 孔连续板设计(如图 1 所示). 拱肋、刚架及桥面混凝土均为 300 号, 墩上立柱混凝土为 170 号, 墩身采用 170 级片石混凝土. 大桥由铁道部设计总局大桥设计事务所设计, 铁道部第一工程局桥梁队施工, 于 1956 年投入运营, 距大桥检测年已使用 51 年. 根据当地气象资料和现场采样分析, 大桥所处环境的湿度、温度分别为 59% 和 9.1℃, CO₂ 浓度为 0.032%.

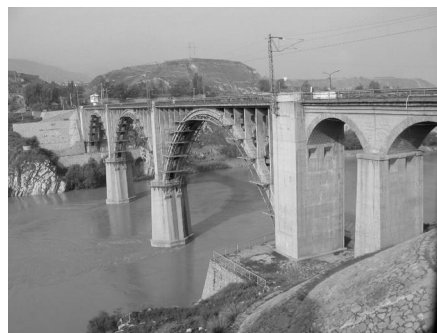


图1 东岗黄河铁路大桥

Fig. 1 The Dong-gang Yellow River
Railway Bridge

收稿日期: 2010-05-10 修改稿日期: 2011-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50538060); 国家杰出青年科学基金(50725824); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目;

“十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAJ03A02-03)

作者简介: 牛荻涛(1963-), 男, 陕西华县人, 博士生导师, 教授, 主要从事结构耐久性研究工作.

2 大桥混凝土结构耐久性检测

课题组于 2007 年 7 月对大桥的主要构件和整体状况进行了详细的调查和检测, 检测内容包括大桥的外观损伤、混凝土强度、碳化深度、钢筋锈蚀、钢筋保护层厚度和腐蚀性离子含量。

2.1 外观损伤检测

检测发现: (1) 拱顶附近梁端支承部位混凝土劈裂; 引桥、墩上立柱、梁体接缝等部位存在不同程度的渗、漏水及混凝土腐蚀现象; 桥上过车时, 梁、拱横向振幅较大。(2) 桥墩施工缝普遍存在环裂, 第一孔包头侧桥墩出现多条竖向裂缝。(3) 拱脚部位混凝土大面积空鼓, 部分主、箍筋锈蚀, 其主要原因是混凝土保护层过薄, 受荷载作用及干湿交替影响。(4) 在环境介质腐蚀和反复动荷载作用下, 梁支承部位出现裂缝, 附近混凝土发生腐蚀; 拱圈立柱端部存在钢筋锈蚀、混凝土开裂现象。

2.2 混凝土强度测试

采用回弹法、回弹—超声综合法测试混凝土强度, 同时在立柱上钻取了 6 个芯样, 根据《钻芯法检测混凝土强度技术规程》^[4]对回弹值进行修正, 大桥主要构件混凝土强度测试结果见表 1。

表 1 大桥主要构件混凝土强度统计结果
Tab. 1 Results of compressive strength of the main component

structural member	Pier	Column	Arch rib	Cross brace	Beam
The number of measuring points	—	432	132	—	—
average / MPa	22.8	37.8	41.2	30.9	31.4
standard deviation / MPa	3.6	3.6	5.3	1.9	0.9
coefficient of variation	0.16	0.10	0.13	0.06	0.03

通过以上结果可以看出, 大桥主要构件的混凝土强度均满足原设计要求, 该大桥原施工质量较好, 主要构件的混凝土强度离散性较小, 变异系数均小于 0.16。经 χ^2 检验, 立柱和拱肋混凝土强度的概率分布不拒绝正态分布。

2.3 混凝土碳化深度测试

根据大桥自身特点及现场检测条件, 拱肋参照《混凝土结构耐久性评定标准》^[5]的要求进行碳化深度测试, 立柱在所取芯样上测试碳化深度, 测试结果见表 2、3。

表 2 拱肋碳化深度测试结果
Tab. 2 Results of carbonation depth of arch rib

Position	Between column No. 1' and 2', upstream side	Between column No. 2' and 3', upstream side	Between column No. 2' and 3', downstream side	Between column No. 3' and 4', downstream side	Between column No. 4' and 5', downstream side	Between column No. 4' and 5', upstream side
Carbonation depth/mm	3.5	2.2	3.3	1.6	4.9	2.4
Position	Between column No. 5' and 6', downstream side	Between column No. 5' and 6', upstream side	Between column No. 6' and vault downstream side	Between column No. 5 and 4, downstream side	Between column No. 3 and 4, downstream side	Between column No. 2 and 1, downstream side
Carbonation depth/mm	8.1	4.7	14.3	7.1	4.3	4.9

表 3 立柱碳化深度测试结果
Tab. 3 Results of carbonation depth of column

Position	Column No. 4, first cross downstream side	Column No. 5, first cross downstream side	Column No. 4, second cross, downstream side	Column No. 5, second cross downstream side	Column No. 4, third cross downstream side	Column No. 5, third cross, downstream side
Carbonation depth/mm	25.1	25.6	16.1	33.5	25.0	25.0

通过实测数据可以看出,拱肋部分不同部位的混凝土碳化深度差异较大,其中 3'-4'柱间下游侧混凝土碳化深度最小,仅为 1.6 mm,6 柱一拱顶间下游侧混凝土碳化深度最大,达到 14.3 mm.立柱的混凝土碳化深度较拱肋要大,最小值为 16.1 mm,最大值为 33.5 mm.

2.4 混凝土保护层厚度检测

钢筋保护层厚度对混凝土结构的耐久性影响极大,因此,混凝土保护层厚度检测对于大桥结构耐久性评估极其重要.采用钢筋定位仪对大桥主要构件的混凝土保护层厚度进行测试,并在立柱部位采用微破损方法进行校验.测试结果见表 4.其直方图见图 2~图 4.

表 4 主要构件钢筋保护层厚度测试结果

Tab. 4 Results of protective layer thickness of the main component

structural member	Pier	Column	Arch rib	Beam
The number of measuring points	108	1000	1899	184
average/ mm	36.6	22.9	22.7	17.1
standard deviation/ mm	10.8	7.6	5.7	2.8
coefficient of variation	0.30	0.33	0.25	0.16

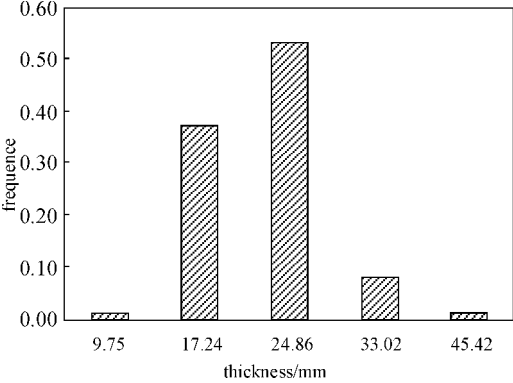


图 2 拱肋保护层厚度概率分布

Fig. 2 Probability distribution of protective layer thickness for main arch rib

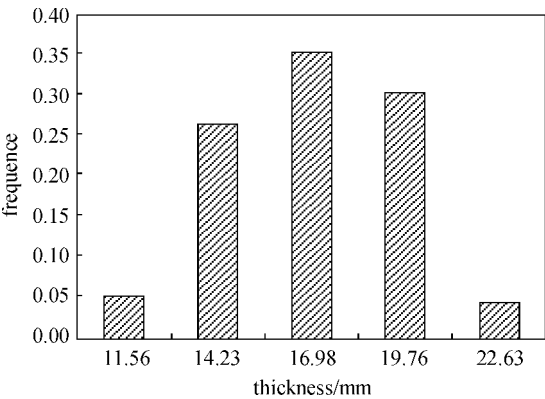


图 3 梁保护层厚度概率分布

Fig. 3 Probability distribution of protective layer thickness for main beam

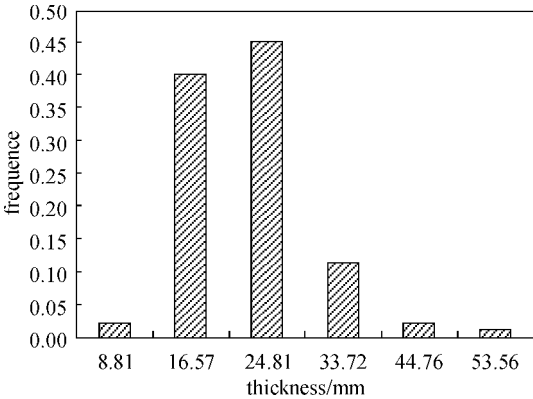


图 4 立柱保护层厚度概率分布

Fig. 4 Probability distribution of protective layer thickness for main column

统计分析结果可以看出,大桥主要构件的钢筋保护层厚度基本满足设计要求,混凝土保护层厚度服从正态分布.

2.5 腐蚀性离子检测

混凝土腐蚀最普遍的形式是硫酸盐侵蚀,硫酸盐溶液与水泥石中的氢氧化钙和水化铝酸钙发生化学反应,生成石膏和硫铝酸钙,产生体积膨胀,最终将导致混凝土的开裂和剥蚀.而混凝土中的氯离子含量达到一定程度,将会导致钢筋表面钝化膜的破坏,加速钢筋锈蚀.因此,本次检测重点测试混凝土中的 Cl⁻ 和环境介质中 SO₄²⁻ 含量.

从混凝土腐蚀部位、拱顶支座部位的泥样和道床泥样取样进行化学分析,结果见表 5.

参照有关标准对混凝土中 Cl⁻ 限值的规定^[9],由测试结果可见,1'桥墩顶帽混凝土中 Cl⁻ 含量最高,达到 0.27%,Cl⁻ 含量均未达到限值;大桥第三跨拱顶泥样中 SO₄²⁻ 含量较高,达到 2.86%.

表 5 腐蚀性离子含量测定(质量百分比)
Tab. 5 Content of causticity ion (Mass percent age)

sample	content of Cl ⁻	content of SO ₄ ²⁻
Concrete(Pier cap No. 1')	0.27	—
Concrete(column No. 4' and 5', first cross, Lanzhou side)	0.12	—
Concrete(vault, first cross)	0.16	—
Concrete(beam, third cross)	0.11	—
Mud(vault, first cross, Baotou side)	0.16	0.52
Mud(vault, first cross, Lanzhou side)	0.19	0.71
Mud(vault, third cross, Baotou side)	0.11	2.86
Mud(vault, third cross Baotou side, downstream side)	0.14	1.22
Ballast(abutment, Lanzhou side)	0.11	0.41

3 大桥混凝土结构剩余寿命预测

3.1 大桥混凝土结构性能退化原因分析

根据大桥所处环境条件和现场检测结果, 导致大桥混凝土结构性能退化的主要原因是:

- (1) 混凝土碳化与钢筋锈蚀. 大桥上部承重构件普遍发生碳化, 由于混凝土碳化导致钢筋钝化膜破坏并产生锈蚀, 随着锈蚀产物的不断增加, 混凝土表面出现锈胀裂缝, 裂缝加速了钢筋的锈蚀过程, 最终导致保护层成片剥落, 钢筋锈蚀引起钢筋截面减小和坑蚀引起应力集中, 使其抗疲劳能力显著下降.
- (2) 由于设计的道面排水速度无法得到满足, 同时, 道床还存在不同程度的污染、板结, 造成雨水从道床溢流到梁体与拱顶交界部位, 加之雨水中硫酸根离子含量较高, 因此造成拱顶部位混凝土的严重腐蚀;

3.2 大桥混凝土结构剩余寿命预测

在进行结构寿命预测时, 合理地选择耐久性失效标准是关键环节. 前苏联有关标准以混凝土完全碳化深度到达钢筋表面的时间作为混凝土结构的寿命^[7]; Funahashi 针对停车场预应力构件的寿命问题, 提出以钢筋开始锈蚀作为寿命终结的标志^[8]; Morinaga 以氯离子引起钢筋锈蚀以至混凝土出现裂缝为结构耐久性失效准则^[9]; Weyers 通过对 90 名资深工程师的调查, 提出以构件损伤面积达 12% 作为耐久性极限状态^[10]; 清华大学肖从真、刘西拉以纵向开裂(截面损失率达到 5%)作为结构寿命终点. 根据大桥的重要性和所处环境条件, 本文采用碳化寿命准则对大桥进行耐久性分析与剩余寿命预测.

混凝土碳化寿命准则可以表示为

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

式中: Ω_c 是混凝土碳化寿命准则, 为随机过程; c 为混凝土保护层厚度; $X(t)$ 是混凝土碳化深度, 为随机过程; x_0 为混凝土碳化残量, 是一随机变量, 可以表示为^[11]

$$x_0 = 4.86(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(c - 5) \times (\ln f_{cu,k} - 2.3)$$
 (2)

式中: RH 是环境相对湿度; $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度.

混凝土碳化深度的随机过程模型为^[12]:

$$X = k\sqrt{t}$$
 (3)

$$k = 2.56K_{mc}K_jK_{CO_2}K_pK_s\sqrt[4]{T(1-RH)RH}\left(\frac{57.94}{f_{cu}}m_c - 0.76\right)$$
 (4)

式中, K_{mc} 为计算模式不定性随机变量; K_j 为角部修正系数; K_{CO_2} 为 CO₂ 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; f_{cu} 为混凝土抗压强度(MPa); m_c 为混凝土立方体抗压强度平均值与标准值之比.

混凝土中钢筋发生锈蚀的概率可以表示为

$$P_t(t) = P\{c - x_0 - k\sqrt{t} \leq 0\}$$
 (5)

碳化可靠指标为

$$\beta_c = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{6}$$

根据大桥主要构件混凝土保护层厚度、混凝土强度、碳化深度及环境条件的实测结果,大桥主要构件钢筋不发生锈蚀的可靠指标随使用年限的变化规律如图 5~图 7 所示。

考虑包兰铁路东岗镇黄河大桥构件破坏后果及人们心理接受水平、现行规范等方面的因素,大桥碳化寿命准则的目标可靠度指标 β 取为 1.28^[13]。于是可得大桥主要构件的碳化耐久年限如表 6 所示。

表 6 大桥主要构件碳化耐久年限

Tab. 6 Carbonation durable life of the main component

structural member	Column	Arch rib	Beam
service-life/a	47	61	37

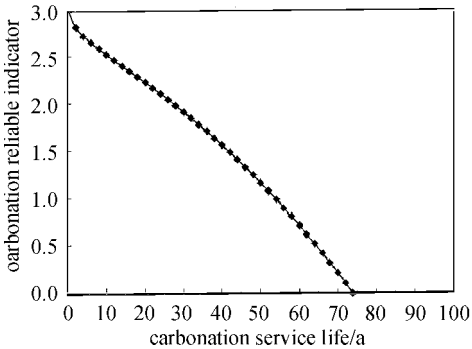


图 5 立柱可靠度指标随时间变化曲线
Fig. 5 Varying curve of reliability for the column

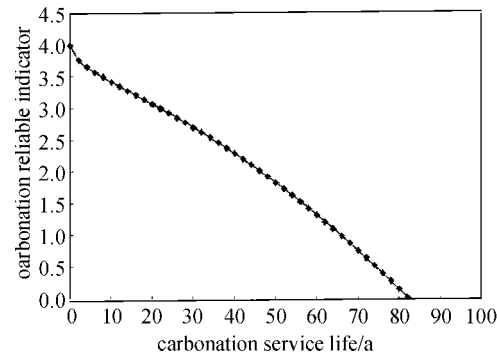


图 6 拱肋可靠度指标随时间变化曲线
Fig. 6 Varying curve of reliability for the arch rib

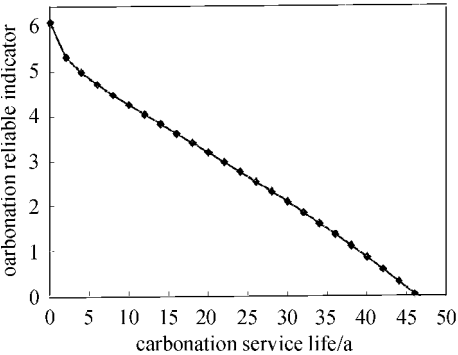


图 7 梁底可靠度指标随时间变化曲线
Fig. 7 Varying curve of reliability for the beam

对于钢筋混凝土拱桥而言,拱结构是最为重要的承重构件,拱结构的耐久性决定着整座大桥的耐久性,因此该大桥的碳化寿命和剩余碳化寿命分别为 61 年和 10 年。

4 结 论

- (1) 通过对大桥的耐久性检测,发现大桥主要构件均存在不同程度的损伤,列车经过时,梁、拱横向振幅较大,构件混凝土强度及保护层厚度均满足原设计要求,说明该大桥原施工质量较好。
- (2) 根据混凝土碳化寿命准则,结合大桥主要构件的混凝土保护层厚度、混凝土强度、碳化深度及环境条件的实测结果,得到大桥主要构件的碳化耐久年限,并根据大桥结构形式给出了大桥的碳化寿命和剩余碳化寿命分别为 61 年和 10 年。
- (3) 根据大桥主要构件碳化耐久年限计算结果和实际损伤状况,建议对立柱及梁体进行加固和维修,以保证大桥的安全运营。

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 Cheng-fang, NIU Di-tao. Durability assessment of RFC bridges based on the analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(6): 829-834.

[2] 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 Wen-jun, CHE Hui-min. ANALYSIS OF CONCRETE CARBONIZATION AND DURABILITY PREDIC-

- TION FOR EXSITING CONCRETE BRIDGES[J] . JOURNAL OF THE CHINA RAILWAY SOCIETY, 1996, 18 (3): 80-85.
- [3] 王春芬, 牛荻涛. 钢筋混凝土铁路桥梁碳化寿命预测[J] . 四川建筑科学研究, 2006, 32(3): 61-63.
WANG Chun-fen, NIU Di-tao. Life forecast for carbonation of reinforced concrete railway bridges[J] . Sichuan Building Science, 2006, 32(3): 61-63.
- [4] CECS03-2007 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S] .
CECS03-2007 Technical specification for testing concrete strength with drilled core[S] .
- [5] CECS220-2007 混凝土结构耐久性评定标准[S] .
CECS220-2007 Standard for durability assessmnet of concrete structures[S] .
- [6] ACI 222. 2R-2001 Corrosion of Prestressing Steels[S] .
- [7] 王庆霖. 已有建筑物的可靠性评价与改造——苏联在这一领域的研究成果与经验[C] //中国建筑学会建筑结构委员会第二届年会论文集, 南京: 1991.
- [8] FUNAHASHI M. Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment[J] . ACI Materials Jour-nal, 1990, 87(6): 581-587.
- [9] 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 the Fifth International Conference, 1990.
- [10] WEYERS R E. Service life model for concrete structures in Chloride Laden Environments[J] . ACI Materai Jour-nal, 1998, 95(4): 445-453.
- [11] 徐善华. 钢筋混凝土结构碳化耐久性分析[J] . 建筑技术开发, 2002, 29(8): 8-10.
XU Shan-hua. THE DURABILITY ANALYSIS OF REINFORCE CONCRET E[J] . Building Technique Development, 2002, 29(8): 8-10.
- [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 Di-tao. Durability and Life Forecast Of Reinforced Concrete Structure[M] . Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 刘 海. 基于概率的混凝土结构耐久性设计与评定[D] . 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
LIU Hai. Durability Design and Assessment for RC Structures Based on Probability Theory [D] . Xi'an: Xi'an U-niversity of Architecture and Technology, 2008.

Carbonation service life prediction of reinforced concrete railway bridge based on durability test

NIU Di-tao, YUAN Cheng-fang, WANG Chun-fen, XU Shan-hua

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The Donggang Yellow River Railway Bridge is a transportation hub, and the durability evaluation and life prediction of the bridge is extremely significant for ensuring the normal operation of the railway. The detailed detection and investigation were given to the structurd technical condition of the bridge, the thickness of concrete protective layer, concrete strength, carbonation depth, and the reinforcement corrosion of the main component of the bridge were detected, and the main diseases and their causes of the bridge were analyzed. Based on the environmental conditions and the detection results of the bridge, the carbonation reliability index and residual life prediction of the main component of the bridge were analyzed, and scientific basis was provided to continue using repairing and reinforcing the bridge.

Key words: concrete bridge; durability; thickness of concrete protective layer; carbonation depth; life prediction